# Virtuaalmälu



## Ülevaade

- Taust
- Lehekülgede laadimine nõudmisel
- Lehekülgede asendamine
- Leheküljeasenduse algoritmid
- Füüsilise mälu haldus
- Pekslemine (*trashing*)





## Taust

- Virtuaalmälu — kasutaja loogilise mälu füüsilisest mälust lahti sidumine
  - Ainult osa protsessi poolt vajatavast mälust on korraga füüsilises mälus
  - Loogiline aadressiruum saab seega olla oluliselt suurem kui füüsiline aadressiruum
  - Aadressiruume (aadressiruumide osi) saavad protsessid omavahel jagada
  - Võimaldab efektiivsemalt protsesse luua
- Virtuaalmälu saab realiseerida kahel viisil
  - Lehekülgede laadimine nõudmisel (*demand paging*)
  - Segmentide laadimine nõudmisel (*demand segmentation*)





## Lehekülgede laadimine nõudmisel

- Iga lehekülg laaditakse mällu alles siis, kui seda esimest korda vaja läheb
  - Vähem I/O pöördusi
  - Vähem mälu vaja
  - Kiirem reaktsiooniaeg
  - Rohkem protsesse
- Lehekülge vajatakse, kui keegi selle lehekülje poole pöördub
  - Vigane lehekülje aadress ⇒ lõpetame protsessi
  - Lehekülg pole mälus ⇒ toome ta mällu ja jätkame
- Sarnane lehekülgede saalimisele, aga „laisem“ mällu toomisel

## Kehtivuse lipp

- Kuidagi on riistvaraliselt vaja vahet teha, kas lehekülg on mälus või mitte
- Seome iga leheküljega kehtivuse lipu (*valid-invalid flag*)
- 1 — mälus, 0 — pole mälus
- Algul kõigil lehekülgedel 0 (algul ei too üldse ühtegi lehekülge mällu)
- Aadresside tõlkimisel vaatab riistvara seda bitti
  - Kui kehtivuse lipp on 0, siis genereerib riistvara leheküljele pöördumise vea (*page fault*)





## Leheküljele pöördumise viga

- Kui mingi lehekülje poole üldse kunagi pöördutakse, siis esimene pöördumine genereerib leheküljele pöördumise vea (püünise)
- OS vaatab oma leheküljetabelit ja otsustab, kas lehekülge polegi olemas või tuleb see lihtsalt mällu tuua
- Mällu toomine:
  - Otsida vaba füüsilise mälu kaader
  - Lugeda lehekülg kettalt sellesse kaadrisse
  - Panna leheküljetabelis vastava lehekülje kohta kehtivuse lipp püsti
  - Taaskäivitada viimane protsessorikäsk (see, mis püünise genereeris) — raskem kui pealtnäha tundub
    - $*$ Mäluploki liigutamine
    - $*$ Autoinkrement
    - $*$ Üks käsk võib mitu püünist genereerida enne edukat täitmist





## Lehekülgede asendamine

- Mis saab, kui pole ühtegi vaba füüsilise mälu kaadrit?
- Leida mälulehekülg, mis pole aktiivselt kasutusel
- Saalida see lehekülg välja
- Saalida selle asemele vajalik lehekülg
- $\Rightarrow$ lehekülgede asendamine
  - Mis algoritmi järgi valida asendatav lehekülg?
  - Kuidas on selle algoritmi jõudlusega?
- Sama lehekülge võidakse mällu tuua palju kordi





## Nõudmisel laadimise jõudlus

- *Page Fault*'ide osakaal $p$ $(0 \leq p \leq 1)$
  - $p = 0 \implies$ pole leheküljepöörduse vigu
  - $p = 1 \implies$ iga mälupöördus põhjustab lehekküljepöörduse vea
- Efektiivne juurdepääsuaeg (*Effective Access Time*)

$$EAT = (1-p) \times ma \; + \; p \times pft$$

  - $ma$ = mälupöördusaeg
  - $pft$ = page fault'i käskude kulu + lehekülje väljasaalimise aeg + lehekülje sissesaalimise aeg + käsu taaskäivitamise aeg
  - Domineerib lehekülje saalimise aeg
  - Lehekülge pole vaja välja saalida, kui teda pole modifitseeritud!

## Efektiivne juurdepääsuaeg — näide

- Olgu mälupöördusaeg $ma = 200\,ns$
- Olgu *page fault*'i serveerimiseks kuluv aeg $pft = 25ms$
- Siis $EAT = (1-p)\times 200 + p\times 25000000$
  $= 200 + 24999800\times p\ \ ns$
- Selleks, et $EAT$ oleks mälupöördusajast mitte rohkem kui 10% aeglasem, peab $p \leq 1/1249990 \cong 8\times 10^{-7}$





## Protsesside loomine

Virtuaalmälu annab võimalusi efektiivsemaks protsesside loomiseks:

- *Copy-on-Write*
  - Vanemprotsess ja lapsprotsess jagavad leheküljetabeleid esialgu
  - Leheküljed on mõlema jaoks readonly, esimesel kirjutamisel tehakse kummalegi koopia
  - Efektiivsem protsesside loomine, eriti exec() tegijatele
- Aadressiruumi kaudu nähtavad failid (*Memory-mapped files*)
  - mmap() primitiiviga seatakse faili sisu kättesaadavaks mingis aadressivahemikus
  - Esimene pöördumine loeb andmed mällu, faili sulgemine kirjutab kettale, vahepeal võib kah kirjutada
  - read()/write() vs mmap()





## Lehekülgede asendamine

- Mälu ülehõivamine (*overallocation, overcommiting*) — lubame protsessidele kokku rohkem mälu kui olemas on
- Kui reaalselt ka rohkem kasutatakse, tuleb lehekülgi asendama hakata
- Kasutame lehekülgede juures uut lippu *dirty* — märgib, et lehekülg on mälus modifitseeritud ja seega tuleb välja saalida enne vabastamist
- Viib lõpuni loogilise ja füüsilise mälu eraldamise — nüüd võivad nad sõltumatute suurustega olla





## Lehekülje asendamisega protsess

- Otsime kettalt sissesaalimiseks vajaliku lehekülje
- Otsime vaba füüsilise mälu kaadri:
  - Kui leiame, kasutame seda
  - Kui ei leia, valime leheküljeasenduse algoritmiga ohvriks mingi lehekülje, mida välja saalida ning saalime välja
- Loeme vajaliku lehekülje (värskesse) vabasse kaadrisse
- Uuendame leheküljetabeleid
- Taaskäivitame protsessi

# Leheküljeasenduse algoritmid

- Tahame madalaimat *page fault*'ide arvu
- Ette on antud kasutatavate kaadrite arv
- Algoritmide võrdlemiseks anname neile ette mingeid mälupöördusmustreid (näidisstringe) ja arvutame leheküljepöörduste vigade arvu
- Võime mäluaadresside pöördused grupeerida lehekülgede pöördusteks
- Üldiselt, mida rohkem kaadreid on kasutada, seda vähem leheküljepöörduste vigu tekib (aga mitte päris alati)





# FIFO leheküljeasendusalgoritm (1)

- Asendame lehekülje, mis on kõige varem mällu toodud
- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |

- Lihtne realiseerida
- OS võib kergesti välja visata tihedalt kasutatava lehekülje





# FIFO leheküljeasendusalgoritm (2)

- FIFO leheküljeasendusalgoritmi korral võib kaadrite arvu suurendamine viia leheküljepöördusvigade arvu suurenemiseni (nn. Belady anomaalia)
- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |





# Optimaalne algoritm (1)

- Asendame lehekülje, mida edaspidi kõige kauem ei kasutata
- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

- Pole realiseeritav (kust me tulevikku ette teame?)
- Kasulik teiste algoritmide hindamiseks (saavutab teoreetilise maksimumi)

# Optimaalne algoritm (2)

- Optimaalse algoritmi korral Belady anomaaliat ei esine
- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| | | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |





# LRU (*Least Recently Used*)

- Asendame kõige kauem mitte kasutatud lehekülje
- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

- Eeldatakse, et minevik on hea tuleviku ennustaja
- Kui see eeldus pole täidetud, siis võib käituda väga halvasti
- LRU algoritmi korral Belady anomaaliat ei esine





# LRU algoritm

- Näide:

| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 |
| | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| | | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |





# LRU realiseerimine

- Iga leheküljega seome mälupöördusaja loenduri (ajatempli)
  - Suurendatakse igal pöörusele sellele leheküljele
  - Ohvriks valitakse vähima loenduriga lehekülg
  - Kulukas realiseerida (vaja kontrollida kõik leheküljed)
- Haldame lehekülgede magasini topeltseotud listina
  - Leheküljele pöördumisel tõstame selle magasini tippu
  - Ohvriks valitakse magasini põhjas olev lehekülg
  - Samuti kulukas realiseerida (nõuab 6-e viida muutmist)

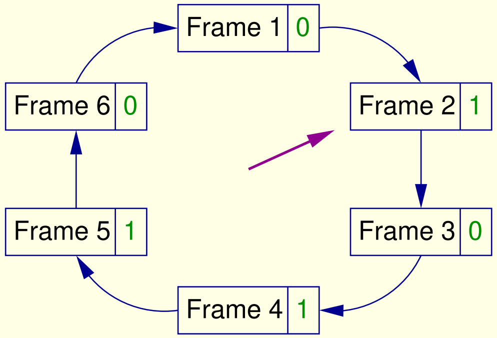
# LRU lähendused

- Kasutuse bitt (*reference bit*)
  - Iga leheküljega seome lipu, algul 0
  - Lehekülje kasutamisel paneme lipu 1-ks
  - Ohvriks valime ühe nullise lipuga lehekülgedest (näiteks FIFO algoritmiga)
- Teine šanss (*second chance, clock*)
  - Vajame kasutuse bitti
  - Käime lehekülgi läbi tsükliliselt (nagu kellaosutiga)
  - Kui kasutuse bitt on 0, siis asendame lehekülje
  - Kui kasutuse bitt on 1, nullime ära, aga jätame lehekülje mällu
  - Ja nii tsükliliselt





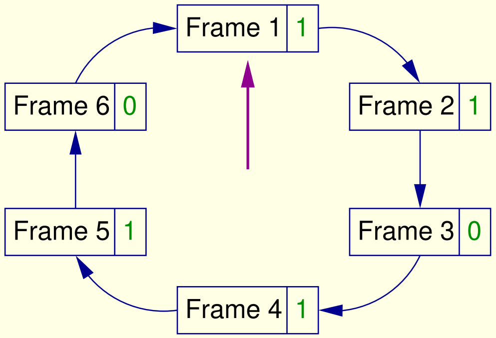
# Teine šanss — näide







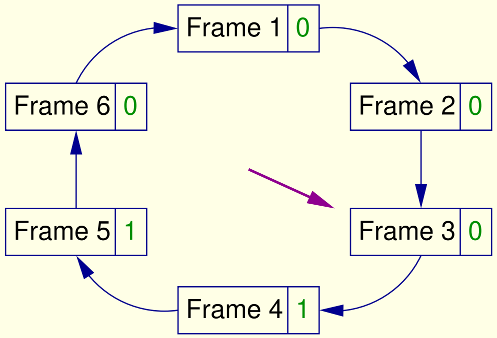

# Teine šanss — näide



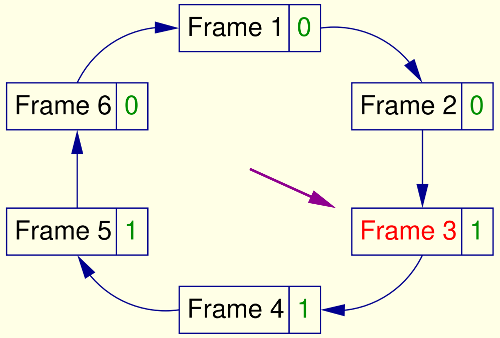





# Teine šanss — näide



## Teine šanss — näide








## Loenduriga algoritmid

- Loendame lehekülje kaudu tehtud mälupöörduste arvu
- LFU (*Least Frequently Used*) — ohvriks valime vähima loenduri väärtusega lehekülje
- MFU (*Most Frequently Used*) — baseerub kaalutlusel, et vähim loenduri väärtus tähendab ilmselt, et lehekülg toodi just mällu ja on värske
- Kumbki pole eriti laialt kasutusel
- Leidub situatsioone, kus LFU on efektiivsem kui LRU (failisüsteemide cached näiteks)





## Füüsilise mälu haldus

- Kuipalju ja missuguseid füüsilise mälu kaadreid eri protsessidele anda?
- Igale protsessil minimaalne ja maksimaalne lehekülgede arv
- Miinimum tuleb riistavara nõuetest — mitu lehekülge suudab üks instruktsioon puutuda (näiteks 6: 2 lehekülge käsu enda jaoks, 2 lähteaadressi ja kaks sihtaadressi jaoks)
- Kaks põhilist hõivamise skeemi:
  - Fikseeritud lehekülgede arvud (võrdne või proportsionaalne)
  - Prioriteediga leheküljehõivamine (suurema prioriteediga protsess võib väiksema prioriteediga protsessi lehekülgi välja tõrjuda)
- Globaalne asendus — kaadri võib võtta kogu mälust
- Lokaalne asendus — kaadrit saab võtta ainult oma mälust





## Pekslemine (*trashing*)

- Kui protsessil pole piisavalt lehekülgi, on leheküljepöördusvigade sagedus väga suur
- Madal protsessorikasutus
- Opsüsteem leiab seetõttu, et võib protsesse juurde tuua, kuna protsessoriaega on
- Lisatakse veel protsesse, läheb veel aeglasemaks
- Pekslemine — protsess tegeleb peaaegu ainult saalimisega
- Lehekülgede saalimine töötab sellepärast, et korraga kasutatakse tegelikult ainult mingit kindlat hulka lehekülgi (töökomplekt — *working set*)
- Pekslemine tekib siis, kui see vajalik lehekülgede hulk ei mahu eraldatud kaadritesse ära

## Muud (1)

- Lehekülgede eellaadimine (*prepaging*)
  - Protsessi käivitamisel või sisse saalimisel loetakse sisse terve töökomplekt
  - Sissesaalimisel tuuakse sisse ka ümberkaudseid lehekülgi
  - Kui leheküljed on kettal järjestikku, on mitme lehekülje korraga sisse lugemine palju efektiivsem, kui ükshaaval
  - Võib laadida kasutuid lehekülgi, mis omakorda võib põhjustada vajalike lehekülgede eemaldamist





## Muud (2)

- Lehekülje suuruse muutmine
  - Sisemine fragemnteerumine
  - Leheküljetabeli suurus
  - I/O kulu
  - Lokaalsus
- TLB ulatus (*TLB reach*) — mälu hulk, mille TLB suudab katta (TLB kirjete arv $\times$ lehekülje suurus)
- TLB ulatus võiks ideaalis ära katta töökomplekti
- Lisaks lehekülje suuruse muutmisele võib sisse tuua eri suurusega leheküljed ($\Rightarrow$ tarkvaraline TLB täitmine)





## Muud (3)

- Programmeerimisel tuleks arvestada lokaalsusega
  - Korraga puutuda vähe mälu, lähestikku asuvaid mälualasid
  - Suuri mälutükke läbida järjestikku
- Lehekülgede lukustamine
  - I/O jaoks
  - Äsja sisse saalitud lehekülgede lukustamine
  - Reaalajaprotsesside jaoks
  - Kasutja poolt juhitav lukustamine on reeglina privilegeeritud operatsioon