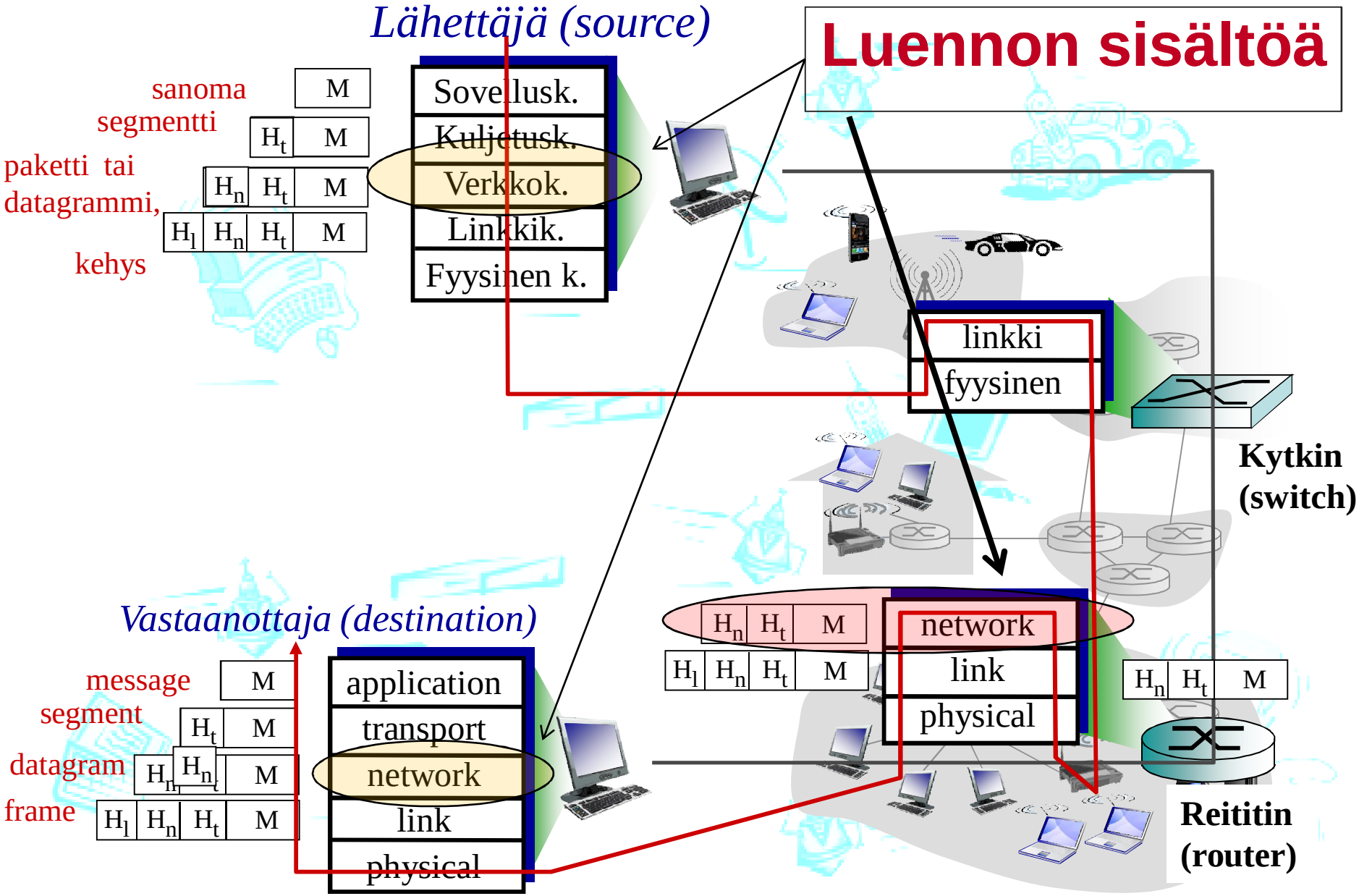
# Tietoliikenteen perusteet

## Luento 7: Verkkokerros verkkokerroksen tehtävät, IP-protokolla, reititin

Syksy 2014, Tiina Niklander

Kurose&Ross: Ch4

# Luennon sisältöä



# Sisältöä

**Verkkokerros**
**Reititin**
**IP-protokolla**

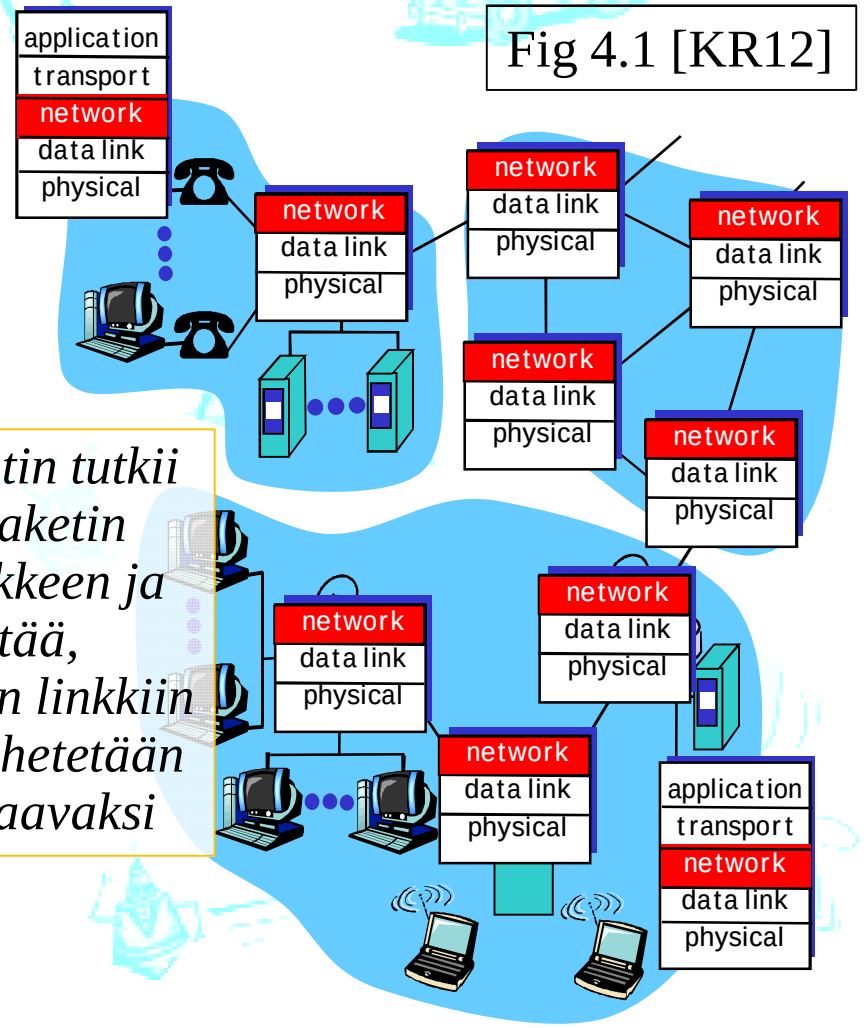
**IP-osoitteet, DHCP, NAT**
**Reititysalgoritmit**

Oppimistavoitteet:
- Osaa selittää, kuinka IP-paketteja välitetään verkossa
- Tietää, mitä tietoja sisältyy IP-pakettiin (ja miksi)
- Osaa selittää reitittimen rakenteen ja toiminnan
- Osaa kuvailla, kuinka reitittimet kokoavat reititystietonsa
= linkkitila- ja etäisyysvektorialgoritmien toimintaideat

# VERKKOKERROKSEN TEHTÄVÄT

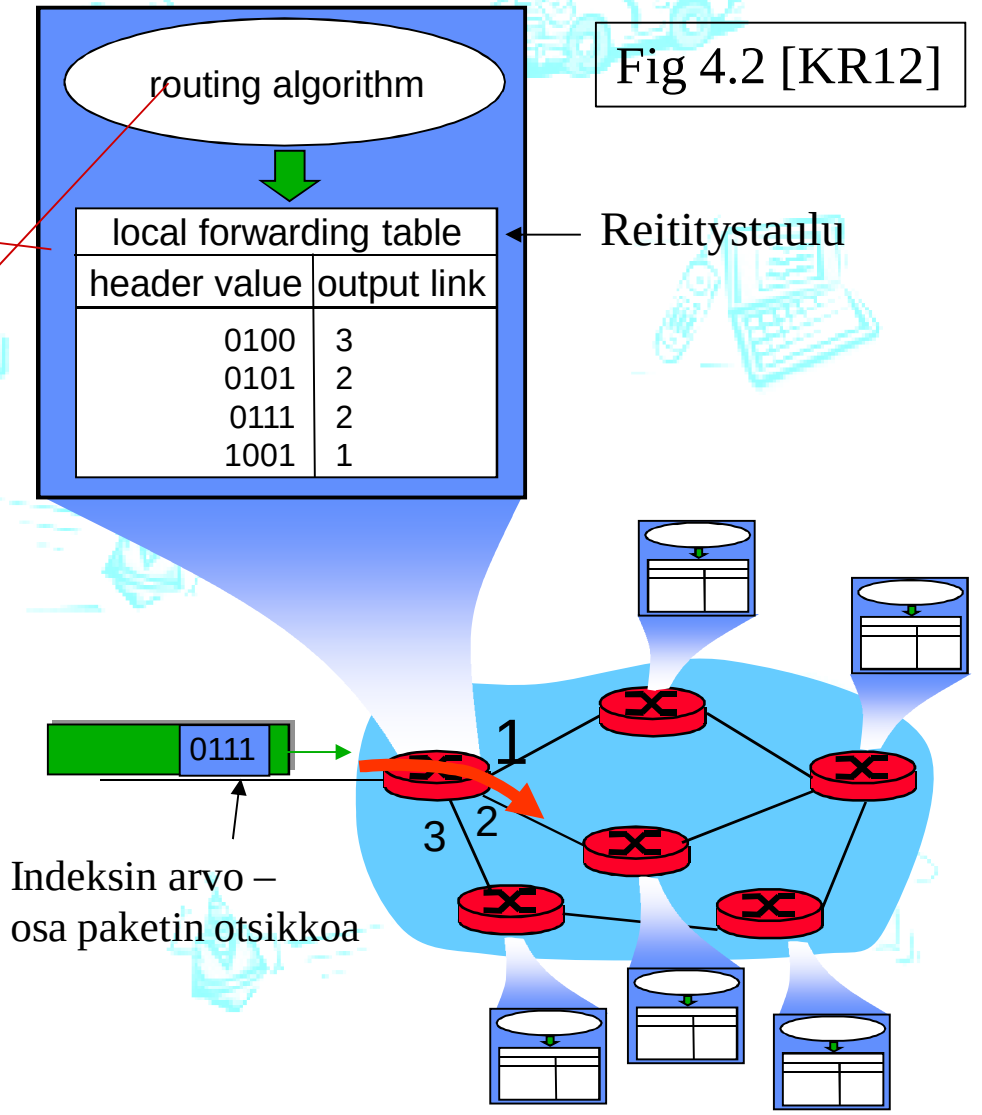
# Verkkokerros: Toimittaa kuljetuskerroksen segmentit vastaanottajalle

- Lähetys
  - Luo kuljetuskerroksen segmenteistä verkkokerroksen IP-paketteja
  - Lisää otsaketietoja: mm. IP-osoitteet
- Pakettien kulku verkossa
  - Isäntä (lähde) – reititin - ...- reititin – isäntä (kohde)
- Vastaanotto
  - Poista otsake
  - Anna segmentti kuljetuskerrokselle



# Paketin välitys ja reititys

- Reitittimen kaksi tehtävää:
- Paketin välitys (forwarding)
  - Paikallinen päätös
  - mihin ulosmenolinkkiin paketti lähetetään
  - katsoo linkin reititystaulusta
- Reititys (routing)
  - Globaali päätös
  - mitä reittiä paketti kulkee lähettäjältä vastaanottajalle
  - reititystaulun ylläpito



# Miksi verkkokerros?

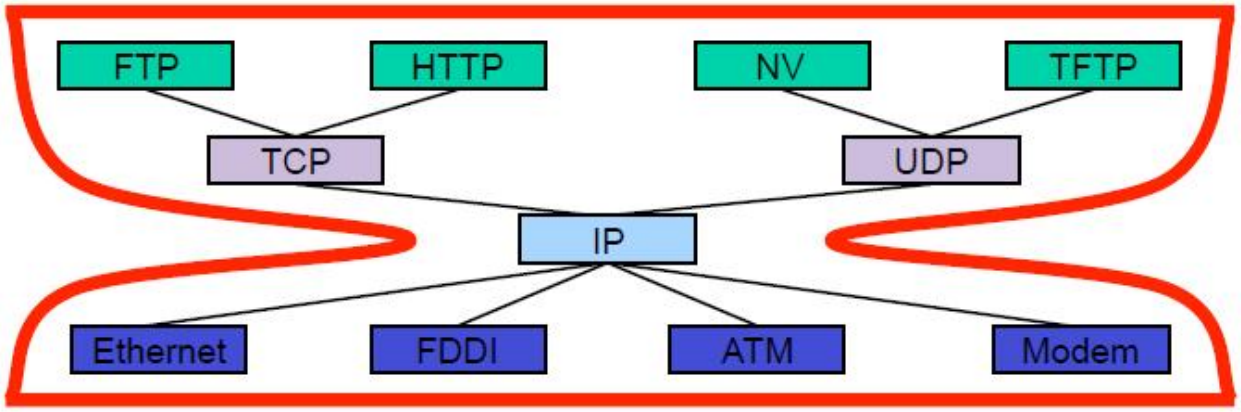
- Internet koostuu hyvin heterogeenisista verkoista
  - Verkot toteutettu eri teknologialla
  - Verkoilla kehyksen (frame) maksimikoko erilainen
  - Palvelu: yhteydellinen / yhteydetön,
  - Erilaisia osoittamistapoja: yksitasoinen/hierarkkinen
  - Monilähetys / yleislähetys
  - Toiminnot: virheenkäsittely, vuonvalvonta, ruuhkanvalvonta, yhteyden laatu / laatutakuu (QoS), turvaus, laskutus, ..

# Verkkoprotokolla: IP

”Everything over IP, IP over everything”

- Verkkoprotokolla IP (Internet Protocol) on verkkokerroksen yhteinen kieli
  - Internetin isäntäkoneiden ja reitittimien kommunikointitapa
    - “Kullakin omat murteensa ja tapansa, mutta kaikki osaavat IP:tä.”
- Yhteinen osoitustapa:  IP-osoite
  - Yksikäsitteiset osoitteet

Prof. B. Godfrey, 4.3.2011, luentokalvo, Univ. Illinois



# Verkon palvelun laatu

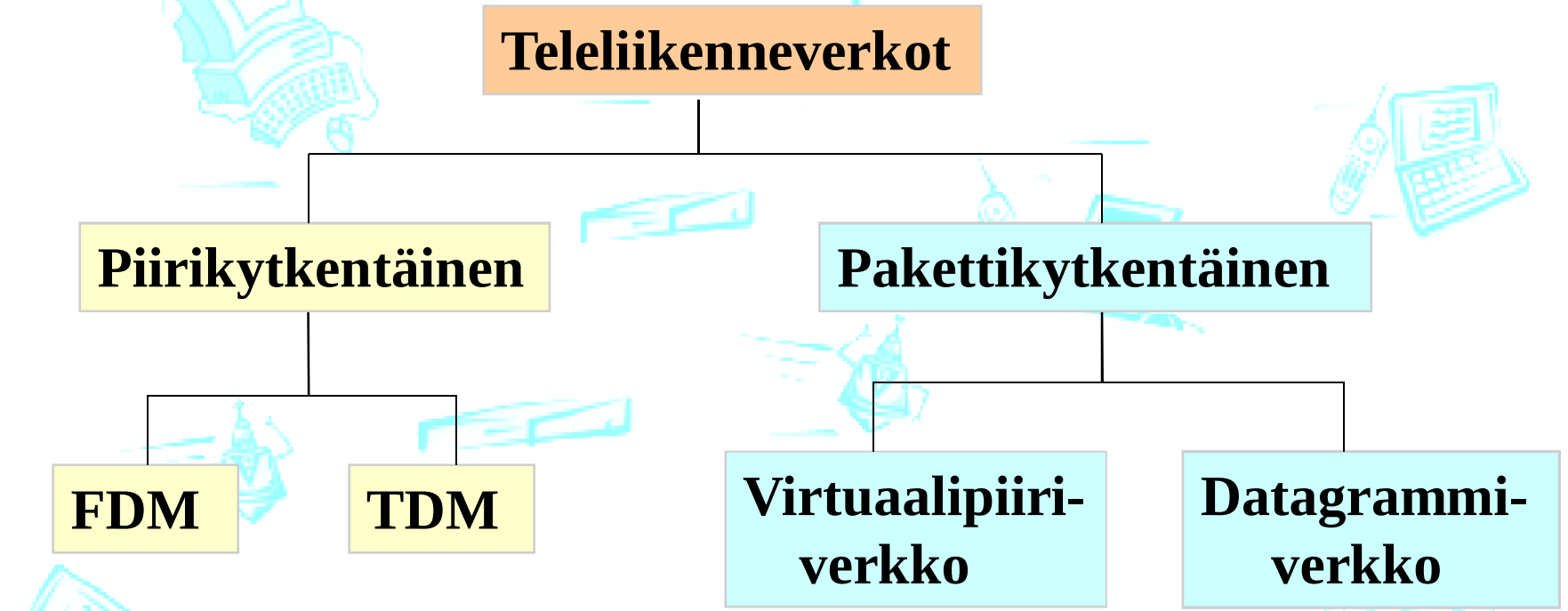
Table 4.2 [KR12]

| Network Architecture | Service Model | Guarantees ? | | | | Congestion feedback |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Bandwidth | Loss | Order | Timing | |
| Internet | best effort | none | no | no | no | no (inferred via loss) |
| ATM | CBR | constant rate | yes | yes | yes | no congestion |
| ATM | ABR | guaranteed minimum | no | yes | no | yes |

ATM – Asynchronous Transfer Mode
CBR – Constant Bit Rate
ABR – Available Bit Rate

(ATM-verkko on puhelinverkon ytimessä)

# Verkkojen taksonomia




FDM – Frequency-division Multiplexing
TDM – Time-division Multiplexing

# Pakettikytkentäinen verkko

- Joko datagrammiverkkona (= Internet)
  - Sanoman jokainen paketti reititetään erikseen
    - kohteen IP-osoitteen perusteella

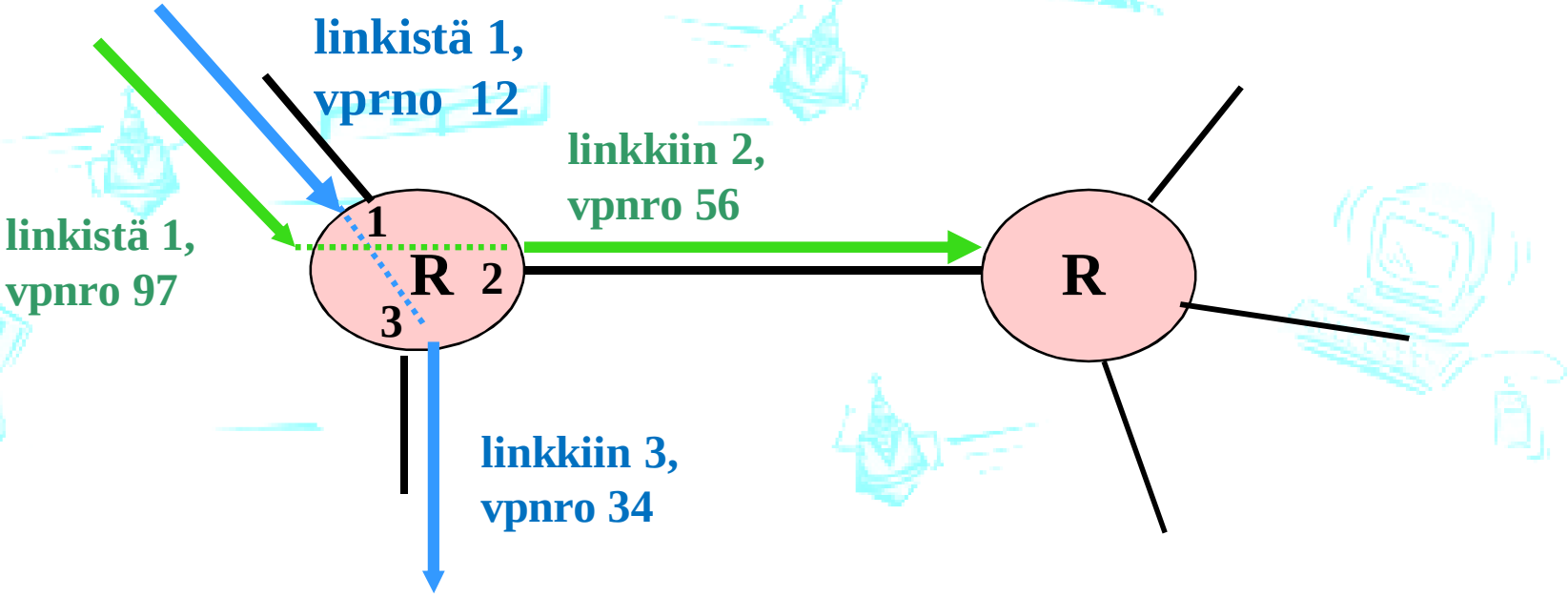
"Tyhmä verkkokerros": vain pakettien välitys koneelta koneelle

"Fiksut isäntäkoneet": virheenvalvonta, vuonvalvonta, järjestys

- tai virtuaalipiiriverkkona
  - Sanoman jokainen paketti kulkee samaa reittiä pitkin
    - linkkiin liitetyn virtuaalipiirinumeron perusteella
  - Signalointiprotokolla: yhteydenmuodostus, ylläpito, purku
    - yhteyden tietoja reitittimessä (virtuaalipiirin muunnostaulukko)
    - mahd. myös kaistanvarausta
  - Fiksu verkkokerros: vuonvalvonta, virhevalvonta, järjestys
  - tyhmät isäntäkoneet: vrt. puhelin
  - ATM-verkot (Asynchronous Transfer Mode), X.25-verkot

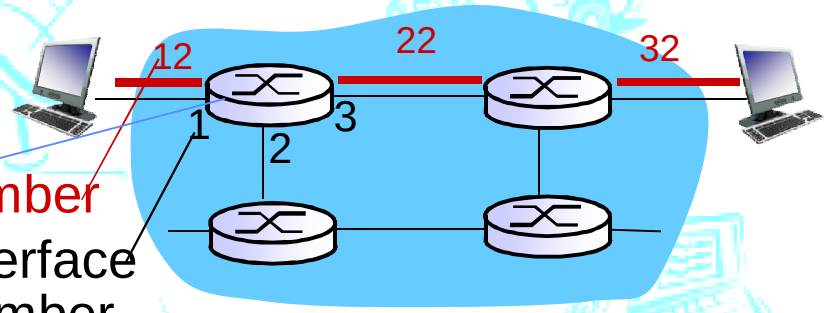
# Reititys: Virtuaalipiiriverkko

- 1. paketti muodostaa reitin, muut paketit kulkevat samaa reittiä
  - otsakkeessa kohdeosoitteen lisäksi virtuaalipiirinumero (vpnro)
  - reititin ylläpitää tietoa piirinumeroista (’hajujälki’)
- Reititys = selvitä vpnro:a vastaava linkki, välitä paketti linkille



# Virtuaalipiirin muunnostaulukko

Fig 4.3 [KR12]




*Reitittimen muunnostaulukko:*

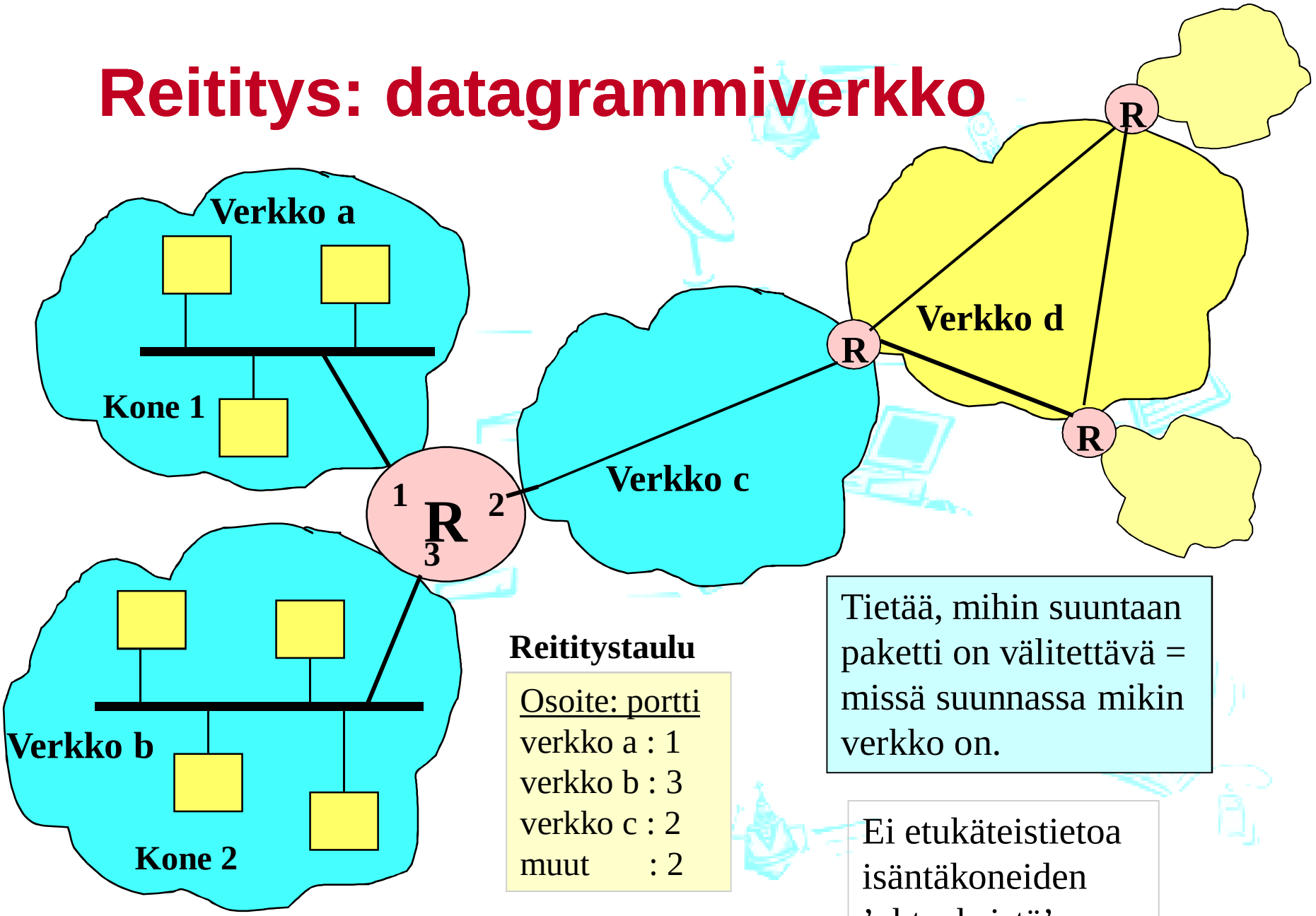
| Incoming interface | Incoming VC # | Outgoing interface | Outgoing VC # |
|---|---|---|---|
| 1 | 12 | 3 | 22 |
| 2 | 63 | 1 | 18 |
| 3 | 7 | 2 | 17 |
| 1 | 97 | 3 | 87 |
| … | … | … | … |

**Taulukkoa päivitettävä aina kun uusi yhteys on muodostettu tai vanha purettu!**
**Pakettivälitystä: Ylläpitää kyllä tilatietoja yhteydestä (=vpnro),**
**mutta ei varaa resursseja etukäteen!**

# Virtuaalipiirin muunnostaulukko

- Virtuaaliyhteyden joka linkillä omat VP-numerot
  - reititin antaa VP-numerot
- *Miksi ei käytetä koko yhteydellä samaa VP-numeroa?*
  - Tarvittaisiin paljon enemmän numeroita!
  - Nyt riittää pienempi numeroavaruus =>
  - tarvitaan lyhyempi kenttä numeroa varten
    - 0-255 => riittää 8 bittiä
    - 0-4095 => tarvitaan 12 bittiä
  - Yhteisestä, koko verkon läpikäyvästä numeroinnista sopiminen on isossa verkossa lähes mahdoton tehtävä!

# Reititys: datagrammiverkko




**Reititystaulu**

| Osoite: portti | |
|---|---|
| verkko a | : 1 |
| verkko b | : 3 |
| verkko c | : 2 |
| muut | : 2 |

Tietää, mihin suuntaan paketti on välitettävä = missä suunnassa mikin verkko on.

Ei etukäteistietoa isäntäkoneiden ’yhteyksistä’

# Datagrammiverkko

- Ei yhteyden muodostusta erikseen
- Reitittimet: ei tietoa päästä-päähän yhteyksistä
  - Ei käsitettä ‘yhteys’ (connection) verkkokerroksella
- Pakettien välitys kohdeosoitteen perusteella

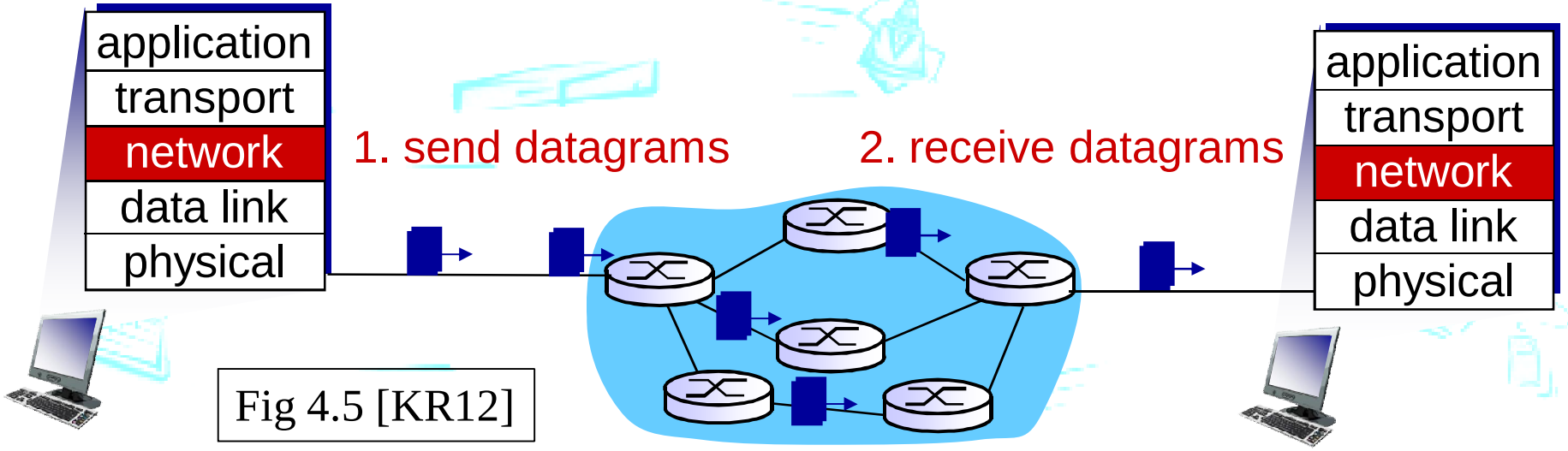
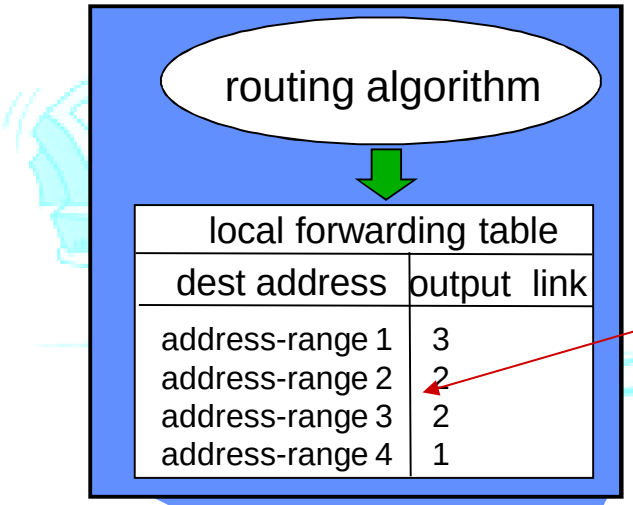



Fig 4.5 [KR12]

# Datagrammiverkon muunnostaulukko




4 miljardia IP-osoitetta, yksittäisten osoitteiden sijasta osoitevälejä (aggregate table entries)

IP destination address in arriving packet's header

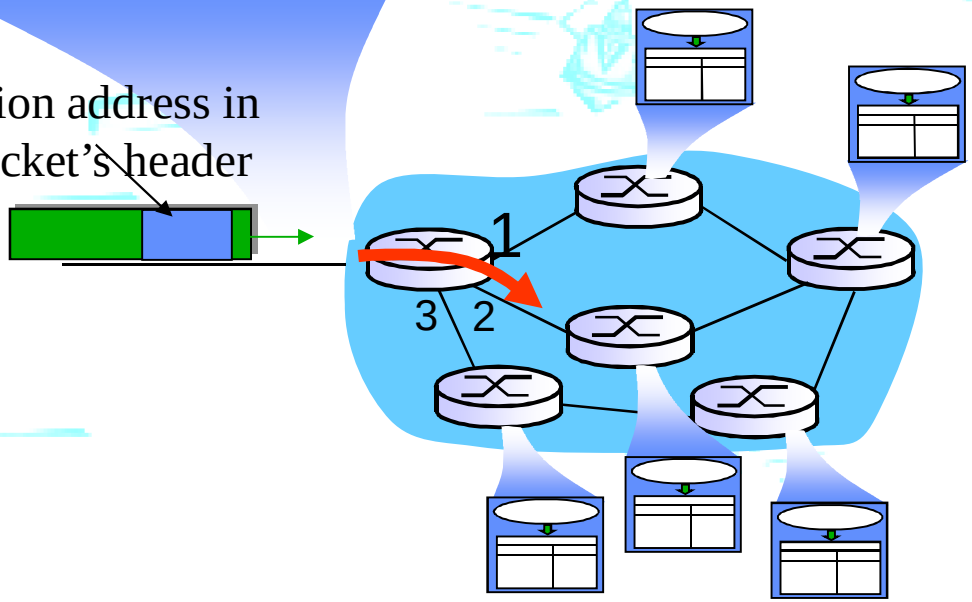



Fig 4.2 [KR12]

# Datagrammiverkon muunnostaulukko

| Destination Address Range | Link Interface |
|---|---|
| **11001000 00010111 00010000 00000000** through **11001000 00010111 00010111 11111111** | 0 |
| **11001000 00010111 00011000 00000000** through **11001000 00010111 00011000 11111111** | 1 |
| **11001000 00010111 00011001 00000000** through **11001000 00010111 00011111 11111111** | 2 |
| otherwise | 3 |

# Pisin alkuosa (longest prefix matching)

Muunnostaulukosta etsitään osumaa. Jos useita, niin käytetään sitä, jolla on pisin yhteinen osoitteen alkuosa.

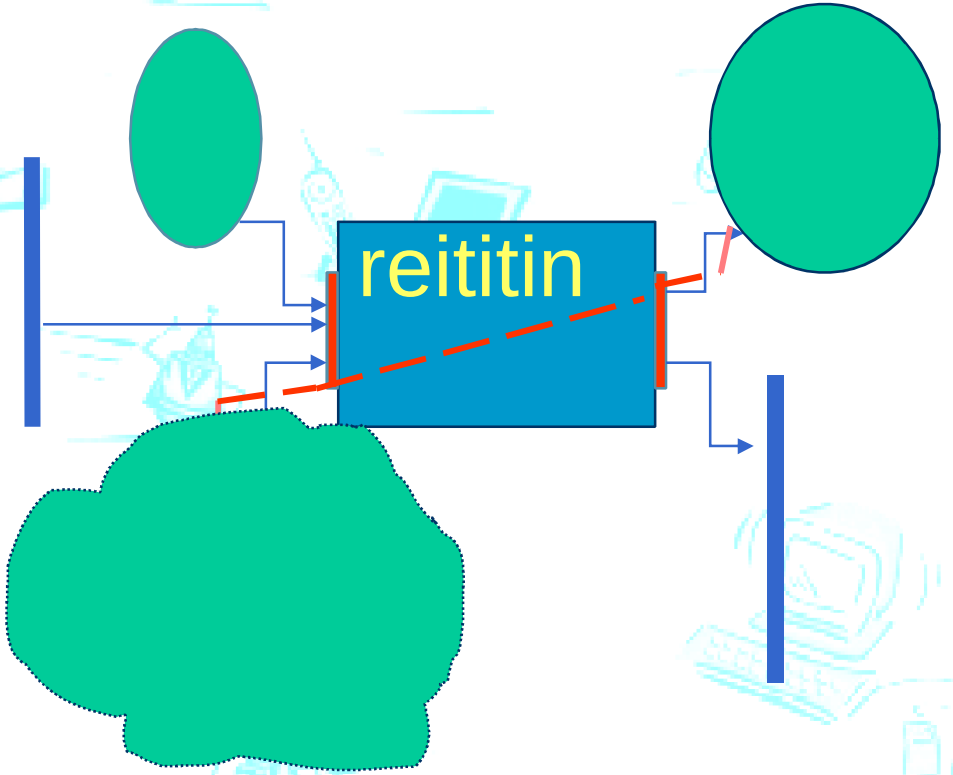
| Destination Address Range | Link interface |
|---|---|
| 11001000 00010111 00010*** ********* | 0 |
| 11001000 00010111 00011000 ********* | 1 |
| 11001000 00010111 00011*** ********* | 2 |
| otherwise | 3 |

esimerkki:

DA: 11001000 00010111 00010110 10100001 Mihin linkkiin?

DA: 11001000 00010111 00011000 10101010 Mihin linkkiin?

# REITITIN



# Verkkokerros ~ reitittäminen

- **Reititin (router)**
  - Osaa muunnokset siihen kytkettyjen teknologioiden välillä
  - Sisääntulolinkki ja ulosmenolinkki voivat ollat *eri teknologiaa*
  - Välittää verkkokerroksen otsakkeen perusteella (IP-osoite)
  - Laitteistotoimintona tai osin ohjelmallisesti
- **Kytkin (switch)**
  - Sekä sisääntulolinkki että ulosmenolinkki ovat *samaa teknologiaa*
  - Lähiverkon sisällä välitys linkkikerroksen otsakkeen perusteella
  - Poikkeuksetta aina laitetason toimintona

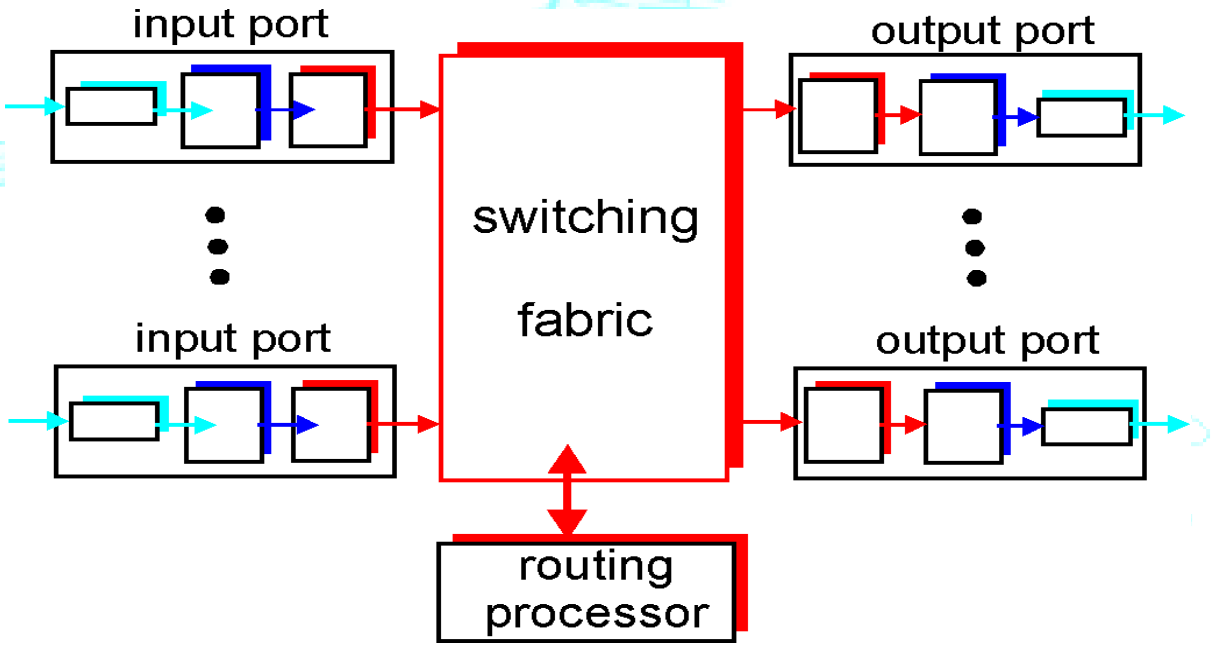
**Keskitin (hub)**
Perustuu toistimiin
Fyysisellä kerrokselle

# Reitittimen arkkitehtuuri

Fig 4.6 [KR12]

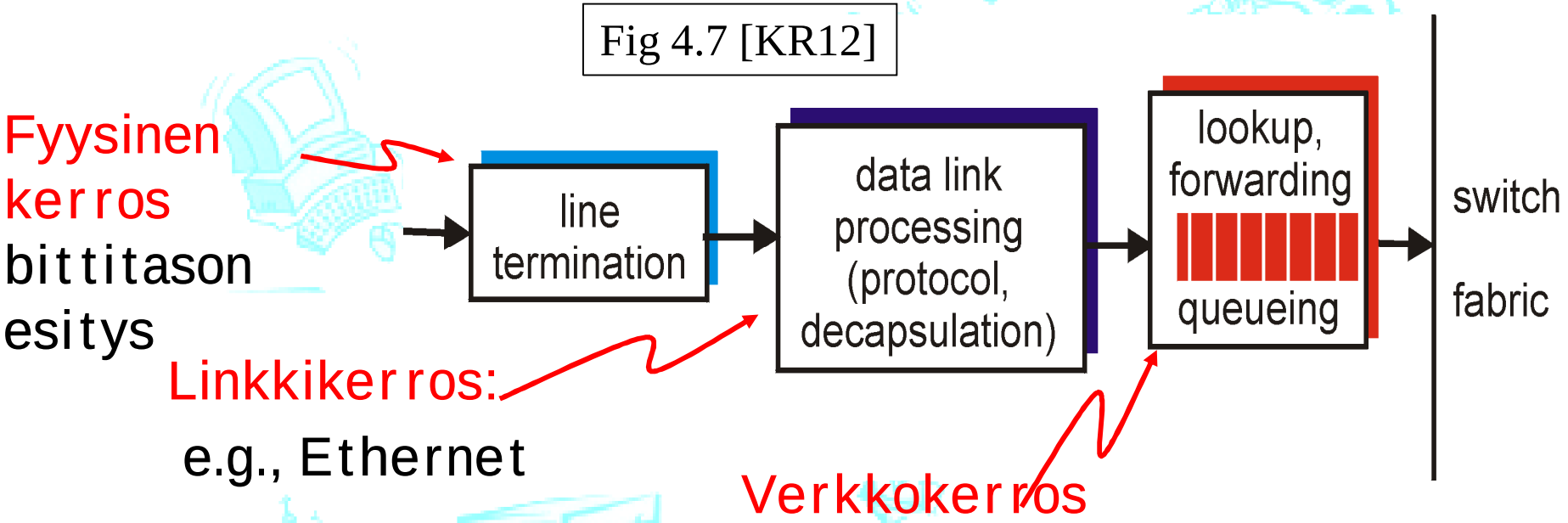
- Kaksi tehtävää
  - Välitä paketteja tulolinkeistä ulosmenolinkkeihin
  - Suorita reititysalgoritmia / -protokollaa
- Portti ~verkkokortti

  Useita portteja niputettu yhteen linjakorteiksi (line card)



# Sisääntuloportti (input port)

Fig 4.7 [KR12]




Tavoite: paketti ulos sisääntulon nopeudella

Jonotus: jos ulosmeno hitaampi kuin sisääntulo tai joku muu siirtää samaan ulostuloon

myös HOL (head-of-line blocking)

Jos linjanopeus 2.5 Gbps ja paketin koko 256 tavua => 1.2 miljoonaa pakettia sekunnissa!

# Ulosmenoportti (output port)

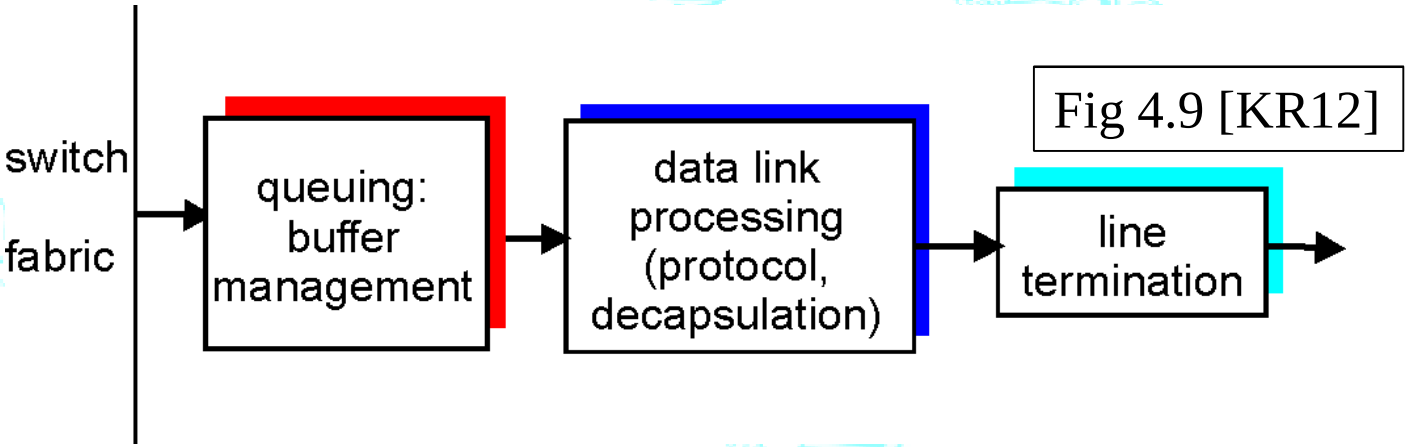
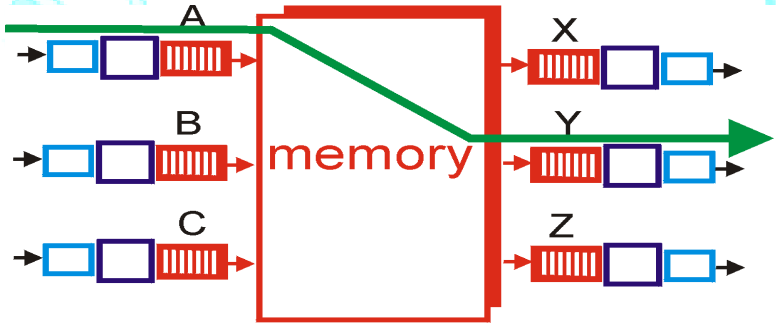



Fig 4.9 [KR12]

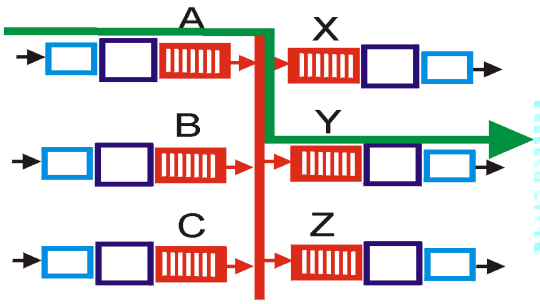
- Puskuroi, jos paketteja tulee nopeammin kuin ulosmenon siirtonopeus sallii
  - Sisääntulo nopeampi tai monesta samaan kohteeseen
- Voi käyttää priorisointia (packet scheduling)
  - FCFS (First Come First Serviced), WFQ (Weighted Fair Queuieng),...
  - QoS (Quality of Service) (ei käsitellä tällä kurssilla!)
- Suorittaa linkki- ja fyysisen kerroksen operaatiot

# Kolme erilaista kytkentätapaa:

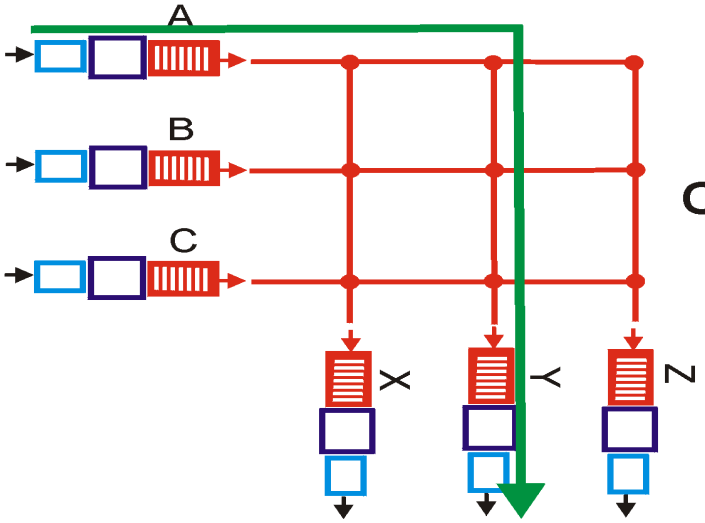
Fig 4.8 [KR12]




**Muisti** memory



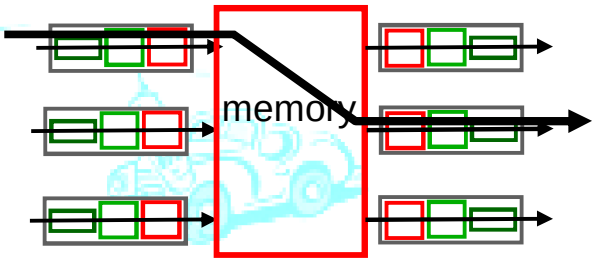

**Väylä** bus




**Ristikytkentä**

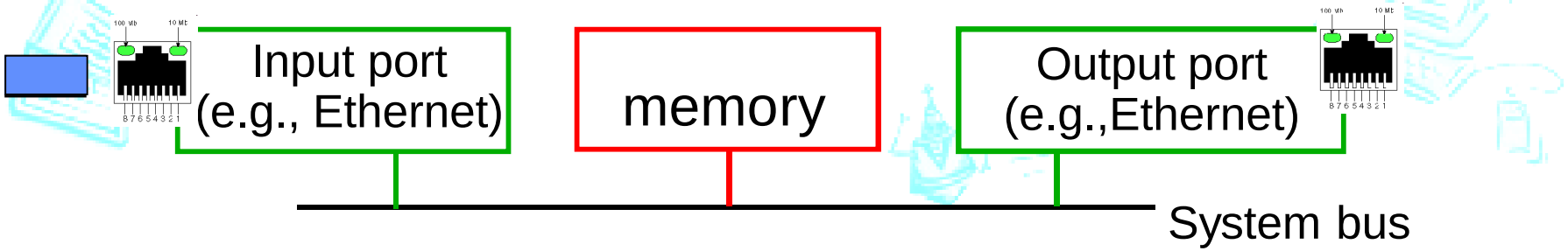
crossbar

# Kytkentä muistin kautta

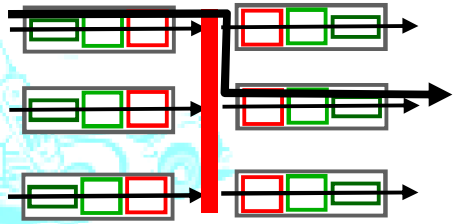



memory

- “Tavallinen” tietokone reitittimenä
  - Sisääntulo (Input): keskeytys, CPU kopioi paketin muistiin, tutkii minne on menossa
  - Ulosmeno (Output) : CPU kopioi paketin muistista
  - Väylä (Bus) on pullonkaula: 2 kopiointia per paketti
- Linkkikerros ja fyysinen kerros laitetoimintoja
- Jonot keskusmuistissa



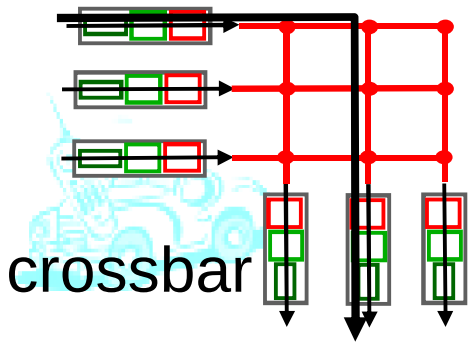
# Kytkentä väylän kautta



bus

- Sisääntulo siirtää paketin väylän kautta suoraan ulosmenoporttiin
- Vain yksi kytkentä aktiivinen kerrallaan
  - Väylä edelleen pullonkaula
- Väylänopeus rajoittaa kytkentänopeutta
  - Gbps nopeudet, riittävä LAN- ja yritysverkoilla

# Kytkentä ristikytkennän kautta




- Yhden väylän sijaan ristikytkentä (crossbar switch)
  - 2*N väylää yhdistää N sisääntuloa ja N ulosmenoa
  - Valitse vaaka- ja pystylinja
- Jos sama ulosmeno/sisääntulo, odotus sisääntuloportissa
  - Sisääntulo voi pilkkoa paketin pienemmiksi soluiksi (cell) ja välittää yksi kerrallaan
  - Ulostulo kokoaa solut taas paketeiksi
- Suuri siirtonopeus
  - Esim. Cisco 12000: 64 Gbps

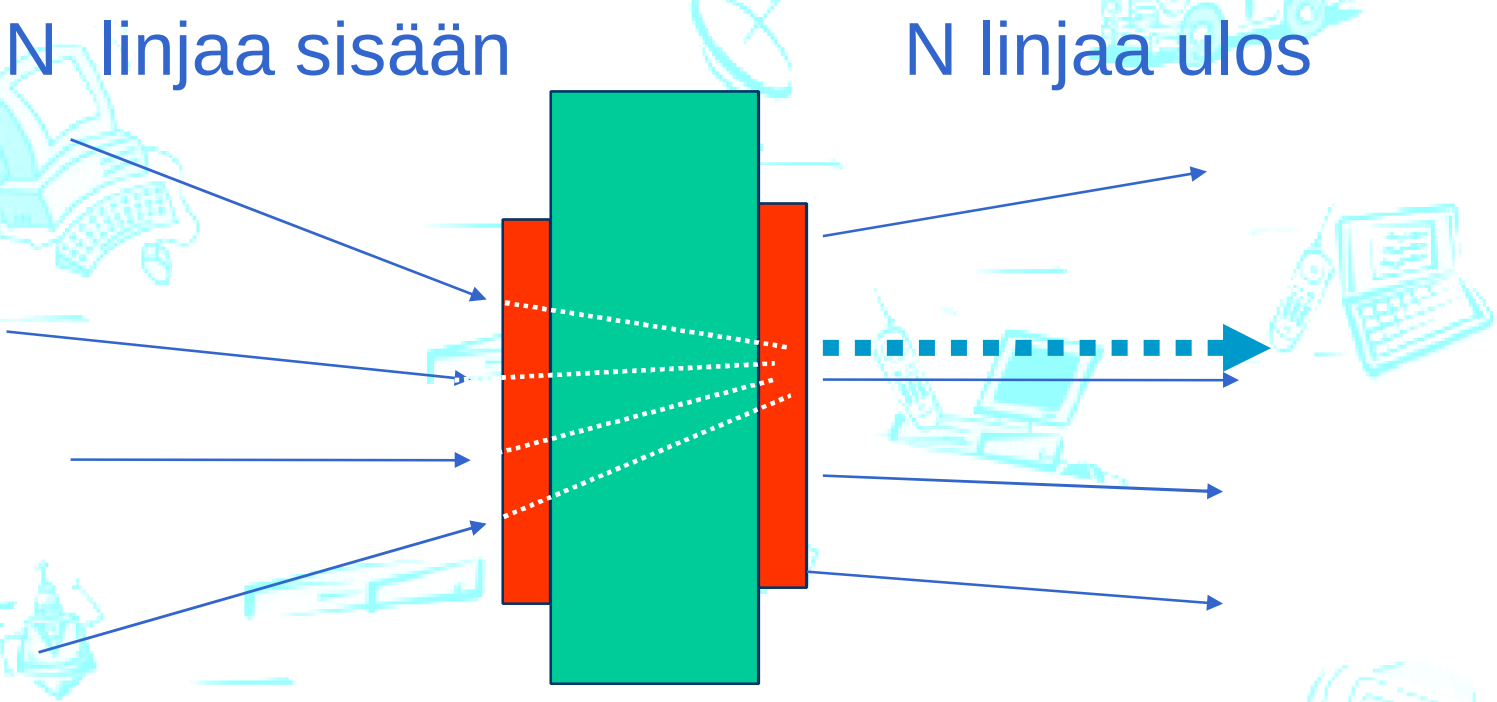
# Reititys ja reititysprosessori

- Prosessori suorittaa reititysprotokollaa
  - Reititysinformaation välitystä reitittimeltä toiselle
  - RIP, OSPF, BGP,...
  - Esim. 5 minuutin välein
- Sisääntulot toimittavat reititysprotokollien paketit prosessorille
- Ylläpitää porttien reititystauluja
  - Kun muuttuu, uusi kopio kullekin portille
- Hallinta- ja ylläpitotoimintoja
  - Reitittimelläkin voi olla suoritettavana sovelluksia

# Pakettien hylkäys

1. Kun puskuritila ei riitä
   - Hylkää saapuva paketti (drop-tail) tai joku muu ..
   - Se kummassa jonossa paketit hylätään, riippuu kytkennän ja linjan nopeuden suhteista
   - RED (Random Early Detection): hylkää jo ennenkuin puskuri täyttyy
2. Siirtovirhe
   - Linkkikerros saa hylätä virheellisen
   - Verkkokerros saa hylätä virheellisen (ICMP-protokolla )
3. Paketin elinaika (Time-to-live, TTL)

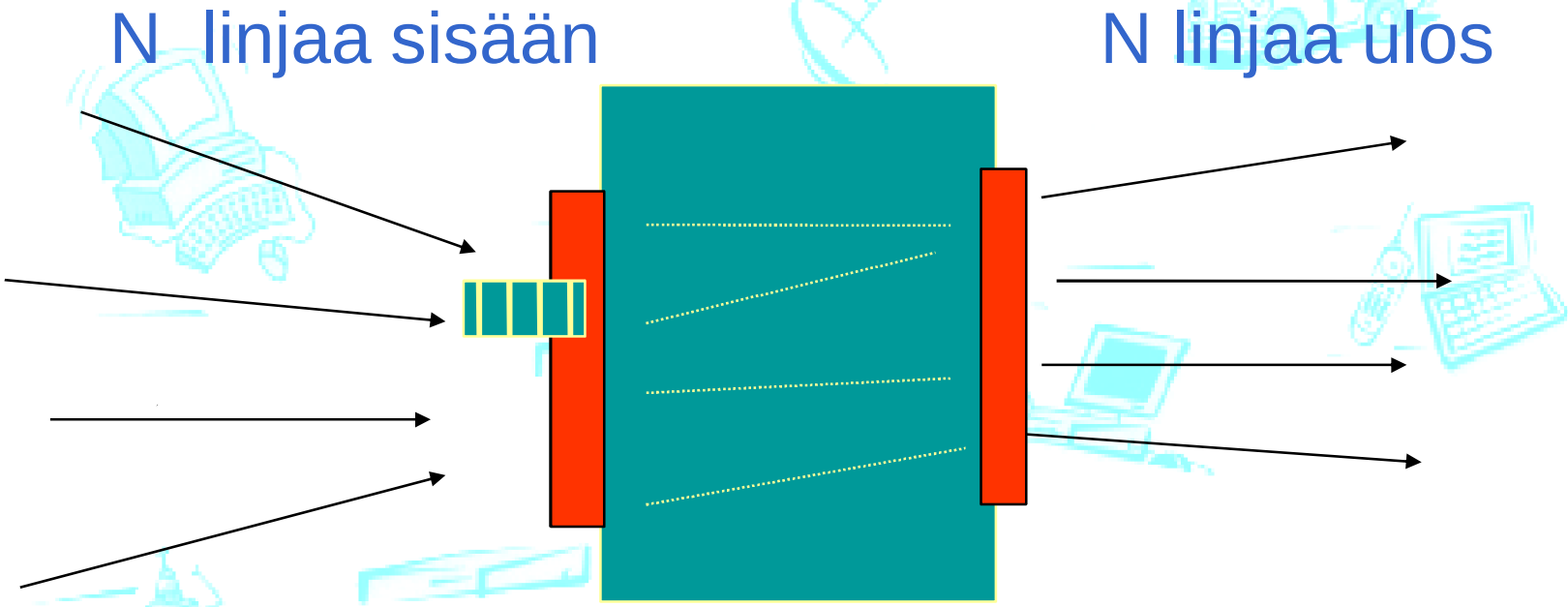
# Pakettien hylkäys ulosmenossa




Kytkin toimii riittävällä nopeudella, joten sisääntulossa ei tarvitse jonottaa.

Yhdelle linjalle liian paljon liikennettä => ulosmenoportin puskuritila täyttyy ja paketteja katoaa!

# Paketin hylkäys sisääntulossa

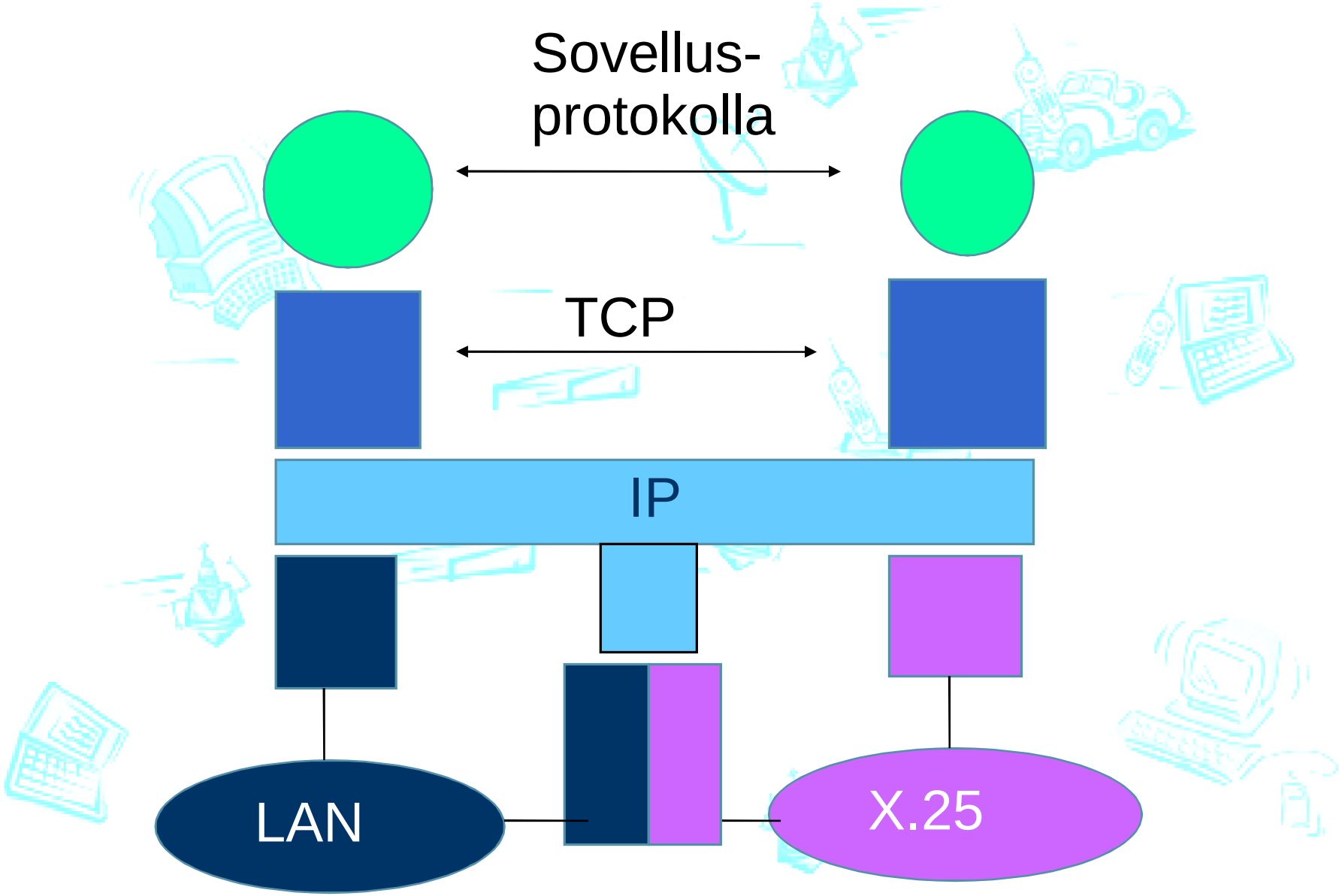



Jos kytkin ei toimi tarpeeksi nopeasti, sisääntuloportteihin syntyy jonoja.

Esim. Ristikytkennässä paketti joutuu odottamaan, jos samaan kohteeseen on menossa useita paketteja. Jonottava paketti voi tukkia tien myös muilta saman portin paketeilta, jotka muuten voisivat edetä kytkimessä. (head-of-the-line-blocking)

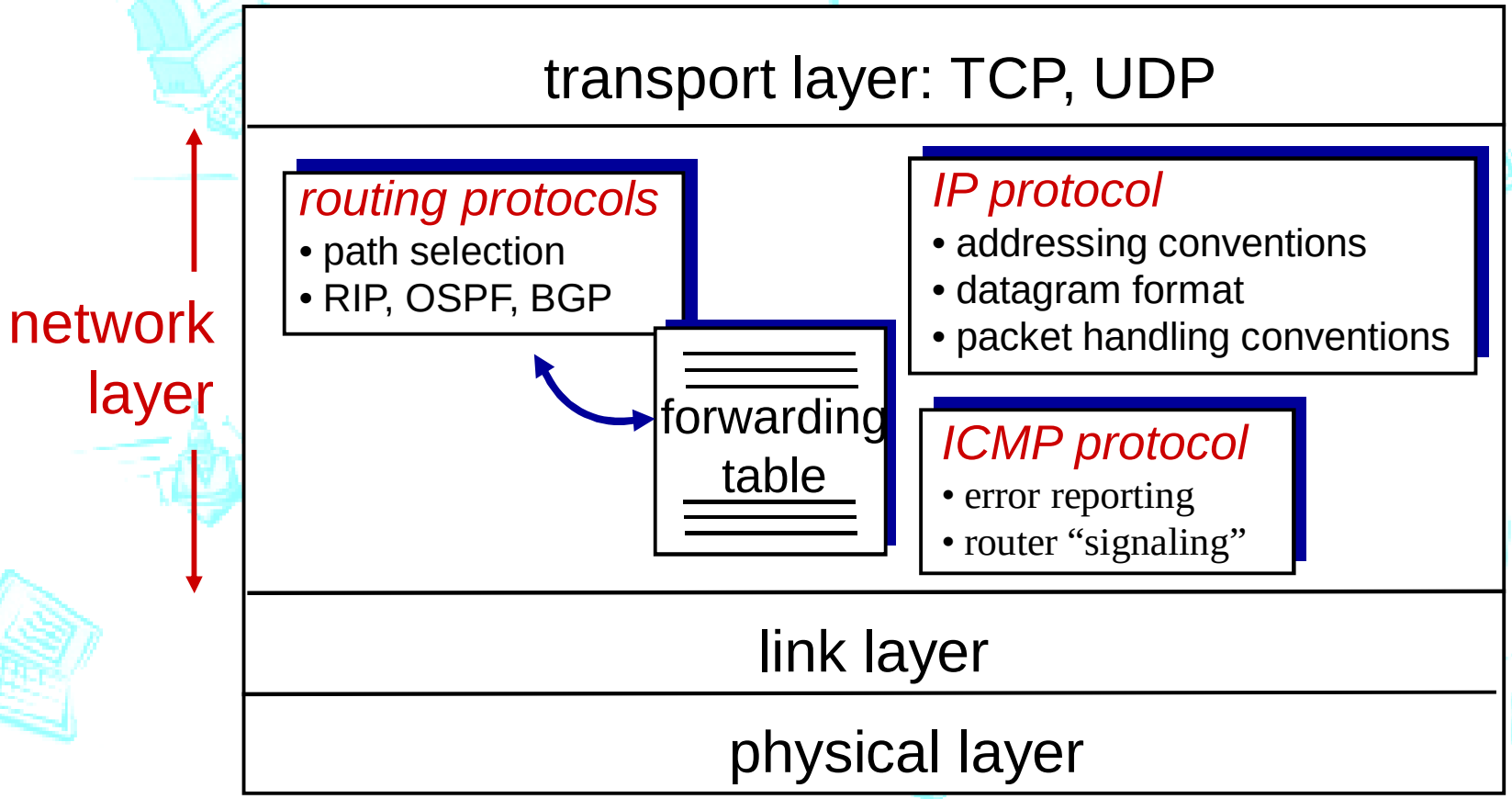
# IP-PROTOKOLLA

RFC 791


Sovellus-
protokolla
TCP
IP
LAN
X.25

# Internetin verkkokerros

Fig 4.12 [KR12]



# Internetin verkkokerros

Tällä kurssilla vain: IPv4 ja reitityksen periaatteet
Etäisyysvektorireititys ja Linkkitilareititys (luento 8)

Internet-protokollat kurssilla:
IPv6, ICMP (Internet Control Message Protocol)
Reititysprotokollat
- Reititystaulujen (forwarding table) ylläpitämistä varten
  - Erillään tavallisten pakettien lähetyksestä
- RIP (Routing Information Protocol): etäisyysvektorialgoritmi
- OSPF (Open Shortest Path First): linkkitila-algoritmi
- BGP (Border Gateway Protocol): hierarkkinen, autonomisten alueiden välinen algoritmi

# Internetin verkkokerros

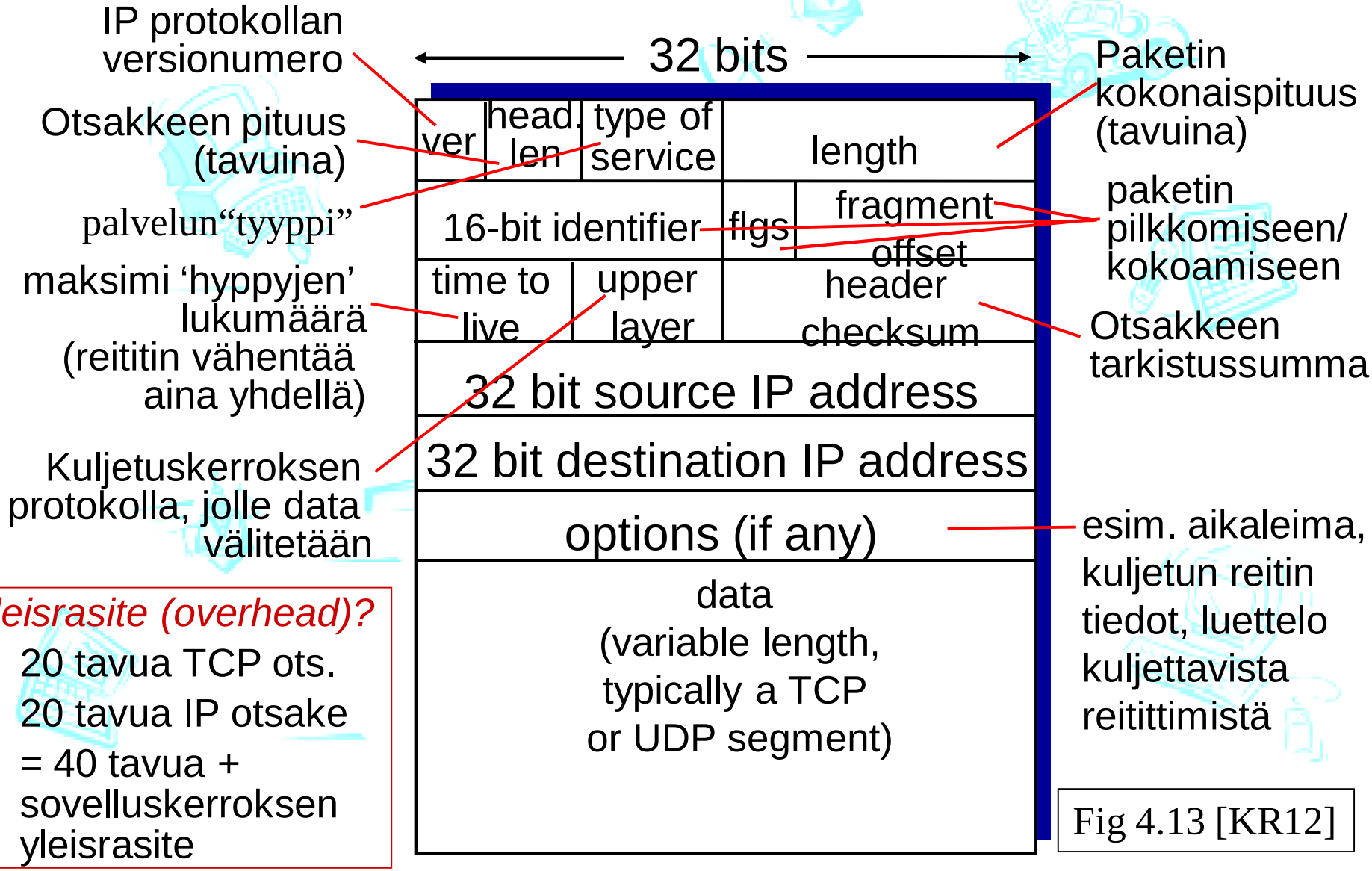
- ICMP (Internet Control Message Protocol)
  - Protokolla, jolla isännät ja reitittimet vaihtavat verkkokerroksen kuulumisia
  - Tavallaan verkkokerroksen päällä: IP-paketissa kuljetuskerroksen tietojen sijasta ICMP-dataa
  - Virheraportointi: unreachable host/network/port/protocol
  - Reititin ei tiedä, minne toimittaisi ...
  - Kaiutus: echo request / reply
  - tätä ping ja traceroute käyttävät RTT:n mittaamisessa
- IPv6
  - Uudistettu versio IP-protokollasta, 128 bitin IP-osoite
  - mm. kiinteänkokoinen otsake, ei tarkistussummaa,
  - pakettien paloittelu jo lähettäjän koneessa

# Verkkokerroksen IP-protokolla
## siirtää kuljetuskerroksen segmentit lähdekoneelta kohdekoneelle

- Tarvitaan
  - Osoitteet (lähettäjä, vastaanottaja)
  - Tieto ylemmän kerroksen protokollasta (UDP, TCP tai joku muu), jotta osaa antaa oikealle rutiinille
  - Liian ison IP-paketin paloittelu tarvittaessa pienemmiksi IP-paketeiksi
  - 'Harhautuneiden' pakettien hävittäminen (time-to-live)
  - Tarkistukset (checksum)
- Hyviä ominaisuuksia (?)
  - Siirtopalvelun eriyttäminen erityyppisille sovelluksille
  - Lähdereititys (source routing): lähettäjä määrää reitin, paketissa tieto siirtopolusta

# IPv4 paketin rakenne

otsake 20+ tavua




*Yleisrasite (overhead)?*

- 20 tavua TCP ots.
- 20 tavua IP otsake
- = 40 tavua + sovelluskerroksen yleisrasite

Fig 4.13 [KR12]

# IP-otsake

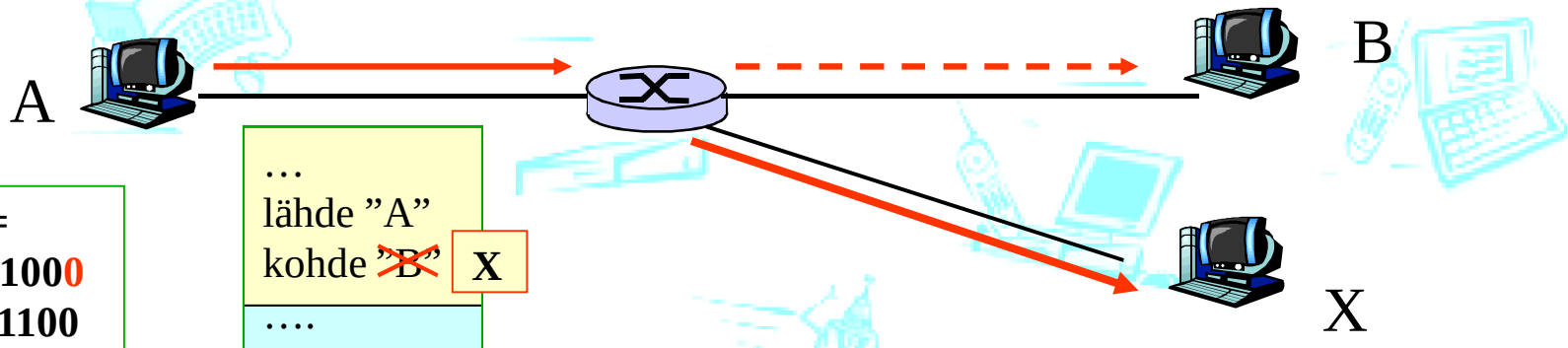
- Versionumero
  - IPv4 vai IPv6, versioilla erilaiset otsakkeet
- Otsakkeen pituus (header length)
  - Vaihtelevan pituinen optiokenttä, mininimi on 20 B
- TOS-kenttä (Type of Service)
  - Varattu halutun palvelun kertomiseen:
    - Nopeus, luotettavuus, kapasiteetti; ääni vs. tiedosto
  - Yleensä ei ole käytössä (osa käytössä uusissa reitittimissä)
- IP-paketin pituus (Datagram length)
  - Koko IP-paketin pituus tavuina, maksimi 65535 B
  - Tavallisimmin 576-1500 B
- Paketin tunniste (16-bit identifier), lippuja (flags), palan paikka (fragmentation offset)
  - Paketin pilkkomiseen pienemmiksi ja kokoamiseen takaisin isoksi

# IP-otsake (jatkuu)

- Elinaika (time-to-live, TTL)
  - Rajoittaa paketin elinaikaa, maksimi 255
  - Vähenee joka hypyllä reitittimestä toiseen, kun TTL=0, hylätään
- Kuljetusprotokolla (Upper-layer protocol)
  - Kumpi kuljetuskerroksen protokolla (TCP=6, UDP=17) vai kenties verkkokerroksen sisäistä dataa (ICMP, reititysprotokolla)
- Otsakkeen tarkistussumma (Header checksum)
  - Vain otsakkeelle (Internet checksum)
  - Tarkista ja laske uusi joka reitittimessä (TTL, Options)
  - Hylkää virheellinen paketti
- Osoitteet (Source IP Address, Destination IP Address)
  - Lähteen ja kohteen IP-osoitteet
- Optiot (Options)
  - Laajennuksia: mm. lähdereititys, harvoin käytetty

# IP-otsakkeen tarkistussumma

- Miksi tarkistussumma IP-otsakkeelle?




**”B” =**
**0010 1000**
**0011 1100**
**0111 0110**
**0110 0101**

**”X” =**
**0010 1001**
**0011 1100**
**0111 0110**
**0110 0101**

- Miksi vain otsakkeelle?

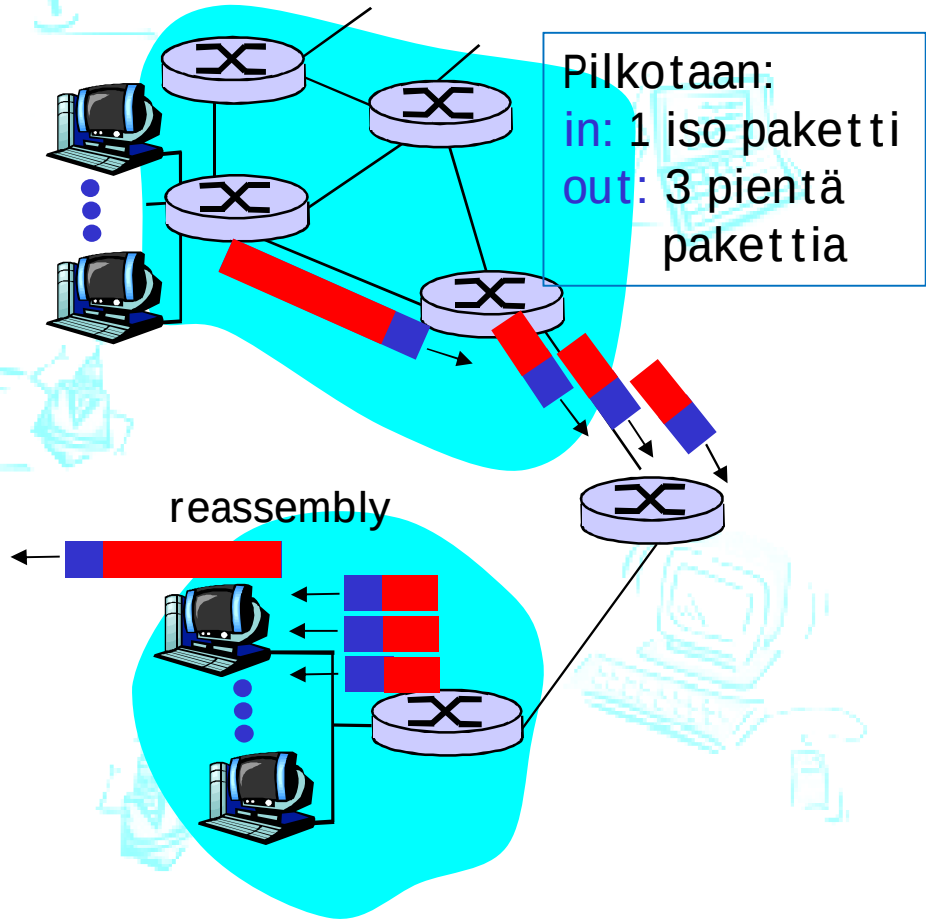
  TCP:llä ja UDP:llä omat tarkistussummat.

UDP- ja joskus jopa TCP-segmentti voidaan hyväksyä väärässä osoitteessa!

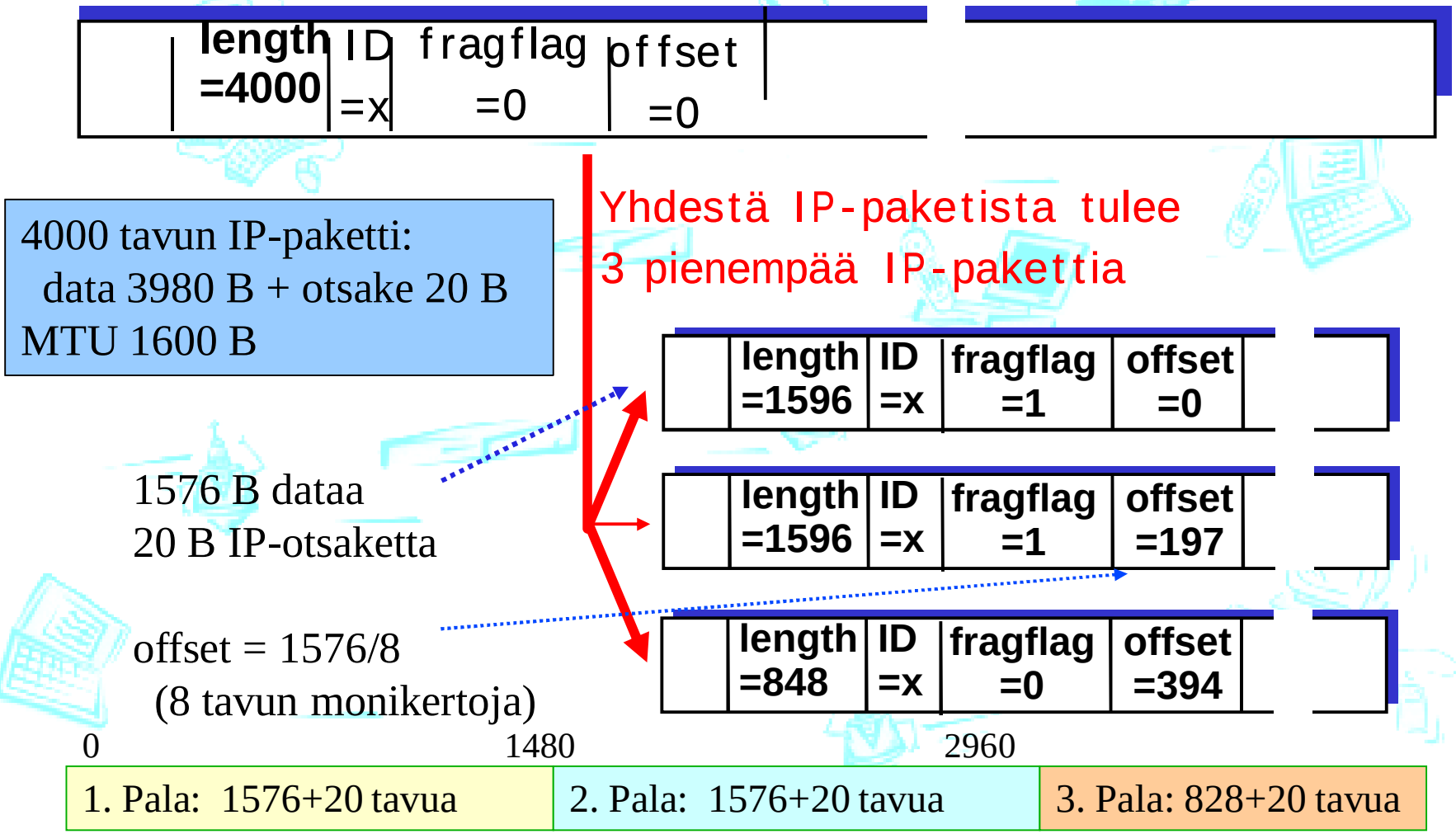
# IP-pakettien paloittelu (fragmentointi)

- Maximum transfer Unit (MTU)
  - suurin mahdollinen IP-paketti eri linkeillä eri kokoinen, esim. Ethernet 1500 B
- *Reititin pilkkoo tarvittaessa* liian ison paketin pienemmiksi paketeiksi (fragmenteiksi)
  - paketit voivat kukin kulkea eri reittiä
- *Kohdekone kokoaa* yhdeksi
  - IP-otsakkeessa kentät yhteenkuuluvien fragmenttien tunnistamiseksi
- IPv6 ei käytä fragmentointia

Fig 4.14 [KR12]

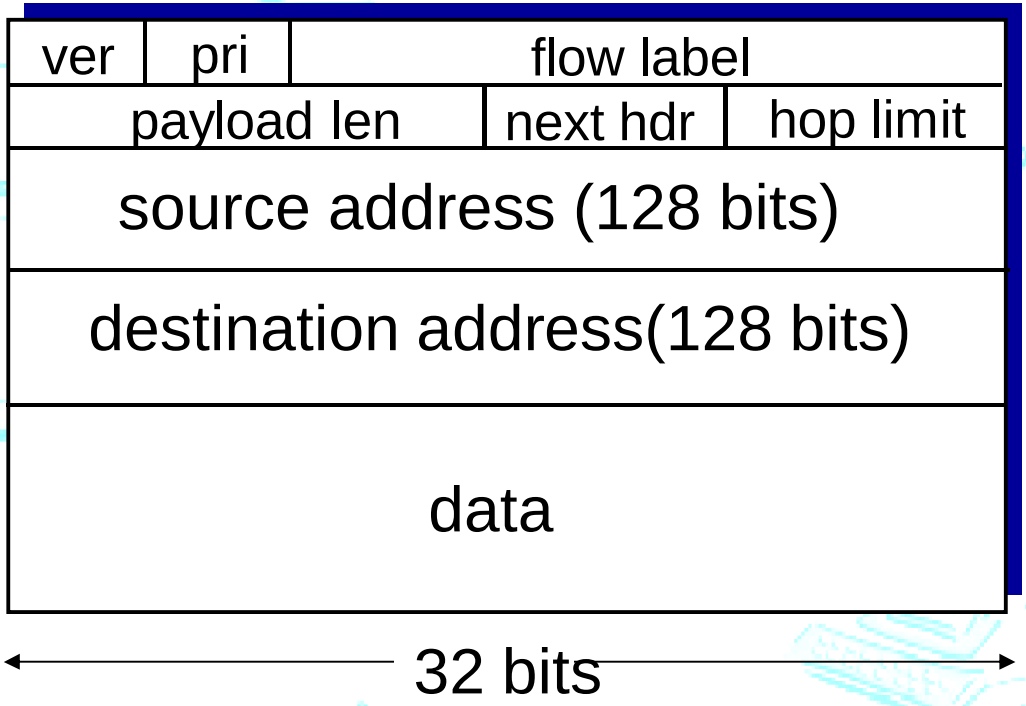


# Esimerkki: IP-paketin paloittelu (ei enää IPv6:ssa)



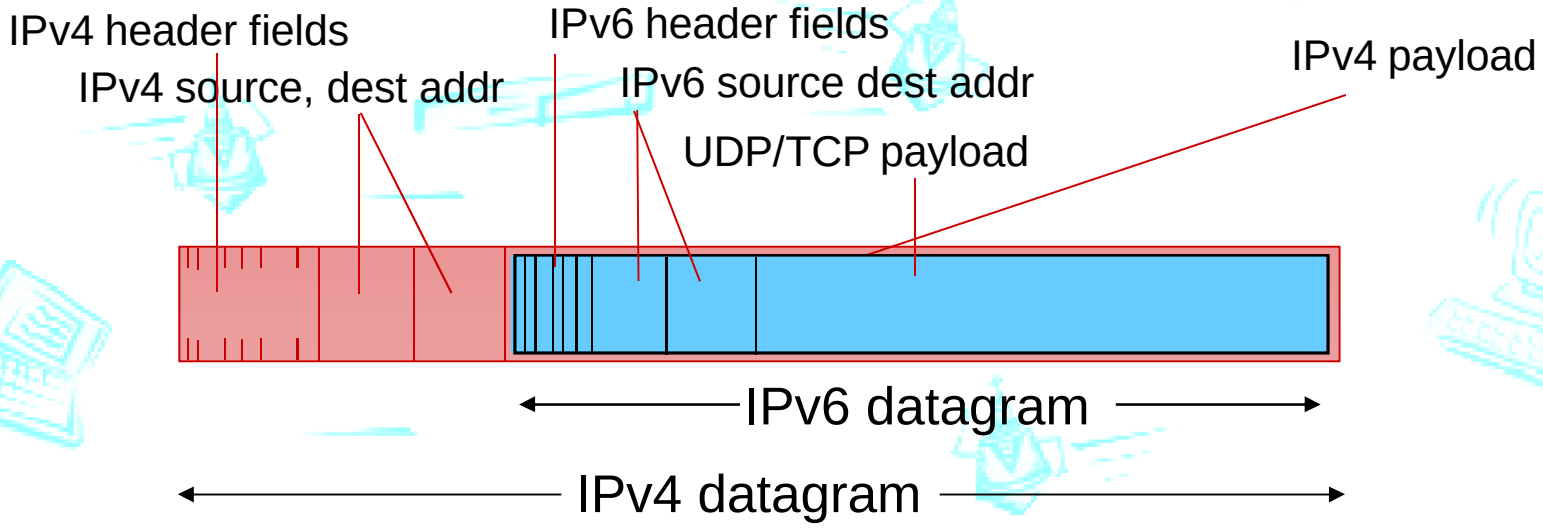
# IPv6 paketti (engl. Datagram)

- 128-bittiset osoitteet
- yksinkertainen otsake -> nopea käsittely reitittimissä
- Prioriteetti - luokittelu
- Vuo (flow)
- Ei paloittelua matkalla
  - 'Packet too big' ICMP virheviesti
- Ei tarkistussummaa



# Siirtymä IPv4:stä IPv6:een

- Kaikkea ei voi päivittää kerralla
  - Käytetään sekaisin uusia ja vanhoja reitittimiä
- tunnelointi: IPv6-paketti IPv4-paketin datana, kun siirretään IPv4-reitittimien välillä (tai päinvastoin)



# Tunnelointi (tunneling)

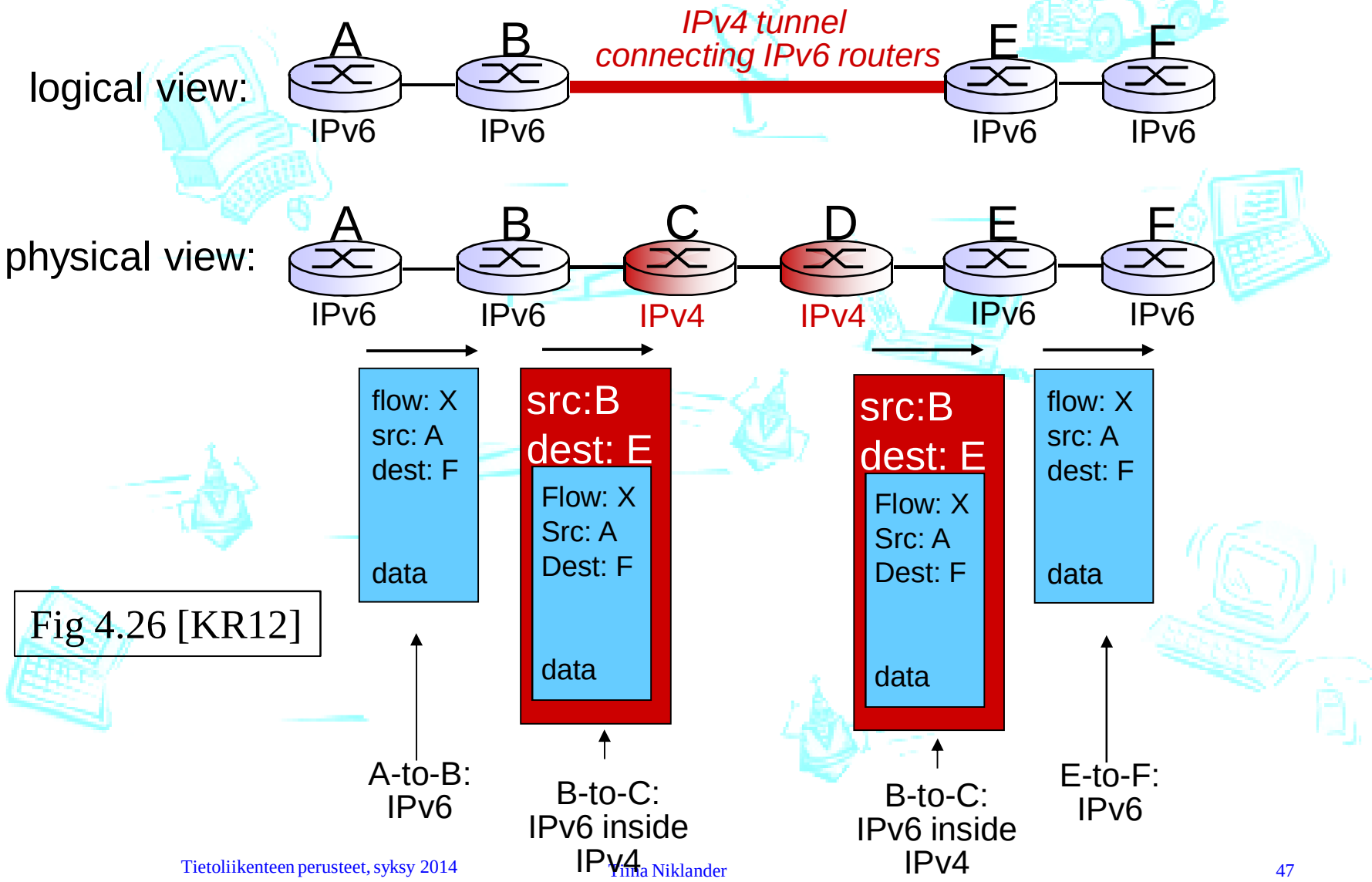



Fig 4.26 [KR12]

# KERROKSET JA OTSAKKEET TÄHÄN MENNESSÄ

# Paketin sisältö

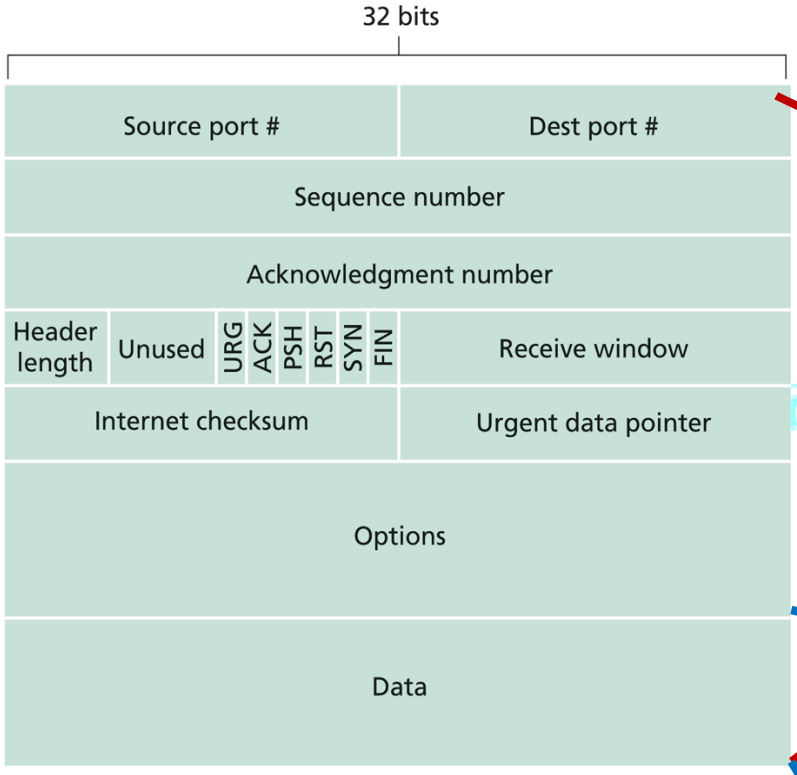



**Figure 3.29** ♦ TCP segment structure