World Class Maintenance

TÜVRheinland®
safetec

Ragnar Aarø, Sjefrådgiver, Safetec

6.2 – RAMS (pålitelighet og tilgjengelighet)

Modul 6 – Vedlikeholdsoptimalisering

World Class Maintenance

Innhold

1. Pålitelighet – tilgjengelighet – vedlikeholdsvennlighet – sikkerhet (RAMS) – hva er det?

2. Feil – feilmode – klassifisering
3. Sviktmodeller
4. Strukturfunksjonen
5. Feiltreanalyse (kort introduksjon)

To innlegg som må sees i sammenheng

6.2 RAMS

- Hva er RAMS (Reliability – Avialability, Maintenability – Safety)
- Hvordan beregne pålitelighet=
- Mål for pålitelighet
- Systemklassifisering, komponent-, system- og strukturpålitelighet
- Bruk av systemanalyser – strukturfunksjon

6.3 ANALYSEMETODER

- Analytiske metoder: FTA, HAZOP, Hendelsestre
- Klassiske feilmetoder (eks badekarkurven)
- Betydningen av MTTR, MTTF, MTBF
- RBD – serie og parallellsystemer
- Rotårsaksanalyser

TÜVRheinland®
safetec

World Class Maintenance

TÜVRheinland®
safetec

Pålitelighet – tilgjengelighet – vedlikeholdsvennlighet – sikkerhet (RAMS) – hva er det?

World Class Maintenance

Pålitelighet – tilgjengelighet – vedlikeholdsvennlighet – sikkerhet

- **Pålitelighet*):** Enhetens evne til å oppfylle krevd funksjon under gitte forhold innenfor et gitt tidsintervall
- **Tilgjengelighet*):** Enhetens evne til å være i en tilstand til å utføre oppgaven under gitte forhold som det kreves og slik det kreves, forutsatt at de nødvendige eksterne ressursene er stilt til rådighet
- **Vedlikeholdsvennlighet*):** Enhetens evne under gitte bruksforhold til å opprettholde eller gjenopprette sin tilstand slik at den kan utføre krevd funksjon, når vedlikeholdet utføres under gitte forhold og med gitte prosedyrer og ressurser
- **Sikkerhet:** Omhandler systems risiko for å skade mennesker, miljø eller andre systemer i løpet av systemets levetid (enkelte omtaler gjerne dette som «trygghet»)

- **RAMS:** Reliability – availability – maintainability – safety

- *«Fokuset for fagområdet RAMS er å sikre at tekniske systemer bevarer økonomi, miljø og helse for eierne, brukerne og omgivelsene av det tekniske systemet.»* (Wikipedia)

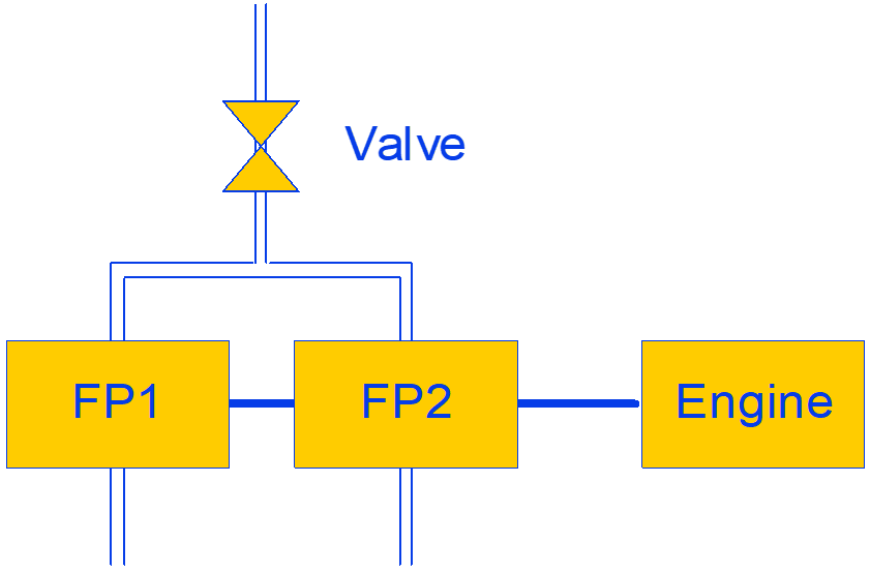
*) Fra NS-EN 13306:2017 – «Vedlikehold – Vedlikeholdsterminologi»

TÜVRheinland® safetec

Pålitelighet – av hva?

- Komponent- og systempålitelighet
  - Fokus i denne presentasjonen
  - Terminologi
  - Metoder og modeller

- Strukturpålitelighet
  - Last-styrke modeller
- Menneskelig pålitelighet
- Programvarepålitelighet



Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Pålitelighet (mer presis definisjon)

- ***En enhets evne til å oppfylle krevd funksjon under gitte forhold (miljø- og operasjonelle betingelser) innenfor et gitt tidsintervall***

- Også ordet «driftssikkerhet» («dependability») benyttes
  - Driftssikkerhet = Evnen (egenskapen) til et system til å utføre sin tiltenkte funksjon over en gitt tidsperiode, under gitte forhold uten prestasjonsnedsetting pga. feil/svikt og vedlikehold

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

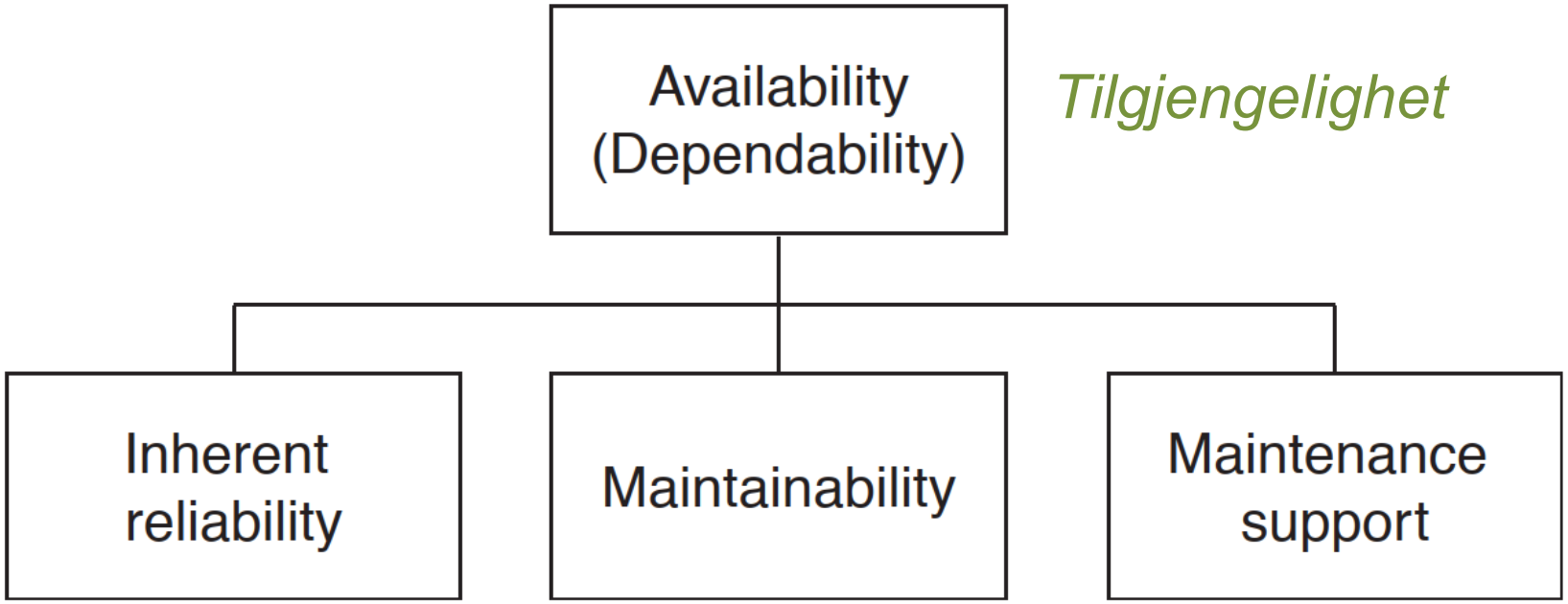
Hvordan måle (kvantifisere) pålitelighet?

- Midlere tid til feil (MTTF; mean time to failure)
- Antall feil per tidsenhet (feilrate)
- Sannsynligheten for at en enhet ikke svikter i et gitt tidsintervall (0 til t) (overlevelsessannsynlighet)
- Sannsynligheten for at enheten kan utføre tiltenkt funksjon ved tid t (tilgjengelighet)

- Relevant å skille mellom pålitelighet av «reparerbare» vs. «ikke-reparerbare» systemer

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Tilgjengelighet – "Reparerbare" systemer



Tilgjengelighet

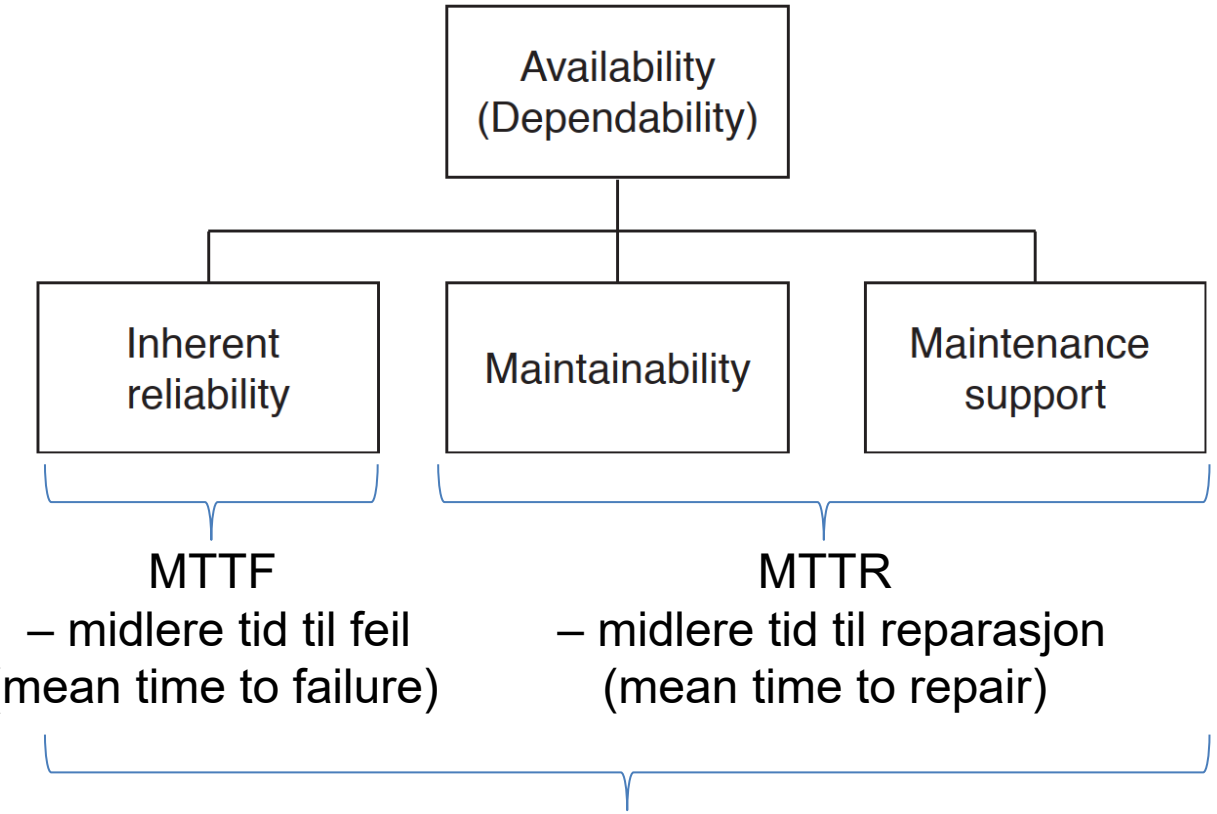
Iboende (innebygd) pålitelighet

Vedlikeholds-vennlighet

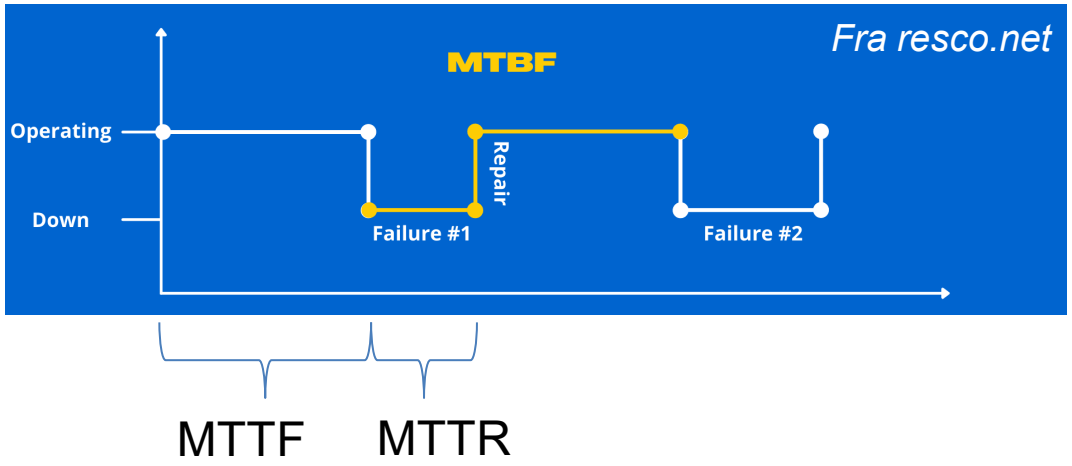
Vedlikeholdsstøtte

Kilde: «System Reliability Theory» (Rausand og Høyland)

Tilgjengelighet – MTTF og MTTR



$$Tilgjengelighet = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$



Sammenheng feilrate og MTTF – og MTTR/tilgjengelighet

- Feilrate (strengt tatt "sviktintensitet"): $\lambda = \frac{1}{MTTF}$
- Eksempel:
  - Anta MTTF = 17 520 timer (dvs. to kalenderår)
  - => $\lambda = \frac{1}{17\ 520\ timer} = 5.7 \cdot 10^{-5}\ per\ time$
  - Feilrater oppgis gjerne per 10^6 timer (som er ca/drøyt 100 kalenderår)
    - => $\lambda = 57 \cdot 10^{-6}\ per\ time$ (– altså ca 57 feil i løpet av 100 kalenderår)

- Anta så MTTR = 72 timer (3 døgn)
- => $\boldsymbol{Tilgjengelighet}\ (gjennomsnittlig) = \frac{MTTF}{MTTR+MTTF} = \frac{17\ 520\ timer}{17\ 520\ timer+72\ timer} = 0.996 = 99.6\ \%$

World Class Maintenance

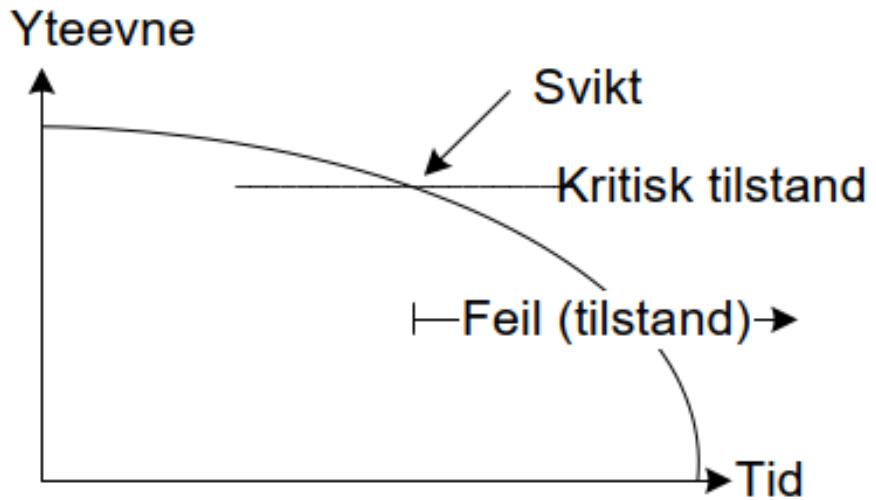
TÜVRheinland®
safetec

Feil – feilmode – klassifisering

Feil og feilklassifisering

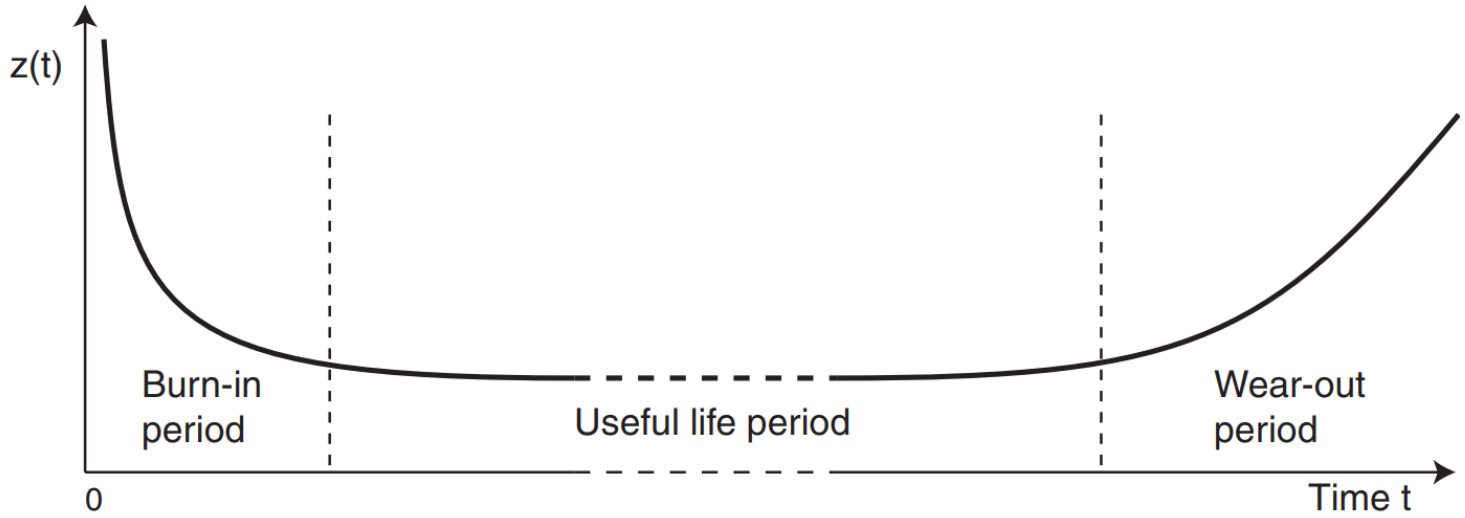
- Merk forskjell på engelsk og norsk
  - Failure = Svikt (dvs tidspunkt/hendelse)
  - Fault = Feil (tilstand)

- Svikt = Opphør av mulighet til å utføre krevd funksjon
- Feilmode (feilmodus) = Effekten av en svikt slik den observeres



Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

«Badekarskurven»



- Mekaniske komponenter er ofte antatt å ha feilrate-funksjon med utseende som en badekar
- Observér:
  - I "useful life period" er feilraten antatt å være konstant
  - Dette er en mye (nesten alltid) brukt antagelse når vi gjør kvantifiseringer av påliteligheten
  - Innebærer at det er viktig å ha så god som mulig kontroll på at en er i «useful life period»

Kilde: «System Reliability Theory» (Rausand og Høyland)

Sentrale begreper

- **Svikt** (Failure)
  - Tap av enhets evne til å oppfylle krevd funksjon
- **Sviktmodus***) (Failure mode)
  - Måten en enhet mister evnen til å oppfylle krevd funksjon på
  - Generelt to typer feilmoder:
    - Komponentens tilstand kan ikke endres
    - Komponentens tilstand endres utilsiktet

  - *Eksempel (fjernoperert ventil):*
    - *Åpner ikke på kommando (Fail to open on command - FTO)*
    - *Stenger ikke på kommando (Fail to close on command - FTC)*
    - *Lekkasje (gjennom ventilen) i lukket posisjon (Leakage in closed position - LCP)*
    - *Lekkasje til omgivelsene (Leakage to the environment - LTE)*

*) NS-EN 13306 anbefaler å ikke bruke termen «feilmode» på norsk

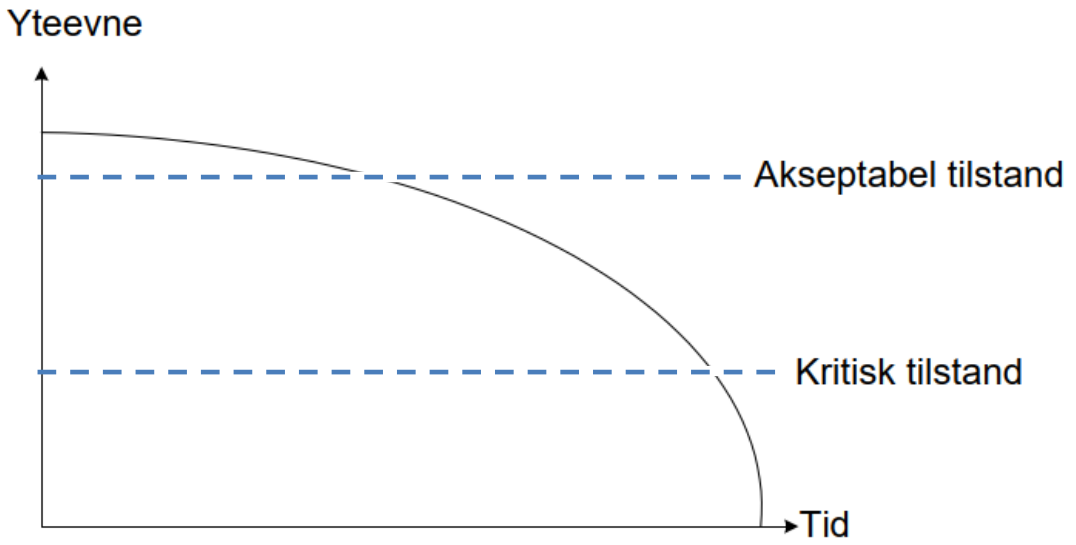
Sentrale begreper, forts.

- **Sviktårsak** (Failure cause)
  - Forhold knyttet til spesifikasjon, utforming, framstilling, installering, bruk eller vedlikehold, som fører til svikt
  - Feilårsak er svaret på ”Hvorfor feiler enheten?”
  - *Eksempler: Korrosjon, erosjon, utmatting, overbelastninger, vedlikeholdsintroduserte feil, operatørfeil, osv.*
- Sviktmekanisme (Failure mechanism)
  - Fysiske, kjemiske eller andre prosesser som kan føre til eller har ført til svikten
- *Eksempel, ventil:*
  - *Sviktmodus: ”Lekkasje gjennom ventil i lukket posisjon”*
  - *Sviktårsak: ”Korrosjon/erosjon på ventilsetet”*

Klassifisering av svikt

- **Plutselig** vs. **gradvis** svikt
  - ”Plutselig” relateres oftest til virker/virker ikke
  - ”Gradvis” relateres ofte til enheter som har en ytelse, eller enheter som har ”målefunksjon”

- ***Refleksjon***
  - Gi eksempler på ”Plutselig”
  - Gi eksempler på ”Gradvis”



Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Klassifisering, forts.

- **Skjult** vs. **åpenbar** feil
  - ”Skjult” relateres ofte til enheter som ikke etterspørres kontinuerlig
  - Åpenbar relateres enheter som etterspørres kontinuerlig, og svikt blir avdekket umiddelbart

- ***Refleksjon***
  - Gi eksempler på ”Skjult” funksjon
  - Gi eksempler på ”Åpenbar” funksjon

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Klassifisering, forts.

- **Fysiske** vs. **funksjonelle** svikt (feil)
  - Fysiske feil kan elimineres ved reparasjon, evt skifte av fysisk enhet
    - Naturlig aldring (innenfor design område)
    - Eksternt påtrykk
  - Funksjonelle feil relateres til feil design, feil plassering, feil bruk, osv.
    - Skifte av enhet vil ikke løse problemet

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

World Class Maintenance

TÜVRheinland®
safetec

Sviktmodeller

Sviktmodeller

- Binær-representasjon
  - Enheten er
    - enten i stand til å utføre tiltenkt funksjon (virker),
    - eller feiler i å utføre tiltenkt funksjon (feiltilstand).
  - Tilstanden til en enhet kan da beskrives som en **tilstandsvariabel** x(t)

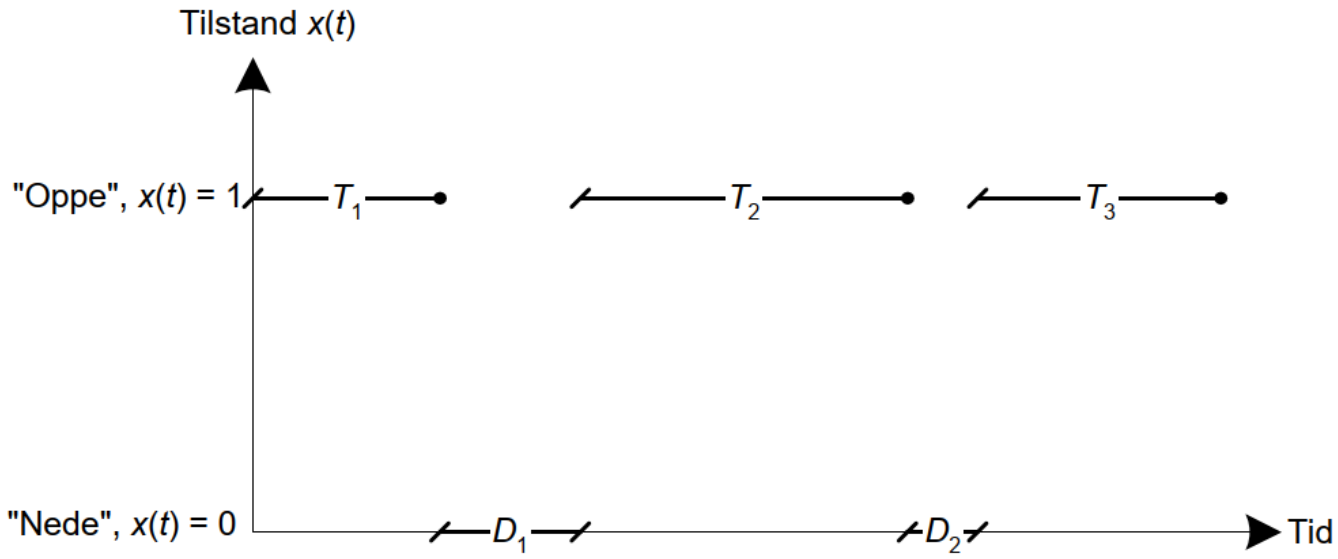
$$x(t) = \begin{cases} 1 \; om \; enheten \; er \; funksjonsdyktg \; ved \; tidspunkt \; "t" \\ 0 \; om \; enheten \; er \; i \; feiltilstand \; ved \; tidspunkt \; "t" \end{cases}$$

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Tidsperspektiv

- «Oppetider»: T_1, T_2 og T_3
- «Nedetider»: D_1 og D_2
- Disse tidene er tilfeldige («stokastiske»)
- Tilstandsvariabelen, *x(t)*, er også tilfeldig («stokastisk»), vi skriver *X(t)*

- Ofte antar vi
  - Oppetidene er uavhengige og identisk fordelt
  - Nedetidene er uavhengige og identisk fordelt
  - Oppetider og nedetider er uavhengig av hverandre



Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Forhold som påvirker oppe- og nedetidene

- Oppetidene
  - Innebygd komponentpålitelighet
  - Forebyggende vedlikehold (smøring, rengjøring, utskifting av deler, inspeksjon)
  - Driftsbetingelser
  - Eksternt påtrykk
  - Menneskelig interaksjon (feil eller skader introdusert under vedlikehold, feil bruk osv)
  - -med mere-

- Nedetidene
  - Reservedelshold og logistikk
  - Tilgjengelige vedlikeholdsresurser, beredskap
  - Vedlikeholdskompetanse
  - Intervall for funksjonstesting
  - -med mere-

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Sannsynlighet – sannsynlighetsregning

- «Hendelse» ➔ Noe som kan inntreffe – eller IKKE inntreffe
- «Sannsynlighet» er noe som sier uttrykkes med en verdi mellom 0 % og 100 %
  - Vi benytter helst verdier fra 0 til 1 (uttrykker ikke med prosenter)

- Vi skriver: **Pr(A)** (engelsk; «probability») for å uttrykke **sannsynligheten for at hendelsen A inntreffer**
  - Eks: Pr(”6-er”) = 1/6 (forutsatt «fair» terning og ett kast)

- Stokastiske variable, eller tilfeldige størrelser kan ta ulike verdier
- Fordelingsfunksjon, og sannsynlighetstetthet beskriver stokastiske variable

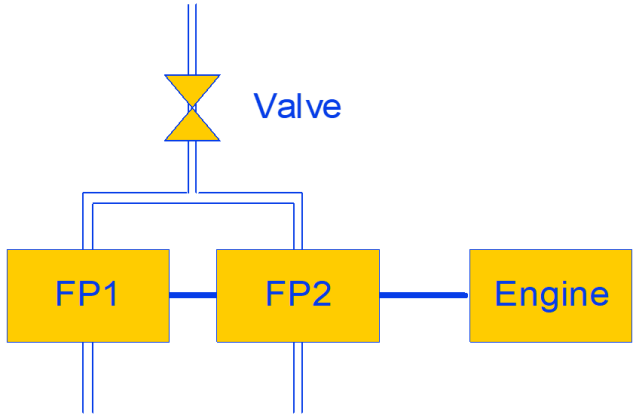
World Class Maintenance

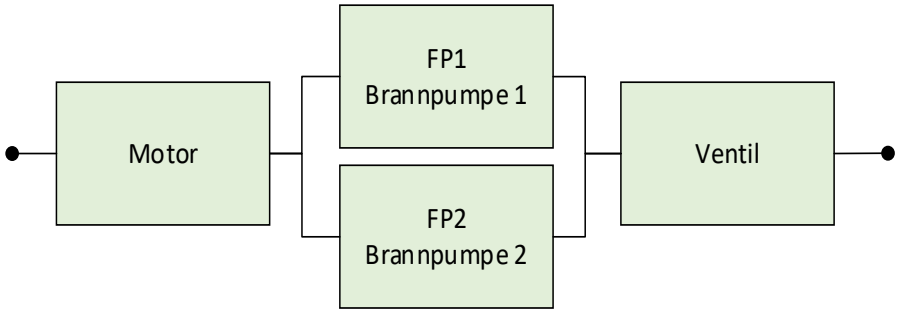
TÜVRheinland®
safetec

Strukturfunksjon

Pålitelighetsblokkdiagram *)

- Et funksjonsdiagram; «suksessdiagram»
- Viser sammenhengen mellom komponenters funksjonstilstand (at de «virker») og funksjonstilstanden til et system (eller til en funksjon)
- Eksempel: Brannvannssystem (funksjon: *«Gi tilstrekkelig vannmengde ved behov»*)





- Systemet/funksjonen fungerer om det er «kontakt» fra venstre til høyre i pålitelighetsblokkdiagrammet

*) *Engelsk; «reliability block diagram» – RBD*

Strukturfunksjon

- For komponenter har vi:

$$x(t) = \begin{cases} 1 \; om \; enheten \; er \; funksjonsdyktg \; ved \; tidspunkt \; "t" \\ 0 \; om \; enheten \; er \; i \; feiltilstand \; ved \; tidspunkt \; "t" \end{cases}$$

- For systemer kan vi tilsvarende definere:

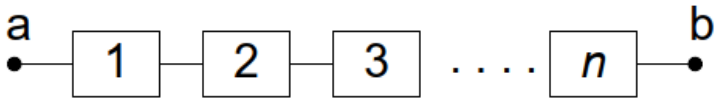
$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 \; om \; systemet \; er \; funksjonsdyktg \; ved \; tidspunkt \; "t" \\ 0 \; om \; systemet \; er \; i \; feiltilstand \; ved \; tidspunkt \; "t" \end{cases}$$

- Φ betegnes strukturfunksjonen, og avhenger av x'ene, dvs. komponentenes tilstand

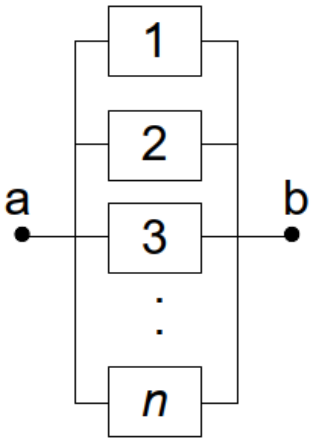
Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Strukturfunksjon for noen enkle strukturer

- For en seriestruktur:
  - $\Phi(x) = x_1 \cdot x_2 \cdot \cdots \cdot x_n$



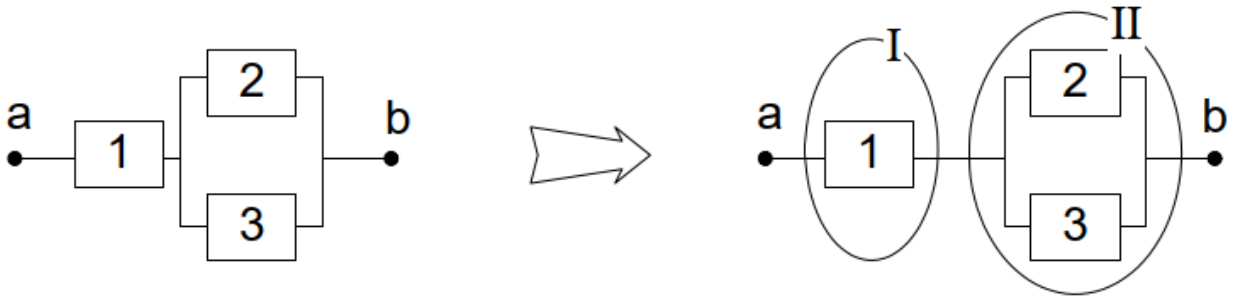
- For en parallellstruktur:
  - $\Phi(x) = 1 - (1 - x_1) \cdot (1 - x_2) \cdot \cdots \cdot (1 - x_n)$



- For strukturer som er sammensatt av serie og parallellstrukturer kan formlene ovenfor settes sammen – se eksempel på neste slide

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Eksempel: Strukturfunksjon for sammensatt struktur



- $\Phi(x) = \Phi_I \cdot \Phi_{II}$ fordi struktur I og II er i serie
- $\Phi_I(x) = x_1$
- $\Phi_{II}(x) = 1 - (1 - x_2) \cdot (1 - x_3)$ - siden komponent 2 og 3 er i en parallell-struktur
- Det vil si:
- $\Phi(x) = x_1 \cdot [1 - (1 - x_2) \cdot (1 - x_3)] = x_1x_2 + x_1x_3 - x_1x_2x_3$

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

Nytte av strukturfunksjonen - Systempålitelighet

- Dersom vi kjenner strukturfunksjonen (matematisk), og vi kjenner verdien på x-ene (komponenttilstandene), kan vi avgjøre om systemet fungerer ved å ”sette inn” x-verdier:
  - Sett inn
    - x = 1 om komponenten fungerer
    - x = 0 om komponenten er i feiltilstand
  - Resultat: Systemet fungerer om utregnet $\Phi=1$ – er i feiltilstand om utregnet $\Phi=0$

Systempåliteligheten

- Dersom vi kjenner strukturfunksjonen, og vi kjenner komponentpålitelighetene (p_1, p_2, …) kan vi sette disse inn på plassen til x’ene for å beregne systempåliteligheten
- MERK:
  - Komponentene må være uavhengige
  - Metoden er ”trygg” dersom vi ikke har ”repeterende” hendelser i strukturen
  - Dersom vi har repeterende hendelser i strukturen bør vi gange ut strukturfunksjonen, og stryke alle potenser i uttrykket, f eks $x_i^2 \rightarrow x_i$

Kilde: Prof. Jørn Vatn, NTNU

World Class Maintenance

TÜVRheinland®
safetec

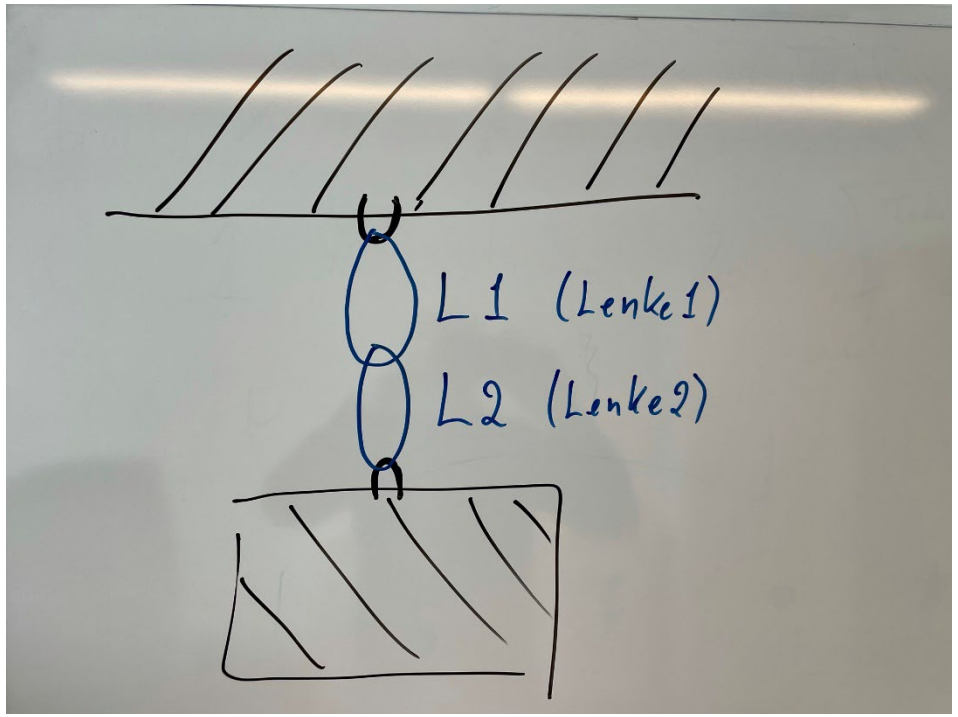
Feiltreanalyse (kort introduksjon)

Feiltreanalyse - Innledning

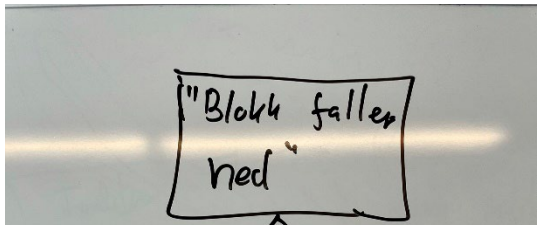
- Hva er et feiltre?
  - Et logisk diagram som viser sammenhengen mellom en uønsket hendelse i et system og årsakene til denne hendelsen.
  - Årsaker kan være miljøforhold, menneskelige feil, normale hendelser og komponentfeil.
  - Gir en god illustrasjon av kombinasjoner av feil og andre hendelser som kan føre til en uønsket hendelse.
- En feiltreanalyse kan brukes kvalitativt og/eller kvantitativt

Et enkelt feiltre

- En «blokk» er opphengt i taket i et kjede bestående av to lenker.
- Uønsket hendelse (TOPP-hendelse): *«Blokk faller ned»*

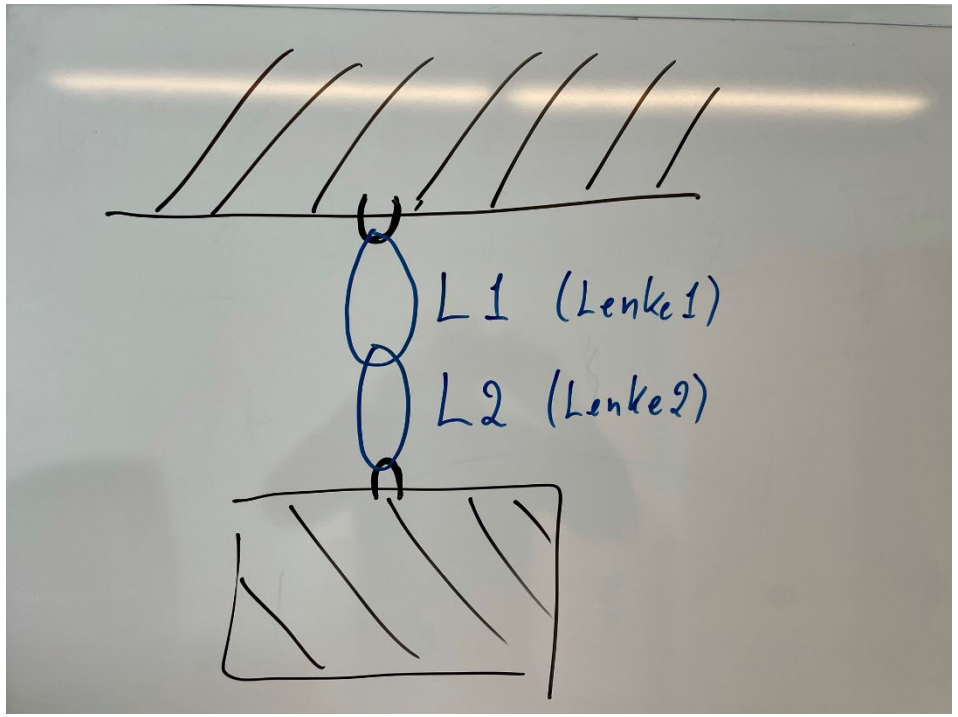


Systemskisse

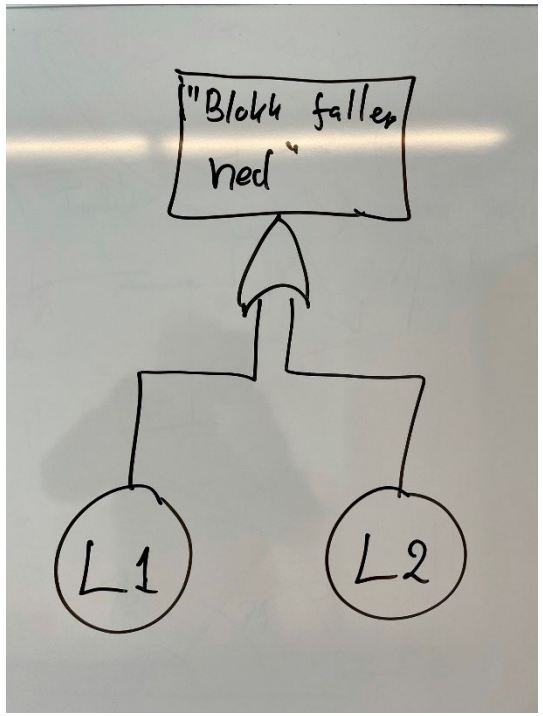


Et enkelt feiltre

- En «blokk» er opphengt i taket i et kjede bestående av to lenker.
- Uønsket hendelse (TOPP-hendelse): *«Blokk faller ned»*



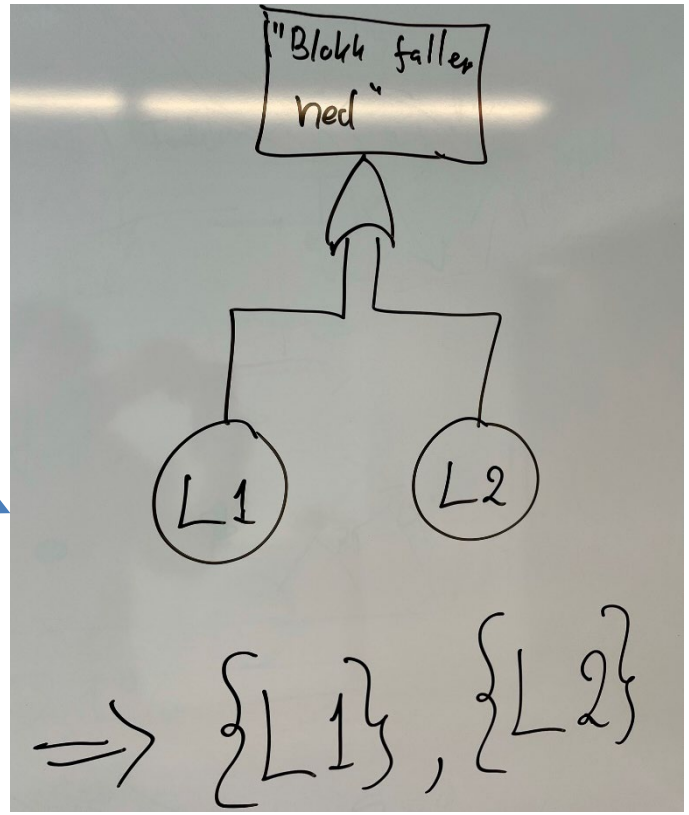
Systemskisse



Feiltre

Resultater fra en feiltreanalyse

- Liste over kombinasjoner av feil som medfører den uønskede hendelsen
  - miljøfaktorer
  - menneskelige feilhandlinger
  - normale hendelser
  - Komponentsvikt
- Sannsynlighet / frekvens av den uønskede hendelsen
- Liste over de mest betydningsfulle komponenter/hendelser



«Minimale kuttesett»

Gjennomføring av analyse

1. Definisjon av problem og randbetingelser
2. Konstruksjon av feiltreet
3. Bestemmelse av minimale kutt- og stimengder
4. Kvalitativ analyse av feiltreet
5. Kvantitativ analyse av feiltreet

Problem og randbetingelser

Problemet

- Definere den kritiske hendelsen som skal analyseres
- Bør alltid besvare:
  - Hva: *"Brann*
  - Hvor: *i motorrom*
  - Når: *ved normal operasjon"*

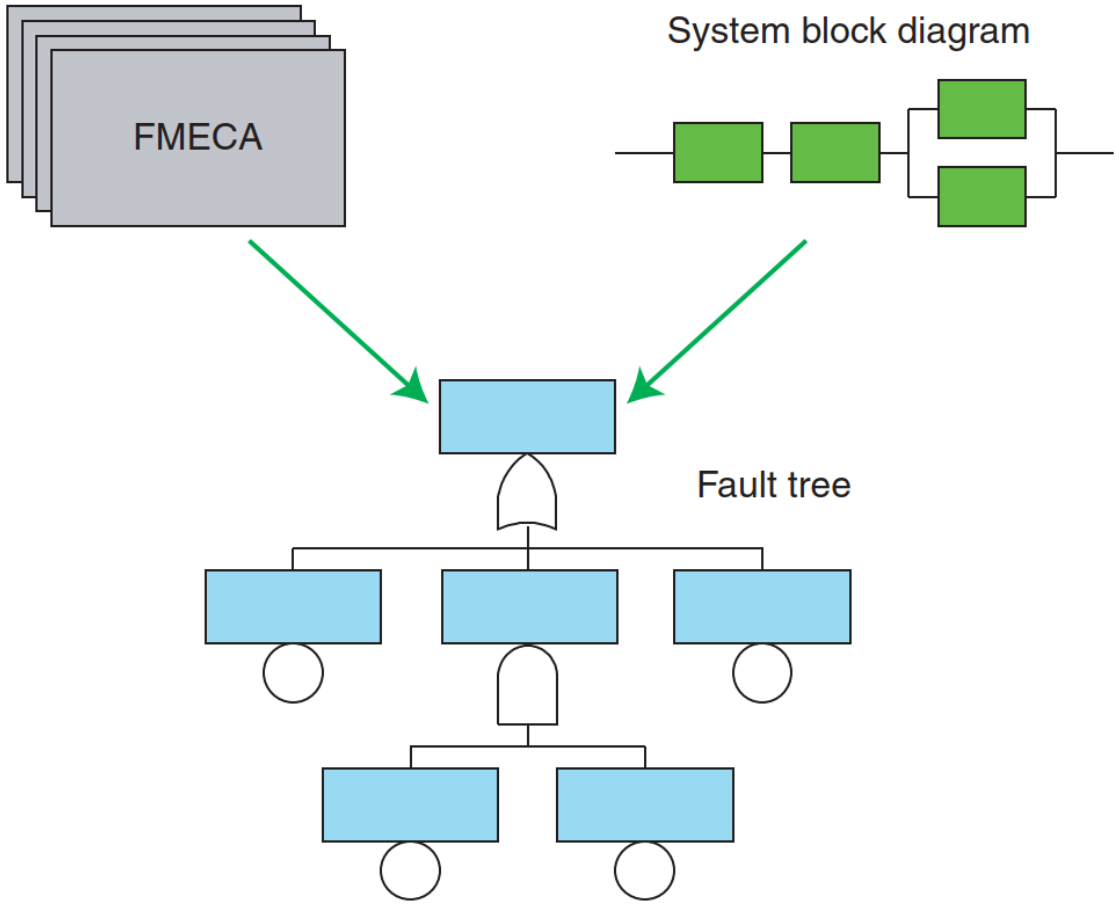
Randbetingelser

- Fysiske avgrensninger
- Initialbetingelser
- Eksterne påvirkninger
- Nivå for nedbryting

Konstruksjon av feiltreet

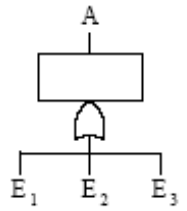
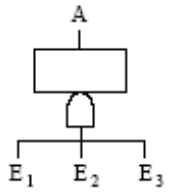
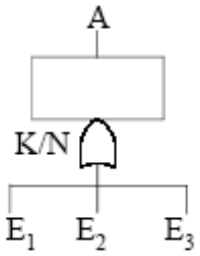
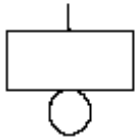
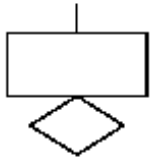
- Tar utgangspunkt i topphendelsen
- Tenker gjennom årsaker til hendelsen
  - "Hva er de direkte, nødvendige og tilstrekkelige årsakene for at topphendelsen skal inntreffe?"
- Kobler sammen årsakene med topphendelsen vha logiske porter (OG og ELLER)
- Stopper når ønsket detaljnivå er nådd
- Portene skal fullføres
- Portene skal ikke knyttes sammen

Forberedelse av en feiltreanalyse



Kilde: «System Reliability Theory» (Rausand og Høyland)

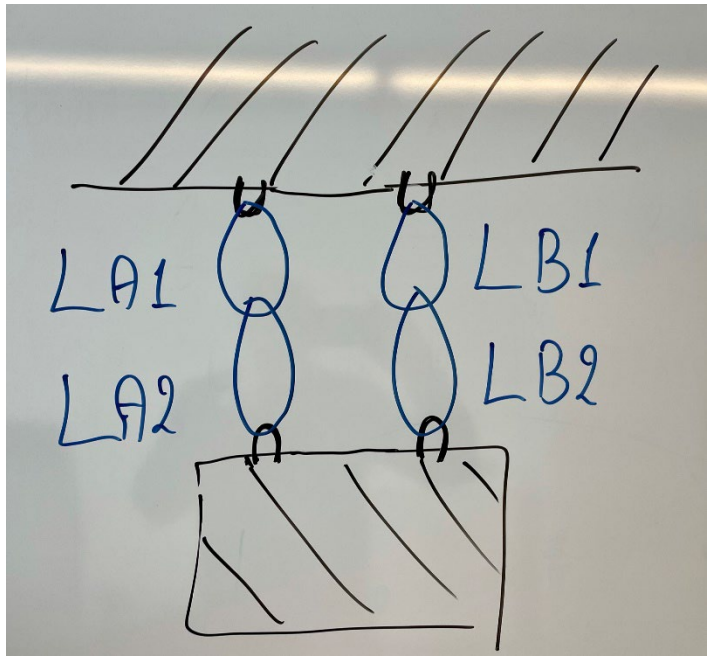
Feiltresymboler
(de vanligste)

	Symbol	Beskrivelse
Logiske Porter	"ELLER" port 	ELLER-porten indikerer at utgangshendelsen A inntreffer hvis minst en av inngangshendelsene E_i inntreffer.
	"OG" port 	OG-porten indikerer at utgangshendelsen A inntreffer hvis alle inngangshendelsene E_i inntreffer.
	"KooN" port 	KooN-porten indikerer at utgangshendelsen A inntreffer hvis K eller flere av inngangshendelsene E_i inntreffer.
Basis Hendelser	"Normal"-inngang 	Symbol for komponent i primær feiltilstand, oppstått under normal drift.
	"Sekundær" -inngang 	Symbol for sekundær feiltilstand oppstått pga ekstreme miljøbetingelser, manglende vedlikehold mm. Årsakene er ikke undersøkt nærmere

Et litt mer komplekst feiltre

- Fortsatt en «blokk» opphengt i taket, men nå med to kjeder, hver bestående av to lenker.

- Uønsket hendelse (TOPP-hendelse): *«Blokk faller ned»*

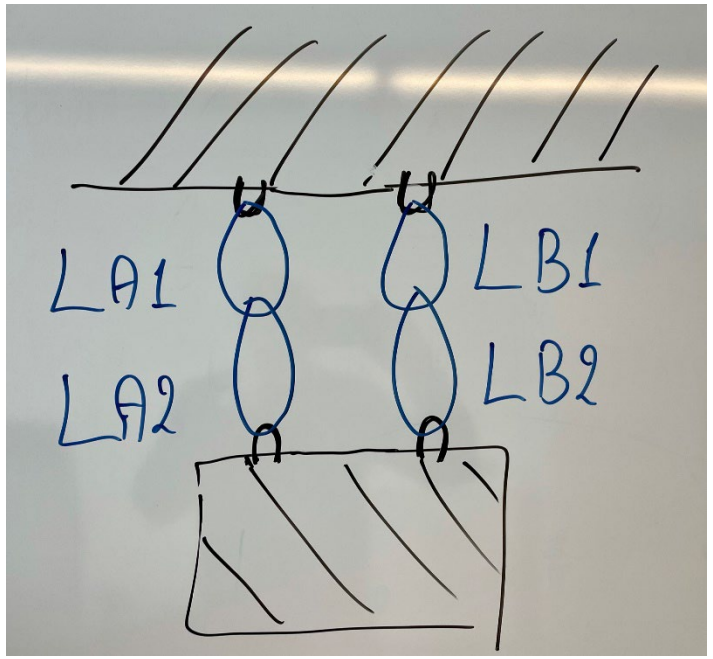


Systemskisse

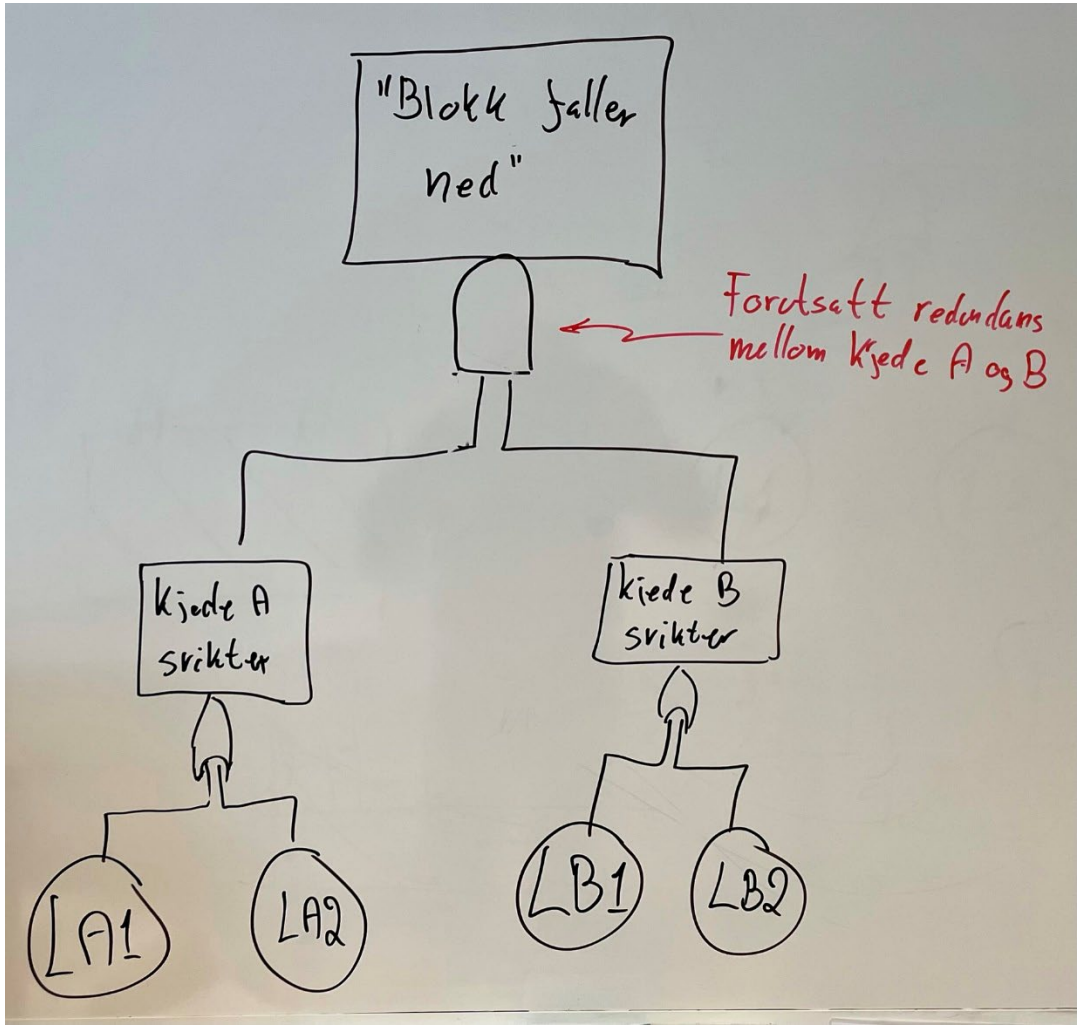
Et litt mer komplekst feiltre

- Fortsatt en «blokk» opphengt i taket, men nå med to kjeder, hver bestående av to lenker.

- Uønsket hendelse (TOPP-hendelse): *«Blokk faller ned»*

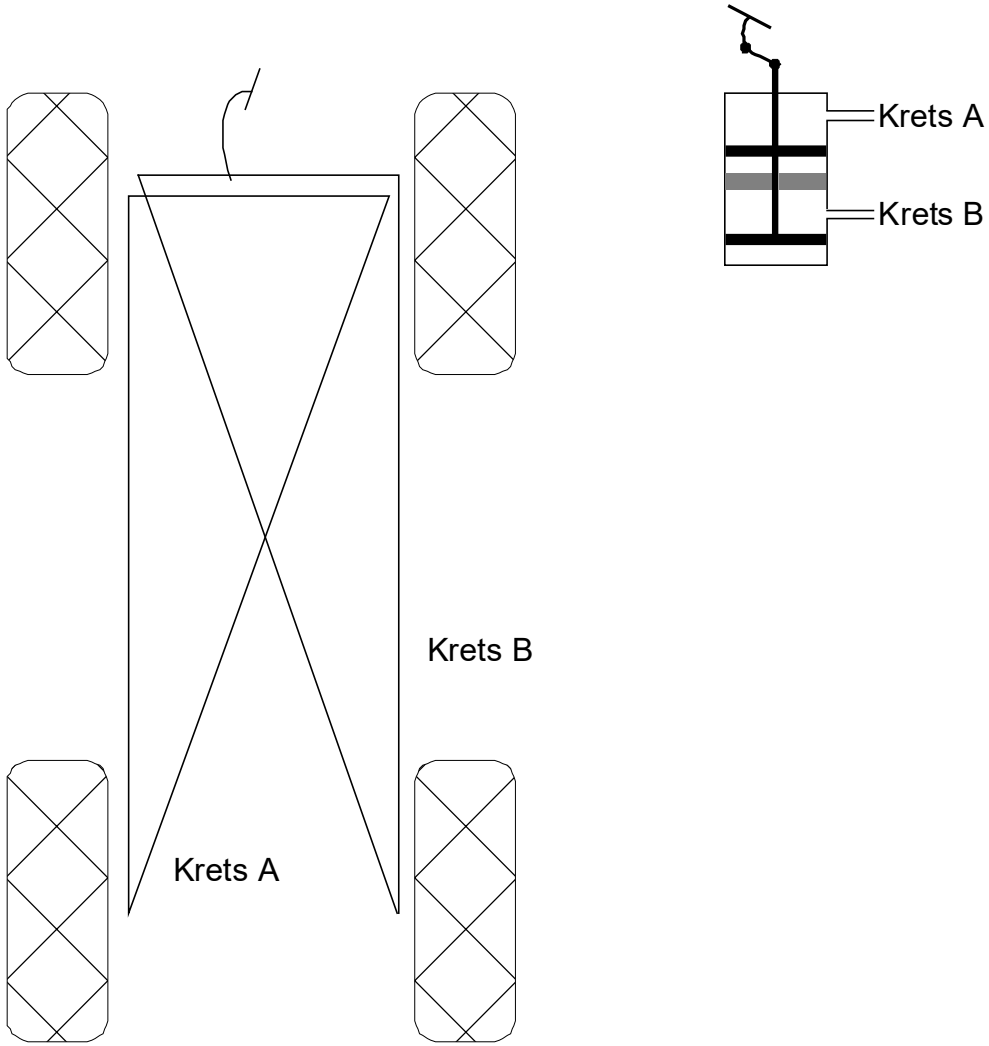


Systemskisse



Feiltre

Eksempel: Bremsesystem i bil

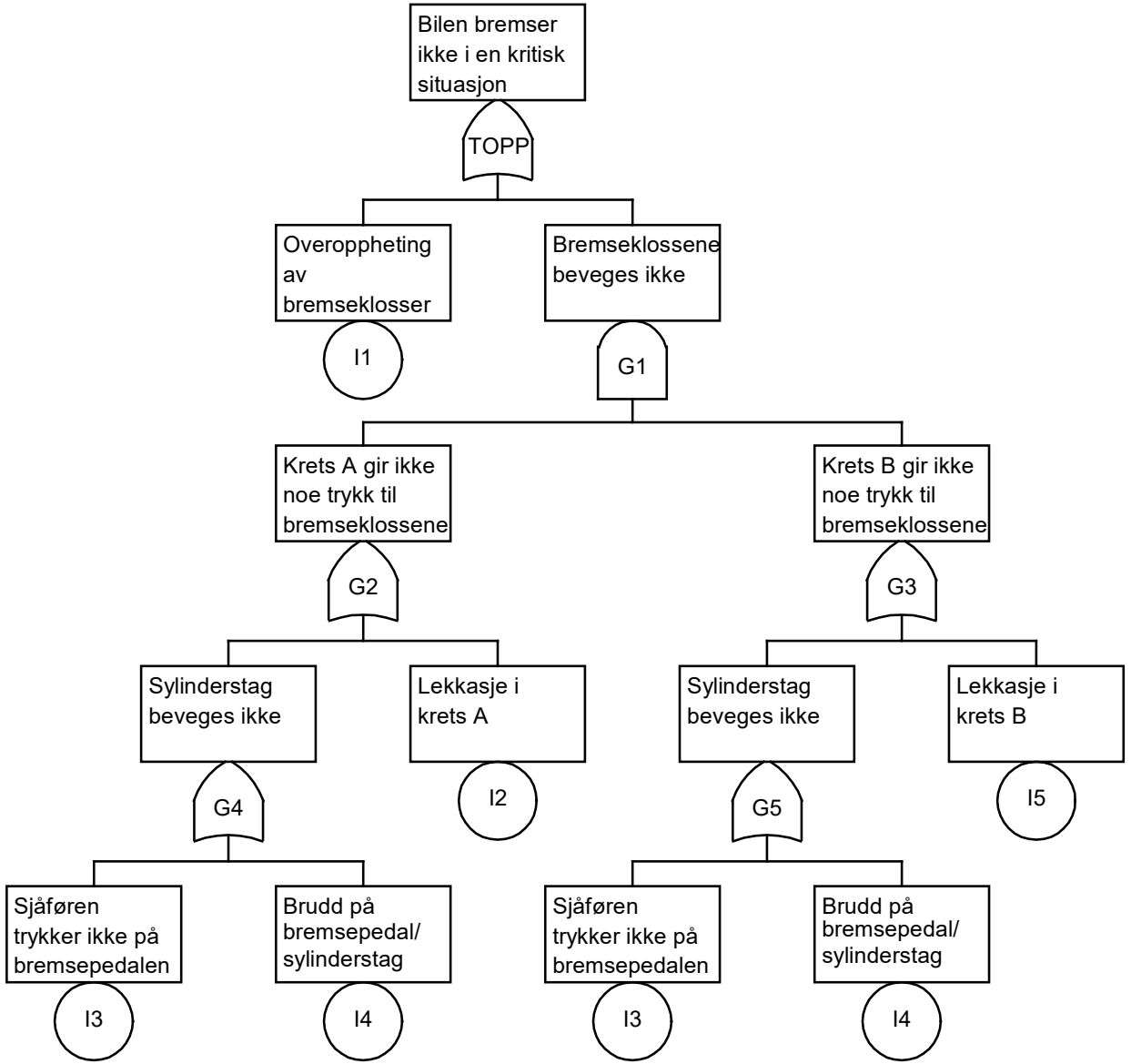


World Class Maintenance

Feiltre for bremse-system i bil

TÜVRheinland®
safetec

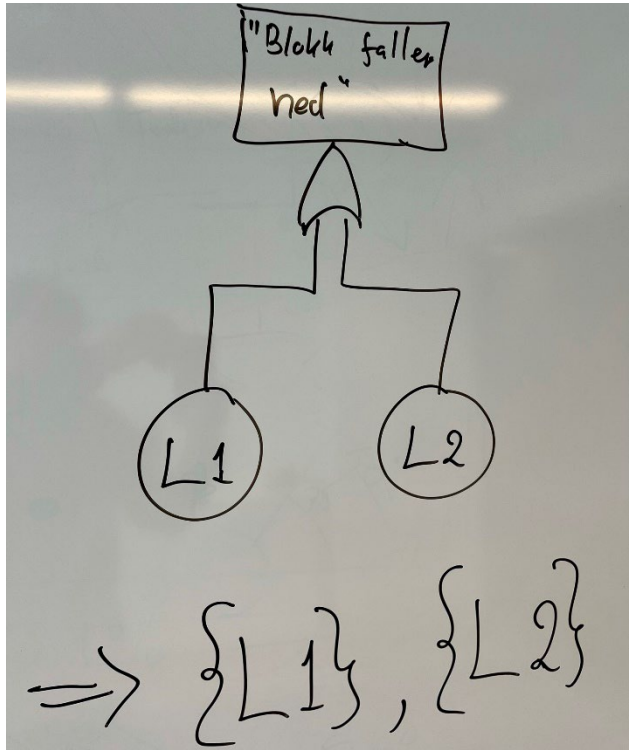
Feiltre for bremse-system i bil

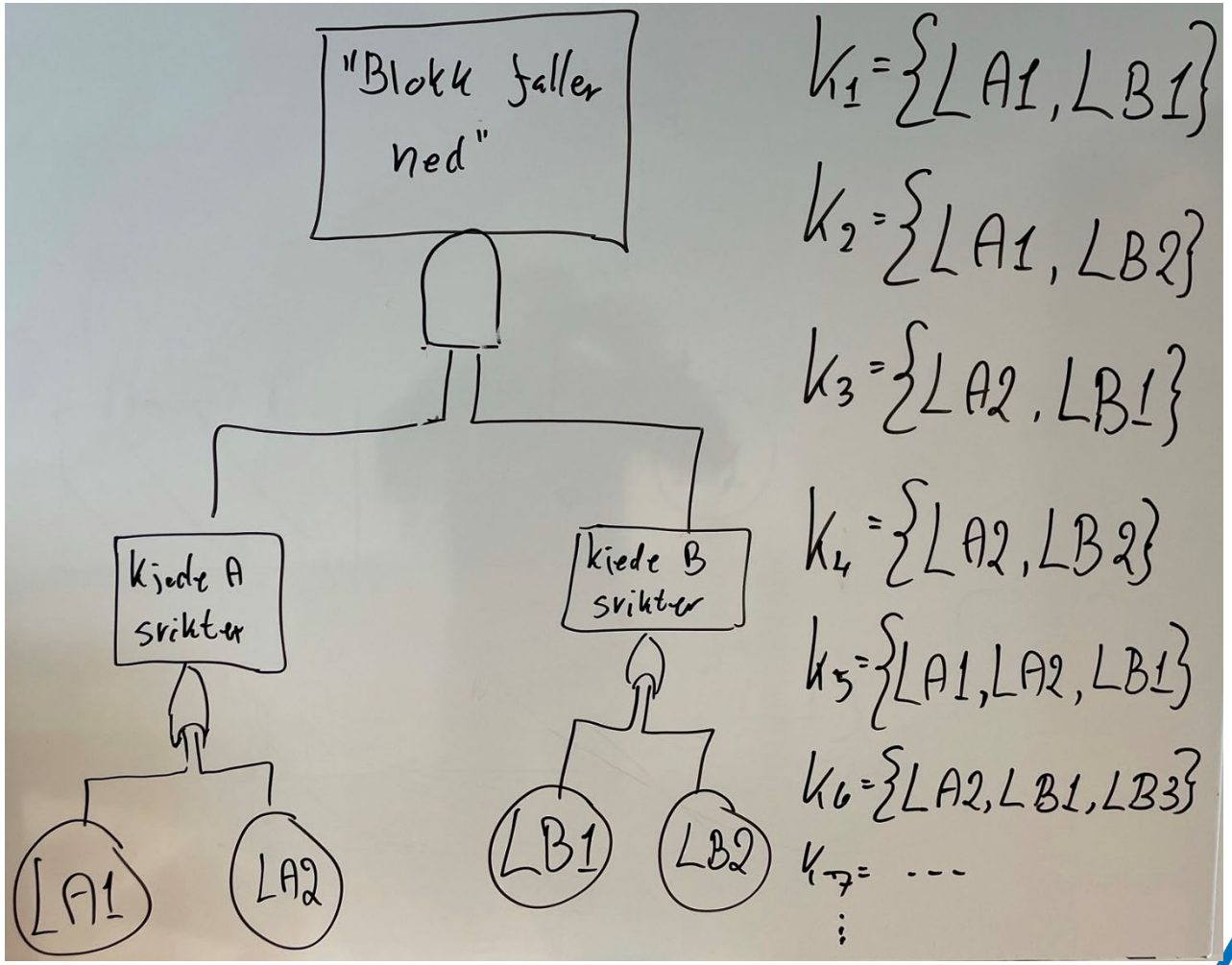


Minimale kutt- og stimengder

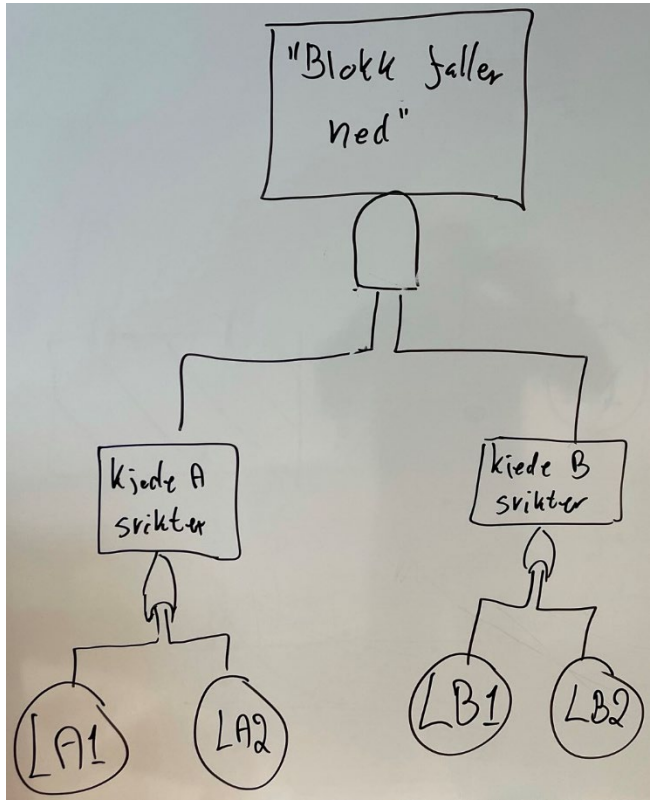
- Kuttmengder:
  - En mengde av basishendelser som ved å inntreffe sikrer at TOPP-hendelsen inntreffer
  - En kuttmengde sies å være minimal hvis den ikke kan reduseres uten å miste status som kuttmengde
- Stimengde:
  - En mengde av basishendelser som ved å ikke inntreffe sikrer at TOPP-hendelsen ikke inntreffer
  - En stimengde sies å være minimal hvis den ikke kan reduseres uten å miste status som stimengde

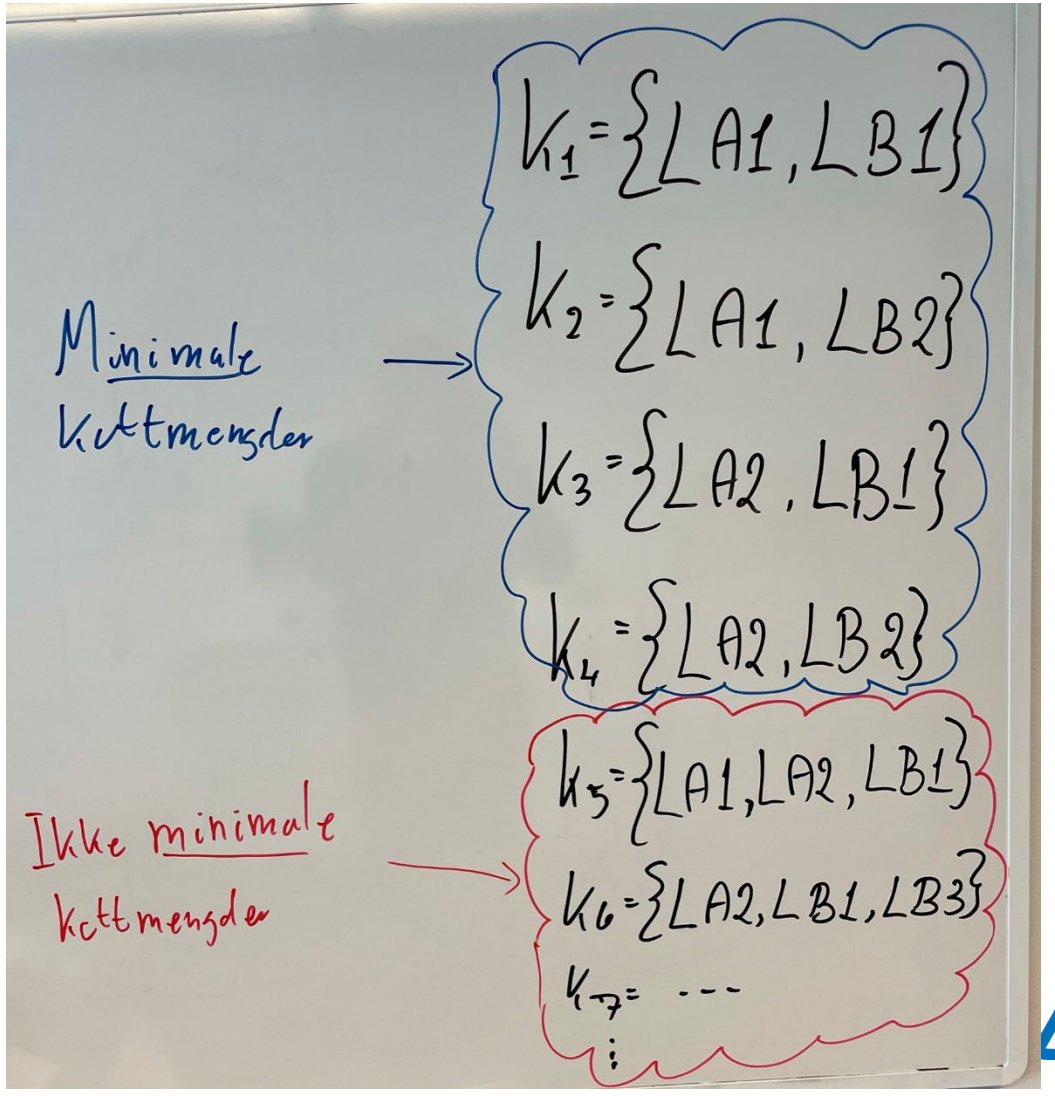
Kuttmengder: Eksempler fra de enkle feiltrærne





Kuttmengder: Eksempler fra de enkle feiltrærne





Kvalitativ analyse

- Tar utgangspunkt i minimale kuttmengder
- Antallet kuttmengder
- Kuttmengdens ”orden” (dvs hvor mange basishendelser kuttmengden inneholder)
- Rangering basert på typen av basishendelser som er involvert:
  - Menneskelig feil (mest kritisk)
  - Svikt av aktivt utstyr
  - Svikt av passivt utstyr

Kvantitativ analyse

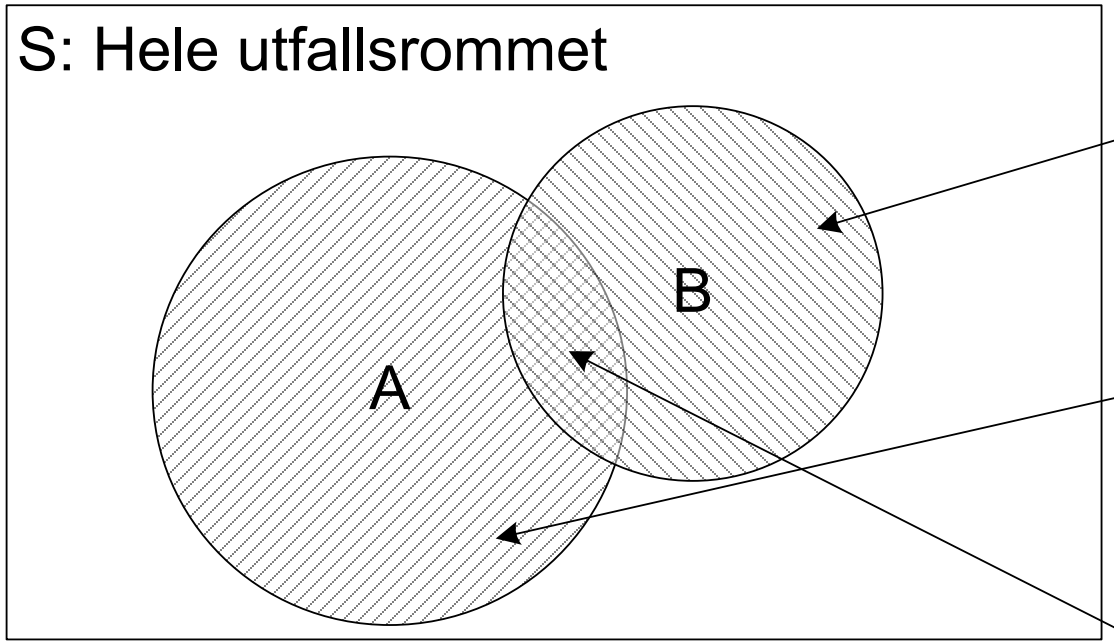
- Beregning av sannsynligheten for at TOPP-hendelsen inntreffer
- Beregning av komponenters pålitelighetsmessige betydning (Birnbaums mål)
- Benytter gjerne et dataverktøy for den kvantitative analysen

Beregning av $Q_0(t)$

- $Q_0(t)$ = sannsynligheten for TOPP-hendelsen
- q(t) = sannsynlighet for at basishendelse inntreffer (typisk komponentsvikt)
- p(t) = sannsynlighet for at basishendelse ikke inntreffer (altså typisk at komponent virker)

- Men først litt om **hendelser**, **mengder** og **sannsynligheter**…

Hendelser (litt mengdelære)

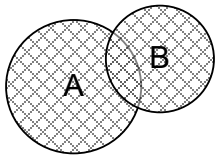


B: Hendelsen B, f.eks. ”svikt av komponent B”

A: Hendelsen A, f.eks. ”svikt av komponent A”

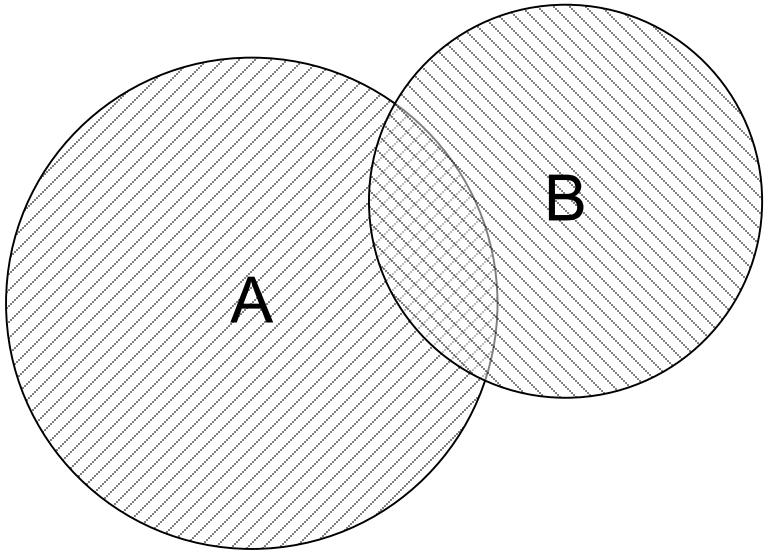
A∩B: ”A snitt B”, hendelsen ”A og B samtidig”

A∪B: ”A union B”, hendelsen ”A eller B”:



Beregning av sannsynligheter

- $P(A) = q_A$
- $P(B) = q_B$
- $P(A \text{ og } B \text{ samtidig}) = P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) = q_A \cdot q_B$
  - NB! Når A og B skjer uavhengig av hverandre
- $P(A \text{ eller } B) = P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$
  $= P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) = q_A + q_B - q_A \cdot q_B$
  - NB! Når A og B skjer uavhengig av hverandre

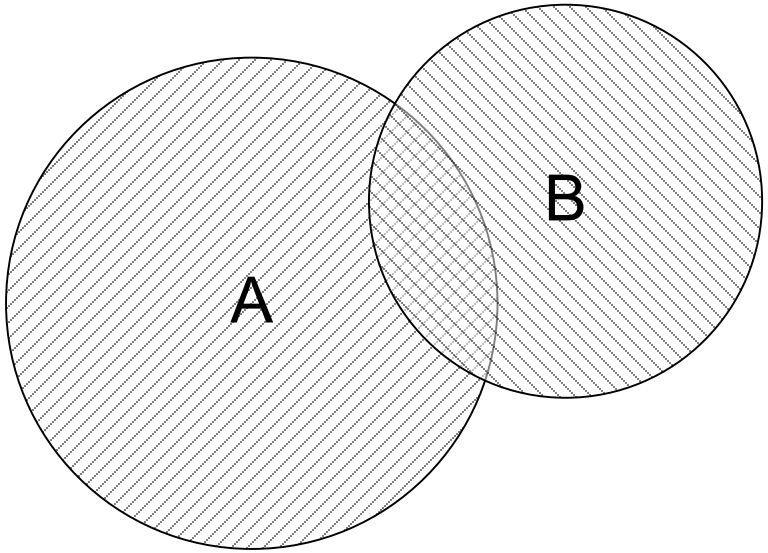


Sannsynligheter i feiltreanalyse

- Anta feiltre med to minimale kuttmengder:
  - $K_1 = \{A,B\}$
  - $K_2 = \{C,D\}$

- Kuttmengde K_1 inntreffer altså hvis hendelsen A og B inntreffer samtidig
  - $P(K_1)=P(A \cap B)=P(A)\cdot P(B)=q_A \cdot q_B$ *(når hendelsene er uavhengige)*
  - Tilsvarende: $P(K_2)= P(C \cap D)=P(C)\cdot P(D)=q_C \cdot q_D$ *(-"-)*

- TOPP-hendelsen inntreffer hvis enten K_1 eller K_2 inntreffer:
  - $P(TOPP) = P(K_1 \cup K_2) = P(K_1) + P(K_2) - P(K_1 \cap K_2)$
    $<\approx P(K_1) + P(K_2)$ (*tilnærmet riktig om sannsynlighetene er små*
    $= q_A \cdot q_B + q_C \cdot q_D$ *og om hendelsene er uavhengige)*



Beregne Q_0 – 1 av 2

- Anta kuttmengder: K_1, K_2, …, K_k
- K_j: Har n_j basishendelser – K_j = {1,2, …, n_j}
- $\widetilde{Q_j}$ = sannsynligheten for at kuttsett j inntreffer

  = $q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_{n_j}$

  = $\prod_{i=1}^{n_j} q_j$

- Igjen gjelder dette når hendelsene er uavhengige

Beregne Q_0 – 2 av 2

- Tilnærmingsformel for Q_0 – som også er en øvre skranke:

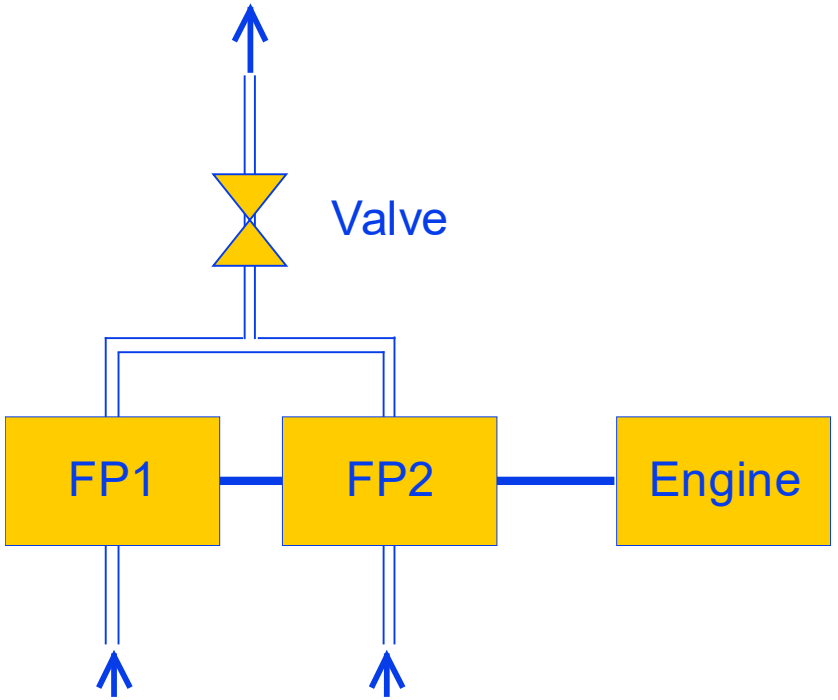
$$Q_0 \leq \check{Q}_1 + \check{Q}_2 + \cdots + \check{Q}_k = \sum_{j=1}^{k} \check{Q}_j$$

$$Q_0 \leq \sum_{j=1}^{k} \prod_{i=1}^{n_j} q_{i,j}$$

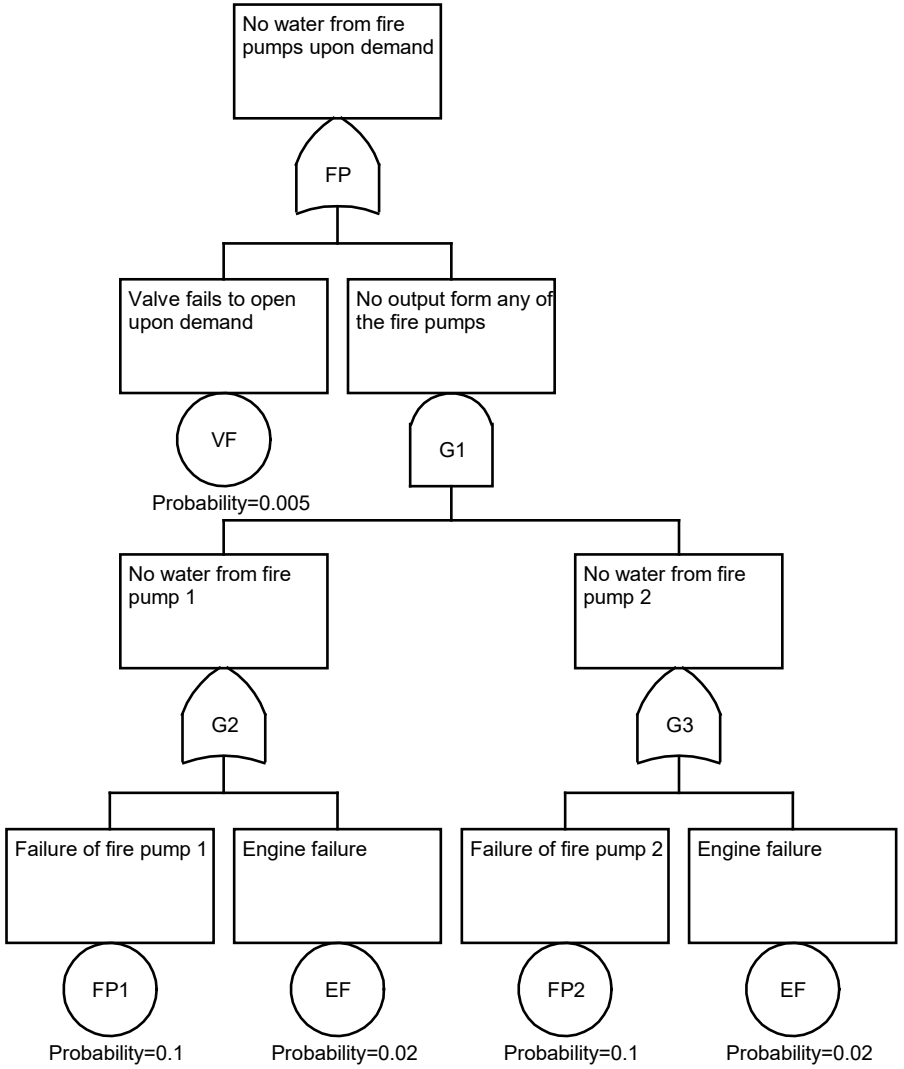
- En god tilnærming når hendelsene er uavhengige q-ene er små, men avhenger også av strukturen i feiltreet (f.eks. ikke for mange ”overlappende” minimale kuttsett)

«Tavle»øving: Brannpumper

Funksjon: Gi tilstrekkelig vannmengde ved behov



Analyseeksempel



Tegnet/konstruert i CARA-FaultTree

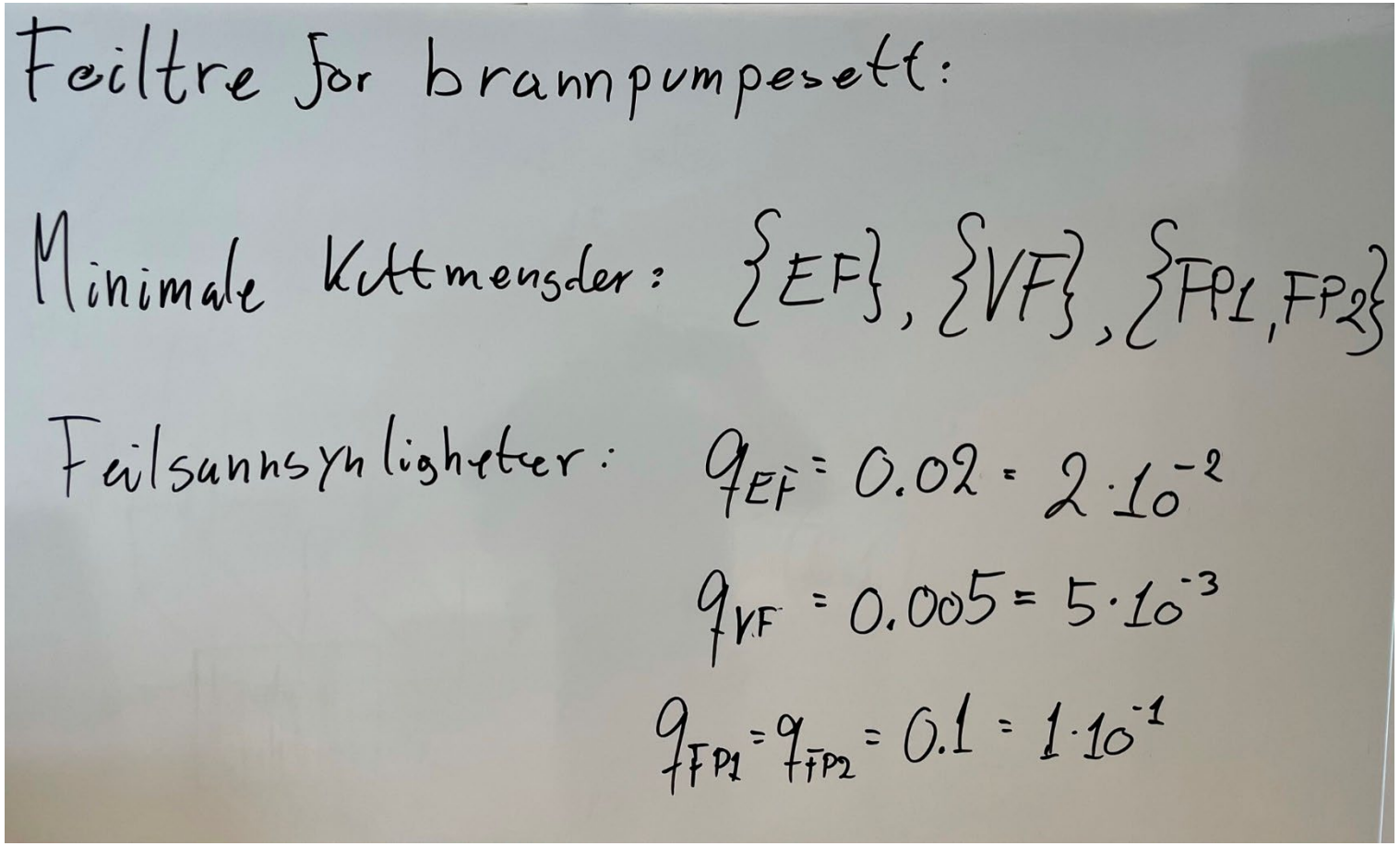
Analyseeksempel

- Minimale kutt-sett:
  - ”Cut set(s) with 1 component (Total: 2): {EF}, {VF}
  - Cut set(s) with 2 components (Total: 1): {FP1,FP2}”

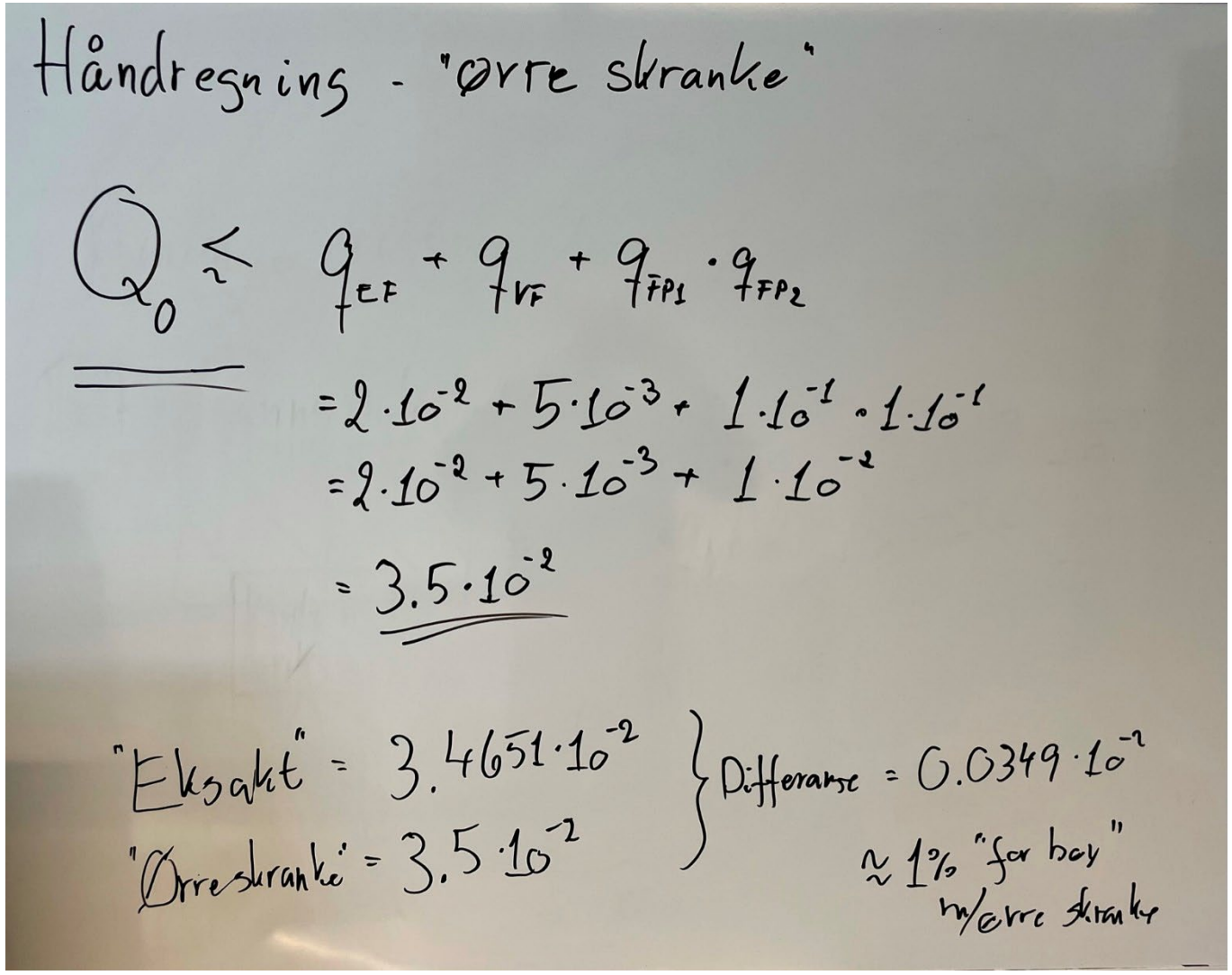
- Sannsynlighet for topp-hendelsen
  - Q0(t), ”utilgjengelighet”
  - t = 0: Q0(t) = 3.4651e-002
  - Dvs. sannsynligheten for at brannpumpesystemet ikke starter ved et branntilløp er 3.5 %

Analysert i CARA-FaultTree

"Tavle-løsning"



"Tavle-løsning"



Analyseeksempel – fra CARA-FaultTree

- Hvordan kan systemet forbedres?
- Forskjellige mål på pålitelighetsmessig betydning, f.eks.:
  - Birnbaum's mål på pålitelighetsmessig betydning
  - "Criticality importance"
- Her:

Event	Birnb.rel.	Crit.import.
EF	98.5 %	56.9 %
VF	97.0 %	14.0 %
FP1	9.8 %	28.1 %
FP2	9.8 %	28.1 %

World Class Maintenance

TÜVRheinland®

safetec

Sjefrådgiver

Ragnar Aarø

+47 934 83 940

Ragnar.Aaro@safetec.no