Luento 5: Kuljetuskerros

luotettavan tiedonsiirron periaatteet

12.11.2012

Tiina Niklander

Kurose&Ross
Ch3

Luennon sisältöä

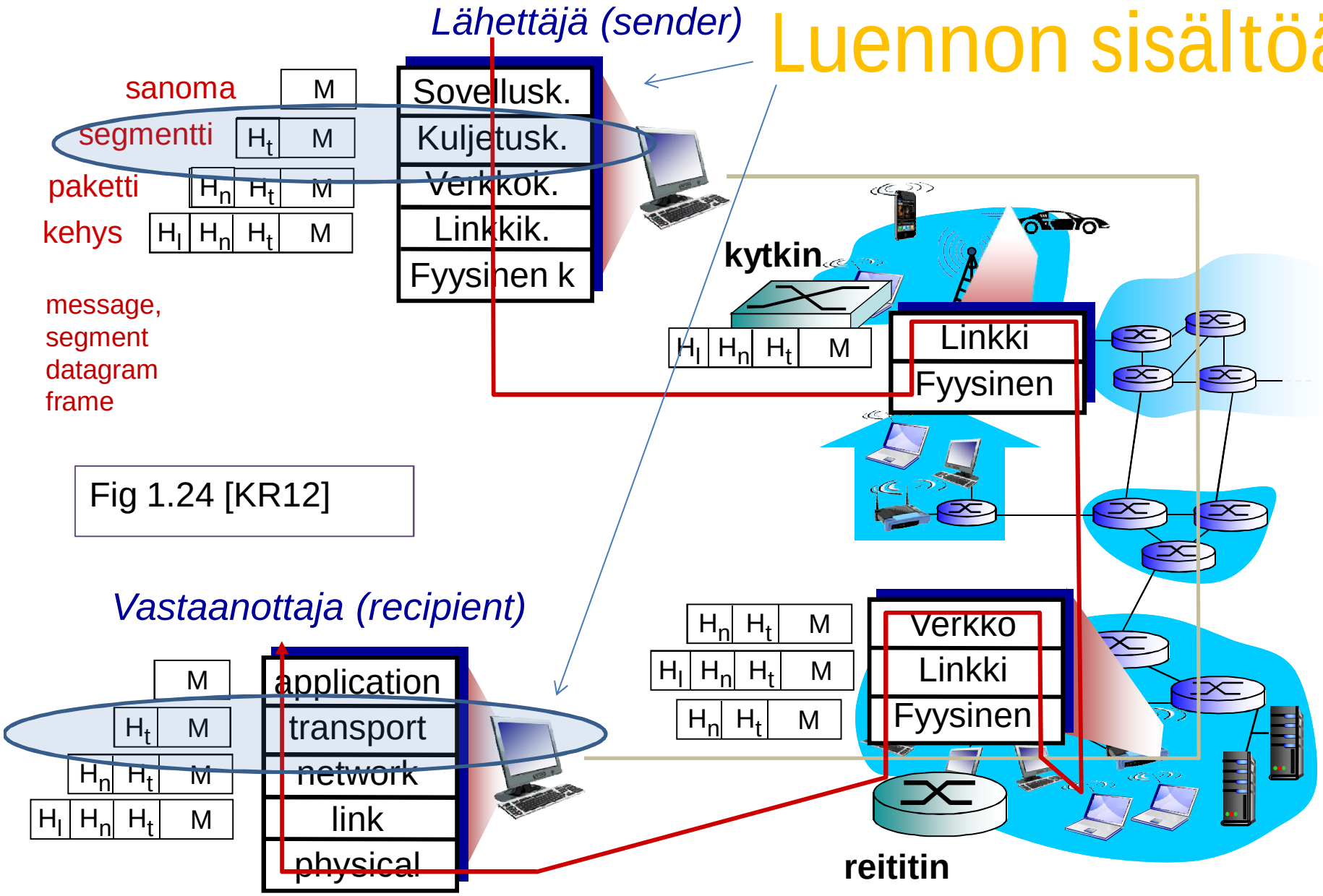


Fig 1.24 [KR12]

Sisältöä

Kuljetuspalvelut
Luotettavan kuljetuspalvelun periaatteet
Yhteydetön kuljetuspalvelu, UDP
Yhteydellinen kuljetuspalvelu, TCP
Ruuhkanhallinta TCP:ssä

Oppimistavoitteet:
- Tuntea Internetin kuljetusprotokollien (UDP/TCP) toiminnallisuus ja periaatteet
- Osata luotettavan kuljetuspalvelun ja vuonvalvonnan periaatteet ja toteutukset
- Osata TCP-ruuhkanhallinnan

Kuljetuskerros

Kuljetuspalvelu

Kuljetuskerros

Tarjoaa kuljetuspalvelun prosessien välille

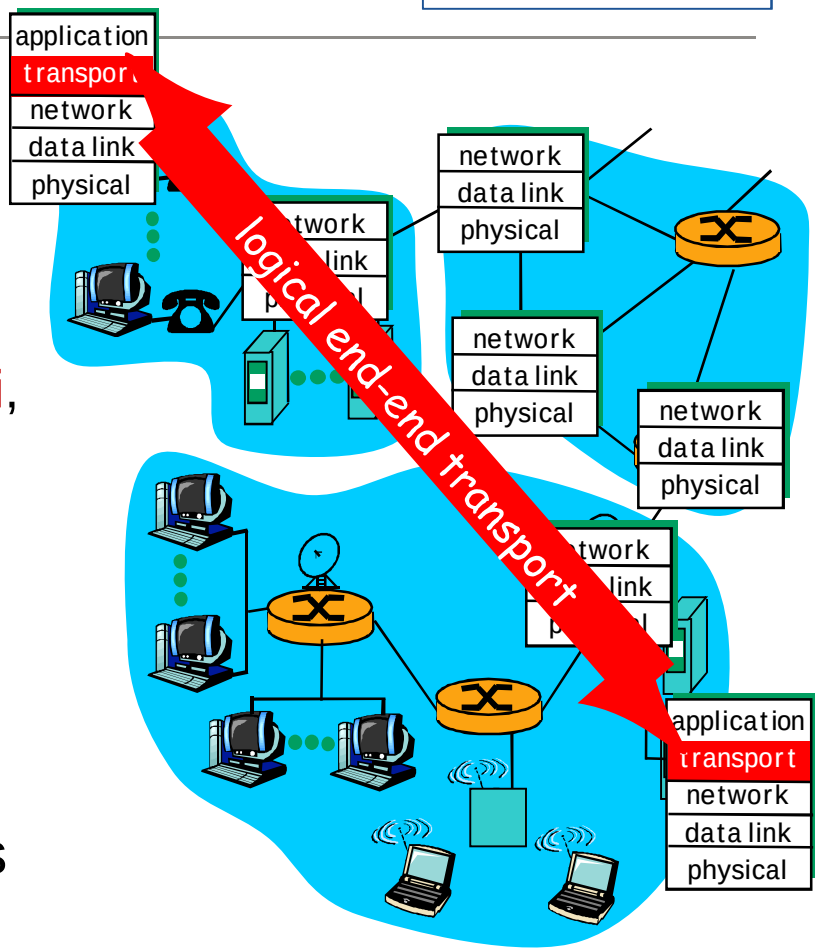
Vain isäntäkoneissa

- Lähetys: Pilko sovelluskerroksen sanoma pienemmiksi segmenteiksi, jotka verkkokerros toimittaa perille.
- Vastaanotto: Kokoa segmentit sanomaksi, jonka sovellus lukee.

Verkkokerros reitittää koneesta koneelle

Segmentin koko s.e. verkkokerros pystyisi välittämään sellaisena

Fig 3.1 [KR12]



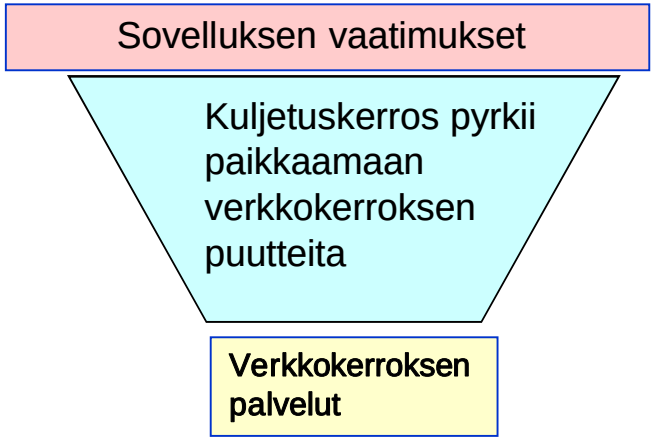
Sovelluksen vaatimuksia

Verkkokerroksen palvelu voi

- Muuttaa segmentin bittejä tai kadottaa segmenttejä
- Toimittaa segmentit epäjärjestyksessä kuljetuskerrokselle
- Viivyttää segmenttejä satunnaisen pitkän ajan
- Luovuttaa kuljetuskerrokselle useita kopioita samasta segmentistä
- Rajoittaa segmentin kokoa

Sovellus edellyttää kuljetuspalvelulta

- Virheettömyyttä, luotettavuutta
- Järjestyksen säilymistä
- Kaksoiskappaleiden karsimista
- Mielivaltaisen pitkien sanomien sallimista
- Vuonvalvonnan mahdollistamista



Kuljetuskerros peittää verkkokerroksen puutteita ja parantaa sovelluksen näkemää palvelun laatua

Internetin kuljetusprotokollat

TCP: luotettava, järjestyksen säilyttävä tavujen kuljetuspalvelu

- **Virheenvalvonta** (error control): Huomaa ja korjaa virheet, hylkää kaksoiskappaleet
- **Vuonvalvonta** (flow control): Älä ylikuormita vastaanottajaa
- **Ruuhkanhallinta** (congestion control): Älä ylikuormita verkkoa
- **Yhteyden** muodostaminen ja purku

UDP: Ei-luotettava, ei-järjestyksen säilyttävä sanomien kuljetuspalvelu

- Välittää vain sanomia, ei pyri mitenkään parantamaan verkkokerroksen tarjoamaa palvelun laatua
- Luotettavuus jää sovelluskerroksen hoidettavaksi

Kumpikaan kuljetuspalvelu ei anna takuita viiveelle tai siirtonopeudelle (“best effort”)

Mikä kone /Mikä prosessi?

- Kuljetuskerros tarjoaa **päästä-päähän yhteyden**
  - Prosessilta prosessille (= pistokkeesta pistokkeeseen)
  - Prosessi lukee ja kirjoittaa sanomia halutessaan
- Datan lisäksi on välitettävä osoitetietoja
  - Vastaanottajan ja lähettäjän tiedot
  - Eri koneiden prosessit voivat käyttää samaa palvelua
  - Saman koneen prosessit voivat käyttää eri palveluita
- Kuljetuskerros: mikä prosessi = mikä portti
- Verkkokerros: mikä kone = mikä IP-osoite
- Porttinumero
  - 16-bittinen: 0 – 65535
  - Portit 0 – 1024 on varattu kukin tietylle palvelulle (well known ports)
    - Esim. www-palvelulle portti 80, SMTP-postipalvelulle portti 25

Segmenttien lomitus (multiplexing) ja erottelu (demultiplexing)

Lomitus lähettäjällä:

Segmenttejä useasta pistokkeesta, liitä kuhunkin kuljetusotsake (käytetään erottelussa myöhemmin)

Erottelu vastaanottajalla:

Välitä saapuva segmentti oikeaan pistokkeeseen, tieto löytyy otsakkeesta

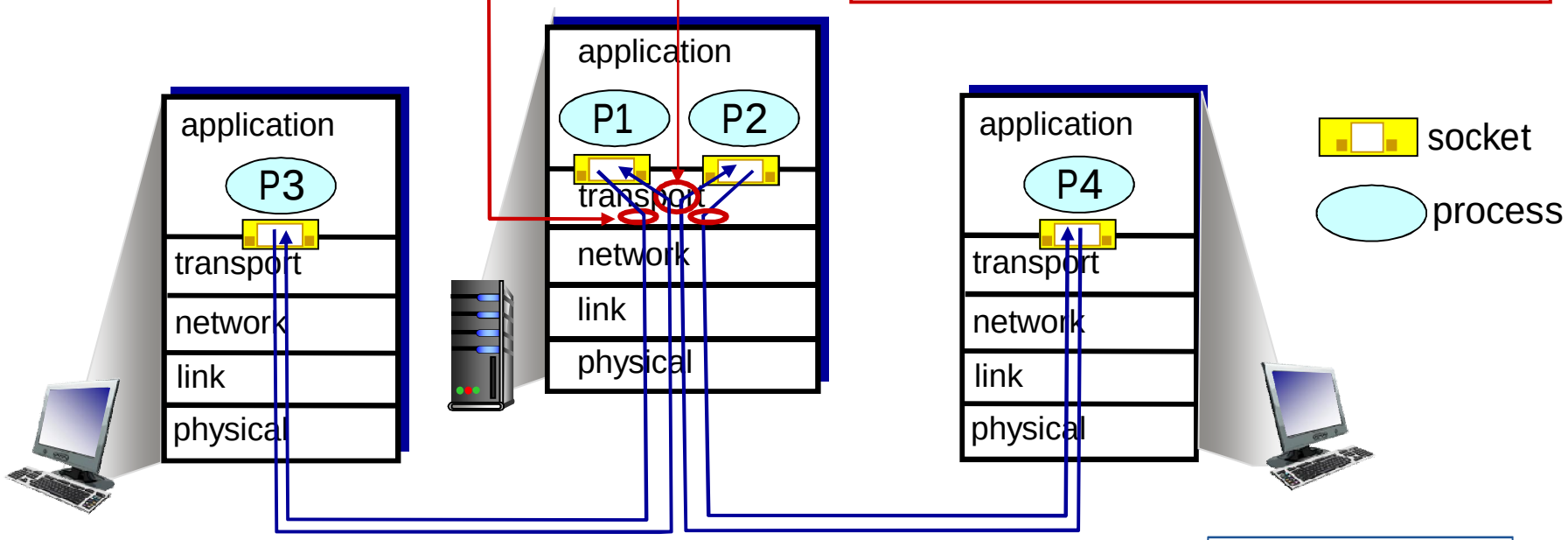


Fig 3.2 [KR12]

Tietoliikenteen perusteet 2012, Tiina Niklander

Mikä kone /Mikä prosessi?

Kts Fig 3.3 & 4.13 [KR12]

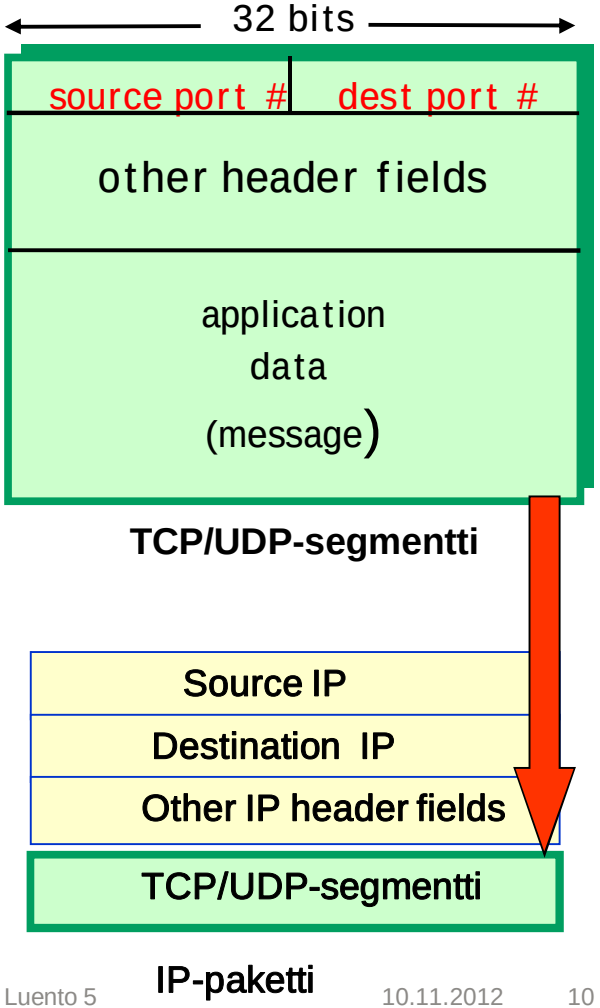
Lähetys (asiakas)

Kuljetuskerros

- Segmentin otsakkeessa lähde- ja kohdeprosessin porttinumero
- Antaa segmentin verkkokerroksen välitettäväksi
- TCP: huolehtii myös luotettavuudesta
- UDP: tarjoaa pelkän välityspalvelun

Verkkokerros

- Paketin otsakkeessa lähde- ja kohdekoneen IP-osoite,
- reitittimet osaavat ohjata oikealle koneelle



Mikä kone /Mikä prosessi?

Kts Fig 3.3 & 4.13 [KR12]

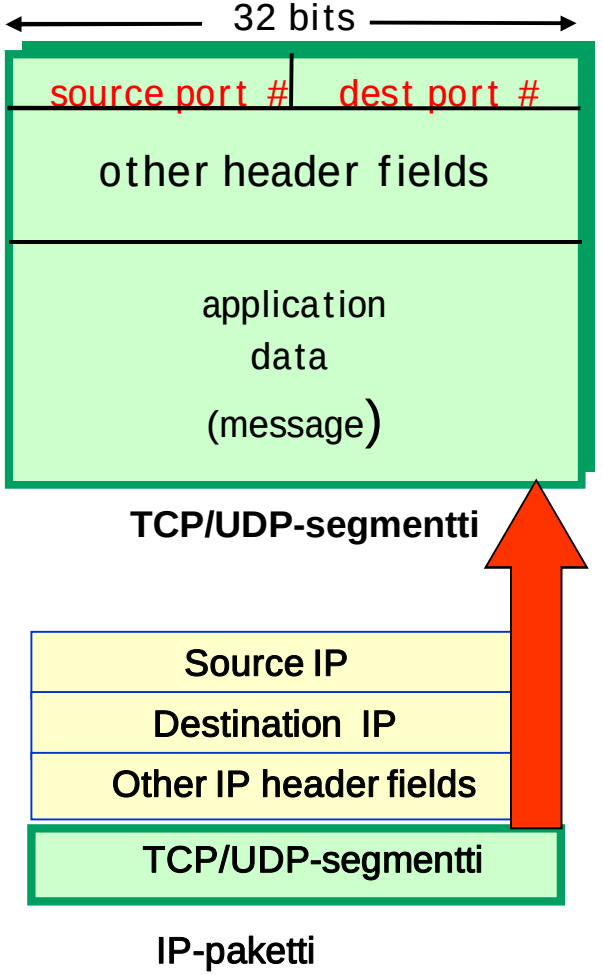
Vastaanotto (palvelija)

Verkkokerros

- Vastaanottaa IP-paketin
- Poistaa verkkokerroksen otsaketiedot
- Luovuttaa paketissa olleen segmentin kuljetuskerrokselle

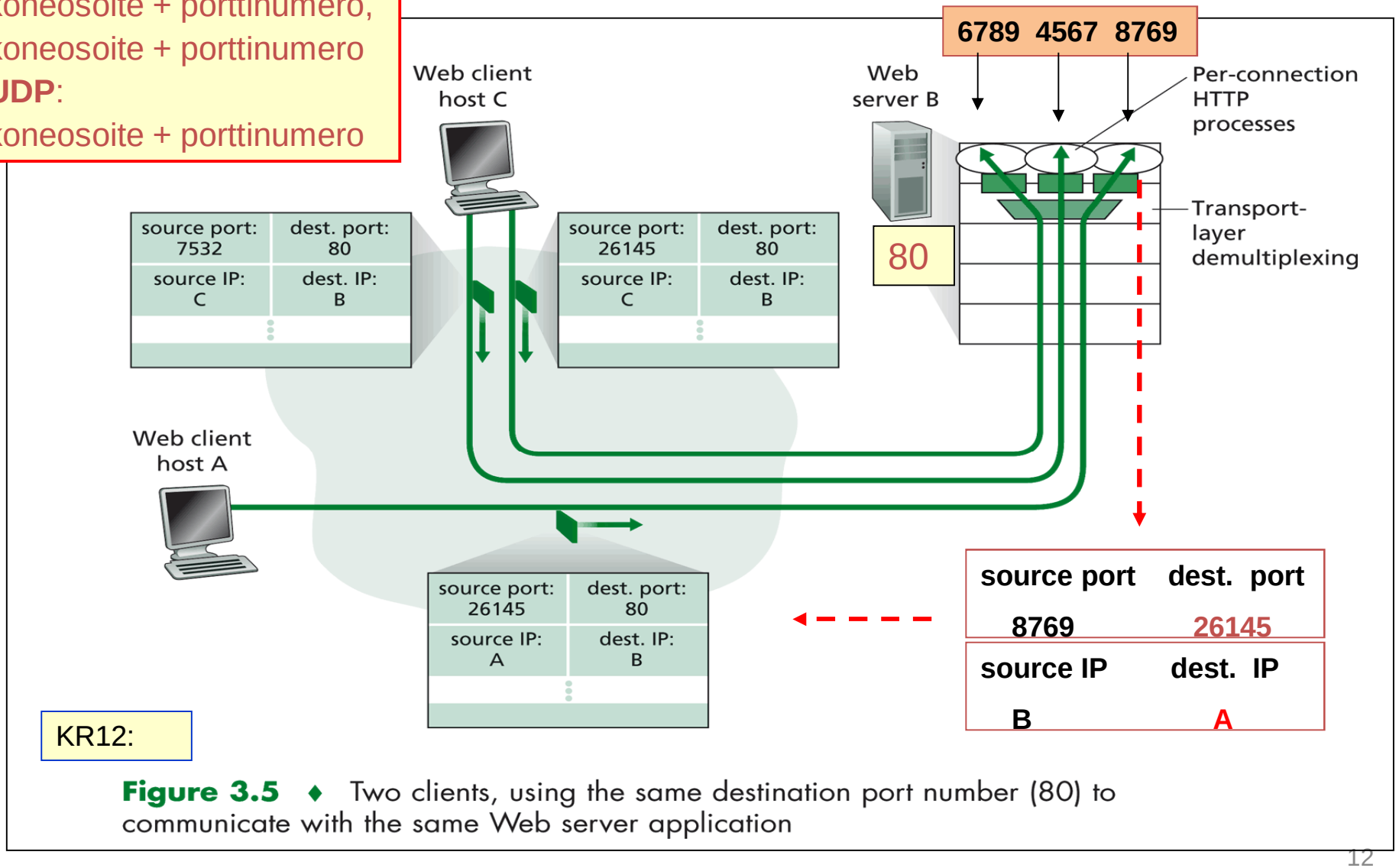
Kuljetuskerros

- Poistaa kuljetuskerroksen otsaketiedot
- Kokoaa yhteenkuuluvat segmentit sanomiksi (tavuvirraksi)
- Ohjaa sanoman (tavuvirran) oikealle prosessille (eli oikeaan pistokkeseen) porttinumeron avulla
  - TCP: huolehtii myös luotettavuudesta
  - UDP: tarjoaa pelkän välityspalvelun



Kaksi www-asiakasta ja palvelija

TCP-yhteys:
koneosoite + porttinumero,
koneosoite + porttinumero
UDP:
koneosoite + porttinumero



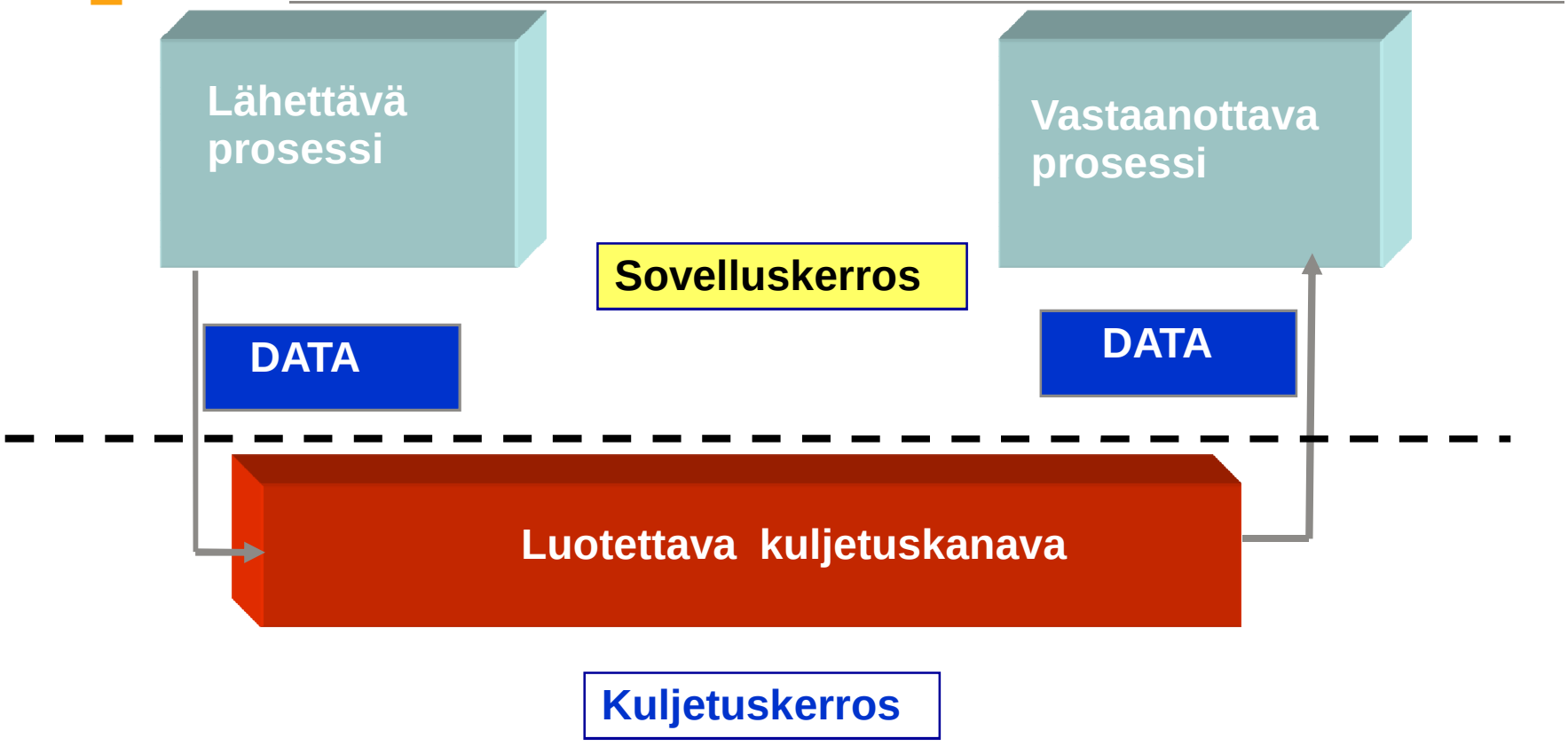
KR12:

Figure 3.5 ♦ Two clients, using the same destination port number (80) to communicate with the same Web server application

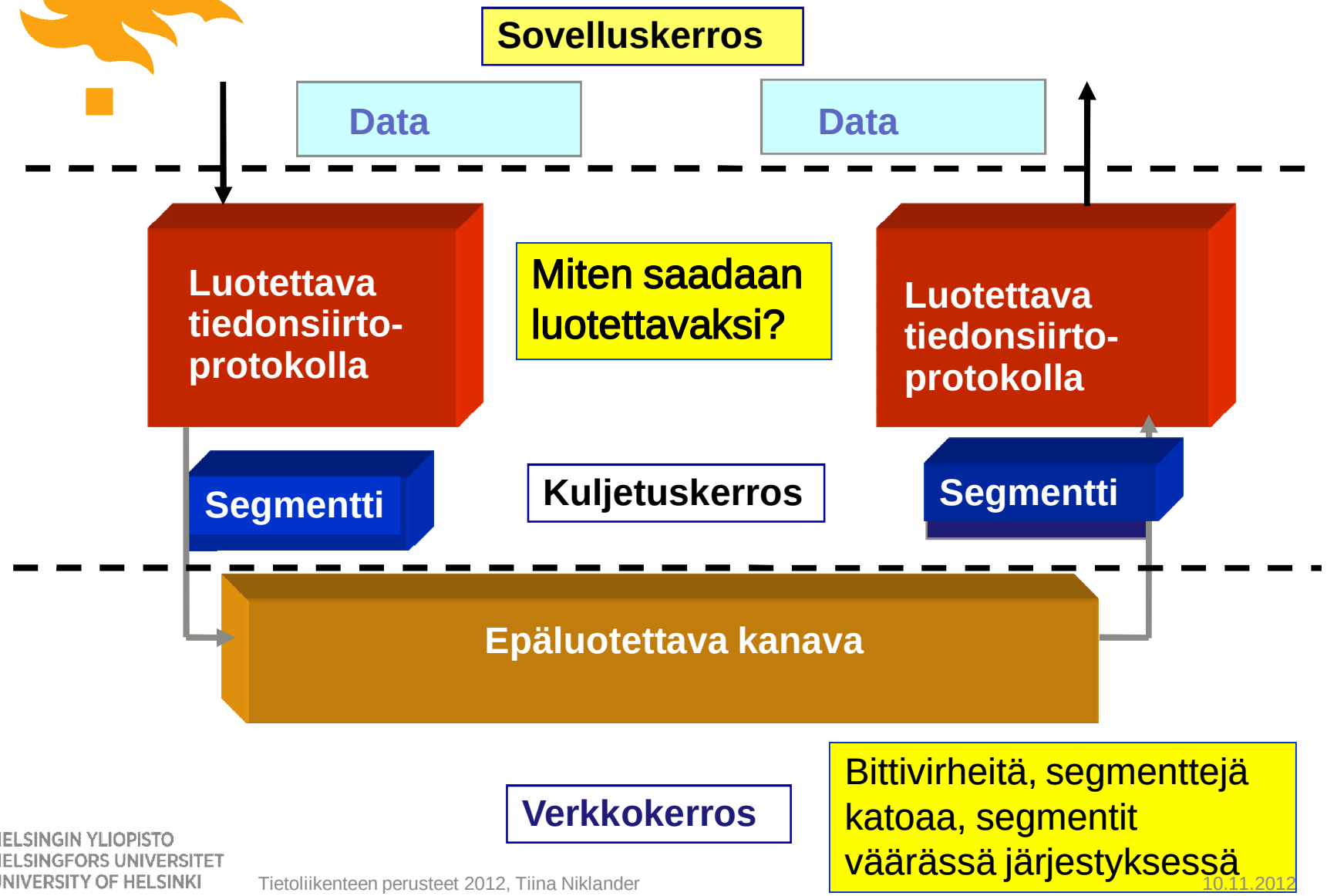
Kuljetuskerros

Luotettavan kuljetuspalvelun periaatteet

Luotettava tiedonsiirto?



Luotettava tiedonsiirto?

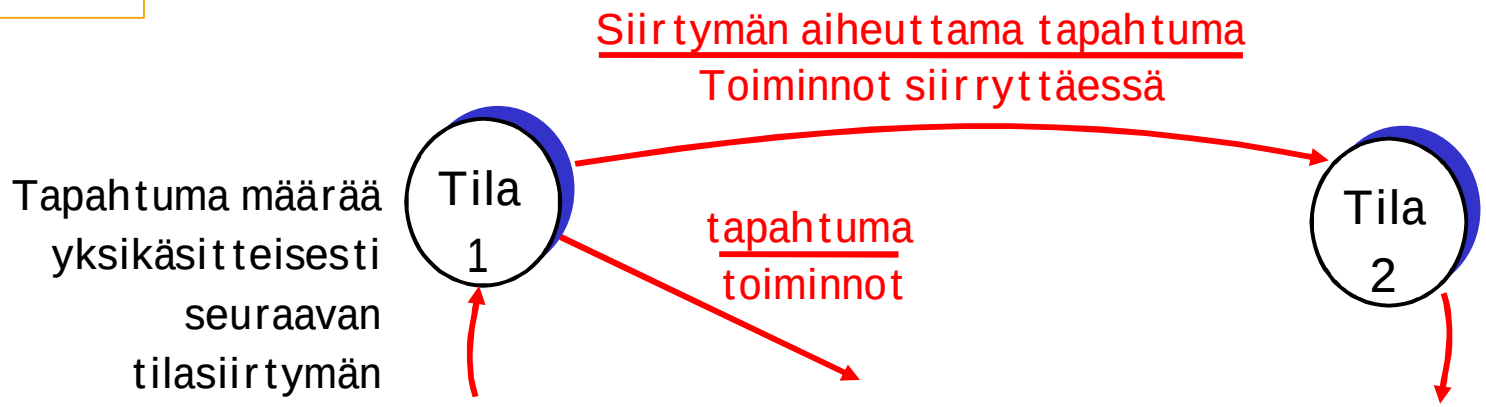


Kuinka saada luotettavaksi?

Tarkastellaan yleisesti luotettavan tiedonsiirron ongelmia ja erilaisia ratkaisuyrityksiä

- Edeten ideaalitilanteesta yhä ongelmaisempaan
- Käyttäen äärellisiä tila-automaatteja lähettäjän ja vastaanottajan toiminnan kuvaamiseksi

LaMa:n termi: Tilasiirtymä-järjestelmä



Ideaalitilanne (→rtd1.0)

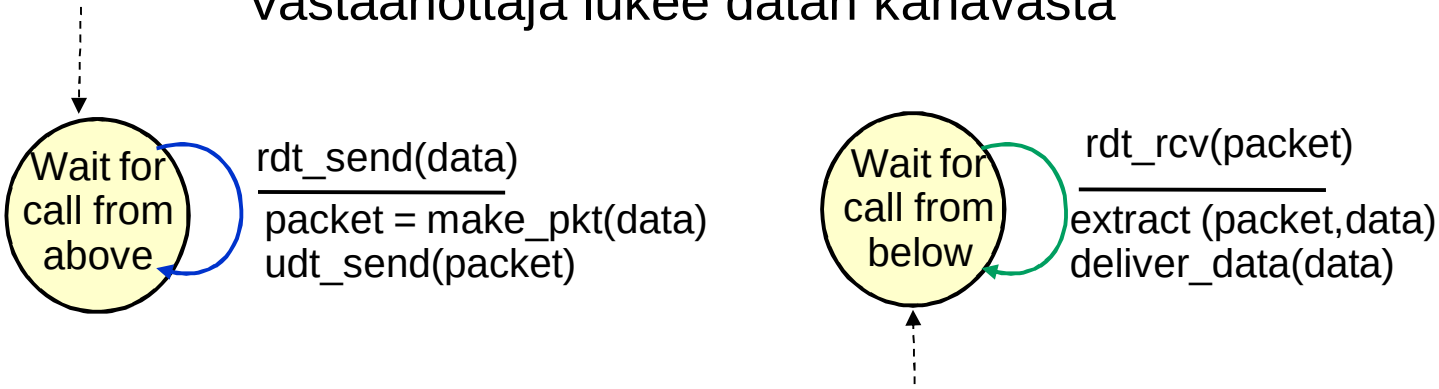
Oletus: siirtokanava on täysin luotettava

Ei bittivirheitä, ei katoavia paketteja, ei epäjärjestystä

Luotettava kuljetuspalvelu =

Lähettäjä kirjoittaa datan kanavaan,

Vastaanottaja lukee datan kanavasta



lähettäjä

vastaanottaja

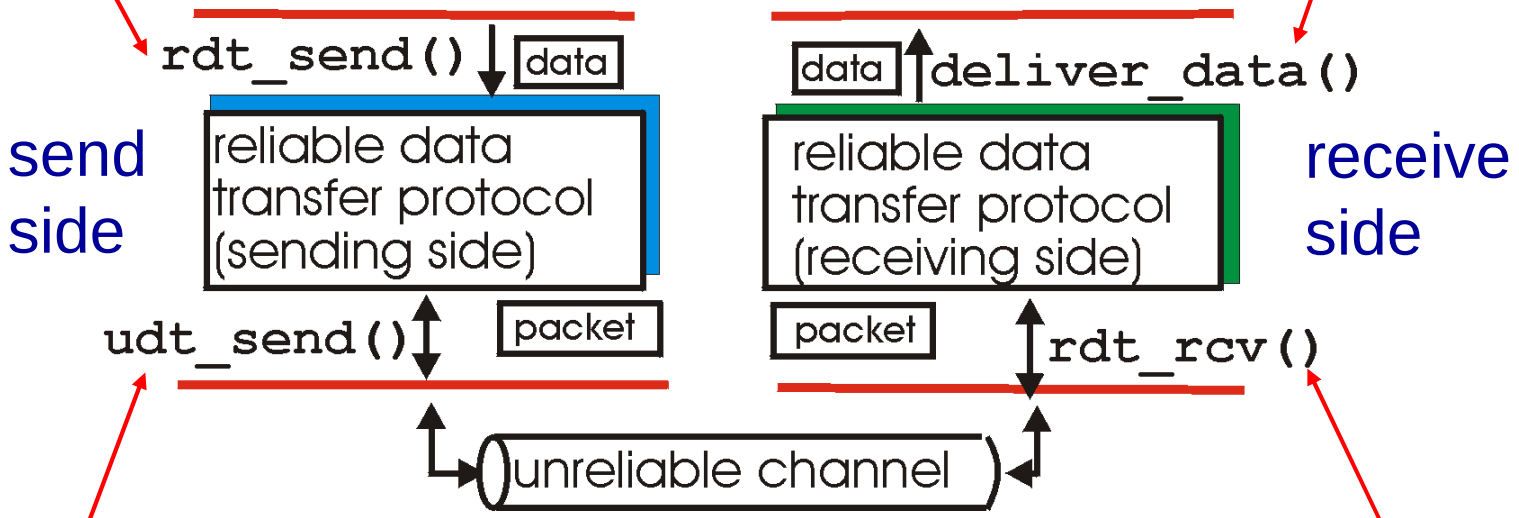
Fig 3.9 [KR12]

Tila-automaattien tapahtumia (kalvot ja kirja)

Kts. Fig 3.8 [KR12]

`rdt_send():` kutsutaan yläpuolelta (esim. Sovellus). Kutsussa tulee välitettävä data.

`deliver_data():` rdt kutsuu. Kutsussa välitetään data yläpuolelle.



`udt_send():` rdt kutsuu. Kutsussa paketti epäluotettavan kanavan kautta vastaanottajalle

`rdt_rcv():` kutsutaan, kun paketti saapuu kanavasta vastaanottajalle

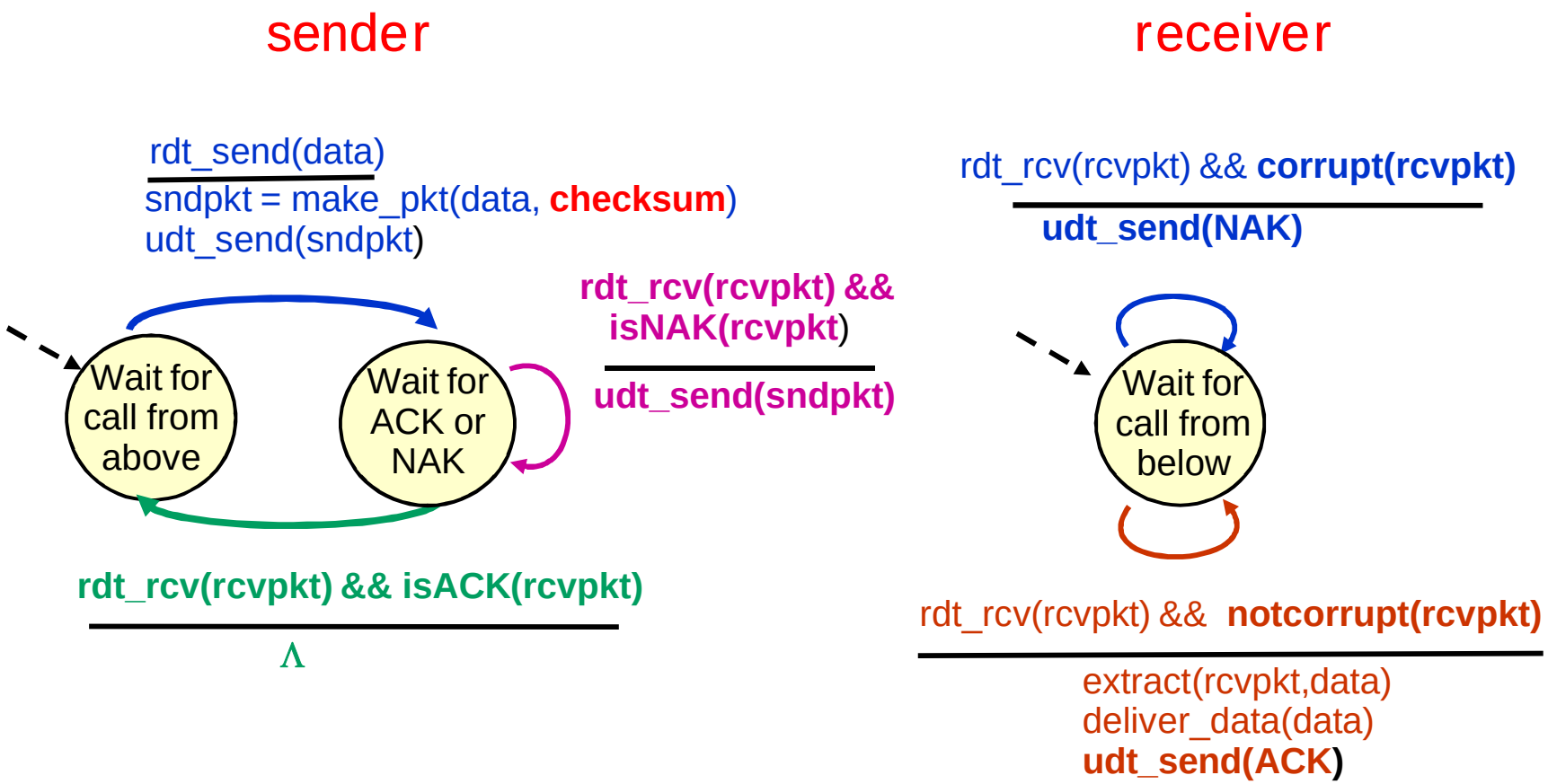
Vain bittivirheitä (→rdt2.0)

- Oletus: Voi olla vain bittivirheitä
  - Bitti voi kääntyä siirron aikana
  - Siirto ei kadota paketteja
- Kuinka toipua?
  - Kuittaukset: vastaanottaja kuittaa ACK:lla virheettömän paketin,
  - NAK-kuittaus, jos paketti on virheellinen + hylkää
  - Jos NAK, niin lähettäjä lähettää paketin uudelleen
- Luotettava kuljetuspalvelu
  - Virheen huomaaminen: tarkistussumma
  - Palaute vastaanottajalta: kuittaussanoma (ACK / NAK)
  - Uudelleenlähetys: dataa puskuroitava
- Stop-and-wait-protokolla
  - Lähettäjä odottaa kuittausta ennenkuin lähettää seuraavan

ACK – Positive acknowledgment
NAK – Negative acknowledgment

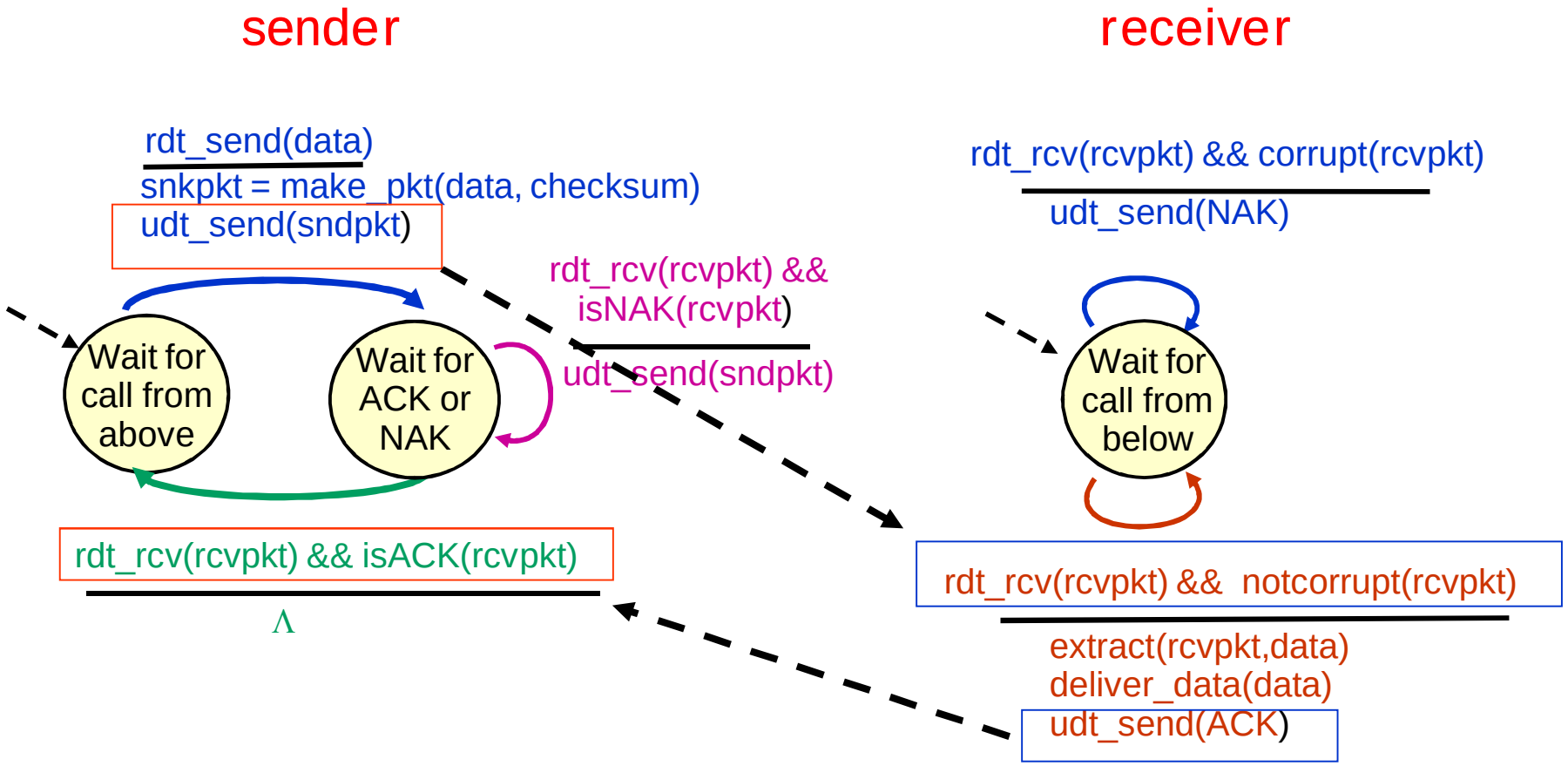
Rtd 2.0: Vain bittivirheitä

Fig 3.10 [KR12]



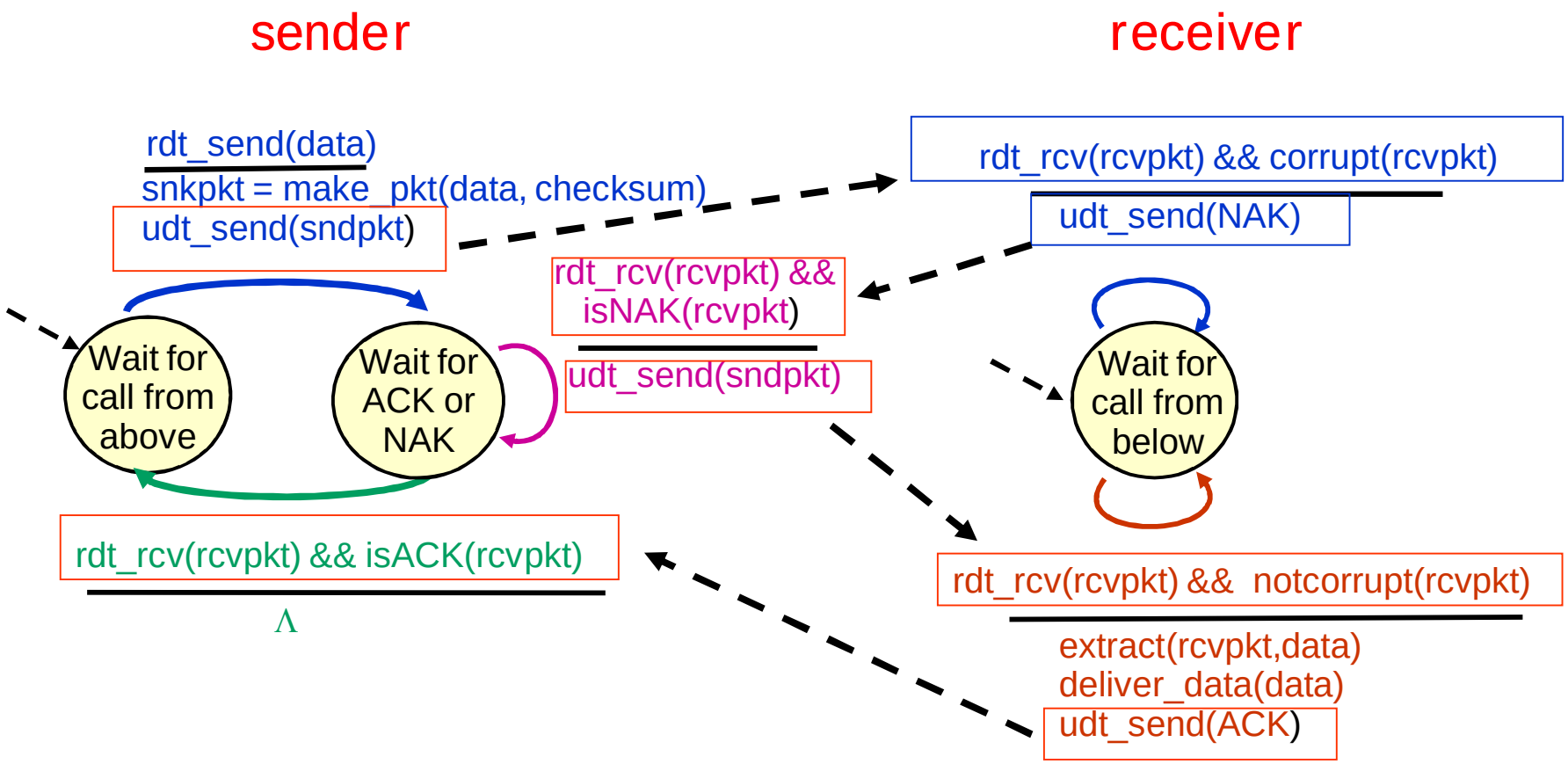
rdt2.0: Toiminta, kun ei ole virhettä

Fig 3.10 [KR12]



rdt2.0: Toiminta virhetilanteessa

Fig 3.10 [KR12]



rdt2.0: Missä voi mennä väärin?

Ei toimi, jos ACK /NAK -paketeissa bittivirheitä!

- Onko OK vai ei?

Korjaus: ACK/NAK-paketteihin tarkistusbitit, jotta virhe huomataan

Entä toipuminen?

- Jos kuittauksessa virhe, lähetetään paketti uudelleen
- Uudelleenlähetys voi tuottaa kaksoiskappaleen (dublicate), joka on huomattava ja hylättävä

=> Paketteihin järjestysnumero

- Kaksoiskappale: jos sama numero
- Vastaanottaja kuittaa normaalisti, mutta ei anna sovellukselle

Versio rdt2.1: enemmän bittivirheitä

Lähettäjä:

Lisää pakettiin järjestysnumeron

(numerot 0 ja 1 riittävät tässä protokollassa. Miksi?)

Ns. vuorotteleva bitti

Tarkista, että ACK/NAK ei ole korruptoitunut

Tilakaaviossa nyt kaksinkertaisesti tiloja

Kaavion tilan ‘muistettava’ paketin numero

Säilytä kopio lähetetystä paketista

Vastaanottaja:

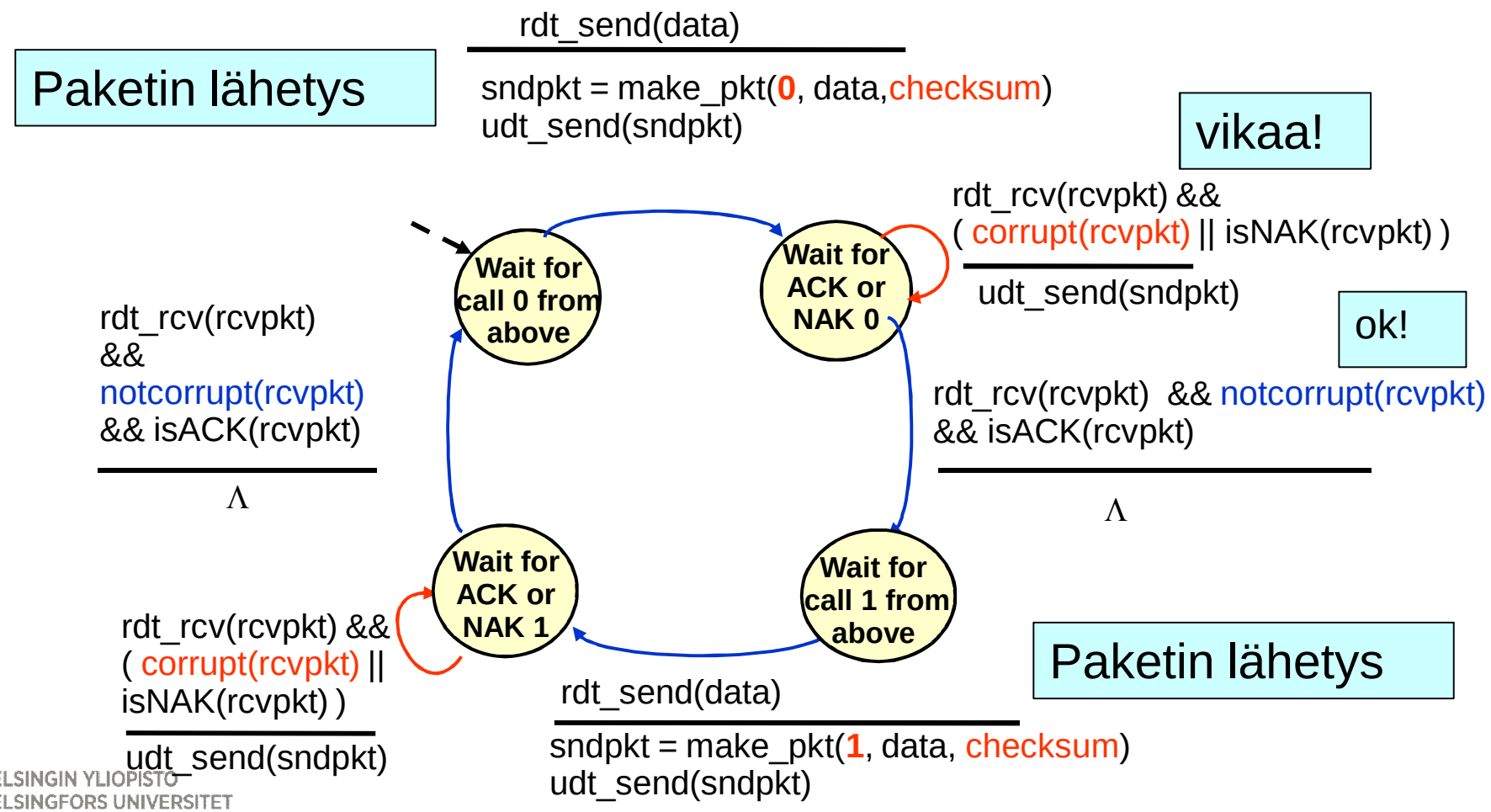
Tarkista, ettei ole kaksoiskappale

Kaavion tilan ‘muistettava’ seuraavan paketin numero: 0 vai 1

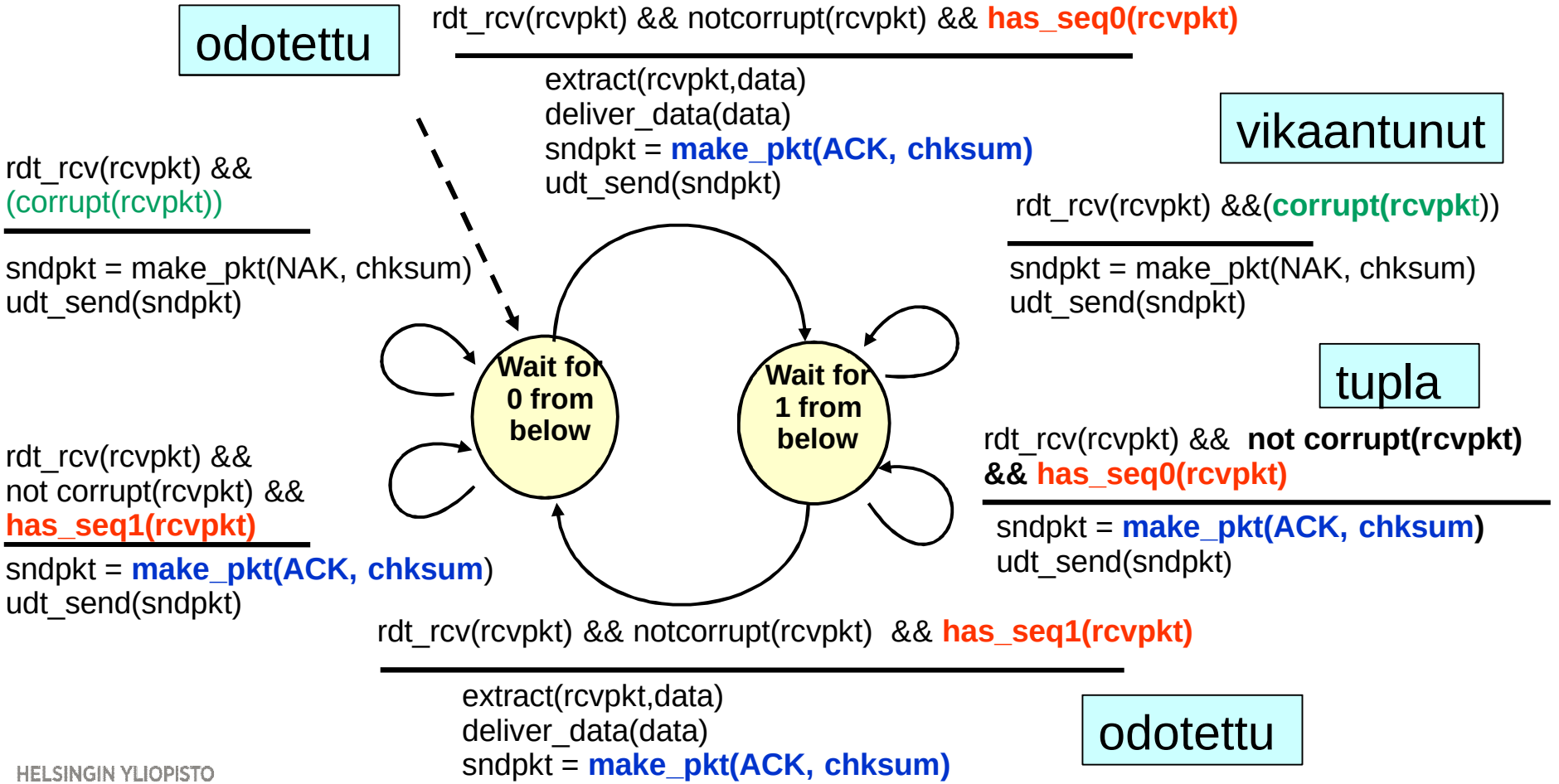
Myös kaksoiskappale kuitattava, koska ei tiedä menikö edellinen kuittaus perille

rdt2.1: Lähettäjän tila-automaatti

Fig 3.11 [KR12]



rdt2.1: Vastaanottajan automaatti



Versio rdt2.2: vain ACK-kuittaus ja vain bittivirheitä

- Sama toiminnallisuus kuin edellä
- Käyttää vain ACK-kuittauksia
  - Vastaanottaja kuittaa viimeksi kunnossa saamansa paketin
  - Kuittaukseen on liitettävä kuitattavan paketin numero
- Jos samalle paketille (nro X) tulee useita ACK-kuittauksia (duplicate ACK), niin sitä seuraava paketti (nro X+1) joko puuttuu tai on virheellinen
  - ~NAK-kuittaus
  - Lähetetään uudelleen sanoma X+1

rdt2.2: Bittivirheitä ja vain ACK-kuittaus

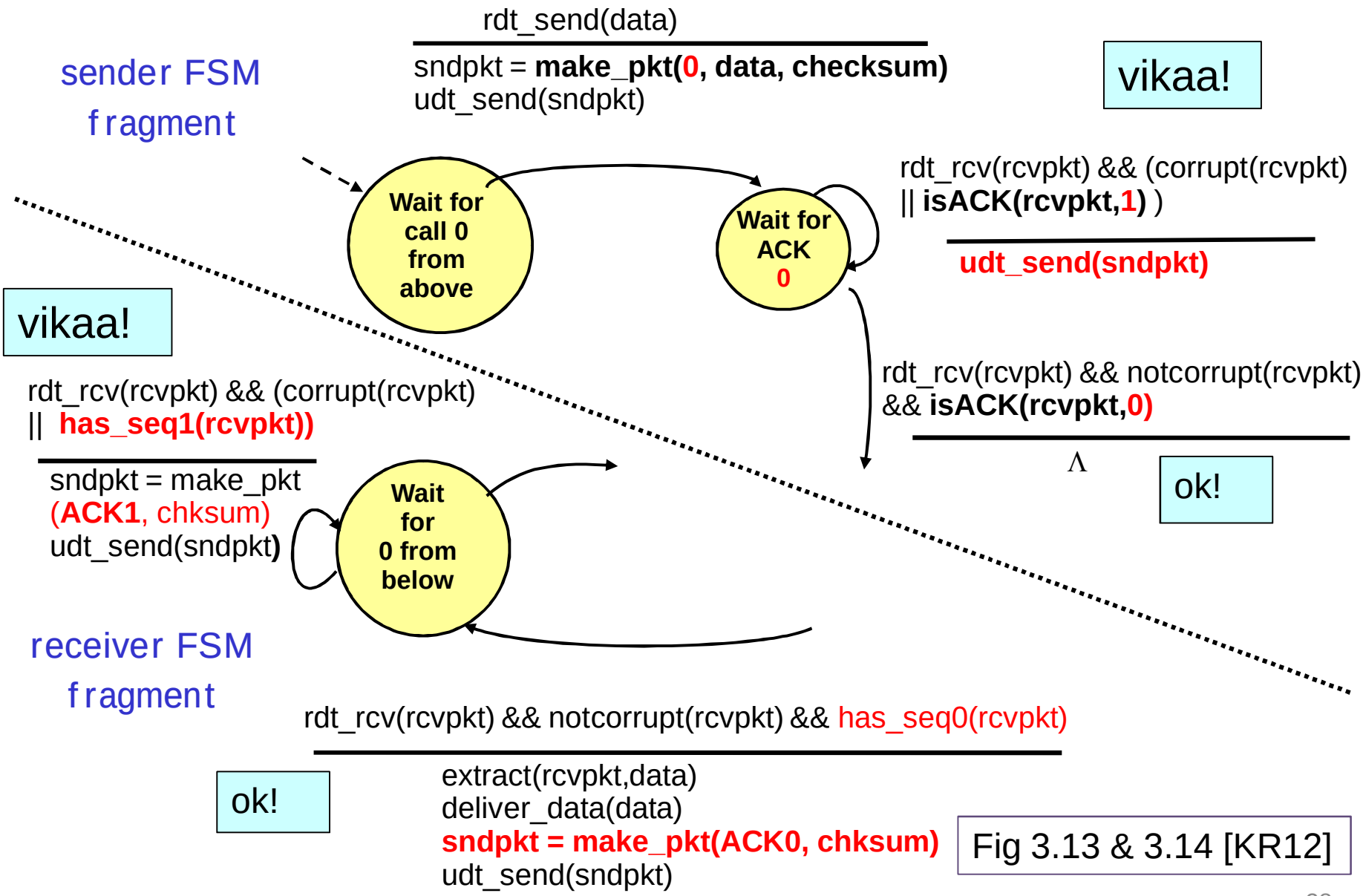


Fig 3.13 & 3.14 [KR12]

Paketteja voi kadota (→rtd 3.0)

Oletus: Siirtokanava voi kadottaa paketteja

- Sekä datapaketteja että kuittauspaketteja voi kadota.
- Tarkistussumma, pakettinumero, ACK eivät vielä riitä! Miksi?

Lähettäjä odottaa jonkin aikaa kuittausta

- Jos ei saavu, lähettää paketin uudelleen
- Ajastin laukaisee uudelleenlähetyksen

Jos paketti (data / kuittaus) kuitenkin vain viivästyy eikä olekaan kadonnut

- Syntyy duplikaatti, joka havaitaan sanomanumeroinnin avulla
- Kuittauksessa mukana kuitatun paketin numero

rdt3.0: vuorottelevan bitin protokolla

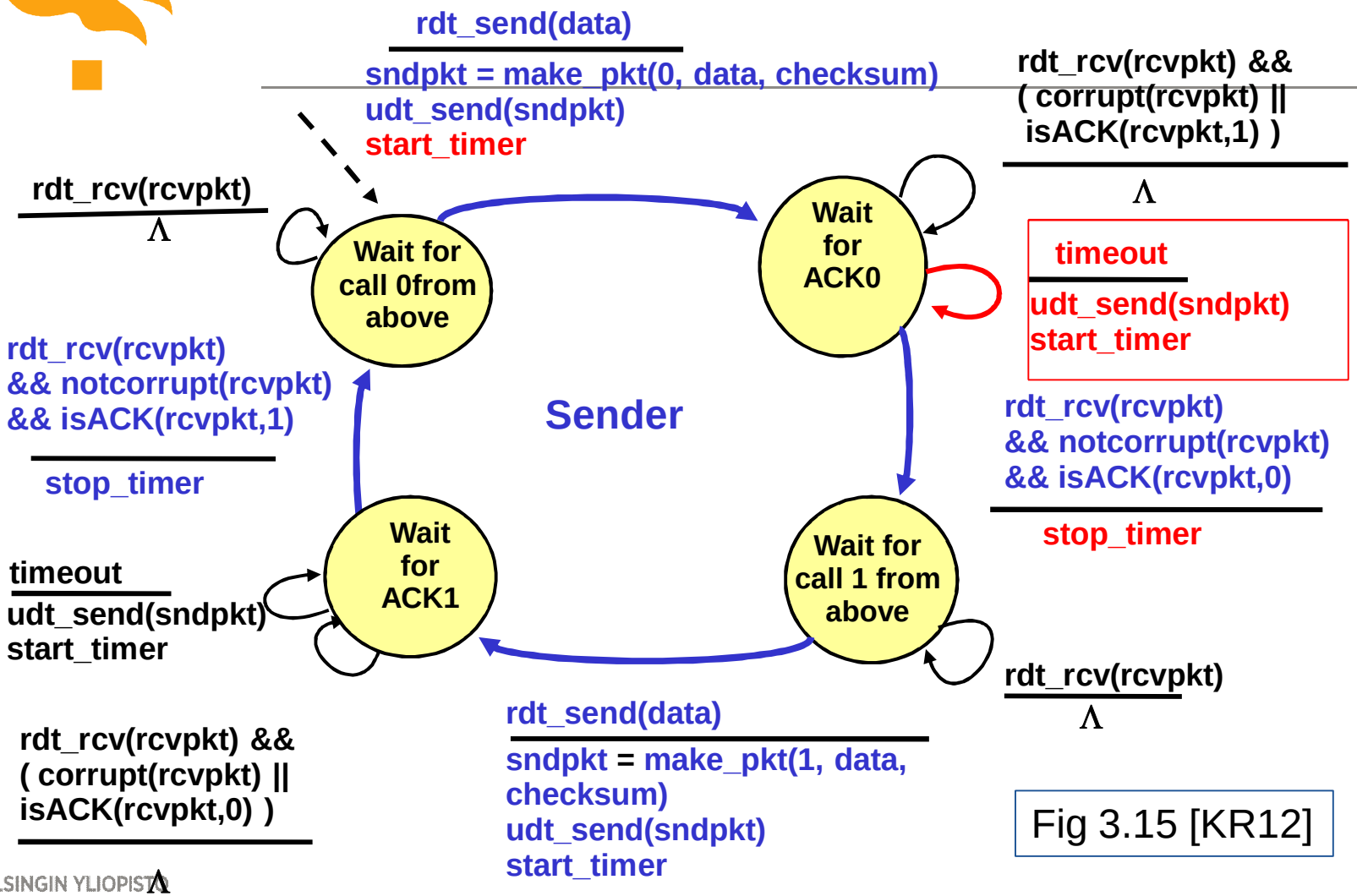
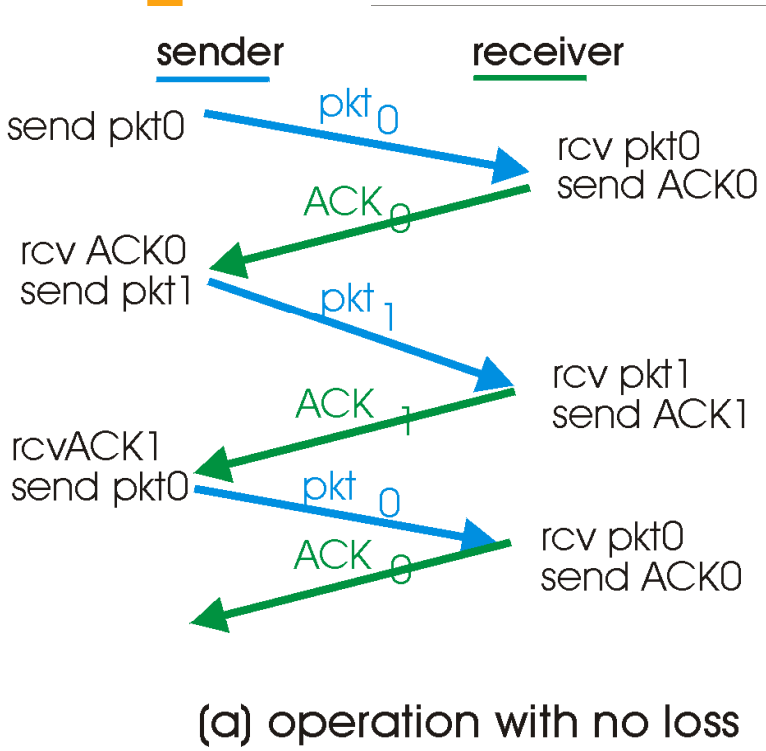


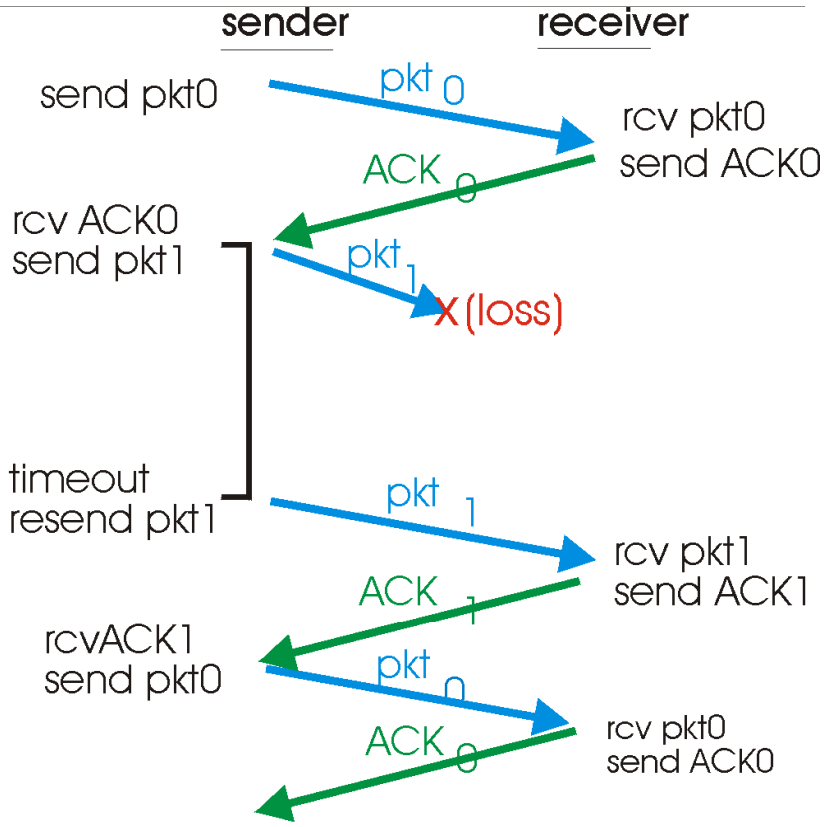
Fig 3.15 [KR12]

rdt3.0 toiminnassa

Fig 3.16 [KR12]



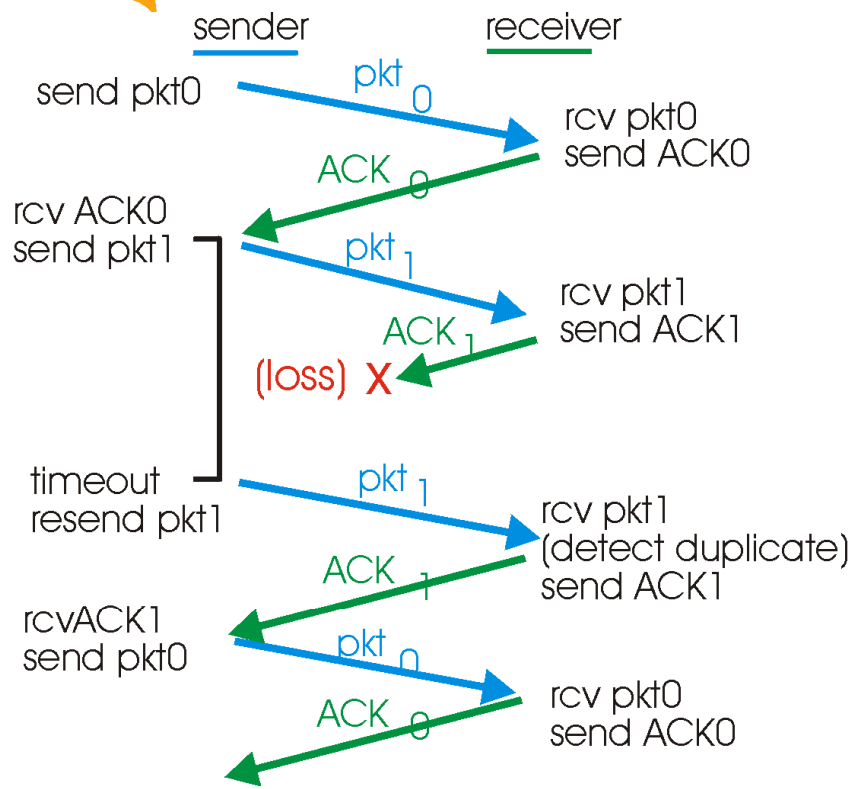
(a) operation with no loss



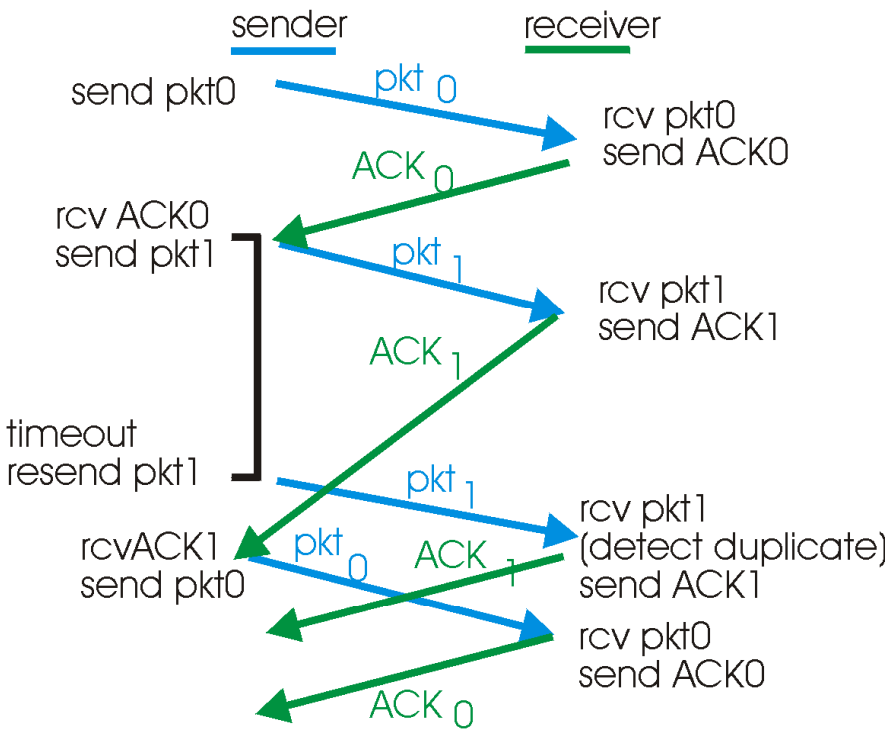
(b) lost packet

rdt3.0 toiminnassa

Fig 3.16 [KR12]



(c) lost ACK



(d) premature timeout

Yhteenveto

- Ideaalitilanne (RDT 1.0)
  - Yksinkertainen lähetys ja vastaanotto
- Vain bittivirheitä datapaketeissa (RDT 2.0)
  - Mekanismit: virheen tunnistus/korjaus, ACK ja NAK signaalit
  - Uudelleenlähetys NAK signaalilla
- Enemmän bittivirheitä (data+signaalit) (RDT 2.1)
  - Mekanismit: virheen tunnistus/korjaus kaikille paketeille, järjestysnumerot paketeille
  - Miksi? vääristynyt signaali voi aiheuttaa tuplalähetyksen, jota ei voi tunnistaa ilman numeroita
- Vain ACK käytössä (RDT 2.2)
  - Lisätään järjestysnumero ACKiin
- Paketteja voi kadota (RDT 3.0)
  - Mekanismit: virheen tunnistus/korjaus kaikille paketeille, järjestysnumerot paketeille (data ja ACK), ajastin

rdt3.0: Tehokkuus?

Esim: 1 Gbps linkki, 15 ms päästä-päähän etenemisviive eli RTT = 30 ms, 1 KB:n paketti

$$T_{transmit} = \frac{L \text{ (packet length in bits)}}{R \text{ (transmission rate, bps)}} = \frac{8kb/pkt}{10**9 \text{ b/sec}} = 8 \text{ microsec}$$

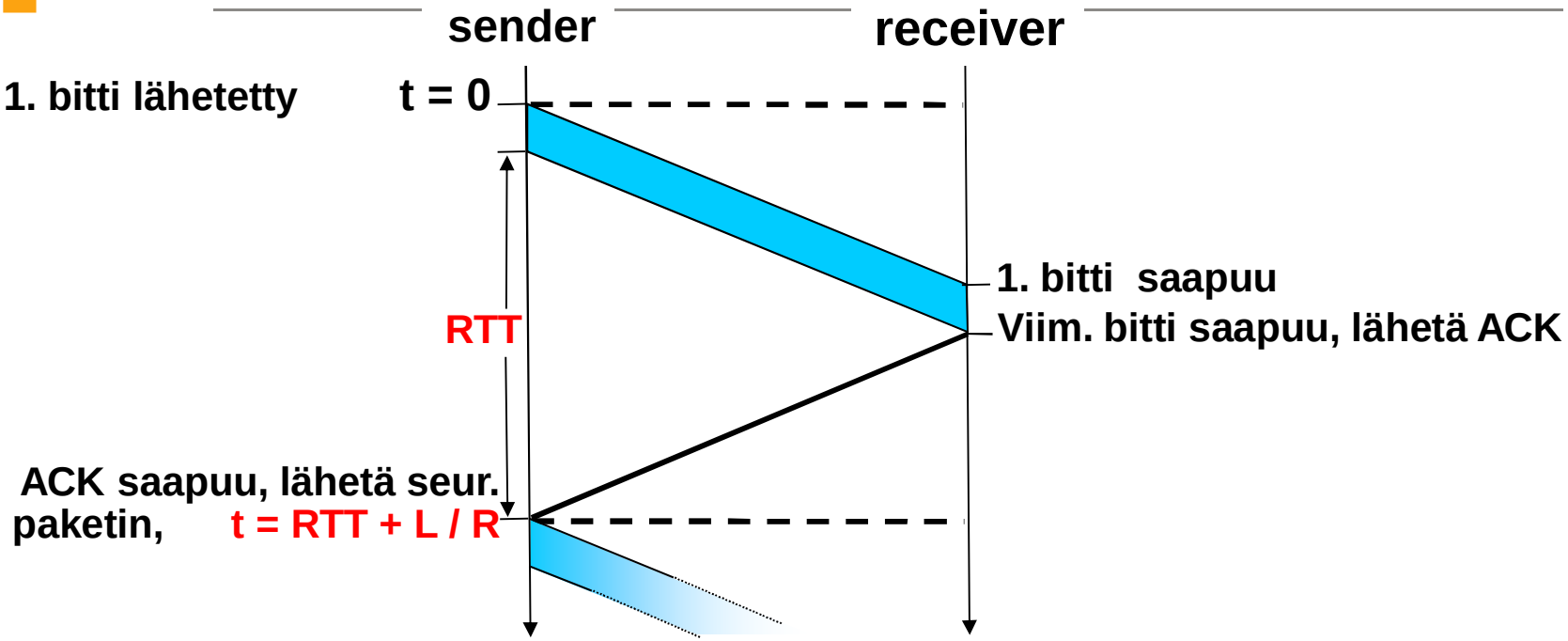
$$U_{sender} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$

Käyttöaste (utilization): se osa kokonaisajasta, jolloin lähettäjä lähettää (RTT+L/R on kokonaisaika lähetyksessä kun odotetaan ACK)

- 1KB paketti 30 ms:n välein -> **33kB/s nopeus 1 Gbps linkillä.**
- Stop-and-wait-protokolla rajoittaa, ei linkin kyky siirtää dataa (linkin siirtonopeus)

rdt3.0: stop-and-wait tehokkuus

Fig 3.18a [KR12]

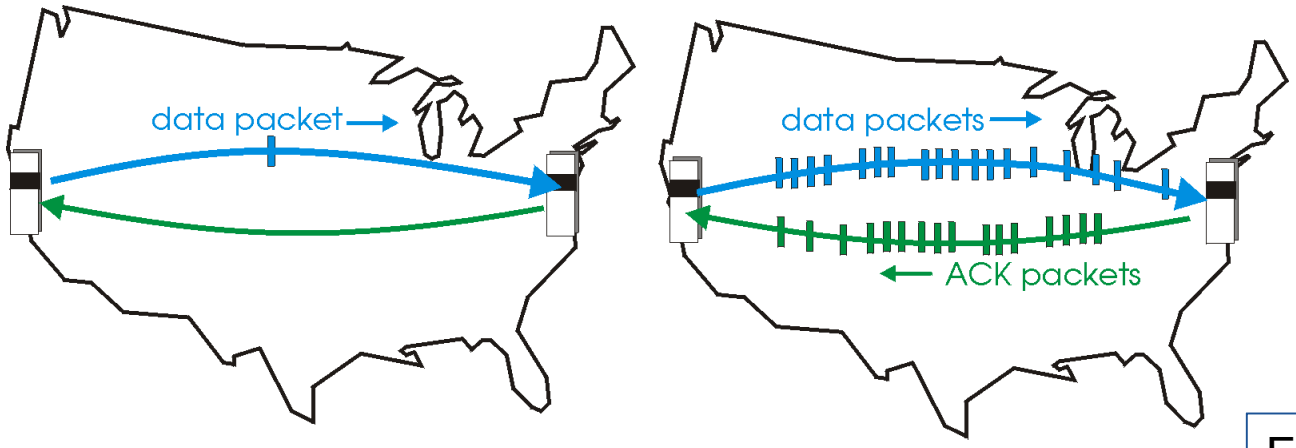


$$U_{sender} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{.008}{30.008} = 0.00027$$

rdtX.X: Liukuhihnaprotokollat

Lähettäjä saa lähettää useita paketteja, vaikka ei ole saanut kuittauksia edeltäviin

- Numerointi (0,1) ei enää riitä, lisää numeroita tarvitaan
- Tarvitaan puskurointia molemmissa päissä

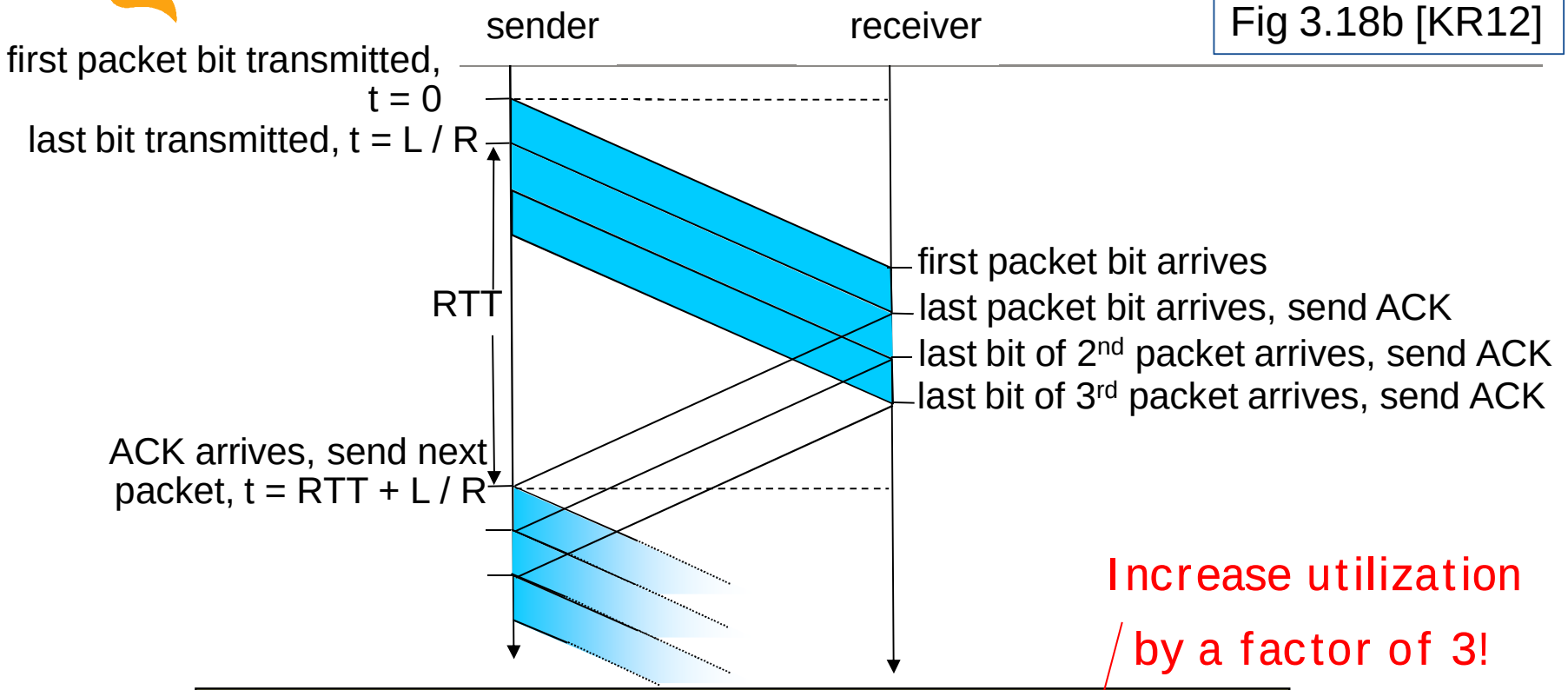


(a) a stop-and-wait protocol in operation (b) a pipelined protocol in operation

Fig 3.17 [KR12]

Liukuhihnoitus: käyttöasteen kasvattaminen

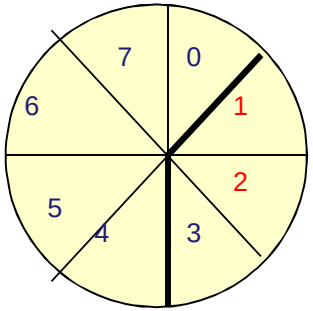
Fig 3.18b [KR12]



Increase utilization by a factor of 3!

$$U_{sender} = \frac{3 * L / R}{RTT + L / R} = \frac{.024}{30.008} = 0.0008 \quad (0.00028)$$

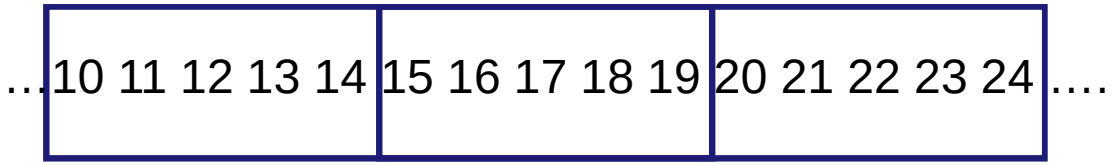
Liukuva ikkuna (sliding window)



Säätelee pakettien lähettämistä ja vastaanottoa, kertoo

- millä pakettinumeroilla on lähetetty/vastaanotettu,
- mistä saatu/lähetetty kuittaukset ja
- millä numeroilla voi vielä lähettää/vastaanottaa paketteja

Ikkunan koko riippuu yhteyden tyypistä ja puskurien koosta



Liukuva ikkuna

Lähetysikkuna (sender window)

- Ikkunan koko = montako pakettia saa olla kuittaamatta
- Mitkä pakettinumerot on käytetty, mutta kuittaamatta
- Mitä pakettinumeroita voi vielä käyttää

• Lähettäjän on odotettava, jos kaikki ikkunan numerot on käytetty

- Kun kuittaus saapuu, ikkuna liukuu
- Seuraavat numerot tulevat luvallisiksi

Vastaanottoikkuna (receiver window)

- Mitkä pakettinumerot otettu vastaan, mutta kuittaamatta
- Mitä pakettinumeroita lähettäjä saa vielä käyttää eli mitkä hyväksytään

•Jos saadussa paketissa on ikkunan viimeinen numero

- Ikkuna pysäyttää pakettien lähetyksen vastapäästä
- Ikkuna estää uusien pakettien vastaanoton

•Paketin kuittaus liu'uttaa myös vastaanottajan ikkunaa

- Hyväksytään uusia pakettinumeroita

Kun ikkunan koko on 1

Vain yksi paketti kuittaamattomana

- One Bit Sliding Window –protokolla
- = stop-and-wait –protokolla

Pakettinumerot 0 ja 1 riittävät

ACK ilmoittaa

- Joko seuraavaksi odotetun paketin numeron (esim.TCP)
- tai viimeksi vastaanotetun virheettömän paketin numeron

ACK sisältää paketin numeron

- Kuittausduplikaatti ei voi kuitata väärää paketteja

Virhetilanteen käsittely

Entä, kun huomataan virhe?

Monta muuta pakettia jo matkalla!

Pakettiin ei tule kuittausta

Paketti katosi tai virheellinen

Kuittaus katosi tai virheellinen

=> Ajastin laukeaa aikanaan

”Go-Back-N” (paluu N:ään)

Paketit uudelleenlähetetään virheellisestä lähtien

Selective Repeat (Valikoiva toisto)

Lähetetään vain virheelliset paketit

Go-Back-N

Vastaanottaja hyväksyy paketit vain järjestyksessä

- Kuittaa järjestyksessä tulleen virheettömän paketin
- Hylkää kaikki puuttuvan tai virheellisen paketin jälkeiset paketit eikä lähetä niistä kuittauksia

Kun lähettäjä ei saa pakettiin kuittausta

- Lähetysikkuna täyttyy ja estää uusien pakettien lähettämisen
- Lähettäjän ajastimet laukeavat
- Lähettäjä lähettää uudestaan kaikki viimeisen kuittauksen jälkeiset paketit
- Näiden kuittaukset siirtävät taas lähetysikkunaa

Tehoton, jos paljon virheitä ja iso ikkuna

Go-Back-N

Fig 3.19 [KR12]

Kumulatiivinen ACK

Lähetä ACK, jossa korkein järjestyksessä saadun kelvollisen paketin numero

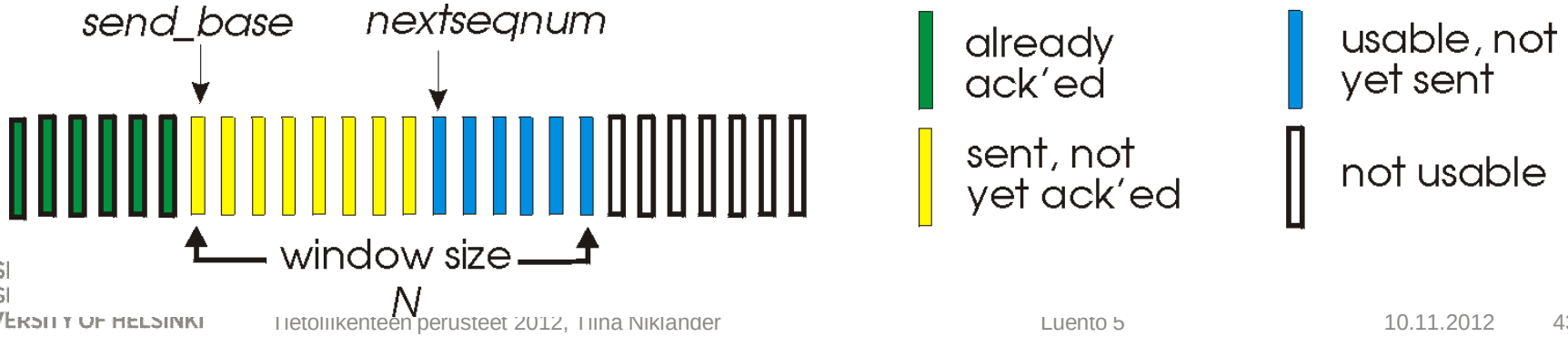
Tämä kuittaa kaikki pienemmällä numerolla lähetetyt paketit

Jos välistä puuttuu paketti

Lähetä uudestaan ACK, jossa korkein järjestyksessä saadun paketin numero (~ NAK)

Tuplakuittaus (duplicate ACK)

Parannus: => nopeampi reagointi puuttuvaan



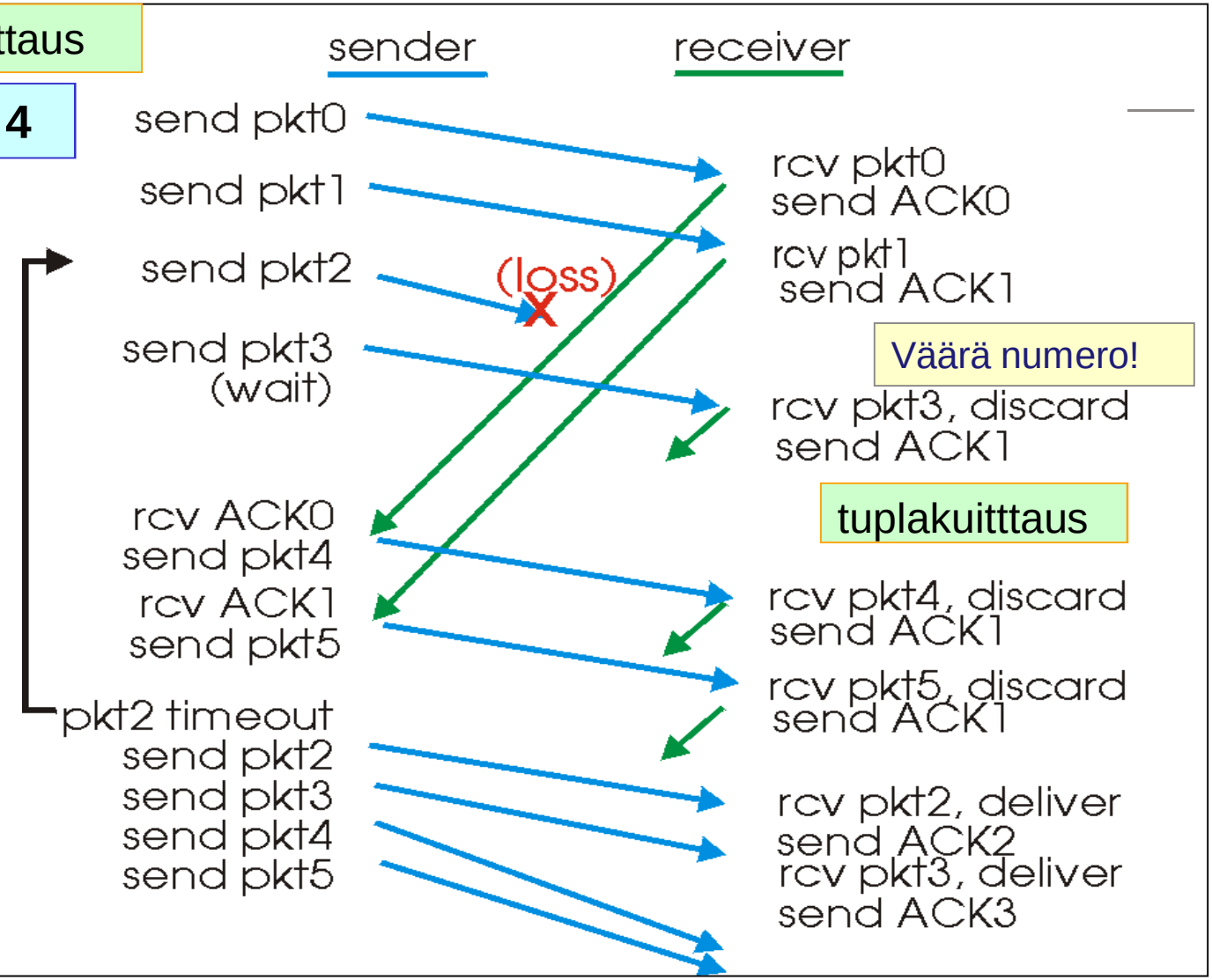
Go-Back-N: Esimerkki

Fig 3.22 [KR12]

Kumulatiivinen kuittaus

Ikkunankoko = 4

Kuittaa viimeisen kunnollisen ja järjestyksessä saadun paketin.



Go-Back-N: lähettäjän tilakaavio

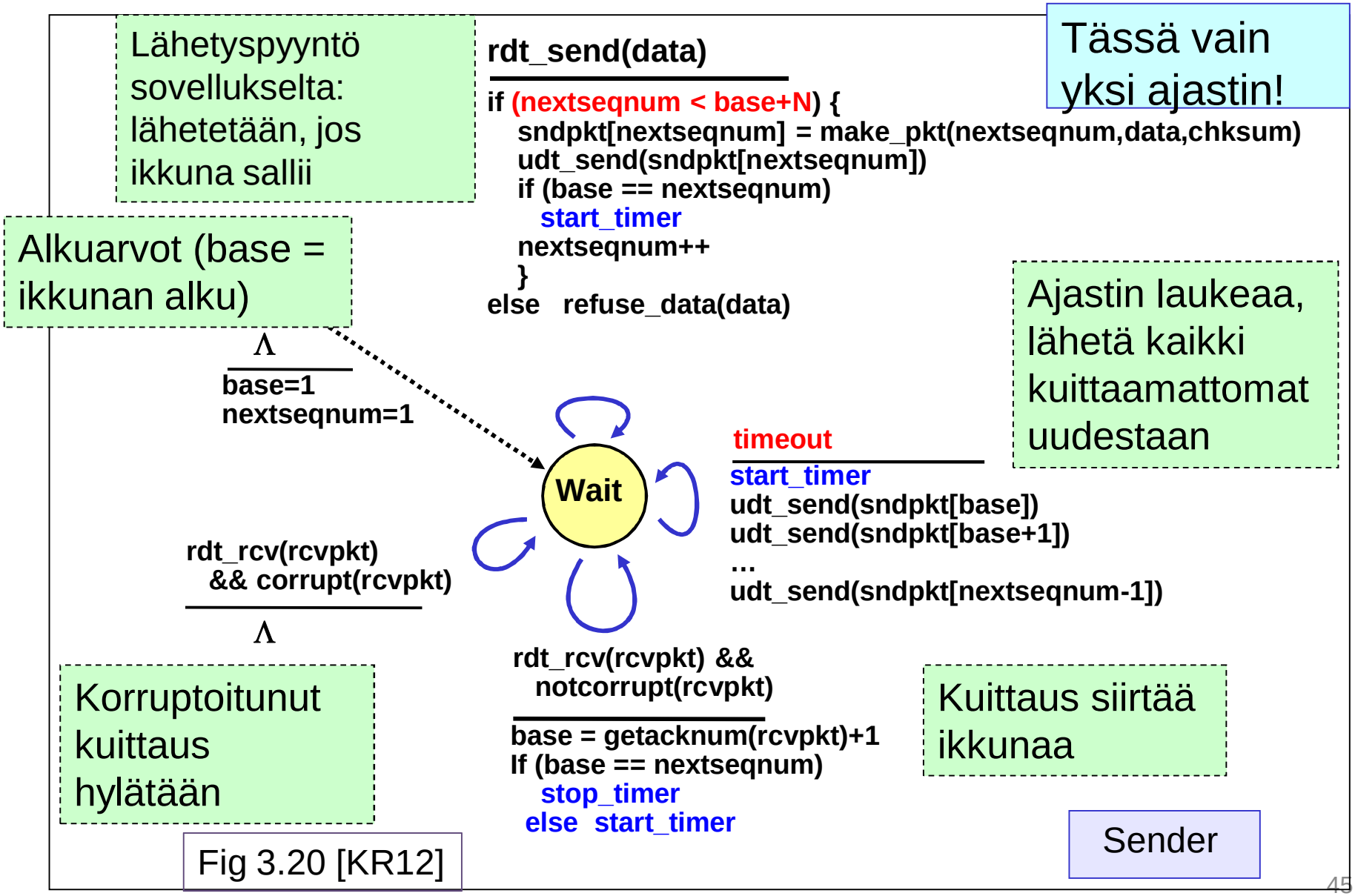


Fig 3.20 [KR12]

Go-Back-N: Vastaanottajan tilakaavio

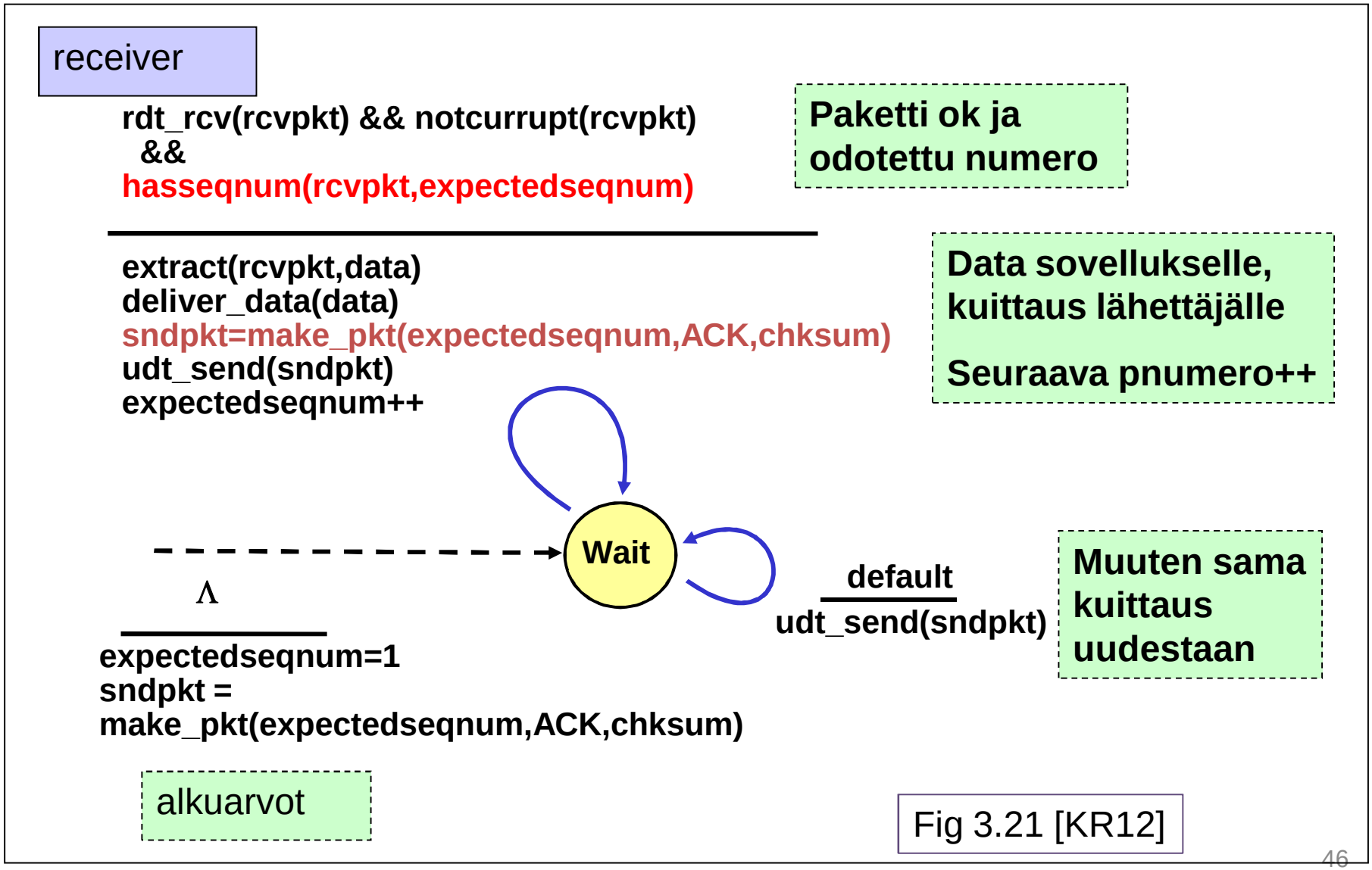


Fig 3.21 [KR12]

Valikoiva toisto (Selective Repeat)

Valikoiva uudelleenlähetys

- Lähetä uudelleen vain virheellinen /puuttuva paketti

Kuittaus jokaiselle kelvolliselle paketille

Paketit sovellukselle oikeassa järjestyksessä

- Vastaanottajalla oltava puskuritilaa pakettien järjestämiseen

Jos lähettäjä ei saa kuittausta paketista

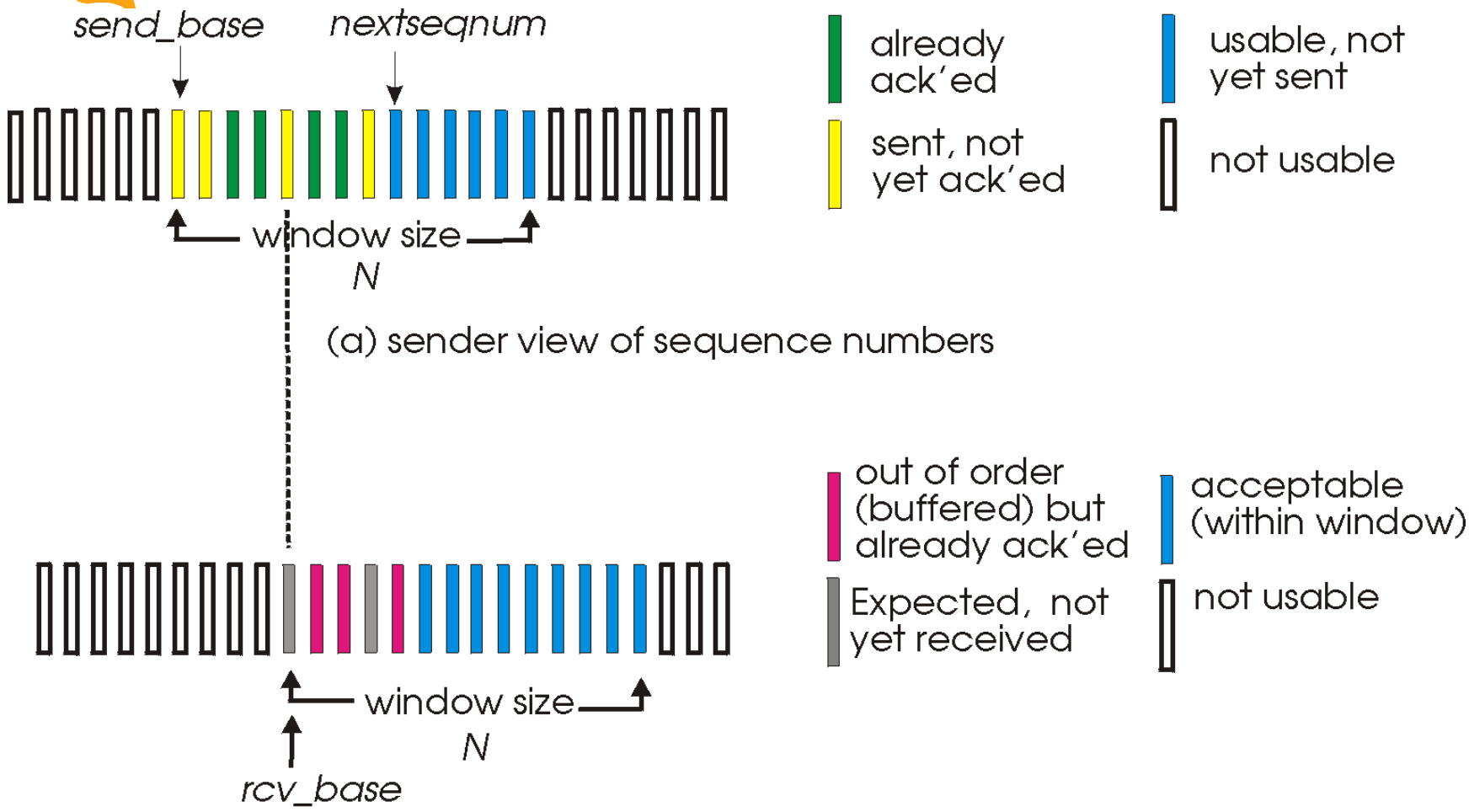
- Lähetysikkunan täyttyminen pysäyttää lähettämisen
- Aikanaan ajastin laukeaa ja aiheuttaa uudelleenlähetyksen
- Jokaisella paketilla on oma ajastin

Ikkuna liukuu nytkin tasaisesti

- Yksi puuttuva kuittaus voi pysäyttää lähetyksen
- Kun puuttuva paketti saatu, ikkuna liukuu kaikkien kuitattujen yli

Valikoiva toisto

Fig 3.23 [KR12]



Esimerkki: Valikoiva toisto

Jokainen sanoma kuitattava erikseen

Paketin 2 katoaminen estää ikkunaa liikkumasta

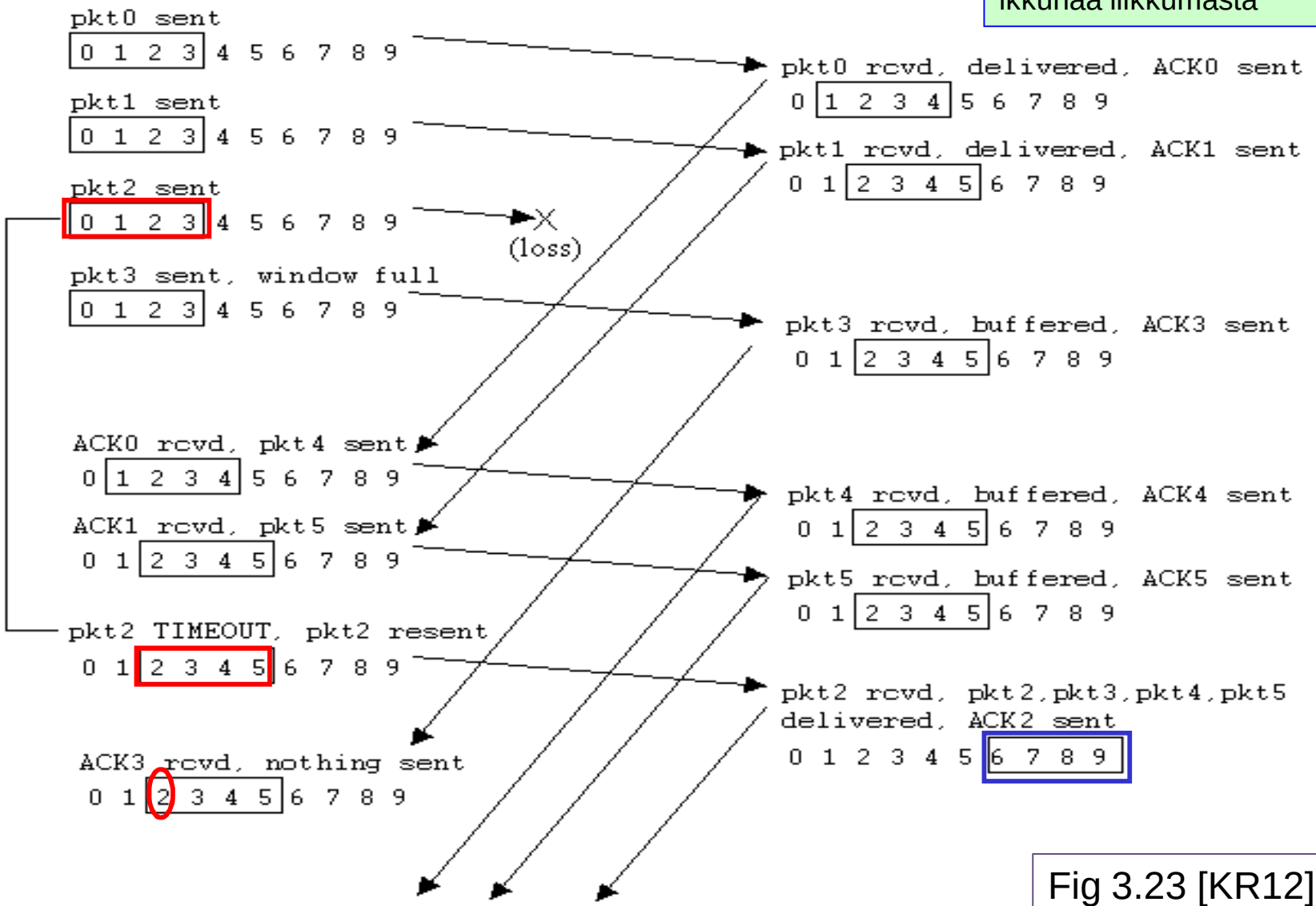


Fig 3.23 [KR12]

Ikkunankoko

Pakettinumeroille varatun kentän koko vaikuttaa myös ikkunankokoon

- Yleensä jokin kakkosen potenssi
- Kentän koko k bittiä => käytössä 2**k pakettinumeroa

n+1 kpl

Kun paketit numeroidaan 0, 1, …, n, niin ikkunan koko saa olla korkeintaan:

MIKSI NÄIN?

Harjoitustehtävinä!

Go-Back-n: **n** (k bit sekvenssinumeroilla < 2^k-1)

Valikoiva toisto: **(n+1)/2** (k bit sekv.num. < 2^{k-1})

Vastaanottajan pitää tietää onko kyse uusista paketeista vai uudelleenlähetyksistä

Yhteenveto menetelmistä

Kts Table 3.1 [KR12]

Tarkistussumma

Ajastin

Järjestysnumero

- Uudelleenlähetys vai uusi paketti

Kuittaukset

- Positiiviset ACK, tuplakuittaukset
- Negatiiviset NAK

Ikkunat, liukuhihnoitus

ACK vai NAK

ACK ja NAK signaaleja voidaan yhdistellä

TCP perustuu vain ACKiin

TCP: Kumulatiivinen ACK

- Tupla ACK X = NAK X+1

Selektiivinen ACK

- Parempi toteuttaa oma NAK signaali, tehokkaampi
- Ei välttämättä tarvita NAKia

Pelkkä NAK