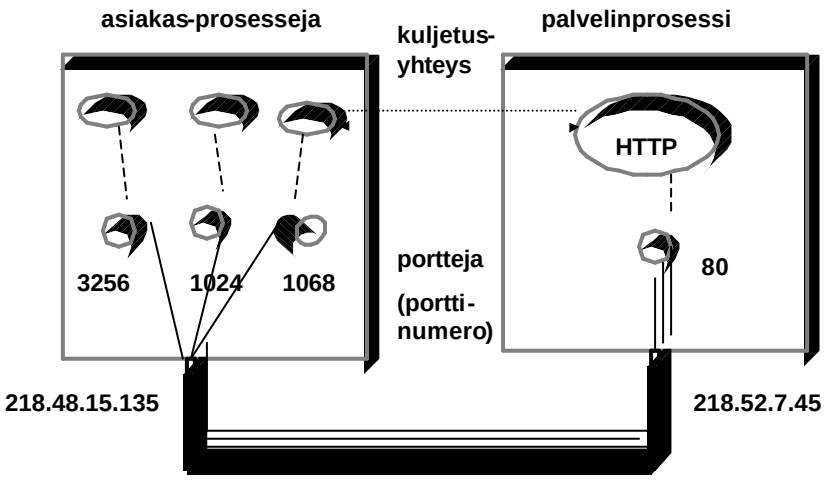
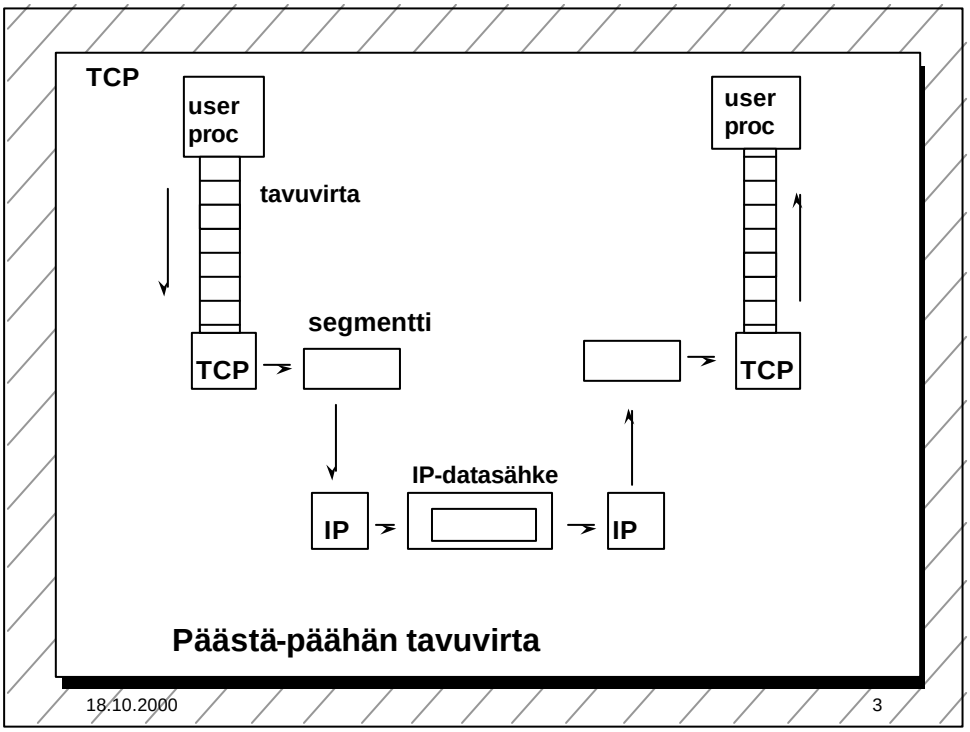
6. Kuljetuskerros

6.1. Kuljetuspalvelu

- ‘End- to- end’
  - prosessilta prosessille
    - 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

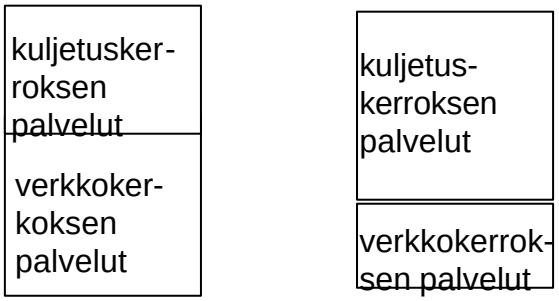


Kuljetusyhteys on looginen ‘päästäpäähän’ yhteys (end-to-end)



kuljetuspalvelut parantavat verkkopalveluja

Sovelluksen näkemä QoS



Vaatimuksia kuljetuspalvelulle

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

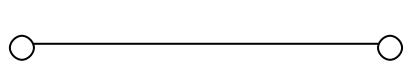
Verkkokerros kuitenkin

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

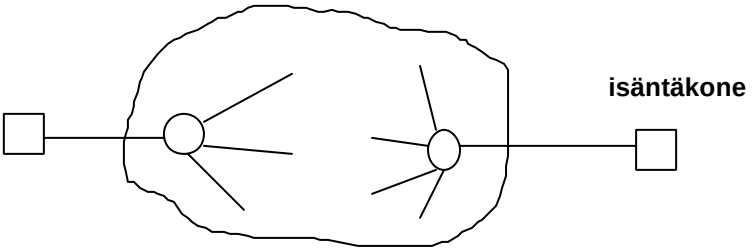
6.2. Kuljetuskerroksen toiminta

- monella tavoin siirtoyhteyskerroksen kaltainen
  - **virhevalvonta**
  - **vuon valvonta jne**
- mutta
  - **siirtoyhteys: välissä fyysinen kanava**
  - **kuljetusyhteys: välissä verkko**

Siirtoyhteyskerros:



Kuljetuskerros



Verkko lisää monimutkaisuutta:

- kohteelle aina osoite
- yhteyden muodostus ja purku monimutkainen
- verkko säilyttää sanomia
  - **sanoma voi jäädä verkkoon pitkäksi aikaa**
  - **vanha paketti voi ilmaantua paljon myöhemmin**
- **yhteyksiä reitittimen kautta on paljon ja ne muuttuvat dynaamisesti**
  - **vuonvalvonta ja puskurointi hankalaa**
- **ruuhka voi lamaannuttaa verkon =>ruuhkan valvonta**

6.2.1. Osoittaminen

- **Kuljetushteydenmuodostuksessa tiedettävä kuljetusosoite**
  - osoite on kaikkien tuntema (‘hätänumero 112’)
  - katsotaan luettelosta tai kysytään nimipalvelijalta (name server) (‘numerotiedustelu 118’)
- **Verkkokerroksen yhteyttä muodostettaessa tiedettävä kuljetusosoitetta vastaava verkko-osoite**
  - **hierarkkinen kuljetusosoite paljastaa**
    - **<maa><verkko><isäntäkone><portti>**
  - **toinen nimipalvelija:**
    - **kuljetusosoite => verkko-osoite**

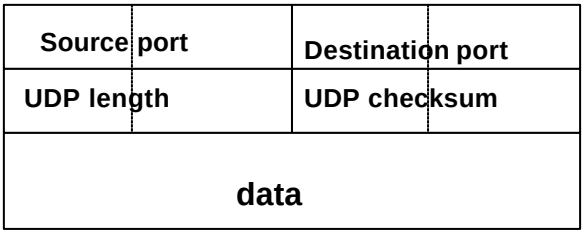
6.3 Internetin kuljetusprotokollat

- UDP (User Datagram Protocol)
  - minimaalinen kuljetuspalvelu (best effort)
    - **ei pyri parantamaan verkon tarjoamia palveluita**
      - **yhteydetön**
      - **kuljettaa sanomia prosessilta toiselle**
      - **ei takaa mitään: virheettömyyttä, järjestystä, jne**
- TCP (Transmission Control Protocol)
  - luotettava tiedonsiirto
    - **numerointi, kuittaukset, tarkistukset, ajastimet**
    - **vuonvalvonta, ruuhkanvalvonta**

6.4.8. UDP

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

UDP-otsake

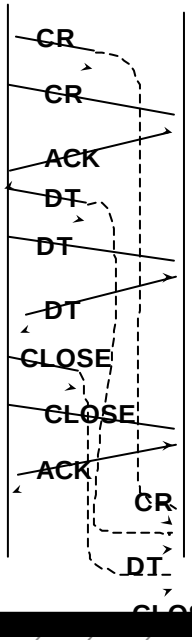


TCP-protokolla

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

6.2.2. 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
    - sanomien numeroinnista sopiminen
  - Bysanttilainen ongelma (two-army problem)
    - “hyökkään, jos olen varma, että sinäkin hyökkäät”
    - symmetrinen yhteyden purku = molemmat osapuolet tietävät, että toinenkin on varmasti purkanut yhteyden

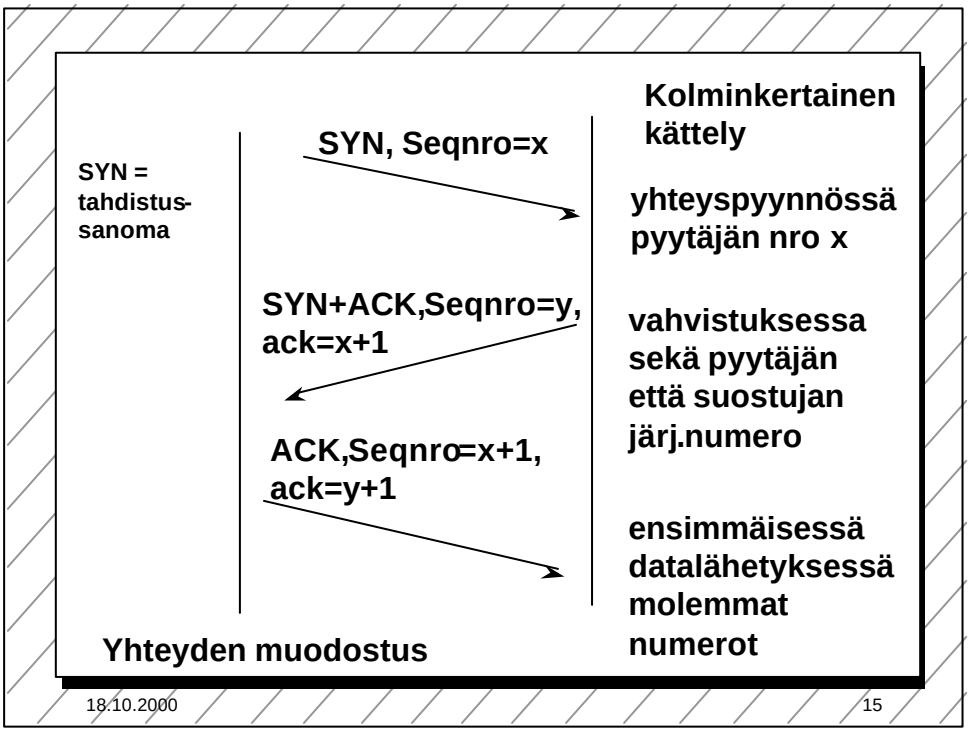


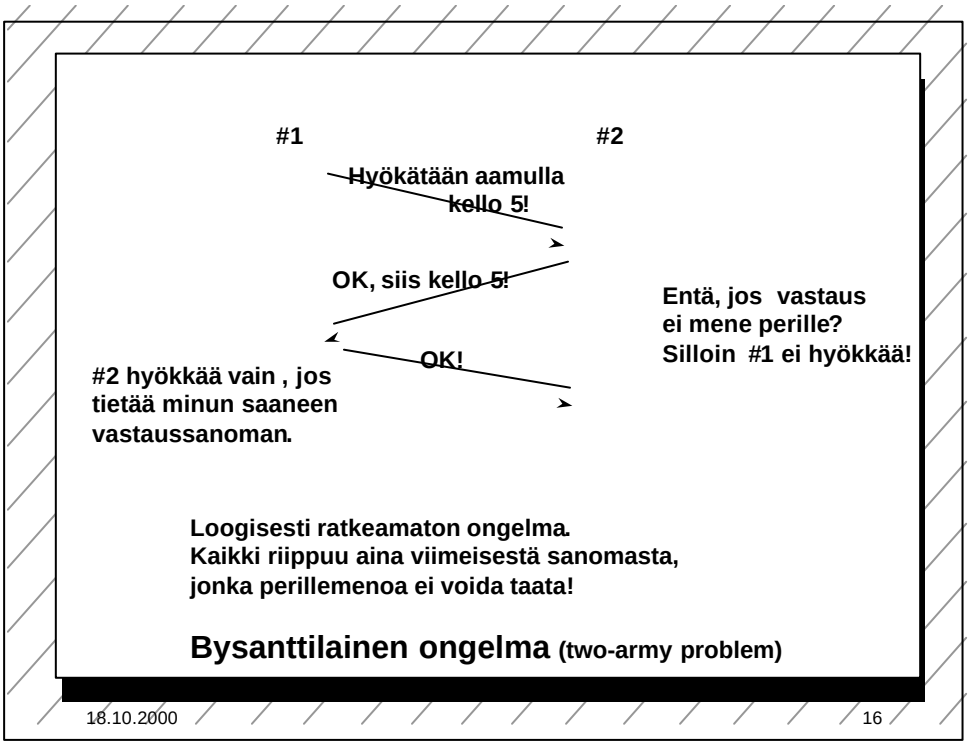
Yhteyden muodostus ruuhkaisessa verkossa

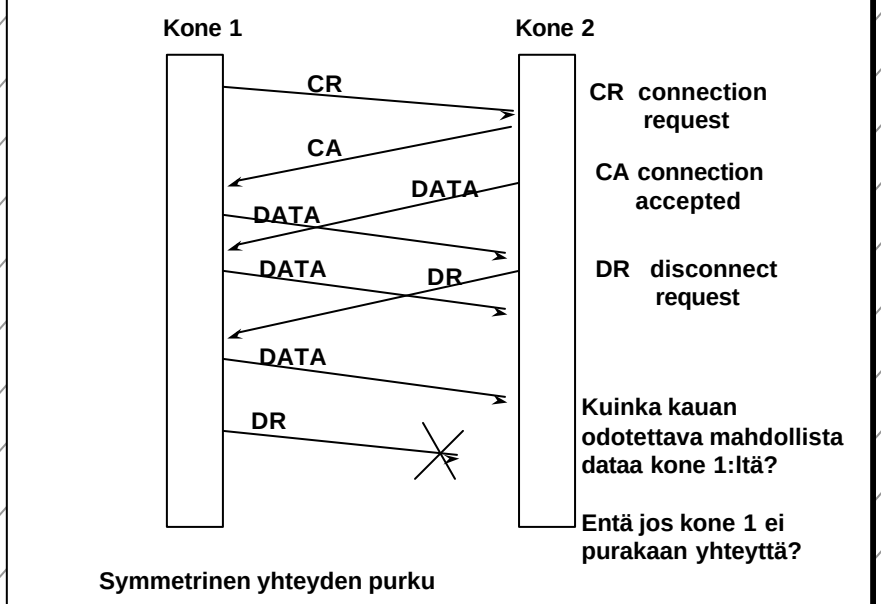
Jokainen paketti lähetetään kahteen kertaan

Kun yhteys on purettu, viivästyneet kaksoiskappaleet saapuvat

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


SYN, Seqnro=x
SYN = tahdistus-sanoma
SYN+ACK,Seqnro=y, ack=x+1
ACK,Seqnro=x+1, ack=y+1
Kolminkertainen kättely
yhteyspyynnössä pyytäjän nro x
vahvistuksessa sekä pyytäjän että suostujan järj.numero
ensimmäisessä datalähetyksessä molemmat numerot
Yhteyden muodostus

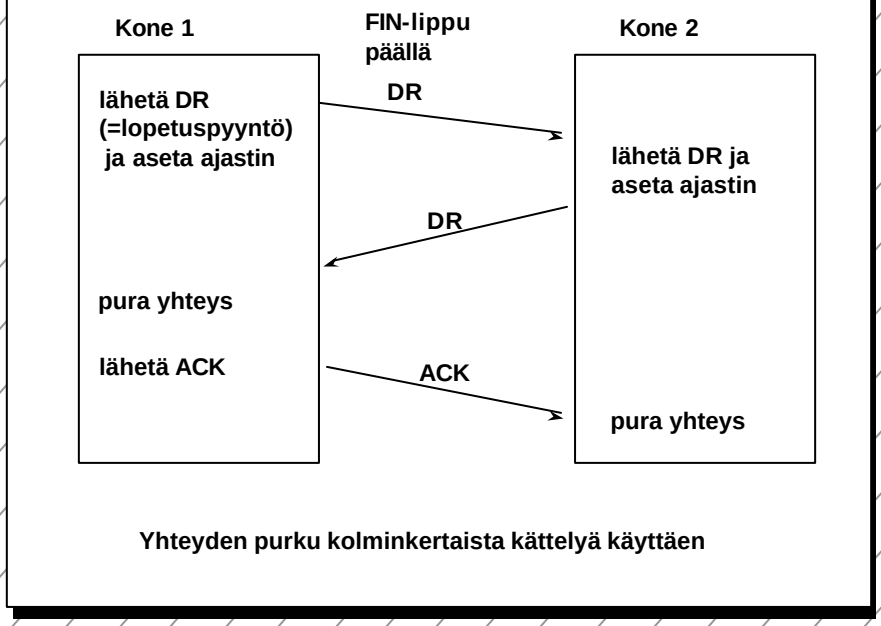

#1
#2
Hyökätään aamulla kello 5!
OK, siis kello 5!
OK!
Entä, jos vastaus ei mene perille? Silloin #1 ei hyökkää!
#2 hyökkää vain , jos tietää minun saaneen vastaussanoman.
Loogisesti ratkeamaton ongelma. Kaikki riippuu aina viimeisestä sanomasta, jonka perillemenoa ei voida taata!
Bysanttilainen ongelma (two-army problem)



Symmetrinen yhteyden purku

Yhteyden purku

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



Yhteyden purku kolminkertaista kättelyä käyttäen

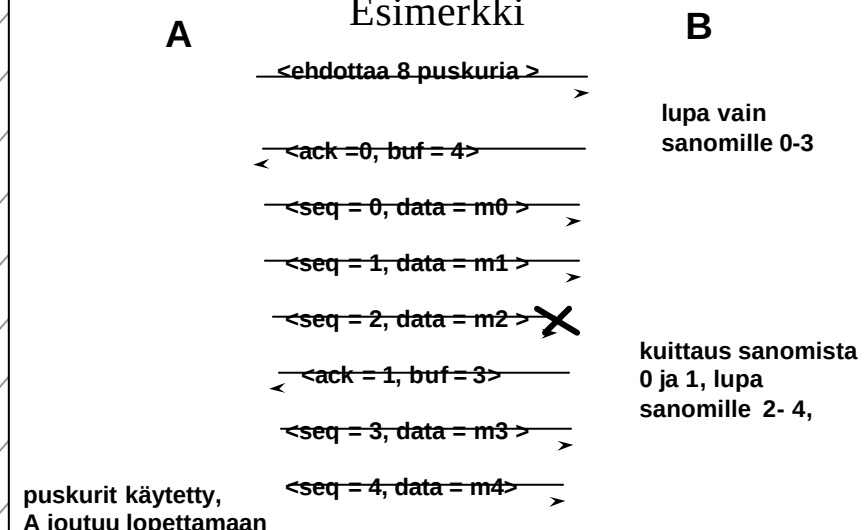
Virheettömyys ja järjestys

- Järjestysnumerot
  - tavuvirta => tavunumerointi
  - segmentin 1. tavun järjestysnumero
  - yhteyden alussa satunnaiset numerot
- kuittaukset
  - kumulatiivinen ACK, ei NAK-kuittausta
  - kuittauksessa seuraavaksi odotettava tavu
- Go Back N
  - virheelliset tai väärässä järjestyksessä tulleet tuhotaan
  - myös valikoiva toista mahdollinen

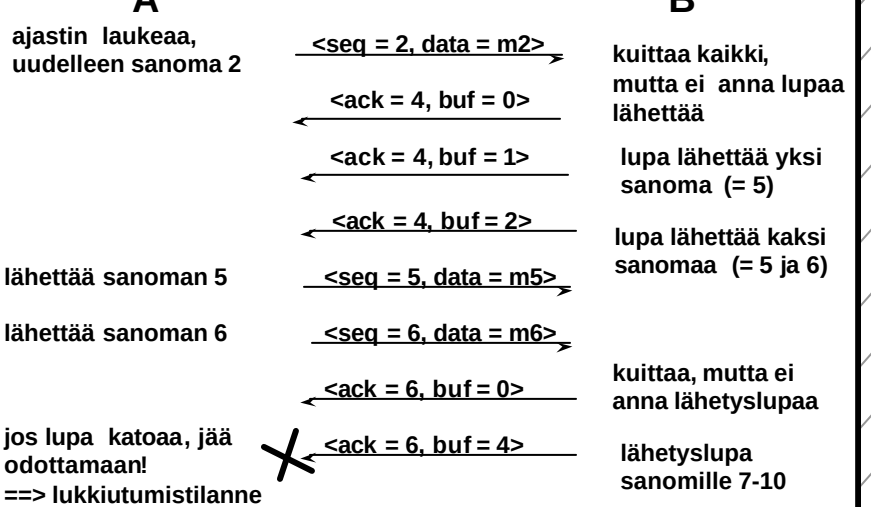
TCP:n vuonvalvonta

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

Esimerkki



Esimerkki jatkuu



- jos ilmoitus lisäpuskureista katoaa, lähettäjä lukkiutuu odotustilaan
  - vastaanottaja voi luulla, ettei ole lähetettävää
- lukkiutumisen estämiseksi
  - kun ikkunankoko = 0 lähettäjä ei saa lähettää, paitsi
  - pikadataa (URG)
  - yhden tavun ‘kyselyn’, jonka vastaanottaja kuittaa ja samalla ilmoittaa ikkunan koon

    => estää turhat lukkiutumiset

6.4.5 Siirron optimointi

- TCP saa optimoida lähettämisiään
  - ei tarvitse lähettää heti kun data on tullut
  - dataa kerätään puskuriin ja lähetetään sopivassa tilanteessa
  - PUSH-lipun avulla sovellus ilmoittaa, että data on lähetettävä heti

Optimointi on usein tarpeen:

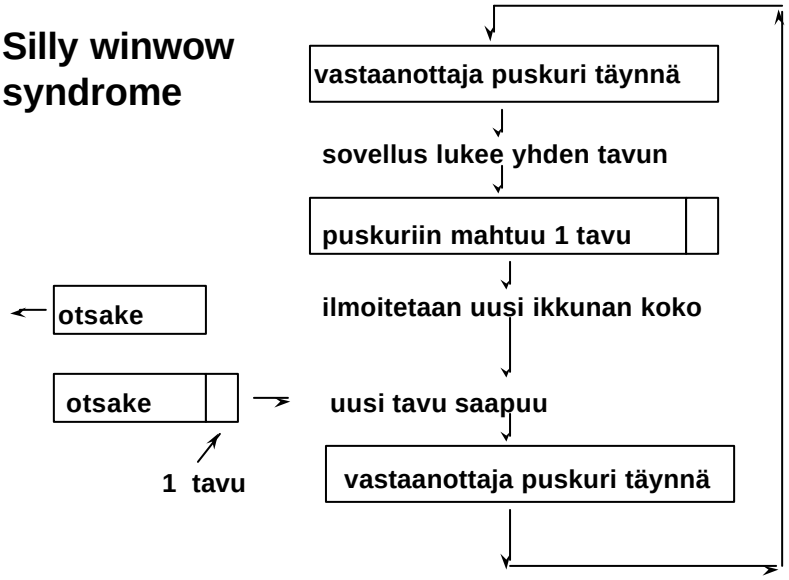
- Interaktiivinen editori => merkki lähetetään heti
  - **21 tavun TCP-segmentti => 41 tavun IP-paketti**
  - **joka kuitataan 40 tavun IP-paketilla**
  - **ilmoitus uudesta ikkunan koosta 40 tavun IP-paketilla**
  - **kaiutetaan merkki vielä 41 tavun IP-paketilla**
  - yhden merkin käsittely =>
    - 162 tavun siirtäminen
    - ja neljän segmentin lähettäminen

- Ratkaisu: Naglen algoritmi
  - jos data tulee tavuttain
    - lähetä 1. tavu
    - kerää sitä seuraavat tavut puskuriin ja lähetä vasta kun edellinen lähetys on kuitattu
    - paitsi jos lähetettävää on suurimman segmentin verran tai puolet ikkunan koosta
  - hankala, jos hiirtä liikutellaan Internetin kautta!

Silly window syndrome

- Tilanteessa, jossa
  - lähettäjältä dataa TCP:lle suurina lohkoina
  - vastaanottajalle vain tavu kerrallaan
- voi tuhota TCP:n suorituskyvyn
  - koko data lähetetään tavu kerrallaan
  - joka tavun välissä ilmoitus ikkunan koon kasvattamisesta yhdellä
- Siis: ei ilmoitusta yhdestä tavusta, lähettäjä ei lähetä yhtä tavua
  - koko segmentti
  - puolet puskurin koosta

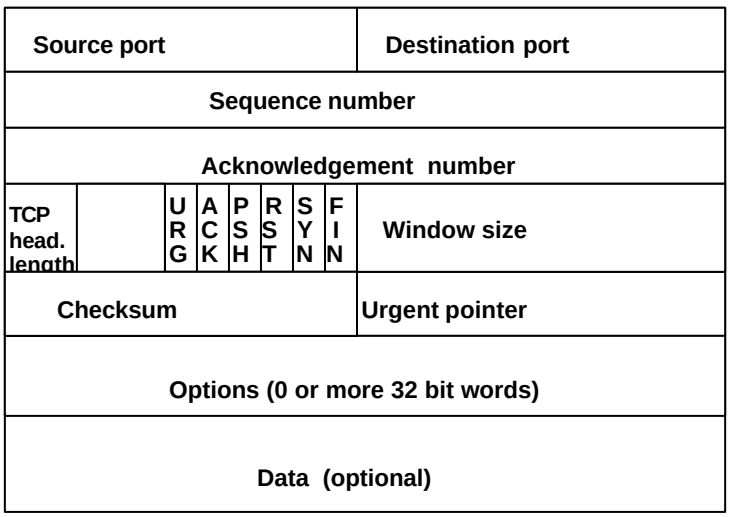
Silly winwow syndrome



6.4.2. TCP-segmentti

- segmentti
  - 20 tavun otsake
    - + optionaalinen osa
  - dataosa
    - voi puuttua
- segmentin kokoa rajoittaa
  - MTU (Maximum transfer unit)
    - verkon rajoitus maksimikoolle (muutama tuhat tavua)
  - IP-paketin dataosa korkeintaan 65535 tavua
- liian isot segmentit paloitellaan
  - joka palalle IP-otsake => yleisrasite kasvaa

TCP-otsakkeen kentät



TPC-segmentin otsakekentät

- **Lähde- ja kohdeportit** (Source port, Destination port)
  - yhteyden päätepisteet
  - portti + koneen IP-osoite => 48 bittinen TSAP
- **Järjestysnumero** (Sequence number)
  - tavut numeroidaan => 32 bittiä
    - segmentin ensimmäisen tavun numero
- **Kuittausnumero** (Acknowledgement number)
  - seuraavaksi odotettu tavu
- **TCP-otsakkeen pituus** (TCP header length)
  - mahdollisten optiokenttien takia
- **6 bitin käyttämätön kenttä**

- **6 lippubittiä**
  - **URG** onko pikadataa
    pikadatan sijainnin ilmoittaa
    pikadatakenttä (Urgent pointer)
  - **ACK** onko kuittauskenttä käytössä
  - **PSH** onko hetilähetettävää (pushed) dataa
  - **RST** yhteyden uudelleenalustuspyyntö (reset),
    yleensä ongelmatilanne
  - **SYN** käytetään yhteyttä muodostettaessa
    SYN =1, ACK = 0 connection request
    SYN =1, ACK = 1 connection accepted
  - **FIN** käytetään yhteyden purkuun
    FIN =1 ei enää lähetettävää

- **Ikkunan koko** (window size)
  - vaihteleva ikkunankoko
  - kuittaus irroitettu lähetysluvasta
- **Tarkistussumma** (Checksum)
  - lasketaan otsakkeelle, datalle ja ns. pseudo-otsakkeelle

pseudo-otsake

Source IP address		
Destination IP address		
00000000	**Protocol = 6**	**TCP/UDP segmentin pituus**

Auttaa havaitsemaan väärään osoitteeseen toimitetut paketit.

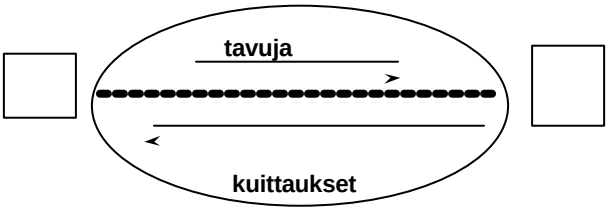
Sisältää IP-otsakkeen tietoja!

- **Optiokenttä** (options)
  - voidaan lisätä piirteitä, joita ei ole varsinaisessa otsakkeessa
    - suurin hyväksyttävä datakenttä
    - ikkunan koon moninkertaistaminen (window scale)
      - nopeille ja pitkän viipeen linjoille 64 ktavun ikkunan koko on liian pieni
    - valikoivan toiston käyttö ‘go back N’:n tilalla
      - vähentää turhia uudelleenlähetyksiä

6.4.6. TCP:n ruuhkan valvonta

- Liikaa kuormitusta => verkko ruuhkautuu => hidastetaan lähettämistä
- Ruuhkan havaitseminen
  - nykyisin siirtovirheet harvinaisia
    - poikkeuksena langattomat verkot
  - => uudelleenlähetykset johtuvat ruuhkasta
    - uudelleenlähetysajastimen laukeaminen on merkki ruuhkasta

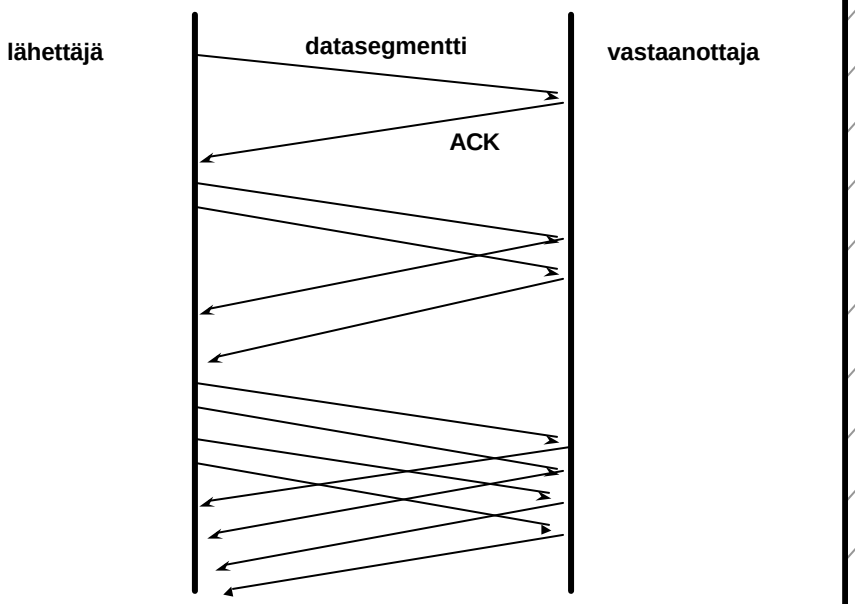
- ruuhkaikkuna
  - "paljonko tavuja (segmenttejä) lähettäjällä saa korkeintaan olla verkossa liikkeellä"
  - kuittaus => ko. tavut jo poistuneet verkosta



- Ruuhkaikkunan koko?
  - Lähettäjän on itse pääteltävä ja arvioitava sopiva ruuhkaikkunan koko
    - kukaan muu ei sitä kerro!
    - timeout => on ruuhkaa
    - kuittaukset tulevat tasaisesti => ei ole ruuhkaa
- Dynaaminen ruuhkaikkunan koko:
  - ruuhkaikkunaa kasvatetaan kunnes törmätään ruuhkaan
  - sen jälkeen ruuhkaikkunaa pienennetään reilusti
  - ja aletaan uudestaan kasvattaa ruuhkaikkunaa

Hitaan aloituksen algoritmi (slow start)

- Algoritmi pyrkii löytämään sopivan ikkunan koon yhteyden alussa tai ruuhkatilanteen jälkeen mahdollisimman nopeasti
  - ei ole niin kovin hidas, vaan alussa eksponentiaalinen!
  - alussa ruuhkaikkuna = yksi segmentti
  - kuitattu ruuhkaikkunallinen kasvattaa ruuhkaikkunan kaksinkertaiseksi



- kynnysarvo (threshold)
  - ‘varoitusarvo’ = tästä lähtien syytä varoa ruuhkaa
  - aluksi 64 K
  - kynnysarvoon saakka voidaan kasvattaa ruuhkaikkunaa eksponentiaalisesti
  - kynnysarvon saavuttamisen jälkeen kasvatetaan ruuhkaikkunaa vain lineaarisesti
    - = kasvatetaan kuittausten jälkeen vain yhdellä
    - edetään hyvin varovaisesti!

- jos ajastin ehtii laueta => ruuhkatilanne
  - kynnysarvoksi puolet nykyisestä ruuhkaikkunan arvosta
  - hitaalla aloituksella etsitään taas uusi sopiva ruuhkaikkunan arvo
    - ruuhkaikkunan arvoksi 1 segmentti
    - ruuhkaikkunaa kasvatetaan aluksi eksponentiaalisesti eli kaksinkertaistetaan kun ikkunallinen on kuitattu
  - kynnysarvon saavuttamisen jälkeen kasvatetaan vain segmentti kerrallaan
  - kunnes taas havaitaan ruuhka ja aloitetaan ruuhkaikkunan uuden arvon etsiminen

Uudelleenlähetysjastimen hallinta

- uudelleenlähetysajastin (retransmission timer)
  - asetetaan aina kun segmentti lähetetään
  - ruuhkaa, jos kuittaus ei saavu ajoissa
- mikä on sopiva ajastimen aika?
  - kuittaus aika vaihtelee suuresti
  - vaihtelu on myös nopeaa
- dynaaminen arvo
  - saadaan jatkuvien verkon suorituskykymittauksien perusteella

- RTT
  - arvio kiertoviiveelle (round-trip time)
  - mitataan jokaisen lähetetyn segmentin kiertoviive M

    RTT = αRTT + (1-α)M, tyypillisesti α = 7/8
- uudelleenlähetysajastimen arvo βRTT
  - aluksi β oli aina 2
  - parannus: otetaan huomioon myös poikkeama D (deviation) oletetun ja saadun kiertoviiveen välillä |RTT-M|

    D = α D + (1- α)|RTT-M|
  - ajastimen arvo = RTT +4*D

- uudelleenlähetysten vaikutus ajastimeen
  - kumpaan segmenttiin kuittaus kohdistuu?
- Karnin algoritmi
  - ei oteta huomioon uudelleenlähettyjen segmenttien kuittauksia RTT:n laskemisessa

Parannuksia ruuhkanvalvontaan

- Nopea uudelleenlähetys (Fast Retransmit)
  - ei odoteta ajastimen laukeamista ennen uudelleenlähetystä
  - vastaanottaja kuittaa jokaisen paketin
  - kun vastaanottaja huomaa puuttuvan paketin, se lähettää uudelleen edellisen paketin kuittauksen
    - Duplicate ACK (~ NAK)
  - kun lähettäjä saa useita (3) peräkkäisiä saman paketin kuittauksia => se havaitsee tästä paketin puuttuvan ja lähettää sen heti uudelleen
  - => nopeampi uudelleenlähetys

- Nopea toipuminen (Fast Recovery)
  - kun kadonnut paketti huomataan nopealla toipumisella ei aloiteta alusta hitaalla aloituksella
    - vaan pudotetaan ruuhkaikkuna puoleen
    - ja jatketaan normaalilla lineaarisella kasvattamisella

- hidas aloitus ja ruuhkan valvonta ongelmallisia langattomassa yhteydessä
- parannuksia
  - tarkempi kello
  - ruuhkan ennustaminen ennen ajastimen laukeamista
  - early warning system
  - => 40-70 % parempia tuloksia

TCP langattomassa verkossa

- monet TCP-toteutukset optimoitu luotettaville lankaverkoille => suorituskyky langattomissa verkoissa erittäin huono
  - ruuhkanvalvonta-algoritmi olettaa ajastimen laukeamisen johtuvan ruuhkasta
    - lähettämistä hidastetaan, jotta verkon kuormitus pienenisi ja ruuhkaa ei syntyisi
  - langattomat yhteydet ovat epäluotettavia ja paketteja katoaa
    - kadonneet paketit syytä lähettää nopeasti uudelleen
    - lähetystä pitäisi päinvastoin nopeuttaa!

6.4.1. TCP:n palvelumalli

- pistoke (socket)
  - TCP-yhteyden päätepiste sovellukselle
    - lähettäjällä ja vastaanottajalla oma pistoke
  - pistokenumero 48 bittiä
    - koneen 32 bitin IP-osoite
    - 16 bitin porttinumero
      - kiinnitettyjä portteja (well-known port)
        - » FTP 21
        - » TELNET 23
        - » HTTP 80

TCP-yhteys

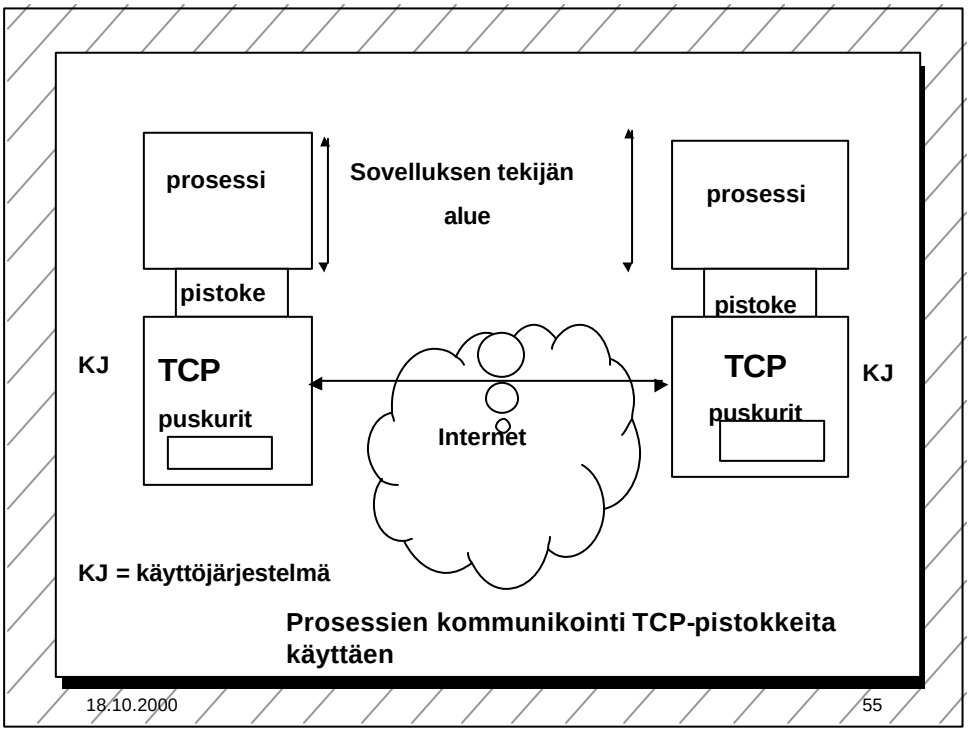
- kaksisuuntainen (full-duplex) kaksipisteyhteys
- tunnistetaan päätepisteinä olevien pistokkeiden tunnuksista (pistoke1, pistoke2)

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

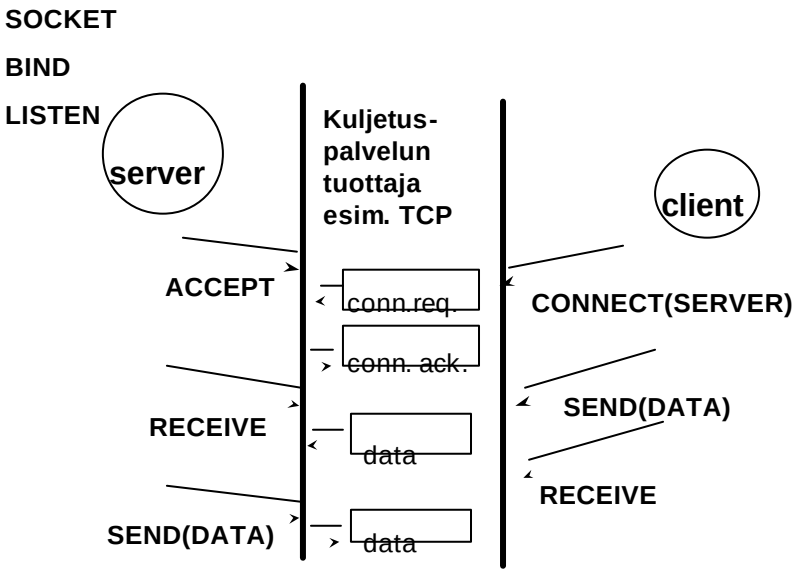
TCP:n pistokeprimitiivit

- SOCKET luo uusi yhteyden päätepiste pistoke
- 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)



Prosessien kommunikointi TCP-pistokkeita käyttäen

Kuljetusyhteyden muodostus ja käyttö

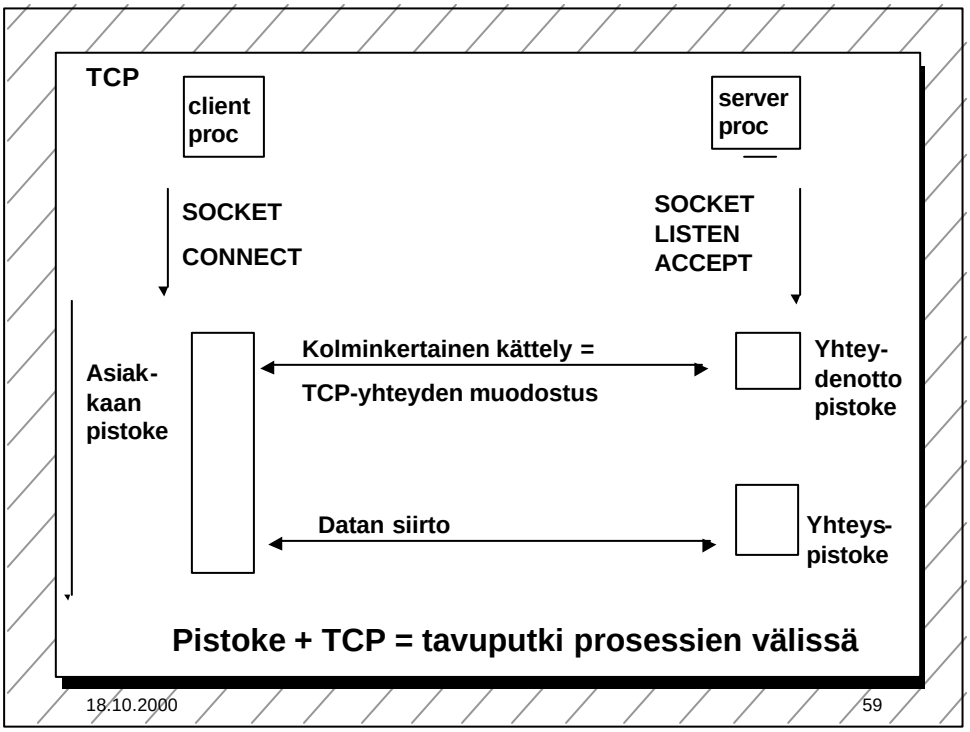


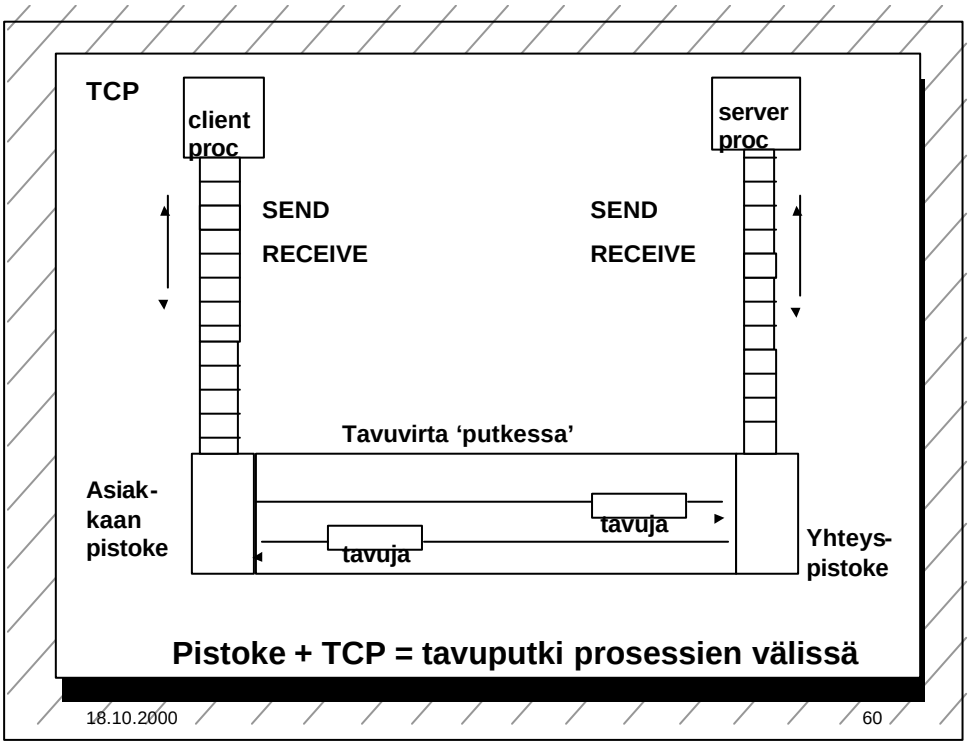
TCP-yhteyden hallinta

- yhteys muodostetaan kolminkertaisella kättelyllä
- passiivinen osapuoli kuuntelee
  - SOCKET
  - LISTEN
  - ACCEPT
- aktiivinen osapuoli aloittaa yhteydenmuodostuksen
  - CONNECT

- CONNECT-primitiivi
  - parametreina
    - IP-osoite ja porttinumero
    - suurin hyväksyttävä segmentin koko
    - muuta tietoa, esim. salasana

- TCP-segmentti, jossaSYN-segmentti
  - SYN = 1
  - ACK = 0


TCP
client proc
server proc
SOCKET
CONNECT
SOCKET
LISTEN
ACCEPT
Asiak-kaan pistoke
Kolminkertainen kättely =
TCP-yhteyden muodostus
Yhtey-denotto pistoke
Datan siirto
Yhteys-pistoke
Pistoke + TCP = tavuputki prosessien välissä


TCP
client proc
server proc
SEND
RECEIVE
SEND
RECEIVE
Tavuvirta 'putkessa'
Asiak-kaan pistoke
tavuja
tavuja
Yhteys-pistoke
Pistoke + TCP = tavuputki prosessien välissä

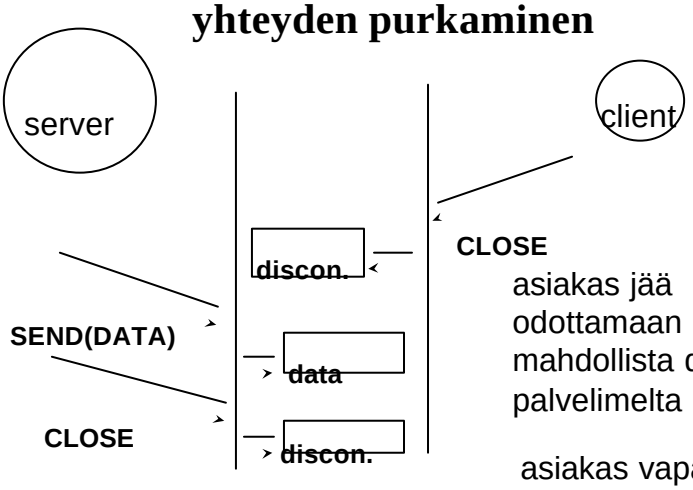
- TCP-yhteys on tavuvirtaa, ei sanomavirtaa
  - lähetettäessä neljä 512 tavun pätkää vastaanottaja saa joko
    - neljä 512 tavun pätkää
    - kaksi 1024 tavun pätkää
    - yhden 2048 tavun pätkän

Segmentit lähetetään neljänä eri IP-pakettina

Ne luovutetaan vastaanottajalle yhdellä READ-kutsulla

neljä 512 tavun segmenttiä **yksi 2048 tavun data**

yhteyden purkaminen



asiakas jää odottamaan mahdollista dataa palvelimelta

asiakas vapautetaan

symmetrinen yhteyden purku

C-rutiineina

int socket(int domain, int type, int protocol)

palvelin:

int bind (int socket, struct sockaddr *address,
int addr_len)

int listen(int socket, int backlog)

int accept(int socket, struct sockaddr *address,
int *addr_len

asiakas:

int connect (intsocket, struct sockaddr *address,
int addr_len)

int send(int socket, char *message, int msg_len, int flags)

sanoman lähetys annetun pistokkeen kautta

int recv(int socket, char *buffer, int buf_len, int flags)

sanoma vastaanotto annetusta pistokkeesta ilmoitettuun puskuriin

Pistokeohjelmointia Javalla

- Socket clientSocket = new Socket(“hostname”, 6789);
- clientSocket.close();
- ServerSocket welcomeSocket = new Server Socket (6789);
- Socket connectionSocket = welcomeSocket;
- accept()

- (esimerkki kirjassa Kurose, Ross, Computer Networking, A Top-Down Approach Featuring the Interbet)

Pistokeohjelmointi

- Pistokeohjelmointia ja yleensä hajautettujen verkkosovellusten tekemistä opetellaan erillisellä kurssilla
  - **Verkkosovellusten toteuttaminen**
    (järjestetään keväällä 2001)