



6. prednáška (18.3.2024)

Backtracking

alebo

hrubou silou
na (skoro) všetky problémy





Začnime zľahka...

● Problém:

- vygenerovať všetky postupnosti dĺžky 3 z čísel 1, 2, 3
 - matematicky: 3-prvkové **variácie s opakovaním** z prvkov množiny $\{1, 2, 3\}$

● Očakávaný výstup:

[1, 1, 1]	[2, 1, 1]	[3, 1, 1]
[1, 1, 2]	[2, 1, 2]	[3, 1, 2]
[1, 1, 3]	[2, 1, 3]	[3, 1, 3]
[1, 2, 1]	[2, 2, 1]	[3, 2, 1]
[1, 2, 2]	[2, 2, 2]	[3, 2, 2]
[1, 2, 3]	[2, 2, 3]	[3, 2, 3]
[1, 3, 1]	[2, 3, 1]	[3, 3, 1]
[1, 3, 2]	[2, 3, 2]	[3, 3, 2]
[1, 3, 3]	[2, 3, 3]	[3, 3, 3]



Generovanie trojíc

```
int[] p = new int[3];
for (int i = 1; i <= 3; i++) {
    p[0] = i;
    for (int j = 1; j <= 3; j++) {
        p[1] = j;
        for (int k = 1; k <= 3; k++) {
            p[2] = k;
            System.out.println(Arrays.toString(p));
        }
    }
}
```

Ďalšie výzvy:

- Ako zmeniť množinu z $\{1, 2, 3\}$ na $\{1, 2, \dots, 5\}$?
- Ako zmeniť množinu z $\{1, 2, 3\}$ na $\{0, 1, 2\}$?
- Čo ak by sme chceli 4-prvkové postupnosti čísel?
- Čo ak by sme chceli 5-prvkové postupnosti čísel?



Generovanie k -tíc

- Čo ak by sme chceli k -prvkové postupnosti z čísel $\{1, 2, 3\}$, t.j. **k -prvkové variácie s opakovaním**, kde k dopredu nepoznáme?
 - pridávanie vnorených cyklov nepomôže, pretože k nepoznáme dopredu...

Generovanie k -tíc je ťažký problém ...
... existuje jednoduchší podproblém?



Analýza trojíc...

[1, 1, 1]
[1, 1, 2]
[1, 1, 3]
[1, 2, 1]
[1, 2, 2]
[1, 2, 3]
[1, 3, 1]
[1, 3, 2]
[1, 3, 3]

[2, 1, 1]
[2, 1, 2]
[2, 1, 3]
[2, 2, 1]
[2, 2, 2]
[2, 2, 3]
[2, 3, 1]
[2, 3, 2]
[2, 3, 3]

[3, 1, 1]
[3, 1, 2]
[3, 1, 3]
[3, 2, 1]
[3, 2, 2]
[3, 2, 3]
[3, 3, 1]
[3, 3, 2]
[3, 3, 3]

Každá skupina „trojíc“
sa skladá zo všetkých
dvojíc z čísel {1, 2, 3}



Ako generovať trojice?

- Vygenerujeme najprv všetky dvojice...
 - a pred každú dvojicu najprv pridáme 1, potom 2 a potom 3...

	1 + [...]	2 + [...]	3 + [...]
[1, 1]	[1, 1, 1]	[2, 1, 1]	[3, 1, 1]
[1, 2]	[1, 1, 2]	[2, 1, 2]	[3, 1, 2]
[1, 3]	[1, 1, 3]	[2, 1, 3]	[3, 1, 3]
[2, 1]	[1, 2, 1]	[2, 2, 1]	[3, 2, 1]
[2, 2]	[1, 2, 2]	[2, 2, 2]	[3, 2, 2]
[2, 3]	[1, 2, 3]	[2, 2, 3]	[3, 2, 3]
[3, 1]	[1, 3, 1]	[2, 3, 1]	[3, 3, 1]
[3, 2]	[1, 3, 2]	[2, 3, 2]	[3, 3, 2]
[3, 3]	[1, 3, 3]	[2, 3, 3]	[3, 3, 3]



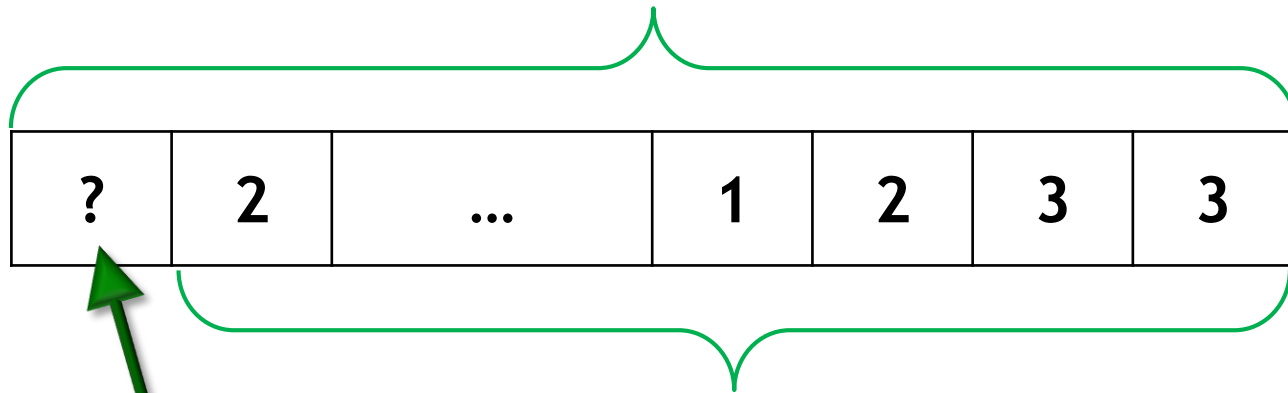
Generovanie v praxi





Ako generovať k -tice?

k -prvková postupnosť z čísel $\{1, 2, 3\}$



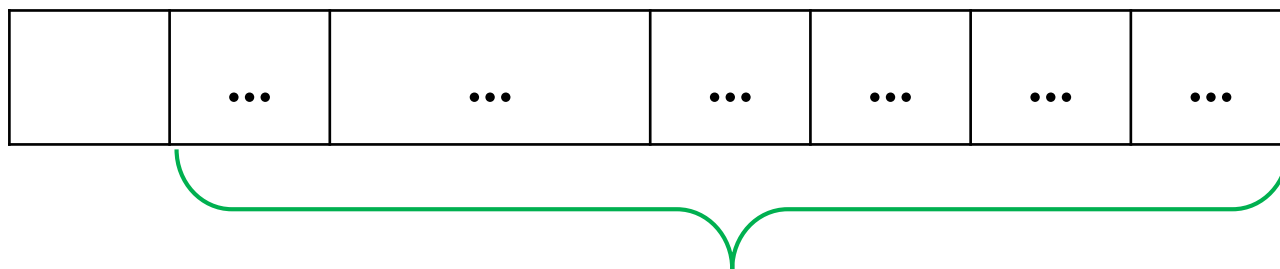
$(k-1)$ -prvková postupnosť z čísel $\{1, 2, 3\}$

Postupným dosadením čísel 1, 2 a 3 dostaneme 3 rôzne k -prvkové postupnosti z čísel $\{1, 2, 3\}$



Ako generovať k -tice?

Ako vygenerovať všetky
 k -prvkové postupnosti z čísel $\{1, 2, 3\}$?



Vygeneruj všetky $(k-1)$ -prvkové
postupnosti z čísel $\{1, 2, 3\}$...

$\{1, 2, 3\}$



Generovanie trojíc

```
int[] p = new int[3];
```

```
for (int i = 1; i <= 3; i++) {                                generuj(0)
    p[0] = i;
    for (int j = 1; j <= 3; j++) {                            generuj(1)
        p[1] = j;
        for (int k = 1; k <= 3; k++) {                        generuj(2)
            p[2] = k;
            System.out.println(Arrays.toString(p));
        }
    }
}
```

báza rekurzie



Generovanie k-tíc

```
private int[] p;
```

generuj všetky postupnosti v podpoli určenom indexami: **odIndexu**, ..., **p.length-1**

```
private void generuj(int odIndexu) {
    if (odIndexu == p.length) {
        vypis();
        return;
    }
}
```

Ak máme generovať postupnosť v podpoli dĺžky 0, znamená to, že pole je naplnené...

```
for (int i = 1; i <= 3; i++) {
    p[odIndexu] = i;
    generuj(odIndexu + 1);
}
}
```

Na prvú pozíciu podpoľa postupne dáme hodnoty **1**, **2** a **3**. Po dosadení každej z nich spustíme generovanie všetkých podpostupností v o 1 menšom podpoli.

```
public void generuj() {
    generuj(0);
}
```

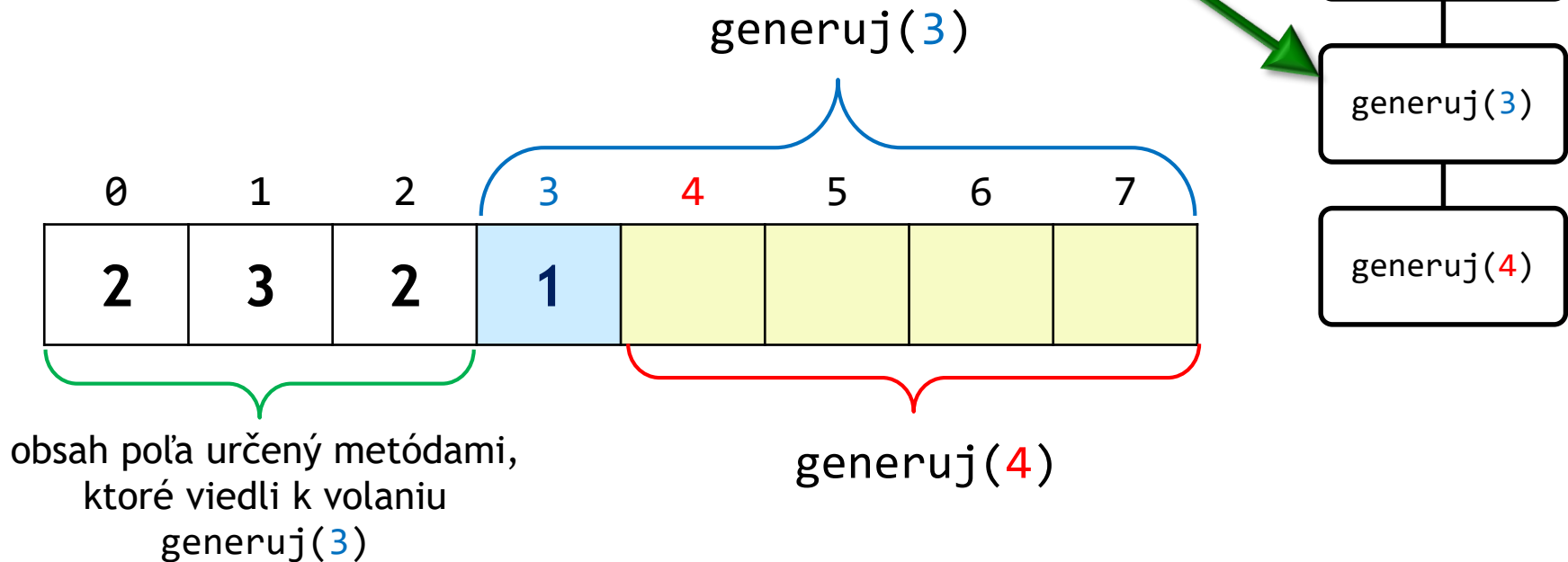
Začínáme generovanie na indexe 0, t.j. v celom poli.



Ako to vlastne generuje?

```
private void generuj(int odIndexu) {
    ...
    for (int i = 1; i <= 3; i++) {
        p[odIndexu] = i;
        generuj(odIndexu + 1);
    }
}
```

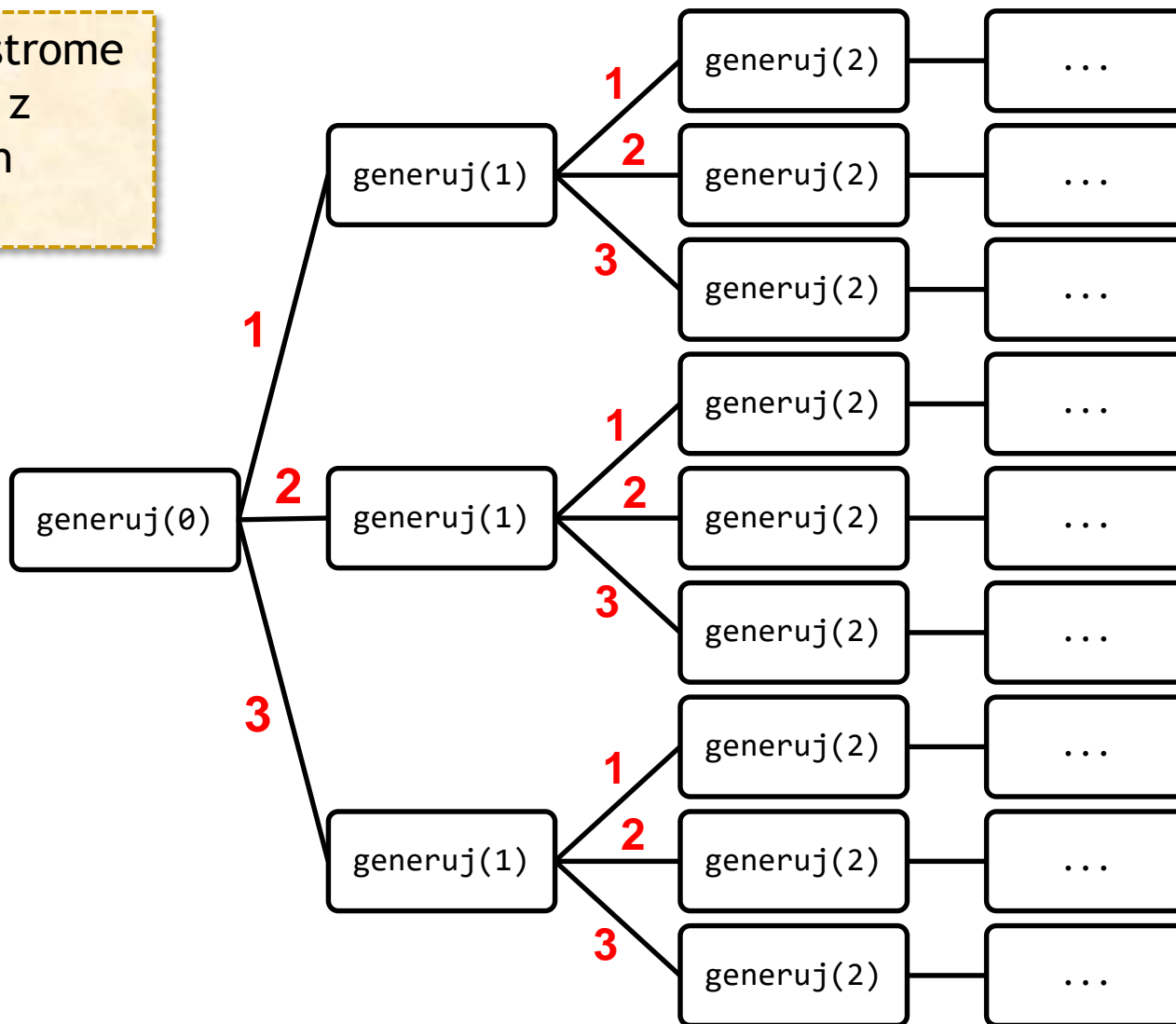
určuje obsah na
indexe 3 a nechá
generovať obsah
od indexu 4





Strom volaní

Každá vetva v strome volaní je jedna z vygenerovaných postupností...





Na čo je to dobré?

**Koho už len zaujíma
generovanie číselných
postupností?!**





Problém batoha



Trezor s cennosťami

Každá vec v trezore má svoju veľkosť a cenu...



Zlodej s batohom

Kapacita batoha je obmedzená!

Ktoré veci zobrať, aby **cena lupu bola čo najväčšia** a zároveň sa to **pomestilo do batoha**?



Ako naplniť batoh?

Kapacita
batoha: 4



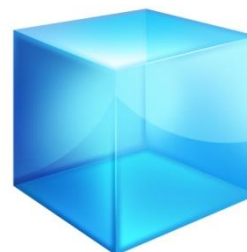
Veľkosť:

12 €



3

7 €



2

7 €



2

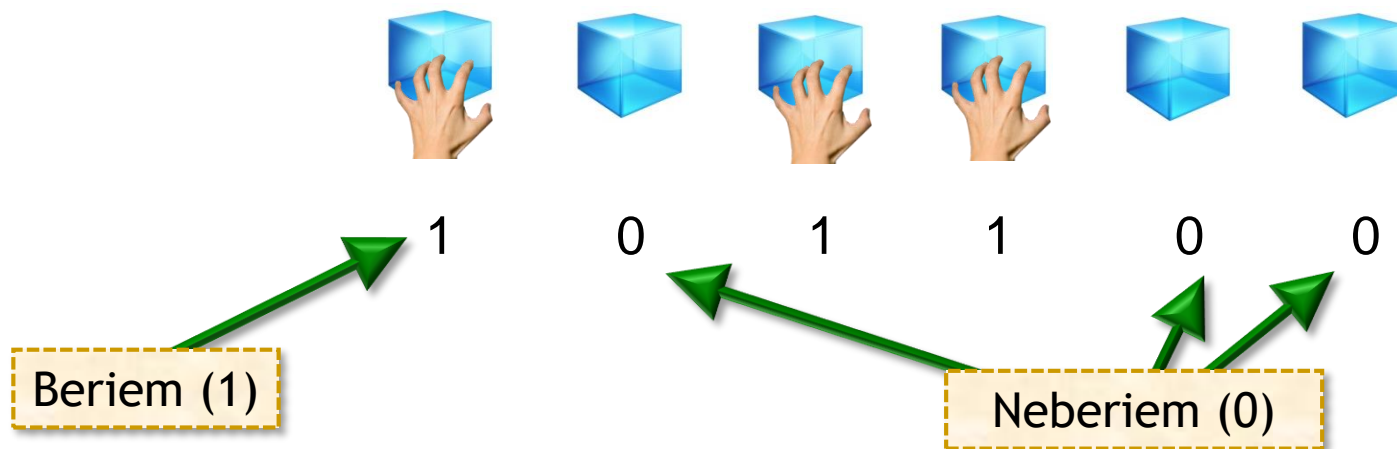
● Jednoduché stratégie nefungujú:

- kým je miesto, ber najdrahšiu vec, ktorú ešte nemáš
- kým je miesto, ber vec s najlepším pomerom cena/veľkosť (jednotková cena), ktorú ešte nemáš



Riešenie hrubou silou!

- Máme n predmetov
- S každým predmetom sú dve možnosti:
 - predmet **zoberiem**
 - predmet **nezoberiem**
- Každý **výber** možno charakterizovať postupnosťou z núl a jednotiek...



Zmestí sa
výber **do**
batoha?

Aká je **cena**
výberu?



Riešenie hrubou silou!

- Máme n predmetov:
 - vygenerujem všetky postupnosti dĺžky n z 0 a 1
= n -prvkové **variácie s opakovaním** z prvkov množiny $\{0 = \text{neberiem}, 1 = \text{beriem}\}$
 - každá **postupnosť zodpovedá výberu**, pre ktorý spočítam:
 - či sa **zmestí do batoha** (súčet veľkostí vybraných predmetov je menší ako kapacita batoha)
 - aká je **cena výberu** (súčet cien vybraných predmetov)
- **Riešenie:**
 - zoberiem výber, ktorý sa zmestí do batoha a má najlepšiu cenu



Programujeme...



Aká je efektivita riešenia?

- n predmetov = 2^n možných výberov
- spracovanie jedného výberu $O(n)$
- celkový čas: $2^{O(n)}$

Verí sa ($P \neq NP$), že túto úlohu nejde riešiť rýchlejšie



- 60 predmetov = 2^{60} výberov $> 10^{17}$ výberov
 - 1 GHz procesor $\sim 10^9$ operácií za sekundy
 - $10^{17}/10^9 = 10^8$ sekúnd > 3 roky



Riešenie hrubou silou!

- Problémy riešime **preskúmaním všetkých možností riešenia**
- Často aplikujeme schému:
 - **generuj** - generuje všetky postupnosti zadanej dĺžky, ktoré zodpovedajú nejakej možnosti riešenia
 - **spracuj** - overí, či vygenerovaná možnosť je prípustná (*napr. celková veľkosť je menšia ako kapacita*) a ak áno, možnosť sa nejako **dodatočne spracuje** (*napr. overí sa, či nie je lepšia ako doposiaľ najlepšie nájdené riešenie*)



A čo ďalej?

A pod'me generovat' opäť
nejaké číselné postupnosti...





Variácie bez opakovania

- **Úloha:** Vygenerovať všetky postupnosti dĺžky k z prvkov množiny $\{1, \dots, n\}$, v ktorých sa ale žiadne číslo neopakuje.
 - matematicky: generujeme **k -prvkové variácie bez opakovania** z n -prvkovej množiny
- **Riešenie:**
 - vygenerujeme všetky postupnosti dĺžky k
 - pre každú postupnosť overíme, či tam náhodou nie sú dve rovnaké čísla - ak nie, tak ju „vypíšeme“



Generujeme bez opakovania

```
private boolean vyhovuje() {
    for (int i = 0; i < p.length; i++)
        for (int j = i + 1; j < p.length; j++)
            if (p[i] == p[j])
                return false;
}
```

Overí, či sú všetky čísla v poli rôzne.

```
return true;
}
```

Pred výpisom overíme, že niet opakovaní.

```
private void generuj(int odIndexu) {
    if (odIndexu == p.length) {
        if (vyhovuje())
            vypis();
        return;
    }
}
```

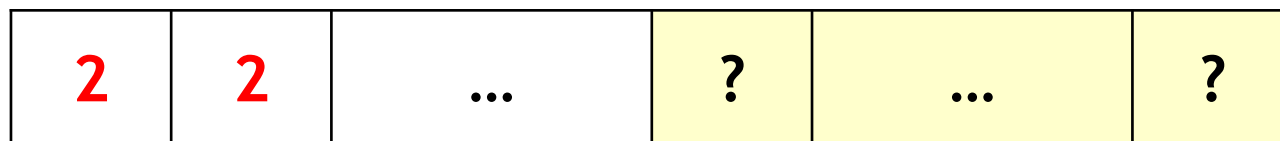
```
for (int i = 1; i <= n; i++) {
    p[odIndexu] = i;
    generuj(odIndexu + 1);
}
```




Ako znížiť straty?

- Metóda `vyhovuje()` **filtruje**, čo sa „vypíše“...
- Postupnosti bez opakovania dĺžky 3 z prvkov množiny $\{1, 2, 3, 4\}$
 - počet „vypísaných“: $4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$ postupností
 - počet vygenerovaných: $4^3 = 64$ postupností
 - ... generujeme **40** postupností **zbytočne** („nevypíšu“ sa)

generuj(...)

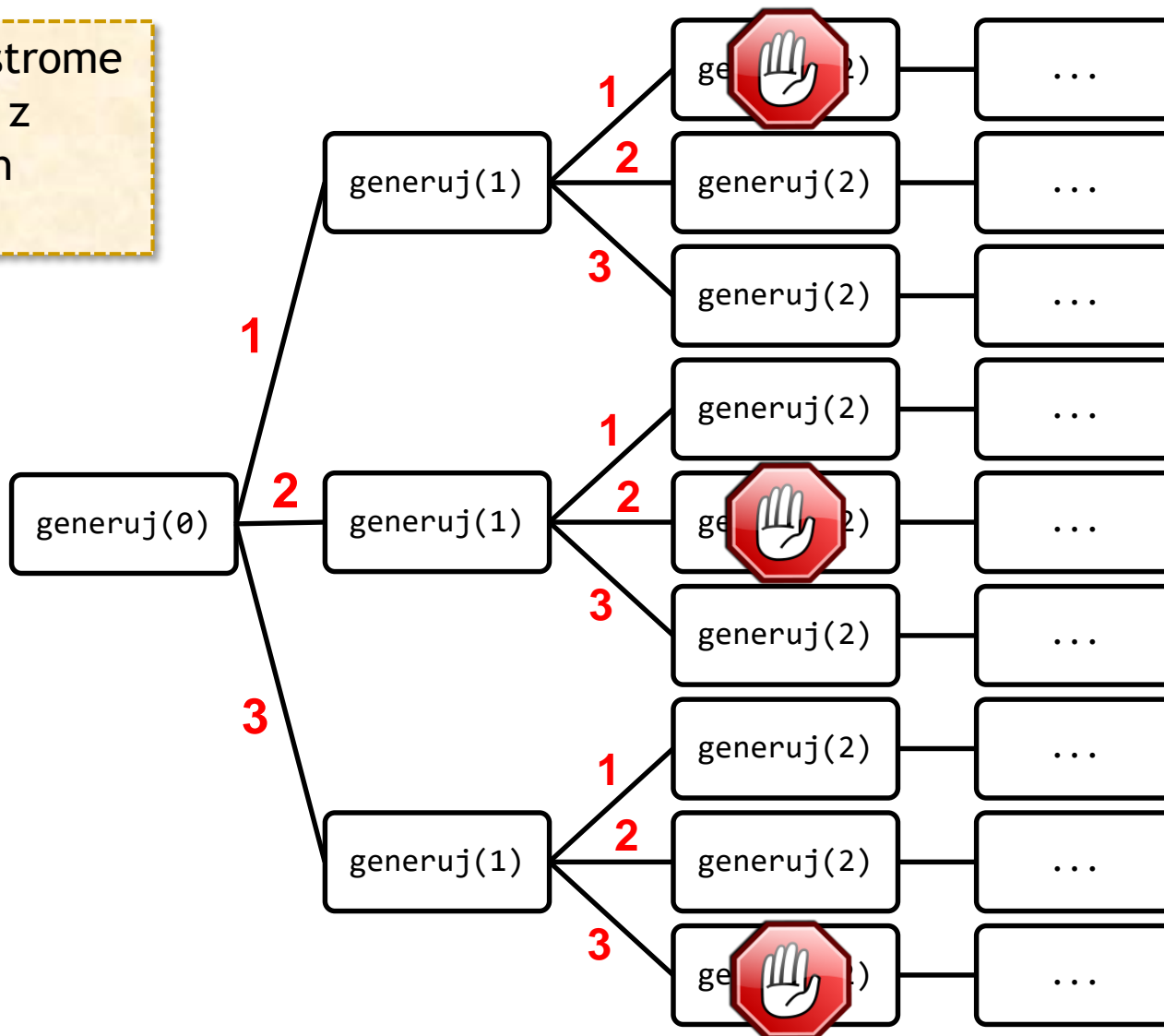


Načo generovať zvyšok, keď kvôli dvojkám na začiatku sa to aj tak nevypíše?



Strom volaní

Každá vetva v strome volaní je jedna z vygenerovaných postupností...





Opatrné generovanie...

```
private boolean moze(int idx, int hodnota) {
    for (int i=0; i<idx; i++)
        if (p[i] == hodnota)
            return false;

    return true;
}
```

Overí, či sa zadaná hodnota nenachádza v poli na indexoch 0,...,idx-1

```
private void generuj(int odIndexu) {
```

...

```
    for (int i = 1; i <= n; i++)
        if (moze(odIndexu, i)) {
            p[odIndexu] = i;
            generuj(odIndexu + 1);
        }
}
```

Hodnotu **i** umiestnime do poľa iba vtedy, keď sa ešte v poli „naľavo“ nenachádza.



Opatrné generovanie rýchlo...

- Overenie, či číslo môžeme umiestniť do poľa (metóda moze), má časovú zložitosť $O(k)$
- Zrýchlenie:** pamätajme si v poli, či sa číslo už nachádza v „ľavej“ fixovanej časti...

```
private Set<Integer> pouzite = new ???Set<Integer>()
```

```
for (int i = 1; i <= n; i++) {
    if (!pouzite.contains(i)) {
        pouzite.add(i);
        p[odIndexu] = i;
        generuj(odIndexu + 1);
        p[odIndexu] = -1;
        pouzite.remove(i);
    }
}
```

Poznačíme, že sme pridali do poľa číslo i ...

Poznačíme, že číslo i už viac nie je v platnej časti poľa ...



Opatrné generovanie rýchlo...

- Overenie, či číslo môžeme umiestniť do poľa (metóda moze), má časovú zložitosť $O(k)$
- Zrýchlenie:** pamätajme si v poli, či sa číslo už nachádza v „ľavej“ fixovanej časti...

```
for (int i = 1; i <= n; i++) {  
    if (!pouzite[i]) {  
        pouzite[i] = true;  
        p[odIndexu] = i;  
        generuj(odIndexu + 1);  
        p[odIndexu] = -1;  
        pouzite[i] = false;  
    }  
}
```

Poznačíme, že sme pridali
do poľa číslo i ...


Poznačíme, že číslo i už viac
nie je v platnej časti poľa ...



Variácie bez opakovania - finty

- **Permutácie** = n-prvkové variácie bez opakovania prvkov z n-prvkovej množiny...
- Ako generovať **variácie z inej množiny** ako sú prvky množiny $\{1, \dots, n\}$?
 - prvky množiny dáme do nejakého poľa - napr. prvky
 - generujeme variácie indexov poľa prvky
 - výpis:

```
for (int i=0; i<p.length; i++)  
    variacia[i] = prvky[p[i]]
```



Generujeme postupnosť indexov v poli prvky.



Backtracking

- Backtracking = **prehľadávanie s návratom**
- Spôsob na hľadanie/konštrukciu riešenia tak, že **skúmame** (generujeme) **všetky možnosti**
- Zvyčajná schéma:
 - sprav jeden **krok „bližšie“** ku skonštruovaniu riešenia
 - pridanie hodnoty do poľa a jej zaevidovanie v poli použite
 - (rekurzívne) generovanie možností (riešení), ktoré vychádzajú z toho, čo máme ...
 - po návrate z rekurzie **vrátíme pôvodný stav** pred spravením jedného kroku „bližšie“
 - odevidovanie hodnoty v poli použite



Backtracking a efektívnosť

- Zvyčajne veľmi neefektívny prístup s **exponenciálnou** časovou zložitosťou...
- Typy problémov:
 - backtracking je **jediná možná stratégia** na ich vyriešenie (resp. iné stratégie majú rovnakú časovú zložitosť)
 - backtracking je **jediná možná stratégia** na ich vyriešenie, no pre isté typy vstupov ich ide riešiť „**prakticky efektívnymi**“ algoritmami (napr. pseudopolynomiálne algoritmy)
 - riešenie vieme nájsť **bez skúmania všetkých možností** (napr. polynomiálne algoritmy)

ak nie sú otázky...

Ďakujem za pozornosť!

