



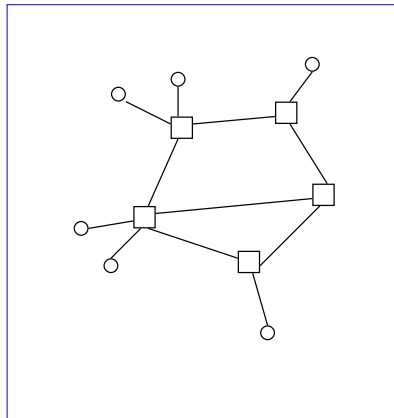
1. Johdanto

Sisältö

- Tietoliikenneverkot ja välityspperiaatteet
- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Littlen kaava

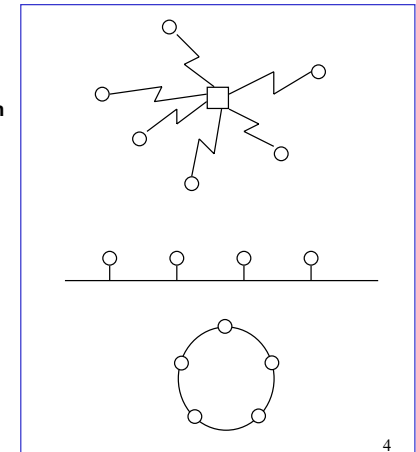
Tietoliikenneverkot

- 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



Jaettu media liityntäverkkona

- Edellisen kalvon mallissa,
 - päätelaitteiden ja verkon solmujen väliset yhteydet oletetaan **pisteestä-pisteeseen** tyyppisiksi (⇒ resursseja jaetaan vain runkoverkon puolella)
- Joissakin tapauksissa, kuten
 - matkapuhelinverkko
 - lähiverkkoliityntäverkko muodostuu **jaetusta mediasta**:
 - käyttäjien on **kilpailtava** resursseista
 - tarvitaan erilaisia **moniliityntäteknikoita**



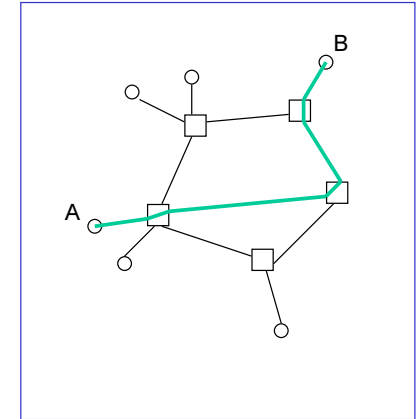
Tiedon siirto yli verkon: välityspäiaatteet

- **Piirikytkentä** (circuit switching)
 - perinteisestä puhelinverkosta tuttu välityspäiaate
 - käytössä myös matkapuhelinverkoissa
 - optiset verkot
- **Pakettikytkentä** (packet switching)
 - dataverkoissa käytetty välityspäiaate
 - kaksi mahdollisuutta
 - **yhteydetön** (connectionless) esim. Internet (IP), SS7 (MTP)
 - **yhteydellinen** (connection oriented) esim. X.25, Frame Relay
- **Solukytkentä** (cell switching)
 - ATM-verkoissa käytetty välityspäiaate
 - erikoistapaus yhteydellisestä pakettikytkennästä
 - kiinteänmittaiset paketit eli **solut** (cell)

5

Piirikytkentä (1)

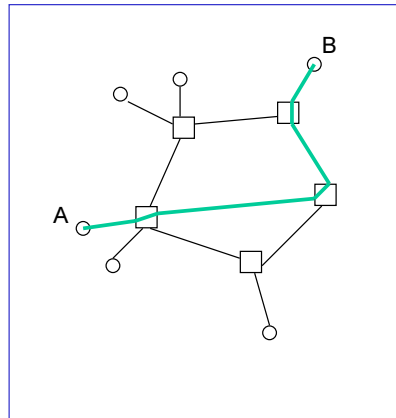
- **Yhteydellinen:**
 - tiedonsiirtoa edeltää **yhteydenmuodostusvaihe**, jonka aikana **yhteys** rakennetaan valmiiksi päästä-päähän valittua reittiä pitkin
 - tarvittavat resurssit (so. kiinteä kanava kaikilta reittiin kuuluvilta linkeiltä) **varataan** koko yhteyden keston ajaksi
 - jos resursseja ei ole tarjolla, yhteyttä ei synny, ts. kutsu **estyy** (blocking)
- Informaation siirto **jatkuvana virtana**



6

Piirikytkentä (2)

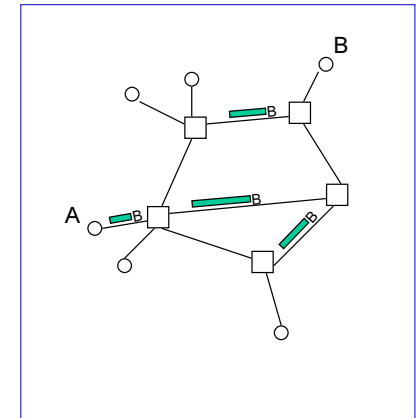
- Ennen informaation siirtoa
 - yhteydenmuodostuksesta aiheutuva viive (delay)
- Siirron aikana
 - signaalin etenemisviive
 - ei lisäkuormaa (overhead)
 - ei ylimääräisiä viiveitä
- Esimerkki: puhelinverkko



7

Yhteydetön pakettikytkentä (1)

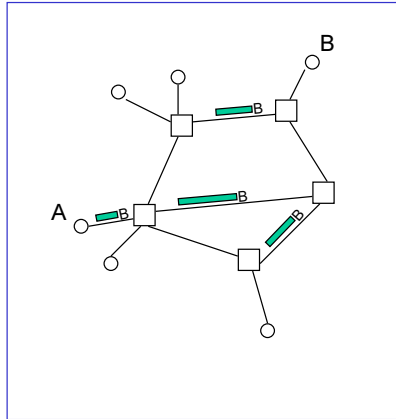
- **Yhteydetön:**
 - ei yhteydenmuodostusta
 - ei resurssien varausta
 - ei estoa
- Informaation siirto **diskreetteinä paketteina**
 - vaihtelevanmittaisia
 - sisältää otsikon, jossa mm. kohteen (globaali) osoite



8

Yhteydetön pakettikytkentä (2)

- Ennen informaation siirtoa
 - ei viiveitä
- Siirron aikana
 - lisäkuorma (otsikkotavut)
 - pakettien prosessointiviiveet
 - pakettien jonotusviiveet (kilpailu yhteisistä resursseista)
 - paketin lähetysviiveet (linkkien äärellinen tiedonsiirtokapasiteetti)
 - signaalin etenemisviive
 - pakettien katoamista (puskuriin täytyessä)
- Esimerkki: Internet (IP-kerros)



9

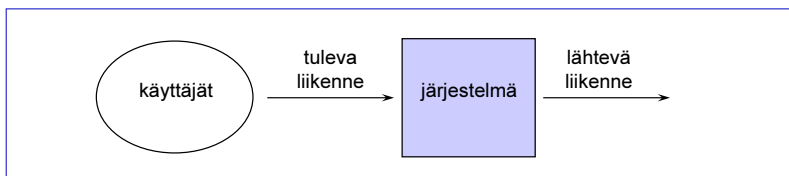
Sisältö

- Tietoliikenneverkot ja välitysperiaatteet
- **Liikenneteorian tehtävä**
- Liikenneteoreettiset mallit
- Littlen kaava

10

Liikenteellinen näkökulma

- Tietoliikennejärjestelmä liikenteellisestä näkökulmasta:

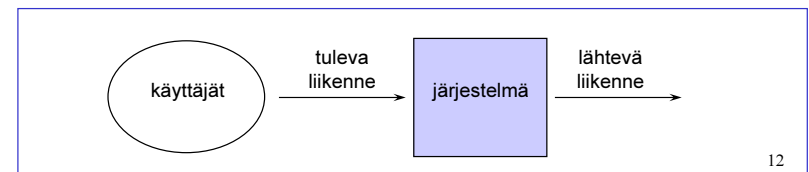


- Idea:
 - järjestelmän **käyttäjät** generoivat liikennettä, jota **järjestelmä** palvelee

11

Mielenkiintoisia kysymyksiä

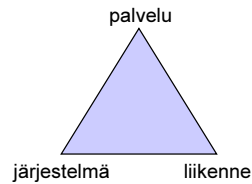
- Millainen on käyttäjän kokemus palvelun laatu annetussa järjestelmässä ja annetulla liikenteellä?
- Miten järjestelmä tulee mitoittaa, jotta annetulla liikenteellä saavutetaan haluttu palvelun laatu?
- Millaisella liikenteellä järjestelmää voidaan kuormittaa niin, ettei palvelun laatu siitä kärsi?



12

Liikenneteorian tehtävä (1)

- Tehtävänä on määrätä seuraavan kolmen tekijän väliset riippuvuudet:
 - palvelun laatu
 - järjestelmän kapasiteetti
 - liikenteen voimakkuus



13

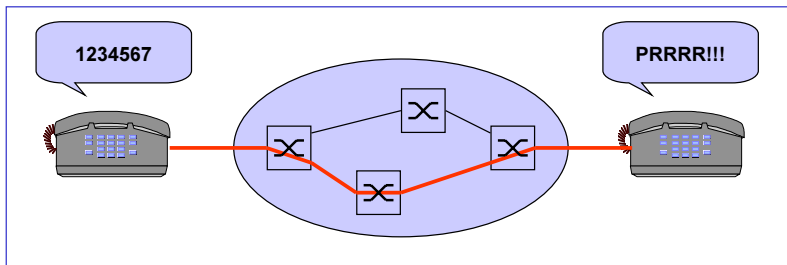
Liikenneteorian tehtävä (2)

- Järjestelmänä voi olla
 - yksittäinen laite (esim. keskusten välinen yhdysjohto puhelinverkossa, IP-verkon linkki, pakettien reititystä tekevä prosessori dataverkossa, reitittimen lähetyspuskuri tai ATM-verkon statistinen multiplekseri) tai
 - kokonainen tietoliikenneverkko (esim. puhelin- tai dataverkko) tai sen osa
- Liikenne muodostuu
 - biteistä, paketeista, purskeista, voista, yhteyksistä, kutsuista, ...
 - riippuu tarkasteltavasta järjestelmästä ja aikaskaalasta
- Palvelun laatua voidaan kuvata
 - käyttäjän kannalta (esim. kutsuesto, pakettihukka, pakettiviive tai läpimeno)
 - järjestelmän kannalta, jolloin usein puhutaan järjestelmän **suorituskyvystä** (esim. prosessorin tai linkin käyttöaste tai verkon maksimikuorma)

14

Esimerkki

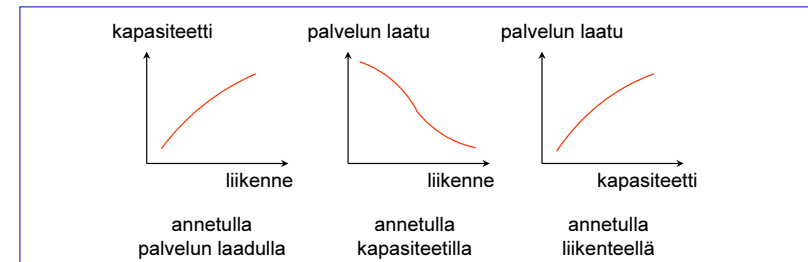
- Puhelinliikenne
 - liikenne = puhelut
 - järjestelmä = puhelinverkko
 - palvelun laatu = todennäköisyys, että puhelu yhdistyy (eikä siis esty)



15

Eri tekijöiden väliset riippuvuudet

- Riippuvuuksien **kvalitatiivinen** kuvaus:



- Riippuvuuksien **kvantitatiivisten** kuvaamiseen tarvitaan **matemaattisia malleja**

16

Liikenneteoreettiset mallit

- Liikenneteoreettiset mallit ovat yleensä luonteeltaan **tilastollisia**, siis stokastisia vastakohtana deterministiselle
 - Vaikka järjestelmät itsessään ovat useimmiten deterministisiä, liikenne on tyypillisesti luonteeltaan stokastista
 - “Koskaan et voi tietää, milloin joku soittaa sinulle”
- Tästä taas seuraa, että myös palvelun laadun kuvaamisessa tarvittavat muuttujat ovat luonteeltaan tilastollisia, siis **satunnaismuuttujia**:
 - käynnissä olevien kutsujen lkm
 - pakettien lkm puskurissa
- Satunnaismuuttujaa kuvaa sen **jakauma**
 - todennäköisyys, että käynnissä olevien yhteyksien lkm on n
 - todennäköisyys, että puskurissa olevien pakettien lkm on n
- **Stokastinen prosessi** taas kuvaa ajan myötä tapahtuvaa satunnaista vaihtelua

17

Todellinen järjestelmä ja sitä kuvaava malli

- On hyvä pitää mielessä todellisen järjestelmän ja sitä kuvaavan mallin ero:
 - Mallilla kuvataan (ja pitääkin kuvata) vain jotakin tiettyä, kiinnostuksen kohteena olevaa osaa tai ominaisuutta todellisesta järjestelmästä
 - Eri syistä johtuen kuvaus ei useinkaan ole edes kovin tarkka vaan hyvinkin approksimatiivinen
- Siis:
 - varovaisuus johtopäätösten teossa

18

Käytännölliset päämäärät

- Verkon suunnittelu
 - mitoitus
 - optimointi
 - suorituskykyanalyysi
- Verkon- ja liikenteen hallinta
 - verkon tehokas operointi
 - vikatilanteista toipuminen
 - liikenteen hallinta
 - reititys
 - laskutus

19

Kirjallisuutta

- Teleliikenneteoria
 - *Teletronikk* Vol. 91, Nr. 2/3, Special Issue on “Teletraffic”, 1995
 - V. B. Iversen, *Teletraffic Engineering Handbook*,
<http://www.tele.dtu.dk/teletraffic/handbook/telehook.pdf>
 - J. Roberts, *Traffic Theory and the Internet*,
IEEE Communications Magazine, Jan. 2001, pp. 94-99
<http://perso.rd.francetelecom.fr/roberts/Pub/Rob01.pdf>
- Jonoteoria
 - L. Kleinrock, *Queueing Systems, Vol. I: Theory*, Wiley, 1975
 - L. Kleinrock, *Queueing Systems, Vol. II: Computer Applications*, Wiley, 1976
 - D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*, 2nd ed., Prentice-Hall, 1992
 - Myron Hlynka's Queueing Theory Page
<http://www2.uwindsor.ca/~hlynka/queue.html>

20

Sisältö

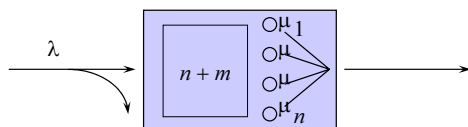
- Tietoliikenneverkot ja välityspperiaatteet
- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Littlen kaava

Liikenneteoreettisten mallien luokitus

- Tässä esityksessä liikenneteoreettiset mallit jaetaan kolmeen osaan:
 - **menetysjärjestelmät** (loss systems)
 - **jonotusjärjestelmät** (queueing systems)
 - **jakojärjestelmät** (sharing systems)
- Jatkossa esittelemme joitakin yksinkertaisia liikenneteoreettisia malleja, joilla voidaan mallintaa joitakin yksittäisiä tietoliikenneverkon osia
- Kokonaisia verkkoja voidaan mallintaa yhdistelemällä tällaisia yksinkertaisia malleja verkoksi:
 - estoverkot (loss networks)
 - jonoverkot (queueing networks)
 - jakoverkot (sharing networks)

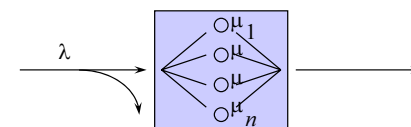
Yksinkertainen liikenneteoreettinen malli

- **Asiakkaita saapuu** keskimäärin nopeudella λ (asiakasta per aikayks.)
 - $1/\lambda$ = keskimääräinen asiakkaiden väliaika
- **Asiakkaita palvelee** n :llä rinnakkaisella **palvelijalla**
- Kukin palvelija palvelee keskim. nopeudella μ (asiakasta per aikayks.)
 - $1/\mu$ = keskimääräinen asiakkaan palveluaika
- Järjestelmässä on $n + m$ **asiakaspaikkaa**
 - vähintään n **palvelupaikkaa** ja korkeintaan m **odotuspaikkaa**
- Estyvät asiakkaat (joiden saapuessa järjestelmä on **täysi**) **menetetään**



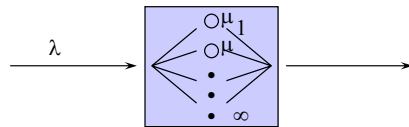
Puhdas menetysjärjestelmä

- Äärellinen määrä palvelijoita ($n < \infty$), palvelupaikkoja n , ei yhtään odotuspaikkaa ($m = 0$)
 - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä eli järjestelmä on ns. **estotilassa** (usein puhutaan myös **täydestä** järjestelmästä), kyseinen asiakas poistuu koko järjestelmästä pääsemättä palveluun ollenkaan. Järjestelmä on siis **estollinen** (häviöllinen) ja estyvä asiakas **menetetään**.
- Käyttäjän kokeman palvelun laadun kannalta kiinnostava suure on esim.
 - todennäköisyys, että järjestelmä on täysi asiakkaan saapuessa



Ääretön järjestelmä

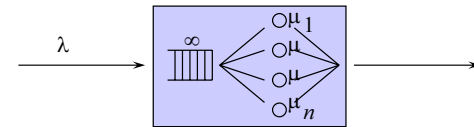
- Ääretön määrä palvelijoita ja palvelupaikkoja ($n = \infty$), ei yhtään odotuspaikkaa ($m = 0$)
 - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, eikä kenenkään tarvitse edes odottaa palveluun pääsyä. Estoton järjestelmä.
 - Tällaisen (hypotettisen) järjestelmän analyysi on tyypillisesti huomattavasti helpompaa kuin vastaavan todellisen järjestelmän, jossa voi olla vain äärellinen määrä palvelijoita.
 - Joskus tämä on ainoa tapa saada edes approksimatiivista tietoa vastaavasta todellisesta järjestelmästä.



25

Puhdas jonotusjärjestelmä

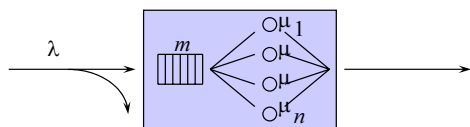
- Äärellinen määrä palvelijoita ($n < \infty$), palvelupaikkoja n , ääretön määrä odotuspaikkoja ($m = \infty$)
 - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, vaan jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä, ko. asiakas jää odottamaan järjestelmän sisälle palveluun pääsyä. Järjestelmä on siis **estoton**.
- Käyttäjän kokeman palvelun laadun kannalta kiinnostava suure on esim
 - todennäköisyys, että asiakas joutuu odottamaan kauemmin kuin jokin annettu referenssiaika (ts. "liian kauan")



26

Estollinen jonotusjärjestelmä

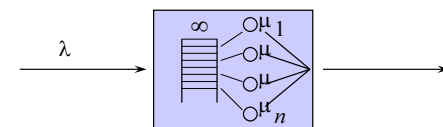
- Äärellinen määrä palvelijoita ($n < \infty$), palvelupaikkoja n , äärellinen määrä odotuspaikkoja ($0 < m < \infty$)
 - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelijat ovat käytössä mutta osa odotuspaikoista on vapaana, kyseinen asiakas jää odottamaan palveluun pääsyä.
 - Jos taas kaikki odotuspaikatkin ovat käytössä, asiakas menetetään.
 - Osa asiakkaista siis joutuu odottamaan palveluun pääsyä, ja osa jopa jää kokonaan vaille palvelua. Tämä järjestelmä on siis estollinen jonotusjärjestelmä.



27

Puhdas jakojärjestelmä

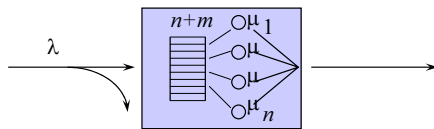
- Äärellinen määrä palvelijoita ($n < \infty$), ääretön määrä palvelupaikkoja ($n + m = \infty$), ei odotuspaikkoja
 - Jos systeemissä on korkeintaan n asiakasta ($x \leq n$), jokaisella asiakkaalla on oma palvelijansa. Jos asiakkaita taas on enemmän ($x > n$), niin kokonaispalvelu ($n\mu$) jaetaan tasan kaikkien asiakkaiden kesken.
 - Asiakkaan saama palveluintensiteetti on siten $\min\{\mu, n\mu/x\}$
 - Yhtäkään asiakasta ei menetetä, eikä kenenkään tarvitse edes odottaa palveluun pääsyä. Siis estoton järjestelmä.
 - Toisaalta asiakkaiden palvelu viivästyy sitä enemmän mitä enemmän systeemissä on asiakkaita. Viive siis kiinnostava suure.



28

Estollinen jakojärjestelmä

- Äärellinen määrä palvelijoita ($n < \infty$), äärellinen määrä palvelupaikkoja ($n + m < \infty$), ei odotuspaikkoja
 - Jos systeemissä on korkeintaan n asiakasta ($x \leq n$), jokaisella asiakkaalla on oma palvelijansa. Jos asiakkaita taas on enemmän ($x > n$), niin kokonaispalvelu ($n\mu$) jaetaan tasan kaikkien asiakkaiden kesken.
 - Asiakkaan saama palveluintensiteetti on siten $\min\{\mu, n\mu/x\}$
 - Jos asiakkaan saapuessa kaikki palvelupaikat ovat käytössä, asiakas menetetään. Tämä järjestelmä on siis estollinen jakojärjestelmä.



29

Sisältö

- Tietoliikenneverkot ja välityspäätteet
- Liikenneteorian tehtävä
- Liikenneteoreettiset mallit
- Littlen kaava

30

Littlen kaava

- Tarkastellaan systeemiä, johon
 - saapuu uusia asiakkaita intensiteetillä λ
- **Stabiilisuusoletus:**
 - Systeemiin ei kerry asiakkaita, vaan se tyhjenee aika ajoin
- Seuraus:
 - Asiakkaita myös poistuu intensiteetillä λ
- Merkitään
 - \bar{N} = keskimäärin systeemissä olevien asiakkaiden lkm
 - \bar{T} = keskimääräinen asiakkaan systeemissä viettämä aika = keskiviive
- **Littlen kaava** kertoo näiden suureiden välisen yhteyden:

$$\bar{N} = \lambda \bar{T}$$

31

Littlen kaavan perustelut (1)

- Merkitään
 - $N(t)$ = hetkellä t systeemissä olevien lkm
 - $A(t)$ = hetkeen t mennessä systeemiin tulleiden lkm
 - $B(t)$ = hetkeen t mennessä systeemistä poistuneiden lkm
 - T_i = asiakkaan i systeemissä viettämä aika
- Kun $t \rightarrow \infty$, niin

$$\frac{1}{t} \int_0^t N(s) ds \rightarrow \bar{N}, \quad \frac{1}{A(t)} \sum_{i=1}^{A(t)} T_i \rightarrow \bar{T}, \quad \frac{1}{B(t)} \sum_{i=1}^{B(t)} T_i \rightarrow \bar{T} \quad (1)$$

- Lisäksi (stabiilisuusoletuksen nojalla)

$$\frac{1}{t} A(t) \rightarrow \lambda, \quad \frac{1}{t} B(t) \rightarrow \lambda \quad (2)$$

32

Littlen kaavan perustelut (2)

- Voidaan olettaa, että
 - systeemi on alkuhetkellä $t = 0$, tyhjä
 - asiakkaat poistuvat saapumisjärjestyksessä (FIFO)
- Tällöin pätee (katso kuvaa seuraavalla kalvolla)

$$\sum_{i=1}^{B(t)} T_i \leq \int_0^t N(s) ds \leq \sum_{i=1}^{A(t)} T_i$$

- Näin ollen

$$\frac{B(t)}{t} \frac{1}{B(t)} \sum_{i=1}^{B(t)} T_i \leq \frac{1}{t} \int_0^t N(s) ds \leq \frac{A(t)}{t} \frac{1}{A(t)} \sum_{i=1}^{A(t)} T_i$$

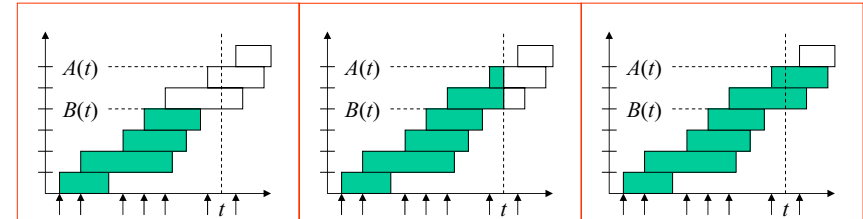
- Kun $t \rightarrow \infty$, niin (1):n ja (2):n nojalla

$$\lambda \bar{T} \leq \bar{N} \leq \lambda \bar{T}$$

- M.O.T.

33

Littlen kaavan perustelut (3)



$$\sum_{i=1}^{B(t)} T_i$$

$$\int_0^t N(s) ds$$

$$\sum_{i=1}^{A(t)} T_i$$

34

Sanastoa

- | | |
|--|--|
| • (tele)liikenneteoria = (tele)traffic theory | • liikenne = traffic |
| • jonoteoria = queueing theory | • kutsu = call |
| • menetysjärjestelmä = loss system | • pitoaika = holding time |
| • jonotusjärjestelmä = queueing system | • liikenneintensiiviteetti = traffic intensity |
| • jakojärjestelmä = sharing system | • liikennemäärä = traffic volume |
| • estoverkko = loss network | • esto = blocking |
| • jonoverkko = queueing network | • aikaesto = time blocking |
| • saapumisintensiiviteetti = arrival intensity | • kutsuesto = call blocking |
| • saapumisväliaika = interarrival time | • estotn = blocking probability |
| • palveluintensiiviteetti = service intensity | • paketti = packet |
| • palveluaika = service time | • lähetysaika = transmission time |
| • ääretön = infinite | • (liikenne)kuorma = (traffic) load |
| | • käyttöaste = utilization |
| | • läpimeno = throughput |

35