Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Sammenhænge mellem forureningsmasse og -flux for grundvandstruende forureninger

Miljøprojekt nr. 1479, 2013

Titel:

Sammenhænge mellem forureningsmasse og -flux for grundvandstruende forureninger

Redaktion:

Katerina Tsitonaki,
Mads G. Møller &
Nina Tuxen, Orbicon

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2013

ISBN nr.

978-87-93026-10-0

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord **5**

Konklusion og sammenfatning **6**

Summary and conclusion **8**

1. Indledning **10**
1.1 Baggrund og behov 10
1.2 Projektets formål 12
1.3 Rapportens indhold 12
1.4 Samspil med andre projekter 12

2. Forureningsmasse **14**
2.1 Definition af forureningsmasse 14
2.2 Generelt om estimering af forureningsmasse 14
2.3 Masseestimering ved tilstedeværelse af NAPL 16
2.4 Kvaliteten i massebestemmelse 18

3. Forureningsflux **19**
3.1 Definition af forureningsflux 19
3.2 Metoder til bestemmelse af forureningsflux 19
3.2.1 Helt simpel/grov beregning 21
3.2.2 Estimering af forureningsflux fra isokonturkort 21
3.2.3 Niveauspecifik prøvetagning i et boringstransekt 22
3.2.4 Passive fluxmetre 22
3.2.5 Volumenpumpning 23
3.2.6 Estimering af forureningsflux fra stoftransportmodeller 26
3.3 Fluxbestemmelse: Eksempler på veldokumenterede sager 26
3.3.1 Eksempel 1: Rødekro 27
3.3.2 Eksempel 2: Borden, Ontario 29
3.3.3 Eksempel 3: Connecticut 31
3.4 Usikkerheder i fluxbestemmelse 33
3.5 Evaluering af metoderne 35

4. Sammenhænge mellem masse og flux **36**
4.1 Sammenhæng mellem masse og flux- Γ-modellen 36
4.1.1 Effekt af forureningskildens arkitektur og alder på forholdet mellem masse-og fluxreduktion 38
4.2 Betydning af Γ-faktor for faneudvikling 41

5. Erfaringsopsamling om masse/flux sammenhænge fra danske og internationale sager **43**
5.1 Litteratursøgning og indsamling af oplysninger 43
5.2 Lokalitetsoversigt og Γ-modellen 44
5.3 Erfaringsopsamling fra pumpesager 49
5.4 Datakvalitet og usikkerheder 49
5.4.1 Usikker massebestemmelse før og efter afværge 49
5.4.2 Usikker/manglende fluxbestemmelse før og efter afværge 50

5.5 Fluxreduktion vs. koncentrationsreduktion 50
5.6 Opsummeringer af erfaringer fra afværgesager 51
5.7 Opsummering om Γ-modellens anvendelighed på afværgesager 51

6. Anbefalinger 53
6.1 Anvendelse af Γ-modellen 53
6.2 Konceptuelle modeller som værktøj til masse- og fluxestimering 53
6.3 Metoder og anbefalinger til fluxbestemmelse 54

Referencer 56

Appendix A. Konceptuelle modeller

Bilag 1: Udfyldte lokalitetsskemaer

Forord

Oprensning af forureningskilder resulterer typisk kun i delvis massefjernelse. Reduktionen i forureningsflux ud af et kildeområde efter en delvis oprensning er et afgørende kriterium for at vurdere effektiviteten af en kildeoprensningsindsats. Der er således stor interesse for karakterisering, estimering og forudsigelse af sammenhængen mellem massefjernelse og reduktion af forureningsflux.

Miljøstyrelsen har under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening igangsat dette projekt for at belyse sammenhænge mellem forureningsmasse og -flux i forbindelse med oprensning af grundvandstruende forureninger.

Region Syddanmark er bygherre for projektet, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Projektet er udført med Orbicon som bygherrerådgiver.

Projektets følgegruppe har omfattet følgende personer:

- Jens Aabling, Miljøstyrelsen, Jord og Affald
- Henrik Østergaard, Region Hovedstaden
- Lone Dissing, Region Syddanmark
- Jørn K. Pedersen, Region Syddanmark
- Peter Rank, Videncenter for Jordforurening
- Poul L. Bjerg, DTU Miljø

Konklusion og sammenfatning

Baggrund og formål
Oprensning af forureningskilder resulterer typisk kun i delvis massefjernelse. Reduktionen i forureningsflux ud af et kildeområde efter en delvis oprensning er et afgørende kriterium for at vurdere effektiviteten af en kildeoprensningsindsats. Der er således stor interesse for karakterisering, estimering og forudsigelse af sammenhængen mellem massefjernelse og fluxreduktion.

En simpel måde at beskrive sammenhængen mellem reduktionen i massen og fluxen er den såkaldte "Γ-model", hvor forholdet mellem den relative flux og den relative masse beskrives ved den empiriske faktor Γ (gamma). Forholdet er beskrevet af nedenstående ligning.

$J_t/J_o=(M_t/M_o)^{\Gamma}$
Hvor J_t er forureningsfluxen til tiden t, J_o forureningsfluxen til starttidspunktet, M_t er massen til tidspunktet t og M_o er massen til starttidspunktet.

Ved igangsættelse af dette projekt var formålet at vurdere den reelle effekt på grundvandet (målt som fluxreduktioner) af afværgetiltag under forskellige geologityper og forureningsforhold. Hensigten var at teste, om Γ-modellen kan bruges i en praktisk sammenhæng med fokus på anvendelsesmuligheder forud for valg af afværgestrategi. Der er tidligt i projektet gennemgået en række sager, og det er konstateret, at Γ-modellen sjældent kan bruges på feltlokaliteter, idet der oftest mangler pålidelige data om masse og flux før og efter afværge. Som resultat af denne indledende fase blev projektets formål revideret til at have et mindre fokus på Γ-modellen og mere fokus på en udredning af, hvordan fluxreduktion afhænger af forskellige faktorer, herunder:

- At illustrere de usikkerheder der er, og de faldgruber der kan være, for ikke at opnå den ønskede fluxreduktion, selvom man foretager en afværge.
- At give anbefalinger om planlægning og dokumentation af flux og evt. masse før og efter en afværge med baggrund i gennemgang af sagerne.

Projektets indhold og resultater
Der er i projektet udført en litteraturgennemgang og indsamling af data fra flere oprensede lokaliteter i Danmark og i udlandet. Gennemgangen har illustreret, at der på de fleste sager ikke findes et pålideligt datagrundlag til at bestemme sammenhængen mellem masse og flux reduktion på grund af usikkerheden i massebestemmelse før og efter afværge, og usikker/manglende fluxbestemmelse før og efter afværge.

Generelt ses der ingen tværgående sammenhænge mellem Γ og afværgemetoder eller den konceptuelle modeltype (forståelsen af forureningsforhold, geologi, hydrogeologi m.m.) for lokaliteterne. Γ-modellen synes dog at kunne beskrive masse/flux-forholdet for lokaliteter med en lav grad af kompleksitet, eksempelvis nogenlunde homogen massefordeling og hydrogeologiske forhold. I sager hvor forureningsudvaskningen er styret af lavpermeable lag og tilbagediffusion er Γ-modellen ikke anvendelig.

For langt de fleste afværgesager som projektet har kigget nærmere på, opnås en reduktion af flux på 90% som resultat af afværgeindsatsen. Massefjernelsen er dog mere variabel fra 50 til 99,9%.

Generelt kræver et præcist masse- og fluxestimat en god konceptuel model for lokalitetens geologi, hydrogeologi og forureningsfordeling. Konceptualisering af lokaliteten i forhold til en forurening kan gennemføres på mange detailniveauer.

Til bestemmelse af flux er der i denne rapport gennemgået flere metoder på forskellige kompleksitetsniveauer. Hvilken metode, der skal vælges, afhænger af både tekniske og økonomiske overvejelser, men de generelle anbefaling er, at fluxen altid bør bestemmes før og efter afværge for at kunne vurdere effekten af afværgeindsatsen i forhold til påvirkning af grundvandsressourcen.

De vigtigste konkrete anbefalinger til fluxbestemmelse er:

- Kontrolplanet hvor fluxen bestemmes skal være placeret, således at det indfanger hele fanens bredde og dybde.
- Data (koncentration, hydraulisk ledningsevne og gradient) skal dække alle hydrogeologiske enheder og laggrænser på lokaliteten. Specifikt kan det anbefales at opdele transektet efter geologien ved beregning af forureningsfluxen, således at områder med lav hydraulisk ledningsevne ikke bliver regnet med en alt for høj værdi og dermed giver en for høj forureningsflux. Dette vil især være vigtigt, hvor der er fundet høje koncentrationer i områder med lav hydraulisk ledningsevne.
- Der skal være større fokus på at bestemme realistiske værdier for den hydrauliske ledningsevne. Det vil formodentlig have langt større betydning for den estimerede forureningsflux end små variationer i koncentrationen, da ledningsevne ofte varierer med flere størrelsesordener.
- På grund af grundvandsmagasinernes heterogenitet er fluxbestemmelse ved niveauspecifik prøvetagning stærkt påvirket af placeringen og antallet af boringerne. I nogle tilfælde kan resultaterne være upålidelige. En del af disse variationer kan imødekommes ved hjælp af volumenpumpning, som kan give en gennemsnitlig flux over et større delvolumen end en punktprøvetagning kan give.
- En grundig konceptuel model og hydrogeologisk karaktering af lokaliteten er nøglen til den korrekte placering/diskretisering af fluxmålinger.

Til opbygning af simple konceptuelle modeller præsenteres her et nyt koncept den såkaldte ”14 Compartments Model”. Konceptet er udviklet af den amerikanske forskningsorganisation ESTCP-SERDP. Styrken i anvendelse af 14 Compartments Model er, at den nemt kan tilpasses forskellige sager og detailniveau, og opstillingen i delzoner, sikrer at alle forureningsfaser, geologitype og spredningsveje medtages i den konceptuelle forståelse. 14 Compartments Model bør dog suppleres af en traditionel illustration af den konceptuelle model.

Dokumentation af oprensningseffekt i forbindelse med afværgeprojekter fokuserer i dag meget på bestemmelse af massereduktion i kildeområdet. Problemet er dog oftest, at bestemmelsen er forbundet med meget store usikkerheder, ikke mindst fordi den oprindelige masse kan være svær at bestemme. Reduktion af fluxen før og efter en afværge er imidlertid nemmere at bestemme, idet fluxmålingerne kan replikeres, og dermed er direkte sammenlignelige. Dette forudsætter, at tidsforskydningen (transporttiden) til kontrolplanet er taget i betragtning. Målinger/bestemmelse af forureningsflux anbefales derfor at indgå som en del af beslutningsgrundlaget forud for valg af afværge (metode) og som det primære mål for effekten i dokumentationsfasen.

Summary and conclusion

Remediation of contaminated sites typically results in partial mass removal. The reduction in mass discharge from a source zone after a partial mass removal is an essential parameter for evaluating the effectiveness of a source zone remediation effort. Thus, there is great interest in characterization, estimation and prediction of the relationship between mass removal and mass discharge reduction.

A simple way to describe the relationship between the reduction in mass and in mass discharge is the so-called "Γ-model", where the relationship between the relative mass discharge and the relative mass described by the empirical factor Γ (gamma). The relationship is described by the equation below.

$$J_t / J_o = (M_t / M_o)^{\Gamma}$$

where J_t is the mass discharge at time t, J_o is the initial mass discharge at time zero, M_t is the mass at time t and M_o is the initial mass.

Initially the scope of this project was to assess the beneficial effect of remediation efforts on groundwater, (measured as reduction in mass discharge) under various types of geology and contamination. The objective was to test whether Γ model can be used in a practical context as a decision factor prior to the selection of a remediation strategy. A number of cases were studied early in the project, and it was found that the Γ-model rarely is applicable at actual field sites, mainly due to lack of reliable data on mass and mass discharge prior to and after remediation. As a result of this initial project phase, the project scope was revised to have a lesser focus on Γ-model but instead map the factors that influence mass discharge reductions. Specific objectives included:

- To illustrate the uncertainties and pitfalls that may result in not achieving the expected mass discharge reduction after remediation.
- To provide recommendations on documenting mass discharge and mass before and after remediation based on the case studies reviewed in this project.

Project content and results

The project included a literature review and collection of data from several remediated sites in Denmark and abroad. The review illustrated that in most cases reliable data for determining the relationship between mass and flux reduction are lacking, due to the uncertainties in mass determination before and after remediation, and inaccurate/ lacking mass discharge data before and after remediation.

No correlation was found between Γ-factor and remediation technologies or conceptual model types in the reviewed case studies. It seems that Γ-model can describe the mass/mass discharge relationship at sites with a low degree of complexity, for example, fairly homogeneous mass distribution and hydrogeological conditions. In more complex sites, especially when cases where contaminant discharge is controlled by back diffusion from low-permeable layers the Γ-model is not directly applicable.

At most of the reviewed sites a reduction in flux of 90% was achieved as a result of remediation efforts. Mass removal ranged from 50 to 99.9%.

Generally an accurate mass and mass discharge estimate requires a good conceptual model of the site's geology, hydrogeology and contaminant distribution. Conceptual models of contaminated sites can be implemented in different levels of detail.

This work presents several methods for determining mass discharge at different levels of complexity. Method selection depends on both technical and economic considerations, but the general recommendation is that mass discharge should always be determined before and after remediation, in order to assess the effect of remediation efforts on protecting the groundwater resources.

The key recommendations for determination of mass discharge are:

- The location of the control plane where the mass discharge is determined shall capture the entire width and depth of the plume.
- Data density (contaminant concentration, hydraulic conductivity and gradient) should cover all hydrogeological units and layer boundaries for the site. Specifically, it is recommended to divide the control plane in units based on the hydrogeology, in order to avoid that datapoints with low hydraulic conductivity are assigned too high K-values (that represents other more permeable layers), which would result in a high mass discharge value. This is particularly important in cases where high contaminant concentrations are found in units of low hydraulic conductivity.
- There should be greater focus on determining realistic values for the hydraulic conductivity. This affects the estimated mass discharge more than small variations in concentration, as the hydraulic conductivity often varies by several orders of magnitude.
- Because of the inherent aquifer heterogeneity the determination of mass discharge by discrete water sampling at a control plane is largely influenced by the location and number of monitoring points. In some cases, the results can be very unreliable. Some of these uncertainties can be addressed by volume pumping, which provides an average mass discharge over a larger volume than a discrete point sampling can provide.
- A thorough conceptual model and hydrogeological characterization of the site is critical to the correct location / discretization of mass discharge measurements.

For the development of simple conceptual models a new concept called "14 Compartments Model" is presented in this work. The concept of the 14 Compartments Model was developed by ESTCP-SERDP. The strength of using 14 Compartments Model is that it can be easily adapted to different cases and levels of detail. The division in compartments ensures that all contaminant phases, geology types and migration pathways are included in the conceptual understanding. 14 Compartments Model should be complemented by a traditional illustration of the conceptual model.

Documentation of remediation effect today focuses mostly on the measuring of mass reduction in the source zone. Usually the mass determination is associated with very large uncertainties, not least because the original mass is hard to determine. Reduction of mass discharge before and after remediation is easier to determine, as mass discharge measurements can be replicated and are therefore directly comparable. This requires that the travel time until the effect of remediation can be observed at the control plane is taken into account. It is recommended to include measurements of mass discharge as part of the decision process prior to selection of remediation technology, as well as the primary measure of effect in the documentation phase.

1. Indledning

1.1 Baggrund og behov

Et stort antal forurenede lokaliteter udgør en trussel for det danske grundvand. Regionernes indsats mod de grundvandstruende forureninger omfatter afværgeforanstaltninger med udgangspunkt i risikovurderingen, der er lavet i forbindelse med en forureningsundersøgelse. Indsatsen kan opdeles i de foranstaltninger der foregår i grundvandsmagasiner, eksempelvis ved etablering af afværgepumpning, der forhindrer yderligere spredning af forurenet grundvand i magasinet, og i afværgeforanstaltninger i kildeområder, hvor selve kilden til den grundvandstruende forurening søges fjernet. Afværge af kildeområder har således til formål at beskytte grundvandet[1], hvilket medfører, at indsatsområdet, hvor afværgen foregår (kildeområdet), er forskellig fra det medie, hvor effekten skal opnås, nemlig grundvandsmagasinet.

Oprensningskriterier for grundvandstruende forureninger fastsættes ofte på baggrund af en risikovurdering af den enkelte lokalitet, som er baseret på beregninger af koncentrationer af kritiske stoffer i grundvandsmagasinet. Koncentrationsberegninger har den fordel, at de direkte kan holdes op i mod kvalitetskriterierne for grundvandet. Da indsatsområdet for afværgen som nævnt er forskellig for mediet, hvor effekten skal opnås, er man i praksis nødt til at "oversætte" oprensningskriteriet fra koncentrationen, der skal overholdes i grundvandsmagasinet, til en tilsvarende koncentration i kildeområdet (ofte en jordkoncentration). Ofte defineres oprensningskriteriet som en oprensningsgrad (% af kildemassen fjernet), hvor man antager et lineært forhold mellem massefjernelsen og den resulterede koncentration.

Forureningsfluxen angiver, hvor meget forureningsmasse, der udledes fra en punktkilde pr. tid (f.eks. kg/år). Det er altså en dynamisk størrelse, der udtrykker den samlede forureningsbelastning. En fordel med forureningsflux som størrelse i forhold til koncentrationer er, at fluxe er direkte sammenlignelige. En større flux påvirker et magasin mere end en mindre flux. Dette gælder ikke nødvendigvis koncentrationer. Man kan f.eks. forestille sig en situation, hvor en forureningsfane med høj koncentration af et forureningsstof har en meget lille udbredelse, eller flytter sig meget langsomt hen mod en indvindingsboring pga. lav strømningshastighed, og derfor udgør en mindre trussel mod indvindingsboringen end en forureningsfane med en lavere koncentration, men hvor f.eks. udbredelsen eller strømningshastigheden er højere (Miljøstyrelsen, 2011a).

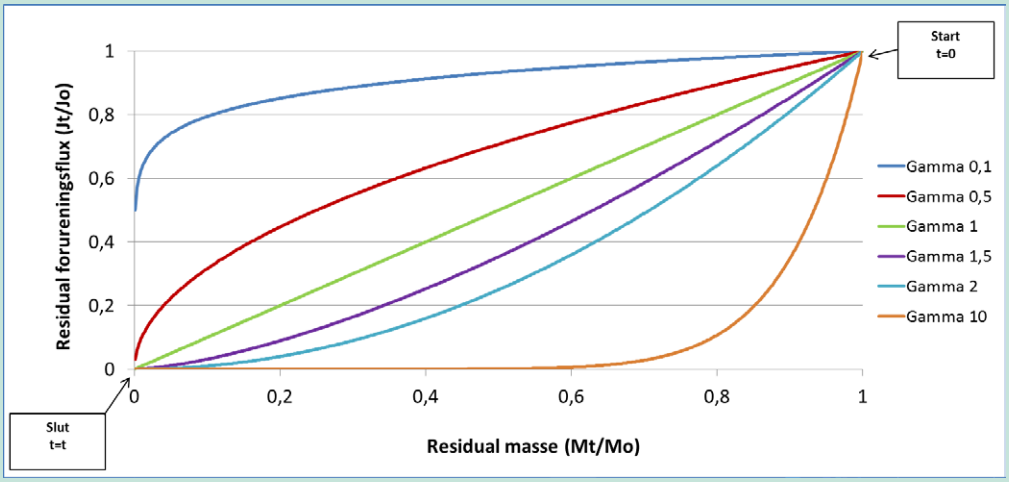
Det er meget svært at vurdere, hvilken effekt en given kildeoprensning har på den forureningsflux, der truer grundvandsmagasinet. Når afværgeprojekter iværksættes, sker det ofte ud fra en antagelse om, at en reduktion i forureningsmassen i kildeområdet medfører en tilsvarende reduktion i den forureningsflux, der påvirker grundvandet. International forskning har imidlertid vist, at der sjældent er en lineær sammenhæng mellem disse størrelser, hvilket betyder, at det kan være vanskeligt at forudse den effekt på grundvandsressourcen, som en given afværgeindsats får.

En simpel måde at beskrive sammenhængen mellem reduktionen i massen og fluxen er den såkaldte "Γ-model", hvor forholdet mellem den relative flux og den relative masse beskrives ved den empiriske faktor Γ (gamma). Forholdet er beskrevet af ligning 1 og er nærmere gennemgået i kapitel 4.

[1] Afværge af kildeområder kan også have til formål at beskytte indeklimaet eller fjerne kontaktrisiko, men dette projekt omhandler kun grundvandsproblematikken

$J_t/J_o=(M_t/M_o)^{\Gamma}$ (1), (Falta et al., 2005a)

Hvor J_t er forureningsfluxen til tiden t, J_o forureningsfluxen til starttidspunktet, M_t er massen til tidspunktet t og M_o er massen til starttidspunktet.



FIGUR 1
Forhold mellem residual masse og flux for forskellige værdier af Γ. Bemærk at startsituationen ses øverst til højre på figuren. En høj Γ på >1 betyder, at en mindre massefjernelse i kildeområdet, kan føre til en højere reduktion i flux. Eksempelvis vil der for Γ =2, med en 40% massefjernelse (residual masse=60%) opnås en 65% reduktion af forureningsfluxen. Tilsvarende vil en 40% massefjernelse for Γ =0,5 kun føre til 20% reduktion af forureningsfluxen.

Funktionen er illustreret på Figur 1, der viser, at når den relative masse reduceres fra 1 til 0,5, vil fluxen være tilsvarende reduceret til 0,25, 0,5 og 0,7 for Γ hhv. 2, 1 og 0,5. Γ-faktoren er således en samleparameter, som inkorporerer både kildearkitektur (dvs. kildezonens geologi i kombination med forureningsfordeling), strømningsmønstre og masseudvekslingsprocesser. I den internationale litteratur har gennemgang af et antal sager vist, at Γ sædvanligvis ligger mellem 0,5 og 2, og som oftest <1.

En høj Γ på >1 betyder, at en mindre massefjernelse i kildeområdet, kan føre til en relativt højere reduktion i flux. Eksempelvis vil der for Γ =2, med en 40% massefjernelse (residual masse=60%) opnås en 65% reduktion af forureningsfluxen (residual flux=35%). Tilsvarende vil en 40% massefjernelse for Γ =0,5 kun føre til ca. 20% reduktion af forureningsfluxen. Hvis der på en given lokalitet kan forudses, hvordan forholdet mellem masse- og fluxreduktion falder ud (dvs. værdien for Γ-faktor er kendt), kan denne bruges til at opstille oprensningskriterier. Hvis der for eksempel vurderes af en 99% reduktion af forureningsfluxen opfylder formålet med at beskytte grundvandet, og Γ-faktor forventes at være 2, kan dette oversættes til et oprensningskriterium svarende til 90% fjernelse af forureningsmassen, ift. 99% for en lineær sammenhæng. Taget i betragtning, at kildeoprensning bliver meget dyrere, jo højere krav, der stilles til oprensningsgraden (%-massefjernelse) (ESTCP, 2011), kan der være store besparelser forbundet med at acceptere en delvis massefjernelse. Omvendt vil der for en lav Γ (eks Γ=0,5) kræves en 99,99% massefjernelse, som på de fleste lokaliteter og med de fleste afværgeteknologier vurderes uopnåeligt. Hvis der således kan forudses, i hvilke tilfælde Γ er under 1, kan det føre til en revurdering af formålet og succeskriterier for en given afværge.

Det skal bemærkes, at Γ-modellen ikke betragter tidsperspektivet, dvs. hvornår effekten i forureningsflux er opnået. Hvis en given afværgeindsats resulterer i 99,9% masse- og flux reduktion efter en periode på 100 år, vil dette ofte ikke imødekomme formålet med oprensningen. Desuden, er

der altid en tidslig forskydning mellem oprensningens afslutning, og hvornår effekten i grundvandet kan observeres. Afhængigt af lokalitetens geologi, udvasknings- og strømningshastighed, kan denne forskydning være på flere årtier.

1.2 Projektets formål

Ved igangsættelse af dette projekt var formålet at vurdere den reelle effekt på grundvandet (målt som fluxreduktioner) af afværgetiltag under forskellige geologityper og forureningsforhold. Hensigten var at teste, om Γ-modellen kan anvendes i forbindelse med dels bestemmelse af det nødvendige behov for oprensning/massefjernelse, dels til valg af afværgestrategi, herunder til dokumentation og monitering af opnået effekt.

Der er tidligt i projektet gennemgået en række sager, og det er konstateret, at Γ-modellen kun sjældent kan bruges på feltlokaliteter, idet der oftest mangler pålidelige data om masse og flux før og efter afværge. Det bliver således nødvendigt at anvende usikre tal i ligning 1, hvilket resulterer i en potentielt misvisende Γ-faktor, der kan være svær at relatere til en afværgemetode eller en lokalitets karakteristika (geologi, forureningsfordeling).

Som resultat af denne indledende fase blev projektets formål revideret til at have mindre fokus på Γ-modellen og mere fokus på en udredning af, hvordan fluxreduktion afhænger af forskellige faktorer, herunder:

- At illustrere de usikkerheder der er, og de faldgruber der kan være, for ikke at opnå den ønskede fluxreduktion, selvom man foretager en afværge
- At give anbefalinger om planlægning og dokumentation af flux og evt. masse før og efter en afværge med baggrund i gennemgang af sagerne.

1.3 Rapportens indhold

Rapporten indledes med to kapitler, der gennemgår begreberne forureningsmasse og forureningsflux samt metoder til estimering af disse (Kapitel 2 og 3). Derefter præsenteres teorien om sammenhænge mellem masse og flux, samt en introduktion til Γ -modellen (Kapitel 4). Tre lokaliteter, hvor fluxbestemmelse er gennemført i detaljer, er præsenteret som eksempler på god praksis i kapitel 4. Eksemplerne belyser desuden de faldgruber, der kan føre til manglende fluxreduktion i forhold til forventningerne, er også præsenteret i kapitel 4.

Rapportens femte kapitel indeholder en erfaringsopsamling af masse- og fluxsammenhænge på afværgesager i Danmark og i udlandet med baggrund i en litteraturgennemgang udført som del af dette projekt. Rapporten afsluttes med anbefalinger til anvendelse af Γ-modellen, og metoder til fluxbestemmelse. Derudover indeholder rapporten en diskussion om brug af konceptuelle modeller som hjælpeværktøj til at opnå den bedst mulige forståelse af masse/flux sammenhænge og dermed den optimale fluxreduktion. Et nyt koncept til opbygning af simple konceptuelle modeller (14-Compartments Model) præsenteres i Appendix A.

1.4 Samspil med andre projekter

Dette projekt er det seneste i en række projekter igangsat af Miljøstyrelsen, der har til formål at undersøge, hvordan indsatsen overfor beskyttelse af grundvandet kan optimeres, således at der reddes mest muligt grundvand for de afsatte midler. I et tidligere teknologiudviklingsprojekt om oprensningskriterier (Miljøstyrelsen, 2011a) viste beregninger, at der ofte kræves meget store oprensningsgrader (>99%), før grundvandskvalitetskriterierne 100 m eller 1 års transport nedstrøms kilden kan overholdes. Dette stiller store tekniske og økonomiske krav til afværgeløsningerne, hvilket igen medfører, at der indenfor de årlige budgetter kan håndteres et mindre antal forurenede lokaliteter.

Miljøstyrelsen har parallelt med dette projekt igangsat et teknologiudviklingsprojekt om "Optimering af afværgestrategi på oplandsskala", hvor der udvikles et koncept, som vil lede frem til

en vurdering af både ødelagt og reddet ressource ved forskellige afværgestrategier i forhold til forskellige kilder (f.eks. reduktion af forureningsfluxen fra kilde 1 og 2 med 50%, reduktion af kilde 3 med 90 eller 99%, osv.). Hvis der opnås en bedre forståelse af sammenhængen mellem oprensningsgraden og den resulterende fluxreduktion vil det give mulighed for bedre at forudsige effekten af en given afværgeindsats, og for at opstille oprensningsgrader, der er opnåelige, omkostningseffektive og giver mulighed for at oprense flere lokaliteter.

2. Forureningsmasse

I dette kapitel vil vi give et overblik over metoder til bestemmelse af forureningsmassen, og der fokuseres på de usikkerheder og faldgruber, der kan være, når massen skal bestemmes på forurenede lokaliteter.

2.1 Definition af forureningsmasse

Forureningsmasse er den totale mængde af forureningsstoffer (opgjort i fx kg) i et forurenet område på undersøgelsestidspunktet. Forureningsmasse er en vigtig del af karakteriseringen af forurenede områder samt i forbindelse med risikovurdering og oprensning af forureningen.

Forureningsmassen består af summen af forureningsmasser i de forskellige faser et stof kan optræde i (gas, sorberet, opløst og separat fase (NAPL)):

$$\text{Total masse } M_{tot} = M_{gas} + M_{jord} + M_{vand} + M_{NAPL} \quad (2)$$

Forureningsmassen er en dynamisk størrelse. En række processer ændrer på fordeling og størrelsen af massen i de forskellige faser (afdampning, sorption og udvaskning og nedbrydning). Fra et traditionelt, stationært risikovurderingsperspektiv (f.eks. vha. JAGG) har en præcis estimering af forureningsmassen ikke så store konsekvenser, da det er forureningskoncentrationer og –flux, der afgør forureningspåvirkningen fra lokaliteten. I mere detaljerede risikovurderinger vurderes ofte også varigheden af belastningen, og denne er afhængig af den samlede forureningsmasse.

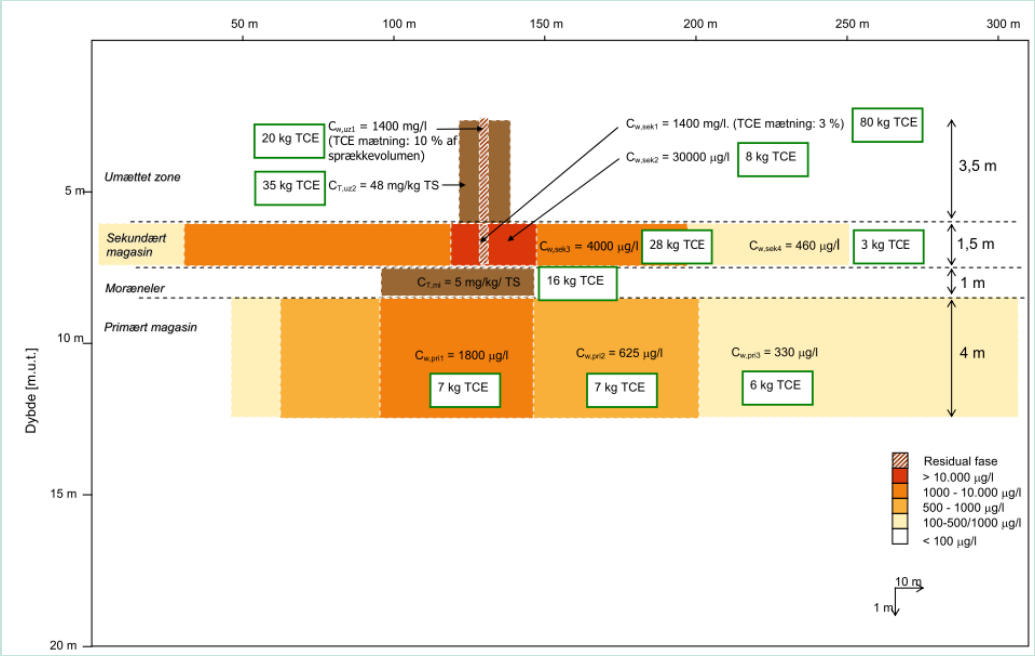
Opgørelse af forureningsmasser er endvidere en nøgleparameter for at kunne vurdere effekten af en oprensning, særligt i de tilfælde, hvor der i forbindelse med oprensningen foregår overvågning af den fjernede masse. Desuden er bestemmelse af forureningsmasse vigtig til dimensionering af afværgeanlæg.

2.2 Generelt om estimering af forureningsmasse

Masseberegning udføres typisk ved at opdele det forurenede område i delvolumener indenfor hvilke forureningskoncentrationen antages homogen. Delområder skal optimalt adskille forskellige geologiske enheder, sået delområde kun består af et geologisk lag (DTU Miljø, 2010). Jo mere inhomogene de geologiske og/eller forureningsmæssige forhold er, des mindre bør delvolumenerne således være. Forureningsmassen indenfor de enkelte delområder opgøres separat. De estimerede middelkoncentrationer for delvolumenerne bygger oftest på gennemsnitlige koncentrationer målt indenfor det givne volumen, forudsat at prøverne er udtaget med nogenlunde ensartet tæthed. Alternativt kan der beregnes vægtede gennemsnitlige værdier, afhængigt af hvor stor en andel af prøvevolumen, der dækkes af de enkelte prøver. Ved brug af en totalkoncentration (C_t), der inkluderer både forureningsmasse på opløst og sorberet form samt fri fase[2], beregnes massen under antagelse af ligevægt mellem faserne (vha. fugacitetsberegninger). Den samlede masse kan herefter estimeres ved at beregne massen i hvert delområde for sig og summere op over alle delområderne. Et eksempel på en masseberegning fra en konkret lokalitet, hvor området er opdelt i flere delvolumener kan ses på Figur 2.

[2] Når masseberegning udføres på baggrund af en total koncentration Ct, er masse af evt. fri fase inkluderet i beregningen.

Der er flere usikkerheder forbundet med estimering af forureningsmasse, da flere af de antagne parametre oftest er usikkert bestemt. Troldborg og Lemming (2005) har udført en følsomhedsanalyse med det formål at analysere, hvilke parametre, der har størst indflydelse på massestimatet. Analysen er udført for den i Figur 2 viste lokalitet, men resultaterne er relevante for de fleste forureningssager. Resultater af følsomhedsanalysen kan ses i Tabel 1. Det angivne usikkerhedsinterval afspejler den resultatændring, der fås ved at anvende minimums- og maksimumsværdien af den parameter, som ved sensitivitetsanalysen påvirkede masseberegningens resultat mest. Usikkerheden knyttet til feltspecifikke parametre kan adresseres ved at anvende forskellige modeller, hvor der eksempelvis i stedet for deterministiske værdier, anvendes probabilistiske distributionskurver for de enkelte parametre (Lemming et al., 2010; Wealthall et al., 2012). Dette er dog en kompliceret opgave, som sjældent vil kunne udføres på små sager, men som til gengæld kan overvejes inden igangsættelsen af større og dyre afværgeprojekter.



FIGUR 2
Eksempel af masseestimering ved opdeling af en TCE-forurenet lokalitet i delvolumener (Troldborg og Lemming 2005). Lokaliteten er opdelt i 4 hydrogeologiske enheder (umættet zone, sekundært magasin, moræneler og det primære magasin). Masseestimering er baseret på målte vandkoncentrationer i det sekundære og det primære magasin, samt total jordkoncentration i den umættede zone og moræneleret. Derudover er der antaget et mindre volumen med fri fase TCE, hvori der antages en vandkoncentration lig med TCEs opløselighed (se også afsnit 2.3 for estimering af DNAPL).

TABEL 1
Estimerede forureningsmasser samt usikkerhed vurderet ud fra den parameter, som beregningen er mest sensitiv overfor. Eksempel fra en konkret case (Fra Troldborg og Lemming, 2005).

Zone	Masse [kg]	Parameter som resultatet er mest sensitiv overfor
Umættet zone (hot spot)	20 ± 40%	Fraktion af organisk carbon
Umættet zone (udover hotspot)	35± 50%	Total jordkoncentration
Sekundært magasin (hot spot)	80 ± 60%	DNAPL mætning
Sekundært magasin (udover hot spot)	40 ± 40%	Vandkoncentration i A_{sek3}
Total masse[1]	210 ± 25%	DNAPL mætning i hotspot i sekundært magasin

Den største usikkerhed er på NAPL mætning (se også afsnit 2.3). Ofte er det meget vanskeligt at afgrænse, hvor stort et område, der er påvirket af residual fase, samt hvor stor mætningen med residual fase er – dvs. hvor stor en procentdel af porevolumenet, der udgøres af residual fase.

Herudover er der stor usikkerhed på de anvendte værdier for indhold af organisk kulstof (f_{oc}), som styrer omregning fra eksempelvis en vandkoncentration til en totalkoncentration, samt porøsiteten. Fugacitetsberegninger, som anvendes til omregning af koncentrationer mellem forskellige faser, indebærer også usikkerheder, fordi fasefordelingskoefficienter er empirisk bestemt, og der ofte mangler pålidelige data for den specifikke geologitype. Eksempelvis har Lu et al. (2011) for nyligt vist, at sorptionskoefficienter (K_d)for chlorerede opløsningsmidler i moræneler er meget større end hidtil antaget, hvilket også flytter grænsen for, hvornår der er fri fase til stede.

Ligeledes er der stor usikkerhed på gennemsnitskoncentrationerne tilskrevet de enkelte delvolumener, idet der er stor usikkerhed forbundet med at fastsætte en repræsentativ koncentration for et delvolumen ud fra interpolation mellem punktmålinger.

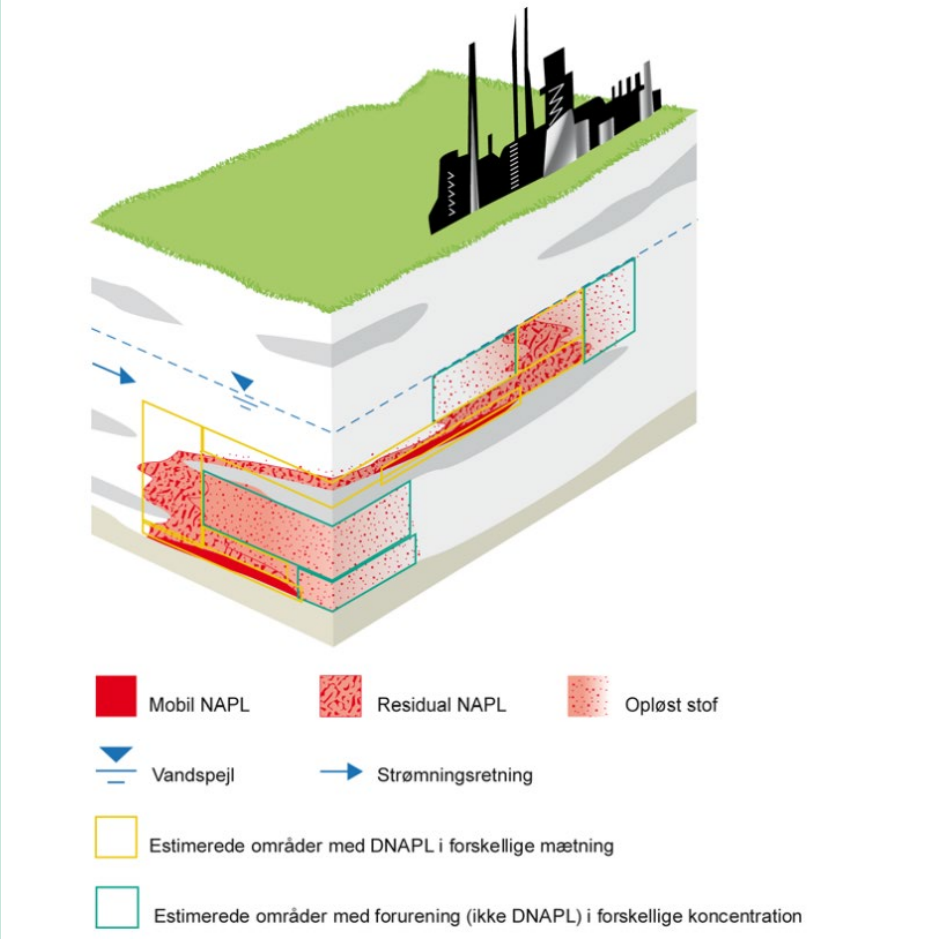
2.3 Masseestimering ved tilstedeværelse af NAPL

Nedenstående afsnit bygger på DTU's vejleding om bestemmelse af fri fase (DTU Miljø, 2010). Vejledningen omhandler DNAPL, men principperne og metodikken kan også anvendes til LNAPL bestemmelse.

DTU har udviklet et regneark i Excel, der hurtigt kan give indikation af, om der er DNAPL i en vand- eller jordprøve i mættet zone (DTU Miljø, 2010).

Masseestimeringsprocessen kan opdeles i tre faser:

1. Konceptuelle modeller: Beskrive mulige koncepter for forureningsudbredelsen (se et fiktivt eksempel på Figur 3).
2. DNAPL vurdering: Bestemme om der er DNAPL, og evt. type og mætning. Prøver vurderes mht. DNAPL ved beregning ud fra jord- og vandprøver. Ud fra jordprøver estimeres evt. DNAPL-mætning.
3. Masseestimering: Udregning af forureningsmasse i området, herunder massen af DNAPL, som vist i Boks 1.



FIGUR 3
Fiktivt eksempel for opdeling af en lokalitet i delvolumener med eller uden DNAPL (Kilde: DTU Miljø, 2010)

BOKS 1 Beregning af masse i DNAPL-fasen som gjort i DTUs regneark (Fra DTU Miljø, 2010)

Beregning af DNAPL masse

Massen (kg) af forurening i DNAPL-fase udregnes som:

$$M = A \cdot h \cdot \theta \cdot S_{DNAPL} \cdot \rho_{DNAPL} \cdot 1000\ L/m^3 \quad (3)$$

Hvor A er arealet i m^2, h er højden (m) af delområdet, der vurderes at indeholde DNAPL,θ er porøsiteten, S_{DNAPL} er DNAPL mætningen (-), og ρ_{DNAPL} er densiteten af DNAPL (kg/L).
I sprækket ler reduceres volumenet (A ·h) til volumenet af sprækkerne (her antages, at porøsiteten i sprækkerne svarer til den i matrix og at sprækkerne er 100% fyldt), og der anvendes er DNAPL-mætning svarende til, at alt DNAPL optræder i sprækkerne.

Ved vurdering af tilstedeværelse og masse af DNAPL er der flere parametre, der kan have afgørende betydning (DTU Miljø, 2010). Hvis vurderingen skal foretages på bagrund af vandkoncentrationer alene, er det en generelt accepteret tommelfingerregel, at koncentrationer over 1% af opløseligheden af det pågældende stof indikerer tilstedeværelse af DNAPL i nærheden af den målte vandprøve, men der skal helst være flere indikationer på DNAPL på lokaliteten. Derudover kan det være vanskeligt at vurdere udbredelsen af DNAPL, idet en vandkoncentration (C_{vand}) i nærheden af prøvetagningsstedet og koncentrationen i filteret ikke afspejler den vertikale variationen i formationen (især ved lange filtre). Derfor er det hensigtsmæssigt, at der indgår koncentrationer fra jordprøver (totalkoncentration, C_t) i vurderingen og i masseberegningen. C_t-koncentrationer

omregnes til vandkoncentrationer og sammenlignes med opløseligheden. Det skal her bemærkes, at evt. fri fase er indeholdt i C_t-koncentrationen, som er en total koncentration og ikke skal forveksles med koncentrationen sorberet på jordpartiklerne (C_{jord}).

Når vurderingen af tilstedeværelse af fri fase foretages ud fra C_t-koncentration er jord-vand fordelingskoefficienten (K_d) en afgørende parameter. Desuden, er størrelsen af porøsiteten afgørende for hvilke niveau i C_t-koncentration angiver DNAPL, men den har også stor betydning for den beregnede DNAPL-masse ud fra litteraturværdier for DNAPL-mætning jf. ligning 3 (DTU Miljø, 2010).

Da selv små variationer i DNAPL-mætning kan give store variationer i den beregnede masse, foreslås det, at der udarbejdes flere konceptuelle modeller for at identificere markante usikkerheder i den konceptuelle forståelse af DNAPL-udbredelsen, så der kan udføres målrettede undersøgelser til at eliminere disse (DTU Miljø, 2010).

2.4 Kvaliteten i massebestemmelse

Generelt kræver et præcist masseestimat en god konceptuel model for lokalitetens geologi, hydrogeologi og forureningsfordeling samt høj tæthed af prøvepunkter. Selve bestemmelsen af forureningsmasse på en lokalitet før og efter en oprensning er behæftet med meget store usikkerheder. Det er efterhånden set på mange lokaliteter, at den ekstraherede masse, eksempelvis i ekstraktionsanlæg i forbindelse med in situ termisk oprensning overstiger det oprindelig masseestimat for kildeområdet (Brooks et al., 2008). Det ligger udenfor dette projekts formål at give anbefalinger til hvordan man udfører en præcis massebestemmelse. Kvaliteten i massebestemmelsen og den usikkerhed, der kan accepteres er afhængigt af formålet med bestemmelsen af massen. Eksempelvis, vil det fra et risikovurderingsperspektiv, som regel være tilstrækkeligt at bestemme massen med en størrelsesordens (faktor 10) præcision. Omvendt vil der, ved projektering af afværge, være brug for en højere præcision i bestemmelse af massen, samt det forurenede volumen for at kunne dimensionere forbrug af materialer (eksempelvis oxidationsmidler) eller udgifter til deponering af opgravet forurenet jord. I dette projekt har et nøjagtigt masseestimat været nødvendigt for at kunne udføre bestemmelsen af Γ-faktor (se Boks 2), og det er fra denne synsvinkel, at problematikken omkring usikker massebestemmelse omtales i denne rapport.

BOKS 2 Udfald af Γ-faktor afhængigt af forureningsmassen

Betydning af usikkerhed i masseestimat for beregning af Γ-faktor

På en hypotetisk forurenet lokalitet er der udført afværge af kildeområdet ved kemisk oxidation. Det er veldokumenteret at afværgen har ført til en reduktion af forureningsflux med 90%, dvs. $Jt/Jo = 0{,}1$

Før afværgen er massen på lokaliteten estimeret til 1000 kg. Efter at afværgen er gennemført, er det vurderet, at der er efterladt en mindre masse på 1-10 kg forurening.

$$Jt/Jo = (Mt/Mo)^{\Gamma}$$

Antages der en Mt på 1 kg, kan der jf. ligning 1 beregnes en Γ på 0,33, mens der for en slutmasse på 10 kg fås en Γ på 0,5.

3. Forureningsflux

3.1 Definition af forureningsflux

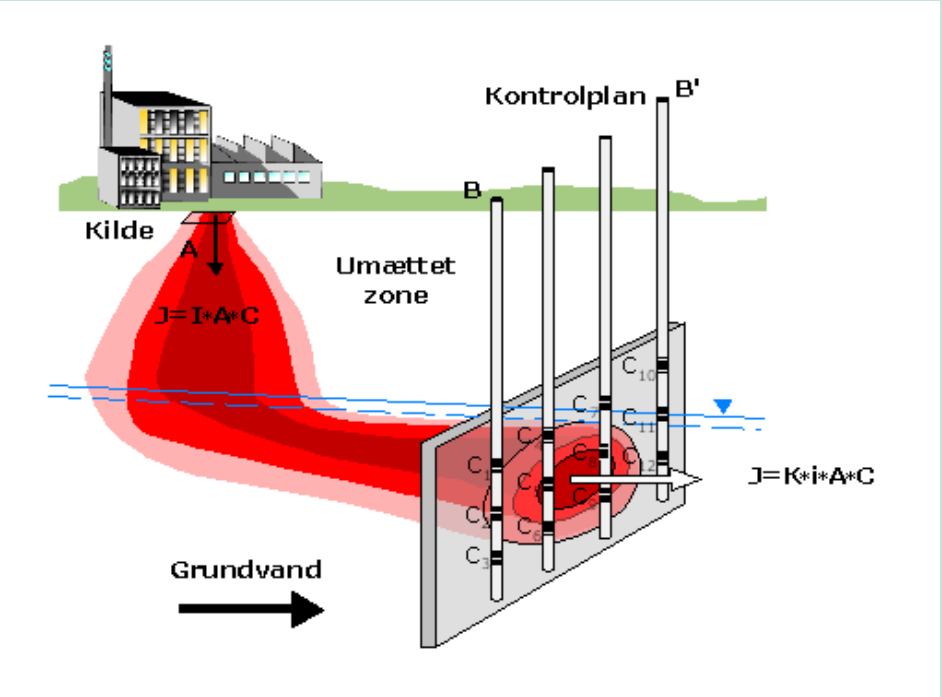
Forureningsfluxen er et mål for hvor meget masse af et stof, der flytter sig pr. tid. Forureningsflux er således en dynamisk parameter.

Ofte måles eller beregnes den totale forureningsflux gennem et kontrolplan, bestående at et boringstransekt, der dækker hele forureningskilden eller -fanen. Kontrolplanet opdeles som regel i flere celler (n), hvor "delfluxen" i hver celle (i) (F_i) kan måles pr. arealenhed ($g/m^2/år$). Kontrolplanet kan være horisontalt under en forureningskilde eller vertikalt på tværs af grundvandsstrømningen, som vist på Figur 4.

Forureningsfluxen (J_t) beskrives af følgende ligning:

Terminologi:

Det skal bemærkes, at den danske terminologi for forureningsflux (J_t) er i strid med den internationale litteratur, hvor termen *mass discharge* ofte benyttes til at beskrive den samlede masseudledning over tid, (forureningsflux), mens termen *mass flux* benyttes for at beskrive masseudledning pr. tid pr. arealenhed. I den internationale litteratur bruges symbolerne M_D for mass discharge og J_i for mass flux, således at ligning 4 konverteres til:



FIGUR 4
Princip for fluxbestemmelse i felten. Ved niveauspecifik prøvetagning måles koncentration, hydraulisk ledningsevne og gradient i en række filtre i et kontrolplan etableret vinkelret på forureningsfanen. Ved passiv prøvetagning måles fluxen gennem hvert filter direkte. Den vertikale flux fra kilden kan ligeledes beregnes ved at gange (del)arealet (A) med nettoinfiltrationen (I) og en antaget vandkoncentrationen (C) for arealet, som vist i ligningen J=I*A*C Kilde: DTU Miljø (2011a)

På flere lokaliteter er der ofte behov for en grov beregning af forureningsflux på baggrund af meget få datapunkter, som resultat af en indledende undersøgelse eller lignende. Dette kan gøres ved:

- Simpel/grov beregning af flux
- Bestemmelse af forureningsflux fra isokonturkort af koncentrationer

Forureningsflux kan bestemmes direkte ved at udføre feltundersøgelser, der har det specifikke formål at bestemme fluxen. Dette kan gøres ved:

- Niveauspecifik prøvetagning i et boringstransekt
- Volumenpumpning
- Passive fluxmålere i boringer

Fælles for disse metoder er, at fluxen estimeres gennem et kontrolplan etableret vinkelret på forureningsfanen. Det er her vigtigt at placere boringerne i kontrolplanet således, at hele fanen dækkes både horisontalt og vertikalt.

Der findes derudover flere modelværktøjer til fluxbestemmelse. Med disse værktøjer beregnes fluxen ud fra oplysninger om punktkilden med hensyn til forureningsudbredelse, kildestyrke og hydrogeologi (ITRC,2010; DTU Miljø, 2010 og 2011a).

Udover koncentrationsmålinger indgår oftest den hydrauliske ledningsevne (K) i fluxberegningen. Denne kan bestemmes i felten ved hjælp af forskellige metoder, eksempelvis, ved "slug-test" eller ved pumpeforsøg og monitering af vandstandsvariationer i selve pumpeboringen og/eller observationsboringer. Der henvises til Videncenter for jordforurenings webbaserede afværgekatalog og projekteringsparametre for en uddybende beskrivelse af disse metoder (VJ, 2009).

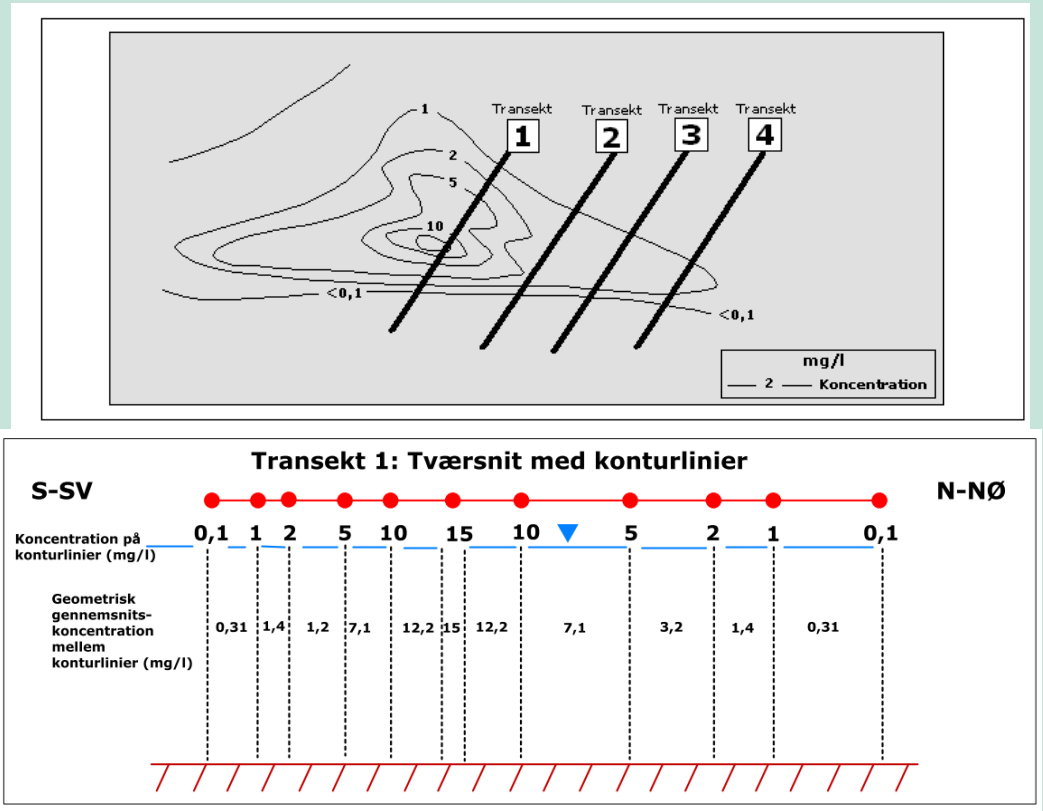
3.2.1 Helt simpel/grov beregning

Der er ofte behov for en grov beregning af forureningsflux på en lokalitet på baggrund af meget få datapunkter, som for eksempel resultater fra en indledende undersøgelse eller lignende. Den horisontale og vertikale flux kan beregnes som vist på Figur 4, og er beskrevet nedenfor:

Forureningsflux gennem det horisontale plan kan beregnes ved at antage en gennemsnitlig koncentration over et areal. Værdien for den hydrauliske ledningsevne kan hentes fra opslagsbøger, mens den hydrauliske gradient kan være bestemt ud fra lokale eller regionale potentialekort (med større eller mindre sikkerhed). Hvad angår den vertikale flux fra et kildeområde, kan denne også bestemmes som vist øverst på Figur 4, hvor I er nettoinfiltrationen.

3.2.2 Estimering af forureningsflux fra isokonturkort

Når feltforholdene, økonomi eller tidsforhold ikke tillader bestemmelse af forureningsfluxen ved nye feltmålinger, kan eksisterende data anvendes til at estimere fluxen. Eksempelvis kan transektmetoden anvendes i kombination med et isokonturkort, der integrerer data fra flere moniteringsboringer, der ikke ligger i et transekt. Et pålideligt isokonturkort forudsætter en solid hydrogeologisk konceptuel model for lokaliteten, samt et relativt stort antal målepunkter (boringer). Derudover er det vigtigt, at målinger fra de eksisterende boringer dækker forureningsfanens tykkelse (ITRC, 2010). Trods usikkerheden knyttet til denne metode, er den ofte anvendt til estimering af forureningsflux, især i forbindelse med risikovurdering og prioritering af forureningsundersøgelser på grund af de meget lave omkostninger, og muligheden for at anvende eksisterende data. Princippet bag beregningerne kan ses i nedenstående figur:



FIGUR 5
Princip for estimering af forureningsflux på baggrund af isokonturkort (Modificeret fra ITRC 2010)

3.2.3 Niveauspecifik prøvetagning i et boringstransekt

Ved den niveauspecifikke prøvetagning måles koncentration og hydraulisk ledningsevne i alle kontrolplanetsfiltre (se Figur 4). Disse punktmålinger interpoleres, så hele kontrolplanets areal dækkes, hvilket typisk gøres ved at lægge et cellenet henover kontrolplanet og tildele hver celle en koncentration, en hydraulisk ledningsevne og en gradient. Forureningsfluxen gennem de enkelte celler kan nu estimeres vha. ligning 4, og den totale flux fra punktkilden bestemmes herefter ved summation af delfluxene (DTU Miljø, 2011). Der findes flere værktøjer, der kan anvendes til at regne på forureningsfluxen ved at bruge data fra et boringstransekt. Et eksempel er Mass Flux toolkit (GSI Environmental, 2010). Mass Flux toolkit er frit tilgængeligt. Værktøjet er udviklet som en del af det amerikanske forsvarsministerium Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) forskningsprogram. I dette værktøj kan brugeren indtaste koncentrationsdata i form af koordinater og type (enkelt punkt eller filterintervallet fra moniterings/undersøgelses-boringer). Som det næste trin kan data for den hydrauliske ledningsevne og hydraulisk gradient indføres, enten diskretiseret for forskellige lag/dybde eller som en enkelt gennemsnitlig værdi. Værktøjet er meget fleksibelt, idet det kan bruges både i sager med meget detaljerede data, og i sager med få målepunkter.

En af de vigtigste udfordringer ved denne metode er placering af transektet, således at det dækker forureningsfanen i både horisontalt og vertikalt plan i forhold til udbredelsen, og at placering af filtrene er optimal i forhold til at afdække heterogeniteter i forureningsfordeling og hydrogeologi (se også 3.3 for en uddybning af disse udfordringer). Desuden er det vigtigt at kobling mellem koncentrationer, hydraulisk ledningsevne og gradient, er korrekt, så at der eksempelvis ikke tildeles en høj K værdi i lavpermeable zoner, hvor der til gengæld er højt indhold af forurening.

3.2.4 Passive fluxmetre

Passive fluxmetre (PFM) består af små porøse moduler, typisk lavet af nylon, fyldt med avancerede adsorbenter, specielt designet til at tilbageholde specifikke kemiske stoffer eller stofgrupper. Sorbenterne indeholder desuden et miljøneutralt sporstof, der opløses proportionalt med mængden af gennemstrømmende vand (ITRC 2010). Modulerne kan nedsænkes i en boring for en periode (typisk dage til måneder). Når modulet tages op igen kan forureningsstofferne og det tilbageværende sporstof ekstraheres fra sorbenten. Den residuelle sorbentkoncentration kan anvendes til at bestemme den mængde af vand der er strømmet igennem cellen. Gennemsnits-forureningskoncentrationen i det gennemstrømmende vand, C_F, beregnes som massen af forurening i sorbenten divideret med den beregnede mængde gennemstrømmende vand.

I hver enkelt celle kan ”delfluxen” pr. areal bestemmes ved ligning 6,

Udfordringerne ved anvendelse af PFM på en feltlokalitet med et eksisterende boringsnetværk er: (1) at vælge et optimalt sæt af boringer til nedsætning af PFM og (2) at kombinere oplysningerne fra PFM med traditionelle målinger af grundvandskoncentrationer. En tredje udfordring med brug af PFM i gamle boringer er, at resultaterne kan påvirkes af tilstopning af boringernes filter, da teknikken bygger på passiv grundvandsstrømning gennem boringen (Basu et al., 2006).

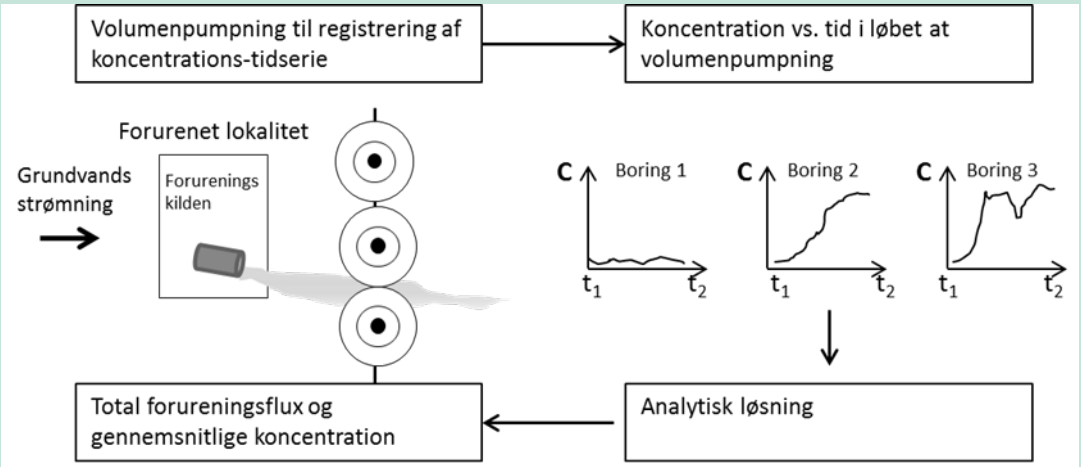
Det skal bemærkes, at trods det lovende navn er fluxmetre ikke egentlig fluxmålere, idet det vand der strømmer igennem modulerne ikke er det samme som det samlede naturlige grundvandsflow. Ved at anvende PFM kan der måles en tidslig integreret forureningskoncentration, men for at beregne fluxen skal der tildeles et areal samt værdier af hydraulisk ledningsevne (K) og gradient (i), der vurderes repræsentative for den specifikke celle. Metoden svarer således til bestemmelsen af flux ved niveauspecifik prøvetagning, omend usikkerheden vedrørende den tidslige variation i koncentrationsniveauer er mindre. Der er i de seneste år udviklet måleudstyr, der kan installeres direkte i magasinet til in situ måling af grundvandshastigheden, hvilket giver mulighed for på en forholdsvis billig måde at opnå en høj diskretiseringsgrad for grundvandstrømning. De kaldes for PVP (Point Velocity Probes) og har vist lovende resultater i grundvandsmagasiner, hvor strømning primært foregår horisontalt (Labaky et al., 2009).

3.2.5 Volumenpumpning

På grund af grundvandsmagasinernes heterogenitet er fluxbestemmelse ved niveauspecifik prøvetagning stærkt påvirket af placeringen og antallet af boringer og filtre. I nogle tilfælde kan resultaterne være meget upålidelige. Desuden udviser de fleste forureningskilder en heterogen massefordeling, især hvis en separat organisk fase er til stede, der fører til komplekse forureningsgeometrier og variable nedstrøms koncentrationer. En del af disse variationer kan imødekommes ved hjælp af volumenpumpning.

Princippet i volumenpumpning er, at der pumpes fra én eller flere boringer i kontrolplanet (se Figur 6). Boringernes placering, pumperater og tider vælges således, at hele forureningsfanen dækkes af indfangningszonerne fra boringerne inden for pumpeperioden. Under en konstant pumpningsrate måles forureningskoncentrationen i det oppumpede vand løbende som funktion af tiden. Koncentrationstidsserierne kan enten tolkes analytisk eller oversættes til en koncentrationsfordeling i fanen omkring pumpeboringerne ved brug af en numerisk grundvandsmodel. Herudfra kan fluxen gennem kontrolplanet bestemmes (DTU Miljø, 2011).

En analytisk løsning antager en steady-state situation med følgende forudsætninger i pumpeboringens indfangningszone (1) Strømningen mod boringer er radialt symmetrisk (2) magasinet er homogent med hensyn til porøsitet, hydraulisk ledningsevne og tykkelse (Bockelmann et al., 2001). Introduktion af koncentrations-tidsserier fra pumpning i den analytiske løsning sigter på at estimere den mobile forureningsflux på tværs af et defineret kontrolplan. Den immobile masse fanget i zoner med lav hydraulisk ledningsevne er dermed negligeret, da denne vil være ubetydelig i sammenligning med fluxen fra de højpermeable zoner. Den analytiske metode er nærmere beskrevet i Bockelmann et al. (2001).



FIGUR 6
Koncept for volumenpumpning. modificeret fra Bockelmann et al. (2001)

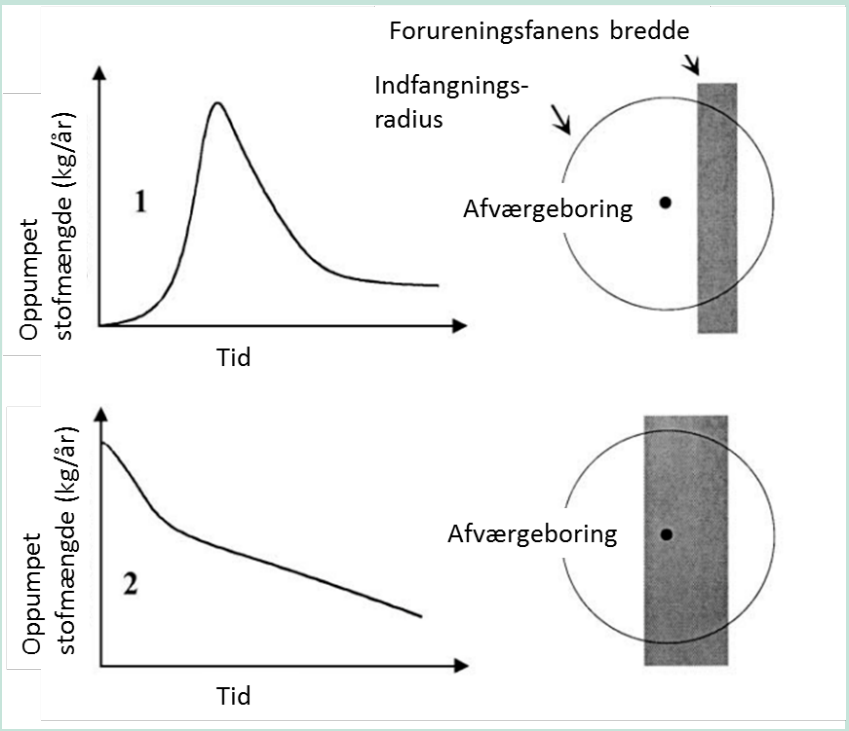
Den analytiske løsning er et forenklet beregningsværktøj, som kan anvendes til homogene eller moderat heterogene magasiner for at bestemme forureningsflux baseret på relative få målinger. Metoden er begrænset af de underliggende forenklede hypoteser, og kan derfor ikke anvendes på stærkt heterogene lokaliteter. Hvis der findes tilstrækkelige data kan der med fordel anvendes en numerisk flow- og transportmodel, der vil gøre det muligt at inddrage rumligt variable strømningsforhold, asymmetriske indfangningszoner, retardation, specifikke randbetingelser og andre stedspecifikke faktorer i fluxberegningen (Bockelmann et al., 2001).

Den største ulempe ved denne metode er omkostningerne ved pumpning, da der ofte er store omkostninger knyttet til udledning af det forurenede grundvand.

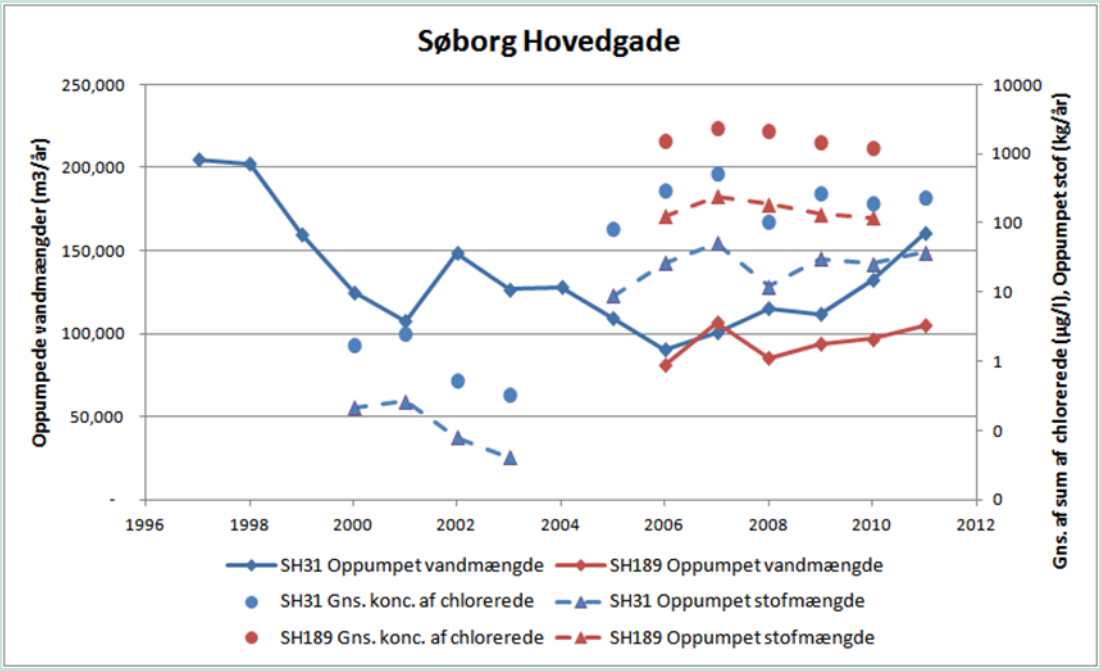
3.2.5.1 Estimering af forureningsflux fra afværgepumpning.

På flere forurenede lokaliteter er der etableret afværgepumpning til at forhindre spredning af forurenet grundvand i magasinet. Hvis det antages at afværgeboringerne og tilhørende indfangningszoner dækker over hele kildeområdet, og at der ikke ligger andre kilder i nærheden, kan det antages, at den årlig fjernede forureningsmasse i afværgeanlægget er et retvisende mål for forureningsfluxen fra lokaliteten. I forbindelse med afværgepumpning sker der ofte indsamling af data (koncentration og pumpeydelse) over en længere periode, hvilket kan give et billede af fluxudviklingen over tid. Hvis afværgeboringen indfanger hele forureningsfanen, vil der, i opstarten af afværgepumpning, forventes en tidslig udvikling svarende til Figur 7, og derefter vil koncentrationen være nogenlunde konstant, når der opnås steady-state tilstand.

På aktuelle lokaliteter ses der dog ofte et mere varierende billede, se eksempelvis de stiplede linjer på Figur 8. Om disse variationer skyldes fejlantagelse i boringernes ydelse, naturlig variation i grundvandsdannelse, mobilisering af fri fase eller andet er svær at vurdere. I lighed med volumenpumpning vil usikkerheden af fluxen bestemt fra afværgepumpningstidsserier, afhænge af lokalitetens kompleksitet og heterogeniteter i geologi og forureningsfordeling.



FIGUR 7
Forventet udvikling i oppumpede stofmængder i afværgeboringer inden opnåelse af steady-state tilstand, afhængigt af boringens placering i forhold til fanen. Fald i koncentrationer skyldes fortynding da afværgeboringer indfanger vand udenfor det forurenede fane.



FIGUR 8
Beregnet effekt af afværgepumpning i afværgeboringerne på Søborg Hovedgade, baseret på oplysninger fra Region Hovedstaden om koncentrationsniveauer for de 10 afværgeboringer og den samlede oppumpede vandmængde på hvert anlæg. Boringernes individuelle pumperater kendes ikke, så koncentrationsniveauerne for hvert år er beregnet som et simpelt gennemsnit for hvert anlæg.

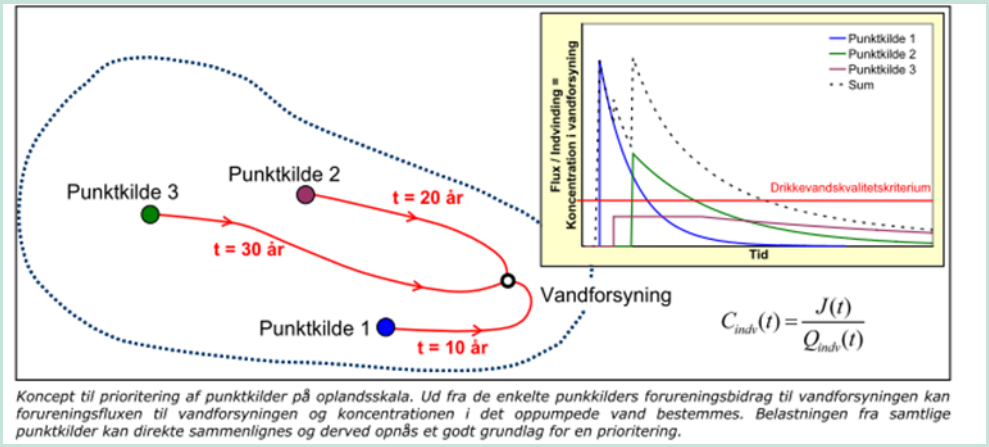
3.2.6 Estimering af forureningsflux fra stoftransportmodeller

Flere forholdsvist simple risikovurderingsmodeller (BIOCHLOR, BIOSCREEN,RISC5, CONSIM, BIOBALANCE og også JAGG, hvis man ser i mellemresultaterne) kan anvendes til at beregne forureningsflux fra en lokalitet på baggrund af input data om geologi, grundvandsstrømning og forureningskoncentration (Troldborg et al., 2008). En gennemgang af de modeller der kan anvendes på lokalitetsskala er udført i forbindelse med tidligere miljøprojekter (Miljøstyrelsen, 2011a og b).

Når en model for lokaliteten er konstrueret, er estimering af forureningsflux fra modellen en nem proces. Generelt gælder det, at kvaliteten og præcision af input værdierne er styrende for kvaliteten af fluxestimatet. I de fleste tilfælde vil en pålidelig model kræve så mange data fra feltmålinger, at fluxen på lokaliteten også vil kunne bestemmes ved en feltmetode.

Modeller, der inkluderer fluxberegninger på lokalskala, kan kobles sammen med transportmodeller, og dermed kan de anvendes som prioriteringsværktøj på oplandsskala hvor et simplificeret estimat af forureningsflux fra enkelte lokaliteter kan sammenlignes. Princippet kan ses på Figur 9.

Oplandsskalamodeller der anvender forureningsflux er gennemgået i Miljøstyrelsen (2011b). Forureningsbidragene til det (eller de) betydende grundvandsmagasin(er) fra enkeltkilderne beregnes typisk ved fastlæggelse af en kildestyrke og beregning af udvaskningen gennem dæklaget og evt. mellemliggende sekundære grundvandsmagasiner på adskillige kompleksitetsniveauer (Miljøstyrelsen, 2011b). I et senere projekt (Miljøstyrelsen, 2012) er der udviklet en håndbog om, hvordan risikobaseret prioritering af punktkilder inden for et større geografisk område gribes an.



Koncept til prioritering af punktkilder på oplandsskala. Ud fra de enkelte punkkilders forureningsbidrag til vandforsyningen kan forureningsfluxen til vandforsyningen og koncentrationen i det oppumpede vand bestemmes. Belastningen fra samtlige punktkilder kan direkte sammenlignes og derved opnås et godt grundlag for en prioritering.

FIGUR 9
Sammenligning af forureningsflux fra enkelte lokaliteter på oplandsskala (Kilde DTU Miljø, 2006)

3.3 Fluxbestemmelse: Eksempler på veldokumenterede sager

I dette afsnit præsenteres tre eksempler på afværgesager, hvor der er udført en detaljeret fluxbestemmelse. Sagerne kan bruges som inspiration til fremtidige projekter hvor dokumentation af forureningsflux bør inddrages før og efter afværge. Eksemplerne illustrerer desuden de forskellige faktorer, der påvirker forureningsfluxen og som vil kunne føre til over/underestimering, hvis forureningsfluxen på den pågældende lokalitet ikke var bestemt med et højt detaljeringsniveau.

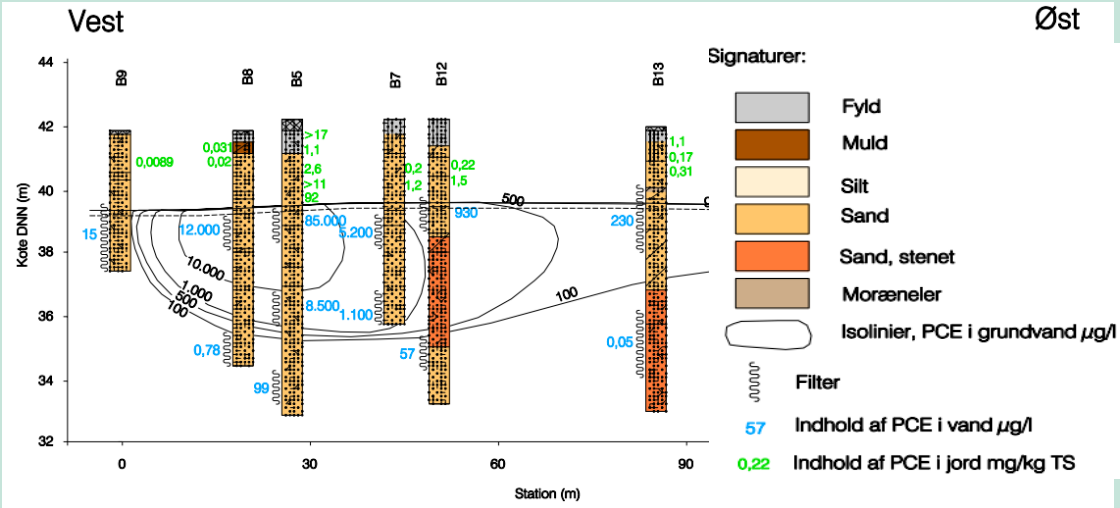
Det første eksempel illustrerer, hvordan fluxbestemmelsen kan anvendes som oprensningskriterium samt betydning af den hydrogeologiske karakterisering. Det andet eksempel illustrerer, hvordan forskellige metoder til bestemmelsen af fluxen kan give forskellige resultater, og især de usikkerheder, der er behæftet med en grov fluxberegning baseret på enkelte vandkoncentrationer. Det tredje eksempel illustrerer hvordan fluxen kan underestimeres, hvis

boringernes placering og filtersætning ikke er dækkende i forhold til forureningsfordelingen. Eksemplet viser desuden, hvordan forureningsfaner kan være vedvarende trods en vellykket afværgeindsats i kildeområdet.

3.3.1 Eksempel 1: Rødekro

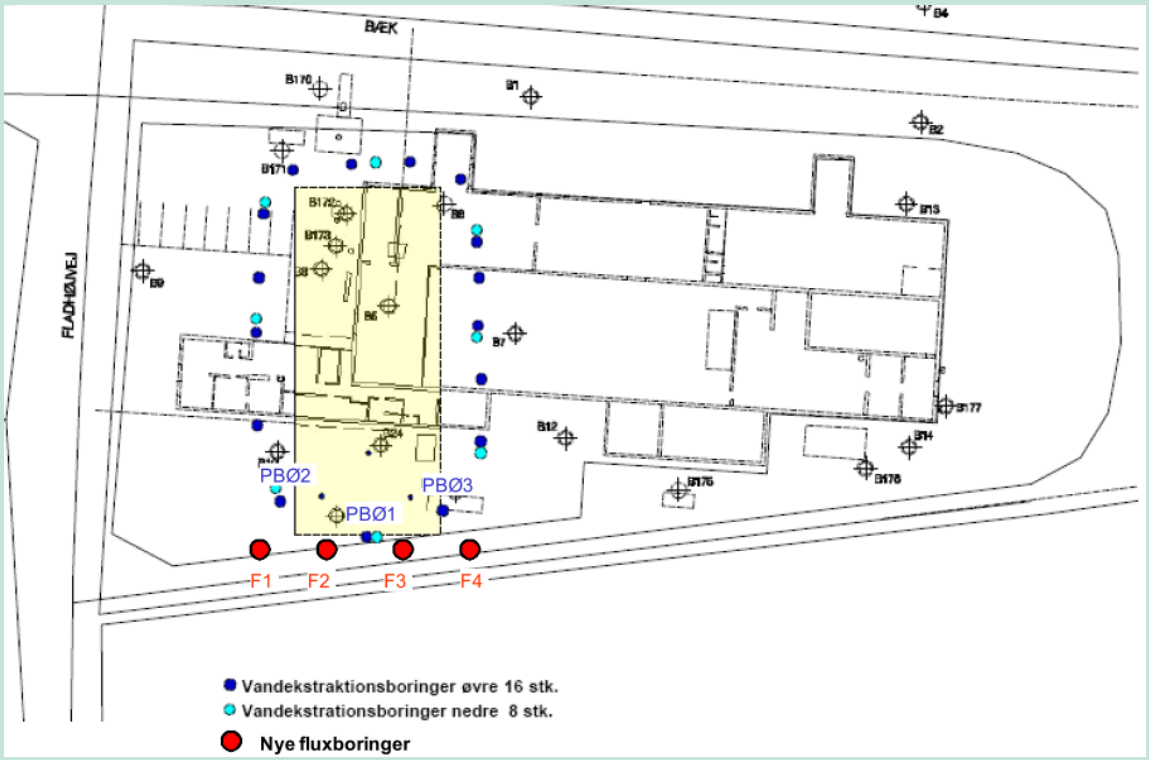
På ejendommen har der i perioden 1964-2001 været drevet renseri, som har forårsaget en kraftig forurening med PCE, primært i et sandmagasin. I efteråret 2006 gennemførtes en oprensning af kildeområdet ved injektion af damp. Efter oprensningen forventedes mere end 95% af forureningskilden at være fjernet.

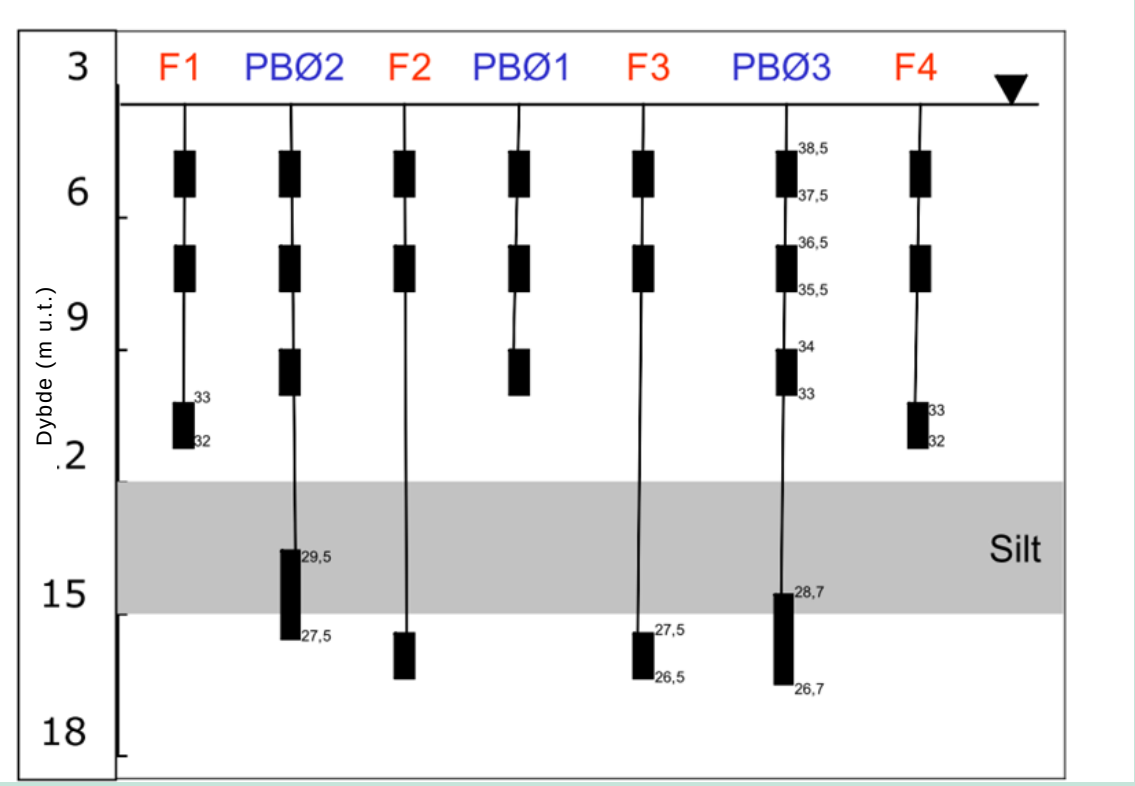
I forbindelse med dimensioneringen af dampoprensningen af kildeområdet ved det tidligere renseri, er der udført pumpeforsøg og flowlogs i boringer på renserigrunden med henblik på at bestemme variationen af den horisontale hydrauliske ledningsevne over dybden. Det fremgik heraf, at der er relativt store variationer i den hydrauliske ledningsevne. Øverst i den mættede zone er der en høj hydraulisk ledningsevne (lokalt helt op til 5 x 10^{-3} m/s i de groveste sekvenser), mens den hydrauliske ledningsevne ca. 12-15 m u. t. er betydeligt lavere (5 x 10^{-4} til 5 x 10^{-5} m/s). Et geologisk tværsnit af lokaliteten kan ses i Figur 10.



FIGUR 10
Geologisk tværsnit og forureningsniveauer før afværge (Region Syddanmark., 2008)

I forbindelse med dokumentationen af effekten af dampoprensningen i kildeområdet er etableret 4 fluxboringer (F1-F4) med i alt 12 filtre umiddelbart nedstrøms behandlingsområdet. Disse er prøvetaget og analyseret for PCE og nedbrydningsprodukter. Desuden er der i forbindelse med dokumentationen udtaget og analyseret prøver fra vandekstraktionsboringer i periferien af oprensningsområdet, hvoraf 3 ligger i den nedstrøms ende af området (PBØ1- PBØ3). Beliggenheden af boringerne og filterdybderne fremgår af Figur 11.





FIGUR 11
Øverst: Beliggenhed af flux og vandekstraktionsboringer nedstrøms det oprensede område(gul firkant). Nederst: Angivelse af filterniveauer i nedstrøms transekt (Region Syddanmark 2012)

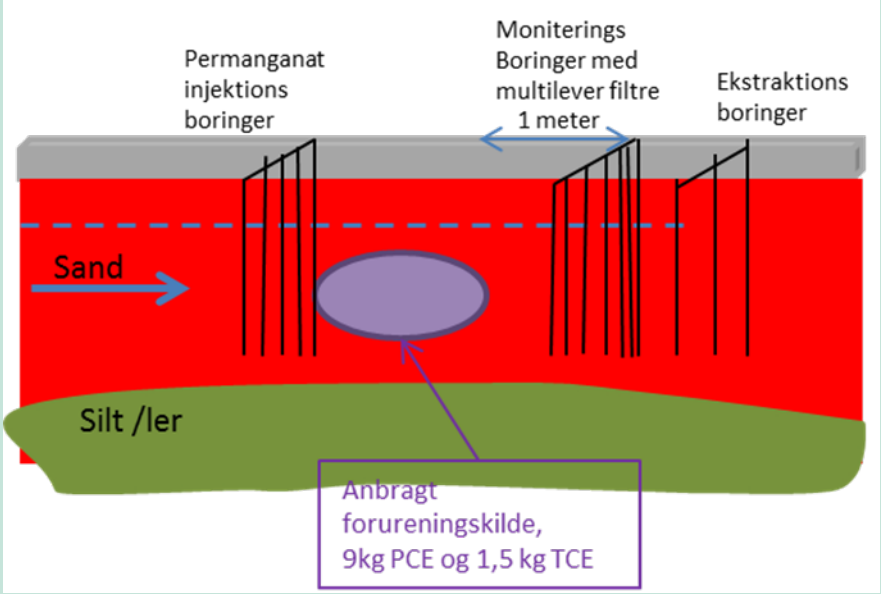
Fluxen af PCE i grundvandet fra kildeområdet før afværgeprojektets start er beregnet på baggrund af data fra en række boringer (i den gule firkant på Figur 11 øverst), hvor der ikke er udført slugtest. Der er anvendt K-værdier som er bestemt ved senere undersøgelser i F- transektet. Fluxen før afværge blev bestemt i 2008 til 108 kg PCE/år. Fluxen af PCE efter afværgeprojektets slutning er

bestemt med en større detaljeringsgrad idet der er udført et transket umiddelbart nedstrøms afværgeområdet (F-transektet). Der er udført niveauspecifik prøvetagning og måling af hydraulisk ledningsevne (via slugtests) i samtlige filtre i F-transektet. Beregningerne viste, at fluxen som følge af oprensningen er reduceret fra ca. 108 kg PCE/år til ca. 4,2 kg PCE/år, svarende til en reduktion på 96% i 2008. I 2010 er fluxen reduceret til <1 kg/årsvarende til en reduktion på 99,5% (Region Syddanmark, 2012). Det skal dog bemærkes, at fluxen før afværge er ikke bestemt med samme kvalitet eller samme sted som fluxen efter afværgen. Det anbefales, at der, som en del af beslutningsgrundlaget før et afværgeprojekt, udføres boringer og ledningsevne målinger til bestemmelse af flux før afværge. På denne måde vil fluxen før og efter afværge være direkte sammenlignelige, så at vurdering af indsatsen vil være nemmere.

Afværgesagen fra Rødekro illustrerer, hvordan en god karakterisering af forureningsfluxen kan anvendes som et pålideligt succeskriterium for afværgen, allerede kort efter oprensningen er overstået. Styrken i netop denne sag er, at transektet er placeret kildenært, så det fungerer som et relativt kortsigtet kontrolpunkt. Dette har også været hjulpet af, at der er tale om en høj grundvandsstrømning. Derudover er de geologiske heterogeniteter taget i betragtning ved fluxbestemmelsen, da den hydrauliske ledningsevne er målt i adskillige filtre og har vist, at de kan påvirke resultatet med flere størrelsesordner.

3.3.2 Eksempel 2: Borden, Ontario

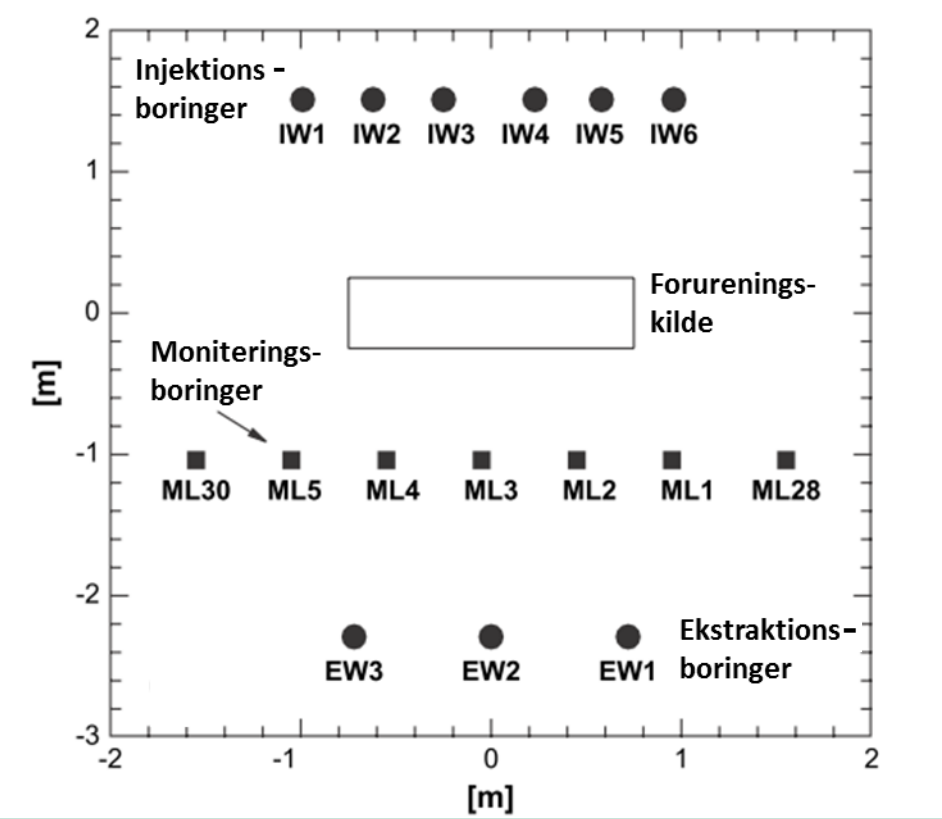
På en lokalitet i Borden, Ontario er der udført et feltforsøg med det formål at bestemme forureningsflux fra en anbragt kilde, før og efter afværge med in situ kemisk oxidation. Forureningen bestod af ca. 9kg PCE og 1,5 kg TCE og blev anbragt i et frit sandmagasin 1 meter under vandspejlet. Sandmagasinet er underlejret af et silt/lerlag. En konceptuel model af lokaliteten kan ses på Figur 12.



FIGUR 12
Konceptuel model for Borden, Ontario (Thomson et al., 2007). Figuren er udarbejdet af Orbicon

Afværge er udført ved in situ kemiskoxidation med kaliumpermanganat ($KMnO_4$). Der er injiceret $KMnO_4$ i løbet af 485 dage i 6 boringer opstrøms kilden, med samtidig ekstraktion og recirkulering fra 3 ekstraktionsboringer nedstrøms kilden. Forureningsmassen i kilden efter afværge blev bestemt ved udtagning og detailkarakterisering af 23 jordkerner fra kildeområdet. Det er beregnet, at 99% af massen blev fjernet som resultat af afværgeindsatsen.

Forureningsflux før afværge blev bestemt i et moniteringstransekt 1 m nedstrøms kilden. Boringstransektet bestod af 7 multilevelboringer med en indbyrdes afstand på 0,5 m og hver udstyret med 14 filtre, svarende til en vertikal diskretisering på 0,2 m (som vist i Figur 13). Da forureningskildens placering og masse er kendt, er placeringen af moniteringstransektet optimal i forhold til at indfange al forureningsflux fra kilden.



FIGUR 13
Placering af injektion/ekstraktions og moniteringsboringer (Modificeret fra Thomson et al., 2007)

Fluxen er bestemt i moniteringstransektet 160-220 dage efter endt kildeoprensning, hvorfor der forventes fuld gennembrud af fanen i transektet. Fluxbestemmelse er udført ved niveauspecifik prøvetagning under to forskellige forhold:

- Målt i moniteringstransektet under naturlige strømningsforhold
- Målt i moniteringstransektet under forceret gradient ved oppumpning i de nedstrømsbeliggende ekstraktionsboringer (EW1-EW3).

TABEL 2
Forureningsflux i moniteringstransektet 160-220 dage efter endt kildeoprensning

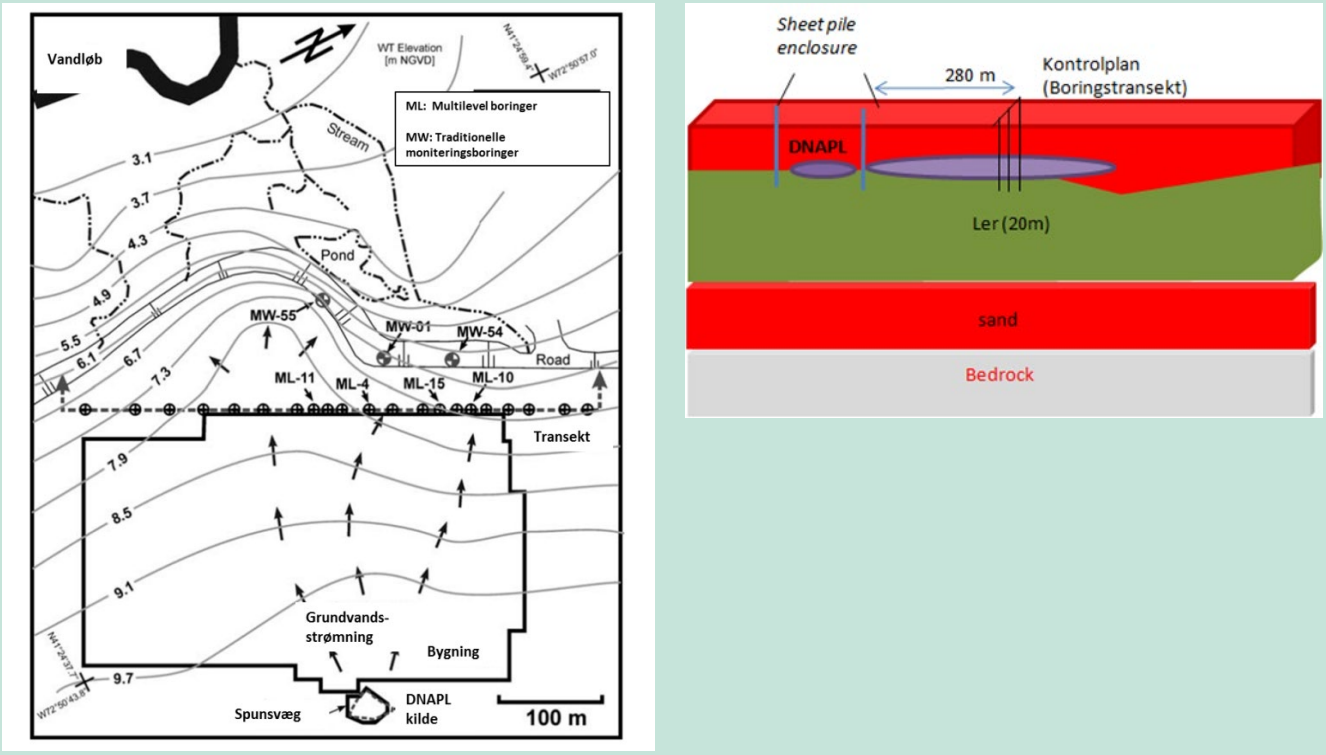
	Før afværge		Efter afværge		Reduktion%	
	TCE	PCE	TCE	PCE	TCE	PCE
Højeste grundvandskoncentration (mg/l)	140	60	2	30	98	50
Naturlig forureningsflux (mg/d)	860	880	7	98	99	89
Forceret forureningsflux (mg/d)	2100	2220	17	220	99	90
Masse i kilden (kg)	9	1,5	<0,001	<0,001	>99	>99

Det ses af Tabel 2, at forureningsfluxen ved begge hydrauliske forhold giver sammenlignelige resultater. Når forureningsfluxen bestemmes ved de naturlige strømningsforhold, er denne afhængig af den hydrauliske ledningsevne og gradient, som kan være varierende med tid, placering og dybde. På grund af den høje prøvetæthed på denne lokalitet er disse usikkerheder mindre udtalt. Ved at anvende en forceret gradient, kan man imødekomme disse usikkerheder, idet man i så fald måler kildestyrken under bestemte gradientforhold. Denne metode er således velegnet til at bestemme effekt af en oprensning i kilden, men vil samtidigt resultere i en højere flux, og dermed overstimering af evt. risiko. Målinger under forceret gradient er mere kontrolleret og kan replikeres, evt. ved at variere ekstraktionsraten. Målinger ved forskellige ekstraktionsrater kan derved bruges til at bestemme usikkerheden på den målte forureningsflux, samt korrigere for evt. overestimering som resultat af den forcerede gradient.

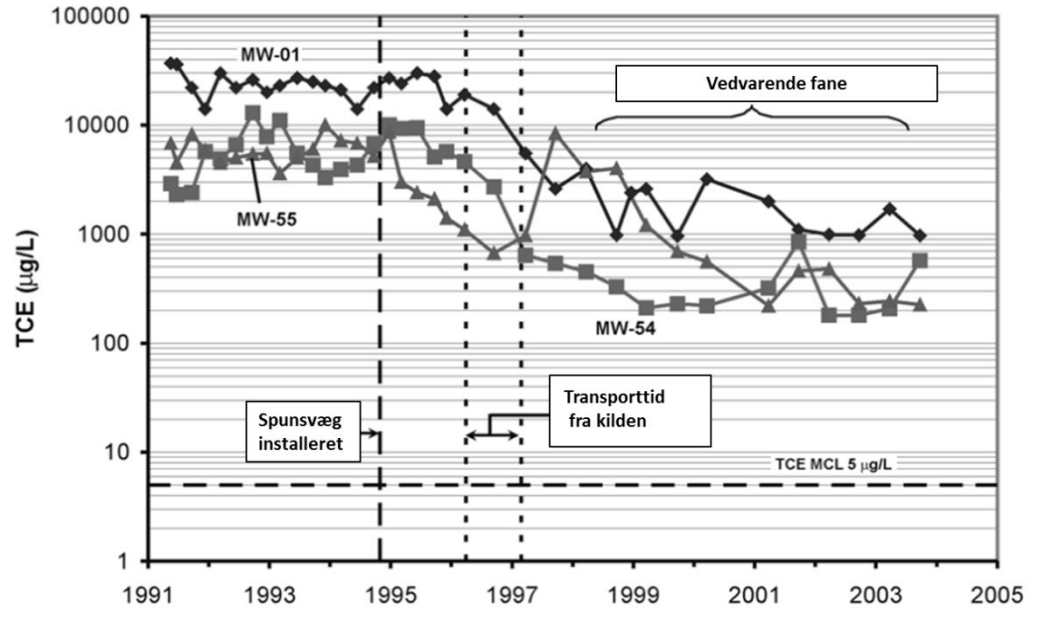
Det ses i Tabel 2, at selvom forureningsfluxen er reduceret med >89%, er den højeste koncentration af PCE kun reduceret med 50%. Dette viser, at brug af koncentration fra en enkelt boring kan være en misvisende parameter til beregning af forureningsflux, da den indebærer antagelsen om et homogent strømningsfelt over hele transektet. Derudover ses det, at på trods af den høje oprensningsgrad på 99%, og en vellykket ISCO afværge, er grundvandskriteriet i transektet ikke overholdt, 200 dage efter oprensningen er afsluttet. Dette understreger, at succeskriterier for afværgeindsats bør tilpasses til at fokusere på risikoen fra forureningsfluxen og ikke på overholdelse af grundvandskvalitetskriteriet nær kildeområdet.

3.3.3 Eksempel 3: Connecticut

På en gammel industrigrund i Connecticut findes en stor TCE DNAPL kilde beliggende i bunden af et frit sandmagasin. Sandmagasinet er homogent uden ler/eller siltlinser, men underlejres at et ler/silt lag. Forureningen er formentlig sket i 1970'erne og har resulteret i en lang forureningsfane med koncentrationer op til 40.000 µg/l 280 m nedstrøms kilden. I 1994 er TCE DNAPL zonen isoleret ved konstruktion af en spunsvæg. En konceptuel model af lokaliteten kan ses i Figur 14.

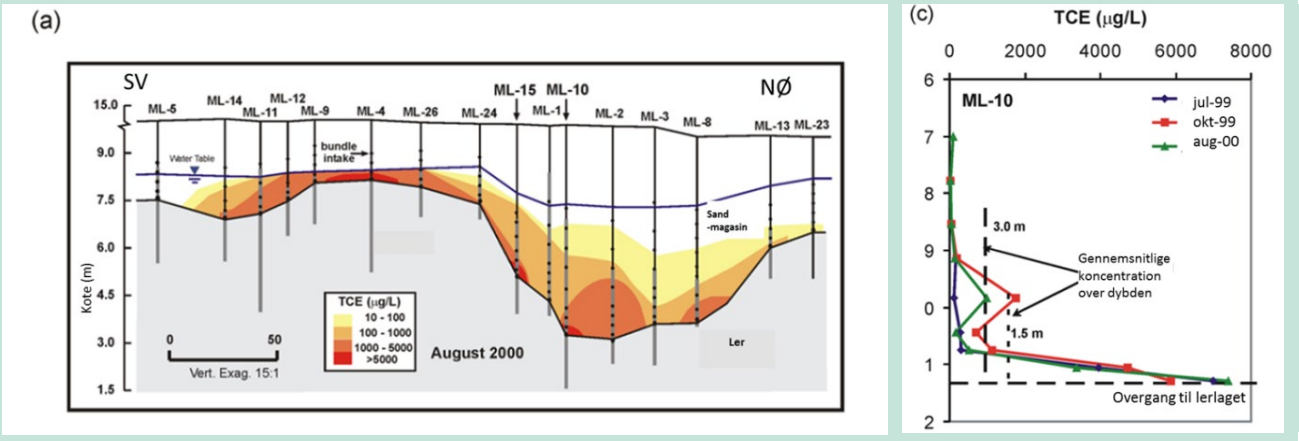


FIGUR 14
Konceptuel model over lokaliteten "Connecticut" (Parker and Chapman 2005)



FIGUR 15
TCE koncentrationer i moniteringsboringer. Der ses et stærkt fald i koncentrationer 4 år efter kildeisolering svarende til transporttiden til boringerne. Derefter ses det dog, at koncentrationerne holder sig stabile og svagt stigende (modificeret fra Chapmanand Parker 2005).

Kildeisolering har ført til en kraftig reduktion af fluxen fra kilden, og effekten i fanen kan ses 4 år senere, svarende til transporttiden til moniteringsboringerne. Til trods for at hele fluxen fra kildezonen er stoppet, ses der vedvarende høje fanekoncentrationer op til 10 år efter kildeisolering (Figur 15). Fluxkarakterisering før afværge var baseret på konventionelle moniteringsboringer med relativt lange filtre og har dermed ikke medtaget de høje koncentrationer af DNAPL i overgangen til den underliggende ler (se Figur 16). For at forklare de vedvarende fanekoncentrationer er der senere udført et moniteringstransekt bestående af flere boringer (>20) med 4-8 filtre hver. Boringerne er udført helt ned til laggrænsen til det underliggende ler (Figur 16). Målingerne i transektet viser, at de højeste koncentrationer træffes i den dybeste del af magasinet i overgangen til den underliggende ler.



FIGUR 16
Venstre: Tværsnit af moniteringstransekt nedstrøms kildeområdet. Højre: Det ses af de højeste koncentrationer træffes ved overgangen til ler. Modificeret fra Chapman og Parker 2005

Beregningerne har vist at ca. 5% af den totale forureningsmasse er tilbageholdt i lerlaget, (3000 kg ift.54700 kg der er indenfor spunsvæggen) (Chapman og Parker 2005). Denne masse bliver langsomt frigjort ved tilbagediffusion, således at der 6 år efter kildeisolering kun er frigjort 7% af massen fra lerlaget. Modelsimuleringer udført af Chapman og Parker (2005) viser, at det vil tage 100 år efter kildeisolering for at 42% af denne indfangede masse vil være fjernet, hvilket også betyder at de høje fanekoncentrationer vil have en lang levetid.

Denne sag illustrerer hvordan en kildeindsats kan vise sig utilstrækkelig i forhold til slutmålet, hvis en lille DNAPL masse er efterladt udenfor kilden. Forureningsfluxen på denne lokalitet efter spunsningen blev underestimeret, idet fluxen udenfor kildeområdet blev overset på grund af for korte moniteringsfiltre.

3.4 Usikkerheder i fluxbestemmelse

I dette afsnit diskuteres usikkerheder i fluxbestemmelse med udgangspunkt i tidligere studier (DTU Miljø, 2011b, Troldborg et al., 2012). Der er forskellige usikkerheder ved kvantificering af forureningsflux. De største usikkerheder skyldes:

- Afgrænsning af fane (herunder placering og antal af målepunkter): Hele forureningsfanen skal dækkes af kontrolplanet, både horisontalt og vertikalt. Faneafgrænsning og kvaliteten af forureningsfluxens kvantificering er afhængige af placeringen og antallet af målepunkter (boringer/filtre).
- Tidslige variationer i koncentrationer: For metoder som niveauspecifik prøvetagning, der giver et øjebliksbillede af forureningsfluxen, kan tidslige koncentrationsvariationer være betydelige for kvantificeringen af forureningsfluxen.
- Variationer i den hydrauliske ledningsevne og gradient: Den hydrauliske ledningsevne i et grundvandsmagasin kan sagtens variere flere størrelsesordener, og da den indgår lineært i beregningen af forureningsfluxen, er bestemmelsen af hydraulisk ledningsevne derfor af afgørende betydning.

Flere studier har undersøgt denne usikkerhed med det formål at bestemme antallet af datapunkter for at opnå et pålideligt fluxestimat. De fleste studier har omfattet fluxbestemmelse i et kontrolplan eksempelvis ved niveauspecifik prøvetagning. Troldborg et al. (2012) har sammenlignet flere studier, der omhandler usikkerheden i forureningsflux og fundet, at usikkerheden som regel er mellem 10 og 80%. I homogene magasiner, ses der en lille usikkerhed selv med en datatæthed, på 0,05 punkter pr. kvadratmeter, eller ca. 1 punkt pr. 8 kvadratmeter. Dette svarer til etablering af 22 datapunkter (filtre) på tværs af en 30 meter bred fane, der har en dybde på ca. 6 meter.

Gennemgang af studier indikerer, at et pålideligt fluxestimat kan opnås ved anvendelse af 1 datapunkt eller mere per korrelationslængde[3] af den hydrauliske ledningsevne langs transektet. Dette kræver imidlertid, at forureningsfanen er dækket af datapunkterne, at der er indtruffet fuldstændigt gennembrud i kontrolplanet, og at der findes målinger af både koncentration og grundvandshastighed (dvs. hydraulisk ledningsevne og gradient) langs kontrolplanet. Den krævede datatæthed afhænger af graden af heterogenitet. En lavere tæthed kan anvendes i mindre heterogene magasiner (dvs. lavt Peclet tal[4]), hvor strømning domineres af dispersion (Troldborg et al., 2012). Det henvises desuden til Troldborg et al. (2012), som har udviklet en analytisk metode til kvantificering af usikkerheden på en given lokalitet med moderat heterogenitet. Metoden omfatter

[3] Hvis det antages, at den hydrauliske ledningsevne i et punkt på en lokalitet, hvor korrelationslængden er 5 meter, er kendt, betyder det, at den hydrauliske ledningsevne med stor sandsynlighed vil være på samme niveau i et hvilket som helst andet punkt indenfor en afstand på 5 meter fra målingen. Bestemmelse af korrelationslængden kræver et godt datasæt og statistisk analyse af data, for eksempelvis at beregne et semivariogram (som viser variansen af målinger som funktion af afstanden mellem datapunkterne). På de fleste lokaliteter vil der ikke være rådighed til så mange data. Korrelationslængde kan evt. estimeres ved at bruge data fra lignende sites i kombination med data fra selve lokaliteten. En metodik dertil er beskrevet i Troldborg et al., 2012.

[4] Peclet tal, er et mål for betydning af advektion vs. dispersion for transportprocessen

usikkerheden i koncentrations- og strømningsfordeling, måleusikkerheder samt usikkerheder i kildeområdet og transportparametre.

Derudover er der en usikkerhed involveret i, at der for at bestemme flux ofte integreres koncentrations- og grundvandshastighedsdata over et kontrolplan, hvilket også kan betyde at kobling mellem koncentrationsdata og grundvandstrømningsdata kan være fejlagtigt. Derfor bør der altid måles for både hydraulisk ledningsevne og forureningsindhold i alle filtre.

3.5 Evaluering af metoderne

I dette afsnit sammenstilles de forskellige metoder til bestemmelse af flux. Når valg af metode foretages, er der flere faktorer, der skal tages i betragtning, såsom omkostninger, tid, datakrav og usikkerhed i bestemmelsen. I nedenstående tabel er der foretaget en overordnet vurdering af de forskellige metoder, men det endelig valg vil afhænge af forholdene på den enkelte lokalitet.

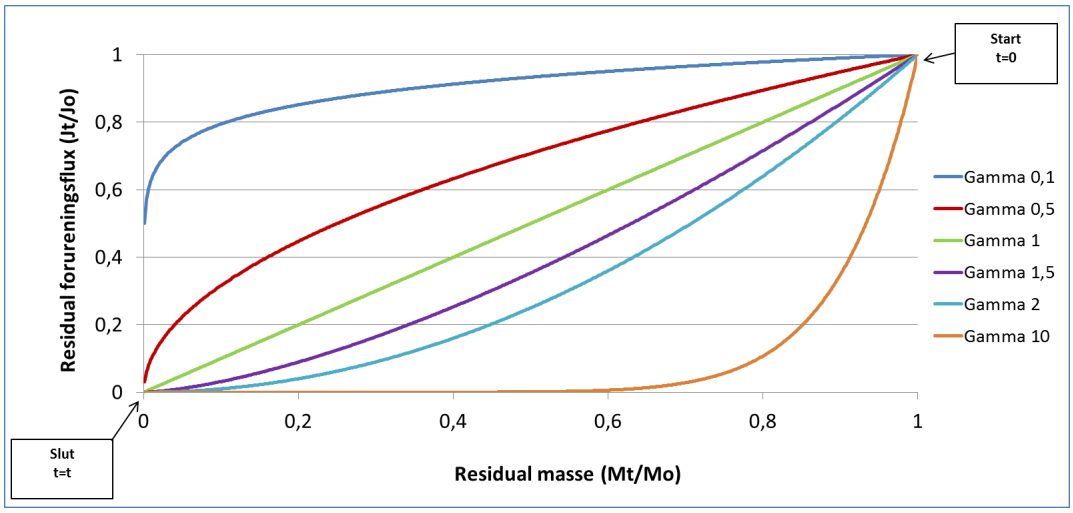
TABEL 3
Sammenstilling af metoder til bestemmelse af forureningsflux

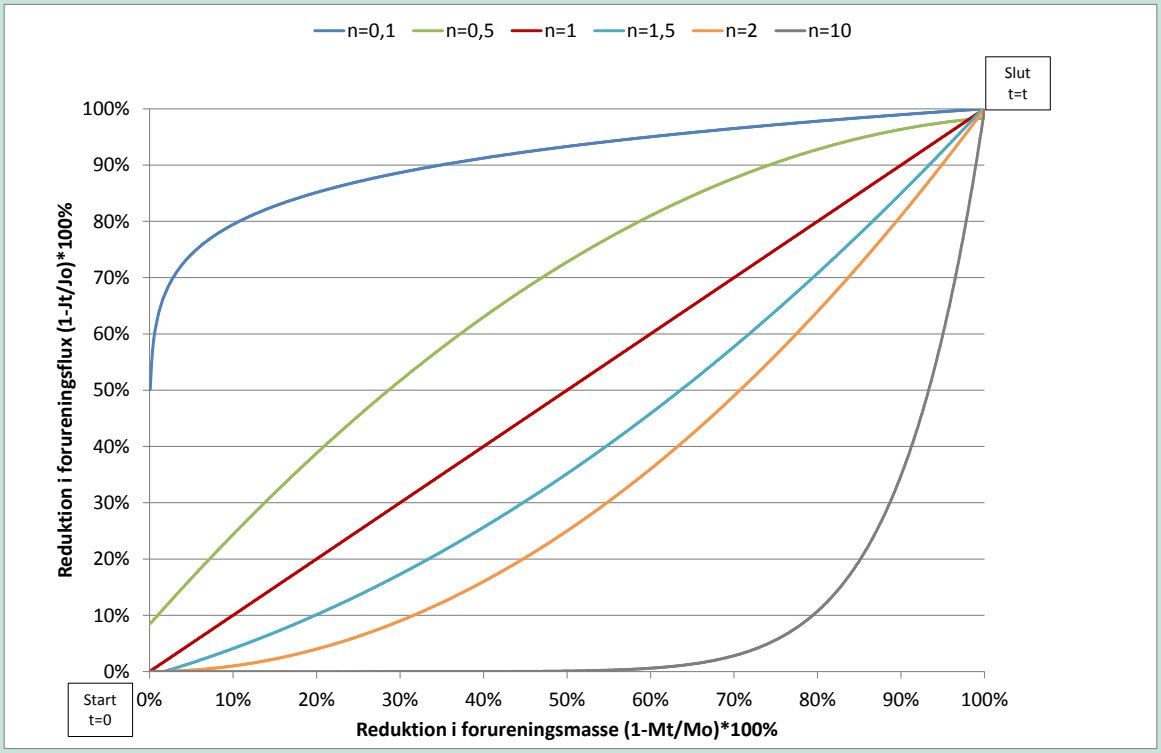
Metode	Omkostninger	Tidskrav	Datakrav	Kvaliteten af bestemmelsen
Simpel/grov beregning af flux	Lav	Nej	Der anvendes eksisterende data	K, i og C interpoleres over et større areal, hvilket for heterogene magasiner vil føre til stor usikkerhed
Bestemmelse af forureningsflux fra isokonturkort	Lav	Nej	Der anvendes eksisterende data	K, i interpoleres over et større areal, hvilket for heterogene magasiner vil føre til stor usikkerhed. Der er som regel bedre diskretisering for koncentrationsdata
Niveauspecifik prøvetagning i et boringstransekt	Høj, men kan reduceres hvis det udføres som en integreret del af undersøgelsen	Høj, men kan reduceres hvis det udføres som en integreret del af undersøgelsen	Høj	Der er som regel god diskretisering af K, i, C data. Såfremt data dækker over alle hydrauliske enheder i kontroplanet og kobling mellem C, i og K data er rigtig, kan usikkerheden være mindre end 20%
Passiv fluxmålere i boringer evt. grundvandshastighedsmålere	Høj, der kræves specielt udstyr til prøvetagning. Kan reduceres hvis det er en integreret del af undersøgelsen	Høj, men kan reduceres hvis det er en integreret del af undersøgelsen	Høj	Der er som regel god diskretisering af K, i, C data. Evt. tidslig usikkerhed for C-data reduceres. Ved brug af grundvandshastighedsmålere i kombination med PFM, eller alm. prøvetagning, er der bedre mulighed for at koncentrationsdata kobles til de rigtige K-værdier. Dog skal der stadig tildeles et areal.
Volumenpumpning	Høj, men kan reduceres hvis fluxbestemmelsen er en integreret del af undersøgelsen. Den største ulempe ved denne metode er omkostningerne ved pumpning da der ofte er store omkostninger knyttet til udledning af det forurenede grundvand.	Høj, men kan reduceres hvis fluxbestemmelsen er en integreret del af undersøgelsen	Lav	Metoden er mindre følsom overfor variationer i K, i, og C, og følsomheden kan bestemmes ved at variere ydelsen af volumenpumpning
Afværgepumpning	Lav, der er tale om eksisterende anlæg	Lav, der er tale om eksisterende anlæg, som dog har været i drift i flere år	Der anvendes eksisterende data	For systemer der har opnået steady-state tilstand, og hvor afværgepumpningen indfanger hele forureningsfanen, kan det forventes at den oppumpede stofmængde svarer til forureningsfluxen

4. Sammenhænge mellem masse og flux

4.1 Sammenhæng mellem masse og flux- Γ-modellen

Forholdet mellem residual forureningsmasse ved en forureningskilde og forureningsflux kan jf. Falta et al. (2005a) beskrives af ligningen



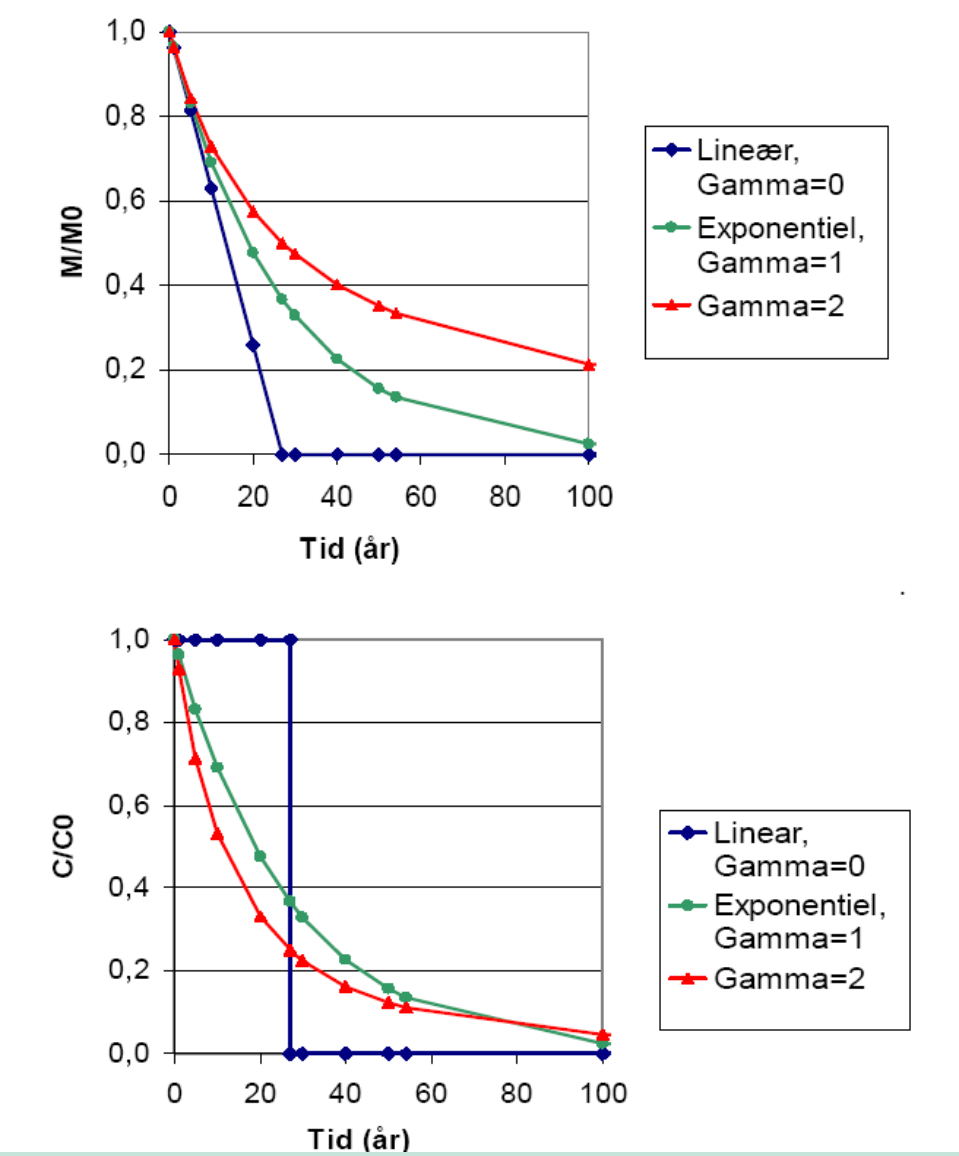


FIGUR 18
Forhold mellem masse- og flux reduktion jf. ligning 8

Γ- modellen (jf. ligning 1) sammenligner masse- og fluxreduktion til tiden t med den underliggende antagelse at reduktion af massen til M_t har ført til en omgående reduktion i fluxen på tidspunkt t. Dermed er det antaget, at der ikke er nogen tidsforskydning til effekten i fluxreduktion er set. Når modellen skal anvendes i praktiske sammenhænge er det nødvendigt at tage dette i betragtning ved at sammenligne M_t med J_t^*, hvor t* svarer til t plus transporttid fra kilden til kontrolplanet hvor fluxen estimeres. Dette er ikke en triviel opgave, og vil for mange lokaliteter begrænse muligheden for at anvende Γ-modellen.

Desuden er det i Γ-modellen ikke taget i betragtning, hvor lang tid, der går, inden en given masse- og/eller fluxreduktion er opnået. Hvis en given afværgeindsats resulterer i 99,9% masse- og fluxreduktion efter en periode af 100 år, vil dette ofte ikke imødekomme formålet med oprensningen. Det er derfor nødvendigt at anvende udvaskningsmodeller for at forstå udvikling i masse og flux over tid.

Udviklingen i fjernet masse i kildeområdet ved en oprensning følger oftest en eksponentielt aftagende funktion over tid. Dog vil oprensning ved aggressive metoder såsom opgravning og termiske teknikker føre til en tilnærmelsesvis momentan massefjernelse i kildeområdet. Tilsvarende kan koncentrationen og dermed fluxen ud af kilden følge en eksponentiel funktion. Under idealiserede forhold vil den eksponentielle faktor over tid for disse to størrelser være ens, som det ofte antages for udvaskningsmodeller (Bjerg et al., 2010; Troldborg et al., 2008). Et typisk forløb kan ses på Figur 19. For Γ=1 ses en eksponentiel reduktion af massen over tiden, som fører til en tilsvarende reduktion af koncentration, og dermed forureningsfluxen ud af kilden. For Γ lig med 2, er effekten af massefjernelse på forureningsfluxen kraftigere, og fluxen reduceres hurtigere end massen. For Γ=0 ses der en lineær massefjernelse, så fluxen er konstant over tid indtil massen er udvasket.



FIGUR 19
Masse / Koncentration som funktion af tiden ved forskellige Γ -værdier (Modificeret fra Bjerg et al., 2010).

4.1.1 Effekt af forureningskildens arkitektur og alder på forholdet mellem masse-og fluxreduktion

Di Filippo et al. (2010) har undersøgt betydningen af forureningskildens arkitektur på forholdet mellem masse- og fluxreduktion. Deres forsøg viste, at en stor relativ massefjernelse kan være nødvendig for at opnå betydelige reduktioner i flux for systemer med ensformig fordeling af forurening (alt forurening optræder som residual fase eller som mobil fri fase) beliggende i hydraulisk tilgængelige områder. Omvendt kan betydelige reduktioner i flux opnås med forholdsvis minimal massefjernelse for mere komplekse systemer, hvor forureningen er til stede i en blanding af lav- og højmætningsområder.

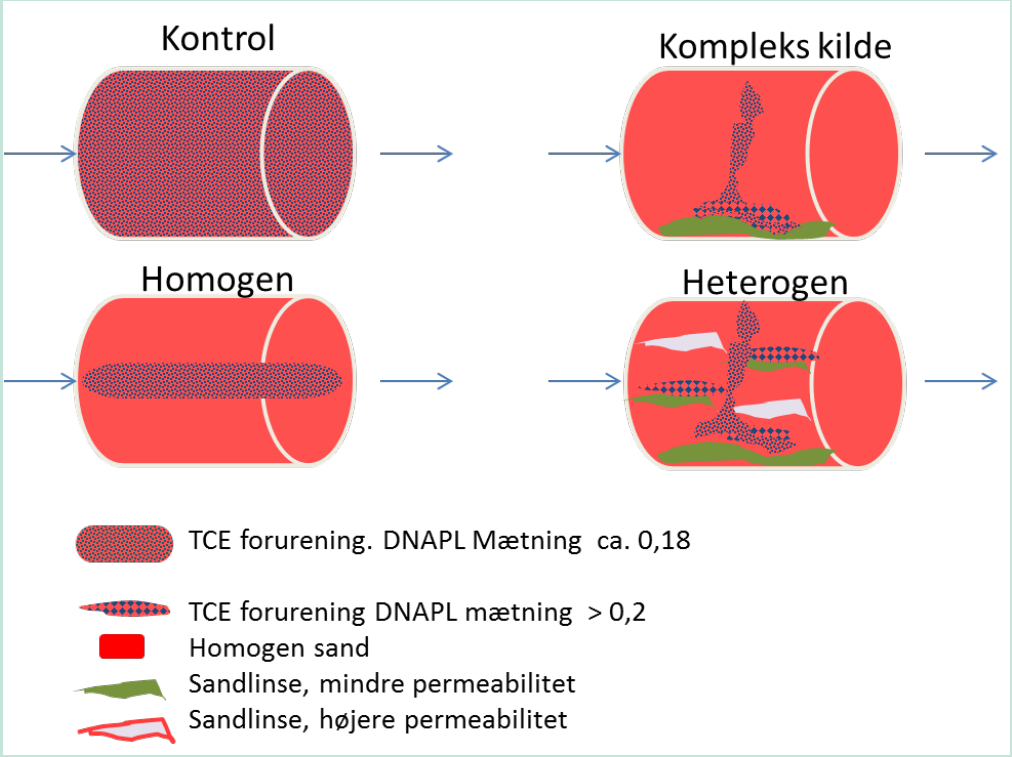
Forsøgene omfattede både forskellig type af forureningsfordeling og forskellige former for hydrogeologisk heterogenitet. Forsøgssystemerne bestod af 4 flowceller. Kontrol og Homogen cellerne var pakket med homogent sand. Cellen med en kompleks kildesammensætning ”kompleks kilde” bestod af sand med et underliggende lag af mindre permeabel sand i cellens bund. Cellerne med en heterogen geologi ”Heterogen” er konstrueret af en blanding af sand med flere linser af

højere og lavere permeabilitet. Cellerne blev forurenet med TCE på forskellige vis som vist på Figur 20. Derefter er der udført udvaskningsforsøg ved hjælp af et overfladeaktivt stof (Tween 80), hvor masse og flux blev moniteret.

En oversigt over forsøgssystemerne kan ses i Tabel 4. Forsøgenes resultater kan ses i Figur 21 og Figur 22 og illustrerer godt de forskellige udfald for de forskellige systemtyper.

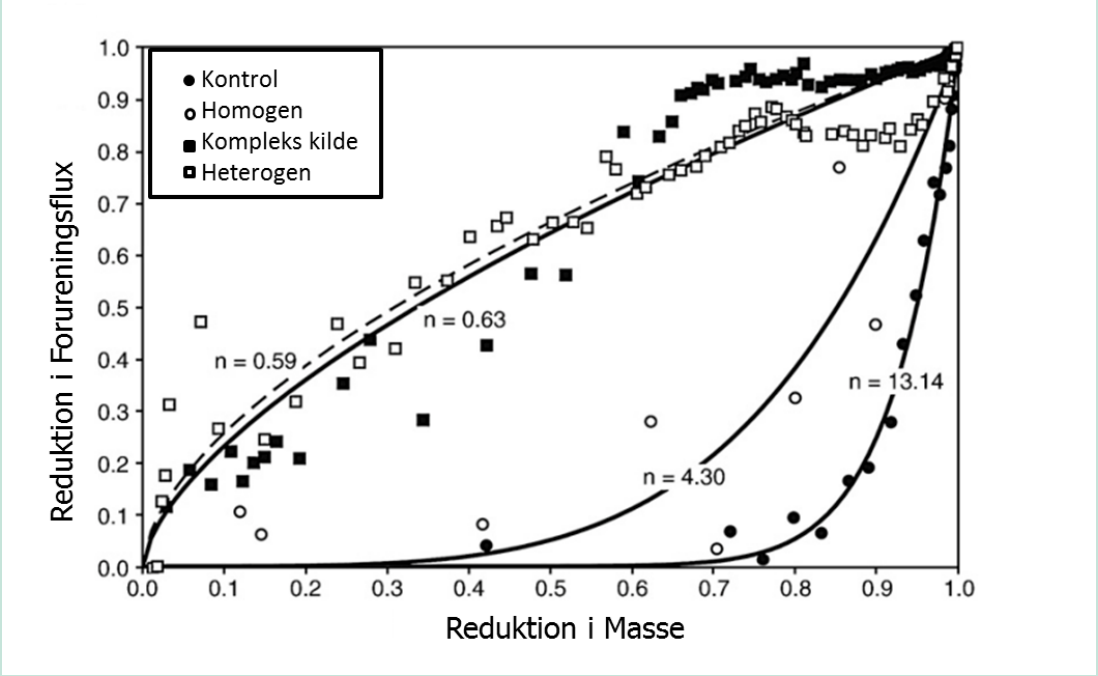
TABEL 4
Forsøgssystemer i Di Filippo et al. (2010)

Navn	Beskrivelse
Kontrol	Homogen sand, jævnt forurenet med TCE over hele området
Homogen	Homogen sand, kun en del af flowcellen var forurenet med TCE
Kompleks kilde	Homogen sand med et lavpermeabelt lag i bunden, hvor en TCE NAPL pool formede sig
Heterogen	Sand med linser af varierende permeabilitet med TCE NAPL fase



FIGUR 20
Konceptuel skitse af forsøgssystemer i DiFilippo et al. (2010) som tolket af Orbicon

Figur 21 viser, at der først skete signifikante reduktioner i forureningsfluxen efter fjernelse af relativ store fraktioner af massen (50%) i flowcellerne "Kontrol" og "Homogen". I kontrolsystemet forekom kun minimal fluxreduktion indtil ca. 75% af massen blev fjernet. I det homogene system skete der først reduktion i forureningsflux efter ca. 50% massereduktion, som følge af den kortere bredde af kildezonen i strømningsretningen og tilhørende begrænsninger i masseoverførsel. Dette forløb svarer til en Γ mindre end 1 (eller n-værdi større end 1). Generelt forventes denne opførsel i systemer, hvor forureningen fordeles relativt ensartet og er tilgængelig for indstrømmende vand.



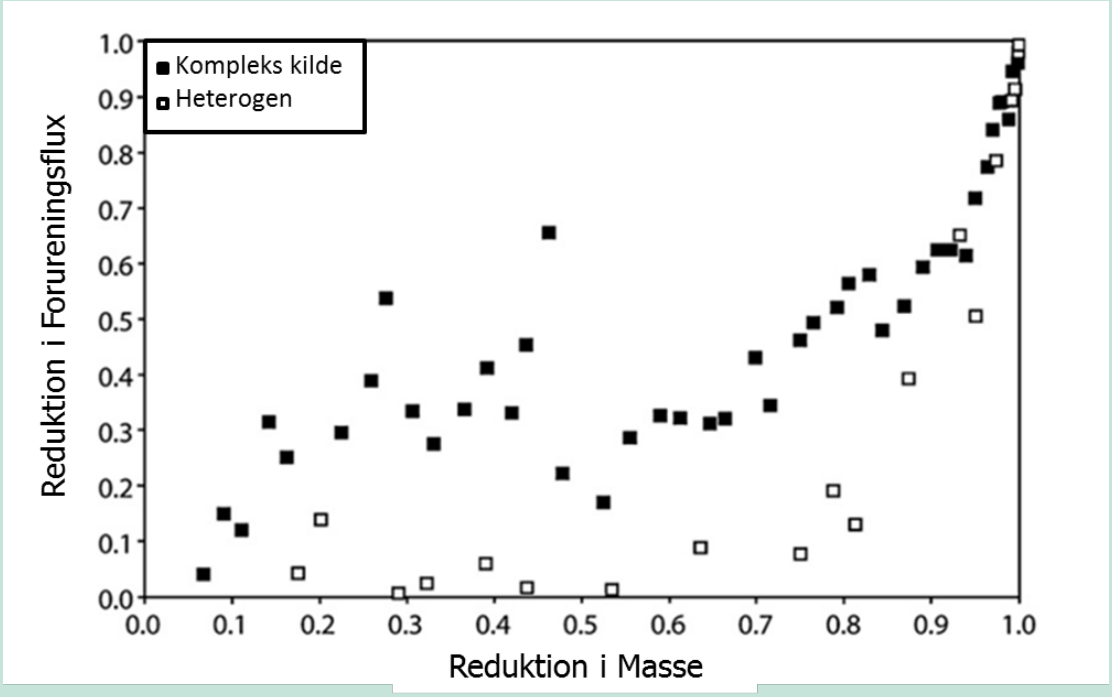
FIGUR 21
Forhold mellem masse- og fluxreduktion i forskellige forsøgssystemer. Akseværdier 0-1 svarer til 0% til 100% reduktion af hhv. masse og flux. (Modificeret fra di Filippo et al., 2010). Bemærk at figuren illustrerer reduktioner i masse og flux, svarende til ligning 8 (n-værdier).

I "kompleks kilde" og "heterogen" systemer har forholdet mellem masse/flux reduktion udviklet sig i to trin. Ved det første trin er der observeret betydelige reduktioner i flux på op til 30% efter fjernelse på mindre end 2% af den totale masse i flowcellen. Disse tidlige reduktioner i flux afspejler fjernelsen af forurening beliggende i hydraulisk tilgængelige lag med lav forureningsmætning. Fluxreduktion fortsatte langsommere indtil alt lettilgængeligt forureningsmasse blev fjernet. I den efterfølgende fase afspejler forholdet mellem masse- og fluxreduktion, at der nu fjernes masse fra områder med højere mætning, og lavere tilgængelighed. Dette forløb svarer til en n-værdi mindre end 1 (eller en Γ større end 1). Ligning 8 beskriver forløbet i "kontrol" og "homogen" systemer ret godt, samt de tidlige stadier af "blandet" og "heterogen" systemer. Resultater fra forsøgene vist på Figur 21 viser, at der i komplekse systemer ofte opnås en betydelig reduktion i flux tidligt i oprensningsfasen.

På de fleste forurenede lokaliteter er denne udvaskning af tilgængelig forureningsmasse, og dermed den periode, hvor fluxen reduceres kraftigt med tiden, overstået før undersøgelsesaktiviteter igangsættes. Med andre ord, på lokaliteter, hvor forureningen er sket for mange år siden, vil en del af den mere tilgængelige masse sandsynligvis være fjernet ved naturlig udvaskning. Denne situation er også simuleret af Di Filippo et al. (2010) for de to typer systemer "kompleks kilde" og "heterogen", som er vist på Figur 22. For at simulere en gammel forurening er "kompleks kilde" cellen skyllet med 29 porevolumener, hvilket betyder at al tilgængelig masse var fjernet og den resterende masse er beliggende i mindre tilgængelige områder ved toppen af kapillærbarrieren. I den indledende fase ses der reduktion af fluxen allerede efter fjernelse af mindre end 10% af massen i "kompleks kilde" systemet, fordi den mere tilgængelige masse i toppen af kapillærbarrieren, som er i direkte kontakt med den gennemstrømmende vand, er fjernet. I intervallet for massereduktion mellem 10 – 70% ses en minimal reduktion i flux, da det nu er tilbagediffusion af DNAPL fra den lavepermeable zone, der styrer udvaskningen. Til sidst sker der store reduktioner i flux i takt med, at der nu sker fuldstændig fjernelse af den resterende masse.

I det heterogene system er en gammel forurening simuleret ved at skylle 109 porevolumener gennem cellen, hvilket svarer til at al forurening fra cellens matrice var fjernet og den resterende masse er beliggende i de lavpermeable linser. Forsøgene viste, at der kun ses en mindre fluxreduktion indtil næsten alt massen i kildezonen er fjernet, og det er først efter 90% af forureningsmassen er fjernet, at der ses en reduktion i forureningsfluxen. Årsagen til det er, at fluxen ud af cellen styres fra tilbagediffusion af DNAPL fra de lavpermeable linser, som er mættet med DNAPL. Derfor er der en stabil flux ud af cellen indtil nærmest al DNAPL er udvasket.

Forsøgene viser desuden, at forløbet i disse komplekse systemer ikke kan beskrives af ligning 8. Γ-modellen er også fundet utilstrækkelig til at beskrive masse-flux sammenhænge i på en feltlokalitet (Fjordbøge et al., 2012), hvor der var udført soil mixing, idet den ikke kunne simulere den hurtige fluxreduktion, som var et resultat af ændringer i permeabilitet pga. soil mixing. Desuden fandt de, at modellen ikke kunne anvendes for nedbrydningsprodukter af moderstoffer PCE, da andre processer såsom nedbrydning i fanen påvirkede fluxen.



FIGUR 22
Betydning af forureningsalder for Masse-/fluxforholdet (Modificeret fra DiFilippo et al., 2010).

4.2 Betydning af Γ-faktor for faneudvikling

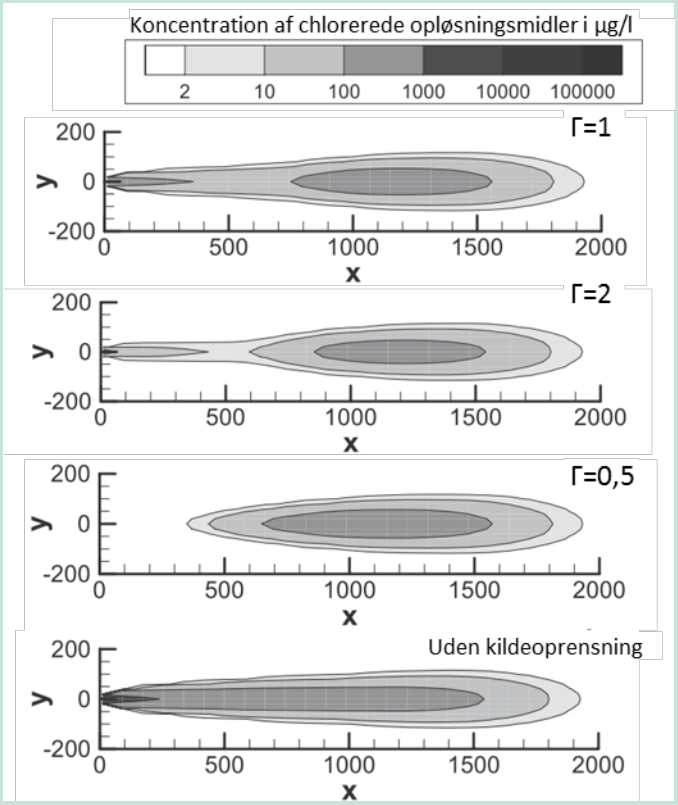
Når et afværgeprojekt sættes i gang, er det ofte hensigten at kontrollere styrken og udbredelse af en forureningsfane. I de fleste tilfælde har forureningsfanen udviklet sig inden afværgeindsatsen, og effekten af en kildeoprensning kan først ses senere.

Falta et al. (2005a) har udviklet en analytisk løsning, der simulerer faneudviklingen fra en DNAPL kilde afhængigt af forureningsfluxen ud af kildeområdet. Dermed kan faneudviklingen for forskellige grader af kildeoprensning og forhold mellem massefjernelse og reduktion i flux (Γ-faktor) simuleres. Falta et al. (2005b) har simuleret forskellige oprensningsscenarier.

Resultaterne viser, at responsen i fanen efter kildeoprensning afhænger kraftigt af hvilke Γ-faktor, der bedst beskriver forholdet mellem massen og flux ud af kilden. Når Γ er>1, fører kildeoprensning til store reduktioner i fanekoncentrationer og -masse på kort sigt, især hvis der er tale om en ”ny”

fane. Hvis responsen i kildezonen beskrives af en Γ<1, er de kortsigtede fordele ved kildeoprensning på fanekoncentrationer og -masse meget mindre.

Et eksempel på modellens output kan ses i Figur 23. Figuren viser, at 90% fjernelse af kildemasse 20 år efter forureningens start reducerer koncentrationerne nær kilden, men fanen, der er blevet skabt i løbet af disse 20 år fortsætter med at sprede sig fremad. For Γ>1 ses det, at to distinkte højkoncentrationszoner former sig, en nær kilde og en ved den forreste kant af fanen. Med tiden vil fanen splittes i to, fordi de lave koncentrationer som følge af kildeoprensning bevæger sig frem, mens den forreste del af fanen er upåvirket af kildeoprensningen. Dog vil der på grund af den lave flux ud af kildeområdet gå længere tid inden den resterende masse udvaskes, og dermed vil fanens levetid være længere. For Γ=0,5, vil der på kort sigt ses en mindre effekt på koncentrationer i fanen, da fluxen reduceres i mindre grad. Fanen vil til sidst blive frigjort fra kilden, når de efterladte 10% af massen udvaskes, hvilket for lave Γ, sker hurtigere end når Γ>1. Ved et første blik på Figur 23, virker det som om, fanen er mindre for Γ<1. Selvom fanen adskiller sig fra kildeområdet ved Γ=0,5, er massen i fanen større end i fanen for Γ>1.



FIGUR 23
Betydning af forskellige Γ på faneudvikling 50 år efter DNAPL spild på en lokalitet, hvor 90% af DNAPL massen er fjernet ved kildeoprensning 20 år efter forureningstidspunktet. Modificeret fra Falta et al. (2005b).

5. Erfaringsopsamling om masse/flux sammenhænge fra danske og internationale sager

I kapitel 4 er der udført en gennemgang af teorien for sammenhængen mellem masse og flux ud fra eksisterende litteratur. I nærværende kapitel, er der udført en litteratur- og erfaringsopsamling fra konkrete sager for at vurdere, i hvor høj grad teorien kan anvendes i praksis.

5.1 Litteratursøgning og indsamling af oplysninger

Litteratursøgning har omfattet en indsamling af danske og internationale erfaringer fra en række afværgesager.

Der er med input fra tidligere projekter (Miljøstyrelsen, 2011a) udvalgt en række danske sager. Der er lagt vægt på, at materialet fra sagerne indeholder oplysninger, der gør det muligt at sammenligne masse og flux før og efter afværge, samt andre oplysninger, der kan gøre det muligt at sammenligne sagerne på tværs og finde korrelationer mellem Γ og andre faktorer (geologi, stoftype osv.). Der er i den forbindelse udarbejdet et oplysningsskema, som er rundsendt til de danske regioner.

Alle oplysninger, der forventes at have indflydelse på Γ er noteret på skemaet (dvs. geologi, stoftype, kildearkitektur, afværgetype, forureningsalder mv.). De udfyldte oplysningsskemaer er vedlagt som bilag 1. Derudover har forfatterne gennemgået en række internationale sager, med baggrund i ITRCs rapport om forureningsflux (ITRC, 2010).

Masse/flux sammenhæng er et meget omdiskuteret emne i den internationale litteratur. Kingston et al. (2010) har udført en gennemgang af masse/flux sammenhænge på 182 termiske afværgesager. Disse data er også indarbejdet i dette kapitel. Endelig er der indhentet dataserier fra 2 danske afværgepumpningssager.

I alt har litteratursøgning og indsamling af oplysninger omfattet:

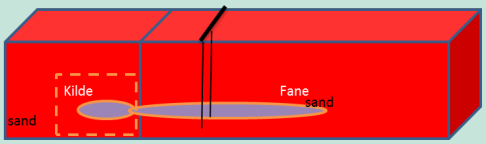
- 5 danske sager, samt 3 afværgepumpningssager, men der er kun anvendt data fra 4 sager og 1 afværgepumpesag
- 7 internationale sager
- Erfaringer fra 182 sager gennemgået af Kingston et al. (2010), herunder også 5 sager fra Kingston et al.(2012),
- Beregninger af Γ-faktor udført for en række amerikanske lokaliteter af DiFillippo & Brusseau (2008)

5.2 Lokalitetsoversigt og Γ-modellen

Projektet har gennemgået flere afværgesager, hvor data har gjort det muligt at beregne en Γ-faktor. En oversigt over sagerne kan ses i Tabel 5. For at systematisere sagerne, er de inddelt i fire typer konceptuelle modeller (KM), afhængigt af lokalitetens geologi, forureningsfordeling og placering af fluxtransektet. De 4 typer kan ses i Figur 24.

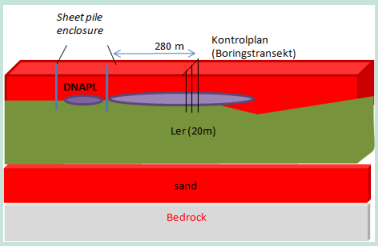
Konceptuelle modeller er en god måde at illustrere og sammenfatte alle resultater og sammenhænge igennem et undersøgelsesforløb eller ved skitsering af mulige afværgeløsninger, da modellerne øger forståelsen af forureningssituationen og endvidere øger kvaliteten af formidlingen, hvis der er flere interessenter involveret i arbejdet med forureningssagen. Det amerikanske forskningsråd (ESTCP, 2011) har fremlagt et nyt koncept til opbygning af konceptuelle modeller, kaldet "14 Compartments Model". I Appendix A er metodikken samt eksempler på anvendelsen af 14 Compartments model præsenteret i detaljer.

De 4 typer i Figur 24 kan sammenlignes med forsøgscellerne i Figur 20 (afsnit 4.1.1). Type A svarer til et homogent system. Type B svarer til et "kompleks kilde" system, hvor et underliggende lavpermeabelt lag danner en langtidskilde. Type C er ikke repræsenteret i Di Filippos forsøg, men kan ses som en kombination af en kompleks kilde i tilknytning til et homogent system. Til sidst svarer Type D lokaliteter til et "heterogent system".



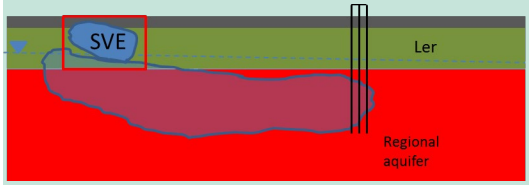
Type A

Permeabel og homogen kildezone hvor der foretages afværge. Fane og kilde i samme hydrogeologiske enhed



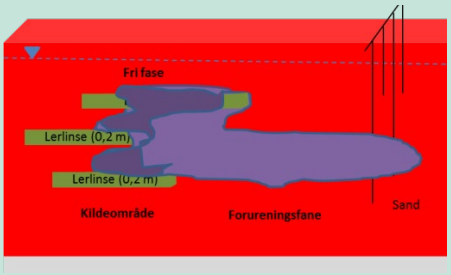
Type B

Permeabel og homogen kildezone hvor der foretages afværge. Fane og kilde i samme hydrogeologiske enhed. Enheden underlejres af et lavpermeabelt lag



Type C

Lavpermeabel kildezone hvor der foretages afværge. Fane i underliggende hydrogeologiske enhed



Type D

Højpermeabel kildezone med stor heterogenitet, f.eks. lerlinser, hvor der foretages afværge. Fane og kilde i samme hydrogeologiske enhed

FIGUR 24
Definition af typer ved gennemgang af afværgesager

Det har ikke været muligt at indsamle datasæt for masse- og fluxreduktion over tid i de forskellige afværgesager. Γ-faktor er således beregnet for slutpunktet af massefjernelsen, og det er en gennemgående antagelse for beregningerne, at effekten i fluxreduktion er opnået, dvs. der er gået den nødvendige tid, så at forureningen fra kilden efter oprensningens afslutning er nået til kontrolplanet, hvor fluxen måles.

Idet der på de fleste lokaliteter er tale om forurening, der er sket for mange år siden, vil forholdet mellem reduktion i masse og flux bedst simuleres af forløbet i Figur 22. Det betyder at der i type B systemer kan forventes en hurtig og kraftig reduktion i flux på mere end 60% ved en mindre massereduktion på eksempelvis 20%. Derefter er fluxen styret af udvaskning af mindre tilgængelig forurening, hvorfor der først kan ses yderligere reduktion i fluxen når massefjernelsen er på over 90%. Jf. afsnit 4.2.1 kan forholdet mellem masse og fluxreduktion ikke beskrives af ligning 1. For den første del af forløbet, ved forholdsvis lave massefjernelser vil der forventes en høj Γ, mens der kan forventes en Γ<1 for massefjernelse på 30-90%, hvorefter Γ vil nærme sig 1. For Type D systemer vil det forventes, at der først observeres en betydelig fluxreduktion, når massefjernelsen overstiger 90%. Γ vil som regel for disse systemer være mindre end 1.

TABEL 5
Oversigt over gennemgåede lokaliteter. På flere lokaliteter er Γ-faktor beregnet ved en antaget massefjernelse (markeret med *). KM: Konceptuel modeltype, jf. Figur 24.

#	Lokalitetsnavn	Afværge-metode	Geologi kilde	Geologi fane	J/Jo	M/Mo	Γ	KM	Kommentarer
1	Rødekro	Damp-oprensning	Silt, sand og grus	Silt, sand og grus	0,01	0,1	1,5	A	Der er udført målinger af flux i transektet umiddelbart nedstrøms det oprensede område.
2	Knullen	ISTD	Ler	Mellem sand	0,05	0,01	0,56	C	ISTD og damp lavet samtidigt. Den lave Γ skyldes formentlig dårlig afgrænsning af kilden eller diffus forurening over et større område, som trods fjernelsen af hotspot give et væsentlig fluxbidrag
	Knullen	Damp-oprensning	mellem sand	Mellem sand				C	
3	Ft. Lewis	ISTD	groft sand	groft sand	0,005 0,005	0,32 0,02	a: 4,6 b:1,47	A	Stor usikkerhed omkring initial massebestemmelse resulterer i meget forskellige Γ. Der er beregnet Γ for både det oprindelige masseestimat og den kendte massefjernelse udfra ekstraktionsanlægget(hhv. a og b)
4	Hill AFB	Surfactantflooding og oppumpning	Silt, sand og grus	Silt, sand og grus	a: 0,1 b: 0,1	a: 0,3 a: 0,02	a: 1,9 b: 0,6	A	Stor usikkerhed omkring initial massebestemmelse resulterer i meget forskellige Γ. Der er beregnet Γ for både det oprindelige masseestimat og den kendte massefjernelse ud fra ekstraktionsanlægget (hhv. a og b)
5	Connecticut*	Indkapsling med spunsvæg	Sand	Sand	0,1	0,01	0,5	B	Årsagen til den dårlige fluxrespons er, at der er ophobet ca. 3.000 kg TCE i lerlaget under fanen i sandmagasinet, som fungerer som en langtidskilde
6	Skuldelev	Soilmixing med nul-valent jern (ZVI)	Sand og lerlinser	Groft sand			0,32	B	Meget veldokumenteret sag, hvor der er arbejdet målrettet med masse/flux sammenhænge.

#	Lokalitetsnavn	Afværge-metode	Geologi kilde	Geologi fane	J/Jo	M/Mo	Γ	KM	Kommentarer
7	Cocoa	Hydraulisk isolering af kilden	Sand	Sand	0, 1 0,01	0,001	a: 0,3 b: 0,7	D	Fluxen er reduceret med 90-99%, men grundvandskoncentrationer er stadig overskredet pga. tilbagediffusion fra lerenheden i fanen
8	*Gl. kongevej	Stimuleret reduktiv dechlorering (SRD)	Ler	Kalk	13	0,6	-3,70	C	Fluxreduktion for det primære magasiner beregnet, ved at antage at fluxen før oprensningen svarer til fluxen i et transekt længere nedstrøms, som ikke er påvirket at oprensningen. Det antages at der ikke er sket nedbrydning. Fluxen efter oprensningen beregnes udfra de kildenære boringer hvor effekten af oprensningen allerede kan ses. Denne fluxberegning indeholder store usikkerheder. Den negative Γ-faktor er et resultat af dannelse af mere mobile nedbrydningsprodukter, der udvaskes i højere grad, og dermed giver en højere flux efter afværge.
9	*Tuscon airport, Arizona	ISCO og ventilation af UZ	Ler	Sand	0,11	0,01	0,96	C	Oprindelig masse ukendt. Ved modellering er det estimeret at fluxreduktioner pga. kildeoprensning er ca. 89%. Der er antaget en massefjernelse på 99% i Γ beregningen
10	*Kingston 1	Opvarmning ved elektrisk modstand (ERH)	Silt, sand og grus	Silt, sand og grus	0,01	0,01	1	A	Ingen data for massereduktion. Antaget 99% massefjernelse
11	*Kingston 2	ERH	Ler med flere sandlinser	Sand	0, 1	0, 1	1	C	Ingen data for massereduktion. En lille del af kildeområdet blev ikke behandlet. Antaget 90% massefjernelse
12	*Kingston 3	ERH	Sand og ler linser	Sand	0,01	0,0 1	1	D	Ingen data for massereduktion. Antaget 99% massefjernelse
13	*Kingston 4	ERH	Sand og lerlinser	Sand	0,1	0,5	3,3	D	Oprensningszone 50% mindre end kildeområdet. Antaget 50% massefjernelse
14	*Kingston 5	ERH	Sand og lerlinser	Sand	0,1	0,5	3,3	D	Oprensningszone 50% mindre end kildeområdet, Antaget 50% massefjernelse

#	Lokalitetsnavn	Afværge-metode	Geologi kilde	Geologi fane	J/Jo	M/Mo	Γ	KM	Kommentarer
15	Borden, Ontario	ISCO	Sand	Sand	a: 0,11 b: 0,01	a: 0,01 b: 0,01	a:0,5 b:1	A	Et feltforsøg hvor massen før/ efter er kendt, da forureningen er anbragt, og flux før og efter afværge er velkarakteriseret. Forceret flux giver et mere sikkert estimat af fluxen, og kan bruges til at måle effekt før og efter, dog vil fluxen formentlig være overstimeret ift. Den naturlige flux. På den anden side kan usikkerhederne beregnes og resultaterne er mindre sensitive i forhold til boringernes placering og heterogeniteter i koncentration og hydraulik.

Referencer: 1-2: Region Syddanmark, se bilag 1, 3-4 Brooks et al., 2008, 5: Chapman and Parker 2005, 6: DTU Miljø., 2011b, 7:Parker et al., 2008, 8: Region Hovedstaden 2010, 9: Brusseau et al.,2011, 10-14: Kingston et al., 2012, 15: Thomson et al., 2007

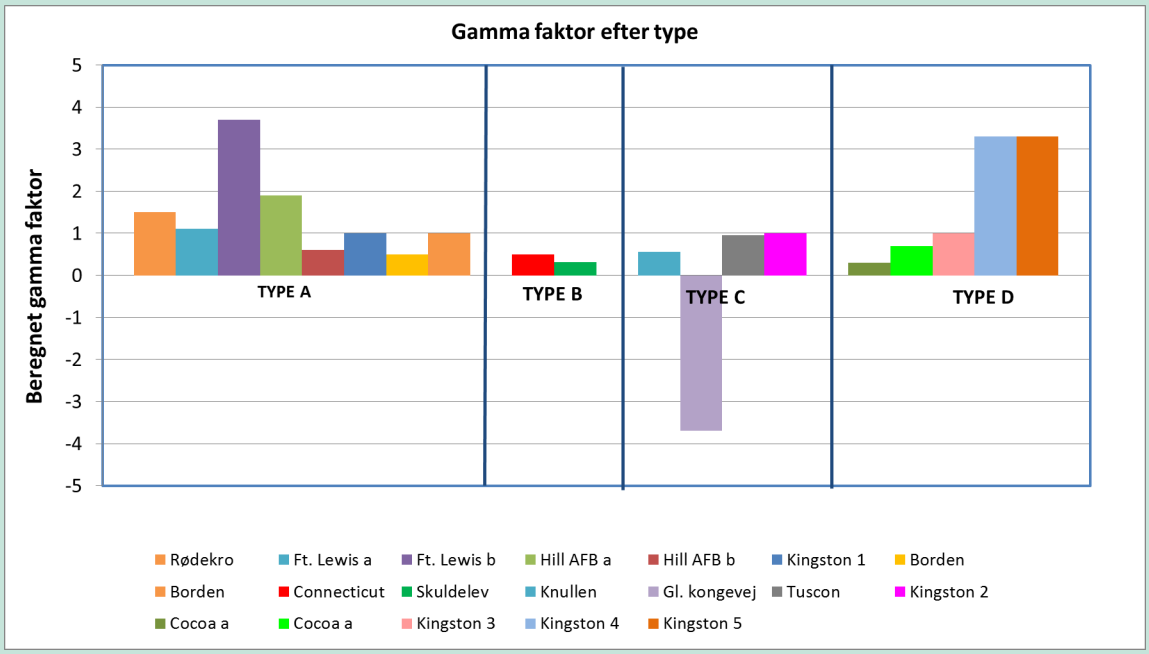
For mange af lokaliteterne i Tabel 5 er Γ beregnet ved at antage en massefjernelse, som ikke er baseret på feltmålinger. Γ-faktoren kan være forskellig for den samme sag, afhængigt af hvilke antagelser, der ligger bag beregningen. Eksempelvis er der på en ISTD oprenset lokalitet i Ft. Lewis (#3) (Brooks et al., 2008) beregnet Γ på både 1,4 og på 4,6. Det er usikkerheden i bestemmelsen af massen før afværge, der forårsager denne forskel, da massen fjernet i ISTD anlægget viste sig at være 70% større end det oprindelige masseestimat.

Γ-faktoren kan desuden variere for forskellige forureningsstoffer på den samme lokalitet. Et eksempel er Borden, Ontario (#15) (Thomson et al., 2007). På denne lokalitet er der udført oprensning med kaliumpermanganat, og både masse og flux før og efter afværge er bestemt med stor sikkerhed. De beregnede Γ for PCE og TCE er på hhv. 0,5 og 1. Det ses således at fluxresponsen for PCE er lavere end for TCE. Dette hænger sammen med, at TCE sorberer mindre og dermed påvirkes hurtigere af massereduktionen.

Udfald af Γ-faktor i forhold til lokalitetstype og afværgemetode er præsenteret i Figur 26 og har primært til formål at illustrere den store variation i Γ. Informationen kan ikke bruges til at ekstrapolere til forventet Γ for lignende sager, idet datagrundlaget har været behæftet med flere usikkerheder og antagelser.

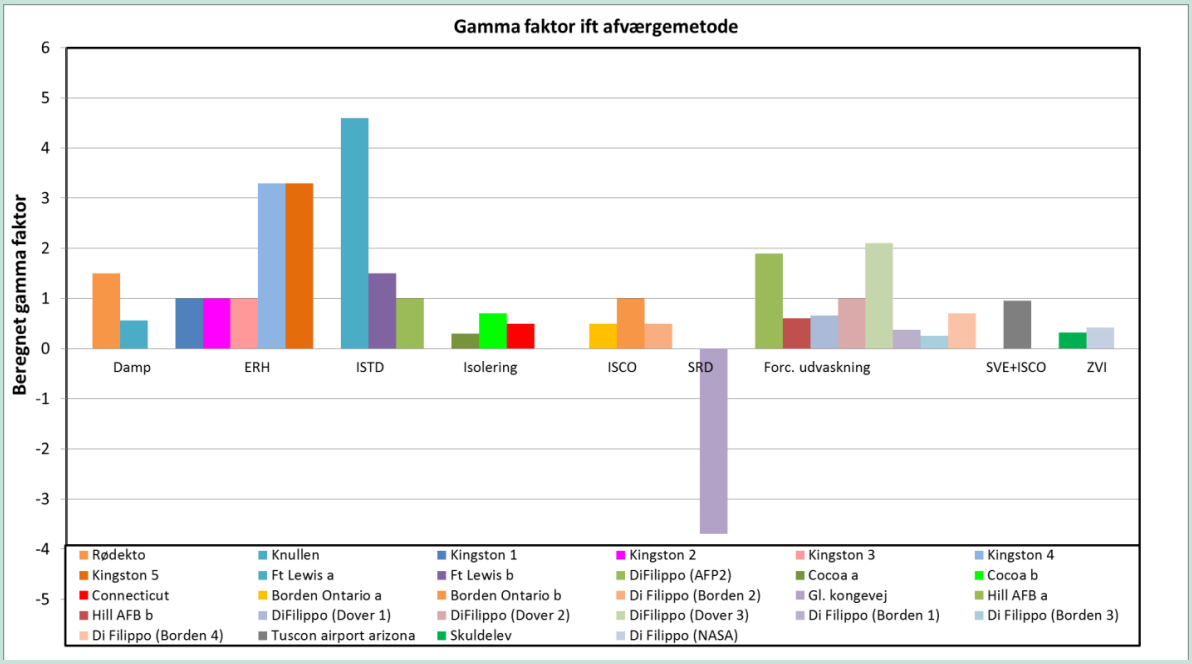
Generelt ses der ingen tværgående sammenhænge mellem Γ og den konceptuelle modeltype for lokaliteterne. Det ses dog, at de højeste fluxresponser opnås i Type A og D sager, hvor kildeoprensningen er foretaget i en permeabel zone, og fanen, hvor fluxen måles ligger i forlængelse af denne.

Teoretisk set vil Γ i både Type B og D systemer oftest være under 1 (se afsnit 4.2.1), hvilket er tilfældet for de fleste af de gennemgåede sager. Dog ses der høje Γ for Kingston 4 og 5 (#13 og 14), men det skal bemærkes, at der på disse sager ikke eksisterede pålidelige data om massefjernelsen.



FIGUR 25
Γ-faktor efter konceptuel modeltype. Data stammer fra Tabel 5

Figur 26 viser, at på 11 ud af 28 sager er der beregnet en Γ lig med eller større end 1. De højeste Γ ses for de termiske metoder. Metoder, der baserer sig på isolering af kilden eller forceret udvaskning, viser mere variable resultater. Oftest, er dette et resultat af en upræcis konceptuel model forud for valg af afværge, der har overset, at en betydelig forureningsmasse er beliggende udenfor det isolerede område og fungerer som en langtidskilde.

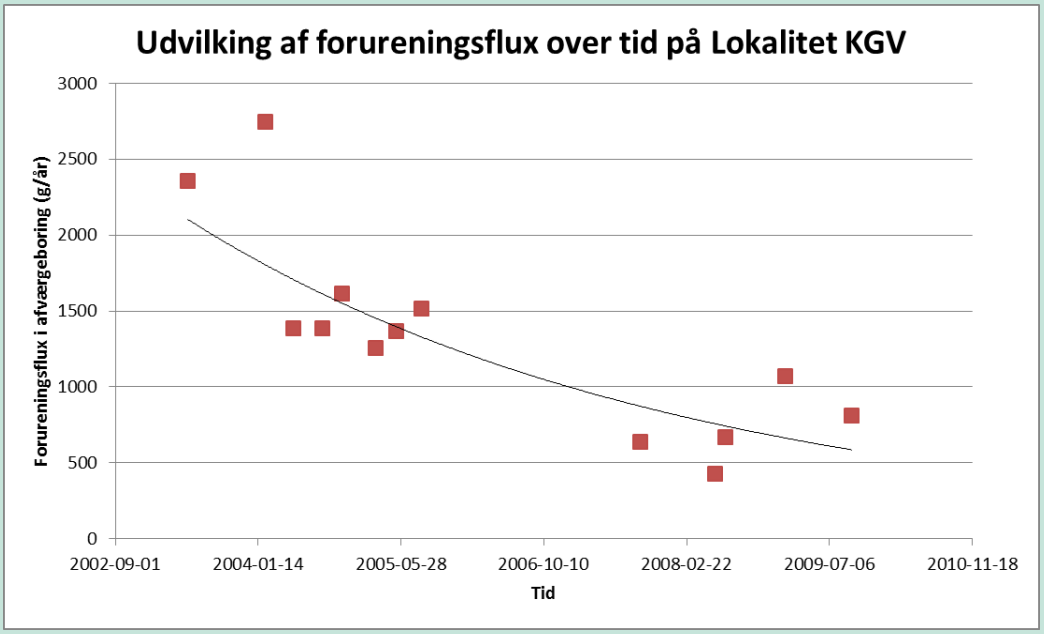


FIGUR 26
Γ-faktor efter afværgemetode. Data stammer fra Tabel 5 og fra DiFilippo & Brusseau (2008) Det var ikke muligt at finde tilstrækkelige oplysninger til tildeling af konceptuel modeltype til DiFilippo & Brusseau (2008) sager, hvorfor der kun er 16 sager afspejlet på Figur 25. Isolering dækker over indkapsling med spunsvæg og hydraulisk isolering

5.3 Erfaringsopsamling fra pumpesager

I forbindelse med afværgepumpning sker der ofte indsamling af data (koncentration og pumpeydelse) over en længere periode. I forbindelse med dette projekt er der søgt efter tidserier fra afværgelokaliteter, der kunne give et retvisende billede af fluxudvikling over tid. Der er udvalgt tre lokaliteter, men ved nærmere gennemgang af tidserierne er det opdaget, at kun en enkelt af disse har registreret data for både koncentration og ydelse over en længere periode og siden afværgepumpningens opstart. Oftest moniteres der kun for koncentrationer, og der antages, at boringer har kørt med en stabil ydelse, men dette er langt fra virkeligheden på de fleste lokaliteter. Det er derfor valgt kun at præsentere data for en enkelt sag.

Figur 27 viser udvikling af flux med tid på en lokalitet (herefter kaldt KGV1). Lokaliteten kan karakteriseres som type C lokalitet, hvor en TCE kilde ligger i et lavpermeabelt lag, hvorfra der sker nedsivning i det underliggende sandmagasin. I 2003 er der etableret afværgepumpning fra sandmagasinet. Forureningsfluxen i pumpeboringen er faldende med tiden. I starten af oppumpningen er fluxen højest, da den mest mobile del af massen fjernes. Derefter ses der en stagnerende udvikling i fluxen, hvilket er i overensstemmelse med, at fluxen ud af kildeområdet nu styres af langsomme processer som tilbagediffusion fra lavpermable lag.



FIGUR 27
Forureningsflux fra pumpedata fra lokalitet KGV (Region Hovedstaden, 2012)

5.4 Datakvalitet og usikkerheder

Ved gennemgang af ovenstående sager blev det tydeligt, at der i langt de fleste sager ikke findes et pålideligt datagrundlag til at beregne Γ-faktoren. En oversigt over de hyppigste databegrænsninger er diskuteret i det følgende:

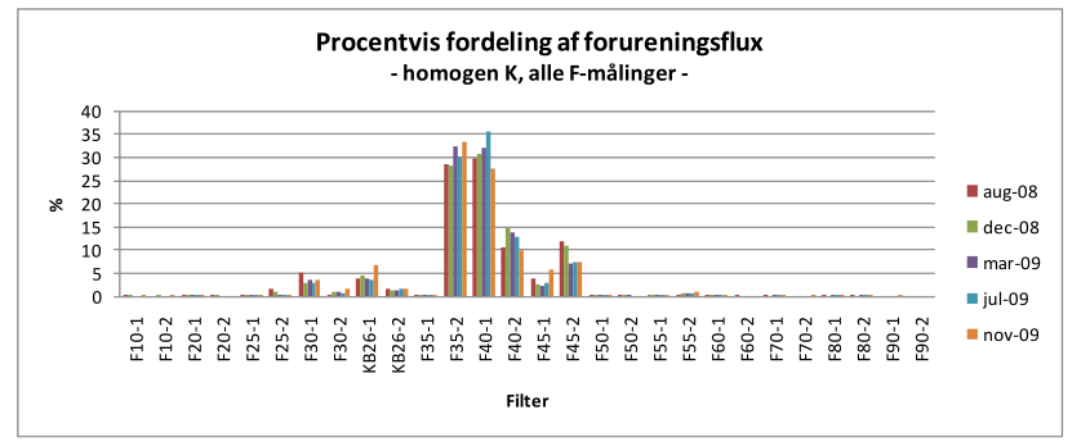
5.4.1 Usikker massebestemmelse før og efter afværge

Som diskuteret i kapitel 2 er massebestemmelse en kompleks opgave, der indeholder flere usikkerheder oftest på grund af dårlig afgrænsning eller vanskeligheder med at bestemme DNAPL massen. Denne store usikkerhed bliver ofte tydelig på sager, hvor der foretages afværge ved massekstraktion (eksempelvis termisk oprensning), hvor den fjernede forureningsmasse ofte er større end den oprindeligt estimerede masse på lokaliteten, som på Hills AFB (#4) (Brooks et al., 2008).

5.4.2 Usikker/manglende fluxbestemmelse før og efter afværge

Ved litteraturgennemgangen blev det erfaret, at fluxbestemmelse meget sjældent er foretaget inden igangsættelsen af afværge. Kingston et al. (2010) opsamlede data for 182 feltlokaliteter, hvor der er udført termisk afværge i perioden 1995-2009. Af de 182 lokaliteter var der kun tilstrækkelig dokumentation til at vurdere reduktion i forureningsflux ud af kildeområdet på 14 lokaliteter. DiFilippo & Brusseau (2008) gennemgik 21 afværgeprojekter og vurderede, at Γ-faktor kun kunne beregnes på 11 af disse med moderat eller god sikkerhed.

Oftest er forureningsflux før afværge estimeret eller kan estimeres på baggrund af en grov beregning (se afsnit 3.2.1), hvor der i bedste fald er anvendt K-værdier fra en enkelt boring. Både den hydrauliske ledningsevne og koncentrationerne kan variere med flere størrelsesordner langs og over dybden af kontrolplanet. Disse heterogeniteter kan medføre en usikkerhed på flere størrelsesordner i fluxestimatet (DTU Miljø, 2011b). Placering af moniteringstransektet og tætheden af boringer er også afgørende. På flere lokaliteter passerer 80 -90% af fluxen igennem 10% af tværsnitsarealet (Brooks et al., 2008,). Dette er illustreret på Figur 28. Desuden viste analyse af data fra 14 lokaliteter udført af Kingston et al. (2010), at der på hver lokalitet var en eller to boringer, hvor høje grundvandskoncentrationer og / eller hydrauliske ledningsevner resulterede i bidrag på mere end ca.25% af den samlede forureningsflux.



FIGUR 28
PROCENTVIS FORDELING AF FORURENINGSFLUX I TRANSEKT PÅ SKULDELEV (LANGE ET AL., 2011)

5.5 Fluxreduktion vs. koncentrationsreduktion

På de fleste afværgesager er koncentrationsreduktion anvendt som moniteringsparameter i stedet for fluxreduktion.

I 9 af de 14 veldokumenterede lokaliteter i Kingston et al. (2010) var koncentrationerne i grundvand reduceret med en faktor 10 eller mindre og på fem lokaliteter var koncentrationsreduktionen lig med eller større end cirka to størrelsesordner (100 x). Da fluxberegninger omfatter rumligt variable hydrauliske ledningsevne data, kan fluxreduktion afvige fra koncentrationsreduktion. For eksempel har reduktionen i forureningsflux varieret fra mindre end en faktor 10 op til en faktor 1000 på steder med en faktor 10 koncentrationsreduktion eller mindre. På 6 ud af 14 lokaliteter er der sket mindst en 100 × reduktion i forureningsflux.

I et senere arbejde har Kingston et al., (2012) studeret fluxreduktion fra 5 lokaliteter (Kingston 1-5, Tabel 5), hvor der er udført oprensning med elektrisk opvarmning (ERH). Forureningsfluxen før afværge varierede fra omkring 10 til 10^3 kg/år på disse fem lokaliteter. Data efter afværge viste reduktioner i koncentrationer og forureningsflux med en faktor mindre end 10 og op til en faktor 100 sammenlignet med før afværge. Den primære faktor, der differentierede omfanget af

koncentration- og forurenings fluxreduktion, var i hvilken grad behandlingszonen omfattede hele kildeområdet.

5.6 Opsummeringer af erfaringer fra afværgesager

Der er i projektet udført en litteraturgennemgang og indsamling af data fra flere oprensede lokaliteter i Danmark og i udlandet. Gennemgangen har illustreret, at der på de fleste sager ikke findes et pålideligt datagrundlag til at bestemme sammenhængen mellem masse- og fluxreduktion på grund af usikkerheden i massebestemmelse før og efter afværge, og usikker/manglende fluxbestemmelse før og efter afværge. Det har dog været muligt at udføre beregninger af masse- og fluxreduktion på ca. 16-20 lokaliteter. Generelt ses der ingen tværgående sammenhænge mellem Γ og afværgemetoder eller den konceptuelle modeltype for lokaliteterne.

Jf. resultater fra projektets erfaringsopsamling (Tabel 5), opnås en reduktion af flux på 90% som resultat af afværgeindsatsen på langt de fleste afværgesager. Massefjernelsen er dog mere variable fra 50 til 99,9%. Det bør i det enkelte tilfælde vurderes, om en fluxreduktion på 90% kan fjerne risikoen for grundvandsressourcen, for det vil betyde, at delvis oprensning i mange tilfælde vil være tilstrækkeligt. Hvis Γ-faktoren var kendt, kunne målsætningen overføres til et oprensningskriterium i kildeområdet, der således kunne præciseres. For Γ=1,5 vil målsætningen (90% reduktion i flux) være opfyldt med kun 79% reduktion af forureningsmassen. Derimod vil der for Γ lig med 0,5 kræves en massereduktion på 99%.

Ved gennemgang af de forskellige afværgesager er der belyst nogle forhold, hvor en given afværgeindsats i kilden ikke har givet den ønskede effekt i form af fluxreduktion. Typiske forhold, hvor afværgeindsatsen ikke har den forventede effekt i reduktion af forureningsfluxen, er:

- Kildeområdet er dårligt afgrænset, så afværgeindsatsen ikke har medført den ønskede oprensningseffekt i kildeområdet.
- Kildeområdet er dårligt karakteriseret, hvilket betyder at der efter den tilgængelige del af massen er fjernet ved afværge stadig er masse tilbageholdt i eksempelvis lavpermeable enheder der opretholder en vedvarende forureningsflux ved tilbagediffusion
- Forureningsfanen indeholder eller tilgrænser lavpermeable enheder, hvor en signifikant del af massen er diffunderet ind gennem fanens levetid. Trods kildefjernelse kan masse fra disse lag opretholde høje koncentrationer i forureningsfanen.

5.7 Opsummering om Γ-modellens anvendelighed på afværgesager

Γ-modellen er et af mange værktøj, der kan anvendes til evaluering af afværgeprojekters effektivitet. Det er en underliggende hypotese at jo større Γ er, jo større er effekten af en afværgeindsats mht. reduktion af forureningsfluxen, og dermed reduktionen af risikoen, i forhold til selve omfanget af indsatsen. Taget i betragtning af at omkostningerne til afværge stiger markant med øgede krav til massefjernelse, kan der være økonomiske gevinster ved at kunne nøjes med en mindre massefjernelse.

En Γ-faktor>1 kan dog ikke være et formål i sig selv. Hvis det antages, at der ved en in situ oprensning kun er fjernet 30% af forureningsmassen, med en 40% reduktion i flux som konsekvens, er Γ-faktor for denne sag 1,4. Projektet vil dog sjældent betegnes som en succes, med mindre denne mindre reduktion i flux har været tilstrækkelig til at fjerne risikoen. Omvendt vil en Γ-faktor på 0,6 (på baggrund af en masse reduktion på 99,9% der fører til 99% fluxreduktion) oftest have nået dets mål og betragtes som en succes. Nytteværdien af Γ-modellen, bliver først tydelig hvis man stiller spørgsmålet: *Kan man nøjes med kun at fjerne en mindre del af massen, hvis det giver en større fluxreduktion?*

Gennemgang af afværgesager i dette projekt, samt fra DiFilippo & Brusseau (2008) har vist en stor spredning i Γ. Der er ved denne gennemgang af litteraturen ikke fundet data, der kan bruges til af forudse hvilke Γ, der beskriver resultater af forskellige afværgemetoder. Heller ikke specifikke

lokalitetstyper har vist sammenhængende resultater, blandt andet fordi der mangler pålidelige data til beregning af Γ. Desuden er det set, at jo mere komplekse systemerne er, des sværere er det at beskrive masse- flux forholdet ved en simpel matematisk ligning som Γ-modellen. Di Filippo and Brusseau (2008) og Fjordbøge et al. (2012) har også konkluderet at heterogene systemer udviser et flertrins opførsel, der ikke repræsenteres af Γ-modellen. Γ-modellen er således kun anvendelig i sager med lille heterogentiet, svarende til type A, sager.

En vigtig udfordring ved anvendelse af Γ-modellen er, at medtage tidsforskydningen fra at massen er reduceret til effekten i flux kan måles. Desuden er der i Γ-modellen ikke taget i betragtning, hvor lang tid der går, inden effekten masse- og fluxreduktion er opnået.

6. Anbefalinger

6.1 Anvendelse af Γ-modellen

Projektet har haft som formål at vurdere den reelle effekt på grundvandet (målt som fluxreduktioner) af afværgetiltag under forskellige forhold, dækkende varierende geologityper og forureningsforhold. Hensigten var at teste om Γ-modellen, der beskriver forholdet mellem massereduktion og fluxreduktion, kan bruges i en praktisk sammenhæng med fokus på anvendelsesmuligheder forud for valg af afværgestrategi.

Der er gennemgået flere afværgesager, samt indsamlet resultater fra flere studier i den internationale litteratur. Der er ikke fundet nogen tværgående sammenhænge mellem Γ-modellen og forskellige afværgeteknologier, eller lokalitetstyper. Det ses, at Γ-modellen kun kan beskrive masse- flux forholdet for lokaliteter med en lav grad af kompleksitet, eksempelvis nogenlunde homogen massefordeling og hydrogeologiske forhold. I sager, hvor masseudvaskning er styret af lavpermeable lag og tilbagediffusion, er Γ-modellen ikke anvendelig.

Selvom Γ-modellen ikke er bredt anvendeligt hvad den matematiske beskrivelse angår, er den værdifuld som et værktøj til at illustrere problemstillingen om masse og flux sammenhænge og øge bevidsthed om at dette sjældent beskrives af en 1:1 lineær forhold.

6.2 Konceptuelle modeller som værktøj til masse- og fluxestimering

Gennemgang af sagerne har vist, at effekten af en afværgeindsats ofte er svær at vurdere på grund af manglende karakterisering af masse- og flux før og efter afværge. Begge størrelser er vigtige og svære at bestemme med stor præcision uden at bruge uforholdsvis mange ressourcer. Der henvises til et tidligere miljøprojekt (Miljøstyrelsen, 2011b) for anbefalinger om dokumentation af oprensningen i kildeområdet (bestemmelse af masse) samt i grundvandet (bestemmelse af flux).

Generelt kræver et præcist masse- og fluxestimat en god konceptuel model for lokalitetens geologi, hydrogeologi og forureningsfordeling. Tilsvarende krav stilles til dokumentation af en gennemført afværge af forureningen, da der her ligeledes kræves en robust estimering af masse og flux for at vurdere effekten af den gennemførte afværge.

Konceptualisering af lokaliteten i forhold til en forurening kan gennemføres på mange detailniveauer. En måde at systematisere tilgangen til opbygning af en konceptuel model er den i Appendix A præsenterede ”14 Compartments Model”. Modellen kan bruges til at illustrere den aktuelle forureningssituation. I modellen kan illustreres i hvilken grad forureningen er beliggende i kildeområde og forureningsfane, samt i hvilken form (gas, fri fase, opløst og sorberet) forureningen er tilstede, og om forureningen primært er i de permeable eller lav permeable aflejringer. Denne viden kan i modellen anvendes til at vurdere den fremtidige naturlige tidslige udvikling i forureningsbilledet, idet udviklingen af forureningsbilledet kan vurderes i forhold til de spredningsmuligheder, der er angivet i form af de forskellige procespile i modellen. Modellen kan endvidere anvendes til at belyse hvilke zoner/områder eller hvilke forureningstransporter gennem zoner, der er relevante i forhold til planlægning og gennemførelse af eventuelle afværgeforanstaltninger. Styrken i anvendelse af 14 Compartments Model er, at den nemt kan tilpasses forskellige sager og detailniveau, og opstillingen i delzoner, sikrer at alle forureningsfaser, geologitype og spredningsveje medtages i den konceptuelle forståelse. Dog skal modellen ikke

erstatte den "traditionelle" konceptuelle model, men nærmere bruges som supplement/huskeliste til det.

6.3 Metoder og anbefalinger til fluxbestemmelse

Taget i betragtning at bestemmelse af forureningsfluxen er både værdifuld i forhold til risikovurdering og prioritering samt kritisk for dokumentation af afværge, anbefales det at man altid laver en pålidelig fluxbestemmelse inden afværge igangsættes, evt. som en del af afsluttende forureningsundersøgelser eller detailprojektering. Udgifterne til eksempelvis et boringstransekt og målinger til bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne vil i langt de fleste tilfælde være lave i forhold til udgifterne for selve afværgeprojektet. Derudover vil eksisterende undersøgelsesboringer kunne anvendes og evt. supplerende boringer kan senere bruges til dokumentation af effekten.

Til bestemmelse af flux er der i denne rapport gennemgået flere metoder, der karakteriseres af forskellige kompleksitetsniveauer/krav:

- Simpel/grov beregning af flux
- Bestemmelse af forureningsflux fra isokonturkort
- Niveauspecifik prøvetagning i et boringstransekt
- Volumenpumpning/Afværgepumpning
- Passive fluxmålere i boringer

Hvilken metode, der skal vælges, afhænger af både tekniske og økonomiske overvejelser, men de generelle anbefaling er, at fluxen altid bør bestemmes før og efter afværge, for at kunne vurdere effekten at afværgeindsatsen i forhold til påvirkning af grundvandsressourcen. Bestemmelsen af fluxen før igangsættelse af afværge er desuden en kritisk komponent i risikovurderingen.

Gennemgangen af afværgesager, hvor der er udført fluxbestemmelse, har illustreret nogle af de forhold, der påvirker estimering af fluxen. På baggrund af erfaringer fra de gennemgåede sager, samt tidligere arbejde fra DTU Miljø (2011b) og Troldborg et al. (2012) kan det konkret anbefales:

- Kontrolplanet, hvor fluxen bestemmes, skal være placeret således, at det indfanger hele fanens bredde. Den vertikale diskretisering af transektet skal dække faneudbredelsen.
- Filtersætning af boringerne skal dække alle hydrogeologiske enheder og laggrænser på lokaliteten. Hovedparten af fluxen foregår i de permeable lag, men laggrænser hvor der bl.a. sker tilbagediffusion, som resulterer i vedvarende forureningsfluxe, må ikke overses. Det anbefales at måle for både koncentration og hydraulisk ledningsevne i alle filtre.
- Specifikt kan det anbefales at opdele transektet efter geologien ved beregning af forureningsfluxen, således at områder med lav hydraulisk ledningsevne ikke bliver regnet med en alt for høj værdi og dermed giver en for høj forureningsflux. Dette vil især være vigtigt, hvor der er fundet høje koncentrationer i områder med lav hydraulisk ledningsevne (DTU Miljø, 2011b).
- Der skal være større fokus på at bestemme realistiske værdier for den hydrauliske ledningsevne. Det vil formodentlig have langt større betydning for den estimerede forureningsflux end små variationer i koncentrationen, da ledningsevne ofte varierer med flere størrelsesordener. Så hvis der med relativt få boringer kan opnås en fornuftig repræsentation af forureningen, vil det formodentlig være bedre at fokusere på estimering af K og variationer af denne i området, frem for at forsøge at opnå en meget detaljeret beskrivelse af koncentrationerne.
- En gennemgang af litteraturen og erfaringer fra danske sager (udført af DTU Miljø, 2011b) viser, at der kan opnås et pålideligt estimat af forureningsfluxen, hvis der benyttes minimum omkring 0,1 målepunkter pr. m^2 langs transektet. Med denne måledensitet forventes en usikkerhed på højst 50% (DTU Miljø 2011, Troldborg et al., 2012). Dette er dog forudsat af, at forureningsfanen er dækket af målepunkterne, at der er sket fuldt forurenings-gennembrud ved transektet, at der i samtlige moniteringspunkter måles for både koncentration og hydraulisk ledningsevne og at grundvandsmagasinet ikke er ekstremt heterogent med fx

dominerende præferentielt flow. Usikkerheden vil desuden være afhængig af, at transektet ikke er placeret meget tæt ved kilden, hvor der kan forventes kraftige koncentrationsgradienter.

- Usikkerhedsvurderinger bør inddrages i fluxberegninger. Ved større undersøgelser anbefales det at anvende geostatistiske metoder for at beskrive usikkerhederne (Troldborg et al., 2012).
- På grund af grundvandsmagasinernes heterogenitet er fluxbestemmelse ved niveauspecifik prøvetagning stærkt påvirket af placeringen og antallet af boringerne. I nogle tilfælde kan resultaterne være upålidelige. En del af disse variationer kan imødekommes ved hjælp af volumenpumpning, som kan give en gennemsnitlig flux over et større delvolumen end en punktprøvetagning kan give.
- En grundig konceptuel model og hydrogeologisk karakterisering af lokaliteten er nøglen til den korrekte placering/diskretisering af fluxmålinger.

Dokumentation af oprensningseffekt i forbindelse med afværgeprojekter fokuserer i dag meget på bestemmelse af massereduktion i kildeområdet, som dog indeholder store usikkerheder, ikke mindst fordi den oprindelige masse kan være svær at bestemme. Forureningsflux fra en forurenet lokalitet er et mål for, hvor stor en belastning af ressourcen forureningen udgør. Reduktion af fluxen før og efter en afværge er også nemmere at bestemme, idet fluxmålingerne kan replikeres, og dermed er direkte sammenlignelige. Dette forudsætter at tidsforskydning (transporttiden) til kontrolplanet er taget i betragtning.

Målinger/bestemmelse af forureningsflux skal derfor indgå som en del af beslutningsgrundlag forud for valg af afværge (metode) og som det primære mål af effekten i dokumentationsfasen.

Referencer

Basu NB, Rao PS, Poyer IC, Annable MD, Hatfield K., (2006): Flux-based assessment at a manufacturing site contaminated with trichloroethylene. J Contam Hydrol. 2006 Jun 30;86(1-2):105-27.

Bjerg PL, Chambon J, Binning P., (2010): Har vi værktøjerne til at definere oprensningskriterier bedre? ATV Møde, Schæffergården, november 2010

Bockelmann A, Ptak T, Teutsch G., (2001): An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site. J Contam Hydrol. 2001 Dec 15;53(3-4):429-53.

Brooks MC, Wood AL, Annable MD, Hatfield K, Cho J, Holbert C, Rao PS, Enfield CG, Lynch K, Smith RE., (2008): Changes in contaminant mass discharge from DNAPL source mass depletion: evaluation at two field sites. J ContamHydrol.2008 Nov 14;102(1-2):140-53.

Brusseau ML, Carroll KC, Allen T, Baker J, Diguiseppi W, Hatton J, Morrison C, Russo A, Berkompas J., (2011): Impact of in situ chemical oxidation on contaminant mass discharge: linking source-zone and plume-scale characterizations of remediation performance. Environ Sci Technol. 2011

DiFilippo EL and Brusseau ML. (2o08): Relationship between mass-flux reduction and source-zone mass removal: analysis of field data. J Contam Hydrol. May26;98(1-2):22-35.

DiFilippo EL, Carroll KC, Brusseau ML (2010): Impact of organic-liquid distribution and flow-field heterogeneity on reductions in mass flux. J Contam Hydrol. 2010 Jun 25;115(1-4):14-25.

DTU Miljø, (2006):Risikovurdering af punktkilder:Tuxen N, Troldborg M, Binning PJ, Kjeldsen P & Bjerg PL (2006):Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet & Københavns Amt, Kgs. Lyngby. http://www.sara.env.dtu.dk/Samarbejdspartnere/RAP%20-%20Koebenhavns%20Amt/Publikationer.aspx

DTU Miljø, (2010): DNAPL i kildeområder- konceptuelle modeller, karakterisering og estimering af forureningsmasse. Jørgensen IV, Broholm MM og Bjerg PL., maj 2010.

DTU Miljø, (2011a):Forekomst af fri fase og kvantificering af forureningsflux for chlorerede opløsningsmidler.Bjerg PL, Broholm MM, Lange IV, Troldborg M, Janniche GS, Lemming G, Santos M og Binning
http://www.sara.env.dtu.dk/Samarbejdspartnere/DNAPL%20og%20forureningsflux/Publikationer.aspx

DTU Miljø, (2011b):Kvantificering af forureningsflux i transekt ved Skuldelev. Lange IV, Troldborg, M, Santos MC, Binning PJ, Bjerg PL, (2011): Et samarbejdsprojekt mellem DTU Miljø og Region Hovedstaden, april 2011

ESTCP, (2011): Guide for Selecting Remedies for Subsurface Releases of Chlorinated Solvents. March 2011, ESTCP, Project ER-200530

Falta RW, Roa PS., Basu N,(2005a): Assessing the impacts of partial mass depletion in DNAPL source zones I. Analytical modeling of source strength functions and plume response. J. Contam Hydrol 78, 259-280.

Falta RW, Basu N, Rao PS, (2005b): Assessing impacts of partial mass depletion in DNAPL source zones: II. Coupling source strength functions to plume evolution. J Contam Hydrol. 2005 Sep;79 (1-2):45-66.

Fjordbøge AS, (2011): Source zone remediation by zero valent iron technologies. Ph.D afhandling fra DTU Miljø.

Fjordbøge AS, Lange IV, Bjerg PL, Binning PJ, Riis C, Kjeldsen P. (2012): ZVI-Clay remediation of a chlorinated solvent source zone, Skuldelev, Denmark: 2. Groundwater contaminant mass discharge reduction. J Contam Hydrol. 2012 Oct;140-141:67-79

ITRC (2010): Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge, http://www.itrcweb.org/Documents/MASSFLUX1.pdf

GSI Environmental, (2010): Mass Flux toolkit, http://www.gsi-net.com/software/free-software/mass-flux-toolkit.html

Kingston JL, Dahlen PR and Johnson PC, (2010): State-of-the-Practice Review of In Situ Thermal Technologies. Ground Water Monitoring & Remediation, 30: 64–72.

Kingston JL, Dahlen PR and Johnson PC, (2012):Assessment of Groundwater Quality Improvements and Mass Discharge Reductions at Five In Situ Electrical Resistance Heating Remediation Sites. Ground Water Monitoring & Remediation, 32: 41–51.

Labaky W, Devlin JF, and Gillham RW, (2009): Field comparison of the point velocity probe with other groundwater velocity measurement methods, Water Resour. Res., 45

Lemming G, Friis-Hansen P and Bjerg PL, (2010): Risk-based economic decision analysis of remediation options at a PCE-contaminated site, Journal of Environmental Management 91 (2010) 1169-1182

Lu, C, Bjerg, PL, Zhang, FJ, and Broholm, MM., (2011). Sorption of chlorinated solvents and degradation products on natural clayey tills. Chemosphere. 83 (11), 1467-1474.

Miljøstyrelsen, (1998): Oprydning på forurenede lokaliteter. Vejledning nr. 6, 1998.

Miljøstyrelsen, (2011a): Fastlæggelse af oprensningskriterier for grundvandstruende forureninger. Overheu ND, Tuxen N, Thomsen NI, Binning PJ, Bjerg PL. og Skou H, 2011. Miljøprojekt nr. 137, 2011.

Miljøstyrelsen, (2011b): Værktøj til brug for risikovurdering og prioritering af grundvandstruende forureninger, Overheu ND, Tuxen N, Pedersen OF, Jensen CB, Rokkjær A, Andersen JA, Aabling J, Troldborg M, Binning P, Bjerg PL. Miljøprojekt nr. 1366, 2011.

Miljøstyrelsen (2012): Håndbog for risikobaseret prioritering af grundvandstruende punktkilder, Overheu ND, Tuxen N, Flyvbjerg J, Binning PJ, og Bjerg PL, Miljøprojekt 1439, 2012

Parker BL, Chapman SW, Guilbeault MA, (2008): Plume persistence caused by backdiffusion from thin clay layers in a sand aquifer following TCE source-zone hydraulic isolation. J Contam Hydrol. 2008 Nov 14;102(1-2):86-104.

Region Hovedstaden, (2010): Gl. Kongevej 39, adskillige referencer, udført af Orbicon

Region Hovedstaden, (2012): Data udtræk fra afværgeanlæg, email korrespondance

Region Syddanmark, (2008): Tidligere Renseri Cliprens, Fladhøjvej 1, Rødekro Fanekortlægning og risikovurdering

Region Syddanmark, (2012): Materiale afleveret i forbindelse med dette projekt Fladhøjvej 1, Rødekro

Thomson NR, Hood ED and Farquhar GJ, (2007): Permanganate Treatment of an Emplaced DNAPL Source. Ground Water Monitoring & Remediation, 27:74–85.

Troldborg M og Lemming G, (2005): Model til risikovurdering af punktkilder på oplandsskala. Eksamensprojekt ved Institut for Miljø og Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet

Troldborg M, Lemming G, Binning PJ, Tuxen N, Bjerg PL,(2008): Risk assessment and prioritisation of contaminated sites on the catchment scale. Journal of Contaminant Hydrology 101(1-4), 14-28.

Wealthall G, Durant N, Jørgensen TH, Grosen B, Broholm, (2012): Approaches to quantifying uncertainty in mass estimates at DNAPL sites , ATV Vintermøde, Temadag, marts 2012

VJ, (2009): Afværgekatalog og projekteringsparametre.. Webbaseret katalog (Videncenter for jordforurening) http://www.jordforurening.info/afvaergekatalog.php

Appendix A
Konceptuelle modeller

Konceptuelle modeller er en god måde at illustrere og sammenfatte alle resultater og sammenhænge på igennem et undersøgelsesforløb eller ved skitsering af mulige afværgeløsninger, da modellerne øger forståelsen af forureningssituationen og endvidere øger kvaliteten af formidlingen, hvis der er flere interessenter involveret i arbejdet med forureningssagen.

Kompleksiteten af den konceptuelle model bør altid vælges, så den kan sikre at formålet med undersøgelsen eller afværgen kan illustreres i modellen. Ved arbejdet med modellen er det således altid vigtigt at have fokus på hvilken problemstilling der ønskes belyst, så arbejdet med modellen kan understøtte, at der indsamles den rigtige viden.

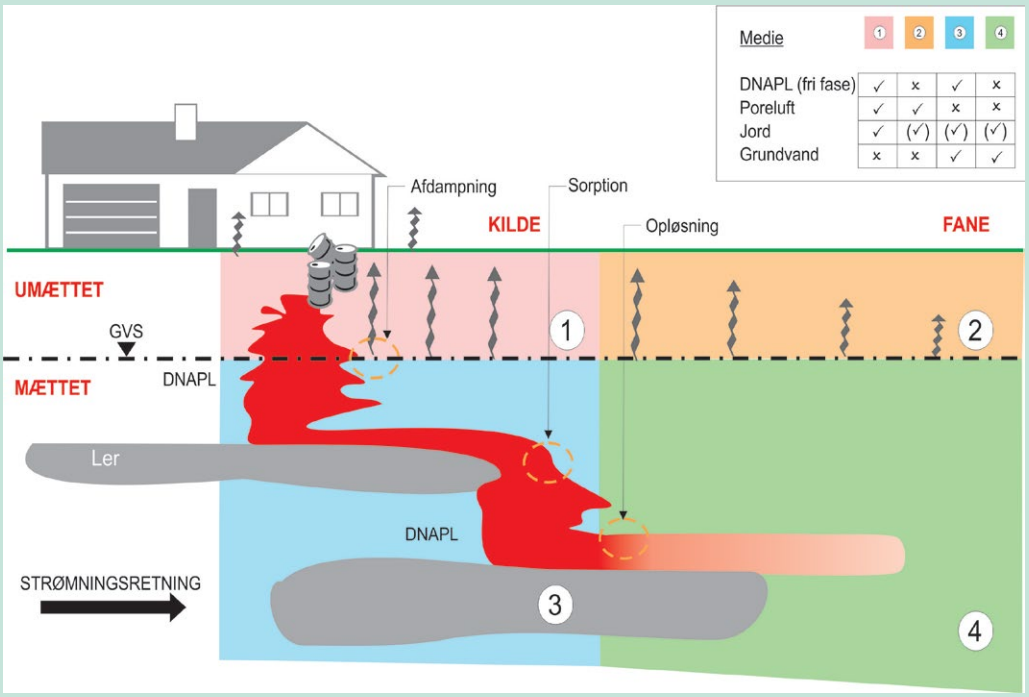
I det følgende kapitel vil der blive præsenteret forskellige konceptuelle modeller i relation til jord, poreluft og grundvandsforurening samt deres forskellige anvendelse og detaljeringsniveau.

A.1 Opstilling af konceptuelle modeller

Den overordnede målsætning med opstilling af en konceptuel model er at beskrive forurenings- og risikobilledet i forhold til sikring af mennesker og miljø. I forhold til en forurening i jord og grundvand er der fokus på følgende risikoområder, hvor forureningen kan udgøre en risiko:

- Jordkontakt (forureningspåvirkning af jord hvor der kan være kontaktrisiko)
- Indeklima (forureningspåvirkning af indeluft i boliger)
- Grundvandsressourcen (forureningspåvirkning af grundvandsindvinding)
- Overfladevand (forureningspåvirkning af søer og vandløb)

I Figur A.1 er vist en konceptuel model, hvor en forurening er opdelt i fire områder/delzoner i form af umættet og mættet zone i kildeområdet samt umættet og mættet zone i faneområdet. På figuren er endvidere med tjekmærker angivet i hvilken form forureningen kan optræde i de fire forskellige delzoner i form af fri fase forurening, poreluftforurening, jordforurening og grundvandsforurening.



FIGUR A.29
KONCEPTUEL MODEL MED FOKUS PÅ KILDEOMRÅDE OG FORURENINGSFANE SAMT UMÆTTE OG MÆTTET ZONE (LÅNT AF RAMBØLL 2011)

Fordelen ved at opdele en forurening i flere delområder er, at de enkelte områder har forskellige karakteristika. I forhold til opdeling af en forurening i et kildeområde og en forureningsfane er der følgende karakteristika i forhold til forureningen:

Kildeområde	Faneområde
• Typisk et mindre område	• Typisk et stort område
• Område med den væsentligste forureningsmasse (>95-99 % af samlet masse)	• Masse typisk < 5 % af samlet forureningsmasse •
• Høje jordkoncentrationer	• "Lave" jordkoncentrationer
• Typisk med fri fase forurening eller residual fri fase. Opløst forurening > 1-10 % af opløselighed	• Ingen fri fase forurening

Der er mange faktorer, der har betydning for hvordan forureningen spredes i jordmatricen, og hermed afgør den tidslige udvikling af forureningsbilledet i kildeområdet og forureningsfanen. I nedenstående Tabel A.1 er listet nogle af de mest betydende områder/faktorer og deres tilhørende elementer/parametre, der kan være relevante at undersøge i forhold til opstilling af en detaljeret konceptuel model. Det er i den forbindelse vigtigt at nævne, at de fleste af parametrene ikke er stationære, hvorfor den konceptuelle model er dynamisk og kan ændres med tiden.

TABEL A.6
BETYDENDE OMRÅDER/FAKTORER OG DERES TILHØRNENDE ELEMENTER I KONCEPTUELLE MODELLER

• Områder/faktorer	• Eksempler på vigtige elementer/parametre
• Generelle forhold	• Historiske aktiviteter, forureningsstoffer, arealanvendelse
• Risikoforhold	• Indeklima, kontaktrisiko, grundvand/drikkevand, overfladevand
• Geologi	• Permeable og lavpermeable aflejringer f.eks. sand, ler, kalk
• Hydrogeologi	• Forekomst af grundvand/grundvandsmagasiner • Grundvandsspejl, strømningsretning, hydraulisk ledningsevne, horisontale og vertikale gradienter
• Redoxforhold, geokemi, biologi	• Redoxzoner, grundvandskemiske parametre, nedbrydningsforhold (specifikke nedbrydere/bakterier, enzymer mv.)
• Forureningsforhold	• Forureningskoncentrationer i jord, poreluft og grundvand, fri fase forurening, fysiske/kemiske egenskaber af forureningskomponenter
• Forureningsmængder	• Forureningsmasse, volumen af forurenede områder
• Spredningsveje	• Fra forureningskilde til "receptor“ f.eks. i poreluft, grundvand og ude/indeluft (sorption, diffusion, afdampning)
• Forureningsfluxe	• Fluxe i mættet og umættet zone
• Afværgevurdering	• Opdeling af forureningsområdet i indsatsområder for afværgeindsats

Ved udarbejdelse af en konceptuel model vil flere af de ovenstående forhold hænge tæt sammen, idet det eksempelvis er vigtigt at tænke forholdene omkring geologi og hydrogeologi sammen med forureningsbilledet, da geologien og hydrogeologien sammen med de fysiske/kemiske egenskaber for den aktuelle forurening ofte er afgørende parametre for hvorledes forureningen spredes i jordmatricen.

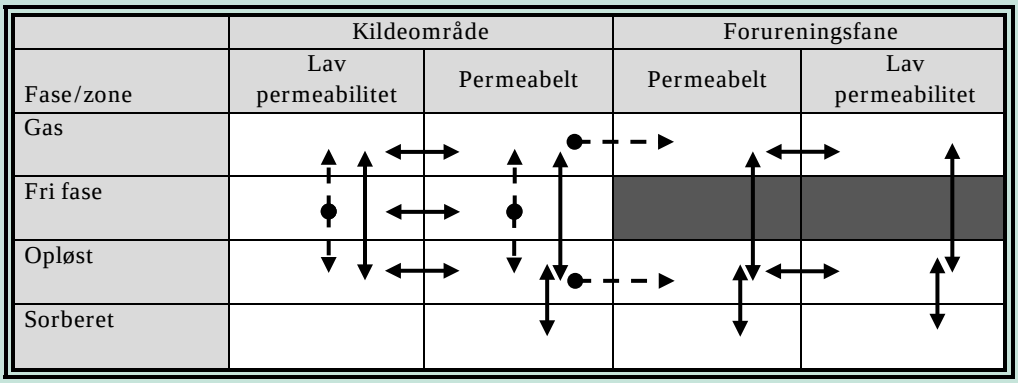
Skal der evt. foretages afværgeforanstaltninger er det endvidere af stor betydning, at der identificeres hvilke indsatsområder/delzoner, der skal foretages afværge i, og at disse områder kortlægges ekstra deltaljeret inkl. bestemmelse af eventuelle projekteringsparametre. Det henvises til Videncenter for Jordforurening afværgekatalog for metoder til bestemmelse af projekteringsparametre (VJ, 2010).

A.2. Præsentation af 14 compartments model

Det amerikanske forskningsråd (ESTCP, 2011) har fremlagt et nyt koncept til opbygning af konceptuelle modeller, kaldet ”14 Compartments Model”. Styrken i anvendelse af 14 Compartments Model er at modellen nemt kan tilpasses forskellige sager og detailniveau samtidigt med at en opdeling i delzoner (compartments) sikrer at alle forureningsfaser, geologityper og spredningsveje medtages i den konceptuelle forståelse.

Princippet bag 14 Compartments Model går ud på at dele en lokalitet op i 14 delzoner (compartments) som vist på Figur A.2. Figur A.2 illustrerer det aktuelle forureningsbillede samt potentialet for at forureningen spredes fra en delzone til en anden i modellen. Modellen kan bruges til at konceptualisere lokaliteter på en ensartet måde, idet systematikken er nem at anvende og kan tilpasses den enkelte lokalitet.

Som vist på Figur A.2, er modellen overordnet opdelt i et kildeområde og en forureningsfane, som er underopdelt i henholdsvis lavpermeable og permeable zoner. Pilene i figuren angiver om forureningen fra en delzone kan spredes til en anden zone. Fuldt optrukne pile angiver, at processen er reversibel i mellem de to delzoner, mens en stiplet linje angiver, at processen er irreversibel. Som det kan ses er det pr. definition vedtaget, at der ikke kan være fri fase forurening i forureningsfanen.



FIGUR A.30
14 COMPARTMENTS MODEL MED INDDELING I 14 DELZONER (MODIFICERET FRA ESTCP, 2011)

Forureningskomponenterne kan optræde i 4 faser (gas, fri fase (NAPL), opløst i vandfasen og sorberet til jorden). Afhængigt af lokalitetens (hydro)geologi og forureningens alder kan stofferne være fordelt i de forskellige delzoner i mere eller mindre grad. En ung forurening vil således i højere grad være at finde i de permeable områder i kildeområdet, mens en gammel forurening i højere grad kan være spredt til områderne med lav permeabilitet i kildeområdet samt til forureningsfanen. Mængden af fri fase forurening vil også typisk blive reduceret med tiden som følge af, at forureningen opløses og spredes til de andre delzoner.

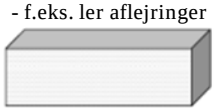
Modellen kan endvidere anvendes til at illustrere hvordan en given afværge vil påvirke forureningssituationen i de 14 delzoner. Forskellige afværgeteknologier udføres ofte i kun få af en lokalitets delzoner. Afværgen kan tilrettelægges så den enten er rettet mod at foretage en massefjernelse og/eller en afskæring af den pågældende forurening i udvalgte delzoner. Modellen kan i den forbindelse anvendes til at illustrere effekten af en given afværgestrategi, ved at visualisere effekten af afværgen enten ved en reduktion af forureningen i en eller flere delzoner eller ved at lægge en afskæring ind, der medfører at forureningen ikke spredes fra en delzone til en anden. Modellen kan endvidere anvendes til at illustrere effekten af en given afværgeløsning ved at opstille modellen før og efter gennemførelse af afværge.

Ved anvendelse af 14 Compartments Modellen er der defineret forskellige forureningsniveauer, som kan tildeles de enkelte delzoner, som vist i Figur A.3. Forureningsniveauerne vælges ved at anvende en målt vandkoncentration (idet der forudsættes ligevægtskoncentration) eller ved at beregne en vandkoncentration ved en ligevægtsberegning.

Forureningsniveau	Koncentration i vandfase (omregnet ligevægtskoncentration)
0	Ingen påvirkning
1	1-10 µg/l
2	<10-100 µg/l
3	<100-1000 µg/l
4	>1000 µg/l

FIGUR A.31
14 COMPARTSMENTS MODEL – DEFINITION FOR ANGIVELSE AF FORURENINGSNIVEAU I DELZONER

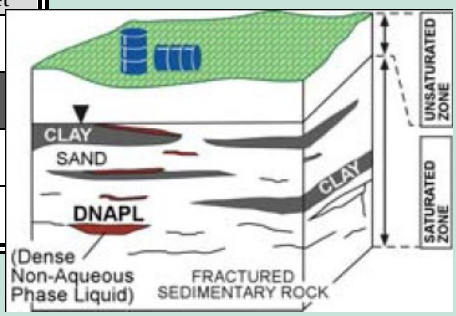
Der er i Figur A.4 defineret 5 forskellige geologityper, som er beskrevet mht. deres egenskaber i forhold til om geologitypen er permeabel eller har en lav permeabilitet. Geologityperne kan anvendes til at definere hvilke delzoner, der er relevante i forhold til en aktuel lokaltet.

Geologi	Permeabilitet (m2)	Hydraulisk ledningsevne (m/s)	Porøsitet (%)	Beskrivelse
Type 1: Sedimenter med mellem heterogenitet og moderat til høj permeabilitet	$k>10^{-14}$	$K>10^{-7}$	5-40	- Ensartet materiale - f.eks. sand og grus aflejringer
Type 2: Sedimenter med lav heterogenitet og lav permeabilitet	$k<10^{-14}$	$K<10^{-7}$	5-40	- Materialer med lav permeabilitet uden nogen sekundære permeabilitet egenskaber med sprækker - f.eks. ler aflejringer 
Type 3: Sedimenter med moderat til høj heterogenitet	$k>10^{-14}$	$K>10^{-7}$	5-40	- Store rumlige variationer i permeabiliteten - f.eks. delta, fluviale og glaciale aflejringer
Type 4: Opsprækkede bjergarter med lav matrix porøsitet	$k<10^{-17}$	$K<10^{-10}$	<1 (både i frakturer og matrix)	- Små hulrum i ufrakturerede matrix - Transmissive egenskaber som følge af opsprækning - krystalinske bjergarter
Type 5: Opsprækkede bjergarter/sedimenter med høj matrix porøsitet	$k<10^{-17}$	$K<10^{-10}$	<1 (i frakturer) 1-40 (i matrix)	- Store hulrum i ufrakturerede matrix - Transmissive egenskaber som følge af opsprækning - f.eks. kalk, sandsten og ler med sekundære permeable enheder

FIGUR A.32
14 COMPARTSMENTS MODEL – DEFINITION AF 5 GEOLOGITYPER I RELATION TIL PERMEABILITET, HYDRAULISK KONDUKTIVITET OG PORØSITET (MODIFICERET FRA ESTCP, 2011)

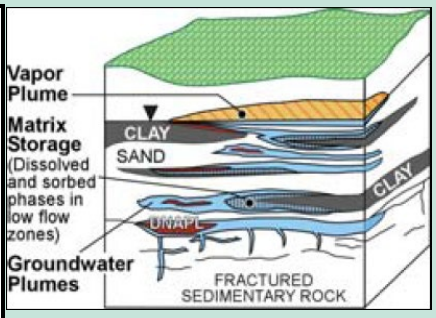
I det følgende er vist et eksempel på en tidslig udvikling af en forureningsspredning illustreret i 14 Compartments Modellen. I Figur A.5 er vist 3 stadier (tidlig, midtvejs og sen forureningsfase) mht. forureningsudviklingen i en geologi, som øverst består af en type 3 geologi, som er underlejret af type 5 geologi. Røde/orange, gule og grønne celler i modellen indikerer at områderne som cellerne repræsenterer er henholdsvis meget, moderat eller lidt forureningspåvirket.

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	0	2	1	0
Fri fase (NAPL)	0	4		
Opløst	0	2	1	0
Sorberet	0	2	1	0



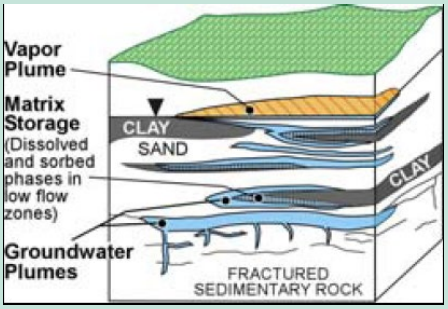
Tidlig forureningsfase: Hoveddelen af forureningen er til stede som fri fase, og der er ved at dannes en forureningsfane i grundvandet.

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	2	2	2	2
Fri fase (NAPL)	2	3		
Opløst	2	3	3	2
Sorberet	2	3	3	2



Midtvejs forureningsfase: En stor del af fri fase forureningen er forskudt til de andre tre faser i form af forurening i gas/poreluft, opløst til vandfasen og sorberet til jorden. Der dannes forureningsfaner i både mættet (grundvand) og umættet zone (gas/poreluft), og forureningen spredes til områder med lav permeabilitet.

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	3	2	2	3
Fri fase (NAPL)	1	1		
Opløst	3	2	2	3
Sorberet	3	2	2	3



Sen forureningsfase: Der er ikke længere fri fase forurening tilstede. Forureningsfaner i de permeable zoner (i gas/poreluft og grundvand) kan blive opretholdt, da de ved desorption og/eller tilbagediffusion fødes med forurening fra de lavpermeable zoner.

FIGUR A.33
14 COMPARTMENTS MODEL VISENDE EKSEMPEL FOR FORURENINGUDVIKLING SOM FUNKTION AF TIDEN (ESTCP, 2011)

Som det ses af Figur A.5 er der stor forskel på forureningsbilledet som funktion af tiden, idet forureningen i den tidlige fase primært er til stede i de permeable områder i kildeområdet, hvorefter forureningen med tiden spredes til de mere lavpermeable områder i kildeområdet samt til et større område i form af både permeable og lavpermeable områder i både den umættede og mættede zone i form af forureningsfaner.

A.3 Anvendelse af 14 Compartments Modellen på 2 danske sager

Nedenfor er ved to konkrete eksempler illustreret hvordan systematikken i 14 Compartments Modellen kan anvendes i forbindelse med beskrivelse af forureningssituationen på to store danske forureningssager før og efter de blev oprenset. Modellen illustrerer forskellene ved en forurening hvor hovedparten af kildeområdet er beliggende i hhv. umættet zone i en permeabel geologi og i mættet zone i en lavpermeabel geologi.

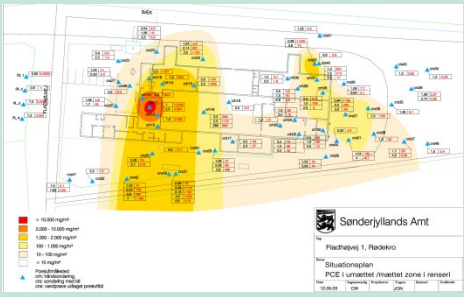
A.3.1 Eksempel 1: Fladhøjvej 1, Rødekro

Geologi og hydrogeologi: Silt, sand og grus, hvilket svarer til en type 1 geologi. Geologien er opdelt i en umættet og mættet zone. Kildeområde og forureningsfane ligger i samme geologiske enhed. Hoveddelen af forureningen i kildeområdet ligger i den umættede zone med høj permeabilitet.

Forurening før oprensning: ca. 2.000 kg PCE i kildeområde og 1.000 kg i forureningsfane
Forurening efter oprensning: ca. 2 kg PCE i kildeområde og <1.000 kg i forureningsfane

I dette eksempel betragtes kun det kildenære del af fanen, der strækker sig 50-100 meter fra kildeområdet

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	2	4	2	2
Fri fase (NAPL, DNAPL)	2	4		
Opløst	2	4	3	2
Sorbered	2	4	3	2



Forurening før oprensning: Hoveddelen af forureningen er til stede som gas/poreluft, fri fase samt sorberet og opløst forurening i kildeområdet.

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	1	1	1	1
Fri fase (NAPL, DNAPL)	0	0		
Opløst	1	1	2	2
Sorberet	1	1	2	2

Forureningssituation efter termisk oprensning (dampoprensning) i kildeområde: Der er ikke længere fri fase forurening tilstede og 99% af forureningen i kildeområdet er oprenset. Forureningen i forureningsfanen er intakt, idet den dog ikke i samme grad fødes med forurening fra kildeområdet, hvilket giver en reduktion i forureningspåvirkningen af de permeable zoner i forureningsfanen.

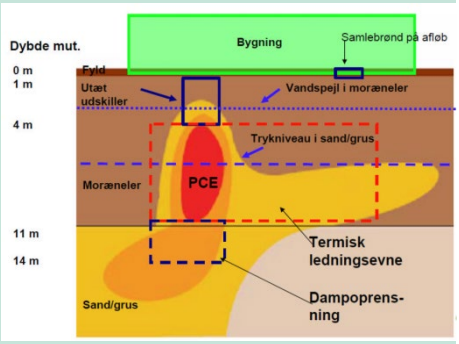
FIGUR A.34
14 COMPARTMENTS MODEL VISENDE FORURENINGSBILLEDE VED RØDE KRO FØR OG EFTER OPRENSNING

A.3.2 Eksempel 2: Knullen 8, Odense

Geologi og hydrogeologi: Ler med enkelte sandlinser underlejret af mættet sandlag. Svarende til en type 2 geologi underlejret af en type 1 geologi. Kildeområdet ligger i overvejende i moræneleret i et område med lav permeabilitet.

Forurening før oprensning: ca. 4.600 kg PCE i kildeområde og 200 kg i forureningsfane
Forurening efter oprensning: Ca. 7 kg PCE i kildeområde og 5 kg i det kildenære forureningsfane

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	3	2	1	1
Fri fase (NAPL, DNAPL)	4	2		
Opløst	4	3	3	3
Sorberet	4	2	3	3



Forurening før oprensning: Hoveddelen af forureningen er til stede som fri fase samt sorberet og opløst forurening i kildeområdet.

	Kildeområde		Forureningsfane	
Fase/zone	Lav permeabilitet	Permeabelt	Permeabelt	Lav permeabilitet
Gas	1	1	1	1
Fri fase (NAPL, DNAPL)	0	0		
Opløst	1	1	2	3
Sorberet	1	1	2	3

Forureningssituation efter termisk oprensning (ISTD) i kildeområdet: Der er ikke længere fri fase forurening tilstede og 90% af forureningen i kildeområdet er oprenset. Forureningen i forureningsfanen er intakt umiddelbart efter afværge men vil med tiden reduceres, idet den ikke i samme grad fødes med forurening fra kildeområdet.

FIGUR A.35
14 COMPARTMENTS MODEL VISENDE FORURENINGSBILLEDE VED KNULLEN FØR OG EFTER OPRENSNING

A.4 Opsummering af potentialer ved brug af 14 Compartments Model

Anvendelse af konceptuelle modeller er et vigtigt værktøj i forbindelse med forståelse og formidling af forureningssager, eftersom modellerne kan visualisere forureningssituationen i forhold til målsætningen. Modellerne kan endvidere anvendes til at visualisere hvilke faktorer, der har størst indflydelse i forhold til den konkrete afværgeindsats og de formål og målsætninger der er opsat.

Ved arbejde med konceptuelle modeller er det vigtigt, at opstille et klart formål med opstilling af modellen, samt at gøre sig klar at en konceptuel model er et øjebliksbillede, da forureningsbilledet ændres med tiden.

Styrken i anvendelse af 14 Compartments Model er, at den nemt kan tilpasses forskellige sager og detailniveau, og opstillingen i delzoner sikrer at alle forureningsfaser, geologitype og spredningsveje medtages i den konceptuelle forståelse. På den måde kan resultatet af afværgeindsats rettet mod en

delzone på de andre delzoner illustreres på en måde der giver et hurtigt overblik. Dog skal modellen ikke erstatte den "traditionelle" konceptuelle model, men nærmere bruges som supplement/huske liste til det.

Nedenstående tabel opsummerer potentialer og spørgsmål der belyses ved anvendelse af 14 Compartments Modellen i arbejdet med en forureningssag:

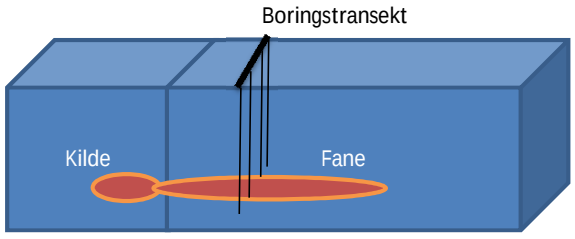
Tabel A.7
Potentialer ved anvendelse af 14 Compartments Modellen i en forureningssag

Potentialer ved anvendelse af 14 Compartments Modellen i en forureningssag
Afklaring af hvor den primære forureningsmasse er til stede
Er forureningen tilstede i kildeområde/forureningsfane(r)?
I hvilken grad er forureningen spredt til de permeable og lavpermeable zoner i kildeområde og forureningsfane(r) ?
I hvilke faser er forureningen primært til stede og i hvilket omfang (gas/poreluft, fri fase, opløst i vandfasen, sorberet til jorden)?
I hvilken grad er der mulighed for, at forureningen kan spredes mellem de enkelte delzoner fra hhv. kildeområde til forureningsfane og fra permeable til lavpermeable zoner mv? Hvilke processer er reversible og hvilke er irreversible mellem de enkelte delzoner ?
At forudse tidslig udvikling af forureningssituationen – hvorledes vil forureningsbilledet ændres over tiden i den aktuelle geologi og hydrogeologi?
Mht. eventuel afværge af forureningen kan modellen anvendes til at udpege de delzoner hvor en oprensning eller afskæring af forureningen kan have størst effekt.
Efter en endt oprensning kan modellen anvendes til at visualisere om den ønskede målsætning med afværgen er opnået. Er der opnået den ønskede massefjernelse i en eller flere af delzonerne i modellen og/eller er der opnået den ønskede reduktion/afskæring af forureningsfluxen fra en eller flere delzoner i modellen?

Bilag 1: Udfyldte lokalitetsskemaer

	STAMDATA			Angiv Reference, eller kommentar
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Hill AFB, Utah, USA	/1/
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		ikke relevant	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		ikke relevant	
	FØR AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
5	Primært Forureningsstof		TCE	
6	sekundær forureningsstof			
7	Hvornår er forureningen sket?		1967	
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		ukendt	
9	Forureningskildens geologi		silt, sand og grus	
10	Ligger den primære forurening i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	ukendt	
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s		
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	2180	
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		stor	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)*		stor	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		nej	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år		
19	Redoxforhold		ukendt	
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og grundvandsmagasinet	m	0	
	Fane			
		Enhed		
21	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		ikke relevant	
22	Geologi af det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		silt, sand og grus	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	ikke målt	
24	Længde af forureningsfanen	m		
25	Bredde af forureningsfanen	m		
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	*2,5 cm/d*	q
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		mellem	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	76 g/dag for TCE, 0,1 g/dag for DCE; total 0,6 mol/dag	for TCE
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	15	
33	Redoxforhold		ukendt	
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 24-34 i søjle D for dette magasin*		nej	
	AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
35	Afværgemetode-kilde		Surfactant flooding og oppumpning	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		juni-juli 2002	
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?		Tilstedeværelse af DNAPL	
38	Afværgemetode-Fane		ingen	
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen		ingen	
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?		ikke relevant	
	EFTER AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		ekstrakteret masse i oppumpning	
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen		ukendt	
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		2003	
44	Primært forureningsstof		TCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	ja	
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	840 (maks estimat)	
47	Er der fri fase?		Ja	
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		nej	
50	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vandprøver	
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		2	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		jun-03	
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg	ukendt	
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s	1,5 cm/dag	q
56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år	5 g/dag for TCE, 3g/dag for cDCE, total 0,07 mole/dag	
58	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 56-64 søjle D for dette magasin*		nej	

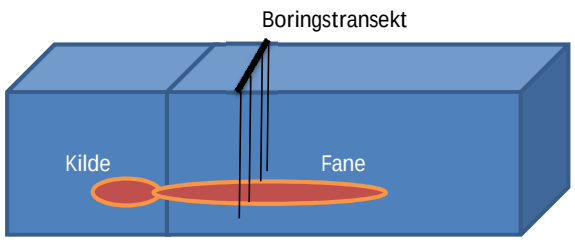
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, eller kommentar
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar			
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?			
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten		Mass reduktion 60%, Flux reduktion 90 %	
			SEAR førte til øget dechlorering, hvor forureningsflux af DCE steg med en faktor 30. Der var store vertikale variationer i forureningsfluxen i den samme boring	
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Brooks et al JCH 102 (2008) 140-153			
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		1,9	maks (antaget M/Mo på 0,6)
	Calculated gamma		0,6	minimum, hvis vi antager en oprindelig masse på 2250 og fjernelse på 2180



Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon
Den meget stor usikkerhed omkring initial massebestemmelse gør det enormt svært at bestemme gamma faktor!

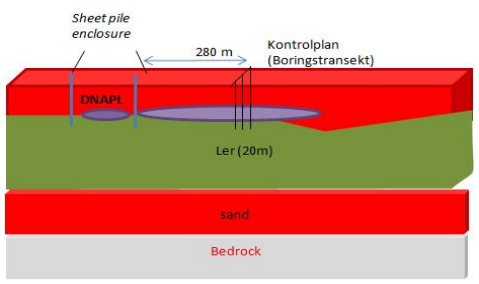
	STAMDATA			Angiv Reference, eller kommentar
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Ft. Lewis Military Reservation, Tacoma, Washi	/1/
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		ikke relevant	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		ikke relevant	
	FØR AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
5	Primært Forureningsstof		TCE	
6	sekundær forureningsstof		ingen	
7	Hvornår er forureningen sket?		1946-1960	
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		ukendt	
9	Forureningskildens geologi		groft sand	
10	Ligger den primære forurening i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	ukendt	
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s		
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	3800	
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		lille	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)*		stor	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?			
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år		
19	Redoxforhold		ukendt	
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og grundvandsmagasinet	m	0	
	Fane			
		Enhed		
21	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		ikke relevant	
22	Geologi af det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		groft sand	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	ikke målt	
24	Længde af forureningsfanen	m		
25	Bredde af forureningsfanen	m		
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	*2,5 cm/d*	q
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		stor	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	655 g/dag TCE og 233 g/dag DCE total 7 mol/d	for TCE
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	45	
33	Redoxforhold		ukendt	
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle D for dette magasin*		nej	
	AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
35	Afværgemetode-kilde		termisk oprensning	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)			
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?			
38	Afværgemetode-Fane		ingen	
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?		ikke relevant	
	EFTER AFVÆRGE			Angiv Reference, eller kommentar
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		jordprøver	
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen		ukendt	
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		2008	
44	Primært forureningsstof		TCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	ukendt	
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	45	
47	Er der fri fase?		ukendt	
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		nej	
50	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vandprøver	
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		2	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg	ukendt	
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s	*19 cm/d q*	q
56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år	2,8 g/dag TCE og 1,9 g/dag DCE, total 0,09 mol/dag	
58	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 56-64 søjle D for dette magasin*		nej	
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, eller kommentar

65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar			
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?			
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten			
			Usikkerhed om masseopgørelse. Massereduktioner usikker men det formodes at være mellem 68% og 98%. Fluxreduktion 99,5%	
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Brooks et al JCH 102 (2008) 140-153			
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		4,6	M/Mo 0,32
	Calculated gamma		1,4	



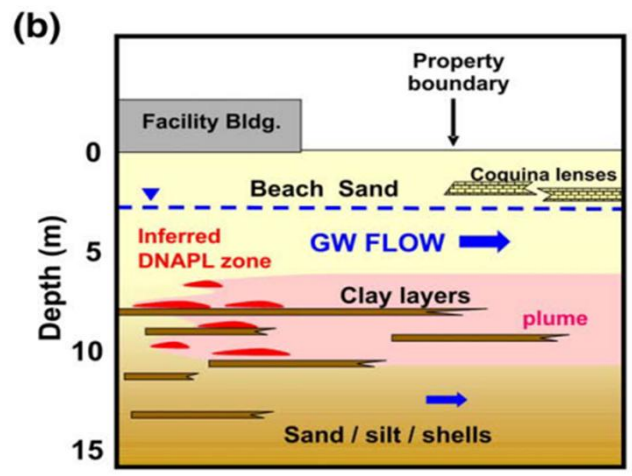
Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon
Den meget stor usikkerhed omkring initial massebestemmelse gør det enormt svært at bestemme gamma faktor!

	STAMDATA			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Connecticut	
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		ikke relevant	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		ikke relevant	
	FØR AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
5	Primært Forureningsstof		TCE	
6	sekundær forureningsstof		ingen	
7	Hvornår er forureningen sket?			
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		ukendt	
9	Forureningskildens geologi		SAND	
10	Ligger den primære forurening i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s		
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s		
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg		
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		lille	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)*		lille	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		nej	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år	ikke målt	
19	Redoxforhold		ukendt	
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og grundvandsmagasinet	m	0	
	Fane			
		Enhed		
21	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		0	
22	Geologi af det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		SAND	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg		
24	Længde af forureningsfanen	m	>330 m	
25	Bredde af forureningsfanen	m	300	
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	*1,90E-04*	
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		lille	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	360000	*estimeret*
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	280	
33	Redoxforhold		ukendt	formentlig aerob
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		nej	
	AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
35	Afværgemetode-kilde		indkapsling af DNAPL med spunsvæg	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		fra 1994-2005	
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?		ukendt	
38	Afværgemetode-Fane		ingen	
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen		ikke relevant	
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?		ikke relevant	
	EFTER AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		der er ikke udført dokumentation i kilden	
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen			
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
44	Primært forureningsstof		TCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	nej	
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	0	*vi antager at indkapsling svarer til 100% fjernelse af massen*
47	Er der fri fase?		nej	
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		lille	
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		nej	
50	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vandprøver i transekt, multileves samplers, jordprøver fra lerenheden under sandmagasinet.	
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		3	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		1999/2000/ og 2005	
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg		
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s		
56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år	36000	i 2000, 6 år efter, i 1997-99 (2 år efter indkapsling var fluxen
58	Redoxforhold efter afværge			

59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*		nej	
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		nej, oprensningskriterierne er ikke opfyldt, da grundvandskoncentrationer i transektet har været over MCL 10 år efter, trods den oprindelig kraftig reduktion lige efter indkapsling af DNAPL	
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?		Ja, det viste sig af lerlaget under sandmagasinet har været et lag af TCE, og tilbagediffusionen fra det lag fungerer som en ny kilde. Derudover har den oprindelige karakterisering af fanen (før afværge) været for dårlig da boringernes filtersætning ikke nåede helt til bunden af magasinet (topppen af lerlaget) hvor de allerhøjeste koncentrationer er truffet	
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten		darcy flux 0,2 m/d,	
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Chapman and Parker Water Research 2005, vol 41			
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		0,5	Vi antager 99 % massefjernelse ved indkapsling
	Calculated gamma			
	Konceptuel model 			
	Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon			
	RIGTIG GOD ARTIKEL, nøgleemne: back diffusion fra lerlag under fanen, dårlig fane karakterisering før afværge. Årsagen til det dårlig fluxrespons er at der har ophobet sig ca. 3000 kg i lerlaget under fanen i sandmagasinet, som fungerer som en konstant langtidskilde			

	STAMDATA			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.			R7
2	Adresse		Cocoa, Florida	R7
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		ikke relevant	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		ikke relevant	
	FØR AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
5	Primært Forureningsstof		TCE	
6	sekundært forureningsstof		c-DCE, t-DCE, 1,1-DCE, VC	
7	Hvornår er forureningen sket?	Årstal	1960-1977	R7
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		Ja	
9	Forureningskildens geologi		sand og lerlinser	
10	Ligger den primære forureningsmasse i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s		
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s		
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	ukendt	
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mV; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		stor	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		stor	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		Ja	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år		
19	Redoxforhold			
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forurening (hvis magasinet ligger i horisontal forsættelse af kildeområdet, se figur til højre, skriv gerne en bemærkning i kommentarfeltet)	m		
	Fane			
		Enhed		
21	Geologi i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		SAND	
22	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*			
23	Forureningsmasse i magasinet	kg		
24	Længde af forureningsfanen	m		
25	Bredde af forureningsfanen	m		
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s		
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mV; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		stor	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)			
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?			
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år		
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	20 og 60	
33	Redoxforhold			
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*			
	AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
35	Afværgemetode-kilde		hydraulisk isolering af kilden	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)			
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?			
38	Afværgemetode-Fane			
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?			
	EFTER AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vandprøver	
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen			
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
44	Primært forureningsstof			
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s		
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg		
47	Er der fri fase?			
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)			
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?			
50	Redoxforhold efter afværge			
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?			
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen			
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg		
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s		
56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?			
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år		
58	Redoxforhold efter afværge			
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*			

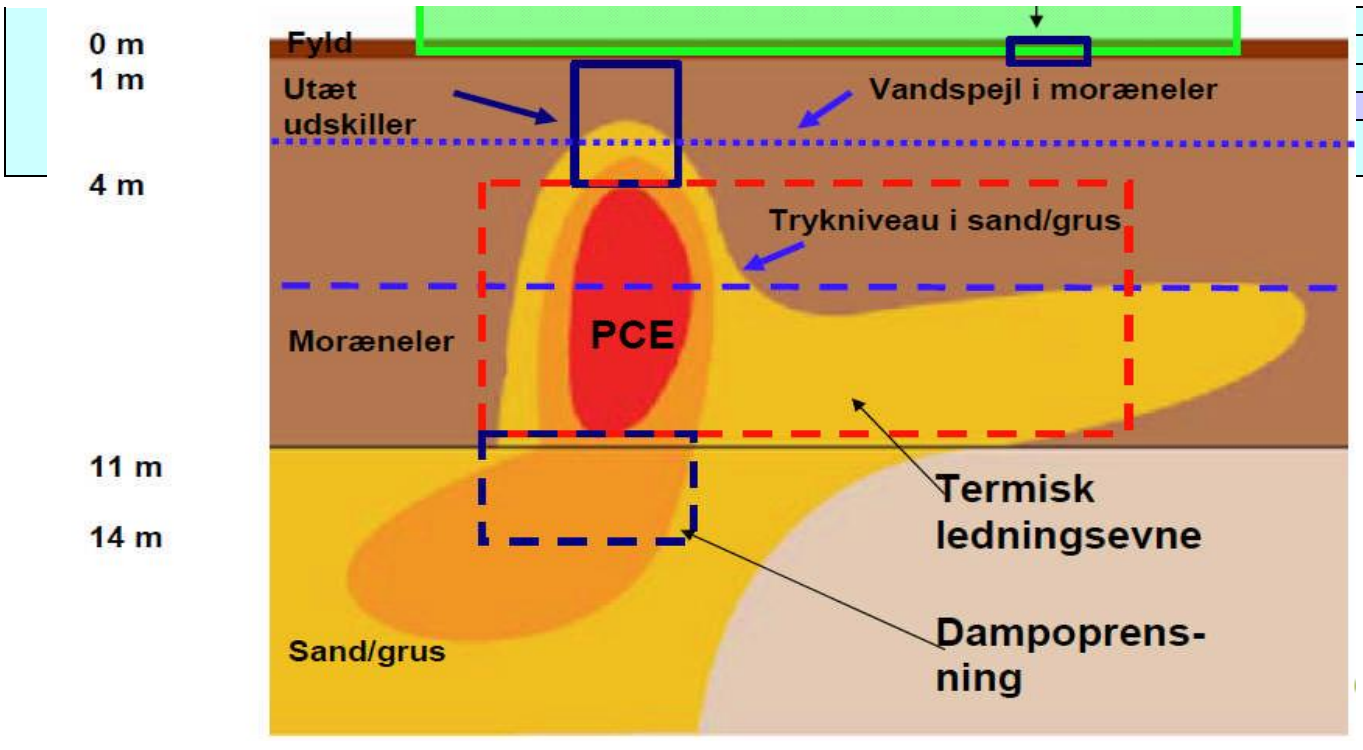
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		fluxen er reduceret med 90-99% men grundvandskoncentrationer er stadig overskredet pga. tilbagediffusion fra lerenheden i fanen...	
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?			
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten			
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1				
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		0,3	
	Calculated gamma		0,7	
	Konceptuel model			



Artikel illustrerer hvordan til trods for hvad der svarer til komplet massefjernelse af kilden, er effekten i det nedstrøms fane mindre pga. af tilbagediffusion fra ler linser

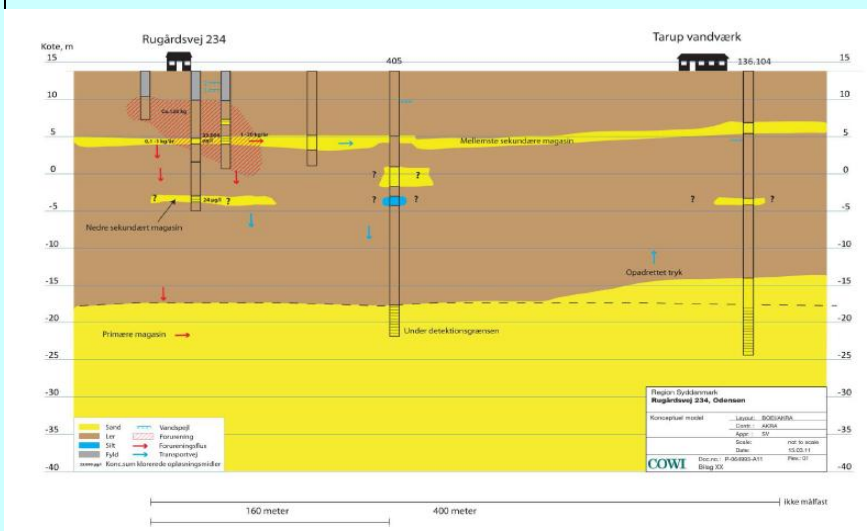
	STAMDATA			Angiv reference og evt. andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.		461-205	
2	Adresse		Knullen 8, Højby 5260 Odense S	
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		Niels Just	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		Henrik Engdal Steffensen	
	FØR AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
5	Primært forureningsstof		PCE	R1
6	sekundært forureningsstof		DCE, VC	R1
7	Hvornår er forureningen sket?	Årstal	1978 - 1991	R1
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		Ja	
9	Geologien i kildeområdet		Ler med enkelte sandlinser	R1
10	Ligger den primære forureningsmasse i mættet eller umættet zone?		Mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	5,5 x 10-9	R1
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (horisontal)	m/s	5,5 x 10-8	R1
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	4600	R2
14	Er der fri fase?		Ja	R1
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Lille	R1
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille	R2
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		Nej	R1
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år		
19	Redoxforhold		Ukendt	R1
	Fane			
		Enhed		
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområdet og det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forurening (skriv gerne en kommentar om hvis kilde og fane ligger i forskellige geologiske enheder)	m	0 m. Kilde ligger i moræneler, direkte ovenpå magasin af sand og grus.	R1
21	Geologi i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Mellem sand	
22	Hvad er gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		+	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	200	R2
24	Længde af forureningsfanen	m	900	R1
25	Bredde af forureningsfanen	m	80	R1
26	Hydraulisk ledningsevne i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	*4 x 10-4*	R1
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Lille	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	4200	R1
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	50	
33	Redoxforhold		Jern/mangan red.	R1
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		Nej	
	AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
35	Afværgemetode-kilde		ISTD og damp	R2
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		1-2-2008 - 31-1-2009, heraf drift 1-7 - 13-10	R2
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?		Produktionen på virksomheden ønskedes opretholdt, og metoden ville sikre oprensning i både lerlag over magasin og i magasin.	
38	Afværgemetode-fane		Monitering af spredning og naturlig nedbrydning	Monitering ikke defineret som en egentlig. afværge, da formålet primært er at følge spredningsudviklingen, herunder effekten af den gennemførte kildeoprensning. Men hvis monitering de kommende år viser at fanen 'skrumper' kan det være berettiget at opfatte den som en overvåget naturlig nedbrydning. Og hvis ikke, kan den levere en begrundelse for en mere aktiv indsats.
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen		Pågående	
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?		Fanen viste sig at være stabil, og med kildefjernelse vil fanen på sigt skrumpe	

	EFTER AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand- eller jordprøver, hvor er de taget osv.)?		Jordprøver udtaget i morænelerslaget ved slut oprensning. Vandprøver udtaget fra det underliggende primære magasin	R1, R2
42	Hvor mange prøverunder er der udført i kildezonen		4 runder i magasin (vandprøver) 1 runde jordprøver i lerlag	R1 og R2
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar på nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		nov-11	R1
44	Primært forureningsstof		PCE, DCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	nej	
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	7	Dertil nogle yderligere kg mere diffus forurening udenfor det oprensede kildeområde. R2
47	Er der fri fase?		Nej	
48	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *efter endt afværge (Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille	
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		Nej	
50	Redoxforhold efter afværge		Jern/mangan red.	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		Vandprøver fra et antal boringsfiltre placeret på langs og tværs i forureningsfanens udbredelsesområde, udvalgt blandt de mange udførte boringer	R1. Data kan i øvrigt ses i Geogis
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		4	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		nov-11	
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg	ikke beregnet, skønsmæssigt 5 kg	
55	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	Nej	
56	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Ja	
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år	Ja	250 gram/år. R1
58	Redoxforhold efter afværge		Jern/mangan red.	
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*		Nej	
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv reference og evt. andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		Oprensningen vurderes som en succes. Kildeområde i ler oprenset 99% og grundvandsmagasinet næsten tilsvarende.	Der blev ikke på forhånd defineret et målbart kvantificeret succeskriterie (så og så mange kg, eller %-vis reduktion). Grundlaget for stop af oprensning var en vurdering af balancen mellem input af ressourcer og output i form af massefjernelse pr 'produktionsdag', idet der ikke var nogen idé i en 100% fjernelse i oprensningsområdet, da der jo alligevel blev efterladt en diffus masse på måske 20 kg udenfor dette. Hvis der efter den intensive (og meget dyre oprensning) fortsat var behov for nedbringelse af fluxen, måtte der i givet fald andre metoder til (treatment train).
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger eller omstændigheder, der har haft betydning for projektet?		Der blev under etableringen af ISTD-boringerne påtruffet yderligere hot spots lige uden for det planlagte oprensningsområde, der derfor blev udvidet.	R2. Som tilfældet var ved Fladhøjvej, Rødekro, foregik samtidig med afværgeforanstaltningen en undersøgelse, der skulle afdække forureningsspredningen, denne er fortsat efterfølgende og afsluttes forår 2012. Optimalt set skulle rækkefølgen være omvendt, så spredningsundersøgelsen kunne præcisere behovet for oprensning, og dermed indgå som en del af grundlaget for fastlæggelse af oprensningskriterierne.
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten		Afværgen blev gennemført med virksomheden i drift og under særdeles vanskelige udførselsmæssige forhold.	Lokaliteten - og forureningsfanen - ligger midt imellem 3 vandværkers kildefelter, herunder et af Odense Vandforsynings største. Man har efterfølgende omlagt indvindingen til udelukkende at ske fra dybe tertiære lag i forhold til tidligere, hvor man også indvandt fra øvre kvartære lag.
68	VEDHÆFT GERNE EN KONCEPTUEL MODEL/TEGNING AF LOKALITETEN			
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Undersøgelse af forureningsspredning i jord og grundvand fra tidligere tøjrenseri på Knullen 8, Højby 5260 Odense. April 2012. NIRAS og Region Syddanmark.			
R2	Oprensning af jordforurening. Termisk behandling af jordforurening (damp og termisk ledningsevne). Erhvervsrenseri, Knullen 8, Odense. Dokumentationsrapport. NIRAS og Region Syddanmark. August 2010.			
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Beregnet gamma		M/Mo	0,01
	Beregnet gamma		J/jo	0,05952381
	Konceptuel model		*gamma*	*0,562611202*


0 m
1 m
4 m
11 m
14 m
Fyld
Utæt udskiller
Vandspejl i moræneler
Trykniveau i sand/grus
Moræneler
PCE
Termisk ledningsevne
Dampoprens-ning
Sand/grus

A	B	C	D	E	F	G
	STAMDATA			Angiv reference og evt. andre kommentarer	*Andre magasiner*	Angiv reference og evt. andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.		461-00169			
2	Adresse		Rugårdsvej 238			
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		Region Syddanmark, Ole Mikkelsen			
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		COWI, Lars Nissen			
	FØR AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer		
5	Primært forureningsstof		cDCE	R3		
6	sekundært forureningsstof		TCE og Vinylklorid	R3		
7	Hvornår er forureningen sket?	Årstal	1951-1989	R1, driftsperiode maskinfabrik 1951-ca. 1989		
	Kilde					
		Enhed				
8	Er området befæstet/bebygget		Ja			
9	Geologien i kildeområdet		1-2 meter fyld, 30-35 m moræneler med indlejring af smeltevandsaflejringer af sand, silt og ler. Smeltevandssand I 1994 er der udført en opgravning af olie- og TCE forurenet jord. I hotspot for TCE forurening blev der gravet til 8 m u.t., som er retableret med grusfyld.	R2. Mere detaljeret geologisk beskrivelse kan ses i tabel 2.2 /R2/. Magasinforhold: Øvre sekundære magasin: 3-6,5 m u.t. Mellemste sekundære magasin: 10-15 m u.t. Nedre sekundære magasin: 16-20 m u.t. Primære magasin: 33 m u.t.		
10	Ligger den primære forureningsmasse i mættet eller umættet zone?		Mættet			
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	1 *10^{-8}	R1, Værdi for moræneler		
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (horisontal)	m/s				
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	60-120	R1, Beregnet som sum klorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter (kg)		
14	Er der fri fase?		?	R1, Der er ikke konstateret fri fase i forbindelse med feltarbejde på ejendommen		
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Stor	Overordnet set er kildeområdet beliggende i moræneler. Kildeområdet dækker henover det øvre sekundære magasin		
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille	På baggrund af analyser i R1		
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		Der er beregnet en forureningsflux			
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år	75-720 g cDCE/år	Beregnet vertikal stofflux fra kildeområdet til det primære magasin, R3		
19	Redoxforhold		Reducerede forhold med indhold af opløst jern og metan	R2		
	Fane					
		Enhed			F	G
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområdet og det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forurening (skriv gerne en kommentar om hvis kilde og fane ligger i forskellige geologiske enheder)	m	0	Der er påvist forhøjet PID helt ned til det mellemste sekundære magasin, hvor den væsentligste horisontale forureningsspredning sker		
21	Geologi i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Øvre Sekundære magasin: Tynde vandførende sandstriber i moræneler	R1. Den horisontale spredning i det øvre sekundære magasin er begrænset i ca. 10-20 meters afstand fra kildeområdet /R3/.	Mellemste sekundære magasin: sand og grus (flere steder som tynde sandlinser i moræneleren)	R1, Den væsentligste horisontale forureningsspredning sker i det mellemste sekundære magasin.
22	Hvad er gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		0,11	Nedadrettet gradient mellem øvre og mellemste sekundære magasin. beregnet udfra data fra B123, R1		
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	1-2	R3		
24	Længde af forureningsfanen	m	100	R3		
25	Bredde af forureningsfanen	m	25	R1, svarende til område, hvor forureningsindholdet > 100 µg/l		
26	Hydraulisk ledningsevne i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	6,53 *10^{-5}	R3, Beregnet i mellemste sekundære magasin		
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Stor	Stor forskel på mægtighed og geologi svingende fra grus til silt.		
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille			
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Nej	Der er ikke målt en forureningsflux. Der er beregnet en forureningsflux, men idet koncentrationerne i magasinet er meget svingende pga. igangværende afværge med SRD vil den beregnede forureningsflux afhænge af dette, se R3		
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	1200-19800	Beregnet ved forskellige scenarier, R3		
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	?			
33	Redoxforhold		Nitratreducerende	Udenfor kildeområdet		
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		Nej			
	AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer	*F*	*G*
35	Afværgemetode-kilde		Kilde ikke oprenset udover afværge i 1994, hvor der blev efterladt betydelig restforurening			
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)					
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?					
38	Afværgemetode-fane		Stimuleret reduktiv deklorering			
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen		Idet det er en form for afskæringsløsning og der endnu ikke er gjort noget i forhold til kildeområdet vil afværgen overfor fanen foresætte mange år endnu, hvis der ikke foretages andet.			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?		Pilotforsøg	R2. Det overordnede formål var at belyse anvendeligheden af stimuleret reduktiv deklorering som afværgeteknologi i forhold til danske lokaliteter		
	EFTER AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer		
	Kilde					
		Enhed				
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand- eller jordprøver, hvor er de taget osv.)?		Vandprøver			
42	Hvor mange prøverunder er der udført i kildezonen		Der er efter etablering af passiv system udført 11 prøvetagningsrunder siden marts 2007 til og med november 2011			
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar på nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		nov-11			
44	Primært forureningsstof		cDCE			
45	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	Ikke undersøgt			
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	Ikke ændret, afværgen har ikke været rettet mod kildeområdet			
47	Er der fri fase?		Stadig ikke påvist			
48	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *efter endt afværge (Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Afværge er ikke afsluttet			
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		Afværgen er ikke afsluttet			
50	Redoxforhold efter afværge		Redoxforhold er ikke stationære, idet de er påvirket af den tilsatte donor og afværgen ikke er endeligt afsluttet. I boring, der tidligere har været en del af behandlingsområdet (ved aktiv system) er redoxforholdene i dag, som før opstart af afværge.			
	Fane					
		Enhed			*F*	*G*
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		Vandprøver			
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		Der er efter etablering af passiv system udført 11 prøvetagningsrunder siden marts 2007 til og med november 2011			

53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		nov-11			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg	Ikke ændret, idet der hele tiden tilgår forureningsmasse fra den overliggende moræneler			
55	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	Nej			
56	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?					
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år				
58	Redoxforhold efter afværge		Redoxforholdene udenfor behandlingsområdet har ikke været påvirket af afværgen			
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*		Nej			
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv reference og evt. andre kommentarer		
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		Det har været muligt at stimulere den reduktive deklorering, men idet der ikke er lavet afværge overfor kildeområdet er der ikke tale om en egentlig oprensning, men derimod en form for afskæringsløsning.			
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger eller omstændigheder, der har haft betydning for projektet?					
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten		Regionen overvejer i øjeblikket om vi skal ændre strategien på lokaliteten og gøre noget over for kilden i stedet for at fortsætte SRD i årevis.			
68	VEDHÆFT GERNE EN KONCEPTUEL MODEL/TEGNING AF LOKALITETEN		Vedhæftet	R3		
	REFERENCER					
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra					
R1	Fyns Amt 2003: Forureningsundersøgelse og afværgeprogram, forurenet lokalitet nr. 461-169. Rugårdsvej 234-238, Odense. COWI, juli 2003.					
R2	Miljøstyrelsen 2006: Forundersøgelser til pilotprojekt om stimuleret reduktiv deklorering. Miljøprojekt nr. 1146.					
R3	Region Syddanmark 2011: Rugårdsvej 234 og 238 A-D, Odense. Fornyet risikovurdering overfor grundvand, COWI, august 2011.					
R4						
R5						
R6						
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON					
			1			



SRD i fanen som afskærende løsning, derfor ikke mulighed for at beregne masse reduktion, ingen data om ledningsevne. Der indhentes oplysninger om skønnet massefjernelse af opgravningen i 1994. Man kan godt beregne en gamma faktor ved at antage 0% masse fjernelse samt 0% flux reduktion... I så fald er gamma 1.	

SRD ikke i kilde men i fanen

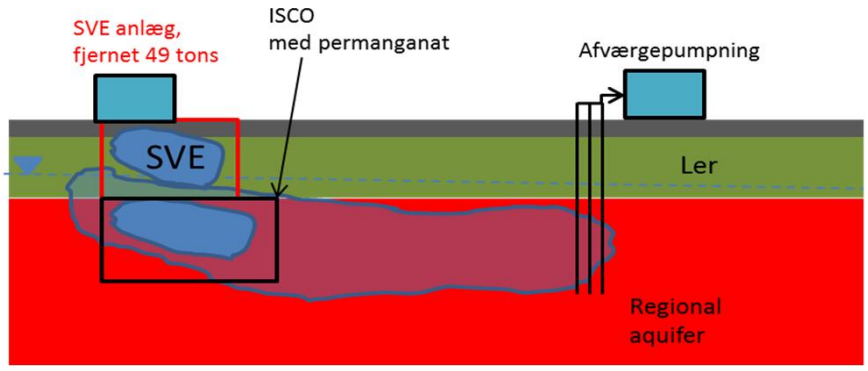
	STAMDATA			Angiv reference og evt. andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Gl. Kongevej 39, Vesterbro	
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		Reg H Henriette Kerrn Jespersen	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		Orbicon, Mette Broholm, Katerina Tsitonaki	
	FØR AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
5	Primært forureningsstof		TCE	
6	sekundært forureningsstof			
7	Hvornår er forureningen sket?	Årstal	ukendt	
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		Ja	
9	Geologien i kildeområdet		Ler med sandlinser	
10	Ligger den primære forureningsmasse i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	ukendt	
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (horisontal)	m/s	ukendt	
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	55	
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Stor	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Stor	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		nej	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år		beregnet
19	Redoxforhold		Aerobe	

	Fane			
		Enhed		
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområdet og det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forurening (skriv gerne en kommentar om hvis kilde og fane ligger i forskellige geologiske enheder)	m	1	
21	Geologi i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		kalk	
22	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		+	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	ukendt	
24	Længde af forureningsfanen	m	150-200	
25	Bredde af forureningsfanen	m	80	
26	Hydraulisk ledningsevne i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	5 x 10-5	
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, frakturer, m.v.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		Lille	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen *(Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		Lille	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		Nej	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år		beregnet
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	1	
33	Redoxforhold		nitrat/mange red	
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		Nej	
	AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
35	Afværgemetode-kilde		SRD med Geoprobe injektioner	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		2006-	
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?		Forureningsstoffer, afprøvning af SRD i ler, økonomi	
38	Afværgemetode-fane		Der er ikke udført afværge i fanen	
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?			
	EFTER AFVÆRGE			Angiv reference og evt. andre kommentarer
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand- eller jordprøver, hvor er de taget osv.)?		Vandprøver og jordprøver. Kerne	R5.
42	Hvor mange prøverunder er der udført i kildezonen		6	R5.
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar på nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*		Vand og kerner i april 2010	R5.
44	Primært forureningsstof		TCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s		Ikke undersøgt.
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	32	afværgeprogram
47	Er der fri fase?		ja	Ikke undersøgt.
48	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *efter endt afværge (Stor: forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesordener indenfor 1 meter i horisontalt plan og 0,5 meter i vertikalt plan)* Hvis datatætheden er utilstrækkelig til at bruge ovenstående kriteriet, angiv venligst jeres bedste vurdering af heterogeniteten.		stor	Baseret på vurdering.
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		300 g/år	beregnet
50	Redoxforhold efter afværge		Ukendt	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?			Der er ikke foretaget oprensning af fanen.

52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		Der moniteres årligt i fanen for at følge udviklingen efter oprensningen af kilden.	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg	14	Ikke beregnet
55	Har afværge forårsaget ændringer i den hydrauliske ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s		Ikke undersøgt
56	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin, der påvirkes af forureningen?		nej	En række boringer i fanen moniteres dog årligt - kan måske bruges til beregning af flux.
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år	800-4000	beregnet
58	Redoxforhold efter afværge			Ikke undersøgt
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*		Nej	
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv reference og evt. andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		Nej, ikke endnu, der er sket en massereduktion men SRD er en langsom proces, og senere beregninger har vist at det foregår langsommere end tidligere forventet pga. diffusionsbegrænsninger. Derudover er der endnu ikke udført 2. injektionsrunde, hvilket altid har været planen	
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger eller omstændigheder, der har haft betydning for projektet?		Ja, der sker dannelse af nedbrydningsprodukter i kilden som udvaskes til kalkmagasinet	
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten			
68	VEDHÆFT GERNE EN KONCEPTUEL MODEL/TEGNING AF LOKALITETEN			
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1				
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Beregnet gamma		-3,7	Antaget M/M0
	Beregnet gamma			J/J0=Jkildenær/J kildefjern
	Konceptuel model			
	Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon			
	Man kan ikke beregne flux før og efter ud af kilden fordi de beregnede fluxer baserer sig på gns masse. Man kan dog beregne fluxreduktion for det primære magasin, ved at antage af fluxen før svarede eks, til boring xx, upåvirket af oprensningen, mens flux efter svarer til B101 mv...I så fald antager vi at der ikke sker nedbrydning. Denne fluxberegning indeholder store usikkerheder.			

	STAMDATA			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Tuscon airport Arizona	
3	Region, Kontaktperson hos Regionen			
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren			
	FØR AFVÆRGE			**Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer**
5	Primært Forureningsstof		TCE	
6	sekundært forureningsstof		1,1 DCE	
7	Hvornår er forureningen sket?	Årstal		
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		ukendt	
9	Forureningskildens geologi			
10	Ligger den primære forureningsmasse i mættet eller umættet zone?		umættet	og mættet
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s	ukendt	
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s	ukendt	
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	ukendt	>49000 kg
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		lille	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)*		lille	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		nej	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år	nej	
19	Redoxforhold		ukendt	
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forurening (hvis magasinet ligger i horisontal forsættelse af kildeområdet, se figur til højre, skriv gerne en bemærkning i kommentarfeltet)	m		måske 0?
	Fane			
		Enhed		
21	Geologi i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		SAND	
22	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		+	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg	ukendt	
24	Længde af forureningsfanen	m	ca. 3000	
25	Bredde af forureningsfanen	m	ca. 300	
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	*ukendt*	
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		lille	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		lille	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år	730000	
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m	ukendt	
33	Redoxforhold		ukendt	
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		nej	
	AFVÆRGE			**Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer**
35	Afværgemetode-kilde		SVE og ISCO	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		1994-2006	
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?			
38	Afværgemetode-Fane			
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?			
	EFTER AFVÆRGE			**Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer**
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?			ekstraktion samt prøver
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen			
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
44	Primært forureningsstof			
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s	måske	
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg	ukendt	49000 kg fjernet
47	Er der fri fase?		nej	
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)			
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		nej	
50	Redoxforhold efter afværge		ukendt	
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?			der afværgepumpes i forureningsfanen. Det formodes at al flux fra området fanges i afværgepumpning. Der har vært afværgepumpning i 23 år (før og efter afværge)
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen		konstant i 23 år ved afværgepumpning	
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg		
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s		
56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?			

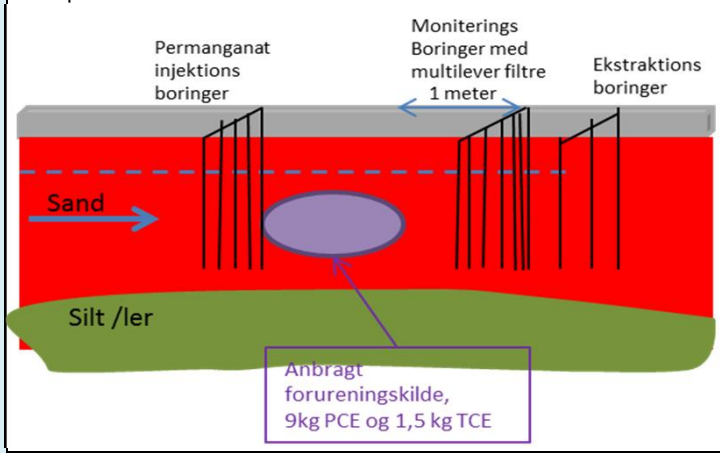
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år		
58	Redoxforhold efter afværge			
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*			
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar			
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?			
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten			
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Brusseau et al., 2011 JCH			
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		ikke relevant	
	Calculated gamma		ikke relevant	
	Konceptuel model			



Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon	
artiklen har anvendt tidserier fra afværgepumpning der dækker hele fanen over 23 år. Afværgepumpning har været i drift før og efter kildeoprensning. Kildeoprensningens effekt på forureningsflux kan derfor estimeres ved at sammenligne tidserierne fra afværgepumpning. Før kildeoprensnings har afværgepumpning nået en "steady state" condition hvor der fjernes ca. 2 kg/d. Efter SVE oprensning i kildeområdet er fluxen faldet til 0,8 kg/d og efter ISCO er det faldet til 0,1 kg/d. Dette er en reduktion på 89 %, hvor der uden kildeoprensning vil forventes en reduktion på ca. 40% pga. afværgepumpning alene.	

	STAMDATA			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
1	Lokalitetsnr.			
2	Adresse		Borden Ontario	
3	Region, Kontaktperson hos Regionen		ikke relevant	
4	Rådgiver, Kontaktperson hos rådgiveren		ikke relevant	
	FØR AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
5	Primært Forureningsstof		PCE	
6	sekundær forureningsstof		TCE	
7	Hvornår er forureningen sket?		6 år før afværge	
	Kilde			
		Enhed		
8	Er området befæstet/bebygget		nej	
9	Forureningskildens geologi		SAND	
10	Ligger den primære forurening i mættet eller umættet zone?		mættet	
11	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet (vertikal)	m/s		
12	Hydraulisk ledningsevne i kildeområdet horisontal	m/s	6,3 x 10-5	
13	Forureningsmasse i kildeområdet	kg	10,6	kendt masse
14	Er der fri fase?		Ja	
15	Heterogenitet af geologien i kildeområdet *(stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)*		lille	
16	Heterogenitet af forureningsfordeling i kildeområdet *(Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)*		lille	
17	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet?		Ja	
18	Hvad var fluxen ud af kildeområdet	g/år	1578	ca. 50% Pc og 50% TCE, ved forced gradient. Kun 635 g/år ved almen naturlig gradient.
19	Redoxforhold			
20	Vertikal afstand mellem det dybeste punkt af kildeområde og grundvandsmagasinet	m	0	
	Fane			
		Enhed		
21	Hvad er den gradienten fra kildeområdet til magasinet? A*ngiv (+) for nedadrettet, (-) for opadrettet*		0	
22	Geologi af det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		SAND	
23	Forureningsmasse i magasinet	kg		
24	Længde af forureningsfanen	m	>330 m	
25	Bredde af forureningsfanen	m	300	
26	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal)	m/s	6,3 x 10-5	
27	Heterogenitet af geologien i forureningsfanen (stor: blandet geologi med flere indkapslede enheder, fraktura, mv.; lille: Over 90 % kan beskrives som sand/ler eller grus)		lille	
28	Heterogenitet af forureningsfordeling i forureningsfanen (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		lille	
29	Er der målt forureningsflux i det første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
30	Hvad er forureningsfluxen i magasinet?	g/år		*estimeret*
32	Horisontal afstand fra kilden til kontrolpunktet i grundvandsmagasinet	m		
33	Redoxforhold		ukendt	formentlig aerob
34	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 21-33 i søjle F og G for dette magasin*		nej	
	AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
35	Afværgemetode-kilde		ISCO med permanganat ved recirkulering	
36	Hvor længe varede afværgeindsatsen i kilden? (angiv start og slut)		1,5 år	
37	Hvad var baggrunden for valg af denne afværgemetode i kildeområdet?			
38	Afværgemetode-Fane			
39	Hvor længe varede afværgeindsatsen i fanen			
40	Hvad var baggrunden for valg af denne metode i fanen?			
	EFTER AFVÆRGE			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
	Kilde			
		Enhed		
41	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vanprøver	
42	Hvor mange prøverunde er der udført i kildezonen			
43	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
44	Primært forureningsstof		PCE, TCE	
45	Har afværge forårsaget ændringer i ledningsevne?, Hvis ja, angiv den nye værdi	m/s		
46	Forureningsmasse i kildeområdet efter afværge	kg		*vi antager at indkapsling svarer til 100% fjernelse af massen*
47	Er der fri fase?		nej	
48	Heterogenitet af kildeområdet ift. forureningsfordeling efter afværge? (Stor: Forureningskoncentrationer varierer over 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan; Lille forureningskoncentrationer varierer med mindre end 2 størrelsesorden indenfor 1 meter i horisontal plan og 0,5 meter i vertikal plan)		lille	
49	Er der målt forureningsflux ud af kildeområdet efter afværge?		Ja	38 g/år ved naturlig gradient og 86 ved forceret gradient
50	Redoxforhold efter afværge			
	Fane			
		Enhed		
51	Hvordan er oprensningen dokumenteret (vand, elle jordprøver, hvor er de taget osv.)?		vandprøver i transekt, multileves samplers, jordprøver, mindst 120 jordkerner med 5 cm vertikal diskretisering	
52	Hvor mange prøverunde er der udført i fanen			
53	Angiv tidspunkt for den seneste monitering. *Svar nedenstående spørgsmål med resultater fra den seneste (monitering) (dage efter afværgestart)*			
54	Forureningsmasse i magasinet efter afværge	kg		
55	Hydraulisk Ledningsevnen i ovennævnte grundvandsmagasin (horisontal) q	m/s	1,9 x10-5	

56	Er der målt forureningsflux i den første forekommende grundvandsmagasin der påvirkes af forureningen?		Ja	
57	Hvad er fluxen i magasinet?	g/år		i 2000, 6 år efter, i 1997-99 (2 år efter indkapsling var fluxen
58	Redoxforhold efter afværge			
59	Er der målt flux i andre magasiner? *Hvis ja, udfyld venligst spørgsmål 51-58 i søjle F og G for dette magasin*		nej	
	PROJEKTETS EVALUERING			Angiv Reference, og evt. Andre kommentarer
65	Betragtes afværgen som en succes på den pågældende lokalitet? Er evt. oprensningskriterier opfyldt? Giv gerne et uddybende svar		JA	
66	Er der i løbet af projektet fremkommet nye oplysninger, eller omstændigheder der har haft betydning for projektet?			
67	Evt. kommentarer om projektet og lokaliteten			
	REFERENCER			
	Angiv venligst hvilke rapporter ovenstående data stammer fra			
R1	Thompson et al GrW and Remediation 2007			
R2				
R3				
R4				
R5				
R6				
	BEREGNINGER, FORBEHOLDT ORBICON			
	Calculated gamma		0,5	for PCE
	Calculated gamma		1,0	for TCE
	Konceptuel model			



Vores kommentarer, forbeholdt Orbicon	
Et feltforsøg hvor massen før/ efter er kendt, da forureningen er anbragt, og flux før og efter afværge er velkarakteriseret. Forceret flux giver en mindre usikker estimat af fluxen, og kan bruges til at måle effekt før og efter, dog vil fluxen formentlig være overstimeret ift. til den naturlige flux. På den anden side, kan usikkerheder beregnes og resultater er mindre sensitive af boringernes placering og	

REFERENCELISTE	
Brooks et al., 2008	Michael C. Brooks, A. Lynn Wood, Michael D. Annable, Kirk Hatfield, Jaehyun Cho, Charles Holbert, P. Suresh C. Rao, Carl G. Enfield, Kira Lynch, Richard E. Smith, Changes in contaminant mass discharge from DNAPL source mass depletion: Evaluation at two field sites, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 102, Issues 1–2, 14 November 2008, Pages 140-153, ISSN 0169-7722, 10.1016/j.jconhyd.2008.05.008.
Basu et al., 2006	Basu NB, Rao PS, Poyer IC, Annable MD, Hatfield K., Flux-based assessment at a manufacturing site contaminated with trichloroethylene.Journal of Contaminant Hydrology, Volume 86, Issues 1-2, 30 June 2006, Pages 105-27.
Kao & Wang 2001	Field investigation of the natural attenuation an intrinsic biodegradiation rates at an underground storage tank site. Environmental Geology 40 (4-5), Februar 2001, Springer-Verlag.
Chapman and Parker, 2005	Chapman, S. W., and B. L. Parker (2005), Plume persistence due to aquitard back diffusion following dense nonaqueous phase liquid source removal or isolation, Water Resour. Res., 41, W12411, doi:10.1029/2005WR004224.
Fjordbøge 2011	Fjordbøge Sidelmann Annika, Source zone remediation by zero valent iron technloologies, PhD Thesis, DTU Environment, Department of Environmental Engineering, Technical Universityof Denmark, ISBN 978-87-92654-33-5, April 2011,
Semprini et al., 1995	Lewis Semprini, Peter K. Kitanidis, Don H. Kampbell, John T. Wilson, Anaerobic transformation of chlorinated aliphatic hydrocarbones in a sand aquifer based on spatial chemical distributions, Water resources, volume 31, No. 4, Pages 1051-1062, April 1995.
Barbaro & Neupane, 2006	Barbaro, J. R. and Neupane, P. P. (2006), Use of Plume Mapping Data to Estimate Chlorinated Solvent Mass Loss. Ground Water Monitoring & Remediation, 26: 115–127. doi: 10.1111/j.1745-6592.2006.00117.x
Bockelmann et al., 2001	Alexander Bockelmann, Thomas Ptak, Georg Teutsch, An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 53, Issues 3–4, 15 December 2001, Pages 429-453, ISSN 0169-7722, 10.1016/S0169-7722(01)00177-2.
Brusseau et al., 2011	M.L. Brusseau, J. Hatton, W. DiGuiseppi, Assessing the impact of source-zone remediation efforts at the contaminant-plume scale through analysis of contaminant mass discharge, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 126, Issues 3–4, 1 November 2011, Pages 130-139, ISSN 0169-7722, 10.1016/j.jconhyd.2011.08.003.
NST 2011	Fluxberegninger projekt, Rosenkæret 17,2860 Søborg, Resume og Datablad
Thomson et al 2007	Permanganate Treatment of an emplaced DNAPL source, Ground Water monitoring and Remediation, 27, Fall 2007, p 74-85

Sammenhænge mellem forureningsmasse og –flux for grundvandstruende forureninger

Når vi i jordforureningssager iværksætter oprensninger og afværgeløsninger, er det ofte ud fra antagelsen om, at en reduktion i forureningens masse i kildeområdet vil medfører en tilsvarende reduktion i den forurening der pr. tidsenhed (forureningsfluxen) siver ned i grundvandet. Det har imidlertid vist sig, at der sjældent er en lineær sammenhæng mellem disse størrelser, hvilket betyder, at det kan være meget vanskeligt at forudse den gavnende effekt på grundvandet efter en forurening er reduceret. Rapporten ser nærmere på disse forhold og kommer med anbefalinger til dokumentation af forureningsflux og – masse før og efter en oprensning/afværge.

Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www. mst.dk