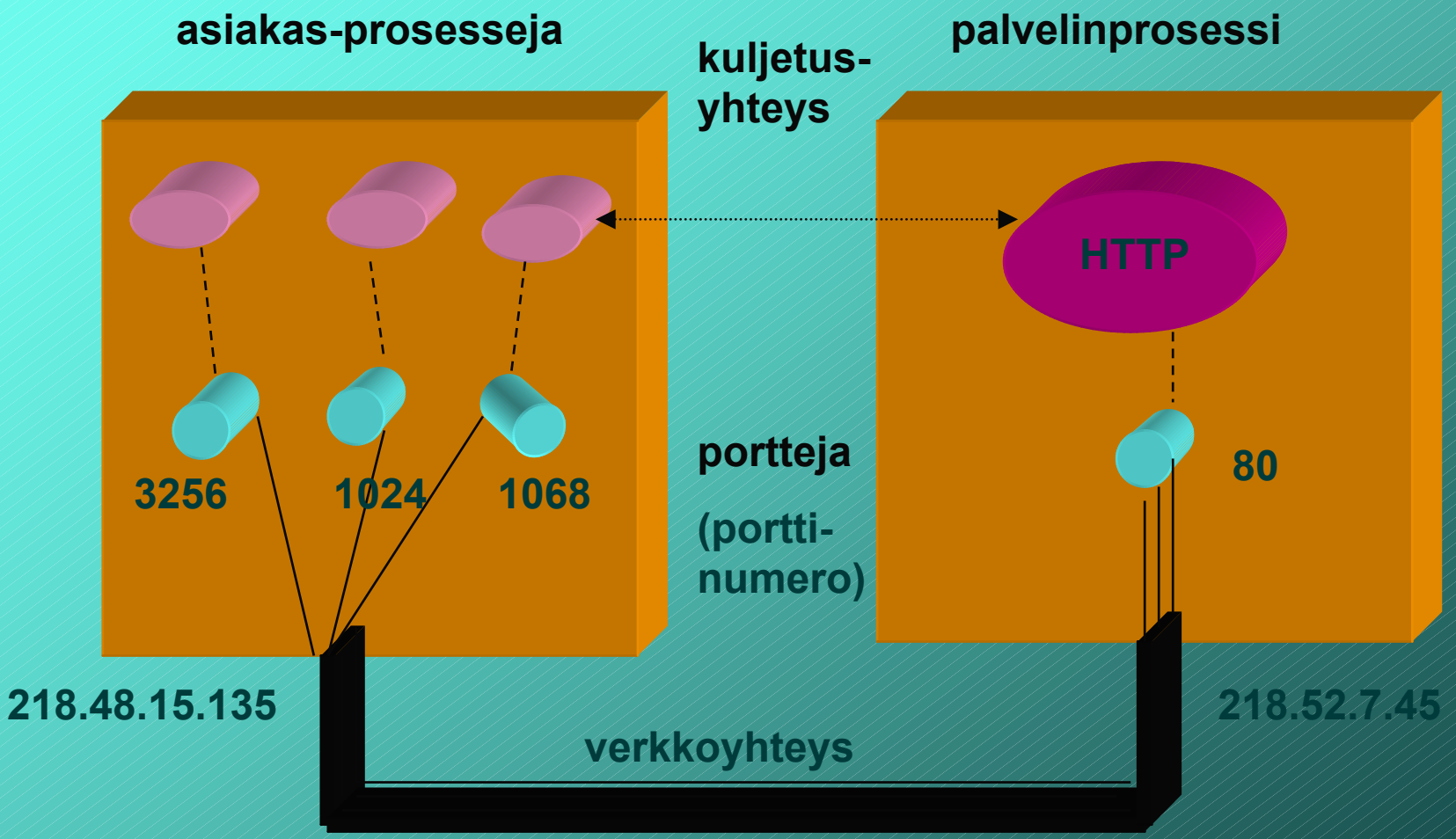
3. Kuljetuskerros

3.1. Kuljetuspalvelu

- ‘End- to- end’
  - prosessilta prosessille looginen yhteys
    - portti
  - verkkokerros koneelta koneelle
    - IP-osoite
- peittää verkkokerroksen puutteet
  - jos verkkopalvelu ei ole riittävän hyvä, sitä voidaan parantaa kuljetuskerroksella
    - kuljetuskerros huomaa verkkokerroksen kadottamat paketit ja pyytää niiden uudelleenlähetystä

Sovelluksien datavirtojen erottaminen

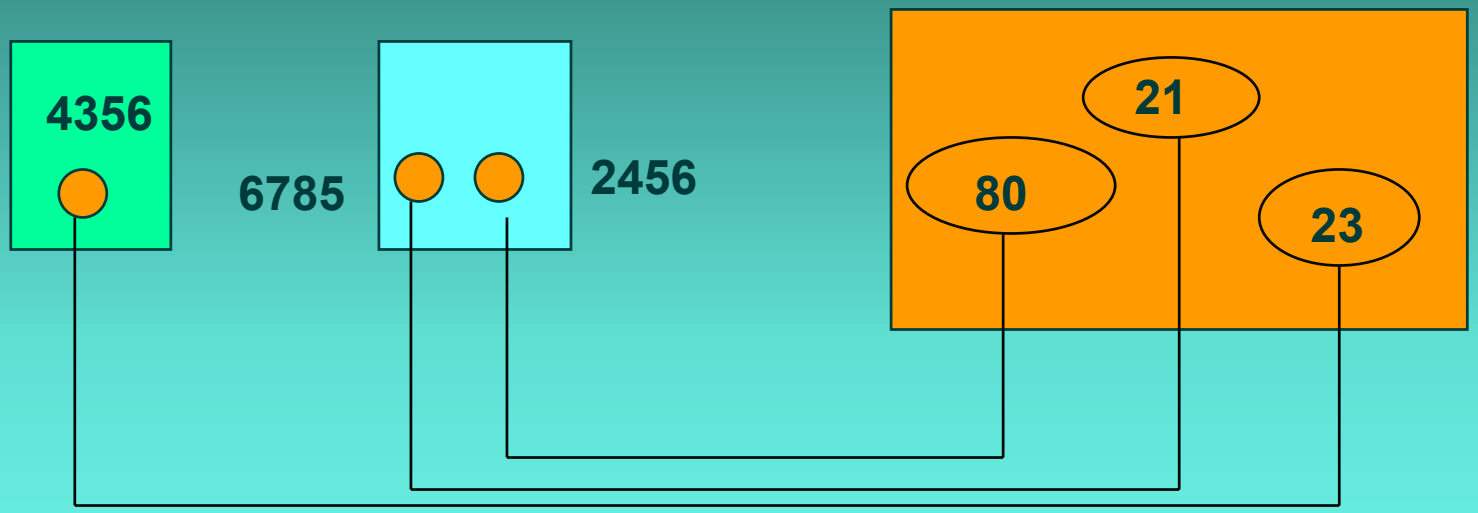
- **IP-osoite**
  - **osoittaa koneen yksikäsitteisesti**
- **Sovellusprosessi tunnistetaan porttinumerosta (16 bittiää =>0-65535)**
  - **jokaisessa lähetetyssä segmentissä on**
    - **lähettäjän porttinumero**
    - **vastaanottajan porttinumero**
- **Yleisillä palvelimilla omat varatut porttinumerot (0-1023)**
    - **SMTP 25, HTTP 80, jne**



Kuljetusyhteys on looginen prosessilta prosessille yhteys (end-to-end)

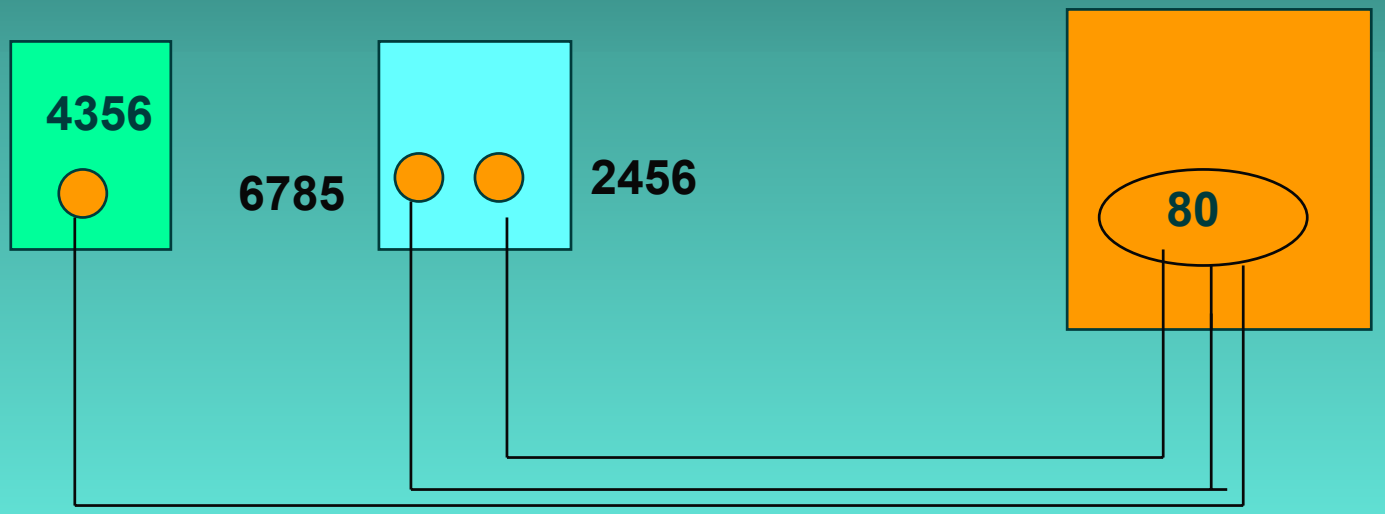
Asiakkaalle kuljetuskerros usein automaattisesti antaa käyttöön jonkin vapaan porttinumeron yhteyden ajaksi

Palvelimilla kiinteät numerot yhteydenottoa varten



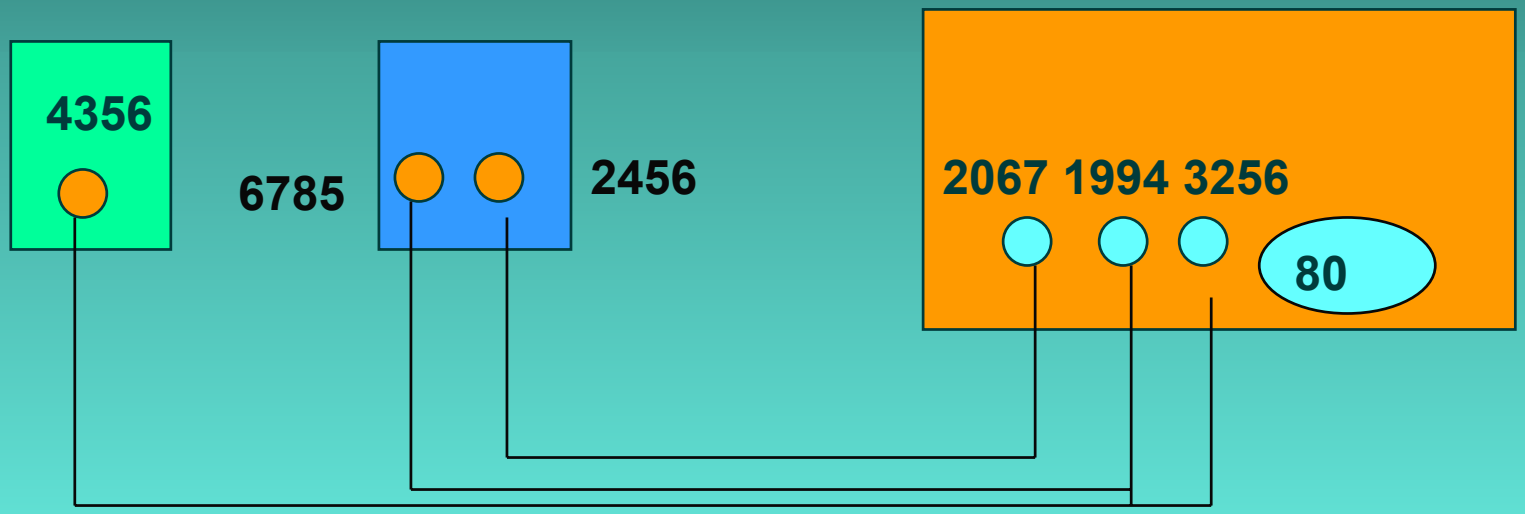
Kolme yhteyttä: 4356 <=> 23, 6785 <=> 21, 2456 <=>80

Tarvitaan sekä lähteen että kohteen porttinumerot



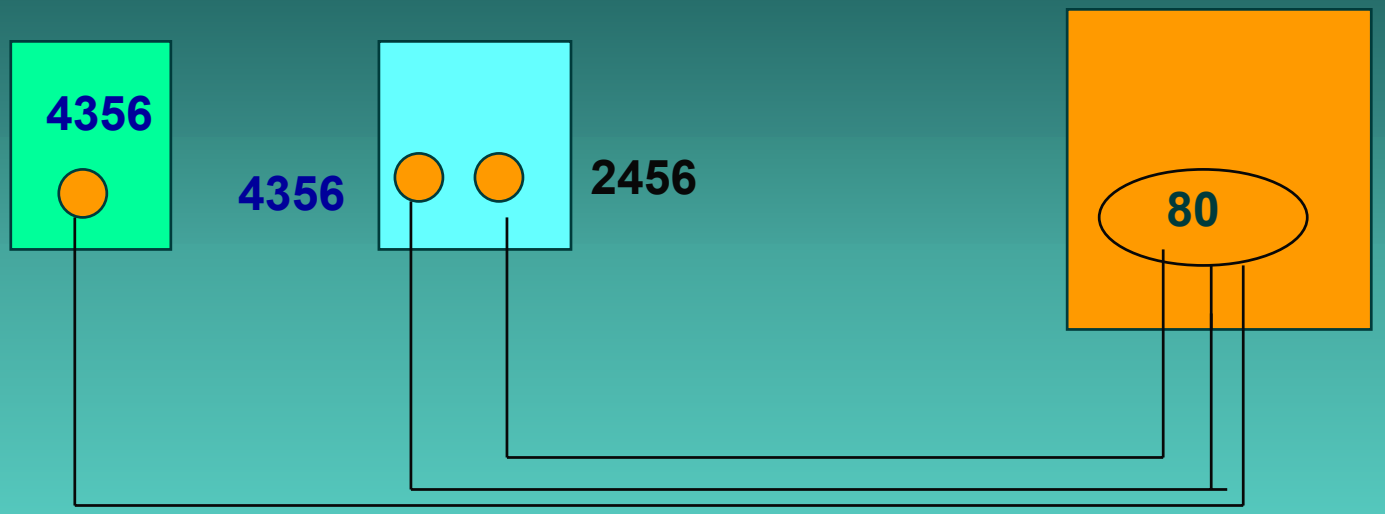
Kolme yhteyttä: 4356 <=> 80, 6785 <=> 80, 2456 <=>80

Palvelimessa yhteyksille uudet porttinumerot, jotta portti 80 voi ottaa vastaan uusia yhteyspyyntöjä



Kolme yhteyttä: 4356 <=> 3256, 6785 <=> 1994, 2456 <=>2067

Eri koneissa voidaan ottaa sama numero!



Kolme yhteyttä: 4356 <=> 80, 4356 <=> 80, 2456 <=>80!

Kuljetusyhteydellä käytetään apuna myös IP-osoitetta:

=> koneilla eri IP-osoitteet, joten yhteydet pystytään erottamaan

Sovelluksen vaatimuksia kuljetuspalvelulle:

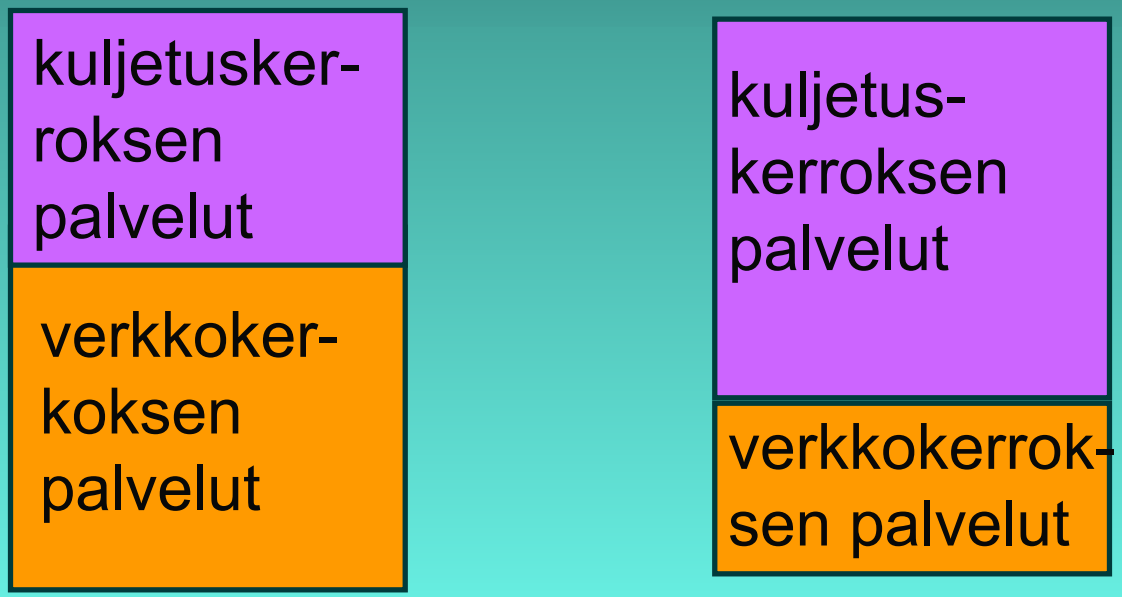
- Virheetön, luotettava
- järjestyksen säilyttävä
- kaksoiskappaleet karsiva
- mielivaltaisen pitkiä sanomia salliva
- vuonvalvonnan mahdollistava

Verkkokerros kuitenkin voi

- kadottaa sanomia
- toimittaa sanomat epäjärjestyksessä
- viivyttää sanomia satunnaisen pitkän ajan
- luovuttaa useita kopioita samasta sanomasta
- rajoittaa sanomien kokoa

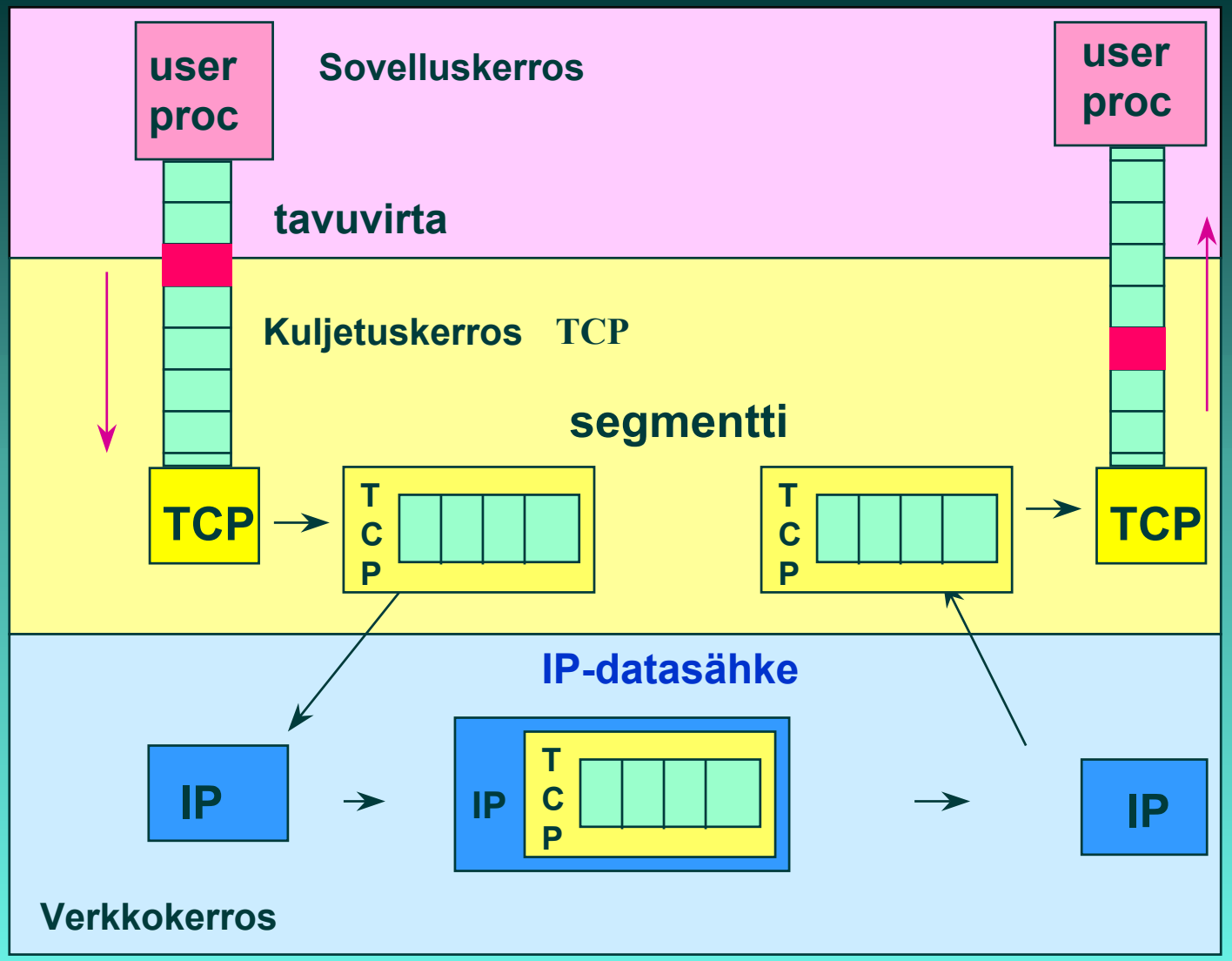
kuljetuspalvelut parantavat verkkopalveluja

Sovelluksen näkemä palvelun laatu (Quality of Service, QoS)



Internetin kuljetuskerros

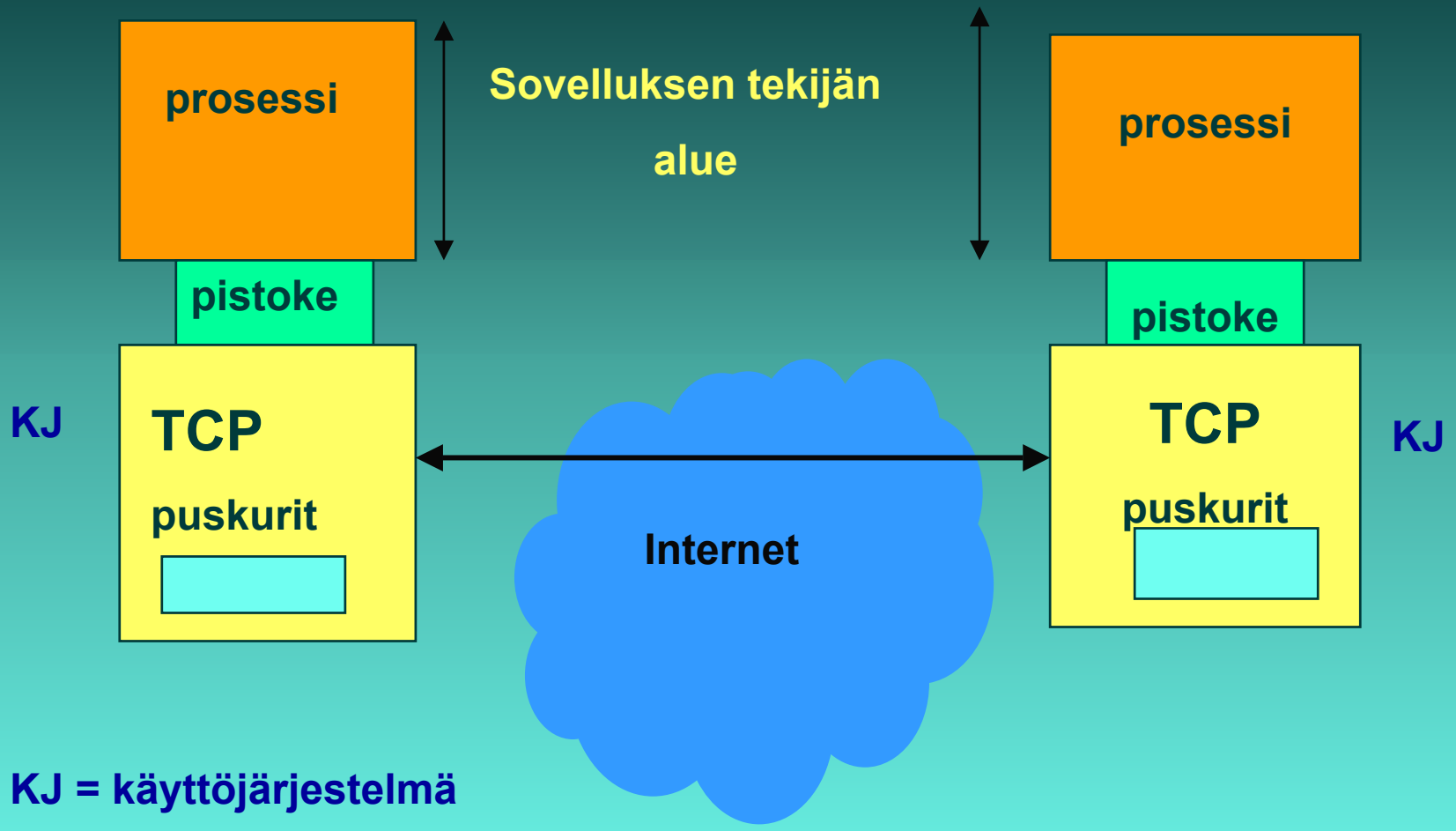
- **UDP (User Datagram Protocol)**
  - **yhteydetön, epäluotettava palvelu**
- **TCP (Transmission Control Protocol)**
  - **yhteydellinen, luotettava palvelu**
    - **virhevalvonta**
      - **havaitsee ja korjaa siirrossa syntyneet virheet**
    - **vuonvalvonta**
      - **ei ylikuormita vastaanottajaa**
    - **ruuhkanvalvonta**
      - **huolehtii ettei verkko pääse ruuhkautumaan**



TCP: prosessilta prosessille - tavuvirta

Pistokerajapinta (Socket interface)

- **Verkkopalvelun ja sitä käyttävän sovelluksen rajapinta**
  - **yleensä käyttöjärjestelmän tarjoama palvelu**
  - **pistokerajapinta alunperin Berkeley Unixin mukana, nyt lähes kaikissa käyttöjärjestelmissä**
  - **miten verkkoprotokollan tarjoamiin palveluihin päästään käsiksi sovelluksesta**



Prosessien kommunikointi TCP-pistokkeita käyttäen

- **pistoke (socket)**
  - TCP-yhteyden päätepiste sovellukselle
    - lähettäjällä ja vastaanottajalla oma pistoke
  - pistokenumero 48 bittiä
    - koneen 32 bitin IP-osoite
    - 16 bitin porttinumero

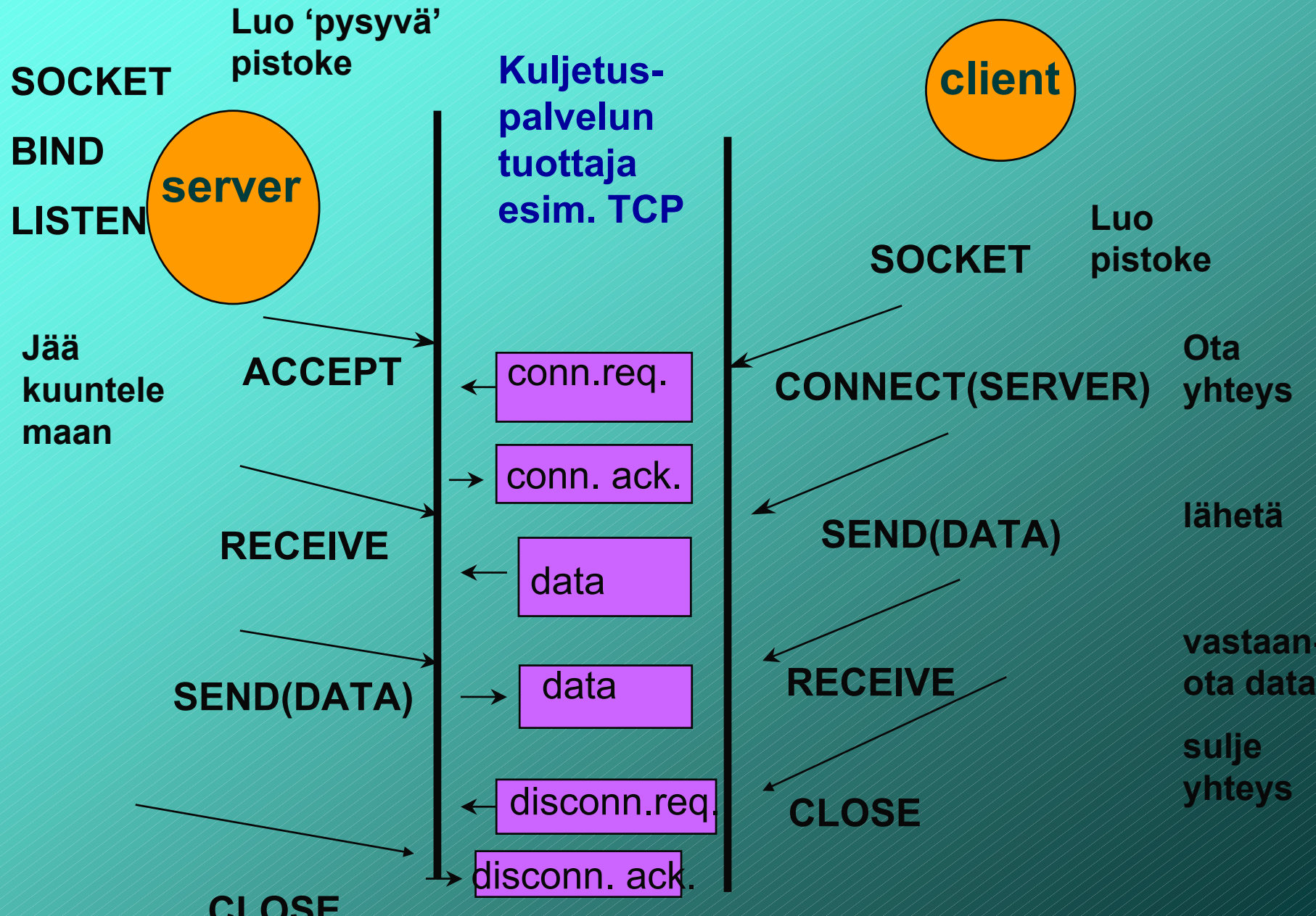
TCP-yhteys

- **kaksisuuntainen (full-duplex) kaksipisteyhteys**
- **tunnistetaan päätepisteinä olevien pistokkeiden tunnuksista (pistoke1, pistoke2)**

TCP:n pistokeprimitiivit

- **SOCKET luo uusi yhteydenpäätepistepistoke**
- **BIND anna pistokkeelle osoite**
- **LISTEN halukas vastaanottamaan yhteyksiä**
- **ACCEPT jää odottamaan yhteysyrityksiä**
- **CONNECT yritä muodostaa yhteys**
- **SEND lähetä dataa yhteyttä pitkin**
- **RECEIVE vastaanota dataa yhteydeltä**
- **CLOSE pura yhteys (symmetrinen)**

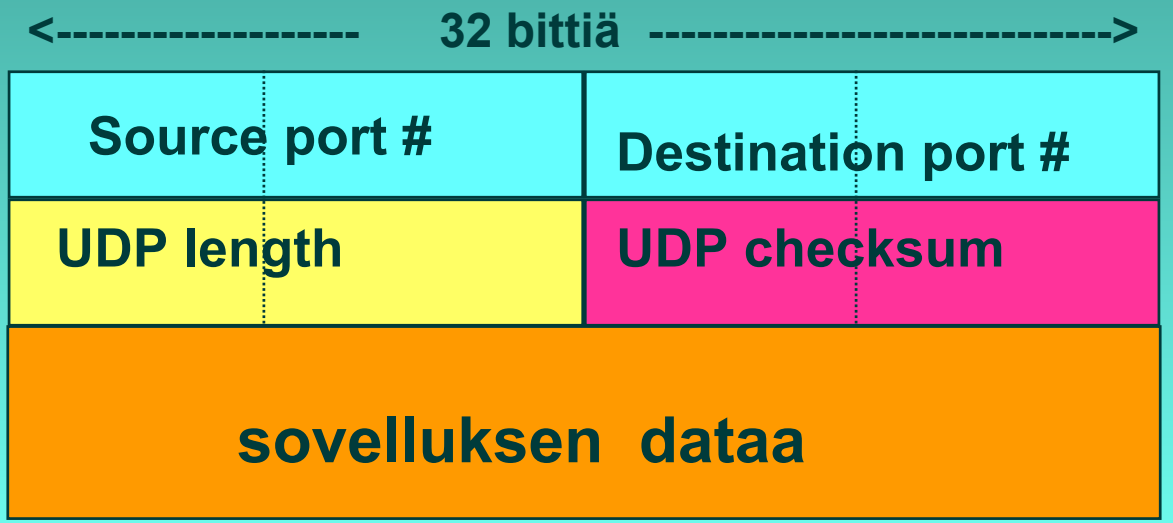
Kuljetusyhteyden muodostus ja käyttö



3.3 UDP

- **UDP (User Data Protocol)**
  - **voidaan lähettää sanomia ilman yhteyden muodostusta**

UDP-otsake



UDP-tarkistussumma

- **Virheen havaitsemista varten otsakkeeseen liitetään tarkistussumma**
  - **kaikki segmentin 16 bitin sanat lasketaan yhteen ja summasta otetaan yhden komplementti**
    - **= muutetaan ykköset nolliksi ja nollat ykkösiksi**
  - **vastaanottaja laskee taas kaikkien segmentin sanojen (mukana myös tarkistussumma) summan**
    - **jos tulokseksi saadaan 16 ykköstä, niin ok!**

Esimerkki

- **Lasketaan yhteen kolme 8 bitin mittaista sanaa:**
- **Lähettäjä vastaanottaja**

Lähettäjä	vastaanottaja
1011 0100	1011 0100
0111 0101	1111 0101
1000 1101	1000 1101
=========	0100 1001
1011 0110	=========
	0111 1111
0100 1001	

Yhden komplementti

- **Miksi tarvitaan tarkistussumma?**
  - **Kaikki siirtoyhteyskerrokset eivät suorita tarkistuksia**
- **UDP-tarkistussumma ei ole kovin tehokas havaitsemaan virheitä!**
- **Se ei myöskään yritä toipua virheistä!**
  - **Jotkut toteutukset voivat tuhota virheellisen segmentin**
  - **jotkut antavat se sovellukselle varoituksen kera**

UDP:n etuja:

- **Yhteydetön**
  - **aikaa ei kulu yhteyden muodostamiseen ja purkamiseen**
  - **ei tarvita resursseja yhteyden tilatietojen ylläpitoon**
- **Otsake (= 8 tavua) pieni => pieni yleisrasite => lisää tehokkuutta**
- **Ruuhkanvalvonta ei säännöstele liikennettä**

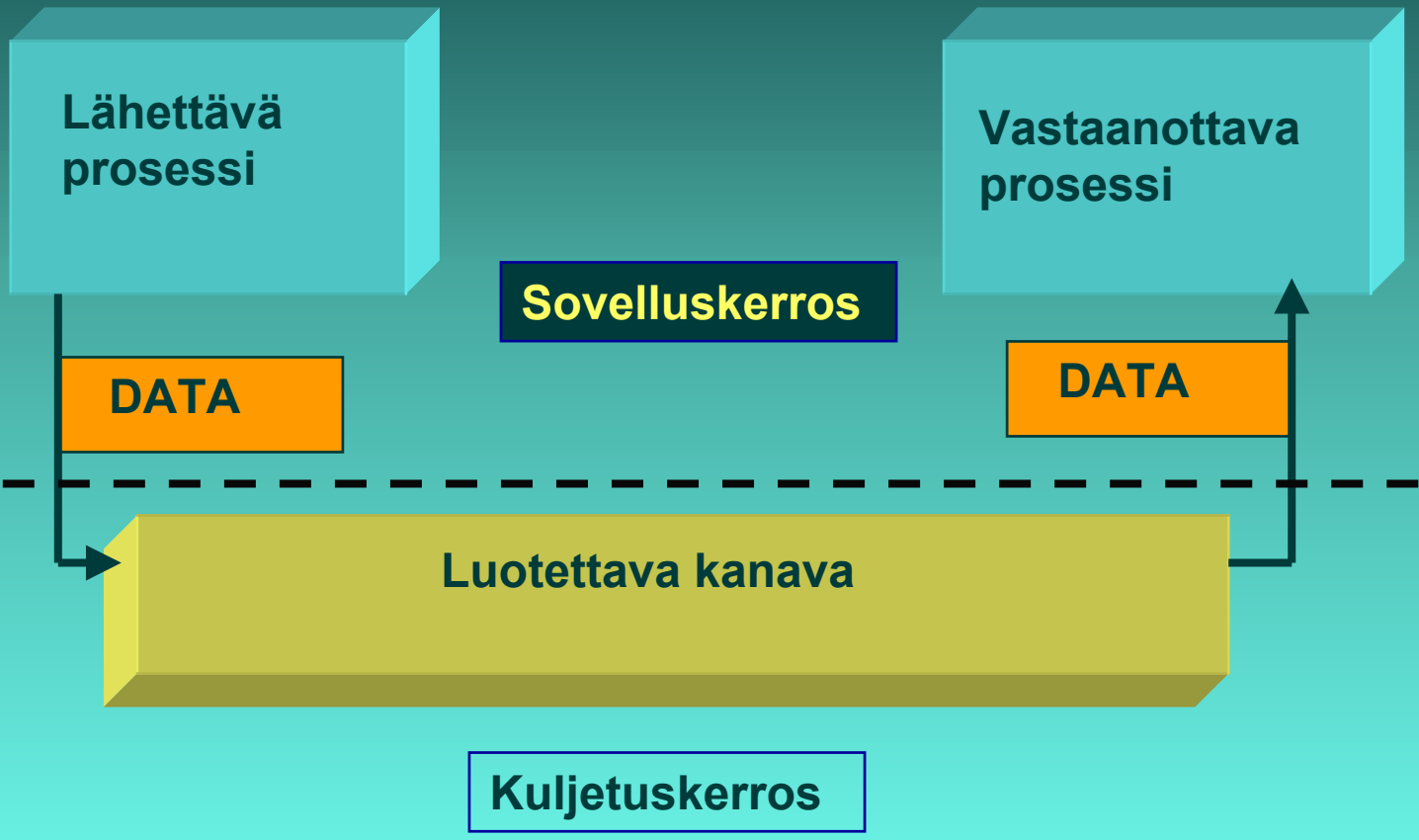
Tehtäviä:

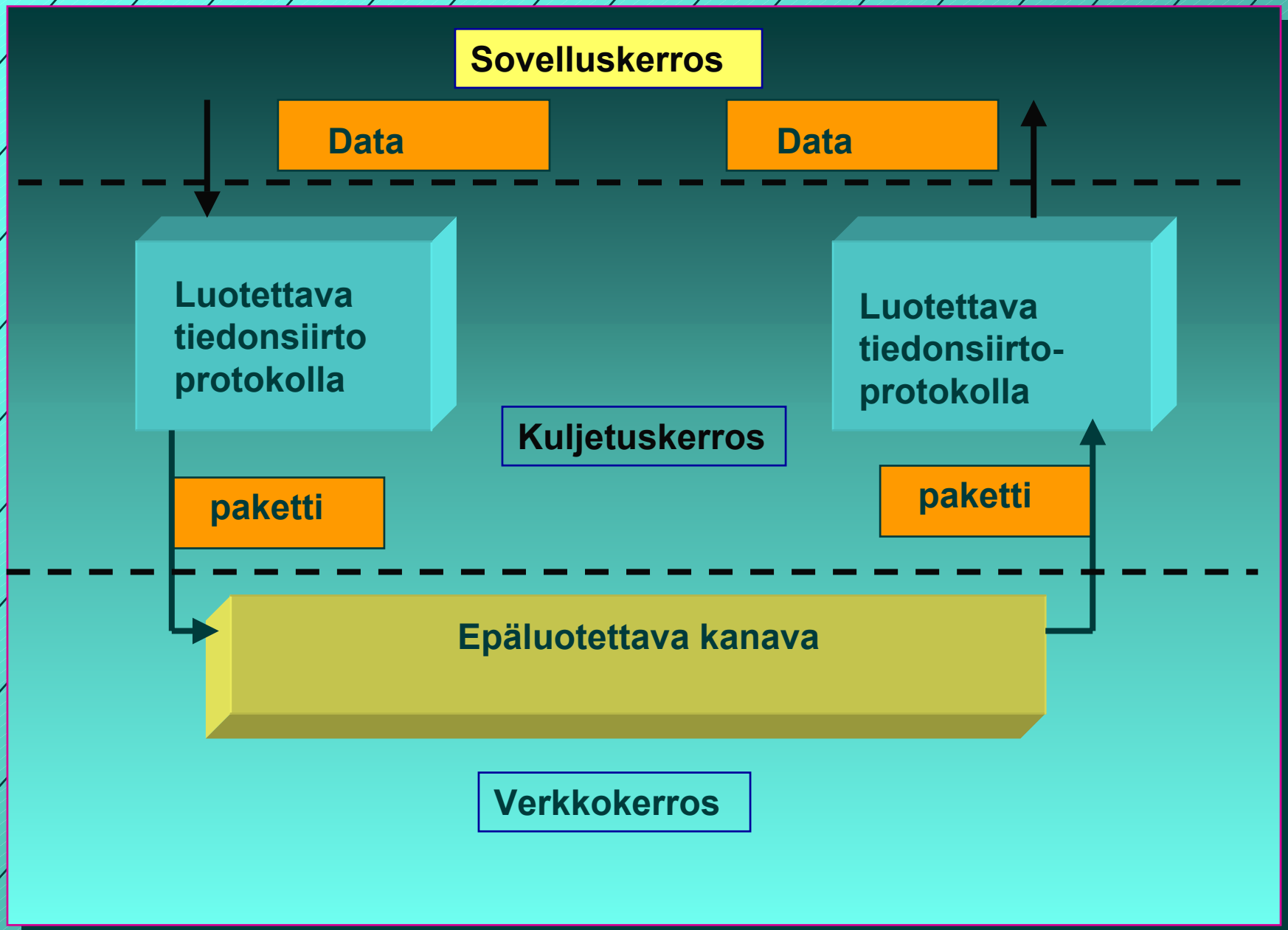
- **Lähetetään 10 tavun viesti UDP:llä.**
  - **Miten kauan kestää lähettäminen, jos lähetysnopeus on 56 kbps?**
    - **10 tavua + 8 tavua = 18 * 8 b = 144 bittiä**
    - **144 b/ 56 000 b/s = 2.57 ms**
  - **Miten suuri on etenemisviive, jos etäisyys lähettäjältä vastaanottajalle on 1000 km?**
    - **1000km/200 000 km/s = 5 ms**
  - **Miten suuri on UDP-otsakkeen aiheuttama yleisrasite (overhead)?**
    - **8/18 = 0.44 eli 44 %**

UDP:n käyttö

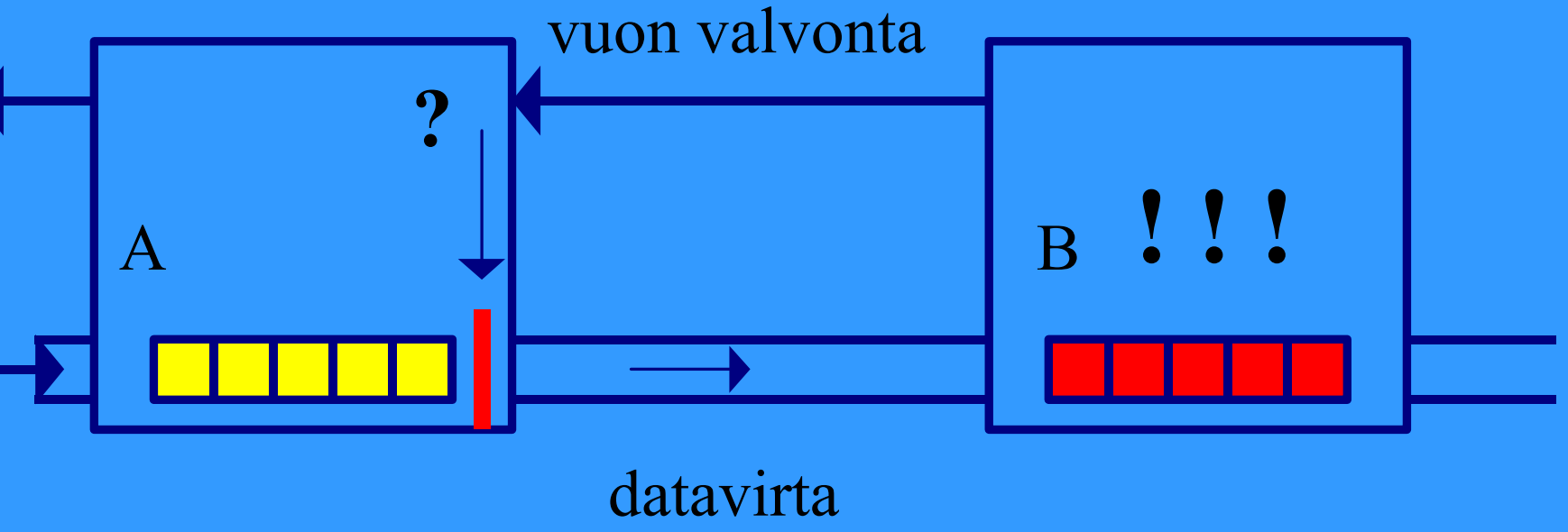
- **Vaikka UDP on epäluotettava, se sopii monien sovellusten tarpeisiin:**
  - **Remote file server (NFS)**
  - **multimedia**
  - **Internet-puhelin**
  - **verkon hallinta (SNMP)**
  - **reititys (RIP)**
  - **nimipalvelu (DNS)**
- **Miksi nämä sovellukset suosivat UDP:tä?**

3.4 Luotettava tiedonsiirto



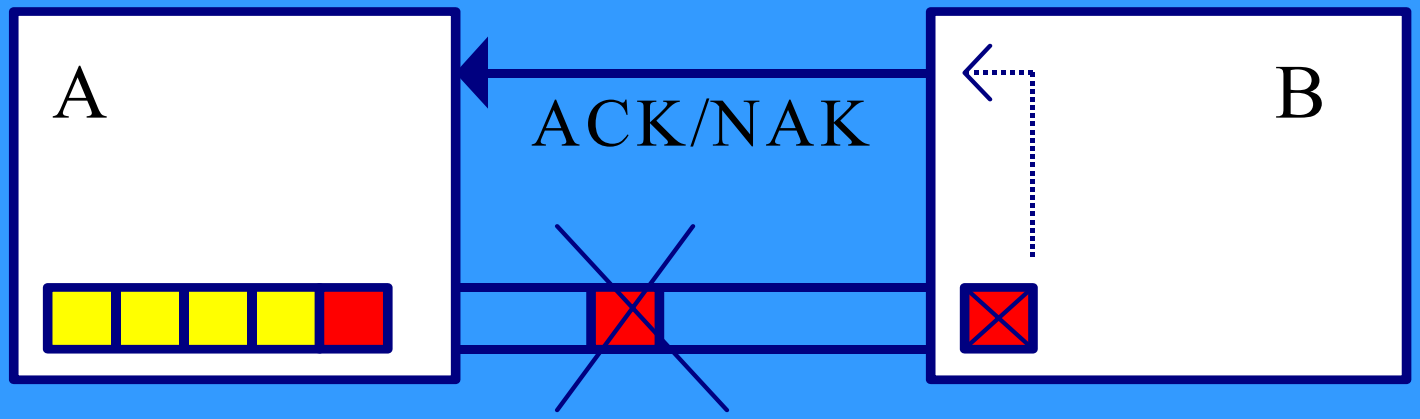

Sovelluskerros
Data
Data
Luotettava tiedonsiirto protokolla
Luotettava tiedonsiirto-protokolla
Kuljetuskerros
paketti
paketti
Epäluotettava kanava
Verkkokerros

Vuon valvonta



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

Kohinainen kanava



- sanoma vääristyy => virhetarkistus
- sanoma katoaa => numerointi, ajastin ja uudelleenlähetys
  - duplikaattien havaitseminen
- sanoma viivästyy => rajallinen elinaika
- sanomien järjestys muuttuu => järjestäminen

Yksinkertainen Stop and wait -protokolla

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

Entä jos virheitä?

- Sanomissa virheitä tai sanomat voivat puuttua kokonaan
- Myös kuittaukset voivat kadota
- Tarvitaan
  - virheen havaitseminen ja korjaaminen
    - tarkistussumma
    - kuittaus
    - uudelleenlähetys
  - sanomien numerointi
  - uudelleenlähetysajastin

Monimutkaisempi “stop and wait” -protokolla

- **ajastin lähettäjälle**
  - jos kuittausta ei kuulu, sanoma lähetetään automaattisesti uudelleen
  - kuittaus: ACK =‘ok, lähetä seuraava’
  - uudelleenlähetys synnyttää kaksoiskappaleita!
- **Sanomanumerointi**
  - jotta vastaanottaja tunnistaa kaksoiskappaleet
  - Miten paljon numeroita tarvitaan?
    - » Numero vie tilaa sanomassa!

Stop and wait -protokollan suorituskyky

- **Esim. satelliittiyhteydellä**
  - **50 kbps, kiertoviive ~520 ms, sanoma 1000 bittiä**
  - **kanavan käyttöaste < 4%**

- **=> lähetetään useita sanomia 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 sanomaa saa korkeintaan olla kuittaamatta
    - järkevä koko riippuu yhteyden tyypistä ja vastaanottajan kapasiteetista
    - kiinteä koko /vaihteleva koko
  - sisältö = mitkä sanomat saa lähettää
    - sanomalla järjestysnumero
      - rajallinen, N bittiä => 2**N arvoa
      - numerot käytettävä järjestyksessä

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

- **Vastaanottajan ikkuna**
  - **kullakin hetkellä sallittujen numeroiden joukko**
    - **mitä sanomia suostuu vastaanottamaan**
  - **kuittaus muuttaa myös vastaanottajan ikkunan**
- **ikkuna pysäyttää sanomien lähetyksen**
    - **seuraava sanomanumero ei ole lähetysikkunassa**
- **ikkuna estää sanoman vastaanoton**
    - **saadun sanoman numero ei ole vastaanottoikkunassa**

Kun ikkunan koko on 1

- Aina vain yksi sanoma kuittaamattomana
  - => One Bit Sliding Window -protokolla
  - ~ stop and wait -protokolla
- sanomanumerot 0 ja 1 riittävät
- ACK-sanoma identifioi viimeksi vastaanotetun virheettömän sanoman
  - jotta kuittausduplikaatti ei voi kuitata väärää sanomaa
  - ACK ilmoittaa joko
    - seuraavaksi odotetun sanoman numeron
    - viimeksi vastaanotetun sanoman numeron

- **Entä kun tapahtuu virhe?**
  - **kaksi eri tapaa hoitaa**
  1. **toisto virheestä lähtien (go back n) (tai paluu n:ään)**
  2. **valikoiva toisto (selective repeat)**

Toisto virheestä eli Paluu n:ään (‘Go back n’)

- virheellisen sanoman havaittuaan
  - vastaanottaja hylkää kaikkia sen jälkeiset sanomat eikä lähetä niistä kuittauksia
  - => sanomat hyväksytään vain oikeassa järjestyksessä
- kun lähettäjä ei saa kuittauksia,
  - sen lähetysikkuna ‘täyttyy’
  - eikä se voi enää lähettää
- lähettäjän ajastimet laukeavat aikanaan ja
  - virheellinen sanoma
  - sekä kaikki sen jälkeen lähetetyt sanomat lähetetään uudelleen
- tehoton, jos paljon virheitä ja iso ikkuna

Valikoiva toisto

- vastaanottaja hyväksyy kaikki kelvolliset sanomat
  - se kuittaa sanomat
  - puskuroi ne ja toimittaa eteenpäin oikeassa järjestyksessä
    - » tarvitaan puskuritilaa
- lähettäjä ei saa kuittausta virheellisestä sanomasta
  - ajastin laukeaa ja sanoma lähetetään uudelleen
  - lähettää uudelleen vain virheellisen sanoman
  - ikkuna liukuu nytkin tasaisesti
    - » yksi puuttuva kuittaus voi pysäyttää lähetyksen

Kuittaukset

- ACK
  - kumulatiivinen ACK
    - tähän saakka kaikki ok!
    - Go-Back N
  - yksittäinen ACK
    - vain tämä ok!
    - Valikoiva toisto
- NAK-kuittaus
  - sanoma virheellinen tai puuttuu

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

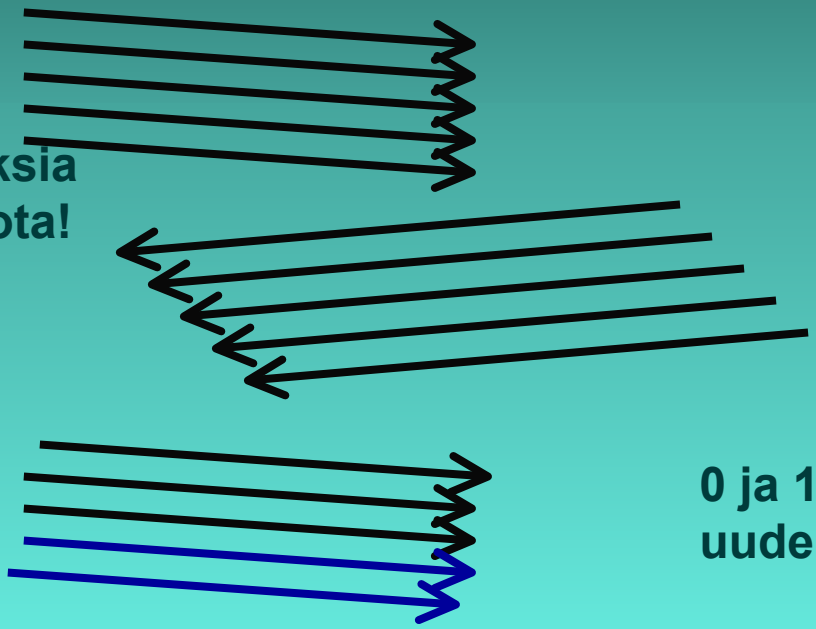
- implisiittinen uudelleenlähetys
  - ei NAK-kuittauksia
- explisiittinen uudelleenlähetys
  - käytetään NAK-kuittauksia

Ikkunankoko

- Kun käytetty numeroavaruus on 0, 1, .. n ja eri numeroita siis käytettävissä n+1
  - yleensä jokin kakkosen potenssi
    - » koska numerokentän koko k bittiä => käytössä 2**k numeroa
- ikkunan koko ‘go back n’:ssä voi olla korkeintaan n
  - eli oltava ainakin yhtä pienempi kuin numeroavaruus
- ikkunan koko valikoivassa toistossa voi olla korkeintaan (n+1)/2
  - saa olla korkeintaan puolet numeroavaruudesta

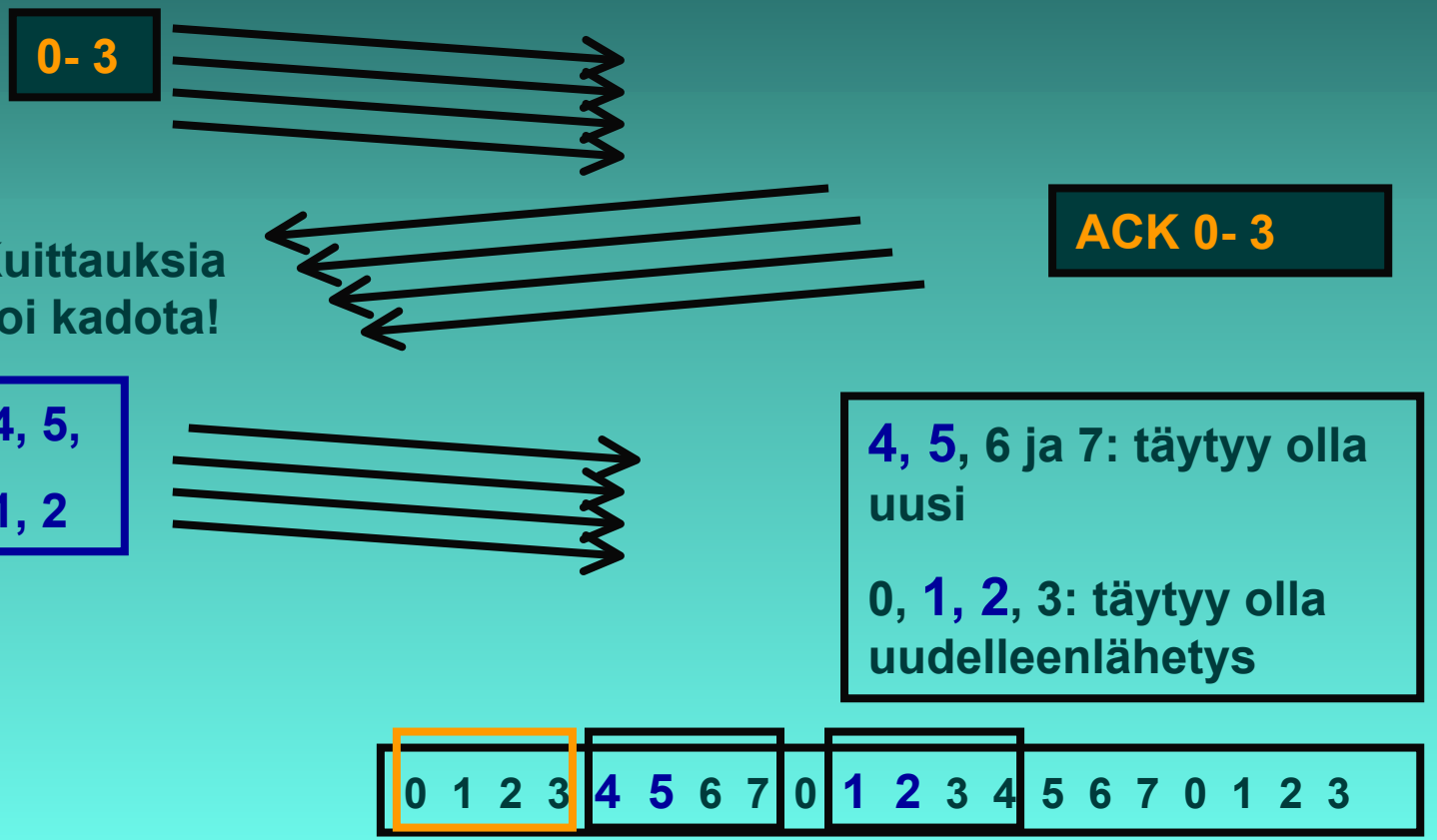
Miksi?

Valikoiva toisto: ikkuna 5, numeroavaruus 8



Miksi?

Valikoiva toisto: ikkuna 4, numeroavaruus 8



Kaksisuuntainen liikenne

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

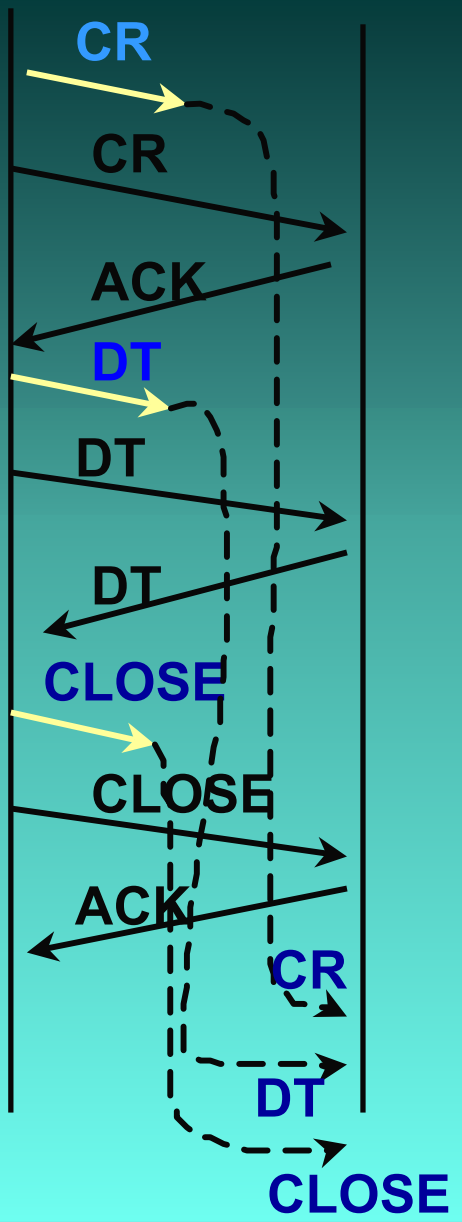
3.5. TCP-protokolla

- yhteyden muodostus ja purku
- luotettavan tavuvirran toteuttaminen
- vuonvalvonta
- siirron optimointi
- TCP-segmentti
- ruuhkan valvonta
- TCP-palvelun käyttö

Yhteyden muodostus ja purku TCP:ssä

- TCP käyttää yhteyden muodostamiseen ja purkuun ns. kolminkertaista kättelyä (three-way handshake)
  - välissä oleva verkko tekee yhteyden muodostamisen ja purun hankalaksi
    - viivästyneet sanomat => sanomille elinaika (max 3 minuuttia)
    - sanomien numeroinnista sopiminen
  - Kahden armeijan ongelma (two-army problem)
    - “hyökkään, jos olen varma, että sinäkin hyökkäät”
    - symmetrinen yhteyden purku = molemmat osapuolet tietävät, että toinenkin on varmasti purkanut yhteyden

Yhteyden muodostus ruuhkaisessa verkossa



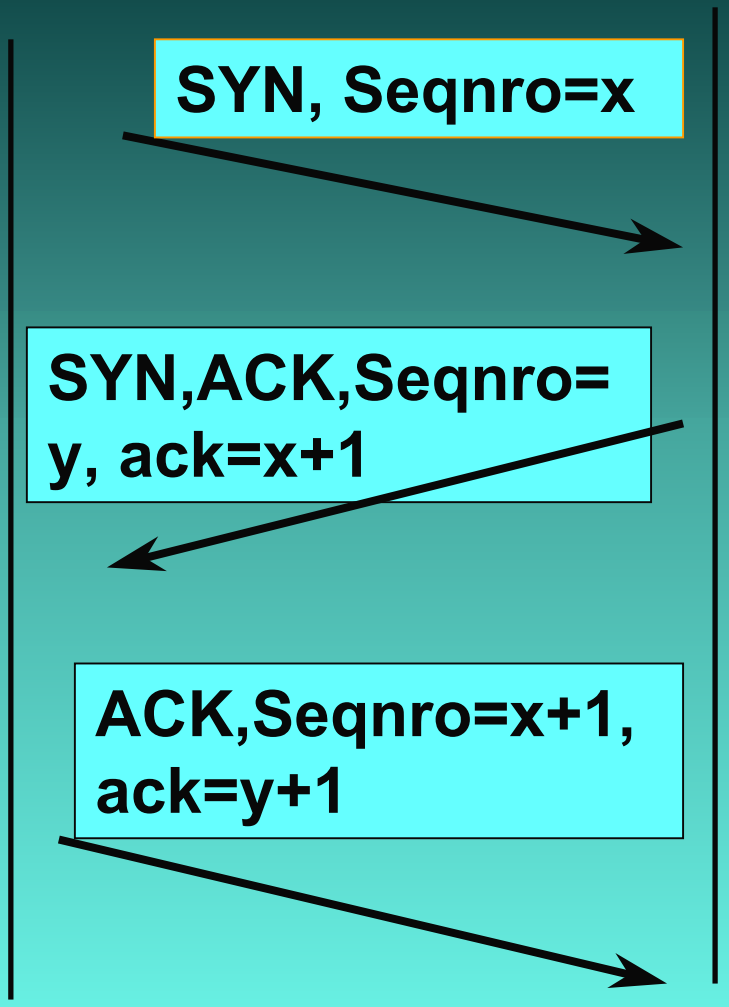
Jokainen paketti lähetetään kahteen kertaan

Kun yhteys on purettu, viivästyneet kaksoiskappaleet saapuvat

Ne tulkitaan uudeksi yhteydeksi, ja data otetaan vastaan kahteen kertaan!

Kolminkertainen kättely

SYN = tahdistus-sanoma

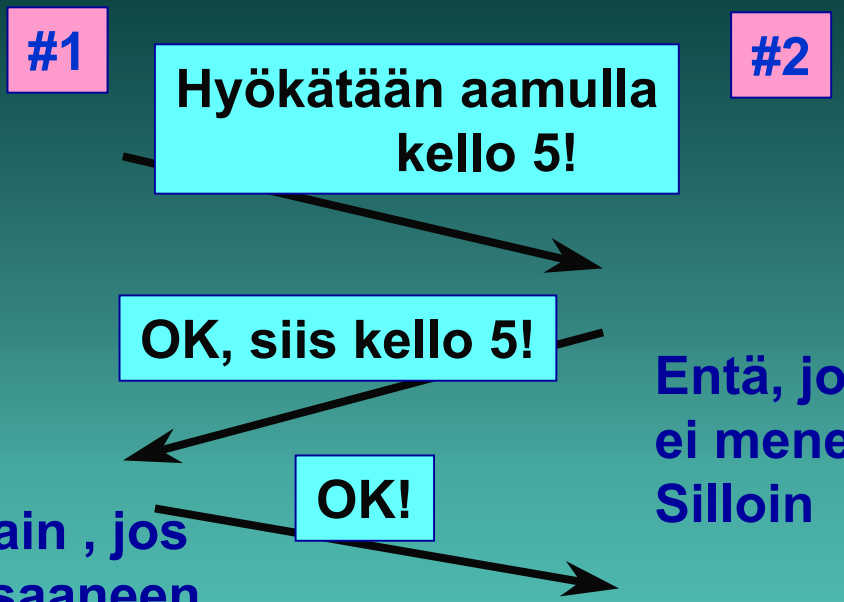


yhteyspyynnössä pyytäjän nro x

vahvistuksessa sekä pyytäjän että suostujan järj.numero

ensimmäisessä datalähetyksessä molemmat numerot

Yhteyden muodostus

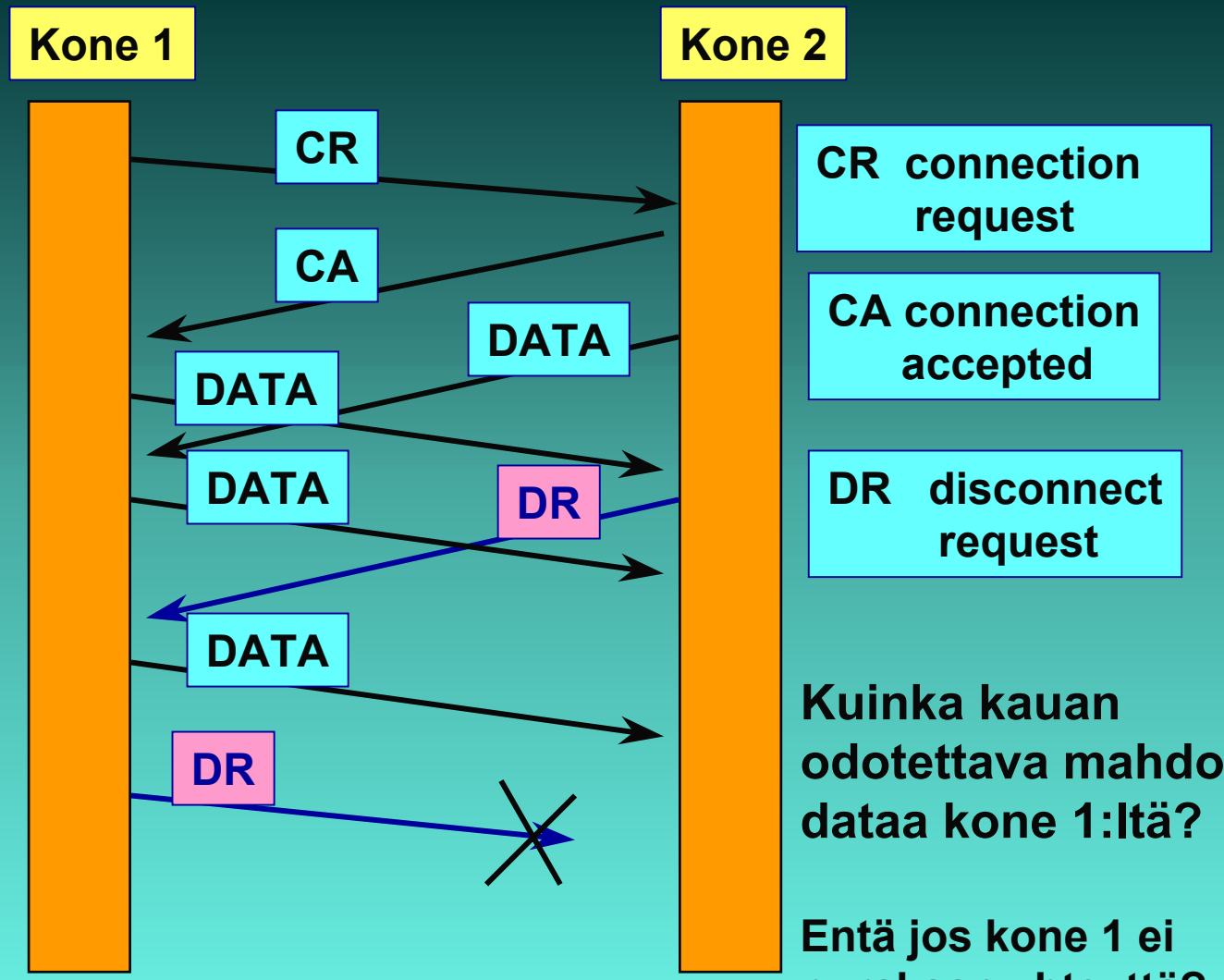


Entä, jos vastaus ei mene perille? Silloin #1 ei hyökkää!

#2 hyökkää vain , jos tietää minun saaneen vastaussanoman.

Loogisesti ratkeamaton ongelma.
Kaikki riippuu aina viimeisestä sanomasta, jonka perillemenoa ei voida taata!

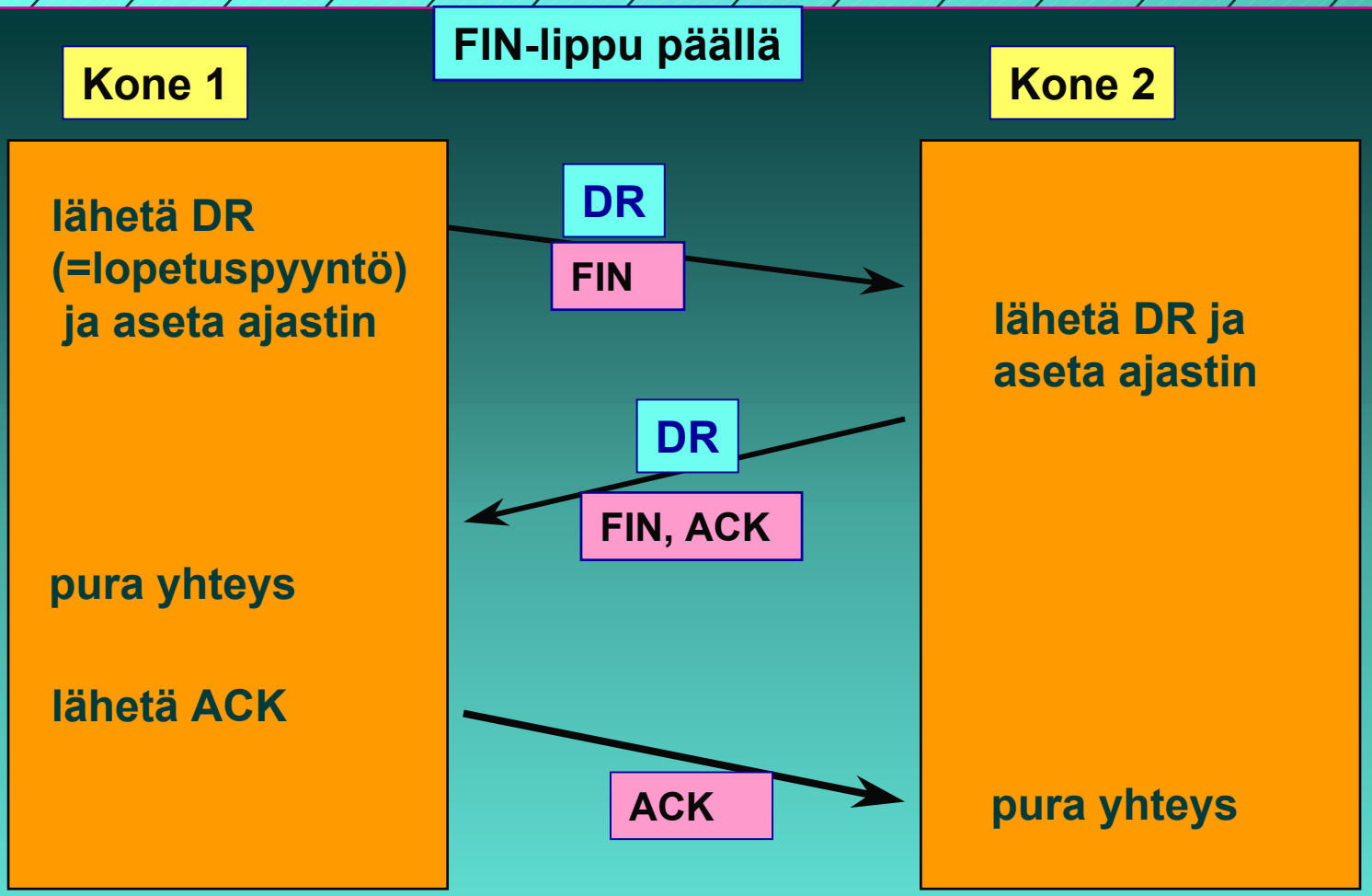
Kahden armeijan ongelma (two-army problem)



Sama ongelma: Symmetrinen yhteyden purku

Yhteyden purku

- molemmat suunnat puretaan erikseen
- TCP-segmentti
  - FIN = 1
  - ei enää dataa lähetettävä
  - kun saadaan kuittaus => yhteys tähän suuntaan purettu
  - yhteys kokonaan purettu, kun molemmat suunnat purettu
- purussa käytetään ajastimia
  - 2 * paketin maksimaalinen elinikä



Yhteyden purku kolminkertaista kättelyä käyttäen

TCP: Virheettömyys ja järjestys

- **Järjestysnumerot**
  - **tavuvirta => tavunumerointi**
  - **segmentin 1. tavun järjestysnumero**
  - **yhteyden alussa satunnaiset numerot**
- **kuittaukset**
  - **kumulatiivinen ACK, ei NAK-kuittausta**
  - **kuittauksessa seuraavaksi odotettava tavu**
  - **kuitataan ‘tiheästi’**
    - **vähintään joka toinen**

- Go Back N -tyyppinen
  - virheellisiä tai väärässä järjestyksessä tulleita ei hyväksytä
    - ne voidaan myös tallettaa
  - mutta ei välttämättä lähetä kaikkia virheellisestä lähtien uudestaan
- Myös ehdotettu valikoivan toiston tyyppistä kuittaamista
  - SACK-kuitaus, joka kertoo, mitkä segmentit on vastaanotettu ok

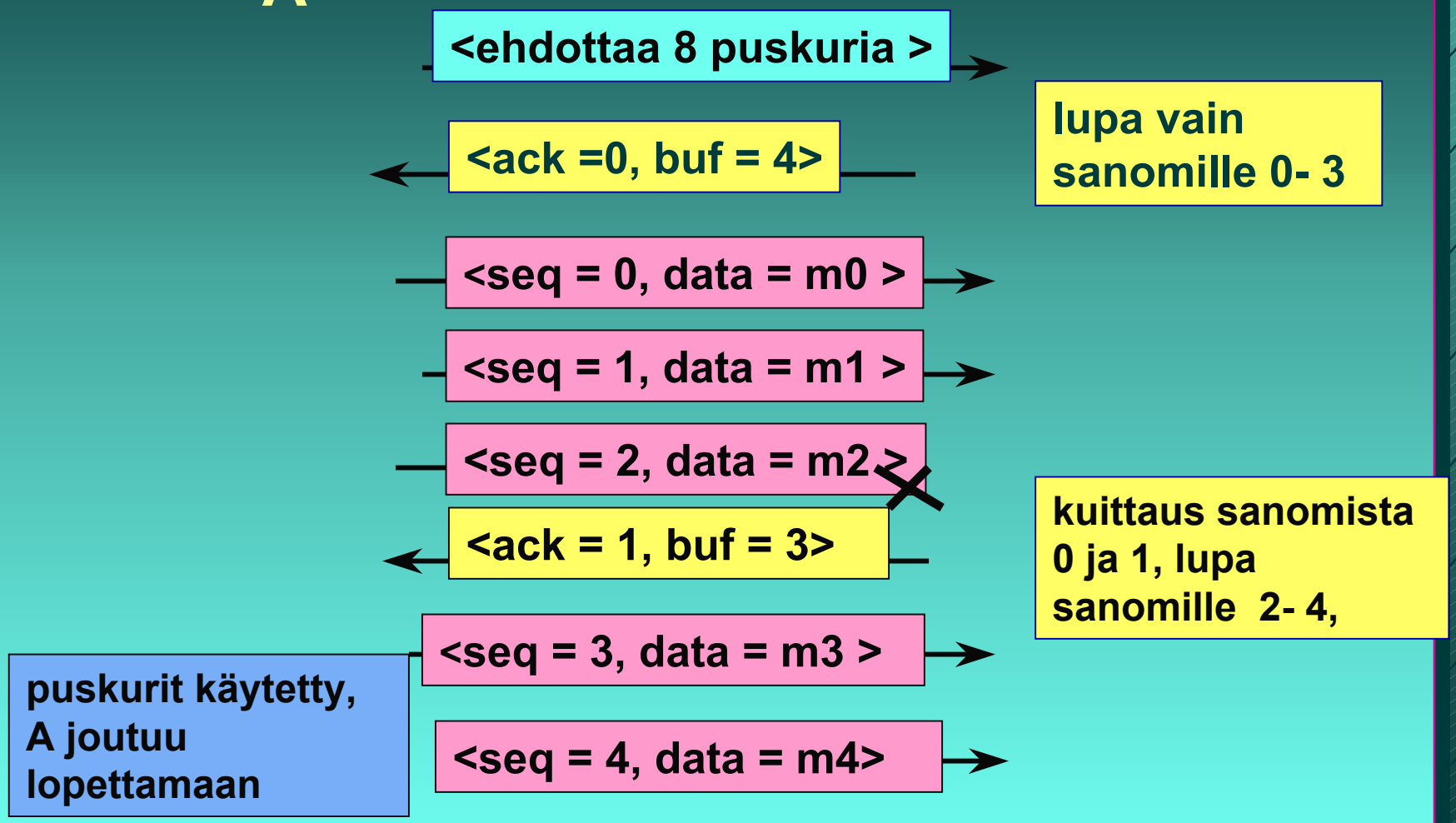
Toistokuittaukset

- **Ensikuittaus**
  - **ensimmäinen vastaanotettu sanoman kuittaus**
    - **ACK(i): sanomaan i saakka kaikki OK!**
- **toistokuittaus (duplicate ACK)**
  - **väärässä järjestyksessä saatu segmentti tai virheellinen segmentti => toistetaan uudestaan jo annettu kuittaus**
    - **NAK-kuittauksen korvike**
    - **3 toistokuittausta => segmentti kadonnut tai virheellinen**

TCP:n vuonvalvonta

- **‘joustava’ liukuva ikkuna (sliding window) (“credit-vuonvalvonta”)**
- **vastaanottaja kertoo, kuinka paljon suostuu vastaanottamaan**
  - **=> kuittaus irroitettu vuonvalvonnasta**
    - **puhtaassa liukuvassa ikkunassa kuittaus siirtää ikkunaa**
    - **AdvertisedWindow-kenttä**
      - **paljonko saa lähettää = paljonko vastaanottajan puskureihin mahtuu**
- **myös ruuhkan valvonta rajoittaa lähettämistä**

Esimerkki


A
B
<ehdottaa 8 puskuria >
lupa vain sanomille 0- 3
<ack =0, buf = 4>
<seq = 0, data = m0 >
<seq = 1, data = m1 >
<seq = 2, data = m2 >
kuittaus sanomista 0 ja 1, lupa sanomille 2- 4,
<ack = 1, buf = 3>
<seq = 3, data = m3 >
puskurit käytetty, A joutuu lopettamaan
<seq = 4, data = m4>

Esimerkki jatkuu