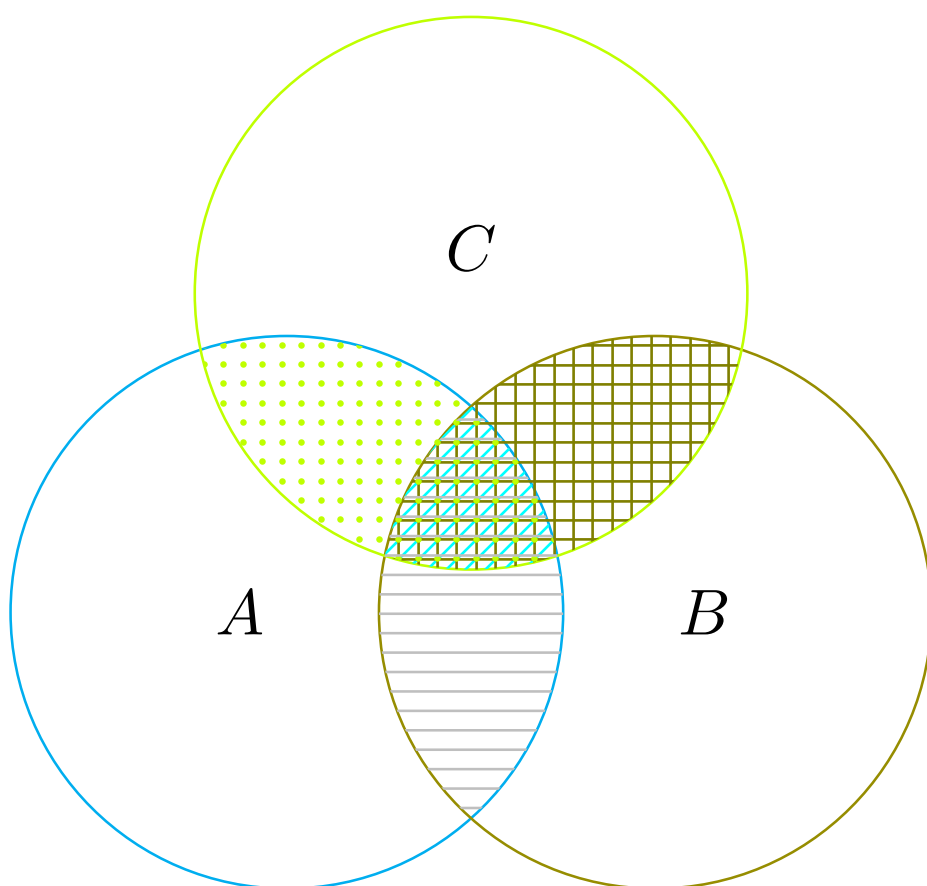


Teorie množin

Tomáš Turek



2. prosince 2023

Poznámka: Následující text jsou moje osobní zápisky z Teorie množin z roku 2021-2022. V textu se můžou vyskytovat jak gramatické chyby, tak i technické chyby (jako ne zcela správný důkaz apod.), tím pádem berte text jako doplněk přednášky.

Obsah

1	Úvod	4
1.1	Jazyk teorie množin	4
1.1.1	Symboly	4
1.1.2	Formule	4
1.1.3	Rozšíření jazyka (zkratky)	4
1.2	Axiomy logiky (“jak se chovají logické symboly”)	4
2	Axiomy teorie množin	6
2.1	1.Axiom existence množin	6
2.2	2.Axiom extenzionality	6
2.3	3.Schéma axiomu vydělení	6
2.3.1	Značení:	6
2.4	4.Axiom dvojice	7
2.5	5.Axiom sumy (axiom of the union)	7
2.6	6.Axiom potence (power set, potenční množina)	8
2.7	7.Schéma axiomu nahrazení	8
2.8	8.Axiom fundovanosti (foundation, regularity)	8
3	Třídy	9
3.1	Rozšíření jazyka:	9
3.2	Atomické proměnné	9
3.3	Eliminace třídivých termů	9
3.4	Třidové operace	10
4	Relace	12
4.1	Značení:	13
4.2	Uspořádání	14
4.2.1	Značení:	15
5	Srovnávání mohutností	17
5.1	Konečné množiny	19
6	Přirozená čísla	23
6.1	9.Axiom nekonečna (“Existuje induktivní množina.”)	23
6.2	Spočetné množiny	26
6.3	Axiom výběru	28
6.3.1	Princip výběru	28
6.3.2	10.Axiom výběru (AC - axiom of choice)	28
6.4	Princip maximality (PM)	29
6.4.1	Princip maximality II (PMS)	29
6.5	Princip trichotomie \preceq (PT)	29
6.6	Princip dobrého uspořádání (VVO)	30

7	Ordinální čísla	31
7.1	"Typy dobře uspořádaných množin."	31
7.1.1	Značení:	32
7.2	Princip transfinitní indukce	33

1. Úvod

1.1 Jazyk teorie množin

Jazyk teorie $x \in Y$. Také se bude používat *metajazyk* jako například: “definovat”, “formule” a “třída”.

1.1.1 Symboly

- Proměnné pro množiny X, Y, Z, x_1, x_2, \dots .
- Binární predikátový (relační) symbol $=$ a taky \in (náležení).
- Dále také logické spojky: $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftarrow$ (\Leftarrow, \Rightarrow).
- Také kvantifikátory: \forall a \exists .
- Samozřejmě i závorky $()$, $[]$.

1.1.2 Formule

Atomické formule $x = y$ a $x \in y$.

1. Jsou-li φ, ψ formule, pak $\neg\varphi, \varphi \vee \psi, \varphi \wedge \psi, \varphi \rightarrow \psi, \varphi \leftrightarrow \psi$ jsou také formule (popřípadě i uzavorkované).
2. Je-li φ formule, pak $(\forall x)\varphi$ a $(\exists x)\varphi$ jsou také formule.

Každá formule pak lze dostat z atomických formulí konečně mnoha pravidly 1 a 2.

1.1.3 Rozšíření jazyka (zkratky)

- $x \neq y$ je pro $\neg(x = y)$.
- $x \notin y$ je pro $\neg(x \in y)$.
- $x \subseteq y$ je pro “ x je podmnožina y ” ($(\forall u)(u \in x \rightarrow u \in y)$).
- $x \subset y$ je pro “ x je vlastní podmnožina” ($x \subseteq y \wedge x \neq y$).

Cvičení: Napište formulí “množina x je prázdná”.

1.2 Axiomy logiky (“jak se chovají logické symboly”)

Axiomy výrokové logiky např.: schéma axiomů: Jsou-li φ, ψ formule, pak

$$\varphi \rightarrow (\psi \rightarrow \varphi)$$

je ****axiom****.

Axiomy predikátové logiky např.: Schéma axiomů: Jsou-li φ, ψ formule, x proměnná, která není volná ve φ , pak

$$(\forall x)(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\varphi \rightarrow (\forall x)\psi)$$

je axiom.

Axiomy pro rovnost:

- x je proměnná, pak $x = x$ je axiom.
- x, y, z jsou proměnné, R je relační symbol, pak

$$(x = y) \rightarrow (\forall z)(R(x, z) \leftrightarrow R(y, z))$$

$$(x = y) \rightarrow (\forall z)(x \in z \leftrightarrow y \in z)$$

$$(x = y) \rightarrow (\forall z)(z \in x \leftrightarrow z \in y)$$

Odvozovací pravidla:

- Z $\varphi, \varphi \rightarrow \psi$ odvod ψ .
- Z φ' odvod $(\forall x)\varphi$.

2. Axiomy teorie množin

“Jak se chová \in .” “Jaké množiny existují.”

Zermelo-Fraenkelova teorie, zkráceně **ZF** má celkem 9 axiomů (resp. 7 axiomů a 2 schémata). Pak je ještě 10. axiom výběru (**AC**) to pak je **ZF+AC=ZFC**.

2.1 1.Axiom existence množin

“Existuje množina.”

$$(\forall x)(x = x)$$

2.2 2.Axiom extenzionality

Udává souvislost mezi \in a $=$. “Množina je určena svými prvky.”

$$(\forall z)(z \in x \leftrightarrow z \in y) \rightarrow x = y$$

Cvičení: Dokažte $((x \subseteq y) \wedge (y \subseteq z)) \rightarrow x \subseteq z$.

2.3 3.Schéma axiomu vydělení

Je-li $\varphi(x)$ formule, která neobsahuje volnou proměnnou z . Pak:

$$(\forall a)(\forall x)(\exists z)(x \in z \leftrightarrow (x \in a \wedge \varphi(x)))$$

je axiom.

“Z množiny a vybereme prvky s vlastností $\varphi(x)$ a ty vytvoří novou množinu z .” Díky axiomu extenzionality je taková z právě jedna.

2.3.1 Značení:

- $\{x; x \in a \wedge \varphi(x)\}$ je zkrácení.
- $\{x \in a; \varphi(x)\}$ "Množina všech prvků a splňující $\varphi(x)$."

Definice 1. • *Průnik:* $a \cap b$ je $\{x, x \in a \wedge x \in b\}$.

- *Rozdíl:* $a \setminus b$ je $\{x, x \in a \wedge x \notin b\}$

Cvičení:

- *Napište formulí “množina a je jednoprvková”.*
- *Dokažte, že množina všech množin neexistuje.*

2.4 4.Axiom dvojice

$$(\forall a)(\forall b)(\exists z)(\forall x)(x \in z \leftrightarrow (x = a \vee x = b))$$

“(Ne)každým dvěma množinám a, b existuje množina z , která má za prvky právě a, b .”

Definice 2. • $\{a, b\}$ je **neuspořádaná dvojice** množin a, b , jakožto dvouprvková množina s prvky a, b (pokud $a \neq b$).

- $\{a\}$ znamená $\{a, a\}$, nebo-li jednoprvková množina s prvkem a .

Příklad. Můžeme vytvořit $\{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \dots$

Cvičení: Dokažte $(\forall z)(x \in z \leftrightarrow y \in z) \rightarrow x = y$.

Definice 3. (a, b) je **uspořádaná dvojice** množin a, b . To je pak množina $\{\{a\}, \{a, b\}\}$

Poznámka. Pro $a = b$ je $(a, b) = \{\{a\}, \{a, a\}\} = \{\{a\}, \{a\}\} = \{\{a\}\}$.

Lemma 1.

$$(x, y) = (u, v) \leftrightarrow (x = u \wedge y = v)$$

Důkaz. • \leftarrow

- $\{x\} = \{u\}$ plyne z axiomu extenzionality.
- $\{x, y\} = \{u, v\}; \{\{x\}, \{x, y\}\} = \{\{u\}, \{u, v\}\}$
- \rightarrow
- $\{\{x\}, \{x, y\}\} = \{\{u\}, \{u, v\}\}$ to pak znamená, že $\{x\} = \{u\} \vee \{x\} = \{u, v\}$ kde v obou případech $x = u$.
- $\{u, v\} = \{x\} \vee \{u, v\} = \{x, y\}$ tedy $v = x \vee v = y$
- Pokud $v = x$ pak z $x = u$ plyne, že $v = u = x$.

□

Definice 4. Jsou-li $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ množiny, definujeme **uspořádanou n -tici** $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$. Následně (a_1) znamená a_1 a je-li definována (a_1, \dots, a_k) pak $(a_1, \dots, a_k, a_{k+1})$ je $((a_1, \dots, a_k), a_{k+1})$.

Lemma 2.

$$(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \leftrightarrow (a_1 = b_1 \wedge \dots \wedge a_n = b_n)$$

Důkaz. Jako cvičení.

□

2.5 5.Axiom sumy (axiom of the union)

$$(\forall a)(\exists z)(\forall x)(x \in z \leftrightarrow (\exists y)(x \in y \wedge y \in a))$$

Definice 5. $\bigcup a$ je **suma** množiny a . Tzn $\{x, (\exists y)(x \in y \wedge y \in a)\}$.

Pozorování: Pokud $a = \{b, c\}$, pak $\bigcup\{b, c\} = \{x, x \in b \vee x \in c\}$.

Definice 6. $b \cup c$ je $\bigcup\{b, c\}$ sjednocení množin b, c .

Definice 7. Jsou-li a_1, \dots, a_n množiny, definujeme **neuspořádanou n -tici** $\{a_1, \dots, a_n\}$ (n -prvkovou množinu, pokud každé a_i je různé) rekurzivně. Je-li definovaná $\{a_1, \dots, a_k\}$ pro $k \geq 2$, pak $\{a_1, \dots, a_k, a_{k+1}\}$ je $\{a_1, \dots, a_k\} \cup \{a_{k+1}\}$.

2.6 6.Axiom potence (power set, potenční množina)

$$(\forall a)(\exists z)(\forall x)(x \in z \leftrightarrow x \subseteq a)$$

“Existuje množina z jejichž prvky jsou právě podmnožiny množiny a .”

Definice 8. $\mathcal{P}(a)$ je “ $\{x; x \subseteq a\}$ ” potenční množina $[2^a]$ množiny a (potence a).

Příklad. $\mathcal{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}$ a $\mathcal{P}(\{\emptyset\}) = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$.

Cvičení: Co je $\mathcal{P}(\cup a)$ a jestli $\cup(\mathcal{P}(a)) = a$?

2.7 7.Schéma axiomu nahrazení

“Obraz množiny funkcí je množina.”

Je-li $\psi(u,v)$ formule, která neobsahuje volné proměnné w, z , pak

$$(\forall u)(\forall v)(\forall w)((\psi(u,v) \wedge \psi(u,w)) \rightarrow v = w) \rightarrow (\forall a)(\forall z)(\forall v)(v \in z \leftrightarrow (\exists u)(u \in a \wedge \psi(u,v)))$$

je axiom.

- “Je-li ψ funkce (částečná) určená formulí: $\psi(u,v)$ je $f(u) = v$, pak obrazem a touto funkcí je opět množina (z) .”
- Také implikuje schéma vydělení: $\varphi(u) \wedge u = v$.
- Poznámka: *transfinitní rekurze, konstrukce $\omega + \omega$, Zornovo lemma, věta o dobrém uspořádání.*

2.8 8.Axiom fundovanosti (foundation, regularity)

$$(\forall a)(a \neq \emptyset \rightarrow (\exists x)(x \in a \wedge x \cap a = \emptyset))$$

“Každá množina má prvek, který je s ní disjunktní.”

Cvičení: Ukažte, že Axiom fundovanosti zakazuje existenci konečných cyklů relace \in . Tedy množiny y takové, že $y \in y$, ale i y_1, y_2, \dots, y_n takové, že $y_1 \in y_2 \in \dots \in y_n \in y_1$.

Díky axiomu fundovanosti lze všechny množiny vygenerovat z prázdné množiny operacemi \mathcal{P}, \cup .

3. Třídý

Definice 9. $\varphi(x)$ je formule a $\{x; \varphi(x)\}$ označuje “seskupení” množin, pro které platí $\varphi(x)$.

- Pokud $\varphi(x)$ je tvaru $x \in a \wedge \psi(x)$, pak je to množina (axiom vydělení).
- $\{x; \varphi(x)\}$ je třídivý term, soubor které označuje je **třída** určená formulí $\varphi(x)$.
- “Definovatelný soubor množin.”
- Je-li y množina, pak $y = \{x; x \in y \wedge x = x\}$ je třída.
- Tedy každá množina je i třída.
- **Vlastní třída** je třída, která není množinou.

3.1 Rozšíření jazyka:

- Ve formulích na místě volných proměnných připustíme třídivé termy.
- Navíc proměnné pro třídy jsou X, Y, \dots (nebude možné je kvantifikovat).

3.2 Atomické proměnné

- $x = y, x \in y, x = X, x \in X, X \in x, X = Y, X \in Y$
- Plus ještě výrazy vzniklé nahrazením $\{x, \varphi(x)\}$ za x a $\{y, \varphi(y)\}$ za y .
- Ostatní formule rozšířeného jazyka vznikají pomocí logických spojek ($\neg, \vee, \wedge, \leftarrow, \rightarrow, \leftrightarrow$) a kvantifikací množinových proměnných ($(\forall x) \dots (\exists y) \dots$).
- Formule s třídivými termy bez třídivých proměnných označován jako “zkrácený zápis” formule základního jazyka.
- Formule s třídivými proměnnými označované jako “schéma formulí” základního (popř. rozšířeného) jazyka.

3.3 Eliminace třídivých termů

x, y, z, X, Y jsou proměnné a $\varphi(x), \psi(x)$ formule základního jazyka. X zastupuje $\{x, \varphi(x)\}$ a Y zastupuje $\{y, \varphi(y)\}$.

1. $z \in X$ zastupuje $z \in \{x, \varphi(x)\}$.
 - “ z je prvkem třídy všech množin, splňující $\varphi(x)$.”
 - Nahradíme: $\varphi(z)$.
2. $z = X$ zastupuje $z = \{x, \varphi(x)\}$.

- “Množina z se rovná třídě X .”
 - Nahradíme: $(\forall u)(u \in z \leftrightarrow \varphi(u))$.
3. $X \in Y$ zastupuje $\{x, \varphi(x)\} \in \{y, \psi(y)\}$.
- Nahradíme: $(\exists u)(\forall v)((v \in u \leftrightarrow \varphi(v)) \wedge \psi(u))$.
4. $X \in y$ zastupuje $\{x, \varphi(x)\} \in y$.
- Nahradíme: $(\exists u)(\forall v)((v \in u \leftrightarrow \varphi(v)) \wedge u \in y)$.
5. $X = Y$ zastupuje $\{x, \varphi(x)\} = \{y, \psi(y)\}$.
- Nahradíme: $(\forall u)(\varphi(u) \leftrightarrow \psi(u))$

Meta pozorování: Formule rozšířeného jazyka určují stejné třídy jako formule základního jazyka. Příklad $\{x; x \notin \{z, \psi(z)\}\} \rightarrow \{x; \neg\psi(x)\}$.

3.4 Třídivé operace

Definice 10. • $A \cap B$ je $\{x, x \in A \wedge x \in B\}$.

- $A \cup B$ je $\{x, x \in A \vee x \in B\}$.
- $A \setminus B$ je $\{x, x \in A \wedge x \notin B\}$.
- Pokud $A = \{x, \varphi(x)\}$ a $B = \{y, \psi(y)\}$, pak $A \cap B = \{z, \varphi(z) \wedge \psi(z)\}$.

Definice 11. $\{x; x = x\}$ je **univerzální třída**, která se značí jako V .

- A je třída, (absolutní) doplněk A je $V \setminus A$, který se značí jako $-A$.
- $A \subseteq B, A \subset B$ značí, že A je podtřídou B (popř. vlastní podtřídou).

Cvičení: Rozepište v základním jazyce teorie množin.

1. $\bigcup A$ nebo-li suma třídy A je $\{x, (\exists a)(a \in A \wedge x = a)\}$
2. $\bigcap A$ nebo-li průnik třídy A je $\{x, (\forall a)(a \in A \rightarrow x = a)\}$
3. $\mathcal{P}(A)$ nebo-li potenciál třídy A je $\{a, a \subseteq A\}$.

$\bigcap \emptyset = V$, protože $\{x, (\forall a)(a \in \emptyset \rightarrow x = a)\}$.

Cvičení: $a \neq \emptyset$, je $\bigcap a$ množina?

Cvičení: Je $\mathcal{P}(V) = V^2$?

Lemma 3. Univerzální třída V není množina.

Důkaz. Cvičení.

□

Lemma 4. Je-li A třída a množina, průnik $A \cap a$ je množina.

Důkaz. Schéma axiomu vydělení $A = \{x, \varphi(x)\}, a \cap A = \{x, x \in a \wedge \varphi(x)\}$.

□

Definice 12. *Kartézský součin tříd* A, B značen $A \times B$ je $\{(a, b), a \in A \wedge b \in B\}$ což je zkrácený zápis pro $\{x, (\exists a)(\exists b)(x = (a, b) \wedge a \in A \wedge b \in B)\}$.

Lemma 5. *Jsou-li a, b množiny pak $a \times b$ je množina.*

Důkaz. • Platí $a \times b \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{P}(a \cup b))$.

- Vpravo je množina axiomu dvojice, sumy, dvakrát potence.
- Pak podle lemma (axiomu vydělení) $A = a \times b, a = \mathcal{P}(\mathcal{P}(a \cup b))$ tedy $a \times b$ je množina.
- Pokud $u \in a, v \in b$, pak $\{u\}, \{u, v\} \subseteq a \cup b$ tedy $\{u\}, \{u, v\} \in \mathcal{P}(a \cup b)$, stejně pak $\{\{u\}, \{u, v\}\} \subseteq \mathcal{P}(a \cup b)$ a $\{\{u\}, \{u, v\}\} \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(a \cup b))$.

□

Definice 13. X je třída, pak $X^1 = X$, induktivně pak $X^n = X^{n-1} \times X$.

X^n je třída všech uspořádaných n -tic prvků X .

Pozorování: $V^n \subseteq V^{n-1} \subseteq \dots \subseteq V^1 = V$

Cvičení: Ukažte, že obecně neplatí $X \times X^2 = X^3$. Například pro $X = \{\emptyset\}$.

4. Relace

Definice 14. • Třída R je (binární) **relace**, pokud $R \subseteq V \times V$.

- xRy zkratka za $(x,y) \in R$.
- n -ární relace je $R \subseteq V^n$.

Příklad. • Relace náležení E je $\{(x,y), x \in y\}$.

- Relace identity Id je $\{(x,y), x = y\}$.

Definice 15. Je-li X relace (libovolná třída), pak:

- $Dom(X)$ je $\{u, (\exists v)(u,v) \in X\}$
- $Rng(X)$ je $\{v, (\exists u)(u,v) \in X\}$
- Je-li Y třída, pak $X \parallel Y (X[Y])$ je $\{z, (\exists y)(y \in Y \wedge (y,z) \in X)\}$.
- Nebo-li obraz třídy Y třídou X .
- $X \upharpoonright Y$ je $\{(y,z), y \in Y \wedge (y,z) \in X\}$.
- Zúžení třídy X na třídu Y . (restrikce, parcelizace)

Lemma 6. Je-li x množina, Y třída, pak $Dom(x), Rng(x), x \upharpoonright Y, x \parallel Y$ jsou množiny.

Důkaz. • Vnoříme do větší množiny.

- Platí $Dom(x) \subseteq \bigcup(\bigcup(x))$.
- Když $u \in Dom(x)$ pak $(\exists v)(u,v) \in x$ a $u \in \{u\} \in (u,v) \in x$. Tedy $\{u\} \in \bigcup(x)$, tedy $u \in \bigcup(\bigcup(x))$.
- Podobně i pro $Rng(x) \subseteq \bigcup(\bigcup(x))$.
- $v \in Rng(x) : (\exists u)(u,v) \in x$
- $v \in \{u,v\} \in (u,v) \in x$ tedy $v \in \bigcup(\bigcup(x))$.
- Pak už jenom $x \upharpoonright Y \subseteq x; x \parallel Y \subseteq Rng(x)$

□

Definice 16. • R, S jsou relace. Pak R^{-1} je $\{(u,v), (v,u) \in R\}$.

- Nebo-li relace **inverzní** k R .
- $R \circ S$ je $\{(u,v); (\exists w)((u,w) \in R \wedge (w,v) \in S)\}$.
- Nebo-li složení relací R a S .

Poznámka. $(f \circ g)(x) = g(f(x))$

Cvičení

- Ověřte, že pro libovolnou relaci R je $Id \circ R = R = R \circ Id$.
- $(x, y) \in E \circ E \leftrightarrow x \in \bigcup y$

Definice 17. Relace F je **zobrazení (funkce)** pokud:

$$(\forall u)(\forall v)(\forall w)((u, v) \in F \wedge (u, w) \in F \rightarrow v = w)$$

“Pro každé $v \in Dom(F)$ existuje právě jedna množina u taková, že $(u, v) \in F$.” Píšeme $F(u) = v$.

Definice 18. • F je zobrazení třídy X **do** třídy Y ; $F : X \rightarrow Y$, pokud $Dom(F) = X$ a $Rng(F) \subseteq Y$.

- F je zobrazení třídy X **na** třídu Y ; pokud navíc platí $Rng(F) = Y$.
- F je **prosté** zobrazení pokud F^{-1} je zobrazení.
- Pokud $(\forall v)(\forall u)(\forall w)((F(u) = w \wedge F(v) = w) \rightarrow u = v)$.
- “Každý prvek $Rng(F)$ má právě jeden vzor.”

Pozorování: Pokud F je prosté zobrazení, pak F^{-1} je také prosté zobrazení.

Definice 19. A je třída, φ je formule pak:

- $(\exists x \in A)\varphi$ je zkratka za $(\exists x)(x \in A \wedge \varphi)$.
- $(\forall x \in A)\varphi$ je zkratka za $(\forall x)(x \in A \rightarrow \varphi)$.

4.1 Značení:

Obraz / vzor třídy X zobrazením F .

- $F[X]$ místo $F \parallel X : F[X] = \{y, (\exists x \in X)y = F(x)\}$
- $F^{-1}[X]$ místo $F^{-1} \parallel X : F^{-1}[X] = \{y, (\exists x \in X)x = F(y)\}$

Definice 20. A je třída, a je množina, pak ${}^a A$ je $\{f; f : a \rightarrow A\}$, třída všech zobrazení z a do A .

Poznámka. • Z axiomu nahrazení $Rng(f)$ je množina, $f \subseteq a \times Rng(f)$, tedy f je množina.

- Nelze definovat ${}^B A$ pokud B je vlastní třída a $A \neq \emptyset$, protože je-li $Dom(f)$ vlastní třída, pak je i f .
- ${}^\emptyset A = \{\emptyset\}$
- ${}^x \emptyset = \emptyset$

Lemma 7. 1. Pro libovolné množiny x, y je ${}^x y$ množina.

2. Je-li $x \neq \emptyset, Y$ je vlastní třída, pak ${}^x Y$ je vlastní třída.

- Důkaz.* 1. Pokud $f : x \rightarrow y$, pak $f \subseteq x \times y$, tedy $f \in \mathcal{P}(x \times y)$. Tedy ${}^x y \subseteq \mathcal{P}(x \times y)$.
2. Pro $y \in Y$ definujeme konstantní zobrazení $K_y : x \rightarrow Y$ tak, že $(\forall u \in x)(K_y(u) = y)$.
 $K_y = x \times y$, protože $x \neq \emptyset$, pro $y \neq y'$ platí $K_y \neq K_{y'}$. $K = \{K_y, y \in Y\}$ máme
 $K \subseteq {}^x Y$.
- Teď sporem: Pokud ${}^x Y$ je množina, pak K je množina. Definujeme $F : K \rightarrow Y$ jako $F(K_y) = y$. Z axiomu nahrazení Y je množina a to je spor.

□

4.2 Uspořádání

Definice 21. *Relace $R(\subseteq V \times V)$ je na třídě A :*

Reflexivní:

$$(\forall x \in A)((x, x) \in R)$$

Antireflexivní:

$$(\forall x \in A)((x, x) \notin R)$$

Symetrická:

$$(\forall x, y \in A)((x, y) \in R \leftrightarrow (y, x) \in R)$$

Slabě antisymetrická:

$$(\forall x, y \in A)((x, y) \in R \wedge (y, x) \in R \rightarrow y = x)$$

Antisymetrická

$$(\forall x \in A)(\forall y \in A)(xRy \rightarrow \neg(yRx))$$

Trichotomická:

$$(\forall x \in A)(\forall y \in A)(xRy \vee yRx \vee x = y)$$

Tranzitivní:

$$(\forall x, y, z \in A)((xRy \wedge yRz) \rightarrow xRz)$$

Pozorování: Tyto vlastnosti jsou **dědičné**, to znamená, že platí na každé podtřídě $B \subseteq A$.

Definice 22. • *Relace R je **uspořádání na třídě A** , pokud R je reflexivní, slabě antisymetrická a tranzitivní.*

- $x, y \in A$ jsou **porovnatelné (srovnatelné)** relací R pokud $xRy \vee yRx$.

4.2.1 Značení:

$x \leq_R y$ znamená xRy , neboli " x je menší nebo rovno y vzhledem k R ."

Definice 23. • Uspořádání R je **lineární** pokud R je trichotomické.

- R' je **ostré** uspořádání pokud je tvaru $R \setminus Id$ (je antireflexivní, antisymetrická a tranzitivní).
- $x <_R y$ značí $xR'y$

Cvičení: Doplňte tabulku ANO/NE.

Relace	Uspořádání?	Ostré?
E		
Id		

Definice 24. Nechť R je uspořádání na třídě A a nechť $X \subseteq A$. Řekněme, že $a \in A$ je (vzhledem k R a A):

- **Majorita (horní mez)** třídy X , pokud $(\forall x \in X)(x \leq_R a)$.
- **Minoranta (dolní mez)** třídy X , pokud $(\forall x \in X)(a \leq_R x)$.
- **Maximální prvek** třídy X , pokud $a \in X \wedge (\forall x \in X)(\neg(a <_R x))$.
- **Minimální prvek** třídy X , pokud $a \in X \wedge (\forall x \in X)(\neg(x <_R a))$.
- **Největší prvek** třídy X , pokud $a \in X$ a a je majoranta X .
- **Největší prvek** třídy X , pokud $a \in X$ a a je minoranta X .
- **Supremum** třídy X , pokud a je nejmenší prvek třídy všech majorant X .
- **Infimum** třídy X , pokud a je největší prvek třídy všech minorant X .

Pozorování: Největší implikuje maximální, pokud R je lineární, tak platí i opačná implikace. Také největší a supremum je vždy nejvýše 1. Lze značit jako $a = \max_R(X)$ a $a = \sup_R(X)$.

Definice 25. • X je **shora omezená**, pokud existuje majoranta X v A .

- X je **zdola omezená**, pokud existuje minoranta X v A .
- X je **dolní množina**, pokud $(\forall x \in X)(\forall y \in A)(y \leq_R x \rightarrow y \in X)$.
- Analogicky i horní množina.
- $x \in A$, pak $|\leftarrow, x]$ je $\{y, y \in A \wedge y \leq_R x\}$. Nebo-li horní ideál omezená x .

Pozorování: R uspořádání na A , pak pro libovolné $x, y \in A$ platí $x \leq_R y \leftrightarrow |\leftarrow, x] \subseteq |\leftarrow, y]$.

Poznámka. • Konstrukce \mathbb{R} z \mathbb{Q} : **Dedekindovy řezy**.

- $X \subseteq \mathbb{Q}$, X je dolní množina (vzhledem k \subseteq) a navíc existuje-li $\sup X$, pak $\sup X \in X$.

Definice 26. Uspořádání R na třídě A je **dobré**, pokud každá neprázdná podmnožina $A : (u \subseteq A)$ má nejmenší prvek vzhledem k R .

Cvičení: Napsat definice pomocí logických formulí.

Pozorování: “Dobré” je dědičná vlastnost. Dobré implikuje lineární.

Cvičení: Najděte nějaké množiny, na nichž je E dobré ostré uspořádání.

Definice 27. Ekvivalence je pokud je reflexivní, symetrická a tranzitivní.

5. Srovnávání mohutností

Definice 28. • Množiny x, y mají **stejnou mohutnost** (psáno $x \approx y$) pokud existuje prosté zobrazení x na y (nebo-li bijekce). Někdy označováno jako x je ekvivalentní y .

- Množina x má **mohutnost menší nebo rovnou** mohutnosti y (psáno $x \preceq y$) pokud existuje prosté zobrazení x do y . Někdy označováno jako x je subvalentní y .
- x má **menší mohutnost** než y (psáno $x \prec y$) pokud platí $x \preceq y \wedge \neg(x \approx y)$.

Pozorování: $x \subseteq y \rightarrow x \preceq y$ (identita), $x \subset y \rightarrow x \preceq y$ (ne $x \prec y$, například $\mathbb{N} \approx \mathbb{N} \setminus \{1\}$).

Poznámka. To jestli \preceq je trichotomická v ****ZF**** nelze rozhodnout. Přidám axiomu výběru už ale ano.

Lemma 8. Jsou-li x, y, z množiny, potom:

1. $x \approx x$
2. $x \approx y \rightarrow y \approx x$
3. $((x \approx y) \wedge (y \approx z)) \rightarrow x \approx z$, tedy \approx je ekvivalence.
4. $x \preceq x$
5. $x \preceq y \wedge y \preceq z \rightarrow x \preceq z$

Důkaz. Prakticky jen triviální, stačí najít dané zobrazení.

- Id
- $F \rightarrow F^{-1}$
- $F \wedge G \rightarrow F \circ G$
- Id
- $F \wedge G \rightarrow F \circ G$

□

Pozorování: $x \approx y \rightarrow (x \preceq y \wedge y \preceq x)$

Theorem 1 (Cantor-Bernstein).

$$(x \preceq y \wedge y \preceq x) \rightarrow x \approx y$$

Důkaz. Důkaz se provede pomocí grafů. Také bude potřeba dodatečné lemma, které bude později. Jako graf si představíme bipartitní, kde jedna partita je x a druhá y . Následně přidáme orientované hrany jakožto funkce f a g , kde $f : x \rightarrow y, g : y \rightarrow x$ jsou prosté zobrazení. Teď se podíváme na komponenty grafu.

1. Buď může být kružnice sudé délky.
2. Nebo cesta s počátkem.
3. Anebo cesty obousměrné.

Nyní uvažme “indukovaná” zobrazení: $(\hat{f}) : \mathcal{P}(x) \rightarrow \mathcal{P}(y)$. Tahle funkce je monotónní vzhledem k inkluzi. Definujeme $H : \mathcal{P}(x) \rightarrow \mathcal{P}(x)$ takto: Pro $u \subseteq x$ nechť $H(u) = x - g[y - f[u]]$. H je monotónní vzhledem k inkluzi. $u_1 \subseteq u_2 \Rightarrow f[u_1] \subseteq f[u_2] \Rightarrow y - f[u_1] \supseteq y - f[u_2] \Rightarrow g[y - f[u_1]] \supseteq g[y - f[u_2]] \Rightarrow H(u_1) \subseteq H(u_2)$. Podle lemma o pevném bodě $(\exists c)(H(c) = c)$, tedy $x - g[y - f[c]] = c \Rightarrow x - c = g[y - f[c]]$. Tedy g^{-1} je prosté zobrazení $x \setminus c$ na $y \setminus f[c]$. Stačí definovat $h : x \rightarrow y$ jako:

$$h(u) = \begin{cases} f(u) & \text{pokud } u = c \\ g^{-1}(u) & \text{jinak} \end{cases}$$

h je prosté zobrazení x na y . □

Definice 29. Zobrazení $H : \mathcal{P}(x) \rightarrow \mathcal{P}(x)$ je **monotónní** (vzhledem k inkluzi) pokud pro každé dvě množiny $u, v \subseteq x$ platí $u \subseteq v \rightarrow H(u) \subseteq H(v)$.

Lemma 9. Je-li $H : \mathcal{P}(x) \rightarrow \mathcal{P}(x)$ zobrazení monotónní vzhledem k inkluzi, pak existuje podmnožina $c \subseteq x$ taková, že $H(c) = c$. Též označován jako **pevný bod**.

Důkaz. $A = \{u, u \subseteq x \wedge u \subseteq H(u)\}$, $c = \bigcup A$ neboli supremum. $u \in A$ pak dostanu dvě možnosti:

1. $u \subseteq c$
2. $u \subseteq H(u) \subseteq H(c)$ (díky tomu, že H je monotónní)

Z toho pak plyne, že $H(c)$ je majoranta a tedy $c \subseteq H(c)$. Pak z monotonie platí $H(c) \subseteq H(H(c))$, tedy $H(c) \in A$, takže $H(c) \subseteq c$, nebo-li c je majoranta. Z obou inkluzí pak plyne, že $c = H(c)$. □

Cvičení: Ilustrace monotónní funkce $h : [0,1] \rightarrow [0,1]$.

Cvičení: $A \subseteq \mathcal{P}(x)$ a uspořádání \subseteq , pak $\sup_{\subseteq} A = \bigcup A$ a $\inf_{\subseteq} A = \bigcap A$.

Příklad. • $\omega = \mathbb{N}_0$ pak $\omega \approx \omega \times \omega$

- $f : \omega \rightarrow \omega \times \omega$ jako $f(n) = (0, n)$
- $g : \omega \times \omega \rightarrow \omega$ jako $g((m, n)) = 2^m 3^n$
- Podle Věty platí $\omega \approx \omega \times \omega$. item $h : \omega \rightarrow \omega \times \omega$ jako $h((m, n)) = 2^m(2n + 1) - 1$

Cvičení: Ověřte, že g je prosté a h je bijekce.

Cvičení: $\mathbb{N} \approx \mathbb{Q}$

Cvičení: $[0,1] \approx [0,1] \times [0,1]$

Lemma 10. Nechť x, y, z, x_1, y_1 jsou množiny, pak:

1. $x \times y \approx y \times x$
2. $x \times (y \times z) \approx (x \times y) \times z$

3. $(x \approx x_1 \wedge y \approx y_1) \rightarrow (x \times y \approx x_1 \times y_1)$
4. $x \approx y \rightarrow \mathcal{P}(x) \approx \mathcal{P}(y)$
5. $\mathcal{P}(X) \approx^x 2$, kde $2 = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$

Důkaz. Vždy jde o to najít vhodné funkce.

1. $(u, v) \rightarrow (v, u)$
2. $(u, (b, c)) \rightarrow ((u, b), c)$
3. $f : x \rightarrow x_1, g : y \rightarrow y_1 : (a, b) \rightarrow (f(a), g(b))$
4. $f : x \rightarrow y, u \rightarrow f[u]$ (izomorfismus vzhledem k inkluzi)
5. Pro $u \subseteq x$ definujeme charakteristickou funkci $\chi_a : x \rightarrow 2$, kde;

$$\chi_a(v) = \begin{cases} 1 & v \in a \\ 0 & v \notin a \end{cases}$$

Zobrazení $\{(a, \chi_a); a \subseteq x\}$ je prosté a zobrazuje $\mathcal{P}(x)$ na 2^x . □

5.1 Konečné množiny

Definice 30 (Tarski). *Množina x je **konečná**, označíme $Fin(x)$, pokud každá neprázdная podmnožina $\mathcal{P}(x)$ má **maximální** prvek vzhledem k inkluzi.*

Cvičení: Napište definici pomocí formule.

Pozorování: x je konečná právě tehdy, když každá neprázdная podmnožina $\mathcal{P}(x)$ má minimální prvek vzhledem k inkluzi.

Důkaz. Uvažme $d : \mathcal{P}(x) \rightarrow \mathcal{P}(x)$ jako $d(u) = x \setminus u$. $u \subseteq v \Leftrightarrow d(u) \supseteq d(v)$ □

Definice 31. *Množina a je **Dedekindovsky konečná** pokud má větší mohutnost než každá vlastní podmnožina $b \subset a$. (Nebo-li neexistuje prosté zobrazení a na b .)*

Lemma 11. *Je-li množina a konečná tak je i Dedekindovsky konečná.*

Důkaz. Nutno dokázat, že pokud $b \subset a$ pak $b \preceq a$. Sporem: $b \approx a$. Necht $y = \{b, b \subset a \wedge b \approx a\}$, $y \neq \emptyset$, $y \in \mathcal{P}(a)$. Necht $c \in y$ je minimální prvek y vzhledem k \subseteq . Necht $f : a \rightarrow a$ je prosté zobrazení a na c . $d = f[c]$. $f \upharpoonright c$ je prosté zobrazení c na d . Tedy $c \approx d$, tedy $d \in y$. $d \subseteq c : (\exists x)(x \in a \setminus c)$ pak $f(x) \in c \setminus d$. Spor s minimalitou volby c . □

Poznámka. Opačná implikace v **ZF** není dokazatelná.

- Existuje lineární uspořádání \leq , které je dobré, pak i \geq je dobré.
- Existuje lineární uspořádání a každá 2 lineární uspořádání jsou izomorfní.
- x je konečná $\Leftrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}(x))$ je dedekindovsky konečná.

Theorem 2. 1. *Je-li a konečná uspořádaná množina (relací \leq) pak každá její neprázdная podmnožina $b \subseteq a$ má maximální prvek.*

2. Každé lineární uspořádání na konečné množině je dobré.

Důkaz. 1. Pro každé $x \in a$ uvažme $|\leftarrow, x] = \{y, y \in a \wedge y \leq x\}$.

- $u = \{|\leftarrow, x], x \in b\}, u \subseteq \mathcal{P}(a), u \neq \emptyset$
- Z konečnosti a existuje $m \in b$ takové, že $|\leftarrow, m]$ je maximální prvek vzhledem k \subseteq .
- $x \leq y \Leftrightarrow |\leftarrow, x] < |\leftarrow, y]$
- Tedy m je maximální prvek b vzhledem k \subseteq .
- Minimální prvek se najde podobně, akorát to bude horní množina a minimální prvek.

2. Minimální prvek v lineárním uspořádání je už nejmenší. □

Definice 32. F je zobrazení A_1 do A_2 , R_1, R_2 jsou relace. F je **izomorfismus** tříd A_1, A_2 vzhledem k R_1, R_2 pokud F je prosté zobrazení A_1 na A_2 a $(\forall x \in A_1)(\forall y \in A_2)(x, y) \in R_1 \Leftrightarrow (F(x), F(y)) \in R_2$.

Definice 33. A je množina uspořádaná relací R . B je množina uspořádaná relací S . Zobrazení F je **počáteční vnoření** A do B , pokud $A_1 = \text{Dom}(F)$ je dolní podmnožina A a $B_1 = \text{Rng}(F)$ je dolní podmnožina B . A F je izomorfismus A_1 a B_1 vzhledem k R, S .

Lemma 12. Necht F, G jsou počáteční vnoření dobře uspořádané množiny A do dobře uspořádané množiny B . Potom $F \subseteq G$ nebo $G \subseteq F$.

Důkaz. Necht R je dobré uspořádání množiny A . Necht S je dobré uspořádání množiny B . $\text{Dom}(F), \text{Dom}(G)$ jsou dolní podmnožiny A . R je lineární, tedy $\text{Dom}(F) \leq \text{Dom}(G) \vee \text{Dom}(G) \leq \text{Dom}(F)$. (BÚNO: $\text{Dom}(F) \leq \text{Dom}(G)$, jinak přejmenuji množiny). Dokážeme $(\forall x \in \text{Dom}(F)) F(x) = G(x)$. Sporem Necht x je nejmenší (vzhledem k R) prvek množiny $\{z, z \in A \wedge G(z) \neq F(z)\}$. Tedy $\forall y <_R x : F(y) = G(y)$. Z linearit S je $F(x) <_S G(x) \vee G(x) <_S F(x)$ (BÚNO: $F(x) <_S G(x)$). Necht $b = F(x)$. Je-li $z \in \text{Dom}(G)$ pak buď: $z <_R x \wedge G(z) = F(z)$, $z \geq_R x \wedge F(x) = b$. Pak $G(z) \geq_S G(x) >_S F(x) = b$. V obou případech $b \notin \text{Rng}(G)$ a tedy $\text{Rng}(G)$ není dolní množina a to je spor. □

Cvičení: Lineární uspořádání jsou každé dvě dolní množiny porovnatelné inkluzí.

Cvičení: Co když místo dobrého uspořádání bude jen lineární uspořádání.

Theorem 3 (O porovnávání dobrých uspořádání.). A je množina dobře uspořádaná relací R . B je množina dobře uspořádaná relací S . Pak existuje právě jedno zobrazení F , které je izomorfismus A a dolní množiny B , nebo B a dolní množiny A .

Důkaz. P je množina všech počátečních vnoření A do B . Necht $F = \bigcup P$. F je zobrazení: Když $(x, y_1)(x, y_2) \in F$ existuje počáteční vnoření F_1, F_2 , že $(x, y_1) \in F_1, (x, y_2) \in F_2$. Podle lemma $F_1 \subseteq F_2$ nebo naopak. Předpokládejme, že nastala tato situace. Tedy $(x, y_1) \in F_2$; F_2 je zobrazení, tedy $y_1 = y_2$. F je počáteční vnoření: Když $x_1 <_R x_2 \in \text{Dom}(F)$ tak existuje počáteční vnoření F' že $x_2 \in \text{Dom}(F')$. Tedy $x_1 \in \text{Dom}(F') \subseteq \text{Dom}(F)$. Podobně pro $\text{Rng}(F) = \bigcup \text{Rng}(F')$ je dolní. $F(x_1) = F'(x_1) <_S F'(x_2) = F(x_2)$, $\text{Dom}(F) = A \vee \text{Rng}(F) = B$. Sporem: $A \setminus \text{Dom}(F), B \setminus \text{Rng}(F)$ jsou neprázdné, mající nejmenší prvky a, b . Definujeme $F' = F \cup \{(a, b)\}$ je počáteční vnoření $F' \in P, F' \subseteq F$ a to je spor. □

Cvičení: Jednoznačnost F .

Cvičení: Sjednocení dolních množin je dolní množina.

Theorem 4. *a je konečná množina, pak každé lineární uspořádání na a jsou izomorfní.*

Důkaz. R, S jsou dvě lineární uspořádání a také dobrá uspořádání. (a, R) je izomorfní dolní množině (a, S) nebo dolní množina (a, R) je izomorfní (a, S) . Dolní množina $b, b \approx a$, z Dedekindovy konečnosti platí, že $a = b$. \square

Lemma 13 (Zachovávání konečnosti.). 1. $(Fin(x) \wedge y \subseteq x) \rightarrow Fin(y)$

2. $(Fin(x) \wedge y \approx x) \rightarrow Fin(y)$

3. $(Fin(x) \wedge y \preceq x) \rightarrow Fin(y)$

Důkaz. 1. $w \subseteq \mathcal{P}(y) \subseteq \mathcal{P}(x)$

2. $\mathcal{P}(y)$ je izomorfní $\mathcal{P}(x)$

3. Plyne z 1 a 2. \square

Lemma 14 (sjednocení konečných množin). 1. $Fin(x) \wedge Fin(y) \rightarrow Fin(x \cup y)$

2. $Fin(x) \rightarrow (\forall y) Fin(x \cup \{y\})$

Důkaz. $w \subseteq \mathcal{P}(x \cup y)$ neprázdná. $w_1 = \{u, (\exists t \in w)(u = t \cap x)\} \subseteq \mathcal{P}(x)$. Má maximální prvek v_1 . $w_2 = \{u, (\exists t \in w)(t \cap x = v_1 \wedge t \cap y = u)\} \subseteq \mathcal{P}(y)$. Má maximální prvek v_2 . $v_1 \cup v_2$ je maximální prvek w . \square

Definice 34. *Třída všech konečných množin $Fin = \{x, Fin(x)\}$.*

Theorem 5 (Princip indukce pro konečné množiny). *Je-li X třída, pro kterou platí:*

1. $\emptyset \in X$,

2. $x \in X \rightarrow (\forall y)(x \cup \{y\} \in X)$, *pak $Fin \subseteq X$.*

Důkaz. Sporem: Pokud $x \in Fin \setminus X$. nechť $w = \{v, v \subseteq x \wedge v \in X\}$. Podle 1: $\emptyset \in w$. $w \subseteq \mathcal{P}(x)$, neprázdná. w má maximální prvek v_0 . $v_0 \subseteq x$. $v_0 \in X$, tedy $v_0 \neq x$ a $v_0 \subset X$. Tedy existuje $y \in x \setminus v_0$. Nechť $v_1 = v_0 \cup \{y\}$. Podle 2: $v_1 \in X$. Tedy $v_1 \in w$, spor s maximalitou v_0 . \square

Lemma 15. $Fin(x) \rightarrow Fin(\mathcal{P}(x))$

Důkaz. Indukcí: Nechť $X = \{x, Fin(\mathcal{P}(x))\}$. $\emptyset \in X$, protože $\mathcal{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}$ je konečná. Nechť $x \in X, y$ je množina. Chceme aby $x \cup \{y\} \in X$. BÚNO: $y \notin x$ (jinak triviální). Rozdělíme $\mathcal{P}(x \cup \{y\})$ na dvě části: $\mathcal{P}(x \cup \{y\}) = \mathcal{P}(x) \cup (\mathcal{P}(x \cup \{y\}) \setminus \mathcal{P}(x))$. Platí $\mathcal{P}(x) \approx z$, kde z se rovná předchozímu druhému prvku v sjednocení. Pro $u \in \mathcal{P}(x)$ definujeme $f(u) = u \cup \{y\}$. f je prosté zobrazení $\mathcal{P}(x)$ na z . Podle předpokladu $Fin(\mathcal{P}(x))$. Podle lemma $Fin(z)$. Podle lemma o sjednocení $Fin(\mathcal{P}(x) \cup z)$. Podle principu indukce $Fin \subseteq X$. \square

Důsledek. $Fin(x) \cap Fin(y) \rightarrow Fin(x \times y)$

Důkaz. Nechť $z = x \cup y$, víme $Fin(z)$. $x \times y \subseteq z \times z \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{P}(z))$. \square

Lemma 16 (sjednocení konečně mnoha konečných množin je konečná množina). *Je-li $Fin(a)$ a $(\forall b \in a)Fin(b)$, pak $Fin(\bigcup a)$.*

Důkaz. Indukcí: $X = \{x, x \subseteq Fin \rightarrow Fin(\bigcup x)\}$.

1. $\emptyset \in X$, protože $\bigcup \emptyset = \emptyset$.
2. Necht $x \in X, y$ množina. Chceme aby $x \cup \{y\} \in X$.

Předpokládejme, že $x \cup \{y\} \subseteq Fin$. Speciálně $x \subseteq Fin$. $\bigcup(x \cup \{y\}) = \bigcup x \cup y$. Obě dvě jsou konečné a sjednocení tím pádem je také konečné. Tedy $x \cup \{y\} \in X$. Podle principu indukce $Fin \subseteq X$. \square

Důsledek (Dirichletův princip pro konečné množiny). Je-li nekonečná množina sjednocení konečně mnoha množin, pak jedna z nich musí být nekonečná.

Lemma 17 (Každá konečná množina je srovnatelná se všemi množinami). $Fin(x) \rightarrow (\forall y)(y \preceq x \vee x \preceq y)$

Důkaz. Indukcí: $x = \{x, (\forall y)(y \preceq x \vee x \preceq y)\}$.

1. $\emptyset \in X$, protože $(\forall y)\emptyset \subseteq y$ tedy $\emptyset \preceq y$.
2. Necht $x \in X, u$ je množina. BÚNO: $u \notin X$. Chceme $x \cup \{u\} \in X$, necht X je množina.

Když $y \preceq x$, pak $x \preceq x \cup \{u\}$ z tranzitivity $y \preceq x \cup \{u\}$. Necht $x \prec y$. g je prosté zobrazení x do y . Necht $v \in X \setminus Rng(g)$. Definujeme $h = g \cup \{(u, v)\}$, h je prosté zobrazení $x \cup \{u\}$ do y . Tedy $x \cup \{u\} \preceq y$. Z principu indukce $Fin \subseteq X$. \square

Cvičení: $Fin(x)$ a $f : x \rightarrow y$, pak $Rng(f) \preceq x$ (pomocí indukce).

Cvičení: $(\forall x)Fin(x)$ lze dobře uspořádat (indukcí).

6. Přirozená čísla

Definice 35 (von Neumann). $0 = \emptyset; 1 = \{0\} = \{\emptyset\}; 2 = \{0, 1\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}; 3 = \{0, 1, 2\} = \dots$, *Myšlenka*: “Přirozené číslo je množina všech menších přirozených čísel.”

Definice 36. w je **induktivní množina**, pokud $\emptyset \in w \wedge (\forall v \in w)(v \cup \{v\} \in w)$.

6.1 9.Axiom nekonečna (“Existuje induktivní množina.”)

$$(\exists z)(0 \in z \wedge (\forall x)(x \in z \rightarrow x \cup \{x\} \in z))$$

Definice 37. *Množina všech přirozených čísel* ω je $\cap\{w, w \text{ je induktivní množina}\}$.

Lemma 18. ω je nejmenší induktivní množina.

Důkaz. $0 \in \omega$, $x \in \omega$, x patří do každé induktivní množiny. $x \cup \{x\}$ patří do každé induktivní množiny. $x \cup \{x\} \in \omega$. \square

Prvky ω jsou **přirozená čísla** v teorii množin.

Definice 38. *Funkce následník* $S : \omega \rightarrow \omega$. Pro $v \in \omega : S(v) = v \cup \{v\}$. “Následník čísla v .”

Theorem 6 (Princip (slabé) indukce pro přirozená čísla.). *Je-li* $X \subseteq \omega$ *taková, že platí:*

1. $0 \in X$,
2. $x \in X \rightarrow S(x) \in X$. *Pak* $X = \omega$.

Důkaz. 1 a 2 dohromady říká, že X je induktivní, tedy $\omega \subseteq X$. \square

Příklad. Důkaz indukci: Chceme dokázat: $(\forall n \in \omega)(\varphi(n))$. Dokazujeme: 1. $\varphi(0)$ a 2. $(\forall n \in \omega)(\varphi(n) \rightarrow \varphi(S(n)))$.

Poznámka. Princip silné indukce: 2: $((\forall m \in \omega)m \in X) \rightarrow n \in X$.

Lemma 19 (\in je ostré uspořádání). *Pro libovolné* $m, n \in \omega$ *platí:*

1. $n \in \omega \rightarrow n \subseteq \omega$
 - “Prvky přirozených čísel jsou přirozená čísla.”
2. $m \in n \rightarrow m \subseteq n$
 - “Nálezení je tranzitivní na ω .”
3. $n \not\subseteq n$
 - “ \in je antireflexivní na ω .”

Z toho všeho plyne, že se jedná o ostré uspořádání.

Důkaz. Indukcí:

1. $0 \subseteq \omega$, a indukční krok $n \in \omega$, předpokládáme, že $n \subseteq \omega$. Pak $\{n\} \subseteq \omega$ tedy $n \cup \{n\} \subseteq \omega$.
2. Indukcí podle n :
 - 1. Krok: $m \notin 0$ tím pádem implikace splněna.
 - 2. Krok $X = \{n, n \in \omega \wedge (\forall m)(m \in n \rightarrow m \subseteq n)\}$.
 - Víme $0 \in X$.
 - Necht $n \in X$, víme $S(n) \in \omega$.
 - Necht $m \in S(n) = n \cup \{n\}$. Pak buď $m \in n$ a z IP pak $m \subseteq n$ anebo $m = n$ tím pádem také $m \subseteq n \subseteq S(n)$.
3. $0 \not\subseteq 0$ platí, necht $n \in \omega$ a $n \not\subseteq n$.
 - Sporem $S(n) \subseteq S(n) = n \cup \{n\}$. Z toho pak plyne, že buď $S(n) \subseteq \{n\}$ anebo $S(n) \subseteq n$. V obou případech je $S(n) \subseteq n$, ale to pak znamená, že $n \in S(n) \subseteq n$ což je spor s předpokladem.

□

Lemma 20. Každé přirozené číslo je konečná množina.

Důkaz. Indukcí: $Fin(\emptyset)$ víme. Podle lemma $Fin(x) \rightarrow (\forall y)Fin(x \cup \{y\})$, speciálně pro $Fin(x \cup \{x\})$ a to je následník. □

Theorem 7. Množina x je konečná právě tehdy, když $(\exists n \in \omega)x \approx n$.

Důkaz. $\Leftarrow Fin(n)$ tedy $Fin(x)$. \Rightarrow indukcí: $X = \{x; (\exists n \in \omega)x \approx n\}$. Víme, že $0 \in X$ protože $0 \approx 0$. Necht $x \in X, y$ množina. Víme, že $(\exists n \in \omega)n \approx x$. $y \in x$ pak $x \cup \{y\} = x \approx n, y \notin x$ pak $x \cup \{y\} \approx S(n) = n \cup \{n\}$. K bijekci x a n přidáme (y, n) . Tedy $Fin \subseteq X$. □

Lemma 21. Množina ω i každá induktivní množina je nekonečná.

Důkaz. Podle lemma: $1 \ n \in \omega \rightarrow n \subseteq \omega$, tedy $n \in \mathcal{P}(n)$ tedy $\omega \subseteq \mathcal{P}(n)$, ω je neprázdná ale nemá maximální prvek vzhledem k inkluzi. Když $n \subseteq \omega$ pak podle lemma 3. $n \not\subseteq n$ a tedy $n \subset n \cup \{n\} = S(n)$. $\omega \subseteq W$ tedy i induktivní množiny. □

Cvičení: ω je Dedekindovsky nekonečná.

Lemma 22 (Linearita \in na ω). $m, n \in \omega$, platí:

1. $m \in n \leftrightarrow m \subset n$
2. $m \in n \vee m = n \vee n \in m$ (trichotomie)

Důkaz. 1. \rightarrow plyne z lemma 2 $m \in n \rightarrow m \subset n \wedge n \not\subseteq m$

- \Leftarrow indukcí podle n ; $n = 0$ nelze splnit.
- Indukční krok. Necht platí pro nějaké n a $\forall m$.

- Necht $m \subset S(n) = n \cup \{n\}$ a $m \subseteq n$, kdyby ne pak $n \in m$ tedy $n \subseteq m$ tedy $S(n) = n \cup \{n\} \subseteq m$ a to je spor.
- $m \subset n$ z IP $m \in n \subseteq S(n)$ tedy $m \in S(n)$
- $m = n$ pak $n \in S(n)$

2. Pro $n \in \omega$ necht $A(n) = \{m \in \omega, m \in n \vee m = n \vee n \in m\}$.

- Dokážeme, že $A(n)$ je induktivní, indukcí podle m .
- $n = 0 : 0 \in A(0)$, protože $0 = 0$
- Je-li $m \in A(0)$, pak: $m = 0 : 0 \in \{m\}$ anebo $0 \in m$ a z obou plyne $0 \in m \cup \{m\} = S(n)$.
- Tedy $S(n) \in A(0)$.
- Tedy $A(0) = \omega$.
- Tedy také $(\forall n \in \omega) 0 \in A(n)$.
- $n \in \omega, m \in \omega$, předpokládejme, že $m \in A(n)$. Ukážeme, že $S(m) \in A(n)$.
- $m \in n \rightarrow m \subset n; \{m\} \subseteq n$ tedy $S(m) \subseteq n$ z toho plyne, že $S(m) = n \vee S(m) \in n$.
- $m = n \vee n \in m$ potom $n \in m \cup \{m\} = S(m)$
- Ve všech případech ke $S(m) \in A(n)$.

□

Theorem 8. *Množina ω je dobře (ostře) uspořádaná relací \in .*

Důkaz. Necht $a \subseteq \omega, a \neq \emptyset$. Zvolme $n \in a$. Není-li n nejmenší (minimální), tak definuji $b = n \cap a$. n je konečná, tak i b je konečná a neprázdná. $b \subseteq \omega$ tedy b má minimální prvek m vzhledem k náležitosti. m je minimální i v množině a : kdyby $(\exists x \in a) x \in m$, tak víme, že $m \in n$, tedy $m \subseteq n$, tedy $x \in n$, tedy $x \in b$. To je spor s minimalitou m v b . \in je lineární na ω , tedy m je nejmenší prvek v a . Tedy \in je dobré uspořádání. □

Poznámka. Nekonečná množina A s lineárním (ostrým) uspořádáním $<$ pro každé $a \in A : |\leftarrow, a|$ je konečná. Pak $<$ je dobré a $(A, <)$ je izomorfní (ω, \in) .

Theorem 9 (Charakterizace uspořádání \in na ω). *Necht A je nekonečná množina, lineárně uspořádaná (ostře) relací $<$ tak, že pro každé $a \in A$ je dolní množina $|\leftarrow, a|$ konečná. Pak $<$ je dobré a množiny A, ω jsou izomorfní vzhledem k $<, \in$.*

Důkaz. $<$ je dobré: $\emptyset \neq c \in A$. Necht $a \in c$, předpokládejme, že a není minimální v c , pak definujeme $b = c \cap |\leftarrow, a|$. b je konečná. Tedy má minimální prvek m , m je minimální i v c . Protože $m \leq a$, pak $x \leq a$ tedy $x \in |\leftarrow, a|$ tedy $x \in b$ a to je spor. Izomorfismus: podle věty o porovnávání dobrých uspořádání jsou 2 možnosti:

1. A je izomorfní s dolní podmnožinou $B \subseteq \omega$, pak B není shora omezená. Neexistuje $n \in \omega (\forall b \in B) b \in n$. Sporem $B \subseteq S(n)$ tedy B by byla konečná a to je spor.
 - To znamená, že $(\forall n \in \omega)$ je menší než nějaký prvek $b \in B$. B je dolní množina, tedy $n \in B \rightarrow \omega \subseteq B \rightarrow \omega = B$.
2. ω je izomorfní dolní podmnožině $C \subseteq A$. C není shora omezená, kdyby ano, tak $\exists a \in A : C \subseteq |\leftarrow, a|$, C by byla konečná, spor. $(\forall a \in A, \exists c \in C : a \subseteq c, C$ je dolní, tedy $C = A$.

□

6.2 Spočetné množiny

Definice 39. Množina x je **spočetná**, pokud $x \approx \omega$. Množina x je **nejvýše spočetná**, pokud je konečná nebo spočetná. Jinak je množina **nespočetná**.

Theorem 10. 1. Každá shora omezená množina $A \subseteq \omega$ je konečná, každá shora neomezená $A \subseteq \omega$ je spočetná.

2. Každá podmnožina spočetné množiny je nejvýše spočetná.

Důkaz. 1. A omezená, to znamená, že $\exists n : A \subseteq S(n)$. Takže $Fin(S(n)) \rightarrow Fin(A)$.

- Pokud je A neomezená, pak je nekonečná. To lze dokázat sporem, že kdyby byla konečná, pak má A maximální prvek m , tedy je shora omezená m , to je spor.
- A je lineárně uspořádaná \in . Pro každé $n \in A$ je $|\leftarrow, n] \subseteq S(n)$, tedy $|\leftarrow, n]$ je konečná. Podle charakterizační věty A je izomorfní ω . Takže $A \approx \omega$.

2. A je spočetná $f : A \rightarrow \omega$ (bijekce). $B \subseteq A$, pak $B \approx f[B] \subseteq \omega$. Podle 1) je $f[B]$ spočetná anebo konečná. □

Příklad. **Lexikografické uspořádání** na $\omega \times \omega$.

$$(m_1, n_1) <_L (m_2, n_2) \leftrightarrow (m_1 \in m_2 \vee ((m_1 = m_2) \wedge (n_1 \in n_2)))$$

Cvičení: Ověřte, že $<_L$ je dobré uspořádání na $\omega \times \omega$.

Cvičení: Ověřte, že $<_L$ na $\omega \times 2$ je izomorfní s (ω, \in) .

Cvičení: Ověřte, že $<_L$ na $2 \times \omega$ není izomorfní s (ω, \in) .

Definice 40. **Maximo-lexikografické uspořádání** na $\omega \times \omega$ je:

$$\begin{aligned} \max(m, n) &= \begin{cases} m & n \in m \\ n & \text{jinak} \end{cases} \\ (m_1, n_1) &<_{ML} (m_2, n_2) \\ &\quad \updownarrow \\ &((\max(m_1, n_1) \in \max(m_2, n_2)) \vee ((\max(m_1, n_1) = \\ &\quad = \max(m_2, n_2)) \wedge ((m_1, n_1) <_L (m_2, n_2)))) \end{aligned}$$

Cvičení: Ověřte, že $\omega \times \omega <_{ML}$ je izomorfní (ω, \in) .

Theorem 11. Jsou-li A, B spočetné množiny, pak $A \cup B$ a $A \times B$ jsou spočetné.

Důkaz. $f : A \rightarrow \omega$ a $g : B \rightarrow \omega$ jsou bijekce. Definujeme $h : A \cup B \rightarrow \omega \times 2 \approx \omega$ jako:

$$h(x) = \begin{cases} (f(x), 0) & x \in A \\ (g(x), 1) & x \in B \setminus A \end{cases}$$

h je prosté. Tedy $A \cup B \subseteq \omega \times 2 \approx \omega \wedge \omega \preceq A \preceq A \cup B$ a z Cantor-Bernsteinovy věty implikuje, že $\omega \approx A \cup B$. $A \times B$ definujeme $k : A \times B \rightarrow \omega \times \omega$ jako $k((a, b)) = (f(a), g(b))$, k je bijekce. Opět mám $A \times B \approx \omega \times \omega \approx \omega$. □

Důsledek. \mathbb{Z}, \mathbb{Q} jsou spočetné. Kde \mathbb{Z} lze modelovat jako množinu dvojic, kde první je číslo a druhé bool jestli je kladné nebo ne. A \mathbb{Q} jako množinu dvojic (m,n) kde je číslo nejmenší společný dělitel $(m,n) = 1$ a číslo je $\frac{m}{n}$.

Důsledek. Konečná sjednocení, konečné součiny jsou spočetné. **Dirichletův princip:** je-li A nespočetná, $A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n$, potom aspoň jedna množina A_i je nespočetná. Konečná podmnožina $[A]^{<\omega}$ konečné posloupnosti jsou spočetné.

Cvičení: Je-li A nespočetné, B spočetná, C konečná, potom $A \cup C, A \setminus C$ jsou nespočetné a $B \cup C, B \setminus C$ jsou spočetné, $A \cup B, A \setminus B$ jsou nespočetné.

Poznámka. Spočetné sjednocení spočetně mnoha množin $\bigcup A$, kde A je spočetná a $(\forall a \in A)$ jsou spočetné.

Theorem 12 (Cantor).

$$x \prec \mathcal{P}(x)$$

Důkaz. Pomocí diagonální metody. $\preceq: f(y) = \{y\}, f: x \rightarrow \mathcal{P}(x)$ je prosté. Definujme $y = \{t, t \in x \wedge t \notin f(t)\}$. Potom $y \subseteq \mathcal{P}(x)$ nemá vzor při f . Kdyby

$$f(v) = y : \begin{cases} v \in y & \text{pak } v \notin f(v) = y \quad \text{SPOR} \\ v \notin y = f(v) & \text{tedy } v \in y \quad \text{SPOR} \end{cases}$$

□

Důsledek. $\mathcal{P}(\omega)$ je nespočetná.

Důsledek. V není množina: $\mathcal{P}(V) \subseteq V$, kdyby byla množina, pak by musela platit Cantorova věta.

Theorem 13.

$$\mathcal{P}(\omega) \approx \mathbb{R} \approx [0,1]$$

Důkaz. Víme $\mathcal{P}(\omega) \approx^\omega 2$ podmnožiny \leftrightarrow charakteristická funkce \leftrightarrow posloupnosti (a_0, a_1, a_2, \dots) , kde $a_i \in \{0,1\}$. $[0,1] \approx^\omega 2$: $a \in [0,1]$ zapíšu v binární soustavě tak, že pokud je to nula, tak je to nekonečně nul a jinak vždy tak, aby obsahovalo nekonečno jedniček. \leftarrow použijeme trojkovou soustavu. $(a_0, a_1, a_2, \dots) \rightarrow a = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{3^{n+1}}$. Cantor-Bernstein $\rightarrow [0,1] \approx^\omega 2$. (pozn.: Cantorovo diskontinuum). $[0,1] \subseteq \mathbb{R}, \mathbb{E} \rightarrow [0,1]$ nějakou vhodnou funkci např. $\frac{\pi/2 - \arctan(x)}{\pi}$. □

Poznámka. Množina algebraických čísel (tj. kořeny polynomů s racionálními koeficienty) je spočetná.

Cvičení: Pokrytí N intervaly.

1. Konečně.

$$\bullet A \subseteq I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_n \text{ pak } \sum(b_i - a_i) \geq 1$$

2. Nekonečně.

$$\bullet \forall \epsilon > 0 : \exists I_1, I_2, \dots, A \subseteq \bigcup I_i; \sum(b_i - a_i) < \epsilon$$

Poznámka. **Hypotéza kontinua** je, že každá nekonečná podmnožina \mathbb{R} je buď spočetná anebo ekvivalentní s \mathbb{R} .

6.3 Axiom výběru

6.3.1 Princip výběru

Pro každý rozklad r množiny x existuje **výběrová množina**. To jest $v \subseteq x$, pro kterou platí $(\forall u \in r)(\exists x)(v \cap u = \{x\})$.

Definice 41. Je-li X množina, pak funkce f definovaná na X splňující $(y \in X \wedge y \neq \emptyset) \rightarrow f(y) \in y$ se nazývá ****selektor**** na množině X .

6.3.2 10.Axiom výběru (AC - axiom of choice)

Na každé množině existuje selektor.

Ekvivalentně

Každou množinu lze dobře uspořádat. \leq je trichotomická. Zornovo lemma.

Důsledek. • Každý vektorový prostor má bázi.

- Součin kompaktních topologických prostorů je kompaktní.
- Hahn-Banachova věta.
- Princip kompaktnosti.
- Banach Tarski (rozdělení koule na malé části a vytvoření dvou stejně velkých koulí).

Definice 42. (Indexový) soubor množin $\langle F_j; j \in J \rangle$. Kde F je zobrazení s definovaným obrazem J . Pro $j \in J : F_j = F(j)$. J je **indexová třída** a jeho prvky jsou **indexy**.

Lze definovat:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bigcup_{j \in J} F_j \text{ jako } \{x, (\exists j \in J)x \in F_j\} \\ \bigcup_{j \in J} F_j = \bigcup \text{Rng}(F) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bigcap_{j \in J} F_j \text{ jako } \{x, (\forall j \in J)x \in F_j\} \\ \bigcap_{j \in J} F_j = \bigcap \text{Rng}(F) \end{array} \right.$$

Kartézský součin souboru množin indexovaného množinou J je $X_{j \in J} F_j : \{f, f : J \rightarrow \bigcup_{j \in J} F_j \wedge (\forall j \in J)f(j) \in F_j\}$.

Lemma 23. Je-li J množina, pak $X F_j$ je množina. Je-li $(\forall j \in J) F_j = Y$, pak $X_{j \in J} F_j =^J Y$.

Důkaz. Axiom nahrazení. $\text{Rng}(F)$ je množina, $\bigcup \text{Rng}(F)$ je množina. $^J \bigcup_{j \in J} F_j$ je množina. $X F_j \subseteq ^J \bigcup_{j \in J} F_j$. \square

Lemma 24. NTJE: (Následující tvrzení jsou si ekvivalentní.)

1. Axiom výběru.
2. Princip výběru.
3. Pro každou množinovou relaci s existuje funkce $f \subseteq s$ taková, že $\text{Dom}(f) = \text{Dom}(s)$.

4. Kartézský součin $X_{i \in x} a_i$ neprázdného souboru neprázdných množin je neprázdný.

Důkaz. $1 \Rightarrow 2$: r rozklad X , podle 1 existuje selektor f na r . Pak $Rng(f)$ je výběrová množina. $2 \Rightarrow 3$: BÚNO: $s \neq \emptyset$. Vytvoříme rozklad s . $n = \{\{i\} \times s \parallel \{i\}; i \in Dom(s)\} = \{\{(i,x), (i,x) \in s\}, i \in Dom(s)\}$. Výběrová množina n je funkce, která je podmnožina s a má stejný definiční obor. $3 \Rightarrow 4$: Máme soubor množin $\langle a_i, i \in x \rangle$. Vytvoříme relaci $s = \{(i,y), i \in x \wedge y \in a_i\}$. Funkce $f \subseteq s : Dom(f) = Dom(s) = x$ je prvkem $X_{i \in x} a_i$. $4 \Rightarrow 1$: x množina. BÚNO: $x \neq \emptyset, \emptyset \in X$. $ID \upharpoonright x$ určuje soubor $\langle y; y \in x \rangle$. Každý prvek $X_{y \in x} y$ je selektor na x . \square

Lemma 25. *Sjednocení spočetného souboru spočetných množin je spočetné. (Popřípadě je všude místo spočetné nejvýše spočetné.)*

Důkaz. Soubor $\langle B_j; j \in J \rangle$. BÚNO: $I = \omega$. Najdeme prosté zobrazení $\bigcup_{j \in \omega} B_j$ do $\omega \times \omega$. Uvažujme soubor $\langle E_j; j \in \omega \rangle$ kde E_j je množina všech prostých zobrazení B_j do ω . Podle lemma 4) je $X_{j \in \omega} E_j$ neprázdný, tedy existuje soubor $\langle f_j; j \in \omega \rangle$, kde $f_j \in E_j$. Definujme $h; \bigcup_{j \in \omega} B_j \rightarrow \omega \times \omega$ jako $h(x) = (j, f_j(x))$. Kde j je nejmenší prvek ω pro který $x \in B_j$. \square

Poznámka. Bez AC je bezesporné ZF a to, že " \mathbb{R} jsou spočetným sjednocením spočetných množin".

6.4 Princip maximality (PM)

- $AC \leftrightarrow PM$
- Je-li A množina uspořádaná relací \leq tak, že každý řetězec má horní mez.
- Pak pro každé $a \in A$ existuje maximální prvek $b \in A$ takový, že $a \leq b$.

Definice 43. $B \subseteq A$ je **řetězec** pokud B je lineárně uspořádaná \leq .

Poznámka. V aplikacích často pro $(A, \subseteq); A \subseteq \mathcal{P}(x)$ stačí ověřit, že $\bigcup B \in A$.

Cvičení: Ukažte pomocí PM: Je-li (A, \leq) uspořádaná množina, pak pro každý řetězec $B \subseteq A$ existuje maximální řetězec C splňující $B \subseteq C \subseteq A$.

6.4.1 Princip maximality II (PMS)

Je-li (A, \leq) uspořádaná množina, kde každý řetězec má supréum, pak pro každé $a \in A$ existuje $b \in A$ maximální prvek splňující $a \leq b$.

Cvičení: Dokažte: $PM \leftrightarrow PMS$.

6.5 Princip trichotomie \preceq (PT)

Pro každé dvě množiny x, y platí $x \preceq y$ nebo $y \preceq x$.

Lemma 26. $PM \rightarrow PT$.

Důkaz. Definuji množinu $D = \{f, f \text{ prosté zobrazení} \wedge \text{Dom}(f) \subseteq x \wedge \text{Rng}(f) \subseteq y\}$. (D, \subseteq) splňuje předpoklady PM. Tedy má maximální prvek g . Kdyby $x \setminus \text{Dom}(g) \neq \emptyset$ a $y \setminus \text{Rng}(g) \neq \emptyset$, pak lze g rozšířit o novou dvojici (u, v) , spor s maximalitou g . Pokud $\text{Dom}(g) = x$, pak $x \preceq y$. Pokud $\text{Rng}(g) = y$, pak g^{-1} je prosté zobrazení y do x , tedy $y \preceq x$. \square

Cvičení: Sjednocení řetězce prostých zobrazení je prosté zobrazení.

6.6 Princip dobrého uspořádání (VVO)

- Každou množinu lze dobře uspořádat.
- Známo jako Zermelova věta.
- $\text{AC} \leftrightarrow \text{VVO}$

Lemma 27. $\text{VVO} \rightarrow \text{AC}$

Důkaz. $x \neq \emptyset, \emptyset \notin x$ podle VVO máme dobré uspořádání na $\bigcup x$. Každý $y \in x$ je neprázdná podmnožina $\bigcup x$, tedy má nejmenší prvek $\min_{\leq} y$. Definujeme $f : x \rightarrow \bigcup x$ jako $f(y) = \min_{\leq}(y)$. Tato f je selektorem na množině x . \square

Cvičení: $\text{PM} \rightarrow \text{VVO}$

7. Ordinální čísla

7.1 "Typy dobře uspořádaných množin."

- Kardinální čísla \subseteq ordinální čísla. Mohutnosti dobře uspořádaných množin. S (AC) mohutnosti všech množin.
- Ordinální čísla jsou dobře uspořádaná \in , platí pro ně princip transfinite indukce.

Definice 44. Třída X je **tranzitivní** pokud $x \in X \rightarrow x \subseteq X$.

Příklad. ω i každé $n \in \omega$ jsou tranzitivní i V .

Cvičení: X tranzitivní $\leftrightarrow \bigcup X \subseteq X$

Lemma 28. 1. Jsou-li X, Y tranzitivní pak $X \cap Y, X \cup Y$ jsou tranzitivní.

2. X třída, pro kterou každé $x \in X$ je tranzitivní množina, pak $\bigcap X$ a $\bigcup X$ jsou tranzitivní.
3. Je-li X tranzitivní třída, pak \in je tranzitivní na $X \leftrightarrow$ každý $x \in X$ je tranzitivní množina.

Důkaz. 1. Je pozorování.

2. Plyne analogicky z 1.

3. Jako Cvičení.

□

Definice 45. Množina x je **ordinální číslo (ordinála)** pokud x je tranzitivní množina a \in je dobré uspořádání na x . Třidu všech ordinálních čísel značíme On .

Příklad. ω a každé $n \in \omega$ je ordinální číslo.

Důsledek. Pro každou nekonečnou množinu x platí $\omega \preceq x$.

Lemma 29. On je tranzitivní třída.

Důkaz. $y \in x \in On$. Máme $y \leq x, \in$ je dobré ostré uspořádání na y . \in je dobré ostré na x . Z lemma 3) je y tranzitivní množina. y je ordinála. □

Lemma 30. \in je tranzitivní na On .

Lemma 31. $x, y \in On$, pak:

1. $x \notin x$
2. $x \cap y \in On$
3. $x \in y \leftrightarrow x \subset y$

Důkaz. 1. Sporem z antireflexivity \in na x .

2. Přímo z definice.

3. \rightarrow z tranzitivity y a 1)

$\leftarrow y \setminus x \neq \emptyset \subseteq y, y \setminus x$ má nejmenší prvek z . Platí $z = x$ (Cvičení). \square

Theorem 14. \in je dobré ostré uspořádání třídy On .

Důkaz. Antireflexivita z lemma 1), tranzitivita pak dohromady dává ostré uspořádání. Trichotomie: $x \neq y \in On$ podle lemma 2) $x \cap y \in On$. Sporem kdyby $x \cap y \subset x \wedge x \subset y$ pak $x \cap y \in y \wedge x \cap y \in x$, tedy $x \cap y \in x \cap y$ a to je spor s lemma 1). Když tedy $x \cap y = x$ pak $x \subset y$ tedy $x \in y$. Z toho plyne, že se jedná o lineární uspořádání. Pro dobrotu stačí existence minimálního prvku (Cvičení). \square

Důsledek. On je vlastní třída. Je-li X vlastní třída, tranzitivní, dobře uspořádaná \in , pak $X = On$.

7.1.1 Značení:

- $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ jsou ordinální čísla.
- $\alpha < \beta$ místo $\alpha \in \beta$.
- $\alpha \leq \beta$ místo $\alpha \in \beta \vee \alpha = \beta$.

Lemma 32. 1. Množina $x \subseteq On$ je ordinální číslo $\leftrightarrow x$ je tranzitivní.

2. $A \subseteq On, A \neq \emptyset$, pak $\cap A$ je nejmenší prvek A vzhledem k \leq .

3. $a \subseteq On$ množina, pak $\cup a \in On$ a $\cup a = \sup_{\leq} a$.

Důkaz. 1. \rightarrow z definice, \leftarrow z věty.

2. Z věty a $\cap A = \inf A$.

3. $\cup a$ je tranzitivní, $\cup a \subseteq On$ podle 1) je ordinální číslo. \square

Důsledek. ω je supremum množiny všech přirozených čísel v On . Konečné ordinály jsou právě přirozená čísla.

Cvičení: Důkaz: $\cup \omega \in On \wedge \cup \omega = \sup_{\leq} \omega$. Zbývá ověřit $\omega = \cup \omega$.

Lemma 33. $\alpha \in On$, pak $\alpha \cup \{\alpha\}$ je nejmenší ordinální číslo větší než α .

Důkaz. $\alpha \subseteq On$ protože On je tranzitivní. $\alpha \cup \{\alpha\}$ je tranzitivní množina ordinálních čísel. Podle lemma 1) $\alpha \cup \{\alpha\}$ je ordinální číslo. Je-li $\beta \in On, \beta \in \alpha \cup \{\alpha\}$, pak $\beta \in \alpha \vee \beta = \alpha$ tedy $\beta \subseteq \alpha$. \square

Definice 46. $\alpha \cup \{\alpha\}$ je **následník** α . α je **předchůdce** $\alpha \cup \{\alpha\}$. α je **izolované** pokud $\alpha = 0$ nebo pokud α má předchůdce, jinak je **limitní**.

Theorem 15 (O typu dobrého uspořádání). Je-li a množina dobře uspořádaná relací r , pak existuje právě jedno ordinální číslo α a právě jeden izomorfismus (a, r) a (α, \leq) . (Bez důkazu.)

Definice 47. α je **typ** dobrého uspořádání r .

Poznámka. Na $On^2 = On \times On$ lze definovat lexikografické uspořádání i maximo-lexikografické uspořádání.

7.2 Princip transfinite indukce

Je-li $A \subseteq On$ třída splňující $(\forall \alpha \in On)(\alpha \subseteq A \rightarrow \alpha \in A)$, potom $A = On$.

Důkaz. Sporem: $On \setminus A \neq \emptyset$ díky dobrému uspořádání \in existuje nejmenší prvek $\alpha \in On \setminus A$. Potom každé $\beta \in \alpha$ už je prvkem A , tedy $\alpha \subseteq A$, z předpokladu věty $\alpha \in A$ a to je spor. \square

Theorem 16 (Druhá verze principu transfinite indukce.). *Je-li $A \subseteq On$ třída splňující:*

1. $0 \in A$
2. Pro každý $\alpha \in On$ platí $\alpha \in A \rightarrow \alpha \cup \{\alpha\} \in A$.
3. Je-li α lineární pak $\alpha \subseteq A \rightarrow \alpha \in A$.

Pak $A = On$.

Theorem 17 (O konstrukci transfinite rekurzí.). *Je-li $G : V \rightarrow V$ třídové zobrazení, pak existuje právě jedno zobrazení $F : On \rightarrow V$ splňující $(\forall \alpha \in On) F(\alpha) = G(F \upharpoonright \alpha)$.*

Varianty:

- $F(\alpha) = G(F[\alpha])$
- $F(\alpha) = G(\alpha, F \upharpoonright \alpha)$
- $G_1(F(\beta))$ je-li α následník β , jinak $G_2(F[\alpha])$ je-li α limitní.

Důkaz. Je pomocí transfinite indukce a axiomu nahrazení. \square

Příklad. $m + n : F(m) = n + m$ se dá nadefinovat jako $F(0) = n, F(S(m)) = S(F(m))$.
AC \rightarrow VVO: A množina g selektor na $\mathcal{P}(A)$ tak $f(0) = g(A)$ a $f(\beta) = g(A - f[\beta])$.