

# Dekompozice problému, AND/OR grafy

Aleš Horák

E-mail: [hales@fi.muni.cz](mailto:hales@fi.muni.cz)  
<http://nlp.fi.muni.cz/uui/>

Obsah:

- Připomínka – průběžná písemka
- AND/OR grafy
- Prohledávání AND/OR grafů

# Připomínka – průběžná písemka

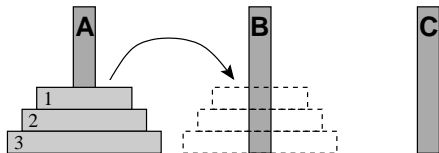
- termín – **příští přednášku, 31. října, 12:00, A217**, na začátku přednášky
- náhradní termín: **není**
- příklady (formou testu – odpovědi A, B, C, D, E, z látky probrané na prvních pěti přednáškách, včetně dnešní):
  - uveden příklad v Prologu+Pythonu, otázka **Co řeší tento program?**
  - uveden příklad v Prologu+Pythonu a cíl/volání programu, otázka **Co je (návratová) hodnota výsledku?**
  - **upravte (vyberte úpravu/doplnění) uvedený program tak, aby...**
  - uvedeno několik **tvrzení**, potvrďte jejich pravdivost/nepřavdivost
  - porovnání **vlastností** několika **algoritmů**
- rozsah: **4 příklady**
- hodnocení: **max. 32 bodů** – za *správnou odpověď* 8 bodů, za *žádnou odpověď* 0 bodů, za *špatnou odpověď* -3 body.

# Obsah

- 1 Přípomínka – průběžná písemka
- 2 AND/OR grafy
  - Příklad – Hanoiské věže
  - Cesta mezi městy pomocí dekompozice
  - AND/OR graf a strom řešení
  - Příklad – výherní strategie
  - Reprezentace AND/OR grafu
- 3 Prohledávání AND/OR grafů
  - Prohledávání AND/OR grafu do hloubky
  - Heuristické prohledávání AND/OR grafu
  - Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

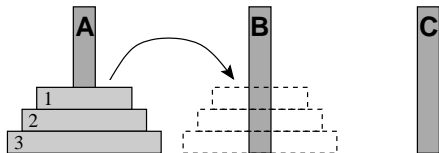
# Příklad – Hanoiské věže

- máme tři tyče: **A**, **B** a **C**.
- na tyči **A** je (podle velikosti)  $n$  kotoučů.
- úkol: přeskládat z **A** pomocí **C** na tyč **B** (zaps.  $n(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$ ) bez porušení uspořádání



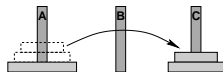
# Příklad – Hanoiské věže

- máme tři tyče: **A**, **B** a **C**.
- na tyči **A** je (podle velikosti)  $n$  kotoučů.
- úkol: přeskládat z **A** pomocí **C** na tyč **B** (zaps.  $n(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$ ) bez porušení uspořádání



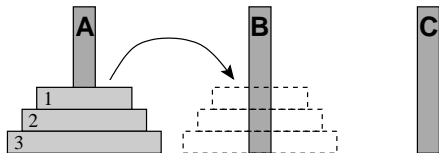
Můžeme rozložit na fáze:

1. přeskládat  $n - 1$  kotoučů z **A** pomocí **B** na **C**.



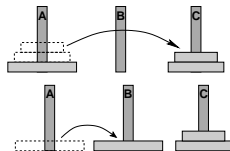
# Příklad – Hanoiské věže

- máme tři tyče: **A**, **B** a **C**.
- na tyči **A** je (podle velikosti)  $n$  kotoučů.
- úkol: přeskládat z **A** pomocí **C** na tyč **B** (zaps.  $n(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$ ) bez porušení uspořádání



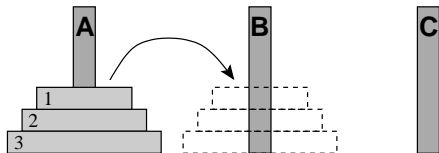
Můžeme rozložit na fáze:

1. přeskládat  $n - 1$  kotoučů z **A** pomocí **B** na **C**.
2. přeložit **1** kotouč z **A** na **B**



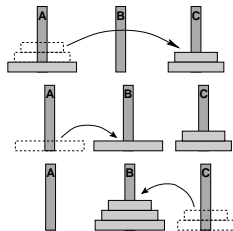
# Příklad – Hanoiské věže

- máme tři tyče: **A**, **B** a **C**.
- na tyči **A** je (podle velikosti)  $n$  kotoučů.
- úkol: přeskládat z **A** pomocí **C** na tyč **B** (zaps.  $n(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$ ) bez porušení uspořádání



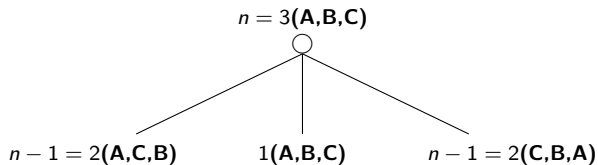
Můžeme rozložit na fáze:

1. přeskládat  $n - 1$  kotoučů z **A** pomocí **B** na **C**.
2. přeložit **1** kotouč z **A** na **B**
3. přeskládat  $n - 1$  kotoučů z **C** pomocí **A** na **B**



# Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

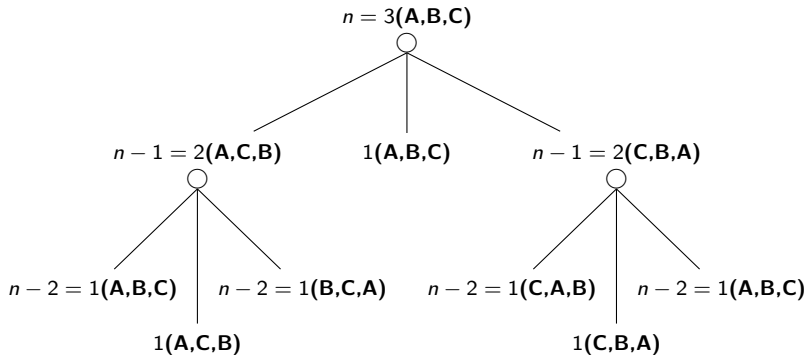
schéma celého řešení pro  $n = 3$ :





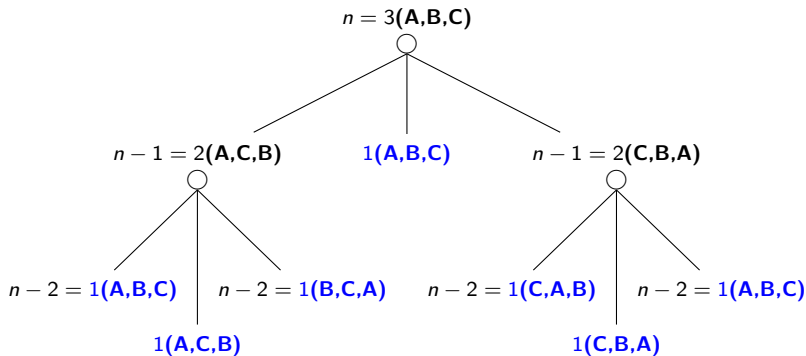
## Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

schéma celého řešení pro  $n = 3$ :



# Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

schéma celého řešení pro  $n = 3$ :



# Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

?–**op**(100,xfx,to), **dynamic**(hanoi/5).

**hanoi**(1,A,B,C,[A to B]).

**hanoi**(N,A,B,C,Moves) :- **N**>1, **N1 is N-1**, **lemma**(hanoi(N1,A,C,B,Ms1)),  
    **hanoi**(N1,C,B,A,Ms2), **append**(Ms1,[A to B|Ms2],Moves).

**lemma**(P) :- **P,asserta**((P :- !)).

# Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

**op(+Priorita, +Typ, +Jméno)**

**Priorita** číslo 0–1200

**Typ** jedno z *xf*, *yf*, *xfx*, *xfy*, *yfx*, *yfy*, *fy* nebo *fx*

**Jméno** funktor nebo symbol

?–**op**(100,xfx,to), **dynamic**(hanoi/5).

**hanoi**(1,A,B,C,[A to B]).

**hanoi**(N,A,B,C,Moves) :- **N**>1, **N1 is N–1**, **lemma**(hanoi(N1,A,C,B,Ms1)),  
**hanoi**(N1,C,B,A,Ms2), **append**(Ms1,[A to B|Ms2],Moves).

**lemma**(P) :- P,**asserta**((P :- !)).

## Příklad – Hanoiské věže – pokrač.

**op(+Priorita, +Typ, +Jméno)**

**Priorita** číslo 0–1200

**Typ** jedno z *xf*, *yf*, *xfx*, *xfy*, *yfx*, *yfy*, *fy* nebo *fx*

**Jméno** funktor nebo symbol

?–**op**(100,xfx,to), **dynamic**(hanoi/5).

**hanoi**(1,A,B,C,[A to B]).

**hanoi**(N,A,B,C,Moves) :- **N**>1, **N1 is N–1**, **lemma**(hanoi(N1,A,C,B,Ms1)),  
**hanoi**(N1,C,B,A,Ms2), **append**(Ms1,[A to B|Ms2],Moves).

**lemma**(P) :- P,**asserta**((P :- !)).

?– **hanoi**(3,a,b,c,M).

**M** = [a to b, a to c, b to c, a to b, c to a, c to b, a to b] ;  
**No**

# Cesta mezi městy pomocí dekompozice

města:

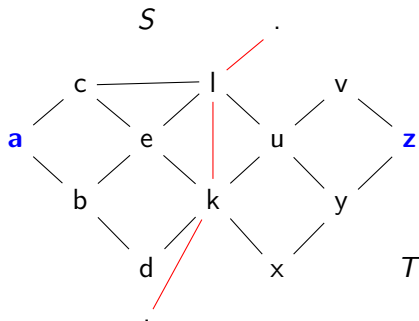
**a**, ..., **e** ... ve státě  $S$

**l** a **k** ... hraniční přechody

**u**, ..., **z** ... ve státě  $T$

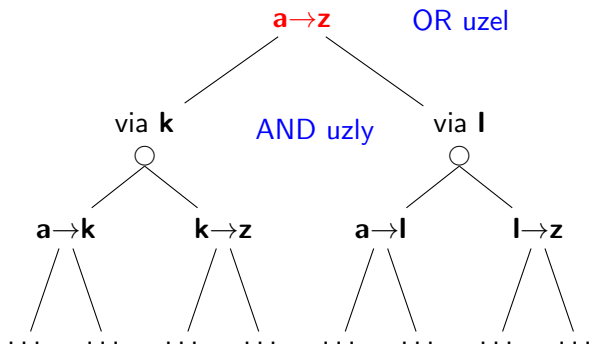
hledáme cestu z **a** do **z**:

- cesta z **a** do hraničního přechodu
- cesta z hraničního přechodu do **z**



# Cesta mezi městy pomocí dekompozice – pokrač.

schéma řešení pomocí rozkladu na podproblémy = AND/OR graf



**Celkové řešení** = podgraf AND/OR grafu, který nevynechává žádného následníka AND-uzlu.

# AND/OR graf a strom řešení

**AND/OR graf** = graf s 2 typy vnitřních uzlů – **AND uzly** a **OR uzly**

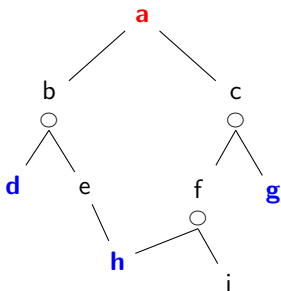
- *AND uzel* jako součást řešení vyžaduje průchod všech svých poduzlů
- *OR uzel* se chová jako běžný uzel klasického grafu



# AND/OR graf a strom řešení

**AND/OR graf** = graf s 2 typy vnitřních uzlů – **AND uzly** a **OR uzly**

- **AND uzel** jako součást řešení vyžaduje průchod všech svých poduzlů
- **OR uzel** se chová jako běžný uzel klasického grafu



# AND/OR graf a strom řešení

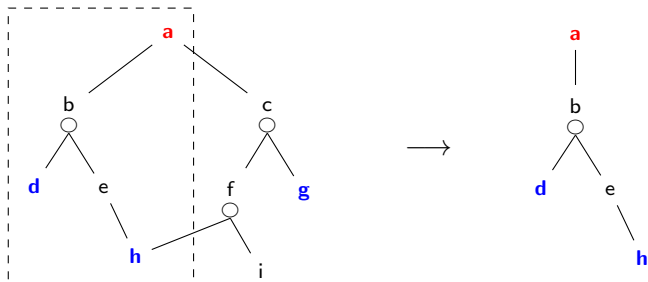
**strom řešení**  $T$  problému  $P$  s AND/OR grafem  $G$ :

- problém  $P$  je **kořen** stromu  $T$
- jestliže  $P$  je **OR uzel** grafu  $G \Rightarrow$  právě jeden z jeho následníků se svým stromem řešení je v  $T$
- jestliže  $P$  je **AND uzel** grafu  $G \Rightarrow$  všichni jeho následníci se svými stromy řešení jsou v  $T$
- každý list stromu řešení  $T$  je **cílovým uzlem** v  $G$

# AND/OR graf a strom řešení

**strom řešení**  $T$  problému  $P$  s AND/OR grafem  $G$ :

- problém  $P$  je **kořen** stromu  $T$
- jestliže  $P$  je **OR uzel** grafu  $G \Rightarrow$  právě jeden z jeho následníků se svým stromem řešení je v  $T$
- jestliže  $P$  je **AND uzel** grafu  $G \Rightarrow$  všichni jeho následníci se svými stromy řešení jsou v  $T$
- každý list stromu řešení  $T$  je **cílovým uzlem** v  $G$

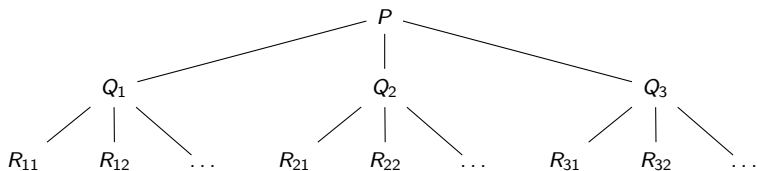


# Příklad – výherní strategie

Hra 2 hráčů s perfektními znalostmi, 2 výstupy  $\left\{ \begin{array}{l} \text{výhra} \\ \text{prohra} \end{array} \right.$

Výherní strategii je možné formulovat jako AND/OR graf:

- počáteční stav  $P$  typu *já-jsem-na-tahu*
- moje tahy vedou do stavů  $Q_1, Q_2, \dots$  typu *soupeř-je-na-tahu*
- následně soupeřovy tahy vedou do stavů  $R_{11}, R_{12}, \dots$  *já-jsem-na-tahu*

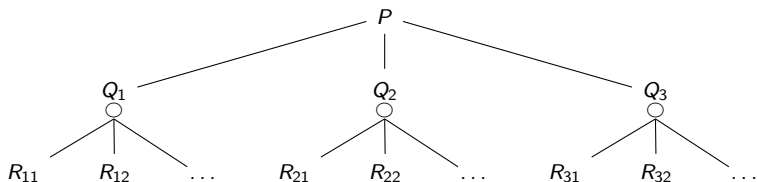


# Příklad – výherní strategie

Hra 2 hráčů s perfektními znalostmi, 2 výstupy  $\left\{ \begin{array}{l} \text{výhra} \\ \text{prohra} \end{array} \right.$

**Výherní strategii** je možné formulovat jako AND/OR graf:

- počáteční stav  $P$  typu *já-jsem-na-tahu*
- moje tahy vedou do stavů  $Q_1, Q_2, \dots$  typu *soupeř-je-na-tahu*
- následně soupeřovy tahy vedou do stavů  $R_{11}, R_{12}, \dots$  *já-jsem-na-tahu*
- cíl – stav, který je **výhra** podle pravidel (*prohra* je neřešitelný problém)
- stav  $P$  *já-jsem-na-tahu* je **výherní**  $\Leftrightarrow$  **některý** z  $Q_i$  je výherní, **OR**
- stav  $Q_i$  *soupeř-je-na-tahu* je **výherní**  $\Leftrightarrow$  **všechny**  $R_{ij}$  jsou výherní, **AND**
- **výherní strategie** = řešení AND/OR grafu

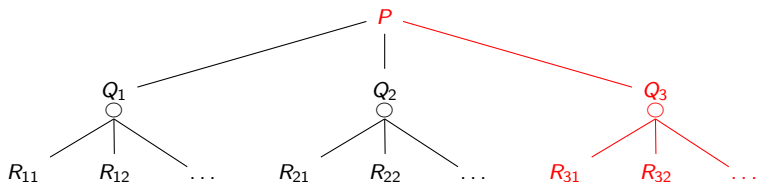


# Příklad – výherní strategie

Hra 2 hráčů s perfektními znalostmi, 2 výstupy  $\left\{ \begin{array}{l} \text{výhra} \\ \text{prohra} \end{array} \right.$

**Výherní strategii** je možné formulovat jako AND/OR graf:

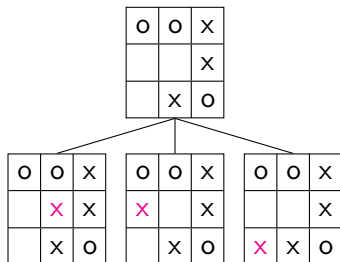
- počáteční stav  $P$  typu *já-jsem-na-tahu*
- moje tahy vedou do stavů  $Q_1, Q_2, \dots$  typu *soupeř-je-na-tahu*
- následně soupeřovy tahy vedou do stavů  $R_{11}, R_{12}, \dots$  *já-jsem-na-tahu*
- cíl – stav, který je **výhra** podle pravidel (*prohra* je neřešitelný problém)
- stav  $P$  *já-jsem-na-tahu* je **výherní**  $\Leftrightarrow$  **některý** z  $Q_i$  je výherní, **OR**
- stav  $Q_i$  *soupeř-je-na-tahu* je **výherní**  $\Leftrightarrow$  **všechny**  $R_{ij}$  jsou výherní, **AND**
- **výherní strategie** = řešení AND/OR grafu



# Příklad – výherní strategie

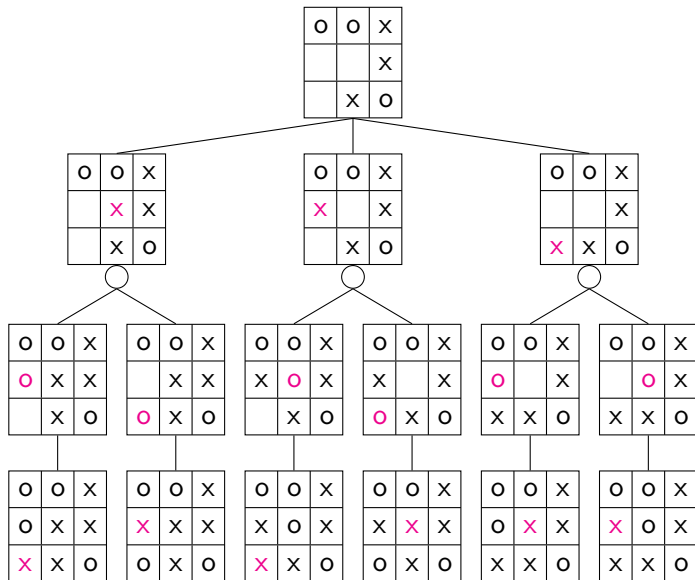
O	O	X
		X
	X	O

# Příklad – výherní strategie

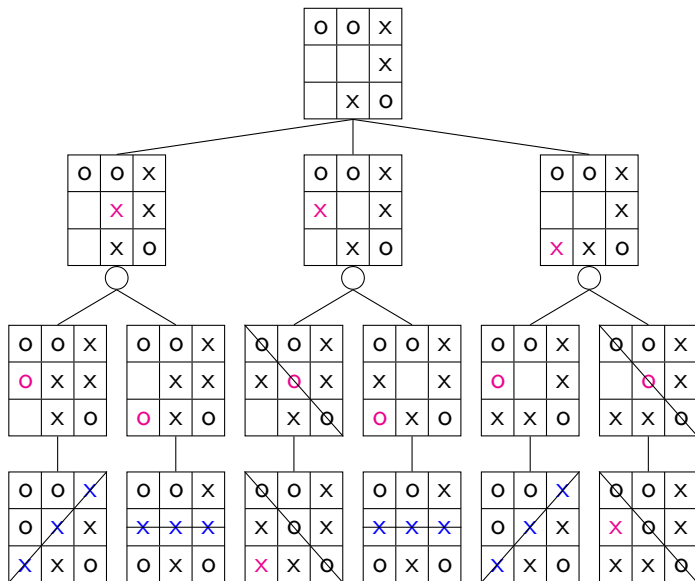




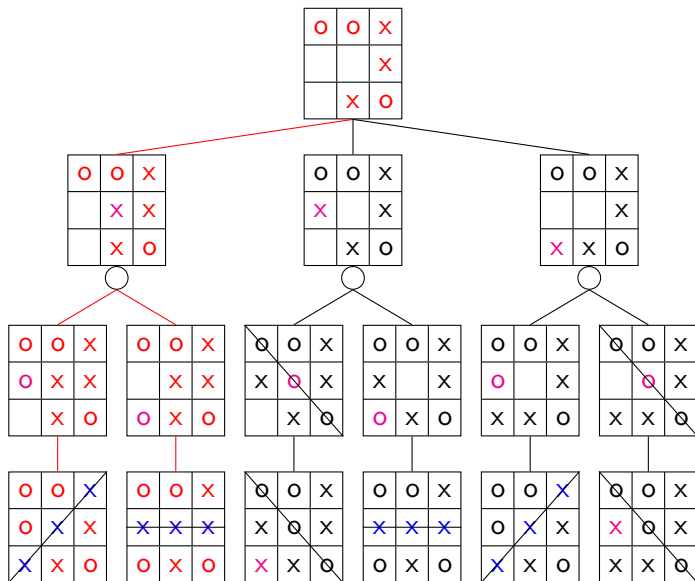
## Příklad – výherní strategie



## Příklad – výherní strategie



## Příklad – výherní strategie



# Reprezentace AND/OR grafu

přímý zápis AND/OR grafu v Prologu:

- OR uzel **v** s následníky **u1**, **u2**, ..., **uN**:

```
v :- u1.  
v :- u2.  
...  
v :- uN.
```

- AND uzel **x** s následníky **y1**, **y2**, ..., **yM**:

```
x :- y1, y2, ...,yM.
```

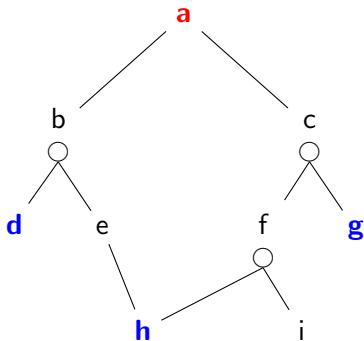
- cílový uzel **g** ( $\hat{=}$  elementární problém):

```
g.
```

- kořenový uzel **root**:

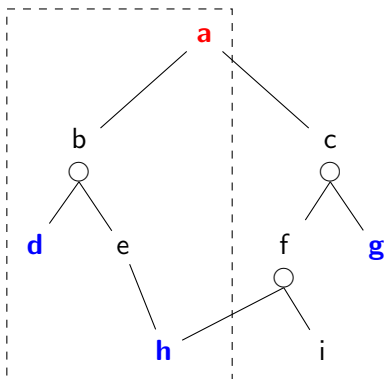
```
?- root.
```

# Triviální prohledávání AND/OR grafu v Prologu



```
a :- b.  
a :- c.  
b :- d, e.  
e :- h.  
c :- f, g.  
f :- h, i.  
d.  
g.  
h.
```

# Triviální prohledávání AND/OR grafu v Prologu



```
a :- b.  
a :- c.  
b :- d, e.  
e :- h.  
c :- f, g.  
f :- h, i.  
d.  
g.  
h.  
  
?- a.  
Yes
```

# Reprezentace AND/OR grafu v Prologu

- zavedeme operátory '---->' a ':'

```
?- op(700, xfx, ---->).
```

```
?- op(500, xfx, :).
```

- AND/OR graf budeme zapisovat

```
a ----> or:[b, c].
```

```
b ----> and:[d, e].
```

# Reprezentace AND/OR grafu v Prologu

- zavedeme operátory '---->' a ':'

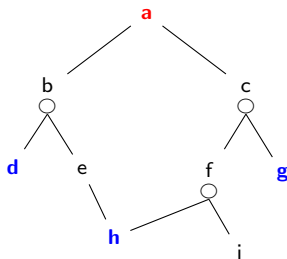
```
?- op(700, xfx, ---->).
```

```
?- op(500, xfx, :).
```

- AND/OR graf budeme zapisovat

```
a ----> or:[b, c].
```

```
b ----> and:[d, e].
```



```
a ----> or:[b,c].
```

```
b ----> and:[d,e].
```

```
c ----> and:[f,g].
```

```
e ----> or:[h].
```

```
f ----> and:[h,i].
```

```
goal(d).
```

```
goal(g).
```

```
goal(h).
```



# Obsah

- 1 Připomínka – průběžná písemka
- 2 AND/OR grafy
  - Příklad – Hanoiské věže
  - Cesta mezi městy pomocí dekompozice
  - AND/OR graf a strom řešení
  - Příklad – výherní strategie
  - Reprezentace AND/OR grafu
- 3 Prohledávání AND/OR grafů
  - Prohledávání AND/OR grafu do hloubky
  - Heuristické prohledávání AND/OR grafu
  - Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

# Prohledávání AND/OR grafu do hloubky

```
% solve(+Node, -SolutionTree)
solve(Node,Node) :- goal(Node).
solve(Node,Node ----> Tree) :-
    Node ----> or:Nodes, member(Node1,Nodes), solve(Node1,Tree).
solve(Node,Node ----> and:Trees) :-
    Node ----> and:Nodes, solveall(Nodes,Trees).

% solveall([Node1,Node2, ...], [SolutionTree1,SolutionTree2, ...])
solveall([],[]).
solveall([Node|Nodes],[Tree|Trees]) :- solve(Node,Tree), solveall(Nodes,Trees).
```

# Prohledávání AND/OR grafu do hloubky

```

% solve(+Node, -SolutionTree)
solve(Node,Node) :- goal(Node).
solve(Node,Node ----> Tree) :-
    Node ----> or:Nodes, member(Node1,Nodes), solve(Node1,Tree).
solve(Node,Node ----> and:Trees) :-
    Node ----> and:Nodes, solveall(Nodes,Trees).

% solveall([Node1,Node2, ...], [SolutionTree1,SolutionTree2, ...])
solveall([],[]).
solveall([Node|Nodes],[Tree|Trees]) :- solve(Node,Tree), solveall(Nodes,Trees).

?- solve(a,Tree).
Tree = a----> (b---->and:[d, e---->h]) ;
No

```

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*)

- doplnění reprezentace o **cenu přechodové hrany** (=míra složitosti podproblému):

Uzel  $\rightarrow$  AndOr:[NaslUzel1/Cena1, NaslUzel2/Cena2, ...,NaslUzelN/CenaN].

- definujeme **cenu uzlu** jako cenu optimálního řešení jeho podstromu
- pro každý uzel  $N$  máme daný **odhad** jeho **ceny**:

$h(N)$  = heuristický odhad ceny optimálního podgrafu s kořenem  $N$

- pro každý uzel  $N$ , jeho následníky  $N_1, \dots, N_b$  a jeho předchůdce  $M$  definujeme:

$$F(N) = \text{cena}(M, N) + \begin{cases} h(N), & \text{pro ještě neexpandovaný uzel } N \\ 0, & \text{pro cílový uzel (elementární problém)} \\ \min_i (F(N_i)), & \text{pro OR-uzel } N \\ \sum_i F(N_i), & \text{pro AND-uzel } N \end{cases}$$

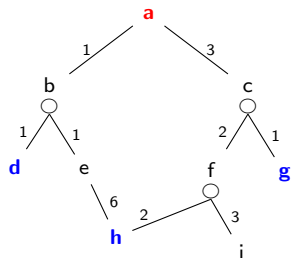
Pro **optimální strom řešení**  $S$  je tedy  $F(S)$  právě cena tohoto řešení (=suma všech hran z  $S$ ).

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



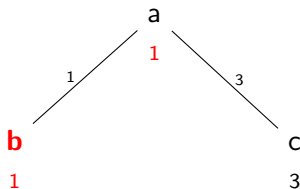
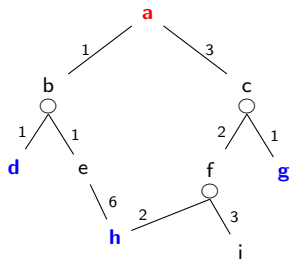
předp.  $\forall N : h(N) = 0$

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



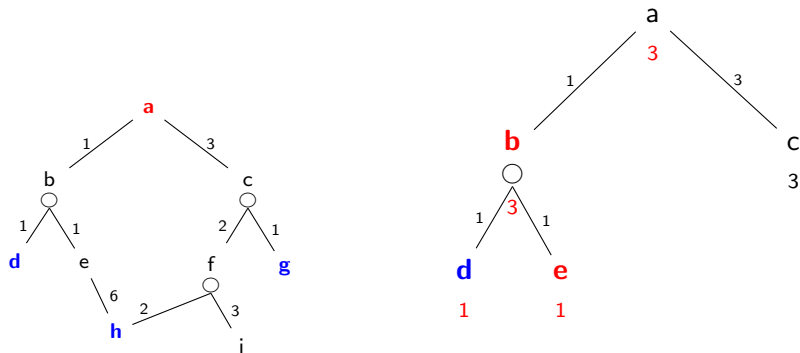
předp.  $\forall N : h(N) = 0$

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



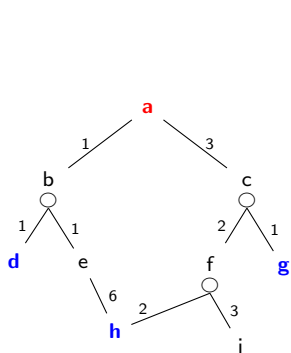
předp.  $\forall N : h(N) = 0$

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

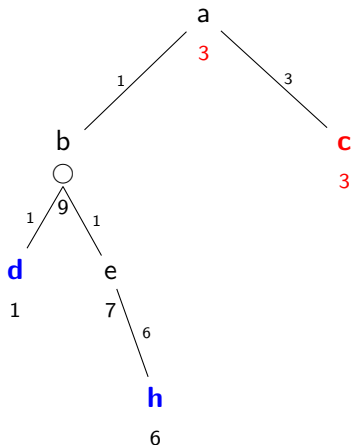
setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



předp.  $\forall N : h(N) = 0$



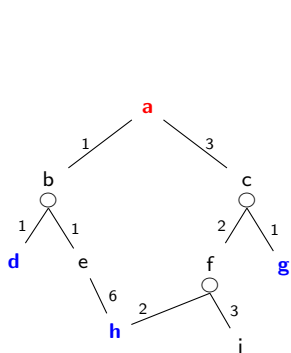


# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

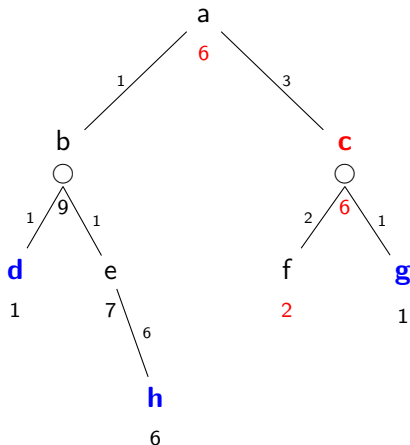
setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



předp.  $\forall N : h(N) = 0$

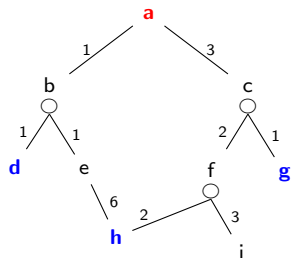


# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

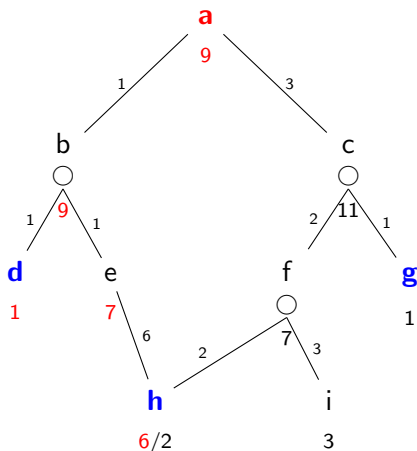
setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



předp.  $\forall N : h(N) = 0$

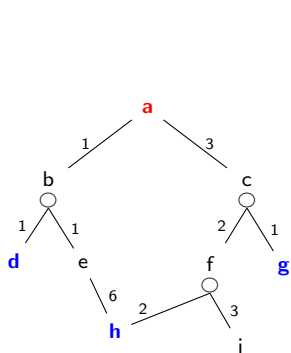


# Heuristické prohledávání AND/OR grafu – příklad

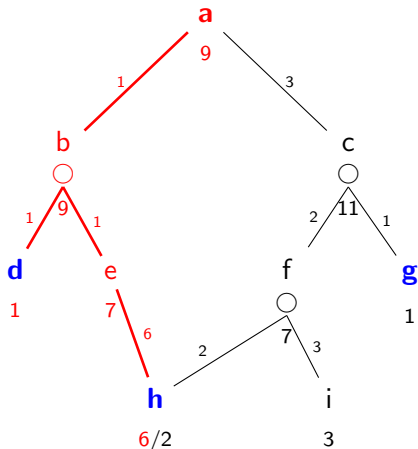
setříděný seznam částečně expandovaných grafů =

[Nevyřešený<sub>1</sub>, Nevyřešený<sub>2</sub>, ..., Vyřešený<sub>1</sub>, ...]

$F_{\text{Nevyřešený}_1} \leq F_{\text{Nevyřešený}_2} \leq \dots$



předp.  $\forall N : h(N) = 0$



# Reprezentace AND/OR grafu při heuristickém prohledávání

- **list** AND/OR grafu ... struktura **leaf(N,F,C)**.  
 $F = C + h(N)$
- **OR uzel** AND/OR grafu ... struktura **tree(N,F,C,or:[T1,T2,T3,...])**  
 $F = C + \min_j F_j$
- **AND uzel** AND/OR grafu ... struktura **tree(N,F,C,and:[T1,T2,T3,...])**  
 $F = C + \sum_j F_j$
- **vyřešený list** AND/OR grafu ... struktura **solvedleaf(N,F)**  
 $F = C$
- **vyřešený OR uzel** AND/OR grafu ... struktura **solvedtree(N,F,T)**  
 $F = C + F_1$
- **vyřešený AND uzel** AND/OR grafu ... **solvedtree(N,F,and:[T1,T2,...])**  
 $F = C + \sum_j F_j$

Python – ("typ uzlu", n, f, ...):

("leaf",n,f,c), ("tree",n,f,c,("or",subtrees)), ...

# Reprezentace AND/OR grafu při heuristickém prohledávání

**F** ... příslušná heuristická  $F$ -hodnota uzlu **N**

**C** ... cena hrany do uzlu **N**

**N** ... identifikátor uzlu

- **list** AND/OR grafu ... struktura **leaf(N,F,C)**  

$$F = C + h(N)$$
- **OR uzel** AND/OR grafu ... struktura **tree(N,F,C,or:[T1,T2,T3,...])**  

$$F = C + \min_i F_i$$
- **AND uzel** AND/OR grafu ... struktura **tree(N,F,C,and:[T1,T2,T3,...])**  

$$F = C + \sum_i F_i$$
- **vyřešený list** AND/OR grafu ... struktura **solvedleaf(N,F)**  

$$F = C$$
- **vyřešený OR uzel** AND/OR grafu ... struktura **solvedtree(N,F,T)**  

$$F = C + F_1$$
- **vyřešený AND uzel** AND/OR grafu ... **solvedtree(N,F,and:[T1,T2,...])**  

$$F = C + \sum_i F_i$$

Python – ("typ uzlu", n, f, ...):

("leaf",n,f,c), ("tree",n,f,c,("or",subtrees)), ...

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*)

```
def andor(node):
    sol, solved = expand(("leaf", node, 0, 0), biggest)
    if solved == "yes": return sol
    else: raise ValueError("Reseni neexistuje.")

def expand(tree, bound):
    if f(tree) > bound: return (tree, "no")
    tree_type = tree[0]
    if tree_type == "leaf":
        _, node, f_, c = tree
        if is_goal(node): return (("solved_leaf", node, f_), "yes")
        tree1 = expandnode(node, c)
        if tree1 is None: return (None, "never") # neexistuji naslednici
        return expand(tree1, bound)
    elif tree_type == "tree":
        _, node, f_, c, subtrees = tree
        newsubs, solved1 = expandlist(subtrees, bound-c)
        return continue_(solved1, node, c, newsubs, bound)

def expandlist(trees, bound):
    tree, othertrees, bound1 = select_tree(trees, bound)
    newtree, solved = expand(tree, bound1)
    return combine(othertrees, newtree, solved)
```

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*)

```
def andor(node):
```

```
    sol, solved = expand(("leaf", node, 0, 0), biggest)
    if solved == "yes": return sol
    else: raise ValueError("Reseni neexistuje.")
```

`expand(tree, bound) → (newtree, solved)`  
 expanduje `tree` po `bound`. Výsledek je `newtree` se stavem `solved`.

```
def expand(tree, bound):
```

```
    if f(tree) > bound: return (tree, "no")
    tree_type = tree[0]
    if tree_type == "leaf":
        _, node, f_, c = tree
        if is_goal(node): return (("solved_leaf", node, f_), "yes")
        tree1 = expandnode(node, c)
        if tree1 is None: return (None, "never") # neexistuji naslednici
        return expand(tree1, bound)
    elif tree_type == "tree":
        _, node, f_, c, subtrees = tree
        newsubs, solved1 = expandlist(subtrees, bound-c)
        return continue_(solved1, node, c, newsubs, bound)
```

```
def expandlist(trees, bound):
```

```
    tree, othertrees, bound1 = select_tree(trees, bound)
    newtree, solved = expand(tree, bound1)
    return combine(othertrees, newtree, solved)
```

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*)

```
def andor(node):
```

```
    sol, solved = expand("leaf", node, 0, 0), biggest)
    if solved == "yes": return sol
    else: raise ValueError("Reseni neexistuje.")
```

**expand(tree, bound) → (newtree, solved)**  
 expanduje **tree** po **bound**. Výsledek je **newtree** se stavem **solved**.

```
def expand(tree, bound):
```

```
    if f(tree) > bound: return (tree, "no")
    tree_type = tree[0]
    if tree_type == "leaf":
        _, node, f_, c = tree
        if is_goal(node): return ("solved_leaf", node, f_, "yes")
        tree1 = expandnode(node, c)
        if tree1 is None: return (None, "never") # neexistuji naslednici
        return expand(tree1, bound)
```

```
    elif tree_type == "tree":
```

```
        _, node, f_, c, subtrees = tree
        newsubs, solved1 = expandlist(subtrees, bound-c)
        return continue_(solved1, node, c, newsubs, bound)
```

**expandlist → (newtrees, solved)**  
 expanduje nejlepší (první) graf v seznamu **trees** se závorou **bound**.  
 Výsledek je v seznamu **newtrees** a celkový stav v **solved**

```
def expandlist(trees, bound):
```

```
    tree, othertrees, bound1 = select_tree(trees, bound)
    newtree, solved = expand(tree, bound1)
    return combine(othertrees, newtree, solved)
```



# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

```

def continue_(subtr_solved, node, c, subtrees, bound):
    if subtr_solved == "never": return (None, "never")
    h_ = bestf(subtrees)
    f_ = c + h_
    if subtr_solved == "yes": return (("solved_tree", node, f_, subtrees), "yes")
    if subtr_solved == "no": return expand(("tree", node, f_, c, subtrees), bound)

```

**continue** → (solution, solved)  
určuje, jak pokračovat po expanzi seznamu grafů

```

def combine(subtrees, tree, solved):
    op, trees = subtrees
    if op == "or":
        if solved == "yes": return (("or_result", tree), "yes")
        if solved == "no":
            newtrees = insert(tree, trees)
            return (("or", newtrees), "no")
        if solved == "never":
            if trees == Nil: return (None, "never")
            return (("or", trees), "no")
    if op == "and":
        if solved == "yes" and are_all_solved(trees):
            return (("and_result", Cons(tree, trees)), "yes")
        if solved == "never": return (None, "never")
        newtrees = insert(tree, trees)
        return (("and", newtrees), "no")

```

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

```
def continue_(subtr_solved, node, c, subtrees, bound):
    if subtr_solved == "never": return (None, "never")
    h_ = bestf(subtrees)
    f_ = c + h_
    if subtr_solved == "yes": return (("solved_tree", node, f_, subtrees), "yes")
    if subtr_solved == "no": return expand(("tree", node, f_, c, subtrees), bound)
```

**continue** → (solution, solved)  
určuje, jak pokračovat po expanzi seznamu grafů

```
def combine(subtrees, tree, solved):
    op, trees = subtrees
    if op == "or":
        if solved == "yes": return (("or_result", tree), "yes")
        if solved == "no":
            newtrees = insert(tree, trees)
            return (("or", newtrees), "no")
        if solved == "never":
            if trees == Nil: return (None, "never")
            return (("or", trees), "no")
    if op == "and":
        if solved == "yes" and are_all_solved(trees):
            return (("and_result", Cons(tree, trees)), "yes")
        if solved == "never": return (None, "never")
        newtrees = insert(tree, trees)
        return (("and", newtrees), "no")
```

**combine(othertrees, newtree, solved)** → (newtrees, solved)  
kombinuje výsledky expanze stromu a seznamu stromů

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

expandnode převede uzel z ("leaf", node, f, c) do ("tree", node, f, c, subtrees)

```
def expandnode(node, c):
    succ = get_successors(node) # podle zadaného AND/OR grafu
    if succ is None: return None
    op, successors = succ
    subtrees = evaluate(successors)
    f_ = c + bestf((op, subtrees)) # c + best h
    return ("tree", node, f_, c, (op, subtrees))

def evaluate(nodes):
    if nodes == Nil: return Nil
    node, c = nodes.head
    f_ = c + h(node)
    trees1 = evaluate(nodes.tail)
    trees = insert(("leaf", node, f_, c), trees1)
    return trees

def are_all_solved(trees):
    if trees == Nil: return True
    return is_solved(trees.head) and are_all_solved(trees.tail)

def is_solved(tree):
    tree_type = tree[0]
    return tree_type == "solved_tree" or tree_type == "solved_leaf"
```

# Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

```
def expandnode(node, c):
```

expandnode převede uzel z ("leaf", node, f, c) do ("tree", node, f, c, subtrees)

```
    succ = get_successors(node) # podle zadaného AND/OR grafu
    if succ is None: return None
    op, successors = succ
    subtrees = evaluate(successors)
    f_ = c + bestf((op, subtrees)) # c + best h
    return ("tree", node, f_, c, (op, subtrees))
```

```
def evaluate(nodes):
```

evaluate vypočítá hodnoty pro seznam následovníků

```
    if nodes == Nil: return Nil
    node, c = nodes.head
    f_ = c + h(node)
    trees1 = evaluate(nodes.tail)
    trees = insert(("leaf", node, f_, c), trees1)
    return trees
```

```
def are_all_solved(trees):
```

```
    if trees == Nil: return True
    return is_solved(trees.head) and are_all_solved(trees.tail)
```

```
def is_solved(tree):
```

```
    tree_type = tree[0]
    return tree_type == "solved_tree" or tree_type == "solved_leaf"
```

## Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

```
def expandnode(node, c):
```

expandnode převede uzel z ("leaf", node, f, c) do ("tree", node, f, c, subtrees)

```
    succ = get_successors(node) # podle zadaného AND/OR grafu
    if succ is None: return None
    op, successors = succ
    subtrees = evaluate(successors)
    f_ = c + bestf((op, subtrees)) # c + best h
    return ("tree", node, f_, c, (op, subtrees))
```

```
def evaluate(nodes):
```

evaluate vypočítá hodnoty pro seznam následovníků

```
    if nodes == Nil: return Nil
    node, c = nodes.head
    f_ = c + h(node)
    trees1 = evaluate(nodes.tail)
    trees = insert(("leaf", node, f_, c), trees1)
    return trees
```

```
def are_all_solved(trees):
```

are\_all\_solved zkontroluje, jestli všechny stromy v seznamu jsou vyřešené

```
    if trees == Nil: return True
    return is_solved(trees.head) and are_all_solved(trees.tail)
```

```
def is_solved(tree):
```

```
    tree_type = tree[0]
    return tree_type == "solved_tree" or tree_type == "solved_leaf"
```

## Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

**insert** vkládá strom do seznamu stromů se zachováním třídění

```
def insert(t, trees):
    if trees == Nil: return Cons(t, Nil)
    t1 = trees.head
    ts = trees.tail
    if is_solved(t1): return Cons(t, trees)
    if is_solved(t): return Cons(t1, insert(t, ts))
    if f(t) <= f(t1): return Cons(t, trees)
    return Cons(t1, insert(t, ts))

def select_tree(subtrees, bound):
    op, trees = subtrees
    if trees.tail == Nil: return (trees.head, (op, Nil), bound)
    f_ = bestf((op, trees.tail))
    if op == "or": bound1 = min(bound, f_)
    if op == "and": bound1 = bound - f_
    return (trees.head, (op, trees.tail), bound1)
```

## Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

insert vkládá strom do seznamu stromů se zachováním třídění

```
def insert(t, trees):
    if trees == Nil: return Cons(t, Nil)
    t1 = trees.head
    ts = trees.tail
    if is_solved(t1): return Cons(t, trees)
    if is_solved(t): return Cons(t1, insert(t, ts))
    if f(t) <= f(t1): return Cons(t, trees)
    return Cons(t1, insert(t, ts))
```

select\_tree(trees, bound) → (besttree, (op, othertrees), bound1)  
vybere besttree z trees, zbytek je v othertrees. bound je závora  
pro trees, bound1 pro besttree

```
def select_tree(subtrees, bound):
    op, trees = subtrees
    if trees.tail == Nil: return (trees.head, (op, Nil), bound)
    f_ = bestf((op, trees.tail))
    if op == "or": bound1 = min(bound, f_)
    if op == "and": bound1 = bound - f_
    return (trees.head, (op, trees.tail), bound1)
```

## Heuristické prohledávání AND/OR grafu (AO\*) – pokrač.

```
def f(tree):  
    return tree[2]
```

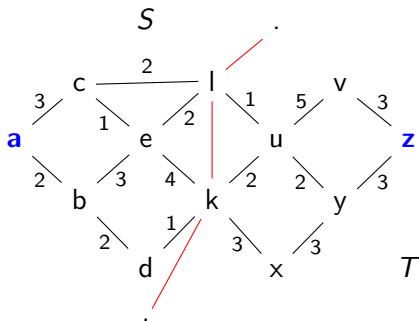
```
def bestf(subtrees):  
    op = subtrees[0]  
    if op == "or":  
        trees = subtrees[1]  
        return f(trees.head)  
    if op == "and" or op == "and_result":  
        trees = subtrees[1]  
        if trees == Nil: return 0  
        return f(trees.head) + bestf(("and", trees.tail))  
    if op == "or_result":  
        tree = subtrees[1]  
        return f(tree)
```

**bestf** vyhledá uloženou *F*-hodnotu AND/OR stromu/uzlu



# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

- cesta mezi **Mesto1** a **Mesto2** – predikát **move(Mesto1,Mesto2,Vzdal)**.
- klíčové postavení města **Mesto3** – predikát **key(Mesto1–Mesto2,Mesto3)**.



```

move(a,b,2). move(a,c,3). move(b,e,3).
move(b,d,2). move(c,e,1). move(c,l,2).
move(e,k,4). move(e,l,2). move(k,u,2).
move(k,x,3). move(u,v,5). move(x,y,3).
move(y,z,3). move(v,z,3). move(l,u,1).
move(d,k,1). move(u,y,2).
move(X,Y,D) :- move(Y,X,D).
    
```

```

stateS(a). stateS(b). stateS(c).
stateS(d). stateS(e).
stateT(u). stateT(v). stateT(x).
stateT(y). stateT(z).
border(l). border(k).
    
```

```

key(M1–M2,M3) :- stateS(M1), stateT(M2),
border(M3).
    
```

```

city(X) :- (stateS(X);stateT(X);border(X)).
    
```

# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

vlastní hledání cesty:

1. **Y1, Y2,...** klíčové body mezi městy **A** a **Z**. Hledej jednu z cest:
  - cestu z **A** do **Z** přes **Y1**
  - cestu z **A** do **Z** přes **Y2**
  - ...
2. Není-li mezi městy **A** a **Z** klíčové město  $\Rightarrow$  hledej souseda **Y** města **A** takového, že existuje cesta z **Y** do **Z**.

# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

## Konstrukce příslušného AND/OR grafu:

“manuální” výpis všech uzlů:

```
?- op(560,xfx,via). % operátory X-Z a X-Z via Y
a-z ----> or:[a-z via k/0,a-z via l/0]
a-v ----> or:[a-v via k/0,a-v via l/0]
...

a-l ----> or:[c-l/3,b-l/2]
b-l ----> or:[e-l/3,d-l/2]
...

a-z via l ----> and:[a-l/0,l-z/0]
a-v via l ----> and:[a-l/0,l-v/0]
...

goal(a-a). goal(b-b). ...
```

# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním

## Konstrukce příslušného AND/OR grafu:

“pravidlová” definice grafu:

```
?- op(560,xfx,via). % operátory X-Z a X-Z via Y
```

```
% a-z ----> or:[a-z via k/0,a-z via l/0]
```

```
% a-v ----> or:[a-v via k/0,a-v via l/0]
```

```
% ...
```

```
X-Z ---> or:Problemlist :- city(X),city(Z), bagof((X-Z via Y)/0, key(X-Z,Y), Problemlist),!.
```

```
% a-l ----> or:[c-l/3,b-l/2]
```

```
% b-l ----> or:[e-l/3,d-l/2]
```

```
% ...
```

```
X-Z ---> or:Problemlist :- city(X),city(Z), bagof((Y-Z)/D, move(X,Y,D), Problemlist).
```

```
% a-z via l ----> and:[a-l/0,l-z/0]
```

```
% a-v via l ----> and:[a-l/0,l-v/0]
```

```
% ...
```

```
X-Z via Y ---> and:[(X-Y)/0,(Y-Z)/0] :- city(X),city(Z),key(X-Z,Y).
```

```
% goal(a-a). goal(b-b). ...
```

```
goal(X-X).
```

# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním – pokrač.

jednoduchá heuristika  $h(X - Z \mid X - Z \text{ via } Y)$ :

- stejné město:  $h = 0$  (cíl, elementární problém)
- hrana mezi  $X$  a  $Y$   $\text{move}(X, Y, C)$ :  $h = C$
- jinak, stejný stát:  $h = 1$
- jinak, různý stát:  $h = 2$

jiná možnost – *vzdušná vzdálenost*

Když  $\forall n : h(n) \leq h^*(n)$ , kde  $h^*$  je minimální cena řešení uzlu  $n \Rightarrow$   
najdeme **vždy optimální řešení**

# Cesta mezi městy heuristickým AND/OR hledáním – pokrač.

```

:- andor(a-z,SolutionTree), write(SolutionTree).
  solvedtree(a-z,11,
    solvedtree(a-z via l,11,
      and:[
        solvedtree(l-z,6,solvedtree(u-z,6,solvedtree(y-z,5,solvedleaf(z-z,3))),
        solvedtree(a-l,5,solvedtree(c-l,5,solvedleaf(l-l,2))))])
  
```

