

# Drikkevandsrør af plast i forurennet jord



Vurdering af risiko

Seniorprojektleder Kim Haagensen, Orbicon  
Civilingeniør, kemi



# Drikkevandsrør af plast i forurenede jord

## Disposition

- Baggrund
- Permeation generelt
- Teori
- Beregninger og resultater
- Risiko
- Perspektiver
- Hvis tid så : Andre forhold

Arbejdet er udført for HOFOR

# Baggrund – tæthed af plast og gummi

- Ballon gummi er tæt over kort tid, men taber ”pusten”
- Fødevarer er indpakket i special emballage for ikke at trække fugt eller optage/miste smag og duft
- Plastdunke til benzin er specialplast
- Plast dækker over et meget bredt spektrum af forskellige materialer, indholdsstoffer og opbygninger
  - PE, PP, PB, PVC, PEX
  - Kompositmaterialer
  - Indhold af salte, blødgørere og evt. overfladebehandling
- Men: plast er permeabelt !



# Baggrund – erfaringer og eksempler

- Der findes flere eksempler internationalt hvor jordforureninger har kontamineret drikkevand i plastrør
  - Ofte på lavt niveau hvor hverken smag eller lugt afslører forureningen
  - Ofte efter stagnation i ledningsnet

- Rotterdam 1982
- Stagnation 8 timer
- Fordelingsnet af PE

(Bromhead, 1997, Drinking water Inspectorate, UK)

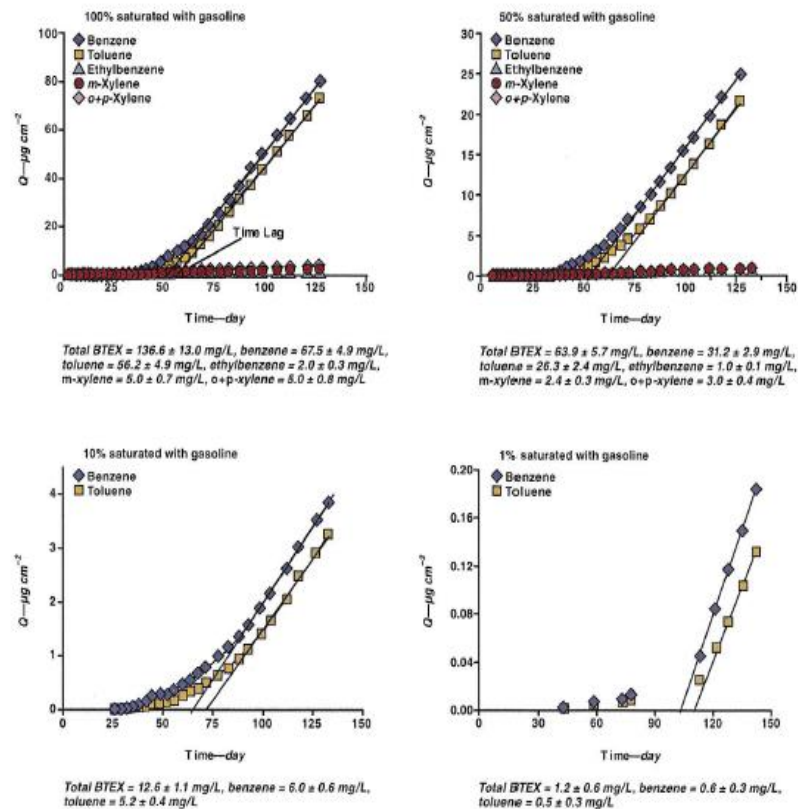
Organic compound	Detected concentration in drinking water samples µg/l				Max detected concentration µg/l
	< 0.5*	0.5-10	10-100	> 100	
Benzene (n)	(143)	(10)	(4)	(6)	7,010
Toluene (n)	(140)	(10)	(4)	(9)	5,050
Xylene (n)	(138)	(12)	(4)	(9)	4080
Carbon tetrachloride (n)	(114)	(2)	(0)	(0)	0.13
Trichloroethene (n)	(104)	(25)	(6)	(2)	13.4
Tetrachloroethene (n)	(79)	(37)	(25)	(2)	14.4

# Permeation - teoretisk

- Permeation omfatter 3 processer (eller flere)
  - ”Opløsning” (sorption) af stof i overfladelag
  - Diffusion gennem godset (evt. flere forskellige lag)
  - ”Afgivelse” (desorption) af stof til nyt medie
- Kan udtrykkes ved Permeabilitetskoefficienten
  - $P = K \cdot D$ 
    - » Hvor K er fordelingskoefficienten mellem medie og plast
    - » Hvor D er diffusionskoefficienten af stof i materiale
- Massetransporten kan beregnes af Fick's 1. lov
  - $F = -P \times (C_i - C_y)/d$

# Permeation – dokumentation

**FIGURE 2** Cumulative mass permeated per unit surface area  $Q$  for BTEX compounds in 1-in. SIDR 9 HDPE pipes exposed to four concentrations of gasoline-contaminated water



BTEX—benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene, HDPE—high-density polyethylene, SIDR—standard inside dimension ratio

# Permeation – beregninger

- Generelt findes 2 situationer
  - Stagnant vand ("stop and go")
  - Vand i bevægelse (flow), varierende
- Begge situationer kan beskrives matematisk:

Ligning 16

$$C_{dv} = \frac{M(t)}{V(t)} = \frac{(F \cdot A \cdot t)}{(q \cdot t)}$$

hvor:

M(t) = samlet tilført masse, g  
 V(t) = samlet vandvolumen, m<sup>3</sup>  
 F = massetransporten, g/m<sup>2</sup>/s  
 A = indre areal af rørstykket, m<sup>2</sup>  
 t = opholdstiden, s  
 q = flow, m<sup>3</sup>/s

- Begge situationer fører til:

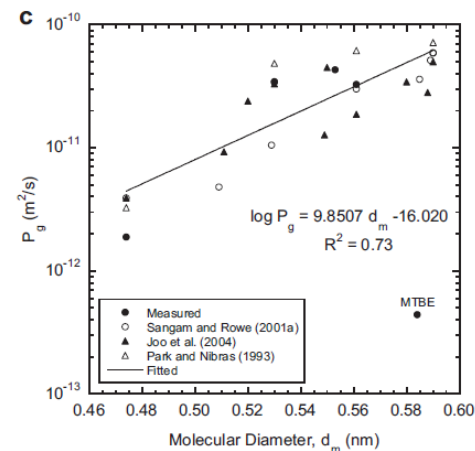
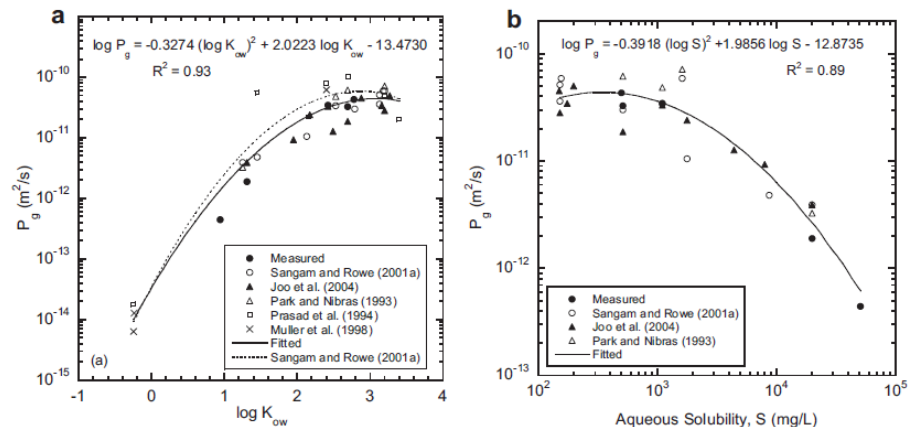
Ligning 19

$$C_y / C_{dv,krav} = \frac{1}{t} \cdot \frac{d \cdot ID}{4} \cdot \frac{1}{P}$$

# Permeabilitetskoefficienten

- Stof og materiale specifik
- Ofte fremkommet ved høje koncentrationer
- Standardiserede forhold

- Heldigvis mange undersøgelser af HDPE

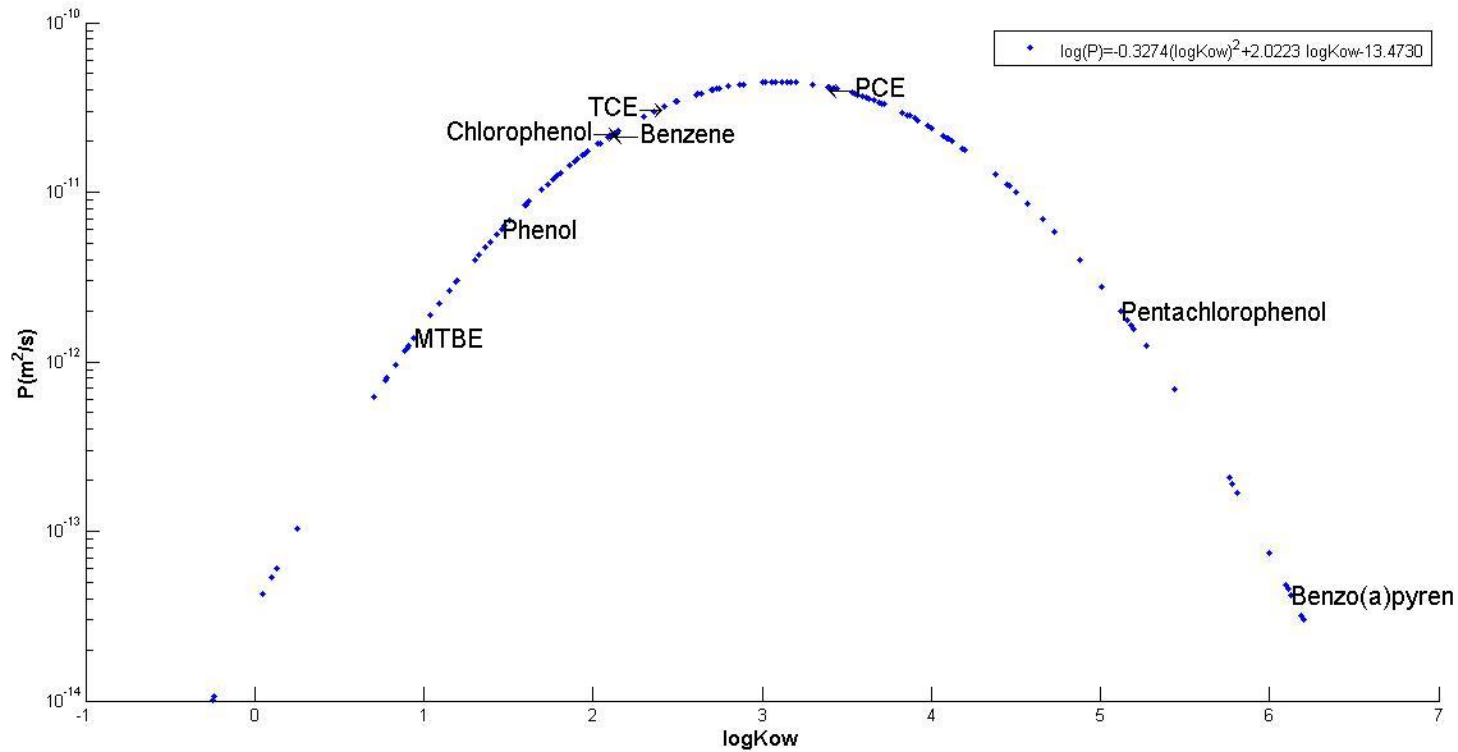


**Ligning 7**  $\log P = -0,3274 (\log Kow)^2 + 2,0223 \log Kow - 13,4730$

Park et al (2012): Comparison of batch and double compartment tests for measuring VOC transport parameters in geomembranes



# Permeation – dokumentation



Medie	Diffusionskoefficient [m²/s]
Luft	4 × 10 <sup>-6</sup> – 2 × 10 <sup>-5</sup>
Poreluft (ler, fyld, sand)	0,08 – 0,11 gange diffusionskoefficienten i luft (JAGG)
Vand	4 × 10 <sup>-10</sup> – 2 × 10 <sup>-9</sup>
HDPE	<4,5 × 10 <sup>-11</sup>

# Permeation – resultater af beregninger

- Grundlag
  - Drikkevand skal ikke indeholde stoffer fra jordforurening (krav  $<DL$ )
  - Lavt flow og stagnation skal kunne accepteres (flow om natten ofte under 0,01 m/s hos HOFOR)  
(flow = 0,005 m/s)
  - Høj permeabilitetskoefficient (max. værdi antaget for alle stoffer i første omgang)

# Dæmpning over rør med stagnant vand

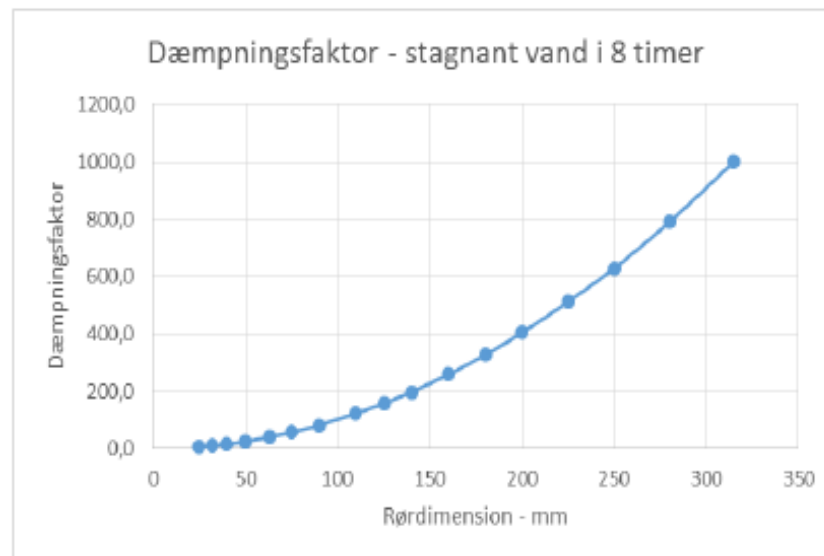
- Stagnation 8 timer
- Beregnet maksimal  $C_y/C_i$

$$C_{dv} = \frac{4 \cdot P \cdot C_y \cdot t}{ID \cdot d}$$

Ligning 19

$$C_y / C_{dv,krav} = \frac{1}{t} \cdot \frac{d \cdot ID}{4} \cdot \frac{1}{P}$$

- Vigtige parametre
  - Rørdimension
    - Godstykkelse (transportvej)
    - Indre diameter (ID) som afgivningsflade
    - Vandvolumen
    - Beregnet for SDR17 og SDR11
  - Opholdstiden



# Dæmpning over rør med flow

- Beregningsgrundlag

Ligning 18

$$C_y = C_{dv,krav} \cdot \frac{v}{L} \cdot \frac{d \cdot ID}{4} \cdot \frac{1}{P}$$

Ligning 19

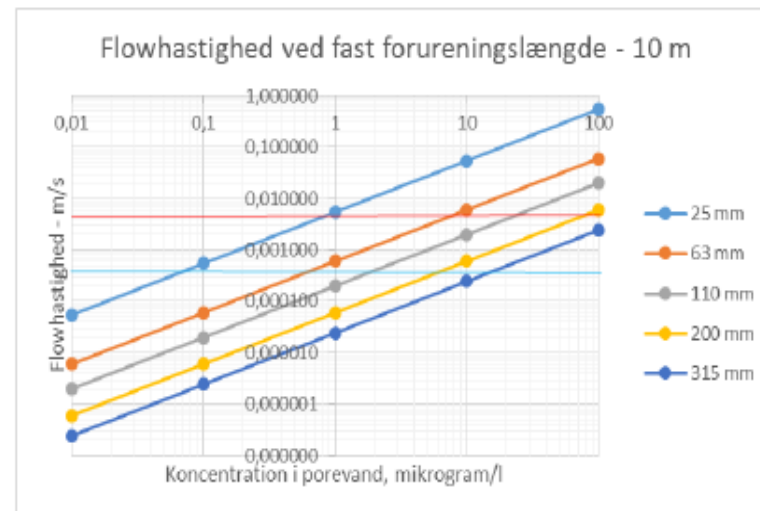
$$C_y / C_{dv,krav} = \frac{1}{L} \cdot \frac{d \cdot ID}{4} \cdot \frac{1}{P}$$

- Flere parametre er vigtige:

- Rørdimension
  - Godstykkelse (transportvej)
  - Indre diameter (ID) som afgivningsflade
  - Vandvolumen
- Opholdstiden udtrykt ved:
  - Flowhastigheden
  - Forureningslængde

# Dæmpning over rør med flow

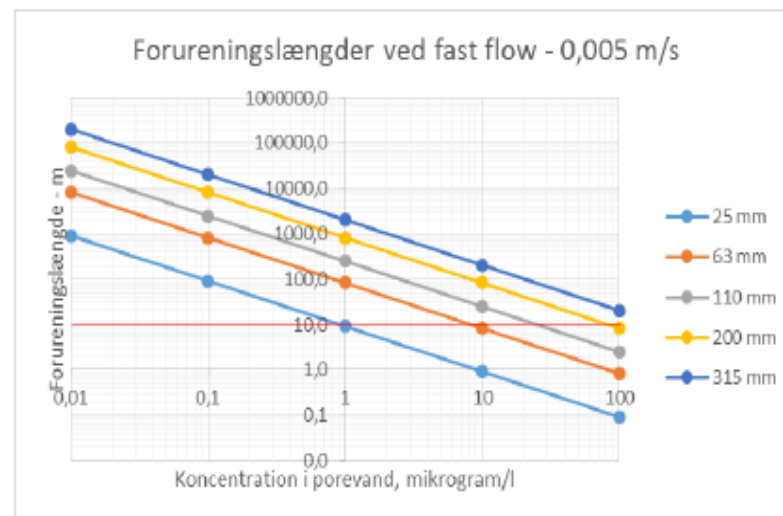
- Fast forureningslængde – 10 m
- Forskellige rørdimensioner
  - SDR17 (<63 mm) eller SDR11
- I figuren er vist kritisk ydre koncentration for overholdelse af koncentration  $C_i$  på 0,01 mikrogram/l
- Rød vandret streg = sædvanligt lavt flow (natforbrug)
- Blå vandret streg = ophold svarende til stagnation 8 timer
- Koncentrationer i forureningskilder øverst til højre



Figur 5.4 Sammenhæng mellem flowhastighed og krav til ydre koncentration for fast forureningslængde for forskellige rørdimensioner. På figuren er vist den lave flowhastighed på 0,005 m/s anvendt i beregningerne (rød vandret streg) og en beregnet flowhastighed på 0,00035 m/s svarende til opholdstiden ved stagnation på 8 timer (blå vandret streg).

# Dæmpning over rør med flow

- Fast lavt flow på 0,005 m/s svarende til natforbrug
- Forskellige rørdimensioner
  - SDR17 (<63 mm) eller SDR11
  - I figuren er vist kritisk ydre koncentration for overholdelse af koncentration  $C_i$  på 0,01 mikrogram/l
  - Rød vandret streg = anvendt forureningslængde på 10 m
- Koncentrationer i forureningskilder nederst til højre



Figur 5.5 Sammenhæng mellem forureningslængde og krav til ydre koncentration ved fast lavt flow. På figuren er vist forureningslængden på 10 m anvendt i beregningerne (rød vandret streg).

# Risikovurdering

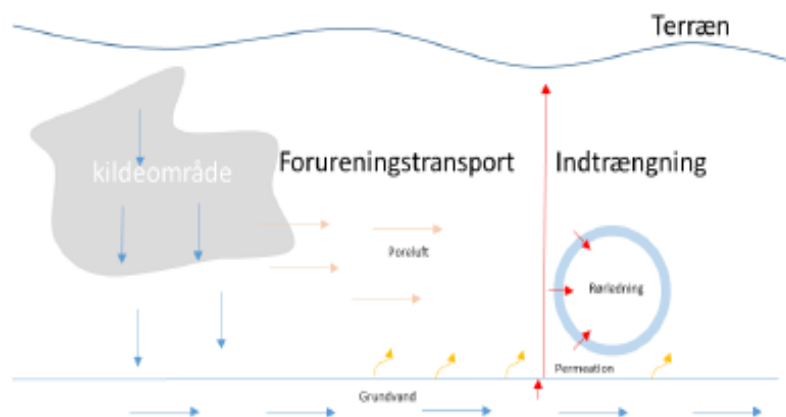


- Risiko ved:
  - Ved lavt flow og stagnation
  - Ved små rørdimensioner
  - Ved "mobile" og permeable stoffer
    - I poreluft
    - I grundvand
- Ved koncentrationer fra omkring
  - 1 – 10 µg/l i vand
  - 1.000 – 10.000 µg/m<sup>3</sup> i poreluft
- Herunder producenternes egen vurdering (konc. i µg/l)

Stofgruppe	PE homogen	PE med alukappe (SLA)
Aromatiske kulbrinter	9	20.000 – 1.780.000
Klorerede opløsningsmidler	10	130.000 – 7.395.000
Alifatiske kulbrinter	100	450 – 9.500
Polyaromatiske forbindelser (PAH)	5	1.300 – 30.000
Phenol	23.000	8.500.000

# Risikovurdering for jordforureninger

- Konceptuel model for påvirkning af rørledning



- Risiko ved kildeområde
- Risiko ved flygtigt stof i poreluft
- Risiko ved vandopløseligt stof med stor flygtighed
- Risiko ved rør lagt vådt



# Vurdering af risiko og jordkoncentrationer

- Beregninger af jordkoncentrationer for flere rørdimensioner er udført baseret på stoffer og data i JAGG
  - Immobiler stoffer kan have meget høje koncentrationer uden risiko (tunge kulbrinter, tjærekomponenter)
  - Flygtige komponenter skal under jordkvalitetskriterierne for fjernelse af risiko (ligesom med vurdering af risiko for indeklimate og grundvand)
  - Vandopløselige stoffer uden særligt højt damptryk har kun risiko ved rør lagt vådt (fx pesticider og mange vandblandbare stoffer)

# Oversigt over risiko ved jordforureninger

- Samlet generel oversigt over potentiel risiko

Stofgruppe	Potentiel risiko (medie)
Aromatiske kulbrinter (BTEX og naphtalen)	Høj (vand og luft)
Polyaromatiske forbindelser (PAH'er)	Lav
Phenoler og chlorphenoler	Middel (vand)
Kulbrinter	Middel (vand og luft)
Tunge kulbrinter	Lav
Chlorerede opløsningsmidler	Høj (vand og luft)
Vandblandbare opløsningsmidler (fx alkoholer, ætere og ketoner)	Middel (vand og luft)
Pesticider	Middel (vand)
PFOS, PFOA	Middel (vand)

# Perspektivering

- Risiko for kontaminering af drikkevand
  - Ved vi nok om forureninger ved ledningsstrækningerne
  - Anvendes oplysninger om forureninger til vurdering af risiko for ledningsført drikkevand
  - Bliver uheld og spild vurderet i forhold til ledningsført drikkevand
  - Er det hovedsagelig på stikledningerne, og derfor kun grundejers problem ?
  - Opdages ofte først ved overskridelse af grænser for lugt eller smag !

# Stoffer ud over dem i JAGG databasen



- Litteratur om biodiesel permeabilitet (methyl estere)
  - Opløselighed og diffusion i HDPE af samme størrelsesorden som forventet ud fra stofegenskaber og model
- Litteratur om phenoler og chlorphenoler
  - Afviger i forhold til model af Rowe & Sangam, men med en permeabilitet ca. 10 gange mindre

# Temperaturafhængighed

- Arrhenius sammenhængen

Ligning 9  $S = S_0 \cdot e^{(-\Delta H/RT)}$

Ligning 10  $D = D_0 \cdot e^{(-E_D/RT)}$

Ligning 11  $P = P_0 \cdot e^{(-E_P/RT)}$

hvor:

$\Delta H$  er opløselighedsenergien for opløsning af stoffet i materialet  
 $E_D$  og  $E_P$  er aktiveringsenergien for diffusion og permeation i materialet.

- Ved lidt matematik fås:

Ligning 12  $D_{T1} = D_{T2} \cdot \theta^{(T1-T2)}$

hvor:

$\theta$  er en konstant temperatur koefficient  
 $T1$  og  $T2$  er temperatur i Kelvin  
 $D$  er diffusionskoefficienten

- Undersøgelser for BTEX gennem HDPE plast
  - Reduktion af  $P$  med en faktor 2-3 fra 22 °C til 9 °C

# Andet

- Effekter af høje koncentrationer
  - ”Opløsning” eller ”swelling” af materialet giver øget gennemtrængelighed
  - BTEX følgende sammenhæng

Ligning 8

$$F(P_m) = 0,0079 \cdot C_{\text{bulk}}^{1,1323}$$

hvor:

$F(P_m)$  = samlede permeation,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{dag}$   
 $C_{\text{bulk}}$  = vandkoncentration,  $\text{mg}/\text{l}$

- Generelle materialeegenskaber

**Table 1.** Effect on Contaminant Diffusivity and Solubility in Polymers when Environmental, Polymer, or Contaminant Property Is Increased

Parameter	Property <sup>a</sup>	
	Diffusivity	Solubility
Temperature	Increase	Increase
Bulk density/crystalline content	Decrease	Decrease
Crosslink density	Decrease	Decrease
Molecular diameter and Molar volume	Decrease	Increase
Carbon black content	Decrease	—

<sup>a</sup>References used to create the table include Crank and Park (1968) and Comyn (1985).

- Effekter af ændret opbygning af plastmaterialet
  - Alukapperør
  - Kompositmaterialer
  - Membran rør



Figure 2: HDPE Membrane

