

# Standardní knihovny C, rekurze

Jan Faigl

Katedra počítačů

Fakulta elektrotechnická

České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 07

**B0B36PRP – Procedurální programování**

# Přehled témat

# Část 1 – Standardní knihovny, čtení/zápis ze souboru

Standardní knihovny

Práce se soubory

Zpracování chyb

# Část 2 – Rekurze

Faktoriál

Obrácený výpis

Hanojské věže

Rekurze

Fibonacciho posloupnost

## Část 3 – Zadání 7. domácího úkolu (HW07)

Zadání – povinná část

Zadání – volitelná část

Zadání – bonusová část

# Část I

## Část 1 – Standardní knihovny, čtení/zápis ze souboru

# Standardní knihovny

- Jazyk C sám osobě neobsahuje prostředky pro vstup/výstup dat, složitější matematické operace ani:
  - práci z textovými řetězci
  - správu paměti pro dynamické přidělování
  - vyhodnocení běhových chyb (run-time errors)
- Tyto a další funkce jsou obsaženy ve standardních knihovnách, které jsou součástí překladače jazyka C
  - **Knihovny** – přeložený kód se připojuje k programu, např `libc.so`
  - **Hlavičkové soubory** – obsahují prototypy funkcí, definici typů, makra a konstanty a vkládají se do zdrojových souborů příkazem preprocesoru `#include <jmeno_knihovny.h>`

*Např. `#include <stdio.h>`*

# Standardní knihovny

- `stdio.h` – Vstup a výstup (formátovaný i neformátovaný)
- `stdlib.h` – Matematické funkce, alokace paměti, převod řetězců na čísla, řazení (`qsort`), vyhledávání (`bsearch`), generování náhodných čísel (`rand`)
- `limits.h` – Rozsahy číselných typů
- `math.h` – Matematické funkce
- `errno.h` – Definice chybových hodnot
- `assert.h` – Zpracování běhových chyb
  
- `ctype.h` – Klasifikace znaků (`char`)
- `string.h` – Řetězce, blokové přenosy dat v paměti (`memcpy`)
- `locale.h` – Internacionalizace
- `time.h` – Datum a čas



# Standardní knihovny (POSIX)

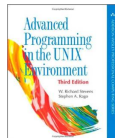
## Komunikace s operačním systémem (OS)

*POSIX – Portable Operating System Interface*

- `stdlib.h` – Funkce využívají prostředků OS
- `signal.h` – Asynchronní události, vlákna
- `unistd.h` – Procesy, čtení/zápis souborů, ...
- `pthread.h` – Vlákna (POSIX Threads)
- `threads.h` – Standardní knihovna pro práci s vlákny (C11)



Advanced Programming in the UNIX Environment, 3rd edition, *W. Richard Stevens, Stephen A. Rago* Addison-Wesley, 2013, ISBN 978-0-321-63773-4



## Základní práce se soubory – otevření souboru

- Knihovna `stdio.h`
- Přístup k souboru `FILE *f;`
- Otevření souboru

`FILE *fopen(char *filename, char *mode);`

- Práce s binárními i textovými soubory
- Soubory jsou čteny/zapisovány sekvenčně
  - Se soubory se pracuje jako s proudem dat
  - Aktuální „pozici“ v souboru si můžeme představit jako kurzor
  - Při otevření souboru se kurzor nastavuje na začátek souboru
- Režim práce se souborem je dán hodnotou proměnné `mode`
  - `"r"` – režim čtení,
  - `"w"` – režim zápisu

*Vytvoří soubor, pokud neexistuje, jinak smaže obsah souboru*

- `"a"` – režim přidávání do souboru

*Kurzor je nastaven na konec souboru.*

- Můžeme otevřít s příznakem `+`, např. `"+r"` pro otevření souboru pro čtení i zápis

viz [man fopen](#)

## Testování – otevření/zavření souboru

### ■ Testování otevření souboru

```
1 char *fname = "file.txt";
2
3 if ((f = fopen(fname, "r")) == NULL) {
4     fprintf(stderr, "Error: open file '%s'\n", fname);
5 }
```

### ■ Zavření souboru – `int fclose(FILE *file);`

```
1 if (fclose(f) == EOF) {
2     fprintf(stderr, "Error: close file '%s'\n", fname);
3 }
```

### ■ Dosažení konce souboru – `int feof(FILE *file);`

## Příklad – čtení souboru znak po znaku

- Čtení znaku: `int getc(FILE *file);`
- Hodnota znaku (`unsigned char`) je vrácena jako `int`

```
1 int count = 0;
2 while ((c = getc(f)) != EOF) {
3     printf("Read character %d is '%c'\n", count,
4           c);
5     count++;
6 }
```

`lec07/read_file.c`

- Pokud nastane chyba nebo konec souboru vrací funkce `getc` hodnotu `EOF`
- Pro rozlišení chyby a konce souboru lze využít funkce `feof()` a `ferror()`

## Formátované čtení ze souboru

- `int fscanf(FILE *file, const char *format, ...);`
- Analogie formátovanému výstupu – hodnoty jsou předávány odkazem
- Vrací počet přečtených položek, například pro vstup

```
record 1 13.4
```

- příkaz: `int r = fscanf(f, "%s %d %lf\n", str, &i, &d);`
- bude hodnota proměnné

```
r == 3
```

- Při čtení textového řetězce je nutné zajistit dostatečný paměťový prostor pro načítaný textový řetězec, např. omezením velikosti řetězce

```
char str[10];
```

```
int r = fscanf(f, "%9s %d %lf\n", str, &i, &d);
```

[lec07/file\\_scanf.c](#)

## Zápis do souboru

- Po znaku – `int putc(int c, FILE *file);`
- Formátovaný výstup

```
        int fprintf(FILE *file, const *format, ...);  
int main(int argc, char *argv[]) {  
    char *fname = argc > 1 ? argv[1] : "out.txt";  
    FILE *f;  
    if ((f = fopen(fname, "w")) == NULL) {  
        fprintf(stderr, "Error: Open file '%s'\n", fname);  
        return -1;  
    }  
    fprintf(f, "Program arguments argc: %d\n", argc);  
    for(int i = 0; i < argc; ++i) {  
        fprintf(f, "argv[%d]='%s'\n", i, argv[i]);  
    }  
    if (fclose(f) == EOF) {  
        fprintf(stderr, "Error: Close file '%s'\n", fname);  
        return -1;  
    }  
    return 0;  
}  
                                            lec07/file_printf.c
```

- Identicky lze použít `stdin`, `stdout`, `stderr`

## Náhodný přístup k souborům – `fseek()`

- Nastavení pozice kurzoru v souboru relativně vůči `whence` v bajtech
- `int fseek(FILE *stream, long offset, int whence);`, kde `whence`
  - `SEEK_SET` – nastavení pozice od začátku souboru
  - `SEEK_CUR` – relativní hodnota vůči současné pozici v souboru
  - `SEEK_END` – nastavení pozice od konce souboru
- `fseek()` vrací 0 v případě úspěšného nastavení pozice
  
- Nastavení pozice v souboru na začátek  
`void rewind(FILE *stream);`

## Binární čtení/zápis z/do souboru

- Pro čtení a zápis bloku dat můžeme využít funkce `fread` a `fwrite` z knihovny `stdio.h`
- Načtení `nmemb` prvků, každý o velikosti `size` bajtů  
`size_t fread(void* ptr, size_t size, size_t nmemb, FILE *stream);`
- Zápis `nmemb` prvků, každý o velikosti `size` bajtů  
`size_t fwrite(const void *ptr, size_t size, size_t nmemb, FILE *stream);`
- Funkce vrací počet přečtených/zapsaných bajtů
- Pokud došlo k chybě nebo detekci konce souboru funkce vrací menší než očekávaný počet bajtů



## Zpracování chyb

- Základní chybové kódy jsou definovány v `errno.h`
- Tyto kódy jsou ve standardních C knihovnách používány jako příznaky nastavené v případě selhání volání funkce v globální proměnné `errno`
- Například otevření souboru `fopen()` vrací hodnotu `NULL`, pokud se soubor nepodařilo otevřít
- Z této hodnoty, ale nepoznáme proč volání selhalo
- Pro funkce, které nastavují `errno`, můžeme podle hodnoty identifikovat důvod chyby
- Textový popis číselných kódů pro standardní knihovnu C je definován v `string.h`
- Řetězec můžeme získat voláním funkce

```
char* strerror(int errnum);
```

## Příklad použití `errno`

### ■ Otevření souboru

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <errno.h>
3 #include <string.h>
4
5 int main(int argc, char *argv[]) {
6     FILE *f = fopen("soubor.txt", "r");
7     if (f == NULL) {
8         int r = errno;
9         printf("Open file failed errno value %d\n", errno);
10        printf("String error '%s'\n", strerror(r));
11    }
12    return 0;
13 }
```

lec07/errno.c

### ■ Výstup při neexistujícím souboru

```
Open file failed errno value 2
String error 'No such file or directory'
```

### ■ Výstup při pokusu otevřít soubor bez práv přístupu k souboru

```
Open file failed errno value 13
String error 'Permission denied'
```

## Testovací makro `assert`

- Do kódu lze přidat podmínky na nutné hodnoty proměnných
- Testovat můžeme makrem `assert(expr)` z knihovny `assert.h`
- Pokud není `expr` program se ukončí a vypíše jméno zdrojového souboru a číslo řádku.
- Makro vloží příslušný kód do programu

*Získáme tak relativně jednoduchý způsob indikace případné chyby, např. nevhodným argumentem funkce*
- Vložení makra lze zabránit kompilací s definováním makra `NDEBUG`  
[man assert](#)
- Příklad

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

int main(int argc, char *argv[])
{
    assert(argc > 1);
    printf("program argc: %d\n", argc);
    return 0;
}
```

[lec07/assert.c](#)

## Příklad použití makra `assert()`

- Kompilace s makrem a spuštění programu bez/s argumentem

```
clang assert.c -o assert
./assert
Assertion failed: (argc > 1), function main, file assert.c
, line 5.
zsh: abort      ./assert

./assert 2
start argc: 2
```

- Kompilace bez makra a spuštění programu bez/s argumentem

```
clang -DNDEBUG assert.c -o assert
./assert
program start argc: 1
./assert 2
program start argc: 2
```

[lec07/assert.c](#)

## Příkazy dlouhého skoku

- Příkaz `goto` je možné použít pouze v rámci jedné funkce
- Knihovna `<setjmp.h>` definuje funkce `setjmp` a `longjmp` pro skoky mezi funkcemi
- `setjmp` uloží aktuální stav registrů procesoru a pokud funkce vrátí hodnotu různou od 0, došlo k volání `longjmp`
- Při volání `longjmp` jsou hodnoty registrů procesoru obnoveny a program pokračuje od místa volání `setjmp`

*Kombinaci `setjmp` a `longjmp` lze využít pro implementace ošetření výjimečných stavů podobně jako `try-catch`*

```
1  #include <setjmp.h>
2  jmp_buf jb;
3  int compute(int x, int y);
4  void error_handler(void);
5  if(setjmp(jb) == 0) {
6      r = compute(x, y);
7      return 0;
8  } else {
9      error_handler();
10     return -1;
11 }
12 int compute(int x, int y) {
13     if(y == 0) {
14         longjmp(jb, 1);
15     } else {
16         x = (x + y * 2);
17         return (x / y);
18     }
19 }
20 void error_handler(void) {
21     fprintf("Error\n");
22 }
```

*Informativní*

# Část II

## Část 2 – Rekurze

# Výpočet faktoriálu

## ■ Iterace

$$n! = n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1$$

```
int factorialI(int n)
{
    int f = 1;
    for(; n > 1; --n) {
        f *= n;
    }
    return f;
}
```

## ■ Rekurze

$$n! = 1 \text{ pro } n \leq 1$$
$$n! = n(n-1)! \text{ pro } n > 1$$

```
int factorialR(int n)
{
    int f = 1;
    if (n > 1) {
        f = n * factorialR(n-1);
    }
    return f;
}
```

lec07/demo-factorial.c

## Příklad výpis posloupnosti 1/3

- Vytvořte program, který přečte posloupnost čísel a vypíše ji v opačném pořadí
- Rozklad problému:
  - Zavedeme abstraktní příkaz: „*obrat' posloupnost*”
  - Příkaz rozložíme do tří kroků:
    1. Přečti číslo  
**číslo uložíme pro pozdější „obraceny” výpis**
    2. Pokud není detekován konec posloupnost „*obrat' posloupnost*”  
**pokračujeme ve čtení čísel**
    3. Vypiš číslo  
**vypíšeme uložené číslo**



## Příklad výpis posloupnosti 2/3

```
1 void reverse()
2 {
3     int v;
4     if (scanf("%i", &v) == 1) {
5         reverse();
6         printf("%3d ", v);
7     }
8 }
9
10 int main(void)
11 {
12     fprintf(stderr, "Enter a sequence of numbers (use
13         ctr+D for the end of the the sequence)\n");
14     reverse();
15     return 0;
16 }
```

lec07/demo-revert\_sequence.c

## Příklad výpis posloupnosti 3/3

### ■ `lec07/demo-revert_sequence.c`

### ■ Vytvoření posloupností

```
./generate_numbers.sh | tr '\n' ' ' | cat > numbers.txt  
clang demo-revert_sequence.c  
./a.out < numbers.txt 2>/dev/null > numbers-r.txt  
./a.out < numbers-r.txt 2>/dev/null > numbers-rr.txt
```

### ■ Příkaz pro výpis obsahu souborů

```
for i in numbers.txt numbers-r.txt numbers-rr.txt; do  
    echo "$i"; cat $i; echo ""; done
```

### ■ Výpis obsahu souborů

```
numbers.txt  
10 4 20 8 8 5 18 6 7 7  
numbers-r.txt  
7 7 6 18 5 8 8 20 4 10  
numbers-rr.txt  
10 4 20 8 8 5 18 6 7 7
```

## Příklad Hanojské věže



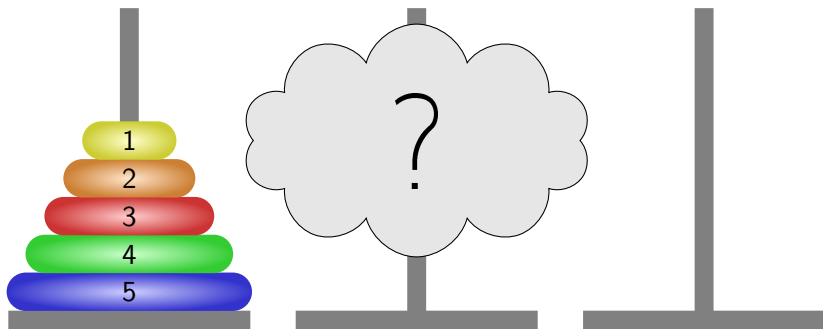
- Přemístit disky na druhou jehlu s použitím třetí (pomocné) jehly za dodržení pravidel:

1. V každém kroku můžeme přemístit pouze jeden disk a to vždy z jehly na jehlu

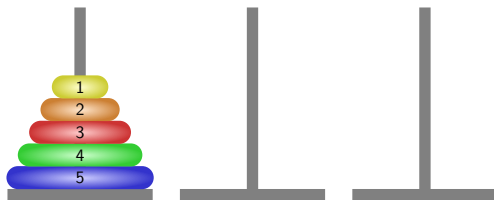
*Disky nelze odkládat mimo jehly*

2. Položit větší disk na menší není dovoleno

## Hanojské věže – 5 disků



## Návrh řešení



- Zavedeme abstraktní příkaz **moveTower( $n$ , 1, 2, 3)** realizující přesun  $n$  disků z jehly 1 na jehlu 2 s použitím jehly 3.
- Pro  $n > 0$  můžeme příkaz rozložit na tři jednodušší příkazy
  1. **moveTower( $n-1$ , 1, 3, 2)**  
přesun  $n - 1$  disků z jehly 1 na jehlu 3
  2. „*přenes disk z jehly na jehlu 2*“  
přesun největšího disku na cílovou pozici  
*abstraktní příkaz*
  3. **moveTower( $n-1$ , 3, 2, 1)**  
přesun  $n - 1$  disků na cílovou pozici

## Příklad řešení

```
1 void moveTower(int n, int from, int to, int tmp)
2 {
3     if (n > 0) {
4         moveTower(n-1, from, tmp, to); //move to tmp
5         printf("Move disc from %i to %i\n", from, to);
6         moveTower(n-1, tmp, to, from); //move from tmp
7     }
8 }
9
10 int main(int argc, char *argv[])
11 {
12     int numberOfDiscs = argc > 1 ? atoi(argv[1]) : 5;
13     moveTower(numberOfDiscs, 1, 2, 3);
14     return 0;
15 }
```

lec07/demo-towers\_of\_hanoi.c

## Příklad výpisu

### ■ `lec07/demo-towers_of_hanoi.c`

```
clang demo-towers_of_hanoi.c
./a.out 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 2 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 1
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 2
```

```
clang demo-towers_of_hanoi.c
./a.out 4
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 2 to 1
Move disc from 2 to 3
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
Move disc from 3 to 1
Move disc from 2 to 1
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
```

# Rekurzivní algoritmy

- Rekurzivní funkce jsou přímou realizací rekurzivních algoritmů
- Rekurzivní algoritmus předepisuje výpočet „**shora dolů**” v závislosti na velikosti vstupních dat
  - Pro nejmenší (nejjednodušší) vstup je výpočet předepsán přímo
  - Pro obecný vstup je výpočet předepsán s využitím téhož algoritmu pro menší vstup
- Výhodou rekurzivních funkcí je jednoduchost a přehlednost



## Rekurzivní vs iteračními algoritmy

- Nevýhodou rekurzivních algoritmů může být časová náročnost způsobená např. zbytečným opakováním výpočtu
- Řadu rekurzivních algoritmů lze nahradit iteračními, které počítají výsledek „**zdola nahoru**“, tj. od menších (jednodušších) vstupních dat k větším (složitějším).
- Pokud algoritmus výpočtu „**zdola nahoru**“ nenajdeme, např. při řešení problému Hanojských věží, lze rekurzivitou odstranit pomocí zásobníku.

*Např. zásobník využijeme pro uložení stavu řešení problému.*

# Rekurze

*“To iterate is human, to recurse divine.”*

L. Peter Deutsch

<http://www.devtopics.com/101-great-computer-programming-quotes>

## Elegance vs obtížnost rekurze

*I've often heard people describe understanding recursion as one of those "got it" moments, when the universe opened its secret stores of knowledge and gifted the mind of a burgeoning developer with a very powerful tool. For me, recursion has always been hard. Each time I'm able to peer more into its murky depths, I am humbled to see how little I feel like I really appreciate and understand its power and elegance.*

Rick Winfrey, 2012

<http://selfless-singleton.rickwinfrey.com/2012/11/27/to-iterate-is-human-to-recurse-divine>

# Fibonacciho posloupnost

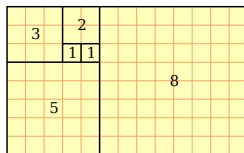
- 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, ...

Nebo 0, 1, 1, 2, 3, 5, ...

- $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$

- pro  $F_1 = 1, F_2 = 1$

Nebo  $F_1 = 0, F_2 = 1$



- Nekonečná posloupnost přirozených čísel, kde každé číslo je součtem dvou předchozích.
- Limita poměru dvou následujících čísel Fibonacciho posloupnosti je rovna **zlatému řezu**.

- Sectio aurea – ideální poměr mezi různými délkami
- Rozdělení úsečky na dvě části tak, že poměr větší části ku menší je stejný jako poměr celé úsečky k větší části

$$\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,618\ 033\ 988\ 749\ 894\ 848 \dots$$

## Fibonacciho posloupnost – historie

- Indičtí matematici (450 nebo 200 BC)
- Leonardo Pisano (1175–1250) popis růstu populace králíků
  - italský matematik známý také jako Fibonacci*
  - $F_n$  – velikost populace po  $n$  měsících za předpokladu
    - První měsíc se narodí jediný pár.
    - Narozené páry jsou produktivní od 2. měsíce svého života.
    - Každý měsíc zplodí každý produktivní pár jeden další pár.
    - Králíci nikdy neumírají, nejsou nemocní atd.
- Henry E. Dudeney (1857–1930) – popis populace krav
  - „Jestliže každá kráva vyprodukuje své první tele (jalovici) za rok a poté každý rok jednu další jalovici, kolik budete mít krav za 12 let, jestliže žádná nezemře a na počátku budete mít jednu krávu?  
*Po 12 let je k dispozici jeden či více býků*

## Fibonacciho posloupnost – rekurzivně

- Platí:

$$f_0 = 1$$

$$f_1 = 1$$

$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}, \text{ pro } n > 1$$

```
1 int fibonacci(int n) {  
2     return n < 2  
3         ? 1  
4         : fibonacci(n - 1) + fibonacci(n - 2);  
5 }
```

Zápis je elegantní, jak je však takový výpočet efektivní?

## Fibonacciho posloupnost – příklad 1/2

- Počet operací při výpočtu Fibonacciho čísla  $n$

```
1 long counter; // store number of individual operations
2
3 long fibonacciRecursive(int n) {
4     counter += 1; // jedno porovnání
5     return n < 2 ? 1 : fibonacciRecursive(n - 1) +
6         fibonacciRecursive(n - 2);
7 }
8 long fibonacciIterative(int n) {
9     long fibM2 = 1;
10    long fibM1 = 1;
11    long fib = 1;
12    for (int i = 2; i <= n; ++i) {
13        fibM2 = fibM1;
14        fibM1 = fib;
15        fib = fibM1 + fibM2;
16        counter += 3; // dvě přiřazení, jeden součet
17    }
18    return fib;
19 }
```

lec07/demo-fibonacci.c

## Fibonacciho posloupnost – rekurzivně 2/2

```
1 int main(int argc, char *argv[])
2 {
3     int n = argc > 1 ? atoi(argv[1]) : 25;
4     counter = 0; // reset counter
5     long fibR = fibonnaciRecursive(n);
6     long counterR = counter;
7
8     counter = 0; // reset counter
9     long fibI = fibonnaciIterative(n);
10    long counterI = counter;
11
12    printf("Fibonacci number recursive: %li\n", fibR);
13    printf("Fibonacci number iteration: %li\n", fibI);
14    printf("Counter recursive: %li\n", counterR);
15    printf("Counter iteration: %li\n", counterI);
16
17    return 0;
18 }
```

lec07/demo-fibonacci.c

```
clang demo-fibonacci.c && ./a.out 30
Fibonacci number recursive: 1346269
Fibonacci number recursive: 1346269
Fibonacci number iteration: 1346269
Counter recursive: 2692537
Counter iteration: 87
```



# Fibonacciho posloupnost – rekurzivně vs iteračně

- Rekurzivní výpočet

- Složitost roste exponenciálně s  $n \sim 2^n$

- Iterační algoritmus

- Počet operací je proporcionální  $n \sim 3n$

`lec07/demo-fibonacci-stats.c`, `lec07/fibonacci.sh`

- Skutečný počet operací závisí na konkrétní implementaci, programovacím jazyku, překladači a hardware

- Složitost algoritmů proto vyjadřujeme asymptoticky jako funkci velikosti vstupu

- Například v tzv. „Big O” notaci

- rekurzivní algoritmus výpočtu má složitost  $O(2^n)$
- iterační algoritmus výpočtu má složitost  $O(n)$

*Efektivní algoritmy mají polynomiální složitost*

## Vsuvka – Vykreslení grafu

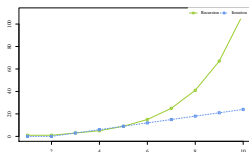
- Jednoduchou úpravou vypíšeme počty operací na řádek

```
printf("%u\t%6.3e\t%6.3e\n", n,
      (double)counterR, (double)counterI);
lec07/demo-fibonacci-stats.c
```

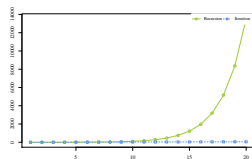
- Program zkompilujeme a spustíme

```
clang demo-fibonacci-stats.c
```

- ```
./a.out 10 > fibonacci.dat && ./
  fibonacci.sh fibonacci.dat
  fibonacci-n10.pdf
```
- ```
./a.out 20 > fibonacci.dat && ./
  fibonacci.sh fibonacci.dat
  fibonacci-n20.pdf
```



fibonacci-n10.pdf



fibonacci-n20.pdf

Přesměřovaný standardní výstup do souboru `fibonacci.dat` představuje tabulku hodnot, která je vykreslena do grafu skriptem `fibonacci.sh` s využitím nástroje `R` – <https://www.r-project.org/>

```
lec07/demo-fibonacci-stats.c, lec07/fibonacci.sh
```

## Vsuvka – Kompilace s optimalizací

- Můžeme rekurzivní výpočet urychlit kompilací s optimalizacemi?

<code>clang demo-fibonacci.c &amp;&amp; time ./a.out 50</code>	<code>clang -O2 -march=native demo-fibonacci.c &amp;&amp; time ./a.out 50</code>
Fibonacci number recursive: 20365011074	Fibonacci number recursive: 20365011074
Fibonacci number iteration: 20365011074	Fibonacci number iteration: 20365011074
Counter recursive: 40730022147	Counter recursive: 40730022147
Counter iteration: 147	Counter iteration: 147
real 1m35.912s	real 1m16.042s
user 1m35.824s	user 1m15.968s
sys 0m0.000s	sys 0m0.008s

- Ano, můžeme, ale pouze zanedbatelně
- V tomto případě je rozhodující asymptotická složitost  $O(2^n)$  vs  $O(n)$

*Obecně se pro odladěné a vypočetně náročné programy vyplatí kompilovat s optimalizací. Nárůst výkonů může být několika násobný.*

## Část III

### Část 2 – Zadání 7. domácího úkolu (HW07)

# Povinná část



# Volitelná část



# Bonusová část



# Shrnutí přednášky