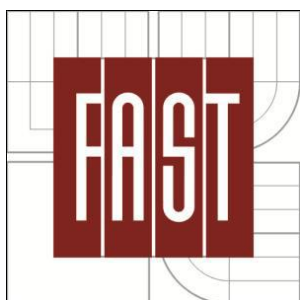


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# OVĚŘENÍ EMPIRICKÝCH VZTAHŮ PRO VÝPOČET HYDRAULICKÉ VODIVOSTI

ASSESSMENT OF EMPIRICAL FORMULAE FOR DETERMINING HYDRAULIC  
CONDUCTIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. LADISLAV BARENČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROMÍR ŘÍHA, CSc.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Ladislav Barenčík
<b>Název</b>	Ověření empirických vztahů pro výpočet hydraulické vodivosti
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2015
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....  
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- BENETÍN, J., (1958). Pohyb vody v zemi. Vydavatelstvo SAV, Bratislava, 215 s.
- ISTOMINA, V.S., (1957) Filtracionnaja ustojčivost' gruntov. Moskva: Gosudarstvennoje izdatel'stvo literatury po strojitel'stvu i architekture.
- KASENOW, M. (2002) Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis. Highlands Ranch, CO : Water Resources Publications. ISBN 1887201319.
- ODONG, J. (2013) Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. International Journal of Agr. & Env.
- ŘÍHA, J. (2005). Hydraulika podzemní vody. Modul 01- Studijní opora pro studijní program s kombinovanou formou studia, Brno.
- SMĚRNICE (1973). Směrnice pro výpočet filtrační stability hrází z místního materiálu. Leningrad: Energie. 113 s.
- VNIIG (1991). Rekomendacii po projektirovaniju obratnyh fil'trov gidrotehničeskich sooruzenij. P 92-80S. Leningrad.106 s. Ministerstvo topliva i energetiki rossijskoj federacii.
- VUKOVIĆ, M., SORO, A. (1992), Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain - size composition. USA: Water Resources Publications. ISBN 0-918334-77-2.

## **Zásady pro vypracování**

Spolehlivé fyzikálně – matematické vyjádření pohybu vody půdním prostředím je časově a finančně náročné. Z toho důvodu se v řadě případů používají pro stanovení hydraulické vodivosti empirické rovnice vycházející především ze zrnitostního rozboru zemin. Výsledky četných studií ukazují, že získané hodnoty hydraulické vodivosti jednotlivými vztahy se značně (až řádově) liší.

Hlavním cílem diplomové práce je prověření empirických vztahů uváděných různými autory v různých rozměrově nehomogenních tvarech, jejich vzájemné porovnání, ověření platnosti pro určité typy zemin a vyhodnocení nejvhodnějších a nejspolehlivějších vztahů porovnáním získaných výsledků s daty získanými v poli popř. laboratorními měřeními.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....  
prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Hlavním cílem diplomové práce je ověřit a porovnat empirické vztahy (Hazen, Slichter, Terzaghi, Beyer, Zauerbrej, Krüger, Kozeny, Zunker, Zamarin, USBR, Pavčić) na výpočet hydraulické vodivosti, které jsou většinou publikovány v různých a rozměrově nehomogenních tvarech. V první části práce je popsána důležitost přesného stanovení hydraulické vodivosti a odvozen obecný vztah na výpočet hydraulické vodivosti. V následující části práce je popsána metodika hodnocení a jsou tam uvedené vztahy v rozměrově homogenní formě. Závěrečná část práce obsahuje vyhodnocení a porovnání empirických vztahů. Podle výsledků této diplomové práce je nejlepším vztahem na určování a odhadování hydraulické vodivosti Hazenův vztah. Vztah s největším rozsahem platnosti je Slichterův vztah.

**Klíčová slova:** hydraulická vodivost, zrnitostní rozbor, empirické vztahy

## **Abstract**

The main purpose of this diploma thesis is to check up and compare empirical formulae (Hazen, Slichter, Terzaghi, Beyer, Zauerbrej, Krüger, Kozeny, Zunker, Zamarin, USBR, Pavčić) for determining hydraulic conductivity, which are mostly published in different and dimensionally inhomogenous forms. The importance of an accurate determination of hydraulic conductivity and the derivation of a general formula for determining hydraulic conductivity are listed in the first part of this diploma thesis. Assessment methodology and empirical formulae in dimensional homogenous form are described in the following part. Evaluating and comparing of empirical formulae is mentioned in the last part. According to the results of this diploma thesis, the best empirical formula for determining and estimating hydraulic conductivity is Hazen formula. Formula with the widest range of validity is Slichter formula.

**Keywords:** hydraulic conductivity, grain – size analysis, empirical formulae

## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Ladislav Barenčík *Ověření empirických vztahů pro výpočet hydraulické vodivosti*. Brno, 2015. 49 s., 106 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30.11.2015

.....  
podpis autora  
Bc. Ladislav Barenčík

**Poděkování:**

Za cenné rady, připomínky, podklady a pomoc při vypracování diplomové práce chci poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaromírovi Říhovi, CSc. a firmě GEOSTAR, spol. s r.o.

## Obsah

1. Úvod a cíle práce .....	9
2. Teoretický rozbor problému .....	10
2.1. Hydraulická vodivost .....	10
2.2. Odvození obecného vztahu pro stanovení hydraulické vodivosti.....	12
3. Současný stav poznání .....	15
4. Publikované vztahy.....	17
4.1. Hazenův vztah.....	17
4.2. Slichterův vztah.....	18
4.3. Terzaghiho vztah.....	19
4.4. Beyerův vztah.....	20
4.5. Zauerbrejův vztah.....	20
4.6. Krügerův vztah.....	21
4.7. Kozenyho vztah.....	22
4.8. Zunkerův vztah.....	23
4.9. Zamarinův vztah.....	24
4.10. Vztah USBR .....	26
4.11. Pavčičův vztah.....	27
5. Metodika hodnocení .....	28
5.1. Rozsah platnosti vztahů.....	28
5.2. Analýza empirických vztahů dle kapitoly 4.....	29
5.3. Způsob hodnocení použitelnosti vztahů.....	30
6. Vyhodnocení výsledků .....	32
6.1. Porovnání výsledků s jinými autoři .....	39
7. Závěr a doporučení .....	40
8. Seznam použité literatury .....	42
9. Seznam zkratk .....	44
10. Seznam symbolů.....	45
11. Seznam tabulek.....	47
12. Seznam obrázků.....	48
13. Seznam příloh .....	49



## 1. Úvod a cíle práce

Hydraulická vodivost je jednou z nejdůležitějších hydrofyzikálních charakteristik, protože je klíčovým parametrem pro řešení úloh v hydrogeologii, hydrogeologii, ochraně životního prostředí, zejména pak ochraně půdy a podzemní vody. Přesné fyzikálně – matematické vyjádření pohybu vody půdním prostředím je velmi náročné a doposud nebyly odvozeny vztahy, které by mohly být použity v každém případě s dostatečnou přesností. Problémem při stanovení hydraulické vodivosti je, že zeminy nejsou homogenní a izotropní materiály a proto se hydraulická vodivost liší v různých směrech a v závislosti od místa měření.

Přesné stanovení hydraulické vodivosti má také velký význam při návrhu sypaných přehrad nebo hrází. Odhadování a určování hydraulické vodivosti pomocí empirických vztahů je časově méně náročné a výrazně levnější oproti jiným metodám. V současné době s rozvojem městského inženýrství a snahou o zasakování vody přímo ve městech a na soukromých pozemcích se problematika stanovení hydraulické vodivosti stává stále více aktuálnější, protože terénní měření nejsou vždy možná. Jednoduchý a spolehlivý způsob stanovení hydraulické vodivosti by zjednodušil a urychlil návrh a realizaci zasakovacích objektů, které přispívají k doplňování zásob podzemní vody zejména v urbanizovaných oblastech.

Hlavním cílem práce je prověření empirických vztahů uváděných ve více tvarech podle různých autorů, jejich vzájemné porovnání a rozměrová analýza. Dalším cílem je také ověření platnosti vztahů pro zvolené typy zemin a vyhodnocení nejpoužitelnějších vztahů porovnáním získaných výsledků s daty získanými v poli, popřípadě laboratorním výzkumem.

## 2. Teoretický rozbor problému

Již dlouhou dobu je známo, že hydraulická vodivost závisí na zrnitostním složení daného materiálu. Užitečnější by bylo charakterizovat průměry pórů než zrnitostní složení materiálu, ale velikost a uspořádání pórů je velice obtížné popsat a proto se jako jednodušší varianta většinou volí zrnitostní rozbor. Mnoho autorů se snažilo tuto závislost popsat nějakým vztahem, ale jak jejich výsledky ukazují, takový vztah také není jednoduché vytvořit [Odong, 2013].

### 2.1. Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost se používá k vyjádření schopnosti půdy vést vodu. Její hodnota závisí na vlastnostech půdy a také na vlastnostech proudící kapaliny - vody. Při hydrodynamickém zkoumání filtrace vody v zemině se uvažují zjednodušené modely pórovitého prostředí jako např. ideální zemina sestávající z rovnoběžných trubiček nebo fiktivní zemina tvořena kulovitými zrny stejného průměru [Benetín, 1958].

Při sestavování matematických modelů proudění podzemní vody proto využíváme tzv. principu spojitosti. Ten předpokládá, že kapalina spojitě (fiktivně) vyplňuje celou zkoumanou oblast proudění, tj. jak póry, tak pevné částice. Tento předpoklad je mimo jiné vynucen matematickými prostředky, které máme pro řešení k dispozici, a které vyžadují, aby hledané funkce byly v celé oblasti spojitě a dostatečně hladké. Fiktivní rychlost proudu je tak přilehavější nazývat specifickým průtokem  $q_p$  [Říha, 2005].

$$q_p = \frac{Q}{A} \quad , \quad (2.1)$$

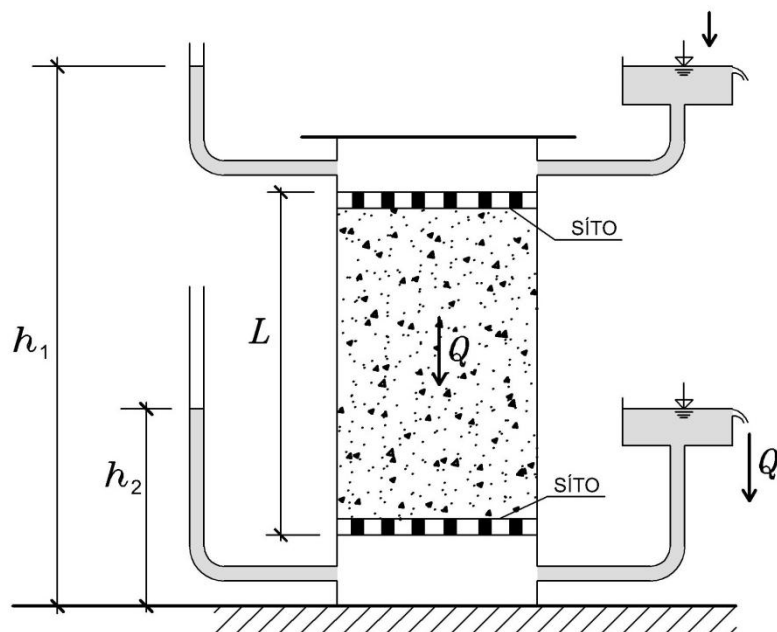
kde:

$q_p$  – specifický průtok,

$Q$  – prosakující průtok,

$A$  – plocha, kterou prosakuje průtok  $Q$ .

V letech 1852 až 1855 prováděl Henry Darcy v Dijonu první experimenty s prouděním vody písčítými filtry a výsledky získané z výsledků experimentů konaných na přístroji znázorněném na obr. 1 publikoval v roce 1856.



**Obr.1** – Darcyho přístroj [Valentová, 1994]

Henry Darcy dospěl k závěru, že celkový průsak  $Q$  vzorkem zeminy ve válci je přímo úměrný průtočnému průřezu válce  $A$ , rozdílu piezometrických výšek  $h_1$  a  $h_2$ , konstantě  $k$  a nepřímo úměrný délce vzorku  $L$  [Kovářík a kol., 2003].

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} = k \cdot A \cdot J \quad , \quad (2.2)$$

kde:

$k$  – hydraulická vodivost,

$h_1, h_2$  – piezometrické výšky,

$L$  – délka vzorku,

$J$  – hydraulický gradient.

Vzájemným porovnáním vztahů (2.1) a (2.2) dostaneme pro  $q_p$  následující vztah:

$$q_p = k \cdot J \quad . \quad (2.3)$$

Ke stanovení hydraulické vodivosti jsou užívány různé postupy, mezi nejznámější způsoby patří:

- přímé laboratorní zkoušky prováděné nejčastěji na propustoměru na porušených nebo neporušených vzorcích,
- terénní zkoušky (nálevné zkoušky, indikační zkoušky, studny),
- nepřímé metody (z výsledků jiných laboratorních zkoušek – například výsledky zrnitostních rozborů) [Kovářík a kol., 2003].

## 2.2. Odvození obecného vztahu pro stanovení hydraulické vodivosti

Aby bylo možné vytvořit závislost mezi hydraulickou vodivostí a fyzikálními charakteristikami, které ji definují, při analýze vzorků používáme model, který uvažuje s laminárním prouděním a pórovité prostředí je definováno jako systém trubiček s kruhovým průřezem, stejným průměrem a s orientací ve směru proudění. Pro pohyb vody v trubičkách je ztráta energie  $E$  na jednotku tíhy kapaliny reprezentována Darcy-Weisbachovou rovnicí [Jandora a Šulc, 2006]:

$$E = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_T^2}{2g} \quad , \quad (2.4)$$

kde:

$\lambda$  – součinitel ztrát třením,

$l$  – délka trubičky,

$d$  – průměr trubičky,

$v_T$  – průřezová rychlost vody v trubici,

$g$  – tíhové zrychlení.

Pro laminární proudění je možno součinitel ztrát třením vyjádřit jako funkci Reynoldsova čísla [Jandora a Šulc, 2006]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad , \quad (2.5)$$

kde:

$Re$  - Reynoldsovo číslo pro kruhový průřez dané vztahem [Jandora a Šulc, 2006]:

$$Re = \frac{v_T \cdot d}{\nu} \quad , \quad (2.6)$$

kde:

$\nu$  – kinematická viskozita.

Dosazením rovnic (2.5) a (2.6) do Darcy-Weisbachovy rovnice (2.4) a následnou úpravou dostaneme:

$$E = \frac{32 \cdot \nu \cdot l \cdot v_T}{g \cdot d^2} \quad . \quad (2.7)$$

Pro proudění vody skutečným pórovitým prostředím platí následující vztahy [Vuković a Soro, 1992]:

$$v_s = \frac{q_p}{n} \quad , \quad (2.8)$$

$$d = C \cdot f(n) \cdot d_e \quad , \quad (2.9)$$

kde:

$C$  – bezrozměrný koeficient,

$n$  – pórovitost,

$f(n)$  – funkce definující závislost mezi skutečným a modelovým pórovitým prostředím,

$d_e$  – průměr efektivního zrna,

$v_s$  – střední rychlost vody v pórech,

$q_p$  – specifický průsak.

Když hydraulický gradient  $J$  vyjádříme jako [Jandora a Šulc, 2006]:

$$J = \frac{E}{l} \quad , \quad (2.10)$$

a spojíme rovnice (2.8) a (2.9) s rovnicí (2.7), za předpokladu  $v_T \approx v_S$  a zavedením výrazu [Vuković, Soro, 1992]:

$$\varphi(n) = n \cdot f(n), \quad (2.11)$$

Výsledná rovnice bude ve tvaru:

$$q_p = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot \varphi(n) \cdot d_e^2 \cdot J. \quad (2.12)$$

Porovnáním rovnice (2.12) s rovnicí (2.3), kterou odvodil Henry Darcy jako zákon proudění kapalin v pórovitém prostředí, dostaneme výsledný vztah:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot \varphi(n) \cdot d_e^2. \quad (2.13)$$

Z výše uvedené analýzy plyne, že hydraulická vodivost závisí na průměru efektivního zrna, pórovitosti, struktuře a tvaru zrn a také na vlastnostech vody (např. teplota, viskozita). Vuković a Soro [1992] uvádějí, že ve vztazích, které berou v úvahu teplotu vody (na které závisí hodnota kinematické viskozity) se hodnota hydraulické vodivosti změní přibližně o 3 %, když se teplota změní o 1 °C.

### 3. Současný stav poznání

K ověření a vzájemnému porovnání byly vybrány empirické vztahy dle Hazena, Slichtera, Terzaghiho, Beyera, Zaubereja, Krügera, Kozenyho, Zunkera, Zamarina, USBR a Pavčiče. Vztah na výpočet hydraulické vodivosti, ze kterého vycházejí všichni autoři, je možné napsat v obecném tvaru dle rovnice (2.13). Jednotlivé vztahy se od sebe liší zejména tvarem funkce  $C \cdot \varphi(n)$ , která závisí na tvaru, velikosti a struktuře zrn, specifickém povrchu zrn, koeficientu nestejnzrnnosti, zhutnění zeminy, atd. Jednotliví autoři odvozovali své vztahy pro různé typy zemin za různých podmínek a tomu odpovídá i uváděný rozsah platnosti daného vztahu. Jejich poznatky shrnují ve svých publikacích autoři jako např. Vuković a Soro [1992], Kasenow [2002], Aravin a Numerov [1953] nebo Odong [2013] jejichž interpretace některých vztahů se značně liší. Dalším problémem u většiny publikovaných vztahů byla rozměrová nehomogenita – veličiny dosazované do vztahu byly v jiných jednotkách než výsledná hydraulická vodivost. U některých vztahů zase nebylo uvedeno, co který člen ve vztahu vyjadřuje a v jakých jednotkách se má dosadit.

Hazen v roce 1892 publikoval vztah, který se v současné literatuře vyskytuje ve dvou podobách, přičemž v jedné z nich je zohledněn i vliv teploty. Slichterova rovnice zase nezahrnuje nestejnorodost mechanického složení pórovitého prostředí. Slichterova, Zauberejova a také Terzaghiho rovnice jsou v různých publikacích uváděny ve stejných tvarech. Oproti většině autorů, Beyer nedefinuje hydraulickou vodivost jako funkci pórovitosti. V Krügerovém vztahu je velký problém s veličinou  $C$ , která se v různé literatuře vyskytuje řádově v rozsahu  $1 \cdot 10^{-3}$  až  $1 \cdot 10^{-5}$ , což může ve výsledcích činit obrovský rozdíl v hodnotě hydraulické vodivosti. V Krügerovém a Zamarinovém vztahu byl rozdíl mezi formulací vztahu v programu MVASKF (program, který Vuković a Soro používali na stanovení hydraulické vodivosti pomocí empirických vztahů) a v samotném textu téže publikace [Vuković a Soro, 1992]. Rovnice USBR a Kozenyho se většinou vyskytují ve dvou podobách, přičemž jedna z nich je častokrát rozměrově nehomogenní. U rovnice Pavčiče se vyskytují jenom minimální rozdíly ve formulaci vztahu a vztah Zunkera bývá častokrát chybně uváděn bez exponentu (na druhou) nad funkcí pórovitosti  $\varphi(n)$ .

Ve zkratce lze říci, že největší problémy u porovnávaných vztahů jsou řádové rozdíly u konstant a rozměrová nehomogenita. Tyto chyby pravděpodobně vznikly pouze malou nepozorností při přepisování nebo špatným převodem jednotek při snaze o rozměrově homogenní vztah. Při určování hodnoty hydraulické vodivosti pomocí empirických vztahů nelze vždy očekávat vysokou přesnost stanovení i při dodržení všech podmínek, protože všechny chyby ve vztazích mohou vytvořit značné rozdíly v konečném výsledku a to zcela určitě může ovlivnit funkčnost a bezpečnost navrhovaných objektů.



## 4. Publikované vztahy

Všechny posuzované vztahy publikované v různých pracích byly vzájemně porovnány a nedostatky v nich byly opraveny. V této kapitole jsou uvedeny vztahy v různých, ale opravených tvarech s popisem jednotlivých členů a s jednotkami, ve kterých mají být dosazeny a ve kterých vychází výsledná hodnota hydraulické vodivosti. Při více tvarech jednoho vztahu je napsáno, který tvar je pro výpočet vhodnější.

### 4.1. Hazenův vztah

Pro písky s efektivním zrnem od 0,1 mm do 3 mm a číslem nestejnozrnnosti  $U < 5$  uvádí Kasenow [2002] a Odong [2013] vztah ve tvaru:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot [1 + 10 \cdot (n - 0,26)] \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.1)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-].

Vuković a Soro [1992] uvádějí vztah:

$$k = 11,6 \cdot C_H \cdot d_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T) \quad [\text{m/s}], \quad (4.2)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

$T$  - teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$C_H$  - součinitel závislý na znečištění písků hlínou, popř. jílem, který nabývá následujících hodnot:

- pro čisté a stejnorodé písky  $C_H = 800$  až  $1200$ ,
- pro jílovité a nestejnorodé písky  $C_H = 400$  až  $800$ .

K analytickému vyjádření součinitele  $C_H$  je možno užít vztahu podle Langa:

$$C_H = 400 + 4000 \cdot (n - 0,26) = 400 \cdot [1 + 10 \cdot (n - 0,26)] \quad (4.3)$$

kde

$n$  – pórovitost [-].

Dosažením hodnoty tíhového zrychlení  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , kinematické viskozity pro teplotu  $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  :  $\nu = 1,307 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  do vztahu (4.1) a jeho následným vyčíslením dostaneme:

$$k = 4503 \cdot [1 + 10 \cdot (n - 0,26)] \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.4)$$

Když do vztahu (4.2) dosadíme vztah (4.3) a vyčíslíme ho pro teplotu  $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , dostaneme:

$$k = 4640 \cdot [1 + 10 \cdot (n - 0,26)] \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.5)$$

Z porovnání vztahů (4.4) a (4.5) je zřejmé, že vyčíslením pro teplotu  $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  dávají vztahy (4.1) a (4.2) velmi podobné výsledné rovnice. Vuković a Soro [1992] na rozdíl od Kasenowa [2002] a Odonga [2013] nepoužívají ve vztahu kinematickou viskozitu, která závisí na teplotě, ale místo toho dosazují do vztahu přímo teplotu. Pro další výpočty v práci jsem používal vztah (4.2).

## 4.2. Slichterův vztah

Slichterova rovnice nezahrnuje nesterodnost mechanického složení pórovitého prostředí. Kasenow [2002] a Odong [2013] uvádějí vztah ve tvaru:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.6)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  
 $n$  - pórovitost [-].

Vynásobením tíhového zrychlení konstantou  $1 \cdot 10^{-2}$  dostáváme vztah, který uvádějí Vuković a Soro [1992] ve tvaru:

$$k = \frac{0,098}{\nu} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}] , \quad (4.7)$$

kde

$\nu$  - kinematické viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  
 $n$  - pórovitost [-],  
 $d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m].

### 4.3. Terzaghiho vztah

Terzaghiho vztah má následující tvar [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_T \cdot \left( \frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}] , \quad (4.8)$$

kde

$C_T = 10,7 \cdot 10^{-3}$  pro hladká zrna a  $C_T = 6,1 \cdot 10^{-3}$  pro drsná zrna,  
 $d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],  
 $g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  
 $n$  - pórovitost [-].

Nejlepší výsledky dává Terzaghiho vztah při hodnocení hrubozrnných písků. Kasenow [2002] a Odong [2013] uvádějí vztah ve stejném tvaru.

#### 4.4. Beyerův vztah

Oproti většině autorů, Beyer nedefinuje hydraulickou vodivost jako funkci pórovitosti. Beyerův vzorec má následující tvar [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_B \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.9)$$

příčemž

$$C_B = 6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{U} \quad [-], \quad (4.10)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$U$  - číslo nestejnozrnnosti [-].

Platnost vztahu (4.9) je uváděna pro efektivní průměr zrna od 0,06 mm do 0,6 mm a číslo nestejnozrnnosti  $1 < U = (d_{60} / d_{10}) < 20$ . Kasenow [2002] a Odong [2013] uvádějí vztah ve stejném tvaru.

#### 4.5. Zauerbrejův vztah

Zauerbrejův vzorec má tvar [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_Z \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \tau \cdot d_{17}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.11)$$

kde

$$C_Z = 3,75 \cdot 10^{-3},$$

bezrozměrný parametr  $\tau \approx 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot (1/\nu)$  nebo je ho možné určit z tabulky 1,

$d_{17}$  - velikost zrna odpovídajícího 17% propadu [m],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-].

**Tab. 1 – Hodnoty parametru  $\tau$  [Aravin a Numerov, 1953]**

$T$ [°C]	$\tau$ [-]	$T$ [°C]	$\tau$ [-]	$T$ [°C]	$\tau$ [-]	$T$ [°C]	$\tau$ [-]	$T$ [°C]	$\tau$ [-]
0	0,588	6	0,721	12	0,854	18	1,000	24	1,155
1	0,612	7	0,744	13	0,874	19	1,025	25	1,180
2	0,635	8	0,766	14	0,902	20	1,052	30	1,313
3	0,656	9	0,786	15	0,926	21	1,080	40	1,620
4	0,676	10	0,807	16	0,950	22	1,107	50	1,926
5	0,698	11	0,837	17	0,975	23	1,131	60	2,231

Vztah (4.11) je určen pro písčité materiály s průměrem efektivního zrna menším než 0,5 mm. Kasenow [2002] uvádí vztah ve stejném tvaru.

#### 4.6. Krügerův vztah

V Krügerovém vztahu je velký problém s veličinou  $C$ , která se v různé literatuře vyskytuje řádově v rozsahu  $1 \cdot 10^{-3}$  až  $1 \cdot 10^{-5}$ , což může ve výsledcích činit značný rozdíl. Krügerův vztah má následující tvar [Vuković a Soro 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_K \cdot \frac{n}{(1-n)^2} \cdot d_e^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.12)$$

kde

$$C_K = 5,05 \cdot 10^{-4} \quad [-],$$

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-],

a velikost efektivního zrna je dána výrazem:

$$\frac{1}{d_e} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta g_i}{d_{iA}} = \sum_{i=1}^N \Delta g_i \cdot \frac{2}{d_i^g + d_i^d} \quad [\text{m}], \quad (4.13)$$

kde

$\Delta g_i$  - hmotnostní podíl  $i$ -té frakce z celkové hmotnosti vzorku [-],

$d_{iA}$  - aritmetický průměr velikosti zrn vymežujících  $i$ -tou frakci [m],

$d_i^g$  - maximální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$d_i^d$  - minimální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$N$  - počet frakcí.

Nejlepší výsledky dává Krügerův vztah pro písky střední zrnitosti s číslem nestejnzrnnosti  $U > 5$ . Kasenow [2002] uvádí vztah ve stejném tvaru, ale s rozdílnou hodnotou koeficientu  $C_K = 4,35 \cdot 10^{-3}$ . V závěrečné části publikace [Vuković a Soro, 1992] je ve výstupu z programu MVASKF uváděna hodnota  $C_K = 5,05 \cdot 10^{-4}$ , při jejímž použití dává vztah nejlepší výsledky, i když v samotném textu téže publikace autor uvádí hodnotu  $C_K = 4,35 \cdot 10^{-5}$ .

#### 4.7. Kozenyho vztah

Kozeny odvodil vztah ve tvaru [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_{KO} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_e^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.14)$$

kde

$$C_{KO} = 8,3 \cdot 10^{-3} \quad [-],$$

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-],

a velikost efektivního zrna je dána výrazem:

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta g_1}{d_1} + \sum_{i=2}^N \Delta g_i \cdot \frac{d_i^g + d_i^d}{2 \cdot d_i^g \cdot d_i^d} \quad [\text{m}], \quad (4.15)$$

kde

$\Delta g_1$  - hmotnostní podíl nejjemnější frakce z celkové hmotnosti vzorku [-],

$d_1$  - největší průměr zrna nejjemnější materiállové frakce ( $d < 0,0025 \text{ mm}$ ) [m],

$\Delta g_i$  - hmotnostní podíl  $i$ -té frakce z celkové hmotnosti vzorku [-],

$d_i^g$  - maximální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$d_i^d$  - minimální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$N$  - počet frakcí.

Vztah je vhodný pro výpočet hydraulické vodivosti hrubozrnných písků. Kasenow [2002] uvádí vztah pro teplotu 10 °C ve tvaru:

$$k = 5400 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/den}], \quad (4.16)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu v [mm]

$n$  - pórovitost [-].

Úpravou vztahu (4.16) na rozměrově homogenní tvar dostáváme:

$$k = 62500 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.17)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu je dosazována v [m].

Vyčíslením vztahu (4.14) pro teplotu  $T = 10$  °C dostáváme:

$$k = 62297 \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{10}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.18)$$

kde

$d_{10}$  - velikost zrna odpovídajícího 10% propadu je dosazována v [m].

Je zřejmé, že vztahy (4.17) a (4.18) se vzájemně téměř neliší. Vztahy (4.14) a (4.16) dávají podle mých výpočtů rovnocenné výsledky, ale vzhledem k rozměrové homogenitě je vztah (4.14) vhodnější.

#### 4.8. Zunkerův vztah

Vztah Zunkera bývá častokrát publikován bez exponentu (na druhou) nad funkcí pórovitosti  $\varphi(n)$ .

Zunkerův vztah má následující tvar [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{v} \cdot C_{ZU} \cdot \left( \frac{n}{(1-n)} \right)^2 \cdot d_e^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.19)$$

kde

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-].

Hodnoty součinitele  $C_{ZU}$  obsahuje tabulka 2, efektivní zrno je za podmínky, že materiál neobsahuje frakce jemnější než 0,0025 mm, dáno výrazem:

$$\frac{1}{d_e} = \sum_{i=1}^N \Delta g_i \cdot \frac{d_i^g - d_i^d}{d_i^g \cdot d_i^d \cdot \ln \frac{d_i^g}{d_i^d}} \quad [\text{m}], \quad (4.20)$$

kde

$\Delta g_i$  - hmotnostní podíl  $i$ -té frakce z celkové hmotnosti vzorku [-],

$d_i^g$  - maximální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$d_i^d$  - minimální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$N$  - počet frakcí.

Zunkerův vztah je používán při hodnocení jemných a středně zrnitých písků. Kasenow [2002] uvádí vztah ve stejném tvaru.

**Tab. 2 - Součinitel  $C_{ZU}$  pro Zunkerův vztah**

Charakteristika porézního materiálu	$C_{ZU}$ [-]
Stejnozrné písky s hladkými zaoblenými zrny	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Stejnozrné písky s drsnými zrny	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Nestejnozrné písky	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Nestejnozrné písky, jílovité, se zrny nepravidelného tvaru	$0,7 \cdot 10^{-3}$

#### 4.9. Zamarinův vztah

Zamarinův vzorec uvádějí Vuković a Soro [1992] ve tvaru:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_{ZA} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_e^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.21)$$



kde

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-],

$C_{ZA} = 8,2 \cdot 10^{-3}$ .

Velikost efektivního zrna pro materiály obsahující částice menší než 0,0025 mm je dána výrazem:

$$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta g_1}{d_1} + \sum_{i=2}^N \Delta g_i \cdot \frac{\ln \frac{d_i^g}{d_i^d}}{d_i^g - d_i^d} \quad [\text{m}], \quad (4.22)$$

Pro prostředí neobsahující částice menší než 0,0025 mm platí vztah:

$$\frac{1}{d_e} = \sum_{i=1}^N \Delta g_i \cdot \frac{\ln \frac{d_i^g}{d_i^d}}{d_i^g - d_i^d} \quad [\text{m}], \quad (4.23)$$

kde

$\Delta g_1$  - hmotnostní podíl nejjemnější frakce [-],

$d_1$  - největší průměr zrna nejjemnější materiálové frakce [m],

$\Delta g_i$  - hmotnostní podíl  $i$ -té frakce z celkové hmotnosti vzorku [-],

$d_i^g$  - maximální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$d_i^d$  - minimální průměr zrna odpovídající  $i$ -té frakci [m],

$N$  - počet frakcí.

Kasenow [2002] uvádí vztah ve stejném tvaru. Dle výstupu z programu MVASKF [Vuković a Soro, 1992] možno vztah napsat ve tvaru:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 8,65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot (1,275 - 1,5 \cdot n)^2 \cdot d_e^2 \quad [\text{m/s}] \quad (4.24)$$

kde

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$n$  - pórovitost [-],

$d_e$  - velikost efektivního zrna [m].

Vztah (4.24) dává přesnější výsledky, a proto je na výpočet vhodnější.

#### 4.10. Vztah USBR

United States Bureau of Reclamation (USBR) doporučuje pro písky středního zrna s číslem nestejnzrnnosti  $U < 5$  vztah [Vuković a Soro, 1992]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_U \cdot d_{20}^2 \quad [\text{m/s}], \quad (4.25)$$

přičemž:

$$C_U = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1000 \cdot d_{20})^{0,3}, \quad (4.26)$$

kde

$d_{20}$  - velikost zrna odpovídajícího 20 % propadu [m],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$\nu$  - součinitel kinematické viskozity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Kasenow [2002] uvádí vztah pro teplotu 10 °C ve tvaru:

$$k = 0,36 \cdot (d_{20}^{2,3}) \quad [\text{cm/s}], \quad (4.27)$$

kde

$d_{20}$  - velikost zrna odpovídajícího 20 % propadu [mm].

Vztahy (4.25) a (4.27) dávají pro teplotu 10 °C stejné výsledky, protože kinematická viskozita závisí na teplotě, ale vzhledem k rozměrové homogenitě je vhodnější vztah (4.25).

#### 4.11. Pavčičův vztah

Pavčičův vzorec je uváděn v následujícím tvaru [Směrnice, 1973]:

$$k = \frac{g \cdot \varphi_1}{v} \cdot \sqrt[3]{U} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2 \quad [\text{cm/s}], \quad (4.28)$$

kde

$U$  - číslo nestejnozrnnosti [-],

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ],

$n$  - pórovitost [-],

$\varphi_1 = 1$  pro štěrkopísčité zeminy,  $\varphi_1 = 0,35$  až  $0,40$  pro stěrky,

$d_{17}$  - velikost zrna odpovídajícího 17 % propadu [m].

Vztah dává nejlepší výsledky pro průměr efektivního zrna  $0,06 \text{ mm} < d_e < 1,5 \text{ mm}$ . Aby byla ve výsledku zajištěna rozměrová homogenita, vztah je možné napsat ve tvaru:

$$k = \frac{g \cdot \varphi_1}{v} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{U} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2 \quad [\text{m/s}]. \quad (4.29)$$

Vjedjenjejevův výzkumný ústav [VNIIG,1991] uvádí vztah, ve kterém se nevyskytuje tíhové zrychlení:

$$k = \frac{4 \cdot \varphi_1}{v} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{U} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2 \quad [\text{m/s}]. \quad (4.30)$$

Rozdíl ve výsledcích mezi vztahy (4.28) a (4.30) je přibližně dvojnásobný, ale podle mých výpočtů dává vztah (4.30) lepší výsledky.

## 5. Metodika hodnocení

Způsob hodnocení byl zvolen po prostudování několika prací s podobnou tematikou a po pečlivém zvážení jiných vyhodnocovacích metod. Posuzované vztahy byly vybrány zejména na základě jejich častého výskytu v jiných publikacích, abych mohl výsledky z této práce porovnat s výsledky jiných autorů. Použité zeminy byly vybírány se záměrem, aby pocházeli z různých zdrojů a měli rozdílné vlastnosti, čím se více prověří hodnocené vztahy. Celkově bylo hodnoceno 11 vztahů - Hazen, Slichter, Terzaghi, Beyer, Zauerbrej, Krüger, Kozeny, Zunker, Zamarin, USBR, Pavčič na 99 vzorcích zeminy – z toho 33 zatříděných jako různé druhy štěrků a 66 jako různé druhy písků. Postup hodnocení vztahů možno shrnout do následujících kroků:

1. Shromáždění hodnocených vztahů , které shrnují ve svých publikacích autoři Vuković a Soro [1992] , Kasenow [2002], Aravin a Numerov [1953], Odong [2013], jejichž interpretace některých vztahů se značně liší. Současně byly vybrány zeminy dle podkladů firmy Geostar [2014], Istominy [1957] a Khaddoura [2012] a zvolené zeminy byly zatříděny podle ČSN 75 2410 (příloha A).
2. Porovnání vztahů uváděných v různých tvarech a jejich oprava.
3. Vytvoření pracovního sešitu v programu Excel, do kterého byly zadávány parametry jednotlivých zemin a program následně vypočítal hodnoty hydraulické vodivosti podle všech posuzovaných autorů, graficky porovnal vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti a sestrojil křivku zrnitosti (příloha B).
4. Stanovení způsobu hodnocení použitelnosti vztahů.
5. Vyhodnocení výsledků a porovnání výsledků s jinými autory.
6. Shrnutí závěrů a doporučení.

### 5.1. Rozsah platnosti vztahů

Rozsah platnosti vztahu jsou meze, pro které byl daný vztah odvozen, a ve kterých by měly být vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti srovnatelné s naměřenými hodnotami. U většiny vztahů (Hazen, Slichter, Beyer, Zauerbrej, Krüger, USBR, Pavčič) je rozsah platnosti stanoven jednoznačně pomocí velikosti efektivního

zrna nebo hodnoty čísla nestejnozrnnosti. Vztahy Terzaghiho, Kozenyho, Zunkera a Zamarina mají jenom slovní popis rozsahu platnosti a autoři dávají spíše doporučení, že daný vztah dává dobré výsledky právě pro uváděný typ zeminy v rámci rozsahu platnosti vztahu. Protože tyto čtyři vztahy jsou doporučovány zejména pro různé druhy písku, pokud byla zemina zatříděná jako určitý druh písku, vypočtená hodnota hydraulické vodivosti byla označena jako platná a byla zahrnuta do hodnocení. Do vyhodnocení dle jednotlivých autorů byly tedy zahrnuty jen ty zeminy, u kterých vztah v rámci rozsahu platnosti vyhovuje.

Hodnoty hydraulické vodivosti stanoveny podle jednotlivých vztahů a autorů byly posuzovány na základě rozsahu platnosti, který je uveden v tabulce 3. U vzorků zemin, jejichž parametry byly jednoznačně mimo rozsah platnosti vztahu, se hodnoty hydraulické vodivosti při celkovém hodnocení vůbec nebraly v úvahu a byly použity jen pro názorné a informativní vyhodnocení.

## **5.2. Analýza empirických vztahů dle kapitoly 4**

Obecnou rovnici pro výpočet hydraulické vodivosti, ze které autoři vycházeli, je možno napsat ve tvaru vztahu (2.13). Jednotlivé vztahy se strukturálně podobají a liší se jenom hodnotou určitých konstant, velikostí efektivního zrna a tvarem funkce pórovitosti. Pro přehlednost a jednodušší orientaci byly vztahy dle jednotlivých autorů společně s jejich rozsahem platnosti shrnuty v tabulce 3.

**Tab. 3 – Shrnutí upravených empirických vztahů dle rovnice (2.13)**

<b>Autor</b>	$\varphi(n)$	$C$	$d_e$	<b>Rozsah platnosti</b>
Hazen	$1 + 10 \cdot (n - 0,26)$	$6 \cdot 10^{-4}$	$d_e = d_{10}$	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$ ; $U < 5$
Slichter	$n^{3,287}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$d_e = d_{10}$	$0,01 \text{ mm} < d_e < 5 \text{ mm}$
Terzaghi	$\left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}}\right)^2$	$6,1 \cdot 10^{-3} < C_T$ $C_T < 10,7 \cdot 10^{-3}$	$d_e = d_{10}$	hrubozrnné písky
Beyer	1	$6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{U}$	$d_e = d_{10}$	$0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$ ; $1 < U < 20$
Zauerbrej	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$d_e = d_{17}$	píščité materiály s $d_e < 0,5 \text{ mm}$
Krüger	$\frac{n}{(1 - n)^2}$	$5,05 \cdot 10^{-4}$	vztah (4.13)	středně zrnité písky; $U > 5$
Kozeny	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	vztah (4.15)	hrubozrnné písky
Zunker	$\left(\frac{n}{1 - n}\right)^2$	$0,7 \cdot 10^{-3} < C_{ZU}$ $C_{ZU} < 2,4 \cdot 10^{-3}$	vztah (4.20)	jemně a středně zrnité písky
Zamarin	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	vztah (4.23)	hrubozrnné písky
USBR	1	$4,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1000 \cdot d_{20})^{0,3}$	$d_e = d_{20}$	$U < 5$
Pavčić	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$\varphi_1 \cdot \sqrt[3]{U}$	$d_e = d_{17}$	$0,06 \text{ mm} < d_e < 1,5 \text{ mm}$

### 5.3. Způsob hodnocení použitelnosti vztahů

Hodnocení použitelnosti vztahů bylo provedeno na základě poměru mezi hodnotou hydraulické vodivosti stanovené z empirických vztahů ( $k_E$ ) a hodnotou stanovenou měření ( $k_M$ ):

$$\text{poměr } r = \frac{k_E}{k_M} , \quad (5.1)$$

když:  $r < 1$  - vztah podhodnocuje,

$r > 1$  - vztah nadhodnocuje.

U vzorků, kde  $r < 1$  byl pro další zpracování stanoven přepočítaný poměr:

$$r_{\text{přep}} = \frac{1}{r} . \quad (5.1)$$

Rozsah poměru  $r$  pro verbální hodnocení byl stanoven s ohledem na praktickou aplikaci vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti a na základě odborného odhadu. Verbální hodnocení slovně popisuje stanovený rozsah poměru  $r$ . Použitelnost popisuje, v jaké míře je daný vztah prakticky použitelný pro inženýrskou činnost – zda můžeme hodnotu hydraulické vodivosti stanovené pomocí daného vztahu použít jako spolehlivou náhradu za hodnotu hydraulické vodivosti stanovené terénními zkouškami nebo laboratorními metodami. Stupnice pro verbální hodnocení a použitelnost je uvedena v tabulce 4.

**Tab. 4 - Hodnocení empirických vztahů**

<b>poměr <math>r, r_{\text{přep}}</math></b>	<b>verbální hodnocení</b>	<b>použitelnost</b>
(1,0 - 1,5>	excelentní	použitelné
(1,5 - 2>	výborné	
(2,0 - 5,0>	dobré	omezeně použitelné
(5,0 - 10,0>	přijatelné	
(10,0 - 20,0>	omezeně přijatelné	nepoužitelné
>20	nepřijatelné	

## 6. Vyhodnocení výsledků

Celkově bylo hodnoceno 11 vztahů na 99 vzorcích zemin. Hodnoty hydraulické vodivosti byly uspořádány dle jednotlivých autorů a zároveň byly dle tabulky 4 zařazeny do tří kategorií (použitelné, omezeně použitelné a nepoužitelné). I když byly do hodnocení zahrnuty jenom hodnoty hydraulické vodivosti vypočtené ze vzorků, které vyhovovaly v rozsahu platnosti daného vztahu, pro porovnání je uvedeno také vyhodnocení popisující chování vztahů mimo jejich rozsah platnosti.

**Tab. 5 – Vyhodnocení empirických vztahů v rámci rozsahu platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet vyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 99 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	51,85	48,15	0,00	27
<b>Slichter</b>	28,09	53,93	17,98	89
<b>Terzaghi</b>	36,36	50,00	13,64	66
<b>Beyer</b>	31,48	48,15	20,37	54
<b>Zaubrebrej</b>	20,78	35,06	44,16	77
<b>Krüger</b>	14,93	26,87	58,21	67
<b>Kozeny</b>	16,67	30,30	53,03	66
<b>Zunker</b>	19,70	33,33	46,97	66
<b>Zamarin</b>	22,73	19,70	57,58	66
<b>USBR</b>	31,25	62,50	6,25	32
<b>Pavčić</b>	18,60	39,53	41,86	86

Z tabulky 5 je zřejmé, že z hlediska použitelnosti je nejvhodnějším empirickým vztahem Hazenův vztah, který v polovině případů dává použitelné výsledky a ani v jednom případě není hodnocen jako nepoužitelný. Za vztahy s největším rozsahem platnosti můžeme označit vztah Slichtera a Pavčiće. Vztahem s nejmenším rozsahem platnosti je Hazenův vztah, u kterého vyhovělo v jeho rozsahu jenom 27 vzorků z 99, což naznačuje, že jeho rozsah platnosti je stanoven velice pečlivě a právě proto dává až v polovině případů použitelné výsledky. Zajímavé výsledky dávají vztahy Krügera a Zamarina, kde více než pro polovinu vzorků, které vyhověly v rozsahu platnosti, je vztah nepoužitelný.



**Tab. 6 – Vyhodnocení empirických vztahů mimo jejich rozsah platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet vyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 99 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	25,00	40,28	34,72	72
<b>Slichter</b>	20,00	20,00	60,00	10
<b>Terzaghi</b>	24,24	39,39	36,36	33
<b>Beyer</b>	28,89	40,00	31,11	45
<b>Zauberej</b>	45,45	50,00	4,55	22
<b>Krüger</b>	37,50	37,50	25,00	32
<b>Kozeny</b>	24,24	45,45	30,30	33
<b>Zunker</b>	36,36	51,52	12,12	33
<b>Zamarin</b>	33,33	42,42	24,24	33
<b>USBR</b>	7,46	20,90	71,64	67
<b>Pavčič</b>	53,85	30,77	15,38	13

Je zajímavé, že použití vztahu mimo rozsah jeho platnosti nemusí vždy znamenat získání nepoužitelných výsledků, což je zřejmé z tabulky 6. Z Porovnání tabulky 6 s tabulkou 5 jsou zřejmé zarážející rozdíly u vztahů Zaubereje, Krügera, Kozenyho, Zunkera, Zamarina a Pavčiče, kde je více použitelných vzorků mimo rozsah platnosti vztahu než v rozsahu platnosti, což pravděpodobně indikuje, že jejich rozsah platnosti není spolehlivě stanoven.

Z 99 zemin použitých v hodnocení bylo 33 zaříděno jako různé druhy štěrků a 66 jako různé druhy písků. Vyhodnocení dle štěrkovitých a písčitých zemin je uvedeno v následujících tabulkách.

**Tab. 7 – Vyhodnocení empirických vztahů pro štěrkovité zeminy v rámci rozsahu platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet vyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 33 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	0	0	0	0
<b>Slichter</b>	21,20	45,50	33,30	33
<b>Terzaghi</b>	0	0	0	0
<b>Beyer</b>	9,10	45,50	45,50	11
<b>Zauberej</b>	8,30	45,80	45,80	24
<b>Krüger</b>	18,20	48,50	33,30	33
<b>Kozeny</b>	0	0	0	0
<b>Zunker</b>	0	0	0	0
<b>Zamarin</b>	0	0	0	0
<b>USBR</b>	0	0	0	0
<b>Pavčíč</b>	11,50	38,50	50,00	26

Z tabulky 7 vyplývá, že šest z jedenácti vztahů vůbec není vhodných pro stanovení hydraulické vodivosti štěrkovitých zemin. Nejvhodnějším vztahem pro štěrkovité zeminy je Slichterův vztah, který vyhovuje pro všech 33 vzorků.

**Tab. 8 – Vyhodnocení empirických vztahů pro štěrkovité zeminy mimo jejich rozsah platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet nevyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 33 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	27,30	39,40	33,30	33
<b>Slichter</b>	0	0	0	0
<b>Terzaghi</b>	24,20	39,40	36,40	33
<b>Beyer</b>	36,40	36,40	27,30	22
<b>Zauberej</b>	66,70	22,20	11,10	9
<b>Krüger</b>	0	0	0	0
<b>Kozeny</b>	24,20	45,50	30,30	33
<b>Zunker</b>	36,40	51,50	12,10	33
<b>Zamarin</b>	33,30	42,40	24,20	33
<b>USBR</b>	6,10	24,20	69,70	33
<b>Pavčíč</b>	71,40	28,60	0,0	7

**Tab. 9 – Vyhodnocení empirických vztahů pro písčité zeminy v rámci rozsahu platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet vyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 66 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	51,90	48,10	0,00	27
<b>Slichter</b>	32,10	58,90	8,90	56
<b>Terzaghi</b>	36,40	50,00	13,60	66
<b>Beyer</b>	37,20	48,80	14,00	43
<b>Zaubrebrej</b>	26,40	30,20	43,40	53
<b>Krüger</b>	11,80	5,90	82,40	34
<b>Kozeny</b>	16,70	30,30	53,00	66
<b>Zunker</b>	19,70	33,30	47,00	66
<b>Zamarin</b>	22,70	19,70	57,60	66
<b>USB</b>	31,30	62,50	6,30	32
<b>Pavčíč</b>	21,70	40,00	38,30	60

Nejvhodnějším vztahem pro písčité zeminy je Hazenův vztah a následně Beyerův a Terzaghiho vztah. Zajímavé je, že vztahy Kozenyho, Zunkera a Zamarina přednostně určeny pro písčité zeminy vůbec nemají v hodnocení dobré výsledky.

**Tab. 10 – Vyhodnocení empirických vztahů pro písčité zeminy mimo jejich rozsah platnosti**

Autor	použitelnost (relativní četnost v %)			počet nevyhovujících vzorků v rozsahu platnosti z 66 vzorků
	použitelné	omezeně použitelné	nepoužitelné	
<b>Hazen</b>	23,10	41,00	35,90	39
<b>Slichter</b>	20,00	20,00	60,00	10
<b>Terzaghi</b>	0	0	0	0
<b>Beyer</b>	21,70	43,50	34,80	23
<b>Zaubrebrej</b>	30,80	69,20	0,00	13
<b>Krüger</b>	37,50	37,50	25,00	32
<b>Kozeny</b>	0	0	0	0
<b>Zunker</b>	0	0	0	0
<b>Zamarin</b>	0	0	0	0
<b>USB</b>	8,80	17,60	73,50	34
<b>Pavčíč</b>	33,30	33,30	33,30	6

Pro lepší představu a orientaci jsem všechny vzorky s rozdělením na písčité a štěrkovité zeminy seřadil do přehledné tabulky podle toho, zda vyhověly nebo nevyhověly v rámci rozsahu platnosti pro jednotlivé autory.

**Tab. 11 – Shrnutí a porovnání vztahů pro štěrkovité a písčité zeminy**

Autor	V rozsahu platnosti			Mimo rozsah platnosti			$\Sigma$
	Celkově	Štěrk	Písky	Celkově	Štěrk	Písky	
<b>Hazen</b>	<b>27</b>	0	27	<b>72</b>	33	39	<b>99</b>
<b>Slichter</b>	<b>89</b>	33	56	<b>10</b>	0	10	<b>99</b>
<b>Terzaghi</b>	<b>66</b>	0	66	<b>33</b>	33	0	<b>99</b>
<b>Beyer</b>	<b>54</b>	11	43	<b>45</b>	22	23	<b>99</b>
<b>Zauerbrej</b>	<b>77</b>	24	53	<b>22</b>	9	13	<b>99</b>
<b>Krüger</b>	<b>67</b>	33	34	<b>32</b>	0	32	<b>99</b>
<b>Kozeny</b>	<b>66</b>	0	66	<b>33</b>	33	0	<b>99</b>
<b>Zunker</b>	<b>66</b>	0	66	<b>33</b>	33	0	<b>99</b>
<b>Zamarin</b>	<b>66</b>	0	66	<b>33</b>	33	0	<b>99</b>
<b>USBR</b>	<b>32</b>	0	32	<b>67</b>	33	34	<b>99</b>
<b>Pavčíč</b>	<b>86</b>	26	60	<b>13</b>	7	6	<b>99</b>

Na závěr byly vyhodnoceny vztahy podle toho, zda nadhodnocují nebo podhodnocují hodnotu hydraulické vodivosti stanovenou měřením. Také byly porovnány rozsahy platnosti vztahů uváděných jednotlivými autory s rozsahy, které jsem stanovil pro průměry efektivních zrn a číslo nestejnozrnnosti. Rozsahy platnosti byly určovány jenom pro použitelné vzorky zemin dle tabulky 4. Protože použitelné vzorky se vyskytovaly také mimo rozsahy platnosti vztahů, v následujících tabulkách neuvádím porovnání jenom pro použitelné vzorky vyhovující v rámci rozsahů platnosti vztahů .

**Tab. 12 – Porovnání rozsahů platnosti vztahů podle jednotlivých autorů s rozsahem pro použitelné vzorky zemin vyhovující v rámci rozsahů platnosti vztahů**

		vzorky vyhovující v rozsahu platnosti vztahů			Rozsah platnosti uváděn jednotlivými autoři
		min	max	použitelné	
<b>Hazen</b>	$d_{10}$ [mm]	0,105	0,370	14	0,1 mm < $d_e$ < 3 mm, $U < 5$
	$U$ [-]	1,5	4,9		
<b>Slichter</b>	$d_{10}$ [mm]	0,011	3,848	25	0,01 mm < $d_e$ < 5 mm
	$U$ [-]	2,7	46,4		
<b>Terzaghi</b>	$d_{10}$ [mm]	0,005	0,424	24	hrubozrnné písky
	$U$ [-]	2,7	134,9		
<b>Beyer</b>	$d_{10}$ [mm]	0,091	0,297	17	0,06 mm < $d_e$ < 0,6 mm; $1 < U < 20$
	$U$ [-]	1,5	16,2		
<b>Zaubrebj</b>	$d_{17}$ [mm]	0,026	0,464	16	píščité materiály s $d_e < 0,5$ mm
	$U$ [-]	1,5	111,9		
<b>Krüger</b>	$U$ [-]	6,5	507,5	10	středně zrnité písky; $U > 5$
<b>Kozeny</b>	$U$ [-]	1,5	69,3	11	hrubozrnné písky
<b>Zunker</b>	$U$ [-]	1,5	129,5	13	jemně a středně zrnité písky
<b>Zamarin</b>	$U$ [-]	1,5	46,9	15	hrubozrnné písky
<b>USBR</b>	$d_{20}$ [mm]	0,166	0,638	10	$U < 5$
	$U$ [-]	2,7	4,4		
<b>Pavčić</b>	$d_{17}$ [mm]	0,069	0,567	16	0,06 mm < $d_e$ < 1,5 mm
	$U$ [-]	1,5	167,9		

Protože Terzaghiho vztah nemá jednoznačně určený rozsah platnosti vztahu, rozsah velikosti efektivního zrna uvedený v tabulce 12 by dle mých výsledků mohl být použit pro jednoznačnější vyjádření jeho rozsahu platnosti. Rozsah velikosti efektivního zrna pro vztah USBR by mohl být také použit pro upřesnění jeho rozsahu platnosti. Pro vztahy Kozenyho, Zunkera a Zamarina, které jsou doporučovány pro písčité zeminy, není možné na základě rozsahu čísla nestejnzrnnosti jednoznačněji zpřesnit jejich rozsah platnosti.

Tab. 13 – Porovnání rozsahů platnosti vztahů podle jednotlivých autorů s rozsahem pro použitelné vzorky zemin nevyhovující v rámci rozsahů platnosti vztahů

		vzorky nevyhovující v rozsahu platnosti vztahů			Rozsah platnosti uváděn jednotlivými autoři
		min	max	použitelné	
Hazen	$d_{10}$ [mm]	0,009	2,150	18	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}, U < 5$
	$U$ [-]	1,5	119,4		
Slichter	$d_{10}$ [mm]	0,005	0,008	2	$0,01 \text{ mm} < d_e < 5 \text{ mm}$
	$U$ [-]	44,5	134,9		
Terzaghi	$d_{10}$ [mm]	0,078	3,848	8	hrubozrnné písky
	$U$ [-]	10,2	46,4		
Beyer	$d_{10}$ [mm]	0,005	1,000	13	$0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}; 1 < U < 20$
	$U$ [-]	21,4	507,5		
Zauberej	$d_{17}$ [mm]	0,514	7,071	10	píščité materiály s $d_e < 0,5 \text{ mm}$
	$U$ [-]	2,7	38,0		
Krüger	$U$ [-]	1,5	4,1	12	středně zrnité písky; $U > 5$
Kozeny	$U$ [-]	11,3	263,5	8	hrubozrnné písky
Zunker	$U$ [-]	11,3	119,4	12	jemně a středně zrnité písky
Zamarin	$U$ [-]	11,3	167,9	11	hrubozrnné písky
USBR	$d_{20}$ [mm]	0,141	0,270	5	$U < 5$
	$U$ [-]	6,5	263,5		
Pavčič	$d_{17}$ [mm]	0,016	7,071	7	$0,06 \text{ mm} < d_e < 1,5 \text{ mm}$
	$U$ [-]	3,4	129,5		

**Tab. 14 – Nadhodnocování a podhodnocování jednotlivých vztahů**

Autor	v rozsahu platnosti		mimo rozsah platnosti		$\Sigma$
	podhodnocuje	nadhodnocuje	podhodnocuje	nadhodnocuje	
<b>Hazen</b>	8	19	32	40	99
<b>Slichter</b>	65	24	7	3	99
<b>Terzaghi</b>	42	24	25	8	99
<b>Beyer</b>	18	36	22	23	99
<b>Zaubrebrej</b>	27	50	6	16	99
<b>Krüger</b>	6	61	7	25	99
<b>Kozeny</b>	14	52	23	10	99
<b>Zunker</b>	13	53	16	17	99
<b>Zamarin</b>	11	55	9	24	99
<b>USBR</b>	11	21	8	59	99
<b>Pavčíč</b>	17	69	2	11	99

Z tabulky 14 je zřejmé, že kromě vztahů Slichtera a Terzaghiho všechny ostatní vztahy ve většině případů v rámci rozsahu platnosti nadhodnocují hodnotu hydraulické vodivosti stanovenou měřením.

### 6.1. Porovnání výsledků s jinými autoři

Většina autorů používá na hodnocení vztahů vzájemně odlišné způsoby a také rozlišné druhy zemin. Odong [2013] prováděl hodnocení vztahů (Hazen, Kozeny, Beyer, Slichter, Terzaghi, USBR, Alyamani a Sen) na štěrkovitých a písčítých materiálech. Podle jeho zjištění dává nejlepší výsledky vztah Kozenyho a následně vztah Hazena. Vztahy Slichtera a USBR dávají ve většině případů nižší hodnoty hydraulické vodivosti oproti naměřené hodnotě, tedy podhodnocují.

Pliakas a Petalas [2011] prováděl hodnocení vztahů (Hazen, Slichter, Terzaghi, Beyer, Zaubrebrej, Krüger, Kozeny, Zunker, Zamarin, USBR, Alyamani a Sen, Shepherd, Loudon) na vzorcích odebraných na čtyřech lokalitách v okolí řeky Nestos v Řecku. V každé lokalitě bylo odebráno několik desítek vzorků převážně písčítých zemin a hodnota hydraulické vodivosti byla měřena pomocí permeometru. Nejlepší a nejspolehlivější výsledky ve všech čtyřech lokalitách dává podle Pliakase vztah Loudona, který jsem však ve své práci nehodnotil. Za použitelné vztahy, které dávaly spolehlivé výsledky ve dvou lokalitách ze čtyř, označil vztah Terzaghiho a Zunkera.

## 7. Závěr a doporučení

Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti pomocí empirických vztahů byly porovnávány s hodnotami, které byly stanoveny nálevnými zkouškami a pomocí Darcyho přístroje. Hlavní výhodou metody stanovení hydraulické vodivosti na základě zrnitostního rozboru s využitím empirických vztahů je poměrně rychlá a snadná proveditelnost, finanční nenáročnost a možnost její aplikace i na zkoumání rozsáhlých oblastí. I když se vypočítané hodnoty hydraulické vodivosti v rámci jednoho vzorku často značně liší, neměla by být tato metoda znehodnocována a podceňována a v praxi by mohla být využita na předběžný odhad hodnot hydraulické vodivosti a také může sloužit jako podklad pro výběr vhodné metody pro stanovení hydraulické vodivosti ve zkoumané lokalitě. Ze získaných výsledků a také porovnáním výsledků s jinými autory je zřejmé, že úspěšnost v hodnocení jednotlivých vztahů závisí zejména na vlastnostech zemin, na kterých byly testovány. Přesto že se nedá vždy zaručit, že i při použití vztahu v rámci jeho rozsahu platnosti dostaneme použitelný výsledek, je možné formulovat několik doporučení:

- Nejvhodnějším a nejpoužitelnějším vztahem je vztah Hazena, který je zároveň vztahem s nejvíce omezeným rozsahem platnosti. Hazenův vztah je také nejvhodnějším vztahem pro určování hydraulické vodivosti v písčitéch zeminách. Pro písčité zeminy dává použitelné výsledky i vztah Terzaghiho a Beyera.
- Nejširší rozsah platnosti má vztah Slichtera a následně Pavčiče. Slichterův vztah je zároveň nejvhodnějším vztahem pro štěrky a také dává použitelné výsledky pro písky a proto by se dal označit za nejvšestrannější vztah. Ve většině případů Slichterův vztah podhodnocuje hodnotu hydraulické vodivosti stanovenou měřením.
- Vztahy Kozenyho, Zunkera a Zamarina, které nemají jednoznačně určen rozsah platnosti a jsou spíše vhodné pro písčité zeminy, nedoporučuji na empirické stanovení hydraulické vodivosti, protože dávají málo použitelných výsledků pro písčité zeminy.



- Vztah Terzaghiho nemá jednoznačně zadán rozsah platnosti a je doporučován pro hrubozrné písky, ale podle mého vyhodnocení dává použitelné výsledky v tomto rozsahu:  $0,005 \text{ mm} < d_{10} < 0,4 \text{ mm}$ .
- Vztah USBR je určen pro zeminy s číslem nestejnozrnnosti  $U < 5$ , ale podle mého vyhodnocení dává použitelné výsledky kromě uvedeného rozsahu i v tomto rozpětí velikosti efektivního zrna:  $0,17 \text{ mm} < d_{17} < 0,64 \text{ mm}$ .
- I když se v několika případech ve vyhodnocení vyskytly použitelné hodnoty hydraulické vodivosti i mimo rozsah platnosti vztahů, pravděpodobně se jedná o náhodu a proto bych doporučoval používat vztahy jenom v rámci jejich rozsahu platnosti.
- Vztah Krügera nedoporučuji, protože pro více než polovinu vzorků, které vyhověly v rozsahu platnosti, je vztah nepoužitelný. Krügerův vztah ve většině případů nadhodnocuje hodnotu hydraulické vodivosti stanovenou měřením.
- Hodnoty hydraulické vodivosti vypočtené pomocí empirických vztahů bych v praxi nedoporučoval využívat v různých výpočtech a návrzích bez srovnání s hodnotami získanými jinou metodou a spíše bych je doporučil používat jenom jako orientační odhad, protože podle mého vyhodnocení i nejlepší vztah (vztah Hazena) dává použitelné výsledky jenom v polovině případů, i když je použit v rámci jeho rozsahu platnosti, což je dle mého názoru nedostačující.

Dalším důležitým výstupem této diplomové práce je pracovní sešit vytvořený v programu Excel, který se používá pro výpočty na Ústavu vodních staveb VUT v Brně a také může být použit na výukové účely. Do pracovního sešitu jsou zadávány parametry jednotlivých zemin a program následně vypočítá hodnoty hydraulické vodivosti podle všech posuzovaných autorů, stanoví, zda vzorek vyhovuje v rozsahu platnosti, graficky porovná vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti a sestrojí křivku zrnitosti. Pracovní sešit a také celý postup vyhodnocování jsou součástí elektronické verze diplomové práce na přiloženém CD.

## 8. Seznam použité literatury

ARAVIN, V.I., NUMEROV, S.N., (1953). *Teorija dviženija židkostež i gazov v nedeformipujemoj poristoj srede*. Moskva: Gosudarstvenoje izdatel'stvo techniko-teoritičeskoj literatury.

BENETÍN, J., (1958). *Pohyb vody v zemine*. Vydavatelstvo SAV, Bratislava, 215 s.

ISTOMINA, V.S., (1957). *Fil'tracionnaja ustojčivost' gruntov*. Moskva: Gosudarstvenoje izdatel'stvo literatury po strojitel'stvu i architekture.

JANDORA, J., ŠULC, J., (2006). *Hydraulika Modul 01- Studijní opora pro studijní program s kombinovanou formou studia*, Brno.

KASENOW, M., (2002). *Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis*. Highlands Ranch, CO : Water Resources Publications. ISBN 1887201319.

KHADDOUR, A. (2012). *Hodnocení filtrační stability zemních konstrukcí vodních staveb podle mezních stavů*. Brno. Doktorská disertační práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

KOVÁŘÍK, K., SITÁNYIOVÁ D., DRUSA M., (2003). *Hydraulika a hydrológia*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 260 s. ISBN 80-807-0037-0.

ODONG, J., (2013). *Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis*. International Journal of Agr. & Env.

PLIAKAS, F., PETALAS C., (2011). *Determination of Hydraulic Conductivity of Unconsolidated River Alluvium from Permeameter Tests, Empirical Formulas and Statistical Parameters Effect Analysis*. 23 s. DOI: 10.1007s/11269-011-9844-8.

ŘÍHA, J., (2005). *Hydraulika podzemní vody*. Modul 01- Studijní opora pro studijní program s kombinovanou formou studia, Brno.

SMĚRNICE (1973). *pro výpočet filtrační stability hrází z místního materiálu*. Leningrad: Energie. 113 p

VALENTOVÁ, J., (1994). *Hydraulika podzemní vody*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 174 s. ISBN 978-80-01-03625-9.

VNIIG, (1991). *Ministerstvo topliva i energetiki rossijskoj federacii. Rekomendacii po projektirovaniju obratnych fil'trov gidrotehničeskich sooruzenij.*. S. Peterburg: Ministerstvo topliva i energetiki rossijskoj federacii.

VUKOVIĆ, M., SORO, A., (1992). *Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain - size composition*. USA: Water Resources Publications.

### **Normy**

ČSN 01 1320 – Veličiny, značky a jednotky v hydromechanice

ČSN 75 2410 – Malé vodní nádrže

### **Ostatní podklady**

Výsledky nálevných zkoušek a charakteristiky různých zemin z roku 2014 od firmy GEOSTAR, spol. s r.o.

## 9. Seznam zkratek

ČVUT	České vysoké učení technické
MVASKF	Program, který vytvořili Vuković a Soro [1992] pro stanovení hydraulické vodivosti pomocí empirických vztahů
USBR	United States Bureau of Reclamation

## 10. Seznam symbolů

$A$	plocha, kterou prosakuje průtok $Q$	[m <sup>2</sup> ]
$C$	bezrozměrný koeficient	[-]
$d$	průměr trubice	[m]
$d_e$	průměr efektivního zrna	[m]
$d_{iA}$	aritmetický průměr velikosti zrn vymezuujících i-tou frakci	[m]
$d_1^d$	minimální průměr zrna odpovídající i-té frakci	[m]
$d_1^g$	maximální průměr zrna odpovídající i-té frakci	[m]
$E$	ztráta energie na jednotku tíhy kapaliny	[m]
$f(n)$	funkce definující závislost mezi skutečným a modelovým pórovitým prostředím	[-]
$g$	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_1, h_2$	piezometrické výšky	[m]
$J$	hydraulický gradient	[-]
$k$	hydraulická vodivost, filtrační součinitel dle ČSN 01 1320	[m/s]
$k_E$	hydraulická vodivost stanovená pomocí empirických vztahů	[m/s]
$k_M$	hydraulická vodivost stanovená měřením	[m/s]
$l$	délka trubice	[m]
$n$	pórovitost	[-]
$Q$	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
$q_p$	specifický průsak (průtok)	[m/s]
$r$	poměr mezi $k_E$ a $k_M$	[-]
$r_{přep}$	přepočítaný poměr $r$	[-]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$T$	teplota vody	[°C]
$U$	číslo nestejnozrnnosti	[-]
$v_s$	střední rychlost vody v pórech	[m/s]
$v_T$	rychlost vody v trubici	[m/s]
$\Delta g_i$	hmotnostní podíl i-té frakce z celkové hmotnosti vzorku	[-]
$\lambda$	součinitel ztrát třením	[-]

$\nu$	kinematická viskozita	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$\tau$	bezrozměrný parametr	$[-]$
$\varphi(n)$	funkce pórovitosti	$[-]$
$\varphi_1$	koeficient závisící na druhu zeminy	$[\text{m}]$

## 11. Seznam tabulek

Tab. 1 – Hodnoty parametru $\tau$ [Aravin a Numerov, 1953].....	21
Tab. 2 - Součinitel $C_{ZU}$ pro Zunkerův vztah .....	24
Tab. 3 – Shrnutí upravených empirických vztahů dle rovnice (2.13).....	30
Tab. 4 - Hodnocení empirických vztahů.....	31
Tab. 5 – Vyhodnocení empirických vztahů v rámci rozsahu platnosti.....	32
Tab. 6 – Vyhodnocení empirických vztahů mimo jejich rozsah platnosti.....	33
Tab. 7 – Vyhodnocení empirických vztahů pro štěrkovité zeminy v rámci rozsahu platnosti.....	34
Tab. 8 – Vyhodnocení empirických vztahů pro štěrkovité zeminy mimo jejich rozsah platnosti .....	34
Tab. 9 – Vyhodnocení empirických vztahů pro písčité zeminy v rámci rozsahu platnosti.....	35
Tab. 10 – Vyhodnocení empirických vztahů pro písčité zeminy mimo jejich rozsah platnosti.....	35
Tab. 11 – Shrnutí a porovnání vztahů pro štěrkovité a písčité zeminy .....	36
Tab. 12 – Porovnání rozsahů platnosti vztahů podle jednotlivých autorů s rozsahem pro použitelné vzorky zemin vyhovující v rámci rozsahů platnosti vztahů .....	37
Tab. 13 – Porovnání rozsahů platnosti vztahů podle jednotlivých autorů s rozsahem pro použitelné vzorky zemin nevyhovující v rámci rozsahů platnosti vztahů.....	38
Tab. 14 – Nadhodnocování a podhodnocování jednotlivých vztahů.....	39

## 12. Seznam obrázků

<b>Obr.1</b> – Darcyho přístroj [Valentová, 1994] .....	11
---	----



## **13. Seznam příloh**

**Příloha A** – Seznam hodnocených zemin

**Příloha B** – Charakteristika jednotlivých hodnocených zemin