# Stromy

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 10

B0B36PRP – Procedurální programování



## Přehled témat







# Část I

# Část 1 – Stromy



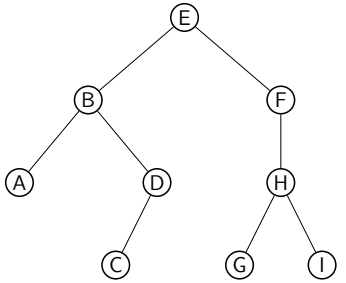


## Lineární a nelineární spojové struktury

- Spojové seznamy představují lineární spojovou strukturu

  *Každý prvek má nejvýše jednoho následníka*
- Nelineární spojové struktury (např. stromy)

  *Každý prvek může mít více následníků*
- **Binární strom**: každý prvek (uzel) má nejvýše dva následníky




- **kořen stromu**
- **list**
- **levý podstrom**
- **pravý podstrom**





## Binární strom

- Pro přehlednost uvažujme datové položky uzlů stromu jako hodnoty typu `int`
- Uzel stromu reprezentujeme strukturou `node_t`

```
typedef struct node {
   int value;
   struct node *left;
   struct node *right;
} node_t;
```

- Strom je pak reprezentován kořenem stromu, ze kterého máme přístup k jednotlivým uzlům (potomci `left` a `right` a jejich potomci)

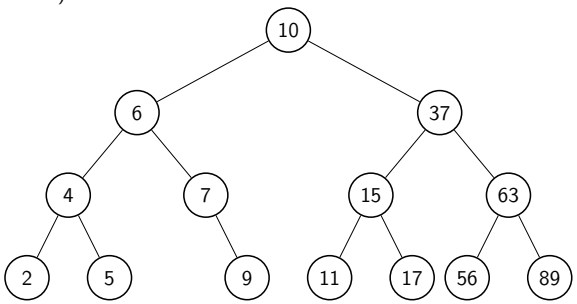
```
node_t *tree;
```





## Příklad – Binární vyhledávací strom

- Binární vyhledávací strom – Binary Search Tree (BST)
- Pro každý prvek (uzel) platí, že hodnota (`value`) potomka vlevo je menší (nebo `NULL`) a hodnota potomka vpravo je větší (nebo `NULL`)








## BST – `tree_insert()` 1/2

- Při vložení prvku dynamicky alokujeme uzel pomocnou (lokální) funkcí, např. `newNode()`

```
static node_t* newNode(int value)
{
   node_t *node= (node_t*)malloc(sizeof(node_t));
   node->value = value;
   node->left = node->right = NULL;
   return node;
}
```

lec10/tree-int.c

- Uvedením klíčového slova `static` je funkce viditelná pouze v modulu `tree-int.c`





## BST – `tree_insert()` 2/2

- Vložení prvku – využijeme rekurze a vkládáme na první volné vhodné místo, splňující podmínku BST.

*Binární vyhledávací strom nemusí být nutně vyvážený!*

```
node_t* tree_insert(int value, node_t *node)
{
   if (node == NULL) {
      return newNode(value); // vracíme nový uzel
   } else {
      if (value <= node->value) { //vložení do levého podstromu
         node->left = tree_insert(value, node->left);
      } else { // vložení do pravého podstromu
         node->right = tree_insert(value, node->right);
      }
      return node; // vracíme vstupní uzel!!!
   }
}
```

lec10/tree-int.c





## Průchod binárním vyhledávacím stromem

- Při hledání prvku konkrétní hodnoty se postupně zanořujeme hlouběji do stromu. Může nastat jedna z následujících situací:

  *Např. hodnota `value` představuje klíč nějaké datové položky.*

  1. Aktuální prvek má hledanou hodnotu klíče, hledání je ukončeno
  2. Hodnota klíče je menší než hodnota aktuálního prvku, pokračujeme v hledání v další úrovni levého potomka
  3. Hodnota klíče je větší než hodnota aktuálního prvku, pokračujeme v hledání v další úrovni pravého potomka
  4. Aktuální prvek má hodnotu **null**, hledání je ukončeno, prvek ve stromu není
- Při průchodu stromem postupujeme rekurzivně tak, že nejdříve navštěvujeme levé potomky a následně pak pravé potomky

  *Pokud budeme při takovém průchodu vypisovat hodnoty v levém podstromu, pak hodnotu prvku a následně hodnoty v pravém podstromu, vypíšeme hodnoty uložené ve stromu uspořádaně (sestupně nebo vzestupně, podle toho jesli vlevo jsou prvky menší nebo větší.)*

## Binární strom celočíselných hodnot int

- Kromě vložení prvků do stromu funkcí tree_insert(),

*Viz předchozí příklad*

implementujete následující funkce:

- tree_free() – Kompletní smazání stromu, včetně uvolnění paměti všech prvků
- tree_size() – Vrátí počet prvků ve stromu
- tree_print() – Vypsání prvků uložených ve stromu (BST)

```
void tree_free(node_t **tree);
int tree_size(const node_t *const tree);
void tree_print(const node_t *const node);
```

lec10/tree-int.h





## Příklad implementace tree_free()

```
void tree_free(node_t **tree)
{
   if (tree && *tree) {
      node_t * node = *tree;
      if ( node->left ) {
         tree_free(&(node->left));
      }
      if ( node->right ) {
         tree_free(&(node->right));
      }
      free(*tree);
      *tree = NULL; // fill the tree variable
                    // of tha calling function to NULL
   }
}
```

lec10/tree-int.h

Předáváme ukazatel na ukazatel, abychom mohli po uvolnění paměti nastavit hodnotu ukazatele ve volající funkci na NULL.





## Příklad implementace tree_size() a tree_print()

- Určení počtu prvků implementujeme rekurzí

```
int tree_size(const node_t *const node)
{
   return node == NULL ?
      0 :
      tree_size(node->left) + 1 + tree_size(node->
   right);
}
```

- Podobně výpis hodnot

```
void tree_print(const node_t *const node)
{
   if (node) {
      tree_print(node->left);
      printf("%d ", node->value);
      tree_print(node->right);
   }
}
```

lec10/tree-int.c





## Příklad použití – 1/3

- Strom naplníme for cyklem
- Vypíšeme počet prvků a uložené hodnoty funkcí tree_print()

```
  ...
  for(int i = 0; i < n; ++i) {
      printf("Insert value %i\n", values[i]);
      if (root == NULL) {
         root = tree_insert(values[i], NULL);
      } else {
         tree_insert(values[i], root);
      }
   }
   printf("No. of tree nodes is %i\n", tree_size(root));

   printf("Print tree: ");
   tree_print(root);
   printf("\n");

   tree_free(&root);
   printf("After tree_free() root is %p\n", root);
   return 0;
}
```

lec10/demo-tree-int.c





## Příklad použití – 3/3

- Program spustíme bez a s argumentem balanced

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out
Insert values2 that will result
    in none balanced tree
Insert value 5
Insert value 4
Insert value 6
Insert value 3
Insert value 7
Insert value 2
Insert value 8

No. of tree nodes is 7

Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
```

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out balanced

Insert values1 to make balanced
    tree
Insert value 5
Insert value 3
Insert value 7
Insert value 2
Insert value 4
Insert value 6
Insert value 8

No. of tree nodes is 7

Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
```

- V obou případech je výpis uspořádaný

lec10/demo-tree-int.c

Jak otestovat, že operace na stromem (tree_insert()) zachová vlastnosti BST?





## Test vlastnosti binárního vyhledávacího stromu

- Ověření zdali je strom binárním vyhledávacím stromem otestujeme funkcí tree_is_bst()

```
_Bool tree_is_bst(const node_t *const node);
```

- Funkce rekurzivně projde strom a ověří, že pro každý uzel platí
  1. Hodnota uzlu není menší než nejvyšší hodnota v levém podstromu
  2. Hodnota uzlu není větší než nejmenší hodnota v pravém podstromu
  3. Podstrom levého následníka splňuje vlastnost BST
  4. Podstrom pravého následníka splňuje vlastnost BST
- K tomu potřebujeme pomocné funkce getMaxValue() a getMinValue()





## Příklad implementace tree_is_bst() - 1/3

- Za předpokladu BST můžeme maximální hodnotu nalézt iteračně

```
static int getMaxValue(const node_t *const node)
{
   const node_t *cur = node;
   while (cur->right) {
      cur = cur->right;
   }
   return cur->value;
}
```

- Podobně minimální hodnotu

```
static int getMinValue(const node_t *const node)
{
   const node_t *cur = node;
   while (cur->left) {
      cur = cur->left;
   }
   return cur->value;
}
```

lec10/tree-int.c





## Příklad implementace tree_is_bst() - 2/3

```
_Bool tree_is_bst(const node_t *const node)
{
   _Bool ret = true;
   if (!node) {
      if (node->left
            && getMaxValue(node->left) > node->value) {
         ret = false;
      }
      if (ret && node->right
            && getMinValue(node->right) <= node->value) {
         ret = false;
      }
      if (ret
            && (
               !tree_is_bst(node->left)
               || !tree_is_bst(node->right)
               )) {
         ret = false;
      }
   }
   return ret;
}
```

lec10/tree-int.c





## Příklad implementace tree_is_bst() - 3/3

- Přidáme výpis a volání tree_is_bst()

```
   ...
   printf("Max tree depth: %i\n", tree_max_depth(root));
   printf("Tree is binary seach tree (BST): %s\n",
         tree_is_bst(root) ? "yes" : "no");
```

- Program spustíme bez a s argumentem balanced

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out
Insert values2 that will result
    in none balanced tree
...
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
Tree is binary seach tree (BST):
    yes
Print tree by depth row
```

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out balanced
Insert values1 to make balanced
    tree
...
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
Tree is binary seach tree (BST):
    yes
```

- V obou případech je podmínka BST splněna

lec10/demo-tree-int.c

Test sice indikuje, že strom je správně vytvořen, ale vizuálně nám výpis příliš nepomohl. V tomto jednoduchém případě si můžeme dále napsat funkci pro názornější výpis jednotlivých úrovní stromu. K tomu budeme potřebovat určení hloubky stromu.

## Příklad implementace tree_max_depth()

- Funkci implementujeme rekurzí

```
int tree_max_depth(const node_t *const node)
{
   if (node) {
      const int left_depth = tree_max_depth(node->left);
      const int right_depth = tree_max_depth(node->right);
      return left_depth > right_depth ?
         left_depth + 1 :
         right_depth + 1;
   } else {
      return 0;
   }
}
```

lec10/tree-int.c





## Výpis hodnot v konkrétní hloubce stromu printDepth()

- Výpis konkrétní vrstvy (hloubky) provedeme rekurzivně lokální funkcí printDepth()

```
static void printDepth(int depth, int cur_depth,
    const node_t *const node)
{
   if (depth == cur_depth) {
      if (node) {
         printf("%2d ", node->value);
      } else {
         printf(" - ");
      }
   } else if (node) {
      printDepth(depth, cur_depth + 1, node->left);
      printDepth(depth, cur_depth + 1, node->right);
   }
}
```

lec10/tree-int.c





## Příklad implementace výpisu stromu tree_print_layers()

- Výpis hodnot po jednotlivých vrstvách (hloubce) implementujeme iteračně pro dílčí hloubky stromu

```
void tree_print_layers(const node_t *const node)
{
   const int depth = tree_max_depth(node);
   for (int i = 0; i <= depth; ++i) {
      printDepth(i, 0, node);
      printf("\n");
   }
}
```

lec10/tree-int.c





## Příklad použití tree_print_layers()

- Přidáme výpis a volání tree_print_layers()

```
...
printf("Print tree by depth row\n");
tree_print_layers(root);
...
```

- Program spustíme bez a s argumentem balanced

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out
Insert values2 that will result
   in none balanced tree
...
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
Tree is binary seach tree (BST):
    yes
Max tree depth: 4
Print tree by depth row
 5
 4  6
 3  -  -  7
 2  -  -  8
 -  -  -  -
```

```
clang tree-int.c demo-tree-int.c
./a.out balanced
Insert values1 to make balanced
   tree
...
...
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
Tree is binary seach tree (BST):
    yes
Max tree depth: 3
Print tree by depth row
 5
 3  7
 2  4  6  8
 -  -  -  -  -  -  -  -
```

lec10/demo-tree-int.c





## Stromové struktury

- Stromové struktury jsou významné datové struktury pro vyhledávání

  *Složitost vyhledávání je úměrná hloubce stromu.*
- Binární stromy – každý uzel má nejvýše dva následníky
  - Hloubku stromu lze snížit tzv. vyvažováním stromu

    *Georgy Adelson-Velsky a Landis*
    - AVL stromy
    - Red-Black stromy
  - **Plný binární strom** – každý vnitřní uzel má dva potomky a všechny uzly jsou co nejvíce vlevo
    - Můžeme efektivně reprezentovat polem

      *Ppro daný maximální počet uzlů*
    - Lze použít pro efektivní implementaci prioritní fronty

      *Heap – halda*
    - Halda (heap) je základem řadícího algoritmu *Heap Sort*
- Vícecestné stromy – např. B–strom (Bayer tree) pro ukládání uspořádaných záznamů

  *Informativní více v Algoritmizaci*



# Část II

## Část 2 – Příklad načítání grafu, kompilace a projekt s více soubory



## Dílčí příklady použití jazykových konstrukcí v projektu

- Program složený z více souborů
- Dynamická alokace paměti
- Načítání souboru
- Parsování čísel z textového souboru

- Měření času běhu programu
- Řízení kompilace projektu složeného z více souborů Makefile



## Zadání

- Vytvořte program, který načte orientovaný graf definovaný posloupností hran
  - Graf je zapsán v textovém souboru
- Navrhněte datovou strukturu pro reprezentaci grafu
- Počet hran není dopředu znám

  *Zpravidla však budou na vstupu grafy s průměrným počtem hran 3n pro n vrcholů grafu.*
- Hrana je definována číslem vstupního a výstupního vrcholu a cenou (také celé číslo)
  - Ve vstupním souboru je každá hrana zapsaná samostatně na jednom řádku
  - Řádek má tvar:

    from to cost
  - kde from, to a cost jsou kladná celá čísla v rozsahu int
- Pro načtení hodnot hran použijte pro zjednodušení funkci fscanf()
- *Program dále rozšiřte o sofistikovanější, méně výpočetně náročné načítání*



## Pravidla překladu v gmake / make

- Pro řízení překladu použijeme pravidlový předpis programu GNU make

  make nebo gmake
- Pravidla se zapisují do souboru Makefile

  http://www.gnu.org/software/make/make.html
- Pravidla jsou deklarativní ve tvaru definice cíle, závislostí cíle a akce, která se má provést

  **cíl** : **závislosti** *dvojtečka*

  **akce** *tabulátor*
- Cíl (podobně jako závislosti) může být například symbolické jméno nebo jméno souboru

  **tload.o** : **tload.c**

  **clang -c tload.c -o tload.o**
- Předpis může být napsán velmi jednoduše

  *Například jako v uvedené ukázce.*

  Flexibilita použití však spočívám především v použití zavedených proměnných, vnitřních proměnných a využití vzorů, neboť většina zdrojových souborů se překládá identicky.

## Příklad – Makefile

- Definujeme pravidlo pro vytvoření souborů .o z .c
- Definice přeložených souborů vychází z aktuálních souborů v pracovním adresáři s koncovkou .c

```
CC:=ccache $(CC)
CFLAGS+=-O2

OBJS=$(patsubst %.c,%.o,$(wildcard *.c))

TARGET=tload

bin: $(TARGET)

$(OBJS): %.o: %.c
    $(CC) -c $< $(CFLAGS) $(CPPFLAGS) -o $@

$(TARGET): $(OBJS)
    $(CC) $(OBJS) $(LDFLAGS) -o $@

clean:
    $(RM) $(OBJS) $(TARGET)
```

ccache

*CC=clang make vs CC=gcc make*

- **Při linkování záleží na pořadí souborů (knihoven)!**
- Jednou z výhod dobrých pravidel je možnost paralelního překladu nezávislých cílů

make -j 4



## Definice datové struktury grafu – graph.h

- Zavedeme nový typ datové struktury hrana—edge_t,
- který použijeme ve struktuře grafu—graph_t

```
#ifndef __GRAPH_H__
#define __GRAPH_H__

typedef struct {
   int from;
   int to;
   int cost;
} edge_t;

typedef struct {
   edge_t *edges;
   int length;
   int size;
} graph_t;

#endif
```

- Soubor budeme opakovaně vkládat (include) v ostatních zdrojových souborech, proto „zabraňujeme" opakované definici konstantou preprocesoru __GRAPH_H__



## Pomocné funkce pro práci s grafem

- Alokaci/uvolnění grafu implementujeme v samostatných funkcích
- Při načítání grafu budeme potřebovat postupně zvyšovat paměť pro uložení načítaných hran
- Proto využijeme dynamické alokace paměti pro „*nafukování*" paměti pro uložení hran grafu—enlarge_graph() o nějakou definovanou velikost

```
#ifndef __GRAPH_UTILS_H__
#define __GRAPH_UTILS_H__

#include "graph.h"

graph_t* allocate_graph(void);

void free_graph(graph_t **g);

graph_t* enlarge_graph(graph_t *g);

void print_graph(graph_t *g);

#endif
```



## Alokace paměti pro uložení grafu

- Testujeme úspěšnost alokace paměti—assert()
- Po alokaci nastavíme hodnoty proměnných na NULL a 0

```
#include <assert.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

#include "graph.h"

graph_t* allocate_graph(void)
{
   graph_t *g = (graph_t*) malloc(sizeof(graph_t));
   assert(g != NULL);
   g->edges = NULL;
   g->length = 0;
   g->size = 0;
   /* or we can call calloc */
   return g;
}
```

- Alternativně můžeme použít funkci calloc()



## Uvolnění paměti pro uložení grafu

- Testujeme validní hodnotu argumentu funkce—assert()

*Pokud se stane chyba, tak funkci v programu špatně voláme.*

*Až program odladíme můžeme kompilovat s NDEBUG.*

```
void free_graph(graph_t **g)
{
   assert(g != NULL && *g != NULL);
   if ((*g)->size > 0) {
      free((*g)->edges);
   }
   free(*g);
   *g = NULL;
}
```

- Po uvolnění paměti nastavíme hodnotu ukazatele na strukturu na hodnotou NULL



## Zvětšení paměti pro uložení hran grafu

- V případě nulové velikosti alokujme paměť pro NSIZE hran
- NSIZE můžeme definovat při překladu, jinak výchozí hodnota 10

např. clang -D NSIZE=100 -c graph_utils.c

```
#ifndef NSIZE
#define NSIZE 10
#endif

graph_t* enlarge_graph(graph_t *g)
{
   assert(g != NULL);
   int n = g->size == 0 ? NSIZE : g->size * 2;
   /* double the memory */
   edge_t *e = (edge_t*)malloc(n * sizeof(edge_t));
   memcpy(e, g->edges, g->length * sizeof(edge_t));
   free(g->edges);
   g->edges = e;
   g->size = n;
   return g;
}
```

- Místo relativně komplexní alokace nového bloku paměti a kopírování původního obsahu můžeme jednoduše použít funkci realloc()



## Tisk hran grafu

- Pro tisk hran grafu využijeme pointerovou aritmetiku

```
void print_graph(graph_t *g)
{
   assert(g != NULL);
   fprintf(stderr, "Graph has %d edges and %d edges are
     allocated\n", g->length, g->size);
   edge_t *e = g->edges;
   for(int i = 0; i < g->length; ++i, e++) {
      printf("%d %d %d\n", e->from, e->to, e->cost);
   }
}
```

- Informace vypisujeme na standardní chybový výstup
- Graf tiskneme na standardní výstup
- Při tisku a přesměrování standardního výstupu tak v podstatě můžeme realizovat kopírování souboru s grafem

*Např.* ./tload -p g > g2



## Hlavní funkce programu – main()

- V hlavní funkci zpracujeme předané argumenty programu
- V případě uvedení přepínače -p vytiskneme graf na stdout

```
int main(int argc, char *argv[])
{
   int ret = 0;
   int print = 0;
   char *fname;
   int c = 1;
   if (argc > 2 && strcmp(argv[c], "-p") == 0) {
      print = 1;
      c += 1;
   }
   fname = argc > 1 ? argv[c] : NULL;
   fprintf(stderr, "Load file '%s'\n", fname);
   graph_t *graph = allocate_graph();
   int e = load_graph_simple(fname, graph);
   fprintf(stderr, "Load %d edges\n", e);
   if (print) {
      print_graph(graph);
   }
   free_graph(&graph);
   return ret;
}
```



## Jednoduché načtení grafu – deklarace

- Prototyp funkce uvedeme v hlavičkovém souboru–load_simple.h

```
#ifndef __LOAD_SIMPLE_H__
#define __LOAD_SIMPLE_H__

#include "graph.h"

int load_graph_simple(const char *fname, graph_t *g);

#endif
```

- Vkládáme pouze soubor graph.h—pro definici typu graph_t

*Snažíme se zbytečně nevkládat nepoužívané soubory*

## Jednoduché načtení grafu – implementace 1/2

- Používáme funkci `enlarge_graph()`, proto vkládáme `graph_utils.h`

```
#include <stdio.h>
#include "graph_utils.h"
int load_graph_simple(const char *fname, graph_t *g)
{
   int c = 0;
   int exit = 0;
   FILE *f =  fopen(fname, "r");
   while(!feof(f) && !exit) {
      if (g->length == g->size) {
         enlarge_graph(g);
      }
      edge_t *e = g->edges + g->length;
      while(!feof(f) && g->length < g->size) {
         /* read and parse a single line -> NEXT SLIDE! */
      }
   }
   fclose(f);
   return c;
}
```

- `load_simple.h` vkládat nemusíme, obsahuje pouze prototyp funkce
- Obecně je to však dobrý zvykem nebo nutností (definice typů)



## Jednoduché načtení grafu – implementace 2/2

- Pro načtení řádku s definicí hrany použijeme funkci `fscanf()`

```
while(!feof(f) && g->length < g->size) {
   int r = fscanf(f, "%d %d %d\n",
         &(e->from), &(e->to), &(e->cost));

   if (r == 3) {
      g->length += 1;
      c += 1; /* pocet nactenych hran */
      e += 1; /* posun ukazatele grafu o sizeof(edge_t)*/
   } else {
      exit = 1; /* neco je spatne ukoncujeme naciteni */
      break;
   }
}
```

- Kontrolujeme počet přečtených parametrů a až pak zvyšujeme počet hran v grafu



## Spuštění programu 1/3

- Nechť máme soubor `g` definující graf o 1 000 000 uzlech

*Velikost souboru cca 62 MB (příkaz `du`–disk usage)*

```
% du g
62M     g

% ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges

% time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
./tload g  1.12s user 0.03s system 99% cpu 1.151 total
```

- Příkazem `time` můžeme změřit potřebný čas běhu programu

*strojový, systémový a reálný*



## Spuštění programu 2/3

- Příznakem `-p` a přesměrováním standardního výstupu můžeme vytisknout graph do souboru

*V podstatě vstupní soubor zkopírujeme.*

```
% time ./tload -p g  > g2
Load file 'g'
Load 2998898 edges
Graph has 2998898 edges and 5242880 edges are allocated
./tload -p g > g2  2.09s user 0.07s system 99% cpu 2.158
    total

% md5 g g2
MD5 (g) = d969461a457e086bc8ae08b5e9cce097
MD5 (g2) = d969461a457e086bc8ae08b5e9cce097
```

- Čas běhu programu je přibližně dvojnásobný
- Oba soubory se zdají být z otisku `md5` identické

*Na Linuxu `md5sum` případně lze použít otisk `sha1`, `sha256` nebo `sha512`*



## Spuštění programu 3/3

- Implementací sofistikovanějšího načítání

```
% /usr/bin/time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
0.19 real         0.16 user         0.03 sys
```

- lze získat výrazně rychlejší načítání

*160 ms vs 1100 s*

```
% /usr/bin/time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
1.15 real         1.05 user         0.10 sys
```



## Jak a za jakou cenu zrychlit načítání seznamu hran

- Zrychlit načítání můžeme přijmutím předpokladů o vstupu
- Při použití `fscanf()` je nejdříve načítán řetězec (řádek) pak řetěz reprezentující číslo a následně je parsováno číslo
- Převod na číslo je napsán obecně
- Můžeme použití postupné „bufferované" načítání
- Převod na číslo můžeme realizovat přímo po přečtení tokenu
- parsováním znaků (číslic) načtené posloupnosti bytů v obráceném pořadí
- Můžeme získat výrazně rychlejší kód, který je však komplexnější a pravděpodobně méně obecný



# Část III

# Část 2 – Zadání 9. domácího úkolu (HW09)



## Zadání 9. domácího úkolu HW09

- 
- Termín odevzdání: 24.12.2016, 23:59:59 AoE

*AoE – Anywhere on Earth*

*Prodloužený termín (náročná úloha)!*





# Shrnutí přednášky

# Diskutovaná témata

- Stromy – nelineární spojové struktury
- Binární vyhledávací strom
- Vyhledání prvku a průchod stromem (rekurzí)
- Rekurzivní uvolnění paměti alokované stromem
- Test splnění vlastnosti binárního vyhledávacího stromu
- Hloubka stromu a výpis stromu po úrovních
- Příklad jednoduchého binárního vyhledávacího stromu s položkami typu `int` `lec10/tree`
- Plný binární strom a jeho reprezentace
- Makefile
- Příklad načtení stromu jako seznamu hran `lec10/graph_load`
- Příště abstraktní datový typ (ADT)