

Åke Holmgren och Staffan Molin

En analys av fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Försvarsanalys
172 90 Stockholm

FOI-R--1090--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

Underlagsrapport

Åke Holmgren och Staffan Molin

En analys av fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige

FOI och Centrum för säkerhetsforskning (KTH)

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Försvarsanalys 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1090--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 0. Gemensam, forskningsnära verksamhet	
	Månad, år December 2003	Projektnummer E1740
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde	
Författare/redaktör Åke Holmgren (KTH / FOI) Staffan Molin (FOI / KTH)	Projektledare Staffan Molin	
	Godkänd av Jan Foghelin	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Krisberedskapsmyndigheten (KBM)	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig prof. Torbjörn Thedéen (KTH)	
Rapportens titel En analys av fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>I rapporten analyseras fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige. Analyserna är främst inriktade mot att finna vilka som är de vanligaste orsakerna till att störningar uppstår, hur ofta och hur omfattande störningarna är. Vidare undersöks om det går att urskilja någon förändring över tid när det gäller antal störningar, storleken på störningar samt deras orsak. I rapporten beskrivs även datakällornas kvalitet och tillgänglighet.</p> <p>Slutsatsen från undersökningarna av störningsstatistiken från det svenska transmissionsnätet är att åska dominerar som störningsorsak. Vidare är det få störningar som ger upphov till s.k. icke-levererad energi, dvs. konsekvenser för slutförbrukare av elektrisk energi. När det gäller icke-levererad energi i förhållande till uttagen energi är denna mycket liten för det svenska transmissionsnätet, dvs. en god leveranssäkerhet under normala förhållanden. För Fortums distributionsnät i Stockholm är kabelfel den dominerande störningsorsaken.</p> <p>För båda de studerade näten gäller att konsumtionsbortfallens storlek, antalet störningar samt avbrottstidernas längd är av samma storleksordningar under den studerade perioden. Vi visar även att tiderna mellan inträffade störningar är exponentialfördelade. När det gäller analys av större störningar, dvs. störningar med stort lastbortfall och lång avbrottstid, konstaterar vi att deras storlek följer en potenslag.</p>		
Nyckelord Elavbrott, Störningsstatistik, Statistiska analyser, Transmissionsnät, Distributionsnät		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 40 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Defence Analysis SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1090--SE	Report type Base data report
	Programme Areas 0.	
	Month year December 2003	Project no. E1740
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories	
Author/s (editor/s) Åke Holmgren (KTH / FOI) Staffan Molin (FOI / KTH)	Project manager Staffan Molin	
	Approved by Jan Foghelin	
	Sponsoring agency Swedish Emergency Management Agency (SEMA)	
	Scientifically and technically responsible prof. Torbjörn Thedéen (KTH)	
Report title (In translation) A Statistical Analysis of Disturbance Data from Power Transmission and Distribution Grids in Sweden		
Abstract (not more than 200 words) <p>In this report we analyse disturbance data from Swedish electric transmission and distribution grids. Under normal operating conditions lightning strikes are the main cause of disturbances in the Swedish national transmission grid. Further, there are only a few disturbances that lead to unserved energy. Also, the unserved energy in relation to the total amount of transmitted energy is extremely small. In the distribution grid of Stockholm, cable failures are the dominant cause of disturbance. For the studied transmission and distribution grids, unserved energy and the number of disturbances appears to be constant under the studied period. Finally, we demonstrate that the time between disturbances is exponentially distributed, and for the larger disturbances we show that the size follows a power law.</p>		
Keywords Power Outage, Disturbances Data, Statistical Analysis, Power Grids		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 40 p.	
	Price acc. to pricelist	

Sammanfattning

I rapporten analyseras fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige. Statistiken är hämtad från Svenska Kraftnäts transmissionsnät och Fortum Distribution ABs distributionsnät i Stockholm. Analyserna är främst inriktade mot att finna vilka som är de vanligaste orsakerna till att störningar uppstår, hur ofta och hur omfattande störningarna är. Vidare undersöks om det går att urskilja någon förändring över tid när det gäller antal störningar, storleken på störningar samt deras orsak. I rapporten beskrivs även datakällornas kvalitet och tillgänglighet.

Slutsatsen från undersökningar av störningsstatistik från det svenska transmissionsnätet är att åska dominerar som störningsorsak. Vidare är det få störningar som ger upphov till s.k. icke-levererad energi, dvs. konsekvenser för slutförbrukare av elektrisk energi. När det gäller icke-levererad energi i förhållande till uttagen energi är denna mycket liten för det svenska transmissionsnätet, dvs. en god leveranssäkerhet under normala förhållanden. För Fortums distributionsnät i Stockholm är kabelfel den dominerande störningsorsaken.

För båda de studerade näten gäller att konsumtionsbortfallens storlek, antalet störningar samt avbrottstidernas längd är av samma storleksordningar under den studerade perioden. Vi visar även att tiderna mellan inträffade störningar är exponentialfördelade.

När det gäller analys av större störningar dvs. störningar med stort lastbortfall, lång avbrottstid som drabbar ett stort antal abonnenter, bekräftar vi resultat från studier av transmissionsnät i Nordamerika och konstaterar att deras storlek följer en potenslag. Det tillgängliga datamaterialet ger dock inte tillräckligt med information för att göra precisa uttalanden om större störningar.

Förord

Rapporten har finansierats av Krisberedskapsmyndigheten (KBM) och är en del i ett samarbetsprojekt om säkring av viktig infrastruktur som genomförs vid Centrum för säkerhetsforskning (KTH) och FOI Försvarsanalys. I rapporten presenteras de statistiska analyserna. De statistiska fallstudierna som genomförts refereras och diskuteras utförligare i Holmgren och Molin (2003).

Staffan Molin och Åke Holmgren önskar tacka Torbjörn Thedéen (KTH), Stefan Arnborg (SvK), Lars-Göran Mattsson (KTH), Per Näsman (KTH) samt Fredrik Berefelt (FOI) för synpunkter och kommentarer. Thomas Thor (SvK) och Nils Wikström (Fortum) har bistått med driftsstörningsdata och värdefull praktisk hjälp.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Förord	ii
Innehållsförteckning	iii
1. Inledning	1
2. Syfte	2
3. Avgränsningar	2
4. Arbetets genomförande	2
5. Beskrivning av datakällor	3
5.1 Svenska Kraftnäts driftstörningsstatistik	4
5.1.1 Syfte med datainsamlingen	4
5.1.3 SvKs datainsamlingsprocess	5
5.1.4 Klassificeringar och definitioner	6
5.1.5 Felaktigheter i datamaterialet.....	6
5.1.6 Möjligheter till jämförelser över tiden	7
5.2 Fortums driftstörningsstatistik från Stockholm	7
5.2.1 Syfte med datainsamlingen	7
5.2.2 Vilka data samlas in?	7
5.2.3 Fortums datainsamlingsprocess	8
5.2.4 Felaktigheter i datamaterialet.....	8
5.2.5 Möjligheter till jämförelser över tiden	9
6. Resultat från statistiska analyser	10
6.1 Resultat från analyser av Svenska Kraftnäts driftsstörningsstatistik	10
6.1.1 Antal störningar	10
6.1.2 Storlek på störningar	18
6.1.3 Analys av större störningars potenslagsbeteende i SvKs nät.....	28
6.2 Resultat från analyser av Fortums driftstörningsstatistik	30
6.2.1 Antal störningar och tid mellan störningar	30
6.2.2 Storlek på störningar (ILE)	31
6.2.3 Avbrottstid	34
6.2.4 Analys av större störningars potenslagsbeteende i Fortums nät	36
7. Diskussion	37
8. Slutsatser	38
9. Referenser	39
9.1 Muntliga referenser	39
9.2 Skriftliga referenser	39
9.3 Databaser och statistikmaterial	40

1. Inledning

För att kunna planera vilka åtgärder som skall genomföras för att minska elförsörjningens sårbarhet är det angeläget att känna till i vilken omfattning som störningar uppstår och vad som orsakar dessa. En större störning i elförsörjningen påverkar de flesta verksamheter i samhället. Kunskap om inträffade störningar är därför inte enbart av intresse för kraftföretag utan även för många offentliga aktörer såsom stat och kommuner.

Eftersom den statistik vi arbetar med är hämtad från och indelad i spänningsnivåer lämnar vi en kortfattad beskrivning av nivåerna i överföringsnäten (Söder, 1998):

- *Transmissionsnätet* förbinder alla stora energikällor och överför stora energimängder från produktionscentra till konsumtionscentra. Det svenska transmissionssystemet är förbundet med utlandet på ett antal ställen. Överföringssystemet skall göra det möjligt att optimera produktionen inom landet samt möjliggöra elkraftshandel med utlandet. Dessutom är det nödvändigt att klara av ledningsbortkopplingar, bortfall av kraftverk, oväntade elförbrukningsvariationer etc. utan att spänningens kvalitet minskas. I transmissionsnätet finns många parallella transmissionsvägar.
- *Subtransmissionsnät*, i Sverige kallade regionnät, har i varje belastningsregion helt eller delvis samma uppgift som transmissionsnätet. Energi-mängder och överföringsavstånd är dock mer begränsade.
- *Distributionsnät*, även kallat fördelningsnät, överför och fördelar den elkraft som tas ut från ett subtransmissionsnäts fördelningsstationer till slutförbrukare.

Tillgången och kvaliteten på störningsdata varierar mellan länder, kraftföretag och deras branschorganisationer samt mellan olika spänningsnivåer. Information om störningar i kraftsystem och deras konsekvenser återfinns i första hand i dessa källor (Knight, 2001):

- Undersökningar av större störningar som genomförs av offentliga organ och kraftföretag.
- Kraftföretagens årsrapporter
- Internationella och nationella sammanställningar
- Företag och andra organisationer som är verksamma inom ett visst distributionsområde

2. Syfte

Rapporten analyserar fel- och driftstörningsstatistik från eltransmissions- och eldistributionsnät i Sverige. Analyserna är främst inriktade mot att finna vilka som är de vanligaste orsakerna till att störningar uppstår, hur ofta och hur omfattande de är samt om det går att urskilja någon förändring över tid. Vi är även intresserade av om tillgängliga data om små störningar kan utnyttjas för uttala sig om risken för stora störningar. Ett ytterligare syfte med denna rapport är att beskriva datakällornas kvalitet och tillgänglighet.

3. Avgränsningar

Här intresserar vi oss främst för störningar i eltransmissions- respektive eldistributionsnät som får konsekvenser för slutförbrukare av elektrisk energi – vad som kan kallas ett konsumtionsbortfall. Vi skulle därför vilja studera distributionsstatistik på en nationell nivå. Tillgänglig distributionsstatistik omfattar dock endast ca 2 miljoner av Sveriges ungefär 5,4 miljoner elnätskunder (SvEl, 1999).

Vi har utnyttjat den statistik som finns tillgänglig för det nationella transmissionsnätet; det nät som drivs och förvaltas av det statliga Affärsverket Svenska Kraftnät (SvK). För att försöka belysa de förhållande som råder i distributionsnätet har vi valt att genomföra en mindre fallstudie av Fortums elnät i Stockholm.

Den statistik som omfattar arbetsolycksfall och elsäkerhet behandlas inte i denna rapport.

4. Arbetets genomförande

Denna rapport är en del i ett forskningsprojekt om elförsörjningens sårbarhet. I rapporten gör vi en analys av driftsstörningsstatistik inom elförsörjningen.

Inledningsvis hade vi ambitionen att med hjälp av störningsstatistik få en total bild av driftstörningarna i de svenska elnäten. Vi studerade därför svensk och viss internationell störningsstatistik för att få en översiktlig bild av vad som fanns att tillgå.

Det stod emellertid tidigt klart att den tillgängliga svenska distributionsstatistiken endast omfattar en ur statistisk synvinkel allt för begränsad del av slutkunderna för att kunna utnyttjas. Att genomföra en egen enkät riktad mot slutkunder ansåg vi vara alltför resurskrävande.

Vi valde att istället utnyttja den nationella statistiken för det svenska stamnätet som insamlats av Statens vattenfallsverk, Vattenfall AB och Svenska Kraftnät. Motivet för detta var främst den stora betydelsen som det svenska stamnätet har för den svenska elförsörjningen. Ett ytterligare skäl var att data insamlats under ett antal år och med viss omklassificering kunde utnyttjas för fortsatta analyser.

De flesta störningar som leder till konsumtionsbortfall uppstår i distributionsledet. För att belysa situationen i detta led valde vi att kontakta Fortum då detta företag driver både regionala och lokala elnät i såväl landsbygd som tätort. Analysen av distributionsledet fokuserades därefter ytterligare mot elnätet i Stockholms kommun.

Data från de olika källorna har sedan sammanställts och i viss mån omklassificerats för att tillåta analyser av längre tidsserier. När det gäller Svenska Kraftnäts statistik har vi använt material från tre databaser och omklassificerat data i de två äldre baserna till samma klassificering som i den nyaste, kallad AnnaKlara (se vidare kapitel 5).

För analysen av statistiken från Fortum har vi utgått från information i driftstörningsrapporter och registrerat orsakerna till störningarna, avbrottstider och lastbortfall. Vi har även erhållit data om s.k. leverans kvalitetsindex som Fortum registrerar i det branschgemensamma DAR-arbetet.

Data från Svenska Kraftnät och Fortum har därefter analyserats och sammanställts med hjälp av statistikprogramvaran MINITAB.

5. Beskrivning av datakällor

I detta kapitel beskriver vi de datakällor – hos Svenska Kraftnät och Fortum – som vi hämtat fel- och driftsstörningsstatistik från. Beskrivningen omfattar ett antal frågeställningar om hur och varför statistik samlas in samt statistikens kvalitet.

5.1 Svenska Kraftnäts driftstörningsstatistik

5.1.1 Syfte med datainsamlingen

SvK använder sin statistik för att göra översiktliga expertanalyser. Man gör inga traditionella statistiska analyser. SvK ingår i de nordiska stamnätsföretagens samarbete inom elområdet, Nordel. SvK rapporterar sammanställningar av statistiken till Nordel.

När en störning i stamnätet uppträder gör man direkt en störningsanalys. Ett av de främsta syftena med en störningsanalys är att undersöka om anläggningarna uppför sig som förväntat vid störningar. Alla fel och avvikelser från ett normalt förlopp undersöks och åtgärdas. SvK påpekar själva att en snabb störningsanalys förbättrar förutsättningarna för en effektiv och korrekt driftuppbyggnad. Ekonomiska motiv gör att störningsanalys är intressant; det är en informationskälla vid investeringsbeslut. På sikt avser SvK införa s.k. tillförlitlighetsbaserat underhåll (RCM). En bra driftsstörningsstatistik är då en viktig förutsättning för att på detta sätt organisera underhållet.

5.1.2 Vilka data samlas in?

SvKs statistik omfattar ett antal typer av områden knutna till driftsstörningar i stamnätet. Rapporterna är organiserade på följande vis:

- i) Driftstörningar
- ii) Fel som inledde eller utvidgade driftstörningen
- iii) Konsumtionsbortfall – Icke levererad energi (ILE)
- iv) Driftavbrott – hur driftstörningar påverkar anläggningsdelars tillgänglighet
- v) Reläskydd och automatiker
- vi) Andra störningar på stamnätet och övriga noteringar

SvK definierar vissa av ovanstående begrepp enligt följande:

En *driftsstörning* definieras enligt SvK som ”utlösning, påtvingad eller obefogad urkoppling, eller misslyckad inkoppling som följd av fel i kraftsystemet”. En driftstörning kan bestå av ett eller flera fel. För att störningen ska räknas som en driftstörning för SvK så måste felet kunna hänföras till SvK. Exempelvis genom att SvK äger den utrustning som gått sönder.

En *slutförbrukare* är en köpare av elektrisk energi som inte säljer all energi vidare.

Icke-levererad energi (ILE) är den beräknade mängd energi som skulle ha blivit levererad till slutförbrukare om avbrottet inte hade inträffat eller om inte överföringsbegränsningar uppstått. Närmare beskrivningar om hur ILE beräknas återfinns i Nordel (2001).

5.1.3 SvKs datainsamlingsprocess

Datainsamlingen för SvKs driftsstörningsstatistik är organiserad på följande vis.

I SvKs stationer finns störnings- och händelseskrivare. Dessa registrerar bl.a. vilka reläskydd som aktiverats och vilka brytare som löst ut. Störnings- och händelseskrivarna har en upplösning på 1 mS.

När en störning skett skickar Nät-vakthavande ingenjör (Nät VHI), som sitter i kontrollrummet (Nätkontroll) på SvK, en preliminär störningsrapport via e-post om det inte föreligger någon brådska. I annat fall ringer Nät VHI någon person i störningsanalysgruppen som består av fem personer från avdelningen för Nät-teknik.

På SvKs regionala driftcentraler skriver man en s.k. utlösningrapport. Störningsanalysgruppen har möjligheter att göra avläsningar av reläskydds-indikering i stationerna via modem eller opto-kommunikation. I vissa fall blir man tvungen att sända ut personal till stationerna som gör en manuell avläsning. När informationen är inhämtad vidtar arbetet för störningsanalysgruppen att analysera störningen.

Störningsanalysgruppen sammanställer informationen i SvKs driftsstörnings-databas AnnaKlara. Följande registreras för respektive störning: Var störningen inträffade, orsak, reläskyddsfunktion, vilka fel och andra avvikelser från korrekt funktion som inträffat.

De entreprenörer som sköter SvKs stationer genomför vid behov reparation av stationen. Störningsanalysgruppen skickar en rapport till den regionala underhållsorganisation inom SvK som har kontakt med aktuell entreprenör. Slutligen sammanställer störningsanalysgruppen en avslutande rapport över störningen. SvKs driftsstörningar sammanställs varje år i en rapport, jämför ”Driftstörningar i Svenska Kraftnäts anläggningar 2000”.

Före år 1999 lagrades data i två databaser som vi betecknar DSF respektive relä- och brytardatabas. DSF omfattar driftsstörningsstatistik från 1950-talet fram till 1998.

Relä- och brytardatabasen omfattar driftsstörningsstatistik som fokuserar på brytare och reläer, från 1985 till 1998. Konsumtionsbortfall eller icke levererad energi finns registrerade från 1993.

Störningar i dessa databaser som gav upphov till icke levererad energi och inträffade mellan år 1993 och 1998 ska vanligtvis finnas registrerade i både DSF och relä- och brytardatabasen.

5.1.4 Klassificeringar och definitioner

Klassificeringen av data sker enligt riktlinjer från Nordel (som för närvarande gemensamt utarbetas av Sverige, Danmark, Finland, Norge och Island). Dessa riktlinjer började man implementera på SvK under år 2000. Vissa av definitionerna återges på annan plats i denna rapport.

Vi har studerat de störningar i SvKs nät som under perioden 1993 till 2001 givit upphov till ILE. Data från de äldre databaserna har omklassificerats enligt de definitioner som används i AnnaKlara.

5.1.5 Felaktigheter i datamaterialet

För den period som vi studerat förefaller rapporteringen av störningar med konsumtionsbortfall ha varit god och det finns inga direkta skäl att anta vare sig över- eller underrapportering.

Osäkerheten rör då snarare uppskattningen av konsumtionsbortfallens storlek, ILE. Vi kan konstatera att i några fall stämmer inte uppskattningar av ILE mellan databaserna. SvK har själva uppmärksammat problemen med ILE och gjort vissa revideringar i efterhand.

I de fall uppgiven ILE inte stämt överens mellan DSF och Brytardatabasen har vi studerat händelseförloppstexter och andra uppgifter för att först bestämma att det verkligen handlar om samma störning. Därefter har vi konsekvent valt det värde på ILE som återfunnits i Brytardatabasen.

SvKs egen insamling av data är omfattande och innehåller såväl kvantitativa som kvalitativa beskrivningar av respektive störning. Det finns därför goda möjligheter att skaffa sig en bild av varje störning. När det gäller uppskattningen av ILE finns emellertid en komplicerad avgränsningsproblematik. Det kan exempelvis vara svårt att avgöra om en viss störning skall hänföras till stamnätet eller till anslutande nät.

5.1.6 Möjligheter till jämförelser över tiden

Det kan vara problematiskt att göra jämförelser över tid eftersom stamnätets struktur och ingående anläggningar successivt förändras. Den bedömning som görs här är att under den studerade perioden har inga förändringar i systemets struktur skett som menligt påverkar möjligheten att göra jämförelser av störningar som orsakat ILE. De senaste verkligt omfattande förändringarna av systemet skedde under 1980-talet, dvs. före den tidsperiod som vi studerar.

Avslutningsvis konstaterar vi att vissa definitioner och klassificeringar har ändrats över tid men inte på ett sådant sätt som påverkar möjligheterna för oss att analysera statistiken. Det kan förtjänas att nämnas att i Nordels riktlinjer så föreslås att driftstörningsstatistiken skall utökas. Leveransavbrott, med tillhörande mått såsom SAIFI och CAIDI, är en ny kategori som dock inte används av SvK.

5.2 Fortums driftstörningsstatistik från Stockholm

5.2.1 Syfte med datainsamlingen

Fortums insamling av driftstörningsstatistik syftar till att skapa en samlad bild för företaget vad som orsakar driftsstörningar och hur antalet störningar förändras över tid. Statistiken används även för analyser av vilka (samhälls-)kostnader som uppstår då driftsstörningar leder till elavbrott för slutkunden samt även för att exempelvis påvisa felaktigheter i levererad utrustning. Statistiken samlas även in för att kunna rapportera vidare till branschorganet Svensk Energi som i sin tur sammanställer driftsstörningsstatistik för ett antal svenska kraftföretag. I anslutning till denna rapportering beräknas olika leverans-säkerhetsindex.

Inrapporteringen sker till ett centralt system vilket drivs av Svensk Energi (det s.k. DAR-systemet). Detta system har funnits i cirka 20 år och byter inom kort namn till DARWIN. Svensk Energi kommer även att ansvara för driften av DARWIN och sammanställa inrapporteringen till STEM/nätmyndigheten. STEM läser sedan av respektive område årsvis med hjälp av en områdeskod (liknande system finns i Norge).

5.2.2 Vilka data samlas in?

Vår undersökning omfattar elnätet i Stockholms kommun. För störningar i detta område samlas uppgifter in om bl.a. felställe, störningens orsak, dess varaktighet, storleken på lastbortfallet och vilka åtgärder som vidtogs.

Nyligen har Fortum börjat redovisa driftsstörningar/fel uppdelat på ledningssträckor vilket gör det lättare att påvisa felaktiga (tillverkningsfel) ledningar m.m.

5.2.3 Fortums datainsamlingsprocess

Data samlas in genom att driftspersonal efter en störning fyller i en förtryckt driftsstörnings- och avbrottsrapport. För respektive störning skrivs sedan en driftsstörningsrapport. För varje kvartal sammanställs en driftrapport för Fortums elnät.

I driftsstörningsrapporten redovisas bl.a. antalet fel på olika spänningsnivåer och ett antal nyckeltal; exempelvis antal driftsstörningar, avbrottstid och samhällskostnad (Fortum anger samtliga som dygnsmedelvärden).

Därutöver sammanställs bl.a. en s.k. avbrottsrapport för varje månad. I denna redovisas avbrotten fördelade på varaktighet och spänningsnivå. Dessutom anges om avbrottet har varit planerat och/eller aviserat eller är en störning.

Målsättningen är att det ska göras en driftrapport varje månad. Nu sker detta kvartalsvis. Statens energimyndighet vill ha årsvis rapportering av leveranssäkerhetsindex på de olika spänningsnivåerna.

Fortums driftsstörningsdata finns tillgängliga i pappersformat och via DAR-systemet.

5.2.4 Felaktigheter i datamaterialet

Wikström (2002) menar att rapporteringen har blivit bättre under de senaste åren, dvs. Fortum har haft en högre rapporteringsgrad på senare år.

Fortum arbetar för att få personalen ute på fältet att uppleva statistikinsamlingen som meningsfull. I regel sker två genomgångar per år med fältpersonalen om hur man fyller i blanketter och klassificerar störningar. I samband med detta arbete har Fortum tagit fram en lathund som hjälp för det praktiska datainsamlingsarbetet.

Driftspersonalen rapporterar mycket noggrant exempelvis störningstider. Detta för att man från Fortums sida bättre skall kunna hantera allmänhetens frågor och även försäkringsärenden.

Antalet inrapporterade störningar har ökad varje år under perioden. Detta beror både på att Fortum blivit bättre på att rapportera in störningar och att det faktiskt sker något fler avbrott i dagsläget. För större störningar kan vi misstänka att mörkertalen är mindre.

På samma sätt som för SvK är Fortums insamling av data omfattande och innehåller såväl kvantitativa som kvalitativa beskrivningar av respektive störning. Det finns därför goda möjligheter att skaffa sig en bild av varje störning.

När det gäller vår uppskattning av ILE finns en svaghet då vi genomgående använt den maximala varaktigheten för en störning för att beräkna den icke levererade energin. Vi har då inte tagit hänsyn till att under viss tid så är lastbortfallet troligen lägre.

Detta innebär att ILE ibland har ett för stor värde. Vår bedömning är dock att detta inte i allt för hög grad påverkar vår analys eftersom vi endast analyserar de relativa förändringar som skett.

5.2.5 Möjligheter till jämförelser över tiden

Fortum har genom uppköp av andra elkraftföretag utökat sitt elnät. För att kunna göra jämförelser över tid har vi därför endast studerat elnätet i Stockholms kommun. Detta elnät har inte genomgått några större förändringar under den tidsperiod som vi studerar, dvs. åren 1998–2001. Definitioner och klassificeringar har inte ändrats över tid. Däremot har nya sätt att redovisa driftstörningar i form av index tillkommit.

Elnätets struktur är den samma, nya kablar läggs ner men detta är endast att betrakta som normalt underhåll. Därutöver sker en förtätning av staden som innebär att belastning, uttagen energi etc. och antalet kunder ökar. Fortum har exempelvis höjt sitt maximalt tillåtna uttag hos SvK under de senaste åren.

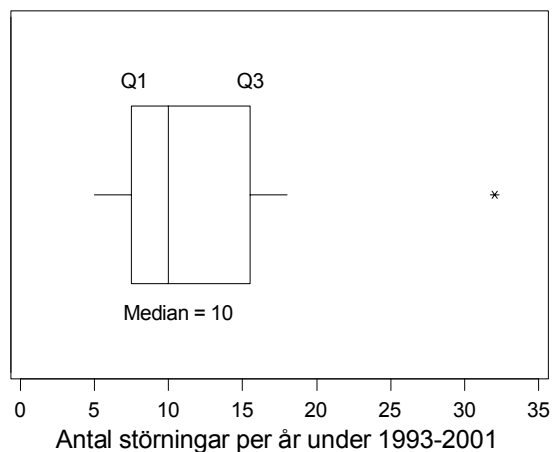
Wikström (2002) påpekar att felen tenderar att flytta sig geografiskt efter var det byggs. Speciellt gäller detta avgrävning av kablar. Vite för detta är endast cirka 10–15 000 kr och många entreprenörer tar inte kontakt med Fortum innan de gräver. Kostnaden som avgrävningarna orsakar bedömer Wikström vara cirka 10 gånger större än det faktiska vitet.

6. Resultat från statistiska analyser

6.1 Resultat från analyser av Svenska Kraftnäts driftsstörningsstatistik

6.1.1 Antal störningar

Totalt har vi 111 observerade störningar under perioden 1993–2001 som givit upphov till icke-levererad energi (ILE). Medelvärdet av antalet störningar per år är 12,55 och spridningen, standardavvikelsen, är 8,20 störningar. I Figur 1 ges en boxplot över antalet ILE-störningar per år under den aktuella perioden. Figuren ger följande information: Median är 10 störningar per år och Q_1 – 25-percentilen, dvs. 25 % av observationerna är under denna gräns – är 7,5 störningar per år. Vidare är Q_3 – 75 %-percentilen, dvs. 25 % av observationerna är över denna gräns – är 15,5 störningar per år. Ändpunkterna i de två horisontella strecken, s.k. whiskers, ges av den nedre gränsen $Q_1 - 1,5 * (Q_3 - Q_1)$ samt den övre gränsen $Q_3 + 1,5 * (Q_3 - Q_1)$, se vidare MINITAB (2000). Asterisken visar en s.k. outlier.



Figur 1. Boxplot över antalet störningar per år som resulterat i Icke-levererad energi under perioden 1993-2001.

SvK klassificerar störningar enligt deras orsaker i åtta olika klasser: Natur/väder, personal, systemfel, utrustningsfel, åska, skadegörelse, okänt samt övrigt. I ett första steg väljer vi att studera de störningar som orsakats av åska separat. Skälen för detta är både statistiska och systemtekniska.

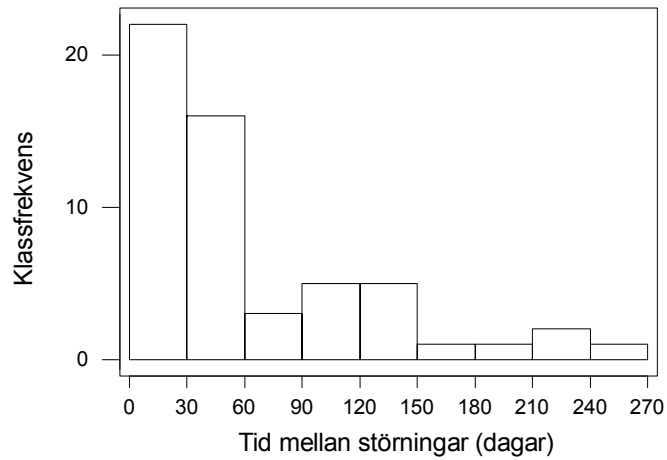
Åsken är cykliskt återkommande varje år, under årets mittmånader. Det finns även starka skäl att tro att det finns beroenden mellan de störningar som orsakats av åska. Åska är vad som inom tillförlitlighetsteorin brukar benämnas en common cause initiator. Övriga störningar, främst orsakade av utrustnings och personalfel, uppvisar troligen inte ett lika starkt beroende mellan varandra.

Det finns vidare skäl att tro att det till stor del är samma geografiska områden i SvKs nät som regelbundet drabbas av åska. Det svenska transmissionsnätets 400 kV-ledningar är skyddade mot åska och så även majoriteten av 220-kV-ledningarna. Ett antal 220 kV-ledningar i fjällvärden saknar dock s.k. topplina och därigenom åskskydd. ILE-störningarna är, som vi kommer att visa senare, mycket små i förhållande till den totala mängden överförd energi. De är i stor utsträckning de 220-kV-ledningar som saknar topplina som ger upphov till ILE-störningar p.g.a. åska. En övrig viktig faktor är att dessa ledningar även är radiella, dvs. ej maskade. Därför bryts elleveransen vid fel eftersom slingmatning ej förekommer. I dag ser SvK få driftsekonomiska möjligheter att bygga om de ledningar som saknar topplina eftersom de servar ett mycket litet antal av SvKs abonnenter.

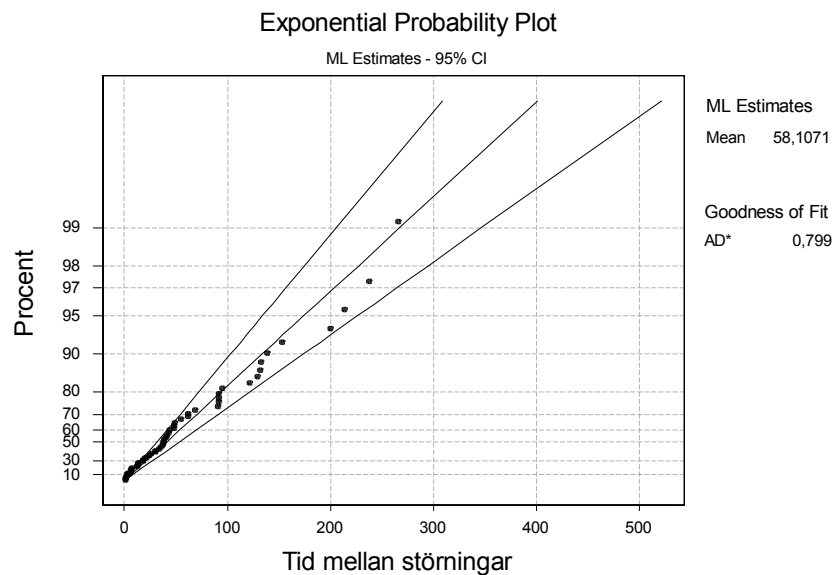
Låt $V(t)$ vara antalet fel i SvKs nät under perioden $(0, t]$. Antalet störningar som givit upphov till icke-levererad energi är en stokastisk variabel som vi betecknar $X(t)$, för perioden $(0, t]$ och där $X(t) \leq V(t)$. Låt vidare $N(t)$ vara antalet störningar under perioden $(0, t]$ som *inte* orsakas av åska. Här studerar vi perioden 1993-2001, dvs. nio år. Antalet fel per år är ungefär 200-300 stycken och sammanfattningsvis kan vi konstatera att mycket få fel ger upphov till störningar som leder till Icke-levererad energi.

I Figur 2 redovisar vi tiderna mellan de störningar som inte orsakats av åska, T . I histogrammet har vi delat upp materialet i nio klasser. Av figuren att döma skulle tiderna mellan störningar kunna vara exponentialfördelade.

I det följande testar vi om observationerna av T kommer från en exponentialfördelning. I det s.k. modifierade Kaplan-Meier-testet plottas kumulativ sannolikhet mot observerade data, se vidare MINITAB (2000). För ML-estimatet (maximum likelihood) ges ett mått på styrkan i resultatet av den s.k. Andersson-Darling statistikan (AD*). Denna beskriver avvikelsen från linjen och generellt sett gäller att ju mindre värde som erhålls desto bättre. Se även de 95-procentiga konfidensgränserna som är inritade i Figur 3. Om vi genomför samma test men med ett MK-estimat (Minsta kvadratmetoden) ges styrkan i den s.k. Pearson correlation coefficient, dvs. styrkan i den linjära relationen mellan de två variablerna. Denna koefficient ligger mellan 0 och 1, ju högre värde desto bättre resultat. I detta test erhöles ett värde på 0,905.



Figur 2. Tid mellan störningar som resulterat i Icke-levererad energi under perioden 1993-2001.



Figur 3. Exponentialfördelningsplot av tid mellan störningar (i dagar) som inte orsakats av åska, under perioden 1993-2001. Ett mått på styrkan i resultatet ges av den s.k. Andersson-Darling statistikan (AD^*), se vidare texten.

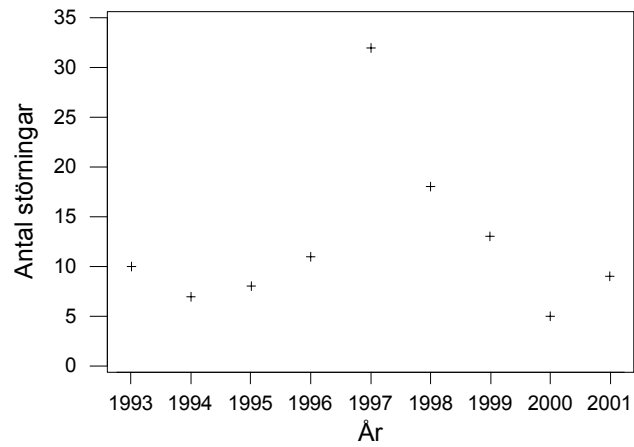
Testet i figur 3 visar att tiderna mellan störningar som inte orsakas av åska kan anpassas till en exponentialfördelning, dvs. $T \in Exp(m)$ med medelvärde $m^* \approx 58$ dagar. Om vi antar att de störningar som inte beror på åska inträffar oberoende av varandra, är poissonprocessen en lämplig modell för att förklara när dessa störningar inträffar. $\{N(t); t \geq 0\}$ är en $Po(\lambda)$ -process, där $N(t) \in Po(\lambda t)$. Poissonprocessen är en reguljär markovprocess där händelser inträffar oberoende av varandra med intensitet λ och tiden mellan störningar $T \in Exp(1/\lambda)$. Poissonprocessens intensitet kan alltså uttryckas som $\lambda = 1/m$. Med empiriska data från nioårsintervallet erhåller vi således $\lambda^* \approx 0,017$ störningar per dag som *inte* orsakas av åska.

De empiriska iakttagelserna kan även stödjas med teoretiska argument. Vi betraktar egentligen en uttunnad punktprocess. I denna rapport studerar vi endast de störningar i stamnätet som ger upphov till ILE, dvs. $X(t)$. Dessa störningar är en delmängd av samtliga störningar, $V(t)$. Nu har vi endast betraktat de störningar som inte orsakats av åska, $N(t)$, dvs. $N(t) \leq X(t) \leq V(t)$. Det är möjligt att visa för vissa antaganden att en uttunnad punktprocess konvergerar i fördelning mot en poissonprocess (Cox och Isham, 1980). Jämför med den vanliga poissonapproximationen av binomialfördelningen, giltig för ett stort antal försök (n) och en liten sannolikhet att lyckas i ett givet försök (p). Dvs. $Bin(n, p)$ approximeras med $Po(np)$ för stora n och små p (Johnson, 2000). Ytterligare ett teoretiskt argument till att poissonprocessen är en lämplig modell är att en summa av händelser som inträffar slumpmässigt, exempelvis utrustningsfel, ger en poissonprocess.

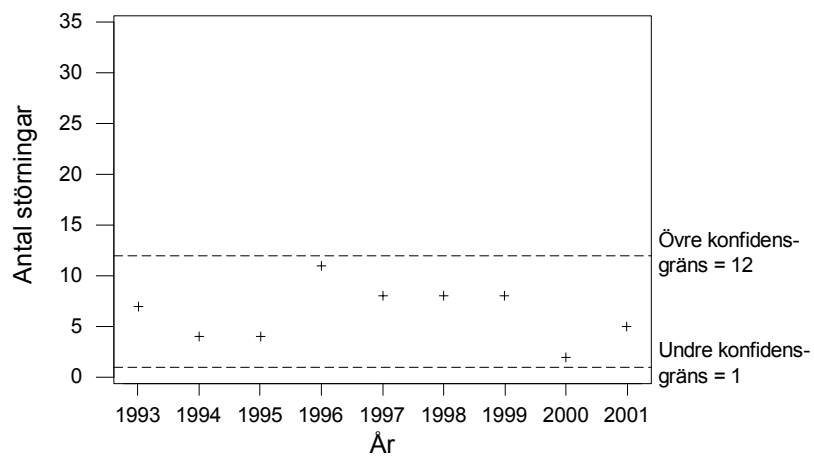
Här har vi endast studerat perioden 1993-2001, dvs. när det gäller antal störningar per år har vi bara nio observationer. Om vi hade haft ett större antal observationer kunde vi, utan att behöva studera tiderna mellan störningarna och anta oberoende mellan dem, direkt med ett χ^2 -test (Chi två-test) undersökt vårt antagande att data kommer från en Poissonfördelning.

Tiderna mellan de störningar som orsakats av åska kan inte nöjdaktligen anpassas till en exponentialfördelning, ej heller kan tiderna mellan det totala antalet störningar anpassas till en exponentialfördelning. När det gäller antal störningar per år som orsakats av åska lyckas vi inte anpassa dessa till någon standardfördelning. Åskstörningarna uppträder m.a.o. inte som övriga störningar.

I Figur 4 visar vi det totala antalet störningar per år, $X(t)$. I Figur 5 visar vi de störningar som inte orsakats av åska, $N(t)$.



Figur 4. Antal störningar per år som givit upphov till icke-levererad energi, under åren 1993 till 2001.



Figur 5. Antal störningar per år som givit upphov till icke-levererad energi och som inte orsakats av åska. Konfidensintervallet i figuren har en approximativ konfidensgrad på 95 procent.

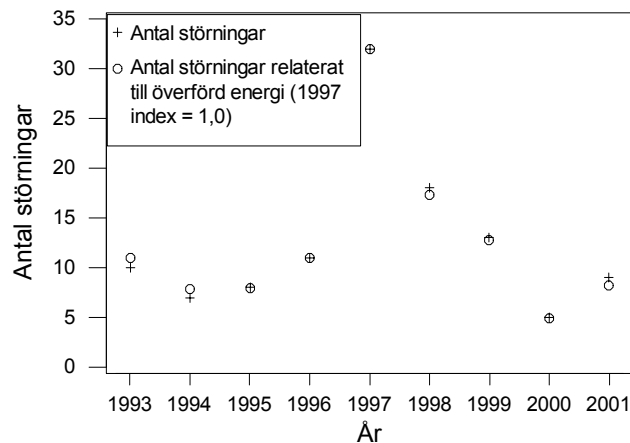
Eftersom $N(t) \in Po(\lambda t)$ kan vi, för de störningar som inte orsakas av åska, ställa upp ett konfidensintervall giltigt för stora λt och med en approximativ konfidensgrad $1 - \alpha$:

$$I_{N(t)} : \overline{N(t)} \pm \lambda_{\alpha/2} \cdot \sqrt{\overline{N(t)}} \quad (1)$$

I (1) ovan är $\overline{N(t)}$ medelvärdet av antalet störningar per år som inte orsakats av åska under den studerade perioden.

I Figur 5 är ett 95-procentigt konfidensintervall, ($\alpha = 0.05$), för ett nytt värde inritat, dvs. $\lambda_{\alpha/2} = 1,96$. Två slutsatser kan dras av figuren: Det finns ingen tidstrend i materialet, samt att den övre konfidensgränsen kan användas som en kontrollgräns för år 2002. Om antalet störningar som inte orsakats av åska är fler än 12 kan ett trendbrott föreligga.

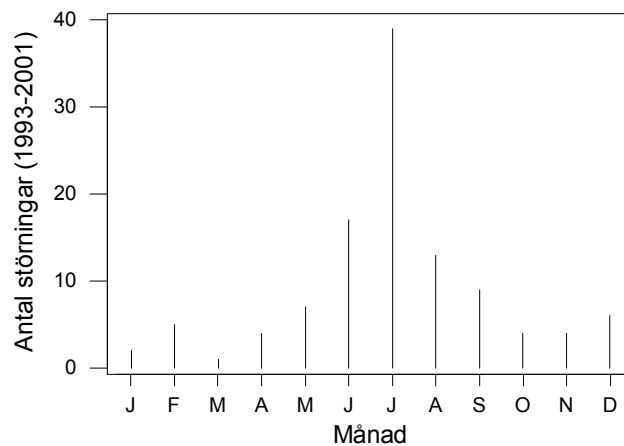
Vi har tidigare inte relaterat antalet störningar per år till något storleksmått. Under 1993 överfördes totalt 101 TWh energi över stamnätet, under 2001 överfördes 122 TWh. I Figur 6 relaterar vi antalet störningar till verksamhetens storlek, i form av en indexering baserad på uttagen energi, samt att vi jämför med antalet störningar per år utan någon indexering.



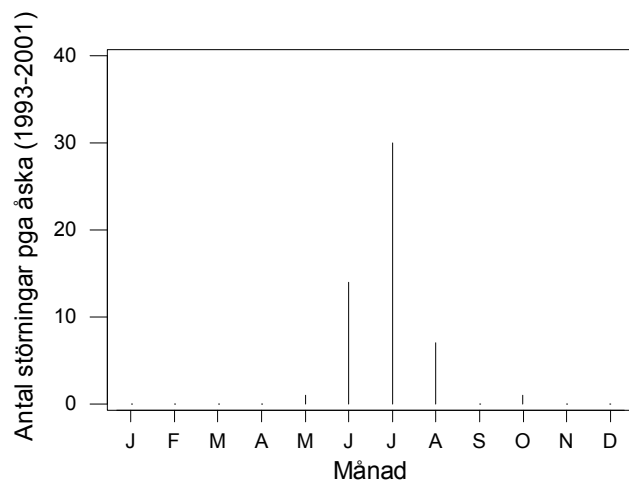
Figur 6. Totalt antal störningar per år relaterat till uttagen energi, för perioden 1993-2001.

Antalet störningar kan även studeras per månad. I Figur 7 visas antal störningar per månad under den aktuella nioårsperioden. Vi kan konstatera att under sommarmånaderna juni, juli och augusti inträffar en stor del av störningarna. Som synes i Figur 8 kan detta till stor del förklaras av åska. Det finns ingen tidstrend när det gäller antalet störningar per månad under nioårsperioden.

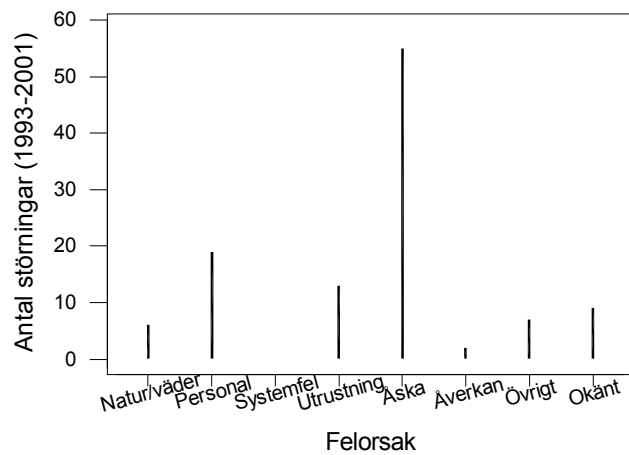
I Figur 9 visar vi hur det totala antalet störningar under nioårsperioden har fördelat sig på olika felorsaker. I SvKs statistik finns åtta olika felorsaker. För en av dessa klasser, Systemfel, finns ingen störning som givit upphov till ILE noterad. Vi noterar att åska är den största felorsaksklassen, följt av personalfel och utrustningsfel. När det gäller antal störningar kan vi även studera hur dessa fördelar sig på olika anläggningsdelar, se Figur 10. Till alla störningar finns en anläggningsdel associerade. Detta skall dock inte tolkas som att det är anläggningsdelen som felat och orsakat störningen. Notera att i Figur 10 är endast de anläggningsdelsklasser som har en ILE-störning associerade till sig medtagna. Dvs. det finns ett 20-tal anläggningsdelsklasser som inte har någon ILE-störning associerad till sig. Luftledningar är den anläggningsdel som har flest störningar associerade till sig, förklaringen är återigen åskan.



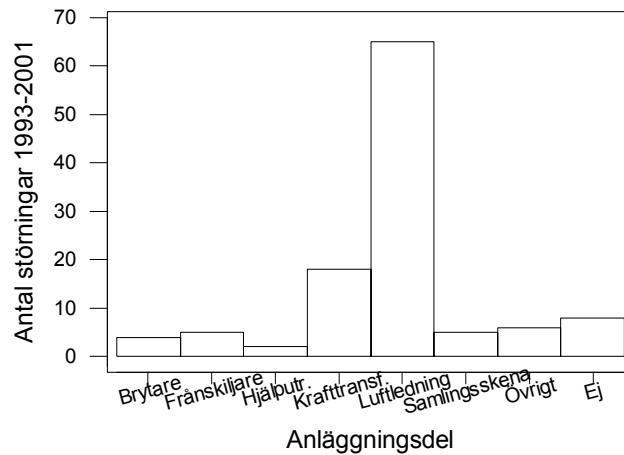
Figur 7. Totalt antal störningar per månad under perioden 1993-2001.



Figur 8. Antal störningar p.g.a. åska per månad under perioden 1993-2001.



Figur 9. Orsaker till störningar under perioden 1993-2001.



Figur 10. Antalet störningar per anläggningsdel under perioden 1993-2001.

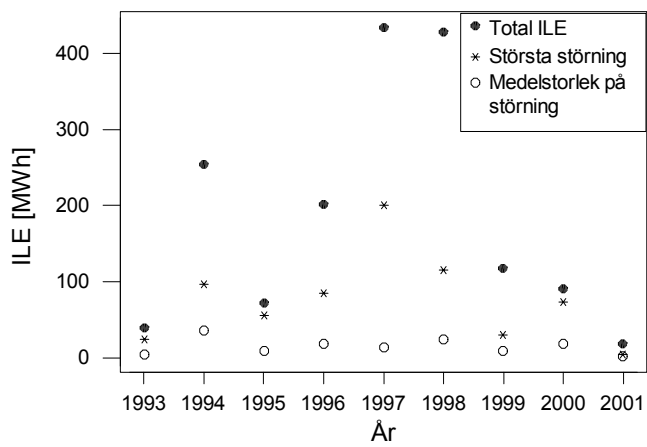
6.1.2 Storlek på störningar

Låt X_i vara antal störningar under år i . Storleken på störning nummer j under år i är en stokastisk variabel som vi benämner Y_{ij} . Om vi vidare låter Z_i vara ILE under år i så är

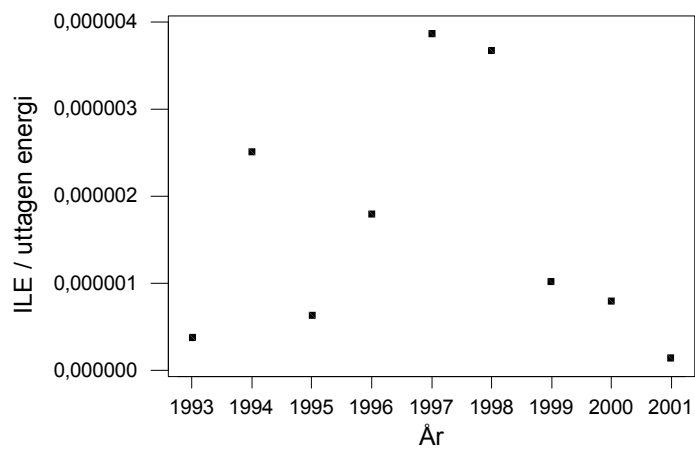
$$Z_i = \sum_{j=1}^{X_i} Y_{ij} \quad (2)$$

I Figur 11 visar vi z_i , årlig medelstorlek på störning (\bar{y}_{ij}) samt årets största störning ($y_{i,\max}$). Medelvärdet på ILE per år under perioden är, \bar{z} , 184 MWh och spridningen (standardavvikelsen, s_z) är 159 MWh. Observera att när det gäller storleken på störningar samt ILE per år så behandlar vi inte åska separat.

Som synes i figur 12 förloras en mycket liten del energi per år. För den givna perioden är medelvärdet av ILE dividerat med uttagen energi 0,00016 procent. Något som indikerar på att näten varit mycket driftsäkra. Observera att detta inte ger oss någon information över hur störningarna fördelar sig i tid eller rum över åren. Utan att vi endast kan säga att för systemet som helhet, under ett år, är mängden Icke-levererad energi (ILE) mycket liten i förhållande till mängden uttagen energi.



Figur 11. ILE per år under perioden 1993 till 2001.



Figur 12. ILE per år dividerat med uttagen energi per år, 1993-2001.

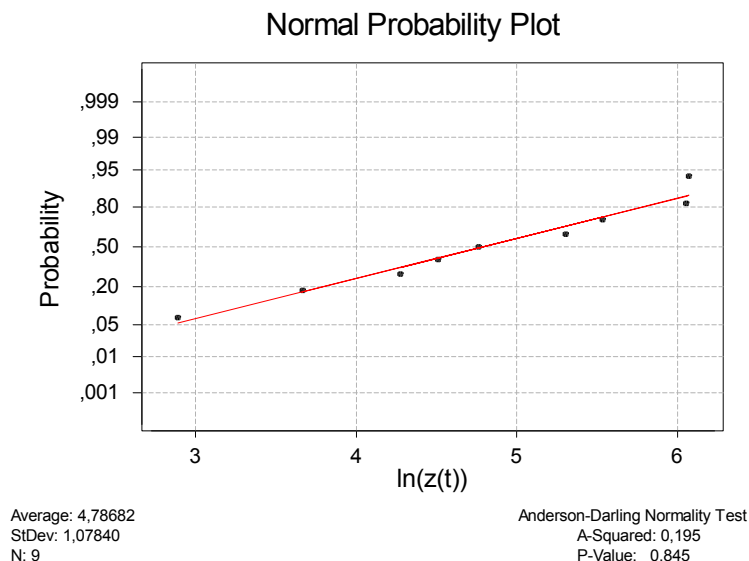
Nästa fråga är huruvida vi kan se någon tidstrend när det gäller total ILE per år. Här har vi endast nio observationer av Z_i , dvs. år 1993 till 2001. Enligt våra test är $\ln(z_i)$ normalfördelad, dvs. $\ln(Z_i) \in N(4,79; 1,08)$. Det test som redovisas i Figur 13 är ett s.k. icke-parametriskt test där:

H_0 : data normalfördelade

H_1 : data ej normalfördelade

Om $p < \alpha$ skall H_0 förkastas. Vi önskar ett 95-procentigt konfidensintervall, dvs. $\alpha = 0,05$. H_0 kan således inte förkastas och observationerna skulle kunna komma från en normalfördelning.

För att en regressionsansats skall vara lämplig vill vi helst att Z_i , eller någon transformering av Z_i , skall vara normalfördelad. Vi kan naturligtvis alltid anpassa en rät linje med minsta-kvadratmetoden till ett datamaterial. I regressionsmodellen vill vi dock att avvikelserna från den räta linjen skall vara approximativt normalfördelade, detta för att enstaka punkter som ligger långt ifrån linjen inte skall få för stor vikt. Den bedömning vi gör här är att regressionsansatsen kan användas för att ge en deskriptiv bild av datamaterialet. I Figur 14 kan vi konstatera att ILE per år har en svagt nedåtgående trend för den aktuella perioden.

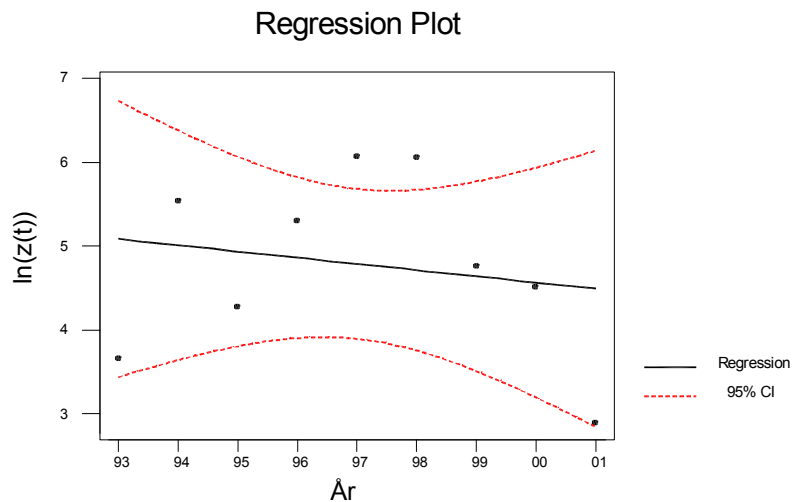


Figur 13. Normalfördelningstest av $\ln(z)$ för perioden 1993-2001.

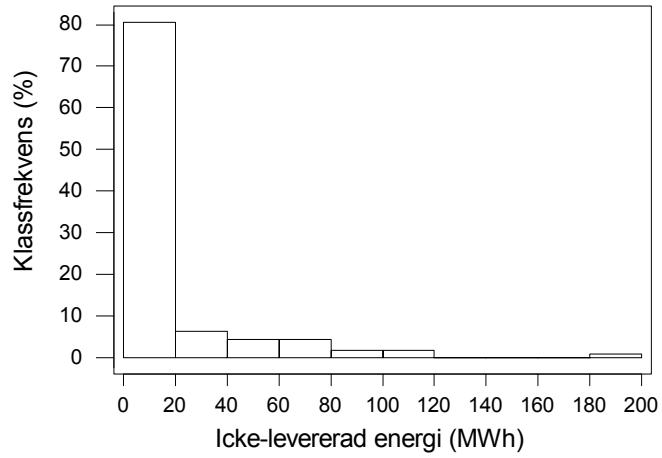
Generellt sett gäller att om vi endast har ett fåtal observationer kan vi ofta anpassa dem till någon standardfördelning. I regel kan det vara svårare att anpassa en stor mängd observationer till någon fördelning. Att vi kan anpassa våra nio observationer till log-normalfördelningen behöver dock inte betyda att det är rätt fördelning, utan att vi endast har så pass lite information att den fördelning vi söker anpassa våra observationer till inte kan uteslutas. Som synes i figur 14 nedan har vi stora avvikelser från den rätta linjen.

Tidigare har vi studerat störningar som beror på åska separat. Våra tester visar att för ILE per år är den bästa approximationen den vi redovisar ovan. ILE per år ej p.g.a. åska kan hyfsat anpassas till en normalfördelning. ILE per år p.g.a. åska kan ganska väl anpassas till en log-normalfördelning.

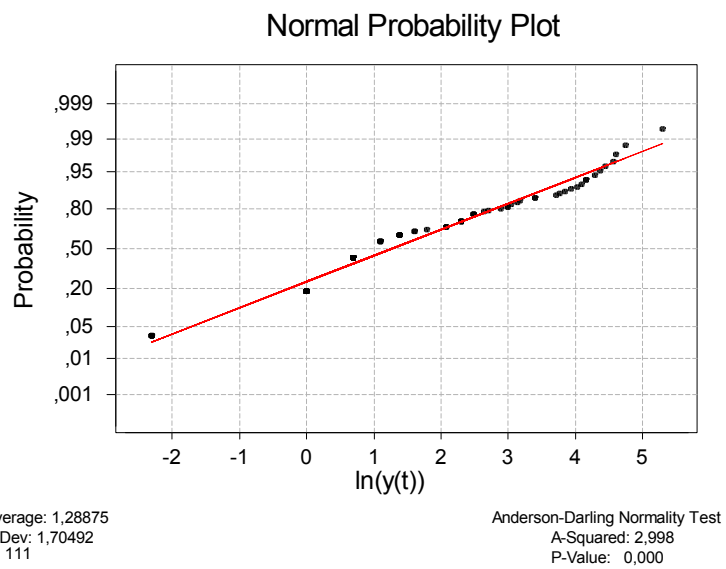
Nu går vi vidare och studerar storleken på störningar som givit upphov till ILE. Vi har tidigare benämmt dessa Y . I Figur 15 ger vi ett histogram över samtliga störningar under perioden 1993-2001. Materialet är uppdelat på 10 klasser.



Figur 14. Regressionsanalys av $\ln(z_t)$ för perioden 1993-2001.



Figur 15. Histogram över storleken på störningar, 1993-2001.

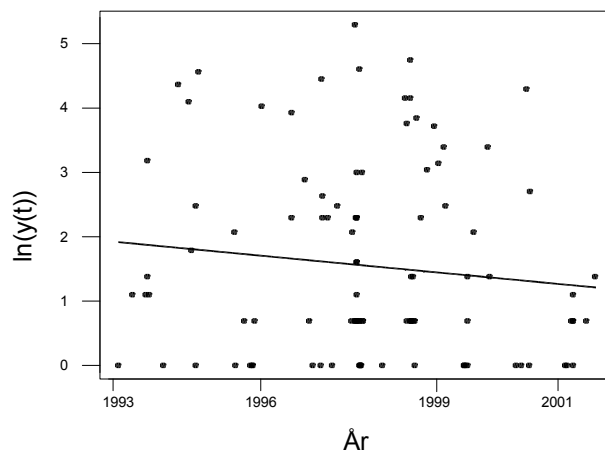


Figur 16. Normalfördelningstest av $\ln(y_{ij})$, för perioden 1993-2001.

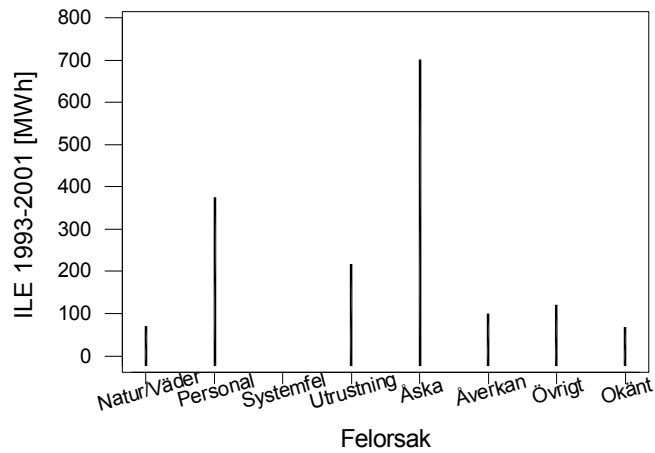
Vi konstaterar genom att testa ett antal standardfördelningar att lognormal är den bästa approximationen. Som synes i figur 16 har vi vissa systematiska avvikelser från den räta linjen, och vi förkastar hypotesen H_0 i det normalfördelningstest vi genomfört. Dvs. Vi förkastar hypotesen, att de logaritmerade data kommer från en normalfördelning. Fördelningen för Y_{ij} skulle kunna beskrivas som lognormal samt ytterligare någon komponent.

Trots att vi inte kan anpassa materialet vare sig till lognormal- eller normalfördelningen genomför vi en regressionsanalys av y_{ij} . Naturligtvis kan vi alltid anpassa en linje till materialet med hjälp av minsta-kvadratmetoden. Vi får dock väldigt stora avvikelser från linjen, men kan rent deskriptivt konstatera att vi inte verkar ha någon ökande trend under tidsperioden när det gäller storleken på en enskild störning. Se Figur 17.

Vi övergår nu till att studera storleken på störningar i ett antal olika orsaksklasser. Precis som för antal störningar, så är här åska den dominerande orsakskategorin. I Figur 18 visar vi total ILE under perioden 1993 till 2001 fördelat på de olika orsakskategorierna.

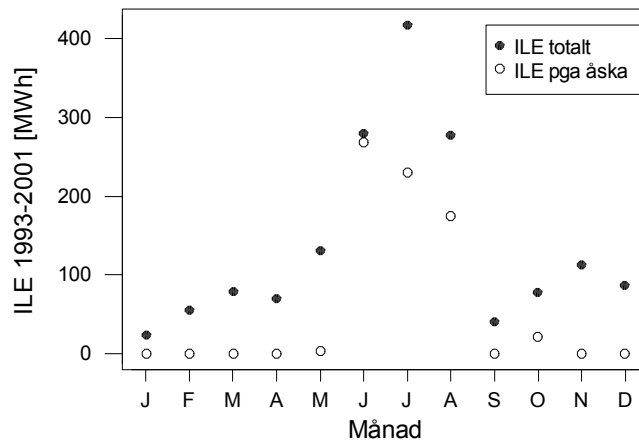


Figur 17. Minsta-kvadratanpassning av en linje till $\ln(y_{ij})$ under perioden 1993-2001. Totalt 111 observationer.



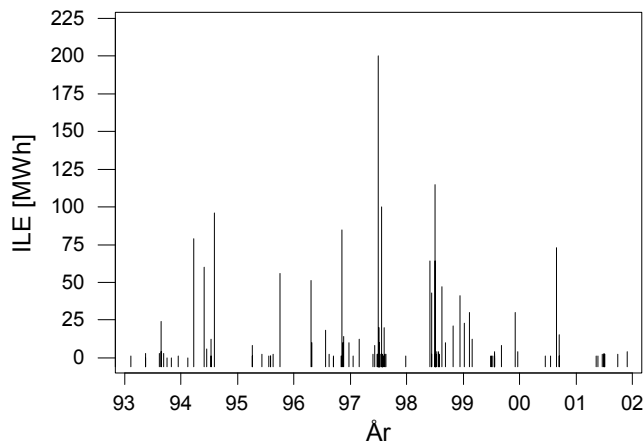
Figur 18. Total ILE under perioden fördelat på de olika felorsakskategorierna.

I Figur 19 ser vi hur total ILE under perioden fördelar sig över året, samt hur stor del av ILE som beror på åska. Åskan är som vi tidigare koncentrerat till årets sommarmånader.



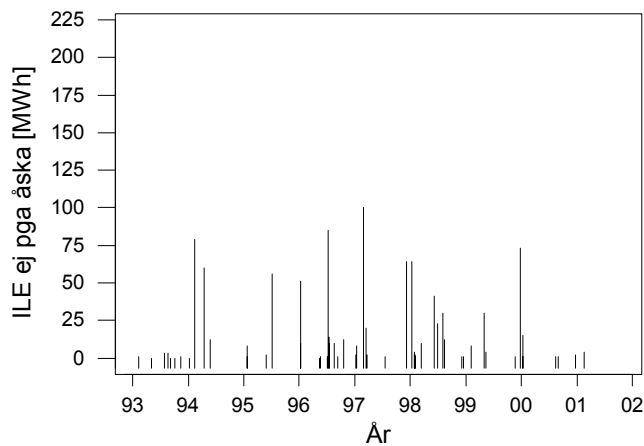
Figur 19. ILE under perioden fördelat på månad och särredovisat för åska.

I det följande studerar vi hur storleken på störningar inom de största orsakskategorierna har ändrat sig i tiden. I Figur 20 visar vi samtliga störningar, deras storlek och när de inträffat.



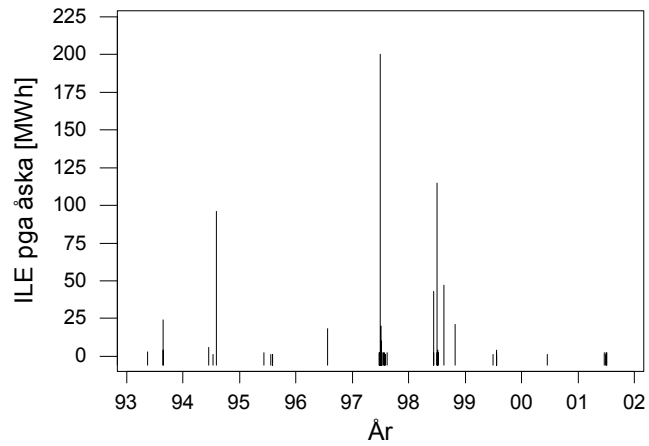
Figur 20. Alla ILE-störningar under perioden 1993-2001. Totalt 111 observationer.

I Figur 21 visar vi de störningar som inte orsakats av åska.



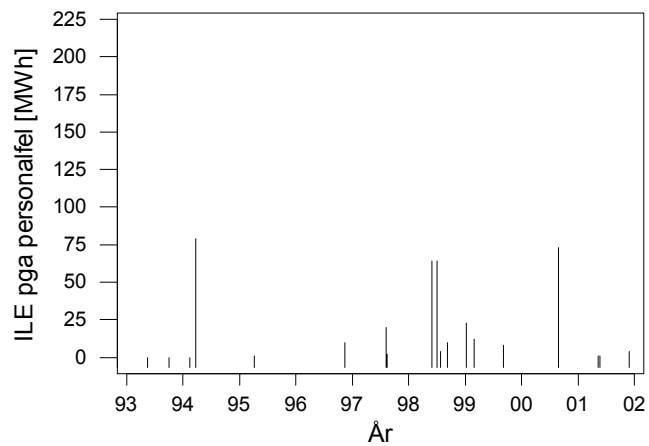
Figur 21. ILE-störningar som inte orsakats av åska 1993-2001 (58 obs.).

I Figur 22 visar vi de störningar som orsakats av åska. Notera åskans återkomst i sommarmånaderna, i mitten på åren.



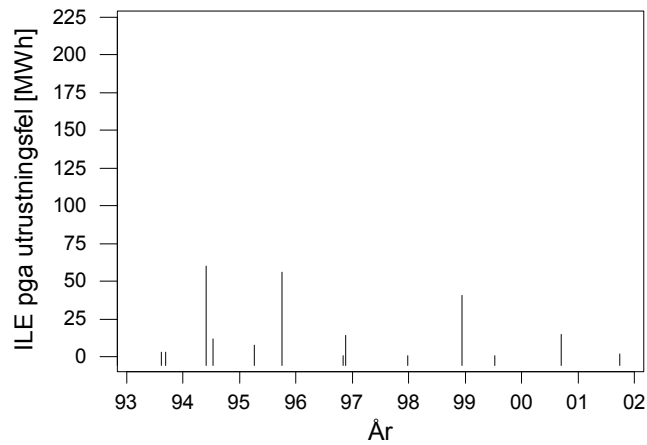
Figur 22. ILE-störningar som orsakats av åska 1993-2001 (53 obs.).

Den nästa största kategorien felorsaker är mänskliga fel (personalfel), se Figur 23.



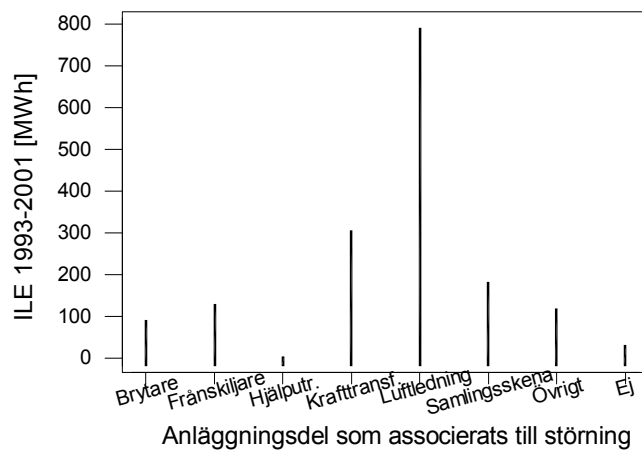
Figur 23. ILE-störningar som orsakats av mänskliga fel 1993-2001 (19 obs.).

I Figur 24 redovisar vi den tredje största orsakskategorin, utrustningsfel.



Figur 24. ILE-störningar som orsakats av utrustningsfel 1993-2001 (13 obs.).

Precis som för antal störningar kan vi studera hur ILE fördelar sig på olika anläggningsdelar. Notera att vi i Figur 25 endast redovisar de anläggningskategorier som har en ILE-störning associerade till sig.



Figur 25. ILE per anläggningskategori.

Vi kan konstatera att anläggningskategorin ”Luftledningar” återigen dominerar och att 60 % av de störningar som har ”Luftledningar” associerade till sig beror på åska.

6.1.3 Analys av större störningars potenslagsbeteende i SvKs nät

I det föregående avsnittet har vi konstaterat att observationerna av icke-levererad energi inte kan anpassas till någon standardfördelning. I nyligen genomförda analyser av störningsstatistik från USA (data från the North American Reliability Council) har det visats att storleken på driftsstörningar följer en potenslag (Chen et al., 2001; Carreras et al., 2001).

Låt oss anta att en stokastisk variabel Y har en täthetsfunktionen, $f(y)$, som är asymptotiskt ekvivalent med en potenslag i fördelningens svans

$$f(y) \sim \varphi(y) \equiv k \cdot y^{-\alpha} \quad (y \rightarrow \infty), \quad (3)$$

där $k > 0$ och $\alpha > 1$ är konstanter. Per definition betyder detta att $f(y)/\varphi(y) \rightarrow 1$ när $y \rightarrow \infty$. Här vill vi studera $P(Y > y) = 1 - F(y)$, där $F(y)$ betecknar fördelningsfunktionen. Eftersom både $f(y)$ och $\varphi(y)$ är intergrebara, se Olver (1997), håller denna asymptotiska relation, där

$$P(Y > y) = \int_y^{\infty} f(u) du \sim \int_y^{\infty} \varphi(u) du = \frac{k \cdot y^{-(\alpha-1)}}{\alpha-1}, \quad (y \rightarrow \infty). \quad (4)$$

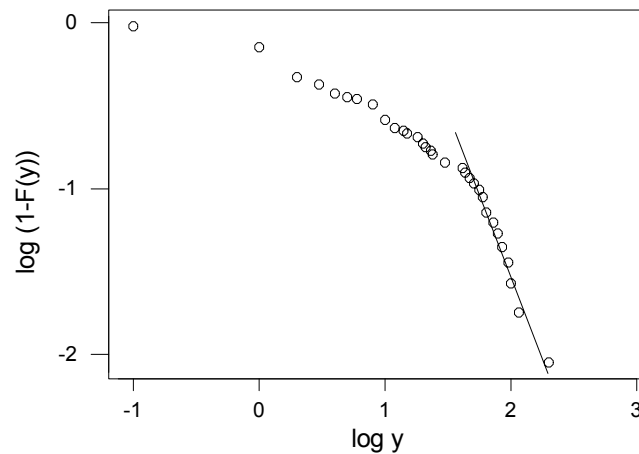
Detta betyder vidare att $\log P(Y > y)$ är asymptotiskt en linjär funktion av $\log y$,

$$\log P(Y > y) \sim -\beta \cdot \log y + \vartheta, \quad (y \rightarrow \infty), \quad (5)$$

där $\beta = \alpha - 1$ och $\vartheta = \log[k/(\alpha - 1)]$.

Sammanfattningsvis indikerar en god linjär anpassning när vi plottar $\log P(Y > y)$ mot $\log y$ på att fördelningens svans följer en potenslag.

I Figur 26 visar vi en log-log-plot av Icke-levererad energi i SvKs nät. Eftersom vi inte har kunnat anpassa data till någon standardfördelning, använder vi den empiriska kumulativa fördelningsfunktionen.

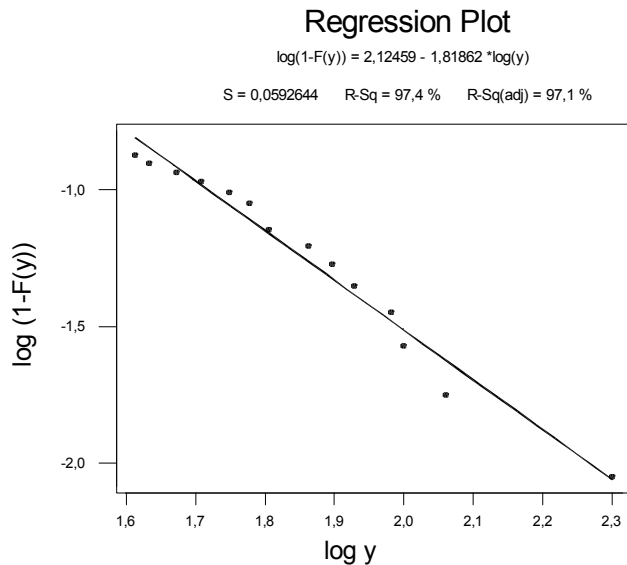


Figur 26. Log-log plot av Icke-levererad energi i SvKs nät under perioden 1993-2001.

Under perioden 1993 till 2001 observerades 111 störningar med ILE i SvKs nät. I Figur 26 ser vi att endast ett fåtal av dessa observationer kan inkluderas i fördelningens svans och följer en potenslag.

Generellt sett är de störningar som observerats i SvKs nät mycket små. Här kan vi genom en grov analys, anpassning av en rät linje till materialet med MK-metoden, konstatera att $\beta = 1,8$ för det svenska stamnätet, se Figur 27.

I Carreras et al. (2000) anges värden för det Nordamerikanska transmissionsnät, $\beta = 0,98$. För en diskussion om skillnaderna i värden på β , se Holmgren och Molin (2003).



Figur 27. Anpassning av en rät linje till de logaritmerade värdena av den empiriska fördelningsfunktionen mot de logaritmerade värdena av Icke-levererad energi.

6.2 Resultat från analyser av Fortums driftstörningsstatistik

6.2.1 Antal störningar och tid mellan störningar

Vi har studerat Fortums driftstörningsstatistik från Stockholm för perioden 1998-2001. Under perioden uppkom 314 störningar med konsumtionsavbrott hos slutförbrukare av el.

Majoriteten av störningarna beror på utrustningsfel, främst kabelfel. Den näst största orsaksklassen är ”okänd” och den tredje största är ”personal”, se vidare Tabell 1. Fortums nät i Stockholm är till största delen markförlagt och i jämförelse med SvK statistik finns endast ett fåtal störningar som beror på åska.

Den näst största felorsaken är mänskliga fel (personalfel). Ett antal störningar per år beror på avgrävning av kablar. Störningar som beror på att kablar skadas vid till exempel byggarbeten återfinns i orsakskategorin ”övrigt”.

Här gör vi inte någon analys av antalet störningar per år eller förlorad energi per år. Skälet till detta är att vi endast har observationer från fyra år. Vi har vidare skäl att undersöka hur rapporteringsgraden förändrats under åren. Antalet inrapporterade störningar har ökat varje år under perioden. Vår bedömning är att detta dels beror på att Fortum blivit bättre på att rapportera in störningar och dels på att det faktiskt sker fler avbrott. Nätets övergripande struktur har inte ändrat sig så mycket. Däremot har fler abonnenter tillkommit samt att man distribuerar mer elkraft.

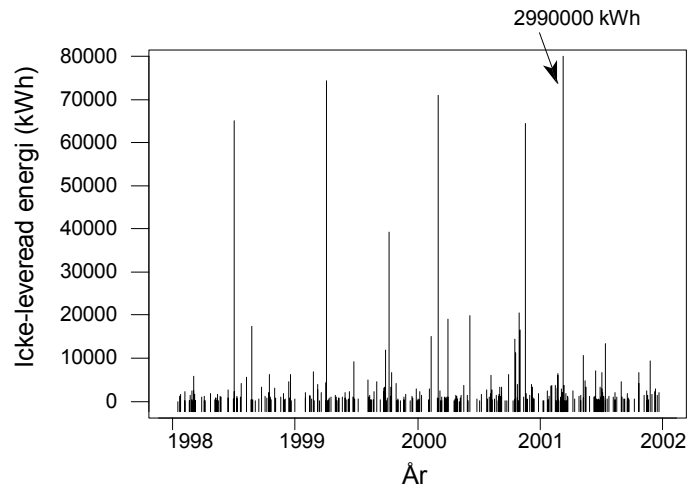
Observationerna av tiden mellan störningar kan, med samma test som för SvK, anpassas till en exponentialfördelning. Tiden mellan störningarna är exponentialfördelad, $T \in \text{Exp}(m)$, med medelvärde $m^* \approx 109$ timmar. Om vi endast betraktar störningar som skett på grund av utrustningsfel, erhåller vi $m^* \approx 114$ timmar, och ett något bättre värde på det mått på goodness-of-fit (Andersson-Darling) som ges i testet.

Antalet störningar är ganska jämnt fördelade över årets månader. I datamaterialet kan vi inte återfinna någon tydlig korrelation mellan störningsorsak och tid på året. För några av orsaksklasserna finns dock mycket få observationer. Exempelvis finns endast två registrerade störningar som orsakats av åska. Båda dessa inträffade under sommarmånaderna.

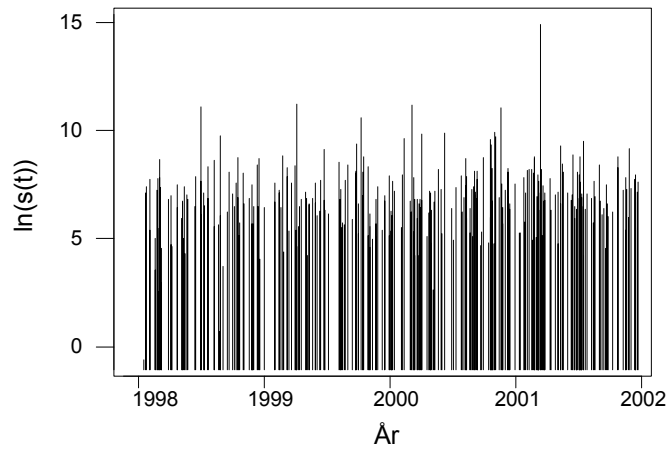
6.2.2 Storlek på störningar (ILE)

Låt S vara storleken på en given störning (i kWh). Precis som förut är detta en stokastisk variabel. I denna studie är Icke-levererad energi skattad genom att för varje störning multiplicera lastbortfallet (i kW) med avbrottstiden. Denna tid är given som tid till samtliga kunder återfått el. I praktiken sker återkoppling oftast stegvis och det sätt som vi skattar ILE är därför en överskattning. Medelstorleken på en störning i Fortums Stockholmsnät under den studerade perioden är cirka 12000 kWh, medianen är 915 kWh och det är en stor spridning i materialet. Standardavvikelsen är ungefär 169 000 kWh.

I Figur 28 redovisas storleken på störningar under den aktuella perioden, s , och i Figur 29 visar vi den naturliga logaritmen av störningsstorleken, dvs. $\ln(s)$. Värt att notera i denna figur är speciellt den stora störning som inträffade i Akalla i mars 2001 och som orsakade elkrisen i Kista.

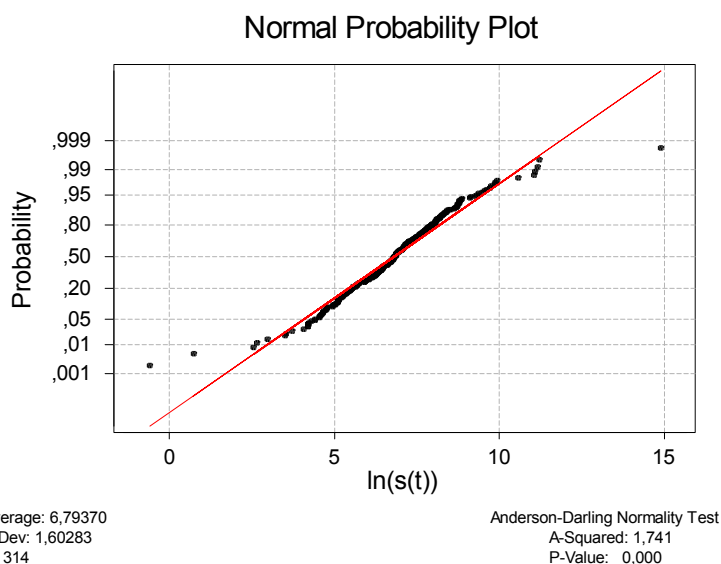


Figur28. Storlek på störningar, s , under perioden 1998-2001.



Figur 29. Den naturliga logaritmen av störningsstorleken, $\ln(s)$, för perioden 1998-2001.

Vi försöker anpassa störningsstorlek till någon standardfördelning, se Figur 30. Vi har icke slumpmässiga avvikelser från den rätta linjen i normalfördelningstestet av de logaritmerade data, och S kan bäst beskrivas som log-normalfördelning samt ytterligare någon komponent.

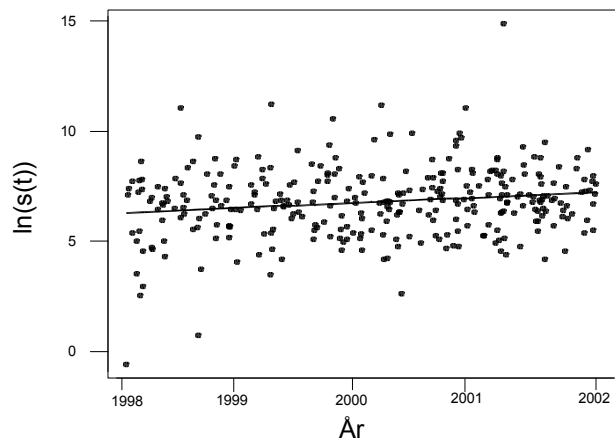


Figur 30. Normalfördelningstest av $\ln(s)$, den logaritmerade störningsstorleken.

I Figur 31 anpassar vi en rät linje till datamaterialet med minstakvadrat-metoden. En deskriptiv tolkning av figuren är att storleken på störningarna under perioden inte kan sägas ha ökat nämnvärt.

Om vi studerar ILE per störningsorsak kan vi konstatera att några få stora störningar bidrar i hög grad till den totala icke-levererade energin, se vidare Tabell 1.

Jämför till exempel störningar orsakade av åska och störningar orsakade av personal. I datamaterialet finns endast två registrerade störningar som orsakats av åska och totalt givit upphov till ILE på 66 000 kWh. Vidare finns 37 störningar som orsakats av personal registrerade. Dessa störningar har tillsammans givit upphov till ILE på 48 000 kWh. Den största störningen, elkrisen i Kista, berodde på ett utrustningsfel, nämligen en kabelbrand i Akalla. Jämför därför den stora skillnaden mellan medelstorlek och median i kategorin utrustningsfel.



Figur 31. Regression av logaritmerade värden på störningsstorlek

Tabell 1. Icke-levererad energi i Fortums distributionsnät under 1998-2001.

Störningsorsak	Icke-levererad energi (kWh)	Antal registrerade störningar	Medelvärde av Icke-levererad energi (kWh)	Median Icke-levererad energi (kWh)
Okänt	62 000	42	1 446	758
Övrigt	64 000	25	2 560	1 774
Skadegörelse	22 000	3	7 333	1 538
Åska	66 000 ^A	2		
Utrustning	3 560 000	203	17 537	971
Personal	48 000	37	12 97	263
Natur/väder	80 000 ^B	2		

^A Under 1998-2001 registrerade endast två störningar som orsakats av åska. Den största av dessa gav upphov till ILE på 65 000 kWh av de totala 66 000 kWh icke-levererad energi som orsakats av åska

^B Under 1998-2001 registrerade endast två störningar som orsakats av Natur/väder (annat än åska) Den största av dessa gav upphov till ILE på 79 800 kWh av de totala 80 000 kWh icke-levererad energi som orsakats av natur/väder.

6.2.3 Avbrottstid

Storleken på en störning kan mätas i avbrottstid, R . Medelavbrottstiden, \bar{r} , är cirka 98 minuter och spridningen, uttryckt som standardavvikelse s_r , är 225 minuter. Medianen är 64 minuter och ett mindre antal långa avbrott får stort genomslag när det gäller medelavbrottstiden. Vi kan inte med statistiska test anpassa de 314 observationerna av R till någon standardfördelning.

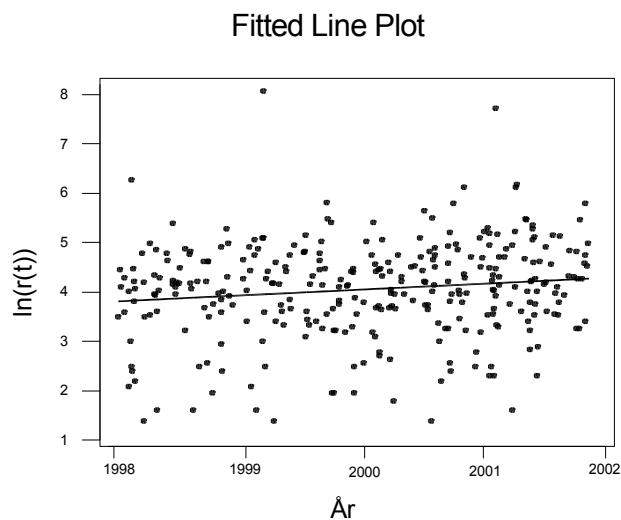
Om vi anpassar en rät linje till datamaterialet med MK-metoden erhåller vi en relativt horisontell linje med stora avvikelser från linjen. En deskriptiv tolkning av resultatet i Figur 32 är att avbrottens längd inte har ökat markant under perioden 1998-2001. I Tabell 2 presenterar vi avbrottstider från Fortums nät uppdelade på orsaksklasser. Vi kan inte finna någon korrelation mellan längd på avbrott och tid på året. Störningar orsakade av personal verkar i regel vara kortare än övriga störningar. Detta är också högst troligt eftersom personal redan är på plats och snabbt kan börja rätta till de misstag som de gjorde.

Tabell 2. Avbrottstider i Fortums Stockholmsnät under perioden 1998-2001.

Störningsorsak	Antal registrerade störningar	Medel-avbrottstid (min)	Median-avbrottstid (min)
Okänt	42	75.1	63.5
Övrigt	25	101.5	77.0
Skadegörelse	3	50.3	52.0
Åska ^A	2		
Utrustning	203	112.6	69.0
Personal	37	44.3	20.0
Natur/väder ^B	2		

^A Under 1998-2001 registrerades endast två störningar som orsakades av åska. Avbrottstiderna för dessa var 217 respektive 43.

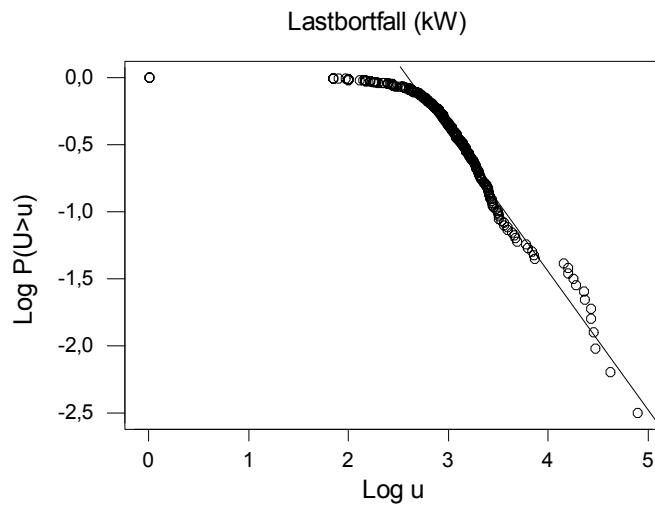
^B Under den studerade perioden registrerades endast två störningar som orsakades av Natur/väder (annat än åska). Avbrottstiderna för dessa var 224 respektive 47 minuter



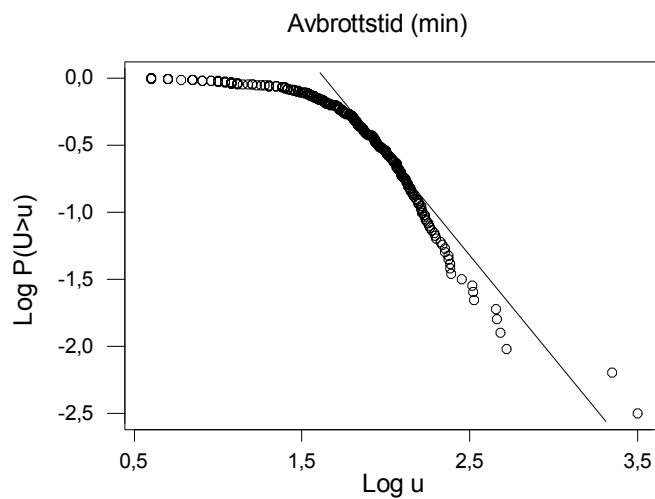
Figur 32. Fitted line plot av logaritmerade avbrottstider

6.2.4 Analys av större störningars potenslagsbeteende i Fortums nät

I det följande plottar vi logaritmen av ett minus den empirisk fördelningsfunktion mot logaritmen av störningsstorleken, dvs. $\log P(U > u)$ mot $\log u$.



Figur 33. Log-log plot av lastbortfall för perioden 1998-2002.



Figur 34. Log-log plot av avbrottstid för perioden 1998-2002.

I Figur 33 ovan visar vi en log-log plot av ett minus den empiriska fördelningsfunktionen mot storleken på störningar i kW. Figur 34 visar en log-log plot av den ett minus den empiriska fördelningsfunktionen mot avbrottstiden. Vi har inte återfunnit några andra studier av distributionsdata och i Tabell 3 presenterar vi våra värden på de anpassade exponenterna för Fortums Stockholmsnät. Dessa värden har skattats med hjälp av minsta-kvadratmetoden/regressionsanalys. Regressionsanalys förutsätter egentligen ett oberoende mellan observationerna. Värdena i fördelningsfunktionen är självklart inte oberoende. Vår bedömning är att regressionsanalys ändå i detta är ett effektivt sätt att nå ett tillräckligt bra resultat.

Tabell 3. Anpassade exponenter från Fortums distributionsdata

	<i>Icke-levererad energi</i>	<i>Lastbortfall</i>	<i>Avbrottstid</i>
β	0,83	1,05	1,55
α	1,83	2,05	2,55

Ett mer teoretiskt tilltalande sätt att skatta värden på exponenterna α och $\beta = \alpha - 1$, skulle vara följande. Låt a , vara det värde på u där vi återfinner ett knä i log-log plotten. Värden $u > a$ används sedan för att estimerar α och β . Inför $H(u)$ enligt följande

$$H(u) = P(U > u | U > a) = \frac{1 - G(u)}{1 - G(a)} \quad (6)$$

I ekvation (6) har vi använt beteckningen $1 - G(u)$ istället för $\log(1 - F(u))$, och u istället för $\log u$. $H(u^*)$ är en rak linje eftersom fördelningen följer en potenslag. Parametervärden för $H(u^*)$ kan sedan skattas med traditionells statistiska analyser, t.ex. Kolmogorov-Smirnov test, vilket är ett icke-parametriskt test för goodness of fit.

7. Diskussion

Vår bedömning är att kvaliteten på de studerade data är god. För både transmissions- respektive distributionsstatistiken finns en tydlig process för data-insamlingen. Att klassificera data synes inte vara alltför komplicerat och det ges dessutom regelbunden utbildning i detta för Fortums del. Vi har dessutom redovisat data på relativt hög nivå med få orsakskategorier vilket minskar risken för felklassificering.

En begränsning i de två fallstudierna är att de korta tidsserierna av data. Detta beror främst på att det råder en osäkerhet om antalet registrerade störningar är korrekt i äldre data. För att undersökningar som bygger på empiriska data ska vara meningsfulla behöver data samlas in under stabila förhållanden. Med stabila förhållanden kan vi i detta fall mena att inga väsentliga förändringar ska ha skett i systemen eller verksamheten under den period vi studerar. Vi vill vara säkra på att vi jämför samma saker över tiden.

För Svenska Kraftnäts del kan vi konstatera att nätet inte har förändrats i någon större utsträckning under den tidsperiod vi studerar. I fallet Fortum är strukturen i princip den samma när det gäller högre spänningsnivåer. Det har däremot skett en förtätning i vissa stadsdelar som resulterat i ett ökat antal abonnenter och ett ökat lastuttag. Konflikten mellan datainsamling under stabila förhållanden och kravet på tillräckligt många observationer är ofta förekommande när det gäller studier av tekniska system.

8. Slutsatser

Resultaten av våra analyser bekräftar vad ”praktikens män” i många stycken redan känner till. Exempelvis dominerar åska som störningsorsak i det svenska transmissionsnätet. Vidare är det få störningar som ger upphov till Icke-levererad energi, samt att Icke-levererad energi i förhållande till uttagen energi är mycket liten. För distributionsnätet i Stockholm är kabelfel den dominerande störningsorsaken. För båda de studerade näten är konsumtionsbortfallens storlek (Icke-levererad energi) och antal störningar i samma storleksordning för de studerade åren. Vidare kan tiderna mellan störningar anpassas till exponentialfördelningen. När det gäller Fortums Stockholmsnät kan vi konstatera att avbrottstidernas längd inte har ändrat sig nämnvärt under den studerade perioden.

När det gäller analys av större störningar dvs. störningar med stort lastbortfall, lång avbrottstid som drabbar ett stort antal abonnenter, konstaterar vi att deras storlek följer en potenslag. Detta bekräftas även i studier av nordamerikanska transmissionsnät. Det tillgängliga datamaterialet ger dock inte tillräckligt med information för att göra precisa uttalanden om större störningar.

9. Referenser

9.1 Muntliga referenser

Thomas Thor, Svenska Kraftnät (Tre intervjuer under 2001/2002)
Nils Wikström, Fortum (Två intervjuer under 2002)

9.2 Skriftliga referenser

Carreras, B., Newman, D., Dobson, I. & Poole, A. 2001. "Evidence for Self-Organized Criticality in Electric Power System Blackouts". *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, January 2001, Maui, Hawaii. ©2001 IEEE.

Carreras, B., Newman, D., Dobson, I. & Poole, A. 2000. "Initial Evidence for Self-Organized Criticality in Electric Power System Blackouts". *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, January 2000, Maui, Hawaii. ©2000 IEEE.

Chen, J., Thorp, J., & Parashar, M. 2001. "Analysis of Electric Power System Disturbance data". *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, January 2001, Maui, Hawaii. ©2001 IEEE.

Cox, D. R. & Isham, V. 1980. *Point Processes*. Chapman and Hall, New York

Holmgren, Å., Molin, S. & Thedéen, T., 2001. "Vulnerability of Complex Infrastructure: Power Systems and Supporting Digital Communication Systems". *Proceedings of the 5th International Conference on Science, Policy and Innovation: Critical Infrastructures*, June 2001, Delft.

Holmgren, Å. & Molin, S. 2003. "Using Disturbance Data to Assess Vulnerability of Power Delivery: A Statistical Analysis of Disturbance Data from Swedish Power Transmission and Distribution Grids". Manuskript insänt till *Journal of Infrastructure Systems*, American Society for Civil Engineers (ASCE).

Johnson, R. A., 2000, *Miller & Freund's Probability & Statistics for Engineers*. 6th edition, Prentice Hall, New Jersey

Knight, U. G. 2001. *Power Systems in Emergencies: From Contingency Planning to Crisis Management*. Wiley, Chichester.

MINITAB 2002. *User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools*. Minitab Inc.

Nordel. 2001. *Nordels riktlinjer för klassificering av driftstörningar. Utgåva: J, november 2001*. Arbetsmaterial från Nordel.

Olver, J. W. F. 1997. *Asymptotics and Special Functions*. A. K. Peters, Massachusetts.

SvEL. 1999. *Leveranssäkerhet i de svenska elnäten 1995 till 1997*. Sveriges Elleverantörer (SvEL), Stockholm.

Söder, L. 1998. *Effektiv drift och planering av kraftsystem*. Institutionen för elkraftteknik, Kungliga tekniska högskolan (KTH), Stockholm.

9.3 Databaser och statistikmaterial

Driftsstörningsstatistik från Svenska Kraftnät (tillgänglig i tre olika Microsoft Access-databaser) samt div. dokumentation och arbetsmaterial om driftsstörningsstatistik och SvKs insamling av driftsstörningsstatistik

Störningsdokumentation i pappersformat från Fortum (dåvarande Birka Nät AB). Dokumentationen inkluderade både sammanställt material samt originalmaterial från datainsamling av samtliga registrerade störningar.