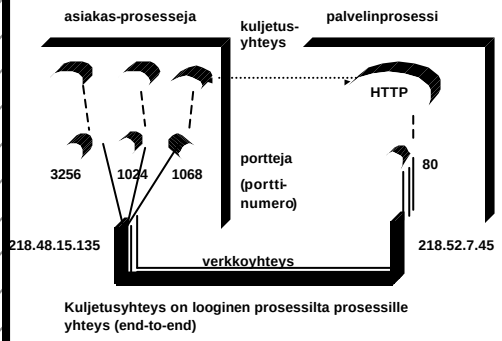
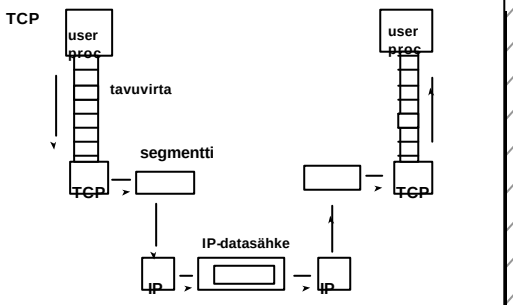
3. Kuljetuskerros

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

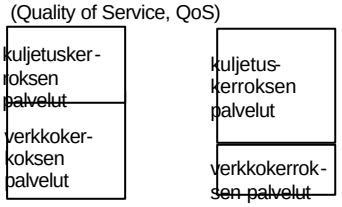




Prosessilta prosessille - tavuvirta

kuljetuspalvelut parantavat verkkopalveluja

Sovelluksen näkemä palvelun laatu (Quality of Service, QoS)



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**

Internetin kuljetuskerros

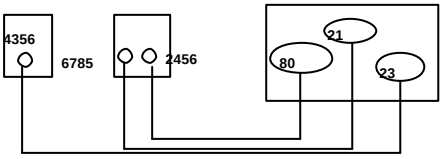
- UDP (User Datagram Protocol)
  - yhteydetön, epäluotettava palvelu
- TCP (Transmission Control Protocol)
  - yhteydellinen, luotettava palvelu
    - virhevalvonta
      - havaitsee ja korjaa siirrossa syntyneet virheet
    - vuonvalvonta
      - ei ylikuormita vastaanottajaa
    - ruuhkanvalvonta
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

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

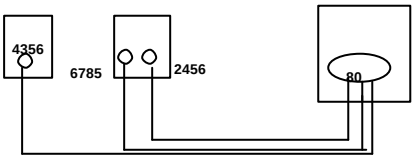
Asiakkaalle kuljetuskerros usein automaattisesti antaa käyttöön jonkin vapaan porttinumeron yhteyden ajaksi

Palvelimilla kiinteät numerot yhteydenottoa varten



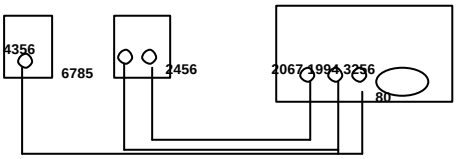
Kolme yhteyttä: 4356 <=> 23, 6785 <=> 21, 2456 <=>80

Tarvitaan sekä lähteen että kohteen porttinumerot



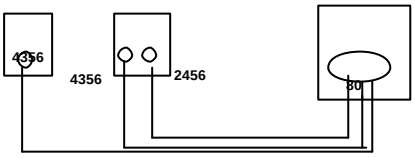
Kolme yhteyttä: 4356 <=> 80, 6785 <=> 80, 2456 <=>80

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!



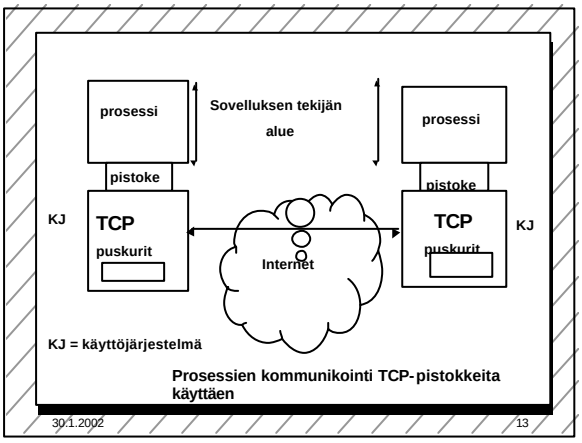
Kolme yhteyttä: 4356 <=> 80, 4356 <=> 80, 2456 <=>80!

Kuljetusyhteydellä käytetään apuna myös IP-osoitetta:

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

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

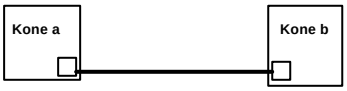


Prosessien kommunikointi TCP-pistokkeita käyttäen

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

TCP-yhteys

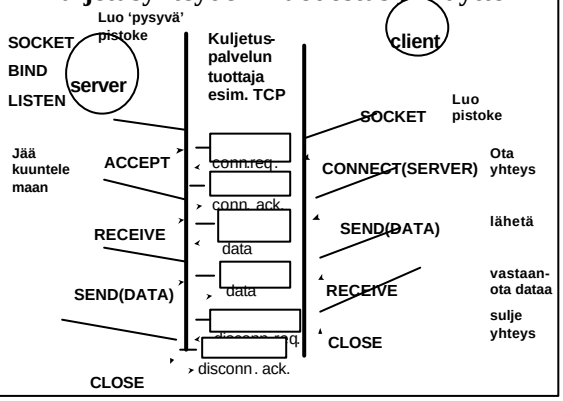
- kaksisuuntainen (full-duplex) kaksipisteyhteys
- tunnistetaan päätepisteinä olevien pistokkeiden tunnuksista (pistoke1, pistoke2)



TCP:n pistokeprimitiivit

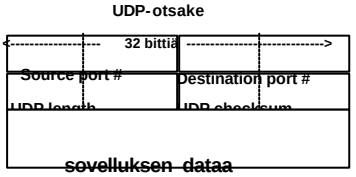
- SOCKET luo uusi yhteyden päätepistepistoke
- BIND anna pistokkeelle osoite
- LISTEN halukas vastaanottamaan yhteyksiä
- ACCEPT jää odottamaan yhteysyrityksiä
- CONNECT yritä muodostaa yhteys
- SEND lähetä dataa yhteyttä pitkin
- RECEIVE vastaanota dataa yhteydeltä
- CLOSE pura yhteys (symmetrinen)

Kuljetusyhteyden muodostus ja käyttö



3.3 UDP

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



UDP-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

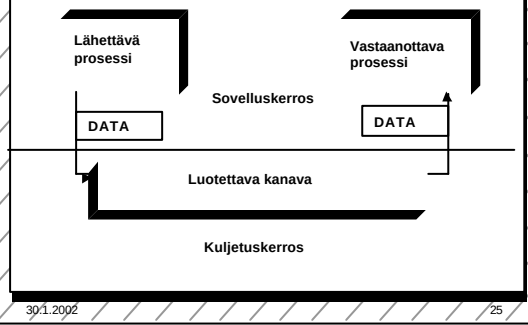
Tehtäviä:

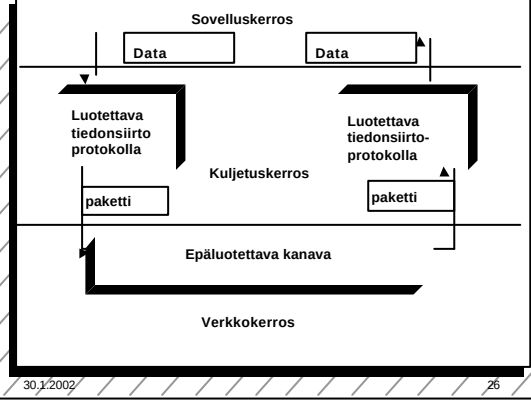
- Lähetetään 10 tavun viesti UDP:llä.
  - Miten kauan kestää lähettäminen, jos lähetysnopeus on 56 kbps?
    - 10 tavua + 8 tavua = 18 * 8 b = 144 bittiä
    - 144 b/ 56 000 b/s = 2.57 ms
  - Miten suuri on etenemisviive, jos etäisyys lähettäjältä vastaanottajalle on 1000 km?
    - 1000km/200 000 km/s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

UDP:n käyttö

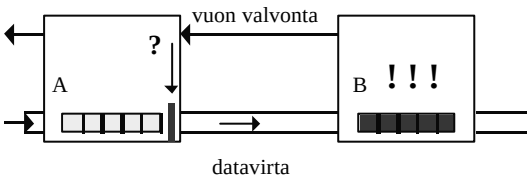
- Vaikka UDP on epäluotettava, se sopii monien sovellusten tarpeisiin:
  - Remote file server (NFS)
  - multimedia
  - Internet-puhelin
  - verkon hallinta (SNMP)
  - reititys (RIP)
  - nimipalvelu (DNS)
- Miksi nämä sovellukset suosivat UDP:tä?

3.4 Luotettava tiedonsiirto



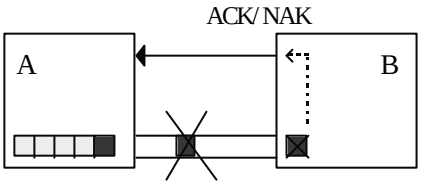


Vuon valvonta



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

Kohinainen kanava



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

Yksinkertainen **Stop and wait** -protokolla

- **Oletus**
  - **virheetön siirto => ei huolta virheistä, mutta vuonvalvontaa tarvitaan**
- **lähettäjä**
  - **lähettää 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
  - **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
  - toisto virheestä lähtien (go back n) (tai paluu n:ään)
  - 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

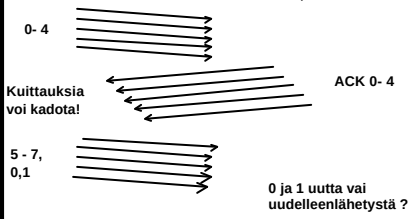
- NAK-kuittaukset voivat aiheuttaa turhia uudelleenlähetyksiä
  - lähetys ja kuittaus menevät ristiin
- NAK-kuittauksen katoaminen ei haittaa
- implisiittinen uudelleenlähetys
  - ei NAK-kuittauksia
- explisiittinen uudelleenlähetys
  - käytetään NAK-kuittauksia

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 ainakin yhtä pienempi kuin numeroavaruus**
- **ikkunan koko valikoivassa toistossa voi olla korkeintaan (n+1)/2**
  - **korkeintaan puolet numeroavaruudesta**

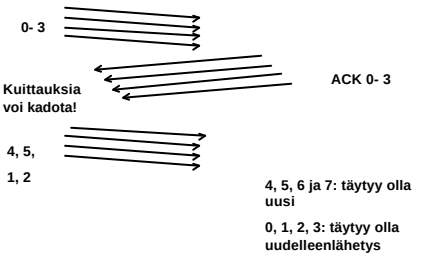
Miksi?

- 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

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