

Pg. Karel H a a s, VÚHU

Stanovení základních parametrů bariéry odvodňovacích vrtů při ustáleném proudění podzemních vod

Hlavním prostředkem techniky při odvodňování hydrogeologicky významných kolektorů v předpolí uhelných velkolomů v SHR i v zahraničí jsou vertikální, širokopráhové odvodňovací vrty, vybavené ponornými čerpadly. Uvažované odvodňovací vrty jsou zpravidla umísťovány v liniích (bariérách), což má některé závažné výhody. Předně se zjednodušuje budování téměř všech zařízení na povrchu terénu, hlavně se zkracují příjezdni komunikace, přívody energie, odvodňovací příkopy a potrubí, zjednodušuje se obsluha a zajišťování provozu odvodňovací soustavy a konečně liniové uspořádání odvodňovacích objektů dovoluje nejlépe oddělit dobývací prostor lomů od neodvodňovaných oblastí (obr. 1). Umístění vrtů v liniích je však podmíněno hlavně hydrogeologickou stálostí zvodněného kolektoru a jeho značným regionálním rozšířením.

Liniová odvodňovací soustava je z technického hlediska definována počtem vrtů n , jejich vzájemnou vzdáleností a , celkovou délkou řady L , poloměrem odvodňovacích vrtů r , a jejich hydrodynamickou úplností. V praxi v SHR je naprostá většina odvodňovacích vrtů úplných, tj. do-vrtaných a vystrojených filtrem až na bázi zvodněného kolektoru (obr. 2). Odvodňovací funkci a hydrogeologický význam uvažované soustavy lze posoudit podle jejich základních hydraulických parametrů a závislostí. Mezi základní hydraulické parametry patří koeficient filtrace zvodněného kolektoru k , koeficienty průtočnosti a tlakové vodivosti (T , D), mocnost zvodněného obzoru M a piezometrická výška H . Uvedené parametry jsou zpravidla stanoveny v předstihu při hydrogeologickém průzkumu. Informace získané při hydrogeologickém průzkumu mají však bodový charakter a pro stanovení hydraulických závislostí, potřebných pro vypracování optimálního návrhu liniové odvodňovací soustavy je nezbytné provést značnou generalizaci výsledků průzkumu. Proto všechny uvedené hydraulické parametry jsou v konkrétních případech vždy průměrnými hod-

notami, které se více nebo méně blíží skutečným přírodním poměrům.

Mezi nejdůležitější závislosti, které zjišťujeme při projektování liniových odvodňovacích soustav patří následující:

- a) závislost vydatnosti vrtu v soustavě Q na snížení hladiny podzemní vody v odvodňovacím objektu s , na počtu a rozteči odvodňovacích vrtů a jiných hydraulických parametrech; $Q = f(s, a, n, k, M, r, \dots)$,
- b) závislosti celkové vydatnosti odvodňovací soustavy $\sum Q$ na počtu a rozteči odvodňovacích objektů; $\sum Q = f(a, n)$,
- c) závislost zbytkového přítoku, který nemůže být zachycen odvodňovací soustavou, na celkové vydatnosti soustavy, počtu vrtů v soustavě a jejich rozteči; $\Delta Q = f(\sum Q, a, n)$,
- d) závislost snížení hladiny ve vzdálenosti x od odvodňovací soustavy na čase a na celkové vydatnosti odvodňovacího systému $s = f(\sum Q, t, x)$.

Přítok podzemní vody do vertikálního čerpacího vrtu o poloměru r závisí zejména na propustnosti zvodněného kolektoru, vyjádřené koeficientem filtrace k , mocnosti obzoru, piezometrické výšce hladiny podzemní vody a infiltračních poměrech.

Za předpokladu centrálně symetrického přítoku artéské podzemní vody z kolektoru do odvodňovacího vrtu, kdy plocha snížení tlakové hladiny je dokonalou rotační plochou, jejíž osou je osa vrtu, proniká voda do odvodňovacího objektu myšlenými koncentrickými válcovými plochami o výšce M a poloměrů x (obr. 2). Hydraulický spád v linii depresní křivky je proměnlivý a jeho hodnota je dána přibližně poměrem diferenciálů

$$i = \frac{dy}{dx} \quad /1/$$

Průtok vody Q každou válcovou plochou je stálý a jeho velikost je dána známou Darcyho rovnicí pro filtrační průtok

$$Q = F \cdot k \cdot i \quad /2/$$

Spojením rovnic /1/, /2/ a vyjádřením válcové plochy pomocí parametrů M , x obdržíme jednoduchou diferenciální rovnici

$$Q = 2\pi k \cdot M \cdot x \cdot \frac{dx}{dy} \quad /3/$$

Poněvadž průtok podzemní vody Q všemi myšlenými válcovými plochami je konstantní, separujeme proměnné v rovnici /3/ a integrujeme v mezích od r do x a od h do y (Obr. 2)

$$\int_h^y dy = \frac{Q}{2\pi k \cdot M} \int_r^x \frac{dx}{x} \quad /4/$$

$$y = \frac{Q}{2\pi k \cdot M} \ln \frac{x}{r} + h \quad /5/$$

Z rovnice depresní křivky /5/ lze vyjádřit přítok vody do odvodňovacího vrtu

$$Q = \frac{2,73 \cdot k \cdot M(y - h)}{\log \frac{x}{r}} \quad /6/$$

Po zavedení celkového dosahu deprese $x = R$ a celkové piezometrické výšky $y = H$ nabývá rovnice /6/ následujícího tvaru

$$Q = \frac{2,73 \cdot k \cdot M(H - h)}{\log R - \log r} = \frac{2,73 \cdot k \cdot M \cdot s}{\log \frac{R}{r}} \quad /7/$$

Analogickým způsobem byla odvozena rovnice pro výpočet přítoku vody do odvodňovacích vrtů v podmínkách režimu podzemních vod s volnou hladinou

$$Q = \frac{1,36 \cdot k \cdot s (2H - s)}{\log \frac{R}{r}} \quad /8/$$

Uvedené vztahy platí přibližně pro výpočet vydatnosti samostatných odvodňovacích vrtů a velikosti snížení hladiny ve vzdálenosti x od odvodňovacího vrtu, za předpokladu ustáleného radiálního proudění podzemních vod a za předpokladu platnosti Darcyho zákona.

V odvodňovací soustavě však dochází k vzájemnému ovlivňování vrtů v provozu, které se projevuje především snižováním vydatnosti jednotlivých objektů úměrně s jejich rostoucím počtem a s klesající vzdáleností mezi jednotlivými objekty.

Obecně lze tedy vyjádřit vydatnost odvodňovacího vrtu v soustavě

Q_0 v podmínkách napjaté hladiny podzemních vod rovnici /9/

$$Q_0 = \left(\frac{2,73 \cdot k \cdot M \cdot s}{\log R - \log r} \right) \cdot \alpha \quad /9/$$

kde α je koeficient vzájemného ovlivňování, který může být stanoven při skupinové čerpací zkoušce v době hydrogeologického průzkumu, anebo v průběhu odvodňování.

Výzkumem interference vrtů v liniové odvodňovací soustavě se zabývali zejména sovětsí autoři a dále upravili rovnici /9/, přičemž brali v úvahu především vzájemnou vzdálenost vrtů a , délku linie odvodňovacích vrtů, umístění soustavy s ohledem na infiltrační území a místo přirozeného odvodňování zvodněného kolektoru.

Pro stanovení závislosti $Q = f(s, k, M, a, r, \dots)$ v podmínkách napjaté hladiny podzemních vod v předpolí velkolomu Šverma v SHR, při liniovém uspořádání odvodňovacích vrtů, bylo využito řešení A. V. Romanova, které dobře vyhovuje hydrogeologickým poměrům zejména podloží zvodněných kolektorů v mostecko-chomutovské části pánve.

$$Q = \frac{2,73 \cdot k \cdot M \cdot s \cdot \lambda}{\log \frac{a}{2\pi r} + \frac{2,73 B_1 B_2}{a(B_1 + B_2)}} \quad /10/$$

kde je Q - přítok podzemní vody do jednoho odvodňovacího vrtu v linii při interferenci vrtů

s - snížení dynamické hladiny v odvodňovacích vrtech

B_1 - střední vzdálenost mezi linií odvodňovacích vrtů a uhlí-
ným lomem, kde je zvodněný kolektor odkryt, anebo přiro-
zeným způsobem odvodňován

B_2 - střední vzdálenost mezi odvodňovací soustavou a infil-
trační oblastí, případně místem vyklínění zvodněného ko-
lektoru proti směru hlavního proudu podzemní vody

λ - koeficient úměrnosti, charakterizující vliv délky řady L
na hydrodynamické pole a přítok vody do vrtů.

Koeficient λ závisí na vztahu $\frac{L}{m}$, kde L je délka linie odvodňova-

cích vrtů a m šířka proudu podzemní vody. V případě, že délka L se blíží šířce m , je koeficient $\lambda \approx 1$. Pokud je $L < m$, je koeficient $\lambda > 1$ a dosahuje nejčastěji hodnot 1,1 až 1,2, protože vlivem obtékání podzemní vody kolem krajních vrtů linie se zvyšuje vydatnost odvodňovacích objektů. Přesněji je možno hodnotu uvažovaného koeficientu stanovit buď podle poměrně složitých vztahů, anebo podle tabulek, uváděných v hydraulické literatuře.

Závislost mezi počtem odvodňovacích vrtů v linii a jejich vzájemnou vzdáleností byla vyjádřena pomocí jednoduchých rovnic

$$n = \frac{L}{a} + 1 \quad /11/$$

$$a = \frac{L}{n - 1} \quad /12/$$

Závislost celkové vydatnosti liniové odvodňovací soustavy na počtu vrtů v linii $\Sigma Q = f(n)$, případně na jejich rozteči $\Sigma Q = f(a)$, vyjádříme jednoduše z rovnic /10/, /11/

$$\Sigma Q = n \cdot \bar{Q} = \left(\frac{L}{a} + 1\right) Q \quad /13/$$

Jako příklad použití vztahů /10/, /11/ uvádíme výpočet parametrů jedné navrhované soustavy odvodňovacích vrtů v předpolí velkolomu Jan Šverma v prostoru Pohody - Holešice, která má v roce 1980 sloužit po určitou dobu pro odvodňování podložních písků. Vstupní data pro výpočet jsou v tabulce 1, výsledky výpočtů v tabulce 2.

Tabulka č. 1

Vstupní data pro výpočet parametrů odv. soustavy

H	s	L	m	M	k	λ	B_1	B_2	r	i
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/den)		(m)	(m)	(m)	
30	25	2150	2300	20	6	1	1500	3000	0,2	0,0235

Tabulka č. 2

Vypočtené parametry odv. soustavy

Počet vrtů v řadě L	Odpovídající rozteč	Vydatnost jednoho vrtu	Vydatnost soustavy	Celkový přítok k soust.	Zbytkový přítok
n	a (m)	Q (l/min)	Σ Q (l/min)	Q _{max} (l/min)	Δ Q (l/min)
2	2150,0	1264	2528	4504	1976
4	716,7	867	3467	4504	1037
6	430,0	640	3842	4504	662
10	238,9	415	4148	4504	356
15	153,6	286	4293	4504	211
20	113,2	218	4361	4504	143
30	74,1	147	4421	4504	83
40	55,1	111	4440	4504	64
50	43,9	89	4460	4504	44

Podle výsledků výpočtů byl sestrojen graf (obr. 3), který znázorňuje kontinuitu závislosti. Z rovnice /10/ a uvedeného příkladu plyne, že vydatnost jednotlivých vrtů v liniové soustavě klesá v závislosti na rostoucím počtu odvodňovacích vrtů a zmenšující se vzdálenosti mezi nimi, přibližně podle rovnocné hyperboly. Předpokladem je, že v odvodňovacích vrtech se udržuje konstantní snížení hladiny s . Pak je možno rovnici /10/ napsat ve zjednodušené formě

$$Q = \frac{A}{\log b \cdot a + \frac{c}{a}} \quad /14/$$

při čemž platí, že:

$$A = 2,73 \cdot k \cdot M \cdot s \cdot \lambda = \text{konst}$$

$$b = \frac{1}{2\pi r} = \text{konst}$$

$$c = \frac{2,73 B_1 B_2}{B_1 + B_2} = \text{konst}$$

Zavedeme-li obecné symboly $Q = y$

$\log b.a + \frac{c}{a} = x$ a dosadíme je do rovnice /14/ obdržíme obecnou rovnici rovnosé hyperboly

$$x \cdot y = A = \text{konst} \quad /15/$$

Celková vydatnost ΣQ , na rozdíl od vydatnosti jednotlivých vrtů, nejprve při menším počtu vrtů v linii a menším vzájemném ovlivňování rychle narůstá. Tento růst se však při určitém počtu vrtů (kdy se přírůstek vydatnosti soustavy, daný zvětšováním počtu jímacích objektů, zhruba vyrovnává s úbytkem vydatnosti jednotlivých vrtů, vyvolaným interferencí) opět rychle snižuje.

Interval, ve kterém dochází k náhlému poklesu přírůstku vydatnosti na křivce celkové vydatnosti soustavy je nejdůležitější pro volbu potřebného počtu vrtů v systému a jejich vzájemné vzdálenosti. Je pozoruhodné, že od určitého počtu vrtů v soustavě, tj. od určité vzdálenosti a se celková vydatnost odvodňovacího systému prakticky dále nezvyšuje, i když počet vrtů roste. V našem příkladě nastává tato situace při 20 vrtech v soustavě a rozteči 113 m. Zvyšování počtu vrtů nad 20 je tedy z hydraulického hlediska neúčinné a hodnotu $n = 20$ je možno považovat v daném případě za maximální.

Jelikož jímání podzemní vody čerpacími odvodňovacími vrty má charakter bodových odběrů, kolem nichž se vytvářejí depresní kužely (obr. 2), nemůže být vrty zachycena veškerá podzemní voda proudící v kolektoru k odvodňovacímu systému. I při velkém počtu vrtů v soustavě se celková vydatnost ΣQ pouze těsně přiblíží celkovému přítoku k linii odvodňovacích objektů. Určitá část vody ΔQ , daná rozdílem mezi celkovým přítokem $Q_{\max}$ a jímáním množstvím ΣQ proniká soustavou obyčejně do odvodňovaného lomu, kam rovněž směřuje hydraulický spád, a kde se nezachycená voda projeví jako tzv. zbytkový přítok.

Celkový přítok k soustavě v podmínkách artéského režimu podzemních vod určíme nejčastěji podle rovnice /2/, při čemž za průtočný průřez F považujeme plochu, danou šířkou proudu m a průměrnou mocností kolektoru M .

Velikost zbytkového přítoku je možno určit podle jednoduchých vztahů

$$\Delta Q = Q_{\max} - \sum Q = m \cdot M \cdot k \cdot i - n \cdot Q$$

/16/

V našem příkladě (tab. 2, obr. 3) činí celkový přítok $Q_{\max}$ podle vstupních údajů v tab. 1 4504 l/min. Odpovídající zbytkový přítok ΔQ pro jednotlivé počty vrtů plyne z tab. 2 a je zřejmý i z obr. 3. Postupné zmenšování zbytkového přítoku do lomu opět není lineární, ale probíhá při rostoucím n podle funkce, která se asymptoticky blíží nule. Od určitého (maximálního) počtu vrtů n je tedy snižování zbytkového přítoku nepatrné i za cenu mnohonásobného zvyšování počtu vrtů v soustavě.

Kritéria pro určení optimálního počtu odvodňovacích vrtů v řadě, a tím i optimální vzájemné vzdálenosti, jsou protikladná. Teoretickým cílem odvodňování je dosáhnout minimálního zbytkového přítoku co nejmenším počtem odvodňovacích vrtů. V praxi je tedy vždy nezbytné dospět k přijatelnému kompromisu, který vychází z potřeb odvodňovaného dolu a ekonomických aspektů. Je účelné, s ohledem na báňsko-hydrogeologické podmínky dobývání na daném dole, stanovit přípustný zbytkový přítok z odvodňovaného kolektoru Δq . Přípustný zbytkový přítok podzemní vody do lomu pak definujeme jako přítok, který je běžně zvládnutelný, nepůsobí technologické obtíže při dobývání a neohrožuje stabilitu svahů na skrývce a vnitřní výsypce.

Přípustný zbytkový přítok stanovíme s ohledem na délku porubní fronty, na níž je zvodněný kolektor od lomu odkryt

$$\Delta q = q \cdot L'$$

/17/

kde je q - přípustný zbytkový přítok, připadající na 1 bm porubní fronty

L' - délka porubní fronty, na níž je zvodněný kolektor odkryt (obvykle platí, že $L' = L$).

V příkladě uváděném v tomto příspěvku činí přípustný zbytkový přítok za předpokladu, že $q = 0,1$ l/min/bm, 215 l/min. Tomuto přípustnému zbytkovému přítoku pak podle obrázku č. 3 odpovídá tzv. optimální počet vrtů $n_{\text{opt}} = 15$, vzájemná vzdálenost objektů $a = 154$ m.

Z grafu lze odečíst i ostatní parametry odvodňovací soustavy, ja-

ko je vydatnost jednotlivých vrtů $Q \approx 300 \text{ l/min}$ a vydatnost soustavy $\Sigma Q \approx 4300 \text{ l/min}$. Průběh funkčních závislostí, znázorněný graficky podle numerických výsledků výpočtů, je tedy velmi výhodnou pomůckou při stanovení potřebných parametrů liniové odvodňovací soustavy.

Doba potřebná pro odvodňování

Dobu potřebnou pro odvodňování je možno velmi přibližně odvodit z rychlosti poklesu hladin na pozorovacích vrtech při čerpacích zkouškách, anebo stanovit pomocí metod pro neustálené proudění podzemních vod. Na základě analogie s Fourierovou teorií vedení tepla odvodil C. V. Theis vztahy, které vyjadřují závislost snižování hladiny podzemní vody v okolí odvodňovacích objektů na čase. Rovnice platí za předpokladu, že množství vody čerpané odvodňovací soustavou je zhruba konstantní a hladina podzemní vody zvodněného kolektoru je napjatá

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad /18/$$

$$u = \frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t} = \frac{x^2}{4 \cdot k \cdot M \cdot t}$$

Funkce $W(u)$, jako exponenciální integrální funkce argumentu u , bývá označována jako tzv. "studňová funkce" a je uváděna v hydraulických tabulkách.

Hodnota exponenciálního integrálu v rovnici /18/ je dána součtem nekonečné řady

$$W(u) = \left(\ln \frac{1}{u} - 0,57216 + u - \frac{1}{u} \cdot u^2 + \frac{1}{u} \cdot u^3 + \dots \right) \quad /19/$$

Za určitých podmínek je možno dosáhnout relativně velmi přesného řešení rovnice /18/ už tehdy, použijeme-li pro vyčíslení funkce $W(u)$ pouze první dva členy řady. Na tomto principu je založeno tzv. Jacobovo zjednodušení Theisovy rovnice.

Výpočet očekávaného snížení s se provádí pro jednotlivé zvolené vzdálenosti x od odvodňovací soustavy a pro jednotlivé zvolené časové

intervaly. Pokud výsledky výpočtů jsou nepříznivé, je možno snižování hladiny urychlit zvýšením celkového čerpaného množství ΣQ , ovšem pouze v mezích závislostí, které jsou zobrazeny v obr. 3.

Výpočty časových závislostí velmi často narážejí v SHR na nedostatky podkladů, zejména chybí většinou údaje o koeficientu tlakové vodivosti D , poněvadž nebyl v minulosti při hydrogeologickém průzkumu zjišťován. Dosazování odhadovaných hodnot tohoto koeficientu do rovnice /18/ je sice možné, ale výsledky výpočtů nemají v žádném případě přesnost větší, než je odhad hydrogeologa.

Závěr

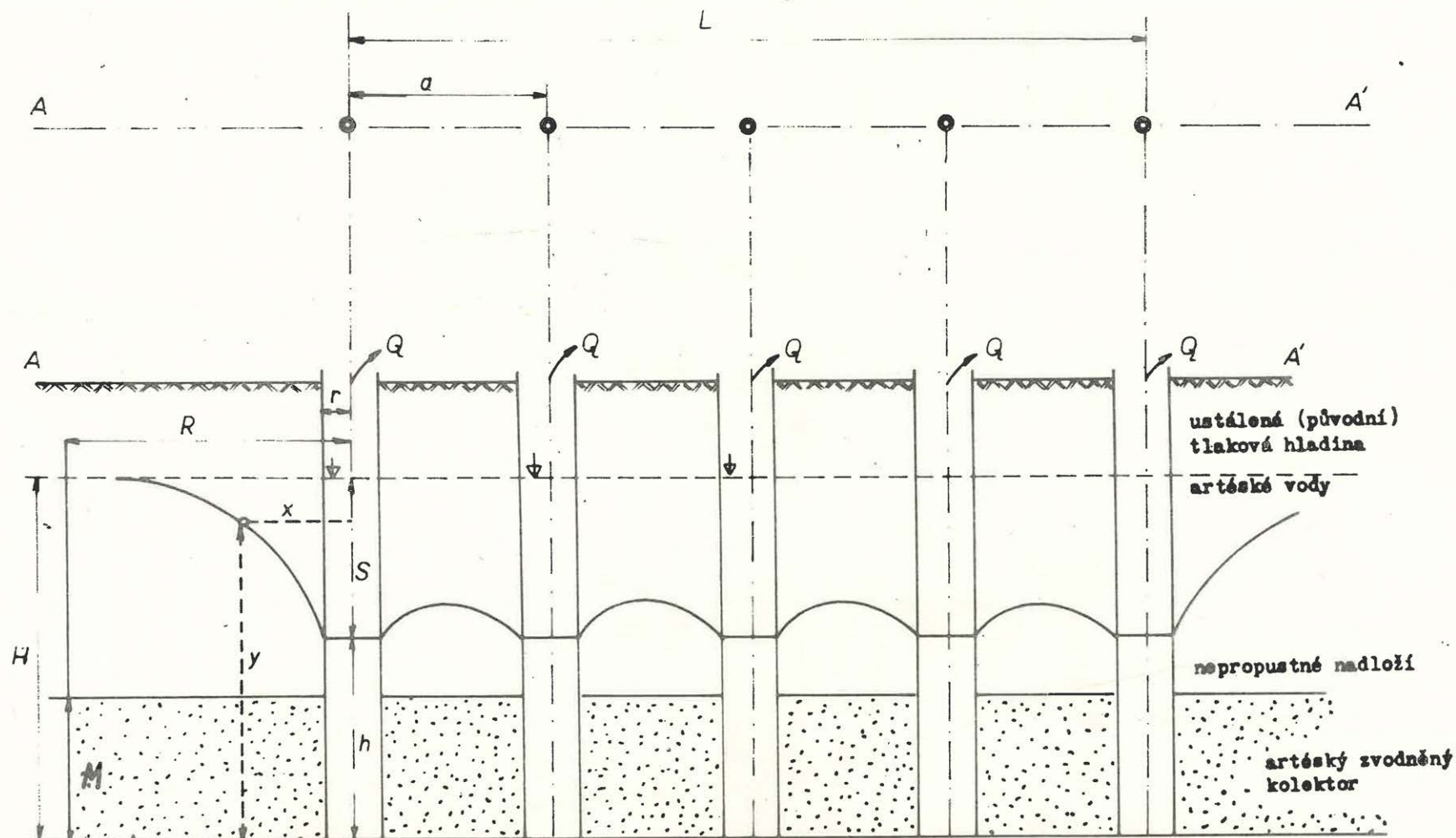
Navrhování bariér odvodňovacích vrtů v předpolí uhelných velkolemů vyžaduje především důkladnou znalost hydrogeologických poměrů a hydraulických parametrů zvodněných kolektorů. Metody hydrauliky podzemních vod umožňují v tomto případě stanovit přibližným výpočtem potřebný počet vrtů v liniových odvodňovacích soustavách, provést optimalizaci s ohledem na potřeby lomu a efektivnost vynaložených ekonomických prostředků a konečně určit očekávanou vydatnost jednotlivých vrtů i celé soustavy, což jsou hodnoty velmi důležité pro zpracování technického projektu odvodňovacího systému.

V případě, že jsou k dispozici jen neúplné hydrogeologické a hydraulické podklady, mají výpočty podle metod hydrauliky podzemních vod pouze platnost kvalifikovaného odhadu.

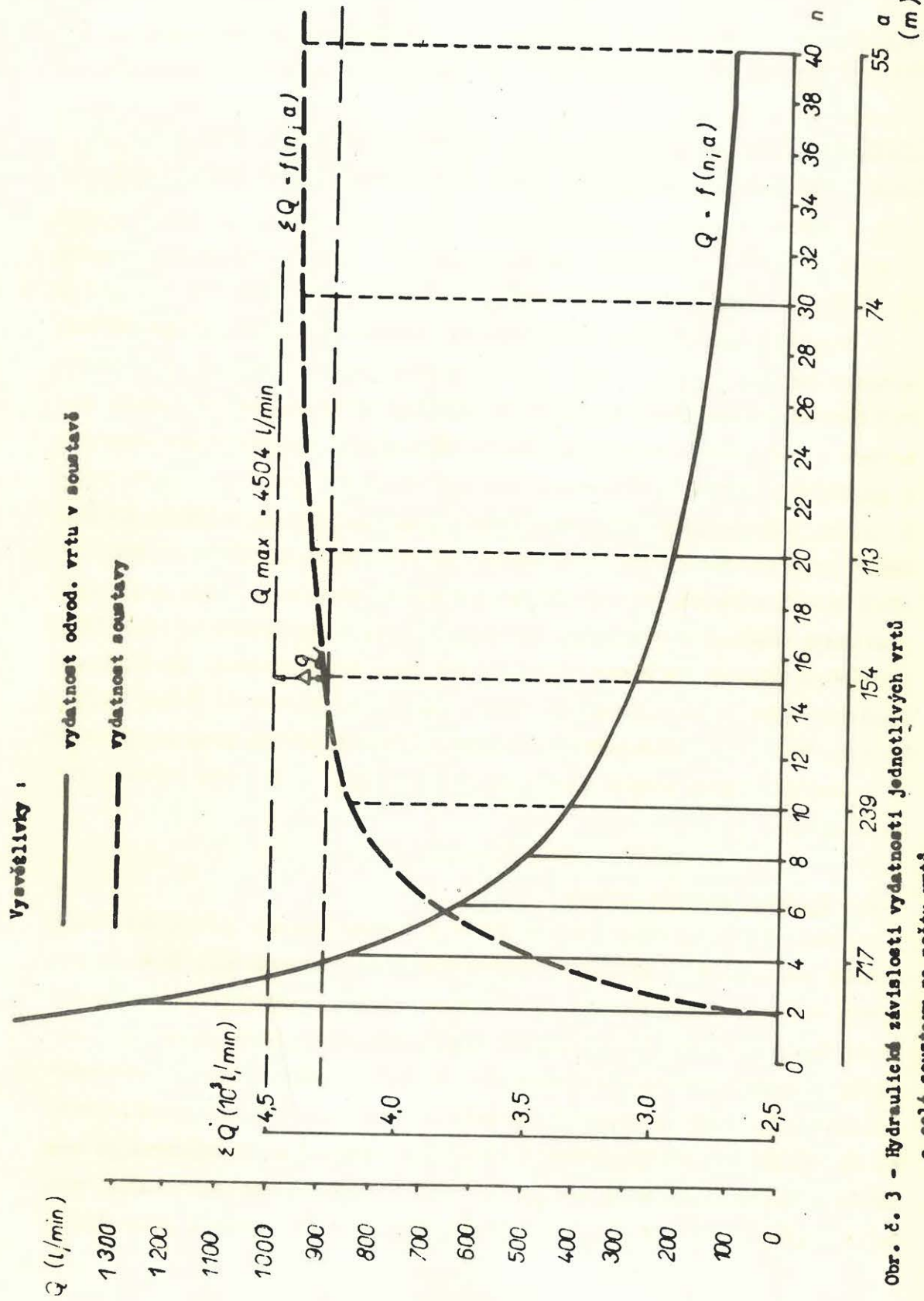
S h r n u t í

Stanovení základních parametrů bariéry odvodňovacích vrtů při ustáleném proudění podzemních vod

Článek podává souhrnnou informaci o možnostech výpočtu hydraulických parametrů liniové odvodňovací soustavy v podmínkách artéského režimu podzemních vod při ustáleném proudění. Výpočtové metody však vycházejí z řady zjednodušujících předpokladů, a proto jejich přesnost velmi podstatně závisí na kvalitě hydrogeologických podkladů. Pokud jsou vstupní podklady neúplné, mají výsledky uvažovaných výpočtů pouze platnost kvalifikovaného odhadu.



Obr. č. 2 - Schéma hydraulických poměrů při čerpání z bariér úplných odvodněných vrtů v artésném režimu podzemních vod.



Obr. č. 3 - Hydraulické závislosti vydatnosti jednotlivých vrtů a celé soustavy na počtu vrtů.