

## Popisná statistika

Popisná statistika je disciplína, která popisuje a sumarizuje informace obsažené ve velkém množství dat pomocí tabulek, grafů, funkcionálních a číselných charakteristik. Činí tak pomocí základních matematických operací. Cílem popisné statistiky je zpřehlednit informace „ukryté“ v datových souborech.

Popisná statistika je velmi důležitá minimálně ze dvou důvodů:

- v praxi se často používá (všichni znají takové pojmy, jako je průměr, směrodatná odchylka, tabulka rozložení četností, výsečový graf apod.)
- motivuje pojmy, se kterými pak pracuje počet pravděpodobnosti (např. relativní četnost motivuje pravděpodobnost, hustota četnosti motivuje hustotu pravděpodobnosti, průměr motivuje střední hodnotu apod.)

Dobré pochopení pojmů popisné statistiky tedy velmi usnadní studium počtu pravděpodobnosti.

## Základní, výběrový a datový soubor

**Základním souborem** rozumíme libovolnou neprázdnou množinu  $E$ .

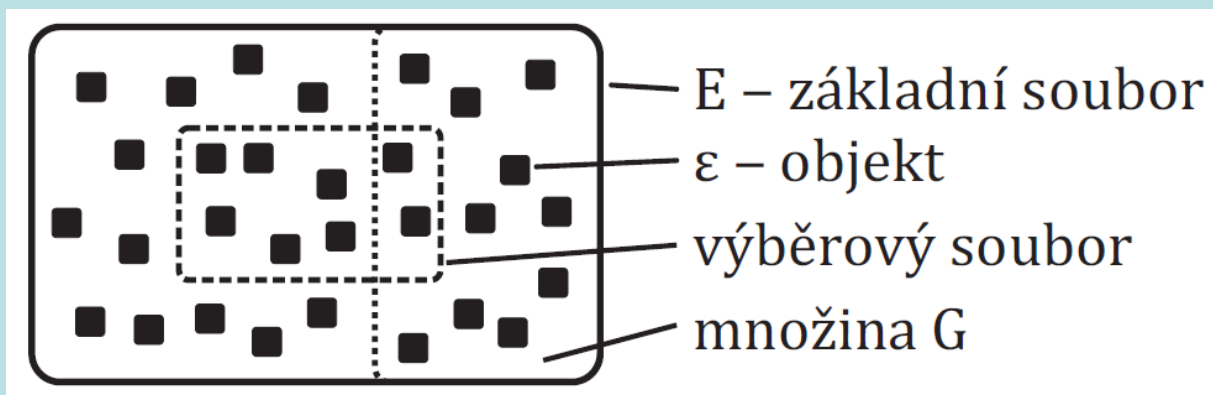
Prvky množiny  $E$  značíme  $\varepsilon$  a nazýváme je **objekty**.

Libovolnou neprázdnou podmnožinu  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n\}$  základního souboru  $E$  nazýváme **výběrový soubor rozsahu  $n$** .

Je-li množina  $G \subseteq E$ , pak symbolem  $N(G)$  rozumíme **absolutní četnost** množiny  $G$  ve výběrovém souboru, tj. počet těch objektů množiny  $G$ , které patří do výběrového souboru.

**Relativní četnost** množiny  $G$  ve výběrovém souboru zavedeme vztahem  $p(G) = \frac{N(G)}{n}$ .

### Ilustrace



**Příklad:** Základním souborem  $E$  je množina všech ekonomicky zaměřených studentů 1. ročníku českých vysokých škol. Množina  $G_1$  je tvořena těmi studenty, kteří uspěli v prvním zkušebním termínu z matematiky a množina  $G_2$  obsahuje ty studenty, kteří uspěli v prvním zkušebním termínu z angličtiny. Ze základního souboru bylo náhodně vybráno 20 studentů, kteří tvoří výběrový soubor  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{20}\}$ . Z těchto 20 studentů 12 uspělo v matematice, 15 v angličtině a 11 v obou předmětech. Zapište absolutní a relativní četnosti úspěšných matematiků, angličtinářů a oboustranně úspěšných studentů.

**Řešení:**

$$N(G_1) = 12, N(G_2) = 15, N(G_1 \cap G_2) = 11, n = 20,$$

$$p(G_1) = \frac{12}{20} = 0,6,$$

$$p(G_2) = \frac{15}{20} = 0,75,$$

$$p(G_1 \cap G_2) = \frac{11}{20} = 0,55$$

Vidíme, že úspěšných matematiků je 60%, angličtinářů 75% a oboustranně úspěšných studentů jen 55%.

**Vlastnosti relativní četnosti:** Relativní četnost má následujících 12 vlastností, které jsou obdobné vlastnostem procent.

- $p(\emptyset) = 0$
- $p(G) \geq 0$  (nezápornost)
- $p(G) \leq 1$
- $p(G_1 \cup G_2) + p(G_1 \cap G_2) = p(G_1) + p(G_2)$
- $1 + p(G_1 \cap G_2) \geq p(G_1) + p(G_2)$
- $p(G_1 \cup G_2) + 0 \leq p(G_1) + p(G_2)$  (subaditivita)
- $G_1 \cap G_2 = \emptyset \Rightarrow p(G_1 \cup G_2) = p(G_1) + p(G_2)$  (aditivita)
- $p(G_2 \setminus G_1) = p(G_2) - p(G_1 \cap G_2)$
- $G_1 \subseteq G_2 \Rightarrow p(G_2 \setminus G_1) = p(G_2) - p(G_1)$  (subtraktivita)
- $G_1 \subseteq G_2 \Rightarrow p(G_1) \leq p(G_2)$  (monotonie)
- $p(E) = 1$  (normovanost)
- $p(G) + p(\bar{G}) = 1$  (komplementarita)

**Pojem podmíněné relativní četnosti:** Pokud se v daném základním souboru zajímáme o dvě podmnožiny, můžeme zavést pojem podmíněné relativní četnosti jedné podmnožiny v daném výběrovém souboru za předpokladu, že objekt pochází z druhé podmnožiny.

Nechť  $E$  je základní soubor,  $G_1, G_2$  jeho podmnožiny,  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n\}$  výběrový soubor. Definujeme:

podmíněnou relativní četnost množiny  $G_1$  ve výběrovém souboru za předpokladu  $G_2$ :

$$p(G_1/G_2) = \frac{N[G_1 \cap I_2]}{N[G_2]} = \frac{p[G_1 \cap I_2]}{p[G_2]},$$

podmíněnou relativní četnost  $G_2$  ve výběrovém souboru za předpokladu  $G_1$ :

$$p(G_2/G_1) = \frac{N[G_1 \cap I_2]}{N[G_1]} = \frac{p[G_1 \cap I_2]}{p[G_1]}.$$

**Příklad:** Pro údaje z příkladu o studentech vypočtete podmíněnou relativní četnost úspěšných matematiků mezi úspěšnými angličtináři a podmíněnou relativní četnost úspěšných angličtinářů mezi úspěšnými matematiky.

(Připomínáme, že z 20 studentů 12 uspělo v matematice, 15 v angličtině a 11 v obou předmětech.)

**Řešení:**

$$N(G_1) = 12, N(G_2) = 15, N(G_1 \cap G_2) = 11, n = 20,$$

$$p(G_1/G_2) = \frac{N(G_1 \cap G_2)}{N(G_2)} = \frac{11}{15} = 0,73 \text{ (tzn., že 73\% těch studentů, kteří}$$

byli úspěšní v angličtině, uspělo i v matematice)

$$p(G_2/G_1) = \frac{N(G_1 \cap G_2)}{N(G_1)} = \frac{11}{12} = 0,92 \text{ (tzn., že 92\% těch studentů, kteří byli}$$

úspěšní v matematice, uspělo i v angličtině)

**Pojem četnostní nezávislosti dvou množin:** O četnostní nezávislosti dvou množin v daném výběrovém souboru hovoříme tehdy, když informace o původu objektu z jedné množiny nijak nemění šance, s nimiž soudíme na jeho původ i z druhé množiny.

V příkladě se studenty by množiny úspěšných matematiků a úspěšných angličtinářů byly četnostně nezávislé, pokud podíl úspěšných matematiků mezi úspěšnými angličtináři by byl stejný jako podíl úspěšných matematiků mezi všemi zkoušenými studenty a stejně tak podíl úspěšných angličtinářů mezi úspěšnými matematiky by byl stejný jako podíl úspěšných angličtinářů mezi všemi zkoušenými studenty, tj.

$$\frac{N[G_1 \cap I_2]}{N[G_2]} = \frac{N[G_1]}{n} \quad \wedge \quad \frac{N[G_1 \cap I_2]}{N[G_1]} = \frac{N[G_2]}{n}.$$

Po snadné úpravě dostaneme multiplikatívni vztah

$$\frac{N[G_1 \cap I_2]}{n} = \frac{N[G_1]}{n} \cdot \frac{N[G_2]}{n}, \text{ tj. } p[G_1 \cap I_2] = p[G_1] \cdot p[G_2].$$

Řekneme tedy, že množiny  $G_1, G_2$  jsou **četnostně nezávislé** v daném výběrovém souboru, jestliže  $p[G_1 \cap I_2] = p[G_1] \cdot p[G_2]$ .

(V praxi jen zřídka dojde k tomu, že uvedený vztah platí přesně. Většinou je jen naznačena určitá tendence četnostní nezávislosti.)

**Příklad:** Pro údaje z příkladu o studentech zjistěte, zda úspěchy v matematice a angličtině jsou v daném výběrovém souboru četnostně nezávislé.

**Řešení:**

$$p(G_1 \cap G_2) = 0,55, \quad p(G_1)p(G_2) = 0,6 \times 0,75 = 0,45,$$

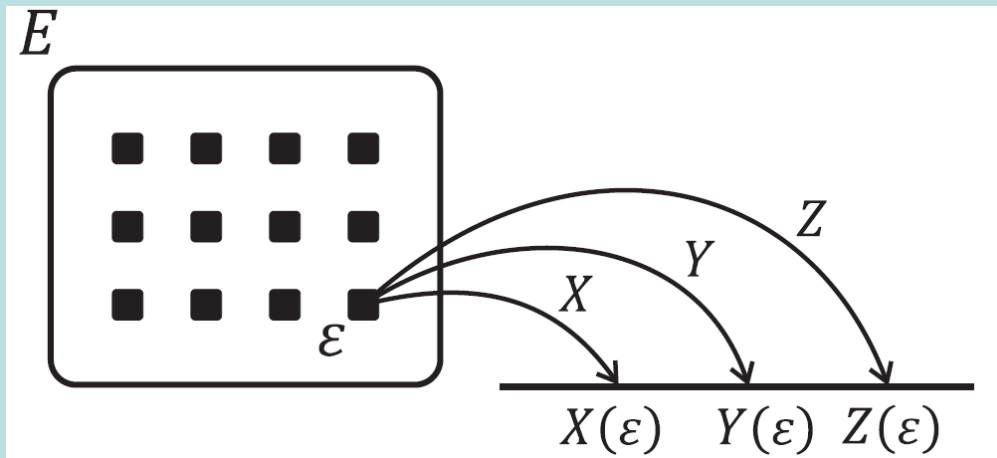
tedy skutečná relativní četnost oboustranně úspěšných studentů je větší než by odpovídalo četnostní nezávislosti množin  $G_1, G_2$  v daném výběrovém souboru. Znamená to, že úspěch v matematice se zpravidla sdružuje s úspěchem v angličtině a naopak.



**Pojem skalárního a vektorového znaku:** Vlastnosti objektů vyjadřujeme číselně pomocí znaků.

Nechť  $E$  je základní soubor. Funkce  $X: E \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $Y: E \rightarrow \mathbb{R}$ , ...,  $Z: E \rightarrow \mathbb{R}$ , které každému objektu přiřazují číslo, se nazývají **(skalární) znaky**. Uspořádaná  $p$ -tice  $(X, Y, \dots, Z)$  se nazývá **vektorový znak**.

### Ilustrace



**Označení:** Nechť je dán výběrový soubor  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n\} \subseteq E$ . Hodnoty znaků  $X, Y, \dots, Z$  pro  $i$ -tý objekt označíme  $x_i = X(\varepsilon_i)$ ,  $y_i = Y(\varepsilon_i)$ , ...,  $z_i = Z(\varepsilon_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

## Pojem datového souboru:

Matice  $\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & \cdots & z_1 \\ x_2 & y_2 & \cdots & z_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_n & y_n & \cdots & z_n \end{pmatrix}$  typu  $n \times p$  se nazývá **datový soubor**. Její řádky odpovídají jednotlivým objektům, sloupce znakům.

Libovolný sloupec této matice nazýváme **jednorozměrným datovým souborem**.

Jestliže uspořádáme hodnoty některého znaku (např. znaku X) v jednorozměrném datovém souboru vzestupně podle veli-

kosti, dostaneme **uspořádaný datový soubor**  $\begin{pmatrix} x_{(1)} \\ \vdots \\ x_{(n)} \end{pmatrix}$ , kde  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ .

Vektor  $\begin{pmatrix} x_{[1]} \\ \vdots \\ x_{[r]} \end{pmatrix}$ , kde  $x_{[1]} < \dots < x_{[r]}$  jsou navzájem různé hodnoty znaku X, se nazývá **vektor variant**.



## Pojem jevu:

Nechť  $\{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n\}$  je výběrový soubor,  $X, Y, \dots, Z$  jsou znaky,  $B, B_1, B_p$  jsou číselné množiny.

Zápis  $\{X \in B\}$  znamená jev „znak  $X$  nabyl hodnoty z množiny  $B$ “.

Zápis  $\{X \in B_1 \wedge Y \in B_2 \wedge \dots \wedge Z \in B_p\}$  znamená jev „znak  $X$  nabyl hodnoty z množiny  $B_1$  a současně znak  $Y$  nabyl hodnoty z množiny  $B_2$  atd. až znak  $Z$  nabyl hodnoty z množiny  $B_p$ “.

Symbol  $N(X \in B)$  značí **absolutní četnost** jevu  $\{X \in B\}$  ve výběrovém souboru, tj. počet těch objektů ve výběrovém souboru, pro něž  $x_i \in B$ .

Symbol  $p(X \in B)$  znamená **relativní četnost** jevu  $\{X \in B\}$  ve výběrovém souboru, tj.  $p(X \in B) = \frac{N(X \in B)}{n}$ .

Analogicky  $N(X \in B_1 \wedge Y \in B_2 \wedge \dots \wedge Z \in B_p)$  resp.

$p(X \in B_1 \wedge Y \in B_2 \wedge \dots \wedge Z \in B_p)$  znamená absolutní resp. relativní četnost jevu  $\{X \in B_1 \wedge Y \in B_2 \wedge \dots \wedge Z \in B_p\}$  ve výběrovém souboru.



## Jednorozměrné bodové rozložení četností

Jestliže počet variant znaku  $X$  v jednorozměrném datovém souboru není příliš velký, pak přiřazujeme četnosti jednotlivým variantám a hovoříme o **bodovém rozložení četností**.

Nechť je dán jednorozměrný datový soubor  $\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ , v němž znak  $X$  nabývá  $r$  variant.

Pro  $j = 1, \dots, r$  definujeme:

$n_j = N(X = x_{[j]})$  – **absolutní četnost varianty  $x_{[j]}$  ve výběrovém souboru**

$p_j = \frac{n_j}{n}$  – **relativní četnost varianty  $x_{[j]}$  ve výběrovém souboru**

$N_j = N(X \leq x_{[j]}) = n_1 + \dots + n_j$  – **absolutní kumulativní četnost prvních  $j$  variant ve výběrovém souboru**

$F_j = \frac{N_j}{n} = p_1 + \dots + p_j$  – **relativní kumulativní četnost prvních  $j$  variant ve výběrovém souboru**

Tabulka typu

$x_{[j]}$	$n_j$	$p_j$	$N_j$	$F_j$
$x_{[1]}$	$n_1$	$p_1$	$N_1$	$F_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$x_{[r]}$	$n_r$	$p_r$	$N_r$	$F_r$

se nazývá **variační řada** (nebo též **tabulka rozložení četností**).

**Příklad:** Máme jednorozměrný datový soubor, který obsahuje údaje o známkách z matematiky (znak X) u 20 studentů.

(2)  
1  
4  
1  
1  
4  
3  
3  
1  
1  
4  
4  
2  
4  
2  
4  
1  
4  
4  
1)

Sestavte tabulku rozložení četností.

**Řešení:**

$x_{[j]}$	$n_j$	$p_j$	$N_j$	$F_j$
1	7	$7/20=0,35$	7	$7/20=0,35$
2	3	$3/20=0,15$	10	$10/20=0,50$
3	2	$2/20=0,10$	12	$12/20=0,60$
4	8	$8/20=0,40$	20	$20/20=1,00$
$\Sigma$	20	1,00	-	-

## Četnostní funkce, empirická distribuční funkce

Pomocí relativních četností zavedeme **četnostní funkci**.

Funkce  $p(x) = \begin{cases} p_j & \text{pro } x \in x_{[j]}, j=1, \dots, r \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$  se nazývá četnostní funkce.

Četnostní funkce je

nezáporná ( $\forall x \in \mathbb{R}: p(x) \geq 0$ )

a normovaná ( $\sum_{x=-\infty}^{\infty} p(x) = 1$ ).

Pomocí kumulativních relativních četností zavedeme **empirickou distribuční funkci**.

Funkce  $F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < x_{[1]} \\ F_j & \text{pro } x_{[j]} \leq x < x_{[j+1]}, j=1, \dots, r-1 \\ 1 & \text{pro } x \geq x_{[r]} \end{cases}$  se nazývá empirická distribuční funkce.

Empirická distribuční funkce je

neklesající ( $\forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}, x_1 < x_2: F(x_1) \leq F(x_2)$ ),

zprava spojitá ( $\forall x_0 \in \mathbb{R}$  libovolné, ale pevně dané:  $\lim_{x \rightarrow x_0^+} F(x) = F(x_0)$ )

a normovaná ( $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0, \lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$ ).



**Příklad:** Pro známky z matematiky nakreslete graf četnostní funkce a empirické distribuční funkce.

**Řešení:**

Variační řada

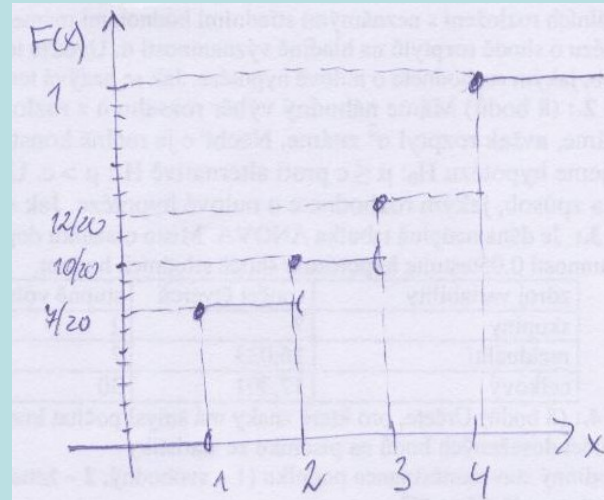
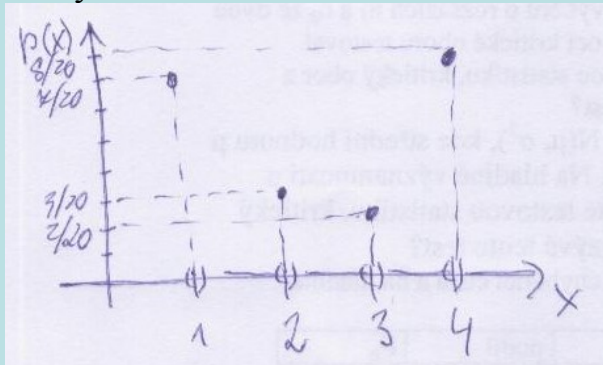
$x_{[j]}$	$n_j$	$p_j$	$N_j$	$F_j$
1	7	$7/20=0,35$	7	$7/20=0,35$
2	3	$3/20=0,15$	10	$10/20=0,50$
3	2	$2/20=0,10$	12	$12/20=0,60$
4	8	$8/20=0,40$	20	$20/20=1,00$
$\Sigma$	20	1,00	-	-

Vzorce

$$p_j = \begin{cases} p_j & \text{pro } x = x_{[j]}, j=1, \dots, r \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

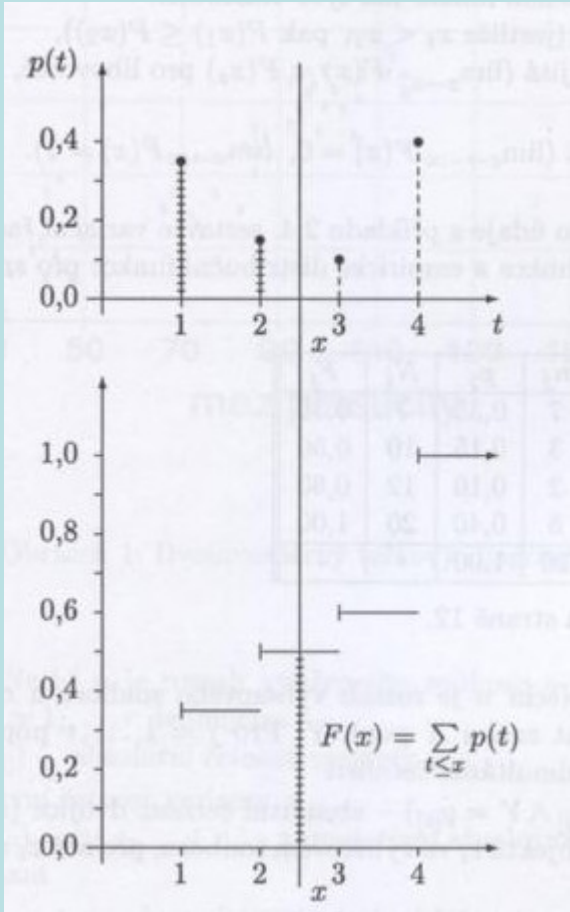
$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < x_{[1]} \\ F_j & \text{pro } x_{[j]} \leq x < x_{[j+1]}, j=1, \dots, r-1 \\ 1 & \text{pro } x \geq x_{[r]} \end{cases}$$

Grafy



# Vztah mezi četnostní funkcí a empirickou distribuční funkcí

$$\forall x \in \mathbb{R} : F(x) = \sum_{t \leq x} p(t)$$



## Grafické znázornění bodového rozložení četností

**Tečkový diagram:** na číselné ose vyznačíme jednotlivé varianty znaku X a nad každou variantu nakreslíme tolik teček, jaká je její absolutní četnost.

**Polygon četnosti:** je lomená čára spojující body, jejichž x-ová souřadnice je varianta znaku X a y-ová souřadnice je absolutní či relativní četnost této varianty.

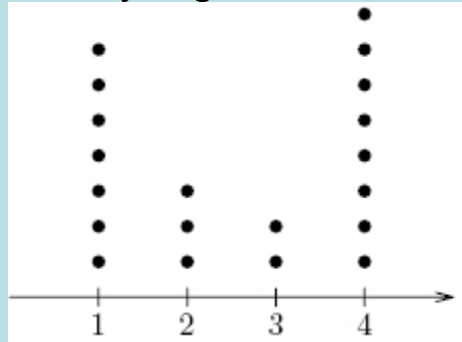
**Sloupkový diagram:** je soustava na sebe nenavazujících obdélníků, kde střed základny je varianta znaku X a výška je absolutní či relativní četnost této varianty.

**Výsečový graf:** je kruh rozdělený na výseče, jejichž vnější obvod odpovídá absolutním četnostem variant znaku X.

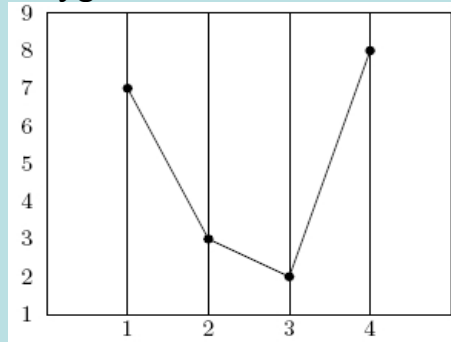
**Příklad:** Pro jednorozměrný datový soubor známek z matematiky sestrojte tečkový diagram, polygon četností, sloupkový diagram a výsečový graf.

**Řešení:**

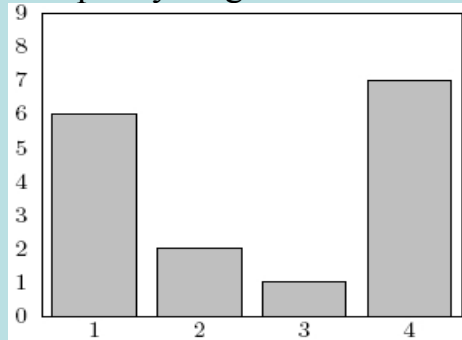
Tečkový diagram



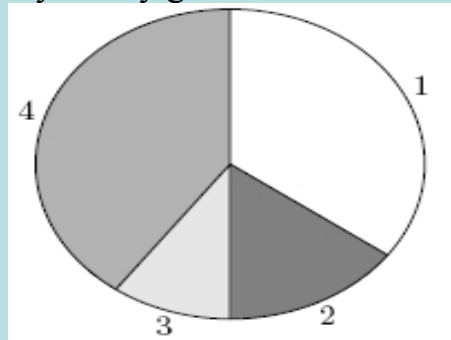
Polygon četností



Sloupkový diagram



Výsečový graf



## Dvourozměrné bodové rozložení četností

Nechť je dán dvourozměrný datový soubor  $\begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \dots & \dots \\ x_n & y_n \end{pmatrix}$ , kde znak X má r variant a znak Y má s variant. Pak definujeme:

$n_{jk} = N(X = x_{[j]} \wedge Y = y_{[k]})$  – **simultánní absolutní četnost dvojice  $(x_{[j]}, y_{[k]})$**  ve výběrovém souboru

$p_{jk} = \frac{n_{jk}}{n}$  – **simultánní relativní četnost dvojice  $(x_{[j]}, y_{[k]})$**  ve výběrovém souboru

$n_{j.} = N(X = x_{[j]}) = n_{j1} + \dots + n_{js}$  – **marginální absolutní četnost varianty  $x_{[j]}$**

$p_{j.} = \frac{n_{j.}}{n} = p_{j1} + \dots + p_{js}$  – **marginální relativní četnost varianty  $x_{[j]}$**

$n_{.k} = N(Y = y_{[k]}) = n_{1k} + \dots + n_{rk}$  – **marginální absolutní četnost varianty  $y_{[k]}$**

$p_{.k} = \frac{n_{.k}}{n} = p_{1k} + \dots + p_{rk}$  – **marginální relativní četnost varianty  $y_{[k]}$**

Simultánní četností zapisujeme do kontingenční tabulky.

Kontingenční tabulka simultánních absolutních četností má tvar:

	y	$y_{[1]}$	...	$y_{[s]}$	$n_{j.}$
x	$n_{jk}$				
$x_{[1]}$		$n_{11}$	...	$n_{1s}$	$n_{1.}$
$\vdots$		...	...	...	...
$x_{[r]}$		$n_{r1}$	...	$n_{rs}$	$n_{r.}$
$n_{.k}$		$n_{.1}$	...	$n_{.s}$	$n$

**Příklad:** Máme datový soubor, který obsahuje údaje o známkách z matematiky (znak X), z angličtiny (znak Y) a pohlaví studenta (znak Z, 0 – žena, 1 – muž) u 20 studentů:

X	2	1	4	1	1	4	3	3	1	1	4	4	2	4	2	4	1	4	4	1
Y	2	3	3	1	2	4	3	4	1	1	2	4	2	3	3	4	1	3	4	3
Z	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0

Vytvořte kontingenční tabulku simultánních absolutních a relativních četností pro známky z matematiky a angličtiny.

**Řešení:**

Kontingenční tabulka simultánních absolutních četností

	$y$	1	2	3	4	$n_{j.}$
$x$	$n_{jk}$					
1		4	1	2	0	7
2		0	2	1	0	3
3		0	0	1	1	2
4		0	1	3	4	8
$n_{.k}$		4	4	7	5	$n = 20$

Kontingenční tabulka simultánních relativních četností

	$y$	1	2	3	4	$p_{j.}$
$x$	$p_{jk}$					
1		0,20	0,05	0,10	0,00	0,35
2		0,00	0,10	0,05	0,00	0,15
3		0,00	0,00	0,05	0,05	0,10
4		0,00	0,05	0,15	0,20	0,40
$p_{.k}$		0,20	0,20	0,35	0,25	1,00

## Simultánní a marginální četnostní funkce

Pomocí simultánních relativních četností zavedeme **simultánní četnostní funkci**:

Funkce  $p(x, y) = \begin{cases} p_{jk} & \text{pro } x = x_{[j]}, y = y_{[k]}, j = 1, \dots, r, k = 1, \dots, s \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$  se nazývá simultánní četnostní funkce.

Pomocí marginálních relativních četností zavedeme **marginální četnostní funkce pro znaky X a Y**. Odlišíme je indexem takto:

$$p_1(x) = \begin{cases} p_{.j} & \text{pro } x = x_{[j]}, j = 1, \dots, r \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}, p_2(y) = \begin{cases} p_{.k} & \text{pro } y = y_{[k]}, k = 1, \dots, s \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}.$$

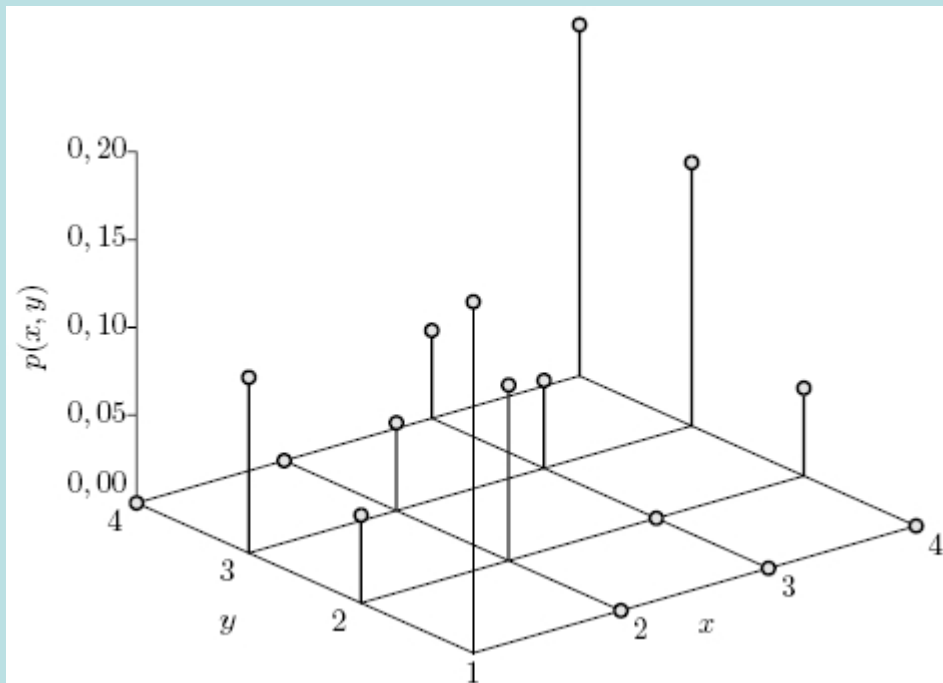
Mezi simultánní četnostní funkcí a marginálními četnostními funkcemi platí vztahy:

$$p_1(x) = \sum_{y=-\infty}^{\infty} p(x, y), p_2(y) = \sum_{x=-\infty}^{\infty} p(x, y).$$

**Příklad:** Sestrojte graf simultánní četnostní funkce pro známky z matematiky a angličtiny.

**Řešení:** Vyjdeme z kontingenční tabulky simultánních relativních četností.

	$y$	1	2	3	4	$p_{j.}$
$x$	$p_{jk}$					
1		0,20	0,05	0,10	0,00	0,35
2		0,00	0,10	0,05	0,00	0,15
3		0,00	0,00	0,05	0,05	0,10
4		0,00	0,05	0,15	0,20	0,40
$p_{.k}$		0,20	0,20	0,35	0,25	1,00





## Četnostní nezávislost znaků v daném výběrovém souboru

Řekneme, že znaky  $X, Y$  jsou v daném výběrovém souboru četnostně nezávislé, právě když

pro všechna  $j = 1, \dots, r$  a všechna  $k = 1, \dots, s$  platí multiplikativní vztah:  $p_{jk} = p_j \cdot p_k$

neboli pro  $\forall (x, y) \in R^2$ :  $p(x, y) = p_1(x) p_2(y)$ .

**Příklad:** Ověřte, zda v našem datovém souboru jsou známky z matematiky a angličtiny četnostně nezávislé.

**Řešení:** Vyjdeme z kontingenční tabulky simultánních relativních četností:

	$y$	1	2	3	4	$p_j$
$x$	$p_{jk}$					
1		0,20	0,05	0,10	0,00	0,35
2		0,00	0,10	0,05	0,00	0,15
3		0,00	0,00	0,05	0,05	0,10
4		0,00	0,05	0,15	0,20	0,40
$p_k$		0,20	0,20	0,35	0,25	1,00

Známky z matematiky a angličtiny nejsou četnostně nezávislé, protože už pro  $j = 1, k = 1$  je multiplikativní vztah porušen:

$p_{11} = 0,20, p_{1.} = 0,35, p_{.1} = 0,20$ , tudíž  $0,20 \neq 0,35 \cdot 0,20$

## Řádkově a sloupcově podmíněné relativní četnosti

$p_{j(k)} = \frac{n_{jk}}{n_{.k}}$  - sloupcově podmíněná relativní četnost varianty  $x_{[j]}$  za předpokladu  $y_{[k]}$

$p_{(j)k} = \frac{n_{jk}}{n_{j.}}$  - řádkově podmíněná relativní četnost varianty  $y_{[k]}$  za předpokladu  $x_{[j]}$ .

Podmíněné relativní četnosti zapisujeme do kontingenční tabulky. Často je vyjadřujeme v procentech.

**Příklad:** Pro datový soubor známek z matematiky a angličtiny sestavte kontingenční tabulku sloupcově a poté řádkově podmíněných relativních četností.

**Řešení:**

Nejprve vypočítáme sloupcově podmíněné relativní četnosti. Použijeme kontingenční tabulku simultánních absolutních četností.

	$y$	1	2	3	4	$n_{j\cdot}$
$x$	$n_{j(k)}$					
1		4	1	2	0	7
2		0	2	1	0	3
3		0	0	1	1	2
4		0	1	3	4	8
$n_{\cdot k}$		4	4	7	5	$n = 20$

	$y$	1	2	3	4
$x$	$p_{j(k)}$				
1		1,00	0,25	0,29	0,00
2		0,00	0,50	0,14	0,00
3		0,00	0,00	0,14	0,20
4		0,00	0,25	0,43	0,80
$\Sigma$		1,00	1,00	1,00	1,00

Interpretujeme např. třetí sloupec: z těch studentů, kteří měli trojku z angličtiny, mělo  $2/7 = 29\%$  jedničku z matematiky,  $1/7 = 14\%$  dvojku z matematiky,  $1/7 = 14\%$  trojku z matematiky a  $3/7 = 43\%$  čtyřku z matematiky.

Nyní vypočítáme řádkově podmíněné relativní četnosti. Opět použijeme kontingenční tabulku simultánních absolutních četností.

	$y$	1	2	3	4	$n_{j\cdot}$
$x$	$n_{j(k)}$					
1		4	1	2	0	7
2		0	2	1	0	3
3		0	0	1	1	2
4		0	1	3	4	8
$n_{\cdot k}$		4	4	7	5	$n = 20$

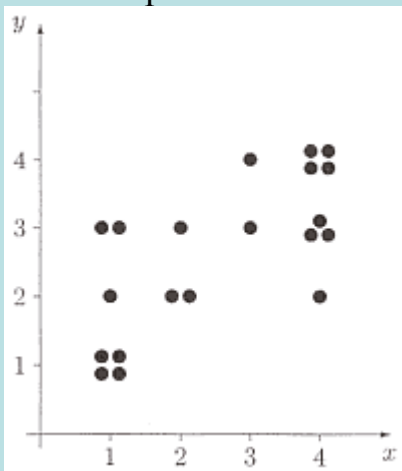
	$y$	1	2	3	4	$\Sigma$
$x$	$p_{(j)k}$					
1		0,57	0,14	0,29	0,00	1,00
2		0,00	0,67	0,33	0,00	1,00
3		0,00	0,00	0,50	0,50	1,00
4		0,00	0,12	0,38	0,50	1,00

Interpretujeme např. první řádek: z těch studentů, kteří měli jedničku z matematiky, mělo  $4/7 = 57\%$  jedničku z angličtiny,  $1/7 = 14\%$  dvojku z angličtiny a  $2/7 = 29\%$  trojku z angličtiny.

## Dvourozměrný tečkový diagram

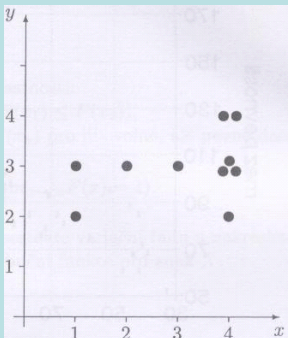
Dvourozměrné rozložení četností lze znázornit pomocí **dvourozměrného tečkového diagramu**. Na vodorovnou osu vyneseme varianty znaku X, na svislou varianty znaku Y a do příslušných průsečíků nakreslíme tolik teček, jaká je absolutní četnost dané dvojice.

V našem příkladě se studenty dostaneme tento diagram:

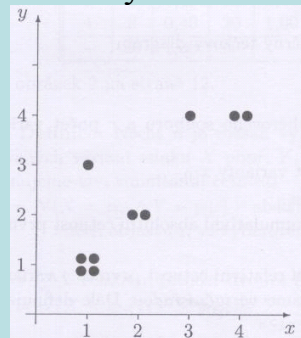


Dvourozměrný tečkový diagram svědčí o nepříliš výrazné tendenci k podobné klasifikaci v obou předmětech. Zcela odlišný vzhled však mají diagramy pro muže a pro ženy:

Pro muže



Pro ženy



## Intervalové rozložení četností

Nechť je dán jednorozměrný datový soubor. Jestliže počet variant znaku  $X$  je blízký rozsahu souboru, pak přiřazujeme nikoliv jednotlivým variantám, ale celým intervalům hodnot. Hovoříme pak o **intervalovém rozložení četnosti**.

Číselnou osu rozložíme na intervaly typu  $\langle -\infty, u_1 \rangle$ ,  $\langle u_1, u_2 \rangle$ , ...,  $\langle u_r, u_{r+1} \rangle$ ,  $\langle u_{r+1}, \infty \rangle$  tak, aby okrajové intervaly neobsahovaly žádnou pozorovanou hodnotu znaku  $X$ . Užíváme označení:

$\langle u_j, u_{j+1} \rangle$  –  **$j$ -tý třídící interval znaku  $X$** ,  $j = 1, \dots, r$ .

$d_j = u_{j+1} - u_j$  – **délka  $j$ -tého třídícího intervalu znaku  $X$** ,  $x_{[j]} = \frac{u_j + u_{j+1}}{2}$  – **střed  $j$ -tého třídícího intervalu znaku  $X$**

Třídící intervaly volíme nejčastěji stejně dlouhé. Jejich počet určíme např. pomocí **Sturgesova pravidla**:  $r = 1 + 3,3 \log_{10} n$ , kde  $n$  je rozsah souboru.

Hodnoty znaku  $X$  roztrídíme do  $r$  třídících intervalů. Pro  $j = 1, \dots, r$  definujeme:

$n_j = N(u_j < X \leq u_{j+1})$  – **absolutní četnost  $j$ -tého třídícího intervalu ve výběrovém souboru**

$p_j = \frac{n_j}{n}$  – **relativní četnost  $j$ -tého třídícího intervalu ve výběrovém souboru**

$f_j = \frac{p_j}{d_j}$  – **četnostní hustota  $j$ -tého třídícího intervalu ve výběrovém souboru**

$N_j = N(X \leq u_{j+1}) = n_1 + \dots + n_j$  – **absolutní kumulativní četnost prvních  $j$  třídících intervalů ve výběrovém souboru**

$F_j = \frac{N_j}{n} = p_1 + \dots + p_j$  – **relativní kumulativní četnost prvních  $j$  třídících intervalů ve výběrovém souboru.**

Tabulka typu

$\langle u_j, u_{j+1} \rangle$	$d_j$	$n_j$	$p_j$	$f_j$	$N_j$	$F_j$
$\langle u_1, u_2 \rangle$	$d_1$	$n_1$	$p_1$	$f_1$	$N_1$	$F_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\langle u_r, u_{r+1} \rangle$	$d_r$	$n_r$	$p_r$	$f_r$	$N_r$	$F_r$
Součet		$n$	1			

se nazývá **tabulka rozložení četností**.

**Příklad:** Do laboratoře bylo dodáno 60 vzorků a byly zjištěny a hodnoty znaku X – mez plasticity (v  $\text{kp/cm}^2$ ) a Y – mez pevnosti (v  $\text{kp/cm}^2$ ). Datový soubor má tvar:

154	178	83	98	73	76
133	164	106	111	77	85
58	75	92	104	47	61
145	161	85	103	68	85
94	107	112	118	137	142
113	141	98	102	44	68
86	97	103	108	92	116
121	127	99	119	141	157
119	138	104	128	155	189
112	125	107	118	136	155
85	97	98	140	82	81
41	72	97	115	136	163
96	113	105	101	72	79
45	89	71	93	66	81
99	109	39	69	42	61
51	95	122	147	113	123
101	114	33	52	42	85
160	169	78	117	133	147
87	101	114	137	153	179
88	139	125	149	85	91

- Pro znak X stanovte optimální počet třídících intervalů dle Sturgesova pravidla.
- Sestavte tabulku rozložení četností.

### Řešení:

ad a) Rozsah souboru je 60. Podle Sturgesova pravidla je optimální počet třídících intervalů  $r = 7$ . Budeme tedy volit 7 intervalů stejné délky tak, aby v nich byly obsaženy všechny pozorované hodnoty znaku X, z nichž nejmenší je 33, největší 160; volba  $u_1 = 30, \dots, u_8 = 170$  splňuje požadavky.

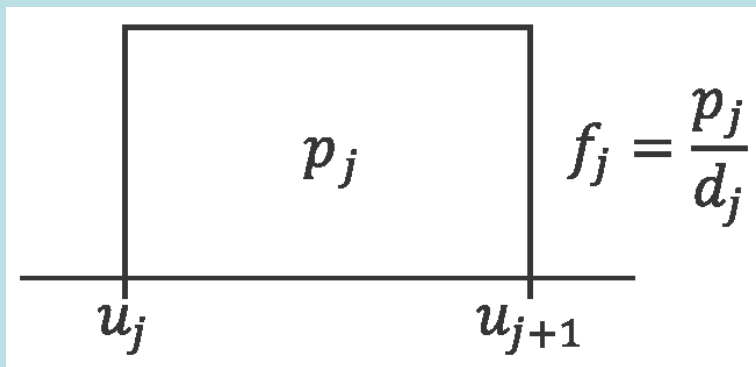
ad b)

$\langle u_j, u_{j+1} \rangle$	$d_j$	$x_{[j]}$	$n_j$	$p_j$	$N_j$	$F_j$	$f_j$
$\langle 0, 50 \rangle$	20	40	8	$8/60 = 0,1\bar{3}$	8	$8/60 = 0,1\bar{3}$	$8/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{6}$
$\langle 0, 70 \rangle$	20	60	4	$4/60 = 0,0\bar{6}$	12	$12/60 = 0,2$	$4/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{3}$
$\langle 0, 90 \rangle$	20	80	13	$13/60 = 0,21\bar{6}$	25	$25/60 = 0,41\bar{6}$	$13/(60 \cdot 20) = 0,018\bar{3}$
$\langle 0, 110 \rangle$	20	100	15	$15/60 = 0,25$	40	$40/60 = 0,6\bar{6}$	$15/(60 \cdot 20) = 0,0125$
$\langle 10, 130 \rangle$	20	120	9	$9/60 = 0,15$	49	$49/60 = 0,81\bar{6}$	$9/(60 \cdot 20) = 0,0075$
$\langle 30, 150 \rangle$	20	140	7	$7/60 = 0,11\bar{6}$	56	$56/60 = 0,9\bar{3}$	$7/(60 \cdot 20) = 0,0058\bar{3}$
$\langle 50, 170 \rangle$	20	160	4	$4/60 = 0,0\bar{6}$	60	$60/60 = 1$	$4/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{3}$
Součty			60	1			

## Histogram, hustota četnosti, intervalová empirická distribuční funkce

Intervalové rozložení četností graficky znázorňujeme pomocí **histogramu**.

Je to graf skládající se z  $r$  obdélníků, sestavených nad třídícími intervaly, přičemž obsah  $j$ -tého obdélníku je roven relativní četnosti  $p_j$   $j$ -tého třídícího intervalu,  $j = 1, \dots, r$ .



Histogram je shora omezen schodovitou čarou, která je grafem funkce zvané **hustota četnosti**:

$$f(x) = \begin{cases} f_j & \text{pro } u_j < x \leq u_{j+1}, j=1, \dots, r \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

Pomocí hustoty četnosti zavedeme **intervalovou empirickou distribuční funkci**:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt.$$

Hustota četnosti je nezáporná ( $\forall x \in \mathbb{R} : f(x) \geq 0$ ) a normovaná ( $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$ ).

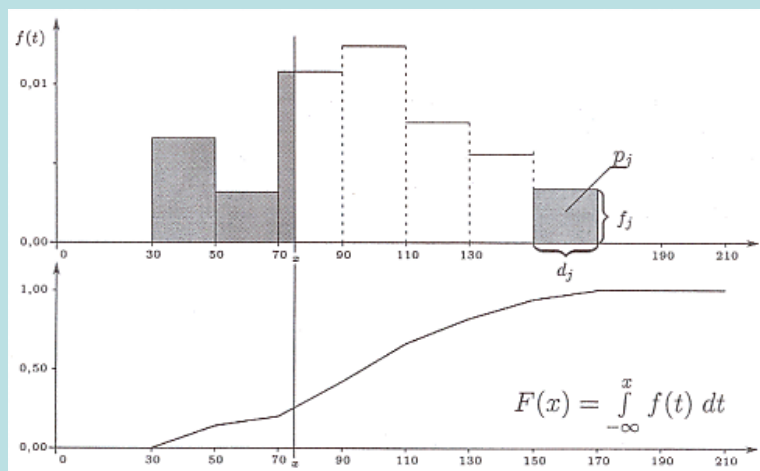
Intervalová empirická distribuční funkce je neklesající, spojitá a normovaná ( $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$ ).



**Příklad:** Pro mez plasticity oceli nakreslete histogram a pod histogram graf intervalové empirické distribuční funkce.

**Řešení:** Vyjdeme z tabulky rozložení četností.

$\langle u_j, u_{j+1} \rangle$	$d_j$	$x_{[j]}$	$n_j$	$p_j$	$N_j$	$F_j$	$f_j$
$\langle 0, 50 \rangle$	20	40	8	$8/60 = 0,1\bar{3}$	8	$8/60 = 0,1\bar{3}$	$8/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{6}$
$\langle 0, 70 \rangle$	20	60	4	$4/60 = 0,0\bar{6}$	12	$12/60 = 0,2$	$4/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{3}$
$\langle 0, 90 \rangle$	20	80	13	$13/60 = 0,21\bar{6}$	25	$25/60 = 0,41\bar{6}$	$13/(60 \cdot 20) = 0,018\bar{3}$
$\langle 0, 110 \rangle$	20	100	15	$15/60 = 0,25$	40	$40/60 = 0,6\bar{6}$	$15/(60 \cdot 20) = 0,0125$
$\langle 10, 130 \rangle$	20	120	9	$9/60 = 0,15$	49	$49/60 = 0,81\bar{6}$	$9/(60 \cdot 20) = 0,0075$
$\langle 30, 150 \rangle$	20	140	7	$7/60 = 0,11\bar{6}$	56	$56/60 = 0,9\bar{3}$	$7/(60 \cdot 20) = 0,0058\bar{3}$
$\langle 50, 170 \rangle$	20	160	4	$4/60 = 0,0\bar{6}$	60	$60/60 = 1$	$4/(60 \cdot 20) = 0,00\bar{3}$
Součty			60	1			



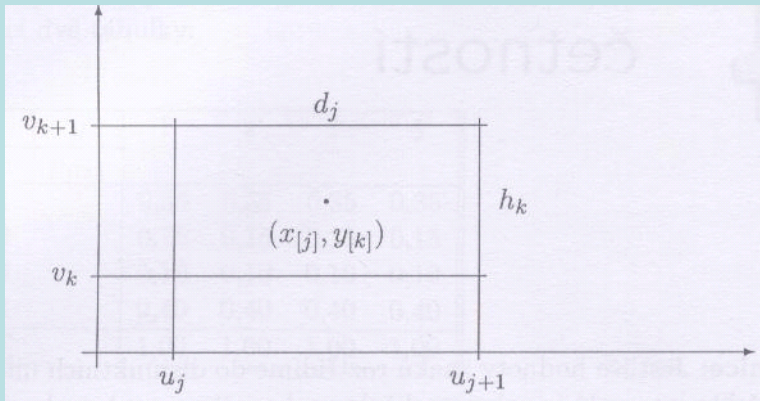
## Dvourozměrné intervalové rozložení četností

Dále se budeme věnovat dvourozměrnému intervalovému rozložení četností, tj. budeme pracovat s dvourozměrným datovým souborem. Zavedeme podobné pojmy jako u dvourozměrného bodového rozložení četností

Nechť je dán dvourozměrný datový soubor  $\begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \dots & \dots \\ x_n & y_n \end{pmatrix}$ , kde hodnoty znaku X roztrídíme do r třídících intervalů  $\langle u_j, u_{j+1} \rangle$ ,

$j = 1, \dots, r$  s délkami  $d_1, \dots, d_r$  a hodnoty znaku Y roztrídíme do s třídících intervalů  $\langle v_k, v_{k+1} \rangle$ ,  $k = 1, \dots, s$  s délkami  $h_1, \dots, h_s$ .

Obdélník  $\langle u_j, u_{j+1} \rangle \times \langle v_k, v_{k+1} \rangle$  se nazývá (j,k)-tý **dvourozměrný třídící interval**.



## Simultánní a marginální četnosti

$n_{jk} = N(u_j < X \leq u_{j+1} \wedge v_k < Y \leq v_{k+1})$  – simultánní absolutní četnost (j, k)-tého třídícího intervalu.

$p_{jk} = \frac{n_{jk}}{n}$  – simultánní relativní četnost(j, k)-tého třídícího intervalu.

$n_{j.} = n_{j1} + \dots + n_{js}$  – marginální absolutní četnost j-tého třídícího intervalu pro znak X.

$p_{j.} = \frac{n_{j.}}{n}$  – marginální relativní četnost j-tého třídícího intervalu pro znak X.

$n_{.k} = n_{1k} + \dots + n_{rk}$  – marginální absolutní četnost k-tého třídícího intervalu pro znak Y.

$p_{.k} = \frac{n_{.k}}{n}$  – marginální relativní četnost k-tého třídícího intervalu pro znak Y.

$f_{jk} = \frac{p_{jk}}{d_j h_k}$  – simultánní četnostní hustota v (j, k)-tém třídícím intervalu.

$f_{j.} = \frac{p_{j.}}{d_j}$  – marginální četnostní hustota v j-tém třídícím intervalu pro znak X.

$f_{.k} = \frac{p_{.k}}{h_k}$  – marginální četnostní hustota v k-tém třídícím intervalu pro znak Y.

Kteroukoliv ze simultánních četností zapisujeme do kontingenční tabulky.

Uvedme kontingenční tabulku simultánních absolutních četností:

	$(v_k, v_{k+1})$	$(v_1, v_2)$	...	$(v_s, v_{s+1})$	
$(u_j, u_{j+1})$	$n_{jk}$				$n_{j.}$
$(u_1, u_2)$		$n_{11}$	...	$n_{1s}$	$n_{1.}$
$\vdots$					$\vdots$
$(u_r, u_{r+1})$		$n_{r1}$	...	$n_{rs}$	$n_{r.}$
$n_{.k}$		$n_{.1}$	...	$n_{.s}$	$n$

**Příklad:** Pro datový soubor obsahující údaje o mezi plasticity (znak X) a mezi pevnosti (znak Y) oceli

a) stanovte dle Sturgesova pravidla optimální počet třídících intervalů pro znak Y

b) sestavte kontingenční tabulku simultánních absolutních četností.

**Řešení:**

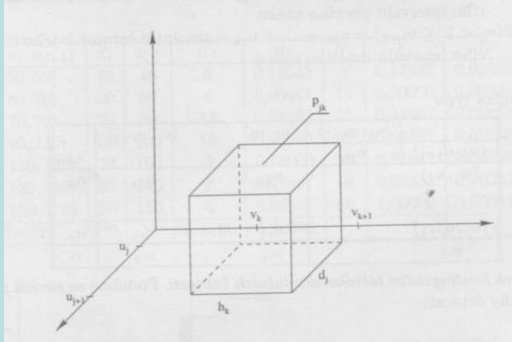
ad a) Rozsah datového souboru je 60. Podle Sturgesova pravidla je tedy optimální počet třídících intervalů  $s = 7$ . Nejmenší hodnota je 52 a největší 189. Volíme  $v_1 = 50, v_2 = 70, \dots, v_8 = 190$ .

ad b)

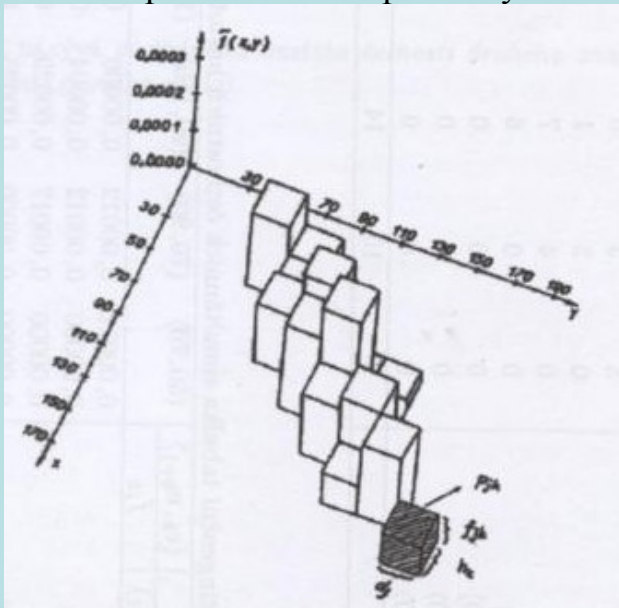
	$\langle v_k, v_{k+1} \rangle$	(50, 70)	(70, 90)	(90, 110)	(110, 130)	(130, 150)	(150, 170)	(170, 190)	
$\langle u_j, u_{j+1} \rangle$	$n_{jk}$								$n_{.j}$
(30, 50)		5	3	0	0	0	0	0	8
(50, 70)		0	3	1	0	0	0	0	4
(70, 90)		0	4	7	1	1	0	0	13
(90, 110)		0	0	6	8	1	0	0	15
(110, 130)		0	0	0	4	5	0	0	9
(130, 150)		0	0	0	0	2	5	0	7
(150, 170)		0	0	0	0	0	1	3	4
$n_{.k}$		5	10	14	13	9	6	3	$n = 60$

## Stereogram

Dvourozměrné intervalové rozložení četností graficky znázorňujeme pomocí **stereogramu**. Je to graf skládající se z  $r \times s$  kvádrů, sestavených nad dvourozměrnými třídicími intervaly, přičemž objem  $(j, k)$ -tého kvádrů je roven relativní četnosti  $p_{jk}$   $(j, k)$ -tého třídicího intervalu,  $j = 1, \dots, r$ ,  $k = 1, \dots, s$ . Výška kvádrů tedy vyjadřuje simultánní četnostní hustotu.



V našem příkladě s mezí plasticity a mezí pevnosti oceli bude mít stereogram tvar:



## Simultánní a marginální hustota četnosti

Pomocí simultánních četnostních hustot zavedeme **simultánní hustotu četnosti**:

$$\text{Funkce } f(x, y) = \begin{cases} f_{jk} & \text{pro } u_j < x \leq u_{j+1}, v_k < y \leq v_{k+1}, j=1, \dots, r, k=1, \dots, s \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

se nazývá simultánní hustota četnosti. Jejím grafem je schodovitá plocha shora omezující stereogram.

Hustoty četnosti pro znaky X a Y odlišíme indexem takto:

$$f_1(x) = \begin{cases} f_j & \text{pro } u_j < x \leq u_{j+1}, j=1, \dots, r \\ 0 & \text{jinak} \end{cases},$$

$$f_2(y) = \begin{cases} f_k & \text{pro } v_k < y \leq v_{k+1}, k=1, \dots, s \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}.$$

Mezi simultánní hustotou četnosti a marginálními hustotami četnosti platí vztahy:

$$f_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy, \quad f_2(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx.$$

## Četnostní nezávislost znaků v daném výběrovém souboru při intervalovém rozložení četností

Pomocí simultánních a marginálních četnostních zavedeme pojem **četnostní nezávislosti znaků v daném výběrovém souboru při intervalovém rozložení četností**:

Řekneme, že znaky X, Y jsou v daném výběrovém souboru četnostně nezávislé při intervalovém rozložení četností, jestliže pro všechna  $j = 1, \dots, r$  a všechna  $k = 1, \dots, s$  platí multiplikativní vztah:  $f_{jk} = f_{j.} \cdot f_{.k}$  neboli pro  $\forall (x, y) \in \Omega^2$ :  $f(x, y) = f_1(x) \cdot f_2(y)$ .

**Příklad:** Zjistěte, zda mez pevnosti a mez plasticity jsou četnostně nezávislé.

**Řešení:** Vyjdeme z kontingenční tabulky simultánních absolutních četností.

	$(v_k, v_{k+1})$	(50, 70)	(70, 90)	(90, 110)	(110, 130)	(130, 150)	(150, 170)	(170, 190)	$n_{.j}$
$(u_j, u_{j+1})$	$n_{jk}$								$n_{.j}$
(30, 50)		5	3	0	0	0	0	0	8
(50, 70)		0	3	1	0	0	0	0	4
(70, 90)		0	4	7	1	1	0	0	13
(90, 110)		0	0	6	8	1	0	0	15
(110, 130)		0	0	0	4	5	0	0	9
(130, 150)		0	0	0	0	2	5	0	7
(150, 170)		0	0	0	0	0	1	3	4
$n_{.k}$		5	10	14	13	9	6	3	$n = 60$

Vidíme, že už pro  $j = 1, k = 1$  je multiplikativní vztah porušen:

$$f_{11} = \frac{5}{60 \cdot 20 \cdot 20} = 0,000208, \quad f_{1.} = \frac{8}{60 \cdot 20} = 0,006667, \quad f_{.1} = \frac{5}{60 \cdot 20} = 0,004167, \quad \text{tudíž}$$

$0,000208 \neq 0,006667 \cdot 0,004167 = 0,000028$  a mez pevnosti a mez plasticity nejsou četnostně nezávislé.