

4. Kiinteät verkot

Kiinteällä verkolla (**fixed network**) tarkoitetaan tässä yhteydessä verkkoa, jonka siirtotienä käytetään ainakin pääosin kiinteästi asennettuja johtimia (ei siis vapaasti eteneviä radioaaltoja). Toisaalta olennaisempaa kuin johtimet on se, että kunkin yhteyden molemmat päätepisteet ovat kiinteästi sijoitettuja. Siten jos verkossa käytetään kiinteästi asennettuja radiolinkkejä kahden pisteen välillä, voidaan edelleen puhua kiinteästä verkosta. Samoin satelliittiyhteyttä voidaan pitää kiinteän verkon osana silloin kun maa-asetat ovat kiinteitä. Kiinteän verkon vastakohta on mobiiliverkko (**mobile network**), jossa päätelaitteet voivat liikkua ainakin suhteellisen vapaasti. Mobiiliverkkoja ja niiden erityisominaisuuksia käsitellään seuraavassa luvussa.

Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Verkkorakenteet ja niiden keskeiset ominaisuudet
2. Verkon rakenteen vaikutus yhteyksien saatavuuteen
3. Piiri- ja pakettikytkennän erot
4. CSMA/CD-toimintaperiaate
5. Järjestelmän suorituskyvyn analysointi mallintamisen avulla

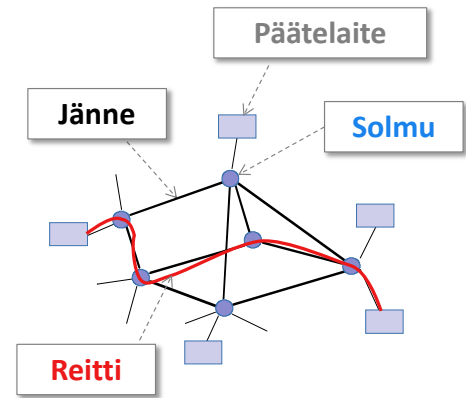
Verkkojen perusteet

Termistö ja luokittelu

Ensin joitakin keskeisimpiä termejä (kuvassa 4.1):

- Verkko (**network**; myös graafi, **graph**): solmujen ja jänneiden muodostama kokonaisuus.
- Solmu (**node**, **vertice**): laite joka kykenee muodostamaan ja ylläpitämään yhteyksiä verkon muihin laitteisiin, graafiteoriassa käytetään myös nimitystä piste.
- Jänne (**edge**, usein käytetään termiä linkki (**link**), myös viiva ja kaari): kahden solmun välinen yhteys. Jänneen päätepisteinä voi myös olla sama solmu.
- Polku (**path**): sarja toisiinsa liittyviä jänneitä ja solmuja. Reitti (**route**): polku kahden solmun välillä siten, että mikään jänne tai solmu ei esiinny enempää kuin kerran.

- Päätelaitte (**end device**): verkkoon yhden jännän kautta kytketty laite.



Kuva 4.1. Verkkotermejä.

Lainsäätäjän mukaan kuitenkin:¹⁴²

Viestintäverkolla [tarkoitetaan] toisiinsa liitetystä johtimista sekä laitteista muodostuvaa järjestelmää, joka on tarkoitettu viestien siirtoon tai jakeluun johtimella, radioaalloilla, optisesti tai muulla sähkömagneettisella tavalla.

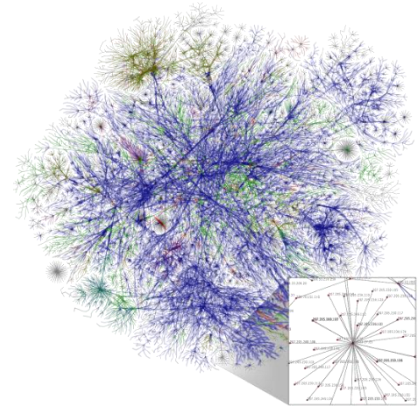
Tämä määritelmä on hieman epälooginen sen suhteen, miten termiä johdin (**wire**) on käytetty. Vaikka johtimen voidaan ajatella olevan mikä tahansa väliaine, joka johtaa jotain paikasta toiseen, niin tietoliikennetekniikassa johdin viittaa useimmiten kuparista tehtyyn metallilankaan, jota käytetään informaation siirtoon. Voidaan myös ajatella, että optinen kuitu on johdin, joka välittää valoa (joka myös on sähkömagneettista säteilyä). Olennaista tuki on informaation siirtyminen.

Televerkot voitiin pitkään luokitella käyttötarkoituksen mukaan puhe-, data- ja kuvansiirtoverkoiksi. Datasiirrolla on perinteisesti tarkoitettu tiedon siirtoa, jossa päätelaitteina käytetään tietokoneita tai niiden oheislaitteita ja kuvansiirrolla lähinnä televisiokuvan siirtoa. Rajat ovat kuitenkin hämärtyneet. Internet, jonka kehittämisen lähtökohta oli datan siirto tietokoneiden välillä, muodostaa nykyisin alustan, jonka päällä välitetään kaikki se informaatio mitä ihminen ja laitteet tuottavat. Vastaavasti matkaviestinverkoja, jotka alun perin suunniteltiin lähinnä puheen välitykseen, käytetään enemmänkin kaikkeen muuhun informaation siirtoon. Lisäksi on syntynyt uusia sovelluksia, joita on vaikea sijoittaa vanhoihin luokkiin, kuten sosiaalisen median sovellukset (esimerkiksi Facebook ja Twitter) ja massiiviset verkkopelit (esimerkiksi World of Warcraft).

Puhelinverkon rakenne määräytyi varsinkin analogisen teknologian ja palvelumonopoliin aikaan puhelujen ohjauksen aiheuttamista rajoitteista, kustannusrakenteesta (kaapelointi maksoi ja kupari oli kallista), liiketoiminnan rakenteesta ja hinnoittelusta. Verkon eri tasoilla käytetään erilaisia verkkotopologioita, mutta mitään yhtä kuvaa koko globaalista puhelinverkosta on vaikea esittää.

¹⁴² Viestintämarkkinalaki, 2 §, <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2003/20030393>, tosin uusi laki astui voimaan 1.1.2015.

Entä Internet? Sen suunnitteluperiaatteita ovat olleet: luotettavuuden korostaminen silloinkin, kun solmut ja linkit olivat epäluotettavia, muuhun tarkoitukseen rakennettujen ja ylläpidettyjen tietokoneiden (ei siis loppukäyttäjien!) yhdistäminen toisiinsa, sekä verkon hallinta ja ylläpito ilman hierarkkisia organisaatioita. Lopputuloksena on verkko, Internet, jonka sangen sekavasta topologiasta löytää lukuisia kuvia netissä, yksi niistä kuvassa 4.2. Internetin toimintaperiaatteisiin palataan tarkemmin kurssin viimeisessä osiossa.



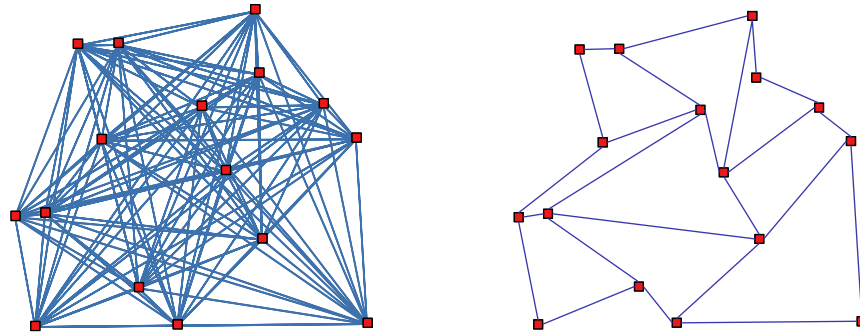
Kuva 4.2. Internetin topologiaa.¹⁴³

Verkkojen rakenteita

Verkon rakenteeseen liittyviä tekijöitä ovat verkon muoto ja koko. Tyypillisiä rakenteita ovat väylä, rengas, tähti, puu ja silmukoitu verkko (kuvat 4.3 - 4.8). Vaikka rakenne kuulostaa yksinkertaiselta ja selkeältä, tietoliikenneverkkojen kohdalla tilannetta hämärtää se, että verkon fyysinen rakenne (eli miten johdot kulkevat) ei aina vastaa toiminnallista eli loogista rakennetta. Topologia tarkoittaa siis verkon rakennetta eli sitä mitkä verkon laitteet on liitetty toisiinsa. Rakenteita on monella tasolla: topologialla voidaan viitata verkon sähköiseen, loogiseen tai fyysiseen rakenteeseen. Samalla verkolla voi eri tasoilla olla eri rakenne. Yksinkertaisin tapa muodostaa verkko on rakentaa keskenään liikennöivien osapuolien välille kahdenvälisiä yhteyksiä. Ensimmäiset puhelinverkot muodostuivat juuri näin: jokaista vastapuolta varten oli vedettävä oma johtonsa. Tällaista verkkorakennetta kutsutaan silmukoiduksi (kuva 4.3). Jos kaikki osapuolet on yhdistetty toisiinsa, verkon sanotaan olevan täysin silmukoitu tai täysin kytketty (**mesh**). Täysin kytketty verkkoa harvoin näkee käytettävän. Kuvan 4.3 toista silmukoidun verkon variaatiota voidaan kutsua ristikoksi.

Verkon luotettavuus, tai täsmällisemmin saatavuus (**availability**), riippuu olennaisesti vaihtoehtoisten reittien määrästä. Käytännössä topologiat voivat muuttua ajan myötä, kun teknologiat ja niiden kustannussuhteet muuttuvat. Esimerkiksi Ethernetin tapauksessa väyläratkaisu ajateltiin edullisemmaksi, koska koaksiaalikaapelin oletettiin olevan niin kallista, ettei sitä kannattanut vetää jokaiseen päätelaitteeseen erikseen. Käytännössä silti päädyttiin varsin nopeasti ratkaisuun, jossa vedettiin erillinen kaapeli jokaiseen työasemaan.

¹⁴³ http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_Internet

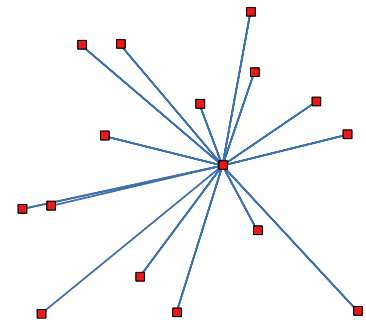


Kuva 4.3. Silmukoituja verkkoja: täysin silmukoitu (vasemmalla) ja ristikko (oikealla).

Puhelinkeskusten keksimisen myötä puhelinverkoista voitiin rakentaa tähtimäisiä, mikä säästi linjanrakennuskustannuksia ja antoi mahdollisuuden soittaa yhden linjan kautta kenelle tahansa verkkoon liittyneelle. Tähtiverkossa (*star*) kaikki verkon asemat ovat liittyneenä yhteen keskuspiisteeseen, jonka kautta kaikki liikenne kiertää (kuva 4.4). Tähtirakenne on tarkoituksenmukainen silloin, verkko on suhteellisen pieni ja/tai välitystekniikan mittakaavaedut ovat merkittäviä.¹⁴⁴

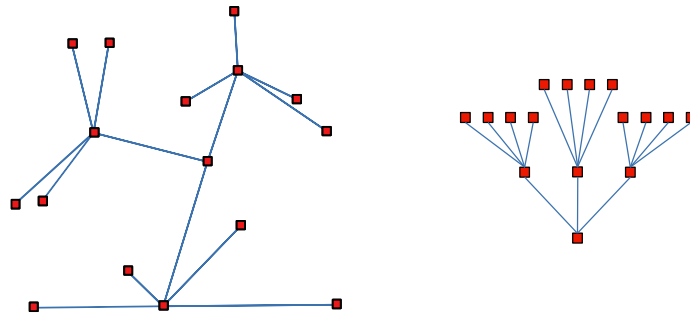
Tähtimäinen rakenne näyttää joskus houkuttevalta. Aikanaan eräs kansainvälinen teleoperaattori laati suunnitelman, jossa koko maan tiedonsiirto olisi voitu hoitaa yhdellä aktiivisella solmupisteellä. Perustelu tällaiselle ratkaisulle oli liikenteen hallinta, eli kaikki liikenteen hallinta ja operointi olisi voitu hoitaa tehokkaasti yhdestä pisteestä. Tämä lienee edelleen tärkein peruste liikenteen keskittämiseksi. Toisaalta luotettavuuden kannalta tähtirakenne on ongelmallinen, koska keskussolmun vioittuessa mitään palvelua ei ole saatavilla.

Kuva 4.4. Tähtimäinen verkko.



Puutopologiassa (*tree*) yhdestä pisteestä lähtee yhteyksiä viereisiin solmuihin ja näistä voi lähteä haaroja, jotka voivat haarautua edelleen (kuva 4.5). Yhden aseman lähetys voi levitä vapaasti koko verkkoon, jolloin se on kaikkien kuultavissa, tai verkko voi olla jaettu osiin siten, että ainoastaan muihin haaroihin suuntautuva liikenne välitetään oman haaran alueelta paikallisliikenteen jäädessä välittämättä. Puurakennetta on käytetty mm. joissakin lähiverkoissa, kaapelitelevisioverkoissa ja sähkölaitosten sähkönjakeluverkoissa.

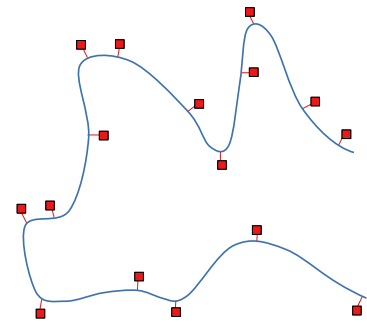
¹⁴⁴ Mittakaavaetu (*economies of scale*) tarkoittaa sitä, että yksikkökustannukset laskevat olennaisesti, kun järjestelmän koko kasvaa.



Kuva 4.5. Puu-verkko. Vasemmalla fyysisen tason kuvaus, oikealla loogisena rakenteena.

Väylä (**bus**) on rakenne, jossa työasemat ovat kiinnitetty yhteiseen siirtotiehen.

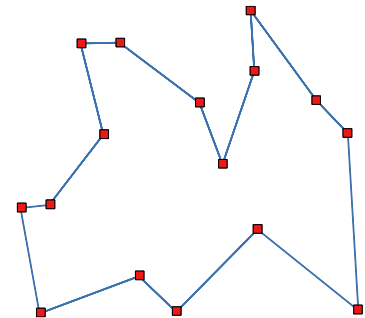
Kuva 4.6. Väylä.



Jokainen lähetys leviää koko väylään ja mikä asema tahansa voi vastaanottaa sen. Lähetettyä pakettia ei kukaan aktiivisesti poista, vaan se katoaa päätevastuksiin. Esimerkkejä väylästä ovat tietokoneen sisäiset väylät, joihin lisäkortit kiinnitetään ja osa Ethernet-verkoista.

Rengasverkko (**ring**) muodostuu asemista, jotka yhdistetään toisiinsa suljetuksi renkaaksi (kuva 4.7). Tieto kulkee rengasverkossa yleensä vain yhteen suuntaan. Data kulkee paketeissa, jotka sisältävät tiedot lähettäjästä ja määränpäästä. Vastaanottaja kopioi paketin itselleen. Paketti kiertää koko verkon ympäri, kunnes se saapuu takaisin lähettäjälleen, joka poistaa sen verkosta.

Kuva 4.7. Rengas.



Niin rengas- kuin väyläverkoissakin asemien täytyy jollain tavoin sopia, kuka kulloinkin saa yhteisen siirtomedian (asemia yhdistävän johdon) käyttöönsä, sillä kahden aseman yhtäaikainen lähetys voi sotkea verkon liikenteen. Tähti-verkossa ja täysin kytketyssä verkossa erityistä vuoronvarausperiaatetta ei välttämättä tarvita.

Kuten kuvistakin voidaan havaita, jänneiden kokonaispituuksissa on huomattavia eroja verkon topologiasta riippuen. Jos verkon kattama pinta-ala pidetään vakiona (1 km^2) ja verkon solmut (N kappaletta) sijoittuvat tasaisesti koko alueelle, niin jänneiden kokonaispituudet (km) kasvavat seuraavalla tavalla:¹⁴⁵

- Puumaisilla verkoilla suhteessa solmujen lukumäärän neliöjuureen (kokonaispituus $\approx \sqrt{N}$).
- Kuvan 4.8f ”jalkapalloverkolla” suhteessa lukumäärän neliöjuureen ($\approx 1,4 \sqrt{N}$)
- Ristikkoverkolla lukumäärän neliöjuureen ($\approx 2 \sqrt{N}$)
- Tähtimäisillä verkoilla suhteessa solmujen lukumäärään ($\approx 0,38 N$).
- Täysin kytketyillä verkoilla suhteessa solmujen lukumäärän neliöön ($\approx 0,26 N^2$).

Kun solmupisteiden määrä on suuri, jänneiden kokonaispituuksissa on suuria eroja. Esimerkiksi sadan solmulla jänneiden kokonaispituudet ovat suunnilleen puu: 10 km, ristikko: 20 km, tähti: 38 km ja täysin kytketty: 2600 km. Käytännössä suurissa verkoissa, kuten Internetissä, verkon topologia on yhdistelmä erilaisista perustopologioista.

Mutta miksi ei rakenneta yhteyksiä, jotka toimivat aina? Taulukossa 4.1 on esitetty tyyppisiä kaapelivikojen syitä. Tilastojen mukaan kaapelivikoja on korkeintaan 2 vikaa / 1000 km / vuosi, käytännössä yleensä sitäkin vähemmän. Sinänsä pienehkö vika voi kuitenkin aiheuttaa merkittäviä ongelmia käyttäjille.

Taulukko 4.1. Tyypillisiä kaapelivikojen syitä.¹⁴⁶

	Sellaisenaan upotettu kaapeli (216 vikaa)	Putkitettu kaapeli (160 vikaa)
Kaivu	80 %	65 %
Jyrsijä	5 %	2 %
Työmiehet	2 %	13 %
Tulva	2 %	-
Salama	2 %	-
Höyry	-	2 %
Äärimmäinen lämpötila	-	2 %
Muut syyt	9 %	17 %

¹⁴⁵ Tarkat kertoimet riippuvat solmujen sijainneista. Esitettyjä kertoimia ei tarvitse osata ulkoa, toisaalta kannattaa itsekin miettiä läpi, miksi jotkut pituudet ovat suhteessa solmujen määrään neliöjuureen ja jotkut neliöön.

¹⁴⁶ Alcoa Fujikura Ltd (May 2001): *Reliability of Fiber Optic Cable Systems: Buried Fiber Optic Cable Optical Groundwire Cable All Dielectric, Self Supporting Cable* (<http://www.southern-telecom.com/solutions/AFL-Reliability.pdf>).

Esimerkkinä tapaus, jossa kaivinkone katkaisi Elisan valokaapelin ja samalla Elisan kiinteän verkon internetyhteydet ulkomaille. Yhden kaapelin rikkoutuminen aiheutti siten merkittävän palvelukatkoksen, koska varayhteys ei toiminut automaattisesti vaan varayhteyden käynnistäminen vaati manuaalisia toimenpiteitä, joihin meni useita tunteja. Varakaapeli meni poikki samalla kertaa, koska se oli liian lähellä ensisijaista kaapelia.¹⁴⁷ Muutama viikko myöhemmin Soneran (eli Telian) matkapuhelinverkossa oli laaja ongelma, joka esti puhelut ja tekstiviestien lähettämisen. Tässä tapauksessa syynä oli ohjelmistovika.¹⁴⁸ DNA:lla vastaavantyyppinen matkapuhelinverkon häiriö vuonna 2011 johtui sähkönsyöttö-ongelmasta.¹⁴⁹

Suurimmassa osassa ongelmia pääasiallisin välitön syy on inhimillinen virhe. Toisaalta on väärin syyttää yksittäisiä henkilöitä, sen paremmin kaivinkoneen kuljettajaa kuin ohjelmoijaa, koska järjestelmä kokonaisuudessaan pitäisi suunnitella siten, että (väistämättömien) inhimillisten virheiden määrä pidetään pienenä ja niiden vaikutus minimoidaan. Koko yhteysvälin saatavuus voidaan laskea varsin yksinkertaisesti, jos oletetaan että viat sattuvat toisistaan riippumatta. Kun yhden jänteen (i) saatavuutta reitillä j merkitään $A_{i,j}$:llä reitin saatavuus on:

$$A_j = \prod_{i=1}^{N_j} A_{i,j}$$

jossa N_j on reitin j jänneiden määrä. Vastaavasti kun yhden reitin saatavuus on A_j , ja M on vaihtoehtoisten reittien määrä, niin kahden solmun välisen yhteyden saatavuus on:

$$A = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - A_j)$$

Näitä laskentaperiaatteita käyttämällä voidaan laskea yhteyden saatavuus monimutkaisissakin tapauksissa, kunhan kaikki vaihtoehtoiset reitit ovat toisistaan riippumattomia. Sen sijaan, jos on mahdollista hyödyntää myös muita verkon jäniteitä, saatavuus on parempi, mutta vaikeammin laskettavissa. Kuvassa 4.9 on esitetty saatavuusanalyysin tuloksia, kun oletetaan, että jänneiden saatavuus on sama riippumatta pituudesta. Olennaista on havaita, että saatavuutta on yleensä helpompi parantaa lisäämällä vaihtoehtoisten reittien määrää kuin parantamalla yksittäisten jänneiden saatavuutta.

¹⁴⁷ Taloussanomat: ”Elisa turvautui käsikäynnistykseen jättiviassa”, 12.12.2014, <http://www.taloussanomat.fi/tietoliikenne/2014/12/12/elisa-turvautui-kasikaynnistykseen-jattiviassa/201417185/12>.

¹⁴⁸ Yle: Sonera: ”Nolo juttu” - Kahden miljoonan suomalaisen kännykät pimenivät, 16.12.2014. http://yle.fi/uutiset/sonera_nolo_juttu_-_kahden_miljoonan_suomalaisen_kannykat_pimenivat/7692397

¹⁴⁹ Iltasanomat: ”Sitkeä verkkovika vaivaa yhä DNA:n matkapuhelimia”, 6.8.2011, <http://www.iltasanomat.fi/kotimaa/art-1288405910272.html>.

Saatavuusanalyysi

Otetaan esimerkiksi 24 solmupisteen verkko, jossa solmut sijaitsevat säännönmukaisesti kuusikulmion kärjissä. Kuvassa 4.8 esitetty kuusi erilaista topologiaa, jolla solmut voidaan yhdistää. Renkaassa on siis aina kaksi vaihtoehtoista reittiä kahden solmupisteen välillä, kun taas puu-rakenteessa on vain yksi mahdollinen reitti. ”Jalkapallossa”¹⁵⁰ vaihtoehtoisia reittejä on kolme jokaisen solmuparin välillä.

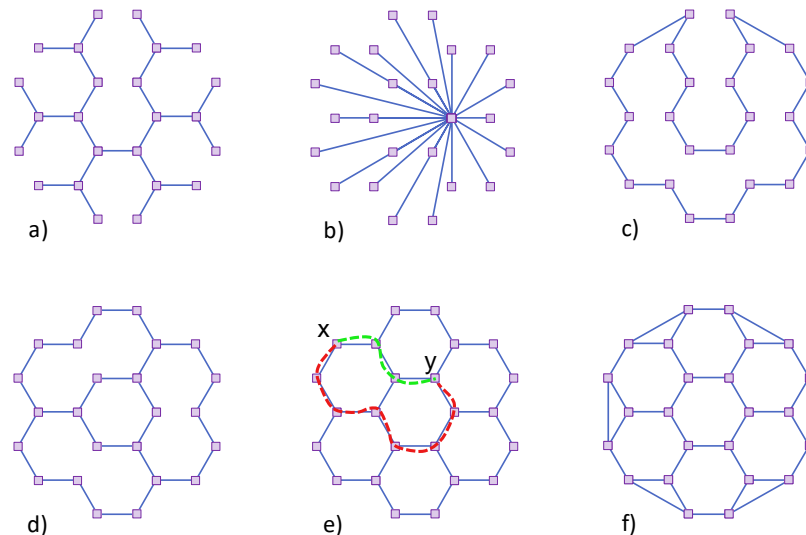
Solmujen paikat ovat samoja, ainoa ero on jänteiden ja sitä myötä erilaisten reittivaihtoehtojen määrä. Tavoitteena on laskea keskimääräinen yhteyden saatavuus eli todennäköisyys, että yhteys toimii satunnaisella hetkellä. Tässä oletetaan, että vähintään yksi ennalta määriteltä reittivaihtoehto on oltava käytettävissä, mutta yhteyden laadulle ei aseteta muita vaatimuksia. Eli jos joku jänne vikaantuu, liikenne siirtyy toiselle reitille, jolloin sen jänteiden kuormitus kasvaa. Yleensä verkot mitoitetaan siten, että verkossa on ylimääräistä kapasiteettia myös vikatilanteita varten.

Käytännössä jotkut solmut ovat pieniä ja niiden liikenne huomattavasti vähäisempää kuin verkon suurimmissa solmuissa. Nämä solmut ovat yleensä verkon reunoilla palvellen suoraan verkon käyttäjiä ja niiden saatavuusvaatimus on löysempi kuin verkon runkoverkon solmujen. Kuvan 4.8 verkot (erityisesti d, e ja f) kuvaavat siten runkoverkkoa, jossa kaikkien solmujen välillä on paljon liikennettä. Tilajaverkko voi tyypillisesti olla joko puhtaasti puumainen tai vaativimmissa tapauksissa tilajayhteydet on kahdennettu.

Puumaisella rakenteella voidaan siis minimoida jänteiden kokonaispituus. Ongelmana on vaihtoehtoisten reittien puute. Eli yhdenkin linkin vikaantuminen jakaa verkon kahteen erilliseen osaan. Lisäksi osa yhteyksistä on sangen pitkiä. Kuvassa 4.8a pisin yhteys muodostuu yhdeksästä linkistä ja kahdeksasta solmupisteestä. Jos täydellinen silmukoitu verkko jätetään pois laskuista, niin reittien pituus voidaan minimoida parhaiten käyttämällä tähtimäistä topologiaa. Mutta tässä minimointi pätee vain, kun kriteerinä on linkkien määrä, sen sijaan keskimääräinen yhteyden pituus kilometreissä on tähtiverkossa (b) suunnilleen sama kuin puumaisella rakenteella (a).

Kolme riippumatonta yhteyttä on useimmiten mahdollista toteuttaa kohtuullisen helposti ilman että linkit risteävät keskenään. Jos halutaan vielä tiheämpää verkkoa, jossa kaikkiin solmuihin on neljä linkkiä eri solmuihin, linkkejä joudutaan yleensä vetämään ristiin, esimerkiksi kuvassa 4.8f yksittäisten kennojen läpi ristiin. Tämä ei sinänsä ole mikään ongelma, mutta ei välttämättä järkevää pelkästään saatavuuden parantamiseksi, ellei linkkien luotettavuus ole erityisen alhainen.

¹⁵⁰ Jalkapallo-nimitys koskee vain tätä materiaalia. Oikeasti jalkapallo tehdään viisikulmaisista palasista, koska pallo on pallo. Toki viisikulmioistakin voi rakentaa säännöllisen verkon, <http://mathworld.wolfram.com/PentagonTiling.html>



Kuva 4.8. Saatavuusanalyysin verkot a) puu, b) tähti (tässä jokaisesta solmusta on oma linkki keskussolmuun), c) rengas, d) rengas+3, e) kenno, f) jalkapallo.

Otetaan esimerkki kahden solmun väliset yhteydet kennorakenteessa. Kuvassa 4.8e solmut on merkitty kirjaimilla x ja y. Lyhin reitti niiden välillä kulkee 3 linkin kautta. Kun kyseiset kolme linkkiä poistetaan, jää seuraavaksi reittivaihtoehdoksi punaisella merkitty reitti, jolla on 7 linkkiä. Jos oletetaan, että yhden linkin saatavuus on 99 %, niin voimme laskea kyseisen solmuparin välisen saatavuuden seuraavasti:

1. Ensisijaisella reitillä on siis kolme linkkiä, joten jos niiden vikaantumiset tapahtumat toisistaan riippumatta, niin todennäköisyys, että kaikki linkit ovat toiminnassa, on $A_3 = 0,99^3 = 0,9703$.
2. Vastaavasti toissijaisella reitillä on seitsemän linkkiä, joten sen yhteyden saatavuus on $A_7 = 0,99^7 = 0,9321$.
3. Todennäköisyys, että sekä ensi- että toissijainen reitti ovat epäkunnossa samaan aikaan, on $p = (1 - A_3)(1 - A_7) = 0,0297 \cdot 0,0679 = 0,00202$.
4. Yhteyden saatavuus solmujen x ja y välillä on siten $A = 1 - p = 0,99798 = 99,80 \%$.

Eri solmujen välillä saatavuus on siis jossain määrin erilainen riippuen siitä, miten kaukana solmut sijaitsevat. Keskimääräinen saatavuus kuvan 4.8 kennoverkossa on 99,69 %, kuten taulukossa 4.2 on esitetty.

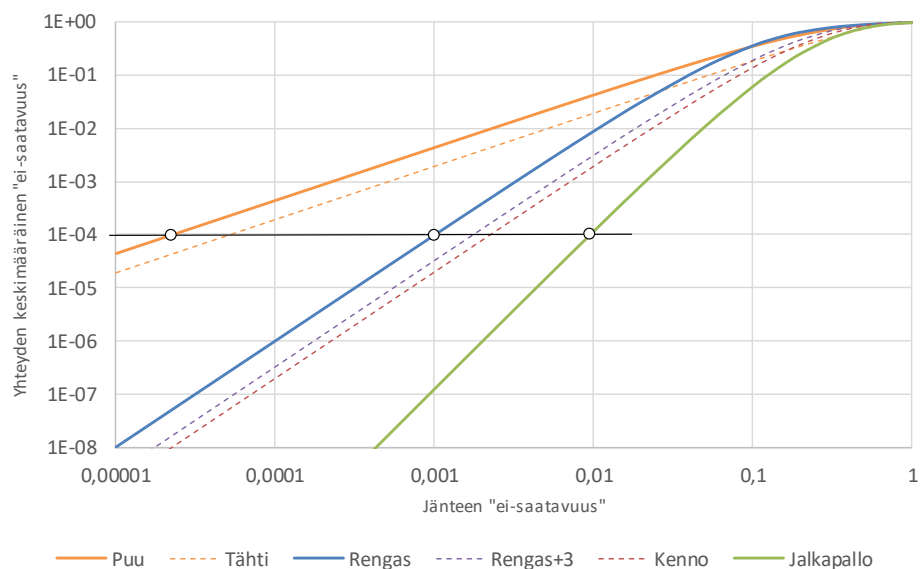
Korostettakoon vielä kerran sitä, että verkon saatavuus riippuu olennaisesti siitä, miten monta vaihtoehtoista reittiä on saatavilla. Jos lasketaan keskimääräisiä yhteyksien saatavuuksia, lukuja dominoivat ne solmuparit, jossa solmujen välillä on vähiten vaihtoehtoisia

reittejä.¹⁵¹ Tämä laskelma perustuu oletukselle, että liikenne jakautuu tasan kaikkien solmuparien välille, mutta ellei luotettavaa dataa ole saatavilla, käytännössä ainoa vaihtoehto on olettaa liikenne tasaisesti jakautuneeksi. Tällä oletuksella voidaan kuvasta 4.9 esimerkiksi päätellä, että rengasverkolla ”neljän yhdeksän” saatavuuteen (eli $A = 99,99\%$) päästään linkin saatavuudella $99,9\%$, kun taas ”jalkapallo”-verkolla vastaavaan saatavuuteen päästään, kun linkin saatavuus on 99% . Puumaisella verkolla vaadittaisiin jokaiselle linkille $99,998\%$ saatavuus, mikä merkitsee noin 10 minuutin ei-saatavuutta vuotta kohti. Tämä on erittäin kova vaatimus, jos ja kun keskimääräinen vian korjausaika on vähintään muutamia tunteja.

Taulukko 4.2. Kuvan 4.8 verkkojen keskeisiä tunnuslukuja.

	Jäniteitä	Jäniteiden pituus yhteensä	Ensisijaisen reitin keskipituus (jänteinä)	Vaihto- ehtoisia reit- tejä	Keskimääräinen yhteyden saatavuus, kun jänteen saatavuus = 99%
Puu	23	23	4,40	1	93,95 %
Tähti	23	53,11	1,92	1	98,09 % *
Rengas	24	25,46	6,26	2	99,10 %
Rengas+3	27	27	4,04	2 – 3	99,69 %
Kenno	30	30	3,62	2 – 3	99,81 %
Jalkapallo	36	36	3,22	3	99,988 %

* oletus että jänteen saatavuus ei riippuisi lainkaan sen pituudesta on jossain määrin kyseenalainen.



¹⁵¹ Dominointi viittaa tässä siihen, että keskiarvoon vaikuttaa eniten ne solmuparit joiden välillä on vähiten vaihtoehtoisia reittejä. Näillä pareilla ei-saatavuus voi olla jopa 100 kertaa suurempi kuin niillä solmupareilla joiden välillä on enemmän yhteysvaihtoehtoja.

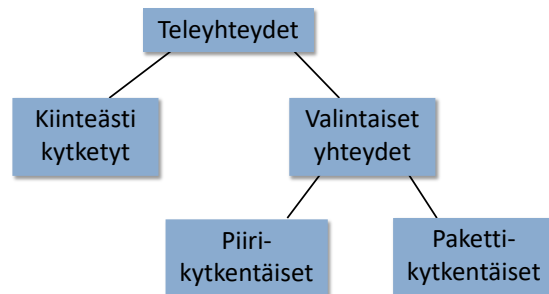
Kuva 4.9. Keskimääräinen kahden solmun välisen yhteyden ”ei-saatavuus” ($= 1-A$) linkin ”ei-saatavuuden” funktiona. Verkot on esitetty kuvassa 4.8.

Piiri- ja pakettikytkentäisyys

Yhteystyyppiä

Tietoliikenneverkoissa toteutettavat yhteydet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: kiinteästi kytkettyihin (**fixed connection**) ja valintaisiin yhteyksiin (**switched connection**). Ensimmäiset puhelinyhteydet ovat esimerkki kiinteästi kytketyistä yhteyksistä: jokaiselle puhelukumppanille oli vedettävä oma erillinen johtonsa, jota käytettiin vain näiden kahden pisteen väliseen liikenteeseen. Puhelinkeskusten keksimisen myötä tuli mahdolliseksi muodostaa yhdellä ja samalla johdolla yhteys (lähes) mihin tahansa maailmassa niin, että (puhe)yhteys muodostettiin vain puhelun ajaksi ja linja vapautettiin puhelun loputtua. Tällaista yhteyttä kutsutaan valinnaiseksi yhteydeksi.

Lisäksi käytetään termiä virtuaalinen yhteys (**virtual circuit**), joka tarkoittaa menetelmää, jossa jollain verkon abstraktitasolla kahden solmun välillä näyttää olevan yhteys, vaikka solmut eivät välttämättä ole liitettyinä suoralla fyysisellä yhteydellä toisiinsa. Virtuaalisia yhteyksiä ja virtuaalisia verkkoja (**virtual network**) käytetään ensisijaisesti verkkojen hallinnan apuvälineenä. Erityisesti kannattaa pitää mielessä, että edellisessä kappaleessa käsitelty saatavuusanalyysi täytyy aina tehdä fyysisen tason yhteyksille, ei virtuaalisille yhteyksille.



Kuva 4.10. Yhteystyyppien jaottelu.

Yksinkertaisin tapa siirtää tietoa kahden tietokoneen välillä on hankkia kaupasta riittävä määrä kaapelia ja yhdistää koneet kiinteästi toisiinsa. Omassa toimistossa tämä onnistuu hyvin, mutta pidempiä yhteyksiä suunnittelevalle on odotettavissa vaikeuksia. Viranomaiset ja maanomistajat saattavat suhtautua kielteisesti yksityiseen kaapelinvetoon korttelista tai kaupungista toiseen; tosin näin juuri tehtiin puhelinverkkojen alkuaikoina (kuten kuvasta 2.1 saatettiin havaita). Lisäksi väistämättä vastaan tulevat taloudelliset realiteetit.

Oman linjan rakentamisen voi välttää vuokraamalla yhteyden sellaiselta, jolla niitä riittää vuokrattaviksi asti. Käytännössä tämä tarkoittaa teleoperaattoria. Teleoperaattori voi erottaa puhelinliikennettä varten rakentamastaan kaapeliverkosta johdinpareja ja vuokrata niitä maksukykyisille asiakkaille. Eri kaapeleissa kulkevia pareja yhdistämällä voidaan

rakentaa satojen tai jopa tuhansien kilometrien pituisia yhteyksiä. Viestintämarkkinalain mukaan:¹⁵²

- Kiinteällä yhteydellä [tarkoitetaan] palvelua, jossa ilman viestien ohjausta tarjotaan määriteltyä siirtokapasiteettia viestintäverkon liityntäpisteiden välillä.
- Tilaajayhteydellä [tarkoitetaan] kiinteän puhelinverkon osaa, joka on käyttäjän liittymän ja sellaisen laitteen välillä, jolla voidaan ohjata viestejä.

Lainsäätäjä ei siis näe selkeää eroa johdon ja sen käytön välillä. Yhdessä tilaajajohdossa voi olla samanaikaisesti kaksi yhteyttä, esimerkiksi puhelinyhteys ja nopea datasiirtoyhteys.

Kiinteän yhteyden suurin heikkous, ja samalla vahvuus, on siinä, että yhteyskumppani ei ole valittavissa. Kiinteillä yhteyksillä voidaan toteuttaa myös turvallinen, suljettu verkko, johon ulkopuoliset eivät helposti pääse liittymään, esimerkiksi väärään numeroon vahingossa soittamalla.

Kiinteän yhteyden suurin heikkous eli yhteyskumppanin valintamahdollisuuden puuttuminen voidaan välttää valintaisilla yhteyksillä. Valintaisen yhteyden keskeinen tunnusmerkki on, että verkolle syötetään ennen varsinaisen yhteyden alkua valintainformaatiota, jonka perusteella verkko muodostaa yhteyden. Tyypillinen esimerkki valintaisesta verkosta on yleinen puhelinverkko, jossa puhelinnumero ilmoittaa verkolle mihin yhteys halutaan ottaa. Puhelinverkossa verkko varaa yhteyttä varten määrätyn kapasiteetin riippumatta siitä, onko kanavalla liikennettä vai ei. Tällaista verkkoa kutsutaan piirikytkentäiseksi (*circuit switched*). Piirikytkentäisyys tarkoittaa sitä, että yhteys tilaajien välillä on avoinna koko yhteystapahtuman (eli istunnon, *session*) ajan. Yhteystapahtuma jakautuu siis kolmeen osaan: yhteyden luominen, yhteyden käyttö ja yhteyden lopettaminen.

Monet sovellukset ovat luonteeltaan sellaisia, että dataa siirretään päätelaitteen ja palvelimen välillä ryöppynä, jonka jälkeen voi olla pitkiä, jopa kymmenien sekuntien tai minuuttien taukoja. Piirikytkentäisessä verkossa tällainen liikenne joko hukkaa resursseja tai vaatii yhteyden automaattisen katkaisun ja avaamisen aina liikenteen tauotessa ja alkaessa uudelleen.

Vasta pakettikytkentäisten (*packet switched*) verkkojen tulo tehosti tietoliikenneyhteyksien käyttöä. Pakettikytkennässä datavirta pilkotaan jo päätelaitteessa paketteihin, jotka lähetetään pakettiverkon solmuun. Siellä paketti ohjataan paketissa olevan osoitteen perusteella oikealle yhteydelle kohti seuraavaa solmua ja vastaanottajalle. Pakettikytkentäinen yhteys varaa siirtokapasiteettia vain tarpeen mukaan, mikä tekee siitä voimakkaasti vaihtelevalla liikenteellä piirikytkentäistä huomattavasti tehokkaamman. Toisaalta jokainen

¹⁵² <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2003/20030393>

paketti tarvitsee otsikkotietoja, mikä pienentää siirron hyötysuhdetta. Paketit saattavat myös kadota matkan varrella, jolloin paketti saatetaan lähettää uudelleen. Piirikytkentäisillä yhteyksillä tällaista vaaraa ei juuri ole, vaikka niissäkin voidaan joskus menettää dataa tahdistusvirheiden eli luiskahdusten takia. Taulukkoon 4.3 on koottu piiri- ja pakettikytkentäisyyden eroavaisuuksia.

Taulukon rivejä ei kuitenkaan kannata opetella ulkoa, vaan pikemminkin kannattaa miettiä mistä erot johtuvat. Yksi mahdollisuus on käyttää analogiaa, jossa informaation sijasta siirretään fyysistä tavaraa. Piirikytkentäisessä verkossa jokaista kuljetettavaa tavaraa varten pitäisi aina rakentaa sopivan kokoinen putki. Jokaisella yhteydellä olisi oma putki siten että putket kulkisivat rinnakkain. Pakettiverkossa sen sijaan riittää aina yksi iso putki kahden solmupisteen välillä siten että solmupisteissä osoitteen perusteella jokainen paketti reititetään erikseen oikeaan suuntaan. Taulukon lista pätee sangen hyvin tälläkin analogialla. Analoginen siirto voi tarkoittaa tässä sitä, että putkessa virtaa vettä kiinteän tavaransijasta.

Taulukko 4.3. Piiri- ja pakettikytkentäisyydet eroja

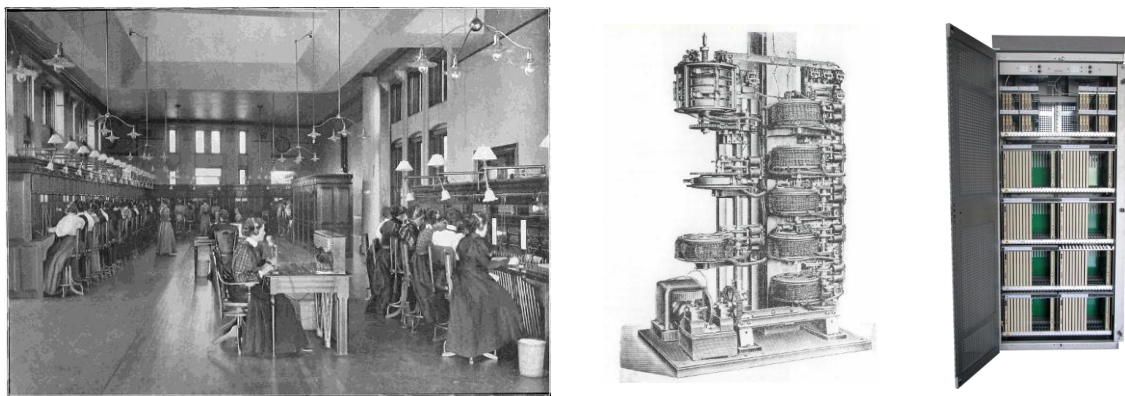
Piirikytkentä	Pakettikytkentä
Puhelinverkoissa alusta alkaen (mutta pakettikytkentäkin toimii puheluille)	Dataverkoissa nykyisin lähes aina
Analoginen tai digitaalinen	Aina digitaalinen
Osoitetieto välitetään vain kerran (vaatii erillisen merkinannon)	Jokaisessa paketissa osoitetieto (ei välttämättä erillistä merkinantoa)
Tehoton jos tarve vaihtelee yhteyden aikana	Tehokas siirtokapasiteetin käyttö (mutta verkon ylikuormituksen vaara olemassa)
Informaatio kulkee aina samaa reittiä järjestystä muuttamatta	Paketit voivat kulkea eri reittejä ja niiden järjestys voi vaihtua (tosin tämä on harvinaista)
Päätelaitteiden pitää toimia samalla nopeudella	Päätelaitteet voivat toimia eri nopeuksilla
Viiveen vaihtelu minimaalista	Viiveen vaihtelu voi olla huomattavaa
Informaatiota hukkuu vain vikatilanteissa	Paketteja voi ruuhkatilanteissa hukkuu matkalla, mutta ne voidaan lähettää uudelleen
Kapasiteetin lisäys jäykkää	Kapasiteetin lisäys joustavaa

Piirikytkentäiset verkot: puhelinverkko

Kuten kuvassa 1.4 esitettiin, tiedon siirto on vain yksi osa monivaiheista kokonaisuutta, jossa lähettäjän ajatteleva viesti muuttuu vastaanottajan ymmärrykseksi. Tiedon siirron lisäksi tarvitaan joku menetelmä, jolla taataan, että tieto siirtyy juuri halutulle vastaanottajalle tai haluttuun paikkaan. Jos tietoa siirretään jalkaisin repussa, niin tarvitaan ainakin osoite, kartta ja jokin kulkuväylä, ettei tarvitse aivan umpimetsässä rämpiä. Niin pitkään

kuin jokaisen tiedonsiirtokanavan päässä oli ihminen (kuten optisen ja sähköisen lennättimen tapauksessa), vastaanottajan nimi ja paikkakunta oli riittävä tieto.

Tästä päättelyn ja toiminnan kustannuksesta tuli ongelma siinä vaiheessa, kun puhelinkeskukseen tarvittiin suuri määrä henkilökuntaa. Ensimmäiset toimivat puhelimet saatiin kehitettyä 1876 ja sangen nopeasti niistä tuli niin suosittuja, ettei kaikkien puhelinten välille ollut mielekästä vetää omaa johtoa (kuva 2.1). Kymmenen puhelimen yhdistämiseen keskenään olisi tarvittu 45 johtoa, sadan puhelimen yhdistämiseen 4950 ja tuhannen puhelimen yhdistämiseen 499 500 johtoa. Vaikka kaikki eivät olisi halunneetkaan puhua kaikkien kanssa, niin oli selvää, että tarvittiin joku järkevämpi ratkaisu.



Kuva 4.11. Käsivälitteinen puhelinkeskus vuodelta 1895 Montrealissa (vasemmalla)¹⁵³, sähkömekaaninen keskus vuodelta 1910 (keskellä)¹⁵⁴ ja puheliverkon keskus vuodelta 2018 (oikealla).¹⁵⁵

Useita puhelimia saattoi kytkeä samalle johdolle, mutta silloin tarvittiin menetelmä valita juuri oikea puhelin ja sulkea muut puhelimet linjalta pois. Kehitys oli nopeaa, sillä ensimmäinen puhelinkeskus otettiin käyttöön jo vuonna 1878 ja Suomessakin jo vuonna 1882. Kuvassa 4.1 on esitetty käsivälitteinen puhelinkeskus 1800-luvun lopulta. Keskuksessa oli siis välittäjiä, jotka yhdistivät puheluita eteenpäin vastaanottajalle tai seuraavaan keskukseseen. Pienten käsivälitteisten verkkojen kapasiteetti ei ollut suuri, mutta niiden palvelut olivat monipuolisia, voisi jopa sanoa älykkäitä: puhelun saattoi siirtää tarvittaessa naapuriin tai jos puhelu oli käynnissä, välittäjä saattoi ilmoittaa toisesta puhelusta, tai välittäjälle saattoi jättää viestin välitettäväksi.

Ensimmäisen toimivan automaattisen keskuksen rakensi Almon Strowger vuonna 1892.¹⁵⁶ Toimintaperiaatteena oli suora ohjaus tilaajan laitteesta. Alkuperäisessä versiossa

¹⁵³ Kuva: http://en.wikipedia.org/wiki/Telephone_exchange

¹⁵⁴ Kuva artikkelista W. Broberg, Några glimtar från automattelefonins pionjärtid, kuvassa Lorimer System –keskus, <http://digitalamodeller.se/daedalus/kapitel/Nagra%20glimtar%20fran%20automattelefonins%20pionjartid.%20Av%20Walter%20Broberg.pdf>

¹⁵⁵ Nokian DX200, <http://www.carritech.com/telecommunications-products/core-network/nokia-dx-200/>

¹⁵⁶ Katso esimerkiksi http://en.wikipedia.org/wiki/Strowger_switch

kahdella eri kytkimellä (jotka molemmat tarvitsivat oman johtonsa keskukseseen) ohjattiin mekaanisesti askeltamalla kytkintä ensin vaakasuunnassa ja sitten pystysuunnassa. Myöhemmin tätä ns. nousukierrovalitsimen periaatetta kehitettiin siten, että yhdellä valintakytkimellä voitiin ohjata vuorotellen aina seuraavaa valintaporrasta. Tämä mahdollisti verkon laajentamisen lähes rajattomasti lisäämällä valintaportaita ja keskuksia. Järjestelmä oli toimiva, mutta hyvin jäykkä numeroinnin ja verkon laajentamisen kannalta.

Suomeen automatisointi ennätti vuonna 1922, ensimmäisenä julkisessa käyttöön tarkoitettuna automaattisena keskuksena Pohjoismaissa.¹⁵⁷ Viimeinen käsivälitteinen keskus lopetti toimintansa vuonna 1980 Kolarissa. Viimeiset nousukiertokeskukset poistuivat käytöstä vasta 90 vuotta tekniikan keksimisen jälkeen. On sangen vaikea kuvitella, että mitään nykyistä laitetta käytettäisiin vielä 2100-luvulla.

Tietokoneiden kehittyessä ja halventuessa puhelinkeskusten ohjaus pyrittiin siirtämään tietokoneille. Puhelinkeskuksen ohjaaminen keskitetysti yhdellä tietokoneella oli erittäin vaikea haaste eikä 70-luvun tekniikka riittänyt luotettavien järjestelmien toteuttamiseen. Tämä teknologiavaihe jäikin varsin lyhyeksi, sillä kehitys kulki analogisista järjestelmistä kohti täysin digitaalista tekniikkaa, jossa sekä siirto-, välitys- että ohjaustekniikkaa ovat digitaalista. Täysin digitaaliset keskukset painoivat puhelinkeskusten kustannukset murtoosaan aikaisempiin tekniikkoihin verrattuna, samalla tuotanto-, asennus- ja ylläpitohenkilöiden tarve putosi olennaisesti.¹⁵⁸ Televerkon digitalisointi saatiin Suomessa valmiiksi vuonna 1996.

Juuri tässä vaiheessa teleala alkoi mullistua teknologisesti toisaalta Internetin ja toisaalta mobiiliverkkojen myötä. Nyt kiinteän puhelinverkon keskukset, jotka vielä 1980-luvulla olivat aikansa ehdotonta huipputeknologiaa ja monimutkaisimpia teknisiä järjestelmiä, ovat siirtyneet taka-alalle. Tämän päivän avainsanoja ovat mm. verkkojen virtualisointi (*virtualization*) ja pilvipalvelut (*cloud services*), sen sijaan että puhuttaisiin puhelinkeskuksista (*exchange*) ja liikennettä kokoavista keskittimistä (*concentrator*).

Mutta keskuksia on edelleen. Nykyaikainen digitaalinen puhelinkeskus on ulkonäöltään hyvin erinäköinen kuin mekaaniset edeltäjänsä. Digitaalinen keskus on laajaa rinnakkaislaskentaa tekevä järjestelmä, jonka ydin on erittäin laaja ja monimutkainen ohjelmistokokonaisuus. Alimmalla tasolla ovat tilaajat (eli siis asiakkaat), jotka on yhdistetty paikalliskeskuksiin tilaajajohdoilla. Saman teleliikennealueen puhelinkeskuksia tilaajajohtoinen ja

¹⁵⁷ M. Kihl, A. Mononen, *Tekniikkaa ja tarinoita Runeberginkadulla, Töölön puhelinkeskusrakennus 1915–2008*, Suomen Kiinteistölehti, Erikaisjulkaisut.

¹⁵⁸ Kun Nokia siirtyi sähkömekaanisista keskuksista digitaaliakeskuksiin, kokoonpanoon tarvittava henkilökunta tilaajaliittymää kohti putosi alle viidesosaan entisestä (M. Sandelin, J. Partanen, *Nokian jalokivi Tarina suomalaisesta DX 200 puhelinkeskuksista*, s. 119). Sen sijaan ohjelmistokehitykseen tarvittiin runsaasti lisää työvoimaa.

keskusten väliset yhdysjohdot muodostavat paikallisverkon (*access network*). Paikalliskeskukset on yhdistetty varmistussyistä aina vähintään kahteen kaukoverkon (*trunk network*) keskukseen ja sitä kautta edelleen yhteen tai useampaan kansainvälisen liikenteen keskukseen.

Mutta onko vuonna 2017 enää olemassa perinteistä puhelinverkkoa, kun kaikki kuitenkin käyttävän matkapuhelimia tai Skypeä? Viestintäviraston tilaston mukaan Suomessa kiinteän verkon puhelinliittymien määrä tippui vuosituhaten vaihteen 2,85 miljoonasta vuoden 2018 noin 350 tuhanteen.¹⁵⁹ Kiinteä puhelinverkko on siis edelleen toiminnassa, vaikka viime vuosina kiinteitä yhteyksiä on laajasti korvattu mobiiliverkon palveluilla. Niinpä kun vuonna 2005 kotitaloudet tuottivat yhteensä 717 miljoonaa kiinteän verkon puhelua, niin vuonna 2017 vastaava luku oli enää 23 miljoonaa. Vaikka mobiilipuheluiden määrä onkin kääntynyt laskuun vuoden 2010 jälkeen, suomalaiset kotitaloudet tuottivat niitä vuonna 2017 vielä 2545 miljoonaa kappaletta.

Ehkäpä kiinteä puhelinverkko olisikin syytä siirtää kokonaisuudessaan historiallisiin aiheisiin. Tärkeimmät perustelut sen pitämiseksi oppimateriaalissa edes ovat: 1) se toimii hyvänä esimerkkinä piirikytkentäisestä verkosta ja 2) puhelinverkon pitkä historia vaikuttaa edelleen mobiiliverkkojen toimintaperiaatteisiin 3) Nokian puhelinkeskus (DX200) ja siihen perustuvat mobiiliverkkojen verkkolaitteet ovat olleet Suomen talouden kannalta erittäin merkittävä vientituote 30 vuoden ajan.¹⁶⁰

Lisäksi historia kertoo sen mitä piirikytkentäisyys on konkreettisesti merkinnyt eri vaiheissa. Käsivälitteisissä verkoissa ihminen muodosti jatkuvan galvaanisen yhteyden päätepisteiden välille. Mekaaniset puhelinkeskukset tekivät saman, eli galvaanisen yhteyden, automaattisesti ilman ihmisen apua. Vasta digitaalinen tekniikka muutti tilanteen, koska sen avulla voitiin välitys- ja siirtoresursseja jakaa paljon joustavammin. Digitaalitekniikassa piirikytkentäisyys tarkoittaa resurssien varaamista verkon läpi siten, että palvelun käyttäjälle voidaan taata riittävä palvelun taso koko halutun ajan yli. Sen sijaan mitään jatkuvaa galvaanista yhteyttä ei päätelaitteiden välille muodosteta. Nykyiset verkot yhdistävät piiri- ja pakettikytkentäisyyden erilaisia ominaisuuksia varsin joustavasti (tosin joustavuudesta seuraa myös käytännön ongelmia).

¹⁵⁹ www.viestintavirasto.fi

¹⁶⁰ Katso esimerkiksi lyhyt artikkeli <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/ict/kaikkien-aikojen-suomalainen-vientituote-alkoi-televasta-vuonna-1969-harva-kadunmies-on-sen-nahnyt-6698244> Myös monilla muilla alan yrityksellä on toimintaa Suomessa, mm. LM Ericsson on toiminut Suomessa vuodesta 1918.

Pakettikytkentäiset verkot: CSMA/CD (Ethernet)

Pakettiverkkojen teknologiaa käsitellään tarkemmin tämän materiaalin viimeisessä Internet-osiossa. Tässä yhteydessä tarkastellaan vain lähiverkoissa käytettävää Ethernet-verkkoa. Ethernetin toimintaperiaate on tavallaan toinen ääripää perinteiseen puhelinverkon toimintaperiaatteeseen verrattuna. Kun puhelinverkossa kaikki on tiukasti kontrolloitua ja palvelu on aina sama, niin Ethernetissä jokainen paketti on omillaan, eikä verkko voi antaa mitään takeita palvelun laadusta.

Ethernet on yleisnimi joukolle IEEE:n ([The Institute of Electrical and Electronics Engineers](#)) kehittämiä tiedonsiirron standardeja.¹⁶¹ Ensimmäinen IEEE 802.3 -standardi julkaistiin vuonna 1983, mutta Ethernetissä käytetyn kilpavaraustekniikan historia palaa 1970-luvun alkuun. Jos verkkoon liitetyt päätelaitteet jakavat saman resurssin (johdon tai radiokaistan) tarvitaan pelisäännöt, joiden avulla resurssi jaetaan ilman, että viestit sotkevat toisiaan. Pelisääntöjä on suunniteltu ja toteutettu useaa eri tyyppiä. Päätyypit ovat

- Hallittuun jakoon perustuvat protokollat ([controlled access protocols](#))
- Satunnaiseen jakoon perustuvat protokollat ([random access protocols](#))
- Kanavointiin perustuvat protokollat ([channelization protocols](#))

Kanavoinnissa resurssin jako perustuu ennalta tiedettyihin tai arvattuihin tarpeisiin, eikä se siten sovi hyvin vaihtelevan dataliikenteen hoitamiseen. Hallittu jako on monessa suhteessa houkutteleva vaihtoehto, sillä se mahdollistaa periaatteessa sekä dynaamisen resurssin jaon että korkean käyttöasteen. Vuorojen hallittu jako vaatii kuitenkin suhteellisen monimutkaisen protokollan, jonka pitää toipua virhetilanteista ja taata kaikille päätelaitteille oikeudenmukainen osuus resurssista.

Ethernet-verkoissa käytetty kilpavarauseriaate juontaa juurensa Havaijilla 70-luvun alkupuolella rakennettuun Aloha-verkkoon. Aloha-verkossa oli yksi keskustietokone ja useita asiakaskoneita, jotka viestivät toistensa kanssa radioteitse. Keskusasema lähetti viestejä yhdellä taajuudella ja kuunteli toista, jolloin asiakaskoneet joutuivat jakamaan keskusaseaman kuunteleman taajuuden jollakin käytännössä toimivalla tavalla. Yksi liikenteen ohjauksessa kokeilluista menetelmistä oli CSMA ([Carrier Sense Multiple Access](#)).

CSMA-periaate osoittautui käytännön laitteisiin soveltuvaksi ratkaisuksi, joten lähiverkkojen kehittelyä jatkettiin sen pohjalta. Ensimmäisenä ehti Xerox, joka sovelsi CSMA-periaatetta koaksiaalikaapeliverkkoon vuonna 1975. Koeverkossa käytettiin 3 Mbit/s siirtonopeutta ja uutena ominaisuutena törmäysten havaitsemista (CD, [Collision Detection](#)). Koeverkon avulla tehtiin runsaasti lähiverkon suorituskykyä koskevia mittauksia, joilla voitiin

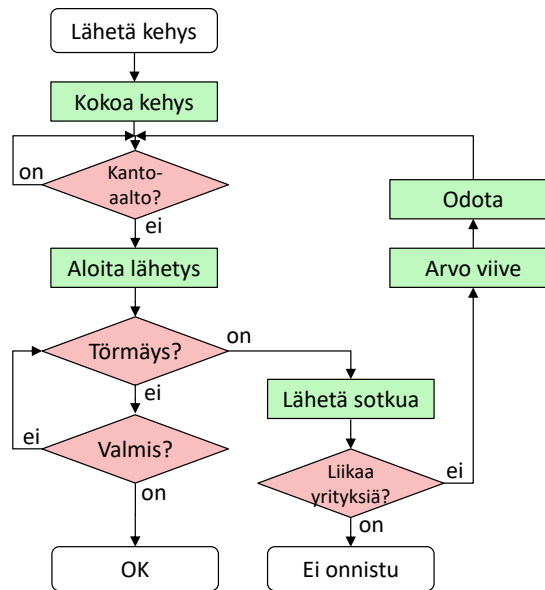
¹⁶¹ IEEE 802.3 [Ethernet Working Group](#), <http://www.ieee802.org/3/>

osoittaa CSMA/CD-periaatteen rajat ja ennen kaikkea sen mahdollisuudet yksinkertaisena ja luotettavana menettelynä. CSMA/CD-periaatetta kutsutaan kilpavarausperiaatteeksi, koska lähetyshaluiset asemat joutuvat kilpailemaan lähetysvuorosta. Se takaa kaikille asemille periaatteessa tasa-arvoisen kohtelun, verkon kuormituksesta riippuen joko hyvän tai huonon.

Ethernetin kilpavarausmenettelyn periaate on esitetty kuvassa 4.12. Halutessaan lähettää asema kuuntelee väylää. Jos väylä on hiljainen, asema lähettää kehyksen väylälle. Jos lähetyksen aikana toinen asema lähettää samaan aikaan, viestit törmäävät¹⁶². Tällöin aseman lähetin-vastaanotin-yksikkö (**transceiver**) havaitsee törmäyksen signaalin vääristymisestä. Jotta kaikki muutkin asemat havaitsisivat törmäyksen, lähetetään 32 bittiä satunnaista liikennettä eli sotkua (**jam**). Jotta asemat eivät törmäyksen jälkeen aloittaisi lähetystä samanaikaisesti ja aiheuttaisi uutta törmäystä, ne arpoivat satunnaisalgoritmilla itselleen lähetysviiveen seuraavaa yritystä varten. Algoritmi pyrkii ottamaan liikennetilanteen huomioon niin, että jokaisen uuden törmäyksen jälkeen keskimääräinen odotusaika ja törmäysmahdollisuus pienenevät. Jos uudelleenlähetykertojen määrä ylittää ennalta määrätyn luvun, uusista yrityksistä luovutaan ja päätöksenteko siirtyy ylemmälle tasolle.

CSMA/CD-algoritmia on kritisoitu siitä, että liikenteen määrän kasvaessa verkon välityskyky pienenee olennaisesti. Sitä, milloin asema saa lähetysvuoron, ei pystytä määrittämään etukäteen. Nykyisin kilpavarausmenetelmää tarvitaan erityisesti radioverkoissa siinä vaiheessa, kun päätelaite pyytää tukiasemalta mahdollisuutta lähettää dataa verkkoon tai muodostaa pysyvämpi yhteys radiotien yli.

¹⁶² Tosin ”törmäyksestä” ei sinänsä seuraa mitään erityistä, koska sähkömagneettiset aallot eivät häiritse toistensa etenemistä. Ongelma syntyy vasta kun pyritään vastaanottamaan määrätty signaali ja toinen signaali sotkee vastaanoton.



Kuva 4.12. Ethernetin varausmenettely. Huomaa että kantaalto viittaa tässä muiden asemien kantaaltoon, ei omaan kantaaltoon.

Liikenneteorian perusteista

Niin puhelin- kuin muitakin tietoverkkoja mitoitettaessa tasapainoillaan asiakkaiden tyytyväisyyden ja verkon rakentamisen ja ylläpitämisen aiheuttamien kustannusten välillä. Taloudellisista syistä johtuen ei aina ole järkevää mitoitaa verkkoja niin, että kaikki liikenne mahtuu kaikissa olosuhteissa verkkoon. Puhelinverkkoja on pyritty mitoitamaan järjestelmällisesti 1900-alusta lähtien. Mitoituksessa on käytetty sekä käytännön mittauksia että teoreettisia tarkasteluja, joita kutsutaan liikenneteoriaksi ([traffic theory](#)). Liikenneteoria tarkastelee sitä, miten järjestelmän, vaikka puhelinverkon, toiminta ja palvelun laatu riippuvat liikenteestä eli verkon kuormituksesta.

Kuvassa 4.13 on esitetty simuloimalla saatua liikennettä, jossa x-akseli on aika minuuteissa ja y-akselilla on liikenteen hetkellinen arvo ns. Erlang-asteikolla. Sekä liikenteen määrän yksikkö että liikenneteorian keskeisin kaava on nimetty siis tanskalaisen matemaatikon Agner K. Erlangin (1878 - 1929) mukaan.

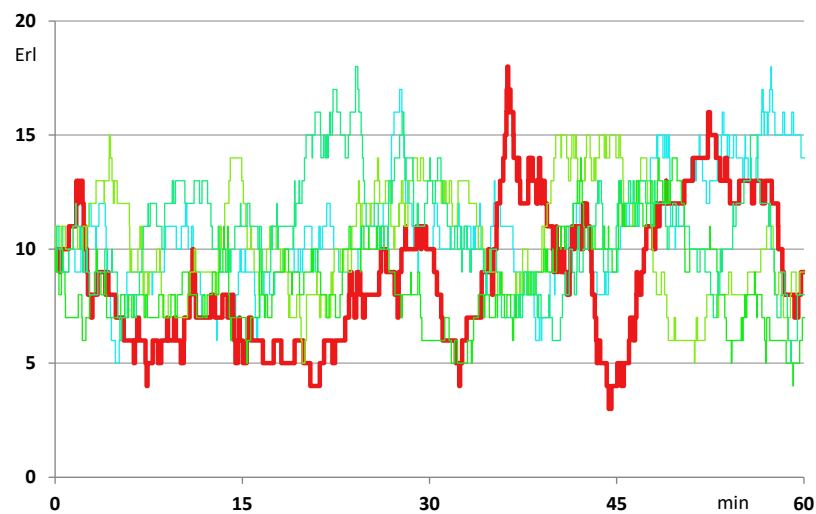


Erlang-arvo kuvaa keskimäärin varattuina olevien kanavien (tai muiden järjestelmän osien) määrää. Esimerkiksi, jos jollain väylällä kahden puhelinkeskuk- sen välillä on käynnissä 8 puhelua, on liikennettä sinä hetkenä 8 Erlangia.¹⁶³ Liikennettä voidaan simuloida satunnaisprosessien avulla. Kuvassa 4.13 hetkellä 0 on käynnissä 10 pu- helua, ja sen jälkeen puheluita alkaa ja päättyy ns. Poisson-prosessin mukaisesti (joka mää- ritellään tarkemmin hieman myöhemmin). Eri väreillä on esitetty viisi eri simulaatioita,

¹⁶³ Erlang on siis puhdas lukuarvo, ei samassa mielessä yksikkö kuin esimerkiksi sekunti tai metri.

joissa liikenne vaihtelee satunnaisesti siten, että hyvin pitkän simulaation keskiarvo olisi 10 Erl. Satunnaisesta generoinnista johtuen noin 32 minuutin kohdalla alkava jyrkkä nousu punaisessa käyrässä (4 → 18) ja sen jälkeinen pudotus (18 → 3) ovat puhtaasti satunnaisuuden tuotosta. Mitään muuta selitystä ei tarvita (eikä edes ole olemassa) kuin se, että noista viidestä simuloinnista on korostettu sitä, johon jyrkimmät vaihtelut sattuivat. Opetus: liikenteen arvolla 10 Erl suhteellisen suuret, yllättävältä näyttävät vaihtelut ovat täysin mahdollisia, jopa todennäköisiä ilman mitään ulkopuolisia selittäviä tekijöitä.

Jos oletetaan, että kyseessä olisi oikea puhelinliikenteen mittausta, kuvan 4.13 perusteella saattaisi arvata, että 20 puhekanavaa olisi riittävästi suurimman osan aikaa. Mutta onko näin todellisuudessa?



Kuva 4.13. Simuloidun liikenteen vaihtelua lyhyellä tarkastelujaksolla (voisi kuvata puhelinkeskusten välisellä väylällä käynnissä olevien puheluiden määrää kymmenen minuutin aikana). Simuloinnin parametrit: $A = 10$ Erl, $h = 5$ min, jokainen simulointi alkaa arvosta 10.

Liikenteen mallintaminen

Liikenneteorian tavoitteena on järjestelmän palvelun laadun arviointi ja järjestelmien mitoittaminen. Estojärjestelmässä (kuten puhelinverkossa) palvelun laatua kuvaa puhelun estymisen todennäköisyys eli **esto** (**blocking probability**). Estojärjestelmässä palvelupyyntö (esimerkiksi puhelu toiselle henkilölle) joko hyväksytään tai hylätään, mutta sitä ei yleensä laiteta odottamaan verkon resurssien vapautumista. Puhelinverkon tapauksessa tavoitteena on mitoittaa verkon resurssit, kun oletetaan että verkon liikenne ja sallittu puhelujen estymisen tunnetaan. Vastaavaa periaatetta voidaan soveltaa monenlaisten järjestelmien suorituskyvyn analysointiin ja järjestelmien mitoittamiseen.

Yleensä mallintamisen perustana on liikennettä (tai muuta kuormittavaa tekijää) koskevat mittaustulokset. Pelkkien mittaustulosten perusteella ei kuitenkaan voida laskea juuri

muuta kuin toteutuneen liikenteen keskiarvo ja keskihajonta. Perusteellisempi tapa lähestyä annettua mitoitustehtävää on muodostaa matemaattinen malli, joka kuvaa mahdollisimman hyvin mitattua liikennettä. Mallia voidaan sitten käyttää liikennettä koskevissa laskelmissa. Laskelmien lopputulokset pätevät tarkkaan ottaen vain niillä oletuksilla, joita mallia rakennettaessa on tehty—todellinen liikenne voi olla jotain muuta ja se voi muuttua yllättävillä tavoilla.

Lähdetään liikkeelle yhden asiakkaan käyttäytymisestä.¹⁶⁴ Jos puhelin on vapaa, alkaa uusi puhelu seuraavan sekunnin aikana jollain todennäköisyydellä tai vastaavasti jos puhelu on käynnissä, se päättyy seuraavan sekunnin aikana jollain todennäköisyydellä. Yksinkertaisimmillaan voidaan olettaa, että nämä todennäköisyydet ovat ajasta ja muista tekijöistä riippumattomia vakioita. Tällä oletuksella järjestelmän tilojen muutokset voidaan kuvata muutamalla parametrilla siten, että järjestelmän menneisyys ei vaikuta tulevaisuuteen, kun sen nykytila tunnetaan. Puhelun tapauksessa esimerkiksi oletetaan, että puhujat eivät “muista” kuinka kauan puhelu on jo kestänyt, vaan että puhelun päättymisen todennäköisyys pysyy koko ajan vakiona. Tästä vakiosta voidaan käyttää nimitystä *palveluintensiteetti* (μ). Palveluintensiteetti on perusteltua siksi, että sillä voidaan kuvata minkä tahansa palvelun nopeutta: esimerkiksi mitä nopeammin valintamyymälän kassa palvelee, sitä suurempi palveluintensiteetti on ja sitä todennäköisemmin palvelu päättyy seuraavan aikayksikön aikana.

Puhelun tapauksessa toinen tarvittava suure on todennäköisyys, että joku asiakas pyrkii aloittamaan uuden puhelun. Myös tämä oletetaan vakioksi, eli kaikilla mahdollisilla puhelimen käyttäjille saattaa tulla mieleen minä hetkenä hyvänsä ja aina samalla todennäköisyydellä, että soitanpa puhelun. Lisäksi oletetaan, että käyttäjiä on niin paljon, ettei jo käynnissä olevien puheluiden määrä vaikuta siihen miten paljon uusia puheluita yritetään aloittaa. Tästä vakiosta käytetään nimitystä *kutsuintensiteetti* (λ). Toisin ilmaistuna: λdt on todennäköisyys, että uusi asiakas pyrkii aloittamaan puhelun äärimmäisen lyhyessä aikavälissä ($t, t+dt$). Vastaavasti palveluintensiteetti ilmaisee todennäköisyyden, että käynnissä oleva puhelu päättyy vastaavassa aikavälissä todennäköisyydellä μdt . Voidaan myös sanoa, että μ on intensiteetti, jolla asiakkaita poistuu yhdestä palvelupaikasta, eli jos palvelupaikka täytetään heti kun edellinen asiakas on poistunut, poistuu asiakkaita keskimäärin μT kappaletta aikana T .

Asiakkaan käyttäytymistä voidaan kuvata aikana, jonka asiakas keskimäärin viettää eri paikoissa. Erityisesti asiakkaan palvelupaikassa viettämää aikaa, *palveluaikaa*, merkitään

¹⁶⁴ Tämä teksti on alun perin kirjoitettu 1980-luvun lopulla, jolloin puhelimet olivat puhelimia eivätkä älykkäitä monitoimilaitteita. Teksti ja esimerkit on siksi esitetty pääosin puheluina. Samoja mallintamis- ja laskentaperiaatteita voi soveltaa monessa muussakin yhteydessä.

lyhenteellä h . Suhteellisen yksinkertaisesti voidaan osoittaa, että oletus puhelun päättymisestä satunnaisella hetkellä riippumatta siitä kuinka kauan puhelun on jo ollut käynnissä tarkoittaa täsmälleen samaa kuin että puhelun pituudet ovat eksponentiaalisesti jakautuneita. Tässä oppimateriaalissa oletetaan aina, että palveluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita.¹⁶⁵

Eksponentiaalisen jakauman muistamattomuusominaisuus on niin keskeinen asia mallintamisen kannalta, että sitä kannattaa tutkia vielä tarkemmin. Eli oletetaan, että puhelun keskipituus on h ja että jakauma on eksponentiaalisesti jakautunut. Tällöin todennäköisyys, että puhelun pituus on välillä $(t, t+dt)$, on:

$$Pr(\text{pituus} = t) = \frac{e^{-t/h}}{h} dt,$$

kun dt on äärimmäisen lyhyt aikajakso. Kyseessä on siis jakauman tiheysfunktio. Tästä voidaan integroimalla laskea todennäköisyys, että puhelun pituus vähintään t ja tuloksena saadaan kertymäfunktio:

$$Pr(\text{pituus} \geq t) = e^{-t/h}.$$

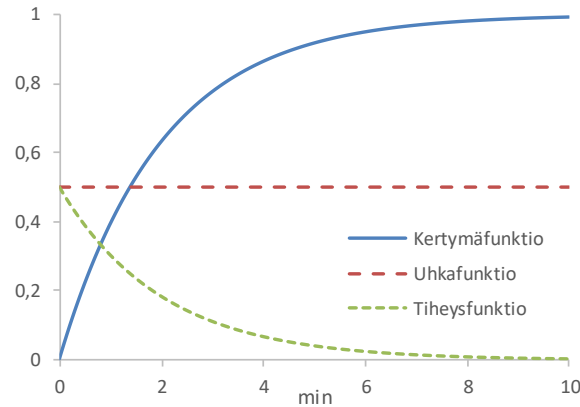
Nyt ehdollinen todennäköisyys, että puhelu, joka on jo kestänyt ajan t , päättyy välissä $(t, t+dt)$, on:

$$\frac{Pr(\text{pituus} = t)}{Pr(\text{pituus} \geq t)} = \frac{dt}{h}.$$

Eli eksponenttijakaumalla päättymisen todennäköisyys on vakio. Yleisemmin päättymisen (tai vaikkapa vikaantuminen) voi riippua jo kuluneesta ajasta. Tästä funktiosta on käytetty luotettavuustekniikan puolella nimitystä uhkafunktio¹⁶⁶ (**hazard function**). Tällä kursilla oletetaan (aina kun mahdollista), että ajat noudattavat eksponenttijakaumaa.

¹⁶⁵ Tämä ei ole kovin realistinen oletus. Toisaalta liikenneteorian puolella palveluaikojen jakauma ei ole kovin kriittinen tekijä, sen sijaan jonojärjestelmissä palveluaikojen jakauma vaikuttaa olennaisesti suorituskykyyn.

¹⁶⁶ Uhkafunktio on kuvaava nimi siinä tilanteessa, kun pyritään mallintamaan uhkaavaa tilannetta: uhkafunktio kertoo, miten jo kulunut aika vaikuttaa uhkaavan tapahtuman todennäköisyyteen seuraavan hetken aikana. Lyhyt mutta selkeä johdanto aiheeseen http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2008/nro2/RakMek_41_2_2008_2.pdf.



Kuva 4.14. Eksponenttijakauman tiheys-, uhka- ja kertymäfunktio, kun jakauman keskiarvo on 2 minuuttia.

Tarkastellaan vielä hyvin pitkää ajanjaksoa T . Määritelmän mukaan järjestelmään tulee tänä aikana λT asiakasta, joista kukin on järjestelmässä keskimäärin ajan h . Tällöin asiakkaat viettävät järjestelmässä yhteensä ajan AT , jossa A on keskimääräinen liikenne. Jos järjestelmään ei keräänny asiakkaita (näin voidaan olettaa kun palveluaika on aina äärellinen), saadaan asiakkaiden järjestelmässä viettämäksi kokonaisajaksi toisaalta λTh . Nämä kahden yksinkertaisen laskelman tulosten tulee olla samoja eli $\lambda Th = AT$. Tästä saadaan yksinkertainen kaava, eli ns. *Littlen lause*:¹⁶⁷

$$A = \lambda h \quad (4.1)$$

Tämä lause voidaan esittää sanallisesti muodossa: järjestelmässä (tai sen osassa) keskimäärin olevien asiakkaiden määrä on yhtä kuin sinne tulevien asiakkaiden määrä aikayksikössä kertaa keskimääräinen asiakkaan järjestelmässä viettämä aika. Littlen lausetta sovellettaessa on muistettava, että λ ja h tulee laskea samoista asiakkaista tai puhelusta. Eli esimerkiksi tilanteessa, jossa osa puheluyrityksistä estyy, on tämä otettava huomioon joko kutsuintensiteetissä (lasketaan vain välitetyt puhelut) tai keskimääräisessä palveluajassa (estyneiden puheluiden palveluaika on nolla).

Esimerkki 4.1. Huoneisto- ja muita malleja

Yksi tämän malleja koskevan tarkastelun tärkeimpiä pointteja on mallintamisen yleispätevyys. Samoja mallintamisen perusteita voidaan soveltaa mihin tahansa ilmiöön, jossa järjestelmällä on selkeästi erottuvia tiloja ja siirtymisiä niiden välillä siten, että siirtymiset olivat jollain tavoin satun-

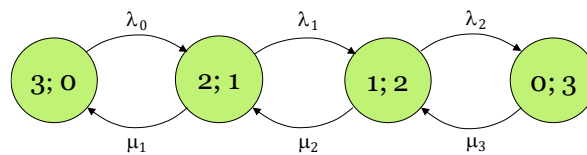
¹⁶⁷ Lauseen täsmällinen todistaminen on toki monimutkaisempi tehtävä, mutta sinänsä lause on intuitiivinen, jos ajattelee toisaalta sitä kuinka pitkään asiakkaat viettävät järjestelmässä aikaa (vasen puoli eli λTh) ja toisaalta sitä miten paljon järjestelmässä on keskimäärin asiakkaita tietyssä aikavälillä (oikea puoli).

naisten ilmiöiden aiheuttamia. Puhelinverkko oli aikanaan kätevä (ja jopa käytännön elämän kannalta tärkeä) esimerkki, koska puhelinverkossa oli aikanaan huomattavaa estoa, eli puheluyritys epäonnistui, koska jollain linkillä ei ollut enää tilaa uudelle puhelulle. Nykyisin tätä tapahtuu harvoin.

Otan seuraavaksi esimerkin aivan muusta ilmiöstä, mutta huomatkkaa, että malli on olennaisesti sama kuin puhelinverkon tapauksessa. Oletetaan siis, että huoneisto koostuu olohuoneesta ja keittiöstä ja että huoneistossa on kolme henkilöä, jotka ovat satunnaisesti joko olohuoneessa tai keittiössä. Henkilöt siirtyvät huoneesta toiseen toisistaan riippumatta satunnaisina hetkinä. Tavoitteena on piirtää tilakaavio ja tilojen väliset siirtymät ja sen jälkeen laskea eri tilojen todennäköisyydet.

Tilakaavio

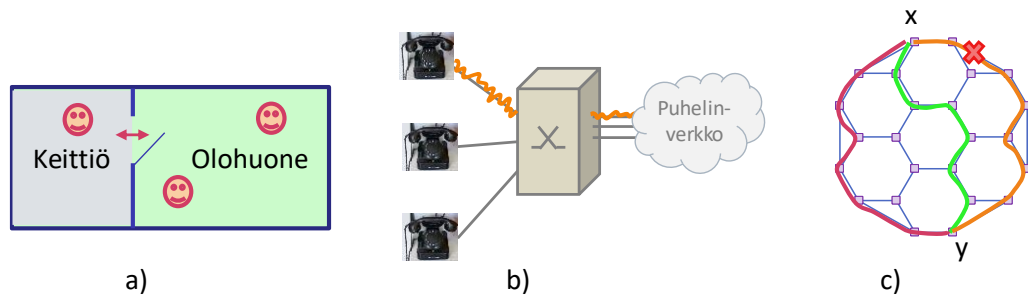
Ensimmäiseksi täytyy miettiä, mitä tässä tapauksessa tarkoitetaan tilalla. Periaatteessa voitaisiin ajatella niin, että jokainen huoneistossa olijalla voi olla joko tilassa 'keittiö' tai tilassa 'olohuone'. Tiloja olisi silloin $2 \times 2 \times 2 = 8$. Tämä on sinänsä pätevä malli, mutta yksinkertaisemmin asian voi esittää, kun tilannetta tarkastellaan huoneiston kannalta.¹⁶⁸ Silloin tiloja on neljä sen mukaan, onko keittiössä kolme, kaksi, yksi vai ei yhtään henkilöä. Koska henkilöiden oletettiin kulkevan olohuoneen ja keittiön välillä satunnaisesti toisistaan riippumatta, siirtymiä tapahtuu vain viereisten tilojen välillä, kuten kuvassa 4.15 on esitetty.



Kuva 4.15. Järjestelmä jossa on neljä tilaa ja jossa siirtymiset tapahtuvat vain vierekkäisten tilojen välillä.

Kun henkilö siirtyy olohuoneesta keittiöön, siirrytään tilakaaviossa yksi pykälä oikealle ja vastavasti toiseen suuntaan, kun henkilö palaa keittiöstä olohuoneeseen (kuva 4.16a). Tila kuvaa tässä siis sitä, miten monta henkilöä on keittiössä tai olohuoneessa. Tässä voisi olla yhtä hyvin kyseessä puhelinvaihte, jossa on kolme kiinteää liittymää ja kolme yhteyttä puhelinverkkoon – käyttäkseni vähän vanhahtavaa esimerkkiä. Tämä on esitetty kuvassa 4.16b. Kyseessä voisi olla myös kolme toisistaan riippumatonta reittiä verkon läpi sekä kyseisten reittien vikaantuminen ja korjaaminen. Tosin reittien tapauksessa täytyy olettaa, että jokaisen kolmen reitin luotettavuus on yhtä suuri. Kuvassa 4.16c reitit on valittu siten, että ne ovat samanpituisia linkeissä laskettuna. Tässä tavoitteena on siis havainnollistaa myös sitä, että erilaiset järjestelmät voivat johtaa samanlaiseen malliin. Tässä tärkeimmät yhtäläisyydet ovat: tiloja on kaikissa neljä ja että siirtymiset tapahtuvat vain viereisten tilojen välillä.

¹⁶⁸ Yleisohjeena voidaan sanoa, että jos esimerkiksi henkilöitä ei tarvitse mallintaa yksilöinä, niin on yksinkertaisempaa mallintaa lukumääriä kuin yksilöiden tiloja. Jos eri henkilöt viihtyvät eri pituisia aikoja vaikkapa keittiössä, on syytä tarkastella jokaista yksilöä erikseen.



Kuva 4.16. Kolme järjestelmää: (a) kolme henkilöä huoneistossa, (b) kolme linjaa puhelinverkosta puhelinvaihteeseen ja c) kolme vaihtoehtoista reittiä verkon läpi.

Asunnon tapauksessa olohuoneessa oleskeleva henkilö päättää siirtyä keittiöön sekunnin aikana todennäköisyydellä 0,02 %. Tarkkaan ottaen oletetaan, että henkilö siirtyy tilasta toiseen intensiteetillä 0,0002-dt, kun aikayksikkö on sekunti tai 0,0012-dt kun aikayksikkö on minuutti.¹⁶⁹ Puhelinvaihteen tapauksessa oletetaan, että kukin kolmesta työntekijästä aloittaa puhelun yhden sekunnin aikana todennäköisyydellä 0,02 %. Reittien tapauksessa yksi toimiva reitti vikaantuu yhden tunnin aikana 0,02 % todennäköisyydellä. Vastaavasti keittiössä oleskeleva henkilö siirtyy olohuoneeseen sekunnin aikana todennäköisyydellä 0,2 %, käynnissä oleva puhelu loppuu todennäköisyydellä 0,5 % sekunnin aikana ja viallinen reitti onnistutaan korjaamaan todennäköisyydellä 0,2 % minuutin aikana.¹⁷⁰ Tässä siis tila (2; 1) tarkoittaa, että kaksi henkilöä on olohuoneessa ja yksi keittiössä, kaksi linjaa on vapaana ja yksi varattuna, ja kaksi reittiä on toiminnassa ja yksi on viallinen (kuten kuvassa 4.16 on esitetty). Analyysin alkuarvot on esitetty taulukossa 4.4. Siirtymäintensiteetit riippuvat tässä tapauksessa siitä, kuinka monta yksikköä (ihmistä, puhelua, vikaa) on siinä tilassa, josta siirrytään pois. Huomatkaa myös aikayksikkömuunnokset, niiden kanssa kannattaa olla huolellinen.

Taulukko 4.4. Siirtymäintensiteetit kuvan 4.16 järjestelmille.

Järjestelmä	Tilat (alaindeksi)	Aikayksikkö	λ_0	λ_1	λ_2	μ_1	μ_2	μ_3
Huoneisto	Henkilöiden määrä keittiössä	minuutti	0,036	0,024	0,012	0,12	0,24	0,36
Vaihte	Varattujen johtojen määrä	minuutti	0,36	0,24	0,12	0,30	0,60	0,90
Verkko	Viallisten reittien määrä	tunti	0,0006	0,0004	0,0002	0,12	0,24	0,36

Siirtymäintensiteettien avulla voidaan laskea tilojen todennäköisyydet, kun tiedetään että siirtymisiä tapahtuu molempiin suuntiin yhtä paljon. Siten:

$$\lambda_i P(3-i, i) = \mu_{i+1} P(2-i, i+1), \quad i = 0, 1, 2$$

¹⁶⁹ Eksponenttijakaumasta johtuen on mahdollista, että yhdenkin sekunnin aikana tapahtuu useampia siirtymiä tilasta toiseen. Aikaväli dt on niin lyhyt, että sen aikana voi tapahtua korkeintaan yksi siirtymä.

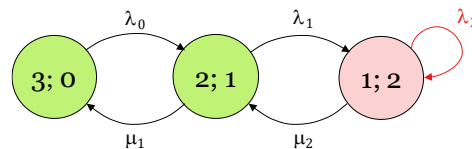
¹⁷⁰ Kun kuvassa linkkejä on jokaisella yhteydellä seitsemän, niin näistä arvoista voidaan käänteisesti laskea, että yhden linkin saatavuus on n. 99,976 %. Yhden reitin saatavuus on tällöin 99,83 %.

Lisäksi tiedetään, että tilojen todennäköisyyksien summa on yksi. Näistä yhtälöistä voidaan ratkaista tilojen todennäköisyydet. Tulokset on esitetty taulukossa 4.5. Annetuilla oletuksilla todennäköisyys, että kaikki kolme henkilöä ovat olohuoneessa, on noin 75 prosenttia. Vastaavasti kaikki kolme johtoa ovat varattuina 2,3 prosentin todennäköisyydellä ja täsmälleen yksi reitti on epäkunnossa noin 0,5 prosentin todennäköisyydellä.

Taulukko 4.5. Tilojen todennäköisyydet taulukon 4.4 muuttujien arvoilla.

Järjestelmä	Tilat	$P(3; 0)$	$P(2; 1)$	$P(1; 2)$	$P(0; 3)$
Huoneisto	Henkilöiden määrä (olohuoneessa, keittiössä)	0,7513	0,2254	0,0225	0,0008
Vaihde	(Vapaiden, varattujen) johtojen määrä	0,3644	0,4373	0,1749	0,0233
Verkko	(Ehjien, viallisten) reittien määrä	0,9950	0,0050	8,3E-06	4,6E-09

Vaikka analyysi on sinänsä pätevä, sitä ei oikein voi kutsua suorituskykyanalyysiksi (paitsi vaihtoehtoisten reittien tapauksessa), koska mitään ongelmatilanteita ei esiinny. Mietitään seuraavaksi, mitä tapahtuu, jos keittiöön ei mahdukaan kuin kaksi henkilöä tai vaihde on liitetty puhelinverkkoon vain kahdella yhteydellä. Tilakaavio on tällöin kuvan 4.17 mukainen ja siirtymäintensiteetit ovat samat kuin taulukossa 4.4, sillä erotuksella, että λ_2 ei nyt johda tilamuutokseen. Tästä seuraa olennainen havainto eli todennäköisyyksien suhteet pysyvät samoina ja se mitä taulukon 4.5 arvoille tarvitsee tehdä, on skaalata tilojen todennäköisyydet siten, että niiden summa on aina yksi.



Kuva 4.17. Kolmen tilan järjestelmä, jossa viimeisessä tilassa esiintyy estoa.

Tämän laskelman tulos on esitetty taulukossa 4.6 huoneistolle ja puhelinvaihteelle. Huomaa, että taulukon 4.6 viimeinen sarake saadaan suoraan kertomalla kyseisen taulukon sarakkeen $P(1; 2)$ arvo taulukon 4.4 λ_2 arvolla ja kertomalla tulos vielä 60:llä, koska aikayksikkö vaihdetaan samalla minuuteista tunneiksi. Johtopäätöksenä voitaisiin sanoa, että annetuilla oletuksilla kahden hengen keittiö on riittävä, mutta kaksi johtoa ei ole riittävä puhelinvaihteen tapauksessa.

Taulukko 4.6. Kuvan 4.17 tilojen todennäköisyydet taulukon 4.4 muuttujien arvoilla.

Järjestelmä	Tilat	$P(3; 0)$	$P(2; 1)$	$P(1; 2)$	$\lambda_2 P(1; 2) / \text{tunti}$
Huoneisto	Henkilöiden määrä (olohuoneessa, keittiössä)	0,7519	0,2256	0,0226	0,016
Vaihde	(Vapaiden, varattujen) johtojen määrä	0,3731	0,4478	0,1791	1,29

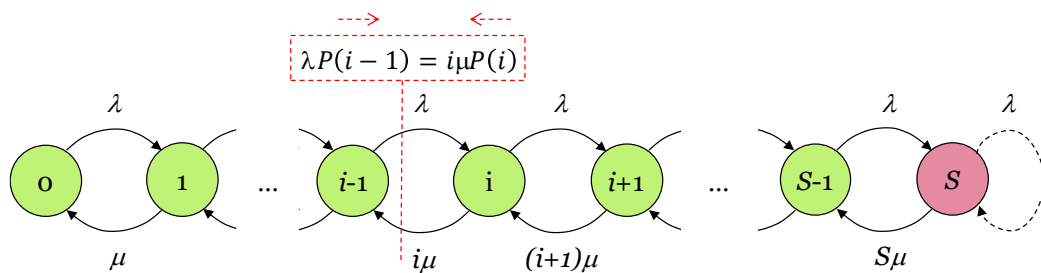
Erlangin kaava

Tässä vaiheessa, siis jos edeltävät mallintamisen perusasiat ovat ymmärrettyinä edes kohtuullisesti, voimme palata tämän liikenneteoria-alaluvun alussa mainittuun ongelmaan eli puhelinverkon mitoittamiseen. Seuraava tarkastelu on periaatteessa suora sovellus edellä esitystä mallinnuksesta.

Nyt oletetaan, että kutsuintensiteetti (λ) on vakio, eikä siis riipu kulloisestakin puheluiden määrästä eikä muutenkaan millään tavoin aikaisemmista tapahtumista. Tämä on käypä oletus silloin, kun tilaajia eli palvelun käyttäjiä on paljon ja kukin tilaaja käyttää palvelua vain pienen osan ajasta. Uusia asiakkaita saapuu eli uusia puheluita aloitetaan tällöin eksponentiaalisesti jakautunein väliajoin.

Lisäksi oletetaan, että palveluajat eli puheluiden pituudet ovat eksponentiaalisesti jakautuneita, siten että keskimääräinen palveluaika on h . Tällöin yhden palvelupaikan eli johdon palveluintensiteetti ($\mu = 1/h$) on vakio, mutta koko järjestelmän palveluintensiteetti on suoraan riippuvainen käynnissä olevien puheluiden määrästä (i) eli $\mu_i = i\mu$. Kun sekä tuloaikojen välit että palveluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita ja riippumattomia kaikista menneistä tapahtumista, voidaan sanoa että tarjottu liikenne on Poisson-prosessin mukaista. Tarjotun liikenteen keskiarvo (A) saadaan soveltamalla Littlen lausetta eli $A = \lambda h = \lambda/\mu$.

Järjestelmä voidaan kuvata tässä tapauksessa yksiselitteisesti käynnissä olevien puheluiden määränä. Kun verkon kapasiteetti on S yhtäaikaista puhelua, saadaan kuvan 4.18 mukainen tasapainotilan kaavio.



Kuva 4.18. Tasapainotilan kaavio Poisson-liikenteellä.

Tavoitteena on ensin laskea eri tilojen todennäköisyydet. Koska liikenteen oletettiin olevan ajasta riippumaton, tulee liikenteen jakautumien olla yhtenevät kaikille tiloille (i) ja kaikille ajan hetkille (t) eli tämän tarkastelun puitteissa voidaan aika jättää pois. Pidetään kuitenkin muistissa se tosiasia, että kaikki tapahtuu ajassa, myös siirtymiset tilasta toiseen. Siirtymisiä vastakkaisiin suuntiin ($i-1 \rightarrow i$ ja $i \rightarrow i-1$) täytyy tapahtua keskimäärin yhtä paljon. Kuvassa 4.18 katkoviivalla esitetyssä välissä saadaan:

$$\lambda P(i - 1) = i\mu P(i) \tag{4.2}$$

$P(i)$ on siis todennäköisyys, että järjestelmä on tilassa i ja kun se kerrotaan siirtymisen intensiteetillä (λ) saadaan kyseisen tyyppisten siirtymisten keskimääräinen määrä samassa aikayksikössä kuin missä λ on annettu. Eli esimerkiksi jos $P(2) = 0,15$ ja $\lambda = 20$ uutta puhelua tunnissa, niin siirtymiä tilasta 2 tilaan 3 tapahtuu keskimäärin $0,15 \cdot 20 = 3$ kertaa tunnissa. Kun vielä muistetaan, että tarjottu liikenne $A = \lambda/\mu$, niin saamme yhtälöt:

$$P(i) = A \cdot P(i - 1)/i; \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (4.3)$$

Kaavan 4.3 yhtälöiden avulla voidaan ratkaista eri tilojen todennäköisyydet, kun lisäksi tiedetään, että todennäköisyyksien summan tulee olla yksi (koska järjestelmä on aina yhdessä ja vain yhdessä tilassa).

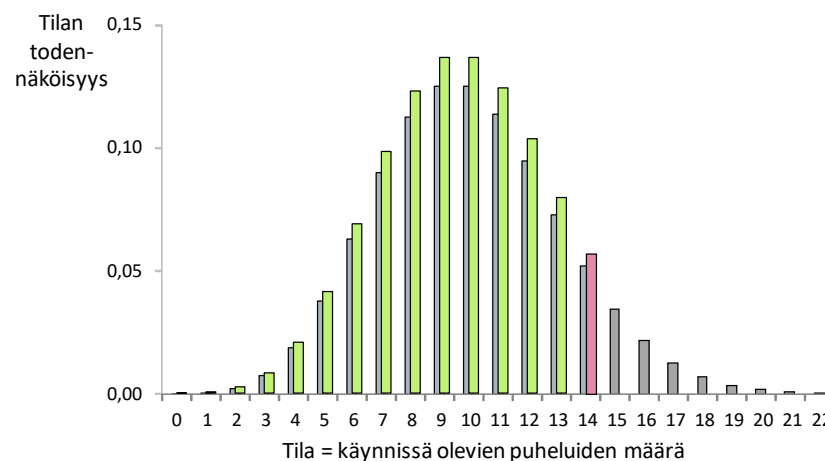
Kun palvelupaikkojen määrä on ääretön ($S = \infty$), tarjotun liikenteen jakaumaksi saadaan:

$$P(i) = \frac{e^{-A} A^i}{i!} \quad (4.4)$$

Kyseessä on **Poisson-jakauma** ja vastaavasti edellä esitetyt ehdot täyttävää liikennettä kutsutaan Poisson-liikenteeksi. Poisson-jakaumalla on myös se erityisominaisuus, että sen keskiarvo ja varianssi ovat yhtä suuria. Ja nyt tärkeä havainto:

- Poisson-liikenteellä tilojen todennäköisyyksien *suhteet* eivät muutu, jos siirtyminen joihinkin tiloihin estetään.

Eli jos oletetaan, että tarjottu liikenne $A = 10$ Erl ja kapasiteetti $S = 14$, niin jakaumasta poistetaan tilat 15:stä ylöspäin ja vastaavasti alempien tilojen todennäköisyydet skaalataan siten, että todennäköisyyksien summa on yksi. Tämä on esitetty kuvassa 4.19. Huomatkaa erityisesti, että estyminen muuttaa kaikkien (myös pienimpien) tilojen todennäköisyyksiä.



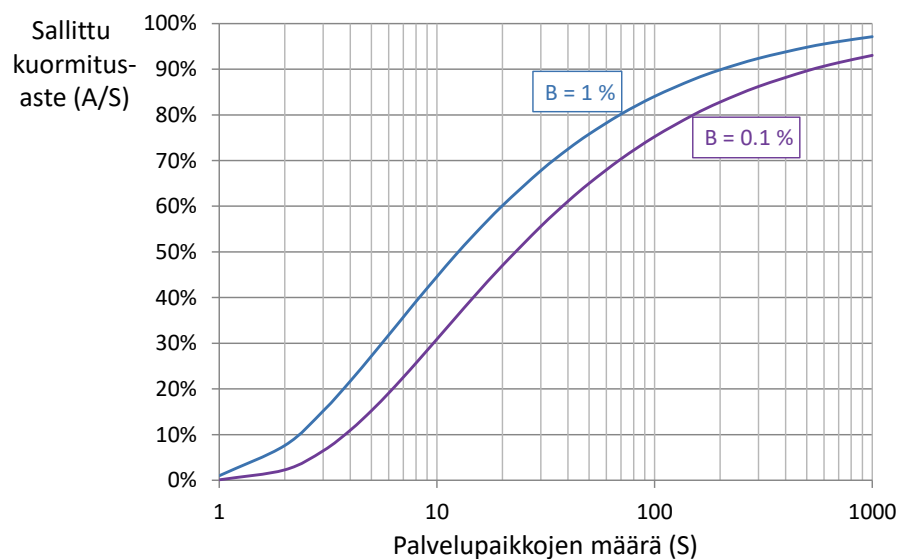
Kuva 4.19. Poisson-jakauma harmaalla, ja 14 palvelupaikan katkaistu Poisson-jakauma vihreällä paitsi viimeinen tila (14) punaisella.

Näin saadaan todennäköisyydeksi, että kaikki palvelupaikat ovat varattuja eli tilan S todennäköisyydeksi, jota kutsutaan estoksi (B , **blocking**):

$$B = \frac{A^S/S!}{\sum_{i=0}^S A^i/i!} \quad (4.5)$$

Tästä kaavasta käytetään nimitystä **Erlangin estokaava**. Erlangin kaavan avulla voidaan laskea uuden puheluyrityksen tai uuden palvelupyynnön estymisen todennäköisyys, kun tunnetaan järjestelmän kapasiteetti ja tarjottu liikenne. Aikanaan puhelinverkoissa pyrittiin siihen, että esto kansallisissa verkoissa olisi korkeintaan muutama prosentti, kun taas kansainvälisillä yhteyksillä sallittiin suurempikin esto. Käytännössä kiinteän puhelinverkon esto on prosentin murto-osia.

Tärkeää on myös havaita, että suuremmilla palvelupaikkojen määrillä sallittu kuormitusaste ($=A/S$) nousee lähelle yhtä (tai jopa yli yhden), kun esto pidetään vakiona. Kuvassa 4.20 on esitetty sallittu kuormitus yhden prosentin estolle. Teorian mukaan sallittu kuormitus on 97 %, kun palvelupaikkoja on 1000. Ongelmaksi muodostuu tällöin se, ettei tarjottua liikennettä yleensä voidaan tuntea riittävän tarkasti eikä se noudata tarkasti Poissonliikenteen mukaisia oletuksia. Erlangin kaavan järkevä käyttöalue rajoittuukin muutamasta palvelupaikasta ehkä noin sataan palvelupaikkaan. Ohjeena voidaan antaa, että suurella liikenteellä (> 100 Erl) ei ole järkevää pyrkiä yli 80 % kuormitukseen riippumatta siitä mitä Erlangin kaava antaa olettaa, johtuen lukuisista liikenteen käyttäytymiseen ja ennustamiseen liittyvistä epävarmuustekijöistä. Toisaalta hyvin pienellä liikenteen arvoilla voi olla perusteltua sallia jonkin verran suurempi esto kuin 1 %, jos halutaan käyttää järjestelmän resursseja tehokkaasti hyväksi.



Kuva 4.20. Sallittu kuormitus (A/S) palvelupaikkojen määrän (S) funktiona Erlangin kaavan mukaisesti, kun esto 1 % (ylempi käyrä) tai 0,1 % (alempi käyrä).

Yksinkertaisena peukalosääntönä voidaan antaa (kun $B < 1\%$) vaatimus palvelupaikkojen määrälle siten että $S \geq A + 3\sqrt{A}$. Tämä sääntö perustuu siihen, että Poisson-jakaumalla varianssi on sama kuin keskiarvo.

Muutama sivu sitten kysyttiin, mahtaisiko 20 kanavaa riittää 10 Erlangin liikenteelle. Esitetyn nyrkkisäännön mukaan tarvittaisiin $S = 19,5$ kanavaa. Erlangin kaavalla laskettuna 20 kanavalla esto on 0,19 %.

Esimerkki 4.2. Erlangin kaavan soveltaminen

Oletetaan, että puhelinpalvelun tarjoajalla on kaksi erillistä yhteyttä yleiseen puhelinverkkoon siten, että toisen ollessa täynnä, estyneitä puheluita ei voida siirtää toiselle yhteydelle, vaikka siellä olisikin tilaa. Oletetaan, että ensimmäiselle yhteydelle tarjottu liikenne $A_1 = 20$ Erl ja toiselle yhteydelle $A_2 = 30$ Erl. Arvio miten paljon palvelun tarjoaja säästää, jos puhelut voivat käyttää vapaasti molempia yhteyksiä.

Ratkaisu

Kokeillaan ensin peukalosääntöä eli:

- Ensimmäiselle yhteydelle tarvitaan $20 + 3\sqrt{20} = 33,42$ eli 34 puhekanavaa.
- Toiselle yhteydelle tarvitaan $30 + 3\sqrt{30} = 46,43$ eli 47 puhekanavaa.
- Yhteensä tarvitaan siis $34 + 47 = 81$ puhekanavaa.

Jos molemmat ovat yhdessä, tarvitaan $50 + 3\sqrt{50} = 71,21$ eli käytännössä 72 puhekanavaa. Säästöä tulee siis 9 kanavaa, eli 11,1 prosenttia kanavien määrästä.

Lasketaan vielä varmuuden vuoksi sama Erlangin kaavalla. Ensin pitää päättää mikä on sallittu esto. Olkoon rajana 0,1 prosenttia, jotta asiakkaat pysyvät varmasti tyytyväisinä. Erlangin kaava kannattaa ohjelmoida tai käyttää jotain sopivaa ohjelmointikieltä tai Exceliä, jotta välttyy käsityöltä. Vastauksiksi tulee tässä tapauksessa:

- $A = 20, S = 35, B = 0,069\%$
- $A = 30, S = 47, B = 0,096\%$
- $A = 50, S = 71, B = 0,096\%$

Säästöä syntyy siten tämän Erlang-laskelman mukaan $(82 - 71)/82 = 13,4$ prosenttia.