Sårbarhetsanalys av samberoende infrastrukturer med användning av nätverksmodellering

– En fallstudie av ett vatten- och eldistributionsnät

Erik Öberg

Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety

Lund University, Sweden

Brandteknik och Riskhantering

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Rapport 5357, Lund 2011

Sårbarhetsanalys av samberoende infrastrukturer med användning av nätverksmodellering

-En fallstudie av ett vatten- och eldistributionsnät

Vulnerability analysis of interdependent infrastructure using the tool of network modelling

-A case study of a water- and an electricity distribution system

Erik Öberg

Lund 2011

Report 5357

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB-5357-SE

Number of pages: 88

Illustrations: Erik Öberg (unless stated otherwise)

Keywords:

Technical infrastructure, interdependent infrastructure, risk, vulnerability analysis, network theory, ISSMA, water distribution system, electricity distribution system

Sökord:

Teknisk infrastruktur, beroende infrastruktur, risk, sårbarhetsanalys, nätverksteori, ISSMA, vattendistributionsnät, eldistributionsnät

Abstract:

Modern technical infrastructures are an essential part of today's modern society. In this report a case study is made where the vulnerability of two interdependent infrastructures, namely a water distribution system and an electricity distribution system, is analyzed using a model based on network theory. The aim of this is to 1) determine what dependencies are present between these two infrastructures 2) study the vulnerability of these two systems, both with and without interdependencies and 3) evaluate what difference interdependencies might have on the outcome of the vulnerability analysis. The main conclusions are, though based on some crude assumptions, that it is important to include interdependencies in vulnerability analysis of technical infrastructure and that the utilized modelling approach is suitable for this kind of analysis, although improvements can be made.

Brandteknik och Riskhantering

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 Lund

Department of Fire Safety Engineering

and Systems Safety

Lund University

P.O. Box 118

SE-221 00 Lund

D*et krävs ett helt nytt sätt att tänka för att lösa de problem vi skapat med det gamla sättet att tänka.*

-Albert Einstein

Summary

Modern technical infrastructures are an essential part of the society that we live in today. Transport of goods by train or by air, the exchange of information via the Internet or the telephone network and the distribution of water and electricity are a few examples of the infrastructures needed for the society to work satisfactory. Today's infrastructures have become more and more integrated into the society and thus creating complex interdependent networks. A failure in one infrastructure will thus be able to spread to other infrastructures. An example of this can be a power outage in a power distribution system that in turn leads to the pumps in a water distribution system to malfunction (Rinaldi et al, 2001). As the infrastructure systems become larger, more coupled and more complex new methods is therefore required in order to be able to analyze their vulnerabilities.

The aim of this report is to, in a case study, analyze the vulnerability of a water- and an electricity distribution system, using the modelling approach developed in the FRIVA project (Johansson, 2010; Hassel, 2010). The aim of this master-thesis is, more specifically, to 1) determine what dependencies are present between these two infrastructures 2) find any vulnerabilities in these two systems, both with and without interdependencies and 3) evaluate what difference interdependencies might have on the outcome of this vulnerability analysis.

The case study carried out in this report was done in a town in southern Sweden. Data for the water distribution system was gathered by the author in cooperation with the water distribution owner, and Lund University had data regarding the electricity distribution system. Due to regulations from Livsmedelsverket, LIVSFS 2008:13, no sensitive data will be presented in this report, neither for the water- or the electricity distribution system.

The main dependency identified between the water and electricity distribution system in the current city is that the pumps in the water distribution system is dependent of electricity from the power distribution system. Another possible dependency between the electricity and the water distribution system is that some power plants need cooling water to operate (Rinaldi et al, 2001). Though, this last dependency was not present in the current city.

The vulnerability analysis revealed a number of vulnerabilities, both when the water- and electricity distribution system were studied independent and interdependent. Proposed measures for improvements, as suggested by the author, are found in the report's final part, chapter 8.

Independently of each other, there were vulnerabilities in the water distribution system at sites in the network with only one or two supply edges. These vulnerabilities were identified by the critical component analysis. If these supply points to the areas mentioned above failed there would be about 1000 customers which lost water supply for one simultaneous failure (N-1) and approximately 5500 customers which lost water supply for two simultaneous failures (N-2). In the electricity distribution system there was vulnerabilities especially at in-feed

points where two simultaneous failures could cause the entire in-feed point to an area to fail, resulting in up to about 3500 customers without electricity.

When the two systems were analyzed together, i.e. including interdependencies, it was highlighted that the highest vulnerabilities were caused due to the dependencies. The maximum consequence reached 32 000 affected customers who lost their supply of water when two faults occurred simultaneously (N-2). This consequence arise when pumps in the water distribution system loses electricity at the same time as a failure occurs at a water reservoir. The geographical vulnerabilities and the spatial dependencies that exist for the two distribution infrastructures are located especially at the in-feed points, this due to the fact that many important components are located in the same location.

The major difference in analysing independent infrastructure and analysing interdependent infrastructure is, according to this case study, the fact that consequences can escalate. When dependencies are not analyzed the impact was not higher than about 1000 affected customers for the N-1 critical component analysis and 5500 affected customers for the N-2. When the water- and power distribution systems were studied including interdependencies between them the consequence escalated to about 8000 affected customers for the N-1 and about 32 000 affected customers for the N-2. The failure sets that caused the highest consequence were always of the characteristics of cascading failure or escalating failure. This is basically what the theory concerning dependencies within infrastructure proclaims, i.e. the consequences will increase when systems with dependencies are analyzed (see, for example, Rinaldi et al, 2001; Little, 2002, 2004).

A variety of confounding factors and assumptions have affected the result in this report, in which a few important examples are:

- Input data for water distribution system was inadequate regarding customers and their consumption volume. Therefore data were converted from the electricity distribution system to the water distributions system. This conversion caused some errors in the distribution of the water consumption in the city, which in turn may have caused some errors in the validity of the results.
- The model used in this case study did not account for conduit and power line capacity, although in-feed and output capacity was considered. This may affect the results to show the system as more robust than they are in reality since possible cascading failures may have been overlooked.
- The analysis was time-independent, which has the consequence that different emergency systems (such as backup power for pumps) and buffers (e.g. water reservoirs) are not possible to model exactly as they work in reality.

Sammanfattning

Moderna tekniska infrastrukturer utgör en av grundstommarna i det samhälle som vi idag lever i och det stödjer hela den livskvalité som förväntas finnas i vår vardag. Transport av gods på väg, via tåg eller flyg, transport av information via internet eller telenätet samt transport av vatten och el är några exempel på den infrastruktur som krävs för att samhället i stort ska kunna fungera tillfredställande. Idag talas det om komplexa infrastruktursystem där olika infrastrukturer integrerats i samhället och på så sätt också blivit beroende av varandra. Ett avbrott eller en skada i den ena infrastrukturen kommer således att kunna påverka den andra infrastrukturen. Ett exempel på detta kan vara ett elavbrott i ett eldistributionsnät som i sin tur leder till att pumpar i ett vattendistributionsnät slutar fungera (Rinaldi et al, 2001). I takt med att systemen blir större, mer samberoende och mer komplexa krävs därför nya metoder för att analysera infrastrukturernas sårbarheter.

Syftet med detta examensarbete är att i en fallstudie analysera sårbarheten för ett vatten- och ett eldistributionsnät med hjälp av en modelleringsansats som tagits fram i FRIVA-projektet (Johansson, 2010; Hassel, 2010), dels för att hitta sårbarheter i det beroende infrastruktursystem som studeras men dels också för att se till skillnaderna mellan att studera endast ett infrastruktursystem åt gången jämfört med att studera flera samtidigt. Följande frågeställningar har valts vilka besvaras i slutet av rapporten:

- Hur påverkar de studerade infrastrukturerna varandra? Vilka kopplingar finns det?
- För de studerade infrastrukturerna, både beroende och oberoende, var finns sårbarheterna och varför finns sårbarheterna där?
- Vad är skillnaden, resultatmässigt, vid sårbarhetsanalys av ett enskilt infrastruktursystem jämfört med analys av infrastrukturer där beroenden tas med i analysen?

Den fallstudie som utförts i rapporten behandlar en stad i södra Sverige där data tagits fram av författaren i samarbete med ägarna till vattendistributionsnätet i staden i fråga. Data för analysen av eldistributionsnätet fanns sedan tidigare vid Lunds Tekniska Högskola. På grund av Livsmedelsverkets föreskrifter, LIVSFS 2008:13, som behandlar vattendistributionsnät och dess säkerhet mot skadegörelse och sabotage, kommer känsliga uppgifter inte att presenteras i denna rapport, varken för vatten- eller eldistributionsnätet.

Det viktigaste beroendet som identifierades mellan vatten- och eldistributionsnätet i aktuell stad är pumparna i vattendistributionsnätets beroende av elektricitet från eldistributionsnätet. Ett annat beroende mellan el- och vattendistributionsnät i allmänhet, men som inte funnits i staden i fråga, är att vissa kraftverk är beroende av kylvatten (Rinaldi et al, 2001).

Den sårbarhetsanalys som genomfördes på vatten- och eldistributionsnätet visade på ett antal sårbarheter, både då vatten- och eldistributionsnätet

studerades beroende och oberoende av varandra. Åtgärdsförslag, framtagna av författaren, återfinns i rapportens avslutande del, kapitel 8.

Då systemen analyserades oberoende av varandra fanns sårbarheterna i vattendistributionsnätet vid områden i nätet som endast har en eller två inmatningsvägar. Dessa sårbarheter identifierades genom den kritiska komponentanalysen. Konsekvensen av att dessa inmatningsvägarna till områdena slogs ut var att ca 1 000 kunder förlorade vattenförsörjning vid ett fel (N-1) och ca 5 500 kunder vid två samtidiga fel (N-2). I eldistributionsnätet låg sårbarheterna speciellt vid inmatningspunkterna där två simultana fel kunde orsaka att en inmatningspunkt till ett område slogs ut, vilket resulterade i att upp till ca 3500 kunder blev utan elektricitet.

Då systemen analyserades beroende av varandra visade det sig att de största sårbarheterna fanns just på grund av beroendet mellan vatten- och eldistributionsnätet. Maximalt förlorade ca 32 000 kunder matning av vatten då två fel inträffade samtidigt (N-2) vid den kritiska komponentanalysen, vilket berodde på att pumpar i vattendistributionsnätet förlorade elektricitet samtidigt som en vattenreservoar gick sönder (dvs. ett fel i respektive infrastruktur). De geografiska sårbarheterna och de geografiska beroenden som finns för de båda distributionsinfrastrukturerna ligger speciellt vid inmatningspunkterna, där många viktiga komponenter finns på samma plats.

Den stora skillnaden vid analys av oberoende infrastruktur och analys av beroende infrastruktur är, enligt denna fallstudie, att konsekvenserna kan eskalera. Då beroenden inte analyserades blev konsekvenserna inte högre än ca 1 000 kunder för N-1 vid den kritiska komponentanalysen och 5 500 kunder för N-2. Då vatten- och eldistributionsnätet studerades med beroenden eskalerade detta och konsekvensen ökades till ca 8 000 kunder för N-1 vid den kritiska komponentanalysen och ca 32 000 kunder vid N-2. De felset som orsakade de högsta konsekvenserna var alla av typen cascading failure och escalating failure. Detta stödjer det som teorier angående beroenden inom infrastruktur ofta antar, dvs. att konsekvenserna kan bli mycket högre då system analyseras med beroenden dess emellan (se exempelvis Rinaldi et al, 2001; Little, 2002; 2004).

En mängd olika felkällor och antaganden har påverkat resultatet i denna fallstudie, där några viktiga exempel är:

- Indata för vattendistributionsnätet var bristfällig gällande kundantal och deras förbrukningsmängd, varför data konverterades från eldistributionsnätet. Denna konvertering orsakade att vattenförbrukningsfördelningen i staden inte blev helt verklighetstrogen, vilket i sin tur kan ha orsakat osäkerhet i resultatens validitet.
- Modellen som användes vid denna fallstudie tog inte hänsyn till ledningars kapacitet, dock togs det hänsyn till inmatningskapacitet och kunders förbrukning. Detta kan ha gjort att analysens resultat visar systemet som mer robust än vad det egentligen är, eftersom möjliga cascading failure kan ha förbisetts.

- Analysen genomfördes tidsoberoende, vilket har som konsekvens att olika reservsystem (exempelvis reservkraft till pumpar) och buffertar (exempelvis vattentorn) inte kunnat modelleras exakt som de fungerar i verkligheten.

Tillkännagivande

Dessa är de sista orden som jag nu skriver i denna resedagbok. En resedagbok som jag fyllt med allt det viktiga som kan behövas vid en resa till sårbarhetsanalysernas huvudstad, nätverksteori, teknisk infrastruktur och MatLab. Denna resa har lärt mig mycket. Inte minst allt om nätverksteori, teknisk infrastruktur och MatLab. Men det finns dock en sak som jag lärt mig över allt annat, och det är att man inte kan resa ensam. Som alla så observant insett står endast mitt namn på framsidan av denna dagbok, men det är inte hela sanningen, utan det är många personer som har hjälpt mig fram till mitt slutliga mål, till slutet på denna resa. Därför tillägnas detta stycke text till de personer som hjälp mig genom min resa i hopp om att de läser detta och tar till sig min tacksamhet:

Tack Jonas Johansson för att du varit en mycket god handledare och för att du lagt så mycket av din tid på mig i hopp om att jag faktiskt någon gång ska förstå hur man skriver kod i MatLab.

Tack Henrik Hassel för att du handlett mig, läst arbetet och kommit med kloka kommentarer.

Tack till alla personer på vattenverket i aktuell stad som hjälpt mig med frågor och tillhandahållit ritningar så att detta examensarbete kunnat bli till verklighet.

Tack till min far, min mor, min bror och min sambo för att ha haft tålamodet att lyssna på mig när jag pratat trams och för att alltid ha stått vid min sida i både vått och torrt.

Tack alla som har påverkat mig och hjälpt mig med denna resa, ni har gjort ett bra jobb.

Lund, 2011-02-07

Innehållsförteckning

1. Inledning

Detta första inledande kapitel syftar till att läsaren ska få en förberedande bild av vad rapporten handlar om och vad syftet med denna är. Rapportens upplägg behandlas också för att förmedla en helhetsbild av rapporten och författarens intention med kapiteluppdelningen. I slutet av detta kapitel nämns det kort om vilken målgrupp rapporten riktar sig till, generella avgränsningar och hur känsliga uppgifter behandlas i rapporten.

1.1. Bakgrund

Modern teknisk infrastruktur utgör en av grundstommarna i det samhälle som vi idag lever i och det stödjer hela den livskvalité som förväntas finnas i vår vardag. Transport av gods på väg, via tåg eller flyg, transport av information via internet eller telenätet samt transport av vatten och el är ett fåtal exempel på den infrastruktur som krävs för att samhället i stort ska kunna fungera tillfredställande. Även små störningar i en infrastruktur kan ge allvarliga konsekvenser för företag och den offentliga sektorn, medan större katastrofer kan skapa känningar i hela samhället vars konsekvens kan sträcka sig årsvis in i framtiden. Som exempel finns stormen Gudrun, vars konsekvenser endast på elnätet utgjorde en merkostnad för Sverige på över fyra miljarder kronor under 2005 (Energimyndigheten, 2008).

Det har länge funnits metoder för att analysera tillförlitligheten för enskilda infrastruktursystem, eftersom det är viktigt att kunna reducera de risker och förebygga skador som kan orsakas av exempelvis naturkatastrofer. Idag håller detta på att utvecklas vidare, och det talas istället om komplexa infrastruktursystem. Ju mer samhället utvecklas och ju mer infrastruktur som byggs, desto mer kopplas dessa infrastrukturer ihop till ett system där avbrott eller skador i den ena infrastrukturen kommer att kunna påverka andra infrastrukturer. Systemen är således beroende och ett exempel kan vara ett elavbrott i ett eldistributionsnät som i sin tur leder till att pumpar i vattendistributionsnätet slutar fungera (Rinaldi et al, 2001). I takt med att systemen blir större och mer komplexa krävs också nya metoder för att analysera dem, där datorbaserade simuleringsmodeller är ett viktigt verktyg (Little, 2004). Det ovan nämnda förhållningssättet till infrastruktur som en viktig och värdefull del av samhället leder till slutsatsen att forskning inom ämnet för att skydda infrastrukturen mot såväl naturkatastrofer som terrorism är essentiell.

För att kunna modellera sårbarhet inom infrastruktur används det idag ofta datorbaserade nätverksmodeller. Att använda nätverksteori för analys av infrastruktur är ett relativt nytt angreppsätt som först började användas i början av 2000-talet (Amaral & Ottino, 2004). Detta har möjliggjort modellering av infrastruktursystem för att kunna utvärdera dess sårbarheter och riskerna vid utslagning av komponenter, och hur dessa konsekvenser sprider sig till beroende system.

Inom Lunds Tekniska Högskola, LTH, pågår forskning inom ämnet risk- och sårbarhetsanalys av infrastruktur med inriktning mot kritiska infrastrukturer, såsom eldistributionsnät och järnvägssystem, som ett delprojekt i ett gemensamt

ramforskningsprojekt kallat FRIVA (Lunds Universitet, 2010). Metoder och modeller baserade på nätverksteori och fysiska modeller av tekniska system har utvecklats för att kunna studera sårbarheten hos både oberoende och samberoende infrastrukturer (Johansson, 2010). Eldistributionsnät har till största delen analyserats oberoende av annan infrastruktur. Som studieobjekt för samberoende tekniska infrastrukturer har järnvägssystemet i södra Sverige analyserats. Som en del i denna forskning kommer detta examensarbete att använda de utvecklade modellerna och metoderna för att studera ett eldistributionsnäts samberoende med ett vattendistributionssystem. Att analysera sårbarheten av beroende infrastrukturer med hjälp av nätverksteori är även något som efterfrågas i tidigare examensarbeten gjorda på LTH (Nykvist & Ohlson, 2007).

1.2. Syfte och mål

Syftet med detta examensprojekt är att analysera sårbarheten för beroende infrastruktur (vatten- och eldistributionsnät) med hjälp av modelleringsansatsen som tagits fram i FRIVA-projektet (Johansson, 2010; Hassel, 2010), dels för att hitta sårbarheter i det beroende infrastruktursystem som studeras men dels också för att se till skillnaderna mellan att studera endast ett infrastruktursystem åt gången jämfört med att studera flera samtidigt. Ett annat syfte, dock inte huvudsyftet, är att utifrån arbetets resultat *diskutera* kring hur väl nätverksmodellering fungerar vid sårbarhetsanalys av beroende infrastruktur.

Målet är att i denna rapport presentera analysen ovan och svara på nedanstående frågeställningar:

1.2.1. Frågeställningar

- Hur påverkar de studerade infrastrukturerna varandra? Vilka kopplingar finns det?
- För de studerade infrastrukturerna, både beroende och oberoende, var finns sårbarheterna och varför finns sårbarheterna där?
- Vad är skillnaden, resultatmässigt, vid sårbarhetsanalys av ett enskilt infrastruktursystem jämfört med analys av infrastrukturer där beroenden tas med i analysen?

1.3. Metod

För att kunna svara på de ovan ställda frågeställningarna måste ett system av beroende infrastrukturer studeras. För att hinna göra detta inom tidsramen för ett examensarbete har vattendistributionsnät och eldistributionsnät valts som de infrastrukturer som ska studeras. Dessa två beroende infrastrukturer kommer att analyseras i en försöksstudie i en stad i södra Sverige med syfte att utifrån denna analys kunna svara på frågeställningarna. De metoder och datormodeller som kommer att användas för att analysera sårbarheten i infrastrukturerna är de som använts av Johansson (2010) i en doktorsavhandling där han analyserade eldistributionsnätet samt beroende järnvägssystem på ett liknande sätt.

För att kunna svara på den första frågeställningen, mer specifikt, krävs det kunskap om riktiga el- och vattennät och deras beroenden. För att få denna kunskap har examensarbetet utförts i samarbete med ägarna av vattendistributionsnätet, benämns hädanefter *vattenverket* i rapporten, i den stad där försöksstudien utförs. Även litteratur som behandlar infrastrukturer, och speciellt om samberoende infrastrukturer, har studerats.

Den andra och tredje frågeställningen kan besvaras först efter att de två beroenden infrastrukturerna analyserats ur ett sårbarhetsperspektiv. Systemen måste både analyseras separat, oberoende av varandra, och tillsammans, samberoende. Efter att detta har gjorts kan slutsatser om systemens sårbarhet dras men också slutsatser kring skillnaden mellan att analysera infrastrukturen oberoende jämfört med att analysera dem samberoende av varandra. En viktig del inom dessa två frågeställningar är att ha kunskap om risk- och sårbarhetsanalys, nätverksteori samt om den datorbaserade modellen som ska användas i detta examensarbete. Kunskap om detta har tagits ifrån litteratur och från handledare vilka har använt datormodellen i fråga.

Data för elnätet finns sedan tidigare inom skolan (LTH) då forskning pågår inom ämnet. Data för vattennätet har tagits fram i samarbete med vattenverket.

1.4. Rapportens disposition

För att på ett strukturerat sätt kunna svara på de ovan nämna frågeställningarna delas rapporten upp i två huvuddelar, en teoridel och en empiridel. Teoridelen behandlar de för rapporten relevanta områdena som det krävs förkunskaper inom för att förstå försöksstudien och analysen som sedan utförs i empiridelen. Denna rapport behandlar sårbarhetsanalys av beroende infrastruktursystem med hjälp av nätverksteori och fysisk modellering, varför rapporten inleds i kapitel 2 med att behandla risk och sårbarhet. Detta följs av ett kapitel om beroende infrastruktur och sedan av ett kapitel om nätverksteori och fysisk modellering. I kapitel 5 beskrivs de modeller som används i empiridelen för att genomföra sårbarhetsanalysen. Kapitel 6 är första kapitlet i rapportens empiridel, och i detta kapitel utförs en analys och simuleringar med hjälp av nätverksmodellen på ett enkelt och litet testnätverk. Detta görs för att ge läsaren ett exempel och ökad förståelse för hur sårbarhetsanalys med hjälp av nätverksteori utförs och därigenom enklare förstå analysen i det efterkommande kapitlet, kapitel 7, där ett verkligt eldistributionsnät och vattendistributionsnät analyseras på samma sätt i en stad i södra Sverige. Kapitel 8 är en avslutande del där resultat, förenklingar och antaganden diskuteras.

Nedan presenteras varje kapitel kortfattat för att ge läsaren en förståelse för varje kapitels innebörd:

- *Kapitel 1 – Inledning*
    - Inledande kapitel som behandlar bakgrunden till rapporten och dess syfte/mål samt den metod som används för att nå målet.
- *Kapitel 2 – Risk och sårbarhet*
    - Kapitlet behandlar begrepp som är centrala inom risk och sårbarhetsanalys och definierar dessa begrepp.

- *Kapitel 3 – Beroende infrastruktur och komplexa system*
    - Beskriver infrastruktur och komplexa system allmänt, centrala begrepp som är viktiga inom området och hur beroenden kan påverka infrastrukturer.
- *Kapitel 4 – Nätverksteori, fysisk modellering och konsekvensmått*
    - Behandlar grundläggande nätverksteori och kort om fysisk modellering med fokus på de begrepp och användningsområden som används i empiridelen av rapporten. Slutet av kapitlet behandlar olika konsekvensmått som kan användas vid sårbarhetsanalys av infrastruktur.
- *Kapitel 5 – Modellering och simulering av sårbarhet*
    - Kapitel som behandlar de modeller och metoder som används i rapportens empiridel.
- *Kapitel 6 – Sårbarhetsanalys av ett testnätverk*
    - En sårbarhetsanalys av ett mindre testnätverk utförs med hjälp av modellen för att exemplifiera inför nästkommande kapitel.
- *Kapitel 7 – Sårbarhetsanalys av ett verkligt vatten- och eldistributionsnät*
    - I detta kapitel utförs en fallstudie där en sårbarhetsanalys utförs med hjälp av presenterad nätverksmodell på ett vatten- och eldistributionsnät i en stad i södra Sverige. Resultatet presenteras från analysen för att sedan diskuteras mer allmänt i kapitel 8.
- *Kapitel 8 – Avslutande del*
    - Resultatet från sårbarhetsanalysen av vatten- och eldistributionsnätet diskuteras gällande felkällor, antaganden, möjliga förbättringar och resultatets rimlighet. Frågeställningarna besvaras sedan och en diskussion kring dessa förs.

1.5. Målgrupp

Rapportens målgrupp är personer med en bakgrund inom riskhantering och/eller som arbetat med sårbarhet av infrastruktur. Rapportens innehåll kan därför komma att ligga på en nivå där det förutsätts att läsaren har en grundläggande förståelse för området risk, sårbarhet och tekniska infrastrukturer. Det är dock författarens ambition att försöka förklara varje moment i rapporten så pass ingående att även läsare med en begränsad förkunskap ska kunna ta till sig majoriteten av rapportens innehåll.

1.6. Avgränsningar

De infrastrukturer som analyseras i fallstudien i denna rapport avgränsas till vatten- och eldistributionsnätet i en stad i södra Sverige. Hur vatten- och eldistributionsnätet är uppbyggt utanför denna stad och hur sårbara de är utanför staden behandlas inte alls. Övriga avgränsningar som gjorts vid modellering och simulering behandlas i kapitel 5, 6, 7 och 8.

1.7. Behandlig av känsliga uppgifter

På grund av Livsmedelsverkets föreskrifter, LIVSFS 2008:13, som behandlar vattendistributionsnät och dess säkerhet mot skadegörelse och sabotage, kommer känsliga uppgifter inte att presenteras i denna rapport. Inga kartor kommer visas och inga platser kommer namnges som kan få läsaren att förstå vilken stad denna fallstudie har utförts i. Samma kommer att gälla för känsliga uppgifter rörande eldistributionsnätet.

2. Risk och sårbarhet

I detta kapitel görs en allmän genomgång av relevanta begrepp som hör till ämnet risk och sårbarhet. Begreppen definieras för att ligga som en grund i resterande delar av rapporten. Delar av de kvantitativa definitionerna av risk och sårbarhet som följer nedan kan anses vara en aning abstrakta, men det argumenteras för att det är fördelaktigt att ha en väldefinierad grund att stå på i rapportens senare delar.

2.1. Kvantitativ definition av risk

Empiridelen i denna rapport behandlar till största delen sårbarhet i system, men eftersom risk och sårbarhet är nära besläktat beskrivs först en bakgrund och en definition av begreppet risk. Det är viktigt att definiera vad som menas med risk i detta sammanhang, eftersom användningen av begreppet är brett och därför kan tolkas på flera olika sätt. Den definition av risk som används i denna rapport, och som är vanligt citerad i många vetenskapliga artiklar, föreslogs av Kaplan och Garrick (1981) som svaret på tre frågor:

- ”Vad kan hända?”
- ”Hur stor är sannolikhet att det händer?”
- ”Vad blir konsekvensen om det händer?”

Svaret på dessa tre frågor bildar en så kallad ”triplett”, vilket kan beskrivas som ett enskilt riskscenario för ett system. Kaplan och Garrick (1981) definierade den kvantitativa risken för ett system enligt formeln nedan:

$$R = \left\{ \left\langle S_i, L_i, X_i \right\rangle \right\} \qquad i = 1,2,\ldots,N$$

där S_i representerar scenario *i*, L_i sannolikheten för att scenario *i* ska inträffa och X_i konsekvensen ifall scenario *i* inträffar. *N* är antalet scenarier som analyseras. Med detta menas det enkelt sagt att varje enskilt riskscenario beskrivs som en triplett och för att analysera den totala risken för ett system måste man ta hänsyn till alla *N* tripletter av riskscenarier. De risktripletter som inte analyseras menade Kaplan och Garrick (1981) att man skulle ta hänsyn till genom att räkna med en sista triplett, *N+1*, vilken ska beskriva ”de övriga riskerna”.

Definitionen ovan uppdaterades senare av Kaplan till att omfatta ett *C*, vilket betyder att antalet scenarier ska vara komplett för att beskriva risken, dvs. att alla möjliga scenarier med en konsekvens måste ingå i bestämningen av risken, och på så sätt övergavs idén kring att kvantitativt ta hänsyn till de ”övriga riskerna” (Kaplan et al, 2001). En konsekvens av Kaplans et al (2001) definition blir att scenarierna i ekvationen ovan är:

- kompletta, dvs. samtliga scenarier ska vara representerade
- finita, dvs. ej oändliga i antal
- disjunkta, dvs. ej överlappande, för att inte räkna samma sannolikhet två gånger

Denna definition ändras senare igen av Kaplan et al (2001) eftersom det visar sig att definitionen inte tar hänsyn till att olika riskidentifieringsmetoder kan

komma fram till olika riskscenarier vid analys av samma system. Enligt de tre punkterna ovan ska olika riskidentifieringsmetoder inte kunna komma fram till olika scenarier, eftersom de då logiskt sett antingen missat scenarier eller räknat med överlappande scenarier. För att råda bot på detta definierades en riskscenariorymd, S_A, vilken innefattar alla möjliga scenarier för ett system, vilket är ett oräkneligt och oändligt antal (till skillnad från den förra definitionen). S_a är ett enskilt scenario i riskscenariorymden och S_i betecknar en ”grupp” av scenarier i scenariorymden och är därför en partition av denna. För att praktiskt kunna analysera den totala risken, R, behövs ett finit antal av S_i studeras, som tillsammans täcker hela eller stora delar av riskscenariorymden (för att få en god approximation av denna).

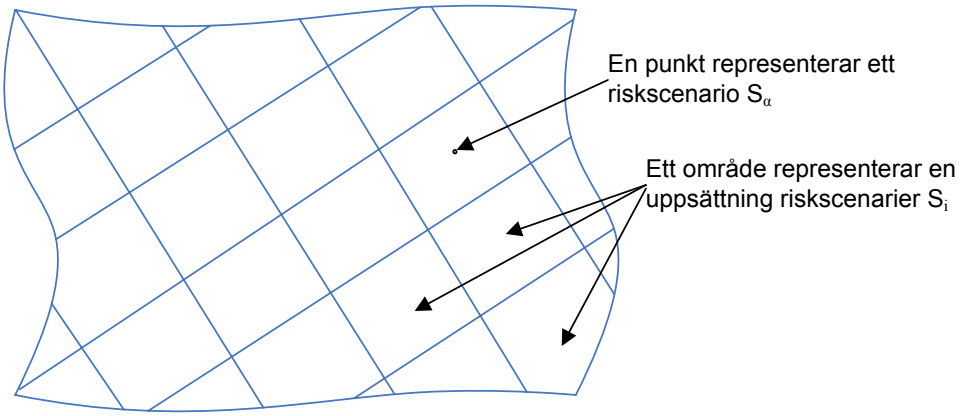
Risken som beräknas utifrån partitionerna blir:

$$R_p = \left\{ \langle S_i, L_i, X_i \rangle \right\}_p$$

där p symboliserar att R_p är baserat på partitioner av scenarier, och därför är en approximation av den ”sanna” risken:

$$R_p \approx R$$

Det krävs alltså olika riskscenarier som ”täcker in” och representerar alla scenarier i scenariorymden som kan inträffa för att göra en komplett analys av risken i ett system, se Figur 1.



Figur 1 Figuren beskriver riskscenariorymden, S_A, uppdelad i områden, S_i, där varje område representerar en uppsättning riskscenarier, S_a. (Johansson & Jönsson, 2007, med tillstånd)

En riskanalys är således alltid en modell av verkligheten där ett oändligt antal riskscenarier representeras av ett finit antal partitioner (Kaplan et al, 2001).

Notera att ingenting i definitionen ovan nämner hur man väger samman konsekvens och sannolikhet till ett riskmått för systemet, dvs. ett mått som är jämförbart mellan olika system eller scenarier. Även hur mått på konsekvensen av ett scenario ska mätas definieras inte, vilket diskuteras senare i kapitel 4, eftersom det är intressant för den fallstudie som genomförs i empiridelen av denna rapport.

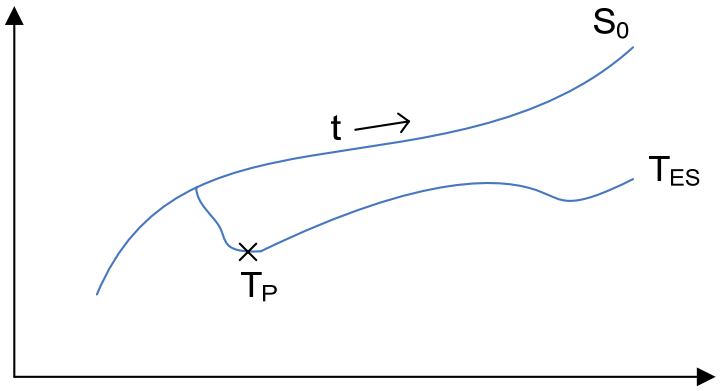
2.2. En kvantitativ definition av sårbarhet

Sårbarhet (eng. vulnerability) är, som begreppet risk, ett otydligt begrepp som kan tolkas på flera olika sätt. Den kvantitativa definitionen av risk är relativt vedertagen inom riskbranschen, medan det inte finns någon definition för sårbarhet som är lika etablerad (Johansson & Jönsson, 2007).

Här ges en kvantitativ definition för sårbarhet som bygger på definitionen ovan för risk. Skillnaden mellan risk och sårbarhet är att risktripletten bestäms givet att systemet är utsatt för en påfrestning (Johansson & Jönsson, 2007). En påfrestning är något som påverkar systemet negativt. De tre frågor som då är intressanta att besvara är:

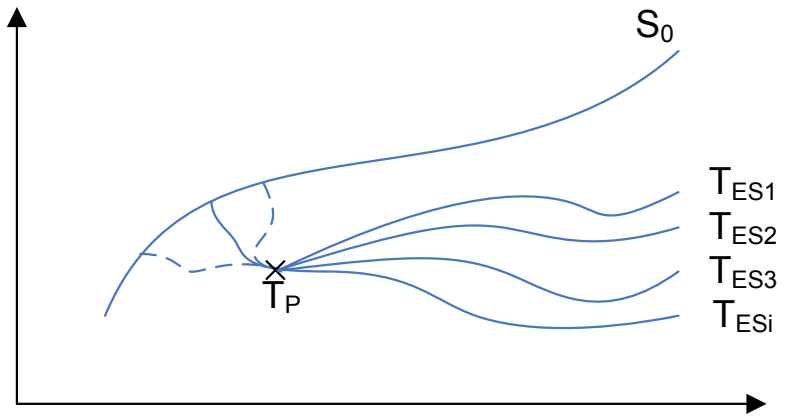
- Vad kan hända, givet en påfrestning?
- Hur sannolikt är det att det händer, givet påfrestningen?
- Vad blir konsekvenserna av detta?

Denna definition för sårbarhet kan beskrivas med en så kallad ”tillståndsrymd”, där varje fungerande system följer en specifik väg, S_0, genom tillståndsrymden. S_0 kan ses som det scenario då allting fungerar normalt. Varje annan väg genom tillståndsrymden beskriver ett riskscenario, S_a, då systemet inte fungerar som det är tänkt. När systemet i fråga hamnar utanför den ”rätta vägen”, S_0, utsätts systemet för en påfrestning. Det en sårbarhetsanalys ska analysera är systemets reaktion av att det hamnar utanför sin rätta väg i tillståndsrymden. När ett system hamnar utanför S_0 på grund av en viss påfrestning kommer det till punkten T_P vilket är ett mellantillstånd innan det slutligen når T_{ES} som betecknar sluttillståndet efter det att en påfrestning skett. Figur 2 nedan visar tankeprincipen. (Johansson & Jönsson, 2007)



Figur 2 Figuren visar ett systems normala väg genom tillståndsrymden, S_0. Vid en tidpunkt längst linjen utsätts systemet för en påfrestning som gör att systemet tar en annan väg genom tillståndsrymden, genom ett mellantillstånd T_P, till ett sluttillstånd T_{ES}. (Johansson & Jönsson, 2007, med tillstånd)

Ovan åskådliggörs endast en väg genom tillståndsrymden, med ett enda sluttillstånd, givet en påfrestning mot systemet. Så måste det inte alltid vara, utan en påfrestning kan leda till olika sluttillstånd vilka har olika sannolikhet att inträffa, se Figur 3. (Johansson & Jönsson, 2007)



Figur 3 Flera olika vägar genom tillståndsrymden som orsakats av en påfrestning mot systemet. Alla vägar som går genom T_P orsakas av samma påfrestning. De olika vägarna till sluttillstånden, T_{ES1} till T_{ESi}, kan ha olika sannolikheter att inträffa. (Johansson & Jönsson, 2007, med tillstånd)

En sårbarhetsanalys uppgift är alltså att studera vad som händer med systemet från mellantillståndet till och med ett sluttillstånd, dvs. studera hur sårbart systemet är givet en viss påfrestning.

Att definiera den kvantitativa sårbarheten för ett system givet en viss påfrestning kan göras med en formel, liknandes den för risk:

$$V_P = \left\{ \left\langle S_i, L_i, X_i \right\rangle \right\} : T_{1,i} \in T_P$$

där S_i är ett scenario (vilken representerar en partition i riskscenariorymden) givet en viss påfrestning, L_i är sannolikheten för att det ska inträffa och X_i är konsekvensen av den inträffade händelsen. Detta för alla möjliga scenarier vars första tillstånd, $T_{1,i}$, efter påfrestningen tillhör tillståndet T_p i tillståndsrymden. Denna definition är alltså exakt som definitionen för risk med skillnaden att den är betingad på att systemet ska ha gått från tillstånd S_0 till T_P (på grund av en påfrestning) innan tripletten bestäms. För en djupare beskrivning av denna kvantitativa definition av sårbarhet hänvisas till Johansson & Jönsson (2007).

2.3. Kvalitativ definition av sårbarhet

Det är möjligt att definiera sårbarhet kvalitativt på många sätt, varav två av dessa redogörs kort nedan eftersom de tydliggör hur sårbarhet definieras i denna rapport.

Begreppet sårbarhet kan enligt Hallin et al (2004, s. 12) ses som ”*… ett uttryck för en oförmåga hos ett objekt, system, individ m.m. att stå emot och hantera en specifik påfrestning…*”.

Johansson et al (2007, s. 6) definierar sårbarheten för ett system ”*… som skadan skedd på systemet då det utsätts för en påfrestning med en viss styrka och omfattning*”.

Speciellt för båda definitionerna ovan är att fokus ligger på *konsekvensen* vid eller efter en påfrestande händelse. Att den påfrestande händelsen sker är alltså i någon form givet, liksom påfrestningen var given i den kvantitativa definitionen

av sårbarhet. Det intressanta vid en sårbarhetsanalys är således att undersöka hur ett system påverkas av en påfrestning.

I denna rapport kommer fokus att ligga på *konsekvensen* av olika påfrestningar mot ett visst system, i likhet med definitionerna ovan. Metoden och analysen som utförs i rapportens empiridel kan dock mycket väl anpassas till att räkna med sannolikheter för olika påfrestningar, men då går analysen mer mot en riskbaserad analys istället för en analys ur ett sårbarhetsperspektiv (Johansson, 2010). Genom att analysera konsekvensen av olika påfrestningar kan värdefull information fås angående exempelvis var konsekvenser kan bli oacceptabla och ifall de delar av systemet som ger upphov till oacceptabla konsekvenser är tillräckligt motståndskraftiga.

2.4. Motståndskraft, robusthet och rapiditet

Inom området sårbarhet och sårbarhetsanalys finns ett antal andra begrepp som är av intresse och därför viktiga att nämna. Om sårbarhet ses som en oförmåga att hantera en påfrestning (Hallin et al, 2004) kan istället systemets *motståndskraft* (eng. resilience) ses som motsatsen, alltså en förmåga att hantera påfrestningar. Systemets motståndskraft kan i sin tur delas in i två attribut, nämligen *robusthet* och *rapiditet* (Wilhelmsson & Johansson, 2009).

Robusthet beskriver hur mycket påfrestning ett system kan påverkas av innan det uppstår konsekvenser, men också hur stora konsekvenserna blir av en given påfrestning. Ju mer robust ett system är, desto mindre blir skadorna av en påfrestning.

Rapiditet beskriver hur snabbt ett system som utsatts för en påfrestning och konsekvenserna av denna kan återställa sig till sitt normala läge. Ju mer rapid ett system är, desto snabbare kan det efter en påfrestning åter fungera normalt.

Robusthet beskriver alltså systemets förmåga att stå emot en påfrestning medan rapiditet beskriver systemets förmåga att hantera och återställa efter påfrestningens konsekvenser (Wilhelmsson & Johansson, 2009).

3. Beroende infrastrukturer och komplexa system

Eftersom denna rapport behandlar sårbarhet av beroende infrastrukturer är det viktigt att läsaren har en grundläggande kunskapsbas relaterat till infrastruktur och beroende infrastrukturer. I detta kapitel beskrivs vad en infrastruktur är, exempel på olika typer av beroenden mellan infrastrukturer och annan relevant terminologi som används inom detta område. I slutet av kapitlet beskrivs hur man idag brukar göra för att bygga motståndskraftiga infrastrukturer och för att minska sårbarheten i systemen. Avslutningsvis ges en kort beskrivning av specifikt el- och vattendistributionsnät och hur dessa ofta är uppbyggda i Sverige.

3.1. Vad är infrastruktur och kritisk infrastruktur?

Infrastruktur definierades av *Critical Infrastructure Assurance Office*, en myndighet i USA, som (Rinaldi et al, 2000, s. 13):

"…the framework of interdependent networks and systems comprising identifiable industries, institutions (including people and procedures), and distribution capabilities that provide a reliable flow of products and services essential to the defense and economic security of the United States, the smooth functioning of governments at all levels, and society as a whole."

Denna definition beskriver infrastruktur som olika system vars syfte är att tillverka eller lagra viktiga resurser i samhället och distribuera dessa vidare. Exempel på infrastruktur enligt denna definition är allt ifrån informationssystem så som internet och telekommunikationsnät, transport så som flyg- och vägnät samt distributionsnät som el- och vattendistributionsnät. Med definitionen av infrastruktur ovan kan även vårdsystemet eller jordbruket ses som infrastruktursystem.

I samband med definitionen ovan identifierades åtta stycken så kallade kritiska infrastrukturer i USA, vilka har extra stor betydelse för landets säkerhet och ekonomiska utveckling (Rinaldi et al, 2000). Dessa var infrastrukturer som behandlade olja och naturgas, el- och vattensystem, telekommunikation, transport, finans och räddningstjänst. Kritisk infrastruktur är alltså extra viktig infrastruktur som vid störningar allvarligt skulle kunna påverka landets välfärd.

I EU antogs ett program år 2007 som handlar om att skydda kritisk infrastruktur i alla EU:s medlemsländer. I programmet definierades kritisk infrastruktur som (MSB, 2009):

"… anläggningar, system eller delar av dessa belägna i medlemsstaterna som är nödvändiga för att upprätthålla centrala samhällsfunktioner, hälsa, säkerhet, trygghet och människors ekonomiska eller sociala välfärd och där driftsstörning eller förstörelse av dessa skulle få betydande konsekvenser i en medlemsstat till följd av att man inte lyckas upprätthålla dessa funktioner."

3.2. Infrastruktur som komplexa system

Olika typer av system kan delas upp i olika kategorier beroende på dess komplexitet, nämligen; simpla, komplicerade och komplexa system. Simpla

system består endast av ett få antal komponenter, dvs. olika delar i systemet som samverkar, och kan enkelt beskrivas med kända naturvetenskapliga lagar. Komplicerade system består istället av ett stort antal komponenter men kan fortfarande beskrivas med givna lagar. Komplexa system är däremot svåra att beskriva med olika lagar och dess komponenter är ofta adaptiva, dvs. ändrar sina egenskaper till följd av en medveten eller omedveten process. (Amaral & Ottino, 2004)

Med det ovannämnda synsättet kan infrastruktur klassas som ett komplext adaptivt system. Infrastruktur har många komponenter som samspelar för att systemet ska fungera och komponenterna i systemet förändras med tiden; de byts ut, slits ut, tas bort eller tillkommer. Exempel på komponenter i en infrastruktur kan vara elledningar och ställverk som åldras med tiden och på så sätt får försämrad robusthet. Det kan också vara exempelvis personal på ett kärnkraftverk som med tiden lär sig arbeta mer effektivt och säkert (Rinaldi et al, 2001).

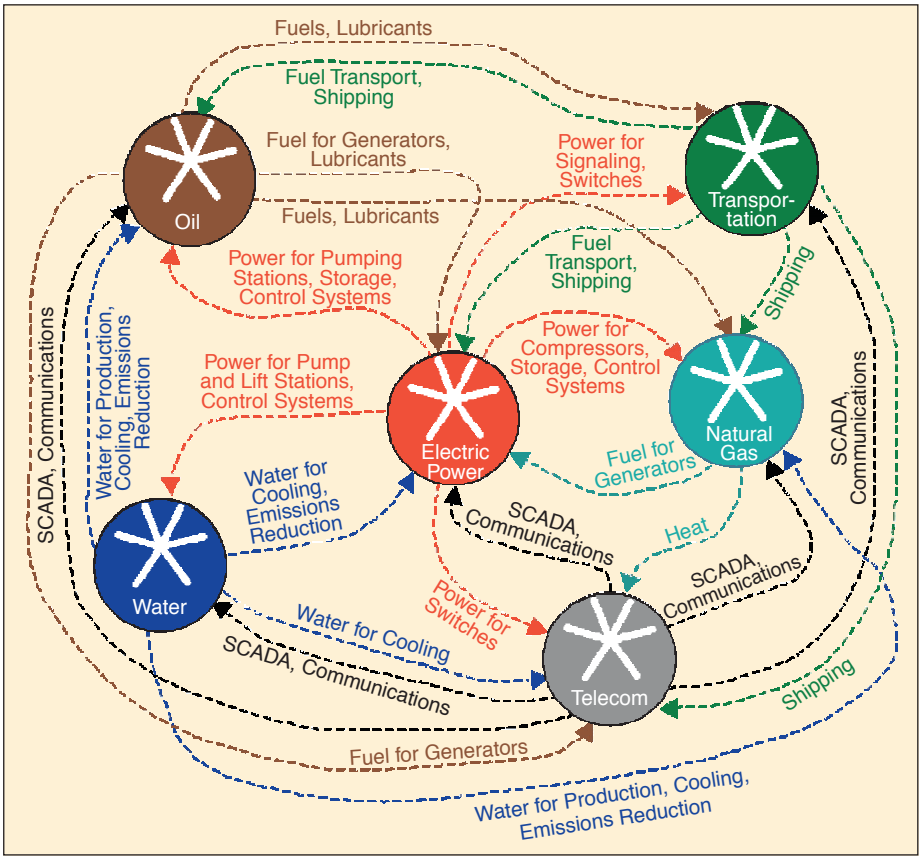
Genom att se infrastruktur som ett system av komponenter vilka kommunicerar med varandra och därigenom bildar ett komplext nätverk är det enklare att intuitivt förstå den modell som används i rapportens empiridel. Modellen i denna rapport kommer endast att behandla fysiska komponenter i infrastruktursystemen, exempelvis olika ledningar, transformatorer eller pumpar, men inte ta hänsyn till människa-teknik-samband, vilket skulle göra systemen oerhört mer komplexa att analysera.

3.3. Beroende infrastrukturer och synergi

En enskild infrastruktur med fysiska komponenter kan argumenteras för att inte vara komplex, utan endast komplicerad. Om dock flera infrastrukturer undersöks tillsammans, med beroenden mellan dessa, blir komplexiteten mycket högre då systemen kan påverka varandra i olika led. I alla grupper av system där många komponenter ska fungerar tillsammans, med beroenden mellan systemen, uppstår *synergieffekter*, dvs. två eller fler komponenter som var för sig inte påverkar systemet särskilt mycket men tillsammans är kritiska för systemets funktion (Rinaldi et al, 2001).

Beroenden mellan infrastruktur kan vara riktat eller oriktat. Ett *ömsesidigt beroende* (eng. interdependence) är ett beroende åt två håll, dvs. två komponenter är beroende av varandra för att utföra sina uppgifter. Om en komponent slås ut slutar den andra att fungera. Ett ömsesidigt beroende mellan två infrastrukturer betyder helt enkelt att systemen som helhet kan påverka varandra (Rinaldi et al, 2001). Ett *enkelberoende* är endast riktat åt ett håll, dvs. ett system skulle påverka ett annat system ifall det skulle fallera, men inte tvärt om (Johansson & Hassel, 2010). Exempelvis är elnätet en typisk infrastruktur som har många beroenden. Utan elektricitet skulle pumpar i vattennätet sluta fungera likaså signalljus vid väg-, tåg- och flygtrafik. Däremot skulle också vattennätet kunna påverka elnätet ifall det exempelvis skulle saknas kylvatten i värmekraftverk. Transport av bränsle till värmekraftverk som upphör, skulle också kunna påverka elproduktionen vid längre trafikfördröjningar. Se Figur 4 nedan för fler exempel på samberoenden mellan infrastruktur. Då två system inte alls är beroende av varandra, varken genom enkelberoenden eller

ömsesidiga beroenden, kallas de för oberoende system (eng. independent) (Rinaldi et al, 2001).



Figur 4 Exempel på samberoenden mellan viss infrastruktur. (Rinaldi et al, 2001, med tillstånd)

I de flesta fall då det gäller infrastruktur finns det ömsesidiga beroenden mellan dem, men alla beroenden är inte lika starka. Som exemplen ovan med elnätet antyder är vissa beroenden mellan system starka, systemen är alltså *tätt* kopplade, vilket betyder att en förlust i det ena systemet direkt kan kopplas till att ett annat system påverkas. Tidsfönstret mellan felet och det beroende system som blir påverkat är relativt kort i tätt kopplade system. Då pumpar i vattennätet direkt slutar fungera på grund av ett elavbrott (ingen reservkraft finns) är ett typiskt exempel på tätt kopplad infrastruktur. Andra beroenden kan vara *lösa*, dvs. beroendet mellan infrastrukturen är inte så starkt och ett fel i det ena systemet påverkar inte det andra direkt utan det finns en tidsfördröjning. Här är ett bra exempel ett förstört vägnät där ingen kol kan transporteras till kolkraftverken. Kolkraftverken har i regel en buffert i form av ett lager och påverkas därför inte direkt av bristen på transport, men om felet inte åtgärdas kan det blir känningar i elnätet. (Rinaldi et al, 2001)

3.4. Olika typer av beroenden

Beroenden mellan infrastruktur kan, som sagts i avsnittet innan, vara enkelberoenden eller ömsesidiga beroenden och det kan finnas tätt beroende infrastruktur eller löst beroende. Enligt Rinaldi et al (2001) finns det en till uppdelning av beroenden i fyra olika kategorier för att strukturera upp dem ytterligare:

- Fysiska beroenden
- Cyberberoenden
- Geografiska beroenden
- Logiska beroenden

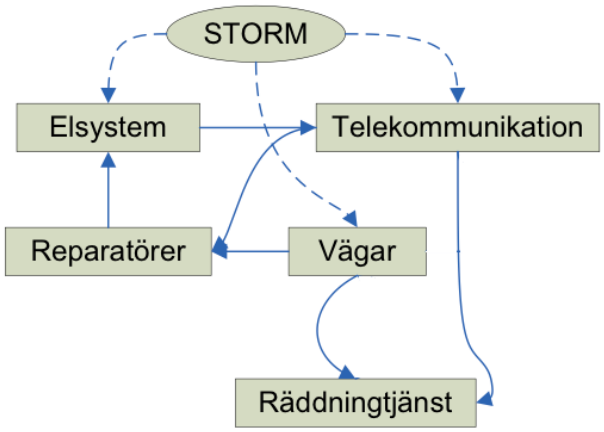
Fysiska beroenden finns mellan infrastruktur om de är beroende av varandras produktion eller distribution. Ett typsikt exempel här är elnätet och vattennätet. Elnätet levererar elektricitet och utan den fungerar inte pumpar i vattennätet.

Cyberberoenden är en ny typ av beroende som kommit i och med den dator- och kommunikationsålder vi idag lever i. En stor del av all infrastruktur fungerar eftersom det finns kontrollsystem som baseras på ett fungerade informationsflöde, exempelvis SCADA-system (för övervakning och styrning av processer). Cyberberoenden är alltså beroenden mellan infrastruktur som uppkommer på grund av att information måste kunna skickas och tas emot för att olika typer av kontrollsystem ska fungera.

Geografiska beroenden finns om komponenter av olika infrastrukturer geografiskt sett ligger nära varandra. Exempelvis är en elkabel och en vattenledning som ligger precis bredvid varandra geografiskt beroende eftersom en grävskopa som förstör vattenledningen också kommer att förstöra elledningen då den gräver.

Två infrastrukturer är *logiskt beroende* av varandra om deras tillstånd kan påverka varandra men beroendet varken är ett fysiskt, cyber- eller geografiskt beroende.

Vid modellering av beroende infrastrukturer är det dock mest intressant att skilja dessa olika beroenden åt genom en uppdelning mellan geografiska beroenden och fysiska, cyber- samt logiska beroenden. Detta eftersom att i en modell kan de fysiska, cyber- och logiska beroenden modelleras som en länk mellan två komponenter, medans de geografiska beroendena modelleras genom deras koordinater, dvs. var de ligger geografiskt placerade (Johansson & Hassel, 2010). Mer om detta kommer under kapitel 5 där modelleringsansatsen beskrivs mer noggrant. Nedan i Figur 5 visas hur olika infrastrukturer påverkades av stormen Gudrun som drabbade Sverige år 2005. Elsystemet, telekommunikationen och vägnätet hade ett geografiskt beroende under stormen eftersom de påverkades av sin geografiska position (vilket under stormen var en stor yta). Om elkablar däremot hade varit nedgrävda hade inte samma geografiska beroende funnits. Telekommunikationen är också fysiskt beroende av elsystemet och reparatörer och räddningstjänst är logiskt beroende av exempelvis vägar och telekommunikation (detta beroende kan också ses som ett fysiskt beroende).



Figur 5 Urval av beroenden under stormen Gudrun i Sverige år 2005. Streckade pilar visar geografiska beroenden och ej streckade pilar visar övriga beroenden. (Bilden omgjord från Johansson & Jönsson, 2007)

3.5. Beroenden i flera steg

Även om det i denna rapport endast kommer att studeras två infrastruktursystem i empiridelen, nämligen vatten- och eldistributionsnätet, är det viktigt att veta vad för resultat som kan gå förlorat då det i denna rapport endast studeras ett urval av alla beroende infrastrukturer som finns.

Som sagt finns det många både täta och lösa kopplingar mellan infrastrukturer och dessa kan ge efterföljande effekter i flera steg. Antag ett strömavbrott som leder till att vattendistributionsnätet slutar att fungera. Denna effekt av beroendet mellan el- och vattendistributionsnätet sägs vara *första ordningens effekt*. Då vattendistributionsnätet inte fungerar blir en konsekvens i varma länder att jordbruken inte kan konstbevattnas och därför kan skörden minska, vilken blir *andra ordningens effekt. Tredje ordningens effekt* kan exempelvis vara att finansmarknaden blir instabil eftersom skörden minskat. (Rinaldi et al, 2001)

Dessa kedjor av beroenden är ytterligare en anledning varför beroende infrastruktur är ett så komplext system. Det är mycket svårt att veta exakt vilka konsekvenser en brist i någon del av systemet kan ge. Genom att endast studera ett urval av alla infrastrukturer i en fallstudie kan vissa viktiga beroenden gå förlorade, och därför är det viktigt att fundera på vad som kan ha missats. Enligt Little (2002) bör man vid riskanalys av beroende infrastrukturer ställa tre frågor angående de beroenden som finns, där frågorna liknar den kvantitativa definitionen för risk/sårbarhet:

- Vad kan hända på grund utav beroenden mellan kritisk infrastruktur?
- Vad är sannolikheten att beroenden orsakar händelser som är oacceptabla inom kritisk infrastruktur?
- Vad kan dessa konsekvenser vara?

I denna rapport kommer dessa frågeställningar inte att analyseras särskilt djupt utan endast diskuteras på grund utav den stora omfattning dessa frågor annars skulle ge upphov till. Poängen är att det är viktigt att ha ett ”system i system”-tänkande (Rinaldi et al, 2001) då man arbetar med beroende infrastruktur, dvs.

att vara medveten om att det urval av infrastrukturer som studeras endast är ett system i ett större system.

3.6. Typer av fel

Vid fel (eng. failure) i komponenter av beroende infrastruktur finns det tre speciella typer av fel som man namngett för dess egenskaper. Egenskaperna av dessa fel baseras på vilken typ av konsekvens felen eller påfrestningen ger upphov till (Rinaldi et al, 2001). Dessa tre typer av fel är:

- Cascading failure
- Escalating failure
- Common cause failure

Cascading failure är en typ av fel som genom beroenden leder till att komponenter i en annan infrastruktur felar, dvs. att felet leder till första, andra eller högre ordningens effekter, liknande en dominoeffekt. Denna typ av fel är extra intressant i denna rapport eftersom det är dessa typer av fel som är skillnaden mellan oberoende och beroende infrastruktursystem.

Escalating failure är en typ av fel som förvärrar andra oberoende fel, dvs. om ett fel utbrutit i ett system samtidigt som ett annat fel utbryter är det ett escalating failure om konsekvensen förvärras av att felen råkat ske samtidigt. Escalating failure kan ses som en typ av fel med synergieffekter.

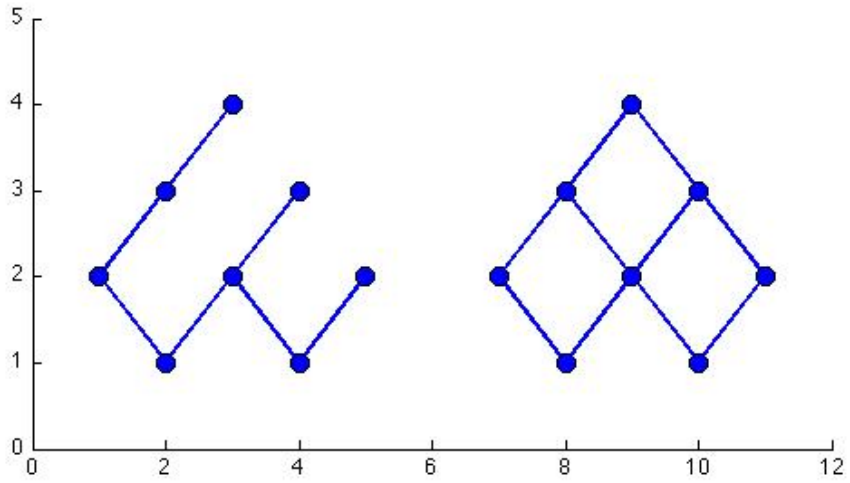
Common cause failure betyder att två eller fler infrastrukturer påverkas av samma fel, dvs. det är en och samma påfrestning som är orsaken till flera avbrott. Det kan exempelvis vara att två komponenter i olika infrastruktursystem är geografiskt beroende eftersom de finns i samma utrymme och förstörs samtidigt av ett terroristattentat.

3.7. Att bygga motståndskraftig infrastruktur

För att skydda viktig infrastruktur mot påfrestningar så att systemet blir motståndskraftigt finns det olika tekniker som utnyttjas. Ofta vill man öka systemets robusthet så att potentiella påfrestningar orsakar en så liten skada som möjligt.

För att öka systemets robusthet kan detta göras genom att utveckla eller uppgradera komponenter i systemet så att dessa blir mer driftsäkra och på så sätt minskar sannolikheten för att dessa fallerar (Little, 2004). Ett exempel är att gräva ner elkablar för att skydda dessa mot stormar (elkablarna kan dock bli mer sårbara mot exempelvis jordbävningar och också svårare att reparera).

Vad som också är vanligt är att bygga infrastrukturer så att det finns mycket *redundans* i systemet. Det betyder att man bygger systemet så att det finns dubbel kapacitet, dvs. ifall en del går sönder finns det en annan del av systemet som kan ta över lasten (Little, 2004). I el- och vattendistributionsnätet bygger man ofta ”loopar” i systemet för att öka redundansen, se Figur 6.



Figur 6 Två olika nätverk som exempelvis kan symbolisera två olika vattendistributionsnät. Det högra nätverket är mer redundant än det vänstra på grund av att nätverket har fler "loopar", dvs. det finns fler alternativa vägar i nätverket ifall en väg skulle gå sönder.

För att göra infrastruktursystem motståndskraftiga mot beroenden med andra infrastrukturer används ofta en *buffert*. En buffert är något som ser till att ett tätt beroende blir ett löst beroende, ofta genom att öka tidsgapet mellan att ett fel uppstår till att konsekvensen sprider sig till andra beroende system (Johansson, 2010). Exempel på detta är lager av medicinartiklar som finns inom sjukvården eller reservkraft vid sjukhus eller vid kritiska vattenpumpar i vattendistributionsnätet som förhindrar direkta konsekvenser av elektricitetsbortfall.

När man designar tekniska system följs ibland en princip som kallas för N-1. Det betyder att man strävar efter att systemet alltid ska klara ett bortfall av en komponent utan att det blir stora konsekvenser som följd (Johansson et al, 2010). Det argumenteras för att det också är viktigt ur sårbarhetssynpunkt att behandla bortfall som innefattar mer än en komponent, dvs. N-2, N-3 etc. (Johansson, 2010), vilket är något som kommer att återkomma i kapitel 5.

3.8. Tillgång till information och data vid analys av infrastruktur

Ett stort problem som finns vid analys av infrastruktur, speciellt samberoende infrastrukturer, är tillgången på information och data. Många infrastruktursystem i dagens samhälle ägs privat av olika aktörer och det är därför vanligt att de inte vill dela med sig av information gällande dessa, eftersom det kan anses som företagshemligheter eller vara förknippat med säkerhetsproblem (Rinaldi et al, 2001). Vid analys av samberoende infrastrukturer, då data behövs gällande flera olika system, blir detta problem extra påtagligt. Som exempel kan nämnas att vattendistributionsnätet i Sverige är skyddat enligt lag, eftersom det räknas som ett livsmedel (LIVSFS 2008:13). Detta är varför specifik information angående vattendistributionsnätet inte redovisas explicit i empiridelen i denna rapport. På grund av att känsliga uppgifter även förekommer för eldistributionsnätet redovisas inte heller specifika detaljer gällande det.

3.9. El- och vattendistributionsnätet i Sverige

I denna rapport är det ett vatten- och eldistributionsnät som kommer att analyseras ur ett sårbarhetsperspektiv med hjälp av nätverks- och fysisk modellering. Dessa två infrastrukturer är båda så i denna rapport kallade *distributionsinfrastrukturer*, dvs. de transporterar och distribuerar nödvändigheter för samhället, i detta fall elektricitet och vatten.

Eldistributionsnätet i Sverige är uppdelat i tre olika typer av nät; stamnät, regionalnät och lokalnät. Stamnätet sträcker sig över hela Sverige och är även ihopkopplat med de närliggande ländernas eldistributionsnät för att de ska kunna hjälpa varandra vid avbrott och obalanser i nätet. Från olika typer av kraftverk går elektriciteten in i stamnätet där den sedan transporteras och sedan transformeras ner till en lägre spänning i regionalnätet, vilket förser olika delar av landet med elektricitet. I regionstationer transformeras sedan elektriciteten ner till ytterligare en lägre spänning om ca 12-24 kV i lokalnätet, vilket endast täcker mindre områden så som enstaka städer. Innan elektriciteten når hushållet transformeras den ned ytterligare till 0,4 kV vid olika nätstationer. I denna rapport är det lokalnätet i aktuell stad som kommer att analyseras ur ett sårbarhetsperspektiv, vars spänning ligger på ca 11 kV. (Svensk energi, 2009)

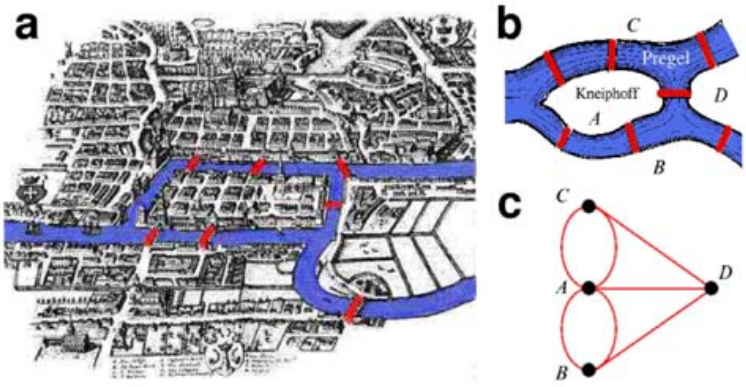
Vattendistributionsnät i Sverige är mer lokala i sin omfattning än eldistributionsnätet som genom stamnätet täcker hela Sverige. Varje region i Sverige har sitt eget vattendistributionsnät där vatten vanligtvis tas från sötvattensjöar eller från grundvattnet. Från vattentäkterna transporteras vattnet i huvudledningar vilka sedan förgrenar sig till mindre rör beroende på hur många kunder som försörjs av ledningarna. Ofta finns högt belägna vattenreservoarer, eller vattentorn, dit vatten pumpas upp med hjälp av tryckstegringspumpar och sedan används den potentiella energin för att kunna förse vattennätet på ett energismart sätt. Detta eftersom att vattenreservoarerna kan ”jämna ut” variansen av vattenförbrukningen i nätet så att tryckstegringspumparna då kan operera med en konstant effekt istället för att variera i takt med variationen i nätet. De större vattenledningarna i städer har en diameter omkring 300-600 millimeter vilka förgrenar sig i mindre rör om ca 100-200 millimeter som leder vattnet i kvarteren. Dessa förgrenar sig sedan i ännu mindre rör om ca 25-30 millimeter som sedan leder vattnet in enstaka hus. I denna rapport studeras de rör som finns i aktuell stad vars diameter ligger mellan ca 100-600 millimeter, dvs. de minsta rören som går in i enstaka hus studeras ej.

4. Nätverksteori, fysisk modellering och konsekvensmått

I detta avsnitt beskrivs nätverk och nätverksteori för att ge läsaren en grundläggande förståelse inför rapportens empiridel vilken använder en modell baserad på nätverksteori och fysiska modeller för att utföra sårbarhetsanalys av el- och vattendistributionsnätet i en stad i södra Sverige. I detta kapitel behandlas först kort bakgrund till nätverksteori och dess användning. Därefter ges en kort beskrivning av fysiska modeller. Sedan appliceras detta på infrastrukturer och viktiga sårbarhetsfrågor diskuteras, bland annat hur man kan mäta konsekvensmått och robusthetsmått.

4.1. Nätverksteorins bakgrund

Grunden inom nätverksteori brukar två kända matematiker få äran för, nämligen Euler och Erdös, varav Euler är den som mestadels får äran för själva konceptet av nätverksteori genom att lösa det så kallade ”Königsbergspusslet”. Problemet bestod av sju broar som knöt an till ön Kneiphoff, i staden Königsberg (idag Kaliningrad) i Ryssland, se Figur 7. Frågan löd om det var möjligt att under en promenad korsa alla broar, men endast en gång vardera. Euler löste problemet genom att konstatera att avståndet mellan broarna inte hade betydelse, varför han istället kunde bygga upp problemet kring den topologiska utformningen av broarna och landytorna. Utifrån denna nya utformning av problemet kunde Euler visa att det var omöjligt att korsa alla broar endast en gång vid en promenad (försök gärna själv). (Amaral & Ottino, 2004)



Figur 7 a) visar en översikt över broarna vid Königsbergspusslet. b) visar en översiktsbild av problemet och broarna samt c) visar problemet utifrån ett topologiskt perspektiv, uppritat som ett nätverk. (Amaral & Ottino, 2004, med tillstånd)

För endast ett tiotal år sedan började forskare inom olika discipliner inse att nätverksteori kunde användas i många fler tillämpningsområden än vad man tidigare trott, nämligen som verktyg för att förklara och modellera komplexa system.

4.2. Vad är ett nätverk?

Ett nätverk (eng. network) är ett system av *noder* (eng. node) och *länkar* (eng. edge), även kallade *kanter*, som binder samman dessa noder. Noder kan vara sammankopplade med flera länkar till olika noder eller endast med en länk till en nod (Amaral & Ottino, 2004). Noderna kan representera allt ifrån personer till komponenter i ett system medan länkarna kan vara abstrakta vänskapsband

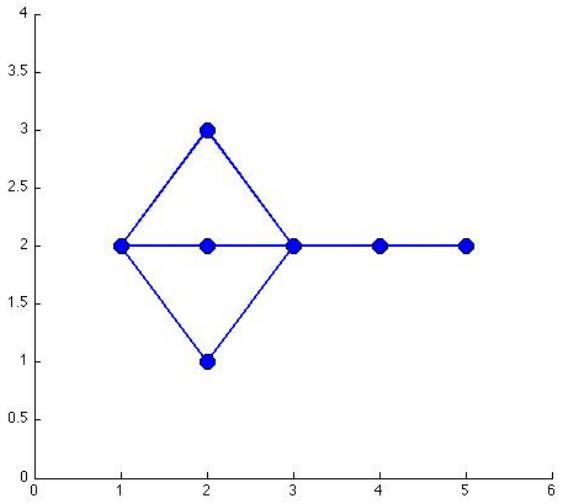
mellan personer eller rör som förbinder komponenter i vattendistributionsnätet. När man förstått denna idé och accepterat den kan många problem ses eller formuleras som olika typer av nätverk. Exempelvis nervsystemet i människans kropp som består av olika celler som binds samman av synapser kan vara ett nätverk där cellerna är noder och synapserna länkar mellan dessa.

Matematiskt kallas ett nätverk för en *graf* och nätverksteori kallas också *grafteori.* En graf beskrivs matematiskt som:

$$G = (V, E)$$

där G är själva grafen, V representerar noderna som är n i antal och E representerar länkarna som är m i antal (Nyqvist & Ohlson, 2007).

En bild på ett nätverk visas nedan, Figur 8, med sju stycken noder och åtta stycken länkar. Som man kan se förbinds vissa noder med flera länkar och har på så sätt många ”grannar” medan andra noder endast har en eller två länkar som binder den samman med andra noder. Man kan se nätverket nedan som exempelvis ett eldistributionsnät där länkarna är elledningar och noderna är förgreningar alternativt viktiga installationer i nätet.



Figur 8 Ett nätverk med n=7 och m=8.

En länk kan vara riktad (eng. directed) eller oriktad (eng. undirected), ungefär som att beroenden antingen kan vara ömsesidiga beroenden eller enkelberoenden. Riktade länkar kan endast skicka information eller resurser åt ett håll medan oriktade länkar kan skicka åt båda hållen (Newman, 2003).

Länkarna och noderna kan vara av olika typer eller ha olika *attribut* kopplade till sig. Detta är olika egenskaper som noderna eller länkarna tillskrivs för att styra dess funktion och/eller hur de interagerar med andra komponenter (Nyqvist & Ohlson, 2007). Exempelvis kan ett ekosystem beskrivas som en nätverksmodell bestående av två olika typer av noder, växter och djur, där det finns riktade länkar mellan organismerna som beskriver näringskedjan.

Olika noder sägs ha olika *grader* (eng. degree) vilket är ett mått som baseras på hur många länkar som är sammankopplade med just den noden. Om länkarna är riktade pratar man om en *in-grad* och en *ut-grad*, dvs. hur många länkar som har riktning till respektive från noden. Exempelvis har noden längst till vänster, vid koordinat (1, 2) i Figur 8, en grad på 3. *Medelgraden* för ett nätverk är den grad som alla noder i nätverket har i medeltal. (Newman, 2003)

Medelgraden av ett nätverk beräknas utifrån följande formel (Johansson et al, 2007b):

$$\langle k \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} k_i = \frac{2m}{n}$$

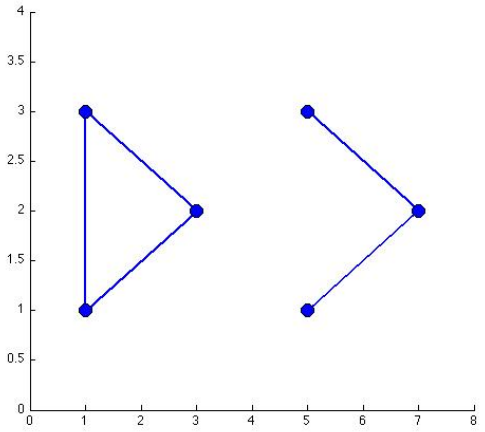
där $\langle k \rangle$ är medelgraden för nätverket, *n* är antalet noder och *m* är antalet länkar. *k* är graden för en specifik nod med index *i*.

Eftersom alla olika noder i ett nätverk ofta har olika grader kan man åskådliggöra detta med en fördelningsfunktion, *P(k)*, vilken visar sannolikheten att en slumpmässigt utvald nod exakt har grad *k* (Albert & Barabási, 2004). Många verkliga nätverk, bland annat inom infrastruktur, har ofta en struktur där flertalet noder har en relativt låg grad medan vissa få noder har en mycket högre grad och kallas *nav* i nätverket (Nyqvist & Ohlson, 2007). Dessa nätverk följer ofta en så kallad *power law-fördelning* (även kallade skalfria nätverk, eng. scale free networks) vilket betyder att sannolikheten att en slumpmässig nod exakt har grad *k* är proportionell mot *k* upphöjt med en konstant:

$$P(k) \propto k^{-y}$$

där *P(k)* är sannolikheten att en slumpmässig nod har exakt grad *k* och där *y* är en konstant (Albert & Barabási, 2004). Ett intressant fenomen som visats med dessa nätverk som följer en power law-fördelning är att de är relativt robusta mot slumpmässiga utslagningar, men sårbara då nätverkets nav attackeras (Albert et al, 2004).

Ett mått på hur redundant ett nätverk är kan bestämmas genom en så kallad *klustringskoefficient.* Klustringskoefficienten för ett nätverk beräknas genom att ta tre gånger alla *trianglar* i nätverket dividerat med det totala antalet *tripletter* i samma nätverk. En triangel är tre noder, A, B och C, som alla är förbundna med varandra genom länkar. En triplett är tre noder, A, B och C, men där endast A har en länk till B och B till C, och ingen länk finns mellan C och A för att sluta tripletten till en triangel, se Figur 9. (Nyqvist & Ohlson, 2007)



Figur 9 Till vänster visas en triangel i ett nätverk och till höger visas en så kallad triplett.

Nedan visas formeln för att beräkna ett nätverks klustringskoefficient:

$$C = \frac{3N_{Trianglar}}{N_{Tripletter}} \qquad 0 \le C \le 1$$

Klustringskoefficienten, *C*, ger ett mått på hur många alternativa vägar det finns i nätverket. Notera att alla möjliga tripletter i nätverket räknas in i formeln ovan, även de tre tripletterna som finns i en triangel. Följden blir således att klustringskoefficienten alltid är ett tal mellan ett och noll.

Kortaste vägen mellan två noder i ett nätverk är den kortaste väg, räknat i antal länkar, som behöver passeras för att ta sig från den ena noden till den andra (Newman, 2003).

Ett nätverks *diameter* används för att beskriva nätverkets storlek. Diametern för ett nätverk bestäms genom att beräkna den *längsta* av alla *kortaste vägar* som finns mellan två godtyckliga noder i nätverket, även här är längden mätt i antal passerade länkar (Newman, 2003).

4.3. Fysisk modellering vid analys av infrastruktur

En modell som endast baseras på nätverksteori ser endast nätverket ur ett topologiskt perspektiv, dvs. hur olika noder är länkade med andra noder, och så länge två noder har en möjlig väg i nätverket dess emellan så anses båda noderna vara fungerande och/eller i kontakt med varandra. För att undersöka hur sårbart/redundant nätverket är ur ett strikt nätverksperspektiv används mått så som fördelningsfunktion, klustringskoefficient och kortaste vägen i nätverket, vilka förklarats ovan (se exempelvis Holmgren, 2006). För att göra nätverksmodellen mer inriktad på just infrastruktur, och speciellt distributionsinfrastruktur, är det möjligt att implementera fysiska modeller i kombination med nätverksmodellen för att kunna spegla verkligheten och de fysiska beteenden som finns. Dessa fysiska modeller kan vara olika avancerade från att exempelvis ta hänsyn till tryck i ledningar för vattendistribution till att endast särskilja olika noder och länkar beroende på dess fysiska egenskaper, till exempel att vissa rör i vattendistributionsnätet har större diameter och därför

kan transportera mer vatten. I resterande delar av rapporten kommer användningen av dessa fysiska modeller att både benämnas *fysisk modell* och *funktionell modell*, vilket är samma sak.

4.4. Sårbarhetsanalys av infrastruktur

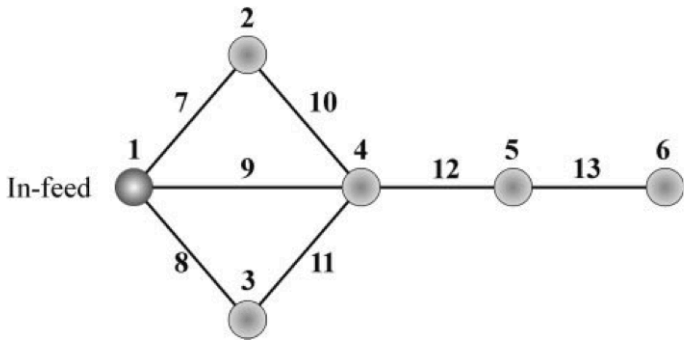
Att utnyttja nätverksteori för att modellera sårbarheten inom infrastruktur började användas först i början av 2000-talet (Amaral & Ottino, 2004). Genom att bygga upp exempelvis distributionsinfrastruktur, så som eldistribution eller vattendistribution, som ett nätverk och analysera de topologiska förhållandena är tanken att viktig information angående nätets robusthet/sårbarhet ska kunna erhållas. I fallet med denna rapport där infrastrukturen är el- och vattendistributionsnätverk består noderna av in- eller utmatningspunkter, förgreningar alternativt viktiga installationer som är av intresse att ha med i modellen och länkarna mellan noderna består av olika typer av ledningar. Viktiga installationer i eldistributionsnätet kan vara exempelvis transformatorer eller ställverk medan det för vattendistributionsnätet kan vara exempelvis tryckstegringspumpar. Anledningen att förgreningar i nätverket representeras med noder är att en länk i ett nätverk inte kan förgrenas utan en nod. Det är också av intresse ur sårbarhetssynpunkt då skadorna kan bli större ifall en förgrening (i nätverksmodellen alltså en nod) går sönder.

Nedan följer fyra begrepp som kommer användas i rapportens empiridel, och som kan ha en ganska mångtydig mening, varför dessa definieras:

- *Komponenter* i ett distributionsnätverk definieras som både länkar och noder inom nätverket vilka kan gå sönder till följd av någon påfrestning mot systemet.
- *Installationer* definieras som komponenter inom nätverket vilka har en tekniskt viktig och ofta automatiserad roll i systemet som exempelvis pumpar, transformatorer eller liknande.
- *Resurser* definieras i denna rapport som olika nödvändigheter en infrastruktur producerar eller levererar till kund. I denna rapports empiridel kommer resurserna som ska distribueras vara vatten och elektricitet eftersom det är ett vatten- och eldistributionsnät som analyseras.
- *Kund* definieras i resterande rapport som det slutliga målet för resurserna, dvs. dit resurserna transporteras för användning. Kunder kan vara ett hushåll, ett sjukhus eller en industri som alla behöver elektricitet och vatten.

Nätverksmodeller i allmänhet följer som sagt en topologisk syn där det är nätverkets uppbyggnad som är det centrala i modellen. En enkel nätverksmodell för att analysera sårbarhet inom distributionsinfrastruktur, exempelvis el- och vattendistribution, plockar bort en eller flera noder och/eller länkar (för att representera ett/flera fel) och mäter sedan vilka noder som förlorat kontakt eller förgreningar mellan varandra (se exempelvis Albert et al, 2004, Salomonsson & Schéele, 2005, och Johansson et al, 2008). I fallet med distributionsnätverk, som exempelvis el- och vattendistribution, används med fördel även olika fysiska modeller som bland annat kan beräkna vilka *utmatningsnoder* som saknar koppling till *inmatningsnoder* (till skillnad från nätverksmodellen som ser alla

noder som homogena). Se Figur 10 för ett exempel med ett litet nätverk. Inmatningsnoder är noder där resurser (vatten alternativt elektricitet i denna rapport) kommer in i distributionsnätverket och utmatningsnoder är där resurserna går ur systemet till kund eller annan slutdestination.



Figur 10 Ett litet exempelnätverk med sex stycken noder, n=6, och sju stycken länkar, m=7. Om exempelvis komponent 1 (en inmatningsnod) fallerar betyder det att distributionen av resurser inte kan nå de andra noderna i nätverket eftersom komponent 1 är den enda inmatningsnoden. Om komponent 4 fallerar (en nod) påverkas förutom komponent 4 själv också noderna 5 och 6 eftersom de inte längre är i förbindelse med inmatningsnoden. Om komponent 9 (en länk) fallerar förlorar inga noder försörjning eftersom det finns alternativa vägar till att nå alla noder. (Johansson et al, 2008, med tillstånd)

I nästa kapitel, 5, förklaras det mer ingående hur den nätverksmodell och den fysiska modell som används i empiridelen av denna rapport fungerar.

4.5. Nätverkets sårbarhet och konsekvensmått

För att kunna bedöma ett systems sårbarhet behövs ett konsekvensmått. Olika risk- och sårbarhetsanalyser kan få helt olika svar beroende på vad som väljs som konsekvensmått, detta eftersom det är en subjektiv uppfattning av verkligheten vad som räknas som konsekvenser och hur stora olika händelsers konsekvenser är (Slovic, 2001). Därför är det viktigt att noggrant överväga vilket konsekvensmått som ska användas under analysen och sedan använda måttet systematiskt under hela processen, samt vara medveten om bristerna med just det konsekvensmåttet.

Ett konsekvensmått kallat *connectivity loss* (*CL*) föreslogs av Albert et al (2004) för att användas på elnät. Albert et al (2004) delade in nätverket i tre olika typer av komponenter: generatorer, distributionsstationer och ledningar. Generatorerna kan ses som en inmatningsnod och distributionsstationerna som en utmatningsnod, enligt denna rapports terminologi. Detta mått definierades som andelen förlorade kontakter mellan generatorer och distributionsstationer, dvs. andelen förlorade förbindelser mellan inmatningsnoder och utmatningsnoder, medelvärdesbildat över alla distributionsstationer.

Det kan dock argumenteras för att varje utmatningsnod inte nödvändigtvis behöver ge upphov till samma konsekvens då den förlorar en förbindelse med en inmatningsnod. Ett annat problem med *CL* är att en utmatningsnod som förlorat *en* förbindelse med en inmatningsnod inte nödvändigtvis behöver sakna matning av resurser och därför inte behöver ge upphov till några konsekvenser så länge den har en annan förbindelse till en annan inmatningsnod. Ett förslag på ett

konsekvensmått liknandes *CL* gavs av Johansson et al (2007a) vilken kallades för *customer equivalent connection loss* (*CECL*). Målet med detta konsekvensmått var att representera konsekvenserna för samhället och inte bara konsekvenserna ur ett nätverksperspektiv. För att beräkna *CECL* ska varje nod som kan slås ut eller förlora matning ges ett *customer equivalent*-värde (*CE*-värde*)* som beskriver hur mycket denna nod är ”värd” för samhället i förhållande till andra noder. Två vanliga mått på detta *CE*-värde är att den antingen speglar antalet personer som förlorar matning av resursen i fråga, alternativt att den speglar hur stor mängd resurser som inte når sin slutdestination (Nyqvist & Ohlson, 2007; Johansson et al, 2007a). Ofta antas ett proportionellt samband mellan *CE*-värdet och antalet personer som förlorat matning av resursen. För att beräkna *CECL* vid en påfrestning av ett nätverk beräknas måttet på de utslagna nodernas *CE*-värde dividerat med nätverkets totala *CE*-värde, där utslagna noder är noder som saknar tillräcklig matning från inmatningsnoder. En ekvation för konsekvensmåttet *CECL* ges nedan:

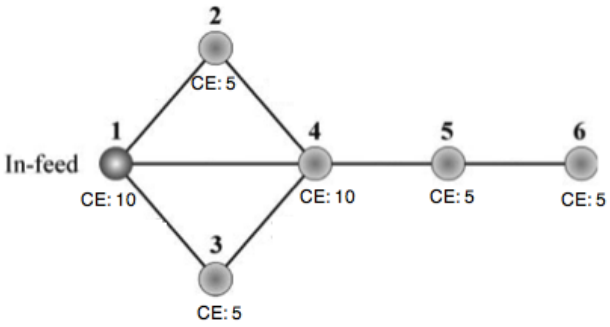
$$CECL = \frac{CE_{utslagna}}{CE_{totalt}}$$

där $CE_{utslagna}$ är *CE*-värdet på alla noder som blivit utslagna under en påfrestning och CE_{totalt} är det totala *CE*-värdet på alla noder i nätverket.

Det är också möjligt med detta konsekvensmått att ge noder kopplade till extra känsliga funktioner i samhället högre *CE*-värde, så som exempelvis sjukhus (Johansson et al, 2007a). Detta är ett sätt att göra noder mer betydelsefulla vilka är kopplade till andra viktiga funktioner eller som har ett beroende med annan infrastruktur utanför det analyserade systemet.

Eftersom *CECL* är ett mått där varje utmatningsnod kan ges individuella konsekvensmått då den inte fungerar tillfredställande anses detta vara ett bra mått på den konsekvens som uppkommer vid olika påfrestningar. För att göra detta systematiskt och inte alltför komplicerat i empiridelen av denna rapport har det valts att basera *CECL* på antalet kunder som förlorar tillgång till vatten eller elektricitet. Att basera *CECL* på antalet kunder är passande vid bostadsområden eller liknande där folk är bokförda, problem uppstår dock vid sjukhus, företag eller industrier där inga personer bor men där det ändå är viktigt att dessa resurser finns. Å andra sidan skulle ett *CECL* baserat på mängden resurser som inte når fram ge sjukhus och industrier ett högt värde ur konsekvenssynpunkt, men ett mindre värde för enstaka personer och bostadshus. Problemet då kan istället grunda sig i att vissa företag eller industrier får oproportionellt höga konsekvensvärden. I denna rapports empiridel kommer som sagt konsekvensmåttet endast att baseras på antalet kunder som förlorar matning av resurser, detta eftersom det inte fanns tillräckligt säkert dataunderlag gällande mängden resurser som används av olika kunder. Om data gällande kunders förbrukning fanns tillgänglig på ett enkelt sätt skulle exempelvis någon typ av medelvärde mellan mängden resurser som inte når fram samt antal kunder som inte får matning kunna användas.

För att ge en bättre förståelse av *CECL* visas ett exempelnätverk nedan, Figur 11, där konsekvensmåttet beräknas:



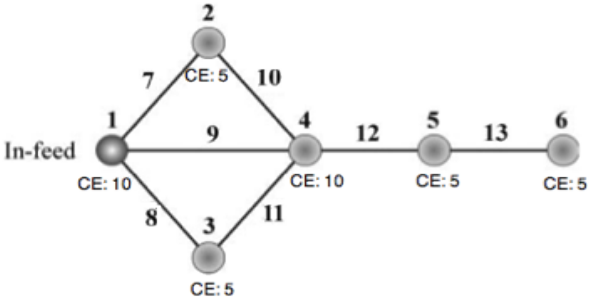
Figur 11 Ett exempelnätverk där varje nod har ett specifikt *CE*-värde. Om komponent 4 fallerar kommer både nod 4, 5 och 6 att förlora matning. *CECL* blir för detta fall 0,5 ((10+5+5)/(10+10+5+5+5+5)=0,5). Om komponent 2 fallerar kommer alla utmatningsnoder fortfarande att vara anslutna med inmatningsnoden förutom nod 2 själv (eftersom den har gått sönder). *CECL* blir för detta fall 0,125 (5/(10+10+5+5+5+5)=0,125). (Bilden omgjord från Johansson et al, 2008)

4.6. Beräkning av synergi i nätverksteori

Vid analys av nätverk kan det vara intressant att veta ifall olika komponenter i ett system har en *synergistisk* effekt då de slås ut samtidigt. En komponent som för sig själv inte orsakar några stora konsekvenser kan i kombination med en eller flera andra komponenter ge upphov till större konsekvenser än vad de skulle orsakat individuellt, vilket är definitionen av *synergi* (Johansson et al, 2008). Synergin för två eller fler komponenter kan beräknas som den extra konsekvensen som uppkommer på grund utav att komponenterna fallerar samtidigt, *synergikonsekvens*, dividerat med den totala konsekvensen orsakat av felet, se formel nedan:

$$synergi = \frac{konsekvens_{synergi}}{konsekvens_{total}}$$

Synergi är alltså den del av konsekvensen som beror på att två eller fler komponenter fallerar samtidigt, istället för individuellt. Se Figur 12 nedan som visar ett exempel på hur synergi kan beräknas för ett system.



Figur 12 Om en av komponent 7, 8 eller 9 slås ut kommer konsekvensen för systemet att vara 0, eftersom det finns alternativa vägar som matar noderna i systemet. Om däremot dessa tre komponenter slås ut samtidigt blir konsekvensen 0,75 ((5+5+10+5+5)/(10+10+5+5+5+5)=0,75). Synergikonsekvensen för detta är också 0,75, eftersom all konsekvens i detta fall beror på synergistiska effekter. Synergin för detta blir således 1 (0,75/0,75=1). Samma resonemang går att föra med exempelvis komponent 2, 3 och 9 då den totala konsekvensen blir samma. Däremot blir i detta fall synergin 0,67 istället för 1 eftersom endast en del av konsekvensen beror på synergistiska effekter (synergikonsekvens: (10+5+5)/(10+10+5+5+5+5)=0,5, synergi: 0,5/0,75=0,67). (bilden omgjord från Johansson et al, 2008)

5. Modellering och simulering av sårbarhet

I detta kapitel beskrivs först olika typer av modeller som används för att analysera sårbarhet inom infrastruktur. Sedan ges en förklaring kring den modell, ISSMA (Interdependent System-of-System Modelling and Analysis), som används för att analysera sårbarheten inom vatten- och eldistributionsnätet i aktuell rapport. Hur nätverket byggs upp med hänsyn till exempelvis beroenden, vilka påfrestningar som analyseras samt viktiga antaganden och begränsningar som följer av modellen tas också upp i detta kapitel.

5.1. Att modellera sårbarhet inom beroende infrastrukturer

Det finns ett antal modeller som används idag för att analysera sårbarhet inom infrastruktur och beroende infrastrukturer. De modeller som behandlar beroende infrastrukturer kan delas upp i två olika huvudkategorier, nämligen empiriska modeller och prediktiva modeller. Empiriska modeller tar information från historiska händelser för att få lärdom om beroenden mellan infrastruktur och konsekvenserna av dessa (se exempelvis Zimmerman & Restrepo, 2006) medan prediktiva modeller försöker ”förutspå” genom modellering och simulering vad som kan hända och vilka konsekvenser olika påfrestningar orsakar med hänsyn till beroenden. Inom kategorin för prediktiva modeller finns bland annat agentbaserade modeller och nätverksmodeller, där en variant på nätverksmodellering är den typ som används i denna rapport. (Johansson, 2010)

När det gäller modeller baserade på nätverksteori har eldistributionsnät analyserats i flertalet verk, bland annat Crucitti et al (2004), Holmgren (2006), Johansson et al (2007 och 2008) och Nykvist & Ohlson (2007). Ett mindre antal verk har skrivits som behandlar nätverksteori och vattendistributionsnätverk, dock inte alls i samma omfattning som det har gjorts med eldistribution. Ett exempel är Dueñas-Osorio et al (2006) som gör en analys av ett vatten- och eldistributionsnätverks sårbarhet mot jordbävningar. Den generella processen av att analysera topologins sårbarhet i ett vattendistributionsnät är i princip den samma som för eldistribution (Johansson, 2010).

Den nätverksmodell som används i denna rapport är en version av den modell som utvecklats och använts av Johansson & Hassel (2010). I nästa avsnitt beskrivs modellen, både angående hur den fungerar, vilka indata som krävs och vad för typ av resultat som erhålls vid simulering.

5.2. ISSMA

ISSMA är en datormodell baserad på nätverksteori som är skriven i datorprogrammet MatLab[1]. Nätverket skrivs in i programmet genom en textkod som enklast skrivs i programmet Excel[2]. Genom att ge varje nod en koordinat och definiera vilka noder som är ihopkopplade med varandra genom länkar kan ett nätverk byggas upp. Att ge noder koordinater som är desamma som de geografiska koordinaterna där komponenten finns, exempelvis koordinater i ett GIS-program (Geografiskt Informations-System), kan vara fördelaktigt då

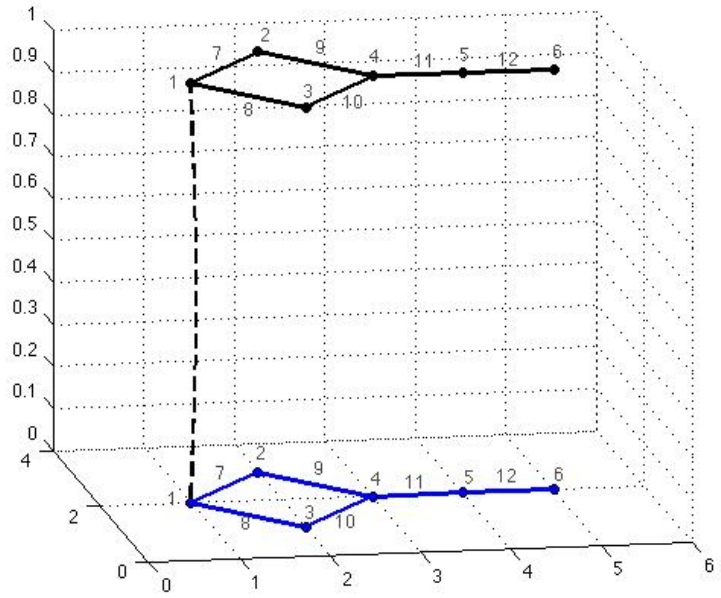
[1] Matlab version 7.10.0.499 (R2010a).
[2] Excel 2008 version 12.2.0.

nätverket kan kopplas ihop med andra system som finns på samma geografiska position (Johansson, 2010). Varje komponent, nod eller länk, ges ett antal data i textfilen: (1) vilken typ av komponent det är, dvs. om det är av intresse för programmet att olika noder/länkar är av olika typ, (2) vilken reparationstid komponenten har, (3) om komponenten initialt i simuleringen ska fungera, (4) om komponenten skall kunna fallera och (5) vilken felfrekvens det är att den fallerar. För noder anges det också (6) om det är en inmatningsnod, och i så fall hur stor kapacitet inmatningsnoden har, dvs. hur stor kapacitet den distribuerar vidare i nätverket, alternativt (7) om det är en utmatningsnod, och i så fall hur mycket kapacitet som den distribuerar vidare utanför nätverket, dvs. hur många kunder som är knutna till den utmatningsnoden och hur stor förbrukning dessa kunder har. (1) till (5) är indata som har med hur användaren vill utföra simuleringen och olika attribut relaterat till olika noder/länkar. (6) och (7) anges i indatafilen eftersom de används för den funktionella modellen (se avsnitt ”Nätverksmodell och funktionell modell” nedan) men de påverkar också hur konsekvensmåttet beräknas.

När dessa indata angetts kan programmet användas för att simulera påfrestningar mot nätverket/nätverken. Att simulera påfrestningar i detta examensarbete görs genom att ta bort komponenter i nätverket, vilket betyder att programmet på olika sätt utsätter systemet för påfrestningar i form av utslagna komponenter och sedan beräknar konsekvensen av just den påfrestningen (Johansson et al, 2010). Mer om detta kommer i det senare avsnittet, ”Olika analysstrategier vid sårbarhetsanalys”.

5.3. Att modellera beroenden

För att analysera två olika beroende nätverkssystem (el- och vattendistribution i detta fall) krävs en nätverksmodell som tar hänsyn till beroenden mellan dessa nätverk. För att på ett systematiskt sätt ”sammanfoga” de två separata nätverken är det upp till användaren av programmet ISSMA att definiera vilka noder i det ena nätverket som har beroenden med det andra. Detta definieras också i textfilen för indata till programmet. Beroendena kan i programmet ses som en typ av länkar mellan dessa två nätverk, vilket fortsättningsvis kallas *beroendelänkar* (Johansson & Hassel, 2010). Vid den utmatningsnod där elnätet försörjer en nod som representerar en pump för vattennätet ska en beroendelänk finnas mellan dessa två noder, vilken då representerar att ifall pumpen förlorar ström kommer den att sluta fungera. I ISSMA kan dessa beroendelänkar definieras att vara riktade eller oriktade, dvs. ömsesidiga beroenden eller enkelberoenden. I exemplet ovan bör beroendelänken alltså vara en riktad beroendelänk för att symbolisera ett enkelberoende mellan elektricitetsförsörjningen och pumpstationen. För att åskådliggöra hur detta modelleras i programmet, se Figur 13 nedan.



Figur 13 Två nätverk med vardera 12 komponenter där en beroendelänk existerar mellan nod 1 i det övre nätverket och nod 1 i det undre. Ifall denna beroendelänk är oriktad (det råder ett ömsesidigt beroende) och nod 1 i antingen det övre eller undre nätverket slås ut, kommer även nod 1 i det motsatta nätverket att sluta fungera, på grund utav beroendet dess emellan.

Beroendelänkar är ett sätt att modellera fysiska, cyber- och logiska beroenden. För att modellera geografiska beroenden används istället komponenters och installationers geografiska koordinater, mer om detta under avsnittet ”Geografisk sårbarhetsanalys”.

I denna rapports empiridel kommer beroendelänkar att framförallt utgöras av riktade länkar från de noder i eldistributionsnätet som försörjer pumpar i vattendistributionsnätet med elektricitet.

5.4. Nätverksmodell och fysisk modell

Modellen ISSMA baseras som tidigare sagt på nätverksteori och fysiska modeller och den analyserar de uppbyggda nätverken baserat på de topologiska och funktionella förhållandena i nätet. De fysiska modellerna i ISSMA finns för att anpassa modellen till analys av infrastrukturer på ett mer reellt sätt. Exempelvis finns det kapacitetsbegränsningar inom distributionsinfrastruktur, antingen att vissa ledningar inte klarar av att distribuera den kapacitet som behövs (rördiametern blir för smal eller elledningar som inte klarar av för höga strömmar) alternativt att det inte finns tillräcklig total kapacitet i systemet för att ”försörja” alla utmatningsnoder (för lite resurser in i systemet leder till att alla kunder inte blir försörjda). ISSMA tar hänsyn till det sistnämnda, medan det förstnämnda är i nuläget en begränsning i modellen. Den del av modellen som beräknar hur mycket kapacitet varje nod skickar alternativt tar emot kallas för den *funktionella* delen av modellen ISSMA. För att en utmatningsnod ska anses fungera behöver den först och främst vara i kontakt med en inmatningsnod via någon väg igenom nätverket (nätverksmodellen). Sedan krävs också att inmatningsnoderna har tillräcklig kapacitet för att försörja utmatningsnoderna till fullo (funktionella delen i modellen). Detta är också en anledning varför man i

indatafilen måste fylla i varje inmatningsnods kapacitet in i systemet och den förbrukning varje utmatningsnods tar ifrån systemet. (Johansson, 2010)

För att beräkna vilka utmatningsnoder som har tillgång till tillräcklig kapacitet från inmatningsnoderna går modellen stegvis igenom topologin från inmatningsnoderna till utmatningsnoderna. Från en inmatningsnod undersöks först alla noder med längd 1 från denna, dvs. alla noder som ligger en länk ifrån. Om kapaciteten räcker för att försörja alla dessa noder fortsätter modellen och beräknar ifall kapaciteten räcker till att försörja alla noder med längd 2 ifrån denna o.s.v. När kapaciteten är förbrukad från alla inmatningsnoder räknas de utmatningsnoder som inte fått tillräcklig matning som ur funktion. Den funktionella modellen i ISSMA beräknar enkelt sagt hur mycket resurser som kommer in i systemet och var dessa kan användas vid utmatningsnoder. Om resurserna inte är tillräckliga eller om det ej finns någon matningsväg till utmatningsnoderna kommer vissa utmatningsnoder inte att kunna distribuera några resurser till kund, varför de räknas som ej fungerande.

Den funktionella modellen i ISSMA är i huvudsak utformad för att beskriva eldistributionsnätets funktion. Den kan dock användas för vattendistributionsnätet med lite ändringar gällande enheter. I eldistributionsnätet anges effekten (volt multiplicerat med ampere) i nätets inmatningsnoder som sedan fördelas till de utmatningsnoder som är i kontakt med inmatningsnoderna, med hänsyn tagen till utmatningsnodernas effektförbrukning. För vattendistributionsnätet anges istället flödet (volym vatten per sekund) som matas in i systemet och som sedan fördelas ut till utmatningsnoderna, med hänsyn till vattenförbrukning.

I ISSMA är den funktionella modellen en relativt enkel beskrivning av systemets reella beteende, då den endast tar hänsyn till in- och utmatningsnoders kapacitet respektive förbrukning av resurser till och från systemet och inte tar hänsyn till begränsningar för länkar (exempelvis dimensioner på vattenrör). Denna typ av modell kan förfinas genom att exempelvis beräkna tryck i ledningarna för vattendistribution och utifrån detta beräkna flöden, för att även exempelvis se till att vissa länkar/ledningar inte kan transportera mer än en viss kapacitet. Ju mer komplicerad den funktionella modellen blir desto mer tidsåtgång krävs vid simuleringarna för att analysera systemets sårbarheter (Johansson, 2010). Mer om detta i avsnittet ”Svårigheter och begränsningar vid modellering och simulering”.

5.5. Olika analysstrategier vid sårbarhetsanalys

Vid simulering och modellering av infrastrukturer för att analysera sårbarheter i dessa system är det fördelaktigt att använda sig av olika typer av *perspektiv* vid analysen. Med detta menas helt enkelt att olika typer av påfrestningar simuleras i modellen, med målet att utföra påfrestningarna på ett systematiskt sätt. Johansson och Hassel (2010) argumenterar för tre olika perspektiv vid sårbarhetsanalys, nämligen *global sårbarhetsanalys*, *kritisk komponentanalys* samt *geografisk sårbarhetsanalys*. Det är viktigt att analysera sårbarheten i ett system på olika sätt för att få kompletterande resultat, vilket är tanken med dessa olika perspektiv (Johansson, 2010). I ISSMA finns möjligheten att utföra analys med hjälp av de tre typerna av sårbarhetsperspektiv ovan, vilket

fortsättningsvis också kommer att kallas för olika *analysstrategier* i denna rapport. Nedan redogörs för var och en av dessa olika analysstrategier med inriktning på hur ISSMA utför dessa samt fördelar och nackdelar förknippade med dem.

5.5.1. Global sårbarhetsanalys

Då man analyserar sårbarhet genom att simulera påfrestningar med olika analysstrategier går dessa generellt ut på att slå ut olika komponenter och därefter beräkna konsekvensen av detta (komponenter är, som beskrivits i kapitlet innan, antingen länkar eller noder i ett nätverk). För global sårbarhet är målet att se hur systemet, antingen ett isolerat system eller ett samberoende system med flera delsystem, reagerar på påfrestningar med olika styrka och omfattning. Detta görs i global sårbarhetsanalys genom att slumpmässigt plocka bort eller slå ut en komponent i systemet, beräkna konsekvensen av detta utefter ett givet konsekvensmått, och sedan slå ut ytterligare en komponent slumpmässigt och beräkna konsekvensen. Detta fortsätter ända tills alla komponenter i systemet är utslagna. Idealt är meningen att utföra denna typ av utslagning på alla möjliga kombinationer av borttagna komponenter, men eftersom beräkningstiden för simulering av detta skulle bli för lång utförs borttagningen slumpmässigt och ofta görs tusentals iterationer för att kunna bilda ett medelvärde av konsekvensen vid slumpmässiga utslagningar. Resultatet från denna simulering kan presenteras i ett diagram som beskriver konsekvensen för systemet som funktion av andelen utslagna komponenter. Konsekvensen kan exempelvis vara hur stor del av systemet som är utslaget eller ett konsekvensmått så som CECL. Utifrån denna typ av diagram kan slutsatser dras hur robust systemet är, och speciellt jämföras med andra typer av system, under förutsättning att konsekvensen för systemen går att jämföra. Ju snabbare konsekvensen för systemet ökar med hänsyn till antal eller andel utslagna komponenter, desto mer sårbart kan systemet anses vara. Se Diagram 1 nedan för ett åskådliggjort exempel. (Johansson, 2010)

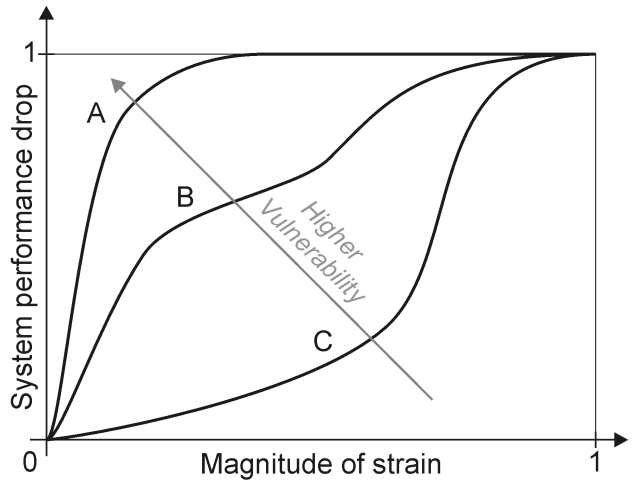


Diagram 1 Ett systems prestationssänkning (en typ av konsekvens) som funktion av en påfrestnings omfattning (exempelvis antalet utslagna komponenter). Ju snabbare systemets prestation sänks vid en ökad påfrestning, desto mer sårbart anses systemet vara. Av de tre linjerna i diagrammet representerar linje A ett system som är relativt sårbart medan C representerar ett relativt robust system. (Johansson, 2010, med tillstånd)

För att ge en bredare uppfattning av sårbarheten för systemet som analyseras är det möjligt att i diagrammet ovan även presentera området där till exempel 90 procent av alla iterationer hamnade och även den maximala och minimala konsekvenskurvan vid iterationerna. Se Diagram 2 nedan som ett exempel:

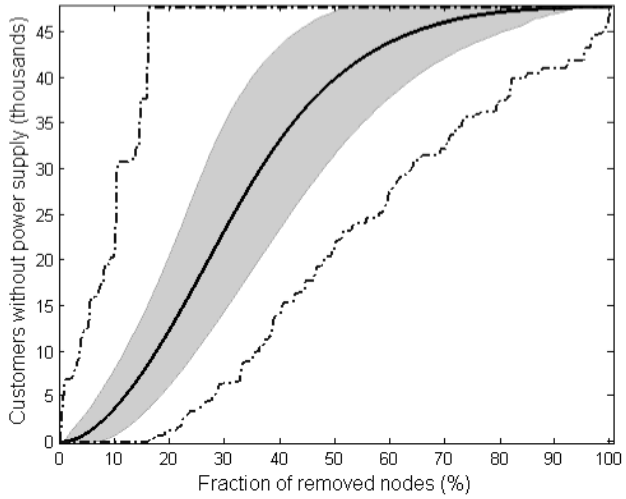


Diagram 2 Antalet kunder utan elektricitet som funktion av antalet utslagna komponenter. Den svarta linjen visar medelvärdet av alla iterationer som gjordes vid denna globala sårbarhetsanalys. Den grå zonen markerar området där 90 procent av alla iterationer hamnade medan de streckade linjerna visar den maximala och minimala konsekvenskurvan vid iterationerna för systemet. (Johansson, 2010, med tillstånd)

Fördelen med global sårbarhetsanalys är att den går relativt snabbt att simulera vid ett fåtal iterationer (hundratals till några tusentals iterationer) och att den ger en generell uppfattning om systemets sårbarhet i stort. Den kan även användas för att jämföra olika systems sårbarhet om konsekvensen är jämförbar. Nackdelen med denna typ av analysstrategi är att borttagningen av komponenter sker slumpmässigt och därför kan analysstrategin missa möjliga viktiga scenarier. Ett annat problem med denna typ av analysstrategi är att det är svårt att tolka utifrån resultatet *var* i systemet sårbarheterna ligger. Eftersom analysstrategin visar sårbarheten för systemet i stort är det svårt att veta var åtgärder ska placeras för att göra systemet mer motståndskraftigt.

5.5.2. Kritisk komponentanalys

Tanken med analysstrategin kritisk komponentanalys är att identifiera komponenter som är *kritiska* för systemet. En komponent eller en mängd komponenter som är kritiska definieras som komponenter vars bortfall orsakar stora konsekvenser för systemet. Ju högre konsekvens bortfallet av dessa komponenter orsakar, desto mer kritiska anses dessa komponenter vara (Johansson et al, 2008).

Vid analysstrategin kritisk komponentanalys simuleras ett bortfall av en komponent eller ett *komponentset* i systemet. Ett komponentset är en mängd komponenter i systemet, vilket kan vara olika stort till antal komponenter räknat, exempelvis två komponenter. Ett *felset* är det specifika komponentset som fallerat. När denna komponent eller felset slagits ut beräknas konsekvensen, utefter ett givet konsekvensmått. Genom att beräkna konsekvensen för alla möjliga felset med en viss storlek, kan de komponenter och komponentset som

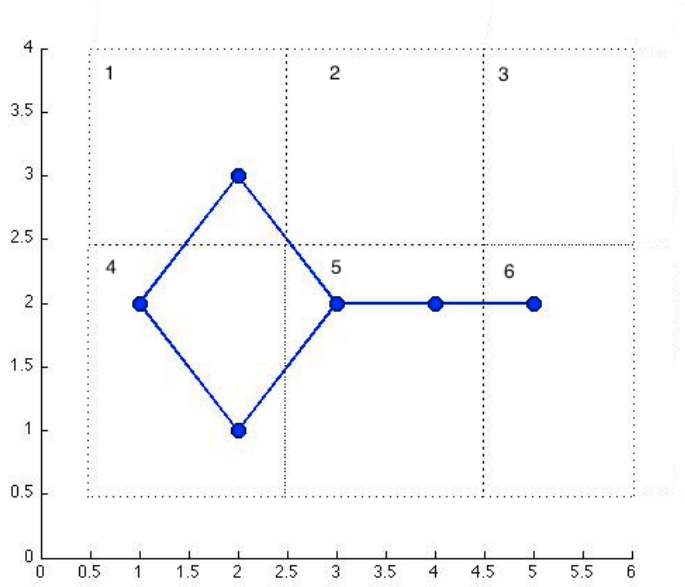
är mest kritiska för systemet identifieras (Johansson, 2010). En analogi finns med uttrycket N-1, vilket betyder ett bortfall av en komponent i ett system. Med analysstrategin kritisk komponentanalys kan även N-2, N-3 och så vidare undersökas systematiskt (Johansson, 2010). Som nämnts tidigare brukar många system byggas för att alltid klara ett bortfall av en komponent, N-1, utan att några konsekvenser ska inträffa. Det argumenteras av Johansson (2010) för att även fel i högre grader, N-*k* där *k*>1, bör analyseras för att på ett mer komplett sätt analysera ett systems sårbarhet.

Genom denna metod kan även komponenters synergieffekter tas med i beräkningarna. I vissa fall kan det vara ganska enkelt att intuitivt förstå vilka enstaka komponenter som är mest kritiska för ett system, men vilka komponentset som är mest kritiska brukar vara mer komplext, speciellt med hänsyn till synergi. En komponent som inte är kritisk för sig själv kan i kombination med andra komponenter ge ett väldigt kritiskt felset. För de olika komponentseten kan det i ISSMA redovisas hur stor del av konsekvensen som beror på synergistiska effekter. (Johansson, 2010)

Fördelen med denna typ av analysstrategi är att den kan beräkna och åskådliggöra vilka komponenter och komponentset i ett system som är kritiska. Genom detta kan värdefull information fås gällande exempelvis vilka komponenter som bör vara mest motståndskraftiga i systemet, eftersom de är de komponenter och komponentset som om de fallerar ger upphov till stora konsekvenser. Denna fördel gör denna analysstrategi till ett bra komplement till global sårbarhetsanalys. En nackdel med denna analysstrategi är tidsåtgången vid analys av större felset, varför felset större än tre sällan studeras, mer om tidsåtgång vid simulering i avsnittet ”Svårigheter och begränsningar vid modellering och simulering”.

5.5.3. Geografisk sårbarhetsanalys

Geografisk sårbarhetsanalys är en analysstrategi vars mål är att fånga de sårbarheter i ett system som uppkommer på grund av komponenters geografiska position. Denna analysstrategi kan också användas för att analysera sårbarheter på grund utav geografiska beroenden mellan olika infrastrukturer (Johansson, 2010). Fysiska, cyber- och logiska beroenden modelleras genom att använda beroendelänkar mellan noder. Däremot modelleras inte geografiska beroenden på detta sätt, utan modelleras istället genom att varje komponent har koordinater som anger dess position. Dessa koordinater används vid geografisk sårbarhetsanalys och tanken är att utföra en påfrestning på alla komponenter inom en specifik area. Detta görs genom att hela nätverket fördelas upp i celler med en viss storlek och geometri, och inom varje cell utsätts komponenterna för en påfrestning och konsekvensen för systemet beräknas (Johansson, 2010). För att göra detta komplett måste olika storlekar på cellerna användas och gärna olika geometriska former. Denna typ av analysstrategi kan exempelvis representera en naturkatastrof, som en storm eller jordbävning, eller en bomb som placerats av terrorister som momentant slår ut flera komponenter inom en area. Se Figur 14 nedan för ett exempel på ett nätverk som delats upp i celler.



Figur 14 Ett nätverk uppdelat i 6 olika celler. Alla komponenter som tillhör en cell antas fallera ifall den cellen blir attackerad. Om exempelvis cell 1 blir attackerad kommer den nod och de två länkar som befinner sig i denna cell att gå sönder, dvs. noden med koordinater (2,3) och de två länkar som tillhör denna nod.

I modellen ISSMA sker geografisk sårbarhetsanalys i nuläget genom att nätverket delas upp i kvadratiska celler, vilka kan vara av olika storlek. Alla komponenter inom den specifika cellen slås ut varpå konsekvensen för detta beräknas för infrastrukturerna. Detta görs sedan för alla olika celler som nätverket delats upp i. Det går även i ISSMA att göra detta med fler celler samtidigt, dvs. genom att låta exempelvis två olika celler slås ut samtidigt i nätverket och sedan beräkna konsekvensen. Detta görs för alla möjliga kombinationer av celler, i likhet med N-2 vid kritisk komponentanalys. (Johansson & Hassel, 2011)

Fördelen med denna typ av analysstrategi är att komponenters geografiska position spelar roll och geografiska beroenden kan således analyseras. Denna analysstrategi kan därför modellera möjliga effekter av viktiga riskkällor så som exempelvis naturkatastrofer vars påfrestning sker mot ett område och inte mot specifika eller slumpmässiga komponenter. Detta gör att denna analysstrategi kompletterar de andra två analysstrategierna. För att representera naturkatastrofer med denna analysstrategi krävs dock att större områden studeras, eftersom stora celler i små nätverk självfallet ger stora konsekvenser. Syftet med denna analysstrategi är att hitta geografiska områden vilka är kritiska för systemet. Detta blir självfallet mer komplext när flera olika beroende system analyseras.

5.6. Analysstrategier vid beroende infrastrukturer

När det gäller global sårbarhet finns olika tillvägagångssätt gällande hur komponenter från olika infrastrukturer kan slås ut. Det är möjligt att i modellen endast slå ut komponenter från en enda infrastruktur och mäta konsekvenserna för hela systemet, dvs. mäta konsekvensen för infrastrukturen som attackeras men också all annan infrastruktur som är beroende av denna. Det är också möjligt att attackera komponenter från olika infrastrukturer slumpmässigt och därefter se till konsekvensen för hela systemet. Det samma gäller för kritisk

komponentanalys. Antingen kan hela felsetet vara från en infrastruktur, exempelvis två elledningar och en transformator i eldistributionsnätet, och därefter analyseras konsekvensen för både den infrastrukturen där felsetet härstammar men också den infrastruktur som är beroende. Alternativt kan felsetet bestå av komponenter från olika beroende infrastrukturer, exempelvis en pump i vattennätet och en elledning i elnätet, och analysera konsekvensen av detta. Liknande angreppssätt kan användas vid analys av geografisk sårbarhet då olika infrastrukturer och komponenter kan väljas att slås ut baserat på deras geografiska position. Även vilket infrastruktursystem komponenterna tillhör och om de exempelvis är nedgrävda eller finns över mark kan tas hänsyn till vid geografisk sårbarhetsanalys, vilket kan vara intressant beroende på om det är en storm eller en jordbävning som är den påfrestning som analyseras.

I denna rapports empiridel kommer global sårbarhetsanalys att genomföras med påfrestningar på vatten- och eldistributionsnätet enskilt samt på båda infrastrukturerna samtidigt. Samma sak gällande kritisk komponentanalys, där alla felset med en viss storlek kommer att analyseras, både då hela felsetet är från ett enskilt system och då komponenter i felsetet är från båda infrastrukturerna. Detta kan ge värdefull information gällande rapportens tredje frågeställning; ”Vad är skillnaden vid analys av ett infrastruktursystem oberoende av andra jämfört med analys av infrastruktur som är beroende?”. För geografisk sårbarhetsanalys kommer endast komponenternas geografiska position att tas hänsyn till, och inte vilket infrastruktursystem de tillhör.

5.7. Svårigheter och begränsningar vid modellering och simulering

Vid modellering och simulering av sårbarheter för samberoende infrastruktur finns ofta ett antal antaganden, begränsningar och avgränsningar som måste göras för att modellen inte ska bli alltför komplex och simuleringstiden inte alltför lång, även så för ISSMA. Modellering av infrastruktur är en komplicerad vetenskap eftersom så många komponenter finns i systemet och om modellen ska likna verkligheten så långt som möjligt blir modellen också ofta väldigt komplex då många olika variabler måste tas med. Det är viktigt att användaren förstår modellen som han/hon använder och kan tolka resultatet som modellen genererar på ett vetenskapligt sätt. En av anledningen till att modellera något är att verkligheten är för komplex varför man vill skapa en förenklad bild, men ändå så korrekt som möjligt, av denna och därigenom kunna dra slutsatser. Därför är inte alltid en avancerad modell den bästa, eftersom den i sig kan bli komplex och svår att tolka. Nedan beskrivs några av de inslag som gör modellering och simulering av infrastruktur svår, och det beskrivs om och i så fall hur detta behandlas i ISSMA.

5.7.1. Reparationstid och buffert

Reparationstid för komponenter går att ange i ISSMA. Det som är svårt är att bedöma reparationstiden för olika komponenter vid flera simultana fel. Eftersom det ofta endast finns begränsade resurser vid reparation, exempelvis reservdelar och personal, gör detta att större påfrestningar och fel i ett system leder till längre reparationstid (Wilhelmsson & Johansson, 2009). Detta är något som ISSMA inte tar hänsyn till, varför detta blir en begränsning i modellen.

Buffertar, så som reservgeneratorer, gör också modellering av infrastruktur mer komplex, då ytterligare en variabel tillkommer. Om exempelvis en pump i vattendistributionsnätet inte får elektricitet från elnätet kan konsekvensen av detta till stor del undvikas om en fungerande reservgenerator är installerad till pumpen. Detta gäller så länge reservgeneratorn har tillgång till drivmedel, vilket betyder att om inte pumpen repareras innan reservgeneratorns drivmedel tar slut kommer konsekvenser fortfarande att uppkomma. Detta kan i sin tur kopplas till reparationstid. ISSMA kan ta hänsyn till buffertar, men endast om analysen görs tidsberoende vilken den inte görs i denna rapport. Vid sårbarhetsanalys där reservkraft tas med i analysen bör det även tänkas på att reservkraft också har en felsannolikhet att inte starta när de väl behövs, exempelvis vid tekniskt fel eller redan tomma drivmedelstankar.

5.7.2. Binära fel för komponenter

När olika analysstrategier simuleras i ISSMA utsätts systemet för påfrestningar i form av att komponenter ”tas bort” eller ”attackeras” och då räknas de som att dessa komponenter gått sönder eller fallerat. Ur nätverkssynpunkt bryts nätverket i dessa punkter och resurser kan inte transporteras där. Ifall den nod som fallerat är en inmatningsnod kommer systemet att få en möjlig brist på resurser, vilket tas hänsyn till i den funktionella modellen. Varje komponent har i ISSMA alltid en binär ”status”, antingen fungerar den eller så fungerar den inte. I verkligheten behöver inte detta vara sant. Om till exempel en rörledning i vattenledningsnätet skadas kan konsekvensen bli att en del av flödet i ledningen stryps medan resterande fortfarande kan transporteras vidare genom ledningen. Detta är i nuläget en begränsning vid användning av ISSMA då komponenter endast kan vara ”på” (fungera) eller ”av” (ej fungera).

5.7.3. Simuleringstid

En speciellt viktig begränsning vid simulering av de olika analysstrategierna är dess tidsåtgång för stora system. Eftersom global sårbarhetsanalys endast plockar bort komponenter slumpmässigt tills alla komponenter är bortplockade beror dess simuleringstid på hur många iterationer som körs och antalet komponenter. Att plocka bort alla komponenter från ett system med samtliga möjliga kombinationer är i princip en omöjlighet idag sett till tidsåtgången, varför det idag utförs med slumpmässig bortplockning. Antalet kombinationer som finns då alla komponenter ska plockas bort från ett system med totalt n komponenter, med hänsyn till ordningen komponenterna plockas bort i, blir:

$$kombinationer = n!$$

Ett enkelt exempel för ett system med endast 15 komponenter ger cirka $1{,}3 \cdot 10^{12}$ antal kombinationer (scenarier) som ska utvärderas. Redan små infrastruktursystem innehåller tusentals komponenter vilket gör att det blir nödvändigt ur tidssynpunkt att välja ut slumpmässiga scenarier som förhoppningsvis täcker scenariorymden väl.

Vid simulering av kritisk komponentanalys blir antalet kombinationer för ett system beroende på hur stora felset som undersöks och hur många komponenter som finns i systemet. Antalet kombinationer att undersöka vid denna typ av analysstrategi för fallet N-k blir:

$$kombinationer = \frac{n!}{(n-k)!k!}$$

där n är antalet komponenter i systemet och k är storleken på det felset som studeras. Även här blir antalet kombinationer väldigt stort då k blir större än två. Ett exempel med ett infrastruktursystem på 800 komponenter, n=800, och vid undersökning av felset med storleksordning tre, k=3, ges antalet kombinationer till ungefär 85 miljoner. Detta endast för analys av alla scenarier för kritisk komponentanalys där storleksordningen på felsetet är 3, N-3 (Johansson, 2010). Om felsetet ökas till fyra för samma system blir antalet kombinationer av kritiska komponentset flera miljarder.

Även den funktionella modellen i ISSMA kan göras mer avancerad, som tidigare nämnts. Detta skulle leda till att tidsåtgången skulle öka för beräkningen av ett scenario då en komponent eller komponentset tas bort. Vid modellering och simulering ställs alltid tidsåtgång mot modellens komplexitet och därför också möjligheten till en bättre naturtrogenhet (Johansson, 2010). I detta arbete finns det en begränsad tidsram och datorkraft vid simulering, varför avgränsningar kring antalet scenarier som kan analyseras och hur avancerad den funktionella modellen kan vara måste göras för att få acceptabla simuleringstider.

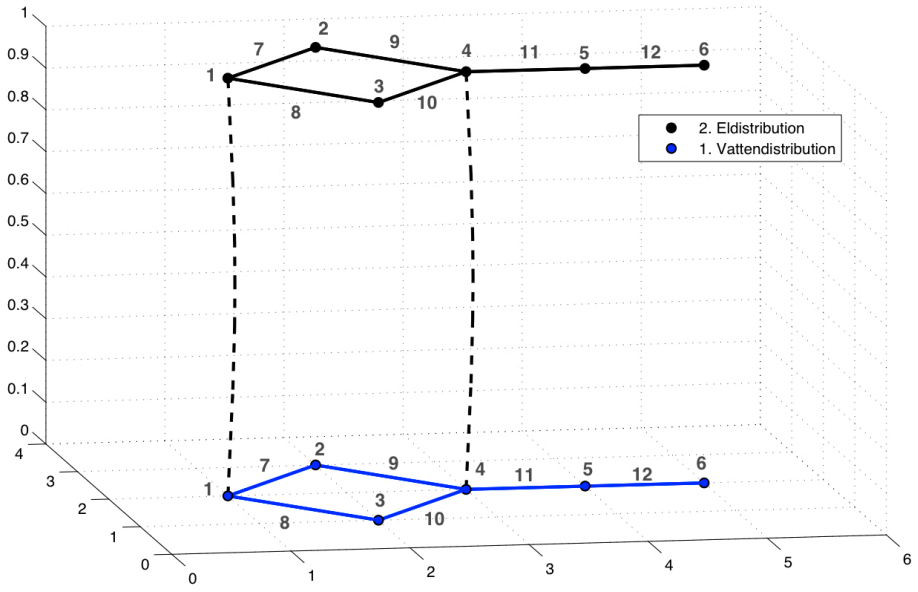
6. Sårbarhetsanalys av ett testnätverk

I detta kapitel utförs en sårbarhetsanalys med hjälp av modellen ISSMA på ett mindre testnätverk. Detta görs för att läsaren ska få en förståelse för hur analysen fungerar och själv kunna förstå tankegången från simulering till resultat. Det är författarens tro att det är nyttigt att först se exempel med små lätthanterliga nätverk innan analys utförs på större och mer komplexa nätverk, eftersom resultatet inte kan tolkas intuitivt för dessa. Den analys som utförs i detta kapitel är väldigt lik den som ska utföras i nästa kapitel, kapitel 7, där ett riktigt el- och vattendistributionsnätverk analyseras. Först i detta kapitel beskrivs hur testnätverket är uppbyggt samt vilka antaganden och modelleringsval som gjorts i modellen. Sedan presenteras resultaten från simuleringarna med de olika analysstrategierna och resultaten från testnätverket kommenteras och diskuteras kort.

6.1. Testnätverkets uppbyggnad

Testnätverket som används är helt påhittat av författaren i tro om att det på ett bra sätt kan beskriva hur nätverksmodellen ISSMA fungerar och ge en bra förståelse för hur de olika analysstrategierna fungerar samt vilken typ av resultat som genereras av dessa och hur de kan tolkas. Testnätverket är uppdelat i två olika separata nätverk med två beroendelänkar dess emellan. För att få en verklighetsförankring och för att likna de infrastruktursnätverk som analyseras i nästkommande kapitel representerar dessa två nätverk ett vatten- och ett elektricitetsdistributionstestnät. Vardera nätverk har sex noder och sex länkar och de är uppbyggda på samma topologiska sätt. Varje komponent har ett komponentnummer, vilket i detta testnätverk är ett nummer mellan 1 till 12 för varje nätverk, se Figur 15. Komponent 1 till 6 i varje nätverk består av noder medan komponent 7 till 12 är länkar mellan dessa. Det testnätverk som ska studeras består alltså av två mindre ”subnätverk” som symboliserar ett vatten- och ett eldistributionstestnät. På grund av detta är det viktigt med ett ”system i system”-tänkande.

Vid nod 1 och nod 4 i vattendistributionstestnätet finns en pump på respektive position, vilka är beroende av elektricitet från eldistributionsnätet. Detta representeras av att det från eldistributionsnätets nod 1 och nod 4 (övre nätverket i Figur 15) går två riktade beroendelänkar till nod 1 och nod 4 i vattendistributionsnätet (nedre nätverket i Figur 15), respektive. Ifall exempelvis nod 4 i eldistributionstestnätet inte får matning av elektricitet eller går sönder kommer även nod 4 i vattendistributionsnätet att slås ut eftersom den inte får elektricitet och därför inte kan pumpa vidare vatten.



Figur 15 Testnätverkets uppbyggnad. 6 noder och 6 länkar per "subnätverk", totalt 24 komponenter för både eldistributionsnätet och vattendistributionsnätet tillsammans.

Nod 1 i båda nätverken är inmatningsnoder och det är där vatten respektive elektricitet pumpas/matas in i systemen. Alla noder räknas också som utmatningsnoder och har ett CE-värde på 1, detta för att göra analysen så lättförståelig som möjligt.

6.2. Sammanfattning av val vid modellering av testnätverket

Som det beskrivits i förra kapitlet måste ett antal val göras vid simulering i ISSMA. Dessa val och de olika förutsättningar som ligger till grund för de testsimuleringar som görs sammanfattas nedan:

- De analysstrategier som genomförs på testnätverket är de som beskrivits i kapitel 5; global sårbarhetsanalys, kritisk komponentanalys och geografisk sårbarhetsanalys.
- Två nätverk studeras som tillhör ”testnätverket”. De symboliserar vatten- respektive eldistributionstestnätverk och består av 12 noder vardera, se Figur 15.
- Två riktade beroendelänkar finns mellan dessa två nätverk, från eldistributionstestnätverket till vattendistributionstestnätverket.
- Nod nummer 1 är inmatningsnod för både eldistributionsnätverket och vattendistributionsnätverket och de har tillräcklig kapacitet för att försörja alla övriga noder med elektricitet respektive vatten.
- Alla komponenter i de två nätverken kan fallera och i den globala sårbarhetsanalysen har alla komponenter samma sannolikhet att fallera vid slumpmässig utslagning.
- Varje nod har ett CE-värde på 1 och alla noder är därför lika mycket värda.

- Länkars kapacitetsbegränsningar tas ej hänsyn till. Endast kapaciteten för in- och utmatningsnoder behandlas i den funktionella modellen (beskriven i kapitel 5).
- Endast *direkta* konsekvenser studeras. I detta testnätverk finns inga buffertar eller reservsystem och komponenters reparationstid tas inte hänsyn till. Det som mäts är därför den direkta konsekvens som uppkommer i infrastruktursystemen vid påfrestningar. En följd av detta är att simuleringarna som utförs *inte* är tidsberoende.

För att göra dessa simuleringar av testnätverket så lika de analyser som ska göras i nästkommande kapitel görs analys av vatten- och eldistributionstestnätverken både separat och tillsammans, dvs. analyserna görs både utan beroenden då beroendelänkar inte tas hänsyn till och med beroenden då de två nätverken är ihopkopplade med beroendelänkar.

6.3. Simuleringsresultat för testnätverket

I denna del presenteras resultaten av de olika analysstrategier som genomförts på testnätverket; global sårbarhetsanalys, kritisk komponentanalys samt geografisk sårbarhetsanalys.

6.3.1. Resultat för global sårbarhetsanalys

För den globala sårbarhetsanalysen utförs tre olika simuleringar i ISSMA med 1000 iterationer vardera. Alla resultat som presenteras är medelvärden av dessa 1000 iterationer. Vid den första simuleringen plockas komponenter slumpmässigt bort från vattendistributionstestnätet, dvs. endast komponenter från vattendistributionstestnätet kan fallera, och konsekvensen för båda nätverken mäts. I den andra simuleringen plockas komponenter slumpmässigt bort från eldistributionstestnätet och konsekvensen för båda nätverken mäts. Vid dessa två simuleringar kan de två nätverkens sårbarhet mätas oberoende av varandra (detta fungerar eftersom de beroendelänkar som finns mellan el- och vattendistributionstestnätet endast är enkelberoenden från el- till vattennätet, varför ett fel i det ena systemet inte kan spridas till det andra systemet och sedan igen tillbaka till det första). I den sista simuleringen plockas komponenter från båda distributionstestnätverken bort slumpmässigt och konsekvensen mäts sedan för båda nätverken.

Konsekvensmåttet har för den globala sårbarhetsanalysen valts att mätas i CECL, dvs. det utslagna CE-värdet dividerat med det totala CE-värdet för nätverket. Detta görs eftersom det är smidigare att jämföra två olika nätverk med olika totala CE-värden i samma diagram då CE-värdet normeras, vilket är fördelaktigt i nästa kapitel då det verkliga vatten- och eldistributionsnät som studeras inte har exakt samma totala CE-värde och inte heller samma antal komponenter.

Resultaten av de första två simuleringarna visas i de följande tre diagrammen nedan. Diagram 3 visar konsekvensen mot vattendistributionstestnätet (mätt i CECL) som funktion av andel utslagna komponenter från vatten- respektive eldistributionstestnätet. Den blå streckade linjen visar den globala sårbarheten för vattendistributionstestnätet då komponenter plockas bort från vattendistributionstestnätet en i taget, dvs. den globala sårbarheten för vattennätet oberoende av elnätet. Den svarta heldragna linjen visar sårbarheten

för vattendistributionstestnätet då komponenter plockas bort från eldistributionstestnätet, dvs. den globala sårbarheten för vattennätets beroende av elnätet.

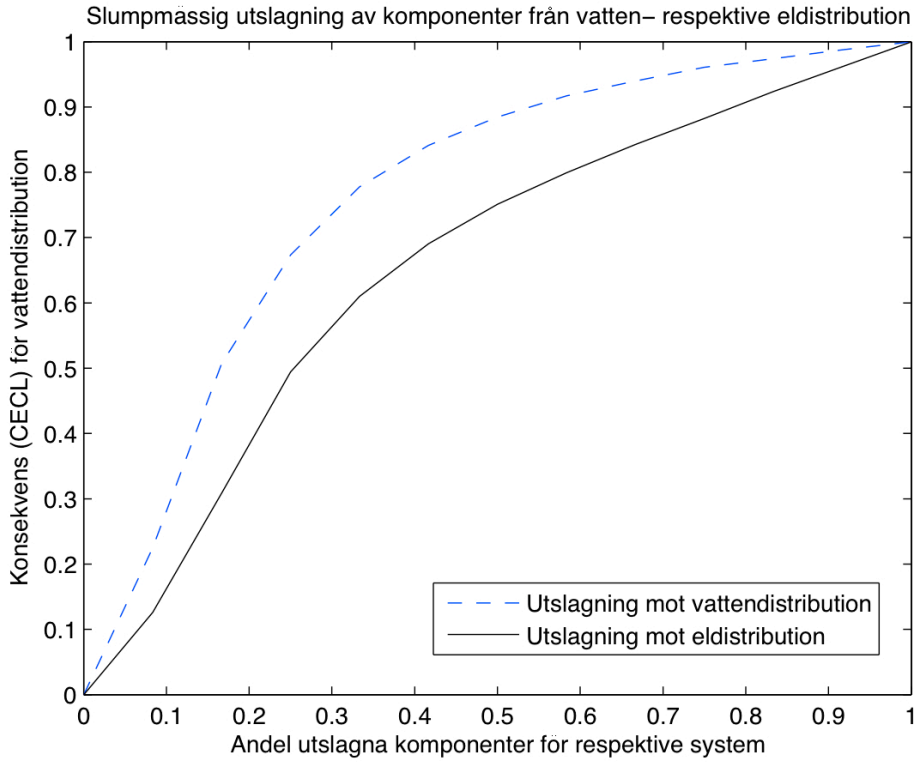


Diagram 3 Konsekvens för vattendistributionstestnätet mätt i CECL som funktion av andelen utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionstestnätet. Eftersom vatten- och eldistributionstestnätet består av 12 komponenter vardera kan värdet på X-axeln multipliceras med 12 om den ska visa antalet utslagna komponenter istället för andel. Eftersom vatten- och eldistributionstestnätet har vardera ett totalt CE-värde på 6 kan värdet på Y-axeln multipliceras med 6 om den ska visa det utslagna CE-värdet istället för utslagen andelen uttryckt i CECL.

I Diagram 3 ovan går det att avläsa från den blåa streckade linjen hur sårbart vattendistributionstestnätet är oberoende av eldistributionstestnätet. Eftersom den blåstreckade linjen har en konkav form kan slutsatsen dras att vattendistributionstestnätet är relativt sårbart ur ett globalt perspektiv, jämfört med om linjen skulle varit mer linjär. Ju mer konkav och tilltagande linjen är desto snabbare förlorar vattendistributionstestnätet sin funktion i och med att komponenter slås ut i det systemet. Med tanke på att detta testnätverk inte är särskilt redundant stämmer detta med teorin. Den svarta heldragna linjen visar att det finns ett riktat beroende från eldistributionstestnätet till vattendistributionstestnätet, dvs. att vattendistributionstestnätet är beroende av eldistributionsnätet. Ju mer konkav denna linje är desto kraftigare är beroendet från el- till vattendistributionsnätet eftersom det visar på att vattendistributionstestnätets funktion avtar snabbt då komponenter slås ut i eldistributionstestnätet.

Diagram 4 visar i princip samma sak som Diagram 3 med skillnaden att den fokuserar på konsekvensen för eldistributionstestnätet, dvs. konsekvensen för eldistributionstestnätet som funktion av andelen utslagna komponent från

vattendistributionstestnätet respektive eldistributionstestnätet. Den svarta heldragna linjen visar den globala sårbarheten för eldistributionstestnätet då komponenter plockas bort från eldistributionstestnätet en i taget, dvs. den globala sårbarheten för elnätet oberoende av vattennätet. Den blå streckade linjen visar sårbarheten för eldistributionstestnätet då komponenter plockas bort från vattendistributionstestnätet, dvs. den globala sårbarheten för elnätets beroende av vattennätet.

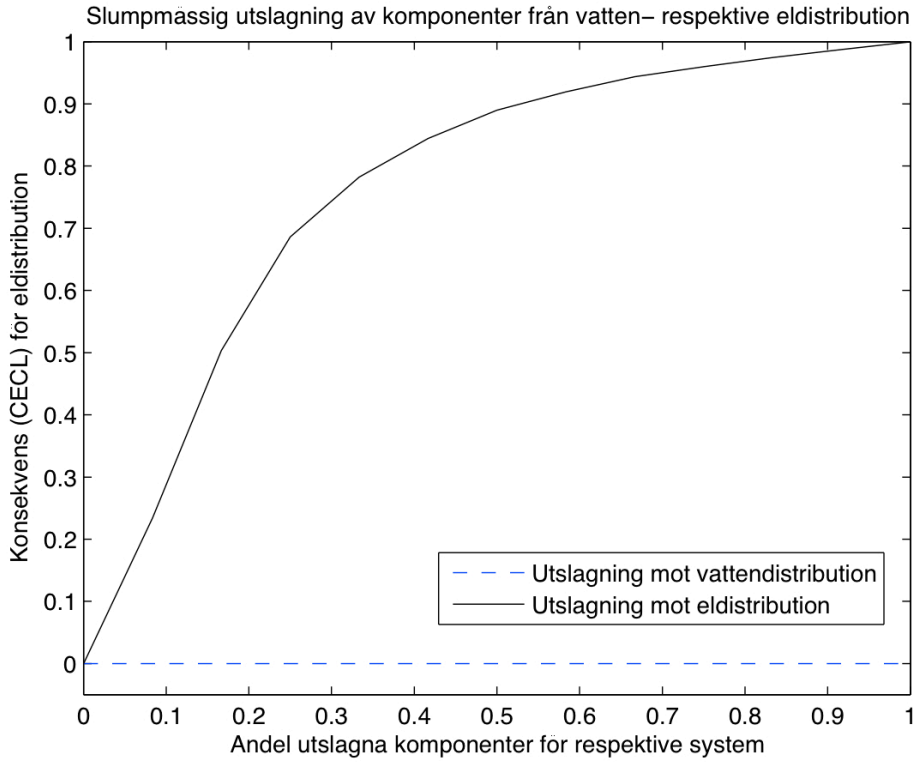


Diagram 4 Konsekvens för eldistributionstestnätet mätt i CECL som funktion av andelen utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionstestnätet.

Ur Diagram 4 ovan är det möjligt att dra samma slutsatser som i Diagram 3 med skillnaden att det är eldistributionstestnätets sårbarhet som representeras av den svarta heldragna linjen och eldistributionstestnätets beroende av vattendistributionstestnätet som beskrivs av den blå streckade linjen. Eftersom beroendelänkarna i detta testnätverk är riktade från eldistributionstestnätet till vattendistributionstestnätet blir den blå streckade linjen i Diagram 4 en nollmängd (med hänsyn till arean under linjen), dvs. inget beroende råder från vatten- till eldistributionstestnätet. Om Diagram 3 jämförs med Diagram 4 kan slutsatsen dras att vatten- och eldistributionstestnätet oberoende av varandra är precis lika sårbara. Detta förefaller logiskt då båda nätverkens topologi och funktionella beteende, utan beroenden, är identiska.

Diagram 5 visar konsekvensen för hela testnätverket om påfrestningar endast drabbar antingen eldistributionstestnätet eller vattendistributionstestnätet. Om de två blå streckade linjerna i Diagram 3 och Diagram 4 läggs ihop med superposition (dvs. $f_1(x)+f_2(x)=f_3(x)$) fås alltså den globala konsekvensen för hela testnätverket då endast komponenter från vattendistributionstestnätet slås ut

slumpmässigt en i taget. På samma vis fås den globala konsekvensen för hela testnätverket då endast komponenter från eldistributionstestnätet slås ut slumpmässigt om de två svarta heldragna linjerna från Diagram 3 och Diagram 4 läggs ihop med superposition. Den blå streckade linjen i Diagram 5 visar alltså den totala konsekvensen som funktion av bortplockade komponenter från vattendistributionstestnätet. För att presentera resultaten på ett enkelt sätt har det valts att varje system i testnätverket, vattendistributionstestnätet och eldistributionstestnätet, var för sig har en maximal konsekvens av 1 mätt i CECL (som i de tidigare diagrammen). Den maximala totala konsekvensen för *båda* nätverken mätt i CECL blir således 2. Eftersom vattendistributionstestnätet inte kan påverka eldistributionstestnätet då det slås ut blir den totala möjliga konsekvensen 1 för den blå streckade linjen i Diagram 5. Den svarta heldragna linjen i Diagram 5 visar den totala konsekvensen mot testnätverket som funktion av bortplockade komponenter från eldistributionstestnätet och som diagrammet visar blir denna konsekvens mätt i CECL maximalt 2.

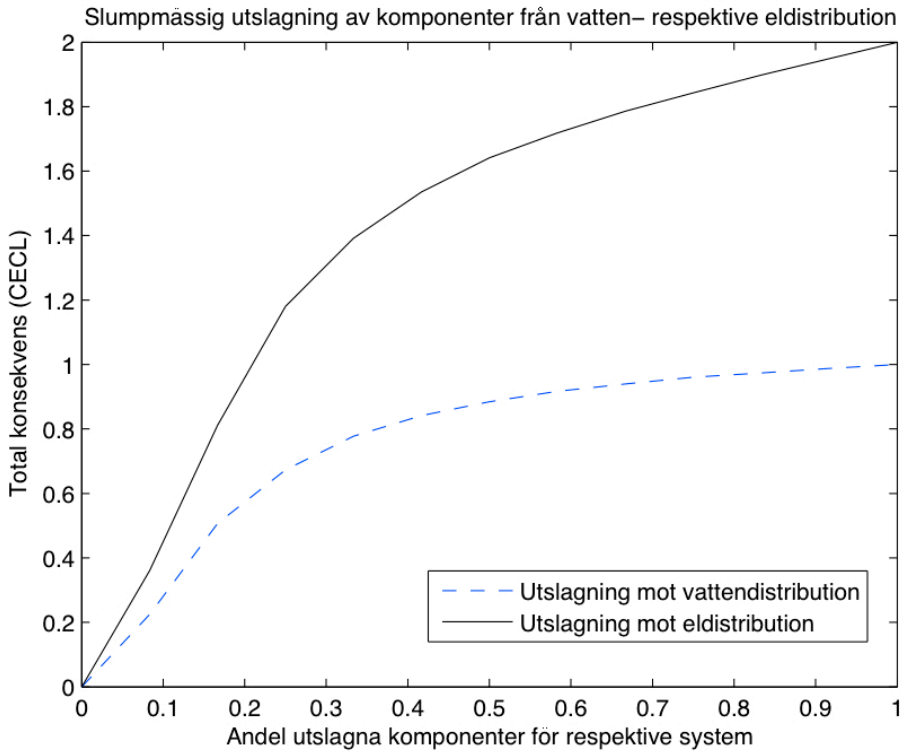


Diagram 5 Total konsekvens för både vatten- och eldistributionstestnätet mätt i CECL som funktion av andelen utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionstestnätet.

Ur Diagram 5 kan slutsatsen dras att utslagna komponenter i eldistributionstestnätet i medeltal ger större konsekvenser över hela testnätet än utslagna komponenter från vattendistributionstestnätet, vilket kan härledas till beroendena mellan systemen. Då eldistributionstestnätverket slås ur påverkas även vattendistributionstestnätet, men inte tvärt om. Detta är ett bra exempel på hur beroende infrastrukturer kan orsaka högre konsekvens än oberoende infrastrukturer. Tack vare beroendet i detta testnätverk blir konsekvensen dubbelt så stor då komponenter slås ut från

eldistributionstestnätverket jämfört med då komponenter slås ut från vattendistributionstestnätverket.

För den sista simuleringen, då komponenter från både vatten- och eldistributionstestnäten slogs ut slumpmässigt, åskådliggörs resultatet i diagrammet nedan. Den blå streckade linjen och den svarta heldragna linjen i Diagram 6 visar konsekvensen för respektive system som funktion av andelen utslagna komponenter. Den blå linjen representerar konsekvensen för vattendistributionsnätet som funktion av bortplockade komponenter från *både* vatten- och eldistributionstestnätverket. Den svarta linjen representerar konsekvensen för eldistributionstestnätverket på samma sätt. Eftersom det är konsekvensen för respektive system som beskrivs på Y-axeln blir denna maximalt 1, enligt CECL. Om dessa två linjer (den blå streckade och den svarta heldragna) läggs ihop med superposition kan konsekvensen för hela testnätverket, dvs. som ett enda stort system, beskrivas som funktion av andel utslagna komponenter. Detta är vad den röda streck-prickade linjen beskriver, och eftersom konsekvensen för både vatten- och eldistributionsnätet visas på Y-axeln kan denna maximalt bli 2.

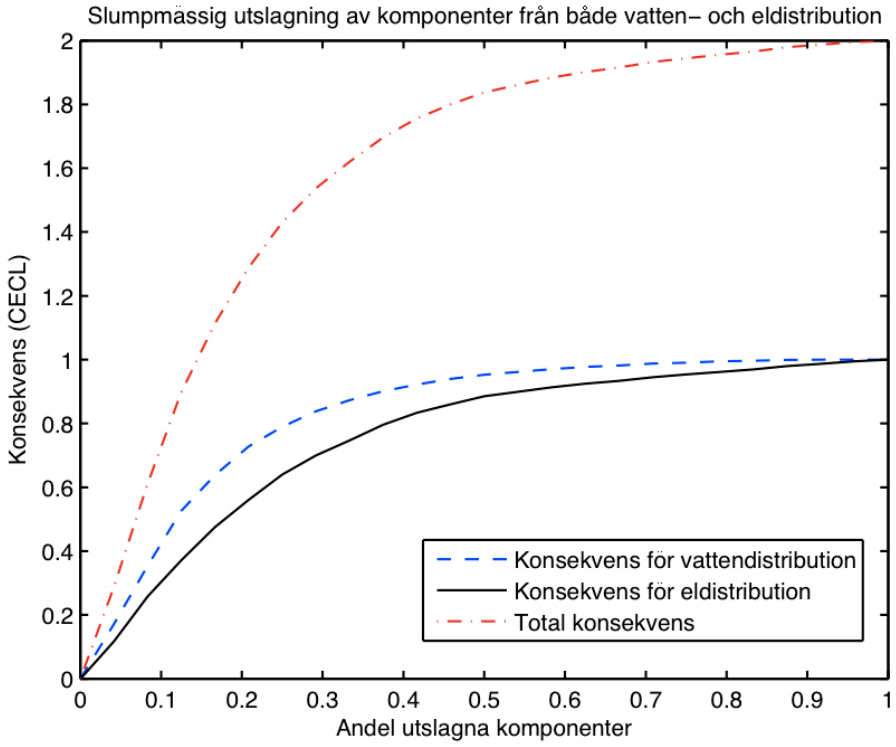


Diagram 6 Konsekvens mot vatten- och/respektive eldistributionstestnätet mätt i CECL som funktion av andelen utslagna komponenter från både vatten- och eldistributionstestnätet. Eftersom det totala antalet komponenter för de två näten är 24 stycken kan värdet på X-axeln multipliceras med 24 för att den ska visa antalet utslagna komponenter istället för andel. Eftersom vatten- och eldistributionstestnätet har vardera ett totalt CE-värde på 6 kan värdet på Y-axeln multipliceras med 6 för att den ska visa det utslagna CE-värdet istället för utslagen andelen uttryckt i CECL.

I Diagram 6 kan det avläsas vilket system som är mest sårbart då komponenter tas bort slumpmässigt från båda systemen. Eftersom topologin för de två nätverken är identisk kan slutsatsen dras att den skillnad i sårbarhet som föreligger mellan systemen beror på beroendet mellan vatten- och

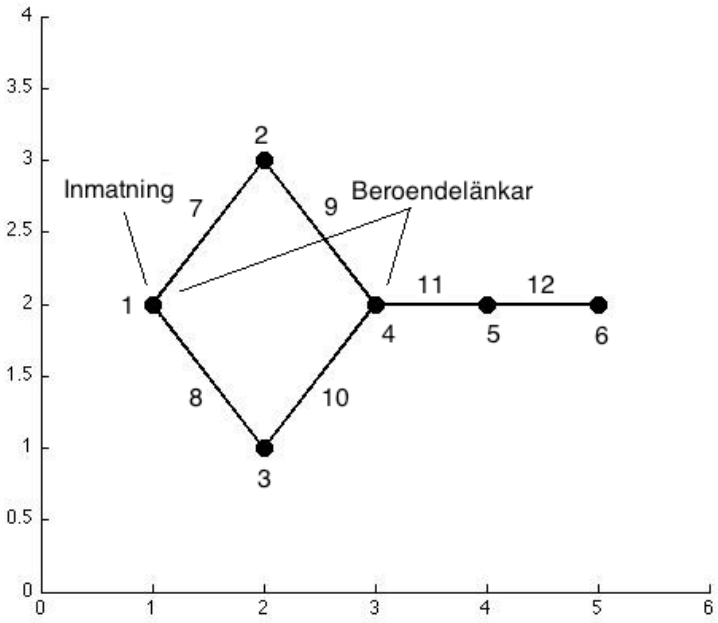
eldistributionstestnätet. Den röda linjen visar en allmän bild av hur sårbarheten för testnätverket är i stort, dvs. hur sårbart hela testnätverket är mot slumpmässiga utslagningar utan fokus på ”nätverken i nätverket”. Den röda linjen i Diagram 6 är som för de andra diagrammen konkav, vilket tyder på att hela testnätverket är relativt sårbart. Detta kan förklaras med den bristande redundans som finns i nätverket och de starka beroenden som finns mellan eldistributionstestnätet och vattendistributionstestnätet.

6.3.2. Resultat för kritisk komponentanalys

Den kritiska komponentanalysen utförs på testnätverket i ISSMA för att (1) hitta kritiska komponenter för endast vatten-/eldistributionstestnätet oberoende av varandra och för att (2) hitta kritiska komponenter för testnätet som helhet, dvs. då komponenterna kan tillhöra både vatten- och eldistributionstestnätet med hänsyn till beroenden. Simulering utfördes för att hitta felset med storlek 1 och 2 (N-1 och N-2), dvs. en komponent utslagen respektive två simultana komponenter utslagna. Eftersom vatten- och eldistributionstestnätet har identisk topologi och uppbyggnad behövs endast ett av systemen studeras då man studerar dem oberoende av varandra.

I den kritiska komponentanalysen presenteras konsekvensen i utslaget CE-värde och *inte* CECL. Detta val görs eftersom det är lättare att ta till sig konsekvenser som uttrycks i heltal istället för fraktioner och eftersom resultaten vid kritisk komponentanalys inte jämförs i diagram på samma sätt som för global sårbarhetsanalys anses detta vara ett rimligt val.

För att läsaren enkelt ska kunna följa vilken komponent som är vilken visas ytterligare en till bild över testnätverket sett uppifrån, Figur 16.



Figur 16 Testnätverket sett uppifrån. Vatten- och eldistributionstestnätet ligger ”över varandra” i denna figur. Komponenterna är markerade med nummer. Inmatningsnoden är nod 1 för både vatten- och eldistributionstestnätet. Från nod 1 respektive nod 4 i eldistributionstestnätet går en beroendelänk till nod 1 respektive nod 4 i vattendistributionstestnätet.

De mest kritiska komponenterna för vatten-/eldistributionstestnätet, oberoende av varandra, vid en borttagen komponent (N-1) presenteras i Tabell 1 nedan där den mest kritiska komponenten presenteras först. Konsekvensen presenteras i utslaget CE-värde.

Tabell 1 Kritiska komponenter för vatten-/eldistributionstestnätet vid N-1. Konsekvensen kan göras om till CECL genom att det utslagna CE-värdet divideras med 6.

Komponent nr.	Konsekvens
1	6
4	3
11	2
5	2
12	1
6	1
3	1
2	1
10	0
9	0
8	0
7	0

Den mest kritiska komponenten är komponent nummer 1, vilket är inmatningsnoden. Detta är logiskt eftersom om denna nod slås ut förlorar hela nätverket matning. Den andra mest kritiska komponenten är nummer 4, vilken om den slås ut stoppar matning till hela nätverkets ”svans”, nod nummer 5 och 6.

De fyra mest kritiska komponenterna för vatten-/eldistributionstestnätet, oberoende av varandra, vid två komponenter samtidigt ur funktion (N-2) presenteras i Tabell 2 nedan.

Tabell 2 De fyra mest kritiska felseten för vatten-/eldistributionstestnätet vid N-2.

Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr.	Konsekvens
1	12	6
1	11	6
1	10	6
1	9	6

Vad som är tydligt med detta resultat är att de mest kritiska felseten innehåller komponent nummer 1, dvs. inmatningsnoden, vilket visar att dessa felset endast är kritiska på grund av komponent 1 eftersom komponent 1 själv genererar en konsekvens på 6. Då systemet innehåller 12 komponenter inkluderar de första 11 mest kritiska felseten komponent 1. Det kan därför vara intressant att studera vilka felset av två komponenter som är mest kritiska *utan* komponent nummer 1. I Tabell 3 nedan visas de tio mest kritiska felseten som inte inkluderar komponent 1 samt vilken rangordning de har, dvs. i vilken ordning de kommer då man sorterar felseten efter högst konsekvens.

Tabell 3 De tio mest kritiska felseten för vatten-/eldistributionstestnätet vid N-2, exklusive komponent nummer 1.

Rang	Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr.	Konsekvens
12	7	8	5
13	3	7	5
14	2	8	5
15	2	3	5
16	8	9	4
17	7	10	4
18	4	8	4
19	4	7	4
20	3	9	4
21	3	4	4

Det första felsetet i Tabell 3 har rangordning 12 för de mest kritiska felseten för N-2. Komponent 7 och 8 är de två länkar som matar vatten/elektricitet via de två möjliga vägarna från nod 1. Om endast en kritisk komponentanalys med N-1 skulle utföras skulle detta kritiska felset missas.

Nedan presenteras de mest kritiska komponenterna för hela testnätverket, då både vatten- och eldistributionstestnätet analyseras tillsammans med beroenden dess emellan. I Tabell 4 presenteras de tio mest kritiska komponenterna för hela testnätverket vid en utslagen komponent (N-1). Vattendistributionstestnätet är betecknad system ”1” och eldistributionsnätet är betecknad system ”2”. Konsekvensen uttrycks i utslaget CE-värde för hela testnätverket, vilket maximalt är 12.

Tabell 4 De tio mest kritiska komponenterna för vatten- och eldistributionstestnätet med beroenden vid N-1. Konsekvensen kan göras om till CECL i likhet med den globala sårbarhetsanalysen genom att det utslagna CE-värdet divideras med 6.

System	Komponent nr.	Total konsekvens
2	1	12
2	4	6
1	1	6
1	4	3
2	11	2
2	5	2
1	11	2
1	5	2
2	12	1
1	6	1

Som kan avläsas i Tabell 4 är den mest kritiska komponenten komponent nummer 1 i system 2, dvs. eldistributionstestnätet. Detta är logiskt då ifall denna komponent fallerar slutar dels hela eldistributionstestnätet få matning, men komponent nummer 1 i vattendistributionstestnätet slutar också fungera

eftersom den representerar en pump som då inte får elektricitet. Resultatet blir att alla noder i båda systemen förlorar matning och konsekvensen blir därmed maximal.

I Tabell 5 presenteras de fyra mest kritiska komponenterna för hela testnätverket vid två simultana fel (N-2). Systembeteckningar enligt tidigare.

Tabell 5 De fyra mest kritiska felseten för vatten- och eldistributionstestnätet med beroenden vid N-2.

System för komp. 1	Komponent 1 nr.	System för komp. 2	Komponent 2 nr.	Total konsekvens
2	1	2	12	12
2	1	2	11	12
2	1	2	10	12
2	1	2	9	12

Även här kan slutsatsen dras att dessa kritiska felset beror på komponent 1 i eldistributionsnätet, eftersom den ensam ger en total konsekvens på 12. På samma sätt som i Tabell 3 kan man undersöka vilka andra felset, vilka inte innehåller komponent 1 i eldistributionstestnätet, som är kritiska felset för systemet. Detta görs dock inte här eftersom detta kapitel endast är till för att visa hur sårbarhetsanalyserna fungerar och vad för typ av resultat de kan generera.

Istället för att exkludera komponent 1 ur felseten är det möjligt att beräkna den synergistiska konsekvens olika felset medför. På detta sätt är det möjligt att sortera bort alla felset som tillkommer på grund utav att en komponent ensam är väldigt kritisk, eftersom synergin då blir låg. I Tabell 6 visas de tio mest kritiska felset som beror på synergistiska effekter, dvs. komponenter som utslagna själva inte medför stora konsekvenser men tillsammans med en annan komponent är kritiska för systemet.

Tabell 6 De tio mest kritiska felset för vatten- och eldistributionsnätet, med beroenden, vilka har högst synergi vid N-2. Sorterat efter maximal synergistisk konsekvens.

System för komp. 1	Komponent 1 nr.	System för komp. 2	Komponent 2 nr.	Total konsekvens	Syn.kon. (synergi)
2	7	2	8	8	8 (100 %)
2	8	2	9	7	7 (100 %)
2	7	2	10	7	7 (100 %)
2	3	2	7	8	7 (87.5 %)
2	2	2	8	8	7 (87.5 %)
2	9	2	10	6	6 (100 %)
2	3	2	9	7	6 (85.7 %)
2	2	2	10	7	6 (85.7 %)
2	2	2	3	8	6 (75 %)
1	7	1	8	5	5 (100 %)

Som kan avläsas i Tabell 6 är felseten med högst synergi de som slår ut båda de två möjliga vägarna där elektricitet matas ut i systemet efter inmatningsnod 1

(de två vägarna mellan nod 1 och nod 4 som visas i Figur 16). Då endast en av dessa två vägar slås ut blir konsekvensen noll, eftersom det finns en alternativ väg för matning, men då båda vägarna slås ut samtidigt uppstår en konsekvens och synergin för felet blir därför 100 %. Alla komponenter som ingår i de mest kritiska felseten med hänsyn till synergi, Tabell 6, härstammar från eldistributionstestnätet, vilket beror på vattendistributionstestnätets beroende av elektricitet.

För att åskådliggöra alla de olika scenarier (antalet felset som analyserats för N-1 och N-2) och dess konsekvens som den kritiska komponentanalysen av vatten- och eldistributionstestnätet, med beroenden, resulterat i kan dessa ritas upp sorterat efter avtagande konsekvens. Detta görs i Diagram 7 nedan. Notera att X-axeln är i logaritmisk skala.

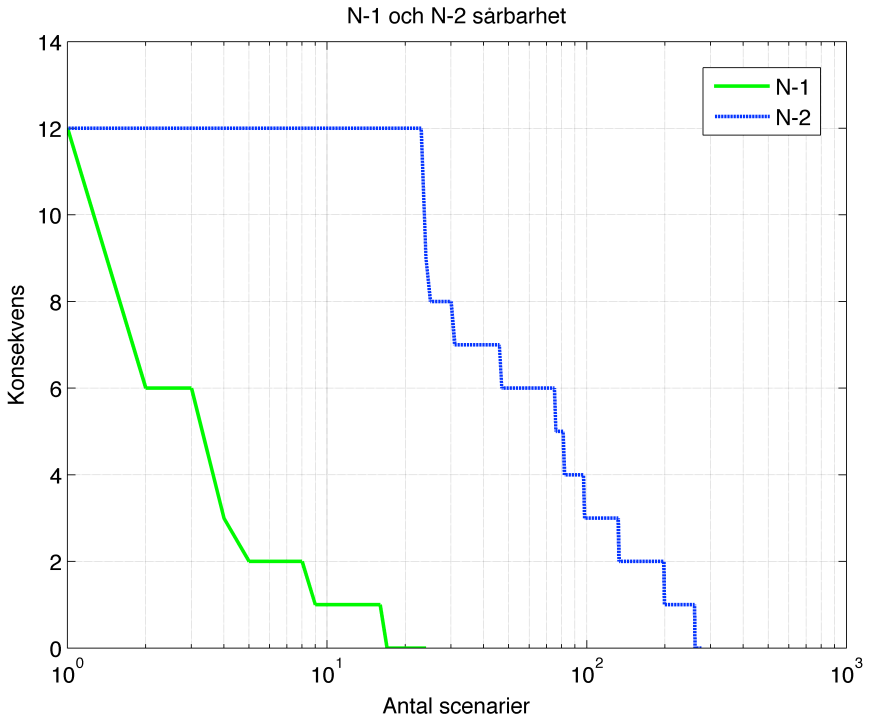


Diagram 7 Alla de analyserade scenarierna för N-1 och N-2 vid kritisk komponentanalys av vatten- och eldistributionstestnätet, med beroenden dess emellan, samt respektive scenarios konsekvens. Scenarierna är sorterade efter avtagande konsekvens.

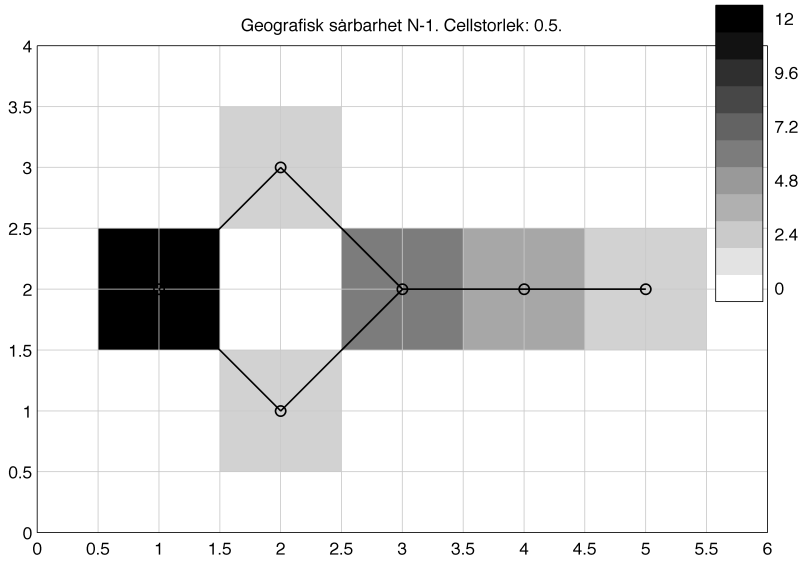
Diagram 7 ovan kan användas för att få en överblick av hur många scenarier som i detta testnätverk ger konsekvenser över ett specifikt värde. Exempelvis kan avläsas att det för detta testnätverk finns ca 20 felset för N-2 som genererar en konsekvens av 12. Om linjen i Diagram 7 avtar långsamt betyder det att mängden felset med en hög konsekvens är stor, vilket antyder att systemet är mer sårbart än om linjen skulle ha avtagit snabbare.

6.3.3. Resultat för geografisk sårbarhetsanalys

Tre olika simuleringar utfördes i ISSMA för att analysera den geografiska sårbarheten i testnätverket. De första två simuleringarna utfördes med en utslagen cell åt gången men med två olika cellstorlekar. I första simuleringen var cellerna kvadratiska med storlek 0.5 (cellens bredd och höjd i koordinatsystemet). I den andra simuleringen minskades cellstorleken till 0.25. I

den sista simuleringen slogs två celler ut simultant (liknande kritisk komponentanalys och N-2) med en cellstorlek på 0.5. I alla simuleringar var cellerna kvadratiska.

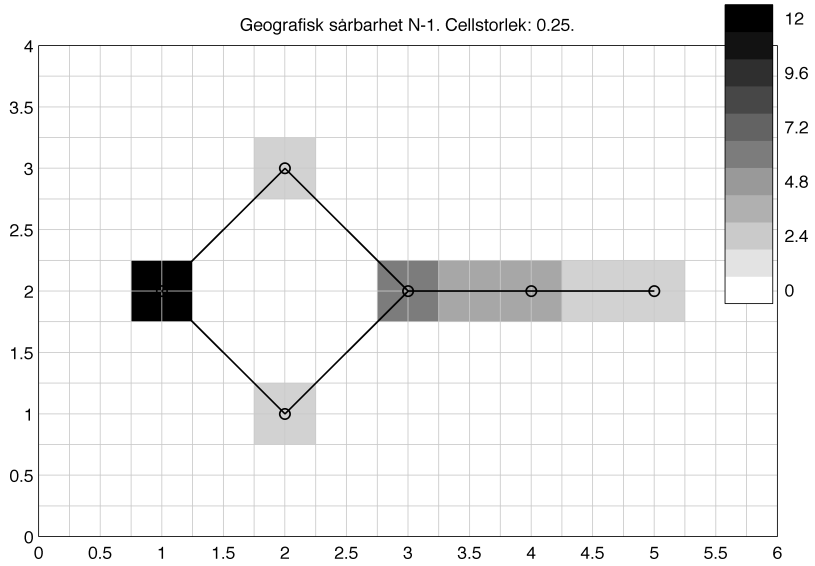
I Figur 17 nedan åskådliggörs resultatet av den geografiska sårbarhetsanalysen med en cellstorlek om 0,5. Konsekvensen visas som en färgskala i varje cell. Ju mörkare cellen är desto högre är konsekvensen. Konsekvensen är mätt i utslaget CE-värde, som för den kritiska komponentanalysen. Notera att vatten- och eldistributionstestnätet ligger ”över varandra” i bilden nedan. Då en cell slås ut räknas alla komponenter som ligger i cellen som utslagna, från båda systemen. Den maximala konsekvensen är därför 12 mätt i utslaget CE-värde.



Figur 17 Geografisk sårbarhetsanalys för testnätverket med cellstorlek 0.5 vid N-1. Konsekvensen kan göras om till CECL genom att det utslagna CE-värdet divideras med 6. X- och Y-axeln beskriver koordinaterna för komponenterna i testnätverket.

Som Figur 17 visar uppstår den högsta konsekvensen för testnätverket om cellerna som innefattar nod 1 tas bort, eftersom då både inmatningsnoden för vatten- och eldistributionsnätet fallerar. Eftersom detta testnätverk är påhittat av författaren med tro att det på ett bra sätt exemplifierar denna typ av sårbarhetsanalys blev en konsekvens att noderna hamnade precis mellan celler. ISSMA behandlar noder som mattematiskt ligger precis mellan två eller fler celler som att noden tillhör alla de cellerna.

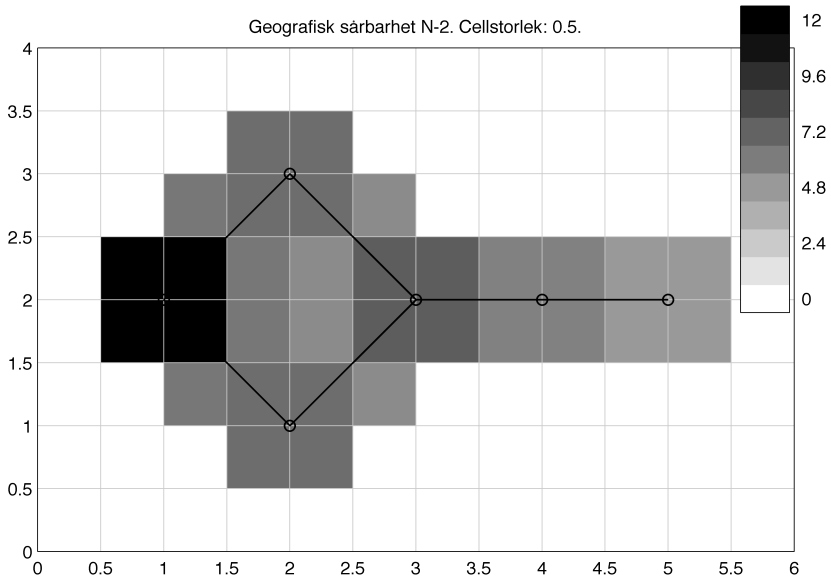
I Figur 18 visas resultatet av den geografiska sårbarhetsanalysen med en cellstorlek om 0.25 och en utslagen cell.



Figur 18 Geografisk sårbarhetsanalys för testnätverket med cellstorlek 0.25 vid N-1.

Figur 18 är mycket lik Figur 17 med skillnaden att upplösningen är högre, dvs. cellerna är mindre och de geografiska sårbarheterna kan åskådliggörs med mer precision. Det är värt att notera att ännu större celler än 0.5 skulle kunna ge andra konsekvenser då ännu fler komponenter kan slås ut samtidigt då en cell slås ut, vilket betyder att analysen inte behöver bli bättre bara för att små celler används. Att ändra cellstorlek bör mer ses som att analysera den geografiska sårbarheten med olika perspektiv, alternativt med hänsyn till olika typer av hot.

Figur 19 visar den geografiska sårbarheten för testnätverket med en cellstorlek om 0,5 då två celler slås ut samtidigt (i likhet med N-2). Konsekvensmåttet i detta diagram är också mätt i utslaget CE-värde. Färgkoden som speglar konsekvensen i varje cell (de celler som innehåller komponenter) har beräknats utifrån att den specifika cellen är utslagen simultant med en annan godtycklig cell, beräknat över ett medelvärde av alla kombinationer med den specifika cellen och en annan cell.



Figur 19 Geografisk sårbarhetsanalys för testnätverket med cellstorlek 0.5 vid N-2.

Som man kan se i Figur 19 har de celler som täcker de två alternativa vägarna mellan nod 1 och nod 4 högre konsekvens vid denna simulering än de har i Figur 17 vid en simultan utslagen cell på grund av att två utslagna celler möjliggör att båda de alternativa vägarna slås ut.

För den sista simuleringen, då två celler slås ut samtidigt, kan det vara intressant att beräkna synergin mellan de två utslagna cellerna, i likhet med synergiberäkningen för kritisk komponentanalys vid N-2. De fem högsta paren celler med den högsta synergin redovisas nedan i Tabell 7. Cellerna anges med dess koordinater i cellens mittpunkt.

Tabell 7 De cellpar vilka har högst synergi vid geografisk sårbarhetsanalys av vatten- och eldistributionstestnätet vid N-2. Sorterat efter synergistisk konsekvens.

Cell 1 (X, Y)	Cell 2 (X, Y)	Total konsekvens	Syn.kon. (synergi)
1.25, 1.25	1.75, 2.25	10	10 (100 %)
1.25, 1.25	1.25, 2.75	10	10 (100 %)
1.75, 1.75	1.75, 2.25	10	10 (100 %)
1.75, 1.75	1.25, 2.75	10	10 (100 %)
1.75, 0.75	1.75, 2.25	10	8 (80 %)

I likhet med den kritiska komponentanalysen finns den största synergin vid de två alternativa vägarna som finns i testnätverket, vilket är förväntat resultat.

7. Sårbarhetsanalys av ett vatten- och eldistributionsnät

I detta kapitel redovisas en fallstudie där en sårbarhetsanalys utförs på ett verkligt vatten- och eldistributionsnät i en stad i södra Sverige. Analysen i detta kapitel följer teorin som presenterats i kapitel 2 till 4 och använder sig av den modell baserad på nätverksteori och fysisk modellering som presenterats i kapitel 5. Tillvägagångssättet för analysen och hur resultatet presenteras i detta kapitel följer samma upplägg som sårbarhetsanalysen i kapitel 6 där sårbarheten i ett testnätverk analyserats. Detta kapitel inleds med att presentera det verkliga vatten- och eldistributionsnät vars sårbarhet ska analyseras och vilka förutsättningar, modelleringsval samt antaganden som ligger till grund för analysen. Därefter presenteras resultaten för den globala sårbarhetsanalysen, kritiska komponentanalysen samt den geografiska sårbarhetsanalysen och slutsatser dras kring analysens utfall. En djupare diskussion kring resultaten i allmänhet presenteras i det nästkommande kapitlet vilket är rapportens avslutande del.

7.1. Vatten- och eldistributionsnätets uppbyggnad

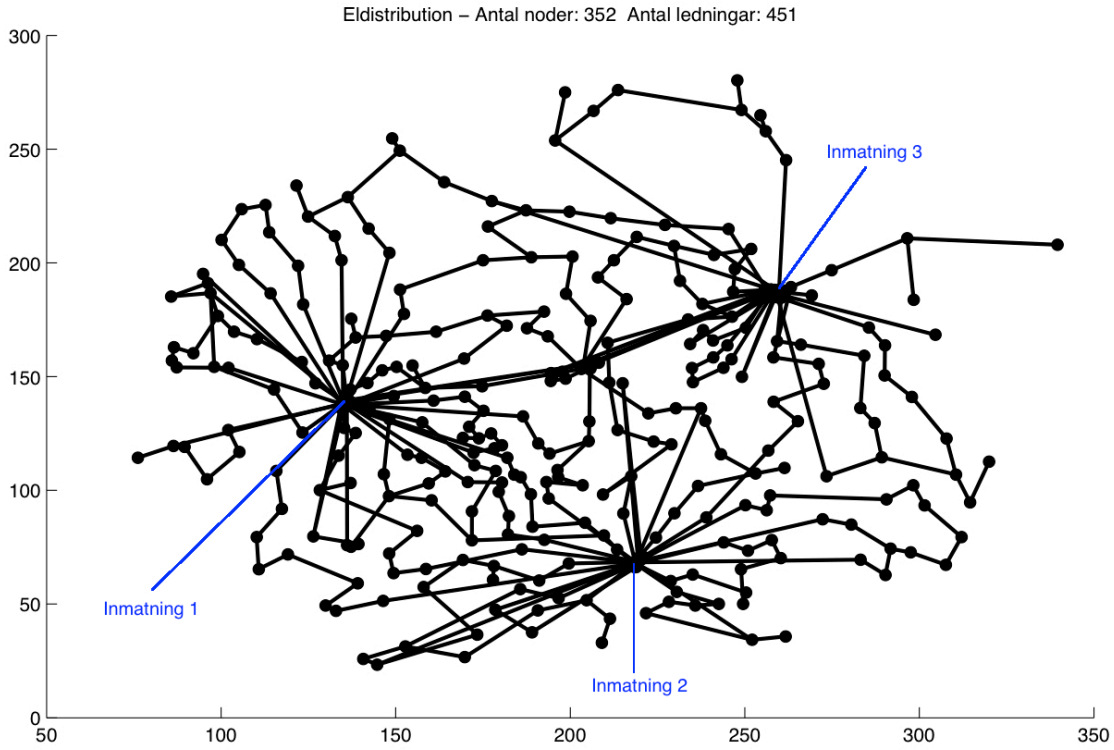
I detta avsnitt presenteras vatten- och eldistributionsnätets uppbyggnad och hur dessa modelleras.

7.1.1. Eldistributionsnätet

Eldistributionsnätverket som används i denna fallstudie är samma nätverk som användes vid en sårbarhetsanalys utförd av Johansson et al (2008) på aktuell stad. Nätverket som representerar eldistributionsnätet är alltså inte direkt modellerat av författaren utan återanvänds från en tidigare studie. Den analys som utförs i denna rapport är dock mer omfattande än den som utfördes av Johansson et al (2008) och det är endast indata som återanvänds.

Eldistributionsnätet i aktuell stad har tre inmatningspunkter, vilka är stationer som transformerar ner elektriciteten från regionalnätet till det distributionsnät som studeras. Från dessa inmatningspunkter distribueras sedan elektriciteten över hela staden till utmatningspunkter där elektriciteten transformeras ner ytterligare och fortsätter ut till kunderna. Två av inmatningspunkterna har tre transformatorer och en av inmatningspunkterna har två transformatorer där elektriciteten transformeras ner till distributionsnätet. Dessa transformatorer modelleras som inmatningsnoder. Viktiga installationer (skenor och utgående fack) vid stationerna modelleras också som noder för att kunna representera ifall fel uppstår i dessa komponenter. Utmatningspunkter, där elektricitet lämnar lokalnätet för att nå kund, modelleras som utmatningsnoder och förgreningar i nätet modelleras också som noder. Alla elledningar som kan användas för transport av elektriciteten modelleras som länkar. Varje nod och varje länk i modellen gavs ett nummer för att enkelt kunna identifieras.

Topologin för nätverket som representerar eldistributionsnätet i aktuell stad åskådliggörs i Figur 20. Totalt har eldistributionsnätet 352 noder och 451 länkar. Varje koordinatenhet på X- respektive Y-axeln representerar ca 25 meter i verkligheten.



Figur 20 Topologin av det studerade eldistributionsnätet med 352 noder och 451 länkar. De tre inmatningspunkterna är markerade i nätverket.

Data gällande inmatnings- och utmatningsnoders kapacitet samt hur många kunder som försörjs är angivet för respektive in- och utmatningsnod. Kapaciteten för varje inmatningsnod (transformator) är för eldistributionsnätet 40 000 kW, vilket ger en total inmatningskapacitet på 320 000 kW för alla transformatorer i aktuell stad. I modellen var stadens totala elektricitetsförbrukning 180 000 kW.

Den funktionella modell som används vid sårbarhetsanalysen av detta eldistributionsnät är densamma som användes för testnätverket (kapitel 6).

7.1.2. Vattendistributionsnätet

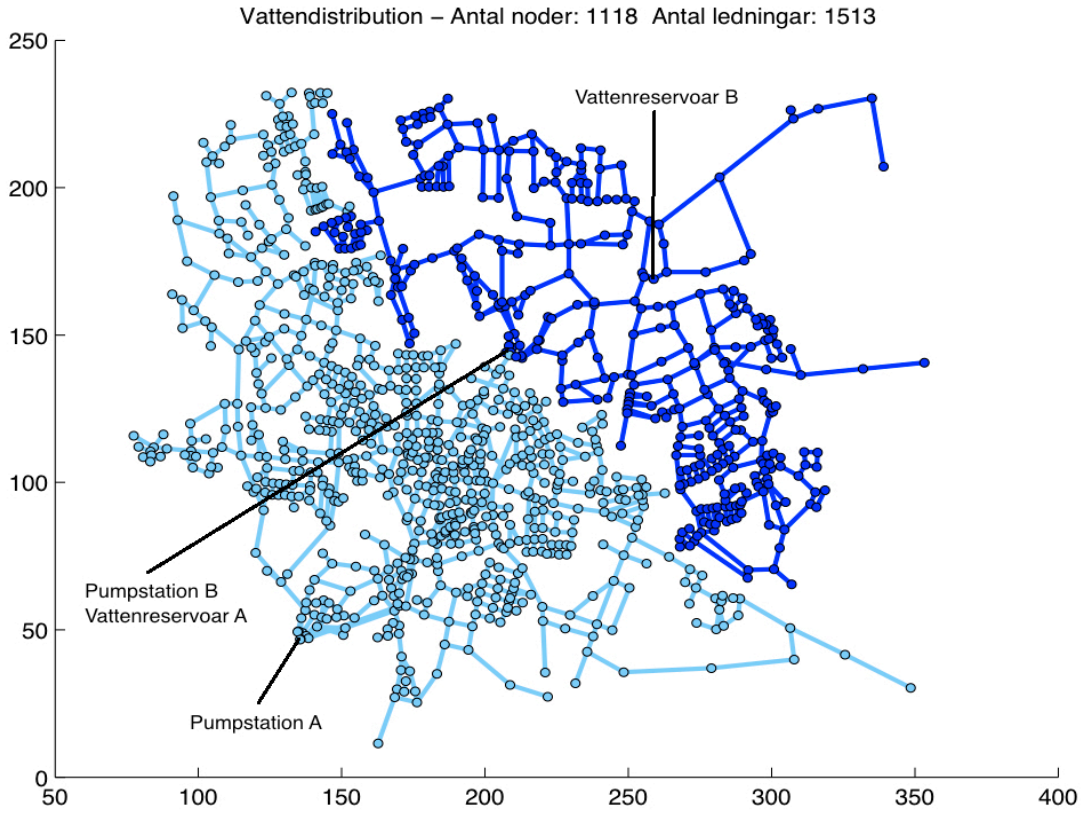
Vattendistributionsnätverket som används i denna studie har modellerats av författaren utifrån vattenledningsritningar som har tillhandahållits av vattenverket från den aktuella staden. De ledningar som var markerade på ledningsritningarna var i storleksordningen 30 till 600 millimeter i diameter.

Vattendistributionsnätet i aktuell stad består av två ”zoner”, se Figur 21. Dessa två zoner betecknas som lågzon och högzon, vilket karaktäriseras av höjdskillnaden dess emellan. Det finns en enda inmatningspunkt där vatten inkommer till systemet, vilken är placerad i lågzonen. Vid denna inmatningspunkt finns en pumpstation, pumpstation A, med fyra pumpar som trycksätter vattenledningarna för att pumpa upp vattnet till nästa pumpstation, pumpstation B, som finns belägen i högzonen. Pumpstation B har sex pumpar. Vid pumpstationen i högzonen finns en vattenreservoar, vattenreservoar A, som används för att trycka ut vatten till lågzonens kunder. Pumpstation B i högzonen

tryckstegrar vattnet så att det kan nå nästa vattenreservoar, ett vattentorn, vattenreservoar B, som finns i högzonen och används för att förse högzonens kunder med vatten.

Vattendistributionssystemet delas upp i två olika nätverk vid sårbarhetsanalysen, ett för högzonen och ett för lågzonen. Detta beror på att dessa i praktiken är separerade i normal drift av ett antal zonventiler. Dessa zonventiler har inte använts de senaste 20 åren enligt vattenverket varför det anses vara ett rimligt antagande att inte räkna med dessa som alternativa vägar i vattendistributionsnätet. Pumpstation A i lågzonen och vattenreservoar A försörjer endast lågzonens kunder, medan pumpstation B i högzonen och vattenreservoar B försörjer högzonens kunder. Varje pump vid pumpstation A som finns i lågzonen modelleras som en inmatningsnod till lågzonen. Även vattenreservoar A modelleras som inmatningsnod till lågzonen, eftersom det i vattenreservoaren finns lagrat vatten som med självtryck distribueras ut till kunder. Reservoarers funktion är självfallet tidsbegränsade tills det att vattnet i dem tar slut, likt en buffert, men för att begränsa omfattningen av denna sårbarhetsanalys utfördes simuleringarna tidsoberoende varför reservoarernas tidsbegränsning inte tas hänsyn till i analysen. På samma sätt som för lågzonen är pumparna vid pumpstation B i högzonen och vattenreservoar B i högzonen inmatningsnoder till högzonens kunder. Pumpstation B har alltid tillgång till vatten genom vattenreservoar A, även om pumpstation A inte kan pumpa upp vatten till högzonen. Denna vattenreservoar är självfallet också tidsbegränsad (ca 5 timmar vid hög vattenförbrukning enligt vattenverket), men detta tas inte med i analysen då simuleringarna genomförs tidsoberoende. Alla utmatningspunkter i vattendistributionsnätet modelleras som utmatningsnoder och alla förgreningar i vattendistributionsnätet modelleras också som noder. Vattenledningar där vatten transporteras modelleras som länkar mellan noderna. Varje nod och länk gavs ett nummer för att kunna enkelt kunna identifieras.

Topologin på det nätverk som representerar vattendistributionsnätet i aktuell stad visas i Figur 21. Totalt har vattendistributionsnätet 1118 noder och 1513 länkar.



Figur 21 Topologin över det studerade vattendistributionsnätet med 1118 noder och 1513 länkar. Lågzonen, vilken har pumpstation A och vattenreservoar A som inmatningspunkter, är den sydvästra delen av nätverket markerat i ljusblått. Högzonen, vilken har pumpstation B och vattenreservoar B som inmatningspunkter, är den nordöstra delen av nätverket markerat i mörkblått.

För vattendistributionsnätet var det ej möjligt att få tag i detaljerad data gällande kundantal och kunders vattenförbrukning. Det som var känt var pumpars kapacitet (400 l/s per pump för pumpstation A och 100-110 l/s per pump för pumpstation B) samt stadens totala vattenförbrukning. Stadens totala vattenförbrukning varierar mellan ca 21 000-27 000 m^3/dygn, varav ca 42 % av detta förbrukas av lågzon och ca 58 % av högzon. Det antas att vattenreservoarerna har tillräcklig kapacitet till att trycka ut denna mängd, vilket resulterar i att vattenreservoar A kan leverera ca 11 300 m^3/dygn vilket är 130 l/s och vattenreservoar B kan leverera ca 15 700 m^3/dygn vilket är 180 l/s. För att få fram kundantal och kunders förbrukning av vatten för varje utmatningsnod gjordes antagandet att samma kunder som förbrukar elektricitet också förbrukar vatten i lika stor proportion. Med hjälp av ett program i MatLab[3], utvecklat av handledaren till detta examensarbete, beräknades vattenförbrukningen utifrån data från eldistributionsnätet.

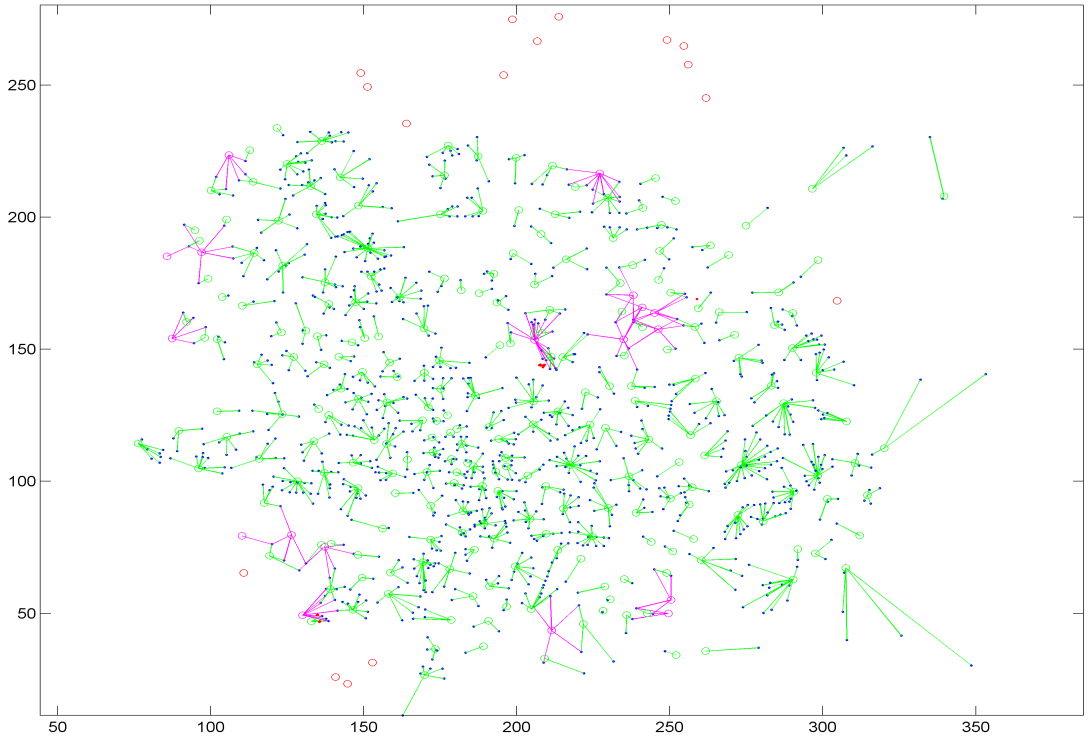
Algoritmen som användes var i stora drag; 1) alla utmatningsnoder i vattendistributionsnätet knöts till den närmsta utmatningsnoden i eldistributionsnätet. 2) Varje vattendistributionsnod tilldelas samma antal

[3] MatLab version 7.10.0.499 (R2010a).

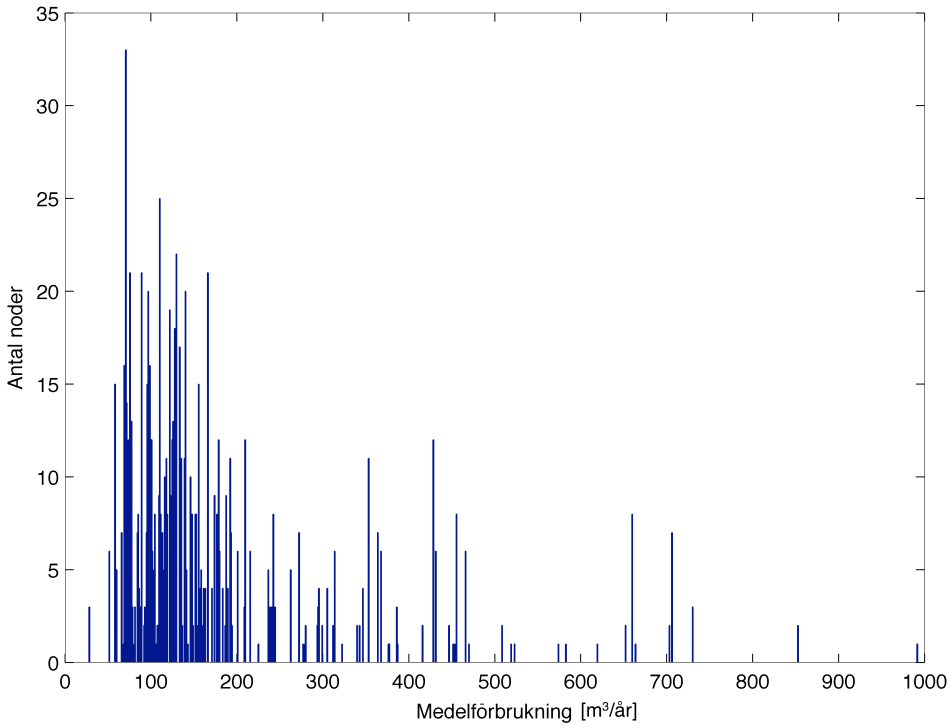
kunder och samma elektricitetsförbrukning som den eldistributionsnoden den var knuten till. 3) Ifall en eldistributionsnod fick fler än en vattendistributionsnod knutna till sig fördelades dess kundantal och dess förbrukning jämt mellan vattendistributionsnoderna. Inmatningsnoderna i vattendistributionsnätet (pumpar och vattenreservoarer) sattes till att inte ha några kunder knutna till sig. Vissa utmatningsnoder i eldistributionsnätet fick dock inte någon utmatningsnod från vattennätet knuten till sig på grund av deras avlägsna position. 4) I en andra omgång tilldelades därför dessa eldistributionsnoders kundantal och förbrukning jämt till alla vattendistributionsnoder inom ett visst avstånd (20 koordinatenheter, vilket är ca 500 meter). 5) Då den totala vattenförbrukningen för staden är känd kunde sedan förbrukningen för varje utmatningsnod i vattennätet beräknas utifrån dess relativa elförbrukning och den totala vattenförbrukningen för staden (nodens elförbrukning genom total elförbrukning för staden och sedan multiplicerat med stadens totala vattenförbrukning). Som värde för stadens vattenförbrukning användes 27 000 m^3/dygn eftersom det är konservativt att i modellen räkna på högsta möjliga förbrukning. Således fick varje utmatningsnod i vattendistributionsnätet en förbrukning i liter vatten per sekund. Vissa eldistributionsnoder låg avsides (de eldistributionsnoder som inte hade någon vattendistributionsnod knuten till sig och vars avstånd till närmaste vattendistributionsnod översteg 20 koordinatenheter). Dessa noders kundantal samt elförbrukning fördelades inte ut till några vattendistributionsnoder (totalt 415 kunder som inte fördelades ut från el- till vattendistributionsnätet). Kundantal för vatten- och eldistributionsnätet stämmer därmed inte överrens exakt. Figur 22 visar vilka vattendistributionsnoder som programmet knöt till vilka eldistributionsnoder samt vilka eldistributionsnoder som ansågs ligga avsides och därför inte fördelades till vattendistributionsnoderna.

I Figur 22 är det möjligt att se vilka eldistributionsnoder som ligger avsides och slutsatsen drogs att dessa eldistributionsnoder ligger så pass långt ifrån vattendistributionsnätet att dess kunder inte bör tillskrivas vattendistributionsnätet.

För att på något sätt kunna validera de antaganden som utförts ovan beräknas i MatLab dels hur vattenförbrukningsfördelningen mellan låg- och högzon blev i modellen och dels hur mycket vatten varje kund i medeltal förbrukar per nod i modellen. Vattenförbrukningsfördelningen mellan hög- och lågzon i modellen blev efter de antaganden som utfördes 66,7 % förbrukning i lågzon och 33,3 % förbrukning i högzon. Kunders medelförbrukning per nod visas i Figur 23 nedan.



Figur 22 Vattendistributionsnoderna (blå prickar) som knöts (grön linje) till de närmsta eldistributionsnoderna (grön cirkel). De eldistributionsnoderna som inte fick någon vattendistributionsnod knuten till sig fördelade kundantal och förbrukning jämt till alla vattendistributionsnoder inom 20 koordinatenheter (lila linjer). De eldistributionsnoder som ansågs ligga avsides är markerade med en röd cirkel.



Figur 23 Histogram över kunders medelförbrukning i m³ vatten per år för varje nod. För att öka tydligheten i detta histogram visas endast de noder vars kunder har en medelförbrukning under 1000 m³/år, vilket är 88 % av alla noder i vattendistributionsnätet.

Stadens verkliga fördelning mellan låg- och högzon är 42 % förbrukning i lågzon och 58 % förbrukning i högzon medan en villa under ett normalår i medeltal förbrukar ca 150 m^3 vatten per år, enligt stadens vattenverk. De noder vars kunders förbrukning markant överstiger 150 m^3/år kan utgöras av exempelvis industrier eller större anläggningar så som sjukhus eller skolor. Effekten av dessa antaganden kring vattendistributionsnätets kundantal och dess förbrukning diskuteras djupare i avsnittet ”Diskussion” i kapitel 8.

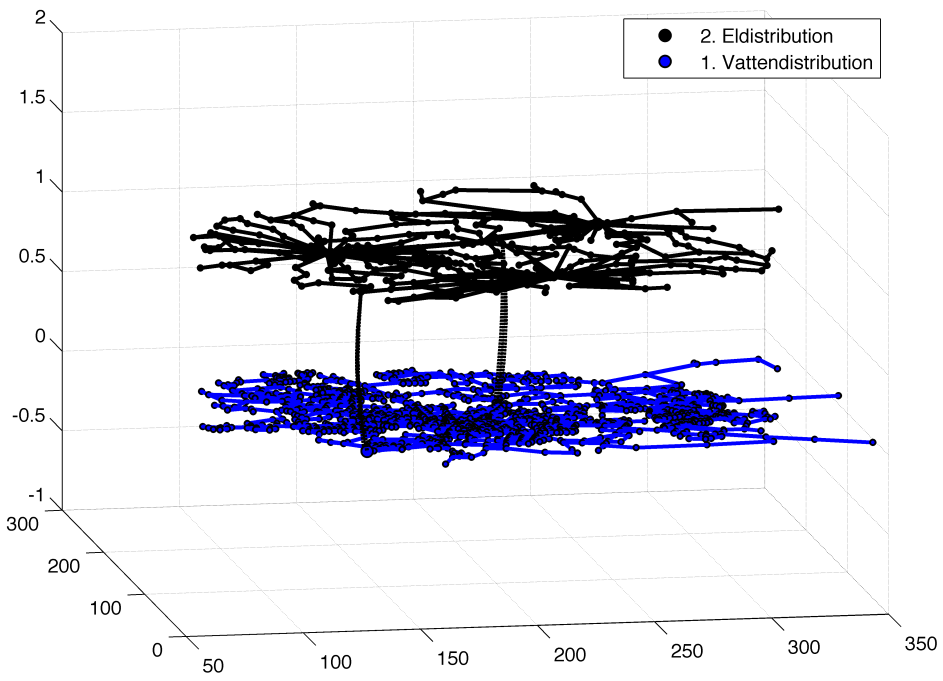
Den funktionella modell som används vid sårbarhetsanalysen av detta vattendistributionsnät är densamma som användes för testnätverket (kapitel 6).

7.1.3. Beroenden mellan vatten- och eldistributionsnätet

De beroenden som finns i det analyserade vatten- och eldistributionsnätet är enkelberoenden mellan vattenpumparna och eldistributionsnätet. Pumparna i vattendistributionsnätet kräver elektricitet för att fungera, varför detta modelleras som beroendelänkar från samtliga noder som representerar pumpar i vattennätet till de närmaste eldistributionsnoderna i elnätet. Antagandet som görs är att beroendelänkarna går från pumparna vid pumpstation A respektive pumparna vid pumpstation B till den närmsta utmatningsnod i eldistributionsnätet för respektive pumpstation.

De pumpar som finns i vattennätet i aktuell stad har alla reservkraft genom generatorer som drivs på diesel. Denna analys görs tidsoberoende samt syftar till att analysera direkta beroenden, varför dessa reservsystem inte tas med i modellen. Konsekvensen av detta antagande diskuteras mer utförligt i avsnittet ”Diskussion” i kapitel 8. I praktiken är beroendet mellan pumpar och elnätet ett svagt beroende, på grund av den tidsfördröjning som finns mellan att ett fel i elnätet kommer påverka pumparna i vattendistributionsnätet (reservsystemen måste exempelvis få slut på drivmedel eller själva gå sönder), men det modelleras i denna modell som ett starkt beroende.

Topologin över både vatten- och eldistributionsnätet inklusive de beroendelänkar som finns mellan de två nätverken visas i Figur 24:



Figur 24 Topologin av både vatten- och eldistributionsnätet inklusive de beroendelänkar som finns mellan systemen.

7.1.4. Konsekvensmått

Konsekvensmåttet vid sårbarhetsanalysen har valts att uttryckas i CECL eller som utslaget CE-värde, vilket beräknas som det antal kunder som förlorat matning av resursen i fråga (vatten eller elektricitet). Detta valdes eftersom det är ett enkelt sätt att spegla konsekvensen mot samhället samt att den data som konverterades från el- till vattendistributionsnätet ansågs vara mer representativ gällande kundantal än kunders vattenförbrukning (då data om vattenförbrukning togs skalenligt utifrån elförbrukning). Detta eftersom man kan tänka sig att det i samma stad finns ungefär lika många kunder som förbrukar el som kunder som förbrukar vatten samt att kunderna geografiskt är fördelade likvärdigt, men däremot behöver inte kunderna förbruka vatten i samma proportion som elektricitet. Varje nod i respektive distributionsnätverk får alltså ett CE-värde lika stort som antalet kunder som noden försörjer. Vatten- och eldistributionsnätet försörjer ca 47 000 kunder vardera (47 108 för vattendistributionsnätet och 47 523 för eldistributionsnätet, där skillnaden beror på de eldistributionsnoder som låg avsides och ej räknades för vattendistributionsnätet).

7.2. Sammanfattning av val vid modellering

Enligt tidigare avsnitt har ett antal val gjorts hur modelleringen och simuleringen i ISSMA utförs för detta verkliga vatten- och eldistributionsnät. Dessa val och de olika förutsättningar som ligger till grund för de simuleringar som görs sammanfattas nedan:

- De analysstrategier som utförs på detta verkliga vatten- och eldistributionsnät är som för testnätverket, se kapitel 6; global

sårbarhetsanalys, kritisk komponentanalys samt geografisk sårbarhetsanalys. Samma typ av analysresultat kommer att presenteras som det gjordes för testnätverket.

- Detta verkliga infrastruktursystem består av ett vattendistributionsnät och ett eldistributionsnät i en stad i södra Sverige.
- Eldistributionsnätet har totalt 8 inmatningsnoder fördelade på tre inmatningspunkter. Resterande noder är utmatningsnoder, viktiga installationer i systemet samt förgreningar. Länkarna är elledningar. Totalt består elnätet av 352 noder och 451 länkar.
- Vattendistributionsnätet består av två separata nätverk, en lågzon och en högzon. Vattennätet har en inmatningspunkt i lågzonen där 4 pumpar finns (pumpstation A). Det finns även en vattenreservoar (vattenreservoar A) som försörjer lågzonen med vatten. Vatten når högzonen genom en andra pumpstation (pumpstation B) som är inmatningspunkt för högzonen, där 6 pumpar finns. Det finns också en andra vattenreservoar i högzonen som försörjer denna med vatten (vattenreservoar B). Varje pump modelleras som en inmatningsnod, vattenreservoarerna modelleras som en inmatningsnod vardera och de resterande noderna är utmatningspunkter och förgreningar i nätet. Länkar är vattenledningar. Totalt består vattennätet av 1118 noder och 1513 länkar.
- Kapaciteten för inmatningsnoder i eldistributionsnätet är känd, likaså inmatningsnoders kapacitet i vattennätet (pumpar och vattenreservoarer).
- Faktisk data för kunder och förbrukning fanns för eldistributionsnätet, men saknades för vattennätet. Därför konverterades kunder och förbrukning från eldistributionsnätet så att det skulle passa för vattendistributionsnätet.
- Alla pumpar i detta infrastruktursystem kräver elektricitet för att fungera och därför finns beroendelänkar från alla pumpar till de närmaste noderna i eldistributionsnätet.
- Konsekvensmåttet för denna modellering beräknas som antal kunder utan matning av vatten/elektricitet. Konsekvensen anges i CECL eller utslaget CE-värde, där CE-värdet för varje nod är det antal kunder som noden försörjer.
- Alla komponenter i vatten- respektive eldistributionsnätet kan fallera och i den globala sårbarhetsanalysen har alla komponenter samma sannolikhet att fallera vid slumpmässig utslagning.
- Länkars kapacitetsbegränsningar tas ej hänsyn till. Endast kapaciteten för in- och utmatningsnoder behandlas i den funktionella modellen (beskriven i kapitel 5).
- Analysen som utförs är inte tidsberoende. Därför studeras endast *direkta* konsekvenser. Inga reservsystem antas fungera. Buffertar, så som vattentorn, vars funktion borde avta eller upphöra med tiden kommer istället alltid att fungera maximalt så länge de inte blir utslagna. Ingen hänsyn tas till komponenters reparationstid.

7.3. Resultat och slutsatser

I detta avsnitt presenteras resultaten från de olika sårbarhetssimuleringarna. Resultaten för de tre olika analysstrategierna; global sårbarhetsanalys, kritisk komponentanalys samt geografisk sårbarhetsanalys, redovisas i var sitt avsnitt och slutsatser kring resultatet och dess betydelse diskuteras kort. Diskussion angående resultaten som helhet och allmän diskussion kring felkällor, antaganden och resultatets känslighet behandlas i nästkommande kapitel.

Simuleringarna som utfördes i denna fallstudie tog ca 40 timmar[4] i datorberäkningstid. Ca 25 timmar för den globala sårbarhetsanalysen, ca 15 timmar för den kritiska komponentanalysen och mindre än en timme för den geografiska sårbarhetsanalysen.

7.3.1. Resultat för den globala sårbarhetsanalysen

Resultatet för den globala sårbarhetsanalysen redovisas på samma sätt som i kapitel 6 och med samma typer av diagram. I likhet med testnätverket utfördes även för detta nätverk tre globala sårbarhetssimuleringar för att få fram de önskade resultaten (dvs. hur vatten- och eldistributionsnätets globala sårbarhet är oberoende samt beroende av varandra). Simuleringarna utfördes med 100 iterationer vardera, på grund av den höga tidsåtgången vid högre iterationsantal. De fem diagrammen nedan beskriver den globala sårbarheten både för distributionsinfrastrukturen oberoende av varandra men också för systemen med beroenden dess emellan.

[4] Simuleringarna utförda på en bärbar Macintosh med en 2.5 GHz Intel Core 2 Duo processor med 2 GB minne (667 MHz DDR2 SDRAM).

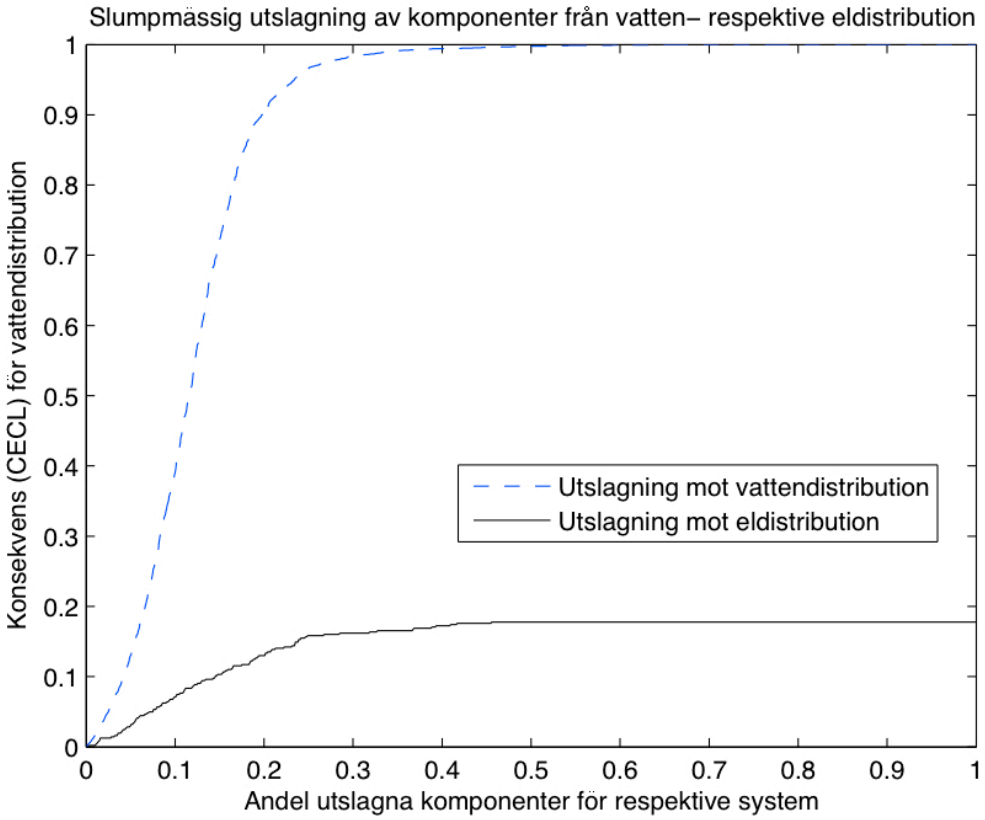


Diagram 8 Konsekvensen, mätt i CECL, som funktion av andelen utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionsnätet vid slumpmässig utslagning av komponenter från varje infrastruktur separat. Genom att multiplicera värde på Y-axeln med 47 000 ges en approximation av antalet kunder som förlorat matning av resurser, dvs. det utslagna CE-värdet.

I Diagram 8 ovan går det bland annat att avläsa att vattendistributionsnätet oberoende av eldistributionsnätet är relativt sårbart ur ett globalt perspektiv. Den blåstreckade linjen har en konkav form och den ökar snabbt vid en liten andel utslagna komponenter. Det finns också ett ganska starkt beroende mellan eldistributionsnätet och vattendistributionsnätet som kan avläsas från den svarta heldragna linjen. Då i medeltal 40 % av eldistributionsnätet är utslaget slutar viktiga pumpar i vattendistributionsnätet att fungera vilket leder till att ca 20 % av vattendistributionsnätets kunder blir utan vattenförsörjning, även då det finns vattenreservoarer. Detta påverkas dock i stor grad av de antaganden som gjorts gällande kunders förbrukning i vattennätet, vilket diskuteras mer utförligt i avsnittet ”Diskussion” i nästkommande kapitel.

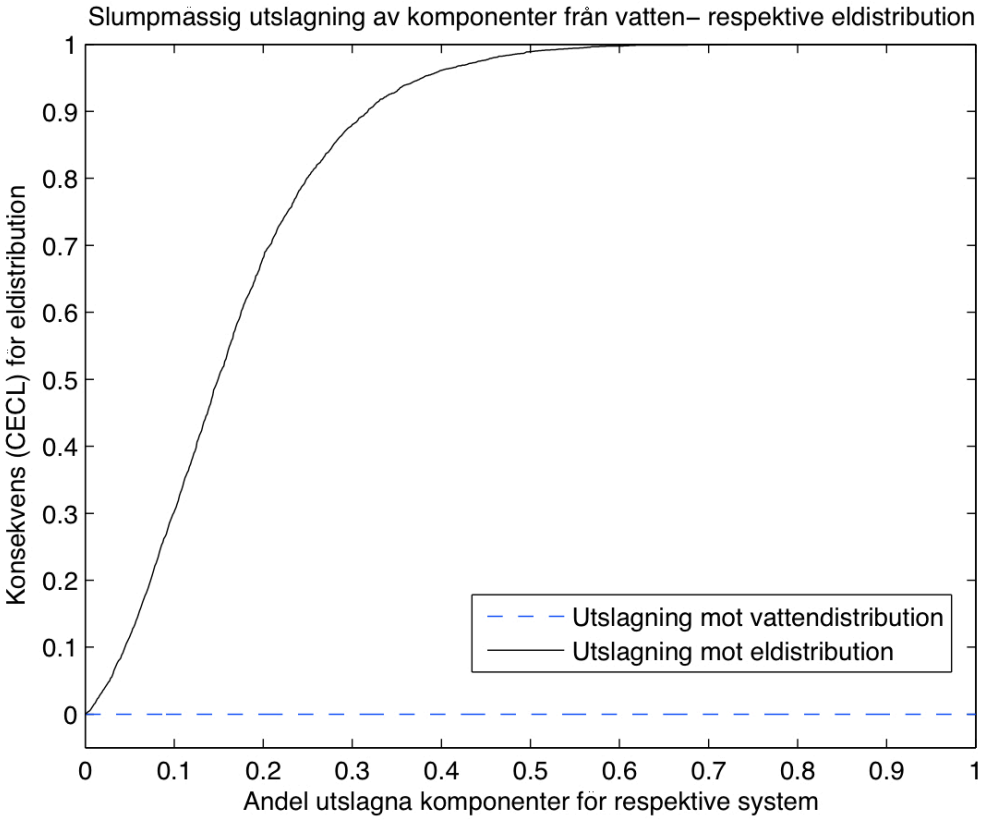


Diagram 9 Konsekvensen, mätt i CECL, som funktion av andelen utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionsnätet vid slumpmässig utslagning av komponenter från varje infrastruktur separat.

Eldistributionsnätet visar sig också vara relativt sårbart oberoende av vattendistributionsnätet, vilket den konkava heldragna linjen åskådliggör i Diagram 9 ovan. Som förväntat finns det inget beroende från vattendistributionsnätet till eldistributionsnätet, vilket den streckade linjen visar.

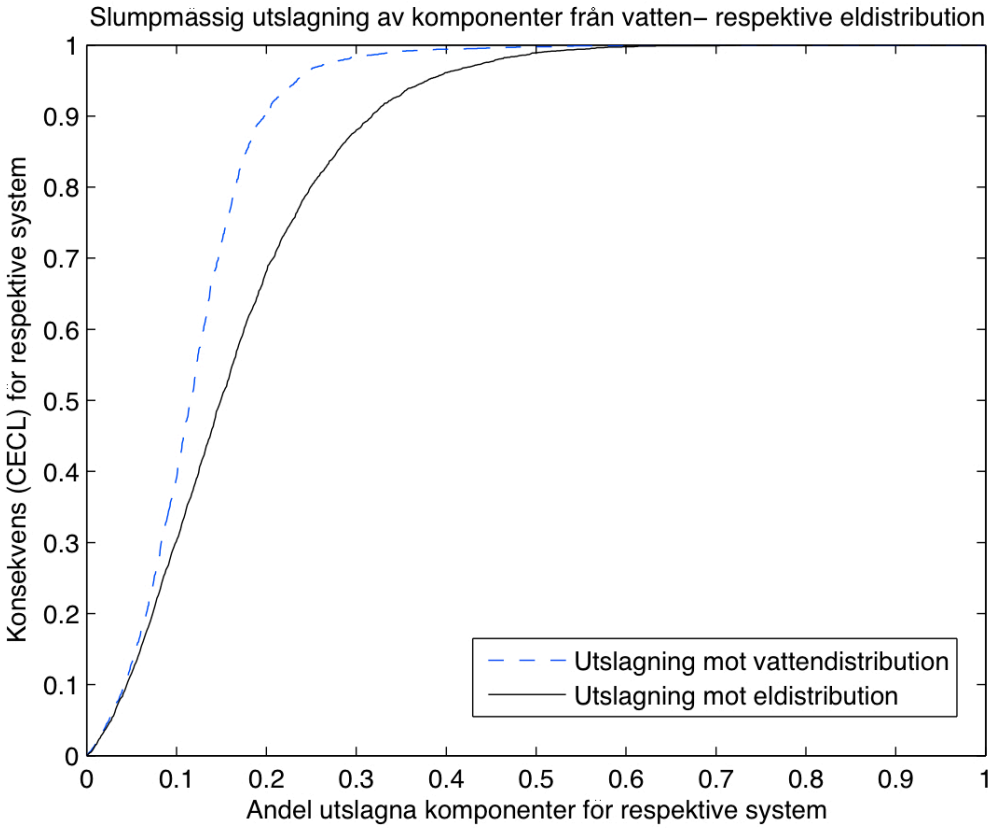


Diagram 10 Konsekvens för vatten- respektive eldistributionsnätet som funktion av utslagna komponenter för vatten- respektive eldistributionsnätet vid slumpmässig utslagning av komponenter från varje infrastruktur separat.

Diagram 10 ovan visar en jämförelse mellan vatten- och eldistributionsnätets sårbarhet oberoende av varandra. Som man kan se är vattendistributionsnätet aningen mer sårbart, men en anledning till detta kan vara att vattendistributionsnätet modellerats med så många fler komponenter, vilket diskuteras utförligare i avsnittet ”Diskussion” i nästa kapitel.

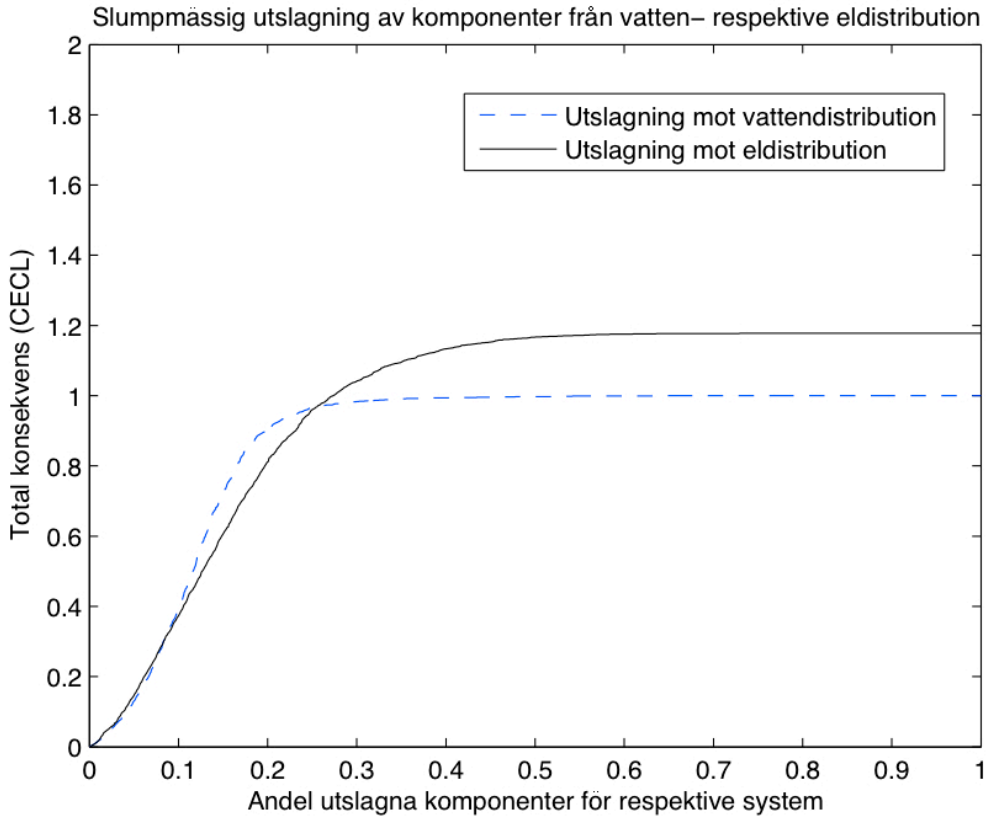


Diagram 11 Total konsekvens för både vatten- och eldistributionsnätet mätt i CECL (maximalvärde 2 eftersom det gäller båda systemen) som funktion av andelen utslagna komponenter från vatten- respektive eldistributionsnätet vid slumpmässig utslagning av komponenter från varje infrastruktur separat.

Diagram 11 ovan visar att konsekvenserna ur ett globalt perspektiv initialt blir högre då komponenter från vattennätet slås ut relativt till om komponenter skulle slås ut från eldistributionsnätet. Men då ett större antal komponenter slås ut (över 20 % av komponenterna) blir konsekvenserna totalt högre vid utslagning mot eldistributionsnätet, vilket har med beroendet mellan systemen att göra. Detta visar på att den totala konsekvensen (samhällskonsekvensen) kan bli högre ifall infrastrukturerna är beroende jämfört med om infrastrukturerna är oberoende.

Diagram 12 nedan visar sårbarheten i vatten- och eldistributionsnätet som ett gemensamt system, då komponenter slås ut från båda systemen slumpmässigt och beroenden finns dess emellan. Konsekvensen för vattendistributionsnätet ökar snabbare än för eldistributionsnätet, vilket är vad de andra diagrammen också visat då distributionsnäten analyserades var för sig. Den röda streckade linjen visar sårbarheten för vatten- och eldistributionsnätet tillsammans. Denna är konkav och snabbt stigandes, vilket tyder på att systemet är sårbart ur ett globalt perspektiv. Det är dock viktigt att tänka på vad diagrammet verkligen visar. Då 20 % av vatten- och eldistributionsnätets komponenter gått sönder, vilket är ca 700 komponenter, har i medeltal ca 90 % av alla kunder förlorat försörjning av vatten och elektricitet. 700 komponenter är många komponenter och det kan ifrågasättas ifall detta tyder på ett sårbart system. Detta diskuteras vidare i kapitel 8 under avsnittet ”Diskussion”.

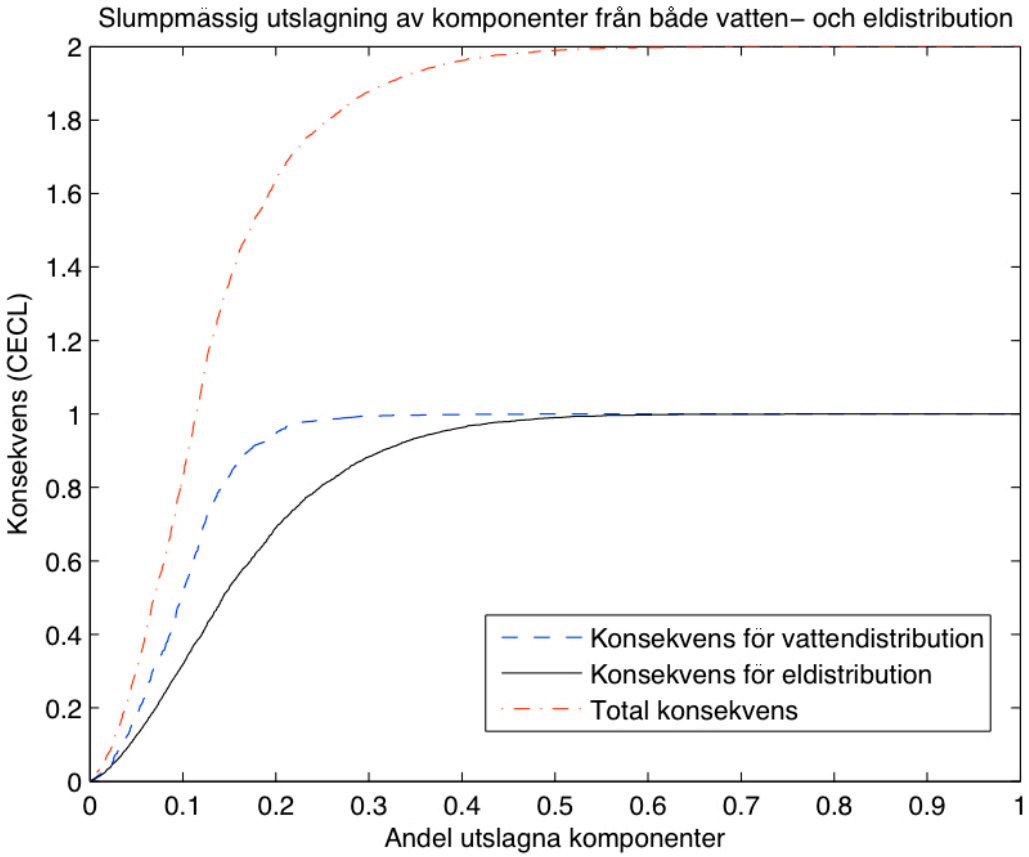


Diagram 12 Konsekvens mot vatten- och/respektive eldistributionsnätet mätt i CECL som funktion av andelen utslagna komponenter vid slumpässig utslagning från både vatten- och eldistributionsnätet.

7.3.2. Resultat för den kritiska komponentanalysen

Resultatet för den kritiska komponentanalysen redovisas först för både vatten- och eldistributionsnätet då dessa analyserats oberoende av varandra, dvs. utan beroendelänkar med i analysen. Detta redovisas både för N-1 och N-2. Sedan redovisas resultatet då dessa två infrastrukturer analyseras med beroenden dess emellan, dvs. då beroendelänkarna har inverkan i analysen, för både N-1 samt N-2. Synergi mellan komponenter redovisas för N-2 både med och utan beroenden för vatten- och eldistributionsnätet. Konsekvensen anges i antalet kunder som förlorar matning av vatten alternativt elektricitet, dvs. utslaget CE-värde, med samma anledning som i föregående kapitel.

Eftersom det är svårt att redovisa exakt var de kritiska komponenterna ligger i systemet, då de totalt är ca 4000 komponenter, hänvisas till de slutsatser som dras efter varje tabell och till sammanfattningen i slutet av kapitlet.

Tabell 8 De tio mest kritiska komponenterna för vattendistributionsnätet oberoende av eldistributionsnätet för N-1. Konsekvensen är angiven i antal kunder som förlorar matning av vatten. Inom parantes anges CECL-värdet.

Komponent nr.	Konsekvens
279	1 100 (0,02)
1520	1 087 (0,02)
284	1 087 (0,02)
917	810 (0,02)
289	767 (0,02)
338	739 (0,02)
1050	737 (0,02)
262	644 (0,01)
1534	491 (0,01)
299	491 (0,01)

Komponent nummer 279, 1520, 284 och 289, se Tabell 8, hör alla till ett område i vattendistributionsnätet som i sig har bra redundans, men endast försörjs av en inmatningsväg till själva området. Dessa komponenter orsakar vid fel alltså att hela detta mindre område i vattendistributionsnätet förlorar matning, vilket leder till att ca 1000 kunder förlorar vattenförsörjning. Detta område består av ca 30 utmatningsnoder. Komponent nummer 917 är en utmatningsnod som själv försörjer 810 kunder. De fem sista kritiska komponenterna i Tabell 8 är komponenter som är inmatningsledningar till andra mycket små områden i vattendistributionsnätet som består av mellan 3-5 utmatningsnoder.

Tabell 9 De tio mest kritiska felseten för vattendistributionsnätet oberoende av eldistributionsnätet för N-2. Inom parantes anges CECL-värdet.

Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr.	Konsekvens
839	881	5 694 (0,12)
881	2288	5 674 (0,12)
840	881	5 674 (0,12)
839	2347	5 660 (0,12)
839	878	5 660 (0,12)
2288	2347	5 640 (0,12)
878	2288	5 640 (0,12)
840	2347	5 640 (0,12)
840	878	5 640 (0,12)
881	2290	5 608 (0,12)

Alla dessa komponentpar i Tabell 9 är inmatningsvägar till ett större område i vattendistributionsnätet som har totalt två inmatningsvägar. Området består av över 100 utmatningsnoder. Då dessa två inmatningsvägar slås ut förlorar ca 5 500 kunder vattenförsörjning.

Tabell 10 De kritiska felseten för vattendistributionsnätet, oberoende av eldistributionsnätet, vilka har högst synergi vid N-2. Sorterat efter maximal synergistisk konsekvens.

Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr	Konsekvens	Syn.kon. (synergi)
839	881	5 694	5 660 (99.4 %)
2288	2347	5 640	5 640 (100 %)
881	2288	5 674	5 640 (99.4 %)
839	2347	5 660	5 640 (99.6 %)
839	878	5 660	5 626 (99.4 %)

Som Tabell 10 visar har alla de kritiska felseten i Tabell 9 hög synergi, eftersom de tillsammans tar bort inmatningen till ett större område i vattendistributionsnätet och ensamma knappt leder till någon konsekvens.

Tabell 11 De tio mest kritiska komponenterna för eldistributionsnätet oberoende av vattendistributionsnätet för N-1. Konsekvensen är angiven i antal kunder som förlorar matning av elektricitet. Inom parantes anges CECL-värdet.

Komponent nr.	Konsekvens
204	1 378 (0,03)
158	1 364 (0,03)
196	1 096 (0,02)
57	1 054 (0,02)
157	1 018 (0,02)
209	1 010 (0,02)
153	933 (0,02)
48	885 (0,02)
143	848 (0,02)
154	810 (0,02)

Alla komponenterna i Tabell 11 ovan är noder som själva försörjer så många kunder som konsekvensen visar, alternativt att de fungerar som ledning till maximalt en annan nod. Komponent nummer 204 försörjer exempelvis själv 1 378 kunder. Dessa sårbarheter behöver inte bero på dålig redundans i systemet utan är endast en konsekvens av att så många kunder matas från samma utmatningspunkt i modellen.

Tabell 12 De tio mest kritiska felseten för eldistributionsnätet oberoende av vattendistributionsnätet för N-2. Inom parantes anges CECL-värdet.

Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr.	Konsekvens
299	314	3 706 (0,08)
284	540	3 132 (0,07)
284	317	3 132 (0,07)
158	284	3 132 (0,07)
349	350	3 078 (0,07)
314	319	3 069 (0,07)
492	504	3 002 (0,06)
319	504	3 002 (0,06)
298	492	3 002 (0,06)
298	319	3 002 (0,06)

Alla felset som visas i Tabell 12 består av komponenter som finns vid inmatningspunkterna för eldistributionsnätet, vilka då de fallerar samtidigt kan påverkar elförsörjningen. Totalt påverkas ca 3 000-3 500 kunder då dessa komponentset vid inmatningen fallerar.

Tabell 13 De kritiska felseten för eldistributionsnätet, oberoende av vattendistributionsnätet, vilka har högst synergi vid N-2. Sorterat efter maximal synergistisk konsekvens.

Komponent 1 nr.	Komponent 2 nr.	Konsekvens	Syn.kon. (synergi)
299	314	3 706	3 706 (100 %)
349	350	3 078	3 078 (100 %)
314	319	3 069	3 069 (100 %)
492	504	3 002	3 002 (100 %)
319	504	3 002	3 002 (100 %)

I tabellen ovan kan avläsas att de felseten med högst synergi alla finns i Tabell 12. Det verkar således som det krävs två simultana fel vid en inmatningspunkt för att elnätets kunder ska påverkas, varför dessa felset också har hög synergi.

I tabellerna nedan betecknas vattendistributionsnätet för system ”1” medan eldistributionsnätet betecknas för system ”2”.

Tabell 14 De tio mest kritiska komponenterna för vatten- och eldistributionsnätet med beroenden dess emellan vid N-1. Konsekvensen är angiven i antal kunder som förlorar matning av vatten adderat med kunder som förlorat matning av elektricitet. Inom parantes anges CECL-värdet.

System	Komponent	Konsekvens
2	6	8 374 (0,18)
2	204	1 378 (0,03)
2	158	1 364 (0,03)
1	279	1 100 (0,02)
2	196	1 096 (0,02)
1	1520	1 087 (0,02)
1	284	1 087 (0,02)
2	57	1 057 (0,02)
2	157	1 018 (0,02)
2	209	1 010 (0,02)

Då analysen utförs med beroenden uppkommer en kritisk komponent som har en mycket högre konsekvens än resterande, se Tabell 14. Komponent nummer 6 i eldistributionsnätet är den nod som försörjer pumparna vid pumpstation A med elektricitet. Då denna komponent fallerar uppstår alltså ett cascading failure (ett fel som sprider sig till ett beroende system) och ca 8 000 kunder i vattendistributionsnätet blir utan vatten. Detta är det beroende som också kunde avläsas i Diagram 8 vid den globala sårbarhetsanalysen. Resterande komponenter är kända sedan innan från den kritiska komponentanalysen för systemen oberoende av varandra.

Tabell 15 De tio mest kritiska felseten för vatten- och eldistributionsnätet med beroenden dess emellan vid N-2. Inom parantes anges CECL-värdet.

System för komp. 1	Komponent 1 nr.	System för komp. 2	Komponent 2 nr.	Konsekvens
1	2028	2	6	32 056 (0,68)
1	1115	2	6	32 056 (0,68)
1	650	2	6	32 056 (0,68)
1	912	2	12	15 054 (0,32)
2	299	2	314	12 079 (0,26)
1	418	2	6	11 330 (0,24)
1	423	2	6	11 169 (0,24)
1	419	2	6	11 169 (0,24)
1	613	2	6	10 980 (0,23)
1	1975	2	6	10 933 (0,23)

Då både vatten- och eldistributionsnätet studeras med beroenden vid N-2 uppstår det mycket stora konsekvenser i relation till då systemen studerades oberoende vid N-2, se Tabell 15. Komponent 2028, 1115 och 650 i vattendistributionsnätet är knutna till vattenreservoar A och komponent 6 i eldistributionsnätet försörjer pumparna vid pumpstation A med elektricitet. Resultatet av dessa två simultana fel blir att hela lågzonen förlorar matning av vatten eftersom alla lågzonens inmatningspunkter blir utslagna. Komponent 912

i vattendistributionsnätet är vattenreservoar B för högzonen och komponent 12 i eldistributionsnätet är den nod som försörjer pumparna vid pumpstation B med elektricitet. Då dessa slås ut blir konsekvensen att hela högzonen förlorar vattenförsörjning. Komponent 299 och 314 i eldistributionsnätet, vilka orsakar en konsekvens på 12 079 då de båda är ur funktion, är två komponenter till en inmatningspunkt i eldistributionsnätet. Då dessa två slås ut förlorar även komponent 6 i eldistributionsnätet försörjning, vilket sedan leder till att pumparna vid pumpstation A slutar att fungera. De fem sista kritiska felseten i Tabell 15 orsakas av en svaghet i den använda funktionella modellen kombinerat med det konsekvensmått som valts. Borttagning av komponent 6 i eldistributionsnätet (vilken gör att pumparna i lågzonen fallerar) och komponent 418, 423, 419, 613 eller 1975 i vattendistributionsnätet resulterar i att den funktionella modellen distribuerar den kvarvarande kapaciteten vatten annorlunda. Detta kan få konsekvensen att färre kunder får försörjning av vatten även då samma mängd vatten distribueras, vilket är en följd av det konsekvensmått som valts. Detta diskuteras vidare i kapitel 8, under avsnittet ”Diskussion”.

Tabell 16 De kritiska felseten för vatten- och eldistributionsnätet vilka har högst synergi vid N-2. Sorterat efter maximal synergistisk konsekvens.

System för komp. 1	Komponent 1 nr.	System för komp. 2	Komponent 2 nr.	Total konsekvens	Syn.kon. (synergi)
1	2028	2	6	32 056	23 682 (73.9 %)
1	1115	2	6	32 056	23 682 (73.9 %)
1	650	2	6	32 056	23 679 (73.8 %)
1	912	2	12	15 054	15 053 (99.9 %)
2	299	2	314	12 079	12 079 (100 %)

De konsekvenser som uppstår vid N-2 då el- och vattendistributionsnätet studeras med beroenden beror på felset där alla har hög synergi, se Tabell 16. Dessa felset skulle kanske aldrig upptäckas om endast en komponent antas fallera åt gången eller vid en analys av de enskilda systemen var för sig.

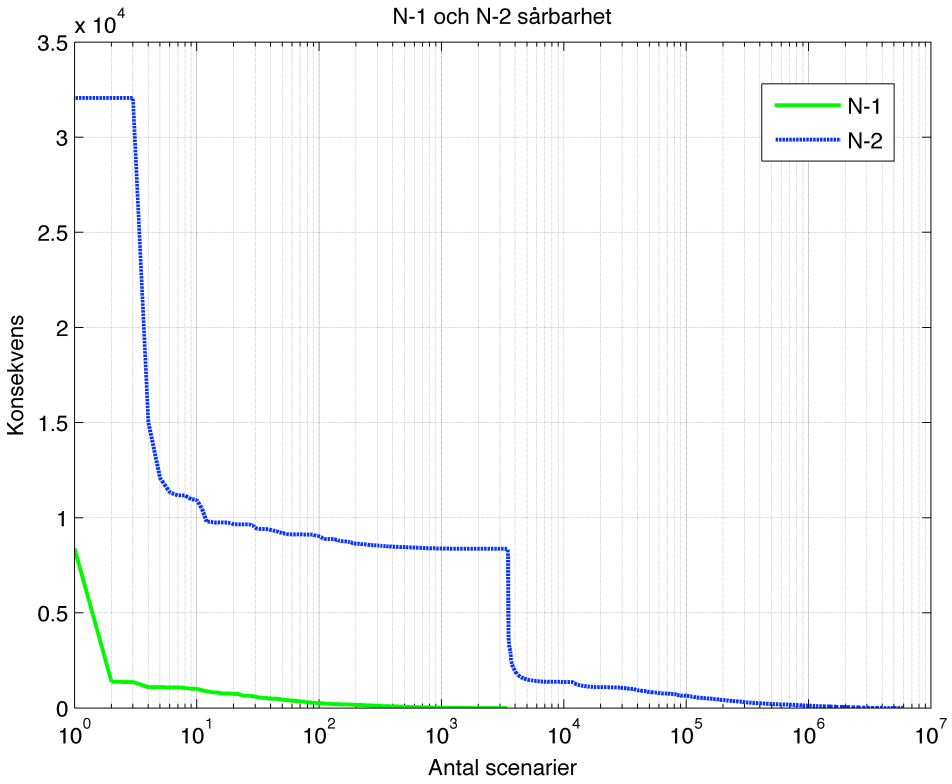


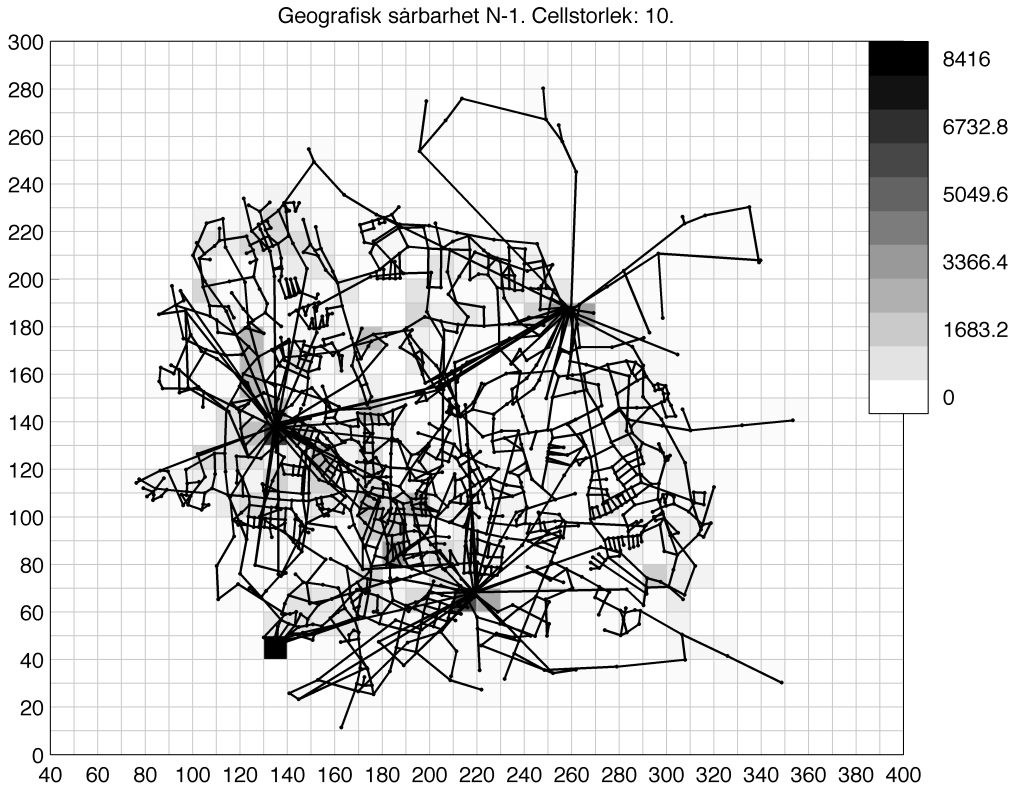
Diagram 13 Alla de analyserade scenarierna för N-1 och N-2 vid kritisk komponentanalys av vatten- och eldistributionsnätet, med beroenden dess emellan, samt respektive scenarios konsekvens. Scenarierna är sorterade efter avtagande konsekvens.

Diagram 13 visar tydligt hur fördelningen ser ut gällande hur många kritiska felset som finns med en viss konsekvens då el- och vattendistributionsnätet analyseras tillsammans med beroenden. Då en komponent fallerar, N-1, visar diagrammet att det inte finns så många scenarier med hög konsekvens, vilket visar att systemet är relativt robust då endast ett fel inträffar åt gången. Då två komponenter fallerar samtidigt, N-2, finns tre felset som är mycket mer kritiska än de övriga, vilka har redovisats i Tabell 15. Därefter kommer några tusen felset som genererar en konsekvens runt 10 000. Dessa tusen felset med så pass hög konsekvens beror i princip alla på den beroendelänk som finns mellan komponent 6 i eldistributionsnätet till pumparna vid pumpstation A, eftersom då dessa pumpar slutar fungera uppstår en i sig hög konsekvens, enligt Tabell 14.

7.3.3. Resultat för den geografiska sårbarhetsanalysen

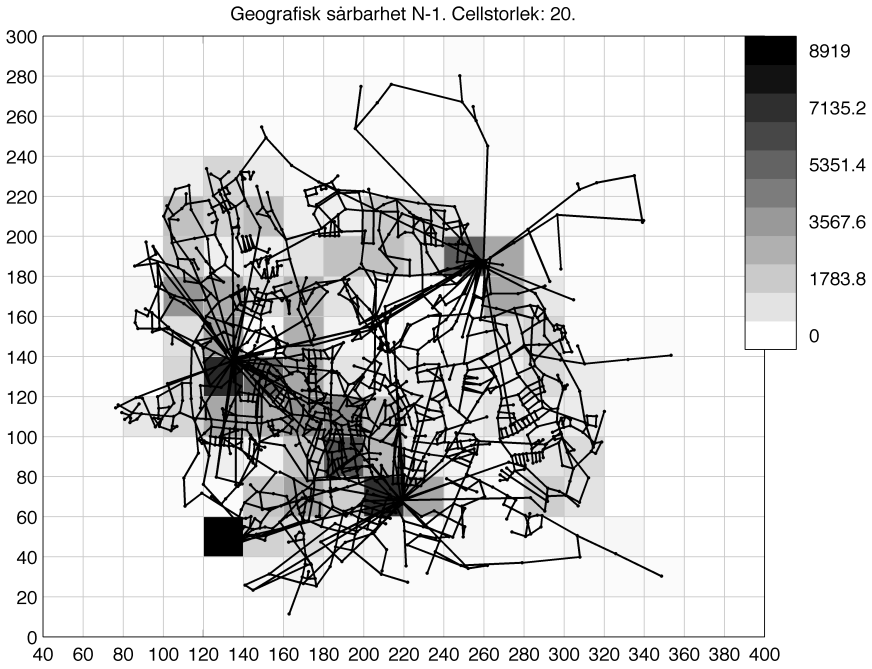
I detta avsnitt redovisas resultatet från den geografiska sårbarhetsanalysen. Då en cell tas bort antas alla komponenter inom cellen att fallera, oberoende om komponenterna finns i vatten- eller eldistributionsnätet. Tre olika simuleringar utfördes. Först en simulering då en cell tas bort i taget, N-1, med kvadratiska celler och en cellstorlek om 10 koordinatenheter som cellens sida (ca 250 meter) samt en simulering med en cellstorlek om 20 koordinatenheter (ca 500 meter). Detta representerar en yta med en ungefärlig area om 0,0625 kvadratkilometer respektive 0,25 kvadratkilometer. En sista simulering utfördes också då två celler simultant tas bort med kvadratiska celler och en cellstorlek om 20 koordinatenheter som cellens sida (ca 500 meter, 0,25 $(km)^2$). Konsekvensen

anges i antal kunder som förlorar matning av vatten adderat med det antal kunder som förlorar matning av elektricitet.



Figur 25 Geografisk sårbarhet för vatten- och eldistributionsnätet för N-1 vid en cellstorlek om 10 koordinatenheter. De celler som är mörka representerar celler vars konsekvens blir störst ifall komponenter i dessa tas bort. Konsekvensvärdet kan divideras med 47 000 för att få konsekvensen i ungefärligt CECL.

Den observante läsaren ser i Figur 25 att cellerna är mörkast runt de olika inmatningspunkterna, speciellt vid pumpstation A för vattendistributionsnätet och vid eldistributionsnätets tre olika inmatningspunkter.



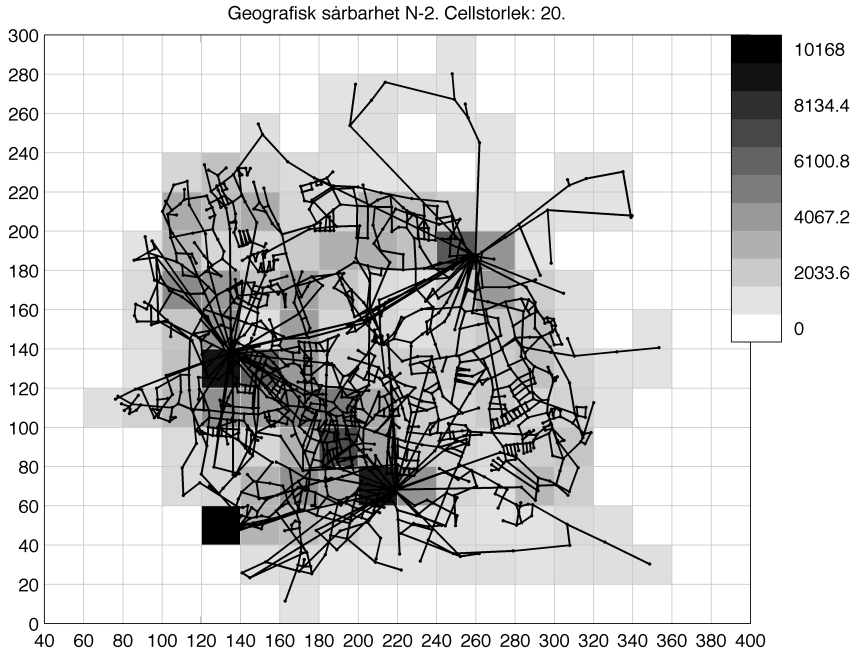
Figur 26 Geografisk sårbarhet för vatten- och eldistributionsnätet för N-1 vid en cellstorlek om 20 koordinatenheter. De celler som är mörka representerar celler vars konsekvens blir störst ifall dessa tas bort.

Även i denna figur, Figur 26, ses det tydligt att de olika geografiska sårbarheterna finns centrerade runt inmatningspunkterna i de två distributionsnätverken. Den inmatningspunkt som inte är så kritisk är den vid pumpstation B och vattenreservoar A.

Tabell 17 De fem celler som ger den högsta konsekvensen vid borttagning. Detta är för den geografiska sårbarhetssimuleringen N-1 vid en cellstorlek om 20 koordinatenheter. Koordinaterna i första kolumnen anger cellens mittpunkt. Inom parantes anges CECL-värdet.

Cell (X, Y)	Konsekvens
130, 50	8 919 (0,19)
130, 130	7 349 (0,16)
210, 70	7 267 (0,16)
190, 90	5 821 (0,12)
250, 190	5 492 (0,12)

Cell (130, 50) är inmatningspunkten för vattendistributionsnätet vid pumpstation A. Cell (130, 130) och (210, 70) är inmatningspunkter för eldistributionsnätet. Cell (190, 90) är en cell i centrala delarna av staden där många noder från både vatten- och eldistributionsnätet finns och cell (250, 190) är belägen vid den tredje inmatningspunkten för eldistributionsnätet.



Figur 27 Geografisk sårbarhet för vatten- och eldistributionsnätet för N-2 vid en cellstorlek om 20 koordinatenheter. De celler som är mörka representerar en cell vars konsekvens blir stor ifall den tas bort tillsammans med en annan cell.

I Figur 27 visas den geografiska sårbarhet som finns kring inmatningspunkterna i systemet ännu tydligare, då två celler slås ut samtidigt.

Tabell 18 De fem cellpar som ger den högsta konsekvensen ifall dessa tas bort. Detta är för den geografiska sårbarhetssimuleringen N-2 vid en cellstorlek om 20 koordinatenheter. Koordinaterna i de två första kolumnerna anger cellernas mittpunkt. Inom parantes anges CECL-värdet.

Cell 1 (X, Y)	Cell 2 (X, Y)	Konsekvens
210, 70	130, 130	36 695 (0,78)
130, 50	210, 130	32 888 (0,70)
130, 50	210, 150	32 595 (0,69)
190, 70	130, 130	27 829 (0,59)
210, 70	250, 170	24 419 (0,52)

Tabell 18 visar att konsekvensen för två utslagna celler samtidigt blir hög vid de cellpar som är kombinationer av de olika inmatningspunkterna som visades i Tabell 17.

Nedan redovisas, för simuleringen N-2, de cellpar vars synergikonsekvens är högst, dvs. de cellpar som tillsammans är mycket mer kritiska än om det slås ut var för sig.

Tabell 19 De fem cellpar som har den högsta synergistiska konsekvensen för simulering N-2 vid en cellstorlek om 20 koordinatenheter.

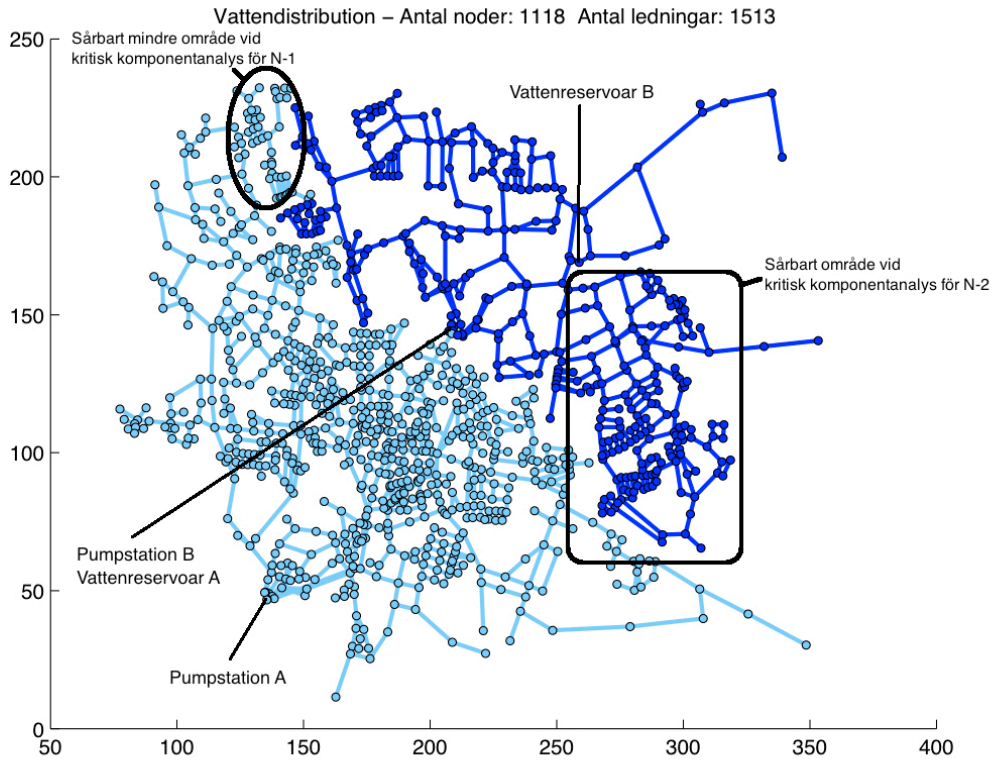
Cell 1 (X, Y)	Cell 2 (X, Y)	Konsekvens	Syn.kon. (synergi)
130, 50	210, 150	32 595	23 641 (72,5 %)
130, 50	210, 130	32 888	23 438 (71,3 %)
210, 70	130, 130	36 695	22 079 (60,2 %)
190, 70	130, 130	27 829	18 871 (67,8 %)
210, 90	250, 170	24 419	17 031 (69,7 %)

I Tabell 19 kan avläsas att alla de cellpar som orsakar högst konsekvens, Tabell 18, också har hög synergi. Detta eftersom två simultant utslagna inmatningspunkter orsakar mycket högre konsekvens än vad två utslagna inmatningspunkter orsakar var för sig, på grund av den överkapacitet som finns i systemet vid endast en utslagen inmatningspunkt.

7.3.4. Slutsatser kring sårbarhetsanalyserna

Den globala sårbarhetsanalysen som utförts visar på att vatten- och eldistributionsnätet, både oberoende av varandra och samberoende, är relativt sårbara ur ett globalt perspektiv eftersom konsekvensen för systemen initialt ökar snabbt då komponenter slås ut (en konkav och snabbt ökande linje i de globala sårbarhetsanalysdiagrammen). Detta var inte väntat eftersom båda systemen till synes är väldigt redundanta och har en del överkapacitet gällande inmatning av vatten/elektricitet i näten. Den kritiska komponentanalysen och den geografiska sårbarhetsanalysen svarar delvis på varför och var systemen är sårbara.

Vattendistributionsnätets sårbarhet, enligt den kritiska komponentanalysen, ligger vid områden som endast har en eller två inmatningsvägar. Vattendistributionsnätet är väldigt redundant, som man kan se i Figur 21, men det finns mindre områden i nätet som i sig är redundanta men som endast har en eller två inmatningsvägar från pumparna eller vattenreservoarerna. Då dessa inmatningsvägar tas bort uppstår höga konsekvenser, upp till att ca 6 000 kunder förlorar matning av vatten. I Figur 28 nedan visas de två mest sårbara områdena i vattendistributionsnätet, vid N-1 respektive N-2.



Figur 28 De två mest sårbara områdena i vattendistributionsnätet till följd av att de endast har en respektive två inmatningsvägar vid kritisk komponentanalys för N-1 respektive N-2. Ellipsen visar det mindre område som är mest sårbart vid N-1 och fyrkanten visar området som är mest sårbart vid N-2.

Eldistributionsnätets sårbarhet ligger, enligt den kritiska komponentanalysen, vid inmatningspunkterna. De högsta konsekvenserna uppstår då två komponenter fallerar vid en inmatningsstation vilket leder till att kunder inte får tillräcklig matning av elektricitet. Dessa fel kan påverka upp till ca 3 500 kunder.

Enligt den kritiska komponentanalysen har beroendet mellan eldistributionsnätet och vattendistributionsnätet en stor betydelse och det är på grund av detta som de högsta konsekvenserna uppstår (många gånger högre konsekvens jämfört med då systemen studeras oberoende). Detta beror dels på ett antal antaganden som gjorts, vilka diskuteras vidare i ”Diskussion” i kapitel 8, men detta resultat visar också på att beroenden mellan infrastrukturer *kan* påverka och markant förstora konsekvenserna av olika fel.

Den geografiska sårbarhetsanalysen som utfördes visar på de geografiska beroenden som finns speciellt vid distributionsnätens inmatningspunkter. Detta förefaller logiskt då det vid alla inmatningspunkter finns många och viktiga komponenter inom samma geografiska område.

8. Avslutande del

Detta är rapportens avslutande del där först en allmän diskussion gällande bland annat använd metod, resultaten, nätverksmodellers användbarhet och vad för åtgärder som kan tänkas följa efter en rapport som denna. Sedan kommer ett avsnitt där rapportens frågeställningar (kapitel 1, avsnitt ”Frågeställningar”) diskuteras och besvaras. Avslutningsvis ger författaren sin syn på vad för typ av framtida arbeten som bör utföras inom detta forskningsområde.

8.1. Diskussion

Nedan förs en allmän diskussion kring viktiga delar i denna rapport uppdelad i fyra huvudavsnitt; metod, resultat, nätverksmodellers användbarhet och åtgärdsförslag.

8.1.1. Metod

Metoden som använts i denna rapport (att först lägga en teoretisk grund för att sedan utföra en fallstudie) är väldigt passande för detta forskningsområde och för ett examensarbete. Det finns en del argument eller teorier gällande hur beroenden inom infrastrukturer gör infrastrukturerna mer sårbara och att dessa därför är viktiga att ta hänsyn till vid analyser (kapitel 3 i denna rapport, se exempelvis Rinaldi et al, 2001). Dessa teorier är de som har lagt grunden för detta examensarbete, men för att förankra teorierna i verkligheten krävs det olika typer av fallstudier. Ett antal fallstudier har genomförts gällande sårbarhetsanalys av infrastrukturer (exempelvis Johansson et al, 2010), men det finns oerhört många olika infrastrukturer och oerhört många sätt en fallstudie kan genomföras på, varför det är viktigt att försöka täcka hela spektrumet genom att genomföra olika typer av fallstudier och med olika metoder/modeller. Fallstudien i denna rapport är ett bidrag till detta forskningsområde. Nackdelen med denna typ av fallstudier är att det resultat som studien genererar kan bli svårtolkat, eftersom det inte alltid finns någon liknande studie med samma metod/modell att jämföra med. Exempelvis är resultatet från denna fallstudie relativt svårtolkat eftersom ingen tidigare har gjort en sårbarhetsanalys med simuleringsmodellen ISSMA på ett vatten- och eldistributionsnät inklusive beroenden dess emellan. Det kan därför vara svårt att säga om metoden som använts och därför också resultaten är ”korrekta” eller ej.

Den metod som använts i denna rapport har för ändamålet varit användbar då den kunnat ge svar på rapportens frågeställningar, se avsnitt ”Svar på frågeställningarna”, vilket har varit rapportens mål.

8.1.2. Resultat

Rapportens resultatdiskussion delas in i fyra delar: felkällor, antaganden, känslighet och giltighet.

Felkällor

De största felkällorna som finns gällande denna rapports sårbarhetsanalys har alla med indata att göra. En analys blir aldrig bättre än vad för data man har att arbeta med. Den indata som har varit mest osäkert gäller vattendistributionsnätet och dess kundantal samt kundernas förbrukning av

vatten. Det har förklarats i föregående kapitel hur data överfördes från eldistributionsnätet till de närmaste noderna i vattendistributionsnätet och hur nodernas förbrukning skalades om så att den kunde representera den totala vattenförbrukningen för hela staden. Detta kan ge stora fel i *var* vattenförbrukningen är högst (exempelvis lågzon/högzon), vilket har stor inverkan på den funktionella modellen i ISSMA. Ett resultat som kan härledas från detta kan vara det beroende som visas i Diagram 8 och i den kritiska komponentanalysen då ett fel i komponent 6 i eldistributionsnätet leder till att pumparna vid pumpstation A slutar fungera vilket i sin tur leder till att ca 8 000 kunder blir utan vatten. Detta beror på att utmatningsnodernas förbrukning inte stämmer så väl överrens med verkligheten, speciellt mellan lågzon och högzon, eftersom vattenreservoar A borde kunna försörja hela lågzonen under en viss tid även om pumparna inte fungerar. I verkligheten ska vattenförbrukningen vara ca 42 % i lågzonen och 58 % i högzonen, medan det i modellen blev en fördelning på 66,7 % i lågzonen och 33,3 % i högzonen, vilket är en markant skillnad mellan verklighet och modell. Detta är självfallet en svaghet i modellen vilken kan resultera i sårbarheter i systemet som inte nödvändigtvis finns i verkligheten.

En annan felkälla som har med indata att göra är tolkning av ritningar. För att göra om vattendistributionsnätet till noder och länkar måste beslut tas var ledningarna går och hur dessa sitter ihop, vilket inte alltid är självklart då ritningen som användes ej var tillräckligt högupplöst. Detta kan ha lett till möjliga fel i nätverksrepresentationen av vattendistributionsnätet vilket kan ha gjort systemet mer eller mindre redundant än vad det borde ha varit.

Det eldistributionsnät som användes i analysen var modellerat som ett nätverk sedan tidigare, vilket kan vara en felkälla då författaren till denna rapport inte har haft lika stor inblick i hur väl eldistributionsnätet är modellerat i förhållande till verkligheten.

Eldistributionsnätet har totalt ca 800 komponenter medan vattendistributionsnätet har totalt över 2500 komponenter. Detta kan ha en stor inverkan på den globala sårbarhetsanalysen vid presentationen av resultaten eftersom båda systemen har normerats i de diagram som presenterats i denna rapport, se exempelvis Diagram 8. Att 20 % av vattendistributionsnätets komponenter fallerar betyder att ca 500 komponenter är utslagna, medan 20 % av komponenterna för eldistributionsnätet endast är ca 160 komponenter. Det är svårt att avväga vilket som är bäst att använda vid presentation av resultatet från global sårbarhetsanalys, andel komponenter i ett system eller antal. Problemet med antal komponenter är att det är svårare att jämföra systemen på ett bra sätt, förutom med andra system som har precis samma antal komponenter. Andelen komponenter gör att systemen blir enklare att jämföra, men som sagt så måste det reflekteras över den skillnad i komponentantal som föreligger.

Gällande den globala sårbarhetsanalysen är det generellt viktigt att reflektera över det komponentantal som de globala sårbarhetsdiagrammen visar (givet att diagrammen visar komponentandel på X-axeln). 20 % av vattendistributionsnätets komponenter är som sagt ca 500 stycken och 20 % av vatten- och eldistributionsnätets komponenter tillsammans är ca 700 stycken. Det kan diskuteras ifall ett system kan anses vara sårbart då det krävs att 700

komponenter i medeltal ska gå sönder för att 90 % av kunderna ska bli utan vatten- och elförsörjning. Å andra sidan är 700 komponenter ”endast” 20 % av det totala antalet komponenter. Enligt författarens åsikt är det viktigt att se detta ur båda perspektiven, både utefter antalet komponenter men också efter andelen komponenter.

Antaganden/begränsningar

De största antagandena som gjorts vid denna sårbarhetsanalys är de som är förknippade med att analysen gjordes tidsoberoende. Därmed var det inte möjligt att modellera buffertar och reservsystem på ett fullt så verklighetstroget sätt. Buffertar, så som vattenreservoarerna i denna analys, borde egentligen endast kunna försörja den aktuella staden med vatten i ca 5 timmar (enligt vattenverket), om pumparna som matar dessa med vatten går sönder. Eftersom analysen gjordes tidsoberoende modellerades dessa reservoarer att alltid fungera, om de inte själva slås ut. Detta antagande gör det modellerade systemet mer robust än vad det egentligen borde vara. Å andra sidan gjordes ett antagande att reservsystem inte tas med i modelleringen, dvs. pumparnas reservgeneratorer går inte igång. Detta antagande gör systemet mer sårbart för beroenden än vad det egentligen borde vara. Författaren anser dock att det inte behöver vara en nackdel att modellera systemet på detta viset vid tidoberoende analys. Detta eftersom analysen då kan visa på ett möjligt behov av reservsystem, och att dessa faktiskt är motiverade.

Vilket konsekvensmått som används påverkar givetvis bilden av sårbarheten som analysen ger. I denna analys valdes att konsekvensmåttet skulle baseras på antalet kunder som förlorar matning av resurserna i fråga, men om konsekvensmåttet hade valts till något annat kunde analysen ha gett andra resultat. Att använda kunder som grund till konsekvensmåttet gjordes med anledning av bristen på tillgänglig data. Överlag anser författaren att kunder är ett relativt bra konsekvensmått om målet är att studera sårbarheten med fokus på stadens befolkning i allmänhet. Det som kan missas med detta konsekvensmått är sårbarheten för viktiga industrier eller andra viktiga resurser för samhället så som sjukvården, då sjukhus är beroende av både vatten och elektricitet. För att utvärdera sårbarheten för de sistnämnda rekommenderar författaren att djupare sårbarhetsanalyser utförs med inriktning mot detta.

En begränsning i programmet ISSMA som kan påverka sårbarhetsbedömningen av denna analys är att den funktionella modellen inte tar hänsyn till ledningars kapacitet. Detta är en begräsning i programmet som kan leda till att det modellerade systemet blir mindre sårbart än det är i verkligheten. Exempelvis om en elledning slutar fungera och all elektricitet måste ta en annan väg i nätverket kan de övriga ledningarna överbelastas och i värsta fall också gå sönder. Dessa effekter, speciellt för elnätet, kan leda till en typ av cascading failure, dvs. ett fel som sprider sig och får högre konsekvenser än förväntat. Denna typ av cascading failure kunde därmed inte studeras i rapporten.

I resultatet uppstod vissa felset, se Tabell 15, som författaren tror fick större konsekvens än de egentligen borde ha fått i verkligheten på grund av hur den funktionella modellen fungerar i kombination med det konsekvensmått som valts. Ifall vissa specifika noder tas bort i kombination med att systemet har

underkapacitet kan det leda till att den funktionella modellen fördelar ut vatten/elektricitet på ett annat sätt jämfört med om systemet endast skulle ha underkapacitet men de specifika noderna skulle vara fungerande. Detta kan leda till att lika stor mängd resurser fördelas ut, men att de fördelas ut till noder som försörjer färre kunder. Resultatet av detta kan bli att konsekvensen blir högre då de specifika noderna tas bort även då noderna egentligen inte är kritiska.

En annan begränsning i ISSMA som gjorde modellering av vattendistributionsnätet svår och som kan påverka resultatets validitet var att modellen inte tog hänsyn till tryck i vattenledningarna. När en pump slås ut påverkas trycket i ledningarna vilket kan få konsekvenser för hela systemet. I ISSMA modellerades pumparna som inmatningsnoder, men det är inte samma sak som ifall det skulle göras tryckberäkningar. Det är svårt att säga ifall denna begränsning gör att resultaten från modellen skulle ge en för låg eller hög sårbarhet jämfört med verkligheten, men troligt är att systemet skulle bli mer sårbart ifall det i modellen togs hänsyn till tryckfall. Detta eftersom det i princip tillkommer en till variabel som måste vara tillfredställd för att vattendistributionen ska fungera normalt.

Känslighet

Det är svårt att bedöma hur känsligt resultatet i denna rapport är, dvs. hur resultatet skulle variera med varierande indata. Eftersom det system som analyserats i rapporten är en typ av komplext system är det möjligt att resultatet kan vara känsligt mot variationer i indata. Om ett antal ledningar skulle ändras i de två distributionsnätverken eller om exempelvis inmatningskapaciteten skulle ändras är det troligt att sårbarheten för systemen skulle kunna variera markant. Att utföra en ordentlig känslighetsanalys på resultatet är tyvärr för tidskrävande givet omfattningen för denna rapport, med tanke på att endast de vanliga simuleringarna tog 40 timmar i datorberäkningstid.

I den globala sårbarhetsanalysen är det alltid fördelaktigt att utföra så många iterationer som möjligt. I denna analys gjordes endast 100 iterationer vilket kan anses vara lite, med tanke på att komponenter tas bort slumpmässigt och målet är att resultatet ska vara så representativt ett medelvärde som möjligt. Även här är det en fråga om tidsåtgång då 100 iterationer redan tog ca 20 timmars simuleringstid för den globala sårbarhetsanalysen på grund av den stora mängden komponenter i systemet.

Giltighet

På grund av felkällorna, antagandena och begränsningarna som påpekats ovan bör slutsatserna i denna rapport ses som en vägledning till hur sårbart vatten- och eldistributionsnätet i aktuell stad är, både beroende och oberoende. Författaren anser att resultatet ska tolkas med eftertanke och ses som en input till framtida åtgärder för att förbättra säkerheten i distributionsnäten. För åtgärdsförslag som författaren rekommenderar, se avsnittet ”Åtgärdsförslag” nedan.

8.1.3. Nätverksmodellers användbarhet

Nätverksmodeller, som exempelvis ISSMA som användes i denna analys, anser författaren vara ett bra verktyg som kan används vid sårbarhetsanalys. De är bra då många scenarier kan analyseras utan att det tar för lång tid. Exempelvis kan nämnas att denna sårbarhetsanalys analyserade mer än 6 miljoner olika scenarier vid den kritiska komponentanalysen. En stor fråga är dock hur avancerad den fysiska modellen bör vara. Ju mer avancerad och verklighetstrogen denna är, exempelvis om den kan beräkna tryck och ledningars kapacitet, desto mer tidskrävande blir modellen. Om exempelvis beräkningen av ett scenario görs 1 sekund längre motsvarar det en förlängd beräkningstid på 70 dygn vid analys av 6 miljoner scenarier.

Författaren anser dock att mer forskning och prövning av modeller baserade på nätverksteori med olika typer av mer eller mindre avancerade fysiska modeller behöver genomföras. Detta för att se ifall denna metod verkligen representerar sårbarheterna i de system som analyseras på ett bra sätt relativt till dess tidsåtgång.

8.1.4. Åtgärdsförslag

Det är svårt för författaren till denna rapport att komma med konkreta åtgärdsförslag eftersom författaren har bristande kunskap gällande hur vatten- och eldistributionsnät drivs i praktiken och vad som är möjliga och rimliga åtgärder. Det är dock alltid viktigt att tänka på vad en åtgärd kostar och väga det mot den potentiella nyttan åtgärden medför, exempelvis genom någon typ av kostnad-nytta-analys. Det är också viktigt att aktuell beslutsfattare funderar över vad som är en ”acceptabel” konsekvens och vad som inte är acceptabelt. Kan det accepteras att 10 000 kunder vid två samtidiga fel i distributionsnäten ej får tillgång till vatten eller elektricitet? För att kunna väga olika åtgärders rimlighet mot varandra måste det först bestämmas vad som kan accepteras och inte.

De sårbarheter som denna rapport identifierat är inmatningspunkterna, mindre områden med endast en eller två inmatningsvägar i vattendistributionsnätet samt beroenden.

- Vid inmatningspunkterna till eldistributionsnätet finns det sårbarheter som beror på att två utslagna komponenter kan orsaka att inmatningspunkten blir utslagen. Åtgärd mot detta kan vara att undersöka hur felsäkra dessa komponenter och installationer är. Det kan även vara lämpligt att undersöka om det går att öka inmatningskapaciteten för övriga inmatningspunkter för att minska sårbarheten.

- Vattendistributionsnätet har sårbarheter i form av att mindre områden endast har en eller två inmatningsvägar, se Figur 28. Här bör det undersökas ifall alternativa matningsledningar bör byggas. Denna åtgärd bör ställas i relation till hur viktiga dessa mindre områden är. Finns där exempelvis ett sjukhus eller någon viktig industri?

- Resultatet i denna rapport visar också på sårbarheten som uppstår på grund av beroenden mellan el- och vattendistributionsnätet. Slutsatsen

som kan dras är att de reservgeneratorer som finns till pumparna i vattendistributionsnätet är mycket viktiga, eftersom de största konsekvenserna som uppstod var på grund av beroenden. Det är således viktigt att ha regelbunden kontroll på att reservgeneratorerna för pumparna i vattendistributionsnätet fungerar tillfyllest för att minimera risken av att dessa inte skulle starta vid elavbrott.

- Den geografiska sårbarhetsanalysen visade på att de områden som är mest sårbara, ur ett geografiskt perspektiv, för vatten- och eldistributionsnätet är inmatningspunkterna. Ytterligare utredning gällande hur stora riskerna för totalhaveri är för alla inmatningspunkter rekommenderas. Kan exempelvis en brand i pumpstation A förstöra hela stationen? Är det möjligt för en sabotör att ha enkelt tillträde till någon inmatningspunkt i eldistributionsnätet?

- Vattendistributionsnätet har endast en inmatningspunkt in till staden, och det bör här göras ytterligare undersökningar hur stor risk detta medför och ifall det är skäligt att bygga en alternativ inmatningspunkt in till staden, vilket skulle minska denna sårbarhet.

8.2. Svar på frågeställningarna

I detta avsnitt ges svar på de frågeställningarna som var rapportens mål att besvara.

> **Hur påverkar de studerade infrastrukturerna varandra? Vilka kopplingar finns det?**

Genom litteraturstudie och avstämning med vattenverket i aktuell stad har beroenden mellan vatten- och eldistributionsnätet identifierats. Det viktigaste beroendet är pumpar i vattendistributionsnätets beroende utav elektricitet från eldistributionsnätet. Det är detta beroende som funnits i aktuell stad och som implementerats i modellen i denna rapport. Ett annat beroende, som inte funnits i staden, men som finns mellan eldistributionsnät och vattendistributionsnät i andra städer är att vissa kraftverk är beroende av kylvatten (Rinaldi et al, 2001).

> **För de studerade infrastrukturerna, både beroende och oberoende, var finns sårbarheterna och varför finns sårbarheterna där?**

Den sårbarhetsanalys som genomfördes på vatten- och eldistributionsnätet visade på ett antal sårbarheter, både beroende och oberoende.

Då systemen analyserades oberoende av varandra fanns sårbarheterna i vattendistributionsnätet vid områden i nätet som endast har en eller två inmatningsvägar. Dessa sårbarheter identifierades genom den kritiska komponentanalysen. Konsekvensen av att dessa inmatningsvägarna till områdena slogs ut var att ca 1 000 kunder förlorade vattenförsörjning vid ett fel (N-1) och att ca 5 500 kunder förlorade vattenförsörjning vid två samtidiga fel (N-2). I eldistributionsnätet låg sårbarheterna speciellt vid inmatningspunkterna där två simultana fel kunde orsaka att en inmatningspunkt till stor del slogs ut, vilket resulterade i att upp till ca 3500 kunder blev utan elektricitet.

Då systemen analyserades beroende av varandra visade det sig att de största sårbarheterna fanns just på grund av beroendet mellan vatten- och eldistributionsnätet. Maximalt förlorade ca 32 000 kunder matning av vatten då två fel inträffade samtidigt (N-2) vid den kritiska komponentanalysen, vilket berodde på att pumpar förlorade elektricitet samtidigt som en vattenreservoar gick sönder. De geografiska sårbarheterna och de geografiska beroenden som finns för de båda distributionsinfrastrukturerna ligger speciellt vid inmatningspunkterna, där många viktiga komponenter finns på samma plats.

> **Vad är skillnaden, resultatmässigt, vid sårbarhetsanalys av ett enskilt infrastruktursystem jämfört med analys av infrastrukturer där beroenden tas med i analysen?**

Den stora skillnaden vid analys av oberoende infrastruktur och analys av beroende infrastruktur är, enligt denna fallstudie, att konsekvenserna kan eskalera. Då beroenden inte analyserades blev konsekvenserna inte högre än ca 1 000 kunder för N-1 vid den kritiska komponentanalysen och 5 500 kunder för N-2. Då vatten- och eldistributionsnätet studerades med beroenden eskalerade detta och konsekvensen ökades till ca 8 000 kunder för N-1 vid den kritiska komponentanalysen och ca 32 000 kunder vid N-2. De felset som orsakade de högsta konsekvenserna var alla av typen cascading failure och escalating failure. Detta är i princip det som teorin angående beroenden inom infrastruktur antar, dvs. att konsekvenserna kan bli mycket högre då system analyseras med beroenden dess emellan (se exempelvis Rinaldi et al, 2001; Little, 2002; 2004).

Det rekommenderas därför att vid olika typer av sårbarhetsanalyser alltid fundera kring vilka beroenden som finns, eller kan finnas, oavsett om analysen är kvantitativ som denna eller kvalitativ. Om beroendena är starka borde de undersökas djupare. Här kan de tre frågorna som beskrevs i kapitel 3 användas (Little, 2002):

- Vad kan hända på grund utav beroenden mellan kritisk infrastruktur?
- Vad är sannolikheten att beroenden orsakar händelser som är oacceptabla inom kritisk infrastruktur?
- Vad kan dessa konsekvenser vara?

Beroende på analysens omfattning är det enligt författarens mening inte alltid en nödvändighet att kvantifiera dessa. I små projekt kan det räcka att endast kvalitativt behandla dessa tre frågor. Det viktiga är att den som utför analysen är medveten om vilka beroenden som finns, för att inte missa dessa och på så sätt potentiellt förbise de största sårbarheterna i systemet.

8.3. Framtida arbete/forskning

Det finns mycket arbete och forskning som bör utföras inom detta område. Nedan anges en lista på ämnen som författaren anser skulle vara intressant att forska inom gällande analys av samberoende infrastruktur, med fokus på potentiella framtida examensarbeten. Dessa bör inte ses som färdiga uppslag utan endast grundläggande idéer.

- Fler fallstudier av beroende infrastruktur, och gärna inom vatten- och eldistribution med användning av exempelvis modellen ISSMA. Detta

eftersom det inte finns många fallstudier som analyserat vatten- och eldistributionsnäts samberoende och det finns inga tidigare som gjort det med modellen ISSMA. Fler fallstudier kan förankra teori samt ge en referenspunkt så att jämförelser mellan olika studier och system kan bli möjligt.

- Testa olika modeller baserade på nätverksteori och jämföra vilket resultat detta ger. Eftersom det finns många olika modeller och metoder hur sårbarhet av beroende infrastrukturer kan analyseras (se exempelvis Apostolakis & Patterson, 2007; Zimmerman & Restrepo, 2006 och Johansson & Hassel, 2010) kan det vara intressant att undersöka hur resultatet mellan dessa skiljer sig. Återigen är detta bra också för att ha en referenspunkt vid framtida analyser.

- Att kombinera kraftigare fysiska/funktionella modeller och nätverksteori, exempelvis så att ISSMA kan ta hänsyn till ledningars kapacitet och/eller beräkna tryck i ledningar vid analys av vattendistribution, skulle vara intressant. En möjlig infallsvinkel kan här vara att jämföra en avancerad modell mot en enkel modell, och se hur resultatet varierar. Ger en avancerad modell ”bättre” resultat i relation till skillnaden i beräkningstid?

- I denna rapport gjordes sårbarhetsanalysen tidsoberoende. Att göra en sårbarhetsanalys tidsberoende skulle vara intressant då det ger hela problemet en ny dimension. Att analysera sårbarhet tidsberoende går att göra på många sätt; hur tar man bort komponenter? I vilket tidssteg? Hur beräknas konsekvensen? Det är även här intressant att undersöka hur resultatet skiljer sig mellan tidsberoende analys och tidsoberoende analys, alternativt olika typer av tidsberoende analyser.

- Att undersöka hur resultatet från dessa nätverksmodeller verkligen speglar verkligheten, dvs. modellens validitet, anser författaren också skulle vara intressant att studera. Detta kan exempelvis göras genom att studera ett ”känt” infrastruktursnätverk med kända sårbarheter, och se ifall modellen identifierar dessa.

9. Källförteckning

Albert, R., Albert I. & Nakarodo, G.L. (2004) Structural vulnerability of the North American power grid. *Physical Review E*, Lett. 59, art. No. 025103.

Albert, R. & Barabási, A.L. (2002) Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics.* Vol. 74, No. 1, pp.47-97.

Amaral, L.A.N. & Ottino, J.M., (2004) Complex networks – Augmenting the framework for the study of complex systems. *The European Pysical Journal B,* Vol. 38, No. 2, pp. 147-162.

Apostolakis, G.E. & Patterson, S.A. (2007) Identification of critical locations across multiple infrastructures for terrorist actions. *Reliability Engineering & System Safety,* Vol. 92, pp. 1183-1203.

Crucitti, P., Latora, V. & Marchiori, M. (2004) A topological analysis of the Italian electric power grid. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,* Vol. 338, No. 1-2, pp. 92-97.

Dueñas-Osorio, L., Craig, J.I. & Goodno, B.J. (2006) Seismic response of critical inderdependent networks, *Wiley InterScience*. DOI: 10.1002/eqe.626.

Energimyndigheten (2008) *Stormen Gudrun*, Tillgänglig på Internet: http://www.energimyndigheten.se/sv/Om-oss/Var-verksamhet/Trygg-energiforsorjning/Elforsorjning/Lardomar-fran-intraffade-elavbrott/Stormen-Gudrun/
[Skriven 2008-01-19, senast ändrad 2009-08-07, hämtad 2010-09-14]

Hallin, P.O., Nilsson, J. & Olofsson, N. (2004) Kommunal sårbarhetsanalys. Krisberedskapsmyndigheten, Stockholm.

Hassel, H. (2010) Risk and vulnerability analysis in society's proactive emergency management – Developing methods and improving practices. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Doctoral Thesis, Lund.

Holmgren, Å.J. (2006) Using graph models to analyze the vulnerability of electric power networks. *Risk Analysis*, Vol. 26, No. 4, pp. 995-969.

Johansson, H. & Jönsson, H. (2007) Metoder för risk och sårbarhetsanalys ur ett systemperspektiv. LUCRAM, Lund University, Rapport 1010, Lund.

Johansson, J., Jönsson, H. & Johansson, H. (2007a) Analysing the vulnerability of electric distribution systems: A step towards incorporating societal consequences of disruptions. *International Journal of Emergency Management*, Vol. 4, No. 1, pp. 4-17.

Johansson, J., Jönsson, H. & Johansson, H. (2007b) Analys av sårbarhet med hjälp av nätverksmodeller. LUCRAM, Lund University, Rapport 1011, Lund.

Johansson, J., Jönsson, H. & Johansson, H. (2008) Identifying critical components in technical infrastructure networks, *Journal of risk and reliability,* Vol. 222, Part O, pp. 235-243.

Johansson, J. (2010) Risk and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures - Addressing socio-technical systems. Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering, Lund University, Doctoral Thesis, Lund.

Johansson, J. & Hassel, H. (2010) An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering and System Safety.* DOI: 10.1016/j.ress.2010.06.010.

Johansson, J., Hassel, H., & Cedergren, A. (2010) Vulnerability analysis of interdependent critical infrastuctures: Case study of the swedish railway system, Submitted to *International Journal of Critical Infrastructures*.

Johansson, J. & Hassel, H. (2011) Geographical vulnerability analysis of interdependent critical infrastructure. Submitted to *11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Zurich, Switzerland.

Kaplan, S. & Garrick, B.J. (1981) On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 11-27.

Kaplan, S., Haimes, Y.Y. & Garrick, B.J. (2001) Fitting hierarchical holographic modeling into the theory of scenario structuring and a resulting refinement to the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, Vol. 21, No. 5, pp. 807-819.

Little, R.G. (2002) Controlling cascading failure: Understanding the vulnerabilities of interconnected infrastructures. *Journal of Urban Technology,* Vol. 9, No. 1, pp. 109-123.

Little, R.G. (2004) A socio-technical approach to understanding and enhancing the reliability of interdependent infrastructure systems. *International Journal of Emergency Management*, Vol. 2, No. 1-2, pp. 98-110.

LIVSFS 2008:13, *Livsmedelsverkets föreskrifter om åtgärder mot sabotage och annan skadegörelse riktad mot dricksvattenanläggningar*, Uppsala: Livsmedelsverket.

Lunds Universitet (2010) *FRIVA*, Tillgänglig på Internet:
http://www.friva.lucram.lu.se/
[Senast ändrad: 2010-09-01, hämtad: 2010-09-17]

MSB (2009) *Skydd av kritisk infrastruktur*, Tillgänglig på internet:
http://www.msb.se/sv/Forebyggande/Samhallsviktig-verksamhet/Kritisk-infrastruktur/
[Senast ändrad: 2009-09-29, hämtad: 2010-11-05]

Newman, M.E.J. (2003) The Structure and function of complex networks. *SIAM Review*, Vol. 45, No. 2, pp. 167-256.

Nykvist, S. & Ohlson, E. (2007) Nätverksteori som verktyg vid risk- och sårbarhetsanalys av eldistributionsnät. Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Rapport 5222, Lund.

Rinaldi, S.M., Peerenboom, J.P. & Kelly, T.K. (2001) Identifying, understanding, and analyzing - Critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine,* Vol. 21, No. 6, pp. 11-25.

Salomonsson, T. & Schéele, M. (2005) Sårbarhetsanalys av ett infrastrukturnätverk: Användning av nätverksteorier för sårbarhetsanalys av komplexa nätverk. Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Rapport 5170, Lund.

Slovic, P. (2001) The risk game. *Journal of Hazardous Materials,* No. 86, pp. 17-24.

Svensk energi (2009) *Så distribueras el*, Tillgänglig på Internet: http://www.svenskenergi.se/sv/Om-el/Elnatet/ [Senast ändrad: 2009-04-21, hämtad:2010-11-19]

Wilhelmsson, A. & Johansson, J. (2009) Assessing response system capabilities of socio-technival systems. *The International Emergency Management Society* (TIEMS2009), Istanbul, Turkey, June 9-11.

Zimmerman, R. & Restrepo, C.E. (2006) The next step: quantifying infrastructure interdependencies to improve security. *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 2, No. 2/3, pp. 215–230.