

Genomträngning av kemiska markföroreningar till dricksvatten i distributionsnätet

Magnus Bäckström

Maria Eklund

Ann-Sofie Wikström



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Agneta Granberg, ordförande	Göteborgs kommun
Daniel Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten
Henrik Aspegren	VASYD
Per Ericsson	Norrvatten
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Henrik Kant	Göteborg Vatten
Lena Ludvigsson-Olafsen	Smedjebackens kommun
Lisa Osterman	Örebro kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten
Bo Rutberg	SKL
Lena Söderberg	Svenskt Vatten

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47607
117 94 Stockholm
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Genomträngning av kemiska markföroreningar till dricksvatten i distributionsnätet
Title of the report:	Penetration of soil contaminants in network
Rapportnummer:	2012-14
Författare:	Magnus Bäckström, Maria Eklund och Ann-Sofie Wikström; Vatten & Miljöbyrå AB
Projektnummer:	10-131
Projektets namn:	Risk för genomträngning av kemiska markföroreningar till dricksvatten i distributionsnätet.
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling
Rapportens omfattning	
Sidantal:	48
Format:	A4
Sökord:	Diffusion, plaströr, tätningssring, bensin, kolväten, vattenledning.
Keywords:	Permeation, diffusion, fuel, pollution, drinking water, gasket.
Sammandrag:	Denna rapport redovisar, i huvudsak baserat på litteraturstudier, en kartläggning av kunskapsläget avseende risken för genomträngning av kemiska föroreningar till dricksvatten i distributionsnätet.
Abstract:	This report presents a literature review of the state of knowledge regarding the risk of contamination of drinking water in the distribution network due to permeation of soil pollutants.
Målgrupper:	VA-huvudmän, VA-ingenjörer, VA-chefer, VA-Konsulter.
Omslagsbild:	Foto: Anders Landström.
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2012
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Dricksvatten är vårt viktigaste livsmedel som leveras kontinuerligt direkt hem till varje hushåll och varje vattenkrävande verksamhet via en unik distributionskanal – vattenledningsnätet. Distributionen av dricksvatten är mycket effektiv och pålitlig, men risken finns att vattenkvaliteten påverkas under transporten i ledningsnätet.

Är då rörväggen en tillräcklig barriär mot yttre påverkan från en markförorening? Som denna rapport visar är denna fråga relativt komplicerad att besvara med tanke på det närmast oändliga antalet kombinationer av föroreningar, halter, rörmaterial, flöden och systemutformningar som finns. Förhoppningen är dock att denna rapport ska vara ett stöd för VA-huvudmän i Sverige som av olika skäl hamnar i situationer där vattenkvalitetsförändring i distributionssystemet på grund av yttre påverkan av kemiska föroreningar konstateras eller befaras.

Projektet som redovisas i denna rapport har genomförts av Vatten & Miljöbyrån AB i Luleå huvudsakligen finansierat av Svenskt Vatten Utveckling. Författare till rapporten är Magnus Bäckström, Maria Eklund och Ann-Sofie Wikström, samtliga Vatten & Miljöbyrån AB. Författarna vill tacka alla som bidragit med synpunkter i arbetet. Ett särskilt tack till Stefan Marklund, Luleå kommun och Filip Gränfors, Jönköpings kommun som agerat bollplank och referenspersoner under hela projektet. Ett stort tack även till Ingemar Björklund, IBCO AB och Svante Lindeborg, Tubman AB som bidragit med sina erfarenheter och synpunkter.

Magnus Bäckström, Maria Eklund och Ann-Sofie Wikström

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	7
1 Bakgrund	8
1.1 Problembild	8
1.2 Kunskapsbehov	9
1.3 Syfte	9
1.4 Metod.....	9
2 Grundläggande fakta kring genomträngningsprocessen	10
2.1 Allmänt	10
2.2 Delprocesser vid genomträngning	10
2.3 Generell teoretisk modell för genomträngning	12
2.4 Teoretisk modell för beräkning av genomträngningstid	12
2.5 Polymertyper och egenskaper	13
3 Prioriterade föroreningar	14
3.1 Klassificering och prioritering utifrån kemiska egenskaper	14
3.2 Prioriterade föroreningar utifrån tidigare studier	15
3.3 Kortfattad beskrivning av ett antal prioriterade föroreningar	15
3.3 Hälsomässiga gränsvärden	20
4 Dokumenterade fall av genomträngning	22
4.1 Incidenter i Europa före 1987	22
4.2 Incidenter i USA före 1991	22
4.3 Incidenter i USA rapporterade under 2000-talet	23
4.4 Genomträngningsfrekvens	24
5 Fördjupning kring genomträngning av plaströr	25
5.1 Tidigare forskning	25
5.2 Beräkningsmodeller genomträngning av plaströr	28
5.3 Svällning av plaströr	30
5.4 Sammanställning av försöksresultat och kritiska parametrar	30
6 Fördjupning kring genomträngning av tätningsringar	33
6.1 Tidigare forskning	33
6.2 Beräkningsmodeller genomträngning av tätningsring	34
6.3 Sammanställning av försöksresultat och kritiska parametrar	35
7 Riskvärdering utifrån referensvärden och teoretiska modeller	37
8 Slutsatser	41
9 Rekommendationer	42
10 Fortsatt arbete	43
Referenser	45

Sammanfattning

Denna rapport redovisar, i huvudsak baserat på litteraturstudier, en kartläggning av kunskapsläget avseende risken för genomträngning av kemiska föroreningar till dricksvatten i distributionsnätet. Genomträngning är en fysikalisk-kemisk överföring av massa, vilken involverar diffusion av ämnen i gasfas eller vätskefas genom ett poröst fast medium. Studien fokuserades på markföroreningar som i olika källor rapporterats orsaka incidenter av genomträngning (ca 20 st. ämnen som härrör från petroleumprodukter eller organiska lösningsmedel). Dessa föroreningar är potentiellt hälsovådliga och/eller orsakar smak- och luktproblem i dricksvatten. De vanligast förekommande ledningsmaterialen i svenska vattenledningsnät (PE, PVC och segjärn) prioriterades. Föroreningar kan teoretiskt tränga in i dricksvatten från omgivande förorenad mark genom exempelvis rör, kopplingar, tätningsringar, reservoarer etc. som är gjorda i icke-metalliska polymeriska material, såsom plast och gummi. Risk för genomträngning finns både för dricksvattensystem anlagda i den omättade zonen ovan grundvattennivån såväl som i den mättade zonen under grundvattennivån.

Risk för dålig vattenkvalitet och/eller lukt- och smakpåverkan på dricksvattnet till följd av genomträngning av markföroreningar förutsätter normalt mycket låg vattenomsättning (i princip stillastående vatten under längre tid) samt höga koncentrationer av markförorening. Frekvensen av incidenter (verkliga fall av genomträngning som givit höga föroreningshalter i dricksvattnet) är mycket låg, enligt dokumenterade undersökningar. För huvudvattenledningar är frekvensen lägre än 5 fall per 100 000 km ledning. För servisledningar i storleksordningen 1–2 incidenter per 100 000 serviser.

Det är betydande skillnader i diffusionskoefficienter (genomsläpplighet) mellan olika ledningsmaterial och tätningsringar. Genomträngning genom en opåverkad ledning är dock en långsam process, oavsett rörmaterial/tjocklek finns normalt tillräcklig tid att agera och att sanera förorenad jord om det görs direkt efter en spillolycka. En riskvärdering visar att PE är det minst motståndskraftiga materialet mot bensinförorening, medan PVC och järn är mycket motståndskraftiga mot sådan förorening, dock kan bensen tränga genom tätningsringar för PVC- eller järnrör. För PE-ledningar finns risk att gränsvärdet 1 µg/l för bensen i dricksvatten överskrids om halten förorening i marken är hög.

Genomträngning pågår kontinuerligt genom en ledning som under lång tid legat i förorenad mark, om den legat så länge att ämnet väl börjat tränga in i dricksvattnet. När det gäller plastledningar (PE och PVC) och vissa tätningsringar som utsätts för höga koncentrationer petroleumförorening under lång tid kan porerna i plasten fyllas med organiska föroreningar, varvid plasten sväller och blir mer genomsläpplig. Förändringen är inte reversibel, en påverkad plastledning måste tas bort och ersättas med en ny ledning, det räcker ej att enbart ta bort förorenad jord och rensa ledningen. Rekommendationer baserat på resultaten av litteraturstudien redovisas tillsammans med förslag på fortsatta studier inom ämnesområdet.

Summary

This report presents a literature review of the state of knowledge regarding the risk of contamination of drinking water in the distribution network due to permeation of soil pollutants. Permeation is a physical-chemical mass transfer which involves the diffusion of substances in the gaseous or liquid phase through a porous solid media. The study focused on soil pollutants that have caused documented incidents of penetration (about 20 substances derived from petroleum products or organic solvents). These pollutants are potentially harmful to human health and/or cause taste and odour problems in drinking water. The most common materials in Swedish water pipes (PE, PVC and ductile iron) were prioritized. Substances can theoretically penetrate to the drinking water from the surrounding contaminated soil through pipe walls, fittings, gaskets, reservoirs, etc. which are made of non-metallic polymeric materials, such as plastics and rubber. Permeation could occur in drinking water systems situated in the unsaturated zone above the groundwater table as well as in the saturated zone below the groundwater table.

Impact on drinking water quality and/or taste and odour as a result of the permeation of soil contamination normally requires very low water exchange in the pipe and high concentrations of soil contamination. The frequency of incidents (real cases of permeation that gave high concentrations in drinking water) is very low, according to documented statistics from the United States. For the main water lines, a frequency of less than 5 cases per 100 000 km have been reported. For service lines, the frequency was in the order of 1–2 incidents per 100 000 service lines.

There are significant differences in the diffusion coefficients between different pipe materials and between different gasket materials. Permeation through an unblemished pipe is a slow process. There is usually sufficient time to act and to remediate contaminated soil if done immediately after a spill, regardless of pipe material and thickness of the pipe wall. A risk evaluation shows that PE has the lowest resistance to permeation of fuel contamination, while PVC pipes and gasketed iron pipes is highly resistant to such pollution. However, if the pipe is exposed to high concentrations of benzene this could cause permeation through common gasket materials and PVC pipes. For PE there is a risk that the limit of 1 microgram per litre for benzene in drinking water is exceeded in case the level of contamination in the soil is high.

Permeation is continuous through a pipe that has been in contaminated soil for a long time and if break-through has occurred (i.e. if the soil contaminant has penetrated the pipe wall and has reached the drinking water). Swelling of plastic pipes (PE, PVC) and certain gasket materials which are exposed to high concentrations of petroleum contamination for a long time has been observed. Swelling is not reversible and it makes the pipe material more permeable. Thus, an affected plastic pipe should be removed and replaced with a new pipe. It is not enough to simply remove the contaminated soil and flush the pipe. Recommendations are presented, based on the results of the literature review, along with suggestions for further studies.

1 Bakgrund

1.1 Problembild

Det allmänna vattenledningsnätet i Sverige har en total längd av cirka 70 000 kilometer (källa: Svenskt Vatten). Den sammanlagda ytan av rörvägg som är i kontakt med omgivande mark är således mycket stor. Tidigare och nuvarande hantering av farliga ämnen i vårt samhälle innebär en risk för markförorening eller akut spridning av vätskor, exempelvis drivmedel eller industriavloppsvatten.

Huruvida dricksvatten som transporteras i en ledning kan ta smak av ämnen som finns i omkringliggande mark är normalt inte en stor fråga vid projektering och anläggning av vattenledningsnät. Det finns dock erfarenheter av att vattenledningar förlagda längre sträckor i moss- och myrmark kan ge dålig smak på vattnet, i synnerhet om det rör sig om ändledningar av mindre dimensioner med tidvis stillastående vatten. Kemiska ämnen i mark, lösta i vatten eller i gasfas, kan således påverka dricksvattnet negativt. Problem med genomträngning av markföroreningar till dricksvatten i distributionsnätet är främst förknippat med plastledningar, men även rörsystem med fogar där tätningssring av gummi innebär en risk för genomträngning.

Detta pekar på vikten av att göra en korrekt riskbedömning om kemiska ämnen kan påverka vårt dricksvatten, i synnerhet diffust i distributionsnätet. Vilka skyddsåtgärder som är rimliga kan vara svårt att avgöra, eftersom sannolikheten för genomträngning är liten men konsekvenserna allvarliga. Risken för genomträngning av toxiska markföroreningar genom rörvägg eller tätningssringar/packningar kan exempelvis behöva utredas när:

- verksamheter som hanterar giftiga kemiska ämnen, exempelvis bensinmackar, önskar etablera sig i nära anslutning till befintliga distributionsledningar för dricksvatten.
- ombyggnad, nyexploatering, förtätning eller stadsomvandling planeras i områden med förorenad mark eller i områden där inkapslat organiskt material leder till gasbildning.
- vattenabonnenter hör av sig med klagomål på smak och lukt som möjligen kan förklaras av att ämnen från omgivande mark påverkar dricksvattnet.

Frågan om plaströr kan avge potentiellt toxiska ämnen till dricksvatten har diskuterats och utretts. En kunskapssammanställning finns publicerad av DANVA (2004). Även om det finns stora skillnader mellan genomträngning från mark och emittering av ämnen från själva plasten kan båda processerna ge en liknande effekt i distributionsnätet, det vill säga en ökning av halten skadliga ämnen eller avgivning av ämnen som kan påverka smak och lukt. Tidigare studier pekar på att det kan förekomma en avgivning av antioxidanter från PE-rör och dibutyltenn från PVC-rör (DANVA 2004).

Ett exempel på hur en VA-organisation hanterar ett misstänkt fall av genomträngning av markförorening kan hämtas från Luleå. Under hösten 2010 inkom till VA-verksamheten i Luleå kommun ett larm att dricksvattnet i ett område smakade bensin. Larmet föranledde kommunen att gå ut med

rekommendationer att inte använda dricksvattnet som livsmedel. Man levererade dricksvatten till området med mobila tankar till dess akuta åtgärder genomförts och smakproblemen försvunnit. Omfattningen och ursprunget till luktstörningen visade sig svår att fullständigt klarlägga (Viklund 2012).

Luleå kommun drog slutsatsen att störningen kan nå dricksvattnet på fyra sätt; via diffusion från direkt förorening i mark genom vattenledningens rörvägg eller via otät koppling, via diffusion som förångad produkt till fri luft och vidare till avluftningsrör ansluten till fri vattenyta i reservoar eller avluftningsrör in i byggnad/bostad, via diffusion från spill i dagvattenbrunn/ledning genom mark till dricksvattenledning eller slutligen via åter sugning i servisledning för dricksvatten från verksamhet/företag. I det akuta läge som uppstod ställdes frågan huruvida eventuella organiska markföroreningar från befintliga eller nedlagda industrier kunnat diffundera in eller på något annat sätt trängt in i dricksvattnet.

1.2 Kunskapsbehov

Det aktuella fallet från Luleå fick relativt stor uppmärksamhet i lokala media och skapade oro hos abonnenter. Detta pekar på vikten av att göra en korrekt riskbedömning om kemiska ämnen kan påverka vårt dricksvatten, i synnerhet diffust i distributionsnätet. Få saker undergräver förmodligen det höga förtroende som medborgarna normalt har till sitt dricksvatten så som en osäkerhet kring orsaker och processer som potentiellt förgiftar dricksvattnet. De kemiska processerna och riskbedömningarna kan uppfattas som komplicerade, vilket kan leda till onödig oro och orimliga skyddsåtgärder i vissa fall. VA-huvudmän i Sverige bör därför rimligen vara betjänta av en kunskapssammanställning inom detta område.

1.3 Syfte

Primärt syfte med denna studie är att kartlägga kunskapsläget avseende risken för genomträngning av kemiska föroreningar till dricksvatten i distributionsnätet. Studien fokuserar på kemiska ämnen i mark som är toxiska eller som kan orsaka smak- och luktproblem.

1.4 Metod

Insamlingen av underlag och data samt den efterföljande syntesen har baserats i huvudsak på litteraturstudier. Den inledande litteratursökningen visade att det finns ett internationellt stoff att samla in, studera och objektivt sammanställa. Ett antal större arbeten nyligen publicerade och diskuterade i USA var av särskilt intresse.

Under litteratursökning och analys prioriterades de vanligast förekommande ledningsmaterialen i svenska vattenledningsnät (PE, PVC och segjärn) samt de organiska ämnen som i olika källor rapporterats orsaka incidenter av genomträngning (ca 20 st. ämnen som härrör från petroleumprodukter eller organiska lösningsmedel). När det gäller segjärnsrör var det fogen/tätningssringen som ägnades intresse.

2 Grundläggande fakta kring genomträngningsprocessen

2.1 Allmänt

Föroreningar kan teoretiskt tränga in i dricksvatten från omgivande förorenad mark genom exempelvis rör, kopplingar, tätningsringar, reservoarer etc. som är gjorda i material som medger genomträngning (*eng. permeation*). Problemet är generellt begränsat till ickemetalliska polymeriska material, såsom plast.

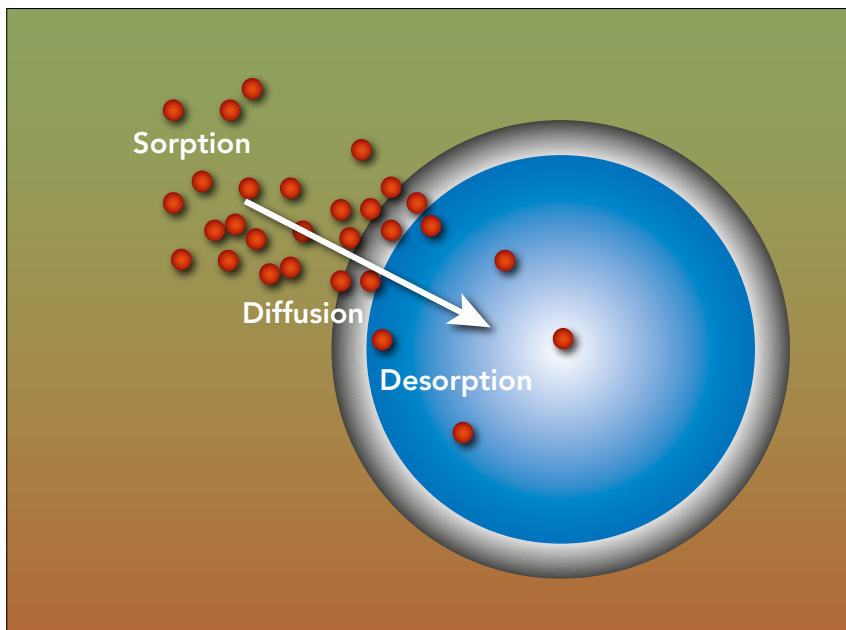
Genomträngning är en fysikalisk-kemisk överföring av massa vilken involverar diffusion av ett ämne genom ett poröst fast medium. Genomträngning kan ske av ämnen såväl i gasfas som vattenlös fas. De föroreningar som är av störst intresse i fråga om genomträngning i dricksvattensystem är flyktiga kolväten och organiska lösningsmedel. Relevanta ämnen och föroreningar beskrivs närmare i kapitel 3. Risken finns både för dricksvattensystem anlagda i den omättade zonen ovan grundvattennivån såväl som i den mättade zonen under grundvattennivån.

Materialen i plaströr och tätningsringar består av polymerer det vill säga långa strängar av sammankopplade molekyler. PVC-plast består exempelvis av kedjor av vinylkloridmolekyler. Polymererna ligger tätt sammanpackade, men det finns ändå små mikroskopiska hålrum mellan polymerkedjorna. Stora grenade eller sfäriska molekyler, exempelvis kolvätekedjor med minst sju kolatomer, har svårt att tränga genom materialet eftersom hålrummen är för små. Små molekyler kan däremot via hålrummen vandra genom polymermaterialet. En avgörande anledning till att materialen ändå är vattentäta så att inte vatten läcker ut, är att vattenmolekylen är polär medan polymermaterialen i allmänhet är opolära.

Vatten är ett starkt polärt ämne och stöts därför bort från de opolära polymererna som utgör rörväggen eller tätningsringen, vilket gör polymermaterialen vattentäta. Däremot kan opolära små molekyler, såsom exempelvis bensen, vandra genom polymermaterialen via tillgängliga hålrum. När en dricksvattenledning ligger i förorenad mark finns därför risk att opolära förorenande ämnen vandrar från marken eller markvattnet genom ledningen och in i dricksvattnet.

2.2 Delprocesser vid genomträngning

Genomträngning av markföroreningar till dricksvatten kan ses som en tre-stegsprocess: sorption – diffusion – desorption (se figur 2-1). Först vandrar föroreningen från marken eller markvattnet till rörets utsida, där det löser sig i rörmaterialet och börjar tränga in (sorption). Därefter diffunderar ämnet genom rörets porösa struktur (diffusion). Slutligen löser sig ämnet och tränger in i dricksvattnet på insidan av röret (desorption från rörmaterialet).



Figur 2-1 Delprocesser vid genomträngning av markförorening till dricksvatten.

2.2.1 Sorption

Sorption, det vill säga hur mycket av det förorenande ämnet som hamnar på utsidan av röret eller tätningssringen och kan tränga in per ytenhet beror främst på ämnets koncentration i marken eller markvattnet samt fördelningskoefficienten (lösligheten, betecknad S) för ämnet i det aktuella polymermaterialet.

2.2.2 Diffusion

Diffusion kan ske när det förorenande ämnet har fördelat sig över polymermaterialets gränsyta och börjat tränga in i materialet, det vill säga det förorenande ämnets vandring genom polymermaterialet via så kallade Browns molekylrörelse. Den innebär molekyelförflyttning som inte drivs av andra krafter än koncentrationsskillnader. Koncentrationen av det förorenande ämnet är högst i gränsytan mellan polymer och omgivande mark. Diffusionen innebär att ämnets molekyler successivt förflyttas inåt, i riktning mot rörets insida, eftersom lägre koncentration råder där. Förflyttningen pågår så länge det råder en koncentrationsskillnad mellan utsida och insida. Diffusionen bestäms av den diffusionskoefficient D (enhet cm^2/s) som gäller för den aktuella kombinationen av penetrerande ämne och polymermaterial.

2.2.3 Desorption

Desorption kallas processen när det förorenande ämnet avges från rörmaterialet och därmed vandrar in i dricksvattnet från insidan av röret eller tätningssringen, alltså i princip den omvända processen till sorption. När det är samma slags medium på insidan av röret som på utsidan (t.ex. vatten) så styrs sorptions- och desorptionsprocesserna av samma fördelningskoefficient, förutom i de fall när penetrantmolekylen är starkt bunden i polymeren.

2.3 Generell teoretisk modell för genomträngning

Teoretiska modeller har tagits fram för att beskriva transporten av en förorening från omgivande mark, genom rörmaterialet och in i dricksvattnet på insidan. Normala värden på variabler som ingår i modellerna har beräknats utifrån experimentdata.

Genomträngning eller flux, förkortad F , definieras som den mängd av ett ämne som tränger igenom en viss kontaktyta (exponerad yta) per tidsenhet. Fluxen är ett resultat av alla tre processerna sorption – diffusion – desorption. Fluxen bestäms av en permeationskoefficient P (enhet cm^2/s), vilken är en produkt av $S \times D$, alltså fördelnings- och diffusionskoefficienterna. Fluxen ges av följande ekvation enligt Cheng (2009):

$$F = DS \frac{C_m - C_d}{l} = P \frac{C_m - C_d}{l}$$

F = flux det vill säga massflöde förorening som tränger genom per ytenhet ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$).

C_m = koncentration av förorenande ämne i markvattnet närmast röret (mg/l).

C_d = koncentration av förorenande ämne i dricksvattnet (mg/l).

D = diffusionskoefficient för aktuell kombination förorening och polymermaterial (cm^2/d).

S = det förorenande ämnets löslighet (fördelningskoefficient) i polymermaterialet (dimensionslös).

P = permeationskoefficient för aktuell kombination förorening och polymermaterial (cm^2/d).

l = polymermaterialets, det vill säga rörets/tätningens, tjocklek (cm).

Samma tidsenhet ska användas för F , D och P . Ovan har använts dygn men standardenheten är annars tidsenheten sekund. Eftersom genomträngningsförloppet normalt pågår under lång tidsenheten dygn vara bättre anpassad till praktisk tillämpning.

Processen drivs inåt genom ledningen så länge föroreningshalten i markvattnet är högre än i dricksvattnet och går snabbare ju större koncentrationsskillnaden är.

Det hydrostatiska tryck som normalt råder i dricksvattenrör utgör obetydligt motstånd mot genomträngning enligt termodynamisk teori (USEPA 2002).

2.4 Teoretisk modell för beräkning av genomträngningstid

Den tid, T , som man har på sig för att hinna sanera efter ett utsläpp till marken innan föroreningen stadigvarande börjar tränga in i dricksvattnet kan förenklat uppskattas med hjälp av följande formel (Cheng 2009):

$$T = \frac{l^2}{6 \times D} \text{ (tid i dygn)}$$

l = rörväggs eller tätningssringens tjocklek (cm).

D = diffusionskoefficienten (cm^2/d), se tabell 5-1 till och med 6-2.

2.5 Polymertyper och egenskaper

Ämnens förmåga att tränga genom olika polymermaterial beror på två huvudfaktorer: ämnets löslighet i det aktuella materialet och dess diffusionshastighet genom materialet (Cheng 2009). Ämnet (föroreningen) som tränger igenom vattenledningens rörvägg kan vara i vätske- eller gasform. Dess löslighet beror på hur ämnet interagerar med polymermaterialet, varvid polariteten har stor betydelse. Diffusionshastigheten beror på föroreningens molekyldimension och polymermaterialets egenskaper. Viktiga egenskaper är bland annat materialets bulkdensitet (hög täthet innebär liten hålrumsvolym) och dess fysiska struktur (kristallin, amorf eller semikristallin struktur). Kristallin struktur innebär att atomerna är ordnade i en geometriskt regelbunden struktur. Amorf är motsatsen, atomstrukturen är oordnad, polymersträngarna ligger slumpvist kors och tvärs. Ett semikristallint material består av både kristallina och amorfa polymerer.

Högre kristallinitet (*eng. crystallinity*) innebär generellt bättre barriäregenskaper. Amorfa (glasaktiga) polymerer uppvisar annorlunda egenskaper, varför diffusionen genom amorfa polymerer avviker från gängse regler. PVC är en amorf glasaktig polymer, vars polymerkedjor har starkt begränsad flexibilitet. Polyeten (PE) är en partiellt kristallin gummipolymer, som delvis innehåller amorfa områden där polymerkedjorna har stor rörlighet. När små organiska ämnen med låg molekyelvikt penetrerar PVC-material så sker det genom de fria hålrum som förekommer mellan de relativt orörliga polymerkedjorna. I PE-material sker istället genomträngningen genom de amorfa områdena med relativt rörliga polymerkedjor. Denna strukturella skillnad gör att PVC och PE har olika egenskaper när det gäller att motstå genomträngning av organiska ämnen. PVC betraktas som i det närmaste ogenomträngligt för vissa organiska ämnen i låg halt, medan genomträngning genom PE-material kan förekomma även vid låga halter av dessa ämnen. För geomembran av HDPE (högdensitetspolyeten) fungerar de kristallina zonerna som ogenomträngliga barriärer mot penetrerande ämnen (Cheng 2009).

Gummiringsfogen är dominerande fogmetod i grå- och segjärnsrör sedan slutet på 1950-talet (Malm *et al.* 2011). Den ursprungliga gummiringsfogen är den så kallade tytonfogen, men denna har senare utvecklats till olika former av dragsäkra varianter (exempelvis VRS och Novosit). Gummiringsfog benämns även tätningssring och görs av olika material (se vidare i kapitel 6). Förutom järnrör används tätningssringar för andra muffade rör, exempelvis PVC-rör. Det vanligaste materialet i svenska tätningssringar som installeras idag är EPDM, etylen-propylen-dien monomer (Lindeborg 2012). EPDM är en amorf elastomer. I likhet med plastmaterial är tätningssringen ett material som är genomträngligt för markföroreningar. Genomträngningsförmågan varierar beroende på ingående material och utformning av tätningssringen.

3 Prioriterade föroreningar

3.1 Klassificering och prioritering utifrån kemiska egenskaper

En mängd olika potentiellt hälsofarliga ämnen kan förekomma i mark som omger vattenledningsnät. Det är dock främst opolära ämnen som studerats i samband med genomträngning genom dricksvattenrör. En opolär molekyl har inga elektriskt laddade poler och saknar ett permanent elektriskt dipolmoment. Det beror på att laddningsfördelningen är symmetrisk över hela molekylen. Opolära ämnen kan bara lösas i opolära lösningsmedel enligt principen lika löser lika. Plastledningar och tätningsringar är vanligtvis tillverkade av opolära material, till exempel polyeten, PVC och butadiengummi. Därför är risken att opolära ämnen löser sig i och tränger igenom ett plaströr eller en tätningsring mycket större än att polära ämnen gör det.

Alltså, diffusionen gynnas när polymer och penetrant (det ämne som tränger igenom från mark till rörvägg) har likartad struktur. Exempelvis starkt polära molekyler visar väldigt låga transporthastigheter genom PE, som är opolär. Permeationshastigheten genom PE för olika ämnen är följande:

alkoholer < organiska syror < ketoner < estrar < aromatiska kolväten < halogenerade kolväten

Forskare som studerat diffusion av organiska föroreningar genom HDPE-geomembran fann att metyl-etyl-keton och ättiksyra trängde genom i betydligt mindre omfattning än klorerade lösningsmedel (diklormetan, 1,1-diklorethan och 1,2-diklorethan). Andra studier visar att det polära ämnet metanol upptogs i mindre utsträckning än opolära ämnen (toluen, 1,2-diklorbensen, 1,1,1-triklorethan) i opolära termoplaster såsom polybutylen (PB) och polyeten (PE) (Cheng 2009).

Lägre diffusionsförmåga har rapporterats genom lågdensitetspolyeten (LDPE) för ämnen med hög molekylvolym, såsom alifatiska aromatiska och klorerade penetrantämnen, än för ämnen med lägre molekylvolym. I ett annat exempel visades att diffusionen var lägre för klorbensener än för metylsubstituerade bensener, eftersom de stora kloratomerna gjorde molekylen mer voluminös, vilket starkt begränsade dess rörelseförmåga (refererat i Cheng 2009).

Molekylformen har rapporterats ha stor betydelse. Penetranter med linjära, flexibla och symmetriska molekyler har högre rörlighet än styva molekyler. Enligt Cheng (2009) är diffusionskoefficienten lägre för o-xylen än för p-xylen, därför att p-xylen har en symmetrisk form, medan o-xylen är asymmetrisk på grund av två metylgrupper sitter invid varandra. Forskare har även funnit att diffusionen av n-alkan och andra linjärt utsträckta eller flata molekyler är högre, med en faktor 1 000, än diffusionen av sfäriska molekyler med ungefär samma molekylvikt (Cheng 2009).

Denna observation är intressant med tanke på att petroleumprodukter till stor del utgörs av n-alkaner. Mao *et al.* (2009) betraktar dock alkaner som inerta till rörmaterial och använde i sina experiment ett standardbränsle

(NIST reference fuel), som innehåller 9 % n-heptan (en typ av n-alkan) och 91 % iso-oktan för att späda ut testämnena (BTEX dvs. bensen, toluen, etylbensen och xylene) till önskad halt.

3.2 Prioriterade föroreningar utifrån tidigare studier

Permeationsförmågan påverkas alltså av vilken typ av penetrant det är, dess koncentration samt storlek och form (utseende) hos penetrantmolekylerna. Förorening i fält sker vanligtvis genom en komplex blandning av organiska ämnen. Petroleumprodukter är de vanligaste föroreningarna. De påträffas i fält på grund av spill eller läckage från underjordiska tankar. Rör- eller tätningringsmaterial kan komma i kontakt med antingen ren bensin (icke-vattenlöst fas) eller olika halter av bensin löst i markvatten (vattenlösningsfas) eller med bensinkomponenter i gasfas ifall röret är i den omättade zonen, det vill säga ovanför ytan av ett förorenat grundvatten (Cheng 2009).

Enligt USEPA (2002) har ett stort antal laboratorieförsök genomförts för att bestämma permeationsförmågan och genomträngningstiden för ett flertal olika kombinationer av ämnen och rörmaterial. En viktig begränsande faktor i dessa studier är att man haft stillastående vatten på rörets insida och sålunda ej studerat den utspädningseffekt som kontinuerligt flöde medför (USEPA 2002).

Studierna har bland annat visat att kemiska ämnen i vissa kemikalieblandningar möjligen kan samverka på ett synergistiskt sätt, så att effekten blir större än när varje enskilt förorenande ämnen förekommer separat. Detta är en viktig iakttagelse, eftersom inträffade föroreningsincidenter oftast rör kemikalieblandningar, till exempel bensin som är en blandning av många olika förorenande ämnen.

Exempel på opolära ämnen som studerats i samband med genomträngning är de fyra BTEX-ämnena (bensen, toluen, etylbensen, xylene), MTBE, diklorbensen, trikloretylen, perkloretylen och diklormetan. Polära ämnen är sådana som innehåller en aldehyd-, keton- eller alkoholgrupp, det vill säga funktionella grupper med syreatom. Exempel på relevanta polära ämnen att beakta med hänsyn till genomträngning av vattenledningar är acetonitril, bensaldehyd och bensylalkohol.

3.3 Kortfattad beskrivning av ett antal prioriterade föroreningar

Detta avsnitt innehåller kortfattade beskrivningar av ett antal föroreningar som rapporterats eller studerats i samband med genomträngning. Beskrivningarna har huvudsakligen hämtats från WHO (2011), Kemikalieinspektionen (www.kemi.se) och Wikipedia (www.wikipedia.se och www.wikipedia.org).

3.3.1 Opolära förorenande ämnen

Bensen

Bensen (C_6H_6) är det enklaste aromatiska kolvätet. Det har visat sig att bensen är cancerframkallande, genom att kroppen via metabolismen inför en epoxid-grupp i molekylén. Denna är mycket reaktiv, och kan bland annat reagera med DNA. Numera används därför inte bensen som lösningsmedel i lika stor utsträckning som tidigare. Den ersätts ofta med toluen, som har liknande egenskaper men inte är lika cancerframkallande. Bensen utgör fortfarande en tillsats i bensin, om än i begränsad utsträckning.

Bensen används främst som en råvara för att göra andra kemikalier. Globalt förbrukas cirka 80 % av bensen i kemiindustrin vid framställning av tre ämnen, etylbensen, kumen och cyklohexan. Etylbensen används i sin tur för att tillverka styren, som används för att göra polymerer och plaster. Kumen används i tillverkning av hartser och lim. Cyklohexan används vid nylon-tillverkning. Mindre mängder av bensen används för att göra vissa typer av gummin, smörjmedel, färgämnen, tvättmedel, läkemedel, sprängämnen och pesticider.

Bensen har länge använts som en tillsats i bensin för att öka oktantalet och motverka knockning. Med den globala avvecklingen av blyad bensin, har bensen gjort en comeback som bensintillsats i vissa länder. Oron över de negativa hälsoeffekter och risker för bensenläckage till grundvattnet har dock lett till strängare reglering och bensenhalten i bensin begränsas numera till max 1 % i Europa. Den amerikanska Environmental Protection Agency har infört nya regler i 2011 som sänkt bensenhalten i bensin till 0,62 %.

Under 2006 kom det larm om att läskedrycker kan innehålla spår av bensen. Som en kemisk reaktion mellan nedbrutna produkter av E211 (natriumbensoat) och E300 (askorbinsyra) kan bensen uppstå.

Toluen

Toluen eller metylbensen är i ren form en färglös vätska som luktar typiskt petroleum. Det framställs genom upprepade extraktioner eller destillationer ur stenkolstjära eller ur lätta petroleumfraktioner. Toluen finns i råolja men bildas också vid till exempel reformering av kolväten i oljeraffinaderier. Det är ett aromatiskt kolväte.

Toluen används, både i Sverige och resten av världen, till största delen i motorbränsle eftersom ämnet är en av de haltmässigt största enskilda komponenterna i bensin, där det ingår med 10–15 %. I Sverige renframställs ingen toluen, men stora mängder bensin framställs med däri ingående toluen. Även i andra tillverkade kolväteprodukter ingår toluen, de exporteras för vidare bearbetning som syntesråvara.

Toluen har, liksom andra lätta aromatiska ämnen, bra lösningsförmåga och används som lösningsmedel i färger, bilvårdspreparat och lim. Användningen av toluen som lösningsmedel minskar sedan flera år i Sverige. Vanlig lacknфта, som innehåller 15–25 % aromater, innehåller inte toluen utan mer högkokande aromater som etylmetylbensen och trimetylbensen.

Etylbensen

Etylbensen är ett aromatiskt kolväte med formeln C_8H_{10} . Etylbensen används främst för tillverkning av styren (C_8H_8). Etylbensen förekommer även med cirka 2 % i bensin.

Xylen

Xylen, dimetylbensen, är ett aromatiskt kolväte som har stora kemiska likheter med toluen. Tre olika isomerer av xylen finns, nämligen orto-xylen, meta-xylen och para-xylen. Xylen ingår bland annat i vissa lösningsmedel. Xylen är, som namnet dimetylbensen antyder, besläktat med bensen; xylen-molekylen består av en bensenring där två väteatomer är utbytta mot metylgrupper. Summaformeln är C_8H_{10} . Xylen är en färglös vätska vars lukt känns vid 20–40 ppm (nuvarande hygieniska gränsvärde i luft är 50 ppm).

Liksom för toluen används den helt dominerande mängden av dessa aromatiska kolväten som motorbränsle eftersom bensin innehåller cirka 10 % xylener. Ren xylen används som lösningsmedel för avfettning/rengöring och syntesråvara för tillverkning av kemiska produkter, bland annat för syntes av specialkemikalier som vitaminer, läkemedel, smakämnen etc. Isomerblandningen xylen används som lösningsmedel i en rad produkter där god lösande förmåga och relativt snabb avdunstning krävs. Jämfört med toluen är mängden xylen lägre i lim och bilvårdsprodukter men avsevärt högre i färger. Även i denna användning minskar mängden för varje år.

MTBE

Metyl-t-butyleter, MTBE, är en oktantalshöjande tillsats i motorbensin i stället för de tidigare använda blyföreningarna. Bensin 98 oktan kan innehålla cirka 7 % MTBE. Ämnet används också som lösningsmedel. MTBE har terpentinliknande lukt och smak, så redan mycket små mängder gör vatten odrickbart. Det är lösligt i vatten, 51 000 mg/l, varför det sprids snabbt i vatten och har god förmåga att transporteras genom jord till grundvattnet. Ny forskning visar att MTBE orsakar tumörer hos råttor och misstänks utgöra samma hälsorisk för människor. Det svenska livsmedelsverket betraktar MTBE som en miljöförorening som inte är acceptabel i allmänt dricksvatten, men gör bedömningen att vatten med halter under 20 mikrogram per liter kan användas utan inskränkningar. Vatten med halter på mellan 20 och 200 mikrogram kan användas under begränsad tid men ska åtgärdas. Vatten med halter över 200 mikrogram bör inte användas som dricksvatten.

Diklorbensen

Diklorbensen, förkortad DCB, finns i form av tre olika isomerer: 1,2-diklorbensen, 1,3-diklorbensen och 1,4-diklorbensen. Diklorbensener används allmänt inom industrin och i hushållsprodukter som luktmaskerande medel, färgämnen och bekämpningsmedel. 1,2-DCB och 1,4-DCB är de mest allmänt använda.

1,2-diklorbensen eller ortodiklorbensen används främst för tillverkning av jordbrukskemikalier. Det är en insekticid för bland annat termiter. Den används också som mjukgörare och för att avlägsna kolbaserade föroreningar på metallytor.

1,4-diklorbensen eller paradiklorbensen är en kemikalie som tidigare användes som antimalmedel. Ämnet levererades i form av små vita kulor, ungefär som grovt salt. Det har en söttaktig, icke obehaglig lukt, som markant skiljer sig från den kvalmiga lukten från naftalin, ett annat antimalmedel. Ämnet är såsom misstänkt cancerogent numera förbjudet för denna användning.

I Sverige saknas gränsvärden för diklorbensen i dricksvatten. I USA gäller gränsvärdena 600 µg/l för 1,2-DCB och 75 µg/l för 1,4-DCB. WHO anger 1 000 µg/l för 1,2-DCB och 300 µg/l för 1,4-DCB som riktlinje för dricksvatten, vilket motsvarar halt som orsakar ett extra cancerfall per 100 000 konsumenter som dricker vatten med denna koncentration under en livstid (WHO 2011).

Trikloreten, "tri"

Trikloretylen eller trikloreten (TCE), trivialnamn tri, C_2HCl_3 , är vid rumstemperatur en vätska med karakteristisk kloroformliknande lukt. Ämnet är olösligt i vatten och beständigt mot alkali samt angriper ej metaller. Trikloretylen används som lösningsmedel för fett. Några vanliga tillämpningar är avfettning före ytbehandling av metallföremål, fläckborttagning på textilier och kemtvätt av textilier. Ämnet används även som utgångsmaterial för syntes av ett flertal organiska ämnen.

Som ersättningsmedel för TCE, till exempel i kemtvättautomater, används det mindre hälsofarliga (men inte helt ofarliga) ämnet perkloretylen.

Ämnet har haft användning som narkosmedel. Denna egenskap har medfört sniffning. Av denna anledning säljs TCE sedan slutet av 1900-talet ej längre i öppna handeln. På 1990-talet förbjöds användningen av TCE helt i Sverige av arbetsmiljöskalet.

TCE löser vissa plaster, och kan därför användas för limning ("kallsvetsning") av dessa. Mot polystyren reagerar TCE skadligt, genom att inte lösa utan i stället initiera sprickbildning.

Tetrakloreten, perkloretylen

Tetrakloreten, även kallad perkloretylen (PCE), C_2Cl_4 , är en tung färglös vätska med skarp och söttaktig lukt, som de flesta människor kan förnimma vid en koncentration av 1 ppm i luft. På grund av att den ej är brandfarlig och dess goda lösningsmedelsegenskaper har den kommit att användas som tvättvätska i kemtvätt. Dessvärre är den cancerogen (klass 3), mutagen, reproduktionsstörande och miljöfarlig. Det finns även studier som visar att den ökar risken för Parkinsons sjukdom.

Perkloretylen används även för avfettning av metalledar i bil- och metallindustri, då vanligen i en blandning med andra klororganiska ämnen. Den förekommer även i ett fåtal konsumentprodukter, bland annat fläck- och färgborttagningsmedel.

Diklormetan

Diklormetan, även kallad metylenklorid – ofta används förkortningen DCM – är en lättflyktig tung vätska med svag söt kväljande doft. Diklormetan är ett synnerligen gott lösningsmedel som är lösligt i de flesta andra organiska lösningsmedel, och som själv är ett utmärkt lösningsmedel för fet-

ter, vaxer och många hartser. Lösligheten i vatten är 13,2 g/l. Diklormetan sönderfaller långsamt under utveckling av gasformig saltsyra.

Det brukas som avfettningsmedel, för extraktioner och som lösningsmedel vid kemiska reaktioner. Diklormetan används ofta i färgborttagningsmedel, men är förbjudet i konsumentprodukter i Sverige. EU införde förbud för denna användning 2011.

Diklormetan får anses vara den minst skadliga av de enkla klorerade kolvätena, men den är behäftad med flera risker. Mer än 70 % av inandad diklormetan tas direkt upp av blodet och sprids i kroppen. En del bryts ned till kolmonoxid som förstör de röda blodkropparna. Diklormetan har visat sig ge cancer i lungor, lever och bukspottkörtel hos försöksdjur. Vidare har den visats vara mutagen och fosterskadande.

Mot denna bakgrund har man försökt att minska användningen av diklormetan, vilket också har givit resultat; i Sverige minskade användningen från cirka 2 600 ton 1988 till cirka 100 ton 2010. I Sverige sker ingen tillverkning av diklormetan.

3.3.2 Polära förorenande ämnen

Polära ämnen är sådana som innehåller en aldehyd-, keton- eller alkoholgrupp, det vill säga funktionella grupper med syreatom.

Acetonitril

Acetonitril, även kallad metylcyanid, är en färglös vätska med svag sötaktig doft. Den är den enklaste organiska nitrilen. Den är ett bra lösningsmedel, hörande till klassen aprotiska lösningsmedel, som är lösligt i de flesta andra organiska lösningsmedel, och som själv är ett utmärkt lösningsmedel för många organiska föreningar. Vattenlösligheten är mycket god och den är blandbar med vatten i alla proportioner. Den används som lösningsmedel och syntesintermediär i organisk syntes samt i viss separationsmetodik (HPLC-kromatografi). Acetonitrilånga är retande för luftvägar och ögon. Den är giftig och metaboliseras i kroppen till bland annat cyanid och tiocyanat. Acetonitril är mycket brandfarlig.

Bensaldehyd

Bensaldehyd, C_6H_5CHO , är ett organiskt ämne med en karakteristisk lukt av bittermandel. Bensaldehyd används som bittermandelessens, säljs i Sverige utspädd med olja som en hushålls arom. Den naturliga aromen i bittermandlar kommer just från bensaldehyd.

Bensylalkohol

Bensylalkohol är en oljeaktig vätska, som är lös i vatten och alkohol och som används i parfymier. Ämnet framställs genom hydrolys av bensylklorid med natriumhydroxid, men förekommer också naturligt i ett antal olika frukter och téer.

3.3 Hälsomässiga gränsvärden

Som nämnts ovan är flyktiga kolväten och organiska lösningsmedel de föroreningar som är av störst intresse i fråga om genomträngning i dricksvattensystem. I tabell 3-1 nedan redovisas en sammanställning av hälsomässiga gränsvärden i dricksvatten för ett antal ämnen som påträffats i samband med incidenter där föroreningar trängt igenom dricksvattenrör eller på annat sätt bedömts relevanta i sammanhanget (se även kapitel 4).

I tabell 3-1 framgår även tröskelvärden för smak och lukt för dessa ämnen. Tabellen bygger i huvudsak på uppgifter från Svenska Livsmedelsverket och WHO (2011) kompletterade med USEPA (2002) samt uppgifter på www.usepa.gov och Health Canada (www.hc-sc.gc.ca).

I de fall USEPA och WHO anger olika värden har det lägsta värdet använts. I de fall olika referenser angett olika tröskelvärden för ett visst ämne eller ifall de angett ett intervall, så har det lägsta värdet använts.

Tabell 3-1 Hälsomässiga gränsvärden samt tröskelvärden för lukt och smak avseende prioriterade förorenande ämnen.

Ämne	Gränsvärde Sverige µg/l	Gränsvärde USA/WHO µg/l	Smak-tröskel µg/l	Lukt-tröskel µg/l	Luktar/smakar under hälso-mässig gräns
Bensen	1	5	500	2000	NEJ
Toluen	-	700	40	24	JA
Etylbensen	-	300	29	2	JA
Xylen	-	500	300	20	JA
MTBE	-	20	40	20	JA
Klorbensen	-	100	10	10	JA
1,2-diklorbensen	-	600	1	2	JA
1,4-diklorbensen	-	75	6	0,3	JA
1,2,4-triklorbensen	-	70	30	5	JA
2,4,6-triklorfenol	-	200	2	300	JA
Pentaklorfenol	-	1	30	1600	NEJ
Diklormetan	-	5	t	9100	NEJ
Dikloreten	3	5	29000	nd	NEJ
Kloreten = VC	0,5	0,3	t	t	NEJ
Triklloreten, TCE	10s	5	nd	10000	NEJ
Tetrakloreten	10s	5	300	nd	NEJ

nd = inga data; t = tröskelvärde saknas.

s = gränsvärdet avser summan av triklloreten och tetrakloreten.

För många ämnen, till exempel bensen, pentaklorfenol, triklloreten och tetrakloreten, är den lägsta smak- eller luktröskeln högre än det hälsomässiga gränsvärdet. För en del andra ämnen, till exempel toluen, xylen och klorbensener, är förhållandet det omvända. Dessa ämnen kan således de flesta människor förnimma innan en hälsomässigt riskabel halt nås i dricksvattnet.

Vattenkonsumenterna har rätt att erhålla ett dricksvatten som smakar bra och inte luktar, förutom de rent hälsomässiga aspekterna. Dålig smak eller lukt på vattnet får anmärkning enligt livsmedelsverkets föreskrifter och måste åtgärdas. Om smaken eller lukten är stark så betraktas vattnet som otjänligt och får inte distribueras.

I tabell 3-2 nedan redovisas en sammanställning av högsta påträffade halt i dricksvatten och grundvatten enligt följande referenser: WHO (2011) inklusive bakgrundsdocument, Ong *et al.* (2008), USEPA (2002), SGU (2010), US Geological Survey (2001) samt uppgifter på www.usepa.gov och Health Canada (www.hc-sc.gc.ca). I tabellen framgår även vattenlöslighet vid 20° eller 25° enligt bakgrundsdocument till WHO (2011). Vattenlöslighetsvärdet kan tolkas som teoretiskt högsta möjliga halt i vatten vid en extrem föroreningsituation. Observera att vattenlösligheten anges i mg/l medan övriga värden i tabellen anges i µg/l.

I tabellen anges även ett ”målvärde”, som är det lägsta värdet av gränsvärdet för dricksvatten (Sverige/USA/WHO) och smak- eller luktröskeln i vatten. Dricksvattnets halt bör alltså understiga målvärdet för att vattnet ska vara fritt från smak och lukt samt vara acceptabelt ur hälsomässig synpunkt där det strängaste gränsvärdet gäller.

Tabell 3-2 Målvärde för dricksvatten, påträffade högsta halter (i µg/l) och vattenlöslighet (i mg/l) för prioriterade förorenande ämnen.

Ämne	Målvärde dricksvatten µg/l	Påträffad högsta halt i dricksvatten µg/l	Påträffad högsta halt i grundvatten µg/l	Vattenlöslighet mg/l
Bensen	1	1 300	300 26 000*	1 800
Toluen	24	4 300	1 100	535
Etylbensen	2	39	300	152
Xylen	20	155	5 400	200
MTBE	20	210	>3 400	48 000
Klorbensen	10	2,1	ea	ea
1,2-diklorbensen	1	2 500	6 800	91
1,4-diklorbensen	0,3	3,2	996	31
1,2,4-triklorbensen	5	1,2	7	19
2,4,6-triklorfenol	2	0,7	ea	900
Pentaklorfenol	1	140	190 000	8 000
Diklormetan	5	27	3 600	20 000
1,2-dikloreten	3	59	Ca 1 000	8 690
Kloreten = VC	0,3	29	4 500	1 100
Trikloreten	5	1 680	42 000	1 400
Tetrakloreten	5	7 750	160 000	160

ea = ej angivet i någon av referenserna; VC = Vinylklorid.

* Ong *et al* (2008) redovisar högsta värde för total BTEX i grundvatten 57,7 mg/l. Andelen bensen angavs inte men antas utgöra cirka 26 mg/l. WHO (2011) redovisar högsta värde 300 µg/l.

4 Dokumenterade fall av genomträngning

4.1 Incidenter i Europa före 1987

Bromhead (1997) återger resultat från en enkätundersökning som genomfördes bland vattenföretag i Storbritannien kring 1987. Ingen detaljerad information om enskilda incidenter tycks ha dokumenterats, men en sammanställning av vattenföretagens erfarenheter utifrån enkäten visar följande:

- 2 av de 12 tillfrågade vattenföretagen hade upplevt varsin incident med PVC-ledningar inblandade.
- Samtliga tillfrågade vattenföretag hade upplevt incidenter med PE-ledningar inblandade (totalt mer än 25 st. incidenter).
- Incidenter på övriga ledningsmaterial saknas.
- Incidenter av genomträngning tycktes i samtliga fall vara förknippat med större spill och läckage som skett efter det att ledningen anlagts. Utsläpp av olja och drivmedel (bensin, diesel) var dominerande föroreningstyp.
- Samtliga incidenter hade uppmärksammats på grund av kundklagomål på smak och lukt.

Bromhead (1997) redovisar även i kronologisk ordning diverse fall av genomträngning av markföroreningar till dricksvatten i ledningsnät i Europa. Redovisningen är relativt kortfattad för rapporterade fall innan 1980-talet. Generellt kan sägas att de flesta fall av genomträngning inträffat i dricksvattenledningsnät av PE. Servisledningar med stillastående vatten var överrepresenterade. Incidenter har även skett med PVC-ledningar, men betydligt mer sällsynt och vid mycket höga halter av markföroreningar.

4.2 Incidenter i USA före 1991

Fram till 1990-talets början hade över 100 incidenter rapporterats i USA där dricksvatten blivit kontaminerat till följd av att en förorening trängt in i dricksvattennätet, framför allt ifrån kraftigt förorenad jord som omgivit ledningen. Incidenterna fördelades lika mellan lågriskområden, såsom bostadsområden, och högriskområden, såsom industriområden, bensinstationer och underjordiska lagertankar. Föroreningsincidenter i lågriskområden orsakades av avfallstippling eller olyckor med läckage av petroleumprodukter, färglösningsmedel eller dylikt (Holsen *et al.* 1991; USEPA 2002).

Petroleumprodukter orsakade 89 % av incidenterna, flyktiga klorerade lösningsmedel (TCE + PCE) 5 % och naturgas 2 %. Med TCE avses trikloreten (tri) och med PCE, perkloretylen. Andra föroreningar som visat sig kunna tränga in i dricksvattensystem är enkla klorerade aromater, klorerade och ickeklorerade rakkedjiga alifatiska kolväten samt fenoliska ämnen. Starkt polära bekämpningsmedel, såsom paraquat, malathion och atrazin,

eller långkedjiga högmolekylära kolväten rapporterades ej utgöra hot på grund av dålig genomträngningsförmåga.

Plaströr var involverade i 98 % av incidenterna i USA. Störst andel incidenter inträffade i rör av polybutylen (PB) 43 %, polyeten (PE) 39 % och PVC (15 %). Asbestcementrör, akrylnitrilbutadienstyren och tätningssringsmaterial var involverade i vardera 1 % av incidenterna. Frekvensen incidenter på servisledningar rapporterades vara totalt 22,3 stycken per miljontal serviser och år, varav 16,5 inträffade på serviser av PB, 3,6 av PE och 2,2 av PVC. Frekvensen incidenter på huvudledningar var totalt 5,0 stycken per 100 000 miles huvudledning och år, fördelat på PVC 4,6, asbestcement 0,3 och metall 0,1 stycken (Holsen *et al.* 1991). Totalfrekvensen motsvarar 3,1 per 100 000 km och år.

Holsen *et al.* (1991) undersökte sju platser närmare där föroreningsincidenter av dricksvatten inträffat. I samtliga fall var det i servisledningar som föroreningar trängt in och marken runt ledningen var kraftigt förorenad. Rörmaterialen var antingen polybutylen eller polyeten. I ett fall rörde det sig om ett läckage av 10 gallon (knappt 40 liter) bensin på en vägbana, varvid jorden kring en servisledning blev starkt förorenad. Dricksvattenprov från servisen togs efter att vattnet stått stilla i 40 timmar. I dricksvattnet uppmättes bensen 1 300 µg/l, toluen 4 300 µg/l, medan halterna etylbensen och xylen ej var mätbara (<500 µg/l). De kan jämföras med gränsvärdena för dricksvatten i USA som är/var 5 µg/l för bensen, 1 000 för toluen, 700 för etylbensen och 10 000 för xylen. Gränsvärdena, som visserligen avser årsmedelvärden, överskreds således kraftigt för bensen och toluen.

4.3 Incidenter i USA rapporterade under 2000-talet

I mars 2000 presenterade Montana Department of Environmental Quality vattenkvalitetsdata från en annan incident med bensinförorenad jord (USEPA 2002). Bensen trängde genom en servisledning av polyeten (troligen 30 mm diam.) så att halten i dricksvattnet uppgick till 527 µg/l, över 100 gånger gränsvärdet för dricksvatten. Kontakttiden med ledningen var okänd.

AWWA Research Foundation publicerade 2008 en sammanställning av uppgifter om inträffade fall, som inhämtats genom en bred enkät, vilken besvarades av 151 VA-verk/VA-bolag i USA (Ong *et al.* 2008). Tillsammans hade respondenterna 83 360 miles (134 200 km) huvudledningar och 5,4 miljoner serviser. Det rapporterades om sex incidenter som rörde huvudledningar och som ledde till antingen överskridet gränsvärde i dricksvatten eller till kundklagomål. Det motsvarar frekvensen ett fall per 14 000 miles (22 000 km) huvudledning. Av dessa sex fall rörde det sig i fyra fall om PVC-rör, i ett fall om rör av asbestcement och i ett fall om en gjutjärnledning med tätningssringsmaterial av styren-butadien-gummi (SBR). I två fall var det förorenande ämnet okänt, i tre fall var det bensin och i ett fall klorerat lösningsmedel. I inget av de sex fallen hade man tagit prov på mark eller grundvatten utanför ledningen, varför föroreningsgraden i marken tyvärr är okänd i dessa fall.

Därutöver rapporterades om 47 fall av förorenad mark och/eller grundvatten nära huvudledning, varvid resultatet var lyckosamt i den meningen att ingen förorening upptäcktes ha trängt in i dricksvattenssystemet och inget kundklagomål erhöles. De 47 fallen med lyckosam utgång fördelas enligt följande på rörmaterial: 9 PVC, 5 gjutjärn, 32 segjärn, 1 stål.

Vad gäller servisledningar rapporterades om 44 genomträngningsincidenter, varav 36 gällde bensinförorening som trängt in i polybutylenrör (PB), i tre fall hade bensinämnen trängt in i polyetenrör (PE) och i två fall genom PVC-rör (Ong *et al.* 2008). Två rapporterade fall rörde kloretrade lösningsmedel som hade trängt genom segjärnsrör med SBR-tätning (Styren-butadien-gummi). Slutligen fanns en rapport om en incident där asfaltlösningsmedel via en mätarbrunn trängt in i en kopparledning med tätningsring av etylen-propylen-dien monomer (EPDM). I samtliga fall ersattes servisledningen i den förorenade marken med en ny ledning av koppar.

Enligt sammanställningen som gjorts av Ong *et al.* (2008) kan man se att för järnledningar med SBR-tätning så har inte genomträngning av huvudledningen noterats vid halten 3,6 mg/kg tetrakloreten (i mark), 15,4 mg/l tetrakloreten (i grundvatten), 0,30 mg/l total BTEX (i grundvatten) eller 25,8 µg/l bensen (i grundvatten). Däremot har man kunnat konstatera att genomträngning skett av servisledning av samma material vid samma haltnivå.

Ong *et al.* (2008) redovisar 562 fall med kopparserviser, 1 PE, 1 PB och 13 segjärnsserviser som motstått genomträngning trots känd förorening i marken omkring servisledningen.

Enkäten innehöll även frågor om ifall VA-verket/bolaget tillämpade särskilda regler vid läggning av vattenledning i förorenad mark. 81 % svarade att de ej hade särskilda regler, 7 % hade regler att lägga segjärnledning med resistent tätningsring i förorenad mark, 5 % svarade segjärn utan angivande om speciella krav på tätningsringar, 1 % svarade stålrör, 3 % svarade annat material och 3 % svarade att de hade en regel att inte lägga plaströr i förorenad mark. Tätningsringar som ansågs resistent var gjorda av nitril-butadien gummi (NBR) eller fluor-elastomer gummi (FKM) (Ong *et al.* 2008).

4.4 Genomträngningsfrekvens

Dokumenterade frekvenser av genomträngning i huvudledningsnät respektive servisledningar för dricksvatten i USA sammanfattas i tabell 4-1, baserat på ovan redovisade incidentrapporter/referenser.

Tabell 4-1 Dokumenterad statistik – genomträngningsincidenter i USA.

Underlag	Rapporterad frekvens av genomträngning	Referens
Rapporterade incidenter (före 1991) huvudledningsnät	1 fall per 32 000 km huvudledning	Holsen <i>et al.</i> (1991)
Rapporterade incidenter (före 1991) serviser	1 fall per 45 000 serviser	Holsen <i>et al.</i> (1991)
Enkät till 151 VA-verk/VA-bolag med sammanlagt 134 200 km huvudledningsnät	1 fall per 22 000 km huvudledning	Ong <i>et al.</i> (2008)
Enkät till 151 VA-verk/VA-bolag med sammanlagt 5,4 miljoner serviser	1 fall per 120 000 serviser	Ong <i>et al.</i> (2008)

5 Fördjupning kring genomträngning av plaströr

5.1 Tidigare forskning

5.1.1 PE-rör

En forskargrupp vid Virginia Tech har undersökt olika egenskaper hos förorenande ämnen och hos vattenrör av högdensitetspolyeten (HDPE) och tvärbunden förnätad polyeten (PEX), i syfte att utvärdera vilka egenskaper som kan användas för att förutspå risken för att ett förorenande ämne tränger igenom röret och hamnar i dricksvattnet (Whelton *et al.* 2010). Risken är störst för de ämnen som visar hög diffusionsförmåga (*eng. diffusivity*) och löslighet (*eng. solubility*) i polymermaterialet som bildar rörväggen.

Opolära ämnens diffusionsförmåga och löslighet visade ett tydligt samband med polymermaterialets bulkdensitet. Bulkdensitet definieras som massan delad med bulkvolymen, där sistnämnda omfattar polymermaterialets totala volym inkl hålrumsvolym i materialet. Ju tätare rörmaterialet är desto svårare är det för opolära ämnen att lösa sig i materialet och tränga genom röret.

För samtliga rörmaterial så var det förorenande ämnets dipolära moment och log KOW (oktanol-vatten fördelningskoefficient) en viktig faktor för att förutsäga ämnets genomträngningsförmåga. Det förorenande ämnets molekylvolym var dock bara användbart för att avgöra diffusionsförmåga och löslighet när det gällde haloalkaner och opolära aromatiska ämnen.

Sammanfattningsvis har Whelton *et al.* (2010) funnit att polära föroreningar hade lättare att lösa sig och diffunderade snabbare genom PEX-rör än genom HDPE-rör, beroende på att PEX-rör innehåller större andel syreatomer i materialet. Polära ämnen är sådana som innehåller en aldehyd-, keton- eller alkoholgrupp, det vill säga funktionella grupper med syreatom. Resultatet överensstämmer alltså med principen ”lika löser lika”. Det här sambandet har tidigare inte uppmärksamrats av vattenrörsindustrin, eftersom tidigare forskning primärt fokuserats på opolära ämnen (Whelton *et al.* 2010).

Mao *et al.* (2010) har undersökt genomträngning av bensen, toluen, etylbensen och xylén (BTEX) från bensinförorenat vatten och jord genom HDPE-rör. HDPE är högdensitetspolyeten. Försöken utfördes i laboratorium varvid olika förhållanden i fält simulerades. Resultaten visade att rör med liten diameter och därmed tunnare vägg var mer känsliga för genomträngning än större rör. I rör där vattnet periodvis står stilla är sannolikheten högre för att överskrida det amerikanska gränsvärdet för bensen i dricksvatten (5 µg/l) än i rör med kontinuerligt flöde. Försök med olika slags jord visade att genomsläppligheten var lägre för HDPE-rör i jord med hög halt organiskt material än i jord med låg halt organiskt material, vid exponeringstider över 30 dygn.

I försöken användes HDPE-rör med inre diameter 2,54 cm och vägg-tjocklek 3,1 mm. Diffusionskoefficienten D bestämdes vid försöken med den så kallade tidsfördröjningsmetoden (*eng. time lag method*). D uppgick till i storleksordningen 2 till 9×10^{-9} cm²/s för både bensen och toluen.

5.1.2 PVC-rör

Feng Maos forskargrupp vid Iowa State University och Arizona Department of Environmental Quality har även undersökt genomträngning av organiska föroreningar genom PVC-rör (Mao *et al.* 2009). De föroreningar som studerades var bensen, toluen och trikloreten (TCE), i såväl gasfas som i vattenlösning. De tre föroreningarna valdes eftersom de ofta förekommer i förorenad jord och grundvatten. I alla försök användes PVC-rör med inre diameter 2,54 cm (1 tum) och vägg tjocklek 0,36 cm.

Försöken visade att när de tre föroreningarna förekom i gasfas vid maximalt möjlig koncentration (mättnadsnivån) så trängde alla tre ämnena genom PVC-röret inom 30 dygn. Det ämne som i gasfas snabbast trängde genom röret var TCE, vilket tog 13 dygn. För toluen tog det 28 dygn och för bensen 31 dygn i gasfas. I ett tidigare försök utfört av samma forskargrupp undersöktes vilken tid det tog för de tre ämnena att tränga genom ett 0,36 cm tjockt PVC-rör när ämnena förekommer som rent lösningsmedel utanför röret. Det tog då 7 dygn för TCE, 16 dygn för toluen och 21 dygn för bensen, enligt figur rapporterad av Mao *et al.* (2009).

För att simulera en extrem föroreningssituation, där grundvattnet blivit helt mättat med organiskt lösningsmedel, det vill säga markvattnet innehåller maximalt möjlig föroreningskoncentration, bereddes vattenlösningar som var mättade med respektive förorening. Halten i mättad lösning var 1 767 mg/l för bensen, 501 för toluen och 1 093 för TCE, vilket är i nära överensstämmelse med vad andra forskare rapporterat. Den tid det tog för de tre föroreningarna att från mättad vattenlösning tränga genom ett 0,36 cm tjockt PVC-rör var 168 dygn för TCE och 250 dygn för bensen, när vattenlösningen omrördes intermittent. Toluen blev aldrig detekterad i vattnet inuti röret under den 10-månadersperiod försöket pågick. Vid kontinuerlig omrörning av vattenlösningen gick genomträngningen snabbare, 60 dygn för TCE och 80 dygn för bensen. Strax därefter nås det stadium när genomträngningen pågår kontinuerligt (steady-state), det vill säga lika mycket tränger in från marken in i röret som tränger ut från röret ut i vattnet på insidan. Masstransporten genom röret uppgick då till cirka 0,27 mg/cm²/d för TCE och 0,14 mg/cm²/d för bensen.

I ett annat försök bereddes vattenlösningar av bensen respektive toluen i fem olika koncentrationer, 100, 80, 60, 40 och 20 % av halten i en mättad vattenlösning, genom att späda den mättade lösningen som beskrevs ovan. Bitar av entums PVC-rör fick ligga i vattenlösningarna i 8 månader (250 d) och upptaget av bensen resp toluen undersöktes dels genom att väga rören, dels genom att i mikroskop bestämma frontens läge, det vill säga hur långt in i rörväggen föroreningen trängt. Försöket visade att för PVC-rör som legat i vatten som innehåller $\leq 60\%$ av den vattenlösliga halten (mättnadsnivån) bensen eller toluen, kunde ingen rörlig föroreningsfront detekteras och ingen signifikant sorption observeras. Viktökningen var då $\leq 2\%$ vilket var jämförbart med kontrollen med avjoniserat vatten. Detta innebär att sorptionen är försumbar vid föroreningsnivåer under 20 % av mättnadsnivån, det vill säga under 340 mg/l för bensen, 100 för toluen och 220 för TCE. Den föroreningsnivån (20 %) anses vara mycket hög och förekommer sällan under verkliga fältförhållanden där grundvatten blivit förorenat.

I ett motsvarande försök exponerades bitar av PVC-rör för bensen respektive toluen i gasform i fem olika koncentrationer under 2,5 dygn. De olika gaskoncentrationerna ordnades genom att gasfasen stod i jämvikt med en vätska, som beretts genom att blanda bensen respektive toluen i olika koncentration med ett konstgjort standardbränsle, som består av två högmolekylära kolväten, iso-oktan och n-heptan. Vätskan efterliknar en konstgjord bensin och de två kolvätena uppges vara inerta i förhållande till rörmaterialet, det vill säga kan ej tränga in i röret. Röret var placerat i luftrummet ovanför vätskan och hade alltså inte direktkontakt med vätskan. Försöket visade att för PVC-rör som exponerats för gas som står i jämvikt med en konstgjord bensinvätska som innehåller ≤ 40 volym-% bensen eller toluen, kunde ingen rörlig föroreningsfront detekteras och ingen signifikant sorption i rörmaterialet observeras. Bensen och toluen är aromatiska ämnen. Totala molandelen aromatiska ämnen i kommersiell bensin är omkring 0,25 eller lägre och motsvarande antas gälla för den gasblandning som avdunstar från bensin. Då ingen signifikant sorption kunde observeras i försöken med 20 volym-% bensen eller toluen, där molandelen bensen i gasfasen var 0,32 respektive toluen 0,28, så kan man dra slutsatsen att gastrycket från aromatiska ämnen som avdunstar från kommersiell bensin inte är tillräckligt stort för att kunna tränga in i PVC-plast.

Försöken tyder på att PVC är en effektiv barriär mot genomträngning av bensen, toluen, etylbensen och xylen från antingen bensinmättad gas eller bensinmättad grundvatten vid typiska förorenade platser (Mao *et al.* 2009).

Ong *et al.* (2008) beskriver samma försök som ovan, men dessutom två experiment som utförts med inköpt bensin som basvara istället för ren bensen och toluen. I det ena experimentet testades effekt av bensin i direkt kontakt med entums PVC-rör, i det andra testades en bensinmättad vattenlösning. I det förstnämnda experimentet låg röret i bensinindränkt kiselsand och undersökningsmetoderna var desamma som ovan, det vill säga permeationstest med analys av BTEX-ämnen i vatten inuti röret, sorptionsförsök genom mätning av viktökning samt okulär mätning av frontens avancemang i mikroskop. I det andra experimentet, med bensinmättad vattenlösning, undersöktes genomträngningen enbart genom analys av BTEX-ämnen i vatten inuti röret.

Inget av försöken visade att någon genomträngning av bensinämnen skett genom PVC-röret, varken vid kontakt med ren bensin eller med bensinmättad vattenlösning. Inga BTEX-ämnen kunde detekteras i vattnet inuti röret ens efter två års exponeringstid. I sorptionsförsöket, som pågick under 90 d, noterades obetydlig viktökning för de rör som hade direkt kontakt med ren bensin (0,30 % för regular; 0,73 % för premium respektive 0,48 % för etanolblandad bensin E10). Ingen svällning eller rörlig front kunde ses i mikroskop för PVC-rör som hade kontakt med ren premiumbensin (dvs. 97 oktan) eller regularbensin (dvs. 93 oktan) under ett års tid. Resultaten av dessa försök bekräftar alltså tidigare studier som visat att PVC är en effektiv barriär mot genomträngning av ämnen från vanlig bensin. Detta kan bero på att halten BTEX-ämnen i bensin inte är tillräckligt hög för att påverka PVC-plasten och initiera svällningsprocessen (Ong *et al.* 2008).

För att testa denna hypotes gjordes ett försök med inköpt premium bensin, som spetsades med tillsats av extra toluen i olika grad. Generellt innehåller bensin i USA mindre än 25 volym-% BTEX-ämnen, men högre halter förekommer ibland, upptill 50 volym-% BTEX. Den inköpta premium bensinen i försöket innehöll 13,5 % toluen; 3,4 % bensen; 1,8 % etylbensen; 10,1 % xilen, totalt 28,7 volym-% BTEX. Den toluenspetsade bensinen innehöll 18,3; 21,2; 30,8; 32,7; 35,9 och 37,7 volym-% toluen. Ingen rörlig front kunde ses efter en veckas exponering om toluenandelen i bensinen var högst 21 volym-%, varvid total BTEX var högst 32 volym-%. En synlig svällning och rörlig front kunde endast ses när toluen översteg 30 volym-%, varvid total BTEX var minst 43 volym-%. Svällningen och inträngningen i PVC-materialet nådde längre ju högre andelen toluen var (Ong *et al.* 2008).

5.2 Beräkningsmodeller genomträngning av plaströr

Grundat på försöksresultat avseende BTEX-ämnens genomträngning av klena HDPE-rör har Mao *et al.* (2010) tagit fram två empiriska samband som visar hur fluxen, F ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$), starkt korrelerar till koncentrationen, C_m (mg/l), av det förorenande ämnet i markvattnet utanför röret. Flux definieras som den mängd förorening som tränger igenom en viss kontaktyta (genomträngningsyta) per tidsenhet. F_1 är flux för ett entums HDPE-rör.

För bensen erhöles sambandet $F_1 = 0,0079 C_m^{1,1323}$

För toluen erhöles sambandet $F_1 = 0,0087 C_m^{1,1444}$

Ekvation ovan användes för att uppskatta halten bensen i dricksvatten inuti röret, efter en period då vattnet stått stilla och permeation av bensen pågått från mark som omger röret, med en given föroreningshalt bensen i markvattnet. Halten bensen i dricksvattnet, C_d (mg/l), efter en stilleståndperiod, t (dygn), kan uppskattas genom följande ekvation:

$$C_d = \frac{4F D_y L_F t}{D_i^2 L_T}$$

D_y är rörets yttre diameter (cm), D_i är dess inre diameter (cm), L_F är den sträcka av röret som omges av förorenad jord (cm), t är tiden vattnet i röret stått stilla (dygn) och L_T är den totala längden på röret med stillastående vatten (cm). Fluxen F av bensen eller toluen genom entums PE-rör erhöles ur föregående ekvation ($=F_1$), eller i övriga fall ur tabell 5-1, där flux är detsamma som permeation vid steady-state. Ekvationen kan även användas för omuffade PVC-rör efter att genombrott inträffat, varvid värden på F hämtas ur tabell 5-2.

Under normala driftsförhållanden kommer halten i röret att påverkas av vattenflödet i ledningen. Vid fullt flöde och total omblandning av den föro-

reningsmängd som trängt in med vattnet i röret, så kan halten förorening i dricksvattnet, C_d (mg/l), uppskattas via följande ekvation:

$$C_d = \frac{4F D_y L_F}{D_i^2 v}$$

v är medelhastigheten för vattenflödet i röret (cm/dygn).

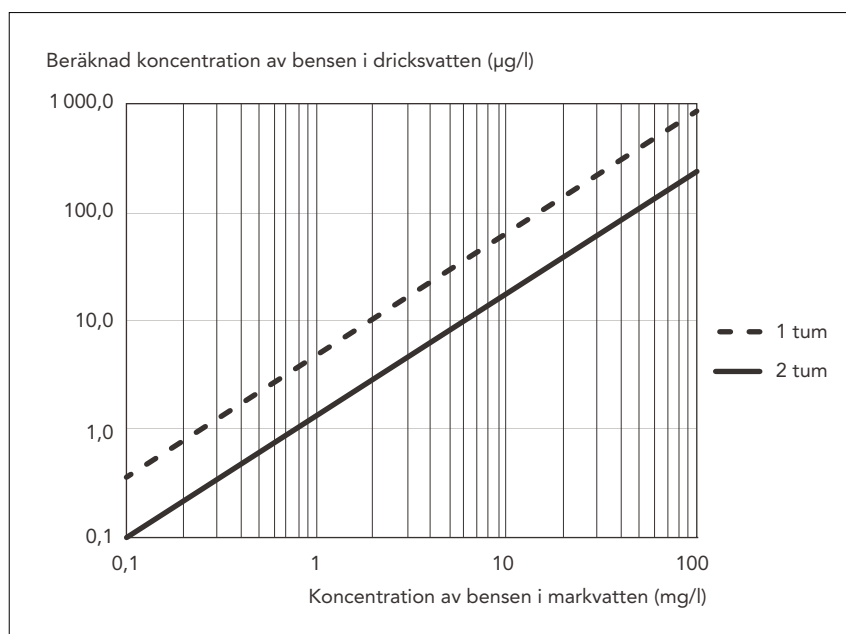
Ekvationen ovan kan även användas för omuffade PVC-rör efter att genombrott inträffat.

Utifrån de resultat som erhöles vid försök med entums HDPE-rör resonerar Mao *et al.* (2010) hur sambandet kan extrapoleras till HDPE-rör av andra dimensioner, baserat på följande ansats:

$$F_d = F_1 \times (l_1 / l_d)$$

F_1 är känd flux för ett entumsrör, l_1 = entumsrörets vägg tjocklek = 0,31 cm, l_d = vägg tjocklek för ett rör av annan dimension (cm) och F_d är uppskattad flux ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$) för rör av annan dimension.

Ansatsen innebär att fluxen är omvänt proportionell mot rörväggs tjocklek, vilket bygger på ett försiktigt antagande om att diffusionskoefficienten är oberoende av polymermaterialets (rörväggs) tjocklek – ett förhållande som det råder oenighet om mellan olika forskare. Utifrån denna ansats och ett teoretiskt resonemang, som stöds av andra forskares resultat, presenterar Mao *et al.* (2009) ett diagram som visar förväntad halt bensen i dricksvatten i HDPE-ledningar av olika dimension, vid olika bensenhalt i omgivande markvatten, efter att vattnet i ledningen stått stilla och påverkats av bensen genomträngning under 8 timmar, se figur 5-1 nedan. Beräkningen avser när $L_F = L_1$, vid kortare förorenad sträcka är den beräknade halten i dricksvattnet proportionellt lägre.



Figur 5-1 Bensenhalt i dricksvatten ($\mu\text{g}/\text{l}$) efter 8 timmar stillastående vatten i klara HDPE-rör (25–50 mm diam., SIDR 9) vid olika halter av bensen i omgivande markvatten (mg/l), enligt Mao *et al.* (2009).

Figur 5-1 visar att det svenska gränsvärdet för bensen i dricksvatten, 1 µg/l, överskrids för tvåtumsrör när halten bensen i markvattnet är 0,8 mg/l och för entumsrör vid 0,25 mg/l.

5.3 Svällning av plaströr

Organiska kemikalier och lösningsmedel som tränger in i plastmaterial orsakar en permanent förändring av det polymera materialet i rörledningen. Rörmaterialet sväller, vilket i sin tur ökar diffusionen med flera storleksordningar.

I samband med att föroreningen tränger in så interagerar de penetrerande molekyler med polymermaterialet. Effekten blir en ”uppmjukning” (eng. *Polymer relaxation*) och den orsakas av att polymerstrukturen sträcks och omorienteras (Cheng 2009). I PVC-plast leder omorienteringen till att materialet sväller och öppnas upp så att mer fri hålrumsvolym skapas (Ong *et al.* 2008).

En modell, som togs fram av Selleck och Marinas (1991), beskrev genomträngning av olika organiska föroreningar genom vattenledningar av plast. Simuleringar gjordes för att beräkna den tid det skulle ta att uppnå en hälsoskadlig halt i dricksvattnet. Beräkningen gjordes dels i det fall man lade ner en helt ny plastledning i kraftigt förorenad mark, dels i det fall ledningen legat länge i kraftigt förorenad mark och redan var påverkad av föroreningen, men rengjordes genom spolning med rent vatten. För en helt ny opåverkad PB-plastledning med inre diameter på 19 mm, tar det relativt lång tid, i storleksordningen veckor, innan hälsoskadlig halt uppnås i dricksvattnet. Om PB-ledningen däremot redan är påverkad (svullen) och spolas ren med vatten, så kommer föroreningen att fortsätta tränga igenom med hög takt och halten i dricksvattnet kommer inom en kort tid, i storleksordningen minuter, att återgå till en hälsoskadligt hög nivå. Detta fenomen har verifierats i laboratorium även för PVC- och PE-rör. Resultatet visar att det inte räcker att enbart renskola en kontaminerad ledning under en längre period. Även om föroreningen spolas bort från rörets inre yta, så behåller röret sin svällda genomsläppliga status (Selleck & Marinas 1991).

Nya PVC-rör visar lägre genomträngningsförmåga än nya PE- eller PB-rör, framför allt beroende på skillnader i materialstrukturen. PVC är ett amorft glasliknande material, medan PE och PB är halvkristallina gummiartade material. Vid låga föroreningshalter är PVC i praktiken icke-permeabelt, genomträngningstiden är i storleksordningen 100 000 år. Däremot vid höga föroreningshalter (mättnadsnivå), som skulle kunna uppstå vid ett större kemikalieläckage, så mjuknar PVC tills sammanbrottsnivån (eng. *point of failure*) nås och genomträngningen ökar dramatiskt (Selleck & Marinas 1991).

5.4 Sammanställning av försöksresultat och kritiska parametrar

Tabell 5-1 är en sammanställning av försöksresultat för PE angivna i refererad litteratur. Med genombrottstid avses exponeringstid till dess mätbar halt av penetrerande ämne kunde återfinnas inuti röret. Med permeation

vid steady-state avses det massflöde av det penetrerande ämnet som vandrar ut i vattnet inuti röret per dygn och per exponerad röryta när steady-state uppnåtts, det vill säga det stadium när lika mycket förorening tränger in som ut ur materialet och halten i stillastående vatten på insidan ökar linjärt.

Tabell 5-1 Sammanställning försöksresultat för PE-rör och PE-material.

Uppgifterna har sammanställts från följande referenser:

1 = Mao et al. 2010, 2 = Whelton et al. 2010, 3 = Ong et al. 2008.

Material och vägg tjocklek mm	Exponerings medium	Penetrerande ämne	Exponerad för konc. mg/l	Diffusionskoeff. cm ² /d	Genombrottstid dygn	Permeation vid steady-state µg/cm ² /d	Ref.
HDPE-rör 3,1	Ren bensin	Toluen	75 900	0,00095	ca 7	13,2	3
HDPE-rör 3,1	100 % bensinmättad vattenlösning	Toluen	56	0,00029	20	1,011	1
HDPE-rör 3,1	50 % bensinmättad vattenlösning	Toluen	26	0,00026	23	0,325	1
HDPE-rör 3,1	10 % bensinmättad vattenlösning	Toluen	5,2	0,00022	29	0,052	1
HDPE-rör 3,1	1 % bensinmättad vattenlösning	Toluen	0,5	0,00016	43	0,0042	1
HDPE-geomembran 0,76	ea	Toluen	100	0,00046			1*
HDPE-rör 3,1	Ren bensin	Bensen	19 800	0,00112	ca 7	13,2	3
HDPE-rör 3,1	100 % bensinmättad vattenlösning	Bensen	68	0,00031	13	1,044	1
HDPE-rör 3,1	50 % bensinmättad vattenlösning	Bensen	31	0,00030	17	0,344	1
HDPE-rör 3,1	10 % bensinmättad vattenlösning	Bensen	6	0,00025	26	0,057	1
HDPE-rör 3,1	1 % bensinmättad vattenlösning	Bensen	0,6	0,00016	43	0,0046	1
HDPE-geomembran 2	ea	Bensen	30	0,00073			1*
HDPE-rör	ea	TCE		0,00017			3*
LDPE-rör	ea	TCE		0,00052			3*
HDPE-rör mono-modal 2,6	Rent ämne	Diklor-metan		0,00553			2
HDPE-rör mono-modal 2,6	Rent ämne	MTBE		0,00058			2
HDPE-rör mono-modal 2,6	Rent ämne	Triklor-metan		0,00501			2
HDPE-rör mono-modal 2,6	Rent ämne	Toluen		0,00492			2
HDPE-rör mono-modal 2,6	Rent ämne	p-xylen		0,00475			2
HDPE-rör bimodal 2,6	Rent ämne	Diklor-metan		0,00734			2
HDPE-rör bimodal 2,6	Rent ämne	MTBE		0,00076			2
HDPE-rör bimodal 2,6	Rent ämne	Triklor-metan		0,00570			2
HDPE-rör bimodal 2,6	Rent ämne	Toluen		0,00622			2
HDPE-rör bimodal 2,6	Rent ämne	p-xylen		0,00613			2

ea = ej angivet i referensen.

* referensen hänvisar till annan referens.

Tabell 5-2 är en sammanställning av försöksresultat för PVC angivna i refererad litteratur. Med genombrottstid avses exponeringstid till dess mätbar halt av penetrerande ämne kunde återfinnas inuti röret. Med permeation vid steady-state avses det massflöde av det penetrerande ämnet som vandrar ut i vattnet inuti röret per dygn och per exponerad röryta när steady-state uppnåtts, det vill säga det stadium när lika mycket förorening tränger in som ut ur materialet och halten i stillastående vatten på insidan ökar linjärt.

Tabell 5-2 Sammanställning försöksresultat för PVC-rör.
Uppgifterna har sammanställts från Mao et al. (2009).

Material och vägg tjocklek mm	Exponerings medium	Penetrerande ämne	Exponerad för konc. mg/l	Genombrottstid dygn	Permeation vid steady-state $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$
PVC 3,6	Rent ämne vätska	TCE		6,5	780
PVC 3,6	Rent ämne vätska	Toulen		16	350
PVC 3,5	Rent ämne vätska	Toulen		5*	
PVC	Rent ämne vätska	Toulen		40*	
PVC 3,6	Rent ämne vätska	Bensen		20	1 350
PVC 3,6	Gas avdunstat från rent ämne	TCE		13	880
PVC 3,6	Gas avdunstat från rent ämne	Toulen		28	390
PVC 3,6	Gas avdunstat från rent ämne	Bensen		31	990
PVC 3,6	Vattenlösning mättad med rena ämnet	TCE	1093	168	270
PVC 3,6	Vattenlösning mättad med rena ämnet	Toluen	501	Ingen under 10 mån, prognos 1 år	
PVC 3,6	Vattenlösning mättad med rena ämnet	Bensen	1767	250	140
PVC 3,6	Ren bensin	BTEX	B: 19 800, T: 75 900, E: 14 700, X: 66 200	Ingen under 2 år	
PVC 3,6	100% bensinmättad vattenlösning	BTEX		Ingen under 2 år	

Det minsta vattenflöde i liter per dygn som krävs för att få tillräcklig utspädning, så att bensenhalten i dricksvattnet understiger det svenska gränsvärdet $1 \mu\text{g}/\text{l}$, kan beräknas genom att multiplicera följande värden: $\pi D_y L_F F$ där D_y är rörets yttre diameter i cm, L_F är förorenad sträcka av röret i cm och F är permeation (flux) vid steady-state i $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$. Värde på F vid angiven rörvägg tjocklek kan erhållas ur tabell 5-1 för PE eller 5-2 för PVC. Exempelvis krävs 13 680 liter/dygn när 100 cm av ett entums ($D_y = 3,3 \text{ cm}$) HDPE-rör exponerats för ren bensin i mer än 7 dygn, det vill säga genombrottstiden (då $F = 13,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{d}$).

6 Fördjupning kring genomträngning av tätningssringar

6.1 Tidigare forskning

Laboratorieförsök har visat att förorenande ämnen även kan tränga igenom tätningssringar i både plast- och järnrörskopplingar, men att detta sällan är den primära vägen för genomträngning. Trots att försök har visat att organiska kemikaliers förmåga att tränga genom material i tätningssringar är 5 till 100 gånger större än genom polybutylenrör, så har tätningssringar sällan varit involverade i de föroreningsincidenter som inträffat i verkligheten. Det finns två huvudsakliga orsaker till detta. Dels är **kontaktytan (genomträngningsytan)** för tätningssringar väldigt mycket mindre än för rörledningar, dels är tätningssringar vanligtvis installerade där flödet är kontinuerligt och högt, varvid utspädningseffekten är stor (USEPA 2002).

Chu-Lin Cheng vid Iowa State University lade 2009 fram sin doktorsavhandling avseende genomträngning genom tätningssringar för segjärnsledningar (Cheng 2009). Segjärnsledningar är i sig ogenomträngliga för kemiska föroreningar, men däremot har det rapporterats att föroreningar skulle kunna tränga genom tätningssringar av polymera material (t.ex. plast, gummi), varför försök utfördes i laboratorieskala för att studera detta.

Sorption (upptag) av bensin undersöktes för fem typer av tätningssringmaterial genom ett gravimetriskt sorptionstest. De fem typerna av tätningssringar var följande:

- etylen-propylen-dien monomer (EPDM).
- styren-butadien gummi (SBR).
- kloropren gummi (CR, kallas även neopren).
- akrylnitril butadien gummi (NBR).
- fluoroelastomer gummi (FKM).

Utifrån resultatet av sorptionstestet kan materialen ordnas i följande skala från högst till lägst upptag av bensin i tätningssringen: EPDM, SBR, CR, NBR, FKM (anm. FKM visade ett väldigt lågt upptag av bensin).

Vidare utfördes ett rörtrumförsök för att bestämma permeationsförmågan för bensen, toluen, etylbensen och xylén (BTEX-ämnena) genom fyra typer av tätningssringar (SBR, CR, EPDM och NBR). Utifrån resultatet kan materialen ordnas i följande skala från minst till mest motståndskraftig mot genomträngning av bensin: SBR, CR, EPDM, NBR. Bensen kan tränga genom SBR-tätningssringar i sådan grad att det är sannolikt att överskrida det amerikanska gränsvärdet för dricksvatten (5 µg/l) om tätningssringarna utsätts för direktkontakt med bensin och vattnet i ledningen förblir stillastående under minst 8 timmar. När det gäller NBR-tätningssringar är det osannolikt att gränsvärdena för dricksvatten överskrids, eftersom NBR är tillräckligt motståndskraftigt mot genomträngning av BTEX-ämnena. Utvärderingar baserade på data från experimenten tyder på att när det är ett flöde av

vatten genom rören (dvs. ej stillastående vatten), så kommer inga gränsvärden för BTEX-ämnena att överskridas.

En anordning med diffusionscell utvecklades för att kunna bestämma diffusionskoefficienter för BTEX-ämnena med avseende på olika tätningningsmaterial. Diffusionskoefficienter för SBR och NBR varierade mellan 10^{-7} och 10^{-8} cm²/s, men det fanns inget samband med tjockleken av det testade polymermaterialet (2 till 5 mm).

En modellberäkning gjordes avseende genomträngning av bensen genom en fyratums SBR-tätningningsring. Modellsimuleringen visade att risken för genomträngning av organiska föroreningar var större när tätningningsringen var utsatt för ett hydrostatiskt tryck än utan hydrostatiskt tryck.

Typiska tätningningsringar består av två delar, hälen och bulben, gjorda av samma polymer men med olika tillverkningssätt (formulations). Gravimetriska sorptionstest tyder på att hälleden av samtliga testade tätningningsringar är mer motståndskraftig mot genomträngning av bensinämnen än vad bulben är. En simulering visade att om bulbens längd ökade med 30 % så minskade genomträngningen till en tredjedel.

Sammanfattningsvis, SBR- och NBR-tätningningsringar är sannolikt tillräckligt motståndskraftiga avseende genomträngning av bensinförorenat grundvatten. NBR är dock det mest effektiva valet när man önskar ett material som är motståndskraftigt mot bensin. Tätningningsringens exponeringsyta och dess orientering i hylsan/muffen efter att rörkopplingen monterats har sannolikt betydelse för hur genomträngningen sker och vilken mängd förorening som tränger igenom.

6.2 Beräkningsmodeller genomträngning av tätningningsring

Vanligtvis när ett bensinspill skett till marken, så kommer BTEX-ämnena i bensinen att delvis lösas i markvattnet. Mättnadsnivån är den högsta möjliga nivå av BTEX som kan lösas i vattnet och det är cirka 130–170 mg total BTEX per liter, varav bensen utgör 40–50 %. I två sällsynta men ändå tänkbara extremfall, att en tätningningsring står i direkt kontakt med ren bensin eller med bensinmättat markvatten, kan halten bensen i dricksvattnet, C_d (mg/l), uppskattas via ekvation nedan, baserad på Cheng (2009):

$$C_d = \frac{4000 M n}{\pi d_i^2 v}$$

M = massflöde av förorening som tränger genom varje tätningningsring per dygn (mg/d).

n = antal tätningningsringar som exponerats av föroreningen.

d_i = rörets inre diameter (cm).

v = vattnets genomsnittliga hastighet i röret (cm/d).

Värde på M , det vill säga mängd förorening från bensin som vandrar in i och tränger genom tätningningsringen per dygn, för aktuell kombination förorening och polymermaterial, erhålls ur tabell 6-1 när det gäller en 2-tums

PVC-ledning respektive tabell 6-2 när det gäller en 4-tums segjärnsledning. Uppskattade värden på M för grövre ledningar, vid användning av tätningssring av SBR eller NBR, har även tagits fram av Cheng (2009) respektive Ong *et al.* (2008).

För att uppskatta halten i en servisledning som omsätts endast en gång per dygn, det vill säga med i det närmaste stillastående vatten, eller i en servisledning med vatten som varit stillastående ett dygn, sätts hastigheten v (i cm/d) till samma värde som servisledningens längd i cm.

6.3 Sammanställning av försöksresultat och kritiska parametrar

Tabell 6-1 och 6-2 är sammanställningar av försöksresultat för tätningssringar angivna i refererad litteratur. Tabell 6-1 avser muffade PVC-rör och tabell 6-2 segjärnsrör. Med tjocklek avses sträcka som måste penetreras för att nå insidan. Med steady-state avses det stadium när lika mycket förorening tränger in som ut ur materialet och halten i stillastående vatten på insidan ökar linjärt. I tabell 6-2 anges exponeringstid till dess detta stadium nås för en tätningssring på ett fyrtumsrör. Notera att det inte är detsamma som genombrotts-tid, vilket angetts för plaströr. Med permeation vid steady-state avses det massflöde av det penetrerande ämnet som vandrar ut i vattnet inuti röret per dygn och tätningssring när steady-state uppnåtts.

Tabell 6-1 Sammanställning försöksresultat för Rieber tätningssringar för 2-tums PVC-rör. Uppgifterna har sammanställts från Ong *et al.* (2008).

Material	Exponeringsmedium	Penetrerande ämne	Genombrotts-tid dygn	Permeation vid steady-state, mg/ring/d
SBR	Ren bensin	Bensen	21	1,59
NBR	Ren bensin	Bensen	21	0,70

I försöken med Rieber tätningssring för tvåtums PVC-rör inträffade genombrottet efter 21 dygn för både SBR- och NBR-tätning som exponerades för ren bensin (tabell 6-1). När genombrottet skett vandrade stadigt 1,59 respektive 0,7 mg bensen per dygn genom SBR- respektive NBR-tätningen (Ong *et al.* 2008). Det innebär att det behövs ett minsta vattenflöde genom röret på 1 590 respektive 700 liter/dygn för att få tillräcklig utspädning så att bensenhalten i dricksvattnet understiger det svenska gränsvärdet 1 µg/l.

I samtliga försök med segjärnstätning (tabell 6-2) kunde observeras att en låg men mätbar mängd (≥ 1 µg) av BTEX-ämnena hade penetrerat genom tätningssringen redan inom 7 dygn för samtliga testade material, när tätningssringens tjocklek var minst 20 mm. Det gällde även SBR- och NBR-tätningar i bensinvattenlösning vid lägsta testade halt (5 % av mättnadsnivå). Med andra ord måste ett utsläpp runt en tätningssring åtgärdas inom 7 dygn även vid låga markföroreningsnivåer och även om en NBR-tätning, som anses vara oljebeständig, används. Vid försök som gjordes med tunnare tätningssringar (2–5 mm) var tiden betydligt kortare, steady-state nåddes inom 1,7–16 timmar för SBR-tätning och 2,6 d för NBR-tätning i kontakt med ren bensin (Cheng 2009).

Det minsta vattenflöde i liter per dygn som krävs för att få tillräcklig utspädning, så att bensenhalten i dricksvattnet understiger det svenska gränsvärdet 1 µg/l, är samma värde som permeation vid steady-state räknat i µg/d, alltså 1 000× värdet i tabell 6-2, om en tätningssring förorenats. Exempelvis krävs 1 060 liter/dygn när en EPDM-tätning exponerats för ren bensen i mer än 35 dygn, det vill säga efter att steady-state nåtts.

Tabell 6-2 Sammanställning försöksresultat för Tyton tätningssringar för 4-tums segjärnsrör. Uppgifterna har sammanställts från följande referenser: 1 = Cheng 2009, 2 = Ong et al 2008.

Material och tjocklek mm	Exponeringsmedium	Penetrerande ämne	Exponerad för konc. mg/l	Diffusionskoeff. cm ² /d	Tid till steady-state nås, dygn	Permeation vid steady-state mg/ring/d	Ref.
EPDM	Ren bensen	Bensen		0,0198	35	1,06	1
EPDM	Ren bensen	Toluen				2,25	1
EPDM	Ren bensen	Etyl-bensen				0,12	1
EPDM	Ren bensen	Xylen m + o + p				0,6	1
EPDM	Ren bensen	Total BTEX		0,104	35	3,93	1
NBR 36,3	Ren bensen	Bensen		0,0077	124	0,16	1
NBR 36,3	Ren bensen	Toluen				0,12	1
NBR 36,3	Ren bensen	Etyl-bensen				0,004	1
NBR 36,3	Ren bensen	Xylen m + o + p				0,016	1
NBR 36,3	Ren bensen	Total BTEX		0,0276	124	0,36	1
SBR 36,3	Ren bensen	Bensen		0,0126	50	2,72	1
SBR 36,3	Ren bensen	Toluen				2,22	1
SBR 36,3	Ren bensen	Etyl-bensen				0,068	1
SBR 36,3	Ren bensen	Xylen m + o + p				0,349	1
SBR 36,3	Ren bensen	Total BTEX	172 000	0,0825	50	5,2	1
SBR 36,3	100 % bensinmättad vattenlösning	Total BTEX	168		210	0,203	1
SBR 36,3	50 % bensinmättad vattenlösning	Total BTEX	88		350	0,041	1
SBR 36,3	20 % bensinmättad vattenlösning	Total BTEX	35		Ej nådd inom 550 d		1
NBR	100 % bensinmättad vattenlösning	Total BTEX	168		Ej nådd inom 550 d		1
SBR	ea	Toluen		0,0015			2*

ea = ej angivet i referensen.

* referensen hänvisar till annan referens.

7 Riskvärdering utifrån referensvärden och teoretiska modeller

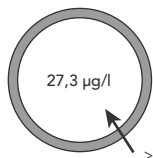
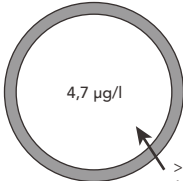
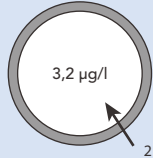
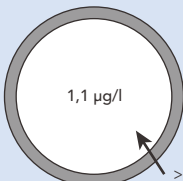
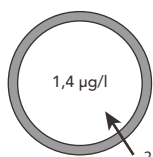
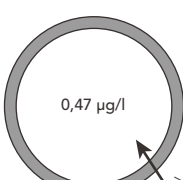
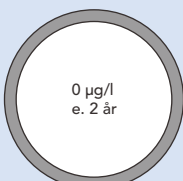
En jämförande riskvärdering för olika rör- och tätningsringsmaterial har utförts baserat på de studier som beskrivits i referenslitteraturen, främst Ong *et al.* (2008). Riskvärderingen har gjorts avseende bensen, eftersom den är väl studerad i referenserna och det finns jämförbara data mellan olika material. Bensen bedöms också vara det ämne som medför störst potentiell risk för överskridet hälsomässigt gränsvärde i dricksvatten på grund av genomträngning från förorenad mark, eftersom bensen såsom komponent i bensen förekommer i många föroreningsituationer och är starkt hälsoskadligt, varför gränsvärdet i dricksvatten är relativt lågt (1 µg/l i Sverige).

Riskvärderingen har utförts för tre föroreningsituationer. A avser en extrem situation där bensen släppts ut i så stor omfattning att ren bensen omger 1 m av röret eller en tätningsring. B avser en mer realistisk situation där bensen lösts i grundvatten tills mättnadsnivån nåtts, det vill säga högsta möjliga halt av bensen i vatten. Det bensenblandade grundvattnet omger 1 m av röret eller en tätningsring. I situation C har ren bensen släppts ut i grundvatten i så stor omfattning att mättnadsnivån nåtts. C är ett specialfall för att illustrera en speciell egenskap hos PVC-plast. Försök har nämligen visat att PVC-plast är mycket motståndskraftig mot bensen, såväl i ren form som blandad i grundvatten. Inga föroreningar från bensen förmådde tränga genom ett PVC-rör som badade i ren bensen under de två år försöket pågick. Däremot kunde bensen vandra genom ett PVC-rör som badade i vatten blandat med ren bensen till mättnadsnivån (1767 mg/l), trots att bensenhalten i bensen (19800 mg/l) var en tiopotens högre än i vattenblandningen (Ong *et al.* 2008).

Riskvärderingsjämförelsen visas i figur 7-1, a–c. Samtliga situationer gäller ledningar med kontinuerligt, men mycket lågt vattenflöde, vilket är en realistisk situation på natten. Antagna vattenflöden anges i figur 7-1, a–c. Cirklarna symboliserar rör i tre storlekar. Haltvärden avser bensen utanför röret (mg/l) eller i dricksvatten inuti röret (µg/l), det sistnämnda avser när steady-state uppnåtts. Halten i dricksvattnet motsvarar alltså halten i vatten som tappas på morgonen, efter att ha stått nästan helt stilla under natten. Tidsangivelsen vid pilen avser antal dygn tills mätbar halt uppstår inuti röret, massflödet (mg/d) avser mängd förorening som vandrar genom röret när steady-state uppnåtts. Värden har angivits eller beräknats i den mån det finns underlag i referenserna, men saknas för vissa dimensioner eller material.

Situation A: Ren bensin omger 1 m av röret eller en tättningsring

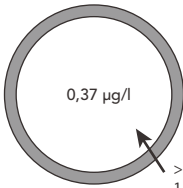
Värdena avser bensinhalt och genomträngning av bensin

Rördiameter Vattenflöde i rör Vattenhastighet	1 tumsrör 500 l/d 900 m/d	2 tumsrör 500 l/d 250 m/d	4 tumsrör 3 000 l/d 367 m/d = 0,004 m/s
PE Bensin med bensinhalt 19,8 g/IE			
PVC med Rieber SBR-tätning Bensin med bensinhalt 19,8 g/IE			
PVC med Rieber NBR-tätning Bensin med bensinhalt 19,8 g/IE			
PVC-rör (ev. tättningsring ej påverkad) Bensin med bensinhalt 19,8 g/IE			

Figur 7-1a Jämförande riskvärdering för olika rör- och tättningsringmaterial (ren bensin, plaströr).

Situation B: Bensinmättat grundvatten omger 1 m av röret eller en tättningsring

Värdena avser bensinhalt och genomträngning av bensin

Rördiameter Vattenflöde i rör Vattenhastighet	1 tumsrör 500 l/d 900 m/d	2 tumsrör 500 l/d 250 m/d	4 tumsrör 3 000 l/d 367 m/d = 0,004 m/s
PE Grundv. med bensinhalt 68 mg/l			
PVC med Rieber SBR-tätning	Grundv. med bensinhalt 68 mg/l	≈ 0 e. 6 mån	≈ 0 e. 6 mån
PVC med Rieber NBR-tätning	Grundv. med bensinhalt 68 mg/l	≈ 0 e. 6 mån	≈ 0 e. 6 mån
PVC-rör (ev. tättningsring ej påverkad)	Grundv. med bensinhalt 68 mg/l	0 µg/l e. 2 år	0 µg/l e. 2 år

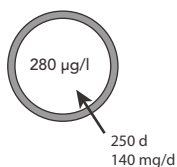
Situation C: Bensinmättat grundvatten omger 1 m av röret

Rördiameter
Vattenflöde i röret

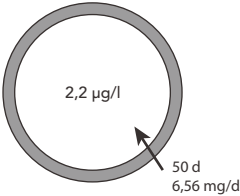
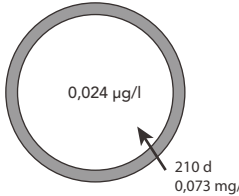
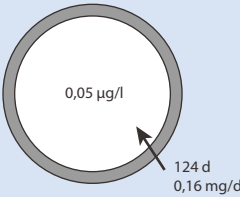
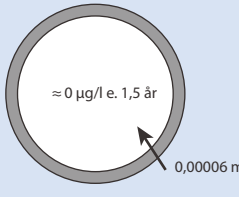
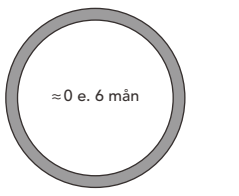
1 tumsrör
500 l/d

PVC-rör
(ev. tättningsring ej påverkad)

Grundv. med bensinhalt 1767 mg/l



Figur 7-1b Jämförande riskvärdering för olika rör- och tättningsringmaterial (bensinmättat grundvatten, plaströr).

Situation A till vänster: Ren bensin omger 1 m av röret eller en tättningsring Situation B till höger: Bensinmättat grundvatten omger 1 m av röret eller tättningsringen Värdena avser bensenhalt och genomträngning av bensen			
Rördiameter		4 tumsrör	4 tumsrör
Vattenflöde i rör		3 000 l/d	3 000 l/d
Vattenhastighet		367 m/d = 0,004 m/s	367 m/d = 0,004 m/s
Situation		Situation A	Situation B
Järnrör med Tyton SBR-tätning	Bensin med bensenhalt 19,8 g/l		
Järnrör med Tyton NBR-tätning	Bensin med bensenhalt 19,8 g/l		
Järnrör med Tyton EPDM-tätning	Bensin med bensenhalt 19,8 g/l		

Figur 7-1c Jämförande riskvärdering för olika rör- och tättningsringmaterial (segjärnrör).

Figur 7-1a–c visar att PE är det minst motståndskraftiga materialet mot bensinförorening, medan PVC och järn är mycket motståndskraftiga mot sådan förorening, dock kan bensen tränga genom tättningsringar för PVC- eller järnrör. För PE-ledningar finns risk att gränsvärdet 1 µg/l för bensen i dricksvatten överskrids om halten förorening i marken är hög. Det har även visats att när bensen förekommer som rent ämne eller blandat i vatten (situation C), kan bensen långsamt tränga genom ett entums PVC-rör utan tättningsringar efter 250 dagar. Under tiden sväller PVC-plasten så att när väl genombrottet har inträffat blir flödet av bensen genom materialet och vidare till vattnet mycket stor (Ong *et al.* 2008).

8 Slutsatser

Generellt har konstaterats att organiska föroreningar i mark (exempelvis orsakade av petroleumutsläpp) kan teoretiskt tränga igenom samtliga plastmaterial eller tätningsringar. Teoretiska modeller och kunskap om genomträngningsprocessen i labbskala för vissa typer och dimensioner av PE-rör, PVC-rör och tätningsringar i PVC- och segjärnsrörssystem finns.

Som del av en riskvärdering kan således beräkning av förväntad halt förorening i dricksvatten göras, förutsatt att permeationskoefficient för respektive förorening och ledningsmaterial är känd samt om halten markförorening är känd. En generell slutsats är att de ingående kritiska modellparametrarna troligen är svåra att bestämma med exakthet i det enskilda fallet. Vägledande beräkningsresultat bör dock kunna erhållas, i synnerhet för de mest studerade föroreningarna (ex. bensen) och ledningsmaterialen (klenplastledningar och muffade rör med standardtätningsringar).

Typ av markföroreningar som omnämns i litteraturen och rapporteras från verkliga fall av genomträngning till dricksvatten är i första hand organiska ämnen bestående av små molekyler som härrör från petroleumprodukter (exempelvis bensen och toluen), organiska lösningsmedel samt flyktiga klorerade lösningsmedel (exempelvis trikloreten, TCE).

Frekvensen av incidenter (verkliga fall av genomträngning som givit höga föroreningshalter i dricksvattnet) är mycket låg, enligt dokumenterade undersökningar i USA. För huvudvattenledningar är frekvensen troligen lägre än 5 fall per 100 000 km ledning. För servisledningar i storleksordningen 1–2 incidenter per 100 000 serviser.

Risk för dålig vattenkvalitet och/eller lukt- och smakpåverkan på dricksvattnet till följd av genomträngning av markföroreningar förutsätter normalt följande:

- Mycket låg vattenomsättning (i princip stillastående vatten under längre tid).
- Höga koncentrationer av markförorening.

Det är betydande skillnader i diffusionskoefficienter (genomsläpplighet) mellan olika ledningsmaterial och tätningsringar. Genomträngning genom en opåverkad ledning är dock en långsam process, oavsett rörmaterial/tjocklek finns normalt tillräcklig tid att agera och att sanera förorenad jord om det görs direkt efter en spillolycka.

Genomträngning pågår kontinuerligt genom en ledning som under lång tid legat i förorenad mark, om den legat så länge att ämnet väl börjat tränga in i dricksvattnet. Genomträngningen pågår så länge det finns en koncentrationsskillnad mellan insidan och utsidan av ledningen.

När det gäller plastledningar (PE och PVC) och vissa tätningsringar som utsätts för höga koncentrationer petroleumförorening under lång tid kan porerna i plasten fyllas med organiska föroreningar, varvid plasten sväller och blir mer genomsläpplig. Förändringen är inte reversibel, en påverkad plastledning måste tas bort och ersättas med en ny ledning, det räcker ej att enbart ta bort förorenad jord och rensa ledningen.

9 Rekommendationer

Följande rekommendationer ges:

- Rutinmässigt alltid använda ren jord för återfyllnad runt och ovanpå ledningar.
- Projektera dricksvattensystem så att reservoarzoner och ledningsavsnitt med stillastående vatten om möjligt undviks, utföra regelbunden underhållsspolning där det ändå förekommer.
- Planera arbeten så att anläggning av dricksvattensystem i förorenad mark om möjligt undviks, gör en riskanalys om det är oundvikligt. Utför mätning av föroreningar på plats i misstänkta områden redan under planeringsfasen.
- Om ett läckage nyligen inträffat så att marken nära en dricksvattenledning blivit förorenad, måste de förorenade jordmassorna och förorenat markvatten omedelbart avlägsnas.
- Genomför en riskvärdering av befintliga vattenledningsnät baserat på kunskap om markföroreningar, vattenomsättning och ledningsmaterial.
- Om en ledning eller tätningsring legat så lång tid i förorenad mark att föroreningen hunnit tränga genom ledningen/tätningsringen och kommit in i dricksvattnet, måste såväl den förorenade jorden och markvattnet som den påverkade ledningen/ tätningsringen avlägsnas. En ny ledning/ tätningsring anläggs och återfyllnad sker med ren jord.
- I situationer där en vattenledning av praktiska och/eller ekonomiska skäl måste förläggas i ett riskområde (dvs. där mycket höga koncentrationer av befintliga eller framtida organiska markföroreningar kan befaras) rekommenderas att vattenledningen anläggs med en 100 % tät barriär av metalliskt material. Exempel finns både för plaströr (flerskikt PE-rör med ett mellanskikt av aluminium som stumsvetsas, svetsen övertäcks med en diffusionstät kappa) och segjärnsrör (skarvar lindas med aluminiumfolie och skyddas med krympmuff).
- Om det är okänt vilket ämne som ligger bakom klagomål på lukt eller smak rekommenderas att en screeninganalys utförs av dricksvattnet, det vill säga ett analyspaket som omfattar ett mycket stort antal ämnen, åtminstone ämnen enligt tabell 3-2, varvid erbjuden rapporteringsgräns ska vara lägre än målvärdet i tabellen. Exempel på lämpliga analyspaket är VOC screening eller paket för undersökning av förorenad mark och markvatten, vilka även kan användas för dricksvatten om ovanstående rapporteringsgräns erbjuds.

10 Fortsatt arbete

Urvalet av olika ledningsmaterial som ingått i tidigare studier samt variationen av rördimensioner, rörväggtjocklekar och rörtyper är begränsat. Utöver de ”standardmaterial” (PE, PVC och vanlig förekommande tätningsringar) som hittills ingått i dokumenterade studier och redovisas i denna rapport finns en mängd andra typer av material och rörsystem för dricksvattendistribution. Som exempel kan nämnas glasfiberarmerad polyester (GRP), stål och PE/PP rör med ett inbyggt diffusionstätt skikt av aluminium. Kompletterande studier av genomträngningsförmåga för fler rörtyper behövs. En målsättning bör vara att den som levererar ett rör till allmänna eller enskilda dricksvattennät ska kunna redovisa det specifika rörmateriallets diffusions-täthet/motstånd mot genomträngning av några vanliga markföroreningar.

Under arbetet med denna rapport har framkommit olika former av ”diffusionstäta” rörsystem och resultat från diffusionstest som genomförts på uppdrag av rörtillverkare. Ett fortsatt arbete kring oberoende och enhetliga diffusionstest av fler rörtyper rekommenderas för att på ett rättvist sätt kunna jämföra olika rörmaterial med avseende på hur väl dessa kan förväntas motstå genomträngning av markföroreningar. Motståndskraft mot genomträngning och materialförändringar på grund av kemiska markföroreningar borde rimligen ingå i kvalitetssäkring och certifiering av komponenter i rörsystem.

Ytterligare långtidsstudier krävs kring hur plast- och gummimaterial i dricksvattennätet påverkas vid långvarig exponering av markförorening, dvs uppföljning av uppsvällning, uppmjukning och genomträngning. Noterbart är att de vetenskapliga studier av genomträngning genom plaströr och tätningsringar som genomförts i USA uteslutande använt nya material. Ett rimligt antagande är att de polymera material som ingår i vattenledningsnätet förändras med tiden, dvs plast och gummi åldras. En relevant fråga som bör utredas ytterligare är således hur rörmateriallets motståndskraft mot genomträngning förändras med tiden. En viktig faktor att väga in i riskvärderingen är om tidiga plastmaterial och tätningsringar (som ej nyanläggs idag men är vanliga i svenska dricksvattennät) kan vara mindre motståndskraftiga mot genomträngning jämfört med de material som idag finns på marknaden.

Rapporterade fall av genomträngning är mycket få men dokumentationen kring de konstaterade incidenterna är oftast knapphändig. Möjligen skulle incidentrapporteringen kunna förbättras om någon form av checklista/mall för incidentrapport togs fram, vilket därmed är ett förslag för fortsatt arbete. Checklistan skulle även kunna inrymma förslag till handlingsplan samt förslag till provtagning och analys när klagomål på smak och lukt (som kan ha orsakats av genomträngning från mark till dricksvatten) kommer in från vattenabonnenter.

I Sverige förekommer ett flertal förorenade platser där tvättkemikalier från gamla kemtvättar läckt ut i marken och grundvattnet i närheten av dricksvattenledningar. Väldigt höga värden av tetrakloreten, även kallad

perklöretylen (PCE), och triklöretylen (TCE eller ”tri”) har uppmätts i en del prover från dessa platser. Exempelvis var grundvattnet helt mättat med PCE i ett prov från den nu nedlagda Bodentvätten, det vill säga halten var 160 mg/l (SGU 2010). Det fanns dock inga undersökningar av PCE i de referenser som ingått i den här litteraturstudien och även TCE är bristfälligt studerad. En överslagskalkyl antyder att TCE kan tränga genom klena ledningar och medföra överskridet gränsvärde vid normalt flöde på natten för ett enfamiljshus. Det vore därför intressant att göra fortsatta studier av dessa två ämnens påverkan på dricksvattenledningar.

Referenser

- Bromhead, J. (1997) Permeation of benzene, trichloroethene and tetrachloroethene through plastic pipes. Report for Drinking Water Inspectorate, December 1997.
- Cheng, C-L. (2009) Permeation of organic compounds through ductile iron pipe gaskets. Doctoral thesis, Iowa State University.
- DANVA (2004) Afsmittning til drikkevand fra plastrør anvendt til vandforsyningsformål - Identifikation af potentielle stoffer. DANVA vejledning nr 60, September 2004. ISBN: 87-90455-43-6.
- Holsen, T.M., Park, J.K., Jenkins, D. & Selleck, R.E. (1991) Contamination of potable water by permeation of plastic pipe. Journal AWWA, 83(8): 53–56.
- Lindeborg, S. (2012) Tubman AB. *Personlig kommunikation*.
- Malm A., Horstmark A., Larsson G., Uusijärvi J., Meyer A. & Jansson, E. (2011) Rörmaterial i svenska VA-ledningar – egenskaper och livslängd. SVU-rapport 2011-14, Svenskt Vatten AB.
- Mao, F., Gaunt, J.A. & Ong, S.K. (2009) Permeation of organic contaminants through PVC pipes. American Water Works Association Journal, Vol. 101:5, pp. 128–136.
- Mao, F., Gaunt, J.A., Cheng, C. & Ong, S.K. (2010) Permeation of BTEX compounds through HDPE pipes under simulated field conditions. American Water Works Association Journal, Vol. 102:3, pp. 107–118.
- Ong, S.K., Gaunt, J., Mao, F., Cheng, C-L. & Esteve-Agelet, L. (2008) Impact of Hydrocarbons on PE/PVC Pipes and Pipe Gaskets. AWWA-RF Report 91204. ISBN 978-1-84339-202-6.
- Selleck R.E. & Marinas, B.J. (1991) Analyzing the permeation of organic chemicals through plastic pipe. Journal AWWA, 83(7): 92–97.
- SGU (2010) Pilen 6 i Boden Miljöteknisk markundersökning. Golder Associates Rapportnr 09512420276, 2010-09-13. Nedladdningsbar pdf på SGUs webbplats: http://www.sgu.se/opencms/export/download/pdf/Rapport_Bodentvaetten.pdf.
- USEPA (2002) Permeation and Leaching, Issue Paper August 15, 2002, U.S. Environmental Protection Agency.
- USEPA (2009) National Primary Drinking Water Regulations. U.S. Environmental Protection Agency.
- US Geological Survey (2001) Occurrence and Distribution of Methyl tert-Butyl Ether and Other Volatile Organic Compounds in Drinking Water in the Northeast and Mid-Atlantic Regions of the United States 1993–98. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4228.

Whelton, A. J., Dietrich, A. M. & Gallagher, D. L. (2010) Contaminant Diffusion, Solubility and Material Property Differences between HDPE and PEX Potable Water Pipes. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 136, No. 2.

Viklund, P. (2012) VA-avd. Luleå kommun. *Personlig kommunikation*.

WHO (2011) Drinking Water Guidelines (including background documents). 4th Ed. World Health Organization.



Box 47607, 117 94 Stockholm

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se