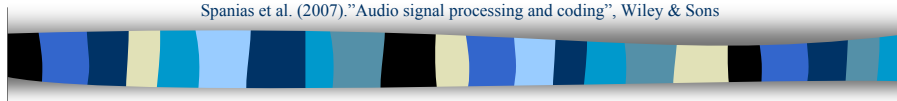


# Kuluttajan audiotekniikkaa

Lähteet: -Pohlman. (1995). "Principles of digital audio".  
-Kontro, Yli-Hietanen, muita. "80545 Digital audio". Kurssin aiemmat luentomateriaalit, TTKK.  
Spanias et al. (2007). "Audio signal processing and coding", Wiley & Sons



Sisältö:

- Johdanto
- Häviöttömiä digitaalisen audion tallennusmuotoja
- Häviöllistä koodausta käyttäviä tallennusmuotoja
- Digitaalinen radio
- Digitaalinen televisio
- Audio Internetissä
- Audion vesileimaus

Audiotekniikkaa 2  
DA / Klapuri & Virtanen

## 1 Johdanto

- Tämä kalvosarja antaa yleistietoa audiotekniikasta ja käsityksen erinäisistä teknisistä ratkaisuista, joita tarvitaan käytännöllisen digitaalisen audion parissa
- Sivuilla on lukuarvoja ja teknisiä detaljeja
  - tämä on eksakti tapa kertoa ko. tekniikoista, mutta:
  - useimpia niitä ei ole tarkoitus opetella ulkoa

## 2 Häviöttömiä digitaalisen audion tallennusmuotoja

Audiotekniikkaa 3  
DA / Klapuri & Virtanen

- Seuraavassa tarkastellaan joitakin digitaalisen audion tallennusmuotoja
- Antavat käsityksen erinäisistä käytännöllisistä teknisistä ratkaisuista, joita tarvitaan audion tallentamisessa
- Lukuksia muitakin tallennusformaatteja on, mutta niiden läpikäyminen ei ole mielekästä
  - esimerkiksi levyformaatteja: CD-ROM, CD-Interactive, digital video interactive, CD-video, CD write once, magneto-optiset uudelleen kirjoitettavat CD:t, CD+graphics, CD+MIDI, CD-3

Audiotekniikkaa 4  
DA / Klapuri & Virtanen

### 2.1 CD-levy

- CD-levy (compact disc, CD)
  - informaatio tallennetaan digitaalisesti
  - datakuoppien (engl. *data pits*) pituus kuvaa sarjaa ykkösiä ja nollia
  - molemmat audiokanavat tallennetaan samaan kuopparaitaan
  - tieto luetaan lasersäteellä
  - informaatiotiheys on noin 100 kertaa suurempi kuin LP-levyillä
- CD-levyn etuja
  - toimintavarma
  - ei kulu toistuvassa käytössä, koska luku tapahtuu lasersäteellä
  - virheenkorjaus käytössä
  - lukupään mekaaninen kuljetus tai levyn pyörimisnopeus ei vaikuta äänentoiston laatuun (ei esim. huojuntaa kuten LP-levyissä)
  - digitaalipiirit ovat immuunimpia vanhentumiselle ja lämpötilavaihteluille
  - SNR yli 90 dB
  - digitaalinen alikoodi: tekstiä näytölle, kontrollidataa, ja käyttäjän dataa

## CD-levy Tallennusformaatti

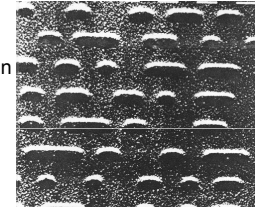
Audiotekniikka 5  
DA / Klapuri & Virtanen

- CD-levyn audiosignaali
  - näytteistystaajuus 44.1 kHz
    - 10 % marginaali Nyquistin taajuuteen ajatellen 20 kHz kuuloaluetta
  - kvantisointi: 16-bittinen lineaarinen kvantisointi
    - teoreettinen SNR noin 98 dB maksimiampitudiselle sinisignaaleille
- Dataformaatti
  - *audion bittinopeus*:  $44100 \times 16 \times 2 = 1.411 \text{ Mbit/s}$
  - cross interleave Reed-Solomon virheenkorjauskoodi (CIRC)
  - *kokonaisdatanopeus* (audio, CIRC, sync, alikoodi): 2.034 Mbit/s
  - modulointi levyille tapahtuvaa fyysistä kirjoittamista varten
    - 8:sta 14:ään modulointi (engl. *eighth-to-fourteen modulation, EFM*)
    - 8-bittinen data konvertoidaan modulaatioissa 14+3:ksi kanavabitiksi
  - *kanavabittinopeus*:  $2.034 \times (17 / 8) = 4.322 \text{ Mbit/s}$

## CD-levy Levyn fyysiset määreet

Audiotekniikka 6  
DA / Klapuri & Virtanen

- Soittoaika korkeintaan 74.7 minuuttia
  - sivuhuomaus: data kirjoitetaan spiraaliin, jonka tiheydestä mahtuvan datan määrä riippuu. CD:n "red book"-standardi määrittelee tiheyden siten, että audiota mahtyy ym. määrä. Käyttäen tiheämpää uraa voidaan soittoaikaa melko turvallisesti venyttää n. 80 minuuttiin. Ei vältt. toimi kaikissa soittimissa.
- Levyn fyysisiä ominaisuuksia
  - yksipuolinen, läpimitta 120 mm, paksuus 1.2 mm
  - raidanleveys 1.6  $\mu\text{m}$ , datakolot noin 0.5  $\mu\text{m}$  leveitä
    - ↑ alkää hyvät ihmiset opetelko tällaisia ulkoa!
  - levy pyörii myötäpäivään, signaali kirjoitetaan sisältä ulospäin
  - vakio lineaarinen lukunopeus maksimoi tallennustiheyden
    - pyörimisnopeus vaihtelee 200 – 500 kierrosta / min
  - datakolojen raja merkitsee ykköstä, ja kaikki välissä olevat alueet, kolossa tai sen ulkopuolella, ovat nollia
  - kuva: datakoloja CD-levyllä



## 2.2 Virheenkorjaus

Audiotekniikka 7  
DA / Klapuri & Virtanen

- Käytännössä kaikissa tallennus- ja siirtokanavissa tulee virheitä tallennettuun tai siirrettyyn dataan
- Digitaalisen tiedon luonne antaa mahdollisuuden korjata virheitä
  - digitaalinen tieto voidaan koodata ja varustaa redundantilla lisäinformaatiolla
  - auki koodatusta datasta voidaan tarkistaa tapahtuiko virheitä, ja mahdollisesti korjata virheet
- Virhetyypit
  - satunnaiset virheet (engl. *random errors*): tapahtuvat yksittäin, ilman riippuvuutta toisistaan
  - pusrkevirit (engl. *burst errors*): useita peräkkäisiä arvoja tuhoutuu
- Virheenkorjauksen tavoitteita
  - hyvä virheenkorjauskyky sekä satunnaisille että pusrkeviritteille
  - luotettava virheiden ilmaisu, vaikkei virhettä voitaisikaan korjata
  - pieni määrä redundanssia

## Virheenkorjaus Tehokas audiosignaalien virheenkorjaus

Audiotekniikka 8  
DA / Klapuri & Virtanen

- Tavoitteena
  - kuultavien virheiden mahdollisimman pieni määrä sen jälkeen, kun virheenkorjaus ja virheiden kätkentä on tehty
  - redundantin tiedon määrä ja prosessointi minimoidaan
- Operaatioita
  - *virheen ilmaisu* käyttää redundanssia, jolla datan pätevyys tarkistetaan
  - *virheenkorjaus* hyödyntää redundanssia ja korvaa virheelliset data-arvot uudelleen lasketuilla päteville arvoilla
  - *virheiden kätkentätekniikoilla* korvataan virheellinen data suurinpiirtein oikealla
    - laajojen virheiden tapauksessa, tai tilanteissa joissa redundantti tieto ei riitä virheenkorjaukseen
  - pahimmassa tapauksessa, jolloin edes virheiden kätkentä ei ole mahdollista, järjestelmä kytkee ulostulon pois päältä sen sijaan että tuottaisi täysin väärää ääntä

## CD:n jälkeläisiä

Audiotekniikkaa 9  
DA / Klapuri & Virtanen

- Super Audio CD
  - Sonyn ja Philipsin tuote
  - optinen levy, fyysisesti sama formaatti kuin DVD
  - 2822.4 kHz näytteenottotaajuus, 1-bittinen sigma-delta modulointi
  - levy voi sisältää myös monikanavamiksauksen
- DVD-audio
  - optinen levy, sama tallennusformaatti kuin DVD:ssä
  - sama levy voi sisältää audiota usealla eri näytteenottotaajuudella ja sananpituudella
- Blu-ray Disc ja Advanced Optical Disc
  - optisia levjä
  - suunniteltu pääasiassa videon tallennukseen, mutta soveltuvat myös audiolle

## 2.3 DAT–nauha

Audiotekniikkaa 10  
DA / Klapuri & Virtanen

- Engl. *digital audio tape (DAT)*
- Ensimmäinen kuluttajille suunnattu järjestelmä, joka mahdollistaa digitaaliseen *tallennuksen* nauhalle
- Magneettinen media
- Pulssinkoodimoduloitua (PCM) dataa (= pakkaamatonta)
  - kaksi kanavaa
  - 32, 44.1 ja 48 kHz näytteistystaajuudet
  - 16-bittinen lineaarinen kvantisointi, tai 12-bittinen epälineaarinen kvantisointi
- Kaksinkertainen Reed-Solomon virheenkorjauskoodi
- DAT-nauhalle mahtuu tyypillisesti 2 tuntia ja jopa 4-6 tuntia audiota

## 3 Häviöllistä koodausta käyttävät tallennusmuodot

Audiotekniikkaa 11  
DA / Klapuri & Virtanen

- Nykyään laaja valikoima kannettavia laitteita
  - esim. Apple iPod
- Koodauksessa käytetään usein MP3:a tai AAC:tä
- Tallennus: kovalevy / flash-muisti
- MP3-CD-ROM-levyjä soittavat laitteet

## 3.1 DVD-levy

Audiotekniikkaa 12  
DA / Klapuri & Virtanen

- Digital versatile disc (DVD)
- *Digitaalisen videon* levitykseen tarkoitettu media
- Tallentaa 17 miljardia tavua dataa 120 mm levyllä
  - yli 2 tuntia digitaalista videota ja audiota
  - yli 8 tuntia kaksipuoliselle, kaksikerroksiselle levyllä
- Yhtäaikainen monen kielen tuki
  - 8 eri audioraitaa, jokaisella jopa 8 kanavaa
- Digitaalisuus antaa myös videolle uusia mahdollisuuksia
  - interaktiivisuus: valikoita yms.
  - tekstitykset ja elokuvan tiedot useilla eri kielillä
  - mahdollistaa "parental" kontrollin
  - jopa 9 eri kamerakulmaa, voidaan valita toiston aikana
  - mahdollistaa katselukertakohtaisen veloittamisen
  - läpinäkyvä videon haarautuminen eri juonenkuljetusten mukaan
  - nopea haku otsikon, luvun, tai aikakoodin perusteella
  - tukee laajakulmaelokuvia ja standardi-/laajakulmatelevisioita

## DVD-levy

- MPEG-2 koodausta käytetään sekä kuvalle että äänelle
- DVD:n etuja
  - kuvan ja äänen laatu on hyvä
  - kestävä
    - ei altis magneettisille kentille tai lämmönvaihteluille
    - ei kulu käytössä
  - kooltaan kompakti
- DVD:n heikkouksia
  - ei voi soittaa takaperin
  - kuvan ja äänen koodaus voi tuottaa havaittavia artefaktoja
  - sisäänrakennettu kopioinnin suojaus ja aluekoodaus
    - valmistajien kannalta etu
    - koodien kiertäminen ei ole kovin vaikeaa

## 3.2 MiniDisc (MD)

- Sony toi markkinoille 1991
- Suunniteltu henkilökohtaisten kannettavien laitteiden markkinoille
- Signaali
  - kaksikanavainen digitaalinen ääni
  - näytteistystaajuus 44.1 kHz, 16-bittinen kvantisointi
  - kuulumalliin perustuva Adaptive transform acoustic coding (ATRAC)
    - viisinkertainen äänidatan pakkaus (1.4 Mbit/s → 280 kbit/s)
- ACIRC-virheenkorjauskoodi
- Elektroninen suojaus täräyksiltä (engl. *electronic shock protection*)
  - toteutettu 10–30 sekunnin muistipuskurilla → hyvä kannettavissa laitteissa
- Lämpimitaltaan 64 mm levy
  - soittoaika 74 minuuttia
  - levyiltä haku käy nopeasti
- Kaksi levyformaattia
  - valmiiksi kirjoitetut MD:t valmistetaan täsmälleen samoin kuin CD:t
  - kirjoitettavat MD:t käyttävät magneto-optista tallennusperiaatetta

## 3.3 Digital compact cassette (DCC)

- Philips toi markkinoille 1991
- Suunniteltiin korvaamaan vanhat analogiset nauhat, ei kilpailemaan CD:n tai DAT:n kanssa
- Signaali
  - kaksikanavaista digitaalista ääntä
  - näytteistystaajuudet 32, 44.1, 48 kHz
  - kuulumalliin perustuva Precision adaptive subband coding (PASC)
  - subjektiivinen äänenlaatu lähes CD:n tasoa
- Virheenkorjaus: Reed-Solomon, tiedon lomitus kahdeksan raidan sekaan
  - PASC-ulostulon 768 kbit/s määrästä 50 % on redundanttia tietoa
- Nauhaformaatti
  - taaksepäin yhteensopiva vanhojen C-kasettien kanssa
    - vanhat soittimet osaavat soittaa, mutteivät tietenkään tallentaa
  - 8 digitaalista audioraitaa + 1 lisäinformaatiolle +2 analogisoittimille
    - sijaitsevat nauhan suuntaisesti
- DCC kadonnut markkinoilta
  - nauha on kuluva media
  - kasetin kelaaminen on hidasta
  - ei tärähdyksiltä suojaava järjestelmä
  - toisaalta hieman parempi äänenlaatu kuin MD

## 4 Digitaalinen radio

- Digital audio broadcasting (DAB)
- Tausta
  - nykyiset FM-radiolähetykset VHF-kaistalla eivät voi tyydyttää tulevaisuuden tarpeita, joita ovat
    - erinomainen äänenlaatu
    - suuri kanavamäärä
    - pienet kannettavat vastaanottimet
    - laatu ei saa heiketä monitie-etenemisen tai signaalin häypymisen takia
  - nykyiset analogiset FM-radiojärjestelmät ovat saavuttaneet teknisen parantelun ylärajan
  - digitaalisella audiotekniikalla (CD, DAT, MD, jne) on joukko laatustandardeja, jotka ovat FM-radion saavuttamattomissa
    - kuuntelijat voivat ostaa parempaa laatua kuin FM-radio voi tarjota
- täytyi kehittää uusi digitaalinen radiojärjestelmä

## Digitaalinen radio

- Eureka projekti EU 147: DAB
  - yhteensä 530 miestyövuotta vuosina 1987-1994
  - osallistujia useista eri maista
  - tavoitteenasettelua, tutkimusta, kehitystä
- DAB – tehtävnmäärittely ja vaatimuksia
  - korkealaatuinen digitaalinen tiedonsiirto
    - virheetön siirto, parempi äänenlaatu, tarvittava radiokaista minimiini
    - tulevaisuudessa monikanavaäänentoisto ja binääridatan siirto
  - uuden järjestelmän pitäisi riittää ainakin 50 vuotta → jätettävä paljon tilaa tulevalle kehitykselle
  - virheetön vastaanotto myös kannettaviin radioihin ilman erikoisantenneja
  - siirtokapasiteetti
    - ainakin 6 maanlaajuista stereokanavaa, sekä paikallisohjelmia
    - riittävä siirtokapasiteetti lisäinformaatiolle
    - datakanavia lisäinformaatiolle: kontrollisignaalit, ohjelman identifiointi yms.
  - järjestelmä dynamiikan kontrolliin
    - vastaanottaja valitsee haluamansa dynamiikan esim. koti-/autokuunteluun

## Digitaalinen radio MUSICAM-audiokoodaus

- DAB käyttää MUSICAM-audiokoodekkia
- Masking pattern adapted universal subband integrated coding and multiplexing (MUSICAM)
  - kuulomalliin perustuva audiokoodekki
  - käytännössä sama kuin MPEG-1 Layer 2 ja MPEG-2 BC Layer 2
  - 16 bittinen, 48 kHz näytteistetty ääni → 8 – 384 kbit/s
    - pakkaussuhde tyypillisesti 6:1 – 12:1 alkuperäiseen verrattuna
  - tukee näytteistystaajuuksia 24 ja 48 kHz
  - standardi jättää mahdollisuuksia jatkokehitykselle ja esim. kanavien määrän lisäämiselle

## Digitaalinen radio Käyttöönotto

- YLE aloitti digitaaliradion koelähetykset 1994
  - 1998: ensimmäinen digikanava *Radio Peili* (asiapuheta, jazzia)
  - 2001: *YLEQ, Radio Peili, Ylen Klassinen, Vega+, Yle World, Yle Mondo*
  - kuuluvuusalue Tre-Turku-Hki kolmio, noin puolet suomalaisista
  - YLE lopetti lähetykset vuoden 2005 lopussa (jatkuvat digi-TV:ssä, myös kaikki FM-kanavat)
- Tekniikka on hyvä, mutta ei levinnyt kuluttajille
  - vastaanottimet liian kalliita
- Analogiset radiolähetykset on tarkoitus lopettaa Saksassa 2015, Norjassa 2014
- Britit ovat olleet edelläkävijöitä digiradioon siirtymisessä, siellä DAB-lähetystyisiä on enemmän
- Digitaalista radiota ei pidä sekoittaa RDS-järjestelmään, jolla voidaan lähettää tekstuaalista tietoa analogisen radiolähettyksen ohessa (kanavan nimi, mainoksia tms.)
  - RDS on melko laajalti käytössä uusissa analogisissa radiovastaottimissa

## 5 Digi-TV

- Digi-TV:n audio lähetetään joko MPEG-1 layer 2 tai Dolby Digital AC3-formaatissa
- Kaikki vastaanottimet voivat vastaanottaa MPEG-1 layer 2-audiota
  - stereoääni
- Monet vastaanottimet tukevat myös AC3:a
  - 5.1 surround-äänentoisto

## 6 Audio Internetissä

- Internet on tuonut uusia mahdollisuuksia
  - levyn voi julkaista Internetissä: nopea myydä ja helppo ostaa
  - live-konsertteja ja DAB-lähetyksiä voidaan välittää Internetissä
- Audio *streaming* Internetissä
  - tarkoittaa sitä, ettei tiettyä audiosignaalia tarvitse imuroida kokonaan ennen soittamisen aloittamista
  - kuuntelu alkaa heti, lataus jatkuu taustalla
  - dataa tulee puskuriiin ja sitä soitetaan puskurin toisesta päästä
    - verkon ruuhkautuminen voi luonnollisesti katkaista toiston
  - stream-formaatti pitää sisällään digitaalisen audion formaatin, joka olla esim. MPEG1 layer 3
    - stream-formaatteja: Windows Media Audio / Active Streaming Format (ASF), QuickTime, RealAudio
- Vastaanottaja ajaa dekooderi-ohjelmaa
  - käytännössä laitteistoriippuva
  - myös dekooderi on tyypillisesti saatavilla Internetissä
  - dekooderin pitää hallita vaihtelevia viiveitä ja datan hukkumista

## 6.1 Oikeuksien rajoittaminen

- Digitaalinen esitysmuoto
  - tekee kopioimisen helpoksi ja halvaksi
  - mahdollistaa alkuperäisen kanssa identtisten kopioiden luomisen
  - tekee kopioiden levittämisen helpoksi ja nopeaksi
  - usein myyjä haluaa, että ostaja ei kopioi äänitettä muille
- Oikeudet voidaan määritellä esim. oheisdatassa
  - ongelma: enkooderin pitää osata rajoittaa oikeuksia
  - ratkaistu esim. rajoittamalla enkoodaus tiettyyn ohjelmistoon/laitteeseen (esim. iTunes)
  - MPEG-21 standardisoi digitaalisen median oikeuksien hallintaa
- Audion oheisdatassa olevat rajoitukset voidaan aina kiertää soittamalla äänite ja nauhoittamalla se uudestaan
  - tätä voidaan (yrittää) estää vesileimauksella

## 7 Audion vesileimaus

- Digitaalinen vesileima
  - identifiointikoodi, joka on pysyvästi upotettu itse tiedon sekaan
  - tekijänoikeuksien suojaus ja tiedon autentikointi
  - voidaan pistää esim. kuva-, ääni-, ja videodataan
- Miksi vesileimata? Koska vesileimalla varmistetaan tiedon alkuperä, turvallisuus, oikeellisuus, tekijänoikeudet, tai sisällön koskemattomuus / etäisyys alkuperäisestä
- Steganografia ≠ kryptografia
  - vesileimausta ei pidä sotkea kryptografiaan
  - *steganografia*: ideana välittää tietoa huomaamattomasti toisen aineiston sisällä, itse aineisto julkista, kreik. *steganos* (peitetty), *graphie* (kirjoitus)
  - *kryptografia*: muutetaan koko aineisto sellaiseen muotoon, etteivät ulkopuoliset saa siitä mitään järkevää tietoa irti

## Audion vesileimaus

### 7.1 Vaatimuksia digitaaliselle vesileimalle

- Millainen vesileima on hyvä?
  - läpinäkyvyys
  - robustisuus hyökkäyksille
  - informaation välityskapasiteetti
- Ratkaisun vaatimukset
  - ulkopuolinen ei voi luoda eikä poistaa vesileimaa
  - vesileima on itse aineistossa eikä oheisinformaationa
  - alkuperäisen aineiston laatu ei saisi heiketä vesileimauksessa
    - toisaalta hyökkäysyrityksien täytyisi heikentää laatua mahd. paljon
  - vesileima ei ole helposti havaittavissa → johtaisi hyökkäysyrityksiin
  - vesileima on robusti alkuperäiseen aineistoon kohdistuvalle tahalliseen tai tahattomalle manipuloinnille, ja hyökkäysyrityksille
    - AD/DA-muunnokset, kohina, pakkaaminen, suodatus jne

## 7.2 Digitaaliset vesileimat audiosignaaleissa

Joitain esimerkkejä vesileiman piilottamisesta:

- Viestin koodaaminen vähiten merkitseviin bitteihin
  - +: helppo vesileimata, -: helppo löytää, kohinaominaisuudet eivät hallinnassa
  - herkkä kaikelle signaalille, redundanssia lisäämällä paranee
- Direct-sequence spread spectrum –menetelmät
  - viesti koodataan siten, että se leviää koko taajuuskaistalle (→ ei kuulu pahasti)
  - binäärinen viesti moduloi pseudo-random kohinaa
  - vaikka osa taajuuskaistasta muuttuu, viesti on edelleen luettavissa
  - koodi on herkkä ajoitusvirheille, vesileiman etsinnässä pitää synkronoitua
- Vaihekoodaus
  - viesti lisätään signaaliin muuttamalla taajuuskomponenttien vaihekulmaa
  - kuulo ei ole herkkä absoluuttisille vaihearvoille, vain vaiheen muutoksille
  - heikkous: jos tietää menetelmää käytetyn, vaiheinformaatio on helppo sotkea
- Kaiun piilotus
  - audiosignaaliin lisätään keinotekoisia kaikuja, joita ihminen ei huomaa
  - kaiut havaitaan, mutta jos ne vastaavat huonetilan kaikuja, eivät häiritse
  - koodaus voidaan määrittellä neljällä parametrilla: kaikujen amplitudi ja vaimennus, sekä omat kaikuviiveensä ykkösille ja nolliille

## 7.3 Hyökkäyksiä vesileiman tuhoamiseksi

- Jittering
  - jaetaan signaali lohkoihin, joista toisia lyhennetään yhdellä näytteellä, toisia pidennetään yhdellä näytteellä
  - vesileimaa etsivän ohjelman synkronointi menee pieleen
- Signaalin keston muuttaminen tai uudelleennäytteistys
- Hyökkäys kaiun kätkentää vastaan
  - yritetään estimoida käytetyn koodauksen parametreja, ja sitten käännetä suodatetaan signaali
- Protokollahyökkäys
  - ei hyökätä varsinaista vesileimaa vaan kokonaisjärjestelmää vastaan
  - vesileimausprosessi on usein additiivinen tai ainakin vaihdannainen
  - lisätään oma vesileima jo leimattuun dataan ja väitetään että oma leima on lisätty ensin
- Keskiarvottaminen (mikäli samaa dataa saatavilla eri vesileimoilla)
- Häviöllinen pakkaus
  - kompressiomenetelmät poistavat signaalista juuri niitä komponentteja, joihin tieto voitaisiin upottaa sen kuulumatta