

# Luento 3

## Riskien kvalitatiivinen arviointi

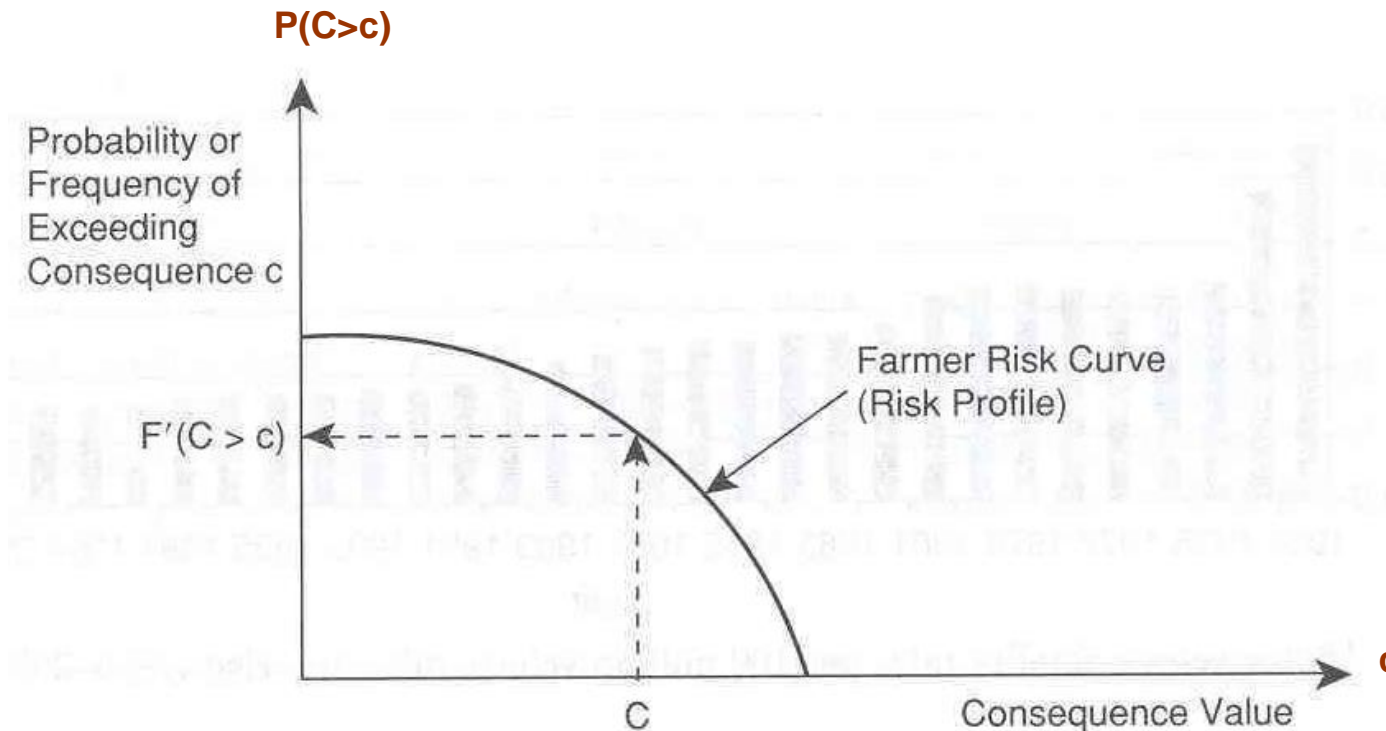
### PSA:n pääpiirteet

### Vikapuuanalyysi

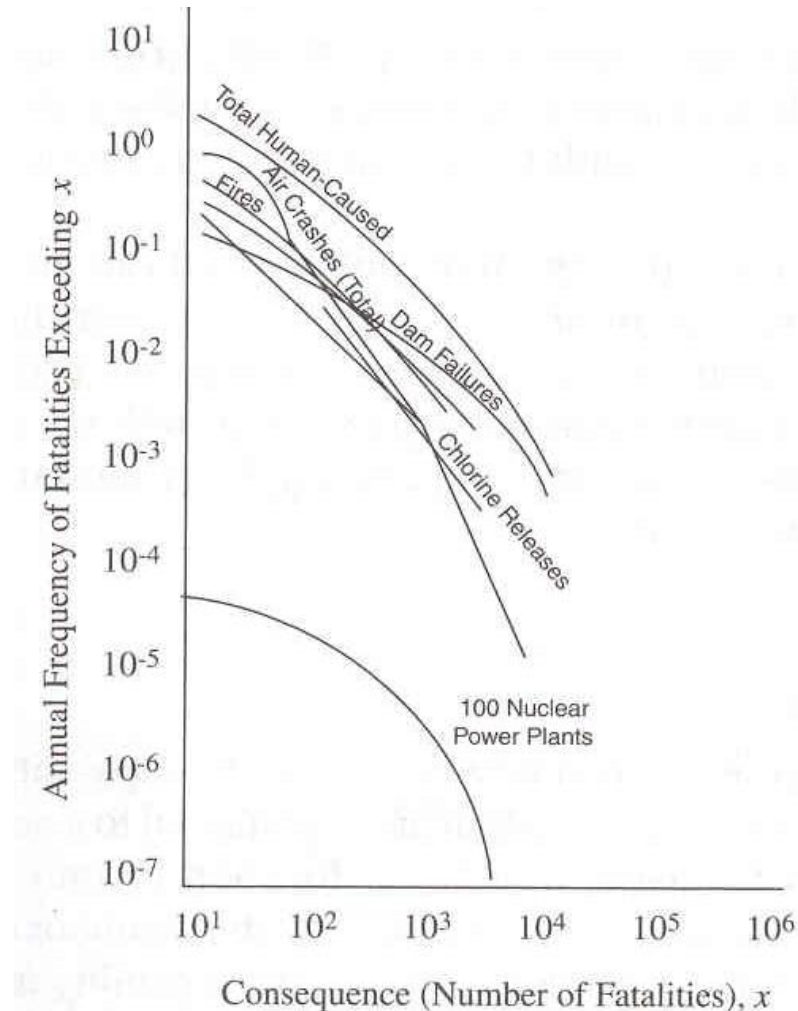
Jan-Erik Holmberg  
Systeemianalyysin laboratorio  
Matematiikan ja systeemianalyysin laitos  
Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu  
PL 11100, 00076 Aalto  
[jan-erik.holmberg@aalto.fi](mailto:jan-erik.holmberg@aalto.fi)

# Farmerin käyrä

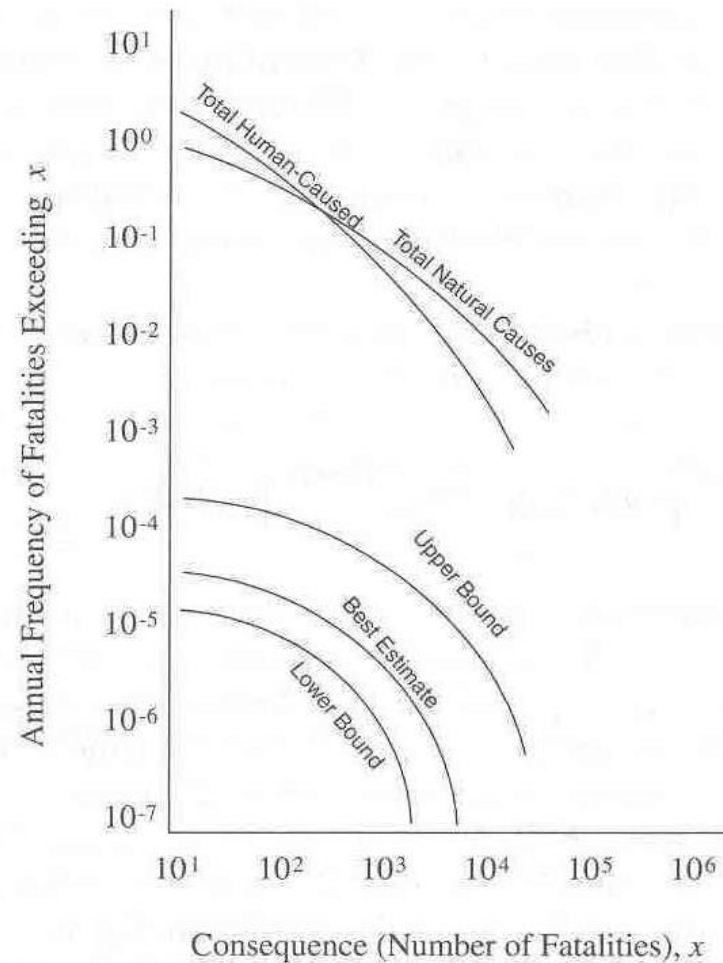
- Tulkinta
  - Liittää kuhunkin tappiotasoon todennäköisyyden, jolla päädytään tätä tasoa suurempaan tappioon



# Farmerin käyriä (1/2)



# Farmerin käyriä (2/2)



# Esimerkki Farmerin käyristä (1/2)

- Lähtökohtia
  - Laitostyyppi hajoaa todennäköisyydellä  $p = 0,1$
  - Hajotessaan laitos aiheuttaa 10 henkilön kuoleman
  - Lasketaan riskiprofiilit, kun laitoksia  $n = 1, 2, 5, 10$  kpl
- Binomijakauma
  - Jos laitoksia  $n$ , niin niistä hajoaa täsmälleen  $x$  kpl todennäköisyydellä

$$P(X = x; n) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x}, 0 \leq x \leq n$$

- Esimerkiksi jos  $n = 3$ ,  $x = 1$ , niin

$$\begin{aligned} P(X = 1; 3) &= \binom{3}{1} 0,1^1 (1 - 0,1)^2 \\ &= \frac{3!}{2! \times 1!} \times 0,1 \times 0,9^2 \approx 0,243 \end{aligned}$$

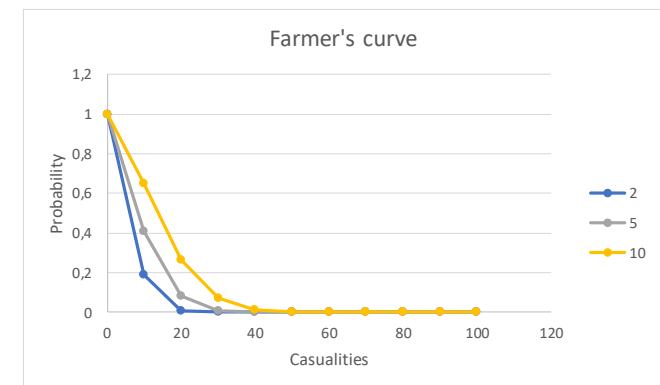
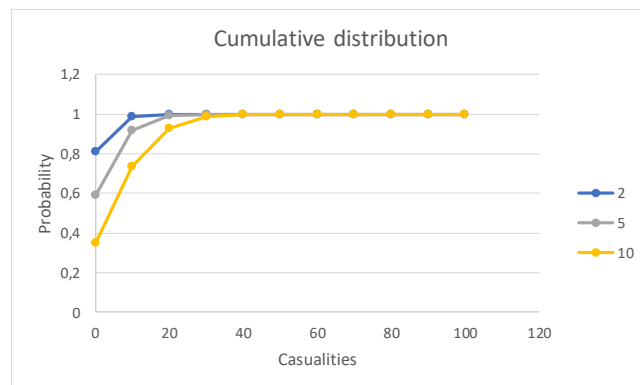
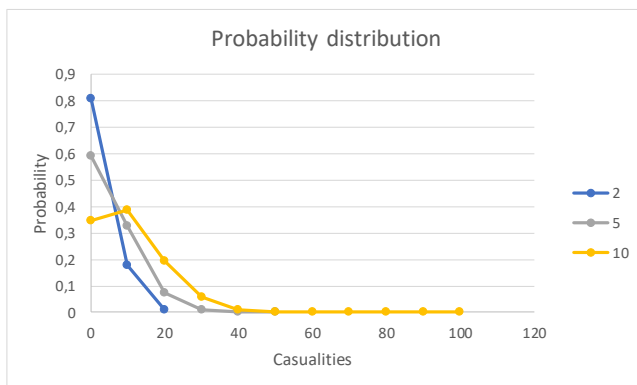
- Enintään  $x$  laitosta hajoaa todennäköisyydellä

$$P(X \leq x; n) = \sum_{i \leq x} \binom{n}{i} p^i (1 - p)^{n-i}$$

# Esimerkki Farmerin käyristä (1/2)

- Todennäköisyys sille, että kuolemia tulee yli  $c$  kpl on komplementtitapaus sille, että enintään  $c/10$  laitosta hajoaa

$$F_n(c) = 1 - \sum_{i \leq c/10} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$$



# Todennäköisyystulkinnat (1/2)

- Subjekttiivinen todennäköisyys
  - Kuvastaa kaiken käytettävissä olevan tietämyksen varaan perustuvaa näkemystä siitä, miten mahdollisena tapahtuman toteutumista pidetään
  - Näkökohtia
    - » ”Kaikkea tietämystä” vaikea hankkia
    - » Näkemykset voi poiketa toisistaan tai olla ristiriitaisia
    - » Näkemykset päivitettävissä Bayesin kaavalla

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)},$$

- » missä  $P(H)$  = Hypoteesin a priori tn  
 $P(E)$  = Evidenssin saamisen tn  
 $P(H|E)$  = Hypoteesin posteriori tn

- Todennäköisyydet riskianalyysissä
  - Ilmiöt monesti harvinaisia eivätkä toistettavissa
  - Sovelletaan usein subjektiivisia todennäköisyyksiä
  - Hyödynnetään käytettävissä olevia ja relevantteja tilastoja

# Todennäköisyystulkinnat (2/2)

- Frekventistinen tulkinta

- Todennäköisyys on raja-arvo, joka saadaan tarkastelemalla tilastollisesti äärettömän isoksi kasvavaa aineistoa
- Esim. kruunan (eng. head) todennäköisyys saadaan raja-arvona sarjasta

$$P_H = \frac{N_H}{N}, N \rightarrow \infty,$$

jossa kolikkoa heitetään äärettömän monesti ja  
jossa  $N$  = kaikkien heittojen määrä ja  
 $N_H$  = saatujen klaavojen määrä

- Näkökohtia

- Reaali-ilmiöillä riittäviä toistoja ei voida tehdä
  - » Mahdotonta, liian kallista, liian hidasta
  - » Esim. tuotannonohjaus, koronnostot, suojavallit
- Toistot eivät tapahdu identtisissä olosuhteissa
- Tilastot antavat kuitenkin tukea muille analyyseille



# Tilastoperustainen riskien arviointi

- Frekvenssipohjainen yhdistely
  - Jos tiedetään,
    - » mitkä ovat odotusarvoiset vahingot vaaratilanteissa ja
    - » miten usein vaaratilanteita toteutuu,
  - niin riskiarvioita voidaan tuottaa näiden tietojen pohjalta
- Esim. USA:n liikennekuolemat
  - USA:ssa on tilastojen valossa 15 miljoonaa liikenneonnettomuutta vuodessa siten, että 1 henkilö kuolee 300 onnettomuutta kohti. Liikennekuolemien riskiä voidaan täten kuvata luvulla

$$\left(15 \times 10^6 \frac{\text{onnettomuus}}{\text{vuosi}}\right) \left(\frac{1 \text{ kuollutta}}{300 \text{ onnettomuus}}\right) = 50000 \frac{\text{kuollutta}}{\text{vuosi}}$$

- Huom!
  - Tapahtumia oltava tarpeeksi paljon tilastollisesti – muuten luottamusvälit ovat isoja
    - » Vrt. suurten lukujen laki  $\Rightarrow$  ennuste tarkentuu
  - Tämä tulos varmaan saatavissa tilastoista suoraan
  - Näkökulmana kansakunnan taso – ei yksilön
    - » Millä tn:llä yksi nimenomainen henkilö kuolee?
    - » Miten ajotottumukset jne. vaikuttavat?

## Esimerkki Salmonella

- Toiseksi yleisin ruokamyrkytyksen aiheuttaja
  - Esiintyy kananmunissa, pastöroimattomassa maidossa, lihassa jne.
- Tilastotietoja USA:sta
  - 19 sairastumista per miljoona syötyä kananmunaa
  - 710 kuolemaa per miljoona sairastumista
  - 47 miljardia syötyä kananmunaa
  - \$400 taloudellinen tappio per sairastapaus
- Mitkä ovat salmonellan odotusarvoiset tappiot (kuolemantapaukset, taloudelliset menetykset)?
  - sairastumisia  $47 \times 10^9 / (1 \times 10^6) \times 19 = 893\,000$  kpl
  - kuolemia  $893\,000 \times (710 / 1 \times 10^6) = 634$  kpl
  - taloudelliset tappiot  $893\,000 \times \$400 = \$357\,200\,000$

## Esimerkki Autokolarit

- Tilastotietoja USA:sta v. 2003
  - väkiluku 250 miljoonaa
  - 6,3 miljoonaa kolaria
  - 1 loukkaantunut per 3 kolaria
  - 1 kuolemantapaus per 165 kolaria
  - kuolemaan johtaneen kolarin odotusarvoiset tappiot \$450 000 kuolemasta ja \$25 000 omaisuudesta
  - loukkaantumiseen johtaneen kolarin vastaavasti \$15 000 loukkaantumisesta ja \$10 000 omaisuudesta
  - muista kolareista \$3 000 omaisuudesta
- Mitkä ovat kolareista aiheutuvat taloudelliset tappiot?

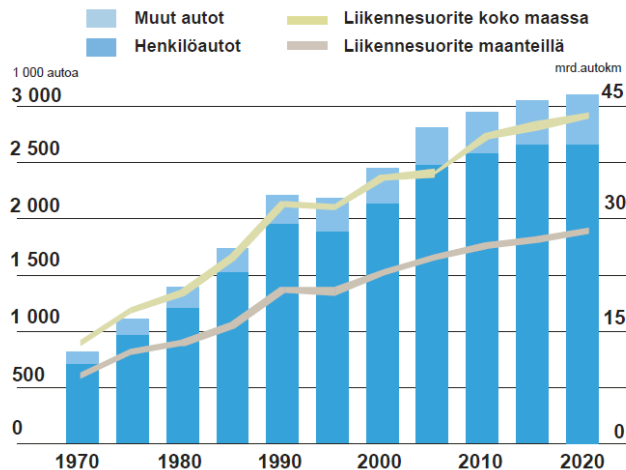
# Autokolarit (jatkoa)

$10^{-2}$

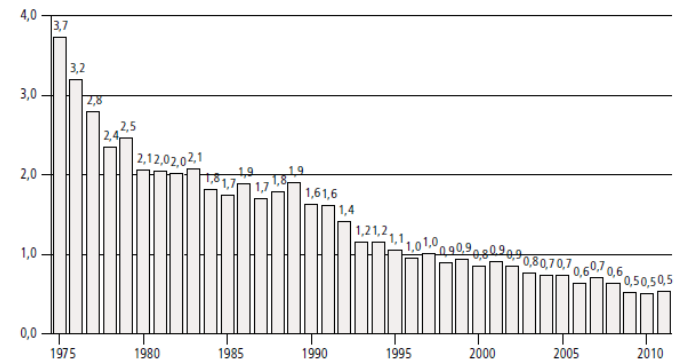
Risk Contributor	Fatality	Injury	Other	Total
Probability per person per accident	$6.3 \times 10^6 / 250 \times 10^6 = 0.025$	0.025	0.025	
Probability of events given accident	1/165	1/3	109/165	
Probability of consequence per person	$1/165 \times 0.025 = 1.53 \times 10^{-4}$	$8.4 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-2}$	
Magnitude of consequence (US\$ at risk)	450,000 + 25,000	15,000 + 10,000	3000	
Risk (expected loss)	US\$ 72.54	US\$ 210.00	US\$ 49.94	US\$ 332.49 per person- year

# Riskin mittaamisesta

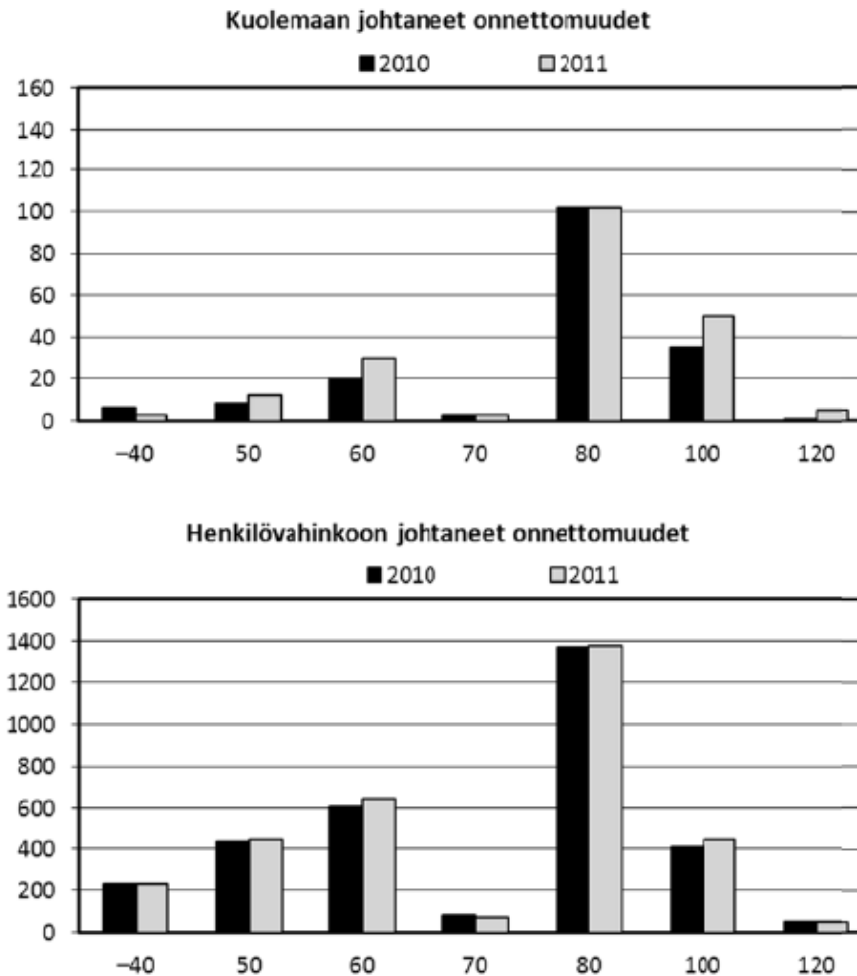
- Riskitaso suhteutettava asteikkoon
  - Ajokilometriä kohden suhteutettu riski vähentynyt tätäkin enemmän (lähde: Tiehallinto)



Kuolleet 100 miljoonaa autokilometriä kohti 1975–2011  
Killed per 100 million automobile kilometres 1975–2011

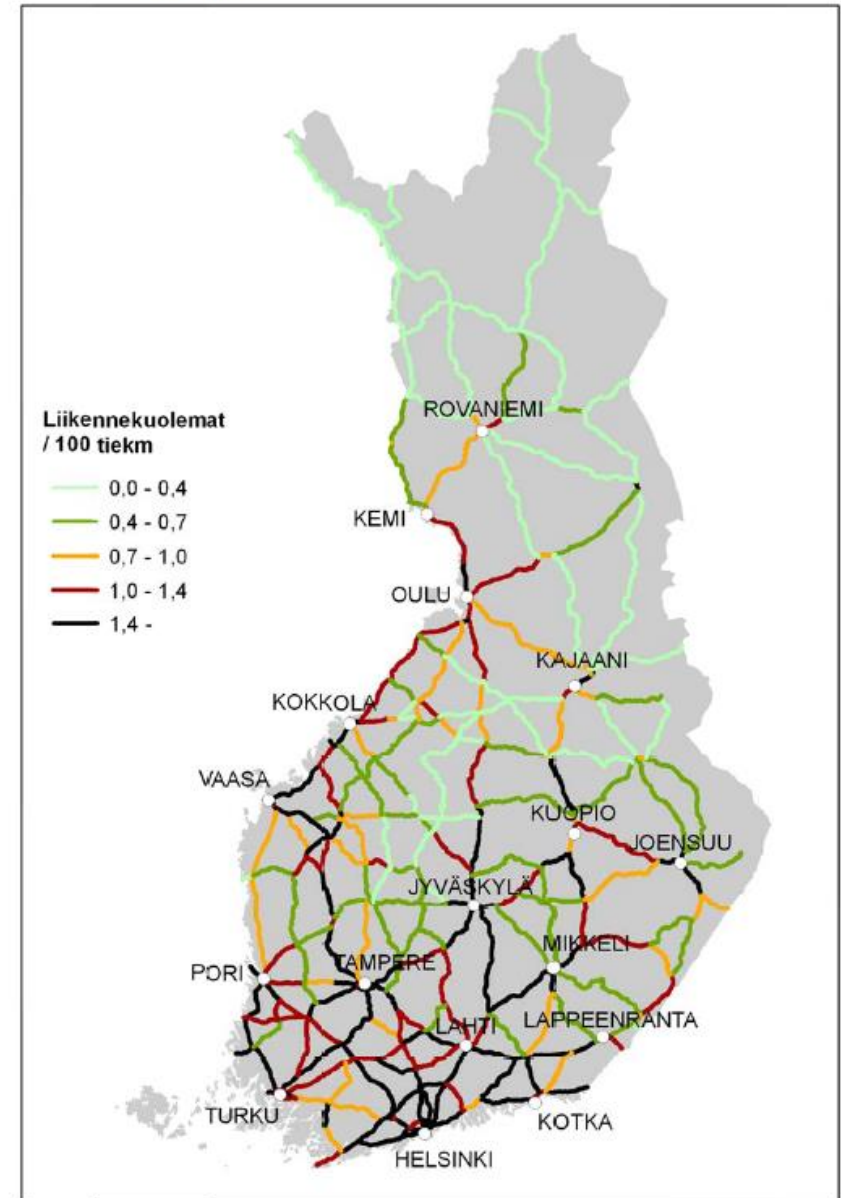


Lähteet: Liikennevirasto, Tilastokeskus – Sources: Finnish Transport Agency, Statistics Finland



Kuva 8. Henkilövahinkoon johtaneiden onnettomuuksien lukumäärä nopeusrajoituksittain (km/h) maanteillä vuosina 2010 ja 2011.<sup>5</sup>

Kartta 3. Liikennekuolemien tiheys päätieverkolla, TARVA-ohjelmalla laskettu nykytilan ennuste..



**Taulukko 3. Tieliikenteessä kuolleet tienkäyttäjryhmän ja iän mukaan 2008**

Table 3. Killed in road traffic by road user group and age 2008

Tienkäyttäjä – Road user	Ikä – Age						
	0–5	6–9	10–14	15–17	18–20	21–24	25–34
Jalankulkija – Pedestrian	1	1	1	1	-	-	2
Polkupyörä, kuljettaja – Bicycle, driver	-	-	-	2	-	-	1
Polkupyörä, matkustaja – Bicycle, passenger	-	-	-	-	-	-	-
Mopo, kuljettaja – Moped, driver	-	-	-	6	-	-	2
Mopo, matkustaja – Moped, passenger	-	-	-	-	-	-	-
Moottoripyörä, kuljettaja – Motor cycle, driver	-	-	-	4	4	2	7
Moottoripyörä, matkustaja – Motor cycle, passenger	-	-	1	-	-	1	-
Henkilöauto, kuljettaja – Passenger car, driver	-	-	-	1	16	14	18
Henkilöauto, matkustaja – Passenger car, passenger	2	1	1	12	9	2	10
Linja-auto, kuljettaja – Bus, driver	-	-	-	-	-	-	-
Linja-auto, matkustaja – Bus, passenger	-	-	-	-	-	-	-
Pakettiauto, kuljettaja – Van, driver	-	-	-	-	-	-	2
Pakettiauto, matkustaja – Van, passenger	-	-	-	-	-	-	1
Kuorma-auto, kuljettaja – Lorry, driver	-	-	-	-	1	-	2
Kuorma-auto, matkustaja – Lorry, passenger	-	-	-	-	-	-	-
Traktori, kuljettaja – Agricultural tractor, driver	-	-	-	-	-	-	-
Traktori, matkustaja – Agricultural tractor, passenger	-	-	-	-	-	-	-
Muu, kuljettaja – Other, driver	-	-	-	-	-	1	1
Muu, matkustaja – Other, passenger	-	-	-	-	-	-	-
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>46</b>

jatkuu – continues

Tienkäyttäjä – Road user	Ikä – Age					Yhteensä Total
	35–44	45–54	55–64	65–74	75–	
Jalankulkija – Pedestrian	4	8	7	8	20	53
Polkupyörä, kuljettaja – Bicycle, driver	1	-	3	6	5	18
Polkupyörä, matkustaja – Bicycle, passenger	-	-	-	-	-	-
Mopo, kuljettaja – Moped, driver	1	-	1	1	2	13
Mopo, matkustaja – Moped, passenger	-	-	-	-	-	-
Moottoripyörä, kuljettaja – Motor cycle, driver	7	4	2	-	-	30
Moottoripyörä, matkustaja – Motor cycle, passenger	1	-	-	-	-	3
Henkilöauto, kuljettaja – Passenger car, driver	18	20	15	16	26	144
Henkilöauto, matkustaja – Passenger car, passenger	4	5	4	2	6	58
Linja-auto, kuljettaja – Bus, driver	-	-	-	-	-	-
Linja-auto, matkustaja – Bus, passenger	-	-	-	-	-	-
Pakettiauto, kuljettaja – Van, driver	-	5	1	-	-	8
Pakettiauto, matkustaja – Van, passenger	-	-	-	-	-	1
Kuorma-auto, kuljettaja – Lorry, driver	-	-	2	-	-	5
Kuorma-auto, matkustaja – Lorry, passenger	-	-	-	-	-	-
Traktori, kuljettaja – Agricultural tractor, driver	1	2	1	1	-	5
Traktori, matkustaja – Agricultural tractor, passenger	-	1	-	-	-	1
Muu, kuljettaja – Other, driver	-	2	1	-	-	5
Muu, matkustaja – Other, passenger	-	-	-	-	-	-
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>37</b>	<b>47</b>	<b>37</b>	<b>34</b>	<b>59</b>	<b>344</b>



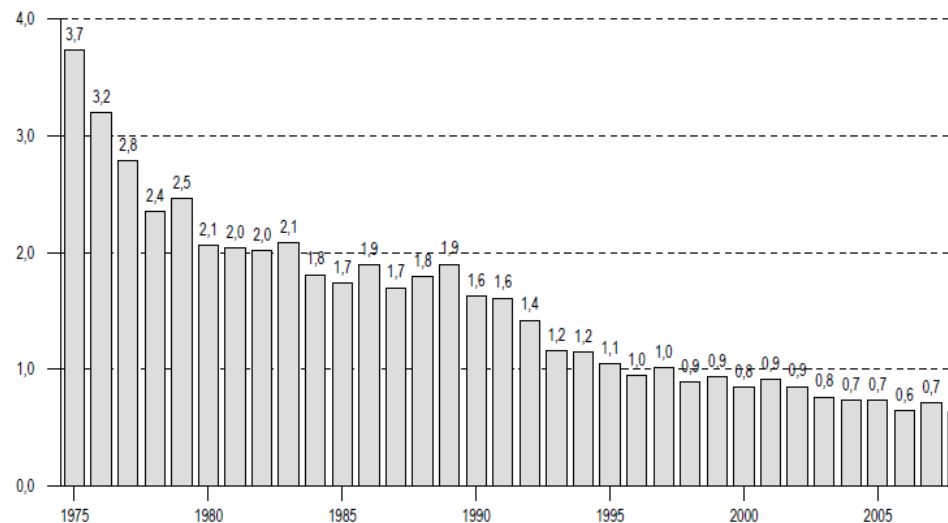
**Taulukko 16. Kuolleet tienkäyttäjärhmittäin ikäryhmän 100 000 asukasta kohti 2008**

Table 16. Killed by age group and road user group per 100,000 inhabitants 2008

Ikä Age	Jalankulkija Pedestrian	Polkupyörä Bicycle	Mopo Moped	Moottoripyörä Motor cycle	Henkilöauto – Pass. car		Muu auto Other car	Muu kulkuneuvo Other vehicle	Yhteensä Total
					Kuljettaja Driver	Matkustaja Passenger			
0–5	0,3	-	-	-	-	0,6	-	-	0,9
6–9	0,4	-	-	-	-	0,4	-	-	0,9
10–14	0,3	-	-	0,3	-	0,3	-	-	0,9
15–17	0,5	1,0	3,0	2,0	0,5	6,0	-	-	12,9
18–20	-	-	-	2,1	8,3	4,7	0,5	-	15,6
21–24	-	-	-	1,1	5,3	0,8	-	0,4	7,5
25–34	0,3	0,2	0,3	1,1	2,7	1,5	0,8	0,2	7,0
35–44	0,6	0,1	0,1	1,1	2,6	0,6	-	0,1	5,3
45–54	1,1	-	-	0,5	2,6	0,7	0,7	0,7	6,2
55–64	0,9	0,4	0,1	0,3	2,0	0,5	0,4	0,3	4,9
65–74	1,7	1,3	0,2	-	3,5	0,4	-	0,2	7,3
75–	4,8	1,2	0,5	-	6,3	1,5	-	-	14,3
<b>Yhteensä Total</b>	<b>1,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>	<b>2,7</b>	<b>1,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>6,5</b>

**Kuolleet 100 miljoonaa autokilometriä kohti 1975–2008**

Killed per 100 million automobile kilometres 1975–2008

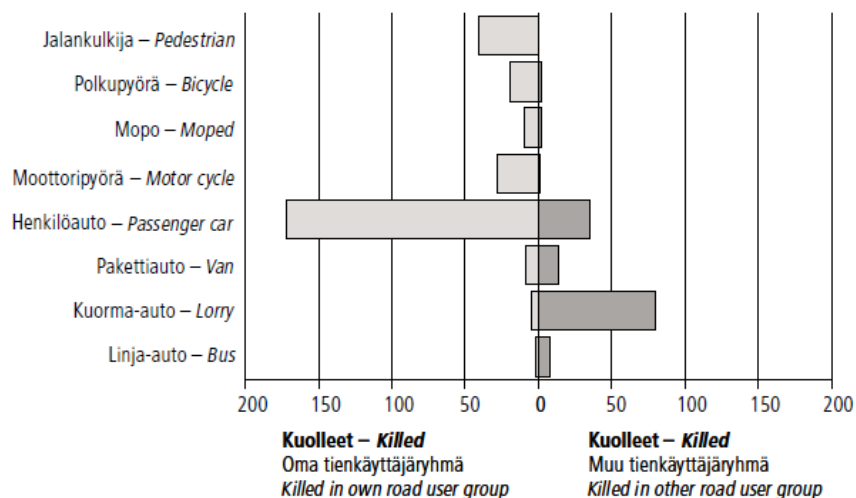


Lähteet: Tiehallinto, Tilastokeskus – Source: Finnish Road Administration, Statistics Finland

**Taulukko 11. Moottoriajoneuvojen kuljettajat henkilövahinko-onnettomuksissa ajokortin mukaan 2011**  
*Table 11. Motor vehicle drivers in accidents involving casualties by type of vehicle and driving licence 2011*

Ajokortti – Driving licence	Kuljettajan liikenneyksikkö – Traffic unit of driver								Yhteensä Total
	Mopo Moped	Moottoripyörä Motor cycle	Henkilöauto Pass. car	Linja-auto Bus	Pakettiauto Van	Kuorma-auto Lorry	Traktori Agric. tractor	Muu Other	
M	768	–	–	–	–	–	–	–	768
T	165	–	–	–	–	–	10	–	175
A1, A	12	167	–	–	1	–	–	–	180
B1, B, BE	37	178	4 263	–	258	2	17	5	4 760
C1, C	29	167	1 273	–	209	127	30	6	1 841
CE, C1E	6	46	300	1	76	271	12	2	714
D1, D1E	1	1	10	3	–	–	–	–	15
D, DE	1	15	103	131	9	81	1	–	341
Harjoituslupa – Learning	–	1	–	–	–	–	–	–	1
Ei ajokorttia – No licence	44	55	217	1	7	4	4	–	332
Ei tietoa – Unknown	64	22	232	11	23	21	2	22	397
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>1 127</b>	<b>652</b>	<b>6 398</b>	<b>147</b>	<b>583</b>	<b>506</b>	<b>76</b>	<b>35</b>	<b>9 524</b>

**Tieliikenneonnettomuksissa kuolleet osallisten tienkäyttäjryhmien mukaan 2011**  
*Killed in road traffic accidents by road user group 2011*



[http://www.liikenneturva.fi/www/fi/tilastot/liitetiedostot/Tieliikenneonnettomuudet\\_2011.pdf](http://www.liikenneturva.fi/www/fi/tilastot/liitetiedostot/Tieliikenneonnettomuudet_2011.pdf)

**Taulukko 17. Kuolleet ja loukkaantuneet kuukausittain 2003–2008**

Table 17. Killed and injured by month 2003–2008

Kuukausi – Month	Vuosi – Year						Rattijuopumustapauksissa 2008 Involving drunken driver
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
<b>Kuolleet – Killed</b>							
Tammikuu – January	22	25	50	15	28	21	3
Helmikuu – February	23	19	20	22	20	22	6
Maaliskuu – March	25	40	24	16	29	21	6
Huhtikuu – April	26	38	19	16	24	25	12
Toukokuu – May	29	42	32	27	39	29	7
Kesäkuu – June	26	28	41	32	48	25	9
Heinäkuu – July	32	26	44	36	42	41	9
Elokuu – August	43	25	42	45	32	27	9
Syyskuu – September	42	40	35	40	31	33	3
Lokakuu – October	33	38	24	30	32	44	21
Marraskuu – November	32	28	28	24	26	29	7
Joulukuu – December	46	26	20	33	29	27	4
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>379</b>	<b>375</b>	<b>379</b>	<b>336</b>	<b>380</b>	<b>344</b>	<b>96</b>
<b>Loukkaantuneet – Injured</b>							
	<b>2003<sup>1)</sup></b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	
Tammikuu – January	621	676	682	474	649	594	37
Helmikuu – February	470	571	472	550	425	520	41
Maaliskuu – March	470	522	499	473	493	427	36
Huhtikuu – April	590	551	490	430	606	590	81
Toukokuu – May	735	746	834	682	738	799	111
Kesäkuu – June	849	778	866	1 013	936	883	140
Heinäkuu – July	902	913	1 124	983	859	950	124
Elokuu – August	989	914	984	946	982	869	107
Syyskuu – September	918	760	864	891	724	805	83
Lokakuu – October	880	830	789	806	664	792	79
Marraskuu – November	748	740	716	603	679	661	78
Joulukuu – December	916	790	663	729	691	623	40
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>9 088</b>	<b>8 791</b>	<b>8 983</b>	<b>8 580</b>	<b>8 446</b>	<b>8 513</b>	<b>957</b>

<sup>1)</sup> Tietoini muuttunut – Compilation method changed

**Taulukko 18. Kuolleet ja loukkaantuneet viikonpäivittäin 2003–2008**

Table 18. Killed and injured by day of week 2003–2008

Viikonpäivä – Day of week	Vuosi – Year						Rattijuopumustapauksissa 2008 Involving drunken driver
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
<b>Kuolleet – Killed</b>							
Maanantai – Monday	42	66	53	42	56	45	6
Tiistai – Tuesday	59	42	46	40	48	48	9
Keskiviikko – Wednesday	55	43	45	55	47	43	15
Torstai – Thursday	45	48	58	45	43	53	14
Perjantai – Friday	54	86	73	53	50	66	21
Lauantai – Saturday	69	55	70	65	72	52	19
Sunnuntai – Sunday	55	35	34	36	64	37	12
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>379</b>	<b>375</b>	<b>379</b>	<b>336</b>	<b>380</b>	<b>344</b>	<b>96</b>
<b>Loukkaantuneet – Injured</b>							
	<b>2003<sup>1)</sup></b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	
Maanantai – Monday	1 293	1 270	1 244	1 184	1 199	1 154	63
Tiistai – Tuesday	1 129	1 233	1 178	1 099	1 140	1 197	81
Keskiviikko – Wednesday	1 210	1 194	1 139	1 173	1 172	1 218	78
Torstai – Thursday	1 263	1 270	1 365	1 244	1 113	1 121	116
Perjantai – Friday	1 532	1 337	1 477	1 480	1 390	1 520	144
Lauantai – Saturday	1 476	1 450	1 425	1 405	1 381	1 319	312
Sunnuntai – Sunday	1 185	1 037	1 155	995	1 051	984	163
<b>Yhteensä – Total</b>	<b>9 088</b>	<b>8 791</b>	<b>8 983</b>	<b>8 580</b>	<b>8 446</b>	<b>8 513</b>	<b>957</b>

<sup>1)</sup> Tietoini muuttunut – Compilation method changed

Ryhmä 1: Vuonna 1996 tai sen jälkeen käyttöönotetut henkilöautot

Aiheuttaja	Malli	Kaikki vahingot			Henkilöautojen yhteenajot				
		Vah lkm	Vah lkm / 100 ajon	H-vah lkm / 100 vah	Yks h-vah / 100 vah	Vah lkm	Uhrin / 100 vah	Uhrin / 100 vah	Vastapuol uhrin / 100 vah
<b>Kaikki henkilöautot</b>		<b>112657</b>	<b>2,8</b>	<b>14,4</b>	<b>4,6</b>	<b>91556</b>	<b>3579</b>	<b>3,9</b>	<b>6,7</b>
ALFA ROMEO 156		208	3,6	12,0	2,9	181	10	.	.
AUDI A3		572	3,2	12,1	3,1	482	11	2,3	7,3
AUDI A4		1257	2,8	13,1	4,2	1057	34	3,2	7,9
AUDI A6		853	3,4	11,8	3,4	727	15	2,1	8,3
BMW 3-SARJA		962	3,0	16,6	5,9	773	30	3,9	9,4
BMW 5-SARJA		789	3,1	13,8	5,1	636	15	2,4	6,8
CHRYSLER GRAND VOYAGER		322	4,0	7,5	2,5	272	13	.	.
CHRYSLER NEON		473	3,2	10,4	2,1	402	8	.	.
CHRYSLER SEBRING		148	2,6	11,5	2,0	127	6	.	.
CHRYSLER VOYAGER		422	3,5	8,3	1,7	358	7	.	.
CITROEN BERLINGO		268	3,2	10,4	3,4	240	11	.	.
CITROEN C3		306	2,4	18,0	4,6	241	17	.	.
CITROEN C4		248	2,7	9,3	4,0	210	8	.	.
CITROEN C5		880	3,2	12,4	3,1	740	20	2,7	6,1
CITROEN SAXO		181	2,7	16,0	5,5	146	10	.	.
CITROEN XANTIA		456	3,3	11,4	3,3	381	6	.	.
CITROEN XSARA		1437	2,9	16,5	6,3	1150	53	4,6	6,3
FIAT BRAVA		455	3,0	15,8	4,6	361	27	7,5	5,3
FIAT BRAVO		334	3,2	15,0	3,6	277	24	.	.
FIAT MAREA		287	3,3	19,9	4,2	242	16	.	.
FIAT PUNTO		1681	2,4	19,3	5,8	1312	103	7,9	6,6
FIAT STILO		480	2,5	12,3	3,8	408	11	2,7	7,1
FORD ESCORT		789	2,6	19,3	6,5	627	46	7,3	8,9
FORD FIESTA		691	2,4	15,6	4,5	568	28	4,9	9,5
FORD FOCUS		2848	2,7	13,7	3,6	2370	88	3,7	5,6
FORD GALAXY, S-MAX		143	3,5	11,9	1,4	118	6	.	.
FORD KA		310	2,0	21,3	3,9	251	16	.	.
FORD MONDEO		2691	2,9	11,4	2,8	2300	83	3,6	6,7
HONDA ACCORD		684	2,9	14,8	4,2	545	19	3,5	5,3
HONDA CIVIC		1059	3,2	16,0	6,2	838	45	5,4	6,1
HONDA CR-V		750	3,5	9,3	2,9	634	11	1,7	4,3
HONDA HR-V		157	3,1	10,2	1,3	134	3	.	.
HONDA JAZZ		125	2,9	18,4	4,0	100	6	.	.
HYUNDAI GETZ		217	2,2	15,7	5,1	163	3	.	.
KIA CERATO		330	3,2	8,8	1,5	280	9	.	.
LADA-VAZ 110		340	2,7	17,6	6,2	269	14	.	.
LADA-VAZ SAMARA		227	2,0	14,1	3,1	189	8	.	.
MAZDA 323		416	2,6	16,8	4,3	343	29	8,5	9,9
MAZDA 323F		210	2,8	11,0	2,4	180	3	.	.
MAZDA 626		646	2,6	14,2	4,0	536	32	6,0	7,6
MAZDA MAZDA3		249	2,5	13,7	2,0	214	11	.	.
MAZDA MAZDA6		873	2,7	9,5	2,4	758	18	2,4	4,4
MERCEDES-BENZ A-SARJA		324	2,5	13,0	3,1	272	9	.	.
MERCEDES-BENZ C-SARJA		1152	2,4	15,0	4,4	911	31	3,4	8,1
MERCEDES-BENZ E-SARJA		1122	2,8	16,5	4,7	868	41	4,7	6,9
MITSUBISHI CARISMA		339	2,6	17,4	5,3	277	16	.	.
MITSUBISHI LANCER		215	2,4	18,1	6,0	170	5	.	.
NISSAN ALMERA		2686	2,4	15,7	5,7	2161	92	4,3	7,2
NISSAN MAXIMA		170	2,7	10,0	2,4	146	5	.	.
NISSAN MICRA		733	2,2	20,1	6,4	573	44	7,7	7,5
NISSAN PRIMERA		2712	2,8	12,8	4,5	2238	75	3,4	5,9
NISSAN X-TRAIL		185	3,5	11,4	1,6	154	4	.	.
OPEL ASTRA		3359	2,6	14,8	4,9	2742	110	4,0	6,6

# Kvalitatiivinen riskianalyysi

- Tukeutuu riskien todennäköisyyksien ja seuraamusten sanalliseen luokitteluun
  - Ei edellytä tarkkoja numeerisia arvioita
  - Mahdollisia todennäköisyysarvioita
    - » Lähes varma/Luultava/Mahdollinen/Mahdollinen/ Epätodennäköinen/Lähes mahdoton
  - Mahdollisia seuraamusarvioita
    - » Katastrofaalinen/Kriittinen/ Marginaalinen/ Merkityksetön
  - Välittää näkemystä riskeistä
  - Tärkeää suhtautua arvioihin kriittisesti

# Kvalitatiivinen riskianalyysi

- Tuotetaan riskimatriisi
  - Vaaraskenaariot positioidaan todennäköisyyksien ja seuraamusten suhteen
  - Luokitellaan vaarojen tärkeys
    - » Esim. High / Intermediate / Low / Trivial
  - Riskienhallintatoimet suunnataan usein tärkeimpiin

TABLE 2.3  
 Qualitative Risk Assessment Matrix

Frequency of Occurrence	Frequency (per Year)	Severity of Consequence			
		Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
Frequent	$>1$	H	H	H	I
Probable	$1-10^{-1}$	H	H	I	L
Occasional	$10^{-1}-10^{-2}$	H	H	L	L
Remote	$10^{-2}-10^{-4}$	H	H	L	L
Improbable	$10^{-4}-10^{-6}$	H	I	L	T
Incredible	$<10^{-6}$	I	I	T	T

# Riskimatriisin esittäminen

**TABLE 2.13**

Likelihood Categories for a Risk Matrix

Category	Description	Annual Probability Range
A	Likely	$\geq 0.1$ (1 in 10)
B	Unlikely	$\geq 0.01$ (1 in 100) but $< 0.1$
C	Very unlikely	$\geq 0.001$ (1 in 1000) but $< 0.01$
D	Doubtful	$\geq 0.0001$ (1 in 10,000) but $< 0.001$
E	Highly unlikely	$\geq 0.00001$ (1 in 100,000) but $< 0.0001$
F	Extremely unlikely	$< 0.00001$ (1 in 100,000)

**TABLE 2.14**

Consequence Categories for a Risk Matrix

Category	Description	Examples
I	Catastrophic	Large number of fatalities and/or major long-term environmental impact
II	Major	Fatalities and/or major short-term environmental impact
III	Serious	Serious injuries and/or significant environmental impact
IV	Significant	Minor injuries and/or short-term environmental impact
V	Minor	First aid injuries only and/or minimal environmental impact
VI	None	No significant consequence

Probability Category	<b>A</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>H</b>
	<b>B</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>H</b>	<b>H</b>
	<b>C</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>H</b>
	<b>D</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>M</b>
	<b>E</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>M</b>
	<b>F</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>	<b>L</b>
		<b>VI</b>	<b>V</b>	<b>IV</b>	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>I</b>
	Consequence Category						

**FIGURE 2.11**  
 Example Risk Matrix

Ayyub, Tables 2.13-2.15



# Myönteiset seuraamukset

TABLE 2.16

Expanded Likelihood Categories for a Risk Matrix

Category	Description	Annual Probability Range
AA	Very likely	$\geq 0.8$
A	Likely	$\geq 0.1$ (1 in 10) but $< 0.8$
B	Unlikely	$\geq 0.01$ (1 in 100) but $< 0.1$
C	Very unlikely	$\geq 0.001$ (1 in 1000) but $< 0.01$
D	Doubtful	$\geq 0.0001$ (1 in 10,000) but $< 0.001$
E	Highly unlikely	$\geq 0.00001$ (1 in 100,000) but $< 0.0001$
F	Extremely unlikely	$< 0.00001$ (1 in 100,000)

TABLE 2.17

Example Consequence Categories for a Risk Matrix in 2003  
 Monetary Amounts (US\$)

Category	Description	Cost
I	Catastrophic loss	$\geq \$10,000,000,000$
II	Major loss	$\geq \$1,000,000,000$ but $< \$10,000,000,000$
III	Serious loss	$\geq \$100,000,000$ but $< \$1,000,000,000$
IV	Significant loss	$\geq \$10,000,000$ but $< \$100,000,000$
V	Minor loss	$\geq \$1,000,000$ but $< \$10,000,000$
VI	Insignificant loss	$< \$1,000,000$
I+	Insignificant gain	$< \$1,000,000$
II+	Significant gain	$\geq \$1,000,000$ but $< \$10,000,000$
III+	Major gain	$\geq \$10,000,000$

H+	H+	M+	AA						
H+	M+	L+	A	L	M	M	H	H	H
M+	L+	L+	B	L	L	M	M	H	H
			C	L	L	L	M	M	H
			D	L	L	L	L	M	M
			E	L	L	L	L	L	M
			F	L	L	L	L	L	L
III+	II+	I+	Probability Categories	VI	V	IV	III	II	I
Gain Categories				Loss Categories					



# Luokittelut riskiarvioinnissa (1/2)

Todennäköisyys (T)	
T = 0	Ei mahdollinen
T = 1	Hyvin epätodennäköinen (kerran 100 vuodessa tai harvemmin)
T = 2	Epätodennäköinen (korkeintaan kerran 30 vuodessa)
T = 3	Lievästi todennäköinen (korkeintaan kerran 10 vuodessa)
T = 4	Melko todennäköinen (korkeintaan kerran 3 vuodessa)
T = 5	Hyvin todennäköinen (kerran vuodessa tai useammin)

Henkilövahingot (H)	
H = 0	Ei henkilövahinkoja
H = 1	Yhden henkilön lievä loukkaantuminen
H = 2	Yhden henkilön vakava loukkaantuminen tai usean henkilön lievä loukkaantuminen
H = 3	Usean henkilön vakava loukkaantuminen
H = 4	Yhden henkilön kuolema
H = 5	Usean henkilön kuolema

## Luokittelut riskiarvioinnissa (2/2)

- Kokonaisriski  $R = T \cdot (H + M + K)$ 
  - Huom! tämä rinnastaa eri vahinkotyytit keskenään lineaarisesti - siirtymät eri luokkien välillä arvioitu yhtä merkittäviksi (vaikka näin ei välttämättä oikeasti ole)

Materiaalivahingot (M)	
M = 0	Ei materiaalivahinkoja
M = 1	Vahingot alle 20 000 EUR
M = 2	Vahingot alle 200 000 EUR
M = 3	Vahingot alle 2 MEUR
M = 4	Vahingot alle 10 MEUR
M = 5	Vahingot yli 10 MEUR

Keskeytysvahingot (K)	
K = 0	Ei keskeytysvahinkoja
K = 1	Toiminnan keskeytys alle 1 viikko
K = 2	Toiminnan keskeytys alle 1 kuukausi
K = 3	Toiminnan keskeytys alle puoli vuotta
K = 4	Toiminnan keskeytys alle 1 vuosi
K = 5	Toiminnan keskeytys yli 1 vuosi tai toiminnan lopettaminen

# Esimerkki polttoainetankki

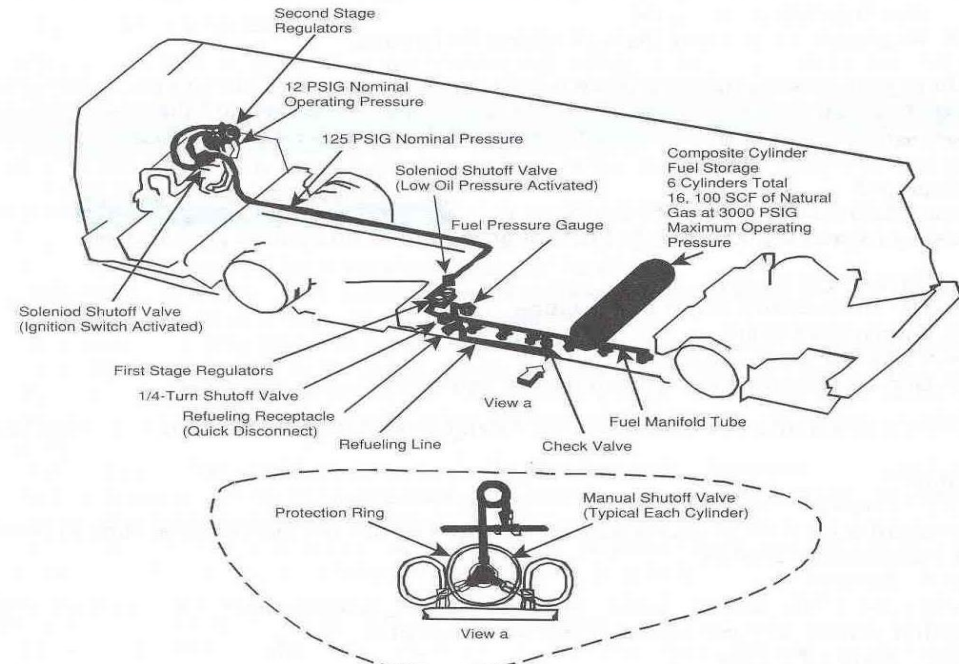
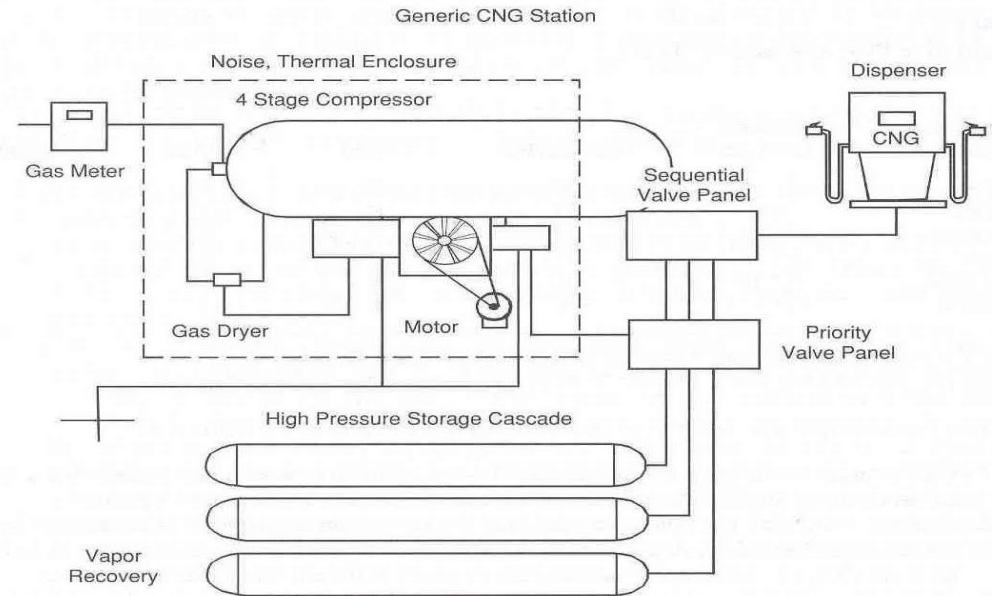


FIGURE 2.7 Overall elements of the CNG system.

# Polttoainetankki – riskien tunnistaminen

- Hazardit
  - Kaasujärjestelmän tulipalot ja räjähdykset
    - » Vahingot matkustajille ja ulkopuolisille
- Barriäärit
  - CNG-säiliö
  - Paineenhallintajärjestelmä
  - Operaattori
  - Hälytysjärjestelmä (kaasuvuodon tunnistus)
  - Ennakkohuolto
- Barriäärien toiminta kriittisissä skenaarioissa
  - CNG-säiliön tai paineenhallintajärjestelmän katastrofaaliset vikaantumiset (sisäiset viat), joista seuraa äkillisesti kaasuvuoto ja syttymisen mahdollisuus
  - CNG-säiliön tai paineenhallintajärjestelmän eheyttä heikentävät viat tai ilmiöt, joista seuraa asteittain kaasuvuoto ja syttymisen mahdollisuus
  - ...

# Vaaraskenaariot

TABLE 2.4  
 Barrier Failures and Their Effects

Failure Category of the Barrier	Failures Internal to the Barrier	Failures External to the Barrier
Mechanically induced failure	Pressure gauge failing cause missile damage Fire resulting from gas release through pressure relive system because of pressure/temperature cycling CNG tank falling hazards CNG fuel tank explosion or other fires due to vehicle impact in traffic accident Vehicle fire caused by fuel system leaks due to poor design or improper installation Vehicle fire due to undetected fuel system leaks from failed components Vehicle explosion resulting from fuel system leaks Building explosion from vehicle, dispenser, or storage vessel leaks Explosion due to mechanical damage to vehicle storage cylinder	Explosion of CNG fuel tank due to failure of the compressor to shut off Missile damage from flying parts generated during CNG tank disassembly High speed flying object from fueling hose failure Fire due to gas dispenser damage from vehicle collision Fire from damaged gas supply pipelines Fire resulting from drive away during fueling Missile damage from catastrophic compressor failure causing damages and injuries/fatalities
Chemically induced failures	Explosion due to catastrophic tank rupture resulted from external corrosion of CNG fuel tank Explosion of vehicle tank due to internal corrosion	Fire from corrosion of gas supply pipeline resulting in leaks Fire and explosion from corrosion of storage vessels
Electrically induced failures	Vehicle fire due to electrical failures not related to CNG system	Electric shock from power supply to natural gas compressor stations Fire from electrostatic charge occurred during tank venting

# Polttoainetankki (jatk.)

**TABLE 2.5**  
**Matrix of Gas Release and Dispersion Scenarios**

CNG Release Mode	Ignition Mode	Expected Consequence
Instantaneous	Immediate	Fireball
	Delayed	Vapor cloud explosion or flash fire
Gradual	Immediate	Jet flame
	Delayed	Vapor cloud explosion or flash fire

**TABLE 2.6**  
**Severity Description from Exposure of the Fire**

Severity Category	Severity Category Description
Catastrophic	CNG release involving catastrophic fire or explosion
Critical	Unconfined CNG release with critical fire or explosive potential
Marginal	Small CNG release with marginal ignition potential or fire effects
Minor	Failure with minor fire potential and only loss of system operation

# Polttoainetankki (jatk.)

**TABLE 2.7**  
**Relative Frequency Categories for Fire Scenarios**

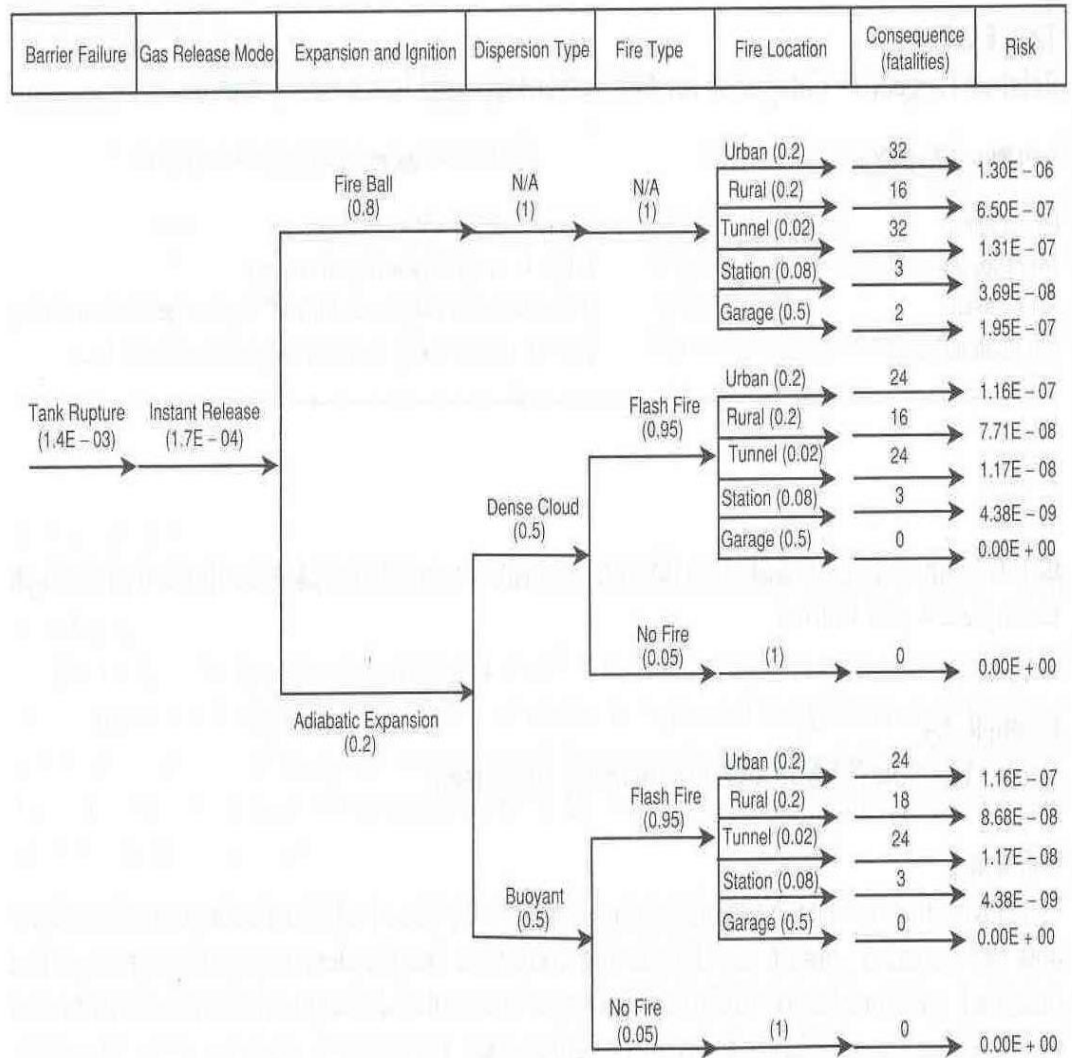
Frequency Category	Frequency Category Description
(A) Frequent	Likely to occur within 1 year or less
(B) Probable	Likely to occur within 10 years or less
(C) Unlikely	Probable within the expected life of 20 years for a bus or station
(D) Remote	Possible but not likely during the expected life of 20 years

**TABLE 2.8**  
**Risk Matrix Showing the Number of Scenarios Falling into the Various Risk Categories**

	Catastrophic	Critical	Marginal	Minor
Likely	0	0	0	4
Probable	1	8	6	15
Unlikely	3	7	12	19
Remote	4	3	2	3



# Onnettomuusketjujen kvantifiointi





# Tn-pohjainen turvallisuusanalyysi

- PSA (Probabilistic Safety Assessment)
- PRA (Probabilistic Risk Analysis)
  - Kehitetty alkuaan ydinvoimalaitosten turvallisuus-tarkasteluihin (WASH-1400, GRS, jne.)
  - Käytetty sittemmin lukuisissa eri yhteyksissä
  - Soveltuu laajojen teknisten järjestelmien riskien analyysiin
- Tukeutuu osin muihin menetelmiin
  - Vikapuut, tilamallit, tilastanalyysit, tapahtumapuut
  - Lisäksi tarvitaan myös fysikaalisia malleja
    - » Esim. onnettomuuksien seurauksien arviointi
- PSA:n tavoitteet
  - Tunnistaa teknisen järjestelmän häiriöistä johtuvat erilaiset onnettomuudet
  - Tuottaa kvantitatiiviset arviot onnettomuuksien esiintymistodennäköisyyksistä ja/tai -taajuuksista
  - Tunnistaa onnettomuuksista johtuvat vahingolliset seuraukset
  - Arvioi seurauksien suuruutta kvantitatiivisesti

## PSA-tasoja

- Taso 1
  - Sisältää vain onnettomuusketjujen esiintymistaajuuden arvioinnin
- Taso 2
  - Sisältää tason 1 lisäksi sisältää eri seurausten suuruuden arvioinnin (esim. ympäristöön pääsevän myrkkymäärän arviointi)
- Taso 3
  - Sisältään tasojen 1 ja 2 lisäksi sisältää fysikaalisten seurausten aiheuttamien terveys-, ympäristö- yms. haittojen kvantitatiivisen arvioinnin

# Määritelmiä

- **Onnettomuus**
  - Alkuhäiriöstä (alkutapahtumasta) liikkeellelähtevä, turvallisuustoimintojen erilaisten vikayhdistelmien kautta epätoivottuun seuraukseen johtava tapahtumasarja
- **Alkutapahtuma**
  - Prosessin häiriö tai vika, jonka hoitaminen vaatii turvallisuustoimenpiteitä (esim. prosessin pysäyttäminen), ja joka ilman onnistuneita turvallisuustoimenpiteitä johtaa epätoivottuihin seurauksiin
- **Turvallisuustoiminto**
  - Alkutapahtuman edelleenkehittymisen estävä tai sitä lieventävä toiminto
- **Turvallisuusjärjestelmä**
  - Tekninen järjestelmä, joka toteuttaa turvallisuustoiminnon
- **Onnettomuusketju**
  - Tietystä alkutapahtumasta alkava onnettomuus, josta tiettyjen turvallisuustoimintojen vikojen tai toimimattomuuden kautta päädytään epätoivottuun seuraukseen

# Tulipalo kemikaalivarastossa (1/2)

- Onnettomuus
  - Kemikaalivarastossa syttyneen tulipalon aiheuttama vahingollinen tapahtuma
- Mahdollisia alkutapahtuma
  - Palonalku, joka johtuu esimerkiksi
    - » varomattomasta tulenkäsittelystä
    - » staattisen sähkön aiheuttamasta kipinästä
    - » varastossa toimivan laitteen viasta
    - » jne.
- Turvallisuustoimintoja
  - Palon sammuttaminen sprinklereillä
  - Palon varhainen havaitseminen ja sammutus henkilökunnan toimesta
  - Automaattinen palohälytys ja palokunnan toteuttama sammutus
- Turvallisuusjärjestelmiä
  - Sprinklerijärjestelmä
  - Palohälytysjärjestelmä
  - Palokunta
  - Jne.

# Tulipalo kemikaalivarastossa (2/2)

- Mahdollisia onnettomuusketjuja
  - Staattisen sähköön aiheuttama palo, joka etenee sprinklerijärjestelmän toimimattomuuden takia, mutta jonka automaattisen palohälytyksen kutsuma palokunta sammuttaa tietyn ajan kuluessa
  - Staattisen sähköön aiheuttama palo, joka tuhoaa varaston sekä sprinklerijärjestelmän että automaattisen palo-hälytyksen toimimattomuuden takia
  - jne.
- PSA:n tasoja
  - Taso 1 - Lasketaan eri palo-onnettomuusketjujen esiintymistaajuuudet
  - Taso 2 - Arvioidaan lisäksi kunkin onnettomuusketjun seurausten suuruus
    - » Esim. automaattisen sammutusjärjestelmän sammuttama palo (taajuus x krt per vuosi) aiheuttaa pienet vesivahingot eikä myrkkypäästöjä synny
    - » Esim. kaikkien turvallisuustoimintojen epäonnistuttua varasto räjähtää, mistä seuraa paineaalto ja erittäin suuri myrkkypäästö
  - Taso 3 – Edellisten lisäksi arvioidaan mm. myrkkypäästöjen lyhyt- ja pitkäaikaisia ympäristön asukkaille aiheutuvia terveyshaittoja

# Onnettomuustn:ien määrittäminen (1)

- Millä tn:illä tietty onnettomuusketju esiintyy tietyn ajanjakson kuluessa?
  - Tn. sille, että ajanjaksolla
    - esiintyy alkutapahtuma ja
    - turvallisuustoiminnot eivät toimi alkutapahtuman esiintyessä
- Alkutapahtumien tunnistaminen ja järjestelmävasteen määrittelemineen
  - Lähtökohtana alkutapahtumien (initiating events, IE) tunnistaminen ja järjestelmävasteen kuvaaminen
  - Voidaan käyttää kvalitatiivisia tunnistusmenetelmiä (käydään läpi myöhemmin)
  - Mitkä turvallisuustoiminnot tai onnettomuuksien etenemistä estävät keinot ovat käytettävissä ko. alkutapahtuman yhteydessä?

$$f = f_{IE} \prod_{i=1}^n P(F_i | IE, F_1, \dots, F_{i-1})$$

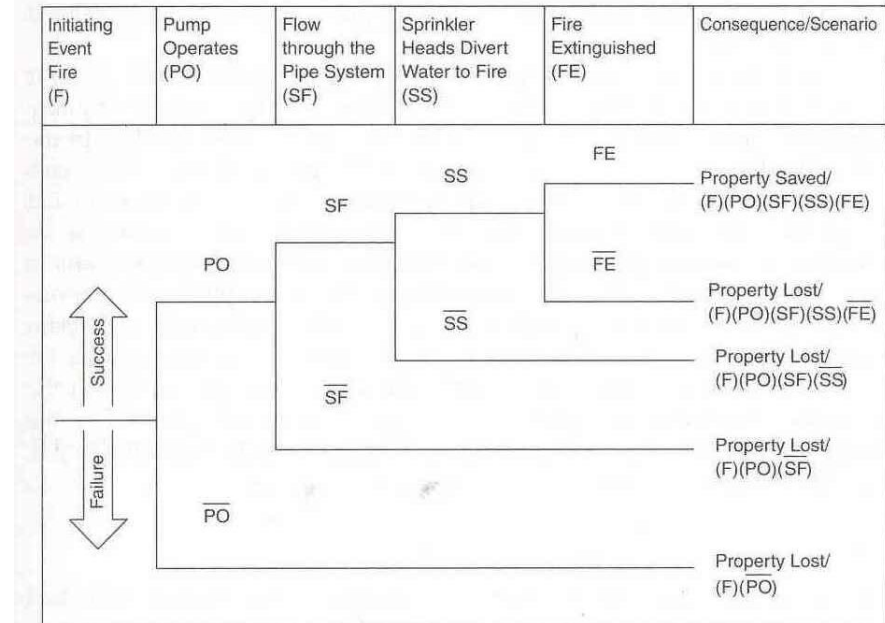
- $f_{IE}$  = alkutapahtuman esiintymistäajuus
- $F_i$  = i:nnen turvallisuustoiminnon vikatapahtuma
- $P(F_i | IE, F_1, \dots, F_{i-1})$  = i:nnen turvallisuustoiminnon ehdollinen vikaantumistn.

## Onnettomuustn:ien määrittäminen (2)

- Onnettomuuden etenemisen kuvaaminen
  - Kuvataan sopivalla loogisella/rakenteellisella mallilla
    - » Sisältää turvallisuustoimintojen onnistumisten ja vikaantumisten aiheuttamat onnettomuuden kulun haarautumat
  - Käytetään usein tapahtumapuuanalyysiä
- Turvallisuustoimintojen luotettavuusanalyysi
  - Kuvataan sopivalla loogisella (tai rakenteellisella) mallilla turvallisuustoimintojen vikaantumiset niiden osien vikaantumisten avulla
  - Sovelletaan usein vikapuuanalyysiä
- Mallin kvantifiointi
  - Johdetaan perustapahtumien esiintymistodennäköisyydet/ -taajuudet perustuen tilastotietoihin, komponenttimalleihin ja asiantuntija-arvioihin
  - Lasketaan onnettomuusketjujen todennäköisyydet ja -taajuudet noudattaen tapahtuma- ja vikapuumallien logiikkaa ja todennäköisyyslaskun sääntöjä

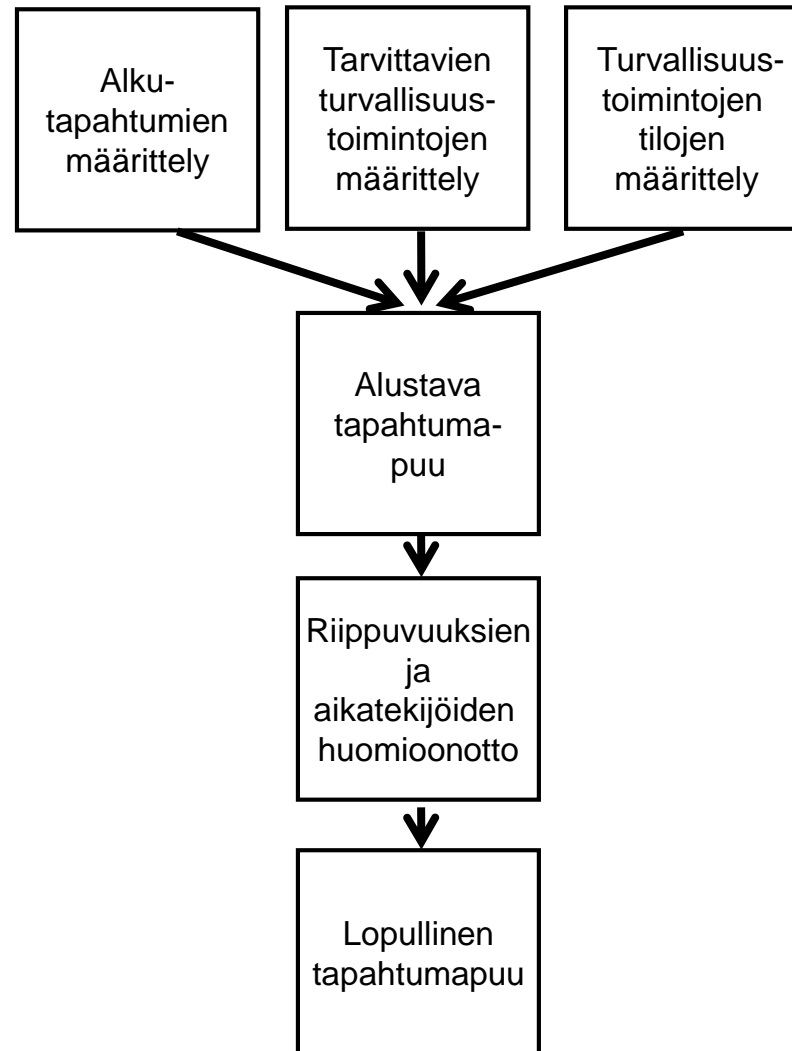
# Tapahtumapuuanalyysi

- Tapahtumapuu
  - Esittää annetusta alkutapahtumasta seuraavat onnettomuusketjut loogisena puuna
  - Etenee alkutapahtumasta aikajärjestyksessä esiintyvien turvallisuustoimintojen tilojen kautta lopputiloihin
  - On yleensä binäärinen so. turvallisuustoiminnoilla on kaksi tilaa (onnistunut =  $\underline{S}$ uccess ja epäonnistunut =  $\underline{F}$ ailure)
  - Myös ei-binääristen tapahtumapuiden käyttö mahdollista
  - Haarautumistodennäköisyydet ehdollisia (ehtona aiemmin onnistuneet tai epäonnistuneet toiminnot)

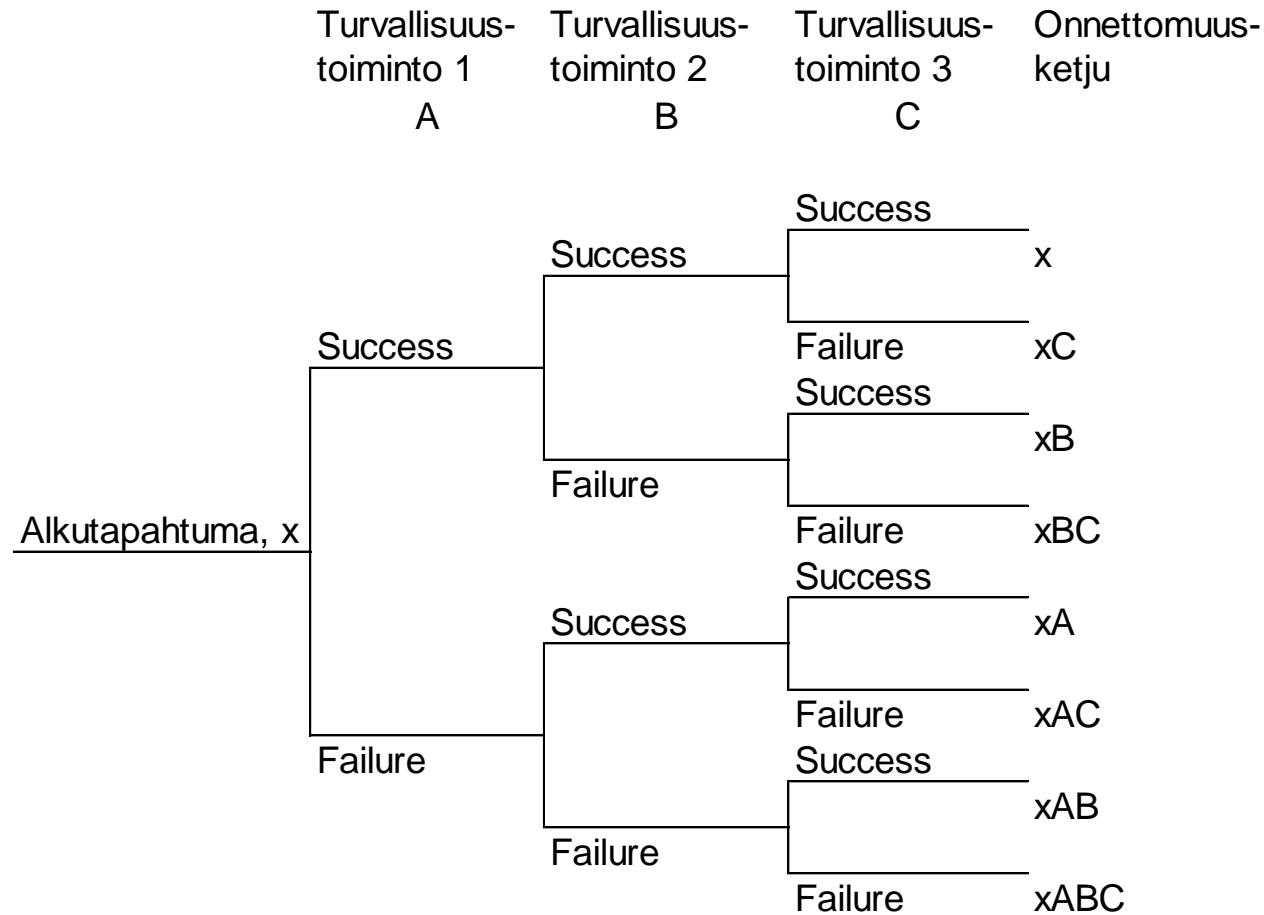




# Tapahtumapuun rakentaminen (1/2)

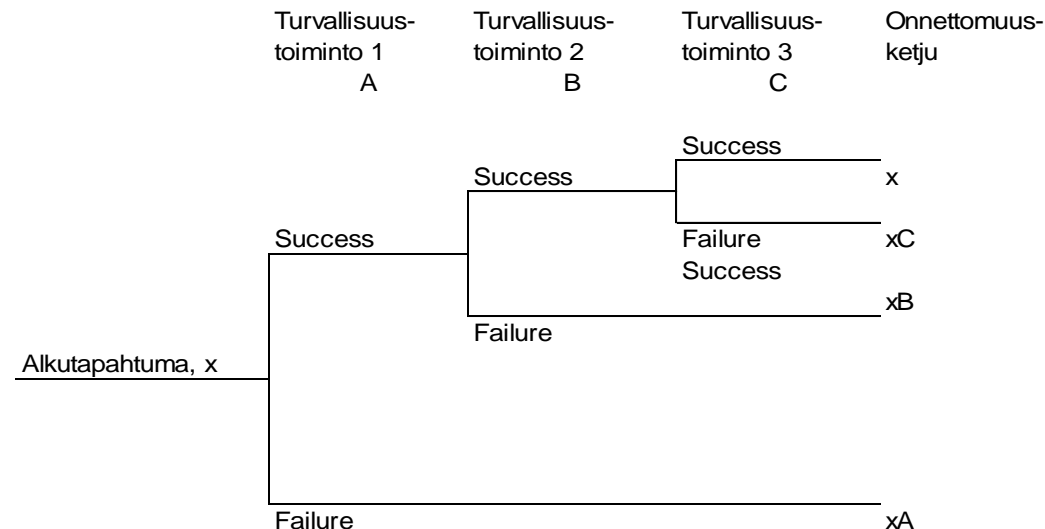


# Esimerkki tapahtumapuusta



# Tapahtumapuun rakentaminen (2/2)

- Periaatteita
  - Tapahtumapuun haarojen todennäköisyydet lasketaan esimerkiksi vikapuilla
  - Riippuvuuksien (esim. usealla turvallisuustoiminnolla on yhteisiä osia) huomioonotto tärkeää
    - » Vikapuulaskenta ottaa yleensä riippuvuudet huomioon
    - » Esim. jos A:n epäonnistuessa toiminnot B ja C eivät enää vaikuta tilanteeseen ja B:n epäonnistuessa C:llä ei ole merkitystä, niin saadaan



- Haarautumistodennäköisyydet ehdollisia (ehtona aiemmin onnistuneet tai epäonnistuneet toiminnot)
- Haettava kompromissi vikapuu- ja tapahtumapuumallien välillä