# Ukazatele, paměťové třídy, volání funkcí

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 05

**B0B36PRP – Procedurální programování**



## Přehled témat







# Část I

# Část 1 – Ukazatele a dynamická alokace





## Modifikátor typu const

- Uvedením klíčového slova **const** můžeme označit proměnnou jako konstantu.

  *Překladač nás kontroluje, zdali se snažíme hodnotu proměnné změnit.*
- Definovat konstantu můžeme např.

```
const float pi = 3.14159265f;
```

- Symbolická konstanta

```
#define PI 3.14159265
```

- je pojmenování literálu, ve zdrojovém souboru je výkyt `PI` textově nahrazen literálem.

*Připomínka*

## Ukazatele na konstantní proměnné a konstantní ukazatele

- Klíčové slovo **const** můžeme zapsat před jméno proměnné nebo před * (typ/).
- Dostáváme 3 možnosti jak definovat ukazatel s `const`.
  - (a) `const int *ptr;` – ukazatel na konstantní proměnnou.
    - Nemůžeme použít pointer pro změnu hodnoty proměnné.
  - (b) `int *const ptr;` – konstantní ukazatel (`const` před jménem proměnné a mezi *).
    - Pointer nemůžeme nastavit na jinou adresu než tu při inicializaci.
  - (c) `const int *const ptr;` – konstantní ukazatel na konstantní hodnotu.
    - Kombinuje předchozí dva případy.

lec05/const_pointers.c

Další alternativy zápisu (a) a (c) jsou

- `const int *` lze též zapsat jako `int const *`; `const` *je stále před* *.
- `const int * const` lze též zapsat jako `int const * const`.

`const` může být vlevo nebo vpravo od jména typu.

- Nebo komplexnější definice, např. `int ** const ptr;` – konstantní ukazatel na ukazatel na `int`.





## Příklad – Ukazatel na konstantní proměnnou (hodnotu)

- Prostřednictvím ukazatele na konstantní proměnnou nemůžeme tuto proměnnou měnit.

```
1  int v = 10;
2  int v2 = 20;
4  const int *ptr = &v;  // ptr cannot be used to modify v
5  printf("*ptr: %d\n", *ptr);
7  *ptr = 11; /* IT IS NOT ALLOWED! */
9  v = 11;  /* We can modify the original variable */
10 printf("*ptr: %d\n", *ptr);
12 ptr = &v2; /* We can assign new address to ptr */
13 printf("*ptr: %d\n", *ptr);
```

lec05/const_pointers.c





## Příklad – Konstantní ukazatel

- Hodnotu konstantního ukazatele nelze po inicializaci měnit.
- Zápis `int *const ptr;` můžeme číst zprava doleva:
  - `ptr` – proměnná, která je;
  - `*const` – konstantním ukazatelem;
  - `int` – na proměnnou typu `int`.

```
1  int v = 10;
2  int v2 = 20;
3  int *const ptr = &v;
4  printf("v: %d *ptr: %d\n", v, *ptr);
6  *ptr = 11; /* We can modify addressed value */
7  printf("v: %d\n", v);
9  ptr = &v2; /* IT IS NOT ALLOWED! */
```

lec05/const_pointers.c





## Příklad – Konstantní ukazatel na konstantní proměnnou

- Hodnotu konstantního ukazatele na konstantního proměnnou nelze po inicializaci měnit a ani nelze prostřednictvím takového ukazatele měnit hodnotu adresované proměnné.
- Zápis `const int *const ptr;` čteme "zprava doleva":
  - `ptr` – proměnná, která je;
  - `*const` – konstantním ukazatelem;
  - `const int` – na proměnnou typu `const int`.

```
1  int v = 10;
2  int v2 = 20;
3  const int *const ptr = &v;
5  printf("v: %d *ptr: %d\n", v, *ptr);
7  ptr = &v2; /* IT IS NOT ALLOWED! */
8  *ptr = 11; /* IT IS NOT ALLOWED! */
```

lec05/const_pointers.c

## Konstantní ukazatel (na konstantní hodnotu)

| Příklad | Konstatní hodnota | Konstantní ukazatel | Popis *„Čtu zprava doleva.“* |
|---|---|---|---|
| `char *ptr` | Ne | Ne | „`ptr` je ukazatel (*) na hodnotu `char`.“ |
| `const char *ptr` | **Ano** | Ne | „`ptr` je ukazatel na hodnotu `char` konstantní.“ |
| `char const *ptr` | **Ano** | Ne | „`ptr` je ukazatel na konstantní hodnotu `char`.“ |
| `char* const ptr` | Ne | **Ano** | „`ptr` je konstantní ukazatel na hodnotu `char`.“ |
| `const char *const ptr` | **Ano** | **Ano** | „`ptr` je konstantní ukazatel na hodnotu `char` konstantní.“ |

- *Konstantní ukazatel je proměnná, jejíž hodnotu nemohu měnit. Ukazatel odkazuje na (stejné) paměťové místo, které mohu případně měnit.*
- *Konstantní hodnotu nemohu měnit. Tedy nemohu měnit obsah paměťového místa, na které odkazuje ukazatel (jehož adresa je uloženo v proměnné typu ukazatel).*





## Ukazatel na funkci

- Implementace funkce je umístěna někde v paměti a podobně jako na proměnnou v paměti může ukazatel odkazovat na paměťové místo s definicí funkce.
- Můžeme definovat **ukazatel na funkci** a dynamicky volat funkci dle aktuální hodnoty ukazatele.
- Součástí volání funkce jsou předávané argumenty, které jsou též součástí typu ukazatele na funkci, resp. typy argumentů.
- Funkce (a volání funkce) je identifikátor funkce a (), tj.

```
typ_návratové_hodnoty funkce(argumenty funkce);
```

- Ukazatel na funkci definujeme jako

```
typ_návratové_hodnoty (*ukazatel)(argumenty funkce);
```





## Příklad – Ukazatel na funkci 1/2

- Používáme dereferenční operátor * podobně jako u proměnných.

```
double do_nothing(int v); /* function prototype */
double (*function_p)(int v); /* pointer to function */
function_p = do_nothing; /* assign the pointer */
(*function_p)(10); /* call the function */
```

- Závorky `(*function_p)` *„pomáhají“* číst definici ukazatele.

  *Můžeme si představit, že závorky reprezentují jméno funkce. Definice proměnné ukazatel na funkci se tak v zásadě neliší od prototypu funkce.*

- Podobně je volání funkce přes ukazatel na funkci identické běžnému volání funkce, kde místo jména funkce vystupuje jméno ukazatele na funkci.





## Příklad – Ukazatel na funkci 2/2

- V případě funkce vracející ukazatel postupujeme identicky.

```
double* compute(int v);
double* (*function_p)(int v);
        ^^^^^^^^^^^^^---- substitute a function name
function_p = compute;
```

- Příklad použití ukazatele na funkci – `lec05/pointer_fnc.c`
- Ukazatele na funkce umožňují realizovat dynamickou vazbu volání funkce identifikované za běhu programu. *V objektově orientovaném programování je dynamická vazba klíčem k realizaci polymorfismu.*

  *Ukazatel na funkci se může hodit v implementaci HW05 povinné a volitelné zadání. Při vhodném návrhu programu je základní část společná, „jen“ zaměníme funkci pro porovnávání dvou řetězců s využitím Hammnigovy nebo Levenštejnovy vzdálenosti. V případě obou funkcí může být vstup dva textové řetězce, případně včetně délky. Tedy můžeme jednoduše zaměnit ukazatel na funkci.*

## Příklad použití ukazatele na funkci

- Vhodným využitím ukazatele na funkci je zajištění přístupu k datům pro jinak naprosto identický algoritmus, jako je řazení (funkce `qsort` z `stdlib.h`). *Zejména pro pole hodnot složeného typu.*

```
void qsort(void *base, size_t nmemb, size_t size, int (*compar)(const void *, const void *));
```

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void print(int n, int array[n]);
int compare(const void *pa, const void *pb);
int main(void)
{
   const int n = 10;
   int array[n];
   for (int i = 0; i < n; ++i) {
      array[i] = rand() % 100;
   }
   print(n, array);
   qsort(array, n, sizeof(array[0]), compare);
   print(n, array);
   return 0;
}
```

```c
void print(int n, int array[n])
{
   for(int i = 0; i < n; ++i) {
      i > 0 ? printf(", ") : 0;
      printf("%d", array[i]);
   }
   n > 0 ? putchar('\n') : 0;
}
int compare(const void *pa, const void *pb)
{
   const int a = *(int*)pa;
   const int b = *(int*)pb;
   return (a < b) - (a > b);
}
```

lec05/demo-pointer_fnc.c





## Definice typu – typedef

- Operátor `typedef` umožňuje definovat nový datový typ.
- Slouží k pojmenování typů, např. ukazatele, struktury a uniony.

*Struktury a uniony viz přednáška 6.*

- Například typ pro ukazatele na `double` a nové jméno pro `int`:

```c
typedef double* double_p;
typedef int integer;
double_p x, y;
integer i, j;
```

- je totožné s použitím původních typů

```c
double *x, *y;
int i, j;
```

- Zavedením typů operátorem `typedef`, např. v hlavičkovém souboru, umožňuje systematické používání nových jmen typů v celém programu. *Viz např. `<inttypes.h>`.*
- Výhoda zavedení nových typů je především u složitějších typů jako jsou ukazatele na funkce nebo struktury.





## Dynamická alokace paměti

- Přidělení bloku paměti velikosti `size` lze realizovat funkcí

```
void* malloc(size);
```

Z knihovny `<stdlib.h>`

  - Velikost alokované paměti je uložena ve správci paměti.
  - **Velikost není součástí ukazatele**.
  - Návratová hodnota je typu `void*` – přetypování nutné/vhodné.
  - Je plně na uživateli (programátorovi), jak bude s pamětí zacházet.
- Příklad alokace paměti pro 10 proměnných typu `int`.

```c
int *int_array;
int_array = (int*)malloc(10 * sizeof(int));
```

- Operace s více hodnotami v paměťovém bloku je podobná poli.
  - Používáme pointerovou aritmetiku.
- **Uvolnění paměti**

```
void free(pointer);
```

  - Správce paměti uvolní paměť asociovanou k ukazateli.
  - Hodnotu ukazatele však nemění!

*Stále obsahuje předešlou adresu, která však již není platná.*





## Příklad alokace dynamické paměti 1/3

- Alokace se nemusí nutně povést – testujeme návratovou hodnotu funkce `malloc()`.
- Pro vyplnění adresy alokované paměti předáváme proměnnou jako ukazatel na proměnnou typu ukazatel na `int`.

```c
void* allocate_memory(int size, void **ptr)
{
   // use **ptr to store value of newlly allocated
   // memory in the pointer ptr (i.e., the address the
   // pointer ptr is pointed).
   // call library function malloc to allocate memory
   *ptr = malloc(size);
   if (*ptr == NULL) {
      fprintf(stderr, "Error: allocation fail");
      exit(-1); /* exit program if allocation fail */
   }
   return *ptr;
}
```

lec05/malloc_demo.c

## Příklad alokace dynamické paměti 2/3

- Pro vyplnění hodnot pole alokovaného dynamicky nám postačuje předávat hodnotu adresy paměti pole.

```
1  void fill_array(int size, int* array)
2  {
3     for (int i = 0; i < size; ++i) {
4        *(array++) = random();
5     }
6  }
```

- Po uvolnění paměti odkazuje ukazatel stále na původní adresu, proto můžeme explicitně nulovat. *Předání ukazatele na ukazatele je nutné, jinak nemůžeme nulovat.*

```
1  void deallocate_memory(void **ptr)
2  {
3     if (ptr != NULL && *ptr != NULL) {
4        free(*ptr);
5        *ptr = NULL;
6     }
7  }
```

lec05/malloc_demo.c





## Příklad alokace dynamické paměti 3/3

```
1  int main(int argc, char *argv[])
2  {
3     int *int_array;
4     const int size = 4;
6     allocate_memory(sizeof(int) * size, (void**)&int_array);
7     fill_array(int_array, size);
8     int *cur = int_array;
9     for (int i = 0; i < size; ++i, cur++) {
10       printf("Array[%d] = %d\n", i, *cur);
11    }
12    deallocate_memory((void**)&int_array);
13    return 0;
14 }
```

lec05/malloc_demo.c





## Příklad - Načítání textového řetězce 1/3

- Implementujete načtení libovolně dlouhého řádku ze `stdin`.
- Řádek je zakončen znakem nového řádku `'\n'`, který není součástí načteného vstupu.
- Reportujte chybové stavy `ERROR_IN = 100` a `ERROR_MEM = 101`.
- Po úspěšném načtení vstupu, reportujte velikost vstupu voláním funkce `strlen()` z `string.h`.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <string.h>
5  #ifndef INIT_SIZE
6  #define INIT_SIZE 128
7  #endif
9  enum {
10    ERROR_OK = EXIT_SUCCESS,
11    ERROR_IN = 100,
12    ERROR_MEM = 101,
13 };
15 char* read(int *error);
16 char* enlarge_string(size_t len, size_t *capacity, char
       *str);
```

```
18 int main(int argc, char *argv[])
19 {
20    int ret = EXIT_SUCCESS;
21    char *str = read(&ret);
22    if (str) {
23       printf("Input string size %ld\n", strlen(str));
24       printf("Input string \"%s\"\n", str);
25       free(str);
26    } else {
27       fprintf(stderr, "ERROR: read return %d\n", ret);
28    }
29    return ret;
30 }
```

lec05/read.c





## Příklad - Načítání textového řetězce 2/4

```
31 // local function only for calling from read()
32 static char* handle_str(char r, size_t l,
33       char *str, int *error);
34 char* read(int *error)
35 {
36    size_t capacity = INIT_SIZE;
37    size_t l = 0; // no.  of read chars
38    char* str = malloc(capacity + 1);
39    int r = '\0';
40    while (
41          str
42          && *error == ERROR_OK
43          && (r = getchar()) != EOF
44          && r != '\n'
45          ) {
46       if (l == capacity) { // enlarge if need
47          // new address of str can be set
48          str = enlarge_string(l, &capacity, str);
49       }
50       //Is it correct?  Can str be NULL?
51       str[l++] = r;
52    } // end while
53    str = handle_str(r, l, str, error);
54    return str;
55 }
```

```
57 char* handle_str(char r, size_t l, char *str, int *error)
58 {
59    if (str) {
60       if (r != '\n') { // end-of-line has not been read
61          *error = ERROR_IN; // report input error
62          free(str);
63          str = NULL;
64       } else {
65          str[l] = '\0'; // null terminating string
66       }
67    } else if (*error == ERROR_OK) { // str is NULL
68       *error = ERROR_MEM; // but error needs to be set
69    }
70    return str;
71 }
73 char* enlarge_string(size_t len, size_t *capacity, char *str)
74 {
75    char *t = realloc(str, *capacity * 2 + 1);
76    if (!t) {
77       free(str);
78       str = NULL; // indicate error
79    } else {
80       str = t;
81       *capacity *= 2;
82    }
83    return str;
84 }
```

lec05/read.c

## Příklad - Načítání textového řetězce 3/4

- Příklad vstupu programu `clang read.c -o read`.
- Vstup soubor `read-in-1.txt`.

```
./read <read_in-1.txt; echo $?
Input string size 11
0
hexdump -C read_in-1.txt
00000000  49 20 6c 69 6b 65 20 70  72 70 21 0a              |I like prp!.|
0000000c
```

lec05/read_in-1.txt

- Vstup soubor `read-in-2.txt`.

```
./read <read_in-2.txt; echo $?
ERROR: read return 100
100
hexdump -C read_in-2.txt
00000000  49 20 6c 69 6b 65 20 70  72 70 21                 |I like prp!|
0000000b
```

lec05/read_in-2.txt





## Příklad - Načítání textového řetězce 4/4

- Generování náhodného vstupu.

```
cat /dev/urandom | env LC_ALL=C tr -dc 'a-zA-Z0-9' | fold -w 10485760 | head -n 1
```

lec05/create_rand_string.sh

- Omezení paměti programu.

```
clang read.c -o read
./create_rand_string.sh >10MB.txt
du -h 10MB.txt
10M 10MB.txt
./read <10MB.txt
Input string size 10485760
```

```
ulimit -v 10240
./read <10MB.txt; echo $?
ERROR: read return 101
101
```

lec05/read.c





# Část II

## Část 2 – Paměťové třídy, model výpočtu





## Paměť počítače s uloženým programem v operační paměti

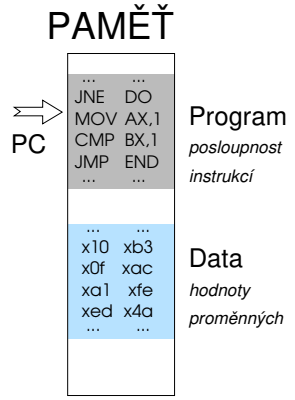
- Posloupnost instrukcí je čtena z operační paměti.
- Flexibilita ve tvorbě posloupnosti.

*Program lze libovolně měnit.*

- Architektura počítače se společnou pamětí pro data a program.
  - von Neumannova architektura počítače

*John von Neumann (1903–1957)*

  - sdílí program i data ve stejné paměti.
  - Adresa aktuálně prováděné instrukce je uložena v tzv. čítači instrukcí (Program Counter **PC**).




- Mimoto architektura se sdílenou pamětí umožňuje, aby hodnota ukazatele odkazovala nejen na data, ale také například na část paměti, kde je uložen program (funkce).

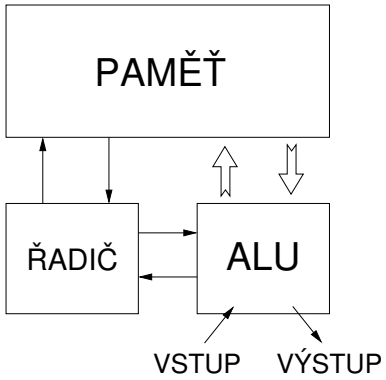
*Princip ukazatele na funkci.*

## von Neumannova architektura

*V drtivě většině případů je program posloupnost instrukcí zpracovávající jednu nebo dvě hodnoty (uložené na nějakém paměťovém místě) jako vstup a generování nějaké výstupní hodnoty, kterou ukládá někam do paměti nebo modifikuje hodnotu PC (podmíněné řízení běhu programu).*

- ALU - Aritmeticko logická jednotka (Arithmetic Logic Unit)

  *Základní matematické a logické instrukce*
- PC obsahuje adresu kódu – při volání funkce tak jeho hodnotu můžeme uložit (na zásobník) a následně použít pro návrat na původní místo volání.








## Základní rozdělení paměti

- Přidělenou paměť programu můžeme kategorizovat na 5 částí.
- **Zásobník** – lokální proměnné, argumenty funkcí, návratová hodnota funkce.

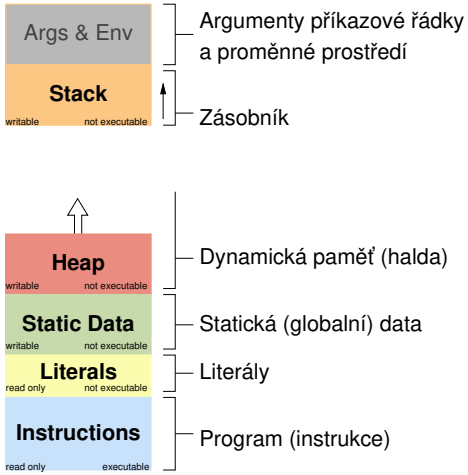
  *Spravováno automaticky.*
- **Halda** – dynamická paměť (`malloc()`, `free()`).

  *Spravuje programátor.*
- **Statická** – globální nebo „lokální“ `static` proměnné.

  *Inicializováno při startu.*
- **Literály** – hodnoty zapsané ve zdrojovém kódu programu, např. textové řetězce.

  *Inicializováno při startu.*
- **Program** – strojové instrukce.

  *Inicializováno při startu.*








## Rozsah platnosti (scope) lokální proměnné

- Lokální proměnné mají rozsah platnosti pouze uvnitř bloku a funkce.

```
1  int a = 1;  // globální proměnná
2
3  void function(void)
4  {  // zde a ještě reprezentuje globální proměnnou
5     int a = 10; // lokální proměnná, zastiňuje globální a
6     if (a == 10) {
7        int a = 1;  // nová lokální proměnná a; přístup
8                    // na původní lokální a je zastíněn
9        int b = 20; // lokální proměnná s platností pouze
10                   // uvnitř bloku
11       a += b + 10; // proměnná a má hodnotu 31
12    } // konec bloku
13    // zde má a hodnotu 10, je to lokální proměnná z řádku 5
14
15    b = 10; // b není platnou proměnnou
16 }
```

- Globální proměnné mají rozsah platnosti „kdekoliv“ v programu.
  - Zastíněný přístup lze řešit modifikátorem `extern` (v novém bloku).

http://www.tutorialspoint.com/cprogramming/c_scope_rules.htm





## Definice vs. deklarace proměnné – `extern`

- **Definice** proměnné je přidělení paměťového místa proměnné (dle typu). Může být pouze jedna!
- **Deklarace** “oznamuje”, že je proměnná někde definována.

```
1  // extern int global_variable = 10; /* extern
       variable with initialization is a
       definition */
2  int global_variable = 10;
3  void function(int p);
```
lec05/extern_var.h

```
1  #include <stdio.h>
2
3  #include "extern_var.h"
4
5  static int module_variable;
6
7  void function(int p)
8  {
9     fprintf(stdout, "function: p %d global
        variable %d\n", p, global_variable);
10 }
```
lec05/extern_var.c

```
1  #include <stdio.h>
2
3  #include "extern_var.h"
4
5  int main(int argc, char *argv[])
6  {
7     global_variable += 1;
8     function(1);
9     function(1);
10    global_variable += 1;
11    function(1);
12    return 0;
13 }
```
lec05/extern-main.c

- Vícenásobná definice končí chybou.

```
clang extern_var.c extern-main.c
/tmp/extern-main-619051.o:(.data+0x0): multiple
      definition of `global_variable'
/tmp/extern_var-24da84.o:(.data+0x0): first
      defined here
clang: error: linker command failed with exit
      code 1 (use -v to see invocation)
```

## Přidělování paměti proměnným

- Přidělením paměti proměnné rozumíme určení paměťového místa pro uložení hodnoty proměnné (příslušného typu) v paměti počítače.
- Lokálním proměnným a parametrům funkce se paměť přiděluje při volání funkce.
  - Paměť zůstane přidělena jen do návratu z funkce.
  - Paměť se automaticky alokuje z rezervovaného místa – **zásobník (stack)**.

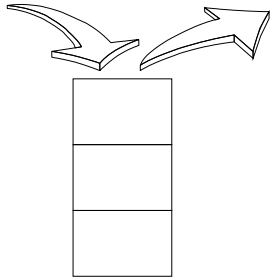
    *Při návratu funkce se přidělené paměťové místo uvolní pro další použití.*
  - Výjimku tvoří lokální proměnné s modifikátorem `static`.
    - Z hlediska platnosti rozsahu mají charakter lokálních proměnných.
    - Jejich hodnota je však zachována i po skončení funkce / bloku.
    - Jsou umístěny ve statické části paměti.
- Dynamické přidělování paměti
  - Alokace paměti se provádí funkcí **malloc()**.

    *Nebo její alternativou podle použité knihovny pro správu paměti (např. s garbage collectorem – `boehm-gc`).*
  - Paměť se alokuje z rezervovaného místa – **halda (heap)**.





## Zásobník



- Úseky paměti přidělované lokálním proměnným a parametrům funkce tvoří tzv. **zásobník** (stack).
- Úseky se přidávají a odebírají.
  - Vždy se odebere naposledy přidaný úsek.

    *LIFO – last in, first out.*
- Na zásobník se ukládá „volání funkce“.

  *Na zásobník se také ukládá návratová hodnota funkce a také hodnota „program counter“ původně prováděné instrukce, před voláním funkce.*
- Ze zásobníku se alokují proměnné parametrů funkce.

  *Argumenty (parametry) jsou de facto lokální proměnné.*

Opakovaným rekurzivním voláním funkce můžeme zaplnit velikost přiděleného zásobníku a program skončí chybou.





## Příklad rekurzivního volání funkce

- Vyzkoušejte si program pro omezenou velikost zásobníku.

```
1  #include <stdio.h>
3  void printValue(int v)
4  {
5     printf("value: %i\n", v);
6     printValue(v + 1);
7  }
9  int main(void)
10 {
11    printValue(1);
12 }
```

lec05/demo-stack_overflow.c

```
clang demo-stack_overflow.c
ulimit -s 10000;  ./a.out  | tail -n 3
value: 319816
value: 319817
Segmentation fault
ulimit -s 1000;  ./a.out  | tail -n 3
value: 31730
value: 31731
Segmentation fault
```





## Návratová hodnota funkce a kódovací styl **return** 1/2

- Předání hodnoty volání funkce je předepsáno voláním **return**.

```
int doSomeThingUseful() {
   int ret = -1;
   ...
   return ret;
}
```

- Jak často umisťovat volání **return** ve funkci?

```
int doSomething() {
   if (
         !cond1
      && cond2
      && cond3
      ) {
      ... do some long code ...
   }
   return 0;
}
```

```
int doSomething() {
   if (cond1) {
      return 0;
   }
   if (!cond2) {
      return 0;
   }
   if (!cond3) {
      return 0;
   }
   ... some long code ....
   return 0;
}
```

http://llvm.org/docs/CodingStandards.html

## Návratová hodnota funkce a kódovací styl **return** 2/2

- Volání **return** na začátku funkce může být přehlednější.

*Podle hodnoty podmínky je volání funkce ukončeno.*

- Kódovací konvence může také předepisovat použití nejvýše jednoho volání **return**.

*Má výhodu v jednoznačné identifikaci místa volání, můžeme pak například jednoduše přidat další zpracování výstupní hodnoty funkce.*

- Dále není doporučováno bezprostředně používat **else** za voláním **return** (nebo jiným přerušení toku programu), např.

```
case 10:
   if (...) {
      ...
      return 1;
   } else {
      if (cond) {
         ...
         return -1;
      } else {
         break;
      }
   }
```

```
case 10:
   if (...) {
      ...
      return 1;
   } else {
      if (cond) {
         ...
         return -1;
      }
   }
   break;
```





## Proměnné

- Proměnné představují vymezenou oblast paměti a v C je můžeme rozdělit podle způsobu alokace.
  - **Statická** alokace – provede se při definici **statické** nebo globální proměnné; paměťový prostor je alokován při startu programu a nikdy není uvolněn.
  - **Automatická** alokace – probíhá automaticky v případě lokálních proměnných (nebo argumentů funkce); paměťový prostor je alokován na **zásobníku** a paměť proměnné je automaticky uvolněna s koncem platnosti proměnné.

*Např. po ukončení bloku funkce.*

  - **Dynamická** alokace – není podporována přímo jazykem C, ale je přístupná knihovními funkcemi.

*Např.* `malloc()` *a* `free()` *z knihovny* `<stdlib.h>` *nebo* `<malloc.h>`

`http://gribblelab.org/CBootcamp/7_Memory_Stack_vs_Heap.html`





## Proměnné – paměťová třída

- Specifikátory paměťové třídy (Storage Class Specifiers – SCS).
  - **auto** (lokální) – Definuje proměnnou jako dočasnou (automatickou). Lze použít pro lokální proměnné definované uvnitř funkce. Jedná se o implicitní nastavení, platnost proměnné je omezena na blok. Proměnná je v **zásobníku.**
  - **register** – Doporučuje překladači umístit proměnnou do registru procesoru (rychlost přístupu). Překladač může, ale nemusí vyhovět. Jinak stejné jako **auto**.

*Zpravidla řešíme překladem s optimalizacemi.*

  - **static**
    - Uvnitř bloku `{...}` – definujeme proměnnou jako statickou, která si **ponechává hodnotu i při opuštění bloku**. Existuje po celou dobu chodu programu. Je uložena v **datové oblasti**.
    - Vně bloku – kde je implicitně proměnná uložena v **datové oblasti** (statická) omezuje její viditelnost na modul.
  - **extern** – rozšiřuje viditelnost statických proměnných z modulu na celý program. Globální proměnné s `extern` jsou definované v **datové oblasti**.





## Příklad definice proměnných

- Hlavičkový soubor `vardec.h`

```
1  extern int global_variable;
```

lec05/vardec.h

- Zdrojový soubor `vardec.c`

```
1  #include <stdio.h>
2  #include "vardec.h"
4  static int module_variable;
5  int global_variable;
7  void function(int p);
9  int main(void)
10 {
11    int local;
12    function(1);
13    function(1);
14    function(1);
15    return 0;
16 }
```

```
18 void function(int p)
19 {
20    int lv = 0; /* local variable */
21    static int lsv = 0; /* local static variable */
22    lv += 1;
23    lsv += 1;
24    printf("func: p%d, lv %d, lsv %d\n", p, lv, lsv);
25 }
```

lec05/vardec.c

- Výstup

```
1  func: p 1, lv 1, slv 1
2  func: p 1, lv 1, slv 2
3  func: p 1, lv 1, slv 3
```

*Uvedený příklad demonstruje různé definice proměnných. V případě proměnné* `global_variable` *je její definice v modulu s funkcí* `main()` *diskutabilní. Modul* `vardec.o` *nebudeme linkovat s jiným program s vlastní (jinou) funkcí* `main()`.

## Definice proměnných a operátor přiřazení

- Proměnné definujeme uvedením typu a jména proměnné.
  - Jména proměnných volíme malá písmena.
  - Víceslovná jména zapisujeme s podtržítkem _ nebo volíme tzv. *camelCase*.

    https://en.wikipedia.org/wiki/CamelCase
  - Proměnné definujeme na samostatném řádku.

```
1 int n;
2 int number_of_items;
```

- Příkaz přiřazení se skládá z operátoru přiřazení = a ;
  - Levá strana přiřazení musí být **l-value – location-value, left-value** – musí reprezentovat paměťové místo pro uložení výsledku.
  - Přiřazení je výraz a můžeme jej tak použít všude, kde je dovolen výraz příslušného typu.

```
1 /* int c, i, j; */
2 i = j = 10;
3 if ((c = 5) == 5) {
4    fprintf(stdout, "c is 5 \n");
5 } else {
6    fprintf(stdout, "c is not 5\n");
7 }
```

lec05/assign.c



# Část III

## Část 3 – Zadání 5. domácího úkolu (HW05)



## Zadání 5. domácího úkolu HW05

**Téma**: **Caesarova šifra**

Povinné zadání: **3b**; Volitelné zadání: **2b**; Bonusové zadání: není

- **Motivace**: Získat zkušenosti s dynamickou alokací paměti. Implementovat výpočetní úlohu optimalizačního typu.
- **Cíl**: Osvojit si práci s dynamickou alokací paměti.
- **Zadání**: https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b0b36prp/hw/hw05
  - Načtení dvou vstupních textů a tisk dekódované zprávy na výstup.
  - Zakódovaný text i (špatně) odposlechnutý text mají stejné délky.
  - Nalezení největší shody dekódovaného a odposlechnutého textu na základě hodnoty posunu v Caesarově šifře.
  - Optimalizace hodnoty Hammingovy vzdálenosti.

    https://en.wikipedia.org/wiki/Hamming_distance
  - Volitelné zadání rozšiřuje úlohu o uvažování chybějících znaků v odposlechnutém textu, což vede na využití Levenštejnovy vzdálenosti.

    https://en.wikipedia.org/wiki/Levenshtein_distance
- Termín odevzdání: 23.11.2024, 23:59:59 PST.





## Shrnutí přednášky

## Diskutovaná témata

- Ukazatele a modifikátor `const`
- Dynamická alokace paměti
- Ukazatel na funkce
- Paměťové třídy
- Volání funkcí

- Příště: Struktury a union, přesnost výpočtu a vnitřní reprezentace číselných typů.





# Část V

# Appendix





## Kódovací příklad – NATO Abeceda – 1/4

- Implementujme program, který převede vstupní text (ASCII, znaky A–Z a a–z) do NATO abecedy, ve které jsou písmena hláskována prostřednictvím následujících jmen.
  - **A**lpha, **B**ravo, **C**harlie, **D**elta, **E**cho, **F**oxtrot, **G**olf, **H**otel, **I**ndia, **J**uliett, **K**ilo, **L**ima, **M**ike, **N**ovember, **O**scar, **P**apa, **Q**uebec, **R**omeo, **S**ierra, **T**ango, **U**niform, **V**ictor, **W**hiskey, **X**-ray, **Y**ankee, **Z**ulu.
- V programu definujeme pole ukazatelů na textové literály s jednotlivými slovy.
- Programově otestujeme, že slova odpovídají počátečním písmenům A–Z.

- Očekávaný výstup pro vstup `in.txt`.

```
$ cat in.txt
I like PRP and programming in C.
$ clang nato-alphabet.c && ./a.out < in.txt 2>/dev/null
India Lima India Kilo Echo Papa Romeo Papa Alpha
    November Delta Papa Romeo Oscar Golf Romeo Alpha
    Mike Mike India November Golf India November
    Charlie
```

- Implementujeme testovací funkce.

```
1 static char *words[] = { // static to be "private"
2    "Alpha", "Bravo", "Charlie", "Delta", "Echo", "
     Foxtrot", "Golf", "Hotel", "India", "Juliett", "
     Kilo", "Lima", "Mike", "November", "Oscar", "Papa",
      "Quebec", "Romeo", "Sierra", "Tango", "Uniform", "
     Victor", "Whiskey", "X-ray", "Yankee", "Zulu", NULL
3 }; // it is an array of pointers to text literls
5 int count_words_array(char *words[]); // Using array
6 int count_words(char **words); // Pointer to pointers
7 bool check_alphabet_words(char *words[]);
```





## Kódovací příklad – NATO Abeceda – 2/4

```
1  // array is termined by NULL used for counting
2  static char *words[] = { "Alpha",  ..,  "Zulu", NULL };
4  // array-like variant
5  int count_words_array(char *words[])
6  {
7     int n = 0;
8     while(words[n] != NULL) {
9        fprintf(stderr, "DEBUG: \"%s\"\n", words[n]);
10       n += 1;
11    }
12    return n;
13 }
15 // pure pointer variant
16 int count_words(char **words)
17 {
18    int n = 0;
19    char **cur = words;
20    while (*cur) {
21       fprintf(stderr, "DEBUG: \"%s\"\n", *cur);
22       cur++;
23       n += 1;
24    }
25    return c;
26 }
```

```
26 bool check_alphabet_words(char *words[])
27 {
28    bool ret = true; // true is from #include <stdbool.h>
29    char c = 'A'; // char is an integer ASCII code number
30    char **cur = &words[0]; // there is always at least one item
31    while (*cur) {
32       fprintf(stderr, "DEBUG: check %s[0] for '%c'\n", *cur, c);
33       if (c != *cur[0]) { // the first letter needs to match
34          ret = false; // false is from #include <stdbool.h>
35          break;
36       } else {
37          c += 1;
38          cur += 1;
39       }
40    }
41    return ret;
42 }
```

- Pole `words` je posloupnost prvků stejného typu (ukazatel na `char` – textový řetězec).
- Hodnota `&words[0]` je identická adresa jako hodnota `words`.

# Kódovací příklad – NATO Abeceda – 3/4

- Můžeme použít `const`.

```
1  static const char * const words[] = { "Alpha", ..., NULL };
2
3  int count_words_array(const char * const words[])
4  {
5     int n = 0;
6     while(words[n] != NULL) {
7        n += 1;
8     }
9     return n;
10 }
11
12 int count_words(const char * const * const words)
13 {
14    int n = 0;
15    // cur je ukazatel na data typu konstantní
16    // ukazatel na konstantní textový řetězec
17    // (na konstantní ukazatel na konstantní hodnoty char).
18    const char * const * cur = words; // cur chceme měnit
19    while (*cur) {
20       cur++; // cur není konstantní ukazatel
21       n += 1;
22    }
23    return n;
24 }
```

```
26 #include <stdio.h>
27 #include <stdbool.h>
28
29 static const char * const words[] = { "Alpha",.., NULL };
30
31 int count_words_array(const char * const words[]);
32 int count_words(const char * const * const words);
33
34 bool check_alphabet_words(const char * const words[]);
35
36 int main(void)
37 {
38    int ret = EXIT_SUCCESS;
39    fprintf(stderr, "DEBUG: size %lu\n", sizeof(words));
40
41    int n = count_words_array(words);
42    fprintf(stderr, "DEBUG: no. of words: %i\n", n);
43
44    n = count_words(&words[0]);
45    fprintf(stderr, "DEBUG: no. of words: %i\n", n);
46
47    bool checked = check_alphabet_words(words);
48    fprintf(stderr, "DEBUG: check_alphabet_words passed [%s]\n",
       checked ? "OK" : "FAIL");
49    return ret;
50 }
```





# Kódovací příklad – NATO Abeceda – 4/4

```
1  ...
2  static const char * const words[] = { "Alpha", ..., NULL };
3  ...
4  char my_toupper(char c);
5
6  int main(void)
7  {
8     ...
9     int c;
10    while ((c = getchar()) != EOF) {
11       c = my_toupper(c); // or toupper() from <ctype.h>
12       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
13          printf("%s ", words[c - 'A']); // always print space
14       }
15    }
16    ...
17 }
18
19 char my_toupper(char c) // or use toupper() from <ctype.h>
20 {
21    if (c >= 'a' && c <= 'z') {
22       c =  c - 'a' + 'A';
23    }
24    return c;
25 }
```

- Funkci `my_toupper()` můžeme nahradit použitím ternárního operátoru.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <assert.h>
4  #include <stdbool.h>
5
6  static const char * const words[] = { "Alpha",.., NULL };
7  ...
8  int count_words_array(const char * const words[]);
9  bool check_alphabet_words(const char * const words[]);
10
11 int main(void)
12 {  // assert macro debug and development only, see -DNDEBUG
13    assert(count_words_array(words) == 'Z' - 'A' + 1);
14    assert(check_alphabet_words(words));
15    int c;
16    while ((c = getchar()) != EOF) {
17       c = (c >= 'a' && c <= 'z') ? c =  c - 'a' + 'A' : c;
18       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
19          printf("%s\n", words[c - 'A']);
20       }
21    }
22    return EXIT_SUCCESS;
23 }
```

- V rámci zpřehlednění můžeme překlad (řádky 15–21) dát do samostatné funkce `void translate(const char * const words[])`.





# Kódovací příklad – NATO Abeceda („*jinak*“) – 1/2

- Slova abecedy uložíme jako řetězec `alphabet` všech slov spojených bez mezery, do kterého budeme odkazovat na jednotlivá slova polem ukazatelů na textové řetězce (`words`).
  - Slov je `'Z' - 'A' + 1`, ale řetězec je posloupnost znaků zakončená `'\0'`.
  - První písmeno slova abecedy používáme k indexaci, např. `'C'harlie` je odkazované ukazatelem `words['C' - 'A']`. První znak slova tak můžeme v abecedě `alphabet` nahradit znakem `'\0'` získáme textové řetězce.

*Bez prvního znaku!*

```
1  //Ukazatel na textový literál.  Literál nemůžeme měnit!
2  //static char *alphabet = "AlphaBravoCharlie...";
3  static char alphabet[] =
4        "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
5        "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
6        "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
7  //pole ukazatelů na textové řetězce
8  static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };
9  int fill_words(char* str, char *words[]);
10
11 int main(void)
12 {
13    int ret = fill_words(alphabet, words);
14    if (!ret) {
15       for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
16          fprintf(stderr, "DEBUG: %02d. '%c' - %c%s\n",
                    c, c, c, words[c - 'A']);
17       } //                ↳ První písmeno slova abecedy.
18    }
19    return ret;
20 }
```

```
24 int fill_words(char* alphabet, char *words[])
25 {
26    int ret = EXIT_SUCCESS;
27    char *cur = alphabet; // kurzor do pole s písmeny abecedy
28    for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
29       assert(words[c - 'A'] == NULL); // nemá být nastaveno
30       cur = strchr(cur, c); // vyhledání řetězce začínající c
31       assert(cur); // písmeno c musí být v abecedě
32       *cur = '\0';
33       words[c - 'A'] = ++cur; // nastavení a posun kurzoru
34       assert(words[c - 'A']); //it should be set now
35    }
36    return ret; // pragmaticky vždy EXIT_SUCCESS nebo assert.
37 }
```

- V implementaci použijeme (makro) `assert()` k testování správné incializace datových struktur.

*Makro slouží pro ladění, viz* `man assert`.





# Kódovací příklad – NATO Abeceda („*jinak*“) – 2/2

- Přidáme překlad znaků načítaných ze `stdin` a implementaci zpřehledníme.

```
1  static char alphabet[] =
2        "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
3        "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
4        "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
5  static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };
6
7  int fill_words(char* str, char *words[]);
8
9  int main(void)
10 {
11    int ret = fill_words(alphabet, words);
12    if (!ret) {
13       for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
14          fprintf(stderr, "DEBUG: %02d. '%c' - %c%s\n",
                    c, c, c, words[c - 'A']);
15       } //                ↳ První písmeno slova abecedy.
16    }
17    int c;
18    while ((c = getchar()) != EOF) {
19       c = (c >= 'a' && c <= 'z') ? c =  c - 'a' + 'A' : c;
20       //   ↳ volání funkce toupper() bude přehlednější!
21       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
22          printf("%c%s ", c, words[c - 'A']);
23       }
24    }
25    return ret;
26 }
```

```
1  static char alphabet[] =
2        "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
3        "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
4        "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
5  static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };
6
7
8  void fill_words(char* str, char *words[]);
9  void translate(char *words[]);
10
11 int main(void)
12 {
13    fill_words(alphabet, words);
14    translate(words);
15    return EXIT_SUCCESS;
16 }
17
18 void translate(char *words[])
19 {
20    int c;
21    while ((c = getchar()) != EOF) {
22       c = toupper(c); // funkce z #include<ctype.h>
23       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
24          printf("%c%s ", c, words[c - 'A']); // první znak!
25       }
26    }
27 }
```

- Další rozšíření programu může být zpracování jiných znaků, než znaků abecedy `'A'-'Z'` a `'a'-'z'`.

# Kódovací příklad – Rotace textového řetězce – 1/4

- Implementujme program, který načte ze `stdin` dva textové řetězce (dva řádky zakončené `'\n'`) a pokusí se najít rotaci (posunutí – `offset`) druhého řádku tak, aby odpovídal prvnímu řádku.
- Oba řádky (řetězce) předpokládáme, že jsou stejně dlouhé.
- Chybu dynamické alokace program indikuje návratovou hodnotou `129`, chybu vstupu hodnotou `100`, jinak vrací `EXIT_SUCCESS`.
- Délka řetězců je až do maximálního hodnoty `size_t`, posunutí pouze do `INT_MAX`.
- V případě neúspěšné dynamické alokace program ukončujeme voláním `exit(129)`;

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <limits.h> // for INT_MAX

#ifndef INIT_LEN
#define INIT_LEN 8
#endif

enum { ERROR_OK = EXIT_SUCCESS, ERROR_IN = 100, ERROR_MEM = 129 };

void* my_realloc(void *ptr, size_t size,
    const char *file, const int line);
```

```c
void* my_realloc(void *ptr, size_t size,
    const char *file, const int line)
{
   void* ret = realloc(ptr, size);
   if (!ret) {
      fprintf(stderr, "ERROR: Cannot realloc %lu bytes -- called
     at %s:%i\n", size, file, line);
      free(ptr);
      exit(ERROR_MEM);
   }
   return ret;
}
```

- Volání `realloc()` alokuje nebo přealokuje paměť.
- Funkci předáváme soubor a číslo řádku, kde funkci `my_realloc()` voláme, pro indikaci, kde došlo k chybě.





# Kódovací příklad – Rotace textového řetězce – 2/4

```c
char* read_line(void); // read a line from stdin, terminated by '\n' return as null-terminated string
char* shift(int offset, const char* src, size_t n, char *dst); // src and dst are strings at least n long (+1 for '\0')
int get_offset(const char *s1, size_t n1, const char *s2, size_t n2); // offset - max INT_MAX; strings - up to can size_t
int print_offset(const char *s, size_t n, int offset);
int main(void)
{
   int ret = ERROR_OK;
   char *l1 = read_line();
   char *l2 = read_line();
   size_t n1, n2;
   if (l1 && l2 && (n1 = strlen(l1)) == (n2 = strlen(l2)) ) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: l1[%lu]: \"%s\"\n", n1, l1);
      fprintf(stderr, "DEBUG: l2[%lu]: \"%s\"\n", n2, l2);
      int offset = get_offset(l1, n1, l2, n2);
      fprintf(stdout, "Matching offset %d\n", offset);
      offset >= 0 && print_offset(l2, n2, offset); // call print_offset only if offset >= 0
  } else {
      fprintf(stderr, "ERROR: Wrong input!\n");
      ret = ERROR_IN;
   }
   free(l1); // free(ptr) - If ptr is NULL no action occurs.
   free(l2); // See man free.
   return ret;
}
```





# Kódovací příklad – Rotace textového řetězce – 3/4

```c
char* read_line(void)
{
   size_t capacity = INIT_LEN;
   char *str = my_realloc(NULL, sizeof(char) * (INIT_LEN + 1)
    , __FILE__, __LINE__); //+1 for '\0'
   size_t len = 0;
   int c;
   while ((c = getchar()) != EOF && c != '\n') {
      if (len == capacity) {
         capacity *= 2;
         str = my_realloc(str, sizeof(char) * (capacity + 1),
     __FILE__, __LINE__); //+1 for '\0'
      }
      str[len++] = c;
   }
   if (len > 0) {
      str[len] = '\0';
   } else {
      free(str);
      str = NULL;
   }
   return str;
}
```

- `read_line()` vrací `NULL` pouze pokud je načten prázdný řadek.
- Chyba alokace dynamické paměti ukončí program voláním `exit()` v naší funkci `my_realloc()`.

```c
char* shift(int offset, const char* src, size_t n, char *dst)
{
   for (size_t i = 0; i < n; ++i) { // n type is size_t !!!
      dst[i] = src[(offset + i) % n];
   }
   return dst;
}
int get_offset(const char *s1, size_t n1, const char *s2, size_t n2)
{ // we already checked that s1 && s2 && n1 == n2
   int ret = -1;
   int max_shift = INT_MAX < n2 ? INT_MAX : n2; // limits.h
   char *s = my_realloc(NULL, sizeof(char) * (n2 + 1), __FILE__,
    __LINE__); // +1 for '\0'
   for (int i = 0; i < max_shift; ++i) {
      s = shift(i, s2, n2, s); // shift s2 to s and return s
      if (strcmp(s1, s) == 0) { //strings matched
         ret = i; // perfect match, exit the loop
         break;
      }
   }
   free(s); // s is dynamically allocated, releaase the memory
   return ret;
}
```

- Posuneme 2. řádek (`s`) a testujeme jestli je identický s 1. řádkem.
- Funkce `strcmp()` porovnává řetězce lexikograficky, proto vrací `int`.





# Kódovací příklad – Rotace textového řetězce – 4/4

- K vytištění posunutého řetězce v samostatné funkci `print_offset()` alokujeme dynamickou paměť, kterou před ukončení funkce opět uvolníme.

```c
int print_offset(const char *s, size_t n, int offset)
{
   int ret = 1;
   char *str = my_realloc(NULL, sizeof(char) * (n + 1),
    __FILE__, __LINE__); // +1 for '\0'
   shift(offset, s, n, str);
   fprintf(stderr, "DEBUG: shift: \"%s\"\n", str);
   free(str);
   return ret;
}
```

```c
   char *l1 = read_line();
   char *l2 = read_line();
   size_t n1, n2;
   if (l1 && l2 && (n1 = strlen(l1)) == (n2 = strlen(l2)) ) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: l1[%lu]: \"%s\"\n", n1, l1);
      fprintf(stderr, "DEBUG: l2[%lu]: \"%s\"\n", n2, l2);
      int offset = get_offset(l1, n1, l2, n2);
      fprintf(stdout, "Matching offset %d\n", offset);
      offset >= 0 && print_offset(l2, n2, offset);
  } else {
      fprintf(stderr, "ERROR: Wrong input!\n");
      ret = ERROR_IN;
   }
```

- Program otestujeme pro ukázkový vstup.

```
Lorem ipsum dolor sit amet.
sit amet.Lorem ipsum dolor
```

```
$ clang -g shift.c -o shift && ./shift <input.txt; echo $?
DEBUG: l1[27]: "Lorem ipsum dolor sit amet."
DEBUG: l2[27]: "sit amet.Lorem ipsum dolor "
Matching offset 9
DEBUG: shift: "Lorem ipsum dolor sit amet."
0
```

- Vyzkoušejte si chování programu v kombinaci s `valgrind` pro detekci chybného přístupu k paměti, např. chybná alokace paměti pro posunutý řetězec.

```c
   for (size_t i = 0; i < n; ++i) {
      dst[i] = src[(offset + i) % n];
   }
```

```
$ valgrind ./shift < input.txt
...
==80708== Invalid write of size 1
==80708==    at 0x202240: shift (shift.c:84)
==80708==    by 0x202092: get_offset (shift.c:95)
==80708==    by 0x201DF2: main (shift.c:36)
```