

Kalevi Kilkki  
Aalto-yliopisto  
Joulukuussa 2018

# Informaatioteknologian perusteet

## Alkusanat

Luet nyt ensimmäistä lausetta tekstistä, jonka ensisijaisena tavoitteena on toimia johdantona informaatioteknologiaksi kutsuttuun tekniikan osa-alueeseen. Tavoitteena on opettaa keskeisiä asioita tietoteknisten järjestelmien ominaisuuksista, kuten miten on mahdollista siirtää huimia määriä dataa silmänräpäyksessä, miten tietty data voidaan ohjata maailmanlaajuisten verkkojen läpi haluttuun kohteeseen ja miten mobiilit päätelaitteet voivat toisiaan häiritsemättä jakaa yhteisen resurssin eli taajuusalueen, ja miten informaatioteknologia tuottaa yhä uusia liiketoiminnan muotoja, esimerkkeinä Google ja Facebook. Lähestymistapa on filosofisempi kuin tyypillisessä tekniikan alan tekstissä; tarkoituksena on myös herättää lukijan kiinnostus asioiden perusteiden ymmärtämiseen.<sup>1</sup>

Materiaali jakautuu seitsemään osioon:

1. Informaatio, historia ja merkitys
2. Liiketoiminta
3. Tiedonsiirron perusteet
4. Verkot, rakenne ja teknologia
5. Mobiili tietoliikenne
6. Tietojenkäsittely
7. Internet

Osiot ovat itsenäisiä kokonaisuuksia, joten ne voi lukea haluamassaan järjestyksessä. Jokainen osio sisältää hieman (ja jotkut vähän enemmänkin) matemaattista mallinnusta. Tekstistä pääosin ja kaikesta kuvituksesta (paitsi valokuvat, joista on pyritty mainitsemaan lähde) vastaa kirjoittaja. Materiaali on siis tarkoitettu Informaatioteknologian perusteiden kurssimateriaaliksi eikä sitä saa käyttää muuhun kuin opiskeluun ilman asianmukaista lupaa. Alaviitteet ovat tiedoksi asiasta kiinnostuneille, eivätkä siten kuulu kurssin varsinaiseen sisältöön eikä niitä kysytä tentissä. Lisäksi esitän kiitokset materiaalin eri versioita lukeneille ja kommentoineille, erityisesti Markus Peuhkurille ja Juho Kaivosojalle.

---

<sup>1</sup> Filosofinen ajattelu aiheuttaa myös ongelmia, [Philosophy Tech Support](http://existentialcomics.com/comic/51), <http://existentialcomics.com/comic/51>

# 1. Informaatio

Yliopiston keskeisinä tehtävinä ovat uuden tiedon kehittäminen ja tiedon välittäminen uusille sukupolville. Tieto ja siihen läheisesti liittyvät käsitteet kuten informaatio ja data ovat siten keskeisiä asioita millä tahansa yliopiston laitoksella tai kurssilla. Erityisesti keskeistä tietoa on kurssilla, jonka nimi on informaatioteknologian perusteet. Niinpä tällä kurssilla aloitetaan pohtimalla sitä mitä informaatio oikeastaan merkitsee. Tähän lähestymistapaan on hyvät historialliset perusteet, sillä informaatioteorian ”isä” Claude Shannon lähti alaa luodessaan alan peruskäsitteistä ja niiden syvällisestä ymmärtämisestä.

Tämän kurssin perusajatus on tarjota välineitä (tai vähintään vinkkejä) sekä filosofisiin pohdintoihin että alan historian päälinjojen ymmärtämiseen. Lisäksi tässä luvussa luodaan pohjaa myöhemmille teknisemmille osioille, muun muassa esittämällä kokonaiskuvat viestintäjärjestelmistä ja niiden perusosista. Tässä yhteydessä on myös hyvä korostaa sitä, että uuden asian opiskelun kannalta on tärkeää, että opiskelija voi sijoittaa asiat johonkin ymmärrettävään kokonaisuuteen. Irrallisten tosiasioiden ulkoa opettelu on vaikeaa ja enimmäkseen turhaa. Ja ulkoa on syytä, kaikesta huolimatta, opetella keskeisimmät lyhenneet. Lisäksi ymmärryksen kannalta on tärkeää ymmärtää mittasuhteita—minkälaiset lukuarvot ovat realistisia ja minkälaiset ei.

Tämän osion keskeisimmät asiat ovat siten:<sup>2</sup>

1. Informaatio käsitteenä
2. Viestintäjärjestelmän perusosat
3. Suuruusluokat femtosta petaan
4. Informaation lyhyt historia
5. Ihmisten tarve kommunikoida

## Informaatio käsitteenä

Informaatio ja teknologia saattavat kuulostaa suomen kielessä käytettyinä hieman vierailta termeiltä. Muitakin termejä on käytetty alan kirjojen ja kurssien nimissä. Käypiä nimityksiä ovat ainakin tietotekniikka, kommunikaatioteknologia, tietoliikennetekniikka,

---

<sup>2</sup> Kaikki esseekysymykset tentissä (jotka siis liittyvät tässä materiaalissa käsiteltyihin aiheisiin) koskevat suoraan näitä lukujen alussa esitettyjä keskeisiä aiheita. Tentissä on lisäksi yhdestä kahteen laskutehtävää ja mahdollisesti yksi tehtävä liittyen kommunikaatioakustiikkaan tai puheteknologiaan. Mahdolliset pohdintaesseen aiheet on merkitty vihreällä värillä.

tiedonsiirtotekniikka, teletekniikka ja viestintäteknologia.<sup>3</sup> Käytännön kannalta informaatioteknologia voidaan määritellä siten että se kattaa tietokoneet ja tietoliikennelaitteet sekä niiden avulla suoritettavan informaation muokkaamisen, siirron, tallentamisen ja hakemisen. Esimerkkeinä voidaan antaa Internet, älypuhelimet, kaupan tietojärjestelmät, sulautetut järjestelmät, langattomat lähiverkot, hakukoneet, sovellukset ja pilvipalvelut.

Tieto ja viesti ovat ymmärrettäviä suomen kielen sanoja, kun taas informaatio ja kommunikaatio ovat hieman vieraampia ja kuulostavat muodollisemmilta, ehkä jopa arvokkaammilta.<sup>4</sup> Myös tekniikalla ja teknologialla on vivahde-ero: *logia*-päätte viittaa oppiin (*logos*) kun taas *tekhne* merkitsi antiikin Kreikassa vapaiden miesten työtä ja taitoja. Oppi katsotaan joskus arvokkaammaksi kuin käytäntö, varsinkin akateemisessa ympäristössä (joidenkin muiden mielestä asia päinvastoin). Ehkäpä juuri näistä vivahde-eroista johtuen termejä tietoteknologia ja informaatiotekniikka käytetään sangen vähän. Tälle kurssille aikanaan valittu nimi, informaatioteknologia, kuulostanee vakuuttavammalta kuin aikaisemmin käytetty teletekniikka. Itse tekstin sisällön kannalta termeillä tekniikka ja teknologia ei silti ole olennaista eroa. Sen sijaan telellä ja tiedolla on selkeä ero: *tele* tulee kreikan sanasta *tēle* ja viittaa etäisyyteen, kun taas *tieto* lienee johdos sanasta *tie* verbin *tietää* kautta.

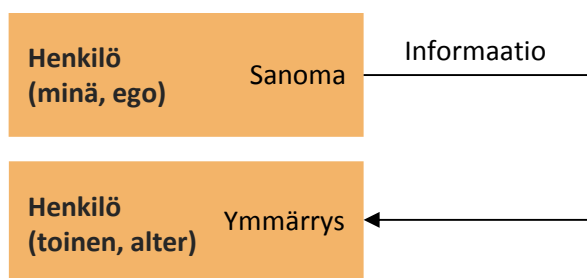
Englannin kielessä olisi tässä yhteydessä käyttökelpoinen sana, **engineering**, jolle ei ole oikein luontevaa käännöstä suomeksi. Insinööriys tai insinööritaito ovat mahdollisia, mutta ne kuulostavat kömpelöiltä kuvaamaan sitä tosiasiaa, että tekniikkaan ja teknologiaan liittyy paljon inhimillistä toimintaa. On joka tapauksessa hyvä pitää mielessä, että teknologiaa kehittävät ja sitä käyttävät ovat, ainakin toistaiseksi, ihmisiä.

Inhimillisestä näkökulmasta katsottuna jokaisella ilmaistulla lauseella on jokin sanoma, jonka henkilö (tässä tapauksessa tekstin kirjoittaja) pyrkii välittämään vastaanottajalle (sinulle, hyvä lukija). Lukijan ymmärrys ei kuitenkaan koskaan ole täsmälleen sama kuin se alkuperäinen merkitys, jota lauseella tai sanomalla on tahdottu ilmaista. Tämä pätee riippumatta siitä, minkälaisia teknisiä välineitä on käytetty tiedon välittämiseen ja miten virheetöntä informaation tekninen välitys on ollut. Vaikka informaatio kuvassa 1.1 näyttäisikin pysyvän täysin muuttumattomana henkilöiden välillä, edustavat kaksi henkilöä aina merkittävästi erilaisia järjestelmiä—mielemme ovat erilaisia, näemme maailman eri tavoin ja pyrimme eri tavoitteisiin. Kuvassa 1.1 hahmoteltu kommunikaatio kahden ihmisen välillä on siis aina epätäydellistä.

---

<sup>3</sup> 1990-luvulla TKK:lla oli myös kurssi nimeltä Teletietotekniikka.

<sup>4</sup> Niille, jotka ovat kiinnostuneita suomalaisten sanojen alkuperästä, suosittelen kirjaa K. Häkkinen, Nykysuomen etymologinen sanakirja, WSOY, 2004. Sieltä selviää mm. että *viesti* on lainaa venäjän sanasta *vest'*. *Sanoma* on käytännössä synonyymi sanalle *viesti*, mutta sanan *sana*, josta siis sanoma on johdettu, alkuperää ei tunneta.



**Kuva 1.1.** Yksinkertainen inhimillinen viestintä.

Lisäksi viestin välityksessä voi tapahtua virheitä: *tekstistä* olisi voinut jäädä *k* pois, jolloin tuloksena olisi ollut *testistä*—jonka jälkeen lauseen tarkoitus olisi entistä hämäämpi. *Testin* tapauksessa lukijan pitäisi pohtia, voisiko tosiaankin olla kysymys testistä, ja jos on niin, mitä kirjoittaja oikein testillä haluaa tarkoittaa, vai onko kyseessä sittenkin vain huolimattomuusvirhe? Voisihan olla, että ”virhe” oli tahallinen ja sillä haluttiin ilmaista tai opettaa jotain erityistä? Erilaiset tulkinnat ovat mahdollisia.<sup>5</sup>

Lukija voi myös miettiä, onko tällaista materiaalia tarpeen aloittaa pohtimalla joidenkin termien olemusta. Toinen vaihtoehto aloitukselle voisi olla tällainen:

Henri istui luennolla ja mielti kuumeisesti mitä kalvolla esiintynyt lyhenne ARP tarkoitti, sillä saattoihan olla, että sitä tietoa tarvitsee tentissä tai että se muuten sisältää tärkeä informaatiota. Kun luennoitsija oli jo ehtinyt seuraavaan asiaan, Henri päätti ottaa puhelimen esille ja googlettaa. Nopean haun perusteella Henri havaitsi että ARP voi tarkoittaa ainakin kahta asiaa: ”protokollaa, jolla Ethernet-verkoissa selvitetään IP-protokollaa käytettäessä IP-osoitetta vastaava Ethernet- eli MAC-osoite” tai sitten ”autoradiopuhelinta, joka oli Suomen ensimmäinen kaupallisesti toiminut julkinen matkapuhelinverkko.”

Mistähän tällä kertaa olikaan kyse? Ilmeisesti tietoverkkojen historiasta, johon kyllä molemmat merkitykset voisivat liittyä—ehkä luennoijan antama ARP-signaali oli turhan tiiviisti koodattu, ajatteli Henri insinöörimäisesti. Mutta hänhän istui luennolla juuri siksi, että oli kiinnostunut siitä miten ihmiset kommunikoivat erilaisilla teknisillä vempaimilla. Jossain mielen sopukoissa viipyili ajatus siitä, että jonain päivänä hänkin voisi olla kehittämässä entistä ehompia laitteita tai sovelluksia. Ennen sitä hänen kuitenkin pitäisi ymmärtää miten ihmeessä kännykällä saattoi noin vain etsiä tietoa tietokoneelta, joka saattoi sijaita Haminassa tai Kaliforniassa. Aika ihmeellistä, sillä eihän edes muutaman kymmenen vuoden takaisissa tieteiselokuvissa osattu kuvitella tällaista.

”Onko kysymyksiä?” Henri palasi ajatuksistaan luennolle ja huomasi, että luennoitsija oli havainnut hänen keskittyneen pikemminkin kännykän käyttöön kuin luennon seuraamiseen. Onneksi Henrillä oli valmis kysymys mielessä: ”Anteeksi, minulle jäi

<sup>5</sup> Näistä viestinnän ongelmista Osmo A. Wiio on kehittänyt lait inhimillisestä viestinnästä, suosittelen luettavaksi: <http://osmo.wiio.net/wiion-lait/>

hieman epäselväksi mihin edellisellä kalvolla esiintynyt lyhenne ARP viittasi?” Luennoitsija näytti suorastaan ilahtuneelta kysymyksestä ja palasi edelliseen kalvoon ja sen sanomaan.<sup>6</sup>

Tästä voisi jatkaa esimerkkien avulla siihen miten informaatioteknologia on muuttanut jokapäiväistä elämäämme reilun sadan vuoden aikana—ja miten se on samalla luonut tuhansittain lyhenteitä. Tällaisen aloituksen tarkoitus olisi ollut olennaisesti sama kuin ensimmäinen aloituksen eli johdattaa lukija informaatioteknologian piiriin, mutta toisesta suunnasta, arkipäivän elämästä filosofisen pohdinnan sijasta. Molemmat ovat tärkeitä näkökulmia.

Kolmas näkökulma olisi lähteä suoraan tekniikasta:

Internet on verkko, joka koostuu reitittimistä, niiden välisistä linkeistä ja päätelaitteista. Informaatiota kuljetetaan verkon sisällä määrämuotoisissa yksiköissä, joita yleensä kutsutaan IP-paketeiksi.<sup>7</sup> IP-paketit sisältävät käyttäjän datan lisäksi riittävästi tietoa, jotta IP-paketit voidaan välittää verkon läpi vastaanottajalle.

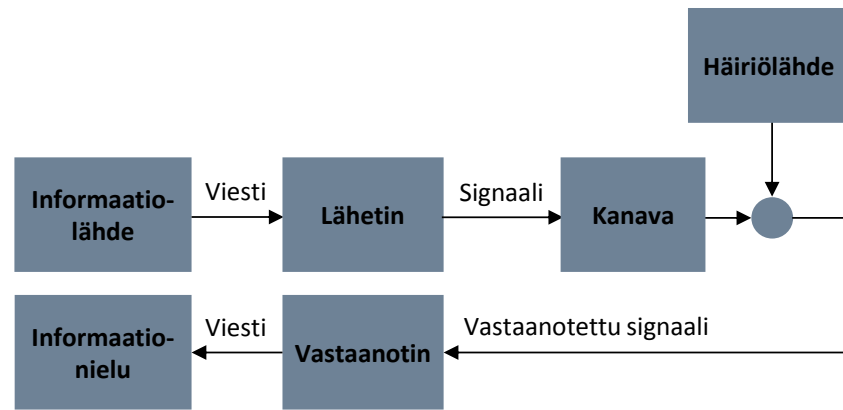
Jos tarkoitus olisi vain jakaa tietoa tekniikasta, tämä olisi hyvin toimiva tapa. Tällä kurssilla pyritään kuitenkin näkemyksellisempään katsaukseen koko informaatiokentän alueesta, mukaan lukien kysymykset miksi ja miten nykyisiin teknologioihin on päädytty. Tätä tarkoitusta varten tarvitaan yhdistelmä erilaisia näkökulmia.

Koska informaatioteknologian ensisijainen tarkoitus on toimia arkipäivän elämässä (pikemminkin kuin tehdä tiedettä), sen ei tulisi irtautua kovin kauas arkipäivän kokemuksesta silloinkaan kun kehitetään tulevaisuuden teknologioita. Toisaalta nykypäivän teknologiat ovat niin monimutkaisia ja vaativia ymmärtää, että systemaattinen ajattelu ja erilaisten menetelmien ja jopa teorioiden hallinta on välttämätöntä. Tämä oppimateriaali pyrkii yhdistämään molemmat näkökulmat, painopisteen ollessa systemaattisen tarkastelun puolella. Esimerkkinä järjestelmällistä ajattelusta on kuvassa 1.2. esitetty informaatioteknologinen malli.

---

<sup>6</sup> Jos luennolla joku asia jää sinulle epäselväksi, kysy ihmeessä välittömästi (koskee ainakin tätä kurssia)!

<sup>7</sup> IP-paketin (IP packet) sijaan on myös käytetty nimityksiä datagrammi (datagram) ja tietosähke.



**Kuva 1.2.** Informaatioteknologinen malli.<sup>8</sup>

Informaatioteknologian uranuurtajat Claude Shannon ja Warren Weaver jakavat viestinnän perusongelmat kolmeen tasoon A, B ja C.<sup>9</sup>

**Kuva 1.3.** Viestinnän perusongelmat

**Taso A:** Kuinka tarkasti viestinnässä käytetyt merkit (symbolit) voidaan välittää (tekninen ongelma).  
**Taso B:** Kuinka tarkasti käytetyt merkit vastaavat tarkoitettua merkitystä (semanttinen ongelma).  
**Taso C:** Kuinka tehokkaasti vastaanotettu merkitys vaikuttaa vastaanottajan käyttäytymiseen halutulla tavalla (tehokkuusongelma).

Tason A keskeiset kysymykset on esitetty kuvassa 1.3. Varsin usein tietoliikennetek-

niikan ajatellaan käsittelevän vain tasoa A. Se tarjoaa kuitenkin rajoittuneen kuvan yleisemmästä informaatioteknologian käsitteestä. Nykyinen informaatioteknologia pyrkii avustamaan myös tason B semanttisten<sup>10</sup> ongelmien ratkaisemisessa: tätä tekstiä kirjoittaessani käytän tekstinkäsittelyohjelmaa, sen oikeinkirjoituksen tarkistusominaisuutta, erilaisia muotoilu- ja kuvanteko-ominaisuuksia, jotta saisin haluamani merkityksen lukijoiden mieleen saakka. Lisäksi käyn tarkistamassa termien merkityksiä verkon kautta eri lähteistä.

Käytännön vuorovaikutustilanteissa useinkin haastavimmat ongelmat koskevat tasoa C, sillä riippumatta käytettyjen merkkien oikeellisuudesta ja virheettömyydestä, varsinainen viestinnän vaikutus voi olla aivan muuta kuin mihin viestinnän osapuolet ovat pyrkineet.<sup>11</sup> Tason C ongelmat kuuluvat pikemminkin psykologian tai sosiologian alueille politiikkaa unohtamatta, eivätkä siten kuulu tämän kurssimateriaalin keskeisiin aiheisiin.

Kun Shannon kehitti informaatioteoriaansa 1940-luvun lopulla nykyisen kaltaista informaatioteknologioiden kehitystä, sen tunkeutumista kaikille elämän osa-alueilla tuskin

<sup>8</sup> Shannon & Weaver, *The Mathematical Theory of Communication* (1963). Kirja käsittelee informaation esittämistä ja siirtämistä, ei niinkään informaation käsittelyä.

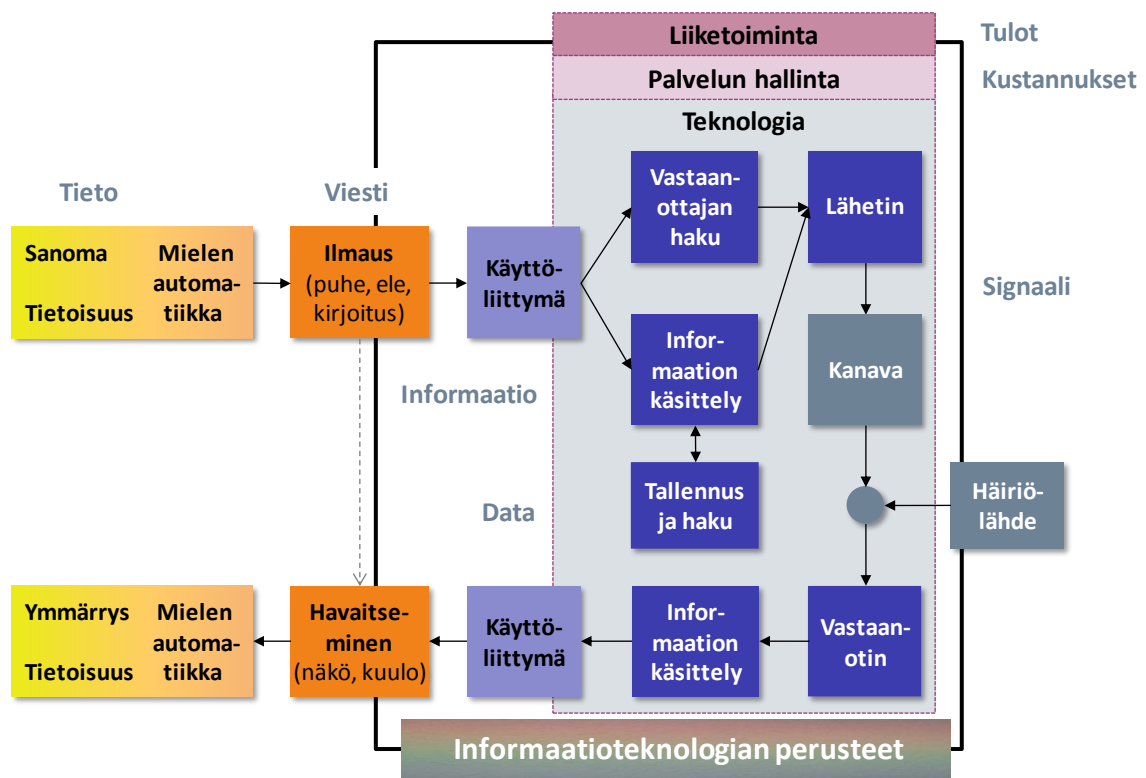
<sup>9</sup> Tämä on esitetty Shannonin & Weaverin kirjan johdantoluvussa, jota voi suositella kaikille asiasta kiinnostuneille.

<sup>10</sup> *Semanttinen* tarkoittaa merkitystä koskevaa, kun taas *syntaksi* tarkoittaa erilaisten kielten lauseoppia.

<sup>11</sup> Vastaukset tenttitehtäviin paljastavat usein merkittäviä viestinnän ongelmia tälläkin kurssilla.

kukaan saattoi aavistaa. Mutta nyt saatamme, koska kaikki käytämme lukuisia informaatioteknologian tuotteita ja palveluita päivittäin lukuisia kertoja. Kuva 1.4 hahmottaa informaatioteknologian nykytilannetta, jossa inhimillinen ja tekninen sekoittuvat toisiinsa monin tavoin. Erityisesti käyttöliittymä (*user interface*) on alue, jossa psykologia, tekniikka ja talous kietoutuvat toisiinsa. Teknologian lisäksi viestintäjärjestelmiin liittyy kiinteästi palveluiden hallinta ja liiketoiminta, jotka usein esitetään teknologian yläpuolisina tasoina kuva 1.4 mukaisesti.

Yksi tärkeimmistä tehtävistä, jotta kommunikaatio saadaan toimimaan, on sopia siitä miten informaatiota esitetään; ihmisten välisessä kommunikaatiossa ensisijaisesti puhutusta kielestä.<sup>12</sup> Vastaavaa yhteensopivuutta tarvitaan myös muilla, teknisemmällä tasolla, jotta verkon laitteet voivat toimia yhdessä.



**Kuva 1.4.** Viestintäjärjestelmien rakenneosia ja termejä.

Mitkä ovat sitten informaation välittämisen haasteet, vaikeudet ja ongelmat, joiden ratkaisemiseen tarvitaan insinööritaitoa? Yksi perusongelma on niukkojen resurssien (esim. taajuuskaistan) jakaminen eri käyttäjien kesken järkevästi ja oikeudenmukaisesti. Lisäksi tarvitaan tietoturvaratkaisuja, joilla pyritään estämään lähetettävän informaation joutumi-

<sup>12</sup> Meidän kannattaa arvostaa suuresti sitä tosiasiaa, että biologinen ja kulttuurievoluutio yhdessä ovat luoneet kielen, jolla tietoisuudet voivat kommunikoida keskenään. Selvää on, että ilman kieltä tätäkään lausetta ei olisi kirjoitettu.

nen väärin käsiin, silmiin tai korviin. Kannattavaa liiketoimintaa varten tarvitaan menetelmiä, joilla käyttäjiltä voidaan periä suoraan tai epäsuorasti (esimerkiksi mainosten avulla) maksuja. Kuvan 1.4 tapaisen järjestelmän haasteita ovat siten muiden muassa:

- Vastaanottajan paikantaminen verkosta, reititys sekä osoitetietojen hallinta.
- Tiedon salaus ja suojaus; kuinka estää lähetettävän informaation joutumista väärin käsiin.
- Niukkojen resurssien (esim. taajuuskaistan) jako eri käyttäjien ja palveluiden kesken ja tähän liittyen palveluiden hinnoittelu.
- Informaatiota kuljettavien signaalien vaimenemisen, vääristymisen ja kohinan vaikutuksen kompensointi ja ylikuulumisen ja muiden häiriötekijöiden hallinta.
- Kustannusten pitäminen hyväksyttävällä tasolla suhteessa saavutettuihin hyötyihin ja käyttäjien maksuhalukkuuteen.

Kuvan 1.4 näkökulma peittää alleen monia muita olennaisia jaotteluita, kuten ero liittyn-  
täverkon (**access network**) ja runkoverkon (**core network**) välillä. Verkot ja niiden palvelut  
voivat myös olla yksityisiä (**private**) tai julkisesti käytettäviä (**public**).

Konkreettisella tasolla tietoliikenteessä on kysymys datan siirtämisestä. Tällöin nopeus on olennainen tekijä, kahdessa suhteessa. Ensiksikin millä nopeudella (yksikkönä m/s tai km/h) tieto siirtyy paikasta toiseen. Toiseksi on tiedonsiirron kapasiteetti, josta myös termiä nopeus käytetään, yksikkönä bit/s. Yksi alan opiskelun kannalta välttämättömistä taidoista on lyhenteiden hallinta. Ensiksikin tavun lyhenne on B (ei b), eikä B koskaan tarkoita bittiä (bittejä ja tavuja ei saa sekoittaa, vaikka niin tehdäänkin mainoksissa ja muissa epäluotettavissa julkaisuissa). Termit ja lyhenteet petaan (P) saakka ylöspäin ja femtoon (f) saakka alaspäin on osattava automaattisesti. Taulukossa 1.1. on esitetty lyhenteitä ja esimerkkejä tehoasteikoilla (tässä on käytetty tehoasteikkoa, koska sille löytyy järkeviä esimerkkejä pienimmistä suurimpiin lukuihin).



**Taulukko 1.1.** Lyhenteet attosta (a) eksaan (E) ja esimerkkejä tehoasteikolla.

			Teho desibeleinä vs. mW (dBm) <sup>13</sup>	Esimerkkejä tehona (W)
eksa ( <i>exa</i> )	E	10 <sup>18</sup>	1 EW = 210 dBm	2,6 EW riittäisi höyrystämään yhden kuutiokilometrin verran vettä sekunnissa
peta	P	10 <sup>15</sup>	1 PW = 180 dBm	Auringon säteilyteho maahan ≈ 174 PW
tera	T	10 <sup>12</sup>	1 TW = 150 dBm	Sähkön tuotanto maailmassa keskimäärin ≈ 3 TW
giga	G	10 <sup>9</sup>	1 GW = 120 dBm	Ihmiskunnan aivojen tehonkulutus ≈ 100 GW Sähkön tuotanto Suomessa keskimäärin ≈ 8 GW Bitcoinin laskennan tehonkulutus ≈ 8 GW
mega	M	10 <sup>6</sup>	1 MW = 90 dBm	Haminan datakeskuksen tehontarve ≈ 100 MW Suomen mobiiliverkkojen yhteenlaskettu tehonkulutus ≈ 60 MW
kilo	k	10 <sup>3</sup>	1 kW = 60 dBm	Teslan kahden moottorin yhteisteho ≈ 580 kW TV-lähetyksen säteilyteho mastossa (max) ≈ 2 kW
-	-	1	1 W = 30 dBm	Tukiaseman säteilyteho (max) makrosoluissa ≈ 200 W, mikrosoluissa ≈ 10 W Aivojen tehonkulutus ≈ 20 W Mobiiliverkon tehonkulutus liittymää kohti ≈ 10 W
milli	m	10 <sup>-3</sup>	1 mW = 0 dBm	Matkapuhelimen lähetysteho (max) ≈ 100 mW WLAN tukiaseman lähetysteho ≈ 100 mW Tyypillinen Bluetooth lähetysteho ≈ 2,5 mW
mikro ( <i>micro</i> )	μ	10 <sup>-6</sup>	1 μW = -30 dBm	Täysikuun valon teho paljaaseen silmään ≈ 1 μW
nano	n	10 <sup>-9</sup>	1 nW = -60 dBm	TV-lähetyksen signaalin voimakkuus, kun signaali on vahva ≈ 1 nW
piko ( <i>pico</i> )	p	10 <sup>-12</sup>	1 pW = -90 dBm	Aivojen tehonkulutus hermosolua kohti ≈ 200 pW Tyypillinen vastaanotetun signaalin voimakkuus matkapuhelimessa (4G) ≈ 10 pW Pohjantähden valon teho silmään ≈ 1 pW
femto	f	10 <sup>-15</sup>	1 fW = -120 dBm	Vastaanotetun signaalin voimakkuus matkapuhelimessa, jolla juuri ja juuri saa yhteyden ≈ 10 fW
atto	a	10 <sup>-18</sup>	1 aW = -150 dBm	Teoreettinen raja signaalin voimakkuudella, joka riittää toimivaan puheyhteyteen ≈ 3 aW

<sup>13</sup> dBm tarkoittaa tehoa suhteessa milliwattiin desibeliasteikolla. Desibelejä käsitellään tarkemmin 3. luvussa.

Kun suuria lukuja on todella vaikea hahmottaa sellaisenaan, otetaan vielä esimerkiksi giga eli G:<sup>14</sup>

- Maailmassa on noin 7,6 G asukasta.
- Suurin prosessorilla saavutettu kellotaajuus on noin 8,4 GHz, tyypillinen kello- taajuus on 3,5 GHz.
- 5G-verkossa tullaan käyttämään mm. 3,5 GHz:n taajuusalueita. Nopeimmat 5G yhteydet kännykään voivat olla useita Gbit/s.
- Tyypillinen keskusmuistin (RAM) koko kannettavassa tietokoneessa on 8 GB ja kännykässä 4 GB.
- Sata vuotta on noin 3,15 Gs.
- Viisi kertaa kuuhun ja takaisin on matkana noin 3 Gm.
- Suomen valtio kerää vuodessa noin 7,4 G€ valmisteveroja<sup>15</sup> kun vastaavasti korkeakouluopetus ja tutkimus vievät noin 3,3 G€ vuodessa.

Erityisesti huomattavaa, että tietokoneen kellojakson pituuden suhde sekuntiin on suunnilleen saman kuin sekunnin suhde sataan vuoteen. Tiedonsiirtonopeuksia voi suhteuttaa myös ihmisen tiedonsiirtokykyyn. On arvioitu, että silmästä aivoihin johtavien hermosolujen yhteenlaskettu tiedonsiirtokapasiteetti on noin 6 Mbit/s, mutta tietoisuuteen asti pääsee informaatiota ehkä 100 bit/s tai jopa vähemmän.<sup>16</sup>

## Informaation sisältö

Mistä on kysymys, kun puhumme tiedosta tai informaatiosta ja teknologiasta tai tietoliikenteestä? Wikipediassa todetaan, että ”informaatio on järjestystä, johon voidaan liittää jokin tulkinta.”<sup>17</sup> Mutta mitä ihmettä on tulkinta? Tulkinnan tuloksen tulisi olla jollain tavoin jonkun järjestelmän hyödynnettävissä. Ihminen ja yhteiskunta ovat tässä mielessä järjestelmiä. Käytännöllisten ja teknisten tarpeiden kannalta tämä tulkintaan perustava informaation määritelmä on riittävä. Teoreettisiin tarpeisiin se on hankala, koska se liittyy

---

<sup>14</sup> G eli giga on yksiselitteisempi lyhenne kuin miljardi, sillä englannin kielessä miljardi on **billion**, mikä aiheuttaa monesti sotkuja käännoissään.

<sup>15</sup> Valmisteverot koostuvat pääasiassa energia-, alkoholi- ja tupakkaveroista.

<sup>16</sup> Nämä arviot: [https://www.researchgate.net/post/Estimates\\_of\\_quantified\\_human\\_sensory\\_system\\_throughput10](https://www.researchgate.net/post/Estimates_of_quantified_human_sensory_system_throughput10)

<sup>17</sup> <http://fi.wikipedia.org/wiki/Informaatio>. Yleisohjeena Wikipedian suhteen: jos haluaa viitata johonkin ”tosiasiaan” niin silloin on aina syytä etsiä alkuperäinen lähde, näin erityisesti oppinäytöissä ja tieteellisissä artikkeleissa. Wikipediaa voi käyttää johdantona ja yleisesityksenä itselle vieraaseen aihepiiriin. Tällöin kannattaa tarkistaa sekä englannin- että suomenkielinen versio.

tulkinnan kautta hyvin monitahoiseen *järjestelmän* (*system*) käsitteeseen. Niinpä informaatioteorian alueella informaatio esitetään symbolijonona, jota ei tarvitse tulkita eikä sillä siten tarvitse olla mitään erityistä käyttötarkoitusta.

Periaatteellisen eron tekeminen tulkinnallisuuden ja pelkän symbolijonon välillä on haastavaa. Kuvan 1.4 vasemmalla reunalla informaatioon liittyy aina tulkinta, koska muuten informaatio olisi pelkkää kohinaa, jota aivomme yrittävät suodattaa pois ennen tietoisuuteen nousevaa tulkintaa.<sup>18</sup>

Sen sijaan kuvan oikean laidan kanavassa<sup>19</sup> (*channel*) informaatio on olennaisesti symbolijonoja, joita siirretään paikasta toiseen ilman, että kukaan tai mikään pyrkii niitä millään tavoin tulkitsemaan. Jossain näiden ääripäiden välissä on vaihe, jossa tulkittava informaatio muuttuu symboleiksi ilman tulkintaa ja päinvastoin. Käyttöliittymä on tässä suhteessa avainasemassa.

Entäpä jos vaikka tekstiä tuotetaan satunnaisesti, käyttämällä tietokoneen kykyä tuottaa jonkin algoritmin mukaan tekstiä, jolla on haluttuja ominaisuuksia. Sisältääkö satunnaisesti tuotettu teksti informaatiota ja jos sisältää, niin mitä informaatiota? Havainnollistetaan tätä seuraavalla esimerkillä:

Takeas vihoht'astun nyt pi misevät la. Japaikat, huumausketi eukiinä sa näksiä pysyn myönistin vatarakkiele tälänä pisti, jossarskui noulopuuttehipi, mikävä minaaniin olinkuolikäyrisen pärevatoollumiten sa tulostelä vihkäkirjelin ta nyttani.

Kun tuota lukee, alkaa väistämättä hakea tulkintaa, merkitystä tai ainakin tyydyttävää selitystä. Kyseessä ei ole mikään oikea kieli, vaikka teksti onkin sukua suomelle. Tuotos on generoitu seuraavalla tavalla:<sup>20</sup>

- 1) Otetaan Seitsemän veljeksien koko teksti.<sup>21</sup>
- 2) Lasketaan jokaisen merkkiparin jälkeisten merkkien määrä: esimerkiksi merkkipari "ne" esiintyy tekstissä 3245 kertaa ja sitä seuraa merkki "a" 10 kertaa, merkki "n" 1627 kertaa, merkki "." 15 kertaa, jne.

---

<sup>18</sup> Kohinan voidaan ajatella olevan informaatiota, josta vastaanottaja ei ole kiinnostunut. Tietoliikenneinsinööri ei yleensä ole kiinnostunut lämpösäteilyn yksityiskohtaisista ominaisuuksista. Jos taas naapurin signaali indusoituu omalle puhekanavalle, sitä voidaan pitää joko kohinana (joka häiritsee oman signaalin vastaanottoa) tai informaationa (jos naapurin välittämät tiedot sattuvat kiinnostamaan).

<sup>19</sup> Kanavalla tarkoitetaan tässä yhteydessä jotain väliaineen ominaisuutta, jota käytetään signaalien siirtämiseen. Kanava voi koostua myös sarjasta erilaisia osia eli erilaisia väliaineita ja niiden ominaisuuksia.

<sup>20</sup> Sama menetelmä on esitetty mm. kirjassa J. Gleick, Informaatio, Art House (käännös alkuteoksesta, *The Information: A History, a Theory, a Flood*, 2012).

<sup>21</sup> <http://www.gutenberg.org/files/11940/11940-8.txt>

- 3) Lasketaan jokaiselle merkkiparille todennäköisyydet, että seuraava merkki on tietty merkki. Esimerkiksi merkkiparin ”ne” jälkeen tulee merkki ”a” 0,31 prosentin todennäköisyydellä, merkki ”n” 50,1 prosentin todennäköisyydellä ja merkki ”.” 0,46 prosentin todennäköisyydellä.
- 4) Aloitetaan merkkiparilla ”.” (jossa siis pisteen jälkeen tulee välilyönti).
- 5) Tämän jälkeen arvotaan (satunnaislukujen avulla) aina seuraava merkki niiden todennäköisyyksien mukaan jotka saatiin 3-kohdassa. Esimerkiksi merkkiparia ”ne” seuraa useimmiten n, mutta välillä myös a, piste tai joku muu 30 mahdollisesta merkistä. Jos seuraava merkki on vaikka a, niin seuraavaksi arvotaan jokin niistä merkeistä, joka seuraa merkkiparia ”ea”.

Tuloksena on periaatteessa loputon, satunnaisesti etenevä merkkijono, jolla on joitain mielenkiintoisia ominaisuuksia. Mutta sisältääkö tulos informaatiota vai kenties kohinaa? Teoreettisessa merkityksessä tuotos sisältää informaatiota, koska siinä esiintyy merkkejä peräkkäin. Kyseinen merkkijono voidaan välittää kanavassa ja se voidaan esittää käyttöliittymän kautta vastaanottajalle. Mielen automatiikka yrittää parhaansa mukaan tulkita tuotosta. Mieli saattaa pitää sitä vaikeaselkoisena tekstinä. Tilastollisessa mielessä tuo keinotekoinen tekstipätkä vastaa siis suomenkielistä tekstiä, mutta ilman varsinaista sanomaa kuvan 1.4 mielessä.

Jossain kuvan 1.4 esittämien ääripäiden (ihminen ja tekninen kanava) välissä, on vielä kolmas näkökulma. Tom Stonier on määritellyt informaation kyvyksi luoda tai ylläpitää järjestystä jossain järjestelmässä.<sup>22</sup> Tätä voisi kuvata informaation tekniseksi määrittelyksi; teknologian tavoitteena on tuottaa ja käsitellä järjestelmiä, joiden toivotaan toimivan jollain ennalta määrättyllä, järjestelmällisellä tavalla. Informaation siirtäminen on välttämätön osa kaikkia monimutkaisia teknisiä järjestelmiä. Nyt meillä on siis seuraavat määritelmää informaatiolle:

1. Informaatio on järjestystä, johon voidaan liittää jokin tulkinta.
2. Informaatio on kyky luoda järjestystä.
3. Informaatio on jono merkkejä.

Tähän meidän on tyytyminen, eli riippuen tilanteesta ja tarpeesta, päädytään erilaisiin määritelmiin.<sup>23</sup> Otetaan esimerkiksi nuo seitsemän kuulua veljestä:

<sup>22</sup> T. Stonier, *Information and the Internal Structure of the Universe*, Springer-Verlag, 1990.

<sup>23</sup> Tiedosta kiinnostuneen kannattaa käydä tutustumassa finton sivustoon <http://finto.fi/tt/fi/page/t117>, jolla systemaattisesti määritelty lukuisia tietoon liittyviä käsitteitä.

”Veljesten nimet vanhimmasta nuorimpaan ovat: Juhani, Tuomas, Aapo, Simeoni, Timo, Lauri ja Eero. Ovat heistä Tuomas ja Aapo kaksoispari ja samoin Timo ja Lauri. Juhani, vanhimman veljen, ikä on kaksikymmentä ja viisi vuotta, mutta Eero, nuorin heistä, on tuskin nähnyt kahdeksantoista auringon kierrosta.”

Näissä kahdessa lauseessa on varmasti kaikkien määritelmien mukaan informaatiota, vaikka kertomus ei varsinaisesti todellisia henkilöitä kuvaakaan. Joka tapauksessa Aleksis Kivellä oli sanoma, jonka hän toivoi tulevan ymmärretyksi. Samoin voidaan ajatella, että lauseet luovat lukijan aivoihin järjestystä, jota lukija voi myöhemmin hyödyntää. Merkkijono on ilmeinen.

Entä sitten tilastollisen informaation avulla tuotettu satunnainen teksti:

”Ja ko taani ja silin olasis, tui ihme sa on ta kinnen manoikaani, ja erojaivattekset, mah! Tuni, eipysyvinä juuttiehumassaukkoa kohin aannen kuinnä kivas. La pä, ja lanhanauliva keanasemakia kenensiinentelkässä ohtee helukkerta, ja iskuloikin tonneen.”

Merkkijonona tulos on samankaltainen kuin Kiven teksti. Tulkinta, vaikea sanoa, merkkijono kun luo aivoihin pikemminkin hämmennystä kuin järjestystä.

Sitten voimme mennä vielä askeleen pidemmälle. Otetaan Seitsemän veljeksien teksti ja pakataan se zip-muotoon. Alkuperäisen tekstitiedoston koko oli 626 kilotavua kun taas pakattuna koko on 254 kilotavua.<sup>24</sup> Tuloksena on merkkijono tähän tapaan:

]5\*!&TqŽí-|8M[öëv<oáRM1M}\_ÄqÛ°ê!Å® úú ism Þ¾ S7GûÑ>Û!&Ußz&f³¶Ûö@új\_h•Ú.'°j½

Tätä tiedoston keskeltä otettua pätkää on mahdoton erottaa satunnaisesta merkkijonosta, ellei käytettävissä ole pakkauksen avaamiseen tarvittava informaatio. Inhimillinen tulkinta on mahdotonta ilman koneen suorittamaa käännoästä. Voidaan sanoa, että kyseessä on informaatio *yhdessä käännoäksen tekemiseen tarvittavan informaation kanssa*.

Informaatio on siis vaikea ja tulkinnallinen käsite. Yksi mahdollisuus on käyttää eri termejä eri merkityksille. Termillä *data* voidaan tarkoittaa merkkijonoa ilman tulkintaa, tai mitattuja arvoja ennen tiedonkäsittelyä. Valitettavasti mitään täysin vakiintuneita, laajasti käytettyjä määrittelyjä näille termeille ei ole.<sup>25</sup>

Lisäksi suomen kielessä on käytettävissä sangen yleiskäyttöinen sana *tieto*. ”Klassisen” määritelmän mukaan tieto on perusteltu, tosi uskomus.<sup>26</sup> Suomenkielen *tietää* verbi on

<sup>24</sup> Informaatioteknologian alueella tavu muodostuu 8 bitistä. Yhdellä bitillä voidaan esittää tieto, jolla on kaksi mahdollista arvoa.

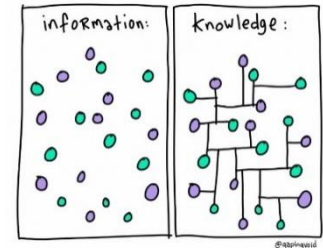
<sup>25</sup> Tämä on informaatioteknologian alan yksi perusongelma: eri osa-alueet ovat kehittäneet omia käsitejärjestelmiään, jotka eivät useinkaan ole yhteensopivia toistensa kanssa. Alan opiskelijoille ja ammattilaisillekin tästä aiheutuu melkoisesti vaivaa ja hämmennystä.

<sup>26</sup> Platon, Theaitetos-dialogi.

merkinnyt alun perin tien tuntemista, mahdollisesti myös jälkien muodostaman uran seuraamista, josta sitten on voinut kehittyä yleisempi menettelytavan tuntemisen merkitys.<sup>27</sup> Tieto viittaa siis inhimillisiin olentoihin ja mieleen ja sen sisältöihin kun taas informaatio viittaa pikemminkin biologisiin tai teknisiin järjestelmiin.

Tieto on kuitenkin sanana varsin kuormitettu. Esimerkiksi englannin kielen sanat *information* ja *knowledge* käännetään usein sanalla tieto. Englannin kielessä sanoilla on melko selkeä ero, kuten oheinen kuva pyrkii ilmaisemaan.<sup>28</sup>

Entä mitä on *teknologia* tai englannin kielellä *engineering*? Herbert Simon on ilmaissut asian seuraavalla tavalla:<sup>29</sup>



“Engineering, medicine, business, architecture and painting are concerned not with the necessary but with the contingent - not with how things are but with how they might be - in short, with design.”

Simonin mukaan siis teknologia ja muut vastaavat alat ovat kiinnostuneita siitä, miten asiat *voisivat* olla, eivät siitä, miten asiat välttämättä ovat. Niistä asioista jotka voisivat olla, voidaan valita joku toteutettavaksi. Insinöörin tavoite on löytää uusia mahdollisuuksia eli teknisiä ratkaisuja ja tehdä valintoja erilaisten ratkaisujen välillä. Tyypillistä ”insinööriajattelulle” on myös perusoletus, että monimutkainenkin järjestelmä voidaan rakentaa suhteellisen pienistä, ymmärrettävistä osista, joilla kullakin on tarkasti määrätty tehtävä.

Vastaavasti voidaan ajatella, että tieteen tehtävä on selvittää mikä on *välttämättä* jollain tavoin. Ymmärrys välttämättömyyksistä on tarpeen, jotta uusia teknologioita voidaan kehittää. Radiotien ominaisuuksia voidaan kuvata Maxwellin yhtälöillä äärimmäisen tarkasti. Yleistä suhteellisuusteoriaa tarvitaan, jotta GPS (**Global Positioning System**) pystyy antamaan tarkan paikkatiedon. Elliptisten käyrien teoriaa käytetään salausalgoritmien suunnitteluun ja toteuttamiseen. Näiden teorioiden perusteellinen hallinta vaatii kykyjä ja taitoja, jotka ovat useimpien insinöörien ulottumattomissa; silti niitä käytetään matkapuhelinverkkojen, päätelaitteiden ja sovellusten toteuttamiseen. Tuskin kukaan yksittäinen henkilö enää hallitsee kaikkia niitä lukuisia teknologian osa-alueita, joita käytetään esimerkiksi älypuhelimissa.

Teknologian kehittäminen on siis verkostoitunutta toimintaa, jossa tietty ihmisryhmä (insinöörit) soveltaa tieteellistä tietoa ja toisia teknologioita käytännön ongelmien ratkaisemiseksi jotain vastinetta, tyypillisesti palkkaa, vastaan. Jonkun toisen ihmisryhmän tehtävä

<sup>27</sup> K. Häkkinen, *Nykysuomen etymologinen sanakirja*, WSOY 2004.

<sup>28</sup> <http://www.gapingvoidart.com/gallery/information-knowledge/>

<sup>29</sup> H. Simon, *The Sciences of the Artificial*, MIT Press, 1996, p. xii.

on sitten hyödyntää kehitettyjä teknologioita kaupallisesti ja siten mahdollistaa vastikkeiden antamisen insinööreille.

Kolme huomionarvoista seikkaa:

1. Sanana teknologia viittaa järjestelmälliseen, tavoitteelliseen ja organisoituun toimintaan, jonka takana on huomattavia kaupallisia tai muita intressejä. Yksittäisten Pelle Pelottomien rooli on yleensä vähäinen teknologian varsinaisen kehitystyön aikana, sen sijaan uusien alueiden ja sovellusten löytämisessä ja alullepanemisessa yhdellä henkilöllä voi olla ratkaiseva merkitys.
2. Insinööri voi toki kehittää laitteita tai tietokoneohjelmia omaksi huvikseen ilman suoranaista palkkaa, joko yksin tai osana yhteisöä. Vastine on tällöin vaikeammin mitattavissa, mutta silti merkittävä: se voi olla joko suorittamisen luoma välitön tyydytys tai sosiaalisen pääoman kertyminen.
3. Nykyinen tieteen kehitys on suuresti riippuvainen teknologiasta; esimerkiksi sellaisen fysiikan tutkimuksen kohteen kuin Higgsin hiukkasen löytäminen on vaatinut moninaisten teknologioiden kehittämistä ja toteuttamista. Tieteen ja teknologian suhde ei ole yhdensuuntainen vaan ne ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa toisiinsa.

Esimerkkinä sekä 1. että 2. kohdassa voidaan mainita Linus Torvalds ja Linux, Tim Berners-Lee ja WWW, sekä ehkä myös Steve Jobs ja henkilökohtainen tietokone.<sup>30</sup> Kolmannesta kohdasta esimerkkinä voisi olla Bitcoinin<sup>31</sup> kehittäjä ”Satoshi Nakamoto”—kuka hän sitten lieneekin.

Insinööriys on venyvä käsite. Osa insinööriyöstä menee hyvin lähelle perustieteitä kun taas monen insinöörin työ on pääosin henkilöjohtamista ja ideoiden ja tuotteiden markkinointia. Eli työnkuva vaihtelee kahden ääripään välillä:

- Perustiedettä syvästi hallitseva henkilö, jonka tavoite on soveltaa vaativia teorioita käytännön ongelmaan. Radioaaltojen etenemisen teorialat ja mallit hallitseva insinööri voi kehittää uusia antenniratkaisuja älypuhelimiin. Elliptisten käyrien teorian soveltaminen salausalgoritmeissa on toinen ajankohtainen esimerkki.
- Myynti-insinööri, jolla on riittävästi tietoa ja ymmärrystä tuotteen tekniikasta, jotta hän pystyy myymään tuotetta tehokkaasti suurimmalle osalle asiakaskuntaa. Liian syvä tekninen ymmärrys saattaa olla jopa haitaksi, sen sijaan käytännön ihmistuntemus on myyntityössä erittäin hyödyllistä.

---

<sup>30</sup> Korostettakoon sitä, että vaikka Linuksella ja Jobsilla on ollut merkittävä rooli kehityksen alullepanijoina ja suunnan näyttäjänä, varsinainen tuotos (Linux, Applen tuotteet) on ollut erittäin suuren joukon yhteistyön tulos.

<sup>31</sup> Bitcoin on tunnetuin ja laajimmin käytetty lohkoketju (Blockchain) –teknologia, katso esim. <https://bitcoin.org/en/protect-your-privacy>.

Näiden väliin mahtuu paljon erilaisia insinööritehtäviä, kuten soveltavaa tutkimusta, standardointia, tuotekehitystä, testausta, tuotannon ohjausta, konsultointia ja markkinointia. On helppo otaksua, että älyllisesti vaativinta on teoreettisin työ ja vähiten älyllisesti vaativaa on työ kauimpana teorioista. Toisaalta, mikä sitten on kaikkein vaikeinta ymmärtää? Ehkä kvanttifysiikka ja yleinen suhteellisuusteoria, vaikka ihmisen aivot ja mieli ovatkin äärimmäinen monimutkaisia kokonaisuuksia.

Insinöörit ratkaisevat teknisiä ongelmia kykyjensä mukaan, kun taas organisaatiot ja yhteisöt pyrkivät turvaamaan oman toiminnan menestyksen ja jatkumisen, jota suuret muutokset saattavat uhata. Uudet tekniset ratkaisut, hyvänä esimerkkinä Internet, johtavat väistämättä suuriin muutoksiin. Tästä seuraa teknologiayrityksien kannalta vakava ristiriita: mitä tehokkaammin organisaatio kehittää ja tuo markkinoille uusia entistä kyvykkäämpiä tuotteita, sitä todennäköisempää on, että yrityksen perinteinen liiketoiminta joutuu oman kehitystyön uhriksi.<sup>32</sup> Uudet tuotteet korvaavat vanhat ja samalla muuttavat liiketoiminnan suhteita ja toimijoiden välisen pelin luonnetta.

## Informaation lyhyt historia

Nykyihmisten kaukaiset esivanhemmat Afrikan savanneille eivät käyttäneet viestintäänsä juurikaan teknisiä apuvälineitä: äännet, eleet ja kosketukset (ja ehkä kivenmurikat painottamaan jonkun asian tärkeyttä) riittivät viestinnän tarpeisiin. Toisaalta ei pidä aliarvioida viestinnän monimutkaisuutta ja –muotoisuutta jo silloin kun ihmiset elivät muutamien kymmenien jäsenten ryhmissä.<sup>33</sup>

Minkä verran ihmiset jättivät tarkoituksella jälkiä tai merkkejä ryhmän muille jäsenille tai muille ryhmille esimerkiksi merkkeinä puissa tai asettamalla kiviä järjestykseen, jäänee arvailujen varaan.<sup>34</sup> Mitä ilmeisimmin niillä on jokin tietoisten olentojen ilmaisema sanoma, vaikka meille nykyihmisinä niiden tulkinta on vaikeaa (ja ilman tulkintaa ei ole informaatiota). Sen sijaan vanhimpien tunnettujen kirjoitusten tulkinta ei jätä paljon epäilykselle sijaa: mesopotamialaisia kirjoitusmerkkejä lähes kuusi tuhatta vuotta sitten käytettiin maataloustuotteiden kirjanpidon ja verotuksen välineenä.

Rumpujen käyttö viestinnässä on hyvin vanhaa perua. Samoin huutoketjuilla siirrettiin jo muinoin viestejä noin 20 kilometrin tuntinopeudella. Savu- ja tulimerkkejä on käytetty

---

<sup>32</sup> Clayton Christensenin *Innovator's Dilemma* vuodelta 1997 on tämän kysymyksen klassikko.

<sup>33</sup> Geneettisesti emme ole juurikaan muuttuneet noista ajoista, jolloin kuljimme pienehköissä ryhmissä savanneilla. Voidaan olettaa, että evoluution tuloksena viestintätaitomme ja -tapamme ovat sopeutuneet niiden aikojen tarpeisiin.

<sup>34</sup> Mikä on esimerkiksi Stonehengen (<http://fi.wikipedia.org/wiki/Stonehenge>) kivien kertoma viesti? Katso ja kuuntele <http://www.youtube.com/watch?v=mbyzgeee2mg>



laajasti siitä lähtien kun ihmiset ovat järjestäytyneet yhteiskunniksi. Lukijana voit miettiä vaikkapa miten nämä esimerkit sopivat kuvan 1.4 malliin.

Foneettinen (eli ääntämisen mukainen) kirjoitus noin tuhat vuotta myöhemmin oli vallankumouksellinen keksintö: se mahdollisti kertaalleen laaditun viestin monistamisen, säilyttämisen ja kuljettamisen olennaisesti helpommin ja luotettavammin kuin pelkästään suulliseen viestintään perustuvissa kulttuureissa oli mahdollista. Mutta ehkäpä juuri kirjallisen ilmaisun vallankumouksellisen luonteen vuoksi kirjoittaminen pysyi hyvin rajallisen ryhmän tehtävänä seuraavien vuosituhansien aikana.<sup>35</sup> Keskeisin poikkeus lienee Rooman valtakunta, jossa lukutaitoisuus oli ilmeisesti varsin korkea. Valtakunnan romahtamisen jälkeen lukutaito pysyi pienen eliitin etuoikeutena 1600-luvun lopulle saakka.<sup>36</sup>

Kirjapainotaidon kehittyminen 1400-luvun puolivälissä merkitsi muutamassa vuosikymmenessä radikaalia muutosta entiseen tilanteeseen, jossa (lähes pelkästään uskonnollisten ja filosofisten) kirjojen kopiointi tapahtui pääosin kirkon valvonnassa ja toimesta. Mielipiteen vapaus oli silloin hyvin rajallinen käsite niidenkin, useimmiten munkkien, joukossa jotka kirjoitustaitoa viljelivät. Sen sijaan kirjapainojen kautta oli mahdollista välittää monenlaisia ajatuksia laajalle lukijakunnalle; vuoteen 1500 mennessä Euroopassa painettiin yli 20 miljoonaa kappaletta kirjoja. Mutta kehitys lähti nopeasti käyntiin vain eräissä osissa Eurooppaa, ei esimerkiksi Kiinassa tai muualla Aasiassa vaikka teknisesti se olisi ollut mahdollista kaikkialla.<sup>37</sup>

Kirjapainon merkitystä on tässä syytä korostaa siksi, että sillä oli olennainen merkitys sille, miten tiede ja teknologia lähtivät kehittymään. Kaikista rajoitteista huolimatta ihmisten ja yhteisöjen välisen viestinnän tehokkuus ylitti jonkin vaikeasti määriteltävän rajan, jonka jälkeen julkaistun tiedon määrä lähti eksponentiaaliseen nousuun 1600-luvulta alkaen. Lisäksi kirjapainotekniikka voidaan ajatella varhaiseksi informaatioteknologian ilmentymäksi: keskeisin käyttöliittymä vastaanottopäässä oli painettu teksti, lehti tai kirja.

Informaatioteknologia on kuitenkin tapana käsittää tietokoneiden ja tietoliikennelaitteiden avulla suoritettavaksi informaation muokkaamiseksi, siirroksi, tallennukseksi ja hauksi (joka siis kuvassa 1.4 merkitty sinisellä alueella). Tämän määritelmän mukaan informaatioteknologian kehityksen alku voidaan sijoittaa 1800-luvun alkupuolelle.<sup>38</sup>

---

<sup>35</sup> Koska tieto on valtaa, kirjoitukseen perustuvan tiedon vapaata leviämistä on pidetty (aiheellisestikin) uhkana itsevaltaisesti johdetuille yhteiskunnille. Pohjois-Korea on nykypäivän räikein esimerkki.

<sup>36</sup> Ruotsi (johon Suomi tällöin kuului) oli ilmeisesti ensimmäinen valtio, joka määräsi lukutaidon kaikille pakolliseksi vuonna 1686. Lukutaidon kehittymisestä kts. Roser & Ortiz-Ospina, *Literacy*, <https://ourworldindata.org/literacy/>

<sup>37</sup> Ajatusmaailman muutoksesta lyhyt artikkeli ja kirja: B. DeLong: *Economic history: The roots of growth*, [https://www.nature.com/articles/538456a?WT.feed\\_name=subjects\\_economics](https://www.nature.com/articles/538456a?WT.feed_name=subjects_economics)

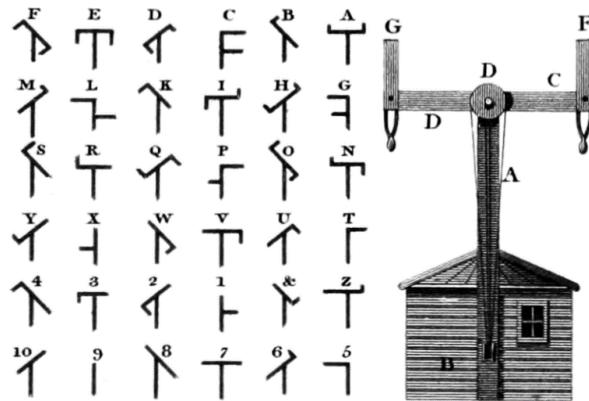
<sup>38</sup> Tosin kauemmaskin ajassa taaksepäin voidaan mennä. Ramon Llull kehitti jo 1200-luvun lopulla menetelmän, jonka avulla väittelijä saattoi, ainakin periaatteessa, löytää vastauksen mihin tahansa kristinuskoa koskevaan argumenttiin tai kysymykseen. Llull kehitti myös "koneita" tätä tarkoitusta varten, katso [http://fi.wikipedia.org/wiki/Ramon\\_Llull](http://fi.wikipedia.org/wiki/Ramon_Llull).

## Tietoliikenteen merkkipaaluja

Mitä sitten voidaan kutsua ensimmäiseksi nykyaikaisen tietoliikenteen ilmentymäksi, jos kirjeiden tai kirjojen kuljettamista hevosvankkureilla ei sellaiseksi lasketa? Hyvä ehdokas on optinen lennätin<sup>39</sup>, jollaisia alettiin rakentaa Euroopassa 1700-luvun lopulla. Optinen lennätin (*optical or semaphore telegraph*) perustui merkkitaulujen ja kaukoputkien käyttöön. Ranskaan Pariisin ja Lillen välille rakennettiin 15 asemaa käsittänyt 230 km pitkä optinen lennätinlinja, jonka avulla pystyttiin siirtämään pari merkkiä minuutissa. Vuonna 1794 linjaa käytettiin siirtämään tieto siitä, että Ranska oli valloittanut Lillen lähellä sijaitsevan Condé-sur-l'Escaut:n kylän Itävaltalaisilta. Tieto siirtyi alle tunnissa. Vastaavanlainen optinen lennätinyhteys rakennettiin Krimin sodan aikaan (v. 1854 - 56) Hangosta Pietariin sotilaallisia tarkoituksia varten. Se korvattiin pian sodan jälkeen sähköisellä lennättimellä.

Myöhemmän tietoliikenteen kehityksen kannalta mielenkiintoista on optisen lennättimen sanomien koodaus. Claude Chappen kehittämällä optisella lennättimellä pystyttiin esittämään 192 erilaista merkkiä vaihtamalla palkkien asentoja. Kuvassa 1.5 on esitetty aakkosia ja numeroita vastaavat merkit. Osa merkeistä oli kuitenkin koodattu siten, että kahden merkin yhdistelmällä voitiin tuottaa 8464 erilaista sanaa tai sanontaa.<sup>40</sup> Koska linjan välityskapasiteetti oli sangen rajallinen, koodauksen tehokkuuteen kannatti panostaa.

**Kuva 1.5.** Chappen optinen lennätinasema ja osa käytetyistä koodista.<sup>41</sup>



Sähkölennätin kehitettiin 1800-luvun alussa. Sähkölennättimen käyttöä rajoitti kuitenkin sähköisen signaalin vaimeneminen siirtoetäisyyden kasvaessa. Samuel Morsen keksimän relepiirin avulla signaalia pystyttiin vahvistamaan, mikä johti lennätinverkkojen nopeaan yleistymiseen 1840-luvulla. Lennätinyhteyksien rakentaminen maksoi paljon, mutta sekä poliitikot että ennen kaikkea liikemiehet ymmärsivät nopeasti lennättimen arvon. Ensimmäinen yritys rakentaa kuparikaapeliin perustuva lennätinyhteys Atlantin

<sup>39</sup> Lennättimellä tarkoitetaan järjestelmää, jolla voidaan siirtää tekstimuotoisia viestejä ilman esineiden fyysistä siirtämistä.

<sup>40</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_telegraph](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_telegraph)

<sup>41</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rees%27s\\_Cyclopaedia\\_Chappe\\_telegraph.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rees%27s_Cyclopaedia_Chappe_telegraph.png)

poikki tehtiin jo 1857 - 58.<sup>42</sup> Valitettavasti lennätinyhteys lakkasi toimimasta jo muutaman viikon jälkeen.

Vastoinkäymisistä huolimatta työtä jatkettiin. Vuonna 1866 saatiin lopulta rakennettua toimiva merikaapeliyhteys Atlantin poikki. Vaikka projekti oli ollut hyvin kallis suhteutettuna silloisiin taloudellisiin voimavaroihin, niin palvelulle riitti myös kysyntää. Sanomien hinta oli 10 dollaria sanaa kohti ja vähimmäissanamäärä oli 10 sanaa, silti esimerkiksi syksyllä 1868 sanomia välitettiin keskimäärin noin 30 päivässä.<sup>43</sup>

Tämän jälkeen huomattavaa edistystä merikaapeleiden osalta tapahtui vasta vuonna 1956, kun TAT-1 kaapeli laskettiin Skotlannin ja Newfoundlandin välille. Sen kapasiteetti oli 36 puhekanavaa. Seuraava porras kapasiteetin kasvukäyrällä oli siirtyminen optisiin merikaapeleihin vuodesta 1988 alkaen. Ensimmäisen optisen kaapelin kapasiteetti oli 560 Mbit/s. Vuoteen 2001 mennessä yhden optisen merikaapelin kapasiteetti oli jo 640 Gbit/s eli noin 100 000 000 000 kertaa suurempi kuin vuoden 1856 kaapelin kapasiteetti. Ei siis ihme, että datan siirtäminen valtameren yli tuntuu nyt ilmaiselta.

Miten sitten tiedonsiirron kapasiteetti on kehittynyt optisesta lennättimestä alkaen? Kuva 1.6 valaisee muutoksen suuruutta. Kuvassa on esitetty tiedonsiirtokapasiteetin ja viiveen suhde eri aikoina erilaisilla tiedonsiirron menetelmillä. Esimerkkinä olkoon aikaisemmin mainittu Paris-Lille (230 km) väli. Ensimmäinen tavu saatiin siirrettyä noin 10 minuutissa, jonka jälkeen päästiin noin yhteen tavuun minuutissa. Tavallisen kirjan välittämiseen optimisella lennättimellä olisi mennyt vähintään vuosi ottaen huomioon sään ja pimeyden aiheuttamat ongelmat. Suuren informaatiomäärän siirtämiseen kirja reppuun ja kävelemään olisi siten ollut huomattavasti nopeampi ja halvempi tiedonsiirtomenetelmä, sillä optisen linjan ylläpitäminen vaati satojen henkilöiden työpanoksen. Viiveen olennainen pienentyminen lyhyillä sanomilla oli siten ainoa merkittävä optisen linjan etu.

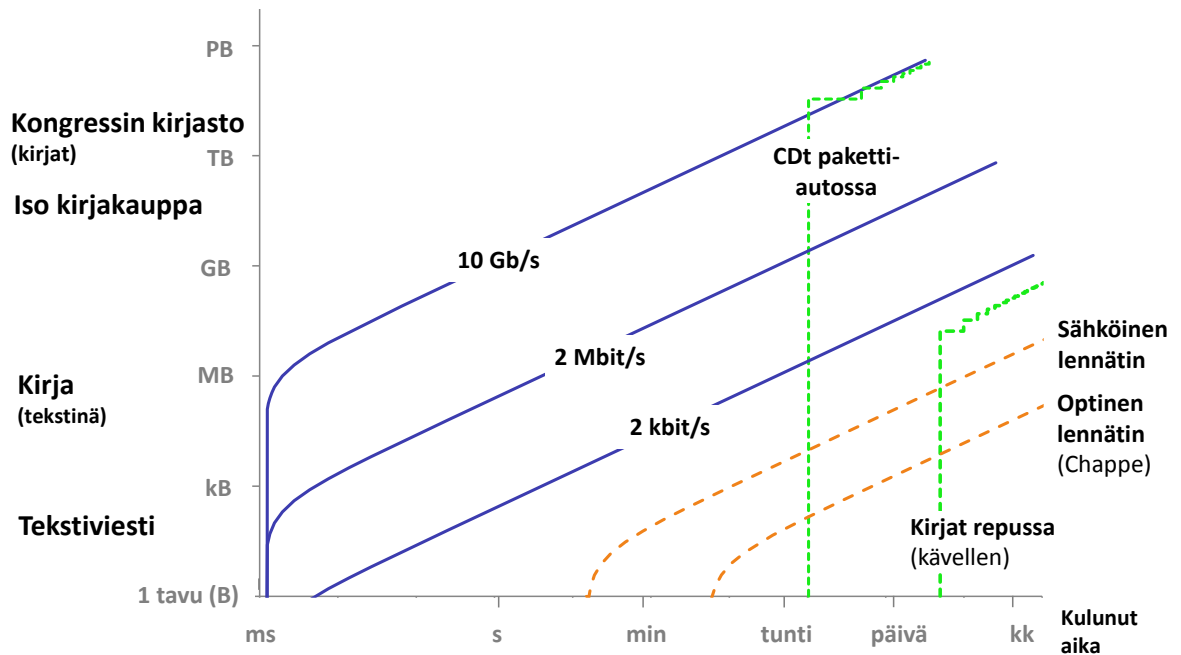
Vastaavasti voidaan ottaa noin vuoden 1985 huipputeknologiat eli CD-levy (750 MB, 15 grammaa), pakettiauto (80 km/h, 1000 kg) ja vuokrattu yhteys (2 Mbit/s). Samassa ajassa kuin pakettiautolla ajaisi 230 km, vuokratulla yhteydellä olisi saanut siirrettyä noin neljän CD:n verran informaatiota. Yhteen pakettiautoon saisi lastattua 50000 CD-levyä, joka tekee siitä suunnilleen yhtä tehokkaan tiedonsiirtovälineen kuin 10 Gbit/s optisen yhteyden pitkällä aikavälillä tarkasteltuna. Noin suuri määrä levyjä olisi toki epäkäytännöllinen menetelmä, mutta periaatteessa yhdellä pakettiautollisella voisi siirtää USA:n kongressin kirjast-

---

<sup>42</sup>Atlantin kaapeleita koskevat tiedot: J. Hayes: *A History of Transatlantic Cables*, IEEE Communications Magazine, Sept. 2008.

<sup>43</sup> Vertailukohtana: Yhdysvaltain kongressiedustajan palkka tuohon aikaan oli noin 100 dollaria viikossa.

ton kirjojen tekstit. Nyt saman tietomäärän saisi kuljetettua muutamalla kiintolevyllä. Tiedonsiirtomenetelmän valinnassa on aina kysymys yhtä aikaa kapasiteetista, viiveestä ja hinnasta. Eri tekijät painottuvat eri tilanteissa ja eri aikoina eri tavoin.



**Kuva 1.6.** Tiedonsiirtoa eri menetelmillä 230 km matkalla, vaaka-akselilla käytetty aika ja pystyakselilla siirretyn datan määrä (molemmat logaritmisella asteikolla).

### Esimerkki 1.1. Siirtonopeuksien suhteita

Oletetaan että teekkari Janne avustaa kesätyönään projektia, jossa Aalto-yliopisto ja Helsingin Yliopiston fysiikan laitos kehittävät yhdessä monimutkaista ilmastomallia. Jannen pitää siirtää ilmastomalliin liittyvää dataa 1,9 teratavua (TB) Otaniemestä Kumpulaan. Jannella on käytettävissä vain 12 kpl 32 GB:n muistitikkua ja polkupyörä. Matkaa on 10 km, mutta onneksi on kesäkuu ja ilmat ovat suotuisat. Toinen vaihtoehto on datayhteys Otaniemen ja Kumpulan välillä.

A. Kuinka nopea datayhteyden tulee vähintään olla, jotta koko datamäärän siirto tapahtuisi nopeammin datayhteydellä kuin polkupyörällä?

B. Entä kuinka nopea datayhteyden pitää olla, jotta se olisi nopeampi kuin tiedon siirtäminen kahdella yhden teratavun kovalevyllä ja autolla?

Ratkaisu

Tässä täytyy tehdä monenlaisia arvioita ja oletuksia ennen kuin päästään varsinaiseen laskelmaan. Ensiksikin muistitikuille kirjoittaminen ja lukeminen vievät aikaa. Jos oletetaan että kirjoitusnopeus on 80 Mbit/s ja lukunopeus 200 Mbit/s niin, 32 GB:n kirjoittamiseen ja lukemiseen

menee yhteensä noin 75 minuuttia.<sup>44</sup> Oletetaan nyt optimistisesti, että kaikkia 12 tikkua voidaan ensin lukea datakeskuksen muistista ja sitten kirjoittaa toisen datakeskuksen muistiin rinnakkain. Sitten jos pyörällä ajamiseen kuluu suuntaansa 35 minuuttia ja vielä 15 minuuttia muuhun tikkujen kanssa pelaamiseen molemmissa päissä, niin optimistisesti arvioiden yhteen kierrokseen menisi yhteensä 175 minuuttia. Kierroksia tarvitaan yhteensä  $5 = 1900/32/12$ . Viimeinen 35 minuuttia takaisinpäin voidaan kuitenkin vähentää kokonaisajasta, koska tehtävä on sitä ennen saatu loppuun. Aikaa kuluu siten yhteensä  $5 \cdot 175 - 35$  minuuttia eli 14 tuntia. Aikaa menee, mutta tuleepahan myös kuntoiltua 100 km:n verran.

Mitä tämä vastaa sitten siirtonopeutena? Kokonaisdatamäärä on 1,9 TB eli  $1,9 \cdot 10^{13}$  bittiä.<sup>45</sup> Vastaavasti 14 tuntia tarkoittaa 50 400 sekuntia. Nopeudeksi saadaan siten noin 302 Mbit/s. Tämä on varsin suuri nopeus, mutta se on hyvinkin saatavissa kahden yliopiston datakeskusten välille.

Kovalevyillä aika menee kirjoittamiseen ja lukemiseen. Jos nopeuksiksi oletetaan 280 Mbit/s lukemiselle ja 200 Mbit/s kirjoittamiselle, niin molemmat operaatiot vievät yhdellä kovalevyllä noin 19 tuntia! Jos kovalevyjäkin voidaan kirjoittaa ja lukea rinnakkain, niin koko toimenpiteeseen matkoineen menee ehkä 20 tuntia. Siitä saadaan keskimääräiseksi nopeudeksi 211 Mbit/s.

#### Opetus

Käytännössä muistitikkujen kanssa pelaaminen varmaan veisi enemmän aikaa; silti sen tehollinen tiedonsiirtonopeus on varsin suuri tällaisella matkalla riippumatta siitä ajaako pyörällä vai autolla. Pullonkaulaksi muodostuu lähinnä muistiin tallentaminen, joka on suhteellisen hidasta helposti siirrettävillä muistiyksiköillä. Jos data on siirrettävillä kovalevyillä valmiina, päästään niitä siirtämällä helposti hyvin suurin tehollisiin siirtonopeuksiin.

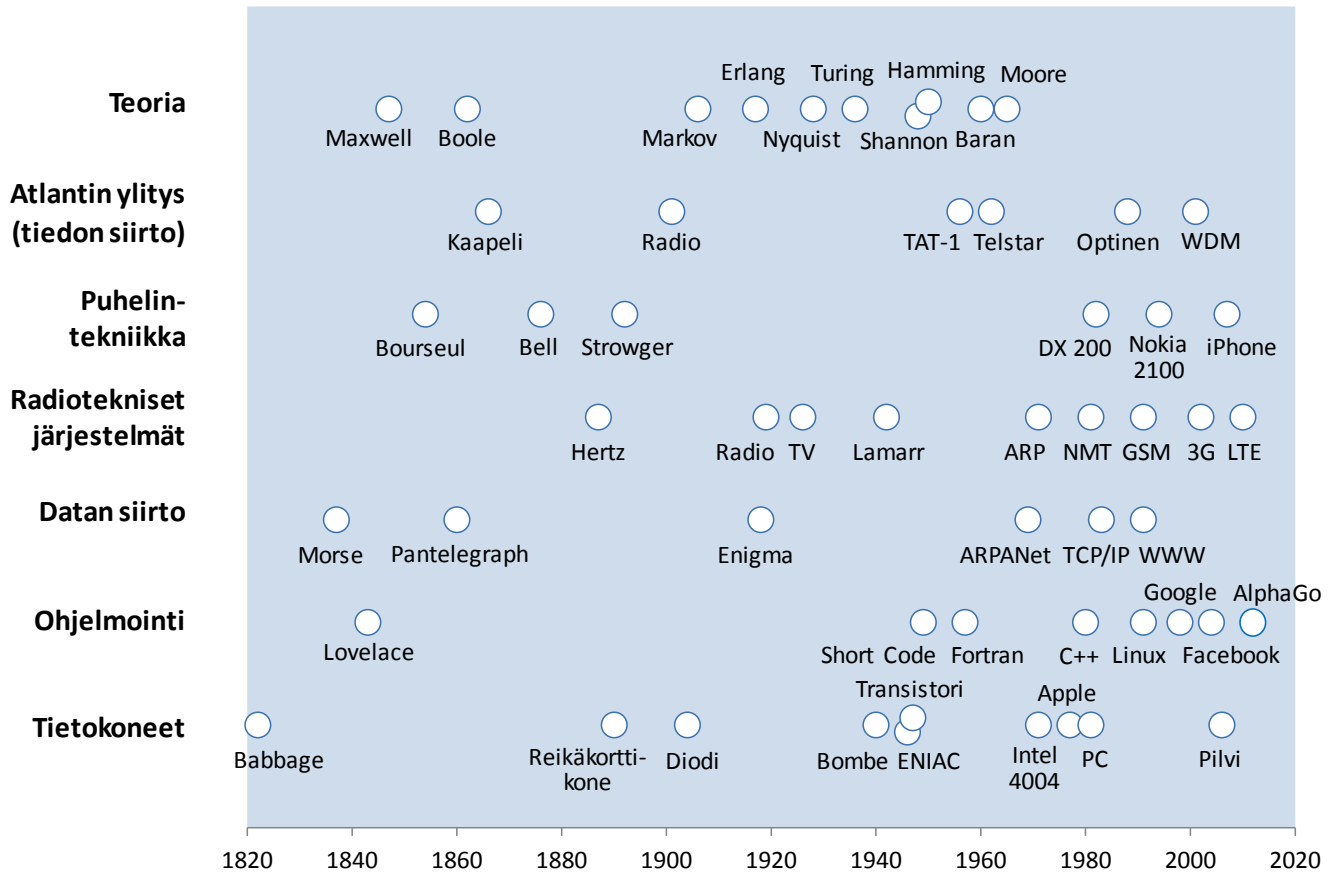
## Informaatioteknologian historiaa

Seuraavassa on listattu informaatiotekniikan kehityksen merkkitapahtumia viimeisen 200 vuoden aikana. Tapahtumat on esitetty kuvassa 1.7 jaoteltuna seitsemään osa-alueeseen: teoriat, tiedonsiirto Atlantin yli, puhelintekniikka, radiotekniikkaan perustuvat järjestelmät, datan siirto, ohjelmointi ja tietokoneet.

---

<sup>44</sup> Nopeuksien arviointiin on käytetty sivustoa <http://usbspeed.nirsoft.net/>. Huomaa, että sivustolla käytetään nopeuden yksikkönä MB/s eli megatavua sekunnissa. Olkaa tarkkana b:n ja B:n suhteen!

<sup>45</sup> Tässä oletetaan että teratavut on ilmoitettu kymmenjärjestelmän mukaan, katso esim. [http://fi.wikipedia.org/wiki/Tavu\\_%28tietotekniikka%29](http://fi.wikipedia.org/wiki/Tavu_%28tietotekniikka%29). Lisäksi pitää aina muistaa että tavu on 8 bittiä.



**Kuva 1.7.** Informaatioteknologian kohokohtia kahden vuosisadan ajalta.

Joissakin tapauksissa kehitys on ollut nopeaa, mutta toisaalta joissakin tapauksissa voidaan jälkikäteen ihmetellä kehityksen hitauttakin:

- Siitä kun Hertz osoitti, että radioaallot siirtyvät valon nopeudella paikasta toiseen, kesti sata vuotta ennen kuin tavalliset ihmiset pystyivät laajassa mitassa hyödyntämään ilmiötä henkilökohtaisiin tarpeisiinsa.<sup>46</sup>
- Siitä kun Morse kehitti sähköisen lennättimen, kesti 120 vuotta ennen kuin data-siirron nopeudet alkoivat merkittävästi nousta.
- Siitä kun lennätin saatiin toimimaan Atlantin poikki, kesti 90 vuotta ennen kuin kaapeleiden kautta voitiin tarjota puhelinpalveluita.<sup>47</sup>

Monella alueella kehitys lähti vauhtiin vasta toisen maailmansodan jälkeen, usein suurten sotilaallisten kehitysprojektien vauhdittamana. Viimeisen kahdenkymmenen viiden vuoden aikana kehitys on ollut huimaa. Nokia 1011 vuodelta 1992 painoi lähes puoli kiloa ja

<sup>46</sup> Hertzin kokeista meni yleisradiolähetysten alkuun 32 vuotta, joka on varsin tarkkaan sama aika, joka meni pakettikytkentäisten verkkojen alusta Internetin kaupalliseen käyttöön.

<sup>47</sup> Radioteitse oli tarjolla hyvin kallis puheyhteys Atlantin yli vuodesta 1926.

sillä saattoi jopa lähettää tekstiviestejä.<sup>48</sup> Hinta oli 8250 mk, joka vastaa nykyrahassa noin 2000 euroa. Nyt vuonna 2017 vastaavalla rahalla saa vaikkapa sekä älypuhelimien että taulutietokoneen ja vielä jää rahaa muihin hankintoihin.

Tässä vielä kronologinen katsaus keskeisiin tapahtumiin:

- 1822 Babbage: Charles Babbage esitteli suunnitelman differenssikoneesta, jolla olisi voinut taulukoida polynomifunktioita. Toteutusta ei saatu Babbagen aikaan valmiiksi, mutta toisen version suunnitelman perusteella v. 1991 rakennettu kone osoittautui täysin toimivaksi.
- 1837 Morse: Samuel Morse esitteli sähköisen lennättimen v. 1837 ja seuraavana vuonna järjestelmän, joka nimettiin morseaakkosiksi.
- 1843 Lovelace: Ada Lovelace julkaisi kirjoituksen ”Notes”, jossa hän kuvaa ohjelmoitavan, yleiskäyttöisen tietokoneen keskeiset periaatteet.
- 1847 Boole: George Boole julkaisi kirjan *The Mathematical Analysis of Logic*, jossa hän esitteli Boolean algebran, joka on myös binäärisen tietojenkäsittelyn perusta.
- 1854 Bourseul: Ranskalainen Charles Bourseul esitti lehtikirjoituksessaan ajatuksen puhelimen periaatteesta, mutta ei pystynyt itse rakentamaan toimivaa puhelinta.
- 1860 Pantelegraph: Ensimmäinen pantelegraph-kuva lähetettiin Pariisista Amiensiin marraskuussa 1860. Pantelegraph oli Giovanni Casellin kehittämä varhainen telekopiolaite (faksi), jolla voitiin siirtää piirroskuvia ja kirjoitusta lennätinlinjan yli.
- 1862 Maxwell: James Clerk Maxwell kehitti Maxwellin yhtälöt, jotka kuvaavat sähköisten ja magneettisten kenttien käyttäytymistä ja niiden vuorovaikutusta.
- 1866 Kaapeli: Ensimmäinen toimiva lennätinkaapeliyhteys Atlantin yli.
- 1876 Bell: Alexander Graham Bell patentoi ensimmäisen toimivan puhelimen. Vastaavan tyyppinen puhelin oli tosin esitelty jo vuonna 1860.
- 1887 Hertz: Heinrich Hertz osoitti kokeellisesti, että radioaaltoja voidaan lähettää ja vastaanottaa ja että radioaallot etenevät valon nopeudella.

---

<sup>48</sup> <http://mobilenewspedia.com/20-years-ago-launched-the-first-gsm-phone-the-nokia-1011/>

- 1890 Reikäkorttikone: Herman Hollerith kehitti reikäkorttikoneen eli korttistojen käsittelyä helpottavan sähkömekaanisen laitteen USA:n vuoden 1890 väestölaskentaa varten.
- 1892 Strowger: Ensimmäinen automaattinen, Almon Strowgerin kehittämä ja patentoima puhelinkeskus otettiin käyttöön Yhdysvalloissa.
- 1902 Marconi: Guglielmo Marconi onnistui vastaanottamaan ensimmäinen Atlantin yli lähetetyn varmennetun radiosignaalin.
- 1904 Diodi: Sir John Ambrose Fleming kehitti vuonna 1904 tyhjiöputkeen perustuvan diodin.
- 1906 Markov: Andrei Markov julkaisi artikkelin, jossa hän esittää jonoteorian kanalta olennaisen Markovin ketjun periaatteet.
- 1917 Erlang: A. K. Erlangin kirjoittama artikkeli julkaistiin Electroteknikerenlehdessä. Erlangin kaavalla voidaan laskea puhelujen estymisen todennäköisyys, kun tunnetaan tarjottu liikenne ja johtojen määrä.
- 1918 Enigma: Saksalainen insinööri Arthur Scherbius haki patenttia salauslaitteelle, joka koostui mekaanisesti pyörivistä salauskiekoista ja sähköisestä osasta, jolla varsinainen salaus tapahtui.
- 1919 Radio: Ensimmäiset säännölliset radiolähetykset aloitettiin Haagissa marraskuussa 1919.
- 1926 TV: Ensimmäinen TV-esitykseksi luokiteltava demonstraatio järjestettiin Lontoossa tammikuussa 1926.
- 1928 Nyquist: Harry Nyquist esitti teoreeman, että signaalista tulee ottaa näytteitä taajuudella, joka on vähintään kaksinkertainen signaalin suurimpaan taajuuteen verrattuna.
- 1936 Turing: Alan Turing kehitti teoreettisen mallin yleispätevälle tietokoneelle.
- 1940 Bombe: Englantilaiset saivat purettua sähkömekaanisella Bombe-laitteella Saksan ilmavoimien Enigma-viestejä.
- 1942 Lamarr: Hedy Lamarr kehitti George Antheilin kanssa taajuushyppelyyn perustuvan hajaspektritekniikan, joka on perusta nykyisille mobiiliradiotekniikoille kuten CDMA:lle.
- 1946 ENIAC: Ensimmäinen elektroninen yleiskäyttöinen tietokone saatiin toimintakuntoon. Sitä käytettiin pääasiassa sotilaallisiin sovelluksiin kuten ballistisiin laskutoimituksiin.



- 1947 Transistori: Walter Brattain ja John Bardeen kehittivät ensimmäisen transistopin Bellin laboratoriossa.
- 1948 Shannon: Claude Shannon julkaisi artikkelin *A Mathematical Theory of Communication*, joka loi perustan informaatioteorialle.
- 1949 Short Code: John Mauchlyn *Short Code* vuodelta 1949 oli ensimmäisiä (suhteellisen) korkean tason ohjelmointikielistä. Ohjelma piti kuitenkin kääntää joka kerta sitä ajettaessa, joten se oli huomattavasti hitaampi kuin konekieli.
- 1950 Hamming: Richard Hamming julkaisi artikkelin *Error detecting and error correcting codes*, *Bell System technical journal* –lehdessä 2/1950.
- 1956 TAT-1: Ensimmäinen puhelinliikennettä välittävä Atlantin alittava kaapeli. Alkuvaiheessa kapasiteetti oli 36 kappaletta 4 kHz puhelinyhteyttä.
- 1957 Fortran: Ensimmäinen FORTRAN-kääntäjä ja sen myötä ensimmäinen FORTRAN-versio ilmestyi huhtikuussa 1957.
- 1960 Baran: Paul Baran alkoi vuonna 1960 julkaista kirjoituksia, joissa esitettiin keskeisimmät periaatteet, joiden pohjalta Internet myöhemmin suunniteltiin.
- 1962 Telstar: Telstar 1 satelliitti laukaistiin kiertoradalleen heinäkuussa 1962. Sillä välitettiin mm. suoraa televisiokuvaa Yhdysvalloista Ranskaan, mutta se säilyi toimintakykyisenä vain kaksi kuukautta.
- 1965 Moore: Gordon Moore esitti arvionsa, että integroitujen piirien kapasiteetti (mitattuna transistorien määrällä) kaksinkertaistuu kahdessa vuodessa.
- 1969 ARPANET: Ensimmäinen sanoma ARPANET-verkossa lähetettiin lokakuussa 1969 UCLA:sta Stanfordin yliopistoon.<sup>49</sup>
- 1971 ARP: Suomen ensimmäinen kaupallisesti toiminut matkapuhelinverkko (Autoradiopuhelin, ARP) aloitti toimintansa. Taajuusalue oli 150 MHz, joten yksittäisen tukiaseman kuuluvuusalue oli suuri.
- 1971 Intel 4004: Intel julkaisi ensimmäisen mikroprosessorinsa. Tärkeimmät ominaisuudet: 4-bittinen, 2300 transistoria, suurin kellotaajuus 740 kHz ja 46 käskyä.

---

<sup>49</sup> UCLA (University of California, Los Angeles) ja Stanford ovat yliopistoja Kalifornian osavaltiossa, Stanford sijaitsee lähellä San Franciscoa.

- 1977 Apple: Apple toi markkinoille ensimmäisen kuluttajille suunnitellun mikrotietokoneensa, Apple II:n.
- 1980 C++: Bjarne Stroustrup kehitti C++:n C-kielestä lisäämällä siihen muun muassa olio-ohjelmointiin liittyviä ominaisuuksia. Suurin osa käyttäjärjestelmistä perustuu C++ kieleen.
- 1981 NMT: Yhteispohjoismainen radiopuhelinverkko aloitti toimintansa loka-kuussa 1981, Suomessa seuraavana vuonna. Alussa taajuusalue oli 450 MHz ja myöhemmin myös 900 MHz.
- 1981 IBM PC: IBM toi markkinoille henkilökohtaisen tietokoneen, josta tuli vallitseva mikrotietokoneiden arkkitehtuuri lähes kaikissa muissa paitsi Applen laitteissa ja pelikäyttöön tarkoitetuissa kotitietokoneissa.
- 1982 DX 200: Ensimmäinenyleiskäyttöisiin mikroprosessoreihin perustuva, digitaalinen DX 200 puhelinkeskus otettiin käyttöön Kokkolassa.
- 1983 TCP/IP: ARPANET siirtyi TCP/IP:n käyttöön vuoden 1983 alussa.
- 1988 Optinen: Ensimmäinen Atlantin alittava optinen kaapeli otettiin käyttöön. Kaapelin kapasiteetti oli 2 kertaa 280 Mbit/s.
- 1991 GSM: Ensimmäinen GSM-puhelu kaupallisessa verkossa käytiin heinäkuussa 1991 kun Harri Holkeri soitti puhelun Radiolinjan verkossa.
- 1991 WWW: Tim Berners-Lee postitti yhteenvedon [World Wide Web](#) (WWW) -projektista elokuussa 1991. Tämän jälkeen WWW oli julkisesti käytettävissä oleva palvelu Internetin yli.
- 1991 Linux: Linus Torvalds julkaisi ensimmäisen version Linuxista Usenetin kautta.
- 1994 Nokia 2100: Nokian ensimmäinen kansainvälinen menestys matkapuhelimissa. 2100-sarjan puhelinten myyntitavoite oli 400 000, niitä myytiin yhteensä 20 miljoonaa.
- 1998 Google: Larry Page ja Sergei Brin perustivat Google-yhtiön vuonna 1998. Yhtiö listautui pörssiin vuonna 2004.<sup>50</sup>
- 2001 WDM: TAT-14 kaapelissa käytettiin aallonpituusmultipleksointia (WDM), joka mahdollisti 160 Gbit/s kapasiteetin yhdellä kuidulla ja 640 Gbit/s kapasiteetin koko kaapelilla.

---

<sup>50</sup> Altavista-hakupalvelu oli julkistettu jo vuonna 1995. Tämä on oiva esimerkki siitä, miten ensimmäinen markkinoille ehtinyt ei välttämättä pysty pitämään dominoivaa asemaansa uuden haastajan paineessa.

- 2002 3G: Ensimmäiset 3. sukupolven (3G) matkapuhelinpalvelut otettiin käyttöön Etelä-Koreassa vuonna 2002. Tosin jo edellisenä vuonna oli rakennettu toimivia 3G-verkkoja, mutta 3G puhelimia ei ollut tällöin vielä kaupallisesti saatavilla.
- 2004 Facebook: Facebook perustettiin vuonna 2004 ja se listautui pörssiin 2012.<sup>51</sup>
- 2006 Pilvi: Amazon aloitti ensimmäisenä pilvilaskentapalvelun (cloud computing) tarjoamisen.
- 2007 iPhone: Apple esitteli iPhone-puhelimen, joka muutamassa vuodessa muutti matkapuhelimien markkinat. Muutos merkitsi Nokian puhelimen valtakauden loppua, joka oli alkanut vuonna 1994 Nokia 2100 -puhelimien myötä.
- 2010 LTE: Ensimmäiset kattavat LTE (Long Term Evolution) palvelut aloitettiin Yhdysvalloissa vuonna 2010. Vaikka LTE:tä markkinoidaan 4G:nä, teknisesti se on edistynyt 3G-teknologia, joka parantaa erityisesti Internet-yhteyden laatua.
- 2016 AlphaGo: Google AlphaGo voitti Go-pelissä maailman parhaan pelaajan Lee Sedolin viiden ottelun sarjassa 4-1.

Entä mikä Suomen osuus informaatioalan kehityksessä on ollut? Nokian puhelimet (aikanaan) ja Linux ovat varmaan olleet kansainvälisesti tunnetuimmat saavutuksemme, unohtamatta peliteollisuuden tuotteita.<sup>52</sup>

## Ennustamisen sietämätön vaikeus

Edellä on kuvattu tietoliikenteen ja tietotekniikan historiaa. Entä mitä voimme sanoa informaatioteknologian kehityksestä seuraavien vuosien ja vuosikymmenien mittaan? Kysymyksen voi jakaa useampaan alakysymykseen: 1) Miten tiedonvälitykseen ja tiedonkäyttöön käytettävien laitteiden suorituskyky kasvaa? 2) Miten informaatiotekniset järjestelmät muuttuvat? 3) Miten tietotekniset palvelut ja niihin liittyvä liiketoiminta muuttuvat? 4) Miten tekniikan ja palveluiden muutokset vaikuttavat ihmisten elämään ja yhteiskuntaan? Nämä ovat isoja kysymyksiä, varsinkin käsiteltäviksi peruskurssilla. Kaikkia näitä ainakin sivutaan myöhemmissä osioissa, ja ainahan on mahdollista pohtia asioita myös itsenäisesti.

---

<sup>51</sup> <http://www.theverge.com/a/new-devils-dictionary#facebook>

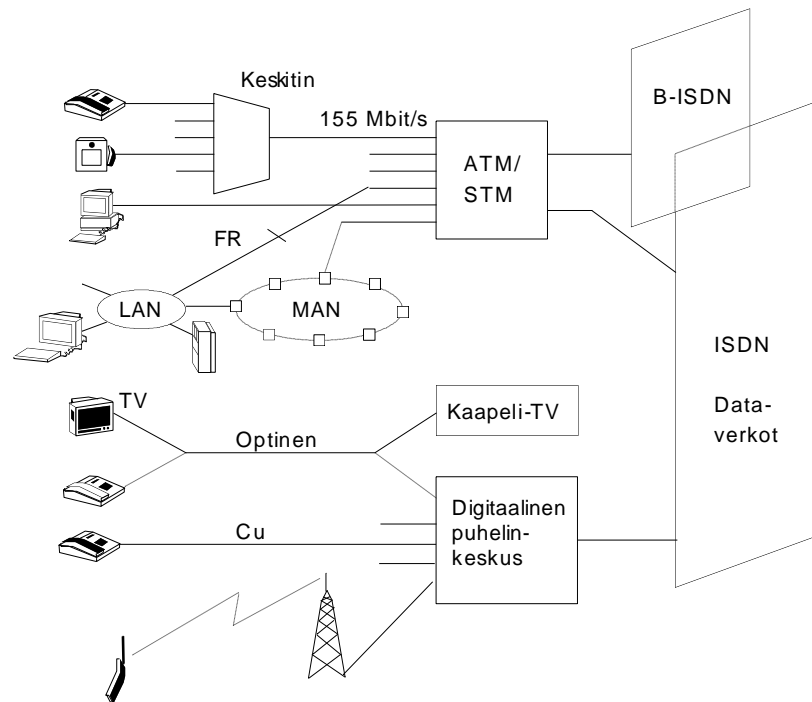
<sup>52</sup> Hyvä yhteenveto koskien viimeistä kahtakymmentä vuotta on Suomen Digitalisoinnin Historia 1995–2015, erityisesti Yrjö Neuvon artikkeli ”Maailmankartalle osaamisella, tekemisellä ja innostuksella” ja Matti Rossin artikkeli ”Suomalainen menestysinfra.” <http://suomidigi.fi/#articles>

Tekniikalla on ollut taipumus kehittyä jatkuvasti ainakin viimeiset viisisataa vuotta. Informaatioteknologian osalta muutokset ovat joillakin aloilla olleet nopeita ja jopa hyp-päyksenomaista, kun taas joillakin lähinnä määrällisiä (eli kvantitatiivista). Joskus tapahtuu suoranaisia teknisen sukupolven muutoksia. Sukupolven voidaan sanoa vaihtuvan silloin 1) kun laitteiden ja järjestelmien suunnitteluun ja operointiin tarvittava tietotaito muuttuu olennaisesti, 2) kun eri sukupolvien järjestelmien yhteensovittamista varten tarvitaan erityisiä laitteita ja järjestelmiä ja 3) kun järjestelmän mahdollistamat ominaisuudet ja palvelut muuttuvat olennaisesti. Esimerkiksi muutos analogisesta digitaaliseen merkitsee kaikkia näitä; muutos tapahtui ensin kiinteän verkon puolella ja sitten matkapuhelinverkoissa. Se, miten Internetissä käytetty IP-teknologia on korvannut aikaisemmat tiedonvälitysteknologiat, on toinen tyypillinen esimerkki sukupolvimuutoksesta.

Vaikka teknisten komponenttien kehittymistä voidaan melko luotettavasti ennustaa, järjestelmätasolla ennustaminen on vaikeampaa. Oikeastaan ainoa lähes varma ennuste on, että järjestelmissä tapahtuu olennaisia teknisiä muutoksia vähintään muutaman vuosikymmenen välein. Se mikä on vaikeaa, on ennustaa mikä seuraava järjestelmä tulee olemaan, esimerkkinä kuva 1.8. Siinä on esitetty vuoden 1995 näkemys televerkkojen rakenteesta 90-luvun lopulla. Kuva on otettu tätä kurssia vastaavan kurssin oppimateriaalista, seuraavin arvioin (suora lainaus):

Verkkotasolla kapeakaistaiset palvelut (puhelinverkko, ISDN ja dataverkot) ovat hallitsevia ja erilaisten matkaviestimien osuus tilaajaliitännöistä tulee olemaan erittäin merkittävä. Laajakaistaisen ISDN:n kattavuus on rajoitettu ja se käyttää pääosin samoja siirto-järjestelmiä kuin kapeakaistainen ISDN. Suurin osa keskuksista on kapeakaistaiseen ISDN:ään tarkoitettuja, mutta osassa keskuksista tarjotaan myös laajakaistaista ATM-välitystekniikkaa.

Kotitilaajat liitetään ISDN-keskuksiin ja vain poikkeustapauksissa tarvitaan laajakaistaisia palveluja, jolloin liitännä voi tapahtua ATM-keskukseen. TV-kuvan jakelu kotitilaille perustuu, yleisradiolähetysten lisäksi, pääosin erillisiin kaapeli-TV-verkkoihin. Kaapeli-TV ja kytkentäiset palvelut saattavat kuitenkin käyttää yhteisiä optisia tilaajajoh-toja.



**Kuva 1.8.** Ennuste vuodelta 1995 (alkuperäinen kuva ilman muutoksia): ”Televerkon rakenne 90-luvun lopulla”. Lyhenteet: ATM = *Asynchronous Transfer Mode*, B-ISDN = *Broadband ISDN*, ISDN = *Integrated Services Digital Network*, STM = *Synchronous Transfer Mode*, FR = *Frame Relay*, LAN = *Local Area Network*, MAN = *Metropolitan Area Network*, Cu = kupari.

Kuva 1.8 edusti aikansa vallitsevaa käsitystä siitä mihin verkot olivat menossa. Näkemys vastasi perinteisten puhelinoperaattoreiden ja tärkeimpien telealan laitevalmistajien uskomuksia ja tavoitteita. Huomaa myös, että kuva sisältää vain laatikoita ei pilviä, kuten nykyisin on tapana! Jos vastaavan kuvan olisi tehnyt eri taustan omaava henkilö, vaikka Internetin kehittämisessä aktiivisesti mukana ollut, kuvasta olisi tullut erilainen.<sup>53</sup> Nyt kuvassa Internet ei ole edes näkyvässä – tai ehkä se oli piilossa ”Dataverkot” -termin takana. Arvio matkaviestimistä oli sentään oikean suuntainen, mutta kovin varovainen.

Sama ongelma koskee myös nykyisiä ennusteita: suunnan voi nähdä ehkä muutama vuosi eteenpäin, mutta luotettavasti ei kovin paljon pidemmälle. Suurimmatkin toimijat erehtyvät joskus pahasti, kun kehitystä pitäisi arvioida muutamaa vuotta pidemmälle (Nokian matkapuhelintoiminta Suomen kannalta varoittavana esimerkkinä).

TKK:n heikkovirtatekniikan professori Jaarli Jauhiainen onnistui ennustamisessa paremmin, sillä hän esitti vuonna 1958 luennollaan ”meidän tulee asettaa tavoitteeksi, että vuonna 1970 jokaisessa suomalaisessa kodissa on puhelin ja vuosituhannen vaihteessa jokainen suomalainen voi käyttää puhelinta ajasta, paikasta ja elintasosta riippumatta.”<sup>54</sup>

<sup>53</sup> Osallistuin Internetin DiffServ-liikenteen hallinnan kehittämiseen vuosina 1997 – 2001. Näkemykseni verkoista ja niiden kehittämisestä muuttui tuona aikana oleellisesti.

<sup>54</sup> A. Parviala (toim.), *Jaarli Jauhiainen puhelinalan näkijä ja tekijä*, 2000 (myös kirjassa M. Sandelin, J. Partanen, *Nokian jalokivi Tarina suomalaisesta DX 200 puhelinkeskuksesta*, 2015).

Tavoite toteutui hämmästyttävän tarkasti. Tähän voidaan soveltaa Alan Kayn lausumaa: ”The best way to predict the future is to invent it.”<sup>55</sup> Toisen tunnetun lausuman mukaan meillä on taipumus yliarvioida muutoksia ja niiden vaikutuksia lyhyellä aikavälillä (esimerkiksi vuosi tai pari) mutta aliarvioida muutosten vaikutusta pitkällä aikavälillä (esimerkiksi kymmenen tai kaksikymmentä vuotta).

Ennustaminen on vaikeaa silloinkin kun tietoa on käytettävissä ja kokemusta alasta pitkältä ajalta.<sup>56</sup> Mikä informaatioteknologian tilanne on vuonna 2050, jää uuden sukupolven kehitettäväksi. Monessa suhteessa tapahtuu varmasti muutoksia, joita nyt emme osaa ennustaa. Voidaan toki olettaa, että tietojenkäsittelykapasiteetti kasvaa edelleen huimasti. Vaikeampaa on ennustaa, miten teknologiset muutokset vaikuttavat jokapäiväiseen elämään. Lisäksi jopa insinöörien on hyvä pitää mielessä, että teknologian historia on täynnä negatiivisia vaikutuksia ja rikottuja lupauksia.<sup>57</sup> Esimerkiksi erään USA:ssa vuonna 2013 tehdyn tutkimuksen mukaan 54 prosenttia vastaajista oli yrittänyt vähentää teknologisten välineiden osuutta ja suosia enemmän suoraa henkilökohtaista kanssakäymistä.<sup>58</sup> Kaikki alalla toimivat insinöörit ovat omalta osaltaan vastuussa siitä, että kehitettävä teknologia palvelee ihmisten oikeita tarpeita.

---

<sup>55</sup> Vuodelta 1971, katso esim. <http://www.smalltalk.org/alankay.html>

<sup>56</sup> Katso myös Andrew Odlyzkon lyhyt mutta valaiseva artikkeli: Technology predictions: Intelligence and brute force, *ON Magazine*, No. 4, 2009, <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/intelligence.brute.force.txt>. Yleisemmin ennustamisen vaikeudesta: <https://www.cbinsights.com/blog/big-compay-ceos-execs-disruption-quotes/> tai B. Evansin Asking the wrong questions [http://ben-evans.com/benedictevans/2017/01/11/wrongquestions?utm\\_content=buffer281c4&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](http://ben-evans.com/benedictevans/2017/01/11/wrongquestions?utm_content=buffer281c4&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer) ja I. Pestov: Worst Tech Predictions Of The Past 100 years, <https://medium.com/@ipestov/worst-tech-predictions-of-the-past-100-years-c18654211375#.lg1k50o5m>

<sup>57</sup> Katso esimerkiksi K. Albrecht: The Information’s Broken Promises, *The Futurist*, March-April, 2014, <http://www.karlalbrecht.com/downloads/Albrecht-IR-BrokenPromises-WorldFutureSociety.pdf>

<sup>58</sup> Americans Spend 23 Hours Per Week Online, Texting, *BusinessNewsDaily*, July 02, 2013, <http://www.businessnewsdaily.com/4718-weekly-online-social-media-time.html>

## 2. Tietoliikennealan liiketoiminta

Insinöörin kannalta tietoliikenne on ensisijaisesti tekniikkaa, jota pyritään kehittämään entistä suorituskykyisemmäksi, eli karkeasti ottaen saamaan enemmän bittejä paikasta toiseen. Tietoliikenne on myös merkittävä liiketoiminnan väline. Ihmiset ovat aina halunneet kommunikoida toistensa kanssa pitkienkin matkojen päästä, ensin kirjeitse, sitten puhelimella, reilut sata vuotta myöhemmin sähköpostilla ja tekstiviestillä ja nyt lopulta erilaisten sosiaalisen median sovellusten kautta. Henkilökohtainen viestintä on aina ollut ihmisille tärkeämpää kuin muiden tuottama sisältö kuten kirja, lehdet, elokuvat ja musiikki. Tämä päti jo kirjeiden aikaan ja on ollut erityisen selkeää puheluiden tapauksessa verrattuna mihin tahansa tuotettuun sisältöön.<sup>59</sup> Tarve on merkittävä ja sen tyydyttäminen on tuottanut suuria voittoja palvelun tarjoajalle varsinkin silloin, kun yksi toimija on päässyt hallitsevaan asemaan.

Jotta näihin tavoitteisiin päästäisiin eli käyttäjät saisivat kommunikoida tehokkaasti ja yritykset saisivat liikevoittonsa, tarvitaan monenlaisia toimijoita. Jonkun yrityksen (valmistaja, **vendor**) täytyy valmistaa päätelaitteet (**end device**) sekä verkossa tarvittavat laitteet (**network equipment**), jonkun (verkko-operaattori, **network operator**) täytyy rakentaa ja ylläpitää verkkoja ja jonkun (palveluntarjoaja, **service provider**) täytyy tarjota palveluita käyttäjille (**user**) ja asiakkaille (**customer**). Lisäksi yhteisön kannalta tärkeitä tehtäviä hoitavat tutkimuslaitokset sekä yhteiskunnan etua valvovat ja säätelevät organisaatiot (**regulator**). Eri toimijoiden väliset suhteet muodostavat monimutkaisen verkoston, josta voidaan käyttää termiä kommunikaatioekosysteemi (**communications ecosystem**).

Tämän osion keskeisimmät asiat ovat:

1. Telealan liiketoiminnan kehitys
2. Monopolin vaikutus laatuun ja hintaan
3. Suomen erityisyys telealalla
4. Nokian nousu, lasku ja tulevaisuus
5. Nyky-yhteiskunnan riippuvuus informaatioteknologiasta

Luontaisena mallina liiketoiminnan tapauksessa on palveluiden kysynnän analysointi. Kysynnän mallintaminen liittyy läheisesti myös kilpailun tehokkuuteen ja monopolien vahvuuteen.

---

<sup>59</sup> Tämän asian analyysin klassikko on A. Odlyzkon artikkeli, **Content is not king**, First Monday, 2001, [http://firstmonday.org/issues/issue6\\_2/odlyzko/index.html](http://firstmonday.org/issues/issue6_2/odlyzko/index.html)

## Telealan kehitys kohti kilpailun vapautumista

Moni lukija, opiskelija tai muuten informaatioteknologiasta kiinnostunut, voi ajatella, että olennaista ovat tosiasiat eli se, miten asiat juuri nyt ovat, ei se, miten johonkin tilanteeseen on päädytty. Varsinaisen teknologian osalta tämä lähestymistapa on ehkä perusteltavissa, mutta liiketoiminnan osalta vähintään kohtuullinen historiatuntemus on välttämätöntä.<sup>60</sup> Se miten asiat nyt ovat, eli tässä tapauksessa miten informaatioalan liiketoiminta on järjestynyt, on pitkän historian tulosta ja siitä riippuva. Asiat, siis alan toimijoiden väliset suhteet, voisivat olla toisinkin, jos ala olisi kehittynyt eri tavalla esimerkiksi alan säätelyn osalta. Kuten materiaali pyrkii osoittamaan, historia näyttää vaikuttavan todella pitkän ajan; tavat jotka ovat joskus jollain markkinoilla vakiintuneet, pyrkivät säilymään silloinkin, kun teknologia muuttuu.

### *Ensiaskleet*

Ennen puhelinta ei voida oikeastaan puhua juuri mistään informaatioteknologiaan liittyvästä liiketoiminnasta lukuun ottamatta lennätintä (jota käsitellään tiedonsiirron yhteydessä), jonka merkitys tavallisen kansalaisen kannalta oli hyvin pieni. Posti oli tosin toiminut Suomessakin jo 1600-luvulta asti, mutta senkin käyttö rajoittui valtion hallintoon ja varakkaimpaan yhteiskuntaluokkaan. Puhelin muutti tiedonvälityksen liiketoiminnan luonteen aivan olennaisesti. Puhelin oli ensimmäisiä teknisiä laitteita, joita tavallinen kansalainenkin saattoi itse käyttää, myös ilman ymmärrystä siitä mihin laitteen toiminta perustui.

Alexander Graham Bell (1847-1922) patentoi maaliskuussa 1876 ”parannetun lennättimensä,” josta sittemmin ruvettiin käyttämään nimeä **telephone**, puhelin. Bell ei kuitenkaan on ollut ainoa eikä edes ensimmäinen puhelimen periaatteen keksijä. Ranskalainen Charles Bourseul esitti jo vuonna 1854 ajatuksen puhelimen periaatteesta, mutta ei pystynyt rakentamaan toimivaa puhelinta. Italialainen Antonio Meucci onnistui ilmeisesti jo vuonna 1856 rakentamaan toimivan laitteen puheensiirtoon kotinsa sisällä. Vuonna 1870 puheyhteys toimi jo mailin matkalla. Patentointi ei kuitenkaan onnistunut niin hyvin, että Meuccin keksintö olisi estänyt Bellin patenttia (toisinkin olisi voinut käydä). Elisha Gray jätti oman puhelinta koskevan patenttihakemuksensa vain muutama tunti Bellin jälkeen. Bellin tärkein ominaisuus olikin ehkä kyky kaupallistaa keksintönsä ja tehdä siitä erittäin tuottoisaa liiketoimintaa.<sup>61</sup>

---

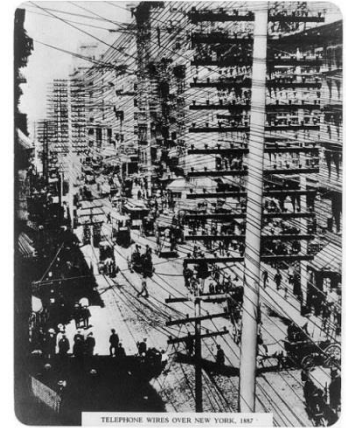
<sup>60</sup> Tästä erosta seuraa myös se, että liiketoiminta on tällä kurssilla ainoa alue, josta tentissä voidaan kysyä historiaan liittyviä asioita.

<sup>61</sup> Ja nyt voimme olla ehkä jopa ylpeitä siitä, että alan keskeinen tutkimusorganisaatio on nimeltään Nokia Bell Labs.



Puhelintoiminta sai kehittyä vapaasti varsinkin Bellin patentin suoja-ajan umpeuduttua vuonna 1894. Ajan kuluessa puhelinliikenteen säätely lailla tuli välttämättömäksi. Yleinen etu vaati puhelinlinjojen vetämistä yksityisen omistamalle maalle, mikä ei onnistunut ilman uutta lainsäädäntöä. Lisäksi asiakkaat vaativat laitteisiin yhdenmukaisempaa tekniikkaa. Villin kilpailun seurauksena eri puhelinyhtiöiden laitteet eivät sopineet yhteen toistensa kanssa, eikä tarvittavaa sopua saatu aikaan ilman viranomaisia.

**Kuva 2.1.** Puhelinjohtoja Manhattanilla 1887.<sup>62</sup>



Vähitellen yhteensopivuusvaatimus asiakkaiden keskuudessa kasvoi ja vuonna 1921 päädyttiin USA:ssa yhden yrityksen (AT&T) monopoliin, ei siis valtion monopoliin kuten lähes kaikkialla muualla maailmassa.<sup>63</sup> Monopolia kuitenkin säädeltiin monin tavoin, mm. sen osalta mitä muita liiketoimintoja AT&T:lle sallittiin. Kun tarkastellaan liittymämääriä suhteessa asukaslukuun, USA:n malli toimi hyvin verrattuna valtiollisiin monopoleihin. Miten yksityisen monopolin vertailu olisi sujunut suhteessa vapaaseen kilpailuun, on hyvin vaikea arvioida, koska kunnollisia vertailukohtia ei tuolta ajalta löydy. Monopoliin pitkä valtakausi tuotti monenlaisia ongelmia, joita on helpompi tarkastella nyt jälkikäteen, kuten tehdäänkin tässä luvussa hieman myöhemmin, kun tarkastellaan palvelujen kysyntää ja tarjontaa.

### *Kilpailun avautuminen*

Telealan säätelyssä ei tapahtunut mitään kovin merkittävää kymmeneen vuosiin. Palvelutarjonnan monipuolistuessa 1960-luvulta alkaen oli enää vaikea perustella, miksi jollekin yritykselle tai organisaatioille pitäisi antaa monopoliasema.<sup>64</sup> Palvelun tasokin oli monessa suhteessa alhainen, sillä käytännössä tilaaja sai puhelinliittymänsä sitten kun asentajilla sattui olemaan aikaa. Puhelinmalleja oli tarjolla muutama väri vaihtoehto. Tarvittaessa valtio saattoi käyttää puhelinmaksuja veroluonteisena tulonlähteenä. Nämä ovat keskeisiä syitä syntyneeseen pyrkimykseen vapauttaa teletoimi ja saada telealan palvelut kilpailun alaiseksi.

<sup>62</sup> Kuva kirjasta F Barrows Colton (1937, s. 399), *The miracle of talking by telephone, photograph Morris Rosenfeld*.

<sup>63</sup> Vaikka silloinenkin tekniikka olisi ehkä mahdollistanut kilpailun, paine monopolien syntymiseen joko luontaisesti ilman sääntelyä tai poliittisten päätösten kautta oli hyvin vahva.

<sup>64</sup> Näin jälkikäteen on helppo sanoa, että mikään valtiollinen monopoli ei olisi kehittänyt vastaavia sosiaalisen median sovelluksia kuin Facebook tai Twitter.

Muutoksen alkupisteen voidaan katsoa ajoittuvan vuoteen 1970, jolloin pieni yhdysvaltalainen MCI-yhtiö alkoi tarjota mikroaaltotekniikkaan perustuvia vuokrajohtoja yksityiseen puhelinkäyttöön Chicagon ja St. Louisin välillä. Kilpailun avautuminen eteni tämän jälkeen oikeusprosessien kautta, joiden avulla AT&T:n monopoli murrettiin. Tärkein päätös tehtiin vuonna 1984, jolloin AT&T:n kaukopuhelintoimi erotettiin omaksi yritykseksi ja samalla paikallispuhelintoimi jaettiin seitsemään itsenäiseen, alueelliseen yhtiöön.

Yhdysvaltojen jälkeen teletoimintaa alettiin vapauttaa myös Euroopan maissa. Edelläkävijä oli Thatcherin Iso-Britannia.<sup>65</sup> Valtionyhtiö British Telecomin (BT) osakkeita myytiin vuodesta 1984 alkaen hyvällä menestyksellä yksityisille ja samalla alan kilpailua pyrittiin muutenkin edistämään. Muut Euroopan maat seurasivat perässä, tosin usein vastahakoisesti. Muun muassa France Telecom yksityistettiin vasta vuoden 1998 alusta.

Erään kansainvälisen tutkimuksen mukaan vapaan telekilpailun maissa kotitalouksien puhelinkulut laskivat vuodesta 1990 vuoteen 1994 yli 3 prosenttia, kun vastaavana aikana monopolimaissa kulut nousivat keskimäärin yli 8 prosenttia. Tämä havainto oli merkittävänä tekijänä käynnistettäessä 1990-luvun puolivälissä telemarkkinoiden vapauttamista ja sitä tietä kilpailua niissä maissa, jotka vielä empivät asiassa. Kilpailun avautuessa kaikki vanhat monopolit joutuivat vähentämään henkilökuntaansa, jopa kymmeniä tuhansia työntekijöitä muutaman vuoden aikana. Osittain tämän johtui informaatioteknologian nopeasta kehitymisestä, joka vähensi verkkojen rakentamiseen ja ylläpitämiseen tarvittavan henkilökunnan määrää olennaisesti, mutta merkittävä osuus johtui myös kilpailun aiheuttamasta paineesta tehostaa toimintaa.

### *Suomen erityisyys*

Suomi on varsin erikoinen maa telealan osalta.<sup>66</sup> Vielä lennättimen aikaan Suomessa edettiin samoin kuin muualla. Sähköisen viestinnän aikakauteen siirryttiin Suomessa kesäkuussa 1855, kun Helsingin ja Pietarin välille avattiin lennätinyhteys. Lennätinverkkoa laajennettiin niin, että vuoteen 1890 mennessä verkko ulottui kaikille tärkeimmille paikkakunnille. Ensimmäisen puhelimen Suomeen toi metallitehtailija Nissinen jouluna 1877 eli puolitoma vuotta Bellin patenttihakemuksen jälkeen.<sup>67</sup> Tämän jälkeen puhelinkojeita ryhtyi rakentamaan ja kauppaamaan useampi yrittäjä ja alalle syntyi nopeasti kilpailua.

Ensimmäiset puhelinlaitokset perustettiin vuonna 1882 Turkuun, Helsinkiin ja Viipuriin. Maa oli tuolloin Suomen suuriruhtinaskunta, eli autonominen osa Venäjää. Suomen senaatti kuitenkin päätti, että puhelintoimintaa koskevat luvat kuuluvat sen

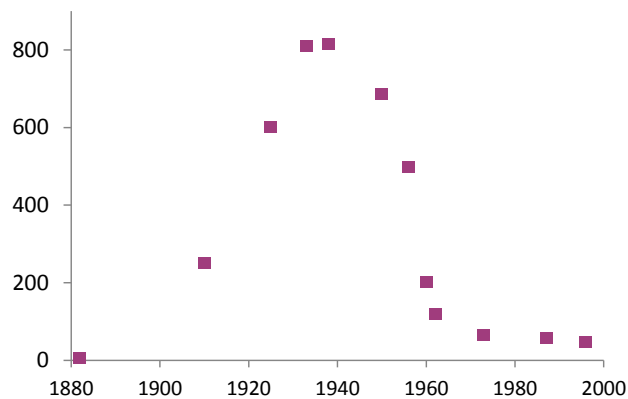
<sup>65</sup> Margaret Thatcher oli Konservatiivipuolueen johtaja ja Britannian pääministeri 1979-90, jona aikana Britanniassa yksityistettiin lukuisia aiemmin valtion hoitamia toimialoja.

<sup>66</sup> Digitaalisen Suomen kehitystä käsitellään artikkeleissa <http://suomidigi.fi/#articles>

<sup>67</sup> Katso esimerkiksi <http://www.kysymuseolta.fi/tekniikanmuseo/#!id=27>

toimialaan ja tämän päätöksen keisari hyväksyi.<sup>68</sup> Senaatin myöntämä toimilupa oli määräaikainen ja maantieteellisesti rajattu. Määräykseen tehtiin myöhemmin valtiota suosiva lisäys, jossa todettiin, ettei Posti- ja lennätinlaitoksen tarvinnut hankkia lupaa.<sup>69</sup> Olennaista myöhemmän kehityksen kannalta oli, että tästä syntyi pysyvä vastakkainasettelu: maassa oli yksi valtiollinen toimija, joka ei tarvinnut toimilupaa ja suuri joukko toimijoita, joiden lupa oli aika ajoin katkolla.

Suomessa ei päädytty telealalla missään vaiheessa valtion monopoliyritykseen (mikä siis oli käytäntö lähes kaikkialla muualla). Enimmillään puhelinlaitoksia oli Suomessa yli 800 kappaletta kuten kuva 2.2 osoittaa. Tekniikan kehittyminen – erityisesti automaattikeskusten tulo televerkkoihin – johti aikaa myöten siihen, että pienten laitosten oli lähes pakko joko fuusioitua naapurikylän puhelinlaitoksen kanssa tai liittyä lähikaupungin suurempaan puhelinlaitokseen.<sup>70</sup>



**Kuva 2.2.** Toimilupalaitosten lukumäärän kehitys Suomessa.<sup>71</sup>

Paikallisten puhelinlaitosten lisäksi tarvittiin yhteyksiä laitosten välille. Ensin yhteyksiä rakennettiin tarpeen mukaan ja myös useita rinnakkain teiden varsille, mutta aina eri puolelle tietä kuin lennätinjohto, joten puhelinjohdot olivat väistämättä lähekkäin. Tästä järjestelystä aiheutui vaikeita ylikuulumisongelmia, joita pyrittiin ratkaisemaan perustamalla oma yhtiö kaukopuhelintoimintaa varten. Lupa myönnettiin vuonna 1894. Etelä-Suomen Kaukopuhelinosakeyhtiö osti vähitellen muiden toimijoiden kaukoyhteyksiä omaan hallintaansa, mutta Itä- ja Pohjois-Suomeen jäi useita itsenäisiä toimijoita. Kaukopuhelinosakeyhtiön toiminta oli hyvin kannattavaa, mutta se ei ollut halukas laajentamaan verkkoaan tai alentamaan hintojaan. Niinpä eduskunta päätti lopulta vuonna 1933 ostaa Etelä-Suomen

<sup>68</sup> Tilastokeskus, Sentraalisantroista kännykkäkansaan - televiestinnän historia Suomessa tilastojen valossa, <http://www.stat.fi/tup/suomi90/syyskuu.html>.

<sup>69</sup> Joidenkin arvioiden mukaan Suomessa teletoimintaa pyrittiin pitämään yksityisenä, jotta Venäjän osuus alan toiminnassa pysyisi mahdollisimman vähäisenä. Suomen itsenäistyessä tilanne tietysti muuttui.

<sup>70</sup> Pienet laitokset olivat todella pieniä: vuonna 1933 puhelimia oli laitoksia kohti keskimäärin 164.

<sup>71</sup> Tiedot vuoteen 1973 asti: Puhelin ja puhelinlaitokset Suomessa 1877-1977 (toim. E. Jutikkala, 1977).

Kaukopuhelinyhtiön valtiolle.<sup>72</sup> Kaukopuhelintoiminnasta tuli valtion monopoli kokonaisuudessaan vasta 1960-luvulla.

Kun telealan kilpailua lähdettiin avaamaan 1980-luvulla, Suomi oli poikkeuksellinen maa, koska täällä oli valmiina kaksi kilpailevaa osapuolta (PLL ja paikalliset puhelinyhtiöt) toisin kuin lähes kaikissa muissa maissa, joissa entisen monopolin kilpailijat joutuivat aloittamaan lähes tyhjästä. Edellytykset todelliselle kilpailutilanteelle telepalveluissa olivat siis Suomessa erityisen hyvät.

Ainakin paikallisten puhelinyhtiöiden mielestä oli kohtuutonta, että yksi osapuoli pystyi tarkastajan ominaisuudessa selvittämään toimilupalaitoksissa jopa niiden strategisia liikesalaisuuksia. Tämä epäkohta poistui vasta vuonna 1988, jolloin telehallinto siirtyi Posti- ja telelaitokselta liikenneministeriölle. Käytännön valvonta tuli silloin perustetun Telehallintokeskuksen (nyttemmin Viestintävirasto) tehtäväksi.

Kuvassa 2.3 on esitelty keskeisimpiä Suomessa toimivia telealan yrityksiä viimeisen 30 vuoden ajalta. Näistä kotimaista alkuperää ovat Elisa (alun perin Helsingin Puhelinyhdistys, HPY), Telia (valtion Posti- ja lennätinlaitoksen manttelinperijä, entinen Telecom Finland ja sittemmin ruotsalaisen Telian kanssa yhdistynyt Sonera) ja Finnetin piiristä alkunsa saanut DNA sekä jäljellä olevat toimilupalaitosten perilliset.

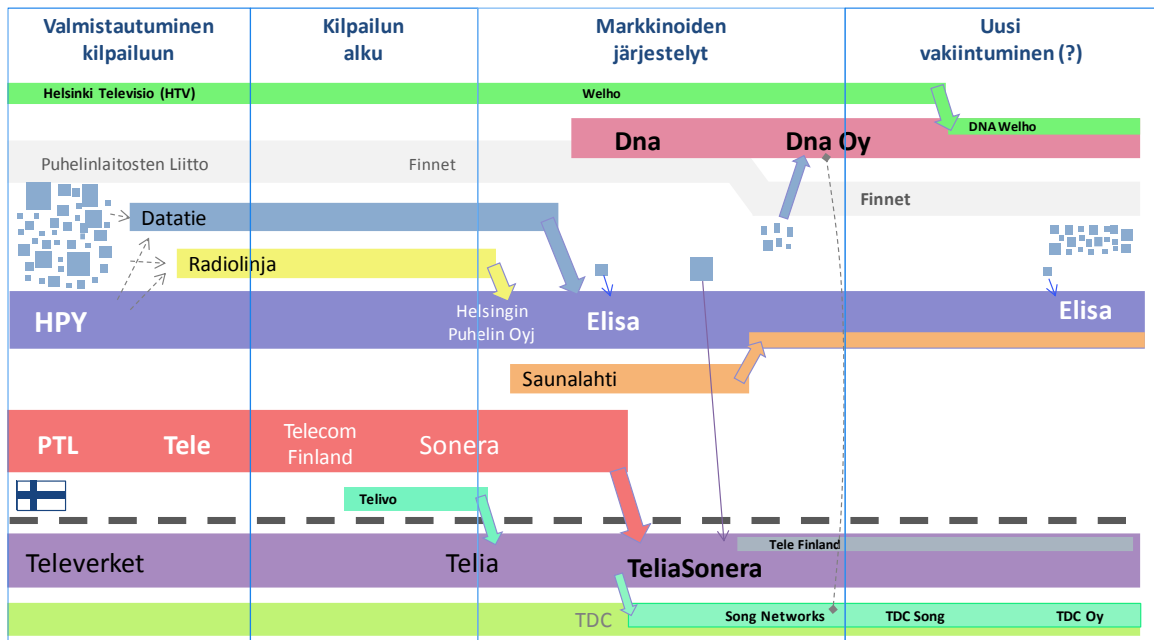
Tässä joitakin keskeisiä muutoskohtia:

- Päätelekauppa vapautui vuonna 1987, kuitenkin myynnissä sai olla ja verkkoon sai liittää edelleen vain tyyppihyväksytyjä laitteita. Sitä ennen kaikki puhelinverkkoon liitetyt laitteet hankki ja omisti puhelinlaitos.
- Ennen vuotta 1988 maanlaajuista datasiirtotoimintaa harjoitti vain Posti- ja telelaitos. Kun kilpailu avautui ja puhelinlaitosten omistama Datatie tuli markkinoille, datasiirron maksut putosivat noin puoleen aikaisemmasta.<sup>73</sup> 1990-luvun aikana datasiirron merkitys kasvoi olennaisesti Internetin myötä.

---

<sup>72</sup> Eduskunnassa oli myös melko laajaa kannatusta ehdotukselle ottaa koko puhelinliiketoiminta valtion haltuun, mikä sinänsä ei olisi ollut poikkeuksellista. Esimerkiksi tuolloin muissa Pohjoismaissa valtio hoiti teletoimintaa.

<sup>73</sup> Kilpailun avaamisesta käytiin kovaa poliittista väänköä; mielenkiintoinen yksityiskohta on, että päätöstä edeltävänä vuonna pääministeriksi nousi Harri Holkeri, joka oli myös Helsingin Puhelinyhdistyksen hallituksen puheenjohtaja.



**Kuva 2.3.** Telealan muutoksia Suomessa vuoden 1985 jälkeen. Siniset laatikot HPY/Elisan yläpuolella kuvaavat itsenäisiä puhelinlaitoksia.

- Matkapuhelinpalveluissa Teellä oli aikaisemmin monopoli-asema NMT-verkoissa<sup>74</sup>, mutta tilanne muuttui ratkaisevasti GSM-tekniikan<sup>75</sup> myötä.<sup>76</sup> Puhelinlaitokset perustivat Telen kilpailijaksi Radiolinja-nimisen operaattorin vuonna 1988, mutta palvelutoiminta alkoi vasta 1991. Radiolinja oli alun perin mukana suomalaisten paikallispuhelinlaitosten yhteenliittymässä, Finnetissä. Elisa hankki enemmistön Radiolinjasta 1998. Tämän jälkeen osa Finnetissä mukana olleista yhtiöstä perusti uuden operaattorin, DNAn. Lisäksi Saunalahti ehti vuosituhannen vaihteessa mukaan kilpailuun,<sup>77</sup> tosin ilman omaa (fyysisen tason) verkkoa. Elisa hankki Saunalahden liiketoiminnan vuonna 2005.
- Ulkomaanpuhelut olivat Telen monopoli kesään 1994 asti. Hintakilpailu ulkomaanpuheluissa on vaikeampaa kuin kotimaanverkoissa, koska kustannukset riippuvat paljolti ulkomaisten operaattoreiden kanssa tehtävistä sopimuksista.
- Kaukopuhelinliikenne oli vuosikymmeniä Posti- ja telelaitoksen, loppuvaiheessa Telen, monopoli. Vuoden 1994 alusta lukien puhelimen käyttäjä saattoi valita puhelukohtaisesti tai jatkuvalla sopimuksella minkä operaattorin kaukoverkkoa hän käyttää. Kaukopuhelujen hinnat laskivat nopeasti ensimmäisten kuukausien

<sup>74</sup> NMT = *Nordic Mobile Telephone*, analoginen matkapuhelinverkko, joka aloitti toimintansa vuonna 1981.

<sup>75</sup> GSM = *Global System for Mobile Communications*, alunperin *Groupe Spécial Mobile*, digitaalinen matkaviestinverkko.

<sup>76</sup> Tiivistetty kuvaus prosessista puhelinlaitoksen näkökulmasta, katso <http://www.jnthistoria.fi/fi/1988/>

<sup>77</sup> Saunalahden hinnasto vuodelta 2004: <http://img.saunalahti.fi/gsm/sl-gsmhinnasto010704.pdf>

aikana kilpailun avautumisen jälkeen. Sitten operaattorit ilmeisesti havaitsivat, että jatkuva vuorovedolla tapahtuva hintojen laskeminen ei välttämättä ole niiden etujen mukaista. Kuten kuvassa 2.4 esitetään, kaukopuheluiden reaali hinnat laskivat yli 90 prosenttia vuodesta 1980 vuoteen 1996.

- Paikallispuhelinliikenteessä paikallisilla puhelinyrityksillä oli monopoli omalla alueellaan ja Telellä omalla alueellaan. Samanaikaisesti kaukopuhelinmonopolin lakkauttamisen kanssa myös paikallispuheluiden monopoli lakkautettiin. Kilpailu paikallispuheluissa jäi kuitenkin vähäiseksi.
- Elisa Communications (nykyisin Elisa Oyj) ja sen tytäryhtiö Radiolinja erosivat Finnet-liitosta vuoden 2000 lopussa.
- TDC on toiminut virtuaalioperaattorina DNA:n matkapuhelinverkossa vuodesta 2007, eli tarjoaa omia palveluita yritysasiakkaille mutta käyttää DNA:n verkkoa omien palveluidensa toteuttamiseen.
- Moi Mobiili aloitti uutena virtuaalioperaattorina v. 2016 käyttäen DNA:n mobiiliverkkoa. Tämän vuoksi on hyvin mielenkiintoista seurata miten Moi Mobiilille käy lähivuosien aikana. Se voi säilyä itsenäisenä, mutta todennäköisempää lie nee, että sille käy lopulta samoin kuin Saunalahdelle.

Tämän kehityksen tuloksena Suomessa telealan kilpailu näyttää toimivan paremmin kuin juuri missään muualla. Esimerkiksi vuonna 2013 saksalaiset teleoperaattorit veloittivat datasiirrosta 15 kertaan enemmän siirrettyä gigatavua kohti kuin suomalaiset operaattorit.<sup>78</sup> Tämän suuntaista ja näin suurta eroa ei mitenkään voida selittää kustannustekijöillä tai asiakkaiden maksuhalukkuuden eroilla.

## Telepalvelut

Telepalvelut<sup>79</sup> voivat olla joko julkisia tai yksityisiä ja ne voivat perustua joko julkisiin tai yksityisiin verkkoihin. Verkon liikenne ei kuitenkaan juuri koskaan ole julkista, paitsi jos julkisuus on nimenomaan tavoitteena, kuten TV- ja radiolähetysten tapauksessa. Julkisilla palveluilla tarkoitetaan siis palvelua, joka on julkisesti saatavilla, yleensä rahallista korvausta vastaan. Julkisen ja yksityisen verkon rajaa hämärtää myös se, että yksityiset verkot ja niiden palvelut voivat käyttää samoja verkkolaitteita kuin julkiset palvelut.

---

<sup>78</sup> Telecoms.com, Operators charge 15 times more per GB in Germany than Finland, 23 May 2013, <http://telecoms.com/144601/operators-charge-15-times-more-per-gb-in-germany-than-finland/>

<sup>79</sup> *Tele*-alkuiset sanat ovat nykyisin vanhahtavia. Toisaalta tele on ytimekäs määre, jota vieläpä käytetään samassa merkityksessä suomen ja englannin kielessä. Tele-alku viittaa kaikkeen pitkän matkan yli tapahtuvaan tiedonsiirtoon.

Telealaa koskevat samat yleiset liiketoiminnan lainalaisuudet kuin muitakin aloja. Esimerkiksi voimme ottaa tunnetun liikkeenjohdon gurun Michael Porterin kirjasta tekijät, jotka tyypillisesti johtavat hintakilpailuun:<sup>80</sup>

- Tuotteet tai palvelut ovat lähes identtisiä ja siirtyminen toimittajien välillä on helppoa ja halpaa.
- Kiinteät kustannukset ovat suuria ja marginaaliset kustannukset ovat alhaisia.
- Kapasiteettia voidaan lisätä tehokkaasti vain suurina määrinä.
- Tuote menettää nopeasti arvonsa.

Nykyisin monet telepalvelut ovat hyvin samankaltaisia (vertaa esimerkiksi Elisan, Telian ja DNA:n mobiilipalveluita). Numeroiden siirrettävyyden ansiosta siirtyminen operaattorilta toiselle on hyvin helppoa. Televerkon kiinteät kustannukset ovat suuria, marginaalikustannukset ovat alhaisia ja kapasiteetin lisäys tapahtuu suurina yksikköinä. Odotukset palvelun tasolle muuttuvat joskus nopeasti. Jos tarkastellaan mobiilin datayhteyden arvon kehitystä, niin 2 Mbit/s datayhteys oli viisitoista vuotta sitten vielä arvokas, mutta nyt tuskin hyväksyttävä palvelu edes kotikäyttöön.

Mitä tästä seuraa? Jos markkinat toimivat tehokkaasti, niin telepalveluiden hintoihin kohdistuu huomattava paine, joten hinnoilla pitäisi olla taipumus lähestyä palvelun tarjoajan kannalta kannattamattoman rajaa. Toisaalta tästä seuraa, että palvelun tarjoajilla on voimakas tarve rajoittaa kilpailua esimerkiksi keskinäisillä sopimuksilla. Tästä taas seuraa, että yhteiskunnalla on tarve säädellä kilpailun toimivuutta estämällä kartellien tai monopoliin syntymistä. Mobiiliverkkojen tapauksessa useimmiten päädytään kolmeen (joskus neljään) palveluntarjoajaan, jotka kilpailevat enemmän tai vähemmän toistensa kanssa, yleensä kuitenkin suoranaista hintakilpailua vältellen.

### *Palveluiden kysyntä ja tarjonta*

Miksi ja mihin tarkoitukseen viestintäpalveluita halutaan käyttää? Tähän on helppo vastata yleisellä tasolla, mutta vaikeaa yksityiskohtaisesti, vielä vaikeampaa sitä on mallintaa. Eräs vastaus on: sosiaaliseen kanssakäymiseen, viihteeseen ja tiedon hankintaan – tärkeiden mukaan ehkä juuri tässä järjestyksessä. Me ihmiset olemme läpeensä sosiaalisia olentoja, joiden elämän laatuun vaikuttaa enemmän suhteet muiden ihmisten kanssa kuin esimerkiksi materiaallinen vauraus. Käytämme hämmästyttävän paljon aikaa myös television katseluun: keskimäärin noin kolme tuntia päivässä, tosin opiskelijat alle puolitoista tuntia.<sup>81</sup> Tämä on paljon enemmän kuin se mitä käytämme puheluihin, joka on keskimäärin

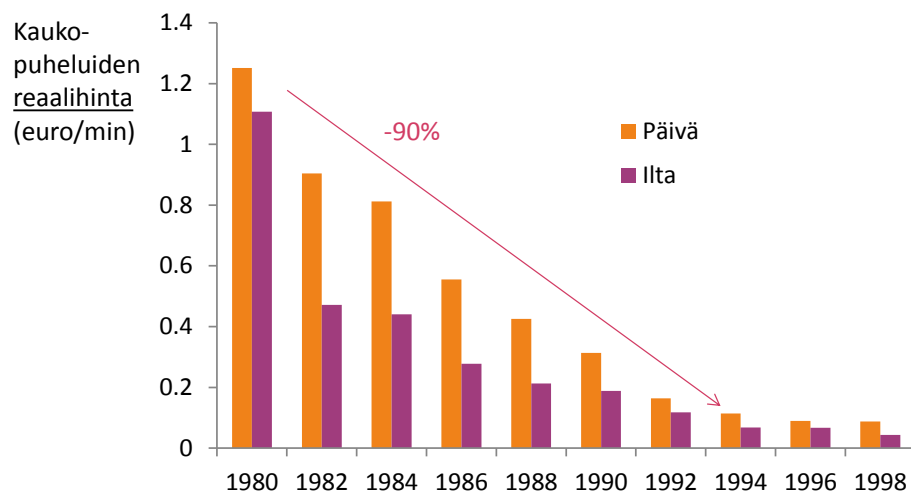
<sup>80</sup> M. Porter, *On Competition, Updated and Expanded Edition*, Harvard Business Review Book, 2008, s. 40-41.

<sup>81</sup> Finnpanel: <http://www.finnpanel.fi/tulokset/tv/vuosi/katsaikakan/2012/>

noin 17 minuuttia päivässä.<sup>82</sup> Viimeisimpänä muutoksena on, että älypuhelinien kanssa vietetty aika on kasvanut minuuteista useisiin tunteihin päivässä, josta merkittävä osa kuluu sosiaalisen median parissa.

Mitkä tekijät sitten vaikuttavat telepalveluiden kysyntään? Hinta varmasti. Taloustieteen puolella on tutkittu paljon erilaisten tuotteiden hintajoustoa, eli kysynnän suhteellista muutosta hinnan muuttuessa. Ongelmana on se, että yleisesti käytettyjen palveluiden hintajoustoa on vaikea tutkia kontrolloidusti, eli siten, että vain hinta muuttuu ja kaikki muu pysyy vakiona. Hinnat muuttuvat ajan mukana, mutta niin muuttuvat monet muutkin asiat, kuten laitteiden ominaisuudet, palveluiden laatu ja vaihtoehtoisten palveluiden kirjo.

Hinnan vaikutus saattaa olla erotettavissa, jos hintamuutokset ovat riittävän suuria ja kohtuullisen nopeita. Esimerkki tällaisesta on kuvassa 2.4, jossa on esitetty miten kauko- puheluiden<sup>83</sup> reaalihintaa laski yli 90 prosenttia 14 vuodessa. Voisi olettaa, että tällainen muutos olisi vaikuttanut dramaattisesti myös kaukopuheluiden määrään. Puheluiden määrä toki kasvoi, mutta vain noin kaksinkertaiseksi. Kuva 2.5 esittää käytön muutoksen reaalihinnan funktiona, joka siis voidaan tulkita hintajoustoksi.



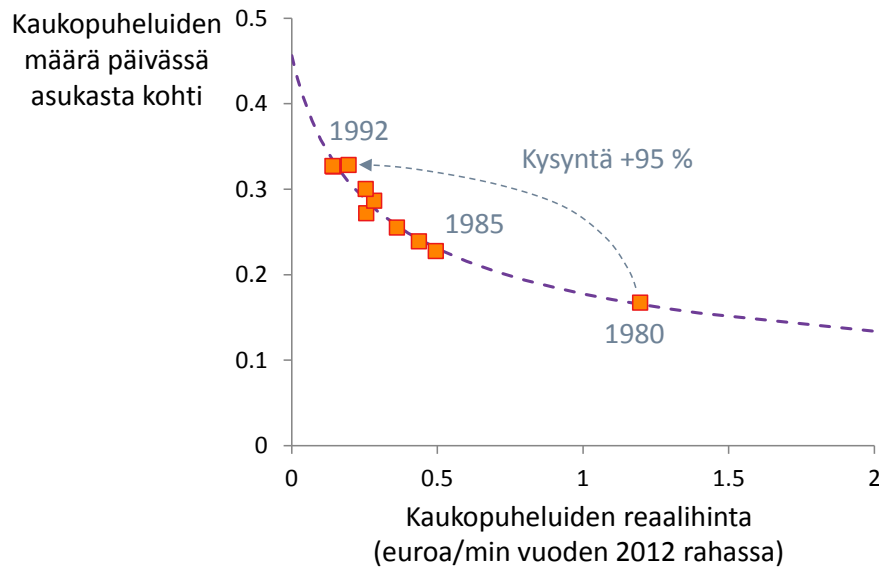
**Kuva 2.4.** Kaukopuheluiden reaali hinnat Suomessa vuoden 2012 rahassa (euroa minuutissa, elinkustannusindeksin mukaan muunnettuna).<sup>84</sup>

<sup>82</sup> Tiedot: [www.viestintavirasto.fi](http://www.viestintavirasto.fi)

<sup>83</sup> Kaukopuhelulla tarkoitettiin tällöin verkkoryhmästä toiseen otettuja puheluita. Suomi oli jaettu yli seitsemään kymmeneen verkkoryhmään, joilla jokaisella oli oma suuntanumero. Vuonna 1996 verkkoryhmät poistuivat ja tilalle tuli 12 telealuetta, joilla on siis oma suuntanumero, esimerkiksi Helsingin telealueella 09 ja Mikkelin telealueella 015.

<sup>84</sup> Hintatiedot: K. Willa, S. Uusitupa ja M. Ilvesmäki: *Tietoliikenneaapinen*, kuva 9.7.





**Kuva 2.5.** Kaukopuheluiden reaalihintaa (euroina vuoden 2013 rahaksi muutettuna vaakakseli, päivä- ja iltapuheluiden keskiarvo) ja kaukopuheluiden kokonaismäärää vuonna 1980 ja vuosina 1985 – 1993 (miljoonaa puhelua vuodessa).

Hinnan vaikutus puheluiden määrään on yllättävän pieni. Voisi kuvitella, että jos nyt puheluiden hinta nousisi kymmenkertaiseksi, niin puheluiden määrä pienenesi olennaisesti. Vai pienenisikö sittenkään? Nimittäin, korkea hinta voi tehdä palvelusta myös arvokkaamman tuntuisen ja siten haluttavamman.<sup>85</sup> Vielä 1970-luvulla kaukopuhelu oli merkittävä tapahtuma, johon saatettiin valmistautua huolella. Tämä saattoi tehdä puheluista erityisen merkittäviä ja arvokkaita molemmille osapuolille.

Tilastoja tulkitessa pitää lisäksi huomioida:

- Kyseessä on puheluiden kappalemäärä, ei minuutit. Puheluiden hinta saattoi vaikuttaa pikemminkin puheluiden pituuteen kuin määrään.
- Puhelinliittymien määrä nousi samalla kun puhelujen hinnat alenivat, ei kuitenkaan yhtä paljon kuin puheluiden määrä.
- Osa kaukopuhelinliikenteestä oli työnantajien maksamaa, jolloin hinnalla ei ollut suoraa vaikutusta kysyntään. Alenevat hinnat saattoivat vaikuttaa työntekijöiden kaukopuheluja koskeviin rajoituksiin ja sitä kautta niiden määrään.<sup>86</sup>

Vuoden 1993 jälkeen matkapuhelut alkoivat vaikuttaa merkittävästi kiinteän verkon puheluihin, joten sen jälkeisiä tilastoja on entistä vaikeampi tulkita hintajoustopähtälistä. Vielä 1970-luvulla kaukopuheluiden määrää rajoittivat hinnan lisäksi viiveet

<sup>85</sup> Tästä ilmiöstä on lukuisia tutkimuksia. Sokkoteesteissä sama viini maistuu paremmalta silloin kun sille ilmoitetaan korkeampi hinta. Maistumisen ero voidaan jopa havaita kuvaamalla aivojen eri osien aktiivisuutta.

<sup>86</sup> Virkamiehet eivät saaneet käyttää virkapuhelintaan yksityisiin puheluihin, ainakaan kaukopuheluihin (saati ulkomaan puheluihin), vaan tällaiset puhelut tuli erikseen tilata ja ne piti maksaa itse.

puheluiden saannissa ja heikohko äänen laatu pitkillä yhteyksillä. Siten väli vuodesta 1980 vuoteen 1993 on ehkä paras ajanjakso, jonka avulla hintajoustosta voidaan päätellä jotain suhteellisen varmaa.

On tärkeää pitää mielessä ero kahden kysymyksen välillä: 1) kokonaiskysynnän riippuvuus hinnasta, silloin kun monopoli yksin muuttaa tai kaikki palvelun tarjoajat yhdessä muuttavat hintaa samassa tahdissa ja 2) yksittäisen palveluntarjoajan hinnan muutoksen vaikutus kyseisen palveluntarjoajan kysyntään, jos muut eivät muuta hintojaan. Jos vain yksi palveluntarjoaja laskee hintaa, kokonaiskysyntä muuttuu vain vähän, mutta kyseinen palvelun tarjoaja voi saada niin paljon lisää asiakkaita, että hinnan lasku kannattaa kyseiselle palvelun tarjoajalle. Tämä tapahtuu tietenkin muiden yritysten kustannuksella ja asiakkaiden eduksi (ainakin jos oletetaan, että palvelun laatu ei laske).

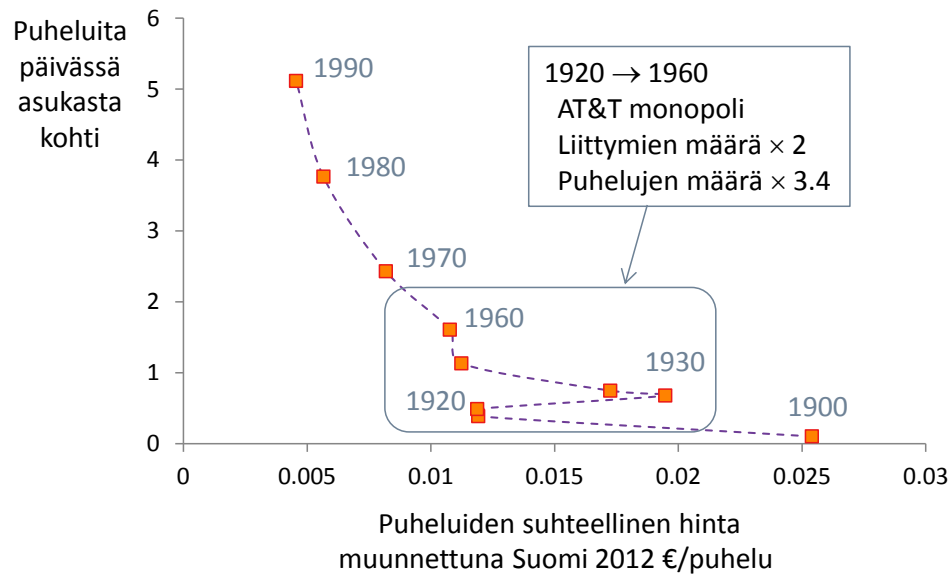
Otetaan vielä toinen esimerkki puheluista ja niiden hinnoista. Kuvassa 2.6 on esitetty muutokset puheluiden määrissä ja yhden puhelun keskimäärin tuottamasta tulosta Yhdysvalloissa viime vuosisadan aikana. Puhelumäärät ovat sangen yksiselitteinen asia. Sen sijaan, koska niin moni asia on muuttunut vuosikymmenten mittaan, puhelun hinta täytyy yrittää suhteuttaa jollain tavalla muuttuneisiin olosuhteisiin. Kuvassa hinta on pyritty muuntamaan vastaavaksi hinnaksi Suomessa vuonna 2012.<sup>87</sup>

Mielenkiintoista kuvassa on se mitä tapahtui 1920-luvulla eli puheluiden suhteellinen hinta nousi merkittävästi. Monopoli, vaikka säädeltykin, kuten tässä tapauksessa USA:ssa, johtaa lähes aina korkeampaan hintatasoon kuin toimiva kilpailu.<sup>88</sup> Tätä tosiasiaa ei muuta edes se, että periaatteessa yksi televerkko ja -palvelu olisi tehokkaampi rakentaa ja ylläpitää kuin useampi rinnakkainen verkko ja palvelu. Tämän takia nytkin Suomessa on kolme rinnakkaista mobiiliverkkoa ja -palvelua, vaikka rinnakkaisten verkkojen rakentaminen saat- taakin tuntua resurssien tuhlaukselta.

---

<sup>87</sup> Tämä on vähän hankala laskelma, joten lopputulos on vain suuntaa antava. Olennaista on, että puheluiden reaalihintaa pysyi lähes samana 40 vuotta tekniikan kehittymisestä huolimatta.

<sup>88</sup> Bell System käytti 1900-luvun alussa häikäilemättä hyväkseen tilannetta, jossa sillä oli käytännössä monopoliasema USA:n kaukopuhelinliikenteessä. Se kieltäytyi liittämästä kilpailevia paikallisia puhelinyhtiöitä kaukopuhelinverkkoon ja tällä tavoin houkutteli asiakkaat omiin paikallisyhtiöihinsä. Kehitys johti AT&T:n säädeltyyn monopoliin.



**Kuva 2.6.** Puheluiden määrä USA:ssa vuodesta 1900 vuoteen 1990. Vaaka-akseli: puhelun suhteellinen hinta tuloihin suhteutettuna muunnettuna suunnilleen Suomen hintatasoon vuonna 2012, pystyakseli: puheluiden määrä päivässä asukasta kohti.<sup>89</sup>

Vuodesta 1920 vuoteen 1960 puheluiden *suhteellinen* hinta ei juurikaan tippunut, mutta puheluiden määrä asukasta kohden kasvoi 3,3-kertaiseksi. Miksi? Yksi olennainen tekijä on puhelinliittymien määrän kasvu: mitä enemmän on henkilöitä joille ja paikkoja joihin voi soittaa, sitä enemmän myös soitetaan. Liittymien määrä asukasta kohden kasvoi vuodesta 1920 vuoteen 1960 noin kaksinkertaiseksi, joten ainakin osa puhelumäärien kasvusta selittyy tällä tavoin. Puhelin on malliesimerkki laitteesta, josta on enemmän hyötyä silloin kun muillakin on samanlainen laite. Tätä ilmiötä kuvaava Metcalfen ”laki” (*Metcalf’s law*) sanoo, että kommunikaatiopalvelun kokonaisarvo on verrannollinen käyttäjien määrän neliöön. Yksittäiselle käyttäjälle palvelun arvo kasvaa tällöin siis suorassa suhteessa muiden käyttäjien määrään. Metcalfen laki on esimerkki verkostovaikutuksesta (*network effect*), jossa tuotteen arvo riippuu sitä käyttävien kuluttajien tai asiakkaiden määrästä.

Puhelimen tapauksessa Metcalfen laki on varsin hyvä nyrkkisääntö.<sup>90</sup> Sosiaalisen median tapauksessa, jossa pyritään olemaan yhteydessä mahdollisimman suureen osaan lähipiiristä, riippuvuus voi olla vielä jyrkempi. Voit verrata kahta samankaltaista sosiaalisen median sovellusta, joista toisessa on mukana koko ystäväpiirisi ja toisessa vain kolmasosa

<sup>89</sup> Kuvat tiedot perustuvat A. Odlyzkon artikkeliin “[The history of communications and its implications for the Internet](#)” (2000). Tuorempi esimerkki yksityisen vaikkakin säädellyn monopolin toiminnasta on sähkönsiirtoyhtiöiden hintojen korotukset: [http://yle.fi/uutiset/kuluttajat\\_tyrmistyivat\\_sahkon\\_siirtohinna\\_ennatyskorotuksista/8633574](http://yle.fi/uutiset/kuluttajat_tyrmistyivat_sahkon_siirtohinna_ennatyskorotuksista/8633574)

<sup>90</sup> Metcalfen lakiinkin kannattaa suhtautua varauksin, katso esimerkiksi: Briscoe, B., Odlyzko, A., & Tilly, B. (2006). [Metcalf’s law is wrong-communications networks increase in value as they add members-but by how much?](#). IEEE Spectrum, 43(7), 34-39.

ystäväpiiristäsi. Luultavasti ensimmäisen arvo on sinulle moninkertainen verrattuna toiseen vähemmän käytettyyn sovellukseen.

Kun laite yleistyy tarpeeksi, siitä voi tulla sosiaalinen välttämättömyys. Tästä esimerkkinä television yleistyminen Yhdysvalloissa: vuonna 1950 vain muutamassa prosentissa kotitalouksia oli televisio, kymmenen vuotta myöhemmin vastaava luku oli 85 prosenttia.<sup>91</sup> Kuka saattoi olla ilman televisiota siinä, kun naapurit olivat jo sen hankkineet? Tuoreempaan esimerkkinä älypuhelimet.

Tarve ilmenee markkinataloudessa maksuhalukkuutena. Maksuhalukkuus vaihtelee kuitenkin eri ihmisten ja tilanteiden välillä. Yleensä pienempi hinta merkitsee suurempaa kysyntää. Taloustieteessä yleisimmin käytetty hintajoustoa kuvaava kaava on:<sup>92</sup>

$$\ln(K) = a - e_p \cdot \ln(h) \quad (2.1)$$

jossa  $K$  = kysyntä,  $h$  = hinta,  $e_p$  = hintajoustoparametri ja  $a$  = vakio joka määrittää kysynnän kokonaistason.

Erään tutkimuksen mukaan telepalveluiden tapauksessa hintajoustoparametrin ( $e_p$ ) arvo on tyypillisesti 0,75.<sup>93</sup> Mitä tästä seuraa? Jos hintaa alennetaan yhdellä prosentilla, niin kysyntä kasvaa vain 0,75 prosenttia. Hinnan alentamisesta ei siten ole suoraa taloudellista hyötyä palvelun tarjoajalle, asiakkaille toki kyllä.

Käytännössä lisäksi, kun hinta laskee jonkun rajan alle, hintajousto pienenee, ellei jopa häviä kokonaan. Suomessa puheluiden hinnat eivät edes kovassa kilpailutilanteessa laskeutuneet juurikaan alle 0,05 euron minuutissa. Tämä voidaan tulkita siten, että hintakilpailu ei toimi, koska asiakkaat eivät enää koe hintaeroja niin merkittävinä, että vaihtaisivat palvelun tarjoajaa hintojen takia.

Joka tapauksessa on selvää, että kaava 2.1 ei päde, kun hinta lähestyy nollaa, koska kaavan mukaan kysyntä kasvaisi äärettömyksiin.<sup>94</sup> Niinpä jos halutaan tehdä realistisia laskelmia, kaavaa on pakko hieman muuntaa. Voidaan esimerkiksi lisätä yksi parametri ( $h_1$ ):

$$\ln(K) = a - e_p \cdot \ln(h + h_1) \quad (2.2)$$

<sup>91</sup> Yhteenveto teknologian kehittämisestä 1900-luvulla, katso <http://www.karlhartig.com/chart/techhouse.pdf>

<sup>92</sup> Hintajouston kaavassa on usein plus-merkki ennen parametria  $e_p$ . Tässä käytetään miinusmerkkiä, koska silloin  $e_p$ :n arvot ovat aina positiivisia ja siten selkeämpiä vertailla sanallisesti.

<sup>93</sup> M. Weingarten, J. Benito-Martin, *Telecommunications Demand: A Macroeconomic View* (1994).

<sup>94</sup> Kiinteä kuukausihinta ilman käyttörajoituksia merkitsee tässä suhteessa samaa kuin ilmainen puhelu. Ilmaisuuksien täytyy aina käsitellä erikseen tapauskohtaisesti. Lisäksi, jos ajatellaan että aika on rahaa, niin millä tahansa ajankäytön muodolla on perushinta, joka syntyy siitä, että henkilö ei voi käyttää aikaansa johonkin muuhun toimintaan.

Kaavojen 2.1 ja 2.2 ongelmana on se, että logaritmien sisällä on suureita, joilla on yksikkö, esimerkiksi minuutti tai euro. Kaava 2.2 voidaan kuitenkin esittää muodossa, jossa ei esiinny logaritmeja:

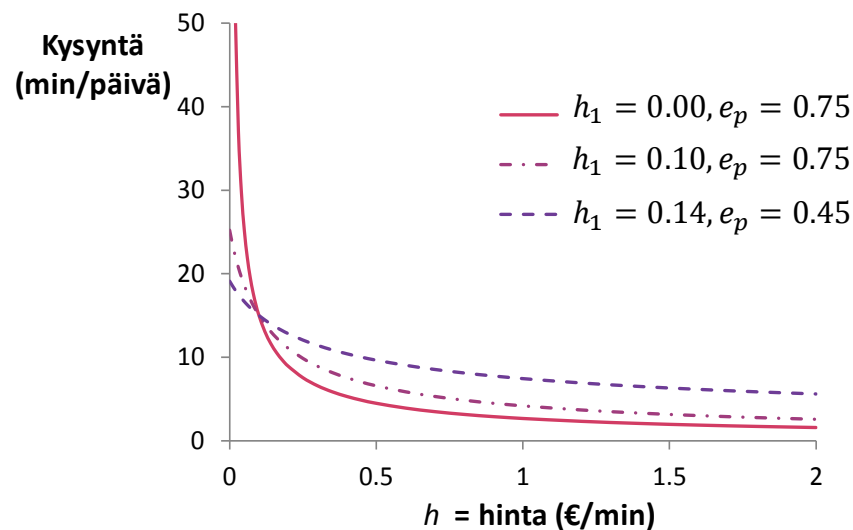
$$\frac{K}{K_0} = \left( \frac{h_0 + h_1}{h + h_1} \right)^{e_p} \quad (2.3)$$

Tässä kaavassa siis yksi piste kiinnitetään, eli kun hinta  $h = h_0$ , niin kysyntä  $K = K_0$ . Sen lisäksi kaavassa on kaksi parametria:  $e_p$  eli hintajousto sekä parametri  $h_1$ , jolla säädetään kaavan käyttäytymistä silloin kun hinta on hyvin pieni.

Parametri  $a$  kaavassa 2.2 saadaan kaavalla:

$$a = \ln(K_0(h_0 + h_1)^{e_p}) \quad (2.4)$$

Tässä logaritmin sisällä on yksiköitä (minuutteja ja euroja), joten kesken laskelmien ei kannata vaihtaa yksiköitä (tai jos vaihtaa, täytyy  $a$ :n arvo vastaavasti päivittää). Kuvassa 2.7 on esitetty kolme eri hintajoustoa kuvaavaa käyrää siten, että  $K_0 = 15$  min/päivä ja  $h_0 = 0,10$  euroa/min.



**Kuva 2.7.** Puheluiden hintajousto kolmella eri parametrien yhdistelmällä, kun oletetaan, että hinnalla 0,10 €/min kysyntä on 15 minuuttia päivässä.

Tässä on vielä syytä korostaa sitä, että kilpailutilanteessa käyrä on yhden toimijan kannalta olennaisesti erilainen kuin kaavassa 2.2 ja kuvassa 2.7. Silloin kun asiakkaalla on valinnanvaraa ja palvelun tarjoajien hinnoissa on eroa, matalamman hinnan palvelulle on olennaisesti suurempi kysyntä kuin korkeamman hinnan palvelulle. Tämä tärkeä ero monopolin ja todellisen kilpailun välillä on aina syytä pitää mielessä. Oligopoli, eli tilanne jossa markkinoilla on vain muutama palveluntarjoaja, sijoittuu yleensä jonnekin näiden välille. Esimerkiksi mobiilipalvelujen tapauksessa usein kolme toimijaa jakaa markkinan ilman havaittavaa hintakilpailua.

Vaikka kysyntä siis pienenee hinnan kasvaessa, monopolitilanteessa kysyntää riittää myös hyvin korkeilla hinnoilla. Esimerkkinä 3 minuutin puhelu New Yorkista Lontooseen vuonna 1927 maksoi tavallisen työläisen 200 tunnin palkan verran ja silti palvelulle oli kysyntää. Tilanteessa, jossa kilpailua ei ole tai se on hyvin rajoittunutta, hinta määräytyy ensisijaisesti asiakkaiden maksuhalukkuuden ja –kyvyn mukaan siten, että myyjä maksimoi tuottonsa. Tai näin siis yksityisen yrityksen tapauksessa, valtion monopolin tapauksessa maksimoinnin kohde riippuu organisaation ja sen henkilökunnan arvoista ja asenteista. Sen sijaan tehokkaan kilpailun tapauksessa hinta määräytyy ensisijaisesti tuotantokustannusten mukaan.

Vielä yksi esimerkki vuosikymmenien takaa osoittamaan kilpailun merkityksen. Taulukossa 2.1 on esitetty puhelujen hintoja hyvin varhaisessa vaiheessa teletoiminnan kehitystä eli vuodelta 1895. Taulukko esittää kaukopuhelujen hintoja etäisyyden funktiona eri maissa. Tanskassa, jota taulukossa ei mainita, minuuttihintaa ei tuossa vaiheessa ollut lainkaan vaan hinta perustui kuukausimaksuun. Muista maista Suomessa oli keskimäärin halvimmat kaukopuhelut. Muut pohjoismaat olivat suunnilleen samalla tasolla, sen sijaan muualla Euroopassa hinnat olivat moninkertaiset, Britanniassa jopa noin kymmenkertaiset.

**Taulukko 2.1.** Kaukopuheluiden hinnat vuonna 1895 eri Euroopan maissa (Pence/min).<sup>95</sup>

	32 km	128 km	256 km	512 km
Suomi	0,2	0,5	0,9	1,5
Norja	1,0	1,0	1,0	1,0
Ruotsi	0,0	1,3	2,2	2,2
Sveitsi	1,0	1,6	1,6	1,6
Belgia	0,0	1,9	1,9	1,9
Ranska	1,0	1,9	2,9	5,8
Hollanti	3,3	3,3	3,3	3,3
Saksa	1,7	4,0	4,0	4,0
Espanja	4,0	4,0	5,6	10,4
Britannia	2,0	5,0	9,3	18,0
Italia	5,8	5,8	5,8	6,9
Unkari	6,7	6,7	6,7	6,7

Maiden välisiä eroja ei voi selittää kustannuseroilla, koska merkittävä osa kustannuksista oli kuparijohdoissa, jonka hinta oli sama kaikkialla. Jonkin verran hintaeroja selittävät

<sup>95</sup> S. Wallsten, *Ringling in the 20th Century, The Effect of State Monopolies, Private Ownership, and Operating Licences on Telecommunications in Europe, 1892-1914* (2001).

myös varallisuuserot. Suomi oli tuohon aikaan köyhä, itse asiassa köyhin taulukossa mainituista maista. Tärkein hintaeroja selittävä tekijä oli se, oliko telealalla kilpailua vai oliko puhelintoimi valtion monopoli.

Hinta ei ollut ainoa monopolin ongelma, sillä palvelun käytön rajoitukset saattoivat olla lähes käsittämättömiä. Vuonna 1889 Britanniassa postin virkailijat nuhtelivat henkilöä, joka oli käyttänyt puhelintaan tehdäkseen ilmoituksen palolaitokselle lähistöllä syttyneestä tulipalosta. Virkailijan mukaan puhelinta olisi saanut käyttää vain omaan liiketoimintaan tai henkilökohtaisiin tarpeisiin, ei mihinkään muuhun. Vaikka käyttö tällaisissa tapauksissa sittemmin sallittiin, niin näyttää siltä, että monopoliasema johtaa lähes väistämättä ylenmääräiseen käyttäjien kontrollointiin.

Palvelun tarjoajan monopoliasema sellaisen palvelun tapauksessa, joka on olennainen osa elämää ja sosiaalisen kanssakäymisen kannalta tärkeää, johtaa monenlaisiin vääristymiin. Tämä koskee palvelun hintaa, laatua ja saatavuutta. Ääriesimerkkinä monet epädemokraattiset valtiot, joissa puhelinta ja Internetiä käytetään vallan välineenä. Telealan luonteesta johtuen palveluilla on taipumus lopulta keskittyä yhdelle toimijalle, joka sitten voi määritellä hinnat ja muut ehdot oman halunsa mukaan. Tästä johtuen toimivan yhteiskunnan on pakko pitää huolta kilpailun toimivuudesta jatkuvasti. Eri yhteiskuntien halu ja kyky tämän tehtävän hoitamiseksi vaihtelee suuresti.

### *Hintajouston vaikutukset operaattorin liiketoimintaan*

#### **Esimerkki 2.1.** Hintajouston monopolioperaattorilla

- a) Oletetaan, että puhelinpalvelun tarjoaja on monopolin asemassa. Palvelun hinnoittelu perustuu minuuttihintaan, joka alkutilanteessa on 0,30 €/min. Tilaaajat, joita alkutilanteessa on yhteensä 1 miljoona, puhuvat puhelimessa keskimäärin 10 min/päivä (tarkkaan ottaen 10 minuuttia päivässä koskee tässä niitä puheluita, joita tilaaja maksaa, ei niitä joissa tilaaja on vastaanottaja eikä maksa puhelua). Lisäksi oletetaan, että hintajouston parametrit kaavassa 2.2 ovat:  $h_1 = 0,10$  ja  $e_p = 0,60$  ja nämä koskevat yksittäisen tilaajan puheluminuutteja (eivät siis tilaajien määrän muutoksen). Miten operaattorin tuotot kuukaudessa muuttuvat seuraavan kuukauden aikana, kun operaattori alentaa hintaa arvoon 0,20 €/min, mutta jolloin tilaajien määrä ei vielä ehdi muuttua. (Koska kyseessä on monopolioperaattori, sen asiakkaat ovat ”tilaajia,” jotka saattavat hyvinkin joutua odottamaan kuukauden ennen kuin pääsevät käyttämään puhelinpalvelua.)
- b) Entä jos a-kohdan hinnan lasku lisääkin tilaajien määrää seuraavien 3 kuukauden aikana 15 prosentilla? Samalla jokaisen käyttäjän puhelumäärät kasvavat, koska on enemmän henkilöitä, joille voi soittaa. Oletetaan siis yksinkertaisuuden vuoksi, että tämäkin kasvu on 15 prosenttia (joka tulee siis a-kohdassa lasketun hintajouston tuottaman lisäyksen päälle). Miten operaattorin tuotot kuukaudessa muuttuvat nyt verrattuna alkutilanteeseen?

#### **Ratkaisu**

Käytetään siis kaavaa 2.2, jossa  $K = 10$ ,  $e_p = 0,60$ ,  $h = 0,30$  ja  $h_1 = 0,10$  (kun yksikköinä ovat min, € ja päivä). Tällöin tuntematon muuttuja  $a$  saa arvon 1,753. Nyt voidaan laskea yhden käyttäjän minuuttimäärä mille tahansa puhelun hinnalle. Arvolla 0,20 saadaan:

$$\ln(K) = 1,753 - 0,60 \cdot \ln(0,20 + 0,01) = 2,377$$

Tästä saadaan kysynnäksi  $K = 11,88$  min/päivä. Kun tilaajien määrä ei (vielä) muutu, niin monopolin kokonaistulot ovat  $T = 1000000 \cdot 11,88 \cdot 0,20 \cdot 30 = 71\,300\,000$  €/kk. Tämä merkitsee huomattavaa pudotusta tuloissa verrattuna alkutilanteen tuloihin (90 000 000 €/kk).

B-kohdassa oletettiin, että myös tilaajien määrä kasvaa eli tässä tapauksessa 15 %, jolloin kokonaistuloiksi saadaan, kun oletetaan että puhelujen kokonaisajat eivät muutu:

$$T = 1150000 \cdot 11,88 \cdot 0,20 \cdot 30 = 82\,000\,000 \text{ €/kk}$$

Nyt kuitenkin vielä oletettiin, että myös puhelujen kokonaispituudet tilaajaa kohti kasvavat suhteessa tilaajien kokonaismäärään. Eli tällöin puheluminuutteja olisikin 13,67 min/päivä. Tällöin kokonaistulot olisivat:

$$T = 1150000 \cdot 13,67 \cdot 0,20 \cdot 30 = 94\,300\,000 \text{ €/kk}$$

Eli nyt päädyttäisiinkin jo suurempiin tuloihin kuin alkuperäisellä hinnalla.

### Pohdintaa

Voisiko hinnan pudotus siis olla hyödyllinen jopa monopolioperaattorin tapauksessa? Vaikka annetuilla oletuksilla näin näyttäisi olevan, niin oletukset eivät välttämättä ole täysin realistisia. Tilaajien määrän kasvu 15 prosentilla kun kuukausittainen lasku tippuu 90 eurosta 60 euroon saattaisi olla mahdollinen silloin kun puheluille ei ole hyviä vaihtoehtoja. Sen sijaan oletus, että uudet tilaajat puhuisivat keskimäärin yhtä paljon kuin aikaisemmat, on jossain määrin epärealistinen oletus. Tällöin, vaikka puheluiden määrä yhtä tilaajaa kohti luultavasti kasvaakin, kun tilaajien määrä kasvaa, niin kokonaisminuuttimäärä ei kasva samassa suhteessa (koska uudet tilaajat ovat luultavasti vähemmän halukkaita maksamaan puheluista).

Silti käytännössä saattaa olla, että monopolinkin kannattaa pitää hinta sellaisena, että valtaosalla asukkaista on varaa käyttää palvelua. Tämä pätee silloin kun verkostovaikutus on merkittävä. Sitten kun suurin osa asukkaista on saatu houkutelua asiakkaiksi, hintoja ei kannata enää laskea vaan pikemminkin nostaa (jos tavoitteena on maksimoida monopolin tuottama voitto).

Vaikka sosiaalisen median palveluiden liiketoimintamalli onkin erilainen, niin siinäkin pätee sama johdopäätös eli jos tavoittelee monopoliasemaa, täytyy ensin houkutella kaikki mahdolliset käyttäjät palvelun piiriin (vaikka se ei olisi lyhyellä aikavälillä kannattavaa) ja vasta sitten hyödyntää kaikin tavoin monopoliaseman tuomia etuja. Itse asiassa monopoli saattaa nostaa hintoja tai huonontaa käyttöehtoja sen jälkeen, kun tilaajat ovat ensin tottuneet palvelun käyttöön.

### Esimerkki 2.2. Pieni hintakilpailuanalyysi kahdella operaattorilla

Oletetaan, että miljoonan asiakkaan jakaa kaksi operaattoria, joilla on seuraavat markkinaosuudet:



$O_1$ : 700 000 asiakasta

$O_2$ : 300 000 asiakasta

Alkutilanteessa hinta on kummallakin 0,10 euro/min ja puheluiden määrä käyttäjää kohti on 15 min/päivä.

Nyt jos vain toinen operaattori laskee hintaa arvoon 0,09 euro/min, niin kuinka paljon kyseisen operaattorin täytyy saada vähintään lisää asiakkaita toiselta, jotta sen (eli hintoja laskevan operaattorin) kokonaistulot puheluidista nousisivat?

- a) Jos  $h_1 = 0$
- b) Jos  $h_1 = 0,10$

### Ratkaisu

Oletetaan aluksi, että hintajouaston kaavan 2.3 mukaiset parametrit matkapuhelinpalvelulle (koskien keskimääräisen asiakkaan puheluminuutteja hinnan funktiona) ovat:

- $e_p = 0,75$
- $h_o = 0,10$  euro/min
- $K_o = 15$  min/käyttäjä/päivä

Kaavasta 2.4 saadaan: Kun  $h_o = 0$ ,  $a = 0,9811$  ja kun  $h_o = 0,10$ ,  $a = 1,501$ . Huomaa myös, että  $a$ :n arvo riippuu käytetyistä yksiköistä.

Tulot ( $T_i$ ) ennen hintamuutoksia:

- Operaattori  $O_1$ :  $T_1 = 15 \cdot 0,10 \cdot 700000 = 1\,050\,000$  €/päivä
- Operaattori  $O_2$ :  $T_2 = 15 \cdot 0,10 \cdot 300000 = 450\,000$  €/päivä

Kysyntä ( $K$  eli minuuttimäärä asiakasta kohden) hinnalla  $x$  saadaan hintajouaston kaavasta:

$$\ln(K) = a - e_p \cdot \ln(x + h_1)$$

Kokonaistulo on siten  $Y_i \cdot K \cdot x$ , jossa  $Y_i$  = uusi asiakasmäärä. Jotta uudella hinnalla  $x$  päästäisiin samoihin tuloihin kuin aikaisemmin, pitää

$$Y_i \cdot x \cdot K = Y_i \cdot x \cdot e^{a - e_p \cdot \ln(x + h_1)} > T_i$$

Huomaa myös, että kysyntä ( $K$ ) esitetään tuotteen kysynnän määrää kuvaavassa yksikössä, kuten kappalemääränä, kiloina tai minuutteina. Kysyntä ei siis sisällä rahayksikköä vaan rahayksikkö esitetään vain hinnoissa, esimerkiksi €/min. Kysynnän ja hinnan tuloksi saadaan siten rahayksiköitä.

Tästä saadaan, kun  $h_o = 0$ :

$$Y_1 = 718683 \text{ eli tarvittava lisäys} = 18683 \text{ eli noin } 6 \% \text{ operaattorin } 2 \text{ asiakkaista}$$

$$Y_2 = 308007 \text{ eli tarvittava lisäys} = 8007 \text{ eli noin } 1,1 \% \text{ operaattorin } 1 \text{ asiakkaista}$$

Vastaavasti kun  $h_o = 0,10$

$Y_1 = 748425$  eli tarvittava lisäys = 48425 eli noin 16 % operaattorin 2 asiakkaista

$Y_2 = 320754$  eli tarvittava lisäys = 20754 eli noin 3 % operaattorin 1 asiakkaista

### Opetus

Hintakilpailu näyttää kannattavammalta strategialta pienemmälle operaattorille kuin suuremmalle! Tästä seuraa usein myös se, että isommat pelurit pyrkivät ostamaan pienemmät pelurit pois markkinoilta hinnalla, joka saattaa vaikuttaa suhteettoman korkealta pienen pelurin tuottamaan voittoon verrattuna—usein pienen pelurin liiketoiminta tuottaa tappiota ostohetkellä. Tappiollisuus johtuu myös siitä, että osoittamalla että pystyy haalimaan asiakkaita suuremmilta operaattoreilta, pienempi tekee itsestään halutun ostokohteen. Asiakkaiden haaliminen vaatii kallista markkinointia ja edullisia hintoja, mikä tekee toiminnasta yleensä tappiollista ennen kuin markkinaosuus kasvaa riittävän suureksi. Alan keskittyminen jatkuu, kunnes kilpailuviranomaiset puuttuvat peliin. Yleensä päädytään lopulta kolmeen operaattoriin.

## Informaatioala yrittöstoimintana

Henkilökohtainen viestintä on kautta historian ollut merkittävämpää liiketoimintaa kuin sisällön tarjoaminen, esimerkkinä informaatioalan liiketoiminta vuonna 2008 Yhdysvalloissa:

- Teleala (ei Internet): liikevaihto 498 miljardia dollaria ja 1,2 miljoonaa työntekijää.
- Internet-ala (operaattorit ja palveluiden tarjoajat): 101 miljardia dollaria ja 392 000 työntekijää.
- Julkaisuala (lehdet ja kirjat): 284 miljardia dollaria ja 1,06 miljoonaa työntekijää.
- Radio ja TV-toiminta: 104 miljardia dollaria ja 292 000 työntekijää.
- Elokvateollisuus: 95 miljardia dollaria ja 327 000 työntekijää.
- Ääniteala (tallennettu musiikki): 15 miljardia dollaria ja 24 000 työntekijää.

Pienellä laskutoimituksella saadaan yllättävä tulos: lehtien, kirjojen, elokuvien ja äänitteiden julkaiseminen sekä radio- ja TV-ohjelmien tuotanto saivat kaikki yhdessä aikaan saman verran liikevaihtoa kuin perinteinen teleala ilman Internetiä.<sup>96</sup>

Telealan eli tietoliikenteen ja siihen liittyvien palveluiden osuus maailman bruttokansantuotteesta kasvoi 1990-luvulla selvästi. OECD-maiden keskiarvo oli vuonna 1990 noin 2 prosenttia, kun se vuonna 2001 oli jo 3,35 prosenttia. Tämä kasvu on ymmärrettävää, kun ottaa huomioon, että sekä Internet että matkaviestimet lähtivät lähes tyhjästä 1990-luvun

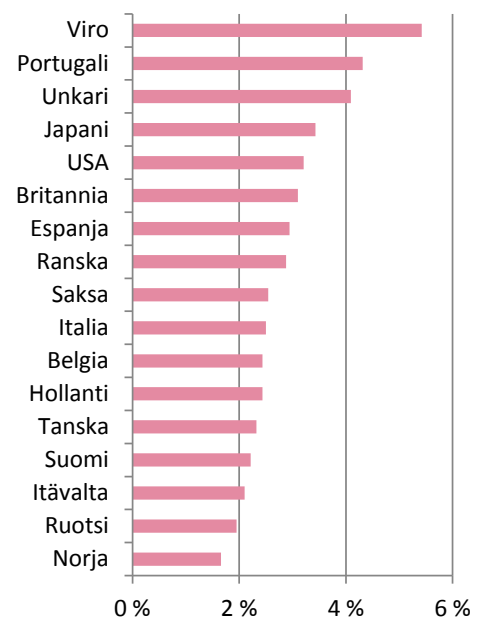
<sup>96</sup> Ohjelmien jakelu kaapeliverkon kautta on luokiteltu teletoiminnaksi.

vaihteesta mutta yleistyivät hyvin nopeasti 1990-luvun aikana. Nopea teknologinen kehitys vaati suuria investointeja ja uudet palvelut saatettiin alkuvaiheessa hinnoitella suhteellisen kalliiksi. Monen alan yrityksen pörssi-arvo olikin suurimmillaan vuoden 2000 alkupuolella. Esimerkiksi Nokian osakkeiden kokonaisarvo oli noin kymmenkertainen nykyiseen verrattuna.

Kuvassa 2.8 on esitetty viestinnän osuus bruttokansantuotteesta Euroopassa ja muutamassa muussa maassa vuosina 2008 tai 2009. Suurimmassa osassa maista osuus on noin 3 prosenttia, mutta erojakin ilmenee. Eroja voi yrittää selittää ainakin neljällä tekijällä:

- 1) Varakkuuserot. Koska verkko- ja päätelaitteiden hinnat määräytyvät kansainvälisillä markkinoilla, vähemmän varakkaissa maissa tietoliikenteen osuus voi luontaisesti olla suurempi kuin varakkaammissa maissa.
- 2) Kilpailun toimivuus. Kysymys on lähinnä siitä, miten vahva asema suurimmilla toimijoilla on viestinnän alalle, joka maan laajuisesti tai paikallisesti.
- 3) Kulttuuriset erot. Viestinnän luonteessa ja määrässä saattaa olla eroja erilaisten kulttuurien välillä.
- 4) Maantieteelliset seikat. Esimerkiksi kattavan matkapuhelinverkon toteuttamisen voisi olettaa olevan halvempaa *asukasta kohden* alueilla, joilla väestötiheys on suuri. Suomen ja Ruotsin lukemat verrattuna Britanniaan ja Ranskaan riittävät kumoamaan tämän teorian.

**Kuva 2.8.** Viestinnän osuus bruttokansantuotteesta (GDP) prosentteina eri maissa (2008/09).<sup>97</sup>



Kumpi on parempi, suuri vai pieni osuus, on vaikea kysymys. Käytäntö kuitenkin näyttää, että suurempi osuus ei tuota parempaa palvelua, pikemminkin päinvastoin. Toisaalta liian pieni luku on varmasti haitallinen yhteiskunnan kannalta. Mielenkiintoisimmaksi eroja selittäväksi tekijäksi jää kilpailutilanne, samoin kuin aikaisemmin tarkastellun kaukopuheluiden hintojen tapauksessa yli sata vuotta sitten! Maiden järjestys on hämmästyttävän tarkasti sama kuin taulukossa 2.1 siten, että

<sup>97</sup> [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Telecommunication\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Telecommunication_statistics)

viestintään menee suurempi osa kansantuotteesta niissä maissa, joissa kaukopuhelut olivat kalliimpia 120 vuotta sitten, ja päinvastoin.

Silti ajatus, että jonkun alan kilpailu Suomessa toimisi paremmin kuin Yhdysvalloissa, Britanniassa tai Saksassa on hieman yllättävä. Kysymys ei kuitenkaan ole yleisestä kilpailun kovuudesta vaan markkinoiden rakenteesta ja säätelyn toimivuudesta juuri viestintäpalveluiden alalla (monella muulla alalla tilanne on täysin toinen). Yhdysvalloille on tyyppistä, että suurimmat toimijat ovat niin suuria ja vaikutusvaltaisia, että ne pystyvät edistämään omaa liiketoimintaansa vaikuttamalla alaa sääteleviin lakeihin ja määräyksiin. Olennaista on havaita, että markkinatalous, merkittävistä eduistaan huolimatta, ei välttämättä aina tuota ihmisten kannalta parasta mahdollista lopputulosta.<sup>98</sup>

Joissakin suhteissa amerikkalainen tietoliikenneala on toki ollut äärimmäisen tehokasta ja edellä käyvä; Internet ja siihen liittyvä teknologia on tästä yksi esimerkki ja informaatioalan jättiläisten, kuten Google, Facebook ja Netflix, maailmanlaajuinen menestys toinen esimerkki, kuten taulukko 2.2 meille kertoo. Sama menestystarina ei kuitenkaan koske matkaviestintää, jonka palveluiden hinta-laatu-suhde ja kattavuus ovat Amerikassa yleensä olleet esimerkiksi pohjoismaita heikompia.

**Taulukko 2.2.** Maailman arvokkaimmat yhtiöt 2006 ja 2016.<sup>99</sup>

Pörssi-arvo miljardia US \$	2006	Pörssi-arvo miljardia US \$	2016	2018
ExxonMobil	362	Apple	571	1010
General Electric	348	Alphabet (Google)	531	766
Microsoft	279	Microsoft	446	859
Citigroup	231	Amazon	362	858
BP	226	ExxonMobil	356	352
Royal Dutch Shell	203	Facebook	356	435

### Palvelujen kehittyminen

Operaattorin vaihto on Suomessa nykyisin helppoa ja se tapahtuu vanha numero säilyttäen joskus pienestäkin ärsykkeestä. Kun tähän tilanteeseen on tottunut, tuntuu oudolta ajatella täysin vaihtoehtotonta tilannetta (joka siis vallitsi 1990-luvulle saakka) tai edes tilannetta, jossa täytyi vaihtaa puhelinnumero, jos halusi vaihtaa operaattoria. Numeroiden siirrettävyys, joka tuli voimaan vuonna 2003, vaikutti merkittävästi Suomen

<sup>98</sup> ”Näkymätön käsi” (*invisible hand*), jota Adam Smith käytti kuvaamaan sitä, että oman edun tavoittelu toimii yhteisen edun hyväksi, ei siis mitenkään automaattisesti pidä paikkaansa edes ns. vapaassa markkinataloudessa.

<sup>99</sup> <https://www.statista.com/chart/5403/most-valuable-companies-2006-vs-2016/>

matkapuhelinmarkkinoihin. Ensimmäisen vuoden aikana asiakkaiden siirtyvyys noin kaksinkertaistui ja uusien palveluntarjoajien (jo vakiintuneiden Telian, Elisan ja DNA:n lisäksi) osuus markkinoista kasvoi moninkertaiseksi.<sup>100</sup>

Toinen merkittävä matkapuhelimiin liittyvä lainsäädännön muutos oli kytkeykaupan salminen huhtikuussa 2006. Ennen kytkeykauppaa asiakkaan piti aina ostaa laite erikseen ja palvelu erikseen. Kytkeykaupan myötä palveluntarjoaja voi alentaa asiakkaan kaupan hetkellä *kokemaa* kustannusta. Kolmekymmentä euroa kuukaudessa kuulostaa pienemmältä kuin 600 euroa puhelimesta, tämä siitä huolimatta, että 2 vuoden aikana asiakas maksaa 720 euroa. Kytkeykauppa voi samalla viedä huomiota esimerkiksi puheluiden ja tekstiviestien hinnoista ja vähentää hintakilpailua niiden osalta. Onko kytkeykauppa lopulta asiakkaiden kannalta hyödyksi vai ei, on erittäin vaikeasti arvioitava kysymys.

Nykypäivänä perinteiset telealan toimijat tarjoavat paljon muutakin kuin perinteisiä puhelinpalveluita—tämä on tietysti nykyopiskelijalle jo itsestäänselvyys nyt kun puhelut muodostavat vain pienen osuuden älypuhelimien käytöstä. Kuten jo luvun alussa havaittiin, puhelumaksujen alentaminen ei välttämättä lisää puheluiden määrää juuri lainkaan, eikä ainakaan tuota merkittäviä lisätuloja, joten uusia asiakkaita ja asiakasryhmiä on etsittävä muualta. Internetin tulo on antanut teleyritysten kehityspäälliköille ja konsulteille tilaisuuden keksiä uusia palveluja. Kaikki teknisesti mahdollinen ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa. Esimerkiksi elokuvien katseleminen televerkon kautta (VoD, *video-on-demand*, videotilauspalvelu) on jo varsin vanha keksintö. Ensimmäiset laajamittaiset kokeilut tehtiin 1990-luvun puolivälissä käyttäen ATM-tekniikkaa. Palvelu ei kuitenkaan yleistynyt vielä siinä vaiheessa.

Miksei tilausvideota ollut tarjolla kaikelle kansalle jo kaksikymmentä vuotta sitten? Syy on varsin yksinkertainen: palvelu oli asiakkaiden mielestä liian kallis. Liikkuvan kuvan siirtäminen vaatii huomattavasti enemmän siirtokapasiteettia kuin pelkän puheen siirtäminen. Kohtuullisen hyvään videokuvan siirtoon tarvittiin noin 1,5 Mbit/s, jolla nopeudella voitiin välittää kymmeniä puhelinyhteyksiä. Kun teleyritysten liiketoiminta perustui vielä silloin pääosin puhepalveluihin, niin videopalvelujen hinnoittelu järkevästi oli lähes mahdoton yhtälö. Elokuvia saattoi silloinkin vuokrata lähikioskista muutamaa euroa vastaavalla hinnalla. Toisaalta, jos videokuvan siirto maksaa euron tunnilta, niin miten operaattori voi perustella sitä korkeamman puhelujen hinnan, varsinkin kun puhelu vie vain murto-osan videokuvan vaatimasta siirtokapasiteetista?

---

<sup>100</sup> T. Smura, *Mobile Number Portability: Case Finland*, 2004. Vaihkokustannus (*switching cost*) vaikuttaa olennaisesti kilpailun toimivuuteen. Kustannuksia on monenlaisia, ei pelkästään taloudellisia. Esimerkiksi uuden järjestelmän logiikan ja käyttöliittymän opettelu voi viedä aikaa. Erityisen merkittäväksi vaihtokustannus muodostuu, jos vaihtaminen käytännössä vaatii vastaavaa muutosta ystäväpiirissä, kuten tilanne on sosiaalisen median tapauksessa.

Tilanne on kuitenkin muuttunut olennaisesti viimeisten vuosien aikana, mm. yhdysvaltalaisyrittäjien Netflixin ansiosta. Netflix aloitti toimintansa DVD-elokuvien ja sarjojen postimyynnillä 1990-luvun lopulla. Vuodesta 2007 alkaen Netflix on siirtynyt elokuvien ja sarjojen verkkojakeluun. Netflixin videojakelu oli jo vuonna 2010 suurin Internetin kapasiteetin kuluttaja Yhdysvalloissa. DVD-tasoinen kuva vaatii noin 1,5 Mbit/s nopeuden, HD-video hyvällä äänenlaadulla vähintään 5 Mbit/s ja 4K-video vähintään 15 Mbit/s. Kun nämä luvut kerrotaan palvelujen käyttäjämäärällä, niin tiedonsiirtokapasiteetin tarve on huima. Jo ennen Netflixia vertaisverkot osoittivat, että kysyntää elokuvien verkkojakelulle on ja että tekniikka periaatteessa mahdollistaa hyvälaatuisen palvelun. Tässä mielessä oli odotettavissa, tai oikeastaan varmaan, että kaiken muun ohella myös elokuvat ja sarjat ja jopa reaaliaikaiset ohjelmat siirtyvät entistä enemmän verkkoon.

Mutta tietysti tällaiset palvelut rasittavat verkkoa merkittävästi. Jos katsoo yhden 2 tunnin elokuvan tai jonkun muun ohjelman päivässä, niin kuukaudessa siitä kertyy 40 GB kuukaudessa DVD-laadulla, 135 GB HD-laadulla ja 405 GB 4k laadulla. Nämä ovat suuria lukuja ainakin, jos yhteys kulkee radiotien yli. Jos 5 % Netflixin nykyisistä 137 miljoonasta asiakkaasta käyttää palvelua yhtä aikaa 5 Mbit/s nopeudella, niin kapasiteettia tarvitaan yhteensä 34 Pbit/s.

Jos videopalvelut olivat pitkään pettymys verkkopalvelujen kehittäjille, niin matkapuhelinten kysyntä yllätti moneen kertaan 90-luvun aikana kaikista laitetoimittajien ja palveluntarjoajien laskelmista huolimatta.<sup>101</sup> Vuosikymmenen alussa tehdyt ennusteet ylittyivät noin kymmenkertaisesti. Lisäksi tekstiviestit sekä ladattavat soittoäänet osoittautuivat aikanaan matkapuhelinoperaattoreille todellisiksi rahasammoiksi ilman juuri minkäänlaista etukäteissuunnittelua. Vaikka tekstiviestin kuljettamisen vaatima kapasiteetti on mitätön, asiakkaalta veloitettiin tekstiviesteistä jopa kymmeniä senttejä kappaleelta – käytännössä tulot olivat puhdasta voittoa, sillä edes markkinointia ei juurikaan tarvittu.

Taulukossa 2.3 on esitetty tilastotietoja siitä, miten telepalveluyritysten koot ovat muuttuneet vuodesta 1994, jolloin tulot tulivat lähes pelkästään kiinteän verkon puheluista, vuoteen 2010, jolloin tulot tulivat pääosin mobiiliverkon puheluista. Muutokset luvuissa kertovat kahdesta asiasta: siitä miten mobiiliverkot ja -palvelut ovat vaikuttaneet kilpailuun ja siitä miten kehittyvien markkinoiden merkitys on kasvanut. Erityisesti Kiinan ja Intian nousu on huomattava, varsinkin jos tilastoidaan asiakasmääriä. Kiinassa on nykyisin selkeästi eniten matkapuhelinliittymiä ja Intiassa toiseksi eniten maailmassa. Perinteisillä

---

<sup>101</sup> Esimerkiksi J. Ollila & H. Saukkomaa, *Mahdoton menestys* (2013), luku 39, Laskelma ruutupaperilla.

eurooppalaisilla teleyrityksillä (Deutsche Telecom, France Telecom ja BT vaikka jääkin hieman 2010 listan ulkopuolelle) nykyinen liikevaihto matkaviestinnän alueella on lähes täsmälleen sama kuin koko liikevaihto 16 vuotta aiemmin.

**Taulukko 2.3.** Suurimmat telepalveluyritykset liikevaihdolla mitattuna, 1994 ja 2010, v. 2010 rahan arvoksi muunnettuna, miljardia US\$

1994, koko toimiala Teleyritys			2010, vain matkaviestintä Teleyritys		
1	NTT, Japani	84,2	1	China Mobile*, Kiina	71,6
2	AT&T, USA	56,0	2	Verizon**, USA	63,4
3	Deutsche Telekom, Saksa	48,5	3	Vodafone Group***, UK	60,8
4	France Telecom, Ranska	30,0	4	AT&T, USA	58,5
5	BT, Britannia	27,0	5	Telefonica, Espanja	52,7
6	Telecom Italia	23,4	6	NTT DOCOMO, Japani	48,5
7	GTE, USA	21,9	7	Deutsche Telekom, Saksa	45,7
8	BellSouth, USA	21,6	8	America Movil, Meksiko	29,9
9	Bell Atlantic, USA	18,0	9	France Telecom, Ranska	29,7
10	MCI, USA	17,1	10	Sprint Nextel, USA	28,6

\* China Mobile perustettiin vasta vuonna 1997.

\*\* Nykyinen Verizon sisältää aikaisempien GTE:n ja Bell Atlantic yhtiöiden liiketoiminnan.

\*\*\* Vodafone oli alun perin armeijan käyttöön tarkoitettujen radioiden valmistaja.

### *Nokian nousu telealan jättiläiseksi – ja pudotus*

Vuonna 1992 maailman teleyritysten kokonaistulot olivat yli 500 miljardia US dollaria ja laitevalmistajien liikevaihto yhteensä noin 120 miljardia dollaria. Kiinteiden puhelinliittymien määrä maailmassa oli vuonna 1994 noin 630 miljoonaa ja nopeasti kasvava (70 % vuodessa) matkapuhelimien määrä oli noin 55 miljoonaa. Tähän taitekohtaan silloin suurissa vaikeuksissa ollut Nokia Oy osui. Nokia pystyi hyödyntämään digitalisoinnin tuoman murroksen ja kasvoi hämmästyttävällä tahdilla. Nokian vuoden 1995 telealan liikevaihto oli noin 26 miljardia markkaa, kahta vuotta myöhemmin lähes kaksinkertainen ja vuonna 1998 jo 79 miljardia markkaa. Syksyllä 1998 Nokia nousi maailman suurimmaksi matkapuhelinvalmistajaksi 40,8 miljoonalla myydyllä puhelimella. Vuonna 2002 nettomyynti saavutti 30 miljardin euron rajan. Parhaimmillaan Nokia onnistui kasvattamaan markkinaosuuttaan matkapuhelimissa lähes 40 prosenttiin. Valtansa ja maineensa huipulla Nokia oli vuonna 2007, jolloin sen liikevaihto oli hämmästyttävät 75 miljardia dollaria.<sup>102</sup>

Miten voimme selittää tämän kertakaikkisen ainutlaatuisen nousun Suomen talous historian aikana? Nokia nousi maailman ehdottomalle huipulle tiukasti kilpaillulla alalla kahdeksassa vuodessa (1992 – 2000) ja pysyi siellä (hieman kriteereistä riippuen) seuraavat kahdeksan tai kymmenen vuotta. Ainakin seuraavat tekijät vaikuttivat menestykseen:

<sup>102</sup> Vertailun vuoksi Suomen valtion menot olivat samana vuonna 40,3 miljardia euroa.

- Nokia oli panostanut kohtuullisen paljon digitaalisen tietoliikenteen laitteiden kehittämiseen jo 1960-luvulta lähtien. Samoin Nokialla oli pitkät perinteet radioteknologian kehittämisessä.
- Mobiiliteknologia oli alalla erittäin merkittävä murroskohta. Perinteiset laitevalmistajat eivät 1990-luvun alussa nähneet, että GSM-teknologia muuttaisi alan liiketoiminnan luonteen hyvin nopeasti. Suurimpien yritysten osaaminen oli pääosin kiinteän verkon laitteiden (käytännössä puhelinkeskusten ja niiden hallintajärjestelmien) puolella, ei siis mobiiliverkoissa eikä senkään vertaa matkapuhelimissa (tosin Motorola oli tällöin merkittävin matkapuhelinten valmistaja).
- Digitaalisen GSM-teknologian ja yleisen kilpailutilanteen vapauttamisen myötä mobiilipalvelut muuttivat alan kilpailutilanteen olennaisesti. Aikaisemmin laitevalmistajilla ja suurimmilla operaattoreilla oli kiinteät suhteet toisiinsa. Nyt alalle tuli yhtäkkiä lukuisia haastajia, joilla ei ollut mitään siteitä mihinkään laitevalmistajaan. Näitä haastajia Nokia pystyi palvelemaan paremmin kuin perinteiset ja jäykät suuryritykset.
- Nokia teki vuonna 1992 hyvin radikaalin päätöksen ja laittoi kaikki liikenevät resurssit mobiiliverkkojen ja puhelimien kehittämiseen ja tähtäsi ehdottomalle huipulle, mikä mm. edellytti systemaattista brändin rakentamista.
- Lisäksi Nokialta löytyi riittävä määrä innokkaita ja kyvykkäitä asiantuntijoita ja johtavia toteuttamaan ja itse asiassa ylittämään tehdyt suunnitelmat.
- Ja varmasti monessa kohtaa oli myös onnea matkassa.

Taulukot 2.4 ja 2.5 kuvaavat muutoksen suuruutta. Nyt kun katsomme vuoden 1994 laitevalmistajien listaa, ja varsinkin jos katsomme alaa vielä pidemmältä ajalta, niin ainoastaan Ericsson ovat säilyttäneet vahvan asemansa. Muiden osa on ollut vaikeampi:

- Vuonna 2006 yhdistynyt Alcatel-Lucent tuotti vuonna 2012 yli miljardi dollaria tappiota. Yhtiön tausta on hyvin monisäikeinen. Sen historiasta löytyy mm. vuonna 1869 perustettu Western Electric, vuonna 1898 perustettu ranskalainen CGE sekä Bell Labs, Alsthol ja ITT Corporation.
- Jo 1800-luvun lopulla toimintansa aloittanut kanadalainen Nortel (Northern Telecom) ilmoitti vuonna 2009 lopettavansa toimintansa. Nortel työntekijöiden määrä oli parhaimmillaan 94 500.
- Motorolan Razr-puhelin oli vielä vuonna 2006 hyvin suosittu ja tuottoisa yhtiölle. Sen jälkeen alkoi jyrkkä alamäki, joka johti siihen, että Google osti



Motorolan matkapuhelintoiminnot vuonna 2012.<sup>103</sup> NSN (Nokia Siemens Networks) osti osan Motorolan verkkoliiketoiminnasta vuonna 2011.

- Siemens yhdisti verkkoliiketoimintansa Nokian kanssa vuonna 2007 ja myi lopulta osuutensa yhteisyrityksessä Nokialle.
- Nokia sai päätökseen Alcatel-Lucentin liiketoiminnan haltuunoton marraskuussa 2016.<sup>104</sup>

**Taulukko 2.4.** Telealan suurimmat laitevalmistajat 1994 (mukana vain kyseisten yhtiöiden telelaitteiden valmistus).

		Miljardia US \$ v. 2010 rahassa
1	Lucent Techn. (AT&T), USA	19,2
2	Alcatel, Ranska	19,2
3	Motorola, USA	19,2
4	Siemens, Saksa	16,5
5	Ericsson, Ruotsi	14,1
6	NEC, Japani	13,5
7	Northern Telecom, Kanada	11,1
8	IBM, USA	8,4
9	Fujitsu, Japani	6,6
10	Nokia, Suomi	5,1

<sup>103</sup> Kiinalainen Lenovo osti Motorolan puhelinliiketoiminnan Googlelta vuoden 2014 alussa. Google kuitenkin pitää itsellään patenttisalkun samalla tavoin kuin Nokia myydessään puhelinliiketoiminnan Microsoftille. ([http://www.huffingtonpost.com/2014/01/29/lenovo-motorola-google\\_n\\_4690283.html](http://www.huffingtonpost.com/2014/01/29/lenovo-motorola-google_n_4690283.html)).

<sup>104</sup> <http://www.helsingintimes.fi/business/14335-nokia-completes-alcatel-lucent-takeover.html>  
Nokian esittämät perusteet Alcatel-Lucentin ostamiselle ovat 1) teknologian murros, jossa pilvipalveluiden ja datakeskusten merkitys vahvistuu nopeasti, ja 2) Amerikan markkinoiden edelläkävijän asema (jossa Nokian matkapuhelimet epäonnistui pahasti). Esimerkiksi S. Bicheno, Exclusive – Nokia details thinking behind Alcatel-Lucent acquisition, [telecoms.com](http://telecoms.com), 10 July 2015.

**Taulukko 2.5.** Suurimpia telealan laitevalmistajia 2007-2011.<sup>105</sup>

Liikevaihto miljardia US \$	2007	2008	2009	2010	2011	2016	2017
Nokia, Suomi	75,1	70,5	57,8	55,9	50,3	25,0	27,8
Cisco, USA	37,7	39,6	35,5	42,4	44,8	48,6	48,1
Ericsson, Ruotsi	29,3	26,7	29,0	30,0	33,1	24,6	24,5
Huawei, Kiina	12,6	18,0	21,5	27,7	32,4	75,1	92,5
NEC, Japani	41,3	46,5	26,8	26,8	27,4		
Alcatel-Lucent, Ranska	26,2	23,6	21,8	21,2	20,4		
ZTE, Kiina	4,8	6,5	8,8	10,7	13,7	15,3	16,3
Nortel, Kanada	8,0	7,6	3,4	0,6	-		
<b>Yhteensä</b>	<b>297,9</b>	<b>295,8</b>	<b>254,2</b>	<b>251,3</b>	<b>264,5</b>		

Nousut ja varsinkin laskut ovat joskus hyvin jyrkkiä, laskuista viimeisenä valitettavana esimerkkinä Nokia.<sup>106</sup> Vaikka puhelimet eivät enää suoraan tahkoa rahaa Nokialle, niin verkkolaitteissa Nokia on noussut kolmen suuren joukkoon Ericssonin ja Huaweiin kanssa. Nokia on siis sulattanut itseensä vuoden 1994 tilaston (taulukko 2.4) neljän suurimman laitevalmistajan verkkoliiketoiminnat lähes kokonaisuudessaan. Ciscon liikevaihto vuonna 1994 oli vain 1,2 miljardia dollaria, mutta voimakkaassa kasvussa. Toiseksi merkittävimmän Internetin verkkolaitteiden valmistajan Juniperin liikevaihto vuonna 2010 oli 4,1 miljardia dollaria.

Nokian menestystarinaa on äärimmäisen vaikea kopioida sellaisenaan. Eikä sitä ollut myöskään helppo jatkaa loputtomiin. Mikä siis meni Nokian kännykkäbisneksessä pieleen? Kysymykseen on esitetty ja tullaan esittämään lukuisia erilaisia ja jopa ristiriitaisia vastauksia. Seuraavassa esitän yhden arvion keskeisimmistä syistä perustuen keskusteluihin aiheen tiimoilta, muutamaan asiaa liittyvään kirjaan ja artikkeliin sekä pienessä määrin omiin kokemuksiin Nokian työntekijänä 1995 – 2008.

Nokian vahvuus kännyköiden tekijänä perustui ensisijaisesti tehokkaaseen prosessiin, joka tuotti suuren määrän uusia puhelinmalleja vuosittain ja valmisti niitä edullisemmin kuin tärkeimmät kilpailijat. Myös yhtiön maine ja tunnettuus olivat maailmanlaajuisesti korkeita. Nokian asema näytti erittäin vahvalta vielä vuonna 2007. Sitten tapahtui kolme merkittävää muutosta. Ensiksikin Applen iPhone tuli markkinoille kesäkuussa 2007 ja muutti ajatuksen siitä, minkälainen älypuhelimien oikeasti pitää olla kosketusnäyttöinen

<sup>105</sup> [http://www.teleco.com.br/en/en\\_pais/en\\_vendors.asp](http://www.teleco.com.br/en/en_pais/en_vendors.asp)

<sup>106</sup> Tippuminen on sangen normaali ilmiö, esim. Tushman, M. L., & O'Reilly, C. A. (1996). *The ambidextrous organizations: Managing evolutionary and revolutionary change*. *California management review*, 38(4), 8-30.

ja helppoine käyttöliittymineen. Toiseksi, Google julkisti ensimmäisen version älypuheliin tarkoitettusta käyttöjärjestelmästä, Androidista, syyskuussa 2008. Kolmanneksi sekä iPhone että Android perustuivat siihen, että ulkopuoliset yritykset tekivät sovelluksia, joita sitten jaettiin ja kaupattiin Applen ja Googlen verkkokauppojen kautta. Sovellusten tuotekehitystuki ja ohjelmointiympäristö oli tehty niin helpoksi ja tehokkaaksi, että kynnys sovellusten tuottamiseen pysyi hyvin alhaisena.

Lyhyenä vastauksena siihen, miksi Nokia menetti muutamassa vuodessa täysin asemansa älypuhelimissa, on että Nokia ei pystynyt vastaamaan näihin haasteisiin riittävän nopeasti ja tehokkaasti. Pohjimmiltaan kysymys oli muutoksesta laitevalmistuksesta ohjelmistotuotantoon. Ensiksikin Nokian älypuhelimien käyttöjärjestelmä, Symbian, ei kerta kaikkiaan ollut riittävän hyvä uusien älypuhelimien pohjaksi. Erityisesti se oli huomattavasti hankalampi sovelluskehittäjien kannalta kuin iOS (eli Applen käyttöjärjestelmä) ja Android. Tämä oli todella vakava ongelma siinä vaiheessa, kun iPhone ja Android-puhelimet murensivat nopeasti Nokian hallitsevan aseman kännykkämarkkinoilla. Eräs hyvin perusteltu selitys Nokian kohtalolle oli alustatalouden aiheuttama muutos, jossa verkostovaikutukset olivat ja ovat erittäin voimakkaita. Kun sovelluskehittäjät valitsevat yhden (tai tässä tapauksessa kaksi) alustaa, niin kyseisestä kehitysalustasta tulee paljon arvokkaampi kuin mikään vähemmän käytetty alusta.<sup>107</sup>

Kun Google kehitti Androidin, Nokia jatkoi Symbian-käyttöjärjestelmän kehittämistä. Symbian ei onnistunut siis houkuttelemaan sovelluskehittäjiä eikä verkkokauppakaan lähtenyt toimimaan. Edes siirtyminen Windows phone -alustaan ei ratkaissut tätä ongelmaa, sillä Microsoftkaan ei pärjännyt kilpailussa Applen ja Androidin kanssa vaan jäi statistin rooliin ja luopui muutaman vuoden jälkeen leikistä kärsittyään suuret taloudelliset tappiot.

Teknisesti Nokia olisi mitä ilmeisimmin ollut kyvykäs tekemään kilpailukykyisiä Android-puhelimia, jotka olisivat voineet näyttää lähes identtisiltä iPhonen kanssa. Samsung teki tämän, mutta Nokia ei pystynyt sopimaan Googlen kanssa Androidin käyttöehdoista, sillä Nokia oli jo tottunut olemaan hallitseva osapuoli monissa neuvotteluissa. Eikä Nokian ”kunniakaan” ehkä antanut periksi kopioida suoraan iPhonen ulkoasua. On vaikea nähdä mikä olisi erottanut Samsungin ja Nokian puhelimet, jos ne olisivat valinneet saman strategian. Mutta tätä on turha spekuloida, koska Nokia valitsi toisin. Nokian luotsaaminen laitevalmistajasta menestyväksi Googlen ja Applen kaltaiseksi ohjelmisto- ja alustafirmaksi olisi ehkä ollut liian vaativa tehtävä kenelle tahansa johtajalle.

---

<sup>107</sup> Katso K. Karhun ja M. Heiskalan erittäin hyvä yhteenveto tapahtuneesta, Matkapuhelin-Nokia jäi alustatalouden jalkoihin, Helsingin Sanomat, 27.10.2018, <https://www.hs.fi/mielipide/art-2000005878533.html>

### 3. Tiedonsiirto

Telesanasto määrittelee tietoliikenneverkon siirtoteiden ja solmujen yhdistelmäksi, joka muodostaa teleyhteyksiä kahden tai useamman käyttäjän välille tietoliikennettä varten. Tietoliikenneverkko muodostuu siis verkon solmuista ja niitä yhdistävistä siirtoteistä. Tässä osiossa käsitellään erilaisia siirtoteitä ja niiden ominaisuuksia, joten tämä on olennaisesti teknisempi kuin aikaisemmat osiot. Tästä myös seuraa se, että opeteltavana on asioita, jotka ovat yhdellä määrättyllä tavalla ilman että tarvitsee pohtia, voisiko asia olla niin tai näin.

Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Desibeliasteikko ja sillä tehtävät laskutoimitukset
2. Analoginen vs. digitaalinen tiedonsiirto
3. Kanavoinnin periaatteet
4. Moduloinnin periaatteet
5. Erilaisten siirtomedioiden perusominaisuuksia

Lisäksi osioon kuuluu Shannonin kaava, joka on keskeinen työkalu arvioitaessa tiedonsiirron tehokkuutta.

#### Lähtökohtia

Signaaliksi kutsutaan ajan mukana vaihtelevaa ilmiötä, joka sisältää informaatiota. Analoginen signaali, kuten ilmanpaineen vaihtelu ihmisen puhuessa, voi periaatteessa saada mitä arvoja hyvänsä. Tällaisen signaalin esittämiseen tarvitaan liukuva asteikko. Digitaalisiksi puolestaan kutsutaan signaalia, joka voidaan esittää portaittaisella asteikolla jollain ulottuvuudella, usein jännitetasoina. Digitaalinen signaali voi siten olla:<sup>108</sup>

- 1) diskreetti<sup>109</sup> sekä ajan että voimakkuuden (intensiteetin) suhteen tai
- 2) jatkuvassa ajassa esitetty analoginen signaali, joka esittää joukkoa bittejä siten, että signaalin aaltomuodot ovat rajattuja.

Signaalit saattavat näyttää kovin erilaisilta; digitaalisiksi ne tekee se, että kummassakin tapauksessa signaali voi esittää vain ennalta määriteltyjä bittejä.

---

<sup>108</sup> Katso esimerkiksi [http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_signal](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_signal). Sanan digitaalinen sijasta käytetään jonkin verran myös termiä numeerinen (numeric). Käytännössä ero digitaalisen ja numeerisen välillä on vähäinen.

<sup>109</sup> Diskreetti tarkoittaa tässä sitä, että signaalin arvo (jossain ulottuvuudessa) voi saada vain määrättyjä arvoja.

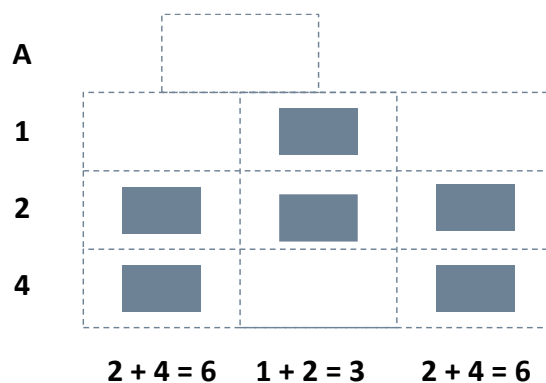
Ennen puhelinta, optinen ja sähköinen lennätin olivat luontaisesti digitaalisia, koska niissä vain määrätyt merkit olivat sallittuja riippumatta pienistä eroista signaalin muodossa. Kuvassa 1.5 esitettiin osa Chappen optisen lennättimen koodeista. Koodeja katsoessa voi kuvitella, että Chappe piti kirjaimien muotoja koodien lähtökohtana. Ilmeisesti merkit perustuivat kuitenkin viestintään käsissä pidettävien lippujen avulla.

Entä jos yläpalkki näyttäisikin olevan hieman vinossa tällä tavoin:  $\Upsilon$ ?

Onko tuo vinolta näyttävä merkki 7 vai 8, vai ehkä 7,3? Erilaisia palkkien asentoja ja niiden pituuksiahan on suuri määrä. Toisaalta hieman eroavia asentoja tai pituuksia on vaikea erottaa, varsinkaan kiikarilla pitkän matkan takaa katsottuna. Silloin kun virheiden määrä pyritään pitämään pienenä, kannattaakin laatia mahdollisimman selkeästi erottuvia koodeja. Tässä suhteessa ruotsalaisen A. N. Edelcrantzin<sup>110</sup> optinen lennätin oli parempi kuin Chappen lennätin.



Edelcrantzin lennättimen taulut oli järjestetty 3 x 3 ruudukoksi siten, että jokainen pystysarake muodosti yhden numeron. Yksi ruutu esitti yhden bitin verran informaatiota, eli yhdeksällä taululla voitiin esittää  $2^9 = 512$  lukua. Ylimmässä rivissä oli yksi ylimääräinen taulu, joka merkitsi kirjainta A, joka siis käytännössä kaksinkertaisti mahdollisten lukujen määrään. 3 x 3 ruudukon jokaisen sarakkeen ylin taulu merkitsi lukua 1, keskimmäinen lukua 2 ja alin lukua 4. Näillä kolmella taululla kullekin sarakkeelle voitiin muodostaa numero, joka saatiin summaamalla näkyvissä olevien taulujen arvot keskenään. Näin kunkin sarakkeen arvoksi saatiin 0-7. Esimerkiksi luku 636 lähetettiin kuvan 3.1 mukaisesti.



**Kuva 3.1.** Numero 636 Edelcrantzin optisella lennättimellä koodattuna.

Joidenkin arvioiden mukaan Edelcrantzin lennätin oli noin kaksi kertaa nopeampi (siirretyn informaation määrässä aikayksikössä) kuin Chappen lennätin. Vaikka optinen lennä-

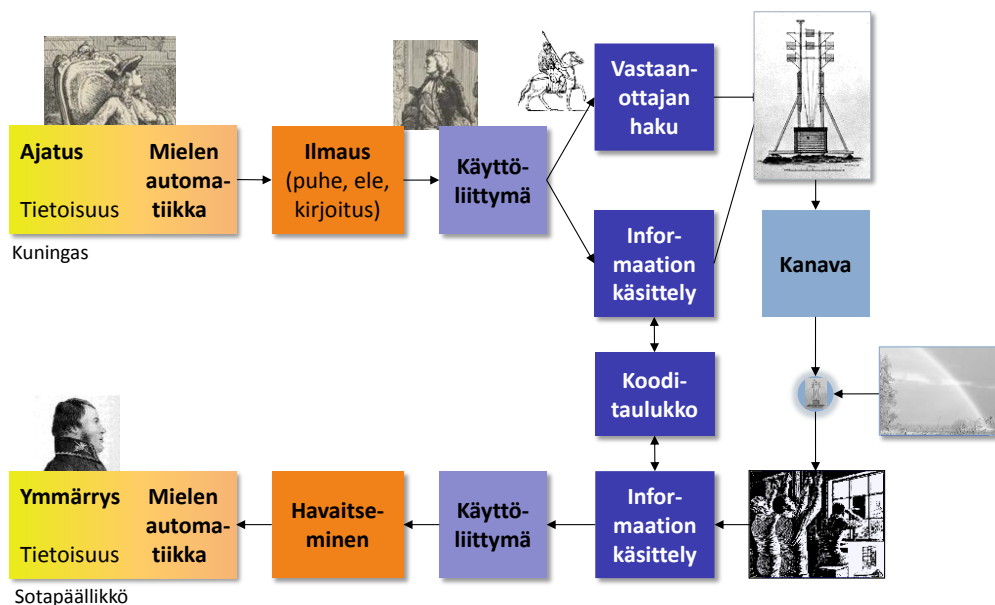
<sup>110</sup> Edelcrantz syntyi Turussa vuonna 1754 mutta teki pääosan urastaan Ruotsissa.

<http://hamradio.nikhef.nl/tech/rty/chappe/edelcrantz.html>, [http://fi.wikipedia.org/wiki/Abraham\\_Niklas\\_Edelcrantz](http://fi.wikipedia.org/wiki/Abraham_Niklas_Edelcrantz)

tin oli melko pitkään käytössä Tukholman saaristossa, sen hyödyllisyys kärsi sään vaihte-  
luiden aiheuttamasta epävarmuudesta. Koodauksen kannalta Edlercrantzin järjestelmää  
voidaan pitää jopa modernina; jos nyt joku haluaisi tehdä optisen lennättimen, niin siinä  
olisi hyvä lähtökohta. Ylintä A-taulua voisi käyttää esimerkiksi pariteettibittinä.

Otetaan vielä esimerkiksi eräs kuningas kaksi sataa vuotta sitten. Hänen alkuperäinen  
ajatuksensa saattoi olla *"Jag måste vara en stark ledare."* Tästä ajatuksesta seuraa lausah-  
dus adjutantille koskien armeijaa sadan kilometrin päässä (suomennettuna): *"Armeija hyö-  
kätköön aamulla kello 6."* Aikaa on niin vähän, matkaa niin paljon ja tiet niin huonoja, että  
ainoa tapa saada käsky sotapäällikölle asti ennen aamun koittoa on optinen lennätinlinja.  
Adjutantti lähettää käskyn eteenpäin ensimmäiselle lennätinasemalle. Lennätinasemalla  
sanoma otetaan vastaan, kaivetaan koodikirja esille ja toivotaan, että sää pysyy suotuisana.

Ennen kuin varsinaisen sanoman voi lähettää, täytyy määritellä sanoman vastaanottaja  
(esimerkiksi, kenraali Adlercrantz) ja lähettäjä (Kuningas III). Sanoman sisältö voisi kai-  
kessa lyhykäisyydessään olla: *"kuningas käsky hyökkäys huomenna kello 6"*. Tuohon voisi  
vielä lisätä "kuitatkaa." Vaikka voitaisiinkin olettaa, että kokenut kenraali ymmärtää lähet-  
tää vastausviestin heti sanoman saatuaan, niin kaikissa luotettavissa siirtojärjestelmissä  
täytyy käyttää tarkkaan määriteltyjä yhteyskäytäntöjä eli protokollia järjestelmän kaikilla  
tasoilla (tähän palataan tarkemmin 4. luvussa). Tarina on esitetty kaaviona kuvassa 3.2.



**Kuva 3.2.** Informaation siirtoa optisen lennättimen aikaan.<sup>111</sup>

Sanomat on hyvä pitää mahdollisimman lyhyinä. Koodikirjasta saattaa jopa löytyä sano-  
man sanat valmiina, esimerkiksi näin: kuningas = 001, kenraali Adlercrantz = 132, käsky =

<sup>111</sup> Kuvat oikealla ylhäällä: <http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/images/history/edelcrantz.html>, oikealla keskellä K. Kilkki, oikealla alhaalla <http://www.alternatehistory.com/discussion/showthread.php?t=144200>

222, hyökkäys = 777, huomenna = 636, kello 6 = 606. Eli alkuperäinen kuningasajatus on nyt saanut numeerisen muodon 001 132 222 777 636 606. Tämä viesti voidaan välittää optista lennätinlinjaa pitkin Edelerantzin laitteella. Viestin välittämiseen tarvitaan noin kymmenen lennätinasemaa, joissa ainakin yhden henkilön pitää jatkuvasti kiikaroida sen varalle, että uusi viesti on tulossa – melkoinen tehtävä, kun viestejä kulkee vain satunnaisesti ja ilmat vaihtelevat. Lopulta viesti saavuttaa vastaanottajan suunnilleen siinä muodossa kuin se on esitetty. Kenraali toteuttaa käskyn ja niin optinen lennätin on muokannut historiaa. Tämä oli tietysti kuvitelmaa, mutta se olisi hyvinkin voinut olla totta. Samoin olisi voinut käydä niin, ettei optinen lennätinlinja olisi toiminut lainkaan koko päivänä sateen takia. Ei sanomaa – ei hyökkäystä.

Informaatiotekniseltä kannalta mielenkiintoista on se, että alun perin epäselvä ajatus on ensi muutettu ymmärrettäväksi puheeksi ja sitten tiivistetty  $6 \times 9 = 54$  bittiin. Nykypäivänä kuningas haluaisi puhua itse kenraalin kanssa, kertoa käskynsä ja ehkä perustelunsa-kin sanallisesti. Puheesta olisi siis seurauksena ilman paineen vaihteluita. Informaation kannalta puhe on paljon rikkaampi kuin viestitetty lyhyt sanoma. Koodatusta käskystä ei selviä, epäröikö kuningas tai missä mielentilassa hän sattui olemaan. Toisaalta puheen tapauksessa tiedonsiirtoon tarvittaisiin huomattavasti enemmän bittejä, jotta kaikki nyanssit voitaisiin välittää. Optisesta lennättimestä ei ollut sellaiseen tehtävään.

## Tiedonsiirron peruseriaatteita

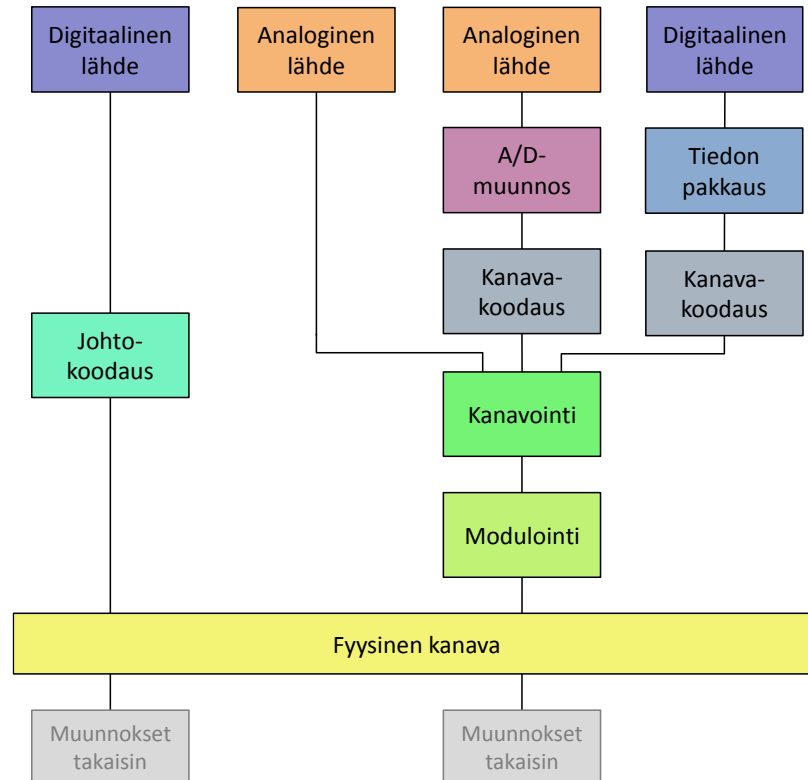
Kannattaako ylipäätään pohtia parin sadan vuoden takaista kuviteltua tapahtumaa sen sijaan, että keskityttäisiin nykyteknologioihin? Silloisella tekniikalla moni asia, joka nyt piiloutuu syvälle teknologian syövereihin, oli nähtävissä ja jopa käsin kosketeltavissa. Esimerkkejä ovat muunnos analogisesta digitaalisiin, virheiden ilmeinen mahdollisuus ja niiden käsittely, kapasiteetin rajallisuus ja siitä johtuva tarve koodien optimointiin, järjestelmän ylläpidon kalleus sekä salakuuntelun (tai -katselun) mahdollisuus. Vaikka teknologia on kehittynyt huimasti, haasteet ja ratkaisujen periaatteet ovat säilyneet olennaisesti samoina.

Seuraavaksi siirrytään nykyaikaan ja oletetaan, että verkon sisällä signaalin siirto tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn avulla digitaalisessa muodossa.<sup>112</sup> Välitettävä informaatio voi alun perin olla joko analogista (puhe tyypillisimpänä esimerkkinä) tai jo valmiiksi digitaalista. Toinen jakolinja voidaan esittää sen mukaan, välitetäänkö informaatio verkossa vai ”vain yksittäisellä” johdolla. Internet ja matkaviestinverkot ovat esimerkkejä verkoista, joissa informaatiota käsitellään monessa eri vaiheessa ja joissa ratkaistavana on lukuisia

---

<sup>112</sup> Tärkein poikkeus digitaalisuuteen on FM-radio, joka siis edelleen perustuu analogiseen signaaliin. FM:n periaate esitetään tarkemmin hieman myöhemmin tässä luvussa.

haasteita. Fyysinen kaapeli tietokoneen ja tulostimen välillä on esimerkki johdosta. Vaikka johdon ja verkon välillä ei ole täsmällistä eroa, niin perusasioiden esittämisen kannalta erottelu on käyttökelpoinen. Joskus käytetään myös termiä virtuaalinen johto (*virtual wire* tai *virtual cable*), jolloin väitetään, että tietty yhteys kahden pisteen välillä toimii ikään kuin välissä olisi pelkkä johto, vaikka yhteys rakentuisikin monimutkaisien laitteiden avulla.



**Kuva 3.3.** Tietoliikennejärjestelmän rakenneosat.

Kuvassa 3.3 on esitetty keskeisimmät tiedonsiirtoon liittyvät osa-alueet, joita ovat:

- **Analoginen lähde**, esimerkiksi puheen aiheuttamat ilmanpaineen vaihtelut.
- **Analogia-digitaalimuunnos** (A/D-muunnos, *analog-digital conversion*), jossa analogisessa muodossa oleva signaali (kuten puheen aiheuttamat paineen vaihtelut) muunnetaan digitaaliseen muotoon.
- **Johtokoodaus** (tai linjakoodaus, *line coding*): koodaus, jolla digitaalinen signaali<sup>113</sup> esitetään ennalta määrätyillä amplitudi- ja aika-arvoilla ottaen huomioon fyysisen siirtokanavan ominaisuudet.
- **Tiedon pakkaus** (tai lähdekoodaus; *data compression, source coding*): data muunnetaan tiiviimpään muotoon. Muunnos voi olla häviöllinen tai häviötön.

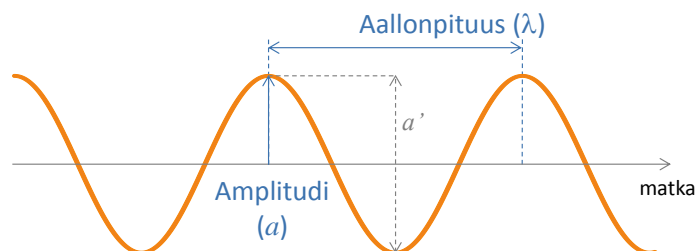
<sup>113</sup> Tässä tarkoitetaan 1-kohtaa luvun alussa esitetystä kahdesta määritelmästä digitaalisille signaaleille.



- **Kanavakoodaus** (**channel coding**), jonka tavoitteena on sovittaa (yleensä digitaalinen) informaatio kanavan ominaisuuksiin siten, että informaatio saadaan siirrettyä mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti.
- **Kanavointi** (tai multipleksointi, **multiplexing**), menetelmä jolla tehostetaan siirtomedian käyttöä yhdistämällä useita signaaleja yhteen kanavaan.
- **Modulointi** (**modulation**), jossa kantoaallon (**carrier**) yhtä tai useampaa ominaisuutta muokataan siten, että sen avulla voidaan välittää haluttu informaatio.
- **Fyysinen kanava** (**physical channel**), jonka avulla signaali siirretään paikasta toiseen. Kanava voi olla vapaa tila, sähköjohdin tai valokuitu.

### Aika- ja taajuusesitystavat

Ennen kuin menemme tarkemmin tiedonsiirron eri osa-alueisiin, on välttämätöntä ymmärtää muutama tekninen perusasia. Kuvassa 3.4 on esitetty siniaalto, jossa signaalin voimakkuus vaihtelee ajan funktiona säännöllisesti. Tietoliikenteen alueella käsitellään yleensä signaaleja, jotka vaihtelevat nollatason molemmin puolin, jolloin amplitudi<sup>114</sup> määritellään suurimman signaalin voimakkuuden ja nollatason erotuksena (kuvassa  $a$ ). Jossain tapauksissa amplitudi voidaan myös määritellä huipusta huippuun (kuvassa  $a'$ ). Epäsäännölliselle signaalille tai signaalille, joka ei vaihtelee nollatason molemmin puolin, amplitudi on vaikeampi määritellä. Amplitudin määritelmän suhteen on siten syytä olla tarkkana.

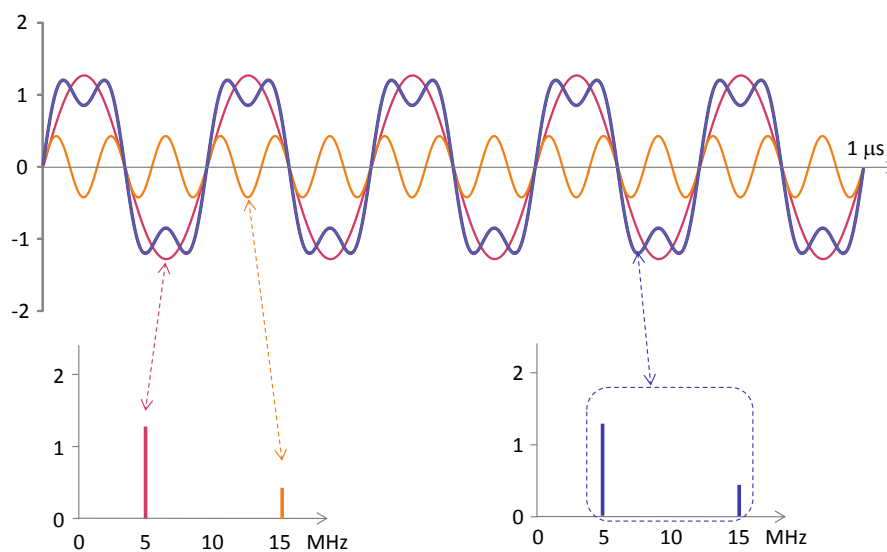


**Kuva 3.4.** Siniaalto, joka etenee väliaineessa (kuva siis esittää signaalin voimakkuutta eri paikoissa samalla hetkellä). Signaalin amplitudi on  $a$  ja aallonpituus on  $\lambda$ .

*Aallonpituus* ( $\lambda$ , **wavelength**) voidaan määritellä kahden peräkkäisen huipun välisenä etäisyytenä. Signaalin *taajuus* ( $f$ , **frequency**) riippuu signaalin etenemisnopeudesta ( $v$ ) siten, että  $f = v/\lambda$ . Lisäksi signaalin täsmälliseksi määrittämiseksi tarvitaan tieto signaalin vaiheesta ( $\phi$ , **phase**). Siniaallon  $\sin(\omega t + \phi)$  vaihe on  $\phi$ , jossa  $\omega$  on kulmataajuus ja  $t$  on aika. Huomaa, että jos aikaa mitataan sekunneissa ja  $\omega = 2\pi$ , niin signaalin  $\sin(\omega t)$  taajuus on 1 Hertz (Hz) ja amplitudi on 1.

<sup>114</sup> Amplitudin synonyymia *värähdyslaajuus* käytetään lähinnä sanastoissa ja sanakirjoissa.

Kuvassa 3.5 sinisen signaalin *kaistanleveys* (*bandwidth*) on  $15 - 5 = 10$  MHz, koska se on muodostettu kahdesta siniaallosta, joista toisen taajuus on 5 MHz ja toisen 15 MHz, kun taas puhtaan siniaallon taajuuskaista on periaatteessa nolla. Tässä yhteydessä on syytä korostaa siniaallon erityisyyttä. Kun signaali esitetään taajuusulottuvuudessa, niin silloin tarkoitetaan aina sitä, miten signaali voidaan esittää eritaajuisten siniaaltojen avulla. Voitaisiin toki ajatella, että signaali on ”muodostettu” muun muotoisista osista. Vaikka jatkuva signaali voidaan esittää myös esimerkiksi kolmioaaltojen<sup>115</sup> summana periaatteessa samalla tavoin kuin siniaaltojen summana, niin tällaiselle esitystavalle ei yleensä ole mitään perusteltua syytä. Eli vielä kertauksena: kun signaali muunnetaan aika-asteikolta (kuvan 3.5 ylä-osa) taajuusasteikolle (kuvan alaosaa), signaali jaetaan eri taajuuksiin siniaaltoihin.



**Kuva 3.5.** Aika- ja taajuusesitystavat ja signaalien yhdistäminen: sininen signaali on muodostettu kahdesta siniaallosta, joista toisen taajuus on 5 MHz ja toisen 15 MHz.

Puhdas siniaalto ei sellaisenaan sisällä muuta informaatiota kuin taajuuden, amplitudin ja vaiheen; informaation määrä ei kasva sen jälkeen, kun nämä ominaisuudet on havaittu. Informaation kuljettamiseksi tarvitaan siten monimutkaisempia ajan myötä muuttuvia signaaleja.

### Termejä ja yksiköitä

Tiedonsiirtonopeutta ja tiedon ja muistin määrää mitataan monenlaisilla yksiköillä. Bitti on määritelmän mukaan pienin informaatioyksikkö, siis jonkinlainen tiedon alkeishiukkanen. Sen nimi on johdettu englanninkielisestä lyhenteestä bit = *binary digit*. Bitillä on nimensä mukaisesti kaksi mahdollista tilaa, joita on tapana merkitä: nolla (0) ja yksi (1). Tavu

<sup>115</sup> Kolmioaallossa signaalin voimakkuus nousee ja laskee lineaarisesti kahden ääripisteen välillä.

(*byte*), koostuu nykyisen käytännön mukaan kahdeksasta bitistä.<sup>116</sup> Tavun lyhenne on B. Tavun merkintänä ei saa käyttää lyhennettä b, koska sitä käytetään bitin lyhenteenä (lyhenteen *bit* ohella). Tiedonsiirtonopeutta mitataan yleensä bitteinä sekunnissa (bit/s). Samaa tarkoittava, mutta epästandardi lyhenne on bps (*bits per second*), jota käytetään erityisesti Pohjois-Amerikassa.

Tietotekniikassa etuliite ”kilo” tarkoittaa usein lukua  $2^{10}=1024$ , varsinkin käsiteltäessä tavuja. Käytäntö on aika sekava. Tiedonsiirtonopeuksissa käytetään lähes aina 10-järjestelmää eli esimerkiksi giga =  $10^9$ , kun taas tietokoneen muistien koot määritellään usein binäärijärjestelmässä jolloin ”gigatavu” =  $2^{30} = 1\,073\,741\,824$  tavua.<sup>117</sup> Näiden kanssa kannattaa olla tarkkana.

Vanhempien tiedonsiirtojärjestelmien tapauksessa käytettiin myös termiä baudinopeus (*baud rate*), jolla tarkoitetaan sitä, kuinka monta symbolia voitiin lähettää aikayksikössä. Yhdellä symbolilla voidaan kuvata useampi kuin yksi bitti. Esimerkiksi Edelcrantzin lennätimellä voidaan sanoa, että yksi baud sisältää yhden läppien kombinaation (eli 9 tai 10 bittiä, riippuen siitä käytettiinkö A-läppää vai ei).

### *Desibeleillä laskemisen perusteet*

Desibelien muunnokset ja yhteenlaskut ovat niin keskeisiä asioita kurssin kannalta, että jokaisen tenttiin tulevan opiskelijan täytyy ne tuntea. Tässä lyhyt kertaus siitä miten desibeleillä lasketaan.

Tehosuhteen kymmenkantaisen logaritmin yksikkö on nimetty puhelimen keksijän Bellin mukaan beliksi, lyhenteenä B.<sup>118</sup> Yleensä käytetään asteikkona desibelejä (*dB*), eli belin kymmenesosa. Desibeli ilmaisee siis kahden tehon suhteen kymmenkertaisen kymmenkantaisen logaritmin, eli:

$$\frac{P_1}{P_2} [dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) [dB] \quad (3.1)$$

Esimerkiksi jos teho  $P_1$  on kaksi kertaa suurempi kuin teho  $P_2$ , niin niiden välinen suhde ( $P_1/P_2$ ) on 3 dB (tai tarkemmin  $10 \log_{10}(2) = 3,0103$  dB). Vastaavasti jos tehojen suhde on 100:1, niin desibeleissä suhde on  $10 \log_{10}(100) = 20$  dB.

<sup>116</sup> Alkuperäisen määritelmän mukaan tavu on pienin tietokoneen muistiosoitteella osoitettava yksikkö, joka saattoi olla jotain muutakin kuin 8, esimerkiksi 6 tai 12. Nykyisin tavulla käytännössä aina tarkoitetaan 8 bitin kokoista yksikköä.

<sup>117</sup> Tässä gigatavun sijasta tulisi käyttää lyhennettä gibi. Standardin mukaan kilo, mega, giga, tera ja peta tarkoittavat aina kymmenen potensseja (3, 6, 9, 12, 15), ei koskaan kahden potensseja (10, 20, 30, 40, 50). Oikeat kahden potenssin termit ovat kibi, mebi, gibi, tebi ja pebi. [https://www1.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_8.pdf](https://www1.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8.pdf), <http://en.wikipedia.org/wiki/Byte>. Tässä materiaalissa käytetään kymmenpohjaista järjestelmää, ellei muuta mainita.

<sup>118</sup> Onneksi Belin lyhennettä B ei juurikaan käytetä sellaisenaan vaan vain lyhenteessä dB, koska tavun lyhenne on B.

Suhteita voidaan laskea paitsi tehoille myös sähkön tapauksessa jännitteille ja virroille. Niinpä desibeleinä jännite tai virtasuhte =  $20 \log_{10} \left( \frac{U_1}{U_2} \right) [dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_2} \right) [dB]$ . Kannattaa olla tarkkana sen suhteen onko alkuarvot annettu tehoina vai amplitudeina. Yksinkertaisinta on opetella kaava tehosuhteina (3.1), ja sitten tarvittaessa muuntaa virta, jännite, ilmanpaine tai vastaava tehoiksi.

Silloin kun teho (ei siis vahvistus tai vaimennus) ilmaistaan desibeliasteikolla, täytyy myös ilmoittaa mihin tehoa verrataan. Sähkötekniikassa vertailukohta on yleensä milliwatti (mW). Lyhenteenä käytetään silloin yksikköä dBm, joka siis ilmaisee tehon suhteessa milliwattiin desibeliasteikolla:

$$P [dBm] = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1mW} \right) [dBm] \quad (3.2)$$

Esimerkiksi radionlinkin tapauksessa lasku voi olla:  $27 \text{ dBm} - 80 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = -50 \text{ dBm}$ , jossa  $27 \text{ dBm}$  voi olla antennin säteilyteho ( $0,5 \text{ W}$ ),  $80 \text{ dB}$  radiolinkin vaimennus ja  $3 \text{ dB}$  antennivahvistus. Vastaanottoteho on siis  $-50 \text{ dBm} = 10 \text{ nW}$ .

Kaavasta 3.w voidaan helposti johtaa kaava teholle, kun dBm-arvo ( $x$ ) tunnetaan:

$$P = 10^{x/10 - 3} [W] \quad (3.3)$$

Esimerkiksi:  $50 \text{ dBm} = 10^{50/10 - 3} = 100 \text{ W}$ .

Korostettakoon, että silloin kun kyseessä ovat tehovahvistukset ja -vaimennukset, voidaan soveltaa desibelien suoraa yhteen- ja vähennyslaskua, kuten edellä esitettiin. Sen sijaan laskutoimitus  $30 \text{ dBm} + 40 \text{ dBm} = 70 \text{ dBm}$  ei viittaa mihinkään reaali maailman ilmiöön—jos tällaisen laskelman esittää tentissä desibelilaskuna, niin lopputuloksena on automaattisesti 0 pistettä. Sama pätee kaavoissa, joissa esiintyy teho watteina (kuten Shannonin kaavassa (3.5) tai radiotien signaalien tehosuhteita kuvaavassa kaavassa 5.1), eli niihin ei saa koskaan sijoittaa desibelejä vaan tehoja wattiasteikoilla ilmaistuna).

Jos tehoja esitettyinä dBm-arvoina haluaa laskea yhteen, niin ne täytyy muuntaa ensin lineaariselle asteikolle ja vasta sitten laskea yhteen. Toisaalta yksinkertaisissa tapauksissa voimme päätellä lopputuloksen, esimerkiksi kun lasketaan yhteen tehot  $30 \text{ dBm}$  ja  $30 \text{ dBm}$ , havaitsemme, että teho kaksinkertaistuu, eli desibeliasteikolla teho kasvaa (likimäärin)  $3 \text{ dB}$ . Tulokseksi saadaan siis  $33 \text{ dBm}$ . Monimutkaisemmissa tapauksissa täytyy aina tehdä muunnos lineaariselle wattiasteikolle ennen yhteenlaskua. Tulos voidaan sitten tarvittaessa kääntää takaisin dBm-asteikolle.

Ja kannattaa vielä kertaalleen palata taulukkoon 1.1, jossa esitettiin esimerkkejä tehoasteikon eri osista. Esimerkiksi  $200 \text{ dBm}$  on erittäin suuri teho, eikä siihen tämän

kurssin laskuesimerkeissä päästä koskaan. Vaikka  $-110$  dBm onkin erittäin pieni teho (10 fW), se on mahdollinen vastaus radiovastaanottimen teholle.

### Esimerkki 3.1. Tehojen laskeminen yhteen desibeliasteikolla

Tiedetään että lähteiden tehot ovat 20 dBm, 25 dBm ja 28 dBm. Mikä on lähteiden yhteenlaskettu teho dBm-asteikolla, kun oletetaan, että lähteet ovat toisistaan riippumattomia?

#### Ratkaisu

Jotta yhteenlasku voidaan suorittaa, täytyy tehot ensin muuntaa lineaariselle asteikolle:

$$20 \text{ dBm} = 10^{20/10} \text{ mW} = 100 \text{ mW}.$$

Vastaavasti laskien saadaan: 25 dBm = 316 mW ja 28 dBm = 631 mW, joten yhteensä tehot ovat 1047 mW, joka dBm-asteikolla on:

$$10 \log_{10} \left( \frac{1047 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) \approx 30,2 \text{ dBm}.$$

Logaritmisesta asteikosta johtuen yhteenlaskettuna suurin teho desibeleissä dominoi lopputulosta: tässä tapauksessa kaksi pienempää lisäävät suurimpaan desibeliarvoon hieman yli 2 desibeliä.

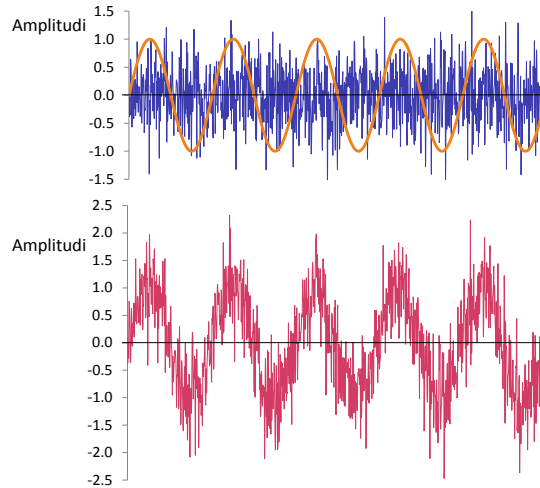
Signaalikohinasuhde (**signal-to-noise ratio**) on signaalin (**signal**, S) ja kohinan (**noise**, N) voimakkuuksien suhde. Tavallisesti signaalikohinasuhteesta käytetään lyhennettä S/N. Tavanomaisesti tämä ilmoitetaan tehosuhteina, eli jos erityisesti ei muuta ilmaista, niin kyseessä on tehojen suhde (ei siis amplitudi eli esimerkiksi jännite tai ilmanpaine). Kun signaalin teho on  $P_S$  ja kohinan teho on  $P_N$ , saadaan signaali-kohina-suhteeksi desibeliasteikoilla:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) [dB] \quad (3.4)$$

Kun yhteyden signaalikohinasuhteen sanotaan olevan hyvä, niin silloin S/N:n arvo on suuri eli signaali on voimakas verrattuna kohinaan.

### Esimerkki 3.2. Signaalikohinasuhde

Laske signaalikohinasuhde tapauksessa, jossa signaali on sinimuotoinen amplitudin ollessa 1. Kohina muodostuu satunnaisesti (normaalijakauman mukaisesti) jakautuneista arvoista, joiden keskiarvo = 0 ja keskihajonta = 0,5. Kuva 3.6 esittää yhtä realisaatiota, jossa kohina on arvottu äärellisille ajanjaksoille eli 1/1000 koko jakson pituudesta. Jos oletetaan, että koko esitetyn jakson pituus on 1 ms, niin signaalin taajuus on 5 kHz. Mikä on kanavan signaalikohinasuhde?



**Kuva 3.6.** Ylempi kuva: signaali (oranssi) ja kohina (sininen). Alempi kuva: yhdistetty signaali ja kohina. Signaali-kohina-suhte on noin 3 dB.

### Ratkaisu

Sinikäyrän teho on  $a^2/2$  eli tässä tapauksessa  $S = 0,5$  (tämä voidaan laskea trigonometrian peruskaavoilla).<sup>119</sup> Kohinalle teho saadaan suoraan keskihajonnan neliönä eli kohinan teho on  $0,25$ . Signaali-kohina-suhteeksi saadaan siten:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \log_{10} \left( \frac{0,5}{0,25} \right) = 3,01 \text{ dB}$$

Kuten kuvasta näkyy, signaali on vielä varsin selkeästi havaittavissa. Siitä huolimatta, jos signaalin sisältämä informaatio vastaanotetaan huonolla menetelmällä, esimerkiksi mittaamalla signaalin hetkellistä arvoa määrävälein, johtaa mittaus helposti väärään lopputulokseen.

### Shannonin kaava

Informaatioteorian edelläkävijä (voidaan jopa sanoa perustaja) Claude Shannon (1916 – 2001) tutki informaation (signaalin) ja kohinan suhdetta toisen maailmansodan päättymisen jälkeen.<sup>120</sup> Keskeisin tutkimuksen tuloksista tunnetaan Shannonin teoreema, joka voidaan esittää matemaattisesti muodossa:

$$C = B \log_2(1 + S/N) \left[ \frac{\text{bit}}{s} \right] \quad (3.5)$$

Tässä  $C$  on yhteyden suurin teoreettinen tiedonsiirtokyky bitteinä sekunnissa ilmaistuna,  $B$  on kaistanleveys (yksikkönä  $1/s$ ) ja  $S/N$  on signaalikohinasuhde paljaana lukuna (ei siis desibeleinä). Kaavassa on oletuksena, että jokainen lähetettävä symboli kohtaa kohinaa

<sup>119</sup> Tässä on jätetty yksiköt pois. Voidaan esimerkiksi olettaa, että amplitudi esitetään voltti-asteikolla ja vastus on 1 ohmi, jolloin tehot on esitetty watti-asteikolla. Absoluuttisilla arvoilla ei ole merkitystä, kun lasketaan tehojen suhteita.

<sup>120</sup> Erittäin hyvä johdanto aiheeseen on esitetty kirjassa: Shannon, C. E., & Weaver, W., (1963). *Mathematical theory of communication*. University Illinois Press.

riippumattomasti muista symboleista. Huomaa myös, että kaavassa esiintyy 2-kantainen logaritmi, ei siis desibeileissä käytetty 10-kantainen logaritmi.

Perinteisen analogisen puhelinyhteyden siirtokaista on 300 – 3400 Hz, eli kaistanleveys  $B = 3100$  Hz. Voimme olettaa, että hyötysignaalin ja häiritsevän kohinan voimakkuuksien suhde on desibeleinä  $S/N = 40$  dB eli signaali on 10000 kertaa kohinaa suurempi. Kun nämä lukuarvot sijoitetaan kaavaan 3.5, saadaan:

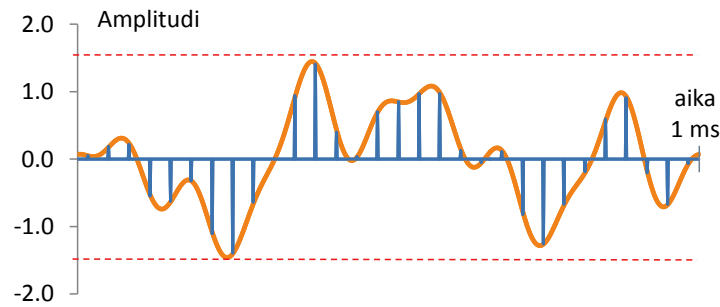
$$C = 3100 \log_2(1 + 10000) \approx 41200 \text{ bit/s.}$$

Näillä oletuksilla analogisessa puhelinverkossa voitaisiin siirtää maksimissaan 41 kbit/s. Miksi sitten voimme nykyisin siirtää dataa (siis tässä tapauksessa puhelinverkon kuparijohdolla) paljon suuremmalla nopeudella? Perinteinen puhelinverkko on nykyisin analoginen vain tilaajajohdon osalta ja käytännössä tilaajajohdon kaista ( $B$ ) on huomattavasti suurempi kuin tuo 3100 Hz. Käytettävissä oleva kaista riippuu johdon ja liitosten laadusta sekä ylikuulumisesta ja voi olla useita megabittejä sekunnissa.

## Analogisesta digitaaliseen

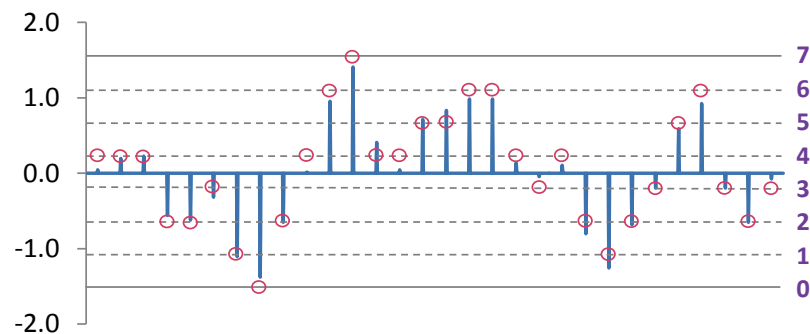
Bellin puhelimen aikaan, ja vielä seuraavan noin sadan vuoden ajan, ilmanpaineen vaihtelut välitettiin analogisesti jännitteen vaihteluina puhelinjohtoja pitkin. Vastaanottopäässä sähköinen signaali muutettiin takaisin korvin kuultaviin ilmanpaineen vaihteluihin. Lopputulos saattoi olla erittäin hyvä ja erittäin huono, riippuen siirtoyhteyksien ja päätelaitteiden laadusta. Pitkillä yhteyksillä analogiseen signaaliin kertyy monenlaisia häiriöitä, joita analogisesta signaalista on hyvin vaikea poistaa. Digitaalinen tekniikka on tässä suhteessa olennaisesti parempi. Nykyisin tiedonsiirto onkin lähes aina digitaalista.

Digitaalisen siirron peruseriaatteet on esitetty kuvissa 3.7 – 3.9. Ensin analogisesta signaalista otetaan näytteitä, yleensä vakiovälein ( $\Delta t$ ) eli näytteenottotaajuudella ( $1/\Delta t$ ). Tuloksena on sarja mittausarvoja, joiden arvo voi vaihdella vapaasti määrätyissä rajoissa. Tulos eli näytteiden sisältämä informaatio esitetään järjestelmän sisällä yleensä sähköisessä muodossa. Periaatteessa on mahdollista lähettää nämä näytteet sellaisenaan. Etuna puhtaaseen analogiseen signaaliin verrattuna on se, että useiden signaalien näytteitä voidaan välittää eteenpäin aikajakoisesti yhdellä siirtotiellä. Tällainen amplitudipulssimodulaatio ei kuitenkaan ole ollut yleisessä käytössä, vaan normaalisti näyte digitalisoidaan siten, että signaali voidaan esittää numeerisessa muodossa.



**Kuva 3.7.** Näytteenotto analogisesta signaalista taajuudella 30 kHz, kun esitetyn jakson pituus on 1 ms. Punaiset katkoviivat esittävät näytteenoton ylä- ja alarajoja. Signaali sisältää taajuuksia 1 – 10 kHz.

Kuvassa 3.8 signaalista otetut näytteet on koodattu kahdeksaan tasoon (0-7). Tasoista valitaan signaalin arvoa lähimpänä oleva. Tässä tapauksessa on yksinkertaisuuden vuoksi käytetty tasojen välillä vakiovälejä. Tasoja täytyy käytännössä olla paljon enemmän kuin kuvassa on esitetty, erityisesti kun toistetaan tai tallennetaan korkealaatuista musiikkia.<sup>121</sup>



**Kuva 3.8.** Näytteiden koodaus kahdeksalle tasolle (0 ... 7).

Pienillä signaalin arvoilla kvantisoinnin aiheuttama pyöristysvirhe voi kasvaa suureksi näytteen arvoon nähden. Kuulohavainnon suhteellisuuden (havaitsemme siis suhteellisia muutoksia emmekä absoluuttisia muutoksia) takia on järkevää käyttää tiheämpää asteikkoväliä pienillä äänenpaineilla kuin suurilla. Tämä epälineaarinen eli epätasavälinen kvantisointi vähentää kvantisointisäröä korvinkuultavasti. Käytännössä asteikko jaetaan kahtia nollassa molemmiin puolin. Negatiivisia äänenpaineita ei luonnollisesti ole olemassa, vaan nollassa on ilman keskimääräinen paine.

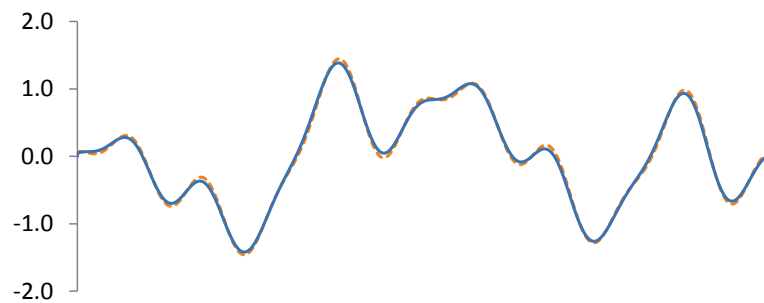
Lopputuloksena on numerosarja 444223102467445566434212356323, joka siis kuvaa alkuperäistä signaalin pätkää kohtuullisen tarkasti.<sup>122</sup> Vastaanottopäässä signaali palaute-

<sup>121</sup> Puhelinverkossa käytetään yleensä 8 bittiä eli 256 tasoa ja CD-levyllä 16 bittiä eli 65536 tasoa.

<sup>122</sup> Bitteinä 100100100010010011001000010100110111100100101101110110100011100010001010011101110011010011 Bittejä tarvitaan 90 esittämään 1 ms pituisia signaalia. Bittinopeus on siten 90 kbit/s eli tämä koodaus on tehontonta.



taan takaisin analogiseen muotoon. Lopputulos voi olla kuvan 3.9 muotoinen. Silmämääräisesti tulos näyttää hyvältä. Korvamme on kuitenkin erittäin herkkä havaitsemaan virheitä, joten signaalin ”todellista” koettua laatua on vaikea päätellä kuvasta.

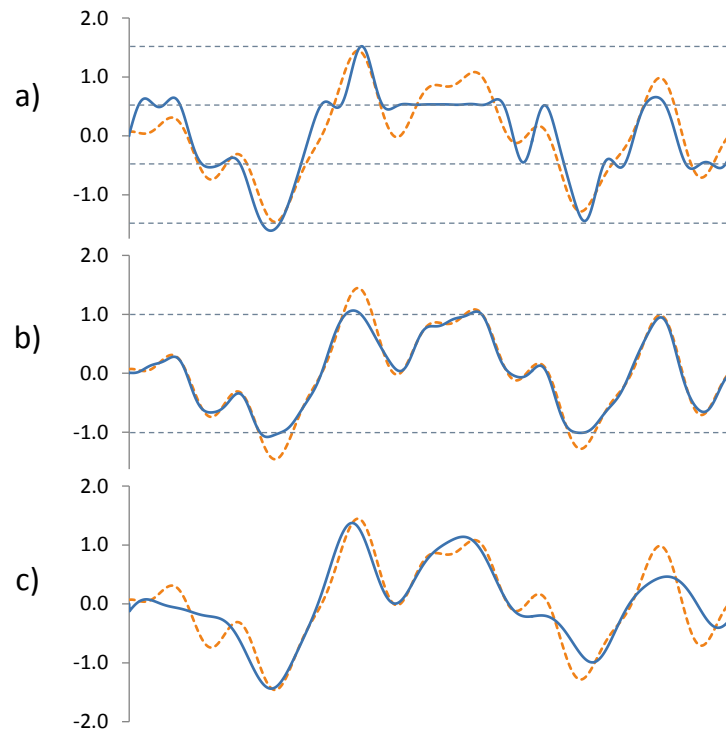


**Kuva 3.9.** Alkuperäinen signaali (oranssi katkoviiva) ja digitaalisen muunnoksen läpikäynyt signaali analogisessa muodossa (sininen viiva).

Digitalisoinnin epätäydellisyyksistä johtuvia virheitä on kolmea päätyyppiä: kvantisointikohina, signaalin leikkaantuminen ja näytteenottotaajuuden riittämättömyys.

1. Tasojen rajallinen määrä aiheuttaa kvantisointikohinaa eli digitaalinen signaalin arvo näytteenottohetkellä poikkeaa alkuperäisestä signaalista. Muutokset vaihtelevat satunnaisesti, joten esimerkiksi äänen tapauksessa kvantisoinnin vaikutuksen voi kuulla kohinana.
2. Kvantisointiin käytetty asteikko on rajallinen, joten on mahdollista, että asteikko ei riitä kuvaamaan kaikkia signaalien arvoja. Jyrkkä signaalin leikkaantuminen aiheuttaa ääneen epämiellyttävän särön. Oheisessa kuvassa näytteenottotaajuus ja tasojen määrä ovat riittäviä kuvaamaan alkuperäistä signaalia, sen sijaan asteikon laajuus ei ole.
3. Näytteenottotaajuus ei ole riittävän suuri, jotta kaikki signaalin (merkitsevät) muutokset saataisiin sisältymään digitalisoituun muotoon. Oheisessa kuvassa suurin signaalin komponentti on 10 kHz:n taajuinen ja näytteenottotaajuus on 15 kHz, jolloin osa signaalin vaihteluista jää havaitsematta.

Kuvassa 3.10 virheitä on korostettu käyttämällä selkeästi liian huonoa digitalisointia, käytännössä virheiden tulee olla huomattavasti pienempiä.



**Kuva 3.10.** Digitalisoinnin aiheuttamat kolme virhetyyppiä: a) kvantisoinnin aiheuttamat virheet,<sup>123</sup> b) asteikoin rajallisuuden aiheuttama signaalin leikkaantumisen ja c) liian pienen näytteenottotaajuuden aiheuttamat virheet.

Edellä on esitetty yksinkertaisin digitalisoinnin periaate. Monimutkaisempiakin menetelmiä on kehitetty erilaisia tarpeita varten. Näistä mainittakoon delta-modulaatio ([delta modulation](#)), jossa koodataan muutoksia peräkkäisten näytteiden välillä.

Mutta kuinka tiheään näytteitä täytyy ottaa? Ruotsalainen Harry Nyquist (1889–1976) esitti, että signaalista voidaan ottaa näytteitä siten, että näytteiden perusteella voidaan konstruoida alkuperäistä vastaava signaali. Teoreeman mukaan näytteitä pitää ottaa taajuudella, joka on vähintään kaksinkertainen alkuperäisessä signaalissa esiintyvään suurimpaan taajuuteen nähden. Jos analogisesta signaalista otetaan näytteitä liian harvakseltaan, signaali saattaa laskostua alemmista taajuuksiksi. Korkeataajuiset komponentit leikautuvat pois, eikä näytejonon perusteella voida enää rakentaa alkuperäistä signaalia.

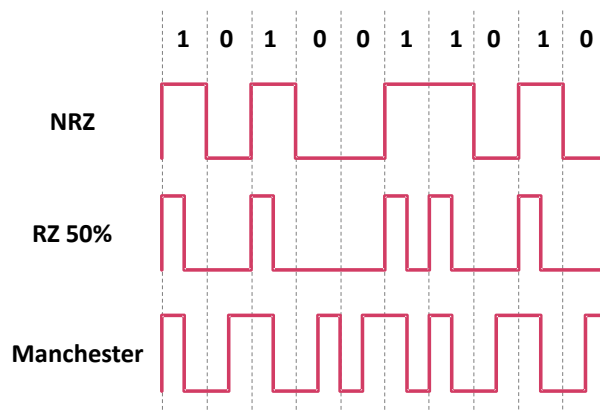
Analogisessa puhelinverkossa puhelimen kyky siirtää puhetta rajoitettiin teknisistä syistä välille 300 - 3400 Hz. Näytteenotto teoreeman mukaisesti näytteenottotaajuuden tulee olla  $2 \cdot 3400$  Hz eli 6800 Hz. Teoreemassa on kuitenkin sana ”vähintään.” Käytännössä näytteenottotaajuuden on syytä olla jonkin verran suurempi. Siksi kansainvälisesti sovittiin, että digitaalisessa puhelinverkossa näytteenottotaajuus on 8000 Hz. Jos jokainen

<sup>123</sup> Kuvassa virheiden korostamiseksi on käytetty vain neljää tasoa (ei kahdeksaa kuten kuvassa 3.8).

näyte sisältää kahdeksan bittiä, syntyy bittivirta, jonka nopeus on 64 kbit/s. Nykyisissä matkapuhelinverkoissa koodaus tehdään monimutkaisemmin, jolloin vastaavaan tai jopa parempaan äänenlaatuun päästään pienemmällä bittinopeudella.

## Johtokoodaus

Johtokoodi (*line code, encoding*) määrittelee miten digitaalinen signaali siirretään johtimen yli. Johtokoodi määrää bittien sähköisen esitysmuodon. Yksinkertaisimmissa menetelmissä käytetään kahta jännitetasoa, joista toinen kuvaa ykköstä, toinen nollaa. Tällainen johtokoodi on esimerkiksi kuvan 3.11 NRZ-koodaus (*non return to zero*).



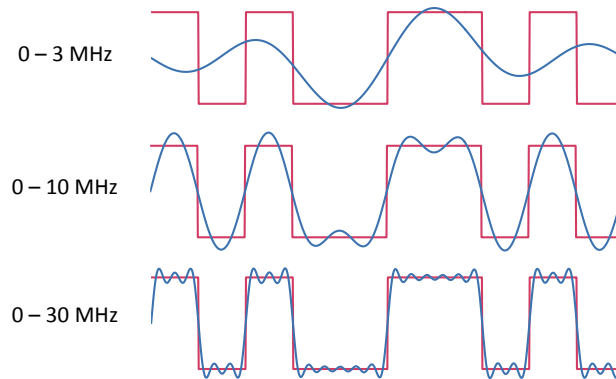
**Kuva 3.11.** Yksinkertaisia johtokoodeja.

Jos signaalissa on pitkä, yhtenäinen jono samaa bittiä, vastaanottajan on vaikea säilyttää tahdistus ja pysyä selvillä siitä, missä eri bittien rajat kulkevat. Tämä voidaan välttää käyttämällä sellaista johtokoodia, jossa signaalin taso muuttuu joka tapauksessa, vaikka siirrettävänä olisikin rivi pelkkiä nollia tai ykkösiä.

RZ-koodauksessa (*return to zero*) kutakin bittiä kuvaava jännitetaso pidetään vain osan aikaa bitin koko kestoista. Tällä koodauksella vastaanottajan on helpompi säilyttää tahti kuin edellä mainitulla NRZ-koodauksella, mutta edelleenkin pitkä rivi nollia voi sekoittaa siirron. Manchester-koodauksessa ongelma on ratkaistu muuttamalla jännitetasoa jokaisen bitin keskellä. Ykkönen (1) ilmaistaan muutoksena positiivisesta jännitetasosta negatiiviseen ( $+ \rightarrow -$ ) ja nolla vastaavasti muutoksena negatiivisesta positiiviseen ( $- \rightarrow +$ ). Jatkuvien jännitemuutosten ansiosta vastaanottajan on helppo pysyä tahdissa. Manchester-koodausta käytetään esimerkiksi Ethernet-verkoissa.

Kuvan 3.11 mukainen signaali, eli kantiaalto, todellakin näyttää digitaaliselta. Käytännössä tilanne on monimutkaisempi. Kulmikas signaalin muoto nimittäin edellyttäisi ääretöntä kaistanleveyttä. Johdon kaistanleveyttä rajoittaa signaalin nousuaika, joten signaali väistämättä pyöristyy enemmän tai vähemmän. Toisaalta pyöristyminen ei haittaa, jos signaalin sisältämä informaatio eli bitit voidaan havaita luotettavasti vastaanottopäässä. Tässä

suhteessa vaatimus on siis eri kuin analogisen signaalin näytteenoton tapauksessa: nyt emme ole kiinnostuneita signaalin alkuperäisestä muodosta vaan sen sisältämästä digitaalisesta informaatiosta. Kuvassa 3.12 on esitetty yksinkertaisen kanttiaallon muoto erilaisilla kaistanleveyksillä. Kun kaistanleveys on riittämätön, signaalin sisältämää informaatiota ei voida enää luotettavasti havaita vastapäässä.



**Kuva 3.12.** Kanttiaalto johdolla, jonka kaistanleveys on joko riittämätön (3 MHz), kohtuullinen (10 MHz) tai hyvin riittävä (30 MHz) kun bittinopeus on 10 Mbit/s.<sup>124</sup>

### *Rinnakkainen ja sarjamuotoinen siirto*

Tietokoneen keskusyksikön tärkeimmät osat on liitetty toisiinsa väylällä. Käytännössä väylä muodostuu suuresta joukosta yhdensuuntaisia kuparijohtimia tietokoneen emolevyllä. Johtimia on paljon, jolloin yhdellä prosessorin kellojaksolla saadaan siirretyksi yhden merkin kaikki bitit samanaikaisesti, kukin omalla johtimellaan. Tätä tiedonsiirtotapaa kutsutaan rinnakkaisiirroksi tai rinnakkaismuotoiseksi siirroksi ([parallel transfer](#)).

Toinen vaihtoehto on siirtää merkit bitti kerrallaan peräkkäin samalla johtimella. Ratkaisu tunnetaan nimellä sarjamuotoinen siirto ([serial transfer](#)). Jos yhden johtimen tiedonsiirtonopeus pidetään vakiona, sarjamuotoinen siirto on hitaampaa kuin rinnakkaismuotoinen siirto. Rinnakkaisliitettä on käytetty esimerkiksi tietokoneen ja kirjoittimen väliin lyhyisiin yhteyksiin. Tätä pidemmällä matkoilla on taloudellisinta käyttää sarjaliikennettä. Nykyisin yleisimmin oheislaitteiden liittämiseen käytetty USB ([Universal Serial Bus](#)) perustuu nimensä mukaisesti sarjamuotoiseen tiedonsiirtoon.

Tarvittava suuri johdinmäärä ei ole merkittävä kustannustekijä silloin kun yhdistetään samassa huoneessa olevia tietokonelaitteita toisiinsa, mutta tilanne on aivan toinen, kun yhteyden pituus on jopa satoja kilometrejä. Lisäksi tahdistus on ongelma pitkillä etäisyyksillä ja suurilla tiedonsiirtonopeuksilla. Etenemisnopeuksissa voi myös olla johdinkohtaisia

<sup>124</sup> Kaistanleveys ja bittinopeus eivät ole synonyymejä, vaikka bittinopeus riippuu käytössä olevasta kaistanleveydestä. Termit kannattaa pitää tiukasti erillään, vaikka englanninkielessä [bandwidth](#) viittaakin usein bittinopeuteen.

eroja, jolloin pitkällä matkalla on hyvin vaikea taata, että rinnakkaisissa johtimissa kulkevat signaalit tulisivat täsmälleen samaan aikaan perille.

### Tahdistus

Tietoliikennejärjestelmissä data siirretään paikasta toiseen muuttamalla bitit symboleiksi analogisesti välitettäviksi aaltomuodoiksi (*waveform*). Kuten edellä esitettiin, kun aaltomuoto kulkee kanavan läpi, joka voi välittää vain rajallisen taajuuskaistan, sen muoto vääristyy. Lisäksi signaaliin yhdistyy kohinaa. Jotta vastaanotin voisi havaita oikean signaalin, täytyy sen tietää milloin signaali alkaa ja milloin se päättyy. Tätä varten lähettimen ja vastaanottimen välillä täytyy olla jonkinlainen tahdistus eli synkronointi (*synchronization*). Yksinkertaisimmillaan vastaanotin pyrkii ottamaan näytteen bitin keskeltä (vertaa kuva 3.12). Jos näyte otetaan liian aikaisin tai liian myöhään, näyte voidaan tulkita väärin. Tarvittavan tahdistuksen tarkkuus riippuu siten käytettävästä signaalin taajuudesta.

Periaatteessa voisi ajatella, että tahdistusongelma voidaan ratkaista tarkalla kellolla. Mutta jos esimerkiksi bittejä siirretään 10 Gbit/s nopeudella bitit peräkkäin, niin yhden bitin siirtämiseen jää aikaa 0,1 ns ja kellon pitäisi pystyä pitämään tätä pienempi tarkkuus jatkuvasti. Käytännössä synkronointia onkin ylläpidettävä suurilla siirtonopeuksilla lähes jatkuvasti bitti kerrallaan.

Bittitahdistuksen (*bit synchronization*) lisäksi vastaanottimen on tiedettävä, milloin merkki tai tavu alkaa ja milloin se loppuu. Merkkitahdistusta (*character synchronization*) varten merkin alkuun ja loppuun voidaan lisätä ylimääräisiä aloitus- ja lopetusbittejä. Kun siirretään pitempiä sanoma, vastaanottajan täytyy lisäksi jostain päätellä, missä kohtaa sanomaa kukin merkki sijaitsee. Tämä tapahtuu sanomatahdistuksen (*frame synchronization*) avulla. Synkronisessa tiedonsiirrossa tahdistus pyritään pitämään yllä jatkuvasti, sen sijaan asynkronisessa (*asynchronous*) siirrossa tahdistus säilytetään vain merkin ajan. Tahdistuksen uudelleen etsiminen kuluttaa aina siirtoresursseja, joten sitä käytetään yleensä vain suhteellisen pienillä siirtonopeuksilla.

### Tiedon pakkaaminen

Alkuperäistä digitaalisessa muodossa esitettyä dataa kannattaa tai on jopa pakko tiedonsiirtokapasiteetin rajallisuuden vuoksi pakata pienempään tilaan. Tila tarkoittaa tässä siis datan määrää bitteinä. Englannin kielellä käytetään tässä yhteydessä useita eri termejä: *data compression*, *source coding* ja *bit-rate reduction*. Pakkaaminen voi olla joko häviötöntä (*lossless*) tai häviöllistä (*lossy*). Häviötön koodaus tarkoittaa, että pakattu data voidaan palauttaa täsmälleen alkuperäiseen muotoon. Häviöllisessä tähän ei pystytä vaan osa alkuperäisestä informaatiosta menetetään.

Häviötön pakkaaminen perustuu datan sisältämään toisteisuuteen eli redundanssiin (*redundancy*). Ensimmäisessä luvussa esimerkkinä käytetyssä Seitsemän veljeksien tekstissä on 613 773 merkkiä (mukaan lukien välilyönnit). Tekstitiedoston kooksi tulee 626 kilotavua. Sen sijaan pakattuna zip-tiedostona koko on vain 254 ktavua.<sup>125</sup> Esimerkiksi kirjainyhdistelmä ”tta” esiintyy tekstissä 2411 kertaa kun taas moni mahdollinen kirjainyhdistelmä ei esiinny joko lainkaan (kuten ”alr” ja ”erp”) tai vain kerran (kuten ”nöl” ja ”pyv”). Tätä tietoa, eli toisteisuutta, voidaan käyttää siten, että yleisemmin esiintyvien kirjainyhdistelmien koodaamiseen käytetään vähemmän bittejä kuin harvemmin esiintyvien yhdistelmien. Samaa periaatetta käytettiin jo ensimmäisessä luvussa esitetyissä optisissa lennätimissä sekä Morse-koodissa, jossa yleisimmät kirjaimet ovat lyhyellä koodilla ( $\cdot = E$ ) kun taas harvinaisemmat kirjaimet esitetään pitkällä koodeilla ( $--\cdot-- = Q$ ).

Luonnostaan digitaalisessa muodossa olevaa dataa ei ole mielekästä pakata häviöllisesti, ellei tiedetä, mikä osa informaatiosta on tärkeää ja mikä vähemmän tärkeää. Tekstissä tämä on hyvin vaikeaa, ainakaan millään automaattisella menetelmällä. Lukuarvoja esittävässä datassa voidaan ehkä jättää viimeiset desimaalit esittämättä, mutta tämäkin on kyseenalaista, ellei bittien merkitystä ja käyttöä tiedetä tarkasti.

Sen sijaan alun perin analogisen signaalin, varsinkin videokuvan, tapauksessa häviöllinen pakkaaminen on usein välttämätöntä. Videokuvan tapauksessa häviöttömällä pakkauksella päästään tyypillisesti noin kolmasosaan alkuperäisestä nopeudesta, mutta silti tarvittavat tiedonsiirtonopeudet ovat suuria verkon yli siirrettäväksi. Esimerkiksi tyypillinen HD (*High Definition*) videokuva (1080p) käyttää kuvan kokona  $1920 \times 1080$ , jolloin kuva-alkioita eli pikseleitä (*pixel*) on yhteensä 2 073 600. Jos kuvia esitetään nopeudella 25 kuvaa sekunnissa ja yhden pikselin värin koodaukseen käytetään 24 bittiä, niin nopeudeksi ilman kuvan pakkaamista saadaan 1,244 Gbit/s. Pakkaamisen jälkeen tyypillinen verkossa käytetty videokuvan nopeus on kuitenkin noin 5 Mbit/s. Ero alkuperäisen ja pakatun signaalin välillä on ratkaiseva varsinkin silloin, kun kuvaa siirretään radiotien yli.

## Kanavakoodaus

Parhaimmillakin yhteyksillä tiedonsiirrossa saattaa tulla virheitä. Vuosikymmenien aikana on kehitetty erilaisia virheitä havaitsevia ja niitä korjaavia koodeja, joilla pyrittiin varmistamaan tiedon perilletulo alkuperäisen kaltaisena. Virheitä voidaan korjata joko jokaisella linkillä erikseen tai päätepisteiden välillä. Tavallisimmat menetelmät ovat pariteettitarkistus, kaiuttaminen ja tarkistussumman laskeminen.

---

<sup>125</sup> Vastaavasti Charles Dickensin kirja *Great Expectations* koko alkuperäisenä tekstitiedostona on 991 kilotavua ja pakattuna 387 kilotavua. Kohtuullisesti pakatun tekstitiedoston koko on noin 40 prosenttia alkuperäisen koosta.

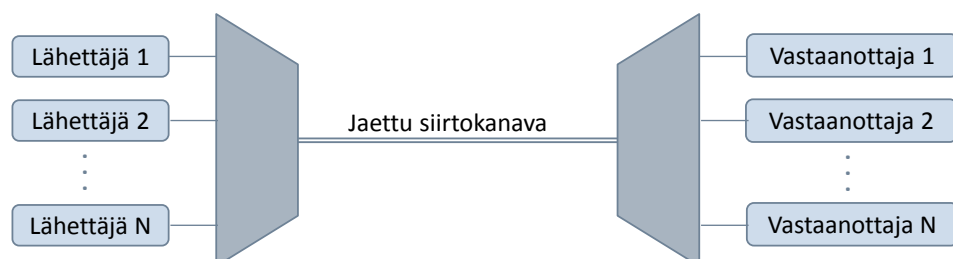
Pariteettitarkistuksia (**parity checking**) on useita erilaisia. Pariteettitarkistuksessa lähettäjä lisää jokaiseen merkkiin yhden pariteettibitin, joka täyttää määrätyt vaatimukset. Yleensä käytetään joko parillista tai paritonta pariteettia (**even parity, odd parity**). Näissä ylimääräinen pariteettibitti täydentää merkin ykkösbittien lukumäärän joko parilliseksi tai parittomaksi. Pariteettitarkistus ei ole kovin varma menetelmä virheitte havaitsemiseksi. Kahden bitin kääntyminen eli muuttuminen vastakkaisiksi samassa merkissä jää pariteettitarkistuksessa huomaamatta. Koska pariteettitarkistus tehdään jokaiselle merkille erikseen, se sopii asynkroniseen tiedonsiirtoon.

Kaiutuksessa (**echo checking**) vastaanottaja lähettää vastaanottamansa datan takaisin lähettäjälle. Lähettäjä vertaa vastaanottamaansa bittivirtaa lähettämäänsä ja tarkistaa, onnistuiko siirto. Menetelmä on varma mutta hidas. Sitä käytetään vain silloin, kun tiedonsiirtovirheitte seuraukset olisivat kohtalokkaat (esimerkiksi lennonjohdon ja lentäjän välisessä puheliikenteessä, jossa lentäjä joutuu toistamaan tornista saamansa ohjeet).

Tarkistussumma (**checksum**) on kohtuullisen varma tapa havaita siirtovirheet. Lähettäjä laskee tarkistussumman suuremmasta bittijoukosta eli lohkoista ja lisää sen lohkon loppuun. Vastaanottaja laskee tulevasta datasta samalla menetelmällä oman tarkistussummansa ja vertaa sitä lohkon mukana tulevaan. Jos summa täsmää, voidaan siirron olettaa onnistuneen. Samoja virheitä korjaavia koodeja käytetään myös palvelinkoneissa. Jonkinlainen kanavakoodaus on välttämätön aina kun siirtotie on hiemankin epäluotettava. Esimerkiksi jo Chappen optisessa lennättimessä käytettiin kanavakoodauksen periaatetta.<sup>126</sup>

## Kanavointi

Kanavointi<sup>127</sup> (**multiplexing**) tarkoittaa monen signaalin (esimerkiksi puheyhteyden) siirtämistä samanaikaisesti yhdellä siirtokanavalla. Kanavoinnin tavoitteena on tehostaa tiedonsiirtokapasiteetin käyttöä ja vähentää kokonaiskustannuksia. Kanavointi tehdään joko taajuus-, aika- tai koodijakoisesti.



**Kuva 3.13.** Kanavoinnin periaate.

<sup>126</sup> J. John Hearfield, [The Chappe semaphore telegraph](http://www.johnhearfield.com/Radar/Chappe.htm), <http://www.johnhearfield.com/Radar/Chappe.htm>

<sup>127</sup> Usein käytetään myös termejä multipleksointi ja demultipleksointi, jolla tarkoitetaan multipleksoidun signaalin jakamista takaisin alkuperäisiin signaaleihin eli kanavoinnin purkamista.

Taajuusjakoisessa kanavoinnissa (FDM, **Frequency Division Multiplexing**) siirtotien (johdon tai radioyhteyden) taajuusalue jaetaan useaan osaan eli kanavaan. Jokaisella kanavalla on oma kantoaaltonsa, jota moduloidaan siirrettävällä signaalilla. Vastaanottopäässä eri kanavat on helppo erotella toisistaan kaistanpäästösuodattimien avulla. Tällä tavoin siirtotien koko käytettävissä oleva taajuusalue saadaan tehokkaaseen käyttöön. Taajuusjakoista kanavointia on käytetty mm. analogisessa puhelinverkossa ja radio- ja televisiosignaalien siirrossa.

Aikajakoisessa kanavoinnissa (TDM, **Time-Division Multiplexing**) useista eri signaaleista otettuja näytteitä siirretään johdolla vuorotellen. Kun näytteitä otetaan siirtonopeuteen verrattuna harvakseltaan, sama fyysinen yhteys ehtii palvella useita loogisia yhteyksiä samanaikaisesti. Käytännössä aikajakoista kanavointia käytettäessä signaalit ovat digitaalisessa muodossa. Digitaaliset matkapuhelinverkot käyttävät samanaikaisesti sekä taajuus- että aikajakoista kanavointia.

Lisäksi multiplekointi voi perustua koodijakokanavointiin (CDMA, **Code Division Multiple Access**). CDMA-kanavoinnissa jokainen käyttäjä voi periaatteessa käyttää hyväkseen koko saatavilla olevaa taajuuskaistaa sekä lähetyksessä että vastaanotossa. Hedy Lamarr (ohessa) kehitti George Antheilin kanssa taajuushyppelyyn perustuvan hajasperitritekniikan, johon CDMA siis perustuu.<sup>128</sup> Käyttäjät erotetaan toisistaan yksilöllisellä koodilla. Lähettäjä sisällyttää vastaanottajan koodin signaaliinsa, jolloin vain koodin tunteva asema voi vastaanottaa sen. Koodijakokanavointi kehitettiin alun perin sotilassovelluksiin estämään salakuuntelua ja parantamaan häiriöiden sietoa.



Aallonpituuskanavoinnin (WDM, **Wavelength-Division Multiplexing**) perusideana on lähettää valokuidulle erivärisiä eli eri aallonpituuksisia valonsäteitä. Se on periaatteessa sama asia kuin taajuusjakoinen kanavointi mutta sovellettuna optisille taajuuksille. WDM-tekniikan kehityksen alkuvaiheessa haasteellisinta oli rakentaa tarpeeksi hyviä lähettäjiä ja vastaanottimia niin, että eriväriset valonsäteet saatiin eroteltua toisistaan. Nykyisin yhteen kuituun saadaan mahtumaan jopa satoja eritaajuisia valonsädetä ja pullonkaula on siirtynyt siirtotiestä valtaviin datamassojen käsittelyyn reitittimissä ja datakeskuksissa.

## Modulointi

Ihmisen puhe mahtuu varsin kapealle taajuusalueelle. Ihmiskorva on herkimmillään taajuusalueella 2 kHz – 6 kHz. Miten radiosta, joka on viritetty taajuudelle 94,9 MHz, kui-

<sup>128</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Hedy\\_Lamarr](https://en.wikipedia.org/wiki/Hedy_Lamarr)



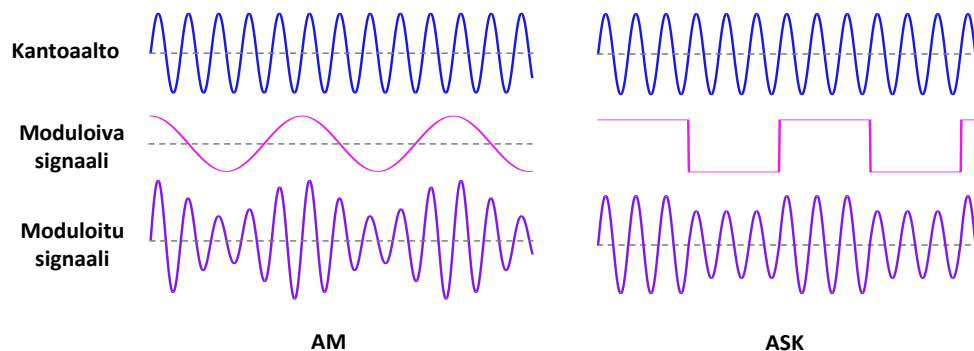
tenkin kuullaan puhetta ja musiikkia? Ilmiö selittyy modulaatiolla. Korkeataajuisen kantoaallon avulla matalataajuinen informaati signaali siirretään käyttökelpoisemmalle taajuusalueelle. Mikrofonin tuottamalla puhetaajuisella signaalilla moduloidaan kantoaaltoa, joka sopii siirtoon huomattavasti alkuperäistä taajuutta paremmin.

Modulointimenetelmiä on useita. Tavallisimmat analogiset modulaatiomenetelmät ovat amplitudimodulaatio (**Amplitude Modulation, AM**), taajuusmodulaatio (**Frequency Modulation, FM**) ja vaihemodulaatio (**Phase Modulation, PM**). Vastaavat digitaaliset modulaatiomenetelmät ovat ASK (**Amplitude-Shift Keying**), FSK (**Frequency-Shift Keying**) ja PSK (**Phase-Shift Keying**) modulaatiot.

### Amplitudimodulaatio

Amplitudimodulaatiossa kantoaalto ja moduloiva, informaation sisältävä signaali yhdistetään siten, että moduloivan signaalin arvon kasvaessa kantoaallon amplitudi kasvaa kuten kuvassa 3.14 on havainnollistettu. Lopputulos on signaali, jonka taajuus pysyy lähellä kantoaallon taajuutta ja jonka amplitudi sisältää moduloivan signaalin informaation. AM-modulaatiota on käytetty analogisissa TV-lähetyksissä, eräissä radiopuhelintyypeissä ja yleisradiotoiminnassa LF- ja HF-alueilla (**low frequency, high frequency**). Koska monet ihmisen tai luonnon aiheuttamat häiriöt vaikuttavat erityisesti signaalin amplitudiin, AM-lähete on herkkä häiriöille. Vastaanottimen toteuttaminen on toisaalta hyvin helppoa.

Kun moduloiva signaali on digitaalinen, puhutaan ASK-modulaatiosta. ASK-modulaatiossa kantoaallon amplitudi vaihtelee kahden tai useamman eri arvon välillä. Kuvan 3.14 esimerkissä digitaalinen signaali on binaarinen (vain kaksi tasoa eli nollat ja ykköset), jolloin moduloidun signaalin amplitudilla on ainoastaan kaksi arvoa. Optisissa kuiduissa käytetään tavallisesti ASK-modulaatiota, jolloin valon voimakkuutta muutetaan lähetettävän datan mukaan.



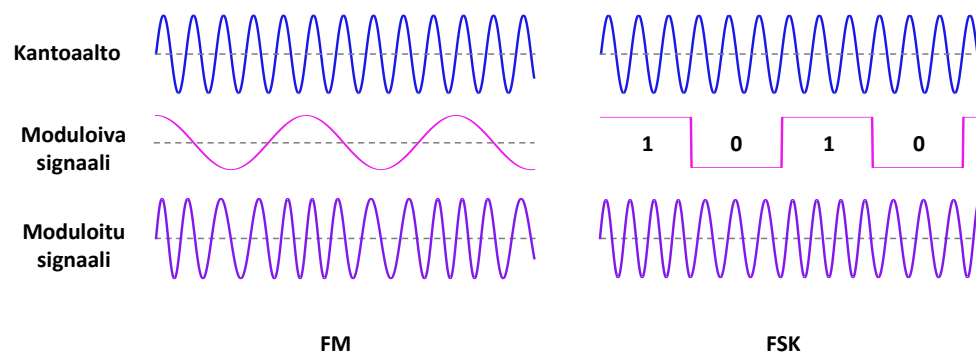
**Kuva 3.14.** Amplitudimodulointi analogiselle (AM) ja digitaaliselle (ASK) signaalille.

## Taajuusmodulointi

Taajuusmodulaatio (FM) on laajasti käytetty menetelmä erilaisissa radioteknisissä järjestelmissä. Toisin kuin amplitudimodulaatiossa, taajuusmodulaatiossa signaalin amplitudi pidetään vakiona, kun taas sen taajuutta muutetaan moduloivan signaalin mukaan, kuten kuvassa 3.15 on esitetty. Taajuusmoduloinnin etuna verrattuna amplitudimodulaation on se, että häiriöt ja siirtoyhteyden ominaisuuksien muuttuminen vaikuttavat vähemmän vastaanotetun signaalin taajuuteen kuin sen amplitudiin. Tämän vuoksi FM-modulaatiota käytetään muun muassa ULA-lähetyksissä<sup>129</sup> ja monissa radiopuhelimissa. ULA-lähetyksessä, joka toimii 87,5 – 108 MHz alueella, moduloiva signaali on siis äänen voimakkuus. Kantoaallon taajuuden vaihtelu tulee pitää tietyissä rajoissa jotta eri kanavat eivät häiritsisi toisiaan, esimerkiksi ULA-lähetyksissä sallittu vaihtelu on  $\pm 75$  kHz. Samalla kuuluvuusalueella eri radioasemien kantotaajuuksissa on yleensä vähintään 0,4 MHz:n ero.<sup>130</sup>

Vaikka FM on monessa suhteessa parempi kuin AM, AM on kuitenkin edelleen käytössä matalimmilla taajuusalueilla. Tärkein syy AM:n käyttöön on se, että FM vaatii toimiakseen suhteellisen suuren taajuuskaistan, jota taas matalilla taajuuksilla ei ole mahdollista varata yhteen käyttöön. AM-lähetyksestä saa kohtuullisesti selvää vaikka käytetty taajuuskaista olisikin kapea ja yhteyden laatu huono.<sup>131</sup>

FSK-modulaatiossa kantoaaltoa moduloi digitaalinen signaali, eli kulloisenkin lähetettävän bitin mukaan lähetetään jompaakumpaa kahdesta (tai useammasta) taajuudesta.



**Kuva 3.15.** FM- ja FSK-modulaatio: siirrettävä tieto liitetään kantoaallon taajuuteen (käytännössä taajuuden suhteelliset vaihtelut kantoaaltoon verrattuna ovat pienempiä kuin kuvassa).

## Vaihemodulaatio

Vaihemodulaatiossa siirrettävä tieto liitetään kantoaallon vaiheeseen, matemaattisesti esitettynä seuraavasti:

<sup>129</sup> ULA = Ultralyhyet aallot, eli tämä on vain suomen kielessä käytetty lyhenne.

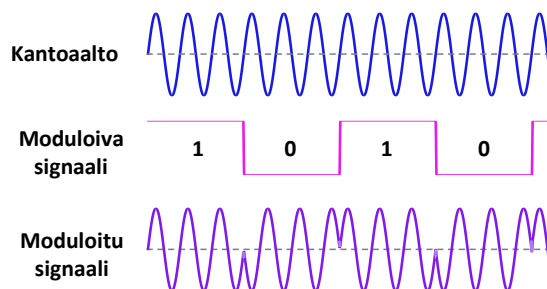
<sup>130</sup> <https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radiotaajuuksienkaytto/radioasematsuomessa.html>

<sup>131</sup> Katso esimerkiksi keskustelu [www.tiede.fi](http://www.tiede.fi/keskustelu/5682/ketju/am_fm_lahete)-sivustolla, [http://www.tiede.fi/keskustelu/5682/ketju/am\\_fm\\_lahete](http://www.tiede.fi/keskustelu/5682/ketju/am_fm_lahete)

$$y(t) = A_c \sin(w_c t + m(t) + \phi_c),$$

jossa  $t$  = aika,  $A_c$  = kanta-aallon amplitudi,  $w_c$  = kanta-aallon taajuus,  $\phi_c$  = kanta-aallon vaihe ja  $m(t)$  moduloi moduloitavan signaalin ( $y$ ) vaihetta. Moduloivan signaalin positiivinen arvo siirtää siis kanta-aallon vaihetta eteenpäin ja negatiivinen taaksepäin.

Digitaalisilla signaaleilla vaihemodulaatio on helpompi hahmottaa kuin analogisessa signaalissa.<sup>132</sup> Tällöin puhutaan PM-modulaation sijasta PSK-modulaatiosta. Kuvassa 3.16 on esitetty, kuinka bittisarja 0101 moduloi kanta-aaltoa. Kun bitti vaihtuu, signaalin vaihe muuttuu äkillisesti 180 astetta.



**Kuva 3.16.** PSK-modulaatio: digitaalinen tieto liitetään kanta-aallon vaiheeseen.

Bittinopeutta voidaan nostaa käyttämällä monitasoista modulaatiota. Jos käytetään neljää eri vaihesiirtoa, 0-asteen vaihemuutos voi tarkoittaa bittikuviota 00, +90-asteen vaihemuutos bittikuviota 01, +180-asteen vaihemuutos bittikuviota 10 ja +270-asteen vaihemuutos bittikuviota 11. Lisäämällä vaihetasojen määrää saadaan siirrettyä enemmän bittejä samassa ajassa. Toisaalta, mitä pienempiä vaihemuutosten erot ovat, sitä herkempi tiedonsiirto on häiriöille. Kun erilaisia vaihemuutoksia on  $n$  kappaletta, käytetään lyhennettä  $n$ -PSK. Esimerkiksi 4-PSK tarkoittaa vaihemodulaatiota, jossa on 4 eri vaihetasoa.

Vaihemodulaatio on erikoistapaus yleisemmästä QAM-modulaatiosta (**Quadrature Amplitude Modulation**), jossa käytetään samanaikaisesti vaihe- ja amplitudimodulaatiota. Esimerkiksi 16-QAM koodauksessa on 16 erilaista symbolia, joten yksi symboli voi välittää 4 bittiä (koska  $2^4 = 16$ ). QAM-koodausta käytetään nykyisin yleisesti mm. kaapeli-TV ja ADSL-järjestelmissä.

## Siirtomediat

Informaatiota voi siirtää joko tarkkaan määritellyä reittiä pitkin, käytännössä yleensä johtoa tai kuitua pitkin, tai vapaassa tilassa käyttäen vapaasti etenevää sähkömagneettista säteilyä. Erot näiden välillä eivät ole aivan täsmällisiä, sillä vaihtovirta johtimessa säteilee aina energiaa ulospäin. Riippuen johtimen tyypistä ja laadusta säteily voi olla merkittävää.

<sup>132</sup> Analogisessa tiedonsiirrossa vaihemodulaatiota ei juurikaan käytetä.

Toisaalta vapaassa tilassa voidaan käyttää kapeita keiloja erityisesti silloin kun aallonpituudet ovat pieniä. Ääritapauksena voidaan ajatella tarkasti suunnattua lasersädettä. Tässä luvussa tarkastellaan vain määrättyä reittiä kulkevaa informaatiota historiallisessa järjestyksessä: avojohdot, parikaapeli, koaksiaalikaapeli ja valokuidut. Vapaan tilan käyttöä käsitellään viidennessä luvussa.

Huomaa, että vaikka sähkömagneettista signaalia voidaan periaatteessa lähettää samanaikaisesti molempiin suuntiin ilman että signaalit häiritsevät toisiaan, käytännössä on lähes aina edullisempaa varata oma johto tai johtopari kumpaankin suuntaan erikseen.

### *Avojohdot*

Ensimmäisiin puhelinyhteyksiin käytettiin galvanoituja 2 mm tai 3 mm rautalankoja. Langat kiinnitettiin orsieristimiin, jotka sijoitettiin korkeisiin pylväisiin ja telineisiin talojen katolla (kuva 2.1). Aluksi käytettiin vain yhtä johtoa, jolloin suljetun virtapiirin aikaansäämiseksi paluujohtimena käytettiin maata. Yksijohtoisuuden ansiosta johdinmateriaalia säästy, mutta toisaalta yhteys oli hyvin altis häiriöille ja salakuuntelulle. Kaukoyhteyksillä (esimerkiksi Helsingin ja Porvoon välillä) ongelmat muodostuivat niin suuriksi, että yksijohtimisista avojohdoista oli pakko siirtyä vähemmän häiriöherkkiin avojohdinpareihin jo 1890-luvulla. Teräsjohtojen korvaaminen kuparijohdoilla paransi puhelinyhteyksien laatua, mutta samalla kasvatti olennaisesti kustannuksia.<sup>133</sup>

Vaikka Suomen kaukopuhelinverkko ulottuikin laajalle, signaalin vaimeneminen rajoitti puhelinyhteyksien pituutta. Signaalin vaimeneminen johtuu johdon resistanssin lisäksi kapasitanssista. Kaksi vierekkäistä johdinta muodostavat kondensaattorin, jonka kapasitanssi riippuu johtimien ominaisuuksista ja pituudesta. Pitkään linjaan muodostuu suuri kapasitanssi, jonka kautta merkittävä osa linjalle syötetystä signaalin tehosta menee hukkaan. Lisäksi johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä, joka puolestaan indusoi naapurijohtimeen virran, joka häiritsee siinä kulkevan signaalin vastaanottoa. Ylikuulumisen välttämiseksi johtimien paikkaa pylväsorsissa oli vaihdettava siten, että peräkkäisillä johdinväleillä syntyneet häiriöt kumosivat osittain toisensa. Periaate on sama kuin mitä käytetään parikaapelissa, jossa johtimet kierretään toistensa ympäri (kuva 3.17). Puhelimen nopean yleistymisen myötä alettiin miettiä ratkaisuja, joilla päästäisiin eroon suurista avojohdoryhmistä. Ensimmäisen vaiheen ajatus oli eristää johtimet ja kääriä niiden ympärille vaippa, eli tehdä useamman johtimen muodostama kaapeli. Lopuksi kaapelit pyrittiin sijoittamaan maan alle, pois sään ja kaatuvien puiden armoilta.

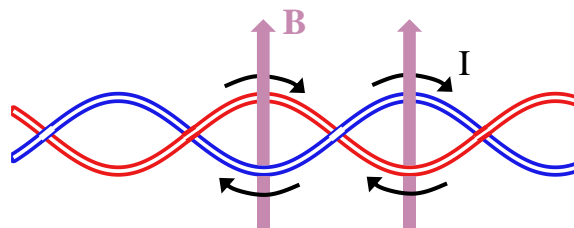
---

<sup>133</sup> Historiallisen osuuden tiedot pääosin kirjasta U.E. Moisala, K. Rahko, O. Turpeinen: Puhelin ja puhelinlaitokset Suomessa 1877-1977, s. 158-162.

### Symmetrinen kaapeli eli ns. parikaapeli

Kierretty parikaapeli (*twisted pair*) on yleisin kodeissa ja työpaikoilla käytetty johtotyyppi. Kierretyssä parikaapelissa on nimensä mukaisesti kaksi toistensa ympäri kierrettyä eristettyä johdinta, joiden ympärille on muovivaippa. Johdinten kiertäminen vähentää sähkömagneettisten häiriöiden vaikutusta johdolla kulkevaan signaaliin, koska vierekkäisten silmukoitten läpi menevien magneettikenttien indusoimat virrat kumoavat toisensa (kuva 3.17). Vaikutus on sitä parempi, mitä tasakokoisempia silmukat ovat. Kierteen nousu pitää saada mahdollisimman tasaiseksi ja lisäksi johdinlankojen välisen etäisyyden tulee säilyä mahdollisimman hyvin vakiona, sillä johdinlankojen geometriset ominaisuudet vaikuttavat kaapelin impedanssiin. Koska jokaisesta impedanssinmuutoksesta heijastuu pieni osa signaalia takaisinpäin, huonolaatuinen johdin voi lopulta sotkea signaalin täysin varsinkin suurilla taajuuksilla.

Suojatussa kaapelissa johtimien ympärille on lisäksi palmikoitu kuparinen häiriösuoja. Kupariverkko toimii Faradayn häkkinä (*Faraday cage*)<sup>134</sup>, joka vähentää johtimen ulkopuolella olevien sähkömagneettisten kenttien pääsyä sisäjohtimiin. Samalla suojaus estää kaapelia häiritsemästä ulkomaailmaa, sillä suurilla taajuuksilla (esimerkiksi 100 MHz) kaapeli toimii luontaisesti antennina eli se säteilee ympäristöönsä radioaaltoja.



**Kuva 3.17.** Ulkoisen magneettikentän (B) indusoimat virrat (I) kumoavat toisensa. Huomaa että yhdellä johdolla peräkkäisissä silmukoissa indusoidut virrat ovat eri suuntiin.

Suojaus voidaan toteuttaa joko suojaamalla jokainen pari erikseen tai käyttämällä koko johdinnipulle yhteistä suojausta. Tällä perusteella puhutaan STP (*Single-pair-shielded Twisted Pair*) ja FTP (*Folio shielded Twisted Pair*) -kaapeleista.<sup>135</sup> Suojaamaton parikaapeli tunnetaan merkinnällä UTP (*Unshielded Twisted Pair*).<sup>136</sup> Parikaapelit jaetaan lisäksi kategorioihin (*category*, Cat) siten, että suurempi numero (esim. Cat7) tarkoittaa parempilaatuista kaapelia kuin pienempi numero (esim. Cat5). Cat3-kaapelia käytetään lähinnä puhelinverkoissa, eikä se sovellu suurille taajuuksille ja bittinopeuksille. Cat5e:llä päästään 100 MHz:n taajuuteen ja 1 Gbit/s siirtonopeuteen suhteellisen lyhyillä

<sup>134</sup> Katso esimerkiksi, [https://fi.wikipedia.org/wiki/Faradayn\\_h%C3%A4kki](https://fi.wikipedia.org/wiki/Faradayn_h%C3%A4kki)

<sup>135</sup> Tietoliikennealalla lyhenne FTP useimmiten viittaa termiin *File Transfer Protocol*, jota käsitellään luvussa 7.

<sup>136</sup> ISON merkinnät kaapeleille ovat hieman erilaiset: [https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted\\_pair#Cable\\_shielding](https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted_pair#Cable_shielding)

siirtoetäisyyksillä.<sup>137</sup> Nykyisin asennukset tehdään usein Cat6-kaapelilla, johon voidaan lisätä tarvittaessa suojaus. Cat7 on suunniteltu suurille nopeuksille 10 Gbit/s asti ja se on aina suojattu.

Puhelinverkon tilaajajohdoissa käytetään yleensä parikaapelia. Se mahdollistaa datasiirron ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) –tekniikan avulla.<sup>138</sup> Nimensä mukaisesti ADSL-siirtotekniikka on epäsymmetrinen, eli siirtonopeus on suurempi verkosta tilaajalle kuin tilaajalta verkkoon. Käytännössä ADSL:n maksiminopeus on noin 8 Mbit/s verkosta tilaajalle (myötäsuunta, *downstream*) ja 1 Mbit/s tilaajalta verkkoon (paluusuunta, *upstream*). Uusimmat ADSL-tekniikat (taulukko 3.1) mahdollistavat suuremmatkin nopeudet silloin kun tilaajajohto on hyvälaatuinen ja riittävän lyhyt. Jos kaapeli on huonolaatuinen tai pitkä, käytettävissä oleva nopeus saattaa jäädä selvästi pienemmäksi kuin nimellisoikeus. Yhteyden laatuun vaikuttaa lisäksi kaapelin naapurijohdinpareissa kulkevat yhteydet, jotka voivat aiheuttaa häiriötä muille ADSL-yhteyksille. ADSL on adaptiivinen systeemi, joka sopeutuu sähköisen ympäristön muutoksiin muuttamalla tiedonsiirtonopeuttaan.

**Taulukko 3.1.** ADSL-tekniikoiden määrittely. Tässä 'ylös' tarkoittaa suuntaa tilaajalta verkkoon ja 'alas' vastaavasti verkosta tilaajalle.

Lyhenne	Standardi	Max. nopeus alas (Mbit/s)	Max. nopeus ylös (Mbit/s)
ADSL	ANSI T1.413-1998 Issue 2	8,0	1,0
ADSL2	ITU G.992.3 (2002-2007)	12,0	1,3
ADSL2+	ITU G.992.5 Annex M (2008)	24,0	3,3

### Koaksiaalikaapeli

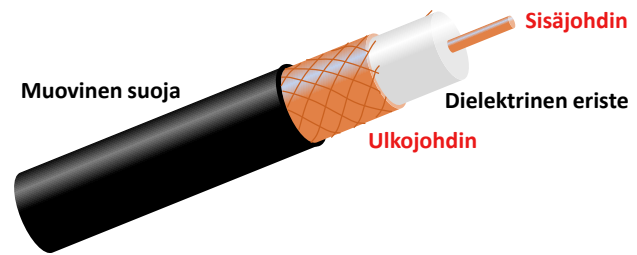
Koaksiaalikaapelia<sup>139</sup> on perinteisesti käytetty suurtaajuisten signaalien siirtämiseen mm. kaapelitelevisiojärjestelmissä ja television antennijohtimena. Myös Ethernet-verkon kaapelointina käytettiin aluksi koaksiaalikaapelia ja vasta myöhemmin siirryttiin pari- ja kuitukaapeleiden käyttöön. Koaksiaalikaapelissa on kaksi johdinta sisäkkäin siten että johdinten akselit ovat yhtenevät (kuva 3.18). Sisempi johdin on yleensä tavallista kuparilankaa, kun taas ulkojohdin on yleensä punottu ohuesta kuparilangasta. Ulkojohtimen ja sisäjohtimen välissä on eriste, joka on usein polyeteeniä. Uloimpana kaapelissa on muovinen suoja-kuori. Lisäksi saatetaan käyttää ohuita foliokerroksia ulkoisten häiriöiden vaimentamiseksi.

<sup>137</sup> Huomaa taajuuden ja bittinopeuden ero. Kaapeleiden ominaisuudet on yleensä suunniteltu korkeintaan 100 m siirtoetäisyydelle.

<sup>138</sup> Muitakin tekniikoita voidaan käyttää, mutta ne eivät ole yleisiä eikä niitä käsitellä tässä materiaalissa.

<sup>139</sup> Lisätietoja koaksiaalikaapelista esim. <https://kompo2010.wikispaces.com/Koaksiaalikaapeli>

**Kuva 3.18.** Koaksiaalikaapelin rakenne (”yksiputkinen”, esimerkiksi lähiverkoissa käytetty).



Lisäksi on huomattava, että korkeataajuuksinen sähkömagneettinen säteily kulkee johtimien välisessä eristeessä, ei itse johtimissa. Tämän ansiosta koaksiaalikaapeli ei juurikaan säteile ulospäin eikä se ole herkkä ulkopuolisille häiriöille. Koaksiaalikaapelin impedanssi (joka on siis eri asia kuin johtimen vaimennus) ei riipu mitenkään johtimen pituudesta vaan johtimien mittasuhteista ja eristemateriaalin ominaisuuksista. Tyypillisiä impedanssiarvoja ovat  $50 \Omega$  ja  $75 \Omega$ . Samoin kuin parikaapelissa impedanssimuutokset erityisesti kaapeleiden päissä aiheuttavat haitallisia heijastuksia ja häviöitä, joten kaapelin sovitukset on syytä tehdä huolella. Koaksiaalikaapelin vaimennus ei lyhyillä etäisyyksillä ole ongelma, mutta hyvin suurilla taajuuksilla koaksiaalikaapelin vaimennus kasvaa nopeasti suhteellisen suuresta kapasitanssista johtuen.

### Valokuidut<sup>140</sup>

Valokuidun eli optisen kuidun (*optical fiber*) käyttämistä tiedonsiirtoon ehdotettiin ensimmäistä kertaa vuonna 1966.<sup>141</sup> Pohjoisamerikkalainen Corning Glass Works valmisti ensimmäisen käytännön tarpeisiin soveltuvan optisen kuidun vuonna 1970. Kaupalliseen käyttöön soveltuvat optiset järjestelmät saatiin kehitettyä 1976, mutta nopeus oli nykyisiin järjestelmiin verrattuna vaatimaton eli 45 Mbit/s. Kymmenen vuotta myöhemmin järjestelmien kapasiteetti oli 1,7 Gbit/s ja toistimien väli 50 km. Ensimmäinen Atlantin ylittävä optinen yhteys otettiin käyttöön vuonna 1988. Vuonna 2014 päästiin yhdellä kuidulla jo niin huimaan nopeuteen kuin 1 Pbit/s.

Valokuidut ovat immuuneja sähkömagneettisille häiriöille, eivätkä ne säteile itsestään ulospäin, joten optisen signaalin salakuuntelu on vaikeaa. Valokaapelien siirtohäviöt ovat oleellisesti pienemmät kuin parhaidenkaan kuparikaapelien. Valokaapeleilla päästään siten paljon kuparikaapeleita pidempiin toistinväleihin, jopa satoihin kilometreihin.

Valokuiduissa käytetään tyypillisesti aallonpituuksia 850 nm, 1300 nm ja 1550 nm, jotka kaikki ovat suurempia kuin näkyvän valon aallonpituudet (390 nm – 700 nm). Esimerkiksi 1550 nm aallonpituus tarkoittaa 193,4 THz taajuutta koska:

<sup>140</sup> Oranssi väri otsikossa tarkoittaa tässä ja myöhemmissä luvuissa sitä, että kyseisen kappaleen sisällöstä merkittävä osa on kirjasta Kirsi Willa, Seppo Uusitupa ja Mika Ilvesmäki: *Tietoliikenneaapinen*.

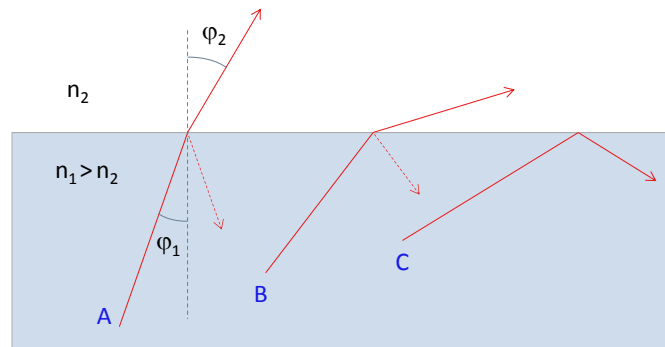
<sup>141</sup> Perustiedot Wikipedia, *Fiber-optic communication*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication), katso myös <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/is-kecks-law-coming-to-an-end>



$$\lambda(193,4 \text{ THz}) = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{193,4 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{s}}} = 1550 \text{ nm}.$$

Koska kyseessä ei ole näkyvä valo, missään tapauksessa ei ole järkevää katsoa kuidun päähän tarkistaakseen mitä siellä mahdollisesti näkyy. Säteilytehot voivat olla niin suuria, että ne vahingoittavat silmää. Lyhyen matkan siirtoon tarkoitetuissa muovikuiduissa (POF, **plastic optical fiber**) käytetään myös näkyvää, punaista valoa, 650 nm, jota vastaavaa taajuus on 461 THz.

Valon tyhjiönopeuden suhdetta valon nopeuteen jossakin aineessa kutsutaan kyseisen aineen taitekertoimeksi (**refractive index**). Tyhjiön taitekerroin ( $n$ ) on 1, veden noin 1,33 ja lasin noin 1,5. Lasin taitekerrointa voidaan kuitenkin säätää varsin laajoissa rajoissa käyttämällä sopivia lisäaineita.



**Kuva 3.19.** Valon heijastuminen kahden väliaineen rajapinnassa ( $n_1 = 1,5 n_2$ ). Tapauksissa A ja B osa signaalista läpäisee rajapinnan ja osa heijastuu takaisin, tapauksessa C tapahtuu kokonaisheijastuminen.

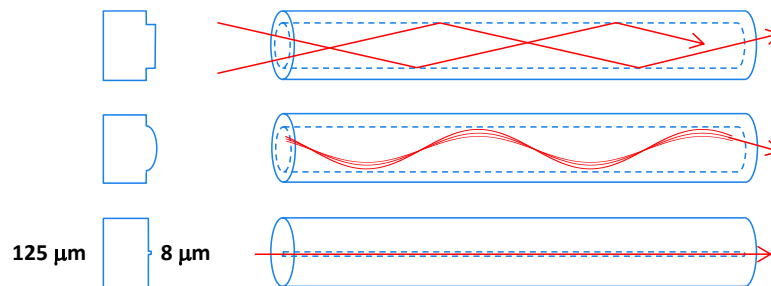
Kun tulevan säteen ja rajapinnan normaalin välinen kulma kasvaa, taittuva säde lähestyy rajapintaa. Kulmaa, jossa taittuva säde etenee rajapinnan suuntaisesti, kutsutaan kokonaisheijastuksen rajakulmaksi. Jos tulevan säteen ja rajapinnan normaalin välinen kulma on tätä kulmaa suurempi, valo ei pääse rajapinnan yli, vaan heijastuu rajapinnasta. Tällaista heijastusta kutsutaan kokonaisheijastukseksi. Kokonaisheijastuminen vaatii, että säteet tulevat kuituun riittävän loivassa kulmassa. Kaikkia säteitä ei saada heijastumaan samassa kulmassa, joten eri säteet kulkevat kuidussa eri matkan, jolloin ne saapuvat vastaanottiin eri aikoina. Tämän vuoksi kuituun lähetetty valopulssi leviää edetessään ja vaikeuttaa vastaanottimen toimintaa.

Askeltaitekertoiminen kuitu (**step-index fiber**) on yksinkertaisin ja vanhin kuitutyyppi (kuva 3.20). Siinä kuidun ytimen ja kuoren välinen taitekerroinraja on jyrkkä ja valonsäteet heijastuvat terävästi ytimen sisällä reunasta reunaan. Asteittaistaitekertoimisessa kuidussa (**graded index fiber**) ytimen taitekerroin pienenee asteittain kohti reunoja parabolisen kaa-



van mukaisesti. Tällaisessa rakenteessa valonsäteiden kulku muuttuu vähitellen jyrkän heijastuksen sijasta. Hyvälaatuisen asteittaiskuidun siirto-ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat kuin askeltaitekertoimisen kuidun.

Asteittaistaitekerroinkuidussakin jotkut säteet kulkevat suurempaan kuin toiset, mutta tasaisesti muuttuvan taitekertoimen ansiosta valopulssi ei leviä kovin paljon. Tämä johtuu siitä, että valon nopeus aineessa on kääntäen verrannollinen aineen taitekertoimeen, jolloin suoraan kulkevat säteet etenevät hitaammin kuin ne, jotka kiertävät ytimen ulkoreunan kautta. Molempien edellä kuvattujen kuitujen päästä tulevat valonsäteet ovat kulkeneet eripituiset matkat ja ovat eri vaiheissa. Näitä kuituja kutsutaan nimellä monimuotokuidut.



**Kuva 3.20.** Profiilit ja valon heijastuminen eri kuitutyypeillä (ylhäältä alas): askeltaitekertoiminen, asteittaistaitekertoiminen ja yksimuotokuitu.

Jos kuidun ytimen halkaisijaa pienennetään ratkaisevasti ja samalla tehdään taitekerroinero ytimen ja kuoren välillä erittäin pieneksi (tyypillisesti noin 0,3 %), puhutaan yksimuotokuidusta (**single mode fiber**). Kuidun halkaisija on vain muutama aallonpituuden monikerta, eli noin 5 – 10 mikrometriä. Koska taitekertoimien ero on pieni, vain todella pienet heijastuskulmat ovat mahdollisia. Voidaan ajatella, että kuituun mahtuu vain yksi muoto eli yhdellä tapaa taittuva valonsäde. Yksimuotokuitujen siirto-ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat kuin asteittaiskuiduilla.

Valokuitu peittoaa muut siirtomediat pitkällä siirtoetäisyydellään ja suurella kaistanleveydellään. Siirtoetäisyyttä rajoittaa johdon vaimennus, kaistanleveyttä puolestaan dispersio eli pulssin leveneminen sen kulkiessa johdon läpi. Vaimennusta aiheuttaa valokuitu itsessään ja valokaapelien väliset liitokset. Kuidun itsensä aiheuttama vaimennus syntyy valon absorptiosta (**absorption**) ja sironnasta (**scattering**) sekä kuidun taivutushäviöistä.

Vaikka valokuiduissa käytettävä lasi- tai kvartsimateriaali on erittäin puhdasta, kuituun jää aina pieniä määriä muita aineita. Jokainen näistä aineista aiheuttaa oman molekyylivärähtelynsä tai sen kerrannaisten kohdalle absorptiopiikin. Hyvälaatuisen yksimuotokuidun vaimennus on noin 0,2 dB/km, mikä siis tarkoittaa, että 15 km jälkeen valon energiasta on jäljellä puolet ja 150 km jälkeen yksi tuhannesosa. Monimuotokuidun vaimennus on tyypillisesti noin 3 dB/km.

Sironna tarkoittaa valon taittumista satunnaiseen suuntaan. Merkittävin sironnan laji on niin sanottu Rayleigh-sironna, joka pienenee voimakkaasti aallonpituuden kasvaessa. Rayleigh-sironnan aiheuttavat mikroskooppiset muutokset lasin tiheydessä ja sen seurauksena taitekertoimessa. Niin sanottua Mie-sirontaa aiheuttavat kuidussa olevat kuplat ja jännitykset. Jännityksiä ja pieniä murtumia syntyy, kun kuitu kierretään kelalle. Kun valokuitu taipuu liian pienelle kaarelle, kokonaisuheijastuminen ei enää onnistu.

## 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

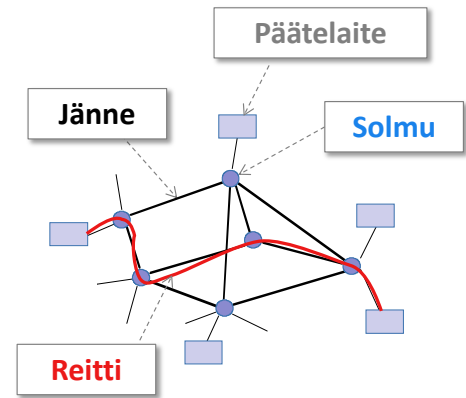
#### *Termistö ja luokittelu*

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 jännin kautta kytketty laite.

Kuva 4.1. Verkkotermejä.



Lainsäätäjän mukaan kuitenkin:<sup>142</sup>

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

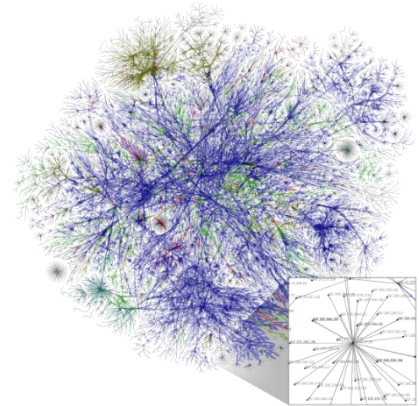
Tämä määritelmä on hieman epälooginen sen suhteen, miten termiä johdin (wire) on käytetty. Vaikka johtimen voidaan ajatella olevan mikä tahansa väliaine, joka johtaa jotain paikasta toiseen, niin tietoliikennetekniikassa johdin viittaa useimmiten kuparista tehtyyn metallilankaan, jota käytetään informaation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

<sup>142</sup> 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.



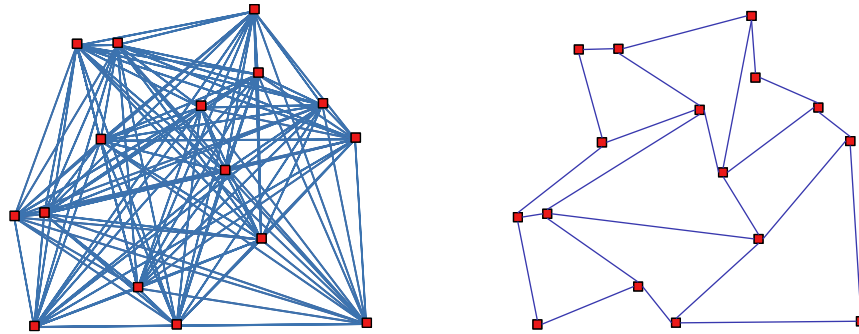
**Kuva 4.2.** Internetin topologiaa.<sup>143</sup>

### *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.

<sup>143</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_Internet](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_Internet)

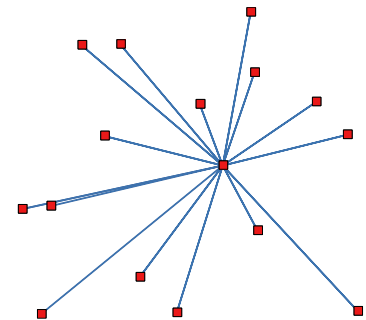


**Kuva 4.3.** Silmukoituja verkkoja: täysin silmukoitu (vasemmalla) ja ristikko (oikealla).

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.<sup>144</sup>

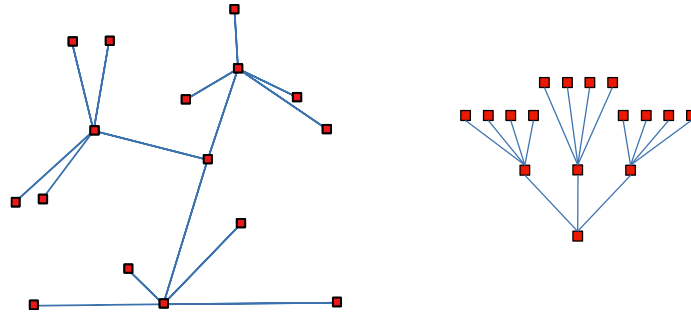
Tähtimäinen rakenne näyttää joskus houkuttevalta. Aikanaan eräs kansainvälinen teleoperaattori laati suunnitelman, jossa koko maan tiedonsiirto olisi voitu hoitaa yhdellä aktiivisella solmupisteellä. Perustelu tällaiselle ratkaisulle oli liikenteen hallinta, eli kaikki liikenteen hallinta ja operointi 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 sähköjako-verkoissa.

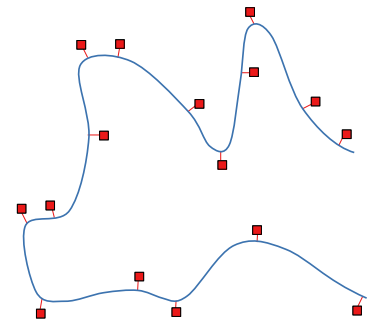
<sup>144</sup> Mittakaavaetu (*economies of scale*) tarkoittaa sitä, että yksikkökustannukset laskevat olennaisesti, kun järjestelmän koko kasvaa.



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

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

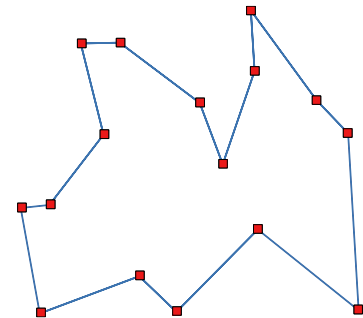
**Kuva 4.6.** Väylä.



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 lähettäjältä 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 ( $1 \text{ km}^2$ ) ja verkon solmut ( $N$  kappaletta) sijoittuvat tasaisesti koko alueelle, niin jänneiden kokonaispituudet ( $km$ ) kasvavat seuraavalla tavalla:<sup>145</sup>

- 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 tyypillisiä 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.<sup>146</sup>

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

<sup>145</sup> 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.

<sup>146</sup> 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.<sup>147</sup> Muutama viikko myöhemmin Soneran (eli Telian) matkapuhelinverkossa oli laaja ongelma, joka esti puhelut ja tekstiviestien lähettämisen. Tässä tapauksessa syynä oli ohjelmistovika.<sup>148</sup> DNA:lla vastaavantyyppinen matkapuhelinverkon häiriö vuonna 2011 johtui sähkönsyöttö-ongelmasta.<sup>149</sup>

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.

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

<sup>148</sup> 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](http://yle.fi/uutiset/sonera_nolo_juttu_-_kahden_miljoonan_suomalaisen_kannykat_pimenivat/7692397)

<sup>149</sup> 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”<sup>150</sup> 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.

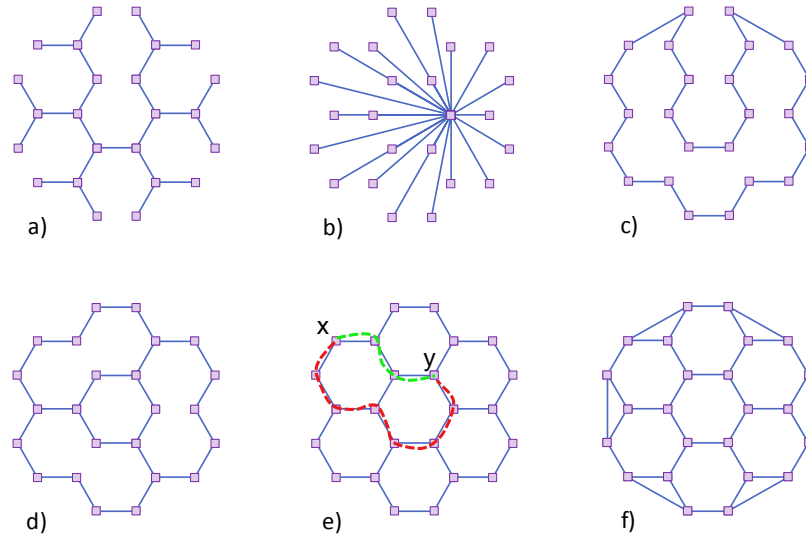
Käytännössä jotkut solmut ovat pieniä ja niiden liikenne huomattavasti vähäisempää kuin verkon suurimmissa solmuissa. Nämä solmut ovat yleensä verkon reunoilla palvellen suoraan verkon käyttäjiä ja niiden saatavuusvaatimus on löysempi kuin verkon runkoverkon solmujen. Kuvan 4.8 verkot (erityisesti d,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

---

<sup>150</sup> 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.

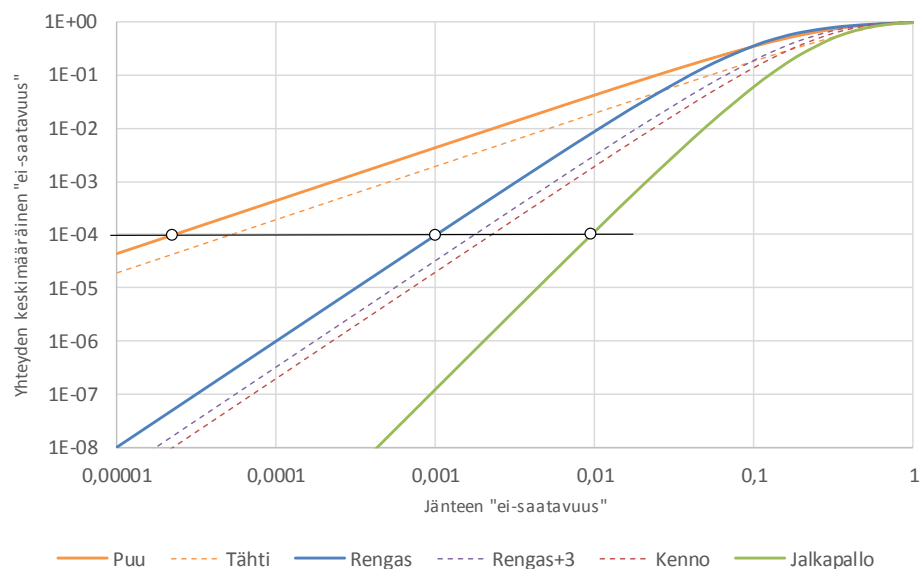
Korostettakoon vielä kerran sitä, että verkon saatavuus riippuu olennaisesti siitä, miten monta vaihtoehtoista reittiä on saatavilla. Jos lasketaan keskimääräisiä yhteyksien saatavuuksia, lukuja dominoivat ne solmuparit, jossa solmujen välillä on vähiten vaihtoehtoisia

reittejä.<sup>151</sup> 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.



<sup>151</sup> 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.

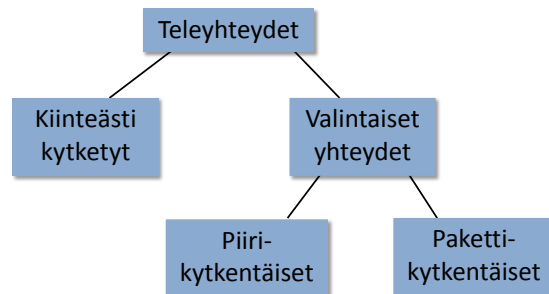
**Kuva 4.9.** Keskimääräinen kahden solmun välisen yhteyden ”ei-saatavuus” (=  $1-A$ ) linkin ”ei-saatavuuden” funktiona. Verkot on esitetty kuvassa 4.8.

## Piiri- ja pakettikytkentäisyys

### Yhteystyyppejä

Tietoliikenneverkoissa toteutettavat yhteydet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: kiinteästi kytkettyihin (**fixed connection**) ja valintaisiin yhteyksiin (**switched connection**). Ensimmäiset puhelin yhteydet 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 liitettynä 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:<sup>152</sup>

- Kiinteällä yhteydellä [tarkoitetaan] palvelua, jossa ilman viestien ohjausta tarjotaan määriteltä 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

---

<sup>152</sup> <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 tavaran sijasta.

**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

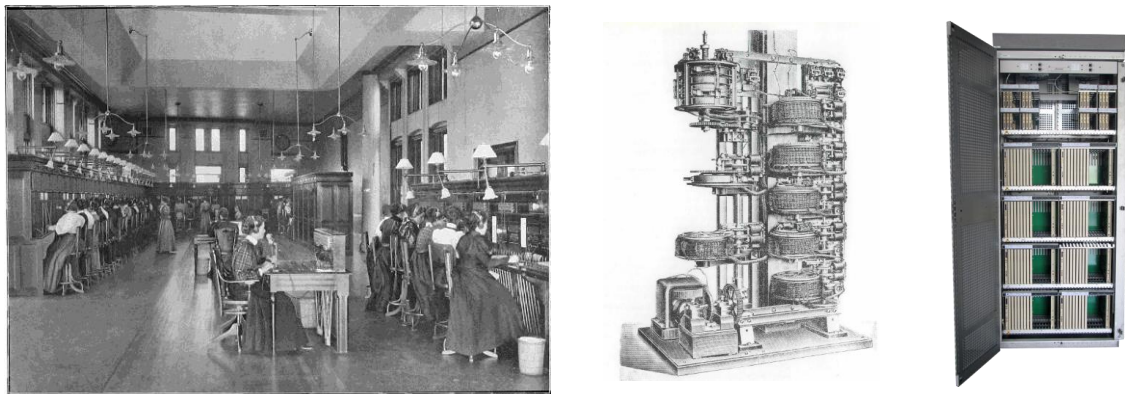
### *Piirikytkentäiset verkot: puhelinverkko*

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)<sup>153</sup>, sähkömekaaninen keskus vuodelta 1910 (keskellä)<sup>154</sup> ja puhelinverkon keskus vuodelta 2018 (oikealla).<sup>155</sup>

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.<sup>156</sup> Toimintaperiaatteena oli suora ohjaus tilaajan laitteesta. Alkuperäisessä versiossa

<sup>153</sup> Kuva: [http://en.wikipedia.org/wiki/Telephone\\_exchange](http://en.wikipedia.org/wiki/Telephone_exchange)

<sup>154</sup> 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>

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

<sup>156</sup> Katso esimerkiksi [http://en.wikipedia.org/wiki/Strowger\\_switch](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. nousukiertovalitsimen periaatetta kehitettiin siten, että yhdellä valintakytkimellä voitiin ohjata vuorotellen aina seuraavaa valintaporraa. 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.<sup>157</sup> 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 ohjaustekniikka ovat digitaalista. Täysin digitaaliset keskukset painoivat puhelinkeskusten kustannukset murtoosaan aikaisempiin tekniikkoihin verrattuna, samalla tuotanto-, asennus- ja ylläpitohenkilöiden tarve putosi olennaisesti.<sup>158</sup> 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

---

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

<sup>158</sup> 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.<sup>159</sup> 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.<sup>160</sup>

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).

---

<sup>159</sup> [www.viestintavirasto.fi](http://www.viestintavirasto.fi)

<sup>160</sup> 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.<sup>161</sup> 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

---

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

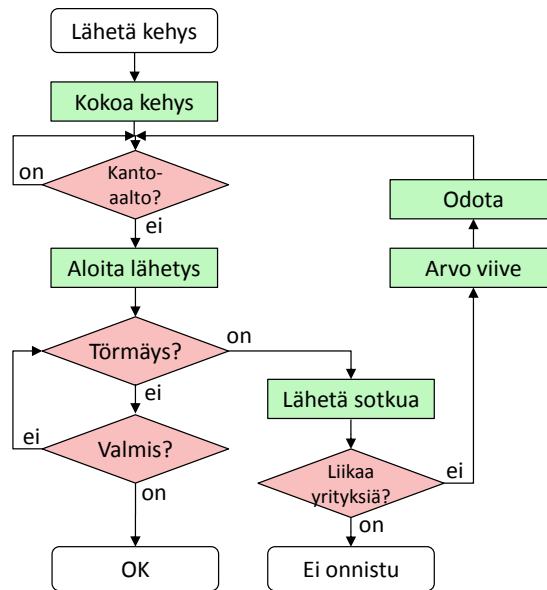
osoittaa CSMA/CD-periaatteen rajat ja ennen kaikkea sen mahdollisuudet yksinkertaisena ja luotettavana menettelynä. CSMA/CD-periaatetta kutsutaan kilpavarauksiperiaatteeksi, koska lähetyshaluiset asemat joutuvat kilpailemaan lähetysvuorosta. Se takaa kaikille asemille periaatteessa tasa-arvoisen kohtelun,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

Ethernetin kilpavarauksimenettelyn 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 törmäävät<sup>162</sup>. 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 kilpavarauksimenetelmää tarvitaan erityisesti radioverkoissa siinä vaiheessa, kun päätelaite pyytää tukiasemalta mahdollisuutta lähettää dataa verkkoon tai muodostaa pysyvämpi yhteys radiotien yli.

---

<sup>162</sup> 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 mitoittaessa tasapainoillaan asiakkaiden tyytyväisyyden ja verkon rakentamisen ja ylläpitämisen aiheuttamien kustannusten välillä. Taloudellisista syistä johtuen ei aina ole järkevää mitoittaa verkkoja niin, että kaikki liikenne mahtuu kaikissa olosuhteissa verkkoon. Puhelinverkkoja on pyritty mitoittamaan 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.

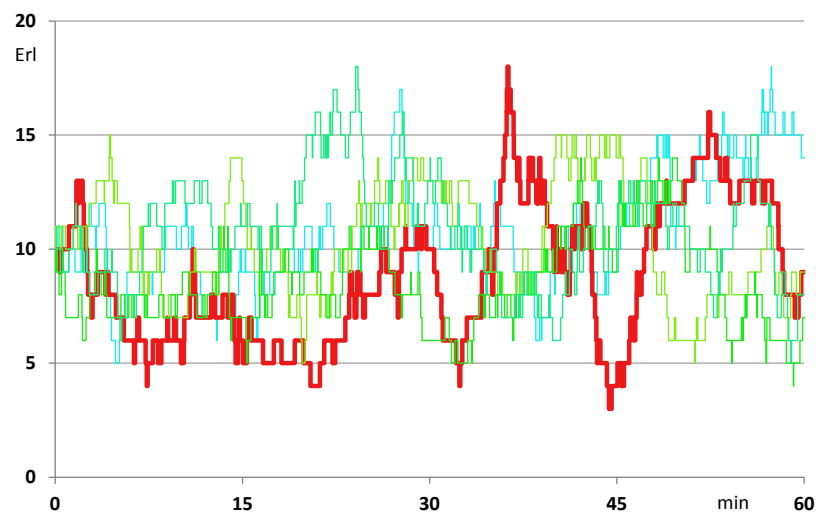


Erlang-arvo kuvaa keskimäärin varattuina olevien kanavien (tai muiden järjestelmän osien) määrää. Esimerkiksi, jos jollain väylällä kahden puhelinkeskusten välillä on käynnissä 8 puhelua, on liikennettä sinä hetkenä 8 Erlangia.<sup>163</sup> Liikennettä voidaan simuloida satunnaisprosessien avulla. Kuvassa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

<sup>163</sup> 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 puhelin-keskusten 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.<sup>164</sup> 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* ( $\mu$ ). 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* ( $\lambda$ ). Toisin ilmaistuna:  $\lambda dt$  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  $\mu dt$ . Voidaan myös sanoa, että  $\mu$  on intensiteetti, jolla asiakkaita poistuu yhdestä palvelupaikasta, eli jos palvelupaikka täytetään heti kun edellinen asiakas on poistunut, poistuu asiakkaita keskimäärin  $\mu T$  kappaletta aikana  $T$ .

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

---

<sup>164</sup> 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.<sup>165</sup>

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:

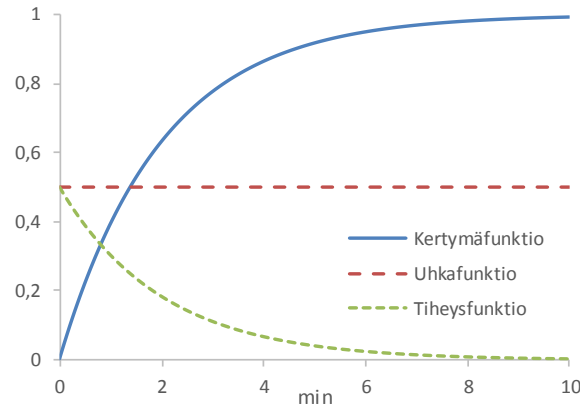
$$\frac{Pr(\text{pituus} = t)}{Pr(\text{pituus} \geq t)} = \frac{dt}{h}.$$

Eli eksponenttijakaumalla päättymisen todennäköisyys on vakio. Yleisemmin päättymisen (tai vaikkapa vikaantumisen) voi riippua jo kuluneesta ajasta. Tästä funktiosta on käytetty luotettavuustekniikan puolella nimitystä uhkafunktio<sup>166</sup> (**hazard function**). Tällä kursilla oletetaan (aina kun mahdollista), että ajat noudattavat eksponenttijakaumaa.

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

<sup>166</sup> 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](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  $\lambda T$  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  $\lambda Th$ . Nämä kahden yksinkertaisen laskelman tulosten tulee olla samoja eli  $\lambda Th = AT$ . Tästä saadaan yksinkertainen kaava, eli ns. *Littlen lause*:<sup>167</sup>

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

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  $\lambda$  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-

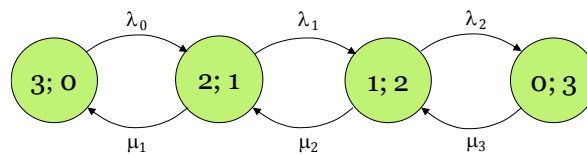
<sup>167</sup> Lauseen täsmällinen todistaminen on toki monimutkaisempi tehtävä, mutta sinänsä lause on intuitiivinen, jos ajattelee toisaalta sitä kuinka pitkään asiakkaat viettävät järjestelmässä aikaa (vasen puoli eli  $\lambda Th$ ) ja toisaalta sitä miten paljon järjestelmässä on keskimäärin asiakkaita 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

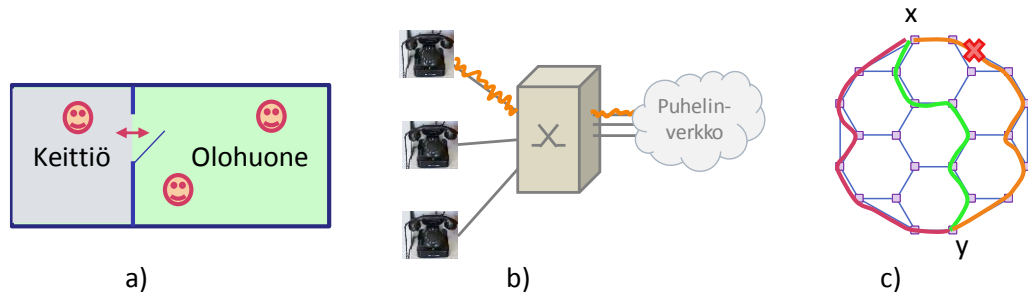
Ensimmäiseksi täytyy miettiä, mitä tässä tapauksessa tarkoitetaan tilalla. Periaatteessa voitaisiin ajatella niin, että jokainen huoneistossa olijasta voi olla joko tilassa 'keittiö' tai tilassa 'olohuone'. Tiloja olisi silloin  $2 \times 2 \times 2 = 8$ . Tämä on sinänsä pätevä malli, mutta yksinkertaisemmin asian voi esittää, kun tilannetta tarkastellaan huoneiston kannalta.<sup>168</sup> 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.

<sup>168</sup> 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.<sup>169</sup> 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.<sup>170</sup> 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	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
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:

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

<sup>169</sup> 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.

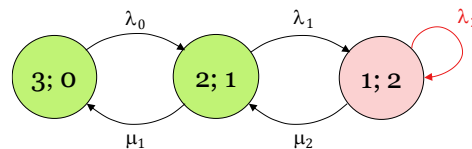
<sup>170</sup> Kun kuvassa linkkejä on jokaisella yhteydellä seitsemän, niin näistä arvoista voidaan käänteisesti laskea, että yhden linkin saatavuus on n. 99,976 %. Yhden reitin saatavuus on tällöin 99,83 %.

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  $\lambda_2$  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  $\lambda_2$  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

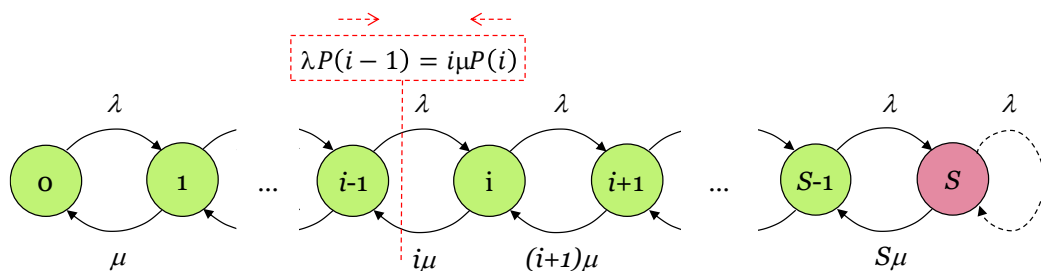
### Erlangin kaava

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 ( $\lambda$ ) 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:

$$\lambda P(i-1) = i\mu P(i) \quad (4.2)$$

$P(i)$  on siis todennäköisyys, että järjestelmä on tilassa  $i$  ja kun se kerrotaan siirtymisen intensiteetillä ( $\lambda$ ) saadaan kyseisen tyyppisten siirtymisten keskimääräinen määrä samassa aikayksikössä kuin missä  $\lambda$  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).

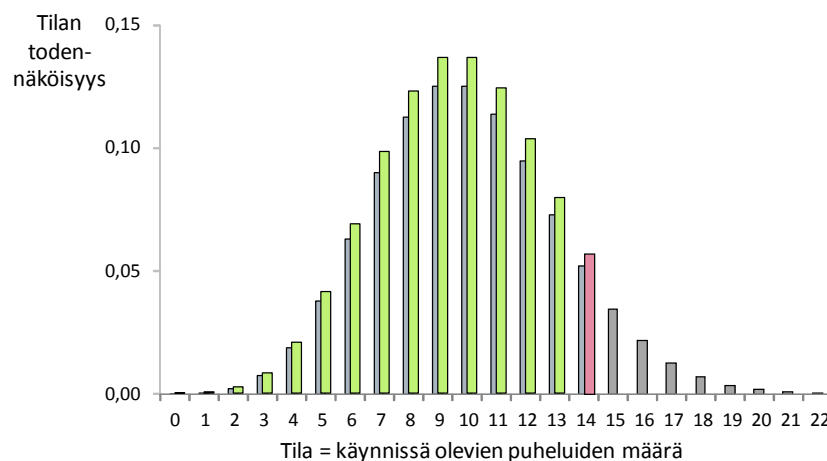
Kun palvelupaikkojen määrä on ääretön ( $S = \infty$ ), tarjotun liikenteen jakaumaksi saadaan:

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

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.



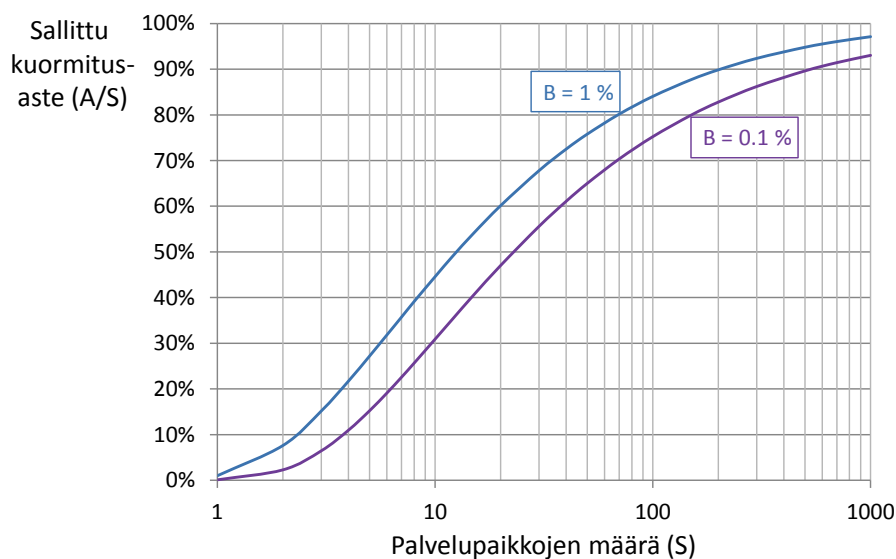
**Kuva 4.19.** Poisson-jakauma harmaalla, ja 14 palvelupaikan katkaistu Poisson-jakauma vihreällä paitsi viimeinen tila (14) punaisella.

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.



## 5. Mobiiliverkot ja langaton tiedonsiirto

Henkilökohtainen viestintä tapahtuu nykyisin pääosin kannettavilla tai oikeastaan kädessä pidettävillä laitteilla. Tämä vaatii radiotekniikan käyttöä ainakin päätelaitteen ja verkon välillä. Radiotie aiheuttaa monenlaisia haasteita, kuten radiokaistan rajallisuus, siirtoyhteyden laadun vaihtelut johtuen sekä ympäristön tilasta että muiden käyttäjien liikenteestä, vastaanottotehon hyvin alhainen taso ja muiden mahdollisuus vastaanottaa sama signaali.

Onhan se hämmästyttävää, että ruuhkaisessa kaupungin keskustassa sadat ellei tuhatnet kännykän käyttäjät voivat samanaikaisesti katsella videon pätkiä, selailla nettiä tai olla yhteydessä kavereihin monenlaisten sovellusten avulla. Tämä tilanne oli vielä ennen ensimmäisten digitaalisten verkkojen kehittämistä täysin utopistinen ajatus. Matkaviestintä oli vielä analogiseen aikaan 1990-luvun alussa varsin pientä liiketoimintaa eikä sen kehittämiseen käytetty kovin merkittäviä panostuksia (siis verrattuna moneen muuhun teknologiseen alaan). Mobiiliverkkojen digitalisointi muutti tilanteen täydellisesti: matkapuhelimesta ja matkaviestinpalveluista tuli parhaille toimijoille erittäin kannattavaa liiketoimintaa (kuten materiaalin toisessa luvussa on kuvattu). Suurten kehityspanosten ansiosta mobiili teknologia on kehittynyt huimasti viimeisen 20 vuoden aikana.

Tämän luvun tavoitteena on tarkastella keskeisimpiä teknologisia haasteita ja sitä, miten niitä on vuosikymmenien mittaan ratkaistu. Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Ilmakehän ominaisuudet siirtotienä
2. Solukkojen toimintaperiaate
3. Solukkojen kapasiteetti
4. Matkapuhelinverkkojen sukupolvet 1G:stä 5G:hen
5. Langattomat lähiverkot (Wi-Fi, WLAN)

Laskennallisina malleina käsitellään sekä yksittäisen radioyhteyden että solukkojen mitoittamista.

### Johdanto

Sanastokeskuksen<sup>171</sup> määritelmän mukaan matkaviestintä on langatonta viestintää, jossa radioyhteyttä käytetään laajalla maantieteellisellä alueella liikkuvien telepäätelaitteiden ja televerkon välillä. Tämä määritelmä vuodelta 2001 on tekninen ja loppuosaltaan jo

---

<sup>171</sup> TEPA – Sanastokeskus TSK:n termipankki, <http://www.tsk.fi/tepa/>

vanhahtava. Langaton viestintä (**wireless communication**) tarkoittaa sitä, että päätelaitteen ja kiinteän verkon välillä tiedonsiirtoon käytetään vapaasti eteneviä sähkömagneettisia aaltoja. Tällöin voidaan käyttää myös termiä mobiili (**mobile**). Kielitoimiston sanakirjan<sup>172</sup> mukaan mobiili on liikkuva, liikuteltava, siirrettävä ja sitä voidaan suomen kielessä käyttää adjektiivina. Sanastokeskus suosittelee sanan mobiili käyttöä yhdyssanojen alkuosana, esimerkiksi mobiililaite mieluummin kuin mobiili laite.

Mobiilisuutta pidetään nykyisin jo niin itsestään selvänä, että sitä ei välttämättä erikseen tarvitse korostaa. Olisi vaikeaa kuvitella älypuhelin, jota ei voisi liikutella. Lisäksi termi puhelin saattaa jäädä vähitellen pois käytöstä, kun päätelaitteita käytetään enimmäkseen muuhun kuin puheluihin – kännykkä on tässä suhteessa parempi termi. Toisaalta puhelin voi jäädä yleisnimeksi viittaamatta erityisesti puheluihin. Uudissanaja syntyy jatkuvasti tekniikan kehittyessä. Taulutietokone tai tabletti (**tablet**) on mobiilikäyttöön tarkoitettu pienikokoinen ja litteä kannettava tietokone, jossa on sormin käytettävä kosketusnäyttö, kun taas taulupuhelin (**phablet**) on älypuhelin, jossa on erityisen suurikokoinen kosketusnäyttö.<sup>173</sup> Laitetyyppien välistä rajaa on usein vaikea määritellä.

Verkkoon mobiiliyhteydellä liitettyjen päätelaitteiden määrä kasvaa räjähdysmäisesti. Verkossa voivat jo nyt olla kellosi ja autosi ja kohta myös anturit, jotka tarkkailevat veresi ominaisuuksia ja liikkuvia viruksia. Anturi voi ilmoittaa sykemittarille, että nyt kannattaisi hiljentää vauhtia, koska veressä on havaittu virus, samalla kun hoito-ohjeet tulevat näytölle ja auton navigaattori saa tiedon lähimmästä terveysasemasta siltä varalta, että tauti paheenee. Paljon mielenkiintoista on tapahtumassa, mutta kehitystyötä varten tarvitaan asiantuntijoita, jotka hallitsevat sekä sähkömagnetismin hienoudet että järjestelmätason suunnittelun ja rakentamisen periaatteet.

Tietoliikennetekniikka on täynnä lyhenteitä<sup>174</sup>, mobiiliverkot on tästä ehkä paras (tai pahin) esimerkki. Eräässä mobiiliverkkojen tekniikkaa käsittelevässä kirjassa<sup>175</sup> lyhenneluttelo sisältää 492 lyhennettä. Yhdellä sivulla on käytetty 21 eri lyhennettä yhteensä 56 kertaa. Jotkut lyhenteet ovat varmasti niin tarpeellisia, että asiantuntijan on syytä tietää mitä ne käytännössä merkitsevät. Muistaako sitten täsmälleen mistä sanoista lyhenne on muodostettu, on jossain määrin sivuasia. Ammatillisen pätevyyden osoittamiseen lyhenteet ovat kuitenkin usein hyödyllisiä; ainakin täydellinen osaamattomuus on epäilyttävää. Joka tapauksessa kannattaa varoa ylenmääräistä lyhenteiden käyttöä varsinkin tilanteissa, jossa kuulijat tai lukijat eivät ole alan insinöörejä.

<sup>172</sup> <http://www.kielitoimistonsanakirja.fi>

<sup>173</sup> Taulupuhelin näyttää jäävän esimerkiksi uudissanasta, joka ei koskaan vakiinnu yleiseen käyttöön.

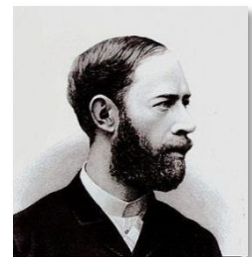
<sup>174</sup> Suosittelun luettavaksi: *IANA Considerations for Three Letter Acronyms*, <https://tools.ietf.org/html/rfc5513>.

<sup>175</sup> Sauter, M. (2010). *From GSM to LTE: An introduction to mobile networks and mobile broadband*.

Teknisillä lyhenteillä on samantapainen tarkoitus kuin kasvien ja eläinten latinankielisillä nimillä. Lyhenteiden avulla voidaan viitata johonkin asiaan, joka on suhteellisen yksiselitteisesti määritelty. Jos käyttää lyhennettä GPRS, viittaa väistämättä kyseisen lyhenteen mukaiseen standardoituun verkkopalveluun. Sen sijaan jos asian ilmaisee sanoilla ”[general packet radio service](#)” lukija ei voi olla varma viitataan ko nimenomaan GPRS:ään vai yleisesti pakettipohjaisiin radioteitse toteutettavaan palveluun.<sup>176</sup>

## Historiaa

James Clerk Maxwell kehitti vuonna 1862 Maxwellin yhtälöt, jotka kuvaavat sähkö- ja magneettikenttien käyttäytymistä ja niiden vuorovaikutusta. Myöhemmin erinomaisen päteväksi osoittautunut teoria ei saanut alkuvaiheessa mitenkään yksimielistä hyväksyntää. Vasta kun Heinrich Hertz (oheisessa kuvassa) vuonna 1887 osoitti kokeellisesti, että radioaaltoja voidaan lähettää ja vastaanottaa ja että radioaallot etenevät valon nopeudella, teoria sai vahvistusta. Hertz ei ymmärtänyt kokeidensa tärkeyttä, vaan viitaten sähkön ominaisuuksia ratkaisevasti valottaneisiin kokeisiinsa hän totesi:<sup>177</sup>



"It's of no use whatsoever[...] this is just an experiment that proves Maestro Maxwell was right—we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. But they are there." Asked about the ramifications of his discoveries, Hertz replied, "Nothing, I guess."

Nyt tietysti tiedämme, että seuraamukset ovat olleet kauaskantoiset. Ilman sähkömagneettisten aaltojen teknistä hallintaa meillä ei olisi juuri mitään mitä nykyisin kutsumme informaatioteknologiaksi. Toisaalta on hyvä huomata, että puhelin oli toiminnassa ja kaupallisessa käytössä jo ennen Hertzin kokeita, vaikka ymmärrys sähköstä oli rajallista. Sen sijaan monimutkaisia radioteknisiä laitteita tuskin olisi pystytty kehittämään ilman riittävää teoreettista ja kokeellista pohjaa.

Käytännön radiotekniikan isänä pidetään usein italialaista sähköinsinööriä Guglielmo Marconia. Marconi oli insinöörityönsä lisäksi erinomainen suhdetoiminta- ja liikemies, joka avitti huomattavasti historiankirjoihin jäämistä. Marconi oli tekninen lahjakkuus, joka jo 20-vuotiaana teki kokeita langattomalla lennättimellä. Kuuluisaksi Marconi tuli kokeistaan, joissa hän pyrki välittämään sähkötystä Atlantin ylitse. Vuoden 1901 kokeiden tulokset

<sup>176</sup> Englannin kielellä usein tällaiset termit kirjoitetaan isoilla alkukirjaimilla. Käytäntö kuitenkin vaihtelee: CRC kirjoitetaan yleensä pienillä alkukirjaimilla, [cyclic redundancy check](#), sen sijaan LTE lähes aina isoilla alkukirjaimilla, [Long Term Evolution](#) ilmeisesti koska ”[long term evolution](#)” voisi viitata mihin tahansa aiheeseen.

<sup>177</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Hertz](http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz); [ramification](#) = seurannaisvaikutus.

jäivät epäselviksi, vaikka Marconi väittikin pystyneensä vastaanottamaan meren yli kulke-  
neen radiosignaalin. Nyt kuitenkin tiedetään (mutta Marconi ei tiennyt) että tällainen pitkä  
matalataajuinen radioyhteys toimii yöllä huomattavasti paremmin kuin päivällä. Niinpä  
pidetäänkin melko epätodennäköisenä, että päiväsaikaan tehdyt kokeet olisivat voineet  
oikeasti toimia. Sen sijaan joulukuussa 1902 tehdyissä uusissa kokeissa radiosignaali saatiin  
varmistetusti siirrettyä Atlantin yli. Säännöllinen kaupallinen sähkötyspalvelu Atlantin yli  
alkoi vuonna 1907, joskin yhteyksien luotettavuudessa oli useiden vuosien ajan ongelmia.  
Erityisen merkittävää langaton tiedonsiirto oli laivojen kannalta. Kaupallinen radioliikenne  
laivoihin alkoi jo vuonna 1904.

Sähkötyksen jälkeen seuraava radiotekninen merkkipaalu oli yleisradiotoiminnan alka-  
minen. Tekniikan kehittyessä pystyttiin radioteitse välittämään myös ääntä. Olennainen te-  
kijä oli tyhjiöputken kehitys: Sir John Ambrose Fleming kehitti vuonna 1904 tyhjiöputken  
perustuvan diodin. Eräs tyhjiöputken kehittäjistä oli suomalainen Eric Tigerstedt, jonka  
vuonna 1914 kehittämä triodi oli keskeinen osa elektronisia laitteita transistorin keksimi-  
seen saakka.

Ensimmäisenä kaupallisena radioasemana pidetään Hollannin Haagissa marraskuussa  
1919 aloittanutta asemaa. Seuraavan vuoden aikana radioasemia perustettiin ympäri maa-  
ilmaa. Suomessa ensimmäiset radiolähetykset alkoivat 1923. Julkinen yleisradiotoiminta  
alkoi vuonna 1926, jolloin perustettiin valtion omistama O.Y. Suomen Yleisradio – A.B.  
Finlands Rundradio. Samoin kuin telepalvelut, yleisradiotoiminta oli pitkään useimmissa  
maissa valtion monopoli. Tärkein poikkeus oli Yhdysvallat, jossa radiolähetykset ovat pe-  
rustuneet kaupalliseen (tosin tiukasti säädeltyyn) kilpailuun alusta saakka.<sup>178</sup> Yleisradiolla  
oli monopoli yleisradiotoimintaan vuoteen 1985 saakka, jolloin osa radiotaajuuksista jaet-  
tiin kaupallisille radioasemille.

Ensimmäisenä televisioesityksenä pidetään tilaisuutta, jossa John Baird demonstroi liik-  
kuvaa kuvaa Lontoossa tammikuussa 1926. Laite oli kuitenkin osittain mekaaninen ja ku-  
van laatu hyvin huono. Televisiotekniikkaa kehitettiin ympäri maailmaa, esimerkiksi  
Wikipedian artikkeli<sup>179</sup> mainitsee yhdysvaltalaisen keksijöiden lisäksi mm. venäläisen,  
saksalaisen, britin, japanilaisen, unkarilaisen ja meksikolaisen, jotka kaikki vaikuttivat  
television kehitykseen. Teknologia vakiintui vasta 1940-luvulla, kun USA:ssa päädyttiin 525  
juovan järjestelmään ja Euroopassa 625 juovan järjestelmään (perustuen venäläisten  
kehittämään standardiin).

---

<sup>178</sup> T. Hazlettin kirja, *The Political Spectrum* (2017), osoittaa miten perusteellisesti politiikka on sotkeutunut TV- ja radiotoimintaan markkinatalousmaissa tekniikan alkuajoista lähtien.

<sup>179</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Television>

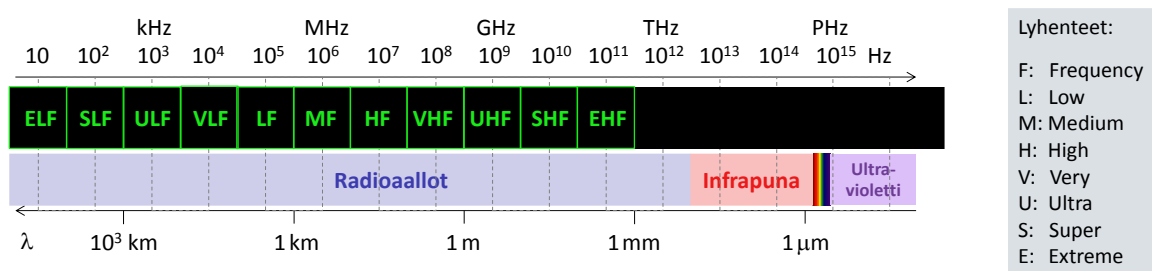
Säännölliset televisiolähetykset alkoivat Suomessa vuonna 1957, ei kuitenkaan Yleisradion lähetyksinä vaan Tekniikan Edistämissäätiön tukemana nimellä TES-TV. Yleisradio aloitti lähetyksensä seuraavan vuoden alussa. Tesvisio ja Tamvisio säilyivät itsenäisinä televisiokanavina vuoteen 1965 saakka, jolloin Yleisradio osti ne ja perusti toisen televisiokanavan. MTV toimi mainosrahoitteisena Yleisradion vuokralaisena vuoteen 1993 saakka, jolloin se siirtyi kokonaan omalle kanavalle. Television perusteknologia analogisine signaaleineen ja kuvaputkineen säilyi periaatteessa muuttumattomana 2000-luvun puolelle saakka. Digitaalisiin televisiolähetysiin siirryttiin Suomessa syyskuussa 2007. Nyt käynnissä on seuraava merkittävä muutos, eli televisio-ohjelmia ei enää katsota silloin kuin televisioyhtiöt päättävät, vaan jokainen voi katsoa melkein mitä haluaa juuri milloin ja missä haluaa Internetin kautta.

## Ilmakehä siirtotienä

Vaikka melko harva tietoliikennealan insinööri joutuu suoranaisesti tekemisiin radioteknisten ilmiöiden kanssa, eräät perusasiat on syytä kaikkien tuntea, kuten minkälaisia radioaaltoja ilmassa ja muissa väliaineissa jatkuvasti etenee eri suuntiin ja miten niitä voidaan hyödyntää eri tarkoituksiin.

### Radiotaajuudet

Kansainvälisen sopimuksen perusteella radiotaajuudet on jaettu alueisiin kuvan 5.1 mukaisesti. Käytännössä radiotaajuuksien katsotaan alkavan kolmesta kilohertsistä ja ulottuvan noin kolmeen terahertsiin. Tämän rajan yläpuolella alkaa infrapuna-alue. Kolmen kilohertsin rajan alapuolellakin on radioaaltoja, mutta niiden hyödyntäminen on käytännössä hankalaa. Sähköverkot säteilevät voimakkaasti taajuudella 50 (tai 60) hertsiä.

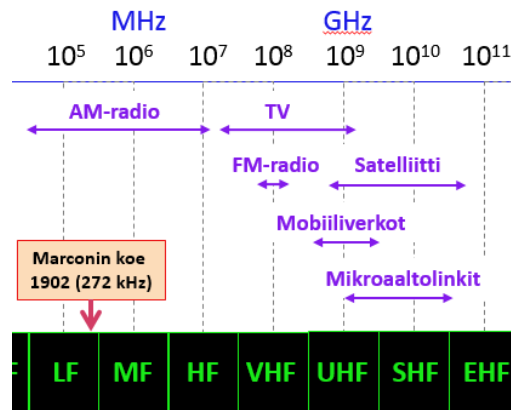


**Kuva 5.1.** Sähkömagneettisen säteilyn taajuusalueet ja aallonpituudet vapaassa tilassa.

Radiotaajuudet on jaettu erilaisten käyttäjäryhmien kesken. Suomessa niiden käyttöä valvoo Viestintävirasto.<sup>180</sup> Radiotaajuuksien jaossa noudatetaan muutamaa perussääntöä.

<sup>180</sup> Viestintäviraston taajuusjakotaulukko määrittelee taajuuksien sallitut käytöt välille 8,3 kHz – 275 GHz.  
[https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko\\_S\\_9.12.2016.pdf](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko_S_9.12.2016.pdf)

Paljon informaatiota sisältävä lähetys tarvitsee laajan kaistan ja se kannattaa siirtää mahdollisimman korkealle taajuusalueelle. Vastaanotin on helpompi rakentaa laajakaistaiseksi, jos vastaanotettava kaistanleveys on pieni kantaallon taajuuteen verrattuna: 100 kHz:n levyistä lähetettä on helpompi vastaanottaa 100 MHz:n taajuusalueella kuin 1 MHz:n taajuusalueella.



**Kuva 5.2.** Taajuusalueiden käyttö tiedon siirtoon.

Käytetty taajuusalue vaikuttaa myös signaalin etenemiseen. FM-radiolähetyksessä käytettävät aallot (taajuus on noin 100 MHz, eli se sijaitsee siis VHF-alueella) vaativat lähes näköyhteyden, minkä vuoksi nykyisin käytettävillä 100-300 metrin korkuisilla mastoilla päästään noin 70 kilometrin yhteysetäisyyksiin. Matkapuhelimien käyttämät taajuudet ovat tyypillisesti 900, 1800 ja 2500 MHz. Näillä taajuuksilla luotettavien viestiyhteyksien takaamiseksi tukiasemia täytyy olla muutaman kilometrin välein. Paikannukseen käytetty GPS käyttää lähinnä 1575 MHz taajuutta.

Radiokaistoja on kolmen tyyppisiä:

- Radiotähtitieteen käyttöön varatut kaistat, joilla ei sallita lähetystoimintaa.
- Kaistat, jotka ovat vapaasti käytettävissä eräin rajoituksin, jotka koskevat erityisesti lähetystehoa. Näihin kuuluvat mm. ISM-taajuusalueet<sup>181</sup> ja jossain määrin tarkemmin säädellyt radioamatööri-kaistat. Esimerkiksi lähiverkoissa käytetty IEEE:n 802.11 käyttää ISM-kaistaa.<sup>182</sup>
- Luvanvaraiset kaistat, joiden käyttöä hallinnoivat kansalliset viranomaiset (esim. Suomessa Viestintävirasto<sup>183</sup> ja USA:ssa FCC<sup>184</sup>). Tietoliikenteen tapauksessa

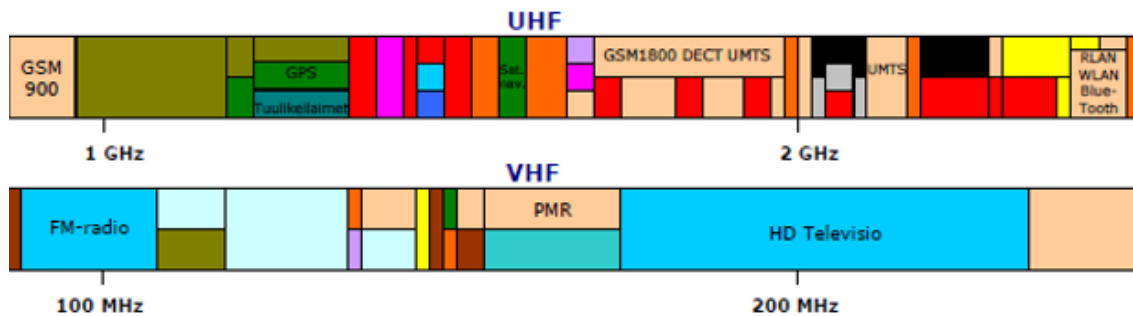
<sup>181</sup> ISM = Industrial, Scientific, and Medicine. Taajuusalueita on matalista (6,8 MHz) hyvin korkeisiin (244 GHz).

<sup>182</sup> Taajuusalueet 2,45 GHz ja 5,8 GHz.

<sup>183</sup> Viestintävirasto valvoo viestintämarkkinoiden ja palveluiden tilaa, <https://www.viestintavirasto.fi/>

<sup>184</sup> FCC = Federal Communications Commission, Yhdysvaltain telehallintovirasto, perustettu vuonna 1934.

käytettävissä olevat taajuuskaistat jaetaan verkko-operaattorien kesken. Kaistojen jaon periaatteista sovitaan alueellisesti tai jopa globaalisti.



**Kuva 5.3.** Radiotaajuuksien käyttö Suomessa muutamalla keskeisellä taajuusalueella.<sup>185</sup>

Radioteknisestä näkökulmasta merkittävin ero luvanvaraisen ja vapaan kaistan välillä on se, että luvanvarainen kaista on lähes vapaa ulkoisista häiriöistä. Kun kaista on yhden toimijan hallinnassa, toimija voi jakaa taajuuskaistan hallitusti eri käyttäjien ja tarpeiden välillä. Tämä mahdollistaa taatun palvelun laadun (QoS, *Quality of Service*) esimerkiksi puheluille samalla kun datayhteyksien nopeudet voivat vaihdella verkon kuormituksen mukaan. Lisäksi keskitetyllä resurssien hallinnalla voidaan periaatteessa tehostaa kaistan käyttöä verrattuna hajautettuun hallintaan (vertaa Ethernetin toimintaperiaate, luku 4).

Luvanvaraisella kaistalla lähetystehot voivat olla suuria, joka mahdollistaa suuren peittoalueen. Toisaalta suuret lähetystehot aiheuttavat enemmän häiriöitä viereisille taajuuskaistoille, jos signaalin suodatusta ei tehdä riittävän hyvin. Sen sijaan vapaalla kaistalla muiden käyttäjien signaalit voivat vaikuttaa olennaisesti taajuuskaistan käyttökelpoisuuteen. Tästä johtuen vapailla kaistoilla lähetystehoja rajoitetaan, mikä väistämättä pienentää solujen kokoa. Vapaa kaistan käyttö merkitsee myös sitä, että mitään laatutakuita ei voida antaa. Saavutettava tiedonsiirtonopeus voi kuitenkin paikallisesti olla hyvin suuri.

### *Radioaallot ilmakehässä*

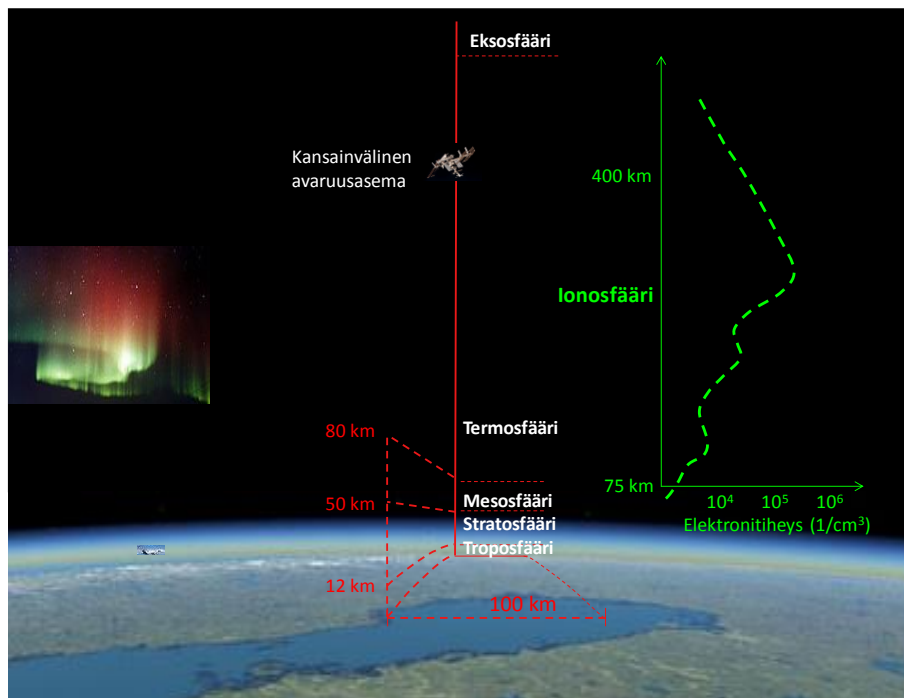
Kuvassa 5.4 on esitetty ilmakehän rakenne pääpiirteissään. Ilmakehän alin kerros, troposfääri, ulottuu noin kymmenen kilometrin korkeuteen. Troposfääri sisältää suurimman osa ilmakehän massasta ja lähes kaikki sääilmiöt tapahtuvat troposfäärissä. Stratosfääri ulottuu 50 kilometriin. Mesosfäärissä vallitsee jo lähes täydellinen tyhjiö. Ionosfääri on rinnakkainen termi ilmatieteellisille kerroksille (troposfääri, stratosfääri, jne.) kuvaten sähköisiä ominaisuuksia. Ionosfääri ulottuu suunnilleen 75 kilometristä jopa 1000 kilometriin. Ionosfääri sisältää auringon säteilyn ionisoimia atomeja, jotka heijastavat radioaaltoja.

<sup>185</sup> Kuva: [https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien\\_kaytto.pdf](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien_kaytto.pdf). Lyhenteet: PMR = Public Mobile Radio, erillislisäverkko, DECT = Digital Enhanced Cordless Telecommunications, johdoton puhelinjärjestelmä, RLAN = Radio LAN. Värikoodeja: punainen = kiinteä liikenne, keltainen = radioamatööriliikenne, oranssi, harmaa ja musta = satelliitteihin liittyvä liikenne.



Matalalla lentävät satelliitit liikkuvat ionosfäärissä. Esimerkiksi kansainvälisen avaruusaseman etäisyys maan pinnasta on noin 360 km. GPS-satelliitit sijaitsevat noin 20 000 km korkeudessa. Tietoliikenteen ja television kannalta tärkein on geostationäärinen rata, joka sijaitsee 35 786 kilometrin korkeudella suoraan päiväntasaajan yläpuolella. Maasta katsottuna geostationäärisellä radalla sijaitseva satelliitti näyttää pysyvän paikallaan, koska satelliitti kiertää maata samalla kiertonopeudella kuin maa pyörii akselinsa ympäri. Puheyhteyteen satelliitin etäisyys aiheuttaa havaittavan viiveen, sillä edestakainen matka satelliittiin ja takaisin maan pinnalle vie noin 0,25 sekuntia.

Eritajuiset radioaallot käyttäytyvät ilmakehässä eri tavoin. Radioaallot suunnilleen 10 MHz:n alapuolella heijastuvat ilmakehästä takaisin maanpinnalle, jos säteilyn kulma maan pintaan nähden on riittävän pieni. Lisäksi ilmakehän epähomogeenisuudet aiheuttavat sirontaa (*scattering*). Sironta vaimentaa aina signaalia, mutta toisaalta sen avulla voidaan päästä radiohorisontin taakse. Sirontaa tapahtuu sekä troposfäärissä että ionosfäärissä. Koska jälkimmäisessä tapauksessa sironta syntyy huomattavasti korkeammalla, ionosfäärisironnalla saadaan pidempiä yhteyksiä kuin troposfäärisironnalla. Käytännössä troposfäärisironnalla päästään noin 500 kilometrin ja ionosfäärisironnalla noin 2000 kilometrin yhteyksiin.



Kuva 5.4. Maan ilmakehän rakenne.<sup>186</sup>

<sup>186</sup> Kuvan asteikon mittakaavassa geostationäärinen rata olisi noin 16 sivun verran ylöspäin.



Troposfäärisirontaa tapahtuu pääasiassa 0,3 - 10 GHz taajuusalueella. Ionosfäärissä sirontaa aiheuttavat ionosfäärin epätasaisuudet ja ilmakehään syöksyvien meteorien synnyttämät ionivanat. Käyttökelpoiset taajuudet osuvat välille 30 - 60 MHz. Alle 30 MHz:n taajuiset aallot voivat ilmakehän olosuhteista (eli radiokelistä) riippuen heijastua ionosfääristä. Heijastuksen hyvyteen vaikuttaa ionosfäärin tila, joka riippuu auringon aktiivisuudesta, vuorokauden- ja vuodenajasta ja maantieteellisestä sijainnista. Yöllä ionosfäärin alimmat kerrokset häviävät ja radioaallot pääsevät esteettä heijastumaan ionosfäärin ylimmistä kerroksista, joissa ionisaatio on voimakkainta. Tästä syystä esimerkiksi kaukaisten radioasemien kuuluvuus on parhaimmillaan yöaikaan.

Suurtaajuisilla radioaalloilla (> 10 GHz) ilmakehän absorptio ja sironta vaimentavat signaalia merkittävästi. Niin sanottu kirkkaan ilmakehän vaimennus aiheutuu hapen ja vesihöyryn molekyylien resonanssitaajuuksista. Hapella nämä taajuudet ovat 60 ja 119 GHz ja vesihöyryllä 22, 183 ja 325 GHz. Radioaalto vaimenee, sillä sen energia hupenee molekyylien virittämiseen. Sade ja sumu aiheuttavat pääasiassa sirontaa. Radioaallot polarisoivat sadepisaran molekyyliä, jolloin pisara käyttäytyy kuin pieni dipoliantenni ja säteilee kaikkiin suuntiin. Voimakas sade estää pitkät yhteydet yli 10 GHz:n taajuuksilla.

Maan pinnalla suoraa näköyhteysreitillä pitkin eteneminen on tärkein mekanismi yli 400 MHz:n taajuuksilla. Näköyhteysreitillä vastaanottavan aseman täytyy olla radiohorisontin yläpuolella. Aallon kaartumisen takia radiohorisontti on kauempana kuin geometrinen horisontti, eli näköyhteysreitti voi nimestään huolimatta ulottua suoraa näköyhteyttä kauemmas. Jos vastaanottaja on maanpinnalla, 320 metrin korkeudella oleva lähetys ulottuu noin 65 kilometrin päähän.<sup>187</sup> Näköyhteys on muita etenemistapoja luotettavampi ja ennustettavampi. Esimerkiksi satelliittilinkkiyhteydet ja matkapuhelinverkot (lukuun ottamatta alhaisimpia taajuusalueita) toimivat näköyhteydellä.

## Matkaviestinverkon perusominaisuudet

Matkaviestimien perusajatuksena on päästä eroon päätelaitteen sidonnaisuudesta yhteen fyysiseen paikkaan. Tämä tapahtuu radioyhteyden avulla eli päätelaitteena on radiopuhelin. Lisäksi verkossa tarvitaan tukiasemia, joihin päätelaitteet ovat yhteydessä. Tukiasemista eteenpäin puhelujen ja muun informaation välittäminen tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin kiinteässä verkossa niin kauan, kun päätelaite ei siirry tukiaseman alueelta toiselle. Solukoverkko (*cellular network*) koostuu siten soluista, joissa radiotien tiedonsiirtokapasiteetti jaetaan solun alueella sijaitsevien käyttäjien kesken. Solukoverkkoa kuvaavia ominaisuuksia ovat:

---

<sup>187</sup> Espoon radiomaston korkeus on 326 m.

- kaksisuuntainen tiedonsiirto verkon ja käyttäjän välillä,
- laaja maantieteellinen peittoalue,
- jatkuva mahdollisuus tiedonsiirtopalveluihin ja
- sujuva palvelu myös silloin kun käyttäjä siirtyy solusta toiseen.

Solukko-verkot ovat siten luonteeltaan laajan alueen verkkoja (*Wide Area Network*, WAN), kun taas paikallisverkot (*Local Area Network*, LAN) tarjoavat yhteyksiä rajallisella alueella. Termi solukko-verkko on luonteeltaan tekninen, matkaviestinverkko viittaa enemmän käyttäjän näkökulmaan – mobiiliverkko on ehkä jotain näiden väliltä. Matkaviestinverkon täytyy siten toisaalta olla hajautettuna ympäri koko sitä aluetta, jolla palvelua halutaan tarjota (tai toimiluvan ehtojen vuoksi vaaditaan tarjottavaksi) ja toisaalta siinä tarvitaan keskitetty osa, joka hoitaa käyttäjien tietojen hallinnan. Tukiasemia (kuvassa 5.5.) voidaan tarvita tuhansittain<sup>188</sup>, kun taas keskitetyn järjestelmän tulee pystyä hallitsemaan jopa kymmeniä miljoonia yhtäaikaista käyttäjiä.



**Kuva 5.5.** Tukiaseman antennit.<sup>189</sup>

### *Solukko-verkkojen toiminta*

Solukko-verkossa yhtä tukiasemaa voi samanaikaisesti käyttää useita päätelaitteita ja toisaalta yksi päätelaite saattaa sijaita useamman tukiaseman peittoalueen sisällä. Resurssin jako-ongelma voidaan siten jakaa kahteen osaan:

1. Yhden tukiaseman ongelma: Miten tukiaseman tarjoama kapasiteetti jaetaan mahdollisimman tehokkaasti useamman päätelaitteen välillä?
2. Useamman tukiaseman ongelma: Miten taajuuskaista jaetaan siten, että käyttäjien kokonaismäärä ja käyttäjien saama tiedonsiirtonopeus maksimoituu?

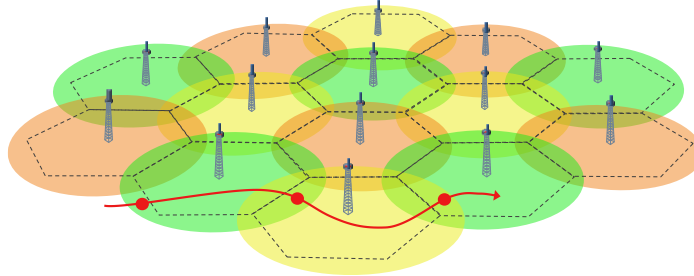
Ensimmäinen kysymys ratkaistaan käyttämällä erilaisia pääsynhallintamenetelmiä, joko eri taajuuksilla, eri aikoina tai eri koodeilla, tai näiden yhdistelmillä. Toisen kysymyksen ratkaisu perustuu siis solukko-verkkoon, jossa tukiasemat toimintaympäristöineen muodostavat solukkoa muistuttavan rakenteen. Solu (*cell*) on samaa maantieteellistä aluetta palvelevan, tiettyyn tukiasemaan kuuluvan lähetin-vastaanotin-parin peittoalue.<sup>190</sup>

<sup>188</sup> Suomessa on yli 10000 tukiasemapaikkaa, Lausunto 24.4.2012, Tietoliikenteen ja tietotekniikan keskusliitto.

<sup>189</sup> Kuva: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/GSM\\_base\\_station\\_4.JPG/180px-GSM\\_base\\_station\\_4.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/GSM_base_station_4.JPG/180px-GSM_base_station_4.JPG)

<sup>190</sup> Sanastokeskuksen termipankki, <http://www.tsk.fi/tepa/fi/>

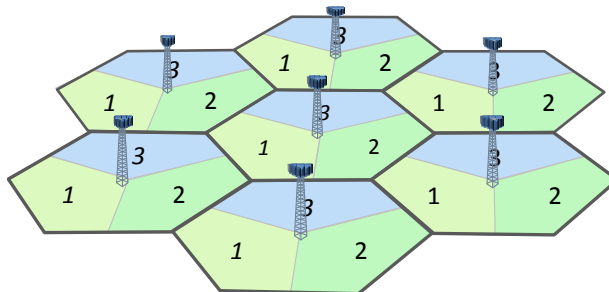
Solukverkon periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 5.6. Kuvassa on esitetty verkko, jossa käytetään kolmea eri taajuusaluetta (merkitty eri värein). Usein käytetään myös suurempaa määrää taajuusalueita (esimerkiksi 7), jolloin eri tukiasemien toisilleen aiheuttamat häiriöt pienentyvät.



**Kuva 5.6.** Solukverkon rakenne. Solut menevät osittain päällekkäin, joten vierekkäiset tukiasemat eivät voi käyttää samoja taajuuksia. Värit kuvaavat eri taajuuskaistoja, kun tukiasemat ovat ympärisäteileviä.

Kuten kuvassa 5.7 esitetään, taajuuksien käyttöä voidaan tehostaa suuntaavilla antenneilla. Kuvassa on esitetty tilanne, jossa kukin tukiasema lähettää kolmeen eri suuntaan eri taajuuskaistoilla siten että missä tahansa solujen raja-alueella viereisissä verkoissa käytetään aina eri taajuuskaistoja. Vaikka edelleenkin kukin taajuuskaista peittää vain yhden kolmasosan koko alueesta (vertaa kuvaan 5.6), niin tukiasemien lukumäärä voi joko olla pienempi (kun kokonaiskapasiteetti pidetään vakiona) tai verkon kokonaiskapasiteetti voi olla suurempi (kun tukiasemien lukumäärä pidetään vakiona). Tukiasemat ovat yhteydessä matkapuhelinkeskukseen, joita voi suuressa verkossa olla useita.

Kun puhelin siirtyy puhelun kestäessä tukiaseman kuuluvuusalueen ulkopuolelle, sen on kyettävä vaihtamaan toisen tukiaseman käyttämälle kanavalle tai puhelu katkeaa. Tätä siirtymistä solusta toiseen kutsutaan solunvaihdoksi tai yhteysvastuun vaihdoksi (**handover**). Matkapuhelimia, jotka suoriutuvat tällaisesta puhelua katkaisemattomasta solunvaihdosta, voidaan kutsua solukkopuhelimiksi (**cellular phone**)<sup>191</sup>.

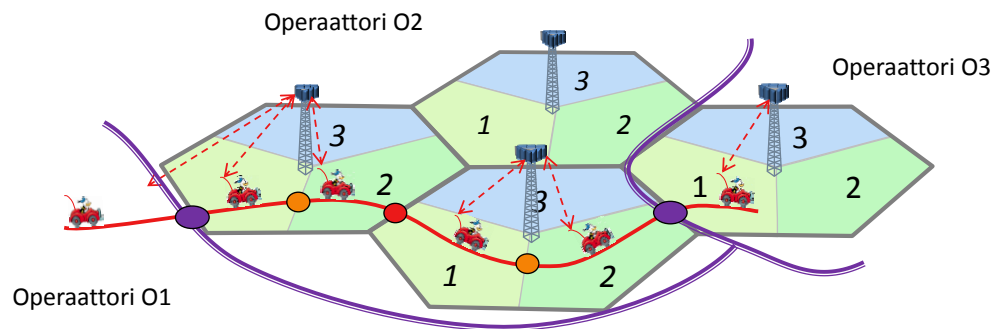


**Kuva 5.7.** Solukverko jossa kukin tukiasema lähettää kolmeen eri suuntaan kolmella eri taajuuskaistalla siten että viereiset solut voivat käyttää samoja taajuuskaistoja.

<sup>191</sup> Solukkopuhelin ei terminä ole yleisessä käytössä toisin kuin englanninkielinen vastine **cellular phone**.

Solunvaihto tapahtuu matkapuhelinkeskuksen ohjauksessa (kuva 5.8). Kun puhelimen ja tukiaseman välinen signaali alkaa heiketä, keskus selvittää, kuuleeko jokin toinen tukiasema puhelimen paremmin. Kun paremmin kuuleva tukiasema löytyy, keskus käynnistää uudella tukiasemalla vapaan liikennekanavan ja käskee puhelinta vaihtamaan uudelle kanavalle. Puhelu (tai datayhteys) jatkuu tämän jälkeen uudessa solussa.

Kuvassa 5.8 on esitetty kolme eri vaihtoa. Ensiksikin käyttäjä voi siirtyä kokonaan uuden verkko-operaattorin alueelle. Puhelu tai muu tiedonsiirto ei tällöin yleensä jatku katkoksetta, varsinkaan jos siirrytään maksullisesta palvelusta toiseen.<sup>192</sup> Toiseksi siirryttäessä solun alueelta toiselle tarvitaan tukiasemien välistä koordinoitua, jotta siirto sujuisi ilman havaittavaa katkosta palvelussa. Kolmanneksi päätelaite voi siirtyä yhden tukiaseman sisällä yhden suunta-antennin alueelta toiselle. Kaikissa näissä tapauksissa on mahdollista, että uudella alueella ei ole riittävästi vapaata kapasiteettia esimerkiksi puhelun jatkamiseen. Katkoksen todennäköisyys pyritään pitämään pienenä tehokkaan liikenteen hallinnan avulla.



**Kuva 5.8.** Tukiaseman vaihto: operaattorin vaihto (violetti), tukiaseman vaihto (punainen) ja suunta-antennin vaihto (oranssi).

Jotta puhelut voidaan välittää oikealle puhelinkeskukselle ja siitä eteenpäin oikealle tukiasemalle, verkko pitää kirjaa siitä, missä päätelaitteet sijaitsevat. Tätä kutsutaan sijainnin seurannaksi. Matkaviestinverkossa jokaisella puhelimella on niin sanottu kotikeskus, johon välitetään tieto siitä, minkä tukiaseman alueella puhelin kulloinkin on. Puhelua muodostettaessa puhelu kulkee kotikeskuksen kautta, josta yhteys jatkuu oikealle tukiasemalle.

<sup>192</sup> Katkokseton tiedonsiirtokin on mahdollista päätelaitteen ohjaamana, jos päätelaite pystyy pitämään samanaikaisesti yhteyttä kahden tai useamman operaattorin verkkoon. Tämä koskee lähinnä datasiirtoa, joka ei vaadi taattua kaistaa.

Tekniset edellytykset matkapuhelinten yleistymiselle ovat olleet vasta muutaman vuosikymmenen ajan. Radiotietä käyttävässä puhelimessa tarvittava tekniikka on huomattavasti vaativampaa kuin lankapuhelimessa. Nykyisiä matkapuhelinverkon keskuksia olisi ollut mahdotonta toteuttaa esimerkiksi 1970-luvulla (tai edes 1980-luvulla) käytössä olleella tekniikalla. Mikropiiriteknologian kehittyminen on mahdollistanut pienet ja edulliset laitteet. Ensimmäiset NMT-verkon puhelimet 1980-luvun alkupuolella soveltuivat painonsa ja tehontarpeensa vuoksi lähinnä autopuhelimeksi, kuten kuvan 5.9 Nokia Mobira Talkman, joka painoi akkuineen kunnioitettavat 5,5 kg.<sup>193</sup>



**Kuva 5.9.** Nokia Mobira Talkman vuodelta 1985.

Erilaiset turvallisuuskysymykset ovat hyvin oleellisia matkapuhelinten yhteydessä. Näitä ovat mm. mahdollisuus salakuunnella puhelua, puhelinten väärinkäyttö ja sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamat terveysriskit. Palveluntarjoajan kannalta ensisijainen ongelma on luvattoman käyttäjän tekeytyminen maksavaksi tilaajaksi.

Terveysriskistä on varmuudella vaikea sanoa kuin, että riski ei ole suuri mutta vaikka pienehkön terveysriskin mahdollisuutta ei voida täysin sulkea poiskaan.<sup>194</sup> Erityisen ongelmallisia ovat kännykät, joissa antenni on hankalassa paikassa eli aivan pään vieressä. Käsi- puhelimissa antennitehot ovat korkeintaan pari wattia ja yleensä selvästi alle yhden watin. Tällaiset tehot eivät riitä juurikaan lämmittämään kudoksia ellei vaikutus kohdistu paikallisesti hyvin pienelle alueelle.<sup>195</sup> Tietoliikenteessä käytettävät taajuudet ovat sen verran alhaisia, ettei säteily aiheuta ionisaatiota (toisin kuin röntgensäteily). Mahdolliset säteilyn terveydelle haitalliset ilmiöt perustuvat siten paikalliseen lämpövaikutukseen. Näitä vaikutuksia rajoittamaan on säädetty asetus, joka määrittelee, että paikallinen ominaisabsorptiokerto ei saa kehossa ylittää arvoa 2 W/kg.<sup>196</sup> Suurimpana riskinä pidetään hyvin paikallista lämpötilan nousua esimerkiksi aivoissa tai silmän linssissä.

Kännykästä sen käyttäjään kohdistuva säteilyteho on huomattavasti suurempi kuin tukiasemasta käyttäjään kohdistuva säteilyteho. Siten terveyden kannalta tukiaseman kannattaa olla mahdollisimman lähellä, jotta kännykän ei tarvitsisi käyttää suurta lähetystehoä.

<sup>193</sup> Tiedot ja kuva <http://nokiamuseum.com/view.php?model=Mobira%20Talkman>

<sup>194</sup> Koska käyttäjiä on ollut satoja miljoonia jo parin vuosikymmenen ajan, merkittävät riskit näkyisivät jo sairastuvuus- tilastoissa [http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/katsaus\\_matkapuhelimet\\_ja\\_tukiasemat.pdf](http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/katsaus_matkapuhelimet_ja_tukiasemat.pdf) tai uudempi rottatutkimus <https://boingboing.net/2018/02/05/rats-exposed-to-cell-phone-rad.html>

<sup>195</sup> Esimerkiksi GSM-puhelimen keskimääräinen säteilyteho on 0,25W.

<sup>196</sup> Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta, 294/2002, liite 5, <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2002/20020294>. Jos yhtä litraa vettä lämmitetään kahden watin teholla, niin vesi lämpenee yhden asteen noin 35 minuutissa. Suoran auringonpaisteen teho kesällä makuuasennossa on noin 4 W/kg laskettuna keskimäärin koko keholle, joten teho on paljon suurempi ihon pintakerroksella.

Siksi olisi loogista, jos käyttäjät haluaisivat verkon tukiasemat lähelle kotejaan ja työpaikkojaan, eikä kauas, niin kuin nyt usein tapahtuu. Matkapuhelinverkon tukiasemien tehot ovat kuitenkin sen verran suuria, ettei päästä kannata laittaa niiden eteen.<sup>197</sup>

### Vapaan tilan vaimennus ja radioyhteyden mitoitus

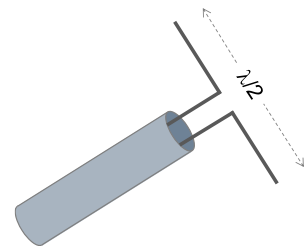
Periaatteessa Maxwellin yhtälöryhmä yhdessä reunaehtojen kanssa määrittää täysin radioaaltojen etenemisen. Reunaehdot ovat käytännön tapauksissa äärimmäisen monimutkaisia, koska niihin vaikuttavat mm. maanpinnan epätasaisuudet ja väliaineen muuttuvat ominaisuudet. Tämän vuoksi Maxwellin yhtälöitä ei yleensä käytetä radiotietoliikenteen mallintamiseen, vaan niiden sijaan käytetään yksinkertaisempia malleja kuvaamaan aaltojen etenemistä, taittumista, heijastumista ja absorptiota.

Tietoliikenteen kannalta olennainen tieto on se, miten radiokanava vaikuttaa lähetettyyn signaaliin. Yleensä on riittävää mallintaa kanava tilastollisena ilmiönä, jossa otetaan huomioon myös erilaiset korrelaatiot ajan ja paikan funktiona. Solukoverkkojen tapauksessa radiokanavien tyypilliset ominaisuudet tunnetaan varsin hyvin laajojen mittausten ansiosta. Tämä on tärkeää, sillä radiotaajuudet ovat kallis resurssi, joka on syytä käyttää mahdollisimman tehokkaasti hyödyksi.

Vapaassa tilassa vastaanotetun ja lähetetyn signaalin tehojen suhde on:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (5.1),$$

jossa  $G_T$  on lähtetimen tehovahvistus,  $G_R$  on vastaanottimen tehovahvistus,  $\lambda$  on käytetty aallonpituus ja  $r$  on etäisyys. Esimerkiksi dipoliantennin (oheisessa kuvassa puolialtodipoli) tehovahvistus verrattuna tasaisesti ympärisäteilevään antenniin on n. 1,64 (eli desibeliasteikolla 2,15 dB). Huomaa erityisesti, että kaavassa 5.1 tehovahvistukset ovat lineaarisella asteikolla, eivät siis desibeleinä.



Kuten kaavasta voidaan havaita, kun aallonpituus pienenee (eli taajuus kasvaa), niin hyötysuhde heikkenee. Tämä voidaan esittää logaritmisella asteikolla seuraavasti:

$$L = 32,44 + 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(r_{km}) \quad [dB] \quad (5.2)$$

$L$  on radiolinkin aiheuttama vaimennus desibeleissä, kun käytetty taajuus ( $f$ ) on esitetty MHz-asteikolla ja etäisyys ( $r$ ) kilometreissä.

<sup>197</sup> Makrosolujen tukiasemien turvaetäisyys on n. 10 m ja mikrosolujen tukiasemilla n. 30 cm.

<http://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>

Vapaan tilan vaimennus ei siis tarkoita sitä, että sähkömagneettisen säteilyn energia häviäisi tai absorboituisi johonkin vaan sitä, että etäisyyden kasvaessa energia jakautuu suuremmalle pinta-alalle. Pinta-ala kasvaa neliöllisesti etäisyyden funktiona. Miksi sitten vaimennus riippuu aallonpituudesta? Tämän ilmiön voi ajatella siten, että mitä pienempi aallonpituus sitä pienempi on ala, jolta antenni pystyy vastaanottamaan sähkömagneettisen säteilyn energiaa. Säteilyn kokonaisenergia tietyllä etäisyydellä ei siten riipu säteilyn aallonpituudesta, sen sijaan antennin vastaanottama energia riippuu aallonpituudesta. Pienillä aallonpituuksilla, joita käytetään esimerkiksi satelliittiyhteyksillä, tarvitaan käytännössä suuri antennivahvistus. Suureen antennivahvistukseen päästään lautasantennilla, silloin kun se on käytännössä mahdollinen.

Vastaanottotehot voivat olla hyvin pieniä. Lähetysteho 100 mW on desibeliasteikolla suhteessa milliwattiin ilmaistuna 20 dBm. Vastaanotetuksi tehoksi voi riittää -100 dBm, joka vastaa siis tehoa  $10^{-13} \text{ W} = 100 \text{ fW}$ .<sup>198</sup> Tällaiseen lopputulokseen päästään kaavan 5.3 mukaan esimerkiksi, jos lähetysteho on 100 mW, taajuus on 2,4 GHz ja etäisyys on 10 km. Käytännössä radioaallot eivät etene niin kuin vapaassa tilassa varsinkaan kaupunkiympäristössä: maksimietäisyys 2,4 GHz:n taajuudella on pikemminkin pari kilometriä kuin kymmenen kilometriä. Tarkempia laskelmia varten on kehitetty monimutkaisia kaavoja, jotka perustuvat todellisessa ympäristössä tehtyihin mittauksiin. Ero vapaan tilan vaimennukseen on niin suuri (useita kymmeniä desibelejä), ettei radioverkon mitoitus voida tehdä vapaan tilan kaavan perusteella juuri missään olosuhteissa edes kaupunkien ulkopuolella. Myös metsä aiheuttaa huomattavaa lisävaimennusta verrattuna vapaan tilan vaimennukseen.

### Esimerkki 5.3. Radioyhteyden mitoitus kaupunkialueella

Oletetaan, että eräällä kaupunkialueella radiotien vaimennus noudattaa kaavaa<sup>199</sup>

$$L^* = 46 + 26 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 34 \log_{10}(r_{\text{km}}) \quad [\text{dB}] \quad (5.3)$$

Jos tukiaseman lähetysteho on 1 W, kuinka kaukana matkapuhelin voi korkeintaan olla, jotta signaalin voimakkuus olisi vähintään -100dBm kun taajuusalue on a) 900 MHz tai b) 2100 MHz. Entä mikä on tulos, jos tukiaseman lähetysteho onkin 10 W taajuusalueella c) 900 MHz ja d) 2100 MHz.

### Ratkaisu

Kaavasta 5.4 saadaan kääntämällä

$$r_{\text{km}} = 10^{(L^* - 46 - 26 \log_{10}(f_{\text{MHz}}))/34}$$

<sup>198</sup> Esimerkiksi: <http://www.antenna-theory.com/design/cellantenna.php>

<sup>199</sup> Tämä kaava vastaa suunnilleen ns. Hata-mallia kaupunkialueelle, kun tukiaseman antenni on 50 m korkeudella ja vastaanottajan antenni 1,5 m korkeudella, [https://en.wikipedia.org/wiki/Hata\\_model\\_for\\_urban\\_areas](https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model_for_urban_areas).



Nyt pitää olla tarkkana sen suhteen mikä on sallittu vaimennus, eli  $L^*$ . Kun lähetysteho on 1 W ja vastaanottoteho -100 dBm, niin sallittu vaimennus on 100 dB verrattuna 1 mW:n tehoon. Verrattuna yhteen wattiin sallittu vaimennus on siten  $100 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 130 \text{ dB}$ . Vastaavasti 10 W:n lähetysteholla sallittu vaimennus on 140 dB. Vastauksiksi saadaan soveltamalla kaavaa 5.4:

$$\text{a) } r = 10^{(130-46-26\log_{10}(900))/34} = 1,63 \text{ km}$$

$$\text{b) } r = 0,85 \text{ km}$$

$$\text{c) } r = 3,20 \text{ km}$$

$$\text{d) } r = 1,68 \text{ km}$$

Vapaan tilan kaavalla tulokset olisivat vastaavasti: a) 84 km, b) 36 km, c) 265 km ja d) 114 km.

### *Solukoverkon kapasiteetti*

Mobiiliverkon kapasiteettia voidaan mitata sillä, miten paljon tiedonsiirtokapasiteettia on käytettävissä pinta-alayksikköä kohden. Kapasiteetin yksikkönä voi tällöin olla esimerkiksi Gbit/s/km<sup>2</sup>. Tällä tavoin määritelty kapasiteetti riippuu olennaisesti neljän tekijän tulosta: spektrinen tehokkuus<sup>200</sup> × kaistanleveys × tukiasemien määrä pinta-alayksikköä kohti × sektorien määrä tukiasemaa kohti. Sektoreita voidaan lisätä suuntaavien antennien avulla kuten kuvassa 5.7 on esitetty. Tyypillisesti sektoreita on kolme.

Spektrinen tehokkuus määritellään tehollisena bittinopeutena käytettävissä olevaa kaistaa kohti eli sen yksikkö on bit/s/Hz, josta itse asiassa tulee yksikötön suure (koska Hz = 1/s). Aikanaan GSM/EDGE-datasiirron tehokkuus oli teoriassa 1,92 mutta käytännössä noin 1.<sup>201</sup> Kun kaista yhteyttä kohti oli 200 kHz, niin tyypillisesti saavutettiin 200 kbit/s nopeus. Vastaavasti 3G/HSPA spektrin tehokkuus on suunnilleen sama kuin EDGellä (eli 1), mutta yhdelle yhteydelle kaistaa on käytettävissä enemmän (5 MHz), jolloin bittinopeudet ovat vastaavasti suurempia. LTE:n teoreettinen spektritehokkuus on noin 4, mutta käytännössä tyypillisesti 1,5. Kun yhteyden kaista on 20 MHz, niin LTEllä päästään 30 Mbit/s nopeuteen. MIMO (**m**ultiple-**i**nput-**m**ultiple-**o**utput) –teknologian avulla päästää vielä suurempiin spektritehokkuuksiin, suotuisissa olosuhteissa jopa 30:een. Käytännössä LTE:llä päästäneen spektritehokkuuteen 6. 5G-teknologia mahdollistaa vielä korkeampia tehokkuuksia, mutta vasta käytäntö osoittaa minkälaiset luvut ovat todellisuudessa mahdollisia.

Verkon kapasiteettia voidaan siis lisätä myös ottamalla käyttöön uusia taajuusalueita. Taajuusalueiden allokointi on kuitenkin vaikea poliittinen kysymys, sillä taajuuksille on

<sup>200</sup> Spectral efficiency

<sup>201</sup>Laskelmissa esitetyt luvut perustuvat artikkeliin Rysavy, P. (2014) Challenges and considerations in defining spectrum efficiency. Proceedings of the IEEE, 102(3), 386-392, sekä Wikipedian artikkeliin Spectral Efficiency.



monia muitakin käyttökohteita kuten kuvasta 5.3 jo nähtiin. Muutokset taajuusalueiden käytössä vaativat vaikeita ja monimutkaisia päätöksiä, joissa eri tahojen intressit ovat usein ristiriidassa keskenään. Korkeammilla taajuuksilla on luonnostaan enemmän kaistaa käytettävissä (huomaa että alle 1 GHz:n alueella on kokonaisuudessaan kaistaa yhtä paljon kuin vaikkapa 10 ja 11 GHz:n välillä).

Korkeille taajuuksille siirryttäessä solukoko kutistuu väistämättä, sillä suurempitaajuinen säteily vaimenee nopeammin kuin matalataajuinen. Eli jos halutaan verkolle hyvä kattavuus, on käytettävä alhaista taajuusaluetta (alimmillaan 450 MHz:n alue). Suuremmilla taajuuksilla (uusimman verkkotekniikan eli LTE:n tapauksessa käytössä on taajuuskaistoja 3,8 GHz asti) verkon kapasiteetti on suurempi, mutta täysin kattavaa verkkoa on hyvin vaikea rakentaa. Lisäksi kun käytettävä taajuus on korkea, kuuluvuus rakennusten sisällä on olennaisesti heikompi kuin ulkona, joka vaikeuttaa verkon suunnittelua ja peiton rakentamista erityisesti kaupunkialueilla.

Lopulta solukoon pienentäminen on helpoin tapa kasvattaa kapasiteettia pinta-alayksikköä kohti, silloin kun teknologia on määrätty ja käytettävä kaista on rajallinen. Solukkoperiaate mahdollistaa myös erikokoisten solujen yhtäaikaisen käytön. Tiheästi liikennöidyillä alueilla kuten kaupunkien keskustoissa käytetään pienempää solukokoa (piensoluverkko) ja haja-asutusalueilla suuria soluja (suursoluverkko). Kun näihin käytetään eri taajuusalueita, niin solut voivat sujuvasti toimia päällekkäin.

Mobiiliverkon kokonaiskapasiteetti riippuu kolmesta tekijästä: a) taajuuskaistasta (eli sääntelystä), b) spektritehokkuudesta (eli teknologian tasosta) ja c) tukiasemien määrästä (eli verkkoinvestointien määrästä). Operaattori voi siis vaikuttaa näihin kaikkiin a) osallistumalla taajuuskaistojen huutokauppoihin, b) valitsemalla kulloinkin tehokkaimman verkoteknologian ja c) tekemällä päätöksiä lisätä tukiasemien määrää.

### **Esimerkki 5.1.** Solukoverkon mitoitus

Pääkaupunkiseudulla asuu noin 1,2 miljoonaa henkilöä 1000 km<sup>2</sup> alueella. Yksinkertainen kysymys: Miten paljon tukiasemia tarvitaan täyttämään mobiilin internetin tiedonsiirtotarpeet?

#### **Ratkaisu**

Ratkaisu on periaatteessa yksinkertainen, kunhan tunnetaan käyttäjien tarpeet ja tukiasemien kapasiteetit (käytännössä verkon suunnittelu ja mitoitus on monimutkaisempaa). Ensiksi pitää olettaa jotain käyttäjien tarpeista. Voitaisiin olettaa tiedonsiirron kokonaismääräksi asukasta kohti kuu- kaudessa esimerkiksi 10 GB.<sup>202</sup> Toisaalta voimme tehdä myös oletuksen siitä minkälaisia nopeuksia

---

<sup>202</sup> Tämä vastaa nykyistä (2017) tilannetta Suomessa. Useimmissa muissa maissa määrä on korkeintaan pari GB/kk.

keskimääräinen käyttäjä tarvitsee ja kuinka suuri osa asiakkaista on aktiivisia kiiretunnin aikana. Seuraavat laskelmat on tehty kahdella erilaisella oletuksella:

1. Bittinopeus  $R = 1$  Mbit/s (eli varsin pieni nopeus).
2. Bittinopeus on  $R = 25$  Mbit/s (eli tyypillinen 4G-nopeus).

Lisäksi oletetaan kaksi vaihtoehtoa aktiivisuudelle kiiretunnin aikana:

- a. Aktiivisuus  $p = 1$  % eli yllä esitettyjä bittinopeuksia käytetään keskimäärin 36 sekuntia kiiretunnin aikana.
- b. Aktiivisuus  $p = 5$  % eli keskimäärin 3 minuuttia kiiretunnin aikana.

Näistä voidaan laskea keskimääräiset datamäärät kuukaudessa, kun tehdään joku oletus siitä, mikä on kiiretunnin osuus kokonaisliikenteestä, esimerkiksi  $q = 7$  %. Näiden perusteella voimme laskea datasiirron kokonaismäärän eri vaihtoehdoille seuraavasti:<sup>203</sup>

$$\text{Datamäärä} = \frac{3600 \cdot 30 \cdot pR \text{ [Mbit/s]}}{8 \cdot 1000 \cdot q} \text{ [GB]}$$

Datamäärät (gigatavuissa) kuukaudessa asukasta kohti ovat tällöin:

- 1a. 1,9 GB
- 1b. 9,6 GB
- 2a. 48 GB
- 2b. 241 GB

Nämä voivat vaikuttaa suurilta luvuilta ja viimeinen on oikeasti suuri datamäärä siirrettäväksi mobiiliverkon yli. Jos ennusteisiin on uskomista, niin on vain ajan kysymys, milloin datamäärät saavuttavat ylimmänkin tason.

Entä sitten tarvittavien tukiasemien määrä? Tätä varten tarvitsemme tietoa tukiasemien kapasiteetista ja siitä miten korkeaksi tukiaseman kuormitus voidaan keskimäärin nostaa, jotta palvelun laatu ja saatavuus pysyisivät riittäväällä tasolla. Kapasiteetti riippuu mm. käytettävästä teknologiasta ja taajuuskaistan leveydestä. Voimme tehdä tässä melko karkean arvion, että jokaisella tukiasemalla on kuvan 5.7 mukaisesti kolme sektoria, joissa kullakin on kapasiteettia  $C = 150$  Mbit/s.

Sallittu keskimääräinen kuormitus on kysymys, johon ei ole aivan yksinkertaista (esimerkiksi Erlangin kaavan tyyppistä) vastausta. Keskimääräinen kuormitus vaihtelee sekä solujen välillä että ajan funktiona kiiretunnin aikana. Toisaalta, koska suurin osa verkon kuormituksesta tulee dataliikenteestä, joka sopeutuu varsin hyvin muuttuviin olosuhteisiin, tässä tapauksessa ei tarvita aivan yhtä paljon pelivaraa kuin perinteisissä puhelinverkoissa. Tehdään oletus, että keskimääräisen kiiretunnin aikainen kuormitus täytyy pitää alle  $\rho = 20$  prosentissa (suhteellisen alhainen lukuarvo johdetaan lähinnä solujen kuormitusten eroista). Tukiasemien kokonaismääräksi ( $M$ ) tulee tällöin:

<sup>203</sup> Kerroin 8 kaavassa tulee siis siitä, että yksiköt vaihdetaan biteistä tavuiksi.

$$M = \frac{pRN}{3C\rho} \quad (5.4)$$

jossa N on asukasmäärä, siis 1,2 miljoonaa. Tukiasemien määräksi saadaan eri vaihtoehdoilla:

$$1a. M = 134$$

$$1b. M = 667$$

$$2a. M = 3334$$

$$2b. M = 16667$$

Kaksi ensimmäistä ovat vielä täysin mahdollisia sekä teknisesti että kaupallisesti, kun ottaa huomioon, että käytännössä tukiasemat jakautuvat useamman, usein kolmen, operaattorin kesken. Ensimmäisessä kohdassa (1a) tarvittaisiin siis yksi tukiasema noin 7,5 neliökilometriä kohden, kun taas viimeisessä (2b) tarvitaan 17 tukiasemaa neliökilometrillä. Epätasaisesta kuormituksesta johtuen tiheimmin asutuilla alueilla tukiasemia pitäisi olla alle 100 metrin välein. Tämäkin on mahdollista toteuttaa, jos tukiaseman hinta laskee riittävän alhaiseksi ja tukiasemien sijoituspaikkoina käytetään esimerkiksi valaisinpylväitä.

## Sukupolvesta toiseen

### *Ensimmäiset sukupolvet: ARP ja NMT*

Ensimmäinen kaupallinen mobiilipalvelu oli AT&T:n MTS<sup>204</sup> vuonna 1949. Palvelu oli kallis ja verkon kapasiteetti hyvin rajallinen. Ensimmäinen matkapuhelinverkko Suomessa oli ARP (autoradiopuhelin), joka otettiin käyttöön 1971; sitä voi siten kutsua sukupolveksi nolla eli 0G. Sen toiminta oli nykyisiin verkkoihin verrattuna alkeellista. Matkapuhelimesta soittaessa puhelun alussa otettiin yhteys käsivälitteiseen keskukseseen, josta puhelu yhdistettiin haluttuun lankaverkon numeroon tai toiseen matkapuhelimeen. Puhelimet eivät osanneet vaihtaa taajuutta kesken puhelun, joten puhelimen siirtyessä tukiaseman kantaan ulkopuolelle puhelu katkesi.

ARP-verkko toimi 150 MHz:n taajuusalueella, jolla signaalin kantomatkka on useita kymmeniä kilometrejä. Häiriöiden estämiseksi samaa kanavaa käyttävien tukiasemien väliin täytyy tällöin jäädä 100 - 200 kilometrin suojavajöhyke. Tämä rajoitti verkon tilaajamäärän varsin pieneksi. Enimmillään verkossa oli runsaat 35 000 tilaajaa. Tilajamäärästä huolehtivat taloudelliset realiteetit, sillä niin puhelimet kuin puhelutkin olivat kalliita. ARP-verkko toimi matalan taajuusalueen ja suuren solukoon ansiosta lähes koko Suomessa ja sitä käytettiin paljon varsinkin syrjäseuduilla. ARP-verkko suljettiin vuoden 2000 lopulla.

Astetta kehittyneempi NMT-verkko avattiin Suomessa 1982. NMT (**Nordic Mobile Telephone**) -järjestelmä oli pohjoismaiden telehallintojen yhdessä kehittämä ja ylläpitämä

<sup>204</sup> MTS = Mobile Telephone Service, [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_mobile\\_phones](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_mobile_phones)

palvelu.<sup>205</sup> Pohjoismaat kattanut NMT-verkko oli aikanaan maailman laajin yhtenäinen matkapuhelinjärjestelmä. Suomessa NMT-verkkoa operoi Posti- ja lennätinlaitos seuraajineen. NMT-järjestelmä käynnistyi kaikissa pohjoismaissa samalla 450 MHz taajuusalueella. NMT 450:n suosio kasvoi nopeasti ja pian kävi ilmeiseksi, ettei kaikkia halukkaita saada mahtumaan samaan verkkoon. Sen vuoksi 1980-luvun puolivälissä ruvettiin rakentamaan 900 MHz:n taajuusalueella toimivaa NMT 900 -verkkoa. Suomessa NMT 900 suljettiin vuoden 2000 lopussa, jolloin sen varaamat taajuudet vapautuivat GSM-verkon käyttöön. NMT 450 jatkoi toimintaansa vuoden 2002 loppuun.

NMT-verkko perustui analogiseen tekniikkaan radiotien osalta, sen sijaan kiinteän verkon osuus ja keskuksset olivat digitaalisia. NMT hallitsi sekä puhelinten sijainnin seurannan että solunvaihdon. Yksi NMT:n perusongelmista oli puhelujen salakuuntelun helppous. Tämä ongelma saatiin ratkaistua vasta digitaalitekniikan avulla.

### *Toinen sukupolvi: GSM*

GSM-lyhenne tuli alun perin sanoista *Groupe Speciale Mobile*, joka oli eurooppalaisen standardointijärjestön ETSIn<sup>206</sup> alatyöryhmä. Myöhemmin GSM liitettiin markkinoinnin kannalta paremmin sopivaan nimitykseen *Global System for Mobile communications*. GSM:n kehitystyön tavoitteena oli luoda vähintään Euroopan kattava matkapuhelinverkko siirryttäessä digitaalitekniikkaan, sillä analogiset matkapuhelinverkon olivat lähes joka maassa erilaisia, jolloin yhtä päätelaitetta saattoi käyttää vain yhdessä maassa. Oleelliset parannukset NMT-verkkoon verrattuna olivat:

- Puhelimen ja tukiaseman välillä yhteys on digitaalinen, jolloin yhteys voidaan salata tehokkaasti ja dataliikenteen välittäminen on olennaisesti helpompaa.
- GSM:ssä tilaajan identifiointi perustuu älykorttiin (SIM, *subscriber identity module*) eikä varsinaiseen puhelinlaitteeseen. SIM-kortti sisältää tilaajan kaikki oleelliset tiedot, joten käyttäjä ei ole sidottu yhteen puhelinlaitteeseen.

Tavoitteena oli saada GSM-palvelu toimintaan heinäkuussa 1991. Käytännössä GSM-palvelut käynnistyivät vasta vuoden 1992 lopulla, ensin 900 MHz:n taajuusalueella. Vuodesta 1998 alkaen otettiin käyttöön 1800 MHz:n alue, kun alempi taajuusalue alkoi täyttyä. GSM-puhelimien määrä kasvoi nopeasti: vuoden 1993 alussa Suomessa niitä oli vain pari tuhatta, vuotta myöhemmin kymmenen kertaa enemmän, keväällä 1996 niiden määrä lähestyi puolta miljoonaa ja vuoden 1998 alussa ylitettiin jo puolentoista miljoonan raja.

---

<sup>205</sup> NMT:n kehittäminen lähti käyntiin vuonna 1968, kun pohjoismaiset telelaitokset perustivat yhteistyöryhmä Nordiska Mobiltelefonigruppen.

<sup>206</sup> ETSI = *European Telecommunications Standards Institute*, on riippumaton, eurooppalainen telealan standardisointijärjestö (<http://www.etsi.org/>)

GSM-puhelinliittymien määrä ylitti kiinteän verkon liittymien määrän kesällä 1999. Jo vuonna 2004 matkapuhelinliittymien määrä pohjoismaissa ja eräissä muissa maissa ylitti asukasluvun.

Kannettavien tietokoneiden käyttäjille GSM tarjosi nopeuden 9,6 kbit/s, joka nykylaitteisiin ja sovelluksiin tottuneena kuulostaa kovin vaatimattomalta. Seuraava askel datasiirrossa oli GPRS (**General Packet Radio Service**), jolla pyrittiin suurempiin nopeuksiin ja tehokkaampaan verkon käyttöön pakettimuotoisen datasiirron avulla. GPRS:n nopeus nousi EDGE-tekniikan (**Enhanced Data rates for GSM Evolution**) avulla 384 kilobittiin sekunnissa.

GSM-puhelimen käyttäjä on suojattu verkkoliittymän väärinkäyttöä vastaan. Lisäksi GSM-verkossa on laiterekisteri-ominaisuus eli jokaisessa puhelimessa on 15 numeroa pitkä tunnus, IMEI-koodi.<sup>207</sup> Koodi tarkistetaan puhelua muodostettaessa, joten varastetun puhelimen käyttö on periaatteessa mahdollista estää. Valitettavasti samoja IMEI-koodeja voi verkossa olla useita eri syistä johtuen, joten koodi ei täydellisellä varmuudella identifioi yhtä laitetta. Puhelun salauksen kannalta GSM-tekniikka on oleellisesti parempi kuin edeltävät analogiset järjestelmät. GSM:n salakuuntelua varten löytyy laitteita, mutta salakuuntelu vaatii esivalmistelua ja tietoa GSM-verkon teknisestä toteutuksesta. Yksittäisen henkilön joutuminen tämän tyyppisen hyökkäyksen kohteeksi on varsin epätodennäköistä.<sup>208</sup>

### *Kolmas sukupolvi: UMTS / 3G*

Hyppäys toisesta sukupolvesta (2G) kolmatta sukupolvea (3G) edustavaan UMTS:iin (**Universal Mobile Telecommunications System**) oli suuri niin verkkoja ylläpitäville operaattoreille kuin asiakkaillekin. Kysymys kuului: Mitä asiakkaat lopulta haluavat? Tarvitseeko käyttäjä todellakin videokuvan siirtoa tai kahta megabittiä sekunnissa taskuunsa? Nyt tiedämme, että tarvetta on aina riittänyt suuremmille nopeuksille, mutta 20 vuotta sitten tämä ei ollut lainkaan ilmeistä.

Britannia järjesti keväällä 2000 huutokaupan, jossa viisi 3G-toimilupaa myytiin yhteensä lähes 38 miljardin euron hintaan. Saksan valtio keräsi saman vuoden elokuussa omasta huutokaupastaan yli 50 miljardia euroa. Hintoja voidaan pitää korkein, mutta toisaalta matkapuhelinpalveluiden tarjoaminen on osoittautunut erittäin kannattavaksi liiketoiminnaksi niille operaattoreille, jotka ovat pystyneet hankkimaan riittävän suuren markkinaosuuden. Euroopan ensimmäinen UMTS-verkko otettiin käyttöön Man-saarella

---

<sup>207</sup> IMEI = **I**nternational **M**obile station **E**quipment **I**dentify, 15 merkkiä pitkä matkapuhelimen laitetunnus. IMEI-koodia käytetään myös 3G- ja LTE-puhelimissa.

<sup>208</sup> Viestintävirasto (2011), GSM-matkapuhelinverkon viestintää on mahdollista salakuunnella – 3G- ja 4G-verkot ovat turvallisia, [https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2011/T\\_29.html](https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2011/T_29.html). Viranomaisten kannalta optimaalinen tilanne on se, että salakuuntelu on yksityisille tahoille hyvin vaikeaa, mutta viranomaisille mahdollista.

vuoden 2001 lopulla. Suomalaisista operaattoreista Radiolinja ja Sonera avasivat verkkonsa testikäyttöön vuoden 2001 alussa. Kaupallinen toiminta käynnistyi Suomessa vasta syksyllä 2004. Suomen 3G:n (ruotsalainen Tele2) toimilupa peruttiin kesäkuussa 2005, koska yhtiö ei täyttänyt toimilupaan sisältyvää rakentamisvelvoitetta. 3G-verkkoja on siten Suomessa rakennettu yhteensä kolme. Verkkojen nykyisiä omistajia ovat Elisa, Telia ja DNA.

3G:n datasiirtonopeudet ovat kasvaneet merkittävästi vuosien mittaan. Taulukossa 5.1 on esitetty muutamia kehitysvaiheita. Yksiselitteisin kehitysvaiheen kuvaus on 3GPP:n (3rd Generation Partnership Project) standardien julkaisunumero (release). 3GPP on usean standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio, joka perustettiin kehittämään kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmiä 1990-luvun lopulla. Ensimmäinen 3G-standardi (Release 99) julkaistiin vuonna 2000. Seuraava eli Release 4 julkaistiin 2001 ja siitä eteenpäin uusia versioita on julkaistu siten, että Release 12 julkaistiin maaliskuussa 2015.<sup>209</sup>

Ensimmäinen merkittävä kehityssaskel datasiirron kannalta oli HSPA (High Speed Packet Access). HSPA jakautuu kahteen osaan eli 1) tiedonsiirtoon verkosta päätelaitteeseen eli HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ja 2) tiedonsiirtoon päätelaitteesta verkkoon eli HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access). Useimpien sovellusten kannalta kapasiteetti alaspäin (käyttäjälle) on huomattavasti tärkeämpi kuin kapasiteetti ylöspäin (verkkoon<sup>210</sup>). Niinpä HSDPA julkaistiin kolme vuotta ennen HSUPA:ta. Seuraava vaihe eli HSPA+ tekniikka mahdollisti noin kaksinkertaiset datansiirtonopeudet.

**Taulukko 5.1.** Solukkoverkkojen teknologioiden kehitystä 3G:stä 5G:hen.<sup>211</sup>

	UMTS / WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A	5G tavoite
3GPP release vuosi	99 2000	6 2005	7 2008	8 2009	10 2011	14 2017
Max bittinopeus alaspäin (Mbit/s)	0,384	14,4	28	42	150	10 000
Max bittinopeus ylöspäin	0,128	5,7	11	11	75	1 000
Edestakainen viive	150 ms	60 ms	35 ms	~10 ms	~10 ms	~1 ms

<sup>209</sup> 3GPP, <http://www.3gpp.org/specifications/67-releases>

<sup>210</sup> Verkkoteknologian kielenkäytössä käyttäjä on verkon alapuolella, mutta voisi tämän ajatella toisinkin päin.

<sup>211</sup> Numeroarvot riippuvat siitä tarkoitetaan teoreettisia nopeuksia vai kaupallisissa verkoissa mitattuja arvoja. Lähteinä M. Sauter (2011): *From GSM to LTE - An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*; <http://www.4gamericas.org/>, Wikipedia [http://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_%28telecommunication%29](http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_%28telecommunication%29), [http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_Speed\\_Packet\\_Access](http://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_Packet_Access)), Pham Nhu Hai (2013), *Introduction to LTE and LTE-Advanced*, ITU Radiocommunication Bureau.

### *Neljäs sukupolvi: 4G & LTE*

Verkkojen kehitys ei lopu johonkin sukupolveen vaan aina kehitetään uusia. Luonnollinen jatko 3G:lle on tietysti 4G ja sitten seuraavaksi 5G. Vuoden 2015 alussa tilanne oli, että 4G:tä käytetään uusimpien puhelimien ja verkkopalveluiden markkinointiin ja 5G:tä uusien tutkimusohjelmien nimissä ja tutkimussuunnitelmissa. Mitä siis tarkoittaa 4G, jos HSPA lasketaan 3G tai 3.5G-tekniologiaksi? Näyttää siltä, että mitään virallista, tarkkaa 4G-määritelmää ei ole eikä varmaan tulekaan.<sup>212</sup> Sen sijaan on olemassa erilaisia radioteknisiä ratkaisuja ja erilaisia verkkoarkkitehtuuriratkaisuja, jotka johtavat erilaisiin teoreettisiin bittinopeuksiin ja erilaisiin kaupallisissa verkoissa toteutuvien palveluiden laatuominaisuuksiin. Kun nopeus verkosta päätelaitteeseen on vähintään 50 Mbit/s, voidaan käyttää nimitystä 4G.

Ensimmäinen standardi, josta käytetään nimitystä LTE (**Long Term Evolution**) on Release 8 vuodelta 2009. LTE-tekniikan tavoitteena on ollut kasvattaa datan siirtonopeuksia, lyhentää viiveitä, parantaa palveluita ja vähentää kuluja. LTE on ensimmäinen matkaviestintekniikka, jossa radioliikenne tukiasemasta päätelaitteeseen on toteutettu erilaisella radiotekniikalla kuin radioliikenne päätelaitteesta tukiasemaan. LTE:ssä verkon arkkitehtuuria on yksinkertaistettu, mikä lyhentää viiveitä tiedonsiirrossa ja vähentää operaattorien kustannuksia. LTE:ssä on mahdollista luoda maantieteellisesti suurikokoisia soluja (yli 100 km) ja tiedonsiirto on mahdollista nopeasti liikkuvissa ajoneuvoissa (jopa 350 km/h).

### *Viides sukupolvi: 5G ja tulevaisuus*

Seuraavan sukupolven eli 5G:n tavoitteet ovat entistäkin kunnianhimoisempia. Käyttäjille pyritään tarjoamaan parhaimmillaan jopa 10 Gbit/s nopeuksia ja taattuna nopeutenaikin useita satoja megabittejä sekunnissa. Samanaikaisesti viive pyritään puristamaan noin 1 ms tasolle. Mutta onko tämä kaikki todella tarpeen? Jos ja kun nykyisillä teknologioilla voidaan tarjota yli 100 Mbit/s latausnopeuksia<sup>213</sup>, niin mitkä ovat perusteet kehittää suurin ponnistuksin täysi uutta teknologiaa?<sup>214</sup>

Pelkkä siirtonopeuksien kasvattaminen ei ehkä ole riittävä peruste, sillä on vaikea kuvitella, että mobiililaitteissa tarvittaisiin merkittävästi yli 20 Mbit/s nopeuksia ainakaan nykyisillä sovelluksilla. Suhteellisen pienellä näytöllä jo 8 Mbit/s nopeus riittää erittäin hyvä-

<sup>212</sup> 4G:n määritelmästä ja sen käyttämisestä markkinointiin on riideltä oikeudessa asti. Markkinaoikeus: Dnro 128/13/M1, 29.4.2013 ja Dnro 298/13/M1, 20.8.2013.

<sup>213</sup> Netradar-mittaus 27.12.2017 Otaniemessä tuotti 66 Mbit/s latausnopeuden, 42 Mbit/s lähetyksenopeuden ja 53 ms viiveen. Nämä lukemat riittävät käytännössä lähes minkä tahansa nykyisen sovelluksen tiedonsiirtoon.

<sup>214</sup> Katso esimerkiksi: M. Matinmikko, M. Latva-aho, Mikro-operaattorit vauhdittavat, [https://issuu.com/uusiteknologia.fi/docs/1\\_2016](https://issuu.com/uusiteknologia.fi/docs/1_2016), s. 20-24 (tosin tällaiset arviot vanhenevat nopeasti).



laatuiseen videokuvaan. Toki jos siirtonopeus on hyvin suuri, nettisivut latautuvat nopeammin. Eräs vaihtoehto olisi, että nykyisiä 4G-verkkoja täydennettäisiin paikallisilla Wi-Fi-verkoilla (joista enemmän myöhemmin tässä luvussa). 4G-tekniikalla tuotettaisiin kattava palvelu laajalla alueella ja niissä paikoissa, missä 4G-verkot eivät riittäisi tyydyttämään lisääntyvää kysyntää, rakennettaisiin lisäkapasiteettia Wi-Fi-tekniikalla. Vuoden 2018 lopulla näyttää siltä, että 5G-tekniikan kehittämiselle on varsin laajamittainen tuki. Tärkeimmät perusteet ovat:

- Uudet kehitteillä olevat sovellukset, esimerkiksi ne jotka käyttävät virtuaalitodellisuutta (**virtual reality**, VR), vaativat entistä enemmän tiedonsiirtokapasiteettia.
- Nykyisessä muodossaan Wi-Fi-verkot ovat tehokkaita, kun vastaanotin on paikallaan, mutta huomattavasti heikommin, kun käyttäjä on liikkeellä. Autonopeuksilla (esim. 50 km/h) siirtonopeudet jäävät varsin pieniksi.
- Monet erikoissovellukset, esimerkiksi teollisuusympäristöissä tai automatisoidussa liikenneympäristössä vaativat ominaisuuksia, joita nykyisillä tekniikoilla on vaikea toteuttaa, koskien yhteyksien luotettavuutta ja sallittuja viiveitä.
- Monin paikoin 4G-tekniikalla toteutettavat verkot eivät enää tarjoa riittävää kapasiteettia käytettävissä olevilla taajuusalueilla. Tällöin on pakko siirtyä korkeammille taajuuksille, jolloin radiotekniikka on suunniteltava uudestaan.

Eräs ehdotettu ja tutkimustyön alla oleva ratkaisu on sijoittaa tukiasemia lyhtypylväisiin. Koska lyhtypylväistä on näköyhteys (!) kadulla kulkeviin ihmisiin ja autoihin, on mahdollista käyttää hyvin korkeita (yli 10 GHz) taajuusalueita, joilla saavutetaan erittäin suuri kapasiteetti. Toisaalta toteutuksen haasteet ovat merkittäviä, esimerkiksi antennit ovat suuntaavia, joten päätelaitteessa on pakko olla useita antennia, joista kullakin ajan hetkellä valitaan paras tai parhaat. 5G-tekniikan kehittämisessä riittää töitä vielä pitkään—emmekä voi vielä tietää, mitä uusia tarpeita ja palveluita samalla syntyy.

### **Esimerkki 5.2.** Tukiasemaverkon mitoitus

Arvioi tarvittava tukiasemien määrä ja keskietäisyys toisistaan, kun 1100 km<sup>2</sup> alueella asuu 7.2 miljoonaa ihmistä (= Hong Kong), kun

- a) On vain matkapuhelinliikennettä siten että keskimääräinen asukas puhuu 15 minuuttia päivässä ja puheen vaatima bittinopeus on 12 kbit/s suuntaansa.
- b) Lisäksi on dataliikennettä siten että keskimäärin asukas käyttää datasiirtoon 1 GB kuukaudessa.
- c) Edellisten lisäksi 1 prosentti asukkaista käyttää datayhteyttä nopeudella 25 Mbit/s koko kiiretunnin ajan.



Yhdessä tukiasemassa oletetaan olevan 3 sektoria, joiden jokaisen kapasiteetti on 150 Mbit/s, kapasiteetti on jaettava kahteen suuntaan (puhelimesta verkkoon ja verkosta puhelimeen). Ota huomioon myös kiiretunnin osuus kokonaisliikenteestä ja kuormituksen vaihteluista (solujen välillä ja eri päivinä) johtuva keskimääräinen sallittava kuormitustaso.

### **Ratkaisu** <sup>215</sup>

Kohta a.

Tässä tarvitsee tehdä oletus kiiretunnin osuudesta kokonaisliikenteestä; käytetään arvoa 7 %. Tällöin kiiretunnin aikana yksi asukas puhuu  $15 \cdot 0,07 = 1,05$  minuuttia. Vaikka bittejä menee molempiin suuntiin, niin yksi asukas ”tuottaa” puhetta vain toiseen suuntaan, koska toinen suunta on toisen asukkaan ”tuottamaa” liikennettä. Toisaalta yksi puhelu kuormittaa verkkoa kahdessa pisteessä. Siiten 1,05 minuuttia tarkoittaa keskimäärin:

$$1,05 \text{ min} \cdot 2 \cdot 12 \text{ kbit/s} / 60 \text{ min} = 0,42 \text{ kbit/s asukasta kohti.}$$

Kerrottuna asukasmäärällä saadaan kokonaiskuormitukseksi kiiretunnin aikana keskimäärin:

$$0,42 \text{ kbit/s} \cdot 7200000 = 3024 \text{ Mbit/s.}$$

Yhden tukiaseman kapasiteetti = 3 sektoria · 150 Mbit/s per sektori eli 450 Mbit/s. Lisäksi pitää huomioida se, että liikenteen epätasaisen jakautumisen vuoksi keskimääräinen kuormitusta ei voida nostaa kovin korkeaksi, ainakaan lähelle 100 prosenttia. Oletetaan, että sallittu keskimääräinen kuormitus kaikkien tukiasemien yli on 20 %. Tällöin tukiasemia tarvitaan:

$$N = 3024 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 34$$

Eli vastaus on 34 tukiasemaa. Solun koko on tällöin  $1100 \text{ km}^2 / 34 = 29,4 \text{ km}^2$ . Neliön muotoisilla soluilla tukiasemien väli olisi 5,4 km.

Kohta b.

Tässä pitää ensin laskea miten suuri osuus liikenteestä tuotetaan yhden kiiretunnin aikana. Oletus on yleensä, että kuukaudessa on 30 päivää, jolloin saadaan:

$$1 \text{ GB} \cdot 0,07 / 30 = 2,33 \text{ MB}$$

Megatavut täytyy kääntää siirrettäviksi kilobiteiksi ja jakaa tunnin ajalle, jolloin saadaan

$$8000 \text{ kbit/MB} \cdot 2,33 \text{ MB} / 3600 \text{ s} = 5,19 \text{ kbit/s.}$$

Kokonaisliikennemäärä datalle on tällöin

$$5,19 \text{ kbit/s} \cdot 7200000 = 37,33 \text{ Gbit/s}$$

Kun tähän lisätään puheluiden tuottama liikenne, saadaan kokonaisliikenteeksi

$$40,36 \text{ Gbit/s,}$$

<sup>215</sup> Tehtävän anto on hieman epätarkka, joten hieman erilaisiinkin vastauksiin voi päätyä—toisaalta tämä epämääräisyys on tyypillistä myös todellisuudessa, joten sitä ei ole syytä säikähtää. Usein vaativampi tehtävä on lähtötilanteen arviointi kuin itse laskelman tekeminen.

Tukiasemia tarvitaan siten

$$N = 40\,360 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 499$$

Solun keskikoko on tällöin 2,23 km<sup>2</sup> ja tukiasemien väli keskimäärin 1,49 km (nelikulmioilla).

### **Kohta c.**

Lopuksi lisätään yksi prosentti eli 72000 raskasta käyttäjää, joiden tuottama kuormitus on

$$72\,000 \cdot 25 \text{ Mbit/s} = 1\,800\,000 \text{ Mbit/s}.$$

Kun tähän lisätään edellä lasketut arvot päästään lukuun:

$$1\,840\,357 \text{ Mbit/s}.$$

Tukiasemia tarvitaan tällöin

$$N = 1\,840\,357 \text{ Mbit/s} / (450 \text{ Mbit/s} \cdot 0,20) = 20\,449.$$

Solun keskikoko on tällöin 0,049 km<sup>2</sup> ja tukiasemien väli keskimäärin 220 m (neliöillä).

### *Huomiota*

Tehtävän kohta b on varsin realistinen laskelma nykypäivänä. Toisaalta liikennemäärät ovat kasvussa, eikä 1 GB/liittymä/kuukausi riitä edes kaikkiin nykyisiin, saati tuleviin, tarpeisiin. Kohta c osoittaa, että varsin pieni määrä erittäin vaativia käyttäjiä voi moninkertaistaa liikenteen määrän. Tällä tavoin laskettu tukiasemien kokonaismäärä on nykyisillä kustannuksilla erittäin suuri, mutta mahdollinen toteuttaa, kun suuri osa tukiasemista on pienen alueen kattavia edullisia tukiasemia. Lisäksi voidaan olettaa, että tukiasemien kapasiteetit nousevat useaan gigabittiin sekunnissa.

## **Langattomat lähiverkot**

Edellä kuvatut verkkoratkaisut 1G:stä 5G:hen eteenpäin on tarkoitettu kaupallisten operaattoreiden palveluja toteuttamiseen. Toinen kehityslinja on langattomat lähiverkot, joita käytetään ensisijaisesti henkilökohtaiseen tiedonsiirtoon kotona tai kahviloissa ja erilaisten organisaatioiden sisäiseen käyttöön. Toisaalta samaa teknologiaa voidaan käyttää kaupallisten palveluiden toteuttamiseen rajatulla alueella. Jatkossa solukoverkkojen ja langattomien lähiverkkojen välinen ero hämärtyy. Ne tavoitteet, joita 5G-tekniikalle on asetettu, vaativat pieniä soluja ja suuria siirtonopeuksia samoin kuin langattomat lähiverkot. Looginen ratkaisu olisi integroida erilaiset tekniikat yhteen saumattomaan järjestelmään. Kysymys on ensisijaisesti liiketaloudellisista päätöksistä: jokainen taloudellinen toimija arvioi itse, mikä teknologia todennäköisesti tuottaa parhaan taloudellisen tuloksen.

Tietoliikenneverkot on tapana jakaa kolmeen kategoriaan verkon fyysisen ulottuvuuden perusteella:

- Likiverkko tai henkilökohtainen verkko (PAN, [Personal Area Network](#))
- Lähiverkko (LAN, [Local Area Network](#))

- Kaupunkiverkko (MAN, [Metropolitan Area Network](#))

Jokaiseen näistä voidaan sitten liittää määre langaton ([wireless](#)), jolloin saadaan lyhenneet WPAN, WLAN ja WMAN (tai joskus myös R, radio, esimerkiksi RLAN).

Ulottuvuuden lisäksi eri verkkotyypeillä on jossain määrin erilaiset käyttötavat. Sanastokeskuksen termipankin mukaan likiverkko on verkko, jonka samaa langatonta tiedonsiirtotekniikkaa hyödyntävät laitteet muodostavat lähietäisyydellä ollessaan automaattisesti, ilman toiminta-asetusten määrittämistä.<sup>216</sup> Likiverkossa päätelaitteet ovat siten periaatteessa tasa-arvoisia, kun taas lähi- ja kaupunkiverkot perustuvat yleensä tukiaseman ([access point](#)) käyttöön. Tukiasema on yleensä liitetty Internetiin langallisen yhteyden kautta. Kaupunkiverkkoja käytetään tyypillisesti yksityisten yritysten tiedonsiirtotarpeisiin. Taulukossa 5.2 on esitetty joitain keskeisimpiä langattomia verkkoteknologioita.

**Taulukko 5.2.** Langattomien verkkojen teknologioita.<sup>217</sup>

Tyyppi	Tuotenimi	IEEE standardi	Vuosi	Taajuus-alue	Max nopeus	Etäisyys sisätila
PAN	Bluetooth	802.15.1a	1999	2.4 GHz	721 kbit/s	10 m
	v3.0 + HS	-	2009	2.4 GHz	24 Mbit/s	
	Smart	-	2010	2.4 GHz	270 kbit/s	10 m
LAN	Wi-Fi	802.11a	1999	5.7 GHz	54 Mbit/s	35 m
		802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbit/s	35 m
		802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbit/s	38 m
		802.11n	2009	2.4 / 5 GHz	150 Mbit/s	70 m
		802.11ac	2013	5 GHz	3,46 Gbit/s	35 m
MAN	WiMAX	802.16e	2005	2 - 66 GHz	70 Mbit/s	
	WiMAX rel. 2	802.16m	2012	1.4 -5.8 GHz	1 Gbit/s	

### Bluetooth

Yleisimmin käytetty likiverkkotekniikka on Bluetooth. Bluetooth on englanninkielinen käännös muinaisskandinaavisesta kuninkaan nimestä Harald Blåtand II. Harald tiettävästi yhdisti 900-luvulla nykyiset Tanskan ja Norjan alueet yhdeksi kuningaskunnaksi. Miksi ihmeessä tällainen nimi, kun verkkotekniikoiden yhteydessä käytetään yleensä jotain kryptisiä kirjainyhdistelmiä, kuten UMTS tai GPRS? Bluetooth oli alun perin vain työryhmän koodinimi siksi aikaa, kun markkinointiosasto kehittäisi paremman nimen. Markkinointiosasto päätyi tylsään nimeen PAN ([Personal Area Networking](#)). Viikkoa ennen julkis-

<sup>216</sup> Sanastokeskuksen termipankki TEPA, <http://www.tsk.fi/tepa/>.

<sup>217</sup> Lähteinä mm. D. Comer, *Computer Networks and Internets*; M. Sauter, *From GSM to LTE*. Wikipedia: Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, IEEE\_802.11, IEEE 802.16.

tamista selvisi, että PAN:ia ei voisi käyttää tavaramerkkinä, koska se oli liian yleisesti käytetty. Julkistus päätettiin tehdä nimellä Bluetooth, joka sitten voitaisiin vaihtaa kun parempi keksittäisiin; vaan Bluetooth-nimellä mennään edelleen.<sup>218</sup>

Bluetooth-standardin tarkoitus, kuten muidenkin standardien, on välttää erilaisten samaan tarkoitukseen mutta keskenään epäyhteensopivien ratkaisujen syntyminen. Bluetoothin tapauksessa tavoite on tarjota yksinkertainen ja edullinen tapa liittää kevyt päätelaite (kuten kuuloke tai hiiri) langattomasti tietokoneeseen tai puhelimeen. Teoriassa Bluetoothilla voi päästä jopa 100 metrin etäisyyksiin suurimmalla lähetysteholla (100 mW), mutta käytännön sovellukset rajoittuvat yleensä alle 10 metrin etäisyyksiin.

Vaikka Bluetoothia käytetään varsin laajasti, sillä on myös heikkoutensa. Ensimmäisen version turvallisuuteen liittyi ongelmia, joita on myöhemmissä versioissa ratkottu. Siirtonopeus (alle 1 Mbit/s) on moniin sovelluksiin liian pieni ja samalla energiankulutus on joihinkin muihin sovelluksiin liian suuri. Niinpä uudemmissa versioissa on pyritty sekä suurempiin bittinopeuksiin että hyvin matalaan energiankulutukseen. Näitä kahta tavoitetta on kuitenkin lähes mahdotonta saavuttaa samanaikaisesti, joten on päädytty kahteen eri ratkaisuun: Bluetooth *low energy* (markkinointinimellä Bluetooth Smart) ja Bluetooth v3.0.

Hyvin alhainen energiankulutus on välttämätön ominaisuus monissa pienellä paristolla toimivissa laitteissa, kuten kelloissa, sykemittareissa ja muissa antureissa. Käytännössä kulutus riippuu olennaisesti siitä, miten usein päälaite tarkistaa onko sille tulossa dataa. Tyypillisessä käytössä pariston pitäisi kestää vuodesta kahteen. Bluetooth v3.0+HS (*High Speed*) mahdollistaa jopa 24 Mbit/s nopeuden, mutta tällöin itse Bluetooth-kanavaa käytetään vain yhteyden luomiseen, sen sijaan data siirretään 802.11-linkin kautta.

### WLAN, IEEE 802.11

Yleisin langattomiin lähiverkkoihin liittyvä lyhenne näyttää olevan Wi-Fi.<sup>219</sup> Wi-Fi on langattomien lähiverkkojen tuotenimi, jota hallinnoi Wi-Fi Alliance.<sup>220</sup> Termiä WLAN voidaan pitää yleisnimenä, joka kattaa erilaiset suhteellisen pienen alueen langattomat verkot. Nimitykset Wi-Fi, WLAN ja IEEE 802.11 ovat lähes synonyymeja keskenään.

Taulukossa 5.2 on esitetty perustiedot muutamasta standardista, jotka kuvaavat langattomien lähiverkkojen kapasiteetin kehittymistä. Ensimmäinen 802.11-standardi (ei taulukossa 5.2) tarjosi 2 Mbit/s nopeuden, mutta sen käytännön toteutukset jäivät rajallisiksi.

<sup>218</sup> J. Kardach (2008) *Tech History: How Bluetooth got its name, Vikings keep the peace*, *EETimes*, [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1269737&page\\_number=1](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1269737&page_number=1).

<sup>219</sup> <http://www.bing.com/>:n haussa Wi-Fi tuottaa 15,4 miljoonaa ja WLAN 12,6 miljoonaa osumaa (26.11.2018).

<sup>220</sup> Wi-Fi ei *virallisesti* ole lyhenne sanoista *Wireless fidelity*, vaikka kyseistä termiä on aikanaan käytetty markkinoinnissa, <http://www.wi-fi.org/>.

Ensimmäinen laajemmin käytetty standardi on 802.11b, jolla teoriassa voidaan saavuttaa 11 Mbit/s nopeus. Sovellusten saavuttamana nopeus jää kuitenkin yleensä selvästi alle 10 Mbit/s, muun muassa johtuen käytetystä CSMA/CD-pääsynhallintamenetelmästä (jonka periaatetta käsiteltiin 4. luvussa). Uudempi 802.11g käyttää monimutkaisempaa tekniikkaa, jonka avulla voidaan päästä huomattavasti suurempiin bittinopeuksiin. Kehitys on jatkunut siten, että 802.11n-standardi mahdollistaa 150 Mbit/s nopeuden ja joidenkin arvioiden mukaan jopa 600 Mbit/s nopeuden.<sup>221</sup>

Alkuperäisenä ideana oli, että WLAN-verkkojen taajuusalueiden käyttäminen ei edellytä viranomaislupia, eli ne toimivat ns. vapailla taajuuksilla. Tästä seuraa myös ongelmia, jos esimerkiksi naapurukset eivät pääse sopuun käyttämistään taajuuksista. WLAN-verkkojen kantama riippuu paljon ympäröivästä tilasta. Raskaasta materiaalista tehtyjen seinien läpi sisätilakantama on vain muutamia kymmeniä metrejä. Vapaassa tilassa päästään suunta-antenneja käyttäen jopa kilometrien kantomatkoihin.

WLAN-tekniikan käyttö alkoi yleistyä vuosituhaten vaihteen aikoihin, ensin tehdas- ja toimistotiloissa kiinteiden lähiverkkojen jatkeena. Standardoinnin edistyessä, valmistajien määrän kasvaessa, tekniikan yleistyessä ja kilpailun koventuessa laitteista saatiin hintansa puolesta kotikäyttöön sopivia. Ensimmäiset julkisessa käytössä olevat WLAN-verkot toteutettiin 1990-luvun lopulla.<sup>222</sup> Julkiset WLAN-verkot tunnetaan myös WLAN *hotspot* -nimellä, jolle Sanastokeskus suosittelee käännöksiä *langaton alue* tai *WLAN-alue*. WLAN-alueella tarkoitetaan siis langattomalla lähiverkkotekniikalla toteutettuja, pienen alueen kattavia yleisessä käytössä olevia joko avoimia tai maksullisia langattomia verkkoja. Erään arvioin mukaan maailmassa olisi noin 47 miljoonaa WLAN-aluetta, joista maksullisia olisi noin 8 miljoonaa.<sup>223</sup>

Toisaalta voitaisiin käyttää termiä WLAN-palvelu, jossa olennaisinta käyttäjän kannalta on langaton yhteys Internetiin. Yksinkertaisimmillaan WLAN-palvelun tarjoamiseen tarvitaan ainoastaan WLAN-tukiasema ja Internet-yhteys, joten kynnys WLAN-palvelun tarjoamiseen on matala. Tyypillisessä WLAN-palvelussa on käyttäjien liikennettä rajoitetaan esimerkiksi käyttäjätunnusten ja salasanojen avulla. Samoin käytettävät laskutusperusteet vaihtelevat, osa operaattoreista laskuttaa palvelun käytöstä aikaveloituksella, osalla veloituspäätteena on siirretty datamäärä. Jotkut operaattorit tarjoavat palvelua ainoastaan palvelun tilanneille asiakkailleen, mutta joillakin operaattoreilla on tarjolla yhteyksiä, jotka eivät edellytä pitkäaikaista asiakassuhdetta.

---

<sup>221</sup> Katso myös <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/why-wifi-stinksand-how-to-fix-it>

<sup>222</sup> Yksi ensimmäisiä laajoja WLAN-ratkaisuja oli MobileStarin tekemä sopimus Starbucksin kahviloiden WLAN-palveluiden toteutuksesta vuonna 2001.

<sup>223</sup> <http://www.ipass.com/wifi-growth-map/>

*WiMAX, IEEE 802.16*

Kaupunkiverkot eivät ole olleet kovinkaan menestyksellisiä, vaikka niitä on kehitetty ja tuoteistettu 1990-luvun alkupuolelta lähtien.<sup>224</sup> Lähiverkkojen ja julkisten maan- tai maailmanlaajuisten verkkojen väliin ei ole jäänyt tilaa sen paremmin teknisesti kuin kaupallistikaan. Langattomalla puolella tilanne näyttää jossain määrin erilaiselta. IEEE 802.16:n, josta käytetään tuotenimeä WiMAX, tulevaisuus on avoin kysymys.<sup>225</sup> On ainakin kaksi mahdollista kehityskulkua:<sup>226</sup>

1. WiMAX harmonisoituu ja integroituu osaksi LTE- tai 5G-ratkaisuja.
2. WiMAX voi palvella yksityisten liiketoiminta-alojen, kuten energia- ja kuljetusalan suuryritysten, tiedonvälitystarpeita.

Ensimmäinen vaihtoehto on teknisesti täysin mahdollinen, sillä sekä LTE että WiMAX ovat niin sanottuja *all-IP* teknologioita eli ne perustuvat kokonaisuudessaan IP-pohjaiseen pakettivälitykseen. WiMAXin menestyksen mahdollisuus riippuu siitä pystyykö se palvelemaan joidenkin toimialojen erityistarpeita paremmin kuin julkiset matkapuhelinverkot. Tällöin WiMAXia voidaan joko käyttää WLAN-verkon käyttäjien saavuttamiseen tai yhdistämään paikallisten WLAN-verkkojen tukiasemia paikkoihin, joissa on hyvin nopea Internet-yhteys.<sup>227</sup> Vaikka WiMAX 2.0 tukee 1 Gbit/s nopeutta, mobiilikäyttö rajoittuu nopeuteen 100 Mbit/s. Lisäksi, kuten kaikissa langattomissa verkoissa, käyttäjän todellisuudessa saama nopeus riippuu monista tekijöistä, erityisesti etäisyydestä tukiasemaan. WiMAXin nopeudet ovat käytännössä samaa luokkaa kuin vastaavan matkapuhelinverkon nopeudet.

---

<sup>224</sup> Esimerkiksi kuva 1.8, joka on siis vuodelta 1995, sisältää MAN-verkon, tosin katkoviivalla piirrettynä. Sen ajan MAN-teknologioita olivat mm. DQDB (*Distributed-Queue Dual-Bus*) ja FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), Nopeat Ethernet-ratkaisut (100 Mbit/s ja 1 Gbit/s) ovat käytännössä syrjäyttäneet nämä MAN-teknologiat.

<sup>225</sup> WiMAX = *Worldwide Interoperability for Microwave Access*.

<sup>226</sup> I. Aldmour, *LTE and WiMAX: Comparison and Future Perspective*, *Communications and Network*, 5, 2013.

<sup>227</sup> Jälkimmäisestä käytetään englannin kielessä nimitystä *backhaul*.

## 6. Tietokoneet ja tietojenkäsittely

### Johdanto

Tietokoneet ovat keskeinen osa informaatioteknologiaa ja jokaisen alalla työskentelevän täytyy osata vähintään ohjelmoinnin perusteet. Koska ohjelmointi on välttämätön taito kaikilla tekniikan aloilla, niin tässä oletuksena on, että jokainen opiskelija perehtyy ohjelmointiin syvemmin muilla kursseilla. Tietokoneiden rakenteen osalta tilanne on hieman toinen. Sen osalta tämän materiaalin pyrkimys on luoda yleiskuva ja opettaa muutamia perusasioita, joiden tuntemus on hyödyllistä muillakin aloilla. Tavoitteena on luoda perusymmärrys siitä, miten tietokoneohjelma muunnetaan fyysisen tason sähköisiksi ilmiöiksi.

Tämän osion keskeisimmät aiheet ovat:

1. Mooren laki ja sen vaikutukset
2. Tietokoneen rakenneosat ja toimintaperiaate
3. Informaation esitystavat mukaan lukien negatiiviset luvut
4. Boolean algebra ja loogiset piirit
5. Ohjelmointikielten tasot ja käyttöalueet

Laskennallisena mallina käsitellään Hamming-koodauksen periaatetta.

### Tietotekniikan sanoista ja historiasta

Kun sanan *tietojenkäsittely* laittaa hakukoneeseen,<sup>228</sup> yksitoista ensimmäistä tulosta viittaa tavalla tai toisella ammattikorkeakouluihin, kahdestoista on Wiktionaryn sivu koskien termiä tietojenkäsittely.<sup>229</sup> Sen sijaan sana *tietotekniikka* antaa erilaisen listan: Wikipedian tietotekniikkaa käsittelevä artikkeli on ensimmäisenä ja Aalto-yliopiston tietotekniikan koulutusohjelma on kolmantena. Tietojenkäsittely on siis jotain käytännöllistä, kun taas tietotekniikka on akateemisempi ja laaja-alaisempi termi.

Suurta epäselvyyttä oli aikanaan nykyisin tietokoneeksi (**computer**) kutsuttujen laitteiden nimeämisessä. Vielä 1950-luvulla nimeämiskäytäntö vaihteli suuresti. Suomen Akatemian kielilautakunnan kokouksessa joulukuussa 1959 esitettiin, että käyttöön otetaan sana tietokone, eikä esimerkiksi tiedin, jota myös oli ehdotettu.<sup>230</sup> Ensimmäinen Teknillisen korkeakoulun diplomityö, jossa käytettiin sanaa tietokone, on vuodelta 1961. Samaan aikaan

<sup>228</sup> Tässä tapauksessa hakukone on [www.bing.com](http://www.bing.com), mutta tulos on olennaisesti sama muillakin hakukoneilla.

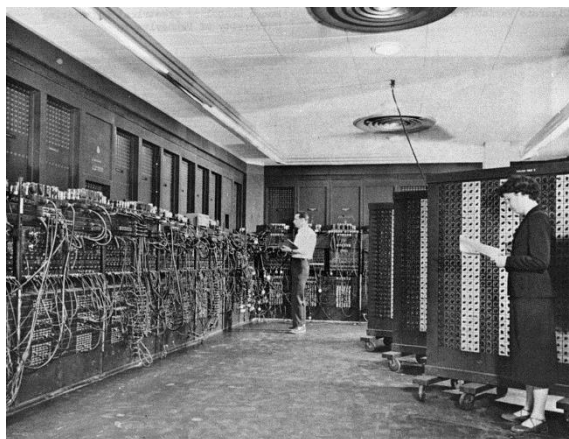
<sup>229</sup> <http://en.wiktionary.org/wiki/tietojenk%C3%A4sittely>. J. Korpelan sanasto: <http://jkorpela.fi/dt.html8>

<sup>230</sup> J. Suominen, *Sähköaivo sinuiksi, tietokone tutuksi. Tietotekniikan kulttuurihistoriaa*, Jyväskylä 2000.



Reikäkortti-lehti muutti nimensä Tietokone-lehdeksi ja Reikäkorttiyhdistys Tietokoneyhdistykseksi. Tietokone vakiintui terminä 1960-luvun aikana. Suuren Tietokirjan kolmannen painoksen viides osa vuodelta 1966 sisältää kolmen sivun artikkelin hakusanalla ”Matematiikkakone - laskeva robotti.” Artikkelissa ei esiinny sanaa tietokone vaan termit sähköaiivot ja numerokone synonyymeinä matematiikkakoneelle. Ohjelmoinnista ei ole sanaakaan. Monet ohjelmointikielet, kuten Fortran ja Cobol, oli kuitenkin kehitetty jo lähes kymmenen vuotta aiemmin. Eikä silloin ollut Wikipediaa, josta olisi voinut tarkistaa mitä ohjelmointi tarkoittaa. Tietotekniikka otettiin käyttöön terminä vasta 1980-luvun aikana.

Siirrytään vielä vähän ajassa taaksepäin ja luodaan lyhyt katsaus tietotekniikan kehitykseen perustuen pääosin Walter Isaacsonin näkemykseen.<sup>231</sup> Ensimmäisen tietokoneen arvonimi on kiistanalainen kysymys, johon voidaan vastata täsmällisesti vain määrittelemällä tietokone riittävän tarkasti. Voidaan vaatia, että tietokoneen on oltava digitaalinen, toiminnaltaan täysin sähköinen, ohjelmitava, yleiskäyttöinen ja toimiva. Näillä kriteereillä ensimmäisen tietokoneen arvon saa ENIAC (**E**lectronic **N**umerical **I**ntegrator **A**nd **C**omputer), kuvassa 6.1. ENIAC:n kehityksen rahoitti USA:n armeija alkupe-  
räisenä tavoitteena laskea ballistisia liikera-  
toja. Laskutoimitukset olivat erittäin  
hankalia suorittaa mekaanisilla laskimilla  
ja ihmistyövoimalla.



**Kuva 6.1.** ENIAC.<sup>232</sup>

Parhaimmillaan ballistisia laskutoimituksia teki yli 170 henkeä, pääosin naisia, mutta tarvittavia taulukoita ei pystytty silti laskemaan riittävän nopeasti. Tällä ongelmalla oli jopa sotilaallista merkitystä. ENIAC valmistui kuitenkin vasta toisen maailmansodan loputtua, joten se ei ehtinyt vaikuttaa sodan kulkuun. Valmistuessaan marraskuussa 1945 ENIAC oli yli sata kertaa nopeampi kuin mikään aikaisempi laskukone. Lisäksi se oli suunniteltu siten, että sillä voitiin tehdä periaatteessa minkälaisia laskutoimituksia tahansa. Ensimmäiseksi sillä tehtiin vetypommin toimintaan liittyviä laskelmia.

Mekaanisia laskukoneita oli jo kehitetty erityistarkoituksia varten, esimerkkinä Yhdysvalloissa vuoden 1890 väestölaskennan tarpeisiin kehitetty reikäkorttikone. Käytännössä pitää siirtyä 1930-luvun lopulle ennen kuin mitään merkittävää tapahtui laskentakoneiden

<sup>231</sup> Walter Isaacson: *The Innovators, How a Group of Hackers, Geniuses, and Geeks Created the Digital Revolution*, Simon & Schuster, 2014. Tietotekniikan kehitysvaiheista on kuvaus myös sivuilla [www.computerhistory.org/timeline/](http://www.computerhistory.org/timeline/)

<sup>232</sup> Kuva: <http://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC#mediaviewer/File:Eniac.jpg>.



alalla. Alan pioneereihin kuului saksalainen Konrad Zuse, joka rakensi mekaanisen laskentakoneen vuonna 1938. Laitteen toiminta ei kuitenkaan ollut kovin luotettavaa, eivätkä sähkömekaaniset versiot laitteesta koskaan valmistuneet.<sup>233</sup> AT&T:n tutkimuslaboratoriossa (Bell Labs<sup>234</sup>) saatiin vuonna 1939 valmiiksi sähkömekaaninen laskin. Myös John Atanasoff (USA, Iowan osavaltio) rakensi tietokoneen prototyypin vuosina 1939-42. Vaikka hän käyttikin laskentaan tyhjiöputkia, muisti perustui mekaanisesti pyörivään rumpuun, joka olennaisesti hidasti laitteen toimintaa.<sup>235</sup> Atanasoff ei saanut laitettaan koskaan toimintakuntoon eikä se ollut vapaasti ohjelmoitavissa. IBM rakensi Howard Aikenin johdolla 1940-luvun alussa laskentakoneen, nimeltään Mark I. Siinä käytettiin mekaanisia kytkimiä, joita ohjattiin sähkömoottoreilla, joten edellä esitettyjä tietokoneen kriteerejä sekään ei täyttänyt.<sup>236</sup> Iso-Britanniassa rakennettiin toisen maailmansodan aikana digitaalinen laskentakone, nimeltään Colossus, joka pystyi vain yhden ennalta määritellyn ongelman ratkaisuun, eli Saksan salakirjoitusten murtamiseen.<sup>237</sup>

Miksi kaikki tämä tapahtui juuri 1930-luvun lopulla ja 1940-luvulla? Mekaanisia ja jopa sähkömekaanisia koneita olisi voitu rakentaa jo aikaisemmin. Ehkä riittävän suurta tarvetta ei aikaisemmin ollut, jotta toimivan laskentakoneen kehittämiseen vaadittu monipuolinen osaaminen olisi saatu koottua yhteen paikkaan. Vasta armeijan laskentatarpeet toivat riittävän kimmokkeen tietokoneiden järjestelmälliseen kehittämiseen. Tämä yhdistettynä muutamaan nerokkaaseen ajattelijaan, joista erityisesti on mainittava Alan Turing ja John von Neumann, johti muutamassa vuodessa kehitysharppaukseen. Lisäksi tarvittiin lukuisia insinöörejä ja tekniikkoja toteuttamaan hienot ajatukset käytännössä. ENIAC painoi 27 tonnia ja siinä oli 17 468 tyhjiöputkea ja 5 miljoonaa juotosta, joten yksinäinen nero ei olisi sitä koskaan pystynyt kokoamaan.

Tarvittiin siis pakottava tarve, syvällinen ymmärrys tehtävän luonteesta, riittävä tekniikan taso ja paikka johon kaikki kertynyt taito ja tietämys saatiin koottua yhteen. Nämä kaikki vaatimukset täytyivät vasta USA:ssa toisen maailmansodan aikana. Iso-Britannia oli myös lähellä läpimurtoa, mutta tehtävän luonteesta johtuen brittien Colossus-projekti oli niin salainen, ettei sen kehitys jatkunut yleiskäyttöisen tietokoneen suuntaan.

Miksi Bellin puhelimelle myönnettiin patentti, mutta kenellekään ei myönnetty patenttia koskien tietokoneen toimintaperiaatetta ja rakennetta? Monimutkaista todellisuutta hieinan oikoen voidaan sanoa, että John von Neumann halusi tietokoneen toimintaperiaatteen

---

<sup>233</sup> Zuse rakensi uusia versioita laskentakoneestaan toisen maailmansodan aikana, mutta Saksan armeija ei missään vaiheessa kiinnostunut projektista. [http://waste.informatik.hu-berlin.de/Diplom/ww2/zuse\\_e.html](http://waste.informatik.hu-berlin.de/Diplom/ww2/zuse_e.html)

<sup>234</sup> Nokia Bell labs on nykyisin osa Nokia-yhtiötä.

<sup>235</sup> Tyhjiöputket olivat vielä tällöin kalliita.

<sup>236</sup> Aiken oli hyvin perillä Charles Babbagen laskentakoneesta.

<sup>237</sup> Salakirjoitusten onnistuneella purkamisella oli ilmeisesti merkittävä vaikutus sodan kulkuun.

vapaaseen käyttöön ja sai tämän aikaan julkaisemalla laajan artikkelin ennen kuin kukaan ehti jättää asiaa koskevia patenttihakemuksia.<sup>238</sup> Tietokoneen patenteista seurasikin melkoisia kiistoja, kun useat henkilöt, erityisesti John Atanasoff sekä ENIAC:n keskeisimmät kehittäjät Presper Eckert ja John Mauchly, katsoivat, että heidän olisi pitänyt voida patentoida tekemänsä keksinnöt. ENIAC:iin liittyvistä patenteista käytiin kiistaa vuoteen 1973 asti, jolloin silloiset kiistan osapuolet, Sperry ja Honeywell, sopivat asian keskenään.<sup>239</sup>

Mikään olennainen osa tietotekniikkaa ei siis alun perin syntynyt yliopistoissa. Ennen 1930-luvun loppua ei juuri ollut tutkimuslaitoksia, joissa olisi yhdistynyt teoreettinen osaaminen, käytännöllinen insinööritaito ja tutkimuksen tavoitteellinen johtaminen. Varhaisimpia esimerkkejä perusteellisesti valmistellusta ja rahoitetusta tuotekehitysprojektista on transistorin kehittäminen. Projekti aloitettiin jo vuonna 1936 ja sen tarkoituksena oli kehittää luotettavampi, halvempi ja kooltaan pienempi vaihtoehto tyhjiöputkelle, johon siis ENIAC ja muutama muu ensimmäisistä tietokoneista perustui. Transistorin tapauksessa toinen maailmansota viivytti kehitystyötä, sillä avainhenkilöt olivat sodan aikana muissa tehtävissä. Transistorin kehitti lopulta ryhmä, jonka muodostivat John Bardeen, Walter Brattain ja William Shockley. Heissä yhdistyi teoreettinen ymmärrys ja tekninen taito sekä Bardeenin ja Brattainin tapauksessa myös kyky kommunikoida tehokkaasti muiden tutkijoiden kanssa.<sup>240</sup> Lisäksi ehdottomana edellytyksenä projektin onnistumiselle oli korkeatasoinen ja monipuolinen tutkimusympäristö, jonka AT&T:n tutkimusorganisaatio Bell Labs tarjosi.<sup>241</sup>

Bell Labs on hyvä esimerkki ainakin kolmeen ilmiöön. 1) Yksityisellä monopolilla (vaikka säädellyllä) on kyky luoda sekä aineellista että henkistä pääomaa, jota voidaan käyttää myös tarkoituksiin, jotka eivät palvele lyhyen ajan liiketoiminnallisia tarpeita.<sup>242</sup> 2) Monopolit eivät yleensä ole hyviä tuotteistamaan luomiaan keksintöjä. Bell Labsissa on keksitty tai kehitetty mm. transistori, laser ja avaruuden taustasäteily.<sup>243</sup> Tutkimustulosten kaupallinen hyödyntäminen on jäänyt usein muille yhtiöille. 3) Se syntyykö johonkin monopolin

---

<sup>238</sup> Von Neumann, John, *First Draft of a Report on the EDVAC*, Univ. Of Pennsylvania, June 30, 1945. Projektin hallinnoimisesta vastannut Herman Goldstine levitti julkaisun paperikopiota useille eri tahoille. Paperi johti useisiin tietokoneiden kehitysprojekteihin, joita ei mitä ilmeisimmin muuten olisi yhtä nopeasti syntynyt.

<sup>239</sup> Patentit ovat kauppatavara, joka voi vaihtaa moneen kertaan omistajaa patentin voimassaoloaikana. Alkuperäiset keksijät saavat yleensä kertakorvauksen keksinnöstään ja vain joskus harvoin osuuden patentin laskennallisesta tuotosta.

<sup>240</sup> Shockley sen sijaan oli hankala persoona. Tutkimusryhmä hajosi välittömästi transistorin keksimisen jälkeen.

<sup>241</sup> Huomatkaa kuvan 2.6 puheluiden reaalihintojen kehitys USA:ssa vuosien 1920 ja 1940 välillä. Puhelinpalvelut olivat tuolloin mitä ilmeisimmin erittäin kannattavaa liiketoimintaa.

<sup>242</sup> Säädellyn monopolin liiketaloudellinen tulos riippuu ensisijaisesti säätelyn tiukkuudesta.

<sup>243</sup> Bell Labsissa tehdyn tutkimuksen perusteella on myönnetty kahdeksan kertaa Nobelin palkinto, joita on ollut jakamassa yhteensä neljätoista tutkijaa.

kaltaiseen yritykseen luovaa toimintaa, riippuu siitä, sattuuko sopivaan asemaan nousemaan henkilö, jolla on riittävä näkemys, kyky ja innostus luoda ja ylläpitää riittävän suuri ja monipuolinen ryhmä. Joskus nousee, useimmiten ei.

### *Mooren laki*

Transistori ja puolijohdeteknologia ylipäättään osoittautui erittäin keskeiseksi tietotekniikan kehittymisen kannalta. Tämän havaitsi yksi puolijohdeiden kehittämisen avainhenkilöistä, Gordon Moore. Hän julkaisi keväällä 1965 artikkelin, jossa hän esitti ennusteen transistorien määrän kasvusta mikropiirillä.<sup>244</sup> Myöhemmin ennusteesta alettiin käyttää nimitystä Mooren laki (*Moore's law*). Mooren laissa (siinä muodossa kuin se on alkuperäisessä paperissa esitetty) kyseessä ei ole suurin mahdollinen integraatioaste vaan se määrä transistoreja, jolla kustannus transistoria kohden on alhaisin. Aina on siis kysymys myös siitä, mikä on taloudellisesti järkevää, ei pelkästään siitä, mikä on teknisesti mahdollista.

Helpointa ennustaminen on silloin kun kyseessä on jokin mitattavissa oleva suure, kuten siirtokapasiteetti tai tietokoneiden laskentanopeus. Alkuperäisessä artikkelissaan Moore esitti, että yhdelle piirille integroitavien transistorien määrä kasvaa 10-kertaiseksi vuoteen 1970 mennessä, eli siis viiden vuoden aikana. Tämä vastaa transistorien määrän kaksinkertaistumista 18 kuukauden välein. Myöhemmin kaksinkertaistumisen ajaksi on vakiintunut 2 vuotta, kuten kuvasta 6.2 voidaan havaita (kaksinkertaistuminen kahdessa vuodessa tarkoittaa tuhatkertaistumista kahdessakymmenessä vuodessa). Mooren laki on toiminut erittäin hyvin viisikymmentä vuotta ja joidenkin arvioiden mukaan se toimii ainakin vuosikymmenen loppuun, jolloin pienimpien transistorien koko on viiden nanometrin luokkaa.<sup>245</sup> Kvanttimekaaniset ilmiöt saattavat estää tätä pienempien transistorien toiminnan.

Tarkastelu voidaan viedä vielä paria astetta pidemmälle. Transistorien määrä sinänsä ei ole niin olennaista kuin se, kuinka monta laskutoimitusta voidaan suorittaa aikayksikössä. Lisäksi yleensä rajoittavana tekijänä ei ole se, kuinka paljon jotain saadaan tungettua yhteen prosessoriin vaan hinta.<sup>246</sup> Kuvassa 6.3 on esitetty miten laskentakapasiteetin määrä 1000 US dollaria kohti on kehittynyt 1900-luvun alusta. Vuotuinen kasvuprosentti näyttäisi siis olevan kasvussa. 1900-luvun alkupuolella samalla hinnalla sai keskimäärin 20 prosenttia enemmän laskutoimituksia sekunnissa kuin edellisenä vuonna. Vuoden 1970 jälkeen vastaava luku on ollut noin 50 prosenttia, viimeisen kymmenen vuoden aikana jopa 100 prosenttia. Kun nyt kapasiteetin 100 miljardia laskutoimitusta sekunnissa saa muutamalla dollarilla, niin vastaava kapasiteetti olisi maksanut 60-luvun alussa ehkä 1000 miljardia

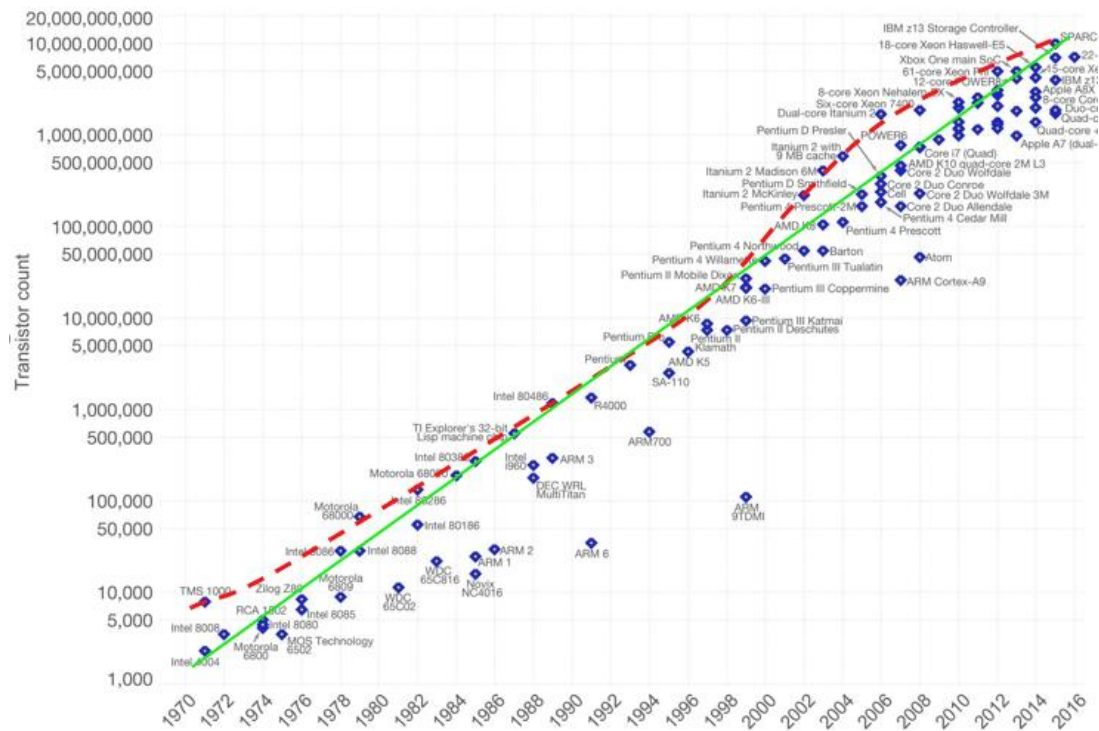
---

<sup>244</sup> Gordon E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics*, April 19, 1965.

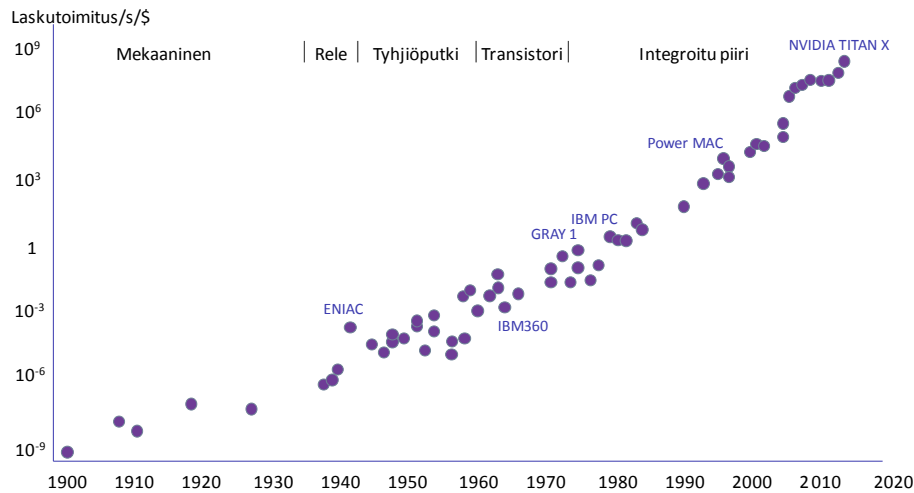
<sup>245</sup> Tim Bradshaw, *Intel chief raises doubts over Moore's Law*, *Financial Times*, July 16, 2015. Artikkelissa esitetyn arvion mukaan kehitys olisi nyt hidastumassa siitä mitä Mooren laki ennustaa, mutta ei kuitenkaan pysähtymässä.

<sup>246</sup> Älypuhelimissa myös tilavuudella on toki olennainen merkitys.

dollaria. Kaikesta tästä on seurauksena ollut se, että älypuhelimissa oli jo vuonna 2012 enemmän tietojenkäsittelykapasiteettia kuin tehokkaimmassa supertietokoneessa (Cray X-MP) vuonna 1982.<sup>247</sup>



**Kuva 6.2.** Transistorien määrän kehitys mikroprosessoreissa, vihreä viiva = Mooren lain mukainen kasvu, punainen katkoviiva kuvaa tiheimmin pakattujen piirien kehittymistä.<sup>248</sup>



**Kuva 6.3.** Laskentakapasiteetin hinnan kehittyminen.<sup>249</sup>

<sup>247</sup> Lähteet: <http://www.walkingrandomly.com/?p=3079> ja <http://www.computerhistory.org/timeline/computers/>

<sup>248</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_Count](http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_Count)

<sup>249</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's\\_law#/media/File:Moore%27s\\_Law\\_over\\_120\\_Years.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law#/media/File:Moore%27s_Law_over_120_Years.png)

## Tietokoneen toiminta

### *Informaation esitystapa*

Tietokone käsittelee pelkkää dataa ilman informaatiota tai tulkintaa sen sisällöstä. Sen sijaan mikään nykyinen tietokone eivät varsinaisesti ”ymmärrä” datan sisältöä, eli sitä mitä se on tekemässä tai mitä tulos tarkoittaa.<sup>250</sup> Käytännössä data esitetään aina bitteinä, eli siis sarjana nollia ja ykkösiä, eli binäärilukuina (**binary number**).<sup>251</sup> Tietty bittikuvio voi yhtä hyvin merkitä numeroa, kirjainta kuin äänen voimakkuutta tai pikselin väriä. Erityisen tärkeää nykyisissä tietokoneissa on, että data voi merkitä myös tietokoneohjelman käskyä.

Binääri numerot esitetään yleensä kahdeksan bitin ryhmissä eli tavuissa. Yhdellä tavulla voidaan siten esittää kokonaisluvut 0:sta 255:een tai -128:sta +127:ään. Suurempien numeroiden esittämiseen käytetään useita tavuja, yleensä kaksi, neljä tai kahdeksan. Toisaalta ihminen on tottunut käsittelemään lukuja kymmenjärjestelmässä. Tästä johtuen binäärilukuja esitetään usein ns. BCD (**Binary Coded Decimal**) muodossa, jossa 10-järjestelmässä esitetyn luvun jokainen kymmenjärjestelmän numero<sup>252</sup> esitetään digitaalisessa muodossa neljällä bitillä. Lisäksi käytetään ns. heksadesimaalista esitystapaa jossa kokonaisluvuilla 0-15 on oma merkki, kuten taulukossa 6.1 on esitetty, jolloin kyseessä on lukujärjestelmä, jossa kantalukuna on 16. Etuna kymmenjärjestelmään verrattuna on helppo muunnettavuus binäärijärjestelmään ja binäärijärjestelmään verrattuna tiiviimpi esitystapa.

Muunnokset eri kantalukujärjestelmien välillä, joskin käsin vähän työläitä, ovat sinänsä suoraviivaisia. Lisäksi on pystyttävä esittämään negatiivisia lukuja, kuten -7. Koska binäärisessä luvussa esiintyy siis vain nollia ja ykkösiä mutta ei etumerkkiä (-), negatiivisuuskin täytyy esittää bittien avulla. Yksi bitti voitaisiin varata etumerkin esittämiseen, mutta tämä ei ole laskutoimitusten toteuttamisen kannalta paras ratkaisu. Yleensä laskutoimitusten sisäisenä esitysmuotona käytetään ns. kahden komplementtia, jossa vastaluku saadaan kääntämällä luvun kaikki bitit ( $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0$ ) ja lisäämällä tulokseen yksi. Esimerkiksi kolmen bitin järjestelmässä  $2 = 010$  joten  $-2 = 101 + 1 = 110$ . Kahdeksan bitin järjestelmässä vastaavasti  $-2 = 11111101 + 1 = 11111110$ . Kahdeksalla bitillä voidaan siten esittää kokonaisluvut välillä -128 (10000000) ja +127 (01111111). Tällä järjestelmällä vähennyslasku toimii täsmälleen samoin kuin yhteenlasku (ylimääräinen ykkönen tuloksen edessä jätetään pois). Kokeile!

<sup>250</sup> Tilanne saattaa vielä joskus muuttua: <https://twitter.com/newscientist/status/629619029695680512>.

<sup>251</sup> Nykyisen binäärijärjestelmän alkuna pidetään Gottfried Leibnizin vuonna 1703 julkaisemaa artikkelia: *Explanation of the Binary Arithmetic, which uses only the characters 1 and 0, with some remarks on its usefulness, and on the light it throws on the ancient Chinese figures of Fu Xi*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Binary\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Binary_number)

<sup>252</sup> Suomen kielellä voidaan ajatella, että luku (esimerkiksi 437) koostuu numeroista (4, 3 ja 7). Käytännössä numero-sanaa käytetään laajemmassa merkityksessä. Englannin kieli on selkeämpi: 437 on **number** ja 4, 3 ja 7 ovat kukin **digit**.

**Taulukko 6.1.** Lukujen esitysmuotoja (negatiiviset luvut 8 bitin järjestelmässä)

Desimaali- luku	Binääri- luku	Heksadesi- maali	BCD- koodi
0	0000	0	0000
1	0001	1	0001
2	0010	2	0010
4	0100	4	0100
8	1000	8	1000
10	1010	A	0001 0000
15	1111	F	0001 0101
16	10000	10	0001 0110
17	10001	11	0001 0111
45	101101	2D	0100 0101
-1	11111111		
-2	11111110		
-45	11010011		
-128	10000000		

Käytännön elämässä olemme useimmiten kiinnostuneita jostain muusta kuin numeroista. Vaikka tämäkin teksti on tietokoneesi muistissa bitteinä, tuskin kukaan pystyy lukemaan tekstiä ruudulta pelkkinä bitteinä. Näytölläsi näkyy siis kirjaimia. Koska muistiin tallennus ja tiedon siirto tapahtuu bitteinä, on välttämätöntä, että bittien ja kirjainten välillä on yksiselitteinen suhde. Ratkaisuksi tähän tarpeeseen kehitettiin 1960-luvulla ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) –merkistö. Kyseessä on 7-bittinen merkistö, joka sisältää amerikanenglannissa tarvittavat kirjaimet (A-Z, a-z), numerot (0-9), yleisesti käytetyt välimerkit ja joitakin erikoismerkkejä kuten # ja \$. Lisäksi merkistö sisältää 33 ohjauskoodia kuten rivinsiirto ja tekstin loppu.<sup>253</sup> Monissa kielissä käytetään kuitenkin muita kirjainmerkkejä, joita ASCII-merkistö ei sisällä, kuten ä ja ö. Tästä on seurannut erilaisia paikallisesti käytettyjä ASCII-muunnelmia. Suomalainen versio korvasi merkit [\]^ merkeillä ÄÖÅÜ ja merkit {}~ merkeillä äöäü. Tästä seurasi myös ongelmia, koska monissa yhteyksissä, esimerkiksi ohjelmoinnissa, tarvittiin myös hakasulkuja. Yhteensopi- vuusongelmia ilmenee edelleen.

Miksi tyydyttiin 7 bittiin, kun 8 bittiä olisi ollut monessa suhteessa järkevämpi valinta. Olisi ollut mahdollista myös määritellä vaihtokoodi (*shift*), jolla olisi voinut laajentaa merkistöä tehokkaasti.<sup>254</sup> Suoraviivaista seitsemän bitin (eli 128 merkin) ratkaisua pidettiin kuitenkin tiedonsiirron kannalta tehokkaampana ja vaihtokoodin luotettavuutta ongelmallisena. Yleensä 7-bittisen ASCII-koodin esittämiseen käytetään yhtä kahdeksan

<sup>253</sup> Lisäksi on muistettava, että kun asiasta kirjoitetaan, niin bitit 0 ja 1 esitetään ASCII-merkkeinä, jotka vievät muistista tilaa vähintään 7 bittiä. Samoin on miinusmerkin (-) laita.

<sup>254</sup> Siis samaan tapaan kuin näppäimistöissä, jossa voidaan vaihtaa pienistä isoihin kirjaimiin ja takaisin yhdellä näppäimellä, jolloin ei tarvita erillisiä näppäimiä pienille ja isoille kirjaimille.

bitin tavua, jolloin ylimääräistä bittiä voidaan käyttää pariteettibittinä. Laajemmissa merkistöissä ensimmäiset 128 merkkiä ovat edelleen ASCII-koodin mukaisia. Merkistöstandardeista tärkein on Unicode, joka määrittelee koodiarvon yli sadalle tuhannelle kirjoitusmerkille.<sup>255</sup> Sen yleisin esitystapa on UTF-8.

### *Tietokoneen perusrakenne*

Nyt pidämme tietokonetta (älypuhelin yhtenä esimerkkinä) itsestäänselvyytenä myös henkilökohtaisessa käytössä, mukana kulkevana ja jatkuvasti toimintavalmiina. Toisin asiat olivat 1940-luvulla. Ensimmäiset tietokoneet olivat jättimäisiä rakennelmia, joiden käyttämiseen tarvittiin joukko eri tehtäviin erikoistuneita henkilöitä (kuten kuvasta 6.1 nähdään). Siihen nähden on yllättävää, että Vannevar Bush kuvasi tietokoneiden tulevaisuutta vuonna 1945:<sup>256</sup>

”Memex on laite, mihin henkilö tallentaa kaikki kirjansa, äänitteet ja viestintänsä, ja joka on mekanisoitu siten, että sitä voidaan hyödyntää äärimmäisen nopeasti ja joustavasti. Se on laajennettu intiimi muistin jatke.”

Memex ei saanut suosiota terminä, mutta ajatus on oiva kuvaus siitä mitä tietokoneesta on tullut vuosikymmeniä myöhemmin. Tietokoneet olivat aikanaan liian kalliita ja kömpelöitä henkilökohtaiseen käyttöön. Tämä tilanne jatkui pitkälle 1970-luvulle. DEC:n pääjohtaja Ken Olson ei vielä vuonna 1974 nähnyt mitään syytä miksi kukaan haluaisi oman tietokoneen.<sup>257</sup> Mikropiirien kehittyminen muutti sitten tilanteen nopeasti, mutta henkilökohtaisten tietokoneiden kehittäminen jäi aluksi pienempien yrittäjien pelikentäksi.

Miten sitten nykyaikainen tietokone varsinaisesti toimii?<sup>258</sup> John von Neumann jaotteli vuonna 1945 tietokoneen rakenteen kuuteen osaan: aritmeettinen laskenta, ohjausosa, muisti, syöttö, tulostus ja ulkoinen muisti. Eräs merkittävä oivallus oli se, että data ja ohjelmat voivat käyttää samaa muistia eli jakaa saman osoiteavaruuden. Vaihtoehtoinen tapa on käyttää eri osoiteavaruuksia ja eri väyliä toisaalta datalle ja toisaalta ohjelmistokäskyille. Näistä kahdesta toimintaperiaatteesta käytetään nimityksiä von Neumannin arkkitehtuuri (*von Neumann architecture*) ja Harvard-arkkitehtuuri (*Harvard architecture*). Koska von Neumannin jaettu väylä voi muodostua suorituskykyä rajoittavaksi tekijäksi, esimerkiksi suorittimen välimuistissa käytetään usein Harvard-arkkitehtuuria vaikka tietokoneessa muilta osin sovellettaisiin von Neumannin arkkitehtuuria.

---

<sup>255</sup> Unicoden merkistöä kehittää ja hallinnoi Unicode Consortium (<http://unicode.org/>) joka aloitti toimintansa vuoden 1991 alussa. Käytännössä ISO/IEC 10646 määrittelee samat merkistöt. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Unicode>

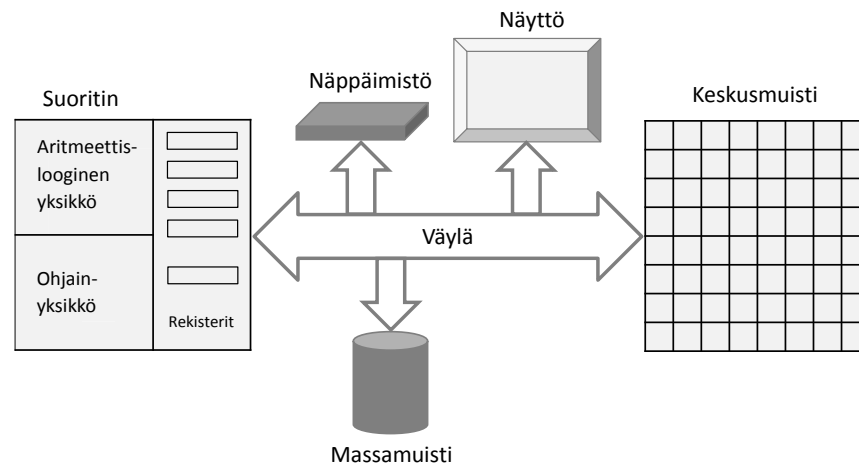
<sup>256</sup> V. Bush, *As We May Think*, *Atlantic*, June 1945 (myös kirjassa W. Isaacson, *The Innovators*, s. 263).

<sup>257</sup> DEC oli siihen aikaan, IBM:n jälkeen, suurimpia tietokonevalmistajia maailmassa.

<sup>258</sup> Yleisesitys tietokoneen toiminnasta: N. Nisan & S. Schocken: *The Elements of Computing Systems, Building A Modern Computer from First Principles*, The MIT Press, 2008.



Yleiskäyttöinen tietokone koostuu siten seuraavista pääkomponenteista (kuvassa 6.4): aritmeettis-looginen yksikkö (*arithmetic logic unit, ALU*), ohjainyksikkö (*control unit*), muisti (*memory*) ja siirräntälaitteet (*I/O devices*).<sup>259</sup>



**Kuva 6.4.** Tietokoneen keskeisimmät rakenneosat.

Eri komponentit on yhdistetty väylällä, joka tyypillisesti koostuu rinnakkaisista johdoista. Lisäksi voidaan erottaa rekisterit, joihin väylä on liitetty. Aritmeettis-looginen yksikkö, ohjainyksikkö ja rekisterit (*register*) muodostavat yhdessä suorittimen (prosessori, *processor*). Rekisterit ovat suorittimen muisteja, jotka tehostavat olennaisesti laskentaa verrattuna siihen, että kaikki data pitäisi hakea keskusmuistista. Aikaisemmin käytettiin paljon myös termiä keskusyksikkö (*Central Processor Unit, CPU*), joka käytännössä on lähes sama asia kuin suoritin.<sup>260</sup> Se mistä toiminnoista suoritin vastaa, on muuttunut ajan myötä integrointiasteen kasvaessa. Nykyisin yhdelle mikropiirille voidaan integroida monta laskentaa tekevää ydintä (*core*), välimuistia (*cache*) ja erilaisia ohjaintoimintoja, jotka kaikki olisi aikaisemmin toteutettu erillisillä piireillä. Kuvassa 6.5 on esimerkki pienikokoisesta tietokoneesta ilman oheislaitteita.

Tietokoneen osat koostuvat elektronisista komponenteista eli mikropiireistä (*integrated circuit*). Yhdelle mikropiirille voidaan integroida suuri määrä, jopa miljardeja, aktiivisia (transistoreita ja diodeja) ja passiivisia (vastuksia ja kondensaattoreita) komponentteja. Suorittinosassa piirit on järjestetty siten, että ne muodostavat loogisia kokonaisuuksia, jossa piirit ohjaavat toisten piirien toimintaa Boolean algebran (*Boolean algebra*) periaatteiden mukaisesti.

<sup>259</sup> Sanastokeskuksen termipankin (<http://www.tsk.fi/tepa/fi/>) mukainen termi on syöttö-tulostus.

<sup>260</sup> Keskusyksikön voidaan myös ajatella sisältävän suorittimen (tai suorittimien) lisäksi väylän.





**Kuva 6.5.** Esimerkki tietokoneesta käytännössä (Raspberry Pi 2).

### *Ohjainyksikkö*

Ohjainyksikkö hallitsee tietokoneen eri osia, lukee ja tulkitsee ohjelman käskyjä ja muuntaa ne muotoon, jolla voidaan ohjata muita tietokoneen osia. Ohjainyksikkö voi jopa muuttaa käskyjen suorituseritystä suorituskäytön lisäämiseksi. Tärkeä osa ohjainyksikön toimintaa on ohjelmalaskuri (*program counter*), joka pitää kirjaa siitä mistä muistipaikasta seuraava käsky pitää lukea. Ohjainyksikön keskeisimmät tehtävät ovat (tehtävien suorituseritystä saattaa vaihdella ja niitä voidaan suorittaa rinnakkain):

- Seuraavan käskyn lukeminen ohjelmalaskurin ilmoittamasta paikasta.
- Numeerisen koodin muuntaminen joukoksi käskyjä järjestelmän muille osille.
- Ohjelmalaskurin arvon kasvattaminen siten, että se osoittaa seuraava käskyä.
- Tarvittavan datan lukeminen muistista tai mahdollisesti oheislaitteesta.
- Tarvittavan datan lähettäminen aritmeettis-loogiseen yksikköön tai rekisteriin.
- Tarvittaessa muiden yksiköiden ohjaaminen suorittamaan vaaditut operaatiot.
- Aritmeettis-loogisesta yksiköstä saadun tuloksen kirjoittaminen muistiin, rekisteriin tai mahdollisesti tulostuslaitteeseen.
- Palaaminen takaisin ensimmäiseen kohtaan.

Koska ohjelmalaskuri on kuin mikä tahansa muistipaikka, sen arvoa voidaan muuttaa ALU:n laskelmien mukaisesti. Tällä tavoin voidaan tehdä ohjelmallisesti hyppyjä tai silmu-koita. Edellä luetellut operaatiot ovat siinä määrin monimutkaisia, että ne muodostavat itsessään lyhyen tietokoneohjelman. Usein tätä tehtävää hoitaa yksi tai useampi erillinen ohjainyksikkö, joissa ajetaan mikrokoodia (mikro-ohjelma, *microcode*).

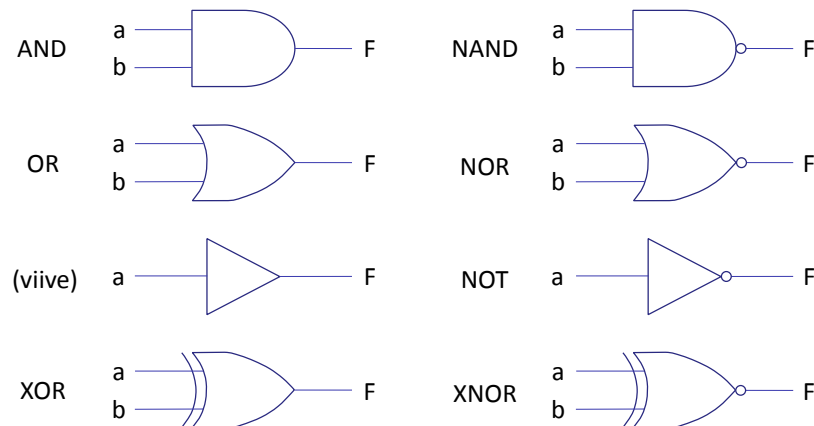
### *Aritmeettis-looginen yksikkö*

Aritmeettis-loogisessa yksikössä suoritetaan nimensä mukaisesti kahdentyyppisiä toimintoja: aritmeettisiä ja loogisia. Aritmeettiset operaatiot voivat rajoittua jopa yhteen- ja vähennyslaskuun, tai operaatiot voivat kattaa huomattavasti monimutkaisempia toimintoja



### Loogisten operaatioiden tekninen toteutus

Tietokone perustuu siis loogisten operaatioiden tehokkaaseen eli nopeaan ja luotettavaan suorittamiseen. Miten kaikki miljardit operaatiot sitten tapahtuvat fyysisellä tasolla? Tietokoneet perustuvat puolijohdeteknologiaan, jolla voidaan toteuttaa loogisia portteja (*logic gate*). Loogiset portit vastaavat kuvan 6.6 mukaisesti Boolean algebran operaatioita.



**Kuva 6.6.** Boolean algebran operaatioita vastaavien loogisten porttien esitystavat.

Portti F = a aiheuttaa vain viiveen ilman mitään varsinaista operaatiota.

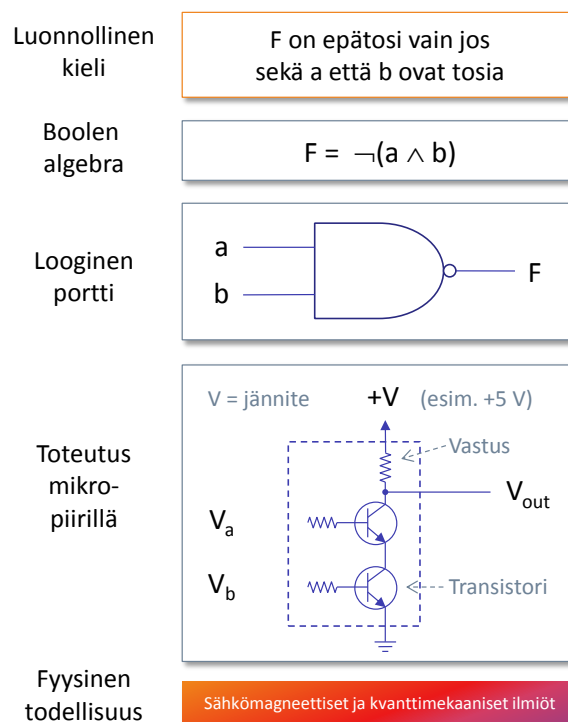
Looginen portti toimii jännitevahvistimena, jonka vahvistus on erittäin suuri. Sisääntulo ottaa hyvin pienen sähkövirran ja tuottaa ulostuloon jännitteen. Virta ei siten kulje sisääntulosta ulostuloon vaan ulostulon jännite ja virta tuotetaan erillisen sisääntulon kautta. Portin ulostulo voidaan yhdistää seuraavan portin sisääntuloksi, jolloin voidaan toteuttaa hyvin monimutkaisia loogisia piirejä ilman, että suunnittelijan tarvitsee miettiä loogisen portin sisäistä toteutusta. Käytännön toteutuksissa on omat rajoituksensa esimerkiksi sen suhteen, kuinka monta sisääntuloa yhdellä loogisella portilla voi olla (*fan-in*) ja kuinka moneen porttiin yksi ulostulo voidaan kytkeä (*fan-out*). Esimerkiksi kuvassa 6.8 (muutama sivu eteenpäin) vasemmanpuoleisessa kuvassa yhdessä portissa (oikealla ylhäällä) on neljä sisääntuloa. Toisaalta sisääntulo a on yhdistetty viiteen porttiin, joten sitä syöttävän portti-piirin *fan-out* täytyy olla vähintään 5. Yleensä sekä sisääntulojen että ulostulojen määrän lisääminen kasvattaa viivettä, joten niitä ei kannata kasvattaa kovin suuriksi ilman pakottavaa tarvetta. Vaikka viiveet ovat erittäin pieniä (ihmisen näkökulmasta katsottuna), äärimmäisen suurilla nopeuksilla tai kelloaajuuksilla viive voi muodostua suorituskykyä rajoittavaksi tekijäksi.

Huomaa, että se mikä näyttäytyy abstraktilla tasolla loogisina operaationa, joka käsittelee muuttujia (jotka voivat saada arvon 0 tai 1), on mikropiirien tasolla jännite. Yleensä arvoa 0 vastaa alempi jännite (käytännössä maa) ja arvoa 1 vastaa joku maahan verrattuna positiivinen jännite. Jännite pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, jotta piirin tehonkulutus ja lämmöntuotto pysyisivät siedettävänä. Lisäksi pienempi jännite mahdollistaa

korkeamman kellotaajuuden käytön koska jännite ehtii nousta tarvittavaan arvoon nopeammin (jännitteen muutokset tapahtuvat aina rajallisessa ajassa). Nykyisissä tehokkaissa prosessoreissa jännite on tyypillisesti hieman yli 1 V.

Integrointiaste (komponenttien määrä piirillä) riippuu olennaisesti käytetystä viivanleveydestä. Nykyisillä tiheimmin pakatuilla integroiduilla piireillä viivanleveys on 14 nm.<sup>262</sup> Pienemmillä viivanleveyksillä kvanttimekaaniset ilmiöt alkavat olennaisesti vaikuttaa elektronien käyttäytymiseen, mikä tekee piirien suunnittelusta erittäin vaikeaa. Vastaavasti, kellotaajuuksia on hyvin vaikea nostaa juurikaan yli 5 GHz:n, koska tehokulutus nousee suunnilleen suorassa suhteessa kellotaajuuteen.<sup>263</sup> Viime vuosina kehitys ei olekaan enää tapahtunut kellotaajuuden kasvattamisella vaan rinnakkaisuuden lisäämisellä.

Periaatteessa tietokoneen ja sen prosessorin toiminta perustuu siis sähkömagneettisiin ja kvanttimekaanisiin ilmiöihin ja kaikki muu sen yläpuolella on vain abstraktia kuvausta, transistorista alkaen, kuten kuvassa 6.7 on hahmoteltu. Tyypillisen tietotekniikan insinöörin kannalta atomifysiikan ilmiöt ovat kuitenkin toissijaisia, kunhan lopputulos sopivalla abstraktiotasolla on juuri se mihin pyritään.



**Kuva 6.7.** NAND-operaatio eri abstraktio- tai esitystasoilla. Huomaa erityisesti, että mikropiireissä sisään- ja ulostulot ovat jännitteitä, ei totuusarvoja.

<sup>262</sup> Tämä 14 nm on noin viidestuhannesosa tyypillisen hiuksen paksuudesta. Piin atomeja 14 nm leveyksiselle väylälle mahtuu rinnakkain noin 100 kappaletta.

<sup>263</sup> Vertailun vuoksi mainittakoon, että IBM PC:n kellotaajuus vuonna 1981 oli 4,77 MHz eli tuhannesosa nykyisistä.

Ohjelmoinnin kannalta olennaista on, että integroidulla piirillä toteutetut loogiset laskutoimitukset ovat äärimmäisen luotettavia. Esimerkiksi jos NAND-portin sisääntuloissa  $a = 0$  ja  $b = 1$ , voimme olla äärimmäisen varmoja, että ulostulon arvo on 1. Toisaalta tämä varmuus vaatii, että toimintaympäristö on piirille sopiva (ei esimerkiksi liian kuuma) ja kellotaajuus on sopiva (jos kellotaajuus on liian suuri, niin ulostulo ei välttämättä ehdi vaihtua oikeaksi). Yhteenvetona voidaan todeta, että integroiduilla piireillä on neljä merkittävää etua: laskennan nopeus, pieni fyysinen koko, pieni tehonkulutus verrattuna laskentatehoon ja lähes virheetön toiminta.

### Esimerkki 6.1. Yhteenlaskun toteuttaminen loogisilla porteilla

Suunnittele loogisten porttien avulla piiri, joka toteuttaa binäärilukujen yhteenlaskun.

#### Ratkaisu

Otetaan esimerkiksi desimaaliluvut  $a = 55$  ja  $b = 114$  ja mietitään mitä niiden yhteenlaskussa tapahtuu. Lasku binäärimuodossa on tällainen:

z	11101100
a	00110111
b	01110010
	-----
S	10101001
C	01110110

Yhteenlasku tapahtuu siten täysin samoin kuin 10-järjestelmässä. Aloitetaan oikealta ja havaitaan, että ensin pitää laskea yhteen 0 ja 1 ja tulokseksi saadaan 1 (tulorivillä S, sanasta sum). Seuraavassa sarakkeessa lasketaan yhteen 1 ja 1, jolloin tulokseksi saadaan binääriluku 10. Tuloriville tulee siis 0 ja seuraavaan yhteenlaskuun jää 1, joka merkitään riville C, sanasta carry, Sillä tarkoitetaan siirtoa seuraavaan sarakkeeseen, joka on merkitty lyhenteellä z (ylin rivi). Kolmannessa sarakkeessa yhteenlaskettavia onkin siten kolme, eli 1, 1 ja 0. Lopputulos on jälleen  $C = 1$  ja  $S = 0$ . Näin jatketaan, kunnes laskutoimitus on saatu suoritettua loppuun. Havaitaan, että koko laskutoimitus koostuu aina rakenteesta, joissa kolme bittiä lasketaan yhteen siten, että tulos voidaan esittää kahdella bitillä (S ja C). Yhteenlaskua varten tarvitsee suunnitella looginen piiri, joka toteuttaa taulukon 6.3 mukaiset totuusarvot.

**Taulukko 6.3.** Kolmen bitin (a, b ja z) yhteenlasku totuusarvotaulukkona.

a	b	z	C	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

S saa arvon 1, jos joko yhdellä kolmesta muuttujasta tai kaikilla kolmella muuttujalla on arvo 1, muissa tapauksissa  $S = 0$ , eli:

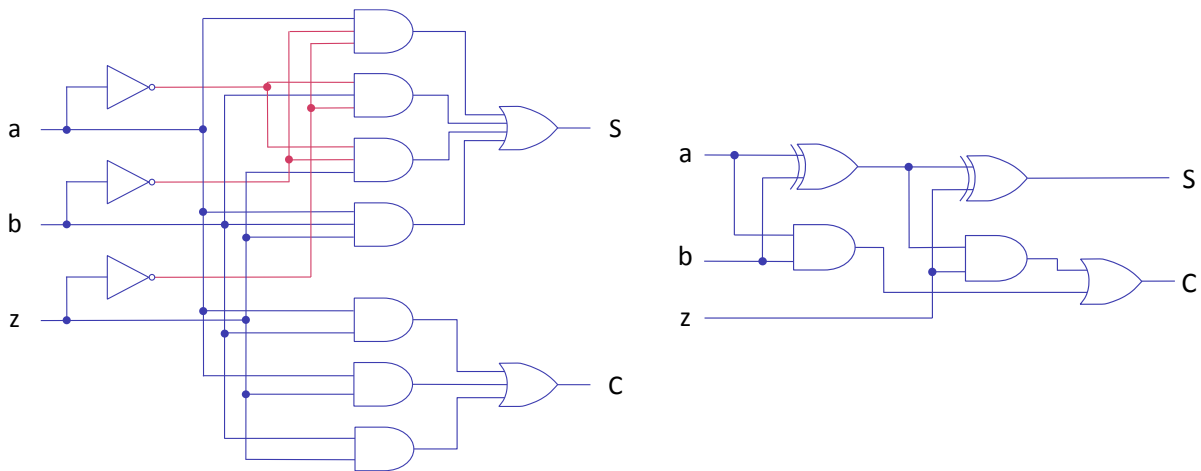
$$S = (a \wedge \neg b \wedge \neg z) \vee (\neg a \wedge b \wedge \neg z) \vee (\neg a \wedge b \wedge z) \vee (a \wedge b \wedge z)$$

Vastaavasti C saa arvon 1, jos vähintään kahdella muuttujalla on arvo 1, eli:

$$C = (a \wedge b) \vee (a \wedge z) \vee (b \wedge z)$$

Tapauksia  $a = b = z = 1$  ei tarvitse käsitellä erikseen, koska muut tekijät kattavat tämän tapauksen.

”Suoraviivainen” toteutus perustuen edellä esitettyihin kaavoihin loogisilla porteilla JA, TAI, ja EI on esitetty kuvassa 6.8. Kuvan toteutus on kaukana optimaalisesta sen suhteen, kuinka monta loogista porttia tarvitaan. Täsmälleen sama totuusarvotaulukko voidaan toteuttaa viidellä loogisella portilla: kaksi XOR-, kaksi JA- ja yksi TAI -portti, joissa kussakin on vain kaksi sisääntuloa. Koko laskutoimitus, esimerkiksi 8 bitin yhteenlasku, saadaan toteutettua siten, että tietyn sarakkeen ulostulo C yhdistetään seuraavan sarakkeen sisäänmenoon z (ensimmäisessä sarakkeessa z on aina 0).



**Kuva 6.8.** Kolmen bitin yhteenlasku, vasemmalla ”suoraviivainen” toteutus, oikealla täsmälleen samaan lopputulokseen johtava yksinkertaisempi toteutus.

## Muisti

Muisti on ollut laskenta- ja tietokoneiden ongelma alusta saakka. Haasteena on ollut sekä muistista haun nopeus että muistin koko. Erityisesti siinä vaiheessa, kun laskenta suoritettiin tyhjiöputkilla, muistista muodostui yleensä suorituskykyä eniten rajoittava tekijä. Laskentakoneiden alkuvaiheessa oli monenlaisia muistivirityksiä, joista mielenkiintoisimpia oli mm. ENIAC:n seuranneessa EDVAC:ssa<sup>264</sup> käytetty akustinen viivelinja. Muisti perustui akustiseen signaaliin, joka kulki elohopealla täytetyssä putkessa. Vaikka tällaiset muistit olivat aikaisempia parempia, niiden avulla ei voitu tehdä kovin suuria muisteja. Viivelinja aiheutti myös huomattavan viiveen, varsinkin jos muisti oli suuri.

<sup>264</sup> EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) valmistui 1949 ja se sisälsi mm. 6000 tyhjiöputkea. Yhteenlaskuun käytetty keskimääräinen aika oli noin 0,8 ms. <https://en.wikipedia.org/wiki/EDVAC>

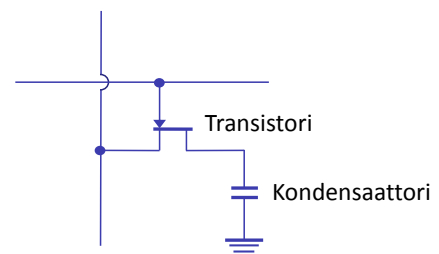
1950-luvun puolivälistä alkaen tietokoneissa siirryttiin ferriittirengasmuisteihin (**magnetic core memory**) kuvassa 6.9. Se perustuu pieniin keraamisiin renkaisiin, joihin tieto tallennetaan magneettikentän polariteetin avulla siten, että sisällön säilyttämiseen ei tarvita sähköenergiaa. Ferriittirengasmuistien hakuajoissa päästiin 1970-luvulla jo 600 nanosekunnin luokkaan.<sup>265</sup> Tämän jälkeen siirryttiin integroituihin puolijohdemuisteihin. Kuvassa 6.5 esitetyn pienen tietokoneen keskusmuisti on 1 gigatavun kokoinen eli kaksisataakertainen verrattuna kuvan 6.9 muistiin.<sup>266</sup> Muistikapasiteetti painoyksikköä kohti on kaksinkertaistunut keskimäärin kahden vuoden välein 1950-luvun lopulta nykypäivään.

**Kuva 6.9.** IBM:n viiden megatavun muistiyksikkö vuodelta 1956, paino yli 1000 kiloa.<sup>267</sup>



Muistia on periaatteessa kahta tyyppiä: luku- ja kirjoitusmuisti (**Random Access Memory, RAM**) ja lukumuisti (**Read Only Memory, ROM**). Tietokoneen keskusmuisti on aina RAM-tyyppistä. RAM voi olla joko dynaaminen (**dynamic RAM, DRAM**) tai staattinen (**static RAM, SRAM**). Dynaamista muistia täytyy virkistää jatkuvasti, sillä se perustuu kondensaattorien käyttöön, joiden varaus osittain purkautuu niitä luettaessa. Kuvassa 6.10 on esitetty DRAM:n yhden bitin säilyttämiseen tarvittava muistielementti, joka siis koostuu yhdestä transistorista ja yhdestä kondensaattorista (**capacitor**).

**Kuva 6.10.** Dynaamisen RAM:n yhden bitin muistiyksikkö.



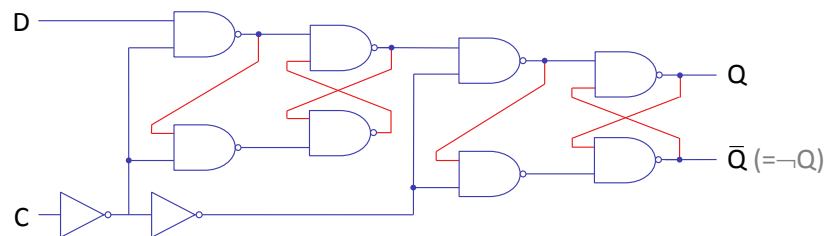
ROM-muistia käytetään tyypillisesti tietokoneen alustukseen käynnistettäessä tietokonea. Käynnistystä varten ROM-muistissa on BIOS (**Basic Input/Output System**) ohjelma, jonka avulla massamuistista ladataan tietokoneen käyttöjärjestelmä keskusmuistiin. Lisäksi suoritin voi käyttää välimuistia (**cache**), joka on hitaampi kuin rekisteri mutta nopeampi kuin keskusmuisti. Tietokone voi siirtää dataa eri muistiyksiköiden välillä ilman, että sovellusten ohjelmoijien tarvitsee puuttua asiaan. Tämän asian hoitaa muistinhallintayksikkö (**Memory Management Unit, MMU**).

<sup>265</sup> <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ferriittirengasmuisti>

<sup>266</sup> Koska kyseessä on keskusmuisti, 1 GB luultavasti tarkoittaa  $2^{30} = 1\,073\,741\,824$  bittiä kuten 3. luvussa mainittiin.

<sup>267</sup> <https://nextshark.com/ibm-5mb-hard-drive/>

Myös suorittimen sisällä tarvitaan muistia. Pieniä muisteja voidaan toteuttaa loogisten porttien avulla. Kuvassa 6.11 on esitetty yhden bitin muisti, jonka toteuttamiseen on käytetty 8 NAND-porttia ja 2 NOT-porttia. Olennaisin ero esimerkiksi kuvassa 6.8 esitettyihin loogisiin piireihin on takaisinkytkennät, joiden avulla piiri muistaa aikaisemman tilansa. Kuvan rakennetta kutsutaan kiikoksi (*flip-flop*). Kiikun tehtävänä on siis säilyttää sille asetettu looginen tila, eli se muistaa yhden bitin. Säilytettävän bitin arvo riippuu kiikun tyy-  
pistä, tulojen tilasta ja lähtöjen edellisestä tilasta. Kuvassa 6.11 kelloisääntulon (C) muutos nol-  
lasta ykköseksi laukaisee prosessin, jonka lopputuloksena ulostulo (Q) saa datasisään-  
tulon (D) arvon ja pitää sen, kunnes kelloisääntulo muuttuu seuraavan kerran nol-  
lasta ykköseen. Suhteellisen monimutkainen rakenne tarvitaan sen takaamiseksi, että piiri toimii  
kaikissa tilanteissa täysin ennustettavalla tavalla. Piirin yksityiskohtaista toimintaa on vai-  
keahkoa hahmottaa, eikä sitä tämän kurssin puitteissa käsitellä.



**Kuva 6.11.** Yhden bitin muisti toteutettuna NAND- ja NOT-porteilla.<sup>268</sup>

### Pääsyntä (*Input/output*)

Pääsyntällä tarkoitetaan niitä keinoja, joilla tietokone vaihtaa informaatiota ulkomaailman kanssa. Laitteita, joita käytetään tähän tarkoitukseen, kutsutaan oheislaitteiksi (*peripherals*). Oheislaitteita on periaatteessa neljää tyyppiä: 1) syöttölaitteet (*input devices*), 2) tulostuslaitteet (*output devices*), 3) muistilaitteet (*storage devices*) ja 4) yhdistetyt syöttö- ja tulostuslaitteet (*input/output*). Henkilökohtaisessa tietokoneessa tyypillisiä oheislaitteita ovat näyttö, näppäimistö, hiiri, kaiuttimet, mikrofoni ja tulostin. Lisäksi muut tallennuslaitteet paitsi keskusmuisti luokitellaan oheislaitteeksi, samoin verkkoyhteydet.

Esimerkkejä tiedonsiirtoon käytettyjen liitäntöjen nopeuksista:<sup>269</sup>

- USB 1.1: 12 Mbit/s (v. 1996)
- USB 2.0: 480 Mbit/s (2000)
- USB 3.0: 5 Gbit/s (2010)
- USB 3.1: 10 Gbit/s

<sup>268</sup> Kuva [https://fi.wikipedia.org/wiki/Kiikku\\_%28digitaalitekniikka%29](https://fi.wikipedia.org/wiki/Kiikku_%28digitaalitekniikka%29), kiikkujen toimintaa on selostettu tarkemmin esimerkiksi Wikipedian englanninkielisillä sivulla [https://en.wikipedia.org/wiki/Flip-flop\\_%28electronics%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Flip-flop_%28electronics%29) ja alan oppikirjoissa, esim. M. Mano & C. Kime: Logic and Computer Design Fundamentals, s. 191-201.

<sup>269</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_device\\_bit\\_rates](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_device_bit_rates)



- HDMI 1.0: 4.95 Gbit/s <sup>270</sup>
- HDMI 2.0: 18 Gbit/s

Käytännössä saavutettavat nopeudet voivat olla huomattavasti alhaisempia. Toisaalta uusimpien standardien nopeudet ovat suuria: kokonaisen elokuvan voi ladata muutamassa sekunnissa. Kehitys on menossa siihen suuntaan, että samaa liitäntää käytetään kaikkeen tiedonsiirtoon sekä lisäksi tehonsyöttöön. Tähän pyritään USB Type-C -liitännällä.<sup>271</sup>

Tietokoneen sisäisten väylien nopeus on parhaimmillaan useita satoja gigabittejä sekunnissa. Sen sijaan kiintolevyiltä voidaan lukea dataa huomattavasti hitaammin ja lisäksi saavutettava nopeus riippuu siitä, miten data sijaitsee levyllä. Useat oheislaitteet ovat monimutkaisia laitteita ja ne voidaan hyvin luokitella tietokoneiksi. Esimerkiksi aikanaan tulostimissa saattoi olla niin tehokas prosessori, että sillä saattoi ratkaista tietyn tyyppisiä laskennallisia tehtäviä nopeammin kuin tavallisella tietokoneella. Nykyisinkin näytönohjaimissa on enemmän tietojenkäsittelykapasiteettia kuin useimmissa yleiskäyttöön suunnitelluissa suorittimissa. Tosin näytönohjain suorittaa tietojenkäsittelyä rinnakkain kymmenissä suorittimissa, jotka suorittavat saman operaation samanaikaisesti suurelle datamäärälle, joten näytönohjainta ei voi käyttää samalla tavoin kuin täysin yleiskäyttöistä suoritinta.

### *Tietokoneen nopeuden havainnollistaminen*

Oletetaan, että tietokoneen kellotaajuus on 3,15 GHz eli se pystyy tekemään yksinkertaisen toimenpiteen 3 150 000 000 kertaa sekunnissa. Miten tämän äärimmäisen nopeuden voisi ymmärtää käyttäen apuna arkipäivän ilmiöitä? Hahmotamme ulkomaailman sekunnin aikaskaalalla. Vaikka voimme havaita lyhyempiäkin tapahtumia, mikä tahansa havainto vaatii aina noin 400 ms ajan ennen kuin voimme tulla siitä tietoiseksi. Eli noin sekunti on lyhyin aika mikä riittää tietoiseen reagointiin ulkoisen ärsykkeeseen. Aivojen ”kellotaajuus” on toki korkeampi, mutta tässä vertailukohtana on siis tietoiset teot.

Miten kauan siis kestää tietoisessa maailmassa siihen, minkä tietokoneen maailmassa kestää yhden sekunnin? 3 150 000 000 sekuntia on 100 vuotta. Eli jos suorittimessa olisi 5 miljardia transistoria ja yksi henkilö pystyisi tekemään saman kuin transistori mutta 1 sekunnin aikana, niin tarvittaisiin suunnilleen kaikki maailman aikuiset 100 vuoden ajan tekemään sama mitä yksi suoritin tekee sekunnissa. Huh. Ei ihme, että nykyiset tietokoneet tekevät ihmeellisiä asioita. Tällä mallilla voi myös hahmottaa erilaisten muistien ja oheislaitteiden nopeuseroja kuten taulukossa 6.4 on esitetty.

<sup>270</sup> HDMI (High-Definition Multimedia Interface) on liitäntästandardi kuvan ja monikanavaäänien siirtämiseen.

<sup>271</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/USB-C>

**Taulukko 6.4.** Tietokoneen toimintojen aikaskaala muunnettuna tietoiselle aikaskaalalle.

	Kesto aika tietokoneen toimintanopeudella (kellotaajuus 3,15 GHz)	Kesto aika ihmisen tietoisella toiminta- nopeudella (1 Hz)
Yksi kellojakso	0,32 ns	1 s
Datan haku erittäin nopeasta välimuistista	10 ns	32 s
Datan haku RAM-muistista	1 µs	53 min
Datan haku kiintolevytä	1 ms	36 päivää
Aika näppäimistön painallusten välillä	0,2 s	20 vuotta
Ihmisen tarvitsema aika näytön lukemiseen	30 s	3000 vuotta
Käyttöjärjestelmän päivitys	2 tuntia	720 000 vuotta
Yhden tavun siirto 1 Gbit/s linkillä	8 ns	24 s
Yhden megatavun siirto 1 Gbit/s linkillä	8 ms	10 kk
Yhden teratavun siirto 1 Gbit/s linkillä	133 min	800 000 vuotta

### Moniajo ja rinnakkaislaskenta

Useimmissa nykyisissä järjestelmissä on välttämätöntä ajaa lukuisia ohjelmistoja siten, että ulospäin näyttää siltä kuin niitä ajettaisiin samanaikaisesti. Käytännössä tämä tapahtuu moniajona, jossa tietokone vaihtaa hyvin nopeasti ajettavaa ohjelmaa. Perinteisesti moniajo (**multitasking**) mikrotietokoneissa on tarkoittanut yhden suorittimen käyttöä. Ensimmäinen moniajotapa oli yhteistyömoniajo, missä ohjelmat vapaaehtoisesti jakoivat suoritinaikaa toisille ohjelmille.<sup>272</sup> Ongelmana tällaisessa järjestelyssä on, että yksi huonosti käyttäytyvä ohjelma voi varastaa koko koneen laskentatehon. Nykyaikaisissa tietokoneissa käyttöjärjestelmän osa, vuorontaja (**scheduler**) hoitaa vuorojen jaon. Koska tietokoneet toimivat nykyisin monta kertaluokkaa nopeammin kuin ihminen voi havaita, inhimillisestä näkökulmasta katsottuna ohjelmat näyttävät pyörivän rinnakkain. Toiminta on siis periaatteessa samankaltaista kuin aikajakoinen kanavointi, jota käsiteltiin luvussa 3.

Voisi kuvitella, että jatkuva ohjelmien vaihtaminen heikentäisi tietokoneen suorituskykyä. Käytännössä monet ohjelmat kuitenkin käyttäisivät suurimman osan ajasta (jos suoritin olisi siis pelkästään yhden ohjelman käytössä) odottaen jonkun oheislaitteen toimintoja. Erityisen hidas on ihminen näppäimistön tai hiiren käyttäjänä (kuten taulukko 6.4 havainnollistaa). Jotkut intensiiviset ohjelmat, kuten virustorjuntaohjelmisto tarkistaessaan kiintolevyn sisältöä, voivat vaikuttaa havaittavasti muiden ohjelmien suorittamiseen.

Sama tehtävä voidaan myös jakaa useamman suorittimen tehtäväksi. Rinnakkaislaskenta (**parallel processing**) tarkoittaa yhden laskentatehtävän ratkaisemista samanaikaisesti useita suorittimia tai suoritinryhmiä (**multi-core**) käyttämällä. Rinnakkaislaskennan avulla suurikin laskentatehtävä voidaan ratkaista nopeasti, jos se pystytään jakamaan

<sup>272</sup> <http://fi.wikipedia.org/wiki/Moniajo>

pienempiin tehtäviin siten, että tehtävät voidaan suorittaa pääosin toisistaan riippumatta. Rinnakkaislaskennan haasteena on tehtävien jakaminen ja laskentaprosessien välinen tiedonsiirto ja keskinäinen ajoittaminen. Saavutettava nopeus ei siten ole läheskään suorassa suhteessa suorittimien lukumäärään. Rinnakkaislaskenta oli vuosikymmenien ajan vain tehokkaimmissa tietokoneissa käytetty ominaisuus. Rinnakkaislaskennan käyttö on nyt levinnyt pieniinkin laitteisiin kuten älypuhelimiin, jossa suoritinpiirillä voi olla kahdeksan rinnakkaista laskentaa suorittavaa ydintä. Vastaavasti supertietokoneissa rinnakkaisia suorittimia voi olla tuhansia tai jopa miljoonia.

## Virheiden havaitseminen ja korjaus

Kuten kanavakoodauksen yhteydessä jo lyhyesti käsiteltiin, datan oikeellisuutta voidaan tarkistaa esimerkiksi tarkistussumman avulla. Käytännössä tarkistussumman laskentaa ei tehdä tyytymällä laskemaan vain ykkösbittien lukumäärää, vaan erilaisin polynomimenetelmin, joissa biteille annetaan painokertoimia niiden sijaintipaikan mukaan.

Piirien ja tallennustiheyden kasvaessa riski bittivirheisiin kasvaa puolijohdemuisteissa mm. kosmisten hiukkasten aiheuttamien virheiden takia. Palvelinkoneissa keskusmuisti on yleensä virheenkorjaavaa ja modernit levyjärjestelmät käyttävät tarkistussummia havaitsemaan bittivirheitä. Bittivirhe saattaa syntyä siis jo tietokoneen sisällä, joten tiedon suojaaminen vain siirron aikana ei välttämättä riitä.

Suunnitteleamalla tarkistussummat sopivasti voidaan virheitä myös korjata. Yksinkertaisin yhden virheen korjaava menetelmä on Richard Hammingin mukaan nimetty Hamming-koodi ([Hamming code](#)). Hamming-koodi perustuu pariteettibitteihin, joita lasketaan järjestelmällisesti eri kohdista kehystä. Esimerkiksi [7/4] Hamming-koodissa on neljä databittiä ja kolme pariteettibittiä siten, että ensimmäinen bitti on pariteettibitti biteille 1, 3, 5 ja 7, toinen bitti on pariteettibitti biteille 2, 3, 6 ja 7 ja neljäs bitti on pariteettibitti biteille 4, 5, 6 ja 7 kuten taulukossa 6.4 on havainnollistettu. Samaa periaatetta voidaan jatkaa periaatteessa niin pitkälle kuin halutaan. Kehyksen koko on siten aina  $2^r - 1$  bittiä, jossa  $r$  on kahta suurempi kokonaisluku. Pariteettibittejä on  $r$  kappaletta ja loput  $2^r - r - 1$  ovat databittejä.

Hamming-koodilla voidaan *joko* korjata 1 bittivirhe *tai* havaita korkeintaan kaksi bittivirhettä. Jos yksittäisiä bittivirheitä pyritään korjaamaan, kahden bitin virhe aiheuttaa virheellisen korjauksen. Lisäämällä yksi pariteettibitti voidaan samanaikaisesti korjata yhden bitin virheet ja havaita kahden bitin virheet.

Jos oletetaan, että ensimmäinen bitti on vähiten merkitsevä, niin esimerkiksi kahdeksan bitin tavu 10011000 vastaa kymmenjärjestelmässä lukua  $2^0+0+0+2^3+2^4+0+0+0 = 1+0+0+8+16+0+0+0=25$ . Toisaalta on syytä huomata, että Hamming-koodaus ei itsessään

tee mitään oletusta bittien tulkinnasta, vaan tulkinta on ylempään eli sovellustason kysymys. Bittien järjestyksen suhteen on kuitenkin syytä olla tarkkana!<sup>273</sup>

**Taulukko 6.5.** Hamming-koodauksen periaate. Databitit:  $d_1, d_2, \dots$ , pariteettibitit :  $p_1, p_2, \dots$ . Esimerkiksi pariteettibitti  $p_1$  kattaa kaikki järjestysnumeroltaan parittomat bitit (3, 5, 7, 9, ...).

Bitti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	$p_1$	$p_2$	$d_1$	$p_3$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$p_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$	$d_{11}$	$p_5$	$d_{12}$	$d_{13}$
$p_1$	x		x		x		x		x		x		x		x		x	
$p_2$		x	x			x	x			x	x			x	x		x	x
$p_3$				x	x	x	x					x	x	x	x			
$p_4$								x	x	x	x	x	x	x	x			
$p_5$																x	x	x

### Esimerkki 6.2. Hamming-koodaus

Vastaanotat Hamming-koodatun kehyksen  $0110111$ . Onko kehyksessä virheellinen bitti tai bittejä? Jos oletetaan, että kehyksessä on yksi virheellinen bitti, niin mitä ovat lähetetyn kehyksen databitit? (Punaisella merkityt bitit ovat siis pariteettibittejä.)

### Ratkaisu

Tässä siis vastaanotetut bitit ovat:  $p_1 = 0, p_2 = 1, d_1 = 1, p_3 = 0, d_2 = 1, d_3 = 1$  ja  $d_4 = 1$ . Siten:

$$p_1 + d_1 + d_2 + d_4 = 0 + 1 + 1 + 1 = 3, \text{ joten tulos on pariton eli ilmoittaa virheestä.}$$

$$p_2 + d_1 + d_3 + d_4 = 1 + 1 + 1 + 1 = 4, \text{ joten tulos on parillinen ja siten virheetön.}$$

$$p_3 + d_2 + d_3 + d_4 = 0 + 1 + 1 + 1 = 3, \text{ joten tulos on pariton eli ilmoittaa virheestä.}$$

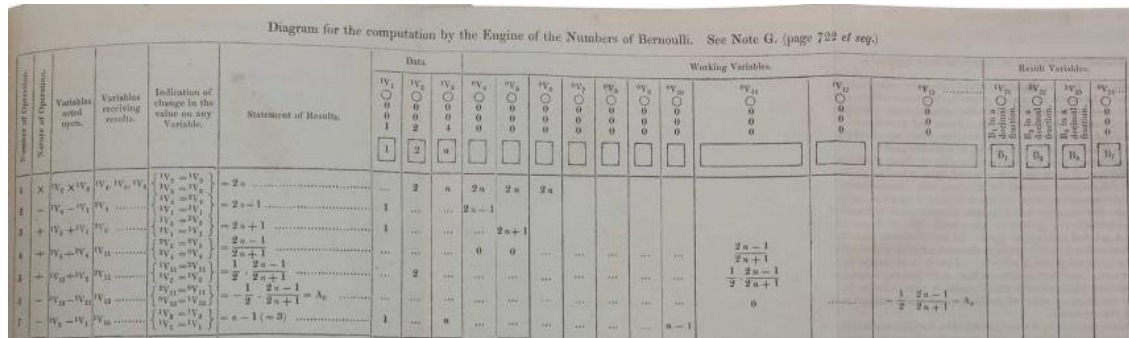
Koska oletettiin, että virheitä on korkeintaan yksi, voidaan keskimmäisen rivin perusteella päätellä, että bitit  $p_2, d_1, d_3$  ja  $d_4$  ovat oikein. Tästä seuraa käyttäen lisäksi ensimmäisen rivin tietoa, että joko  $p_1$  tai  $d_2$  on virheellinen (mutta ei molemmat). Vastaavasti kolmannen rivin mukaan joko  $p_3$  tai  $d_2$  on virheellinen. Tästä seuraa, että  $d_2$  eli toinen databitti on virheellinen, joten sen pitäisi olla 0 eikä 1. Jos siis lähetys sisälsi vain yhden virheen, alkuperäinen kehys oli  $0110011$  eli lähetetyt databitit olivat 1011 (kymmenjärjestelmässä  $1 + 0 + 4 + 8 = 13$ , kun oletetaan, että vähiten merkitsevä bitti on ensimmäisenä).

<sup>273</sup> Katso esimerkiksi <https://fi.wikipedia.org/wiki/Tavuj%C3%A4rjestys>

## Algoritmit, ohjelmointi ja ohjelmistot

### Ohjelmointikielien kehitys

Walter Isaacson aloittaa kirjassaan digitaalisen vallankumouksen käsittelyn, hieman yllättäen, naishahmosta nimeltä Ada Lovelace, joka eli Englannissa 1800-luvun alkupuolella.<sup>274</sup> Ada Lovelacea pidetään ensimmäisenä, joka kehitti ja esitti ajatuksen ohjelmoitavasta laskentakoneesta ja siinä käytettävistä algoritmeista. Tämä tapahtui vuonna 1843! Kuvassa 6.12 on esitetty Lovelacen kehittämä algoritmi Bernoullin lukujen laskemiseksi.



**Kuva 6.12.** Osa ensimmäisestä julkaistusta algoritmista tietokoneelle: Bernoullin lukujen laskeminen, Ada Lovelace, 1843.<sup>275</sup>

Mutta ei Adakaan olisi voinut ajatuksiaan kehittää ilman Charles Babbagen mekaanista laskentakonetta, jonka tarkoituksena oli alun perin logaritmitaulukoiden laskeminen. Babbage sai tähän tarkoitukseen rahoitusta valtiolta, mutta ei valitettavasti saanut koskaan laitteitaan täysin valmiiksi. Ongelmaksi muodostui se, että hänellä oli vain yksi tekninen avustaja. Kunnolla toimivan koneen rakentaminen olisi vaatinut suuremman ryhmän asialle omistautuneita riittävän kyvykkäitä eri alojen edustajia. Ohjelmoinnin kehitys pysähtyikin lähes täysin sadaksi vuodeksi. Seuraava merkittävä askel oli vasta tämän luvun alussa mainittu ENIAC.

Vaikka lähes kaikki laitteistokehittäjät olivat miehiä, ensimmäiset ohjelmoinnin kehittäjät olivat naisia! Miksi näin? ENIAC:n kuten muidenkin alkuvaiheen laskentalaitteiden ajatuksena oli korvata ihmistyövoimalla ja mekaanisilla laskimilla suoritettavat laskentatehtävät, joita useimmiten tekivät naiset.<sup>276</sup> ENIAC:n tapauksessa ”ohjelmointi” oli hyvin työlästä ja aikaa vievää, sillä mitään nykyisen kaltaisia ohjelmointikieliä ei ollut. ENIAC:n ohjelmointiin käytettiin 3000 kytkintä ja kymmeniä johtoja, joilla mekaanisesti ohjattiin koneen

<sup>274</sup> Ada Lovelace oli runoilija lordi Byronin tytär jonka elämä kesti, isänsä tapaan, vain 36 vaiheikasta vuotta. Ohjelmointikieli Ada nimettiin vuonna 1979 Ada Lovelacen mukaan.

<sup>275</sup> "Diagram for the computation of Bernoulli numbers" by Ada Lovelace, Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons, <http://www.sophiararebooks.com/pictures/3544a.jpg>.

<sup>276</sup> Laskentaa suorittavista henkilöistä käytettiin nimeä ”computer” jo 1600-luvulla ja vielä 1940-luvulla

sähköistä toimintaa. Työ vaati äärimmäistä kärsivällisyyttä ja huolellisuutta. Ohjelmointitehtävä annettiin aikaisemmin itse laskentaa tehneille naisille, jotka hoitivat vaativan ohjelmoinnin erittäin ansiokkaasti.

Nopeasti tuli ilmeiseksi, että tietokoneiden käyttö eli siis ohjelmointi piti saada kätevämmäksi. Esimerkiksi A-2 kielellä, kun jokin muuttuja haluttiin korottaa kolmanteen potenssiin, koodi oli:

```
APN034 012038
```

Tässä muuttujan arvo oli muistipaikassa 34 ja laskun tulos sijoitettiin muistipaikkaan 38. Varmaankin koodia saattoi oppia lukemaan ja kirjoittamaan, mutta intuitiivista se ei ollut. Ohjelmointi oli kuitenkin helpompaa kuin kytkinten ja johtojen asettelu. Olennaista edistystä oli se, kun ohjelmointikielistä saatiin kehitettyä luonnollista (yleensä englannin) kieltä muistuttavia. Näistä ensimmäinen merkittävää suosiota saanut kieli oli Fortran, joka julkaistiin vuonna 1957. Fortran on edelleen laajassa käytössä, joskin siihen on tehty merkittäviä laajennuksia vuosien varrella. Fortranilla potenssiin korotus ilmaistiin näin:

```
Y = T**3
```

Muita Fortranin uusia ominaisuuksia olivat mahdollisuus lisätä kommentteja koodin joukkoon sekä sisään- ja ulostuloa koskevat muotoilukomennot.<sup>277</sup> Vaikka Fortran-koodin lukeminen oli huomattavasti helpompaa kuin konekielen lukeminen, niin alkuvaiheen optimismi koodin ymmärrettävyydestä:

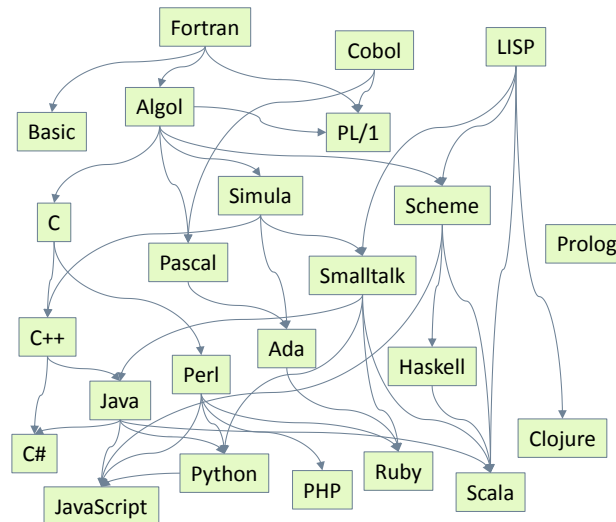
“After an hour course in FORTRAN notation, the average programmer can fully understand the steps of a procedure stated in FORTRAN language without any additional comments.”<sup>278</sup>

oli ehkä realistista muutaman ohjelma-askeleen osalta. Pidempi ohjelma, jossa käytetään ehdollisia silmukoita ja muita monimutkaisia ominaisuuksia, on paljon vaikeampi ymmärtää. Ohjelmointikieliä on kehitetty sadoittain erilaisiin tarpeisiin. Kuvassa 6.13 on esitetty muutama suhteellisen yleisesti käytetty ohjelmointikieli ja karkea arvio eri kielten välisistä kehityssuhteista.

---

<sup>277</sup> Katso esimerkiksi: Knuth, D. E., & Pardo, L. T., *The early development of programming languages*, kirjassa N. Metropolis (ed.), *A history of computing in the twentieth century*, Elsevier, s. 197-273.

<sup>278</sup> Preliminary report, Specifications, for the IBM Mathematical FORMula TRANslating System, New York: IBM Cort., Nov. 1954.



**Kuva 6.13.** Eräitä ohjelmointikieliä ja niiden välisiä suhteita.

Mitä näistä sadoista kielistä sitten informaatioteknologian alalla toimivan asiantuntijan olisi syytä osata itse koodata, jos tähtäimessä ei ole ura ohjelmoijana? Kysymyshän ei ole lainkaan siitä, tarvitsevatko kaikki ohjelmointitaitoa ja -kokemusta vai ei, vaan siitä miten paljon ja miten syvällistä. Yksi vastaus voisi olla: C ja Python, jotka antavat suhteellisen kattavan kuvan ja kokemuksen hieman eri tason ohjelmointikielistä. Lisäksi kokemusta olisi hyvä hankkia koodaamalla jotain alhaisen tason konekieltä, koska silloin ohjelman ja varsinaisen tekniikan välinen rajapinta tulee konkreettisesti tutuksi. Toisessa suunnassa on hyödyllistä tutustua ns. ohjelmistokehyksiin (*software framework*). Ohjelmistokehys on ohjelmistotuote, joka muodostaa rungon, jonka päälle voi rakentaa tietokoneohjelmia.

Ohjelmointikielien voidaan siten jakaa taulukon 6.6 mukaisesti eri tasoihin. Rajat tasojen välillä ovat hämärä. Esimerkiksi Perl on alun perin suunniteltu lähinnä tekstinkäsittelyyn, mutta siitä on käytännössä tullut yleiskäyttöinen (korkean tason) ohjelmointikieli. Erityisen epämääräinen on luokittelu korkean tason ja symbolisen konekielen välimaastossa. Suhteellisen selkeää on, että konekielen ja korkeimman tason kielten välillä on välimuotoja, mutta mitkä kielet kuuluvat niihin ja mitä nimeä tasosta käytetään, vaihtelee suuresti. Monissa lähteissä symbolinen konekieli luokitellaan alhaisen tason kieleksi, kun taas joissakin lähteissä C-ohjelmointikieltä kutsutaan alhaisen tason kieleksi ja sijoitetaan konekielten yläpuolelle. Joskus, mukaan lukien taulukko 6.6, käytetään nimitystä keskitason kieli, johon C-kieli ja sen johdannaiset sijoitetaan, konekielten ja (varsinaisten) korkean tason kielten väliin.<sup>279</sup> Joskus C-kieli lasketaan korkean tason kieleksi.

<sup>279</sup> Esimerkiksi: <http://fresh2refresh.com/cprogramming/c-language-history/>



**Taulukko 6.6.** Ohjelmointikielen tasot (eräs luokittelu).<sup>280</sup>

Taso	Esimerkkejä
Ohjelmistokehykset (software framework)	Ajax framework
Täsmäkielet (domain-specific languages)	Mathematica, SQL
Korkean tason kielet (high level languages)	Python, Perl, Ruby
Keskitasen kielet (middle-level languages)	C, C++
Symbolinen konekieli (assembly language)	Assembler
Konekieli (machine language, machine code)	

Seuraavassa keskeisimpien tasojen määritelmät:<sup>281</sup>

- Täsmäkieli on ohjelmointikieli, joka ei ole yleiskäyttöinen vaan sopii käytettäväksi nimenomaisen aihealueen yhteydessä.
- Korkean tason ohjelmointikieli on kieli, jonka abstraktiotaso on korkea ja joka ei riipu ohjelmaa suorittavan tietokoneen erityispiirteistä.
- Konekieli on ohjelmointikieli, joka sopii tietynlaisten prosessorien suoritettavaksi, mutta jota ihminen ei yleensä itse lue tai kirjoita.

Merkittävimmät erot alhaisempien ja korkeampien tason kielten välillä liittyvät muistin hallintaan ja koodin luonnollisuuteen kielenä. Korkean tason kielissä muistin hallinta on automaattista ja turvallista, kun taas alhaisemman tason kielissä koneen muistia voidaan hallita suoraan, jolloin sen käyttöön liittyy huomattavia riskejä. Konekieltä käytetään erityisesti silloin, kun koodin tehokkuus on tärkeää. Esimerkkinä tästä lähes neljän vuosikymmenen takaa on Nokian valinta koodata ensimmäisen digitaalisen puhelinkeskuksen käyttöjärjestelmä assemblerilla sen sijaan, että olisi käytetty korkeamman tason ohjelmointikieltä.<sup>282</sup> Tämä ratkaisu (joka ei ollut lainkaan itsestään selvä) oli merkittävä, koska sillä tavoin saatiin enemmän suorituskykyä irti samoista suorittimista kuin korkeamman tason ohjelmointikieliä käyttäneet kilpailijat. Mitä korkeammalle tasolle kielissä mennään, sitä enemmän koodi muistuttaa luonnollista kieltä.

Edellä kuvatut asiat voidaan tiivistää alhaalta ylöspäin seuraavasti:

1. Tietokone rakentuu transistorien ja muiden peruskomponenttien avulla toteutetuista loogisista piireistä. Loogiset piirit suorittavat operaatioita biteillä, joiden avulla kuvataan kaikki mahdollinen, sekä data että suoritettavat toimenpiteet eli käskyt. Kun tietokone toimii virheettömästi, niin samoilla syötteillä ja samalla

<sup>280</sup> Mitään yksiselitteistä totuutta tasoista ei ole, varsinkaan välitasoilla, katso esimerkiksi <http://www.cse.hut.fi/fi/opinnot/CSE-A1121/2015/yleista/sanasto.html#term-ohjelma>,

<http://www.codecommit.com/blog/java/defining-high-mid-and-low-level-languages>

<sup>281</sup> Ohjelmoinnin peruskurssi Y2, Sanasto, <http://www.cse.hut.fi/fi/opinnot/CSE-A1121/2015/yleista/sanasto.html>

<sup>282</sup> M. Sandelin, J. Partanen (2015), *Nokian jalokivi Tarina suomalaisesta DX 200 puhelinkeskuksesta*, s. 89. Päätös tehtiin silloisessa Telefenno-nimisessä yrityksessä, joka syntyi kun Nokia ja valtion omistaman Televan puhelinliiketoiminta yhdistettiin vuonna 1977. Televa myytiin Nokialle ja samalla Telefenno fuusioitiin Telenokiaan kesäkuussa 1981.



ohjelmalla lopputulos on aina täsmälleen sama. Jos toimintaan halutaan satunnaisuutta, se voidaan tehdä vain syöttämällä järjestelmään satunnaistettua dataa.

2. Koska mikropiirit käsittelevät bittejä, ohjelma täytyy syöttää prosessorille biteinä. Konekielinen käsky voi esimerkiksi määrätä, että rekisterin 1 ja rekisterin 2 sisältämät luvut lasketaan yhteen ja sijoitetaan rekisteriin 5. Operaatio (tässä yhteenlasku) määritetään tietyn paikan määrättyllä bittikuviolla ja vastaavasti käytettävät rekisterit määritellään omilla paikoillaan koodissa.
3. Jos halutaan koodata suoraan konekielisenä koodina, binääriset koodit voidaan esittää helpommin ymmärrettävällä symbolisella konekielellä. Symbolisessa konekielessä käskyt, esimerkiksi lukujen vertailu tai yhteenlasku, esitetään lyhyellä kirjainkoodilla, samoin rekistereille on omat ymmärrettävät nimensä. Konekieltä käytetään yleensä sellaisten ohjelmapätkien koodauksen, jotka pyritään toteuttamaan mahdollisimman tehokkaasti.
4. Yleensä ohjelmointi tapahtuu korkeamman tason ohjelmointikielellä, joka muunnetaan konekieliseen muotoon joko tulkin (*interpreter*) tai kääntäjän (*compiler*) avulla. Tulkki käsittelee yhtä käskyä kerrallaan, kun taas kääntäjä käsittelee kokonaista ohjelmaa. Korkean tason ohjelmointikieli käsittelee erilaisia objekteja, kuten numeroita, sanoja tai kuvia. Ohjelma on siis täsmällinen kuvaus siitä, miten suorittimen tulee käsitellä sille annettuja objekteja.

### *Ohjelmointi työurana tai uran osana*

Kuten edellä todettiin, jokaisen informaatioteknologian alalla toimivan täytyy hallita ohjelmoinnin perusteet. Entä jos tavoitteena ei ole varsinaisesti ohjelmointi eikä edes tekniikan kehittäminen, vaan pikemminkin yritystoiminta ja vaurastuminen sen avulla? Monet viime vuosikymmenien menestyneimmistä yrityksistä ovat syntyneet ohjelmistoalalle, kuten Microsoft, Apple, Google ja Facebook. Onko näiden yritysten menestyksen salaisuus siten ylivoimainen ohjelmointitaito? Useimmat avainhenkilöt ovat olleet ohjelmoijia. Toisaalta he ovat keskittyneet yrityksen kehittämiseen kaiken muun kustannuksella. Yliopiston näkökulmasta näitä henkilöitä voidaan pitää pudokkaina, mutta J. Kemppisen sanoin: <sup>283</sup>

Bill Gatesista ja Steven Jobsista ei tullut professoreita Berkeleyhin. Mitä putoamista sellainen on? Molemmat omaksuivat suhteessa yleisöön 1800-luvun lopun toimintaperiaatteet eli kurkunleikkauskapitalismin ja monopolien rakentamisen.

---

<sup>283</sup> Kemppinen, J., Sotamiehellä on tikapuuhermosto, <http://kemppinen.blogspot.fi/>, 1.1.2015.

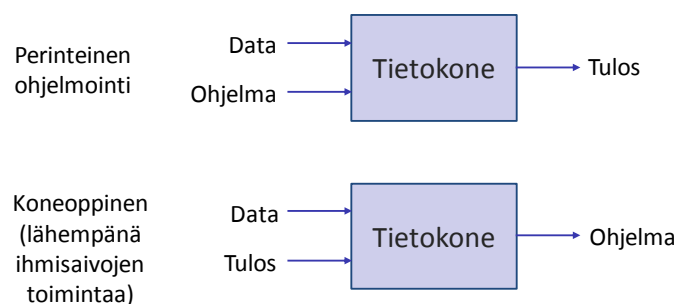
Tämä on provosoivasti kirjoitettu, mutta kun Gates, Jobs ja Zuckerberg ovat usein käytettyjä esimerkkejä siitä, ettei yliopisto-opintoja tarvitse suorittaa loppuun tullakseen rikkaaksi, niin samalla on hyvä miettiä, mitkä ominaisuudet tekivät heistä lopulta superrikkaita. Tuskin ylivertainen ohjelmointitaito, vaan pikemminkin kokonaisnäkemys siitä mihin maailma oli menossa sekä kyky hyödyntää kohdalle osuneet tilaisuudet ja kova työ.

Douglas Comerin mukaan sovellusten ohjelmoija, joka ymmärtää tietoliikenneverkon toiminnan, pystyy kirjoittamaan sovelluksia, jotka ovat luotettavampia ja tehokkaampia kuin ilman näkemystä tehdyt sovellukset.<sup>284</sup> Järjestelmän kehittäjien liiallinen erikoistuminen ja toiminnan kapea-alaisuus on usein vaarallinen yhdistelmä lopputuloksen kannalta, varsinkin jos kyseessä ovat monimutkaiset kokonaisuudet, kuten tietoverkot.

### Vaihtoehtoinen malli: koneoppiminen ja hahmontunnistus

Menemättä syvemmälle monimutkaiseen aihepiiriin on syytä muistuttaa, että tässä oppimateriaalissa pääosin tarkasteltu perinteiden tietojenkäsittely pohjautuu rakenteeseen, joka on hyvin toimiva, mutta ei ainoa mahdollinen. Kuvassa 6.14 on esitetty karkealla tasolla perinteisen ohjelmoinnin ja koneoppimisen (*machine learning*) välinen ero (voidaan myös käyttää termiä tekoäly, *artificial intelligence*)<sup>285</sup>. Perinteisessä ohjelmoinnissa monimutkaisuus on koodissa, jonka ihmiset kirjoittavat. Koneoppimisessa algoritmit ovat suhteellisen yksinkertaisia ja monimutkaisuus on datassa. Koneoppimisessa on olennaista, että tietokone päättää automaattisesti datan rakenteen itse datan perusteella ilman, että ihmisen tarvitsee määrittellä rakennetta.

Toisin sanoen perinteisessä ohjelmoinnissa data ja ohjelma määrittelevät tuloksen, kun taas koneoppimisessa data ja tulos yhdessä johtavat ”ohjelmaan.” Data voi esimerkiksi olla suuri joukko kuvia, joista kone etsii automaattisesti säännönmukaisia hahmoja. Tulos voi olla henkilö, jolloin koneoppimisen avulla tunnistetaan henkilö kasvokuvien avulla.



**Kuva 6.14.** Perinteisen ohjelmoinnin ja koneoppimisen välinen periaatteellinen ero.

<sup>284</sup> Comer, D. E. (2008). *Computer Networks and Internets*. Prentice Hall Press, sivu 3.

<sup>285</sup> Erään vitsin mukaan koneoppiminen tehdään Python-koodilla kun taas tekoäly tehdään PowerPointilla.

Koneoppimisen periaate muistuttaa aivojen toimintaperiaatetta. Aivoissa tietojenkäsittelyn perusmoduuli toteuttaa yksinkertaisen hahmontunnistuksen algoritmin. Moduuli sisältää suunnilleen 100 hermosolua sekä moduulien väliset hermoyhteydet ja hermoyhteydet muihin osiin aivoja.<sup>286</sup> Ihmisen aivojen tietojenkäsittelyn vahvuudet ovat:

1. Tasojen määrässä: yhden moduulin tuloksia käytetään ”ylemmän” tason moduulin sisääntulossa. Ihmisellä moduulit ovat järjestyneet pääosin kuuteen tasoon.
2. Takaisinkytkennöissä: ylemmän abstraktiotason moduulien tuloksia käytetään alemman tason moduulien sisääntuloissa.
3. Äärimmäisessä rinnakkaisuudessa joka mahdollistaa miljoonien rinnakkaisten hahmontunnistusketjujen läpikäymisen.

Hyvin korkean tason hahmontunnistus, esimerkiksi ironian havaitseminen puheesta, voi vaatia kymmenien hahmontunnistusvaiheiden läpikäymisen—ei siis ole ihme, että edes kaikki ihmiset eivät ymmärrä ironiaa.

Miten tämä sitten liittyy informaatioteknologiaan? Ihmisen aivojen toiminnan ymmärryksen pohjalle on jo nyt rakennettu merkittävää teknologiaa, esimerkiksi puheen- ja kasvojen tunnistuksen aloilla. Samoja periaatteita voidaan soveltaa myös verkkoihin, esimerkiksi ruuhka- tai vikatilanteen nopeaan havaitsemiseen tai jopa niiden ennakointiin.<sup>287</sup> Jos noudatetaan aivojen toimintaperiaatetta, koneoppiminen voisi perustua yhteen yleiskäyttöiseen hahmontunnistuksen yksikköön, jota ei tarvitse sovittaa kunkin ongelman erityisvaatimuksiin. Optimaalista kuitenkin lienee jossain määrin sopeuttaa hahmontunnistuksen moduulia siihen, minkälaisia hahmoja on tarkoitus tunnistaa. Puhetta voidaan tunnistaa samoilla algoritmeilla kuin kuvia, mutta lopputulos ei ole yhtä tehokas kuin kuvantunnistusta varten kehitetyt algoritmit. Samaa sääntö pätenee koneoppimiseenkin.

## Mahdollisia kehityskulkuja

On hämmästyttävää miten vähäisen tiedonkäsittelykapasiteetin turvin lennettiin ensin avaruuteen maan kiertoradalle ja sitten kuuhun ja takaisin. Dramaattinen muutos tietojenkäsittelyssä on vaikuttanut lähes kaikkiin elämän osa-alueisiin, ei vain varsinaiseen informaatioteknologiaan. Miten tästä eteenpäin? Useimmat ennusteet menevät täysin pieleen, silti joillakin on ollut taito nähdä hämmästyttävän tarkkaan tulevaa kehitystä. Yksi parhaista esimerkeistä on Isaac Asimovin vuonna 1964 tekemä ennuste siitä, miltä maailma

---

<sup>286</sup> Aivojen toiminnan periaatteista helposti luettavia kirjoja ovat mm.: Kurzweil, R. (2012): *How to create a mind: The secret of human thought revealed*, Penguin, ja Hawkins, J. & Blakeslee, S. (2007): *On Intelligence*, Macmillan.

<sup>287</sup> Katso esimerkiksi <https://www.ietf.org/proceedings/92/slides/slides-92-sdnrg-0.pdf>

näyttää vuonna 2014.<sup>288</sup> Vaikka kaikki hänen ennusteensa eivät ole toteutuneet, ennusteet koskien esimerkiksi litteitä näyttöjä ja viestintää ovat oikeaan osuneita:

"Communications will become sight-sound and you will see as well as hear the person you telephone. ... The screen can be used not only to see the people you call but also for studying documents and photographs and reading passages from books."

Yhtä hyvää arviota vuodelle 2069 en voi luvata, mutta yksinkertainen laskelma voi antaa suuntaa tulevalle kehitykselle. Laskelma on sinänsä varsin karkea, mutta olennaista on suuruusluokat ja tietyn rajan ylittyminen. Miten nykyisten prosessorien tietojenkäsittelykyky ja hinta suhtautuvat ihmisaivojen kapasiteettiin ja sen hintaan? Aivoissa on noin 100 miljardia hermosolua ja hermosolu voi olla yhteydessä muihin hermosoluihin keskimäärin noin 10000 synapsin kautta. Vaikka hermosolujen "kellotaajuus" on ehkä vain luokkaa 1000 Hz, niin rinnakkaisuus tekee aivoista hyvin tehokkaan. Eräs arvio aivojen tietojenkäsittelykyvystä on päätynyt lukuun 100 miljoonaa MIPS:iä.<sup>289</sup> Tämä ei ole pieni luku, mutta ei kovin suurikaan luku verrattuna nykyisten tietokoneiden laskentatehoon.

Tämä on sangen dramaattinen tulos. Ovatko tietokoneet jo nyt älykkäämpiä kuin ihmiset? Asia on paljon monimutkaisempi, kun otetaan huomioon se, miten aivot hyödyntävät tietojenkäsittelykykyään eli millainen "ohjelmisto" aivoissa on. On asioita joita tietokoneet ei edelleenkään osaa tehdä yhtä hyvin kuin ihmiset. Vapaamuotoisen ja –sisältöisen puheen kääntäminen kieleltä toiselle on edelleen vaikea tehtävä mille tahansa koneelle tai ohjelmistolle. Toisaalta monilla alueilla, kuten kasvojen tunnistuksessa ja luonnollisen puheen tuottamisessa, edistys on ollut huimaa viimeisten vuosien aikana.

Tietojenkäsittelyn hinta on painunut niin alhaiseksi, että kaikki ne tietojenkäsittelyn tehtävät, joihin pystytään kehittämään suhteellisen tehokkaat menetelmät ja algoritmit, siirtyvät väistämättä koneiden tehtäväksi. Suhteellinen tarkoittaa tässä tehokkuutta suhteessa aivojen käyttämiin menetelmiin. Evoluutio on kehittänyt aivoille elämän kannalta keskeisiin tehtäviin hyvin tehokkaat menetelmät, mutta tästä eteenpäin automaattisten laitteiden käyttämien menetelmien ei tarvitse edes olla yhtä tehokkaita kuin ihmisaivojen menetelmien. Suurten numeroiden kertolasku ja shakki eivät kuitenkaan ole ihmisen elämän kannalta kriittisiä taitoja, sen sijaan kasvojen ja puheen tunnistus ovat. Lopulta siinä vaiheessa, kun tietokoneet pystyvät itse kehittämään omat tietojenkäsittelyn menetelmänsä, seuraukset ihmiselämälle voivat olla järisyttäviä. Tässä suhteessa Googlen AlphaZero saattaa ennakoida merkittävää käännettä koneoppimisen saralla.<sup>290</sup>

<sup>288</sup> Katso esimerkiksi [http://www.huffingtonpost.com/2014/01/02/isaac-asimov-2014\\_n\\_4530785.html](http://www.huffingtonpost.com/2014/01/02/isaac-asimov-2014_n_4530785.html)

<sup>289</sup> H. Moravec (1998), "When will computer hardware match the human brain." *Journal of evolution and technology*, MIPS = Million Instructions Per Second.

<sup>290</sup> Lukekaa: <http://continuations.com/post/168426788670/alphazero-chess-computers-will-think-differently>.

## 7. Internet eli verkkojen verkko

### Johdanto

Kaikkien tuntema Internet<sup>291</sup> on kansainvälinen tietoverkko, joka koostuu suuresta joukosta sovitulla tavalla yhteen liitettyjä verkkoja. Tunteminen jää kuitenkin useimmilla hyvin pintapuoliseksi, sillä Internetin käyttö sinänsä ei vaadi juuri minkäänlaista käsitystä siitä, miten Internet on saanut alkunsa tai miten se teknisesti toimii. Sen sijaan Informaatioteknologian alalla toimivan asiantuntijan on tunnettava IP-tekniikan (IP = **Internet Protocol**) keskeisimmät periaatteet ja ominaisuudet. Samalla tämä osuus myös syventää muutamien aikaisempien osuuksien tarkasteluja. Erityisesti on huomattava, että Internetin verkkolaitteet ovat tietokoneita, joiden ohjelmistot ovat erittäin monimutkaisia.

Tämän osan keskeisimmät aiheet ovat:

1. Miten internetistä on tullut sellainen kuin se on
2. IP-verkon rakenneosat ja protokollatasot
3. IP-paketin rakenne, sekä IPv4 että IPv6
4. TCP:n toimintaperiaate ja sen vaikutus Internetin palveluun
5. Turvallisuushaasteet Internetissä

Teoreettinen osuus käsittelee jonojärjestelmien mallinnusta.

### Internetin kehittyminen

#### Historiaa

Internetin alku ajoittuu 1950- ja 60-lukujen vaihteeseen. Idän ja lännen välinen kilpavarustelu oli saanut uutta vauhtia Sputnikin laukaisusta 1957, minkä seurauksena Yhdysvaltojen puolustusministeriö perusti ARPA:n (**Advanced Research Projects Agency**<sup>292</sup>) edistämään tutkimusta ja kuromaan kiinni oletettua Neuvostoliiton etumatkaa huipputekniikan alueella. Samaan aikaan RAND Corporationissa<sup>293</sup> työskennellyt Paul Baran esitti ajatuksen täysin hajautetusta verkon toimintaperiaatteesta, jonka avulla voitaisiin varautua myös ydinsodan aiheuttamiin äärimmäisiin tilanteisiin. Hänen ajatuksenaan oli, että jokainen

---

<sup>291</sup> Melko vakiintuneen käytännön mukaan Internet isolla I:llä on erisnimi, joka viittaa yhteen kaikkien tuntemaan maailmanlaajuiseen tietoverkkoon. Pienellä kirjoitettuna internet tarkoittaa joukkoa reitittimillä yhdistettyjä verkkoja, joissa kaikissa käytetään IP-yhteyskäytäntöä eli protokollaa. Käytäntö on sama myös englannin kielessä.

<sup>292</sup> Nimiä ARPA ja DARPA (**Defense ARPA**) on käytetty vuoron perään saman organisaation nimenä, W. Isaacson, *The Innovators*, p. 228 tai <http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA>

<sup>293</sup> RAND on vuonna 1948 perustettu tutkimuslaitos Yhdysvalloissa, joka alun perin teki tutkimusta Yhdysvaltain ilmavoimille, mutta on myöhemmin laajentanut toimintaansa muille aloille.

verkon solmu yhdistettäisiin muutamaan muuhun solmuun ja jokainen solmu pystyisi tekemään reitityspäätöksiä täysin itsenäisesti verkon kulloisenkin tilanteen mukaan. Baranin arvion mukaan kolme tai neljä vaihtoehtoista yhteyttä muihin solmuihin olisi riittävä takaamaan lähes yhtä hyvän verkon luotettavuuden kuin mihin teoriassa voitaisiin päästä.<sup>294</sup>

Ajatus itsenäisestä reitityksestä johti myös siihen ajatukseen, että välitettävä informaatio tuli pilkkoa määrämittäisiin paketteihin, jotka sisältävät reitityksessä tarvittavan tiedon. Tämä periaate poikkesi olennaisesti silloisissa verkoissa, erityisesti puhelinverkossa, käytetyistä periaatteista. Puhelinverkossa yhteys muodostettiin ensi erillisen merkinannon avulla, jolloin itse puhelun aikana ei tarvinnut enää välittää mitään puhelun reititykseen liittyvää tietoa. Pakettipohjainen verkko, jossa reititys tapahtuu periaatteessa itsenäisesti jokaiselle paketille erikseen, oli varsin radikaali.

Kehitys kohti Internetiä, sellaisena kuin sen nyt tunnemme, ei kuitenkaan ollut suoraviivaista. Baran yritti vakuuttaa AT&T:n insinöörit pakettikytkentäisyyden eduista, laihoin tuloksin. Vaikka Baran kirjoitti laajan artikkelin kehittämistään pakettiverkon toimintaperiaatteista<sup>295</sup>, hänen ajatuksensa eivät ilmeisesti vaikuttaneet merkittävästi ARPA:ssa tehtyyn pakettiverkkojen kehitystyöhön ainakaan ennen vuotta 1967.

Toinen olennainen kehitykseen vaikuttanut tekijä oli tietokoneiden ja niiden välisen tiedonsiirron kehittyminen. Vuonna 1965 yhdistettiin Yhdysvaltojen länsi- ja itärannikoilla sijaitsevat tietokoneet datayhteydellä valintaisen puhelinverkon kautta. Tätä voidaan pitää ensimmäisenä laajan alueen tietokoneverkkona. Ensimmäiset käytännön kokemukset osoittivat, että kaukanakin olevat tietokoneet voidaan yhdistää toisiinsa, mutta että piirikytkentäinen puhelinverkko oli tähän tarkoitukseen väärä teknologia. Pakettikytkentäinen verkko oli olennaisesti parempi ratkaisu. Ensimmäinen suunnitelma verkolle, jota kutsuttiin ARPANET:iksi, julkaistiin vuonna 1967. Samaan aikaan oli käynnissä, toisistaan tietämättä, kaksi muutakin samaa aihealuetta tutkinutta projektia: jo edellä mainittu RAND sekä NPL Isossa-Britanniassa.<sup>296</sup>

Varsin yleisesti on esitetty väittämää, että Internet olisi suunniteltu kestämään ydinsota. ARPANETin keskeiset kehittäjät, Bob Taylor ja Larry Roberts, ovat kuitenkin vakuuttaneet, ettei ydinsotaan varautumisella ollut mitään vaikutusta ARPANETin toimintaperiaatteiden valinnassa. Internetin arkkitehtuuri ei siten suoranaisesti perustu tarpeeseen suunnitella verkko ydinsotaa varten. Asialla on myös kolmas näkökulma (Baran siis ensimmäinen), nimittäin ARPANETin kehitystyön rahoittaminen. ARPAn johtajien tasolla ydinsotaan

---

<sup>294</sup> Tämä vastaa hyvin niitä tuloksia jotain esitettiin luvussa 4 kohdassa saatavuusanalyysi.

<sup>295</sup> P. Baran: *On Distributed Communications: IX: Security, Secrecy, and Tamper-free Considerations*. Defense Technical Information Center, 1964.

<sup>296</sup> NPL, National Physical Laboratory, Iso-Britannia.

varautumisella oli huomattava vaikutus. Jos johtajat olisivat pitäneet ARPANETin tavoitteena vain muutamien yliopistojen ja tutkimuslaitosten tietokoneiden yhdistämistä, se tuskin olisi saanut niin paljon rahoitusta kuin mitä se 1960-luvulla sai. Voidaan jopa spekuloida, että jos joku muu taho olisi tarjonnut ydinsotaan varautumisen kannalta paremman ja uskottavamman ratkaisun, rahoitus olisi suunnattu sinne. Eli vastaus onko Internet alun perin suunniteltu ydinsodan varalle, on kyllä tai ei riippuen näkökulmasta.

Joka tapauksessa jo Internetin alkuvaiheessa korostettiin vaatimusta, että verkon tulee olla mahdollisimman toimintakykyinen silloinkin, kun merkittävä osa verkosta tulee toimintakyvyttömäksi. Syitä saattoi olla monia, eivätkä ne välttämättä liittyneet mitenkään sotaan, vaan pitkien yhteyksien epäluotettavuuteen, hajautetusta toiminnasta mahdollisesti aiheutuviin yhteensopivuusongelmiin ja akateemisen ympäristön epähierarkkisuuuteen.

Käytännössä tasavertaisiin solmuihin perustuva verkko ilman keskitettyä hallintoa täytti parhaiten hajautetun dataliikenteen vaatimukset. Tällaisessa verkossa jokainen solmu pystyy itsenäisesti välittämään ja vastaanottamaan viestejä. Tieto liikkuu verkossa pieninä paketteina,<sup>297</sup> jotka etsivät tiensä vastaanottajalle ennalta määräämätöntä reittiä pitkin. Tämä vastasi siis hyvin Paul Baranin esittämiä ajatuksia. Toisaalta on varsin vaikea jälkikäteen sanoa, kuka ensimmäisenä esitti jonkun myöhemmin tärkeäksi havaitun idean. Pakettikytkennän osalta tätä kunniaa on sovitettu myös Leonard Kleinrockille, eikä vähiten hänen itsensä toimesta. Vaikka Kleinrock on ollut ansiokas sekä pakettikytkentäisten verkkojen teoreettisissa analyysissä että ARPANETin teknisessä kehittämisessä, ei häntä ilmeisesti voida pitää pakettikytkennän periaatteen varsinaisena keksijänä.<sup>298</sup>

Ajatus hajautetusta pakettipohjaisesta tietoverkosta levisi nopeasti. Vuoden 1969 loppuun mennessä verkkoon liitettiin ensimmäiset neljä solmukonetta. Koneet olivat sen aikaisia supertietokoneita ja niiden ylläpitäjät kehittivät yhdessä tarvittavat protokollat ja ohjelmistot. Tässä on yksi olennainen ero perinteisiin televerkkoihin, joita (ehkä aivan alkuvaihetta lukuun ottamatta) ei ole kehitetty niiden pääasiallisten käyttäjien toimesta vaan suurten valtiollisten tai kaupallisten toimijoiden tutkimus- ja tuotekehitysosastoilla.

Alkuvaiheessa ARPANETissa käytettiin NCP-protokollaa (**Network Control Protocol**), jolla oli kuitenkin monia rajoituksia, mm. verkossa käytettyjen osoitteiden suhteen. NCP ei kyennyt selviytymään pakettien hukkumisesta, sillä ARPANET oletettiin niin luotettavaksi, ettei pakettien hukkumisia tarvinnut ottaa huomioon. Koska tavoitteena oli liittää yhteen

---

<sup>297</sup> Termi ”packet” eli paketti tuli NPL:n puolelta.

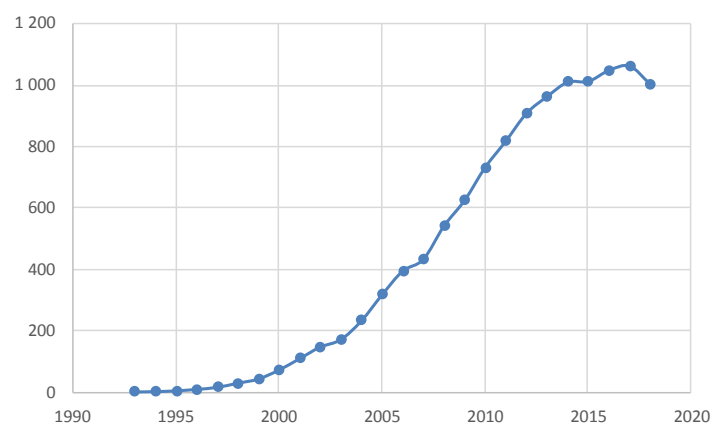
<sup>298</sup> Isaacsonin *The Innovators* –kirjan lukuun 7, *The Internet*. Pakettikytkennällä, kuten monella muullakaan teknologialla, ei ole yhtä keksijää, myös A. Schaffer, *Tech’s Enduring Great-Man Myth*, MIT Technology Review, August 4, 2015, <http://www.technologyreview.com/review/539861/techs-enduring-great-man-myth/>



monenlaisia, myös vähemmän luotettavia verkkoja, tarvittiin uusi protokolla. Suunnittelun pohjaksi otettiin seuraavat periaatteet:

- Verkkoja piti voida yhdistää toisiinsa ilman muutoksia itse verkkotekniikkaan.
- Liikennöinti tapahtuisi ”best effort” periaatteen mukaan, eikä verkko itse pyrkisi varmistamaan, että paketti saada kuljetettua verkon läpi.
- Verkon tulisi toimia myös tilanteissa, joissa paketteja hukkuu.
- Verkkojen yhdistämiseen käytettäisiin ”mustia laatikoita” (black boxes), jotka eivät pyrkineet tietämään mitään läpikulkevista informaatiosta. Näin ”laatikoista” saatettiin tehdä mahdollisimman yksinkertaisia hyödyntäen kaupallisesti saatavilla olevia tietokoneita. Mustia laatikoita alettiin kutsua myöhemmin reitittimiksi (router) ja yhdyskäytäväksi (gateway).
- Mitään maailmanlaajuista verkon valvontaa ei toteutettaisi.
- Osoitteiden tulisi kattaa koko maailmanlaajuinen verkko.
- Päätelaitteet hoitaisivat yhteyksien hallinnan (flow control).

Vuonna 1977 Internetiin oli liitettyä noin 100 tietokonetta, joista vain muutama oli Yhdysvaltain mantereen ulkopuolella satelliittilinkin takana. Armeijan verkko erkaantui ARPANETista vuonna 1983 omaksi MILNET-verkokseen. Tämä helpotti verkon laajentumista Yhdysvaltain ulkopuolelle. 1980- ja 90-lukujen vaihteessa ARPANET muuttui Internetiksi, minkä jälkeen verkon kasvu nopeutui entisestään (kuva 7.1). Internetin luonne on myös muuttunut olennaisesti siinä mielessä, että alkuvaiheen tarve hyödyntää keskitettyjä, kalliita tietokoneresursseja on vaihtunut tarpeeksi toteuttaa täysin yleiskäyttöinen ja hajautettu tiedonsiirtojärjestelmä.



**Kuva 7.1.** Internetiin liitettyjen (isäntä)koneiden (host) lukumäärän kehitys (miljoonaa).<sup>299</sup>

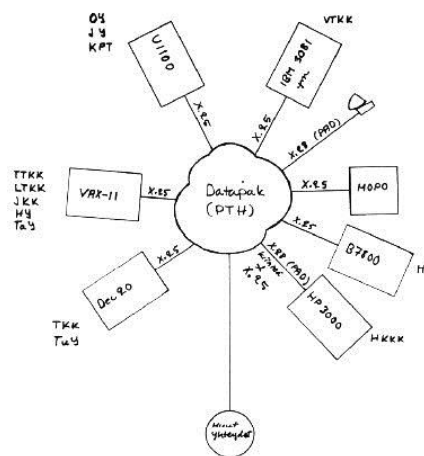
<sup>299</sup> Data: <https://www.statista.com/statistics/264473/number-of-internet-hosts-in-the-domain-name-system/>



## Suomi Internetiin

Päätös Suomen liittymisestä Internetiin tehtiin 2.12.1986 Funetin johtoryhmän kokouksessa.<sup>300</sup> Käytännössä liittyminen tapahtui kuitenkin vasta vuoden 1988 puolella. Funet tulee sanoista **Finnish University and Research Network** eli se on Suomen korkeakoulujen ja tutkimuksen tietoverkko. Kuvassa 7.2 on esitetty Funetin ensimmäisen vaiheen verkon suunnitelma, jossa käytettiin silloisen Posti- ja telehallituksen Datapak-palvelua. Datapak-palvelu perustui X.25-protokollaan, joka mahdollisti yhteyksien muodostamisen tietokoneiden välille sanomien lähettämistä varten. Liikennemaksut olivat niin kalliita (sisältäen liittymismaksun, kiinteän kuukausimaksun ja siirrettyyn tietomäärään perustuvan maksun), että tutkimuslaitosten ja yliopistojen oli pakko hakea edullisempia tiedonsiirtotapoja.

USA:n hallinnoimaan Internetiin liittyminen ei 1980-luvulla ollut suoraviivainen asia, sillä USA:ssa oli epäilyksiä Suomen suhteesta Neuvostoliittoon. Toisaalta Suomi muiden Pohjoismaiden mukana suhtautui myönteisemmin Internetiin kuin useat Länsi-Euroopan maat, jotka ehkä halusivat suojella kansallisia tietoliikennealan monopolejaan. Liittymislupa joka tapauksessa saatiin syksyllä 1988. Ensimmäisessä vaiheessa yhteys pohjoismaista Yhdysvaltoihin toimi 56 kbit/s satelliittilinkillä. Muun muassa Funet on päivittänyt ulkomaanyhteytensä 100 Gbit/s nopeuteen.



**Kuva 7.2.** Kuva Funetin projektisuunnitelmasta vuodelta 1984.<sup>301</sup>

<sup>300</sup> Tämä tieto sekä pääosa Suomen osuudesta perustuu kirjaan: P. Ahonen, Suomen tie internetiin, CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy, Art Print Oy, Helsinki, 2008.

<sup>301</sup> Kuva ja historiatiedot: <http://www.skrolli.fi/internetit-ennen-interneti%C3%A4-modeemipurkkien-nousu-ja-tuho>. Sama kuva on myös P. Ahosen kirjassa Funet Suomen tie internetiin (s. 37). Arpanetin runkoverkon nopeus oli vuonna 1986 56 kbit/s, päivitys nopeuteen 1,544 Mbit/s tehtiin vuonna 1988, <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>

## Standardisointi

Internetiä kehittää suuri joukko erilaisia kansainvälisiä yhteisöjä. Niistä merkittävin on tietotekniikan ammattilaisista koostuva IETF (*Internet Engineering Task Force*) joka pyrkii tunnistamaan Internetin ongelmia ja tekemään ehdotuksia niiden korjaamiseksi.<sup>302</sup> Sen paremmin IETF kuin muukaan vastaavat yhteisöt eivät ole virallisia standardointiorganisaatioita. Useimmat valmistajat pyrkivät silti noudattamaan niiden suosituksia. IETF on normeja tekeväksi organisaatioksi varsin poikkeuksellinen. Sen keskeisen toimintaperiaatteen on muotoillut David Clark seuraavasti ”*We believe in rough consensus and running code*” eli ”uskomme karkeaan yhteisymmärrykseen ja toimivaan koodiin” sekä ”*We reject kings, presidents and voting*” eli ”hylkäämme kuninkaat, presidentit ja äänestykset.” Päätöksiä on tietysti joskus tehtävä, mutta varsinaisia muodollisia äänestyksiä ei järjestetä. Sen sijaan yksimielisyyttä voidaan testata läsnä olevien ihmisten hyrinän (*humming*) voimakkuudella. Tällainen periaate on täysin poikkeuksellinen standardointiorganisaatiolle.



## Internetin toimintaperiaatteet

Oliko kaikki se kehitys, joka on johtanut nykyiseen Internetiin, väistämätöntä? Tuskin. Datapalvelut olisivat saattaneet pysyä paljon tiukemmin suurten teleyritysten hallinnassa. Jos Paul Baran olisi pystynyt vakuuttamaan AT&T:n insinöörit pakettikytkentäisyyden eduista ja ARPA olisi ryhtynyt rahoittamaan AT&T:n kehitystyötä, niin verkon arkkitehtuurista ja palvelumallista olisi varmasti tullut keskitetympi ja tiukemmin kontrolloitu kuin nykyisessä Internetissä. Entä voidaanko Internetin nykyisestä dominoivasta asemasta päätellä, että Internet on erityisen erinomainen tekninen ratkaisu? Ei. Jos Internet voitaisiin nyt suunnitella alusta alkaen ilman, että otettaisiin huomioon jo toiminnassa olevia verkkoja ja laitteita, niin siihen tehtäisiin merkittäviä muutoksia esimerkiksi verkko-osoitteiden osalta.<sup>303</sup> Toisaalta on vaikea sanoa mihin tarkkaan ottaen päädyttäisiin, sillä toiveet ja näkemykset ovat ristiriitaisia. Mutta nyt meillä on Internet sellaisena kuin se on ja jokaisen informaatioteknologian alalla toimivan on tunnettava sen keskeiset toimintaperiaatteet.

Miten liikenne tai pikemminkin data ylipäätään voi kulkea onnistuneesti niin monimutkaisen verkon kuin Internet läpi? Päätelaitteita on miljardeja, palvelimia (*server*) kymmeniä miljoonia, verkon solmupisteitä miljoonia ja verkkoa operoivia tahoja tuhansia. Periaat-

<sup>302</sup> IETF:n toimintaperiaatteista, katso: P. Hoffman (ed.) *The Tao of IETF: A Novice's Guide to the Internet Engineering Task Force*, <http://www.ietf.org/tao.html>.

<sup>303</sup> Esimerkiksi: Day, J. (2007). *Patterns in network architecture: a return to fundamentals*. Pearson Education.

teessa ongelma on samankaltainen kuin lähetettäessä (fyysistä) postia silloin, kun vain henkilön nimi on tiedossa. Ensin henkilölle täytyy löytää osoite, jonka avulla paketti voidaan kuljettaa haluttuun kohteeseen. Osoitetieto (esimerkiksi Konemiehentie 2, 02150 Espoo, Suomi) on sarja kirjaimia ja numeroita, joiden perusteella paketti voidaan kuljettaa perille, mutta se ei varsinaisesti ole paikkatieto. Sen sijaan koordinaattitieto, esimerkiksi 60°11'13"N 24°49'16"E, määrittelee fyysisen paikan tarkasti mutta ei sisällä reititystietoa paketin kuljettamista varten.

Tietoverkoissa osoite viittaa yleensä laitteeseen, samaan tapaan kuin osoite Konemiehentie 2 viittaa rakennukseen. Toinen mahdollisuus on viitata liitântään, eli rakennuksen tapauksessa tiettyyn ulko-oveen. Vaikka ero tuntuu pieneltä, sillä on merkitystä reitityksen toiminnan kannalta varsinkin, jos osoitteesta ei voi päätellä mitkä ovet vievät samaan fyysiseen paikkaan, eli mitkä liitännät johtavat samaan aliverkkoon (**subnetwork** tai **subnet**). Aliverkon voi ajatella vastaavan rakennuksen sisäisiä osoitteita, esimerkiksi ”Konemiehentie 2, B251” johtaa yhteen Aalto-yliopiston työhuoneeseen. IP-verkossa aliverkko tarkoittaa verkon osaa, joka on loogisesti erotettu OSI-mallin kolmannella eli verkkokerroksella (OSI-malli selostetaan tarkemmin hieman myöhemmin tässä luvussa). Koneet, jotka kuuluvat samaan aliverkkoon, käyttävät osoitteita siten, että niissä on täsmälleen samat merkittävimmät bitit määrättyyn rajaan saakka. Kyseinen raja jakaa IP-osoitteen aliverkon osoitteeseen ja aliverkon sisällä tietokoneen yksilöivään osaan.

Toinen ilmiö, joka joskus voi aiheuttaa lisävaivaa on se, että osoitetieto ei yleensä sisällä luotettavaa tietoa kahden osoitteen välisestä etäisyydestä. Internetissä käytettävä paketin osoite, historiallisesta taustasta johtuen, ei kerro sellaisenaan mitään tietokoneen fyysisestä sijainnista eikä edes kovin paljon loogisesta sijainnista verkossa. Esimerkiksi IP-osoite 130.233.199.243 on käytössä Aalto-yliopistossa Espoossa, mutta osoite 131.233.199.243 on käytössä Philadelphian kaupungin lähistöllä Yhdysvalloissa.<sup>304</sup>

Tässä vaiheessa voimme olettaa, että oikean talon tai oikean tietokoneen löytäminen on riittävää, jotta paketti löytää perille. Käytännössä tarvitaan siis hakemisto, joka yhdistää nimen ja osoitteen. Puhelinten tapauksessa tällainen oli vuosittain päivitetty puhelinluettelo, josta löytyi tieto henkilön puhelinnumerosta ja yleensä myös osoitteesta. Internetin tapauksessa ei tietenkään ole mielekästä käyttää puhelinluettelon tapaisia opuksia, vaan osoitteen haunkin täytyy tapahtua Internetin välityksellä mahdollisimman automaattisesti.<sup>305</sup> Tällaista kyselyä varten tarvitaan joku osoite, josta sitten muita osoitteita voidaan hakea. Tätä varten IETF on kehittänyt protokollan nimeltä DHCP (**Dynamic Host**

---

<sup>304</sup> IP-osoitteita koskevat tiedot: [http://www.ip-adress.com/ip\\_tracer/](http://www.ip-adress.com/ip_tracer/)

<sup>305</sup> Miljardin IP-osoitteen tiedot vaatisivat noin 4 miljoonaa sivua tyypillisessä puhelinluettelon formaatissa. Luetteloista voisi muodostaa noin sata metriä korkean pinon. Lisäksi IP-osoitteet muuttuvat jatkuvasti.

Configuration Protocol), joka mahdollistaa tietokoneen siirtymiseen uuteen verkkoon ilman, että kenenkään tarvitsee tehdä manuaalisia muutoksia mihinkään tietokantaan.<sup>306</sup>

Verkon ylläpitäjällä on käytössä tietty IP-osoiteavaruus, josta verkko voi jakaa IP-osoitteita verkkoon liittyville laitteille. Päätelaitte pyytää käynnistyksen yhteydessä DHCP-palvelimelta oman IP-osoitteen, joka on yleensä voimassa ennalta määrätyn ajan. Päätelaitte pyytää tarvittaessa osoitteen voimassaoloajan jatkamista. Yleensä jatkaminen tapahtuu automaattisesti ilman mitään häiriöitä verkkoyhteydessä. Jos palvelin ei jostain syystä jatka voimassaoloaikaa, niin päätelaitte ei voi enää käyttää aikaisemmin annettua IP-osoitetta.

Mutta miten laite osaa uudessa verkossa kysyä mitään DHCP-palvelimelta, jos se ei tiedä sen IP-osoitetta? Päätelaitteen lähettämä paketti voi löytää perille, vain jos sillä on tiedossa vastaanottajan IP-osoite eikä IP-osoitteeksi kelpaa ”DHCP.” Tähän tarpeeseen tarvitaan ennalta tarkasti määritelty menettely. Koska päätelaitte ei tässä vaiheessa tiedä vastaanottajan IP-osoitetta, sen on käytettävä yleislähetystä (**broadcast**). Kun DHCP-palvelin vastaanottaa yleislähetysten, jossa on DHCP:n osoitetta koskeva tiedustelu, se esittää tarjouksen, joka sisältää IP-osoitteen ja sen voimassaoloajan ja joitakin muita tietoja. IP-paketti sisältää automaattisesti lähettäjän, eli tässä tapauksessa DHCP-palvelimen, IP-osoitteen. Laite saattaa saada eri palvelimilta useita eri tarjouksia, joista se sitten valitsee yhden ja ilmoittaa tästä kyseiselle palvelimelle.

Periaatteessa DHCP voi jakaa mitä tahansa asetustietoja, mutta keskeisimmät näistä ovat oletusyhdyskäytävän (**default gateway**) ja nimipalvelimen (**Domain Name System, DNS**) IP-osoitteet. Tämän jälkeen päätelaitteella on tieto siitä, miten aliverkon ulkopuolelle päästään ja mistä voidaan kysyä muita IP-osoitteita.

Nimipalvelu on keskeinen osa Internetin toimintaa. Ilman toimivia nimipalvelimia verkko ajautuisi kaaokseen. IP-verkko kyllä toimisi, koska se perustuu IP-osoitteisiin, mutta sen sijaan se Internetin palvelu, jota pääosin käytämme eli WWW (**World Wide Web**) olisi erittäin hankalakäyttöinen.<sup>307</sup> Tämä esimerkki osoittaa sen, miten tärkeää on erottaa käsitteellisesti toisistaan:<sup>308</sup>

- Internet, joka on maailmanlaajuinen avoin tietoverkko, joka ytimeltään perustuu TCP/IP-yhteyskäytäntöjen käyttöön, ja
- WWW, joka on palvelujärjestelmä, jonka avulla julkaistaan verkkosivuja ja hyödynnetään niitä.

---

<sup>306</sup> RFC 1541, <https://tools.ietf.org/html/rfc1541>

<sup>307</sup> Sanastokeskuksen mukaan voidaan käyttää joko muotoa www tai WWW, mutta ei mielellään termiä web.

<http://www.tsk.fi/tepa/fi/haku/www>

<sup>308</sup> Nämä ovat sanastokeskuksen mukaiset määritelmät.

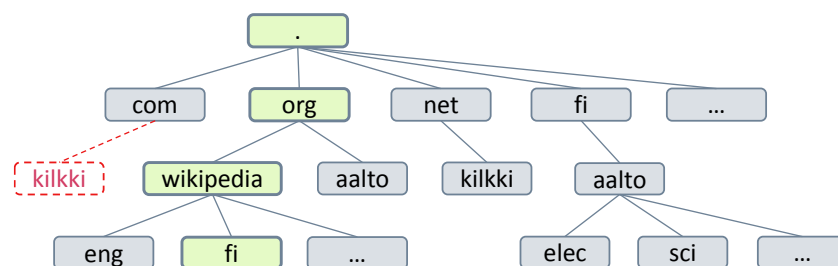
Internet on siis verkko, joka toimii tiettyjen protokollien mukaisesti, kun taas WWW on Internetin päälle rakennettu palvelu, joka toimii OSI-mallin ylimmällä eli sovelluskerroksella. Ilman DNS-palvelimia verkkoon liitetyt laitteet on edelleen mahdollista löytää, mutta selaimesi löytää vain ne verkkosivut, joita vastaavat IP-osoitteet sillä on tiedossa.

Nimipalvelun toiminta perustuu verkkotunnuksiin (*domain name*) ja URL (*Uniform Resource Locator*) -osoitteisiin. Esimerkkinä URL:sta on <https://www.aalto.fi/fi/opiskelu-aallossa>, jonka osat ovat:

- https (*hypertext transfer protocol secure*) määrittelee yhteyskäytännön,
- www.aalto.fi määrittelee palvelimen, josta resurssi on löydettävissä ja
- loppuosuus /fi/opiskelu-aallossa/ määrittelee verkkosivun, jonka perusteella palvelin osaa palauttaa halutun sisällön käyttäjälle.

Erisnimien (suurten yritysten nimet näyttävät olevan erityisessä suojeluksessa) käytöllä verkko-osoitteena on jonkin verran rajoituksia, silti samankaltaisilla mutta hieman eroavilla verkkotunnuksilla voi päätyä täysin eri sivustoille.<sup>309</sup> Sitten on tietysti lukematon määrä muodollisesti oikeita sivuston nimiä, jotka eivät johda mihinkään.

Vaikka *.fi* on ylimmällä hierarkiatasolla Suomen maatunnus, se ei tarkoita sitä, että osoitteen takana oleva laite tai palvelin olisi Suomessa, vaan ainoastaan että kyseinen tunnus on myönnetty Suomessa.<sup>310</sup> (*fi*-juuren alaisia nimiä jakaa keskitetysti Viestintävirasto). Muilla tasoilla *fi* ei välttämättä liity mitenkään Suomeen (tosin Wikipedian tapauksessa *fi* viittaa suomenkieliseen Wikipediaan). Vaikka joku sivusto olisikin tarkoitettu WWW-käyttöön, sivuston URL:ssa ei tarvitse olla missään kohtaa ”www”. Toki www-alku helpottaa asiakkaita havaitsemaan mikä on yrityksen verkko-osoite.<sup>311</sup> Verkkotunnukset muodostavat siten hierarkkisen rakenteen, josta kuvassa 7.3 on esitetty yksi esimerkki.



**Kuva 7.3.** Verkkotunnusten hierarkkinen rakenne (kilkki.com –verkkotunnus on periaatteessa mahdollinen, mutta sitä ei verkosta löydy).

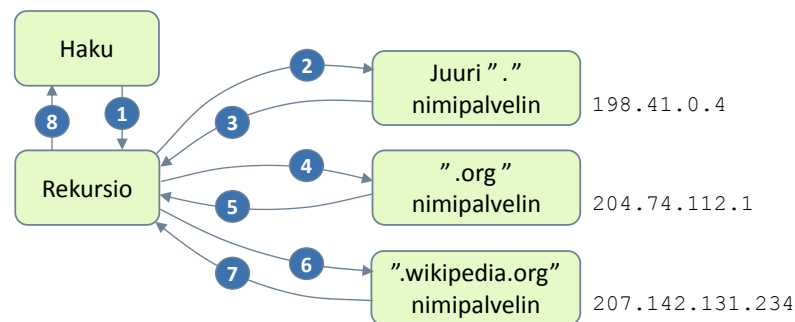
<sup>309</sup> Kokeile esimerkiksi osoitteita aalto.fi, aalto.org ja aalto.net.

<sup>310</sup> fi-juuren alaisia nimiä jakaa keskitetysti Viestintävirasto <https://www.viestintavirasto.fi/index.html>.

<sup>311</sup> Kotisivuni osoite on kilkki.net ilman www-alkua. Selaimet esittävät sen silti usein muodossa www.kilkki.net.

Kuvassa 7.4 on esitetty osoitehaku verkkotunnukselle *fi.wikipedia.org*. Haku sisältää tässä tapauksessa kahdeksan vaihetta:

1. Palvelin tekee hakupyynnön rekursiiviselle osalle kohteelle *fi.wikipedia.org*.
2. Rekursiivinen<sup>312</sup> osa kysyy juuripalvelimelta *fi.wikipedia.org*:n osoitetta. Juuripalvelimen osoitteet vaihtuvat yleensä hyvin harvoin, joten voidaan olettaa, että nimipalvelinohjelmisto tietää ainakin yhden juuripalvelimen osoitteen, tässä tapauksessa osoitteen 198.41.0.4.
3. Tehtyyn hakuun juuripalvelin vastaa lähettämällä takaisin tiedon, että *.org* verkkotunnusten nimipalvelin löytyy IP-osoitteesta 204.74.112.1.
4. Seuraavaksi kysytään *.org* nimipalvelimelta mistä IP-osoitteesta löytyvät osoitteet *fi.wikipedia.org* –verkkotunnuksille.
5. Vastaus: palvelin osoitteessa 207.142.131.234 tietää Wikipedia.org osoitteet.
6. Nyt rekursiivinen osa voi kysyä viimeiseksi annetusta IP-osoitteesta, mikä on IP-osoite verkkotunnukselle *fi.wikipedia.org*.
7. Wikipedian verkkopalvelin lähettää kysytyn IP-osoitteen rekursiiviselle osalle.
8. Rekursiivinen algoritmi havaitsee, että sillä on nyt vastaus alun perin tehtyyn kyselyyn ja lähettää vastauksen eteenpäin.



**Kuva 7.4.** Nimipalvelinjärjestelmän osoitehaun rekursiivinen periaate.

Kysely jatkuu, kunnes haettu IP-osoite löytyy tai nimipalvelin toteaa, ettei haettua kohdetta vastaa mikään IP-osoite (kuten käy esimerkiksi *kilkki.com*-hauille). Tämän jälkeen, kun haluttu verkko-osoite on löydetty onnistuneesti, käyttäjä ja hänen laitteensa ja selaimensa voivat aloittaa liikennöinnin halutulle verkkosivustolle, eli hakea jotain tietoa vaikkapa Wikipedian suomenkielisiltä sivuilta.

<sup>312</sup> Rekursiivinen tarkoittaa ominaisuutta, jossa sama rakenne voidaan toistaa periaatteessa rajattoman monta kertaa.

### *IP-paketin rakenne*

Ennen kuin paketteja voidaan siirtää, on sovittava vielä lukuisista muista asioista ja käytetyistä menetelmistä. Ensinnäkin on määriteltävä tarkasti, mikä on IP-paketin muoto, koska mitään tulkinnanvaraisuutta ei saa jäädä. Tässä on merkittävä ero fyysiseen postipalveluun, jossa kokeneet postinjakelijat osasivat (ainakin aikaisemmin) toimittaa perille kirjeitä ja paketteja varsin puutteellisin tiedon; pelkkä nimi ja paikkakunta saattoivat hyvin riittää. Jokaisella koneella Internet-verkossa on siis oma osoite. Samalla koneella voi olla myös useampia osoitteita. Kahdella eri koneella ei voi kuitenkaan olla samaa osoitetta.<sup>313</sup>

Vastaanottajan osoitteen ja lähetettävän data lisäksi IP-paketissa on myös muuta informaatiota. Periaatteessa IP-paketin koko voi olla enimmillään  $2^{16}$  tavua eli  $65536 \cdot 8$  bittiä. Useimmat verkot eivät kuitenkaan pysty käsittelemään näin suuria yksittäisiä paketteja vaan tyypillisesti suurin mahdollinen koko on 1500 tavua. Tämän vuoksi data yleensä pilkotaan jo lähtiessä sopivan kokoihin osiin.

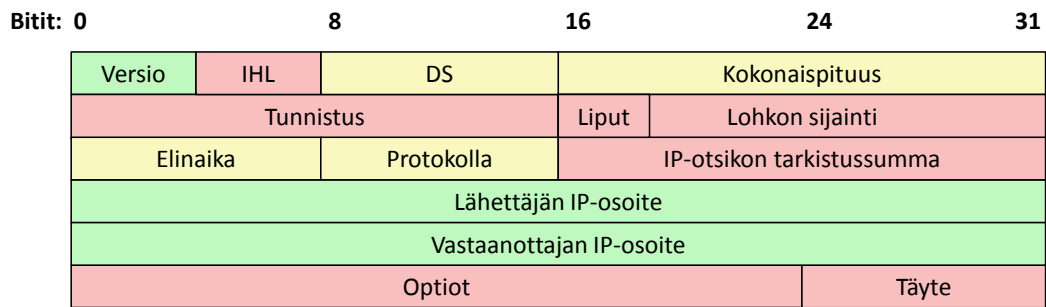
Paketin dataosuutta edeltävää tiedonsiirtoa ohjaavaa osaa kutsutaan otsikoksi (**header**). Otsikon rakenne riippuu siitä, onko kyseessä IPv4- vai IPv6-paketti. Edelleen laajimmin käytössä oleva IPv4 on määritelty jo vuonna 1979 ja sen ollut käytössä kohta 40 vuotta. Voisi olettaa, että seuraava versio olisi IPv5, mutta näin ei käytännössä ole, sillä IPv5 oli kokeellinen protokolla. 1990-luvulla huomattiin, että IPv4:n osoiteavaruus ( $2^{32} = 4\,294\,967\,296$ ) ei riitä loputtomiin, kun WWW:n myötä käyttäjien ja verkkoon liitettyjen tietokoneiden määrät lähtivät räjähdysmäiseen kasvuun. Ongelmaa pahensi se, että osoiteavaruus oli jaettu sängen epätasaisesti.<sup>314</sup> Niinpä IETF suunnitteli uuden version, IPv6:n, jolla osoiteongelma ja samalla myös joitakin muita ongelmia ratkaistiin. Vaikka IPv6 on ollut käytössä jo pitkään, siirtymävaihe on kestänyt paljon pidempään kuin alun perin arvioitiin. Varovaisen arvion mukaan IPv6-liikenteen osuus ylittää IPv4-liikenteen ensi vuosikymmenen alkupuolella. Niinpä IP-paketin esittely on edelleen syytä aloittaa v4-muodosta.

IPv4:n otsikon vähimmäispituus on  $5 \cdot 32$  bittiä (kuva 7.5). Useimmissa tietokoneissa otsikoiden käsittely nopeutuu, mikäli otsakkeen pituus on 32 bitin kerrannainen. Sen vuoksi otsikon loppuun lisätään tarvittaessa täytettä. IHL (**Internet Header Length**) kertoo IP-otsikon pituuden, jonka avulla täytebittien ja varsinaisen datan raja tunnustetaan. IPv4-osoite käsitellään 32-bittisenä lukuna. Osoitteen alkuosa on verkko-osoite. Loppuosan osoitteista vastaava organisaatio voi jakaa paikalliseen verkko-osoitteeseen ja laiteosoitteeseen. Jotta osoitteita olisi helpompi käsitellä, ne ilmaistaan tavuja vastaavina kymmenjärjestelmän lukuina (0-255) pisteillä erotettuina, esimerkiksi 207.142.131.234.

<sup>313</sup> Joskus käytetään tarkoituksellisesti samaa osoitetta eri paikoissa verkkoa, esimerkiksi nimipalvelimien tapauksessa. Käyttäjän kannalta on tällöin sama mikä nimipalvelin vastaa.

<sup>314</sup> Yksittäinen amerikkalainen yliopisto saattaa hallinnoida suurempaa osoitemäärää kuin Kiina.





**Kuva 7.5.** IPv4-paketin otsikon rakenne. Punaisella merkityt alueet poistuivat IPv6:ssa, keltaisella merkityt ovat IPv4:ssä hieman eri muodossa tai eri paikassa.

Alun perin IP-osoitteet jaettiin kolmeen eri luokkaan (A, B, C) ajatuksena, että on muutamia todella suuria verkkoja, jonkin verran keskikokoisia verkkoja ja paljon pieniä verkkoja. Jako on sikäli tehoton, että on paljon organisaatioita, joissa on yli 250 konetta, mutta selvästi vähemmän kuin 65000 konetta. Osoitteita jäi siis paljon käyttämättä. Ratkaisuksi kehitettiin luokaton reititys, jossa verkkokohtaisesti voidaan valita verkko-osan pituus. Vaikka uusia IPv4-osoitteita ei ole enää jaettavissa, jo jaettuja osoitteita voi ostaa vapailta markkinoilta.

DS-tavua (*Differentiated Services*, eriytetty palvelu) käytetään paketin luokitteluun ja priorisointiin. Tämän tavun merkitys ja tulkinta riippuvat käytettävästä verkosta. DS-kentän avulla lähettäjä voi esimerkiksi toivoa, että paketti siirretään erityisen pienellä viiveellä. DS-tavua on käytetty lähinnä puheyhteyksien viiveen minimoiseen ja erottelemaan joitain muita kriittisiä sovelluksia tavallisesta dataliikenteestä.<sup>315</sup>

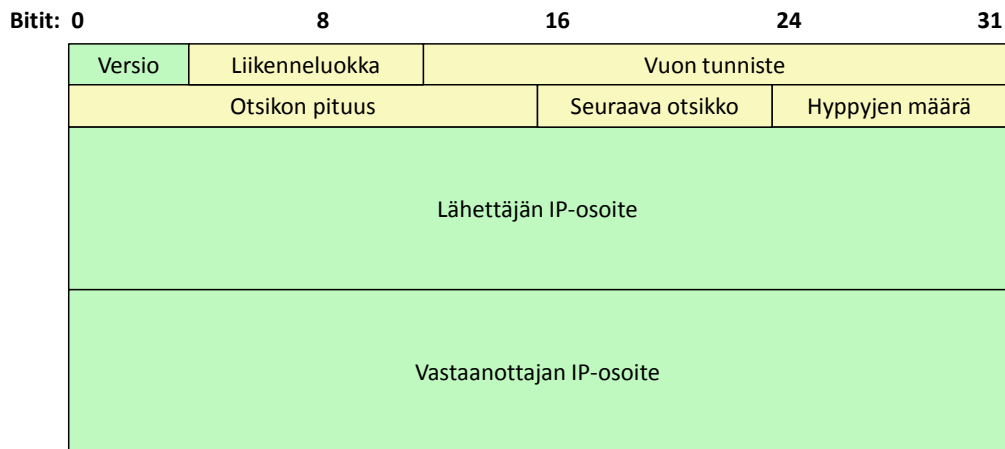
Koska erilaisissa verkoissa pakettien sallittu koko vaihtelee, voidaan paketteja joutua pilkkomaan pienemmiksi palasiksi. Pilkkominen on monella tavoin ongelmallista: jos yksikin osa paketista hukkuu, käytännössä koko IP-paketti täytyy lähettää uudelleen. Pilkkomista (*fragmentation*) pyritään käytännössä välttämään (IPv6:ssa ei edes ole tätä mahdollisuutta). Tunnistus-, ohjaus- ja lohkon sijaintitietoja käytetään apuna, kun palasista koostaan alkuperäistä viestiä. Elinaika ilmaisee ajan, jonka paketti voi olla verkossa; kyseessä ei kuitenkaan ole aika, vaan jokainen reititin vähentää lukua yhdellä. Kun luku tulee nolllaksi, paketti hävitetään, joten paketti ei voi jäädä verkkoon ikuisesti. Osoitteiden lisäksi otsikossa on erilaisia optioita ja täytettä. Käytännössä optioiden käyttö on ollut hyvin harvinaista.

IPv4:n osoitteiden riittävydestä ja muista IPv4:n rajoituksista on väitelty 20 vuotta. Tärkein IPv6:n etu on osoiteavaruuden huomattava kasvu: IPv4:n 32 bitin sijasta IPv6:ssa on käytettävissä 128 bittiä, mikä periaatteessa tarkoittaa  $2^{128} = 3,4 \cdot 10^{38}$  osoitetta. Erityisesti IoT-laitteet (eli kaikenlaiset, usein pienet, Internetiin liitettävät laitteet) voivat jatkossa tarvita niin paljon osoitteita, ettei IPv4 siihen veny. Otsikon rakenteessa on myös

<sup>315</sup> K. Kilkki, *Differentiated Services for the Internet*, MacMillan, 1999, saatavilla osoitteessa <http://kilkki.net/book>



muita muutoksia, joilla on pyritty tehostamaan reitittimien toimintaa ja ottamaan huomioon muuttuneita vaatimuksia. Eräs IPv6:n merkittävistä eduista on, että suuri osoiteavaruus helpottaa automaattisen konfiguraation (**auto-configuration**) toteuttamista.



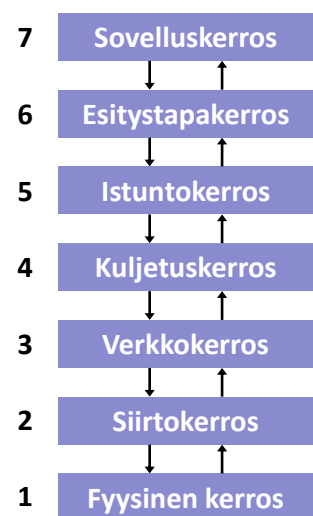
**Kuva 7.6.** IPv6-paketin otsikko. Keltaisella merkityt kentät ovat lähes samoja kuin IPv4:ssä.

### OSI-malli

Protokolla (myös yhteyskäytäntö, **protocol**) on säännöstö, jota kahden tai useamman laitteen on noudatettava, jotta niiden välinen yhteys olisi mahdollinen. Monet menetelmät, vaikkapa reititysalgoritmit, toteutetaan erilaisten protokollien avulla. Tietoliikennetekniikassa käytetään tavallisesti yhtä aikaa useita eri protokollia, jotka huolehtivat kukin omasta tarkoin rajatusta tehtävästään tiedon siirrossa. Yhdessä nämä protokollat muodostavat protokollapinon. Kansainvälinen standardointijärjestö ISO<sup>316</sup> on standardoinut tietoliikennetekniikassa käytettävän protokollapinon eri kerrosten tehtävät. ISON protokollapinoa kutsutaan OSI-malliksi.<sup>317</sup> OSI-malli pyrkii kuvaamaan tietoliikennejärjestelmän rakennetta ja protokollia sähköiseltä tasolta käyttäjän tasolle asti.

OSI-malli jakaantuu seitsemään kerrokseen. Kerrosten tehtävät ja niiden väliset rajapinnat on tarkkaan määritelty. Kerros voi antaa ylä- ja alapuolelleen olevalle kerrokselle vain tietynlaisia pyyntöjä ja ilmoituksia, joihin se saa vasteita ja vahvistuksia.

**Kuva 7.7.** OSI-mallin kerrokset



<sup>316</sup> ISO = The International Organization for Standardization, <http://www.iso.org>

<sup>317</sup> OSI = ISO Reference Model for Open Systems Interconnection

Eri kerrosten tärkeimmät tehtävät ovat:

1. Rakenteellisella eli fyysisellä kerroksella (**physical layer**) määritellään konkreettisia, mitattavia asioita. Muut kerrokset sisältävät ohjelmistomäärittelyitä. Fyysisen kerroksen alueeseen kuuluvat esimerkiksi liittimet, johdot ja sähköiset tasot.
2. Siirtoyhteyskerros tai siirtokerros (**data link layer**) määrittelee, kuinka verkossa rakennetaan yhteyksiä solmusta toiseen. Siirtokerroksen protokollat huolehtivat virhesuojauksesta ja palautumisesta normaalitoimintaan virhetilanteiden jälkeen.
3. Verkkokerros (**network layer**) reitittää kehykset tai paketit määränpäähensä usein monimutkaisen verkon yli.
4. Kuljetuskerros (**transport layer**) tarjoaa ylemmille kerroksille suoran liikenneyhteyden ja häivyttää erityyppiset siirtojärjestelmät näkyvistä. Kuljetuskerroksen protokollat tarjoavat usein myös virhekorjauksen.
5. Istuntokerros (**session layer**) idea on muodostaa ja purkaa yhteydet liikennöivien sovellusten väliltä ja jaksottaa liikenteen loogisiin osiin.
6. Esitystapakerros (**presentation layer**) sisältää (ainakin periaatteessa) muunnokset, joita tarvitaan esimerkiksi tietojen suojauksessa ja erilaisten aakkosten käytössä.
7. Sovelluskerros (**application layer**) palvelee suoraan loppukäyttäjää.

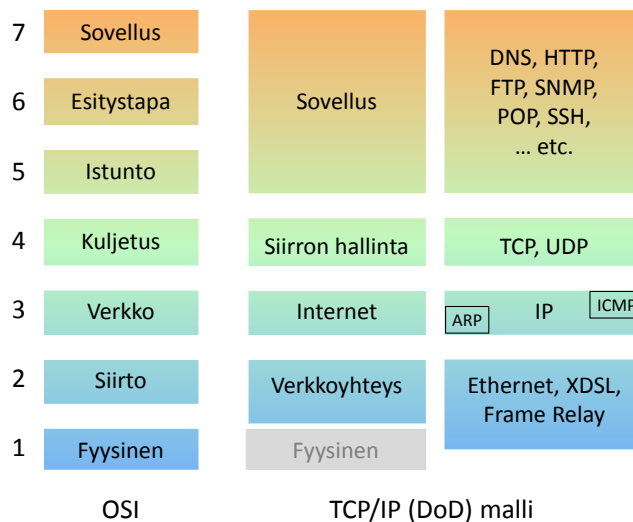
Huolimatta tunnettuudestaan OSI-mallia ei ole sellaisenaan käytetty juuri missään järjestelmässä. Informaatioteknologian asiantuntijan kuuluu kuitenkin tuntea OSI-malli ja sen tasot. OSI-malliin viitataan myös Internetin puolella, vaikka IP-verkot eivät noudatakaan täsmälleen OSI-mallia ja sen kerroksia.

### *TCP/IP-protokollaperhe*

TCP (**Transmission Control Protocol**) -protokolla sijoittuu OSI-mallissa IP-protokollan yläpuolelle. Se on yhteydellinen protokolla, joka tarjoaa ylemmille kerroksille luotettavan kuljetuspalvelun IP-kerroksen toimintaa valvomalla. Ensimmäinen versio TCP/IP-protokollasta esiteltiin vuonna 1973. Aluksi tavoitteena oli, että TCP:tä voitaisiin käyttää kaikkien tiedonsiirtoon. TCP suunniteltiin protokollaksi, joka selviää hukatuista ja väärään järjestykseen joutuneista paketeista havaitsemalla ja uudelleen lähettämällä hukatut paketit. Toisaalta on tilanteita, missä pakettien uudelleen lähettäminen ei ole mielekästä, esimerkiksi puhelut. Tarvittiin siis toinen protokolla, joka hoitaa kyseiset sovellukset. Tätä varten kehitettiin UDP (**User Datagram Protocol**).

Internet perustuu siis ARPANETin pohjalta syntyneeseen TCP/IP-arkkitehtuuriin, josta käytetään myös nimitystä DoD-arkkitehtuuri.<sup>318</sup> TCP/IP-malli on yksinkertaisempi kuin OSI-malli, eikä se pyri samanlaiseen yleispätevyyteen kuin OSI. TCP/IP-arkkitehtuurin mukaiset protokollat eivät noudata täsmällisesti OSI-mallin kerrosjakoa, mutta yksinkertaisuuden vuoksi niitä jatkossa käsitellään kuin ne olisivat OSI-yhteensopivia.

OSI-mallissa IP-protokolla sijoittuu kolmostason yläosaan. Koska IP-protokolla ei odota paljon alla olevalta verkolta, se tarjoaa yhteydettömän palvelun riippumatta siitä, minkälaisia verkkoja sen alapuolella on. Jokaiseen pakettiin liitetään vastaanottajan täydellinen osoite ja paketit lähetetään matkaan toisistaan riippumatta. Pakettien kulkureitti ja järjestys saavat vaihdella matkalla (tosin yhden yhteyden pakettien kulkeminen eri reittejä on harvinaista ja yleensä liittyy johonkin vikatilanteeseen).



**Kuva 7.8.** Vasemmalla OSI-malli, keskellä TCP/IP-malli ja oikealla Internetissä käytettyjä yleisimpiä protokollia.

TCP/IP-mallissa (kuvassa 7.8 oikealla) verkkoyhteyskerros kattaa kaikki Internet-kerroksen alapuolella olevat verkot. Se, miten kukin verkko kuljettaa IP-paketteja eteenpäin, on määritelty IETF:n julkaisemissa RFC ([Request for Comment](#)) -julkaisuissa. Verkkoyhteyskerroksen yläpuolella ovat Internet-kerros ([Internet layer](#)) ja siirronhallintakerros ([transmission control layer](#)), jotka ovat saaneet nimensä suoraan IP- ja TCP-protokollilta. Ylimpänä TCP/IP-mallissa on prosessi- ja sovelluskerros ([process / application layer](#)), johon sijoittuu erilaisia protokollia ja apuohjelmia, kuten tiedostojen siirtoon tarkoitettu FTP ([File Transfer Protocol](#)), postin kuljettamiseen tarkoitettu SMTP ([Simple Mail Transfer Protocol](#)) ja SNMP ([Simple Network Management Protocol](#)).<sup>319</sup>

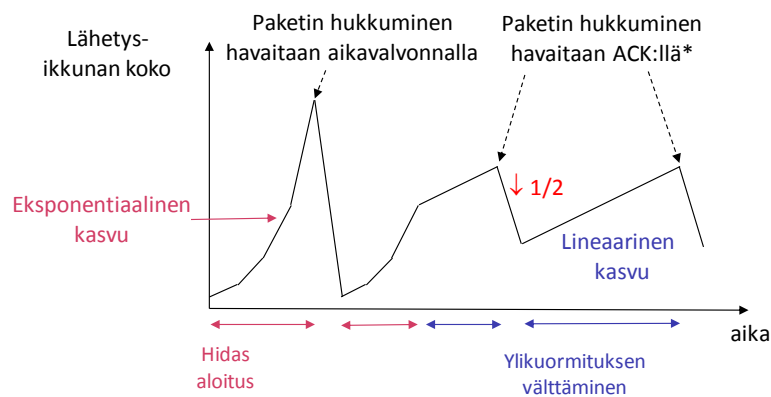
<sup>318</sup> DoD tulee nimestä [Department of Defense](#), eli Yhdysvaltain puolustusministeriö.

<sup>319</sup> IETF tuntuu suosivan ”yksinkertaisia” (”simple”) protokollia, mutta käytännön yksinkertaisuus on toinen asia.

Kun IP-paketti ja kriittisimmät protokollat on nyt määritelty, paketti voidaan lähettää verkkoon olettaen, että se löytää tiensä perille. Merkittävänä ongelmana kuitenkin on se, että ilman mitään etukäteisvalvontaa käyttäjät saisivat lähettää mielin määrin liikennettä verkkoon ottamatta huomioon verkon kuormitustilannetta. Lopputuloksena on merkittävä riski verkon ylikuormittumisesta, ellei ennakoiviin tai reagoiviin toimenpiteisiin ryhdytä.

Kun Internetin liikenne alkoi 1980-luvulla kasvaa, törmättiin karuun todellisuuteen. Verkko ylikuormittui vuonna 1986 useita kertoja niin pahasti, että verkon välityskyky romahti täysin. Ongelman ydin oli siinä, että TCP:n säätömekanismi oli suunniteltu ottamaan huomioon vastapään rajallisen kapasiteetin (jotta vastaanottopään puskuri ei vuotaisi yli), mutta ei verkon kuormitustilannetta. Kun verkon kuormitus nousi tietyn rajan yli, uudelleenlähetyspyynnöt lisäsivät verkon kuormitusta ilman, että mikään mekanismi olisi palauttanut verkon toimivaan tilaan.

Ensimmäisen toimivan ratkaisun tähän ongelmaan esitti Van Jacobson.<sup>320</sup> Ratkaisu perustuu siihen, että jos päätelaite havaitsee, että paketteja hukkuu (= päätelaite ei saa määräajassa kuittausta lähetetyistä paketeista), se ”pudottaa lähetysnopeuden puoleen.” Lainausmerkit johtuvat siitä, että TCP ei suoranaisesti säätele lähetysnopeutta, vaan sitä määrää dataa (ns. ikkunan kokoa), jonka laite voi lähettää ennen vastaanottajan kuittausta. Käytännössä ikkunan koko yhdessä päästä-päähän viiveen kanssa määrää keskimääräisen lähetysnopeuden. Ikkunan kokoa säädellään ylöspäin lineaarisesti. Yhteyden alkuvaiheessa sovelletaan yleensä ns. hitaan aloituksen (*slow-start*) periaatetta, jotta uusi yhteys löytäisi sopivan lähetysnopeuden ilman että verkko tukkeutuisi kuten kuvassa 7.9 on esitetty.



**Kuva 7.9.** TCP:n nopeuden säädön periaate (ACK-paketti sisältää viimeisen yhtenäisen sekvenssinumeron, jos numero on sama kuin edellisessä ACK-paketissa, niin lähettäjä olettaa, että vähintään yksi paketti on hukkunut).

<sup>320</sup> Jacobson, V. (1988). *Congestion avoidance and control*, ACM SIGCOMM Computer Communication Review (Vol. 18, No. 4, pp. 314-329). Katso myös <https://flylib.com/books/en/4.245.1.75/1/>

Käytännössä näiden periaatteiden avulla voidaan melko luotettavasti säätää Internetin käyttöastetta ilman, että verkon sisällä tarvitaan kuormituksen valvontamekanismeja. Olennaista on, että tässä tapauksessa kuormituksen hallinta hoidetaan hajautetusti pääte-laitteissa. Lopputuloksena Internetissä voi joskus hukkua varsin paljon paketteja (parin prosentin hukkuneiden pakettien osuutta voidaan pitää normaalina), mutta uudelleenlähe-tysten avulla kaikille sellaisille sovelluksille, jotka eivät ole erityisen viiveherkkiä, voidaan taata varsin luotettava palvelu. Lisäksi korkean kuormituksen aikana kapasiteetti jakautuu suunnilleen tasan TCP:tä käyttävien yhteyksien välillä. Pullonkaulan kohdalla keskimääräi-nen kuormitus voi nousta noin 90 prosenttiin. Pääosa Internetistä toimii edelleen TCP:n avulla ns. *best effort* –periaatteella.

### Reititys

Lopulta kun kaikki on periaatteessa kunnossa paketin siirtämistä varten, miten paketti löytää perille? Reititys on prosessi, jossa jonkin reititysalgoritmin avulla selvitetään sopivin reitti lähettäjän ja vastaanottajan välille ja talletetaan tämä tieto verkon solmupisteisiin. Reitti voidaan optimoida esimerkiksi reitin pituuden, viiveen tai kaistanleveyden suhteen. Sopivimman reitin valintakriteerit riippuvat verkon ylläpitäjän toiveista. Yleistäen reitityk-sen tavoitteena on verkon suorituskyvyn maksimointi ja kustannusten minimointi.

IP-protokolla sallii tietopakettien sekä suoran että epäsuoran reitittämisen. Suoraa rei-titystä käytetään samassa fyysisessä verkossa olevien koneitten välillä. Tällöin paketit eivät kulje reitittimen kautta. Esimerkiksi Ethernet-lähiverkossa olevissa tietokoneissa säilyte-tään verkossa olevia IP-osoitteita vastaava Ethernet-verkkokortin ns. MAC-osoite<sup>321</sup> ja muodostetaan lähtevät Ethernet-kehukset suoraan kohdekoneen MAC-osoitteen mukaan. MAC- ja IP-osoitteiden vastaavuuksien etsintä ja ylläpito on esimerkki OSI-kerroksien välisestä yhteistyöstä. MAC-osoitteita tarvitaan OSI-mallin 2. kerroksen toiminnassa ja IP-osoitteet vastaavasti toimivat OSI-mallin 3. kerroksella.

Reititysalgoritmit voidaan luokitella sen mukaan, miten algoritmi sopeutuu verkkotopo-logian muutoksiin. Tällöin algoritmit voidaan jakaa staattisiin ja adaptiivisiin. Kun lähettäjä ja vastaanottaja pysyvät kutakuinkin paikoillaan eikä verkon rakenne muutu jatkuvasti, sopivat reitit voidaan kirjata yksinkertaisimmillaan vaikkapa käsin reititystietokantaan. Tämän kaltaista reititystä kutsutaan staattiseksi reititykseksi, ja sitä voidaan käyttää pie-nissä lähiverkoissa tai kun vaihtoehtoisia reittejä ei ole.

Adaptiivinen reititys huomioi verkon tilan muutokset ja sopeutuu yhteyksien katkeami-seen. Verkon reitittimet vaihtavat jatkuvasti keskenään tietoja verkon tilasta, esimerkiksi havaitsemistaan uusista siirtoyhteyksistä tai entisten siirtoyhteyksien katkeamisesta.

---

<sup>321</sup> MAC = *Media Access Control*. MAC-osoite on verkkosovittimen ethernet-verkossa yksilöivä osoite.

Tämän kaltainen ratkaisu skaalautuu myös suurikokoisiin verkkoihin. Tietojen käsittelemisen ja reititystaulun ylläpitäminen vaatii reitittimeltä kuitenkin paljon prosessointitehoa. Reitityksen vaatima ohjausliikenne tulee myös pitää mahdollisimman pienenä niin, ettei se häiritse verkon varsinaista hyötyliikennettä.

Suurin osa adaptiivisista reititysalgoritmeista perustuu niin sanotun lyhimmän polun ([shortest path algorithm](#)) laskemiseen. Tässä menetelmässä jokaiselle siirtoyhteydelle määrätään laskennallinen pituus, joka puolestaan riippuu siitä, minkä kriteerin mukaan reitit halutaan optimoida. Tämän jälkeen etsitään lyhin tie lähettäjän ja vastaanottajan välille.

Tärkeimmät menetelmät lyhimmän polun laskemiselle ovat etäisyysvektorialgoritmit ja yhteystila-algoritmit. Etäisyysvektorialgoritmia käyttävässä verkossa reitittimet lähettävät naapureilleen reitti-ilmoituksia, jotka kertovat etäisyyksiä niihin verkkoihin, jotka kyseisen reitittimen kautta on tavoitettavissa. Reitti-ilmoituksissa etäisyys ilmoitetaan paljaana lukuna, eikä siitä käy ilmi, minkä muiden reitittimien kautta kyseinen reitti kulkee. Reititin valitsee saamiensa ilmoitusten perusteella lyhimmät reitit, eli niiden reitittimien kautta kulkevat polut, joilla on ollut pienin painokerroin.

Koska viesteistä ei käy ilmi kuin reitin pituus ja se, minkä naapurin kautta reitti kulkee, mahdollisten reitityssilmukoiden havaitseminen on vaikeaa. Topologian muuttuessa saattaa kestää kauan, ennen kuin verkko stabiloituu ja oikeasti lyhimmät reitit onnistutaan ottamaan käyttöön. Tästä syystä etäisyysvektorialgoritmi ei sovellu suuriin verkkoihin yhtä hyvin kuin yhteystila-algoritmi. Etäisyysvektorialgoritmiin perustuvia reititysprotokollia ovat muun muassa RIP ([Routing Information Protocol](#)) ja IGRP ([Interior Gateway Routing Protocol](#)).

Yhteystila-algoritmia käyttävissä verkoissa kaikki reitittimet tuntevat koko alueen topologian. Jokainen reititin ylläpitää tietokantaa, jonka perusteella se laskee itse oman reititystaulunsa. Aina topologian muuttuessa reititystaulu lasketaan uudelleen. Reitittimet välittävät toisilleen tietoa verkon topologiasta säännöllisin yhteystilailmoituksin. Muutostilanteissa, esimerkiksi jonkin siirtoyhteyden katketessa, muutoksen havainnut reititin kertoo siitä välittömästi naapureilleen, jotka välittävät viestin edelleen omille naapureilleen. Lyhyet muutosviestit kulkevat koko verkon halki, joten verkko sopeutuu nopeasti uuteen topologiaan. Vastapainoksi menetelmä vaatii reitittimiltä runsaasti laskentakapasiteettia ja muistia.

Yhteystila-algoritmiin perustuvia reititysprotokollia ovat muun muassa OSPF ([Open Shortest Path First](#)) ja IS-IS ([Intermediate System to Intermediate System](#)). Toisinaan verkon ylläpitäjä haluaa esimerkiksi sopimusteknisistä syistä suosia sellaista verkkoa, joka tarjoamat polut eivät ole kaikkein lyhyimpiä. Tästä syystä suurempien verkkokokonaisuuk-

sien, ns. autonomisten alueitten, väliseen reititykseen on kehitetty polkuvektoreihin perustuvia reititysprotokollia, joista merkittävin on BGP (**B**order **G**ateway **P**rotocol). BGP-viestistä käy ilmi se, minkä autonomisten alueiden kautta tieto kustakin tunnetusta verkosta on saatu. Näitä välitysketjuja tulkitsemalla voidaan selvittää verkon topologia autonomisten alueiden tasolla ja havaita mahdolliset reitityssilmukat.

## IP-verkon rakenneosat ja toiminta

Edellä oli kuvattu Internetin toimintaa periaatteellisella tasolla. Käytännössä tarvitaan tietysti laitteita toteuttamaan haluttu verkon toiminnallisuus ja lopuksi vielä organisaatiot ylläpitämään verkkojen toimintaa. Laitteita voidaan nimetä sen mukaan miten ja mihin niitä käytetään ja erityisesti millä OSI-tasolla ne pääosin toimivat kuten kuvassa 7.10 on esitetty:<sup>322</sup>

- Toistin (**repeater**): laite, joka vahvistaa vastaanottamansa signaalin ja lähettää sen sitten eteenpäin.
- Keskitin (**hub**): tietoliikenneverkon laite, jolla voidaan kytkeä useita pääte- ja verkkolaitteita samaan fyysiseen verkkoon.
- Silta (**bridge**): tietoliikenneverkon laite, joka yhdistää verkon osia OSI-mallin toisella eli siirtoyhteyskerroksella.
- Kytkin (**switch**): laite tai laitteen osa, johon muut tietoliikenneverkon laitteet on kytketty ja joka välittää yhdestä laitteesta tulevan tietoliikenteen niihin laitteisiin, joihin se on tarkoitettu.
- Reititin (**router**): laite tai ohjelmisto, joka ohjaa tietoliikennettä sopivalle reitille kohti määränpäättä.
- Yhdyskäytävä (**gateway**): tietoliikenneverkossa oleva verkon solmu, joka mahdollistaa erilaisten tietoliikenneverkkojen yhteensovittamisen.
- Palvelin (**server**): tietokone tai ohjelmisto, joka hoitaa tehtäviä muiden samaan verkkoon kytkettyjen tietokoneiden pyyntöjen ohjaamana tai niiden puolesta.
- Palomuuuri (**firewall**): tekninen järjestely, jolla hallitaan liikennettä tietoliikenneverkosta toiseen tai tietoliikenneverkon ja yksittäisen järjestelmän välillä.

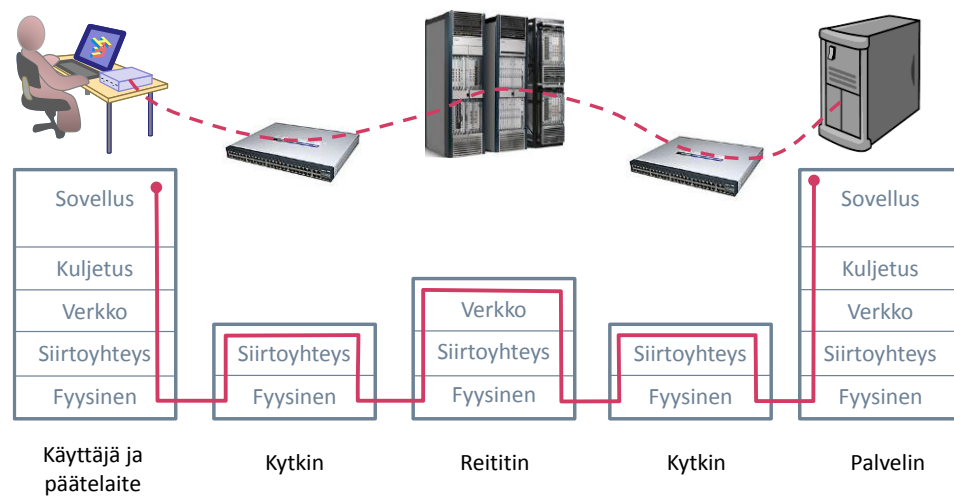
Tähtimäinen Ethernet-verkko rakennettiin aluksi yksinkertaisesti yhdistämällä työasemat keskittimellä. Tavallinen, ei-kytkentäinen keskitin välittää saamansa sanomat kaikille verkon asemille. Kytkentäinen keskitin eli kytkin vähentää verkon kuormitusta tavalliseen

---

<sup>322</sup> Termit pääosin Sanastokeskuksen terminpankin <http://www.tsk.fi> määritelmien mukaisia.

keskittimeen verrattuna, ohjaamalla sanomat ainoastaan yhteen suuntaan kerrallaan. Lähiverkko voidaan periaatteessa rakentaa toistimien ja siltojen avulla. Niitä ei kuitenkaan nykyverkoissa käytetä vaan ne on korvattu kytkimillä, joissa on sillan toiminnallisuus jokaisen verkkoliitännän välillä.

Reititin on Internetin IP-protokollia käyttävien tietokoneverkkojen vastine puhelinverkon puhelinkeskukselle. Se reitittää sanomia yleisiin verkkoihin tai toisiin lähiverkkoihin. Se suodattaa, valvoo ja rajoittaa hyvinkin tarkkaan läpikulkevaa liikennettä. Reititin voi toimia myös palomuurina ja voi siten estää murtautumisyrietykset. Reititin toimii OSI-mallin verkkokerroksella, eli se ohjaa paketteja eteenpäin pelkän IP-osoitteen perusteella.



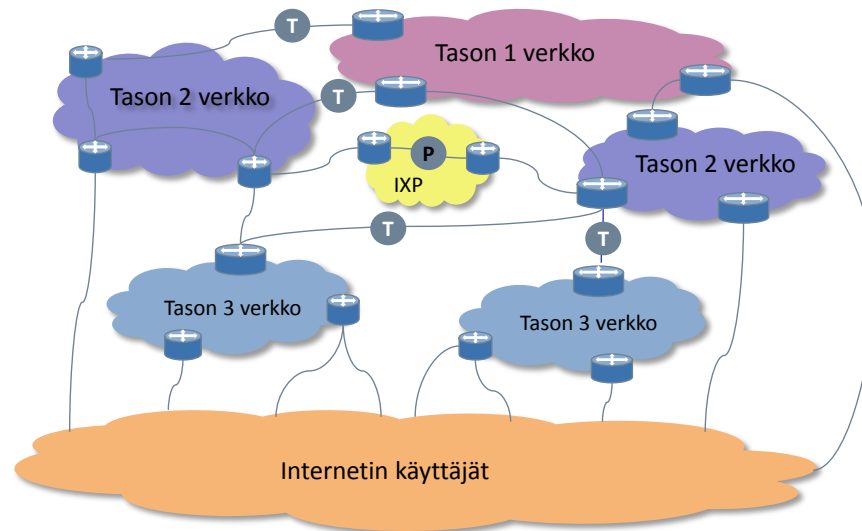
**Kuva 7.10.** Yhteyden muodostuminen IP-verkon läpi eri OSI-mallin kerroksilla.

Yhdyskäytävä on protokollamuunnin eli käytännössä laite tai ohjelmisto, jonka avulla voidaan yhdistää täysin erilaisia protokollia noudattavat verkot. Yhdyskäytävän kautta lähiverkkoon liitetyt koneet voivat olla yhteydessä ulkoisiin palveluihin. Yhdyskäytävää tarvitaan myös silloin, kun sähköposti lähetetään edelleen tekstiviestinä vastaanottajan kännykkään. Monissa järjestelmissä termiä ”gateway” käytetään viittaamaan reitittimeen, jolle lähetetään kaikki saman aliverkon ulkopuolelle suuntautuva IP-liikenne. Tällöin ei välttämättä tehdä mitään protokollamuunnosta. Yhdyskäytävää voidaan käyttää myös tietoturvasojen erottamiseen.

Laitteiden lisäksi tarvitaan joku organisaatio pitämään huolta verkkojen toiminnasta. Vaikka Internet on toimintaperiaatteeltaan varsin epähierarkkinen, globaalilla tasolla verkot ja niitä hallinnoivat operaattorit muodostava hierarkkisen rakenteen. Ylimmällä tasolla (tier 1) toimivat suurimmat kansainväliset verkkopalveluja tarjoavat yritykset, jotka ovat kaikki suoraan toisiinsa yhteydessä eivätkä siten tarvitse muiden operaattoreiden apua kattavan kansainvälisen palvelun toteuttamiseen.



Alemman tason operaattorit ostavat välityspalveluita (**transit**) ylemmän tason operaattoreilta, jotta niiden asiakkaat voisivat olla yhteydessä Internetiin kokonaisuudessaan. Tasoja voi olla useita, mutta kaikilta tasoilta voidaan tarjota palveluita loppukäyttäjille. Samalla tasolla olevat operaattorit voivat vaihtaa keskenään liikennettä tasavertaisesti ilman operaattoreiden välistä rahallista korvausta ns. **peering**-periaatteella. Merkittävä osa **peering**-yhteyksistä tapahtuu keskitetyissä välityspisteissä (IXP, **Internet Exchange Points**).



**Kuva 7.11.** Internetin verkkojen ja operaattoreiden hierarkia. T = **transit**-yhteys, P = **peering**-yhteys.<sup>323</sup>

### Internetin turvallisuudesta

Internetin negatiivisista lieveilmiöistä kohutaan tasaisin välein jopa iltapäivälehtien palstoilla. Milloin otsikoissa ovat pomminrakennusohjeet, milloin anonyymit seksipalvelimet, tietokonevirukset, kansainvälinen rikollisuus, tai eri maiden tiedusteluelimien suorittama laajamittainen vakoilu. Ihmisillä on jyrkkiä mielipiteitä Internetin hyvydestä ja pahuudesta, vaikka käytännön todellisuudesta olisi enintään hämääriä käsityksiä. Kiistatta Internetissä on myös riskejä ja sudenkuoppia. Jokainen (kansainväliseen) tietoverkkoon liitetty kone on jossain määrin altis ulkopuoliselle hyökkäykselle. Hyökkäyksiä tekevät niin (teollisuus)vakoojat, jännitystä etsivät harrastelijat kuin rahanahneet rikollisetkin.

Nimitys hakkeri (**hacker**) syntyi 1960-luvun alussa MIT:n (Massachusetts Institute of Technology) tekoälylaboratoriossa. Hakkerin merkityksen vivahteet ovat jonkin verran vaihdelleet vuosien saatossa. Aluksi hakkerointi (hacking) oli suhteellisen viatonta modernien laitteiden kanssa pelaamista, mutta 1960-luvulla hakkerit käyttivät jo selkeästi väärin

<sup>323</sup> Kuva perustuu Wikipedian Internetiä käsittelevään artikkeliin, <http://en.wikipedia.org/wiki/Internet> katso myös <http://arstechnica.com/security/2016/04/flashback-declassified-1970-dod-cybersecurity-document-still-relevant/>

mm. puhelinverkon yhteyksiä.<sup>324</sup> Historiallisesta taustasta johtuen lienee parempi, että termi hakkeri käytetäänkin vain sellaisissa yhteyksissä, joissa on vähintään väärinkäytön mahdollisuus olemassa. Lisäksi on käytössä termi krakkeri (**cracker**), joka yksiselitteisesti liittyy järjestelmien väärinkäyttämiseen.

Eräs keino turvata Internetin käyttöä ovat palomuurit, jotka valvovat kahden verkon, yleensä luotettavan verkon ja epäluotettavan verkon, välistä liikennettä. Palomuurin tehtävänä on estää ulkopuolisia tunkeutumasta suojattuun verkkoon ja samalla taata omille käyttäjille turvalliset yhteydet oman verkon ulkopuolelle. Palomuuuri voi rajoittaa liikennettä muun muassa lähettäjän tai vastaanottajan IP-osoitteen, protokollan tai portin perusteella. Kevin Mitnick huiputti palomuuureja niin sanotulla IP-huijauksella (**IP spoofing**).<sup>325</sup> IP-osoite on melko helppo väärentää ja murtautuja voi väärän IP-osoitteen avulla tekeytyä luotettavaksi. Mikäli luvaton palvelin onnistuu vakuuttamaan palomuurin siitä, että se on kohtoisin turvallisesta osoitteesta, se voi saada samat oikeudet kuin osoitteen todelliset käyttäjätkin. Kehittyneemmät palomuurit eivät mene tähän halpaan, vaan hylkäävät paketit, jotka väittävät olevansa lähiverkosta, mutta tulevat kuitenkin ulkopuolisesta verkosta.

Palomuurin ongelmana on rajanveto: salliako kaikki, mikä ei erikseen ole kiellettyä, vai kieltääkö kaikki, mitä ei erikseen sallita? Turvallisempi järjestelmä on usein hankala sekä ylläpitäjille että käyttäjille, toisaalta heikommalla suojauksella ei välttämättä saavuteta riittävää turvatasoa. On silti muistettava, että palomuuuri voi valvoa vain kauttansa kulkevaa liikennettä. Hyväkään palomuuuri ei anna täydellistä suojaa millekään tietoverkolle. Täysin turvallista järjestelmää ei ole olemassa, vaan käyttäjät ovat itse vastuussa verkon turvallisuudesta. Tietoturvaan liittyviä hyödyllisiä ohjeita löytyy mm. Viestintäviraston sivuilta.<sup>326</sup>

## Pakettiverkkojen analysointi jonoteorian avulla

Pakettikytkentäinen liikenne muodostuu siis paketeista. Tämä ajatus alkoi kehittyä 1960-luvun alkupuolella. Pakettikytkentäisyys oli vaativa teknologinen haaste ottaen huomioon silloin käytettävissä olleet tietokoneet ja niiden (nykymittapuun mukaan äärimmäisen) rajallinen tietojenkäsittelykapasiteetti. Toisaalta haasteena oli ymmärtää ja analysoida miten laaja pakettipohjainen verkko toimisi erilaisissa kuormitustilanteissa ja

---

<sup>324</sup> Katso esimerkiksi B. Yagoda, *A Short History of "Hack"*, The New Yorker, 6.3.2014, <http://www.newyorker.com/tech/elements/a-short-history-of-hack>

<sup>325</sup> Mitnick vangittiin vuonna 1995 ja pitkien oikeuskäsittelyjen jälkeen hän sai viiden vuoden vankeustuomion. Toisaalta hän kirjoitti yhdessä W.L. Simonin kanssa kirjan *The art of deception: Controlling the human element of security*, johon Google Scholarin mukaan on 1264 tieteellistä viittausta (26.11.2018). Konna vai sankari?

<sup>326</sup> <https://www.viestintavirasto.fi/kyberturvallisuus/tietoturvaohjeet.html>

olosuhteissa. Tähän kysymykseen pyrittiin vastaamaan kehittämällä jonoteoriaa. Jonoteoria ei kuitenkaan ollut sinänsä uusi ala, vaan sitä oli kehitetty jo 1900-luvun alusta alkaen. Jonoteorian alkukohtana voidaan pitää Andrei Markovin vuonna 1906 julkaisemaa artikkelia, jossa hän esittää Markovin ketjun periaatteet.<sup>327</sup>

Verkon solmupisteeseen tulevaa pakettia voidaan käsitellä periaatteessa kolmella tavalla: se voidaan lähettää välittömästi eteenpäin, se voidaan hylätä tai se voidaan laittaa jonoon. Käytännössä tulevaa pakettia käsitellään aina sen verran, että tiedetään, minkälaisesta paketista on kysymys, joten ainakin osa paketista joudutaan laittamaan muistiin odottamaan jatkokäsittelyä. Tässä yhteydessä keskitytään vain jonotukseen ja sen vaikutukseen paketin saamaan palvelun laatuun eli viiveeseen ja paketin hylkäämisen todennäköisyyteen.

Tässä yhteydessä jonotusta käsitellään suppeasti yksinkertaisten mallien avulla, jotka usein ovat arkielämästä otettuja. Perusyksikkönä käytetään usein nimitystä *asiakas*, mutta täsmälleen samat periaatteet soveltuvat mihin tahansa järjestelmään, johon sisältyy jonotusmahdollisuus, myös silloin kun kyseessä on informaatiota sisältävä datapaketti, fyysinen paketti tai ihminen. Asiakas-termiä käytetään tässä yhteydessä, koska sitä on usein helpompi hahmottaa mielikuvana: asiakas saapuu ja jonottaa, häntä palvellaan ja sitten hän poistuu. Ensisijaisena tavoitteena on ajatusmallien, laskentamenetelmien ja keskeisimpien kaavojen esitleminen.

Jonojen analysoinnin kannalta olennaisinta ovat seuraavat neljä asiaa:<sup>328</sup>

1. Minkälaisella prosessilla asiakkaat saapuvat
2. Palveluaikojen jakauma
3. Palvelupaikkojen määrä ( $S$ )
4. Odotuspaikkojen määrä ( $N$ )

Näihin pohjautuen yksinkertaisimmat jonot voidaan määrittellä  $X/Y/S/N$  notaatiolla, jossa  $X$  määrittelee saapumisprosessin ja  $Y$  määrittelee palveluprosessin. Esimerkiksi  $M/M/S/N$  tarkoittaa:

- $\underline{M}/M/S/N$  kutsut saapuvat Poisson-prosessin mukaisesti,
- $M/\underline{M}/S/N$  palveluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita,
- $M/M/\underline{S}/N$  palvelupaikkojen määrä on  $S$  ja

<sup>327</sup> Markov julkaisi paperinsa ennen kuin Erlang julkaisi kaavansa. Erlangin kaava perustuu Markovin prosessiin.

<sup>328</sup> Perusteellinen kirja jonottamisen mallinnuksesta: Hassin, R. (2016). Rational queueing.

<https://content.taylorfrancis.com/books/download?dac=C2015-0-61989-6&isbn=9781498745284&format=googlePreviewPdf>

$M/M/S/N$  odotuspaikkojen määrä on  $N$ . Jos merkintää ei ole, odotuspaikkoja on ääretön määrä (ei siis nolla!).

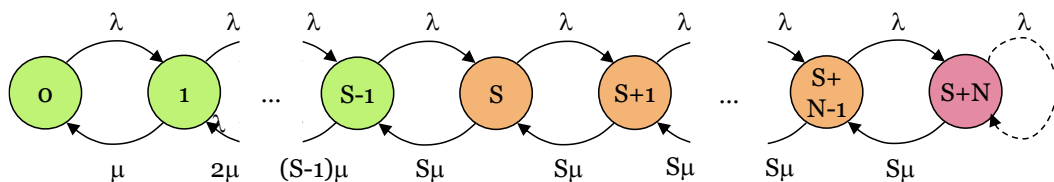
Merkinnän  $M$  lisäksi yleisimpiä merkintöjä ovat:

- D deterministinen prosessi eli saapumisaikavälit tai palveluajat ovat vakiopituisia ja
- G yleinen aikajakauma.

Vaikeammin käsiteltäviä  $D$  ja  $G$ -jonomalleja ei tarkastella tässä kurssissa. Pääsääntönä voidaan sanoa, että jonotusjärjestelmissä keskimääräiset odotusajat ja jonojen pituudet ovat sitä pidempiä, mitä suurempia saapumis- ja palveluaikojen vaihtelut ovat.

Vertaamalla liikenneteoreettisia laskelmia (esim. Erlangin kaavan johto luvussa 4) ja edellä esitettyjä laskelmia, voidaan havaita selviä yhtäläisyyksiä. Itse asiassa Erlangin malli on  $M/M/S/0$ -järjestelmä jonoteorian kannalta.

$M/M/S/N$ -järjestelmän tasapainotilan kaavio on esitetty kuvassa 7.12. Merkintä  $\mu$  tarkoittaa yhden palvelupaikan palveluintensiteettiä, eli sitä miten monta asiakasta yksi palvelupaikka saa palveltua keskimäärin aikayksikössä. Kuten 4. luvussa esitettiin eksponentiaalisesti jakautuneet palveluajat tarkoittavat sitä, että päättymisen todennäköisyys ei riipu siitä, miten kauan palvelu on jo kestänyt. Keskimääräinen palveluaika (niille asiakkaille, jotka palveluun pääsevät) on tällöin  $h = 1/\mu$ .



**Kuva 7.12.**  $M/M/S/N$ -järjestelmän tasapainotilan kaavio.

Tilojen todennäköisyydet voidaan laskea kuvan mukaisesti rekursiivisesti seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 i\mu P(i) &= \lambda P(i-1) \quad \text{kun } 0 < i \leq S \\
 S\mu P(i) &= \lambda P(i-1) \quad \text{kun } S < i \leq S+N \\
 P(i) &= 0 \quad \text{kun } i > S+N, \text{ tai } i < 0
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Näistä saadaan tilojen todennäköisyydet tilan  $0$  todennäköisyyteen suhteutettuna:

$$\begin{aligned}
 P(i) &= \frac{A^i}{i!} P(0) \quad \text{kun } 1 \leq i \leq S \\
 P(i) &= \left(\frac{A}{S}\right)^{i-S} P(S) \quad \text{kun } S < i \leq S+N
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

jossa  $A = \lambda/\mu$ . Jonoteoriassa  $A$ :n sijasta käytetään yleensä merkintää  $\rho = A/S$ , joka kuvaa yhden palvelupaikan keskimääräistä kuormitusta. Todennäköisyys  $P(0)$  voidaan ratkaista merkitsemällä eri tilojen todennäköisyyksien summa ykköseksi.

Tässä vaiheessa (siis peruskurssin puitteissa) on olennaista ymmärtää periaate, jolla tilojen todennäköisyydet voidaan laskea, kun oletetaan, että asiakkaita tulee Poisson-prosessin mukaisesti ja palveluajat ovat eksponentiaalisesti jakautuneita. Lisäksi kun tilojen todennäköisyydet tunnetaan, voidaan Littlen lauseen (kaava 4.7 eli  $A = \lambda h$ ) avulla laskea keskimääräinen odotusaika.

### *M/M/1 -jono*

Käytännön kannalta on hyvä luoda itselle kuva siitä, miten yksinkertaiset jonot tyypillisesti käyttäytyvät. Tähän tarkoitukseen on paras tarkastella yksinkertaisinta M/M/1-jonomallia, jossa siis on yksi palvelupaikka ja ääretön määrä odotuspaikkoja ja tarjottu liikenne on Poisson-prosessin mukaista. Tällöin saadaan varsin yksinkertaisesti (kun  $A < 1$ ):<sup>329</sup>

$$P(i) = (1 - A)A^i \quad (7.3)$$

Todennäköisyydet muodostavat siis geometrisen sarjan. Asiakkaiden määrän keskiarvoksi saadaan tällöin:

$$E[i] = \frac{A}{1 - A} \quad (7.4)$$

Tässä asiakkaiden määrän keskiarvossa ovat siis mukana sekä odottavat että palveltavana oleva asiakas. Kun  $A < 1$  niin kaikki asiakkaat saavat lopulta palvelua, joten heitä on keskimäärin palveltavana  $A$  kappaletta. Keskimääräinen odottavien asiakkaiden määrä on siten:

$$E[w] = \frac{A}{1 - A} - A = \frac{A^2}{1 - A} \quad (7.5)$$

Useimmiten ollaan kiinnostuneita keskimääräisestä odotusajasta ( $h_w$ ). Se saadaan soveltamalla Littlen lausetta kaikkiin asiakkaisiin, jolloin lopputulemana on:

$$h_w = \frac{A}{1 - A} h \quad (7.6)$$

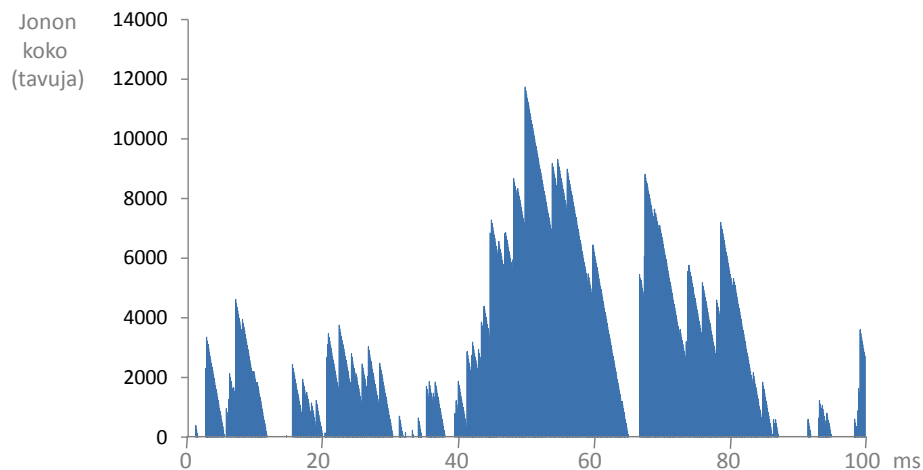
Tässä on huomattava, että keskimääräinen odotusaika sisältää myös ne asiakkaat, jotka pääsevät välittömästi palveltavaksi.

---

<sup>329</sup> Jos  $A \geq 1$ , niin mitään tasapainotilaa ei synny.

Nyt voi näyttää siltä, että jonoteoria on pelkkiä kaavoja. Toki kaavoja riittää varsinkin, kun mennään ilmiöihin syvemmälle ja monimutkaisempiin malleihin. Toisaalta kaavat eivät ole sillä tavalla oleellisia, että kovinkaan montaa niistä kannattaa opetella ulkoa. Jos jotain on hyvä muistaa, niin kaava 7.6 eli keskimääräinen odotusaika  $M/M/1$ -järjestelmässä. Sen mukaan, kun kuormitus on puolet palvelukapasiteetista (eli  $A = 0,5$ ), odottamiseen menee keskimäärin yhtä paljon aikaa kuin itse palveluun. Kun kuormitusaste on 90 prosenttia, odottamiseen menee keskimäärin 9 kertaa enemmän aikaa kuin palveluun.

Kuvassa 7.13 on esitetty jonon käyttäytyminen satunnaiselle dataliikenteelle, siten että järjestelmän kapasiteetti on 10 Mbit/s ja keskimääräinen kuormitus on 0,8. Tällä nopeudella keskimääräinen palveluaika ( $h$ ) on 0,8 ms. Tässä siis oletetaan, että paketin palveluaika on suorassa suhteessa paketin kokoon, mikä on oletettavaa silloin kun järjestelmän suorituskyky rajoittaa lähtevän linkin kapasiteetti. Jonon pituuden vaihtelut voivat olla hyvinkin suuria jo 80 prosentin kuormituksella, kuten edellä esitetty teoreettinen tarkastelu osoitti. Samoin kuin aikaisemmassa liikennesimulaatiossa (kuva 4.13), tässäkin hahmottaa helposti liikenteen käyttäytymisessä erilaisia vaihteita. Esimerkiksi kuvassa 7.13 jonon nopealle kasvamiselle noin 40 ja 50 millisekunnin välillä helposti olettaa löytyvän jonkun ymmärrettävän syyn. Mitään erityistä syytä ei kuitenkaan ole, vaan liikenteen vaihtelut ovat simuloinnin vuoksi täysin satunnaisia.



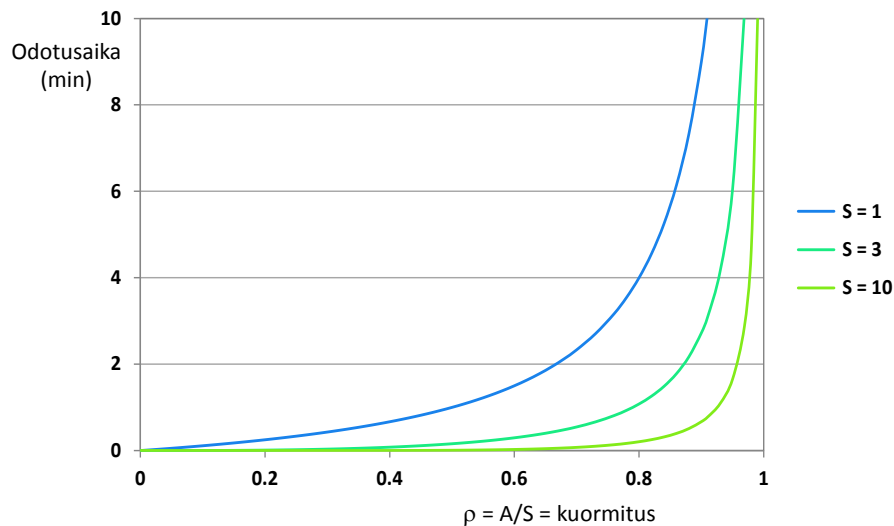
**Kuva 7.13.** Simuloitua liikennettä  $M/M/1$ -järjestelmässä, y-akselilla datan määrä jonossa tavuina, x-akselilla aika, yhteensä 100 ms. paketin keskikoko on 1000 tavua, pakettien välisen ajan keskiarvo on 1 ms.

### *M/M/S -jono*

Entä sitten hieman monimutkaisemmat jonot, esimerkiksi  $M/M/S$ ? Kuvassa 7.14 on esitetty keskimääräinen odotusaika kuormituksen ( $A/S$ ) funktiona, kun palvelupaikoilla on yhteinen jono (ilman että jonottajien määrää rajoitetaan). Kun palvelupaikkojen määrä kas-

vaa, päästään yhä lähemmäs 100 prosentin kuormitusta ilman merkittävää odotusajan kasvua. Jos odotusaika halutaan pitää alle keskimääräisen palveluajan, kolmen palvelupaikan tapauksessa kuormitus voidaan nostaa noin 79 prosenttiin ja kymmenellä palvelupaikalla noin 92,5 prosenttiin. Käytännössä täytyy lisäksi huomioida se, että edes nykyistä tarjottua liikennettä ei yleensä tunneta tarkasti, saati tulevaa. Käytännössä jonon kuormitusaste on syytä pitää alle 80 prosentin, jotta vältetään kohtuuttoman pitkät jonot ja viiveet.

Käytännössä pakettiverkkojen mitoituksessa täytyy ottaa huomioon kaikki yhteyden laatuun vaikuttavat tekijät. Kun yhteyden bittinopeus on suuri (esim. 1 Gbit/s), jono voi olla paketeilla mitattuna pitkä ilman, että loppukäyttäjän havaitsema viive kasvaa merkittävästi. Pitää myös muistaa, että odotuspaikkojen lisääminen ei auta silloin kun palvelukapasiteetti ei riitä kaikkien asiakkaiden palvelemiseen tai pakettien välittämiseen. Tällöin suuret puskurit ovat pikemminkin haitallisia, koska ne väistämättä kasvattavat viiveitä.



**Kuva 7.14.** Keskimääräinen odotusaika kuormituksen funktiona M/M/S-järjestelmillä, kun keskimääräinen palveluaika on 1 min.

### Esimerkki 7.1. M/M/1 -jonojärjestelmien analyysi

Reitittimellä on yksi jono linkille, jonka nopeus on 10 Mbit/s. Paketteja tulee keskimäärin 750 kappaletta sekunnissa ja pakettien keskimääräinen koko on 1 kB. Laske keskimääräinen odotusaika niille paketeille, jotka joutuvat jonottamaan, kun oletetaan että pakettien koko on eksponentiaalisesti jakautunut. Lisäksi oletetaan, että paketit saapuvat eksponentiaalisin väliajoin ja että puskurin koko riittävä, jotta käytännössä kaikki tulevat paketit mahtuvat puskuriin.

### Ratkaisu

Voimme soveltaa tässä suoraan M/M/1 jonon kaavaa asiakkaiden eli pakettien määrälle (kaava 7.4). Ensinnäkin pitää laskea mikä on keskimääräinen kuormitus. Vastaus on  $(750 \times 8 \text{ kbit/s}) / (10 \text{ Mbit/s}) = 0,6$  (yksiköiden kanssa on syytä olla tarkkana). Onneksi keskimääräinen kuormitus on pienempi

kuin yksi, koska vain tällöin voimme soveltaa aiemmin esitettyjä kaavoja. Keskimäärin järjestelmässä on siten

$$E[i] = \frac{0,6}{1-0,6} = 1,5 \text{ pakettia.}$$

Näistä siis keskimäärin 0,6 on palveltavana (koska jokainen lopulta pääsee linkille), joten jonossa on keskimäärin 0,9 pakettia. Se kuinka moni paketti joutuu jonoon aikayksikössä, voidaan laskea sen tiedon pohjalta, että uuden paketin tullessa todennäköisyys, että paketti on palveltavana (eli sen lähetys on käynnissä), on 0,60 (miksi näin, se kannattaa selvittää itselleen huolellisesti!). Paketteja tulee yhteensä 750 sekunnissa, joten jonoon joutuu keskimäärin 450 pakettia sekunnissa. Soveltamalla Littlen lausetta jonottajiin saadaan:

$$t = \frac{E[w]}{\lambda} = \frac{0,9}{450/s} = 0,002 \text{ s} = 2 \text{ ms}$$

Huomaa myös se, että kaavalla 7.6 saataisiin arvo:  $h_w = \frac{A}{1-A} \cdot h = \frac{0,6}{1-0,6} \cdot 0,8 \text{ ms} = 1,2 \text{ ms}$ , sillä keskimääräinen paketin lähetysaika  $h = 8 \text{ kbit} / 10 \text{ Mbit/s} = 0,8 \text{ ms}$ . Tämä viive on pienempi kuin edellä laskettu arvo, koska kaavan 7.6 laskelmassa mukana ovat kaikki paketit, eli myös ne jotka pääsevät suoraan lähetettäväksi, kun taas tehtävässä pyydettiin ottamaan huomioon vain jonottamaan joutuvat paketit.

Pakettien koot eivät tietenkään voi olla eksponentiaalisesti jakautuneita, koska tavu on pienin yksikkö mitä paketissa käsitellään. M/M/1-malli antaa kuitenkin kohtuullisen hyvän arvion jonon käyttäytymisestä. M/M/1-mallin perusteella 30 paketin puskurilla tuleva paketti jouduttaisiin hylkäämään todennäköisyydellä  $5 \cdot 10^{-8}$ .

### **Esimerkki 7.2.** Jonojärjestelmän suorituskyvyn parantaminen

Tarkastellaan tapausta, jossa palvelupaikkaan (vaikkapa valintamyymälän kassalle) tulee keskimäärin yksi asiakas minuutissa, palveluaika on eksponentiaalisesti jakautunut ja jonon pituutta ei rajoiteta. Oletetaan aluksi, että asiakkaan palvelu kestää keskimäärin yhden minuutin, joten yksi palvelupaikka ei riitä, koska jonon keskipituus kasvaisi kohti äärettömyyttä. Tehtävänä on vertailla kolmea vaihtoehtoa, joilla tilannetta voidaan parantaa:

- a) Lyhennetään palveluaikaa 30 sekuntiin.
- b) Lisätään toinen palvelupiste siten, että palvelupaikoilla on yhteinen jono.
- c) Jaetaan asiakkaat satunnaisesti kahteen palvelupaikkaan, joilla on kummallakin oma jononsa (eli asiakas ei valitse jonoansa, vaan valinta tapahtuu satunnaisesti, eikä asiakas myöskään vaihda jonoa, vaikka toinen palvelupaikka sattuisi olemaan vapaana).

### **Ratkaisu**

Kohdat a ja c ovat selvästi M/M/1-järjestelmiä, jolloin keskimääräinen odotusaika voidaan laskea kaavalla 7.6. eli a-kohdassa  $h = 0,5$  ja  $\lambda = 1$  ja c-kohdassa kummallakin palvelupaikalla  $h = 1$  ja  $\lambda = 0,5$ , joten kummassakin tapauksessa kuormitus on sama eli 0,5. Keskimääräinen odotusaika on kuitenkin c-kohdassa kaksinkertainen.



Kohta  $b$  muodostaa  $M/M/2$ -järjestelmän, jolloin yleensä selvin tapa odotusajan laskemiseksi on ratkaista tilojen todennäköisyydet kaavalla 7.1. Saatujen todennäköisyyksien avulla voidaan sitten laskea keskimääräinen odotusaika. Esimerkin tapauksessa keskimääräiseksi odotusajaksi saadaan 20 s, joka ehkä hieman yllättäenkin on lyhempi kuin  $a$ -kohdan tapauksessa. Kuitenkin, jos otetaan huomioon myös asiakkaan palveluaika, on  $a$ -kohta asiakkaan kannalta edullisempi. Tulokset on koottu taulukkoon 7.1. Lukija voi miettiä, miksi toisaalta  $b$ -kohdassa odotusaika on lyhempi kuin  $a$ -kohdassa ja toisaalta miksi kokonaisaika on pitempi  $b$ -kohdassa.

**Taulukko 7.1.** Odotus- ja palveluajat esimerkin tapauksessa.

	Keskimääräinen odotusaika	Keskimääräinen palveluaika	Kokonaisaika
a) $M/M/1, h = 0,5 \text{ min}$	30 s	30 s	60 s
b) $M/M/2, h = 1 \text{ min}$	20 s	60 s	80 s
c) $2 \times M/M/1, h = 1 \text{ min}$	60 s	60 s	120 s

### Esimerkki 7.3.

 Pankkiautomaatin suorituskyvyn analyysi

Toiseksi esimerkiksi aikanaan useampaan kertaan tenttitehtävänä ollut ongelma. Pankkiautomaatilla käy keskimäärin 8 asiakasta tunnissa. Asiointi kestää keskimäärin 3 minuuttia siten että aika on eksponentiaalisesti jakautunut. Asiakas jää odottamaan, jos automaatilla on yhteensä korkeintaan kolme asiakasta, muutoin asiakas siirtyy viereisen pankin tiskille asioimaan (siltoin kun pankeissa vielä oli palvelutiskejä).

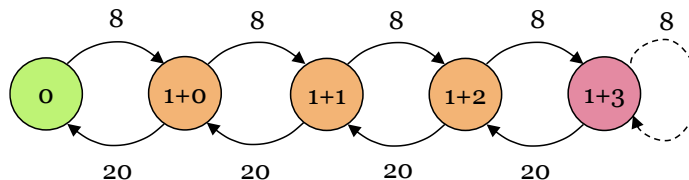
- Kuinka monta asiakasta tunnissa siirtyy pankkiin?
- Kuinka monta asiakasta on keskimäärin odottamassa pääsyä automaatille?
- Kuinka pitkään asiakas joutuu keskimäärin odottamaan ennen kuin hän pääsee automaatille, kun asiakkaan tullessa täsmälleen yksi henkilö on automaatilla ja yksi odottamassa?

### Ratkaisu

Vaikka kyseessä on ilmeisen jonoteoreettinen ongelma, ei sen ratkaisemiseen tarvitse muistaa kaavoja (toisin kuin varsin monet tenttiin osallistuneet olettavat). Tässä riittää, kun ymmärtää mallintamisen perusteet ja joitakin laskentamenetelmiä. Ensiksi täytyy selvittää järjestelmän mahdolliset tilat. Automaatilla voi uuden asiakkaan tullessa olla nollasta neljään asiakasta: jos automaatilla on kolme asiakasta, tuleva asiakas jää neljänneksi, jonka jälkeen tulevat asiakkaat siirtyvät pankkiin, kunnes yksi asiakas poistuu (aika moni erehtyy jo tässä vaiheessa).

Asiakkaita tulee 8 tunnissa, jolloin saapumisintensiteetti  $\lambda = 8$ , kun aikayksikkönä on tunti. Käytettävällä aikayksiköllä ei sinänsä ole väliä, kunhan käyttää koko ajan samaa yksikköä (aikayksiköiden kanssa erehtyy noin neljäsosa vastaajista). Keskimääräinen palveluaika on 3 min eli palveluintensiteetti on  $60/3 = 20$  asiakasta tunnissa. Oletuksena on, että asiakkaat tulevat toisistaan riippumatta eli yksi kerrallaan, jolloin järjestelmän tilassa tapahtuu siirtymisiä vain peräkkäisten tilojen välillä. Näin saadaan kuvan 7.15 mukainen järjestelmä.

On huomattava, että esimerkiksi järjestelmän tila 1+2 tarkoittaa tässä tilannetta, jossa yksi asiakas on automaatilla ja kaksi odottamassa (muunkinlaiset merkintätavat ovat mahdollisia, kunhan merkinnät ovat johdonmukaisia). Yläpuolella oleva 8 tarkoittaa, että tunnissa tulee keskimäärin 8 asiakasta (tämä on useimmissa vastauksissa oikein) ja alapuolella oleva 20 tarkoittaa, että jos järjestelmässä on vähintään yksi asiakas, asiakkaita poistuu keskimäärin 20 kappaletta tunnissa (tähän asti oikein vastanneista ehkä noin kolmanneksen mielestä poistuvien asiakkaiden määrä aikayksikössä riippuu jonon pituudesta, joka tässä tehtävässä on siis väärä oletus).



**Kuva 7.15.** Jonotusjärjestelmän tilat ja niiden välisten siirtymisten intensiteetit.

Tämän jälkeen lasketaan tilojen todennäköisyydet esimerkiksi siten, että otetaan lähtökohdaksi tilan 0 todennäköisyys, jolloin muiden tilojen todennäköisyydet voidaan ratkaista rekursiivisesti kaavoista  $8P(0) = 20P(1+0)$ ,  $8P(1+0) = 20P(1+1)$  jne. Kun vielä tiedetään, että järjestelmä on täsmälleen yhdessä tilassa, voidaan todennäköisyydet laskea suhteellisen helposti (jos kuva on osattu johtaa oikein, useimmat osaavat kyllä suorittaa laskelmatkin oikein). Tilojen todennäköisyyksiksi saadaan:

$$P(0) = 0,6062$$

$$P(1+0) = 0,2425$$

$$P(1+1) = 0,0970$$

$$P(1+2) = 0,0388$$

$$P(1+3) = 0,0155$$

Tämän jälkeen kohtien  $a$  ja  $b$  ratkaisut ovat melko yksinkertaisia. Kohdan  $a$  vastaus on tilan  $P(1+3)$  todennäköisyys (0,0155) kertaa tulevien asiakkaiden määrä tunnissa (20) eli 0,31. Kohdassa  $b$  vastaus saadaan yhteenlaskulla  $1P(1+1) + 2P(1+2) + 3P(1+3) = 0,221$  (tässäkin kohdassa on varsin helppo erehtyä ottamalla mukaan myös automaattia käyttävä asiakas).

Kohdan  $c$  laskemiseen ei edellä esitettyjä laskelmia tarvita ollenkaan. Ainoa mitä tarvitsee tietää, on eksponentiaalisen jakauman niin sanottu muistamattomuusominaisuus, joka tässä tapauksessa merkitsee sitä, että asiakkaan jäljellä oleva keskimääräinen palveluaika on aina vakio. Tässä tapauksessa automaatilla olevan asiakkaan jäljellä oleva aika on keskimäärin 3 min ja ensimmäisenä jonossa olevan automaatilla käyttämä aika on keskimäärin myös 3 min eli yhteensä 6 min.