

Risikanalyt från råvatten till tappkran

Andreas Lindhe



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. 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
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

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

Anders Lago, ordförande	Södertälje Kommun
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Per Fåhraeus	Varbergs Kommun
Carina Färm	Eskilstuna Energi & Miljö AB
Daniel Hellström	Svenskt Vatten AB
Marie Nordkvist Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Mats Rostö	Gästrik Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Lena Söderberg	Svenskt Vatten AB
Ulf Thysell	VA SYD
Susann Wennmalm	Käppalaförbundet
Fred Ivar Aasand	Norsk Vann, adjungerad

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
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:	Risکاناليس från råvatten till tappkran
Title of the report:	Risk analysis from source to tap
Rapportnummer:	2010-08
Författare:	Andreas Lindhe (växeltel: +46 (0)31-772 10 00, e-post: andreas.lindhe@chalmers.se), Avdelningen för geologi och geoteknik, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola
Projektnummer:	28-112
Projektets namn:	Ramprogram för FoU inom dricksvattenområdet i Sverige – från råvatten till tappkran
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, Göteborgs Stad och EU-projektet Techneau (kontrakt 018320)
Rapportens omfattning	
Sidantal:	44
Format:	A4
Sökord:	Dricksvatten, dricksvattensystem, fara, risk, risکاناليس, riskbedömning, riskhantering, felträäd, osäkerhet, vattensäkerhetsplan
Keywords:	Drinking water, drinking water system, hazard, risk, risk analysis, risk assessment, risk management, fault tree, uncertainty, water safety plan
Sammandrag:	I rapporten presenteras och diskuteras risk som koncept samt riskhanteringsens roll och struktur inom dricksvattenförsörjningen. En kvantitativ felträädsmetod för risکاناليس av dricksvattensystem, från råvatten till tappkran, beskrivs och illustreras med exempel från en fallstudie.
Abstract:	In this report the concept of risk and the role of risk management within the drinking water sector are presented and discussed. A quantitative fault tree method for risk analysis of drinking water supplies, from source to tap, is described and a case study is illustrated.
Målgrupper:	VA-ansvariga, VA-konsulter, tillsynsmyndigheter
Omslagsbild:	Göta älv, råvattentäkt i Göteborg (vänster), vattenreningsverk i Pretoria, Sydafrika (mitten), dricksvattenkran (höger). De tre bilderna illustrerar begreppet från råvatten till tappkran. Foto: Andreas Lindhe
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2010
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

I många länder, däribland Sverige, förutsätter de flesta att det alltid kommer vatten i kranen och att vattnet är av god kvalitet. Det händer dock att folk blir utan dricksvatten i kranen och när de dricker vattnet kan de bli sjuka. Med hjälp av ett förebyggande arbete försöker inblandade aktörer hindra denna typ av händelser. Det går dock inte att eliminera risken helt och därför måste risker analyseras noggrant för att skapa kunskap om vilka risker som finns, hur allvarliga de är och vilka åtgärder som kan och bör vidtas. Syftet är att genom en effektiv riskhantering uppnå en acceptabel risknivå. Denna rapport är en översatt sammanfattning av den licentiatuppsats om riskanalys och dricksvattensystem som Andreas Lindhe vid Chalmers presenterade i oktober 2008. Licentiatuppsatsen finns att ladda ner via www.dricks.chalmers.se/publikationer.asp.

Dricksvattenforskningen vid Chalmers har sedan 2003 genomförts inom ramprogrammet DRICKS, med viktig basfinansiering från Svensk Vatten Utveckling. DRICKS består av seniora forskare och doktorander som bedriver forskning *från råvatten till tappkran*. Forskningsprojekt pågår inom områdena riskbedömning, råvattenskydd, beredningsteknik, distribution och konsumentperspektiv. Mer information om DRICKS finns på www.dricks.chalmers.se.

Det doktorandarbete som ligger till grund för denna sammanfattningsrapport har finansierats av Svenskt Vatten Utveckling, Göteborgs Stad samt EU-projektet Techneau. Ett stort tack riktas till dessa organisationer samt de personer vid Göteborgs Stad som på olika sätt bidragit till detta arbete.

Göteborg, februari 2010

Andreas Lindhe

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	7
1 Introduktion	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte	9
1.3 Avgränsningar	9
2 Risk och dricksvatten	10
2.1 Risk som koncept	10
2.2 Risker inom dricksvattenförsörjningen	11
2.3 Varför skall vi hantera risker?.....	12
2.4 Riskhanteringsprocessen	12
3 Ramverk och metoder	14
3.1 Riskhantering och dricksvattenförsörjning	14
3.2 Internationella och nationella ramverk	14
3.3 Ett förklarande ramverk.....	17
3.4 Metoder för riskanalys från råvatten till tappkran.....	19
4 Metod för integrerad riskanalys	22
4.1 Bakgrund till metoden	22
4.2 Metodens grunder	22
4.3 Fallstudie	27
5 Diskussion och slutsatser	32
5.1 Integrerad riskanalys och riskhantering.....	32
5.2 Nyttan för branschen	33
5.3 Slutsatser.....	34
Referenser	36

Sammanfattning

Dricksvattenförsörjningen har en central funktion i samhället och är samtidigt utsatt för ett stort antal risker. För att analysera och hantera dessa risker krävs både lämpliga metoder och en förståelse för de arbetsmoment och aspekter som behöver beaktas. Denna rapport utgör en sammanfattning av licentiatuppsatsen med titeln *Integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems*, som Andreas Lindhe presenterade vid Chalmers i oktober 2008. För ytterligare redogörelse av det som behandlas i denna rapport hänvisas således till licentiatuppsatsen¹.

Världshälsoorganisationen WHO framhåller att en säker dricksvattenförsörjningen inte uteslutande kan baseras på analyser av färdigproducerat dricksvatten. I stället krävs ett riskbaserat arbetssätt som inkluderar hela försörjningskedjan, från råvatten till tappkran. WHO förespråkar framtagandet av vattensäkerhetsplaner (Water Safety Plans) där bland annat risker skall analyseras och åtgärder föreslås. Vattensäkerhetsplanerna bidrar till en viktig ökad fokus på riskfrågor kopplat till dricksvatten och förväntas bli del av EU:s dricksvattendirektiv. För att möjliggöra det som WHO förespråkar krävs dock lämpliga metoder och verktyg.

Tillgången till metoder för att genomföra integrerade riskanalyser av dricksvattensystemet är begränsad. Med integrerad avses att hela systemet, från råvatten till tappkran, inkluderas. En metod baserad på felträdsteknik har utvecklats för att visa hur så kallade integrerade riskanalyser kan genomföras och vilka möjligheter det ger. Ett felträd är en modell som beskriver hur olika händelser förhåller sig till varandra och vad som måste hända för att problem skall uppstå. Med hjälp av metoden kan risken beräknas för hela systemet samt för delar av systemet. Detta ger möjlighet att se hur olika delar av systemet bidrar till den totala risken. Både en kvantitets- och en kvalitetsrelaterad risk beräknas, och de uttrycks som antalet minuter per år den genomsnittlige brukaren (i) blir utan vatten och (ii) får vatten som inte uppfyller kvalitetskraven. Utöver risknivåerna ger modellen information om hur ofta händelser inträffar och hur varaktiga de är.

Den framtagna metoden är ett bidrag till den verktygslåda som dricksvattenproducenter världen över bör ha tillgång till för att underlätta arbetet med vattensäkerhetsplaner och riskhantering i stort.

¹ Licentiatuppsatsen finns att ladda ner via www.dricks.chalmers.se/publikationer.asp.

Summary

Drinking water supply is an essential public function but is at the same time exposed to risks. To analyse and manage the risks, suitable methods and a good understanding of the different aspects included in risk management is necessary. This report is a summary of the licentiate thesis *Integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems*, by Andreas Lindhe. For additional information the reader is referred to the licentiate thesis².

The World Health Organization (WHO) emphasises that end-product testing is not sufficient to guarantee safe drinking water to consumers. Instead, a risk-based approach including the entire system, from source to tap, is required. The WHO recommends preparation of Water Safety Plans as one step in managing risks. The water safety plans provide an important focus on risk issues related to drinking water systems and will likely be incorporated in the EU Drinking Water Directive. However, suitable methods are needed to assist water utilities in their work with water safety plans and risk management in general.

Methods for integrated, i.e. from source to tap, risk analysis of drinking water systems are limited. To support risk management of drinking water systems a method for integrated risk analysis has been developed based on fault tree analysis. A fault tree is a logic diagram used to model interactions between events and illustrates how failure may occur. The method can be used to calculate the risk level for the entire system as well as for its different sub-systems. Thus, the contribution of each sub-system to the total risk level can be analysed. The risk is calculated separately for quantity-related as well as quality-related risks and expressed as the number of minutes per year the average consumer (i) does not have access to drinking water and (ii) is supplied with water that does not meet the water quality standards. In addition to risk levels the method provides information on failure rates and duration of failures.

The method developed is one source of input to a set of tools to assist water utilities in risk analysis and risk management.

² The thesis can be downloaded from www.dricks.chalmers.se/publikationer.asp.

1 Introduktion

I detta inledande kapitlet presenteras bakgrunden till rapportens innehåll, syftet med arbetet samt de avgränsningar som gjorts. Rapportens koppling till den bakomliggande licentiatuppsatsen beskrivs också.

1.1 Bakgrund

Dricksvattenförsörjningens centrala samhällsfunktion i kombination med de risker som finns gör att en effektiv riskhantering är av stor vikt. Att hantera risker är i sig inget nytt för dricksvattenbranschen, men de metoder och verktyg som ständigt utvecklas ger nya möjligheter. Det går inte att eliminera alla risker, det är varken tekniskt möjligt eller ekonomiskt försvarbart. Däremot är det viktigt att den acceptabla risknivån inte överskrids. För att ta reda på vilka faror som finns, hur stor risken är och senare även identifiera möjliga åtgärder samt vilken effekt dessa har, behöver riskanalyser genomföras. Riskanalysen syftar till att ge tillräcklig information för att välgrundade beslut skall kunna fattas.

Världshälsoorganisationen WHO pekar på begränsningarna i att uteslutande förlita sig på provtagning av färdigproducerat dricksvatten, så kallad efterkontroll, för att garantera ett säkert dricksvatten till konsumenterna (WHO, 2008). I stället förordas riskbaserade *Water Safety Plans*, vilket på svenska kan beskrivas som vattensäkerhetsplaner. En sådan plan förordar ett integrerat angreppssätt genom att risker i råvattentäkt, beredning och distribution analyseras (Bartram *et al.*, 2009; Davison *et al.*, 2005; WHO, 2008). För att kunna utföra detta arbete krävs dock olika typer av hjälpmedel. Det finns dock begränsat med metoder och vägledning kring hur riskanalyser som inkluderar ett helt dricksvattensystem kan genomföras.

Som en del i arbetet med vattensäkerhetsplaner föreslår WHO enklare riskrankning med hjälp av matriser (Bartram *et al.*, 2009; Davison *et al.*, 2005; WHO, 2008). Detta arbetssätt kan i många sammanhang vara användbart, men har också begränsningar. Dricksvattensystem är komplicerade i den mening att dess olika delar hänger ihop och interagerar. Av denna anledning har behovet av mer avancerade metoder som kan beskriva interaktionen mellan händelser identifierats. Till exempel är ett pumphaveri som isolerad händelse kanske inte tillräcklig för att konsumenterna skall bli utan vatten. Om det däremot samtidigt inträffar ett rörbrott eller det uppstår fel i beredningen, som begränsar produktionskapaciteten, kanske konsumenterna drabbas. I denna rapport beskrivs en metod som kan ta hänsyn till interaktioner mellan olika felhändelser (Lindhe, 2008). Metoden bygger på felträdsteknik och kan underlätta riskhanteringsarbete inom dricksvattenbranschen.

Vikten av att arbeta riskbaserat poängteras av många institutioner runt om i världen (CDW/CCME, 2004; IWA, 2004; NHMRC/NRMMC, 2004). De vattensäkerhetsplaner som förordas av WHO får allt större spridning i världen och förväntas bli del av EU:s

dricksvattendirektiv. I Sverige har arbeten genomförts med bland annat HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point, på svenska faroanalys och kritisk styrpunkt), riskrankning med matriser och mikrobiell riskanalys (Abrahamsson Lundberg *et al.*, 2009; SLV, 2007; Svenskt Vatten, 2007). Oavsett vad arbetet kallas är det viktigt att det finns ett förebyggande arbete och att lämpliga hjälpmedel tillämpas för att uppnå en säker dricksvattenförsörjning. Eftersom dricksvattensystem är utsatta för ett stort antal olika typer av risker behövs det en uppsättning av metoder. En metod kan inte användas för att analysera och lösa alla problem.

1.2 Syfte

Denna rapport har två huvudsyften. Det första är att ge en svensk översättning och sammanfattning av licentiatuppsatsen *Integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems* av Lindhe (2008). Det andra syftet kan delas in i följande delmål:

- Beskriva risk som koncept och dess innebörd inom dricksvattenområdet, samt beskriva de huvudsakliga ramverk och riktlinjer för riskhantering som finns tillgängliga inom detta område. Vidare skall ett övergripande ramverk presenteras, som illustrerar de komponenter som ingår i riskhantering av dricksvattensystem.
- Beskriva en felträdsmetod som utvecklats för integrerad riskanalys av dricksvattensystem, från råvatten till tappkran, samt illustrera en tillämpning.

1.3 Avgränsningar

Rapporten är en utökad sammanfattning av den bakomliggande licentiatuppsatsen. För ytterligare beskrivning hänvisas den intresserade läsaren till Lindhe (2008).

Såväl *risk* som *dricksvatten* är omfattande ämnesområden och denna rapport är fokuserad på (i) den övergripande strukturen för riskhantering av dricksvattensystem samt (ii) hur integrerade riskanalyser, det vill säga från råvatten till tappkran, kan genomföras. Rapporten tar inte upp krishantering, vilket är nära relaterat till riskhantering.

2 Risk och dricksvatten

För att ge en grund till innehållet i denna rapport beskrivs i detta kapitel risk som koncept, syftet med att hantera risker samt kopplingen mellan risk och dricksvattenförsörjning.

2.1 Risk som koncept

Termen *risk* används på olika sätt inom olika områden, men ofta beskrivs risk som en sammanvägning av sannolikheten för och konsekvenserna av en oönskad händelse (EC, 2000; IEC, 1995; ISO/IEC, 2002). Kaplan och Garrick (1981) beskriver svaret på frågan ”Vad är risk?” som svaren på följande tre frågor:

- Vad kan hända?
- Hur sannolikt är det
- Vad är konsekvenserna?

Denna beskrivning framhåller vikten att både sannolikheten och konsekvensen beaktas. Om till exempel endast sannolikheten beaktas skulle två händelser med vitt skilda konsekvenser men med samma sannolikhet kunna framstå som likvärdiga ur risksynpunkt. I de flesta fall är detta inte riktigt och därför skall både sannolikhet och konsekvens inkluderas i risken. Som exempel kan händelsen *rörbrott* användas. Sannolikheten för att händelsen inträffar kan vara 0,05 och konsekvensen att 100 personer blir utan vatten i åtta timmar (Lindhe, 2008 kap 2.1).

Ibland uttrycks risken som sannolikheten multiplicerat med konsekvensen, det vill säga som den förväntade konsekvensen. Detta är ett vanligt förekommande sätt att uttrycka risken på, men det bör poängteras att även andra sammanvägningar kan göras beroende på bland annat de frågor som skall besvaras och övriga syften med analysen.

Två andra termer som är starkt kopplade till risk är *fara* och *osäkerhet*. En fara beskrivs ofta som källan till den oönskade konsekvens som kan uppstå (IEC, 1995). Skillnaden jämfört med risk är att fara inte inkluderar information om sannolikheten (Burgman, 2005). En transport av farligt gods nära en vattentäkt kan till exempel betraktas som en fara. Ibland används även begreppet *farohändelse* eller *oönskad händelse* och i exemplet med farligt gods kan detta utgöra en olycka med transport av farligt gods, vilket leder till läckage och spridning av en förorening till vattentäkten. Osäkerhet är en viktig del av begreppet risk eftersom vi inte vet exakt när en händelse kommer att inträffa eller precis vad konsekvenserna blir. Det bör poängteras att osäkerhet i sig kan vara förknippat med positiva händelser och konsekvenser, men när det handlar om risk är osäkerhet kopplat till oönskade händelser och konsekvenser (Kaplan & Garrick, 1981).

Den till synes tekniska definitionen av risk som här presenteras får ibland kritik då den inte anses ta hänsyn till hur människor faktiskt upplever risken (Slovic, 2001). En orolig konsument kan uppleva hälsorisken med upptäckta medicinrester i dricksvattnet som väldigt stor, medan experter menar att denna risk är liten eftersom halterna är extremt låga. Även om inte människors upplevelse av risk tas med i den beräknade risken, bör detta tas hänsyn till i beslutsprocessen då resultaten från en riskanalys används. Det finns många aspekter som påverkar hur människor upplever risk (Klinke & Renn, 2002; Renn, 1998; Slovic, 1987), men detta behandlas dock inte vidare i denna rapport.

Eftersom risk kan definieras på olika sätt är det viktigt att tydligt beskriva vad som avses. I denna rapport används definitionen av Kaplan och Garrick (1981), vilket innebär att både sannolikhet och konsekvens beaktas.

2.2 Risker inom dricksvattenförsörjningen

Vilka risker finns det då inom dricksvattenförsörjningen? Ezell *et al.* (2000) beskriver dricksvattenförsörjningen som en nyckelfunktion i samhällets infrastruktur och ger allt från naturkatastrofer och industriella utsläpp till terrorism och IT-relaterade attacker som exempel på vad som kan skada försörjningssystemet. Eftersom alla dricksvattensystem ser olika ut varierar också riskerna i systemen (Lindhe, 2008 kap 3.2). Det går dock att generalisera och beskriva kategorier av risker. Till att börja med kan två huvudtyper av konsekvenser diskuteras. Ur konsumentens perspektiv kan han eller hon antingen bli utan vatten i kranen eller till exempel få ett hälsomässigt undermåligt vatten. Det går således att tala om kvantitets- och kvalitetsrisker. Går man vidare i händelsekedjan kan ett hälsomässigt undermåligt vatten leda till att konsumenten blir sjuk, vilket utöver ohälsan även kan leda till att personen drabbas ekonomiskt till följd av frånvaron från arbetet.

WHO (2008) framhåller mikrobiologiska föroreningar som den vanligaste och mest förekommande hälsorisken kopplat till dricksvatten. WHO (2008) beskriver att vattenkvaliteten kan påverkas negativt av biologiska, kemiska, fysiska eller radiologiska föroreningar. Vidare finns det olika typer av föroreningskällor, till exempel kontinuerliga och diffusa. Vad gäller kvantitetsaspekterna kan tillgången till såväl råvatten som dricksvatten påverkas av både kvalitetsstörningar och fel på fysiska komponenter i systemet. En kvalitetsavvikelse på exempelvis det utgående dricksvattnet från vattenverket kan leda till att leveransen till brukarna måste avbrytas. Uppstår det kvalitetsproblemen i råvattnet kan det leda till att råvattentäkten inte kan utnyttjas. Fel på fysiska komponenter kan göra det omöjligt att distribuera vattnet.

Pollard *et al.* (2004) beskriver ett antal riskkategorier som är aktuella för dricksvattenbranschen och samhället i stort. Dessa kategorier är: finansiella risker, kommersiella risker, hälsorisker, miljörisker, risker som innebära att organisationens rykte skadas samt risker förknippade med att lagkrav inte uppfylls. Det finns således ett brett spektrum av risker som kan vara av olika betydelse för olika aktörer i samhället.

Eftersom samhället ständigt förändras och utvecklas så behöver begreppet *framtida risker* också diskuteras. Termen kan tyckas något underlig eftersom en händelse inte behöver ha inträffat för att utgöra en risk. Här syftar dock begreppet på händelser som förväntas bli mer sannolika i framtiden till följd av förändringar såsom exempelvis förändrat klimat. Baserat på framförallt litteraturstudier listar Rosén och Lindhe (2007) följande händelser och aspekter som relevanta för framtida risker: sabotage och terroristhandlingar, konflikter, nya kemikalier, oro bland allmänheten, klimatförändringar och tekniska fel i åldrade distributionssystem.

För att hjälpa dricksvattenproducenter i arbetet med att identifiera relevanta farohändelser finns checklistor att tillgå. Beuken *et al.* (2007), Nadebaum *et al.* (2004) och Olofsson *et al.* (2001) är exempel på arbeten som kan fungera som hjälp. Tidigare konstaterades att dricksvattensystem skiljer sig åt på olika sätt, detta gör att det inte går att ta fram en komplett lista som är giltig för alla system. Checklistorna bör tillämpas med omdöme och ses som ett verktyg av för att underlätta identifieringsarbetet och ge inspiration så att inga händelser bortses ifrån. Expertkunskapen bland de personer som arbetar med systemet är givetvis av största vikt då farohändelser identifieras.

2.3 Varför skall vi hantera risker?

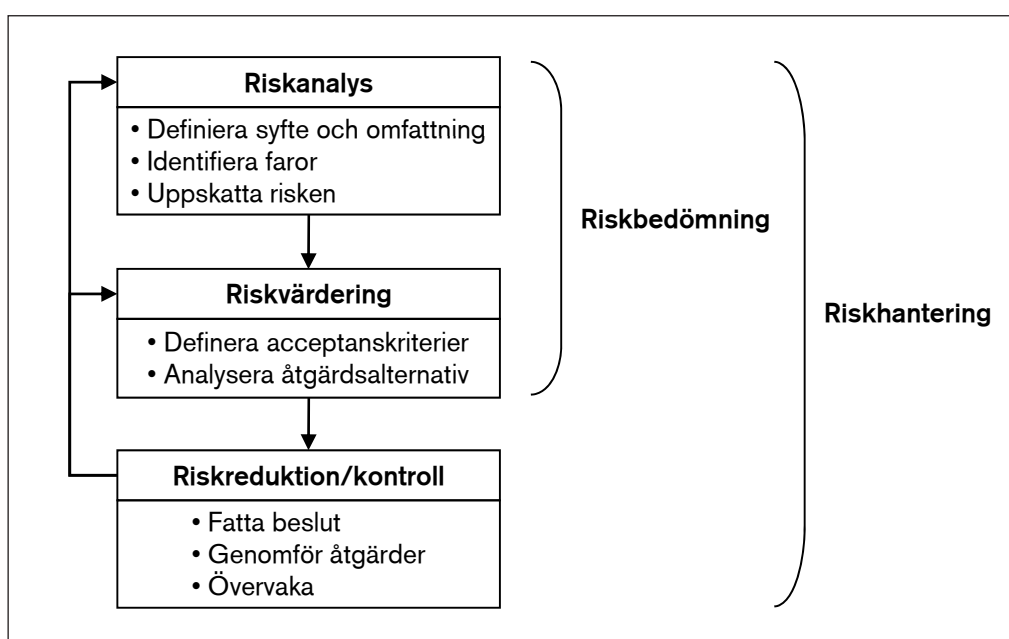
Svaret på frågan i rubriken kan tyckas självklar. Inom dricksvattenförsörjningen måste risker hanteras för att ett tillförlitlig försörjningssystem med vatten av hög kvalitet skall kunna säkerställas. Detta är givetvis en av huvudorsakerna, men det finns andra aspekter som inte får glömmas bort (Lindhe, 2008 kap 2.3). Som tidigare nämnts är det omöjligt att eliminera risken helt, vi måste i stället hitta en acceptabel risknivå. Genom att identifiera faror och analysera risker kan lämpliga åtgärder identifieras och på detta sätt underlättas en effektiv användning av de ekonomiska medel som finns tillgängliga. Väl genomförda analyser kan både se till att investeringar görs i de mest lämpliga åtgärderna och att åtgärder som inte har någon effekt undviks eller avvecklas om de redan vidtagits. God kunskap om systemet och dess risker skapar också nya möjligheter. Projekt som tidigare ansetts för riskabla kan i vissa fall genomföras då en ökad kunskap och förståelse visar att risken det aktuella projektet är förknippat med är låg.

2.4 Riskhanteringsprocessen

Med begreppet *riskhanteringsprocess* avses hela kedjan, från det att risken analyseras till det att åtgärder vidtas. Beroende på typ av risk och ämnesområde beskrivs denna process på lite olika sätt. En vanligt förekommande beskrivning av riskhanteringsprocessen illustreras i Figur 2-1. Det första steget benämns riskanalys och i detta steg definieras syfte och omfattning, varefter möjliga faror identifieras och riskens storlek uppskattas. Riskanalysen ger information till nästa steg som benämns riskvärdering.

Detta steg innefattar beslut om risken kan accepteras eller inte. Om risken anses oacceptabel måste möjliga åtgärder identifieras och analyseras.

Baserat på riskanalysen och riskvärderingen, vilka tillsammans benämns riskbedömning, fattas beslut och eventuella åtgärder genomförs samt följs upp. Det är viktigt att förstå att processen inte skall stanna här. Riskhantering är en ständigt pågående process där nya riskanalyser genomförs vid behov och redan genomförda analyser uppdateras när ny information blir tillgänglig eller om förutsättningarna ändras. Detta illustreras av återkopplingspilarna i Figur 2-1. En viktig aspekt som inte tydligt framgår i Figur 2-1 är vikten av kommunikation. För att uppnå en effektiv riskhantering måste såväl information till analyser som resultat och andra aspekter kommuniceras mellan experter, beslutsfattare, allmänhet och andra aktörer (Davidsson *et al.*, 2003; Owen *et al.*, 1999).



Figur 2-1 Riskhanteringsprocessen enligt IEC (1995), översatt av författaren.

3 Ramverk och metoder

Det finns olika ramverk som beskriver hur risker inom dricksvattenförsörjningen kan hanteras. I detta kapitel beskrivs några av de vanligaste ramverken samt olika metoder som kan användas för att analysera risken.

3.1 Riskhantering och dricksvattenförsörjning

En tillförlitlig försörjning av dricksvatten med god kvalitet är viktig för människors hälsa och samhällets ekonomiska utveckling (IWA, 2004). WHO (2008) menar att dricksvatten är säkert om det kan konsumeras under hela livet utan att utgöra någon betydande hälsorisk. Ett av huvudmålen för dricksvattenbranschen bör således vara att tillhandahålla tillförlitliga system som ger konsumenterna en kontinuerlig tillgång till dricksvatten av god kvalitet. Detta mål kan delas in i kvantitets- och kvalitetsmål precis som huvudkategorierna av risker (kapitel 2.2). För att uppnå en säker vattenförsörjning förespråkas av många ett proaktivt riskhanteringsarbete (IWA, 2004; WHO, 2008).

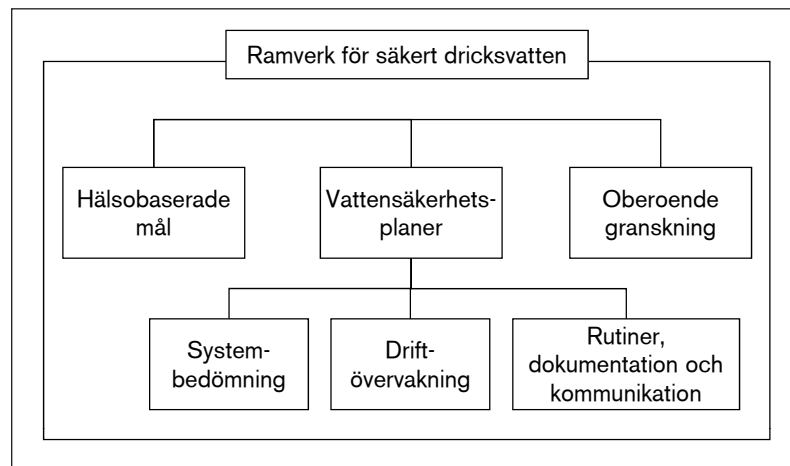
I litteraturen framhålls den förändring av riskhanteringsarbetet som skett och sker inom dricksvattenbranschen (Hrudey *et al.*, 2006; MacGillivray *et al.*, 2007a; 2007b; Pollard *et al.*, 2004). Denna förändring innebär att riskhanteringen blir mer uttalad och integrerad med verksamhetens övriga arbete, jämfört med tidigare då fokus främst var på utformning och drift av vattenverk (Hrudey *et al.*, 2006). Även om det alltid funnits ett förebyggande arbete som syftat till att förhindra oönskade händelser ger nya metoder och verktyg nya möjligheter att förbättra riskhanteringsarbetet. Exempel på denna förändring är de av WHO presenterade vattensäkerhetsplanerna samt den ökade tillämpningen av HACCP, vilka båda beskrivs i kapitel 3.2.

Riksrevisionen (2008) granskade om regeringen och de statliga myndigheterna skapat tillräckliga möjligheter för att allvarliga kriser inom dricksvattenförsörjningen skall kunna hanteras. Granskningen identifierade såväl styrkor som svagheter, bland annat konstaterades att kvaliteten på risk- och sårbarhetsanalyserna inte är tillräcklig. Problemen rör exempelvis samverkan och samordning av både de kommunala risk- och sårbarhetsanalyserna och de analyser som görs av de statliga myndigheterna. Det finns således ett behov av att utveckla lämpliga metoder och vägledningar som kan bistå dricksvattenbranschen och de statliga myndigheterna i arbetet med att analysera och hantera risker.

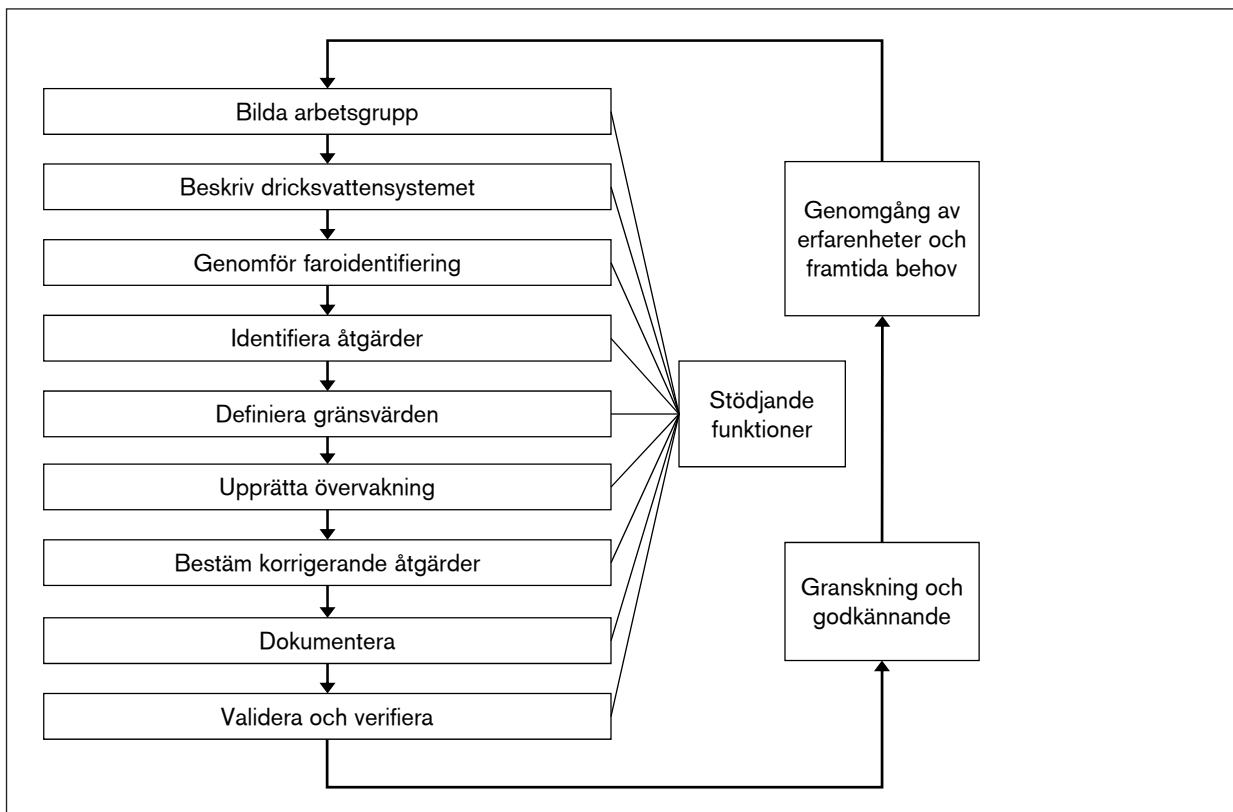
3.2 Internationella och nationella ramverk

För att arbeta proaktivt och riskbaserat förespråkar WHO att vattensäkerhetsplaner (*Water Safety Plans*) utarbetas (Bartram *et al.*, 2009; Davison *et al.*, 2005; WHO, 2008). Vattensäkerhetsplanerna ingår som en central del i det WHO beskriver som ett ramverk för säkert dricksvatten (Figur 3-1). Förutom vattensäkerhetsplanerna utgör hälsobaserade

mål samt oberoende granskning grunderna i ramverket. Exempel på hälsobaserade mål är de gränsvärden som definierats i Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten (SLVFS 2001:30). De hälsobaserade målen skall styra vattensäkerhetsplanerna och via granskningen skall kvaliteten på arbetet säkerställas. Vad gäller själva vattensäkerhetsplanerna består de av systembedömning, driftövervakning samt rutiner, dokumentation och kommunikation. Bedömningen av systemet syftar till att analysera hela systemet, från råvatten till tappkran, för att avgöra om det kan leverera dricksvatten som uppfyller de hälsobaserade målen. Baserat på systembedömningen skall styrpunkter, gränsvärden, övervakning, rutiner för åtgärder m.m. tas fram. De arbetssteg som ingår i systembedömning, driftövervakning, rutiner med mera beskrivs Davison *et al.* (2005) på det sätt som presenteras i Figur 3-2. Arbets sättet som vattensäkerhetsplanerna bygger på är till stor del baserat på HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point, på svenska faroanalys och kritisk styrpunkt) och tanken om flera barriärer.



Figur 3-1 Ramverk för säkert dricksvatten enligt Davison *et al.* (2005), översatt av författaren.



Figur 3-2 Huvuddelarna i arbetet med en vattensäkerhetsplan enligt Davison et al. (2005), översatt av författaren.

Syftet med att använda sig av flera barriärer är att om en barriär inte har någon verkan finns det ytterligare möjligheter att till exempel hindra en oönskad händelse. I svenska regelverk avser barriär en fysisk barriär i vattenverket. Det bör dock poängteras att en barriär inte behöver vara ett fysisk reningssteg, även övervakning, utbildning av personal, riktlinjer m.m. kan förhindra oönskade händelser och därför ses som barriärer (CDW/CCME, 2004).

HACCP utvecklades av livsmedelsföretaget Pillsbury då NASA (National Aeronautics and Space Administration) efterfrågade ett arbetsätt för att garantera säker mat på bemannade rymdfärjor. Syftet med HACCP är att identifiera faror samt var och hur dessa kan kontrolleras och styras i systemet (Codex, 2003). Inom delar av livsmedelsindustrin har HACCP använts sedan lång tid tillbaka. Arbetet av Havelaar (Havelaar, 1994) ses ofta som den första tillämpningen av HACCP-principerna inom dricksvattenförsörjningen. I litteraturen påpekas att HACCP-principerna enklast tillämpas på beredningsdelen av ett dricksvattensystem och inte lika enkelt på råvattenförsörjningen och distributionen (Hamilton *et al.*, 2006; Hrudey, 2004; NHMRC/NRMMC, 2004). En av anledningarna till detta är att dricksvattenproducenten inte i samma utsträckning som för beredningen, kan styra det som sker i avrinningsområdet och ute på distributionsnätet. I Sverige har en handbok för egenkontroll med HACCP tagits fram av Svenskt Vatten (2007). WHO:s vattensäkerhetsplaner bygger till viss del på HACCP, men det bör poängteras att vattensäkerhetsplanerna innefattar fler aspekter än det som ingår i grunderna för HACCP.

Vattensäkerhetsplanerna och de övriga delarna av WHO:s ramverk för säkert dricksvatten bör ses som en ständigt pågående process eller ett ledningssystem och inte som ett arbete som genomförs en gång. Precis som riskhanteringsprocessen (kapitel 2.4) är det ett iterativt arbete som måste uppdateras allteftersom förändringar sker och ny information blir tillgänglig.

Ramverk och riktlinjer har även utarbetats på nationell nivå i många länder. I Australien finns det som kallas *Drinking Water Guidelines*, vilket har stora likheter med det ramverk som WHO föreslår (Nadebaum *et al.*, 2003; NHMRC/NRMMC, 2004; Rizak *et al.*, 2003). I Nya Zeeland finns guider som beskriver hur *Public Health Risk Management Plans* kan utarbetas (Ministry of Health, 2005a; 2005b). Ytterligare exempel på riktlinjer finns i Danmark (DANVA, 2006) och Norge (Mattilsynet, 2006). I Sverige har Livsmedelsverket givit ut ett antal vägledande dokument, till exempel *Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning* (SLV, 2007).

Utifrån de internationella och nationella ramverk och riktlinjer som finns kan några tydliga trender identifieras. Vikten av ett proaktivt och riskbaserat arbetssätt motiveras av många med de begränsningar som uppstår om endast efterkontroll tillämpas, det vill säga provtagning av färdigproducerat dricksvatten. Som exempel nämns begränsningarna vad gäller vilka patogener och föroreningar som kan analyseras och det faktum att det tar tid att genomföra analyser (CDW/CCME, 2004; Rizak *et al.*, 2003; Sinclair & Rizak, 2004; Vieira, 2007). Tidsaspekten är viktig eftersom när en oacceptabel vattenkvalitet upptäcks kan vattnet redan ha konsumerats. Efterkontroll är ett viktigt uppföljningsverktyg men kan inte användas som enda strategi för att säkerställa kvaliteten på dricksvattnet. Vidare poängteras vikten av att ta hänsyn till hela systemet, från råvatten till tappkran, samt att utnyttja flera barriärer för att öka säkerheten. De ramverk och riktlinjer som finns fokuserar främst på vattenkvaliteten och behandlar inte i samma utsträckningen kvantitetsfrågor, det vill säga med vilken tillförlitlighet konsumenten har vatten i kranen.

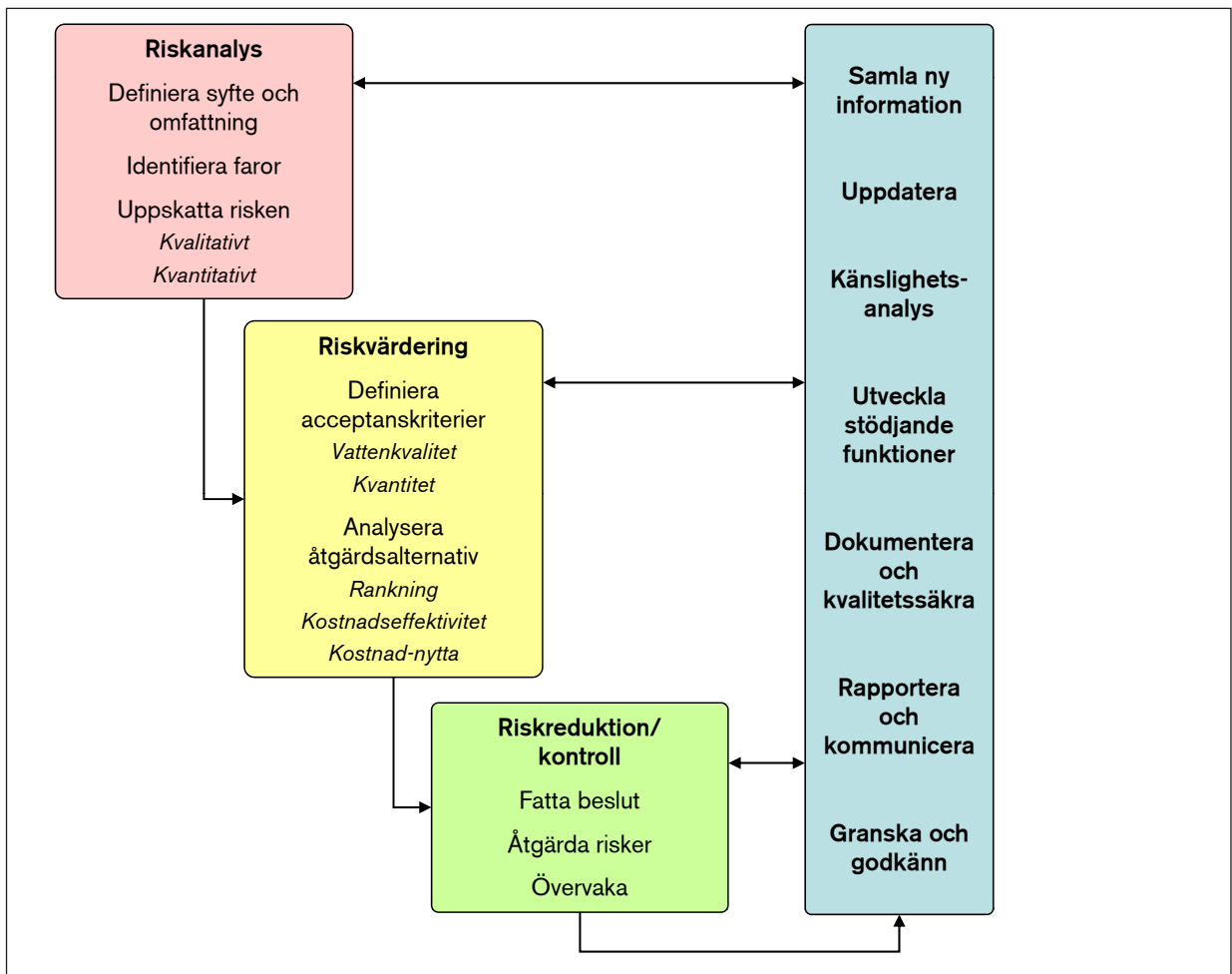
3.3 Ett förklarande ramverk

För att sammanfatta och ge en övergripande bild av vilka delar som bör ingå när risker hanteras inom dricksvattenförsörjningen, har ett ramverk sammanställts av Rosén *et al.* (2007) inom EU-projektet Techneau³. Syftet med detta ramverk är inte att ge en exakt beskrivning av vika steg som skall genomföras utan sammanfatta och visa på de huvudsakliga moment som ingår, oavsett viken typ av risk som behandlas. Ramverket som illustreras i Figur 3-3 bygger på beskrivningen av riskhanteringsprocessen av IEC (1995) (kapitel 2.4), men har kompletterats med ytterligare aspekter som bedömts viktiga. Eftersom de flesta ramverk om riskhantering inom dricksvattenförsörjning fokuserar på vattenkvalitet (kapitel 3.2) ansågs det inom Techneau viktigt att bredda

³ Information om EU-projektet Techneau samt publikationer kan nås via www.techneau.org.

beskrivningen och inkludera fler risktyper. Eftersom ramverket i Figur 3-3 inte specificerar vilken typ av risk som behandlas skall det ses som ett komplement till övriga beskriva ramverk.

Ramverket (Figur 3-3) bygger på de tre huvudstegen riskanalys, riskvärdering och riskreduktion/kontroll. De kompletteringar som gjorts är bland annat för att visa att risknivån kan uppskattas på olika sätt (kapitel 3.4). Vidare betonas att både vattenkvalitets- och kvantitetskriterier krävs då risken skall värderas och att olika typer av utvärderingar kan göras av möjliga åtgärdsalternativ. Eftersom riskhantering är en iterativ process har kompletteringar gjorts för att visa på vikten av att bland annat samla ny information och vid behov uppdatera genomförda analyser och värderingar. Det finns oftast osäkerheter rörande exempelvis indata till riskanalyser och därför framhålls i ramverket även vikten av känslighetsanalyser.



Figur 3-3 Övergripande ramverk som beskriver huvuddelarna i riskhanteringsarbetet kopplat till dricksvattenförsörjning (Rosén et al., 2007).

Utöver ramverket i Figur 3-3 bidrar Techneau med att utveckla metoder, ta fram beskrivningar och genomföra fallstudier. Dessa resultat skall stötta dricksvattenbranschen i arbetet med vattensäkerhetsplaner och övrigt riskhanteringsarbete.

3.4 Metoder för riskanalys från råvatten till tappkran

Det finns olika typer av metoder som kan användas för att på olika sätt analysera varierande typer av risker i ett dricksvattensystem (Lindhe, 2008 kap 4.3; Pollard, 2008; Rosén *et al.*, 2007). Valet av metod beror till stor del på syftet med analysen. Metoderna kan delas in i kvantitativa och kvalitativa. Kvantitativa metoder syftar till att beräkna riskens storlek i siffror, medan kvalitativa metoder används för att beskriva risken i stället för att kvantifiera den. Ett mellanting till dessa metoder är de som kallas för semikvantitativa metoder. Dessa metoder kan betraktas som kvalitativa och syftar till att rangordna risker, ofta med hjälp av sannolikhets- och konsekvensklasser. När en riskanalys genomförs används ofta olika metoder för olika delar av arbetet. Till exempel kan kvalitativa metoder användas i den inledande faroidentifieringen och kvantitativa metoder då risken beräknas.

Kvantitativa riskanalysmetoder används då en detaljerad beskrivning av risken behövs. Som exempel kan mikrobiell riskanalys nämnas (Abrahamsson Lundberg *et al.*, 2009; Haas *et al.*, 1999), där hälsorisken är av intresse och uttrycks som sannolikheten för infektion. I en mikrobiell riskanalys studeras en eller flera patogener och beroende på tillämpningen finns det möjlighet att ta hänsyn till stora delar av dricksvattensystemet. Det finns även kemisk riskanalys (Leeuwen & Vermeire, 2007), vilket liknar mikrobiell riskanalys fast i stället studeras risken förknippad med kemiska föroreningar.

För att i en mikrobiell eller kemisk riskanalys ta hänsyn till de konsekvenser som uppstår kan risken uttryckas i termer av *Disability Adjusted Life Years* (DALY). Detta är ett mått som beskriver antalet år som går förlorade på grund av såväl tillfälliga som kroniska hälsobesvär och förtidig död (Havelaar & Melse, 2003; Homedes, 1996). Andra typer av kvantitativa metoder som används för att genomföra riskanalyser är så kallade logiska diagram, till exempel felträd, händelseträd och influensdiagram (Bedford & Cooke, 2001). Dessa kan användas för att studera hur olika händelser är kopplade till varandra och för att beräkna sannolikheten för att olika händelser skall inträffa. Även modeller av processer, i till exempel beredning och distribution, kan användas för att analysera händelser och ge information som kan användas i en riskanalys. En kvantitativ metod har utvecklats för att möjliggöra integrerade riskanalyser och den presenteras i kapitel 4.

Bland kvalitativa eller semikvantitativa metoder är riskrankning med riskmatriser det vanligaste metoderna. Denna typ av analys är vanligt förekommande inom många områden och används till exempel då exakta uppskattningar av risknivån inte behövs eller övergripande analyser görs för att identifiera var ytterligare studier är nödvändiga. WHO föreslår användandet av riskrankning i arbetet med vattensäkerhetsplaner (Bartram *et al.*, 2009; Davison *et al.*, 2005; WHO, 2008) och Livsmedelsverkets handbok om risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning bygger på riskrankning med matriser (SLV, 2007).

Riskrankning inleds som alla riskanalyser med faroidentifiering. För varje fara bedöms sedan sannolikheten och konsekvensen baserat

på fördefinierade kategorier (Tabell 3-1). Vanligen används i storleksordningen fyra till fem kategorier och dessa kan till exempel definieras som liten till mycket stor konsekvens eller sannolikhet (AZ/NZS, 2004; Deere *et al.*, 2001; SLV, 2007). Oftast görs en mer detaljerad beskrivning av respektive kategori där även den ungefärliga storleksordningen kan beskrivas i siffror. Informationen om sannolikheter och konsekvenser används sedan för att illustrerade de resulterande riskerna i en matris. Tabell 3-1 är ett exempel på hur en riskmatris kan se ut och hur tillhörande sannolikhets- och konsekvenskategorier kan definieras. Matrisen består av en sannolikhets- och en konsekvensaxel och risken ökar upp mot det övre högra hörnet. I exemplet i Tabell 3-1 har fyra risknivåer definierats: låg, måttlig, hög och extrem. Oftast används risknivåerna för att visa vilka risker som kan accepteras och vilka som måste åtgärdas (Lindhe, 2008 kap 4.3). Eftersom alla dricksvattensystem ser olika ut och omständigheterna varierar, måste både sannolikhets- och konsekvenskategorierna samt acceptanskriterierna noga diskuteras för varje tillämpning. De kategorier som används i Tabell 3-1 är troligen inte tillämpbara på svenska förhållanden. Sannolikhetsskalan i Tabell 3-1 kan till exempel anses alltför fokuserad på vanligt förekommande händelser. I många tillämpningar vill man täcka in ett större område, så att en *mycket liten sannolikhet* till exempel motsvarar en händelse som inträffar en gång på 100 år eller mer sällan.

Tabell 3-1 Exempel på riskmatris och tillhörande sannolikhets- och konsekvenskategorier (Davison *et al.*, 2005), översatt av författaren.

		Konsekvens				
Sannolikhet	Obetydlig	Lindrig	Måttlig	Allvarlig	Katastrofal	
Mycket stor	H	H	E	E	E	
Stor	M	H	H	E	E	
Måttlig	L	M	H	E	E	
Liten	L	L	M	H	E	
Mycket liten	L	L	M	H	H	

Observera att antalet riskkategorier skall avspegla behovet i den specifika tillämpningen.
 E – Extrem risk, omedelbara åtgärder nödvändiga; H – Hög risk, kräver uppmärksamhet;
 M – Måttlig risk, ansvarig person skall utses; L – Låg risk, hanteras med nuvarande rutiner.

Exempel på sannolikhets- och konsekvenskategorier för riskrankning	
Kategori	Definition
<i>Sannolikhet</i>	
Mycket stor	En gång per dag
Stor	En gång per vecka
Måttlig	En gång per månad
Liten	En gång på år
Mycket liten	En gång vart femte år
<i>Konsekvens</i>	
Katastrofal	Vattenkvalitet som kan orsaka dödsfall
Allvarlig	Vattenkvalitet som kan orsaka sjukdom
Måttlig	Allvarliga lukt- och smakproblem
Lindrig	Mindre lukt- och smakproblem
Obetydlig	Inga mätbara effekter

Fördelarna med riskrankning med matriser är att det inte krävs så mycket erfarenhet av riskanalys samt att resultaten är lätta att kommunicera och tolka av icke experter. Samtidigt finns det begränsningar som är viktiga att känna till. En svårighet som kan uppstå är att bestämma vilken händelse som sannolikheten och konsekvensen skall uppskattas för. Är det starthändelsen som leder till exempelvis ett utsläpp eller är det senare i händelsekedjan då det skett en spridning till vattentäkten? Det kan vara svårt att bedöma sannolikheten för en hel händelsekedja samtidigt som enskilda händelser inte ger så värdefull information då de inte leder till några konsekvenser (Lindhe, 2008 kap 4.3). En annan begränsning är att det vid riskrankning med matriser inte finns något strukturerat sätt att analysera osäkerheten i resultaten (Burgman, 2005; Cox, 2008).

Det kan konstateras att risken kan analyseras på många olika sätt. Trots att det finns många olika metoder att tillgå är metoder för integrerade riskanalyser, från råvatten till tappkran, än så länge tämligen ovanliga.

4 Metod för integrerad riskanalys

För att möjliggöra integrerad riskanalys av dricksvattensystem har en ny metod baserad på felträdsteknik utvecklats. I detta kapitel sammanfattas metoden och ett exempel på dess tillämpning.

4.1 Bakgrund till metoden

Den begränsade tillgången till metoder för integrerad riskanalys av hela dricksvattensystemet initierade utvecklingen av en ny metod. Det övergripande syftet med metoden är att både kunna ta hänsyn till hela systemet, från råvatten till tappkran, samt att kunna beakta såväl kvantitets- som kvalitetsrelaterade risker. Vid utformning av metoden identifierades ett antal viktiga kriterier. Metoden skall kunna:

- ta hänsyn till hela system (integrerad riskanalys)
- modellera interaktioner mellan händelser (till exempel att två eller flera händelser måste inträffa samtidigt för att problem skall uppstå)
- modellera systemets egen förmåga att kompensera för fel (om till exempel inget vatten kan levereras från vattenverket kan reservoarerna i distributionsnätet försöka konsumenterna med vatten under en begränsad tid)
- ta hänsyn till osäkerheter i indata och resultat (det vill säga vara probabilistisk)
- ge kvantitativa resultat
- beräkna risken som antalet minuter per år den genomsnittlige brukaren drabbas av kvantitets- och kvalitetsproblem
- ge information om såväl sannolikhet som felintensitet och varaktighet för felhändelser

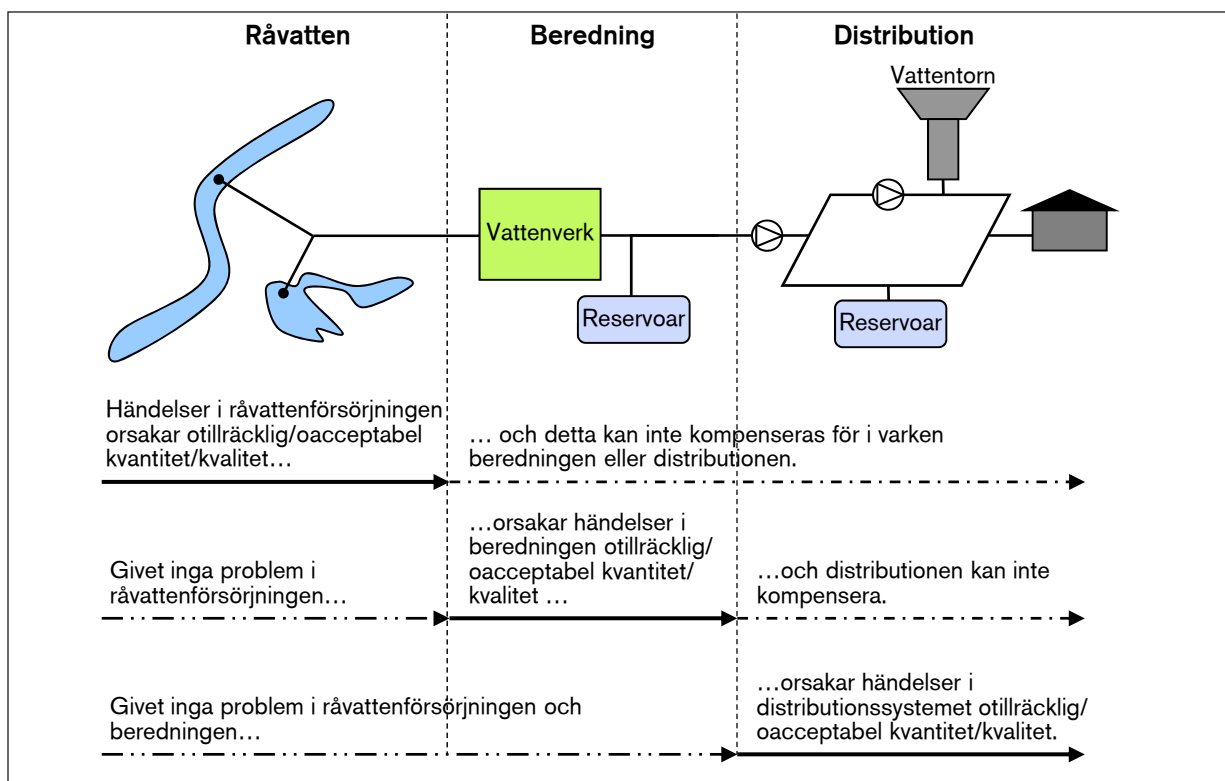
Baserat på ovanstående kriterier ansågs felträdsanalys vara en lämplig utgångspunkt för metoden (Lindhe, 2008 kap 5.1). Det var framförallt behovet av att kunna modellera interaktionen mellan händelser som gjorde att metoden baserades på felträdsanalys. För att anpassa felträdsmetodiken till att modellera ett helt dricksvattensystem krävdes bland annat en konceptuell modell för hur felhändelser kan uppstå och nya så kallade logiska grindar behövdes för att kunna modellera ett systems egen förmåga att kompensera för fel.

4.2 Metodens grunder

För att beskriva den utvecklade felträdsmetoden presenteras först de olika typer av felhändelser som antas kunna uppstå och hur dessa uppstår. I enlighet med tidigare beskrivning av olika risktyper, innefattar metoden två huvudsakliga felhändelser: *kvantitetsfel*, det vill säga inget vatten levereras till konsumenten, och *kvalitetsfel*, det vill säga vatten levereras men uppfyller inte kvalitetskraven. Kvantitetsfel kan till

exempel uppstå till följd av att fysiska komponenter går sönder (pumphaveri eller rörbrott) eller att en oacceptabel kvalitet upptäcks i systemet, vilket leder till att dricksvattenproducenten stoppar leveransen. Kvalitetsfel beror givetvis också på att en oacceptabel vattenkvalitet uppstår till följd av någon händelse. Till skillnad från kvantitetsfelen uppstår kvalitetsfel om den oacceptabla kvaliteten inte upptäcks eller om den upptäcks men det inte är möjligt att vidta tillräckliga åtgärder. En konceptuell modell för hur denna typ av fel kan uppstå och hur systemets huvuddelar hänger samman illustreras i Figur 4-1. Felträdsmetoden beskrivs mer i detalj av Lindhe *et al.* (2009; 2008) och Lindhe (2008 kap 5).

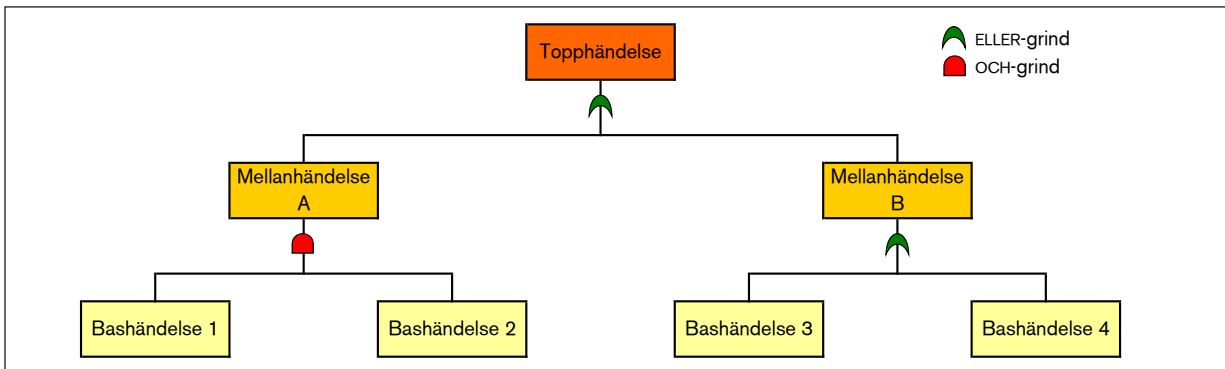
I Figur 4-1 har systemet delats in i dess tre huvuddelar: råvatten, beredning och distribution. Syftet med denna indelning är att i slutresultatet kunna visa hur mycket respektive systemdel bidrar till den totala risknivån. Den konceptuella modellen (Figur 4-1) visar att fel som uppstår i en del av systemet kan kompenseras av efterföljande delar. Till exempel innebär ett stopp av råvatten in i verket inte att konsumenterna direkt blir utan dricksvatten. Vattnet inne i verket och dess lågreservoarer samt i reservoarerna i distributionsnätet kan kompensera för den uteblivna råvattenleveransen under en viss tid. På samma sätt kan försämrad råvattenkvalitet under vissa förhållanden kompenseras för i beredningen, så att det färdiga dricksvattnet uppfyller de kvalitetskrav som finns. Indelningen av systemet samt definitionen av fel kan anpassas beroende på det aktuella systemet samt analysens syfte.



Figur 4-1 Konceptuell modell över vad som måste ske för att felhändelser i dricksvattensystemet skall orsaka problem hos konsumenterna (Lindhe *et al.*, 2009).

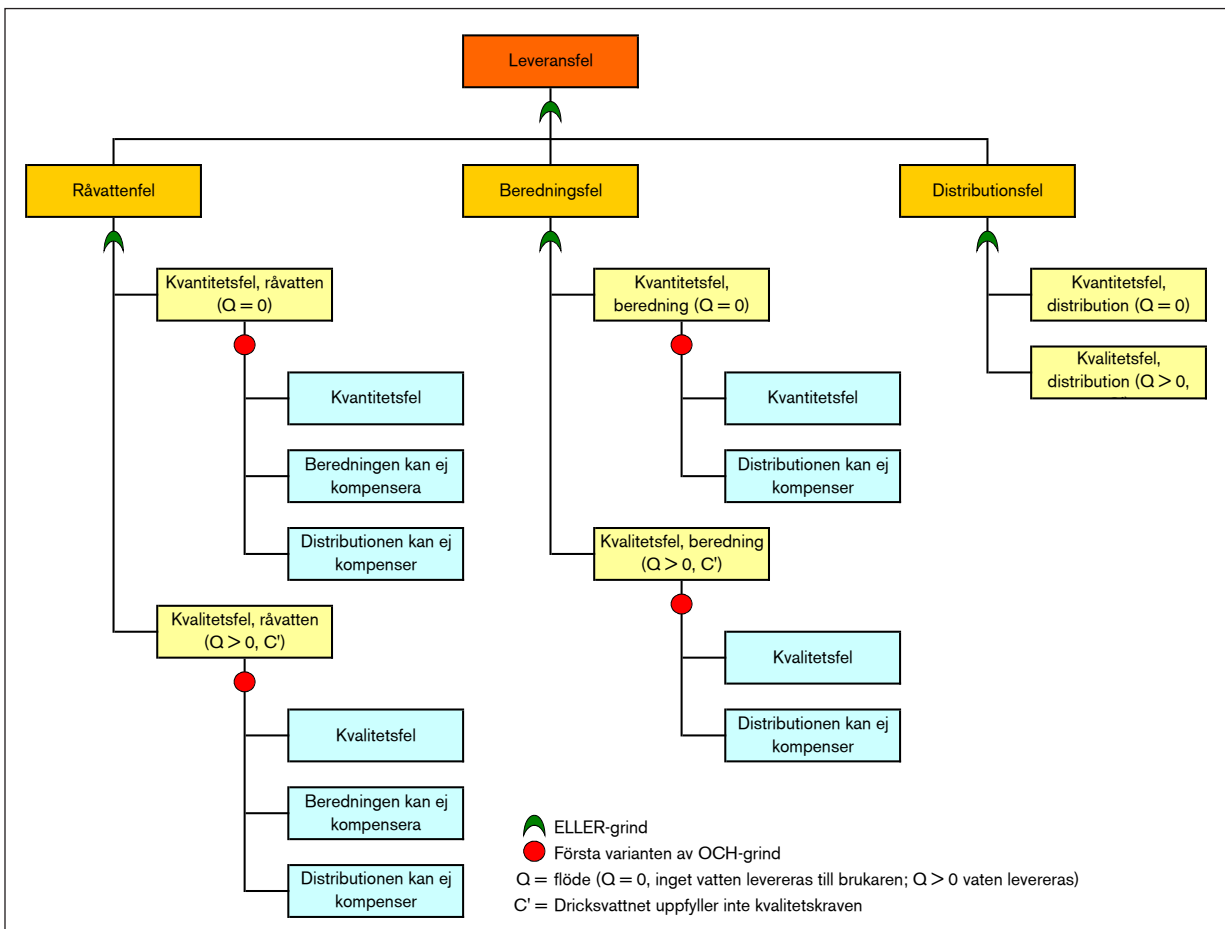
Metoden för integrerad riskanalys bygger på felträd, vilket är ett logiskt diagram som både grafiskt och matematiskt beskriver sambandet mellan olika händelser (Bedford & Cooke, 2001). I Figur 4-2 illustreras ett enkelt felträd och dess byggstenar. Längst upp i felträdet finns topphändelsen, det vill säga den händelse som motsvarar systemfel eller annan händelse som skall studeras (till exempel inget vatten i kranen). För att beskriva hur denna händelse kan uppstå används logiska grindar, till exempel OCH- samt ELLER-grindar. I felträdet i Figur 4-2 visar ELLER-grinden att det räcker att antingen mellanhändelse A eller B inträffar för att topphändelsen skall inträffa. Vidare används en OCH-grind för att visa att både bashändelse 1 och 2 måste inträffa samtidigt för att mellanhändelse A skall inträffa. De olika händelserna bryts således ned i bakomliggande händelser för att beskriva hur den slutliga topphändelsen kan inträffa. Utöver de två logiska grindar som finns i Figur 4-2 har två varianter av OCH-grinden tagits fram för att kunna modellera dricksvattensystems förmåga att kompensera för fel, det vill säga det som illustreras i Figur 4-1. Den första varianten av OCH-grind beskriver hur ett fel som uppstår kan kompenseras av en eller flera komponent under en begränsad tid. För att det skall uppstå fel krävs det således både ett inledande fel någonstans i systemet samt att kompensationsmöjligheterna inte är tillgängliga eller att den möjliga kompensations tiden inte är tillräckligt lång. Den andra varianten av OCH-grind liknar den första varianten, men kan även modellera komponenter vars kompensationsförmåga återfås efter det att den försvunnit. Nedan ges exempel på några olika förhållanden som de olika typerna av logiska grindar kan modellera.

- *ELLER-grind*: En vattentäkt kan förorenas av mikrobiologiska, kemiska eller andra föroreningar.
- *OCH-grind*: För att vattenverket inte skall kunna förses med råvatten måste försörjningen från samtliga vattentäkter vara ur funktion samtidigt.
- *Första varianten av OCH-grind*: Om vatten inte kan pumpas från vattenverket ut på distributionsnätet kan reservoarerna ute i distributionsnätet kompensera under en begränsad tid. Om reservoarerna inte kan användas, till följd av exempelvis underhåll, är inte kompensation alls möjlig.
- *Andra varianten av OCH-grind*: Oacceptabel råvattenkvalitet kan kompenseras för i beredningen. Eftersom inte alla kvalitetsavvikelser kan kompenseras finns det en sannolikhet för att ingen kompensation kan ske. Om kompensation är möjlig sker det så länge det inte uppstår några problem i beredningen. Om det uppstår problem kan kompensationsförmågan återkomma efter att felet avhjälpes.



Figur 4-2 Exempel på felträd med de två vanligast använda logiska grindarna (Lindhe, 2008 kap 5.2).

Felträdet i Figur 4-3 har tagits fram för att beskriva en övergripande struktur på ett felträd för ett helt dricksvattensystem. Felträdet är indelat i systemets tre huvuddelar och innefattar både kvantitets- och kvalitetsfel. Båda feltyperna beskrivs i samma felträd för att ge en överblick av systemet, men resultaten presenteras separat. I Figur 4-3 visas också att hänsyn tas till systemets kompensationsförmåga. Denna principstruktur utgör alltså grunden för metoden, men då ett felträd byggs för ett system som skall studeras ökar dock omfattningen och detaljnivån. Detaljeringsgraden avgörs bland annat av hur långt olika händelser behöver brytas ned i underliggande händelser för att det skall vara möjligt att ta fram indata.



Figur 4-3 Övergripande felträdsstruktur som illustrerar de huvudsakliga felhändelser som bör ingå när en integrerad riskanalys genomförs med felträdsmetoden (Lindhe, 2008 kap 5.2).

För varje logisk grind finns ett matematiskt samband som beskriver hur de ingående händelserna hänger samman. Genom att ange indata för bashändelserna kan resultaten för topphändelsen beräknas. Traditionellt sett används felträäd främst för att beräkna sannolikheten för topphändelsen baserat på sannolikheten för bashändelserna. För att ge ytterligare resultat och även underlätta insamlingen av data ses varje bashändelse i denna metod som en Markovprocess (Rausand & Høyland, 2004). Detta innebär att i stället för att ange en sannolikhet för händelsen beskrivs den med en *felintensitet* (λ) och en *nertid* ($1/\mu$). Nertident motsvarar varaktigheten av ett felet. Ett alternativ till att ange felintensiteten är att ange dess invers, det vill säga *upptiden* ($1/\lambda$). Upptiden motsvarar tiden tills dess att händelsen inträffar. För händelsen *pumphaveri* motsvara upptiden den tid pumpen fungerar och nertiden den tid det tar att reparera eller ersätta pumpen. För de händelser som beskriver en komponents förmåga att kompensera för ett fel i systemet motsvarar upptiden den möjliga kompenstationstiden och nertiden den tid kompenstation inte är möjlig. Således kan en tidsserie beaktas för varje händelse, vilken består av en *upptid* och en *nertid*. Baserat på upp- och nertiden kan sannolikheten (P_F) för händelsen beräknas enligt Ekv. 1. I felträdet beräknas felintensiteten, varaktigheten och sannolikheten för samtliga händelser, det vill säga inte bara för topphändelsen. Ekvationerna för samtliga logiska grindar och ytterligare beskrivning av matematiken ges av Lindhe (2008 kap 5.2), Lindhe *et al.* (2009) och Norberg *et al.* (2009).

$$P_F = \lambda / (\lambda + \mu) \quad \text{Ekv. 1}$$

Uppdelningen i kvantitets- och kvalitetsfel gör att två riskmått beräknas och uttrycks som det förväntade antalet kvantitets- och kvalitetsrelaterade CML (Customer Minutes Lost). Detta motsvarar antalet minuter per år den genomsnittlige brukaren är (i) utan vatten, för kvantitetsfel, och (ii) får vatten av oacceptabel kvalitet, för kvalitetsfel. För att kunna beräkna risken på detta sätt måste, utöver de i felträdet angivna upp- och nertiderna, även konsekvensen anges. Konsekvensen (C_i) definieras för olika huvudtyper av händelser i felträdet och anges i form av andelen brukare som drabbas. Således anges inte konsekvensen för topphändelsen utan för ett antal händelser i felträdet som innefattar underliggande händelser med liknande konsekvenser. Risken (R) beräknas enligt Ekv. 2, där hänsyn tas till konsekvensen i form av andelen brukare som drabbas och sannolikheten som beskriver hur ofta händelserna inträffar samt deras varaktighet. Eftersom risken beräknas för ett antal (n) händelser i felträdet, summeras dessa riskvärden för att få den totala risken. Lindhe *et al.* (2009) och Lindhe (2008 kap 5.2) beskriver i detalj hur risken beräknas.

$$R = \sum_{i=1}^n P_{Fi} C_i \quad \text{Ekv. 2}$$

I alla riskanalyser och modeller är tillgången och kvaliteten på indata viktig. Eftersom det sällan finns mätningar och historiska data (*hårda data*) på alla händelser som tas med i ett felträäd utnyttjas även expertbedömningar

(mjuka data). Genom att använda upp- och nertider i stället för direkta bedömningar av sannolikheten underlättas expertbedömningarna. Alla indata beskrivs med sannolikhetsfördelningar för att osäkerheterna i såväl indata som resultat skall kunna beaktas. De fördelningar som används är gamma- och betafördelningar. Gammafördelningen kan beskriva exponentialfördelade tider och används för att modellera upp- och nertiderna. Betafördelningen är en kontinuerlig fördelning för en slumpmässig variabel definierad över ett begränsat intervall, till exempel intervallet 0–1. Här används betafördelningen för att beskriva andelen brukare som drabbas vid en specifik händelse. En fördel med gamma- och betafördelningen är att de gör det möjligt att uppdatera expertbedömningar med verkliga data när sådana blir tillgängliga. Beräkningarna genomförs med Monte Carlo-simuleringar. Detta innebär att beräkningarna utförs upprepade gånger, till exempel 10 000 gånger, och varje gång används ett nytt värde för varje indata som hämtas ur respektive sannolikhetsfördelningen. Detta innebär att även resultaten presenteras som fördelningar och inte som ett enda värde.

4.3 Fallstudie

Parallellt med att felträdsmetoden utvecklades genomfördes en fallstudie för att utvärdera metoden och de erhållna resultatens användbarhet. Fallstudien genomfördes för dricksvattensystemet i Göteborg. Detta system är av betydande storlek och har även en relativt komplicerad råvattenförsörjning, två vattenverk och ett distributionssystem med ett flertal leveranszoner av olika karaktär. Dessa egenskaper gjorde Göteborgssystemet till ett lämplig studieobjekt för att testa metodens förmåga att modellera komplexa system med många komponenter och händelser som interagerar.

Tillämpningen av felträdsmetoden genomfördes i följande huvudsakliga steg:

- Definition av studiens syfte och omfattning
- Systembeskrivning, faroidentifiering samt konstruktion av felträdsmodellen
- Utvärdering av tillgänglig data
- Insamling av expertbedömningar
- Beräkning av risken
- Osäkerhetsanalys
- Resultatutvärdering

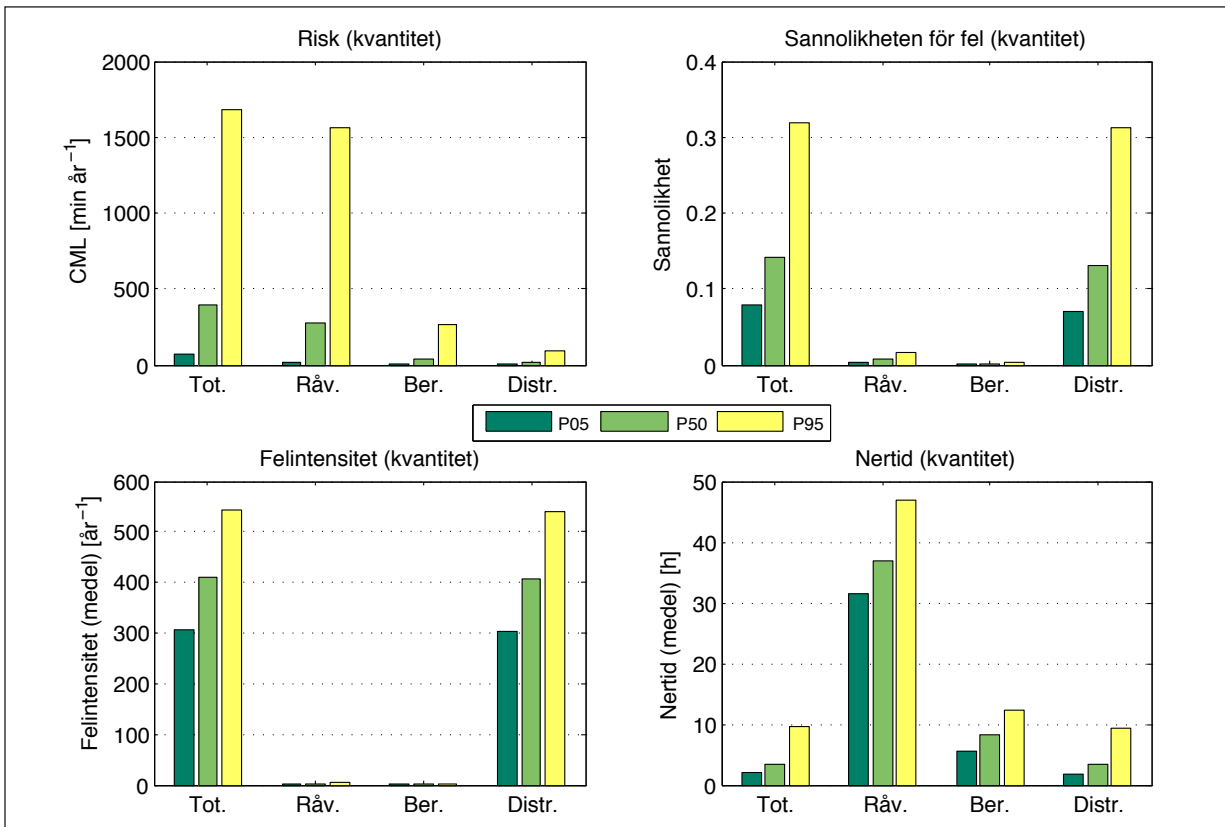
Arbetet var en iterativ process där till exempel felträdsmodellen utvärderades och uppdaterades allteftersom de olika delarna blev klara och resultaten kunde utvärderas. Både kvantitets- och kvalitetsfel modellerades och för kvalitetsfel definierades oacceptabel kvalitet som *otjänligt dricksvatten* enligt SLVFS 2001:30. Hela felträdsmodellen av Göteborgssystemet bestod av 116 bashändelser och 101 logiska grindar. Fallstudien och dess resultat presenteras mer i detalj av Lindhe *et al.* (2008) och Lindhe (2008 kap 5.3).

För Göteborgssystemet beräknades bland annat de resultat för kvantitets- och kvalitetsfel som presenteras i Figur 4-4 respektive Figur 4-5. I båda figurerna presenteras risken uttryckt som CML (Customer Minutes Lost, förväntat antalet minuter per år den genomsnittlige brukaren drabbas), sannolikheten för fel, felintensiteten (antalet felhändelser per år) och nertiden (varaktigheten uttryckt i timmar). Sannolikheten för fel kan beskrivas som andelen av tiden det är fel någonstans i systemet. Om sannolikheten till exempel är 0,10 innebär det att under 10 % av året förväntas det vara fel någonstans i den del av systemet som analyseras. Samtliga resultat presenteras för hela systemet samt systemets tre huvuddelar (råvatten, beredning och distribution). För att illustrera osäkerheten i resultaten presenteras 5-, 50- (median) och 95-percentilerna. Den 5:e percentilen motsvarar till exempel det värde som underskreds av 5 % och överskreds av 95 % av de framsimulerade värdena för det specifika resultatet.

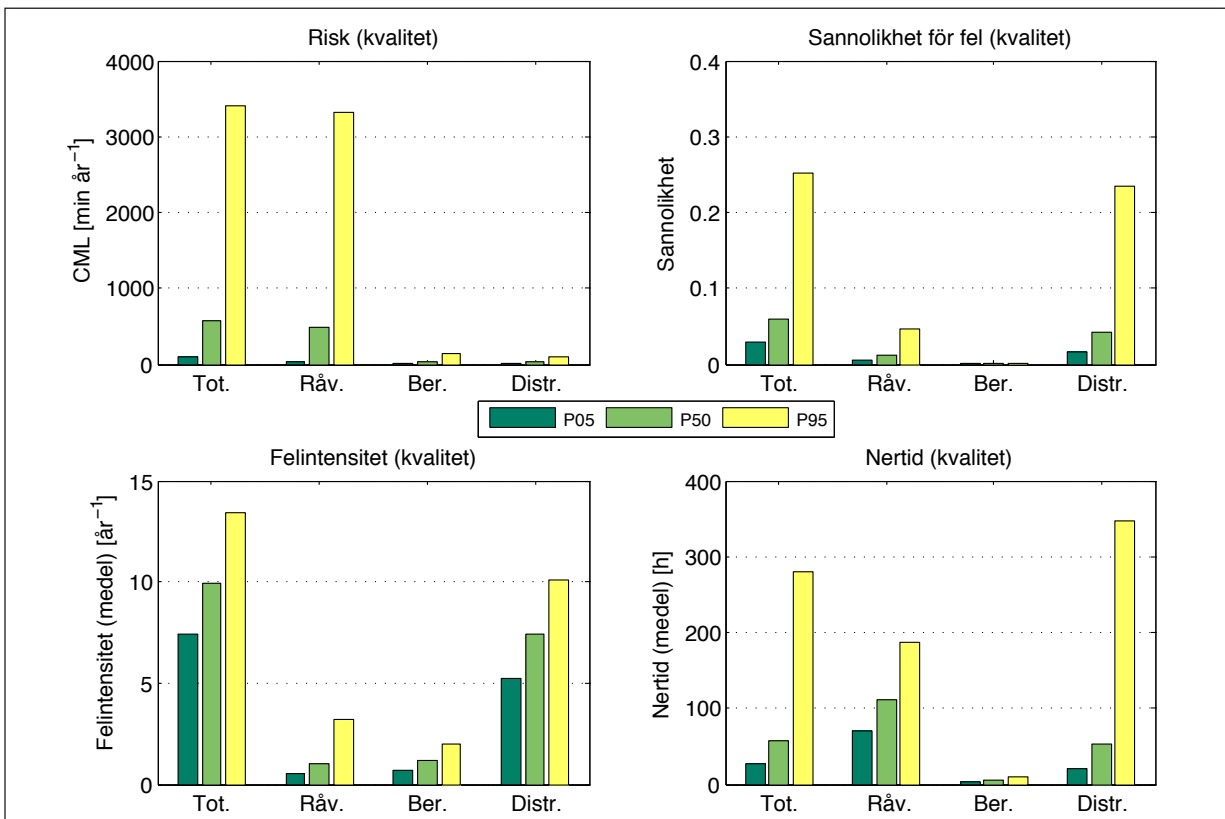
Av resultaten i Figur 4-4 och Figur 4-5 går det att dra några generella slutsatser om risken och systemets dynamik. Det framgår att den totala risknivån för både kvantitets- och kvalitetsfel till störst del härrör från råvattenförsörjningen i systemet. Beredningen och distributionen bidrar i betydligt mindre omfattning till den totala risken. Samtidigt är sannolikheten⁴ och intensiteten för fel förhållandevis låg för råvattenförsörjningen och störst för distributionen. Detta innebär att den höga risken som råvattenförsörjningen bidrar med har sitt ursprung i konsekvensen. Konsekvensen beskrivs dels av nertiden, vilken är relativt hög för båda feltyperna (kvantitets- och kvalitetsfel), och dels av antalet brukare som drabbas. Eftersom råvattenförsörjningen är den första delen av systemet kan ett stort antal brukare drabbas, vilket bidrar till en hög risk. Att distributionen bidrar i relativt liten del till risken beror på att nertiden är kort och att ett relativt litet antal brukare drabbas vid varje felhändelse. För kvalitetsfel bör det poängteras att även händelser med korta varaktigheter kan ge hälsomässiga effekter hos brukarna.

För att en helhetsbild skall erhållas och det skall vara möjligt att förstå hur den totala risknivån uppstår, krävs det att både risknivåerna och sannolikheter, felintensiteter samt nertider, det vill säga de dynamiska egenskaperna, studeras. Felträdsmetoden ger således möjlighet att både studera nivån på den resulterande risken samt varifrån den härstammar och hur den uppstår.

⁴ Notera att sannolikheten är beräknad baserad på både intensiteten och varaktigheten (nertiden).



Figur 4-4 Diagram över risken (förväntat antal CML), sannolikheten, felintensiteten och varaktigheten för **kvantitetsfel**. Resultaten presenteras som 5-, 50- och 95-percentiler för såväl hela systemet (Tot.) som de tre huvuddelarna (Lindhe, 2008 kap 5.3).

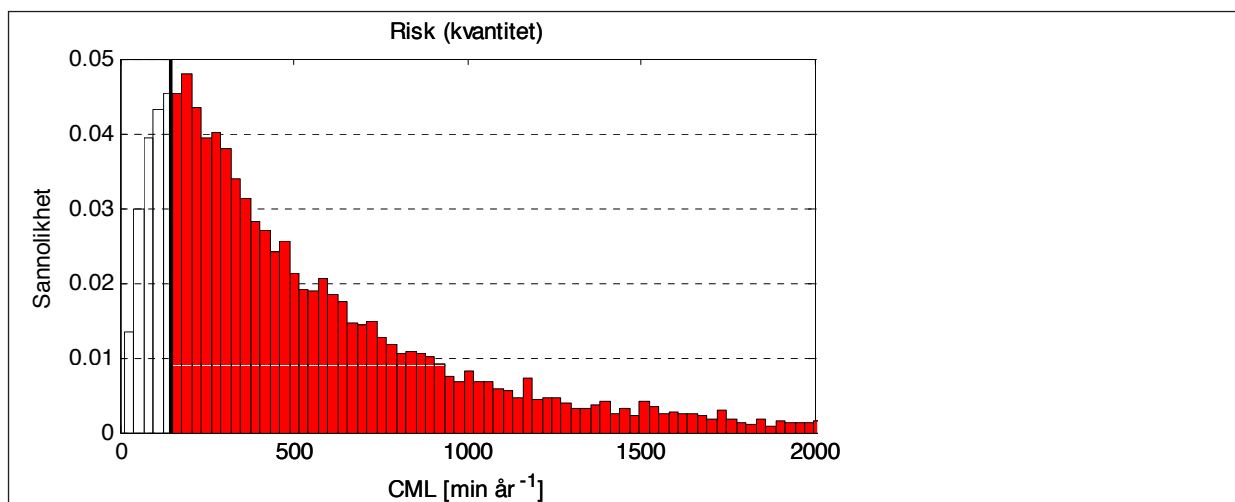


Figur 4-5 Diagram över risken (förväntat antal CML), sannolikheten, felintensiteten och varaktigheten för **kvalitetsfel**. Resultaten presenteras som 5-, 50- och 95-percentiler för såväl hela systemet (Tot.) som de tre huvuddelarna (Lindhe, 2008 kap 5.3)

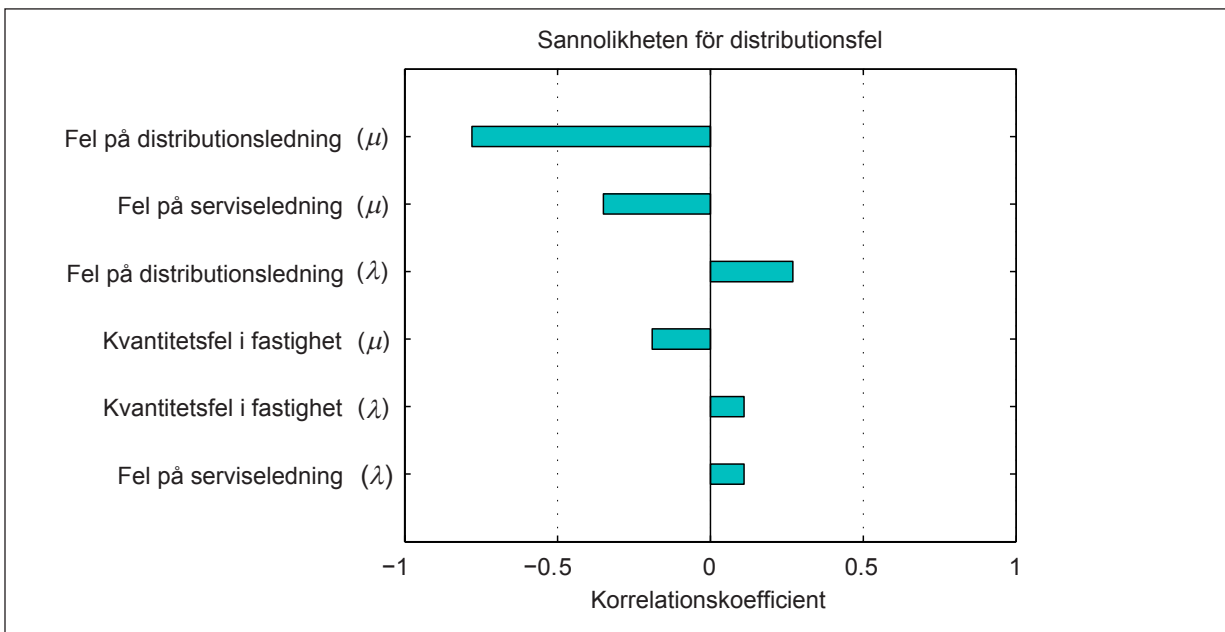
Percentilerna i Figur 4-4 och Figur 4-5 visar att osäkerheten i vissa av resultaten är hög. Tack vare att osäkerheten i resultaten beräknas kan sannolikheten att specifika värden överskrids beräknas. I Göteborg finns ett politiskt fastställt mål som säger att *avbrottstiden för dricksvattenleveransen för den genomsnittlige brukaren skall vara mindre än 10 dygn på 100 år* (Göteborg Vatten, 2006). Anledningen till att ett hundraårsperspektiv använts är att både frekvent förekommande och mycket sällsynta händelser skall tas med i resonemanget. Det uppsatta målet kan översättas till 144 CML per år för den genomsnittlige brukaren. Om detta jämförs med den kvantitetsrelaterade risken erhålls en sannolikhet för att målet inte uppnås på 0,84 (Figur 4 6). Det är alltså mycket troligt att värdet på 144 CML överskrids. Göteborg Vatten har uppskattade den totala avbrottstiden på 100 år för den genomsnittlige brukaren till 61 dygn (Göteborg Vatten, 2006). Detta kan uttryckas som 878 CML, vilket ungefär motsvarar den 80:e percentilen i resultatet från felträdsmodellen. Resultatet från felträdsmetoden är således i samma storleksordning som uppskattningen av Göteborg Vatten, vilket är naturligt eftersom felträdsmodellen bygger på data och expertbedömningar från Göteborg Vatten.

Felträdsmetoden ger möjlighet att beräkna korrelationskoefficienter som beskriver hur mycket osäkerheten i en variabel påverkar resultatet. I Figur 4-7 visas ett exempel på de sex variabler som bidrar mest till osäkerheterna i resultatet *sannolikheten för distributionsfel*. Endast storleken på staplarna behöver beaktas, om de är positiva eller negativa avgörs endast av hur de ingår i felträdsmodellen. Denna information kan användas för att identifiera de händelser där ytterligare information (till exempel genom nya mätningar) är mest betydelsefull för att effektivt reducera osäkerheten i resultatet.

Det faktum att metoden tar hänsyn till osäkerheterna gör det således möjligt att: (i) beräkna sannolikheten för att acceptanskriterier eller andra mål överskrids, (ii) beräkna korrelationskoefficienter för att se hur mycket osäkerheten i olika variabler i felträdet påverkar osäkerheten i resultatet, samt (iii) studera osäkerheten i enskilda resultat (till exempel den totala risknivån).



Figur 4-6 Osäkerhetsfördelning för den kvantitetsrelaterade risken för hela systemet, jämfört med målet på 144 CML. Sannolikheten för att risken ligger över målet (röd ytan) är 0,84 (Lindhe, 2008 kap 5.3).



Figur 4-7 Korrelationskoefficienter för de sex variabler som har störst inverkan på osäkerheten i resultatet "sannolikheten för distributionsfel" (Lindhe, 2008 kap 5.3).

Den tillämpning som presenterats här visar hur felträdsmetoden kan användas för att analysera nuvarande situation i ett dricksvattensystem. En av de stora fördelarna med felträdsmetoden är möjligheten att förändra och uppdatera modellen för att se vilken effekt olika riskreducerande åtgärder får. Detta har gjorts för Göteborgssystemet (Lindhe *et al.*, 2010) och i skrivande stund avslutas även en studie där felträdsmodellen använts för att modellera åtgärdsalternativ och dessa resultat har kombinerats med en ekonomisk analys för att beräkna åtgärdernas kostnadseffektivitet.

5 Diskussion och slutsatser

Avslutningsvis diskuteras några centrala aspekter kopplade till integrerad riskanalys av dricksvattensystem och riskhantering i stort. Den utvecklade felträdsmetodens fördelar och begränsningar diskuteras och de huvudsakliga slutsatserna samt nyttan för dricksvattenbranschen sammanfattas.

5.1 Integrerad riskanalys och riskhantering

För att kunna ta hänsyn till hela dricksvattensystemet i en riskanalys krävs lämpliga metoder. Denna rapport presenterar en felträdsmetod som möjliggör integrerade riskanalyser, vilka tar hänsyn till både kvantitets- och kvalitetsfel. I vanligt förekommande riskrankningar med matriser framhålls ofta svårigheten med att ta hänsyn till händelsekedjor. En av felträdsmetodens fördelar är att den bygger på beskrivningar av hur händelser hänger samman. Mätningar och statistik finns ofta inte tillgängliga för alla typer av händelser, men däremot har personalen som arbetar med systemet god kunskap om de förhållande som råder. Möjligheten att använda expertbedömningar i felträdsmetoden gör att denna viktiga informationskälla kan utnyttjas. Eftersom alla indata bedöms med osäkerheter erhålls viktig information om resultaten som punktskattningar inte skulle ge. Bland annat är det möjligt att beräkna sannolikheten för att ett uppsatt mål inte uppfylls. Eftersom metoden inte bara ger information om den totala risknivån, utan även sannolikheten, felintensiteten och nertiden för samtliga händelser i felträdet, kan systemets dynamiska egenskaper identifieras. Det är viktigt att studera både risken och systemets dynamik för att få en helhetsbild.

Tack vare att resultaten från felträdet kan presenteras både sammanvägt för hela systemet samt uppdelat på till exempel de tre huvuddelarna (råvatten, beredning och distribution), går det lättare att se var behovet av åtgärder för att minska risken är störst. En felträdsmodell kan även användas för att utvärdera möjliga åtgärdsalternativ och se vilken effekt de har på risken. Felträdsmetodens möjlighet att modellera systemets egen förmåga att kompensera för fel är av stor vikt, bland annat då åtgärdsalternativ utvärderas. En hög kvantitetsrelaterad risknivå kopplat till råvattenförsörjningen kanske reduceras mest effektivt genom att förbättra kapaciteten i beredningen. Detta är ett exempel på de analyser som gjorts för Göteborgssystemet.

Den kvalitetsrelaterade risken som beräknas med felträdsmetoden ger ingen beskrivning av den faktiska hälsoeffekt brukaren drabbas av. Den beräknade tid som den genomsnittlige brukaren får dricksvatten av oacceptabel kvalitet i kranen, skulle dock kunna kombineras med ytterligare beräkningar för att uppskatta hälsoeffekten. Till exempel skulle informationen från felträdsmetoden kunna kombineras med en kvantitativ mikrobiell riskanalys eller liknande. Syftet med felträdsmodellen i en sådan kombinerad analys är då att beskriva systemet och dess funktion. För att möjliggöra en sådan kombination kan dock

metodtillämpningen behöva anpassas, till exempel vad gäller vilka kvalitetsparameter som tas hänsyn till när oönskade händelser definieras.

Tre viktiga skillnader och fördelar med den presenterade felträdsmetoden jämfört med traditionell felträdsanalys är: (i) möjligheten att beräkna såväl sannolikhet som felintensitet och nertid för samtliga händelser i felträdet, (ii) de nya logiska grindarna för att modellera kompensationsförmågan, och (iii) att risken beräknas uttryckt som CML (Customer Minutes Lost). Vid traditionell felträdsanalys beräknas endast sannolikheten för topphändelsen och inga konsekvenser inkluderas.

Integrerade riskanalyser syftar till att ge en helhetsbild där olika delar av systemet kan jämföras. Integrerade analyser skall inte ersätta andra typer av metoder som fokuserar på mer avgränsade delar av systemet. I stället skall information från den senare typen av metoder användas som information och indata till integrerade riskanalyser. Integrerade analyser kan även identifiera behovet av mer detaljerade analyser av enskilda delar av systemet.

I jämförelse med riskrankning med matriser kan felträdsmetoden och andra kvantitativa metoder uppfattas som mer tids- och resurskrävande. För felträdsmetoden är det mer komplicerat att konstruera en felträdsmodell än att ta fram en riskmatris, men när ett felträd väl är uppställt ger det fler och tydligare svar. Ett felträd ger också större möjlighet att utvärdera olika åtgärdsalternativ. Vid val av metod måste således en avvägning göras mellan den de resurser som krävs och de resultat som erhålls.

Vi kan här avsluta med att konstatera att risken kan analyseras på olika sätt, men som Kammen och Hassenzahl (2001) poängterar är huvudmålet med en riskanalys att ge information till beslutsfattarna. Det är dock inte bara det slutgiltiga resultatet som är värdefullt från en riskanalys. Genomförandet av en riskanalys innebär att frågor och aspekter som annars lätt glöms bort lyfts fram och diskuteras.

5.2 Nyttan för branschen

Förhoppningen är att den framtagna felträdsmetoden och det övriga som beskrivs i denna rapport, och den bakomliggande licentiatuppsatsen, på olika sätt skall komma dricksvattenbranschen till nytta.

För den som tidigare inte varit bekant med risk som koncept ges i denna rapport den bakgrund som behövs för att förstå de grundläggande principerna. De viktiga delarna i riskhanteringsarbetet beskrivs och en struktur för arbetet presenteras. Vidare förklaras kopplingen mellan risk och dricksvattenförsörjning. De ramverk som är av stor betydelse inom dricksvattenbranschen sammanfattas för att ge en bakgrund till riskhanterings betydelse för en säker dricksvattenförsörjning.

Den beskrivna felträdsmetoden är ett verktyg som kan tillämpas och anpassas efter de behov som finns i respektive tillämpning. Det kan inte förväntas att vem som helst, utan tidigare erfarenhet av felträdsanalys, skall kunna tillämpa metoden. En tillämpning av metoden kan således kräva att man tar hjälp av någon utanför organisationen. Liksom i andra

sammanhang kan det inte förväntas att alla resurser finns internt hos dricksvattenproducenten. Metoden är mer komplicerad än till exempel riskranking baserad på riskmatriser, men ger också ytterligare resultat och gör det möjligt att modellera riskreducerande åtgärder. Felträdsmetoden ger också möjlighet att på ett beräkningsmässigt korrekt sätt ta hänsyn till samverkan mellan olika komponenter i systemet, vilket inte är möjligt med riskmatriser. Beskrivningen av felträdsmetoden i denna rapport förväntas ge en förståelse för vilka problem som kan modelleras och vilka resultat som erhållas. Med denna information kan läsaren således bedöma om en felträdsanalys kan ge svar på hans/hennes problemställningar.

5.3 Slutsatser

Utifrån rapportens innehåll och den bakomliggande licentiatrippporten kan följande slutsatser dras:

- Den föreslagna felträdsmetoden möjliggör modellering av *hela* dricksvattensystemet, från råvatten till tappkran. Resultaten ger information om såväl den totala risknivån som de ingående delarnas bidrag till den totala risken. Genom att beskriva händelser med bland annat upp- och nertider underlättas användandet av expertbedömningar och information erhålls om systemets dynamiska funktion.
- Osäkerheter är en viktig del av riskanalyser och genom att beskriva indata med osäkerhetsfördelningar kan sannolikheten beräknas för att olika kriterier överskrids. Vidare kan de ingående händelsernas bidrag till osäkerheterna i resultaten beräknas och på så sätt går det att identifiera var i systemet ytterligare och mer tillförlitlig information ger störst effekt.
- Ett dricksvattensystems egen förmåga att kompensera för fel är av stor betydelse då risker analyseras. De nya logiska grindar som tagits fram möjliggör en modellering av dessa förhållanden.
- Förutom att modellera ett dricksvattensystems nuvarande uppbyggnad kan en felträdsmodell användas för att utvärdera möjliga åtgärder. På så sätt kan ytterligare beslutsunderlag erhållas.
- En enskild metod kan inte användas för att analysera alla problem. Den föreslagna felträdsmetoden är ett verktyg för att genomföra integrerade riskanalyser. Eftersom finansieringen av riskreducerande åtgärder är begränsad är integrerade analyser viktiga för att någon del av systemet inte skall glömmas bort.
- Vikten av ett riskbaserat arbetssätt som inkluderar hela dricksvattensystemet, från råvatten till tappkran, poängteras av många. De av WHO föreslagna vattensäkerhetsplanerna kommer med stor säkerhet få en allt större betydelse världen över.

Riskanalyser som ger nödvändiga och informativa resultat till beslutsfattare är avgörande för att en säker och tillförlitlig dricksvattenförsörjning skall uppnås. Integrerade riskanalyser kan visa hur olika delar av systemet bidrar till den totala risken och hur systemets delar hänger ihop. Denna information är viktig för att bland annat kunna prioritera riskreducerande åtgärder så att tillgängliga ekonomiska resurser används

effektivt. Den presenterade felträdsmetoden skall ses som ett bidrag till den verktyglåda som dricksvattenproducenter värden över bör ha tillgång till för att underlätta arbetet med att genomföra och implementera vattensäkerhetsplaner och riskhantering i stort.

Referenser

- Abrahamsson Lundberg J., Ansker J. & Heinicke G. (2009). *MRA – Ett modellverktyg för svenska vattenverk*, Rapport 2009-05, Svenskt Vatten.
- AZ/NZS (2004). *Risk Management AS/NZS 4360:2004*, Standards Australia/Standards New Zealand.
- Bartram J., Corrales L., Davison A., Deere D., Drury D., Gordon B., Howard G., Rinehold A. & Stevens M. (2009). *Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers*, World Health Organization, Geneva.
- Bedford T. & Cooke R. M. (2001). *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Beuken R., Sturm S., Kiefer J., Bondelind M., Åström J., Lindhe A., Machenbach I., Melin E., Thorsen T., Eikebrokk B., Niewersch C., Kirchner D., Kozisek F., Gari D. W. & Swartz C. (2007). *Identification and description of hazards for water supply systems – A catalogue of today's hazards and possible future hazards*, Deliverable no. D4.1.1, D4.1.2, Techneau.
- Burgman M. A. (2005). *Risks and decisions for conservation and environmental management*, Cambridge University Press, Cambridge.
- CDW/CCME (2004). *From source to tap: Guidance on the Multi-Barrier Approach to Safe Drinking Water*, Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water and Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Task Group, Health Canada.
- Codex (2003). *Hazard and Critical Control Point (HACCP) System and Guidelines for its Application*, Annex to the Recommended International Code of Practice-General Principle of Food Hygiene (CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003), Codex Alimentarius Commission.
- Cox A. L. (2008). What's Wrong with Risk Matrices?, *Risk Analysis*, 28 (2), 497–512.
- DANVA (2006). *Vejledning i sikring af drikkevandskvalitet*, Dansk Vand og Spildevandsforening, Skanderborg, Tillgänglig: <worker.zmag.dk/showmag.php?mid=sqhq&preview=1> (2009-09-17).
- Davidsson G., Haeffler L., Ljungman B. & Frantzich H. (2003). *Handbok för riskanalys*, Räddningsverket, Karlstad.
- Davison A., Howard G., Stevens M., Callan P., Fewtrell L., Deere D. & Bartram J. (2005). *Water Safety Plans: Managing drinking-water quality from catchment to consumer*, WHO/SDE/WSH/05.06, World Health Organization, Geneva.
- Deere D., Stevens M., Davison A., Helm G. & Dufour A. (2001). Management strategies, i *Water Quality: Guidelines, Standards and Health – Assessment of risk and risk management for water-related*

- infectious disease*, Bartram, J. & Fewtrell, L. (Eds.), 257–288, IWA Publishing, London, UK.
- EC (2000). *First report on the harmonisation of risk assessment procedures, Part 2: Appendices 26–27 October 2000*, European Commission, Health and Consumer Protection Directorate-General.
- Ezell B. C., Farr J. V. & Wiese I. (2000). Infrastructure risk analysis model, *Journal of Infrastructure Systems*, 6 (3), 114–117.
- Göteborg Vatten (2006). *Åtgärdsplan vatten: Långsiktiga mål för Göteborgs vattenförsörjning*, Göteborgs Stad.
- Haas C. N., Gerba C. P. & Rose J. B. (1999). *Quantitative microbial risk assessment*, Wiley, New York.
- Hamilton P. D., Gale P. & Pollard S. J. T. (2006). A commentary on recent water safety initiatives in the context of water utility risk management, *Environment International*, 32 (8), 958–966.
- Havelaar A. H. (1994). Application of HACCP to drinking water supply, *Food Control*, 5 (3), 145–152.
- Havelaar A. H. & Melse J. M. (2003). *Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking-water Quality: A burden of disease approach*, RIVM report 734301022.
- Homedes N. (1996). *The Disability-Adjusted Life Year (DALY) Definition, Measure and Potential Use*, Human Capital Development, Working Papers, HCDWP 68.
- Hrudey S. E. (2004). Drinking-water Risk Management Principles for a Total Quality Management Framework, *Journal of Toxicology & Environmental Health: Part A*, 67 (20–22), 1555–1567.
- Hrudey S. E., Hrudey E. J. & Pollard S. J. T. (2006). Risk management for assuring safe drinking water, *Environment International*, 32 (8), 948–957.
- IEC (1995). *Dependability Management – Part 3: Application guide – Section 9: Risk analysis of technological systems*, International Standard IEC 300-3-9, International Electrotechnical Commission.
- ISO/IEC (2002). *Guide 73 Risk management – Vocabulary – Guidelines for use in standards*, International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission.
- IWA (2004). *The Bonn Charter for Safe Drinking Water*, International Water Association, London.
- Kammen D. M. & Hassenzahl D. M. (2001). *Should we risk it? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*, Princeton University Press, Princeton.
- Kaplan S. & Garrick B. J. (1981). On The Quantitative Definition of Risk, *Risk Analysis*, 1 (1), 11–27.
- Klinke A. & Renn O. (2002). A new approach to risk evaluation and management: Risk-based, precaution-based, and discourse-based strategies, *Risk Analysis*, 22 (6), 1071–1094.

- Leeuwen C. J. v. & Vermeire T. G. (2007). *Risk assessment of chemicals: An introduction*, 2 ed., Springer, Dordrecht.
- Lindhe A. (2008). *Integrated and Probabilistic Risk Analysis of Drinking Water Systems*, Licentiatuppsats 2008:8, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Lindhe A., Rosén L., Norberg T. & Bergstedt O. (2009). Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems, *Water Research*, 43 (6), 1641–1653.
- Lindhe A., Rosén L., Norberg T., Bergstedt O. & Pettersson T. J. R. (2010). Cost-effectiveness analysis of risk-reduction measures to reach water safety targets, Submitted to *Water Research*.
- Lindhe A., Rosén L., Norberg T., Petterson T. J. R., Bergstedt O., Åström J. & Bondelind M. (2008). Integrated risk analysis from source to tap: Case study Göteborg, In proceeding of the 6th *Nordic Drinking Water Conference*, Oslo, 9–11 Juni, 231–241.
- MacGillivray B. H., Sharp J. V., Strutt J. E., Hamilton P. D. & Pollard S. J. T. (2007a). Benchmarking risk management within the international water utility sector. Part I: Design of a capability maturity methodology, *Journal of Risk Research*, 10 (1), 85–104.
- MacGillivray B. H., Sharp J. V., Strutt J. E., Hamilton P. D. & Pollard S. J. T. (2007b). Benchmarking risk management within the international water utility sector. Part II: A survey of eight water utilities, *Journal of Risk Research*, 10 (1), 105–123.
- Mattilsynet (2006). *Økt sikkerhet og beredskap i vannforsyningen – Veiledning, Statens tilsyn for planter, fisk, dyr og næringsmidler*, Mattilsynet, Oslo, Tillgänglig: <www.mattilsynet.no/mattilsynet/multimedia/archive/00021/Sikkerhet_og_beredsk_21772a.pdf> (2009-09-18).
- Ministry of Health (2005a). *Drinking-water Standards for New Zealand 2005*, New Zealand Ministry of Health, Wellington.
- Ministry of Health (2005b). *A Framework on How to Prepare and Develop Public Health Risk Management Plans for Drinking-water Supplies*, New Zealand Ministry of Health, Wellington.
- Nadebaum P., Chapman M., Morden R. & Rizak S. (2004). *A Guide To Hazard Identification & Risk Assessment For Drinking Water Supplies*, Research Report 11, Cooperative Research Center for Water Quality and Treatment.
- Nadebaum P., Chapman M., Ortisi S. & Baker A. (2003). Application of quality management systems for drinking water quality, *Water Science and Technology: Water Supply*, 3 (1–2), 359–364.
- NHMRC/NRMMC (2004). *National Water Quality Management Strategy: Australian Drinking Water Guidelines*, National Health and Medical Research Council and Natural Resource Management Ministerial Council, Australian Government.
- Norberg T., Rosén L. & Lindhe A. (2009). Added value in fault tree analyses, In *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and*

- Applications*, Martorell, S. *et al.* (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 1041–1048.
- Olofsson B., Tideström H. & Willert J. (2001). *Identification of risks to urban water supplies (In Swedish)*, Report 2001:2, Urban Water, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Owen A. J., Colbourne J. S., Clayton C. R. I. & Fife-Schaw C. (1999). Risk communication of hazardous processes associated with drinking water quality – a mental models approach to customer perception, Part 1 – a methodology, *Water Science and Technology*, 39 (10–11), 183–188.
- Pollard S. J. T. (2008). *Risk Management for Water and Wastewater Utilities*, IWA Publishing, London.
- Pollard S. J. T., Strutt J. E., Macgillivray B. H., Hamilton P. D. & Hrudey S. E. (2004). Risk analysis and management in the water utility sector a review of drivers, tools and techniques, *Process Safety and Environmental Protection*, 82 (6 B), 453–462.
- Rausand M. & Høyland A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*, 2 ed., Wiley-Interscience, N.J.
- Renn O. (1998). The role of risk perception for risk management, *Reliability Engineering and System Safety*, 59 (1), 49–62.
- Riksrevisionen (2008). *Dricksvattenförsörjning – beredskap för stora kriser*, 2008:8, Riksrevisionen, Stockholm.
- Rizak S., Cunliffe D., Sinclair M., Vulcano R., Howard J., Hrudey S. & Callan P. (2003). Drinking water quality management: A holistic approach, *Water Science and Technology*, 47 (9), 31–36.
- Rosén L., Hokstad P., Lindhe A., Sklet S. & Røstum J. (2007). *Generic framework and methods for integrated risk management in water safety plans*, Deliverable no. D4.1.3, D4.2.1, D4.2.2, D4.2.3, Techneau.
- Rosén L. & Lindhe A. (2007). *Trend report: Report on trends regarding future risks*, Deliverable no. D1.1.9, Techneau.
- Sinclair M. & Rizak S. (2004). Drinking-water Quality Management: The Australian Framework, *Journal of Toxicology & Environmental Health: Part A*, 67 (20–22), 1567–1580.
- Slovic P. (1987). Perception of risk, *Science*, 236 (4799), 280–285.
- Slovic P. (2001). The risk game, *Journal of Hazardous Materials*, 86 (1–3), 17–24.
- SLV (2007). *Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning*, Livsmedelsverket, Uppsala, Tillgänglig: <www.slv.se/upload/dokument/livsmedelskontroll/dricksvatten/HANDBOK%20RSA%20DRICKSVATTENF%C3%96RS%C3%96RJNING%202007.pdf> (2009-10-01).
- SLVFS 2001:30 *National Food Administration Ordinance on Drinking Water (In Swedish)*, Swedish National Food Administration.

Svenskt Vatten (2007). *Dricksvatten: Produktion och Distribution – Handbok för Egenkontrollprogram med HACCP*, 2007-06-26, Svenskt Vatten, Stockholm, Tillgänglig: <www.svensktvatten.se/web/haccp.aspx> (2009-10-01).

WHO (2008). *Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: Incorporating first and second addenda, Vol. 1, Recommendations*, 3 ed., World Health Organization, Geneva.

Vieira J. M. P. (2007). Water safety plans: Methodologies for risk assessment and risk management in drinking water systems, *IAHS-AISH Publication* (310), 57-67.



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tel 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
E-post svenskvatten@svenskvatten.se
www.svenskvatten.se