

Ing. Jaroslav Z e l e n k a, VÚHU

Vliv měrné rypné síly a obvodové rychlosti na výkonost pohonu kola

Použité symboly:

k	- měrná rypná síla	(kp/cm)
k_r	- měrná řezná síla	(kp/cm)
N	- celková výkonost kola	(kW)
N_z	- výkonost pro zvedání zeminy v korečku	(kW)
R	- poloměr kola	(m)
D	- průměr kola	(m)
n	- počet otáček kola	(1/min)
p	- počet výsypů	(1/min)
η	- celková účinnost pohonu kola	
$l_{stř}$	- střední délka řezných hran dle VÚHU	(cm)
$L_{stř}$	- střední délka řezných hran dle RVHP	(cm)
G_H	- hmotnost zeminy v korečku	(kg)
H_z	- výška zdvihu zeminy v korečku	(m)
Q_r	- teoretická těžební výkonost kola v rostlé zemině	(m ³ /hod)
s_o	- hloubka třísky	(cm)
b	- šířka třísky	(cm)
z	- počet korečků na kolese	
β_K	- úhel záběru kola	(grad)
v_o	- obvodová rychlost kola	(m/s)
k_p	- poměr řezných hran třísky	

Pomineme-li těžební výkonost kolesového rypadla, která je základním parametrem vyplývajícím z požadovaných těžebních podmínek, pak optimální výkonost pohonné jednotky pro koleso je ovlivněna dvěma dalšími základními parametry, a to:

- a) měrnou rypnou silou
- b) obvodovou rychlostí kola.

Pro vyjasnění pojmů uvedeme nejprve základní definice. Pod pojmem měrná řezná síla na kolese se rozumí obvodová síla, přepočtená na 1 cm délky řezné hrany, která je vyvinuta k rozpojování a urychlení zeminy a k překonání všech pasivních odporů, a to jak třecích účinků zeminy a korečku, tak i pasivních odporů kola a pohonné jednotky. Ve vztahu k zemině odpovídá tato hodnota měrnému řeznému odporu.

V hodnotě měrné řezné síly není započtena složka potřebná pro zdvih zeminy v korečku od místa rozpojení k místu výsypu. Jestliže do obvodové síly zahrneme i tuto složku, pak tato hodnota přepočtená na 1 cm délky řezné hrany korečku se nazývá měrnou rypnou silou a ve vztahu k zemině odpovídá měrnému rypnému odporu.

Zde je však nutno si jasně uvědomit, že měrná řezná nebo rypná síla je určována základními parametry kola (výkonnost pohonu, počet výsypů, průměr kola apod.). Měrný řezný nebo rypný odpor zeminy je základním parametrem rýpané zeminy a je ovlivněn jejími půdně mechanickými vlastnostmi. Při požadavku vysoké měrné rypné nebo řezné síly se úměrně zvyšuje velikost pohonné jednotky a tím narůstá tíhové zatížení na špičce kolesového výložníku, což vede k nadměrnému zvýšení hmotnosti kolesového rypadla. Při malé hodnotě měrné rypné síly snižuje se však těžební výkonnost rypadla v tvrdých zeminách.

Pro dokonalé využití těžební výkonnosti rypadla by měla proto platit buď rovnost měrné rypné síly a měrného rypného odporu, nebo zvýšení rypných odporů zeminy jen ojediněle ve výjimečných případech.

Měrná rypná síla zásadně vyplývá ze základních parametrů kola a je určena vztahem:

$$k = \frac{975 \cdot N \cdot \eta}{R \cdot n} \cdot \frac{1}{l_{\text{stř}}} \quad (\text{kp/cm})$$

Měrná řezná síla je vyjádřena rovnicí:

$$k_r = \frac{975 \cdot N_r \cdot \eta}{R \cdot n} \cdot \frac{1}{l_{\text{stř}}} \quad (\text{kp/cm})$$

kde $-N_r-$ je zbytková výkonnost pohonu kola po odečtení výkonové složky $-N_z-$, která se spotřebuje na zvedání zeminy v korečku do místa výsypu a určíme ji:

$$N_z = \frac{G_H \cdot p \cdot H_z}{102 \cdot 60} \quad (\text{kw})$$

Výška zdvihu zeminy v korečku $-H_z-$ do místa výsypu je závislá na:

- a) srpovitým tvarem třísky
- b) konstrukčním provedení vynášecího zařízení a tím na úhlu výsypu
- c) lepivosti zeminy.

V uvedeném vztahu se uvažuje v hodnotě:

$$H_z = (0,5 - 0,65) \cdot D$$

Po úpravě lze základní vztah pro výkonnost zjednodušit:

$$N_z = \frac{Q \cdot D}{278}$$

kde je dosazeno:

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{měrná tíha zeminy v korečku} &= 2,2 \text{ Mp/m}^3 \\ H_z &= 0,6 D \end{aligned}$$

Pro názornost o velikosti uvedené výkonové složky je vynesena grafická závislost na obr. 1, kde vyplývá lineární závislost této složky na zvyšování těžební výkonnosti v rostlé zemině a na průměru kola.

Pro určení základní položky ve výkonové rovnici a to střední délky řezných hran $-l_{\text{str}}-$ se používá dosud dvou různých výpočtových postupů, a to:

a) dle metodiky VÚHU Most

$$l_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \left[\beta_K \cdot b + (1 - \cos \beta_K) \cdot s_0 + \frac{s_c^2}{4R} \cdot \left(\beta_K + \frac{\sin 2\beta_K}{2} \right) \right]$$

Metodika výpočtu vychází ze základního vztahu pro obecnou hloubku třísky -s-

$$s = s_0 \cdot \sin \varphi + \frac{1}{2} \frac{s_0^2 \cdot \cos^2 \varphi}{R},$$

kde druhý člen, odvozený rozvinutím druhé odmocniny řadou, respektuje nepatrný přírůstek pro hloubku třísky v obecné poloze korečku. Ve výpočtu uvažuje obdélníkový profil třísky, tím je zanedbáno zaoblení korečku a vypočtená hodnota střední délky řezných hran je menší oproti skutečné.

b) dle metodiky RVHP, zpracované v NDR:

$$L_{\text{stř}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[\beta_K \cdot b + \left(\frac{3\beta_K}{\pi} - 0,425 \right) \cdot (s_0 + 0,7 r) \right]$$

V tomto případě je zanedbán druhý člen pro obecnou hloubku třísky, uvažuje se však vliv zaoblení korečku -r-. Závislost byla odvozena grafickým řešením dvojného integrálu, který zahrnuje vliv poloměru zaoblení korečku -r- na hloubku třísky -s- v závislosti na úhlu záběru kola - β_K -. Jeho platnost je proto omezena okrajovými podmínkami:

$$a) \quad 0,7 = \frac{s_0}{r} = 2,5$$

$$b) \quad \frac{14}{16} = \beta_K = \frac{22}{16}$$

Srovnání obou vzorců pro střední délku řezných hran lze provést jen při podmínce:

$$\beta_K = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

V tomto případě lze položit ve vzorci RVHP $r = 0$ a oba vzorce dávají shodné výsledky:

$$\text{dle metodiky VÖHU} \quad L_{\text{stř}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot b + s_0 + \frac{\pi \cdot c^2}{8R} \right)$$

dle metodiky RVHP $L_{stř} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot b + 1,075 s_o \right)$

Pro jiný úhel záběru kola β_K nelze srovnání provést, jelikož ve vzorci RVHP nelze uvažovat $r = 0$, tím se narušují omezující podmínky.

Metodika výpočtu měrné řezné nebo rypné síly podle RVHP uvažuje též optimální poměr rozměrů třísky $-b-$ a $-s_o-$ při minimální délce hran. Tento poměr odvozený ze základní rovnice pro $L_{stř}$ vychází:

$$\frac{s_o}{b} \text{ opt} = \frac{\beta_K}{3\beta_K - \frac{\pi}{2} - 0,425}$$

a není závislý na poloměru zaoblení korečku $-r-$.

Při dosazení: $\beta_K = -\frac{\pi}{2} = 90^\circ$

$$\frac{s_o}{b} \text{ opt} = 1,46$$

S touto hodnotou je uvažováno též ve výsledném a nyní velmi často používaném vzorci RVHP pro výpočet měrné řezné síly:

$$k_r = \frac{232 N - Q_r \cdot D}{\sqrt{Q_r \cdot D \cdot p} + 1,59 \cdot D \cdot p \cdot r}$$

Při výpočtu měrné rypné síly je vynechán v čitateli zlomku výraz $Q_r \cdot D$, který představuje výkonnost pro vynášení zeminy v korečku.

Uvedené vzorce platí pro následující podmínky:

$$\eta = 0,9 \quad \beta_K = \frac{\pi}{2} \quad \frac{s_o}{b} \text{ opt} = 1,46$$

$$H_z = 0,65 D$$

$$\gamma = 2,2 \text{ Mp/m}^3$$

Jestliže však nebude dodržen optimální poměr stran rýpané třísky, změní se výrazně měrná řezná i rypná síla. Pro názornost uvádíme změnu

délky řezných hran (při konstantním počtu korečků) při různém poměru stran rýpané třísky.

$$1. \quad s_0 = 100 \text{ cm} \quad b = 100 \text{ cm} \quad \frac{s_0}{b} = 1$$

$$L_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[2,645 + 1,075 \cdot 0,7 \cdot r \right]$$

$$2. \quad s_0 = 100 \text{ cm} \quad b = 68,5 \text{ cm} \quad \frac{s_0}{b} \text{ opt} = 1,46$$

$$L_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[2,15 + 1,075 \cdot 0,7 \cdot r \right]$$

$$3. \quad s_0 = 100 \text{ cm} \quad b = 50 \text{ cm} \quad \frac{s_0}{b} = 2$$

$$L_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[1,860 + 1,075 \cdot 0,7 \cdot r \right]$$

Délka řezných hran v uvedeném rozmezí poměrů stran odebírané třísky se liší ca o 20 - 30 % a tím úměrně ovlivňuje velikost měrné rypné nebo řezné síly. Tuto okolnost je nutno zvláště brát v úvahu při měření rypných odporů při různých poměrech stran třísky, jestliže se použije při vyhodnocení vzorců RVHP.

Dalším základním parametrem pro výkonnost pohonné jednotky kola je obvodová rychlost.

Horní hranice obvodové rychlosti kola je závislá především na správném vyklopení zeminy z korečku. Zvyšováním obvodové rychlosti kola narůstá kvadraticky odstředivá síla, působící na zeminu v korečku a je hlavní překážkou dokonalého gravitačního výsypu zeminy z korečku. Z podmínky silové rovnováhy mezi vahou zeminy a působící odstředivou silou na zeminu v korečku lze určit odpovídající obvodovou rychlost kola, kdy zemina z korečku nevypadne:

$$v_{\text{max}} = 2,21 \cdot \sqrt{D}$$

Vezmeme-li v úvahu všechny další vlivy pro plynulý výsyp zeminy, jako nalepování, napěchování zeminy v korečku, třecí účinky apod., nelze docílit uvedené hodnoty obvodové rychlosti kola.

V odborné literatuře se často používá porovnávací vzorec:

$$v_o = k_v \cdot v_{\max}$$

Pro současná kolesová rypadla v provozu nebo v projekci se používá hodnota rychlostního součinitele $-k_v-$ v rozmezí:

$$k_v = 0,3 \div 0,6$$

a to v závislosti na velikosti korečků. U malých typů koles používá se vyšší hodnoty rychlostního součinitele $-k_v-$, u velkých průměrů kola je používána nižší hodnota. Pro ověření dokonalého výsypu zeminy z korečků byla provedena zkouška na kolesovém rypadle KU 801 při vyšší obvodové rychlosti, která dokázala, že i při rychlostním koeficientu $k_v = 0,64$ se objevují potíže při výsypu zeminy jen výjimečně při zhoršených podmínkách dobývané zeminy. Zde je však nutno připomenout, že hodnota rychlostního součinitele $-k_v-$ je závislá na velikosti úhlu výsypu z kola.

Závěrem je však možno konstatovat, že bezpečný výsyp zeminy z korečku je zajištěn při

$$k_v = 0,4 - 0,45$$

což odpovídá rychlosti kola:

$$v_o = (0,884 - 0,995) \cdot \sqrt{D}$$

Přesto však poslední vývoj ve světě při výrobě a projekci velkých kolesových rypadel vykazuje pokles velikosti obvodové rychlosti kola. Hlavním důvodem však zde není problém vyklápění zeminy z korečků, ale závislost obvodové rychlosti na výkonnosti pohonné jednotky kola a tím i na celkovém zatížení na špičce kolesového výložníku.

Abychom stanovili alespoň přibližně závislost měrné rypné síly a obvodové rychlosti kola na velikost pohonu kola, použijeme k odvození základní vztah z výpočtové metodiky VÚHU s tím, že zanedbáme poslední nepatrně ovlivňující člen při výpočtu střední délky řezných hran, a to:

$$l_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[\beta_K \cdot b + (1 - \cos \beta_K) \cdot s_o \right]$$

Tím je také zanedbán vliv zaoblení korečku.

V dalším výpočtu použijeme:

$$\beta_K = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad \frac{s_o}{b} = k_p \Rightarrow b = \frac{1}{k_p} \cdot s_o$$

$$l'_{\text{str}} = \frac{z}{2\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{2 k_p} \cdot s_o + s_o \right]$$

$$l'_{\text{str}} = \frac{z \cdot s_o}{2\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{2 k_p} + 1 \right]$$

Celková výkonnost pohonu kola je vyjádřena:

$$N = \frac{1}{102 \cdot \eta} \cdot k \cdot l'_{\text{str}} \cdot v_o$$

Po dosazení předcházející rovnice:

$$N = \frac{\frac{\pi}{2 k_p} + 1}{2 \cdot 102 \cdot \eta} \cdot z \cdot s_o \cdot v_o \cdot k$$

Pro teoretickou těžební výkonnost kola v rostlé zemině lze odvodit vztah:

$$Q_r = \frac{0,36}{2\pi \cdot k_p} \cdot s_o^2 \cdot z \cdot v_o$$

a po dosazení do předcházející rovnice:

$$N = \frac{\pi + 2 k_p}{0,72 \cdot 102 \cdot \eta} \cdot \frac{Q_r \cdot k}{s_o}$$

Poslední tři odvozené rovnice jsou pro názornost vyneseny v diagramech na přiložených obrázcích.

Na obr. 2 je uvedena závislost:

$$N = \frac{\pi + 2 k_p}{408 \cdot \pi \cdot \eta \cdot k_p} \cdot z \cdot s_o \cdot v_o \cdot k,$$

což představuje základní vztah mezi výkonností pohonu kola a hlavními parametry rýpané třísky. Zvláštní pozornost nutno věnovat kusovitosti rýpané třísky. Jak ukazuje provedený výpočet na diagramu, lze docílit při stejné obvodové rychlosti kola $-v_o-$ a stejné měrné rypné síle $-k-$ různou velikost pohonu kola v závislosti na velikosti rýpané třísky a počtu korečků. Zvláště výrazné zvýšení výkonnosti pohonu nastává při velmi malé požadované kusovitosti, kdy je nutno zvýšit obvodovou rychlost kola $-v_o-$.

Při tom však teoretická těžební výkonnost kola $-Q_r-$ je stejná při konstantní měrné rypné síle $-k-$.

Názorný případ lze uvést pro kolesová rypadla KU 800 a SRs 2400, kde při prakticky stejné těžební výkonnosti $-Q_r-$ jsou různé pohonné jednotky (KU 800 - 1600 kW; SRs 2400 - 1260 kW). Přesto je však u rypadla SRs 2400 dosaženo při nižší výkonové jednotce vyšší měrné rypné síly avšak při značně zvýšené kusovitosti rýpané zeminy, což velmi často není při zjednodušeném posuzování základních parametrů bráno v úvahu.

Na obr. 3 je vynesena závislost:
$$Q_r = \frac{0,36}{2\pi \cdot k_p} \cdot s_o^2 \cdot z \cdot v_o$$

kde lze pro požadovanou těžební výkonnost určit obvodovou rychlost $-v_o-$ v závislosti na požadované kusovitosti.

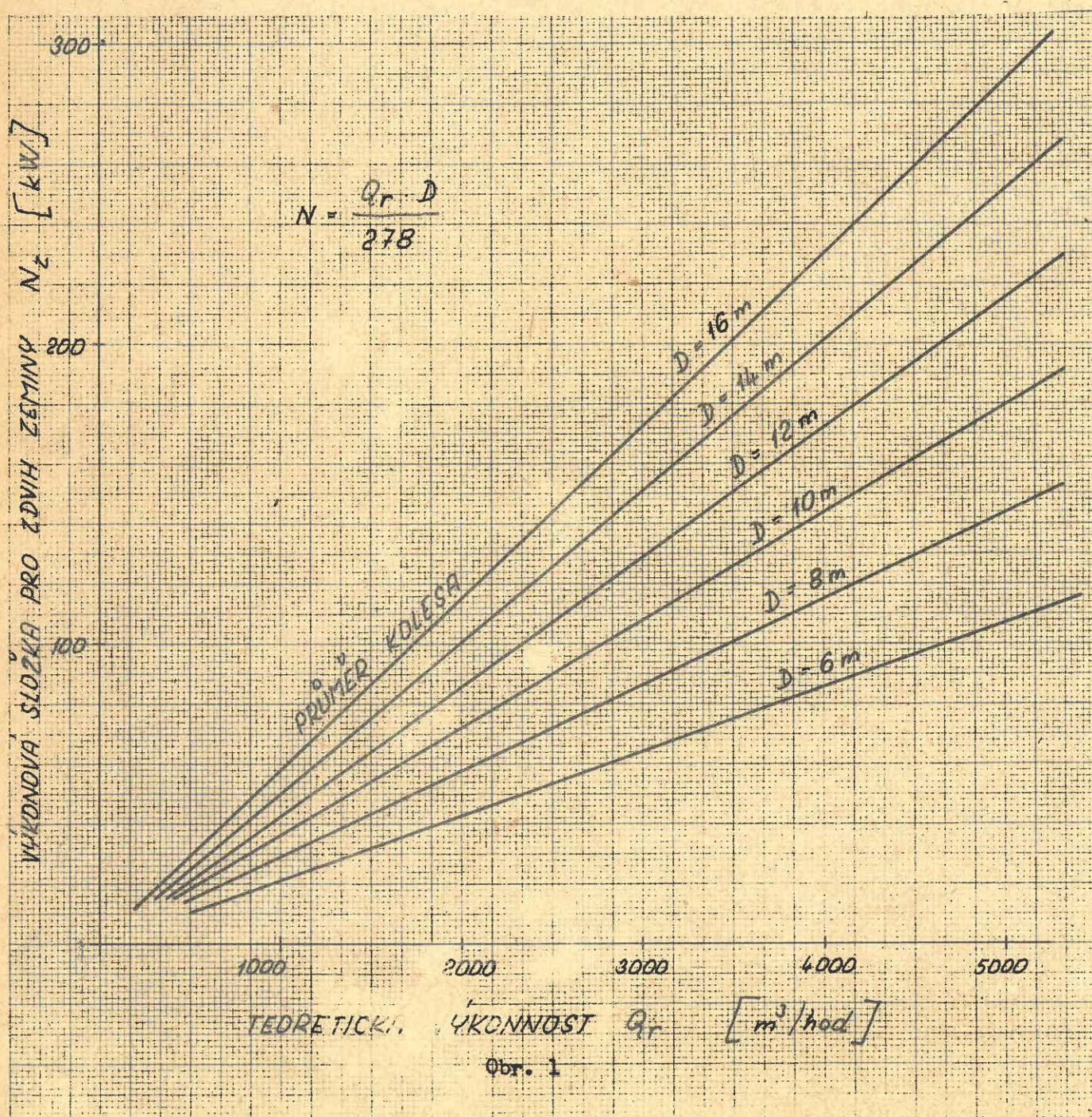
Na obr. 4 je uveden vztah:
$$N = \frac{\pi + 2 k_p}{0,72 \cdot 102 \cdot \eta} \cdot \frac{G_r \cdot k}{s_o}$$

kde lze pro požadovanou měrnou rypnou sílu a těžební výkonnost stanovit výkonnost pohonu tělesa v závislosti na kusovitosti.

Uvedené závislosti vyplývají z výpočtu dle metodiky VŮHU a je proto nutno dosazovat měrnou rypnou sílu stanovenou dle této metodiky.

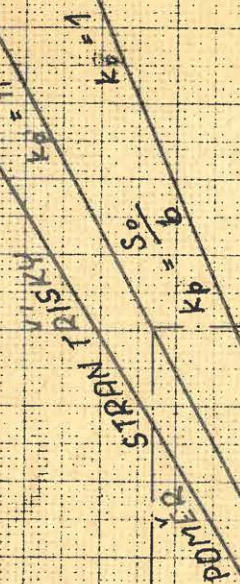
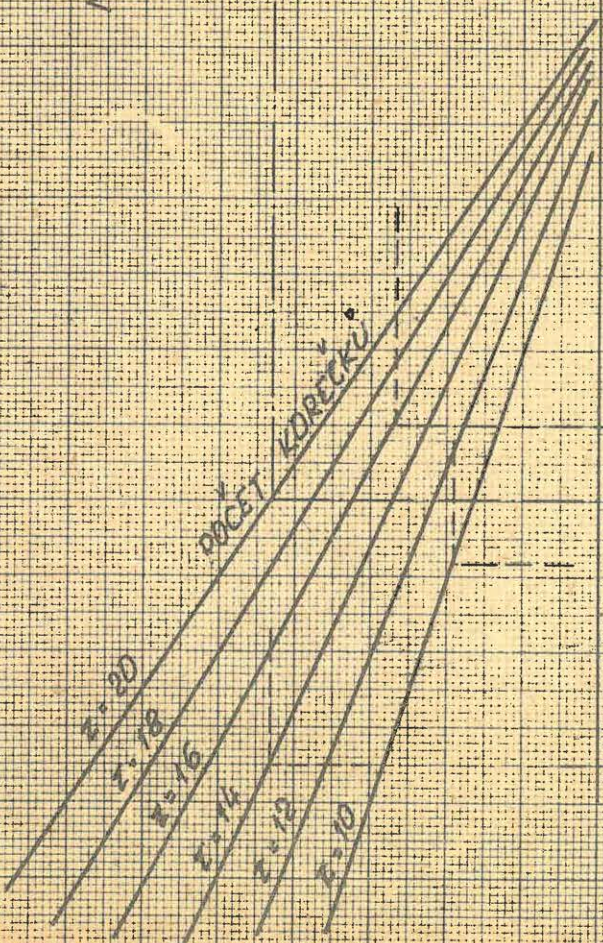
Celková účinnost kola je v uvedených výpočtech uvažována v konstantní hodnotě $\eta = 0,85$.

zifischen Schneid- oder Grabkraft des Schaufelrads angewendeten Rechen-
methoden analysiert. In die Berechnung der Schaufelradantriebsleistung
wurde auch die Schaufelradumfangsgeschwindigkeit aufgenommen. Auch wer-
den Diagramme für die abgeleiteten Grundbeziehungen angegeben, aus de-
nen die Abhängigkeit klar hervorgeht, die zwischen der Grösse der Schau-
felradantriebseinheit und Stückigkeit des Spans bei konstanter spezi-
fischer Grabkraft, Umfangsgeschwindigkeit und theoretischer Förder-
leistung des Schaufelrads besteht.



$$N = \frac{\pi}{2\pi \cdot 102.3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1.5}}$$

$$z = 0.85$$



VÝKONNOST POHONU KOLESA N [kW]

1500
1000
500

OBVODOVÁ RYCHLOST KOLESA v_0 [m/s]

1
2
3
4

PRŮMĚRNÁ RYCHLOST v [m/s]

$k = 50$

k [kp/cm]

$k = 100$

$k = 150$

$k = 200$

HLoubKA [cm]

v'_{54}

$30 = 10$

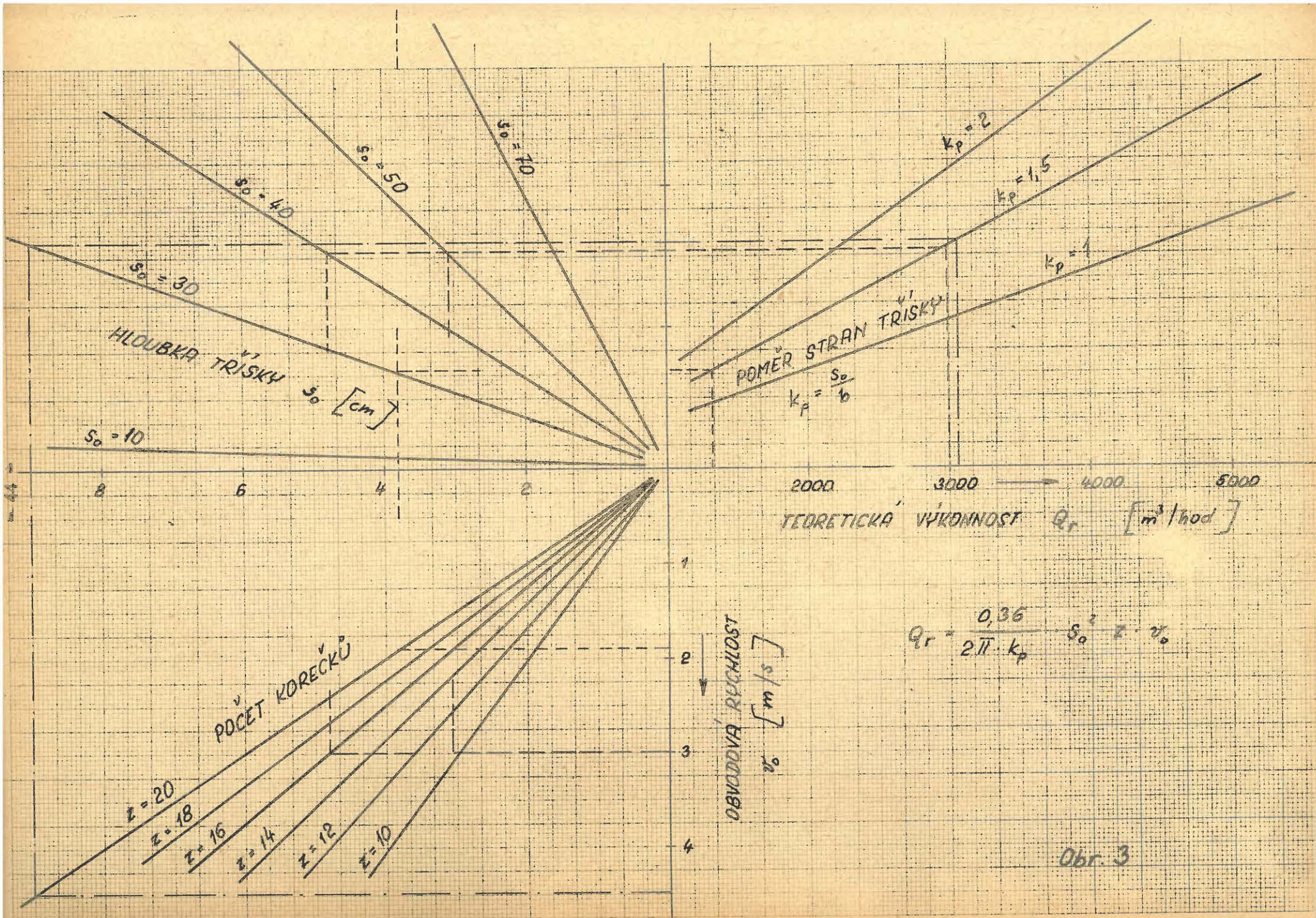
$50 = 30$

$70 = 40$

$90 = 50$

$10 = 80$

Obr. 2



Obr. 3

