

Vyučující - studenti

- dotazy, diskuse
- prezentace k dispozici
- lukas.smelik@gmail.com
- otázky z tohoto tématu ke zkoušce zadávám já

A scenic view of a river flowing through a forested valley. The river is clear and shallow, with many rocks visible on the bottom. The banks are covered in lush green trees and bushes. In the background, there are mountains under a clear blue sky.

Proudění v korytech vodních toků

Ing. Lukáš Smelík, Ph.D.

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.

Vodní tok

- vodoteč, koryto s vodou
- část území, kterým odtéká voda z povodí
- povrchový, podpovrchový
- přírozený: bystřina, **potok**, říčka, **řeka**, veletok
- umělý: kanál, náhon, meliorace, závlaha, akvadukt, tunel
- stálý, občasný
- Proudění:
 - **s volnou hladinou**
 - tlakové



Variabilita vodních toků - míra úpravy



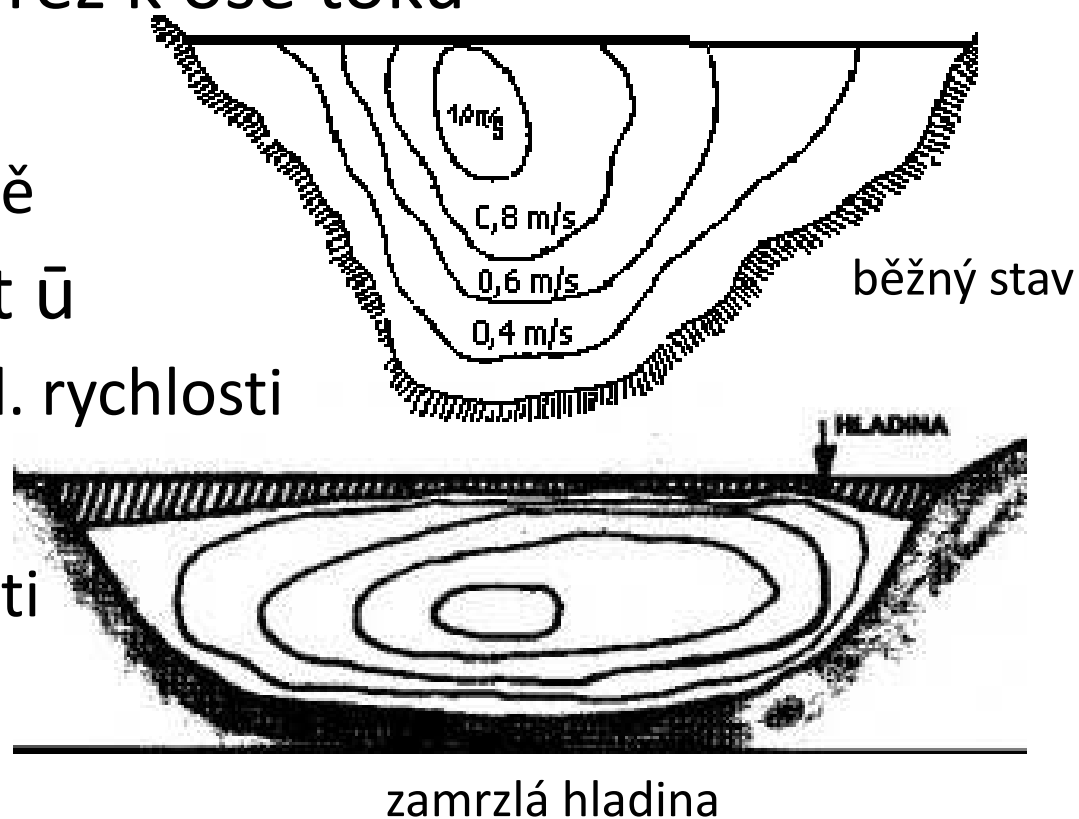
Historický vývoj toků

- přirozený tok
- drobné úpravy - přístup, brod, ryby
- energetické úpravy - náhon, jez
- soustavná úprava - povodně
- revitalizace - estetika
- renaturace - biologické funkce
- přirozený vývoj



Proudění

- Hydrodynamika - pohyb kapalin a jejich působení na tuhá tělesa při vzájemném relativním pohybu
- průtočný profil - kolmý řez k ose toku
- bodová rychlost u
 - okamžitá rychlost v bodě
- střední bodová rychlost \bar{u}
 - vyrovnaná hodnota bod. rychlosti
- **průřezová rychlost v**
 - střední hodnota rychlosti v průtočném průřezu



Příčné řezy

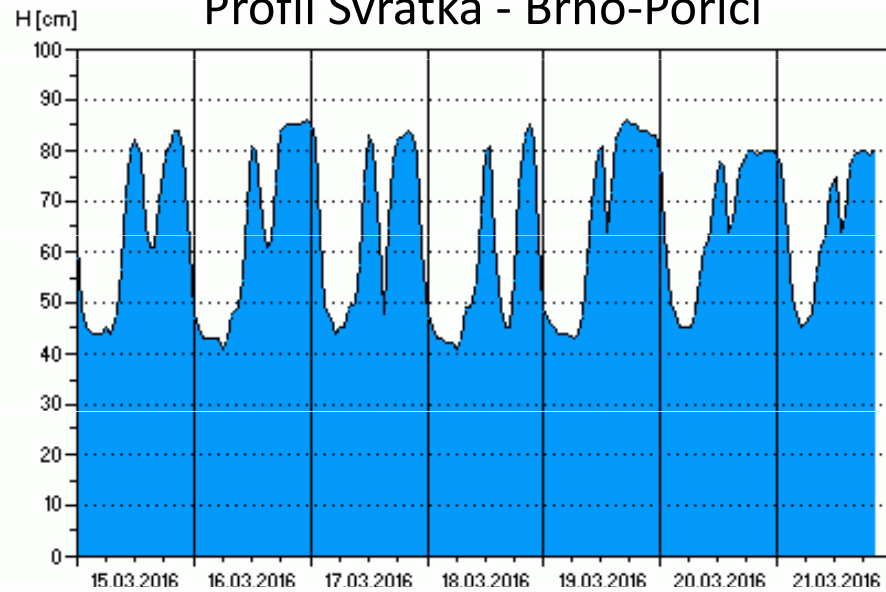
- příčné řezy (průtočné profily) - dané staničením (kilometráží) – v čase proměnná
- **průtočná plocha A** – obsah plochy kolmé v každém bodě k vektoru bodové rychlosti
- objemový **průtok Q** – objem kapaliny proteklé určitým průtočným profilem za jednotku času

Ustálenost proudění

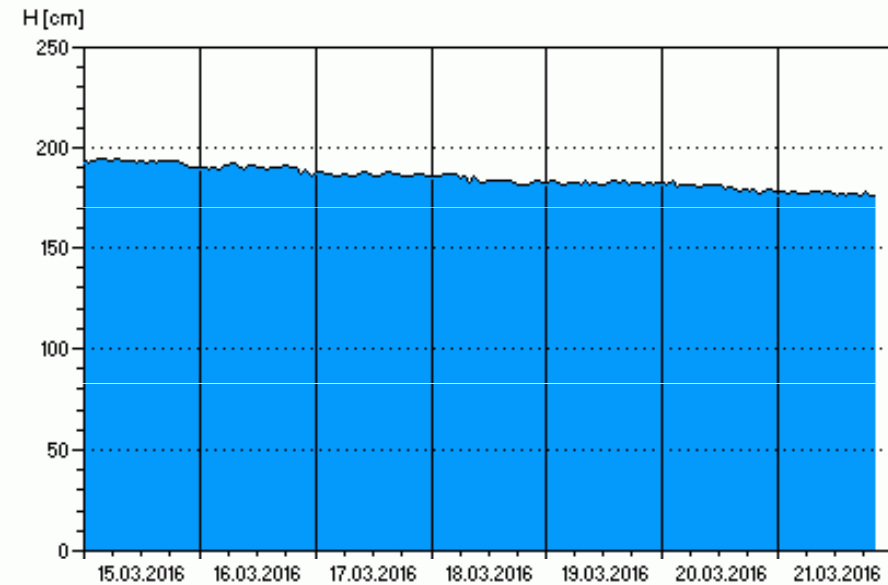
- dle změny průtoku v čase
 - ustálené (stacionární) – průtok, průřezová rychlost, průtočná plocha jsou v čase neměnní a závisí jen na poloze
 - návrhový průtok
 - neustálené (nestacionární) – hydraulické veličiny jsou funkcí času a polohy
 - transformace nivou

Ustálenost proudění

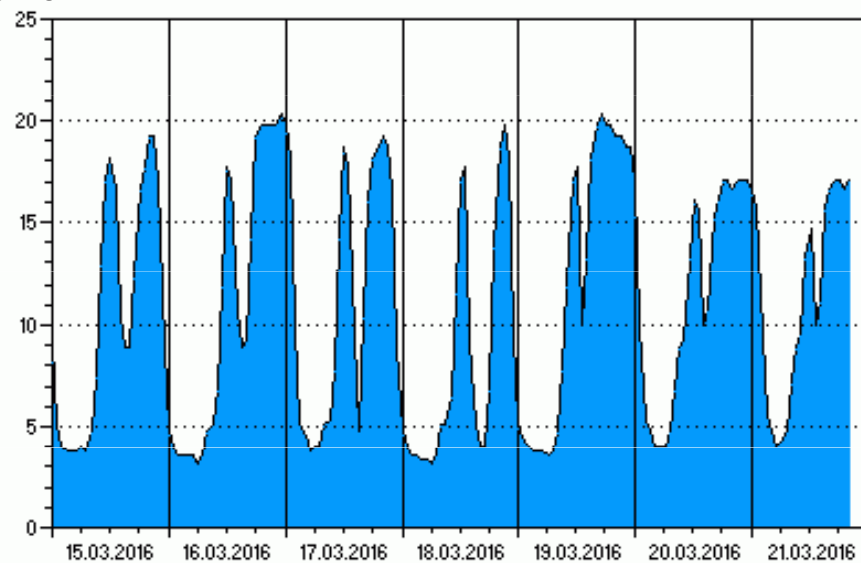
Profil Svatka - Brno-Poříčí



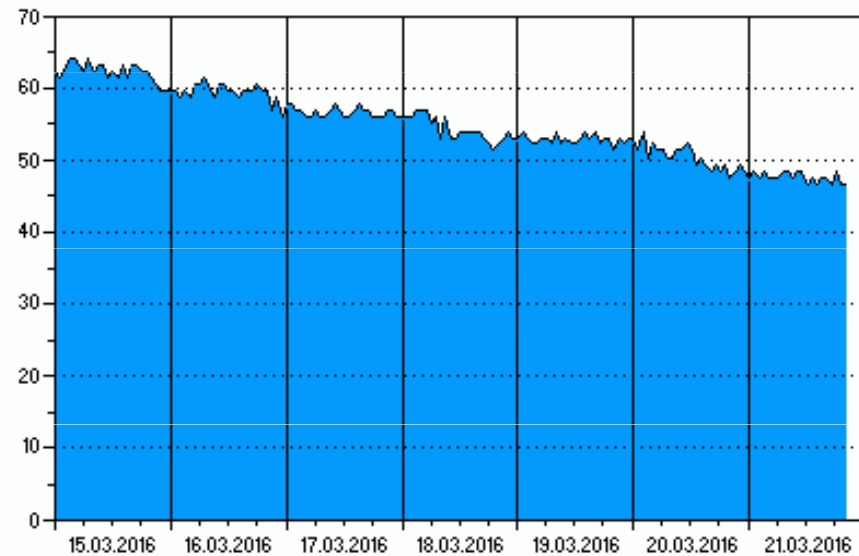
Profil Morava - Kroměříž



Q [m³s⁻¹]

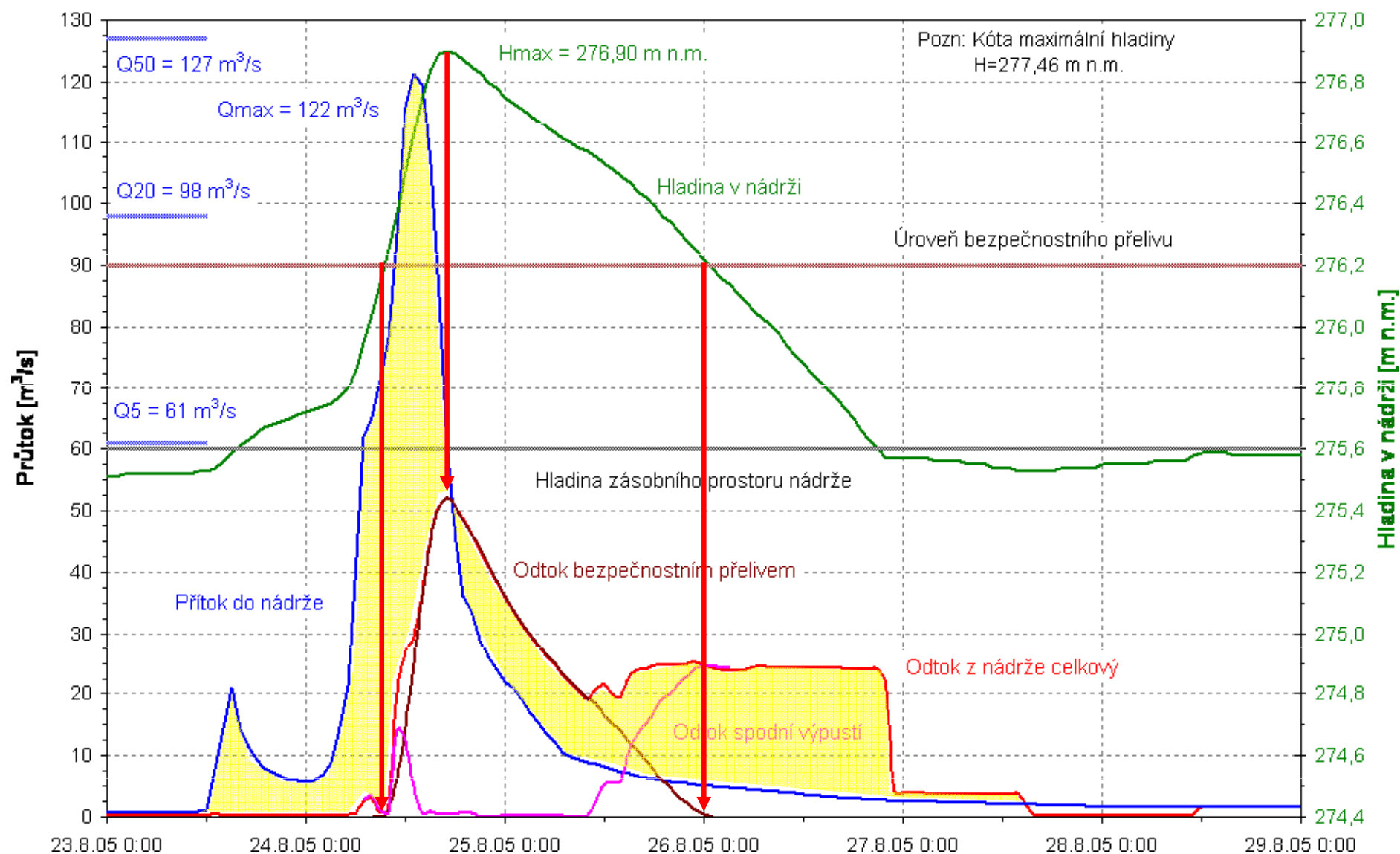


Q [m³s⁻¹]



Transformace povodně - nádrž

Transformace povodňové vlny 23. - 29.8.2005
Vodní dílo TĚRLICKO



Transformace povodně - niva



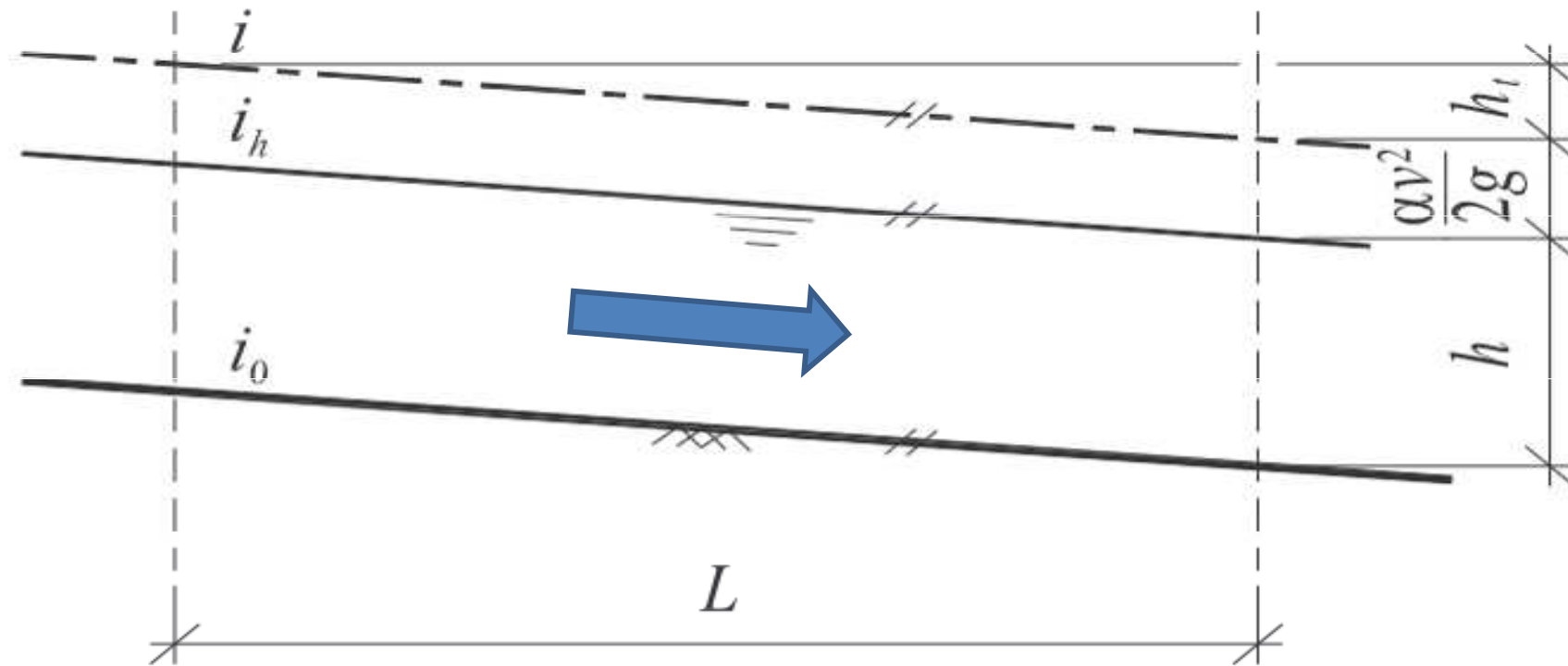
Rovnoměrnost proudění

- dle změny parametrů v prostoru
 - rovnoměrné – zvláštní případ ustáleného proudění, průtočné průřezy, rychlost, sklon dna a drsnost jsou v celém úseku konstantní
 - idealizovaný případ
 - nerovnoměrné – hydraulické veličiny jsou funkcí času a polohy



Rovnoměrné ustálené proudění

- Grafické znázornění Bernoulliho rovnice



$$i_0 = i_h = i$$

sklon dna = sklon hladiny = sklon čáry energie

Druhy modelů

- **1D** – směr vektoru rychlosti jen ve směru proudnice
 - běžné modelování nižší kvality, výpočet v řádu sekund
- **2D** – směr vektoru rychlosti v horizontální rovině
 - modelování vyšší kvality, pro inundace, výpočet v řádu hodin až dní
- **3D** – vektor rychlosti může směřovat všemi směry
 - řešení detailů – přepady, usměrnění proudu, výpočet v řádu hodin až dní

(Zaměření koryta)

- nerovnoměrné koryto - pro informaci
- 1D:
 - příčné profily jsou vzdáleny desítky až stovky metrů
 - geodetické zaměření
 - v místech změn profilu
 - podle délky úseku
- 2D:
 - plošná informace – fotogrametrie, laserové skenování
 - kombinace s 1D ve vlastním korytě

Časté tvary koryt

- obdélník

- úzké prostory,
u silnice, ve městech



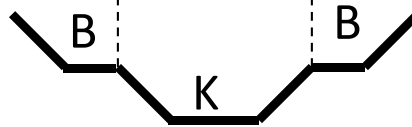
- lichoběžník

- technický tvar blízký přírodě, často,
mimo města



- složený lichoběžník

- řeky, vznikem hrází, berma zaplavena
maximálně několikrát ročně



- miskovitý

- mělký, přístup, vyrovnaný průtok během roku



- půlkruhový

- NE, složitá stavba, komplikovaná údržba



Výpočet průtoku

- rovnoměrné ustálené proudění s volnou hladinou

- hydraulický poloměr [m]

$$R = \frac{A}{O}$$

průtočná plocha
omočený obvod

- rychlostní součinitel Chézyho [$\text{m}^{0,5}/\text{s}$]

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

souč. drsnosti

- rychlost dle Chézyho rovnice [m/s]

$$v = C \sqrt{R i}$$

podélný sklon dna

- průtok [m^3/s]

$$Q = v A$$

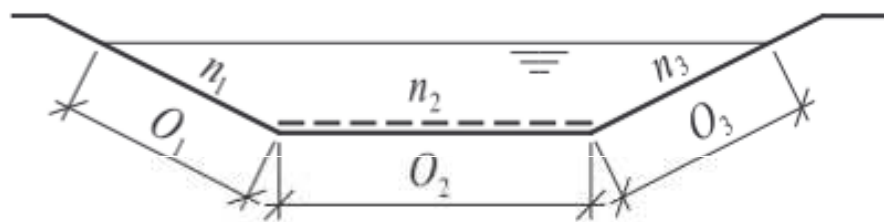
Průtočná plocha [m²]

- univerzální rovnice $A = \left(\underset{\text{šířka ve dně}}{b + \underset{\text{sklon břehu}}{m \cdot h}} \right) \cdot \underset{\text{hloubka}}{h}$
 - jsou-li oba břehy ve stejném sklonu
 - sklon se udává jako 1:m



Omočený obvod [m]

- na styku vody s korytem
- u složeného koryta započítat svislici mezi kynetou a bermou – drsnost 0,010 (jako sklo) přiřadit ke kynetě
- části koryta s různou drsností



$$n = \frac{n_1 O_1 + n_2 O_2 + n_3 O_3}{O_1 + O_2 + O_3}$$



Součinitel drsnosti n [-]

- vyjadřuje odpory proudění
 - originálně vyjadřuje ztráty třením
 - často ztráty místní a třením společně
- subjektivně stanovovaný, zkušenosti
- neměřitelný parametr

- Faktory ovlivňující drsnost:

- sedimenty, dnové útvary
- nepravidelnost koryta, překážky
- meandrování
- proměnlivost v čase
- vegetace
- vodní stav

* faktory jsou vzájemně závislé



Stanovení součinitele drsnosti

- Tabulky
 - rychlé, snadné, subjektivní
 - vhodné pro dlouhé úseky, čisté, plné koryto
 - velký rozptyl doporučených hodnot jednoho typu koryta
 - nezávislost na vodním stavu
- Fotografické katalogy
 - vhodné pro začátečníky, doplnění tabulek
 - knižní, PDF, webové
 - fotografii lze zařadit k více popisům
 - ovlivnění pod hladinou

Popis koryta	<i>n</i>
výjimečně <u>hladké stěny</u> , smaltované povrchy	0,009
čistě ohoblovaná prkna, dobrá omítka z čistého cementu	0,010
dobrá cementová omítka, hoblovaná prkna, litinové a ocelové trouby dobře spojované	0,011
nehoblované prkna, vodovodní trouby v běžných podmínkách - bez inkrustací, čisté stokové trouby	0,012
kvádrové zdivo, dobře provedené cihelné zdivo, stokové trouby v běžných podmínkách, trochu zanesené trouby vodovodní, hladký beton	0,013
znečištěné trouby vodovodní i stokové, obetonování kanálů běžného provedení	0,014
obyčejné <u>cihelné zdivo</u> , obložení z přitesaného kamene	0,015
dobré lomové zdivo, staré cihelné zdivo, poměrně hrubé obetonování, výjimečně hladká skála	0,017
obyčejné lomové zdivo, kamenná dlažba, kanály poměrně hladce vyrubané ve skále, kanály v ulehším štěrku nebo v ulehlé zemině ve velmi dobrém stavu	0,020
kanály v hutné zemině nebo v ulehším štěrku, velké zemní kanály <u>velmi dobře udržované</u>	0,023
dobré zdivo na sucho, velké zemní kanály při průměrné údržbě, malé zemní kanály při dobré údržbě, řeky v nejlepším stavu (volné přímé koryto bez překážek proudu, bez nánosů a výmolů)	0,025
velké zemní kanály s podprůměrnou údržbou, malé zemní kanály průměrně udržované	0,028
zemní kanály v poměrně špatném stavu (<u>místy zarostlé koryto</u> , nánosy na dně), řeky v dobrých podmínkách	0,030
kanály ve špatném stavu (s nepravidelným průřezem, místy zarostlé nebo zanesené kameny), řeky v poměrně dobrých podmínkách, ale proud je ovlivněn částečně kamením nebo rostlinami	0,035
kanály ve <u>výjimečně špatném stavu</u> (výmoly i nánosy, koryto zarostlé kořeny, zanesené hrubými kameny), řeky s horšími podmínkami průtoku (v korytě je větší množství kamenů a rostlin nebo meandruje a má malý počet mělčin a výmolů)	0,040
<u>horské bystřiny</u>	0,080

Stanovení součinitele drsnosti

- Empirické rovnice
 - velké množství rovnic
 - vhodné jen pro určité typy koryt
 - omezující podmínky

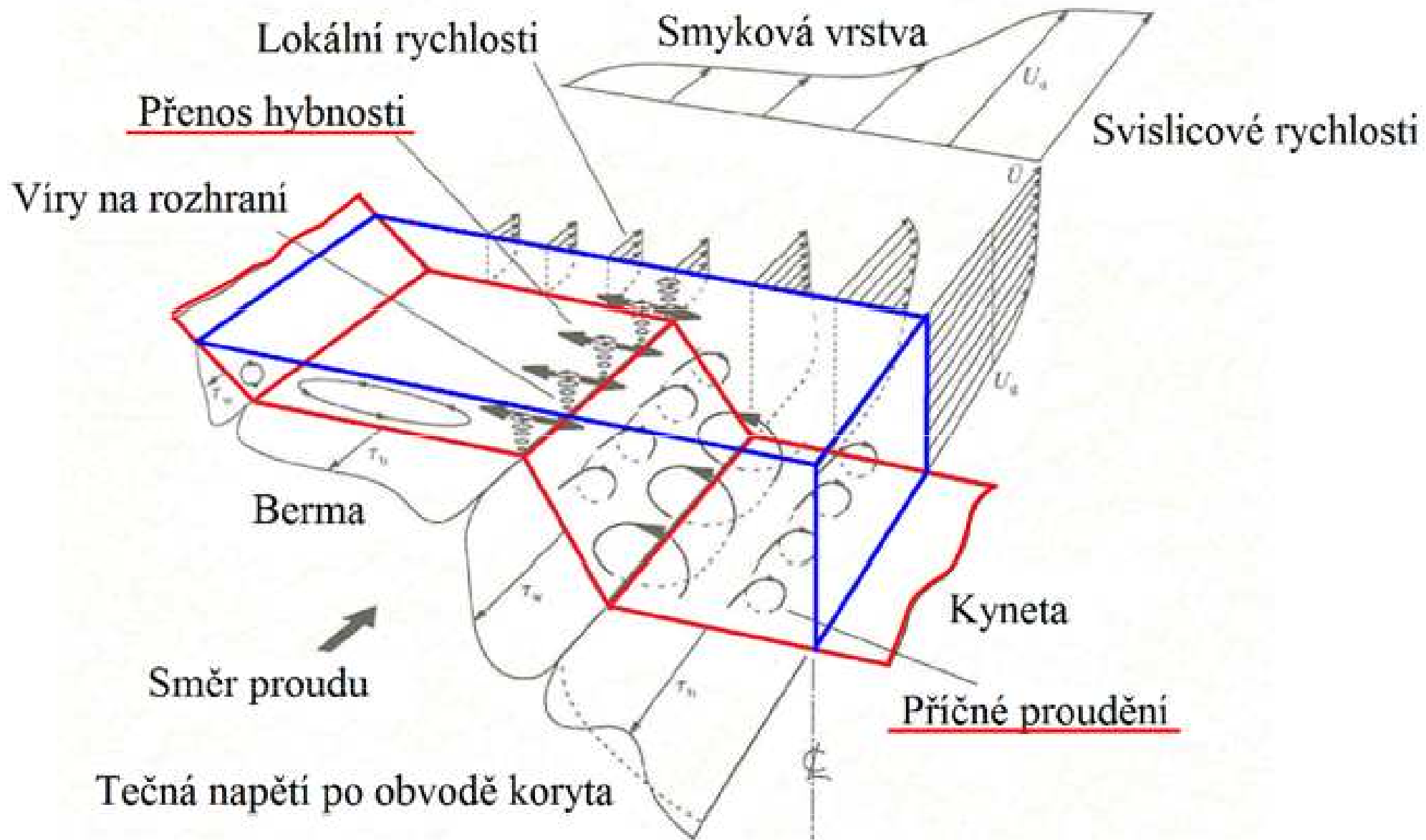
- Cowanova metoda

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$$

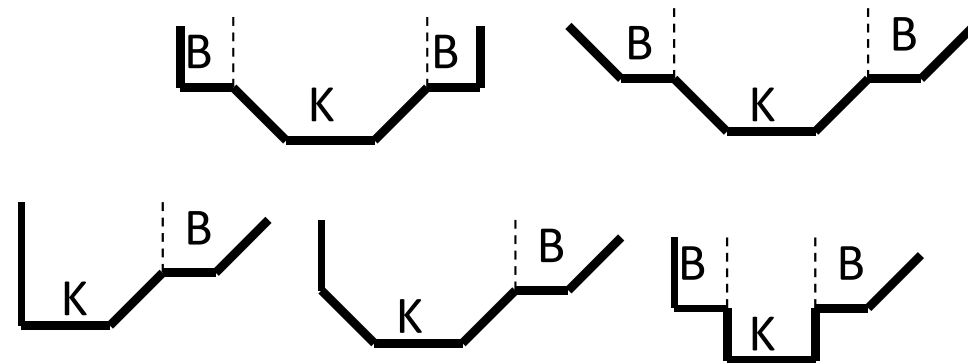
- n_0 - materiál dna
- n_1 - nerovnosti povrchu
- n_2 - změna příčného profilu
- n_3 - překážky
- n_4 - vegetace
- m_5 - meandrovitost

<http://sites.google.com/site/vypocetdrsnosti>

Ztráty třením



Složené koryto



- **Kyneta**

- voda většinu roku pouze v ní
- navrhuje se na průtok 30denní až jednoletý
- v příliš širokém korytě by docházelo k usazování
- potřebná hloubka pro živočichy, min 0,4m
- potřebná rychlost, aby se voda příliš neprohřívala, min 0,4 m/s

↓
zhoršení kvality (sinice, řasy atd.)

- **Berma**

- pro větší průtoky → průměrně 1x za 30dní až 1rok se začne plnit berma
- vznikne přirozeně, stavbou zdí nebo hrází
- udržovat trávu, keře a stromy → snižují kapacitu

Složená koryta



Výpočet průtoku v bermě a kynetě

- Průtoky v jednotlivých částech se počítají zvlášť a pak se sečtou !!! ---> rozdílné rychlosti

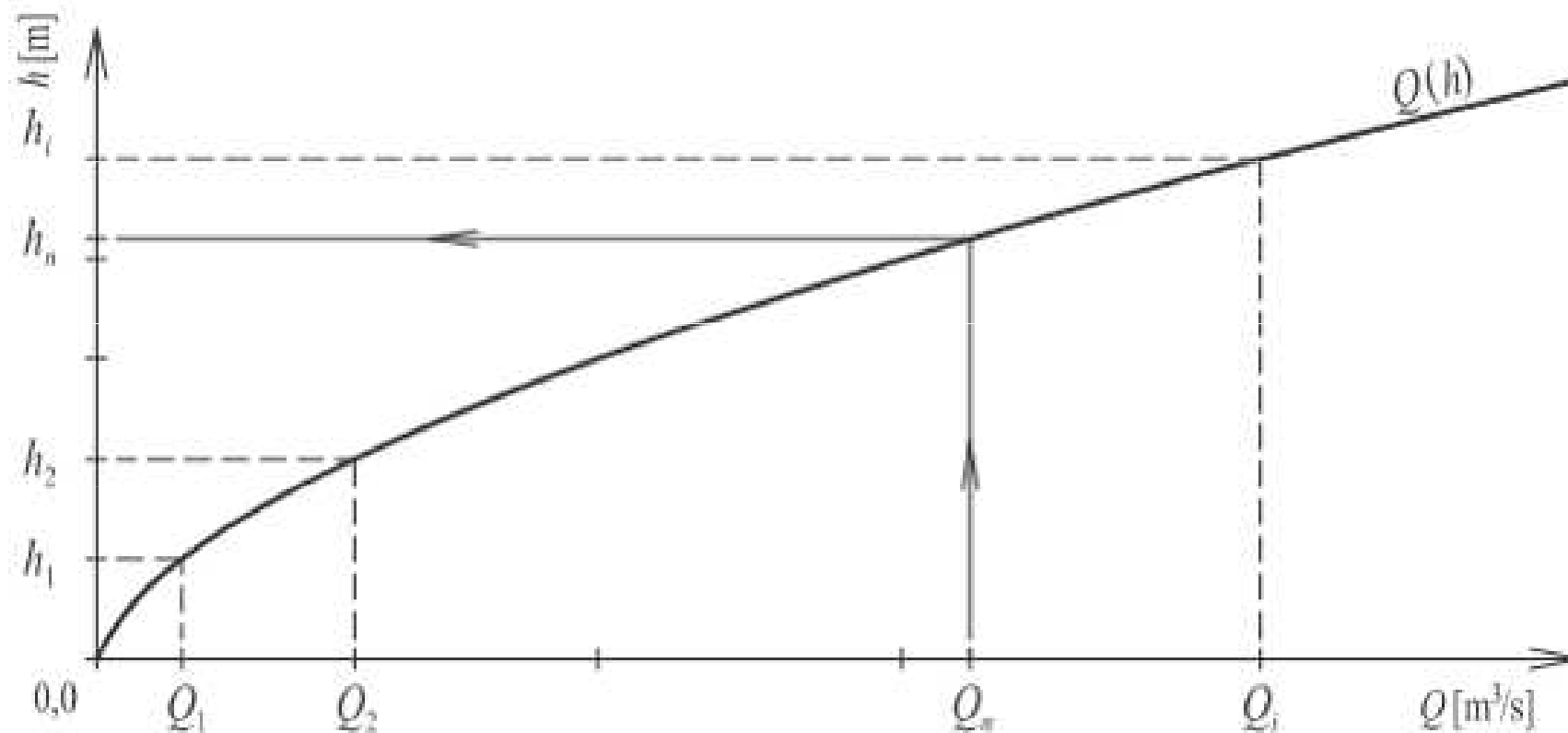
DOBŘE

/ ŠPATNĚ

KYNETA								BERMA								CELKEM		CELKEM	
h	A	O	R	n	C	v	Q	h	A	O	R	n	C	v	Q	ΣQ		v	ΣQ
m	m ²	m	m	-	m ^{0,5} /s	m/s	m ³ /s	m	m ²	m	m		m ^{0,5} /s	m/s	m ³ /s	m ³ /s		m/s	m ³ /s
0,2	3	16	0,2	0,029	26	0,5	2									2		0,5	2
0,4	6	16	0,4	0,029	29	0,8	5									5		0,8	5
0,6	10	17	0,6	0,029	31	1,0	10									10		1,0	10
0,8	13	18	0,7	0,029	32	1,2	16									16		1,2	16
1,0	17	19	0,9	0,029	34	1,4	23									23		1,4	23
1,2	20	19	1,0	0,029	34	1,6	32									32		1,6	32
1,4	24	20	1,2	0,030	34	1,7	41	0,2	2	11	0,2	0,030	25	0,5	1	41		1,3	35
1,6	28	20	1,4	0,031	34	1,8	50	0,4	4	12	0,3	0,030	28	0,7	3	53		1,5	46
1,8	31	21	1,5	0,031	34	1,9	59	0,6	6	13	0,5	0,030	29	0,9	5	65		1,6	59
2,0	35	21	1,7	0,032	34	2,0	69	0,8	8	14	0,6	0,030	31	1,0	8	78		1,7	72
2,2	39	21	1,8	0,032	34	2,0	79	1,0	10	14	0,7	0,030	31	1,2	12	91		1,7	85
2,4	42	22	2,0	0,033	34	2,1	90	1,2	12	15	0,8	0,030	32	1,3	15	105		1,8	99
2,6	46	22	2,1	0,034	34	2,2	100	1,4	14	16	0,9	0,030	33	1,4	19	119		1,9	113

Měrná křivka

- Zjištění průtoku Q ze známé hloubky h



Limnigraf – (automatické) měření průtoku v korytě pomocí čidla měřícího hloubku

Nejistoty







ZAMĚŘENÍ
ROZKOLÍSANOST HLADIN
OBJEKTY
ODHAD DRSNOSTI
NEROVNÉ DNO
PLAVENINY + SEDIMENT

SPA

- Drobné vodní toky
 - značky na objektech
 - ultrazvukové čidlo - SMS
- Významné vodní toky
 - hlásná povodňová služba



Stanice: LG Brno-Poříčí		Tok: Svratka
Povodně		
	1. stupeň povodňové aktivity:	120 [cm]
	2. stupeň povodňové aktivity:	160 [cm]
	3. stupeň povodňové aktivity:	260 [cm]
	3. stupeň povodňové aktivity (🚨 extrémní ohrožení):	340 [cm] (Q50)

Protipovodňová opatření

- povodňové zdi
- povodňové hráze
- mobilní hrazení
- povodňová vrata
- individuální ochrana
- vodní nádrže
- Suché nádrže
- úpravy v krajině
- ... omezení výstavby



Protipovodňová technická opatření



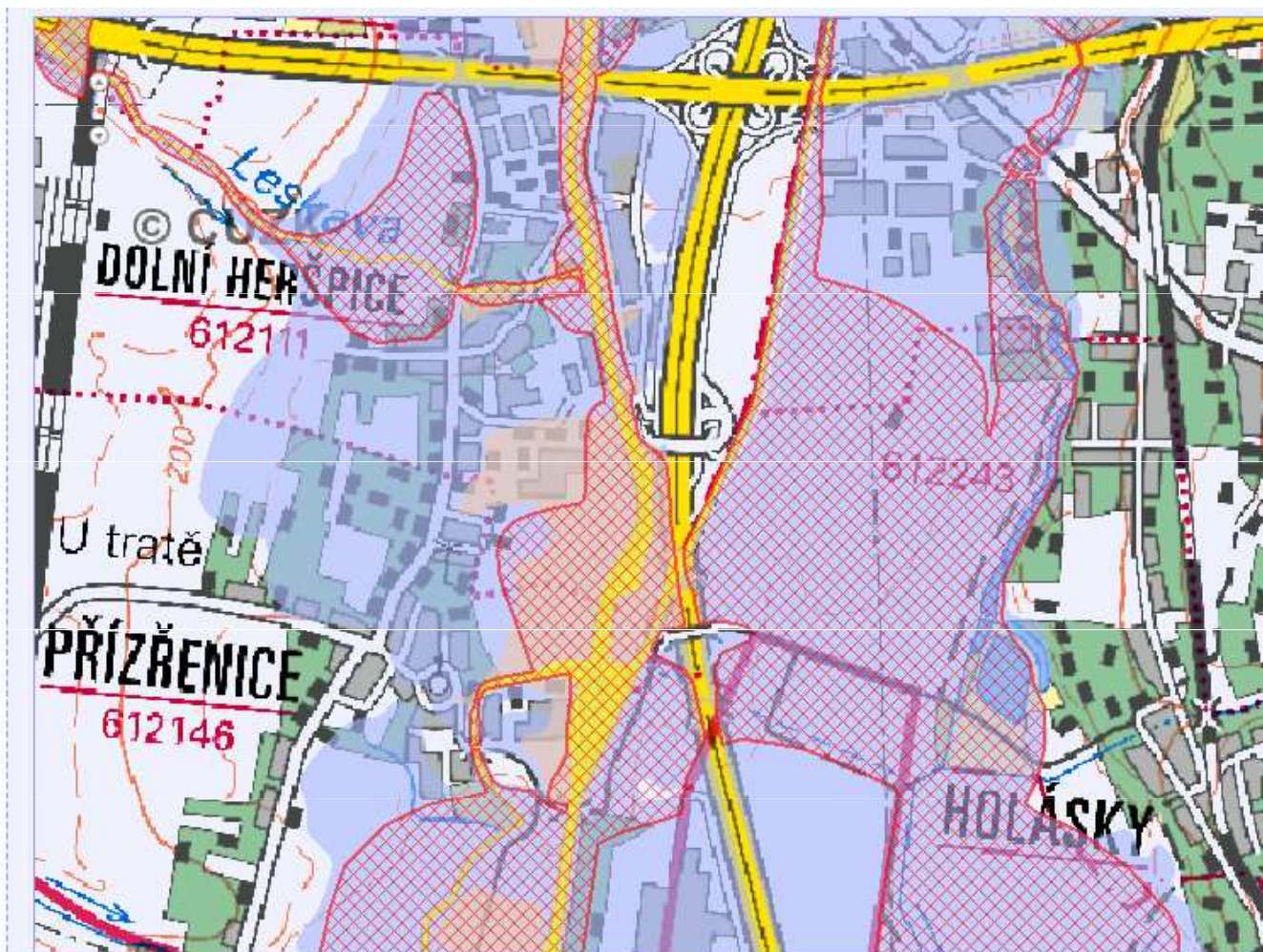
Protipovodňová technická opatření








Náhled do legislativy - povodně

- lidé jsou zodpovědní sami za sebe
- pomoc státu
 - integrovaný záchranný sbor, hmotná pomoc, peněžní pomoc, pomoc vojáků a dobrovolníků, ...
- povodňová paměť
- tady povodeň nikdy nebyla - jiné rozložení srážek, jiné využívání krajiny, větší zastavěná plocha, kanalizace
- povodňové mapy
- území v rozlivech jsou levná – sociálně slabí
- pojišťovny
- vykoupení – není politický zájem

Záplavová území - dibavod.cz



záplavová území

-  aktivní zóna záplavového území pro Q100
-  záplavové území 5-leté vody
-  záplavové území 20-leté vody
-  záplavové území 100-leté vody
-  záplavové území největší zaznamenané přirozené povodně

pohyb v mapovém výřezu

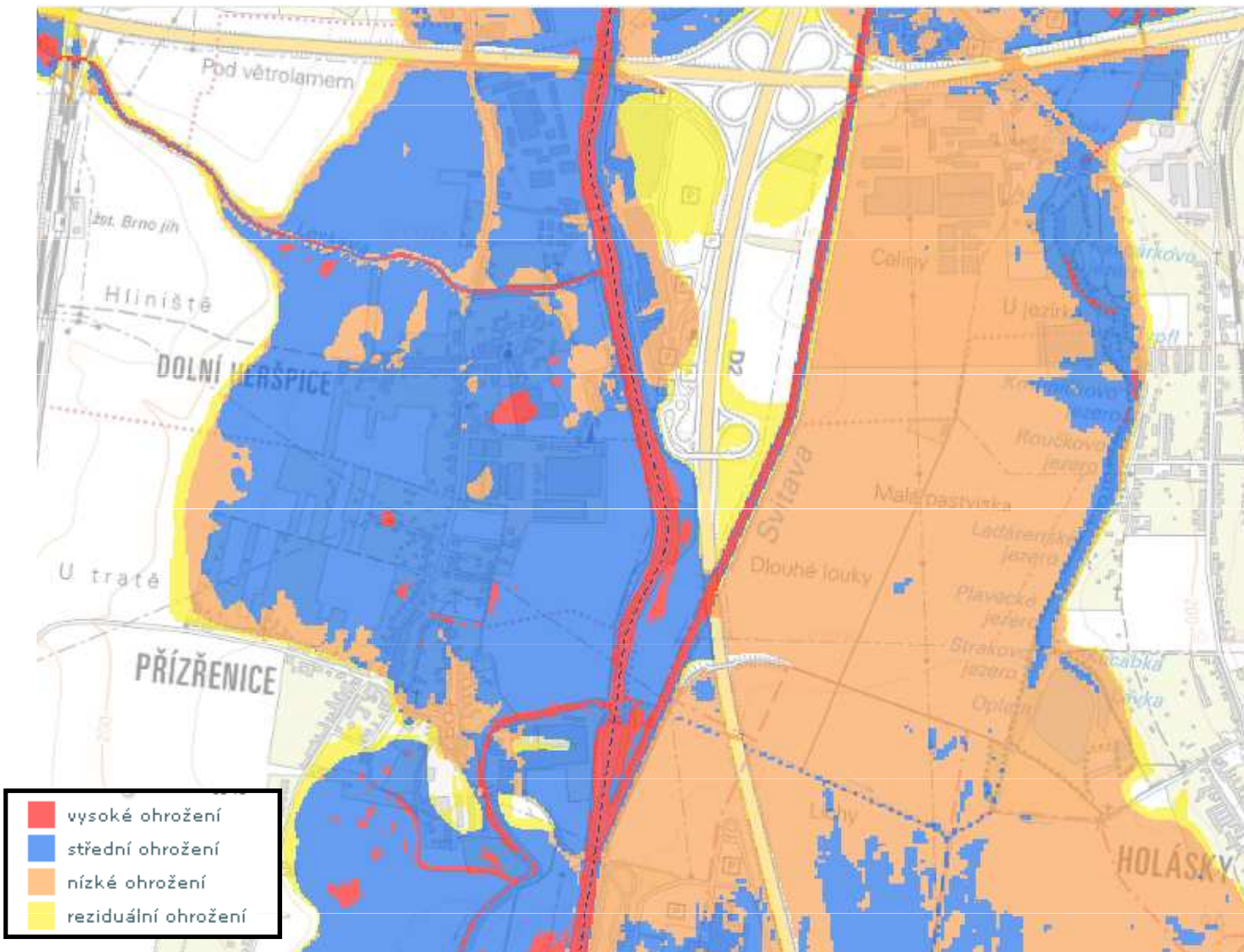
posun mapy:

- myší se stisknutým levým tlačítkem
- šipkami na klávesnici

přiblížení, oddálení:

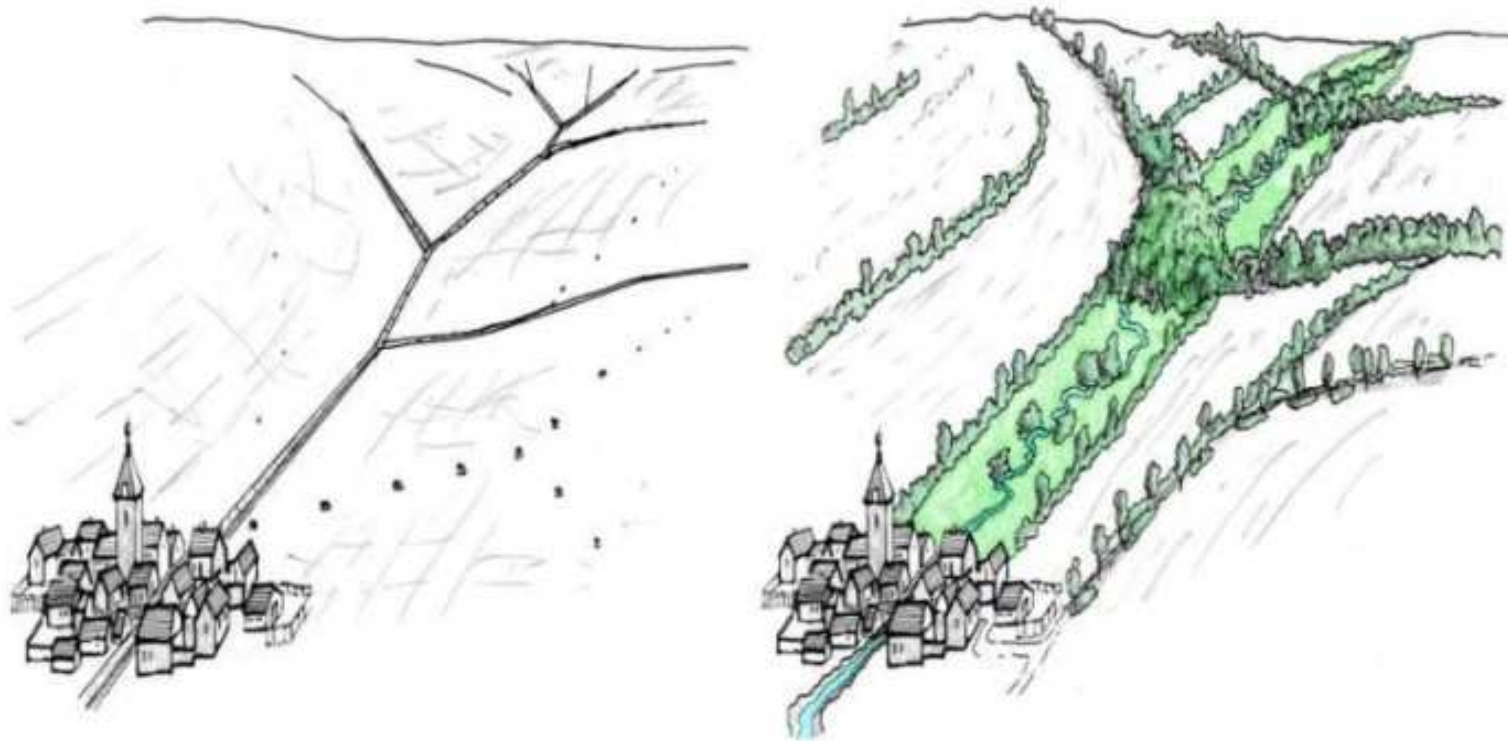
- kolečkem myši
- klávesami + - na klávesnici
- shiftem + tažením myši se stisknutým levým tlačítkem (výběr obdélníkové oblasti pro přiblížení)

Povodňové ohrožení - cds.chmi.cz



Budoucnost protipovodňových opatření

- prodloužit čas, po který voda zůstane v krajině
- vsakování, akumulace, omezení soustředěného odtoku, zpomalení vody v korytě



Sedimenty v tocích



Obr. 18 Stav na jaře 2009

Obr. 19 Nános na podzim 2009

Sedimenty v tocích



Cíle návrhu

- omezit vznik nánosů omezujících kapacitu koryta,
- zvýšit protipovodňovou ochranu města,
- umožnit provádění údržby,
- omezit vznik ledových jevů,
- zajistit stabilitu opěrných zdí,
- zajistit stabilitu dna,
- zajistit co nejnižší finanční náročnost,
- zvýšit estetickou hodnotu lokality.

Možné návrhy

- Návrh č. 1: proplachování jezem při SPA I a více
- Návrh č. 2: vytvoření kynety, sklopení jezu



Obr. 33 Jednostranná kyneta



Obr. 34 Stěhovavá kyneta

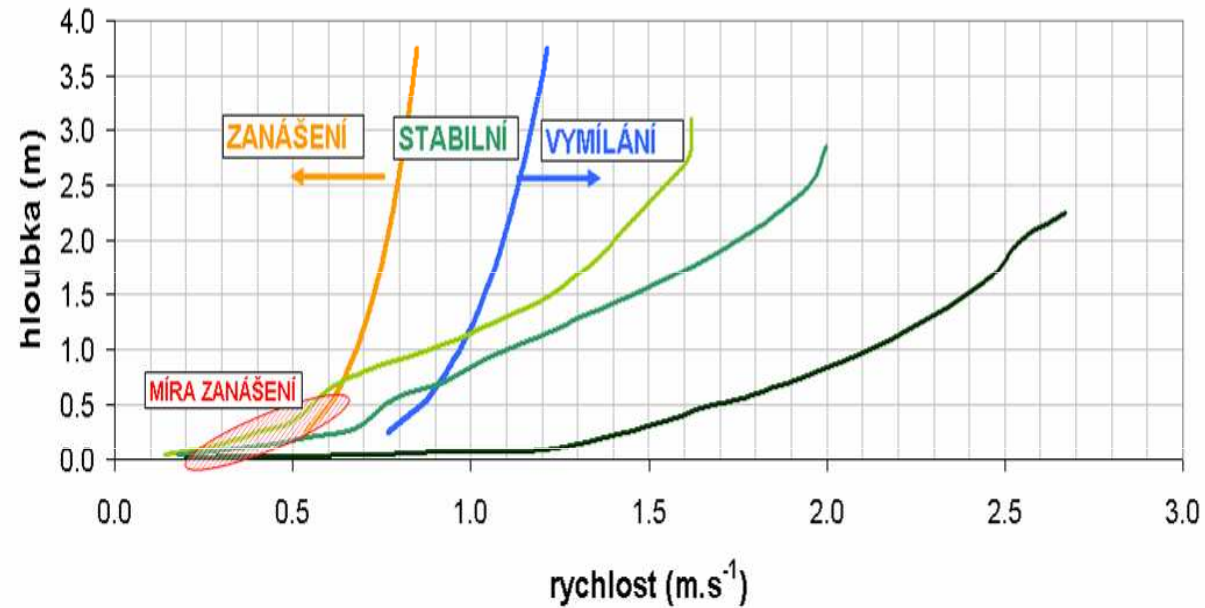


Obr. 35 Kyneta v ose toku

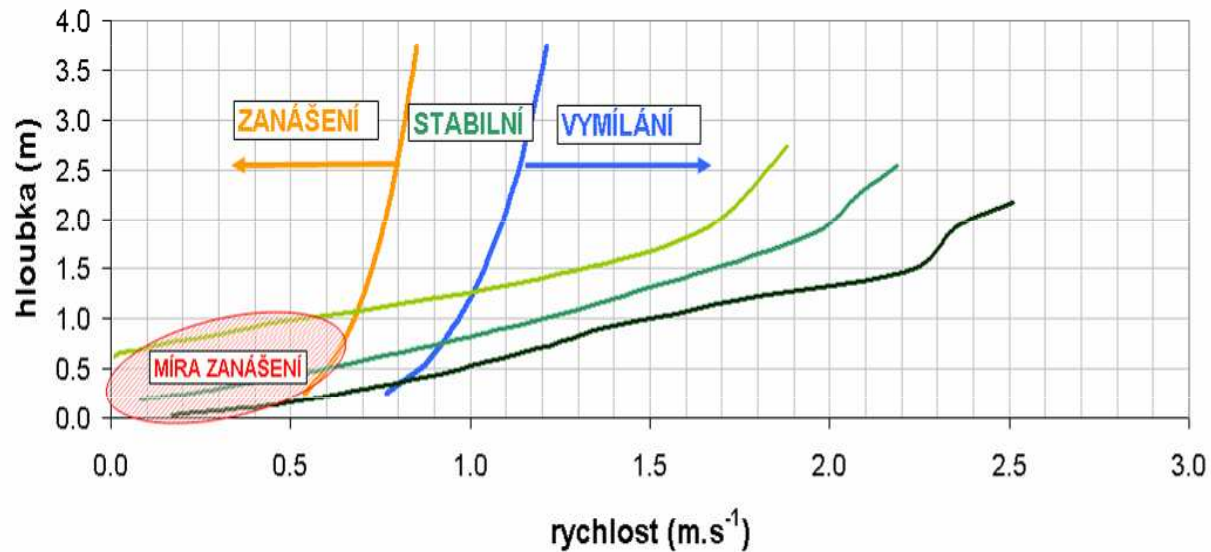
- **Návrh č. 3: odstranění klapky, snížení prahu, zvětšení podélného sklonu, návrh jednostranné kynety**
- Návrh č. 4: odstranění jezu, stavba nových zdí

Míra zanášení před a po návrhu

Současnost



Návrh č. 3



Výpočet zanášení

- velikost efektivního zrna, rychlost proudění

Pro výpočet průměrné vymílací rychlosti byly použity vzorce [33] a tabulky:

Šamov
$$v_v = 3,7 \cdot d_{ef}^{\frac{1}{3}} \cdot h^{\frac{1}{3}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]},$$

Gončarov
$$v_v = \log\left(\frac{8,8 \cdot h}{d_{90}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_{ef}}{1,75 \cdot \gamma}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \text{ pro } 1,5 < d_{ef} < 20 \text{ mm},$$

Mayer-Peter
$$v_v = C \cdot \sqrt{0,047 \cdot \frac{\gamma'_s}{\gamma_s} \cdot d_{ef}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \text{ pro } 4 < d_{ef} < 30 \text{ mm},$$

kde d_{ef} velikost efektivního zrna [m],

d_{90} velikost zrna 90 % propadu na sítěch [m],

h hloubka vody [m],

g gravitační zrychlení, $g = 9,81 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$

γ měrná tíha vody, $\gamma = 10 \text{ [KN.m}^{-3}\text{]},$

γ_s měrná tíha splavenin, $\gamma_s = 26,5 \text{ [KN.m}^{-3}\text{]},$

γ'_s měrná tíha splavenin ve vodě, $\gamma'_s = 16,5 \text{ [KN.m}^{-3}\text{]},$

CChézyho rychlostní součinitel $[\text{m}^{0,5} \cdot \text{s}^{-1}\text{]},$

Výpočet zanášení

Nezanášecí = zanášecí rychlost

$$v_n = 0,7 \cdot v_v$$

Tab. 15 Vymílací rychlosti do hloubky 0,4 m dle Mareše, s odhadem (červeně)

d _{ef} (mm)	0,25	1,0	2,5	7,9	10	15
v _v (m.s ⁻¹)	0,27	0,47	0,53	0,72	0,80	0,95

Tab. 16 Vymílací rychlosti od hloubky 0,4 m, s odhadem (červeně)

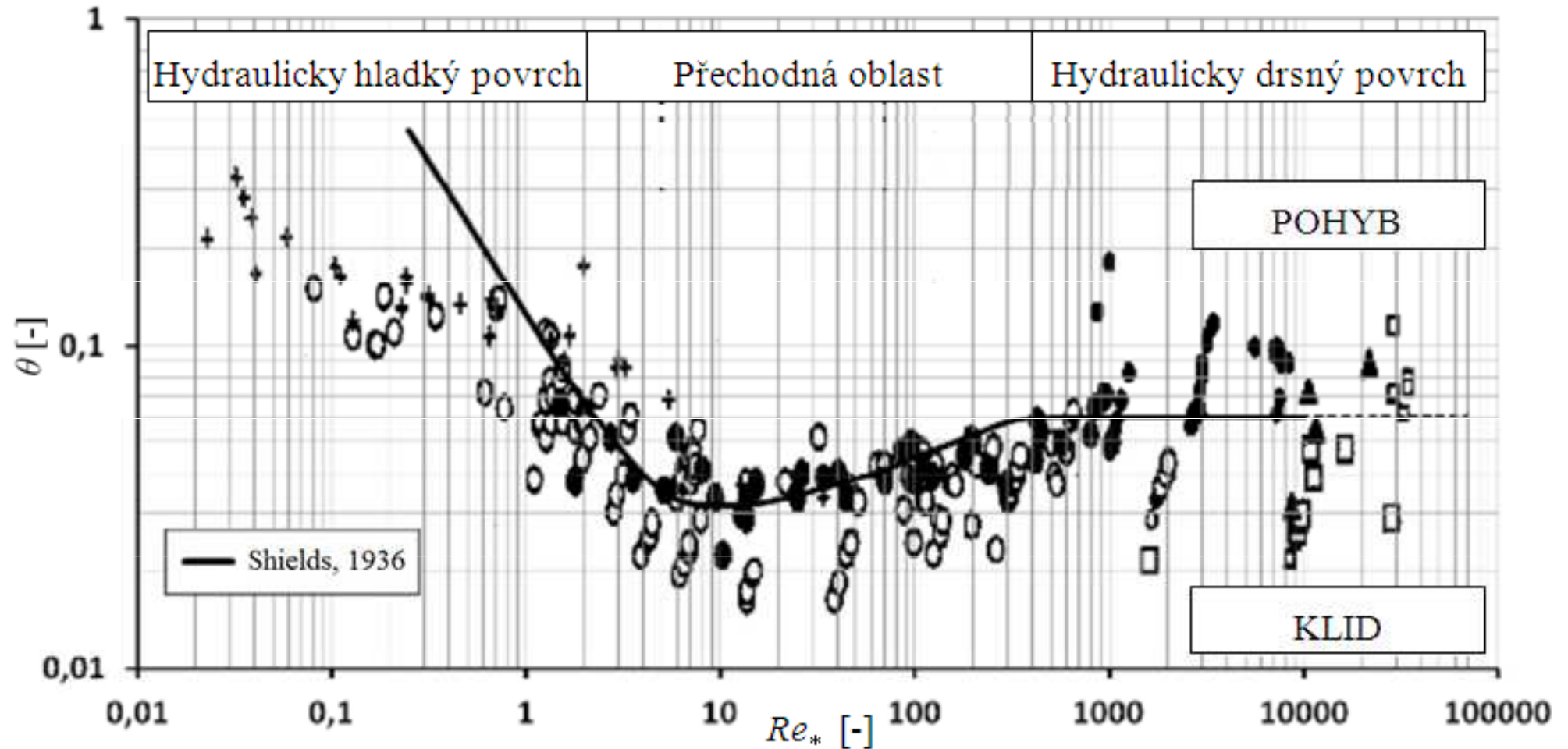
d _{ef} (mm)	průměrná hloubka (m)			
	0,4	1,0	2,0	3,0
5,0	0,65	0,80	0,90	0,95
7,9	0,74	0,92	1,02	1,10
10,0	0,80	1,00	1,10	1,20

Literatura (Mareš, 1997) uvádí pro průměrnou hloubku proudění do 0,4 m tyto vymílací rychlosti

- přirozených materiálů dna a tvárných kamenných opevnění:

střední písek	0,25 - 1 mm	0,27 - 0,47 m.s ⁻¹
hrubozrný písek	1 - 2,5 mm	0,47 - 0,53 m.s ⁻¹
drobný hrubý štěrk	10 - 15 mm	0,8 - 0,95 m.s ⁻¹
střední štěrk	25 - 40 mm	1,2 - 1,5 m.s ⁻¹
hrubý štěrk	40 - 75 mm	1,5 - 2,0 m.s ⁻¹
malé kameny	75 - 100 mm	2,0 - 2,3 m.s ⁻¹
střední kameny	100 - 150 mm	2,3 - 2,8 m.s ⁻¹
velké kameny	150 - 200 mm	2,8 - 3,2 m.s ⁻¹

Výpočet zanášení



Obr. 7 Shieldsův diagram

Výpočet zanášení

Shieldsovo kritérium se počítá dle rovnice

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}}, \quad (19)$$

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot i_H, \quad (20)$$

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d_{50}}{\nu}, \quad (21)$$

$$v_* = \sqrt{g \cdot R \cdot i_H}, \quad (22)$$

kde τ [Pa] je smykové napětí, ρ_s [kg·m⁻³] hustota zrn (obvykle 2 650 kg·m⁻³), ρ [kg·m⁻³] hustota vody, R [m] hydraulický poloměr, Re_* [-] třecí Reynoldsovo číslo, v_* [m·s⁻¹] třecí rychlost a ν [m²·s⁻¹] kinematická viskozita vody [9].

Děkuji, že jste mi věnovali Vaši pozornost.

