

CLP(FD) - prohledávání

Vestavěné predikáty pro labeling

- Instanciaci proměnné Variable hodnotami v její doméně

`indomain(Variable)`

hodnoty jsou instanciovány při backtrackingu ve vzrůstajícím pořadí

```
?- X in 4..5, indomain(X).
```

```
  X = 4 ? ;
```

```
  X = 5 ?
```

Vestavěné predikáty pro labeling

- Instanciaci proměnné `Variable` hodnotami v její doméně

`indomain(Variable)`

hodnoty jsou instanciovány při backtrackingu ve vzrůstajícím pořadí

```
?- X in 4..5, indomain(X).
```

```
    X = 4 ? ;
```

```
    X = 5 ?
```

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( [Var|Rest] ) :- % výběr nejlevější proměnné k instanciaci
    indomain( Var ),      % výběr hodnot ve vzrůstajícím pořadí
    labeling( Rest ).
```

Vestavěné predikáty pro labeling

- Instanciaci proměnné `Variable` hodnotami v její doméně

`indomain(Variable)`

hodnoty jsou instanciovány při backtrackingu ve vzrůstajícím pořadí

```
?- X in 4..5, indomain(X).
```

```
    X = 4 ? ;
```

```
    X = 5 ?
```

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( [Var|Rest] ) :-      % výběr nejlevější proměnné k instanciaci
    indomain( Var ),          % výběr hodnot ve vzrůstajícím pořadí
    labeling( Rest ).
```

- `labeling(Options, Variables)`

```
?- A in 0..2, B in 0..2, B#< A, labeling([], [A,B]).
```

Uspořádání hodnot a proměnných

- Při prohledávání je rozhodující **uspořádání hodnot a proměnných**
- Určují je **heuristiky výběru hodnot a výběru proměnných**

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( Variables ) :-  
    select_variable(Variables,Var,Rest),  
    select_value(Var,Value),
```

Uspořádání hodnot a proměnných

- Při prohledávání je rozhodující **uspořádání hodnot a proměnných**
- Určují je **heuristiky výběru hodnot a výběru proměnných**

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( Variables ) :-
```

```
    select_variable(Variables,Var,Rest),
```

```
    select_value(Var,Value),
```

```
    ( Var #= Value,
```

```
        labeling( Rest )
```

Uspořádání hodnot a proměnných

- Při prohledávání je rozhodující **uspořádání hodnot a proměnných**
- Určují je **heuristiky výběru hodnot a výběru proměnných**

```
Labeling( [] ).
```

```
Labeling( Variables ) :-
```

```
    select_variable(Variables,Var,Rest),
```

```
    select_value(Var,Value),
```

```
    ( Var #= Value,
```

```
      Labeling( Rest )
```

```
    ;
```

```
    Var #\= Value ,           % nemusí dojít k instanciaci Var
```

```
    Labeling( Variables ) % proto pokračujeme se všemi proměnnými včetně Var
```

```
    ).
```

Uspořádání hodnot a proměnných

- Při prohledávání je rozhodující **uspořádání hodnot a proměnných**
- Určují je **heuristiky výběru hodnot a výběru proměnných**

```
Labeling( [] ).
```

```
Labeling( Variables ) :-
```

```
    select_variable(Variables,Var,Rest),
```

```
    select_value(Var,Value),
```

```
    ( Var #= Value,
```

```
      Labeling( Rest )
```

```
    ;
```

```
    Var #\= Value ,           % nemusí dojít k instanciaci Var
```

```
    Labeling( Variables ) % proto pokračujeme se všemi proměnnými včetně Var
```

```
    ).
```

- **Statické uspořádání:** určeno už před prohledáváním
- **Dynamické uspořádání:** počítá se během prohledávání

Výběr hodnoty

- Obecný princip výběru hodnoty: **první úspěch** (*succeed first*)
 - volíme pořadí tak, abychom výběr nemuseli opakovat
 - ?- `domain([A,B,C],1,2), A#=#B+C.`

Výběr hodnoty

- Obecný princip výběru hodnoty: **první úspěch** (*succeed first*)
 - volíme pořadí tak, abychom výběr nemuseli opakovat
 - ?- `domain([A,B,C],1,2), A#B+C`. optimální výběr $A=2, B=1, C=1$ je bez backtrackingu

Výběr hodnoty

- Obecný princip výběru hodnoty: **první úspěch** (*succeed first*)
 - volíme pořadí tak, abychom výběr nemuseli opakovat
 - ?- `domain([A,B,C],1,2), A#B+C`. optimální výběr $A=2, B=1, C=1$ je bez backtrackingu
- Parametry `Labeling/2` ovlivňující výběr hodnoty př. `labeling([down], Vars)`
 - **up**: doména procházena ve vzrůstajícím pořadí (default)
 - **down**: doména procházena v klesajícím pořadí
- Parametry `Labeling/2` řídící, jak je výběr hodnoty realizován
 - **step**: volba mezi $X \#M$, $X \#\backslash M$ (default)
 - viz dřívější příklad u "Uspořádání hodnot a proměnných"
 - **enum**: vícenásobná volba mezi všemi hodnotami v doméně
 - podobně jako při `indomain/1`

Výběr proměnné

- Obecný princip výběru proměnné: *first-fail*
 - výběr proměnné, pro kterou je nejobtížnější nalézt správnou hodnotu
pozdější výběr hodnoty pro tuto proměnnou by snadněji vedl k failu
 - vybereme proměnnou **s nejmenší doménou**
 - ?- `domain([A,B,C],1,3), A#<3, A#=B+C.`

Výběr proměnné

- Obecný princip výběru proměnné: *first-fail*
 - výběr proměnné, pro kterou je nejobtížnější nalézt správnou hodnotu
pozdější výběr hodnoty pro tuto proměnnou by snadněji vedl k failu
 - vybereme proměnnou **s nejmenší doménou**
 - ?- $\text{domain}([A,B,C],1,3), A\#<3, A\# = B+C.$ nejlépe je začít s výběrem A

Výběr proměnné

● Obecný princip výběru proměnné: *first-fail*

- výběr proměnné, pro kterou je nejobtížnější nalézt správnou hodnotu
pozdější výběr hodnoty pro tuto proměnnou by snadněji vedl k failu
- vybereme proměnnou **s nejmenší doménou**

● ?- domain([A,B,C],1,3), A#<3, A#=#B+C.

nejlépe je začít s výběrem A

● Parametry Labeling/2 ovlivňující výběr proměnné

- **leftmost**: nejlevější (default)
- **ff**: s (1) nejmenší velikostí domény `fd_size(Var,Size)`
(2) (pokud s nejmenší velikostí domény více, tak) nejlevější z nich

Výběr proměnné

● Obecný princip výběru proměnné: *first-fail*

- výběr proměnné, pro kterou je nejobtížnější nalézt správnou hodnotu
pozdější výběr hodnoty pro tuto proměnnou by snadněji vedl k failu

- vybereme proměnnou **s nejmenší doménou**

- ?- domain([A,B,C],1,3), A#<3, A#=#B+C. nejlépe je začít s výběrem A

● Parametry Labeling/2 ovlivňující výběr proměnné

- **leftmost**: nejlevější (default)

- **ff**: s (1) nejmenší velikostí domény fd_size(Var,Size)

(2) (pokud s nejmenší velikostí domény více, tak) nejlevější z nich

- **ffc**: s (1) nejmenší velikostí domény fd_degree(Var,Size)

(2) největším množstvím omezením „čekajících“ na proměnné

(3) nejlevější z nich

- **min/max**: s (1) nejmenší/největší hodnotou v doméně proměnné fd_min(Var,Min)/fd_max(Var,Max)

Hledání optimálního řešení

(předpokládejme minimalizaci)

- Parametry Labeling/2 pro optimalizaci: `minimize(F)/maximize(F)`
 - Cena $\# = A+B+C$, `labeling([minimize(Cena)], [A,B,C])`
- **Metoda větví a mezí (*branch&bound*)**
 - algoritmus, který implementuje proceduru pro minimalizaci (duálně pro maximalizaci)
 - uvažujeme nejhorší možnou cenu řešení UB (např. cena už nalezeného řešení)
 - počítáme dolní odhad LB ceny částečného řešení
 LB je tedy nejlepší možná cena pro rozšíření tohoto řešení
 - procházíme strom a vyžadujeme, aby prozkoumávaná větev měla cenu $LB < UB$
pokud je $LB \geq UB$, tak víme, že v této větvi není lepší řešení a odřízneme ji
 - přidává se tedy inkrementálně omezení $LB \# < UB$ pro snižující se UB tak, jak nalézáme kvalitnější řešení

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání
- `schedule(Ss, End) :-`

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),
```

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],
```

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],  
    domain(Ss, 0, 51),  
    domain([End], 0, 69),
```

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],  
    domain(Ss, 0, 51),  
    domain([End], 0, 69),  
    after(Ss, Ds, End),      % koncový čas
```

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],  
    domain(Ss, 0, 51),  
    domain([End], 0, 69),  
    after(Ss, Ds, End),      % koncový čas  
    cumulative(Ss, Ds, Rs, 13),
```


Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],  
    domain(Ss, 0, 51),  
    domain([End], 0, 69),  
    after(Ss, Ds, End),      % koncový čas  
    cumulative(Ss, Ds, Rs, 13),  
    append(Ss, [End], Vars),  
    Labeling([minimize(End)], Vars).
```

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-  
    length(Ss, 7),  
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],  
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],  
    domain(Ss, 0, 51),  
    domain([End], 0, 69),  
    after(Ss, Ds, End),      % koncový čas  
    cumulative(Ss, Ds, Rs, 13),  
    append(Ss, [End], Vars),  
    labeling([minimize(End)], Vars).  
  
after([], [], _).  
after([S|Ss], [D|Ds], E) :-  
    E #>= S+D, after(Ss, Ds, E).
```

Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```
schedule(Ss, End) :-
    length(Ss, 7),
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],
    domain(Ss, 0, 51),
    domain([End], 0, 69),
    after(Ss, Ds, End),      % koncový čas
    cumulative(Ss, Ds, Rs, 13),
    append(Ss, [End], Vars),
    labeling([minimize(End)], Vars).

after([], [], _).
after([S|Ss], [D|Ds], E) :-
    E #>= S+D, after(Ss, Ds, E).

| ?- schedule(Ss, End).
Ss = Ss = [0,16,9,9,4,4,0], End = 22 ?
```

Algoritmy pro řešení problému splňování podmínek (CSP)

Grafová reprezentace CSP

● Reprezentace podmínek

- intenzionální (matematická/logická formule)
- extenzionální (výčet k-tic kompatibilních hodnot, 0-1 matice)

Grafová reprezentace CSP

● Reprezentace podmínek

- intenzionální (matematická/logická formule)
- extenzionální (výčet k-tic kompatibilních hodnot, 0-1 matice)

● **Graf:** vrcholy, hrany (hrana spojuje dva vrcholy)

● **Hypergraf:** vrcholy, hrany (hrana spojuje množinu vrcholů)

● Reprezentace CSP pomocí **hypergrafu podmínek**

- vrchol = proměnná, hyperhrana = podmínka

Grafová reprezentace CSP

● Reprezentace podmínek

- intenzionální (matematická/logická formule)
- extenzionální (výčet k-tic kompatibilních hodnot, 0-1 matice)

● Graf: vrcholy, hrany (hrana spojuje dva vrcholy)

● Hypergraf: vrcholy, hrany (hrana spojuje množinu vrcholů)

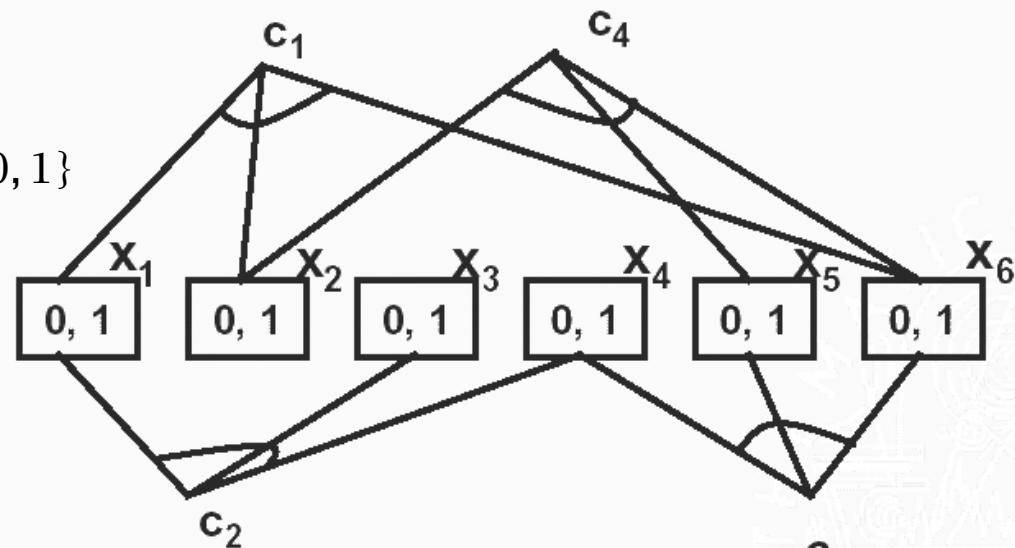
● Reprezentace CSP pomocí hypergrafu podmínek

- vrchol = proměnná, hyperhrana = podmínka

● Příklad

- proměnné x_1, \dots, x_6 s doménou $\{0, 1\}$

- omezení $c_1 : x_1 + x_2 + x_6 = 1$
 $c_2 : x_1 - x_3 + x_4 = 1$
 $c_3 : x_4 + x_5 - x_6 > 0$
 $c_4 : x_2 + x_5 - x_6 = 0$



Binární CSP

● Binární CSP

- CSP, ve kterém jsou pouze binární podmínky
- unární podmínky zakódovány do domény proměnné

● Graf podmínek pro binární CSP

- není nutné uvažovat hypergraf, stačí graf (podmínka spojuje pouze dva vrcholy)

Binární CSP

● Binární CSP

- CSP, ve kterém jsou pouze binární podmínky
- unární podmínky zakódovány do domény proměnné

● Graf podmínek pro binární CSP

- není nutné uvažovat hypergraf, stačí graf (podmínka spojuje pouze dva vrcholy)

● Každý CSP lze transformovat na "korespondující" binární CSP

● Výhody a nevýhody binarizace

- získáváme unifikovaný tvar CSP problému, řada algoritmů navržena pro binární CSP
- bohužel ale značné zvětšení velikosti problému

Binární CSP

● Binární CSP

- CSP, ve kterém jsou pouze binární podmínky
- unární podmínky zakódovány do domény proměnné

● Graf podmínek pro binární CSP

- není nutné uvažovat hypergraf, stačí graf (podmínka spojuje pouze dva vrcholy)

● Každý CSP lze transformovat na "korespondující" binární CSP

● Výhody a nevýhody binarizace

- získáváme unifikovaný tvar CSP problému, řada algoritmů navržena pro binární CSP
- bohužel ale značné zvětšení velikosti problému

● Nebinární podmínky

- složitější propagační algoritmy
- lze využít jejich sémantiky pro lepší propagaci
 - příklad: `all_different` vs. množina binárních nerovností

Vrcholová a hranová konzistence

● Vrcholová konzistence (*node consistency*) NC

- každá hodnota z aktuální domény V_i proměnné splňuje všechny unární podmínky s proměnnou V_i

Vrcholová a hranová konzistence

● Vrcholová konzistence (*node consistency*) NC

- každá hodnota z aktuální domény V_i proměnné splňuje všechny unární podmínky s proměnnou V_i

● Hranová konzistence (*arc consistency*) AC pro **binární CSP**

- **hrana** (V_i, V_j) **je hranově konzistentní**, právě když
pro každou hodnotu x z aktuální domény D_i existuje hodnota y tak, že
ohodnocení $[V_i = x, V_j = y]$ splňuje všechny binární podmínky nad V_i, V_j .

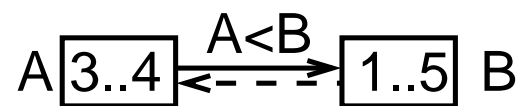
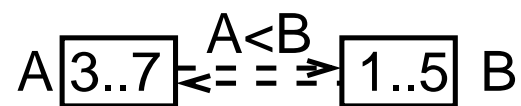
Vrcholová a hranová konzistence

● Vrcholová konzistence (*node consistency*) NC

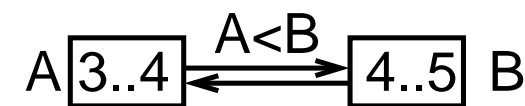
- každá hodnota z aktuální domény V_i proměnné splňuje všechny unární podmínky s proměnnou V_i

● Hranová konzistence (*arc consistency*) AC pro **binární CSP**

- **hrana** (V_i, V_j) je **hranově konzistentní**, právě když pro každou hodnotu x z aktuální domény D_i existuje hodnota y tak, že ohodnocení $[V_i = x, V_j = y]$ splňuje všechny binární podmínky nad V_i, V_j .
- hranová konzistence je **směrová**
 - konzistence hrany (V_i, V_j) nezaručuje konzistenci hrany (V_j, V_i)



konzistence (A,B)



konzistence (A,B) i (B,A)

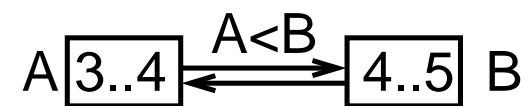
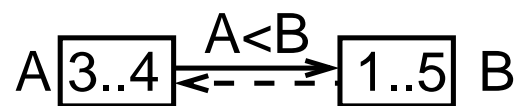
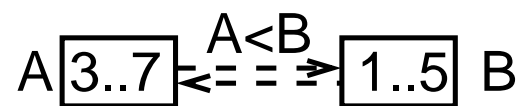
Vrcholová a hranová konzistence

● Vrcholová konzistence (*node consistency*) NC

- každá hodnota z aktuální domény V_i proměnné splňuje všechny unární podmínky s proměnnou V_i

● Hranová konzistence (*arc consistency*) AC pro **binární CSP**

- **hrana** (V_i, V_j) je **hranově konzistentní**, právě když pro každou hodnotu x z aktuální domény D_i existuje hodnota y tak, že ohodnocení $[V_i = x, V_j = y]$ splňuje všechny binární podmínky nad V_i, V_j .
- hranová konzistence je **směrová**
 - konzistence hrany (V_i, V_j) nezaručuje konzistenci hrany (V_j, V_i)



konzistence (A,B)

konzistence (A,B) i (B,A)

- **CSP** je **hranově konzistentní**, právě když

jsou všechny jeho hrany (v obou směrech) hranově konzistentní

Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu (V_i, V_j) hranově konzistentní?
- Z domény D_i vyřadím takové hodnoty x , které nejsou konzistentní s aktuální doménou D_j (pro x neexistuje žádná hodnota y v D_j tak, aby ohodnocení $V_i = x$ a $V_j = y$ splňovalo všechny binární podmínky mezi V_i a V_j)

Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu (V_i, V_j) hranově konzistentní?
- Z domény D_i vyřadím takové hodnoty x , které nejsou konzistentní s aktuální doménou D_j (pro x neexistuje žádná hodnota y v D_j tak, aby ohodnocení $V_i = x$ a $V_j = y$ splňovalo všechny binární podmínky mezi V_i a V_j)

● `procedure revise((i,j))`

`Deleted := false`

`for $\forall x$ in D_i do`

`if neexistuje $y \in D_j$ takové, že (x,y) je konzistentní`

`then $D_i := D_i - \{x\}$`

`Deleted := true`

`end if`

`return Deleted`

`end revise`

Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu (V_i, V_j) hranově konzistentní?
- Z domény D_i vyřadím takové hodnoty x , které nejsou konzistentní s aktuální doménou D_j (pro x neexistuje žádná hodnota y v D_j tak, aby ohodnocení $V_i = x$ a $V_j = y$ splňovalo všechny binární podmínky mezi V_i a V_j)

● `procedure revise((i,j))`

`Deleted := false`

`for $\forall x$ in D_i do`

`if neexistuje $y \in D_j$ takové, že (x,y) je konzistentní`

`then $D_i := D_i - \{x\}$`

`Deleted := true`

`end if`

`return Deleted`

`end revise`

● `domain([V_1, V_2], 2, 4), $V_1 \# < V_2$`

Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu (V_i, V_j) hranově konzistentní?
- Z domény D_i vyřadím takové hodnoty x , které nejsou konzistentní s aktuální doménou D_j (pro x neexistuje žádná hodnota y v D_j tak, aby ohodnocení $V_i = x$ a $V_j = y$ splňovalo všechny binární podmínky mezi V_i a V_j)

● `procedure revise((i,j))`

`Deleted := false`

`for $\forall x$ in D_i do`

`if neexistuje $y \in D_j$ takové, že (x,y) je konzistentní`

`then $D_i := D_i - \{x\}$`

`Deleted := true`

`end if`

`return Deleted`

`end revise`

- `domain([V_1, V_2], 2, 4), $V_1 \# < V_2$ revise((1,2)) smaže 4 z D_1 ,`

Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu (V_i, V_j) hranově konzistentní?
- Z domény D_i vyřadím takové hodnoty x , které nejsou konzistentní s aktuální doménou D_j (pro x neexistuje žádná hodnota y v D_j tak, aby ohodnocení $V_i = x$ a $V_j = y$ splňovalo všechny binární podmínky mezi V_i a V_j)

● `procedure revise((i,j))`

`Deleted := false`

`for $\forall x$ in D_i do`

`if neexistuje $y \in D_j$ takové, že (x,y) je konzistentní`

`then $D_i := D_i - \{x\}$`

`Deleted := true`

`end if`

`return Deleted`

`end revise`

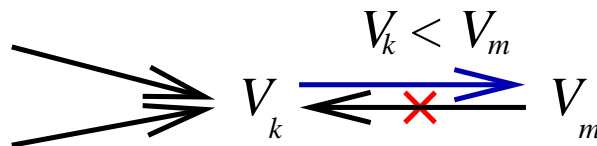
- `domain([V_1, V_2], 2, 4), $V_1 \# < V_2$ revise((1,2)) smaže 4 z D_1, D_2 se nezmění`

Dosažení hranové konzistence problému

- Jak udělat CSP hranově konzistentní?
 - revize je potřeba opakovat, dokud se mění doména nějaké proměnné
 - efektivnější: opakování revizí můžeme dělat pomocí **fronty**
 - přidáváme do ní hrany, jejichž konzistence mohla být narušena zmenšením domény

Dosažení hranové konzistence problému

- Jak udělat CSP hranově konzistentní?
 - revize je potřeba opakovat, dokud se mění doména nějaké proměnné
 - efektivnější: opakování revizí můžeme dělat pomocí **fronty**
 - přidáváme do ní hrany, jejichž konzistence mohla být narušena zmenšením domény
- Jaké hrany přesně revidovat po zmenšení domény?
 - ty, jejichž konzistence může být zmenšením domény proměnné narušena jsou to hrany (i, k) , které vedou do proměnné V_k se zmenšenou doménou



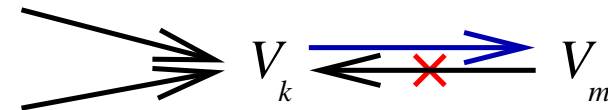
- hranu (m, k) vedoucí z proměnné V_m , která zmenšení domény způsobila, není třeba revidovat (změna se jí nedotkne)

Algoritmus AC-3



```
● procedure AC-3(G)
  Q := {(i,j) | (i,j) ∈ hrany(G), i ≠ j} % seznam hran pro revizi
  while Q non empty do
    vyber a smaž (k,m) z Q
    if revise((k,m)) then % pridani pouze hran, ktere
      Q := Q ∪ {(i,k) ∈ hrany(G), i ≠ k, i ≠ m} % dosud nejsou ve fronte
  end while
end AC-3
```

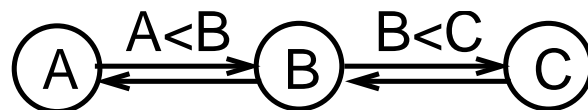
Algoritmus AC-3



```

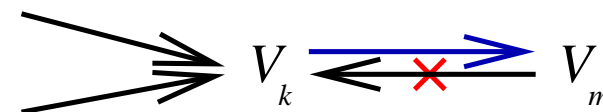
● procedure AC-3(G)
  Q := {(i,j) | (i,j) ∈ hrany(G), i ≠ j}      % seznam hran pro revizi
  while Q non empty do
    vyber a smaž (k,m) z Q
    if revise((k,m)) then                       % pridani pouze hran, ktere
      Q := Q ∪ {(i,k) ∈ hrany(G), i ≠ k, i ≠ m} % dosud nejsou ve fronte
  end while
end AC-3
  
```

● Příklad:



$A < B, B < C: (3..7, 1..5, 1..5) \xrightarrow{AB} (3..4, 1..5, 1..5) \xrightarrow{BA}$
 $(3..4, 4..5, 1..5) \xrightarrow{BC} (3..4, 4, 1..5) \xrightarrow{CB} (3..4, 4, 5)$
 $\xrightarrow{AB} (3, 4, 5)$

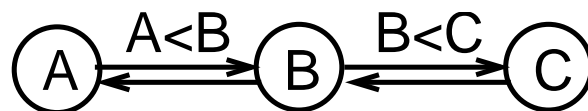
Algoritmus AC-3



```

● procedure AC-3(G)
  Q := {(i,j) | (i,j) ∈ hrany(G), i ≠ j}      % seznam hran pro revizi
  while Q non empty do
    vyber a smaž (k,m) z Q
    if revise((k,m)) then                       % pridani pouze hran, ktere
      Q := Q ∪ {(i,k) ∈ hrany(G), i ≠ k, i ≠ m} % dosud nejsou ve fronte
  end while
end AC-3
  
```

● Příklad:



$A < B, B < C: (3..7, 1..5, 1..5) \xrightarrow{AB} (3..4, 1..5, 1..5) \xrightarrow{BA}$
 $(3..4, 4..5, 1..5) \xrightarrow{BC} (3..4, 4, 1..5) \xrightarrow{CB} (3..4, 4, 5)$
 $\xrightarrow{AB} (3, 4, 5)$

● Technika AC-3 je dnes asi nejpoužívanější, ale stále není optimální

● Jaké budou domény A, B, C po AC-3 pro: $\text{domain}([A, B, C], 1, 10)$, $A \neq B + 1$, $C \# < B$

Je hranová konzistence dostatečná?

- Použitím AC odstraníme mnoho nekompatibilních hodnot
 - Dostaneme potom řešení problému? NE
 - Víme alespoň zda řešení existuje? NE

Je hranová konzistence dostatečná?

- Použitím AC odstraníme mnoho nekompatibilních hodnot
 - Dostaneme potom řešení problému? NE
 - Víme alespoň zda řešení existuje? NE
- $\text{domain}([X, Y, Z], 1, 2), X \neq Y, Y \neq Z, Z \neq X$
 - hranově konzistentní
 - nemá žádné řešení

Je hranová konzistence dostatečná?

● Použitím AC odstraníme mnoho nekompatibilních hodnot

● Dostaneme potom řešení problému?

NE

● Víme alespoň zda řešení existuje?

NE

● $\text{domain}([X, Y, Z], 1, 2), X \neq Y, Y \neq Z, Z \neq X$

● hranově konzistentní

● nemá žádné řešení

● Jaký je tedy význam AC?

● někdy dá řešení přímo

● nějaká doména se vyprázdní \Rightarrow řešení neexistuje

● všechny domény jsou jednoprvkové \Rightarrow máme řešení

● v obecném případě se alespoň zmenší prohledávaný prostor

k-konzistence

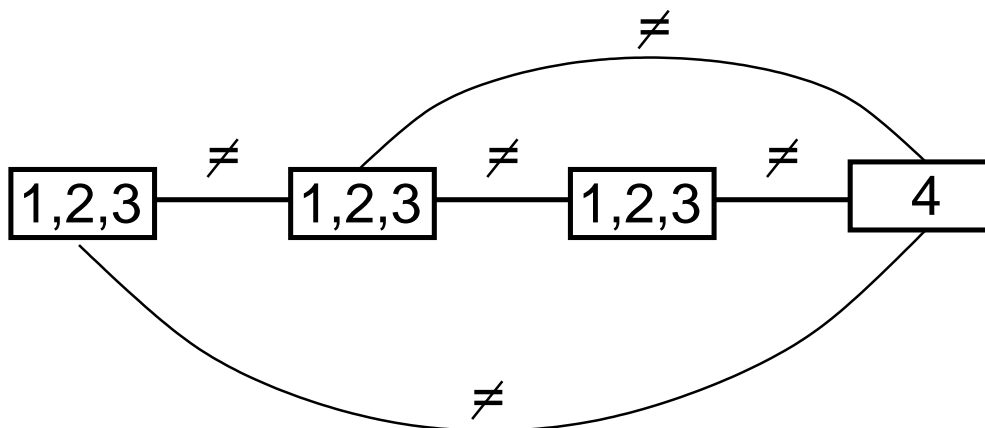
- Mají NC a AC něco společného?
 - NC: konzistence jedné proměnné
 - AC: konzistence dvou proměnných
 - ... můžeme pokračovat

k-konzistence

- Mají NC a AC něco společného?
 - NC: konzistence jedné proměnné
 - AC: konzistence dvou proměnných
 - ... můžeme pokračovat
- CSP je **k-konzistentní** právě tehdy, když můžeme libovolné konzistentní ohodnocení $(k-1)$ různých proměnných rozšířit do libovolné k -té proměnné

k-konzistence

- Mají NC a AC něco společného?
 - NC: konzistence jedné proměnné
 - AC: konzistence dvou proměnných
 - ... můžeme pokračovat
- CSP je **k-konzistentní** právě tehdy, když můžeme libovolné konzistentní ohodnocení $(k-1)$ různých proměnných rozšířit do libovolné k -té proměnné

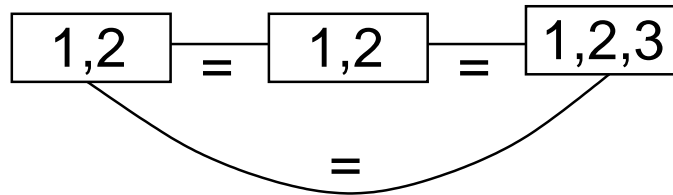


4-konzistentní graf

- Pro obecné CSP, tedy i pro nebinární podmínky

Silná k-konzistence

3-konzistentní graf



není 2-konzistentní

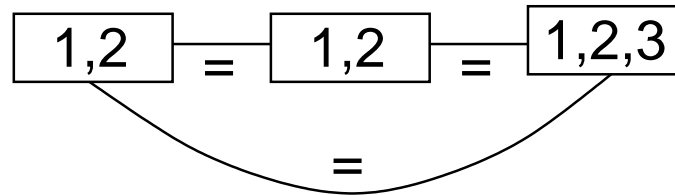
Silná k-konzistence

3-konzistentní graf

(1, 1) lze rozšířit na (1, 1, 1)

(2, 2) lze rozšířit na (2, 2, 2)

(1, 3) ani (2, 3) nejsou konzistentní dvojice (nerozšiřujeme je)



není 2-konzistentní

(3) nelze rozšířit

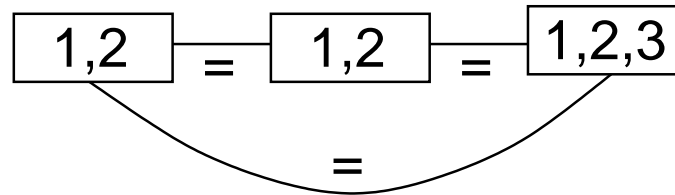
Silná k-konzistence

3-konzistentní graf

(1, 1) lze rozšířit na (1, 1, 1)

(2, 2) lze rozšířit na (2, 2, 2)

(1, 3) ani (2, 3) nejsou konzistentní dvojice (nerozšiřujeme je)



není 2-konzistentní

(3) nelze rozšířit

● CSP je **silně k-konzistentní** právě tehdy, když je j-konzistentní pro každé $j \leq k$

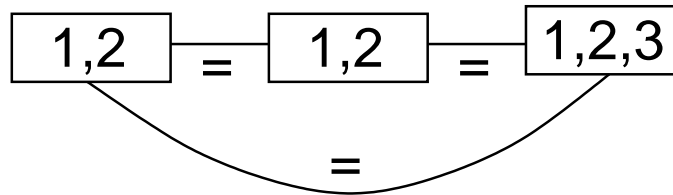
Silná k-konzistence

3-konzistentní graf

(1, 1) lze rozšířit na (1, 1, 1)

(2, 2) lze rozšířit na (2, 2, 2)

(1, 3) ani (2, 3) nejsou konzistentní dvojice (nerozšiřujeme je)



není 2-konzistentní

(3) nelze rozšířit

- CSP je **silně k-konzistentní** právě tehdy, když je j-konzistentní pro každé $j \leq k$
- Silná k-konzistence \Rightarrow k-konzistence
- Silná k-konzistence \Rightarrow j-konzistence $\forall j \leq k$
- k-konzistence $\not\Rightarrow$ silná k-konzistence

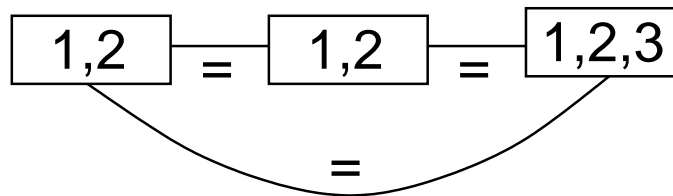
Silná k-konzistence

3-konzistentní graf

(1, 1) lze rozšířit na (1, 1, 1)

(2, 2) lze rozšířit na (2, 2, 2)

(1, 3) ani (2, 3) nejsou konzistentní dvojice (nerozšiřujeme je)



není 2-konzistentní

(3) nelze rozšířit

- CSP je **silně k-konzistentní** právě tehdy, když je j-konzistentní pro každé $j \leq k$
- Silná k-konzistence \Rightarrow k-konzistence
- Silná k-konzistence \Rightarrow j-konzistence $\forall j \leq k$
- k-konzistence $\not\Rightarrow$ silná k-konzistence
- NC = silná 1-konzistence = 1-konzistence
- AC = (silná) 2-konzistence

Konzistence pro nalezení řešení

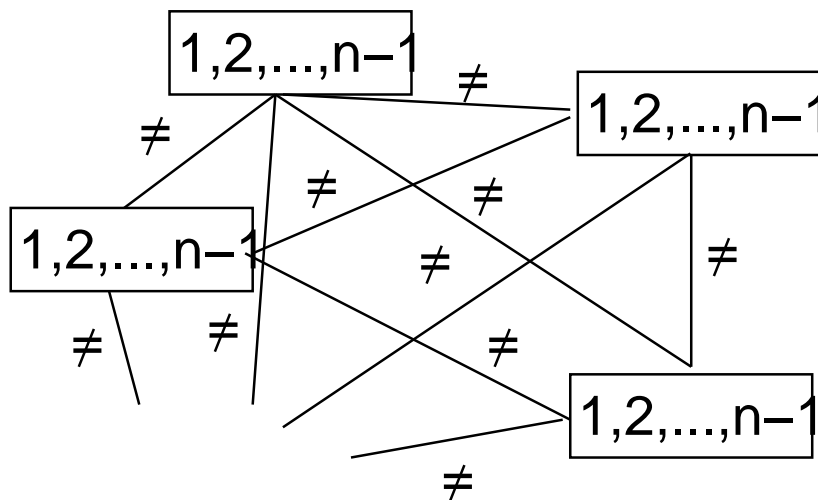
- Máme-li graf s n vrcholy, jak silnou konzistenci potřebujeme, abychom přímo našli řešení?
- silná n -konzistence je nutná pro graf s n vrcholy

Konzistence pro nalezení řešení

- Máme-li graf s n vrcholy, jak silnou konzistenci potřebujeme, abychom přímo našli řešení?
- silná n -konzistence je nutná pro graf s n vrcholy
 - n -konzistence nestačí (viz předchozí příklad)

Konzistence pro nalezení řešení

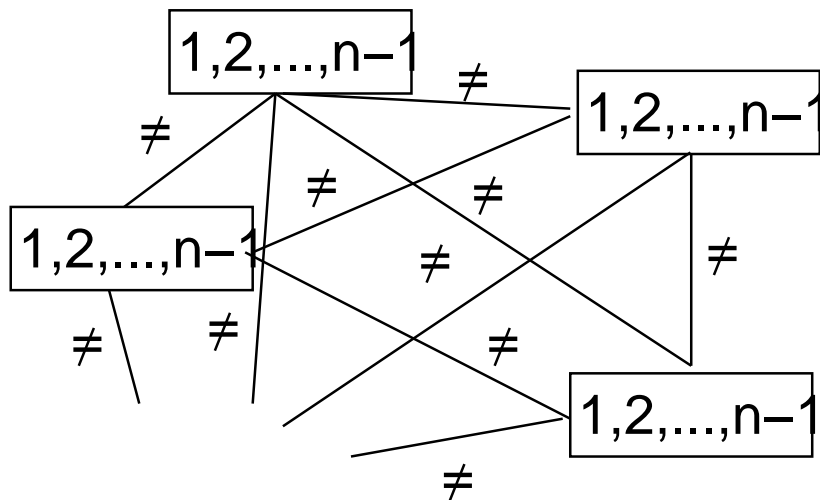
- Máme-li graf s n vrcholy, jak silnou konzistenci potřebujeme, abychom přímo našli řešení?
- silná n -konzistence je nutná pro graf s n vrcholy
 - n -konzistence nestačí (viz předchozí příklad)
 - silná k -konzistence pro $k < n$ také nestačí



graf s n vrcholy
domény $1..(n-1)$

Konzistence pro nalezení řešení

- Máme-li graf s n vrcholy, jak silnou konzistenci potřebujeme, abychom přímo našli řešení?
- silná n -konzistence je nutná pro graf s n vrcholy
 - n -konzistence nestačí (viz předchozí příklad)
 - silná k -konzistence pro $k < n$ také nestačí



graf s n vrcholy
domény $1..(n-1)$

silně k -konzistentní pro každé $k < n$
přesto nemá řešení

Řešení nebinárních podmínek

- k-konzistence má exponenciální složitost, v reálu se nepoužívá
- S n-árními podmínkami se pracuje přímo
- Podmínka je **obecně hranově konzistentní (GAC)**, právě když pro každou proměnnou V_i z této podmínky a každou hodnou $x \in D_i$ existuje ohodnocení zbylých proměnných v podmínce tak, že podmínka platí
 - $A + B \neq C$, $A \in 1..3$, $B \in 2..4$, $C \in 3..7$ je obecně hranově konzistentní

Řešení nebinárních podmínek

- k-konzistence má exponenciální složitost, v reálu se nepoužívá
- S n-árními podmínkami se pracuje přímo
- Podmínka je **obecně hranově konzistentní (GAC)**, právě když pro každou proměnnou V_i z této podmínky a každou hodnou $x \in D_i$ existuje ohodnocení zbylých proměnných v podmínce tak, že podmínka platí
 - $A + B \neq C$, $A \in 1..3$, $B \in 2..4$, $C \in 3..7$ je obecně hranově konzistentní
- Využívá se sémantika podmínek
 - speciální typy konzistence pro globální omezení
 - viz `all_distinct`
 - konzistence mezí
 - propagace pouze při změně nejmenší a největší hodnoty v doméně proměnné
- Pro různé podmínky lze použít různý druh konzistence
 - $A \# < B$: hranová konzistence, konzistence mezí

Konzistenční algoritmus pro nebinární podmínky

- Algoritmus s **frontou proměnných** (někdy též nazýván AC-8)

- opakovaně se provádí revize podmínek, dokud se mění domény

```
procedure Nonbinary-AC-3-with-Variables( $(V, D, C)$ )
```

```
   $Q := V$ 
```

```
  while  $Q$  non empty do
```

```
    vyber a smaž  $V_j \in Q$ 
```

```
    for  $\forall C$  takové, že  $V_j \in scope(C)$  do
```

```
       $W := revise(V_j, C)$ 
```

```
      //  $W$  je množina proměnných jejichž, doména se změnila
```

```
      if  $\exists V_i \in W$  taková, že  $D_i = \emptyset$  then return fail
```

```
       $Q := Q \cup \{W\}$ 
```

```
    end Non-binary-consistency
```

- **rozsah omezení $scope(C)$** : množina proměnných, na nichž je C definováno

Konzistenční algoritmus pro nebinární podmínky

- Algoritmus s **frontou proměnných** (někdy též nazýván AC-8)

- opakovaně se provádí revize podmínek, dokud se mění domény

```
procedure Nonbinary-AC-3-with-Variables(( $V, D, C$ ))
```

```
   $Q := V$ 
```

```
  while  $Q$  non empty do
```

```
    vyber a smaž  $V_j \in Q$ 
```

```
    for  $\forall C$  takové, že  $V_j \in scope(C)$  do
```

```
       $W := revise(V_j, C)$ 
```

```
      //  $W$  je množina proměnných jejichž, doména se změnila
```

```
      if  $\exists V_i \in W$  taková, že  $D_i = \emptyset$  then return fail
```

```
       $Q := Q \cup \{W\}$ 
```

```
    end Non-binary-consistency
```

- **rozsah omezení $scope(C)$** : množina proměnných, na nichž je C definováno

- Implementace: u každé proměnné je seznam **vybraných podmínek** pro propagaci,
REVISE procedury pro tyto podmínky definuje uživatel v závislosti na typu podmínky

Globální podmínky

- Propagace je lokální
 - pracuje se s jednotlivými podmínkami
 - interakce mezi podmínkami je pouze přes domény proměnných
- Jak dosáhnout více, když je silnější propagace drahá?
- Seskupíme několik podmínek do jedné tzv. **globální podmínky**
- Propagaci přes globální podmínku řešíme speciálním algoritmem navrženým pro danou podmínku
- Příklady:
 - `all_different` omezení: hodnoty všech proměnných různé
 - `serialized` omezení:
rozvržení úloh zadaných startovním časem a dobou trvání tak, aby se nepřekrývaly

Propagace pro all_distinct

● $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $\text{dom}(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

● $U = \{X2, X4, X5\}$, $\text{dom}(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro $X1$, $X3$, $X6$

$X1$ in $5..6$, $X3 = 5$, $X6$ in $\{1\} \setminus (5..6)$

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

● $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $\text{dom}(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

X_1 in $5..6$, $X_3 = 5$, X_6 in $\{1\} \setminus (5..6)$

● **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : \text{card}\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

● $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $\text{dom}(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

$X_1 \text{ in } 5..6, X_3 = 5, X_6 \text{ in } \{1\} \ \vee \ (5..6)$

● **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : \text{card}\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

stačí hledat **Hallův interval** I : velikost intervalu I je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v I

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

- $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $dom(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

X_1 in $5..6$, $X_3 = 5$, X_6 in $\{1\} \setminus (5..6)$

- **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : card\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

stačí hledat **Hallův interval** I : velikost intervalu I je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v I

- **Inferenční pravidlo**

- $U = \{X_1, \dots, X_k\}$, $dom(U) = \{D_1 \cup \dots \cup D_k\}$

- $card(U) = card(dom(U)) \Rightarrow \forall v \in dom(U), \forall X \in (V - U), X \neq v$

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

- $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $dom(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

X_1 in $5..6$, $X_3 = 5$, X_6 in $\{1\} \setminus (5..6)$

- **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : card\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

stačí hledat **Hallův interval** I : velikost intervalu I je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v I

- **Inferenční pravidlo**

- $U = \{X_1, \dots, X_k\}$, $dom(U) = \{D_1 \cup \dots \cup D_k\}$

- $card(U) = card(dom(U)) \Rightarrow \forall v \in dom(U), \forall X \in (V - U), X \neq v$

- hodnoty v Hallově intervalu jsou pro ostatní proměnné nedostupné

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

- $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $dom(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

X_1 in $5..6$, $X_3 = 5$, X_6 in $\{1\} \setminus (5..6)$

- **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : card\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

stačí hledat **Hallův interval** I : velikost intervalu I je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v I

- **Inferenční pravidlo**

- $U = \{X_1, \dots, X_k\}$, $dom(U) = \{D_1 \cup \dots \cup D_k\}$

- $card(U) = card(dom(U)) \Rightarrow \forall v \in dom(U), \forall X \in (V - U), X \neq v$

- hodnoty v Hallově intervalu jsou pro ostatní proměnné nedostupné

- **Složitost:** $O(2^n)$ – hledání všech podmnožin množiny n proměnných (naivní)

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

Propagace pro all_distinct

- $U = \{X_2, X_4, X_5\}$, $dom(U) = \{2, 3, 4\}$:

$\{2, 3, 4\}$ nelze pro X_1, X_3, X_6

X_1 in $5..6$, $X_3 = 5$, X_6 in $\{1\} \setminus (5..6)$

- **Konzistence:** $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : card\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$

stačí hledat **Hallův interval** I : velikost intervalu I je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v I

- **Inferenční pravidlo**

- $U = \{X_1, \dots, X_k\}$, $dom(U) = \{D_1 \cup \dots \cup D_k\}$

- $card(U) = card(dom(U)) \Rightarrow \forall v \in dom(U), \forall X \in (V - U), X \neq v$

- hodnoty v Hallově intervalu jsou pro ostatní proměnné nedostupné

- **Složitost:** $O(2^n)$ – hledání všech podmnožin množiny n proměnných (naivní)

$O(n \log n)$ – kontrola hraničních bodů Hallových intervalů (1998)

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6