



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Vliv hladinové regulace na průtoky v korytech řek

Katedra hydrotechniky

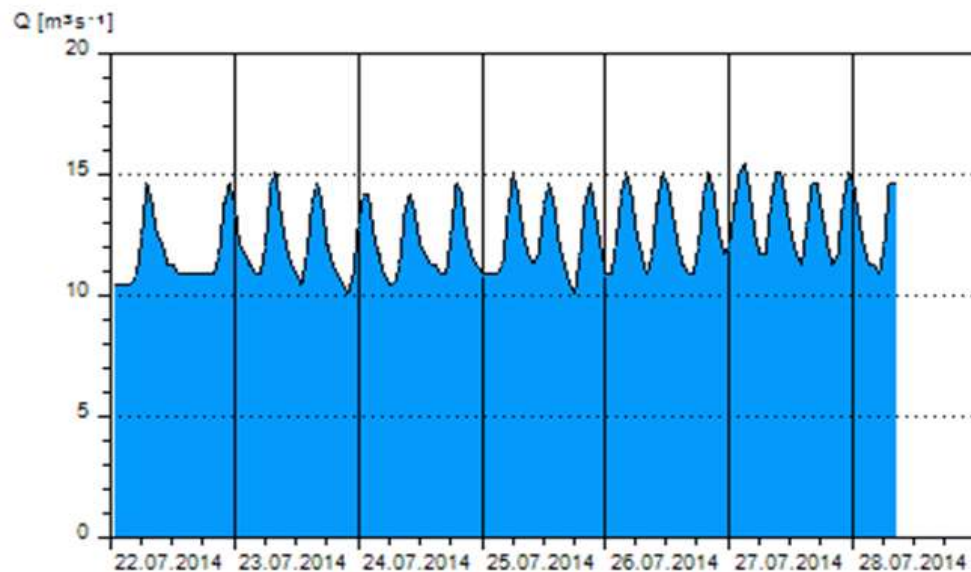
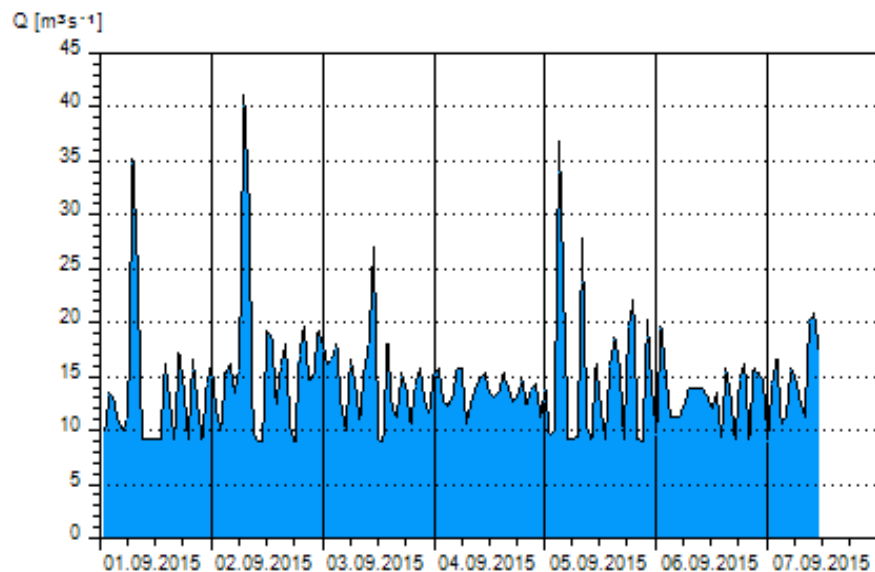
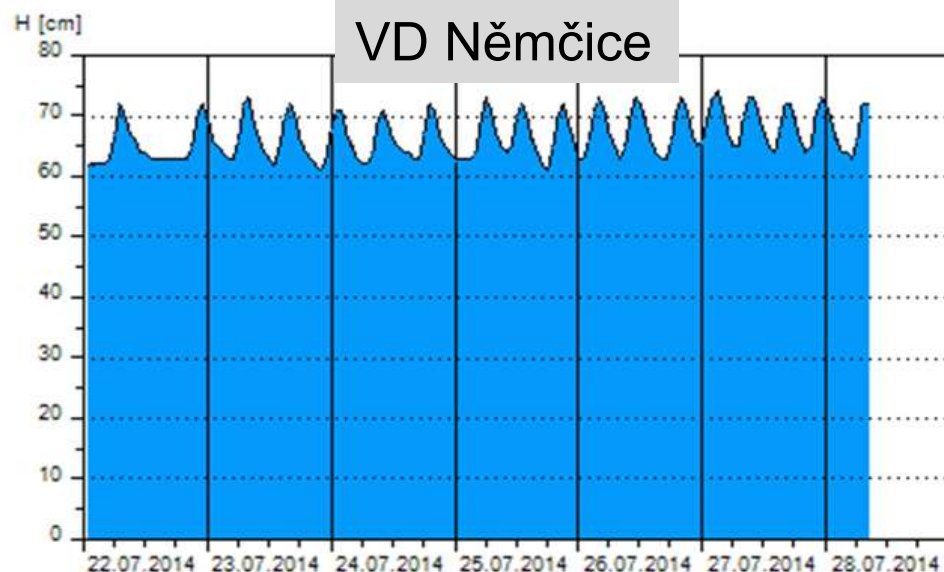
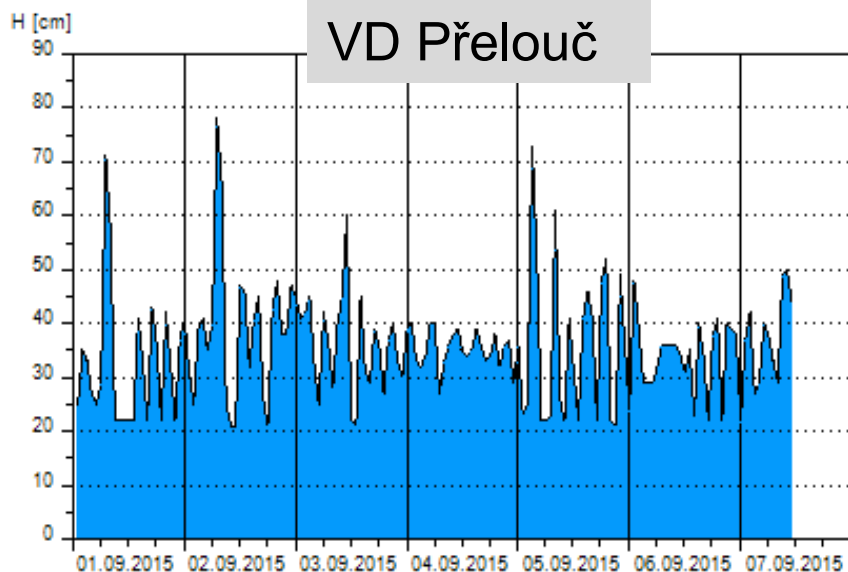
Petr Nowak

Eva Škařupová

nowak@fsv.cvut.cz

eva.skarupova@fsv.cvut.cz

Kmitání průtoků na kaskádě jezů - příklad



Stávající stav

■ Výrazné kmitání průtoků a hladin

- Střední Labe – pozorované extrémní rozkmity v obdobích sucha
- Zahraničí – Německo, Rakousko – zákmity průtoků zcela výjimečně
- Závěr - Ustálení průtoků je řešitelné

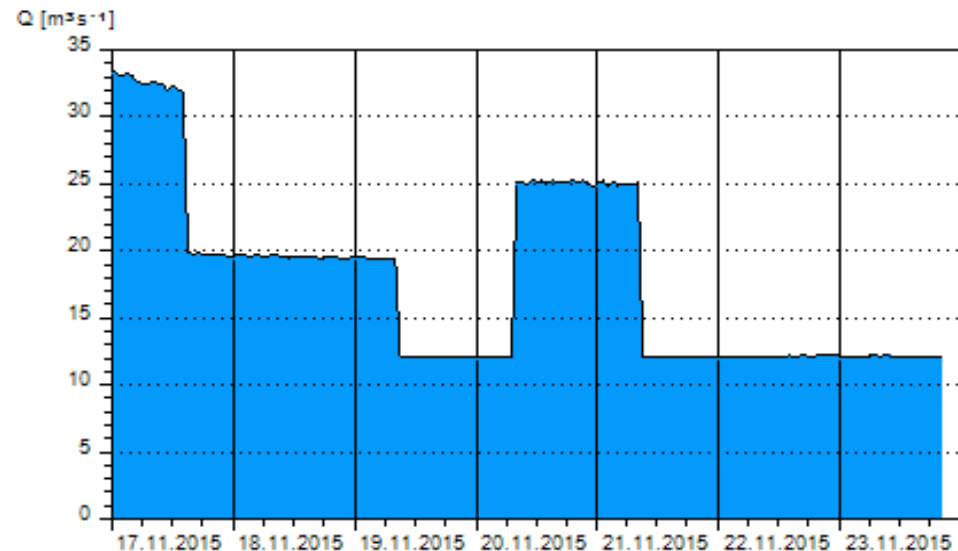
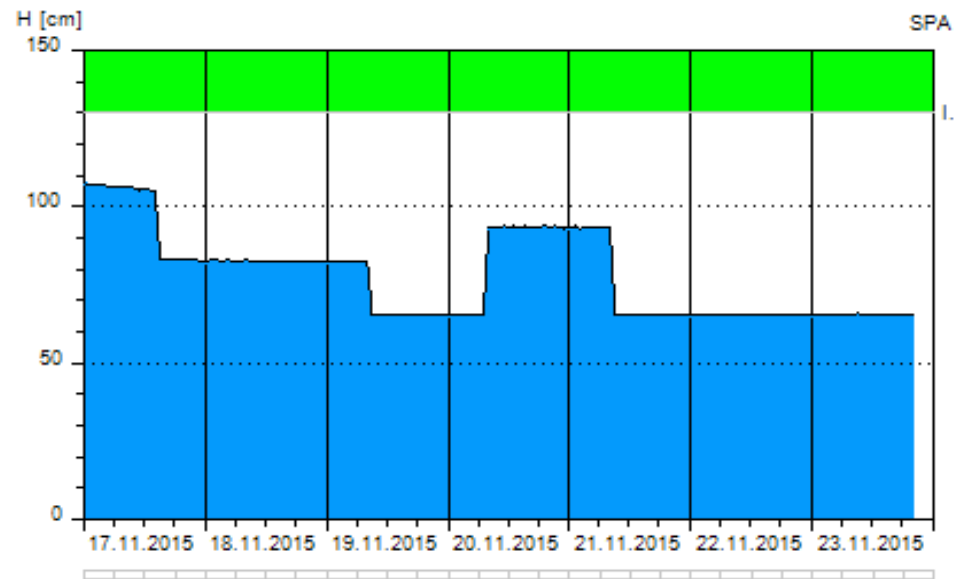
■ Charakteristika - Střední Labe

- Úsek s úplnou kaskádou jezů
- Jezy – většinou s pohyblivými uzávěry
- Splavný úsek – plavební komory
- Vodní elektrárny - typicky
 - Příjezové v průběžném provozu
 - automatický, bezobslužný režim
 - **Hladinová regulace**



Změny průtoků

- Změna odtoku srážkami – zpravidla strmé čelo, povlovný týl
- Změny v odběrech vody ze zdrže
- Změna odtoků z přehrad – zpravidla skoková – např. Les Království
- Proplavovací cyklus plavební komory - plnění, prázdnění komory
- Poruchové stavy a nestandardní manipulace na VD – např. manipulace s jezovými uzávěry
- Provoz MVE
 - Proplach turbíny
 - Výpadek elektrárny – havarijní odstavení
 - Čištění česlí
 - Přepínání soustrojí – skupinový regulátor
 - **Nestabilní hladinová regulace**



Negativní dopady kmitání průtoků

■ NEGATIVA

■ Plavba

- Snížení bezpečnosti – hladiny, rychlosti vody

■ Jezové uzávěry

- Vyšší počet manipulací – snížení životnosti, zvýšené nároky na obsluhu

■ Odběry vody

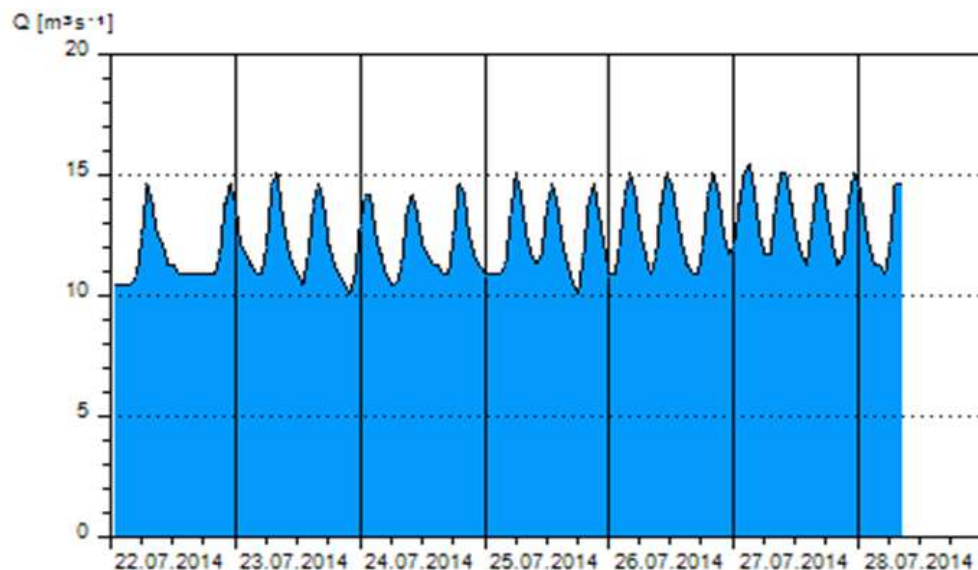
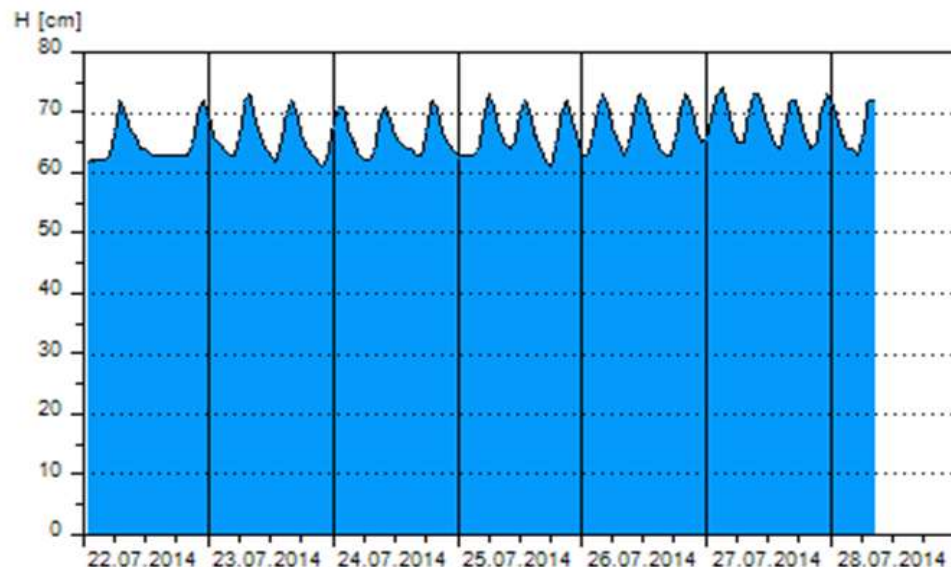
- Zvýšení rozkvyu hladin

■ Vodní elektrárny

- Zvýšení počtu regulačních zásahů – snížení životnosti
- Provoz mimo optimální pracovní bod – nižší výroba
- Zvýšený počet najíždění a odstavení soustrojí
- Zvýšení přepadů přes jeze – ztráta výroby

■ POZITIVA

- ???? - žádná



Specifika MVE

▪ Majetkoprávní vztahy

- **Kaskády elektráren – různí majitelé a provozovatelé**
- **V rámci jednoho stupně různí vlastníci a provozovatelé dílčích objektů (jez, komora, MVE) – víceúčelovost VD**

▪ Omezení legislativou

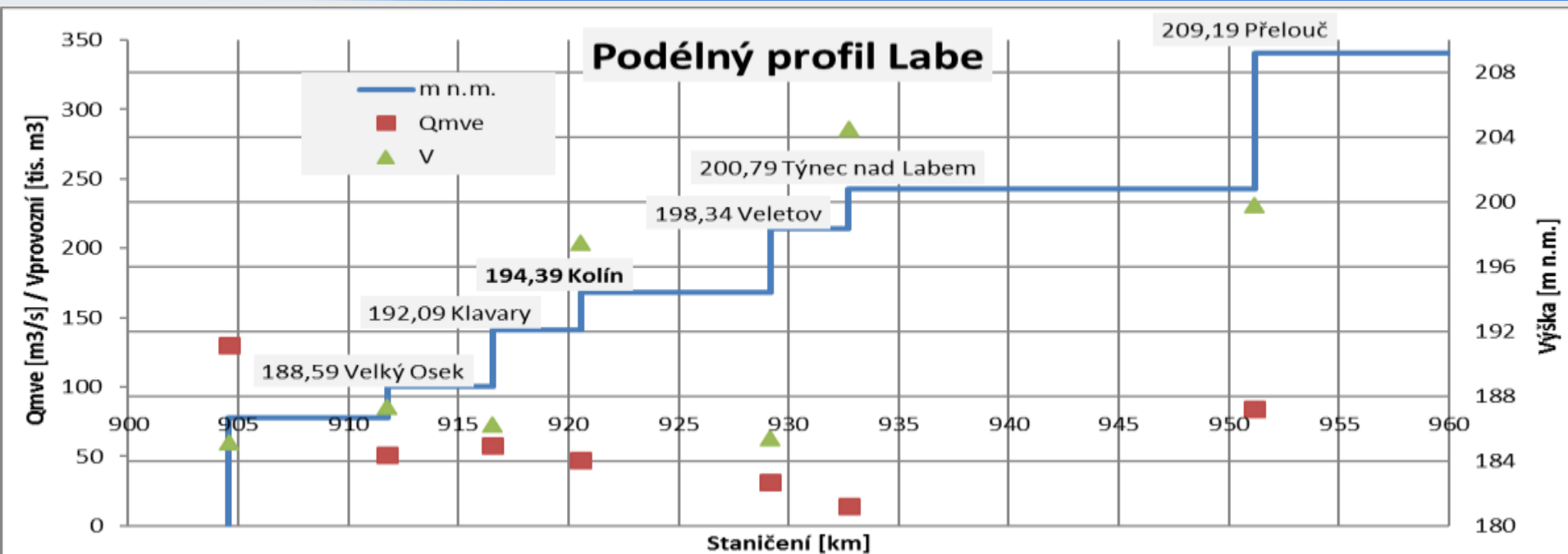
- **Povolení k nakládání s povrchovými vodami**
 - definice rozsahu hladin
 - Zpravidla nedefinovaný vztah k průtokům

▪ Slabá motivace

- **Nutnost komunikovat s ostatními partnery**
- **Nutné hlubší znalosti pro pochopení hladinové regulace**

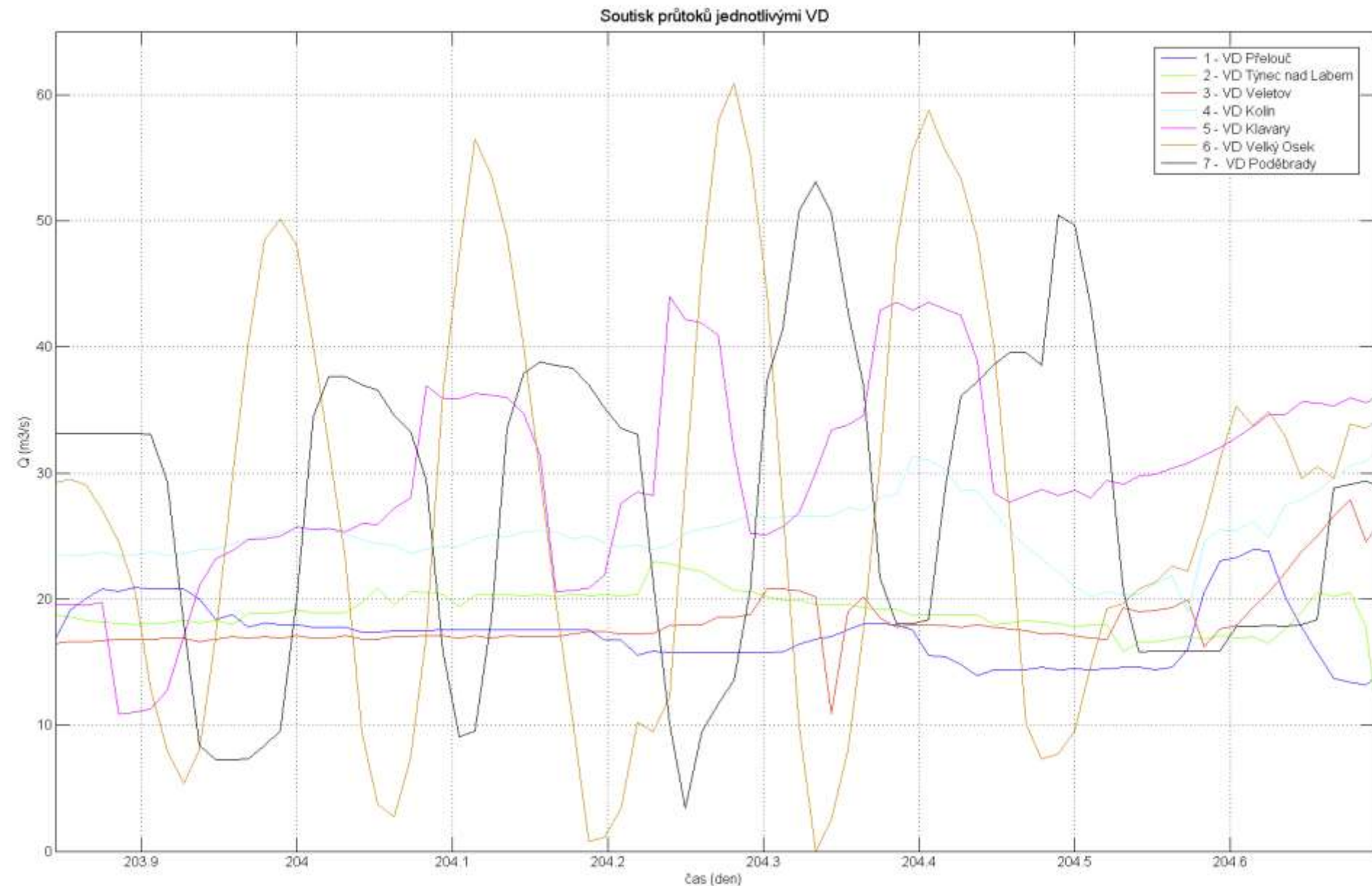


Charakteristika úseku

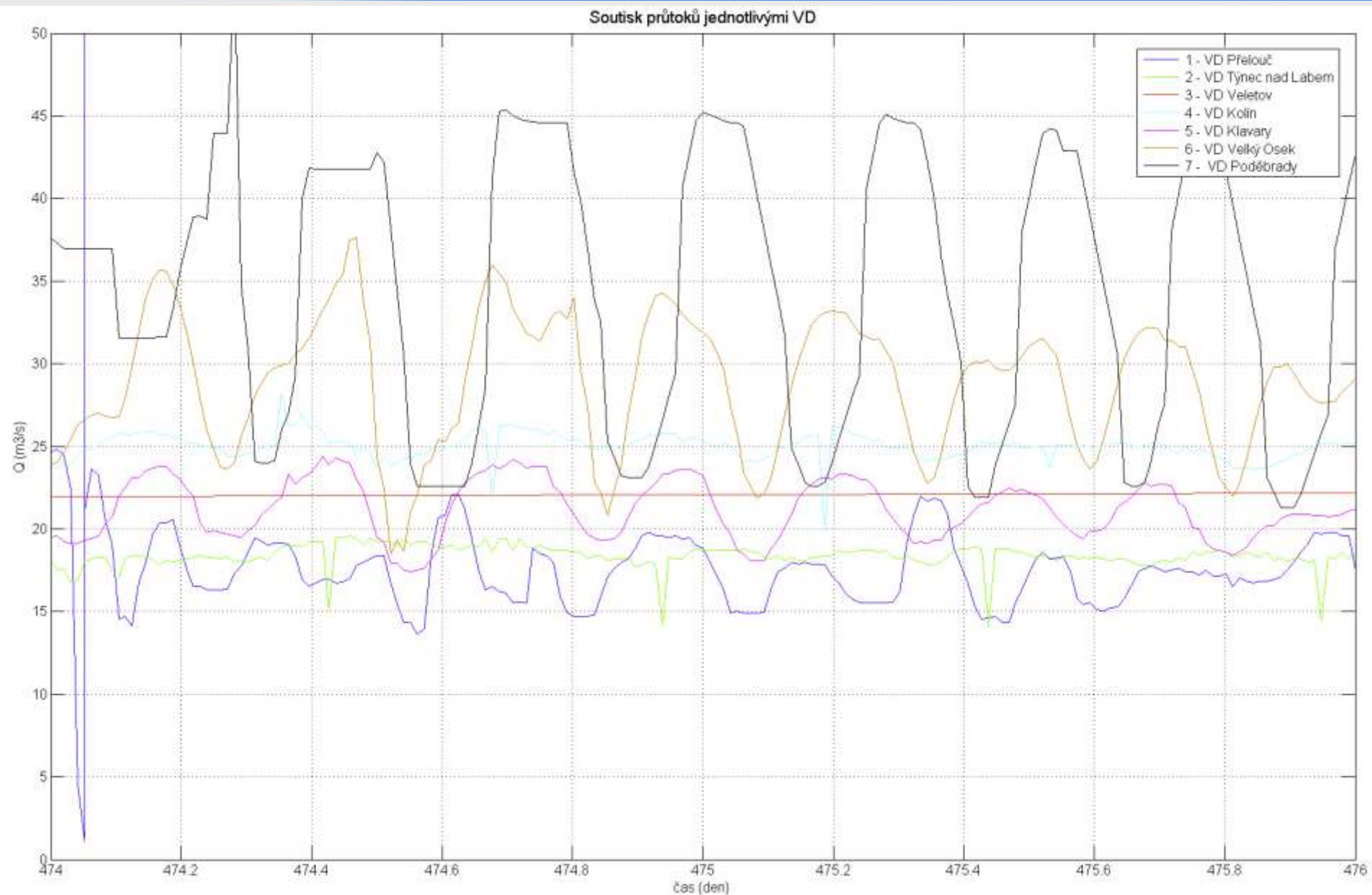


Stupeň	Přelouč	Týnec nad Labem	Veletov	Kolín	Klavary	Velký Osek	Poděbrady
Qmve [m³/s]	84	14,00	31,63	47,50	58,10	51	60
deltaH [m]	0,40	0,30	0,30	0,40	0,30	0,30	0,30
délka zdrže [km]	9,62	15,89	3,50	8,51	4,04	4,77	7,21
šířka koryta [m]	60	60	60	60	60	60	60
plocha [m²]	577 140	953 400	210 000	510 600	242 400	286 200	432 600
objem [m³]	230 856	286 020	63 000	204 240	72 720	85 860	129 780
doba plnění [hod]	0,76	5,68	0,55	1,19	0,35	0,47	0,60

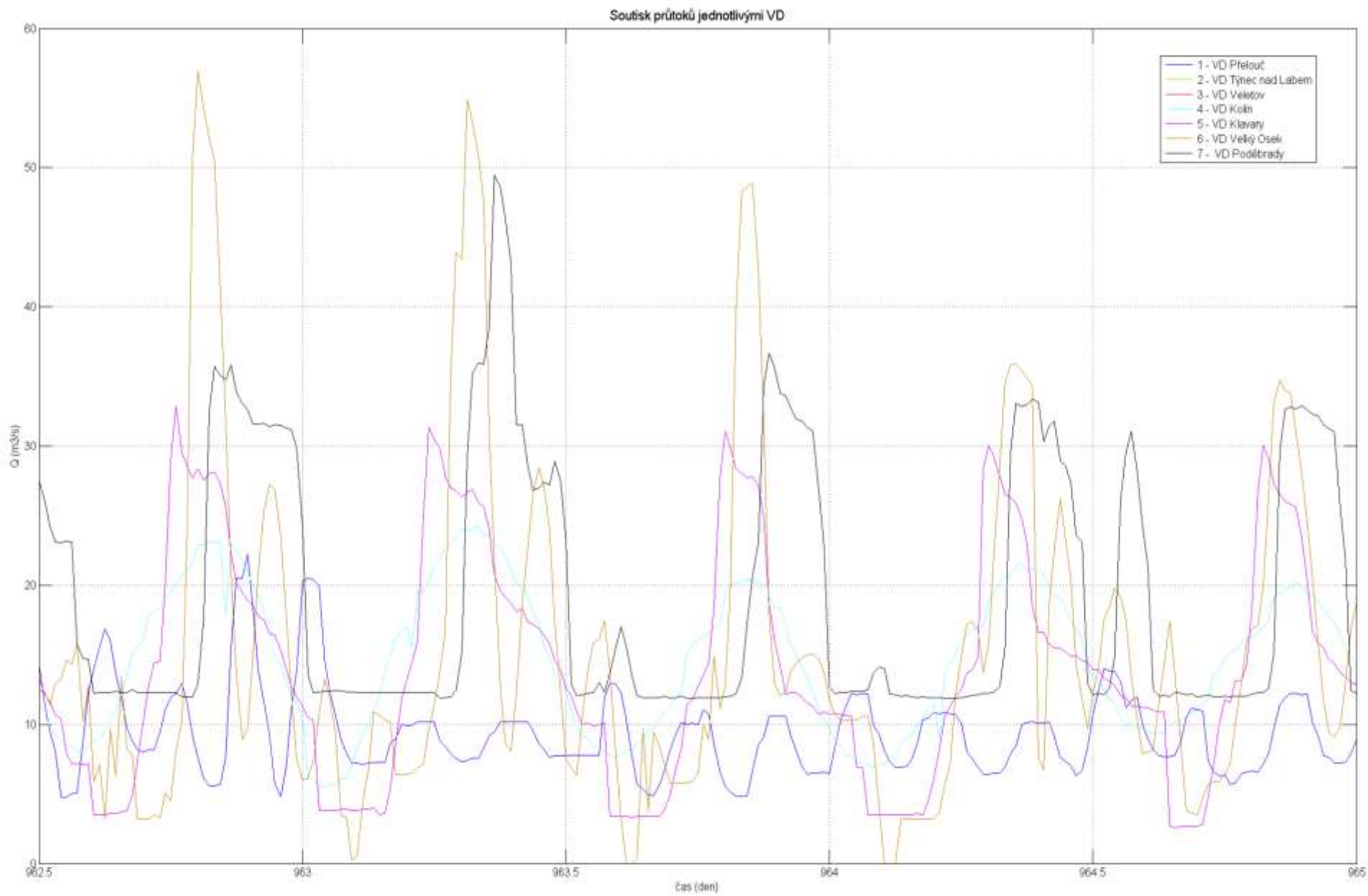
Odtoky z jednotlivých stupňů - příklad



Odtoky z jednotlivých stupňů - příklad

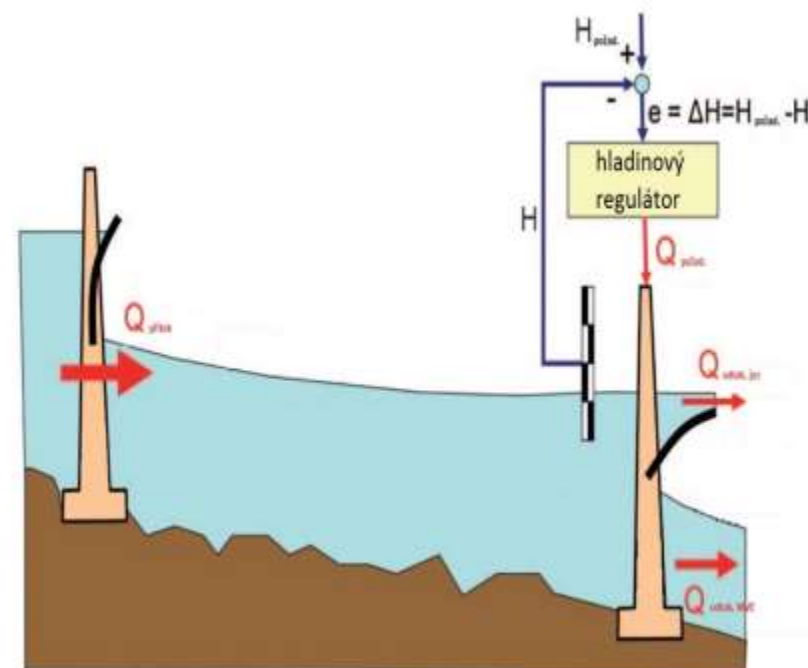


Odtoky z jednotlivých stupňů - příklad



Autonomní hladinová regulace

- Regulátor nekomunikuje mimo MVE
- Měřená veličina – skutečná hladina
- Požadovaná veličina – požadovaná hladina
- Poruchová veličina, např.:
 - Změna přítoku
 - Změna odběru
 - Manipulace s jezovým uzávěrem, plavební komorou, manuální zásah do soustrojí
 - Vlnění hladiny – větrové vlny, vlny od plavidel



- Velmi pomalé děje – perioda 8-14 hodin
 - Průkaznost stability časově velmi náročná – logování dat
- Dynamická odezva regulované soustavy silně závislá na průtoku – tj. regulátor nelze odladit a vyzkoušet při uvedení do provozu

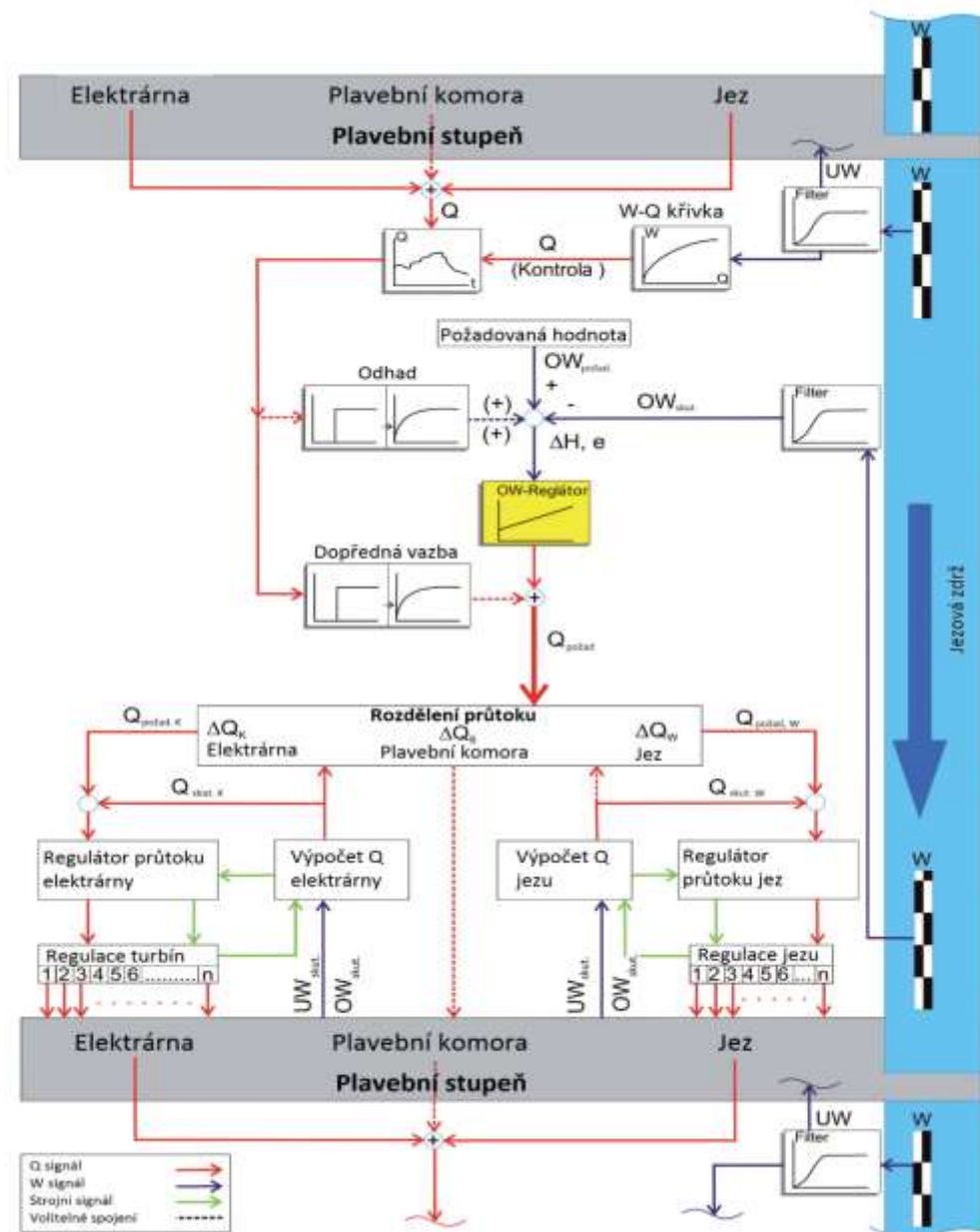
Pokročilá regulace kaskády

▪ Q-H regulace

- Nutnost znát odtok z výše ležícího stupně
- Přerozdělení průtoku na jednotlivé objekty daného profilu
 - Elektrárna – velmi rychlé reakce
 - Jez – pomalé reakce
 - Plavební komora

▪ vyšší nároky na řízení a přenos dat

- Přesnost dat
- Spolehlivost komunikace
- Doporučovaná – např. „Bundesanstalt für Wasserbau“

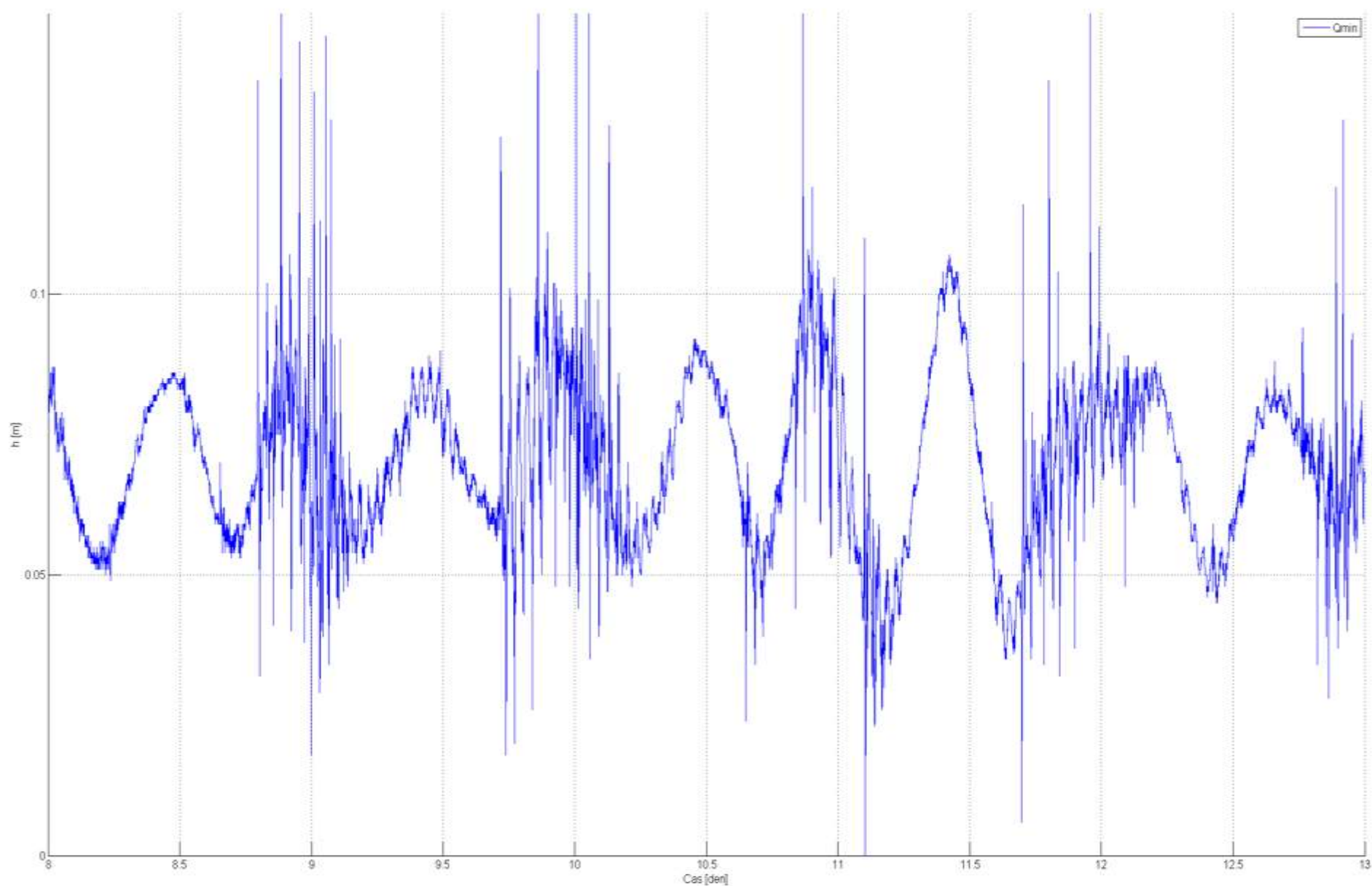


Analýza provozních dat – MVE Kolín

- Existence dlouhodobých logovaných provozních údajů
 - vzorkovací perioda 1 minuta
 - *Pozn.: data z ostatních zdrojů zpravidla 15 minut*
- Znalost regulačního algoritmu
- Možnost provést doplňková měření
- Dostupnost

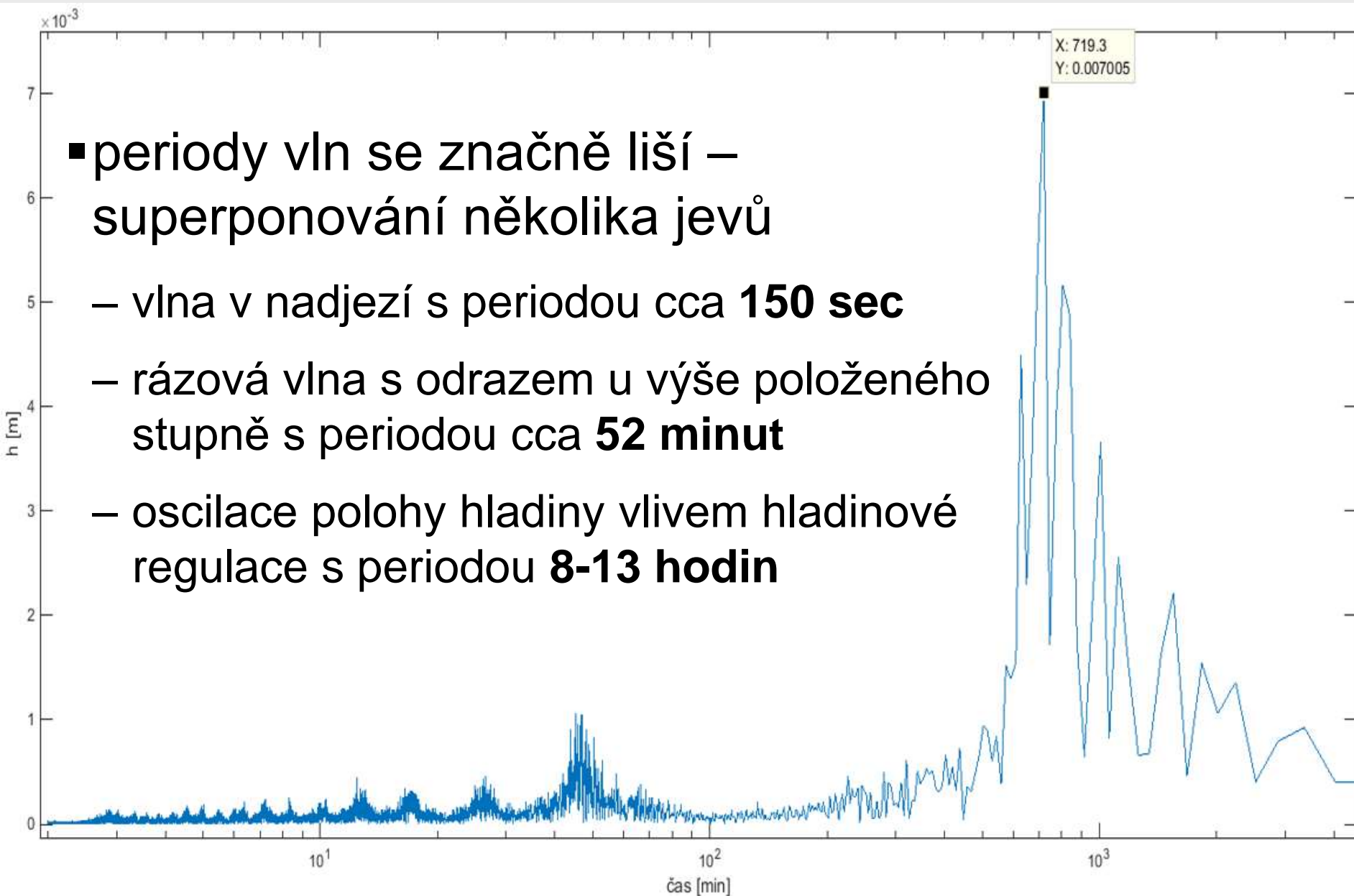


Záznam průběhu hladiny – 5 dní



Frekvenční analýza kmitání hladiny

- periody vln se značně liší –
superponování několika jevů
 - vlna v nadjezí s periodou cca **150 sec**
 - rázová vlna s odrazem u výše položeného stupně s periodou cca **52 minut**
 - oscilace polohy hladiny vlivem hladinové regulace s periodou **8-13 hodin**



Kmitání s periodou cca 3 minuty

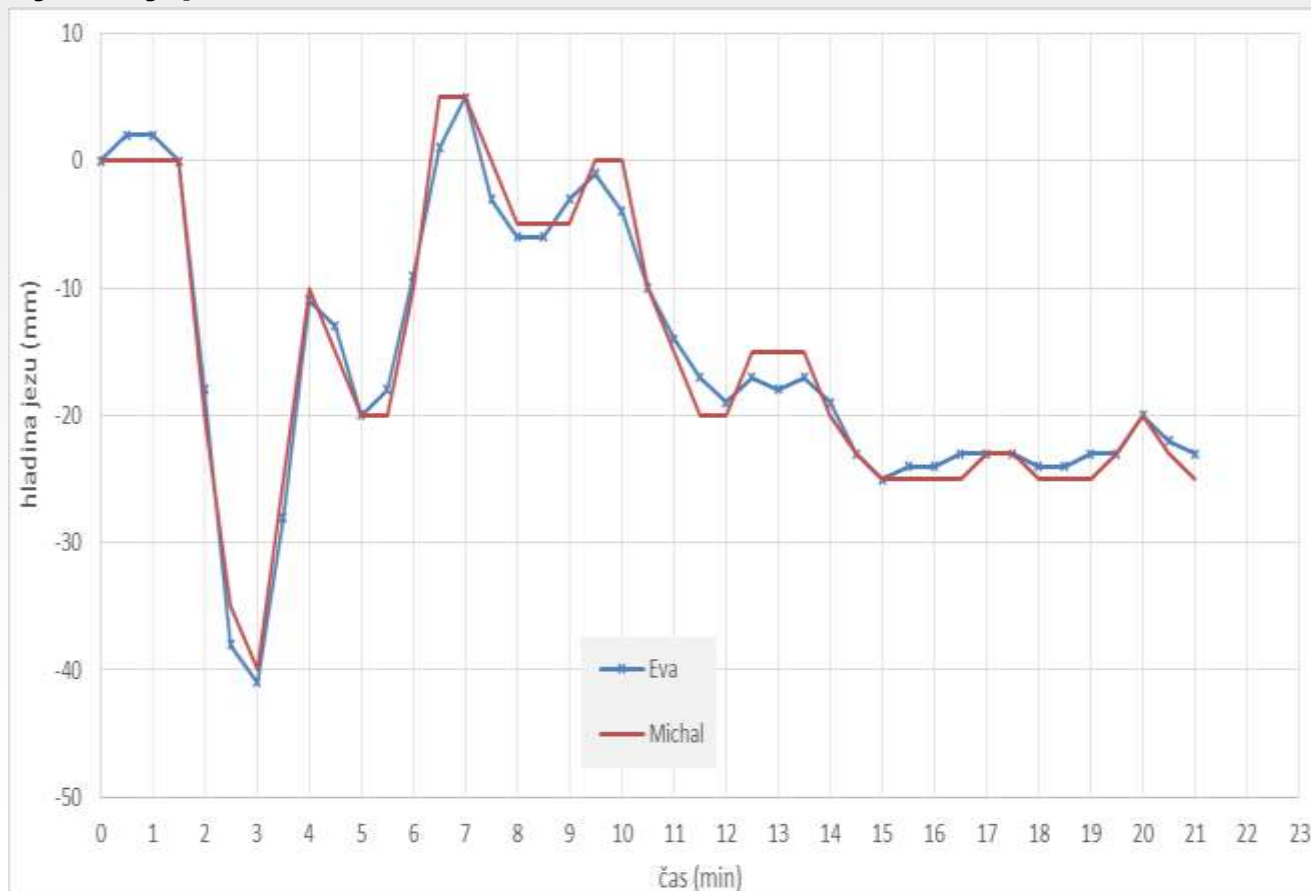
▪ Zdroj kmitů hladiny

▪ Plnění plavební komory

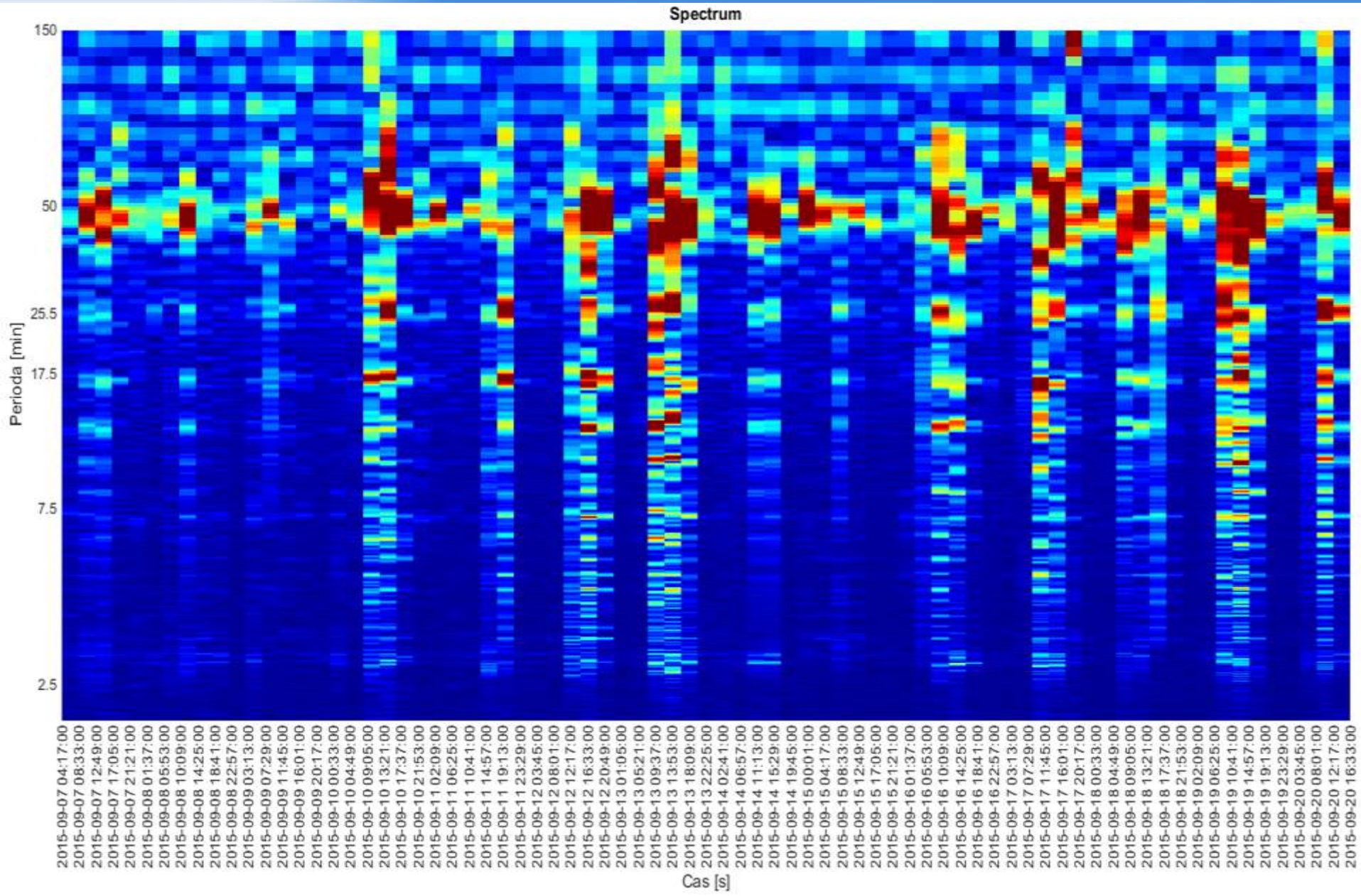
- Maximální průtok cca 5 m³/s
- V suchých obdobích výrazný podíl

▪ Ověřeno

- dobou doběhu při známém počátku manipulace
- Provozními zápisy
- Spektrogramem



Spektrogram časového průběhu hladiny



Kmitání s periodou 150 sec

▪ Vlna mezi MVE a PK

▪ Rychlost šíření rázové vlny

- $Fr = 1$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}}$$

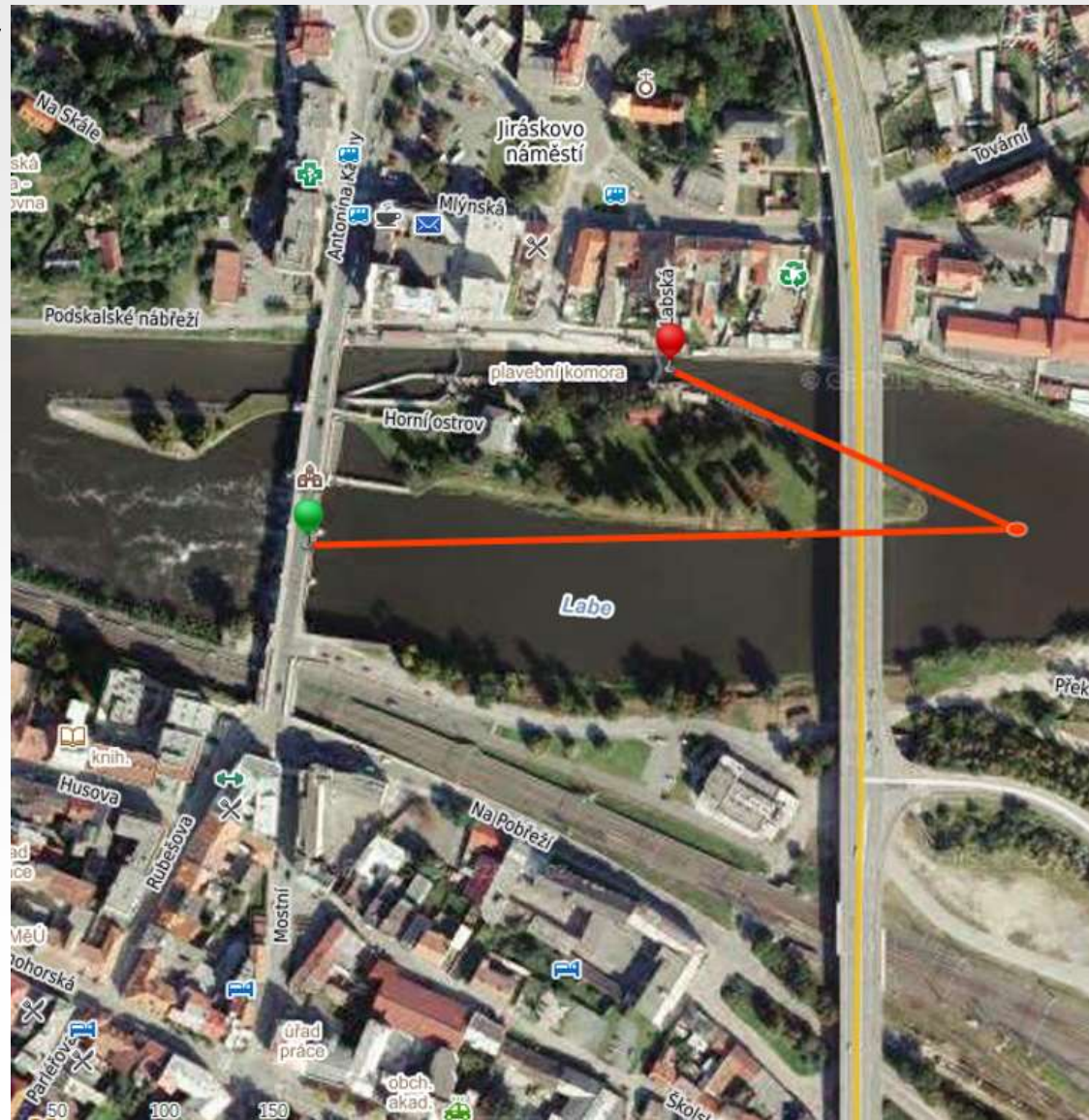
- Hloubka cca 3 m

- rychlost cca 5,4 m/s

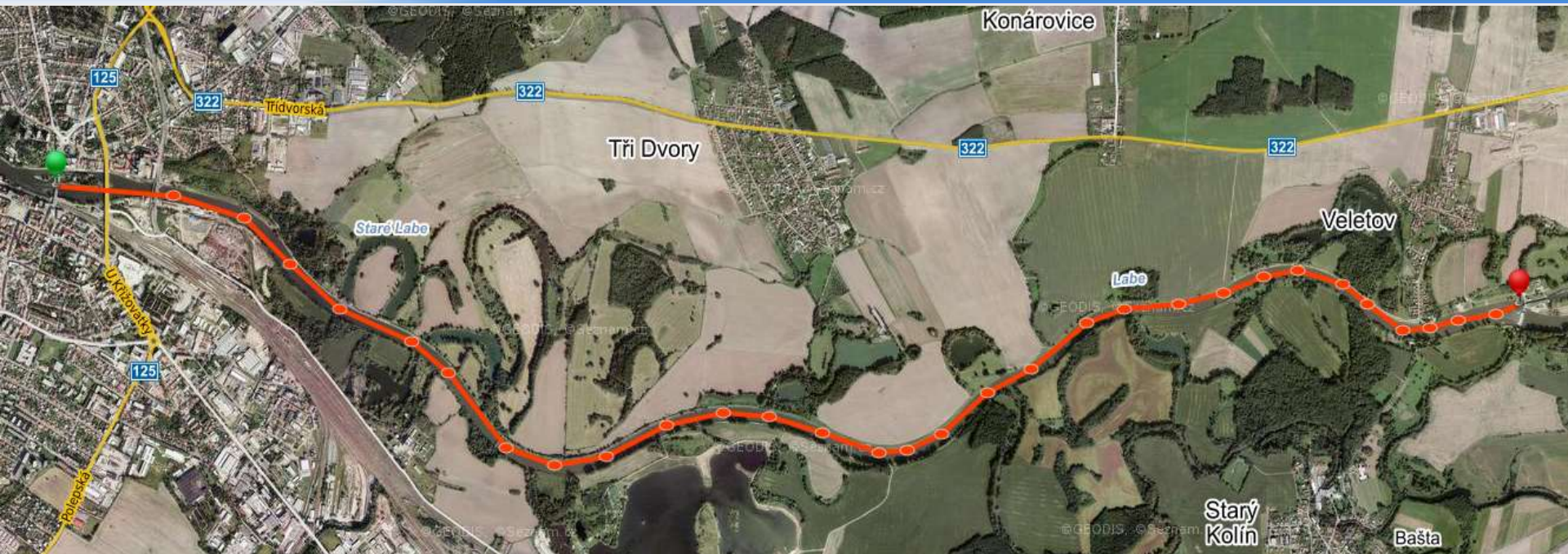
- Délka cca 500 m

- Perioda kmitu cca 150 s

$$T = \frac{2 \cdot L}{v}$$



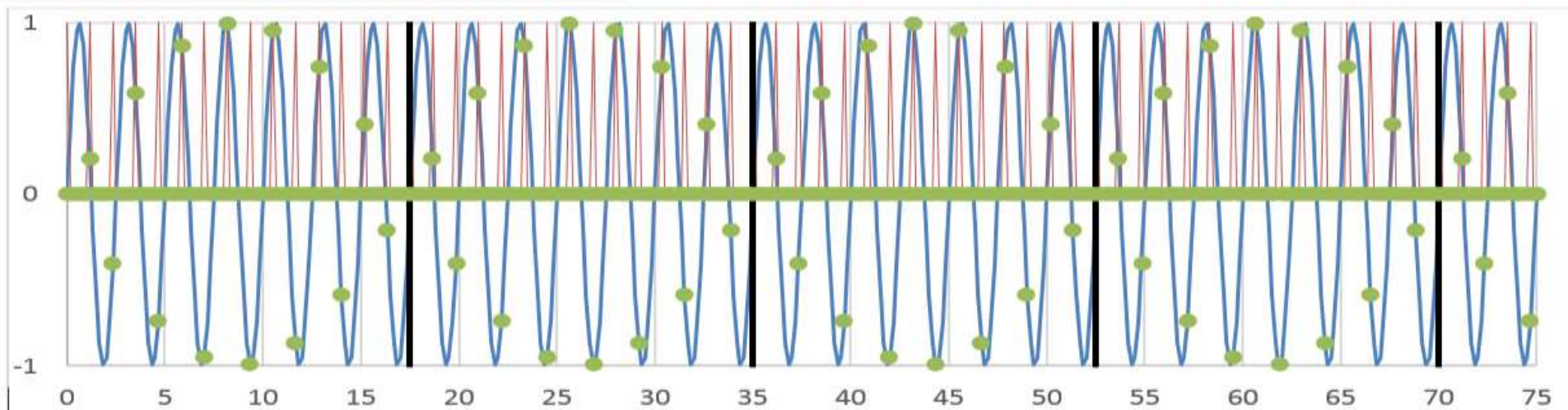
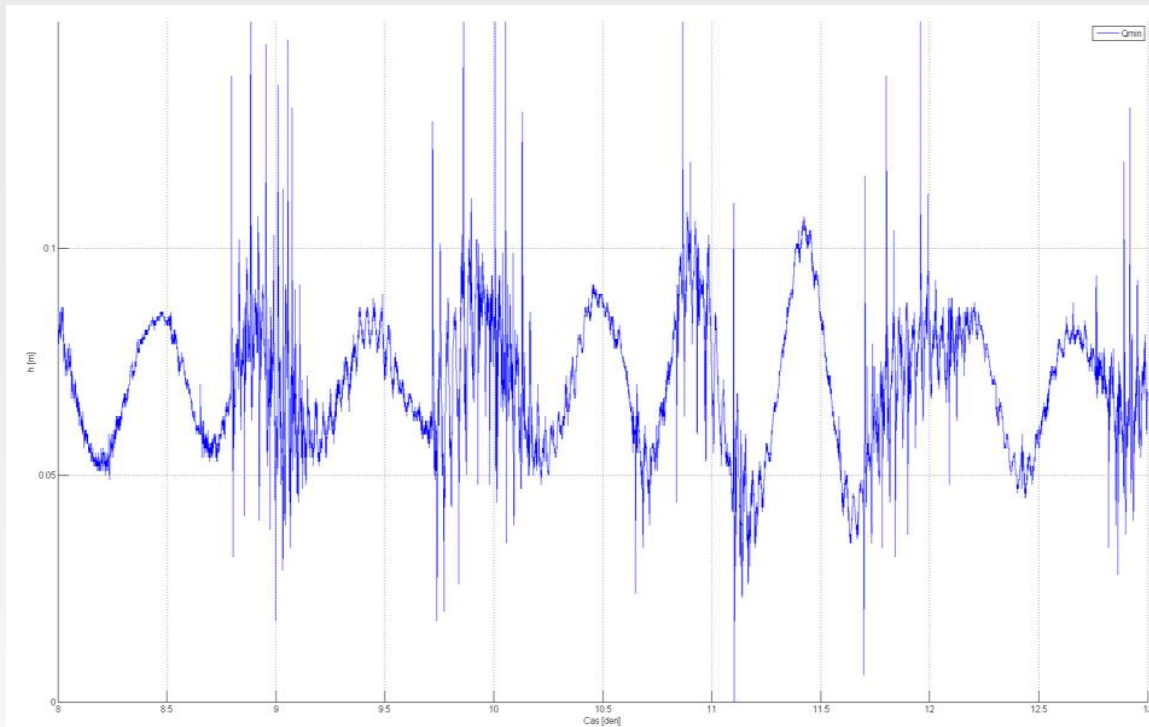
Kmitání s periodou 52 minut



- **Kmitání vlny mezi Kolínem a Veletovem**
 - Hloubka cca 3 m
 - rychlost cca 5,4 m/s
 - Délka cca 8,5 km
 - Perioda kmitu cca 52 minut

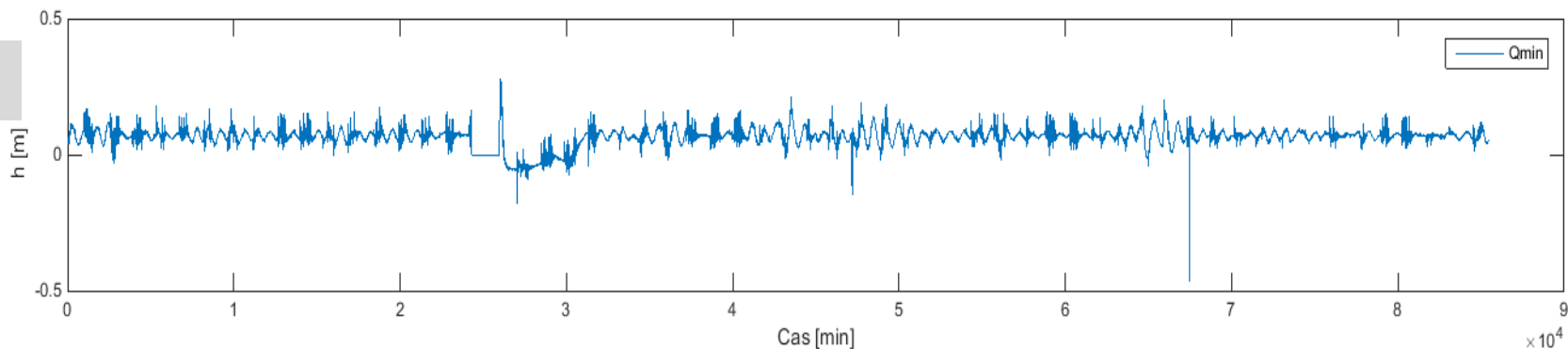
Interference regulátoru a kmitání hladiny

- Vzorkovací frekvence 60 sec
- Perioda hladinového regulátoru 70 sec
- Kmitání hladiny PK-MVE cca 150 sec
- Kmitání hladiny v délce zdrže cca 52 minut
- Kmitání s periodou 17,5 minuty
 - Společný násobek PK-MVE a regulátoru
 - 3 periody odpovídají 52,5 minutám

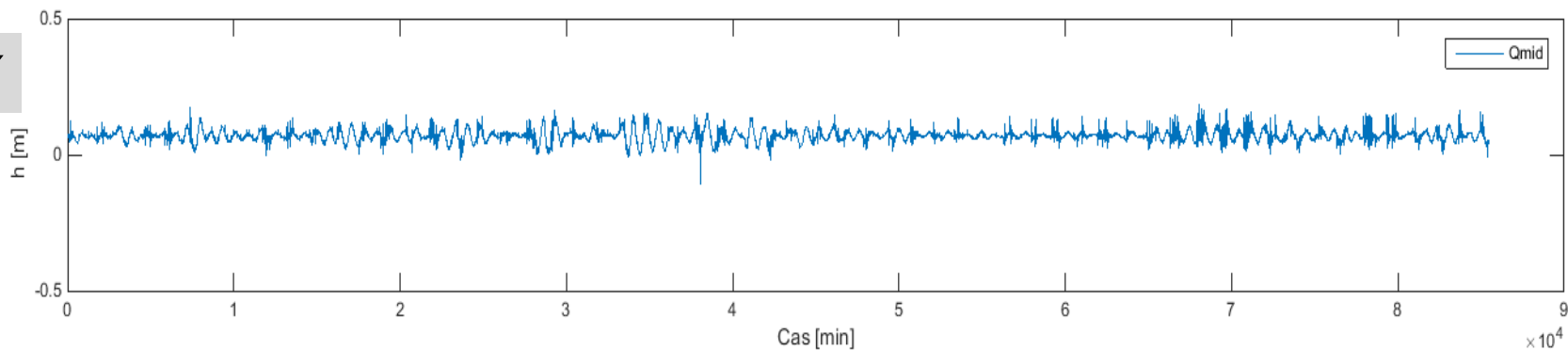


Časové průběhy hladin

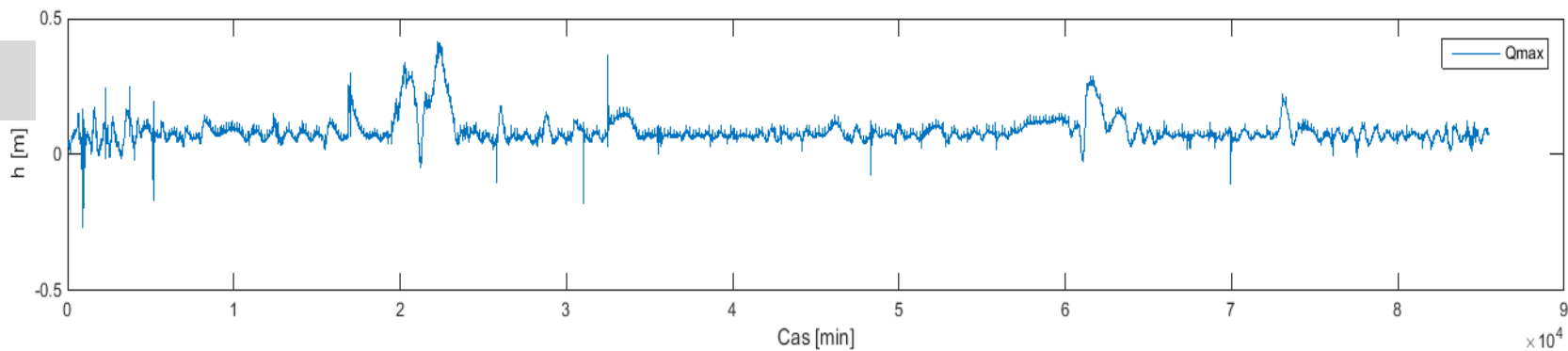
suché



střední

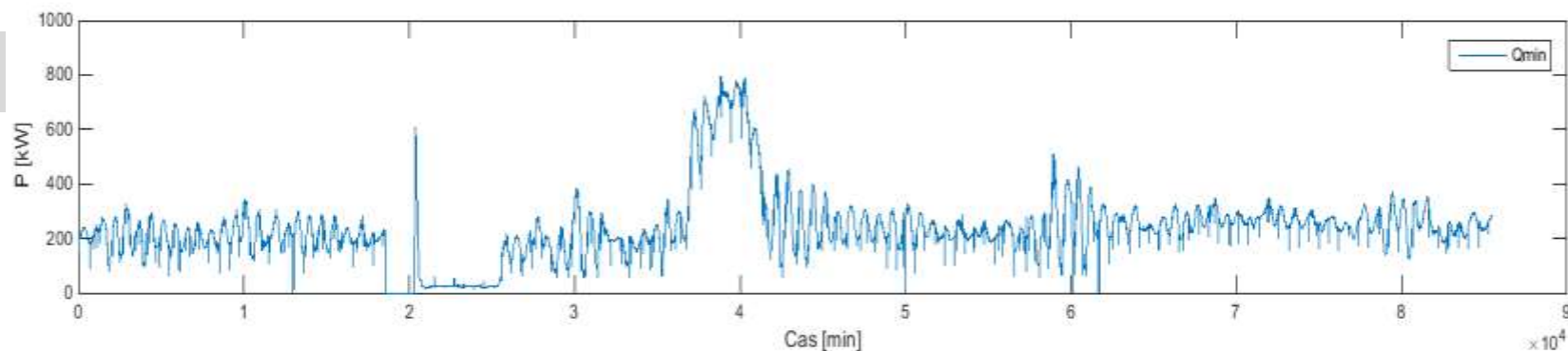


vodné

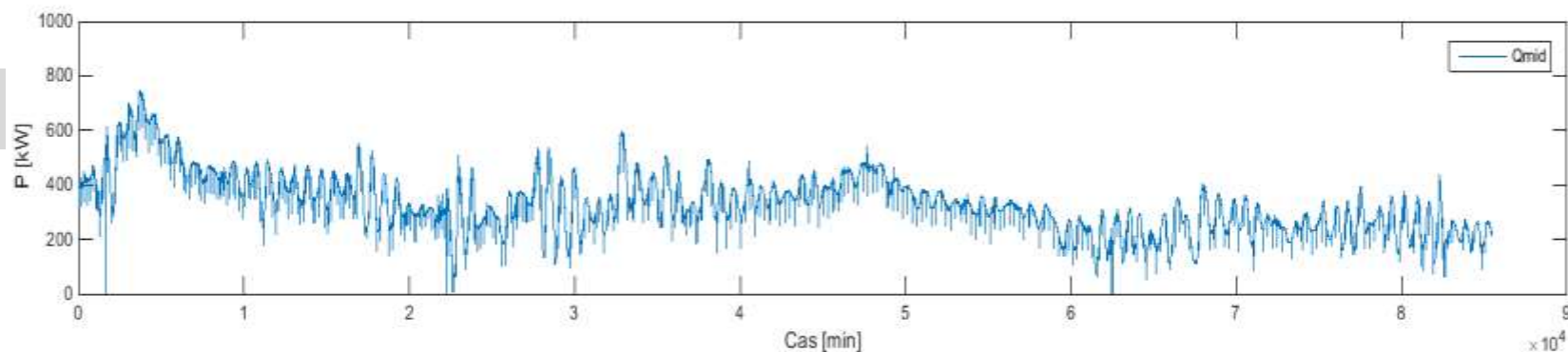


Časové průběhy výkonů

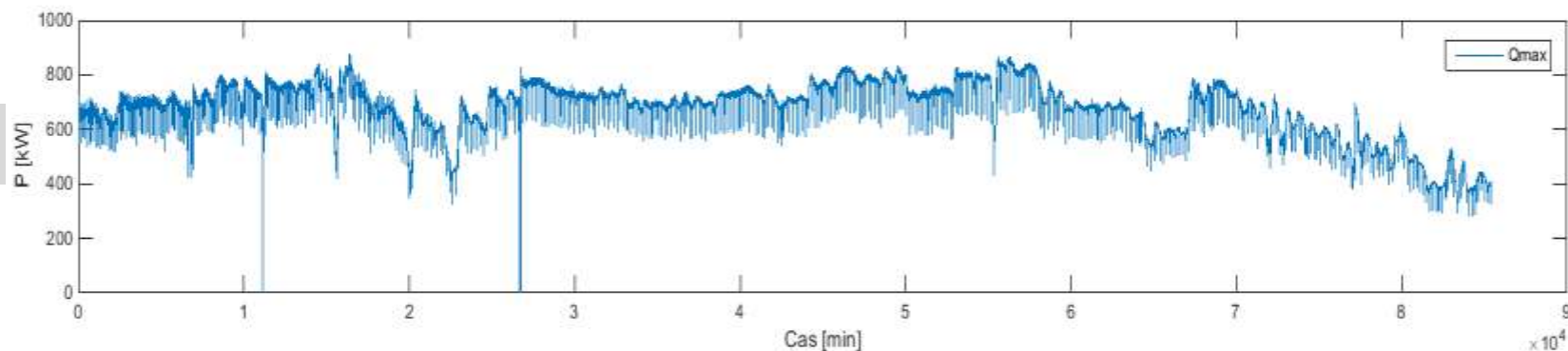
suché



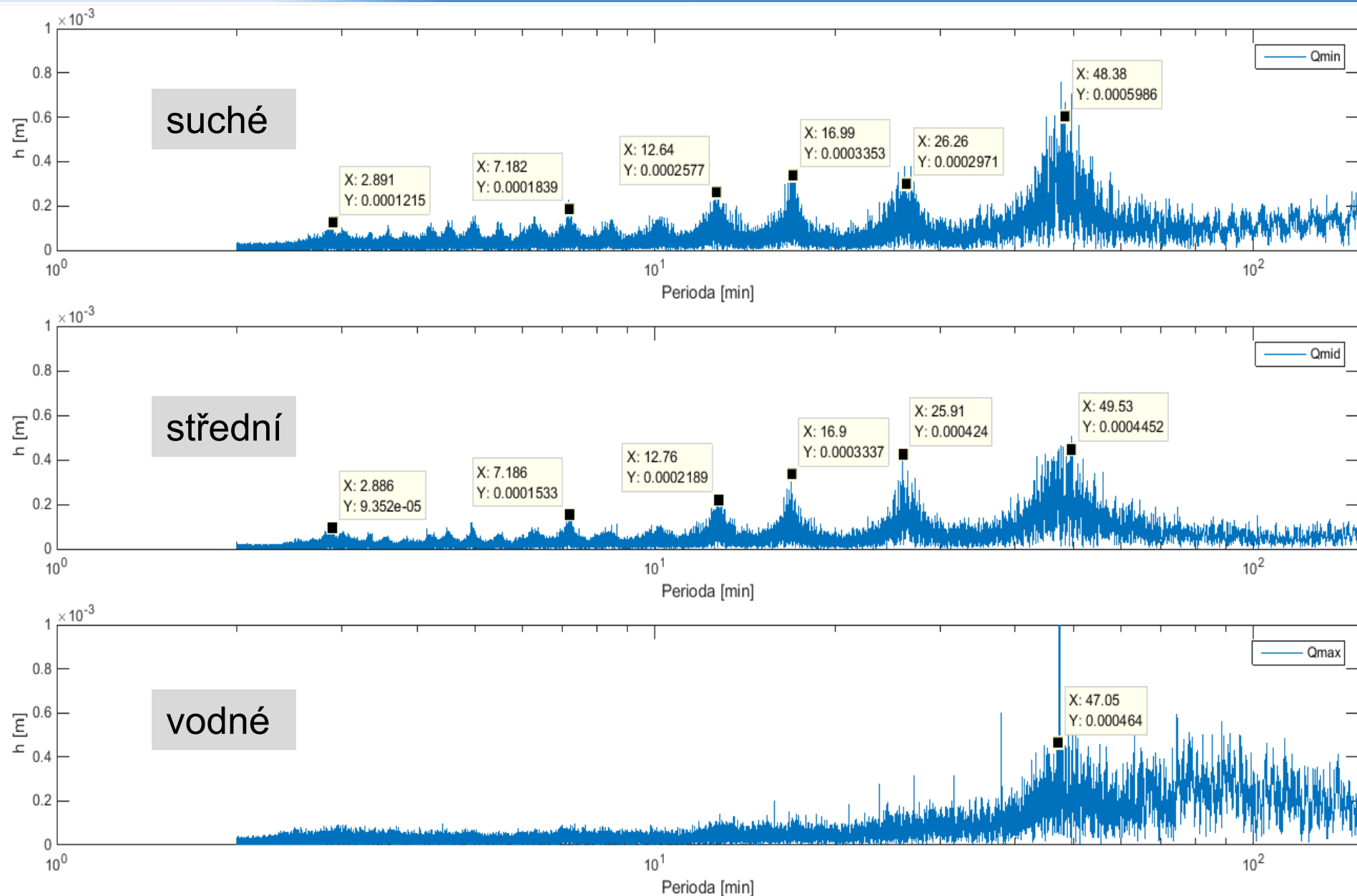
střední



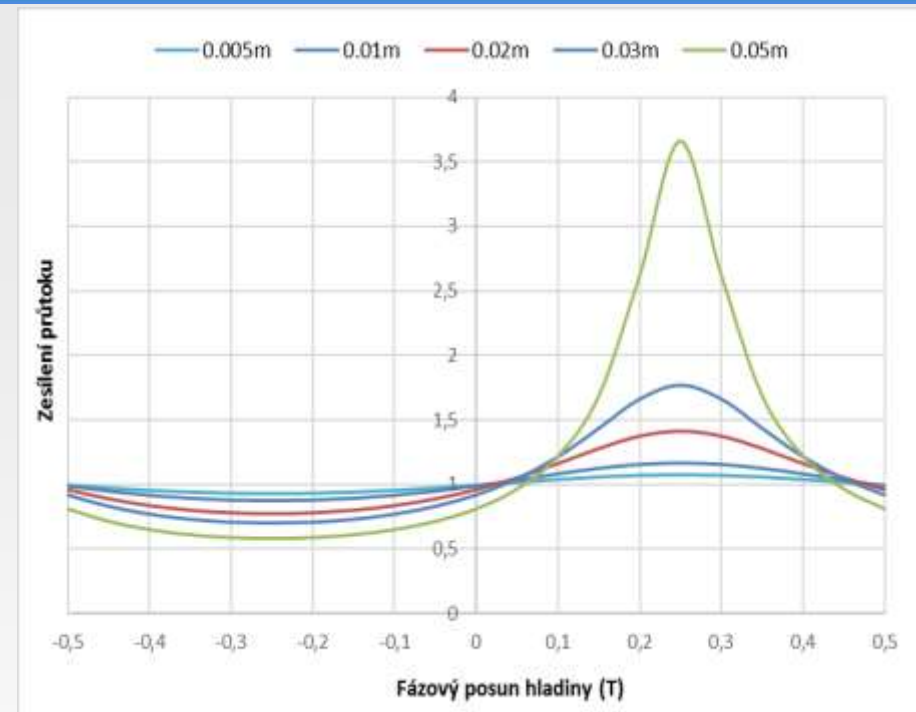
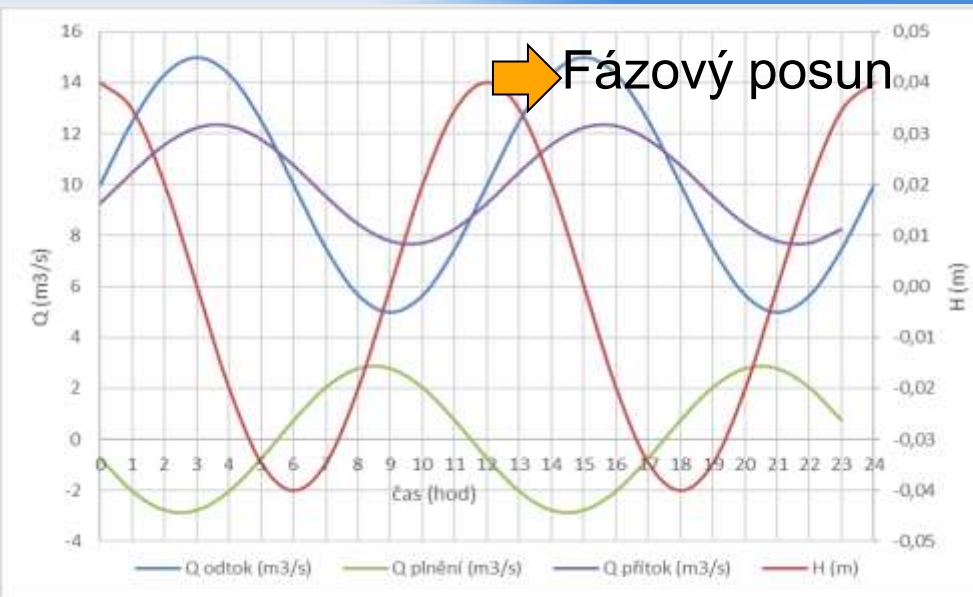
vodné



Frekvenční analýza kmitání hladiny



Teorie - harmonické ustálené kmitání



■ Teoretický příklad

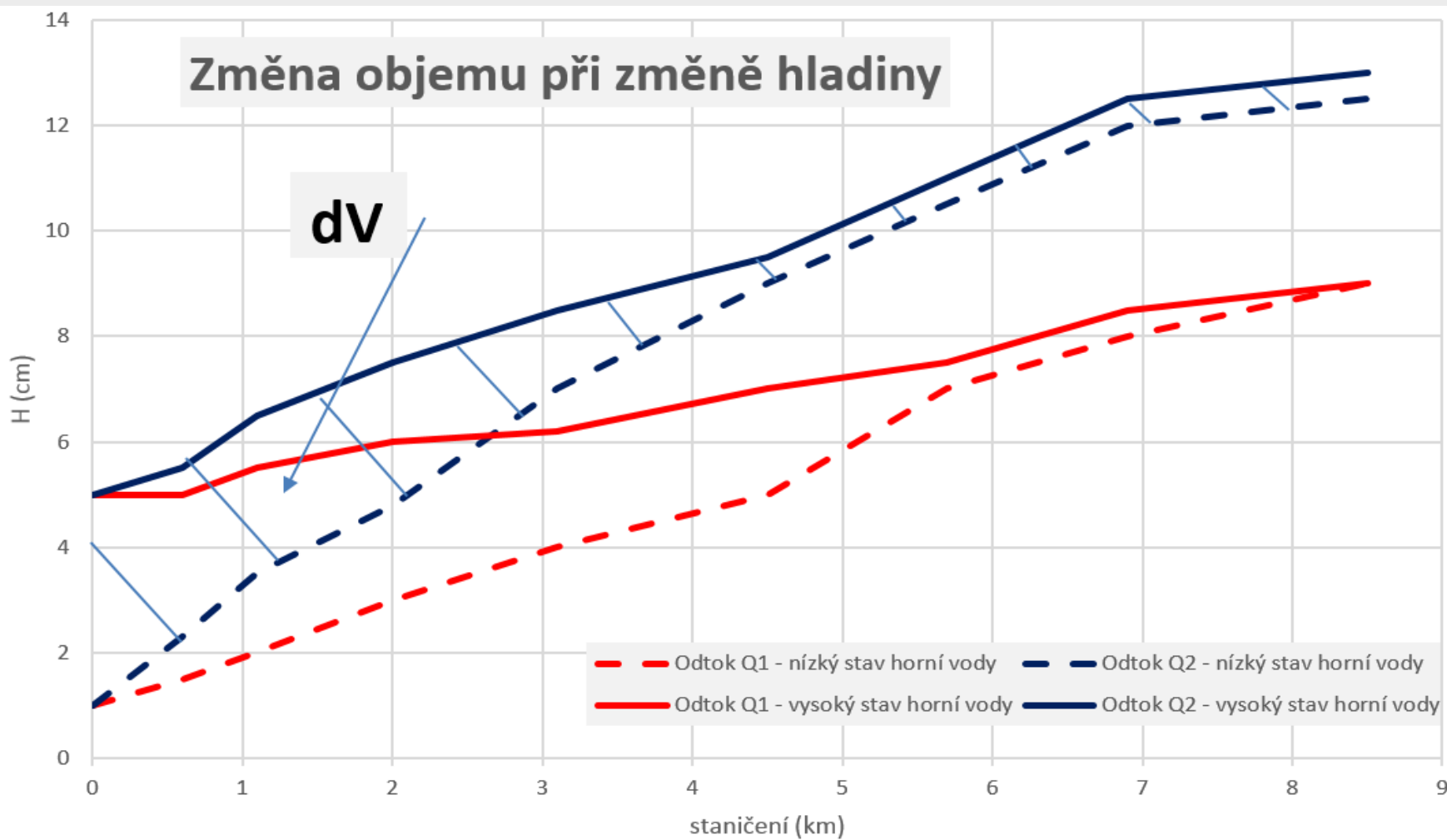
- Přítok do zdrže harmonicky kmitá
- Hladina ve zdrži harmonicky kmitá
 - Shodná frekvence
 - Proměnlivá fáze
- Odtok ze zdrže harmonicky kmitá se shodnou frekvencí
 - Dopočet bilancí objemů

■ Závěr

- **Fáze mezi hladinou a odtokem má zásadní vliv na tlumení**
 - -1/4 periody zesiluje
 - +1/4 periody zeslabuje
- Vliv amplitudy hladiny
- Vliv zatopené plochy

Statická charakteristika zdrže

- Akumulační objem při změně hladiny
- Možnost využít pro tlumení odtoků

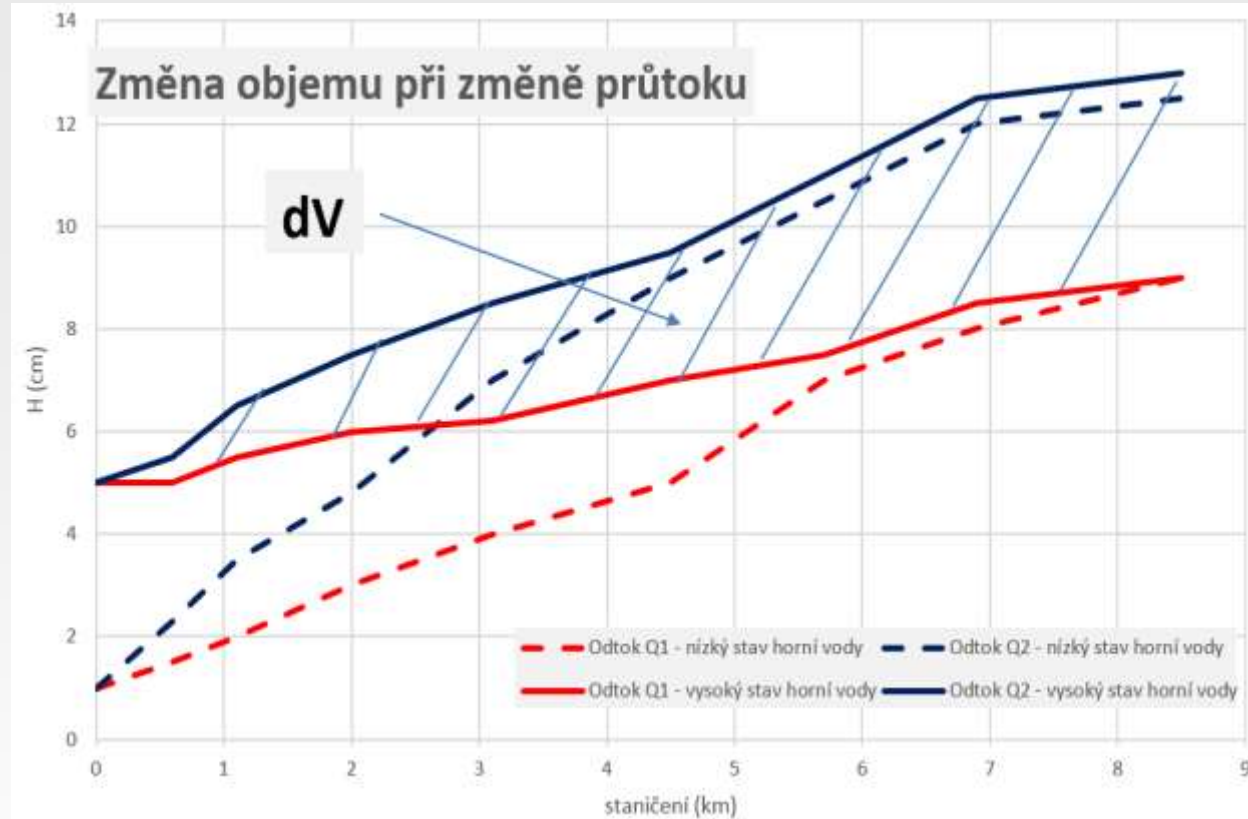


Dynamické charakteristiky zdrže

▪ Retenční čas - T_r

- ΔV – retenční objem
- ΔQ – změna průtoku

$$T_r = \frac{\Delta V}{\Delta Q}$$

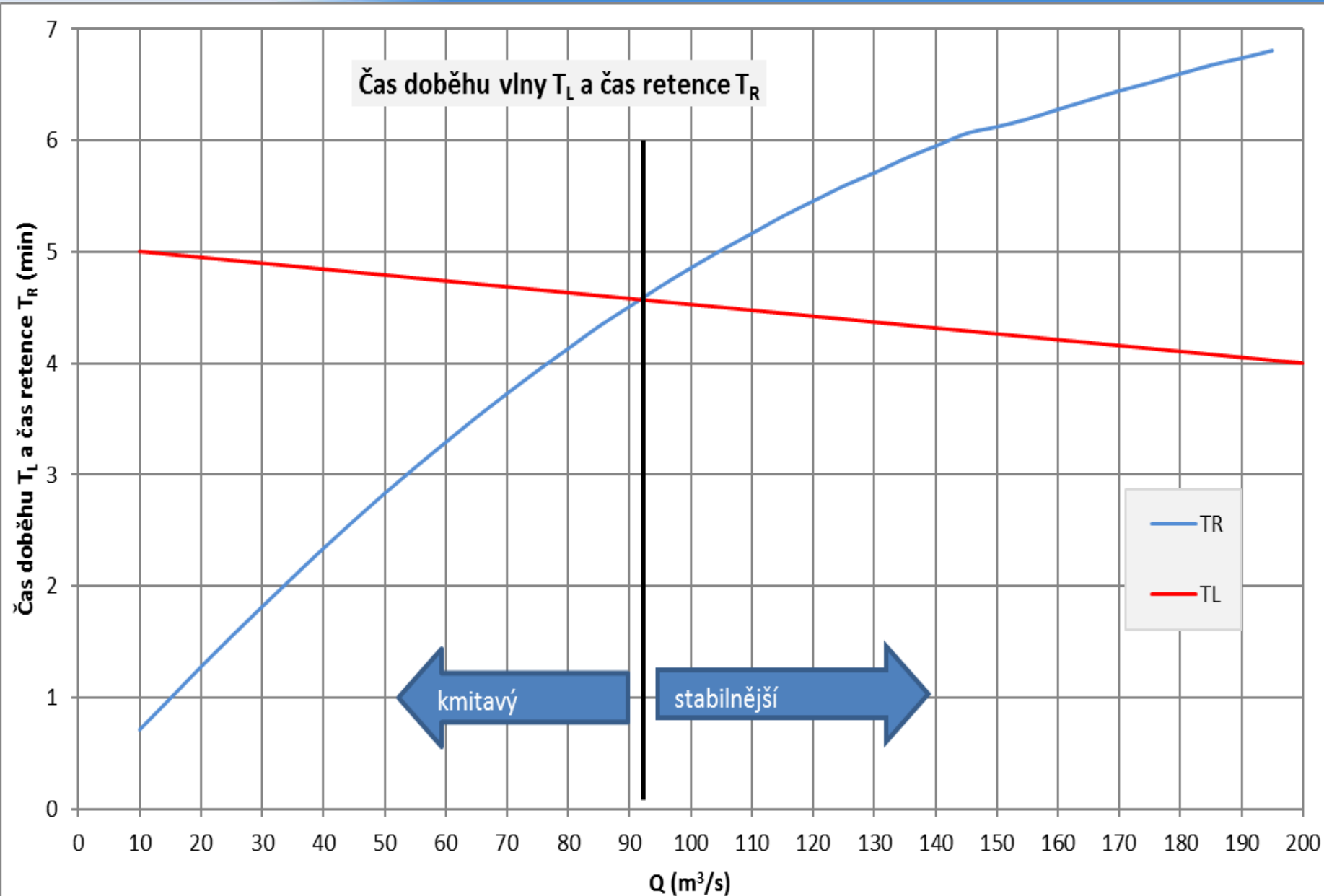


▪ Čas doběhu vlny - T_l

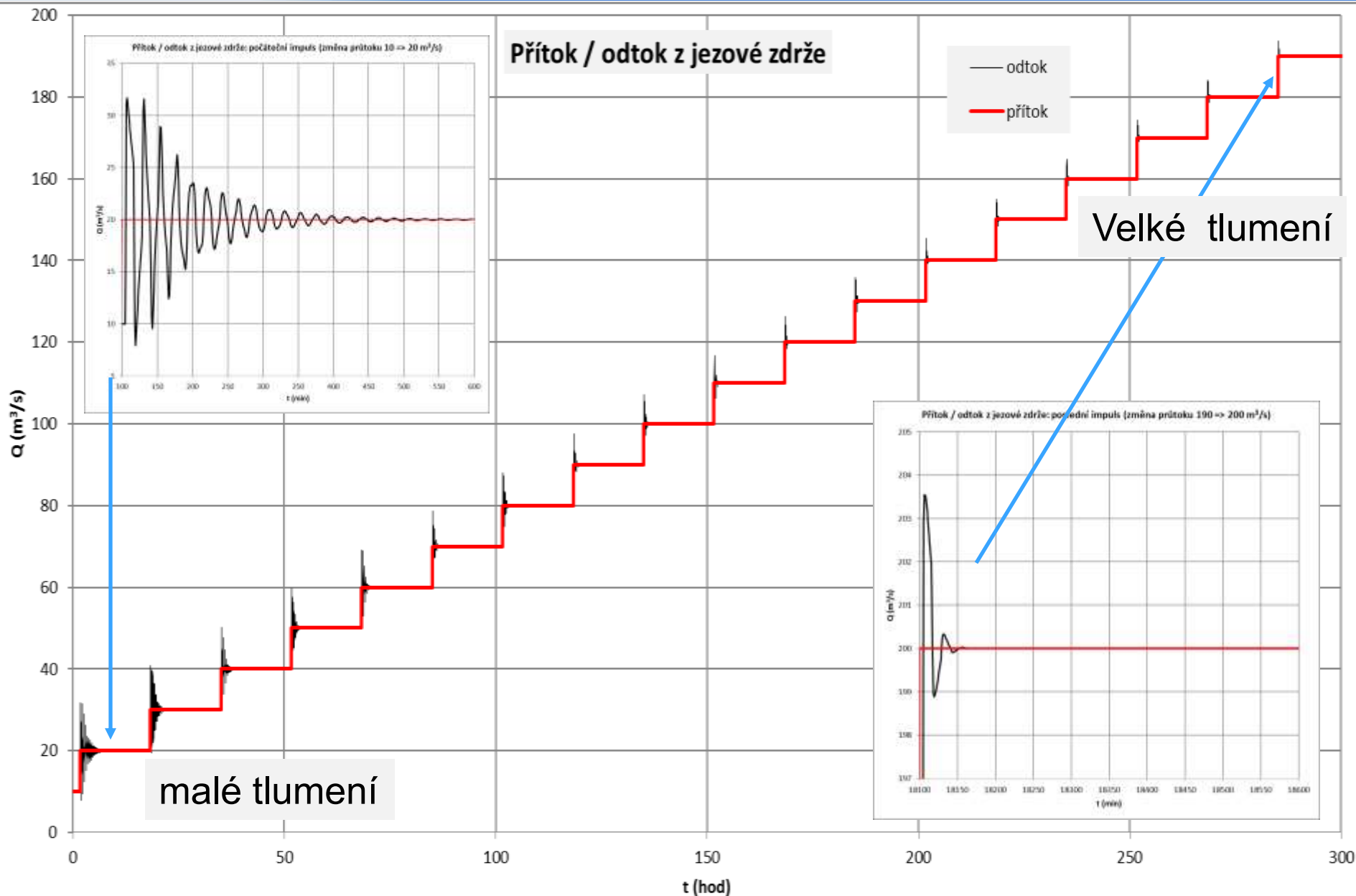
- L – délka zdrže
- v – rychlost šíření rázové vlny

$$T_l = \frac{L}{v}$$

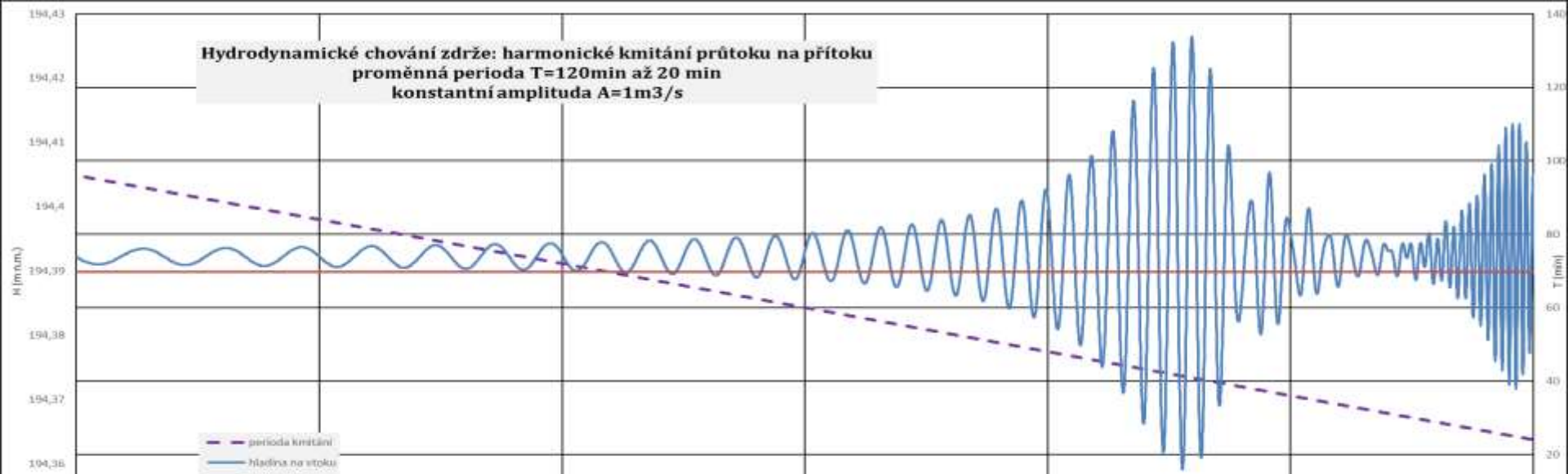
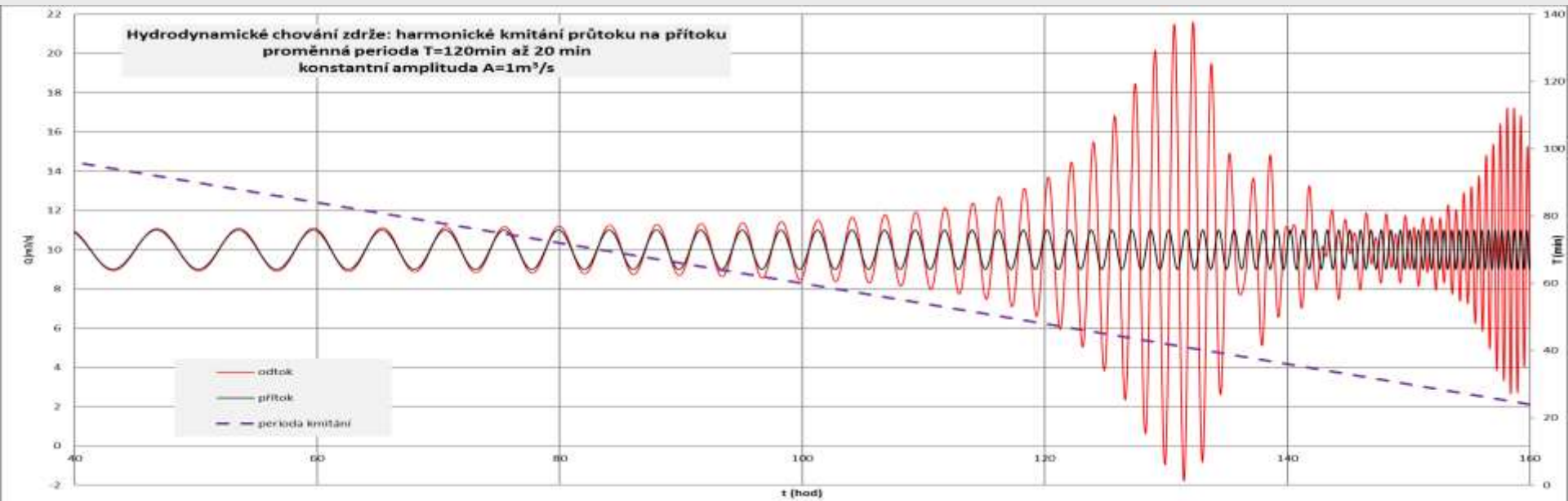
Dynamické charakteristiky zdrže



Odezva zdrže – ideální hladinový regulátor

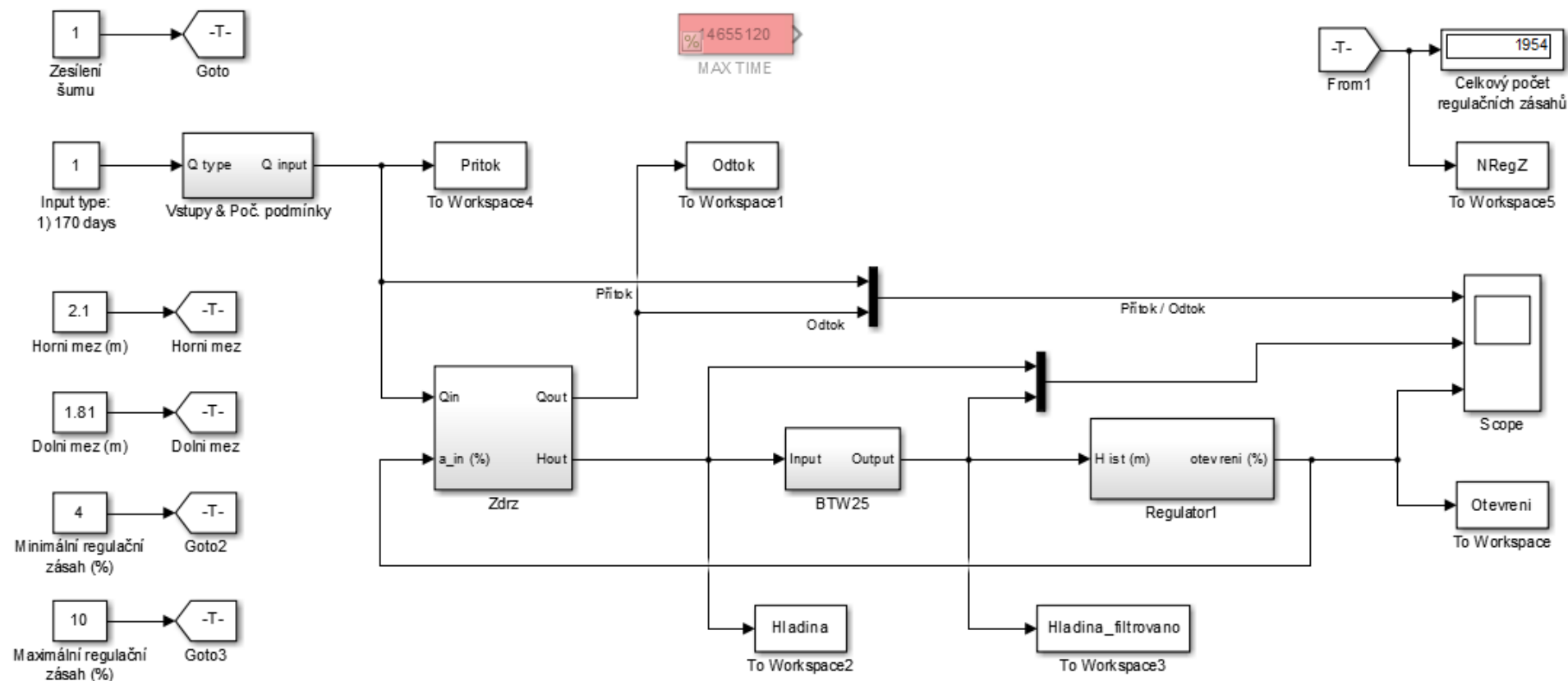


Lokality energetického využití



Video

Simulace hladinové regulace - Simulink

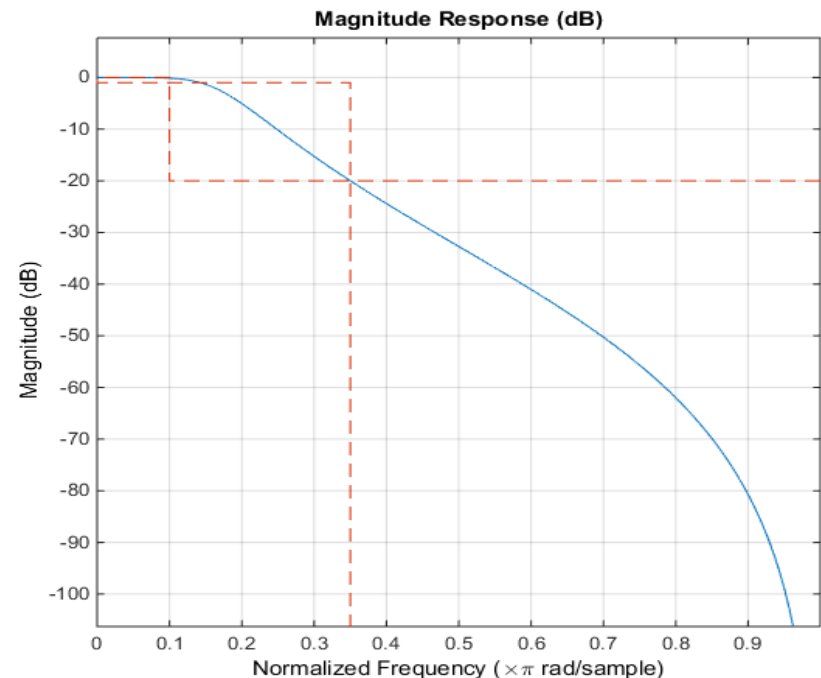
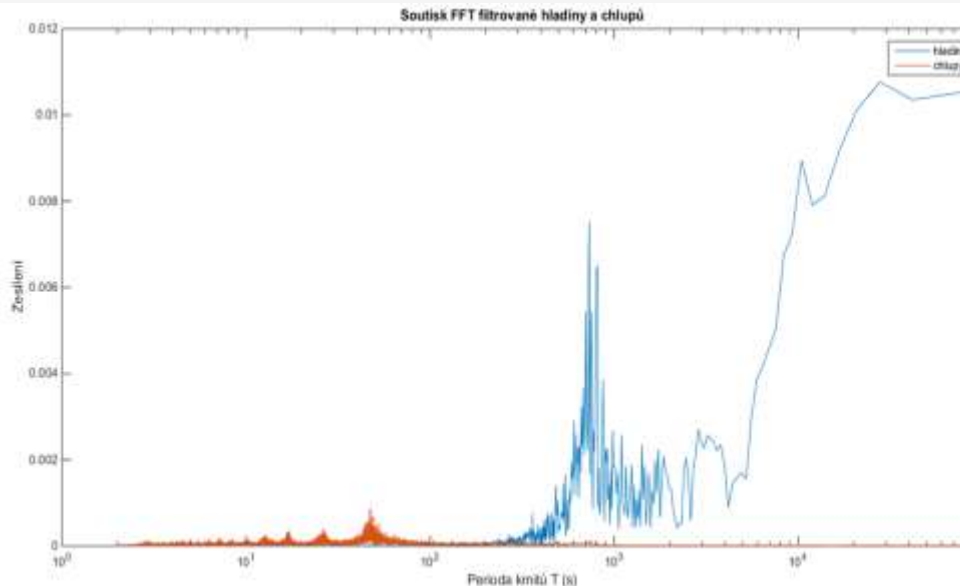
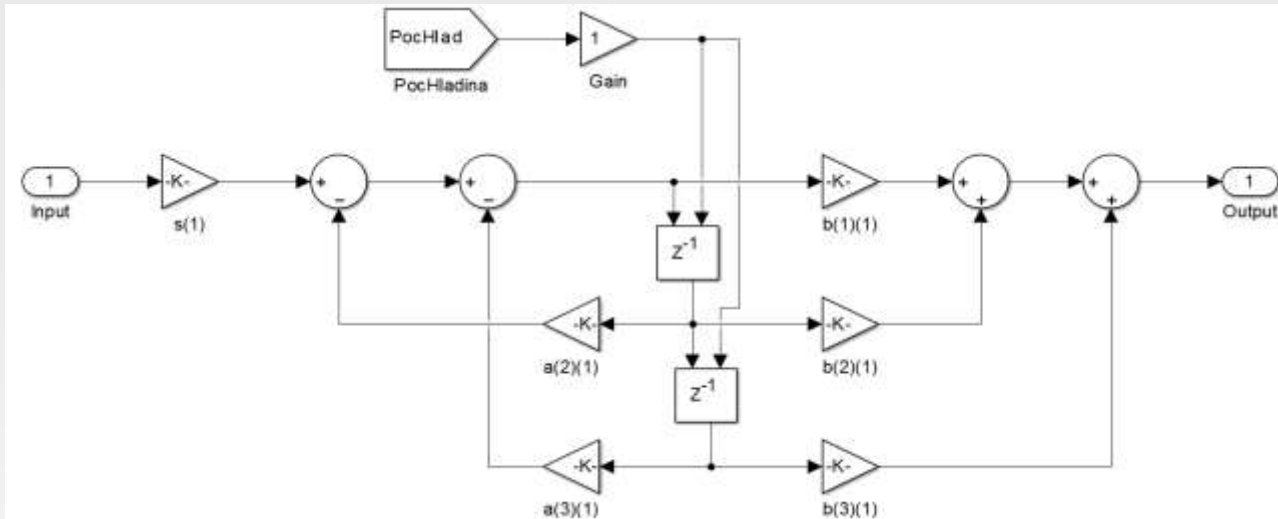


▪ Schéma vodní elektrárny s hladinovým PD regulátorem

- Testování na řadě dopočítaných přítoků
- Délka simulace cca 170 dní
- Výpočetní krok 1 minuta

Filtrace měřené hladiny

- Návrh filtru na základě frekvenční analýzy naměřeného signálu
- Vybraný typ filtru
 - Butterword
 - Druhého řádu
 - Konstanty závislé na vzorkovací frekvenci signálu
- Nutná inicializace vnitřních proměnných



Výsledky simulace - porovnání

fixed time step simulace		60 sec																				
délka simulace		169,7 dní																				
filter							regulátor								vyhodnocení							
řád	zpoždění	frekvence		magnitude		umělé zpoždění									regulační zásahy							
		passband	stopband	ripple	attenuation		počet		H_max	H_min	H_std	Q_max	Q_min	Q_std								
		vzorky	f_norm	f_norm	dB	dB	minuty	typ	H min	H max	dY_min	dY_max	P- člen	D-člen	celkový	za den	m	m	m			
0	0	0	0	0	0	0	PD			2	7	3	6,5	17 436	102,75	2,30	1,51	0,074	53,12	0,00	14,88	
2	25	0,01	0,1	1	25	0	PD			2	7	3	300	3 300	19,446	2,10	1,84	0,014	50,23	5,03	12,87	
2	25	0,01	0,1	1	25	0	PD			4	10	3	300	2 658	15,663	2,10	1,83	0,015	50,49	4,22	12,90	
2	25	0,01	0,1	1	25	0	statika	1,95	2,1	4	10			3 570	21,037	2,15	1,96	0,038	51,63	3,70	12,79	
2	25	0,01	0,1	1	25	0	statika	1,84	2,1	4	10			2 078	12,245	2,11	1,87	0,065	50,49	5,50	12,76	
2	25	0,01	0,1	1	25	0	statika	1,81	2,1	4	10			1 954	11,514	2,11	1,84	0,072	50,64	4,64	12,75	

▪ Kritéria hodnocení kvality

▪ Vícekriteriální - přidělení vah

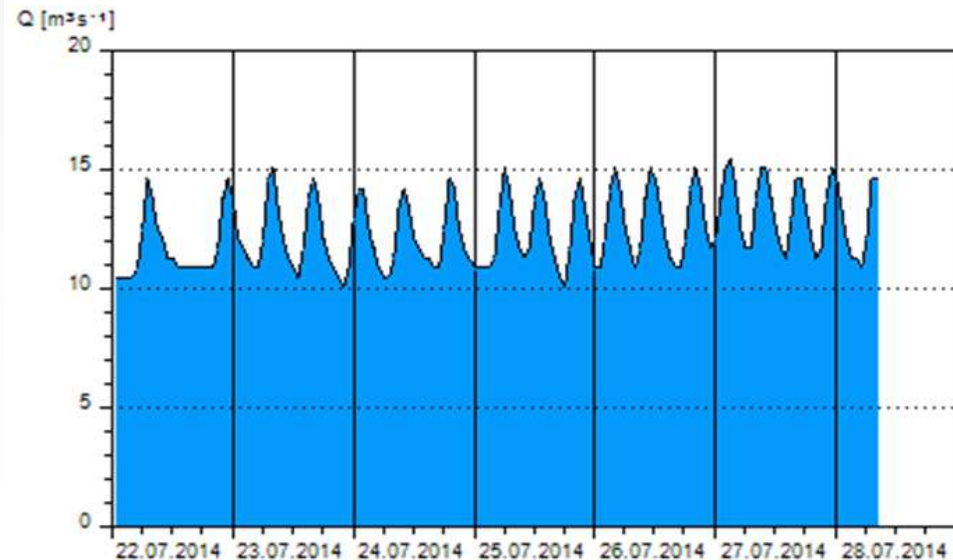
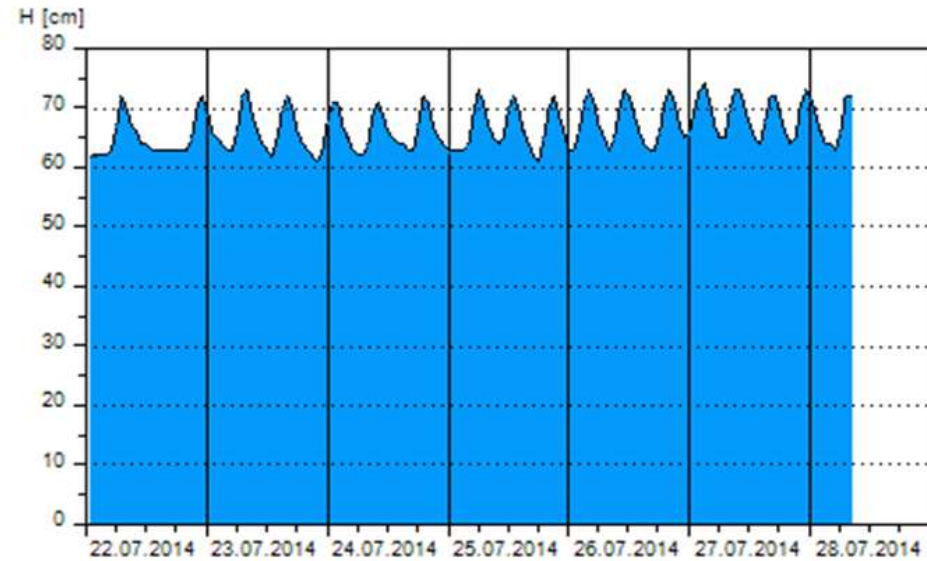
▪ Např.: počet regulačních zásahů, zatlumení kmitání odtoků, kmitání hladiny

▪ Nutné zapojení kvalitního filtru hladiny

▪ Vyhoví PD regulátor i regulace se statikou

Závěr

- Stávající stav je neuspokojivý – zejména v suchém období
- Každá jezová zdrž má odlišnou dynamickou odezvu
- **Kmitání odtoků lze utlumit zlepšením autonomní hladinové regulace**
- Optimální regulace vyžaduje komunikaci s výše ležícím stupněm nebo řízení celé soustavy jako celku





České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Děkuji za Vaši pozornost

Katedra hydrotechniky

Petr Nowak

Eva Škařupová

nowak@fsv.cvut.cz

eva.skarupova@fsv.cvut.cz