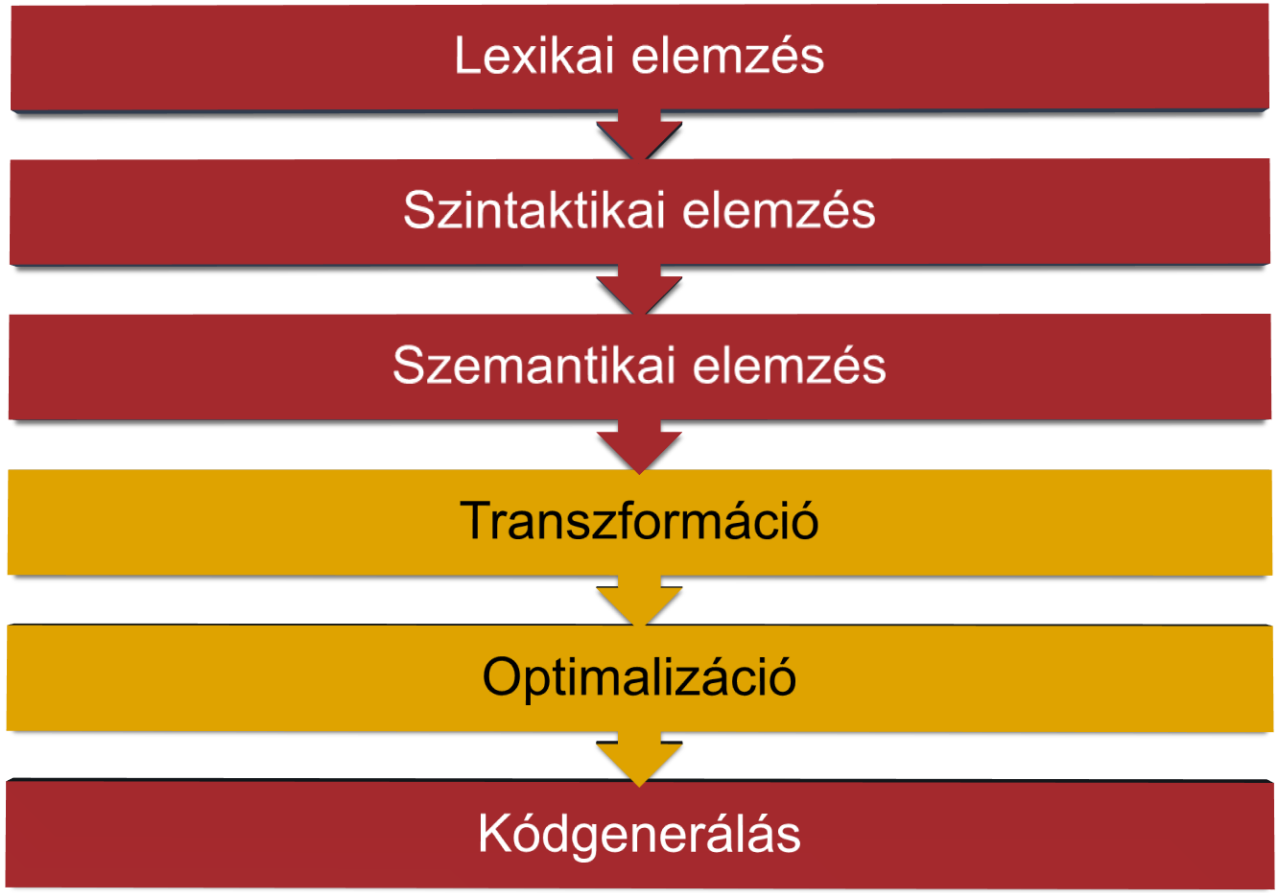
Modellalapú szoftverfejlesztés

V. előadás

Transzformáció, optimalizálás

Dr. Simon Balázs

Fordítás fázisai



A mai előadás: Transzformáció, Optimalizálás

I. Transzformáció

II. Típusok leképzése

III. Utasítások leképzése: SSA

IV. Optimalizáció

V. Optimalizációs technikák

Transzformáció

- Cél: szintaxisfából gépközeli köztes kód (IR = Intermediate Representation)
  - típusok, adatstruktúrák memóriakiosztása
  - utasításokból elemi műveletek, amelyek könnyen gépi kóddá fordíthatók
  - erőforráslimit nincs (pl. regiszterek száma nincs korlátozva)
- Gépközeli köztes kód lehetőségek:
  - 1. Nincs explicit köztes kód: szintaxisfából közvetlen gépi kód
  - 2. Three-Address Code (TAC v. 3AC): minden művelet max. 3 operandusú (pl. `t1 = t2 * t3`)
  - 3. Static Single-Assignment (SSA): mint a TAC, de minden változó immutable

A mai előadás: Transzformáció, Optimalizálás

I. Transzformáció

II. Típusok leképzése

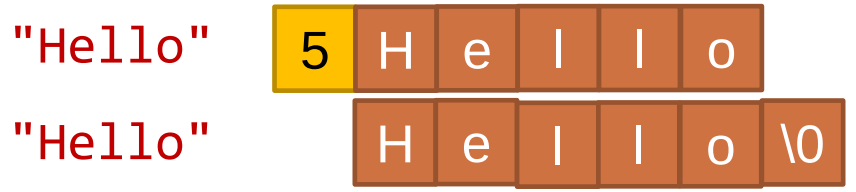
III. Utasítások leképzése: SSA

IV. Optimalizáció

V. Optimalizációs technikák

Egyszerű típusok leképzése

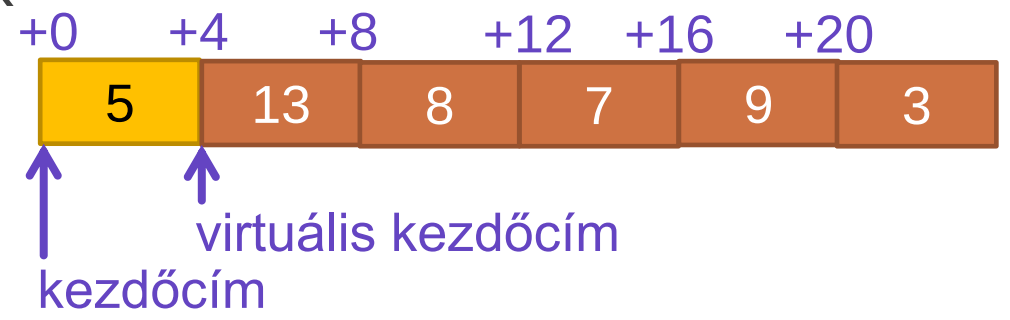
- Primitív típusok:
  - pointer, bool, char, byte, short, int, long, float, double, …
  - címezhető memóriaterületre kell illeszteni, minimális méret tipikusan 1 byte
  - kezelendő: bool értéke, char kódolása, big/little endian, fixed/floating point, hívási konvenció, …
- Enum/Flags:
  - egészekre leképezve (byte, short, int, long, …)
  - értékkészlettől függ a méret, de van olyan nyelv (pl. C#), ahol explicit megadható
- String típus:
  - programnyelvtől függ, hogy primitív vagy összetett típus
  - egyszerűként (pl. Pascal, C#): hossz + karakterek
  - összetettként (pl. C): karaktertömb ‘\0’-val lezárva



Összetett típusok leképzése: Tömb

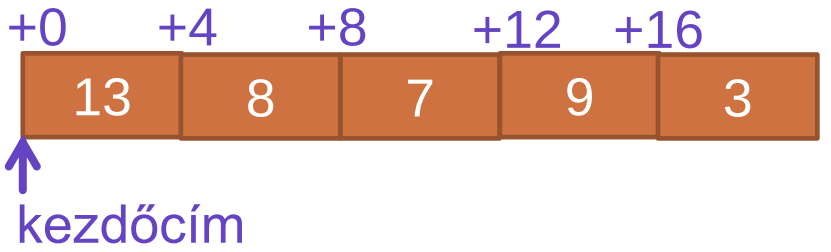
- Fajtái:
  - statikus: fix méret, fordítási időben foglalva a stack-en (pl. C)
  - dinamikus: fix méret, futási időben foglalva a heap-en (pl. C malloc, C#)
  - flexibilis: futásidőben változtatható (pl. Python)
- Ellenőrzött méret (pl. C#): hossz + elemek

```
int[] a = new int[] { 13, 8, 7, 9, 3 };
```



- Nem ellenőrzött méret (pl. C): elemek

```
int a[] = { 13, 8, 7, 9, 3 };
```

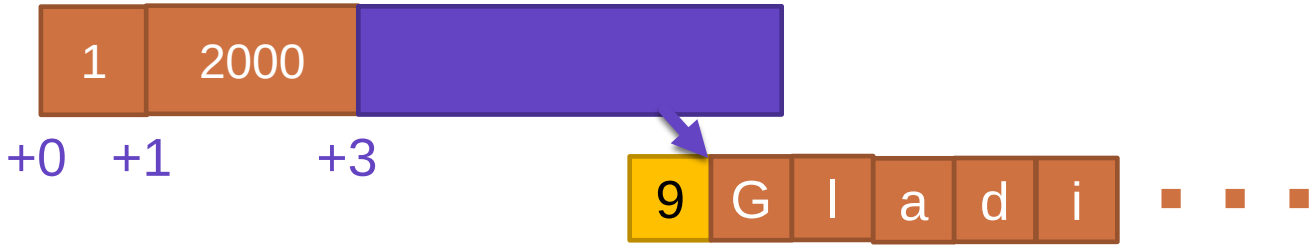


(32 bites architektúra)

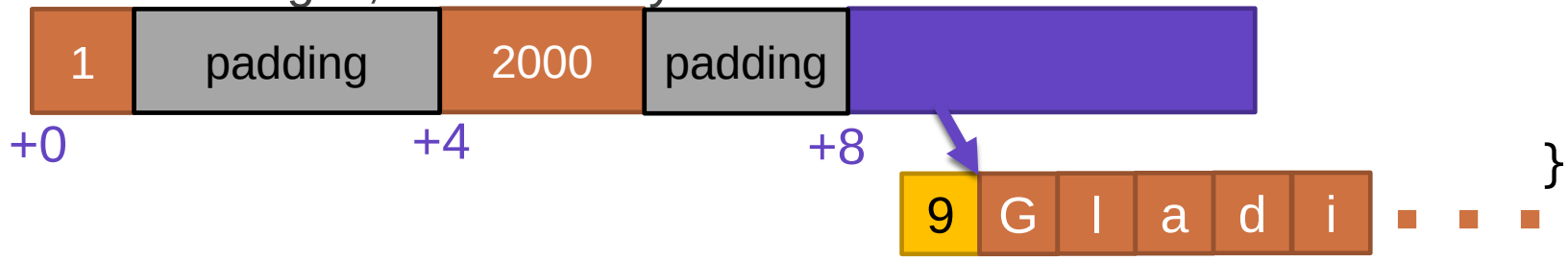
Összetett típusok leképzése: Struktúra (Unió esetén: mezők átlapolódva)

```
var m = new Movie() { Genre = Genre.Drama, Year = 2000, Title = "Gladiator" }
```

- Tömörített (packed)
  - > struktúra mérete = mezők méreteinek összege



- Igazított (aligned):
  - > mezők szóhatárhoz igazítva
  - > több területet foglal, de hatékonyabb a címzés




```
struct Movie
{
    Genre Genre;
    short Year;
    string Title;
}

enum Genre : byte
{
    Action = 0,
    Drama = 1,
    Romance = 2,
    Comedy = 3
}
```

(32 bites architektúra)

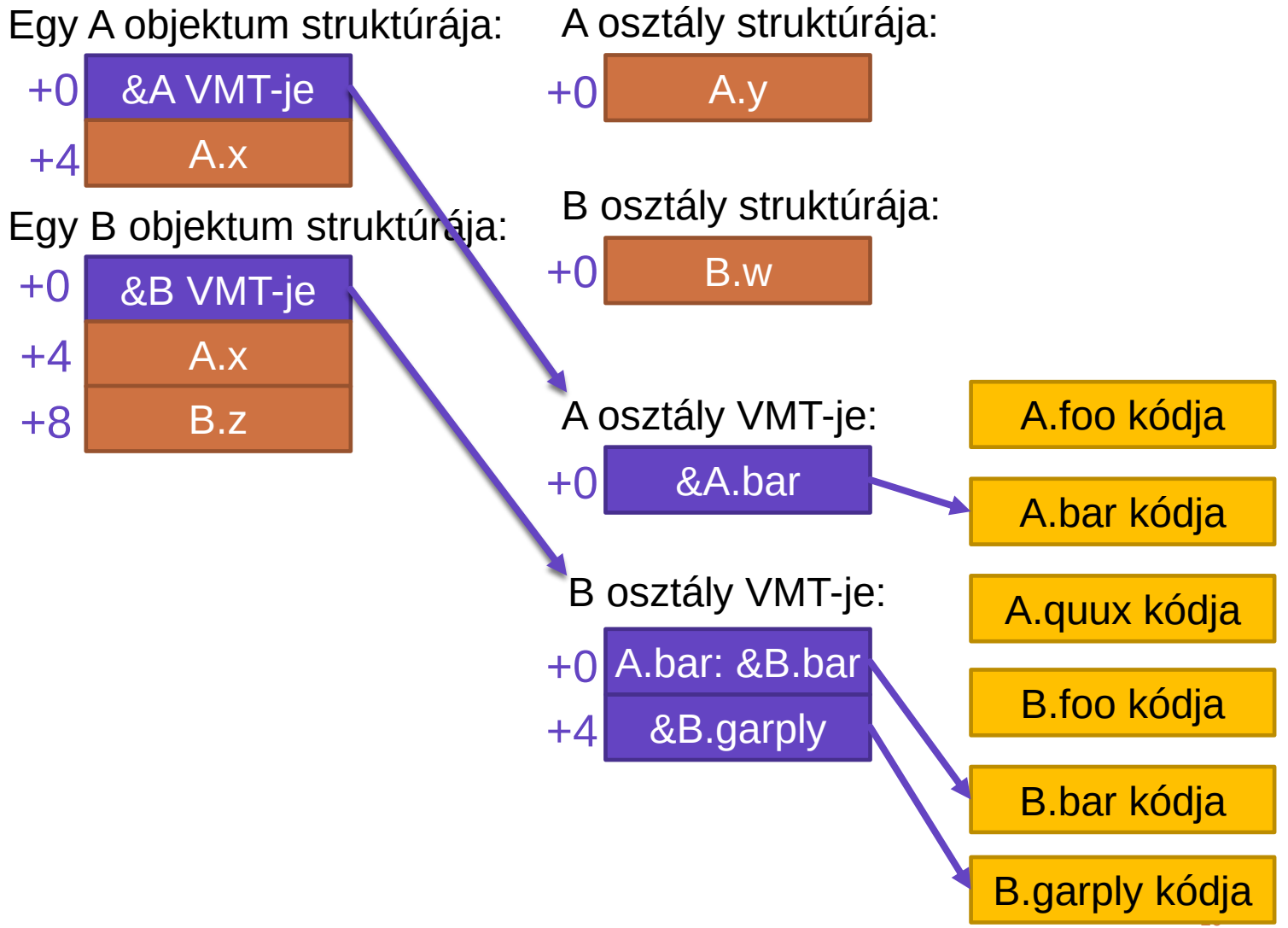
Összetett típusok leképzése: Osztály és objektum

- Objektum: osztály példány szintű változói (mezői) egy struktúrába szervezve
  - nulladik mező: mutató a típusleíróra
  - ősosztályok tagváltozói is szerepelnek a stuktúrában
- Osztály: statikus mezők + mutatók a statikus és példányszintű metódusokra
  - statikus mezők: osztályra jellemző struktúrába szervezve
  - tagfüggvények: implicit nulladik paraméter az objektumra mutató pointer (this)
  - statikus függvények: nincs objektumra mutató pointer
  - polimorfizmus: virtuális metódus tábla (VMT)
- Konstruktor:
  - objektum lefoglalása a heap-en + inicializálás

Összetett típusok leképzése: Osztály és objektum

```
class A
{
  int x;
  static int y;
  void foo() { ... }
  virtual void bar() { ... }
  static void quux() { ... }
}

class B : A
{
  int z;
  static int w;
  new void foo() { ... }
  override void bar() { ... }
  virtual void garply() { ... }
}
```

(32 bites architektúra)



A mai előadás: Transzformáció, Optimalizálás

I. Transzformáció

II. Típusok leképzése

III. Utasítások leképzése: SSA

IV. Optimalizáció

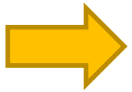
V. Optimalizációs technikák

Static Single Assignment (SSA)

- Minden változó pontosan egyszer kap értéket
  - > a definíciója helyén, még a felhasználása előtt
- Változók jelölése: eredeti név számozva (verziózva)
- Minden művelet max. 3 operandusú (pl. `t1 = t2 * t3`)
- Példa:

Programkód:

```
x = 3;
y = 4;
z = 5;
x = x+y;
z = (x+y)*z;
```



SSA kód:

```
x1: 3
y1: 4
z1: 5
x2: x1+y1
t1: x2+y1
z2: t1*z1
```

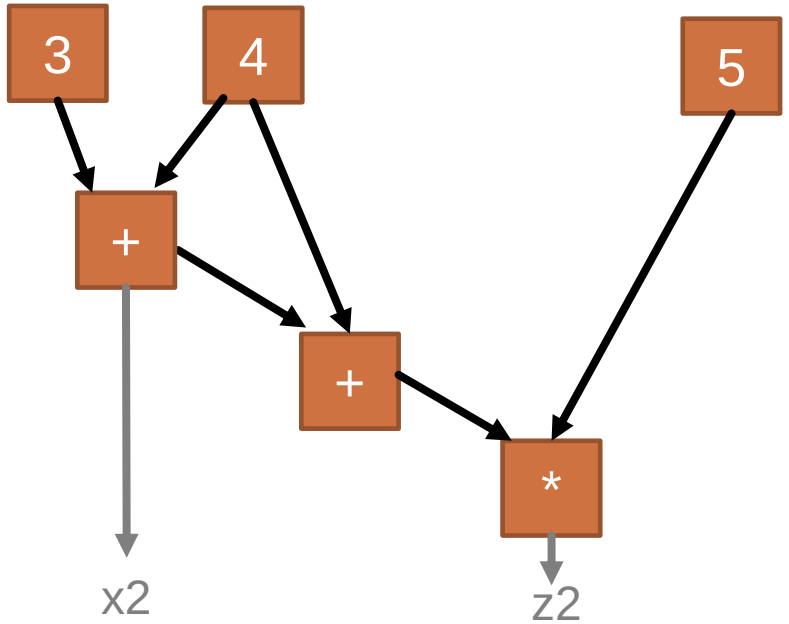
SSA gráf

- SSA kód szemléletesebb ábrázolása adatfolyam gráf (dataflow-graph, DFG) formájában
  - > Csúcsok: konstansok vagy műveletek
  - > Irányított élek: definíció-használat kapcsolatok (élek megfordítása: adatfüggőség)
- Egyes optimalizációk egyszerűbbek/szemléletesebbek gráf formában

SSA kód:

```
x1: 3
y1: 4
z1: 5
x2: x1+y1
t1: x2+y1
z2: t1*z1
```

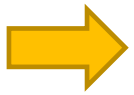
Gráf:



Φ-függvény

Kérdés: mi történik, ha két vagy több vezérlési ág találkozik?

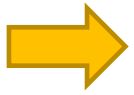
```
if (x < y) z = x;
else z = y;
w = z;
```



```
if (x1 < y1) z1 = x1;
else z2 = y1;
w1 = ???
```

Be kell vezetni egy speciális jelölést: Φ-függvény
Értéke: a tényleges vezérlési ágnak megfelelő paraméter.

```
if (x < y) z = x;
else z = y;
w = z;
```



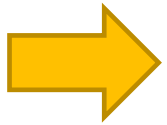
```
if (x1 < y1) z1 = x1;
else z2 = y1;
z3 = Φ(z1,z2);
w1 = z3;
```

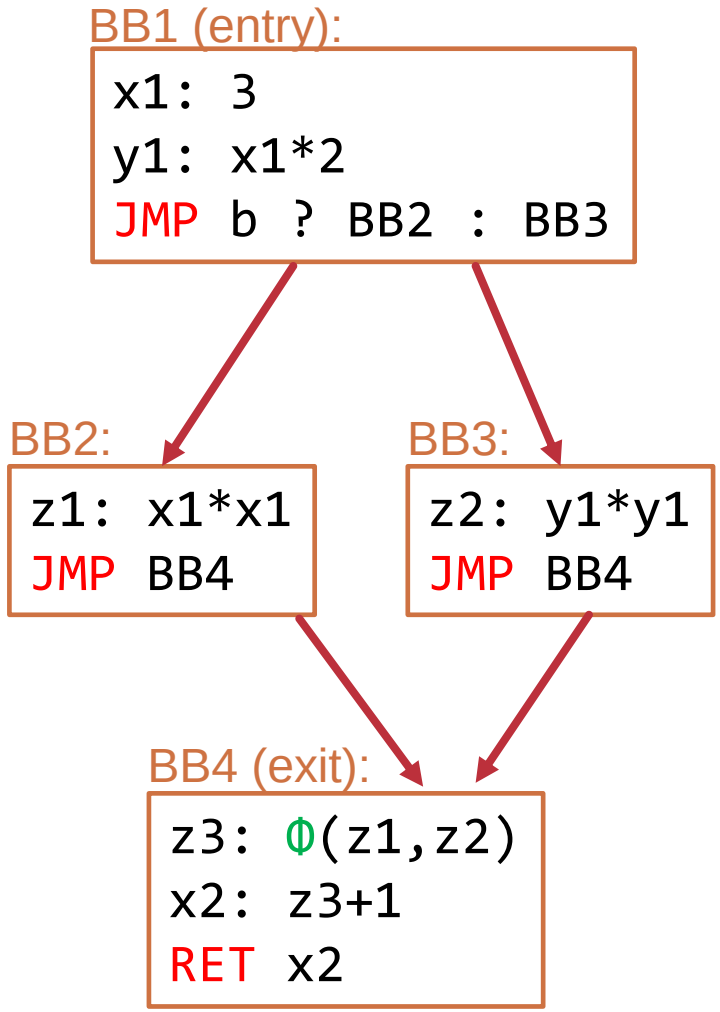
Program leképzése

- Az egész program: függvényekre darabolva
- Függvény: vezérlési folyam gráf (control-flow graph, CFG)
  - csúcs: alapblokk
  - él: ugrás egyik blokkból a másikba
  - két kitüntetett blokk: belépési blokk (entry block) és kilépési blokk (exit block)
- Alapblokk (Basic Block):
  - maximális hosszúságú utasítássorozat (SSA utasítások)
  - atomi: ha a blokk egy utasítása végrehajtódik, akkor az összes többi is
  - címkével kezdődik, nem tartalmaz egyéb címkét
  - címkére ugrással vagy feltételes címkére ugrással fejeződik be, nem tartalmaz egyéb ugrást (függvényhívás nem számít ugrásnak)

Vezérlési folyam gráf (control-flow graph) példa

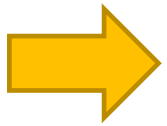
```
int foo(bool b)
{
  int x = 3;
  int y = x*2;
  int z;
  if (b) z = x*x;
  else z = y*y;
  x = z+1;
  return x;
}
```

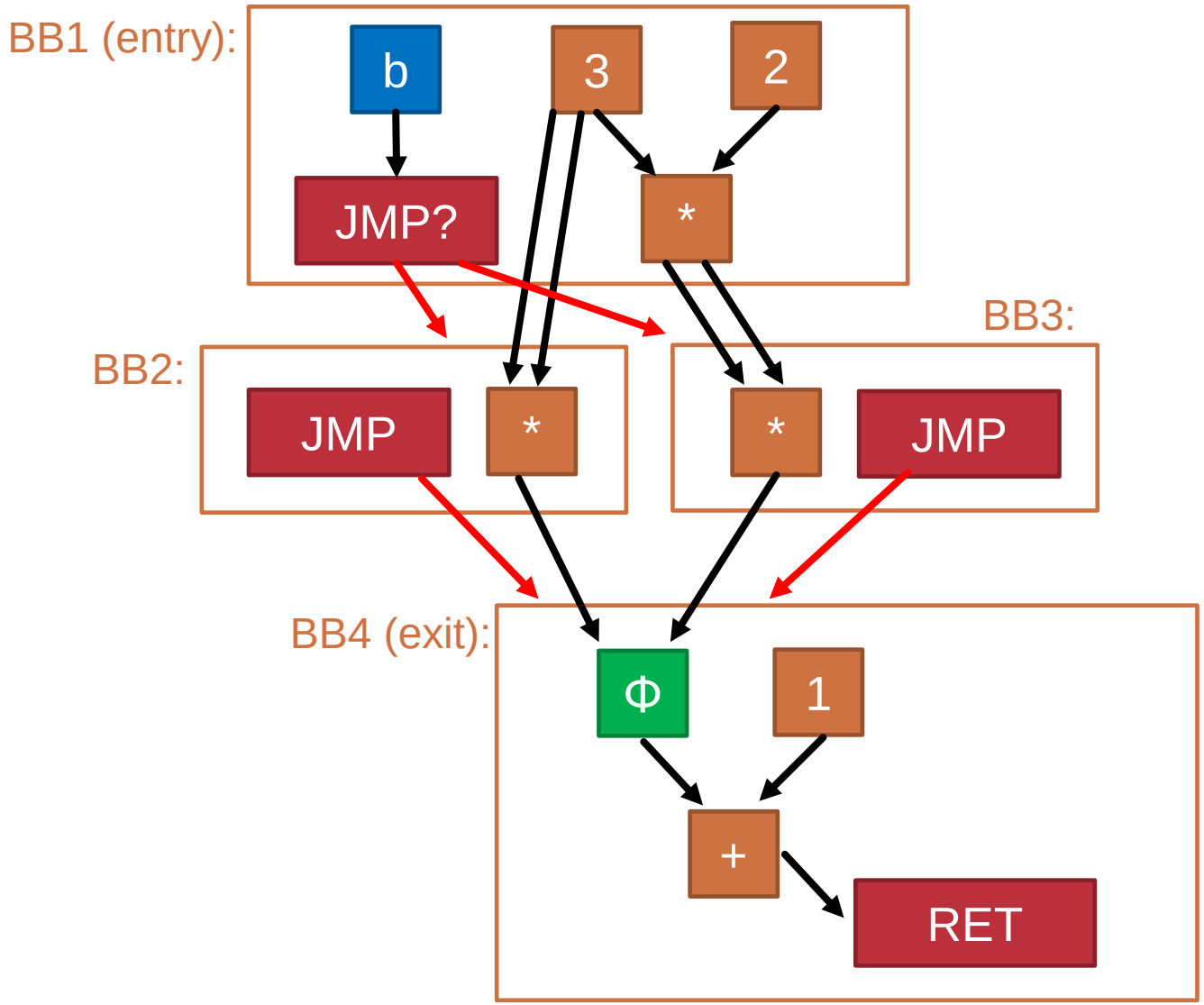




Vezérlési folyam- és adatfolyam gráf

```
int foo(bool b)
{
  int x = 3;
  int y = x*2;
  int z;
  if (b) z = x*x;
  else z = y*y;
  x = z+1;
  return x;
}
```





Utasítások leképzése

- Aritmetikai és logikai műveletek: egy-az-egyben leképezve
  - egyes programnyelveknél túlcsordulás-ellenőrzés is kell (drága!)
- Elágazások, ciklusok, kivételek: újabb alapblokkok és vezérlési élek
- Memória-hozzáférés: címaritmetika (bázis cím + relatív cím)
  - írás, olvasás
  - indexelés ellenőrzés is kellhet (drága!)
- Típuskonverzió: megfelelő utasításokra leképezve
- Függvényhívás:
  - állapotmentés, veremfoglalás, vezérlésátadás, verem-felszabadítás, állapot-visszaállítás

Aritmetikai és logikai műveletek

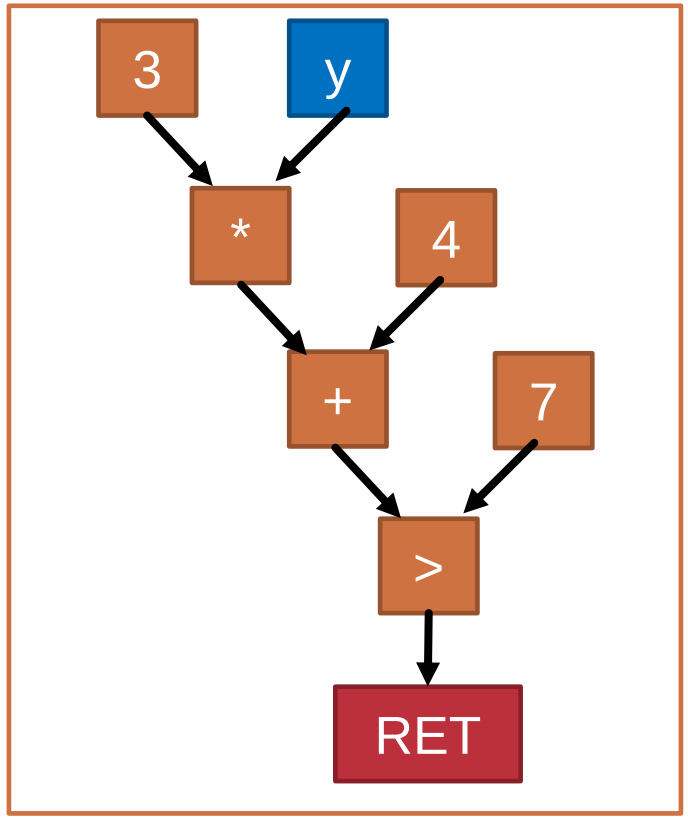
Programkód:

```
bool foo(int y)
{
  return 3 * y + 4 > 7;
}
```

SSA:

```
t1: 3 * y
t2: t1 + 4
t3: t2 > 7
RET t3
```

Gráf:

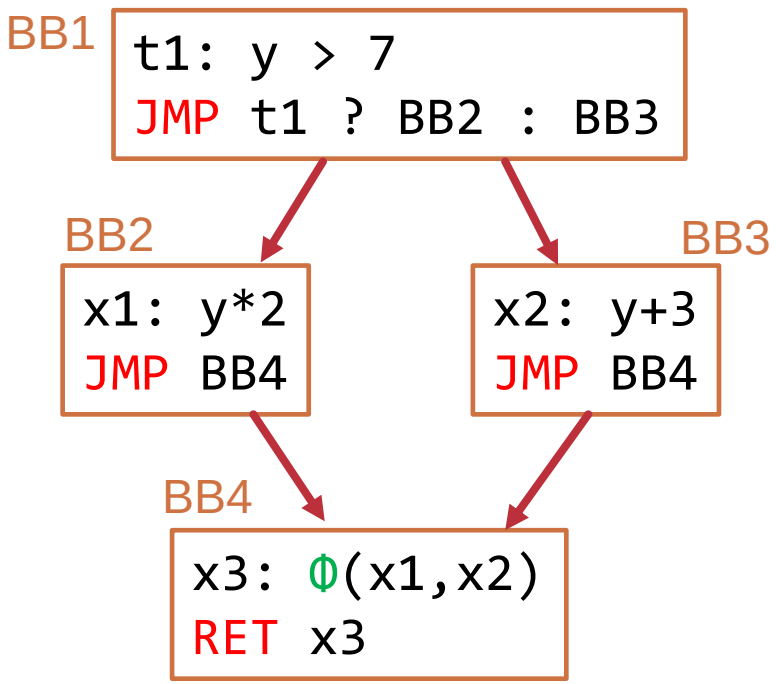


Elágazás: if

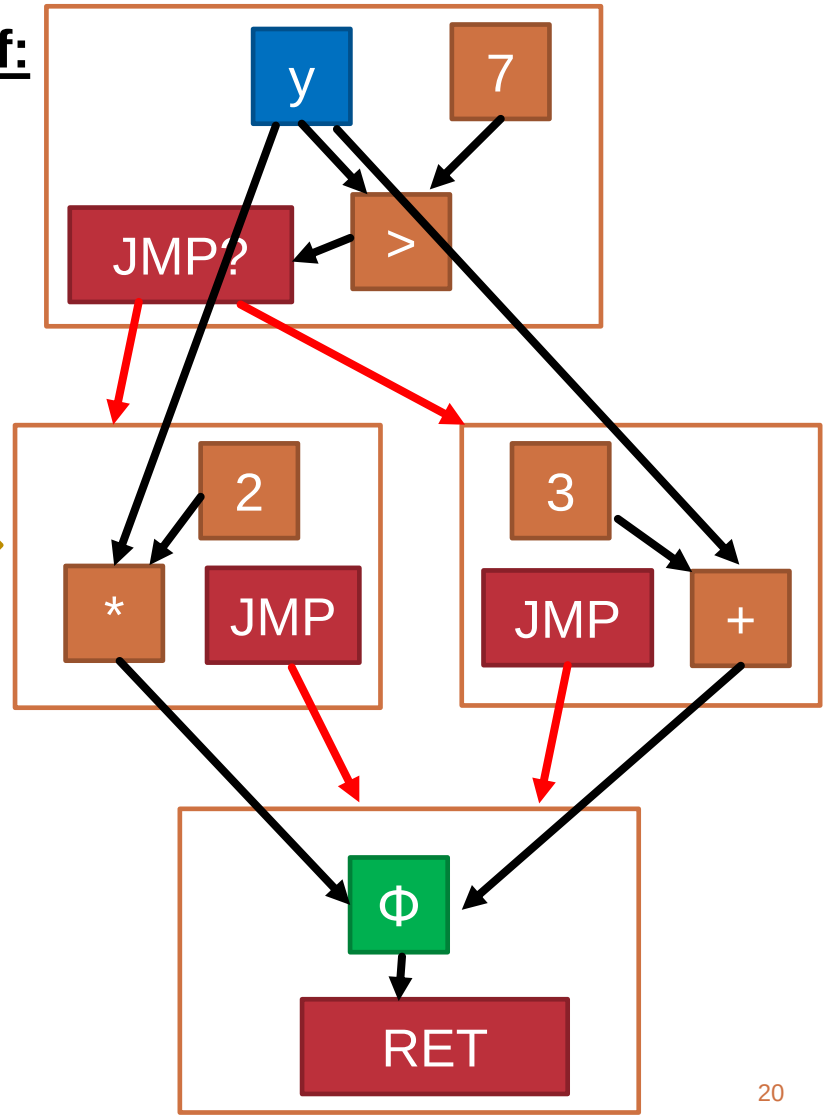
Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x;
  if (y > 7)
  {
    x = y*2;
  }
  else
  {
    x = y+3;
  }
  return x;
}
```

SSA:



Gráf:

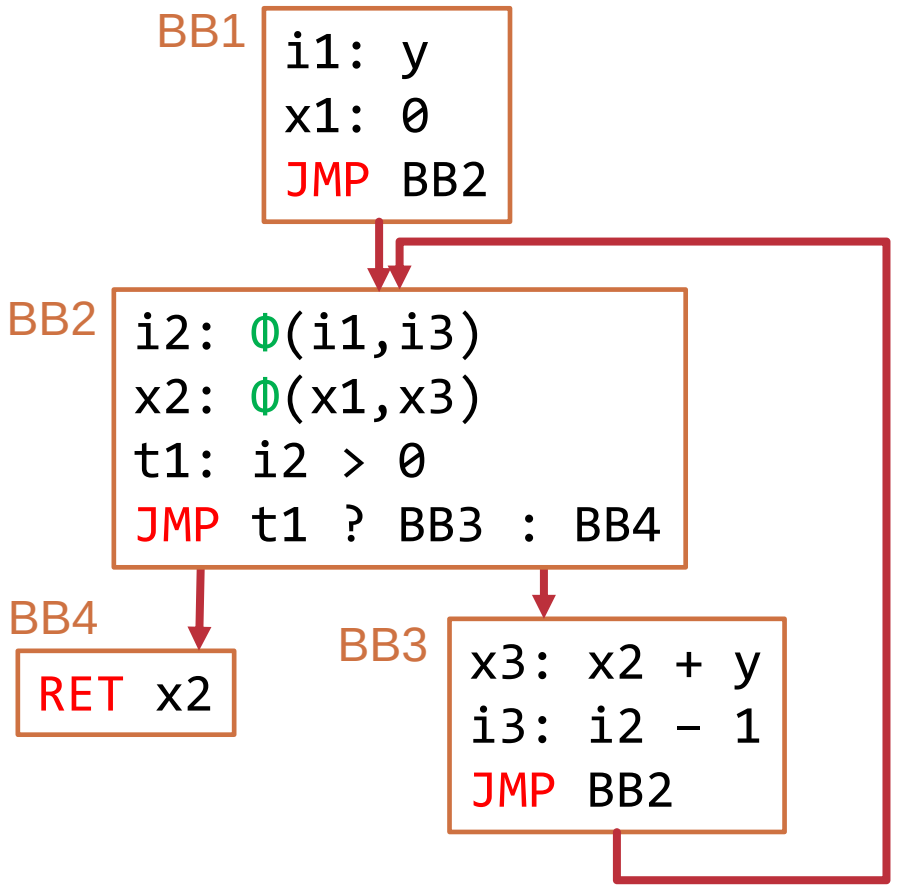


Ciklus: while

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int i = y;
  int x = 0;
  while (i > 0)
  {
    x += y;
    --i;
  }
  return x;
}
```

SSA:

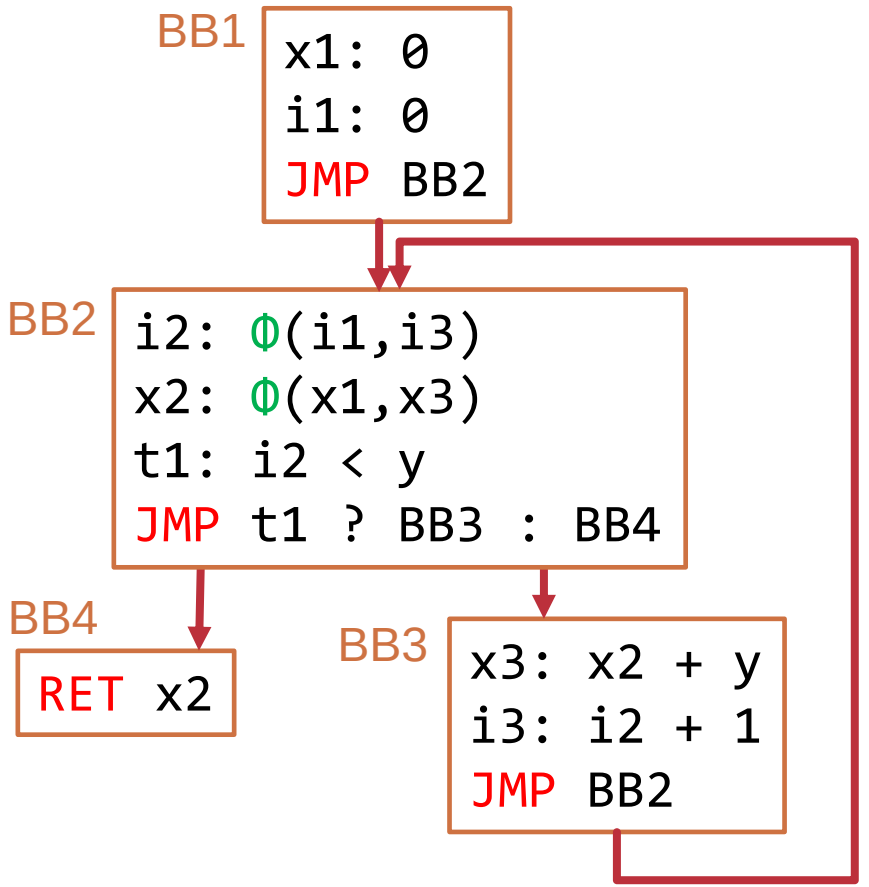


Ciklus: for

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x;
}
```

SSA:

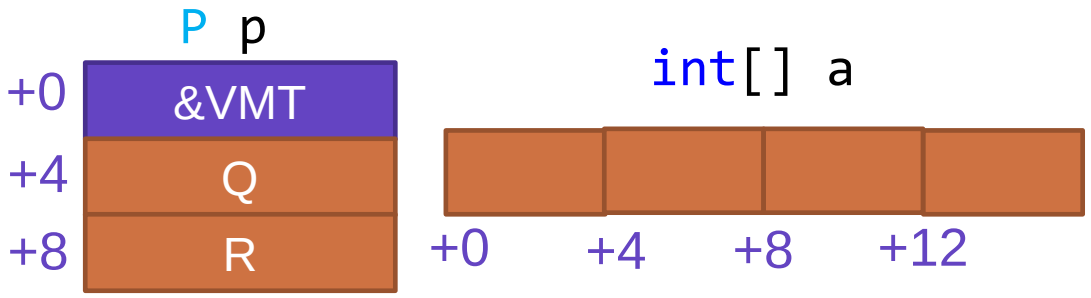


Memória: olvasás (LD = load), írás (ST = store)

Címszámítás: bázis + offszet

Programkód:

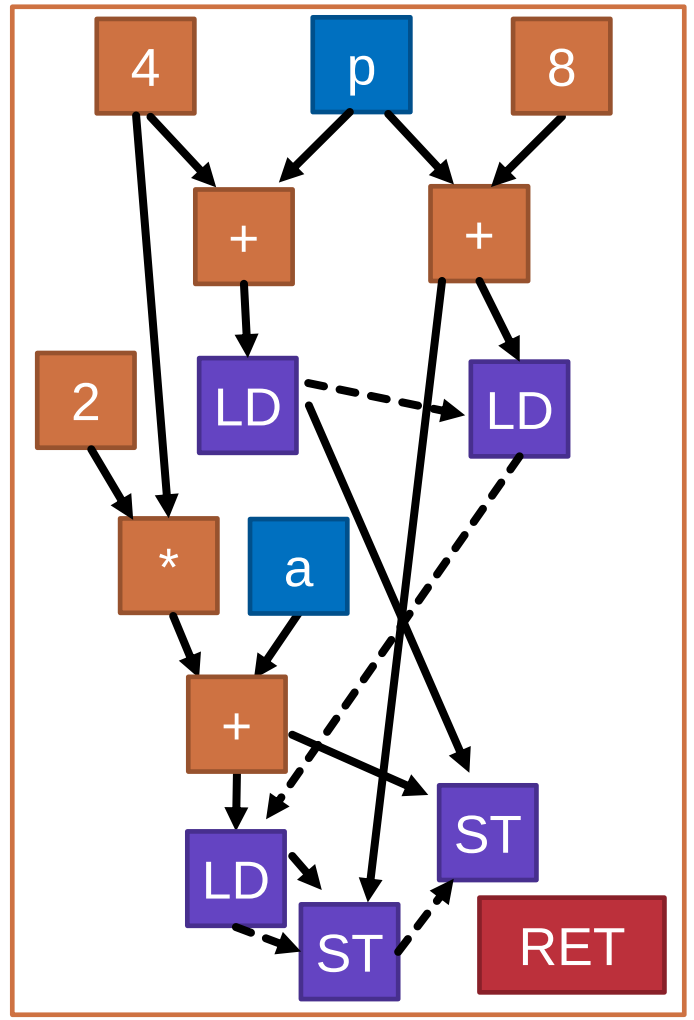
```
class P { int Q; int R; }

void foo(P p, int[] a)
{
  int q = p.Q;
  int r = p.R;
  int s = a[2];
  p.R = s;
  a[2] = q;
}
```



SSA:

```
t1: p + 4
q1: LD t1
t2: p + 8
r1: LD t2
t3: 4 * 2
t4: a + t3
s1: LD t4
ST t2: s1
ST t4: q1
RET
```

Gráf:



Függvényhívás

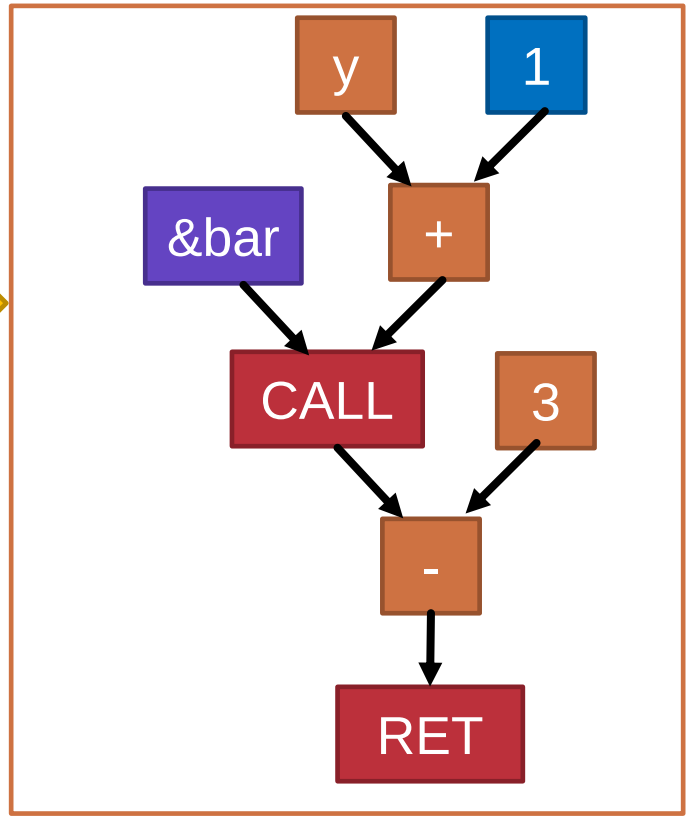
Programkód:

```
bool foo(int y)
{
  return bar(y+1)-3;
}

int bar(int x)
{
  return x*2;
}
```

SSA:

```
t1: y + 1
t2: CALL bar(t1)
t3: t2 - 3
RET t3
```

Gráf:



Függvényhívás

- 1. Állapot (regiszterek) mentése
- 2. Hívott függvénynek hely foglalása a veremben (Stack Frame)
  - visszatérési cím, visszatérési érték, paraméterek, lokális változók
- 3. Visszatérési cím beírása a verembe (kivételkezelés esetén 2 visszatérési cím van!)
- 4. Argumentumok beírása a verembe
- 5. Programszámláló (Program Counter) átállítása a hívott függvény címére
- 6. Hívott függvény törzsének végrehajtása
- 7. Programszámláló (Program Counter) átállítása a visszatérési címre
- 8. Visszatérési érték kinyerése a veremből
- 9. Lefoglalt veremterület (Stack Frame) felszabadítása
- 10. Állapot (regiszterek) visszaállítása

SSA számítása

- Alapblokkok és a vezérlési gráf létrehozása
- Blokkonként sorban: blokkokon belül értékek sorszámozása
- Φ-függvények csak akkor számíthatók, ha minden megelőző blokk kész
  - amíg nem számíthatók: ideiglenesen megjegyezzük egy Φ’ függvénnyel
- Φ-függvény bekerülhet egy megelőző blokkba is!
- Előfordulhat, hogy a Φ’ függvényből nem lesz Φ-függvény

Φ-függvény szabályok

- A Φ-függvények mindig egy olyan blokk elején szerepelnek, amelynek több megelőző blokkja is van
- Egy Φ-függvénynek pontosan annyi operandusa van, ahány megelőző alapblokkból érkezhet a Φ-függvény blokkjába a vezérlés
- A Φ-függvény értéke annak az operandusnak az értéke, amelyik a végrehajtáskor ténylegesen megelőző alapblokkhoz tartozik
- Egy blokkon belül minden Φ-függvényt szimultán egyszerre kell kiértékelni

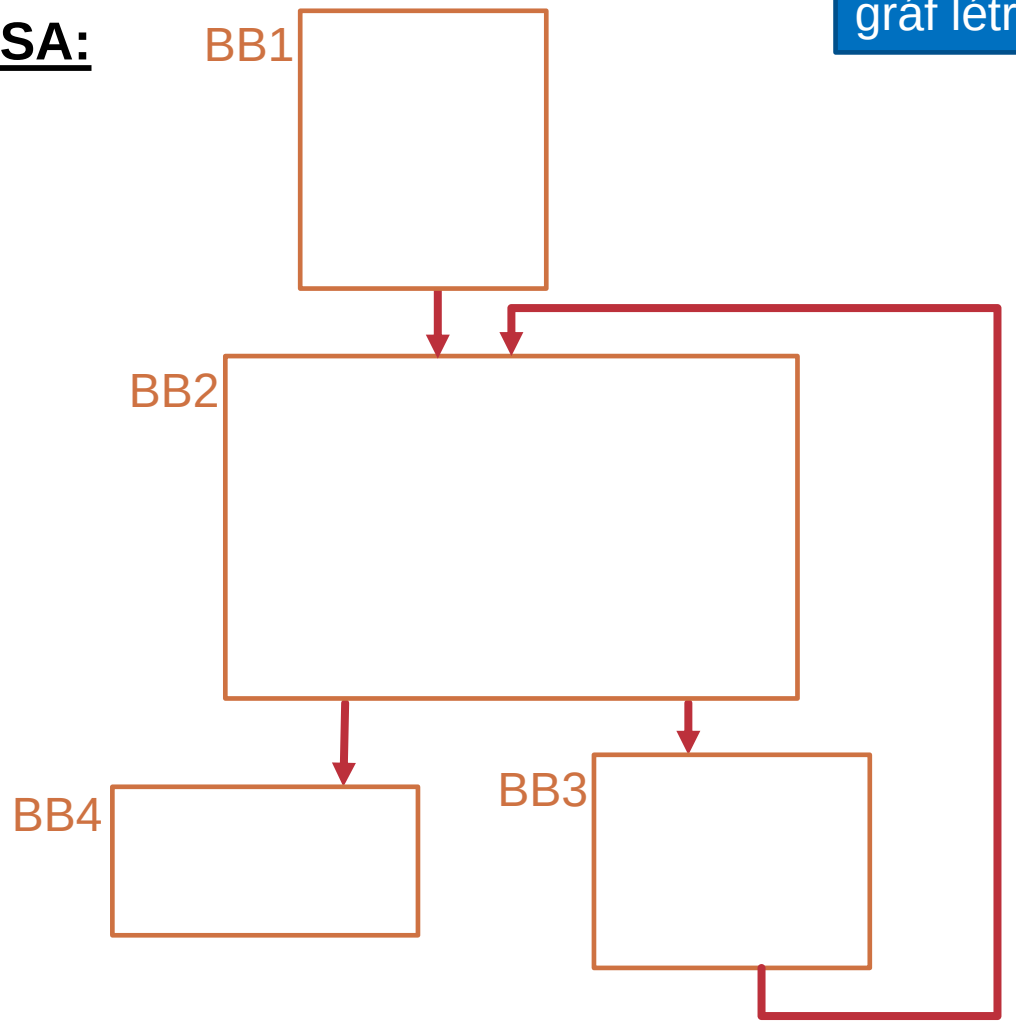
SSA számítás példa (1/6)

Alapblokkok és vezérlési gráf létrehozása.

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

SSA:



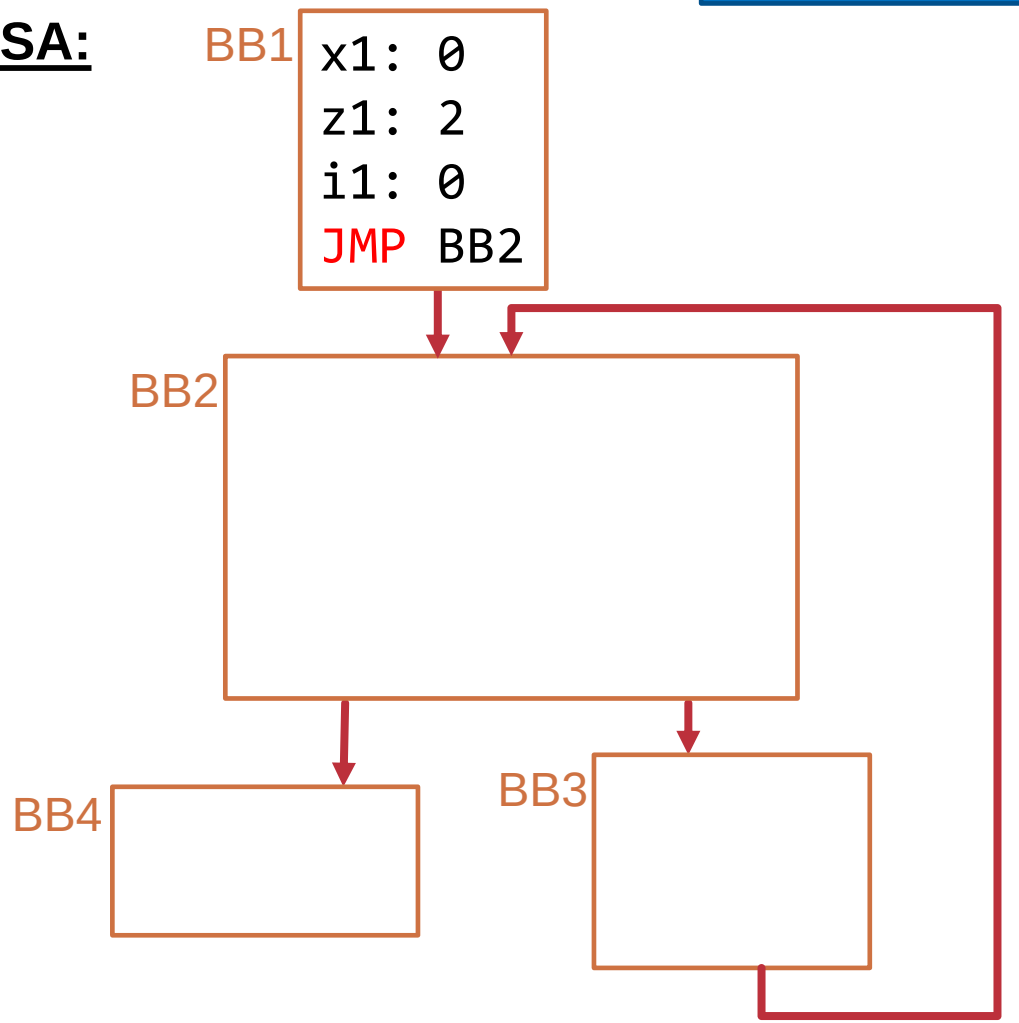
SSA számítás példa (2/6)

BB1-ben az értékek számozása.

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

SSA:

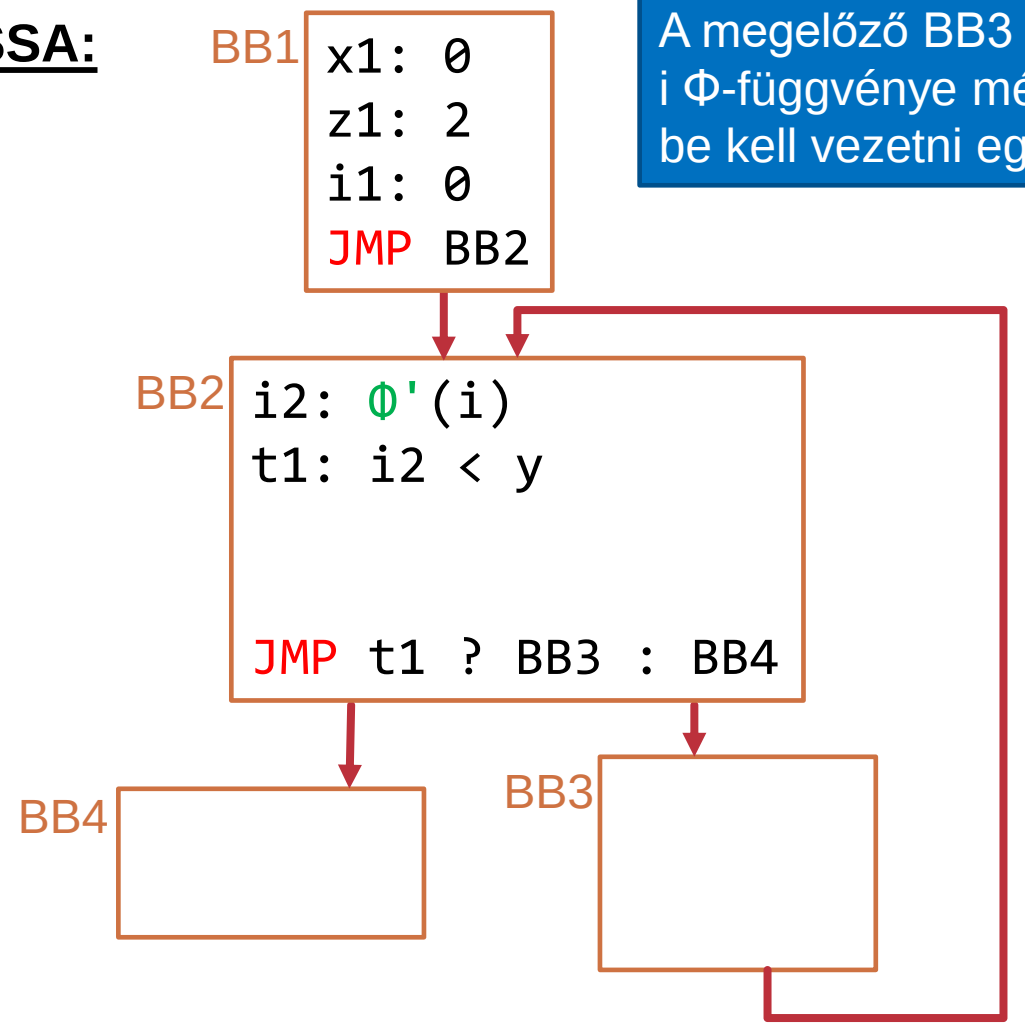


SSA számítás példa (3/6)

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

SSA:



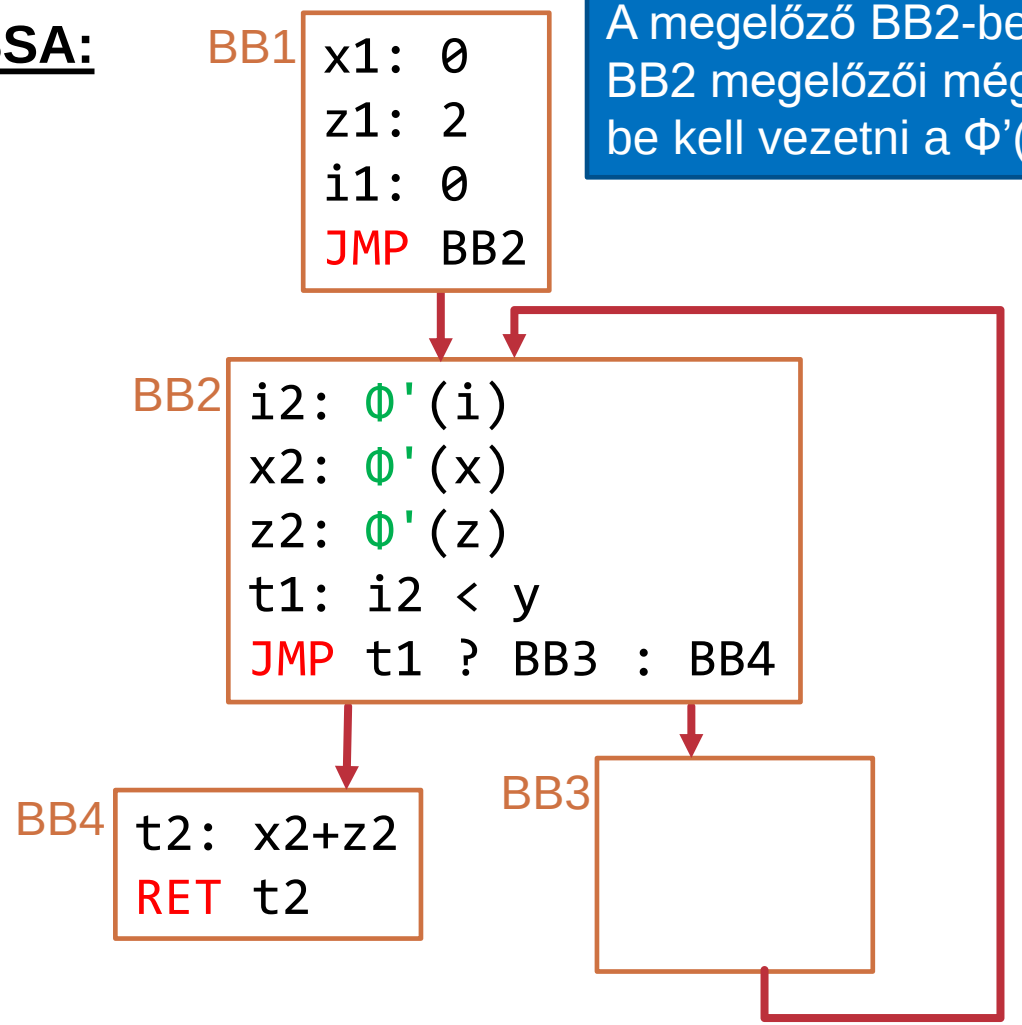
BB2-ben az értékek számozása.
A megelőző BB3 még nincs kész, így i Φ-függvénye még nem számítható: be kell vezetni egy Φ'(i) függvényt.

SSA számítás példa (4/6)

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

SSA:



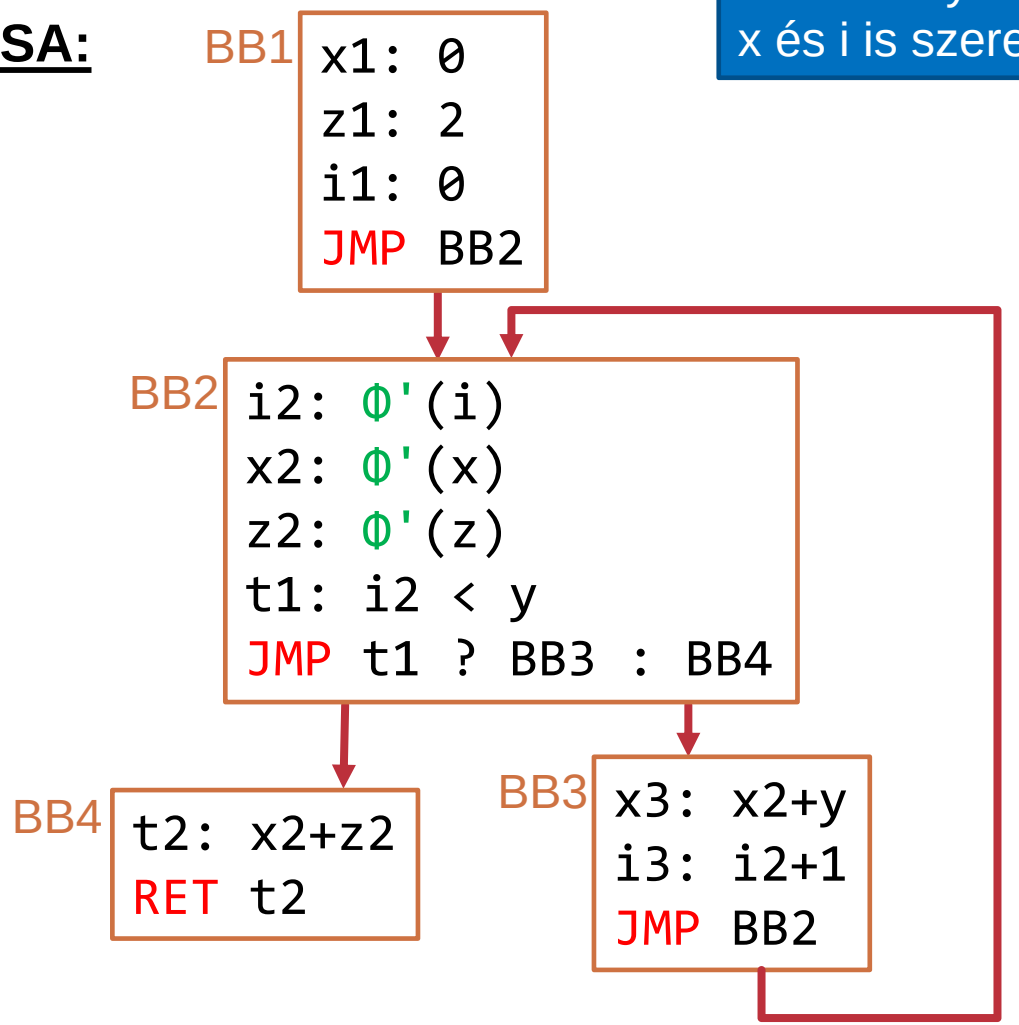
BB4-ben x és z is használva van.
A megelőző BB2-ben nem szerepelnek.
BB2 megelőzői még nincsenek kész:
be kell vezetni a Φ'(x) és Φ'(z) értékeket.

SSA számítás példa (5/6)

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

SSA:



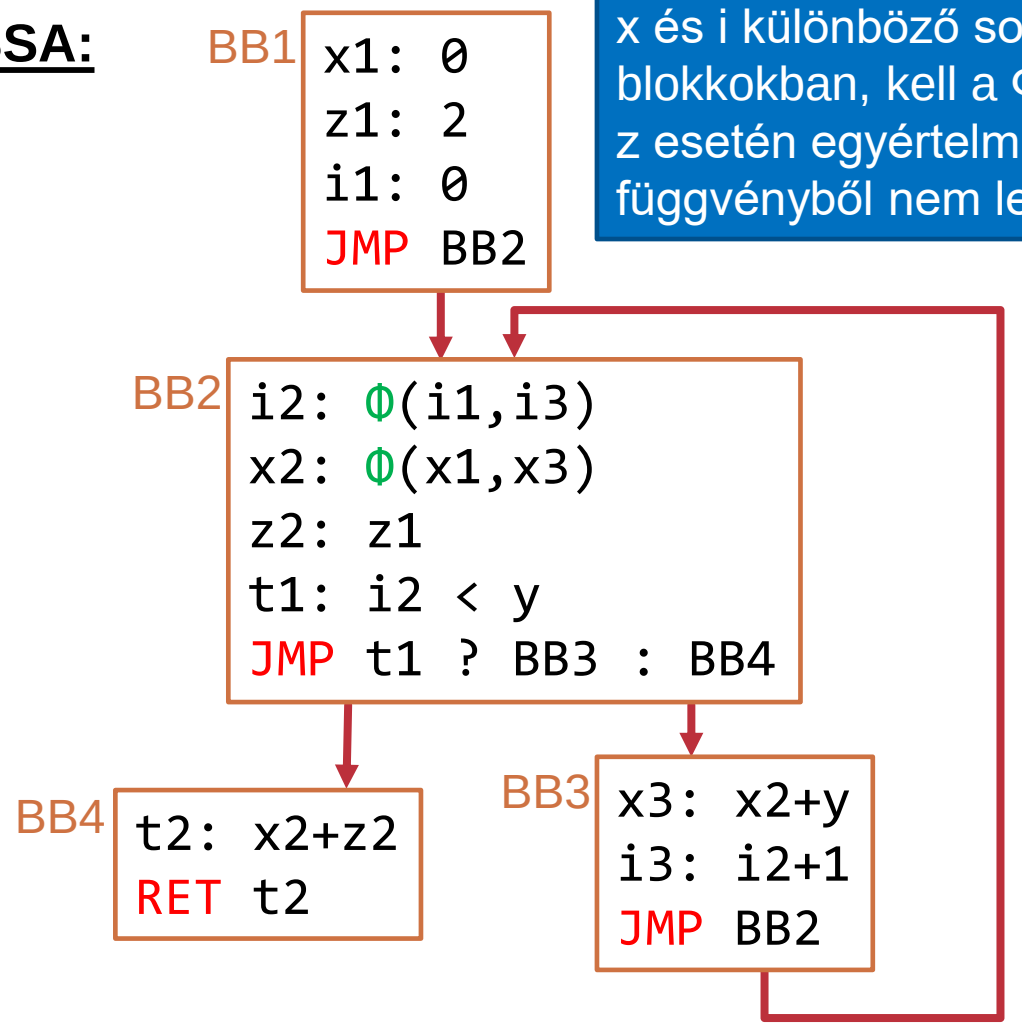
BB3 könnyen számítható, mert x és i is szerepel BB2-ben.

SSA számítás példa (6/6)

Programkód:

```
int foo(int y)
{
  int x = 0;
  int z = 2;
  for (int i = 0; i < y; ++i)
  {
    x += y;
  }
  return x + z;
}
```

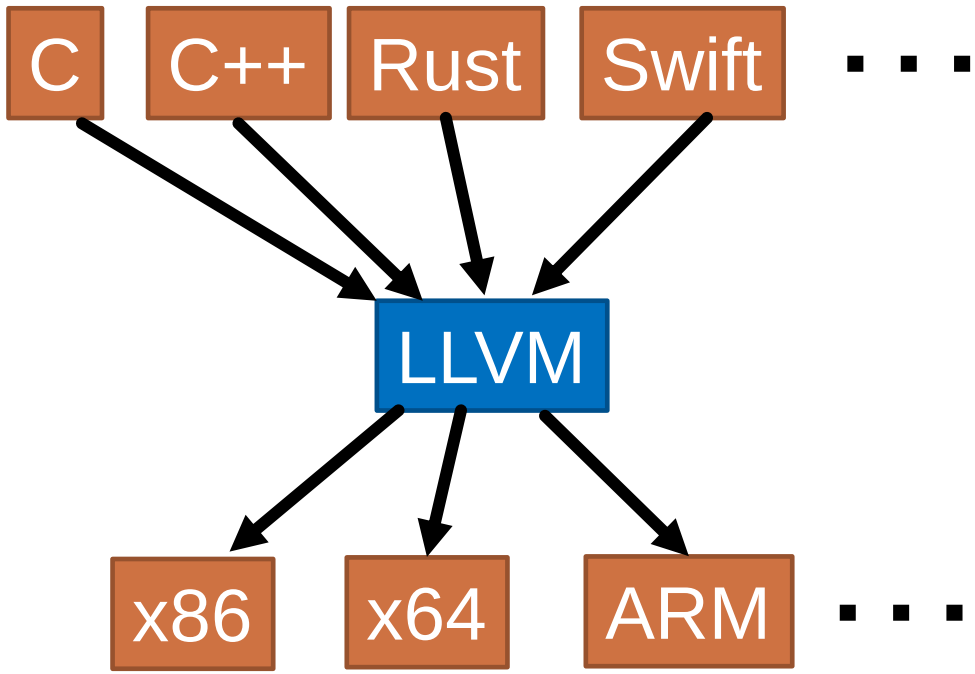
SSA:



BB2-ben Φ' átalakítása:
x és i különböző sorszámú a megelőző blokkokban, kell a Φ függvény.
z esetén egyértelmű a sorszám, a Φ' függvényből nem lesz Φ függvény.

LLVM

- Fordító eszközrendszer
  - front end (transzformáció SSA formára)
  - optimalizáció
  - back end (gépi kód generálása)
- Programnyelv-független köztes nyelv (Intermediate Representation – IR)
  - típusrendszer, utasítások, kifejezések
- Saját programnyelvünkhöz is felhasználhatjuk!
- Alternatíva LLVM helyett:
  - generálhatunk C, Java, C#, stb. kódot, és lefordíthatjuk a hagyományos fordítóval



A mai előadás: Transzformáció, Optimalizálás

I. Transzformáció

II. Típusok leképzése

III. Utasítások leképzése: SSA

IV. Optimalizáció

V. Optimalizációs technikák

Optimalizálás

- Cél: hatékonyabb végrehajtás a viselkedés megváltoztatása nélkül
  - > kisebb kódméret, gyorsabb futás, kevesebb memória, alacsonyabb fogyasztás, stb.
- Nincs optimális program, csak optimalizált!
  - > különben lenne algoritmusunk a megállási problémára, de az eldönthetetlen
- Néhány példa optimalizálási technikákra:
  - > Konstans kifejezések kiértékelése, Halott kód eliminálása, Operátorok egyszerűsítése, Ciklusinvariáns kódok átmozgatása, Részleges redundanciák eliminálása, Kódáthelyezés, Indexhatárok ellenőrzésének eliminálása, Függvények inline beépítése, Lefutási ágak egyszerűsítése, Ciklusok kibontása/feldarabolása , Regiszterkiosztás, Jobbrekurzió feloldása ciklussá

Optimalizálás sorrendje

- Kérdés: Melyik optimalizációkat alkalmazzuk? Milyen sorrendben?
  - nincs rá pontos válasz
- Néhány optimalizáció hasonlít egymásra, vagy részhalmaza egymásnak
- Numerikus programoknál:
  - operátoregyszerűsítés: általában legalább 2-szeres gyorsulást eredményez
  - cache-optimalizálás: általában 2-5-szörös gyorsulást eredményez
- Egyéb optimalizálások:
  - az elsőnek választott kb. 15%-os gyorsulást eredményez
  - minden további kevesebb, mint 5%-ot hoz
- Forrás: http://www.info.uni-karlsruhe.de/lehre/2007WS/uebau1/folien/10-SSA_v2.pdf

Optimalizáció szintjei

- Lokális
  - Egyetlen alapblokkon belül, izolálva a többitől
- Globális (intraprocedurális)
  - Alapblokkok sorozatán (control-flow gráf) belül
- Interprocedurális
  - A teljes program kódját figyelembe veszi
  - Függvényhatárokon átívelő
  - Ritkán támogatják a fordítók

Optimalizálás SSA segítségével

- Sok optimalizálás könnyen végrehajtható az SSA formán
- Két fő transzformáció: normalizálás és optimalizálás
- Normalizálás: különbözőképpen leírt kifejezések összehasonlíthatóvá tétele
  - > elősegíti az optimalizációt
  - > algebrai azonosságok felhasználása: kommutativitás, asszociativitás, disztributivitás
  - > alkalmazhatóságát korlátozzák a kivételek vagy az előírt kiértékelési sorrend (pl. Java)
- Optimalizálás: program hatékonyabbá tétele

Adatfolyam-elemzés SSA segítségével

- Egyes optimalizációk átrendezhetik az utasítások sorrendjét
- Adatfolyam-elemzés: adatfüggőségek felderítése
  - változó definíció-használat, értékadás-olvasás műveletekből adódó függőségek
  - fontos a kódgenerálási fázisban az utasítások megfelelő sorrendezéséhez
- Adatfolyam-elemzés SSA nélkül is végezhető, de SSA-val gyakran egyszerűbb
- Szemantikai elemzéshez is hasznos
  - nem inicializált változók felismerése
  - nem használt változók kijelzése
  - élő (később potenciálisan használt) változók felderítése
  - annak felismerése, hogy egy függvény nem minden ágon tér vissza
  - stb.

A mai előadás: Transzformáció, Optimalizálás

I. Transzformáció

II. Típusok leképzése

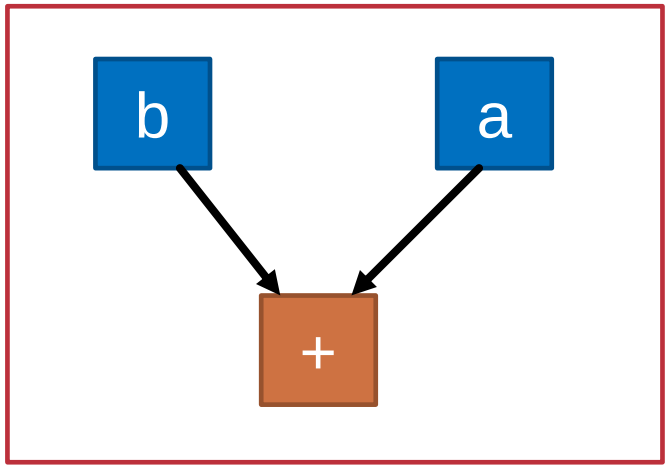
III. Utasítások leképzése: SSA

IV. Optimalizáció

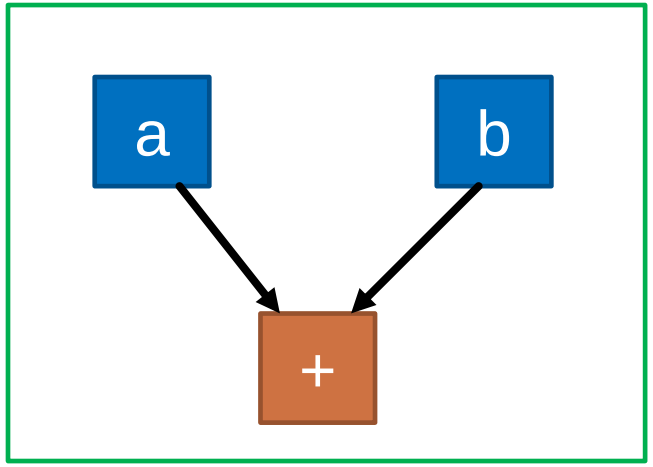
V. Optimalizációs technikák

Normalizálás: kommutativitás kihasználása

```
t1: b+a
```




```
t1: a+b
```



Így könnyebb felismerni a közös részkifejezéseket

Optimalizálás: közös részkifejezések eliminálása

```
x = b+a;
y = (a+b)*2;
```

SSA

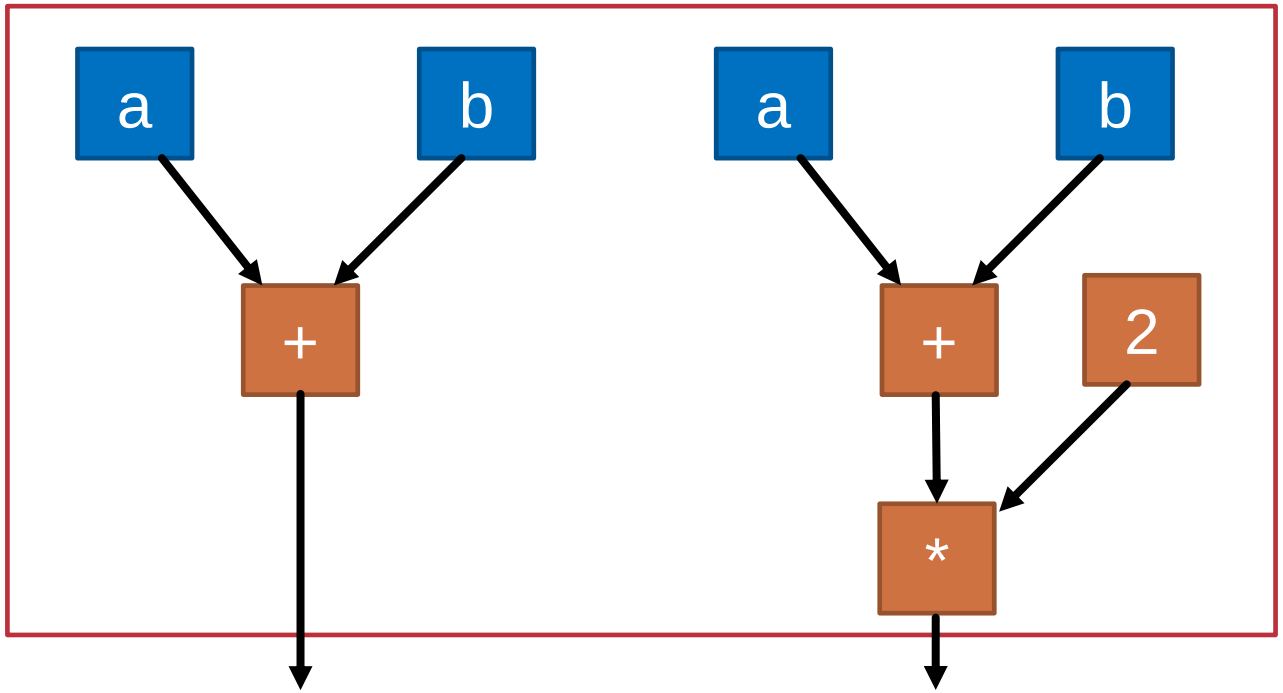
```
x1: b+a
t2: a+b
y1: t2*2
```

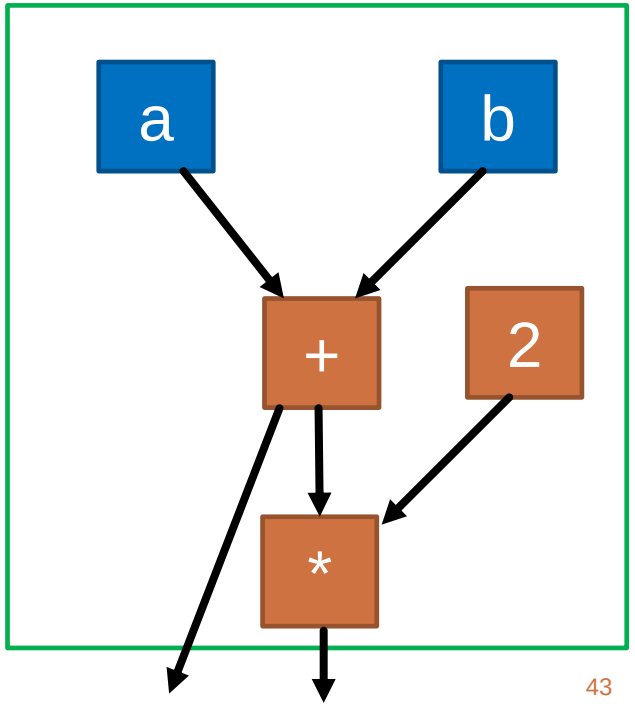
Norm.

```
x1: a+b
t2: a+b
y1: t2*2
```

Opt.

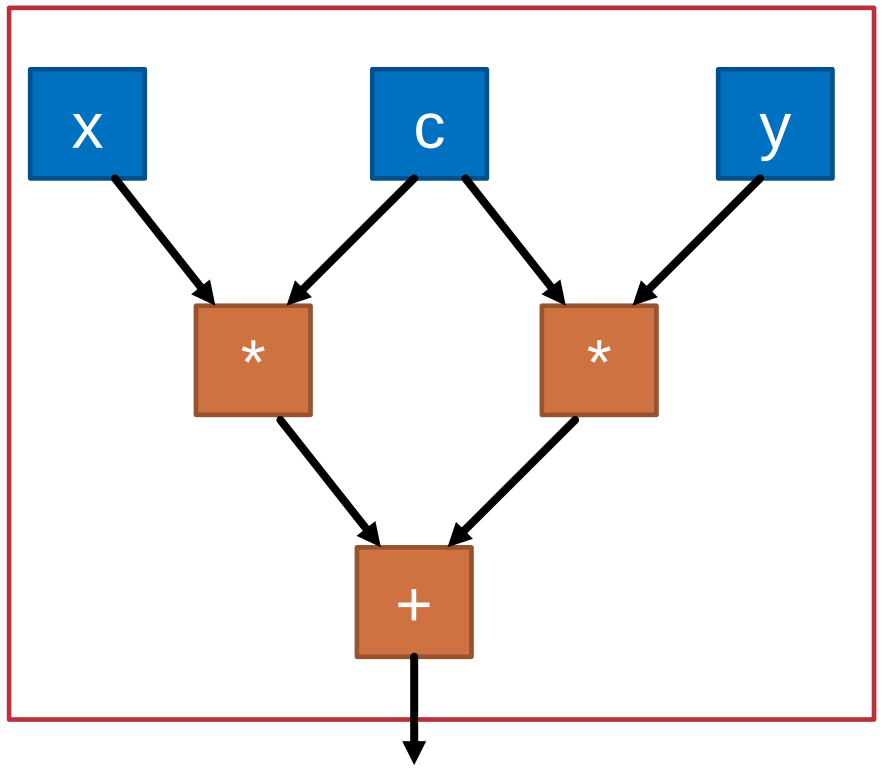
```
x1: a+b

y1: x1*2
```



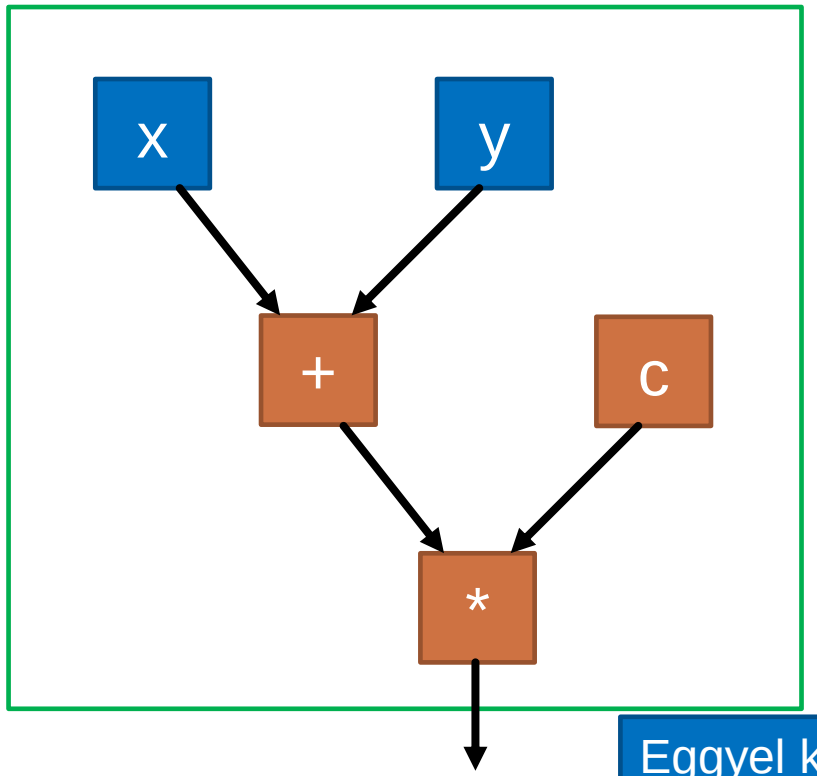


Normalizálás: disztributivitás kihasználása

```
t1: x*c
t2: y*c
t3: t1+t2
```




```
t1: x+y
t2: t1*c
```



Eggyel kevesebb szorzás!

Optimalizálás: konstans kifejezések kiértékelése

```
x = 2+4;
y = x*3;
```

SSA

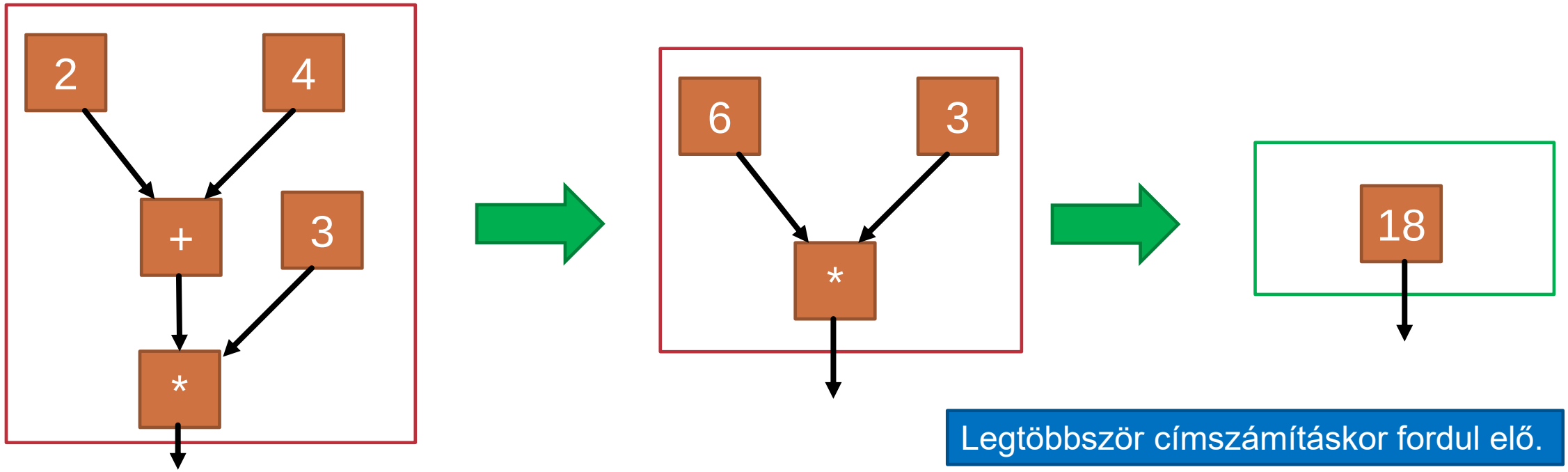
```
x1: 2+4
y1: x1*3
```

Opt.

```
x1: 6
y1: x1*3
```

Opt.

```
y1: 18
```



Legtöbbször címszámításkor fordul elő.

Optimalizálás: inverz operátor törlése

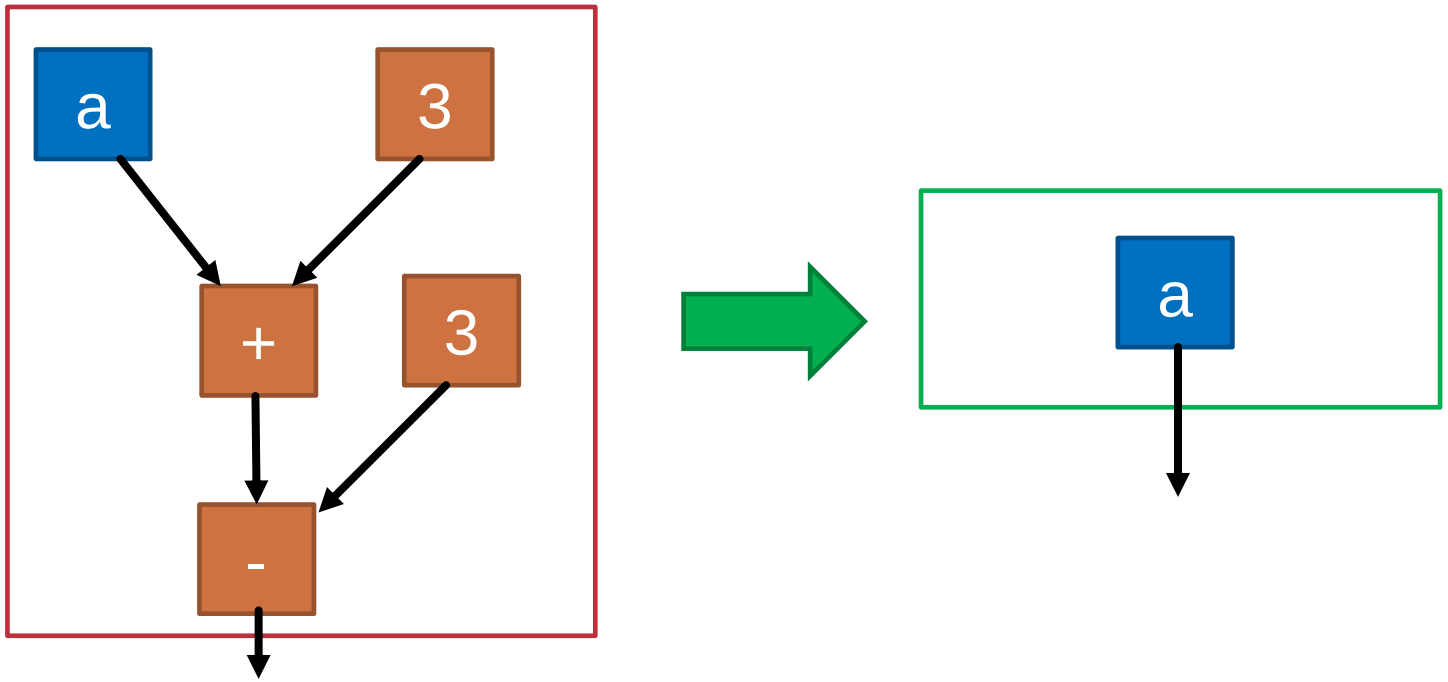
```
x = a+3;
y = x-3;
```

SSA

```
x1: a+3
y1: x1-3
```

Opt.

```
y1: a
```



Optimalizálás: operátoregyszerűsítés

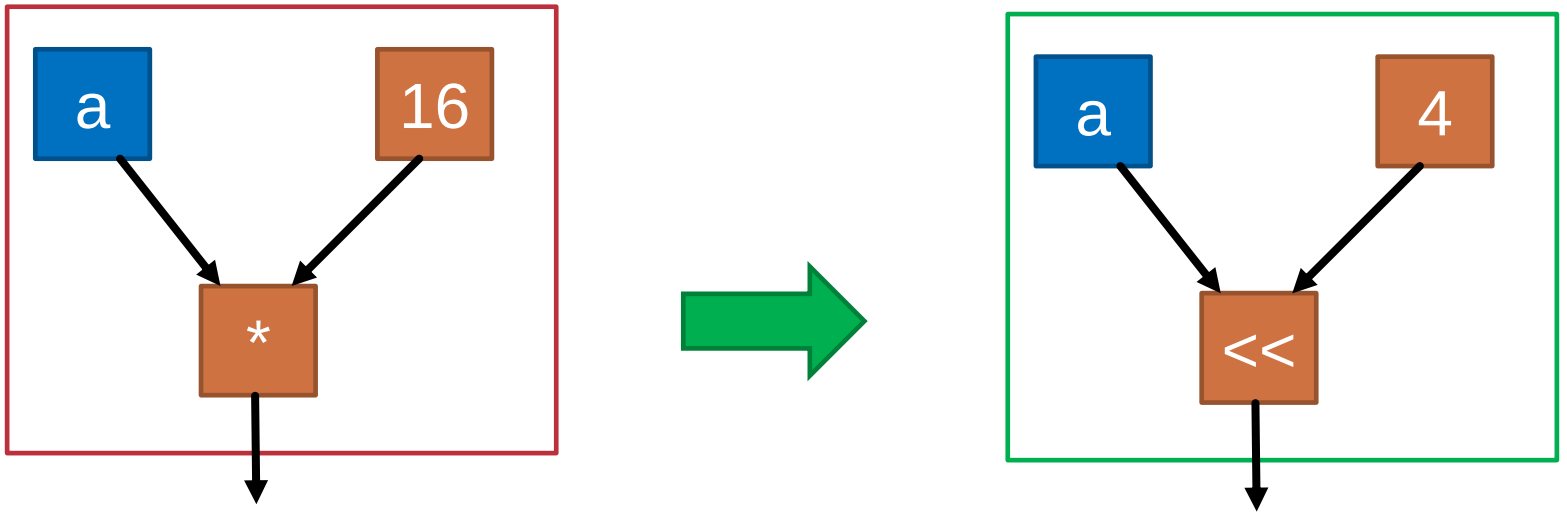
```
x = a*16;
```

SSA

```
x1: a*16
```

Opt.

```
x1: a << 4
```

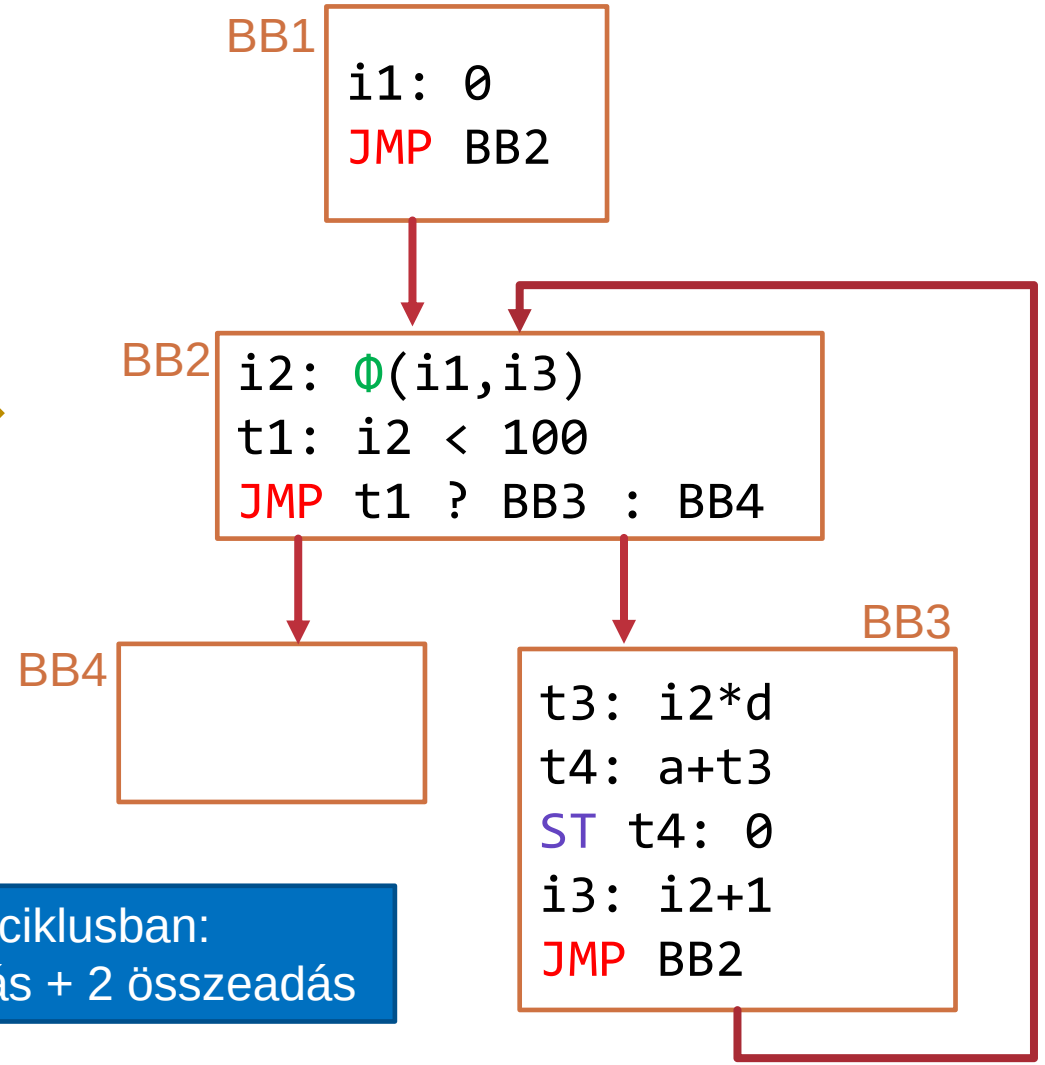


2-hatvánnyal szorzás/osztás helyett shift-elés.

Optimalizálás: ciklusok egyszerűsítése (1/3)

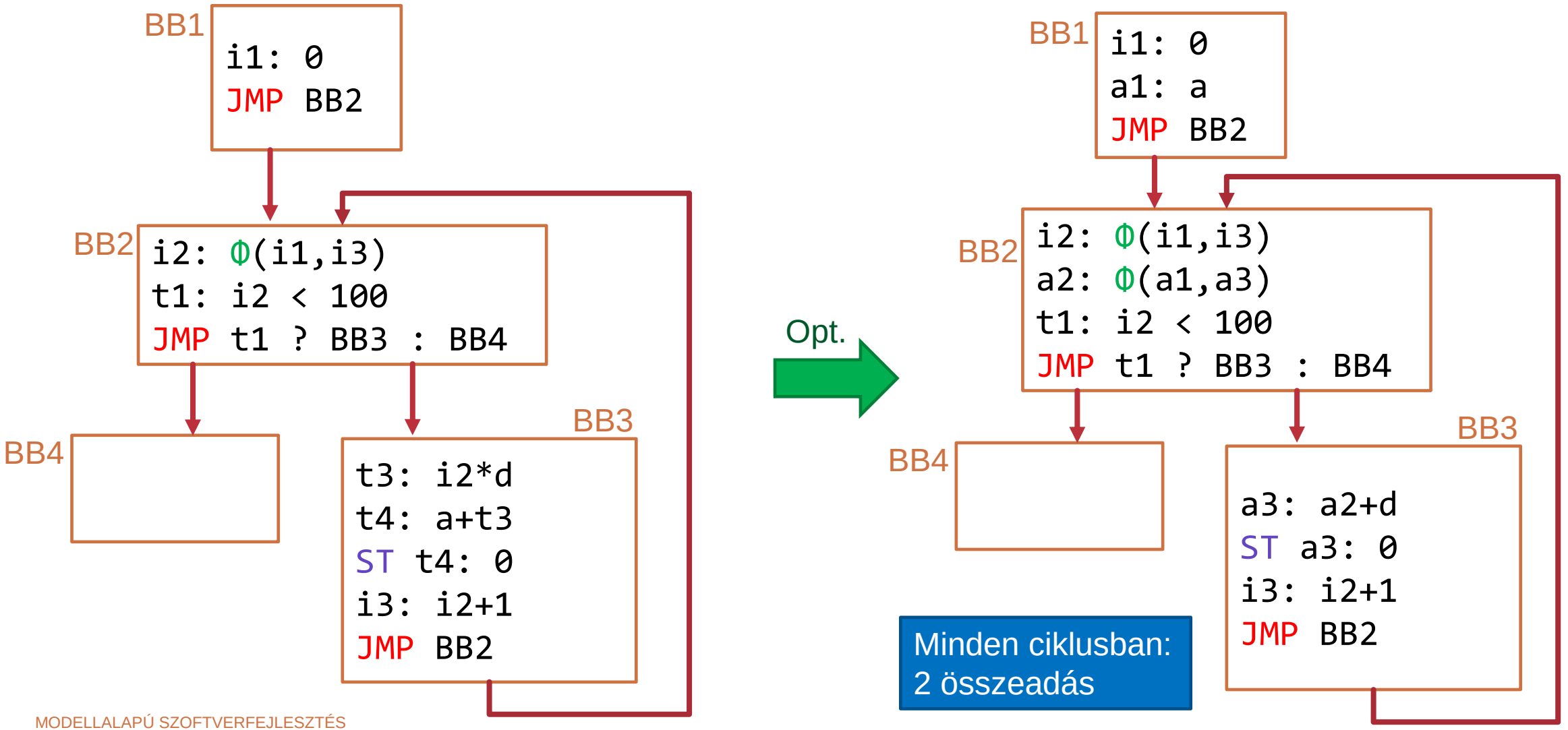
```
for (int i = 0; i < 100; ++i)
{
    a[i] = 0;
}
```

SSA

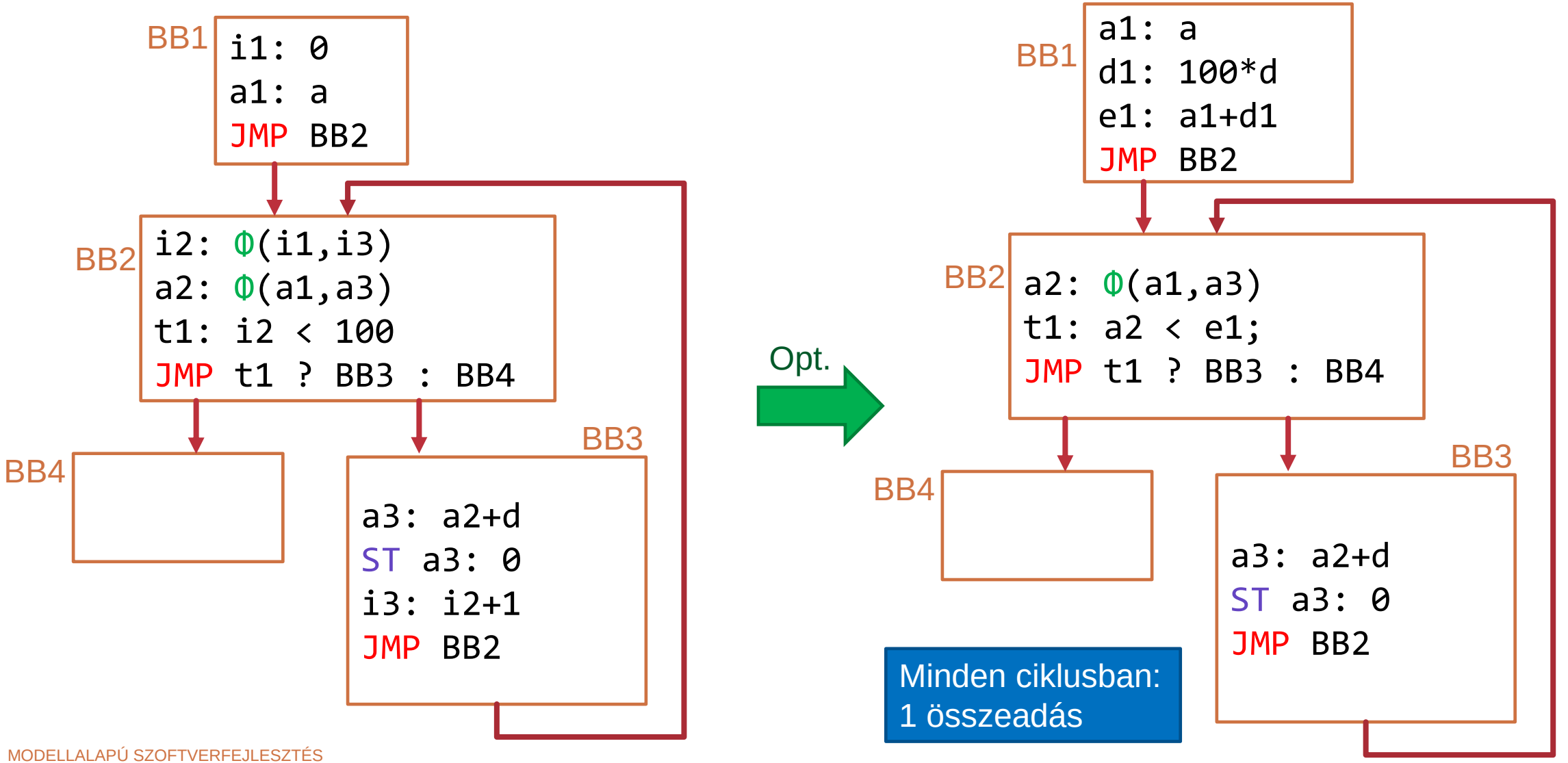


Minden ciklusban:
1 szorzás + 2 összeadás

Optimalizálás: ciklusok egyszerűsítése (2/3)



Optimalizálás: ciklusok egyszerűsítése (3/3)



Optimalizálás: store-load

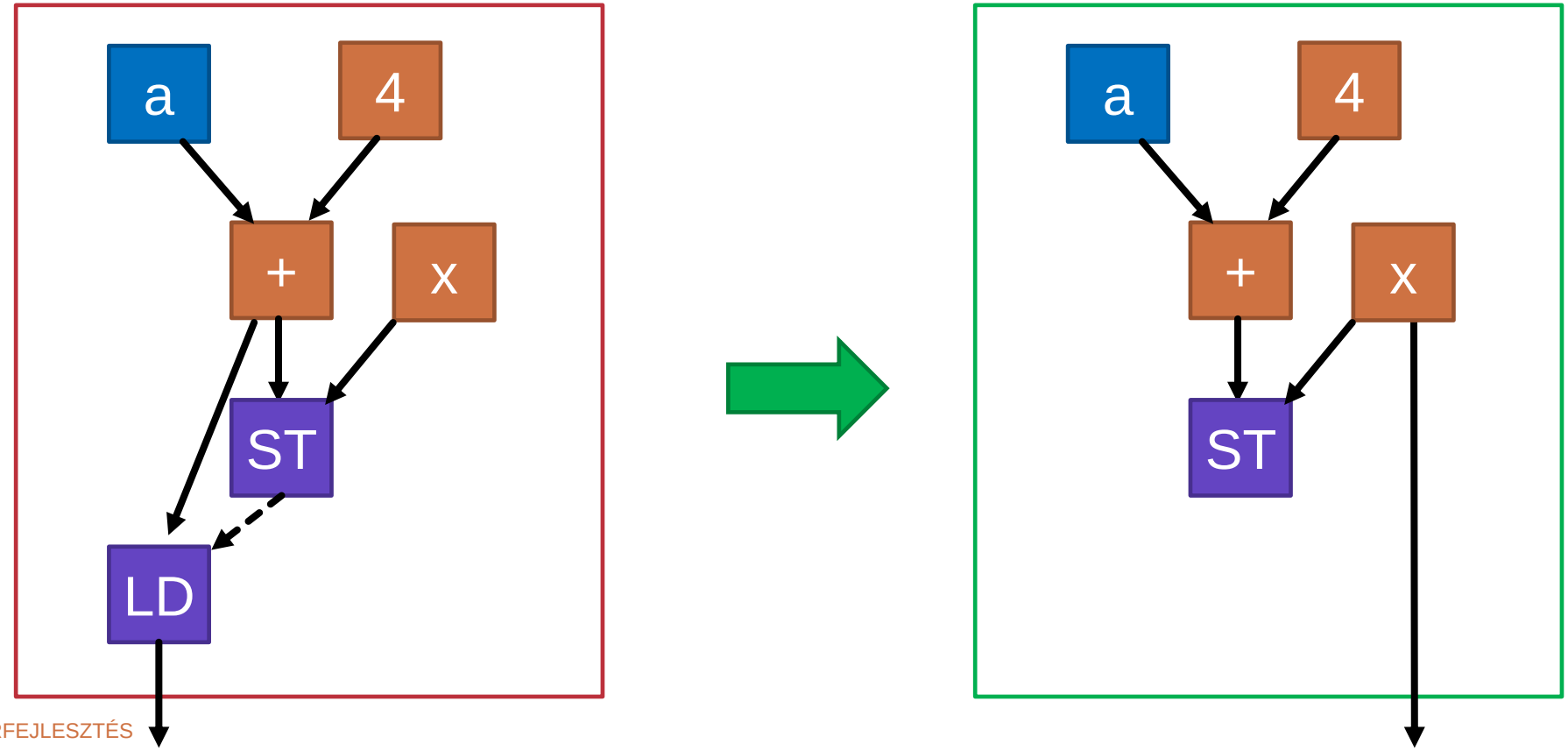
```
a[1] = x;
y = a[1];
```

SSA

```
t1: a+4
ST t1: x
y1: LD t1
```

Opt.

```
t1: a+4
ST t1: x
y1: x
```



Optimalizálás: load-load

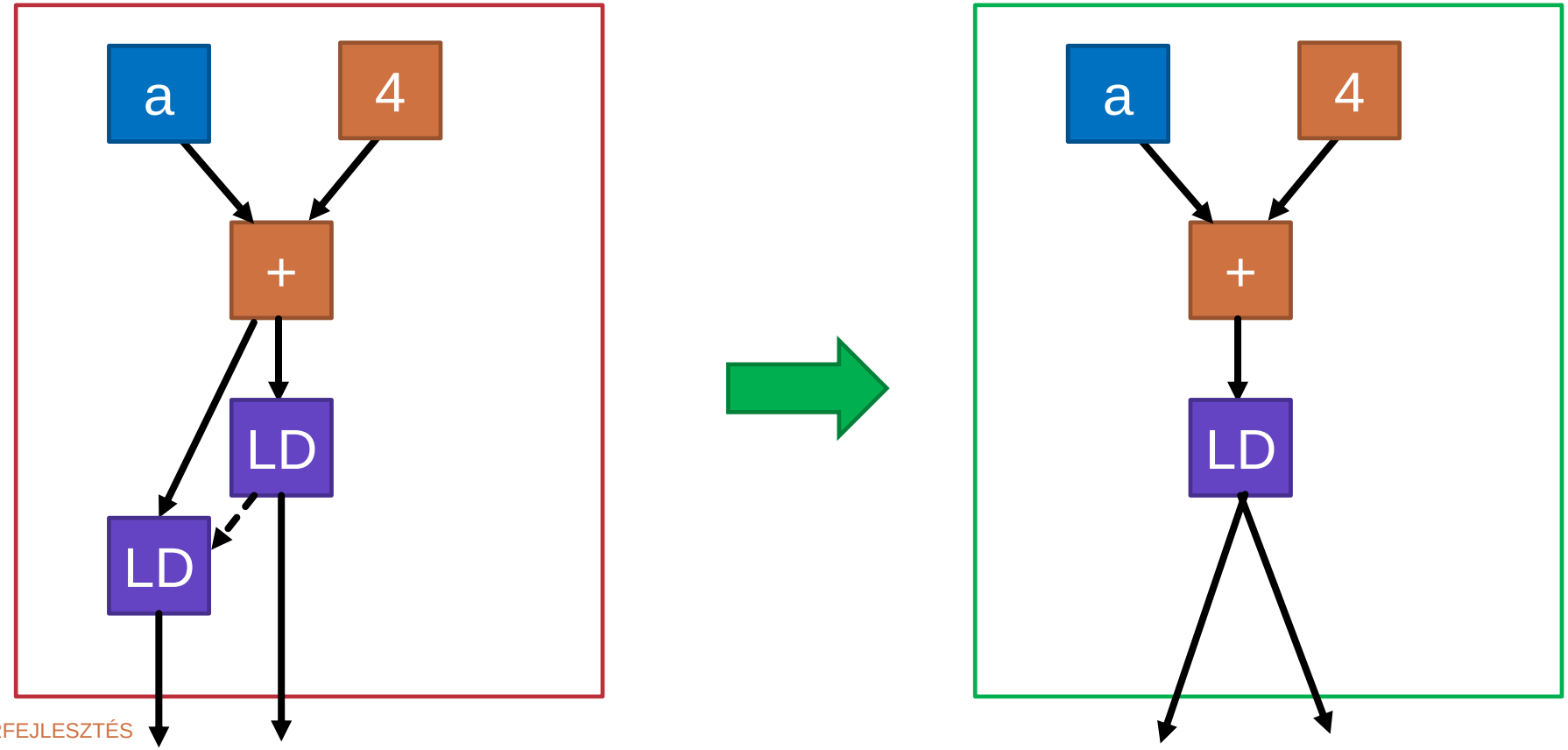
```
x = a[1];
y = a[1];
```

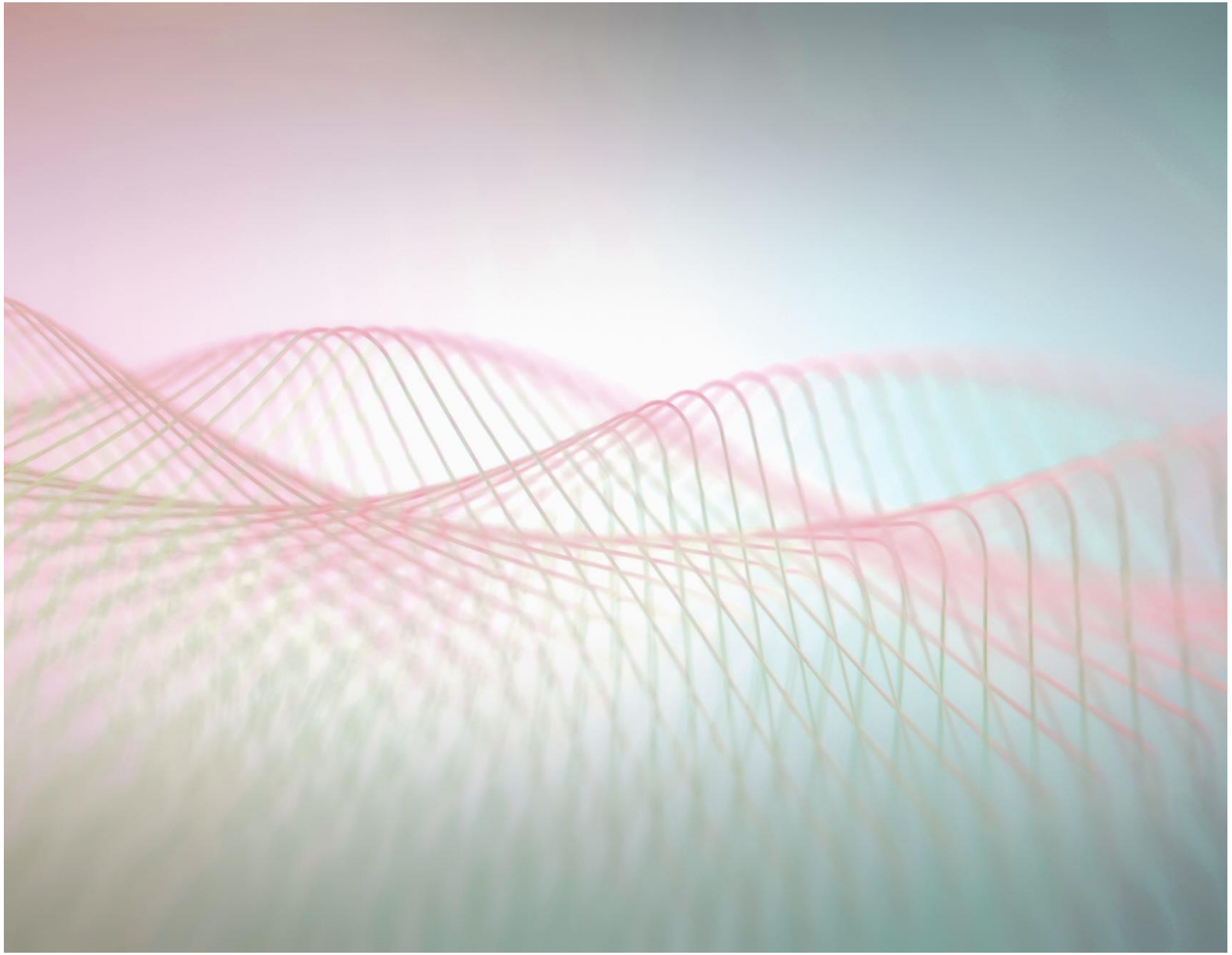
SSA

```
t1: a+4
x1: LD t1
y1: LD t1
```

Opt.

```
t1: a+4
x1: LD t1
y1: x1
```





Harmadik gyakorlat

A következő rész tartalmából…

- Témakör: Szöveges szakterületi nyelvek IDE támogatása
- Eclipse környezetben – Java nyelv
- Xtext – szöveges szakterületi nyelv leírása, feldolgozása és IDE támogatása
- Xcore – metamodellezés (egyben AST leírás)
- Xtend – sablon alapú kódgenerálás
- IDE funkciók:
  - syntax highlighting, validation, error markers, content assist, hyperlinking, outline, automatic code formatting, automatic build / code generation

Köszönöm a figyelmet!