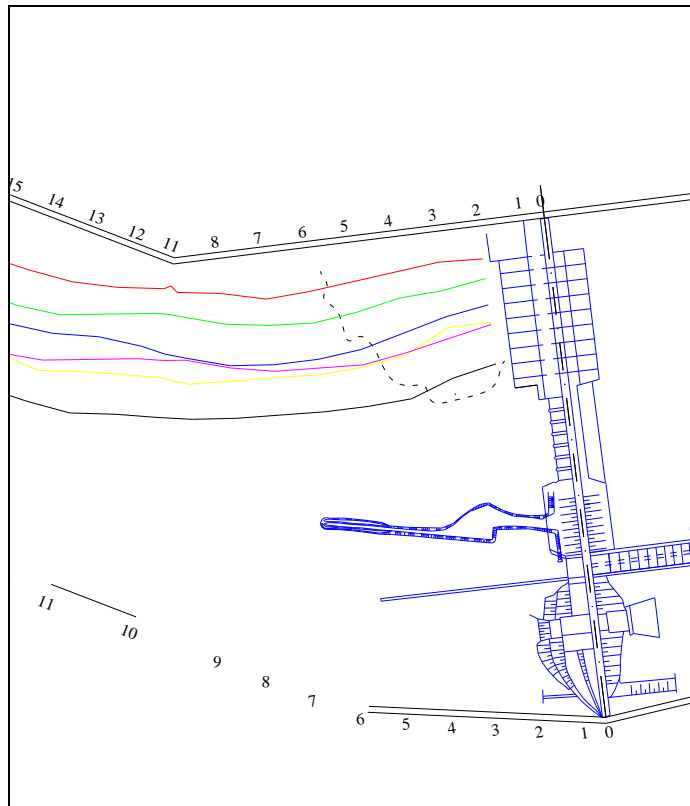




# Преглед метода за мерење протока на ХЕ Ђердап 2

В.Проф. Душан Продановић  
Грађевински факултет Београд



## Апсолутно / директно мерење протока

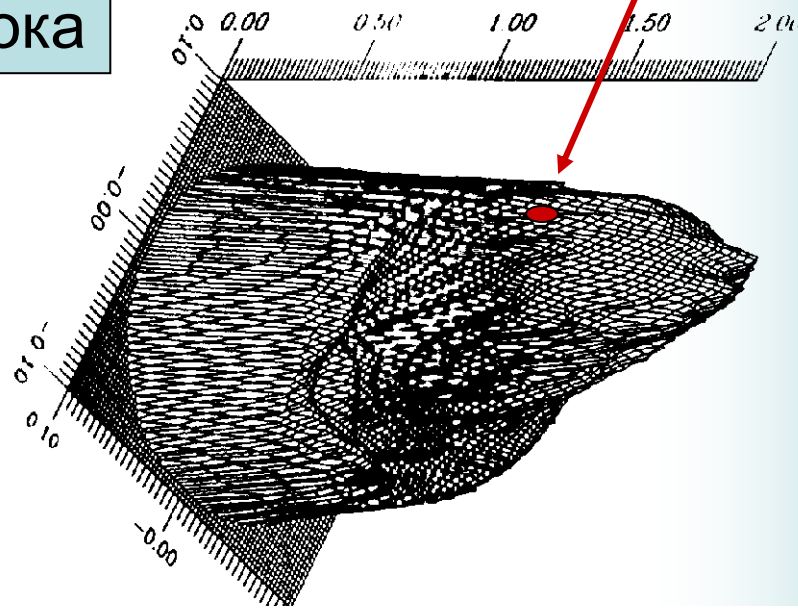
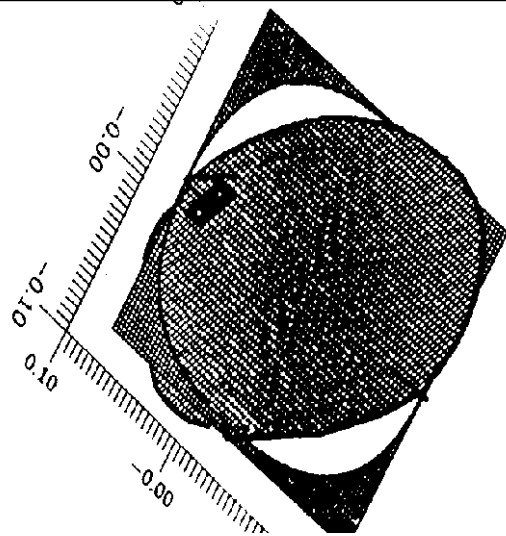


VS

Индексна метода ←

Мери се само једна брзина и на основу ње рачуна проток

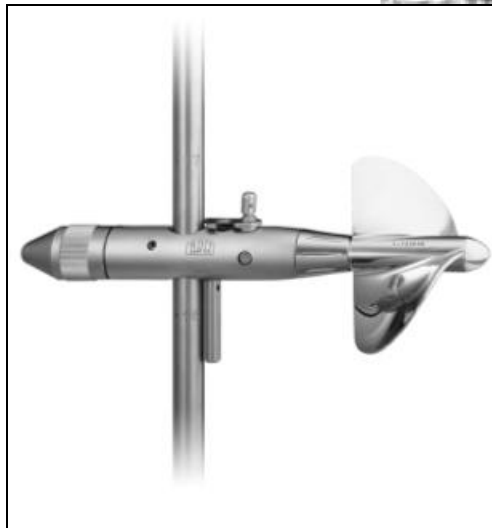
Није баш “апсолутна метода”, уважава се реалан распоред брзина, интеграцијом до протока



Распоред брзина у кружној цеви 1.8D низводно од лептирастог затварача

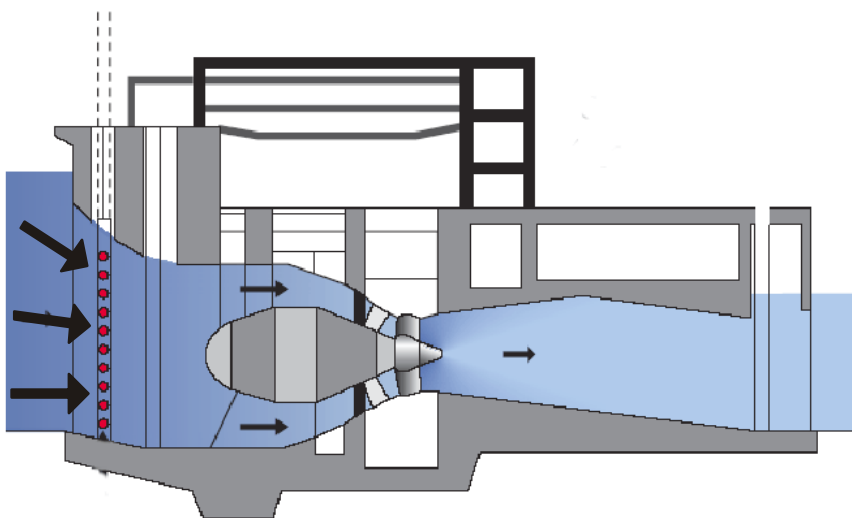
За мерење протока, треба измерити  
распоред брзина у пресеку.

То се стандардно ради помоћу  
хидрометријских крила, према  
стандарду IEC 60041

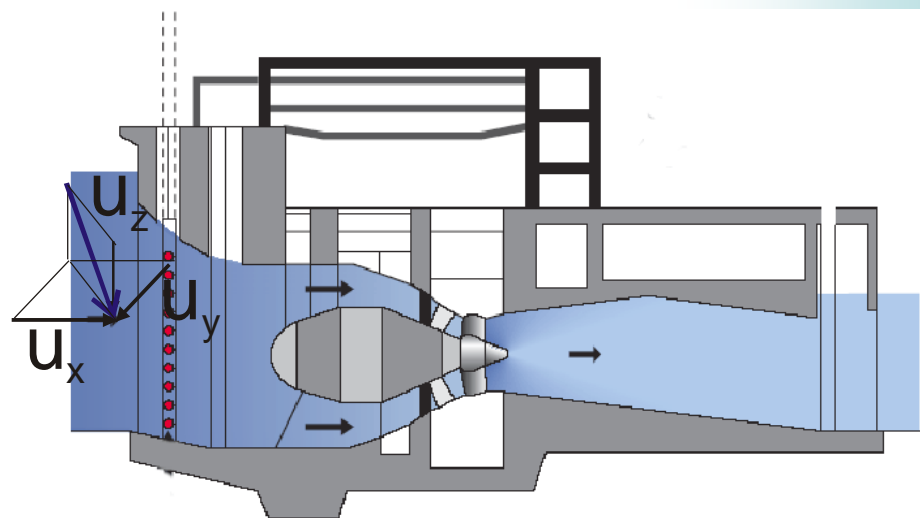


# На ХЕ Ђердап 2 проблем представља просторна струјна слика

(није према **стандарду IEC 60041**)



**2D струјање** – са овим још и можемо да се изборимо ако предпостављамо у напред како изгледа струјно поље

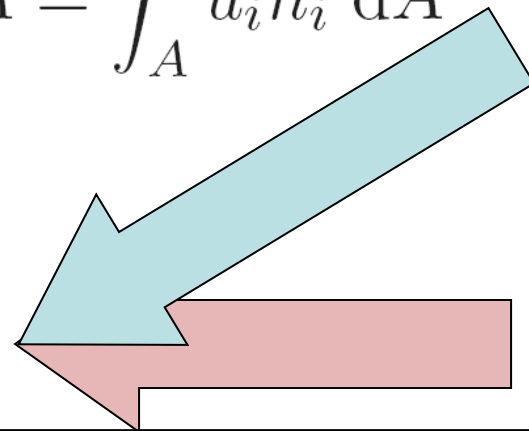
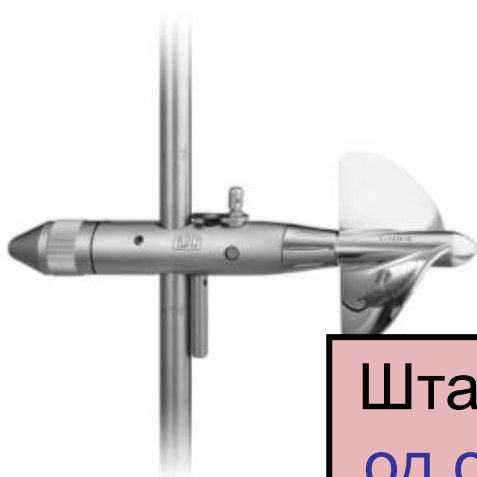


**3D струјање** – ово је већ тешко! По правилу се јавља и вртложно струјање – значи велика неустаљеност!

Које су могућности мерења протока  
уколико је изразито просторно струјање?

$$Q = \int_A \vec{u} \cdot \vec{n} \, dA = \int_A u_i n_i \, dA$$

Стварни вектор брзине  $U_i$



$U_i \cos \phi$  – даје проток кроз  
раван чији је орт

Шта ако је **угао дострујавања већи**  
**од очекиваног**, па се праве грешке  
а ми тога **НИСМО СВЕСНИ** (не видимо  
колики је стварни угао?)  
Обична кр **ујавањем**

**Компонентна крила** – коректно мере у **уском опсегу** углова,  
потребно **калибрисати за разне углове**

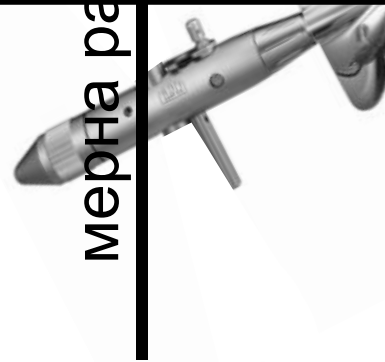


## Које су могућности мерења протока

Јако **споро**, **напорно** и **скупо**!

Да ли има других могућности?

Да ли постоји “**чаробна метода**” која ће омогућити **брзо**, **лако** и **јефтино** мерење?



Треба урадити **више серија мерења**, са крилима монтираним под различитим угловима у односу на мерну раван.

За 3D струјно поље: **4 серије мерења** (4-та је контролна)

# Последњих година је у хидрометрији популарно мерење протока помоћу ADCP-а **Acoustic Doppler Current Profiler**

Ултразвуча безконтактна метода па не квари поље брзина и не утиче на укупне перформансе система



Мери распоред брзина у тачкама – одмах се добија профил брзина а проток се рачуна интеграцијом уз могућу интерполацију и екстраполацију

Користи Доплеров фреквентни помак + корелацију за што тачније мерење

## ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Обрадом података добија се информација о 3D

**брзини делића** које вода носи

**Не воде!**

Тамо где је и **четврти сензор**, може се вршити контрола измерених 3D података, али и пратити контура дна



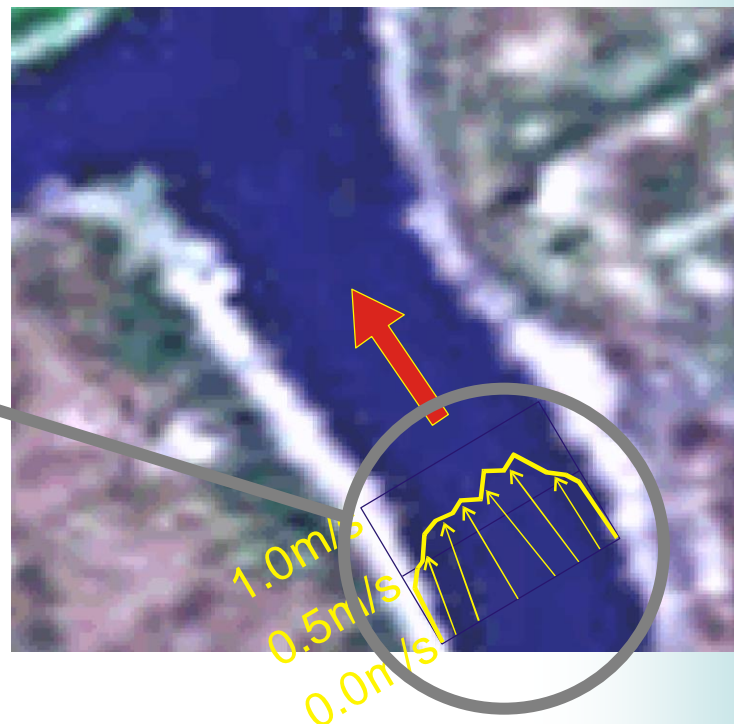
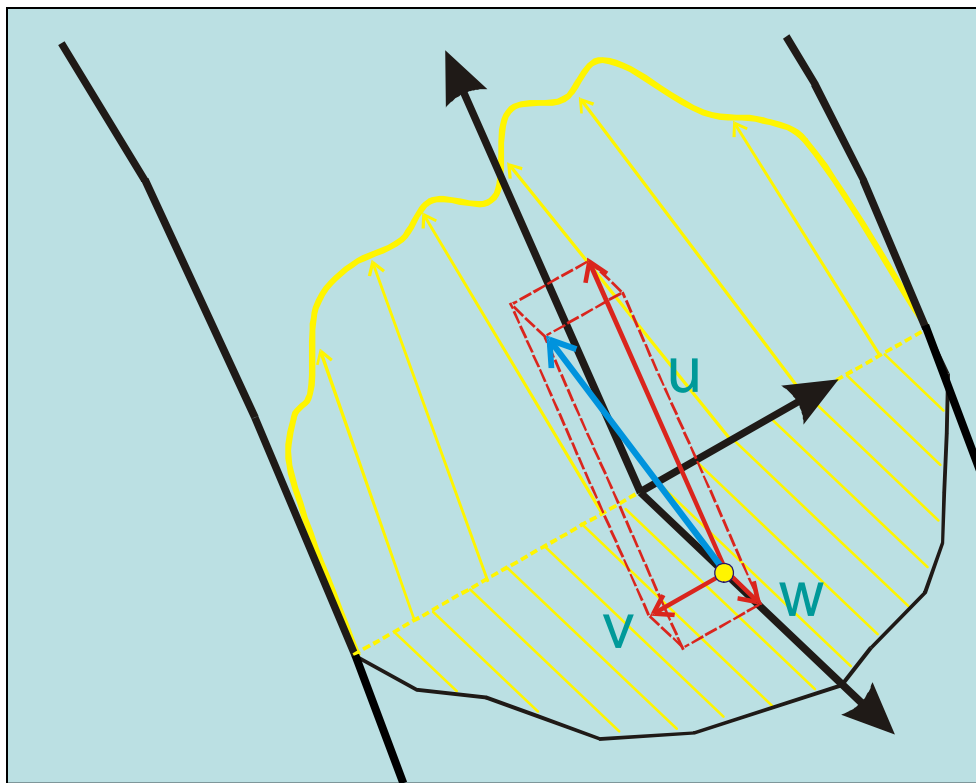
Сензор није фиксан, већ се полако креће по профилу





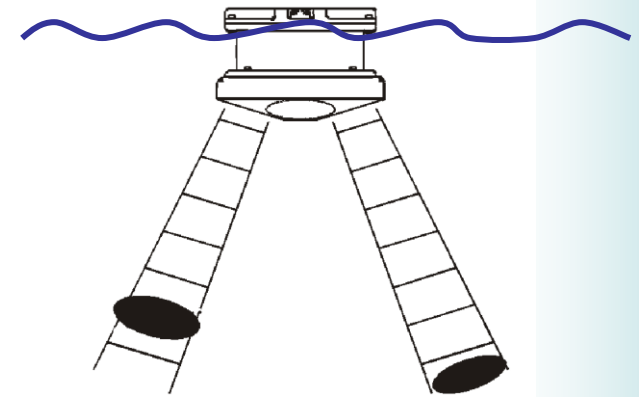
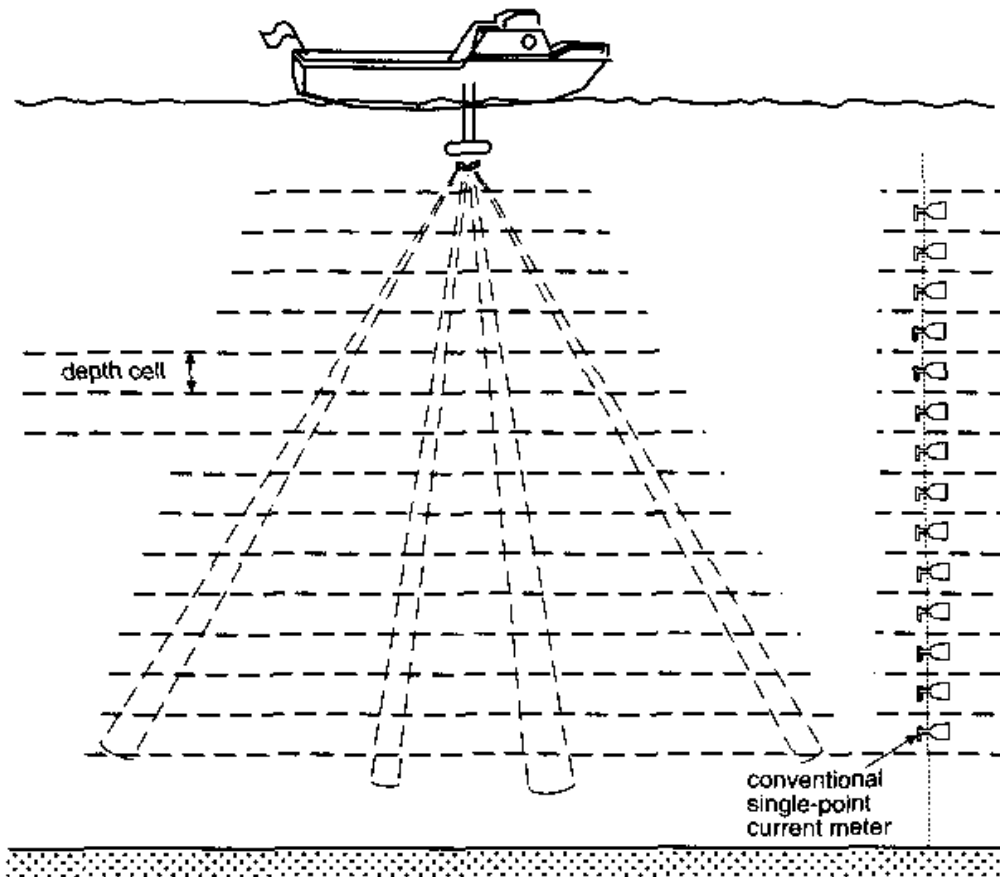
# ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Велика предност: мери **3 компоненте**  
брзина у **100 и више пресека** по дубини



# ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Велика предност: мери **3 компоненте**  
брзина у **100 и више пресека** по дубини



И не само брзине, већ и  
снима дно, сналази се у  
магнетном координатном  
систему, курс брода не  
мора да буде права  
линија, рачуна проток, ...

# Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

## ADCP

Мерење протока и распо-  
реда брзина Дунава и  
Саве – почетци...

Аца – главни руковалац  
ванбродским мотором

Бојан Палмар – експерт  
за RDI-јев уређај

Екипа из РХМЗ-а  
припрема RDI  
ADCP за мерење  
на реци Сава





# Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

## ADCP

Мерење протока и распо-  
реда брзина Дунава и  
Саве – почетци...

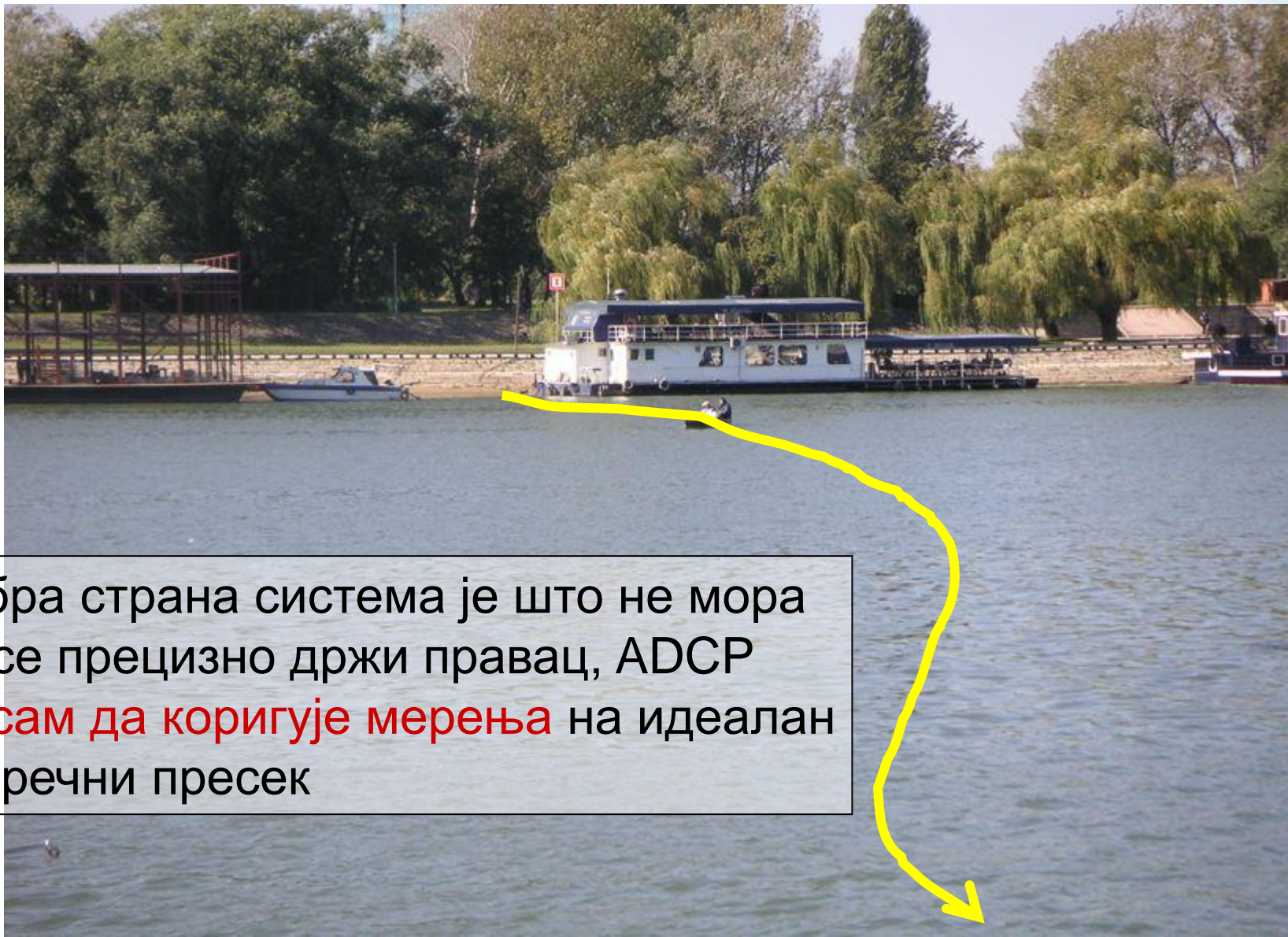
и са новим ХИДРОЛОГ 2  
чамцем



Екипа из РХМЗ-а  
припрема RDI  
ADCP за мерење  
на реци Сава



## ADCP



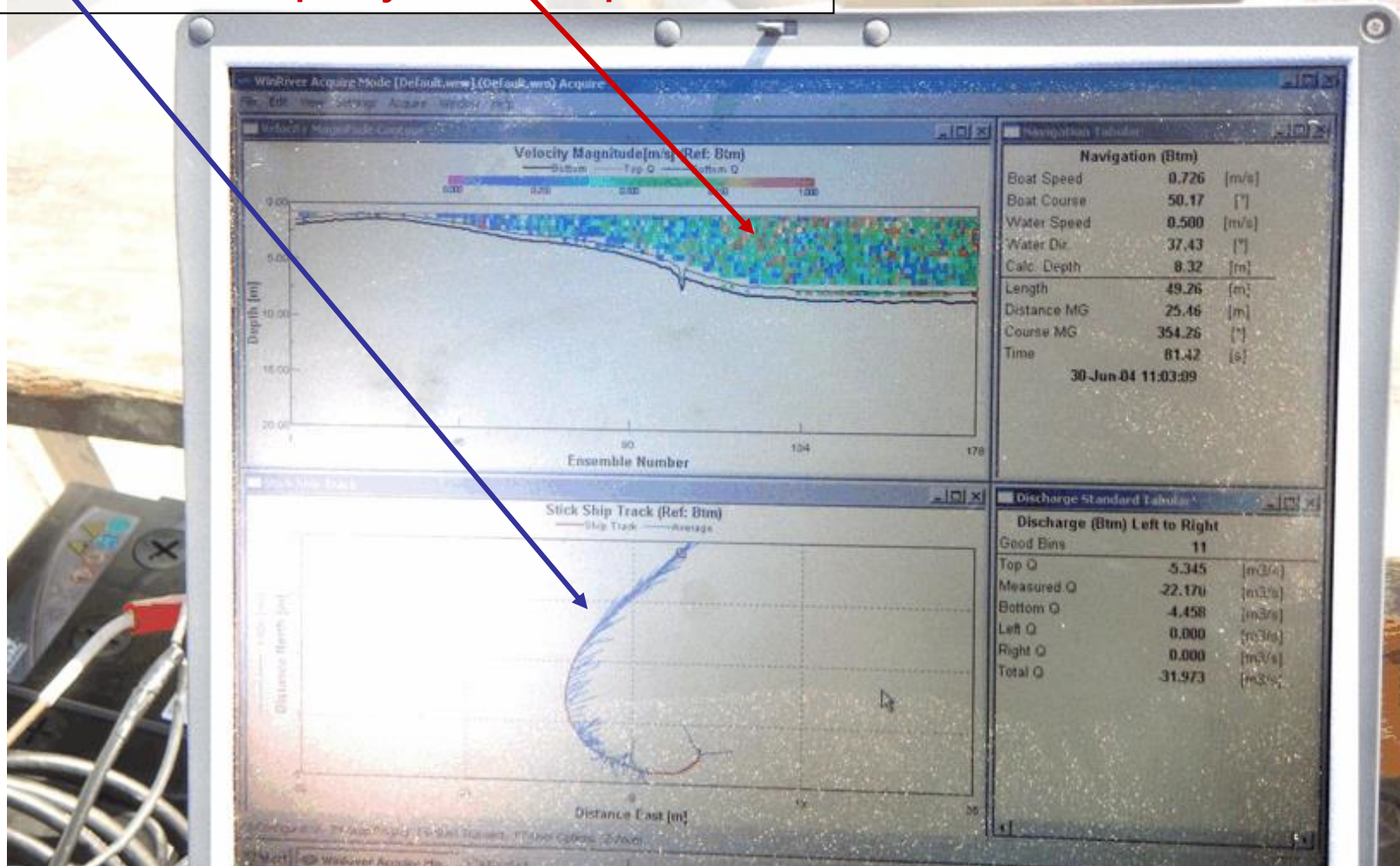
Добра страна система је што не мора да се прецизно држи правац, ADCP ће **сам да коригује мерења** на идеалан попречни пресек



# Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

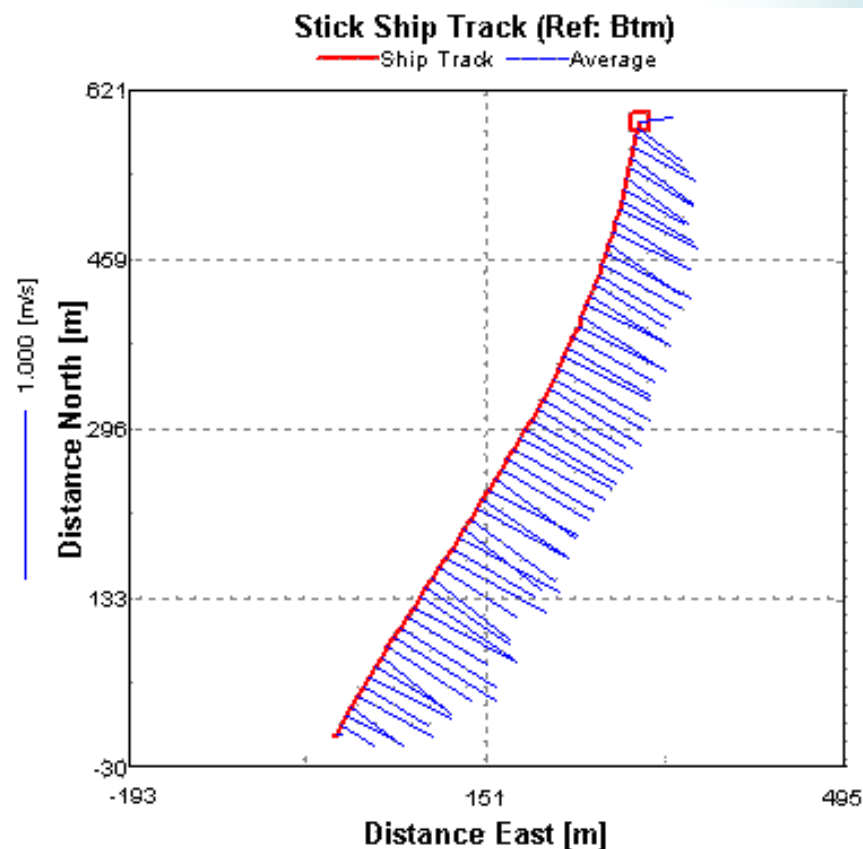
## ADCP

Изглед екрана рачунара  
за време мерења – одмах се види  
траса чамца и резултат мерења



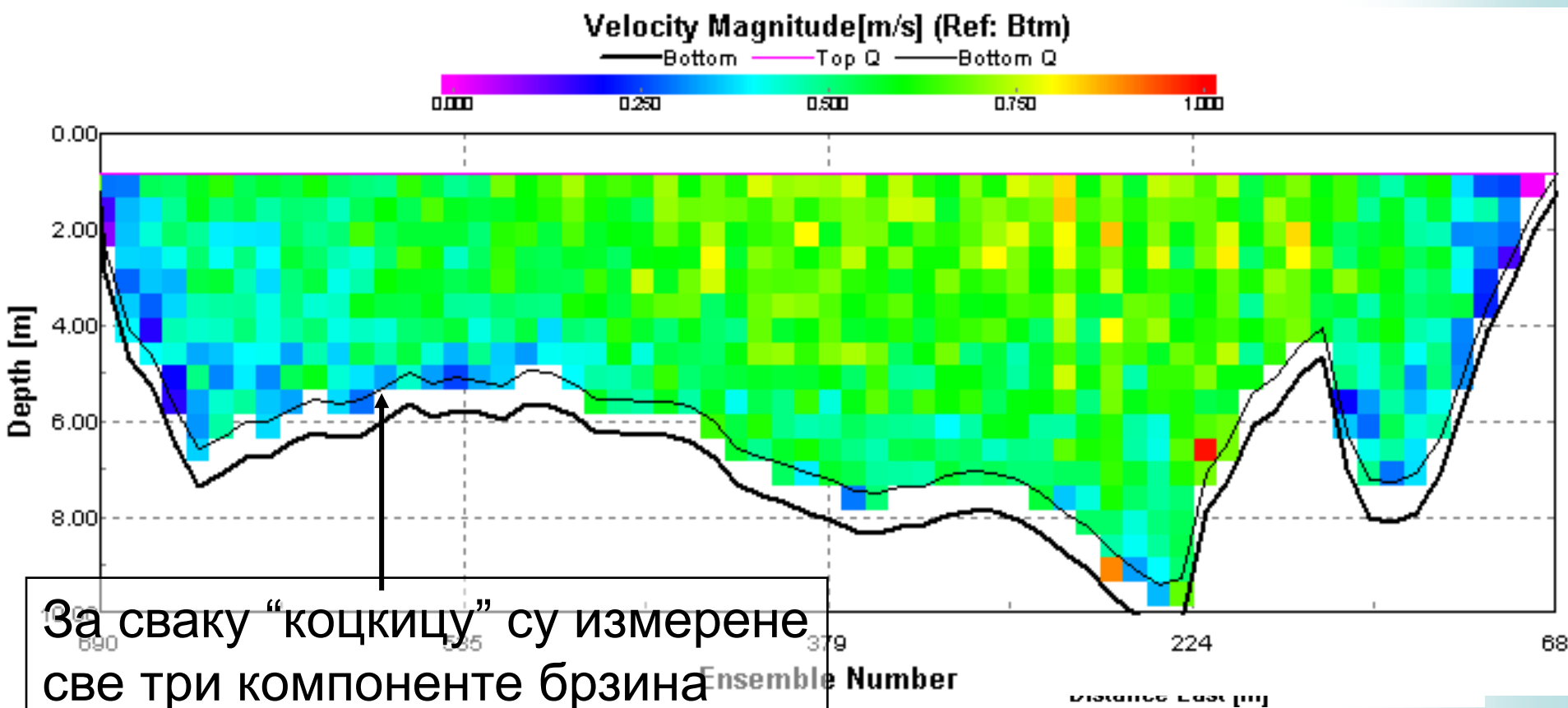
## ADCР – пример мерења

### Дунав код Земунa – осредњени распоред брзина по дубини



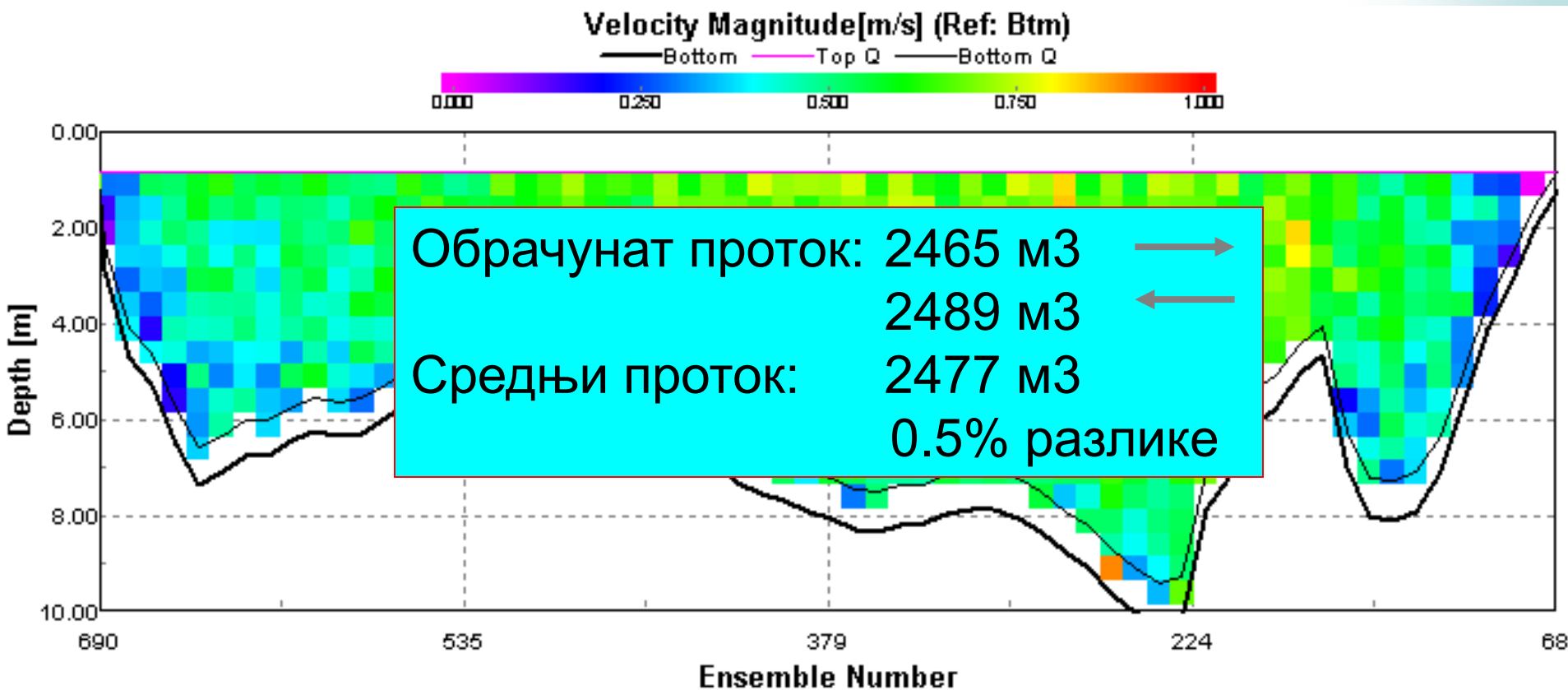
# ADCP – пример мерења

## Дунав код Земунa – осредњени распоред брзина по дубини



# ADCP – пример мерења

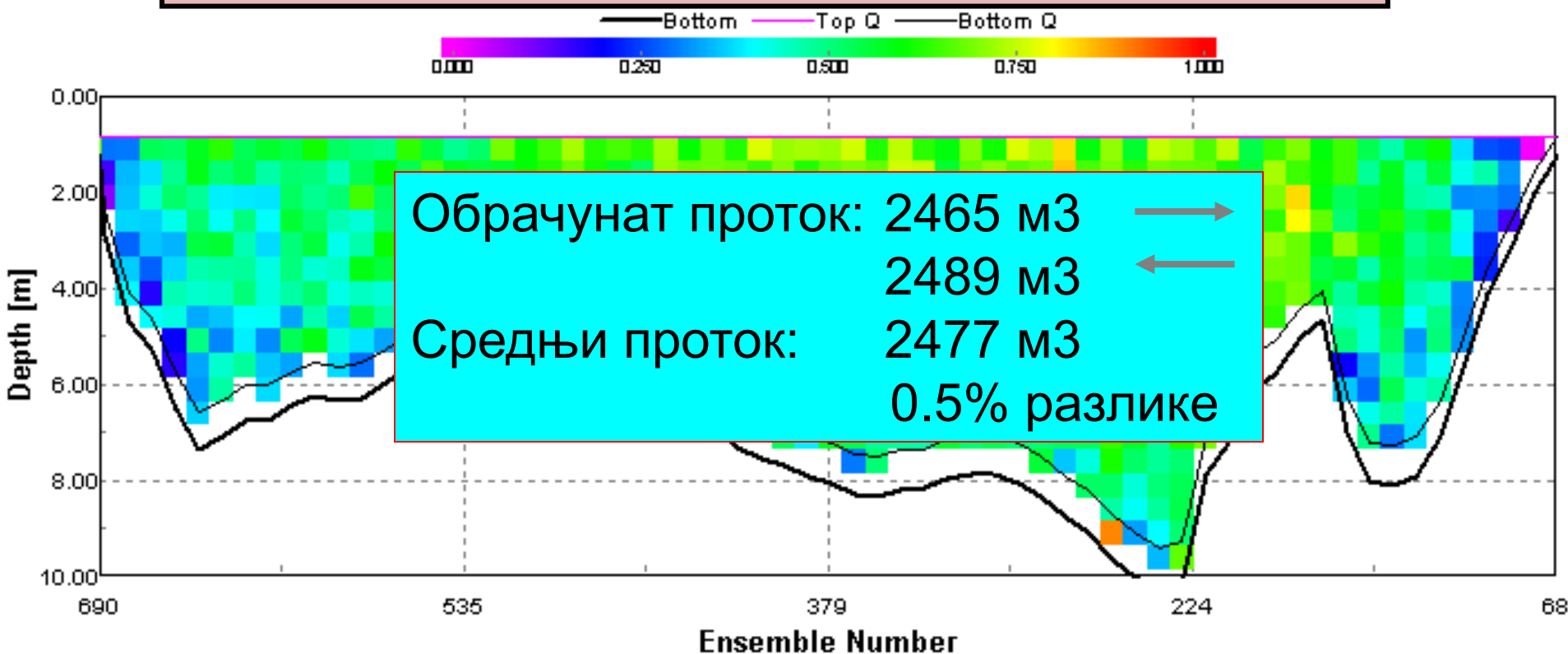
## Дунав код Земунa – осредњени распоред брзина по дубини



## ADCP – пример мерења

Д Изгледа идеално – брзо и тачно мерење. Ред

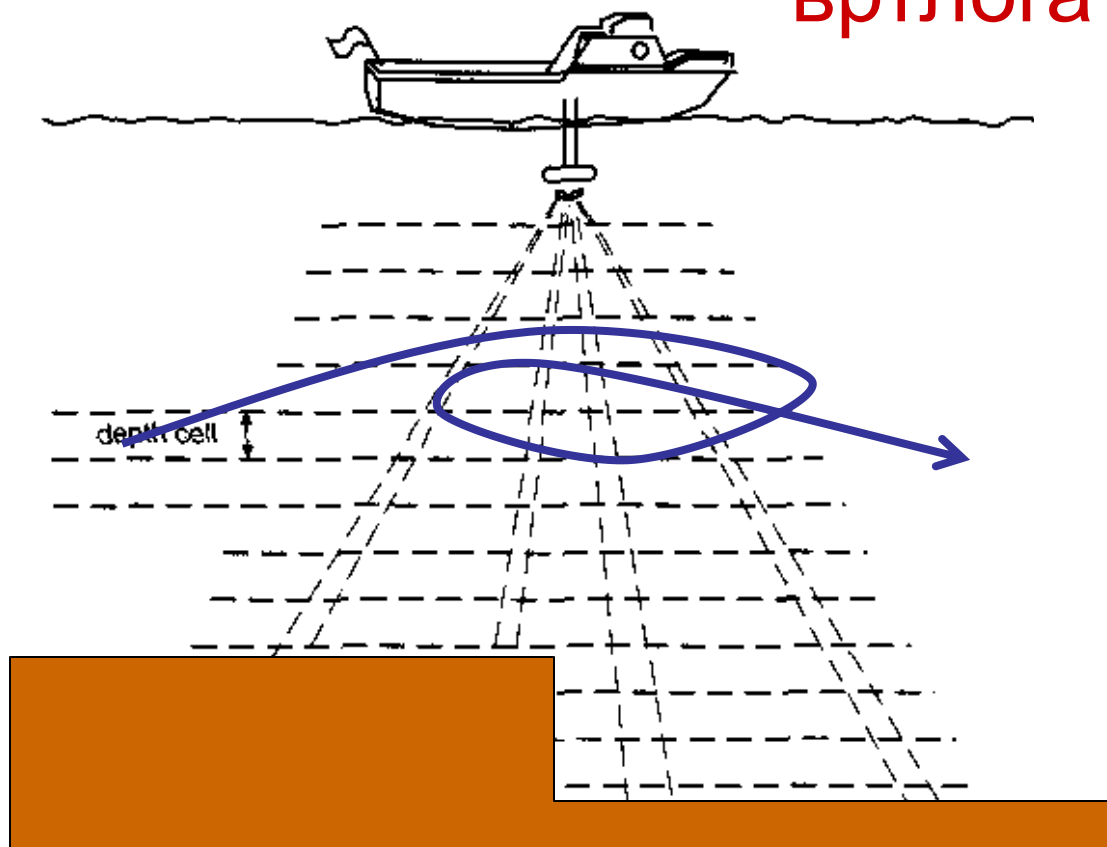
Мора да има и неких проблема...





## ADCР – недостатак:

Претпоставља се да је у једној равни  
брзина хомогена, да нема промена ни  
вртлога

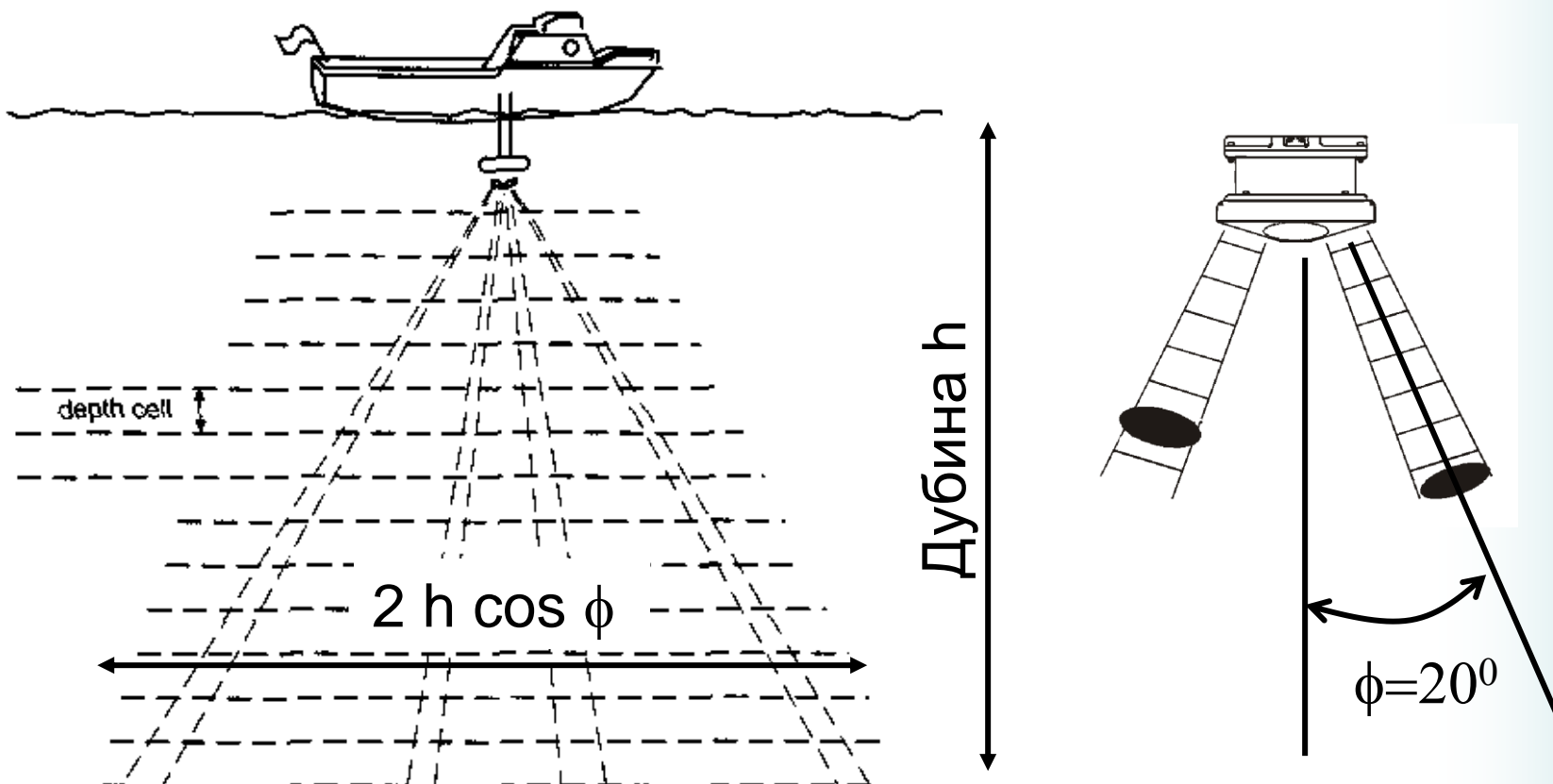


На месту нагле  
промене брзине

На месту нагле  
промене дубине

## ADCP – недостатак:

Зона у којој се претпоставља да је течење у хомогеним условима **расте са дужином**



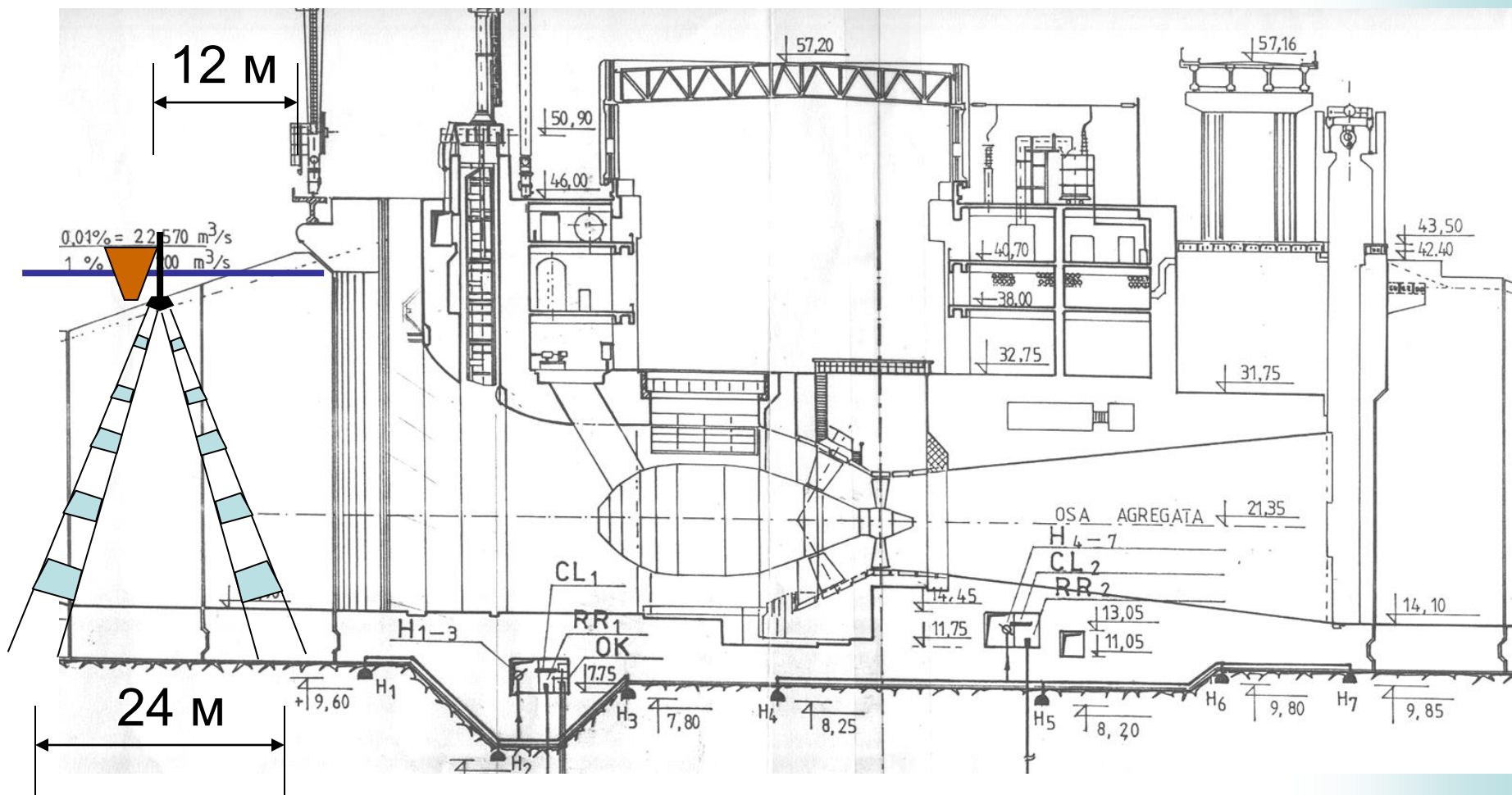
## Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

ADCSP – значи да на Ђердапу 2 може да се користи **само узводно од захвата воде**

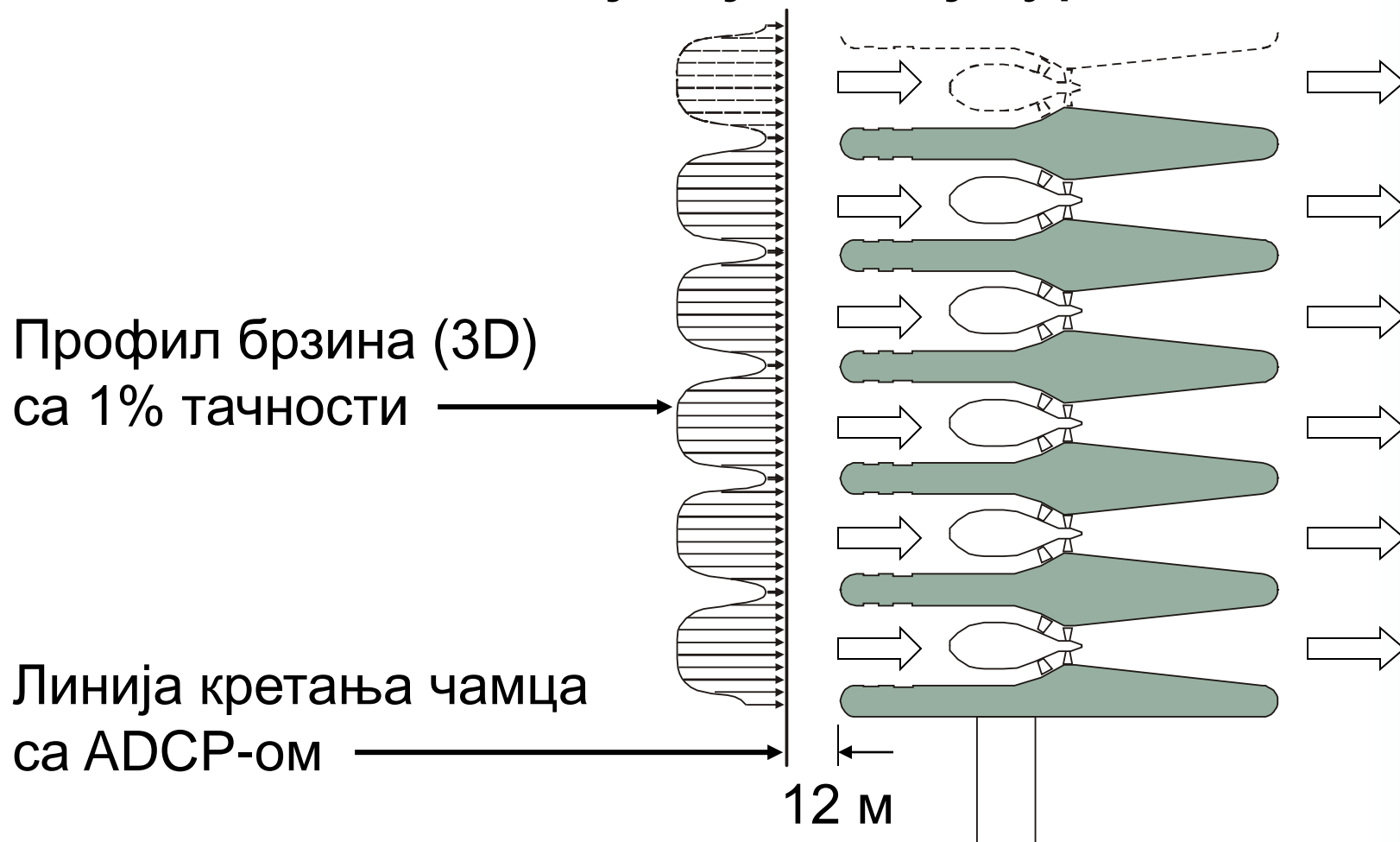


# Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

ADCSP – значи да на Ђердапу 2 може да се користи **само узводно од захвата воде**



ADCSP – мери се узводно од захвата воде  
па **није могуће тачно одредити проток** по  
свакој појединој турбини





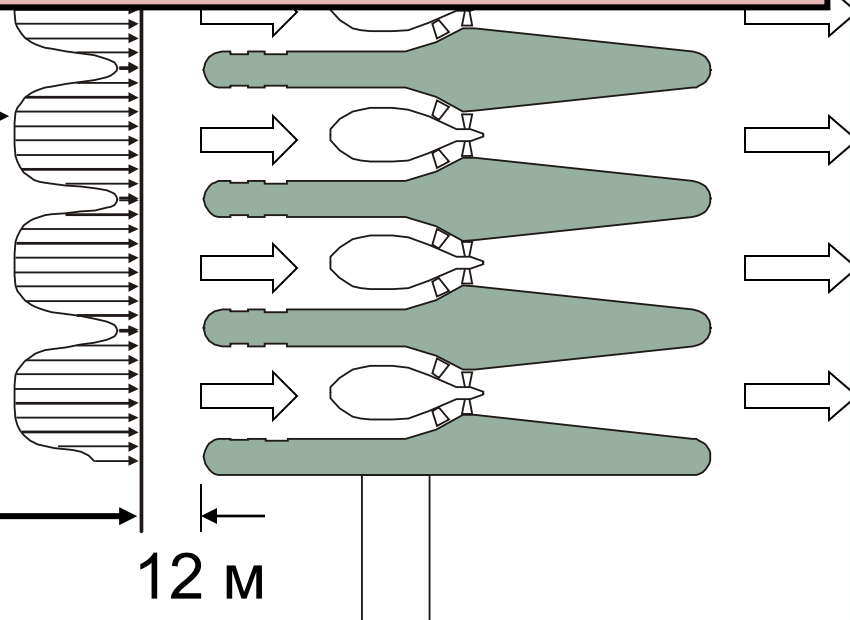
ADCSP – мери се узводно од захвата воде

ADCSP би требало искористити јер је **брз и јефтин**, али за истраживачке сврхе и као **контролно мерење!**

Да ли има других могућности за апсолутно мерење протока?

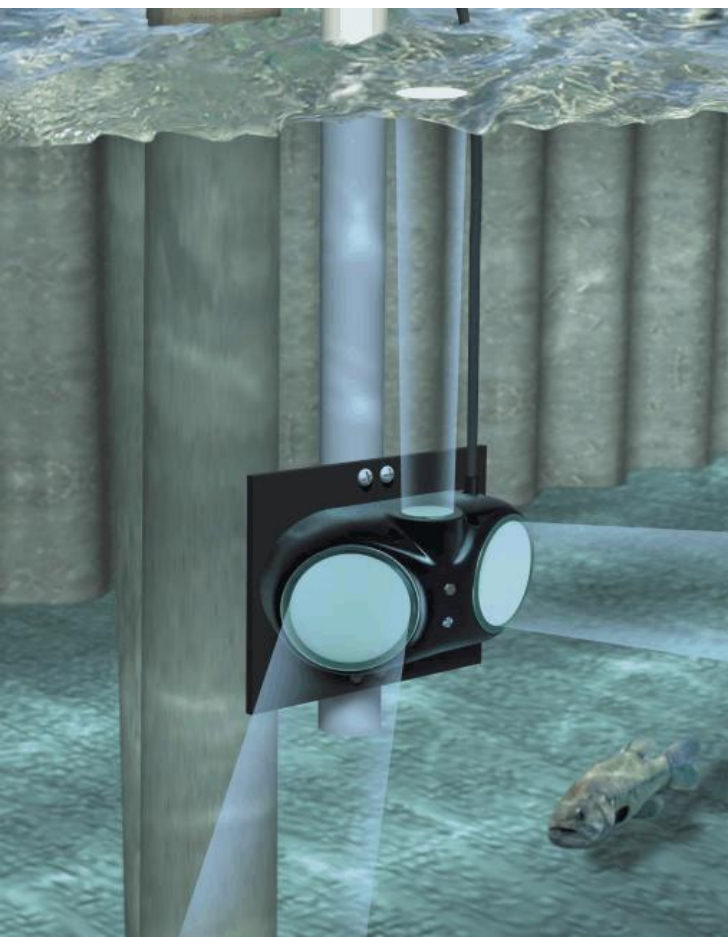
Профил брзина (3D)  
са 1% тачности

Линија кретања чамца  
са ADCSP-ом



## Хоризонтални ADCP

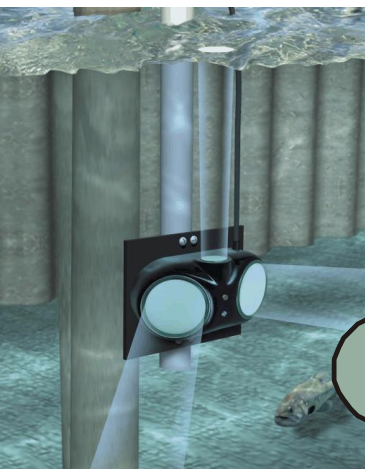
Поставља се на вертикални зид и мери  
2D брзине у хоризонталној равни



Као резултат се добија профил  
брзина у 100 – 200 пресека

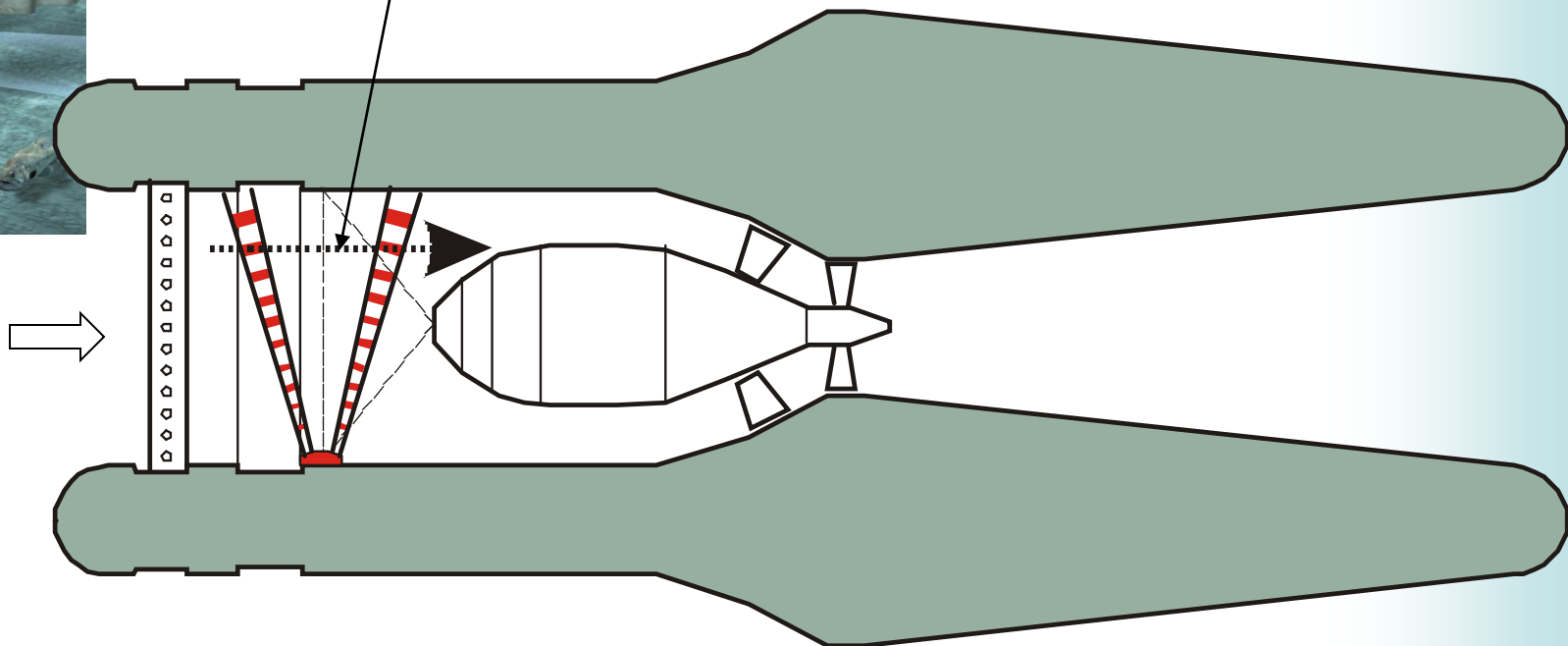
## Хоризонтални ADCP

Да ли је применљив на Ђердапу 2 ?



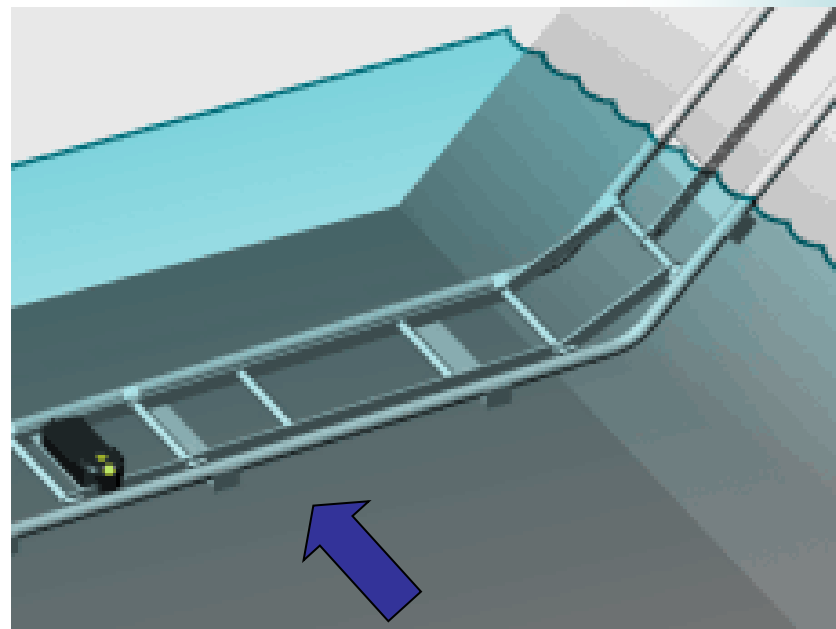
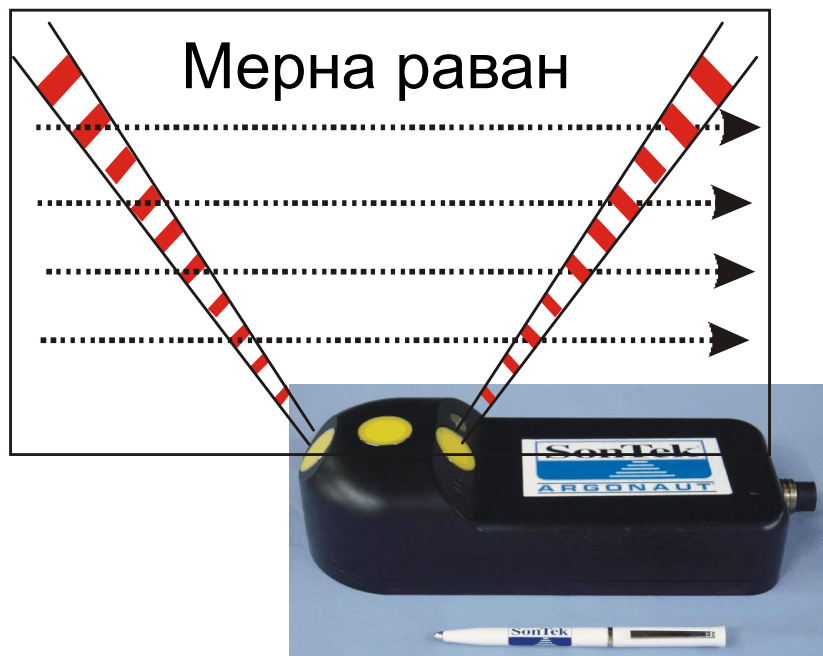
Брзина мерена на основу ове две  
ћелије **није у истоветним условима**

$\phi = 20^\circ$ , углавном је већи!



## Хоризонтални ADCP

А простор око турбине? Постоје и **мале верзије уређаја**, предвиђене за канале



## Хоризонтални ADCSP

А простор око турбине? Постоје и **мале верзије уређаја**, предвиђене за канале



Ово би још и могло да да добар резултат...

...да нема ове **вртложне компоненте!**



## Закључак:

- ADCP може да се примени али само изван самог објекта

Које су друге могућности за  
**апсолутно мерење протока?**

• Да ли се и други “муче” са овим проблемом? **К**

## Проблем мерења протока “у Срба” и у свету

Активна је група **IGHEM**:

the **I**nternational **G**roup for **H**ydraulic **E**fficiency  
**M**easurement

IGHEM је независна група стручњака који се баве мерењима хидрауличке ефикасности великих хидросистема



сајт групе IGHEM

[www.ighem.org](http://www.ighem.org)

**IGHEM** одржава сваке две године састанке са презентацијом искустава – сви радови су доступни на сајту групе:

Milano 2008

Portland 2006

Lucerne 2004

Toronto 2002

Kempten 2000

Reno 1998

Montreal 1996

Прегледом радова са **IGHEM** – а може се закључити следеће:

- И даље се хидрометријска крила користе као референтна метода
- Ултразвучна вишетрачна **Transit Time** мерила се и даље доказују у различитим условима (одобрава их и IEC 60041)
- Појављује се **ASFМ** (Acoustic Scintillation Flow Meter) метода
- Користе се и **ADVM** (Acoustic Doppler Velocity Meter) за мерење 3D брзине у тачки, кроз време
- Добар рад: Hydro2007 - Turbine flow measurement for low head plants in 21<sup>st</sup> century - Comparison Of Different Techniques

### Прегледом радова са **IGHEM** – а може се закључити следеће:

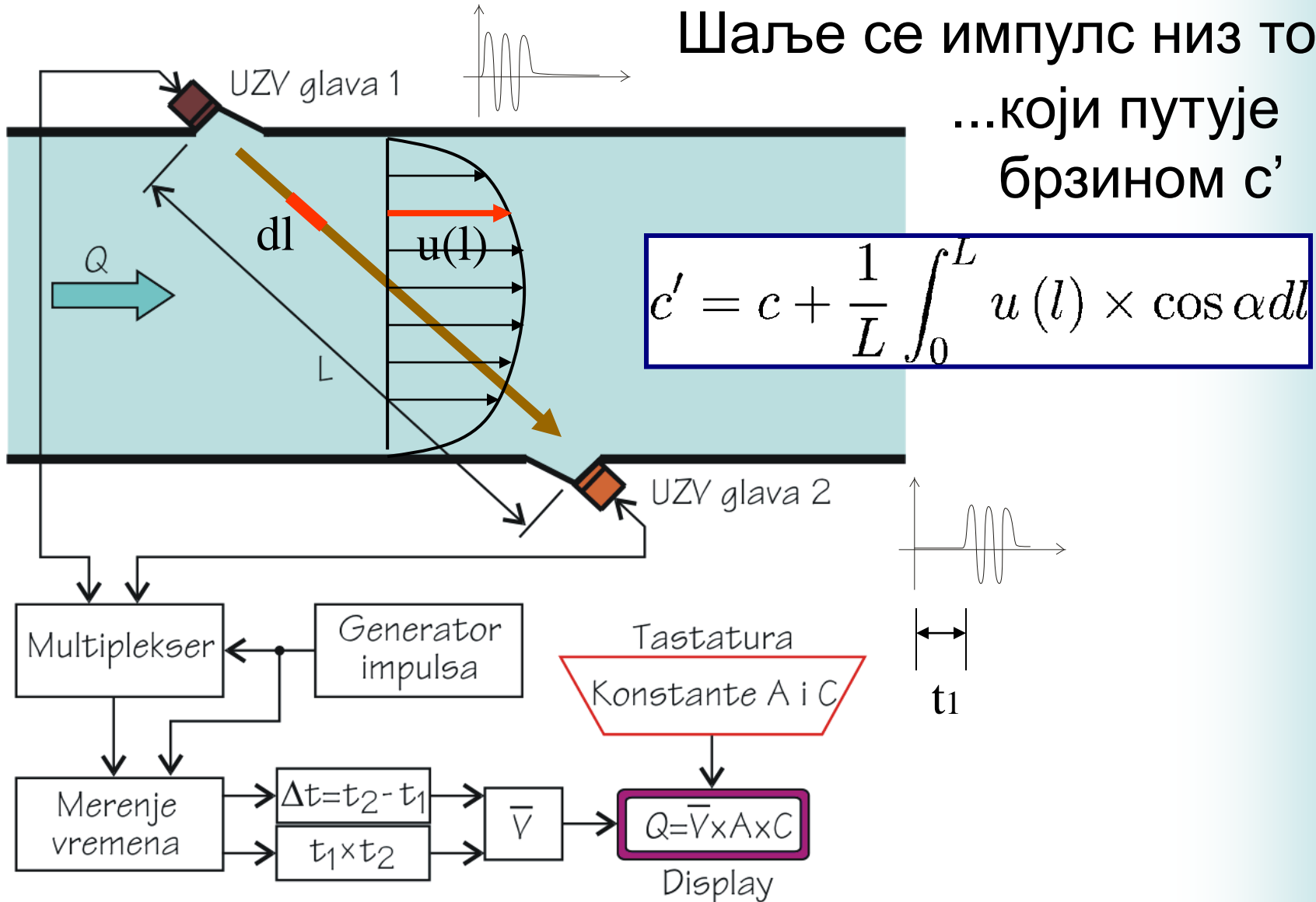
- И даље се хидрометријска крила користе као референтна метода
- Ултразвучна вишетрачна **Transit Time** мерила се и даље доказују у различитим условима (одобрава их и IEC 60041) 
- Појављује се ASFМ (Acoustic Scintillation Flow Meter) метода
- Користе се и ADVМ (Acoustic Doppler Velocity Meter) за мерење 3D брзине у тачки, кроз време
- Добар рад: Hydro2007 - Turbine flow measurement for low head plants in 21<sup>st</sup> century - Comparison Of Different Techniques



## УЗВ Transit Time метода – принцип рада

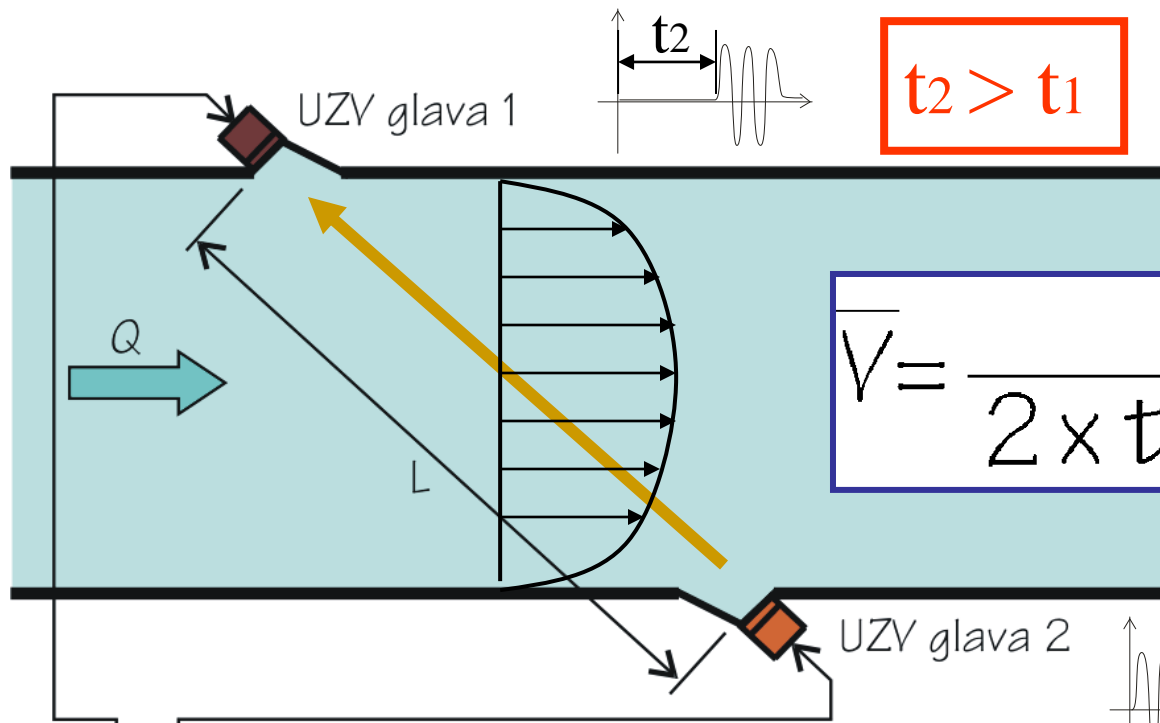
Шаље се импулс низ ток..

...који путује  
брзином  $c'$

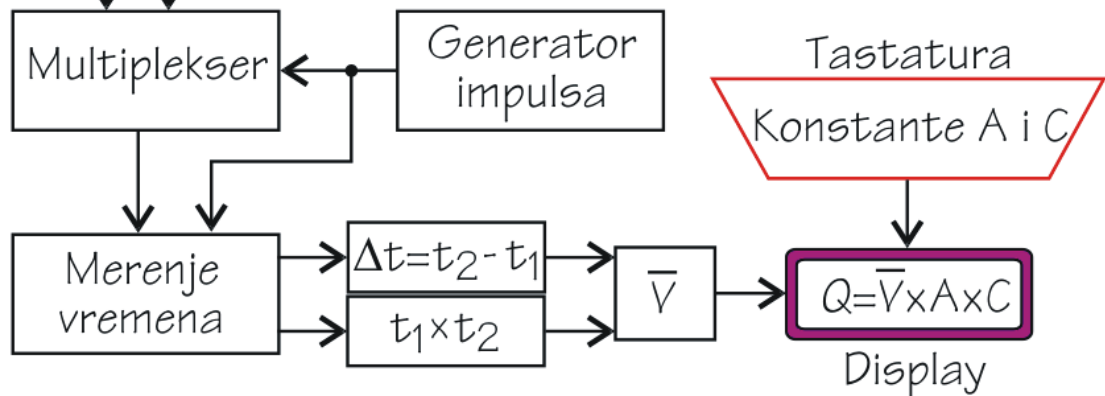
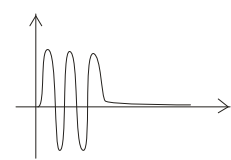


## УЗВ Transit Time метода – принцип рада

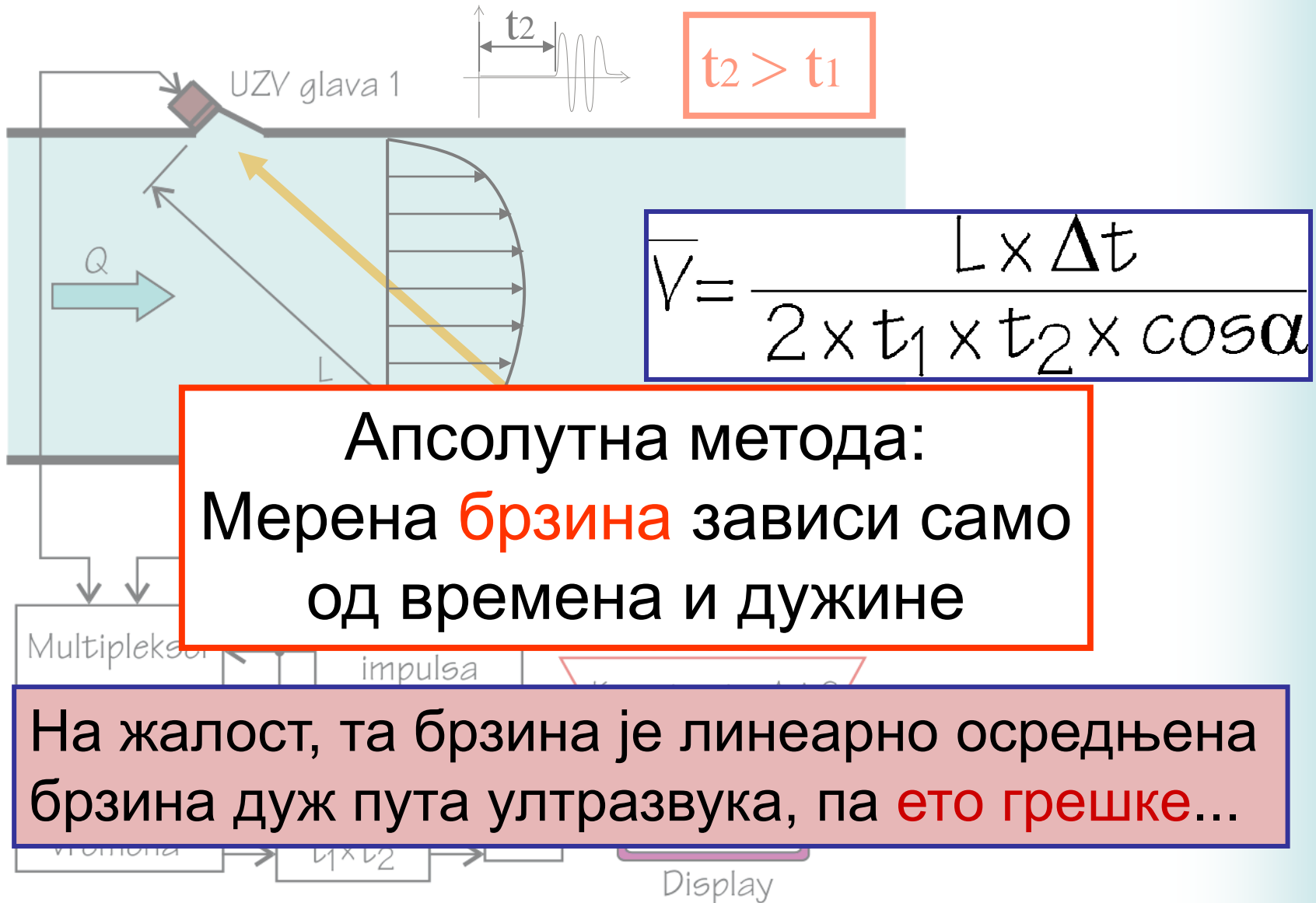
Шаље се други импулс уз ток...  
...који је спорији



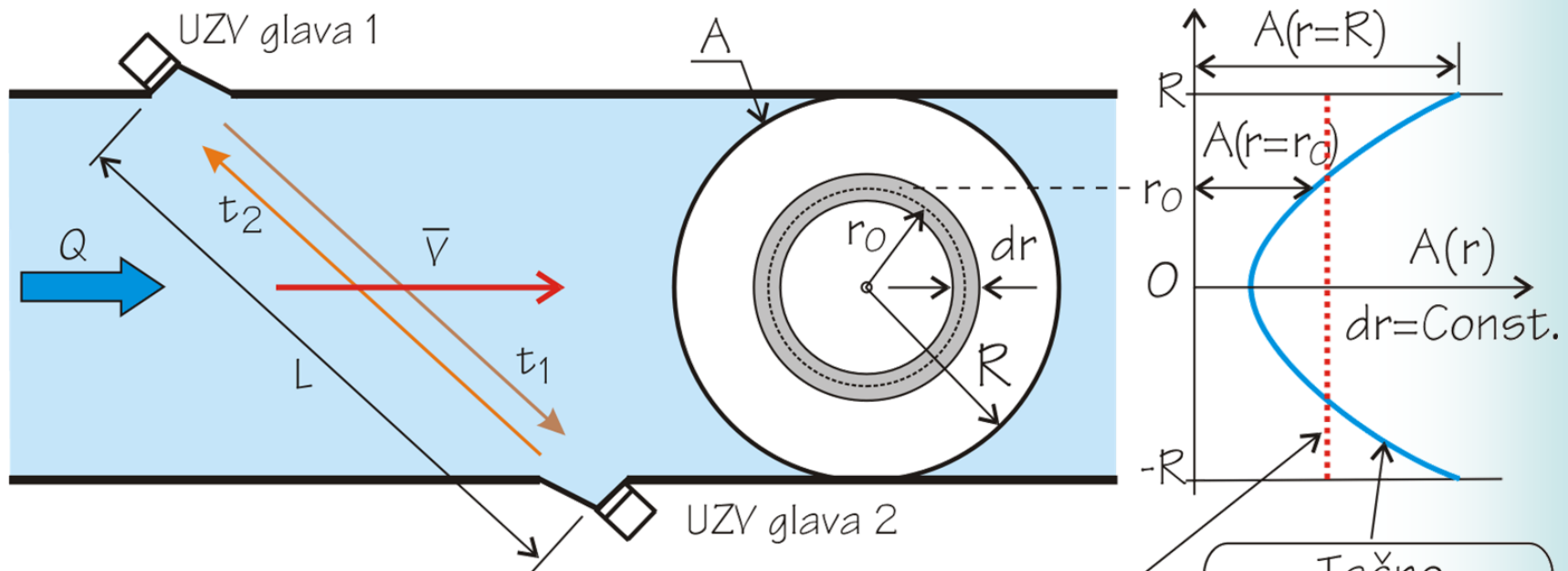
$$\bar{V} = \frac{L \times \Delta t}{2 \times t_1 \times t_2 \times \cos \alpha}$$



## УЗВ Transit Time метода – принцип рада



## УЗВ Transit Time метода – принцип рада



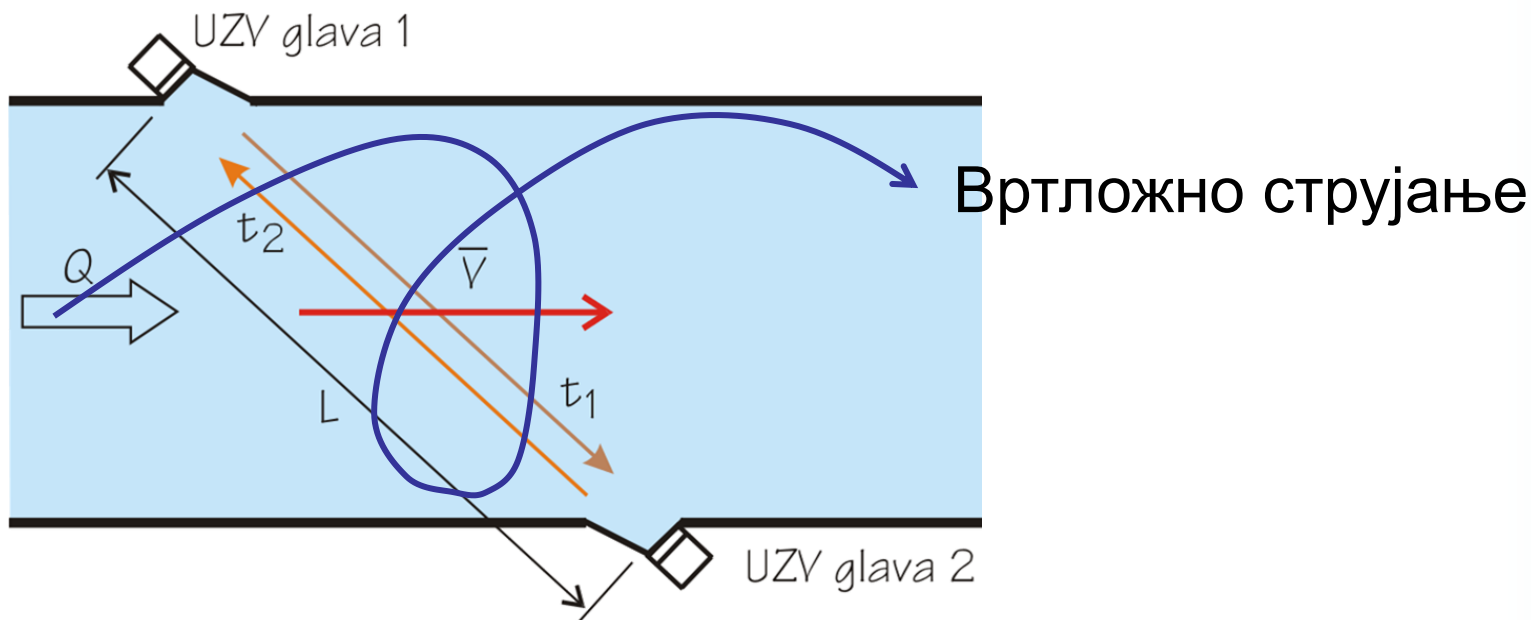
UZV ovako osrednjava (linearno!)

$$c' = c + \frac{1}{L} \int_0^L u(l) \times \cos \alpha dl$$

Tačno osrednjavanje sa promenljivim koeficijentima

Треба нам проток, а допринос брзина није исти...

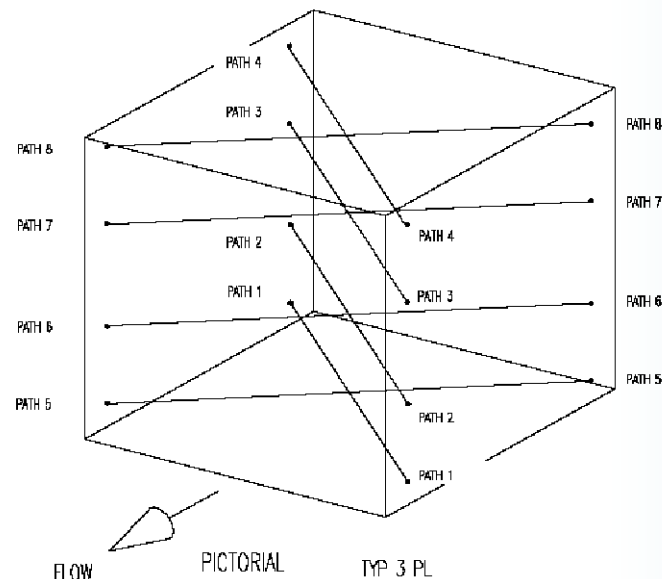
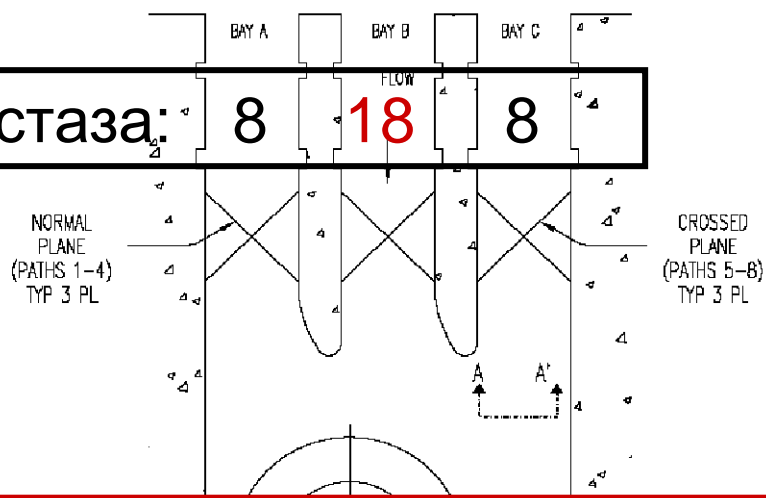
## УЗВ Transit Time метода – принцип рада



Вртложно струјање је други велики извор грешака, јер се бочна компонента брзине двоструко обрачунава у интегралу!

## УЗВ Transit Time метода – практична примена је са вишеструким “стазама”

Број стаза: 8 18 8

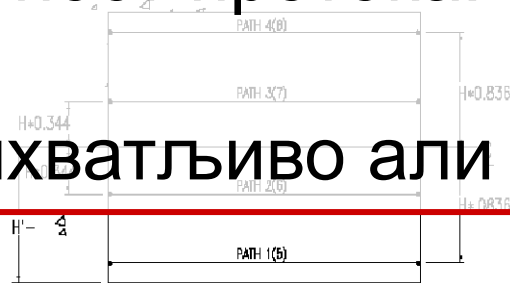


Постигнута је неодређеност протока:

• за 8 стаза: 2 %

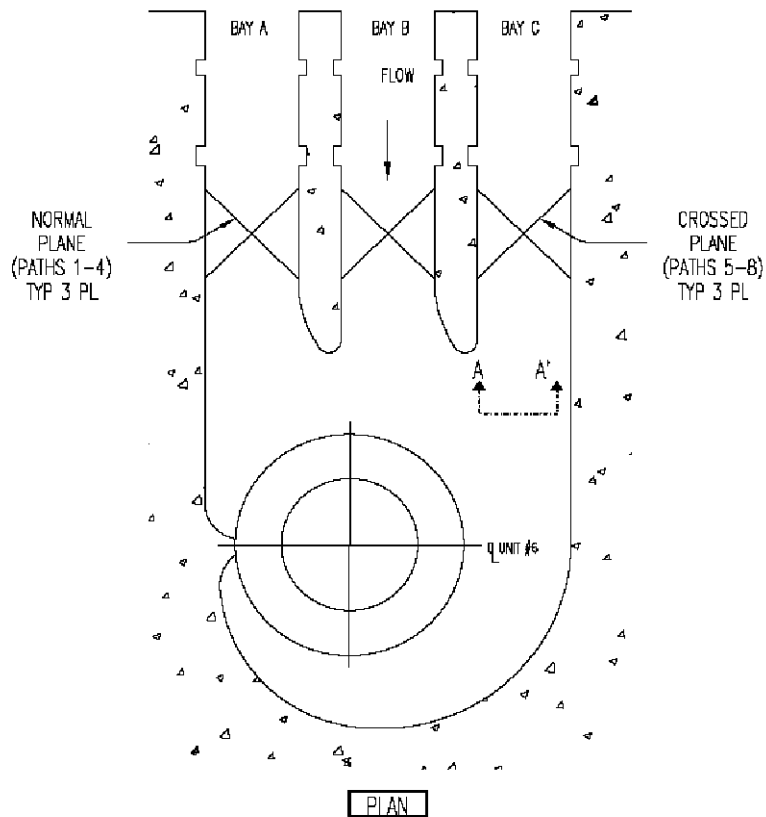
• за 18 стаза: 0.8% - прихватљиво али СКУПО!

PLAN

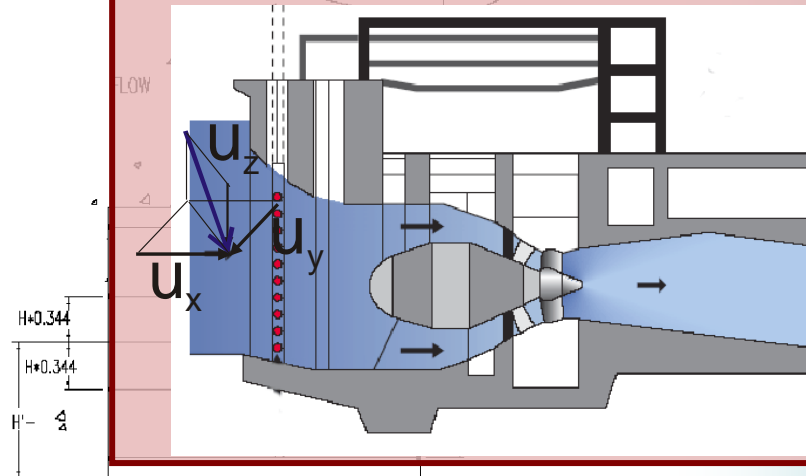




## УЗВ Transit Time метода – практична примена је са вишеструким “стазама”



Овде је још и могло да се примени. На Ђердапу 2 нема ни оволико **праве** прилазне деонице!



### Прегледом радова са **IGHEM** – а може се закључити следеће:

- И даље се хидрометријска крила користе као референтна метода
- Ултразвучна вишетрачна Transit Time мерила се и даље доказују у различитим условима (одобрава их и IEC 60041)
- Појављује се **ASFМ** (Acoustic Scintillation Flow Meter) метода 
- Користе се и ADVМ (Acoustic Doppler Velocity Meter) за мерење 3D брзине у тачки, кроз време
- Добар рад: Hydro2007 - Turbine flow measurement for low head plants in 21<sup>st</sup> century - Comparison Of Different Techniques

# ASFM - Acoustic **Scintillation drift** Flow Meter

Acoustic scintillation drift је техника мерења брзине воде у развијеној турбуленцији, где се користе

турбулентни

вртлози као

“маркери” а

мери се њихов

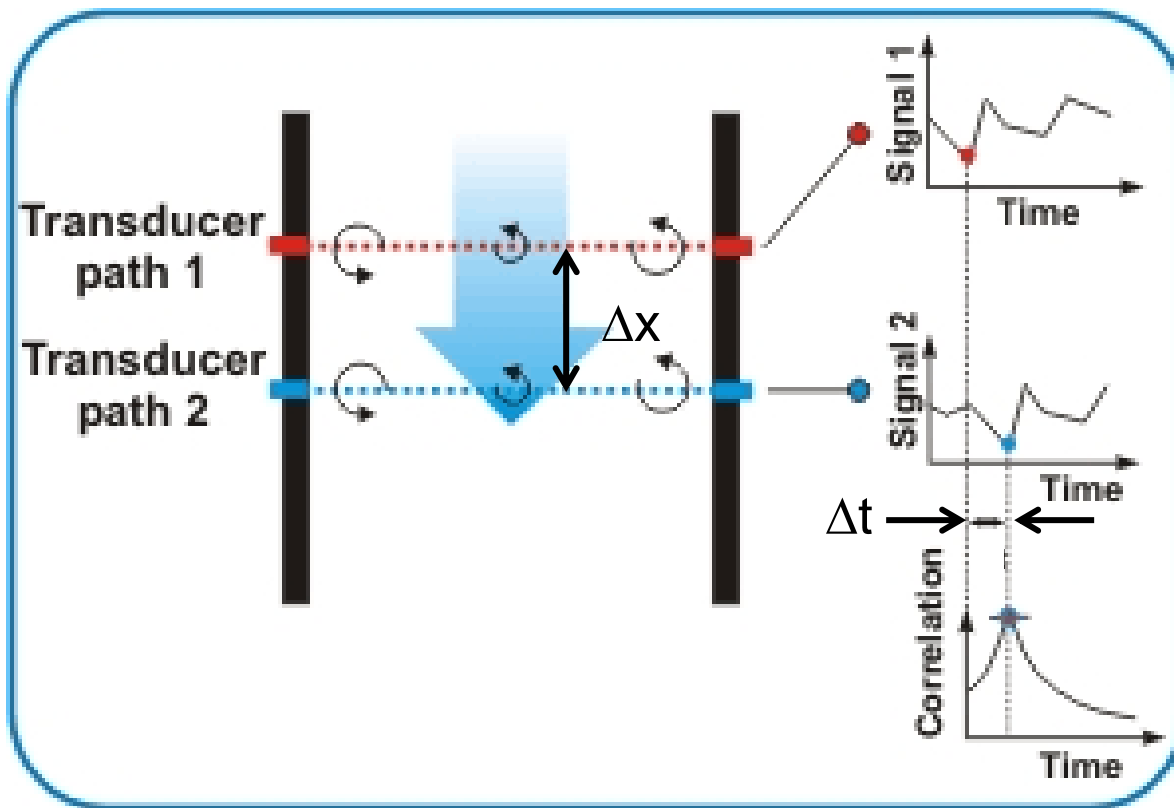
утицај на

кретање

ултразвучних

импулса кроз

воду



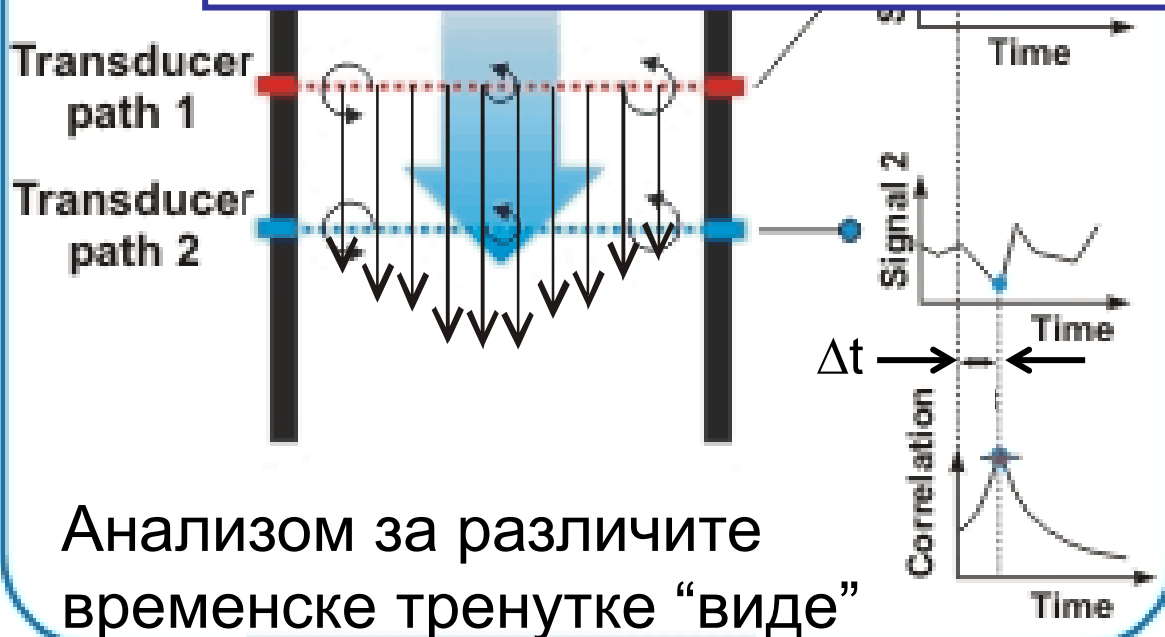
# ASFM - Acoustic Scintillation drift Flow Meter

Acoustic scintillation drift је техника мерења брзине воде у развијеној турбуленцији, где се користе

Произвођач и инжењеринг:

[ASL AQFlow Inc.](#), Канада

[Видео презентација ...](#)



маркери а  
мери се њихов  
утицај на  
кретање  
ултразвучних  
импулса кроз  
воду

Анализом за различите  
временске тренутке “виде”

се брзине у сваком од “slotova” – добија се распоред брзина

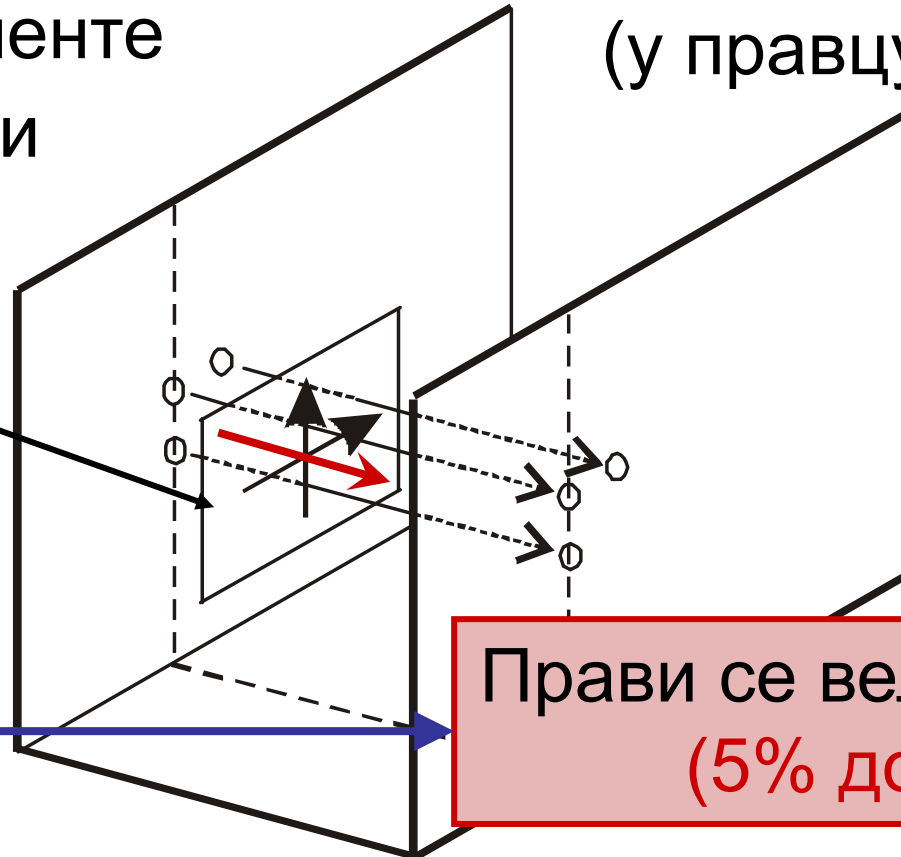
# ASFM - Acoustic **Scintillation drift** Flow Meter

Постављањем **три**  
**примопредајника** мере  
се две компоненте  
брзине у равни  
управној  
на УЗВ

класа  
тачности

1 – 2%

Али шта ако постоји  
значајна **трећа**  
**компонента брзине**  
(у правцу УЗВ-а)?

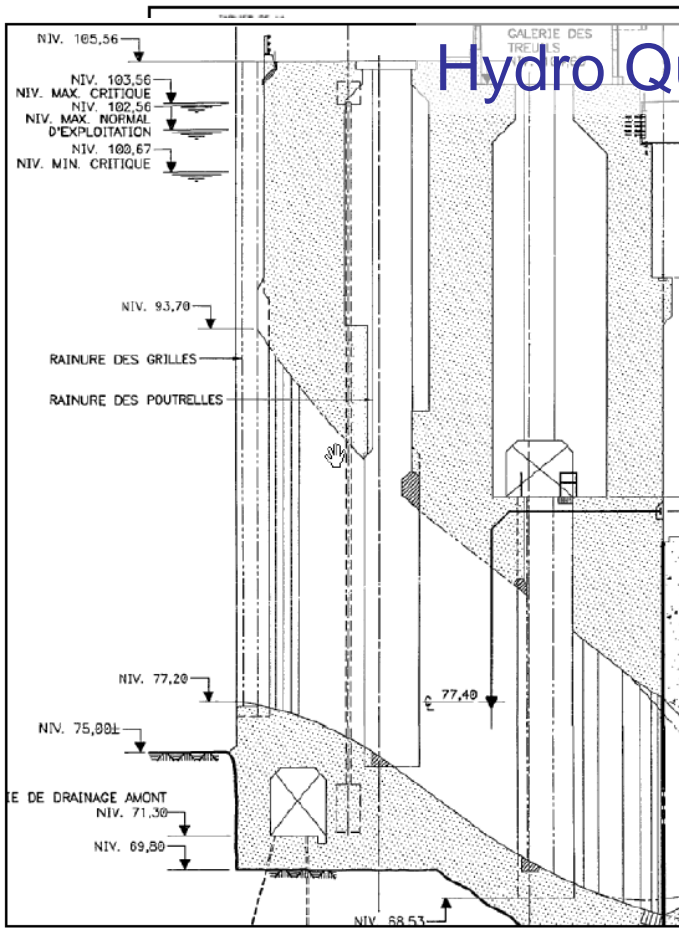


Прави се велика грешка  
(5% до 20%)

## ASFМ – Доста примера у литератури

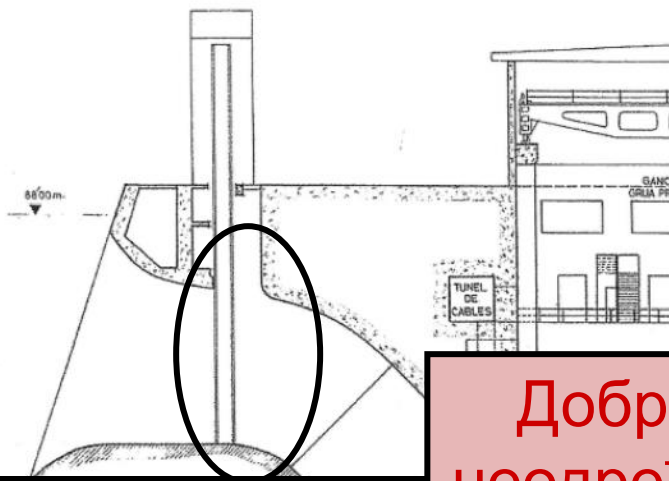
Провера мерне несигурности поређењем са крилима  
(често се користи метода покретних рамова)

Hydro Quebec – Rocher-de-Grand-Mere (2008)





## ASFМ – Доста примера у литератури

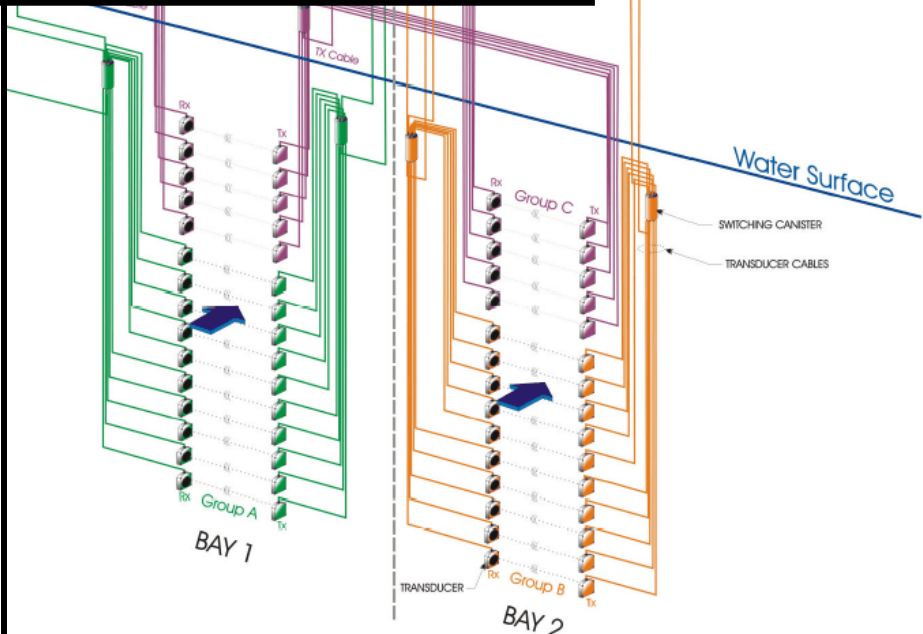
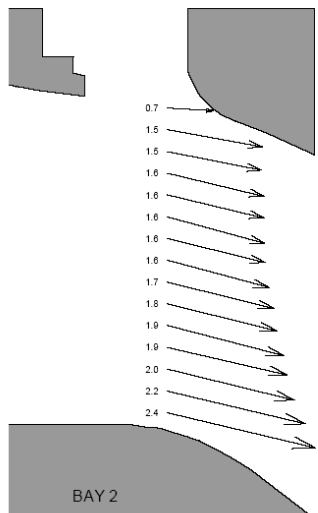
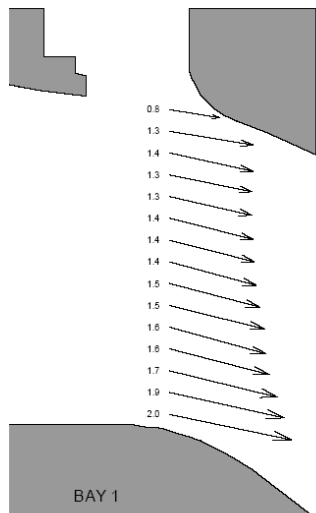


Добри услови за мерење,  
неодређеност протока је **0.5%**

Castrelo - Unit 1 - 52MW - con10

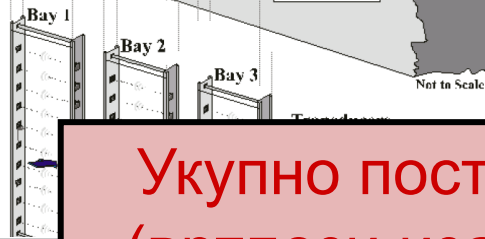
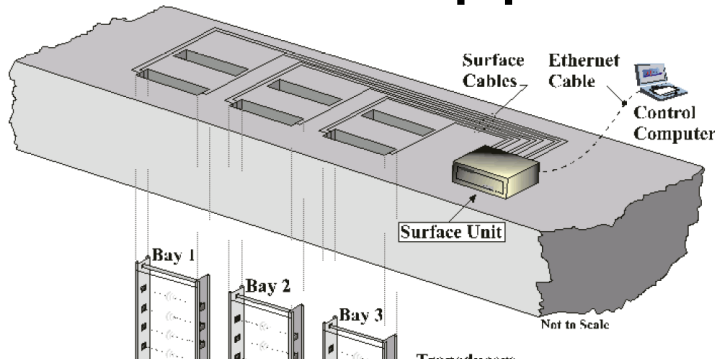
Union Fenosa - Castrelo Dam - Unit 1 - Test 10 - 52MW

Oct.13,2007 - 12:17



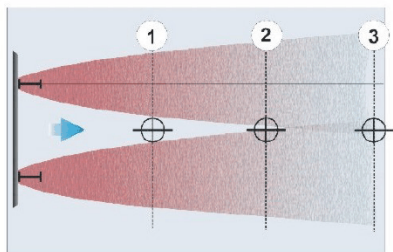
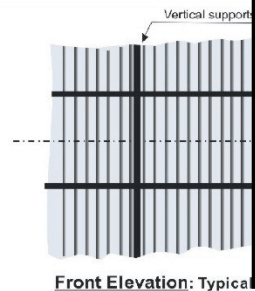
## ASFМ – Доста примера у литератури

Lower Granite Dam  
Columbia River

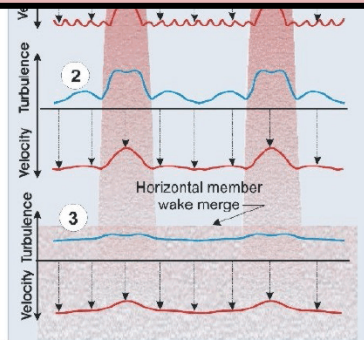


Укупно постигнута неодређеност протока 1%  
(вртлози иза решетака не прате баш ток воде)

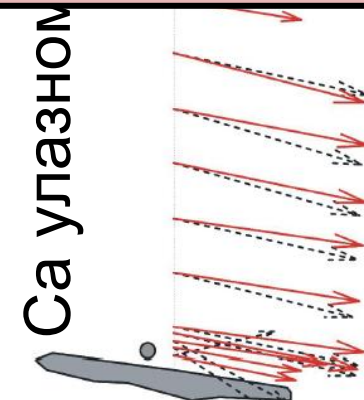
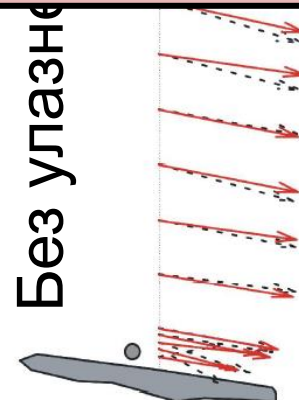
Након корекција услед утицаја решетки проток је повећан а неодређеност је пала на **0.5%**



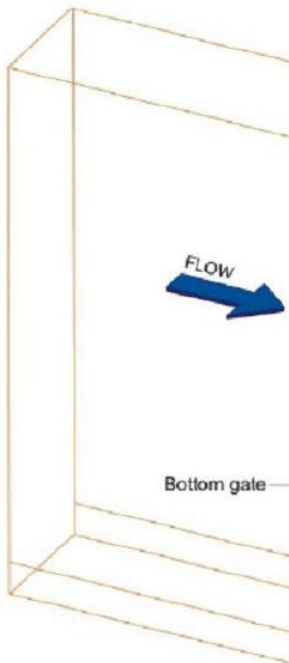
Side Elevation: Horizontal member wakes. ASFМ measurement planes shown at three locations. ③ is downstream of the wake merging distance.




Plan View: Vertical member wakes with Turbulence and Velocity distributions. Bias Levels: ① High, ② Medium, ③ Negligible.



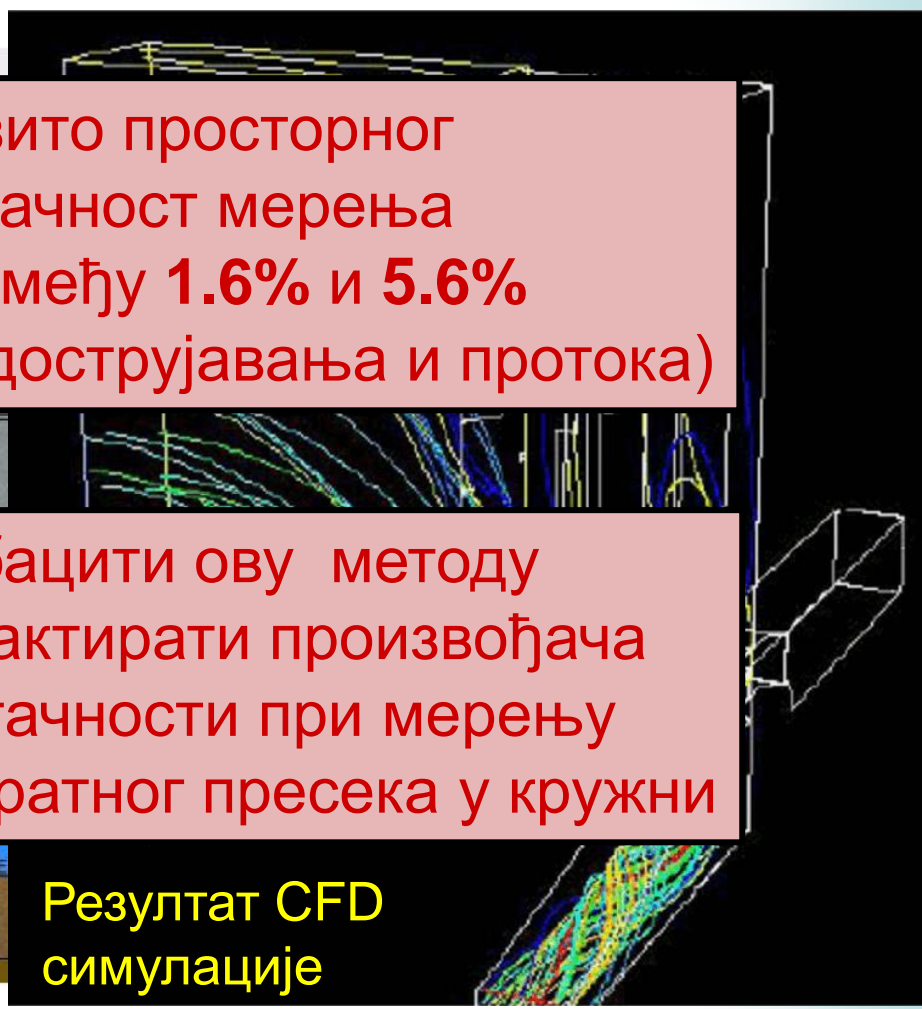
# ASFМ – Изгледа као идеална метода Али шта се догађа при косом струјању?



Због изразито просторног струјања тачност мерења протока је између **1.6%** и **5.6%** (зависи од услова дострујавања и протока)



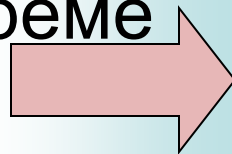
Не треба одбацити ову методу  
Требало би контактирати произвођача да да процену тачности при мерењу на прелазу из квадратног пресека у кружни



Резултат CFD симулације

### Прегледом радова са **IGHEM** – а може се закључити следеће:

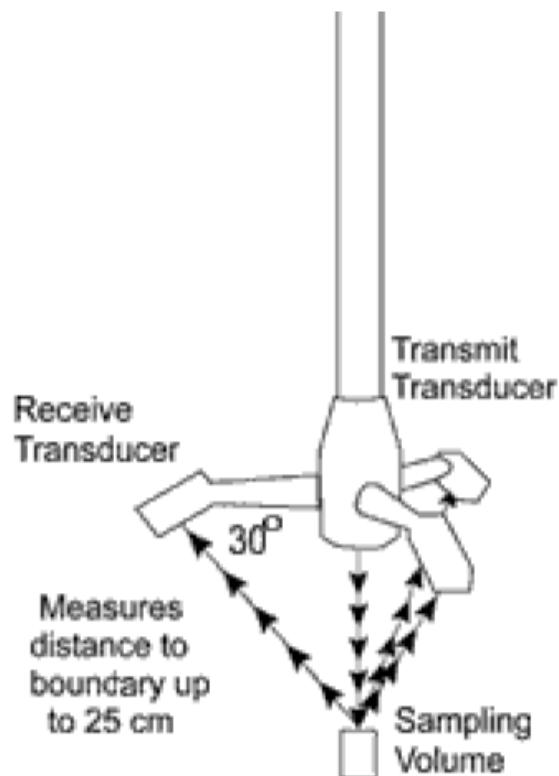
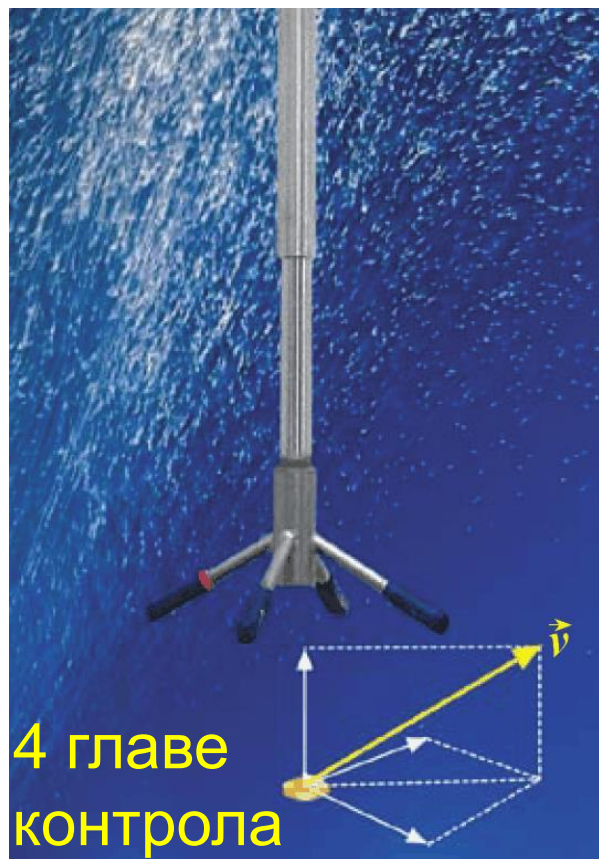
- И даље се хидрометријска крила користе као референтна метода
- Ултразвучна вишетрачна Transit Time мерила се и даље доказују у различитим условима (одобрава их и IEC 60041)
- Појављује се ASFМ (Acoustic Scintillation Flow Meter) метода
- Користе се и **ADVМ** (Acoustic Doppler Velocity Meter) за мерење 3D брзине у тачки, кроз време
- Добар рад: Hydro2007 - Turbine flow measurement for low head plants in 21<sup>st</sup> century - Comparison Of Different Techniques



## ADVM Acoustic Doppler Velocity Meter

Мерење 3D брзине у тачки, кроз време

Користи Доплер методу – нема калибрације



Down looking теренска



Side looking лаборатор.



## ADVM Acoustic Doppler Velocity Meter

Може се користити уместо хидрометријских крила али је прескупо да се постави 200 ADVM-ова!



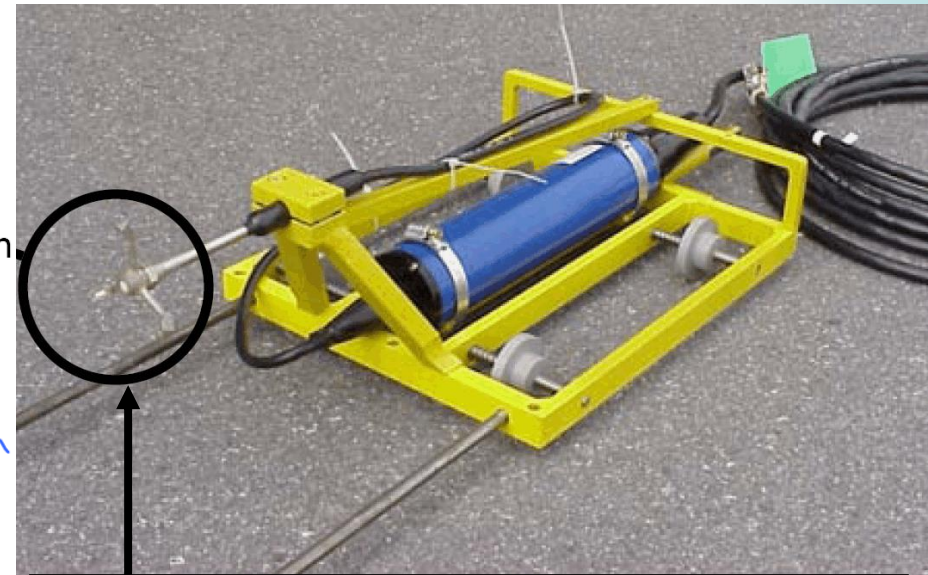
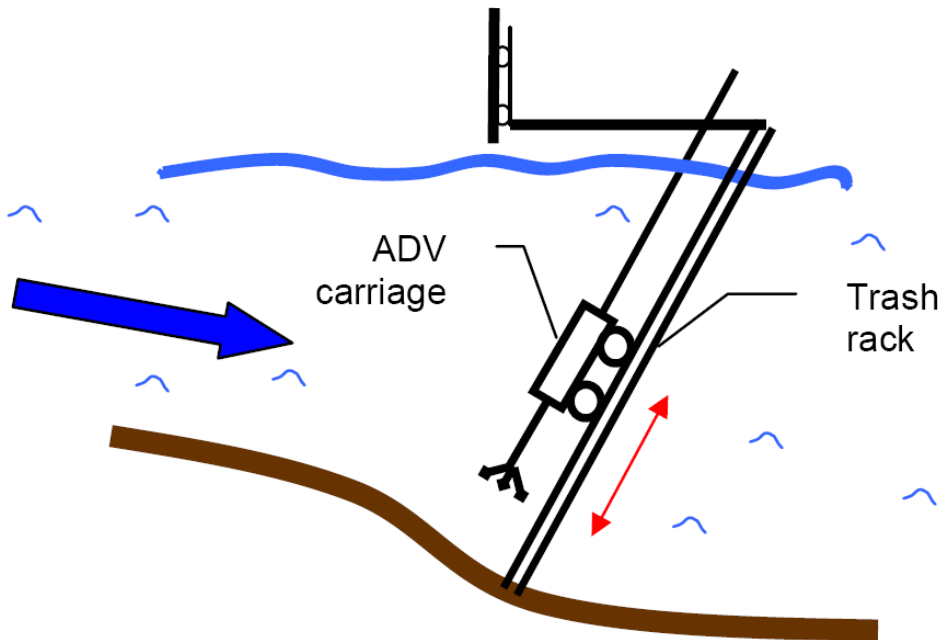
Рам са  
крилима



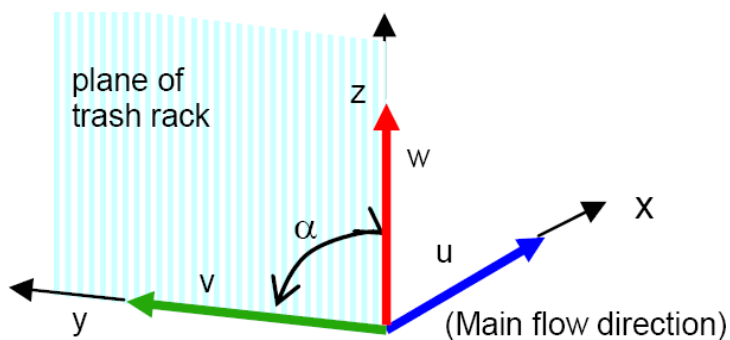
Рам са ADVM сензорима  
Фотомонтажа!

Могуће решење:  
поставити мањи број  
сензора на покретни  
рам који се спушта  
дуж мерног профила  
(за Ђердап 2 би то  
било  $2 \times 14 = 28$  ком)

# ADVМ – Пример мерења протока узводно од решетке: Emmenweid, Lucerne



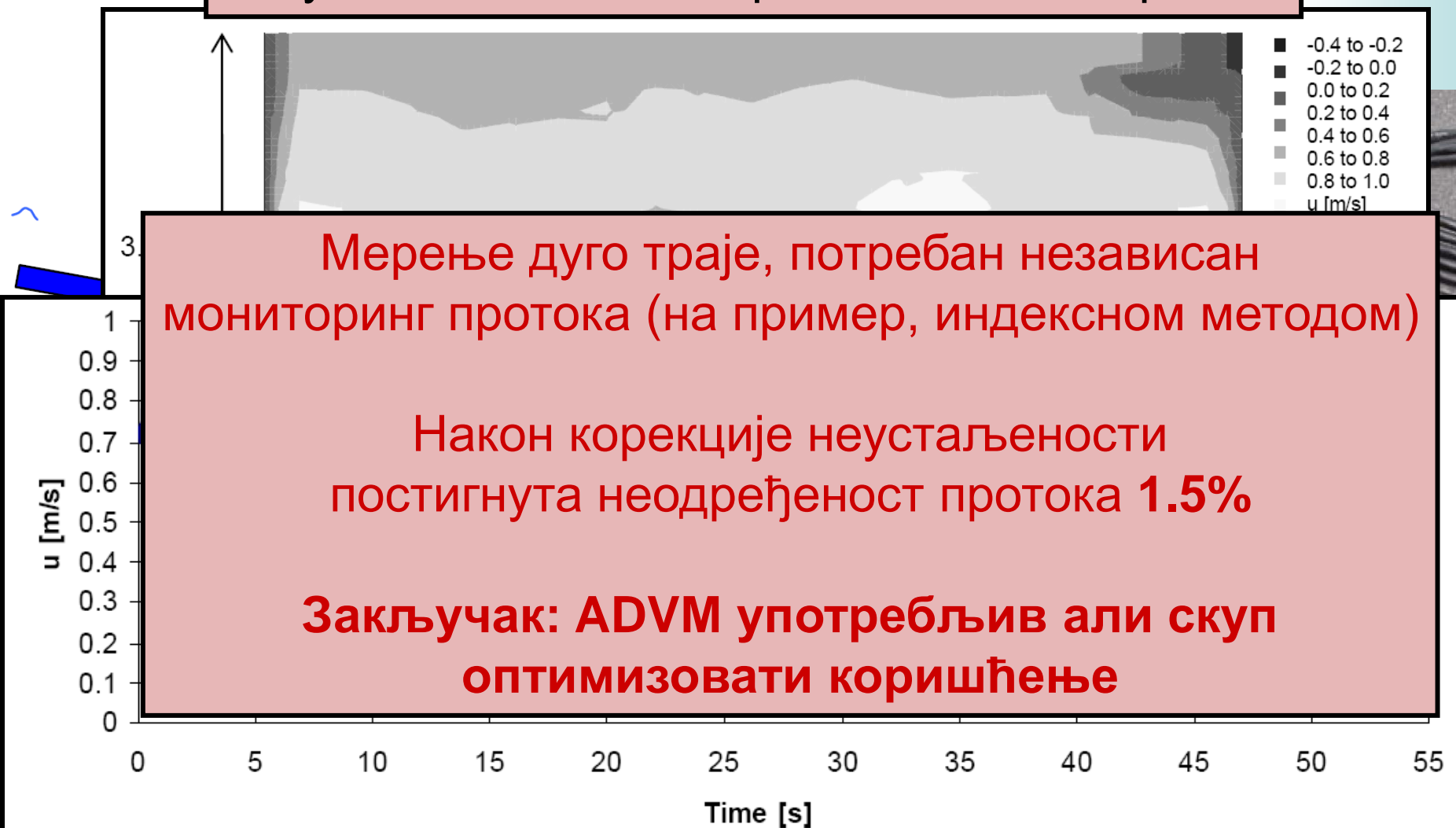
ADVМ резолуције 0.1 mm/s



ADVМ се спушта полако низ решетку, па се затим помера хоризонтално на другу позицију

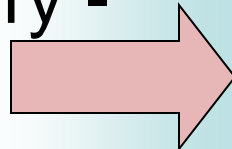
## ADVM – Пример мерења протока узводно

Резултати: Поље све три компоненте брзина



### Прегледом радова са **IGHEM** – а може се закључити следеће:

- И даље се хидрометријска крила користе као референтна метода
- Ултразвучна вишетрачна Transit Time мерила се и даље доказују у различитим условима (одобрава их и IEC 60041)
- Појављује се ASFМ (Acoustic Scintillation Flow Meter) метода
- Користе се и ADVМ (Acoustic Doppler Velocity Meter) за мерење 3D брзине у тачки, кроз време
- Добар рад: Hydro2007 - Turbine flow measurement for low head plants in 21<sup>st</sup> century - Comparison Of Different Techniques



# Turbine flow measurement for low head plants

## Comparison Of Different Techniques

	Current-meters on stationary supports	Acoustic scintillation on stationary frames	Current-meters/acoustic scintillation on moving frames	Acoustic time-of-flight on intake walls	Acoustic scintillation on intake walls
Require intake dewatering/rewatering	yes	no	no/no	yes	yes
Flow obstruction/debris impact vulnerability	yes	no	yes/no	no	no
Portable between intakes	no	yes	yes/yes	no	no
Suitable for continuous monitoring	no	limited	no/no	yes	yes
Suitable for very short intakes	yes	yes	yes	limited	yes
Mechanical maintenance required	yes	no	yes/no	no	no
Code approved for short intakes	not yet	not yet	not yet	not yet	not yet
Downtime	very high	low	very low	very high	very high
Relative cost	high	medium	low	high	high



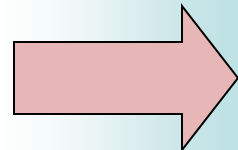
## Преглед мерних метода

Поред:

- хидрометријских крила (**калибрација, угао**), и
- ултразвучних метода (**апсолутне методе**)

постоје и:

- Pitot сонде (**мале брзине!**)
- Трасерске методе (**велики проток на Ђердапу!**)
- Електромагнетне сонде - **Шта је ово? Да ли може да помогне?**



# Електромагнетна (ЕМ) сонда за брзине (слично као ЕМ мерач протока у цеви)

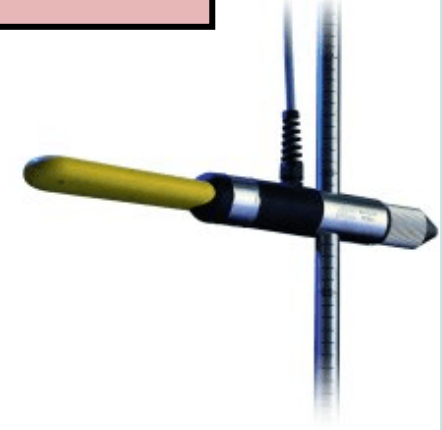
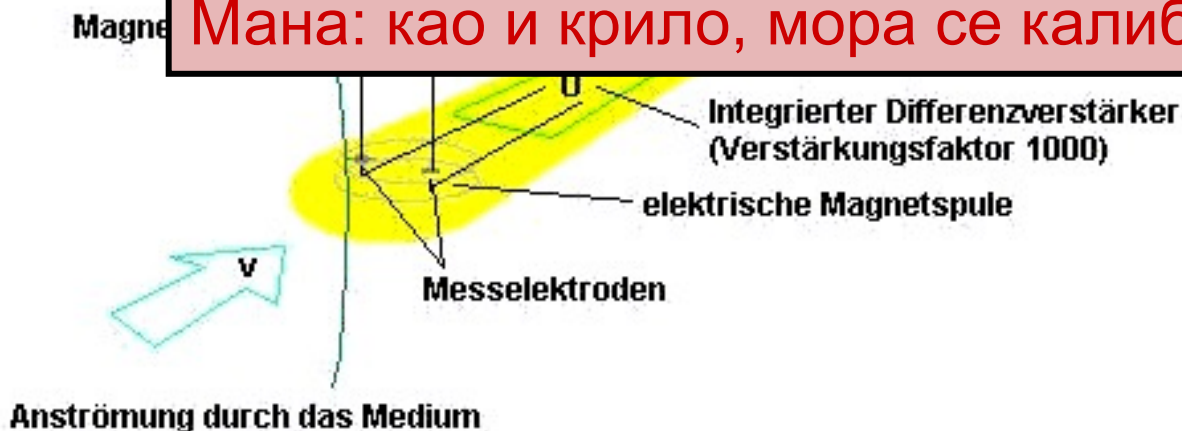
Већ дуже време се користи у хидрометрији

Ради на Фарадејевом принципу индукције

$$U = B * L * v$$

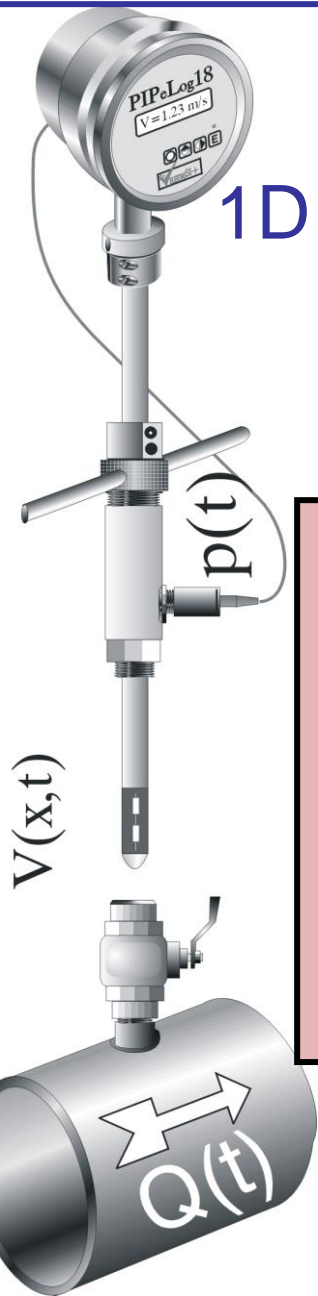
Важно: мери се стварна брзина  
воде а не делића, вртлога  
или нечег трећег!

Мана: као и крило, мора се калибрисати



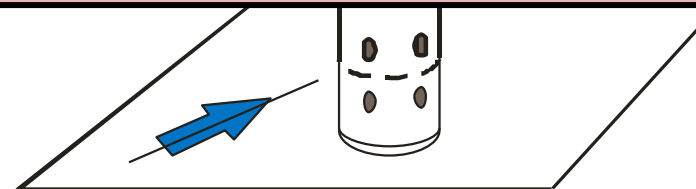
## ЕМ сонда за брзине

1D протокометријска сонда      2D сонда



Добра вест:  
Домаћи произвођач па је могуће  
прилагођавање потребама корисника

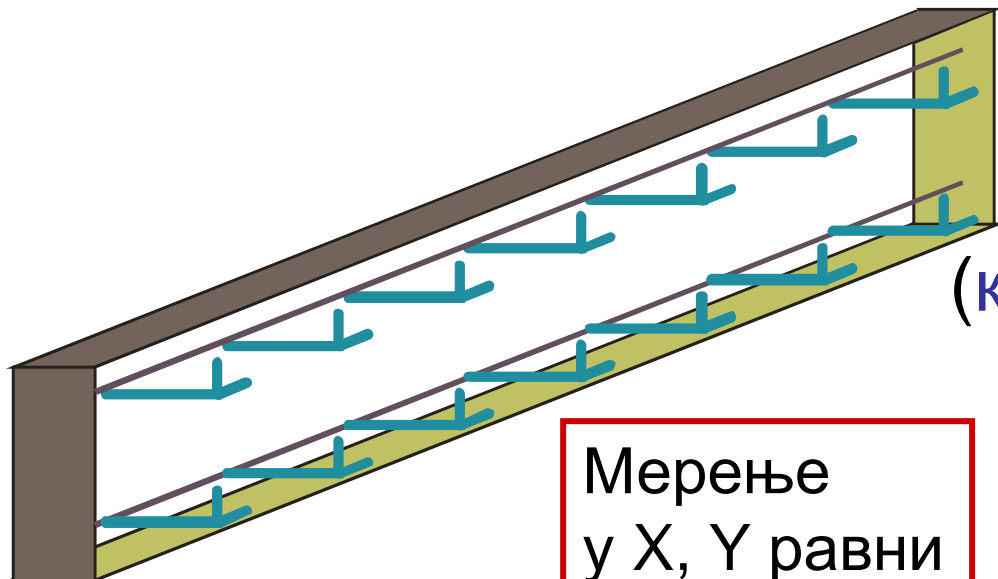
Лоша вест:  
ИЕС 60041 не спомиње ЕМ сонде  
(мада могу да се “провуку” као ЕМ крила)



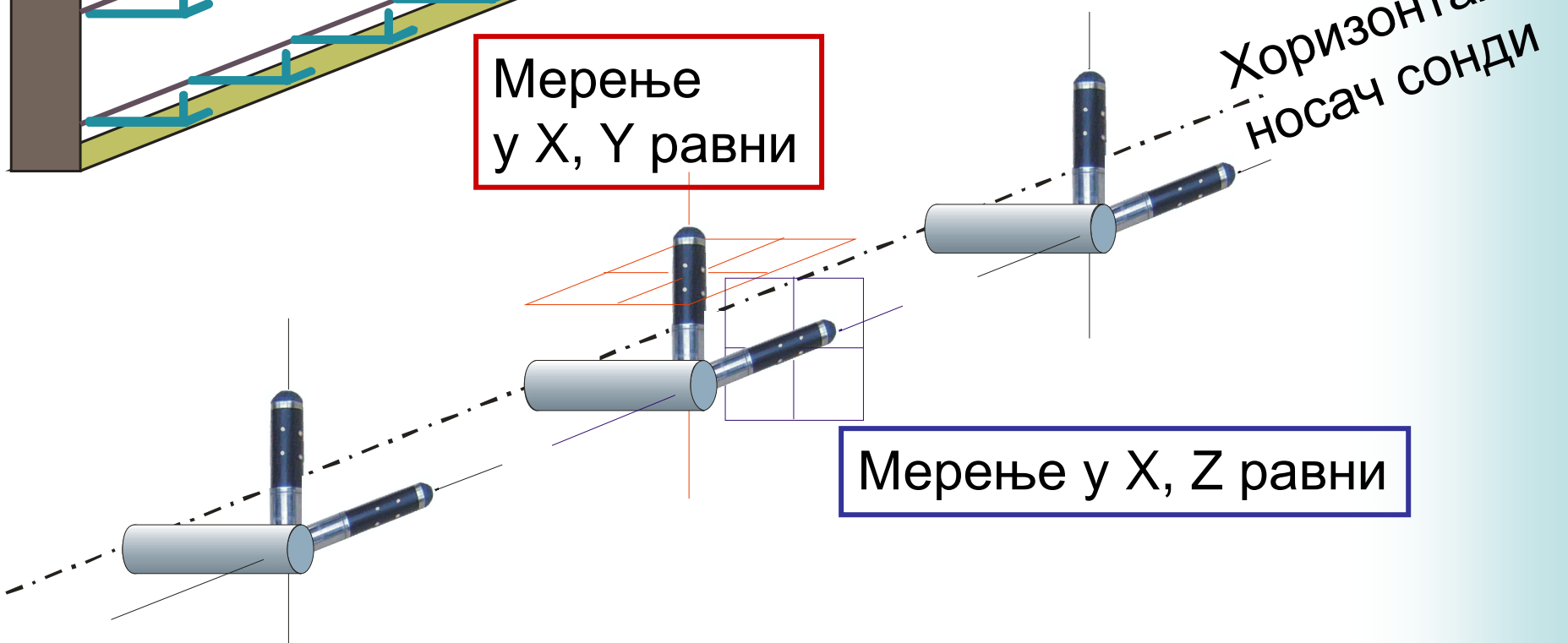
## ЕМ сонда за брзине

Могућа монтажа у покретном раму

(комбинација са ADVM?)



Мерење у X, Y равни

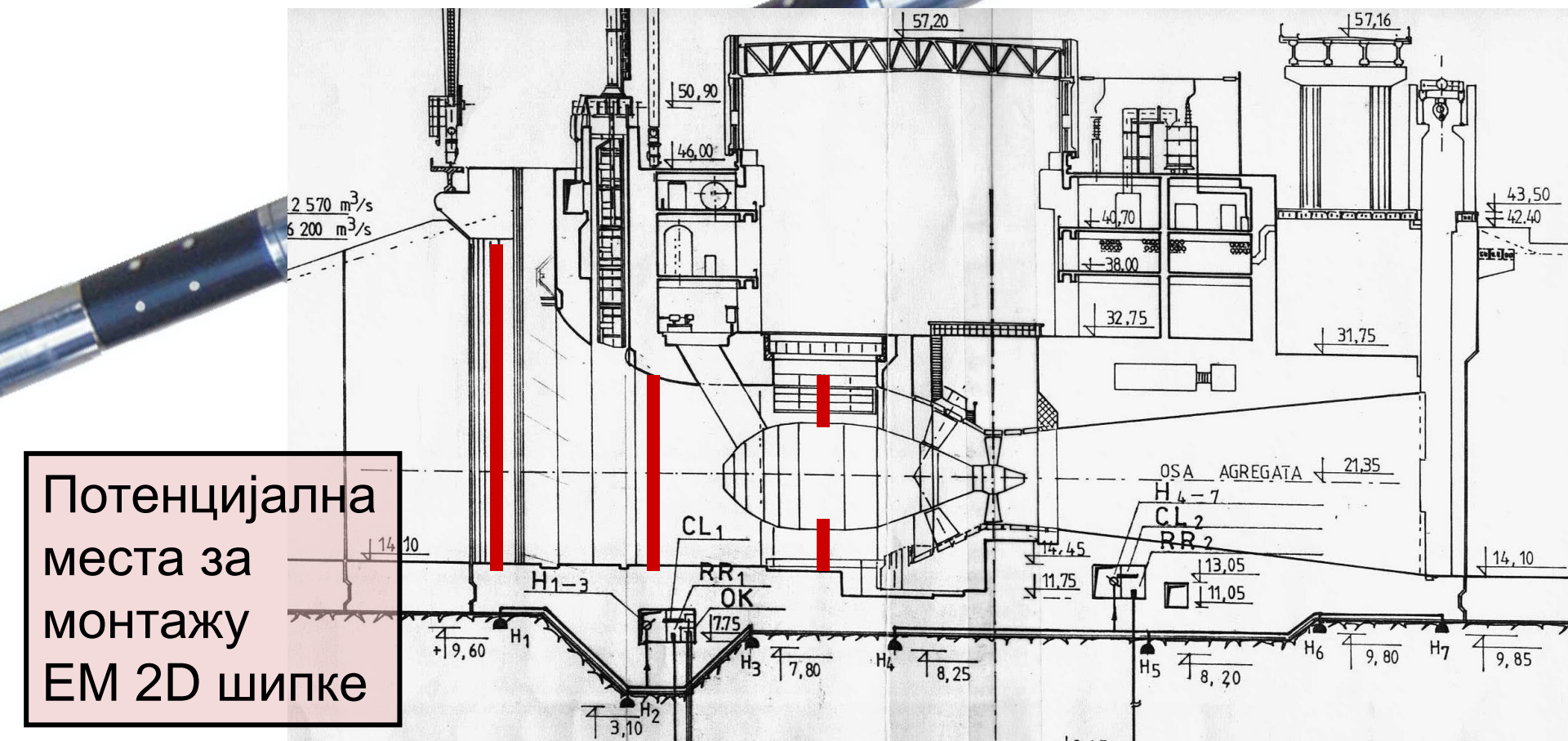


Мерење у X, Z равни

# Методе мерења протока на ХЕ Ђердап 2

## ЕМ сонда за брзине

Или у виду дугачке шипке  
са више 2D сензора



## ЕМ сонда за брзине

Или као решетка  
са низом 2D сензора,

(згодно за монтажу

испр

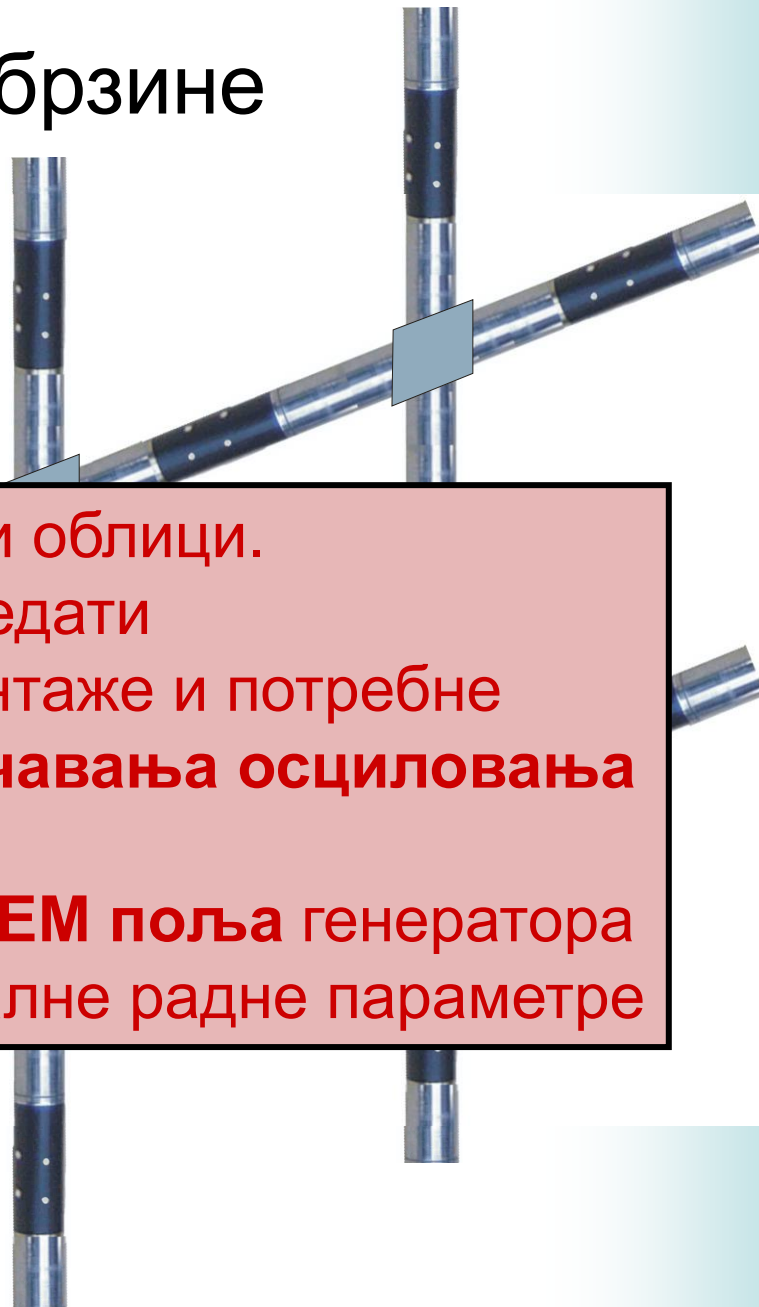
под

Могући су разни облици.

Треба сагледати

реалне могућности монтаже и потребне  
димензије сонди због **спречавања осциловања**

Такође, **проверити утицај ЕМ поља генератора**  
на рад сонди – наћи оптималне радне параметре





### ЗАКЉУЧАК – Технички могућа решења

1. ADCP испред решетке – контролно
2. ASFM код турбине – ради са 2D, не затвара профил, тешка монтажа, нестандартно па произвођач мора да да решење, велики опсег брзина
3. ASFM низводно од брзог затварача – могло би, произвођач да да процену грешке мерења
4. Батерија ADVM и EM испред решетке – питање је да ли може да се монтира, систем за покретање, индексна метода за контролу
5. EM сонде низводно од брзог затварача – пуно сонди, 2x2D конфигурација
6. Решетка EM сонди монтирана испред решетке – пакети који се монтирају под водом директно на решетку
7. Размотрити постављање неколико EM 2D сонди око генератора – кроз генератор?

### ЗАКЉУЧАК - Прихватљива решења

1. Због чега се мери проток – потребна тачност
2. Да ли је метода призната од стране ИЕС-а
3. Да ли ће се признати нека друга метода (ADVМ, ЕМ сонде, признавање калибрације ЕМ сонди..)
4. Где се мери – да ли се жели видети и вихорно струјање око генератора, да ли се жели видети под којим условима вода долази на решетке или се очекује само што тачнији проток

Од ових одговора у многоме зависи које од техничких решења је прихватљиво



# Преглед метода за мерење протока на ХЕ Ђердап 2

В.Проф. Душан Продановић  
Грађевински факултет Београд

Захваљујем се на пажњи

