

# **Tietokantakyselyjen optimointi relaatiotietokannassa**

Olli Rissanen

Kandidaatintutkielma

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 21. huhtikuuta 2013

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Olli Rissanen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Tietokantakyselyjen optimointi relaatiotietokannassa			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Tietojenkäsittelytiede			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Kandidaatintutkielma		21. huhtikuuta 2013	26
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Tutkielmassa tutustutaan tietokantakyselyjen optimointiin relaatiotietokantojen hallintajärjestelmien osalta sekä optimoinnin vaikutukseen kyselyjen suorituskyyvyssä.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Information systems Query optimization			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2 Taustaluku</b>	<b>5</b>
2.1 Relaatiomalli . . . . .	5
2.2 Relatioalgebran operaatiot . . . . .	5
2.3 Optimoijan tavoitteet . . . . .	6
2.4 Optimoijan historia . . . . .	7
<b>3 Tietokantakyselyn prosessointi</b>	<b>8</b>
3.1 Kyselyn jäsentäminen . . . . .	8
3.2 Kyselyn optimointi . . . . .	9
3.3 Kyselyn suorittaminen . . . . .	10
<b>4 Kyselysuunnitelmien tuottaminen</b>	<b>10</b>
4.1 Kyselysuunnitelma . . . . .	11
4.2 Hakualgoritmit . . . . .	12
4.2.1 Dynaamiset algoritmit . . . . .	14
4.2.2 Muut algoritmit . . . . .	14
4.2.3 Algoritmien heuristiikat . . . . .	15
4.3 Alikyselyt . . . . .	17
<b>5 Kyselysuunnitelmien kustannusarviointi</b>	<b>18</b>
5.1 Systeemitauluston tilastotieto . . . . .	19
5.2 Tulosityoukon koon arviointi . . . . .	20
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>21</b>
<b>Lähteet</b>	<b>23</b>

# 1 Johdanto

Modernit järjestelmät lisäävät jatkuvasti tietokantojen työtaakkaa tiedon määrän kasvaessa. Jotta tiedosta saadaan mahdollisimman paljon irti, tarvitaan tiedon hallitsemiseen yhä tehokkaampia työkaluja. Tietokannan suorituskyky on tärkeää koko järjestelmän suorituskyvyn osalta, sillä tiedon lukeminen massamuistista on hidasta verrattuna rekistereiden tai välimuistin käyttöön. Optimoimalla tietokantakyselyjen suoritusta voidaan vaikuttaa suoritettujen operaatioiden määrään sekä muistialueen kokoon ja siten vähentää tietokannan vasteaikaa sekä resurssien käyttöä [MKR12].

Tietokantaa käytetään tietokannan hallintajärjestelmällä, joka on koelma ohjelmia tiedon tallentamiseen, muokkaamiseen, analysoimiseen ja keräämiseen tietokannasta. Hallintajärjestelmää käytetään kyselykielellä, joista esimerkiksi SQL [CAE<sup>+</sup>76] on suunniteltu relaatiotietokantojen hallintajärjestelmille. Hallintajärjestelmän vastuulla on kyselyn muuttaminen tietokannan ymmärtämään muotoon säilyttäen kyselyn alkuperäinen tarkoitus. Kyselyn optimointi on toteutettu automaattisena toimenpiteenä hallintojärjestelmän sisältämässä kyselyn optimoijassa, ja kaikista hallintajärjestelmän komponenteista optimoijalla on suurin merkitys tietokannan suorituskykyyn [MKR12]. Kyselyn optimoijan tavoitteena on minimoida itse optimointiin käytetty aika ja maksimoida optimoinnista saatu hyöty [JK84].

Optimoija toimii arvioimalla mahdolliset menetelmät kyselyn suorittamiseen ja valitsemalla niistä tehokkaimman [SAC<sup>+</sup>79]. Menetelmää kyselyn suorittamiseksi sanotaan kyselysuunnitelmaksi, ja se sisältää sarjan tietokannan relaatioihin kohdistuvia algebrallisia operaatioita, jotka tuottavat tulokseksi halutun vastauksen. Tietokantakyselyä vastaavia kyselysuunnitelmia voi olla useita, sillä kysely voidaan usein esittää monena algebrallisesti toisiaan vastaavana esityksenä [JK84]. Algebrallista operaatiota kohden voi

myös löytyä useita toteutuksia, kuten join-operaatiota toteuttavat merge join, hash join ja nested loop join. Kyselysuunnitelma sisältää operaatioiden lisäksi tiedon ne toteuttavista algoritmeista. Saman kyselyn sisältämät mahdolliset kyselysuunnitelmat voivat olla suorituskyvyltään jopa eri suuruusluokassa [Ioa96, Ora13].

Tutkielmassa keskitymme kyselyn optimoijan toimintaan ja ongelmiin yleisellä tasolla. Jokainen kaupallinen optimoija on osittain erilainen kokonaisuus komponentteja, jotka kuitenkin pohjautuvat samoihin yleisiin malleihin. Yksittäistä hallintajärjestelmää käsiteltäessä mainitaan siitä erikseen. Tutkielman tavoitteena on tutustuttaa lukija optimoijan toiminnan perusteisiin ja optimoijan ajankohtaisiin ongelmiin.

Kyselyn optimointi on NP-täydellinen ongelma [IK84], jossa hakualue voi nousta erittäin suureksi. Haasteeksi nousee kyselysuunnitelmien hakeminen ja niiden suorituskyvyn ennustaminen. Kaikkien mahdollisten kyselysuunnitelmien arvioiminen on usein liian hidasta, joten optimoijan tulee valita pienin mahdollinen hakualue joka pitää sisällään halvimmat suunnitelmat [Cha98]. Suorituskyvyn ennustamisen ja hakualueen rajauksen lisäksi optimoija tarvitsee tehokkaan algoritmin koko hakualueen läpikäymiseen. On epärealistista odottaa kyselyn optimoijan aina löytävän parhaan kyselysuunnitelman, ja onkin tärkeämpää välttää huonoimpia suunnitelmia ja löytää hyvä suunnitelma [RG03].

Luku 2 sisältää esitiedot kyselyn optimoijan toiminnalle, joiden lisäksi luvussa perehdytään optimoijan historiaan ja sen tavoitteisiin. Luku 3 tiivistää tietokantakyselyn prosessoinnin hallintajärjestelmän sisällä ja esittelee optimoijan toiminnan pääpiirteittäin kyselyn prosessoinnissa. Kyselysuunnitelman tuottamiseen syvennytään tarkemmin luvussa 4, jossa käsitellään kyselysuunnitelman rakennetta, niiden tuottamiseen käytettäviä algoritmeja

sekä heuristiikkoja epäoptimaalisten kyselysuunnitelmien karsimiseen. Kyselysuunnitelmien kustannusarviointi ja siihen liittyvä tilastotiedon käyttö esitellään luvussa 5.

## 2 Taustaluku

Luvussa käydään läpi relaatiomallin käsite sekä relaatioalgebran operaatiot, jotka ovat optimoijan keskeisimmät esitiedot. Lisäksi luvussa tutustutaan tarkemmin optimoijan tavoitteisiin ja sen vaikutuksen alaisiin resursseihin, sekä annetaan lyhyt katsaus optimoijan historiaan.

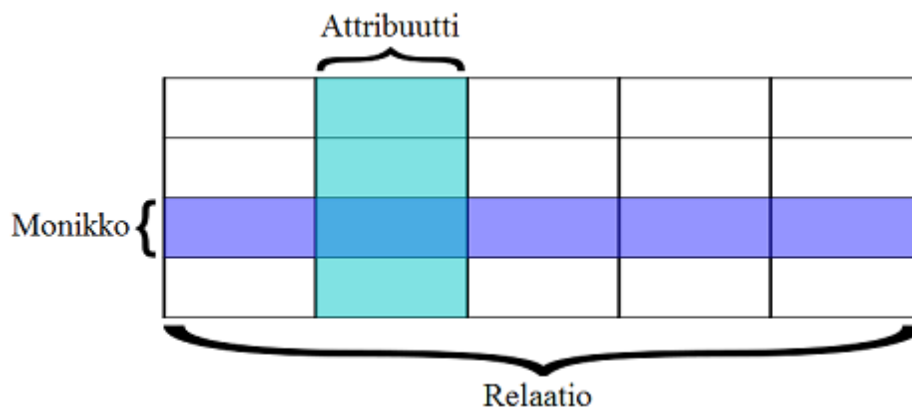
### 2.1 Relaatiomalli

Relaatiotietokanta on relaatiomalliin [Cod70] perustuva tietokanta. Relaatiomallin keskeinen piirre on kaiken datan esittäminen  $n$ -paikkaisen karteesisen tulon osajoukkona, ja se tarjoaa deklarativisen menetelmän datan ja kyselyjen määrittämiseen. Relaatiomalli koostuu attribuuteista, monikoista ja relaatioista. Matemaattisessa määritelmässä attribuutti on pari joka sisältää attribuutin nimen ja tyyppin sekä jokaiseen attribuuttiin liittyy sen arvojoukko. Monikko on järjestetty joukko attribuuttien arvoja. Relaatio koostuu otsakeesta ja sisällöstä, jossa otsake on joukko attribuutteja ja keho on joukko monikkoja. Relaation otsake on myös jokaisen monikon otsake. Visuaalisessa esityksissä relaatio on taulukko ja monikko taulukon rivi.

### 2.2 Relaatioalgebran operaatiot

Liitos (join) on operaatio muotoa  $A \bowtie B$ , jossa  $A$  ja  $B$  ovat relaatioita. Liitos tuottaa relaation, joka on kaikkien kombinaatioiden joukko  $A:n$  ja  $B:n$  samoista yhteisistä attribuuteista.

Kuva 1: Relaatiomalliin perustuva tietokanta



Valinta (selection) on muotoa  $\sigma_{ehto}(A)$ , jossa *ehto* on jokin loogisilla operaatioilla  $=$ ,  $\neq$ ,  $\leq$ ,  $\geq$ ,  $\wedge$ ,  $\vee$  vertailtavissa oleva ehto. Valinta tuottaa relaation, joka on joukko kaikista relaation monikoista joille pätee valinnan ehto.

Projektio (projection) on muotoa  $\pi_{a_1, \dots, a_n}(A)$ , jossa  $a_1, \dots, a_n$  on joukko attribuuttien nimiä. Projektio poimii relaatiosta alijoukon joka sisältää annetut attribuutit.

## 2.3 Optimoijan tavoitteet

Tietokantakyselyjen optimoinnilla viitataan tietokantakyselyn suorittamiseen mahdollisimman tehokkaasti. Optimoinnin tavoitteena on joko maksimoida suorituskky annetuilla resursseilla tai minimoida resurssien käyttö. Jarke ja Koch määrittivät artikkelissaan [JK84] mitattaviksi resursseiksi suorittimen ja muistin käytön sekä kommunikointikustannukset. Teorey ja Fry [TF82] huomasivat optimoijan vaikuttavan suorittimen palvelu aikaan (service time), suorittimen jonotusaikaan, I/O:n palvelu aikaan, I/O:n jonotusaikaan ja lukittumisen viiveeseen. Osa tutkimuksista, kuten Kooi:n väitöskirja [Koo80] kuitenkin sivuuttavat suorittimen käytön kokonaan.

Muistin käyttö jakautuu tallennuskustannukseen sekä ulkomuistiin pääsyn kustannukseen. Tallennuskustannuksella tarkoitetaan ulkomuistin sekä puskurimuistin käyttöä, ja se tulee aiheelliseksi kun muistin käyttö aiheutuu pullonkaulaksi. Kommunikointikustannukset käsittävät tiedon viennin tallennuspaikasta laskentapaikkaan ja edelleen tulosten esityspaikkaan. Ne jakautuvat kommunikaatioväylän käyttökustannukseen ja tiedonsiirrosta aiheutuvaan suorittamisen viiveeseen.

Resurssin merkitys riippuu tietokantatyypistä. Jarke ja Koch erittelivät hajautetuissa tietokannoissa kommunikointikustannukset hallitseviksi kustannuksiksi, kun taas paikallisesti hajautetuissa tietokannoissa kaikilla resursseilla on sama painoarvo. Jarken ja Kochin mukaan keskitetyissä tietokannoissa ulkomuistiin pääsyn kustannus ja prosessorin käyttö ovat oleellisia. Tässä tutkielmassa keskitymme erityisesti keskitettyjen tietokantojen optimointiin.

## 2.4 Optimoijan historia

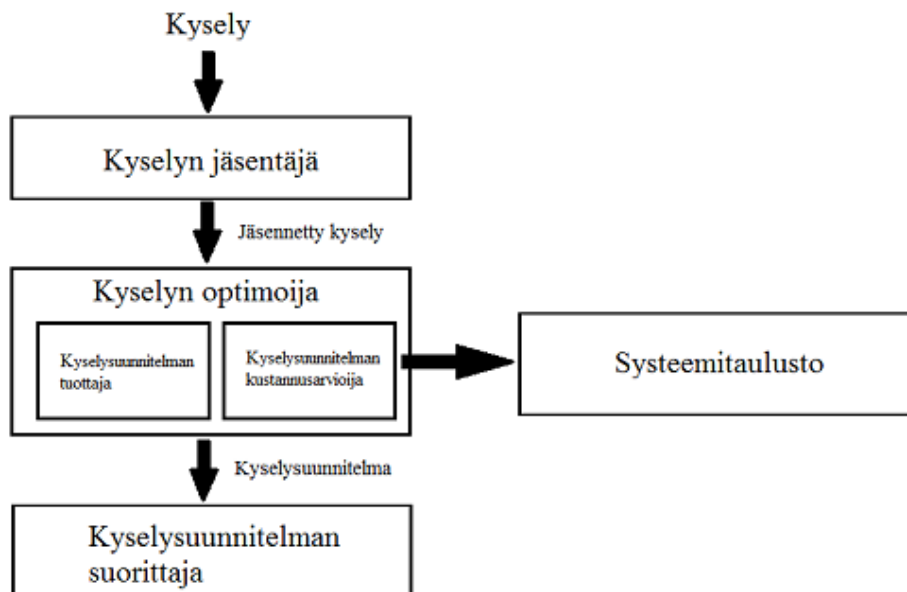
Kun Coddin relaatiomallin pohjalle luotiin sitä toteuttavia kieliä, nousi vuonna 1974 kehitetty SQL nopeasti käytetyimmäksi. SQL:n myötä optimoinnista tuli osa järjestelmän toiminnallisuutta, sillä SQL tarjosi deklaraatiivisuutensa vuoksi useita tapoja toteuttaa kukin kysely. Ennen relaatiomallin käyttöä optimointi tehtiin käsin. Selinger et al. esittelivät artikkelissaan [SAC<sup>+</sup>79] System R-tietokantaohjelmiston OPTIMIZER-komponentin, joka on ensimmäisiä relaatiomalliin pohjautuvia kyselyn optimoijia. OPTIMIZER esitteli dynaamisen hakualgoritmin kyselysuunnitelmien luomiseen, ja se on käytössä hieman muunneltuna käytännössä kaikissa kaupallisissa järjestelmissä [Ioa96].



### 3 Tietokantakyselyn prosessointi

Tietokannan hallintajärjestelmän suorittama SQL-kyselyn prosessointi sisältää useita vaiheita. Kuva 2 esittää kyselyn optimointikerroksen ja suorituserroksen hallintajärjestelmän sisällä. Alempana analysoimme komponenttien toimintaa tarkemmin.

Kuva 2: Kyselyn jäsentäminen, optimointi ja suoritus [RG03]



#### 3.1 Kyselyn jäsentäminen

Kyselyn prosessointi alkaa kyselyn jäsentäjän suorittamalla kyselyn syntaksin validoinnilla. [SAC<sup>+</sup>79] Osa hallintajärjestelmistä, kuten Oracle 11g, validoi myös samalla semantiikan oikeellisuuden [Ora09]. Syntaksin validoinnissa jäsentäjä tarkastaa kyselyn lauseopin oikeellisuuden. Semantiikan validoinnissa tarkastetaan objektien aitous, kyselyn yksiselitteisyys, oikeus haettavaan tietoon ja muuttujien tyypin sopivuus sarakkeiden tyyppeihin. Useat hallintajärjestelmät myös tallentavat kyselyt validoinnin jälkeen talteen, jotta

samaa kyselyä ei tarvitse jäsentää ja optimoida uudelleen. Yksi esimerkiksi kyselyjä tallentavasta hallintajärjestelmästä on Oracle Database, jossa tallennuspaikkaa kutsutaan nimellä Shared Pool [Ora05].

Seuraavaksi jäsentäjä jakaa kyselyn lohkoihin (block) siten, että yhdessä lohkoissa on täsmälleen yksi SELECT-lause, yksi FROM-lause ja korkeintaan yksi WHERE-, GROUP BY- ja HAVING-lause [RG03]. Kyselyn mahdollisesti sisältämät alikyselyt muodostavat kukin oman lohkonsa. Alikyselyitä tarkastellaan kappaleessa 4.3.

Jokainen lohko jäsennetään puuksi, joka on kyselyn algebrallinen esitysmuoto [MJ12]. Puun solmu sisältää yhden operaation kyselyn suorittamiseksi, ja sillä on nolla tai useampi alisolmu joiden ulostuloa (output) käytetään sen syötteenä. Esimerkiksi join-operaatiossa solmulla on kaksi alisolmuja, joille toteutetaan join-operaatio ja sort-operaatiolla on yksi alisolmu joka järjestetään. Lehtisolmut ovat solmuja jotka suorittavat hakuja (scan) levyiltä ja palauttavat saadut tulokset. Puu suoritetaan lehtisolmuista juureen.

Tämän jälkeen monimutkaiset kyselyt uudelleenkirjoitetaan (rewrite) soveltamalla niihin muutossääntöjä [Ioa96]. Pirahesh et al. tutkivat uudelleenkirjotusta Starburst-hallintajärjestelmän osalta artikkelissa [PHH92], ja määrittivät uudelleenkirjoituksen tavoitteiksi tehdä kyselyistä mahdollisimman deklarativisia ja suorittaa luonnollisia heuristiikkoja, kuten predikaattien siirtämistä mahdollisimman aikaiseen vaiheeseen.

### 3.2 Kyselyn optimointi

Kun kysely on jäsennetty ja mahdollisesti uudelleenkirjoitettu, lähetetään se kyselyn optimoijalle. Kyselyn optimoija hakee tietokannan systeemitaulustoon tallennettua tilastotietoa kyselyyn liittyvistä relaatioista ja relaatioihin liittyvistä saantipoluista (access path). Tilastotietoa käytetään kyselyn suo-

rituskyvyn arviointiin. Saantipolku on menetelmä jolla taulurivit haetaan taulusta, ja se muodostuu joko tiedoston lukemisesta tai indiksien käytöstä. Selinger et. al. tutkivat kattavasti saantipolkujen kustannusarviointia artikkelissaan [SAC<sup>+</sup>79].

Mikäli kyselyn semantiikkaa ei ole vielä tarkastettu, tarkastaa optimoija kyselyn semantiikan oikeellisuuden ja kyselyn tyyppien sopivuuden sarakkeisiin ja operaatioihin systeemitaulun tiedon pohjalta. Optimoija määrittää lohkojen suoritusjärjestyksen ja käy läpi saantipolut jokaisen lohkon FROM-lauseen relaatioiden lukemiseen. Mikäli lohossa on useampi relatio, arvioi optimoija join-operaation järjestyksen ja suoritustapojen suorituskyvyt ja valitsee tehokkaimman algoritmin operaatioiden suorittamiseen. Optimoija valitsee jokaiselle lohkolle valikoivimman, vähiten resursseja käyttävän saantipolun ja rakentaa niistä kyselysuunnitelman [SAC<sup>+</sup>79].

### **3.3 Kyselyn suorittaminen**

Seuraavassa vaiheessa kysely suoritetaan käyttämällä optimoijan tuottamaa kyselysuunnitelmaa. Suorittamisessa kyselysuunnitelma muutetaan suoritettavaksi konekieleksi ja kyselyn lähteen mukaan joko suoritetaan tai tallennetaan muistiin myöhempää suorittamista varten.

## **4 Kyselysuunnitelmien tuottaminen**

Kyselyn optimoijan tulee tuottaa mahdollisimman suorituskykyisen kyselysuunnitelman sisältämä joukko käyttämättä tuottamiseen liikaa resursseja. Kappale on jaettu kolmeen osa-alueeseen, joista aluksi perehdymme kyselysuunnitelman rakenteeseen. Tämän jälkeen tutkimme algoritmeja kyselysuunnitelmien joukon luomiseen, sekä heuristiikkoja epäoptimaalisten

kyselysuunnitelmien karsimiseen. Luvun lopuksi tutkimme alikyselyjen suorittamista.

#### 4.1 Kyselysuunnitelma

Kyselysuunnitelma koostuu laajennetusta relaatioalgebrapuusta, jossa jokainen solmu kuvaa algebrallista operaatiota. Solmuun on liitetty tieto käytettävästä hakumetodista tiedon hakemiseen taulusta ja suoritusmetodista operaation suoritukseen. Kyselysuunnitelma sisältää kaikki tiedot jotka hallintajärjestelmä tarvitsee halutun tiedon hakemiseen tietokannasta. Tutkitaan seuraavaa SQL-kyselyä:

```
SELECT K.nimi
FROM Kirjat K, Teokset T
WHERE K.tid = T.tid AND K.kid = 5 AND T.arvosana > 3
```

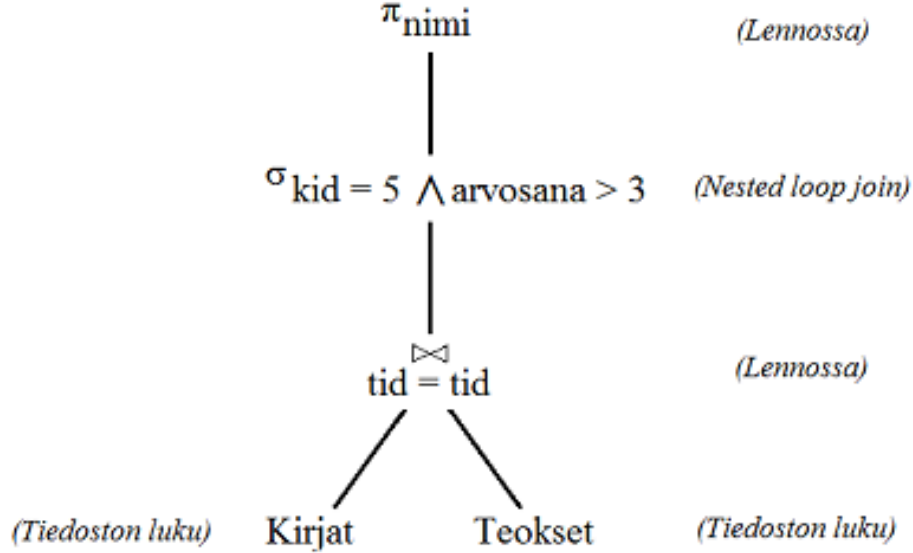
Kysely voidaan tulkita relaatioalgebrassa seuraavasti:

$$\pi_{nimi}(\sigma_{kid=5 \wedge arvosana > 3}(Kirjat \bowtie_{tid=tid} Teokset))$$

Kysely voidaan suorittaa esimerkiksi käyttäen join-operaatiossa nested loop join-algoritmia, jonka jälkeen jokaiselle riville suoritetaan valinta ja projektio. Kyselyä vastaava esimerkkikyselysuunnitelma esitetään kuvassa 3.

Join-operaatiossa voidaan käyttää hyväksi putkitusta (pipelining) [DSRS01], jossa operandi putkitetaan suorituksen aikana toiseen operaatioon ilman väliaikaista taulua tuloksen tallentamiseen, lennossa. Ilman putkitusta väliaikaiset tulokset tulee materialisoida. Putkitusta käytetään usein peräkkäisten join-operaatioiden toteuttamiseen, jolloin jokainen operaation palauttama operan-

Kuva 3: Kyselysuunnitelma esimerkkikyselylle



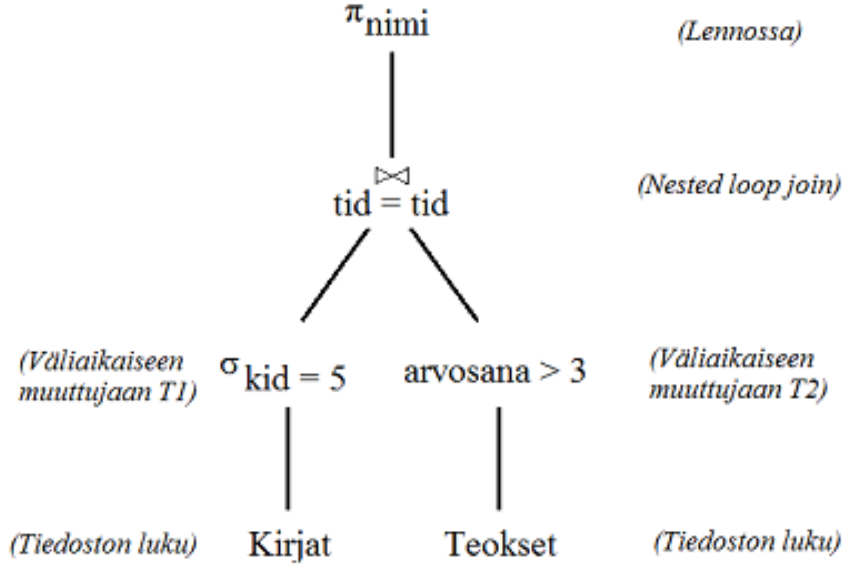
di voidaan syöttää seuraavan operaation parametriksi. Putkitusta voidaan käyttää operaation suorittavan algoritmin salliessa sen.

Usein tehokkaampi tapa kyselyn suorittamiseen on suorittaa valinnat mahdollisimman aikaisessa vaiheessa [RG03]. Esimerkkikyselyssä tauluille suoritetaan kullekin valinta erikseen, joten suorittamalla ne ennen join-operaatiota voidaan vähentää yhdistettävien alkioden määrää. Tehokkaampi kyselysuunnitelma aikaisilla valinnoilla, tallentaen valinnat väliaikaismuuttujiin T1 ja T2, esitetään kuvassa 4. Edelleen tehokkaampi tapa olisi välikaikaiseen muuttujaan tallentamisen sijaan putkittaa valinta-operaatiosta alkiot suoraan join-operaatioon.

## 4.2 Hakualgoritmit

Kyselyn optimoija tarvitsee tehokkaan algoritmin mahdollisten kyselysuunnitelmien luomiseen. Jarke ja Koch määrittelivät artikkelissaan [JK84] kak-

Kuva 4: Suorituskykyisempi kyselysuunnitelma erimerkkikyselylle



si tapaa kyselysuunnitelman valintaan. Ensimmäisessä tavassa arvioidaan jokaisen erillisen kyselysuunnitelman kustannus, jolloin hyvä suunnitelma löydetään mutta optimointiin kulunut aika on suuri. Toisessa tavassa kustannus lasketaan inkrementaalisesti niiden rakentamisen aikana, ja suorituskyvyltään huonoksi havaitut kyselysuunnitelmat karsitaan pois. Selinger et al. esittelemä dynaaminen algoritmi [SAC<sup>+</sup>79] on toisen tavan laajennus, jossa algoritmi arvioi operaation ja sen mahdolliset vaikutukset seuraaviin operaatioihin kerrallaan.

Kyselysuunnitelmat sisältävä hakualue voi kasvaa erittäin suureksi kyselyn ollessa laaja. Useat optimoijat käyttävät heuristiikkoja, kuten valinnan suorittamista mahdollisimman aikaisin tai vain tietynlaista join-operaatioiden järjestyksen hyväksymistä, pienentääkseen kyselysuunnitelmien määrää. Optimoija voi näin karsia tarkasteltavien kyselysuunnitelmien määrää. Tavoitteena on pitää hakualue mahdollisimman pienenä, sisältäen kuitenkin optimaalisen suunnitelman [JK84]. Kappaleessa 4.2.1 tutustutaan tarkemmin dynaamisiin

algoritmeihin sekä kappaleessa 4.2.2 vaihtoehtoisin algoritmeihin hakualueen läpikäymiseen, kuten sääntöihin perustuvaan Starburst-hallintajärjestelmälle kehitettyyn algoritmiin [Loh88]. Lopuksi kappaleessa 4.2.3 käsitellään yleisiä optimoijan käyttämiä heuristiikkoja.

#### **4.2.1 Dynaamiset algoritmit**

Selinger et al. System R:lle esittelemä algoritmi on dynaaminen karsiva ja tyhjentävä (exhaustive) hakualgoritmi. Dynaamista algoritmia pidetään standardina algoritmina optimoijalle, ja usean hallintajärjestelmän hakualgoritmi pohjautuu dynaamiseen algoritmiin sisältäen kuitenkin hieman variaatioita. Algoritmi rakentaa kaikki mahdolliset join-puut käyttämällä heuristiikkoja ja karsii alioptimaalisiksi tiedetyt puut. Selinger et al. esittelemän algoritmin käyttämät heuristiikat ovat predikaattien ja valintojen suorittaminen mahdollisimman aikaisin ja niiden putkitus, karteesisten tulojen välttäminen sekä pelkästään vasemmalta syvien puiden käyttö join-operaation suorituksessa. Heuristiikkoja tutkitaan tarkemmin kappaleessa 4.2.3. Algoritmi huomioi join-operaation suorittamiseen vain nested loop join- ja merging scans-algoritmit, joiden Selinger et al. huomasivat lähes aina tuottavan optimaalisimman tai lähes optimaalisimman suorituskyvyn muille paitsi erittäin pienille relaatioille.

#### **4.2.2 Muut algoritmit**

Dynaamisten algoritmien kilpailijoita ovat satunnaistetut algoritmit, kuten Iterative Improvement [NSS86], jossa algoritmi pyrkii dynaamisten algoritmien kyselysuunnitelmien tuottamisen sijaan rakentamaan yhden mahdollisimman hyvän suunnitelman. Algoritmi käy satunnaisesti läpi verkon solmuja, jossa jokainen solmu kuvaa yhtä kyselysuunnitelmaa johon on liitetty sen

kustannus. Iterative Improvement valitsee vain siirtoja alamäkeen, jossa kohdesolmun kustannus on pienempi kuin lähtösolmun, ja lopuksi palauttaa reitin varrelta löydetyn pienimmän kustannuksen sisältävän solmun.

Satunnaisten algoritmien lisäksi geneettiset algoritmit, kuten Bennet et al. esittelemä algoritmi [BFI91], ovat tutkimuksen kohteena. Geneettinen algoritmi koostuu kromosomeista, jotka ovat ratkaisuita ongelmaan ja vertailtavissa keskenään niiden kunnon (fitness) mukaan. Geneettinen algoritmi simuloi biologista ilmiötä, jossa kromosomeja verrataan keskenään niiden kunnon mukaan ja niistä luodaan jälkeläinen joka perii vanhemmilta ominaisuuksia. Heikommat kromosomit karsiutuvat pois ja suorituskypyisemmät jatkavat seuraavaan sukupolveen. Bennet et al. algoritmista kromosomit ovat binääripuita, joiden solmuissa on tieto kunkin operaation kustannuksesta. Suorituskypyisimmät jälkeläiset selviytyvät jatkoon, ja lopputuloksena saadaan optimaalinen ratkaisu.

### 4.2.3 Algoritmien heuristiikat

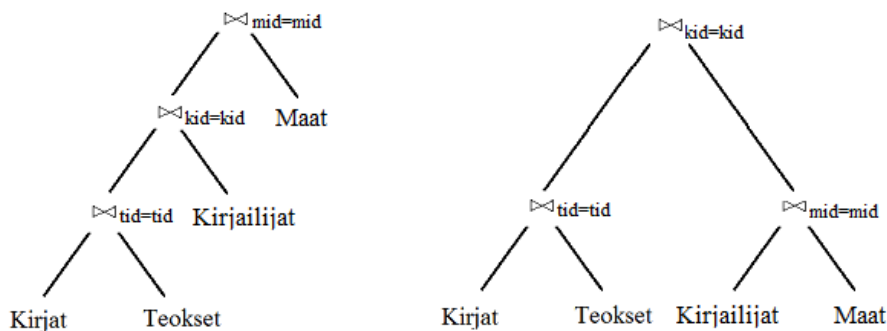
Optimoija voi suorittaa usean peräkkäisen join-operaation liittämisen monella eri tavalla. Ono ja Lohman tutkivat join-operaation suorittamisjärjestysten vaikutusta tarkemmin artikkelissaan [OL90], ja huomasivat join-operaation järjestyksen olevan hallitseva kustannus kyselyn optimoinnissa.

Tutkitaan kyselyä  $Kirjat \bowtie Teokset \bowtie Kirjailijat \bowtie Maat$ . Vasemmalta syväksi (left-deep) puuksi kutsutaan tapaa liittää kyselyt seuraavasti:  $((Kirjat \bowtie Teokset) \bowtie Kirjailijat) \bowtie Maat$ , jossa oikea lapsi on aina kantataulu. Kuva 5 havainnollistaa vasemmalta syvät ja lehtevät puut. Optimoijat käyttävät usein pelkästään vasemmalta syviä puita, sillä eri tapoja liittää join-operaatioita on join-operaatioiden määrän kasvaessa erittäin paljon. Käyttämällä vain vasemmalta syviä puita voidaan pienentää hakuaaluetta



[IK91], ja vasemmalta syvät puut mahdollistavat putkituksen. Oikea lapsisolmu eli join-operaation sisempi taulu täytyy aina materialisoida, sillä se täytyy käydä läpi jokaiselle ulomman taulun eli vasemman lapsisolmun monikolle [RG03].

Kuva 5: Vasemmalta syvät ja lehtevät puut



Ioannidis ja Cha Kang tutkivat artikkelissaan [IK91] left-deep puiden ja lehtevien (bushy) puiden suorituskykyeroja, ja huomasivat sekä lehtevien puiden että vasemmalta syvien puiden samanaikaisen käytön olevan helpompaa ja sen tuottavan parempia tuloksia kuin vain vasemmalta syvien puiden käytön. Lehtevä puu mahdollistaa suuremman joukon mahdollisia kyselysuunnitelmia, joten se usein sisältää vasemmalta syviin puihin verrattuna huonompia suunnitelmia mutta usein myös optimaalisimman suunnitelman.

Yleinen optimoijien käyttämä heuristiikka on myös predikaattien suorittaminen samaan aikaan relaatioiden ensimmäisen haun yhteydessä. Projektio pyritään suorittamaan suoraan muiden operaatioiden tulosjoukolle. Levy et al. esittelivät artikkelissaan [LSMS94] tavan siirtää predikaatteja lohkojen välillä, jolloin predikaatit voidaan suorittaa yhä aiemmin ja siten vähentää väliaikaisen tulosjoukon kokoa. He myös esittelivät aritmeettisesti vertailtavissa olevien predikaattien lisäksi tavan siirtää negatiivisia predikaatteja,

kuten NOT EXISTS ja EXCEPT. Predikaattien suorittaminen mahdollisimman aikaisin ei kuitenkaan aina tuota suorituskyyisintä tulosta. [RG03] Mikäli taulut on indeksoitu, voi valinta kadottaa tärkeät indeksit jolloin join-operaation suorittaminen hidastuu.

Tärkeä heuristiikka on lisäksi karteestien tulojen välttäminen join-operaation suorituksessa mikäli kysely ei erityisesti vaadi niitä. Heuristiikkaa toteuttava algoritmi tuottaa join-operaation suoritukseen vain vaihtoehdot jotka eivät sisällä karteesta tuloa. Chaudhuri määritteli artikkelissaan [Cha98] karteestien tulojen välttämisen toisinaan johtavan huomompaan suorituskyykyyn.

Laajennetuissa optimoijissa heuristiikkoja voidaan vaihtaa kyselykohtaisesti [Cha98], kuten toisinaan sallimalla lehtevien puiden läpikäyminen tai karteestien tulojen käyttäminen. On kuitenkin erittäin vaikeaa määritellä heuristiikkojen vaikutukset etukäteen. Yksi ratkaisu ongelmaan on geneettisten algoritmien [BFI91] käyttö parhaiden heuristiikkojen määrittämiseen.

### 4.3 Alikyselyt

Kyselyn predikaatin operandin ollessa toinen kysely puhutaan alikyselystä. Won Kim esitteli strategian [Kim82], jossa alikysely suoritetaan ennen ulompaa kyselyä ja saatu tulos liitetään ulomman kyselyn predikaatiksi. Kim jakoi alikyselyt viiteen luokkaan niiden sisältämien predikaattien mukaan. Tutkimme seuraavaksi näistä viidestä luokasta kahta luokkaa, joissa alikysely ei sisällä join-operaatiota joka viittaa ulompaan kyselyyn. Tällaisessa tapauksessa alikysely voidaan suorittaa omana lohkonaan.

```
SELECT nimi  
FROM Kirjat
```

```
WHERE hinta =  
    (SELECT AVG(hinta)  
    FROM Kirjat)
```

Esimerkkikyselyssä alikyselyn palauttama arvo lisätään ulompaan kyselyyn predikaatiksi niinkuin se olisi ollut osa ulompaa kyselyä. Esimerkkitapauksessa AVG(hinta) palauttaessa arvon 10 predikaatiksi saadaan "hinta = 10". Mikäli alikysely palauttaa joukon monikkoja, kuten seuraavassa tapauksessa:

```
SELECT nimi  
FROM Kirjat  
WHERE tid IS IN  
    (SELECT tid  
    FROM Teokset  
    WHERE arvosana > 3)
```

Ulompaan kyselyyn liitetään predikaatti "tid IS IN X", jossa X on alikyselyn palauttama joukko monikoita. Mikäli alikysely sisältää join-operaation viitaten ulompaan kyselyyn, joudutaan join-operaatio suorittamaan ennen alikyselyn suorittamista. Alikyselyn paluuarvo voidaan kuitenkin edelleen liittää ulomman kyselyn predikaatiksi.

## 5 Kyselysuunnitelmien kustannusarviointi

Kyselysuunnitelmien kustannusarvioinnissa optimoijan tulee arvioida kyselysuunnitelmien operaatioiden suorittamiseen kuluva aika sekä niiden tulosjoukon koko. Kyselysuunnitelman kustannus on sen sisältämien operaatioiden kustannusten summa, ja operaatioiden kustannukseen vaikuttaa olennaisesti

ti sen operandien koko. Yksittäisten operaatioiden kustannus arvioidaan käyttämällä systeemitaulustoon tallennettua tilastotietoa operandeihin liittyvistä tiedoista, kuten järjestyksestä ja koosta.

Optimoija käyttää kustannusarvointiin joko heuristisia arvioita tai kustannusmallia (cost model) [JK84], joista tutkimme tarkemmin kustannusmallia. Kustannusmallissa optimoija arvioi jokaisen operaation kustannuksen ja tulostuloksen koon, sillä operaation tulostulostulo on usein seuraavan operaation parametri. Kustannusmallin tuottaman kustannusarvion perusteella voidaan valita paras kyselysuunnitelma. Kappaleessa 5.1 tutustutaan tarkemmin systeemitaulustoon tallennettavaan tilastotietoon, ja kappaleessa 5.2 käsitellään systeemitauluston tilastotiedon pohjalta tehtävää kyselysuunnitelman kustannusarvointia.

## 5.1 Systeemitauluston tilastotieto

Systeemitaulusto sisältää tietokannan tilastollisen profiilin. Tilastotiedon avulla pyritään arvioimaan predikaattien ja operaatioiden kustannuksia käyttämällä tilastotietoa niiden operandeista. Mannino et al. tutkivat kattavasti tilastotiedon käyttöä kyselyn optimoinnissa artikkelissaan [MCS88]. Heidän mukaan tarkka tilastotiedon tallentaminen on tärkeää kyselyn optimoinnille, mutta liian täsmällinen tallentaminen aiheutuu rasitteeksi.

Artikkelissa tilastollinen profiili jaettiin neljään kategoriaan: (1) keskitietoihin kuten moodi, mediaani ja keskiarvo, (2) hajontaan kuten varianssi sekä pienin ja suurin arvo, (3) kokoon kuten mahtavuus ja eri arvojen lukumäärä sekä (4) frekvenssin jakaantumiseen kuten normaalius ja tasaisuus. Systeemitaulusto sisältää myös jokaisesta taulusta tiedot sen nimestä ja tiedoston nimestä, attribuuttien tyypeistä ja nimistä, indekseistä ja niiden nimistä ja hakuavaimista sekä yleisistä tiedoista kuten sivukoosta ja puskurimuistin

koosta. Hallintajärjestelmät tyypillisesti tallentavat tilastotiedon systeemitaulustoon histogrammeihin [?], joissa tieto jaetaan lohkoihin. Optimoija voi tällöin ladata muistiin vain kulloinkin relevantit lohkot.

Bruno et al. tarkastelivat tutkimuksessaan [BC02] tilastotiedon laajentamista väliaikaisiin tuloksiin, ja he huomasivat ratkaisun tuottavan parempia kyselysuunnitelmia kuin pelkän tietokannan taulun tilastotiedon käytön.

## 5.2 Tulosjoukon koon arviointi

Predikaatin kustannus riippuu sen syöteen koosta ja järjestyksestä. Tutkitaan seuraavaa tapausta:

```
SELECT attribuutit
FROM relaatiot
WHERE ehto 1  $\wedge$  ehto 2  $\wedge$  ...  $\wedge$  ehto n
```

Kyselyn palauttamien monikkojen maksimimäärä on relaatioiden karteeminen tulo. Jokainen WHERE-ehto harventaa monikkojen määrää. WHERE-ehdon vaikutusta tulosjoukon kokoon voidaan mallintaa lisäämällä jokaiseen ehtoon vähennyskerroin, joka on oletettu suhde lähtöjoukosta tulosjoukkoon vain kyseisen ehdon osalta. Tulosjoukon koko voidaan siten arvioida kertomalla maksimijoukko vähennyskertoimien tulolla [RG03].

WHERE-lauseen ehtojen kertoimia voidaan laskea hyödyntämällä systeemitaulustoon tallennettua tilastotietoa. Selinger et al. määrittivät artikkelissaan [SAC<sup>+</sup>79] laskukaavoja vähennyskertoimien laskemiseen. He myös määrittivät oletuskertoimet relaatioille, joille arvioinnin kannalta olennaista tilastotietoa ei ole saatavilla. Oletetaan seuraavat tiedot:

$NKeys(I)$  = eri avainten lukumäärä indeksissä I

$F$  = vähennyskerroin

$sarake = arvo$

Tämän tyyppiselle ehdolle vähennyskerroin voidaan arvioida kaavalla  $F = \frac{1}{NKeys(I)}$ , jos sarakkeessa on indeksi kyseiselle relaatiolle. [SAC<sup>+</sup>79] Ilman indeksiä kyselyn optimoija käyttää kiinteää arvoa vähennyskerroimen arvioimiseen, joka esimerkiksi System R-relaatiotietokantaohjelmassa on 1/10.

$sarake1 = sarake2$

Tässä tapauksessa voidaan vähennyskerroin arvioida käyttäen kaavaa  $F = \frac{1}{MAX(NKeys(I1), NKeys(I2))}$  jos kummassakin sarakkeessa on indeksi. Lisäksi oletetaan, että jokaisesta pienemmän indeksin arvoa vastaa arvo toisesta indeksistä. Mikäli vain toisessa sarakkeessa on indeksi, voidaan kustannus laskea aiemmalla kaavalla käyttäen indeksin omaavaa saraketta. Mikäli kummassakaan sarakkeessa ei ole indeksiä, arvioidaan arvoksi 1/10.

Join-predikaatin suorittamisessa merkittävää kustannusarvioinnin kannalta on sen suorittava algoritmi sekä join-predikaattien järjestys. Nested loop join- sekä merging scans-algoritmit ovat yleisesti käytettyjä, ja jälkimmäinen vaatii liitettävien relaatioiden olevan järjestyksessä liitettävien attribuuttien mukaan. Optimoijan tulee tällöin ottaa arvioinnissa huomioon relaation järjestämiseen kuluvat resurssit. Mahdolliset indeksit vaikuttavat myös olennaisesti algoritmien kustannuksiin.

## 6 Yhteenveto

Kyselyn optimoijan tehtävä on tuottaa mahdollisten kyselysuunnitelmien joukko, arvioida niiden kustannus tilastotiedon pohjalta ja valita niistä

paras. Kustannus koostuu kyselysuunnitelman suorittamiseen käytetyistä resursseista.

Kyselysuunnitelmien tuottamisessa kaikkien suunnitelmien läpikäyminen on kuitenkin usein liian hidasta, joten kyselysuunnitelmien joukkoa pyritään karsimaan heuristiikkojen avulla. Heuristiikkojen käyttäminen ei ole triviaalia, sillä toisinaan paras kyselysuunnitelma karsitaan heuristiikan takia.

Kyselysuunnitelmien kustannusarviossa ajankohtainen ongelma on tilastotiedon optimaalinen tallentaminen. Liian tarkka tilastotiedon tallentaminen rasittaa tietokannan käyttöä, mutta auttaa kyselysuunnitelmien optimoinnissa.

## Lähteet

- [BC02] Bruno, Nicolas ja Surajit Chaudhuri: *Exploiting statistics on query expressions for optimization*. Teoksessa *Proceedings of the 2002 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, sivut 263–274. ACM, 2002.
- [BF191] Bennett, Kristin, Michael C Ferris ja Yannis E Ioannidis: *A genetic algorithm for database query optimization*. Computer Sciences Department, University of Wisconsin, Center for Parallel Optimization, 1991.
- [CAE<sup>+</sup>76] Chamberlin, D.D., M.M. Astrahan, K.P. Eswaran, P. P. Griffiths, R.A. Lorie, J. W. Mehl, P. Reisner ja B.W. Wade: *SEQUEL 2: A Unified Approach to Data Definition, Manipulation, and Control*. IBM Journal of Research and Development, 20(6):560–575, 1976, ISSN 0018-8646.
- [Cha98] Chaudhuri, Surajit: *An overview of query optimization in relational systems*. Teoksessa *Proceedings of the seventeenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART symposium on Principles of database systems*, sivut 34–43. ACM, 1998.
- [Cod70] Codd, Edgar F: *A relational model of data for large shared data banks*. Communications of the ACM, 13(6):377–387, 1970.
- [DSRS01] Dalvi, Nilesh N, Sumit K Sanghai, Prasan Roy ja S Sudarshan: *Pipelining in multi-query optimization*. Teoksessa *Proceedings of the twentieth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems*, sivut 59–70. ACM, 2001.



- [IK84] Ibaraki, Toshihide ja Tiko Kameda: *On the optimal nesting order for computing N-relational joins*. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 9(3):482–502, 1984.
- [IK91] Ioannidis, Yannis E ja Younkyung Cha Kang: *Left-deep vs. bushy trees: An analysis of strategy spaces and its implications for query optimization*. Teoksessa *ACM SIGMOD Record*, nide 20, sivut 168–177. ACM, 1991.
- [Ioa96] Ioannidis, Yannis E: *Query optimization*. ACM Computing Surveys (CSUR), 28(1):121–123, 1996.
- [JK84] Jarke, Matthias ja Jurgen Koch: *Query optimization in database systems*. ACM Computing surveys (CsUR), 16(2):111–152, 1984.
- [Kim82] Kim, Won: *On optimizing an SQL-like nested query*. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 7(3):443–469, 1982.
- [Koo80] Kooi, Robert Philip: *The optimization of queries in relational databases*. 1980.
- [Loh88] Lohman, Guy M: *Grammar-like functional rules for representing query optimization alternatives*, nide 17. ACM, 1988.
- [LSMS94] Levy, Alon Y, I Singh Mumick ja Yehoshua Sagiv: *Query optimization by predicate move-around*. Teoksessa *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON VERY LARGE DATA BASES*, sivut 96–96. INSTITUTE OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE), 1994.
- [MCS88] Mannino, Michael V, Paicheng Chu ja Thomas Sager: *Statistical profile estimation in database systems*. ACM Computing Surveys (CSUR), 20(3):191–221, 1988.

- [MJ12] Mahajan, S.M. ja V.P. Jadhav: *An analysis of execution plans in query optimization*. Teoksessa *Communication, Information Computing Technology (ICCICT), 2012 International Conference on*, sivut 1–5, 2012.
- [MKR12] Mor, Jyoti, Indu Kashyap ja RK Rathy: *Analysis of Query Optimization Techniques in Databases*. *International Journal*, 47, 2012.
- [NSS86] Nahar, Surendra, Sartaj Sahni ja Eugene Shragowitz: *Simulated annealing and combinatorial optimization*. Teoksessa *proceedings of the 23rd ACM/IEEE Design Automation Conference*, sivut 293–299. IEEE Press, 1986.
- [OL90] Ono, Kiyoshi ja Guy M Lohman: *Measuring the complexity of join enumeration in query optimization*. Teoksessa *Proceedings of the 16th International Conference on Very Large Data Bases*, sivut 314–325. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1990.
- [Ora05] Oracle: *Understanding Shared Pool Memory Structures*, syyskuu 2005. <http://www.oracle.com/technetwork/database/focus-areas/manageability/ps-s003-274003-106-1-fin-v2-128827.pdf>.
- [Ora09] Oracle: *Oracle Database Online Documentation 11g Release 1*, 2009. [http://docs.oracle.com/cd/B28359\\_01/server.111/b28318/sqlplsql.htm](http://docs.oracle.com/cd/B28359_01/server.111/b28318/sqlplsql.htm).
- [Ora13] Oracle: *MySQL 5.0 Reference Manual*, 2013. [http://docs.oracle.com/cd/E17952\\_01/refman-5.0-en/controlling-optimizer.html](http://docs.oracle.com/cd/E17952_01/refman-5.0-en/controlling-optimizer.html).

- [PHH92] Pirahesh, Hamid, Joseph M Hellerstein ja Waqar Hasan: *Extensible/rule based query rewrite optimization in Starburst*. Teoksessa *International Conference on Management of Data: Proceedings of the 1992 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, nide 2, sivut 39–48, 1992.
  
- [RG03] Ramakrishnan, R. ja J. Gehrke: *Database Management Systems*. McGraw-Hill international editions: Computer science series. McGraw-Hill Education, 2003, ISBN 9780072465631.
  
- [SAC<sup>+</sup>79] Selinger, P Griffiths, Morton M Astrahan, Donald D Chamberlin, Raymond A Lorie ja Thomas G Price: *Access path selection in a relational database management system*. Teoksessa *Proceedings of the 1979 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, sivut 23–34. ACM, 1979.
  
- [TF82] Teorey, Toby J ja James P Fry: *Design of database structures*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 1982.