5.2 Samanaikaisuuden hallinta

Tietokannalla on tyypillisesti useita samanaikaisia käyttäjiä (ohjelmia/ihmisiä).
On toivottavaa, että
- yhdenkään käyttäjän toiminta ei hidastuisi kohtuuttomasti, vaikka muita käyttäjiä olisi runsaastikin (ainakaan toiminta ei saisi estyä kokonaan)
- tietokanta säilyy eheänä eli että jokaisen transaktion toiminnot pysyvät periaatteessa loogisesti erillään muiden transaktioiden toiminnoista (eristyvyys; välttämätön ominaisuus)

Esim. nosto pankkitililtä:
- useat transaktiot generoituvat samasta proseduurista
  tilinosto(X, summa):
  (X = tietyn tilin saldo tili-relaatiossa, alussa esim. 2000)

T1	T2
read_item(X, v)	read_item(X, u)
v:=v-500;	u:=u-1000;
write_item(X, v)	write_item(X, u)

- jos T1 ja T2 alkavat suunnilleen samaan aikaan ja etenevät vuorotellen 'huonossa kontrollissa', voi tilin X saldo olla lopussa 1500, 1000 tai 500 markkaa

Hyvä kontrolli olisi esimerkiksi se, että T1 suoritetaan kokonaan ennen transaktiota T2 tai päinvastoin.
Yleistettynä tämä sarjallinen suoritus aiheuttaa kuitenkin joidenkin transaktioiden huomattavan viivästymisen (pahimmillaan suorituksen estymisen, jos käynnissä oleva ei pääse ollenkaan loppuun).

Samanaikaisuuden hallinnan alijärjestelmän tehtävänä on lieventää hallitusti sarjallisuuden vaatimusta eli sallia rinnakkkaisuutta, mutta eliminoida sen haitat.

Transaktiohistoria eli ajoitus (schedule) = se järjestys, jossa eri transaktioiden luku- ja kirjoitusoperaatiot suoritetaan.

Esim. sarjallinen historia:

```
T1:  read_item(x1, v1)
T1:  write_item(x1, v1)
T1:  commit;
T2:  read_item(x2, u2)
T2:  read_item(x1, u1)
T2:  write_item(x1, u3)
T2:  commit;
```

tai:
T2, T2, T2, T2, T1, T1, T1

Transaktiojoukon jokainen sarjallinen ajoitus on oikea; vrt. eristyvyyden määrittely.
(oikeellisuus eli C-ominaisuus vaaditaan tietysti myös)

Huom. Kahden sarjallisen ajoituksen tulos ei ole aina sama, jos transaktiot eivät ole riippumattomia.
(esim. tililtäotto, tililepano, jos saldo ei alussa riitä)

Rinnakkaisessa ajoituksessa on ainakin jokin vaihe, jossa on samanaikaisesti kesken enemmän kuin yksi transaktio. Rinnakkaisia ajoituksia on tyypillisesti monia: transaktion vuoro voi päättyä melkein missä kohdassa tahansa (käytännössä esim. siirräntäoperaation kohdalla; vrt. käyttöjärjestelmätason prosessinhallinta).

Rinnakkainen ajoitus on oikea, jos se on ekvivalentti jonkin sarjallisen ajoituksen kanssa. Ekvivalenssi voidaan määritellä eri tavoilla.

Esimerkiksi ajoitus

```
T1:  read_item(x1, v1)
T2:  read_item(x2, u2)
T1:  write_item(x1, v1)
T1:  commit;
T2:  read_item(x1, u1)
T2:  write_item(x1, u3)
T2:  commit;
```

on ekvivalentti ajoituksen (T1; T2), mutta ei ajoituksen (T2; T1) kanssa.

- tulosekvivalenssi: sama tulos
  (ei riitä! esim. x := x + 10, x := x * 1.1 sattumalta ...)
- konfliktiekvivalenssi:
  konfliktoivat operaatiot samassa järjestyksessä
- näkemysekvivalenssi:
  luetaan kummassakin saman write-lauseen tulos,
  kummassakin sama viimeinen write-lause

Ajoitus on sarjallistuva (serializable), jos se on ekvivalentti jonkin sarjallisen suorituksen kanssa. Ekvivalenssi määritellään yleensä konfliktiekvivalenssina: siis keskenään konfliktoivien eli 'vaarallisten' operaatioiden järjestys säilyy ajoituksissa samana.

Operaatiot konfliktoivat, jos
1) ne kuuluvat eri transaktioihin,
2) ne kohdistuvat samaan tietoalkioon, ja
3) ainakin toinen operaatio on write-operaatio.

Esimerkkejä samanaikaisuusongelmista:

1° 'lost update' -ongelma

Tilinosto-esimerkissä esim. seuraava ajoitus:

T1	T2
read_item(X, v);	
v:=v-500;	
	read_item(X, u);
	u:=u-1000;
write_item(X, v);	
commit;	
	write_item(X, u);
	commit;

johtaa tulokseen X = 1000; transaktion T1 tekemä X-päivitys häviää, kun T2 'kirjoittaa sen päälle'.

Ongelma kuuluu luokkaan 'toistokelvoton luku': read_item(X,u) tuottaa T2:ssa ennen T1:n tekemää päivitystä eri arvon kuin se tuottaisi päivityksen jälkeen suoritettuna.

2° tilapäisen päivityksen ongelma

```
        T1                          T2
read_item(X, v);
v:=v-500;
write_item(X, v);
                                read_item(X, u);
                                u:=u-1000;
                                write_item(X, u);
                                commit;
abort;
```

Tässä on kysymyksessä 'likainen luku' (dirty read): T2 lukee T1:n 'tilapäisesti' päivittämän arvon, joka kuitenkin peruuntuu T1:n päättyessä abort-operaatioon.

(tulos = 500, vaikka vain T2 toteutuu)

3° Koosteoperaation suoritus muiden transaktioiden rinnalla

Esim. summan lasku voi johtaa eri tuloksiin riippuen siitä, mitkä muut transaktiot ovat jo ehtineet päivittää summauksen kohteena olevia tietoalkioita ja mitkä tekevät sen vasta myöhemmin.

```
   T1              T2              T3
s := 0
s := s + u      u := u + x      v := v – y
s := s + v        - missä kohdassa nämä ?
s := s + w
```

Esimerkit rikkovat transaktioiden eristyvyyttä vastaan.

Eristyvyysrikkomuksissa on kolme päätyyppiä eli eristyvyysanomaliaa:

1° likainen kirjoitus (dirty write)
   transaktio kirjoittaa toisen, sitoutumattoman, transaktion kirjoittaman tietoalkion päälle
2° likainen luku (dirty read)
   transaktio lukee likaisen eli ei-pysyvän tietoalkion arvon
3° toistokelvoton luku (unrepeatable read)
   toinen transaktio kirjoittaa T1:n lukeman tietoalkion ennenkuin T1 sitoutuu

Likainen kirjoitus:

```
T1:  write-item(X, u);
        ...
T2:  write_item(X, v);
        ...
T1:  commit;
```

T2:n write_item on tässä likainen. Jos T1 ei sitoudu, vaan suorittaa rollback-toiminnon, write_item on silti likainen.

Esim. Tietokannan eheysrajoite: X = Y
T1 asettaa X := Y := 1; T2 asettaa X := Y := 2
(kumpikin transaktio on siis selvästi oikeellinen)

Seuraava ajoitus rikkoo tietokannan eheyden (lopputulos: X = 2, Y = 1):

```
T1:  u:=1;
T1:  write_item(X, u);
     T2:  v:=2;
     T2:  write_item(X, v);
     T2:  write_item(Y, v);
     T2:  commit;
T1:  write_item(Y, u);
T1:  commit;
```

T2:n operaatio write_item(X, v) on likainen kirjoitus (muut kirjoitusoperaatiot ovat puhtaita).

Likainen luku:
   transaktio T1 lukee toisen transaktion T2 kirjoittaman tietoalkion ennenkuin T2 sitoutuu tai peruuntuu

```
T1:  write_item(X, u);
        . . .
T2:  read_item(X, v);
        . . .
T1:  commit;        (tai T1: rollback)
```

Esim. Tietokannan eheysrajoite X > 0, Y > 0
T1 asettaa X:lle arvon 1; T2 asettaa Y:lle saman arvon kuin X:llä on.

```
T1:  u := 0;
T1:  write_item(X, u);
     T2:  read_item(X, v);
     T2:  write_item(Y, v);
     T2:  commit;
T1:  u := 1;
T1:  write_item(X, u);
T1:  commit;
```

Tässä T2:n lukuoperaatio on likainen, koska T1 ei ole lukuhetkellä sitoutunut (ja on kirjoittanut T2:n lukeman arvon).

Myös seuraava ajoitus rikkoo tietokannan eheyden:

```
T1:  u := 0;
T1:  write_item(X, u);
     T2:  read_item(X, v);
T1:  rollback;
     T2:  write_item(X, v);
     T2:  commit;
```

Tulos: X = 0, transaktiot yksinään ovat oikeellisia.

Toistokelvoton luku:
ks. tilinostoesimerkin menetetty päivitys

SQL2:ssa on lause SET TRANSACTION, jolla sovellusohjelmassa voidaan valita aloitettavan transaktion eristyvyystaso (isolation level). Mahdolliset tasot vaativuudeltaan nousevassa järjestyksessä:

1) lue sitoutumatonta (read uncommitted):
transaktio saattaa lukea likaista tietoa tai toistokelvottomasti, mutta ei kirjoita likaista

2) lue sitoutunutta (read committed)
transaktio saattaa lukea toistokelvottomasti, mutta ei kirjoita eikä lue likaista

3) toistokelpoinen luku (repeatable read)
transaktio ei kirjoita eikä lue likaista eikä lue toistokelvottomasti

4) sarjallistuva (serializable)
kuten 3; lisäksi ns. haamuilmiöiden esiintyminen on kielletty

Oletustaso on standardissa sarjallistuvuus; käytännössä esimerkiksi Oraclessa taso 2.

Eristyvyystaso on yhteydessä samanaikaisuuden hallinnan käytäntöön, esim. lukitusperiaatteeseen. Ankara (strict) kaksivaiheinen lukituskäytäntö takaa transaktioille eristyvyystason 3.

Korkea eristyvyystaso rajoittaa samanaikaisia operaatioita. Transaktion eristyvyystaso voidaan asettaa oletusta alemmaksi, jos halutaan lisää samanaikaisuutta (riski korjausten tarpeelle kasvaa):

```
set transaction isolation level read committed;
    ...
update taulu set .....
commit;
```

(Oraclessa asetus voi siis olla kireämpi kuin oletus)

Haamuilmiö: erikoistapaus, joka syntyy, kun tietokantaan lisätään transaktiossa T rivi, joka täyttää toisen transaktion T' käsittelemien rivien valintaehdon. Esim.

```
T:   insert into employee values ( … , dno=5)
T':  select sum(salary) … where dno=5
```

Ajoitus (T, T') ottaa mukaan myös uuden työntekijän palkan, ajoitus (T',T) sitävastoin ei. Jos T' ehtii ottaa relaation käyttöönsä ennen lisäystä, kesken laskennan ilmestyvä uusi rivi on ns. haamutietue.

Lukituskäytäntö

Samanaikaisuuden hallinnan sisältämä kontrolli transaktioiden suoritukselle (eristyvyyden takaaminen) voidaan hoitaa useilla menetelmillä:

- asettamalla tietoalkioille lukkoja (locks):
  operointi on sallittu vain transaktiolle, joka on saanut haltuunsa tietoalkion lukon (käyttöoikeuden)
- seuraamalla transaktioiden ajoitusta niihin liittyvien aikaleimojen (timestamp) avulla
- ylläpitämällä tietoalkioiden useita arvoja ('vanha' ja 'uusi'):
  moniversiotekniikalla
- optimistisilla menetelmillä: antamalla transaktioiden suorittaa varsinaiset operaationsa ja tarkistamalla sitten validointivaiheessa, ettei suoritukseen sisälly ristiriitaisia tilanteita
  (operaatiot kohdistuvat tietoalkioiden tilapäisiin kopioihin, joten menetelmä on tavallaan moniversioinen)

Lukitusmenetelmä on yleisimmin käytössä.

Lukko (lock) on tietoalkion käyttöä valvova muuttuja.

Lukkoja on erityyppisiä:
- lukulukko (read lock; shared lock) antaa oikeuden lukea tietoalkion, mutta ei kirjoittaa sitä
  - lukulukko tiettyyn tietoalkioon voi samanaikaisesti olla usealla transaktiolla (lukuoperaatiot eivät häiritse toisiaan, 'shared')
- kirjoituslukko (write lock, exclusive lock) antaa oikeuden kirjoittaa (ja lukea) tietoalkion arvon
  - kirjoituslukko on poissulkeva, 'yksityinen': vain yhdellä transaktiolla voi olla samanaikaisesti kirjoituslukko tietoalkioon X
    - muilla ei voi olla edes lukulukkoa tietoalkioon X

(muitakin lukkotyyppejä on)

Lukkojen käyttöön liittyviä operaatioita

read_lock(X): lukulukon pyyntö
write_lock(X): kirjoituslukon pyyntö
unlock(X): X:n lukon vapautus

valvoo tkhj:n lukonhallitsin (lock manager).

Transaktiolla on enintään yksi lukko tietoalkioon kerrallaan.

Keskeiset tietorakenteet:
- lukkotaulu (lock table), joka on organisoitu tietoalkiokohtaisesti:
  - tietoalkion X tunniste
  - X:n lukon haltijoiden tiedot: transaktio (tunniste) ja lukon tyyppi
  - X:n lukkoa haluavien transaktioiden jono

- transaktiotaulu: jokaiselle transaktiolle tietue, josta alkaa transaktion hallussa olevien lukkojen (tietoalkioiden tunnisteiden) ketju

Lukkotaulusta saadaan nopeasti selville tietoalkion lukituksen tilanne. Organisointina voi olla esim. hajautusrakenne.
Transaktiotaulun avulla löydetään transaktion sitoutuessa tai peruuntuessa sen hallussa mahdollisesti olevat lukot, jotka on vapautettava.
(vrt. sitoutumiskäytäntö, s. 22)

Lukko-operaatioiden toiminta (suorittajana T):

read_lock(X): (rl(X) = X:n lukulukkojen määrä)
1. hae X:ää lukkotaulusta
2. jos X ei ole taulussa, vie X tauluun,
   aseta rl(X) := 0 ja mene askeleeseen 5
3. jos transaktiolla T on jo lukko X:ään, palaa
4. jos jollakin toisella transaktiolla on jo kirjoituslukko X:ään, aseta T lukon vapautumista odottavien transaktioiden jonoon lukkotaulussa
5. kirjaa lukkotauluun T:lle lukulukko X:ään (ja liitä X T:n lukkojen ketjuun transaktiotaulussa),
   aseta rl(X) := rl(X) + 1

write_lock(X):
1. hae X:ää lukkotaulusta
2. jos X ei ole taulussa, vie X tauluun ja mene askeleeseen 5
3. jos transaktiolla T on jo kirjoituslukko X:ään, palaa
4. jos jollakin toisella transaktiolla on jo luku- tai kirjoituslukko X:ään, aseta T lukon vapautumista odottavien transaktioiden jonoon
5. jos T:llä on jo lukulukko X:ään,
   korota (upgrade) se kirjoituslukoksi ja
   aseta rl(X) := 0;
   muuten kirjaa T:lle uusi lukko, kirjoituslukko, lukkotauluun

Askeleeseen 4 sisältyy siis mahdollinen lukon odotus, joka päättyy, kun lukonhallitsin vapauttaa vastaavan lukon ja 'herättää' transaktion.

unlock(X):
1. etsi X:ää vastaava tietue lukkotaulusta
2. jos X:ään on kirjoituslukko transaktiolla T,
   poista T lukonhaltijain joukosta ja herätä ensimmäinen odottavista transaktioista, jos niitä on;
   muuten (T:llä on lukulukko)
   aseta rl(X) := rl(X) - 1;
   jos rl(X) = 0, herätä ensimmäinen odottavista transaktioista, jos niitä on
3. jos odottavien jono oli tyhjä, poista X:n tietue lukkotaulusta

Herätetty transaktio jatkaa siis suoritustaan read_lock- tai write_lock-operaationsa askeleesta 4.
Lukon konversio voitaisiin periaatteessa suorittaa myös 'alaspäin': muuttamalla (downgrade) kirjoituslukko lukulukoksi.

Lukitusoperaatiot (lukonpyynnöt) read_lock(X) ja write_lock(X) voidaan ajatella vastaavia luku- ja kirjoitusoperaatioita read_item(X,v), write_item(X,v) edeltäviksi operaatioiksi transaktion suorituksessa.
Ne eivät kuitenkaan automaattisesti takaa transaktion sarjallistuvuutta; tarvitaan hyvin määritelty lukituskäytäntö.

Vastaesimerkki: Olkoon alussa X = 20, Y = 30 ja seuraava ajoitus:

```
        T1                      T2
  read_lock(Y);
  read_item(Y);
  unlock(Y);
                          read_lock(X);
                          read_item(X);
                          unlock(X);
                          write_lock(Y);
                          read_item(Y);
                          Y:= X + Y;
                          write_item(Y);
                          unlock(Y);
  write_lock(X);
  read_item(X);
  X:= X + Y;
  write_item(X);
  unlock(X);                      (tulos: X = 50, Y = 50)
```

Sarjallisen suorituksen tulos on joko
X = 50, Y = 80 (järjestys T1, T2)
X = 70, Y = 50 (järjestys T2, T1)
(Sarjalliset suoritukset antavat tässä eri tulokset, koska transaktiot eivät ole toisistaan riippumattomia.)

Kaksivaiheinen lukituskäytäntö korjaa tilanteen (s. 48).

Lukkojen varaaminen ja vapauttaminen käytännössä:

Samanaikaisuuden hallinta kuuluu (joko järjestelmän oletuksiin tai määritteleviin asetuksiin perustuen) tkhj:n tehtäviin.
Tietokantasovelluksen ohjelmoijan (tai kyselyjä tekevän käyttäjän) ei siten tarvitse huolehtia tietoalkioiden lukituksesta.

Esim. SQL:
select -lausetta suoritettaessa varataan lukulukkoja hakemisto- ja tietoalkioille sen mukaan kuin on tarvetta lukea ko. alkioita

insert-, update- ja delete -operaatioille varataan vastaavasti kirjoituslukkoja

Normaalisti lukot vapautetaan vasta transaktion päättyessä: sen sitouduttua tai peruunnuttua.
Vapautus tehdään lauseella
unlock(all),
joka vapauttaa kaikki transaktionsa lukot. (Ne löytyvät transaktiotaulun kautta.)

Transaktion päättymiseen asti pidettävä lukko on pitkäaikainen, aikaisemmin eksplisiittisesti vapautettavat lyhytaikaisia. Lyhytaikainen lukko vapautetaan normaalisti heti operaation jälkeen (vrt. edellinen esimerkki).

Esimerkiksi tietohakemistosivuihin ja varsinaisiin hakemistosivuihin (ISAM, B+ -puu) kohdistuvat lukot ovat yleensä lyhytaikaisia.

Sovelluksen ohjelmoija vaikuttaa lukkojen varausaikaan yleensä vain epäsuorasti määrittelemällä transaktiot ‘sopivan’ pituisiksi (mahdollisimman lyhyiksi).

Lukkojen granulaarisuus on tärkeä samanaikaisuuden asteeseen liittyvä tekijä. Lukittava ‘tietoalkio’ voi olla yksittäinen kenttä, tietue, sivu, taulu tai jopa koko tietokanta. Hienojakoinen granulaarisuus vaatii paljon lukkoja ja monimutkaista lukkojen hallintaa, mutta sallii maksimaalisen samanaikaisuuden.
Käytännössä on yleistä rivi-, sivu- tai taulukohtainen lukinta.

Oracle: rivilukkoja ja taululukkoja, paljon erilaisia tyyppejä.

- oletus: rivilukot
- lauseella ’lock table’ voidaan säädellä lukinnan laajuutta
  row share, row exclusively, share, exclusive, …
- lukitusalgoritmiin kuuluva odotus voidaan myös estää
  (nowait)

Kaksivaiheinen lukituskäytäntö
(2PL, two-phase locking)

Eristyneisyysanomaliat ovat mahdollisia, koska samaan tietoalkioon operointia ei rajoiteta tarpeeksi. Edellisessä esimerkissä (s. 45) kaikki lukot ovat (hyvin) lyhytaikaisia.

Kaksivaiheinen lukitus:
- mitään lukkoa ei vapauteta ennenkuin kaikki transaktion tarvitsemat lukot on varattu

→ transaktio jakaantuu kahteen vaiheeseen:
kasvuvaihe, jonka aikana kaikki lukot varataan,
kutistumisvaihe, jonka aikana lukot vapautetaan.

Lukulukon korotus kirjoituslukoksi tulkitaan lukon varaukseksi eli on tehtävä kasvuvaiheen aikana. (vastaavasti kirjoituslukon alennus lukulukoksi kutistumisvaiheessa)

Kaksivaiheinen lukitus voi olla perusmuodon lisäksi mm.
- ankara (strict): kaikki lukot vapautetaan vasta transaktion sitoutuessa (tai peruuntuessa)
- konservatiivinen: kaikki lukot varataan transaktion alussa
  - tulee tietää tarvittavien tietoalkioiden joukot:
    read-set ja write-set

(Huom. E&N esittelee useampia vaihtoehtoja:

- conservative: kuten edellä
- rigorous: kuten strict edellä
- strict: kirjoituslukot pidetään sitoutumiseen asti)

Konservatiivinen menetelmä:
- voi olla liian varovainen: transaktion vaikea päästä alkuun
- luku- ja kirjoitusjoukkojen määritys etukäteen hankalaa
+ transaktiot eivät voi lukkiutua

Ankara kaksivaiheinen lukitus on käytännössä yleisin.
Se takaa transaktion sarjallistuvuuden, jos kaikki transaktiot noudattavat samaa käytäntöä.

Käytännön merkitys: ei tarvitse tutkia erikseen ajoituksen sarjallistuvuutta (read/write-suhteiden verkko; verkon syklittömyys), lukkojen varaus- ja vapautusperiaate riittää.

> Transaktioista voidaan muodostaa verkko, jonka solmuina ovat transaktiot ja särminä transaktioita yhdistävät konfliktoivien operaatioiden (r/w, w/r, w/w) parit (sarjallistuvuusverkko). Jos verkossa on sykli, vastaava ajoitus ei ole sarjallistuva, muuten on.

Esim. seuraavat transaktiot toteuttavat 2PL-ehdon:

T1'	T2'
read_lock(Y);	read_lock(X);
read_item(Y);	read_item(X);
write_lock(X);	write_lock(Y);
unlock(Y);	unlock(X);
read_item(X);	read_item(Y);
X:= X + Y;	Y:= X + Y;
write_item(X);	write_item(Y);
commit;	commit;
unlock(X);	unlock(Y);

- lukkiutuma (deadlock) on mahdollinen!
  T1' varaa Y:n lukulukon, T2' X:n lukulukon
  - erilaisia menetelmiä lukkiutuman hoitamiseen

- esimerkissä lukulukon vapautus ei päästä toista transaktiota eteenpäin eli toiminta vastaa 2PL-käytäntöä
  (ei kuitenkaan ankaraa)
  - käytännössä tässä jompikumpi sarjallinen suoritus

Kuinka ankara 2PL estää eristyvyysanomaliat?

1° likainen kirjoitus

```
Esim.   T1:  write_lock(X);
             write_item(X, u);
                  T2:  write_lock(X);
                  T2:  write_item(X, v);
        T1:  commit;   (tai rollback;)
        T1:  unlock(X);
               . . .
```

Ajoitus ei ole mahdollinen, koska T2 ei voi saada X:n kirjoituslukkoa eikä siten tehdä likaista kirjoitusta.
Olennaista on, että T1:n kirjoituslukko on pitkäaikainen; yleisesti: kirjoittaja ottaa kirjoituslukon ja kaikilla muilla on pitkäaikaiset kirjoituslukot.

2° likainen luku

```
Esim.   T1:  write_lock(X);
        T1:  write-item(X, u);
                  T2:  read_lock(X);
                  T2:  read_item(X, v);
        T1:  commit;          (tai rollback;)
        T1:  unlock(X);
                              . . .
```

T2 ei voi saada edes lukulukkoa, kun X:llä on pitkäaikainen kirjoituslukko.
Huom. Lyhytaikainenkin lukulukko riittää estämään likaisen luvun, kun muilla on pitkäaikaiset kirjoituslukot.
(ei kuitenkaan takaa sarjallistuvuutta)

3° toistokelvoton luku

```
Esim.   T1:  read_lock(X);
        T1:  read_item(X, u);
                  T2:  write_lock(X);
                  T2:  write_item(X, v);
        T1:  commit;          (tai: rollback;)
        T1:  unlock(X);
               . . .
```

Toistokelvoton luku estyy: T2 ei voi saada kirjoituslukkoa X:ään eli ei voi muuttaa X:n arvoa, kun T1:llä on pitkäaikainen lukulukko. (Lyhytaikainen lukulukko ei riitä.)

On luontevaa ajatella, että sama lukituskäytäntö koskee kaikkia transaktioita. Transaktiokohtaisia muutoksia voidaan kuitenkin tehdä (eristyneisyystason asetus lauseella set transaction … - ei enää 2PL).

On helppo nähdä, että ankara 2PL rajoittaa usein 'liian paljon' samanaikaisuutta: tietyn tietoalkion lukko voitaisiin vapauttaa heti, kun siihen kohdistuvat operaatiot on tehty. Tätä 'hintaa' pidetään järkevänä verrattuna kunkin ajoituksen sarjallistuvuuden selvittämiseen erikseen.

Lukitus ja hakemistot

Kaksivaiheinen lukitus ei sovellu hyvin hakemistojen käsittelyyn:
- hierarkkisen hakemiston käsittely alkaa juuresta
- alempien tasojen ja tietosivujen käsittelyssä tarvitaan lukkoja myöhemmin, jolloin ei enää välttämättä tarvita ylempien tasojen sivuja

→ lukkojen vapautus vasta kutistusvaiheessa rajoittaa huomattavasti samanaikaisuutta

Useimmiten isäsivun lukko voitaisiin vapauttaa, kun lapsisivuun on saatu lukulukko. Jos tulee tarvetta päivittää hakemistosivua, varataan päivitystä varten lukko uudelleen.

Esim. B+ -puu:

1) konservatiivinen tapa:
varataan tasoittain kirjoituslukkoja; vapautetaan ne, kun on saatu lukko seuraavalle tasolle ja todettu, ettei tarvitse palata (sivulla on tilaa uudelle alkiolle)

2) optimistinen tapa:
varataan lukulukkoja tasoja alas edettäessä; jos lehtitaso jaetaan ja ylempää tasoa pitää päivittää, korotetaan lukulukkoja kirjoituslukoiksi (tarpeen mukaan)

Tapauksessa 1 käytetään siis rajoittavampia lukkoja, mutta lyhytaikaisesti; tapauksessa 2 yleensä jaettuja lukulukkoja pitempään.

Hakemistojen lukituksella voidaan vaikuttaa myös ns. haamutietueiden havaitsemiseen: tiheän hakemiston tapauksessa hakemistosivun lukitus estää päivittävää ja lukevaa transaktiota pääsemästä samanaikaisesti tietosivulle

esim. T: insert into employee values (… , dno=5)
T' select sum(salary) … where dno=5

- jompikumpi varaa hakemistosivun lukon eli rivin lisäys ei tapahdu kesken laskennan
(harva hakemisto: samoin, mutta estävä vaikutus ulottuu laajemmalle)

Datasivujen lukot / haamutietueet?
- dno = 5 –tietueet monella datasivulla => yksittäisen datasivun lukitus ei riitä
- dno = 5 –tietueet samalla datasivulla => kuten hakemistotapaus, sivun lukitus riittää

Lukkiutuma (deadlock)

- kaksi tai useampia transaktioita yrittää lukita jotakin toisen transaktion käytössä olevaa tietoalkiota: transaktiot ovat siis lukitusalgoritmeja suorittaessaan odottavien transaktioiden jonossa

Esim. T1', T2' sivulla 50

Mitä voidaan tehdä?

1) lukkiutuman estävä käytäntö
konservatiivinen 2PL: kaikki lukot alussa
- varataan paljon lukkoja turhan aikaisin
→ samanaikaisuus vähäistä
- vaikea tietää, mitä tietoalkioita tarvitaan

2) tietoalkioiden järjestykseen perustuva varaaminen
estää ristikkäiset varaukset
- järjestys? sen ylläpito?

3) no wait –periaate: transaktio ei odota koskaan, vaan käynnistyy myöhemmin uudelleen
(vuoro transaktiolle taattava 'joskus' – tai sovellus luopuu transaktiosta kokonaan, 'ei enää tarpeen')

4) aikaleimoihin perustuva lukkiutuman ratkaisu:
esim. nuorempi peruutetaan (aloitetaan myöhemmin uudelleen samalla aikaleimalla)
('wait – die')

5) lukkiutuman havaitseminen ja purku: odotusverkko
- odotusverkon ylläpito: verkon sykli merkitsee lukkiutuman syntymistä
- purku: peruutetaan jokin transaktio ja aloitetaan se myöhemmin uudelleen

Transaktioiden odotus lukinnassa tai lukkiutumia purettaessa voi johtaa nälkiintymiseen (starvation):

- lukon odotus: vaikka ei synny lukkiutumaa, jokin transaktio häviää aina kilpailun lukitusvuorosta
- ratkaisuja: FIFO, prioriteetin kasvatus odottaessa

- lukkiutuman purku: transaktio ei saa vuoroa uudelleen-aloituksissa (vrt. wait-die: alkuperäisen aloitusajan säilyminen)