



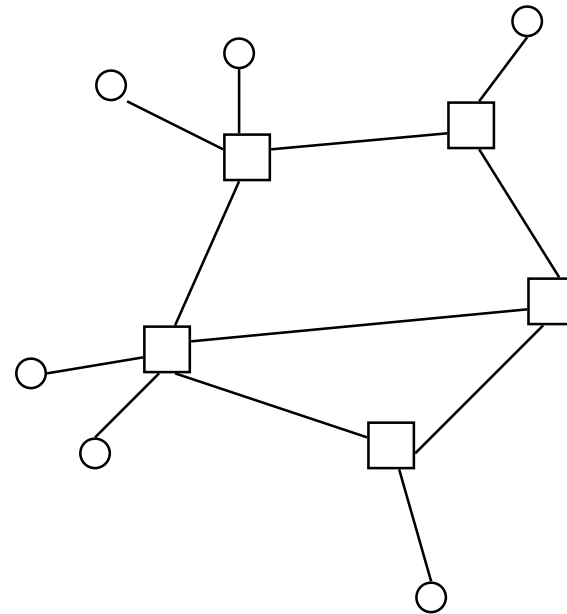
# 10. Verkon suunnittelu ja mitoitus

## Sisältö

- Johdanto
- Verkon suunnittelu
- Liikenne-ennusteet
- Mitoitus

## Tietoliikenneverkko

- Yksinkertainen tietoliikenneverkon malli koostuu
  - **solmuista** (node)
    - päätelaitteet ○
    - verkon solmut □
  - solmujen välisistä **linkeistä** (link)
- **Liityntäverkko** (access network)
  - päätelaitteita verkon (reunalla oleviin) solmuihin yhdistävä osa tietoliikenneverkosta
- **Runkoverkko** (trunk network)
  - verkon solmuja toisiinsa yhdistävä osa tietoliikenneverkosta



## Miksi verkon suunnittelua ja mitoitusta?

- “The purpose of dimensioning of a telecommunications network is to ensure that

the expected needs will be met in an economical way

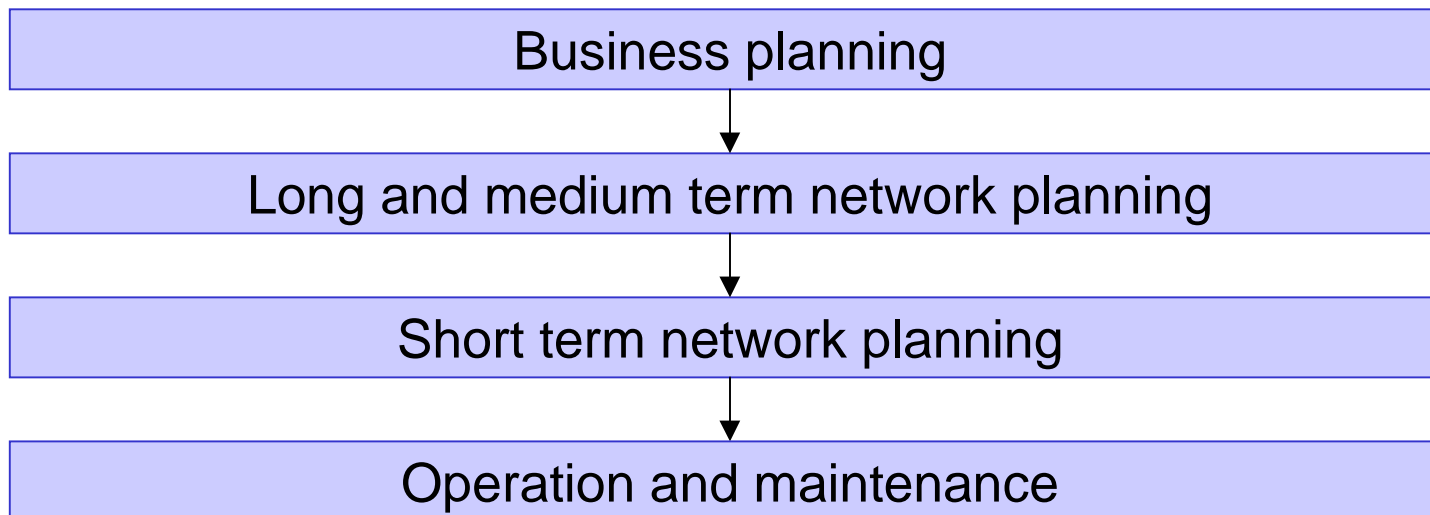
both for subscribers and operators.”

## Sisältö

- Johdanto
- Verkon suunnittelu
- Liikenne-ennusteet
- Mitoitus

## Verkon suunnittelu stabiilissa ympäristössä (1)

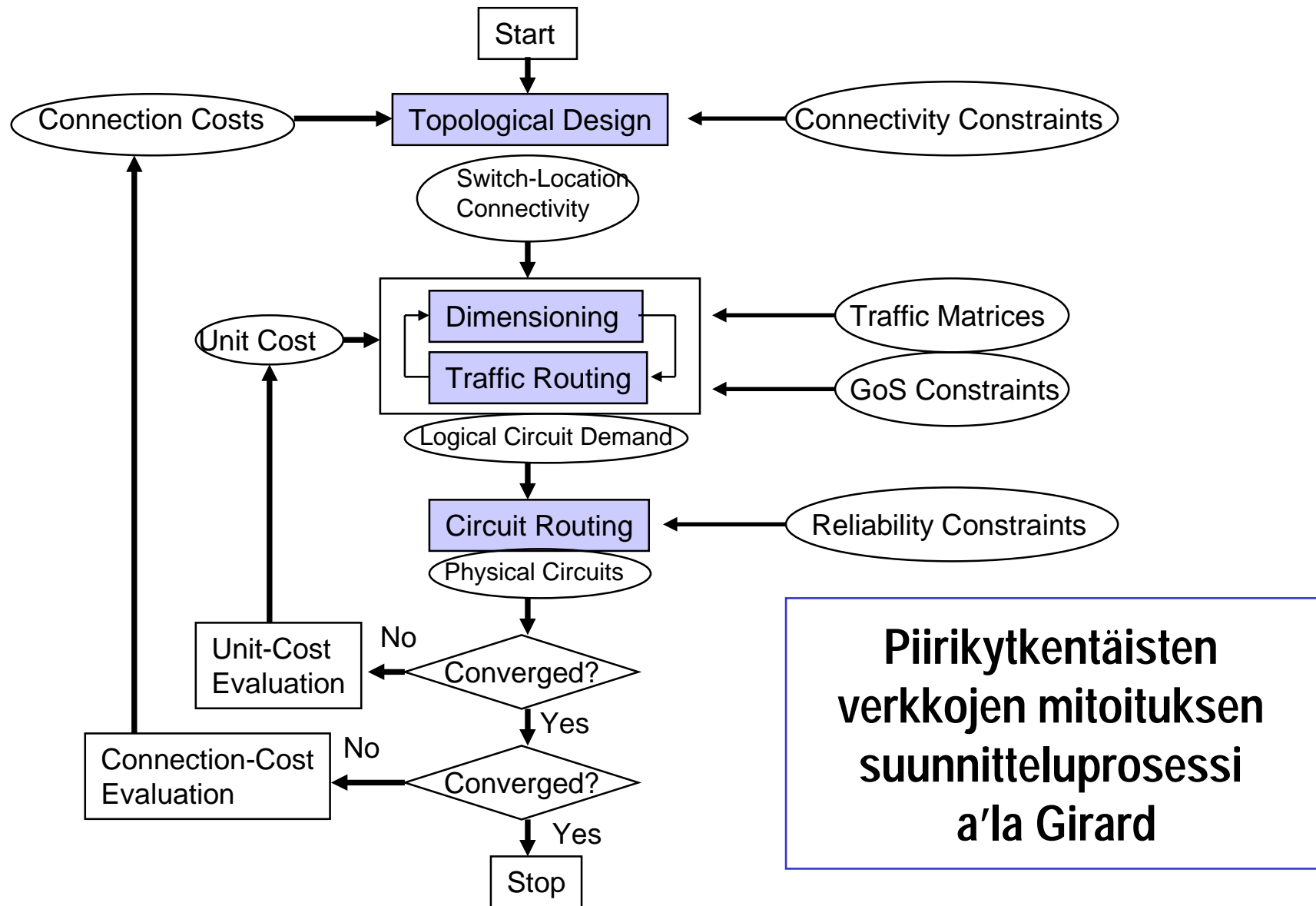
- Perinteinen suunnittelumalli:



## Verkon suunnittelu stabiilissa ympäristössä (2)

- Liikenteellinen näkökulma
  - Tiedon keruu (nykyinen status)
    - liikennemittaukset
    - tilaajien määrät ja alueellinen jakauma
  - Ennustus
    - palveluskenaariot
    - liikennemäärät ja -profiilit
- Taloudellinen näkökulma
- Teknillinen näkökulma
- Verkon optimointi ja mitoitus
  - hierarkkinen rakenne ja topologia
  - liikenteen reititys ja mitoitus
  - circuit routing

10. Verkon suunnittelu ja mitoitus



**Piirikytkentäisten verkkojen mitoituksen suunnitteluprosessi a'la Girard**



## Verkon suunnittelu turbulentissa ympäristössä (1)

- Päätöksiin vaikuttavat (uudet) tekijät:
  - Markkinat
    - kilpailu!
    - operaatorin tuleva rooli (niche): valta-asema/yhteistoiminta
  - Asiakkaiden tarpeet:
    - uudet palvelut: Internet & matkaviestimet (ennen kaikkea)
    - uudet liiketoimintamahdollisuudet
  - Teknologia:
    - uudet teknologiat: ATM, xDSL, GSM, CDMA, WDM,...
  - Standardit:
    - uusia standardeja ilmestyy jatkuvasti
  - Verkon suunnittelun ja operoinnin tuki:
    - uudet tietokoneavusteiset menetelmät
  - Kustannukset:
    - trendit: laitekustannukset alaspäin, henkilöstökustannukset ylöspäin

## Verkon suunnittelu turbulentissa ympäristössä (2)

- Operaattorin suojautuminkeinot:
  - Avoin, yleiskäyttöisille alustoille (platform) perustuva verkkoarkkitehtuuri
  - Marginaalikustannuksiltaan alhaisten verkon geneeristen osien ylimitoitus (redundancy)
- Uusi suunnittelumalli:

Business planning; Strategic-tactical planning of network resources for **flexible use**



Business-driven, dynamic network management for **optimal use** of network resources

## Sisältö

- Johdanto
- Verkon suunnittelu
- Liikenne-ennusteet
- Mitoitus

## Liikennemittausten ja -ennusteiden tarve

- Jotta verkon mitoitus olisi mahdollista, pitää olla jonkinlainen

### käsitys/arvio verkolle tarjottavasta liikenteestä

- Jos kyseessä on jo olemassa oleva ja toimiva verkko,
  - liikennettä voidaan tietysti arvioida tekemällä **(liikenne)mittauksia**
- Muutoin arvio täytyy perustaa muuhun käytettävissä olevaan tietoon kuten esim. arvioihin
  - tilaajien lkm:stä ja
  - yksittäisen tilaajan generoimasta ominaisliikenteestä
- Verkkoon tehtävien investointien pitkä aikajänne ⇒
  - pelkästään nykyisen liikenteen arviointi ei riitä
  - tarvitaan myös **(liikenne)ennusteita** tulevista liikennemääristä

## Liikenteen ennustaminen

- Tietoa tulevista tarpeista
  - arvio kehityksen kulkusuunnasta tulevaisuudessa
- Tarkoitus
  - luoda perusta verkkoon liittyville investointipäätöksille
- Ennustejaksot
  - aikanäkökulma tärkeä (ennusteen luotettavuuden kannalta)
  - tarve eripituisiin ennustejaksoihin

## Liikenne-ennuste

- Liikenne-ennuste kertoo
  - arvioidun verkon liikenteen kasvun suunnittelujakson aikana
- Lähtökohta:
  - nykyinen liikenteen määrä ns. kiiretunnin aikana (mitattu/arvioitu)
- Muut asiaan vaikuttavat tekijät:
  - muutokset tilaajien lkm:ssä
  - muutokset tilaajien generoimassa ominaisliikenteessä
- Lopputulos (so. ennuste):
  - **liikennematriisi** (traffic matrix), joka kertoo keskusten välisen **liikennetarpeen** (traffic interest)

## Liikennematriisi

- Liikennematriisi  $T = (T(i,j))$ 
  - kuvaa keskusten välisen liikennetarpeen
  - $N^2$  elementtiä ( $N =$  keskusten lkm)
  - elementti  $T(i,i)$  on arvio keskuksen  $i$  sisäiselle liikenteelle (erlangeina)
  - elementti  $T(i,j)$  on arvio keskukselta  $i$  keskukseseen  $j$  suuntautuvalla liikenteelle (erlangeina)
- Ongelma:
  - liikennematriisi kasvaa helposti liian suureksi:  
600 keskusta  $\Rightarrow$  360,000 elementtiä!
- Ratkaisu: hierarkkinen esitys
  - ylätaso: (laajempien) liikennealueiden välinen liikenne
  - alataso: keskusten välinen liikennetarve liikennealueen sisällä

## Esimerkki (1)

- **Oletukset:**
  - Paikalliskeskuksen alueella on 1000 yksityistilaajaa ja 10 yritystilaajaa (PBX)
  - Yksittäisen yksityistilaajan ominaisliikenteeksi on arvioitu 0.025 erlangia ja yksittäisen yrityksen ominaisliikenteeksi 0.200 erlangia
- **Kysymykset:**
  - Mikä on näiden tilaajien yhdessä generoima liikenneintensiteetti  $a$ ?
  - Mikä on uusien kutsujen saapumisintensiteetti, jos oletetaan, että keskimääräinen pitoaika on 3 minuttia?
- **Vastaukset:**
  - $a = 1000 * 0.025 + 10 * 0.200 = 25 + 2 = 27$  erlangia
  - $h = 3$  min
  - $\lambda = a/h = 27/3$  kutsua/min = **9 kutsua/min**



## Esimerkki (2)

- **Oletukset:**
  - Viiden vuoden ennustejaksolla uusien tilaajien lkm:n arvioidaan kasvavan lineaarisesti nopeudella 100 tilaajaa/vuosi
  - Yksittäisen tilaajan ominaisliikenteen arvioidaan kasvavan arvoon 0.040 erlangia
  - Yritystilaajien lkm:n arvioidaan kasvavan ennustejakson aikana 20:een
- **Kysymys:**
  - Mikä on liikenneintensiteetti  $a$  ennustejakson lopussa?
- **Vastaus:**
  - $a = (1000 + 5 \cdot 100) \cdot 0.040 + 20 \cdot 0.200 = 60 + 4 = \mathbf{64 \text{ erlangia}}$

## Esimerkki (3)

- **Oletukset:**
  - Tarkastellaan pientä verkkoa, joka koostuu kolmesta tällaisesta keskuksesta
  - Oletetaan, että puolet paikalliskeskusten liikenteestä on sisäistä liikennettä ja puolet suuntautuu muihin keskuksiin
- **Tehtävä:**
  - Konstruoi liikennematriisi  $T$ , joka kuvaa keskusten välistä liikennettä ennustejakson lopussa.

- **Vastaus:**
  - $T(i,i) = 64/2 = 32$  erlangia
  - $T(i,j) = 64/4 = 16$  erlangia

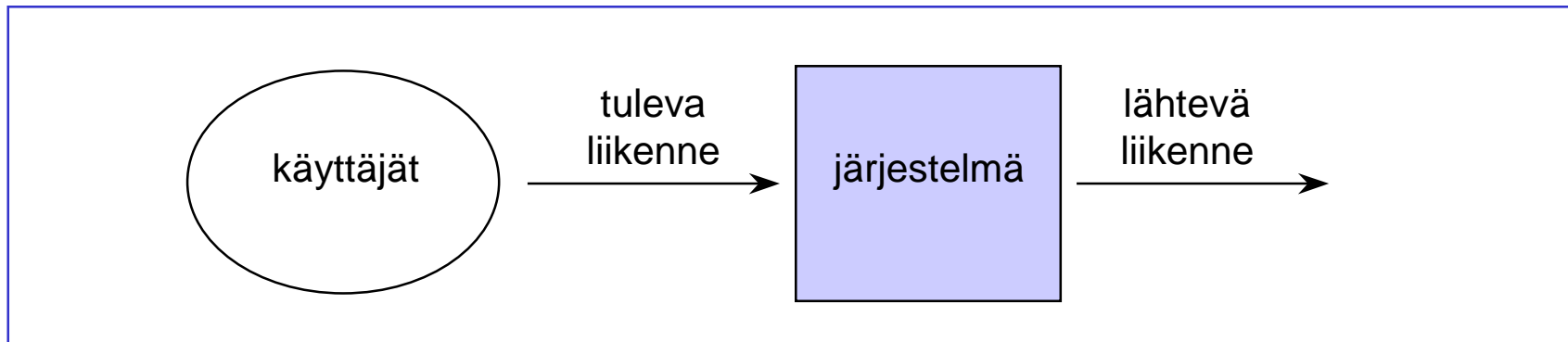
alue	1	2	3	summa
1	32	16	16	64
2	16	32	16	64
3	16	16	32	64
summa	64	64	64	192

## Sisältö

- Johdanto
- Verkon suunnittelu
- Liikenne-ennusteet
- Mitoitus

## Mitoitus (1)

- Tietoliikennejärjestelmä liikenteellisestä näkökulmasta:



- Mitoituksen perustehtävä:

Määrää järjestelmän (minimi)kapasiteetti,  
joka takaa halutun palvelun laadun  
annetulla liikenteellä

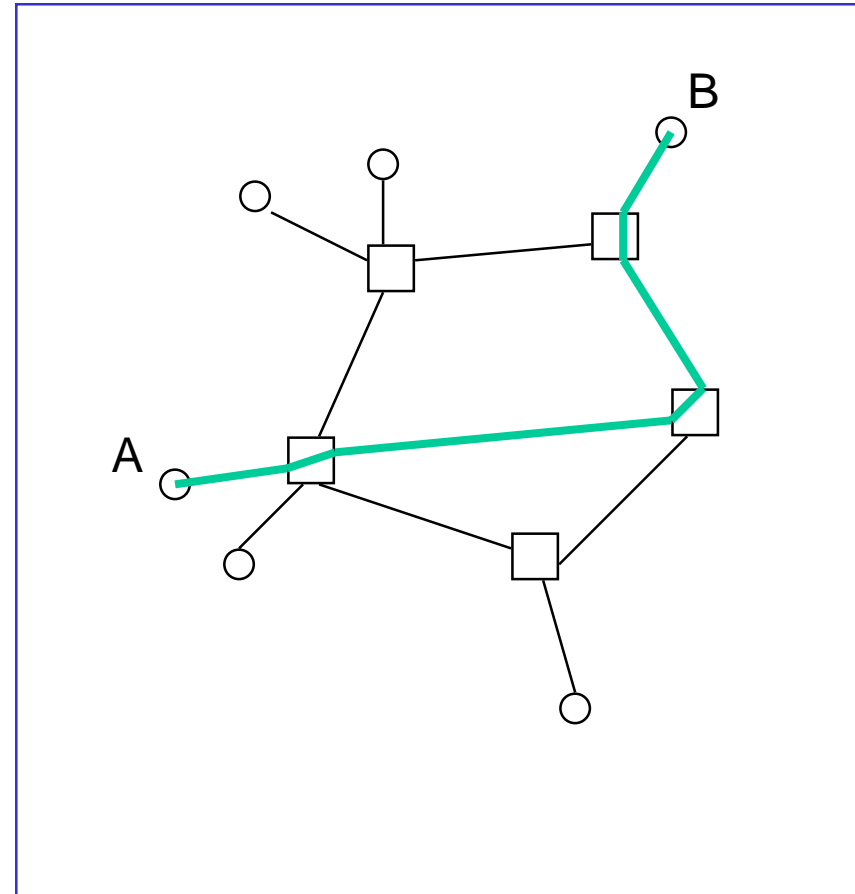
## Mitoitus (2)

- Havainto:
  - Liikenne vaihtelee ajan myötä (ja eri aikaskaaloissa)
- Yleissäntö:
  - Jotta systeemi toimisi hyväksyttävästi myös ruuhka-aikoina, mitoituksen tulee perustua (jollakin järkevällä tavalla) liikenteen huippuihin (eikä siis keskimääräiseen liikenteeseen)
- Kuitenkin:
  - Verkon tuottamat tulot taas riippuvat nimenomaan keskimääräisestä (eikä siis huippu-) liikenteestä.
- Puhelinverkkojen mitoituksessa liikenteen huippu määritellään ns. kiiretunnin avulla:

**Kiiretunti**  $\approx$  se yhden tunnin pituinen jakso, jona liikenteen määrä on suurin

## Puhelinverkko

- Yksinkertainen puhelinverkon malli koostuu
  - verkon solmuista (keskukset)
  - solmujen välisistä linkeistä
- Liikenne muodostuu kutsuista (puheluista), jotka varaavat yhden kanavan per linkki.
- Kutsun kaksi vaihetta:
  - ensin on muodostettava yhteys verkon läpi lähteestä kohteeseen (**yhteydenmuodostusvaihe**)
  - vasta sen jälkeen voi varsinainen tiedonsiirto alkaa (**tiedonsiirtovaihe**)

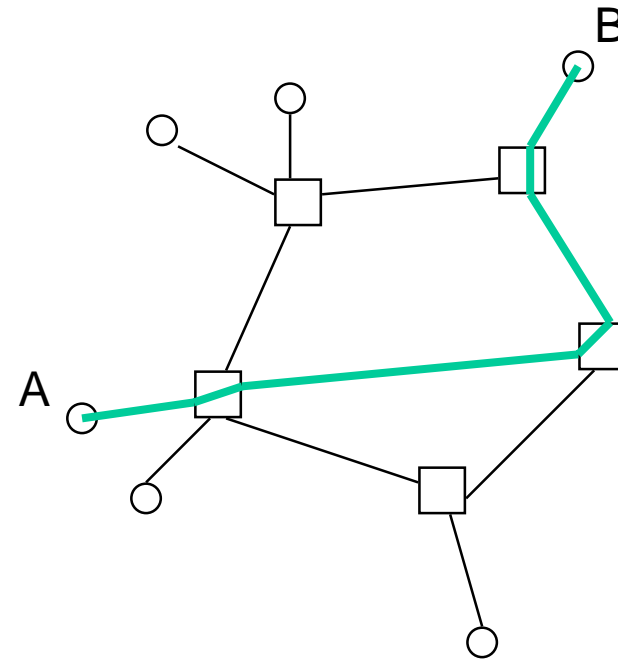


## Kaksi liikenneprosessia

- **Yhteydenmuodostukseen liittyvä liikenneprosessi**
  - verkon solmuissa
  - yhteydenmuodostuksen aikana kutsu kilpailee muiden yhteyttä vasta muodostavien kutsujen kanssa reitillään olevien verkon solmujen prosessointikapasiteetista (jonotusperiaatteella)
  - tyypillisesti tähän kuuluva aika voidaan laskea **sekunneissa** (josta ajasta varsinaiseen prosessointiin kuluu ehkä joitakin kymmeniä tai satoja millisekunteja)
- **Tiedonsiirtoon liittyvä liikenneprosessi**
  - linkeillä
  - varsinaisen tiedonsiirron aikana kutsulle on varattu kanava kultakin linkiltä sen reitin varrelta
  - perinteisesti puhelujen kestot ovat olleet joitakin **minuutteja**
- **Huom.** Eri prosessien **aikaskaalojen** erilaisuus

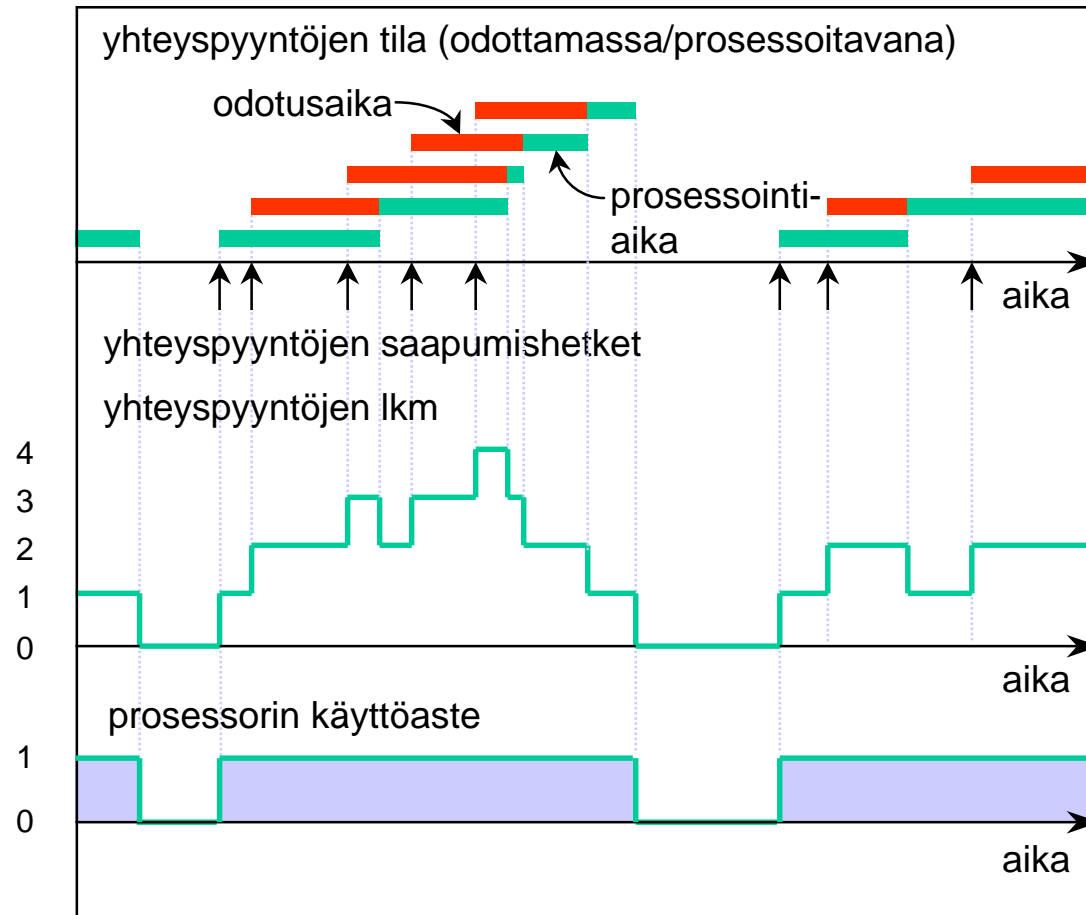
## Yksinkertaistettu puhelinverkon mitoitus

- Oletetaan
  - kiinteä topologia ja reititys
  - annettu liikennematriisi
  - annettu palvelun laatuvaatimus
- **Verkon solmujen mitoitus:**  
Laske kullekin solmulle vaadittava **kutsujen käsittelynopeus**
  - max. lkm yhteydenmuodostuksia per aikayksikkö
- **Linkkien mitoitus:**  
Laske kullekin linkille vaadittava **kanavien lkm**
  - max. lkm käynnissä olevia puheluita





# Yhteydenmuodostukseen liittyvä liikenneprosessi (1)



## Yhteydenmuodostukseen liittyvä liikenneprosessi (2)

- Oletetaan, että uusia yhteyspyyntöjä saapuu
  - Poisson-prosessin mukaisesti intensiteetillä  $\lambda$
- Oletetaan lisäksi, että yhteyspyyntöjen käsittelyajat eri solmuissa ovat
  - riippumattomia ja samoin jakautuneita (IID) noudattaen eksponenttijakaumaa odotusarvonaan  $s$ 
    - tyypillisesti  $s$  on luokkaa **kymmeniä millisekunteja**
    - $s$  on pikemmin **järjestelmää** (kuin liikennettä) **kuvaava parametri**
- Oletetaan vielä, että jokaisessa solmussa yhteyspyynnön käsittelystä huolehtii
  - yksittäinen prosessori, jolla on käytettävissä ääretön puskuri (jossa yhteyspyynnöt odottavat käsittelyyn pääsyä)
    - $1/s$  kertoo kutsujen käsittelynopeuden
- Näillä oletuksilla kyseinen liikennemalli on
  - **M/M/1 jonomalli** kuormanaan  $\rho = \lambda s$

## Yhteydenmuodostukseen liittyvä liikenneprosessi (3)

- Puhdas jonotusjärjestelmä  $\Rightarrow$

Palvelun laadun mittana on esim. **keskimääräinen odotusaika**  $E[W]$

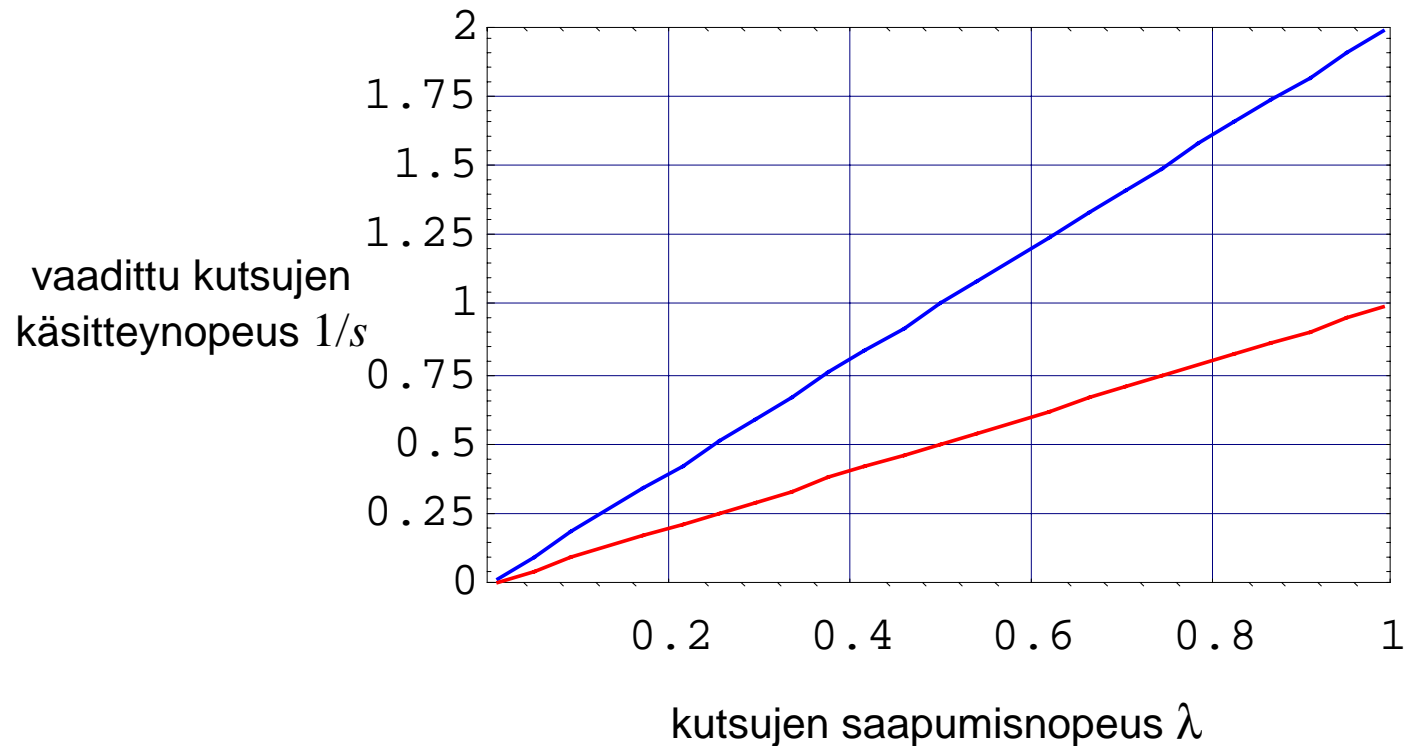
- Keskim. odotusajan  $E[W]$  kaava M/M/1 jonossa (olettaen, että  $\rho < 1$ ):

$$E[W] = s \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$$

- $\rho = \lambda s$
- **Huom.**  $E[W]$  kasvaa äärettömyyksiin, kun kuorma  $\rho$  lähestyy 1:stä

## Mitoituskäyrä

- Palvelun laatuvaatimus (esimerkiksi):  $E[W] \leq s$   
⇒ sallittu kuorma  $\rho \leq 0.5 = 50\% \Rightarrow \lambda s \leq 0.5$   
⇒ vaadittu kutsujen käsittelynopeus  $1/s \geq 2\lambda$



## Mitoitussääntöjä

- Jotta vaadittu palvelun laatuvaatimus (so. yhteyspyynnön keskimääräinen odotusaika per solmu on korkeintaan keskimääräisen prosessointiajan suuruinen) saavutetaan ...

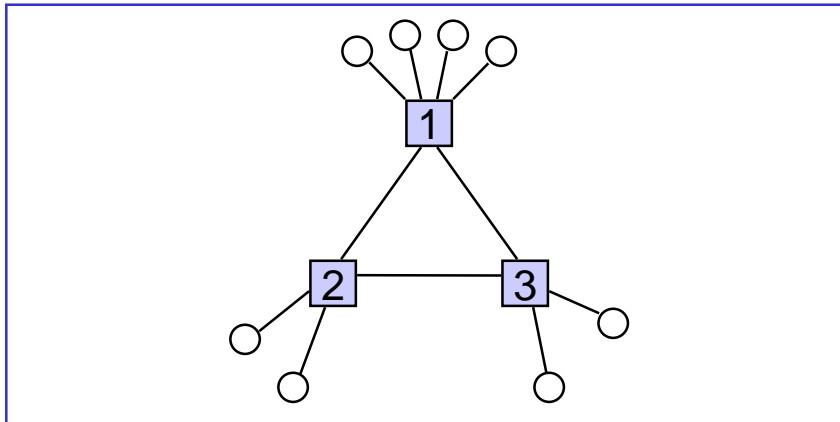
... liikenteen aiheuttaman kuorman pitää olla alle 50%

- Vaikka tyytyisit heikompaankin palvelun laatuun, älä silti koskaan unohda **turvamarginaalia** , so. ...

... älä anna liikenteen aiheuttaman kuorman lähestyä 100%:a

- Muuten räjähtää!

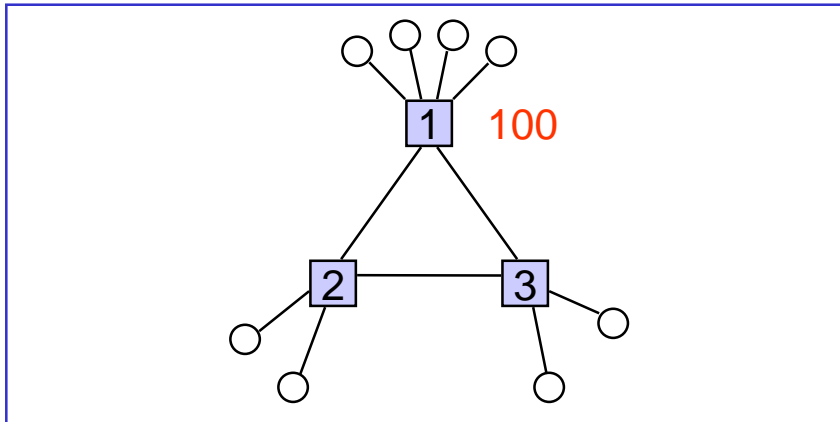
## Esimerkki (1)



alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Oletukset:**
  - 3 paikalliskeskusta, jotka kytketty täydellisesti toisiinsa
  - liikennematriisi  $T$  annettu ohessa
  - kiinteä (suora) reititys: kutsuille valitaan lyhyin polku
  - keskim. pitoaika  $h = 3$  min
- **Tehtävä:**
  - Laske kullekin solmulle laatuvaatimuksen  $\rho \leq 50\%$  täyttävä kutsujen käsittelynopeus

## Esimerkki (2)

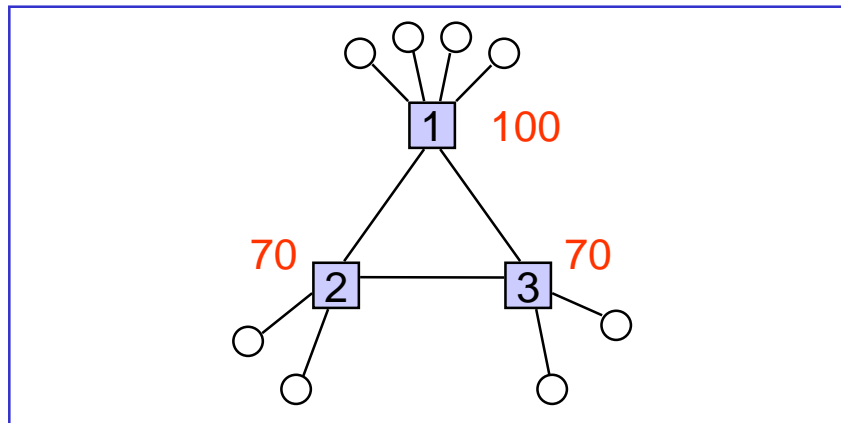


alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Solmu 1:**

- yhteyspyyntöjä omalta alueelta:  
 $[T(1,1) + T(1,2) + T(1,3)]/h$   
 $= 90/3 = 30$  kutsua/min
- yhteyspyyntöjä alueelta 2:  
 $T(2,1)/h = 30/3 = 10$  kutsua/min
- yhteyspyyntöjä alueelta 3:  
 $T(3,1)/h = 30/3 = 10$  kutsua/min
- yhteyspyyntöjä kaiken kaikkiaan:  
 $\lambda(1) = 30 + 10 + 10 =$   
 $50$  kutsua/min
- vaadittu kutsujen käsittelynopeus:  
 $\rho(1) = \lambda(1)/\mu(1) = 0.5 \Rightarrow$   
 $\mu(1) \geq 2 * \lambda(1) = \mathbf{100}$  kutsua/min

## Esimerkki (3)



alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Solmu 2:**

- yhteyspyyntöjä kaiken kaikkiaan:  

$$\lambda(2) = [T(2,1) + T(2,2) + T(2,3) + T(1,2) + T(3,2)]/h$$

$$= (75+15+15)/3 = 35 \text{ kutsua/min}$$
- vaadittu kutsujen käsittelynopeus:  

$$\mu(2) \geq 2 * \lambda(2) = \mathbf{70 \text{ kutsua/min}}$$

- **Solmu 3:**

- yhteyspyyntöjä kaiken kaikkiaan:  

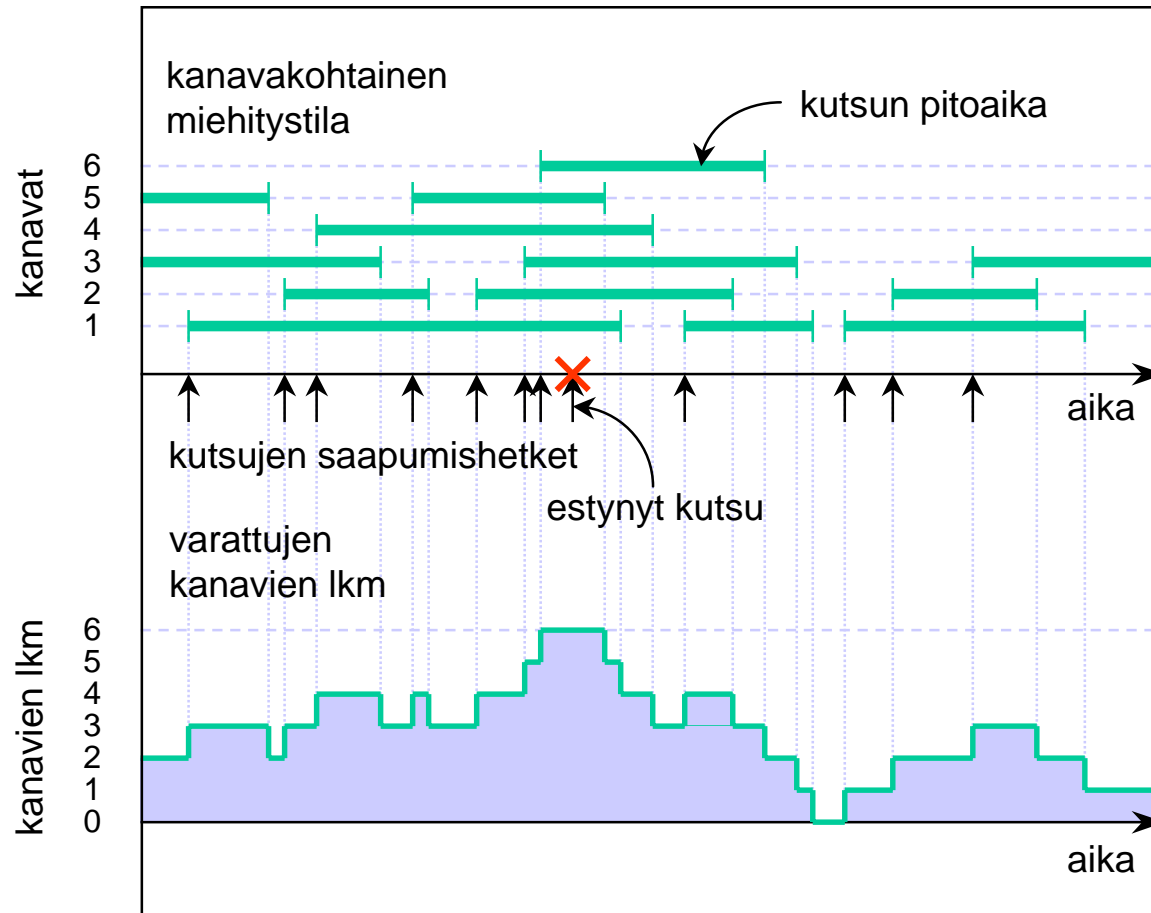
$$\lambda(3) = [T(3,1) + T(3,2) + T(3,3) + T(1,3) + T(2,3)]/h$$

$$= (75+15+15)/3 = 35 \text{ kutsua/min}$$
- vaadittu kutsujen käsittelynopeus :  

$$\mu(3) \geq 2 * \lambda(3) = \mathbf{70 \text{ kutsua/min}}$$



## Tiedonsiirtoon liittyvä liikenneprosessi (1)



## Tiedonsiirtoon liittyvä liikenneprosessi (2)

- Edellä on jo oletettu, että uusia yhteyspyyntöjä saapuu
  - Poisson-prosessin mukaisesti intensiteetillä  $\lambda$
- Oletetaan lisäksi, että kutsujen pitoajat (so. varsinaisen tiedonsiirron kestoajat) ovat
  - riippumattomia ja samoin jakautuneita (IID) odotusarvonaan  $h$ 
    - tyypillisesti  $h$  on luokkaa **minuutteja** (eikä millisekunteja kuten  $s$ )
    - $h$  on pikemmin **liikennettä** (kuin järjestelmää) **kuvaava parametri**
- Näillä oletuksilla kyseinen liikennemalli on
  - **M/G/n/n estomalli** (so. Erlang-malli) liikenneintensiteettinään  $a = \lambda h$

## Tiedonsiirtoon liittyvä liikenneprosessi (3)

- Puhdas menetysjärjestelmä  $\Rightarrow$

Palvelun laadun mittana on esim. **kutsuesto**  $B$

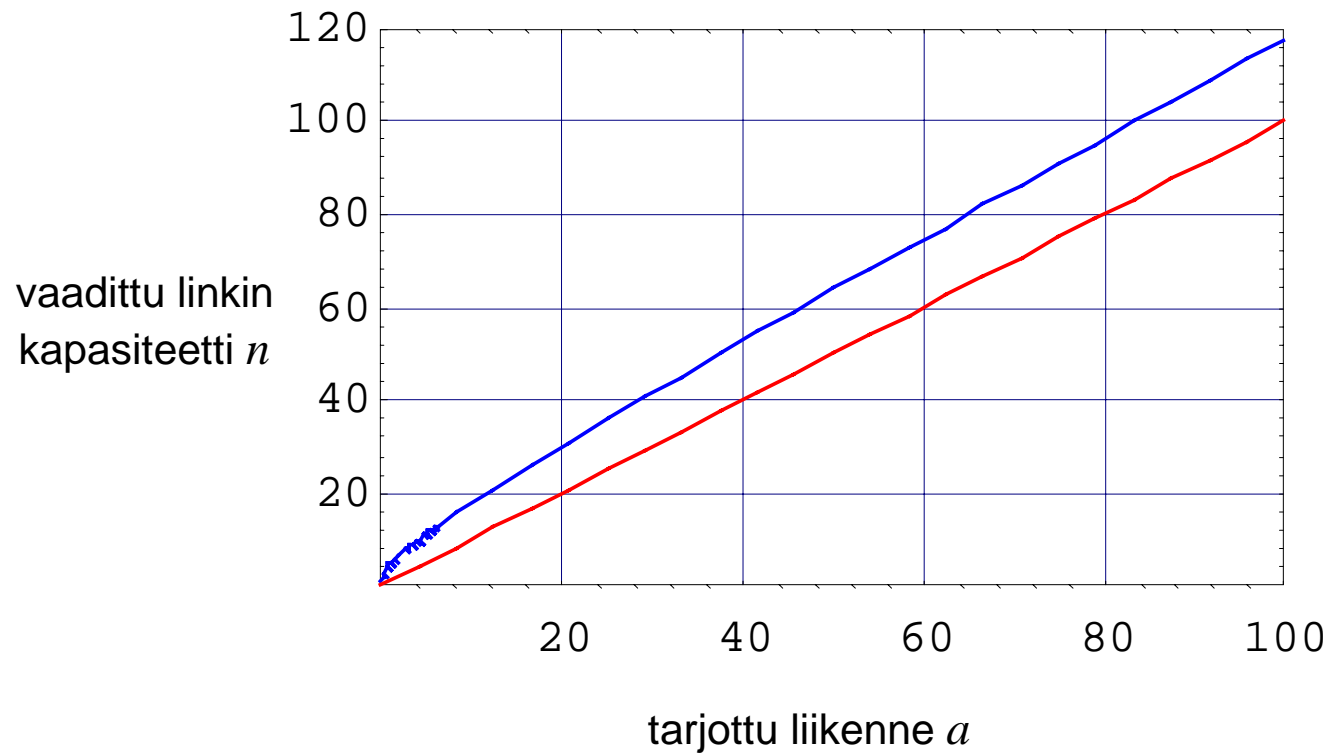
- **Erlangin kaava** kutsuestolle  $B$ :

$$B = \text{Erl}(n, a) = \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{a^i}{i!}}$$

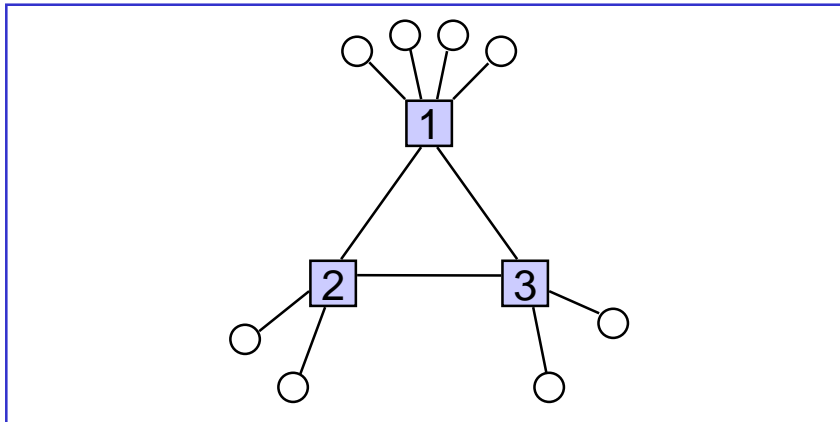
- $a = \lambda h$
- $n! = n(n-1)(n-2) \dots 1$

## Mitoituskäyrä

- Palvelun laatuvaatimus (esimerkiksi):  $B \leq 1\%$   
⇒ vaadittu linkin kapasiteetti:  $n \geq \min\{i = 1, 2, \dots \mid \text{Erl}(i, a) \leq B\}$



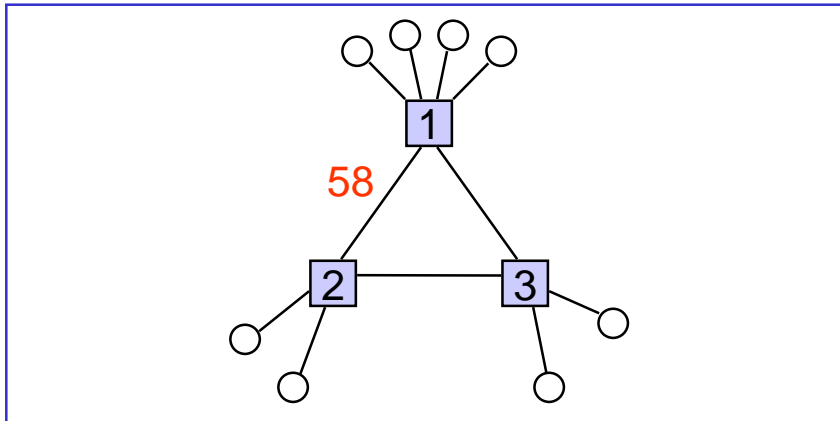
## Esimerkki (1)



alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Oletukset:**
  - 3 paikalliskeskusta, jotka kytketty täydellisesti toisiinsa kaksisuuntaisilla linkeillä
  - liikennematriisi  $T$  annettu ohessa
  - kiinteä (suora) reititys: kutsuille valitaan lyhyin polku
  - keskim. pitoaika  $h = 3$  min
- **Tehtävä:**
  - Laske kullekin linkille laatuvaatimuksen  $B \leq 1\%$  täyttävä kapasiteetti (so. kanavien lkm)

## Esimerkki (2)

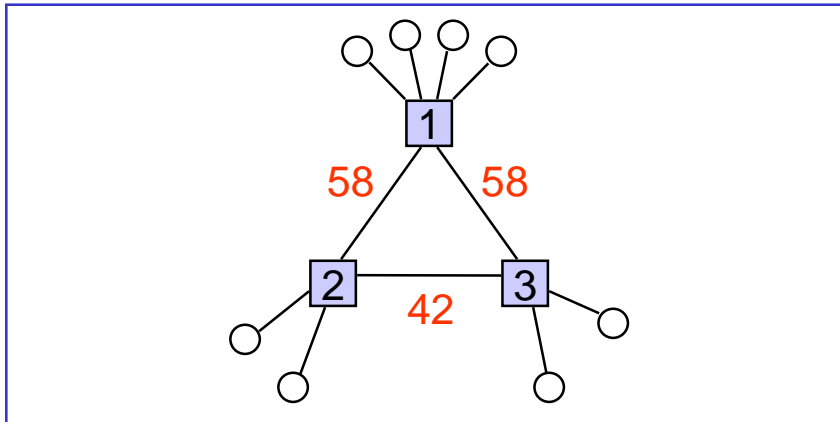


alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Linkki 1-2** (solmujen 1 ja 2 välillä):

- tarjottu liikenne suunnassa  $1 \rightarrow 2$ :  
 $a(1,2) = T(1,2) = 15$  erlangia
- tarjottu liikenne suunnassa  $2 \rightarrow 1$ :  
 $a(2,1) = T(2,1) = 30$  erlangia
- tarjottu liikenne kaiken kaikkiaan:  
 $a(1-2) = T(1,2) + T(2,1)$   
 $= 15 + 30 = 45$  erlangia
- vaadittu kapasiteetti:  
 $n(1-2) \geq \min\{i \mid \text{Erl}(i,45) \leq 1\%\}$   
 $\Rightarrow n(1-2) \geq \mathbf{58}$  kanavaa

## Esimerkki (3)



alue	1	2	3	summa
1	60	15	15	90
2	30	30	15	75
3	30	15	30	75
summa	120	60	60	240

- **Linkki 1-3** (solmujen 1 ja 3 välillä):
  - tarjottu liikenne kaiken kaikkiaan:  
 $a(1-3) = T(1,3) + T(3,1)$   
 $= 15 + 30 = 45$  erlangia
  - vaadittu kapasiteetti:  
 $n(1-3) \geq \min\{i \mid \text{Erl}(i,45) \leq 1\%\}$   
 $\Rightarrow n(1-3) \geq \mathbf{58}$  kanavaa
- **Linkki 2-3** (solmujen 2 ja 3 välillä):
  - tarjottu liikenne kaiken kaikkiaan:  
 $a(2-3) = T(2,3) + T(3,2)$   
 $= 15 + 15 = 30$  erlangia
  - vaadittu kapasiteetti:  
 $n(2-3) \geq \min\{i \mid \text{Erl}(i,30) \leq 1\%\}$   
 $\Rightarrow n(2-3) \geq \mathbf{42}$  kanavaa

## Taulukko: $B = \text{Erl}(n,a)$

- $B = 1\%$

$n$ :	$a$ :
– 35 kanavaa	24.64 erlangia
– 36 kanavaa	25.51 erlangia
– 37 kanavaa	26.38 erlangia
– 38 kanavaa	27.26 erlangia
– 39 kanavaa	28.13 erlangia
– 40 kanavaa	29.01 erlangia
– 41 kanavaa	29.89 erlangia
– <b>42 kanavaa</b>	<b>30.78 erlangia</b>
– 43 kanavaa	31.66 erlangia
– 44 kanavaa	32.55 erlangia
– 45 kanavaa	33.44 erlangia

- $B = 1\%$

$n$ :	$a$ :
– 50 kanavaa	37.91 erlangia
– 51 kanavaa	38.81 erlangia
– 52 kanavaa	39.71 erlangia
– 53 kanavaa	40.61 erlangia
– 54 kanavaa	41.51 erlangia
– 55 kanavaa	42.41 erlangia
– 56 kanavaa	43.32 erlangia
– 57 kanavaa	44.23 erlangia
– <b>58 kanavaa</b>	<b>45.13 erlangia</b>
– 59 kanavaa	46.04 erlangia
– 60 kanavaa	46.95 erlangia



## Päästä-päähän esto

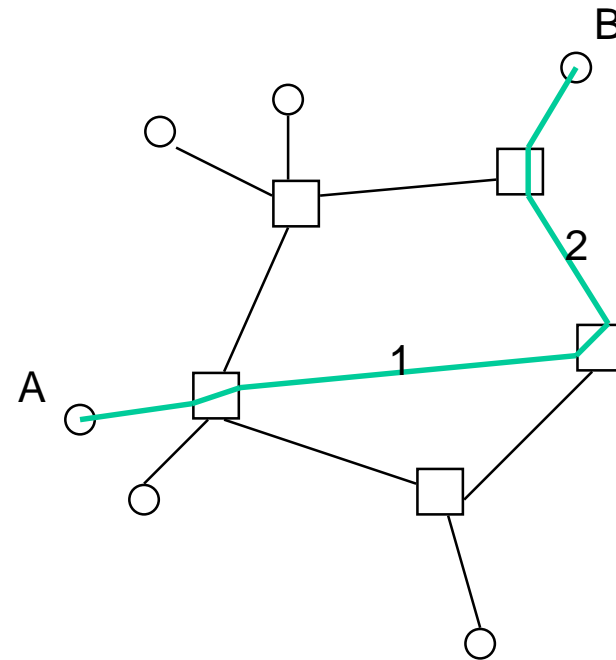
- Tähän asti olemme keskittyneet kutsuston  $B_c$  laskemiseen yhden linkin tapauksessa
- Kutsun reitti kuitenkin muodostuu useammasta peräkkäisestä linkistä. Näin ollen kiinnostavampi suure on kutsun kokema **päästä-päähän esto** (end-to-end blocking probability)  $B_e$ .
- Päästä-päähän estoa voidaan arvioida esim. ns. **tulorajamenetelmällä** (Product Bound), missä estymisen eri linkeissä approksimoidaan tapahtuvan riippumattomasti:
  - Indeksoidaan  $j$ :llä linkejä kutsun reitin varrella,  $j = 1, 2, \dots, J$ . Merkitään  $B_c(j)$ :llä kutsun yksittäisessä linkissä  $j$  kokemaa estoa. Tällöin

$$B_e \approx 1 - (1 - B_c(1)) * (1 - B_c(2)) * \dots * (1 - B_c(J))$$

$$B_c(j):t \text{ pieniä} \Rightarrow B_e \approx B_c(1) + B_c(2) + \dots + B_c(J)$$

## Esimerkki

- Yhteyspyyntö päätelaitteesta A päätelaitteeseen B on reititetty läpi runkoverkon linkkien 1 ja 2
- Merkitään  $B_c(1)$ :llä ja  $B_c(2)$ :lla kutsuestoa näissä linkeissä
- Tuloraja-approksimaatio päästä-päähän estolle  $B_e$ :  
$$B_e \approx 1 - (1 - B_c(1))(1 - B_c(2))$$
$$= B_c(1) + B_c(2) - B_c(1) * B_c(2)$$
- Likimain:  
$$B_e \approx B_c(1) + B_c(2)$$



## Kirjallisuutta

- 1 A. Olsson, ed. (1997)
  - “Understanding Telecommunications 1”
  - Studentlitteratur, Lund, Sweden
- 2 A. Girard (1990)
  - “Routing and Dimensioning in Circuit-Switched Networks”
  - Addison-Wesley, Reading, MA

**THE END**

