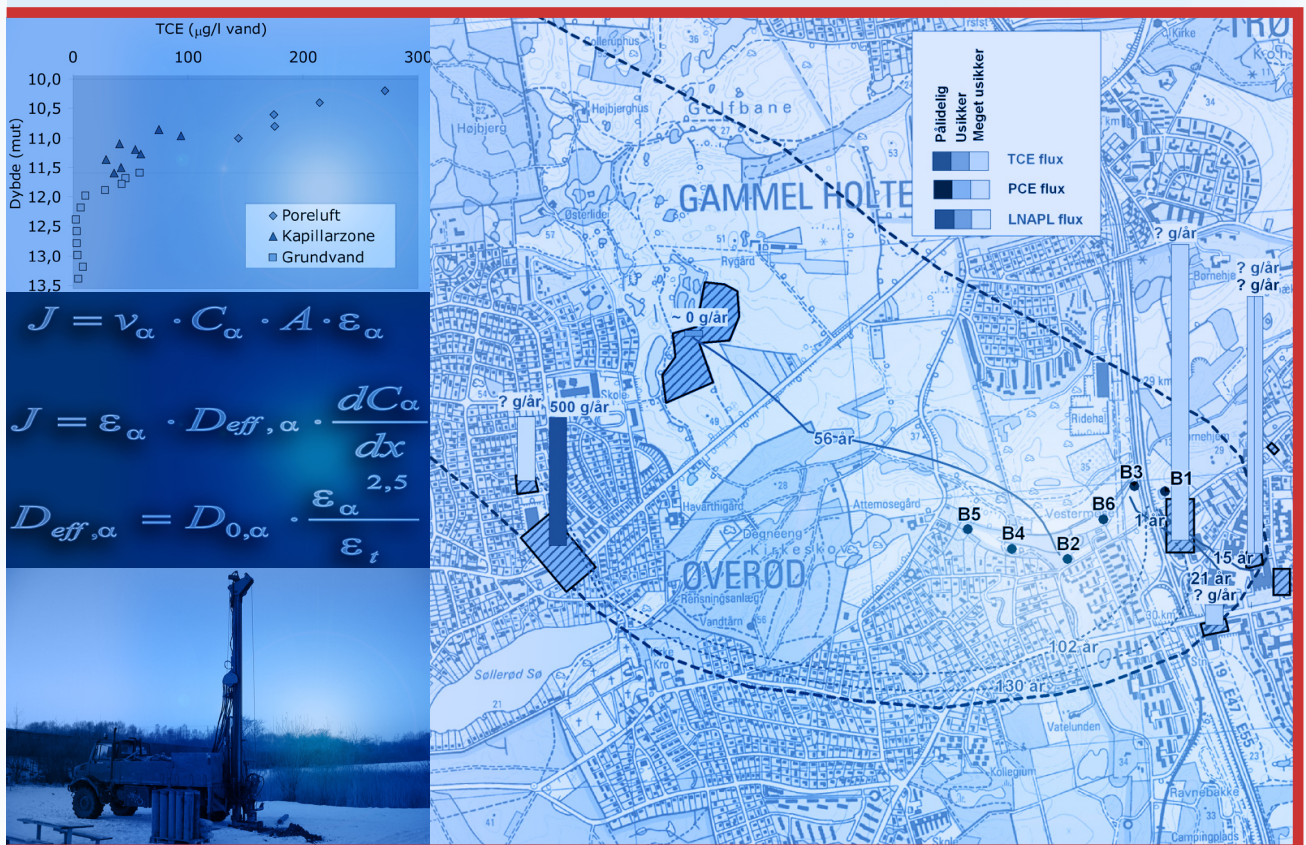


Risikovurdering af punktkilder

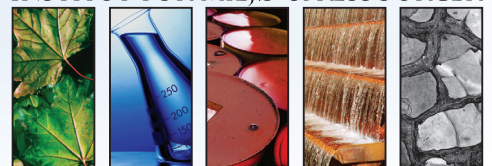
Nina Tuxen, Mads Troldborg, Philip J. Binning, Peter Kjeldsen og Poul L. Bjerg



$$J = v_{\alpha} \cdot C_{\alpha} \cdot A \cdot \varepsilon_{\alpha}$$

$$J = \varepsilon_{\alpha} \cdot D_{eff, \alpha} \cdot \frac{dC_{\alpha}}{dx}$$

$$D_{eff, \alpha} = D_{0, \alpha} \cdot \frac{\varepsilon_{\alpha}^{2,5}}{\varepsilon_t}$$



Titel: Risikovurdering af punktkilder

Forfattere: Nina Tuxen, Mads Troldborg,
Philip J. Binning, Peter Kjeldsen og Poul L. Bjerg

Udgivelsesår: 2006

Tryk: Vester Kopi, DTU

Font: Verdana

Grafik: Forfatterne og Torben Dolin

Omslag: Julie Camilla Middleton

ISBN nummer: 87-91855-20-9

Publikationen kan downloades på
sara.er.dtu.dk

Forord

Et samarbejdsprojekt

Resultaterne, som er beskrevet i denne publikation, udspringer af et samarbejdsprojekt mellem Københavns Amt og Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet. Projektet er forløbet i perioden 2005-2006.

Der er arbejdet med en række problemstillinger omkring risikovurdering og forurening fra punktkilder på både lokal skala og oplandsskala. Vi har ønsket at relatere undersøgelserne til en konkret feltlokalitet i Københavns Amt for at sikre relevans af resultaterne, men det overordnede mål har været at etablere resultater af generel værdi for risikovurdering af punktkilder.

Arbejdsgruppen, som i samarbejde med os har planlagt projektet, har bestået af:

Fra Københavns Amt:

- Carsten Bagge Jensen
- Hanne Kristensen
- Jesper Elkjær Christensen
- Kristine M. Pollas
- Johanne A. Andersen

Fra Søllerød Kommune:

- Jeanette Toftdal

Vi takker for projektgruppens aktive deltagelse og løbende interesse for de opnåede resultater.

Aktiviteterne har været centreret omkring en feltlokalitet – Rundforbivej 176 – Birkegården i Nærum. Birkegården huser i dag materielgård og brandvæsen i Søllerød Kommune.

Der rettes en særlig tak til Søllerød Kommune og alle medarbejdere på Birkegården for deres velvillighed og fleksibilitet i forbindelse med feltarbejdet.



Vil du vide mere

Detaljerede resultater fra samarbejdsprojektet er publiceret i form af en række tekniske notater, som er tilgængelige på sara.er.dtu.dk

Der findes en oversigt over alle notater bagerst i denne publikation.

Denne publikation kan med fordel bruges til at identificere de notater, som du finder interessante.

Målgruppe og indhold

Målgruppen for publikationen er fremtidige medarbejdere i Regioner og Miljøcentre, som kommer til at arbejde med risikovurdering. Vi håber, at også medarbejdere i rådgivende ingeniørfirmaer kan finde inspiration til løsning af opgaver.

Indholdet i denne publikation er struktureret omkring en række hovedtemaer. De enkelte temaer kan læses separat, hvis læseren er interesseret i særlige emner. Der er fokuseret på at give overblik og fremdrage væsentlige konklusioner.

Der ligger detaljerede notater som grundlag for beskrivelsen af de enkelte temaer. Disse notater er anført bagerst i notatet.

Det skal understreges, at de fremsatte synspunkter og konklusioner, er forfatterens ansvar.

God læselyst!

Poul L. Bjerg

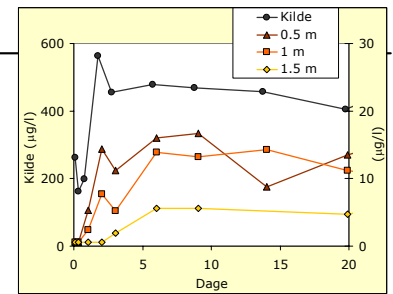
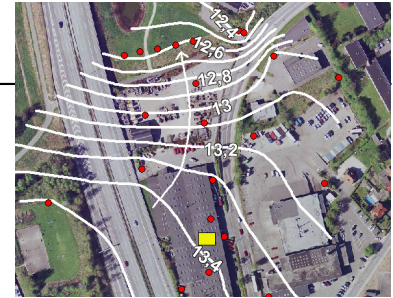
Lyngby, december 2006

Deltagere i samarbejdsprojektet fra Institut for Miljø & Ressourcer

- Nina Tuxen (Projektleder)
- Mads Troldborg
- Julie L.L. Kofoed
- Kristian D. Raun
- Philip J. Binning
- Peter Kjeldsen
- Poul L. Bjerg (Projektansvarlig)

Indhold

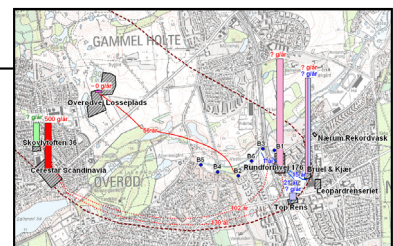
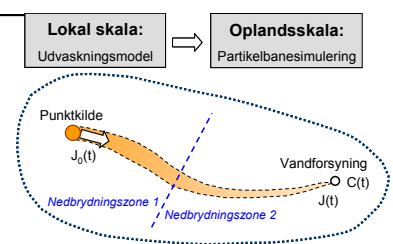
- Indledning.....3
Baggrunden for samarbejdsprojektet og præsentation af projektemner
- Rundforbivej 176.....4
Præsentation af feltlokalitet: historik, geologi, hydrogeologi og redoxforhold
- Nærum vandværk og opland.....5
Præsentation af værkstedsområde: indvinding, forurening og afværgeforanstaltninger
- Processer i poreluft og grundvand.....6
Klorerede opløsningsmidlers egenskaber, advektion, diffusion og stofoverførsel fra poreluft til grundvand
- Risikovurdering i umættet zone.....8
Gassky, grundvandsforurening og fluxberegning
- Forureningsflux i grundvand.....10
Forureningsflux som parameter i risikovurdering og metoder til fluxbestemmelse
- Usikkerheder ved forureningsflux.....12
Afgrænsning af fane, koncentrationsvariationer og hydraulisk ledningsevne
- Værktøjer til risikovurdering og prioritering på oplandsskala.....14
Skala for vurdering, udvaskningsmodel og partikelbanesimulering
- Kildeopsporing – Nærum Vandværk..16
Elementer i kildeopsporing
- Konceptuel model.....18
Spredning af forurening og dynamisk udvikling
- Prioritering og afværge.....19
Vurderinger, der indgår i prioriteringsovervejelser
- Fremtidige udfordringer.....20
- Vil du vide mere.....21



Fluxberegning

$$J_{total} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \cdot K_i \cdot \frac{dh}{dl}$$

J_{total} : Total flux (g/år)
 A_i : Areal af gridcelle i (m²)
 C_i : Koncentration (g/m³)
 K_i : Hydraulisk ledningsevne (m/år)
 dh/dl : Hydraulisk gradient
 n : Antal gridceller



Indledning

Baggrund

Risikovurdering af punktkilder er meget afgørende for beslutninger vedrørende oprensning af en forurenede lokalitet.

Gennemsigtighed i beslutningsprocessen er et krav for at sikre, at beslutninger kan forsvares og forklares. Det gælder ikke mindst, fordi der er tale om betydelige omkostninger, som rækker langt ud i fremtiden. Omkostningerne til drift af afværgeanlæg udgør i Københavns Amt 20 % af midlerne, som er anvendt på området.

Risikovurdering af punktkilder foretages på forskellige skalaer. Vi taler om en lokal skala, som fx er vurdering af en forureningskildes påvirkning af indeklima for bygninger på grunden eller påvirkning af arealanvendelse ved jordforurening.

Ved risiko for grundvandsforurening kan risikoen også vurderes på det lokale niveau fx om et sekundært grundvandsmagasin opfylder grundvandskvalitetskriterierne.

Drivkraften for en indsats er dog ofte påvirkning af vandressourcen og i sidste instans påvirkning af en vandforsyning på oplandsskala.

Det kan også være påvirkning og interaktion med vandløb, søer og have.

Projektets formål

Rammen for denne publikation er risikovurdering på lokal- og oplandsskalaer. Vores mål har været at sammenfatte den viden som er opbygget gennem et konkret samarbejdsprojekt med Københavns Amt. Vi har ønsket at se de opnåede resultater i et større perspektiv, så konklusioner og anbefalinger kan være inspiration for de kommende Regioner og Miljøcentre, som i fremtiden vil være ansvarlige for området.

Projektemner

Spredning af forurening i umættet zone. Projektets formål er at belyse den laterale forureningsspredning i poreluft, herunder at opnå forståelse for faktorer af betydning for poreluft- og porevandskoncentrationerne. Stofoverførslen fra poreluften til grundvandszonen via den kapillære zone er også et væsentligt emne. Området er nyt, så der er behov for udvikling af nye metoder til bl.a. prøvetagning

Metoder til bestemmelse af forureningsflux i grundvand ved en punktkilde. Projektets formål er at udvikle en eller flere metoder til bestemmelse af forureningsfluxe nedstrøms en punktkilde. Metoden skal sigte mod permeable akviferer og praktisk anvendelighed. Fordele, ulemper og usikkerheder ved metoderne skal belyses.

Risikovurdering på oplandsskala. Projektets formål er at udvikle et modelkoncept, som kan give en troværdig sammenhæng mellem forureningsflux fra punktkilder og resulterende koncentrationer ved en kildeplads eller i en indvindingsboring. Alle undersøgelser vil blive relateret til et specifikt grundvandsopland, så der som en del af delprojektet opnås et konkret resultat for dette opland.

Indhold og afgrænsning

Indholdet af samarbejdsprojektet er fokuseret omkring påvirkning af grundvand med klorerede opløsningsmidler. Der er arbejdet med 3 hovedproblemstillinger som beskrevet ovenover.

Vi har ikke konkret arbejdet med risikovurdering i forhold til indeklima. Afværgeteknologier er heller ikke emnet for dette projekt.

Der er i et søsterprojekt arbejdet med anaerob deklorering af klorerede opløsningsmidler og oprensning af lavpermeable aflejringer.

- Der er arbejdet med 3 problemstillinger omkring risikovurdering af grundvand knyttet til en forurenede lokalitet i Københavns Amt
- Resultaterne har relevans for den konkrete lokalitet og opland
- Målet har også været at etablere resultater af generel værdi for risikovurdering af grundvand

Rundforbivej 176

Case

Efter en screening af en række lokaliteter i Københavns Amt, blev Rundforbivej 176 i Nærum, Søllerød Kommune, valgt som case-lokalitet.

Historie

På lokaliteten har der været en maskinfabrik, der har anvendt klorerede opløsningsmidler. Den historiske redegørelse tyder på, at hovedkilden til forureningen er et dyppekar placeret i fabriksbygningen. Den primære forurening har været triklorethen (TCE). TCE kan spredes ved transport vertikalt på grund af dets høje densitet i forhold til vand. I perioden fra etablering af fabriksbygningen i 1963 til lukningen af fabrikken i 1973 sker der en stor udbygning af infrastrukturen i området. Det fremgår fx af flybillede fra perioden, hvor den øgede befæstningsgrad er markant.

Geologi og redox

Geologien er karakteriseret ved et sekundært sandmagasin, der kun er beskyttet af et mindre dæklag af moræneler. Strømningen er nordøstlig. Der er betydelige variationer i den hydrauliske ledningsevne. Det primære magasin i området er et kalkmagasin, der nogen steder er beskyttet af moræneler.

Der er aerobe forhold i den øvre del af det sekundære magasin under Rundforbivej 176. Forventningen er, at der i større dybder kan være mere reducerede forhold. Klorerede opløsningsmidler kræver bl.a. meget reducerede forhold, for at kunne nedbrydes.

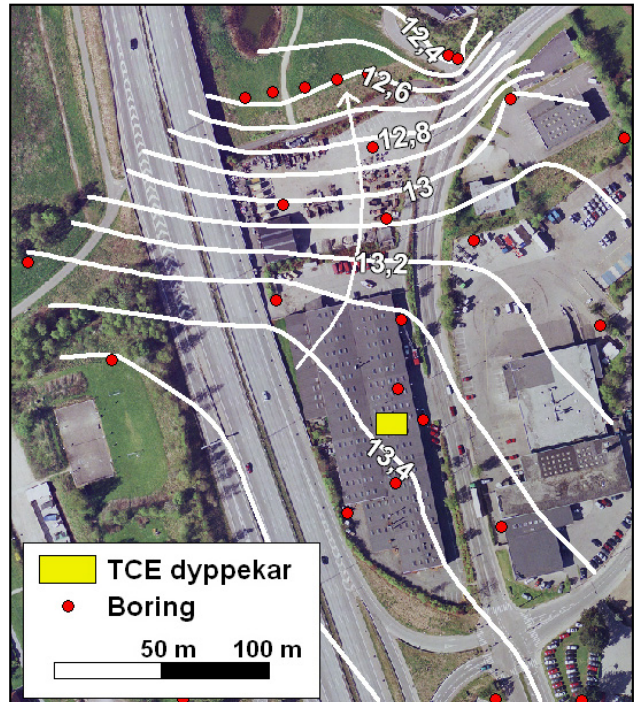
Væsentlige årstal

1953-1973: Maskinfabrik på lokaliteten

1963: Bygning på ca. 5000 m² etableres. Tidligere var der kun en landbrugsejendom

1963-72: Sandsynligt tidsrum for spildet fra et utæt TCE dyppekar.

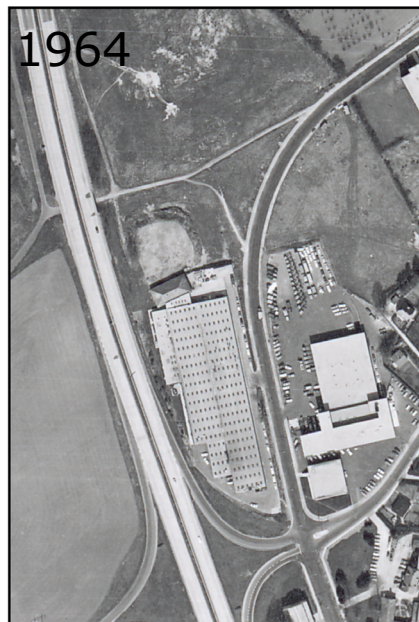
1973-nu: Arealet og bygningerne benyttes til materielgård og brandstation for Søllerød Kommune.



Potentialekort i det sekundære magasin for området omkring Rundforbivej 176. Pejledata er fra marts 2006. Strømningsretningen er nordøstlig.



1954



1964



2004

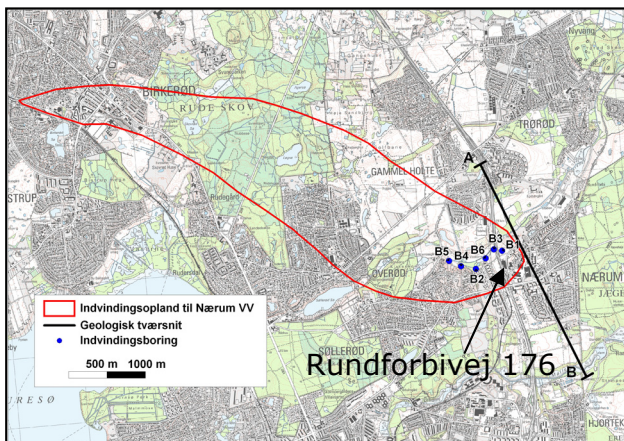
Flybilleder fra 1954, 1964 og 2004. I 1954 er der kun den oprindelige landbrugsejendom på lokaliteten. I 1964 er den nuværende bygning blevet etableret. Den væsentligste forskel mellem forholdene i 1964 og i dag er en generel øget befæstningsgrad.

Nærum Vandværk og opland

Opland til Nærum Vandværk

Der skal opstilles et modelkoncept til risikovurdering af punktkilder, som skal afprøves på et udvalgt værkstedsområde, der er beliggende i Søllerød Kommune i den nordøstlige del af Københavns Amt i et område med særlige drikkevandsinteresser.

Værkstedsområdet dækker et areal på knap 65 km² og omfatter hele indvindingsoplandet til Nærum Vandværk samt Nærum Industriområde, der er beliggende øst for indvindingsoplandet. Det viste indvindingsopland er baseret på et potentialebillede for det primære magasin fra 1999 samt simuleringer med en grundvandsmodel over området.



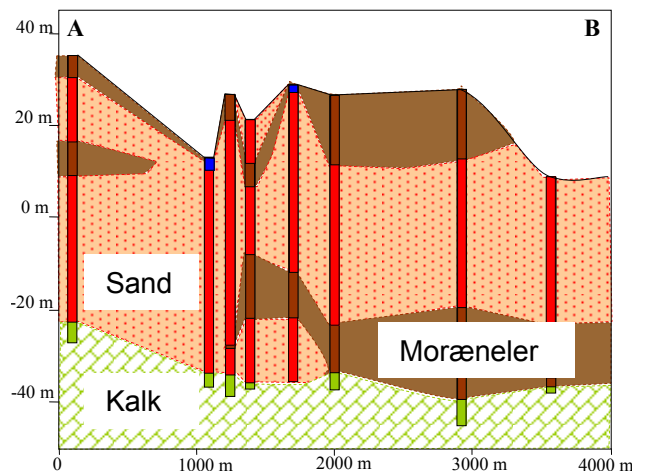
Figuren viser oplandet til Nærum Vandværk. Det markerede geologiske snit er vist på figuren til højre. Oplandsgrænsen for indvindingsoplandet skærer i gennem Nærum industri-kvarter. Afrænsningen er afhængig af indvindingen på Nærum Vandværk.

Nærum Vandværk

Vandværket er et typisk dansk vandværk med simpel vandbehandling med luftning og filtrering. Indvinding sker fra en række boringer placeret i oplandets østlige ende

Før TCE-forureningen blev konstateret i 1987 blev der indvundet knap 1.300.000 m³/år fra vandværkets 6 indvindingsboringer (B1 – B6). Efter der blev konstateret TCE ved vandværket, er oppumpningen i de enkelte boringer ændret, og den årlige totale ydelse reduceret til ca. 850.000 m³/år.

Indvindingen styrer strømningsforholdene i det primære magasin.



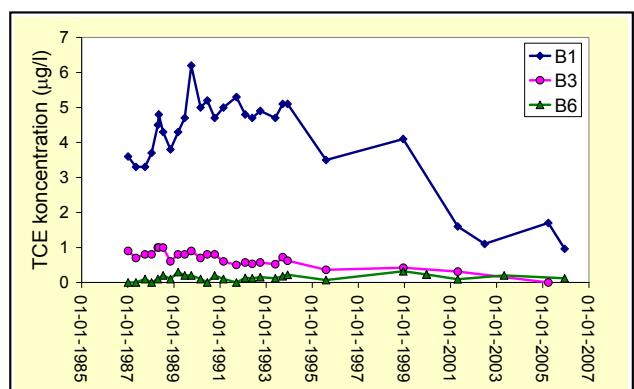
Geologisk profil som er repræsentativ for geologien ved Rundforbivej 176. Det nedre lag af moræneler træffes ikke i hele området. Det sekundære magasin består af smeltevandssand, mens det primære magasin er kalk.

Forurening og afværg

I 1997 blev der iværksat en afværg i det sekundære magasin i form af en række afværgboringer øst for Rundforbivej 176.

Formålet var bl.a. at forebygge, at en række andre kendte forureningskilder i området skulle føre til forurening af Nærum Vandværk. Vandet behandles i et afværganlæg inden det ledes til et vandløb kaldet Kighanerenden.

Oppumpningen har varieret over tiden og er i dag ca. 250.000 m³/år. Oppumpningen styrer sammen med indvindingen på Nærum Vandværk strømningsforholdene i det sekundære grundvandsmagasin. Oppumpningen har ikke afgørende betydning for strømningsforholdene i det primære kalkmagasin.



Figuren viser koncentrationen af TCE i 3 indvindingsboringer ved Nærum Vandværk. Efter at forureningen blev konstateret ændrede vandværket indvindingsstrategi. De observerede koncentrationer svarer til en forureningsflux på 800-1400 g/år. Kravet til drikkevand for TCE er 1 µg/l.

Processer i poreluft og grundvand

Hvilke er vigtigst?

Klorerede opløsningsmidler er flygtige, organiske stoffer med relativ høj vandopløselighed. Stofferne er mobile, da de kun i begrænset omfang sorberer til jordfasen (udtrykt ved lav $\log K_{ow}$).

Under aerobe forhold (som er observeret ved Rundforbivej) vil klorerede opløsningsmidler være unedbrydelige. Under områder, hvor det øverste jordlag er tæt vil der ingen udvaskning være. Det kan enten forekomme i områder med stor befæstningsgrad (som er observeret ved Rundforbivej) eller i områder, hvor det øverste jordlag er vandmættet ler.

De vigtigste processer er under sådanne forhold advektion (herunder dispersion) og diffusion. Forekommer der fri fase, kan der desuden ske en vertikal transport betinget af tyngdekraften, da klorerede opløsningsmidler er karakteriseret som DNAPL's (Dense Non Aqueous Phase Liquids).

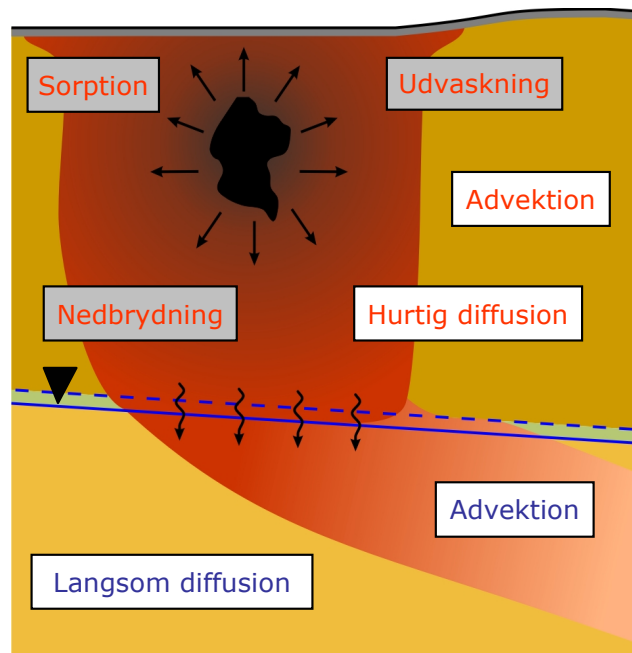
Fysisk-kemiske konstanter for TCE (ved 25 °C)

	Densitet (kg/l)	Damptryk (atm)	Log K_{ow}	Vandopløselighed (mg/l)
TCE	1,468	0,0964	2,53	1400

Advektion

Advektion flytter massecentrum af forureningsstof. Den drivende kraft er trykgradienter – enten i poreluften eller i grundvandet. Stofferne vil dog også spredes fra massecentrum pga. dispersion.

Hastigheden af advektionen er bl.a. afhængig af jordens permeabilitet. I finkornede aflejringer vil permeabiliteten være lille, mens den i grovkornede eller opsprækkede aflejringer vil være stor.



Vigtige processer, der styrer transport i poreluft og grundvand. Området ved Rundforbivej 176 er befæstet, indholdet af organisk kulstof er lavt og der er aerobe forhold – derfor er de gråfarvede processer ikke vigtige.

Diffusion

Diffusion spreder forurening fra massecentrum pga. koncentrationsgradienter, som er den drivende kraft.

Den flux, der kan spredes pga. diffusion er udover koncentrationsgradienten afhængig af den effektive diffusionskoefficient. Den effektive diffusionskoefficient er reduceret i forhold til den frie diffusionskoefficient (som er ca. en faktor 10.000 højere i luft end i vand).

Reduktionsfaktoren kaldes også tortuositeten og skyldes, at der er tale om porøse medier, hvor diffusionsvejen bliver længere, da stoffet skal udenom fx sandkorn. I poreluft skal stoffet endvidere udenom porevand.

Flux-ligninger

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

Følgende ligninger beskriver fluxen for forskellige processer:

$$\text{Advektion: } J = v_{\alpha} \cdot C_{\alpha} \cdot A \cdot \varepsilon_{\alpha}$$

$$\text{Diffusion: } J = \varepsilon_{\alpha} \cdot D_{\text{eff}, \alpha} \cdot \frac{dC_{\alpha}}{dx}$$

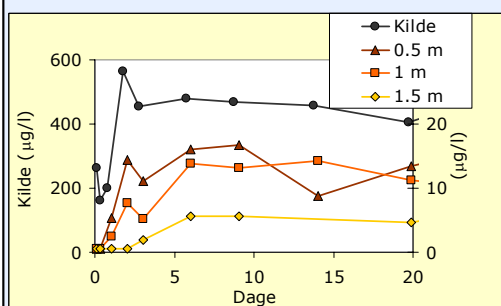
$$\text{hvor } D_{\text{eff}, \alpha} = D_{0, \alpha} \cdot \frac{\varepsilon_{\alpha}^{2,5}}{\varepsilon_t} = D_{0, \alpha} \cdot \tau$$

Ofte måles eller beregnes fluxen gennem et kontrolplan, der dækker hele forureningen. I andre tilfælde kan fluxen opgives pr. arealenhed.

- J: Flux (g/år)
- α : Medie (jord/vand)
- v_{α} : Porevandshastighed (m/år)
- C_{α} : Koncentration (g/m³)
- A: Areal (m²)
- $D_{\text{eff}, \alpha}$: Effektiv diffusionskoefficient (m²/år)
- ε_{α} : Luft-/vandfyldt porøsitet
- ε_t : Total porøsitet
- $D_{0, \alpha}$: Fri diffusionskoefficient (m²/år)
- τ : Tortuositet

Sporstofundersøgelse i umættet zone

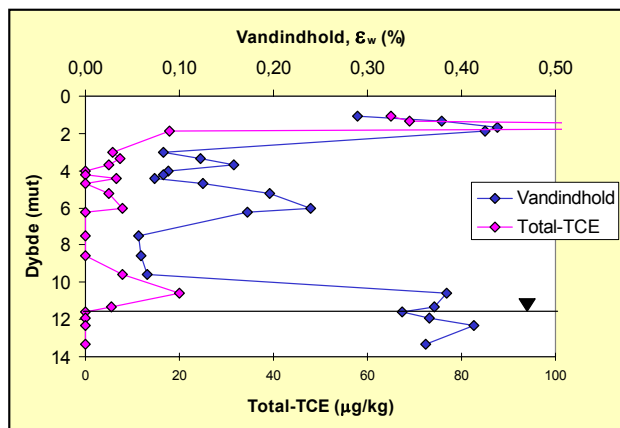
En glas/PE-beholder indeholdende en kilde med fri fase CFC-113 blev nedsænket 4 meter under terræn. Fra beholderen diffunderede en konstant flux ud i poreluften med minimal forstyrrelse af omgivelserne. Koncentrationer blev målt i flere afstande fra kilden over tid. Efter få dage opnåedes en konstant flux ud af beholderen. Der sås en hurtig stofudbredelse (ca. 2 m/dag) og faldende koncentrationer med afstand fra kilden.



Faktorer, der influerer på porelufttransport

Tortuositeten er meget afhængig af vandindholdet, jf. ligningen på side 6. Det forventes derfor, at den diffusionsdrevne flux vil være større i tørre områder end i våde områder.

Advektionen af poreluft er afhængig af trykgradienten, og derfor forventes en sammenhæng mellem den advektionsdrevne flux og differenstrykket (forskelle i tryk mellem forskellige områder). Differenstræk opstår pga. variationer i atmosfæretryk og forsinkelse af trykudligningen i jordlagene.



Observeret sammenhæng mellem TCE i jorden og vandindhold. Der har på spildtidspunktet (>30 år siden) været residual fase TCE i hele den umættede zone. Denne TCE er nu forsvundet i de tørre områder, hvor diffusionen er hurtigere end i de fugtige (mere finkornede) områder.

Stofoverførsel fra poreluft til grundvand

Hvis der sker infiltration, vil den væsentligste flux fra poreluft til grundvand være styret af advektion, som vil være relateret til infiltrationens størrelse. I områder, hvor der ingen infiltration er, sker stofoverførslen fra poreluften til grundvandet pga. diffusion alene.

Da diffusionen er meget hurtigere i luft end i vand, vil det være diffusionen i grænselaget mellem poreluften og den kapillære zone, der bliver begrænsende for fluxen.

På grund af advektion og dispersion i grundvandet, vil massen, der når grundvandet hele tiden fjernes fra kildeområdet. Herved opretholdes koncentrationsgradienten over grænsefladen.

Stofoverførsel

Stofoverførsel fra poreluft til grundvand:

$$J = C_W \cdot \varepsilon_t \sqrt{\left(\frac{4}{\pi} \cdot D_{tv} \cdot \frac{v_p}{L}\right)} \cdot BL, \text{ hvor}$$

$$D_{tv} = \alpha_{tv} \cdot v_p + D_{eff,\alpha}$$

J:	Flux (g/år)
C_W :	Koncentration i luft-vand grænseflade (g/m ³)
ε_t :	Total porøsitet
D_{tv} :	Dispersionskoefficient (m ² /år)
v_p :	Grundvandshastighed (m/år)
L:	Længde af hotspot i strømningsretning (m)
B:	Bredde af hotspot (m)
α_{tv} :	Transvertikal dispersivitet (m)
$D_{eff,\alpha}$:	Effektiv diffusionskoefficient (m ² /år)

- Hurtig og effektiv spredning af forurening i poreluft
- Befæstning og vandindhold styrer spredningen
- Diffusion er vigtigst i poreluft og advektion er vigtigst i grundvand

Risikovurdering i umættet zone

Baggrund

I forbindelse med risikovurderinger (i forhold til grundvand) af forureninger i den umættede zone, er udvaskning pga. infiltrerende vand, den proces, der oftest fokuseres på. Dette er fx. tilfældet i JAGG, som har udvaskning, som den eneste proces, der flytter forurening fra den umættede til den mættede zone.

Dette betyder, at der i områder med meget lille infiltration (pga. befæstning eller fin-kornet, vandmættet topjord) vil blive vurderet, at der er en meget lille risiko overfor grundvandet – selv med en stor forurening i den umættede zone.

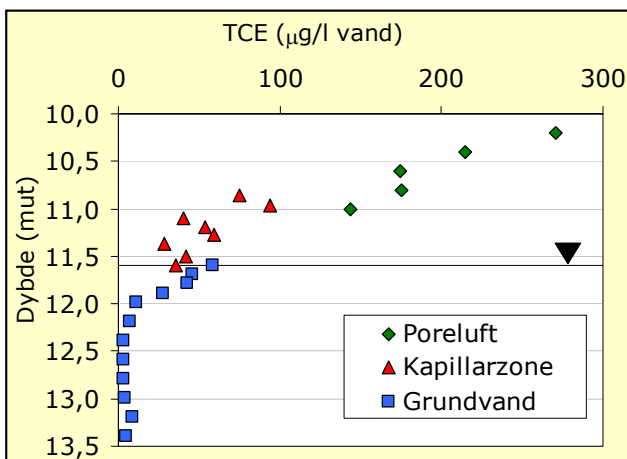
Der kan dog også ske stofoverførsel mellem de to zoner pga. diffusion. Det er dog dårligt belyst, om denne proces er væsentlig.

Spredning i umættet zone

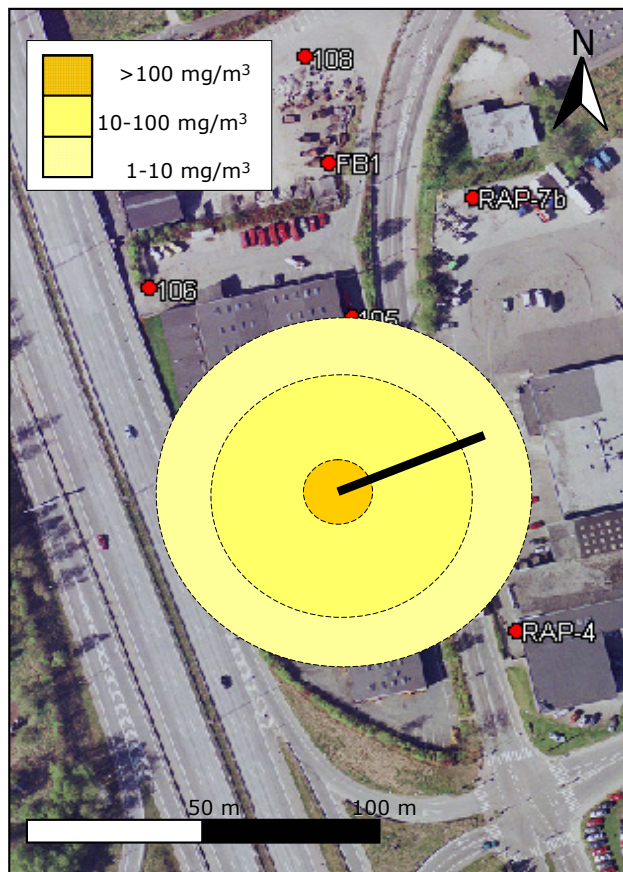
Indholdet af TCE i poreluften blev målt i 4 meters dybde langs et transekt. Der blev fundet aftagende koncentrationer med afstand fra kilden. I det yderste målepunkt, 35 meter fra kilden, var koncentrationerne stadig markante (9 mg/m^3).

I 4 meters dybde er der fundet homogent, tørt sand i borerne omkring kilden. Det antages derfor, at diffusionen har udbredt forureningen i samme grad til alle sider, og at der findes en tilnærmelsesvis cirkulær forureningsfane i den umættede zone omkring kilden.

Den store udstrækning af fanen i den umættede zone, skyldes at kilden ligger i et industriområde med høj befæstningsgrad. Der er derfor kun meget ringe mulighed for afdampning til atmosfæren.



Observerede koncentrationer af TCE tæt på kildeområdet i poreluft, kapillarzonen og det øvre grundvand. Alle koncentrationer er omregnet til ækvivalente vandkoncentrationer.



Koncentration af TCE i poreluften i 4 meters dybde. Koncentrationen er målt langs det markerede transekt. Hypotesen er, at den samme udbredelse ses i alle retninger fra kilden, da der er tale om homogent, tørt sand.

På spildtidspunktet (> 30 år siden) var koncentrationerne i kildeområdet langt højere end i dag, og det vurderes, at der har været fri fase i hele den umættede zone under det utætte TCE-dyppekar. På dette tidspunkt har fanen formentlig haft en endnu større udbredelse og haft højere koncentrationer end der observeres i dag.

Poreluftforurening giver grundvandsforurening

Forureningen i poreluften har spredt sig til den kapillare zone og videre til grundvandet. Den vigtigste spredningsmekanisme er diffusion, da der ingen infiltration er i området.

Det er kun det øvre grundvand, der er påvirket af poreluftforureningen, og der observeres en opblandingsdybde på $\frac{1}{2}$ meter.

Der er fundet sammenlignelige koncentrationer i poreluften, kapillarzonen og det øvre grundvand, hvilket tyder på et system i ligevægt. Dette betyder også, at fugacitetsprincippet ville kunne anvendes til at omregne fra luftkoncentration til vandkoncentration og omvendt.

Prøvetagning af kapillarzonen

Vand i kapillarzonen kan ikke prøvetages med almindelige vandpumper, da der er undertryk i vandet. For at løse dette problem, er der udviklet et system baseret på keramiske sugeceller, hvori der kan tages vandprøver fra kapillarzonen for hver 10. cm fra 10-11 meters dybde. Systemet er konstrueret så sugecellerne er monteret udenpå en fleksibel "liner", der fyldes op med sand eller vand, når lineren er i den rette dybde. Herved presses sugecellerne, der er indsmurt i silicamel, ud mod formationen, og der skabes kapillær kontakt. Prøvetagning foregår ved at et evakueret glas påsat et septum i bunden, nedsænkes over de lukkede sugeceller. En nål monteret i toppen af sugecellen penetrerer septummet, og undertrykket fra glasset over føres til sugecellen. Vandet transporteres ind i glasset, som herefter føres op til overfladen. I et sådant lukket system undgår man tab af de flygtige stoffer.



Den målte porøsitet (0,39) og den beregnede grundvandshastighed (2,5 m/år) for lokaliteten er anvendt. Den vertikale dispersivitet er sat til 3 mm. Resultatet bliver, at der i dag er en ret lille forureningsflux på ca. 2 g/år fra poreluften til grundvandet.

Denne flux har tidligere været markant højere: Hvis det antages, at der på spildtidspunktet har været ligevægt mellem den frie fase, poreluften og porevandet i kapillarzonen, kan koncentrationen i kildeområdet i grænsefladen mellem poreluft og porevand sættes til TCE's opløselighed (1400 mg/l). Antages samme fald i koncentration med afstand fra kilden som før, fås en samlet flux på ca. 20 kg/år.

Dette tal er sandsynligvis for højt, da der sjældent observeres vandkoncentrationer lig med opløseligheden. Hvis koncentrationen i stedet sættes til 10% af opløseligheden fås en flux på 2 kg/år.

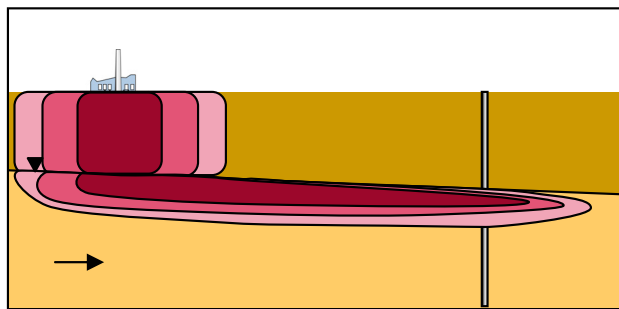
For at sammenligne disse resultater med det observerede, kan der ses på den flux, der passerer et transekt placeret 165 meter nedstrøms forureningen – en afstand, der svarer til ca. 25 års transport fra kildeområdet. Den del af denne flux, der vurderes at stamme fra poreluftfanen, er på ca. 0,5 kg/år.

Selvom disse historiske beregninger involverer en del antagelser, viser de dog, at der kan forekomme en stor flux fra poreluftfanen til grundvand, selvom der ingen væsentlig infiltration er.

Fluxberegning

Fluxen fra poreluften til grundvandet er beregnet, som beskrevet på side 7.

Området omkring forureningen er inddelt i en række ringe med større og større radius, og hver ring er tildelt en repræsentativ koncentration i grænsefladen mellem luft og vand. Disse koncentrationer er estimeret ud fra målte koncentrationer i toppen af kapillarzonen (op til 110 µg/l). Endvidere er der benyttet det fald i koncentration som funktion af afstand fra kilden som blev observeret i poreluften i 4 meters dybde.



Konceptuel model. Under befæstede arealer kan der dannes en sky af forurenede poreluft, der spredes til alle sider fra kilden. Denne sky vil alene pga. diffusion kunne give anledning til en betydelig forurening af det øvre grundvand. En proces, der formentlig vil være endnu vigtigere, hvis der er grundvandsvariationer.

- Signifikant fane af forurenede poreluft i den umættede zone
- Poreluftforurening kan give anledning til betydelig forurening af det øvre grundvand – selv uden vandinfiltration
- Metode udviklet til prøvetagning af kapillarzonen
- Sammenlignelige koncentrationer observeret i poreluft, kapillarzone og grundvand

Forureningsflux i grundvand

Hvorfor forureningsflux?

Når det skal vurderes hvorvidt en punktkilde udgør en risiko for grundvandet, har den hidtidige praksis været fokuseret på beregning eller måling af koncentrationer umiddelbart nedstrøms punktkilden.

På det seneste er der sat spørgsmålstejn ved om koncentrationer alene er repræsentative for risikoen. Et af problemerne er, at koncentrationsberegninger kun fortæller om en forureningskilde udgør en risiko, og ikke hvor stor denne risiko er.

Til beskrivelse af en punktkildes påvirkning af grundvandet anvendes især i nyere litteratur størrelsen *forureningsflux*. Forureningsfluxen er en dynamisk størrelse, der udtrykker den samlede forureningsbelastning. Fordelen ved at benytte forureningsfluxe i risikovurderinger er bl.a., at de giver mulighed for at sammenligne belastningen fra forskellige punktkilder, hvilket er alfa omega i forbindelse med en prioritering.

Der er imidlertid behov for at få udviklet og afprøvet metoder til kvantificering af fluxe i praksis.

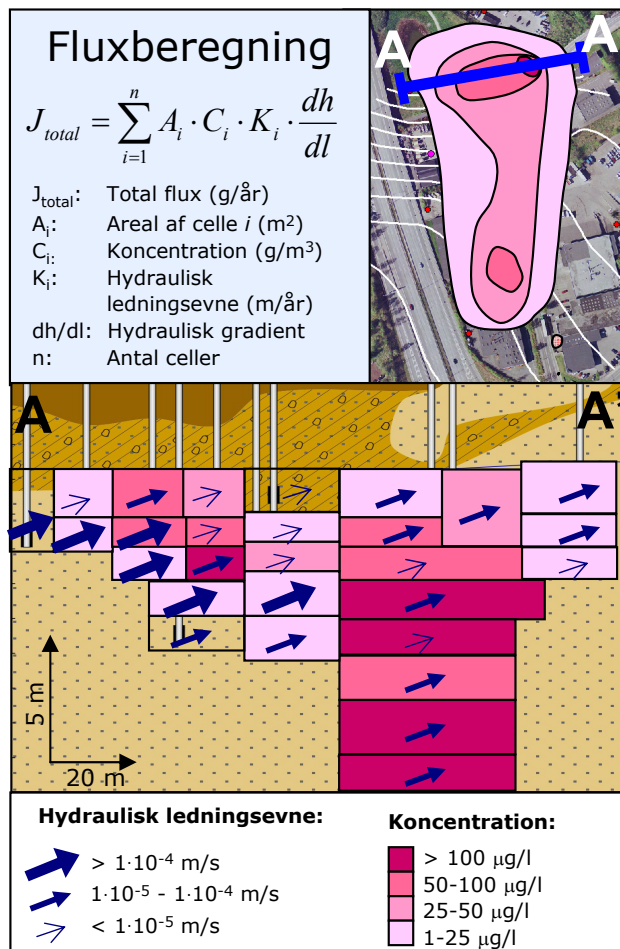
Definition af forureningsflux

Forureningsfluxen angiver, hvor meget forureningsmasse, der udledes fra en punktkilde pr. tid (fx kg/år). Forureningsfluxen har flere benævnelser i den internationale litteratur, men *mass flux*, *mass discharge* eller *contaminant flux* hører til de oftest benyttede. Som symbol for forureningsflux anvendes især *J*.

Det skal bemærkes, at denne terminologi strider mod den traditionelle definition af flux, hvor enheden er masse pr. tid pr. areal.

Metoder til fluxbestemmelse

Der eksisterer 3 metoder til fluxbestemmelse i praksis: *niveauspecifik prøvetagning*, *volumen pumping* og *passive prøvetagere*. Fælles for disse metoder er, at fluxen estimeres gennem et kontrolplan etableret vinkelret på forureningsfanen. Det er her vigtigt, at borerne i kontrolplanet placeres således, at hele fanen dækkes både horisontalt og vertikalt. De 2 førstnævnte metoder er afprøvet i praksis på Rundforbivej 176 i dette projekt. Der findes derudover flere modelværktøjer til fluxbestemmelse. Med disse værktøjer beregnes fluxen ud fra oplysninger om punktkilden med hensyn til udbredelse, kildestyrke, geologi og hydrogeologi.



Beregning af forureningsflux i grundvand vha. niveauspecifik prøvetagning. Ved Rundforbivej er fluxen gennem et kontrolplan etableret vinkelret på forureningsfanen estimeret til 1150 g/år ud fra målinger af koncentration, hydraulisk ledningsevne og hydraulisk gradient.

Niveauspecifik prøvetagning

Ved den niveauspecifikke prøvetagning måles koncentration og hydraulisk ledningsevne i alle kontrolplanets filtre. Ved at lægge et cellenet henover kontrolplanet og tildele hver celle en koncentration, en hydraulisk ledningsevne og en gradient kan fluxen gennem de enkelte celler estimeres. Den samlede flux fra punktkilden bestemmes herefter ved at summere fluxene gennem de enkelte celler.

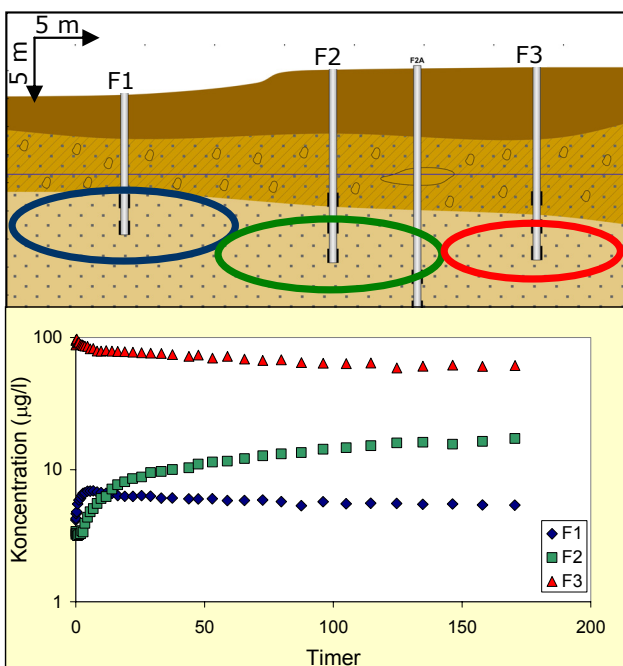
På Rundforbivej er denne metode benyttet ved at anvende traditionelle borer med 2-3 filtre af 1 m. I litteraturen har der ofte været anvendt såkaldte multi level samplere, som typisk er installationer med mange prøvetagningspunkter over dybden. Der kan opnås en meget detaljeret beskrivelse af den vertikale fordeling. Disse typer af installationer giver dog ikke mulighed for at bestemme den hydrauliske ledningsevne for det enkelte punkt. Samtidig stiller det særlige krav til de kemiske analyser, da der kun kan prøvetages meget små vandmængder.

Sammenligning og evaluering af metoder til bestemmelse af forureningsflux i grundvand.

		Volumenpumpning	Niveauspecifik prøvetagning
Anvendelighed i naturgivne situationer	Heterogen geologi	Mindre anvendelig	Anvendelig
	Bred /dyb fane	Mindre anvendelig	Anvendelig
	Smal fane / tæt ved forureningskilden	Anvendelig	Mindre anvendelig
Praktiske forhold	Antal boringer	Få boringer påkrævet	Mange boringer påkrævet
	Udstyr og prøvetagning	Behov for meget udstyr	Lidt udstyr
	Datatorolkning	Svær	Simpel

Volumenpumpning

Princippet i volumenpumpningen er, at der pumpes fra én eller flere boringer i kontrolplanet. Boringernes placering, pumperater og -tider vælges således, at hele forureningsfanen dækkes af influenszonerne. Under en konstant pumpning måles forureningskoncentrationen i det oppumpede vand løbende som funktion af tiden. Koncentration-tids-serierne kan enten analytisk eller ved brug af en numerisk grundvandsmodel oversættes til en koncentrationsfordeling i fanen omkring pumpeboringerne. Herudfra kan fluxen gennem kontrolplanet bestemmes.



Influenszoner samt tilhørende koncentration-tids-serier opnået ved volumenpumpning

Sammenligning af metoder

Der er ved Rundforbivej 176 opnået meget ens resultater med de to metoder. Fluxestimaterne er derfor ikke evalueret kvalitetsmæssigt. I stedet er metoderne evalueret i forhold til deres anvendelighed i forskellige naturgivne situationer, og de mere praktiske forhold omkring metoderne er blevet sammenlignet.

Store lokale variationer i magasinets hydrauliske ledningsevne er problematisk for begge metoder, men især for volumenpumpningen. Dette skyldes, at der ved den analytiske tolkning af volumenpumpningsdata antages homogene forhold omkring pumpeboringen.

Kontrolplanets placering i forhold til forureningskilden har betydning af valg af metode. Placeres kontrolplanet tæt på forureningskilden kan der være betydelige lokale koncentrationsgradienter. Her vil fluxbestemmelsen med den niveauspecifikke prøvetagning være meget afhængig af boringernes placering i kontrolplanet. Placeres kontrolplanet derimod længere fra forureningskilden, vil fanen dække et større areal, og koncentrationsgradienterne vil være mindre på grund af fortynding. Det kan i denne situation være meget svært at dække hele forureningsfanen med influenszoner fra en volumenpumpning.

Den praktiske udførsel og tolkning af data er relativt simpel for den niveauspecifikke prøvetagning i forhold til volumenpumpning. Ved volumenpumpning behøves generelt færre boringer, men til gengæld skal der bruges mere udstyr og installationer, og det oppumpede vand skal afledes og evt. renses.

- Forureningsflux er et godt mål til risikovurderinger
- Der er opnået ens forureningsfluxe med niveauspecifik prøvetagning og volumenpumpning
- Niveauspecifik prøvetagning er en velegnet metode til fluxbestemmelse i praksis
- Volumenpumpning egner sig ikke til brede og dybe forureningsfaner

Usikkerheder ved forureningsflux

Baggrund

Kvantificeringen af forureningsfluxe er forbundet med usikkerheder. Usikkerhederne forårsages af flere faktorer såsom heterogen geologi og komplekse forureningsfordelinger.

I forhold til risikovurdering og prioritering er det afgørende, at usikkerhederne tages med i betragtningerne, da der ellers er risiko for, at der ofres penge og ressourcer på de "forkerte" forureningskilder. Hidtil har usikkerheder på fluxbestemmelser imidlertid ikke været undersøgt i særlig høj grad.

Der er ved afprøvningen og sammenligningen af de to metoder til bestemmelse af forureningsflux identificeret 3 faktorer, der giver anledning til de største usikkerheder:

- Afgrænsning af fane (placering og antal boringer/filtre)
- Tidsmæssige koncentrationsvariationer
- Variationer i hydraulisk ledningsevne

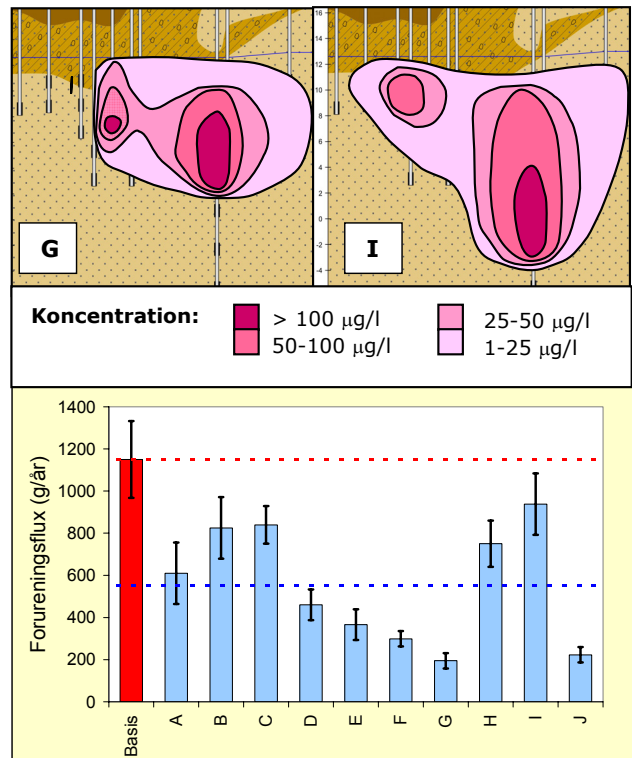
Afgrænsning af fane

For at estimere hvor meget forureningsmasse, der totalt set udledes fra en punktkilde er det essentielt, at boringerne i kontrolplanet placeres således, at hele forureningsfanen dækkes horisontalt og vertikalt. Afgrænsning af fanen og kvaliteten af fluxbestemmelsen vil især for den niveauspecifikke prøvetagning afhænge af placering og antal af boringer.

Ved Rundforbivej er forureningsfanen ikke afgrænset vertikalt til trods for, at der er etableret 28 filtre i kontrolplanet 165 meter nedstrøms forureningskilden. Den manglende afgrænsning betyder, at den beregnede forureningsflux ikke repræsenterer den totale belastning fra Rundforbivej.

Hvis det antages, at den estimerede forureningsflux er "den korrekte", kan der foretages en usikkerhedsvurdering af placeringen og antallet af filtre i kontrolplanet ved Rundforbivej. Dette er gjort ved 10 gange tilfældigt at udvælge 10 filtre og derefter foretage fluxbestemmelserne udelukkende på baggrund af disse 10 målepunkter.

Der er for de 10 tilfælde estimeret fluxe, der i gennemsnit er ca. 50 % af fluxen beregnet for det oprindelige scenarium, hvor alle 28 filtre er inkluderet. For basisscenariet har det vist sig, at en meget stor del af den samlede flux kan tilskrives nogle få filtre, primært fordi der her er bestemt høje hydrauliske ledningsevner. I de scenarier, hvor disse filtre ikke er udvalgt,



Placeringen og antallet af filtre betyder for fluxbestemmelsen med den niveauspecifikke prøvetagning. Måledataene fra 10 af de i alt 28 filtre er tilfældigt udvalgt 10 gange. På baggrund heraf er fluxen således bestemt 10 gange. Øverst fremgår to eksempler på den tolkede forureningsudbredelse ved transektet baseret på de 10 tilfældigt udvalgte koncentrationsmålinger. Nederst er flux resultaterne fra de 10 scenarier (blå søjler) samt basis scenariet hvor alle filtrene er inkluderet (rød søjle) vist.

er der opnået de mindste fluxestimerer. Beregningen af forureningsfluxen er derfor afhængig af om kontrolplanets filtre placeres i de "rigtige" områder af fanen.

Koncentrationsvariationer

Med begge metoder opnås et øjebliksbillede af forureningsfluxen til et givent tidspunkt. Tidslige variationer i koncentrationen vil derfor være kritiske for fluxbestemmelsen.

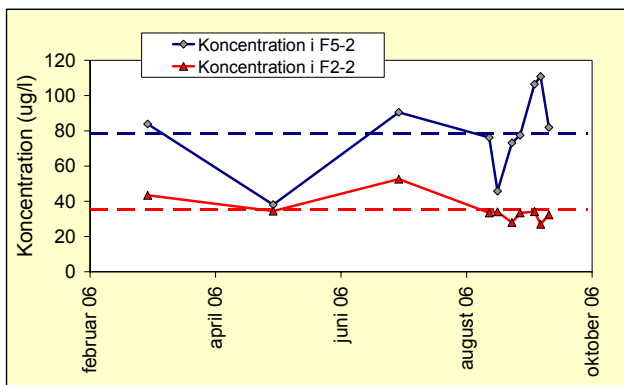
Koncentrationen er målt over tid i 2 af boringerne i transektet ved Rundforbivej. Der er observeret en maksimal variation i koncentrationen på omkring en faktor 3, hvilket betyder, at fluxen ligeledes vil kunne variere en faktor 3. Ved Rundforbivej er kontrolplanet placeret relativt langt fra kildeområdet. Det er muligt, at variationen i koncentrationerne kan være større tættere på forureningskilden.

Usikkerheder som følge af koncentrationsvariationerne kan omgås ved i stedet at benytte *passive prøvetagere* til prøvetagningen. Fordelen ved at anvende passive samplere er, at de måler en gennemsnitlig

koncentration for den periode, de er installeret i en boring. På den måde vil en gennemsnitlig flux kunne estimeres, der i forhold til en risikovurdering er mere repræsentativ for den reelle belastning.

To typer passive samplere har været anvendt ved Rundforbivej. Der er med begge metoder opnået koncentrationer, der ligger en faktor 2 - 3 under gennemsnittet af de målte koncentrationer i borerne. Dette kan skyldes, at der ikke er opnået fuld genfinding ved ekstraktionen.

Passiv prøvetagning er en interessant metode, der dog endnu ikke er færdigudviklet. Det kritiske ved anvendelsen af passiv prøvetagning er især valget af sorbent materiale.



Observerede TCE koncentrationer i to af transektets filtre ved Rundforbivej i løbet af 2006. Gennemsnitskoncentrationen er markeret med stiplede linje.

Hydraulisk ledningsevne

Bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne er meget kritisk for både den niveauspecifikke prøvetagning og volumenpumpningen, da den indgår lineært i fluxberegningen. Dette skal især ses i lyset af, at et grundvandsmagasins hydrauliske ledningsevne i naturen let kan variere flere størrelsesordener. Eksempelvis er der ved kontrolplanet ved Rundforbivej fundet en variation i sandmagasinets hydrauliske ledningsevne på over en faktor 100.

Variationen i den hydrauliske ledningsevne har således en markant større indflydelse på

Passiv prøvetagning

Almindeligvis defineres en passiv sampler, som en sampler, der er i stand til at udtage en prøve fra et område af begrænset udstrækning uden aktiv transport af mediet gennem pumpning eller purge teknikker. Der er i 2 borer ved Rundforbivej installeret 2 forskellige typer passive samplere, der er udviklet af hhv. Sorbisense og Institut for Miljø & Ressourcer. Begge metoder bygger på et princip, hvor forureningen opsamles over tid ved med en meget lav ydelse at pumpe forurenede vand gennem en kolonne indeholdende en sorbent. Efterfølgende ekstraheres stoffet, og idet den oppumpede vandmængde også kendes kan en gennemsnitlig stofkoncentration beregnes for den periode samleren har været installeret i boringen. Det er i den forbindelse afgørende at opnå en god *genfinding*, dvs. få alt det sorberede stof ekstraheret fra kolonnen. Til dette formål findes flere forskellige ekstraktionsmidler. I praksis kan det dog i nogen tilfælde være vanskeligt at få en 100% ekstraktion af stoffet.



fluxresultatet sammenlignet med de observerede koncentrationsvariationer.

Ved Rundforbivej er den hydrauliske ledningsevne estimeret lokalt omkring alle filtre ud fra gennemførte *slug tests*. På flere filtre er der udført dobbeltbestemmelser og der er herved opnået meget ens værdier for hydraulisk ledningsevne (varierer op til en faktor 1,5). Det vurderes således, at de opnåede hydrauliske ledningsevner generelt er pålidelige. Udførelsen og datatolkningen af *slug tests* er forholdsvis nem. I forhold til hvor vigtigt det er at kende den hydrauliske ledningsevne, kan denne metode derfor klart anbefales.

For flere af borerne i kontrolplanet er den hydrauliske ledningsevne ligeledes bestemt ud fra sigteanalyser på opboret materiale. Der er herved fundet værdier, der er i god overensstemmelse med værdierne fra *slug testene*.

- Placering og antal af borer er væsentlig for usikkerheden ved kvantificeringen af forureningsfluxe
- Bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne anbefales som led i fluxbestemmelse
- Koncentrationsvariationer kan være væsentlig for bestemmelse af forureningsfluxe tæt ved forureningskilden.

Værktøjer til risikovurdering og

Skala for risikovurdering og prioritering

Antallet af forureningskilder, der truer grundvandet i Danmark er meget stort. I forhold til problemets omfang er de tilgængelige midler til kortlægning, monitoring og afværgelse meget begrænsede. Det er derfor nødvendigt at få prioriteret oprydningsindsatsen, således at ressourcerne bruges på de punktkilder, der udgør de største risici. De eksisterende risikovurderingsværktøjer er imidlertid ikke egnede til prioritering. Årsagen hertil er, at de baserer risikovurderingen på beregninger af koncentrationer i grundvandet på *lokal skala*, og det er derfor svært at sammenligne belastningen fra forskellige punktkilder.

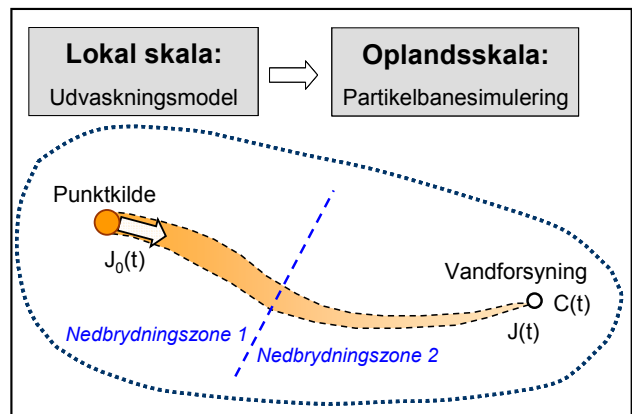
Til en prioritering er det nødvendigt at gribe problemet an på en større skala. Det kan være hensigtsmæssigt at vurdere risikoen i forhold til en vandforsyning og således betragte problemstillingen på *oplandsskala*. Ofte vil det netop være punktkildernes påvirkning af en vandforsyning, der vil være afgørende for hvor højt de prioriteres. Der findes imidlertid ingen standardiseret fremgangsmåde til at foretage risikovurdering af punktkilder på oplandsskala.

Koncept

Der er udviklet et koncept til risikovurdering af punktkilder på oplandsskala, der overordnet sigter på at beskrive punktkildernes forureningsbidrag til en vandforsyning. For at sikre konceptets anvendelighed til prioritering har det været nødvendigt at finde en passende balance i detaljeringsgraden. Konceptet skal således være simpelt nok til, at det let kan anvendes på forskellige punktkilder uden dog at blive for unuanceret.

Det er derfor valgt at adskille problemstillingen og fokusere på to niveauer; henholdsvis lokal skala og oplandsskala. Lokal skalaen repræsenteres med en udvaskningsmodel, der beskriver forureningsfluxen fra punktkilden til grundvandet. Modellen er anvendelig på lokaliteter, hvor stofoverførslen fra den umættede zone til grundvandet er domineret af udvaskning (pga. infiltration) i forhold til stofoverførsel pga. diffusion.

Transporten og opholdstiden til vandforsyningen på oplandsskala beskrives vha. partikelbanesimuleringer med en grundvandsmodel. De to niveauer er koblet til hinanden, og således kan punktkildernes belastning af vandforsyningen beskrives ved en forureningsflux til vandforsyningen.

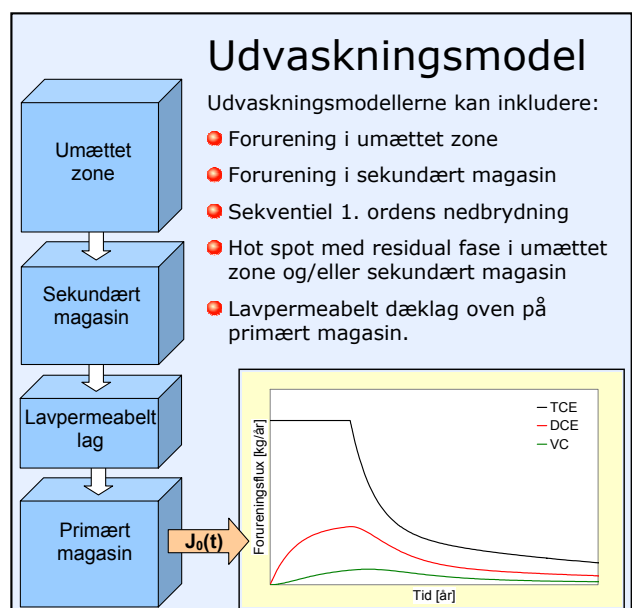


Risikoen vurderes på baggrund af punktkildens forureningsbidrag til det oppumpede grundvand ved en vandforsyning. Forureningsfluxen på kildeskala, $J_0(t)$, beskrives vha. en udvaskningsmodel. Opholdstiden og transporten gennem oplandet beskrives ud fra partikelbanesimuleringer med en grundvandsmodel.

Udvaskningsmodeller

Der er opstillet 3 analytiske udvaskningsmodeller, der alle beskriver en punktkildes belastning af grundvandet ved en forureningsflux som funktion af tid. Den ene udvaskningsmodel er simpel og kan benyttes i tilfælde, hvor datagrundlaget om punktkilden er begrænset. De to andre udvaskningsmodeller er mere komplicerede og kræver et bedre kendskab til forureningskilden. Valget af udvaskningsmodel vil afhænge af den givne forureningsituation samt af datagrundlaget.

Udvaskningsmodellerne er udviklet for en specifik TCE forurenede lokalitet, hvor der er konstateret forurening i umættet zone og i et sekundært magasin. Desuden er der observeret et hot spot med residual fase samt et lavpermeabelt lag, der adskiller det sekundære og primære magasin.



prioritering på oplandsskala

Udvaskningsmodellerne er derfor i stand til at beskrive alle disse elementer. Der tages i den forbindelse udgangspunkt i reaktormodeller, hvor forureningen i fx umættet zone og sekundært magasin hver især repræsenteres med en reaktor. Ud fra massebalancer og ligevægtsbetragtninger kan udvaskningen og nedbrydningen af forureningsmassen i kildeområdet beskrives ved et sæt koblede differentialligninger, og deraf kan fluxen fra punktkilden beregnes over tid.

Udvaskningsmodellerne kan tilpasses mange forskellige forureningssituationer og kan derfor implementeres på de fleste punktkilder.

Partikelbanesimulering og opholdstid

Med udgangspunkt i fluxen estimeret med udvaskningsmodellen skal forureningsfluxen, der strømmer til vandforsyningen bestemmes.

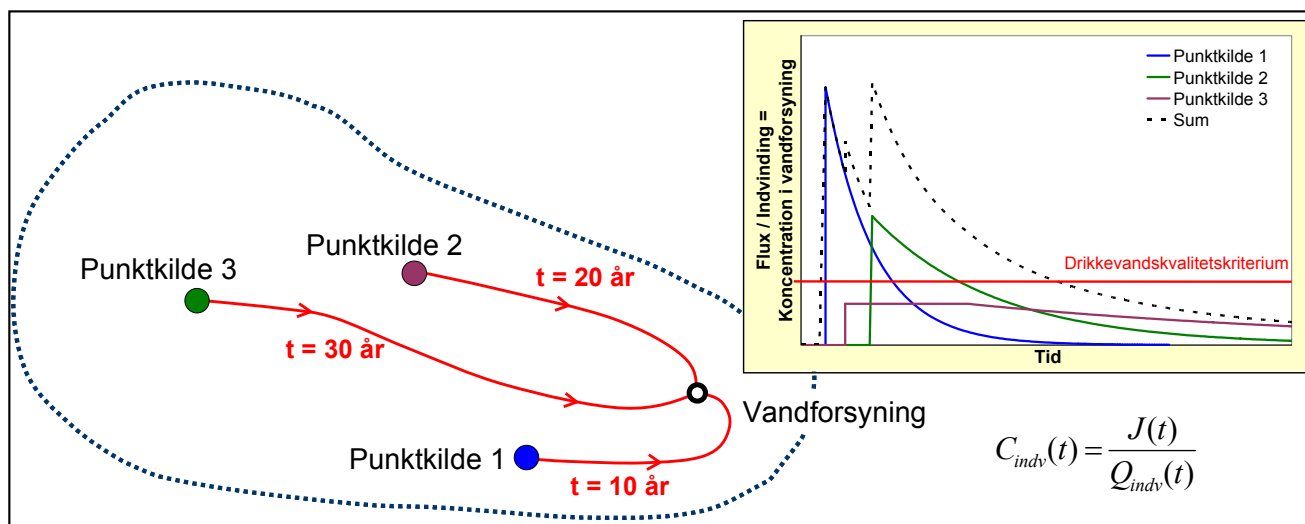
Forureningsfluxen fra punktkilden vil undervejs til vandforsyningen kunne reduceres som følge af nedbrydning i oplandet. Nedbrydningen kan i det udviklede koncept beskrives ved en sekventiel første ordens kinetik, og der kan således tages højde for dannelse af nedbrydningsprodukter. Det er endvidere muligt at inkludere 2 nedbrydningszoner i

konceptet, og derved tage højde for varierende nedbrydningsrater grundet skift i redoxforhold. Til beregning af forureningens opholdstid fra punktkilden til vandforsyningen samt i de 2 nedbrydningszoner tages udgangspunkt i partikelbanesimuleringer med en eksisterende grundvandsmodel. Der tages højde for, at stoffet kan sorbere og derfor bevæger sig langsommere end grundvandet. Ud fra opholdstiden i nedbrydningszonerne samt de anvendte nedbrydningsrater kan reduktionen af forureningsfluxen fra punktkilden vurderes. Forureningsfluxen til vandforsyningen samt koncentrationen i det oppumpede vand kan deraf bestemmes.

Forudsætningen for konceptet er, at en grundvandsmodel for oplandet er til rådighed.

Prioritering på oplandsskala

Med det udviklede koncept opnås et godt grundlag for en prioritering af punktkilder på oplandsskala. De enkelte punktkilders belastning af vandforsyningen kan direkte sammenlignes og vurderes. Det summerede forureningsbidrag fra samtlige punktkilder skal ideelt set være i overensstemmelse med de oppumpede forureningsmængder ved vandforsyningen. Hvis dette ikke er tilfældet, kan det være tegn på uidentificerede kilder.



Koncept til prioritering af punktkilder på oplandsskala. Ud fra de enkelte punktkilders 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.

- Risikovurdering skal tilpasses relevant skala og datagrundlag
- Der udviklet et koncept til risikovurdering og prioritering på oplandsskala, der involverer fluxbetragtninger
- Udvaskningsmodeller til fluxbestemmelse på lokal skala er udviklet

Opsporing af forureningskilder i

Baggrund

Når der er konstateret forurening i en vandforsyningsboring er det typisk nødvendigt med et hurtigt indgreb. I den næste fase, når den umiddelbare risiko er afværget, er der behov for at identificere de mulige forureningskilder, der har forårsaget forureningen. I denne fase er der behov for at bruge en række forskellige værktøjer og metoder.

Forureningskilder

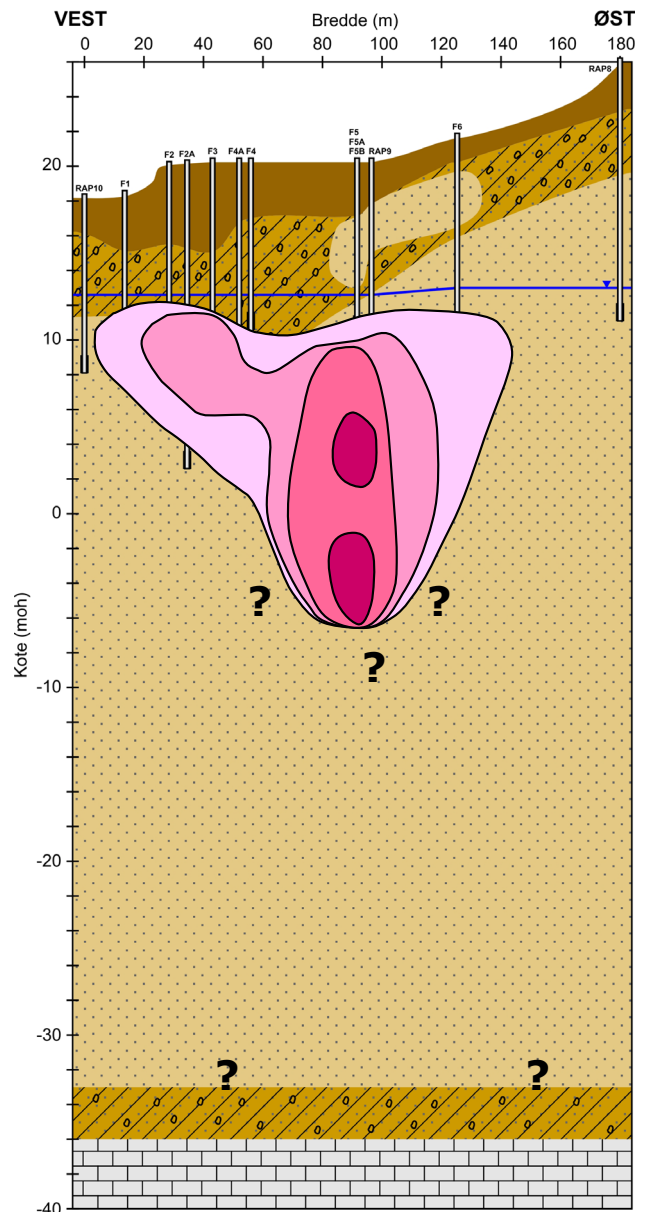
I det grundvandsdannende opland til Nærum vandværk er der kortlagt 3-5 forureningskilder, der dog alle er placeret langt fra vandværket. Forurening fra disse forureningskilder vil sandsynligvis være længe undervejs og flere af forureningskilderne har en meget lille forureningsflux.

I Nærum industriområde, i den østlige del af indvindingsoplandet, er der endvidere en række forureningskilder. Disse kilder ligger imidlertid uden for det grundvandsdannende opland, og kan derfor kun give anledning til forurening af vandværkets borer, hvis forureningen har spredt sig til kalkmagasinet.

Spredning vertikalt

Der er observeret en bemærkelsesværdig dybtliggende forurening ved Rundforbivej 176, som ikke kan forklares ved forurening i opløst form. Der vil nemlig typisk ske en meget begrænset spredning vertikalt i et sandet grundvandsmagasin, da den vertikale dispersivitet vil være lille.

Klorerede opløsningsmidler kan dog i form af fri fase spredes dybt vertikalt i akviferer. Det er sandsynliggjort ved den observerede forureningsspredning, at dette er tilfældet.



Figuren illustrerer den kortlagte forureningsfane ved Rundforbivej 176 i et tværsnit 165 meter fra kilden (der er målt ned til 18 m under grundvandsspejlet). Hvis TCE-forureningen skal være årsag til forureningen af Nærum Vandværks borer, skal der være forurening ned til kalkmagasinet. Laggrænserne i dybden er baseret på skøn.

Indvindingsopland primære magasin
Grundvandsdannende opland

Definition af typer af oplande

- **Indvindingsopland**
Et indvindingsopland omfatter det område, hvor en partikel placeret i det primære grundvandsmagasin vil ende i indvindingsboringen på vandværket. Et indvindingsopland vil normalt være større end et grundvandsdannende opland.
- **Grundvandsdannende opland**
Det grundvandsdannende opland omfatter det område, hvor en partikel frigivet ved jordoverfladen - som en vanddråbe - vil ende i indvindingsboringen på vandværket.

oplandet til Nærum Vandværk

Elementer i kildeopsporing

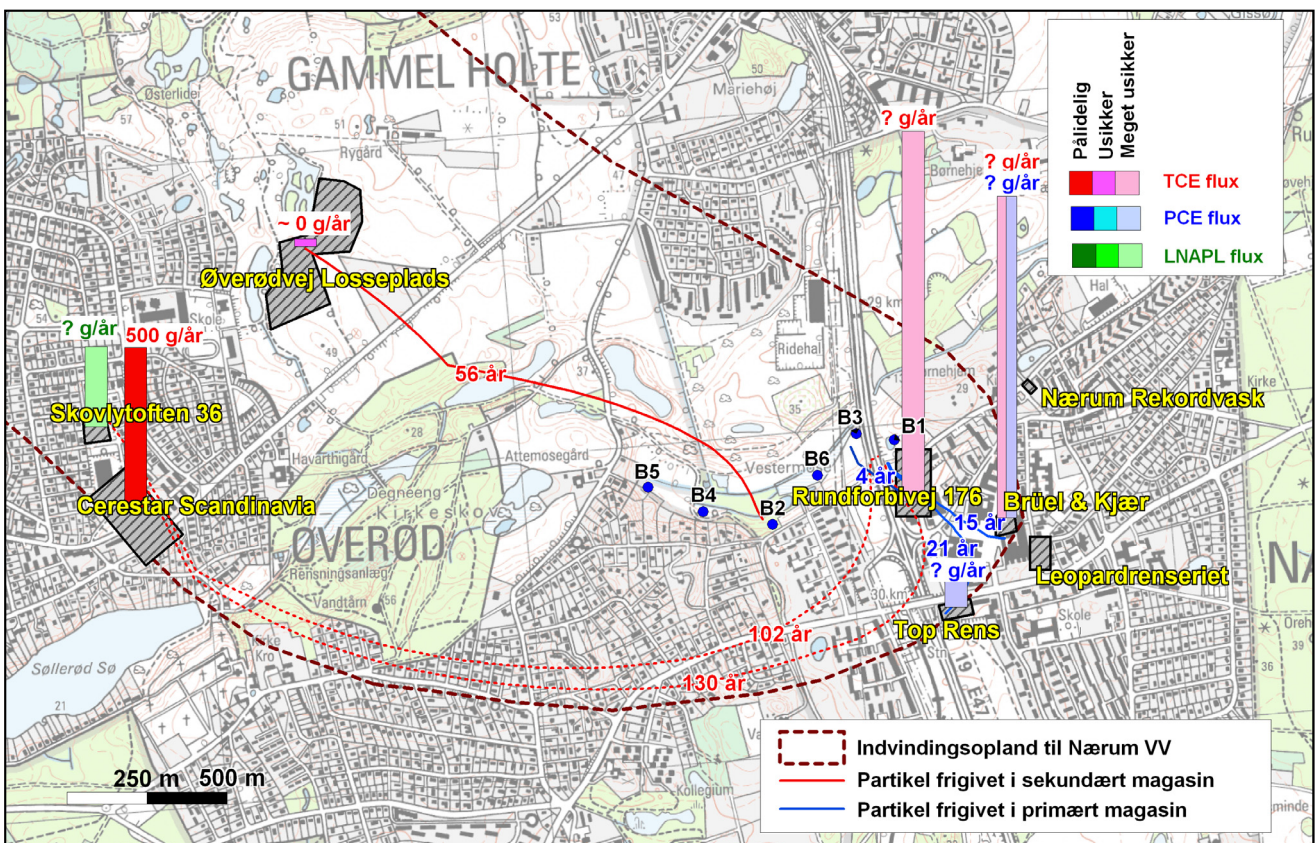
- Forureningskildens placering i oplandet til vandværket. Her bør både indvindingsoplandet og det grundvandsdannede opland fastlægges ved modellering.
- Historie – alder af forureningen. Det er vigtigt at fastlægge et omtrentligt tidspunkt. Visse kilder kan udelukkes, når denne viden kombineres med transporttiden.
- Transporttid mellem forureningskilden og vandværket kan vurderes ved partikelbanesimulering.
- Hvilke stoffer findes – stofsammensætning. Er der tale om de samme stoffer ved forureningskilden og ved vandværket?
- Mulige spredningsmekanismer for forureningsstoffer
- Forureningsfluxen kan indgå i vurderingen. Meget små forureningskilder kan på den måde udelukkes.

Identifikation af forureningskilder ved Nærum Vandværk

I indvindingsoplandet til Nærum Vandværk er der kun ganske få sandsynlige forureningskilder. To forureningskilder er så langt væk at transporttiden udelukker dem som værende skyld i forureningen.

En forureningskilde er primært forurennet med PCE som slet ikke findes i vandværkets borer. Et par forureningskilder kan i kombination med de øvrige forhold også udelukkes, da forureningsfluxen synes at være meget lille.

Forureningen fra Rundforbivej 176 anses for at være den mest sandsynlige kilde. Det bestyrker mistanken om, at der er sket stofspreddning ned i kalkmagasinet under forureningskilden.



Figuren illustrerer forureningskilder, flux til primært magasin og opholdstid i oplandet til Nærum Vandværk.

- Kildeopsporing kræver kobling af mange typer af informationer
- Lokal forureningsundersøgelse og modellering på oplandsskala tyder på, at forureningen på Rundforbivej 176 har spredt sig til kalkmagasinet under lokaliteten
- Geologi, hydrogeologi og modellering på oplandsskala er afgørende for risikovurdering

Konceptuel model

Spredning af forurening

Undersøgelserne på Rundforbivej 176 peger på at der er to forskellige spredningsmekanismer, som gør sig gældende. Den primære spredning horisontalt i kildeområdet er betinget af gastransport.

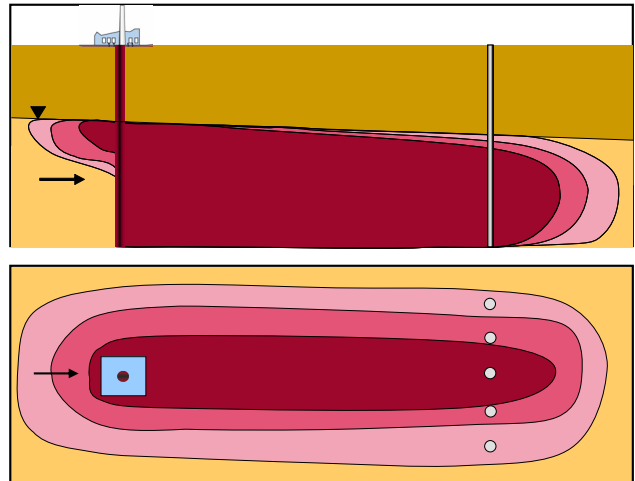
Den dybtliggende forurening (18 m under grundvandsspejlet) tyder på, at der har været fri fase, som har spredt sig vertikalt. Det understøttes yderligere af partikelbanesimuleringer, som peger på, at forureningen fra Rundforbivej kan være årsagen til forureningen af Nærum Vandværk. Det er betinget af, at der er sket spredning til kalkmagasinet under lokaliteten. Det er sandsynligt, da der er tale om en forurening med TCE. Dokumentation af denne hypotese vil kræve yderligere undersøgelse.

Dynamisk udvikling

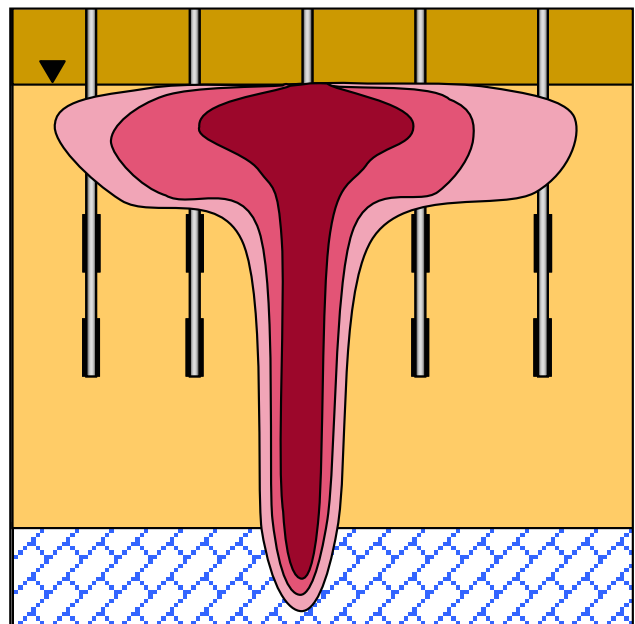
De målte koncentrationer i grundvandet lige under lokaliteten er i dag lave. Hvis der tidligere er sket en spredning af fri fase i gennem både umættet og mættet zone vil der dengang have været meget højere koncentrationer i poreluft og grundvand.

Ved beregninger kan det godtgøres, at de koncentrationer, som observeres i dag 165 m fra forureningskilden i den øvre del af det sekundære magasin, kan forklares ved gas-spredning horisontalt og transport over den kapillare zone til grundvandet. Denne spredningsmekanisme resulterer i en meget bred forureningsfane. Et lokalt spild på et begrænset areal vil ikke kunne give så stor en spredning horisontalt, da den horisontale dispersivitet i et sandmagasin er lille.

Variationer i grundvandets strømningsretning kan også have en betydning, men det er ikke sandsynligt, at den observerede koncentrationsfordeling kan forklares alene ved dette.



Figuren illustrerer den konceptuelle model for forureningsspredningen ved Rundforbivej 176 i et langsgående snit og en plantegning. Spildet af TCE forårsager spredning med to mekanismer. Gasspredningen giver en bred forureningsfane, mens den formodede spredning som fri fase giver en smal og dyb forureningsfane.



Figuren illustrerer den konceptuelle model for forureningsspredningen ved Rundforbivej 176 i et tværsnit nedstrøms forureningskilden. Det formodes at den frie fase på grund af dens densitet har spredt sig til overkanten af lerlaget eller kalken.

Hvad er en konceptuel model

- En konceptuel model er en hypotese for hvordan et system eller en proces virker
- Fejl og usikkerheder kan tilskrives fejl i den konceptuelle model, utilstrækkelige data og usikkerheder i kemiske analyser eller numeriske beregninger.
- Konceptuelle fejl og utilstrækkelige data kan give anledning til de største fejl og bør derfor have høj prioritet i en beslutningsproces.

Hvad kan en konceptuel model bruges til?

- Helhedsorientering i planlægningsfasen
- Planlægning af undersøgelsen så de svage punkter i den konceptuelle model undersøges.
- Løbende identifikation af videnshuller – passer data ind i det overordnede billede?
- En sammenhængende konceptuel model er velegnet til at formidle resultater

Prioritering og afværgelse

Afværgelseforanstaltninger

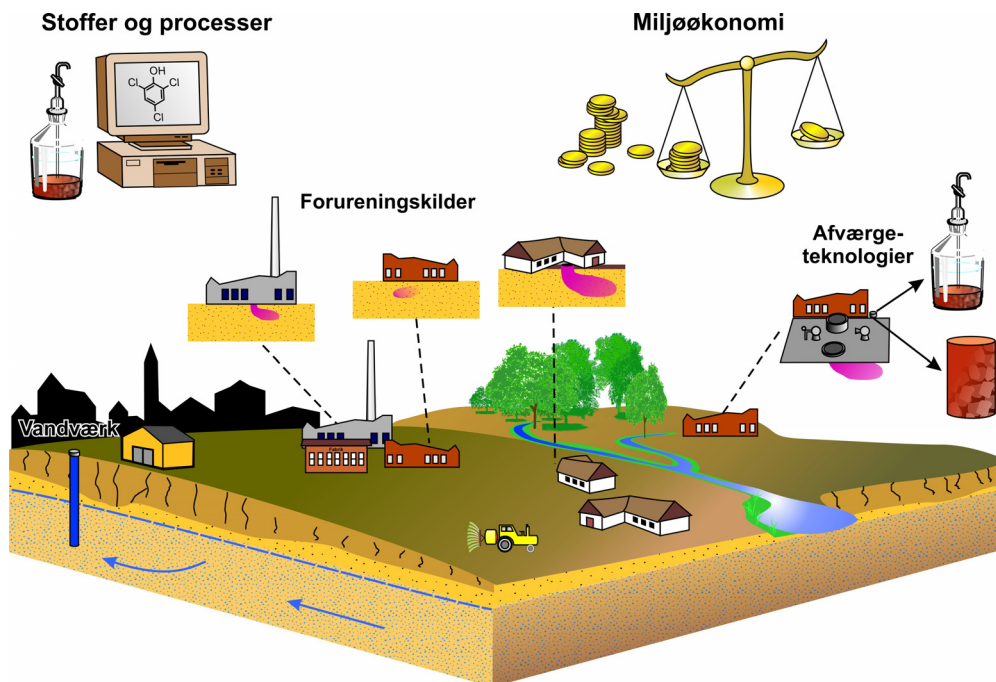
- Der har siden 1995 været afværgepumpe (250.000 m³) i det sekundære magasin
- Strømningsforholdene med og uden afværgepumpning og under forskellige indvindingsforhold på Nærum Vandværk tyder på, at afværgepumpningen kun påvirker strømmingen i det sekundære sandmagasin
- Nærum Vandværk beskyttes ikke af afværgepumpningen
- Der fjernes mange kg klorerede opløsningsmidler fra det sekundære magasin. Denne forurening ville ellers have spredt sig mod Øresund eller et mindre vandløb nord for området
- Formålet med afværgelseforanstaltningen bør genovervejes. En revurdering af afværgelseforanstaltningerne kan potentielt spare penge
- En miljøøkonomisk vurdering bør være en integreret del af en beslutning om afværgelseforanstaltninger

Prioritering af afværgelse

Undersøgelse af punktkilder danner grundlaget for at prioritere og vælge en evt. afværgelse-løsning. En veltilrettelagt og lidt dyrere undersøgelse kan i næste fase billiggøre en afværgelse-løsning.

En afværgelse på Rundforbivej 176 skal ses i sammenhæng med de øvrige forureningskilder i området. Der er behov for at afklare, om der er andre af forureningskilderne i nærområdet, som kan være en trussel. Blandt andet bør forureningskilderne vest for Nærum Vandværk inddrages i denne vurdering. Det er også vigtigt at holde sig for øje, hvad en eventuel afværgelse skal beskytte. Er der tale om at beskytte drikkevandet, vandressourcen eller overfladevandet?

Indgreb over for forureningskilderne kræver en samlet miljøøkonomisk vurdering. De konkrete muligheder og omkostninger skal vejes op mod omkostningerne ved at løse problemerne på Nærum Vandværk.



Figuren illustrerer elementer i en samlet vurdering af risiko og valg af afværgelse for et indvindingsopland.

- To vigtige spredningsmekanismer for forureningen på Rundforbivej 176
- Dokumentation af den konceptuelle model kræver yderligere undersøgelser
- Rundforbivej 176 udgør med stor sandsynlighed en trussel for Nærum Vandværk
- Afværgelseforanstaltninger for området skal ses i en helhed på oplandsskala – herunder betydningen af de øvrige forureningskilder

Fremtidige udfordringer

Bestemmelse af forureningsflux

Der er behov for at udvikle metoder til heterogene geologier og kalk. Niveauspecifik prøvetagning kan give gode resultater, men stiller store krav til antallet af borer. Potentialet i volumenpumpning ved smalle faner og tættere på forureningskilden bør undersøges nærmere. Passive prøvetagningsmetoder kan være relevante, men der er behov for metodeudvikling. For alle metoder gælder, at der skal fokus på kvantificering af usikkerhederne.

Hvordan anvendes forureningsflux?

Forureningsflux kan med fordel indgå i en risikovurdering som et supplement til kvalitetskriterier. Vurdering kræver udarbejdelse af et fælles administrativt grundlag.

Umættet zone og risikovurdering?

Der er behov for at opnå øget viden om den ikke-udvaskningsbetingede stofflux fra den umættede zone til grundvandszonen - en stofflux som er betinget af diffusiv spredning over kapillarzonen. Der bør især fokuseres på betydningen af geologiske forhold og sæsonmæssige variationer i grundvandspejlets placering. Samtidig bør der udvikles modelkoncepter til beregning af den førnævnte stofoverførsel til brug ved risikovurderinger både på lokal- og oplandsskala.

Risikovurdering på oplandsskala

Der er i dette projekt udviklet et værktøj til risikovurdering, som integrerer fluxberegninger på lokal skala med oplandsskala beregninger. Sådanne værktøjer skal i højere grad indarbejdes i fremtidige risikovurderinger. Der bør være fokus på pålidelige geologiske modeller, der er et væsentligt grundlag for modellering på alle skalaer. Hydrauliske parametre er meget betydende og er generelt undervurderede ved dataindsamling.

Kildeopsporing

Opstilling af forureningskilder på oplandsskala er et væsentligt element ved beslutninger om afværge. Integreret anvendelse af historisk information, undersøgelser af de enkelte forureningskilder og modellering på oplandsskala er en farbar vej, som kan benyttes systematisk i fremtiden.

Prioriteringsværktøjer

Integrerede prioriteringsværktøjer bør vinde indpas i miljøforvaltningen for at sikre gennemsigtige beslutninger. Der skal lægges vægt på at skabe overblik via anvendelse af geografiske informationssystemer (GIS). Ved beslutning af indgreb skal det baseres på en helhedsorienteret vurdering.

Miljøøkonomi

Miljøøkonomiske metoder har været anvendt i miljøforvaltningen i Københavns Amt i form af livscyklusanalyser og cost effectiveness analyser. Det medvirker til at sikre en helhedsorienteret tankegang. Samtidig sætter det fokus på tidsperspektivet ved valg af en afværgeløsning, da både anlægs- og driftsomkostninger indgår i beregningerne. Afledte effekter og gener kan også tages med i overvejelserne. Anvendelsen af disse metoder er stadig i sin vorden, og der er behov for metodemæssig udvikling. Ved valg af afværgeteknologier skal der mere fokus på tidshorisonter og definition af oprensningskriterier. Også usikkerheder ved afværgeteknologiernes formåen er et kritisk element.

EU's Vandrammedirektiv

Vandrammedirektivet er under implementering i Danmark. Det rejser en række administrative spørgsmål omkring håndtering af kvalitetskriterier og målfastsættelse for grundvand og overfladevand som helhed. Vidensniveauet omkring samspil mellem grundvand og overfladevand og betydende processer kræver et forskningsmæssigt løft, da det ikke har været i fokus tidligere.

Vil du vide mere

I denne rapport er de væsentligste resultater og konklusioner fra samarbejdsprojektet præsenteret. I tillæg til dette findes en række tekniske notater, hvor alle de anvendte metoder samt de opnåede resultater og konklusioner er præsenteret i en mere detaljeret form. Notaterne kan sammen med det udviklede modelkoncept downloades på sara.er.dtu.dk.

Notatoversigt:

- A. Beskrivelse af lokalitet
- B. Studie i umættet zone
- C. Studie i kapillarzonen
- D. Fluxworkshop
- E. Volumenpumpning
- F. Passive prøvetagere
- G. Forureningsflux ved kilden
- H. Forureningsflux i transekt
- I. Beskrivelse af værkstedsområde
- J. Koncept til risikovurdering
- K. Beskrivelse af lokal model
- L. Beskrivelse og anvendelse af oplandsmodel

Eksamensprojekter relateret til projektet med Københavns Amt:

"Model til risikovurdering af punktkilder på oplandsskala" af Mads Troldborg og Gitte Lemming, oktober 2005

"Spredning af TCE i den umættede zone under en industrigrund" af Marie Bæk Rose og Marie Louise Thomsen, juni 2006

"Modellering af transportprocesser for TCE i den umættede og kapillære zone" af Signe Nielsen, januar 2007.

De nævnte eksamensprojekter er tilgængelige på biblioteket på Institut for Miljø & Ressourcer. E-mail: library@er.dtu.dk

I forbindelse med arbejdet i dette projekt har vi søgt inspiration i en del videnskabelige litteratur. Referencerne kan findes i de tekniske notater. De mest centrale er desuden listet nedenfor:

Umættet zone og kapillarzonen:

Grathwohl, P., 1998. Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

Grathwohl, P., Halm, D., Bonilla, A., Broholm, M., Burganos, V., Christophersen, M., Comans, R., Gaganis, P., Gorostiza, I., Höhener, P., Kjeldsen, P., van der Sloot, H., 2003. Guideline for Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites (GRACOS).

Klenk, I. D. & Grathwohl, P., 2002. Transverse Vertical Dispersion in Groundwater and the Capillary Fringe, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 58, pp. 111-128.

Flux i grundvand:

Guilbeault, M.A., Parker, B.L., Cherry, J.A., 2005. Mass and flux distributions from DNAPL zones in sandy aquifers. *Ground Water*, 43, 1, 70-86.

Bockelmann, A., Ptak, T., Teutsch, G., 2001. An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gas work sites. *Journal of Contaminant Hydrology*, 53, 429-453.

Annable, M.D., Hatfield, K., Cho, J., Klammner, H., Parker, B.L., Cherry, J.A. and Rao, P.S.C., 2005. Field-scale evaluation of the passive flux meter for simultaneous measurement of groundwater and contaminant fluxes, *Environmental Science and Technology*, 39, 7194-7201.

Risikovurdering på oplandsskala:

Einarson, M.D. & Mackay, D.M., 2001. Predicting impacts of groundwater contamination. *Environmental Science and Technology*, 35, 66A-73A.

Institut for Miljø & Ressourcer
Danmarks Tekniske Universitet
Bygningstorvet, Bygning 115
2800 Kgs. Lyngby
reception@er.dtu.dk
4525 1600
www.er.dtu.dk

