3. Siirtoyhteyskerros

linkkikerros (Data Link Layer)

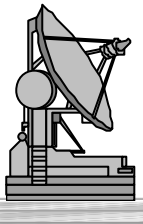
- **yhtenäinen linkki solmusta solmuun**
  - **bitit sisään => bitit ulos**
- **ongelmia:**
  - **siirtovirheet**
    - **havaitseminen**
    - **korjaaminen**
  - **solmun kapasiteetti**
    - **vuonvalvonta**

Virheiden hallinta

- **bittivirta ==> kehyksiä**
  - **tarkistus**
  - **korjaus /uudelleenlähetys**
- **kuittaus**
  - **mitä lähetettävä uudelleen**
  - **kuittausviive**
    - **odotettava kuittausta**

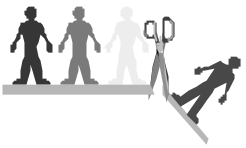
Kuittausviive

- **hidastaa lähetystä**
  - **odotettava kuittausta ennenkuin voidaan lähettää lisää**
    - **esim. satelliiteilla viive hyvin pitkä**
- **tuhlaa kapasiteettia**
    - **linja käyttämättömänä odottelun ajan**
- **lähetetään ennakkoon**
  - **kuittaukset ja lähetykset 'limittyvät'**
- korjaava koodi
    - vastaanottaja pystyy korjaamaan



Vuonvalvonta

- **lähetetys ei saa ylittää vastaanottajan käsittelykapasiteettia**
  - **rajalliset puskurit**
  - **ylimäärä häviää**
- **kapasiteettiraja = (ennakko)lähetysmäärän rajoitus**



3.1. Suunnitteluperiaatteita

- **siirtoyhteyskerros tarjoaa palveluja verkkokerrokselle**
  - **datan siirto lähdekoneen verkkokerrokselta kohdekoneen verkkokerrokselle**
    - **kuittaamaton yhteydetön palvelu**
    - **kuittaava yhteydetön palvelu**
      - **virheelliset havaitaan ja lähetetään uudestaan**
    - **kuittaava yhteydellinen palvelu**
      - **luotettava bittivirta**

Verkkokerroksen tarpeet ja perustason laatu => linkkitason tehtävät

- **virheettömyys**
  - **perustaso luotettava, linkkitaso ei tee mitään**
  - **perustaso epäluotettava, linkkitaso kuittaava**
- **järjestys**
  - **yhteydetön: järjestys voi muuttua**
  - **yhteydellinen: järjestys säilyy**
- **kaksoiskappaleet**
  - **kuittaava: voi syntyä**
    - **yhteydetön: ei havaita/havaitaan**
    - **yhteydellinen: kaksoiskappaleet tuhotaan**

Missä virhe hoidetaan?

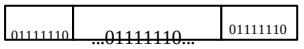
- **kuittaava linkkikerros havaitsee virheet ja korjaa ne**
- **yhteydetön, kuittaamaton & virhe**
  => kuljetuskerros havaitsee ja korjaa
- **ja jos ei, niin sovelluskerros havaitsee ja korjaa**
- **ja jos ei, niin asiakas havaitsee ja korjaa**

3.1.2. Kehystys (framing)

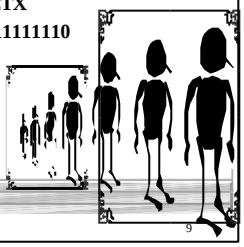
- **tavoite**
  - **bittivirheiden hallinta**
    - **muuttuu**
    - **katoaa**
    - **monistuu**
- **bittivirta kehyksinä**
- **kehys tarkistettavissa**
  - **tarkistustietoa**

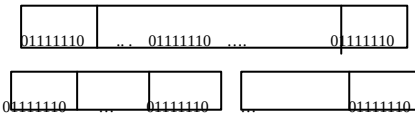
Kehysrakenne

- **bittivirta => kehysrakenne?**
  - **Miten kehys rajataan?**
    - **aloitusmerkki DLE STX, lopetusmerkki DLE ETX**
    - **erillinen lipputavu: 011111110**



Entä jos haluaa lähettää kehyksessä datana 01111110 tai DLE- merkin ?





Ongelma ratkaistaan: Bitin lisääminen (Bit stuffing)

- **lisäämällä lähetysvaiheessa automaattisesti dataan ylimääräinen 0-bitti aina viidennen peräkkäisen 1-bitin perään.**
  01111110 => lähetetään 011111010
- **siis ensin linjalle lähetetään lippukuvio ja sitten data, johon on tarvittaessa lisätty ylimääräinen bitti**
- **vastaanotossa ylimääräiset 0-bitit poistetaan automaattisesti**

- **Samoin lisätään ylimääräinen DLE-merkki jokaisen datassa olevan DLE-merkin jälkeen** (character stuffing)

Kehystahdistus = löydetään kehysrajat

- **kehystahdistus onnistuu mielivaltaisen bittivirheen jälkeen**
  - **bittivirhe rikkoo lippukuvion**
    01111110 => 01101110
  - **bittivirhe tekee dataan ylimääräisen lippukuvion**
    … 01110110 => 01111110
  - **näistä huolimatta parin virheellisen kehyksen jälkeen löydetään 'oikea' kehyksen alku**

Kehysten kuljetus

- **tavoite**
  - **kaikki kehykset**
  - **kukin kehys virheettömästi**
  - **lähetysjärjetyksessä**
- **vastaanottaja kertoo lähettäjälle**
  - **ACK: kehys vastaanotettu ok**
    - **tietty kehys**
    - **kaikki kehykset tähän asti**
  - **NAK: kehyksessä vikaa => lähetettävä uudelleen**
  - **Saako lähettää lisää vai pitääkö keskeyttää**
    - **vuonvalvonta**

Kehysten kuljetus (2)

- **Entä jos kehys katoaa kokonaan?**
  - **Ei tule mitään kuittausta!**
  - **Joko sanoma kadonnut tai kuittaus kadonnut**
- **lähettäjän ajastin**
  - **laukeaa, jos kuittausta ei tule tiettynä aikana**
  - **ajastimen laukeaminen => uudelleenlähetys**
- **=> vastaanottaja voi saada useita kopioita**
  - **kyettävä erottamaan duplikaatit**

  => kehysnumero

Vuonvalvonta

- **lähettäjä ei saa lähettää enempää kuin vastaanottaja kykenee käsittelemään**
  - **puskurit vuotavat yli => dataa katoaa**
- **vastaanottaja säätelee lähettämistä**
  - **lähetyslupa N:lle kehykselle**
  - **odota sitten uutta lupaa**

3.2. Virheiden havaitseminen ja korjaaminen

Virheiden takia dataan lisäinformaatiota:

- **virheen korjaus (error-correcting code, forward error control)**
  - **lisäinformaatiota niin paljon, että vastaanottaja sekä havaitsee että kykenee itse korjaamaan virheen**
- **virheen havaitseminen (error-detecting code, feedback/backward error control)**
  - **lisäinformaatiota, jotta vastaanottaja havaitsee virheen tapahtuneen => korjauksena uudelleenlähetys**

Korjaus/havaitseminen

- **virheen korjaava koodaus**
  - **kallis koko ajan**
    - **paljon lisäinformaatiota**
  - **rajoitettu korjauskyky**
    - **esim. kokonaan kodonnut kehys**
- **virheen havaitseva koodaus**
  - **virheen sattuessa kallis**
    - **uudelleen lähettäminen maksaa**
    - **uudelleen lähettäminen on hidasta**

Virheet

- **Kahdenlaisia virheitä:**
  - **yhden bitin virheet**
  - **usean peräkkäisen bitin vääristyminen (burst error)**
- **Virheiden esiintymistiheys**
  - **BER (bit error rate)**
  - **mitä suurempi BER, sitä lyhyempiä kehyksiä kannattaa käyttää**

Virheen korjaus

- Käytetään esim.
  - CD- ja DVD-levyissä, digitaalitelevisiossa
  - nopeissa modeemeissa, kannettavissa puhelimissa
  - satellittiyhteyksissä, avaruusluotaimissa
- Esimerkkejä
  - Hamming-pariteettitarkistus (Tito-kurssilla)
    - pystyy korjaamaan yhden virheellisen bitin
    - virheryöpyn, jos se jaetaan yhden bitin virheiksi
  - Reed-Solomon -koodit
    - lohkokoodeja , jotka pystyvät korjaamaan virheryöppyjä

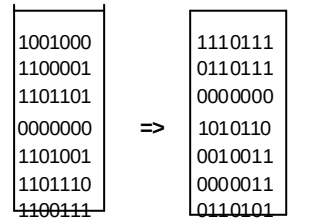
Yhden bitin virheet korjaava koodi

- **Hamming: minimimäärä tarkistusbittejä, kaikkien yhden bitin virheiden korjaamiseksi**
- **00110010000**
  - **bitit 1, 2, 4, 8, 16,.. eli kakkosen potenssit tarkistusbittejä (pariteettibittejä)**
  - **muut 3,5,6,7,9,10,11, … databittejä**
- **yhtä databittiä varmistaa usea pariteettibitti**
  - **esim. paikassa 11 olevaa bittiä tarkistusbitit paikoissa 1+2+8 =11**
  - **kun tarkistusbitit paikoissa 1, 2 ja 8 eivät täsmää => bitti paikassa 11 on virheellinen**

Virheryöpyn korjaaminen

- **Hamming-koodit korjaavat vain yksittäisiä virheitä**
- **virheryöpyn korjaamiseksi järjestetään k peräkkäistä koodisanaa matriisiksi**
  - **yksisana per rivi**
- **lähetetään matriisi sareke kerrallaan**
  - **ei siis rivi kerrallaan**
  - **k:n bitin mittainen virheryöppy hajoaa k:ksi yksittäiseksi virheeksi**
    - **korkeintaan yksi virhe yhdessä koodisanassa**
    - **jonka Hamming-koodi osaa korjata**

Esimerkiksi:



virheryöppy yksittäisiä virheitä

Virheen havaitseminen

- Pariteettibitti
  - parillinen pariteetti
  - pariton pariteetti
- horisontaaliset ja vertikaaliset pariteetit
- CRC (Cyclic redundancy code (tai check))
  - **yleisimmin käytetty virheen paljastusmenetelmä**
  - **perustuu polynomien aritmetiikkaan (modulo2-aritmetiikkaan, XOR)**
  - **useita tarkistusbittejä => havaitaan usean bittivirheen ryöppy**

Pariteetti

- **esimerkki yksinkertaisesta virheen havaitsevasta koodista**
- **jokaiseen merkkiin lisätään yksi ylimääräinen ns. pariteettibitti**
  - **lisäyksen jälkeen kaikissa merkeissä on parillinen (tai jos niin sovitaan pariton) määrä ykkösiä**
- **paljastaa kaikki yhden bitin virheet**
  - **kehyksen pituudesta riippumatta**
- **ei paljasta kahden bitin virheitä**

Pariteettibitin käyttö

- **erityisesti asynkronisessa tiedonsiirrossa merkkejä siirrettäessä**
- **käytännössä paljastaa noin puolet virheellisistä bittijonoista**
  - **esim. modeemeissa syntyy useita virheitä**
  - **linjahäiriöt aiheuttavat usein pitkiä virheryöppyjä**

Horisontaaliset ja vertikaaliset pariteetit

- **järjestetään bittijono kaksiulotteiseen taulukkoon**
- **lasketaan pariteetti jokaiselle vaaka- ja pystyriville**

1 0 0 1 0 1 0	1	
0 1 1 1 0 1 0	0	
1 1 1 0 0 0 1	0	horisontaaliset
1 0 0 0 1 1 1	0	pariteetit
0 0 1 1 0 0 1	1	
1 0 1 1 1 1 1	0	taulukon pariteetti
vertikaaliset pariteetit		

Virheiden havaitseminen

- **Ei löydä lyhyitä virheryöppyjä, joissa neljä bittiä vaihtuu sopivasti**

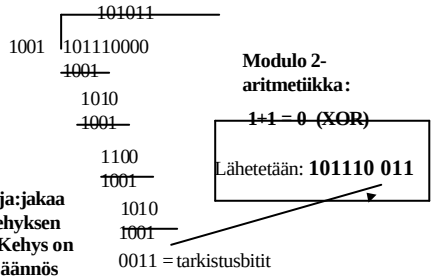
1 0 0 1 0 1 0
0 1 1 1 0 1 0
1 1 1 0 0 0 1
1 0 0 0 1 1 1
0 0 1 1 0 0 1

CRC:n perusidea

- **tarkistusavain (virittäjä, virittäjäpolynomi)**
  - **L+1 bittiä**
  - **lähettäjä ja vastaanottaja tuntevat**
- **lähettäjä**
  - **laskee lähetettävälle datalle tarkistusbitit ja liittää ne kehykseen**
- **vastaanottaja**
  - **tarkistaa, onko koko saapunut kehys (data + tarkistusbitit) pysynyt muuttumattomana**

Esimerkki: data = **101110**, virittäjä = **1001**,(polynomina X**3 +1), tarkistusbittejä 3

Lähetettävä data = **101110???** **tarkistusbitit**



Vastaanottaja:jakaa saamansa kehyksen virittäjällä. Kehys on ok, jos jakojäännös on 0!

Standardoituja virittäjiäpolynomeja

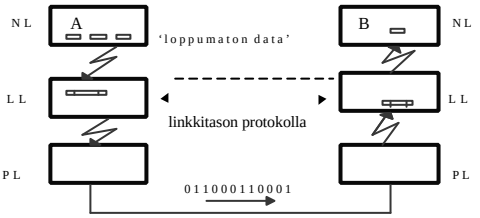
- **CRC-12 = x**12 + x**11 + x**3 + x**2 + x + 1**
- **CRC-16 = x**16 + x**15 + x**2 +1**
- **CRC-32=x**32+ x**26 + x**23+…+ x**4 + x**2 + x+1**

CRC: n virheiden havaitsemiskyky

- kaikki virheröypyt, joiden pituus < tai = virittäjän
- useimmat virheryöpyt, joiden pituus on suurempi
  - **CRC-32: P{ryöppy > 33 havaitaan} = 0.9999999998**
  - – Huom
    - » Arvioinneissa lähtökohtana ollut täysin satunnainen bittien jakautuminen, mutta todellisuudessa näin ei ole!
    - » Joten havaitsemattomien virheiden määrä on arvioitua suurempi.

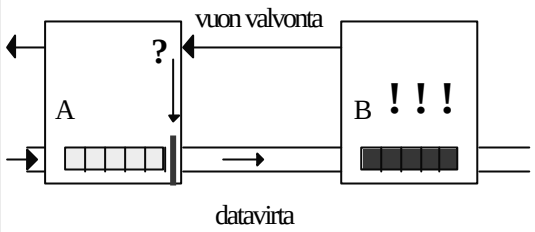
3.3. Linkkitason protokollat

Peruskäsitteet



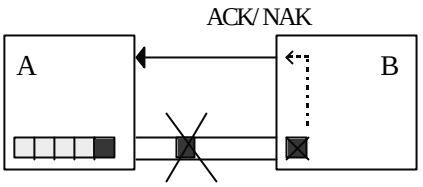
- **NL: A=> B " datavirtaa luotettavasti ja yhteydellisesti"**
- **LL: siirtää dataa, suorittaa tarkistukset, virheestä toipumiset, huolehtii vuon valvonnasta**

Vuon valvonta



- **X-ON / X-OFF : GO! | STOP!**

Kohinainen kanava



- **sanoma vääristyy => virhetarkistus**
- **sanoma katoaa => ajastin ja uudelleenlähetys**
  - **duplikaattien havaitseminen**

Yksinkertainen **Stop and wait** -protokolla

- **Oletus**
  - **virheetön siirto => ei huolta virheistä**
  - **mutta vuonvalvontaa tarvitaan**
- **lähettäjä**
  - **lähettää kehyksen**
  - **odottaa lupaa lähettää seuraava kehys**
- **vastaanottaja**
  - **käsittelee kehyksen**
  - **lähettää tiedon (=antaa luvan) lähettäjälle**

ARQ-protokolla
(Automatic Repeat Request)

- **normaali tilanne**
  - **kohinainen kanava => virheitä**
  - **sanomat ja kuittaukset voivat kadota**
- **ajastin lähettäjälle**
  - jos kuittausta ei kuulu, kehys lähetetään automaattisesti uudelleen
  - **kuittaus: ACK ='ok, lähetä seuraava'**
  - **uudelleenlähetys synnyttää kaksoiskappaleita!**
- **kehysnumerointi**
  - jotta vastaanottaja tunnistaa kaksoiskappaleet
  - Miten paljon numeroita tarvitaan?
    - **Numero vie tilaa kehyksessä!**

Stop and wait -protokollan suorituskyky

- Esim. satelliittiyhteydellä
  - 50 kbps, kiertoviive ~520 ms, kehys 1000 bittiä
  - kanavan käyttöaste **< 4%**
- => lähetetään useita kehyksiä ja sitten vasta odotetaan kuittauksia
  - **ideaali: lähetykset liukuhihnalla (pipeline)**
    - **lähetykset ja kuittaukset limittyvät**
    - **ei mitään odottelua**
    - **lähetyskanava koko ajan käytössä**
  - **suorituskyky kasvaa**

Liukuvan ikkunan protokolla
(Sliding Window)

- **Lähetysikkuna**
  - **ikkunan koko**
    - montako kehystä saa korkeintaan olla kuittaamatta
    - järkevä koko riippuu yhteyden tyypistä ja vastaanottajan kapasiteetista
  - **sisältö = mitkä kehykset saa lähettää**
    - kehyksellä järjestysnumero
      - **rajallinen, N bittiä => 2**N arvoa**
      - **numerot käytettävä järjestyksessä**

- Lähettäjä joutuu odottamaan vasta, kun kaikki ikkunan kehykset on lähetetty
  - **eli kehysnumerot käytetty**
- Kun kuittaus saapuu => ikkuna liukuu
  - **seuraavat kehysnumerot tulevat luvallisiksi**
- **eli**
  - **lähettäjä: tietyllä hetkellä sallittujen numeroiden joukko = lähettäjän ikkuna**
    - **mitkä kehykset saa lähettää "etukäteen" odottamatta kuittausta**

- **Vastaanottajan ikkuna**
  - **kullakin hetkellä sallittujen numeroiden joukko**
    - **mitä kehyksiä suostuu vastaanottamaan**
  - **kuittaus muuttaa myös vastaanottajan ikkunan**
- **ikkuna pysäyttää kehysten lähetyksen**
  - **seuraava kehysnumero ei ole lähetysikkunassa**
- **ikkuna estää kehyksen vastaanoton**
  - **saadun kehyksen kehysnumero ei ole vastaanottoikkunassa**

Kun ikkunan koko on 1

- **Aina vain yksi kehys kuittaamattomana**
  - **=> One Bit Sliding Window -protokolla**
  - **~ stop and wait -protokolla**
- **kehysnumerot 0 ja 1 riittävät**
- **ACK-kehyksessä viimeksi vastaanotetun virheettömän kehyksen kehysnumero**
  - **jotta kuittausduplikaatti ei voi kuitata väärää kehystä**
- **samanaikainen aloitus tai liian lyhyt lähettäjän ajastimen aika voi aiheuttaa paljon turhia lähetyksiä**

- **entä kun tapahtuu virhe?**
  - **kaksi eri tapaa hoitaa**
  - **toisto virheestä lähtien (go back n)**
  - **valikoiva toisto (selective repeat)**

Paluu n:ään ('Go back n')

- **virheellisen kehyksen havaittuaan**
  - **vastaanottaja hylkää kaikkia sen jälkeiset kehykset**
  - **eikä lähetä niistä kuittauksia**
- **kun lähettäjä ei saa kuittauksia,**
  - **sen lähetysikkuna 'täyttyy'**
  - **eikä se voi enää lähettää**
- **lähettäjän ajastimet laukeavat aikanaan ja**
  - **virheellinen kehys**
  - **sekä kaikki sen jälkeen lähetetyt kehykset lähetetään uudelleen**
- **tehoton, jos paljon virheitä ja iso ikkuna**

Valikoiva toisto

- **vastaanottaja hyväksyy kaikki kelvolliset kehykset**
  - **se kuittaa kehykset**
  - **puskuroi ne ja toimittaa eteenpäin oikeassa järjestyksessä**
    - **tarvitaan puskuritilaa**
- **lähettäjä ei saa kuittausta virheellisestä kehyksestä**
  - **ajastin laukeaa ja kehys lähetetään uudelleen**
  - **lähettää uudelleen vain virheellisen kehyksen**
  - **ikkuna liukuu nytkin tasaisesti**
    - **yksi puuttuva kuittaus voi pysäyttää lähetyksen**

Ikkunankoko

- **Kun käytetty numeroavaruus on 0, 1, .. n ja eri numeroita siis käytettävissä n+1**
  - **yleensä jokin kakkosen potenssi**
- **ikkunan koko 'go back n':ssä voi olla korkeintaan n**
- **ikkunan koko valikoivassa toistossa voi olla korkeintaan (n+1)/2**

Kaksisuuntainen liikenne

- **datakehys ja kuittauskehys**
- **kehyksessä sekä data että kuittaus**
  - **'piggypacking'**
  - **tehostaa lähetystä**
- **ongelma: kauanko kuittaaja odottaa dataa ennen pelkän kuittauksen lähettämistä?**

Negatiiviset kuittaukset

- **NAK-kuittauksilla voidaan nopeuttaa uudelleenlähettämistä**
  - **vastaanottaja ilmoittaa heti virheellisestä tai puuttuvasta kehyksestä**
  - **ei ole tarpeen odottaa ajastimen laukeamista**
- **hyödyllinen, jos kuittausten saapumisaika vaihtelee paljon**
  - **ajastinta vaikea asettaa oikein**

- **NAK-kuittaukset voivat aiheuttaa turhia uudelleenlähetyksiä**
  - **lähetys ja kuittaus menevät ristiin**
- **NAK-kuittauksen katoaminen ei haittaa**
- **implisiittinen uudelleenlähetys**
  - **ei NAK-kuittauksia**
- **explisiittinen uudelleenlähetys**
  - **käytetään NAK-kuittauksia**

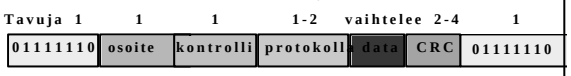
3.6. Linkkitason protokollia

- Linkkitason protokollia on useita
  - **HDLC** (High-level Data Link Control)
    - useita, enemmän tai vähemmän toisistaan poikkeavia yhteensopimattomia versioita
    - käsitellään jonkin verran harjoituksissa
  - **PPP** (Point-to-Point Protocol)
    - soittoyhteys modeemin tai ISDN:n kautta tietokoneeseen
    - yleisimmin käytettyjä linkkiprotokollia

PPP (Point-to-Point Protocol)

- IETF:n vaatimuksia
  - hyvin toimiva kehystys
  - kehysten virhetarkistus (virheellinen kehys tuhotaan!)
  - havaitsee, jos yhteys ei toimi ja ilmoittaa tästä verkkokerrokselle
  - useat verkkokerroksen protokollat voivat käyttää
  - verkko-osoitteista sopiminen mm. IP-osoitteet neuvoteltavissa yhteyden muodostuksen aikana
  - autentisointi mahdollista
  - ei vuonvalvontaa

PPP-kehys



- **lipputavu 01111110,**
  - **character stuffing, DLE = 01111101**
- **osoitekenttä aina 11111111 (=yleislähetys)**
- **kontrollikenttä aina 00000011**
  - **osoite- ja kontrollikenttä voidaan jättää kokonaan pois**
- **protokolla: mille protokollalle data on tarkoitettu**
  - **esim. IP, IP:n Control Protocol, PPP:n Link Control Protocol**
- **data: sisältää ylemmälle protokollalle tarkoitettua dataa**
  - **maksimi sovitaan, oletusmaksimi 1500 tavua**
- **CRC: tarkistusbitit;**

- LCP (Link Control Protocol)
  - » muodostaa ja testaa linjayhteyksiä
  - » neuvottelee yhdeyden ominaisuuksista
  - » purkaa yhteyden, kun sitä ei enää tarvita
- NCP (Network Control Protocol)
  - » neuvottelee verkkokerroksen optioista
  - » oma NCP kullekin verkkoprotokollalle
  - » TCP/IP: tärkein tehtävä IP-osoitteen antaminen päätteelle dynaamisesti

Yhteydenotto PPP:llä

- soitto modeemilla reitittimeen
  - » fyysinen yhteys
- PPP-parametrien valinta
  - » LCP-paketteja vaihtamalla
- verkkokerroksen konfigurointi
  - » TCP/IP: IP-osoitteen antaminen PC:lle
  - » PC => tilapäinen Internet isäntäkone
- PC voi lähettää ja vastaanottaa tavallisen isäntäkoneen tapaan

Yhteyden purku

- NCP purkaa verkkoyhteyden ja vapauttaa IP-osoitteen
- LCP purkaa siirtoyhteyskerroksen

Linjayhteyden muodostus

- Dead
  - » ei kantoaaltoa, ei peruskerroksen yhteyttä
- Established
  - » peruskerroksen yhteys muodostettu
  - » sovitaan LPC-optioista
- Authenticate
  - » osapuolet varmistuvat toistensa identiteetistä
- Network
  - » NCP konfiguroi verkkokerroksen

- Open
  - » tiedonsiirto voi alkaa
- Terminate
  - » kun tiedonsiirto suoritettu => lopetustilaan
  - » tästä palataan alkutilaan lopettamalla kantoaalto

LPC-pakettityypit

- optioista ja niiden arvoista sopiminen
  - Configure-
    - » request ehdotettuja optioita ja arvoja
    - » ack kaikki hyväksytään
    - » nak optioita, joita ei voida hyväksyä
    - » reject optioita, joista ei voida neuvotella
- linjan sulkeminen
  - Terminate-
    - » request linjan sulkemispyyntö
    - » ack OK, linja suljetaan

- tuntemattomat sanomat
  - Code-reject tuntematon pyyntö
  - Protocol-reject tuntematon protokolla
- linjan testaus
  - Echo-request palauta tämä kehys
  - Echo-reply tässä kehys takaisin
  - Discard-request hylkää tämä testisanoma

Yhteenveto

- tehtävät
- kehystys
- virhetarkistukset
  - havaitseva / korjaava
  - pariteetti, Hamming, CRC
- linkkitason protokollien peruskäsitteitä
  - stop and wait
  - liukuva ikkuna
  - go-back n
  - valikoiva toisto
- esimerkki: PPP