

Sårbarhetsanalys – komplexa system

Eldistributionsnät



Håkan Nilsson

Oskar Johansson

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Sårbarhetsanalys - komplexasystem

Eldistributionsnät

**Håkan Nilsson
Oskar Johansson**

Lund, December 2005

Sårbarhetsanalys - komplexasystem

Håkan Nilsson
Oskar Johansson

Antal sidor: 67

Illustrationer: Håkan Nilsson och Oskar Johansson

Nyckelord

Sårbarhet, elkraftssystemen, elnät, eldistributionsnät, topologi, fördelningsstationer, intermeditet, klustringskoefficient, grad, E.ON Elnät Sverige AB.

Industriell Elektroteknik och Automation
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet
Box 118
221 00 Lund
Telefon: 046-222 9290
Telefax: 046- 14 21 14

Industrial Electrical Engineering and
Automation
Lund Institute of Technology
Lund University
Box 118
221 00 Lund, Sweden
Tel: +46-46-222 9290
Fax: +46-46- 14 21 1

Abstract

Finance and efficiency have been the focal points of the contemporary society for the last few decades. Achieving high efficiency and profitability renders society highly dependent on complex technical systems.

When doing a vulnerability analysis one must always consider hazards from a systemic point of view contrary to a risk analysis where one investigates what effects a problem can have on the system.

The power grid is one of the most essential infrastructures in modern society. Consequently, should this infrastructure break down it would have greater adverse effects on society than the break down of any other critical infrastructure. In this report we will do a topologic analysis of the power distribution systems in Malmö. The report will only analyse the 26 substations with connecting power lines. Transmission capacity and instability will not be included in the report. However, simulations do include both the parameters of fault and break down frequencies.

Förord

Detta arbete är det sista och avslutande momentet i civilingenjörsutbildningen på 180 poäng, för Håkan en avslutning vid Rikshanteringsprogrammet, för Oskar en avslutning med inriktning på Industriella styrsystem. Arbetet omfattar 2x20 poäng och har utförts vid institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation i samarbete med Riskhanteringsprogrammet.

För god hjälp och handledning under arbetets gång vill vi tacka våra handledare Gustaf Olsson (IEA LTH), Olof Samuelsson (IEA LTH) , Ulf Lager (E.ON Elnät Sverige AB) och Peter Hjalmar (E.ON Elnät Sverige AB).

Ett speciellt stort tack vill vi rikta till forskarstuderande Jonas Johansson (IEA LTH) och Teknisk doktor Henrik Johansson (Brandteknik LTH) för idéer och inspiration under arbetets gång, samt att vi fått använda deras programvara vilken gjort stora delar av arbetet möjligt.

Tacka vill vi också all personal på E.ON Elnät som varit vänliga och hjälpsamma med att ta fram bakgrundsmaterial och fakta, de har även gjort så att vi känt oss välkomna i deras gemenskap.

Vi vill även här passa på och rikta ett stort tack till alla de personer som väglett, stöttat oss och gjort de här 4,5 åren på LTH möjliga, familj, vänner, lärare och studiekamrater.

Håkan Nilsson
Oskar Johansson

Malmö, december 2005

Summary

Introduction

The power grid has expanded at an enormous pace in the last century. In the beginning of the century the power grid contained several separate local grids, now a complex network interconnected both internationally and nationally. Because more and more techniques are dependent of electricity, the electrical power in today's society has become an indispensable asset. The Swedish power grid is a robust and well-connected network. This has been well established in a previous vulnerability analysis.

Definition: Vulnerability is the effect a specific lost substation/power cable creates on the distribution grid as a whole. This report has included for the analysis essential parameters such as, documented risk, length of cable, clustering coefficient and betweenness. Robustness is the opposite of vulnerability.

Methods

In the simulations and calculations of Malmö's distribution grid, two computer programs developed at Lund Institute of Technology by Jonas Johansson, PhD student at Industrial Electrical Engineering and Automation and Henrik Johansson, PhD at the Department of Fire Safety Engineering have been applied.

During the simulations four types of simulation alternatives were available; rejection of vertices with the highest grade, random rejection of a vertex, rejection with highest betweenness and random rejection of edges. When an edge gets rejected one or several vertices could lose contact with the main source vertices and thereby become useless. Simulations will effectively continue until all vertices have lost contact with the main source vertices, which renders them useless. Consequently, one thousand simulations will give a good average value of how fast it takes for a vertex to lose contact with the main source vertices. Every vertex will thereby get an assigned value of how vulnerable it is in relation to the rest of the network. A low value means that it lost connection at an early stage, which is equivalent to a less advantageous placement in the network.

Demarcations

In the report we are analysing the vulnerability of Malmö's distribution grid. The geographic demarcations have been limited to the two primary input stations from the national power grid, Sege and Arrie, which feed electricity to Malmö. Since investigating further down the network will not contribute additional input this analysis has been restricted to the investigation of Malmö's 26 substations in the network.

In this report a graph, specifically an electrical distribution grid, will be considered equal to a technical network. Substations and branches will be represented as vertices. The graph's edges will correspond to cables and transmission lines. The power grid will only be looked upon in a topological aspect. Consequently, no considerations will be taken to any electrical

flux, parameters such as transmission capacity and instability will in other words be excluded. Looking at the power grid from a topological perspective gives a possibility to view the grid in a completely new and unorthodox perspective. The simulations will, however, include both the parameters of fault and break down frequencies

The vulnerability analysis

In vulnerability analysis one considers a hazard from the system's point of view, contrary to a risk analysis where one looks at what harm a specific hazard can do to the system. In a larger context one can say that a vulnerability analysis is a vital part of the bigger concept of crisis management. In other words, a well-executed vulnerability analysis is a prerequisite for good crisis management.

When one does a vulnerability analysis of the critical infrastructure it is of the utmost importance to include the perspective of society. The strain on civilians in larger catastrophes becomes obvious at a very early stage. Since the electrical infrastructure is one of the most essential infrastructures in modern society the consequences of a major break down would be catastrophic. The expansion and interconnection between different power grids have made it more or less impossible to understand and/or predict the stability in the contemporary power grid.

Today's electrical power grid has safety mechanisms for instance should a minor interference in the system for instance occur it would not cause any greater inconvenient consequences. In fact, most errors pass by the common consumer without him ever being aware of it since faulty connections can be isolated, because of high redundancy and automatic switchovers. It is more likely that the common consumer will be affected if errors occur in the lower grid of the grid hierarchy.

When comparing the clustering coefficient C and the average length l of the distribution grid with the former analyses on the Nordic and the West American power grids. An unexpected result was that the West American power grids and Malmö's distribution grid had the same clustering coefficient.

This result implies that the West American power grid is as well connected as Malmö's distribution grid. One possible explanation that Malmö's clustering coefficient C is not essentially higher than the American could be that there has been more thought behind the initial design of the West American main power grid. Another explanation could be that Malmö's power grid provides for and follows the city of Malmö's constant dynamic growth and development. The construction of a main power grid is based on a more fixed reality. In other words, cities have fixed geographic positions.

Another interesting observation was when simulations with regards to rejection of vertices with highest grade were executed. A rejection of the vertices with the highest grade did not necessarily result in the most negative effect on the system. Our interpretation and conclusion of this result is that high grade does not necessarily imply high significance for the network as a whole. When designing and constructing a power grid, the main goal should be to design it in such away that every individual station in the network has equal importance and thereby has little or no influence on the grid when rejected. In light of these findings it should be noted that a terrorist attack or sabotage on a high grade station could with little effort cause a

large disturbance. During the vulnerability analysis of Malmö's distribution grid, we discovered that when approximately 10 % of the vertices were rejected, over 50% of the network lost connection with the main source vertices.

When observing the analysis results regarding random rejection of vertices, one can initially note a linear behaviour. A collapse of the network does not occur until approximately 30 % of the vertices have been rejected, based on simulations where the vertices with higher grade get rejected. The conclusion of the vulnerability analysis on Malmö's distribution grid, regarding rejection of vertices, indicates a robust network.

Simulations have also been done with and without respect to fault and break down frequencies. Despite the fact that it only changed the character of the graph slightly when studying it in a macro perspective, we found that analysing the network in a micro perspective showed significant differences.

Malmö's distribution grid clearly has a few highly vital stations that are essential for the function of the whole network. Consequently, one can conclude that distributing the connections more evenly over all stations or increasing the number of stations would achieve a more robust network. An alternative to this would be islanding, in other words constructing locally generated feedings to the network.

Conclusion

With regards to the applied method of analysis, we conclude that doing a vulnerability analysis on a network like Malmö's, with the help of a topologic study, is both feasible and gives a realistic result. When we first set out to do this analysis those informed in this matter, employed with E.ON, stated that it was a robust network. Our conclusion, having investigated Malmö's distribution grid from a macro perspective, confirms those findings.

With the application of our results on an existing risk analysis we were able to make a list of suggestions prioritising the stations that should be the objects of initial reinvestment and upgrading.

Innehållsförteckning

1	Inledning	2
1.1	Syfte med analysen	2
1.2	Frågeställningar	2
1.3	Rapporten i korthet	3
1.4	Väsentliga resultat	4
1.5	Kortfattade slutsatser	5
2	Sårbarhetsanalysens uppbyggnad	7
2.1	Lagar och förordningar	9
3	Nätverkstrukturer	11
3.1	Small world	11
3.2	Slumpmässiga nätverk	11
3.3	Infrastrukturella nätverk	11
4	Metoder för nätverksanalys	13
4.1	Nätverksanalys	13
4.1.1	Grafteori	13
4.2	Motivering av valda metoder	16
5	Svenska kraftsystemets uppbyggnad	18
5.1	Det svenska elnätet	18
5.2	Malmös distributionsnät	18
5.3	Reglerande organ inom elproduktionen	20
5.3.1	Statens Energimyndighet	20
5.3.2	Elsäkerhetsverket	20
5.3.3	Svenska Kraftnät	20
5.3.4	Svensk elmarknad	20
5.4	Hot mot elnätet	21
6	Sårbarhetsanalysens utförande och resultat	22
6.1	Avgränsningar	22
6.1.1	Fördelningsstationer	23
6.2	Syfte med angreppssättet	24
6.3	Valda metoder	24
6.4	Viktning av resultaten	24
6.5	Risikanalysen utförd på distributionsnätet i Malmö	25
6.6	Beskrivning av simuleringsmetodik	25
6.7	Analys av topologiska resultat	27
6.8	Analys av simulerings resultat	28
6.8.1	Nätets sårbarhet ur ett makroperspektiv	28
6.8.2	Nätets sårbarhet ur ett mikroperspektiv	32
7	Handlingsplan	40
8	Driftstörningar	41
8.1	Sett ur ett företagsperspektiv	41
8.2	Sett ur ett samhällsperspektiv	42
8.3	Återställningstiden vid avbrott i Malmönätet	44
9	Slutsatser	45
	Litteraturförteckning	47
	Bilagor	50

1 Inledning

Effektivitet och ekonomi har de senaste decennierna varit ledord i vårt samhälle. För att uppnå en hög lönsamhet och effektivitet har samhället i allt högre grad blivit beroende av tekniskt komplexa system. Detta har i sin tur inneburit att infrastrukturen inte längre består av individuella system oberoende utav varandra. Istället har det vuxit upp ett stort antal sammankopplade nätverk, där olika system i hög grad är kopplade till varandra. Följden har blivit ett mer sårbart samhälle.

E.ON Elnät Sverige AB har visat ett intresse av en sårbarhetsanalys av deras lokala distributionsnät i Malmö. Riskanalyser är redan gjorda på E.ON:s samtliga fördelningsstationer. En metodikgranskning och validering av deras nuvarande metoder, samt eventuellt ett förbättrande av analysmetoden önskades av E.ON Elnät.

1.1 Syfte med analysen

Syftet med examensarbetet är att identifiera speciellt sårbara noder i distributionsnätet. Detta kan ligga till grund för ekonomiska prioriteringar vid uppgradering och nybyggnation av nätet. Samtidigt kommer sårbarhetsanalysen visa vilken effekt en eller flera utslagna noder får på samhället d.v.s. kunderna.

1.2 Frågeställningar

Sveriges elnät är ett stabilt och finmaskigt nätverk. Detta framgår tydligt vid genomgång av tidigare sårbarhetsanalyser och av diskussioner med nätansvariga. Det är dock ett faktum som gäller stamnätet och regionalnäten. Denna rapport kommer att behandla ett lokalt distributionsnät med en helt annan struktur. Slutnoder (kunder) är betydligt fler till antal, dessutom kommer det förmodligen inte vara lika finmaskigt som regionalnäten. Distributionsnätet bygger mer på flera trädstrukturer, med ett antal högst vitala noder. Därmed utkristalliserar sig frågorna:

- Kan man genom rapportens angreppssätt d.v.s. en topologisk nodanalys;
 - hitta en användbar parameter eller en lista av kriterier på sårbarheten? D.v.s. en eller flera parametrar som kan användas vid jämförelse av andra likvärdiga nät.
 - identifiera speciellt sårbara noder?
 - använda metodiken vid uppbyggnad och nydesign av elnät?
- Finns ekonomiska incitament till att minska sårbarheten?
- Finns några uppenbara organisatoriska brister?
- Hur känsligt är samhället för korta avbrott (< 3 min)?
- Hur klarar samhället av att hantera långa avbrott (> 3 min)?

1.3 Rapporten i korthet

Bakgrund

Elkraftssystemen har byggts ut enormt under de senaste hundra åren, från att bestå av flera olika lokala nät, till att idag vara sammanlänkade både nationellt och internationellt. Genom att allt fler tekniker är beroende av el, har elkraften i dagens samhälle blivit en oundgänglig tillgång. Sveriges elnät är ett stabilt och finmaskigt nätverk. Detta framgår tydligt vid genomgång av tidigare sårbarhetsanalyser.

Sårbarhetsanalysens uppbyggnad

Vid en sårbarhetsanalys utgår man ifrån själva systemet man vill skydda, till skillnad från en riskanalys där man tittar på en specifik riskkälla/hotbild och vilken skada denna kan åsamka ett system. I stora drag kan man säga att en sårbarhetsanalys är en vital del i det större begreppet krishantering. Följaktligen är en noggrann sårbarhetsanalys grunden och därmed också förutsättning till en god krishantering.

Definition: Sårbarhet är effekten en viss förlorad station/kabel får för det övriga nätet. Här har hänsyn tagits till, för analysen väsentliga parametrar, dokumenterad risk, kabellängd, levererad effekt, klustringskoefficienten och intermeditet (belastning). Motsatsen till sårbarhet blir robusthet.

När man gör en sårbarhetsanalys av den kritiska infrastrukturen är det dessutom av största vikt att inkludera ett samhällsperspektiv i analysen. Påfrestningarna på civilbefolkningen blir tidigt uppenbara vid större katastrofer. Elnätet är den infrastruktur som samhället är mest beroende av, och därmed blir det följaktligen den infrastruktur som ger störst konsekvenser för samhället om den bryter samman. Den stora utbyggnaden och sammankopplingen mellan olika elnät har gjort det nästan omöjligt att förstå och förutspå stabiliteten i det stora sammankopplade systemet.

Nätstrukturen

Elnätet är på olika sätt skyddat, så att enskilda skador på systemet inte skall ge några större konsekvenser för konsumenterna. Faktum är att de flesta fel går den vanlige elkonsumenten obemärkt förbi, detta genom en väldigt hög redundans, automatiska omkopplingar och isolering av felaktiga ledningar. Desto längre ned i hierarkin det blir fel, desto högre sannolikhet är det att avbrott i nätet orsakar avbrott i elförsörjningen för konsumenten.

Avgränsningar

Rapporten analyserar sårbarheten på Malmöstads eldistributionsnät. Geografiska avgränsningar är de två primära inmatningarna till Malmöstad – stamnätstationerna Sege och Arrie. Analysen går endast ned på fördelningsstationsnivå då analysen längre ned i systemet inte tillför någon väsentlig information när man är ute efter nätets totala sårbarhet. Detta baseras på att nätstationer i regel är kopplade i slingor eller radiellt (se bilaga 2), vilket gör att

de inte påverkar distributionsnätets struktur. Det går även att på denna nivå göra omkopplingar så att enbart kunder på den enskilda nätstationen blir spänningslösa. Dessutom tages ingen hänsyn till elektriska flöden, överföringskapacitet och ostabilitet.

Rapportens angreppssätt

I denna rapport likställs ett tekniskt nätverk, specifikt ett eldistributionsnät, med en graf. Fördelningsstationer, nätstationer och förgreningar är representerade av noder. Grafens bågar motsvarar luftledningarna och kablar i elnätet. Följaktligen tas ingen hänsyn till det elektriska flödet utan endast elnätets topologi. Genom att behandla systemet rent topologiskt och därmed inte ta hänsyn till elektriska parametrar som t.ex. överföringskapacitet och ostabiliteter - får man genom nodanalysen möjlighet att se systemet ur ett helt annat perspektiv än vanlig praxis.

Simuleringsmetoder

Vid beräkningar och simuleringar av Malmös elnät har två program utvecklade vid Lunds Tekniska Högskola av forskarstuderande Jonas Johansson vid IEA och Teknisk doktor Henrik Johansson vid Brandteknik använts.

Vid simulering användes fyra typer av simuleringsalternativ, utslagning av nod med högsta grad, slumpmässig utslagning av nod, utslagning av nod med högst intermeditet och slumpmässig utslagning av båg/länk. Utslagning av en nod/länk kan ge upphov till att en eller flera noder förlorar kontakten med källnoderna och därmed blir obrukbara. Innebörden med detta blir att varje simulering håller på till dess att alla noder förlorat kontakt med källnoderna. Tusen simuleringar ger följaktligen ett genomsnittligt värde som beskriver hur tidigt en nod förlorar kontakt med källnoderna. Varje nod får på så sätt ett värde som därmed ger en indikation på hur pass utsatt den är i förhållande till de övriga noderna. Ett lågt värde innebär att noden slagits ut i ett tidigt skede, vilket är ekvivalent med en sämre placering i nätet.

Alla resultat har före sammanställning normerats för att kunna jämföra olika data med varandra och på så sätt uppnå en så korrekt bild av sårbarheten som möjligt. För att kunna sammanställa gjorda beräkningar och nodanalys med den riskanalys som är gjord på nätet sedan tidigare krävdes en viss omarbetning av resultaten. Dessutom gjordes en ansats att formulera beräkningarna och resultatet från nodanalysen till en "risk". För att därefter uppnå möjligheten att presentera de olika resultaten som en helhet i den slutgiltiga sårbarhetsanalysen.

1.4 Väsentliga resultat

Vad som kan tyckas anmärkningsvärt är att ett stadsnät som Malmös har samma värde på klustringskoefficient som västra USA:s kraftnät. Detta innebär att västra USA:s kraftnät är maskat i lika hög grad som Malmös distributionsnät. En möjlig förklaring till att Malmönätet inte har en väsentligt högre klustringskoefficient än det amerikanska, kan vara att det funnits en större baktanke vid uppbyggnaden av västra USA:s stamnätsstationer. Detta kan i sin tur bero på att Malmös elnät tillgodoser och följer Malmö stads ständigt dynamiska utveckling. I

ett stamnät bygger man istället gentemot en mer statisk realitet d.v.s. städerna har sin bestämda geografiska position.

En intressant iakttagelse vid utslagning av noder med högst grad, är att den nod med högst grad inte nödvändigtvis behöver vara den nod som vid utslagning ger störst konsekvens för nätverket som helhet. Vår tolkning av detta blir att hög grad inte är ekvivalent med hög betydelse för övriga delar av nätet. Målet i nätuppbbyggnaden bör vara att göra så att varje enskild station har så liten inverkan på det omgivande nätverket som är möjligt.

Man kan dock klart konstatera att ett riktat sabotage mot noder med hög grad kan åstadkomma stora driftstörningar med en relativt liten arbetsinsats. Redan vid utslagning av strax över 10 % av noderna har över 50 % av noderna förlorat kontakt med källnoderna.

Analysen av Malmönätet med avseende på slumpmässig utslagning av länkar som i denna rapport illustrerar oavsiktliga avbrott som t.ex. avgrävning av kabel och slitage. Här kan man konstatera att ett markant bortfall av noder sker först då runt hälften av länkarna är utslagna. Vid ca: 40 % utslagna länkar har ca 10 % av fördelningsstationerna förlorat kontakt med det övriga nätet. Vår slutsats av detta delresultat blir, att vad det beträffar förbindelser mellan de olika fördelningsstationerna indikerar allt på ett robust nätverk.

Betraktar man istället den slumpmässiga utslagningen av noder följer den initialt ett linjärt beteende. Här sker en kollaps av elnätet först när omkring 30 % av det totala antalet noder är utslagna. Detta är effekten, när noderna av högre grad blir utslagna. Slutsatsen av detta delresultat blir att även vad det beträffar utslagning av noder indikerar allt på ett robust nätverk.

Simuleringarna har gjorts med och utan avseende på fel och haverifrekvenser. Det blir emellertid ingen större skillnad på det strukturella beteendet i de olika simuleringarna. Dock tenderar hela systemet att haverera något tidigare när fel och haverifrekvenser inkluderas. Därmed anser vi att man kan dra slutsatsen att fel- och haverifrekvenser inte har någon större inverkan men förmodligen ges en mer korrekt bild av systemet i sin helhet vid simuleringarna med fel- och haverifrekvenser.

Kaskadeffekten är den följd effekt som en störning på en position i elnätet kan få för det övriga nätet genom att orsaka överbelastningar i andra vitala delar. När även dessa överbelastade komponenter kopplas ifrån sprids effekten blixtnabbt vidare. För att simulera detta scenario har begreppet intermeditet använts. Här ser man tydligt att det räcker med att slå ut ca.15% av de högst belastade noderna för att slå ut så mycket som 90% av det övriga nätet.

1.5 Kortfattade slutsatser

Malmös distributionsnät har tydligt ett antal stationer av stor betydelse för hela nätets funktionalitet. Följaktligen kan det konstateras att en bättre utformning av ett nätverket borde kunna uppnås då antalet noder ökas och/eller att gradstorleken fördelas jämnt över alla noderna. Samtidigt bör man undvika ett fåtal större kärnnoder. Ett av alternativen till att omfördela nodernas gradstorlek kan t.ex. vara möjlighet till ödrift, med matningsmöjligheter från lokala generatoranläggningar.

För att göra ett nätverk mindre sårbart bör alla stationer få möjlighet till alternativ matning från flera olika fördelningsstationer. Således räcker det inte med att lägga redundanta kablar från en och samma station. För att göra detta kan man inte enbart titta på värden såsom grad, klustringskoefficient och intermeditet. Istället krävs att man gör en enskild bedömning på var nod med hjälp av dessa värden, men med beaktande av nodens topologiska position i nätet. Gör man detta på ett systematiskt sätt redan när man projekterar ny- och ombyggnationer av nätet, har man gjort stora ekonomiska vinster.

Litteraturstudier har visat att hushållen inte är speciellt känsliga för korta avbrott (<3min) men vid avbrott som sträcker sig över några timmar börjar även hushållen känna av effekten. I industrin och processindustrin i synnerhet är effekten tydligt kännbar redan vid korta avbrott.

Att där finns klara ekonomiska incitament att uppgradera och förbättra de mest sårbara stationerna anser vi visats med en tydlighet när Icke Levererad Energi undersökts. Problem med en eller flera fördelningsstationer innebär förlorade inkomster till elproducenten samtidigt som större avbrott ofta innebär bad-will för varumärket.

2 Sårbarhetsanalysens uppbyggnad

Vid en sårbarhetsanalys utgår man ifrån själva systemet man vill skydda, till skillnad från en riskanalys där man tittar på en specifik riskkälla/hotbild och vilken skada denna kan åsamka ett system.

Någon vedertagen internationell standard vad beträffar sårbarhetsanalyser finns för närvarande inte. Däremot finns det flera olika förslag på angreppssätt och manualer som kan modifieras och anpassas till det valda systemet. När man vid en närmare studie granskar de olika angreppssätten upptäcker man snart flera likheter.

I stora drag kan man säga att en sårbarhetsanalys är en vital del i det större begreppet krishantering, närmare bestämt fas ett, två och sista punkten i fas fyra (se nedan). Följaktligen är en noggrann sårbarhetsanalys grunden och därmed också förutsättning till en god krishantering.

Krishantering är en cyklisk process bestående av fyra faser [1].

- **Fas ett:** Förebyggande
 - Definiera systemet som skall skyddas, med klara avgränsningar.
 - Identifiera och rangordna alla kritiskt sårbara enheter och noder.
 - Identifiera riskkällor och andra oönskade händelser, samt arbeta fram lämpliga åtgärds paket och kostnader.
- **Fas två:** Förberedande
 - Kartlägg och analysera handlingsplaner, för att kunna hantera den oönskade händelsen när den väl inträffar, d.v.s. krishanteringsförmågan.
- **Fas tre:** Akut avhjälpande
 - Bedömning av händelsen.
 - Aktivering av handlingsplaner.
- **Fas fyra:** Återuppbyggande.
 - Värdera, dokumentera och lära sig av oönskade händelser.
 - Vad som gjordes bra och vad som kan förbättra?
 - Hur klarar systemet av att återgå till normalt läge och hur lång tid tog det tills att ***hela*** systemet var återställt efter en händelse?

Skall en sårbarhetsanalys få någon genomslagskraft gäller det att ta tillvara på gamla erfarenheter - analysera varför systemet fallerade och dra lärdom. Samtidigt gäller det att man proaktivt söker efter fel och sårbarheter i systemet, exempelvis genom övningar och simuleringar.

En sårbarhetsanalys måste vara levande för att uppnå ständiga förbättringar. Av denna anledning skall sårbarhetsanalyser genomföras kontinuerligt. Därigenom finns även goda

möjligheter att uppnå en god säkerhetskultur inom en organisation. Detta blir speciellt viktigt när det handlar om kritiska infrastrukturer såsom energi, data/telekommunikation, vattensystem och transportsystem. Analysen får inte bli en pappersprodukt som endast pryder bokhyllan. Nya hotbilder växer ständigt fram och komplexiteten i nätverksarkitekturen ”lever” och förändras över tiden. Resultatet av en sårbarhetsanalys blir därmed en färskvara.

När man arbetar med uppgiften att uppnå ständiga förbättringar, finns det flera alternativ. En modell är PDCA-cykeln [2], som på ett illustrativt sätt visar hur man uppnår detta, figur 2.1.

Planera (Plan):

- Inventera
- Planera
- Sätta upp mål

Utföra (Do):

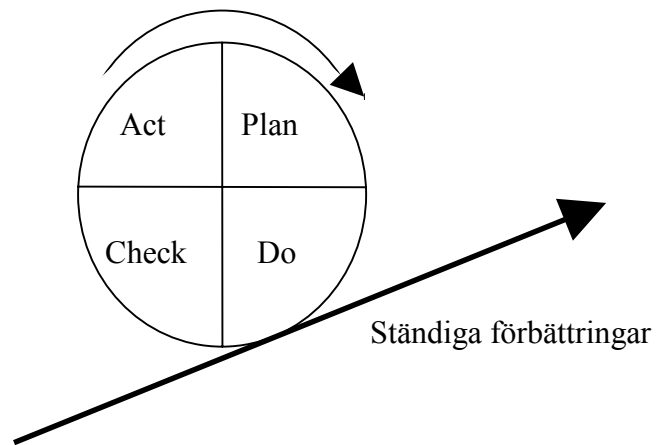
- För en öppen diskussion
- Avsätta erforderliga resurser
- Verkställa

Kontrollera (Check):

- Följs uppsatt plan?
- Uppnår vi uppsatta mål?

Agera (Act):

- Verkställ förbättringar
- Utvärdera



Figur 2.1. PDCA-cykeln. (Källa: Institutionen för Designvetenskaper, LTH, Lund.)

När man gör en sårbarhetsanalys av den kritiska infrastrukturen är det dessutom av största vikt att inkludera ett samhällsperspektiv i analysen. Påfrestningarna på civilbefolkningen blir tidigt uppenbara vid större katastrofer. Av denna anledning bör man dela upp en sårbarhetsanalys i två delar - dels sett från systemets perspektiv, dels ur ett samhällsperspektiv [3]. Större störningar inom bl.a. elförsörjningen kan snabbt innebära stora belastningar för samhället och dess funktionsförmåga.

Eftersom en riskkälla eller en hotbild kräver en definiering kan man t.ex. använda sig av Abrahamsson & Magnussons typindelning [3].

- **Typ ett:** Organisatoriska olyckor. Orsakerna till dessa olyckor kan vara av mänskliga, organisatoriskt eller tekniskt ursprung.
- **Typ två:** Naturkatastrofer av olika slag.
- **Typ tre:** Terroristangrepp och andra typer av avsiktlig påverkan.

2.1 Lagar och förordningar

Lag (2003:778) [4] om skydd mot olyckor

3 kap. Kommunens skyldigheter
Förebyggande verksamhet

...3§ En kommun skall ha ett handlingsprogram för förebyggande verksamhet. I programmet skall anges målet för kommunens verksamhet samt de risker för olyckor som finns i kommunen och som kan leda till räddningsinsatser...

... Handlingsprogrammet skall antas av kommunfullmäktige för varje ny mandatperiod...

Lag (2002:833) [5] om extraordinära händelser i fredstid hos kommuner och landsting

...1 § Kommuner och landsting skall för varje ny mandatperiod fastställa en plan för hur de skall hantera extraordinära händelser...

...3 § Med extraordinär händelse avses en sådan händelse som avviker från det normala, innebär en allvarlig störning eller överhängande risk för en allvarlig störning i viktiga samhällsfunktioner och kräver skyndsamma insatser av en kommun eller ett landsting.

Förordning (2002:472) [6] om åtgärder för fredstida krishantering och höjd beredskap

Risk- och sårbarhetsanalys

...3 § Varje myndighet skall i syfte att stärka sin krishanteringsförmåga årligen analysera om det finns sådan sårbarhet och sådana risker inom myndighetens ansvarsområde som synnerligen allvarligt kan försämra förmågan till verksamhet inom området...

...4 § Myndigheterna som anges i bilagan till denna förordning skall planera och vidta förberedelser för att förebygga, motverka och begränsa identifierad sårbarhet och risker inom de samverkansområden som anges i bilagan...

...8 § ...har ett ansvar att vidta de förberedelser som krävs inom respektive ansvarsområde vid höjd beredskap...

Förordning(2003:789) [7] om skydd mot olyckor

3 kap. Kommunens skyldigheter

...3§ De handlingsprogram som avses i kap. 3 och 8 §§ lagen (2003:778) om skydd mot olyckor skall innehålla uppgifter om samverkan med andra kommuner och med statliga myndigheter och enskilda.

...4 § En kommuns handlingsprogram skall tillställas länsstyrelsen, Statens räddningsverk samt de kommuner och andra med vilka samverkan inom förebyggande arbete eller räddningstjänst kan bli aktuell.

SvKFS föreskrifter (1998:1) [8] om säkerhetsskydd

4 § Den säkerhetsanalys som skall genomföras enligt 5 § säkerhetsskyddsförordningen skall göras minst en gång vartannat år.

Säkerhetsskyddsförordning (1996:633) [9] Säkerhetsanalys

...5§ ...anläggningar som kräver ett säkerhetsskydd med hänsyn till rikets säkerhet eller skyddet mot terrorism...

Ellagen (1997:857) [10] Skyldighet att överföra el

3 kap. Nätverksamhet m.m.

...9§ ...Överföringen av el skall vara av god kvalitet.

En nätkoncessionshavare är skyldig att avhjälpa brister hos överföringen i den utsträckning kostnaderna för att avhjälpa bristerna är rimliga i förhållande till de olägenheter för elanvändarna som är förknippade med bristerna...

3 Nätverkstrukturer

Mycket har hänt sedan Euler, en av dåtidens största inom matematiken, började sin forskning om grafteori i mitten av 1700-talet. Idag är nätverksteori en tvärvetenskap d.v.s. ett samarbete mellan forskare från olika vetenskapsgrenar. Detta har visat sig vara en stor tillgång eftersom man har kunnat se problemställningar utifrån flera olika perspektiv.

3.1 Small world

Stanely Milgrams experiment ”The small world problem” [11] bygger på att man inte behöver ta mer än några steg för att nå vem som helst i världen - man kan via ens vänners vänner o.s.v. nå vilken person som helst i världen. Milgram ville påvisa att världen egentligen bestod av ett enda stort socialt nätverk. Nu är det inte riktigt på det viset eftersom en persons umgängeskrets vanligtvis inte är så stor. Sannolikheten att två slumpmässigt utvalda vänner i en bekantskapskrets känner varandra är väldigt stor, d.v.s. en hög klustringskoefficient. Begreppet small world nätverk lever dock vidare i nätverksteorin. Exempel på small world nätverk är filmskådespelare[12] och samförfattare till vetenskapliga artiklar [13].

3.2 Slumpmässiga nätverk

I ett slumpmässigt nätverk, med ett specifikt antal noder och bågar, är sammankopplingen mellan noderna slumpmässig. En utav anledningarna till att de ofta jämförs med verkliga nätverk är att man har en bra uppfattning om hur slumpmässiga nätverk uppför sig. T.ex. är klustringskoefficienten C , som beskrivs närmre i kap.4.1.1, betydligt mindre för ett slumpmässigt nätverk än för ett verkligt nätverk.

3.3 Infrastrukturella nätverk

I nationalencyklopedin kan man läsa :

” i **n**frastruktur (av *infra-* och *struktur*), ett system av anläggningar och driften av dessa, som utgör grund för försörjningen och förutsättningen för att produktionen skall fungera: bl.a. vägar och järnvägar, flygplatser och hamnar, kraftverk, eldistribution och andra anordningar för energiförsörjningen, vatten- och avloppssystem, teleförbindelser och utbildningsväsen. Det är sålunda i stor utsträckning fråga om verksamheter som stat eller kommun på ett eller annat sätt har ansvar för. Med infrastruktur avses även de bakre fasta anläggningarna som flygfält, oljeledningar och depåer i ett försvarssystem. ”

Infrastrukturerna i det utvecklade samhället börjar som också nämns i inledningen bli allt mer komplexa. Idag är nästan alla de ingående delarna i en infrastruktur beroende av varandra. Det har också kommit till nya former av tekniska infrastrukturer t.ex. ”the World Wide Web” (www) och det fysiska bakomliggande nätet Internet.

WWW är en ofantlig mängd noder (hemsidor) sammankopplade till ett komplext nätverk med stöd av länkar (URLs). Internet är det fysiska nätverket som realiserar www med hjälp av hubbar, switchar och servrar.

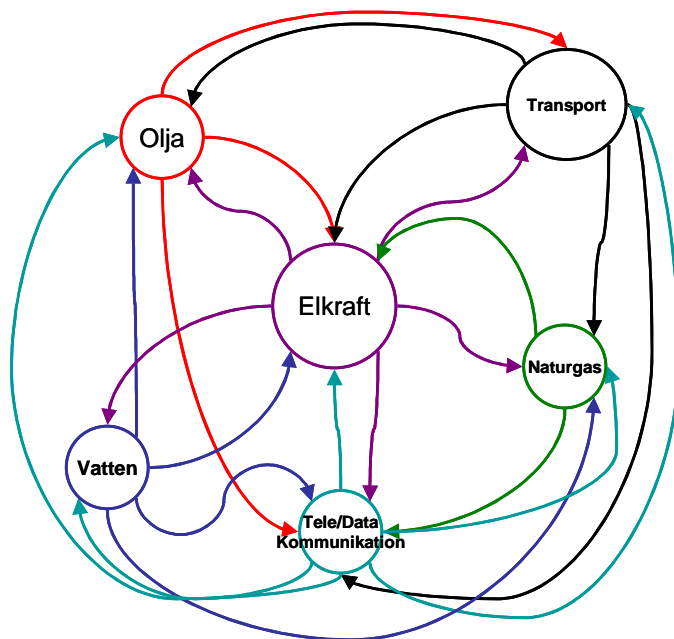
En infrastruktur kan ofta enkelt beskrivas med mer eller mindre känsliga noder som kännetecknas av att de sammankopplar olika former av till- och frånflöden. Det kan vara flygplatser, fördelningsstationer, vägkorsningar o.s.v. Dessa noders sårbarhet kommer att vara föremål för granskning i vår sårbarhetsanalys. Viktiga uppgifter om noden är dess egen sårbarhet, felfrekvens och det som påverkar dess förmåga att fungera normalt, såsom till- och frånförsele av det aktuella mediet.

De olika infrastrukturerna är mer eller mindre komplexa. Analyseras enbart en nod och dess till- och frånförsele brukar problemet te sig ganska enkelt. Kopplar man däremot alla de olika noderna i det studerade systemet får man ett komplext system. Går man sedan vidare med att sammankoppla de olika systemen, t.ex. elnät och telenät, har man ett system med väldigt hög komplexitet. Ett komplext system behöver inte vara komplicerat men är det ofta och kännetecknas av t.ex. olinjära ekvationer eller av ett adaptivt beteende.

Sammankopplingen mellan de olika nätverken leder till ett starkt beroende emellan dem, alltså är system A och B i hög grad korrelerade. Dessa beroende kan delas in i olika typer[14]:

- Fysiskt beroende
- Geografiskt beroende
- Informations- och kommunikationsberoende
- Logiskt beroende

Problematiken i dessa beroende kommer inte att belysas ingående i den här rapporten, dock kommer samhällseffekter av störningar i elnätet att diskuteras och de sidoeffekter som dessa medför. Figur 3.1 nedan visar en schematisk skiss över hur den ömsesidiga kopplingen d.v.s. interdependens kan se ut.



Figur 3.1. Interdependens mellan olika infrastrukturer (källa: Peerenboom, J).

4 Metoder för nätverksanalys

4.1 Nätverksanalys

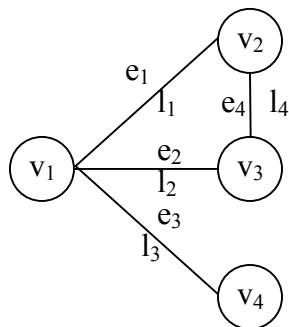
Nätverk går under bemärkelsen grafer i den traditionella matematiken. I denna rapport kommer en graf likställas med ett tekniskt nätverk, specifikt ett eldistributionsnät. Fördelningsstationer, nätstationer och förgreningar blir representerade av noder. Grafens bågar kommer att motsvara luftledningarna och jordkablarna i elnätet. Följaktligen kommer inte det tagas någon hänsyn till det elektriska flödet utan endast elnätets topologi. Detta upplägg är snarlikt tidigare gjorda analyser av elkraftssystem i Norden [15] och Nordamerika [16].

4.1.1 Grafteori

Definition 1: En graf G är ett ordnat par av mängder $G = (V, E)$, där V är icke-tom och ändlig och elementen i E har utseendet $\{a, b\}$, $a, b \in V$, d.v.s. utgöres av par av elementen i V (då $b = a$). [17]

V är elementen noder $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ och E är elementen bågar $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, där n respektive m indikerar antalet noder och bågar i grafen.

Längden l mellan två noder är den kortaste vägen mellan desamma, vilket inte alltid är ekvivalent med minst antal bågar, se exempel.



Exempel:

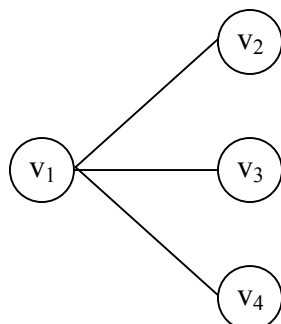
Om

$l_1=3$ och

$l_2=l_3=l_4=1$

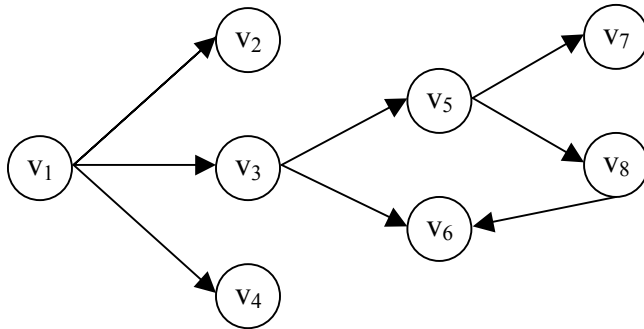
Den kortaste vägen mellan v_1 och v_2 blir därmed:
 $v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_2$ vilket ger att $l=2$.

Definition 2: Låt v vara en nod i en graf eller multigraf G . Med graden av v menas antalet bågar som har ändpunkt i v . Detta tal skrivs $\text{deg}(v)$. [18]

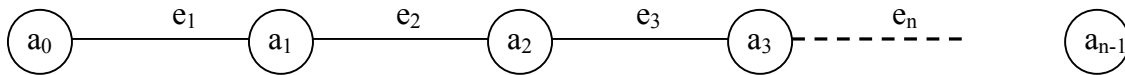


$\text{Deg}(v_1) = 3$

Definition 3: En riktad graf G är ett ordnat par av mängder $G = (V, E)$, där $V \neq \emptyset$ är ändlig och elementen i E utgöres av ordnade par (a, b) , $a, b \in V$ [17].



Definition 4: Låt a och b vara noder i en oriktad graf. En väg från a till b är en alternerande följd av noder och bågar $a = a_0, e_1, a_1, e_2, a_2, \dots, a_{n-1}, e_n, a_n = b$ sådan att $e_i = a_{i-1} a_i$ (bågen e_i förenar alltså noderna a_{i-1} och a_i). Talet n kallas vägens längd [17].



Elnätssystem är ett nätverk med egenskaper som en oriktad graf, enligt definition 4. Nyligen gjorda nätverksstudier [18, 19], har visat på tre tydligt uttalande karakteristiska parametrar.

- Graddistribution: Graden k är antalet bågar med ändpunkt i en nod n . Nodgradens distributionsfunktion $P(k)$, ger sannolikheten att en slumpmässigt vald nod har exakt k bågar. Den genomsnittliga graden (\bar{k}) av en graf är $\bar{k} = 2M / N$, där M och N indikerar bågar respektive noder.
- Den genomsnittliga längden l mellan två noder i ett nätverk.
- Klustringskoefficienten C är en lokal egenskap som beskriver densiteten av trianglar i grafen, där $0 \leq C \leq 1$.

$$C_i = \frac{\text{antal trianglar förbundna med nod } n_i}{\text{antal trippletter centrerade på nod } n_i} \quad [19]$$

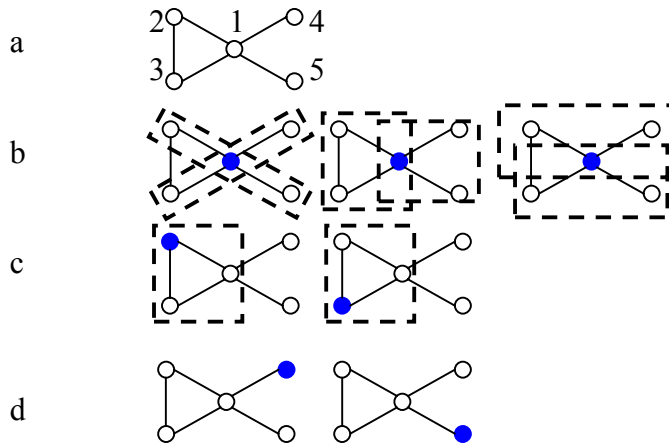
analogt

$$C_i = \frac{2M_i}{k_i(k_i - 1)} \quad [20]$$

där en nod n_i i ett nätverk har k_i bågar som förbinder den till k_i andra noder och M_i är antalet bågar som bildar baser till trianglar förbundna med nod n_i . För hela nätverket beräknas C enligt följande ekvation,

$$C = \frac{3 * \text{totala antalet trianglar i nätverket}}{\text{totala antalet sammankopplade trippletter i nätverket}} \quad [19]$$

Ett belysande exempel av klustringskoefficienten C kan vara på sin plats. Nedan är ett nätverk (fig.4.1a) med en triangel och åtta trippletter förbundna med fem noder. De individuella noderna i nätverket har lokala klustringskoefficienter C_i . Detta illustreras i fig.4.1b-d. Nod ett har sex trippletter (fig. 4.1b), $C_1 = 1/6$, nod två och tre har vardera en tripplett (fig. 4.1c), $C_2 = C_3 = 1$, och nod fyra och fem saknar trippletter alltså $C_4 = C_5 = 0$ (fig. 4.1d). Nätverkets totala C är $3/8$.



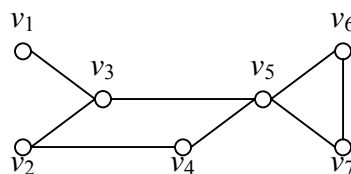
Figur 4.1a-d. Ett enkelt nätverk bestående av fem noder och fem bågar.

- Intermeditet (eng. betweenness), initialt använt vid studier av socialanätverk av L.C.Freeman (1977)[21, 22], är ytterligare ett begrepp som ofta kommer upp vid analys av komplexa nätverk. Detta är ett mått konstruerat att mäta hur central en nod är i förhållande till flödet i det betraktade nätverket, där kortaste vägen är av betydelse. Analytiskt, definieras intermeditet $C_B(v)$ enligt följande,

$$C_B(v) = \sum_{u \in V} \sum_{w \in V / \{u\}} \frac{\sigma_{uw}(v)}{\sigma_{uw}} \quad [21]$$

där σ_{uw} indikerar antalet kortaste vägar l , i hela systemet, mellan u och w och $\sigma_{uw}(v)$ indikerar antalet kortaste vägar l igenom den betraktade noden v . För en normalisering divideras $C_B(v)$ därefter med $C_{B(v)max}$ som definieras enligt, $C_{B(v)max} = (n^2 - 3n + 2)$, där n indikerar totala antalet noder i systemet. Det maximala värdet uppnås i ett stjärnformat nätverk.

Nedan illustreras begreppet intermeditet, med hjälp utav en enkel graf, fig.4.2. Antalet kortaste vägar l i nätverket med avseende på v_3 beskrivs i matrisform, tabell 4.1 nedan. En sammanställning av nodernas grad och intermeditet redovisas i tabell 4.2 nedan.



Figur 4.2. Ett enkelt nätverk bestående av sju noder och åtta bågar/länkar

Tabell 4.1, Antal kortaste vägar / i systemet med avseende på V_3 .

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
V_1	0	1	0	$(1+1)/2$	1	1	1
V_2	1	0	0	0	1/2	1/2	1/2
V_3	0	0	0	0	0	0	0
V_4	$(1+1)/2$	0	0	0	0	0	0
V_5	1	1/2	0	0	0	0	0
V_6	1	1/2	0	0	0	0	0
V_7	1	1/2	0	0	0		0

Tabell 4.2, Intermeditet (C_B) och grad (k)

Noder	k	C_B	C_B , normaliserad
V_1	1	0	0
V_2	2	2	0,067
V_3	3	13	0,43
V_4	2	3	0,1
V_5	4	18	0,6
V_6	2	0	0
V_7	2	0	0

I Freemans ursprungliga algoritm[19] tar man ej hänsyn till källnoder. I programmet NetCalc, gjort av Henrik Johansson Brandteknik LTH, som har använts vid simuleringarna har man gjort en viss modifiering. Därigenom uppnår man hur nodens intermeditet förhåller sig i relation till källnoder. Algoritmen i NetCalc beräknar kortaste vägarna till en källnod för alla noder. Därefter räknar den hur många av de kortaste vägarna som passerar en specifik nod (inklusive vägen från noden själv). Därmed kommer ingen nod i våra resultat få en intermeditet på noll.

4.2 Motivering av valda metoder

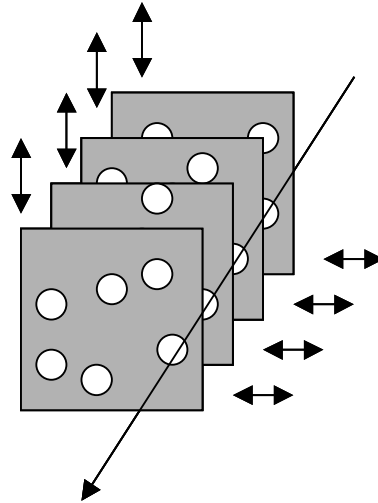
Rapportens angreppssätt att analysera sårbarheten av distributionsnätet kan motiveras enligt följande resonemang.

Genom att det redan finns sårbarhetsanalyser på elnätet i Norden och ett examensarbete som har behandlat ett mindre distributionsnät i södra Sverige, finns möjligheten att jämföra beräknade värden och nyckeltal. Därigenom kan man eventuellt komma fram till ett värde på sårbarheten när olika elnät bedöms, vilket inte finns i dagsläget.

Dessutom bedömer vi att intervjuer kan ge viktig information vad det beträffar den organisatoriska sårbarheten. Genom att lyssna och diskutera med erfaren personal på E.ON ges dessutom möjligheten att få en bättre bild av verkligheten och en möjlighet att ta till vara på kunskap som finns inom företaget.

Vid en förändring i ett komplext system vet man ofta inte vad följderna blir för det övriga systemet. Det är lätt att det uppkommer fel som kan ligga latent en längre tid. När sedan förhållanden en dag överensstämmer är olyckan framme, detta även om man hela tiden förmodat att man varit skyddad mot det som nu inträffat. Vid samtal med ansvariga inom

E.ON Elnät har vi förstått att man ofta för att korrigera ett missförhållande vid en station t.ex. risk för överbelastning, gräver ner ytterligare en kabel för att omfördela belastningen. Man betraktar stationen rent teknisk med hjälp av simuleringsprogram, när väl alla parametrar är tillfredsställande är man nöjd. Problemet är att man inte vet hur det övriga systemet reagerar inför en sådan förändring. En förklarande modell är Reasons (1997) "Schweizerost" modell, figur 4.3, som visar att den skyddande barriärerna rör på sig. När sedan hålen i "osten" som illustrerar de latent fel sammanfaller är olyckan framme.



Figur 4.3. Reason's (1997) "Schweizerost" modell.

Detta visar på betydelsen av att man vid förändringar i ett komplextsystem även betraktar det i sin helhet. Detta görs här genom att behandla systemet rent topologiskt och samtidigt inte ta hänsyn till elektriska parametrar som t.ex. överföringskapacitet och ostabilitet. Det är vår förhoppning att man genom nodanalysen skall få möjligheten att se systemet ur ett helt annat perspektiv än vanlig praxis. Vi menar att potentialen att upptäcka eventuella latent fel i systemets uppbyggnad ökar om tittar på systemet ur flera olika synvinklar.

5 Svenska kraftsystemets uppbyggnad

Elkraftssystemen har byggts ut enormt under de senaste hundra åren. Från att bestå av flera olika lokala nät, till att idag vara sammanlänkade både nationellt och internationellt. Elnäten har vuxit till kollosalt komplexa system vilket har inneburit ett stabilare elförsörjningssystem, där länder kan hjälpa varandra med att upprätthålla balansen i elproduktionen. Nackdelen med detta är dock att även fel kan spridas över landsgränserna. Genom att allt fler tekniker är beroende av el, har elkraften i dagens samhälle blivit en oundgänglig tillgång. Detta har i sin tur gjort samhället betydligt mer sårbart.

5.1 Det svenska elnätet

Det svenska elnätet är uppdelat i tre nivåer, se bilaga 1. Ryggraden i elnätet är stamnätet som ägs av svenska staten och förvaltas av SvK (Svenska Kraftnät). På den regionala nivån finns ett fåtal aktörer som levererar elen ut på lokalnivå. På lokal distributionsnivå agerar en uppsjö av olika elbolag .

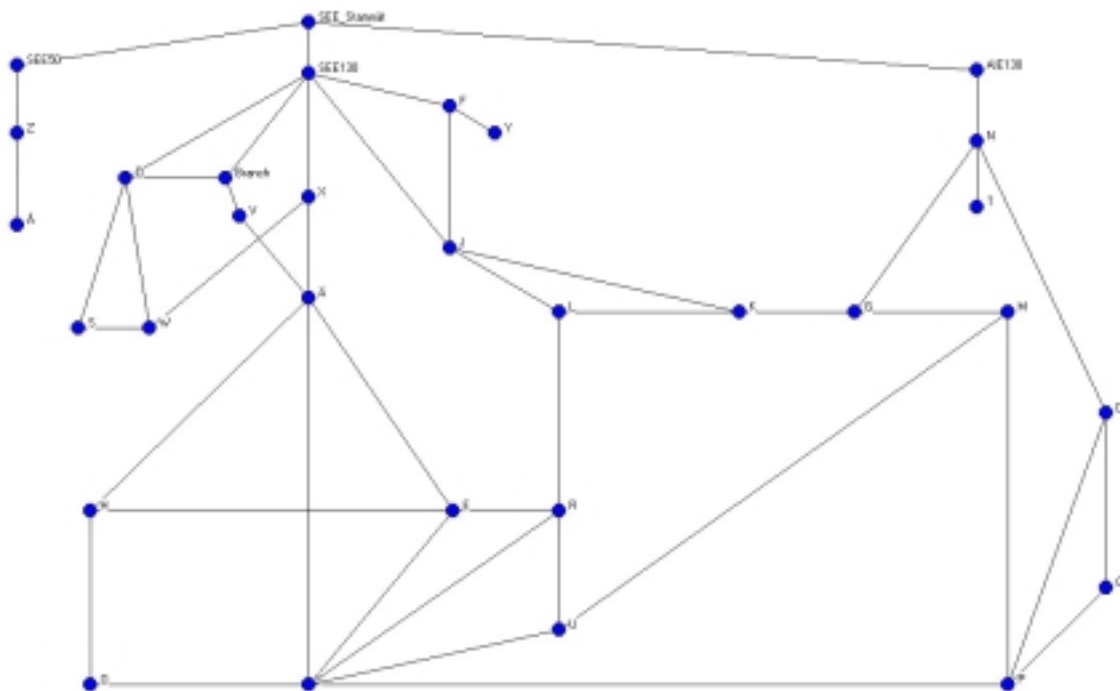
Stamnätet består av kraftledningar på 400 kV och 220 kV, samt ett stort antal transformator- och kopplingsstationer. Från stamnätet transformeras el ner till 130 kV och distribueras ut på de regionala elnäten. Till de regionala elnäten är därefter de lokala elnätstributörerna anslutna, via transformatorer, som levererar en spänning på 0,4 kV ut till kunderna. Kunder med behov av högre spänningsnivåer har egna transformatorer och kan därmed själv reglera spänningen till önskad nivå.

5.2 Malmös distributionsnät

Distributionsnätet är ett typiskt stadsnät (figur 5.1 nedan), bestående av 26 stycken fördelningsstationer. Dessa fördelningsstationer är i sin tur direkt eller indirekt kopplade till två stycken stamnätstationer, Sege och Arrie. Sege har sex stycken utgående fack för 130kV och två för 50kV, Arrie har två 130kV fack. I fem stycken av de undersökta fördelningsstationerna sker enbart fördelning – med andra ord finns det inga direkt anslutna kunder till dessa stationer. Alla utom två av stationerna har redundans med minst två alternativa matningsvägar, oftast tre. Fem stycken av stationerna har gasisolerade 130kV ställverk (GIS) de resterande 16 är luftisolerade. De gasisolerade ställverken anses ha en högre säkerhet och kräver mindre underhåll. De tar även mindre plats och är mindre uppseendeväckande, därmed lämpar de sig bättre för stadsmiljö. Dessutom är de att föredra där det finns risk för hårda väderpåfrestningar som t.ex. nära havet där saltbeläggningar och nedisning är ett stort problem. Fyra av stationerna har enbart 10kV ställverk.

Fördelningen i de två stamnätstationerna sker efter transformering till sex stycken fördelningsstationer. I dessa fördelningsstationer sker fördelning till de övriga stationerna samt i två av dem transformering ner till 10kV. 10kV är den spänning som i övervägande del används för att mata nätstationerna i Malmös elnät. Det finns ca 1000 stycken nätstationer

varv 193 stycken finns hos kunder med så kallade högspänningsabonnemang. De övriga ca 800 nätstationerna transformerar ned spänningen till 0,4kV och ansluter drygt 6000 kabelskåp. Utifrån kabelskåpen sker sedan matning ut till de övriga 170 000 kunderna.



Figur 5.1. Förenklad bild av Malmös distributionsnät, där punkterna indikerar fördelningsstationer.

Malmönätet anses av de flesta tillfrågade på E.ON som har erfarenhet av det, att det är ett säkert nät med få avbrott. Man har länge arbetat med att förbättra nätet så att t.ex. avbrott på kablar och fel på enstaka nätstationer ska ha så liten och kort effekt för kunden så möjligt. Råkraftnätet i Malmö är vid normaldrift ett radiellt nät men med alla redundanta ledningar tillkopplade blir nätet ett maskat slingnät. Övervägande del av utgående kablar från facken i 10kV ställverken går i slingor - d.v.s. att man kan mata nätstationerna från två håll. Nätstationerna matar sedan kabelskåpen helt radiellt, vilket även gäller de kablar som matar enskilda kunder. Den enskilt största anledningen till fel i nätet är avgrävda kablar som dessutom tar längst tid att åtgärda. Avgrävning av 130kV kablar är dock högst ovanlig, däremot är nästan alltid en 130kV kabel av olika anledningar ur drift, vilket naturligtvis minskar redundansen. Sådana anledningar kan t.ex. vara att signalledningar till differentialskyddet är skadade. Dessa signalledningar går i samma kabelgrop som högspänningskablarna och blir ofta skadade av fukt. Även när det sker grävning i närheten av kablarna brukar man för säkerhets skull koppla ifrån spänningen.

Den största skadan i nätet skulle vara om funktionen i en eller båda stamnätstationerna på något sätt skulle skadas t.ex. att 400kV transformatorn blir oduglig. Man kan dock mata nätet med enbart en av stationerna. Personal som har erfarenhet av Malmönätet anser dessutom att det är möjligt att förse hela nätet med spänning med hjälp av alternativa matningsvägar, utifall att båda anläggningarna skulle bli skadade. Scenariot är dock högst otroligt; det skulle t.ex. kunna vara en terroristattack eller liknande. Andra skador som får stora konsekvenser är brand i ett 10kV ställverk. Ställverk av nyare typ är så långt det går skyddade mot detta. Kablarna i kabelgolvet är sektionerade och de olika slingorna går till fack som befinner sig i olika brandceller. Bränder av den här typen händer dock väldigt sällan. Det senaste och det enda till oss nämnda är det som för ett par år sedan orsakade ett några timmar långt avbrott i hela centrala Örebro.

5.3 Reglerande organ inom elproduktionen

5.3.1 Statens Energimyndighet

Statens Energimyndighet [23] är den myndighet som behandlar lag och tillsyn. En viktig uppgift är att fungera som ett rådgivande organ i beredskaps- och säkerhetsfrågor. Dessutom ligger det ett lagförslag som kortfattat går ut på att Energimyndigheten kontinuerligt skall kontrollera nätföretagen med hjälp av Nätnyttomodellen. Nätnyttomodellen är en modell som det är tänkt Energimarknadsinspektionen¹ skall använda sig av vid kontroll om nätföretagens tariffer är skäliga eller ej. En gång om året är nätföretagen i Sverige skyldiga att redovisa sina värden vad beträffar leverans kvalitet. Om uttagna avgifter är skäliga eller ej avgörs sedan bland annat av kundavbrotts tid.

Miljö- och samhällsbyggnadsdepartementet är direkt ansvariga för Energimyndigheten, enligt förordning (2004:1200) [24].

5.3.2 Elsäkerhetsverket

Elsäkerhetsverket [25] en myndighet under Miljö- och samhällsbyggnadsdepartementet. Verket arbetar bland annat med att övervaka så att elinstallationer är konstruerade på ett sådant sätt att de inte interfererar med radio- och telekommunikation. Elsäkerhetsverket är en utav de myndigheter som nämns i bilagan till förordningen om åtgärder för fredstida kris hantering och höjd beredskap (§ 4 och § 8 i SFS 2002:472). I verksamhetsplanen 2005 kan man bland annat läsa,

”... Elsäkerhetsverkets mål för åtgärder inom samverkansområdet Teknisk infrastruktur är

- att säkerställa att verksamheten inom elförsörjningen bedrivs så att under svåra påfrestningar på samhället i fred tillsyn utövas över reparationer och provisoriska åtgärder som framtvingas i elnät och nätanläggningar...” [26].

5.3.3 Svenska Kraftnät

Svenska Kraftnät (SvK) [27] är ett statsägt affärsdrivande företag som förvaltar och driver stamnätet. Det är bland annat SvKs uppgift att tillse balansen mellan producerad och konsumerad el i det svenska elnätet. SvK är dessutom ansvarig elberedskapsmyndighet.

5.3.4 Svensk elmarknad

Huvudaktörerna inom elproduktionen i Sverige är tre stora kraftbolag, Vattenfall AB, E.ON Sverige AB och Fortum AB. Dessa står tillsammans för 90% av den svenska elproduktionen. Den huvudsakliga produktionen av el kommer ifrån vattenkraft och kärnkraft, som står för 90% av elproduktionen. Övrig elproduktion kommer ifrån fossila bränslen och en liten del förnyelsebar energi. I detta sammanhang kan nämnas att det i Sverige för nuvarande finns runt 600 vindkraftverk som tillsammans producerar ca 0,7 TWh/år (0,3% av Sveriges totala elproduktion) [23, 28].

¹ Energimarknadsinspektionen är ett organ som verkar under Energimyndigheten.

Bland Sveriges 1 200 vattenkraftverk finns det största runt älvarna i norra Sverige. Av Sveriges 12 kärnkraftsreaktorer är 10 i drift och två under avveckling. Kärnkraftverken är placerade på fyra platser i landet: Ringhals (4st.), Forsmark (3 st.), Oskarshamn (3 st.) och Barsebäck (2 st. under avveckling).

5.4 Hot mot elnätet

Elnätet är den infrastruktur som samhället är mest beroende av, därmed blir det följaktligen den infrastruktur som ger störst konsekvenser för samhället om den bryter samman.

Många beskriver den som det mest komplexa systemet av alla i modern tid. Den stora utbyggnaden och sammankopplingen mellan olika elnät har gjort det nästan omöjligt att förstå och förutspå stabiliteten i det stora sammankopplade systemet.

Elnätet är på olika sätt skyddat, så att enskilda skador på systemet inte skall ge några större konsekvenser för konsumenterna. Faktum är att de flesta fel går den vanlige elkonsumenten obemärkt förbi, detta genom en väldigt hög redundans, automatiska omkopplingar och isolering av felaktiga ledningar. Desto lägre ner i hierarkin det blir fel, desto högre sannolikhet är det att avbrott i nätet orsakar avbrott i elförsörjningen för konsumenten, tabell 5.1.

Tabell 5.1. Genomsnittlig avbrottstid minuter/år, åren 1998-2001

Stamnät	Stadsnät	Glesbygdsnät
0,2	23	203

(Källa: Svenska kraftnät [29]).

Det finns en hel del sårbara noder och ledningar i elnätet. Stabiliteten i systemet påverkas speciellt då det blir fel på flera noder samtidigt. Ett annat problem är kaskadeffekten. Då en ledning eller kabel blir skadad t.ex. vid ett blixtnedslag eller kortslutning sker en automatisk fränkoppling av denna. Detta leder till att den effekt som tidigare gick genom ledningen måste omfördelas till de delarna av nätet som fortfarande är helt. Blir nu dessa tidigare hela ledningarna överbelastade kommer automatiken att koppla bort de överbelastade ledningarna. Följden blir att automatiken gör det omöjligt för kraftverken att leverera någon el, vilket i sin tur leder till att även dessa stängs ner.

Många har förmodligen fortfarande den 23:e september 2003 färskt i minnet, då hela södra Sverige samt östra Danmark blev mörkt. Avbrottet varade för de hårdast drabbade i fem timmar. Detta berodde på två större fel i det svenska stamnätet, först ett fel i ett ställverk utanför Varberg samt nästan samtidigt ett fel i Oskarshamns kärnkraftsblock nr 3. Strax innan samma år, den 14:e augusti, bröt det nordamerikanska elnätet samman. Dessa två händelser har satt sårbarheten av elnätet i strålkastarljus.

Även andra orsaker såsom stora stormar och orkaner kan orsaka stora problem för elnätet, eftersom stora delar av regionnätet speciellt på landsbygden består av luftledningar. Stormen Gudrun i januari 2005 orsakade stor förödelse på elnätet i södra Sverige.

Mer riktade attacker mot nätet såsom terroristattacker och skadegörelse kan också förekomma. Dessa attacker har ur ett sårbarhetsperspektiv störst verkan med minst insats, under förutsättning att man vet vilka noder man ska sätta ur spel. Det svenska elnätet har i övrigt varit väldigt skonat från större elavbrott vilket också gör att det inte finns någon stor kunskap om hur elnätet uppför sig vid större störningar.

6 Sårbarhetsanalysens utförande och resultat

I sårbarhetsanalysen av Malmös 26 fördelningsstationer och elkablar som sammanlänkar desamma har det bedömts väsentligt att inkludera flera parametrar. En sårbarhetsanalys består av tre faser och därför har vi placerat in de olika faserna löpande i texten för att på ett tydligare sätt redogöra för vad de olika faserna innebär. Innan analysen är det dock nödvändigt att definiera hur ordet sårbarhet tolkas i rapporten.

Definition: Sårbarhet är vilken konsekvens en viss förlorad station/kabel får för det övriga nätet. Här har hänsyn tagits till, för analysen väsentliga parametrar, dokumenterad risk, kabellängd, levererad effekt, klustringskoefficienten och intermeditet (belastning). Motsatsen till sårbarhet blir robusthet.

Till analysens disposition fanns en riskanalys på Malmönätets alla fördelningsstationer, gjord på uppdrag av E.ON Elnät Sverige. I den löpande texten kommer denna att benämnas riskanalysen.

6.1 Avgränsningar

Fas 1. Förebyggande

- Övre avgränsning är Sege och Arrie som ingår i stamnätet. Undre avgränsning har efter noggrann övervägning beslutats till att inte inkludera nätstationerna, av den anledning att dessa inte kommer att ha någon avgörande effekt på analysen i stort. Detta baseras på att nätstationer i regel är kopplade i slingor eller radiellt (se bilaga 2), vilket gör att de inte påverkar distributionsnätets struktur. Det går även att på denna nivå göra omkopplingar så att enbart kunder på den enskilda nätstationen blir spänningslösa, alltså blir konsekvenserna obetydliga i förhållande till nätet i stort. Dock kommer analysen att ta hänsyn till antal kunder och levererad effekt vid de olika fördelningsstationerna. I analysen kommer elnätet att behandlas som om det var maskat. Motiveringen till detta är dels för att det är en förutsättning för angreppssättet d.v.s. nodanalysen, dels för att möjligheten finns i nätet. Under normaldrift matas nätet radiellt vilket är nödvändigt för att upprätthålla balansen, dock kan man vid fel göra omkopplingar så att nätet spänningssätts med hjälp av alternativa kopplingsvägar. Således finns möjligheten att med hjälp av de olika brytarna och frånskiljarna använda alla de kopplingsvägarna som används i nodanalysen. Resultatet blir då ett fiktivt maskat nät.
- Analysen kommer inte att ta hänsyn till interpedenser emellan olika nätverk.
- I denna rapport kommer en graf likställas med ett tekniskt nätverk, specifikt ett eldistributionsnät. Fördelningsstationer, nätstationer och förgreningar blir representerade av noder. Grafens bågar kommer att motsvara luftledningarna och kablarna i elnätet. Följaktligen kommer inte det tagas någon hänsyn till det elektriska flödet utan endast elnätets topologi.

6.1.1 Fördelningsstationer

Fördelningsstationerna fördelar och transformerar oftast också spänningen i nätet med lägsta spänningsnivån 10kV. Fördelningsstationerna kan vara anslutna direkt till stamnätet, till varandra eller till regionstationer. Oftast finns det ett 130 kV ställverk och ett 10 kV ställverk samt nästan i samtliga fall en eller flera transformatorer. Se bilaga 1 för en schematisk bild av hur det svenska kraftnätet i regel är uppbyggt.

① 130 kV ställverk

Här kommer inkommande och utgående ledningar till 130kV ställverket. Med olika brytare och frånskiljare kan man göra omkopplingar på två skenor och därigenom koppla på det sätt som passar det aktuella driftsläget bäst. Här mäts även ström och spänning i spännings- och strömtransformatorer, detta för att mäta den aktuella effekten som belastar ledningarna. Det är även här reläskydd och annan kontrollutrustning får sin information

② Transformatorn

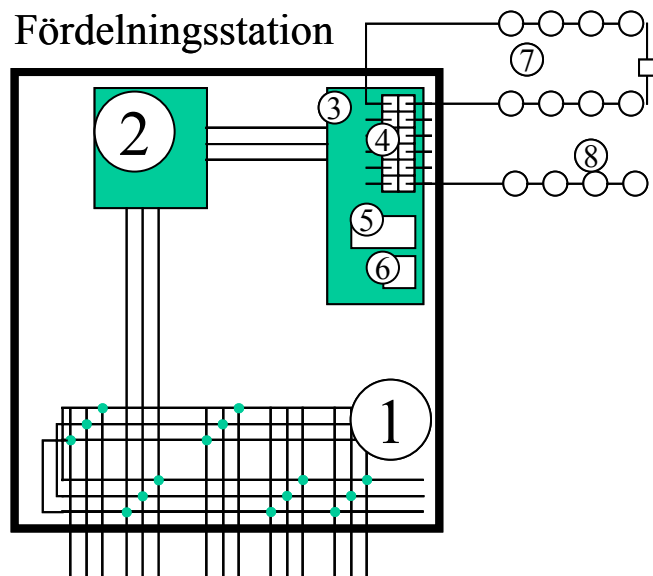
Från 130 kV ställverket matas transformatorns primärsida och transformerar ner den till lämplig spänning, som i Malmönätet med få undantag är 10kV.

③ Byggnad

Här inryms 10 kV ställverket ④ som har samma funktion som 130 kV ställverket fast då med lägre spänning. Här kan även högspänningskunder vara direktanslutna. Kontrollutrustning för fördelningsstationen ⑤ finns också i denna byggnad, ledningar för SCADA system går sedan vidare härifrån. Eftersom all styrning av brytare och dylikt drivs av 110V likspänning finns det även ett reservsystem ⑥ bestående av en del batterier. Batterierna är avsedda att klara avbrott som varar i ungefär tre timmar. Ställverkshusen skiljer sig mycket ifrån varandra. Utformningen har varierat beroende på när de är byggda och hur säkerhetstänket varit vid den aktuella tidpunkten. Numera är de oftast indelade i olika brandceller och kontrollrum samt reservsystemen är väl skilda åt. Även de ett tag så populära ”datagolven” används numera mycket sparsamt eftersom kabelbränder sprider sig väldigt lätt i sådana.

⑦,⑧ Nätstationer

I nätstationerna transformeras högspänningen ned till lågspänning (0,4 kV) som sedan fördelas ut till kabelskåp och sen vidare till kundernas servicentraler. Det finns olika typer av matningsalternativ till nätstationerna. De är i Malmönätet oftast matade från två håll i så kallade slingnät ⑦. I nätstationerna finns sedan möjligheten att bryta förbindelsen till efterföljande station. Detta gör det möjligt att isolera eventuellt felaktiga stationer för att minska antalet drabbade kunder med så många som möjligt. Slingorna är vid normal drift delade på mitten för att fördela lasten någorlunda jämt. Det finns även fall där slingorna är helt radiella ⑧, de är sällsynta i stadsnät fast blir betydligt vanligare när man kommer ut på landsbygden. Olika alternativ till kopplingar för slingmatning och för maskning av både 10kV nätet och 0,4kV nätet återfinns i bilaga 2.



6.2 Syfte med angreppssättet

Med hjälp utav detta angreppssätt är det vår förhoppning och målsättning att möjliggöra en objektiv kvantitativ prioritering av de olika stationerna, istället för en mera sedvanlig subjektiv kvalitativ bedömning. Syftet är att uppnå det mest effektiva och ekonomiskt försvarbara åtgärds paketet. Nodanalysen ger också möjligheten att få se nätet ur ett nytt perspektiv - det topologiska som ej tar hänsyn till elektriska storheter och olika former av ostabiliteter.

6.3 Valda metoder

Vid beräkning av parametrar i nodanalysen av Malmös elnät har två program utvecklade vid Lunds Tekniska Högskola av forskarstuderande Jonas Johansson vid IEA och Teknisk doktor Henrik Johansson vid Brandteknik använts. Dessutom visade det sig att gratisprogrammet NetDraw av Steve Borgatti [30] fungerade väldigt bra när man på ett grafiskt sätt skulle belysa effekten av utslagna noder i nätverket.

Alla resultat har före sammanställning normerats för att kunna jämföra olika data med varandra och på så sätt uppnå en så korrekt bild av sårbarheten som möjligt, inom ramen för rapporten.

6.4 Viktning av resultaten

För att kunna sammanställa beräkningarna och nodanalyserna med riskanalysens resultat på ett korrekt sätt krävdes en viss omarbetning av resultaten. Dessutom gjordes en ansats att formulera beräkningarna och resultatet från nodanalysen till en "risk". För att därefter uppnå möjligheten att presentera de olika resultaten som en helhet i den slutgiltiga sårbarhetsanalysen.

Detta utfördes genom att transformera den genomsnittliga utslagsfrekvensen till ett tal, fördelat mellan noll och ett. Vid de initiala simuleringarna tittade vi på vilken effekt utslagning av en specifik nod fick på storkunder. Här betraktades storkunders årliga förbrukning. Anledningen till att endast storkunder valdes, var att de oftast står för över 50 % av den levererade effekten (P) från en fördelningsstation. Genom att titta på antalet kunder som drabbas vid en utslagning av en nod får vi samtidigt konsekvensen. Ur ett företagsperspektiv är det naturligtvis av intresse att även inkludera de berörda elförbrukning, vilket vid en utslagning innebär förlorade intäkter. Lagar och förordningar föreskriver olika nivåer på säkerhet beroende på belastning. I den slutliga utvärderingen av sårbarhetsanalysen är därför förbrukad effekt en viktig storhet att beakta.

Förfaringssättet ger oss en möjlighet att beräkna "risken", genom att multiplicera den genomsnittliga utslagsfrekvensen med konsekvensen. Därpå, för att uppnå en så rättvis bild som möjligt, graderades stationerna från 1 till 26 där fördelningsstationen med högst "risk" fick 26. Detta förfaringssätt användes sålunda även på riskanalysens resultat. Därigenom kommer vi även ifrån problemet med att vissa stationer har noll i riskbedömningen i riskanalysen.

6.5 Riskanalysen utförd på distributionsnätet i Malmö

Vid kartläggningar av risker inom E.ON Elnät Sverige har man använt sig av en riskanalys där man tittat på stationerna ur tre olika aspekter; egendoms-, person- och miljöskada förutom detta har man vägt in kundkonsekvenser och varumärke. En av de mer framträdande riskerna i riskanalysen är brandrisken i någon vital del i de undersökta fördelningsstationerna.

De framtagna riskvärdena i analysen låg i ett intervall mellan noll och uppåt. För att kunna använda dessa värden i den slutgiltiga sårbarhetsanalysen har en viss modifiering gjorts. Sårbarhetsanalysen behandlar 26 fördelningsstationer, därav har stationen med högst risk i riskanalysen blivit tilldelad ett värde på 26. Därefter har de övriga stationerna fått riskvärde på en sjunkande skala. Stationer med lika värde i riskanalysen har även blivit tilldelad lika värde i graderingen i denna rapport.

6.6 Beskrivning av simuleringsmetodik

Analysen ser i detta avseende elnätet rent topologiskt och tar inte hänsyn till fysiska egenskaper som till exempel överföringskapacitet.

Vid simulering användes fyra typer av simuleringsalternativ, utslagning av nod med högsta grad, slumpmässig utslagning av nod, utslagning av nod med högst intermeditet C_B och slumpmässig utslagning av båge/länk. Utslagning av en nod/länk kan ge upphov till att en eller flera noder förlorar kontakten med källnoderna och därmed blir obrukbara. Innebörden med detta blir att varje simulering håller på till dess att alla noder förlorat kontakt med källnoderna. Tusen simuleringar ger följaktligen ett genomsnittligt värde som beskriver hur tidigt en nod förlorar kontakt med källnoderna. Varje nod får på så sätt ett värde som därmed ger en indikation på hur pass utsatt den är i förhållande till de övriga noderna. Ett lågt värde innebär att noden slagits ut i ett tidigt skede, vilket är ekvivalent med en sämre placering i nätet.

De olika alternativen beskriver var för sig olika scenario.

- Utslagning av noder med högsta grad representerar t.ex. ett terroristangrepp. Av naturliga skäl sker då attacken där minst arbetsinsats ger störst konsekvens.
- Slumpmässig utslagning av nod är tänkt att simulera materiella fel och slitage på fördelningsstationsnivå, det vill säga oavsiktliga incidenter.
- Slumpmässig utslagning av båge/länk simulerar liknande scenario som föregående men med avseende på luftledning och kablar.
- Utslagning av nod med högst intermeditet (belastning) C_B är ett försök att illustrera kaskadeffekten som kan resultera i större driftavbrott.

För att försöka uppnå en viss realitet i simuleringarna använde vi oss av felfrekvenser hämtade från statistiska data, tabell 6.1 nedan. De använda parametrarna har även verifierats av specialister på E.ON Elnät.

Tabell 6.1. Fel- och avbrottsfrekvenser av luftledning och kabel

Typ	Fel- och avbrottsfrekvenser ((fel/km)/år)
130kV luftledning	$20 \cdot 10^{-3}$
130kV kabel	$8 \cdot 10^{-3}$
50kV luftledning	$40 \cdot 10^{-3}$
50kV kabel	$10 \cdot 10^{-3}$
10kV kabel	$30 \cdot 10^{-3}$
Övriga*	$1 \cdot 10^{-6}$

(Källa: E.ON Elnät Sverige och Nordel)

*Genom att använda oss av "övriga" med en så låg felfrekvens som 10^{-6} , är vår intention att efterlikna mellanliggande kablar inne på fördelningsstationerna bland annat mellan ställverk och transformatorer.

Kabellängderna har uppmäts med hjälp av ett utav E.ON Elnäts internt tillgängliga program, Facil+. Som ren kuriosita kan nämnas att den totala kabellängden som förbinder fördelningsstationerna i Malmönätet har beräknats till cirka 250km.

Fördelningsstationernas haverifrekvens har beräknats enligt följande. Det individuella antalet fack på en fördelningsstation multiplicerat med felfrekvensen per år, enligt tabell 6.2.

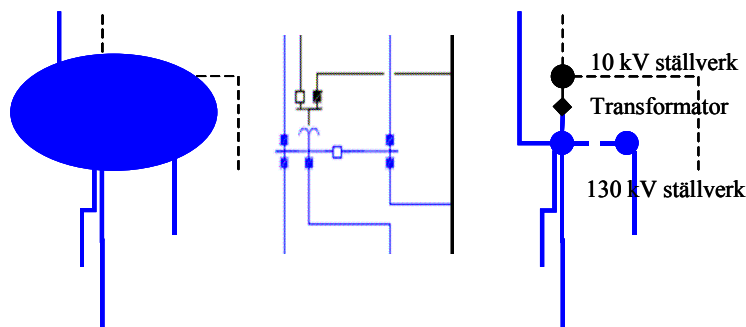
Tabell 6.2. Haverifrekvens per fack inom E.ON Elnät Sverige

Spänningsnivå kV	Antal fack inom E.ON elnät Sverige	Antal totalhaverier av fack per år	Frekvens per år
130	700	2	$2,857 \cdot 10^{-3}$
50-40	1100	2	$1,818 \cdot 10^{-3}$
20-10	6000	5	$0,833 \cdot 10^{-3}$

(Källa: E.ON Elnät Sverige)

Transformatorers totalhaveri estimerades av personal på E.ON Elnät till $2 \cdot 10^{-3}$ /år. Genom att inkludera relevanta avbrotts- och haverifrekvenser i våra simuleringar, var förhoppningen att uppnå mer korrekta resultat.

För att beskriva nätet i simuleringarna har vi varit tvungna att göra vissa förenklingar. Den bild som är den absolut enklaste av det simulerade distributionsnätet visas i figur 6.1.a. Figur 6.1.a beskriver dock nätet på ett ganska dåligt sätt och parametrar som felfrekvenser går ej att inkludera på ett bra sätt. Det blir även problem med den matematiska teorin eftersom den inte tillåter två redundanta länkar emellan noder. Därför har vi försökt efterlikna det enlinjeschema där elnätet är uppritat, figur 6.1.b. Den modell som vi använt oss av, figur 6.1.c, är en bättre bild av hur en fördelningsstation är uppbyggd i verkligheten. Eftersom det finns flera komponenter som kan falla ges då möjligheten att sätta in olika felfrekvenser på de ingående komponenterna.



Figur 6.1.a

Figur 6.1.b

Figur 6.1.c

Figur 6.1.a-c visar olika sätt att beskriva en fördelningsstation.

6.7 Analys av topologiska resultat

Vid analyser och jämförelser av olika nätverk med hjälp av topologiska studier är där speciellt två parametrar som utmärker sig, nämligen klustringskoefficienten C och genomsnittlig kortaste längd l . I tabell 6.3 nedan görs en jämförelse av våra resultat och resultaten från tidigare studier av betydligt större kraftnät, nämligen det nordiska kraftnätet [31] och västra USA:s kraftnät [32].

Tabell 6.3 . Redogörelse av klustringskoefficient och genomsnittlig längd.

Nätverk	Klustringskoefficienten C	$C_{slumpmässig graf}$	l	$l_{slumpmässig graf}$
Malmös distributionsnät	0,080	0,036	5,11	4,28
Nordiska kraftnätet	0,0166	0,00049	21,75	10,0
Västra USA:s kraftnät	0,080	0,00054	18,7	8,7

För att beräkna C_{sl} och l_{sl} vid behandling av slumpmässig graf har följande två formler använts[31].

$$C_{sl} = p^* = \langle k \rangle / N = 2 * M / (N(N-1))$$

$$l_{sl} \approx \log N / \log \langle k \rangle$$

Vid beräkningarna för Malmönätet användes följande parametrar;

$$\langle k \rangle = 2,77, N = 78 \text{ och } M = 108.$$

Vid de två övriga nämnda topologiska analyser har slutsatsen blivit att de har varit robusta nätverk. Att det nordiska kraftnätets klustringskoefficient är noterbart lägre än västra USA:s kraftnät är kanske inte så förvånande med anledning av den geografiska strukturen med långa avstånd där största delen av elproduktionen sker i norr och konsumtionen i söder.

Vad som kan tyckas anmärkningsvärt är dock att ett stadsnät som Malmös har samma värde på C som västra USA:s kraftnät. Detta innebär att västra USA:s kraftnät är maskat i lika hög grad som Malmös distributionsnät. En möjlig förklaring till att Malmönätet inte har en väsentligt högre klustringskoefficient än det amerikanska, kan vara att det funnits en större baktanke vid uppbyggnaden av västra USA:s stamnätsstationer. Klustringskoefficientens värde för Malmö kan i sin tur bero på att Malmös elnät tillgodoser och följer Malmö stads ständigt dynamiska utveckling. I ett stamnät bygger man istället gentemot en mer statisk realitet d.v.s. städerna har sin bestämda geografiska position.

Ett högt C innebär att nod i har hög sammanlänkning med andra noder i förhållande till antal anslutna länkar till nod i . Ett högt C för nätverket i sin helhet innebär följaktligen att antalet noder sammankopplade i trianglar * 3, i förhållande till antalet noder sammankopplade i trippletter är likvärdigt.

Det hade varit av större intresse att kunna göra en liknande jämförelse med andra stadsnät, men några sådana analyser har så vitt vi vet inte tidigare gjorts. Då hade man sannolikt med större säkerhet även kunna avgöra betydelsen av klustringskoefficienten vid uppbyggnaden av ett kraftnät i stadsmiljö.

Man kan dock genom att betrakta den genomsnittliga längden l konstatera att Malmös distributionsnät har fler stationer per förbindelse än de övriga i denna rapport jämförda nät. Värt att notera i detta sammanhang är att när vi pratar om den genomsnittliga längden l tages ingen hänsyn till den geografiska längden. Den genomsnittliga längden l är endast det genomsnittliga antalet bågar mellan de olika noderna i det behandlade nätverket.

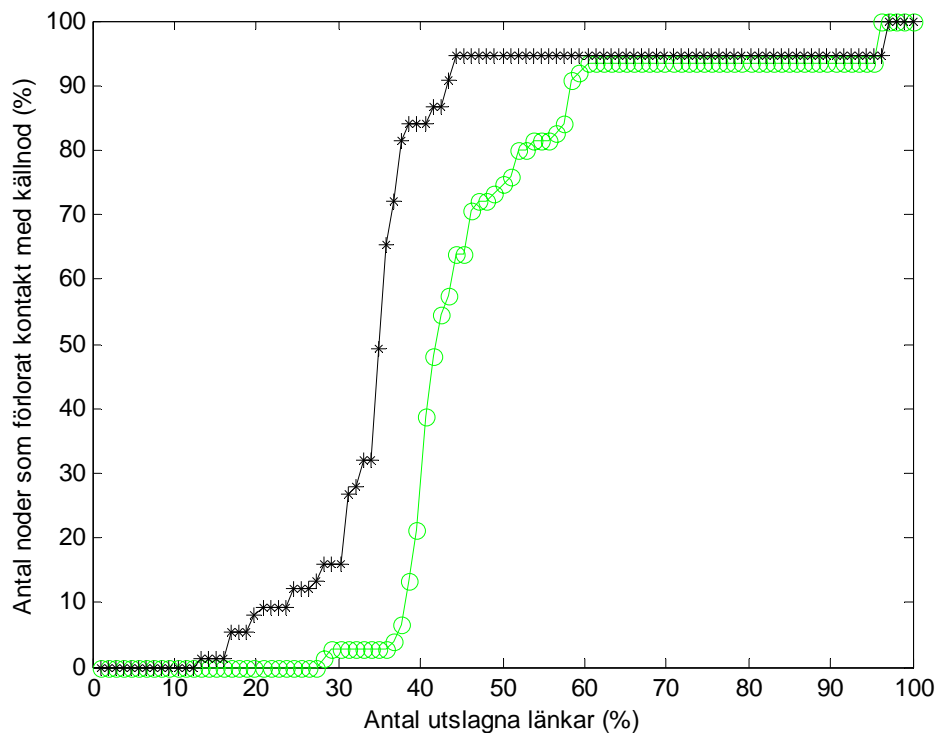
Slutsatsen vi drar av denna delanalys är att karakteristiska drag för ett stadsnät bör vara just en hög klustringskoefficient tillsammans med en låg genomsnittlig längd. Våra analysresultat av Malmös distributionsnät indikerar på ett robust nätverk med stor redundans.

6.8 Analys av simuleringsresultat

Vid analys av simuleringsresultaten har vi betraktat nätverket ur två perspektiv. Dels hur nätet i sin helhet har reagerat vid de olika simuleringsalternativen, i rapporten kallad makroperspektivet. Dessutom har vi gått ner på ett mikroperspektiv och iakttagit när de olika fördelningsstationerna har slagits ut i förhållande till varandra, vid de olika simuleringarna.

6.8.1 Nätets sårbarhet ur ett makroperspektiv

Analysen av Malmönätet med avseende på slumpmässig utslagning av länkar som i denna rapport illustrerar oavsiktliga avbrott som t.ex. avgrävning av kabel och slitage. Här kan man konstatera att ett markant bortfall av noder sker först då runt hälften av länkarna är utslagna, figur 6.2 nedan. Vid ca: 40 % utslagna länkar förlorar runt 10 % av fördelningsstationerna kontakt med det övriga nätet. Lite anmärkningsvärt var däremot resultatet när det togs hänsyn till avbrottsfrekvensen. Utslagningen börjar i detta fall tidigare, redan vid ca:15 %, men närmar sig och följer därefter i stort sätt samma mönster som den tidigare simuleringen där ingen hänsyn till avbrottsfrekvensen togs. Slutsatsen av detta delresultat tyder på att Malmös distributionsnät är ett robust nätverk d.v.s. det krävs att en väsentlig del av förbindelserna blir obrukbara för att konsekvenserna skall bli betydande.



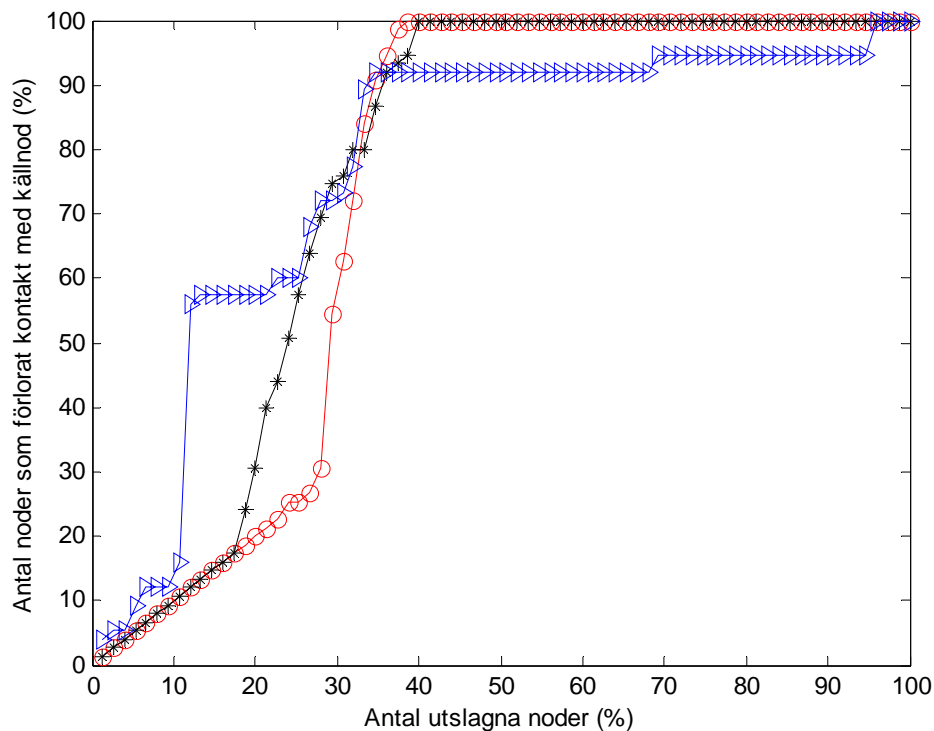
Figur 6.2 Effekten på nätverket vid slumpmässig utslagning av länkar. Gröna cirklar markerar utslagning utan hänsyn till avbrottsfrekvens och svarta stjärnor med hänsyn till avbrottsfrekvens. Figuren visar ett medel av 1000 simuleringar.

En fortsatt analys av fördelningsstationer inom Malmös elnät, där vi först behandlar gradbaserad utslagning, skall illustrera avsiktliga avbrott såsom sabotage eller en terroristattacker. Därefter behandlas slumpmässig utslagning av noder, som skall simulera oavsiktligt avbrott.

Man kan klart konstatera att ett sabotage kan åstadkomma stora driftstörningar med en relativt liten arbetsinsats. Detta simuleras med utslagning av noder med högst grad, resultaten är markerade med blå trianglar i figur 6.3 nedan. Redan vid strax över 10 % av noderna utslagna har över 50 % av noderna förlorat kontakt med källnoderna. Det är lätt att trivialisera detta resultat och uttrycka skepticism mot att sabotage och/eller terroristattacker är något vi skall beakta här i Sverige. Vi menar inte heller att där ligger ett direkt hot mot elnätet, man bör dock ha haft det under övervägande. Medvetenheten om riskerna bör åtföljas av en adekvat handlingsplan om det ”otänkbara” inträffar.

Vem skulle till exempel inte ha ifrågasatt ens kompetens om man hade uttryckt farhågor, att inte ett utan två flygplan med avsikt skulle flyga in i ett höghuskomplex innan den 11 september. Det är de stora katastroferna som redan har inträffat som man ofta är väl förberedd för. När man gör en analys av sårbarheten måste man arbeta proaktivt. På så sätt ges friheten och möjligheten att röra sig utanför de normala ramarna. Sålunda inte begränsas av gamla erfarenheter och endast förbereda organisationen på incidenter som redan ägt rum.

Betraktar man istället den slumpmässiga utslagningen av noder markerade med röda cirklar i figur 6.3 nedan, så följer den initialt ett linjärt beteende. Här sker en kollaps av elnätet först när omkring 30 % av det totala antalet noder är utslagna. Detta är effekten, när noderna av högre grad blir utslagna. Malmös distributionsnät har tydligt ett antal stationer av stor betydelse för hela nätets funktionalitet.



Figur 6.3 Effekten på nätverket vid slumpmässig utslagning av noder utan att inkludera haverifrekvens (röda cirklar), slumpmässig utslagning av noder utan med hänsyn till haverifrekvens (svarta stjärnor) och gradbaserad utslagning (blå trianglar), vid 1000 simuleringar.

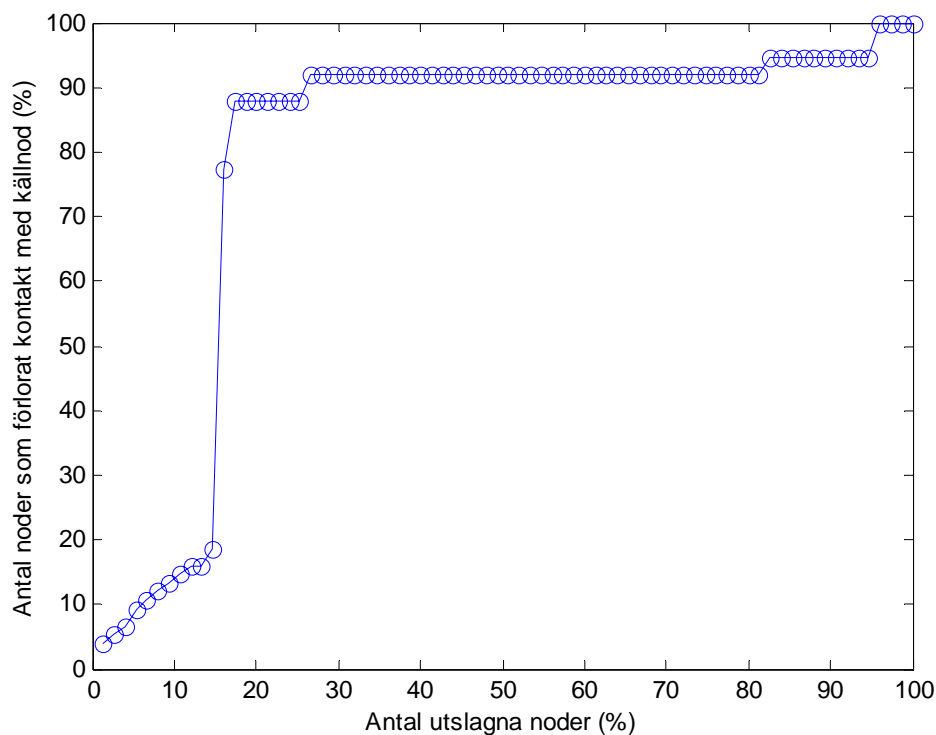
Följaktligen kan det konstateras att en bättre utformning av ett nätverket borde kunna uppnås då antalet noder ökas och/eller att gradstorleken fördelas jämnt över alla noderna. Samtidigt bör man undvika ett fåtal större kärnnoder. Ett av alternativen till att göra noderna mindre sårbara kan t.ex. vara möjlighet till ödrift med matningsmöjligheter från lokala generatoranläggningar.

Som man kan avläsa i figur 6.3 skiljer sig inte simuleringarna utan och med hänsyn till haverifrekvens nämnvärt, utan beteendet är i stort sett detsamma. Den stora skillnaden är att grafen där hänsyn togs till estimerad haverifrekvens flackar av vid ca: 30 % utslagna noder, samtidigt som stigning är som brantast för grafen där det inte togs hänsyn till någon haverifrekvens. Därmed anser vi att man kan dra slutsatsen att fel- och haverifrekvenser inte har någon större inverkan men förmodligen ges en mer korrekt bild av systemet i sin helhet vid simuleringarna med fel- och haverifrekvenser. Viktigt att poängtera i denna delanalys är dock att vi inte tittat närmare på vilken nod som slås ut, utan endast betraktat nätverket i sin helhet.

Kaskadeffekten är den följd effekt som en störning på en position i elnätet kan få för det övriga nätet, genom att orsaka överbelastningar i andra vitala delar. När även dessa överbelastade komponenter kopplas ifrån sprids effekten blixtnabbt vidare. Rent intuitivt kändes intermeditet C_B som det, ur ett elkraftsystems perspektiv, mest väsentliga måttet när vi körde simuleringar. Intermeditetet indikerar hur pass central position en specifik nod har i nätet som helhet. Här utgår vi från att strömmen hela tiden omkopplas på ett sådant sätt att den alltid tar sig fram den kortaste vägen. Noder med hög intermeditet är knutpunkter i nätverket m.a.o. många andra noder är beroende av dessa för att ha kontakt med källnoderna. Eftersom vi i detta arbete analyserar ett elkraftssystem känns det mer naturligt att kalla detta mått för belastning. Vår initiala förhoppning var att använda oss av C_B och att göra en ny

beräkning av detsamma efter varje simulering och därigenom även få en uppfattning om hur systemet som helhet reagerar vid "worst case" scenario d.v.s. följd effekten när en nod helt slås ut. Detta har dock inte implementerats i de program vi använt, så någon jämförelse med sådana värden har inte varit möjlig att göra. Vi har dock gjort simuleringar utan omräkning av C_B och resultaten återfinns i figur 6.4. Här ser man tydligt att det räcker med att slå ut ca. 15% av de högst belastade noderna för att slå ut så mycket som 90% av det övriga nätet. Vid utslagning av de högst lastade noderna sker en omfördelning av belastningen till de noder som är kvar i nätet. Detta leder som regel till att de noder som redan var hårt belastade blir ännu mer belastade, vilket i sin tur leder till den oönskade kaskadeffekten. Detta är ett scenario som inte är helt olikt det avbrott som drabbade Sverige och delar av Danmark den 23 september 2003.

Ett alternativ [33] som det för tillfället arbetas på i Karlskrona är ett system som skall förhindra kollaps av hela nätet vid större elavbrott. Tanken är att man skall kunna omfördela strömförsörjningen med hjälp av ett förprogrammerat styrprogram som styrs över tele/datanätet och därigenom säkra elförsörjningen till prioriterade användare.

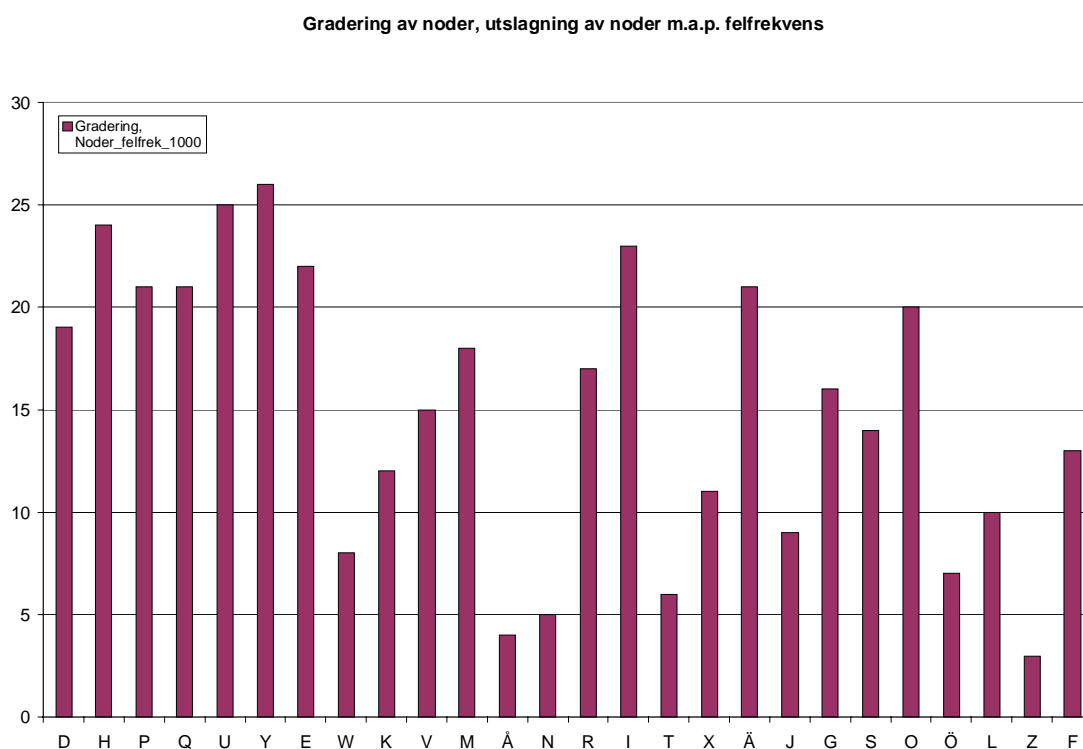


Figur 6.4 Effekten på nätverket vid utslagning av noder med högst intermeditet.

6.8.2 Nätets sårbarhet ur ett mikroperspektiv

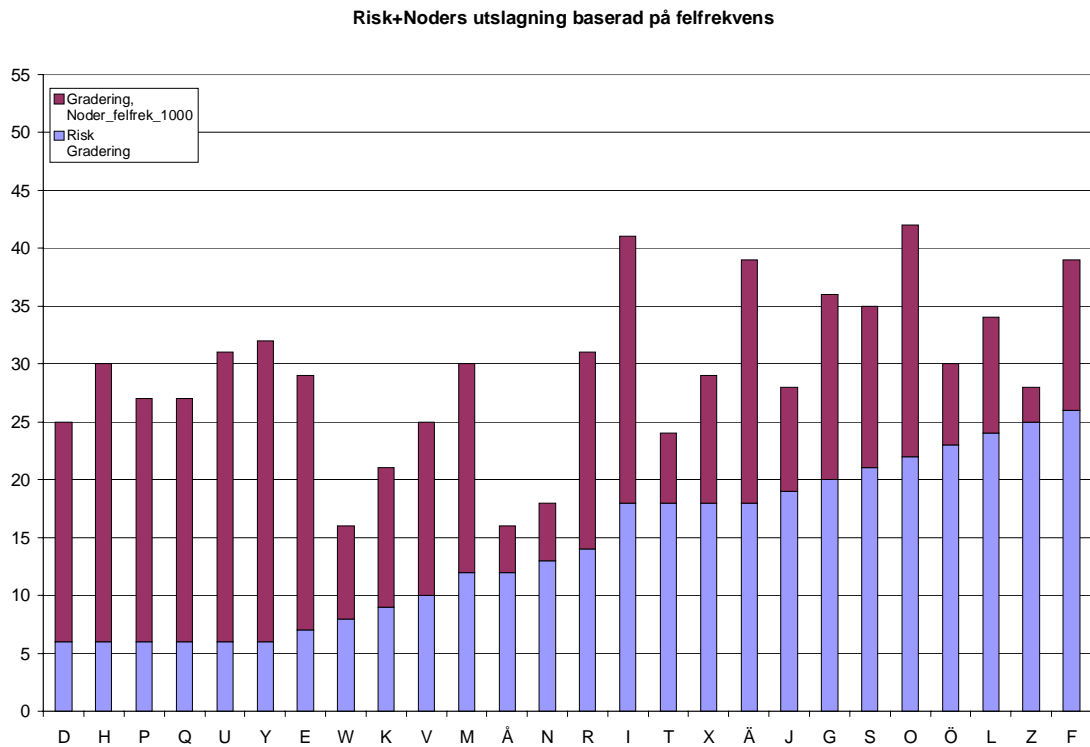
För att kunna fastställa någon form av prioriteringslista, i reinvesterings syfte, av de behandlade fördelningsstationerna ur ett sårbarhetsperspektiv, har vi tagit fram olika diagram. Samtliga presenterade diagram baseras på 1000 simuleringar. Alla diagrammen är sorterade efter riskanalysens gradering. Sålunda har stationen med lägst risk enligt riskanalysen blivit placerad längst till vänster i diagrammen. Diagrammen visar när de olika stationerna förlorar kontakten med matningsstationerna enligt den simuleringsmetodik som är beskriven kapitel 6.6.

I figur 6.5 visas resultatet av simuleringarna vid slumpmässig utslagning av stationer med hänsyn till felfrekvens. För att förändra denna bild på sårbarheten krävs en ombyggnad av nätet. Figur 6.5 anser vi bäst representera hur sårbar en station är i nätet, helt objektivt.



Figur 6.5. Gradering av stationer, utslagning av noder med avseende på felfrekvens (sorterad efter riskbedömningen).

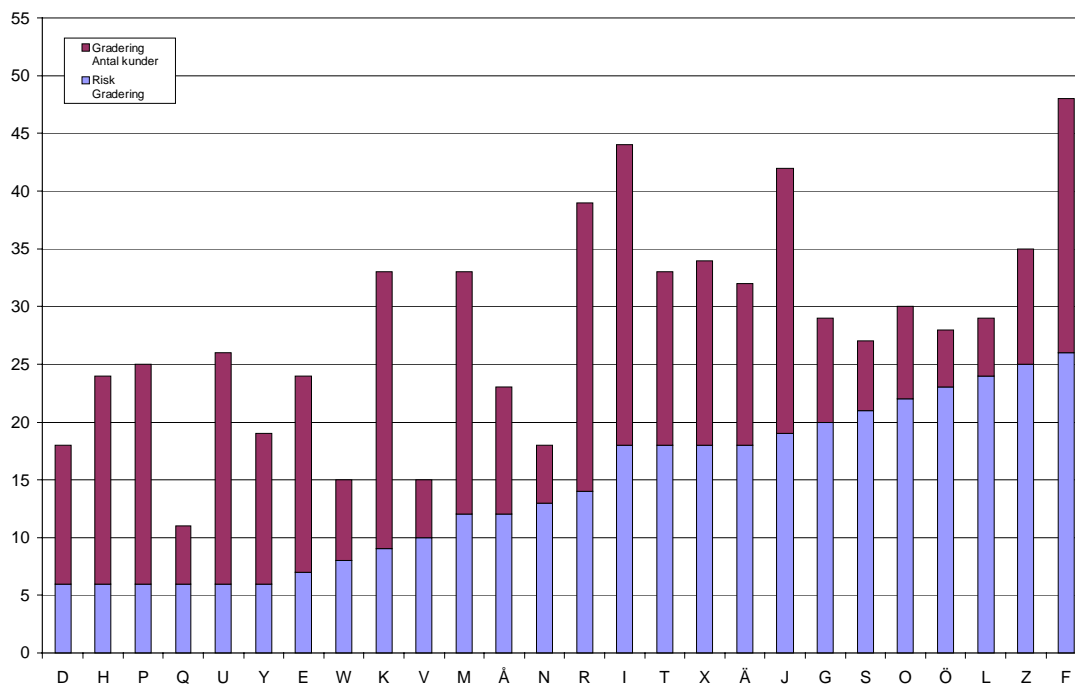
Adderas risken från riskanalysen till föregående resultat i figur 6.5 uppnås figur 6.6. Här öppnas möjlighet att förbättra en stations position i förhållande till de övriga genom att se över och åtgärda den risk som framkommit i riskanalysen.



Figur 6.6. Risk plus stationers utslagning med avseende på felfrekvens (sorterad efter riskbedömningen).

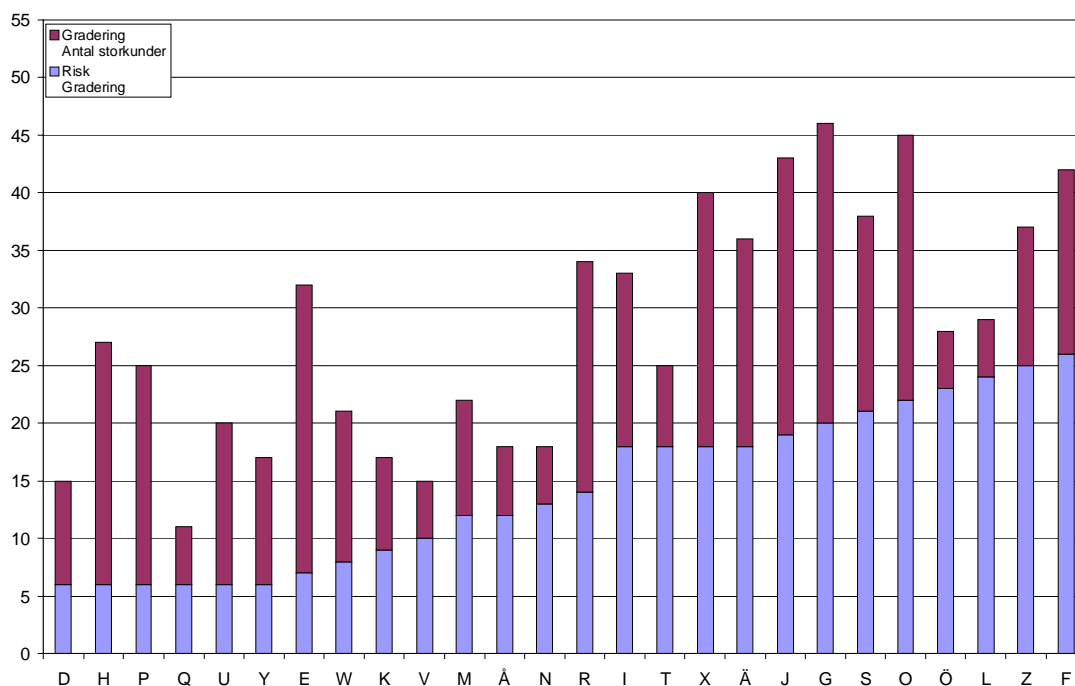
Resultatet kan sedan multipliceras med valfri konsekvens beroende på ur vilket perspektiv man är intresserad att betrakta nätet. Några olika konsekvenser som vi har ansett vara av relevant betydelse återfinns i bilaga 3. Multiplikationen med vissa utvalda konsekvenser redovisas nedan i figur 6.7-6.10. För att knyta samman riskanalysen med våra resultat har vi slutligen adderat de olika graderingarna med varandra. På så sätt uppnås även en bättre helhetsbild av sårbarheten för varje specifik station.

Risk+Produkten av nodersutslagnig och totalt antal anslutna kunder



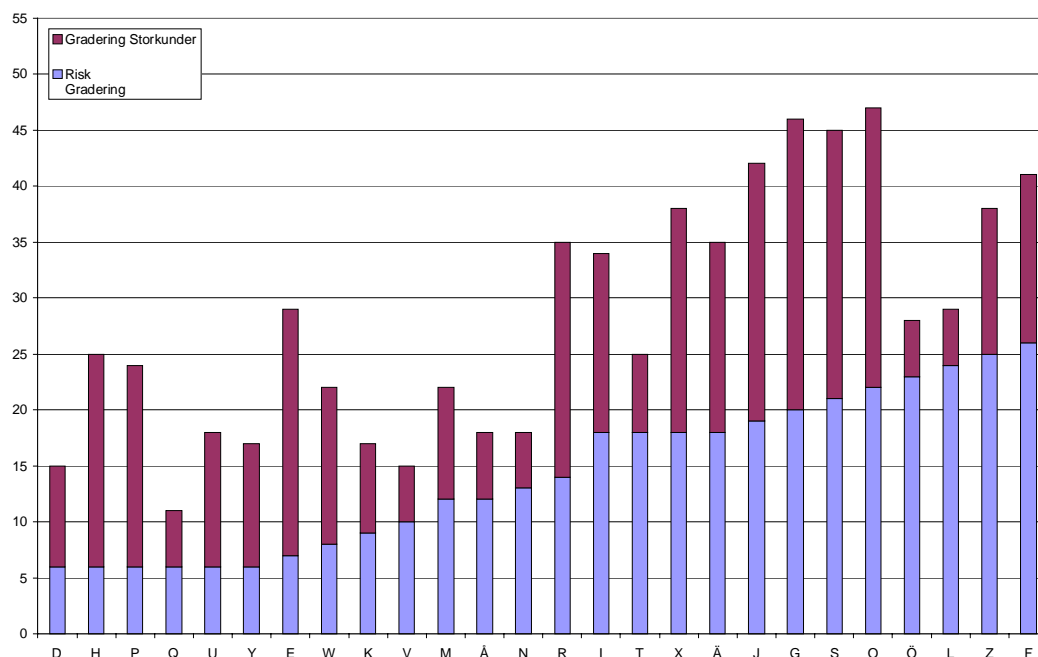
Figur 6.7. Risk plus produkten av stationers utslagnig och totalt antal anslutna kunder (sorterad efter riskbedömningen).

Risk+Produkten av nodersutslagnig och totalt antal anslutna storkunder



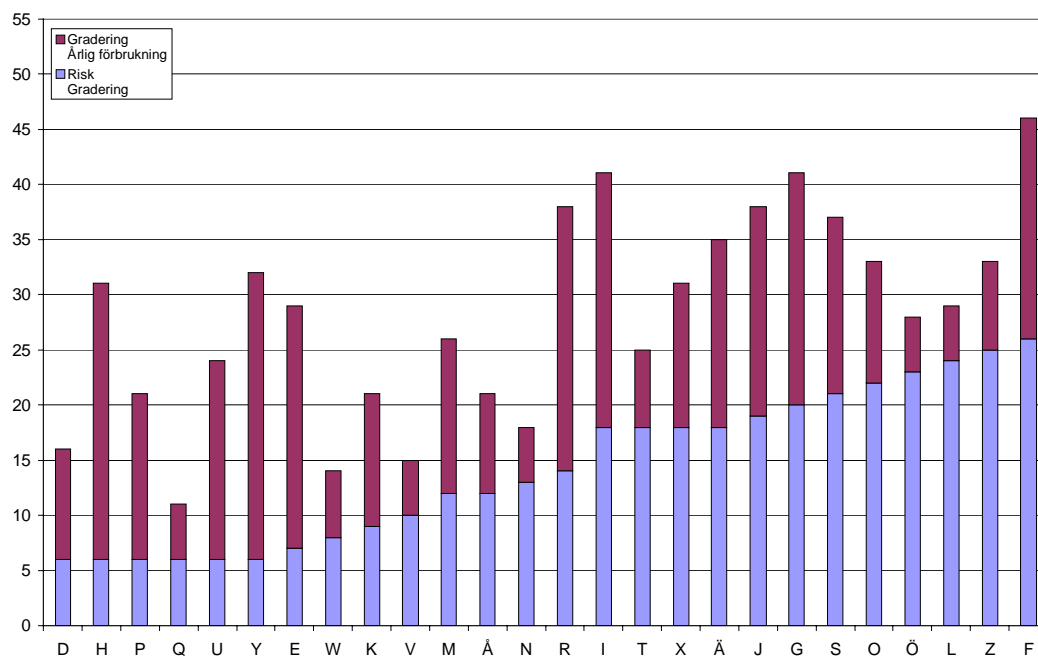
Figur 6.8. Risk plus produkten av stationers utslagnig och totalt antal anslutna storkunder (sorterad efter riskbedömningen).

Risk+Produkten av nodersutslagning och förbrukning hos storkunder



Figur 6.9. Risk plus produkten av stationers utslagning och förbrukning hos storkunder (sorterad efter riskbedömningen).

Risk+Produkten av nodersutslagning och total årsförbrukning

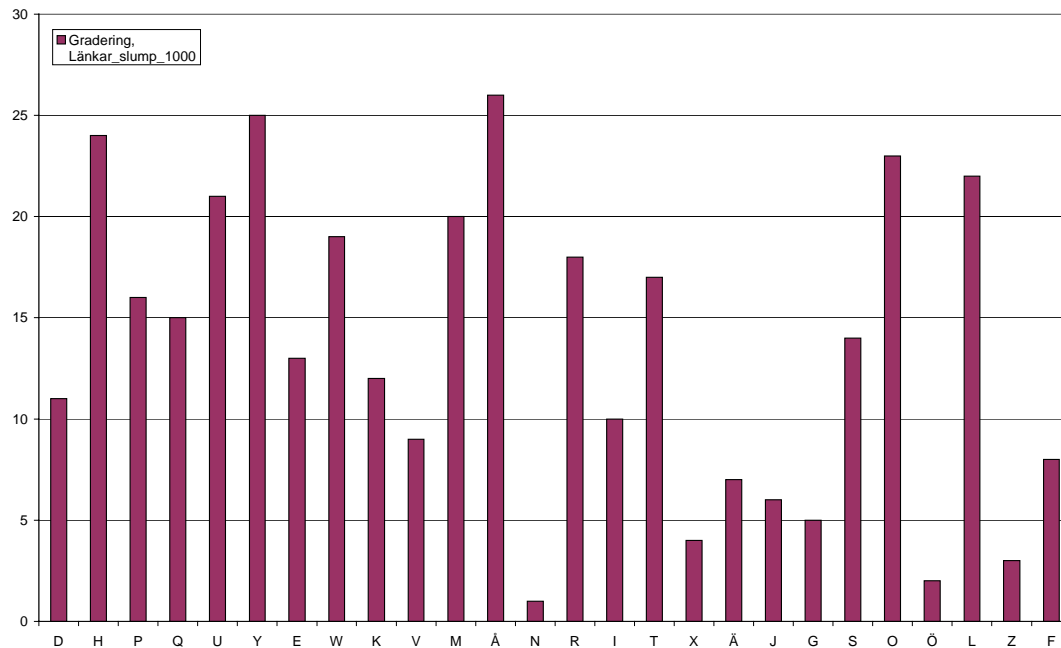


Figur 6.10. Risk plus produkten av stationers utslagning och total årsförbrukning (sorterad efter riskbedömningen).

Betraktar man istället simuleringsresultaten med slumpmässig utslagning av länkar med och utan avbrottsfrekvens beskrivs ett helt annat scenario än ovan. Detta scenario beskriver istället sårbarheten på noder enbart med avseende på utslagning av länkar. Länkar som i denna sårbarhetsanalys representerar kablar och luftledningar. Enskilda stationers positionering kan endast förbättras genom att kabla nätet eller att öka redundansen. Den mest realistiska bilden

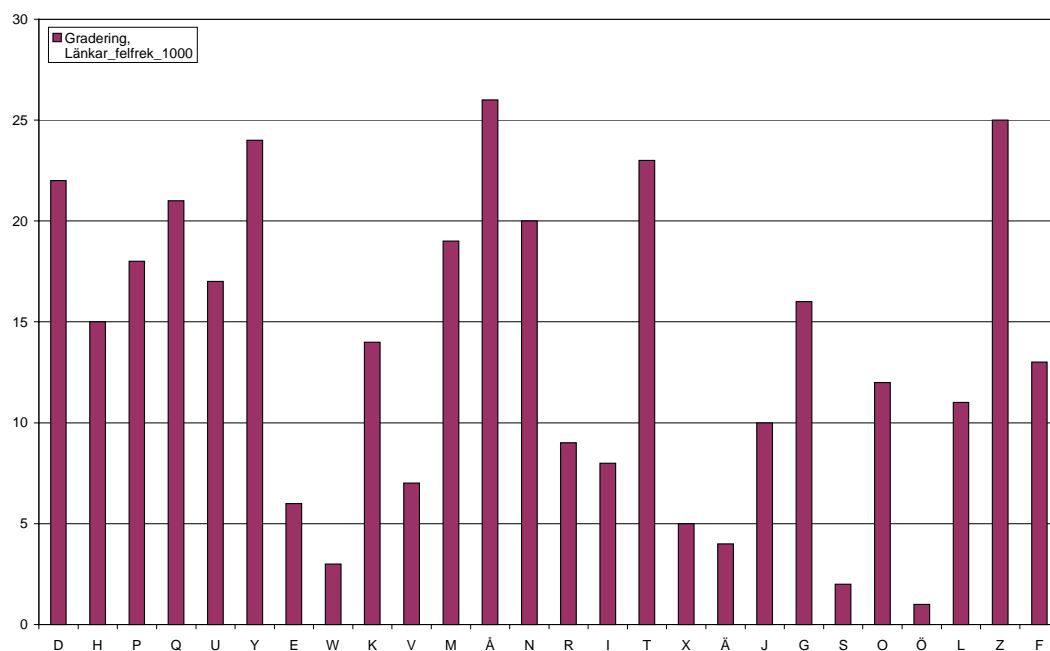
anser vi uppnås genom att inkludera avbrottsfrekvensen. När man går ner på mikronivå och studerar specifika stationer upptäcker man en distinkt skillnad när avbrottsfrekvensen inkluderas, en klar skillnad från resultatet från den topologiska studien. Eftersom riskanalysen endast behandlat enskilda fördelningsstationer har ingen addering av riskbedömningen gjorts. Resultaten redovisas i figur 6.11-6.12.

Gradering av noder, utslagning av länkar m.a.p. slump



Figur 6.11. Gradering av noder, utslagning av länkar med slumpmässig utslagning (sorterad efter riskbedömningen).

Gradering av noder, utslagning av länkar m.a.p felfrekvens

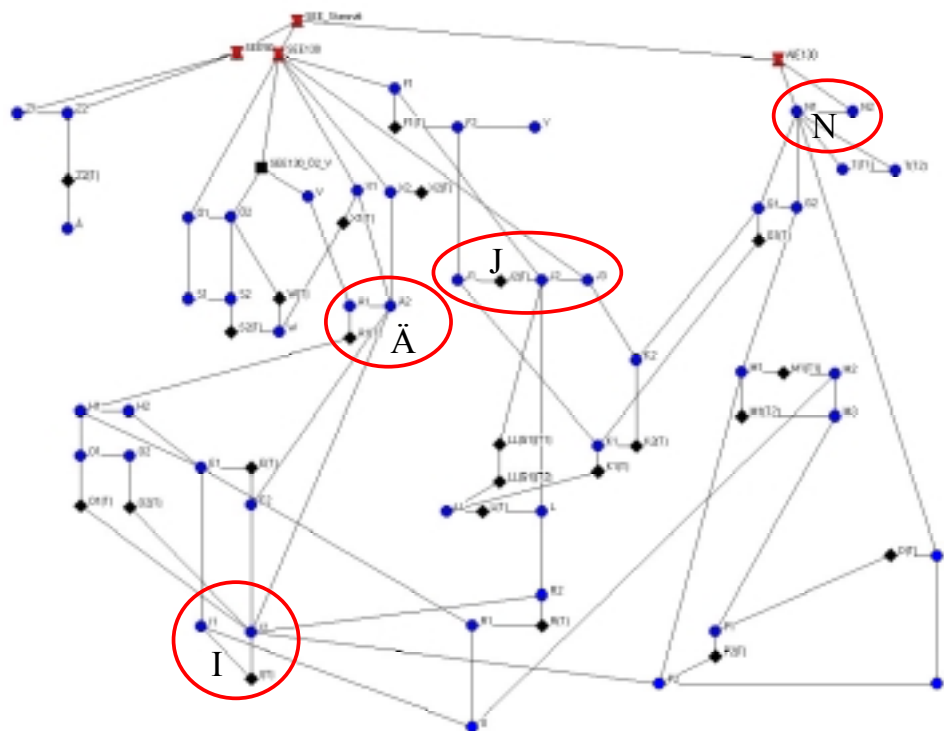


Figur 6.12. Gradering av noder, utslagning av länkar med slumpmässig utslagning med avseende på felfrekvens (sorterad efter riskbedömningen).

Resultatet av utslagning av nod med högsta grad har vi valt att visa med hjälp av bilder ifrån nätanalysprogrammet NetDraw. Vid denna simulering har utslagningen av noder med samma grad skett slumpmässigt. I tabell 6.4 redovisas de fyra noder i nätverket med högst grad. Figur 6.13 illustrerar en förenklad bild av Malmönätet i sin helhet. Fördelningsstationerna med högst grad är markerade med cirklar i figuren.

Nod	Grad
I	8
J	7
N	7
Ä	6

Tabell 6.4. Beteckning och gradtal på de fyra stationerna med högst grad i nätverket.

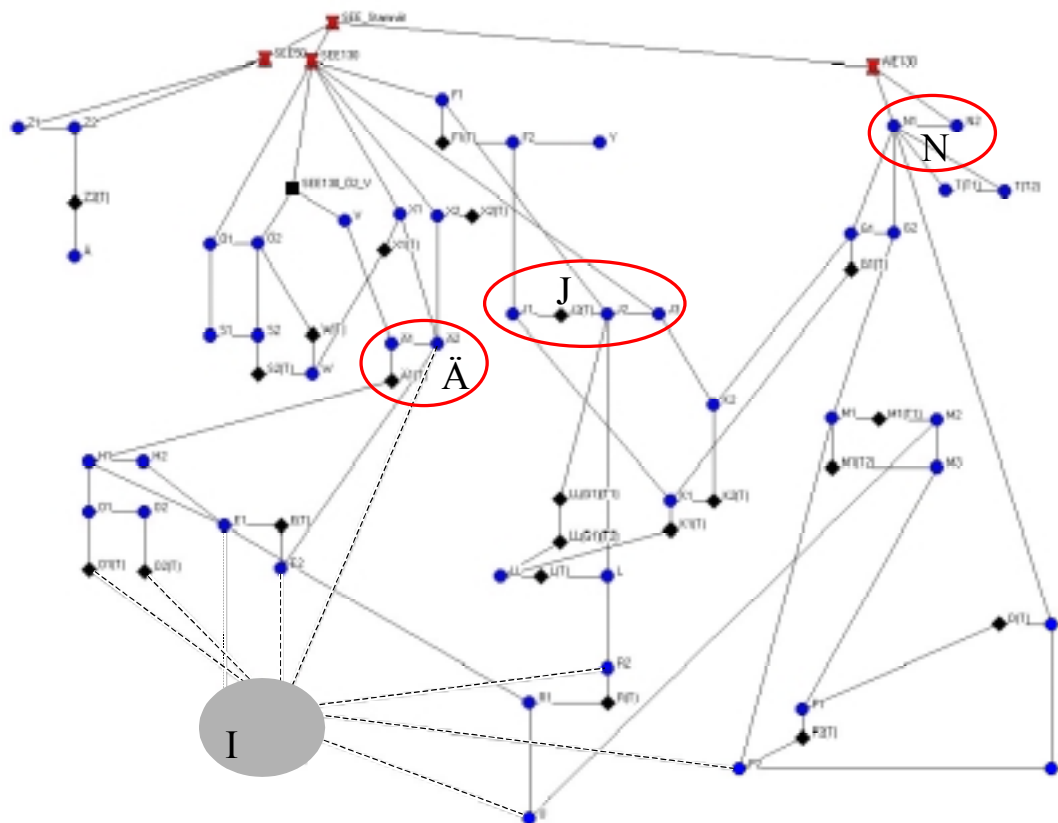


Figur 6.13 Malmönätet med de fyra stationerna med högst grad.

Som vi beskrivit tidigare ser man här att varje station i simuleringen egentligen har flera noder, detta för att få modellen att beskriva verkligheten lite bättre. Detta gör att när vi beskriver noder med högsta grad är det hela fördelningsstationens grad vi avser. Cirklarna i figur 6.13 symboliserar staketet på en fördelningsstation, och graden räknas således genom att räkna antalet gånger cirkeln blir genomskuren av länkar (ledning, kablar).

En intressant iakttagelse vid utslagning av noder med högst grad, är att den nod med högst grad inte nödvändigtvis behöver vara den nod som vid utslagning ger störst effekt på nätverket som helhet. Detta kan man tydligt observera i figur 6.14 när nod I slås ut. Effekten blir att när nod I slagits ut drabbas endast kunder anslutna till nätstationer som är underordnande nod I. Inverkan på det övriga nätet blir i stort sätt obefintlig.

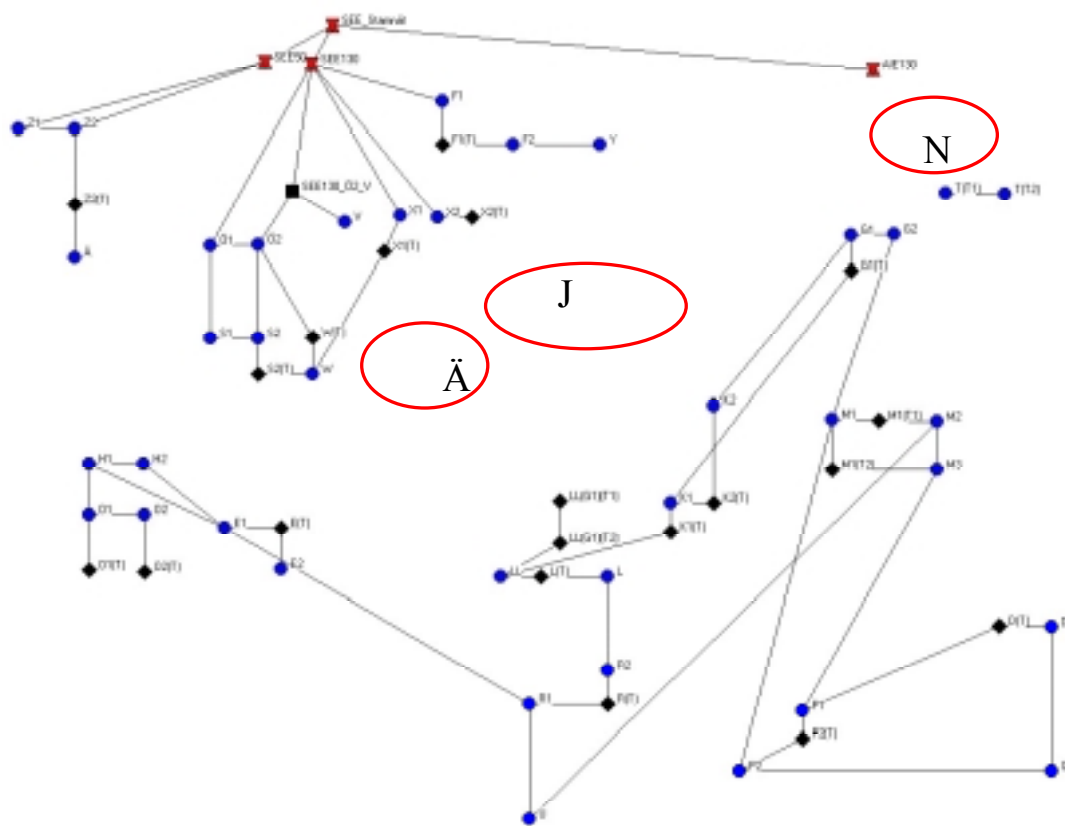
Vår tolkning av detta blir att hög grad inte är ekvivalent med hög betydelse för övriga delar av nätet. För att göra ett nätverk mindre sårbart bör alla stationer få möjlighet till alternativ matning från flera olika fördelningsstationer. Således räcker det inte med att lägga redundanta kablar från en och samma station. Målet vid nätuppgagnad bör vara att göra så att varje enskild station har så liten inverkan på det omgivande nätverket som är möjligt d.v.s. att ett bortfall av en nod inte påverkar det övriga nätet. För att göra detta kan man inte enbart titta på värden såsom grad, klustringskoefficient och intermeditet. Istället krävs att man gör en enskild bedömning på var nod med hjälp av dessa värden, men med beaktande av nodens topologiska position i nätet. Gör man detta på ett systematiskt sätt redan när man projekterar ny- och ombyggnationer av nätet, har man gjort stora ekonomiska vinster.



Figur 6.14. Malmö nätet med de fyra stationerna med högst grad, nod I utslagen.

Vid de fortsatta simuleringarna av hög grad blir däremot effekten på nätet i sin helhet verkningsfull. Som man tydligt kan observera i figur 6.15 har efter utslagning av ytterligare tre stationer över 50% av fördelningsstationerna förlorat kontakt med källnoderna. Detta bekräftar även de resultat som framkom vid analys på makronivå. I figur 6.3 kan man se att det räcker med att slå ut 10% för att uppnå samma effekt. Ett scenario liknande detta skulle ha lamslagit en stad som Malmö, med stora ekonomiska konsekvenser för både kunder och nätägare. I sådana situationer kan man se betydelsen av en färdig och väl inövad handlingsplan där alla inblandade vet hur de skall agera.

Här syns tydligt att sårbarheten för ett nät inte har med noders enskilda sårbarhet att göra utan istället vilken effekt den har på det övriga nätet när den förlorar sin funktionalitet.



Figur 6.15. Malmönätet med de fyra stationerna med högst grad utslagna.

7 Handlingsplan

Fas 2 Förberedande

Vid större oönskade händelser är det ofta lämpligt att inom ett företag ha upprättat en handlingsplan. Därigenom kan missförstånd undvikas och ansvarig personal har klara direktiv på hur och vem som skall agera vid olika händelser. Handlingsplanen är en handling välförankrad på befattningsnivå. Dessutom ger det en indikering på hur utpräglad säkerhetskulturen är inom företaget.

Driftcentralen som är bemannad dygnet om har alltid en ansvarig, den så kallade driftledaren. Driftledaren är den som styr hur olika kopplingar i nätet skall göras både vid normal drift och vid fel. Det är enbart han som har den överblick över nätet som krävs för uppgiften och till sin hjälp har han olika driftsinstruktioner för de olika anläggningarna som ingår i systemet. Någon direkt handlingsplan för olika scenarier finns inte eftersom det finns oändligt många kombinationer av fel och driftssituationer. Därför är det driftledaren som mer eller mindre enväldigt avgör hur olika kopplingar ska göras för att på bästa sätt lösa uppgiften. Till sin hjälp har han storstörningsgruppen.

E.ON Elnät använder sig av en storstörningsgrupp som kallas in av driftsledningen vid större avbrott eller förvarningar om sådana. Avbrottet ska vara av sådan art att det föreligger risk för att ett stort antal kunder kommer att bli drabbade eller om avbrottet kommer att ta lång tid att åtgärda. Arbetsuppgifter som tas över av storstörningsgruppen är främst sådana som rör resurs och informationsfrågor.

Storstörningsgruppen består av ett stort antal specialistkompetenser som kan kallas in efter behov. Det åligger dock inte driftledningen att sammankalla dessa utan detta utförs av storstörningsgruppen. Driftledning kontaktar och rådgör med någon i uppstartsgruppen som sedan efter behov sätter samman erforderlig personal och kallar in nödvändiga resurser. För att lösa uppgiften har ledaren för storstörningsgruppen chefen för processledningens befogenheter.

Beskrivningen för hur storstörningsgruppen skall kallas in och dess funktion är välbeskriven på E.ON:s interna nät. Instruktionerna infattar beskrivningar om hur och när storstörningsgruppen ska agera vid olika händelser och situationer. Det beskrivs även hur information ska spridas både inom företaget, till kunder, media och till myndigheter.

8 Driftstörningar

Leveranssäkerheten av effekten i ett elnät är naturligtvis av största intresse både för elproducenten och elkonsumenten. För att få en så korrekt bild som möjligt av Malmönätet var det därför av vikt att titta på den aktuella avbrottsstatistiken. Till vårt förfogande fick vi all driftstörnings/avbrottsrapportering från åren 2002 och 2003. Det är följaktligen den information beräkningarna är baserade på. Med anledning av den korta tidsperioden kan inga direkta statistiska slutsatser dras, däremot kan det ge en fingervisning åt vilket håll det pekar. Vi tittade även närmare på orsaken till driftstörningarna och delade in felen i sex olika kategorier; den mänskliga faktorn, materialfel, avgrävning, överbelastning, okänt och övrigt.

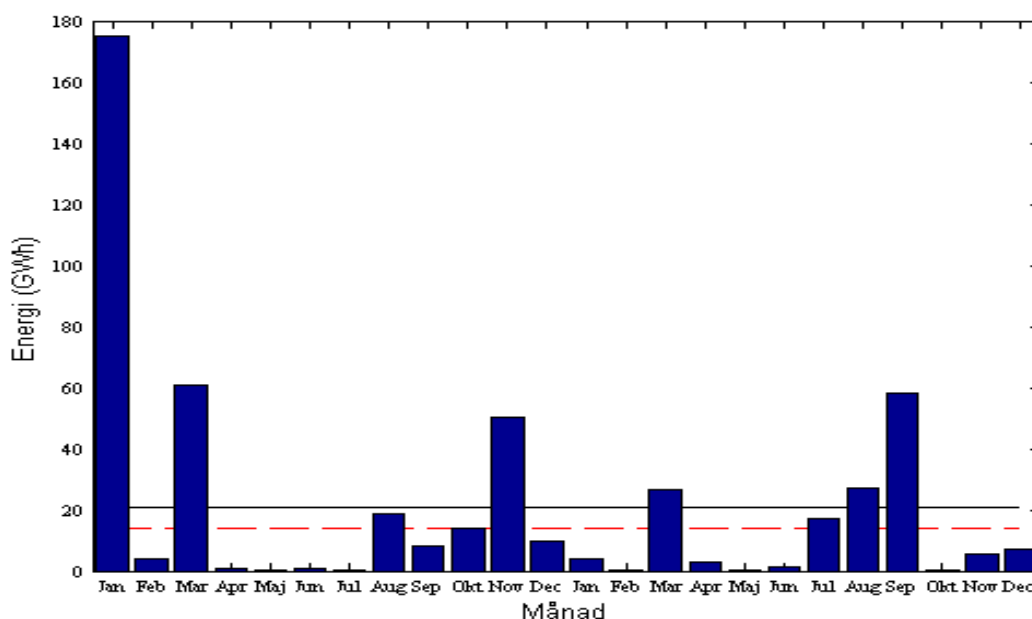
8.1 Sett ur ett företagsperspektiv

En intressant parameter i detta sammanhang är icke levererad energi (ILE). I denna rapport har ILE beräknats enligt följande uttryck;

$$\text{ILE} = \text{Den bortkopplade effekten} * \text{Medelavbrottstiden för berörda kunder (CAIDI)*}$$

* CAIDI = Medelavbrottstid för "berörda kunder" i aktuellt nät och tidsperiod.

Detta är även hur Nordel [34] uppger att ILE beräknas i Sverige. Värt att notera är spiken i januari 2002, se figur 8.1. Detta berodde bland annat på avbrott i fördelningsstationerna S, Ä, F och T. Genomslaget blir påfallande när avbrottet är i toppen av distributionsnätet, vilket även indikerar betydelsen av ett väl underhållet system på fördelningsstationsnivå. Stapeldiagrammet visar det totala ILE per månad under den betraktade tidsperioden



Figur 8.1 Blå staplar indikerar beräknad ILE för Malmös distributionsnät under perioden 2002 och 2003. Svart horisontal heldragen linje är beräknad medel av ILE och streckad röd linje markerar medel av ILE när januari 2002 är exkluderad.

8.2 Sett ur ett samhällsperspektiv

Individer påverkas olika när det blir ett elavbrott och är mer eller mindre känsliga. Beroende på när det inträffar, hur länge det varar och var de befinner sig just då, så drabbas de mer eller mindre hårt. Vid somliga tidpunkter kan det ge allvarliga konsekvenser ofta med ekonomiska förluster som följd.

Än värre är det då om det blir person- eller miljöskador som följd av ett elavbrott, vilket ofta leder till bad-will för det drabbade företaget. Det finns t.ex. i viss kemiskindustri risk för utsläpp och explosioner om ett avbrott sker vid en viss kritisk tidpunkt i tillverkningsprocessen.

Avbrotten delas in i två kategorier, långa och korta avbrott. De långa kan vara alltifrån mer än tre minuter och uppåt emedan de korta kan vara delar av en sekund (dippar) men inte längre än tre minuter.

Korta avbrott och dippar i elnätet inträffar oftast på grund av kortslutningsfel, omkopplingar i nätet och olika väderpåverkningar (främst åska). En stor del av industrins dippar beror oftast på interna störningar t.ex. start av stora motorer och omkoppling av transformatorer. Kortare avbrott kan bero på lösta säkringar till följd av överbelastning. De längre avbrotten i industrins interna anläggningar beror till stor del på avgrävda kablar inom det egna området [35].

Privatpersoner är i dagsläget ganska okänsliga för kortare avbrott och dippar. Eventuellt kan det leda till att man får starta om datorn, att kakan inte blir tillräckligt gräddad o.s.v. Det finns dock en stor risk för att även de privata hushållen kan bli mer känsliga ju mer teknisk utrustning som byggs in i hemmet. Detta skulle kunna vara viss medicinsk behandling som kan ske i hemmiljön. Man kan t.ex. behandla njurpatienter med dialys i hemmet. Med sådan utrustning är det naturligtvis viktigt att försäkra sig om att man har en väldigt säker elleverans. Andra korta avbrott som kan påverka gemene man är t.ex. att hissar stannar, porttelefoner och elektroniska lås blir omöjliga att använda.

I en ganska nyligen gjord studie [36] är hushållens vilja att betala (WTP-Willingness to pay) för att slippa ett avbrott undersökt, tabell 8.1. Nästan inga (10%) av hushållen är intresserade av att betala för avbrott som varar mindre än en timme. Studien visar också att det beror mycket på när avbrottet inträffar, på dagen eller kvällen. Det finns även skillnader vad det gäller årstider samt om avbrotten är planerade eller inte. Människor på landsbygden är i regel mindre känsliga, även kvinnor tenderar till att vara mindre känsliga än män.

Tabell 8.1. Hushållens vilja att betala (WTP-Willingness to pay) för att slippa ett avbrott.

	Planerade	Oplanerade
Antal timmar	SEK/avbrott	SEK/avbrott
1	6,30	9,39
4	28,46	37,32
8	84,42	108,09
24	189,25	223,01
2-6	--	68,80

(Källa: Department of Economics Gothenburg University [36])

Företag, myndigheter och organisationer är mer eller mindre känsliga för korta avbrott och dippar. Kontorsverksamhet är oftast väldigt okänslig då det för det mesta handlar om ganska små mängder förlorad data. Interna UPS system (Uninterruptible Power Supply) brukar skydda servrar och andra kritiska delar i datanätverken men inte användarterminaler.

De som berörs mest och där kostnaderna är störst, är företag inom tillverkningssektorn. Här skiljer det sig också väldigt emellan de olika branscherna. Det tar några timmar för att återstarta ett modernt sågverk där underspänningsskydden löst, detta förutsatt att styrsystemen stänger ned de olika delarna i processen under systematiserade former. Dock blir konsekvenserna större för plastindustrin där ett sekund långt avbrott kan leda till en veckas rengöring av processutrustning. Läkemedelsindustrin kan i vissa delar av produktionen bli tvungna att sanera lokalerna till följd av korta avbrott. Denna sanering kan ta flera dagar att utföra.

Den ökade användningen av datorer och styrsystem i tillverkningsprocesserna är naturligtvis en kritisk punkt. Dessa är emellertid nästan alltid skyddade med UPS:er, vilka är avsedda för att klara kortare avbrott samt att stänga ned processen på ett säkert sätt. De flesta energikrävande industrier har inte reservkapacitet för att klara av alla motordrifter. Därför inriktar de sig på att klara av de mest kritiska delarna, vilket egentligen är att skydda sig ifrån personskador, miljöpåverkan och stora skador på tillverkningsutrustning.

Förebyggande åtgärder i elnätet för att minska avbrott är att lägga ned redundanta kablar till de kunder som är känsliga för korta avbrott. Det är dock inte säkert att detta avhjälper felen som uppkommer i samband med dippar. Det finns exempel på industrier som i den mån det går försöker stanna produktionen då det föreligger stor risk för åska. Kostnaderna för industrin i samband med korta avbrott och dippar är väldigt varierande och skiljer sig mycket även inom samma bransch. Som exempel kan nämnas läkemedelsindustrin där ett avbrott som sker vid en viss fas i tillverkningen, kan göra att hela batchen blir förstörd detta till ett marknadsvärde så högt som 100 Mkr. Någon samlad information som på ett någorlunda korrekt sätt beskriver kostnader orsakade av korta avbrott är svår att få fram. Mycket beroende på att de flesta företagen inte mäter korta avbrott och ofta inte är medvetna om orsaken till de fel som uppstår i sin utrustning till följd av detta. [35]

Kostnader för planerade och oplanerade avbrott

Energimyndigheten har gjort ett försök att kartlägga kostnader för olika typer av avbrott och för olika typer av konsumenter. Nedan följer två av dessa tabeller, tabell 8.2 och 8.3. Det sägs dock i rapporten[37] att resultaten ska granskas med kritiska ögon ty kostnaderna skiljer sig väsentligt från individ till individ.

Tabell 8.2. Kostnader för avbrott per kundkategori år 2003 (omräknat från 1993).

Kundkategori	Planerade	Oplanerade
	SEK/kWh	SEK/kWh
Hushåll	2	4
Jordbruk	14	35
Handel & tjänster	124	169
Mindre industri	34	60
Större industri	18	32

(Källa: Svensk energi [37])

Tabell 8.3. Kostnader för avbrott per distributionstyp år 2003 (omräknat från 1993).

Distributionstyp	Planerade	Oplanerade
	SEK/kWh	SEK/kWh
Tätort	75	105
Landsbygd	49	70
Blandad	57	81
Hela landet	35	51

(Källa: Elavbrottskostnader 2003, Svensk energi)

8.3 Återställningstiden vid avbrott i Malmönätet

Fas 4 Återuppbyggande

Vad det beträffar åtgärdstiden bygger beräkningarna på tider tills det att sista kunden är återinkopplad efter ett uppkommet fel. I detta sammanhang betraktas avbrott från fördelningsstationer fram till kundanläggningar.

Tabell 8.4. Data över driftstörningar under åren 2002 och 2003.

	Antal driftstörningar	Genomsnittlig återställningstid (minuter)	Median återställningstid (minuter)
Mänskliga faktorer	9	103	63
Materialfel	65	132	60
Avgrävning av kabel	61	174	150
Överbelastning	235	115	90
Okänt	149	230	90
Övrigt	36	138	120

Det som kan avläsas i tabell 8.4, är att överbelastning är den klart dominerande orsaken till driftstörningar. Detta berör dock oftast endast en eller ett fåtal kunder. Efter samtal med personal som har erfarenhet av nätet kan en förklaring till detta vara att kablarna börjar bli utmattade och försvagade på grund av ålder. Resultatet är lite överraskande med tanke på att den allmänna uppfattningen är att avgrävning är det största orsaken till driftavbrott.

Eftersom statistiken baseras på 2002 och 2003 kan resultatet vara missvisande i nuvarande situation. Detta med tanke på Citytunneln och andra större projekt som pågår i Malmö med omnejd. Däremot sker reparationen av avgrävda kablar relativt snabbt, av den enkla anledning att felet är uppenbart och redan exponerat för elmontörer.

Värt att notera är att fel beroende på väder har konstaterats som orsak vid sju tillfällen med en sammanlagd avbrottstid på 14h 40min. Detta innebär en genomsnittlig återställningstid på ca två timmar för avbrott på grund av väder under de berörda åren.

9 Slutsatser

Vid analysen av sårbarheten på Malmös distributionsnät använde vi oss av ett topologiskt angreppssätt. Det är vår klara övertygelse att detta är möjligt även om vi inte tagit hänsyn till elektriska enheter. Våra resultat när vi tittar på systemet ur makronivå visar att Malmös elnät är ett robust system när vi har betraktat parametrar såsom klustringskoefficient C och kortaste vägen l . Vårt påstående har även bekräftats av ansvariga på E.ON Elnät Sverige som anser Malmös elnät som ett av de säkrare näten i deras ägo med stor redundans. Vad som har visat sig betydligt mer intressant är när vi gått ner på mikronivå och tittat på individuella stationer. Tillsammans med den av Carl Bro gjorda riskanalys och vår topologiska studie kan man se vilken status en specifik fördelningsstation har samt vilken effekt den har på det övriga systemet vid utslagning. Detta bör ge klara indikationer på hur man bör planlägga sin reinvestering vad det beträffar Malmönätet. Vi ser inga som helst hinder att detta tillvägagångssätt inte skulle kunna appliceras på de övriga näten inom koncernen.

En förutsättning är enligt oss dock att en inventering av stationernas status, likt den gjord i riskanalysen. Detta om man är intresserad av att gå ner på mikronivå. Ligger fokus endast på nätverkets uppbyggnad, går det att få en klar bild på sårbarheten endast genom att göra en topologisk studie.

Malmös distributionsnät har tydligt ett antal stationer av stor betydelse för hela nätets funktionalitet. Följaktligen kan det konstateras att en bättre utformning av ett nätverket borde kunna uppnås då antalet noder ökas och/eller att gradstorleken fördelas jämnt över alla noderna. Samtidigt bör man undvika ett fåtal större kärnnoder. Ett av alternativen till att omfördela nodernas gradstorlek kan t.ex. vara möjlighet till ödrift, med matningsmöjligheter från lokala generatoranläggningar.

För att göra ett nätverk mindre sårbart bör alla stationer få möjlighet till alternativ matning från flera olika fördelningsstationer. Således räcker det inte med att lägga redundanta kablar från en och samma station. För att göra detta kan man inte enbart titta på värden såsom grad, klustringskoefficient och intermeditet. Istället krävs att man gör en enskild bedömning på var nod med hjälp av dessa värden, men med beaktande av nodens topologiska position i nätet. Gör man detta på ett systematiskt sätt redan när man projekterar ny- och ombyggnationer av nätet, har man gjort stora ekonomiska vinster.

Att där finns klara ekonomiska incitament att uppgradera och förbättra de mest sårbara stationerna anser vi visats med en tydlighet när vi i kapitel 8 diskuterade Icke Levererad Energi. Problem med en eller flera fördelningsstationer innebär förlorade inkomster till elproducenten samtidigt som större avbrott ofta innebär bad-will för varumärket.

E.ON Elnät Sverige har enligt oss en väl utpräglad säkerhetskultur, detta kan man bland annat konstatera genom deras stora intresse av denna rapport. Där man redan i ett tidigt stadium uppmuntrade att betrakta nätet ur ett perspektiv som inte tidigare gjorts för att se nätet med nya ögon. Vi har även tittat på deras handlingsplan och samtalat med personal för att försöka bilda oss egen uppfattning vad det beträffar företagets säkerhetskultur. Vår slutsats att de är väl förberedda att hantera oönskade händelser.

Vårt intryck av den topologiska analysen är att det skulle kunna vara ett ypperligt verktyg vid ombyggnad och nydesign av nätverk såsom elkraftnätet. Därigenom skulle man enligt oss kunna uppnå ett robust nätverk med få eller inga större knutpunkter, som om de slås ut ofta ger upphov till utslagning av en stor del av hela nätverket. Topologiska studier ger möjlighet att analysera stora som små elnät oberoende av elektriska storheter och stabilitet.

Vid behandling av elnätet ur ett makroperspektiv, gjordes en jämförelse med tidigare studier av kraftnät vad det beträffar klustringskoefficient C och kortaste vägen l . Resultatet var enligt oss aningen förvånande. Malmös stadsnät hade nämligen samma värde på C som västra USA:s kraftnät. Vår tolkning av detta blev att det kan ha funnits en större baktanke vid uppbyggnaden av västra USA:s stamnätsstationer. Dessutom konstaterades att en anledning till detta kan vara att Malmös elnät tillgodoser och följer Malmö stads ständigt dynamiska utveckling. Ett stamnät bygger man istället gentemot en mer statisk realitet d.v.s. städerna har sin bestämda geografiska position

Litteraturstudier har visat att hushållen inte är speciellt känsliga för korta avbrott (<3min) men vid avbrott som sträcker sig över några timmar börjar även hushållen känna av effekten. I industrin och processindustrin i synnerhet är effekten tydligt kännbar redan vid korta avbrott.

Litteraturförteckning

- [1] Boisvert, P. & Moore, R. (2004). The Canadian Centre for Management Development (CCMD), *Crisis and emergency management: A Guide for Managers of the Public Service of Canada*.
www.myschool.gc.ca/Research/publications/pdfs/crisis_e.pdf
(September 2005)
- [2] Akselsson, R. (2004). *Människa, Teknik, Organisation och Riskhantering*, Institutionen för Designvetenskaper, LTH, Lund, Sverige.
- [3] Abrahamsson, M. & Magnusson, S.E. (2004). *Risk- och sårbarhetsanalyser*. Krisberedskapsmyndigheten
- [4] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/2003:778 (September 2005).
- [5] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/2002:833 (September 2005).
- [6] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/2002:472 (September 2005).
- [7] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/2003:789 (September 2005).
- [8] Svenska Kraftnät (1998). *Affärsverket svenska kraftnäts författningssamling*
www.svk.se/upload/3432/svkfs981.pdf (September 2005).
- [9] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/1996:633 (September 2005).
- [10] Lagen.nu, Sverige. lagen.nu/1997:857 (September 2005).
- [11] Wikipedia, the free encyclopedia.
en.wikipedia.org/wiki/Small_World_Phenomenon (September 2005).
- [12] Watts, D.J & Strogatz, S.H. (1998). *Nature* (London) **393**, 440.
Cornell University, Theoretical and Applied Mechanics.
tam.cornell.edu/SS_nature_smallworld.pdf (September 2005).
- [13] Newman, M. E. J. *The structure of scientific collaboration networks*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **98**, 404-409 (2001). Santa Fe Institute
aps.arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0007/0007214.pdf (September 2005).
- [14] Peerenboom, J. *Infrastructure Interdependencies: Overview of Concepts and Terminology*. Pacific NorthWest Economic Region.
www.pnwer.org/pris/peerenboom_pdf.pdf (September 2005).

- [15] Holmgren, Å. (2004). *Vulnerability Analysis of Electric Power Delivery Networks*. KTH Land and Water Resources Engineering. Licentiate Thesis, Stockholm, Sverige, 2004.
- [16] Albert, R., Albert, I. & Nakarado, G.L. (2004). *Structural vulnerability of the North American power grid*. arXiv.org e-Print archive, arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0401/0401084.pdf (September 2005).
- [17] Böiers, L.-C. (2003). *Diskret matematik*. Studentlitteratur, Lund, Sverige.
- [18] Albert, R. & Barabási, A.-L. (2002). *Statistical mechanics of complex networks*. Physica A **311**,590-614. Department of Physics, University of Notre Dame, Indiana, USA. www.nd.edu/~networks/publications.htm (September 2005).
- [19] Newman, M.E.J. (2003). *The Structure and Function of Complex Network*. SIAM REVIEW Society for Industrial and Applied Mathematics Vol. 45, No. 2,pp . 167–256. Santa Fe Institute, USA. www.santafe.edu/~mark/pubs.html (September 2005).
- [20] Holmgren, Å.(2004). *Vulnerability Analysis of Electric Power Delivery Networks. Del 3, Graph Modeling and Vulnerability Analysis of Electric Power Grids. Sid.3* KTH Land and Water Resources Engineering. Licentiate Thesis, Stockholm, Sverige, 2004.
- [21] Homle, P.(2004). *Form and function of complex networks*. Department of physics, Umeå University, Sweden. www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn=nbn_se_umu_diva-222-1_fulltext.pdf (Oktober 2005)
- [22] Brandes, U. (2001). *A faster Algorithm for Betweenness Centrality*. Department of Computer & Information Science, University of Konstanz, Germany. <http://www.inf.uni-konstanz.de/algo/publications/b-fabc-01.pdf> (November 2005)
- [23] Statens Energimyndighet. www.stem.se (September 2005).
- [24] Sveriges Riksdag. rixlex.riksdagen.se (September 2005).
- [25] Elsäkerhetsverket. www.elsakerhetsverket.se (September 2005).
- [26] Elsäkerhetsverket. www.elsakerhetsverket.se/download/18.186167d100d176b191800086/Verksamhetsplan+2005.pdf (September 2005).
- [27] Svenska Kraftnät. www.svk.se/ (September 2005).
- [28] VindForsk, Vindbladet Nr 61, juni-juli 2005. www.vindenergi.org (September 2005).

- [29] Svenska Kraftnät. *Elavbrottet 23 september 2003- händelser och åtgärder*. www.svk.se/upload/3592/Rapport_avbrott_20030923_for_webb.pdf (September 2005).
- [30] NetDraw. <http://www.analytictech.com/downloadnd.htm> (November 2005)
- [31] Holmgren, Å.(2004). *Graph Modeling and Vulnerability Analysis of Electric Power Grids., kap3.1, p.6*. KTH Land and Water Resources Engineering. Licentiate Thesis, Stockholm, Sverige, 2004.
- [32] Watts, D .J. & Strogatz, S. H. (1998). *Collective dynamics of 'small-world' networks*. Department of Theoretical and Applied Mechanics, Kimball Hall, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA. Nature, 393.pp.440-442. http://nicomedia.math.upatras.gr/courses/mnets/mat/Watts&Strogatz_collective_dynamics.pdf (November 2005)
- [33] Eriksson, L. (2005). *Karlskrona säkrar sin el med prioritering*. Ny Teknik, sid. 4, 7 Sept. 2005.
- [34] Nordel. <http://www.nordel.org/Content/Default.asp?PageID=159> (November 2005)
- [35] Johnson, T. m.fl. (2003). *Elkundens störningskostnader*, Elforsk rapport 04:42 http://www.elforsk.se/publish/show_report.phtml?id=609# (November 2005)
- [36] Carlsson, P. och Martinsson, F. (2004). *Willingnes to Pay among Swedish Households to Avoid Power Outages*, Department of Economics, Gothenburg University. <http://swopec.hhs.se/gunwpe/abs/gunwpe0154.htm> (November 2005)
- [37] Tapper, M. m.fl. (2003), *Elavbrottskostnader 2003*, Svensk Energi

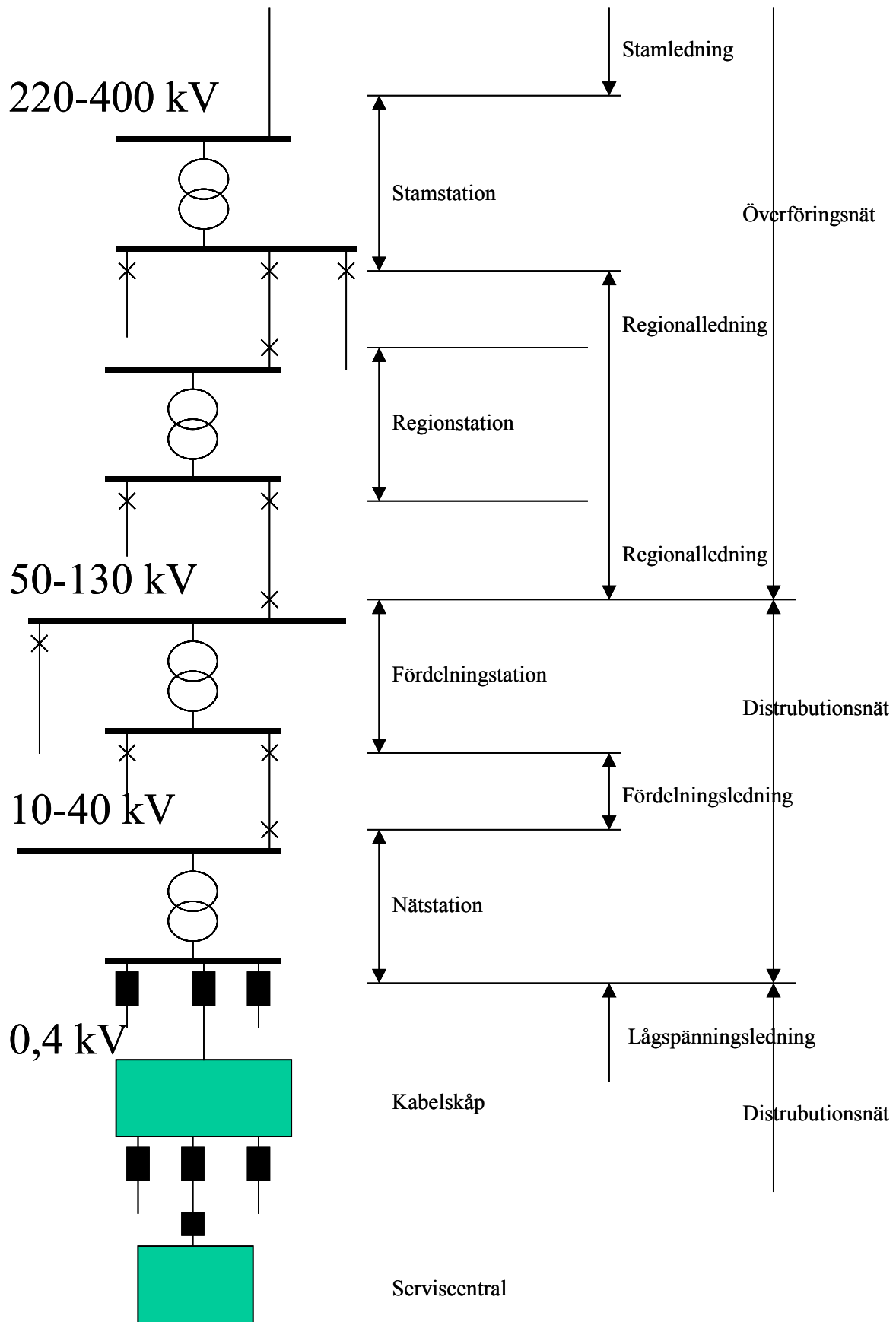
Bilagor

Bilaga 1 ger en schematisk bild av hur det svenska kraftnätet i regel är uppbyggt.

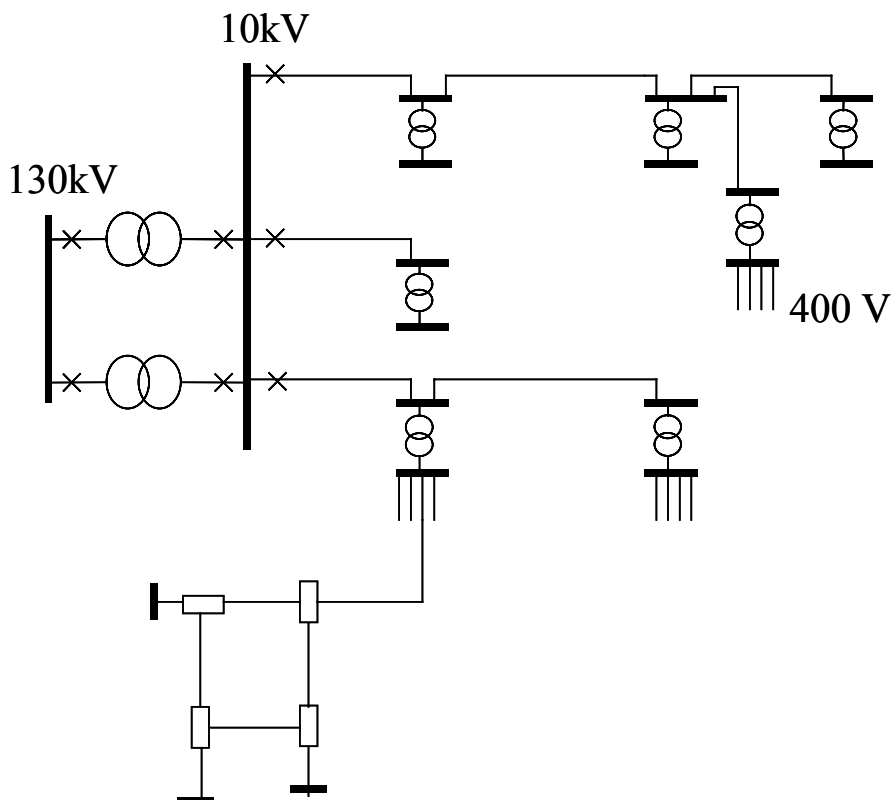
Bilaga 2 beskriver olika alternativ till kopplingar för slingmatning och för maskning av både 10kV nätet och 0,4kV nätet

Bilaga 3, stapeldiagram med konsekvenser som vi har ansett vara av relevant betydelse under sårbarhetsanalysen.

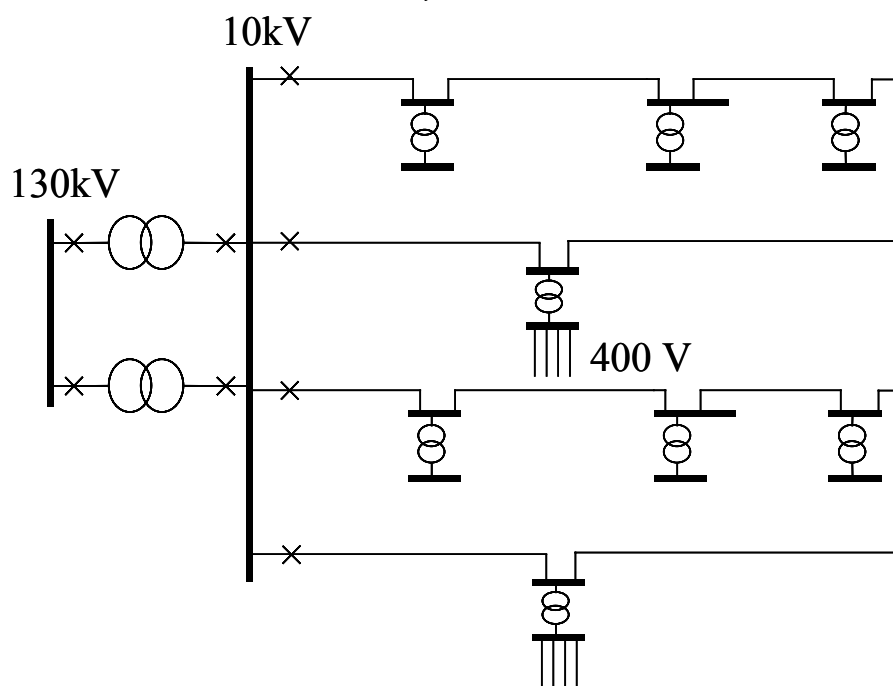
Bilaga 4 innehåller simuleringsresultat, rådata och graderingar. Dessa data är underlagen som använts vid den topologiska analysen av nätet.



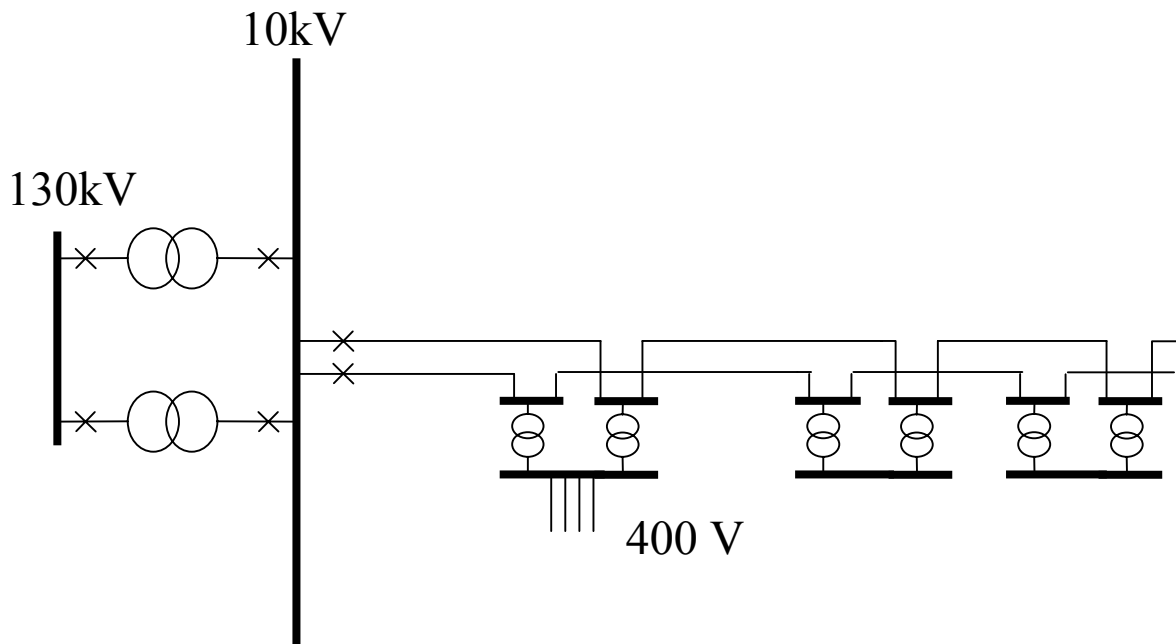
Radialnät 10 kV
Radiellt 0,4 kV nät



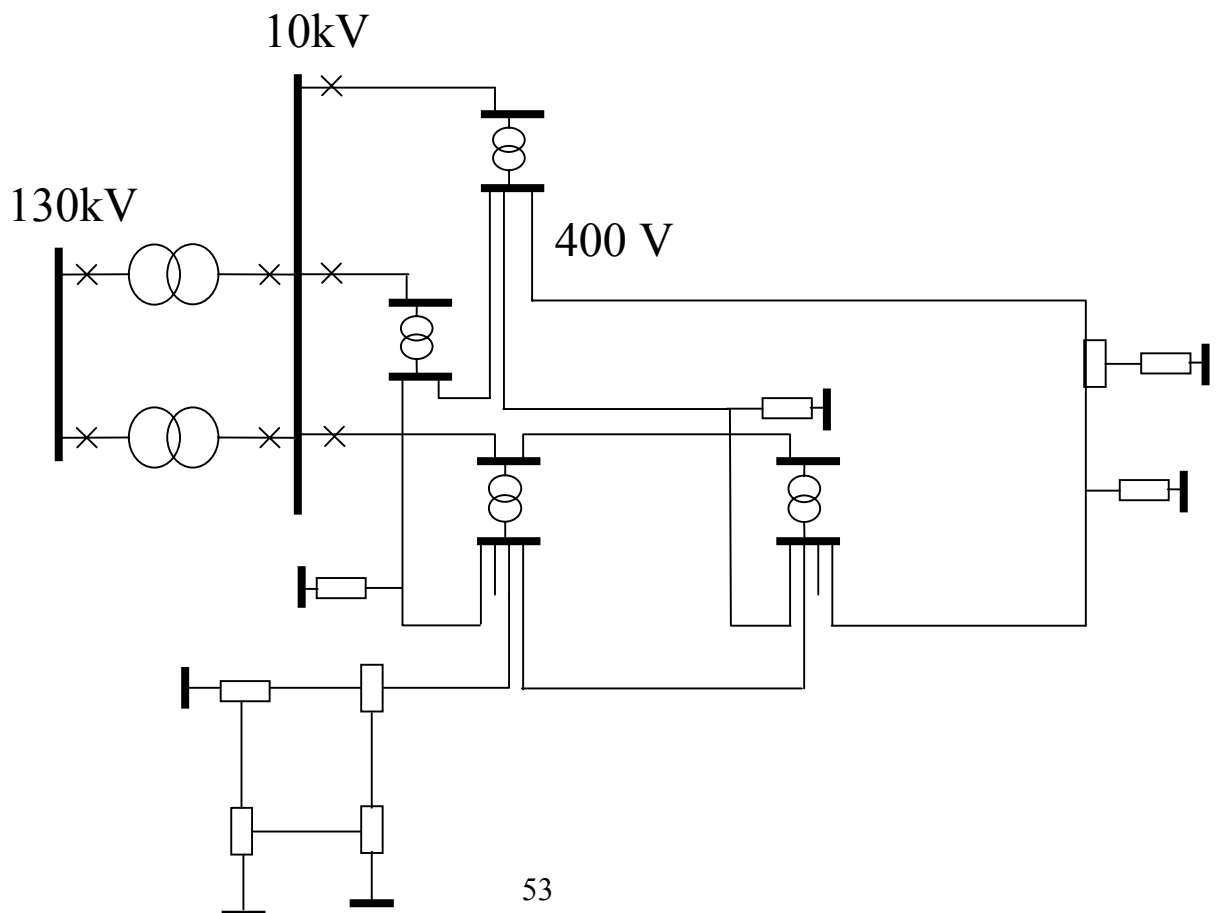
Slingnät 10 kV
Radiellt 0,4 kV nät

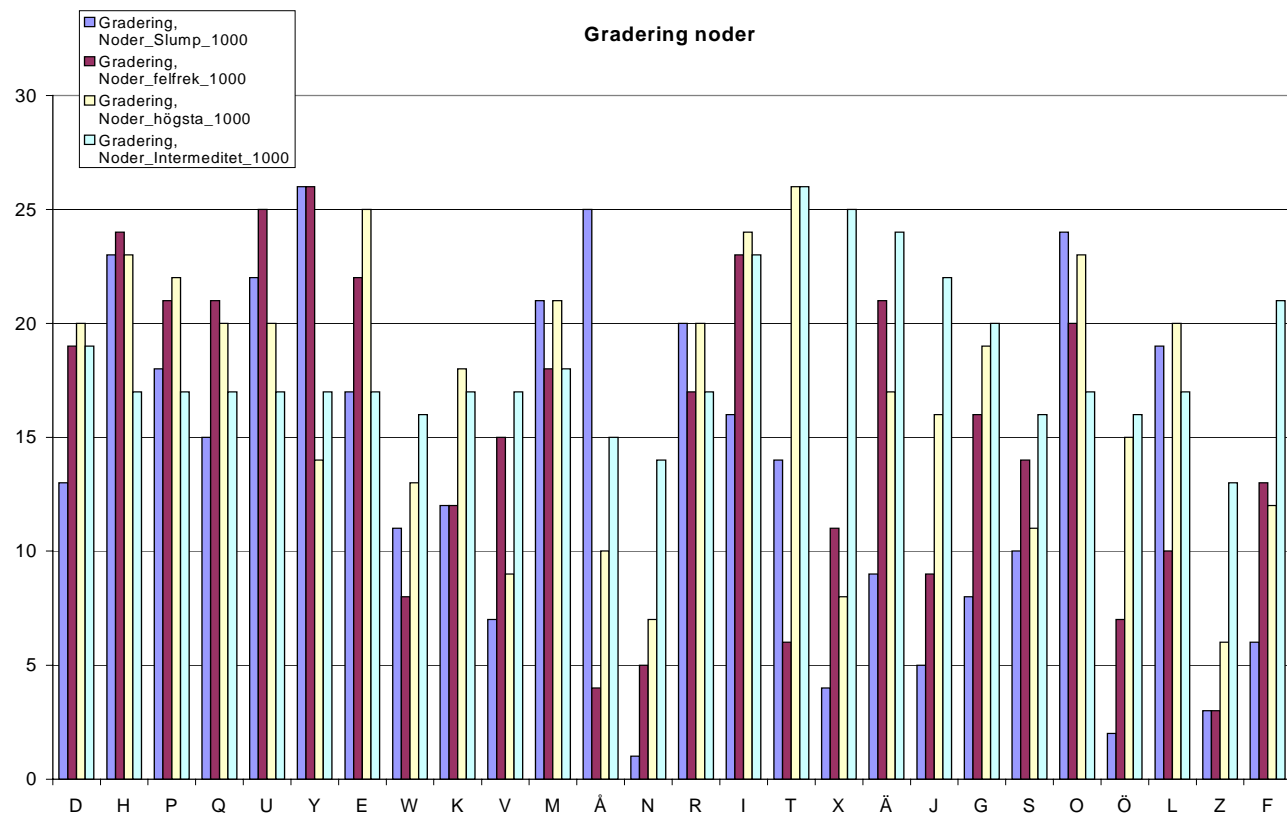


Dubbelkabelnät 10 kV
Radiellt 0,4 kV nät

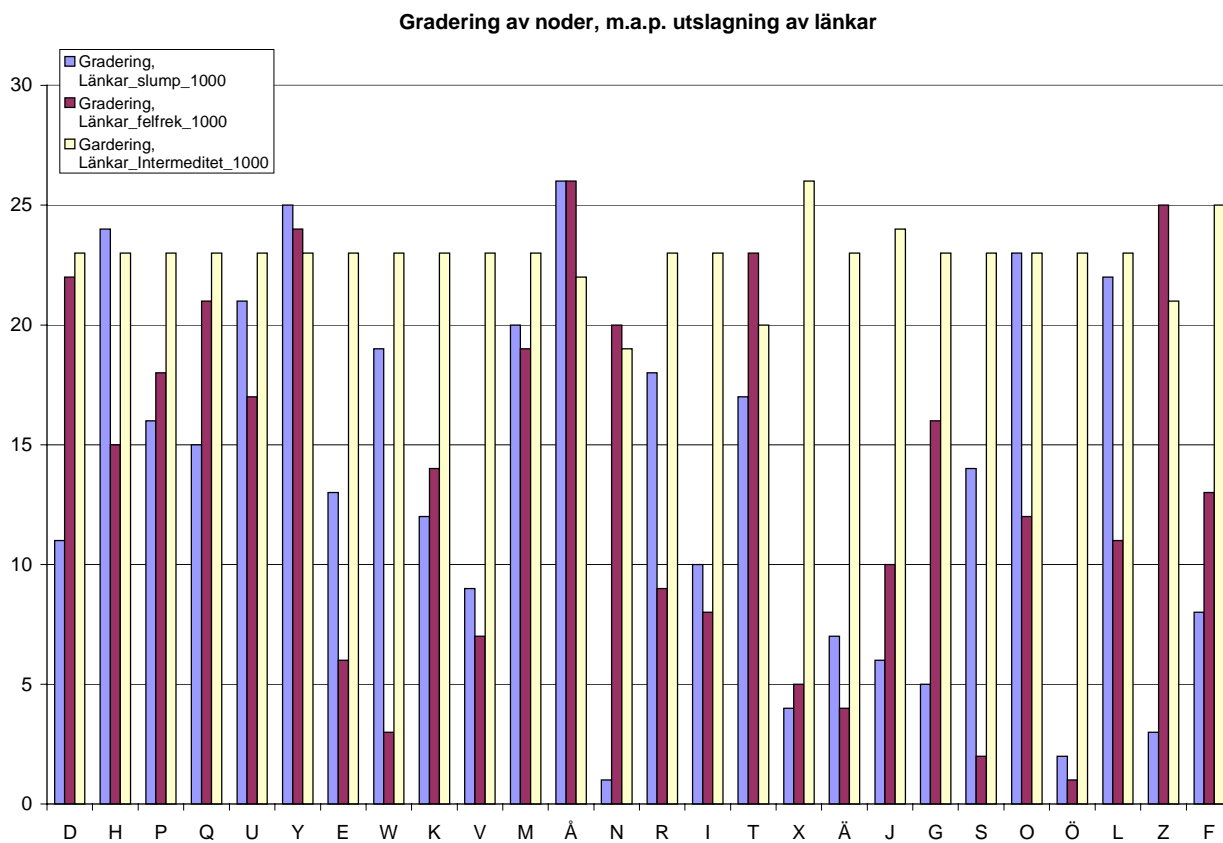


Masknät
Radiellt 10 kV nät
Maskat 0,4 kV nät



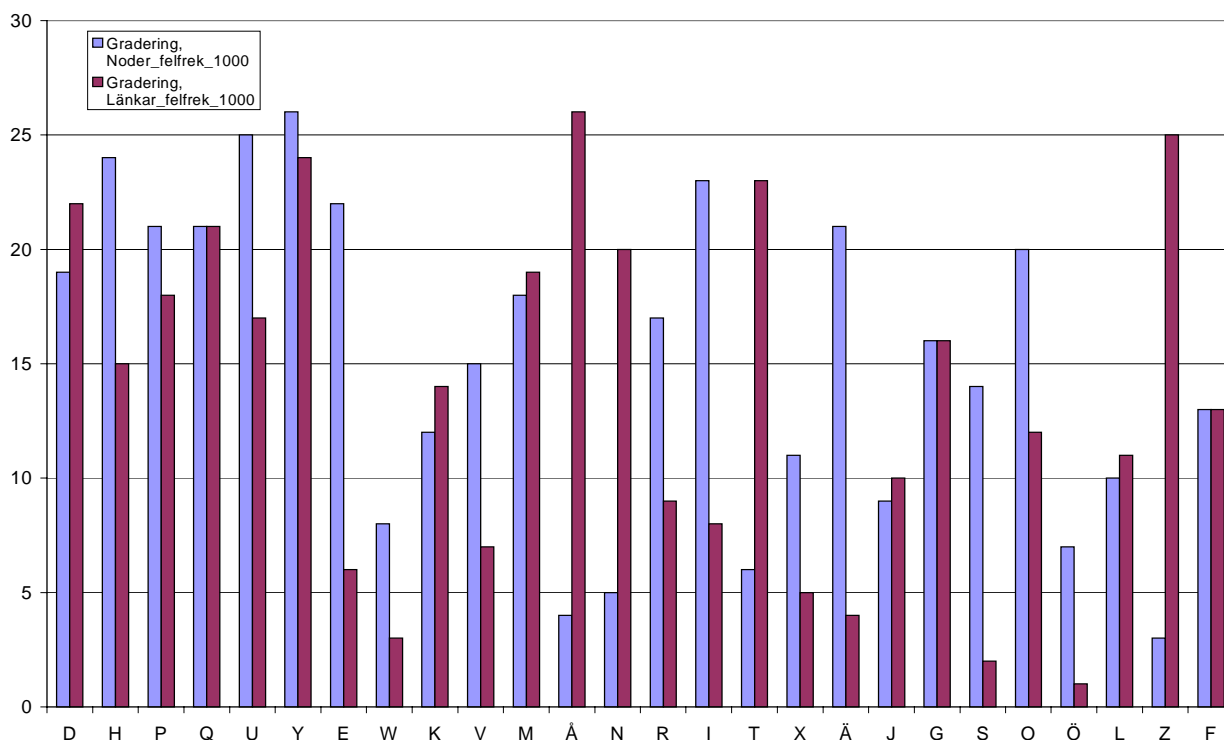


Gradering av stationer med avseende på utslagning av noder med olika attackstrategier.

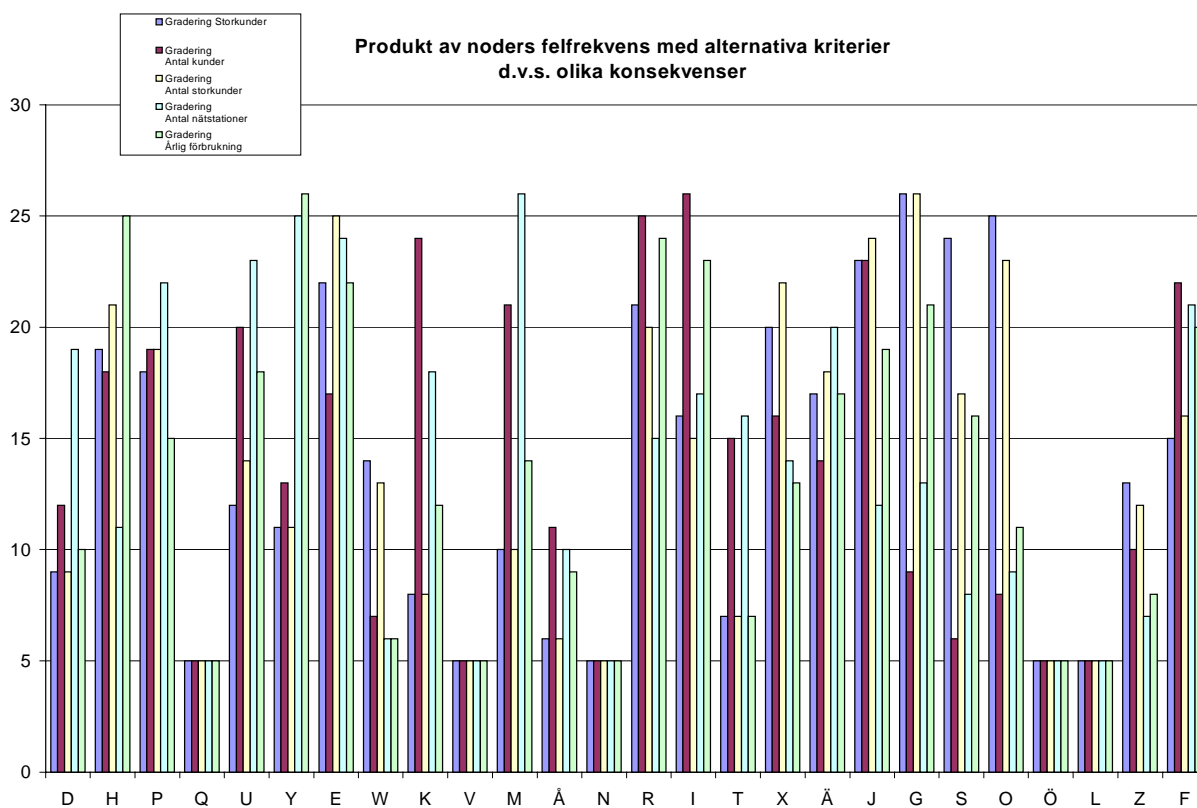


Gradering av stationer med avseende på utslagning av länkar med olika attackstrategier.

Gradering Noder, utslagning av noder och länkar m.a.p. felfrekvens

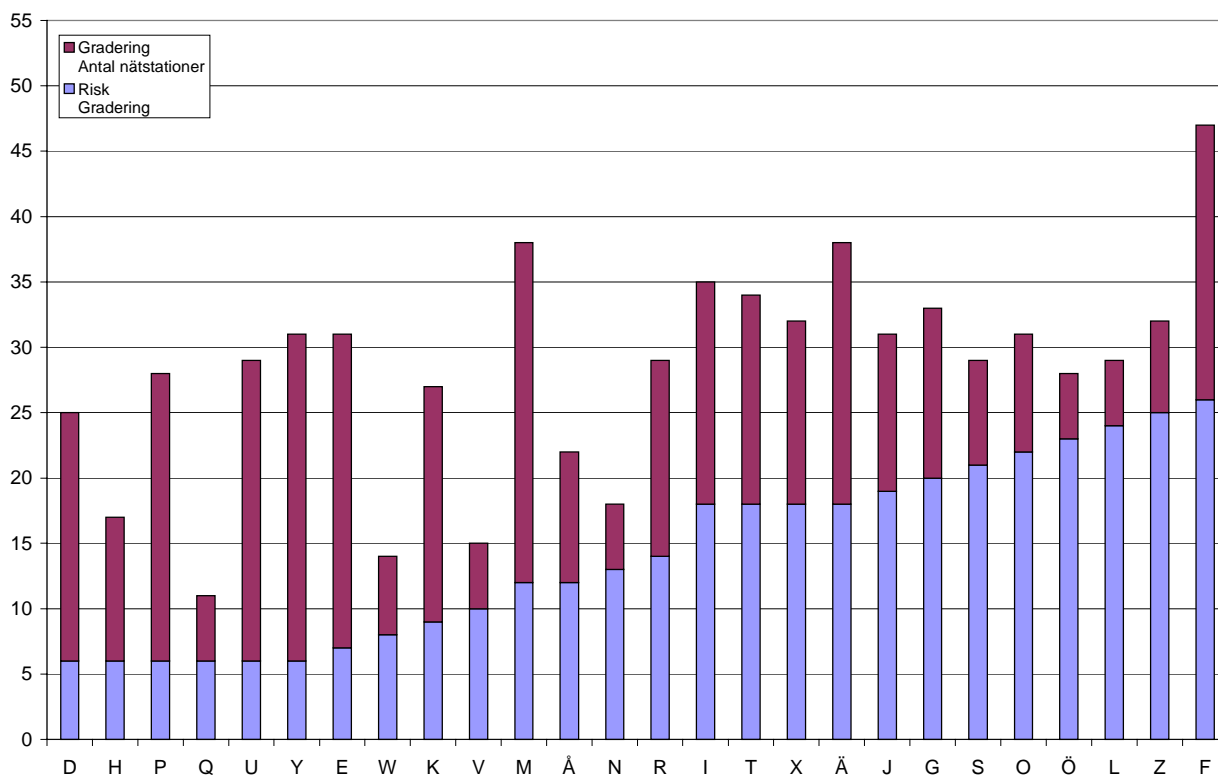


Jämförelse av stationers gradering, slumpmässig utslagning med avseende på fel/haverifrekvens av noder och länkar.



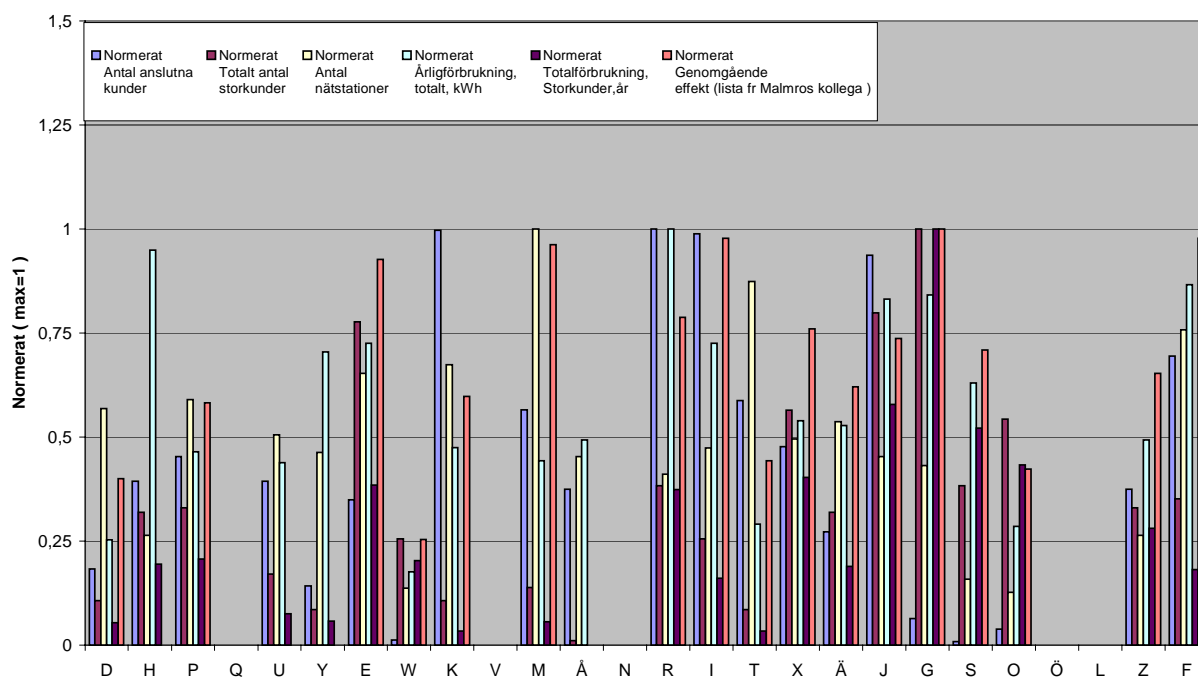
Stationers gradering efter slumpmässig utslagning av noder med avseende på fel/haverifrekvens. Simulerings resultaten är normerade därefter multiplicerade med olika konsekvenser och slutligen graderade för att kunna jämföras med varandra.

Risk+Produkten av noders utslagning och totalt antal anslutna nätstationer



Stationers gradering efter slumpmässig utslagning av noder med avseende på fel/haverifrekvens. Simulerings resultaten är normerade därefter multiplicerade med antalet nätstationer och slutligen graderade för att kunna jämföras med den adderade risken.

Jämförelse av kriterier



Stationers olika jämförelsekriterier (konsekvenser), här normerade för att kunna jämföras.

Bilaga 4

		Stationsdata							
Noder		Normerat		Normerat		Normerat		Normerat	
		Antal anslutna kunder	Antal anslutna kunder	Totalt antal storkunder	Totalt antal storkunder	Antal nätstationer	Antal nätstationer	Antal kabelskåp	Antal kabelskåp
D		3330	0,182736103	10	0,10638298	54	0,5684211	388	0,5091864
H		7176	0,39378807	30	0,31914894	25	0,2631579	74	0,0971129
P		8258	0,453163584	31	0,32978723	56	0,5894737	577,00	0,76
Q		0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
U		7175	0,393733194	16	0,17021277	48	0,5052632	169,00	0,22
Y		2595	0,142402458	8	0,08510638	44	0,4631579	346,00	0,45
E		6360	0,349009493	73	0,77659574	62	0,6526316	147	0,1929134
W		215	0,011798277	24	0,25531915	13	0,1368421	28,00	0,04
K		18161	0,996597706	10	0,10638298	64	0,6736842	493,00	0,65
V		0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
M		10303	0,565384404	13	0,13829787	95	1	497,00	0,65
Å		6819	0,374197443	1	0,0106383	43	0,4526316	426,00	0,56
N		0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
R		18223	1	36	0,38297872	39	0,4105263	262,00	0,34
I		18008	0,988201723	24	0,25531915	45	0,4736842	262,00	0,34
T		10704	0,587389563	8	0,08510638	83	0,8736842	762,00	1,00
X		8682	0,476430884	53	0,56382979	47	0,4947368	351,00	0,46
Ä		4953	0,271799374	30	0,31914894	51	0,5368421	332,00	0,44
J		17066	0,936508808	75	0,79787234	43	0,4526316	364,00	0,48
G		1165	0,063930198	94	1	41	0,4315789	190	0,2493438
S		155	0,008505735	36	0,38297872	15	0,1578947	21,00	0,03
O		701	0,03846787	51	0,54255319	12	0,1263158	33,00	0,04
Ö		0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
L		0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Z		6819	0,374197443	31	0,32978723	25	0,2631579	166,00	0,22
F		12654	0,69439719	33	0,35106383	72	0,7578947	421	0,5524934

		Förbrukning							
Noder	Årligförbrukning, totalt, kWh	Normerat	Årligförbrukning, storförbrukande LV-kunder, kWh	Årligförbrukning, storförbrukande HV-kunder, kWh	Totalförbrukning, Storkunder, år	Normerat	Genomgående effekt	Normerat	
		Årligförbrukning, totalt, kWh	Årligförbrukning, storförbrukande LV-kunder, kWh	Årligförbrukning, storförbrukande HV-kunder, kWh	Totalförbrukning, Storkunder, år	Totalförbrukning, Storkunder, år	Genomgående effekt	Genomgående effekt	
D	62929731,00	0,25	506088	3855000	9928056	0,05	15800	0,40	
H	236465386,00	0,95	526500	29589720	35907720	0,19		0,00	
P	115654341,00	0,46	837864	28061136	38115504	0,21	23000	0,58	
Q	0,00	0,00	0	0	0	0,00		0,00	
U	109144438,00	0,44	455220	8437800	13900440	0,08		0,00	
Y	175423701,00	0,70	320112	6755688	10597032	0,06		0,00	
E	180623806,00	0,73	3653100	27141132	70978332	0,38	36600	0,93	
W	43928183,00	0,18	925668	26301000	37409016	0,20	10000	0,25	
K	118159194,00	0,47	514512	0	6174144	0,03	23600	0,60	
V	0,00	0,00	0	0	0	0,00		0,00	
M	110258325,00	0,44	734508	1440456	10254552	0,06	38000	0,96	
Å	122753292,00	0,49	0	26976	26976	0,00		0,00	
N	0,00	0,00	0	0	0	0,00		0,00	
R	249050110,00	1,00	2322756	41099304	68972376	0,37	31100	0,79	
I	180623806,00	0,73	1065960	16889820	29681340	0,16	38600	0,98	
T	72285115,00	0,29	504792	115608	6173112	0,03	17500	0,44	
X	134290439,00	0,54	2676564	42228492	74347260	0,40	30000	0,76	
Ä	131318561,00	0,53	1218240	20308104	34926984	0,19	24500	0,62	
J	207034359,00	0,83	3367332	66361488	106769472	0,58	29100	0,74	
G	209486166,00	0,84	3938644,44	137427564	184691297	1,00	39500	1,00	
S	156790327,00	0,63	1293408	80739648	96260544	0,52	28000	0,71	
O	71095509,00	0,29	2283228	52541136	79939872	0,43	16700	0,42	
Ö	0,00	0,00	0	0	0	0,00		0,00	
L	0,00	0,00	0	0	0	0,00		0,00	
Z	122753292,00	0,49	1391256	35092932	51788004	0,28	25800	0,65	
F	215729000,00	0,87	1368252	17078100	33497124	0,18	38600	0,98	

Bilaga 4

Noder	Risk		Simuleringar med avseende på noder				
	Risk	Risk Gradering	Noder_Slump_1000	Gradering, Noder_Slump_1000	Noder_felfrek_1000	Gradering, Noder_felfrek_1000	Normering, Noder_felfrek_1000
D	1	6	24,6	13	18,2	19	0,591767101
H	1	6	21,7	23	15,1	24	0,710495887
P	1	6	23,2	18	16,8	21	0,639792943
Q	1	6	23,7	15	16,8	21	0,639070486
U	1	6	22,3	22	14,0	25	0,770382576
Y	1	6	17,6	26	10,8	26	1
E	21	7	23,5	17	16,4	22	0,654739192
W	33	8	25,6	11	25,7	8	0,418983421
K	36	9	25,0	12	22,6	12	0,475459851
V	42	10	28,3	7	21,5	15	0,500325703
M	54	12	22,5	21	18,3	18	0,58646756
Ä	54	12	17,9	25	38,9	4	0,276114421
N	61	13	36,4	1	32,1	5	0,335444223
R	63	14	23,1	20	18,8	17	0,572424807
I	78	18	23,6	16	16,4	23	0,65700611
T	78	18	24,3	14	31,1	6	0,345389137
X	78	18	31,2	4	22,9	11	0,468545409
Ä	78	18	26,9	9	16,8	21	0,638235992
J	80	19	28,7	5	24,6	9	0,43722046
G	108	20	27,4	8	20,6	16	0,522446798
S	109	21	25,8	10	21,7	14	0,49523327
O	110	22	21,5	24	17,1	20	0,627811592
Ö	124	23	33,7	2	29,8	7	0,360669484
L	133	24	23,2	19	24,1	10	0,44651607
Z	182	25	31,6	3	40,9	3	0,263209856
F	204	26	28,3	6	22,4	13	0,480294796

Noder	Simuleringar med avseende på noder			
	Noder_högsta_1000	Gradering, Noder_högsta_1000	Noder_Intermeditet_1000	Gradering, Noder_Intermeditet_1000
D	9,0	20	11,3	19
H	8,5	23	12,0	17
P	8,5	22	12,0	17
Q	9,0	20	12,0	17
U	9,0	20	12,0	17
Y	19,9	14	12,0	17
E	4,5	25	12,0	17
W	21,1	13	13,0	16
K	14,4	18	12,0	17
V	24,7	9	12,0	17
M	8,8	21	11,7	18
Ä	24,5	10	20,0	15
N	26,8	7	31,5	14
R	9,0	20	12,0	17
I	6,5	24	9,7	23
T	1,5	26	1,0	26
X	25,0	8	6,0	25
Ä	14,8	17	8,7	24
J	15,8	16	9,8	22
G	9,2	19	11,0	20
S	23,3	11	13,0	16
O	8,5	23	12,0	17
Ö	16,4	15	13,0	16
L	9,0	20	12,0	17
Z	33,7	6	34,0	13
F	23,0	12	10,0	21

Bilaga 4

Simuleringar med avseende på länkar										
Noder	Gradering, Länkar_slump_1000		Länkar_felfrek_1000		Normering, Länkar_felfrek_1000		Länkar Intermeditet 1000		Gradering, Länkar_Intermeditet_1000	
	D	46,221	11	25,699	22	0,542589206	21,0	23		
H	42,5645	24	37,109	15	0,375757902	21,0	23			
P	44,54866667	16	33,348	18	0,41813602	21,0	23			
Q	45,062	15	28,563	21	0,488184014	21,0	23			
U	43,241	21	34,266	17	0,406933987	21,0	23			
Y	31,03	25	21,302	24	0,654586424	21,0	23			
E	45,52733333	13	39,625	6	0,351899054	21,0	23			
W	44,027	19	44,119	3	0,316054308	21,0	23			
K	46,15625	12	37,142	14	0,375424048	21,0	23			
V	48,64	9	39,512	7	0,352905446	21,0	23			
M	43,7828	20	33,222	19	0,419721871	21,0	23			
Å	30,221	26	13,944	26	1	34,1	22			
N	65,1285	1	30,234	20	0,46120262	61,2	19			
R	44,11266667	18	38,468	9	0,362483103	21,0	23			
I	46,52833333	10	39,171	8	0,355977637	21,0	23			
T	44,2045	17	21,737	23	0,641486866	58,8	20			
X	53,152	4	39,9195	5	0,349302972	14,2	26			
Ä	49,52066667	7	40,206	4	0,346813908	21,0	23			
J	51,82975	6	38,237	10	0,364672961	20,7	24			
G	51,897	5	34,834	16	0,400298559	21,0	23			
S	45,40666667	14	45,618	2	0,305668815	21,0	23			
O	42,78725	23	37,3	12	0,37383378	21,0	23			
Ö	56,9435	2	46,985	1	0,296775567	21,0	23			
L	42,967	22	38	11	0,366947368	21,0	23			
Z	54,81233333	3	17,904	25	0,778820375	52,0	21			
F	49,09866667	8	37,227	13	0,374566847	20,0	25			

Beräkningar på :Normering, Noder_felfrek_1000												
Noder	Produkt: Totalförbrukning, Storkunder,år		Produkt: Antal anslutna kunder		Produkt: Totalt antal storkunder		Gradering Antal storkunder		Produkt: Antal nätstationer		Produkt: Årligförbrukning, Årlig förbrukning	
	D	5875096,922	9	1970,584448	12	5,917671014	9	31,9554235	19	37239745	10	
H	25512287,37	19	5098,518484	18	21,31487661	21	17,7623972	11	168007684	25		
P	24386030,49	18	5283,410127	19	19,83358125	19	35,8284048	22	73994831	15		
Q	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		
U	10708656,78	12	5527,494985	20	12,32612122	14	36,9783637	23	84082973	18		
Y	10597032	11	2595	13	8	11	44	25	175423701	26		
E	46472295,76	22	4164,141262	17	47,79596103	25	40,5938299	24	118261485	22		
W	15673757,49	14	90,08143545	7	10,0556021	13	5,44678447	6	18405180	6		
K	2935557,589	8	8634,826362	24	4,754598514	8	30,4294305	18	56179953	12		
V	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		
M	6013962,087	10	6042,375267	21	7,624078276	10	55,7144182	26	64662931	14		
Å	7448,462613	6	1882,824235	11	0,276114421	6	11,8729201	10	33893954	9		
N	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		
R	39481499,02	21	10431,29726	25	20,60729305	20	22,3245675	15	142562461	24		
I	19500821,73	16	11831,36603	26	15,76814664	15	29,5652749	17	118670944	23		
T	2132125,826	7	3697,045322	15	2,763113095	7	28,6672984	16	24966493	7		
X	34835067,34	20	4067,911241	16	24,83290668	22	22,0216342	14	62921169	13		
Ä	22291658,29	17	3161,18287	14	19,14707977	18	32,5500356	20	83812232	17		
J	46681797,69	23	7461,604375	23	32,79153452	24	18,8004798	12	90519658	19		
G	96491376,91	26	608,6505199	9	49,10999903	26	21,4203187	13	109445377	21		
S	47671424,01	24	76,76115691	6	17,82839773	17	7,42849906	8	77647786	16		
O	50187178,33	25	440,0959262	8	32,01839121	23	7,53373911	9	44634585	11		
Ö	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		
L	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		
Z	13631113,1	13	1794,828011	10	8,159505548	12	6,58024641	7	32309876	8		
F	16088494,35	15	6077,650354	22	15,84972828	16	34,5812253	21	103613516	20		

Bilaga 4

Noder	Nätdata			Utslagning				
	Verklig grad (inkl redundanta Grädlänkar)	Klustrings- koefficient	Intermeditet	Intermeditet från början	1	2	3	4
D	3	0,333333333	3	3	1	1	1	
H	3	0,333333333	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
P	4	0,166666667	1	1	3	3	4	
Q	2	2	1	1	1	1	1	
U	3	0,333333333	1	1	1	1	2	
Y	1	1	0	1	1	1	1	1
E	4	6	0,5	1	1	1	2,5	
W	3	0,333333333	1	1	1	1	1	1
K	3	0,333333333	1	1	3	4,5	1	
V	2	2	0	1	1	5,5	15	
M	3	4	0	1,333333333	1	2,5	2	
Ä	1	1	0	1	1	1	1	1
N	4	7	0	7,333333333				
R	4	0,333333333	1,333333333	1,333333333	1,5	4	3	
I	6	8	0,2	1,833333333	5	3	9	
T	1	2	0	1				
X	3	5	0	6,833333333	10			
Ä	5	6	0,2	5,333333333	8,5	4,5	14	
J	4	0,333333333	4,333333333	4,333333333	6,5	10,5		
G	3	5	0	2,333333333	2	3,5	1	
S	2	3	1	1	1	1	1	1
O	2	3	0	1	1	1	1	1
Ö	4	0,333333333	2,5	2,5	2,5	3	3	3
L	3	0,333333333	2,333333333	2,333333333	2,5	5	2	
Z	2	3	0	2	2	2	2	2
F	3	0,333333333	2	2	2	2	2	2