

# Krožni cevni lok kot merilnik pretoka zraka

Patricija KOŠUTA ROBBA, Jože KUTIN, Ivan BAJSIĆ

**Izvleček:** V prispevku je predstavljena možnost uporabe kolenskega krožnega cevnega loka za merjenje pretoka zraka. Fizikalno teoretično izhodišče za popis delovanja kolenskega merilnika pretoka temelji na teoriji prostega vrtinca. Meritve so bile opravljene s tremi krožnimi cevnimi loki, ki so se geometrijsko razlikovali glede na radij ukrivljenosti loka in lego odjemov statičnega tlaka. Rezultati meritev z opredeljeno analizo merilne negotovosti kažejo na dobro ujemanje s teoretičnimi napovedmi.

**Ključne besede:** kolenski merilnik pretoka, krožni cevni lok, prosti vrtinec, merilna negotovost

## 1 Uvod

Kolenski merilnik pretoka oz. krožni cevni lok (v nadaljevanju KC-L) sodi med merilnike, ki kot izhodni signal v odvisnosti od pretoka tekočine ustvarjajo razliko statičnega tlaka. Primarni zaznavalni element je kro-

žni cevni lok, skozi katerega teče merjeni tok tekočine, na zunanjem in notranjem obodu pa so izvedeni odjemi statičnega tlaka. *Slika 1* prikazuje primer 90-stopinjskega krožnega cevnega loka s tlačnimi odjemi pod kotom  $\theta_n = \theta_z = 45^\circ$  glede na vstopni prečni presek. Pomembno geometrijsko lastnost krožnega cevnega loka predstavljata še notranji premer cevi  $D$  in srednji radij ukrivljenosti kolena  $R$  oz. njuno razmerje  $R/D$ .

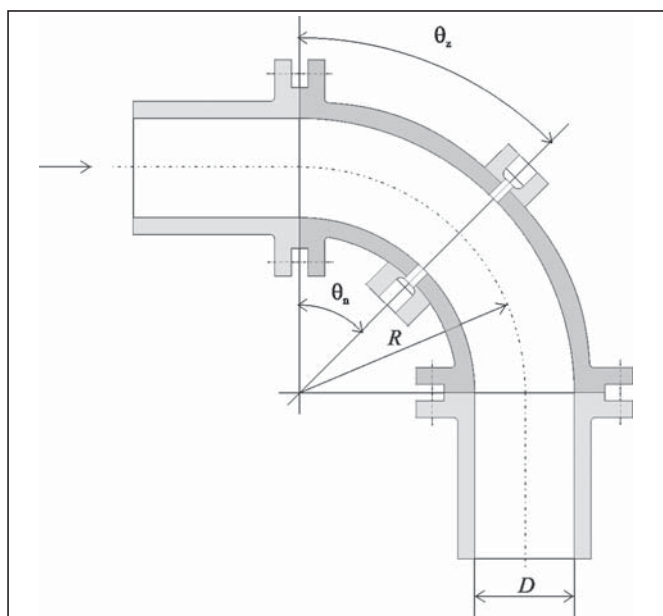
Sekundarni del merilnika predstavlja merilnik razlike statičnih tlakov na zunanjem in notranjem obodu pretočne cevi. Izhodna tlačna razlika je v primeru turbulentnega režima toka

kvadratno odvisna od pretoka skozi cevno koleno, poleg tega pa nanjo vplivajo tudi gostota tekočine in vstopne tokovne razmere. Glavni vzrok za pojav tlačne razlike je centrifugalna

sila, ki deluje na tok tekočine skozi cevni lok (glej poglavje 2).

KCL ima širok spekter uporabe, se zlahka montira in vzdržuje ter je uporaben za pretok tekočine v obeh smereh. Če je že vgrajen, ne povzroča dodatne motnje. Omejuje ga dolga natočna cev, ustvarja pa nizko tlačno razliko v primerjavi z ostalimi merilniki pretoka, ki delujejo na osnovi razlike statičnega tlaka.

Ideja o uporabi KCL kot merilnika pretoka ni nova, saj prvi objavljeni eksperimentalni rezultati segajo v začetek dvajsetega stoletja. Številni raziskovalci so eksperimentalno raziskovali vpliv različnih parametrov na pretočni koeficient, ki povezuje odvisnost med prostorninskim pretokom in razliko statičnega tlaka (glej npr. [1–3]). Lansford [1] je kot medij uporabljal vodo, preizkušena so bila 90-stopinjska KCL z odjemi tlaka pri  $45^\circ$ , Miller [2] pa je preizkušal z zrakom s koleni različnih prečnih prereзов, kotov ukrivljenosti in leg odjemov statičnega tlaka. Pretočni koeficient pa so izpeljali teoretično Lansford [1] (na podobnih izhodiščih temelji izpeljava v poglavju 2.1) in Bean [4], z numerično analizo razmer v merilniku pa so se ukvarjali Sanches et al. [5] in Rup in Malinowski [6].



**Slika 1.** Zgradba krožnega cevnega loka

Patricija Košuta Robba, univ. dipl. inž., dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Ivan Bajsić, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Namen tega prispevka je predstaviti lastne eksperimentalne rezultate pri različnih izvedbah krožnih cevni lokov v toku zraka z opredeljeno analizo merilne negotovosti. V prispevku so obravnavani merilni rezultati za krožna cevna kolena dveh različnih razmerij  $R/D$  in dveh različnih leg tlačnih odjemov. Fizikalna izhodišča za popis toka tekočine skozi krožno cevno koleno in ustvarjanja merilnega učinka so podana v poglavju 2. Merilni sistem in testirani krožni cevni loki so opisani v poglavju 3. Poglavje 4 pa predstavlja merilne rezultate, njihovo primerjavo s teoretičnimi napovedmi in analizo merilne negotovosti.

## ■ 2 Fizikalna izhodišča

### 2.1 Teorija prostega vrtinca

Prosti oz. potencialni vrtinec opisuje ravninsko krožno gibanje idealne tekočine. Predpostavimo stacionaren, polno razvit tok nestisljive in neviskozne tekočine skozi ravninsko koleno, ki ga omejujeta dve koncentrični steni. Koleno je v horizontalni ravnini. Za takšen tok tekočine je značilno, da so prečne komponente hitrosti enake nič in je edina komponenta hitrosti v usmerjena v obodni smeri kolena.

Slika 2 prikazuje elementarni delec tekočine v predpostavljenih tokovnih razmerah. Na delec tekočine v radialni smeri delujeta površinska tlačna sila in volumska centrifugalna sila, kar lahko zapišemo kot ravnotežno enačbo:

$$dp = \rho \frac{v^2}{r} dr \quad (1)$$

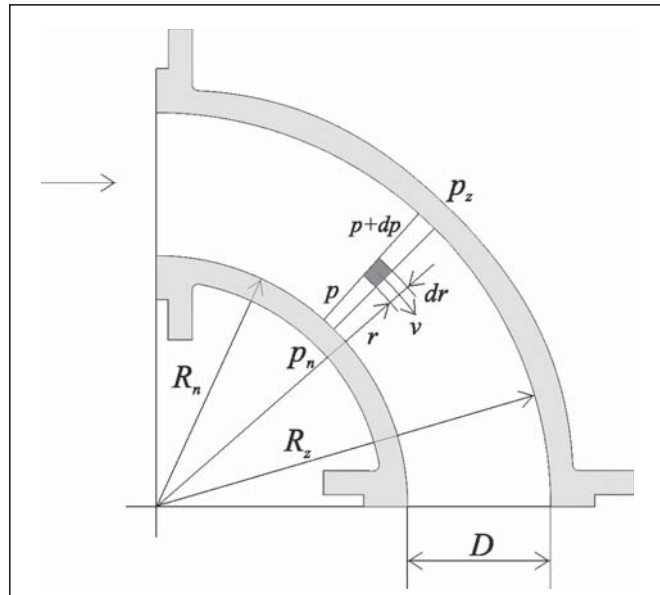
Za potencialni tok v danih tokovnih razmerah velja tudi:

$$\nabla \times \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{v}{r} + \frac{dv}{dr} = 0 \quad (3)$$

kar opisuje hiperbolično porazdelitev hitrosti tekočine z radijem, ki je značilna za prosti vrtinec:

$$v(r) = \frac{K}{r} \quad (4)$$



Slika 2. Sile na elementarni delec tekočine

Namesto konstante  $K$  lahko porazdelitev hitrosti izrazimo s povprečno hitrostjo tekočine  $\bar{v}$  kot:

$$v(r) = \frac{D\bar{v}}{r \ln \frac{R_z}{R_n}} \quad (5)$$

Enačbo (5) uvrstimo v enačbo (1), integriramo med notranjim in zunanjam obodom ter tako določimo radialno tlačno razliko na kolenu:

$$\Delta p = p_z - p_n = C_p \frac{\rho \bar{v}^2}{2} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{D^2}{\left(\ln \frac{R_z}{R_n}\right)^2} \left( \frac{1}{R_n^2} - \frac{1}{R_z^2} \right) \quad (7)$$

kjer je  $C_p$  tlačni koeficient. Merilno značilnico nadalje izrazimo kot povezavo med prostorninskim pretočkom  $q_v$  in tlačno razliko  $\Delta p$ :

$$q_v = A_D \bar{v} = A_D C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{C_p}} \quad (9)$$

kjer je  $A_D$  prečni presek pretočnega prereza in  $C$  pretočni koeficient. V primeru kolena, ki ima relativno velik radij ukrivljenosti,  $R^2 \gg (D/2)^2$ , se izraz za tlačni oz. pretočni koeficient poenostavi v:

$$C_p = \frac{2D}{R}$$

oz.

$$C = \sqrt{\frac{R}{2D}} \quad (10)$$

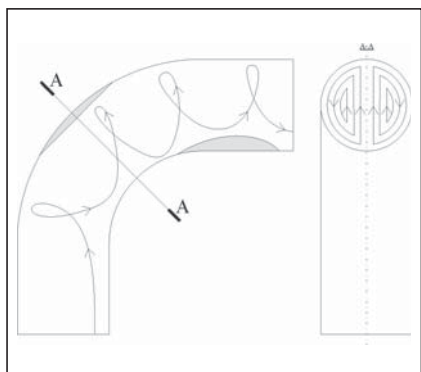
Pretočni koeficient v obliki iz enačbe (10) je uveljavljen v literaturi [1–4, 7].

### 2.2 Realne tokovne razmere v krožnem cevem loku

Realne tekočine so viskozne. Zaradi viskoznosti tekočin in delovanja centrifugalne sile se v KCL pojavijo separacija mejne plasti in sekundarni tokovi, zaradi česar toka tekočine ne moremo obravnavati ne kot ravninski in ne kot stacionarni. Tudi profil hitrosti se vzdolž KCL spreminja.

Hitrostno polje je na vstopu v krožni lok pri dovolj dolgi natočni cevi razvito s konstantnim statičnim tlakom po prerezu. Zaradi delovanja centrifugalne sile se tlak na zunanji steni povečuje in ob izravnavi zmanjšuje, na notranji pa zmanjšuje in ob izravnavi povečuje. Tej spremembi sledi hitrostno polje tako, da se območje višje hitrosti pomakne najprej k notranji steni in nato k zunanji [8].

Zaradi delovanja centrifugalne sile se pojavi pozitiven tlačni gradient najprej na zunanji steni krožnega loka in nato na notranji steni. Zaradi viskoznosti tekočine in pozitivnega tlačnega gradienta v obeh področjih prihaja do separacije mejne plasti. Za točko separacije sledi območje povratnega toka. V povratnem toku se oblikujejo večji nepravilni vrtinca, vanj pa se lahko vriva tudi odlepljena mejna plast, ki še poveča vrtinčenje in razširi območje motenj. V KCL je separacija na notranji steni bolj intenzivna zaradi vztrajnosti, ki vleče tekočinske delce navzven v prvotni smeri toka. Do separacije pride tako pri laminarni kot turbulentni mejni

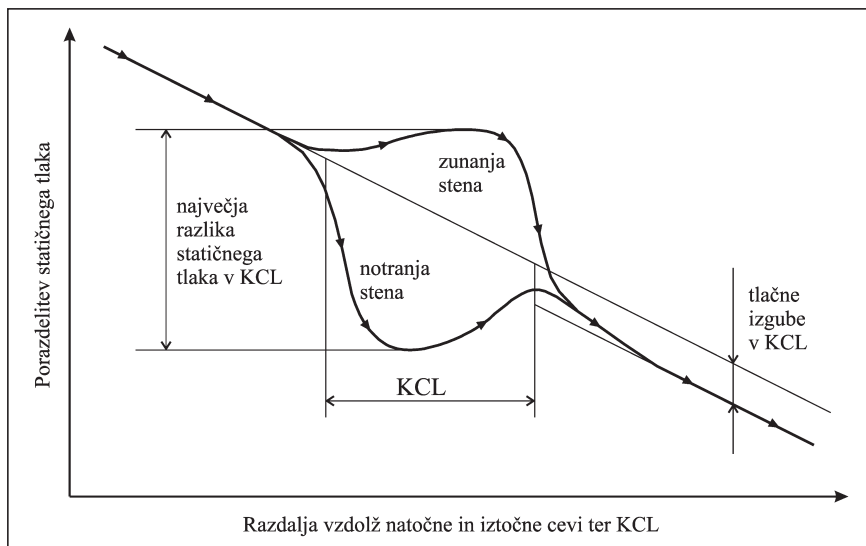


**Slika 3.** Vrtinčna dvojica v okroglem prerezu, naložena na glavni tok, in območja separacije toka

plasti, vendar je laminarna mejna plast bolj podvržena separaciji. Poleg tokovnega režima na obsežnost separacije vplivajo še velikost kota med vstopno in izstopno ravnino prečnega prereza KCL, radij ukrivljenosti in hrapavost stene [9]. Večji kot med vstopnim in izstopnim prečnim prerezom KCL ter večja hrapavost stene povečujeta območje separacije, večji relativni radij ukrivljenosti  $R/D$  pa ga zmanjšuje. Največji je vpliv relativnega radija ukrivljenosti. Separacija mejne plasti 90-stopinjskega krožnega loka se pojavi za vrednosti  $R/D$ , manjše ali enake 1,5 [10].

Sekundarni tokovi so posledica delovanja centrifugalne sile na mejno plast. V mejni plasti je zaradi nižje hitrosti tudi manjše naraščanje tlaka od notranjega k zunanemu radiju v primerjavi z naraščanjem tlaka vzdolž osrednjega območja. V osrednjem območju prereza se pojavijo sekundarni tokovi, ki so usmerjeni radialno navzven, v mejni plasti ob steni pa so usmerjeni proti centru ukrivljenosti in oblikujejo vrtinčno dvojico, prikazano na *sliki 3*. Vrtinčna dvojica naložena na glavni tok, vzporeden z osjo cevi, daje tokovnicam spiralno obliko, ki lahko vztraja še 50 do 75D za krožnim lokom [11].

Poznavanje porazdelitve statičnega tlaka na notranji in zunanji steni krožnega loka je najpomembnejše za uporabo KCL kot merilnika pretoka. *Slika 4* prikazuje tipično porazdelitev statičnega tlaka na notranji in zunanji steni vzdolž KCL z dolgo natočno in iztočno cevjo. S *slike 4* vidimo, da



**Slika 4.** Tipična porazdelitev statičnega tlaka na zunanji in notranji steni pretočne cevi

se najmanjši statični tlak na notranji steni pojavi že nekoliko pred sredino KCL, največji pa nekoliko za sredino KCL. Največjo razliko v statičnem tlaku lahko torej pričakujemo z ustrezno zamaknjenima odjemoma.

Vpliv krožnega loka na porazdelitev tlaka na stenah se pozna tudi v natočni in iztočni cevi. Krajšanje natočne cevi pokvari razviti tok na vstopu v KCL, zato se spremeni porazdelitev tlaka na stenah. Krajšanje dolžine iztočne cevi pod 1,5 D pa poveča pozitivni tlačni gradient predvsem na notranji steni [10].

Separacija mejne plasti s svojo nestalnostjo zmanjšuje ponovljivost merilnika, sekundarni tokovi pa spremenijo merjeno razliko statičnega tlaka. Z večanjem razmerja  $R/D$  se skušamo izogniti separaciji, a s tem kvarimo merilni učinek. Pri višjih  $Re$ -številih pričakujemo boljše ujemanje rezultatov meritev s teoretičnimi napovedmi, saj so tam učinki viskoznosti manjši.

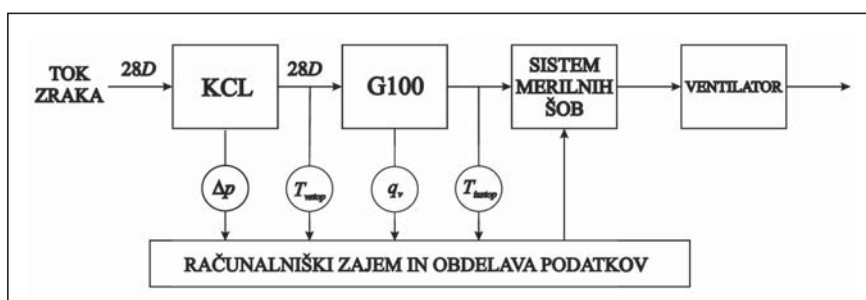
Raziskovalci KCL so skušali zajeti lastnosti realnih tekočin s korekcijo pretočnega koeficienta. Po Beanu [4] je za KCL 90° z odjemi pri 45° korekcija pretočnega koeficienta narejena s funkcijo  $Re$ -števila:

$$C_{kor} = \sqrt{\frac{R}{2D}} \cdot \left(1 - \frac{6,5}{Re^{1/2}}\right) \quad (11)$$

ki ima veljavnost v območju  $10^4 \leq Re \leq 10^6$  za  $R/D \geq 1,25$ . Uporaba te enačbe omogoča 4-odstotno točnost neumerjenega merilnika [4].

### 3 Merilni sistem

Preizkuse smo izvedli na merilni progi s tokom zraka, ki je shematsko prikazana na *sliki 5*. Preizkušeni KCL je bil vedno nameščen v horizontalni legi na vstopni strani pretočnega sistema, med natočno in iztočno cevjo dolžine 28D. Uporabljene so bile standardne, hidravlično gladke cevi notranjega premera  $D = 80$  mm. Preizkušali smo tri različne izvedbe KCL: z dvema različnima razmerjema



**Slika 5.** Shematski prikaz merilnega preizkuševališča

srednjega polmera kolena in premera cevi  $R/D$  ter dvema različnima kombinacijama kotov tlačnih odjemov na notranjem in zunanjem loku  $q_n$  in  $q_z$ :

- $R/D = 1,5$  s tlačnima odjemoma pri  $q_n = q_z = 45^\circ$ , v nadaljevanju KCL 1,5
- $R/D = 1,25$  s tlačnima odjemoma pri  $q_n = q_z = 45^\circ$ , v nadaljevanju KCL 1,25
- $R/D = 1,25$  s tlačnima odjemoma pri  $q_n \approx 20^\circ$  in  $q_z \approx 70^\circ$ , v nadaljevanju KCL 1,25 m.

Kot referenčni merilnik prostorninskega pretoka smo uporabili rotacijski plinomer G100 z merilnim območjem od  $16 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $160 \text{ m}^3/\text{h}$  ter razširjeno merilno negotovostjo  $0,30 \%$  merjene vrednosti [12]. Tlačna razlika na krožnem cevnom loku je ugotovljena s piezoupornim tlačnim zaznavalom z merilnim območjem od  $0$  do  $2000 \text{ Pa}$  in razširjeno merilno negotovostjo  $1,8 \text{ Pa}$ . Pri merjenju smo spremljali tudi temperaturo zraka in tlak okolice, ki sta bila uporabljena za oceno gostote zraka. Preizkusi so potekali pri barometriškem tlaku zraka  $975 \pm 1 \text{ mbar}$  in temperaturi zraka  $20,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Merilni sistem je bil računalniško podprt. Omogočal je računalniško nastavljanje vrednosti prostorninskega pretoka s pnevmatskim odpiranjem sistema merilnih šob in zajem merilnih signalov. Pri vsakem nastavljenem pretoku sta se v časovni periodi od  $2$  do  $3 \text{ min.}$  določali referenčna (»prava«) vrednost prostorninskega pretoka in tlačna razlika na KCL. Za vsako merilno točko je bila nato določena srednja povprečna vrednost pretoka in tlačne razlike ter ocenjen eksperimentalni standardni odmik ali raztros izmerkov.

Meritve smo izvedli za prostorninske pretoke od  $160 \text{ m}^3/\text{h}$  navzdol, s korakom približno  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , dokler je bila tlačna razlika z danim merilnikom tlaka še uporabno merljiva (do približno  $10 \text{ Pa}$ ). Pri prvem in drugem KCL smo serijo meritev ponovili trikrat, v tretjem primeru pa smo izvedli samo eno serijo meritev. Več serij meritev za isti KCL smo naredili z namenom, da bi ugotovili ponovljivost meritev.

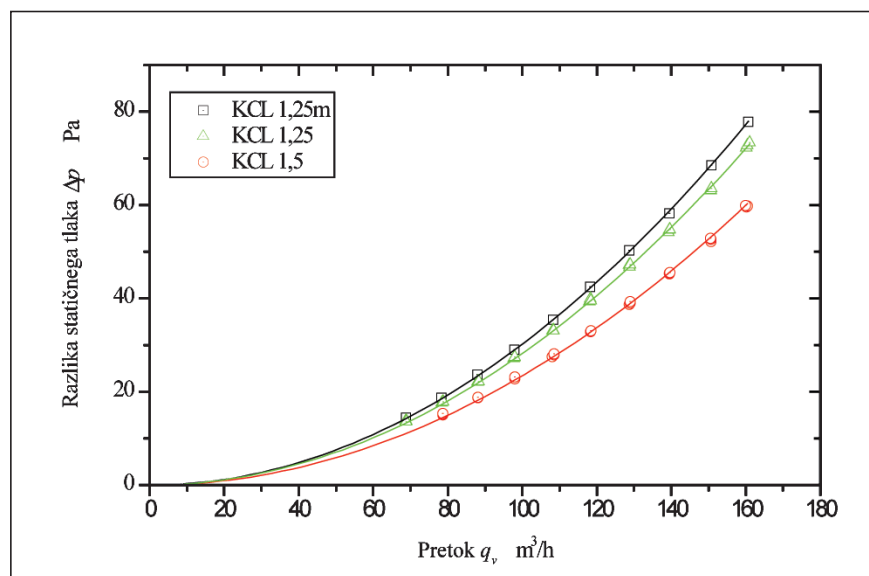
## 4 Rezultati meritev

Slika 6 prikazuje izmerjeno odvisnost tlačne razlike na krožnem cevnom loku glede na prostorninski pretok za vse tri obravnavane izvedbe. Največjo merilno občutljivost, to je največjo tlačno razliko pri istem pretoku, ima krožni cevni lok z razmerjem  $R/D = 1,25$  in zamaknjenimi tlačnimi odjemi, najmanjšo merilno občutljivost pa krožni cevni lok z razmerjem  $R/D = 1,5$ . Večjo občutljivost pri KCL z manjšim razmerjem  $R/D$  napoveduje tudi že teorija prostega vrtinca. Iz poenostavljenega izraza (10) za pretočni koeficient vidimo, da se pretočni koeficient z večanjem razmerja  $R/D$  povečuje, večji pretočni koeficient pa pomeni manjšo tlačno

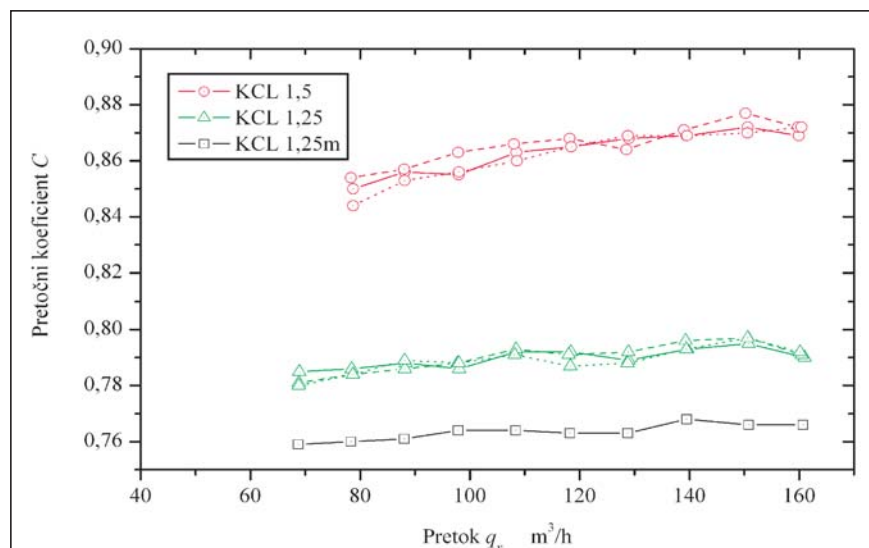
razliko pri istem pretoku, enačba (8). Na sliki 6 so izmerjene vrednosti, aproksimirane s kvadratno funkcijo. Vidimo, da izmerjene odvisnosti tlačne razlike približno sledijo kvadratni odvisnosti s prostorninskim pretokom. Za podrobnejši vpogled v to odvisnost za posamezno merilno točko izračunamo vrednost pretočnega koeficienta (enačba (8):

$$C = \frac{4}{\pi D^2} \frac{q_v}{\sqrt{2\Delta p / \rho}} \quad (12)$$

V izračunih pretočnega koeficienta je upoštevana srednja vrednost razlike statičnega tlaka in pretoka, prečni preseki pretočnega preseka KCL je izračunan iz nominalne vrednosti premera.



Slika 6. Odvisnost razlike statičnega tlaka od pretoka za različne geometrije KCL



Slika 7. Odvisnost pretočnega koeficienta od pretoka za različne geometrije KCL

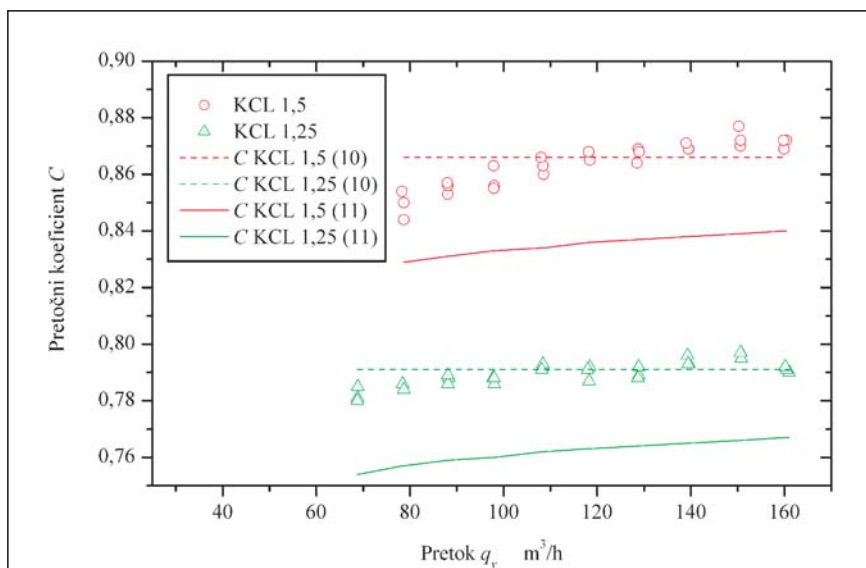
Slika 7 prikazuje odvisnost pretočnega koeficienta  $C$  od prostorninskega pretoka. Za KCL 1,5 in KCL 1,25 so prikazane vse tri serije meritev, ki kažejo dobro ponovljivost. Pri vseh treh izvedbah krožnih cevni lokov se pretočni koeficient nekoliko povečuje s pretokom. Najmanjše spremembe  $C$  v določenem območju pretoka so pri KCL 1,25 m. Razlika med največjim in najmanjšim  $C$  glede na povprečni  $\bar{C}$  znaša 3,8 % pri KCL 1,5, pri KCL 1,25 m pa 1,2 %.

O naraščanju pretočnega koeficienta z  $Re$ -številom so poročali že Murdock et al. [3], zajeto pa je tudi v korigirani enačbi (11). Za primerjavo smo na sliki 8 skupaj z eksperimentalnimi rezultati prikazali tudi teoretično ocenjen nekorigiran (10) in korigiran pretočni koeficient (11). Enačba (11) velja za odjeme pri kotu  $45^\circ$ , zato so na sliki prikazani le izmerki za KCL z odjemi tlaka v sredini loka. Vidimo lahko, da se rezultati meritev dobro ujemajo z nekorigiranim koeficientom ter da ima korigirani pretočni koeficient podoben trend spreminjanja s pretokom kot naši izmerki, le da se korigirani koeficienti nahajajo nižje od izmerkov. Odstopanje med izmerjenimi in po enačbi (11) korigiranimi pretočnimi koeficienti je velikostnega reda 3,5 % oz. manjše od merilne negotovosti 4 %, ki jo zagotavlja enačba (11) [4]. Poznavanje merilne negotovosti naših izmerkov pa nam bo o tej razliki povedalo še več (glej poglavje 4.1).

V preglednici 1 so podane povprečne vrednosti pretočnih koeficientov, ki temeljijo na rezultati meritev. Za primerjavo so po enačbah (9) in (10) izračunani še približki pretočnih koeficientov po teoriji prostega vrtinca. Za njihov izračun so bile uporabljene

**Preglednica 1.** Relativni odstopki pretočnega koeficienta po teoriji prostega vrtinca za različne geometrije KCL

	$\bar{C}$	C po enačbi (9)	C po enačbi (10)	Relativno odstopanje za C po enačbi (9) v %	Relativno odstopanje za C po enačbi (10) v %
KCL 1,5 m	0,864	0,961	0,866	11,3	0,3
KCL 1,25 m	0,789	0,764	0,791	-3,2	0,2
KCL 1,25 m	0,763	0,764	0,791	0,1	3,6



**Slika 8.** Primerjava izmerjenih pretočnih koeficientov s teoretičnimi pretočnimi koeficienti

nominalne vrednosti premera  $D$  in radija ukrivljenosti  $R$ .

Iz preglednice 1 je razvidno, da so relativna odstopanja za  $C$  manjša pri manjšem razmerju  $R/D$  ter da poenostavljeni pretočni koeficient po enačbi (10) bolje pokriva eksperimentalne rezultate v primeru KCL z odjemi pri  $45^\circ$ . Pri vrednotenju relativnega odstopanja za  $C$  po enačbi (10) ne smemo pozabiti, da gre za primerjavo s povprečno vrednostjo izmerjenega pretočnega koeficienta, dejansko odstopanje je razvidno s slike 8. Zaradi manj intenzivne separacije pri večjem relativnem radiju ukrivljenosti bi pričakovali, da se z večanjem razmerja  $R/D$  relativno odstopanje teoretično ocenjenega pretočnega koeficienta zmanjšuje, saj so s tem odstopanja od idealnih razmer manjša. A separacija ni edini dejavnik, ki ga teorija prostega vrtinca ne upošteva. Enačba (9) je izpeljana za idealen dvodimenzionalni tok. Sekundarni tokovi, ki so

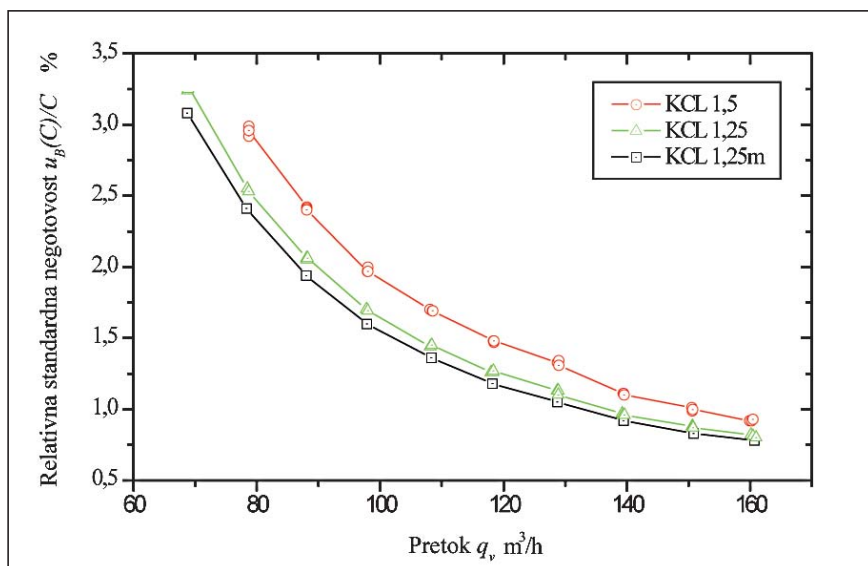
posledica viskoznosti tekočin, zato v enačbi (9), pa tudi (10) niso zajeti. Razen tega je enačba (9) izpeljana za hiperbolično porazdelitev hitrosti (4), kjer se hitrost z oddaljenostjo od središča krožnega loka zmanjšuje. Dejanski profil hitrosti se vzdolž KCL spreminja (glej poglavje 2.2), premik največje hitrosti k notranji steni nastopi le v začetnem delu KCL [8]. Zaradi vseh teh dejavnikov so relativna odstopanja približkov pretočnih koeficientov po teoriji prostega vrtinca razumljiva, bolj presenetljivo pa je dobro ujemanje nekorigiranega pretočnega koeficienta po enačbi (10).

#### 4.1 Ocena merilne negotovosti

Za razumevanje območja veljavnosti vrednosti pretočnih koeficientov, ki so bili določeni iz rezultatov meritev, ocenimo njihovo merilno negotovost [13]. Relativno standardno merilno negotovost, ki zajema vpliv merjenih veličin, smo izračunali po enačbi:

$$\frac{u_B(C)}{C} = \sqrt{\left(\frac{u(q_v)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{u(\Delta p)}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2} \quad (13)$$

Za standardne merilne negotovosti pretoka  $u(q_v)$  in tlačne razlike  $u(\Delta p)$  je upoštevana merilna točnost merilnikov in ocenjen raztros izmerkov.



**Slika 9.** PrIMERJAVA relativnih standardnih merilnih negotovosti vseh treh geometrij

Relativna standardna merilna negotovost gostote  $u(r)$  je ocenjena na 1 %. Najmanjši je vpliv relativne merilne negotovosti pretoka, ki skoraj v vseh merjenih točkah znaša 0,15 %, relativni vpliv merilne negotovosti tlačne razlike pa se zmanjšuje s pretokom oz. naraščajočo tlačno razliko in znaša od 0,6 % do 3,2 %.

Slika 9 prikazuje odvisnost relativne standardne merilne negotovosti  $u_B(C)/C$  od pretoka za vse tri KCL. Opazimo lahko, da je relativna standardna merilna negotovost  $u_B(C)/C$  pri konstantnem pretoku največja pri KCL 1,5 in najmanjša pri KCL 1,25 m. Višja  $u_B(C)/C$  pri KCL 1,5 je posledica nižjih izmerkov tlačne razlike pri istem pretoku, ki se odraža v večji relativni merilni negotovosti tlačne razlike. Iz istega vzroka je lega grafa relativne negotovosti  $u_B(C)/C$  za KCL 1,25 m najnižja.

Zanimiva je tudi ugotovitev, kako se s pretokom spreminjajo deleži vplivov posameznih veličin na skupno negotovost pretočnega koeficienta. Delež posameznih vplivov je določen kot razmerje kvadratov vpliva posamezne veličine in celotne negotovosti. Na sliki 10 je prikazano to spreminjanje za KCL 1,25, podoben vzorec pa lahko zasledimo pri vseh treh KCL. Zmanjševanje deleža negotovosti merjenja tlačne razlike s pretokom rezultira v naraščanju deleža negotovosti gostote in pretoka. Glede na to,

da je delež negotovosti tlačne razlike največji, bi bilo za zmanjšanje merilne negotovosti predvsem pomembno, da bi uporabili dober merilnik razlike statičnega tlaka, zlasti če uporabljamo merilnik z višjim razmerjem  $R/D$  in merimo nižje vrednosti pretokov. Pri višjih pretokih je pomemben tudi delež negotovosti gostote, zato so pomembni tudi pogoji okolja, pri katerih merimo pretok.

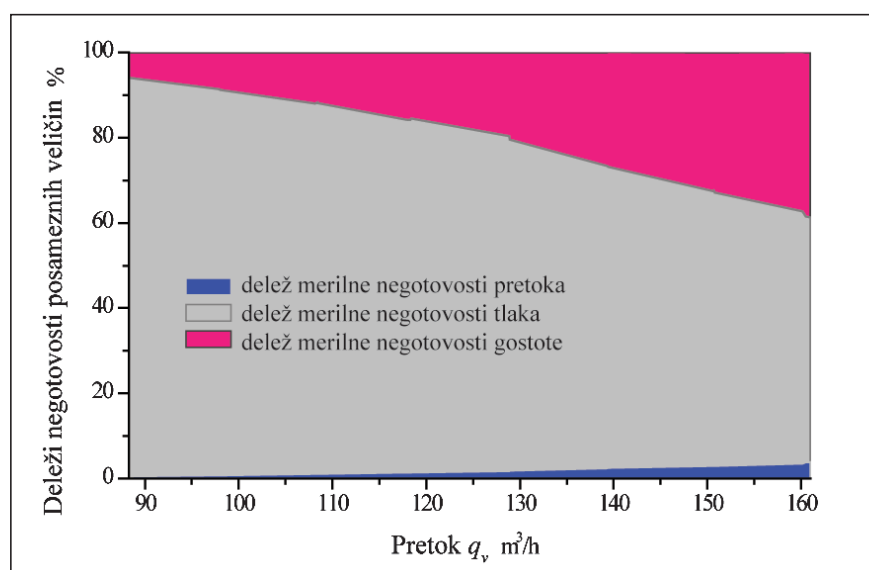
Ker smo se pri podajanju pretočnega koeficienta posameznega KCL v preglednici 1 odločili za povprečno vrednost, bomo zanjo ocenili tudi merilno negotovost. Relativna merilna negotovost povprečnega pre-

točnega koeficienta je sestavljena iz relativne standardne merilne negotovosti tipa A, ki zajema vpliv raztrosa pretočnega koeficienta, in povprečne vrednosti standardne merilne negotovosti  $u_B(C)/C$ , ki zajema vpliv merjenih veličin. Relativno merilno negotovost povprečnega pretočnega koeficienta izračunamo po enačbi:

$$\frac{u(\bar{C})}{\bar{C}} = \sqrt{\left(\frac{u_A(\bar{C})}{\bar{C}}\right)^2 + \left(\frac{u_B(\bar{C})}{\bar{C}}\right)^2} \quad (14)$$

Relativna standardna merilna negotovost pretočnega koeficienta tipa A pri nobenem KCL ne preseže 0,2 %, povprečna vrednost relativne standardne merilne negotovosti merjenih veličin pa ne 1,7 %. Vpliv merilne negotovosti tipa A lahko v primerjavi z relativno standardno merilno negotovostjo merjenih veličin zamenjamo, tako da lahko povprečnim pretočnim koeficientom  $\bar{C}$  iz preglednice 1 pripišemo standardno merilno negotovost 1,7 %. Z upoštevanjem faktorja pokritja ( $k = 2$ ) znaša razširjena merilna negotovost 3,4 %.

Poznavanje merilne negotovosti omogoča boljše vrednotenje rezultatov. Tako lahko ocenimo, da je izkazani trend naraščanja  $C$  s pretokom na sliki 7 istega velikostnega reda kot ocenjena razširjena merilna negotovost, vendar lahko zaradi dobre ponovljivosti kljub temu sklepamo, da ta trend dejansko obstaja.



**Slika 10.** Spreminjanje deležev posameznih virov merilnih negotovosti s pretokom za KCL 1,25

Pri vrednotenju razlike med izmerjenim in z  $Re$ -številom korigiranim pretočnim koeficientom enačba (11), slika 8, moramo poleg ocene negotovosti merjenja upoštevati tudi negotovost določanja  $C$  po teoriji prostega vrtinca, ki je posledica odstopanja  $R$  in  $D$  od nominalnih vrednosti. Preverjanje njunih vrednosti je pokazalo oceno odstopanja vrednost  $R$  za  $\pm 1$  mm,  $D$  pa za  $\pm 0,5$  mm, zaradi česar lahko pretočni koeficient odstopa (10) do  $\pm 0,8$  %. Z upoštevanjem ocenjene negotovosti izmerkov in negotovosti dimenzij KCL je razlika med izmerki pretočnega koeficienta in vrednostmi iz enačbe (11) lahko tudi večja – 4 %.

Negotovost določanja pretočnega koeficienta  $C$  zaradi odstopanje  $R$  in  $D$  od nominalnih vrednosti se bolj kot v poenostavljeni enačbi (10) pozna v enačbi (9), kjer je ta vpliv do  $\pm 2,1$  % (KCL 1,2). To je potrebno upoštevati tudi pri vrednotenju relativnih odstopanj v preglednici 1.

## ■ 5 Sklepi

V prispevku je predstavljena možnost uporabe KCL za merjenje pretoka zraka. Preizkuse smo izvedli z zrakom pri atmosferskih okoliških pogojih s tremi KCL, ki so se geometrijsko razlikovali glede na radij ukrivljenosti loka in lego odjemov statičnega tlaka. Rezultate meritev smo primerjali s teoretičnimi izhodišči, na katerih temelji teorija prostega vrtinca. Podali smo tudi oceno merilne negotovosti izmerkov.

Na podlagi dobljenih rezultatov ugotavljamo:

- Prostorninski pretok je po teoriji prostega vrtinca sorazmeren kvadratnemu korenu tlačne razlike. Pretočni koeficient je funkcija geometrije KCL in se povečuje z večanjem relativnega radija ukrivljenosti  $R/D$ .
- Eksperimentalno dobljeni izmerki potrjujejo korensko odvisnost pretoka od tlačne razlike ter povečevanje pretočnega koeficienta z večjim relativnim radijem ukrivljenosti  $R/D$ . Preizkusi KCL istega relativnega radija ukrivljenosti  $R/D = 1,25$  z različno lego odje-

mov statičnega tlaka so pokazali večjo občutljivost merilnika z zamaknjenimi odjemi statičnega tlaka.

- Po teoriji prostega vrtinca izpeljani približek pretočnega koeficienta v enačbi (9) slabše popisuje izmerjene pretočne koeficiente kot njegova poenostavljena oblika iz enačbe (10).
- Večkratno ponavljanje serij meritev je pokazalo dobro ponovljivost izmerkov.
- Korekcija pretočnega koeficienta z  $Re$ -številom v enačbi (11) se od izmerjenih vrednosti pretočnega koeficienta razlikuje za manj kot 4 %. Izmerki pretočnega koeficienta kažejo isti trend kot korekcija pretočnega koeficienta z  $Re$ -številom. V prihodnje bi bilo zato primerno raziskati, kakšno je ujemanje teorije prostega vrtinca pri višjih  $Re$ , ko doseže pretočni koeficient konstantno vrednost.
- Analiza merilne negotovosti eksperimentalno dobljenih izmerkov je pokazala, da lahko razširjeno relativno merilno negotovost pretočnega koeficienta ocenimo na  $\pm 3,4$  % za vse tri KCL. Pri uporabljeni merilni opremi povzroča glavni vir negotovosti negotovost merjenja tlačne razlike, ki se z večanjem prostorninskega pretoka manjša. Če želimo torej poboljšati merilno negotovost umerjanja KCL, moramo v prihodnje uporabiti še točnejši merilnik tlačne razlike.
- S preizkusi je bilo ugotovljeno območje uporabe izbranih KCL, vezano na najmanjšo merjeno razliko statičnih tlakov 10 Pa. KCL relativnega radija ukrivljenosti 1,5 s tlačnima odjemoma pri kotu  $45^\circ$  je uporaben za merjenje prostorninskih pretokov zraka, ki so večji od  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , kar ustreza  $Re > 2,3 \times 10^4$ , KCL relativnega radija ukrivljenosti 1,25 s tlačnima odjemoma pri kotu  $45^\circ$  pa lahko meri prostorninske pretoke večje od  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ , kar ustreza  $Re > 2 \times 10^4$ . Spodnja meja uporabe KCL  $R/D = 1,25$  s premaknjenima tlačnima odjemoma je enaka kot pri odjemih pri kotu  $45^\circ$ , saj se tlačna razlika zaradi

premaknjenih tlačnih odjemov bistveno ne poveča.

- KCL se lahko z upoštevanjem enačbe (11) uporablja kot umerjen merilnik za pretoke, ki ne zahtevajo večje točnosti. Primer takšne uporabe je npr. prevzemni preizkus prezračevalnih sistemov, kjer je dopustna relativna točnost merjenja pretoka 10 %. Z umerjanjem lahko njegovo točnost bistveno izboljšamo, zlasti če uporabimo ustrezen merilnik razlike statičnega tlaka.

## Literatura

- [1] Lansford, W. M.: The use of an elbow in a pipe line for determining the rate of flow in the pipe, Bulletin No. 289, University of Illinois, Urbana, 1936.
- [2] Miller, D. S.: Performance of bend flowmeters, RR1204, BHRA Fluid Engineering, 1973.
- [3] Murdock, J. W., Foltz, C. J., Gregory, C.: Performance characteristics of elbow flowmeters, Trans. ASME, Ser. D, Vol. 86, 1964, str. 499–506.
- [4] Bean, H. S.: Fluid meters: Their theory and application, Sixth Edition, Report of ASME Research committee on Fluid Meters, American Society of Mechanical Engineers, 1971.
- [5] Sanches, F., Gomez, A., Toledo, M., Quinto, P., Zurita, V.: Experimental and numerical curved flow study for metrology purposes, Journal of Applied Research and Technology, Vol.1 (2), 2003, str. 114–126.
- [6] Rup, K., Malinowski, L.: Fluid flow identification on base of pressure difference measured on the secant of a pipe elbow, Forschung im Ingenieurwesen, Springer, Berlin/Heidelberg, Volume 70 (4), 2005.
- [7] Baker, R. C.: Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications, Cambridge University Press, 2000, str. 169–170.
- [8] Idelchik, I. E.: Fluid Dynamics of industrial equipment: Flow distribution design methods, Hemisphere Publishing Corpo-

- ration, New York, Washington, Philadelphia, London, 1991, str. 25–29.
- [9] Idelchik, I. E.: Handbook of hydraulic resistance, Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York, Washington, Philadelphia, London, 1986, str. 265–272.
- [10] Ward-Smith, A. J.: Internal fluid flow, Clarendon Press, Oxford, 1980, str. 249–285.
- [11] Massey, B. S.: Mechanics of fluids, Sixth edition, Van Nostrand Reinhold, London, 1989, str. 214–215, 251–253, 319–323.
- [12] Blagojević, B., Bajsić, I., Kibarovski, Z.: Ocena merilne negotovosti preizkuševališča za umerjanje: a) mehovnih plinomerov od G10 do G100, b) rotacijskih in turbinskih plinomerov do velikosti G100, Razvojno–raziskovalna naloga št. P2000-1, LMPS, 2000.
- [13] EA-4/02: Expression of the uncertainty of measurement in calibration, EA, 1999.

### A Bend of Circular CROSS - Section Employed as the Air Flowmeter

**Abstract:** The present work investigates a possibility of using a bend of circular cross-section as the air flowmeter. The physical - theoretical relation for flow rate through the bend or elbow flowmeter is derived from the free vortex concept. In the experimental work three circular cross-section bands, which geometrically differ in bend centerline radius and pressure tapings, were tested. The measurement uncertainty of the results was evaluated. The comparison between experimental and theoretical results shows good agreement.

**Keywords:** Elbow flowmeter, Bend of circular cross-section, Free vortex, Measurement uncertainty



# DOMEL®

*Ustvarjamo gibanje*

DOMEL d.d. Otoki 21, 4228 Železniki, Slovenija  
T: +386 (0)4 51 17 358; F: +386 (0)4 51 17 357;  
E: info@domel.com; I: www.domel.com

SREDA, 18. 11. 2009

## HIŠNI SEJEM

- › Predstavitev možnosti uporabe in načina delovanja Indra Drive pogonskega sistema
- › Praktični prikaz delovanja razstavnih celic

**Rexroth**  
Bosch Group

Predavatelj: G. Hanisch, Rexroth Bosch Group

Prijave in  
informacije: 04 511 73 58; Brane Ozbek  
04 511 73 56; Meta Pegam

