

## Prohledávání stavového prostoru

Aleš Horák

E-mail: `hales@fi.muni.cz`

`http://nlp.fi.muni.cz/uui/`

Obsah:

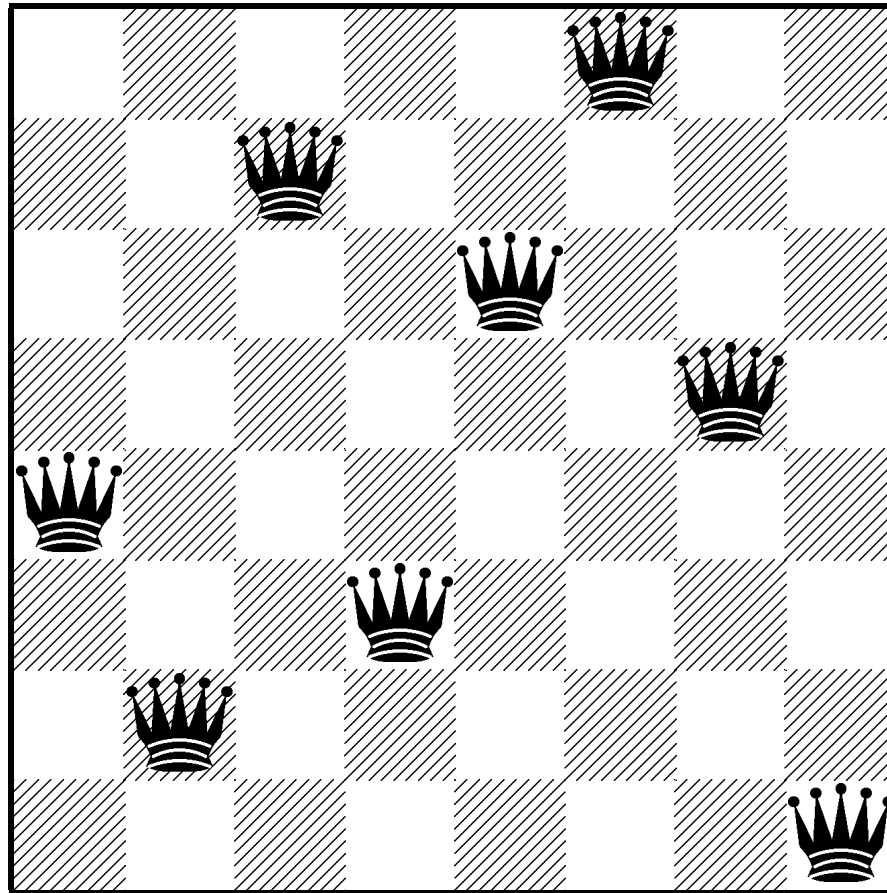
- Problém osmi dam
- Prohledávání stavového prostoru
- Prohledávání do hloubky
- Prohledávání do šířky
- Prohledávání s postupným prohlubováním
- Shrnutí

## PROBLÉM OSMI DAM

**úkol:** *Rozestavte po šachovnici 8 dam tak, aby se žádné dvě vzájemně neohrožovaly.*

## PROBLÉM OSMI DAM

úkol: Rozestavte po šachovnici 8 dam tak, aby se žádné dvě vzájemně neohrožovaly.



## PROBLÉM OSMI DAM I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

Solution = [1/4, 2/2, 3/7, 4/3, 5/6, 6/8, 7/5, 8/1]

## PROBLÉM OSMI DAM I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

Solution = [1/4, 2/2, 3/7, 4/3, 5/6, 6/8, 7/5, 8/1]

`solution(S) :- template(S), sol(S).`

`sol([]).`

`sol([X/Y|Others]) :- sol(Others),  
member(X,[1,2,3,4,5,6,7,8]),  
member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),  
noattack(X/Y,Others).`

`noattack(_,[]).`

`noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- X=\=X1, Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,  
noattack(X/Y,Others).`

`template([X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]).`

## PROBLÉM OSMI DAM I

datová struktura – osmiprvkový seznam **[X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]**

Solution = [1/4, 2/2, 3/7, 4/3, 5/6, 6/8, 7/5, 8/1]

`solution(S) :- template(S), sol(S).`

`sol([]).`

`sol([X/Y|Others]) :- sol(Others),  
 member(X,[1,2,3,4,5,6,7,8]),  
 member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),  
 noattack(X/Y,Others).`

`noattack(_,[]).`

`noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- X=\=X1, Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,  
 noattack(X/Y,Others).`

`template([X1/Y1, X2/Y2, X3/Y3, X4/Y4, X5/Y5, X6/Y6, X7/Y7, X8/Y8]).`

?- `solution(Solution).`

`Solution` = [8/4, 7/2, 6/7, 5/3, 4/6, 3/8, 2/5, 1/1] ;

`Solution` = [7/2, 8/4, 6/7, 5/3, 4/6, 3/8, 2/5, 1/1] ;

Yes

## PROBLÉM OSMI DAM II

počet možností u řešení I =  $64 \cdot 63 \cdot 62 \dots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

## PROBLÉM OSMI DAM II

počet možností u řešení I =  $64 \cdot 63 \cdot 62 \dots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

omezení **stavového prostoru** – každá dáma má svůj sloupec

počet možností u řešení II =  $8 \cdot 7 \cdot 6 \dots \cdot 1 = 40\,320$



## PROBLÉM OSMI DAM II

počet možností u řešení I =  $64 \cdot 63 \cdot 62 \dots \cdot 57 \approx 1.8 \times 10^{14}$

omezení **stavového prostoru** – každá dáma má svůj sloupec

počet možností u řešení II =  $8 \cdot 7 \cdot 6 \dots \cdot 1 = 40\,320$

```
solution(S) :- template(S), sol(S).
```

```
sol([]).
```

```
sol([X/Y|Others]) :- sol(Others), member(Y,[1,2,3,4,5,6,7,8]),
                    noattack(X/Y,Others).
```

```
noattack(_ ,[]).
```

```
noattack(X/Y,[X1/Y1|Others]) :- Y=\=Y1, Y1-Y=\=X1-X, Y1-Y=\=X-X1,
                                noattack(X/Y,Others).
```

```
template([1/Y1,2/Y2,3/Y3,4/Y4,5/Y5,6/Y6,7/Y7,8/Y8]).
```

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y$$

$$D_x = [1..8] \quad \longrightarrow \quad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y$$

$$D_y = [1..8] \quad \quad \quad D_v = [2..16]$$

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y$$

$$D_x = [1..8] \quad \longrightarrow \quad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y$$

$$D_y = [1..8] \quad \quad \quad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y \qquad D_x = [1..8] \qquad \longrightarrow \qquad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y \qquad D_y = [1..8] \qquad \qquad \qquad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

```

solution(YList) :- sol(YList, [1,2,3,4,5,6,7,8], [1,2,3,4,5,6,7,8],
                      [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                      [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).

sol([], [], Dy, Du, Dv).
sol([Y|YList], [X|Dx1], Dy, Du, Dv) :- del(Y, Dy, Dy1), U is X-Y, del(U, Du, Du1), V is X+Y,
                                     del(V, Dv, Dv1), sol(YList, Dx1, Dy1, Du1, Dv1).

del(Item, [Item|List], List).
del(Item, [First|List], [First|List1]) :- del(Item, List, List1).
    
```

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y \qquad D_x = [1..8] \qquad \longrightarrow \qquad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y \qquad D_y = [1..8] \qquad \qquad \qquad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

```

solution(YList) :- sol(YList, [1,2,3,4,5,6,7,8], [1,2,3,4,5,6,7,8],
                      [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                      [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).

sol([], [], Dy, Du, Dv).
sol([Y|YList], [X|Dx1], Dy, Du, Dv) :- del(Y, Dy, Dy1), U is X-Y, del(U, Du, Du1), V is X+Y,
                                     del(V, Dv, Dv1), sol(YList, Dx1, Dy1, Du1, Dv1).

del(Item, [Item|List], List).
del(Item, [First|List], [First|List1]) :- del(Item, List, List1).
    
```

Problém  $n$  dam pro  $n = 100$ :

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y \qquad D_x = [1..8] \qquad \longrightarrow \qquad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y \qquad D_y = [1..8] \qquad \qquad \qquad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

```

solution(YList) :- sol(YList, [1,2,3,4,5,6,7,8], [1,2,3,4,5,6,7,8],
                      [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                      [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).

sol([], [], Dy, Du, Dv).
sol([Y|YList], [X|Dx1], Dy, Du, Dv) :- del(Y, Dy, Dy1), U is X-Y, del(U, Du, Du1), V is X+Y,
                                     del(V, Dv, Dv1), sol(YList, Dx1, Dy1, Du1, Dv1).

del(Item, [Item|List], List).
del(Item, [First|List], [First|List1]) :- del(Item, List, List1).
    
```

Problém  $n$  dam pro  $n = 100$ : řešení  $1 \dots 10^{400}$

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y \qquad D_x = [1..8] \qquad \longrightarrow \qquad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y \qquad D_y = [1..8] \qquad \qquad \qquad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

```

solution(YList) :- sol(YList, [1,2,3,4,5,6,7,8], [1,2,3,4,5,6,7,8],
                      [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                      [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).

sol([], [], Dy, Du, Dv).
sol([Y|YList], [X|Dx1], Dy, Du, Dv) :- del(Y, Dy, Dy1), U is X-Y, del(U, Du, Du1), V is X+Y,
                                     del(V, Dv, Dv1), sol(YList, Dx1, Dy1, Du1, Dv1).

del(Item, [Item|List], List).
del(Item, [First|List], [First|List1]) :- del(Item, List, List1).
    
```

Problém  $n$  dam pro  $n = 100$ : řešení I ...  $10^{400}$  řešení II ...  $10^{158}$

## PROBLÉM OSMI DAM III

souřadnice  $x$  a  $y$   $\longrightarrow$  souřadnice diagonály  $u$  a  $v$

$$u = x - y \qquad D_x = [1..8] \qquad \longrightarrow \qquad D_u = [-7..7]$$

$$v = x + y \qquad D_y = [1..8] \qquad \qquad \qquad D_v = [2..16]$$

počet možností u řešení III = 2057

```

solution(YList) :- sol(YList, [1,2,3,4,5,6,7,8], [1,2,3,4,5,6,7,8],
                      [-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7],
                      [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16]).

sol([], [], Dy, Du, Dv).
sol([Y|YList], [X|Dx1], Dy, Du, Dv) :- del(Y, Dy, Dy1), U is X-Y, del(U, Du, Du1), V is X+Y,
                                     del(V, Dv, Dv1), sol(YList, Dx1, Dy1, Du1, Dv1).

del(Item, [Item|List], List).
del(Item, [First|List], [First|List1]) :- del(Item, List, List1).
    
```

Problém  $n$  dam pro  $n = 100$ : řešení I ...  $10^{400}$  řešení II ...  $10^{158}$  řešení III ...  $10^{52}$



## PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

Řešení problému prohledáváním stavového prostoru:

- předpoklady – statické a deterministické prostředí, diskrétní stavy
- *stavový prostor*
- *počáteční stav*      **init(State)**
- *cílová podmínka*      **goal(State)**
- *přechodové akce*      **move(State,NewState)**
- *prohledávací strategie*

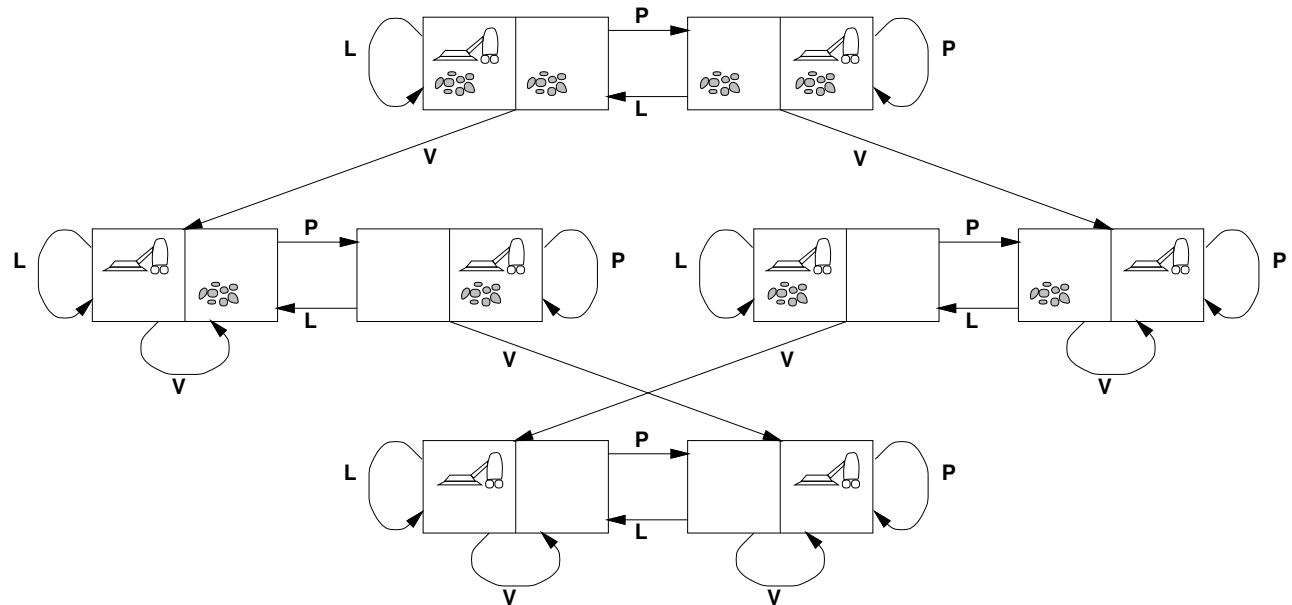
## PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

Řešení problému prohledáváním stavového prostoru:

- předpoklady – statické a deterministické prostředí, diskrétní stavy
- *stavový prostor*
- *počáteční stav*      **init(State)**
- *cílová podmínka*      **goal(State)**
- *přechodové akce*      **move(State,NewState)**
- *prohledávací strategie*

Problém agenta Vysavače:

- máme dvě místnosti (L, P)
- jeden vysavač (v L nebo P)
- v každé místnosti je/není špína
- počet stavů je  $2 \times 2^2 = 8$
- akce = {*doLeva*, *doPrava*, *Vysávej*}



## ABSTRAKCE PROHLEDÁVÁNÍ STAVOVÉHO PROSTORU

- *prohledávací strom*
- *kořenový uzel*
- *uzel prohledávacího stromu:*
  - *stav*
  - *rodičovský uzel*
  - *přechodová akce*
  - *hloubka uzlu*
  - *cena –  $g(n)$  cesty,  $c(x, a, y)$  přechodu*
- *(optimální) řešení*

## DALŠÍ PŘÍKLAD – POSUNOVAČKA

počáteční stav (např.)

7	2	4
5		6
8	3	1

→ ... →

cílový stav

	1	2
3	4	5
6	7	8

- hra na čtvercové šachovnici  $m \times m$  s  $n = m^2 - 1$  očíslovanými kameny
- příklad pro šachovnici  $3 \times 3$ , posunování osmi kamenů (8-posunovačka)
- stavy – pozice všech kamenů
- akce – “pohyb” prázdného místa

## DALŠÍ PŘÍKLAD – POSUNOVAČKA

počáteční stav (např.)

7	2	4
5		6
8	3	1

→ ... →

cílový stav

	1	2
3	4	5
6	7	8

- hra na čtvercové šachovnici  $m \times m$  s  $n = m^2 - 1$  očíslovanými kameny
- příklad pro šachovnici  $3 \times 3$ , posunování osmi kamenů (8-posunovačka)
- stavy – pozice všech kamenů
- akce – “pohyb” prázdného místa

☞ Optimální řešení obecné  $n$ -posunovačky je NP-úplné

Počet stavů	u 8-posunovačky	...	$9!/2 = 181\,440$
	u 15-posunovačky	...	$10^{13}$
	u 24-posunovačky	...	$10^{25}$

## REÁLNÉ PROBLÉMY ŘEŠITELNÉ PROHLEDÁVÁNÍM

- hledání cesty z města  $A$  do města  $B$
- hledání itineráře
- problém obchodního cestujícího
- návrh VLSI čipu
- navigace auta, robota, ...
- postup práce automatické výrobní linky
- návrh proteinů – 3D-sekvence aminokyselin
- Internetové vyhledávání informací

## ŘEŠENÍ PROBLÉMU PROHLEDÁVÁNÍM

Kostra algoritmu:

```
solution (Solution) :- init (State), solve (State, Solution).  
solve (State, [State]) :- goal (State).  
solve (State, [State | Sol]) :- move (State, NewState), solve (NewState, Sol).
```

**move(State,NewState)** – definuje prohledávací **strategii**

## ŘEŠENÍ PROBLÉMU PROHLEDÁVÁNÍM

Kostra algoritmu:

```
solution (Solution) :- init (State), solve (State, Solution).  
solve (State, [State]) :- goal (State).  
solve (State, [State|Sol]) :- move (State, NewState), solve (NewState, Sol).
```

**move(State,NewState)** – definuje prohledávací **strategii**

Porovnání strategií:

- úplnost
- optimálnost
- časová složitost
- prostorová složitost



## ŘEŠENÍ PROBLÉMU PROHLEDÁVÁNÍM

Kostra algoritmu:

```
solution (Solution) :- init (State), solve (State, Solution).  
solve (State, [State]) :- goal (State).  
solve (State, [State | Sol]) :- move (State, NewState), solve (NewState, Sol).
```

**move(State,NewState)** – definuje prohledávací **strategii**

Porovnání strategií:

- úplnost
- optimálnost
- časová složitost
- prostorová složitost

složitost závisí na:

- $b$  – faktor **větvení** (branching factor)
- $d$  – hloubka cíle (goal depth)
- $m$  – maximální hloubka větve/délka cesty (maximum depth/path)

## NEINFORMOVANÉ PROHLEDÁVÁNÍ

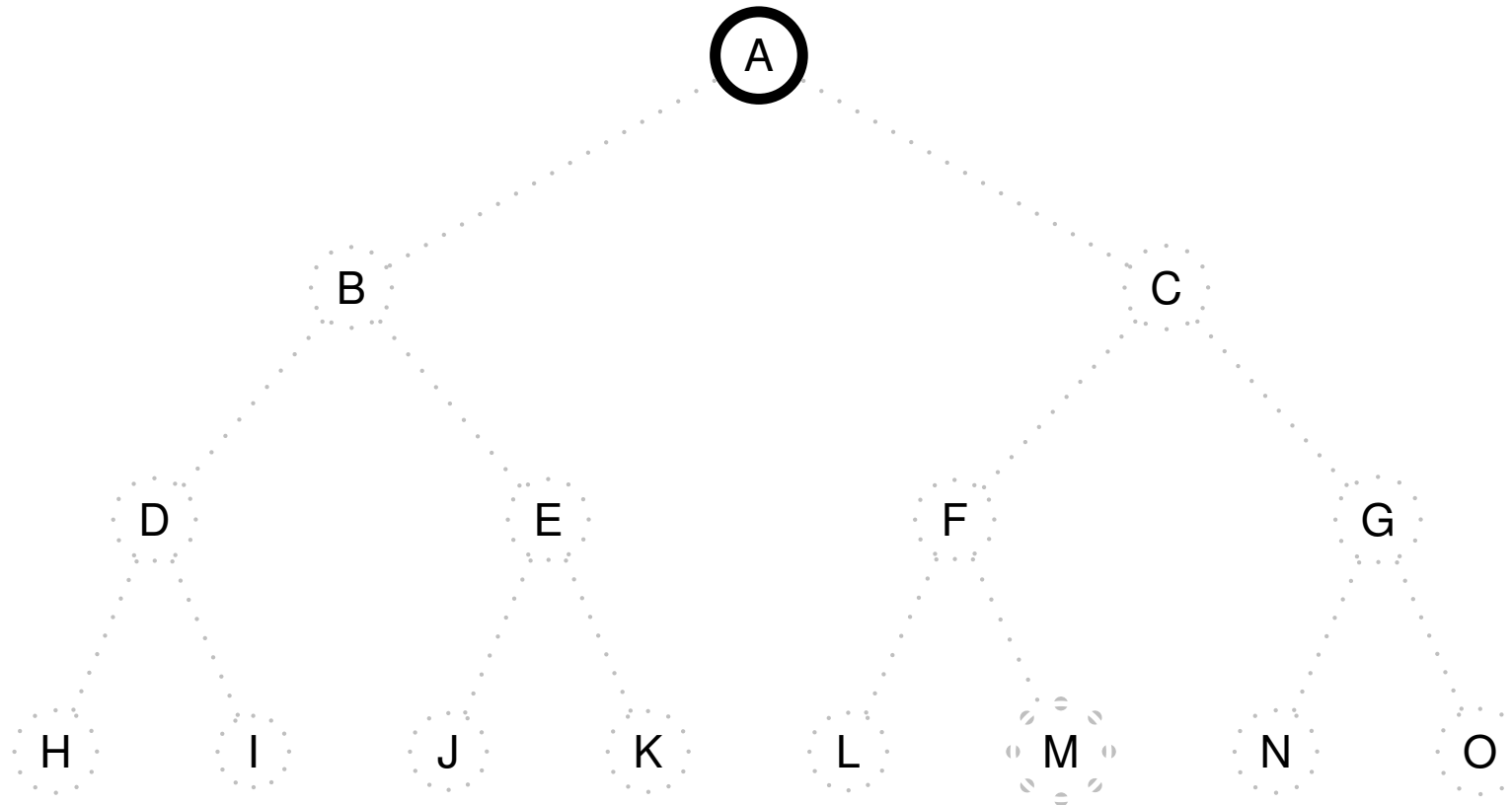
- prohledávání do hloubky
- prohledávání do hloubky s limitem
- prohledávání do šířky
- prohledávání podle ceny
- prohledávání s postupným prohlubováním

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)

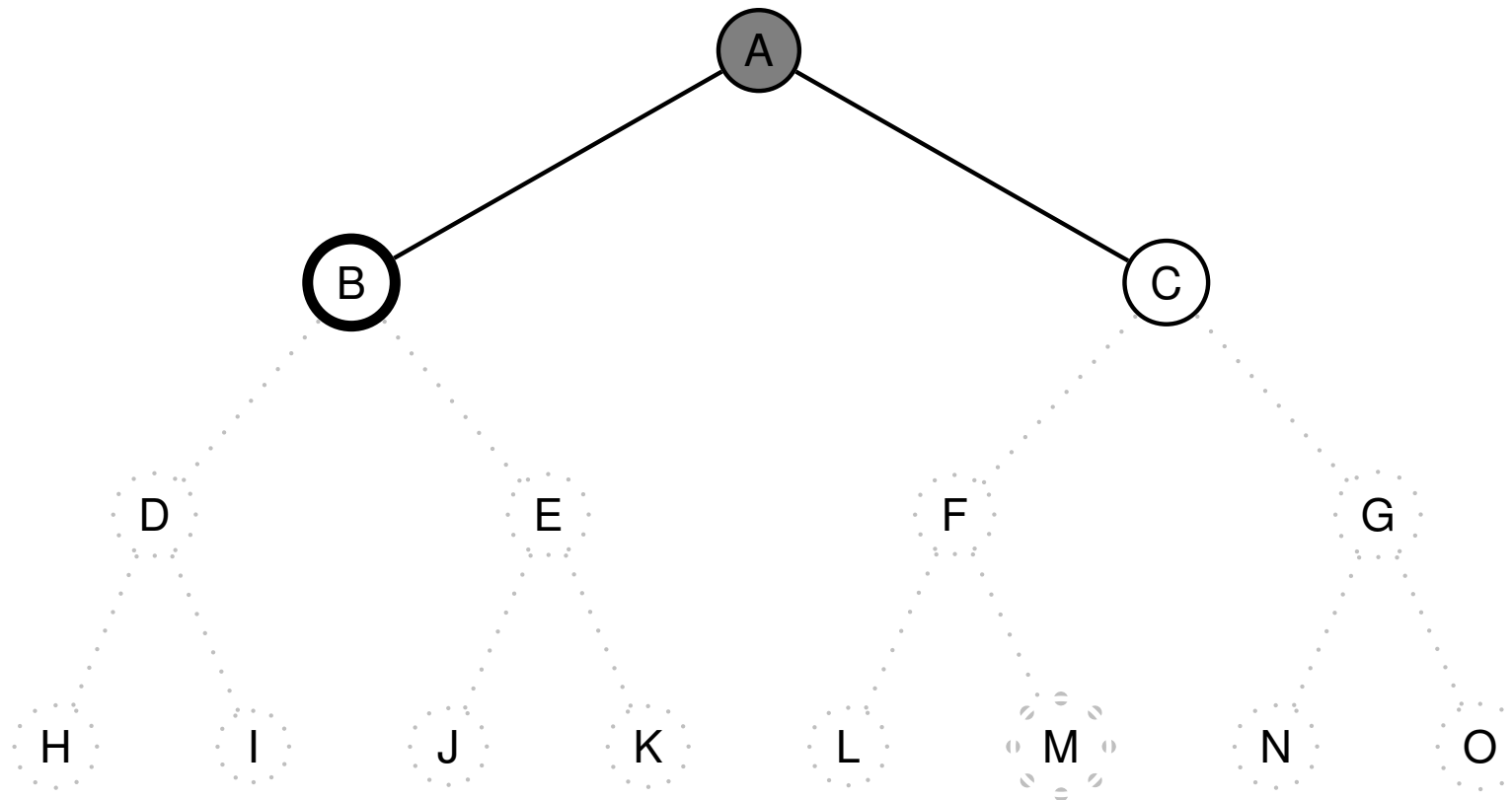
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



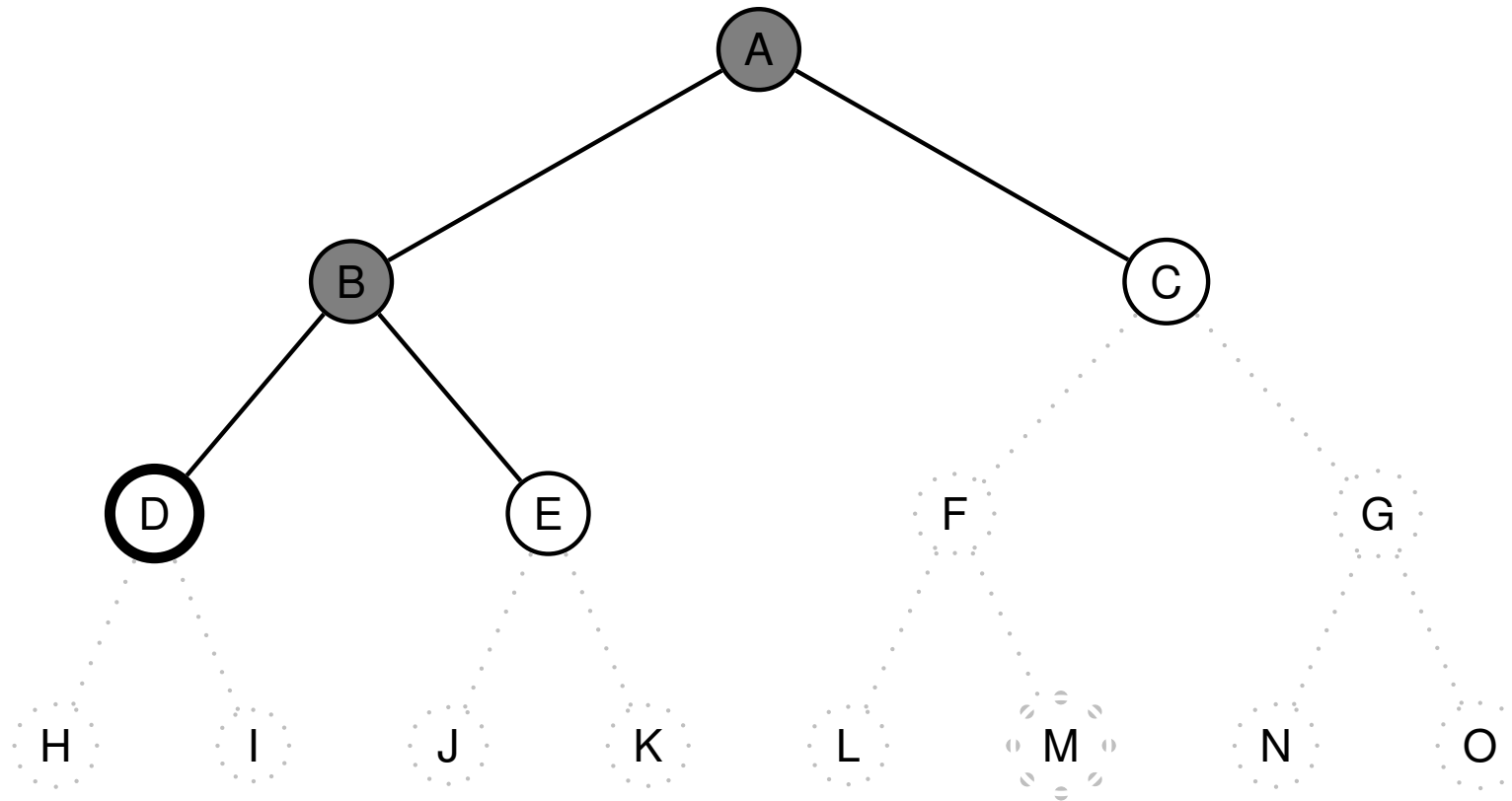
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



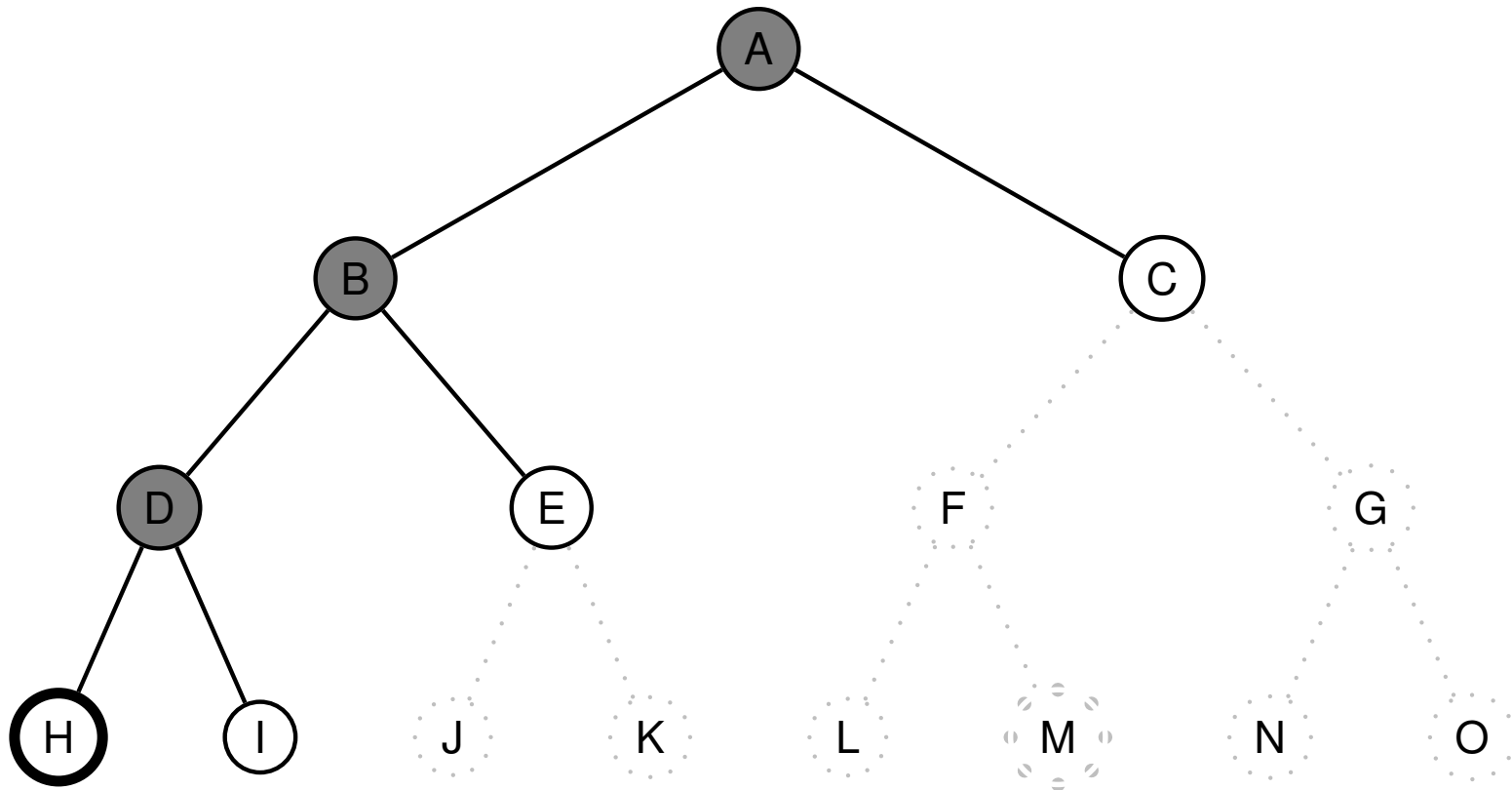
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



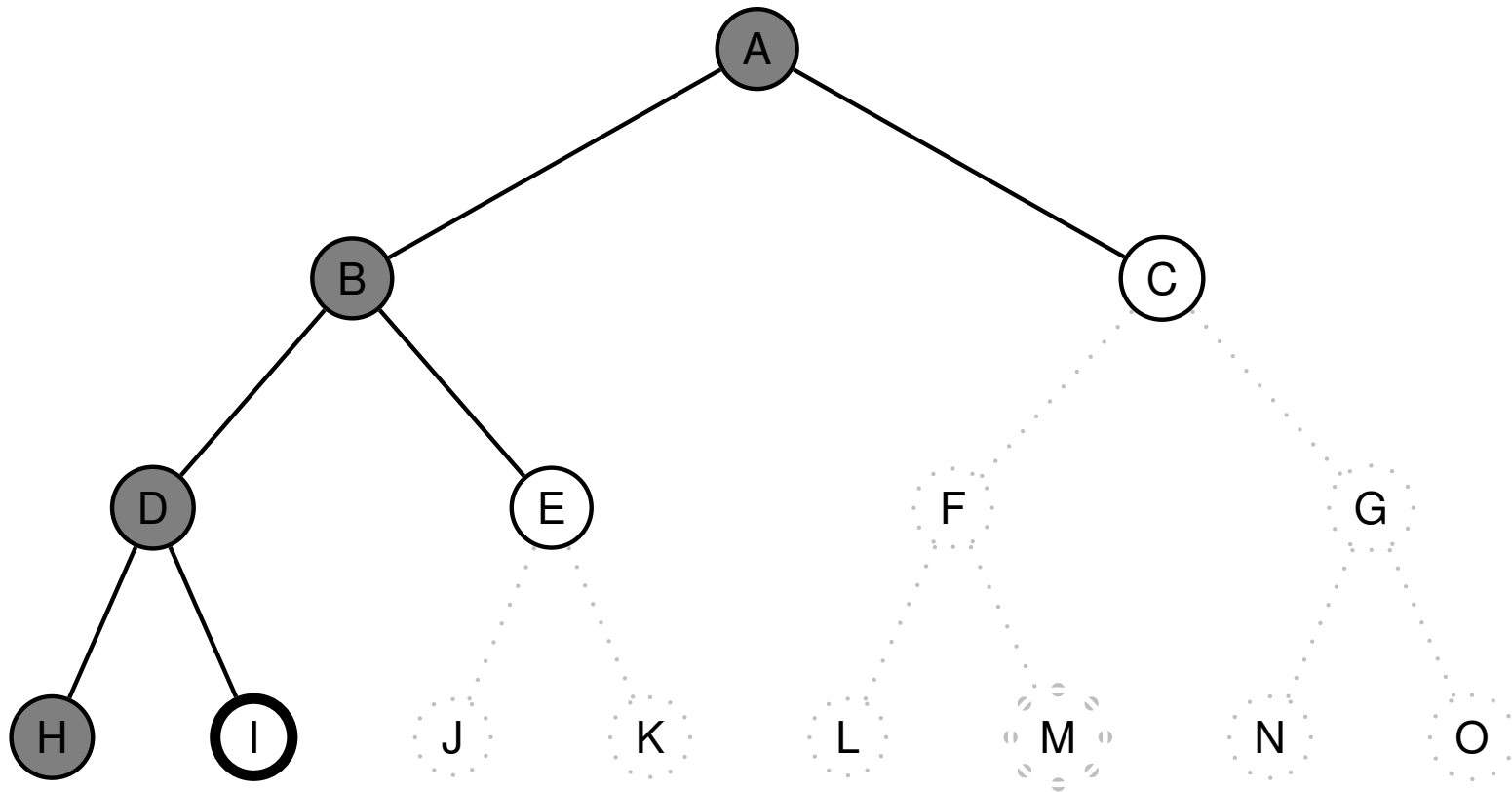
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

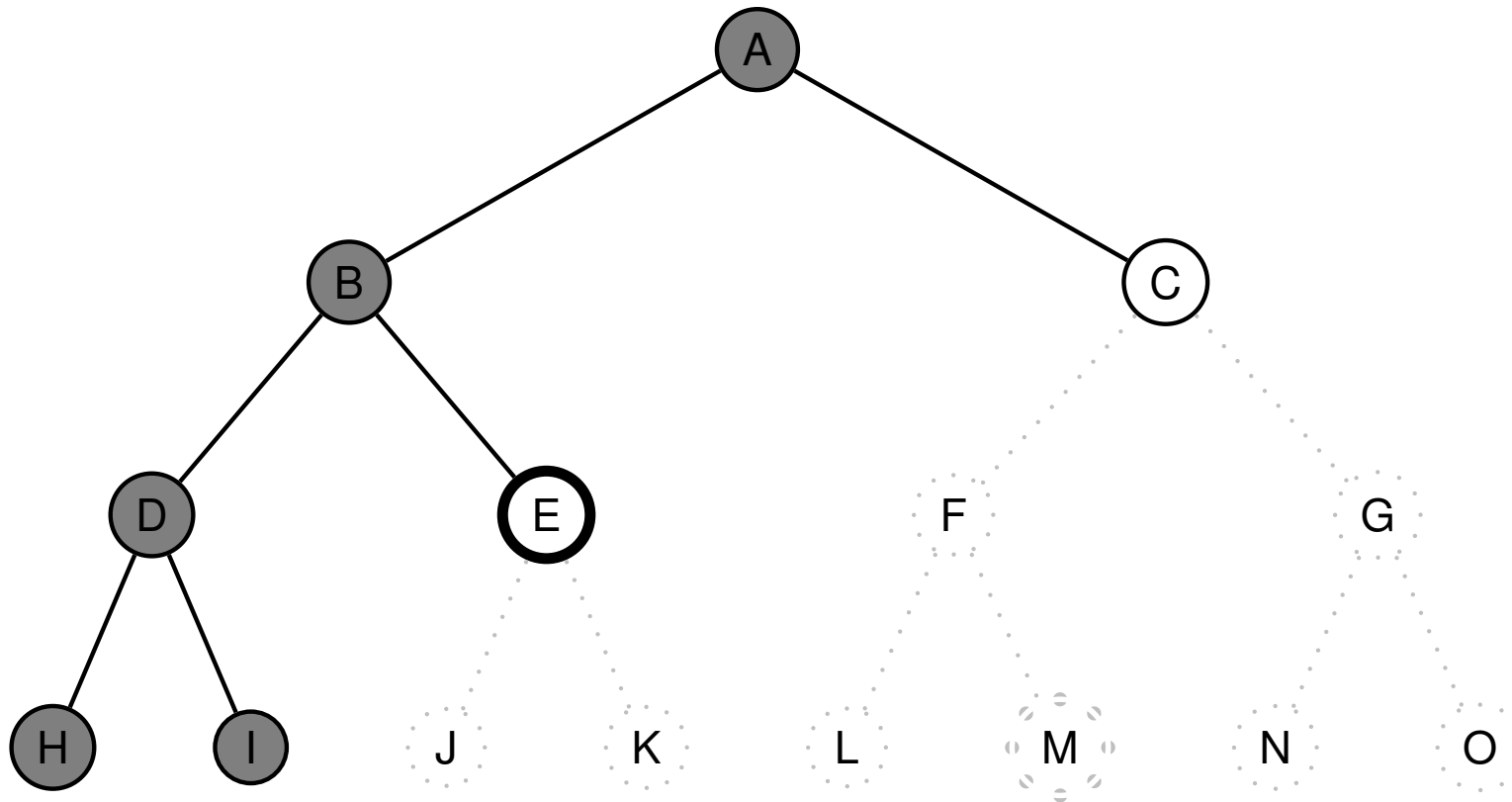
Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)





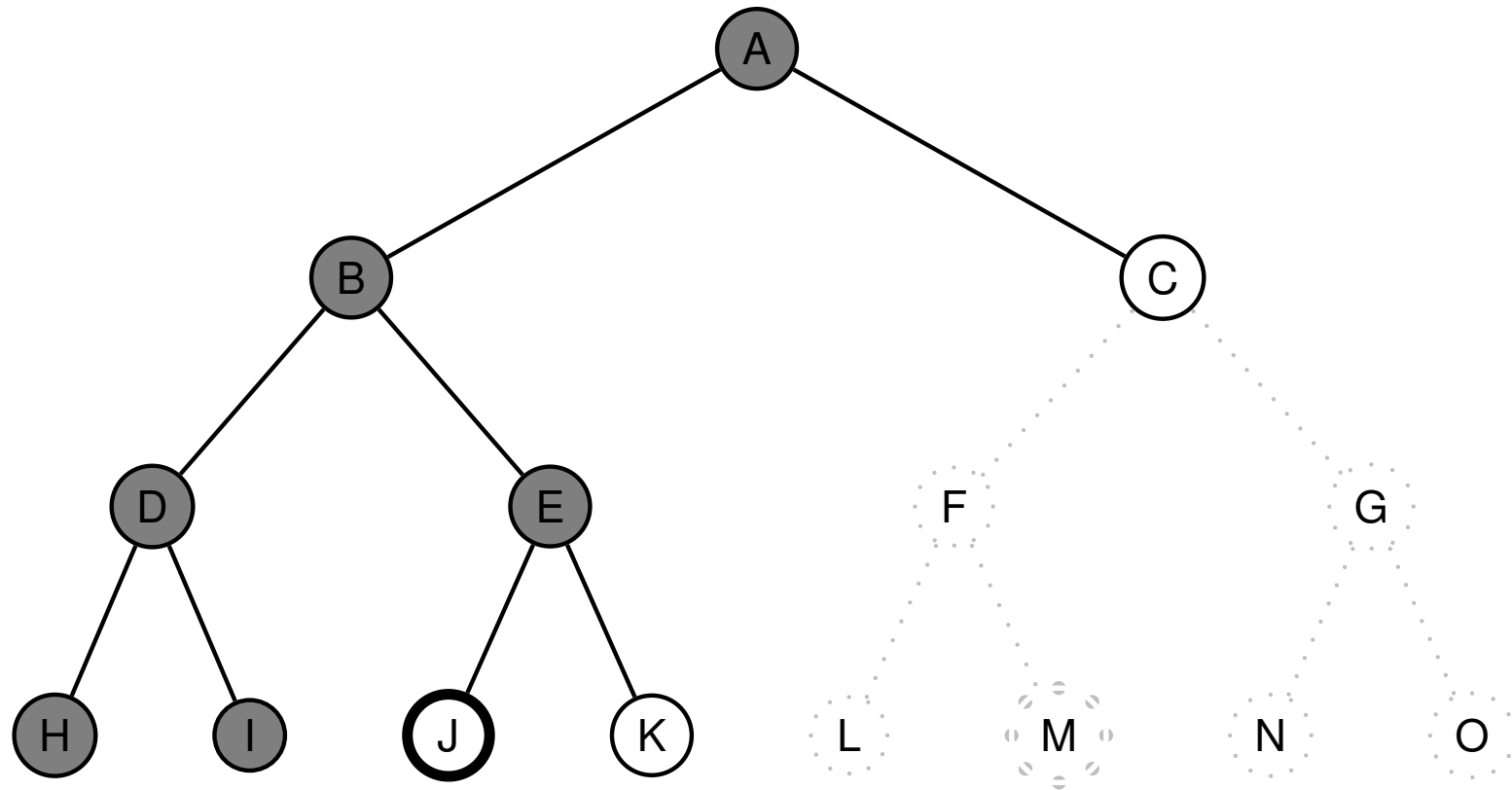
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



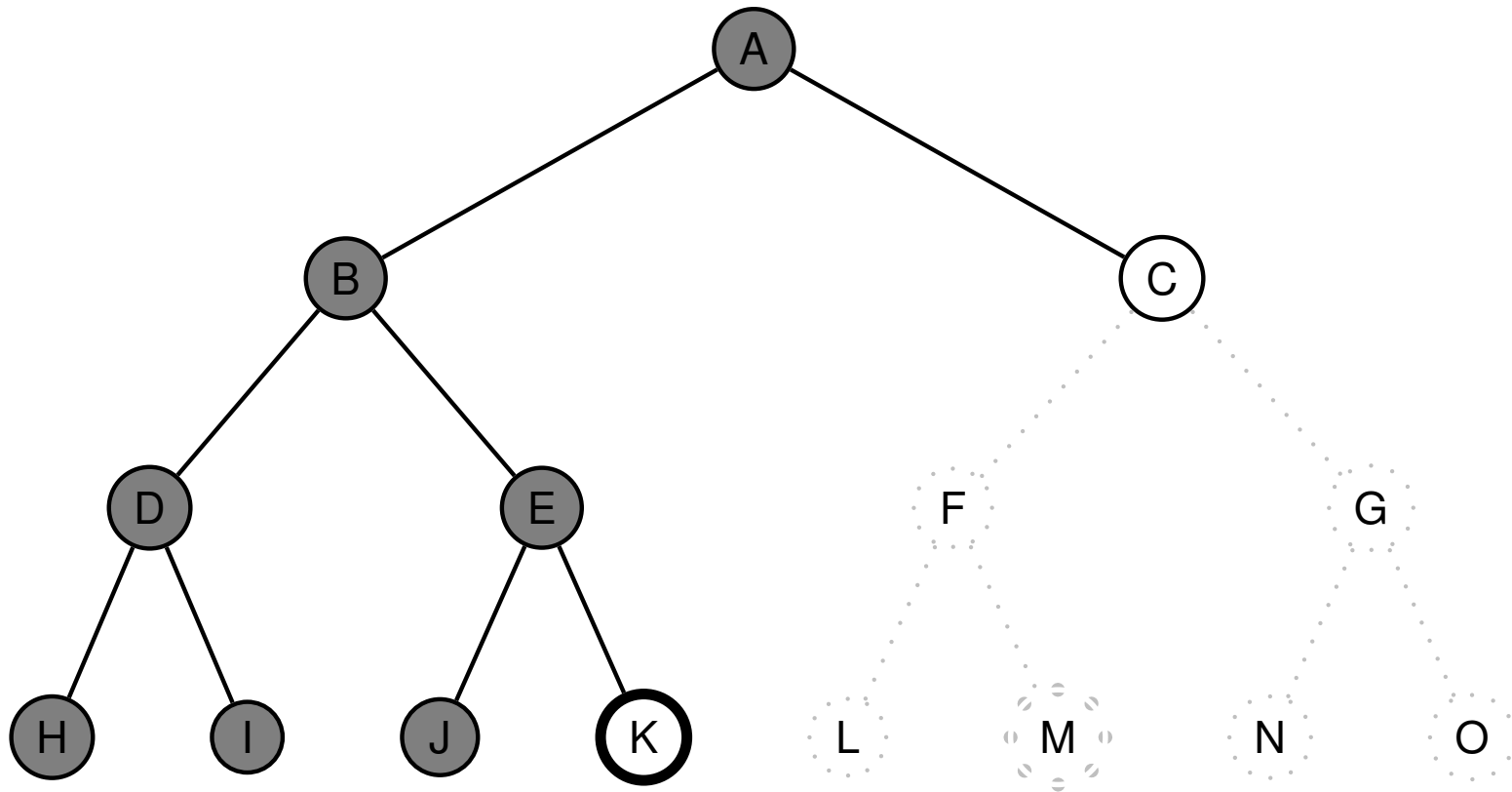
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



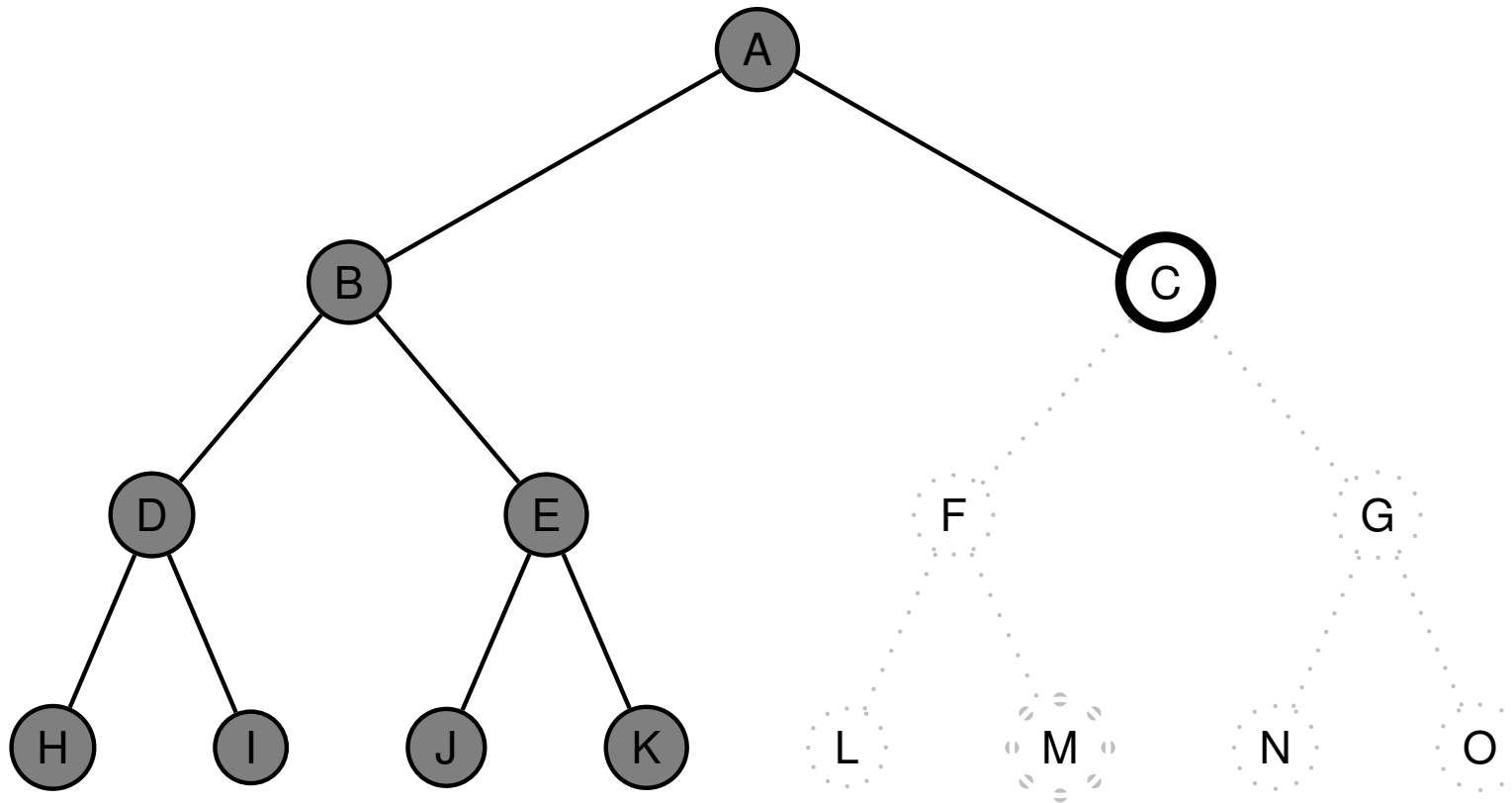
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



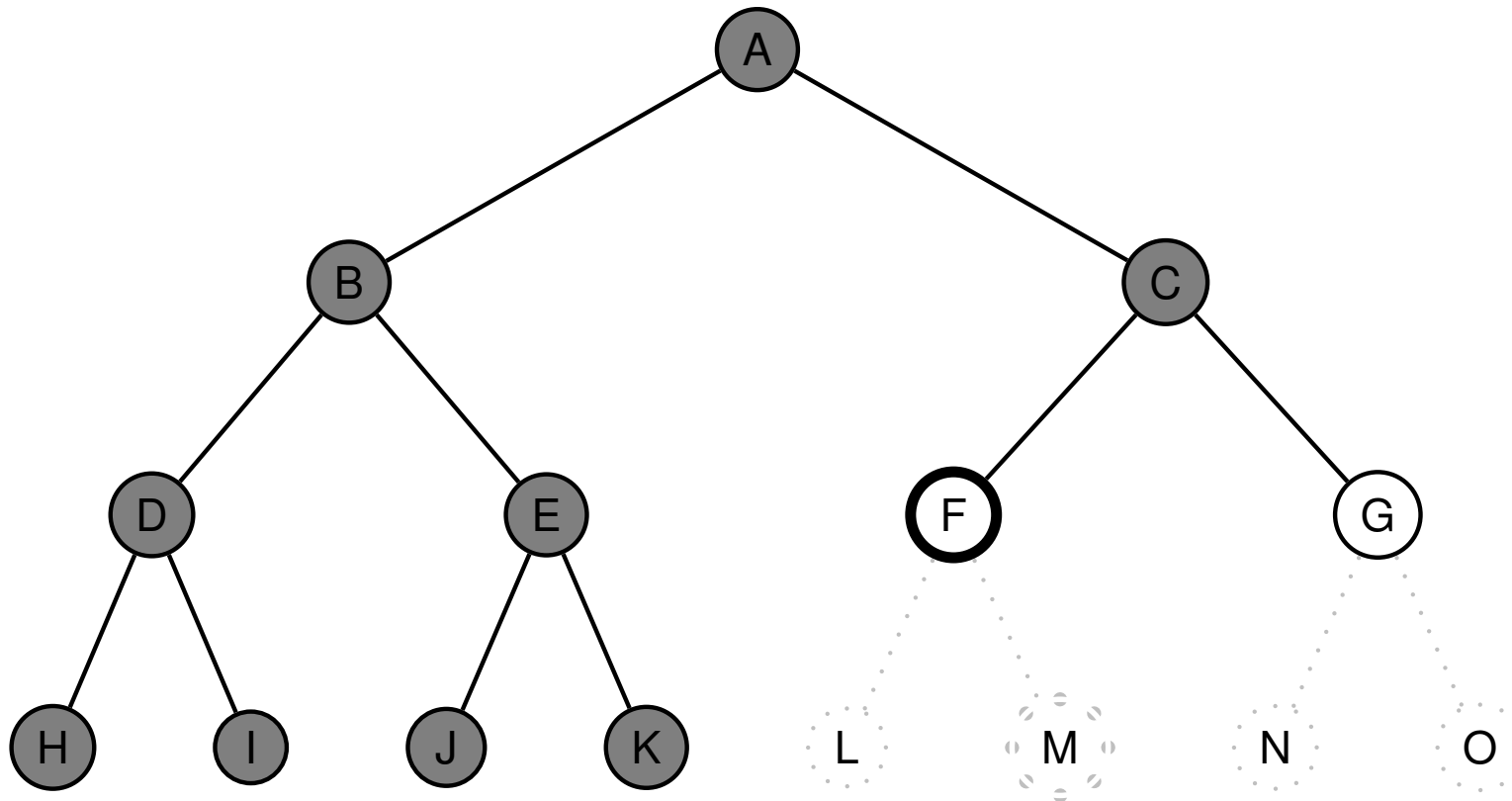
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



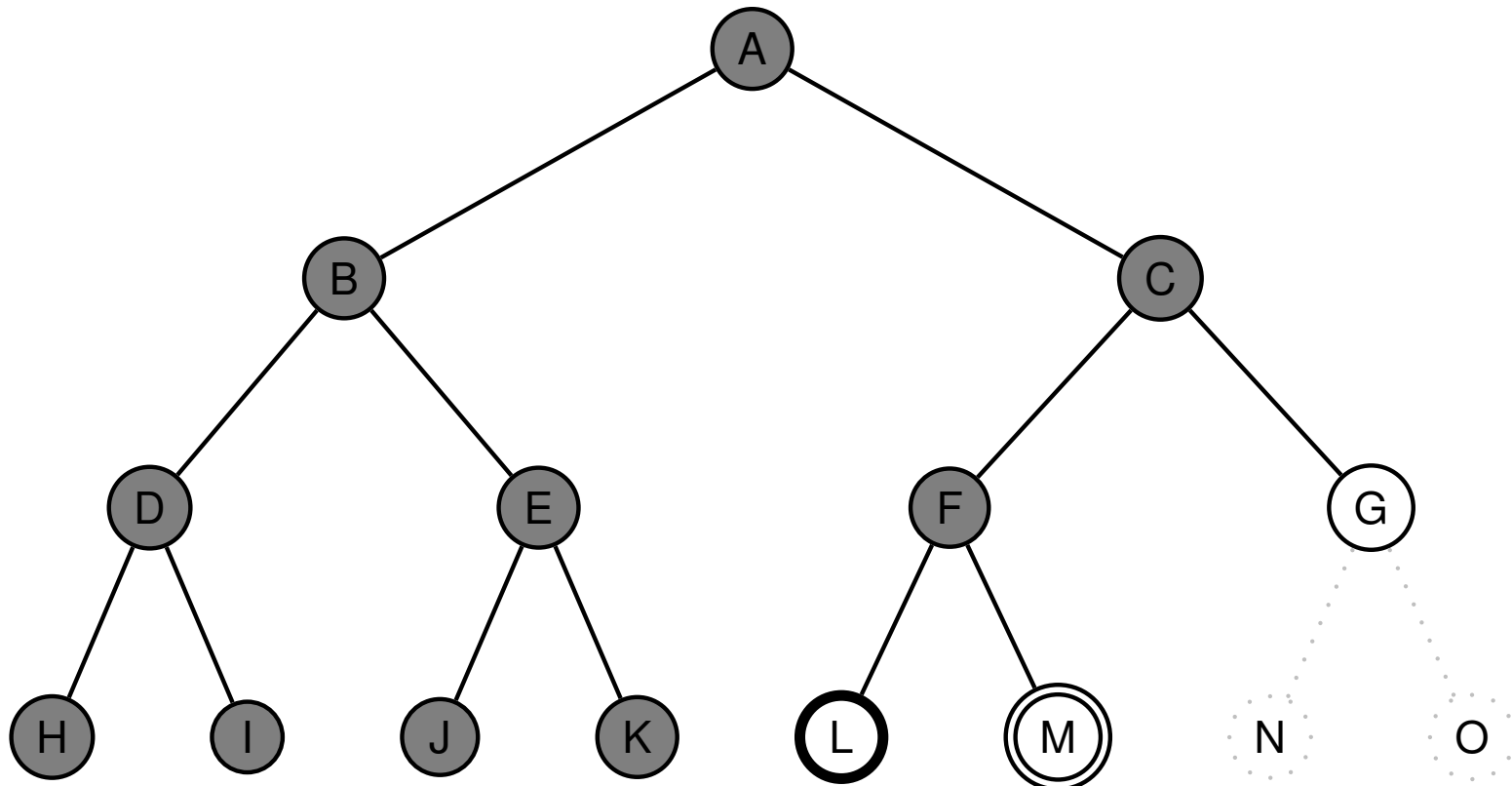
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



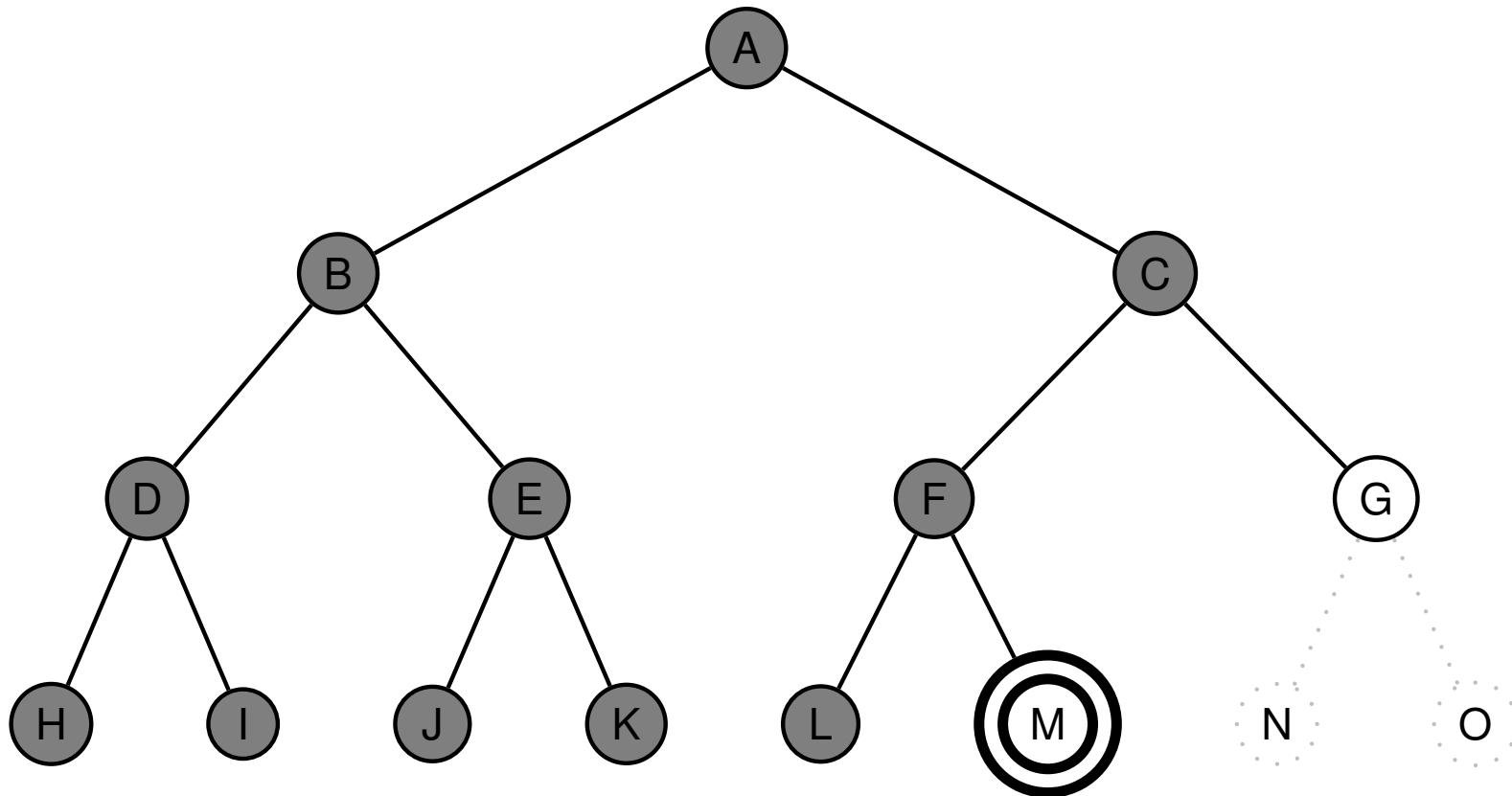
## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

Prohledává se vždy nejlevější a nejhlubší neexpandovaný uzel (*Depth-first Search, DFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do zásobníku (fronty LIFO) × Prolog – využití rekurze



## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do zásobníku (fronty LIFO) × Prolog – využití rekurze

```
solution (Node,Solution) :- depth_first_search ([], Node,Solution).  
  
depth_first_search (Path,Node,[Node|Path]) :- goal(Node).  
depth_first_search (Path,Node,Sol) :- move(Node,Node1),  
    not(member(Node1,Path)),depth_first_search([Node|Path],Node1,Sol).
```

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

*úplnost*

*optimálnost*

*časová složitost*

*prostorová složitost*

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

*úplnost*                      není úplný (nekonečná větev, cykly)

*optimálnost*

*časová složitost*

*prostorová složitost*

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

*úplnost*                      není úplný (nekonečná větev, cykly)

*optimálnost*                není optimální

*časová složitost*

*prostorová složitost*

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

*úplnost*                      není úplný (nekonečná větev, cykly)

*optimálnost*                není optimální

*časová složitost*         $O(b^m)$

*prostorová složitost*

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY – VLASTNOSTI

*úplnost*                      není úplný (nekonečná větev, cykly)

*optimálnost*                není optimální

*časová složitost*         $O(b^m)$

*prostorová složitost*     $O(bm)$ , lineární

Největší problém – nekonečná větev = nenajde se cíl, program neskončí!

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití “zarážky” = limit hloubky  $\ell$

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search_limit(Node,Solution, $\ell$ ).
```

```
depth_first_search_limit(Node,[Node],_) :- goal(Node).
```

```
depth_first_search_limit(Node,[Node|Sol],MaxDepth) :- MaxDepth > 0, move(Node,Node1),  
Max1 is MaxDepth-1, depth_first_search_limit(Node1,Sol,Max1).
```

## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití “zarážky” = limit hloubky  $\ell$

```
solution(Node,Solution) :- depth_first_search_limit(Node,Solution, $\ell$ ).
```

```
depth_first_search_limit(Node,[Node],_) :- goal(Node).
```

```
depth_first_search_limit(Node,[Node|Sol],MaxDepth) :- MaxDepth > 0, move(Node,Node1),  
Max1 is MaxDepth-1, depth_first_search_limit(Node1,Sol,Max1).
```

neúspěch (**fail**) má dvě možné interpretace – vyčerpání limitu nebo neexistenci řešení



## PROHLEDÁVÁNÍ DO HLOUBKY S LIMITEM

Řešení nekonečné větve – použití “zarážky” = limit hloubky  $\ell$

```
solution (Node, Solution) :- depth_first_search_limit (Node, Solution,  $\ell$ ).
```

```
depth_first_search_limit (Node, [Node], _) :- goal(Node).
```

```
depth_first_search_limit (Node, [Node|Sol], MaxDepth) :- MaxDepth > 0, move(Node, Node1),  
Max1 is MaxDepth - 1, depth_first_search_limit(Node1, Sol, Max1).
```

neúspěch (**fail**) má dvě možné interpretace – vyčerpání limitu nebo neexistenci řešení

Vlastnosti:

<i>úplnost</i>	není úplný (pro $\ell < d$ )
<i>optimálnost</i>	není optimální (pro $\ell > d$ )
<i>časová složitost</i>	$O(b^\ell)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(b\ell)$

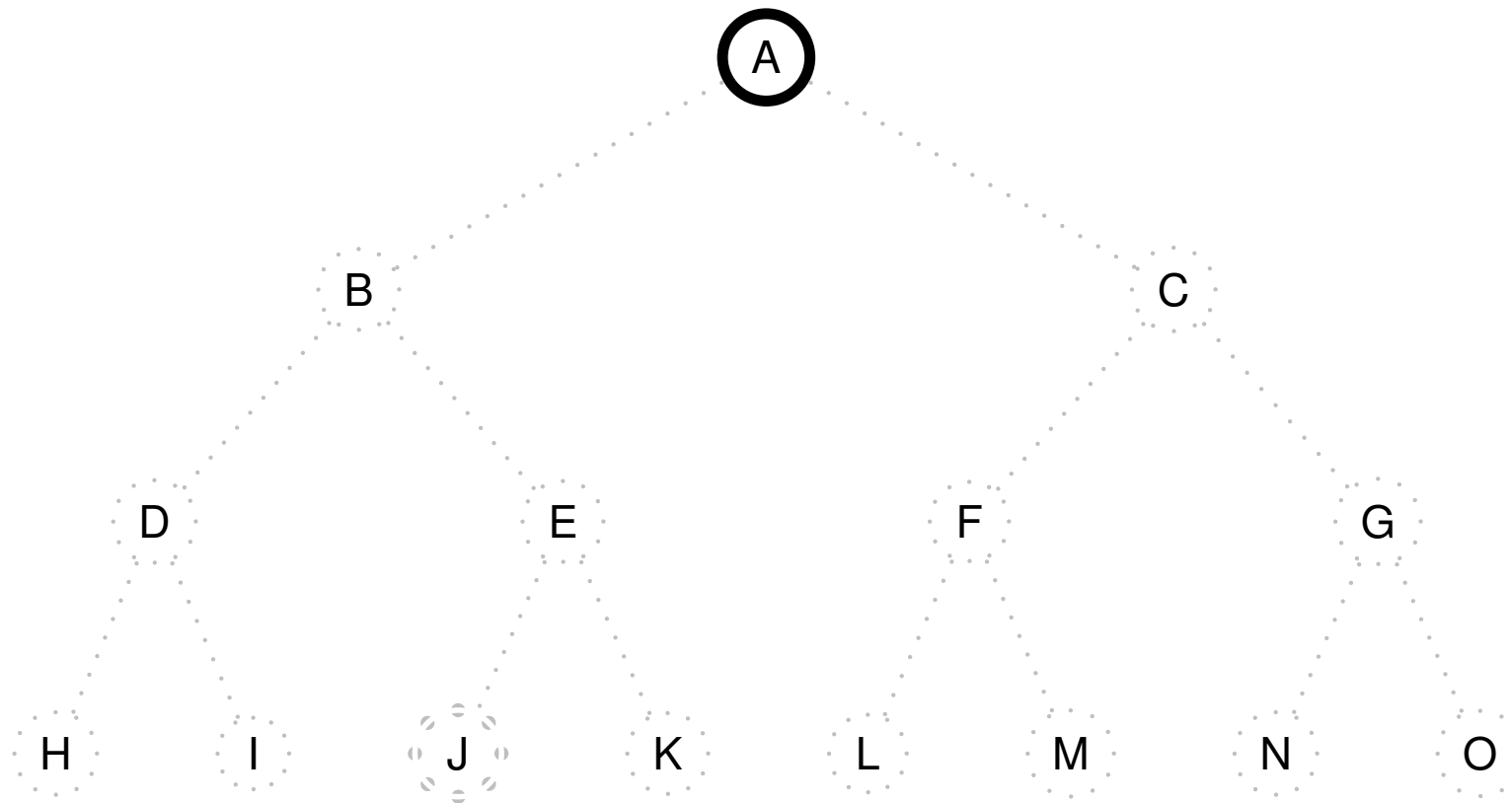
dobrá volba limitu  $\ell$  – podle znalosti problému

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)

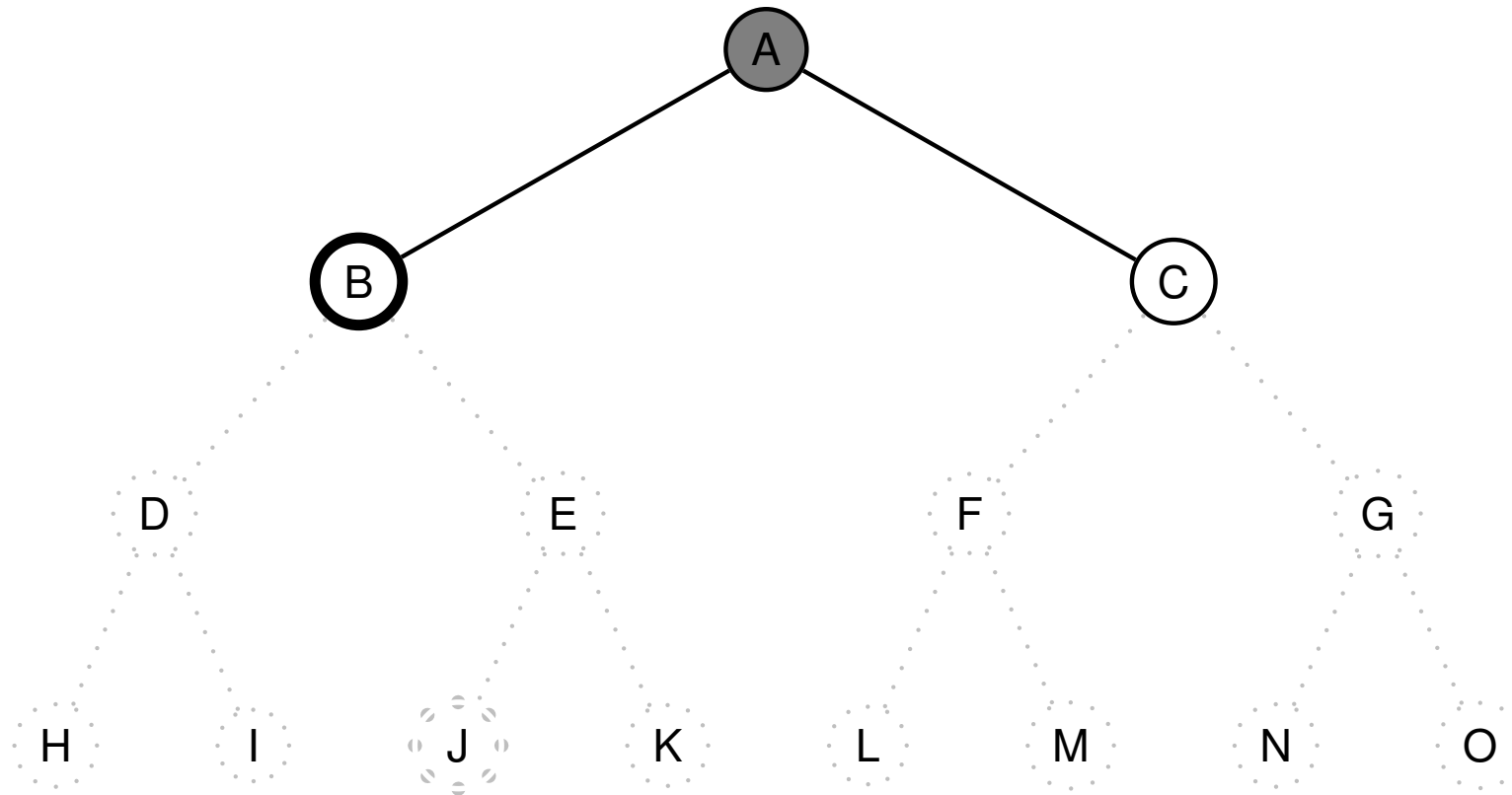
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



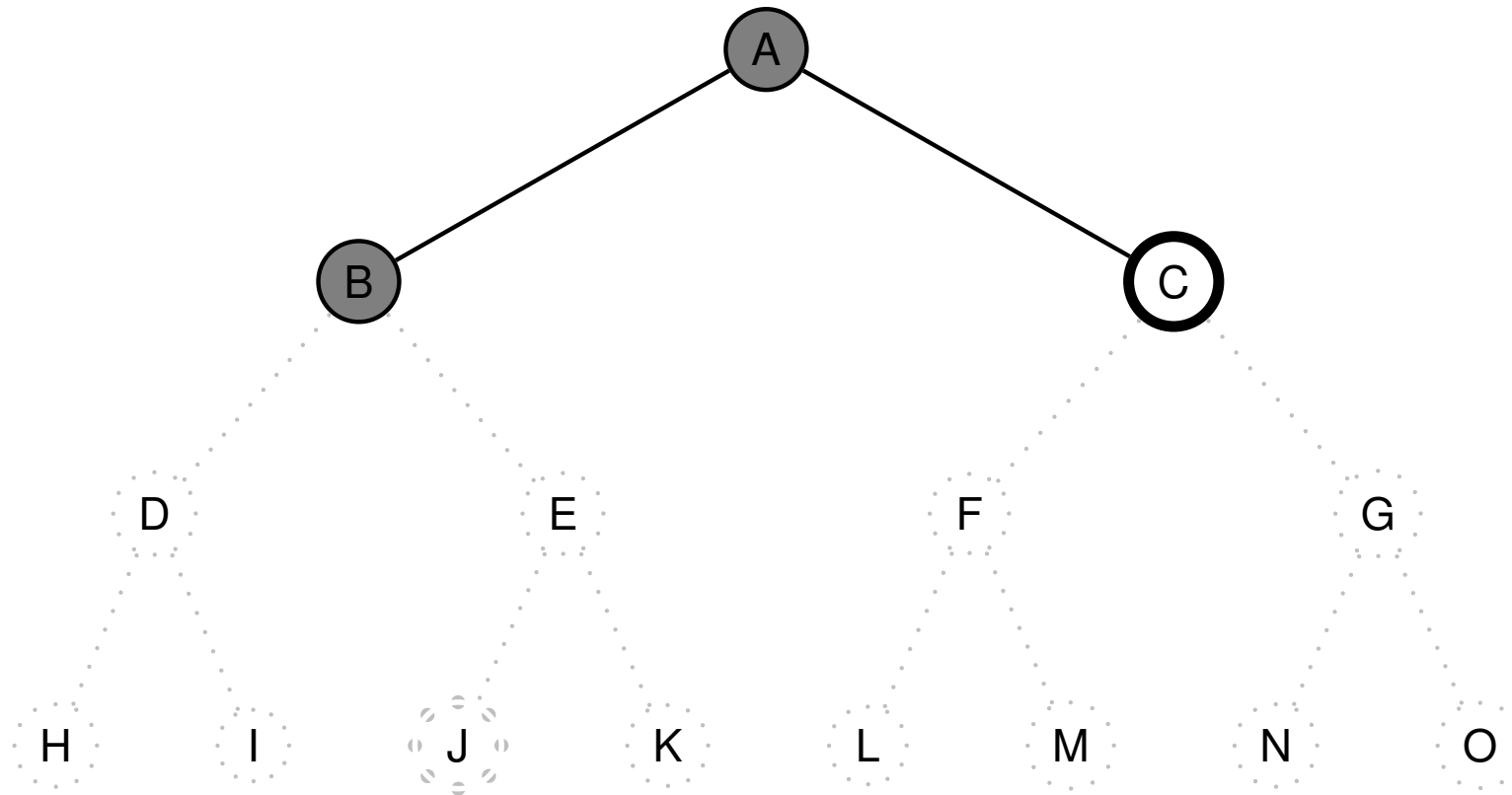
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



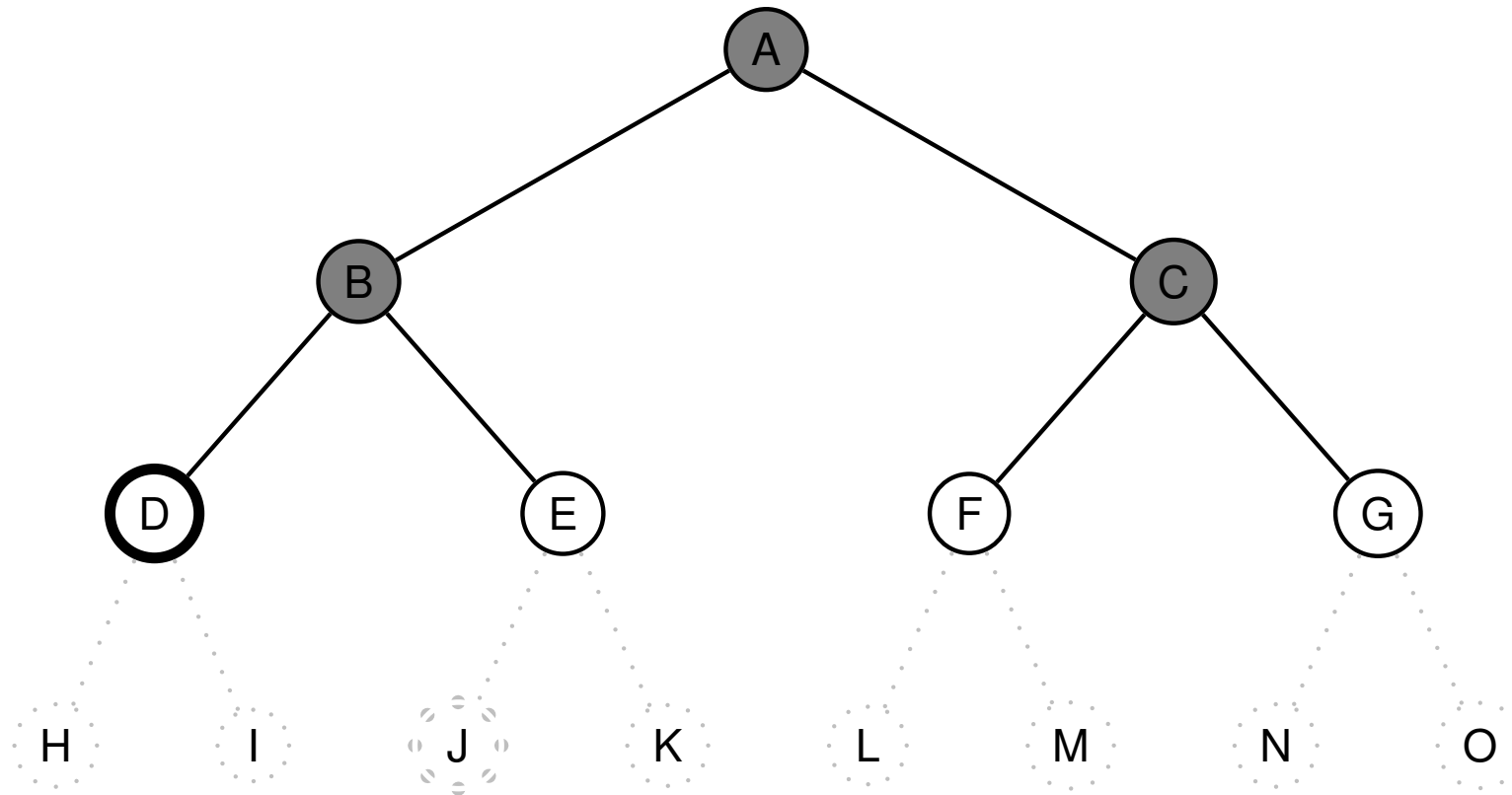
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



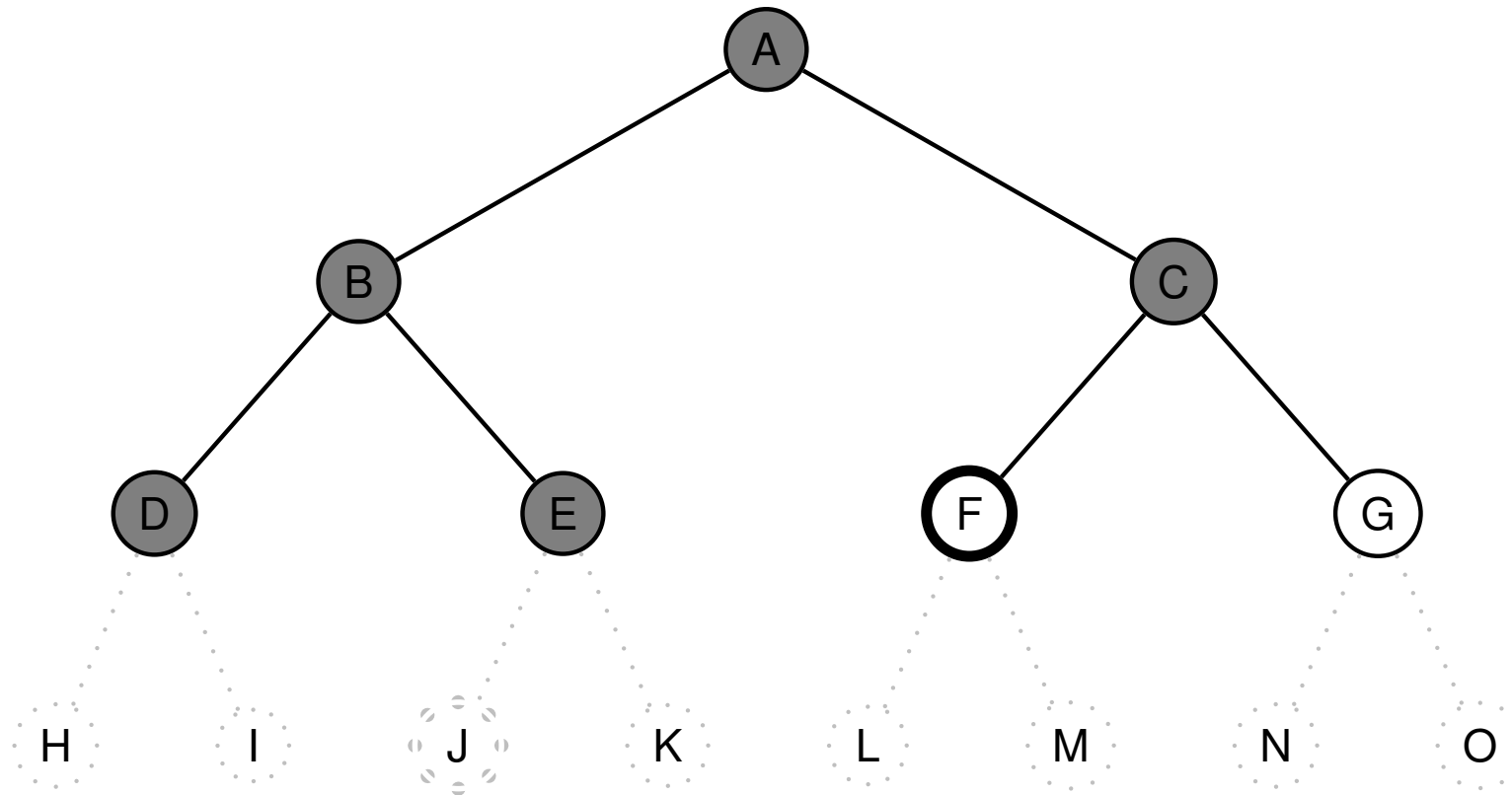
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



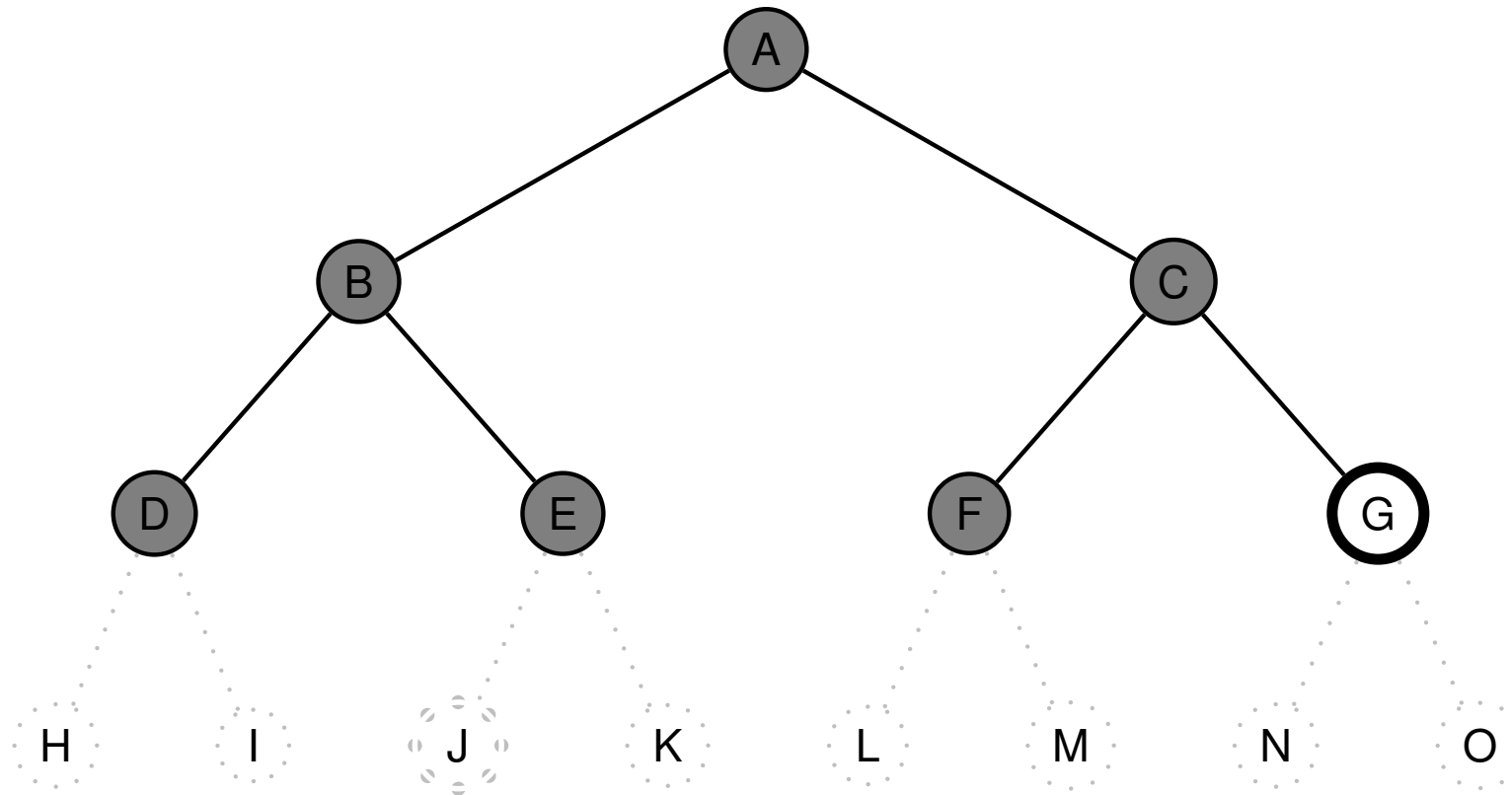
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

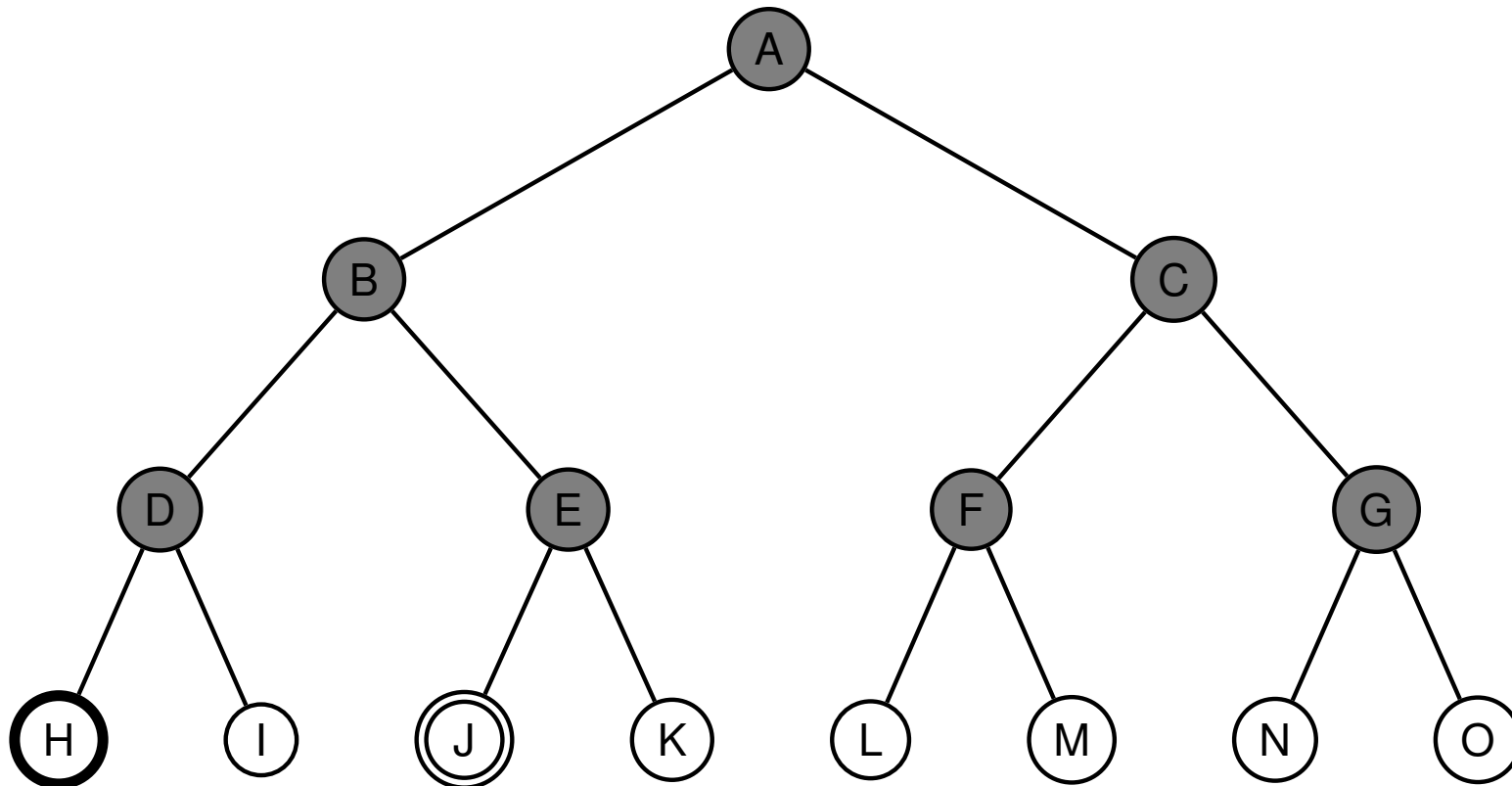
Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)





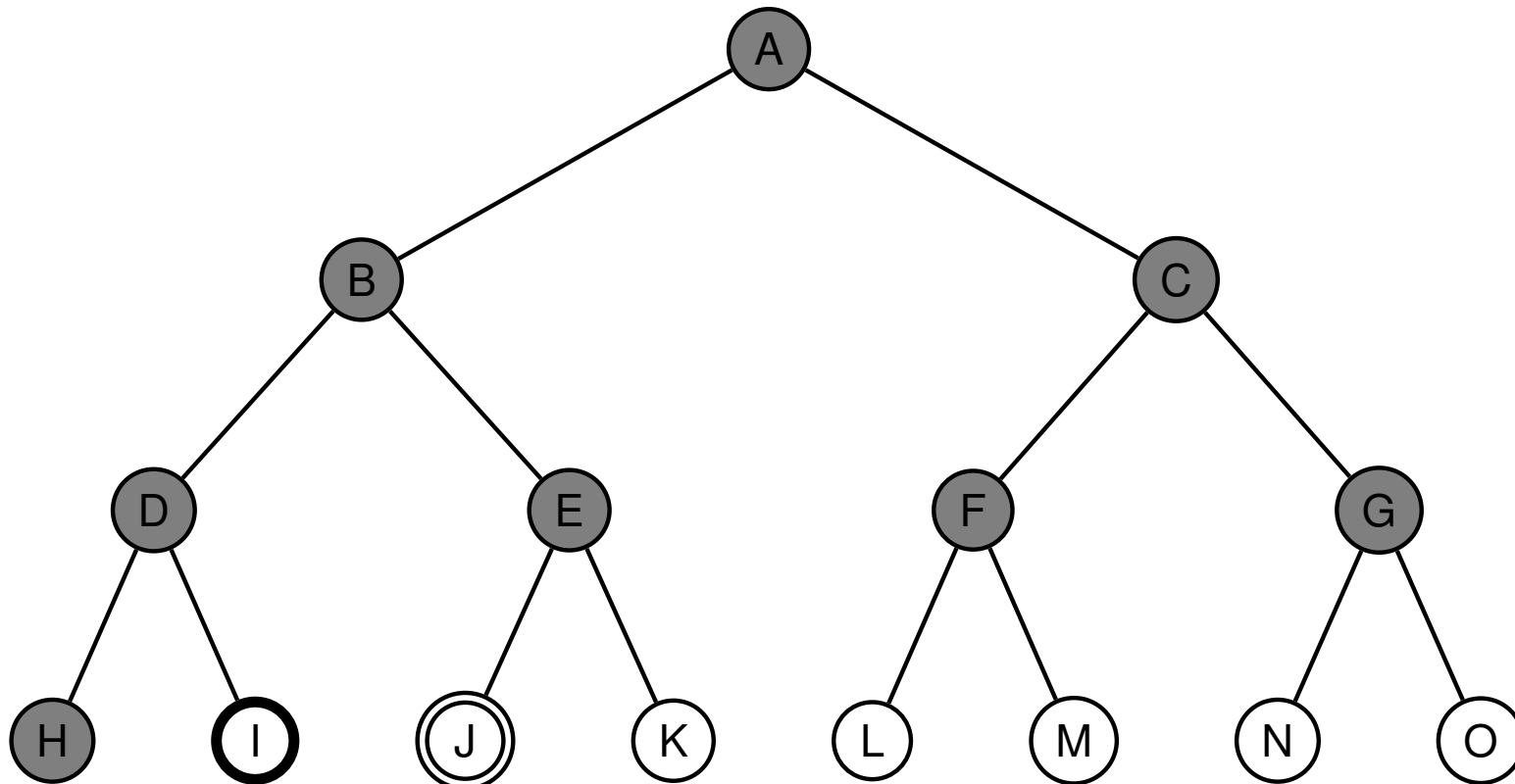
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



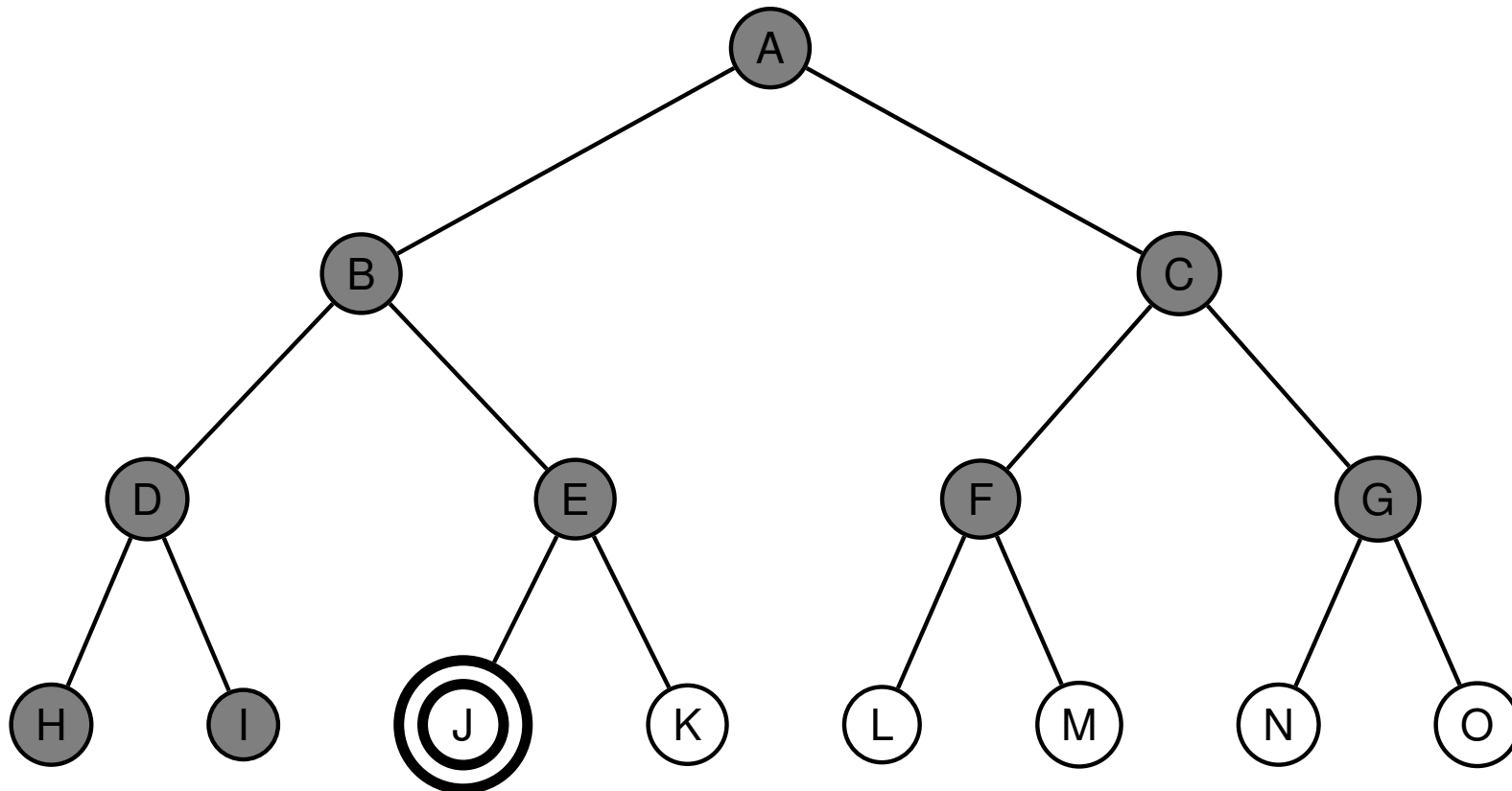
## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

Prohledává se vždy nejlevější neexpandovaný uzel s nejmenší hloubkou. (*Breadth-first Search, BFS*)



## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do **fronty** (FIFO) × Prolog – udržuje **seznam cest**

```
solution (Start, Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).  
  
breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[ Node|Path]) :- goal(Node).  
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths], Solution) :-  
    bagof([M,N|Path], (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),  
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,  
    breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
```

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do **fronty** (FIFO) × Prolog – udržuje **seznam cest**

```
solution (Start, Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).  
  
breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[ Node|Path]) :- goal(Node).  
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths], Solution) :-  
    bagof([M,N|Path], (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),  
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,  
    breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
```

**bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)**  
*postupně vyhodnocuje Cíl  
a všechny vyhovující  
instance Prom řadí do  
seznamu Sezn*

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do **fronty** (FIFO) × Prolog – udržuje **seznam cest**

```

solution (Start, Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[ Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths], Solution) :-
    bagof([M,N|Path], (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
    breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
    
```

**bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)**  
 postupně vyhodnocuje **Cíl**  
 a všechny vyhovující  
 instance **Prom** řadí do  
 seznamu **Sezn**

**p :- a,b;c. ⇔ p :- (a,b);c.**

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY

procedurální programovací jazyk – uzly se uloží do **fronty** (FIFO) × Prolog – udržuje **seznam cest**

```

solution (Start, Solution) :- breadth_first_search ([[ Start ]], Solution).

breadth_first_search ([[ Node|Path]|_],[ Node|Path]) :- goal(Node).
breadth_first_search ([[ N|Path]|Paths], Solution) :-
    bagof([M,N|Path], (move(N,M),not(member(M,[N|Path]))), NewPaths),
    NewPaths\=[], append(Paths,NewPaths,Path1), !,
    breadth_first_search (Path1,Solution); breadth_first_search (Paths,Solution).
    
```

**bagof(+Prom,+Cíl,-Sezn)**  
 postupně vyhodnocuje Cíl  
 a všechny vyhovující  
 instance Prom řadí do  
 seznamu Sezn

**p :- a,b;c. ⇔ p :- (a,b);c.**

Vylepšení:

→ **append** → **append\_dl**

→ seznam cest:	<b>[[a]]</b>	→	<b>l(a)</b>
	<b>[[b,a],[c,a]]</b>		<b>t(a,[l(b),l(c)])</b>
	<b>[[c,a],[d,b,a],[e,b,a]]</b>		<b>t(a,[t(b,[l(d),l(e)]),l(c)])</b>
	<b>[[d,b,a],[e,b,a],[f,c,a],[g,c,a]]</b>		<b>t(a,[t(b,[l(d),l(e)]),t(c,[l(f),l(g)])])</b>

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

*úplnost*

*optimálnost*

*časová složitost*

*prostorová složitost*



## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

*úplnost*                    **je** úplný (pro konečné  $b$ )

*optimálnost*

*časová složitost*

*prostorová složitost*

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

*úplnost*

je úplný (pro konečné  $b$ )

*optimálnost*

je optimální podle délky cesty/**není** optimální podle obecné ceny

*časová složitost*

*prostorová složitost*

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
<i>časová složitost</i>	$1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$ , exponenciální v $d$
<i>prostorová složitost</i>	

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální podle délky cesty/není optimální podle obecné ceny
<i>časová složitost</i>	$1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$ , exponenciální v $d$
<i>prostorová složitost</i>	$O(b^{d+1})$ (každý uzel v paměti)

## PROHLEDÁVÁNÍ DO ŠÍŘKY – VLASTNOSTI

- úplnost* je úplný (pro konečné  $b$ )
- optimálnost* je optimální podle délky cesty/**není** optimální podle obecné ceny
- časová složitost*  $1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d + b(b^d - 1) = O(b^{d+1})$ , exponenciální v  $d$
- prostorová složitost*  $O(b^{d+1})$  (každý uzel v paměti)

Největší problém – paměť:

Hloubka	Uzlů	Čas	Paměť
2	1100	0.11 sek	1 MB
4	111 100	11 sek	106 MB
6	$10^7$	19 min	10 GB
8	$10^9$	31 hod	1 TB
10	$10^{11}$	129 dnů	101 TB
12	$10^{13}$	35 let	10 PB
14	$10^{15}$	3 523 let	1 EB

Ani čas není dobrý → potřebujeme **informované** strategie prohledávání.

## PROHLEDÁVÁNÍ PODLE CENY

- BFS je optimální pro rovnoměrně ohodnocené stromy × prohledávání podle ceny (Uniform-cost Search) je optimální pro **obecné ohodnocení**
- fronta uzlů se udržuje **uspořádaná** podle ceny cesty

## PROHLEDÁVÁNÍ PODLE CENY

- BFS je optimální pro rovnoměrně ohodnocené stromy × prohledávání podle ceny (Uniform-cost Search) je optimální pro **obecné ohodnocení**
- fronta uzlů se udržuje **uspořádaná** podle ceny cesty

## Vlastnosti:

<i>úplnost</i>	je úplný (pro cena $\geq \epsilon$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální (pro cena $\geq \epsilon$ , $g(n)$ roste)
<i>časová složitost</i>	počet uzlů s $g \leq C^*$ , $O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$ , kde $C^*$ ... cena optimálního řešení
<i>prostorová složitost</i>	počet uzlů s $g \leq C^*$ , $O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$

## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

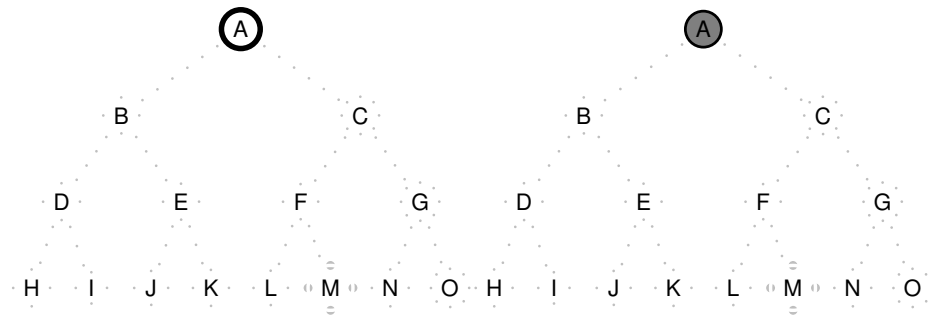
prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)



## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

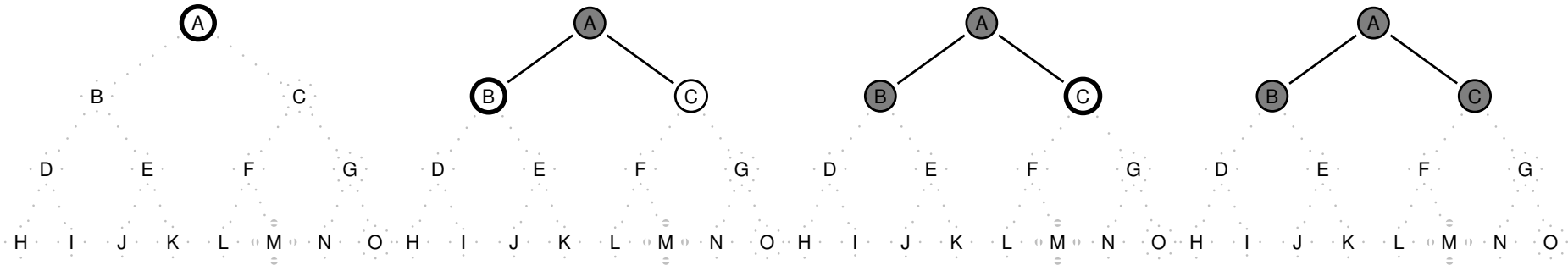
limit=0



## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

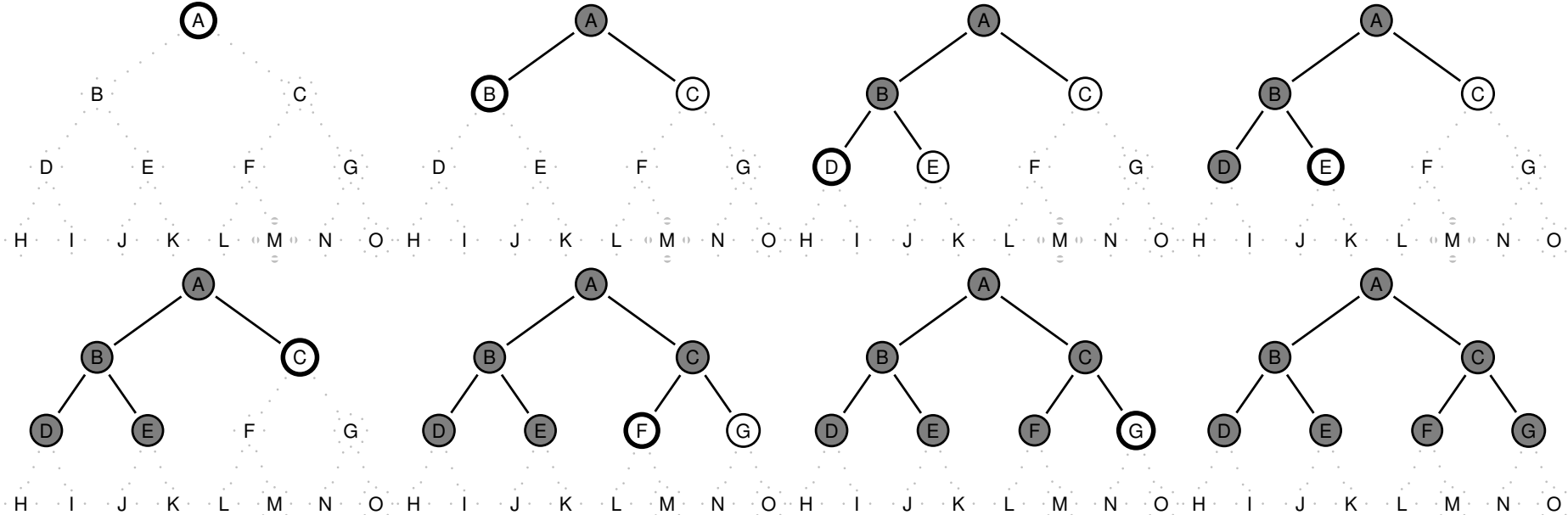
limit=1



# PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

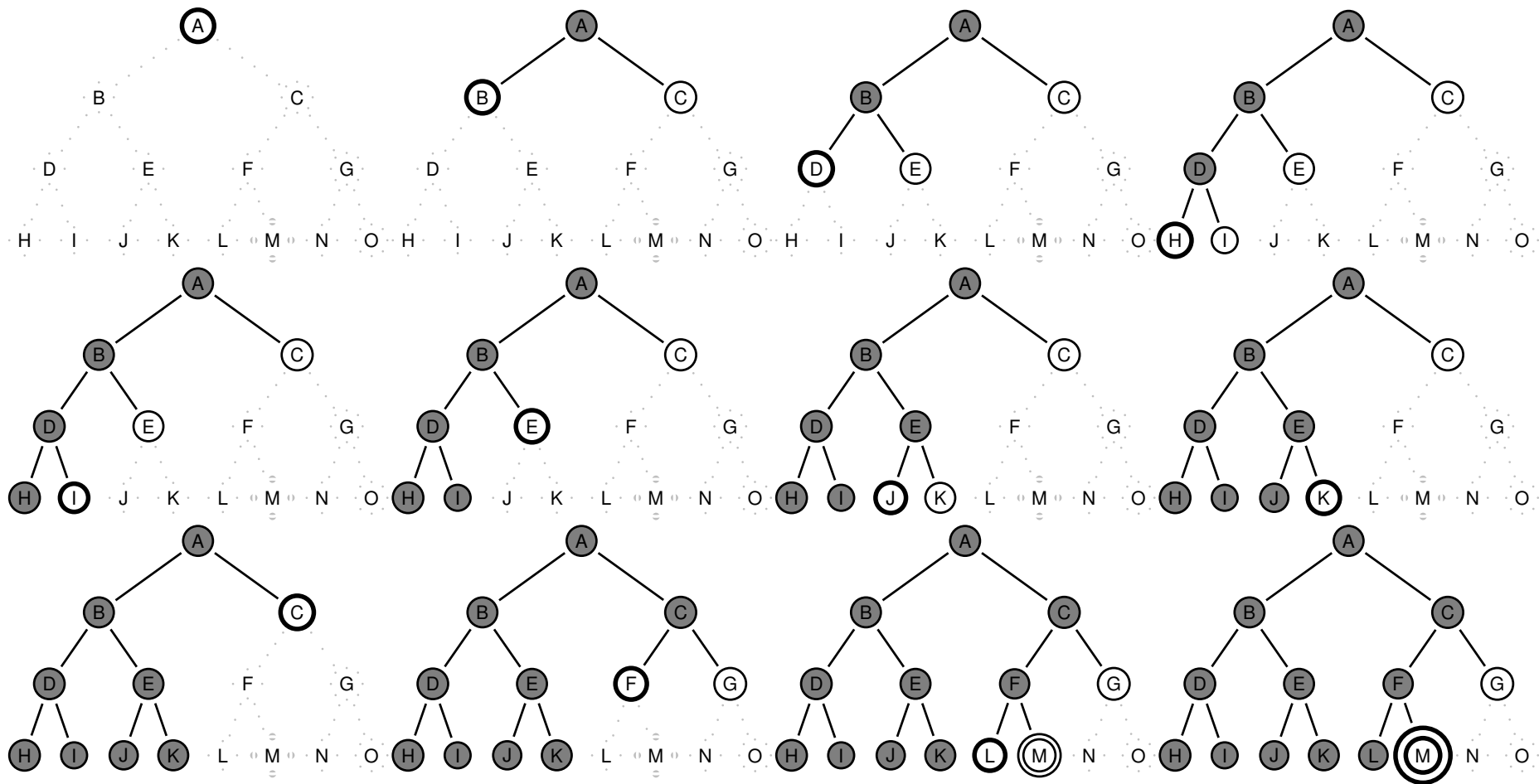
limit=2



## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM

prohledávání do hloubky s postupně se zvyšujícím limitem (Iterative deepening DFS, IDS)

limit=3



## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
<i>časová složitost</i>	$d(b) + (d - 1)b^2 + \dots + 1(b^d) = O(b^d)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(bd)$

## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
<i>časová složitost</i>	$d(b) + (d - 1)b^2 + \dots + 1(b^d) = O(b^d)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(bd)$

→ kombinuje výhody BFS a DFS:

- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
<i>časová složitost</i>	$d(b) + (d - 1)b^2 + \dots + 1(b^d) = O(b^d)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(bd)$

→ kombinuje výhody BFS a DFS:

- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

→ zdánlivé plýtvání opakovaným generováním

ALE generuje o jednu úroveň míň, např. pro  $b = 10, d = 5$ :

$$N(\text{IDS}) = 50 + 400 + 3\,000 + 20\,000 + 100\,000 = 123\,450$$

$$N(\text{BFS}) = 10 + 100 + 1\,000 + 10\,000 + 100\,000 + 999\,990 = 1\,111\,100$$

## PROHLEDÁVÁNÍ S POSTUPNÝM PROHLUBOVÁNÍM – VLASTNOSTI

<i>úplnost</i>	je úplný (pro konečné $b$ )
<i>optimálnost</i>	je optimální (pro $g(n)$ rovnoměrně neklesající funkce hloubky)
<i>časová složitost</i>	$d(b) + (d - 1)b^2 + \dots + 1(b^d) = O(b^d)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(bd)$

→ kombinuje výhody BFS a DFS:

- nízké paměťové nároky – lineární
- optimálnost, úplnost

→ zdánlivé plýtvání opakovaným generováním

ALE generuje o jednu úroveň míň, např. pro  $b = 10, d = 5$ :

$$N(\text{IDS}) = 50 + 400 + 3\,000 + 20\,000 + 100\,000 = 123\,450$$

$$N(\text{BFS}) = 10 + 100 + 1\,000 + 10\,000 + 100\,000 + 999\,990 = 1\,111\,100$$

IDS je **nejvhodnější** neinformovaná strategie pro **velké prostory** a **neznámou hloubku** řešení.



## SHRNUTÍ

<i>Vlastnost</i>	<i>do hloubky</i>	<i>do hloubky s limitem</i>	<i>do šířky</i>	<i>podle ceny</i>	<i>s postupným prohlubováním</i>
<i>úplnost</i>	ne	ano, pro $l \geq d$	ano*	ano*	ano*
<i>optimálnost</i>	ne	ne	ano*	ano*	ano*
<i>časová složitost</i>	$O(b^m)$	$O(b^\ell)$	$O(b^{d+1})$	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	$O(b^d)$
<i>prostorová složitost</i>	$O(bm)$	$O(b\ell)$	$O(b^{d+1})$	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	$O(bd)$