Svenskt Vatten
UTVECKLING

Rapport
Nr 2024-14

Leveranssäkerhets-analys för dricks-vattensystem

För utvärdering av risker och nyttan med åtgärder

Andreas Lindhe

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.

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

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Bibliografiska uppgifter
Nr 2024-14

RAPPORTENS TITEL	Leveranssäkerhetsanalys för dricksvattensystem. För utvärdering av risker och nyttan med åtgärder
TITLE OF THE REPORT	Water supply security analysis of drinking water systems. For the evaluation of risks and the benefit of measures
FÖRFATTARE	Andreas Lindhe, Chalmers tekniska högskola och DRICKS
RAPPORTNUMMER	2024-14
ANTAL SIDOR	34
SAMMANDRAG	God leveranssäkerhet är en viktig del av en tillförlitlig och säker dricksvattenförsörjning. Det innebär att avbrotten i leveransen ska vara sällsynta och kortvariga. I rapporten presenteras en metod som är utvecklad för att analysera leveranssäkerheten i dricksvattensystem. Metoden bygger på att tänkbara felhändelser identifieras, och den gör det möjligt att kvantifiera risken samt modellera effekten av möjliga åtgärder. Rapporten är en del av projektet Stärkt vattenförsörjning för Göteborgsregionen (SVAR).
SUMMARY	Water supply security is critical to a reliable and safe drinking water supply. Hence, interruptions in the supply should be rare and short. The report presents a method developed for analysing water supply security. Potential failure events are identified and modelled using the method to quantify the risk and estimate the effect of mitigation measures. The report is part of the project Strengthening water supply for the Gothenburg region (SVAR) project.
SÖKORD	Leveranssäkerhetsanalys, dricksvatten, risk, åtgärder
KEYWORDS	Water supply security, drinking water, risk, measures
MÅLGRUPPER	VA-organisationer, konsulter, forskare och andra som är intresserade av leveranssäkerheten i dricksvattensystem
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGSÅR	2024
UTGIVARE	©Svenskt Vatten AB
REFERENS	Lindhe A. (2024). *Leveranssäkerhetsanalys för dricksvattensystem. För utvärdering av risker och nyttan med åtgärder*. SVU-rapport 2024-14. Stockholm: Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	22-109
PROJEKTETS NAMN	Samverkansmodell för regional vattenförsörjning
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Resultaten som presenteras i denna rapport om leveranssäkerhetsanlys av dricksvattensystem utgör en av två delar i projektet *Samverkansmodell för regional vattenförsörjning (22-109)*, finansierat av Svenskt Vatten Utveckling. Den andra delen handlar om organisering för stärkt vattenförsörjning och redovisas i en separat SVU-rapport (2024-9): *Organisering för stärkt vattenförsörjning. Kapaciteter, hållbarhet, samarbete, samordning och samverkan.*

SVU-projektet har i sin tur varit en del av det övergripande projektet Stärkt vattenförsörjning för Göteborgsregionen (SVAR), finansierat av de ingående kommunerna och Länsstyrelsen i Västra Götaland med medel från Havs- och vattenmyndigheten. SVAR-projektets syfte är att bidra till en mer robust och hållbar vattenförsörjning i ett förändrat klimat genom att ta fram modeller för samverkan, samt undersöka ekonomiska fördelningsprinciper för ett utökat mellankommunalt samarbete och ett effektivt regionalt nyttjande av råvattenresurser, dricksvattenproduktion och -distribution.

Denna rapport är fokuserad på de tekniska förutsättningarna i dricksvattenförsörjningen och specifikt hur leveranssäkerheten kan analyseras och åtgärder i systemet utvärderas. Den metod för leveranssäkerhetsanalys som presenteras samt de exempel och råd som ingår i rapporten bidrar till SVAR-projektets syfte om att uppnå en robust vattenförsörjning genom bland annat ett effektivt nyttjande av råvattenresurser, dricksvattenproduktion och -distribution.

De genomförda leveranssäkerhetsanalyserna i Göteborgsregionen har bidragit med viktigt underlag till såväl problembeskrivningen som de exempel och slutsatser som presenteras i rapporten. Ett stort tack till de personer vid regionens kommuner och Göteborgsregionens kommunalförbund (GR) som på olika sätt bidragit till arbetet som ligger till grund för denna rapport. Tack också till övriga som lämnat synpunkter på arbetet, till exempel Svenskt Vatten.

Andreas Lindhe, Chalmers tekniska högskola och DRICKS

Innehåll

Förord 2
Sammanfattning 4
Summary 5

1 Inledning 6
1.1 Bakgrund 6
1.2 Syfte 7
1.3 Avgränsningar 7
1.4 Rapportstruktur 8
2 Metod och angreppssätt 9
2.1 Några grundläggande begrepp 9
2.2 Bakgrund och motiv till metoden 10
2.3 Felträdsanalysens grunder 10
2.4 Avbrottsrisk 13
2.5 Utvärdera åtgärder 14
2.6 Definiera indata och hantera osäkerheter 15
2.7 Arbetsprocessen 17
3 Exempel på tillämpning 19
3.1 Övergripande beskrivning av systemen i exemplet 19
3.2 Händelser och felträdsstruktur 20
3.3 Avbrottsrisk och åtgärder 22
3.4 Riskreduktion och åtgärdskostnad 27
4 Diskussion 29
5 Slutsatser och råd till VA-branschen 32

Referenser 33

Sammanfattning

God leveranssäkerhet är en viktig del av en tillförlitlig och säker dricksvattenförsörjning. Det innebär att avbrotten i leveransen ska vara sällsynta och kortvariga. I rapporten presenteras en metod som är utvecklad för att analysera leveranssäkerheten i dricksvattensystem. Metoden bygger på att tänkbara felhändelser identifieras, och den gör det möjligt att kvantifiera risken samt modellera effekten av möjliga åtgärder. Rapporten är en del av projektet Stärkt vattenförsörjning för Göteborgsregionen (SVAR).

Med leveranssäkerhet menas förmågan att leverera dricksvatten i tillräcklig mängd och utan avbrott. I Sverige finns det inga lagkrav som specificerar vilken leveranssäkerhet som behöver uppnås i dricksvattensystemen, utan det ligger på de ansvariga för respektive system att avgöra. Det här kan vara en bidragande orsak till att det finns få etablerade metoder för att analysera och kvantifiera leveranssäkerheten.

Den metod för leveranssäkerhetsanalys som presenteras i rapporten innefattar en systematisk genomgång av dricksvattensystemets olika delar, och att händelser identifieras som enskilt eller i kombination med andra händelser kan leda till avbrott i dricksvattenförsörjningen. Baserat på de identifierade händelserna och information om hur systemet fungerar byggs en så kallad felträdsmodell upp som gör det möjligt att beräkna en avbrottsrisk och modellera effekten av åtgärder. Risken kvantifieras och uttrycks som den förväntade avbrottstiden per person och år. Indata till beräkningarna utgörs av de ingående händelsernas frekvens, varaktighet och konsekvens i form av hur många som drabbas vid ett leveransavbrott.

Eftersom risken kvantifieras blir det tydligt hur mycket den kan reduceras med hjälp av olika åtgärder samt hur ett ökat dricksvattenbehov och andra förändringar påverkar risken. Genom att presentera åtgärdernas kostnader tillsammans med den beräknade riskreduktionen erhålls ytterligare underlag för att väga respektive åtgärds nytta mot dess kostnad.

Leveranssäkerheten kan variera mycket mellan olika kommuner beroende på de lokala förutsättningarna. Generellt kan sägas att god leveranssäkerhet kräver redundans i systemets alla delar. Det betyder att det till exempel ska finnas dubbla pumpar i en pumpstation eller mer än en vattentäkt. Såväl råvattenförsörjning, beredning som distribution behöver således säkerställas. Hur redundans bäst uppnås kan dock skilja sig åt mellan olika kommuner. Resultaten och erfarenheterna som presenteras i rapporten är baserade på de leveranssäkerhetsanalyser som genomförts tillsammans med kommunerna i Göteborgsregionen. Flera av regionens kommuner är på olika sätt beroende av varandra och det finns därför ett behov av att analysera leveranssäkerheten tillsammans. Genom att modellera flera områden eller kommuner i en leveranssäkerhetsanalys går det att visa hur åtgärder i en kommun kan vara till nytta även för andra och vilken effekt gemensamma åtgärder har.

Processen att genomföra en leveranssäkerhetsanalys är värdefull i sig då den bidrar till kunskapsutbyte mellan de personer som deltar och ofta skapar nya insikter om systemets svagheter. Även om syftet med denna rapport är att beskriva en specifik metod är förhoppningen att den framför allt ska ge inspiration till ett riskbaserat arbete med leveranssäkerhetsfrågor oavsett vilken metod som används.

Summary

Water supply security is critical to a reliable and safe drinking water supply. Hence, interruptions in the supply should be rare and short. The report presents a method developed for analysing water supply security. Potential failure events are identified and modelled using the method to quantify the risk and estimate the effect of mitigation measures. The report is part of the project Strengthening water supply for the Gothenburg region (SVAR) project.

Water supply security refers to the ability to supply drinking water in sufficient quantity without interruptions. In Sweden, no legal requirements specify the required level of water security in drinking water systems. Instead, this must be decided by those responsible for each system. This may be why few established methods exist for analysing and quantifying water supply security in drinking water systems.

The presented method for analysing water supply security includes a systematic review of the different parts of the water supply system and identification of events that, individually or in combination with other events, can lead to interruptions in the drinking water supply. Based on the identified events and information on the system's functioning, a fault tree model is built to calculate the risk of interruption and model the measures' effects. The risk is quantified and expressed as the expected outage time per person per year. Input data for the calculations are the frequency, duration, and consequence of the events included in the model. The consequence is described in terms of how many people are affected by a supply interruption. By quantifying the risk, it can be clearly presented how much different measures can reduce it and how increased drinking water demand and other changes affect the risk. Presenting the costs of the measures together with the estimated risk reduction provides additional support to weigh the benefits of each measure against its costs.

Depending on local conditions, water supply security can vary greatly between municipalities. High supply security generally requires redundancy in all parts of the system. The raw water supply, the treatment and the distribution must be secured. How redundancy is best achieved can, however, differ. The results and experiences presented in this report are based on the work carried out together with the municipalities in the Gothenburg region. The drinking water supplies in several of the region's municipalities are interdependent in various ways, and it is therefore important to jointly analyse the water supply security. Including several areas or municipalities in a water supply security analysis makes it possible to show how measures in one municipality can also benefit others and what effect joint measures have.

The process of analysing water supply security is valuable, as it contributes to the exchange of knowledge between the people involved and typically creates new insights regarding the system's weaknesses. Although this report presents a specific method, the overall aim is to provide inspiration for risk-based assessment of water supply security regardless of the method used.

1 Inledning

I detta inledande kapitel ges en kort introduktion till vad som avses med leveranssäkerhet och varför det finns ett behov av strukturerade analyser för våra dricksvattensystem. Syftet med rapporten presenteras liksom några viktiga avgränsningar.

1.1 Bakgrund

Samhället är starkt beroende av en välfungerande dricksvattenförsörjning (WWAP 2105). Störningar såsom kvalitetspåverkan och avbrott i dricksvattenleveransen kan leda till omfattande effekter för privatpersoner, verksamhetsutövare och samhällsviktiga funktioner, samt medföra stora samhällsekonomiska kostnader (t.ex. Sjöstrand et al. 2021; Sjökvist et al. 2019; Lindberg et al. 2011; Grimbäck & Silbersky 2021). För att betona dricksvattnets betydelse används ofta målbeskrivningar som på ett eller annat sätt uttrycker att dricksvattenförsörjningen ska vara tillförlitlig och säker. Andra vanliga begrepp som används för att beskriva målet med dricksvattenförsörjningen är trygg och robust. Det som avses är typiskt att (1) dricksvattenkonsumenterna ska ha tillgång till tillräckligt med vatten i kranen utan oacceptabla avbrott, och att (2) vattnet ska vara hälsomässigt säkert. Den sistnämna aspekten regleras genom Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten (LIVSFS 2022:12). Dricksvattnet anses vara hälsosamt och rent om det inte innehåller mikroorganismer, parasiter och ämnen i sådant antal eller sådana halter att det utgör en potentiell risk för människors hälsa, och att de i föreskrifterna specificerade gränsvärdena uppfylls. För att säkerställa att detta uppfylls krävs såväl riskbedömningar som provtagning och uppföljning av vattenkvaliteten.

När det gäller tillgången till vatten och specifikt det som i denna rapport benämns *leveranssäkerhet*, det vill säga förmågan att leverera dricksvatten utan avbrott, är kravbilden mindre tydlig. Lagen om allmänna vattentjänster (2006:412) innehåller till exempel inte några krav gällande leveranssäkerhet. I Svenskt Vattens publikation P114 konstateras att det inte finns några generella krav gällande leveranssäkerhet i dricksvattenförsörjningen definierade i lagstiftningen (Svenskt Vatten 2020). Vidare framhålls att kommunens ledning därför bör göra ett medvetet ställningstagande gällande vilken leveranssäkerhet som dricksvattenförsörjningen ska ha. Oberoende av vad lagstiftningen säger är leveranssäkerheten en central fråga för alla Sveriges kommuner om en tillförlitlig och säker dricksvattenförsörjning ska uppnås.

Leveranssäkerheten i ett dricksvattensystem påverkas av förutsättningarna i såväl råvattenförsörjningen, beredningen och distributionssystemet. Tillgången på råvatten kan begränsas till följd av exempelvis föroreningshändelser, torka eller problem med pumpning och överföring av råvatten till vattenverket. I beredningen kan till exempel problem i beredningsprocesserna och övervakningen samt störningar i kemikalieleveranser och elförsörjningen påverka möjligheterna att producera tillräckliga mängder dricksvatten. Rörbrott samt problem med pumpstationer och reservoarer är exempel på händelser som kan inträffa i distributionssystemet och påverka leveransen till konsumenterna. Ofta finns det beroenden som måste beaktas, exempelvis att flera händelser måste inträffa samtidigt för att orsaka problem, att flera försörjningsområden eller kommuner är beroende av samma vattentäkt, att en kommun vid behov kan försörjas med vatten från en annan kommun för att hantera problem som uppstår. För att kunna beakta de relevanta händelsekedjorna och ge en korrekt bild av förutsättningarna är det därför viktigt att beakta hela försörjningsystemet. Det krävs ett strukturerat och riskbaserat angreppssätt för att kartlägga problembilden och i slutändan identifiera och utvärdera lämpliga åtgärder för att över tid bibehålla och vid behov förbättra leveranssäkerheten.

I Göteborgsregionen har de tretton kommuner som ingår i Göteborgsregionens kommunalförbund (GR) tagit fram en gemensam vattenförsörjningsplan (GR 2020). I planen presenteras följande vision: *En trygg och långsiktigt hållbar vattenförsörjning*. Vidare specificeras att en trygg vattenförsörjning innebär att konsumenten ska kunna förvänta sig säker leverans av dricksvatten, det vill säga en leverans med mycket få och korta avbrott, samt att vattnet i kranen alltid ska vara hälsosamt och gott. För att bland annat uppnå en god leveranssäkerhet genomförs åtgärder lokalt i respektive kommun men det sker också olika typer av samarbete, samordning och samverkan mellan kommunerna. Som del av det gemensamma arbetet genomfördes under åren 2021 till och med 2023 projektet *Stärkt vattenförsörjning i GR* (SVAR), med det övergripande syftet att säkra och stärka framtida vattenförsörjning i regionen på ett resurseffektivt sätt. Arbetet och resultaten som presenteras i denna rapport är del av detta projekt och fokuserar på leveranssäkerhet och hur riskreduktionen, det vill säga nyttan, av åtgärder kan uppskattas och utvärderas. Detta är frågor som är relevanta för alla Sveriges kommuner. Ibland handlar frågan om hur en god leveranssäkerhet uppnås för flera olika områden som i dag kanske inte är sammankopplade. Är en sammankoppling, en kompletterande produktionsanläggning, eller något annan lösning det bästa alternativet? Samma frågor kan ställas på en regional nivå där man utvärderar hur samarbeten och andra åtgärder mellan kommunerna kan användas för att uppnå en god leveranssäkerhet i de individuella kommunerna och regionen som helhet. Om det finns beroenden mellan kommunerna i form av exempelvis en gemensam vattentäkt eller möjligheten att överföra dricksvatten mellan kommunerna, kan åtgärder i en kommun även få positiva effekter på leveranssäkerheten i andra kommuner. Det finns således behov av strukturerade leveranssäkerhetsanalyser och beslutsstöd för att identifiera lämpliga åtgärder, på lokal och regional nivå, som kan reducera risken och därmed öka leveranssäkerheten på ett resurseffektivt sätt.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att presentera en metod för hur leveranssäkerheten i ett eller flera dricksvattensystem kan analysera och användas som underlag för att utvärdera och prioritera åtgärder. De teoretiska grunderna för metoden beskrivs med hänvisning till tidigare publikationer. Med inspiration från tillämpningar i Göteborgsregionen beskrivs också hur metoden praktiskt kan användas för att strukturerat analysera och kvantifiera leveranssäkerheten och effekten av olika åtgärder. Genom att analysera flera områden, eller flera kommuner, är det möjligt att illustrera såväl beroenden som påverkar leveranssäkerheten i flera områden men även hur åtgärder kan få kommunöverskridande nyttor. Som del av beslutsstödet jämförs åtgärdernas effekt på leveranssäkerheten med dess kostnader för att ge en övergripande bild av nyttorna i relation till kostnaderna. Metoden och det generella angreppssättet som presenteras är tillämpbart för såväl enskilda kommuner som regioner där dricksvattenförsörjningen i de ingående kommuner är eller i framtiden kan bli beroende av varandra.

1.3 Avgränsningar

Metoden som presenteras i denna rapport används för att analysera kritiska funktioner och känsliga händelser som kan uppstå i dricksvattenförsörjningen. Av denna anledning är det inte möjligt att ingående presentera underlag och resultat från en specifik kommun. Ett hypotetiskt exempel har därför tagits fram baserat på erfarenheterna från de tillämpningar som gjorts i Göteborgsregionen. Exemplet som presenteras i rapporten illustrerar konkreta händelser som typiskt ingår i en leveranssäkerhetsanalys och visar

även hur olika åtgärder kan utvärderas. Exemplet ger således samma information till läsaren som ett verkligt exempel skulle gjort.

1.4 Rapportstruktur

Efter detta inledande kapitel presenteras i kapitel 2 en metod som är anpassad för att analysera leveranssäkerheten i dricksvattensystem. I kapitel 3 beskrivs sedan ett exempel för att illustrera hur metoden kan användas i syfte att kartlägga de händelser som kan orsaka leveransavbrott, kvantifiera leveranssäkerheten och den effekt möjliga åtgärder kan ge, samt utvärdera olika åtgärder. I kapitel 4 diskuteras den presenterade metoden och erfarenheterna från dess tillämpning. Avslutningsvis presenteras de viktigaste slutsatserna från arbetet i kapitel 5.

2 Metod och angreppssätt

I detta kapitel presenteras en metod som kan användas för att genomföra leveranssäkerhetsanalyser av dricksvattensystem. Inledningsvis beskrivs några grundläggande begrepp kopplade till leveranssäkerhet. Därefter presenteras metodens grunder i några efterföljande delavsnitt och avslutningsvis sammanfattas de steg som typiskt ingår vid tillämpningen av metoden. Detta kapitel fokuserar på de grundläggande koncepten och teorin. I kapitel 3 ges ett exempel på tillämpning för att i ytterligare detalj visa på den praktiska tillämpningen.

2.1 Några grundläggande begrepp

I inledningskapitlet beskrivs att *leveranssäkerhet* i denna rapport avser förmågan att leverera dricksvatten utan avbrott. Till detta kan även läggas att mängden vatten som levereras ska täcka det behov som finns. Denna definition är i linje med hur man beskriver leveranssäkerhet kopplat till elförsörjningen (t.ex. Svenska Kraftnät 2023). Att det aldrig skulle uppstå avbrott i dricksvattenleveransen får dock anses orimligt. En hundraprocentig leveranssäkerhet skulle kräva mycket stora resurser och bedöms i de flesta fall kosta för mycket. I stället accepterar vi en viss risk, det vill säga vi accepterar att det finns en sannolikhet för att det uppstår händelser som medför avbrott i dricksvattenleveransen och orsakar konsekvenser i samhället. Avbrottens omfattning skiljer sig dock åt – jämför till exempel brott på en större huvudledning med brott på en mindre distributionsledning – och detta påverkar hur allvarliga vi anser dem vara. Av denna anledning definieras risken som en kombination av sannolikhet och konsekvens (se avsnitt 2.4 för ytterligare detaljer). Den totala avbrottsrisken för ett system är en sammanvägning av händelser med olika sannolikhet och konsekvens. Genom att analysera avbrottsrisken kan leveranssäkerheten utvärderas, och precis som i många andra sammanhang handlar det om att hitta en rimlig balans mellan risken och de åtgärder som kan genomföras.

Arbetet med leveranssäkerhet bör således vara *riskbaserat*. Vikten av ett riskbaserat arbetssätt ingår bland annat som en viktig del i det nya dricksvattendirektivet, det vill säga Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2020/2184 om kvaliteten på dricksvatten. Det har sedan många år också förespråkats av Världshälsoorganisationen (WHO 2017) som del av arbetet med så kallade Water Safety Plans. Även om dricksvattendirektivet och WHO:s vägledning fokuserar på vattenkvalitet, är principerna om att beakta hela försörjningssystemet på ett riskbaserat sätt lika relevant för leveranssäkerheten. Men vad menas med riskbaserat? Förenklat kan det beskrivas som ett strukturerat och förebyggande arbete. Det innebär att risker identifieras, analyseras och vid behov genomförs åtgärder för att hantera de risker som inte kan accepteras i nuläget. I ett leveranssäkerhetssammanhang innebär det att både ofta förekommande händelser såsom rörbrott och händelser som kan inträffa men aldrig har inträffat ska beaktas och när en samlad bild har skapats, kan beslut om nödvändiga och lämpliga åtgärder fattas baserat på uppskattade risknivåer. Den metod som presenteras nedan möjliggör ett strukturerat och riskbaserat arbete med leveranssäkerhet.

För att hantera de risker som finns och uppnå god leveranssäkerhet framhålls ofta vikten av *redundans* i dricksvattensystemen. Detta innebär att systemet inte ska vara beroende av individuella komponenter eller försörjningsalternativ. Att ha dubbla pumpar i en pumpstation eller mer än en vattentäkt är exempel på hur redundans kan skapas. En synonym till redundans är överflöd (NE 2023), det vill säga komponenter och andra delar av systemet som inte behövs om allt funderar som det ska, men om det uppstår

problem är redundansen avgörande för att dricksvattenleveransen kan upprätthållas utan störningar.

2.2 Bakgrund och motiv till metoden

Metoden för leveranssäkerhetsanalys som här presenteras är baserad på så kallad felträdsanalys, vilket kan beskrivas som en logisk eller händelsebaserad modell. Genom att beskriva händelser och hur de individuellt eller i kombination med andra händelser kan orsaka avbrott i leveransen av dricksvatten, kan den totala avbrottsrisken beräknas baserat på hur ofta de ingående händelsernas bedöms inträffa samt hur länge de påverkar dricksvattenleveransen och hur stor del av vattenbehovet som inte kan tillgodoses. Metoden utvecklades som del av ett doktorandprojekt vid Chalmers i nära samarbete med nuvarande Kretslopp och vatten, Göteborgs Stad. Som komplement till nedanstående beskrivning av metoden hänvisas även till Lindhe (2010a) samt Lindhe et al. (2009) för grunderna och tillämpningen av metoden, Lindhe et al. (2012) för detaljerad teori, samt Lindhe et al. (2011) för ytterligare exempel på hur åtgärder kan utvärderas med hänsyn till kostnadseffektivitet.

Felträdsmetoden utvecklades av Lindhe et al. (2009), se även Lindhe (2010b), då en brist på lämpliga metoder för att genomföra leveranssäkerhetsanalyser som beaktar hela dricksvattensystemet hade identifierats. De huvudsakliga kriterier som ställdes upp inför att metoden skulle utvecklas var (baserat på Lindhe 2010a):

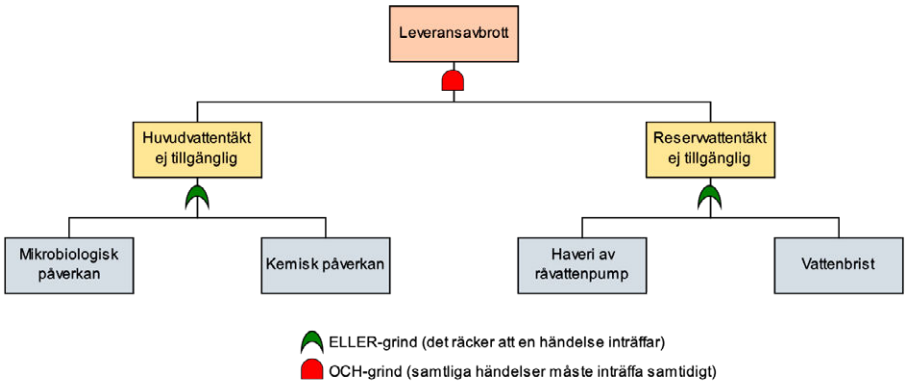
- Hela dricksvattensystemet, från råvatten till tappkran, ska kunna analyseras.
- Interaktioner mellan händelser ska kunna beaktas, till exempel att två eller flera händelser måste inträffa samtidigt för att problem ska uppstå.
- Det ska vara möjligt att ta hänsyn till dricksvattensystemets egen förmåga att kompensera för fel, exempelvis att leveransen ut till konsumenterna kan upprätthållas under en begränsad tid med hjälp av reservoarer vid händelse av problem i produktionen.
- Osäkerheter i indata och resultat ska kunna beaktas och illustreras, det vill säga metoden ska vara probabilistisk.
- Resultaten ska vara kvantitativa i syfte att underlätta utvärderingen av åtgärders effekt på risken.
- En avbrottsrisk ska beräknas och uttryckas som antalet minuter per år den genomsnittlige brukaren (det vill säga dricksvattenkonsumenten) förväntas drabbas av avbrott i dricksvattenleveransen.

Med utgångspunkt i ovanstående kriterier utvecklades en metod baserat på befintliga riskbedömningstekniker från andra ämnesområden. En anpassning och vidareutveckling gjordes för att passa de specifika förutsättningarna som finns i ett dricksvattensystem samt vilka resultat som krävs för att kunna utgöra ett stöd då exempelvis åtgärder ska prioriteras. Sedan metoden utvecklades och först tillämpades på Göteborgs dricksvattensystem har den vidareutvecklats baserat på erfarenheterna från ytterligare tillämpningar i bland annat Göteborg och i arbetet som presenteras i denna rapport i ytterligare kommuner i Göteborgsregionen.

2.3 Felträdsanalysens grunder

Ett felträd är en logisk modell som visar hur olika händelser *(bashändelser)* är beroende av varandra och hur de sammantaget kan leda till överordnade händelser *(mellanhändelser)* och till slut till ett systemfel *(topphändelse)*, vilket i denna rapport utgörs av avbrott i dricksvattenleveransen (Bedford & Cooke 2001). För att illustrera vad som avses med de olika händelsetyperna presenteras ett exempel i Figur 2.1. Felträdet i

figuren visar att leveransavbrott (topphändelsen) uppstår om det samtidigt är problem med både huvud- och reservvattentäkten (mellanhändelser) och ingen av dem därför kan användas. I exemplet är det mikrobiologisk eller kemisk påverkan (bashändelser) som kan medföra att huvudvattentäkten inte kan användas. För reservvattentäkten är det händelserna pumphaveri eller begränsad vattentillgång (bashändelser) som kan göra den otillgänglig. I en verklig tillämpning används fler händelser för att beskriva alla händelser som kan medföra leveransavbrott i systemets olika delar. Företrädelsevis delas felträdet in i systemets huvuddelar, det vill säga råvattenförsörjning, beredning och distribution. Genom att identifiera de händelser som har sitt ursprung i respektive del av systemet samt hur bland annat efterföljande delar av systemet kan kompensera för fel som uppstår, kan ett heltäckande felträd byggas upp som beskriver systemet från råvatten till tappkran. Identifieringen av relevanta händelser bör göras i en grupp med personer som har kunskap om dricksvattensystemets olika delar. Förslagsvis genomförs en strukturerad brainstorming där vattnets flöde genom systemet följs och gruppen kritiskt granskar vilka händelser som kan inträffa och påverka leveransen av dricksvatten.



Figur 2.1
Illustration av ett felträds uppbyggnad med exempel på de två vanligaste logiska grindarna.

Utöver att rent visuellt beskriva hur ett system fungerar och vad som kan leda till leveransavbrott, används felträd för att beräkna sannolikheten för att de ingående händelserna ska inträffa och speciellt topphändelsen. För att kunna göra detta krävs det att sannolikheten för de ingående bashändelserna definieras, och med hjälp av de så kallade logiska grindarna som beskriver beroendet mellan händelserna kan sannolikheten för mellanhändelserna och topphändelsen beräknas. I Figur 2.1 illustreras OCH- samt ELLER-grinden, vilket är de två vanligaste logiska grindarna. I Tabell 2.1 presenteras utöver dessa grindar även två varianter av OCH-grinden som tagits fram för att beskriva typiska förhållanden som kan råda i dricksvattensystem. Den första varianten av OCH-grind beskriver hur ett fel som uppstår kan kompenseras av en eller flera komponenter under en begränsad tid. För att det ska uppstå fel krävs det således både ett inledande fel någonstans i systemet samt att kompensationsmöjligheterna inte är tillgängliga eller att den möjliga kompensationstiden 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.

Logisk grind	Exempel
ELLER-grind	En vattentäkt kan förorenas av mikrobiologiska, kemiska eller andra föroreningar.
OCH-grind	För att vattenverket inte ska 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	Försämrad 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 avhjälpts.

Tabell 2.1
Beskrivning av de viktigaste logiska grindarna som är relevanta för dricksvattensystem.

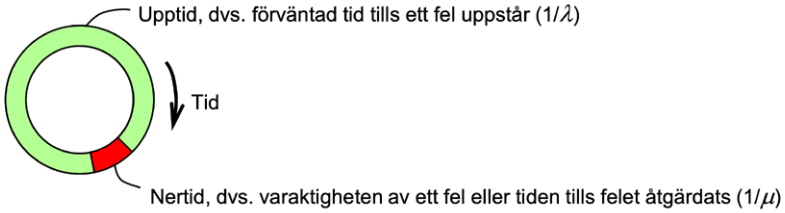
Den felträdsmetod som här tillämpas benämns dynamisk felträdsanalys eftersom det är möjligt att ta hänsyn till tidsberoenden. Med tidsberoenden avses både aspekten med kompensationsförmåga som ovan beskrivits för varianterna av OCH-grinden, men även att alla ingående bashändelser beskrivs baserat på hur ofta de förväntas inträffa samt hur långvariga de är. Metoden bygger på en beskrivning av bashändelserna som Markovprocesser (Rausand & Høyland 2004), vilket innebär att de följer en tidskontinuerlig stokastisk process. Om vi tänker oss en pump innebär detta att den antingen kan fungera (1) eller vara trasig (0) och vi vill beskriva hur övergångarna mellan dessa tillstånd (0 och 1) sker. Detta gör vi genom att för varje bashändelse i felträdet definiera en *felintensitet* (λ) som beskriver hur ofta händelsen inträffar och en *nertid* ($1/\mu$) som beskriver hur långvarigt felet som uppstår är, det vill säga varaktigheten. Ett alternativ till att ange felintensiteten är att ange dess invers, det vill säga *upptiden* ($1/\lambda$). Upptiden kan också uttryckas som den förväntade tiden mellan händelserna. För exemplet med pumpen motsvarar 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 kompensationstiden och nertiden den tid som kompensation inte är möjlig.

Baserat på felintensitet, eller upptid, och varaktighet, det vill säga nertiden, beräknas sannolikheten (P_F) för händelsen enligt:

$$P_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

I Figur 2.2 illustreras hur upptiden och nertiden kan ses som delar av en tidscykel. Sannolikheten för fel motsvarar nertidens andel av den totala tiden, det vill säga:

$$\frac{\frac{1}{\mu}}{\frac{1}{\mu}+\frac{1}{\lambda}} = \frac{\frac{1}{\mu}}{\frac{\lambda+\mu}{\mu\lambda}} = \frac{\lambda\mu}{\mu(\lambda+\mu)} = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} = P_F$$



Figur 2.2
Illustration av hur tiden tills ett fel uppstår (eller uttryckt som en felintensitet) och varaktigheten av ett fel kan ses som en tidscykel för att beräkna sannolikheten för ett fel.

I ett felträd beräknas felintensitet, varaktighet och sannolikhet för samtliga händelser och till slut för topphändelsen. I Tabell 2.2 presenteras de matematiska samband som används för att genomföra beräkningarna för de olika logiska grindarna. För varianterna av OCH-grinden motsvarar i=1 den händelse som kompenseras för och i=2,..., n de kompenserande händelserna. För den andra varianten är ekvationen bara giltig för en kompenserande händelse (i=2). Utöver parametrarna kopplade till sannolikheten, felintensiteten och varaktigheten, ingår en felsannolikhet (q_i) för varianterna av OCH-grinden. Denna parameter avser sannolikheten att den kompenserade händelsen inte är tillgänglig när den väl behövs. Till exempel att ett reservaggregat inte startar när det behövs.

ELLER-grind	OCH-grind
$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ $\mu = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_i}{\prod_{i=1}^{n} (\lambda_i + \mu_i) - \prod_{i=1}^{n} \mu_i}$ $P_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = 1 - \prod_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}$	$\mu = \sum_{i=1}^{n} \mu_i$ $\lambda = \sum_{i=1}^{n} \mu_i \cdot \frac{\prod_{i=1}^{n} \lambda_i}{\prod_{i=1}^{n} (\lambda_i + \mu_i) - \prod_{i=1}^{n} \lambda_i}$ $P_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \prod_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$
Första varianten av OCH-grind	**Andra varianten av OCH-grind**
$\mu = \mu_1$ $P_F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \prod_{i=2}^{n} \frac{\lambda_i + q_i \mu_1}{\lambda_i + \mu_1}$ $\lambda = \frac{P_F}{1 - P_F} \cdot \mu$	$P_F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\lambda_2 + q_2 (\mu_1 + \mu_2)}{\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2}$ $\lambda = \frac{\mu_1 \lambda_1 q_2 (\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2) + \lambda_1 \lambda_2 (1 - q_2)(\mu_1 + \mu_2)}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)(1 - P_F)}$ $\mu = \frac{\mu_1 \lambda_1 q_2 (\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2) + \lambda_1 \lambda_2 (1 - q_2)(\mu_1 + \mu_2)}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2) P_F}$

Tabell 2.2
Matematiska samband som beskriver hur uträkningarna av sannolikheten och övriga variabler ska göras för de olika logiska grindarna med n antal ingående händelser (Lindhe et al. 2009).

2.4 Avbrottsrisk

För att beskriva nivån på leveranssäkerheten kvantifieras en avbrottsrisk genom att kombinera den med felträdet beräknade sannolikheten med en konsekvens baserad på information om hur många personer som drabbas av leveransavbrott. Avbrottsrisken uttrycks som det förväntade antalet avbrottsminuter per år för genomsnittsbrukaren. Detta motsvarar enheten Customer Minutes Lost (CML) som används internationellt för att beskriva leveranssäkerheten i exempelvis elsystem, men det finns även exempel från dricksvattenområdet (Blokker et al. 2005).

Konsekvensen (C_i) definieras för olika huvudtyper av händelser i felträdet, det vill säga lämpliga grupper av händelser som leder till likartade konsekvenser. För att beräkna risken uttrycks konsekvensen som andelen brukare som drabbas. Detta kan antingen beräknas genom att uppskatta antalet personer som drabbas vid en viss typ av leveransavbrott, eller genom att uppskatta andelen av dricksvattenbehovet som inte kan tillgodoses och anta att det är proportionellt mot andelen av brukarna som drabbas.

Konsekvensen anges vanligen inte för topphändelsen i felträdet utan för ett antal (n) händelser i felträdet som innefattar underliggande händelser med liknande konsekvenser.

Risken (R) beräknas enligt ekvationen nedan genom att multiplicera sannolikheten, vilket motsvarar andelen av ett år som det är leveransavbrott, med konsekvensen uttryckt som andel brukare i systemet som drabbas. Den totala avbrottsrisken för ett system utgörs av summan av risken för olika händelser eller grupper av händelser, beroende på vilken nivå i felträdet som konsekvenserna definierats.

$$R = \sum_{i=1}^{n} P_{Fi} \cdot C_i$$

Avbrottsrisken ska tolkas som ett sammanvägt mått baserat på såväl frekventa, men med hänsyn till konsekvensen mindre allvarliga händelser, som händelser med mycket låg sannolikhet men med extremt allvarliga konsekvenser. Att det är risken för medelbrukaren beror på att felträdets händelser inte per automatik påverkar alla i ett dricksvattensystem. Vissa händelser kan påverka alla, men andra påverkar bara vissa delar av systemet. Genom att väga ihop samtliga händelser är det avbrottsriken för den genomsnittlige brukaren som erhålls. Risken kan således vara både högre och lägre för vissa delar av systemet, men syftet med metoden är att ge en samlad bild. Det går givetvis att beräkna risken för specifika områden genom att utesluta händelser som inte kan påverka det eller de aktuella områdena.

2.5 Utvärdera åtgärder

En felträdsmodell som byggs upp för ett dricksvattensystem kan justeras på olika sätt för att representera de förväntade effekterna av en åtgärd. Det kan till exempel handla om att ett problem byggs bort och händelser därför utesluts från modellen, att redundans skapas och därmed införs fler händelser i modellen, eller att åtgärden medför en justering av ursprunglig felintensitet, avbrottstid eller konsekvens av en händelse. Genom att beräkna avbrottrisken för individuella åtgärder eller kombinationer av åtgärder är det möjligt att tydligt utvärdera och jämföra dem baserat på den riskreduktion de förväntas ge.

För att ge ytterligare underlag vid utvärdering och jämförelse av åtgärder, kan åtgärdernas riskreduktion ställas i relation till kostnaden för att genomföra dem. Riskreduktionen kan ses som den nytta åtgärderna ger upphov till, och genom att dividera denna med uppskattad åtgärdskostnad fås en kvot som beskriver kostnaden per enhet riskreduktion. Denna kvot visar inte om åtgärderna ger en tillräcklig riskreduktion, men kan tydliggöra skillnaderna mellan åtgärderna och är ett underlag för vidare diskussion.

Utöver genomförandet av åtgärder kan risken också förändras över tid till följd av exempelvis ökat vattenbehov, försämrad status på delar av systemet och nya risker som introduceras. För att ta hänsyn till detta och illustrera hur denna förändring påverkar risken kan analysen genomföras för olika tidpunkter. Utöver nuläget är det möjligt att identifiera de huvudsakliga förändringar som antas ske i framtiden och justera felträdsmodellen utifrån detta. Om vattenbehovet till exempel förväntas öka och detta påverkar konsekvensen av vissa händelser, då kan modellen justeras utifrån detta och beskriver då avbrottsrisken exempelvis 2050. Detta kan vara extra intressant då åtgärderna kan vara olika viktiga beroende på när i tid de genomförs och får avsedd effekt.

2.6 Definiera indata och hantera osäkerheter

Utöver de händelser som bygger upp en felträdsmodell är deras respektive felintensitet och varaktighet, samt för relevanta händelser även konsekvensen, nödvändigt underlag för att beräkna avbrottsrisken. Historiska data, det vill säga information om tidigare inträffade händelser, kan och bör i den utsträckning det är möjligt användas som underlag för att exempelvis bestämma hur ofta en händelse kan inträffa. Datatillgången är dock ofta begränsad bland annat sällsynta händelser. Av denna anledning behöver även uppskattningar göras av vissa parametrar, det vill säga expertbedömningar (O'Hagan et al. 2006), och användas som underlag för beräkningarna. Det finns specifika verktyg för att ge struktur och underlätta framtagandet av expertbedömningar (t.ex. Oakley 2023). Här nöjer vi oss med att konstatera att de som har bäst kunskap om det aktuella dricksvattensystemet gör en så bra bedömning som möjligt av hur ofta en viss typ av händelse kan förväntas inträffa, hur långvarigt det problem som uppstår kan vara, och så vidare. Givetvis kan, och bör i de fall det är lämpligt, information från andra källor tas in för att underlätta bedömningen. Att händelserna beskrivs med en felintensitet och en varaktighet underlättar dock expertbedömningarna eftersom dessa är mer lättolkade jämfört med att göra en direkt bedömning av händelsens sannolikhet.

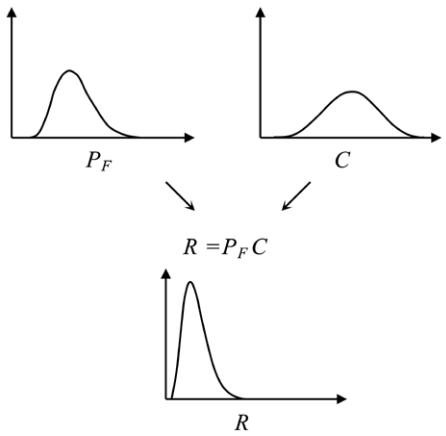
För att ta hänsyn till att det kan finnas begränsat med underlagsdata, men framför allt för att beakta den naturlig variation som kan finnas i hur ofta händelser inträffar, hur lång tid det tar att åtgärda dem och vilka konsekvenser de leder till, så beaktas osäkerheter i beräkningarna med felträdsmetoden. Detta innebär att alla indata kan beskrivas med sannolikhetsfördelningar för att osäkerheterna i såväl indata som resultat ska kunna beaktas. Beräkningarna genomförs med Monte Carlo-simuleringar, vilket illustreras i Figur 2.3. Detta är en vanlig teknik för stokastisk simulering som innebär att beräkningarna utförs upprepade gånger, till exempel 10 000 gånger, och varje gång slumpas ett nytt värde från de sannolikhetsfördelningar som definierats för modellens indata. Detta gör det är möjligt att även presentera osäkerheterna i resultaten, exempelvis som medelvärden i kombination med 5- och 95-percentiler. Percentilerna motsvarar de värden i den resulterande osäkerhetsfördelningen som 5 % av simuleringsresultaten underskrider (5-percentilen) respektive överskrider (95-percentilen). Således ligger 90 % av värdena i den framräknade osäkerhetsfördelningen inom intervallet mellan dessa percentiler.

Osäkerheterna kan även illustreras med hjälp av variationskoefficienten (CV), vilket kan beskrivas som en normerad standardavvikelse. Den beräknas genom att dividera standardavvikelsen med medelvärdet och syftet är att enklare kunna jämföra osäkerheten i observationer på olika skalor. Om avbrottsrisken är olika stor i olika delar av ett dricksvattensystem kan det vara svårt att bara utifrån percentiler se vilken del som är förknippad med störst osäkerhet. I dessa fall kan en jämförelse av variationskoefficienterna underlätta tolkningen av resultaten.

Monte Carlo-simuleringar möjliggör också känslighetsanalyser där de händelser och de indata som bidrar mest till osäkerheterna i resultaten identifieras. Detta kan göras genom att beräkna korrelationskoefficienter, till exempel Spearmans rangkorrelation, som visar hur väl sambandet mellan exempelvis en viss händelses felintensitet och systemets totala avbrottsrisk kan beskrivas. Dessa resultat kan användas för att se för vilka händelser ytterligare information bör samlas in om syftet är att minska osäkerheterna i resultaten.

För att definiera en händelses felintensitet och varaktighet används gammafördelningar. Denna fördelning kan beskriva exponentialfördelade tider och lämpar sig därför då felintensiteten också kan beskrivas som en upptid och varaktigheten motsvarar nertiden. Gammafördelningen definieras med två parametrar och i de fall expertbedömningar görs kan förslagsvis två percentiler användas i stället för fördelningens standardparametrar.

När konsekvensen av händelserna ska beskrivas kan till exempel en betafördelning användas. Betafördelningen är en kontinuerlig fördelning för en slumpmässig variabel definierad över ett begränsat intervall, till exempel intervallet 0–1. Fördelning kan därför användas i de fall konsekvensen beskrivs som antalet personer som drabbas av ett avbrott och översätts till andelen av dricksvattensystemets alla brukare. Betafördelningen kan också användas då konsekvensen beskrivs utifrån hur stor andel av produktionskapaciteten som försvinner. I vissa fall kan dock andra typer av sannolikhetsfördelningar behöva användas för att beskriva konsekvensen på ett korrekt sätt. Det kan även finnas andra indata eller parametrar i modellen som i den specifika tillämpningen kan behöva definieras med osäkerheter, och då väljs en fördelning som är lämplig för den aktuella parametern.



Figur 2.3
Illustration av hur indata till beräkningarna definieras som sannolikhetsfördelningar och hur detta beaktas med hjälp av Monte Carlo-simuleringar så att osäkerheterna i resultaten kan presenteras.

I Tabell 2.3 presenteras ett exempel som visar hur indata till beräkningarna kan beskrivas och användas för att definiera osäkerhetsfördelningar samt beräkna avbrottsrisken. I detta fall antas händelserna direkt orsaka avbrott i dricksvattenleveransen, men samma princip används i de fall flera händelser behöver kombineras med någon av de logiska grindarna. De två händelser i exemplet är förorening av råvattentäkten samt problem med en av två råvattenpumparna. Förorening avser händelser kopplade till olycksartade utsläpp vilka i värsta fall medför att råvattentäkten inte alls kan användas för dricksvattenproduktion. Baserat på de riskkällor som finns i anslutning till råvattentäkten och tidigare händelser uppskattar de som genomför analysen och som har erfarenhet av systemet, att en förorening till följd av olycka kan inträffa en gång på 20 till 100 år. Beroende på hur allvarlig föroreningen är antas det ta mellan 1 och 30 dygn att vidta åtgärder så att vattenverket kan återgå till full produktionskapacitet. Under den tid produktionskapaciteten är påverkad bedöms den reduceras med 75 till 95 %. Eftersom det finns intag på olika djup antas en viss produktion kunna upprätthållas. Den andra händelsen, problem med råvattenpump, bedöms baserat på tidigare händelser i systemet inträffa 1 till 2 gånger per år. Erfarenheten är att det tar mellan 1 och 3 timmar att åtgärda felet. Råvattenpumparna är dubblerade men måste båda vara i drift för att uppnå samma kapacitet som vattenverket. Vid problem med en av pumparna har detta antagits reducera produktionskapaciteten med 20 till 30 %. I en fullständig leveranssäkerhetsanlys bör även scenariot med båda råvattenpumparna ur funktion ingå.

Bedömningarna ovan av de två händelserna har sammanfattats i Tabell 2.3. Utifrån detta har osäkerhetsfördelningar ansatts för att beskriva felintensitet, nertid och konsekvens på det sätt som beskrivs i avsnitt 2.3 och 2.4. För att definiera felintensiteten och nertiden används de uppskattade intervallen som beskriver hur ofta och hur långvariga de problem som uppstår antas vara. Felintensiteten och varaktigheten beskrivs med gammafördelningar och dessa definieras med två parametrar, i detta fall två percentiler (P05 och P95), vilka ansätts baserat på det minsta och högsta värdet i de angivna

intervallen. Konsekvenserna är uttryckta som andelen av produktionskapaciteten som inte kan upprätthållas, vilket antas motsvara andelen brukare som drabbas och beskrivs med en betafördelning. Betafördelningen definieras också med två percentiler (P05 och P95) baserat på det angivna intervallet för konsekvensen. Den resulterande avbrottsrisken presenteras också i Tabell 2.3 med tillhörande osäkerheter baserat på Monte Carlo-simuleringar. Trots att den föroreningshändelsen antas förekomma mer sällan medför den längre varaktighet och den allvarligare konsekvensen att den får en högre risk jämfört med pumpproblemet.

Tabell 2.3
Exempel baserat på två händelser som visar hur underlagsinformationen kan beskrivas och användas för att definiera indata och beräkna avbrottsrisken.

Händelse	Bedömning av händelse	Felintensitet (λ)	Nertid ($1/\mu$)	Konsekvens	Avbrottsrisk, min/person och år
Förorening till följd av olycka	1 gång på 20–100 år 1–30 dagar 75–95 % reduktion av produktions-kapaciteten	Gamma: P05 = 0,01 (1/100 år), P95 = 0,05 (1/20 år)	Gamma: P05 = 12 (365/30), P95 = 365 (365/1)	Beta: P05 = 0,75 P95 = 0,95	Medel = 377 P05 = 23 P95 = 998
Problem med råvattenpump	1 till 2 gånger per år 1–3 timmar 20–30 % reduktion av produktions-kapaciteten	Gamma: P05 = 1 P95 = 2	Gamma: P05 = 2 920 (365×24/3), P95 = 8 760 (365*24/1)	Beta: P05 = 0,2 P95 = 0,3	Medel = 53 P05 = 29 P95 = 91

2.7 Arbetsprocessen

Arbetet med att genomföra en leveranssäkerhetsanalys med den ovan beskrivna felträdsmetoden kan sammanfattas i nedanstående huvudsteg. Det exakta genomförandet liksom hur dricksvattensystemet bäst representeras och modelleras med ett felträd varierar givetvis från fall till fall.

- Sammansättning av en arbetsgrupp som tillsammans har kompetens om det aktuella dricksvattensystemets olika delar.
- Brainstorming för att identifiera de händelser som kan orsaka avbrott i dricksvattenleveransen. Förslagsvis går gruppen systematiskt igenom systemets olika delar från råvattentäkt och de händelser som kan påverka den, vidare till beredningen och ut i distributionssystemet. Utöver händelserna i sig behöver de omständigheter som krävs för att händelsen eller händelserna ska leda till ett faktiskt avbrott diskuteras. Sammantaget ger detta underlag för att sätta upp ett felträd.
- De ingående händelserna bedöms och felintensiteter, varaktigheter och konsekvenser bedöms. I samband med detta brukar det vara naturligt att granska och revidera strukturen på felträdet för att säkerställa att dricksvattensystemet representeras på ett rimligt sätt. Även ytterligare indata såsom vattenförbrukning, vattenverkskapacitet med mera kan behöva tas fram beroende på hur konsekvenser och annat beräknas.
- Beräkningar och utvärdering av preliminära resultat. Arbetet med att genomföra en leveranssäkerhetsanlys är typiskt ett iterativt arbete där delresultat granskas och utvärderas i syfte att se till så att resultaten är rimliga, att alla relevanta händelser har tagits med och att de beskrivits på ett rimligt sätt.
- Utöver att beräkna den nuvarande avbrottsrisken för nuvarande system, kan möjliga åtgärder identifieras och modelleras. Resultaten för nuvarande system kan ge vägledning kring vilka händelser som bidrar mest till den totala avbrottrisken och därmed vilken typ av åtgärder som kan vara mest lämpliga. Genom att uppdatera felträdsmodellen och dess indata så att individuella eller kombinationer av åtgärder representeras, kan deras effekt på avbrottsrisken beräknas. Felträdet kan även justeras för att visa hur framtida förändringar i systemet kan påverka avbrottsrisken och detta kan även kombineras med åtgärder för att visa hur risken utvecklas över tid med och utan åtgärder.

- Resultaten för modellerade åtgärder kan kombineras med till exempel kostnaden för att genomföra dem. Detta ger ytterligare beslutsstöd för att vägleda prioriteringen av åtgärderna.
- När åtgärder genomförts i systemet och andra förutsättningar förändrats eller ny kunskap finns, då kan felträdsmodellen uppdateras för att visa på det nya nuläget. Utifrån detta kan nya slutsatser dras kring leveranssäkerheten och om det krävs ytterligare åtgärder och i så fall vilka åtgärder som är lämpligast att genomföra. En leveranssäkerhetsanalys bör som alla andra riskbedömningar ses som ett levande arbete som uppdateras med jämna mellanrum.

3 Exempel på tillämpning

Baserat på de leveranssäkerhetsanalyser som genomförts i Göteborgsregionen har exemplet som presenteras nedan tagits fram. Syftet är att visa hur felträdsmetoden kan användas för att utvärdera leveranssäkerheten och möjliga åtgärder i en kommun eller en region. Huvudfokus är på att beskriva de viktigaste principerna, vilka resultat som erhålls och hur dessa kan användas. Den exakta utformningen av felträdet och vilka åtgärder som är aktuella skiljer sig från fall till fall. Av denna anledning presenteras inte alla detaljer i analysen men exempel på vanligt förekommande händelser och förhållanden beskrivs.

3.1 Övergripande beskrivning av systemen i exemplet

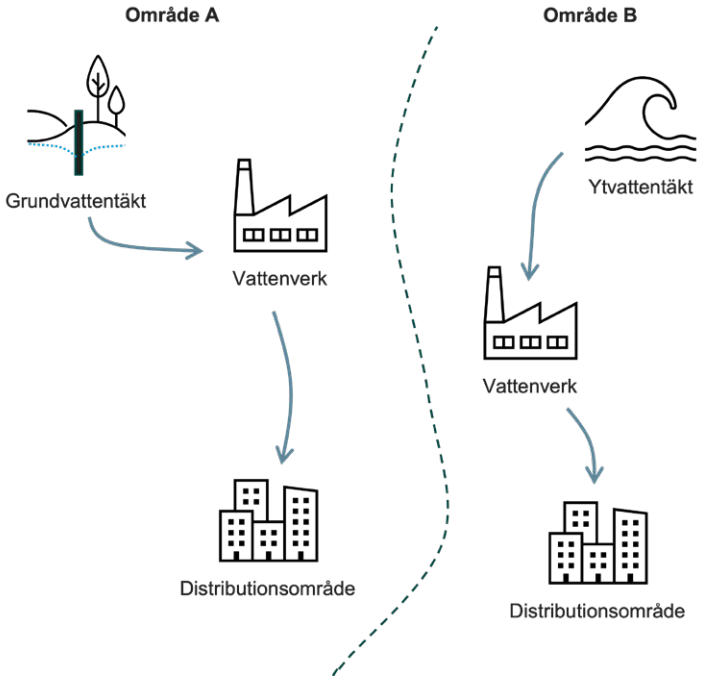
Även om dricksvattensystem på en övergripande nivå har en likartad struktur med råvattentäkt, beredning och distribution, kan skillnaderna mellan systemen vara stora. I till exempel Göteborgsregionen finns kommuner av varierande storlek och olika förutsättningar för hur dricksvattenförsörjningen kan lösas. Såväl ytvattentäkter som grundvattentäkter och konstgjord grundvattenbildning förekommer. Tillgången till reservvattentäkter eller möjligheten att på annat sätt skapa redundans i råvattenförsörjningen skiljer sig också mellan kommunerna. Regionen som helhet är starkt beroende av Göte älv, då denna utgör huvudvattentäkt för många av regionens invånare och älven utgör en reserv för ytterligare en andel av invånarna. Kapaciteten och redundansen i vattenverken skiljer sig också åt. Det finns över tio sammankopplingar där vatten kan överföras mellan kommunerna. Vissa av dessa är dubbelriktade så att båda kommunerna kan få ett tillskott av vatten vid behov. Andra sammankopplingar är enkelriktade så att vatten bara kan överföras från en av kommunerna till den andra. Den sistnämnda typen förekommer till exempel i de fall en kommun köper allt sitt dricksvatten från en eller flera grannkommuner och saknar egen dricksvattenproduktion. I de flesta fall utgör dock sammankopplingarna en reserv, men som också kan ge ett kontinuerligt tillskott av vatten. Sammantaget finns det ett större eller mindre beroende mellan många av kommunerna i Göteborgsregionen. Även om inte de tekniska systemen är sammankopplade kan råvattentäkterna ligga i samma avrinningsområde och på så sätt vara beroende av varandra. Förhållandena som beskrivits ovan kan vara aktuella för såväl en region med flera kommuner som inom en och samma kommun. I båda fallen kan det finnas områden som är mer eller mindre beroende av varandra och där helheten bör analyseras för att förstå leveranssäkerheten och kunna identifiera möjliga åtgärder. Utmaningarna och exemplet som här illustreras är således relevanta på både regional och lokal skala och därför används begreppet *område* för att beskriva olika systemdelar som kan ingå i samma kommun eller utgöra olika kommuner.

I Figur 3.1 illustreras de två områden som här används som exempel för att beskriva hur leveranssäkerheten kan analyseras med felträdsmetoden. Dricksvattensystemen i områdena är i utgångsläget, det vill säga nuläget när analysen genomförs och nedan kallat referensscenariot, inte sammankopplade utan helt fristående. I område A används en grundvattentäkt där det finns få verksamheter och riskkällor i tillrinningsområdet. Situationen är annorlunda i område B där en ytvattentäkt används och det finns många verksamheter och andra riskkällor som bedöms kunna påverka vattenkvaliteten och möjligheten att nyttja täkten för dricksvattenproduktion. Överföringen av råvatten till vattenverket är också mer känsligt i område B jämfört med område A.

Beredningsprocesserna är mer avancerade i ytvattenverket i område B jämfört med grundvattenverket i område A, men det förstnämnda har en mer redundant utformning

och det har nyligen genomförts förbättringar i bland annat styrsystemet. När det gäller distributionssystemet är område A beroende av längre överföringsledningar som delvis inte är dubblerade. I område B har flera projekt genomförts i syfte att till exempel dubblera alla kritiska ledningar, installera reservkraft i pumpstationer och utöka reservoarvolymerna.

I såväl område A som B är kapaciteten i råvattentäkt och vattenverk tillräckliga för att klara medeldygnsbehov och maxdygnsbehov. Detta säger dock lite om leveranssäkerheten i systemen och därför har det bestämts att en analys av leveranssäkerheten ska genomföras.



Figur 3.1
Schematisk illustration av två områden där dricksvattenförsörjningen baseras på olika vattentäkter och vattenverk och distributionssystemen inte är sammankopplade. Illustrationen motsvarar referensscenariot i exemplet, det vill säga utgångsläget innan några åtgärder vidtagits.

3.2 Händelser och felträdsstruktur

För att identifiera de händelser som kan leda till avbrott i dricksvattenleveransen och reda ut hur systemens egenskaper påverkar händelsernas effekt, sätts en grupp samman med personer som tillsammans har god kännedom om och erfarenhet av hela försörjningssystemen i område A och B. De går strukturerat igenom de olika systemdelarna och beskriver de händelser som kan uppstå i råvattenförsörjningen, beredningen och distributionen. För varje händelse avgörs om den enskilt kan påverka leveransen eller om den måste ske i kombination med någon annan händelse eller om det finns möjlighet att på olika sätt kompensera för denna händelse under en begränsad eller längre tid.

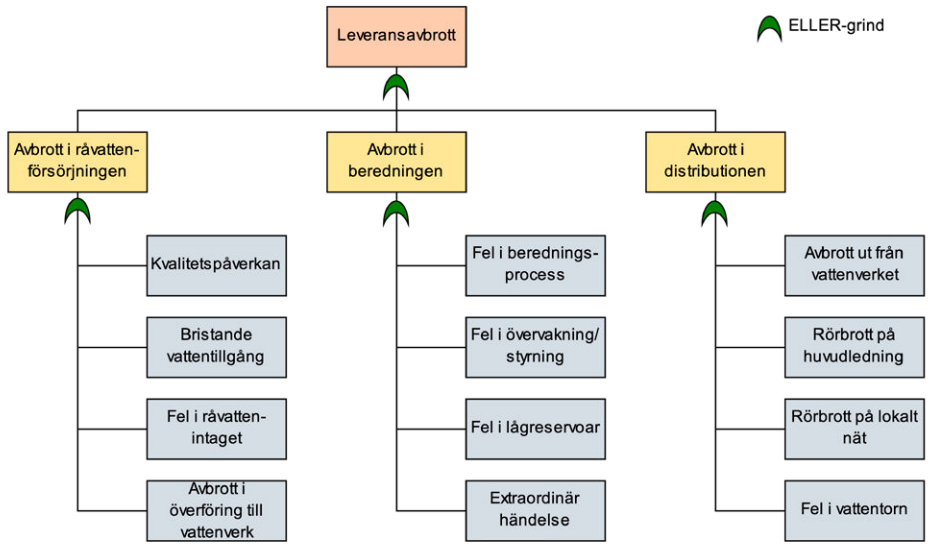
I avsnitt 3.1 ovan gavs en kort och översiktlig beskrivning av skillnaderna mellan område A och B. Detta kan brytas ner och kompletteras med mer information för att skapa felträdsmodeller, vilka kan byggas upp med olika detaljnivå. Syftet är att bryta ner händelserna tillräckligt lång så att så att deras felintensitet, varaktighet och konsekvens kan bedömas. Det går dock att göra samlade bedömningar och fokusera på de stora dragen om syftet är att hålla nere detaljnivån. Men det går också att göra analysen med en högre detaljnivå där varje komponent och händelse beaktas, i syfte att inte missa relevanta omständigheter och representera systemet så bra som möjligt. I stället för att beskriva exakt vilka händelser som inkluderats i modelleringen av område A och B i exemplet, beskrivs här typiska händelser som ofta förekommer och exempel på olika detaljnivå illustreras.

De händelser som leder till avbrott i dricksvattenleveransen kan vara relaterade till allt från förorening av vattentäkten till problem med övervakningssystemet. För att kunna härleda och se vilken del av systemet som händelserna har sitt ursprung i kan det vara en fördel att dela in felträdet i avbrott relaterade till råvattenförsörjningen, beredningen och distributionen. För råvattenförsörjningen bör händelser som kan påverka vattenkvaliteten och därmed möjligheten att upprätthålla dricksvattenproduktionen beaktas. Exempel på sådana händelser är mikrobiologisk påverkan (t.ex. bräddningar, enskilda avlopp och ytavrinning) och kemisk påverkan (t.ex. utsläpp från verksamheter, trafikolyckor med eller utan farligt gods). Även händelser som kan påverka vattentillgången i täkten bör beaktas, såsom begränsad tillrinning eller grundvattenbildning på grund av olika anledningar. Exempel på andra händelser som kan vara relevanta är algblomning, skogsbrand och isbildning. Råvattenförsörjningen är också beroende av intagsanläggningar eller brunnar, pumpning, ledningar, elförsörjning, övervakning och kommunikation. Händelser i råvattenförsörjningen kan under vissa omständigheter hanteras genom att använda vatten i eventuella råvatten- eller dricksvattenreservoarer. Denna och annan typ av kompensation behöver beaktas när ett felträd konstrueras.

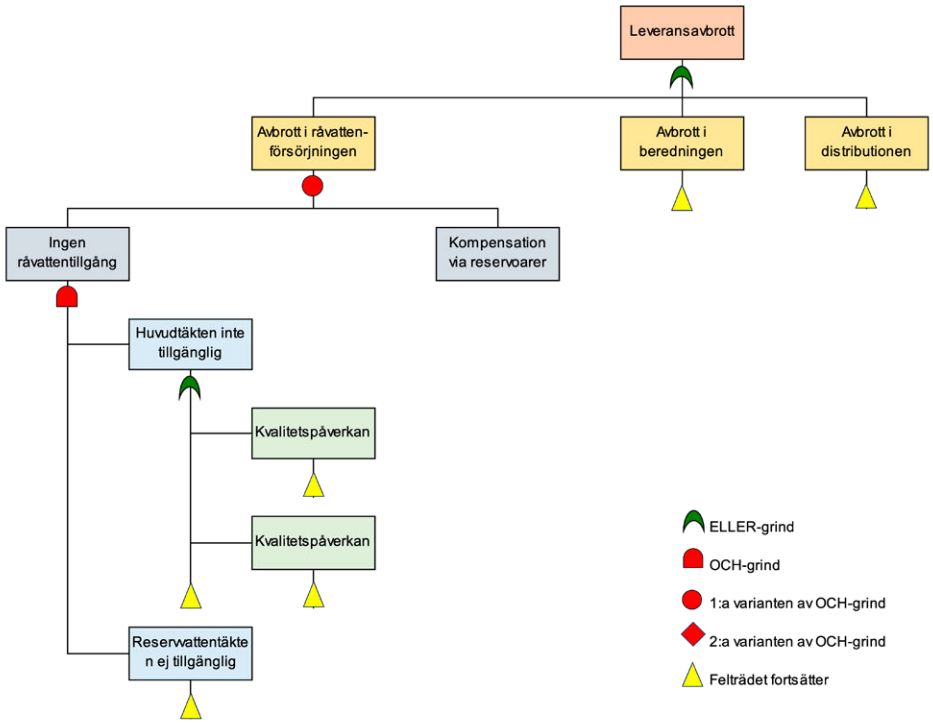
I vattenverket bör de ingående beredningsprocesserna granskas för att se om problem med dessa individuellt eller i kombination med andra händelser kan begränsa produktionskapaciteten eller helt slå ut den. Pumpningen och ledningarna i vattenverket bör också beaktas liksom eventuella händelser kopplad till styrsystem, kemikalieleverans och hantering, elförsörjning, brand, med mera. Även händelser i vattenverket kan under vissa förutsättningar kompenseras för, i alla fall under en begränsad tid, med hjälp av vattnet i reservoarer ut i ledningsnätet eller genom att öka produktionen i andra produktionsanläggningar om sådana finns och är kopplade till samma system.

Händelser som är relevanta att beakta för distributionssystemet varierar beroende på hur det är utformat. Vanligt förekommande händelser är dock rörbrott på olika typer av ledningar, problem med pumpstationer (t.ex. pumphaveri och elavbrott), tryckreducering och vattentorn (t.ex. ledningsbrott, kvalitetspåverkan och kommunikationsfel). Ofta kan distributionsområdet delas in i olika huvudområden eller typer av områden (t.ex. låg-, mellan- och högzon, med eller utan reservoar) och händelser som kan påverka dessa specificeras. Även för distributionen ska möjligheten att hantera de händelser som kan uppstå analyseras. Här liksom för händelser i råvatten och beredning kan leverans av dricksvatten från annat område utgöra en möjlig kompensations.

För att illustrera olika sätt att strukturera ett felträd presenteras i Figur 3.2 och Figur 3.3 två olika exempel. Exemplet i Figur 3.2 är övergripande och består av händelser som individuellt bedömts leda till leveransavbrott, därav används bara ELLER-grindar. I Figur 3.3 illustreras delar av ett felträd där ytterligare logiska grindar används för att dels beakta att flera händelser måste inträffa samtidigt för att ett leveransavbrott ska kunna uppstå, dels för att hantera möjligheten att under en begränsad tid kompensera för fel som uppstår. I detta exempel finns det både en huvudvattentäkt och en reservvattentäkt som båda måste vara otillgängliga för att avbrott ska uppstå. Om det uppstår ett avbrott i råvattenförsörjningen kan reservoarvolymerna utnyttjas och avbrott uppstår först när dessa är tömda. Möjligheten att kompensera för olika händelser kan även hanteras genom att justera konsekvensen för olika scenarier, så den behöver inte uteslutande modelleras med hjälp av logiska grindar. Observera att felträdet i Figur 3.3 förenklats på så sätt att alla ingående händelser inte inkluderats utan syftet är att illustrera strukturen då olika typer av logiska grindar används.



Figur 3.2
Exempel på felträdsmodell med mindre antal händelser där alla individuellt antas medföra leveransavbrott av olika allvarlighetsgrad.



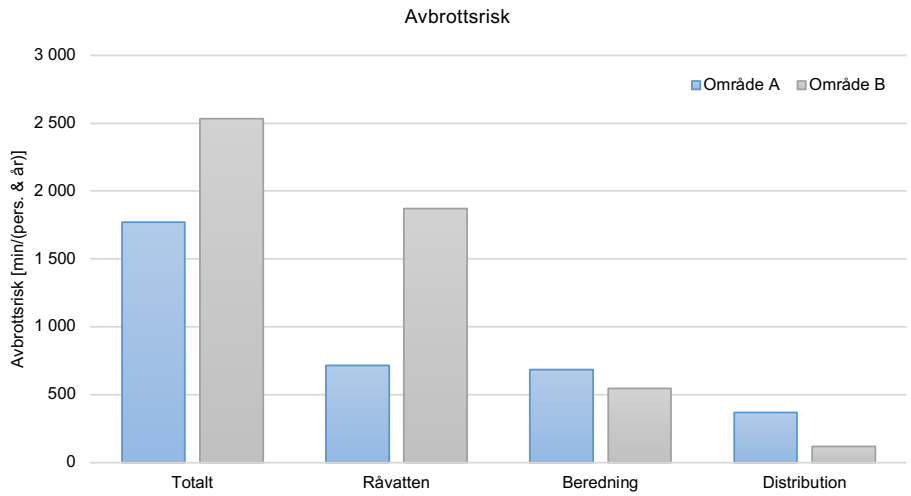
Figur 3.3
Exempel på delar av ett felträd där kompensation via reservoarer beaktas och flera händelser måste inträffa samtidigt för att det ska uppstå leveransavbrott.

3.3 Avbrottsrisk och åtgärder

För de händelser som bedömts relevanta för de två exempelområdena bedöms felintensiteten, varaktigheten och på lämplig nivå i respektive felträdsmodell även konsekvenserna. Resultatet i form av den förväntade avbrottsrisken (medelvärdet) presenteras i Figur 3.4. Den totala avbrottsrisken ligger på cirka 1 800 och 2 500 minuter per person och år för område A respektive område B. Risken är en sammanvägning av händelser i olika delar av systemet som inträffar olika ofta och leder till avbrott som drabbar olika många personer under olika lång tid. I verkligheten kan avbrotten således ligga på en låg nivå under vissa år och en betydligt högre under andra år om det är sällsynta men allvarliga händelser som påverkar risken mest. Avbrottsrisken för exempelområdena

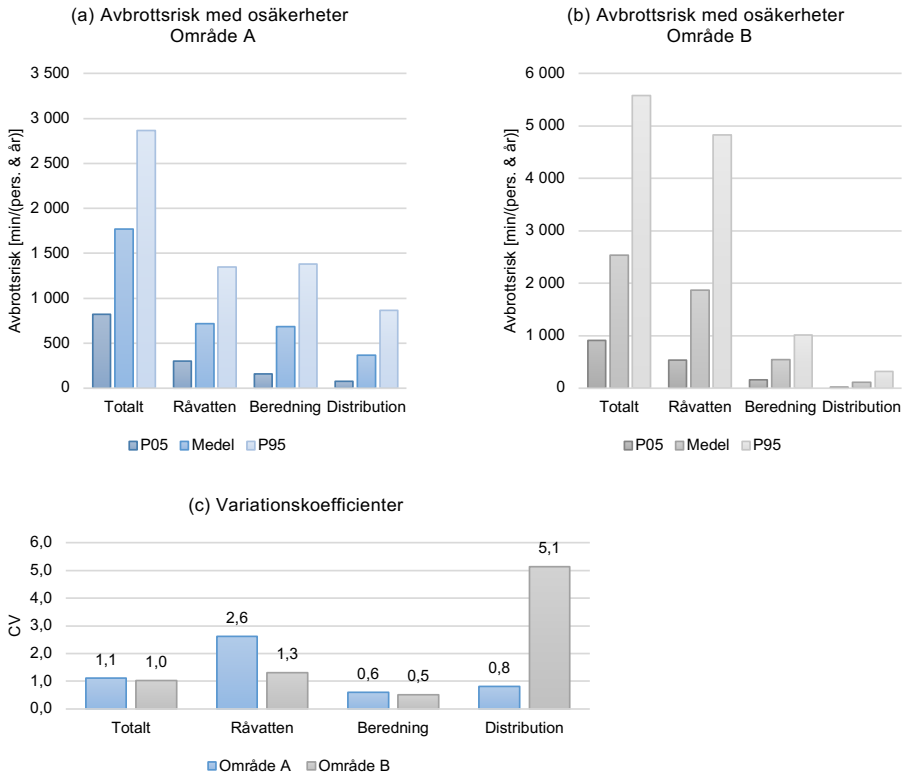
är i storleksordningen 2 000 minuter per person och år. Om bara en typ av händelse beaktas uppnås denna risknivå genom till exempel 100 avbrott per år som varar i 8 timmar och påverka 1 000 personer i en kommun med 30 000 invånare, eller en händelse som inträffar en gång vart tionde år och leder till avbrott för samtliga 30 000 invånare i kommunen under två veckor.

Avbrottsrisken i exemplet är högst för område B och det största bidraget kommer från händelser kopplade till råvattenförsörjningen (Figur 3.4). Beredningen och framför allt distributionen bidrar i betydligt mindre omfattning till den totala avbrottsrisken i område B. Område A har en lägre total avbrottsrisk än område B och skillnaden ligger framför allt i råvattenförsörjningen. Avbrottsrisken till följd av händelser i beredning och distribution är däremot högre i område A än område B. I avsnitt 3.2 beskrevs att ytvattentäkten i område B var utsatt för ett stort antal faror vilket avspeglar sig i risken. Även om beredningen är mer komplicerad i område B är den mer redundant och ger en något lägre avbrottsrisk än i område A. Vad gäller distributionen har område B en betydligt lägre avbrottsrisk än område A, även om dessa i båda fall bidrar minst till den totala avbrottsrisken.



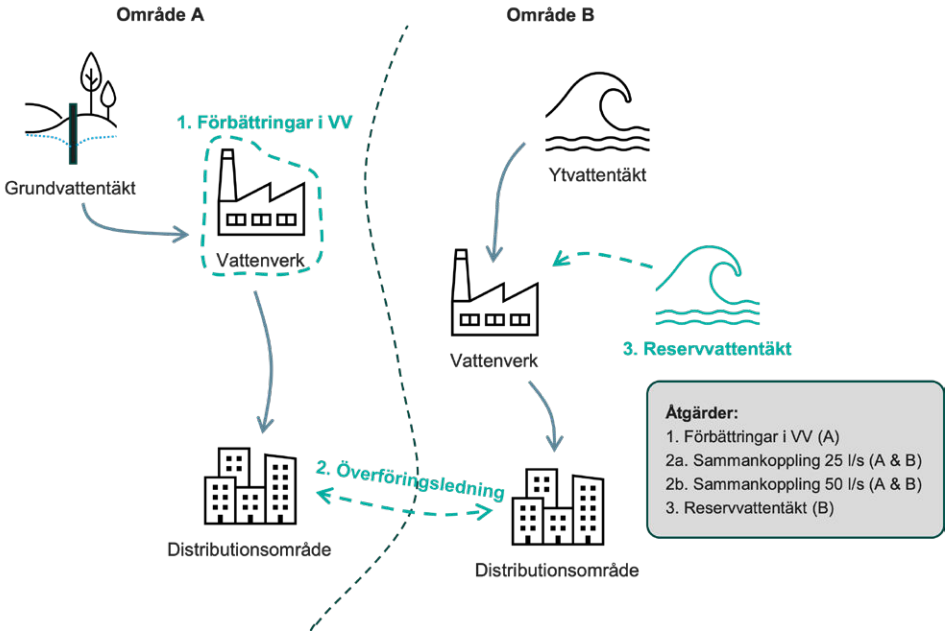
Figur 3.4
Avbrottsrisk (medelvärde) för exempelområdena A och B uppdelat på råvatten, beredning och distribution samt total för hela systemet.

För att ytterligare analysera avbrottsrisken och skillnaden inom och mellan områdena kan osäkerheterna i resultaten analyseras. Bedömningarna av felintensiteter, varaktigheter och konsekvenser är gjorda i form av intervall, vilket tillsammans med Monte Carlo-simuleringarna gör det möjligt att presentera resultaten som medelvärden och percentiler (se avsnitt 2.6). I Figur 3.5a och b presenteras avbrottsriskens medelvärde tillsammans med 5- och 95-percentilerna för respektive område. Resultaten visar att det är stora osäkerheter i resultaten, vilket till stor del beror på att det ingår händelser som inte inträffar ofta och därmed är osäkerheterna stora kring dess felintensitet och varaktighet. Osäkerheterna påverkar dock risken i de olika delområdena på samma sätt, vilket innebär att samma slutsats om deras respektive bidrag till den totala risken dras oberoende av om jämförelsen görs av 5-percentilerna, medelvärdena eller 95-percentilerna. Eftersom det kan vara svårt att direkt se vilken del av systemet som är förknippat med störst osäkerheter presenteras även variationskoefficienten (CV) i Figur 3.5c. Variationskoefficienterna är störst för distributionsrisken i område B, men denna del av systemet bidrar minst till den totala risken. För att ytterligare spåra osäkerheterna och ge vägledning kring vilken typ av ytterligare underlag som mest effektivt skulle kunna reducera osäkerheten i resultaten kan korrelationskoefficienter beräknas. Med hjälp av dessa går det att se vilka indata, det vill säga de sannolikhetsfördelningar som beskriver felintensiteterna med mera, som bidrar mest till osäkerheterna i avbrottsrisken.



Figur 3.5
Avbrottsrisken presenterad som medelvärde samt 5- och 95-percentiler för (a) område A och (b) område B samt (c) variationskoefficienter för de två områdenas avbrottsrisk.

För att hantera och reducera avbrottsrisken i exempelområdena har fyra olika åtgärdsförslag identifierats utifrån bland annat resultaten i Figur 3.4. Åtgärderna illustreras i Figur 3.6 och är: (1) förbättringar i område A:s vattenverk (VV) i syfte att bygga bort några av riskerna risker, (2) bygga en sammankoppling av distributionsområdena i syfte att kunna överföra (2a) 25 l/s eller (2b) 50 l/s mellan de båda kommunerna, samt (3) inkopplingen av en reservvattentäkt till vattenverket i område B. I område A är det svårt att göra åtgärder för att förstärka råvattenförsörjningen och därför bedöms åtgärder i vattenverket vara det lämpligaste sättet att öka leveranssäkerheten genom interna åtgärder i område B. Genom sammankopplingen kan en reserv skapas för båda kommunerna och två olika kapaciteter utvärderas för att se vilken inverkan de har på leveranssäkerheten. Överföringskapaciteterna kan jämföras med medeldygnsförbrukningen som är 10 000 m^3/d (116 l/s) i område A och 30 000 m^3/d (347 l/s) i område B. Eftersom råvattenförsörjningen är en så dominerande faktor för den totala risken i område B utvärderas effekterna av en reservvattentäkt. Genom att justera felträdsmodellerna så att hänsyn tas till de olika åtgärderna kan deras effekt på avbrottsrisken beräknas.



Figur 3.6
Exempelområdena inklusive de analyserade åtgärdsalternativen.

I Figur 3.7 presenteras åtgärdernas effekt på avbrottsrisken i område A och B. Risken innan några åtgärder genomförts presenteras som ett referensscenario (*Ref.*) och därefter illustreras de individuella åtgärdernas riskreduktion samt effekten av åtgärderna 1, 2b och 3 kombinerat (*Alla åtgärder*). För att illustrera hur effekten av förändringar över tid kan medföra en ökad risk ingår även ett scenario med samtliga åtgärder kombinerat med ett ökat dricksvattenbehov i båda områdena (*Alla åtgärder + ökat behov*). Figur 3.7 ska således läsas från vänster till höger med start i referensscenariot, varefter ett antal individuella åtgärder följer och slutligen två scenarier med flera kombinerade åtgärder samt ytterligare förändringar i systemet. Resultaten för område A och B presenteras tillsammans i figuren för att det ska vara lättare att jämföra effekten av de olika åtgärderna.

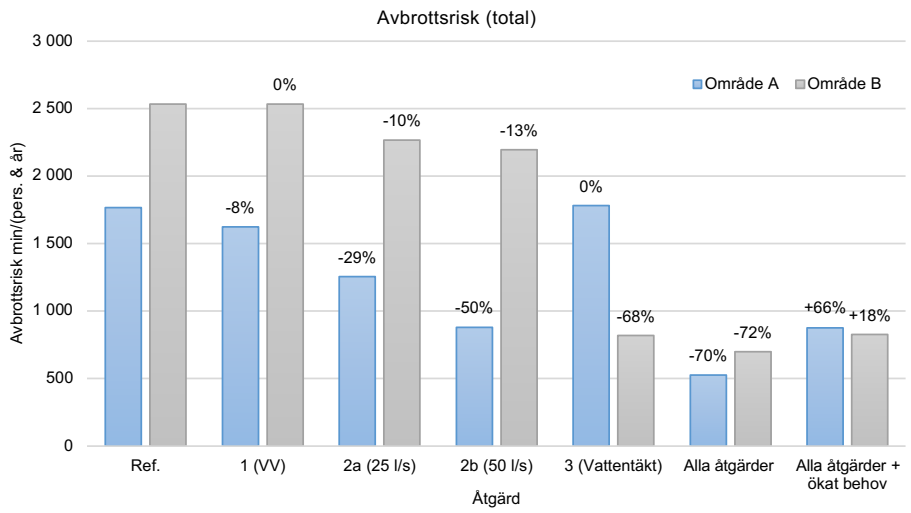
Åtgärderna i område A:s vattenverk har en viss effekt på avbrottsrisken i det aktuella området (-8 %) men har av naturliga skäl ingen effekt på område B. Sammankopplingarna möjliggör en överföring av vatten mellan kommunerna och reducerar därför avbrottsrisken i båda kommunerna. För område A reduceras risken 29 och 50 % för den lägre respektive högre kapaciteten och motsvarande reduktion för område B är 10 respektive 13 %. Den högre kapaciteten ger av naturliga skäl en större riskreduktion eftersom mer vatten kan överföras och fler av de händelser som ingår i felträdet kan hanteras genom att leveransavbrott helt undviks eller att konsekvenserna blir mindre. Sammankopplingarna har en mindre effekt på område B än område A och anledningen till detta är dels att område B har ett större dricksvattenbehov, men det är också en effekt av vilka händelser som bidrar mest till avbrottsrisken i område B. I område B är det händelserna kopplade till råvattenförsörjningen som bidrar mest till risken och dessa leder typiskt till omfattande konsekvenser. Det innebär att en stor del av produktionskapaciteten försvinner vid dessa händelser och sammankopplingarna kan därför inte kompensera för dessa händelser i samma utsträckning som är möjligt för händelserna i område A. Den sista individuella åtgärden är reservvattentäkten i område B, vilken medför en kraftig reduktion (-68 %) av avbrottsrisken eftersom den gör att flera av de händelser som tidigare bidrog mest till den totala risken kan hanteras utan att det uppstår leveransavbrott.

Om och hur mycket avbrottrisken behöver reducerar beror på vilka mål som sätts upp. För resonemangen i detta exempel utgår vi ifrån att målet för båda områdena är att avbrottsrisken i alla fall ska vara mindre än 700 minuter per person och år. Detta innebär att ingen av de individuella åtgärderna reducerar risken tillräckligt mycket. Av denna anledning presenteras i Figur 3.7 även en kombinerad åtgärd som innefattar 1,

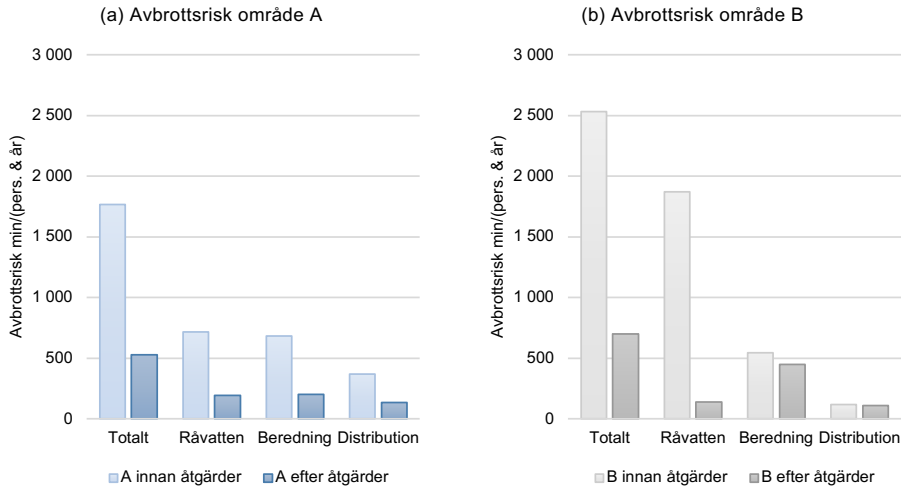
2b och 3. Denna åtgärd ger av naturliga skäl störst riskreduktion, men det intressanta är att de åtgärder som tidigare bara fick effekt i det område där de genomfördes (åtgärderna 1 och 3) nu med den sammankoppling som finns även har en positiv effekt på leveranssäkerheten i det andra området. Tydligast illustreras detta av område A som med åtgärd 2b uppnår en riskreduktion på 50 %. När denna sammankoppling kombineras med en reservvattentäkt i område B ökar riskreduktionen till 70 %. Även förbättringarna på vattenverket ingår i detta scenario men reservvattentäkten bidrar mest till den ytterligare riskreduktionen. Detta illustrerar hur åtgärdernas effekt i olika områden och totalt kan utvärderas.

För att tydliggöra hur avbrottsrisken förändras från referensscenariot till scenariot med alla åtgärder implementerade, presenteras i Figur 3.8 den totala avbrottsrisken (medelvärdet) för dessa två scenarier samt risken uppdelat på systemets huvuddelar för område A och B. Resultaten visar hur råvattenrisken kraftigt minskat för område A och för område B har risken kopplat till alla tre delområden reducerats påtagligt.

Över tid kan olika förutsättningar ändras och påverka avbrottsrisken. För att illustrera detta kombinerades scenariot med alla åtgärder med en ökning av dricksvattenbehovet i de två områdena med 20 %. Detta leder till att det finns mindre marginaler när det uppstår avbrott som ska kompenseras för genom exempelvis överföring av vatten mellan kommunerna. Detta kan illustrera den förväntade situationen vid ett visst årtal i framtiden och resultatet i Figur 3.7 visar att risken ökar i förhållande till scenariot med samtliga åtgärder implementerade. Detta illustrerar behovet av att kontinuerligt uppdatera de analyser som görs och utvärdera behovet av ytterligare åtgärder för att ha tillräckligt god leveranssäkerhet.



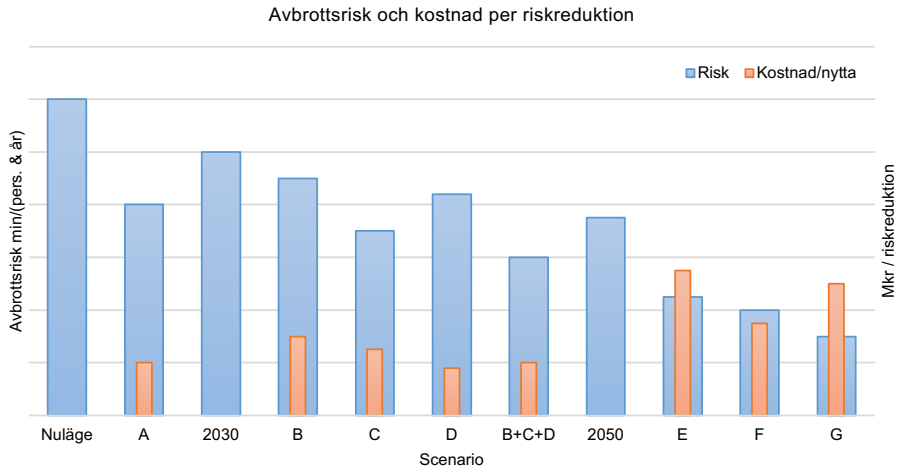
Figur 3.7
Total avbrottsrisk för område A och B för referensscenariot (ursprungsläget) samt de analyserade åtgärderna och ett scenario med ökat vattenbehov. Procentsatserna beskriver riskförändringen jämfört med referensscenariot, förutom för sista scenariot som visa ökningen jämfört med scenariot med samtliga åtgärder.



Figur 3.8
Skillnaden i avbrottsrisk för exempelområdena innan några åtgärder genomförts samt för scenariot med alla tre åtgärder (1, 2b och 3) implementerade.

3.4 Riskreduktion och åtgärdskostnad

Utöver den möjliga riskreduktion som analyserade åtgärder ger upphov till, kan de även utvärderas och jämföras med avseende på kostnaderna som de är förknippade med. I avsnitt 2.5 beskrivs hur riskreduktionen som en åtgärd ger upphov till kan betraktas som en nytta och genom att jämföra denna med kostnaden för åtgärden kan en kostnads-nyttokvot beräknas och användas för att beskriva marginalkostnaden för riskreduktionen. I Figur 3.9 illustreras detta för ett exempel som inte är samma som områdena A och B ovan. I detta exempel har ingen uppdelning gjorts i olika områden och risken beskrivs utifrån nuläget, hur den kan reduceras med olika åtgärder över tid och hur risken förväntas öka år 2030 och 2050 till följd av ändrade förutsättningar. Figuren ska således läsas från vänster till höger med start i nuläget. Risken kan reduceras med åtgärd A för att sedan successivt öka på grund av olika förändringar till nivån som presenteras för scenario 2030. På motsvarande sätt kan åtgärderna B, C och D implementeras individuellt eller tillsammans och dess effekt på avbrottsrisken beskrivs av respektive stapel. Ytterligare förändringar leder till en riskökning fram till 2050 från nivån då samtliga åtgärder efter 2030 implementerats (B+C+D). Efter 2050 finns ytterligare tre åtgärder (E, F och G) som kan genomföras. Åtgärdernas placering tidsmässigt är gjorda utifrån när de är möjliga att implementera och får effekt på leveranssäkerheten. De mindre staplarna inuti staplarna för avbrottsrisken beskriver kvoten mellan åtgärdskostnaden och beräknad riskreduktion. Åtgärderna kostar olika mycket, medför olika riskreduktion och kvoten skiljer sig därför mellan dem. Detta kan användas för att till exempel avgöra vilken eller vilka åtgärder som är mest rimliga att genomföra vid en viss tidpunkt. I exemplet i Figur 3.9 ökar marginalkostnaden för att reducera risken över tid. Så behöver det inte alltid vara men denna situation kan uppstå om det över tid krävs mer omfattande åtgärder för att bibehålla och reducera risken.



Figur 3.9
Illustration av hur avbrottsrisken och förändringen av den över tid och till följd av olika åtgärder kan jämföras i kombination med kostnaden per riskreduktion (kostnad/nytta) för de olika åtgärderna. Värdena på axlarna har utelämnats eftersom syftet är att illustrera koncepten och inte detaljer kring kostnader med mera.

4 Diskussion

Dricksvattensystem är komplexa i den mening att de är beroende av såväl naturliga system i form av vattentäkter och tekniska system i form av vattenverk samt distributionssystem. Dessa delar är utsatta för olika typer av faror och systemets geografiska utbredning bidrar till utmaningarna i arbetet med att skydda systemet. Förändringar över tid såsom klimatförändringar, ändrad markanvändning och ökat vattenbehov är exempel på ytterligare aspekter som på olika sätt bidrar till att den samlade risken som dricksvattensystem är utsatta för kan öka. Av bland annat dessa anledningar är ett strukturerar och riskbaserat arbetssätt viktigt för att uppnå och bibehålla en tillförlitlig och säker dricksvattenförsörjning. Leveranssäkerheten är en central del i detta och påverkas av såväl dricksvattensystemets inneboende egenskaper och händelser kopplade till dess funktion som yttre påverkan till följd av andra typer av händelser. Det är inte bara fysisk skada på systemet som kan leda till avbrott i dricksvattenleveransen utan även händelser som påverkar vattenkvaliteten eller styrsystem kan få allvarliga konsekvenser och orsaka leveransavbrott. I de flesta fall är det just kombinationen av händelser, det vill säga specifika händelsekedjor som utgör det stora problemet och därför behöver beaktas när leveranssäkerheten analyseras.

Det finns olika verktyg och metoder för att beakta risker kopplade till dricksvattenförsörjningen. Det finns dock begränsat med metoder som är framtagna för att specifikt analysera leveranssäkerheten och inkludera hela försörjningsystemet, det vill säga råvattenförsörjning, beredning och distribution. En anledning till detta kan vara att det inte finns några specifika lagkrav gällande leveranssäkerheten i dricksvattensystem. Detta innebär inte att VA-huvudmännen i Sverige inte arbetar med leveranssäkerhetsfrågor. Det görs viktigt arbete gällande exempelvis förnyelse och förstärkning av ledningsnätet, långsiktig planering av hur vattentillgången över tid ska tillgodoses, som på olika sätt påverkar leveranssäkerheten. Erfarenheterna från arbetet med leveranssäkerheten i Göteborgsregionen visar att sammanställningar över dagens och framtida vattenbehov i relation till kapaciteten i vattentäkter och vattenverk inte är tillräckligt för att kunna belysa leveranssäkerheten. Kapaciteten i ett system säger ingenting om dess redundans och riskbild, vilket krävs för att kunna bedöma leveranssäkerheten. Huvudsyftet med den metod för leveranssäkerhetsanalys som presenteras i denna rapport är att möjliggöra ett strukturerat arbete där systemets alla delar kan beaktas för att skapa en helhetsbild där exempelvis det som bidrar mest till avbrottsrisken kan identifieras och möjliga åtgärder kan utvärderas.

Erfarenheterna från de analyser som genomförts med den så kallade felträdsmetoden, och exemplifieringen som presteras i denna rapport, visar att metoden kan användas på ett effektivt sätt för att modellera och beräkna avbrottsrisken i dricksvattensystem. Eftersom risken kvantifieras underlättas utvärderingen av åtgärder då det blir enklare att se och jämföra hur stor effekt olika åtgärder förväntas få på avbrottsrisken. En god leveranssäkerhet kan uppnås på olika sätt beroende på de platsspecifika förutsättningarna. Tillgången till lämpliga råvattentäkter och dess kapacitet samt riskbild, utformningen och statusen på befintliga produktionsanläggningar samt distributionssystemet är exempel på sådant som har stor betydelse för leveranssäkerheten. Dålig leveranssäkerhet beror vanligen på bristande redundans och ännu värre blir det om systemet är utsatt för många risker. Beroendet av en enskild vattentäkt utan möjlighet till försörjning av rå- eller dricksvatten från annat håll har stor inverkan på leveranssäkerheten. Detsamma gäller givetvis även beredningen och distributionen. Vissa kommuner har möjlighet att uppnå redundans inom den egna kommunen, medan det för andra är mer effektivt att göra det tillsammans med andra. En gemensam åtgärd kan till exempel vara möjligheten att vid behov överföra dricksvatten mellan två kommuner. Ett område eller en

kommun med ett i relation till grannarna litet vattenbehov kan ha lättare för att uppnå tillräcklig redundans genom att köpa vatten jämfört med ett område eller en kommun med stort vattenbehov. Oavsett vilka förhållanden som råder är det viktigt att genom någon form av leveranssäkerhet kartlägga och bestämma vilken säkerhet som krävs i en sammankoppling mellan två områden eller två kommuner. Det är till exempel stor skillnad mellan att skapa en sammankoppling i syfte att: (1) överföra vatten vid planerat underhåll, (2) försörja delar av vattenbehovet då det uppstår akuta händelser och den interna kapaciteten är otillräcklig, och (3) kontinuerligt överföra vatten då den interna kapaciteten är för låg för normalförbrukningen. För situation 2 ställer betydligt lägre krav på tillgängligheten i sammankopplingen jämfört med situation 3. I det senare fallet behöver det vara en hög sannolikhet att vatten alltid kan överföras. Vidare bör övervägas om överföringen av vatten ska kunna göras åt båda håll med samma kapacitet och uthållighet eller om det framför allt är en enkelriktad överföring.

Nödvändiga indata till modellen baseras ofta på både statistik om tidigare inträffade händelser och bedömningar av dem som ingår i gruppen som genomför analysen och som har god kunskap om det aktuella systemet. Att delar av underlaget till beräkningarna bygger på expertbedömningar kan ses som en svaghet, men detta är ofta fallet i riskbedömningar då de händelser som beaktas inte alltid har inträffat. Resultaten utgör därför den bästa bedömning av avbrottsrisken baserat på den kunskap och erfarenhet som finns. Osäkerheterna som finns till följd av såväl bristande dataunderlag som naturliga variationer beaktas genom att alla indata kan definieras som osäkerhetsfördelningar. Detta gör det även möjligt att presentera resultaten med osäkerheter och genomföra känslighetsanalys i syfte att se vad som bidrar mest till osäkerheterna i resultaten. Även om indata kan definieras med hjälp av expertbedömningar bör vikten av att dokumentera inträffade händelser framhållas. Anledningen till detta är både att det utgör ett värdefullt underlag då möjliga händelser som kan leda till leveransavbrott identifieras, och för att kunna se på trender gällande exempelvis hur ofta olika saker inträffar. Denna typ av data är inte bara värdefull då en leveranssäkerhetsanalys genomförs. Utan denna dokumentation är det svårt att följa upp vilken effekt som genomförda åtgärder får och det utgör ett viktigt underlag för strategisk planering på olika plan.

Eftersom en felträdsmodell bygger på olika typer av händelser kan resultat från andra analyser och modeller vara av stort värde då händelserna ska identifieras samt för att definiera nödvändiga indata till felträdsberäkningarna. Riskbedömningar för vattentäkten kan till exempel ge information om vilka föroreningshändelser som bör beaktas och mikrobiologiska riskbedömningar för vattenverket samt arbetet med HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) ger på motsvarade sätt underlag kopplat till beredningen. För distributionssystemet kan genomförda analyser med hydrauliska modeller ge information om vilka kritiska händelser som kan inträffa och vilka konsekvenser som uppstår vid brott på olika ledningar.

Möjligheten att utvärdera åtgärder är en central funktion med felträdsmetoden. Möjlig riskreduktion av individuella eller kombinationer av åtgärder har visat sig vara ett bra underlag för att inom eller mellan kommuner diskutera betydelsen av åtgärder och hur de bör prioriteras. I exemplifieringen som presenteras i denna rapport kombineras den beräknade riskreduktionen med kostnaden för att genomföra åtgärderna. Detta är ett enkelt sätt för att utöka beslutsstödet som felträdsmetoden ger i syfte att belysa fler aspekter. I tillämpningarna av metoden har detta tydligt kunnat illustrera hur marginalkostnaden för ytterligare riskreduktion ofta ökar allteftersom åtgärder genomförs, det vill säga det blir svårare och svårare att ytterligare reducera avbrottsrisken och därmed dyrare. Som del av utvärderingen av möjliga åtgärder behöver också en diskussion föras kring vad som är en acceptabel avbrottsrisk, det vill säga vilket mål ska användas för leveranssäkerheten.

För att fördjupa utvärderingen av de åtgärder som analyseras kan resultaten från en leveranssäkerhetsanalys användas som underlag till mer detaljerade beslutsanalyser.

Exempelvis kan ytterligare beslutskriterier beaktas genom en multikriterieanalys och för detta har ett verktyg anpassat till dricksvattentillämpningar utvecklats av Sjöstrand et al. (2021). Även andra typer av beslutsanalyser såsom samhällsekonomisk kostnadsnyttoanalys kan genomföras (t.ex. Rosén et al. 2020), men gemensamt för alla beslutsanalysmetoder är att åtgärdernas effekt på leveranssäkerheten behöver vara känd och därför behövs den typ av metod som presenteras här.

En leveranssäkerhetsanalys kan genomföras på olika detaljnivå. I tidigare arbeten (t.ex. Lindhe et al. 2009) där dricksvattensystemet i Göteborg analyserats har en detaljerad analys genomförts med fler än etthundra händelser i felträdsmodellen. Syftet med projektet som ligger till grund för denna rapport var att se hur felträdsmetoden kunde användas på en mer regional nivå för att bland annat undersöka hur samverkan mellan kommuner och därmed åtgärder i olika kommuner påverkar leveranssäkerheten i olika delar av regionen. Av denna anledning var detaljnivån något lägre och antalet händelser per kommun låg i stället i storleksordningen 20 händelser. Detaljnivån kan givetvis ökas efterhand när en första modell satts upp och det finns inget som säger att en regional analys behöver vara mindre detaljerad än en analys som fokuserar på endast en kommun. Inom en kommun kan det också finnas områden som i nuläget är mer eller mindre beroende av varandra, vilket gör att det regionala tänk som låg till grund för detta arbete kan vara lika tillämpbart inom en kommun. De förenklingar som gjordes för att reducera antalet händelser handlar till stora delar om att fokusera på de stora dragen och att till exempel inte bryta ner alla systemdelar i dess individuella komponenter. Exempelvis så kan kemisk förorening av en vattentäkt delas upp i händelser kopplade till olyckor på intilliggande väg, utsläpp från industrier, och så vidare, eller så görs en samlad bedömning för flera av dessa händelsetyper gemensamt. Grupperingen av händelser behöver göras med eftertanke så att händelser med vitt skilda felintensiteter, varaktigheter och konsekvenser inte blandas då det blir svårt att ta fram en rimlig bedömning av dessa.

Erfarenheter från de leveranssäkerhetsanalyser som genomförts visar att utöver det slutgiltiga resultatet är processen i sig av stort värde. Att strukturerat granska dricksvattensystemets funktion och de händelser som kan inträffa och påverka leveransen av vatten ger ofta nya insikter och ny förståelse för systemets förutsättningar. En viktig del i detta är det faktum att personer som i det dagliga arbetet arbetar med olika delar av systemet tillsammans resonerar kring vad som kan hända, vilka möjligheter det finns att hantera specifika situationer och så vidare. Detta skapar en gemensam förståelse för de risker som finns. Detta brukar framhållas som en viktig del för de flesta typer av riskbedömningar och är således inte unik för leveranssäkerhetsanalys. Liknande effekter kan således uppnås även om leveranssäkerheten genomförs med en annan metod än den som presenteras i denna rapport. Det viktiga är att på något sätt genomföra en strukturerad och riskbaserad analys av leveranssäkerheten.

5 Slutsatser och råd till VA-branschen

Nedan presenteras de viktigaste slutsatserna kopplade till den presenterade metoden, exemplifieringen, samt erfarenheterna från tidigare tillämpningar av metoden. Slutsatserna innefattar också råd till VA-branschen gällande arbetet med leveranssäkerhetsfrågor.

- Leveranssäkerheten i ett dricksvattensystem påverkas av många faktorer och är beroende av förutsättningarna i hela försörjningskedjan. För att analysera leveranssäkerheten bör därför hela systemet beaktas och ett strukturerat arbete genomföras med syfte att identifiera relevanta händelser, beroenden och annat som kan påverka möjligheterna att upprätthålla dricksvattenleveransen.
- En god leveranssäkerhet är viktig för en välfungerande dricksvattenförsörjning och samhället i stort. Det finns i Sverige inga lagstiftade krav som definierar vilken leveranssäkerhet som ska uppnås i ett dricksvattensystem. Kravnivån får därför beslutas av de ansvariga för respektive system. Avsaknaden av nationella krav kan vara en anledning till att det finns få tillgängliga metoder utvecklade specifikt för att genomföra leveranssäkerhetsanalyser av dricksvattensystem.
- Metoden för leveranssäkerhetsanalys som presenteras i denna rapport visar att det genom ett strukturerat och riskbaserat arbete går att kartlägga och tydligt illustrera leveranssäkerheten. Möjliga åtgärder för att öka leveranssäkerheten kan modelleras och utvärderas i syfte att ge beslutsstöd. Genom att beskriva leveranssäkerheten kvantitativt med en så kallad avbrottsrisk blir det lättare att visa vilken effekt möjliga åtgärder får. Processen att genomföra en leveranssäkerhetsanalys är värdefull i sig då den bidrar till kunskapsutbyte mellan de personer som deltar i arbetet och typiskt ger nya insikter om systemets svagheter.
- Leveranssäkerheten kan variera mycket mellan olika kommuner beroende på de lokala förutsättningarna. Generellt kan sägas att god leveranssäkerhet kräver redundans i systemets alla delar. Såväl råvattenförsörjning, beredning och distribution behöver således säkerställas. Hur redundans uppnås bäst kan dock skilja sig åt mellan olika kommuner. Ibland är det mest effektiva att komplettera eller förstärka i det egna systemet, men ibland kan åtgärder i samverkan med andra kommuner vara ett bättre alternativ. Gemensamma åtgärder för att skapa reservkapacitet kan, beroende på förutsättningarna, vara mer resurseffektivt och hållbart.
- För att underlätta leveranssäkerhetsanalyser är information om tidigare inträffade händelser i dricksvattensystemet och annan statistik över avvikelser ett viktigt underlag. Att dokumentera denna typ av information är därför viktigt och något som underlättar även andra typer av analyser.

Den presenterade metoden för att analysera leveranssäkerheten i dricksvattensystem och utvärdera åtgärder är flexibel och kan anpassas till de platsspecifika förutsättningarna. Resultaten från de tillämpningar som genomförts visar att resultaten och genomförandet av en leveranssäkerhetsanalys ger värdefullt beslutsstöd. Även om syftet med denna rapport är att beskriva en specifik metod, är förhoppningen att den framför allt kan ge inspiration till ett riskbaserat arbete med leveranssäkerhetsfrågor oavsett vilken metod som används.

Referenser

Bakke S.J., Ionita M. och Tallaksen L.M. (2020) The 2018 northern European hydrological drought and its drivers in a historical perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 5621-5653.

Bedford T. och Cooke R. M. (2001). *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge University Press, Cambridge.

Blokker M., Ruijg K. och de Kater H. (2005). Introduction of a substandard supply minutes performance indicator. *Water Asset Management International, 1(3)*, 19–22.

GR (2020). *Vattenförsörjningsplan för Göteborgsregionen*. Göteborgsregionens kommunalförbund. https://goteborgsregionen.se/download/18.22a3cc8817801faddf36b0/1615554177804/Vattenf%C3%B6rs%C3%B6rjningsplan%20f%C3%B6r%20G%C3%B6teborgsregionen%202020.pdf [2023-11-20]

Grimbäck G. och Silbersky U. (2021). *Platspilot på uppdrag av Vad kostar ett hål i gatan? Fallstudie på samhällsekonomiska kostnader för vattenläckan Studentgatan – Södra Promenaden i Malmö*. Diarienummer: 21/00501, ISBN 978-91-519-9260-0, VA SYD.

Jonsson R., Gustafsson S. och Hermelin B. (2024). *Organisering för stärkt vattenförsörjning. Kapaciteter, hållbarhet, samarbete, samordning och samverkan*. SVU-rapport 2024-9. Stockholm, Svenskt Vatten.

Lindberg A., Lusua J. och Nevhage B. (2011). *Cryptosporidium i Östersund vintern 2010/2011 – Konsekvenser och kostnader av ett stort vattenburet sjukdomsutbrott*. Totalförsvarets forskningsinstitut & Livsmedelverket, FOI-R--3376—SE.

Lindhe A. (2010a). *Riskanalys från råvatten till tappkran*. SVU-Rapport 2010-08. Stockholm, Svenskt Vatten.

Lindhe A. (2010b). *Risk Assessment and Decision Support for Managing Drinking Water Systems*, Doktorsavhandling 3119, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/129014.pdf

Lindhe A., Norberg T. och Rosén L. (2012). Approximate dynamic fault tree calculations for modelling water supply risks. *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 61–71.

Lindhe A., Rosén L., Norberg T., Bergstedt O. och Pettersson T. J. R. (2011). Cost-effectiveness analysis of risk-reduction measures to reach water safety targets. *Water Research*, 45(1), 241–253.

Lindhe A., Rosén L., Norberg T. och Bergstedt O. (2009). Fault tree analysis for integrated and probabilistic risk analysis of drinking water systems. *Water Research*, 43(6), 1641–1653.

NE (2023). Redundant. Nationalencyklopedin. https://www.ne.se/uppslagsverk/ordbok/svensk/redundant [2023-12-12]

Oakley, J. E. (2023). Expert elicitation. https://jeremy-oakley.sites.sheffield.ac.uk/research/expert-elicitation [2023-12-14]

O'Hagan A., Buck C. E., Daneshkhah A., Eiser J. R., Garthwaite P. H., Jenkinson D. J., Oakley J. E. och Rakow T. (2006). *Uncertain judgements: eliciting experts' probabilities*: Wiley-Blackwell.

Rausand M. och Høyland A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*, 2 ed., Wiley-Interscience, N.J.

Rosén L., Lindhe A., Bergion V., Sokolova E., Bondelind E., Malm A., Pettersson T., Moona N., Vinas V., Lång L.-O., Sörén K., Sjöling Å och Murphy K. (2020). Riskbaserat beslutsstöd för säker dricksvattenförsörjning. SVU-rapport 2020-5. Stockholm, Svenskt Vatten.

Sjöstrand K., Lindhe A. och Rosén L. (2001). *WISER – ett verktyg för beslutsstöd inom dricksvattensektorn*. SVU-rapport 2001-8. Stockholm, Svenskt Vatten.

Sjöstrand K., Klingberg J., Zadeh N.S., Haraldsson M., Rosén L. och Lindhe A. (2021). The Value of Water—Estimating Water-Disruption Impacts on Businesses. *Water*, 13, 1565.

Sjökvist E., Abdoush D. och Axén J. (2019). *Sommaren 2018 – En glimt av framtiden?* Klimatologi nr 52, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut.

Svenskt Vatten (2020). *Distribution av dricksvatten – Funktionskrav, hydraulisk dimensionering och utformning av allmänna vattenledningsnät P114*, Publikation oktober 2020. Svenskt Vatten.

Svenska Kraftnät (2023). Leveranssäkerhet. https://www.svk.se/om-kraftsystemet/oversikt-av-kraftsystemet/leveranssakerhet/ [2023-12-12]

WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality*, 4th ed, incorporating the 1st addendum. World Health Organization, Geneva.

WWAP (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. United Nations World Water Assessment Programme, Paris, UNESCO.

Svenskt Vatten
UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma
BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma
TELEFON 08-506 002 00
E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se