

DECRIS ARBEIDSNOTAT 10

TITTEL

Avhengighetsanalyse for kritisk infrastruktur

FORFATTERE

Per Hokstad, Ingrid B. Utne, Jørn Vatn

SAMMENDRAG

Notatet beskriver en metodikk for avhengighetsanalyse av kritisk infrastruktur, som er en viktig del av detaljanalysene i DECRIS.

Notatet inneholder:

- Litteraturstudie av avhengigheter knyttet til kritisk infrastruktur.
- Beskrivelse av framgangsmåte for analyse av et kritisk (sårbart) punkt i infrastrukturen, der det er store avhengigheter til øvrig infrastruktur.
- Beskrivelsen konkretiseres ved hjelp av et eksempel: *Kulvert på Oslo S*.

ISBN

DATO

2009-06-16

GRADERING

ANTALL SIDER

ÅPEN

22

KONTAKT DETTE NOTAT

ADRESSE

Ingrid B. Utne

Ingrid.b.utne@sintef.no, 73592987

NØKKELOD NORSK

NØKKELOD ENGELSK

Avhengighet, risiko, sårbarhet, kritisk infrastruktur

Interdependency, risk, vulnerability, critical infrastructure

Innhold

1	Innledning	3
2	Litteraturgjennomgang av avhengigheter knyttet til kritisk infrastruktur	3
	2.1 Kritisk infrastruktur.....	3
	2.2 Avhengigheter.....	4
	2.3 Analyse og modellering av avhengigheter.....	5
3	DECRIIS metodikk for analyse av avhengigheter	8
	3.1 Metoden i trinn.....	8
	3.2 Beskriv ulykkesscenario.....	8
	3.3 Trinn 1: Avdekk avhengigheter.....	9
	3.4 Trinn 2: Kvalitativ analyse.....	12
	3.5 Trinn 3: Semi-kvantitativ analyse.....	13
	3.6 Trinn 4: Kvantitativ analyse.....	15
	3.7 Trinn 5: Vurder analyse og angi risikoreducerende tiltak.....	16
4	Illustrasjon av metoden – Case kulvert ved Oslo S	16
	4.1 Scenariobeskrivelse - Fellesføringer.....	16
	4.2 Analyse av avhengigheter.....	17
	4.3 Semi- kvantitativ analyse.....	19
	4.4 Risikoreducerende tiltak.....	20
5	Oppsummering	21
6	Referanser	22

1 Innledning

Et viktig mål i DECRIS er å utvikle ROS- metodikk som kan anvendes på tvers av samfunnets infrastrukturer. En slik metodikk må ta hensyn til avhengigheter mellom infrastrukturene. Slike avhengigheter kan forårsake alvorlige svikt i viktige samfunnskritiske funksjoner, og dermed ramme samfunnet på en rekke områder.

Dette notatet beskriver metoden for å analysere og modellere avhengigheter utviklet i DECRIS- prosjektet. Første avsnitt inneholder en litteraturgjennomgang av viktige begreper og definisjoner knyttet til kritisk infrastruktur. Deretter beskrives den delen av DECRIS- metodikken som fokuserer på avhengigheter. I avsnitt fire illustreres metodikken ved et eksempel fra case- studiet som er gjennomført i prosjektet.

2 Litteraturgjennomgang av avhengigheter knyttet til kritisk infrastruktur

Et viktig mål i DECRIS er å analysere avhengigheter mellom infrastrukturene i prosjektet. I den forbindelse er det behov for å avklare begreper som ”kritisk infrastruktur”, kategorisere ”avhengigheter” og oppsummere tidligere arbeid på området.

2.1 Kritisk infrastruktur

NOU (2006) skiller mellom kritisk infrastruktur og kritiske samfunnsfunksjoner. Kritisk infrastruktur defineres som ”de anlegg og systemer som er helt nødvendige for å opprettholde samfunnets kritiske funksjoner som igjen dekker samfunnets grunnleggende behov og befolkningens trygghetsfølelse”. Videre angis det tre kriterier for å identifisere kritisk infrastruktur: Avhengighet, alternativer og tett kobling. I NOU (2006) er avhengighet det viktigste kriteriet når man skal velge ut hva som er kritisk infrastruktur, fordi bortfall av en infrastruktur har alvorlige konsekvenser dersom et stort antall mennesker er avhengige av den. Det andre kriteriet er alternativer, som betyr at man må vurdere hvorvidt det finnes alternative løsninger dersom en infrastruktur bortfaller. Få eller manglende alternativer indikerer at infrastrukturen er kritisk. Siste utvelgelseskriterium er tett kobling, som i følge (NOU, 2006) betyr å vurdere i hvilken grad forstyrrelser i infrastrukturen får konsekvenser for andre infrastrukturer. Tett kobling er et begrep som er brukt av blant annet Perrow (1999), men da med en litt annen betydning.

I NOU (2006) defineres følgende infrastrukturer som kritiske: Elektrisk kraft, elektronisk kommunikasjon, vann- og avløp, transport, olje- og gass og satellittbasert infrastruktur. Samfunnskritiske funksjoner (SKF) er bank og finans, matforsyning, helse-, sosial- og trygdetjenester, politi, nød- og redningstjeneste, kriseledelse, storting og regjering, domstolene, forsvar, miljøovervåkning og renovasjon.

Rinaldi et al. (2001) refererer til følgende definisjon av kritiske infrastruktur i sin artikkel: ”The framework of interdependent networks and systems comprising identifiable industries, institutions (including people and procedures), and distribution capabilities that provide a

reliable flow of products and services essential to the defense and economic security of the United States, the smooth functioning of governments at all levels, and society as a whole". Rinaldi et al. (2001) inkluderer åtte kritiske infrastrukturer: Telekommunikasjon, elektrisitetsforsyning, naturgass og olje, bank og finanssektoren, transport, vannforsyning, myndighetstjenester og redningstjenester.

Johansson (2007) gir flere eksempler på kritisk infrastruktur i sin avhandling, for eksempel husvære, mat, vann, sanitæranlegg, evakuering og transport, energi og drivstoff, helsesystem, offentlig sikkerhet/trygghet, kommunikasjon, banksystemer og tilgang til finansielle ressurser og postvesen.

Kröger (2008) nevner fem faktorer som påvirker risikoen for svikt i kritisk infrastruktur: (1) Systemrelaterte faktorer knyttet til kompleksitet og sammenkoblinger, (2) teknologiske faktorer knyttet til innovasjon og drift, (3) miljøfaktorer som ressurstilgang og klimatiske forhold, (4) institusjonelle faktorer som markedsliberalisering, regulering og lovverk, og (5) samfunnsmessige faktorer som offentlighetens risikooppfatning, urbanisering og eksponering for terroraksjoner.

2.2 Avhengigheter

I artikkelen til Rinaldi et al. (2001) defineres avhengighet mellom infrastrukturer som et toveis forhold der tilstanden i hver av infrastrukturene påvirker eller er korrelert til tilstanden i den andre. Det skilles altså mellom "dependencies" som enveis avhengigheter og "interdependencies" som toveis avhengigheter. Hos Rinaldi et al. (2001) er hovedfokuset på toveis avhengigheter, og det betyr at man ser på avhengigheter i et makroperspektiv og ikke som noe som eksisterer mellom systemkomponenter. Andre skiller ikke spesifikt mellom enveis og toveis avhengigheter, for eksempel Peerenboom et al. (2002).

Avhengigheter kan også være direkte (av første orden) og indirekte (av høyere orden) (Johansson and Jönsson, 2008). Direkte avhengigheter er ofte lett å få øye på. Vanskeligere kan det være å identifisere avhengigheter som er mer indirekte, for eksempel at infrastruktur *i* avhenger av infrastruktur *j*, og infrastruktur *j* er avhengig av infrastruktur *k*. Avhengigheten mellom infrastruktur *j* og *k* kan betegnes som andreordens avhengighet.

Rinaldi et al. (2001) bruker et rammeverk bestående av seks dimensjoner til å beskrive og analysere avhengigheter mellom infrastrukturer. Disse dimensjonene er (1) type avhengigheter, (2) miljø, (3) koblinger og reaksjonsmåte, (4) infrastrukturkarakteristikker, (5) type svikt og (6) operasjonsmodus:

1. Type avhengigheter: Fysisk, cyber, geografisk, logisk. Fysisk avhengighet vil si at det er en fysisk kobling mellom inndata og utgangsdata, for eksempel at en vare som produseres eller modifiseres av en infrastruktur, er nødvendig for at en annen infrastruktur skal fungere. Cyberavhengighet vil si at tilstanden avhenger av den informasjonen som overføres gjennom informasjonsinfrastrukturen. Geografisk avhengighet betyr at en hendelse i infrastrukturenes nære omgivelser påvirker dem begge, eller at det er romlig nærhet mellom infrastrukturene. Logisk avhengighet vil si at to eller flere infrastrukturer påvirker hverandre gjensidig uten at det foreligger fysisk-, geografisk- eller cyberavhengighet.
2. Miljø/omgivelser: Omgivelsene til infrastrukturen gir rammebetingelser for hvordan infrastrukturen fungerer. Viktige aspekter ved omgivelsene er økonomi og

3. Koblinger og reaksjonsmåte: Type kobling (tett/løs kobling, lineærhet/kompleksitet) har betydning for hvordan forstyrrelser påvirker infrastrukturene.
4. Infrastrukturkarakteristikker: Egenskapene ved en infrastruktur kan beskrives ved hjelp av romlige/geografiske skalaer, tidsskalaer, operasjonelle faktorer og organisatoriske aspekter.
5. Typer svikt: Kaskadesvikt (svikt i en infrastruktur forårsaker svikt i en annen infrastruktur), eskaleringssvikt (svikt i en infrastruktur forverrer en uavhengig forstyrrelse i en annen infrastruktur), fellessvikt (to eller flere infrastrukturer svikter samtidig).
6. Operasjonsmodus: Kan variere fra optimal drift til totalsvikt. I en analyse av avhengigheter mellom infrastrukturene er det viktig å ha oversikt over hvilke andre infrastrukturer som har betydning for at en infrastruktur skal fungere normalt, hvilke som har betydning under forstyrrelser, og hvilke som er viktige for å gjenopprette normal drift.

Zimmerman (2001) beskriver tre viktige faktorer knyttet til avhengigheter mellom infrastrukturer, nemlig sammenkobling, redundans og systemkunnskap. Sammenkobling har effekt på hvordan svikt forplanter seg i systemene, redundans har betydning for eventuelle alternative muligheter for å opprettholde drift av systemet, og kunnskap gir mulighet for å oppdage og gjenkjenne trusler.

Zimmerman (2001; 2004) skiller mellom romlige og funksjonssammenkoblinger (avhengigheter). Romlige avhengigheter er knyttet til nærhet mellom infrastrukturer. Funksjonsavhengighet refererer til en situasjon der en type infrastruktur er nødvendig for drift av en annen, for eksempel at pumpene i et vannbehandlingsanlegg trenger strøm for å fungere. Zimmerman (2001) beskriver også tilfeller hvor man har både romlig og funksjonell avhengighet, for eksempel i trådløs kommunikasjon.

2.3 Analyse og modellering av avhengigheter

I følge Johansson og Jönsson (2008) kan modeller og rammeverk for å analysere avhengigheter mellom infrastrukturer, grovt sett deles inn i to typer: Den første kategorien består av prediktive tilnærminger, mens den andre kategorien inneholder empiriske tilnæringsmetoder.

Prediktive metoder

Prediktive metoder har som mål å modellere og/eller simulere atferden til en gruppe sammenkoblede infrastrukturer eksempelvis ved å evaluere hvordan forstyrrelser forplanter seg mellom systemene. Eksempler på slike metoder er (Brown et al., 2004; Balducelli et al., 2005).

Brown et al. (2004) beskriver et simuleringsverktøy, utviklet hos Sandia National Laboratories, som kan brukes til å evaluere potensielle reaksjoner på forstyrrelser i komplekse systemer, som funksjon av menneskelig atferd og fysiske begrensninger. Rammeverket for analysene er risikobasert, men simuleringene er basert på system dynamics og agent-based modellering.

Balducelli et al. (2005) bruker en simuleringsmodell til å undersøke komplekse adaptive systemer (CAS)¹ (i dette tilfellet kritiske infrastrukturer). Det vil si at en CAS ses på som populasjoner av samhandlende agenter, hvor en agent har en lokasjon, visse egenskaper og hukommelse.

Johansson (2007) presenterer to metoder for å vurdere sårbarhet i teknisk infrastruktur: Global sårbarhetsanalyse og analyse av kritiske komponenter. Den globale analysen er en måte å evaluere ytelsen til infrastrukturen på når den utsettes for ulike typer forstyrrelser. Analyse av kritiske komponenter er viktig for å vurdere sårbarheter i systemets komponenter. Anvendbarheten av metodene til Johansson (2007), ble testet gjennom empiriske studier av tre elektriske fordelingssystemer i Sverige. Resultatene fra den globale analysen viser at fordelingssystemer er sårbare for visse typer påvirkninger. Resultatene fra analysen av kritiske komponenter viser at metodene kan brukes til å identifisere og rangere komponenter som er kritiske for systemet, og at de gir mulighet for å teste systemene mot visse typer uforutsette hendelser.

Den prediktive modellen til Johansson og Jönsson (2008) er inspirert av nettverksteori. Fysiske og funksjonelle egenskaper ved de aktuelle systemene må integreres for at modellen skal ha praktisk verdi, og derfor blir hver infrastruktur representert både i en nettverksmodell og i en funksjonell modell. I nettverksmodellen, som gir en felles plattform for å modellere infrastrukturene, angis et systems fysiske komponenter i form av noder og "edges". I den funksjonelle modellen evalueres hvert system ved å bruke systemets nettverkmodell i tillegg til informasjon om avhengigheter til andre systemer.

Rinaldi et al. (2001) og Balducelli et al. (2005) påpeker at det er store utfordringer knyttet til å utvikle omfattende arkitektur og rammeverk for å kunne modellere og simulere avhengigheter i infrastrukturer. Det finnes mange modeller og datasimuleringsverktøy for én infrastruktur (trafikkmodeller, strømlastprogrammer for elektriske kraftnettverk osv.), men ikke noe som analyserer på tvers. Slike modeller krever blant annet nye dataverktøy, tilgang på en betydelig mengde data og integrering av dynamikken i samspillet mellom infrastrukturmodellene.

Empiriske metoder

Empiriske tilnærminger forsøker å studere tidligere hendelser for på den måten å øke forståelsen av avhengigheter i infrastrukturene. Ofte er hensikten å finne mønstre som er interessante i forhold til politiske beslutninger, for eksempel hvor ofte svikt forplanter seg mellom infrastrukturene, og mønstre knyttet til i hvilken grad samfunnet rammes av svikt i infrastrukturene på grunn av avhengigheter. Eksempler på slike metoder er (McDaniels et al., 2007; Zimmerman and Restrepo, 2006; Benoît, 2004).

Benoît et al. (2004) har utviklet en metode for å definere, beskrive og vurdere overføring av sårbarheter mellom kritiske infrastrukturer. Metoden baserer seg på tre steg: (1) Først gjennomføres en vurdering av innledende sårbarheter og potensielle konsekvenser, (2) deretter overføres disse konsekvensene til andre nettverk gjennom kaskadeeffekter, og til slutt (3) defineres de overførte konsekvensene som sårbarheter. Metoden baserer seg på omfattende konsekvensanalyse.

¹ Engelsk: Complex Adaptive Systems (CAS).

Zimmerman og Restrepo (2006) påpeker behovet for kvantitative metoder som kan måle grad av avhengighet mellom kritiske infrastrukturer og kaskadeeffekter som kan oppstå. I artikkelen beskriver de mulige kvantitative indikatorer for slike målinger.

McDaniels et al. (2007) fokuserer på å utvikle en modell for å analysere funksjonelle og geografiske avhengigheter. Funksjonelle avhengigheter inkluderer både fysiske og cyberavhengigheter fra Rinaldi et al. (2001). McDaniels et al. (2007) presenterer et rammeverk for å analysere avhengigheter, og beskriver at det å beregne sannsynligheter for en infrastruktursvikt, krever data fra databaser, ekspertvurderinger og/eller simuleringer. I artikkelen diskuteres et empirisk forsøk på å utvikle databaser med data om sannsynligheter for infrastruktursvikt basert på å evaluere sammenkoblinger mellom infrastrukturer. Det betyr at studien i artikkelen ikke gir en komplett risikoanalyse av infrastruktursvikt, men at resultatene kan danne grunnlag for fremtidige probabilistiske risikoanalyser.

Kröger (2008) anvender en matrise for å vurdere koblingene mellom infrastrukturene elektrisitetsforsyning, gass, jernbane, IKT og vannforsyning. Farger brukes til å illustrere hvor sterk avhengighetene er mellom infrastrukturene: For eksempel er elektrisk jernbanetransport avhengig av kontinuerlig elektrisitetsforsyning og offentlig internett, og disse cellene er dermed markert i rødt. For de andre infrastrukturene er avhengigheten av elektrisitetsforsyning mer moderat og de er dermed markert i gult. Grønt antyder svak avhengighet. Videre påpeker Kröger (2008) behovet for utvidede analyser av avhengigheter, og utfordringer ved å bruke tradisjonelle risikometoder til å analysere sikkerhetsrelaterte problemstillinger for store og komplekse infrastrukturer.

I følge Johansson og Jönsson (2008) utfyller de prediktive og empiriske metodene hverandre i forhold til å kunne brukes som grunnlag for risiko- og sårbarhetsanalyser. Hvilken metode som egner seg for analyse av sårbarheter, avhenger av formålet med analysen. De prediktive metodene kan gi viktig informasjon om et spesifikt system og kan være nyttige i forhold til proaktiv risikostyring. De empiriske metodene kan gi viktig informasjon om generelle mønstre ved infrastrukturavhengighet og frekvensen av forstyrrelser som forplanter seg gjennom systemene. De er derfor viktige for den generelle forståelsen av infrastrukturavhengigheter og kan gi innspill til de prediktive modellene og i politiske beslutningsprosesser.

3 DECRIS metodikk for analyse av avhengigheter

I dette avsnittet beskrives DECRIS metodikken for å analysere avhengigheter mellom infrastrukturene og konsekvenser av disse avhengighetene.

3.1 Metoden i trinn

Som diskutert i tidligere notater (4, 5, 6), har DECRIS' risiko- og sårbarhetsanalyse to hovedfaser:

1. Fase 1 består av en analyse av uønskede hendelser, og likner en utvidet grovanalyse, inklusiv oppstart, definere målsetting osv, (notat 4).
2. Fase 2 består av følgende trinn, (notat 6):
 - a. Velg ut uønskede hendelser fra fase 1 på grunnlag av behovet for mer detaljerte analyser. Definer hendelsene og beskriv disse som ulykkesscenarier.
 - b. Gjennomfør detaljerte analyser av ulykkesscenariene.
 - c. Anvend resultatene fra den detaljerte analysen i den overordnede ROS-analysen og vurder totalrisikoen.

En analyse av avhengigheter (pkt 2b) er eksempel på en viktig detaljanalyse, og denne kan inkludere følgende (del)trinn:

1. Avdekk avhengigheter
2. Gjennomfør en kvalitativ kartlegging og analyse av avhengighetene.
3. Gjennomfør en semikvantitativ analyse; dvs. sannsynligheter og konsekvenser er kvantifisert ved å angi ulike kategorier (lav, middels, høy osv), og så estimere totalrisikoen knyttet til scenariet.
4. Ved behov, gjennomfør en ren kvantitativ analyse av totalrisiko.
5. Evaluer analyseresultat og angi tiltak for å redusere kritiske avhengigheter og dermed totalrisikoen.

Disse trinnene beskrives nærmere under. Først kommenteres beskrivelsen av ulykkesscenariet (jfr pkt. 2a over)

3.2 Beskriv ulykkesscenario

Basert på grovanalysen i fase 1, velger vi ut kritiske uønskede hendelser for mer detaljert analyse.

Grunnlaget for analysen av avhengigheter baseres på en systembeskrivelse, nærmere diskutert i notat 6. Det betyr at den uønskede hendelsen må detaljeres som et ulykkesscenario med en fysisk stedsbeskrivelse, beskrivelse av omgivelser, rammebetingelser og begrensninger, samt tidsrom. Tekniske og organisatoriske systemer må beskrives, viktige driftsmessige faktorer, og fysiske objekter som rammes umiddelbart av hendelsen, må også inkluderes. De seks dimensjonene til Rinaldi et al. (2001), se kap. 2, kan brukes som innspill til scenariobeskrivelsen. Deretter må funksjonene i scenariet beskrives, i forhold til de fysiske objektene, organisasjonene, og sosiale strukturene, og ikke minst, knyttet til de samfunnskritiske funksjonene (SKF) og deres driftssituasjon før, i løpet av, og etter den

uønskede hendelsen. I DECRIS har vi tatt utgangspunkt i en generisk liste med SKF'er som kan brukes som utgangspunkt for funksjonsbeskrivelsen:

- Elektrisitetsforsyning
- Elektronisk kommunikasjon (IKT)
- Vann og avløpssystemer
- Olje- og gassforsyning
- Transport (vei, jernbane,....)
- Bank og finans
- Matvareforsyning
- Sanitærforhold
- Helse-, sosial- og trygdetjenester
- Politi- og redningstjenester
- Myndigheter
- Media
- Viktige industrivirksomheter
- Nasjonale symboler og kulturskatter

Scenariobeskrivelsen må også inkludere mulige årsaker til den uønskede hendelsen. Dersom omfang/type konsekvenser avhenger av årsak, må man ta hensyn til dette i analysen.

3.3 Trinn 1: Avdekk avhengigheter

Vi innfører først ulike *kategorier* av avhengigheter som blir behandlet i DECRIS. Disse kategoriene hjelper oss med å avdekke avhengighetene i analysen.

I første del av notatet diskuterte vi ulike typer avhengigheter, blant annet bruken av begrepene "interdependencies" og "dependencies". I DECRIS brukes *avhengigheter* om både enveis eller flerveis avhengigheter, (dvs. uavhengig av årsaksretningen på avhengigheten).

En kan både ha (i) avhengigheter mellom årsakene til en uønsket hendelse, ("sammenfall av uheldige omstendigheter") og (ii) avhengigheter mellom infrastrukturene, som følge av at konsekvensene til den uønskede hendelsen forplanter seg ("dominoeffekter") eller at flere infrastrukturer rammes "samtidig". I dette notatet fokuserer vi på de sistnevnte typer (ii), det vil si:

1. Lokasjonsspesifikke (fysiske) avhengigheter
2. Funksjonsavhengigheter

De lokasjonsspesifikke avhengighetene tilsvarer de geografiske og fysiske gruppene til Rinaldi et al. (2001) og den romlige koblingen til Zimmerman (2001). Disse avhengighetene er i hovedsak knyttet til fellessvikt. Lokasjonsspesifikke avhengigheter kan for eksempel være at en kortslutning i en strømkabel fører til brann, hvorav røyken fra brannen gjør at jernbanestasjonen må stenge slik at togtrafikken dermed ikke kan gå.

Funksjonsavhengigheter fokuserer på funksjonene til et scenario og likner cyber- og logiske avhengighetskategorien til Rinaldi et al. (2001) og funksjonskoblingen til Zimmerman (2001). Disse avhengighetene er i hovedsak knyttet til kaskadesvikt. Funksjonsavhengigheter kan for eksempel være at et strømbrydd fører til utfall av internett.

For å avdekke lokasjonsspesifikke avhengigheter mellom SKF'ene i scenarioet, vist i figur 1, kan vi systematisk stille flere spørsmål:

- Kan scenarioet forårsake tap av en SKF på grunn av den fysiske lokasjonen til systemet eller utstyret?
- Er det lokasjoner som, for eksempel, kan trues på grunn av brann?

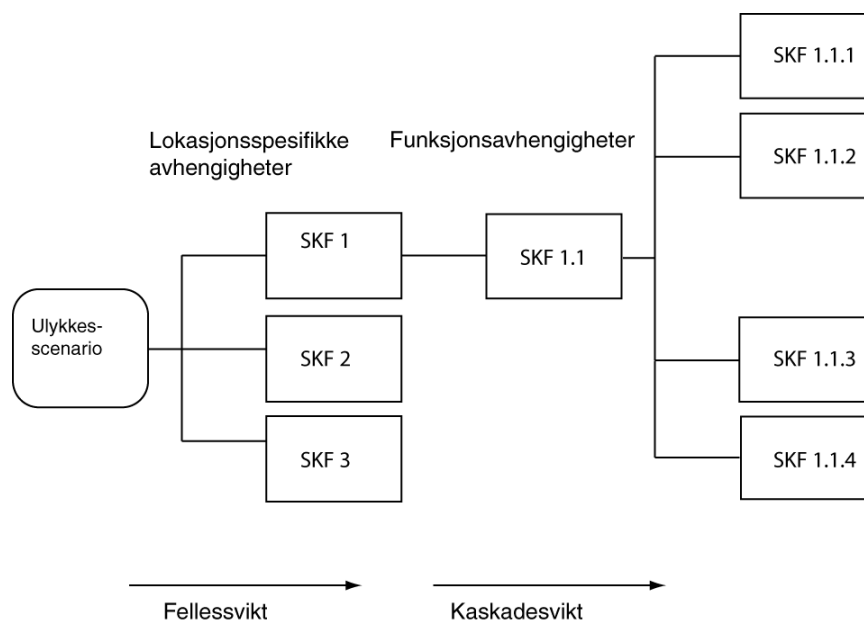
For å avdekke funksjonsavhengigheter mellom SKF'ene i scenarioet, vist i figur 3, kan vi spørre:

- Hva er de funksjonelle avhengighetene mellom SKF'ene avdekket i spørsmålene over og andre berørte SKF'er?

Videre undersøker vi de funksjonelle avhengighetene mellom SKF'ene, og ulike typer konsekvenser, ved å spørre:

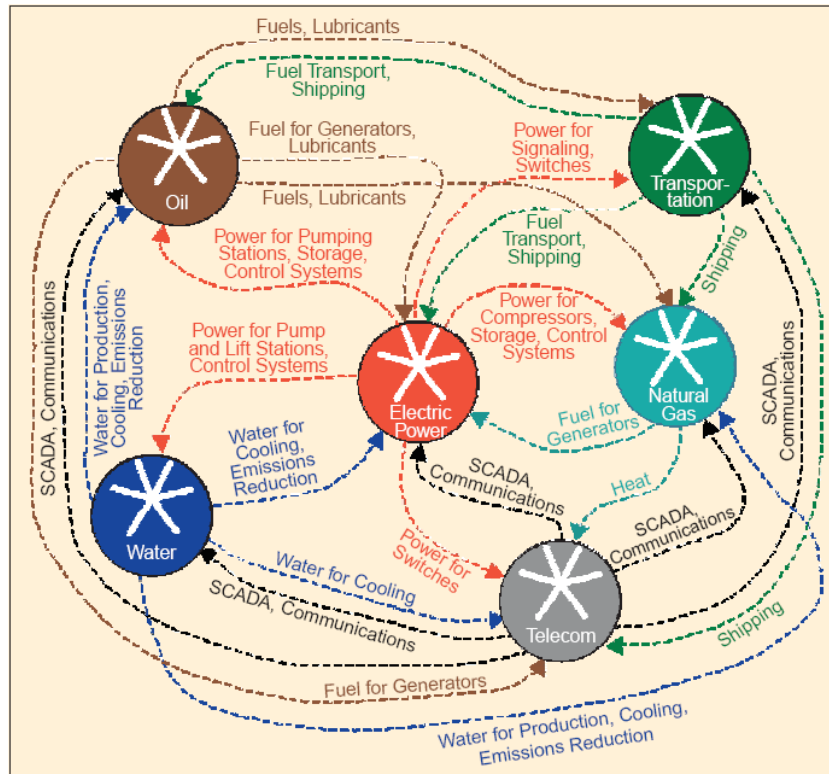
- Forårsaker avhengigheten en total eller delvis svikt i SKF'en?
- Finnes det barrierer som kan motvirke fellessvikt eller kaskadesvikt?
- Hvilke konsekvenser er sannsynlige som følge av tap av de ulike SKF'ene? De mest relevante konsekvensdimensjonene er:
 - Liv og helse (i forhold til innbyggere)
 - Tap av infrastrukturtenester knyttet til berørte personer og tidsrom
 - Økonomi (for eksempel skade på materielle verdier)
 - Miljø (for eksempel forurensning)

Avdekkingen av avhengigheter er en iterativ eller gjentakende prosess. Det vil si at vi ofte kan finne nye avhengigheter som etterfølgere til tidligere avhengigheter, Vi skiller derfor mellom *første ordens avhengigheter* (lokasjonsspesifikke avhengigheter) og *høyere ordens avhengigheter* (funksjonsavhengigheter), som vist i *kaskadediagrammet* i figur 1.



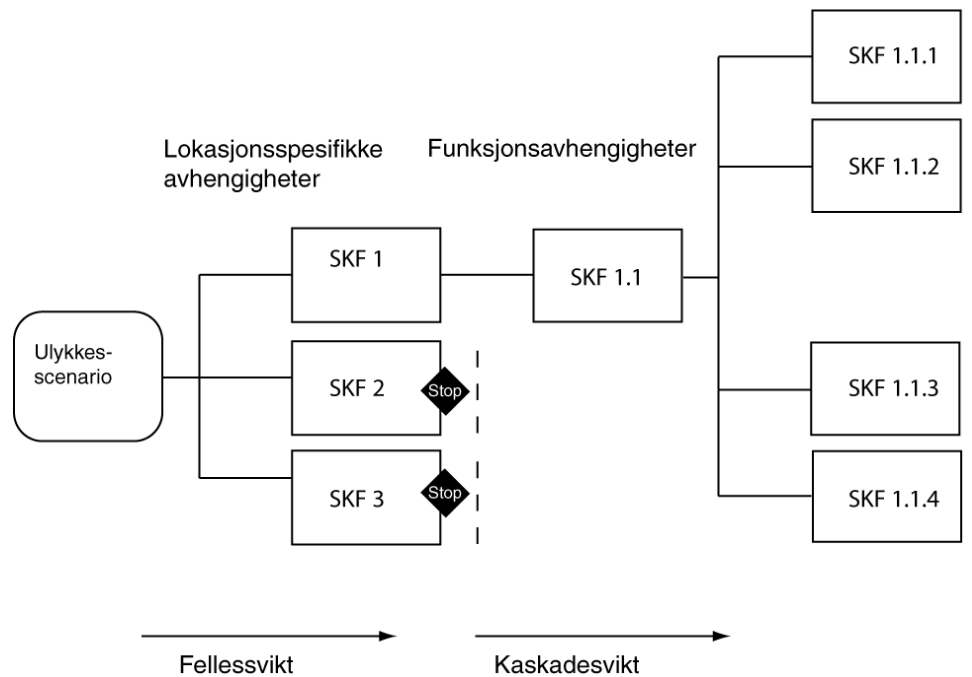
Figur 1. Eksempel på et kaskadediagram.

Et kaskadediagram illustrerer avhengigheter og forholdene dem i mellom. Et slikt diagram gjør det enklere å få oversikt over avhengighetene i ulykkesscenarioet. Til forskjell fra spaghetti-diagrammet til Rinaldi et al. (2001), vist i figur 2, er kaskadediagrammet mer strukturert og oversiktlig. På mange måter likner et kaskadediagram et hendelsestre, men det er noen forskjeller. Disse vil vi komme tilbake til senere.



Figur 2: Eksempel på "spaghetti-diagram", hentet fra Rinaldi et al. (2001).

Når vi lager et kaskadediagram, starter vi med ulykkesscenarioet lengst til venstre, og modellerer deretter de lokasjonsspesifikke avhengighetene (eller førsteordens avhengighetene) til høyre for ulykkesscenarioet. Funksjonsavhengighetene følger deretter, som høyere ordens avhengigheter. Avhengighetene i diagrammet visualiseres ved hjelp av linjer. Boksene illustrerer konsekvensene av avhengighetene, for eksempel "utfall av strømforsyning". Disse boksene kalles *noder*. Dersom vi velger å ikke forfølge en konsekvens videre, merker vi av boksen med et "stopp"-symbol, vist i figur 3. Sluttnodene, det vil si de nodene som ikke har noen påfølgende noder til høyre i diagrammet, kalles *løvnoder*.



Figur 3. Kaskadediagram med "stopp"-symbol og løvnoder (med stiplede linjer).

Utvikling og bruk av kaskadediagrammet er forklart mer detaljert i de neste trinnene.

3.4 Trinn 2: Kvalitativ analyse

Etter å ha avdekket avhengighetene på et nivå som passer i forhold til analysens formål, kan vi velge å gjennomføre en ren kvalitativ analyse ved å diskutere avhengighetene som fremkommer i kaskadediagrammet (figur 3) og avdekke koblinger med stort ulykkespotensial. Deretter må det vurderes om det er behov for avhengighetsreducerende- eller risikoreducerende tiltak. I noen tilfeller kan det være aktuelt å grovt forfølge de avhengighetene som har størst sannsynlighet for å inntreffe, og dermed forenkle diagrammet.

For å vurdere risikoen, innfører vi for hver "følgehendelse"² (eller node i kaskadediagrammet) mål på:

- Sannsynlighet (P), evt frekvens (F)
- Omfang (E)³
- Varighet (D)⁴

For den uønskede hendelsen (selve ulykkesscenarioet) angir vi en frekvens, F , (for eksempel antall hendelser per 100 år eller lignende). For de etterfølgende hendelsene i kaskadediagrammet, angir vi en betinget sannsynlighet, P , for hendelsen, gitt at den forutgående hendelse i diagrammet (dvs. årsaken) har inntruffet. For å vurdere slike betingede sannsynligheter, må analytikeren vurdere verdiene av omfang (E) og varighet (D) for den forutgående hendelsen.

² En "følgehendelse" er en konsekvens av forutgående hendelser i kaskadediagrammet.

³ E- Engelsk for "extent".

⁴ D- Engelsk for "duration".

I figur 3 ser vi at ulykkescenarioet kan forårsake tre lokasjonsspesifikke konsekvenser (node SKF 1-3). Vi velger ikke å forfølge SKF 2 og 3 videre, men ut i fra SKF1 får vi 4 funksjonsavhengigheter. Diagrammet gir altså en skjematisk oversikt over følgehendelser som kan brukes som utgangspunkt for en diskusjon omkring sannsynligheter og konsekvenser for ulykkescenarioet og følghendelsene.

Dersom en slik kvalitativ vurdering ikke er tilstrekkelig, kan vi analysere og vurdere risikoen knyttet til avhengighetene på en semi- kvantitativ måte.

3.5 Trinn 3: Semi-kvantitativ analyse

I en semi-kvantitativ analyse, angir en *kategori* for *F*, *P*, *E*, *D*. Tabell 1 gir en oversikt over hvordan en kan definere fem kategorier for hver av disse parametrene, men kategoriene må tilpasses analysens formål og omfang. I (Utne et al., 2009) har vi forenklet noen av kategoriene, fra intervall til punkttestimater, fordi beregningsalgoritmene da blir mer intuitive og enklere å forstå. I det følgende, bruker vi kategorier som er konsistente med DECRIS-verktøyet InfraRisk, noe som gjør beregningene litt mer kompliserte. For enklere forklaring av beregningene, se (Utne et al., 2009).

Tabell 1: Kategorier for F, P, E og D.

Kat.	Frekvens	Sannsynlighet	Omfang	Varighet
1	Mindre enn en gang pr 1000 år	10^{-4}	Uvesentlig	< 1 t
2	En gang pr 100-1000 år	10^{-3}	Moderat	1 t – 6 t
3	En gang pr 10-100 år	10^{-2}	Medium	6 t – 48 t
4	En gang pr 1-10 år	10^{-1}	Stort omfang	48 t– 1 uke
5	En gang eller mer pr år	1	Katastrofalt omfang	> 1 uke

Kategori 1 omfatter hendelser med frekvens sjeldnere enn hvert 1000 år, en sannsynlighet på 10^{-4} , omfanget til å være uvesentlig og varigheten til å være mindre enn en time. Kategori 1 inkluderer altså de mest trivielle hendelsene. I motsatt ende av skalaen har vi kategori 5, altså de hendelsene med en frekvens på en gang eller mer per år, med sannsynlighet tilnærmet lik en, med katastrofalt omfang, og med varighet over en uke. Bruk av kategorier som vist i tabell 1, forenkler risikoberegningene, men utfordringen kan være å avgjøre innholdet i kategoriene, for eksempel hvilken varighet som tilsvarer hvilken sannsynlighet. Kategoriene i tabell 1 er gitt på en logaritmisk skala.

Første trinn i den semi-kvantitative analysen er å estimere parameterne $\langle F, E, D \rangle$ for den uønskede hendelsen (ulykkescenarioet) og $\langle P, E, D \rangle$ for hver følgehendelse (node). Vi må ta i betraktning *E* og *D* på en kvalitativ måte når vi beregner sannsynligheter (frekvenser): Et stort omfang og lang varighet kan påvirke sannsynligheten til en følgekonsekvens.

Siden alle kategoriene i tabell 1 er gitt på en logaritmisk skala, er det naturlig å eksponensiell transformasjon for å finne tilhørende verdier som svarer til ”virkelige” verdier. Når det gjelder frekvensen for selve ulykkescenarioet benyttes følgende transformasjon:

$$f = 10^{F-4.5} \quad (1)$$

Formel 1 viser at dersom en hendelse for eksempel har $F = 2$, er et frekvensmål i betydningen forventet antall forekomster per år gitt ved det geometriske snittet av intervallene i tabell XX, det vil si $f = 316$ år.

Den betingete sannsynligheten for at følgehendelsene vil inntreffe, kan en sette lik

$$p = 10^{P-5} \quad (2)$$

Tilsvarende får en for $P=3$, at den reelle verdien er $p=10^{-2}$, det vil si hendelsene skjer med ca hundre års mellomrom.

”Virkelig verdi” av omfanget kan for eksempel beregnes fra:

$$e = 10^E \quad (3)$$

Ved å bruke formel (3) tilsvarende kategori 1 (uvesentlig) at 10 personer blir berørte, mens kategori 4 (katastrofalt omfang) tilsvarende 100 000 personer.

For varighet kan vi bruke:

$$d = 6^{D-1.5} \quad (4)$$

Beregningsalgoritmen i (4) er utledet fra kategoriene for varighet i tabell 1. Ved for eksempel $D = 4$ blir $d = 88.5$ t, som ligger mellom 48 timer og 1 uke.

Deretter gjennomfører vi beregningene av risikoen knyttet til scenarioet og følgehendelsene. Siden vi til nå har konsentrert oss om frekvensen og sannsynlighetene, gjenstår beregningene av konsekvensene for å kunne estimere risikoen. Konsekvensberegningene begynner med å studere nodene til høyre i kaskadediagrammet, det vil si løvnodene. Løvnodene har ingen noder til høyre for seg, og er markert med en stiplet linje i figur 3. Når konsekvensene for hver løvnode er beregnet, må vi fusjonere konsekvensene for løvnodene sammen i en konsekvens for hver gren, eller fusjonsnode. Vi bruker ikke E og D i disse beregningene (unntatt for løvnodene), for å unngå å ta varighet og omfang i betraktning flere ganger for en SKF.

Når vi har beregnet konsekvensene for hver fusjonsnode, kan vi beregne risikoen for ulykkesscenarioet. I praksis betyr det at vi beveger oss fra venstre til høyre når vi vurderer frekvens og sannsynligheter (ved hjelp av omfang og varighet), og fra høyre til venstre når vi beregner konsekvensene, noe som er forskjellig fra hendelsestreakanalyse (ETA). Til slutt kan vi sammenstille totalrisikoen.

Beregningene gjennomføres altså som følger:

1. For løvnoder er den forventede konsekvensen:

$$C_j = 10^{P_j-5} \times 10^{E_j} \times 6^{D_j-1.5} \quad (5)$$

2. Når vi beregner risikoen for ulykkesscenarioet, ”fusjonerer” vi altså flere noder fra høyre til venstre. Først summerer vi konsekvensbidraget fra hver gren, og deretter multipliserer vi med det transformerte sannsynlighetsmålet. Det vil si at for fusjonsnode i er (forventet) konsekvens gitt ved:

$$C_i = 10^{P_i-5} \times \sum_j C_j \quad (6)$$

Der summasjonen går over de noder, j , som er direkte til høyre for node i , og som ”fusjonerer” i denne.

3. Når vi kommer til noden lengst til venstre, altså selve ulykkeshendelsen, kan totalrisikoen beregnes ved:

$$R = 10^{F-4.5} \times \sum_j C_j \quad (7)$$

der summasjonen nå er over alle noder, j , direkte til høyre for ulykkeshendelsen, og vi har at $C = \sum_j C_j$ er total konsekvens, gitt som antall forventede persontimer tapt eller berørt (som følge av svikt i infrastrukturtenester). Frekvensen til scenariet er gitt i (1), og som vi ser av (7) er risikoen gitt som $R = f \times C$.

3.5.1 Vekting og interaksjonseffekter

I fremgangsmåten beskrevet over, behandles alle SKF'ene som like viktige. I noen tilfeller kan det være at vi ønsker å vektlegge at svikt i noen SKF'er er verre enn i andre. Da kan vi bruke en vektingsprosedyre ved:

$$C_j = w_j \times 10^{P_j-5.0} \times 10^{E_j} \times 6^{D_j-1.5} \quad (8)$$

C_j er forventet konsekvens, mens w_j er en vektfaktor som gjenspeiler viktigheten til SKF $_j$. I figur 7 har vi brukt vektfactorer for å illustrere at noen noder er mer kritiske enn andre.

Vi kan også ta hensyn til interaksjonseffekter som gjenspeiler at konsekvensen av å miste to SKF'er som følge av en fellesfeil, er mer alvorlig enn simpelthen bare å summere SKF'ene (når de svikter individuelt): Tap av jernbanetransport er for eksempel verre dersom vegtransporten også svikter. En måte å integrere slike interaksjonseffekter på kan være å øke omfangsmålet, E . En grov måte kan være å øke alle E_j med en enhet når det er kombinerte effekter. Dersom effektene er sterke, kan vi øke E_j med to enheter, og så videre.

Ved å ikke beregne interaksjonseffekter, kan vi lage et numerisk mål på slike kombinerte effekter. Forholdet mellom denne risikoen (uten interaksjonseffekter), og risikoen hvor interaksjonseffektene er tatt hensyn til, gir et kvantitativt uttrykk for ”styrken” til den ikke-lineære interaksjonseffekten.

I noen tilfeller kan det være at vi avdekker at mer enn en SKF berører en annen SKF, for eksempel at tap av IKT og strømforsyning begge forårsaker svikt i jernbanetransporten. Ved å bruke vektorer kan man ta i betraktning at dette er en mer kritisk situasjon enn tap av én SKF, og at en mer detaljert analyse er nødvendig, for eksempel feiltreanalyse (FTA).

I de tilfellene hvor vi finner at vi trenger mer informasjon, kan vi gjøre en mer detaljert kvantitativ analyse. Hvis ikke, hopper vi direkte til trinn 6.

3.6 Trinn 4: Kvantitativ analyse

I en kvantitativ analyse kan vi bruke feiltreanalyse, hendelsestreanalyse og nettverkmodeller av kapasiteten til en infrastruktur. Som nevnt av Kröger (2008), har metoder som FTA ulemper i forhold til analyse av komplekse avhengigheter. Like fullt, for å undersøke noder i

kaskadediagrammet i detalj, bør bruk av FTA og ETA ikke være mer komplisert enn i de fleste andre situasjoner der FTA er nyttig. FTA er for eksempel brukt i en studie av (Volkanowski et al., 2009) til å beregne påliteligheten til kraftforsyning.

3.7 Trinn 5: Vurder analyse og angi risikoreduserende tiltak

Når risikoen til ulykkesscenarioet har blitt analysert, kan vi vurdere i hvilken grad scenarioet kan oppstå på andre steder, og om risikoen for alternative steder også bør analyseres. Behov for eventuelle risikoreduserende tiltak må også vurderes, for eksempel behov for nye eller flere barrierer som redundans.

4 Illustrasjon av metoden – Case kulvert ved Oslo S

I dette avsnittet gir vi et eksempel på hvordan metodikken skissert i del tre kan anvendes.

4.1 Scenariobeskrivelse - Fellesføringer

Til å illustrere metoden bruker vi ett av de fire scenarioene valgt ut for detaljanalyse i fase 1 av DECRIS-metoden: Hendelse i ”fellesføringer” – Case: Kulvert Oslo S (se notat 5).

Vårt ulykkesscenario er basert på en hendelse på Oslo S som skjedde 27. november 2007: En kabelbrann på Oslo Sentralstasjon (Oslo S) førte til ca. 20 timers stans i all togtrafikk på Østlandet og bortfall av tele- og datatrafikk for et stort antall kunder i ca. 10 timer. Årsaken til kabelbrannen skyltes gravearbeid i en grøft med høyspenningskabler, der en kabel ble skadet (DSB, 2008). Merk at vi ikke bruker dette kulverteteksempelet til ulykkesgranskning av hva som virkelig skjedde den dagen, men som underlag til å analysere relevante avhengigheter og mulige konsekvensutfall av et slikt type scenario.

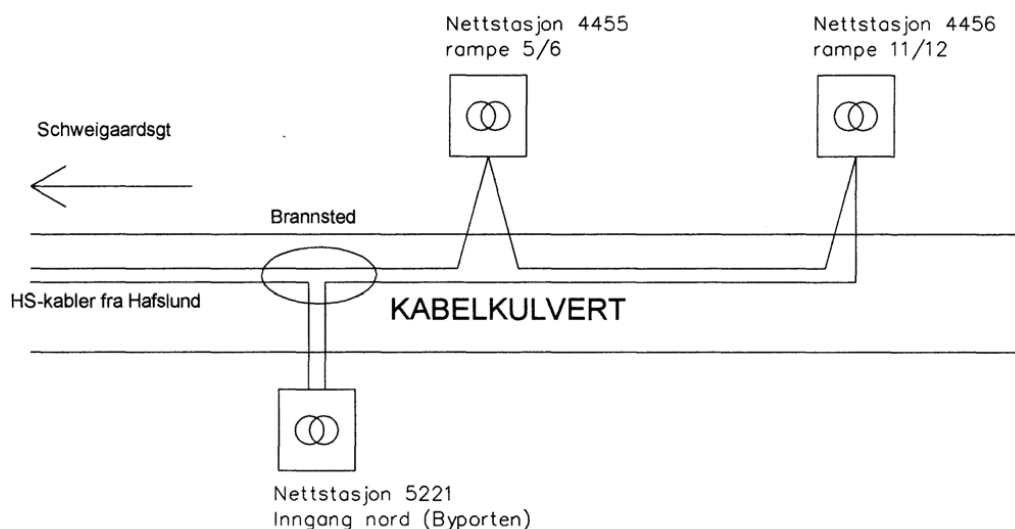
I kulverten ligger en rekke SKF-enheter, vist i figur 4:

a) Strømforsyningskabler.

De viktigste kablene er angitt i figur 4. Det er to høyspentkabler som gir strøm til tre nettstasjoner (4455, 4456 og 4455), og en av disse er viktig for togframføring. En kabel for reservekraftforsyning ligger i samme kulvert. Vi ser at selv om vi har redundans, så kan en kabelbrann føre til svikt i strømforsyning siden alle kablene ligger i samme kulvert.

b) Lavspenningskabler/IKT.

De viktigste av disse antas å være sambandskabler til BaneTele utstyr, (3. etasje Oslo S).

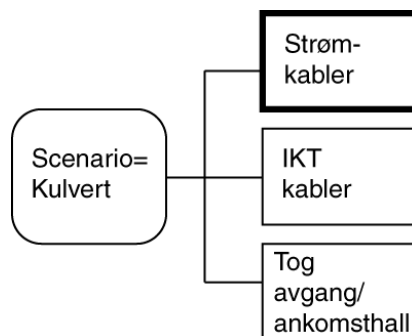


Figur 4. Viktige elektriske kabler i kulverten, (fra (DSB, 2008)).

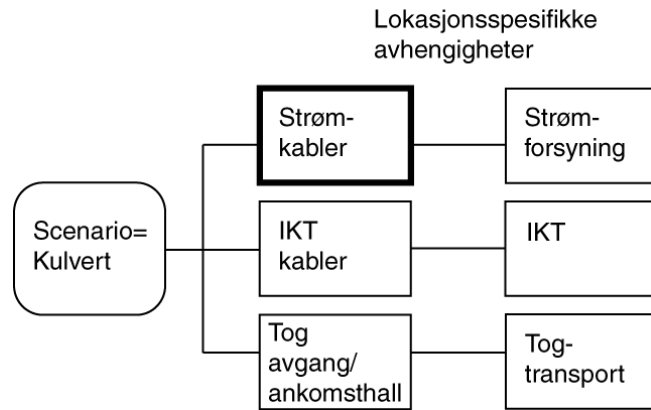
4.2 Analyse av avhengigheter

I del tre av notatet nevnte vi en del relevante spørsmål som kan brukes til å avdekke avhengigheter:

- Kan scenarioet forårsake tap av en SKF på grunn av den fysiske lokasjonen til systemet eller utstyret?
 - I vårt eksempel har vi kabler i kulverten som gir lokasjonsspesifikke avhengigheter for strømforsyning og for IKT (figur 5).
- Er det lokasjoner som for eksempel kan trues på grunn av brann?
 - I hendelsen på Oslo S spredde røyk seg fra brannen i kulverten til Oslo S jernbanestasjon (ankomst/avgangshallen). Dette illustrerer en lokasjonsspesifikk avhengighet mellom strømforsyning/IKT og togtransport (figur 6).
- Hva er de funksjonelle avhengighetene mellom SKF'ene avdekket i spørsmålene over og andre berørte SKF'er?
 - Viktige telefonsystemer krever strømforsyning. Dette betyr at det er en funksjonell avhengighet mellom SKF strømforsyning og SKF IKT (figur 7).



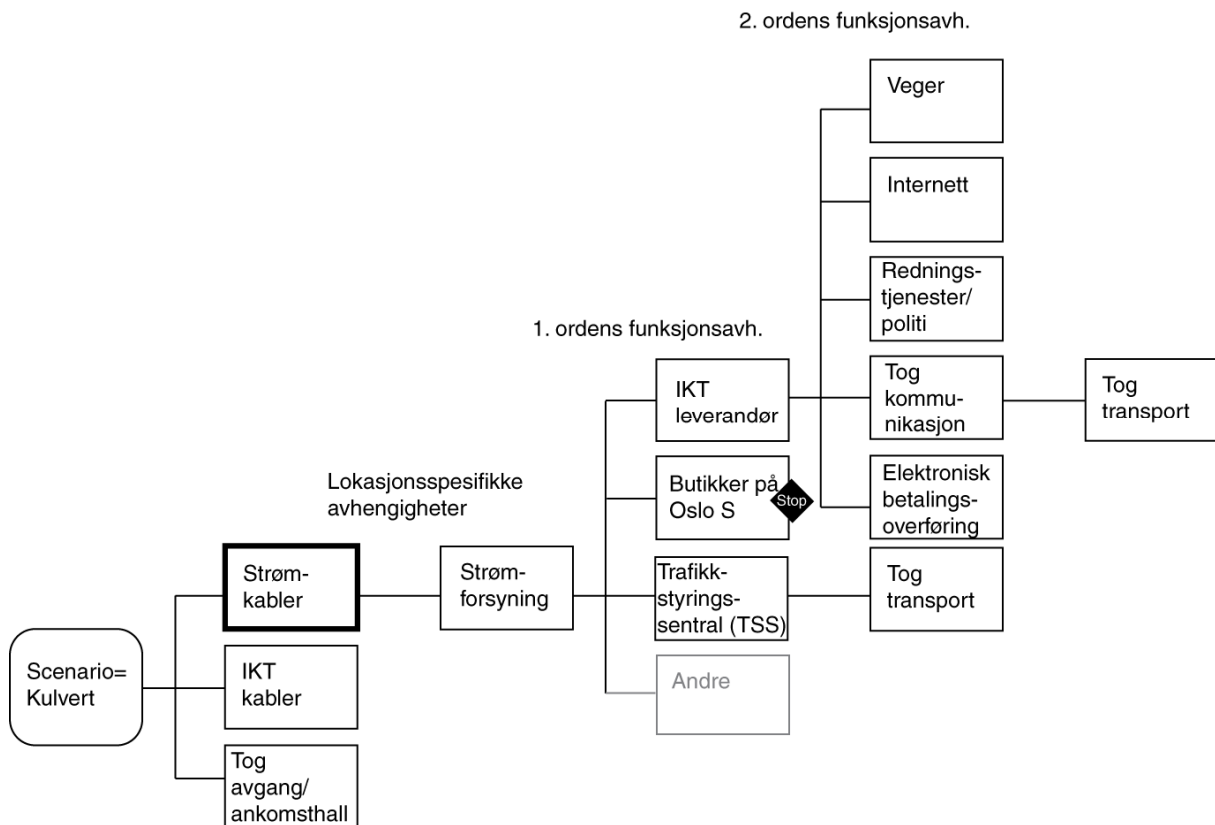
Figur 5. Komponenter og systemer som rammes umiddelbart. Svart ramme markerer redundans.



Figur 6. Lokasjonsspesifikke avhengigheter.

De lokasjonsspesifikke avhengighetene er vist i figur 6, hvor vi har spesifisert de relevante SKF'ene, strømforsyning, IKT og togtransport, og videre koblet disse til deres fysiske objekter, det vil si kabler og ankomst/avgangshall (siden det er disse objektene som berøres umiddelbart).

Vi kan fortsette å avdekke avhengighetene og konsekvensene videre ut i hendelseskjeden ved å stille liknende spørsmål. I figur 7 ser vi at veger kan berøres dersom IKT svikter. Årsaken kan være mulig tap av kontroll med trafikklys, noe som kan medføre trafikkproblemer og kork. Hypotetisk sett kan en trafikkork forårsake en brokollaps, på grunn av overlast. En brokollaps kan forårsake lokasjonsspesifikke avhengigheter mellom vegtransporten og broen. Likevel vil vi i vårt eksempel fokusere på funksjonsavhengighetene som følger av de første lokasjonsspesifikke avhengighetene.



Figur 7. Kaskadediagram for kulverteksempellet med fokus på svikt i strømforsyning.

Ved å fortsette å stille spørsmålene, kan vi som nevnt avdekke type kobling og responsatferd til infrastrukturene:

- Forårsaker avhengigheten en total eller delvis svikt i SKF'en?
 - For eksempel, dersom strømkabelen i kulverten brenner, hva er sannsynligheten for at det fortsatt vil være strøm til kunder? Vil redundansen ødelegges?
 - Finnes det barrierer som kan motvirke fellesfeil eller kaskadefeil?
 - Barrierer knyttet til vårt kulvertscenario kan for eksempel dreie seg om:
 - Fysisk beskyttelse av fremføringslinjer i kulvert
 - Adgangskontroll (jfr. sabotasje)
 - Redundans, for eksempel krafttilførsel
 - Atskillelse/separering mellom ulike SKFer som kan berøres
- En viktig redundans i det aktuelle tilfelle er en kabel for reservekraft til den viktige nettstasjonen 4455. Imidlertid er verdien av denne redundansen forholdsvis begrenset da reservekabelen ligger i samme kulvert som hovedforsyningen til denne nettstasjonen. Trafikkstyringssentralen (TSS) og Jernbaneverkets (JBV) utstyr på Oslo S er også forsynt med UPS (med noe utilstrekkelig kapasitet ved bortfall av reservekraft).
- Hvilke konsekvenser er sannsynlige som følge av tap av de ulike SKF'ene?
 - I vårt eksempel fokuserer vi på tap av strømforsyning.

Figur 4 skisserer hvordan en del viktige infrastrukturenheter fysisk sett avhenger av kabler i kulverten. Generelt skal en sjekke om den aktuelle framføringen ligger nær f.eks:

- Trafikknutepunkt
- Trafikksentraler
- Transportåre (veg/bane).

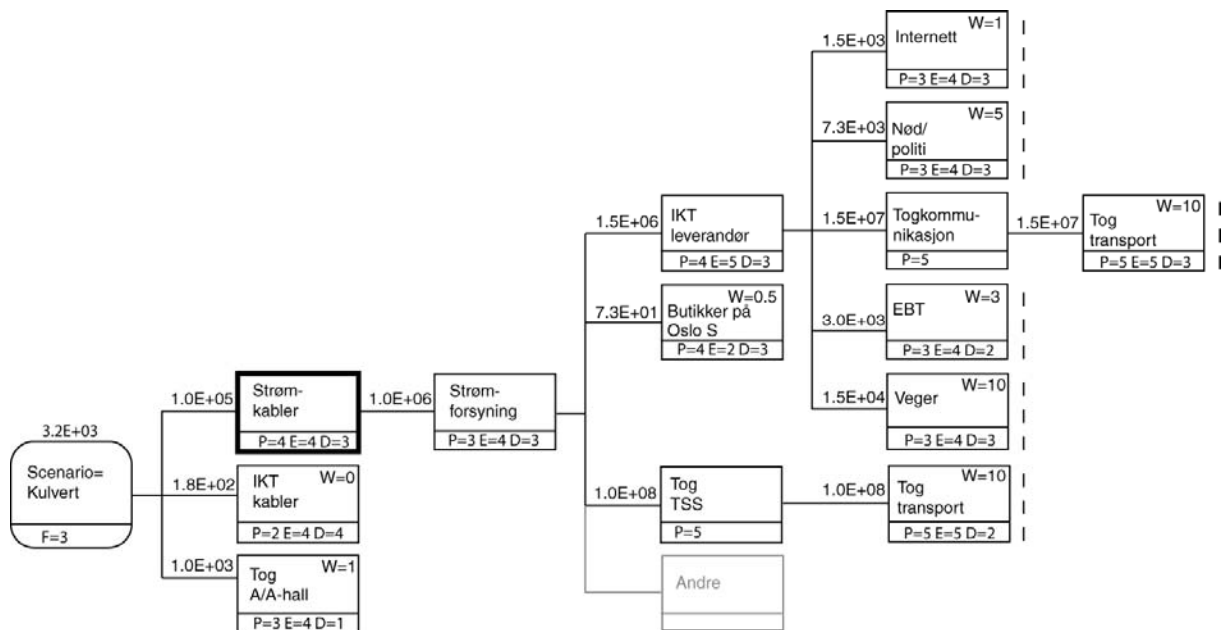
Den aktuelle kabelkulverten ligger nær:

- Trafikknutepunktet, Oslo S (under hendelsen i november 2007 måtte avgangshallen evakueres pga røyk)
- Trafikkstyringssentralen (TSS) i 9. etasje av Oslo S (måtte også evakueres under aktuelle hendelse)
- T-banestasjon Oslo S
- En del veier

Denne fysiske nærheten kan resultere i evakuering (ved brann/røyk) evt. ødeleggelse (brann/eksplosjon). Figur 7 viser funksjonelle avhengigheter mellom strømforsyning, nettstasjoner og togtransport (via trafikkstyringssentralen).

4.3 Semi- kvantitativ analyse

Figur 8 viser kaskadediagrammet for vårt eksempel, med mulige sannsynligheter, omfang og varighet $\langle P, E, D \rangle$. For noen noder setter vi $P=5$, på grunn av koblinger mellom nodene, for eksempel mellom TSS og togtransport. Når TSS svikter vet vi at togtrafikken rammes, uansett varighet og omfang.



Figur 8. Kaskadediagram med verdier for $\langle P, E, D \rangle$. EBT står for elektronisk betalingsterminal.

4.4 Risikoreduserende tiltak

I vårt eksempel kan det være relevant å vurdere andre kulverter og risikoen for svikt i forhold til kulverten ”vår”. Dermed kan vi få oversikt over totalrisikoen knyttet til risikoen for et slikt type scenario:

- Er vår kulvert bedre eller verre enn andre kulverter med hensyn til avhengigheter og konsekvenser?
- Er det behov for å analysere andre kulverter?

Forslag til risikoreduserende tiltak, i prioritert rekkefølge, bør inkluderes i analysen.

5 Oppsummering

Analyse av avhengigheter bør være en integrert og viktig del av en ROS-analyse. Avhengigheter påvirker totalrisikoen, og påvirker derfor behovet for risikoreduserende tiltak.

Det er flere utfordringer knyttet til utvikling av metoder for modellering av avhengigheter, blant annet behovet for mer kunnskap, data og dataverktøy. Fremgangsmåten beskrevet i dette notatet kan bli tidkrevende for store og komplekse systemer, noe kritiske infrastrukturer gjerne er. Likevel kan vår fremgangsmåte tilpasses ressursnivå, siden den er mulig å gjennomføre på en mer overordnet og grov måte kvalitativt eller semi- kvantitativt. Vi foreslår også en logisk måte å strukturere avhengighetene på ved å bruke kaskadediagram, og ikke de mer kaotiske ”spaghetti-diagrammene”, hvor ett er vist i figur 2.

Det gjenstår fortsatt videre arbeid med metodikken. I figur 7 og 8 ser vi at én SKF, togtransport, er representert av to noder. Dette er noe vi ikke har fokusert på i dette eksempelet, det vil altså si hvordan vi skal håndtere beregninger når en SKF er representert flere ganger i samme kaskadediagram.

Metoden bør også testes på andre typer scenarioer for å avdekke svakheter og legge til rette for mulige forbedringer.

6 Referanser

- Balducelli, C., Bologna, S., Di Pietro, A. and Vicoli, G. (2005) Analysing interdependencies of critical infrastructures using agent discrete event simulation. *International Journal of Emergency Management*, 2, pp 306-318.
- Benoît, R. (2004) A method for the study of cascading effects within lifeline networks. *International Journal of Critical Infrastructures*, 1, pp 86-99.
- Brown, T., Beyeler, W. and Barton, D. (2004) Assessing infrastructure interdependencies: the challenge of risk analysis for complex adaptive systems. *International Journal of Critical Infrastructures*, 1, pp 108-117.
- DSB (2008) Fire in cable culvert. Oslo Central Station (In Norwegian: Brann i kabelkulvert. Oslo Sentralstasjon 27.11.2007), Tønsberg, Directorate for Civil Protection and Emergency Planning.
- Johansson, J. (2007) Risk and Vulnerability Analysis of Large-Scale Technical Infrastructures, *Department of Industrial Electrical Engineering and Automation*, Lund University.
- Johansson, J. and Jönsson, H. (2008) A model for vulnerability analysis of interdependent infrastructure networks, in: Matorell et al. (ed) *ESREL 2008*, Valencia, Spain, Taylor & Francis Group, London.
- Kröger, W. (2008) Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools. *Reliability Engineering and System Safety*, 93, pp 1781-1787.
- McDaniels, T., Chang, S., Peterson, K., Mikawoz, J. and Reed, D. (2007) Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependencies. *Journal of Infrastructure Systems*, 13, pp 175-184.
- NOU (2006) Norges offentlige utredninger 2006:6. Når sikkerheten er viktigst. Beskyttelse av landets kritiske infrastrukturer og kritiske samfunnsfunksjoner in: Justis- og politidepartementet (ed) Oslo.
- Peerenboom, J. P., Fisher, R. E., Rinaldi, S. M. and Kelly, T. K. (2002) Studying the chain reaction. *Electric perspectives*, 27, pp 22-35.
- Perrow, C. (1999) *Normal accidents. Living with high-risk technologies*, New Jersey, USA, Princeton University Press.
- Rinaldi, S. M., Peerenbom, J. P. and Kelly, T. K. (2001) Identifying, Understanding and Analyzing Critical Structures Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, pp 11-25.
- Utne, I. B., Hokstad, P. and Vatn, J. (2009) A structured approach to modeling interdependencies in risk analysis of critical infrastructures, *ESREL 2009*, Praha, Tsjeckia.
- Volkanowski, A., Cepin, M. and Mavko, B. (2009) Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, pp 1116-1127.
- Zimmerman, R. (2001) Social Implications of Infrastructure Network Interactions. *Journal of Urban Technology*, 8, pp 97-119.
- Zimmerman, R. (2004) Decision-making and the Vulnerability of Interdependent Critical Infrastructure, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- Zimmerman, R. and Restrepo, C. E. (2006) The next step: quantifying infrastructure interdependencies to improve security. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2, pp 215-230.