

*DINAMIČNO URAVNOVEŠANJE  
HIDRONIČNIH SISTEMOV*



*SAMODEJNI  
REGULATOR PRETOKA*

 **CALEFFI**

*Tehnično poročilo*

DINAMIČNO URAVNOVEŠANJE  
HIDRONIČNIH SISTEMOV

SAMODEJNI REGULATOR PRETOKA  
AUTOFLOW

CLAUDIO ARDIZZOIA  
WALTER SCHINCARIOL

**VSEBINA**

<b>URAVNOVEŠENI KROGOTOKI</b>	<b>str. 3</b>
<i>Ročno uravnovešanje – Črpalka s konstantno hitrostjo</i>	<i>str. 4</i>
Primer .....	4
Delna obremenitev .....	9
Poraba energije .....	12
<i>Naprava Autoflow</i>	<i>str. 13</i>
Zakoni ravnovesja pri Autoflowu .....	13
Geometrija Autoflowa .....	14
Velikosti Autoflowa .....	15
Delovanje Autoflowa .....	16
Odstopanja pretoka .....	18
<i>Uravnovešanje z Autoflowom – Črpalka s konstantno hitrostjo</i>	<i>str. 19</i>
Neprekinjeno uravnovešanje .....	19
Načrtovanje z Autoflowom .....	20
Primer .....	20
Delna obremenitev .....	21
<i>Ročno uravnovešanje – Črpalka s spremenljivo hitrostjo</i>	<i>str. 24</i>
Konstantna hitrost .....	24
Proporcionalna kontrola .....	26
<i>Uravnovešanje z Autoflowom – Črpalka s spremenljivo hitrostjo</i>	<i>str. 28</i>
Najmanjši obratovalni $\Delta p$ .....	28
Energijski prihranek .....	29
<i>Uporaba krogotokov z Autoflowom</i>	<i>str. 30</i>

## Uvod

V tem tehničnem poročilu so prikazane vse prednosti, ki jih prinaša uporaba samodejnih regulatorjev pretoka Autoflow v hidravličnih sistemih.

Ti regulatorji omogočajo tako imenovano dinamično in neprekinjeno uravnovešanje krogotokov, v katere so nameščeni. Predlagana analiza, ki je bila opravljena za namene tega poročila, se osredotoča na tehnične vidike, ki so lahko razumljivi in na voljo v posebnem dodatku k drugemu delu tega dokumenta za bolj poglobljeno preučitev.

Posebna pozornost je posvečena zaprtim krogotokom klimatskih sistemov. Na koncu so rezultati analize predstavljeni z uporabo drugih aplikacij.

Sklicevanja na vire so označena s simbolom [n°].

## Uravnovešeni krogotoki

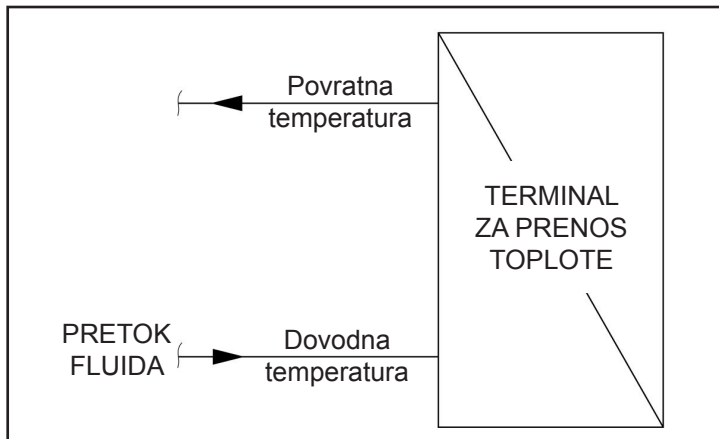
Sodobni klimatski sistemi morajo izpolnjevati dve osnovni zahtevi: **zagotavljanje večjega toplotnega udobja in zniževanje porabe energije.**

Za doseganje tega cilja je potrebno terminalne enote sistema napajati z ustrezno količino fluida, da lahko grejejo, hladijo ali razvlažujejo v skladu s specifikacijami proizvajalca.

Fizikalni zakoni prenosa toplote služijo kot podlaga vsakršnemu razmisleku o energijskem prihranku; ti zakoni pravzaprav določijo, da je **oddajanje ali odvajanje toplote** s terminalne enote **odvisno od pretoka** (Slika 1).

Zato je zdaj mogoče potrditi, da sistem ni dovršen vse, dokler se ne nastavi pretok fluida v vsak terminal. Samo terminali, v katere fluid doteka **s pravilnim pretokom**, lahko obratujejo pod nazivnimi pogoji, za katere so bili oblikovani. Tem pogojem pravimo **uravnovešeni hidravlični krogotok**.

Slika 1



Dobro uravnovešen sistem:

- zagotavlja pravilno obratovanje terminalov;
- omejuje preveliko hitrost pretoka fluida, ki lahko povzroči hrup in obrabo;
- preprečuje, da bi črpalke obratovale z nizko učinkovitostjo ali se pregrevale;
- omejuje vrednosti diferenčnega tlaka, ki lahko vplivajo na kontrolne ventile tako, da preprečuje prepihanje in napake v obratovanju.

## Ročno uravnovešanje – Črpalka s konstantno hitrostjo

Na majhnih in srednje velikih sistemih, ki obratujejo s črpalko s konstantno hitrostjo pretoka, je izbira ustrezne velikosti cevovodov običajno zadostno zagotovilo, da so krogotoki uravnovešeni.

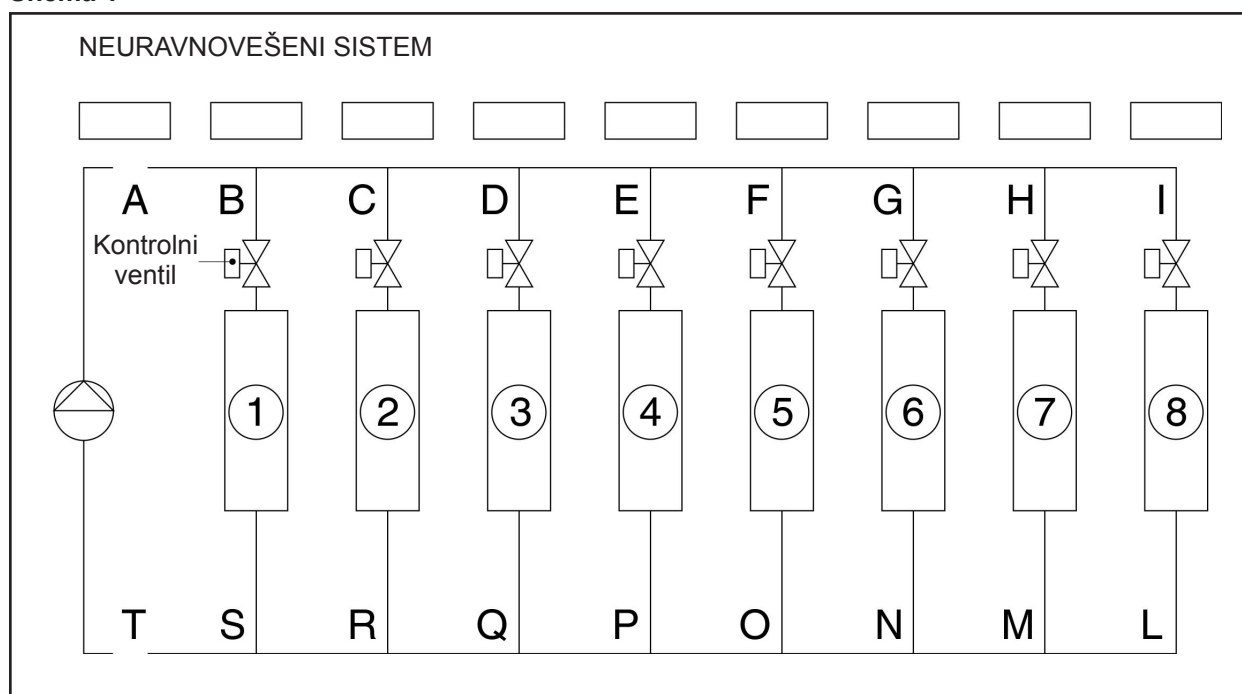
Na sistemih s širokim omrežjem ali spremenljivo hitrostjo pretoka pa je za uravnovešanje krogotokov treba vključiti naprave za regulacijo pretoka vode.

Najprej bo izvedena analiza vedenja ventilov za ročno uravnovešanje, ki so nameščeni v neuravnovešen krogotok. To je klasična metoda uravnovešanja krogotoka.

### Primer

Za razjasnitev problema je bil numerični primer upoštevan in uporabljen kot konkretna podpora obravnavanju naslednjih vidikov:

Shema 1



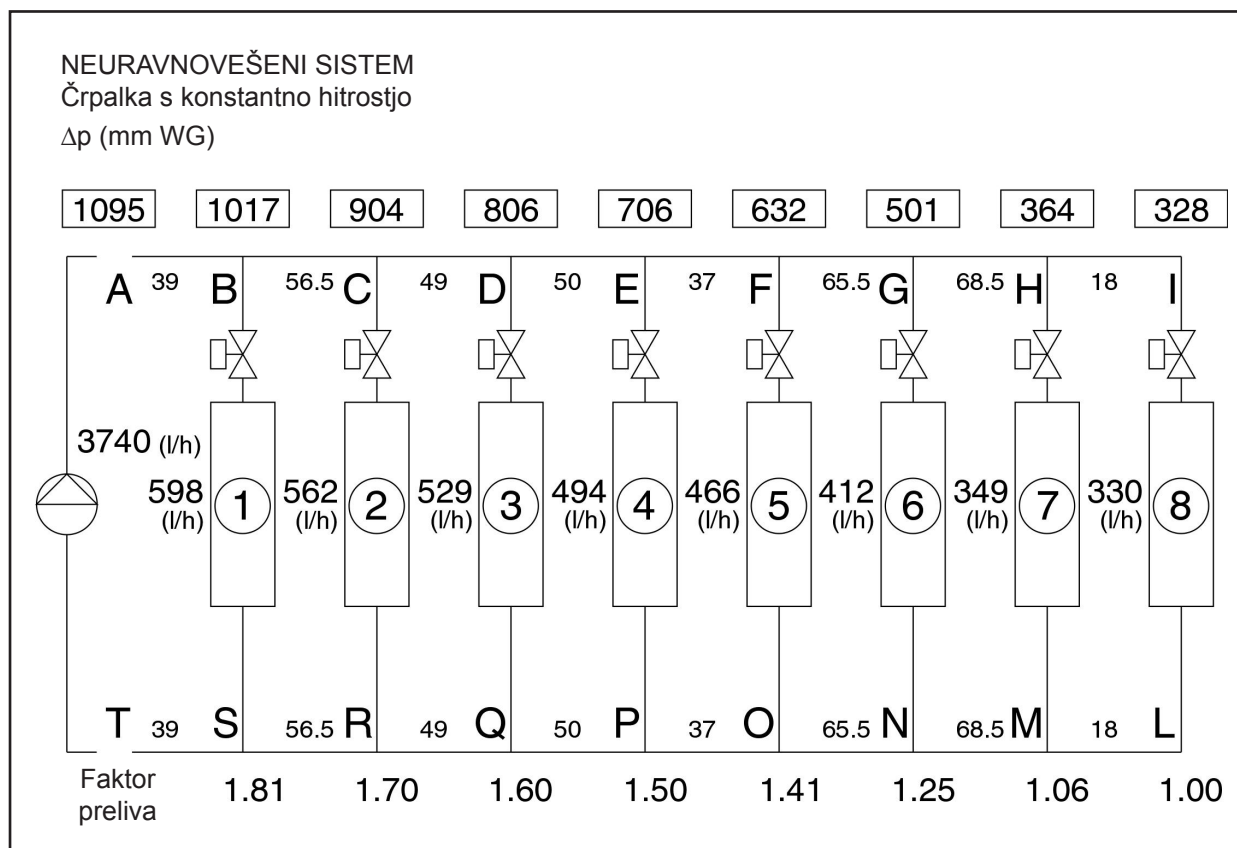
Iz tega primera so razvidni **računski rezultati** krogotoka, ki napaja 8 stranskih krogotokov iz glavnega cevovoda (Shema 1).

V vsak tokokrog se namesti ventilatorski konvektor z nazivno stopnjo pretoka 330 l/h. To privede do padca tlaka za 150 mm WG.

Izračuni za določanje končnih pogojev obratovanja (Shema 2) so podani na strani 11 drugega zvezka Caleffijevih priročnikov.

Za logično in idealno kontinuiteto je bolje uporabljati natančne količinske podatke, ki jih ni težko pridobiti.

Shema 2



Pretok se pogosto določi na podlagi zmogljivosti prenosa toplote in razlike v temperaturi vode, ki se dovaja v terminale.

Če vzamemo najbolj oddaljeni terminal v krogotoku in ga poskusimo pravilno napajati, bodo drugi terminali **prekomerno polnjeni** zaradi višjega  $\Delta p$ , ki je pogojen s padcem tlaka v skupnem cevovodu.

Namen tega primera je prikazati, da bodo zaradi zagotavljanja nazivnega pretoka v najbolj oddaljenem terminalu (8) najbližji terminali prekomerno polnjeni.

Bolj kot je zadnji terminal oddaljen, večji bo preliv v najbližjih terminalih.

Za **zagotavljanje vsaj nazivnega pretoka v vsakem terminalu** brez uravnovešanja se ustvari preliv, ki doseže 81 % v prvem terminalu.

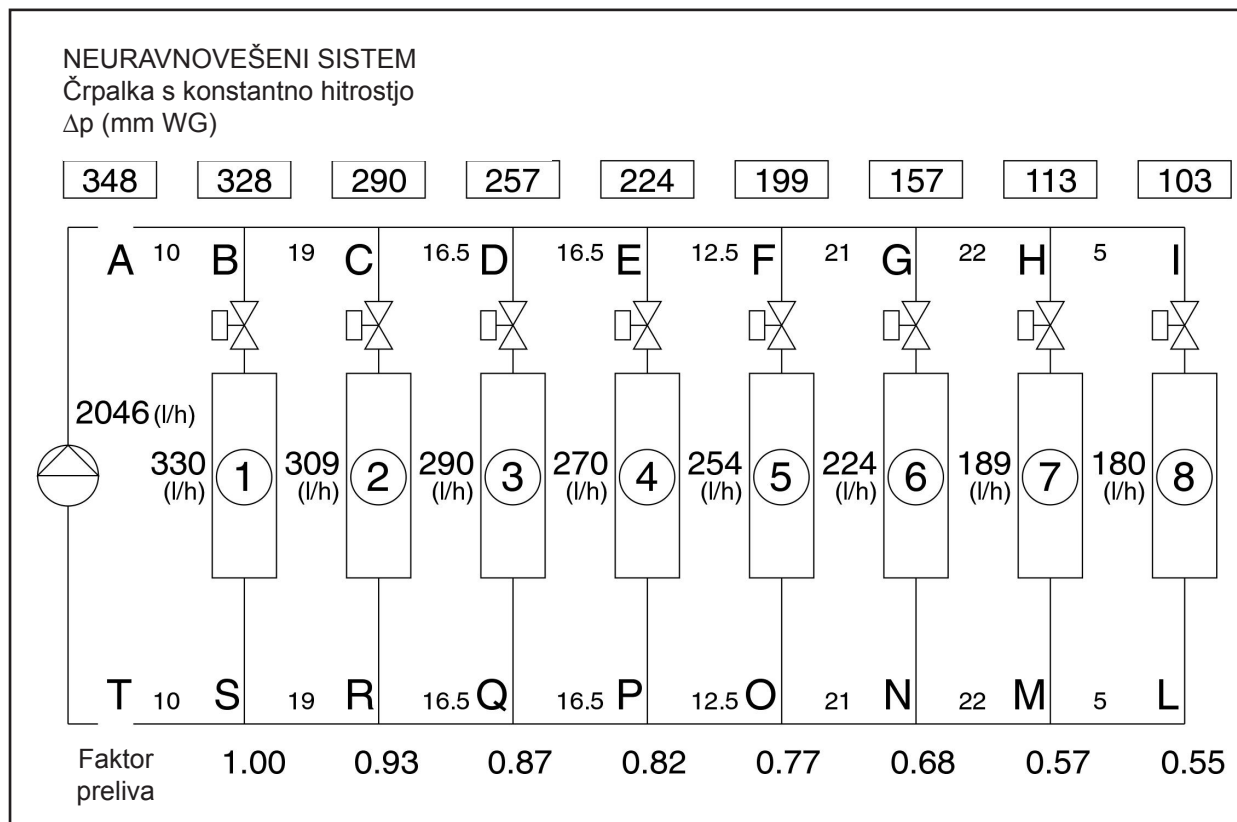
V tem primeru skupni pretok naraste z 2640 l/h na 3740 l/h, kar predstavlja 42 % porast.

Kot smo že ugotovili, to povzroča večjo porabo energije, ki se absorbira v črpalki, večji hrup, ki ga povzroča višji pretok, težave v delovanju kontrolnih ventilov ter težave z erozijo, ki nastane zaradi visoke hitrosti pretoka fluida.

Po drugi strani pa, če je najbližji terminal (1) polnjen z načrtovanim pretokom po zaslugi znižanja tlaka in pretoka v črpalki, bodo **drugi terminali nezadostno polnjeni** (Shema 3).

Vendar do takšne situacije ne bi smelo priti, saj potrebni prenos toplote v terminalih ne bo dosežen.

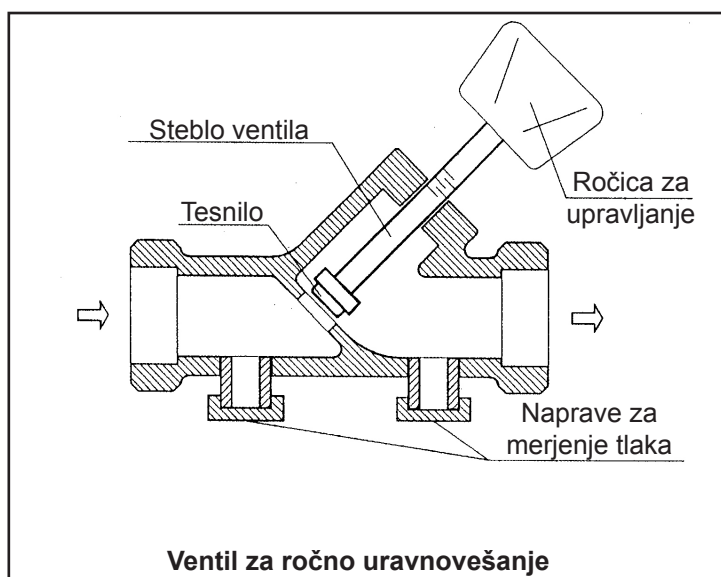
Shema 3



Skupni pretok pade s teoretične vrednosti 2640 l/h na 2046 l/h.

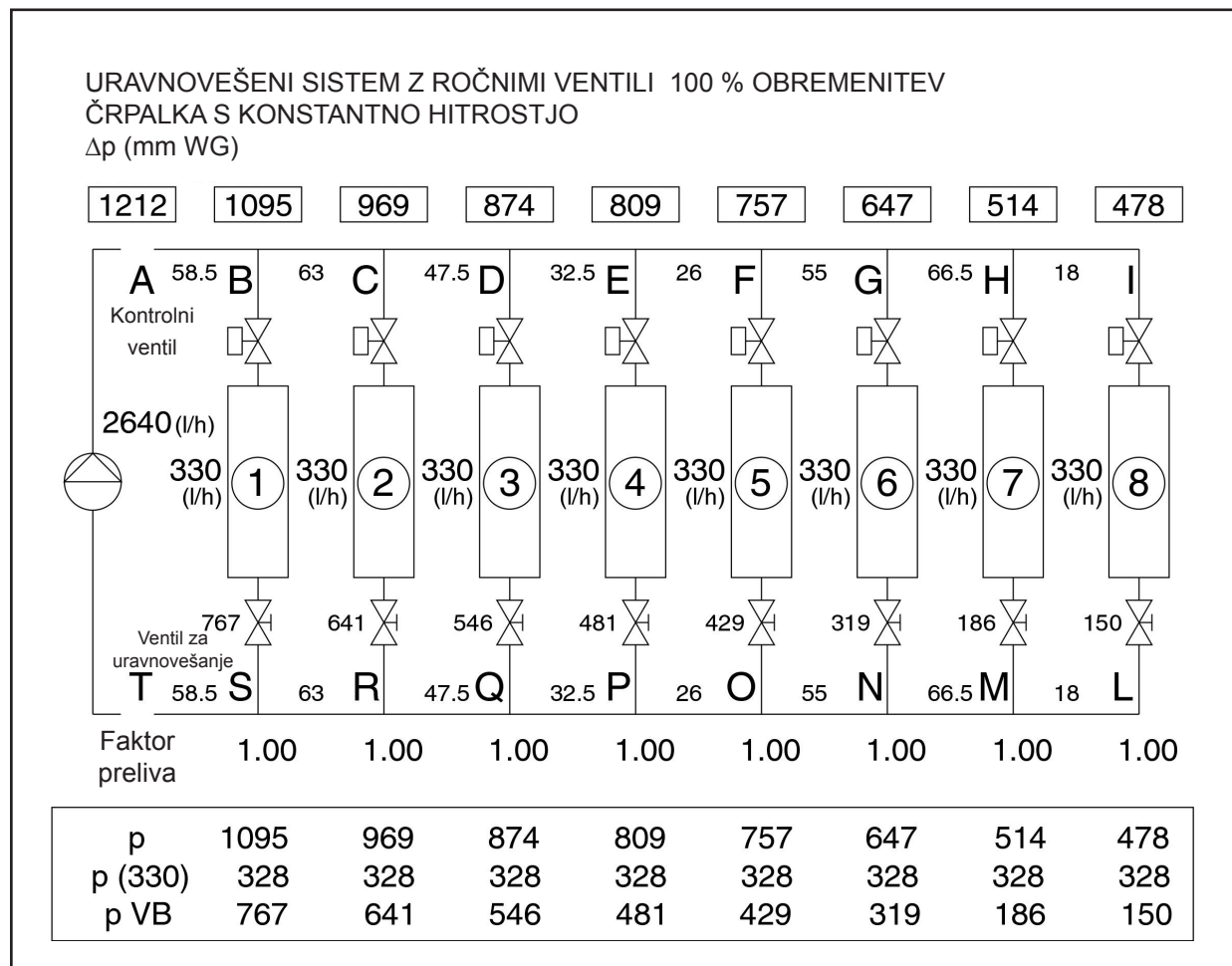
Za rešitev tovrstnih težav je treba v krogotoke namestiti ventile za uravnovešanje, ki lahko zagotovijo načrtovan pretok (Slika 2).

Z obračanjem ročice lahko nastavimo pretok skozi ventil, ki bo odčital  $\Delta p$ , izmerjen s piezometrih.



Sledi primerjava računskih rezultatov iz istega krogotoka, ki so nastali ob uporabi ventilov za ročno uravnavanje pri kontroli pretoka v vseh stranskih krogotokih (Shema 4).

Shema 4



Iz sheme je razvidno, da znaša padec tlaka med točkama I in L 328 mm WG pri pretoku 330 l/h do 8. terminala.

Pri uravnavanju vsakega stranskega krogotoka je treba doseči pretok 330 l/h v vsakem terminalu.

Skupni pretok v takšni situaciji potemtakem znaša:  $330 \cdot 8 = 2640$  l/h.

Ventili za uravnavanje v vsakem stranskem krogotoku se lahko nastavijo za pretok 330 l/h v vsakem terminalu.

Najbolj oddaljeni terminal je opremljen z ventilom za uravnavanje, ki je povsem odprt in povzroča padec tlaka za 150 mm WG.

Zato  $\Delta p$  v tem krogotoku postane:  $328 + 150 = 478$  mm WG.

Po opravljenem izračunu padca tlaka v krogotoku, v katerem se uporabljajo ventili za ročno uravnavanje, se lahko izračuna tudi zahtevani  $\Delta p$  vsakega ventila za uravnavanje, da se zagotovi pretok 330 l/h.

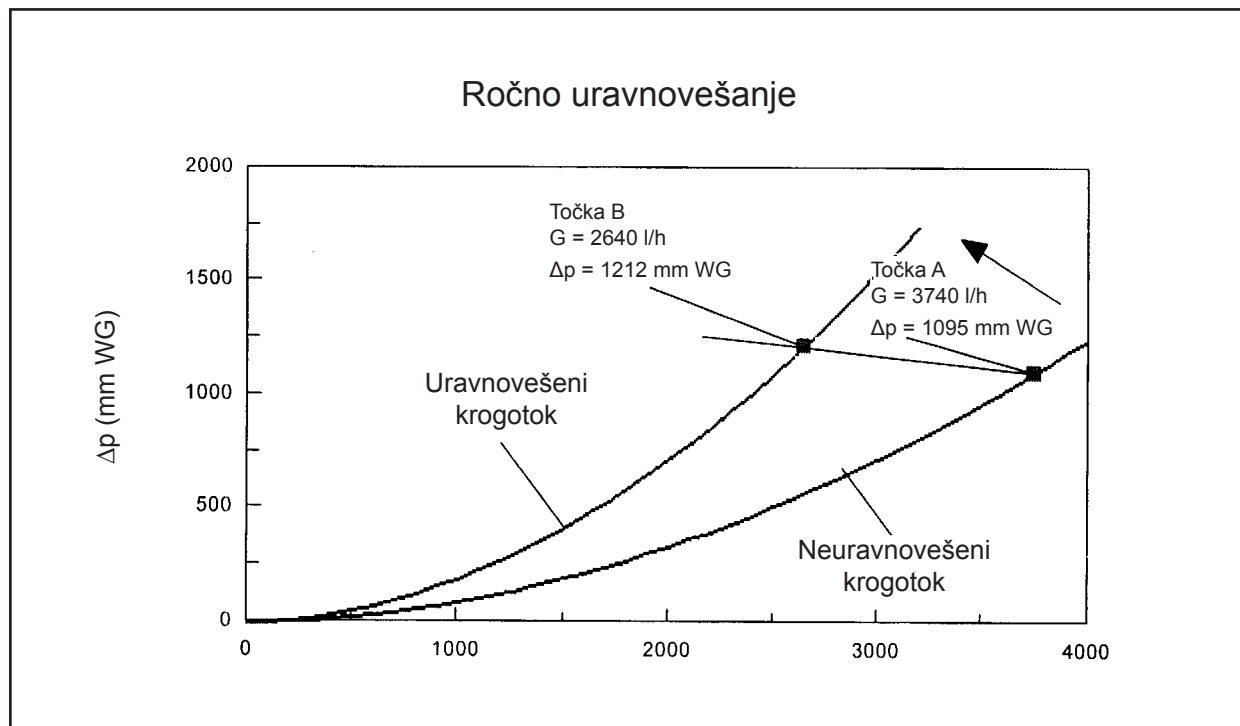
S pomočjo teh ventilov za uravnavanje se lahko zagotovi **načrtovani pretok v vsakem terminalu.**



Narišemo lahko graf s karakterističnimi krivuljami dveh različnih situacij (Slika 3).

### Točke obratovanja: uravnovešeni krogotok, neuravnovešeni krogotok

Slika 3



Vrednost karakteristične krivulje uravnovešenega krogotoka je višja kot tista v neuravnovešenem krogotoku (glej dodatek). To pojasni, zakaj so vrednosti krivulje uravnovešenega krogotoka višje kot vrednosti krivulje neuravnovešenega krogotoka.

V fizikalnem smislu sta namestitve ventilov za uravnovešanje v krogotok in njihova prilagoditev omogočila večji padeč tlaka v posameznih stranskih krogotokih in s tem skupnega tlaka v celotnem krogotoku.

**Opozorilo:** upoštevati je treba, da se lahko karakteristična krivulja črpalke ujema z načrtovanim tlakom in stopnjo pretoka.

Toda to je **statična situacija**, ki v resnici nastopi le redkokdaj.

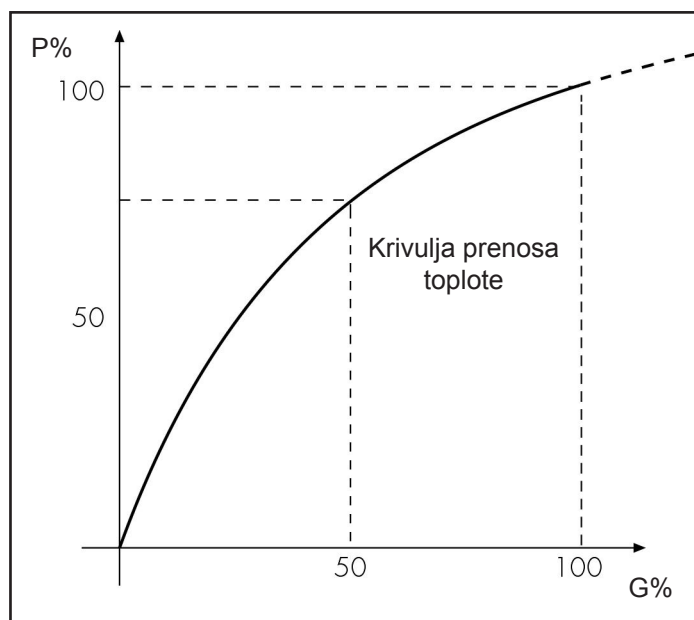
Dejansko je **kontrolni ventil zmožen samodejno spreminjati pretok, s katerim je vsak terminal napajan v skladu s toplotnimi obremenitvami pri ogrevanju ali hlajenju.**

Primer se navezuje na trend tipične krivulje, ki se nanaša na pretok in izhodno toplotno moč terminala (Slika 4). [4]

Ker obratuje na podlagi temperaturnega signala, regulirni ventil samodejno znižuje stopnjo pretoka, s tem pa tudi oddajanje toplote terminalne enote; na ta način se pretok spreminja vzporedno s spremembami v toplotni obremenitvi sistema.

Tako se v krogotoku vzpostavi nova obratovalna situacija **z novo točko ravnovesja.**

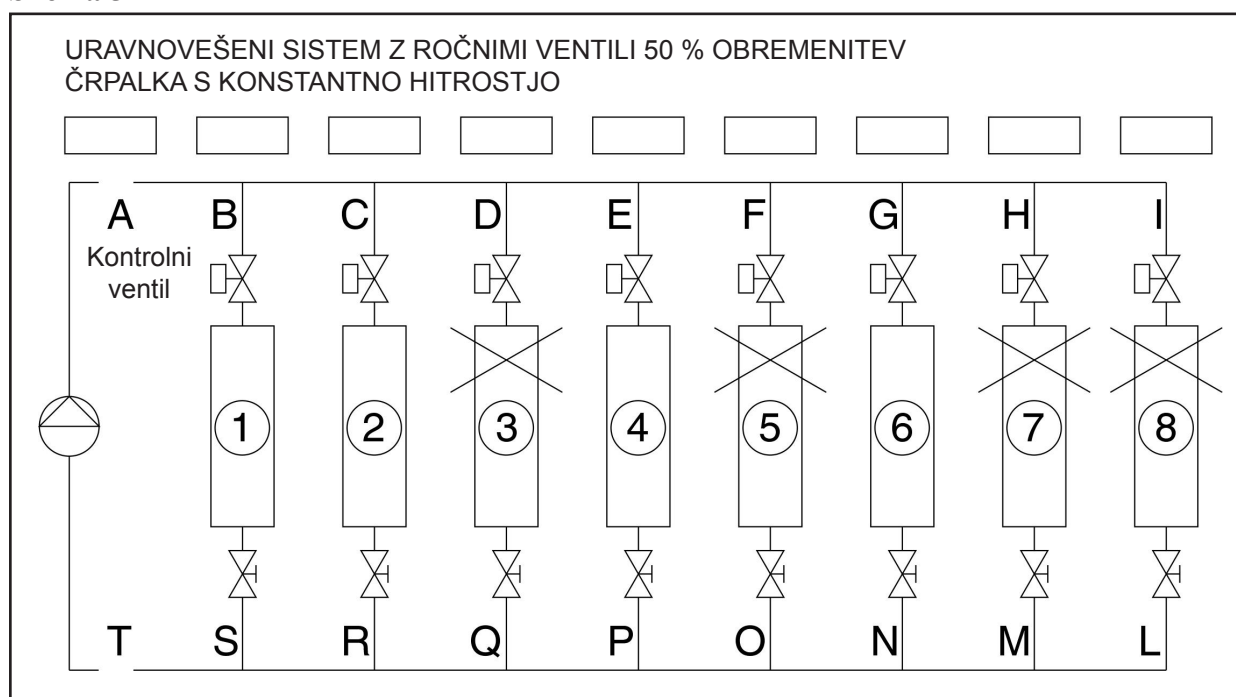
Slika 4



### Delna obremenitev

Za boljšo predstavo o tem, kaj se zgodi, če je **krogotok deloma zaprt**, predpostavljajmo, da je nekaj terminalov iz prejšnjega primera zaprtih (Shema 5).

Shema 5

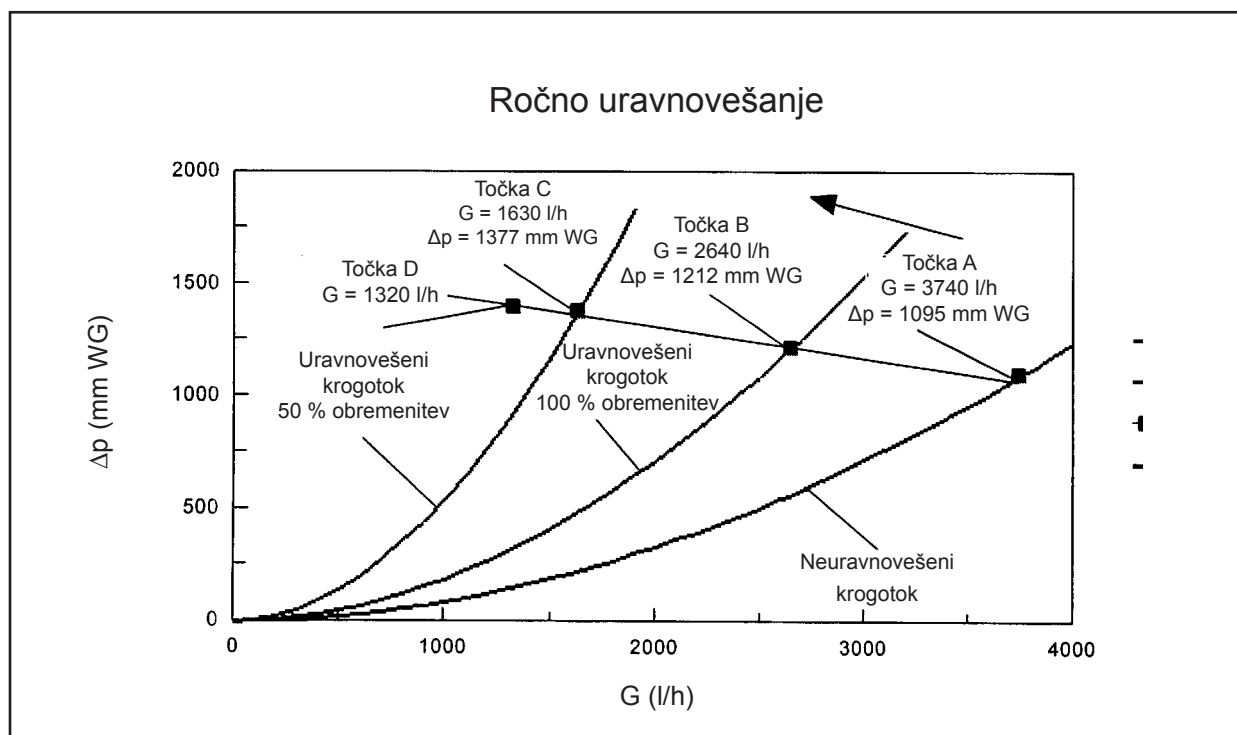


Novi pogoji obratovanja so skupna točka na stičišču krivulje črpalke in krivulje krogotoka.

Reprezentativno točko novega pogoja obratovanja pri delni obremenitvi lahko predstavimo z grafom (Slika 5).

**Točke obratovanja: polna obremenitev, delna obremenitev.**

Slika 5



Stičišče s krivuljo črpalke je nova točka ravnovesja C.

$G = 1630$  l/h

$\Delta p = 1377$  mm WG

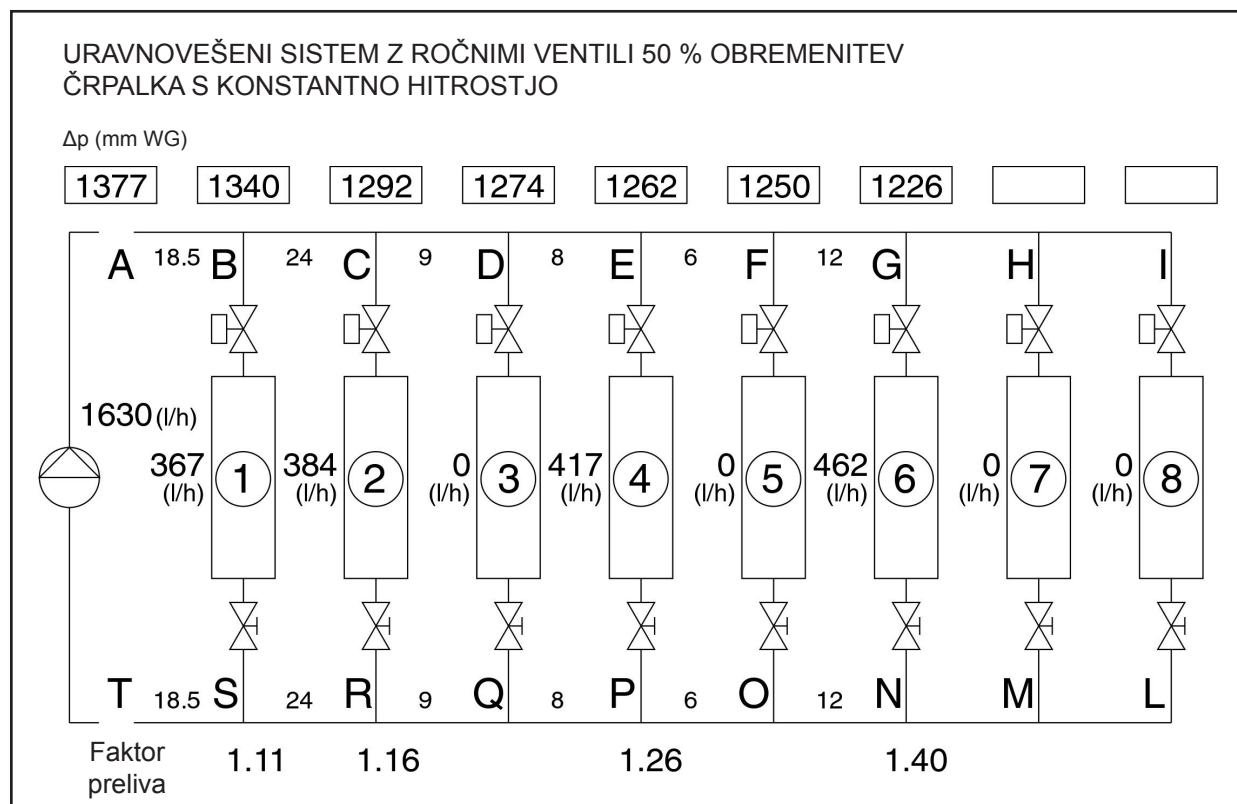
Skupni pretok pod temi novimi pogoji ni več skladen z nazivnim pretokom in znaša 1630 l/h namesto  $4 \cdot 330 = 1320$  l/h (točka D).

Razlika v pretoku je enaka + 23 %

Zaprtje regulirnih ventilov povzroči nadtlak v krogotoku in **ново razdelitev pretoka** v vsakem stranskem krogotoku (Shema 6).

Numerična analiza nadtlaka, ki nastane ob zaprtju ventilov, je opravljena v dodatku k temu poročilu.

Shema 6



V primerjavi z nazivno vrednostjo se je pretok povečal v vseh odprtih terminalih.

Faktor preliva je večji za večino terminalov, ki so oddaljeni od črpalke. Takšna situacija nastane zato, ker ventil za uravnotežanje prikaže manjšo izgubo tlaka za najbolj oddaljene stranske krogotoke kot druge stranske krogotoke.

Da bi lahko vsak terminal znova obratoval pod normalnimi pogoji, bi bilo treba ventile ponastaviti, kar pa ni izvedljivo, ker se krogotoki poljubno zapirajo. Treba je upoštevati, da je **v praksi ventile težko ponastaviti**: kot je že bilo prikazano, po zakonu o soodvisnosti hidravličnih krogotokov (glej dodatek) vsakršna sprememba, ki nastane v enem od krogotokov, privede do spremembe v pretoku v drugih krogotokih.

## Poraba energije

Splošno znano je, da vhodna moč črpalke narašča vzporedno s povečevanjem pretoka (glej dodatek). Če to moč izračunamo za nekaj različic iz prejšnjega primera, dobimo (Tabela 1):

## Moč črpalke

Tabela 1

RAZLIČICA	Obremenitev %	G (l/h)	$\Delta p$ (mm WG)	Efektivnost	Moč
1	100 %	2640	1212	0,8	100 %
2	50 % (dejanska)	1630	1377	0,7	81 %
3	50 % (teoretična)	1320	1400	0,6	75 %

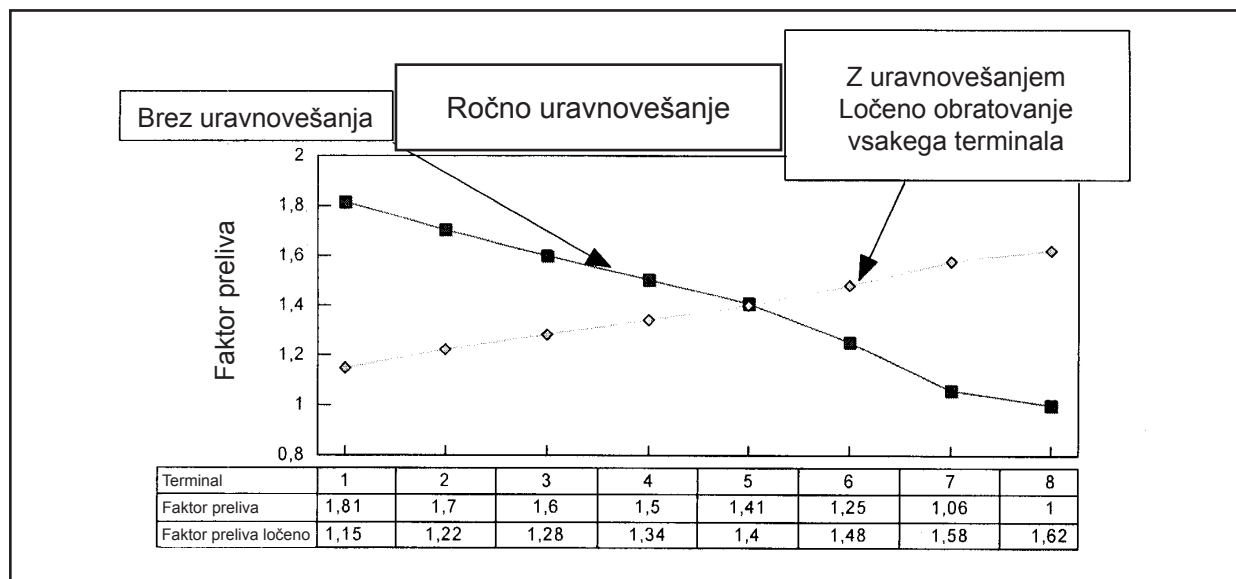
V različici 2 je vhodna moč za 6 % višja kot moč, ki bi bila lahko pridobljena, če bi bil sistem ob delni obremenitvi ponovno kalibriran na teoretični pretok (različica 3). Absolutne vrednosti moči so v tem primeru majhne, saj se nanašajo na primer, v katerem so pretoki in tlaki majhni. Opazimo lahko večji odstotek porabe energije v primerjavi s teoretičnimi pogoji, ki omejujejo tovrstno uravnovešanje.

Podane so tudi številke, ki ponazarjajo ekstremne pogoje delnega zapiranja (Slika 6).

Če v danem trenutku obratuje le en terminal, se s tem ustvarijo pogoji prekomernega polnjenja. Opazimo lahko, da se ob približevanju terminalu, za katerega na začetku smatramo, da je najslabše polnjen, pogoji prekomerne oskrbe zvišajo na vrednost 60 %.

## Pogoji ekstremne delne obremenitve

Slika 6



Odstotek povečanja vhodne moči se v primerjavi s teoretičnimi vrednostmi zviša za največ 10 %.

Zato lahko sklepamo, da ob sklicevanju na načrtovane nazivne pogoje povsem uravnovešeni sistem prikaže omejitve obratovanja pri delni obremenitvi.

Pri uporabi ventilov za ročno uravnovešanje se zdi, da preliva ni mogoče kontrolirati, zato se poraba energije poveča v primerjavi z zaželenimi pogoji.

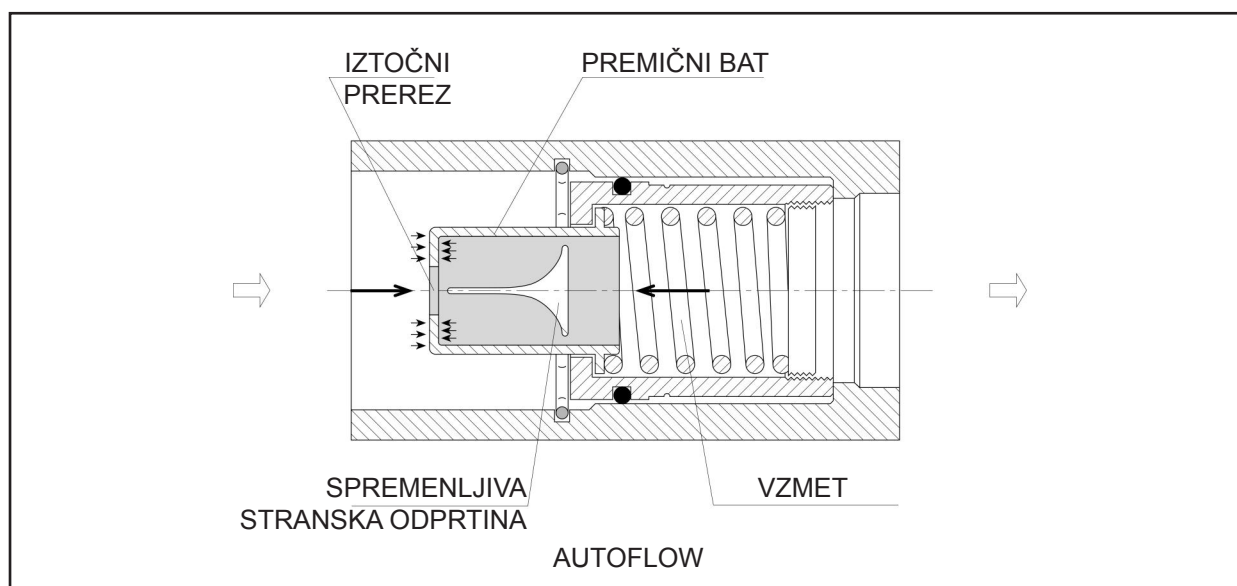
## Naprava Autoflow

Naprava Autoflow je samodejni regulator pretoka, katerega namen je vzdrževati konstantni pretok ne glede na razlike v diferenčnem tlaku med vhodnim in izhodnim priključkom.

Regulirni element Autoflow sestavljata dva bistvena dela (Slika 7):

1. bat z dvema različnima tipoma prerezov za pretakanje fluida: iztočni prerez in spremenljiva stranska odprtina;
2. spiralna vzmet, ki blaži sunek fluida v bat.

Slika 7



Ravnovesje se vzpostavi med silo vzmeti in silo, ki jo povzroči diferenčni tlak na površino glave bata.

### Zakoni ravnovesja pri Autoflowu

	Odnos	Opis	Kjer je
1	$G = K \cdot A \cdot \Delta p^{0,5}$	Stopnja pretoka - $\Delta p$	$G$ = Stopnja pretoka fluida
2	$F = \Delta p \cdot A_0$	Sila - $\Delta p$	$K$ = koeficient ravnovesja
3	$F = K_s \cdot X$	Sila vzmeti – položaj bata	$A$ = prerez za pretakanje fluida $F$ = sila $\Delta p$ = diferenčni tlak $A_0$ = površina glave bata $K_s$ = Karakteristika vzmeti $X$ = Položaj bata

## Geometrija Autoflowa

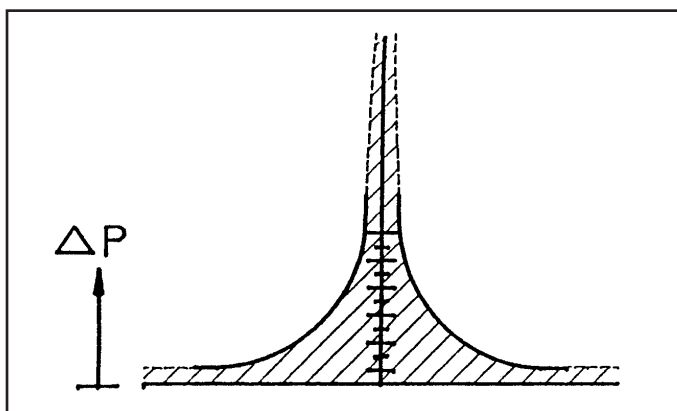
Pri vzpostavljanju zgornjih odnosov lahko določimo geometrijo prereza, ki je potreben za pretakanje fluida, da se ohrani konstantni pretok ob spreminjajočem se diferenčnem tlaku.

Izpeljemo lahko grafično krivuljo, ki identificira obliko prereza za pretakanje fluida proti  $\Delta p$ , da se ohrani konstantni pretok (Slika 8).

$A = f(\Delta p)$     z  $G = \text{konstanten}$      $A = \text{spremenljivi prerez za pretakanje fluida}$

### Oblika prereza kot funkcije $\Delta p$

Slika 8



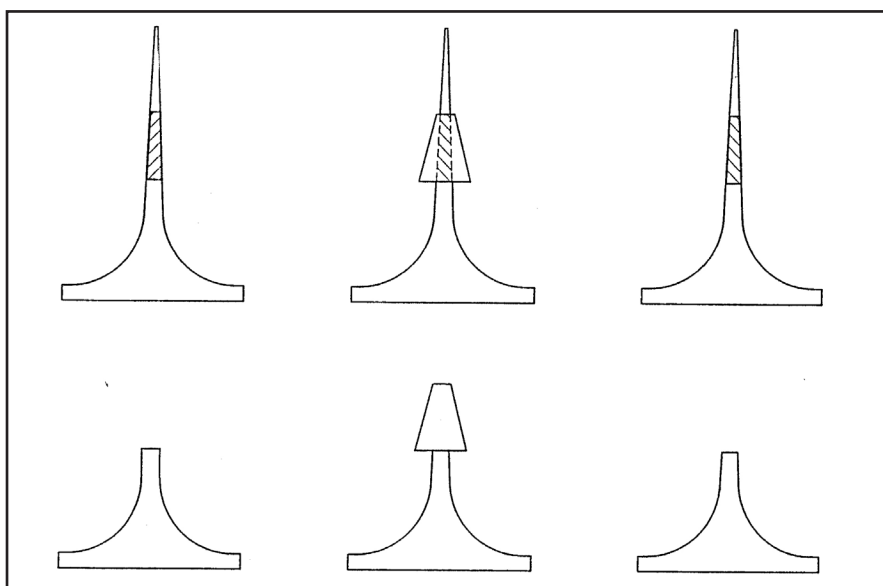
Osenčeno območje predstavlja prerez za pretakanje fluida glede na  $\Delta p$  in s tem položaj bata v ohišju.

Bolj kot se bat v notranjosti premika, manjše je to območje.

Spodaj sledi nekaj primerov tipičnih geometrij (Slika 9), ki jih izpeljemo ob dvodimenzionalnem oblikovanju stranske površine bata. Dve manjši osenčeni območji sestavljata večjo osrednjo območje.

### Geometrijska kompozicija

Slika 9

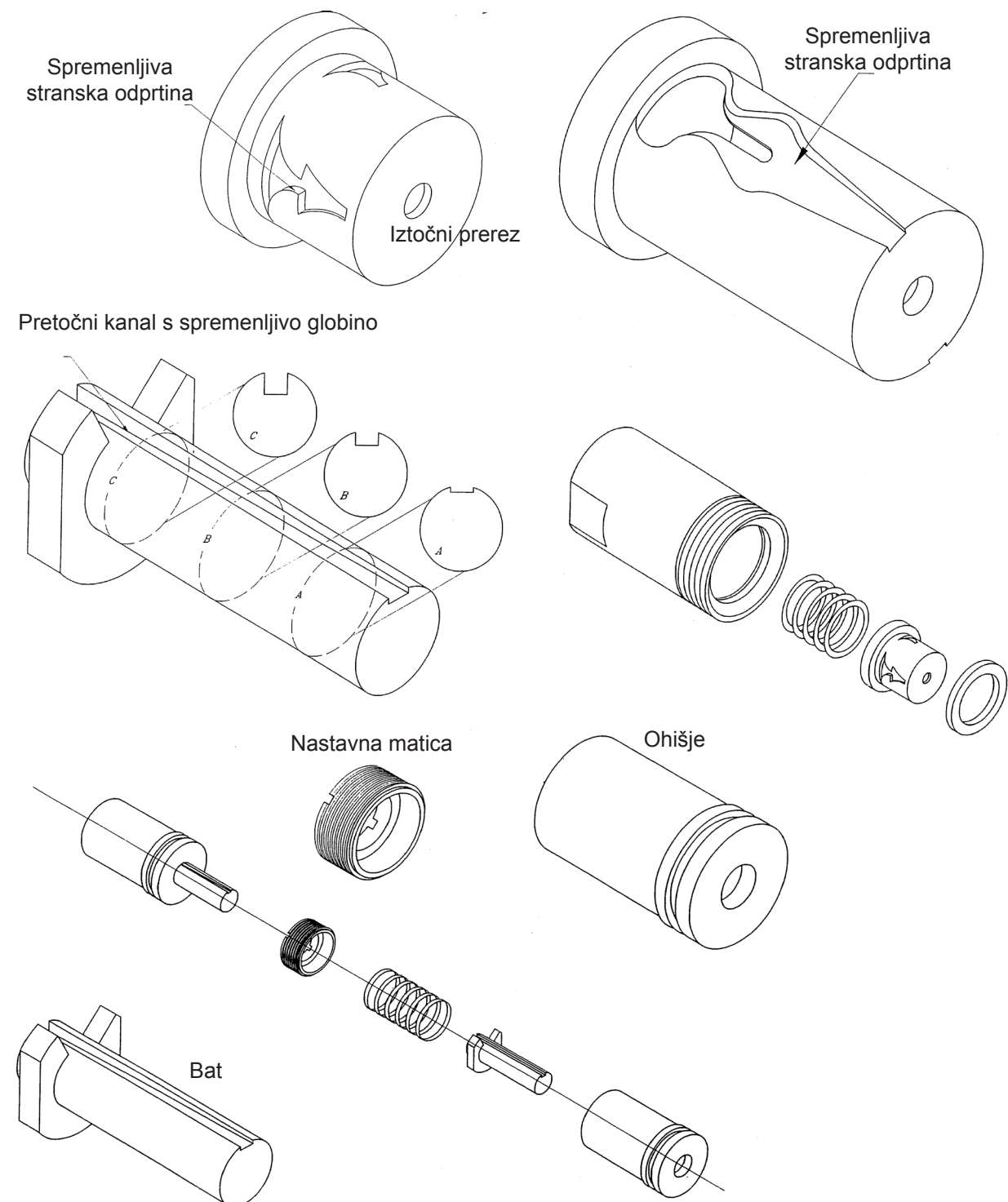


## Velikosti Autoflowa

Oblike in velikosti pretoka se spreminjajo glede na nazivni pretok in kontrolno območje diferenčnega tlaka. Vsekakor so odvisne od dimenzij regulatorja, tako imenovane kartuše. Zato se regulatorji pretoka Autoflow proizvajajo v različnih oblikah in velikostih (Slika 10).

## Geometrije in oblike regulatorjev Autoflow

Slika 10



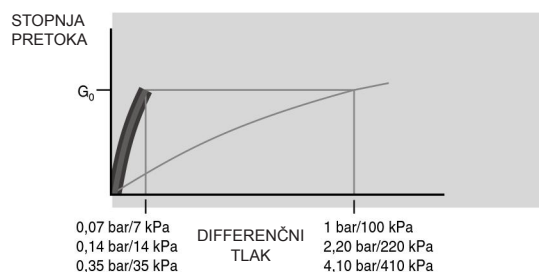


## Delovanje Autoflowa

Delovanje naprave Autoflow je lažje razumljivo s pomočjo krivulje  $\Delta p$ -G in osnovne sheme, ki prikazuje odnos med temi količinami.

### POD KONTROLNIM OBMOČJEM

SLIKE manjakajo



V tem primeru ostane regulirni bat v ravnovesju brez stiskanja vzmeti, fluidu pa omogoča maksimalno prost prehod.

V praksi bat deluje kot fiksna odprtina, zaradi česar je pretok skozi napravo Autoflow odvisen zgolj od diferenčnega tlaka.

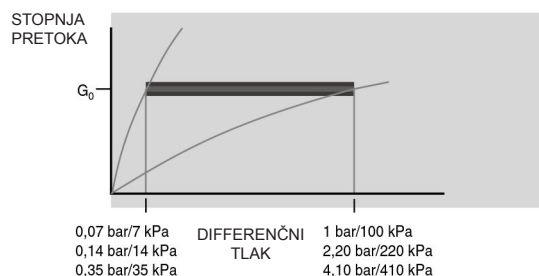
Območje  $\Delta p$  7÷100 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,378 * G_0$

Območje  $\Delta p$  14÷220 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,267 * G_0$

Območje  $\Delta p$  35÷410 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,169 * G_0$

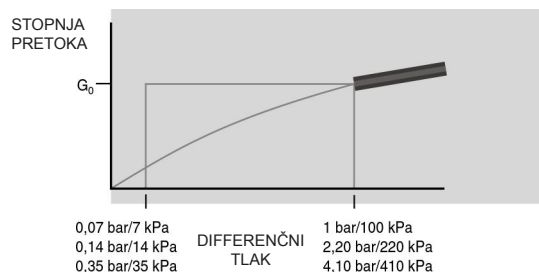
kjer je  $G_0$  = nazivni pretok

### ZNOTRAJ KONTROLNEGA OBMOČJA



Kadar je diferenčni tlak znotraj kontrolnega območja, bat stisne vzmet in omogoči fluidu ustrezen pretok, saj zagotavlja konstantni nazivni pretok.

### NAD KONTROLNIM OBMOČJEM



V tem območju bat popolnoma stisne vzmet in za pretok fluida pusti odprt le iztočni prerez.

Podobno kot v prvem primeru deluje bat tudi tukaj kot fiksna odprtina.

Pretok skozi Autoflow je odvisen od diferenčnega tlaka.

Območje  $\Delta p$  7÷100 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,1 * G_0$

Območje  $\Delta p$  14÷220 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,067 * G_0$

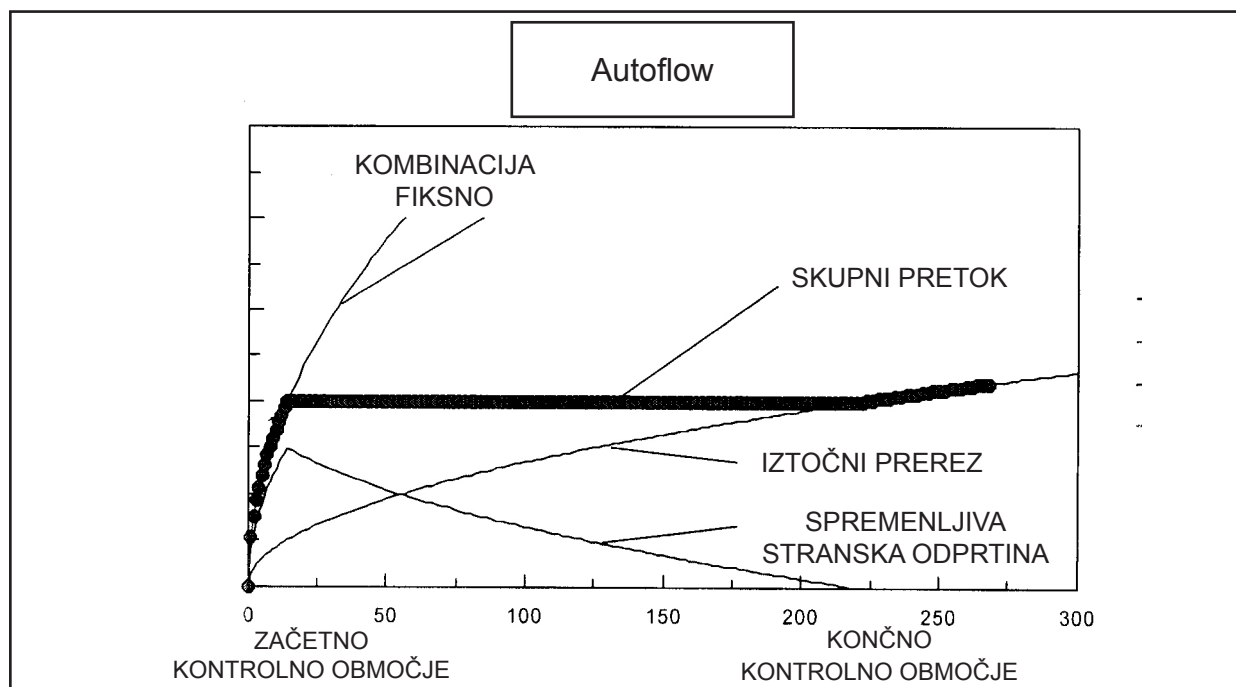
Območje  $\Delta p$  35÷410 kPa:  $Kv_{0,01} = 0,049 * G_0$

kjer je  $G_0$  = nazivni pretok

Koristno bi bilo v istem grafu predstaviti krivulje pretokov, ki se pojavijo v posameznih prerezih in kompozicijah v funkciji  $\Delta p$  (Slika 11).

### Kompozicija pretokov z Autoflowom

Slika 11



Skupni pretok je vsota pretokov skozi IZTOČNI PREREZ in SPREMENLJIVE stranske prereze.

### Pripombe

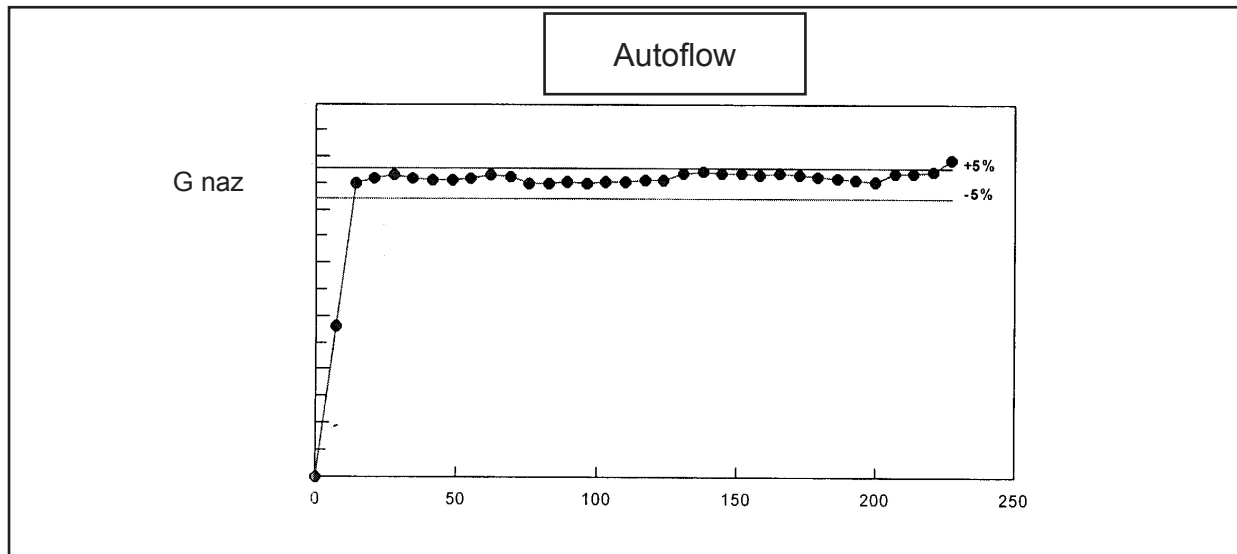
Kontrolno območje teh naprav je še posebej široko in lahko izpolnjuje zahteve večine sistemov.

Poleg tega so na voljo različna območja diferenčnega tlaka (tj. 14÷220 kPa in 35÷410 kPa), kar še dodatno povečuje verjetnost kontrole.

## Odstopanja pretoka

Ohranja se nazivni pretok z odstopanjem  $\pm 5\%$ .

Slika 12



S tem je omogočeno ohranjanje pretoka znotraj predpisanih omejitev, da se doseže optimalno delovanje terminalov in regulirnih naprav.

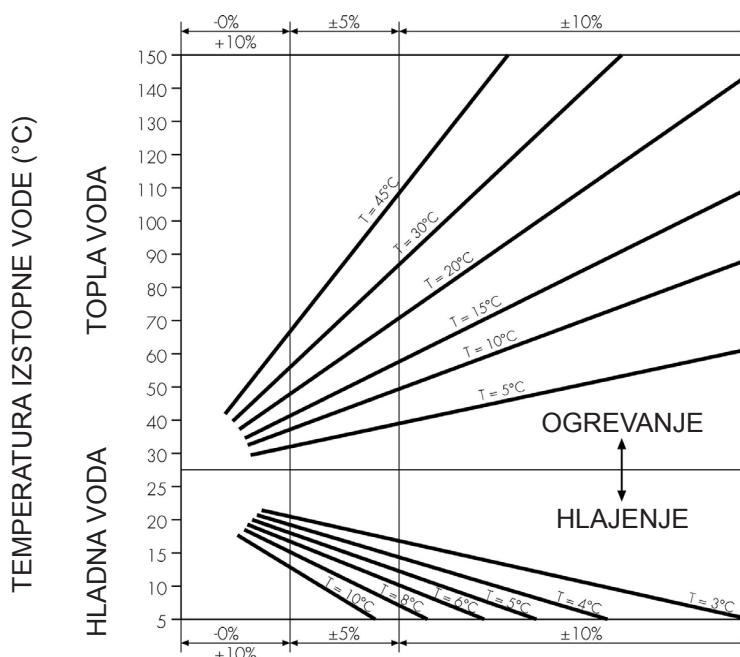
Te omejitve so odvisne od delovanja sistema, tj. ogrevanja ali hlajenja, in od temperatur toplotnega fluida.

Na splošno bi lahko rekli, da je predpisano odstopanje za nazivni pretok v primeru ogrevanja  $\pm 10\%$ , v primeru hlajenja pa ne več kot  $\pm 5\%$  (Slika 13).

## Odstopanja pretoka pri ogrevanju – hlajenju

Na podlagi zakonov o prenosu toplote in pretoku lahko izvedemo reprezentativni graf. Ta graf lahko služi kot koristen vodič pri izbiranju odstopanj pretoka. [6] [4].

Slika 13



## Uravnovešanje z napravo Autoflow – črpalka s konstantno hitrostjo

Kot smo že videli, tradicionalna metoda uravnovešanja z ventili za ročno uravnovešanje zagotavlja zgolj konstanten pretok pod obratovalnimi pogoji, ki so identični pogojem, katerim so bili prilagojeni – tj. **načrtovanim pogojem**.

Če sistem obratuje pod delno obremenitvijo, se karakteristika krogotoka spremeni in potrebno je novo uravnovešanje, da se dosežejo načrtovani pretoki skozi vsak terminal v krogotoku.

Pravzaprav je pri delni obremenitvi vedno prisoten preliv v terminalih.

Očitno je, da tovrstno obratovanje (ponastavitev ventilov) v praksi ni izvedljivo in da se uporabljajo naprave za uravnovešanje, ki so drugačne od tradicionalnih ventilov za ročno uravnovešanje.

Te naprave morajo biti dinamične in zagotavljati načrtovan pretok znotraj normalnega kontrolnega območja pod kakršnimi koli obratovalnimi pogoji.

### 1. Nprekinjeno uravnovešanje

V neuravnovešenem krogotoku so nazivni pretoki skozi različne terminale zagotovljeni le, kadar se absorbira presežek diferenčnega tlaka na različne elemente.

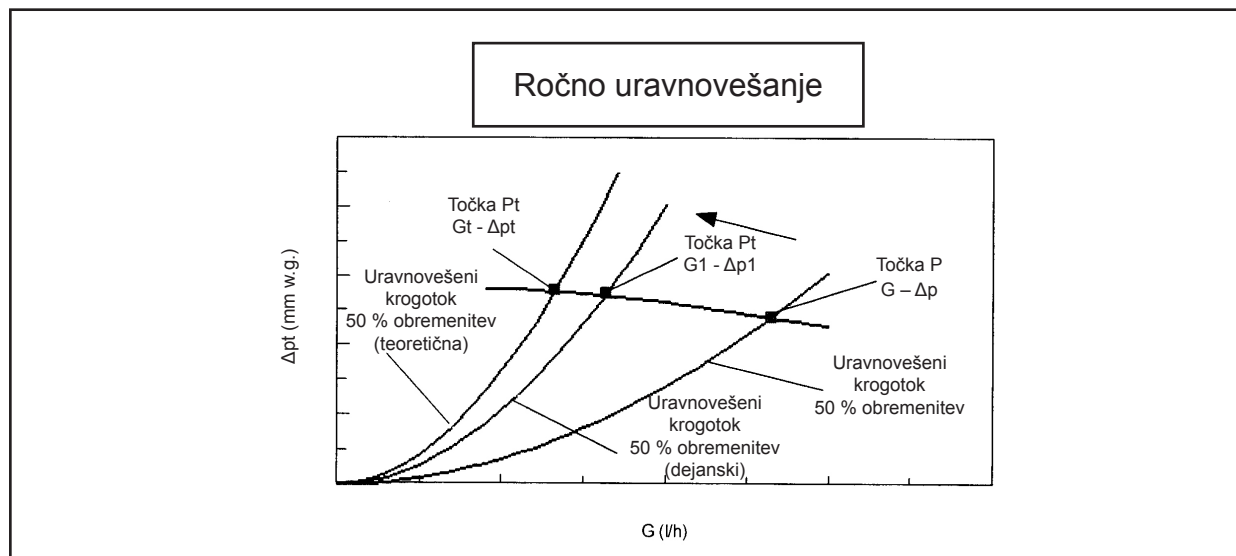
Ko se ti elementi uravnovesijo, delno zaprtje ventilov povzroči nadtlak zaradi povečanih padcev tlaka.

Nova vrednost določi novo obratovalno točko sistema – P1.

Na tej obratovalni točki je ustrezní pretok G1, ki je večji od zaželenega teoretičnega pretoka pri delni obremenitvi, tj. teoretičnega Gt (Slika 14).

**Obratovalne točke sistema: polna obremenitev in delna obremenitev.**

Slika 14



Za zagotavljanje želenih pretokov je treba krogotok znova vzpostaviti zaradi absorpcije nadtlaka in ponastaviti skupni pretok na teoretični Gt.

Zahvaljujoč njeni konstrukciji lahko naprava Autoflow absorbira ta nadtlak in hkrati vzdržuje konstantni pretok.

Zato ji lahko upravičeno rečemo **regulator pretoka dinamičnega in povezanega tipa**.

## 2. Načrtovanje z napravo Autoflow

Pri oblikovanju tega projekta je treba upoštevati, da ima najbolj oddaljeni krogotok, ki je opremljen z Autoflowom, vedno načrtovani pretok.

Če krogotok ni opremljen z Autoflowom, bi bil v primeru delnega zaprtja drugih krogotokov prekomerno polnjen.

To je krogotok, v katerem je diferenčni tlak na Autoflowu nižji od drugih (pravila za izračun padcev tlaka so vedno enaka).

**Izbrati je treba črpalko, ki bo zagotovila minimalni diferenčni tlak na Autoflowu v tem krogotoku, omogočila zagon regulirnega delovanja naprave in ohranjala konstantni pretok.**

Spodaj navedena zaprtja pri delni obremenitvi povzročajo že dobro znani nadtlak, ki ga v tem primeru absorbira sama naprava.

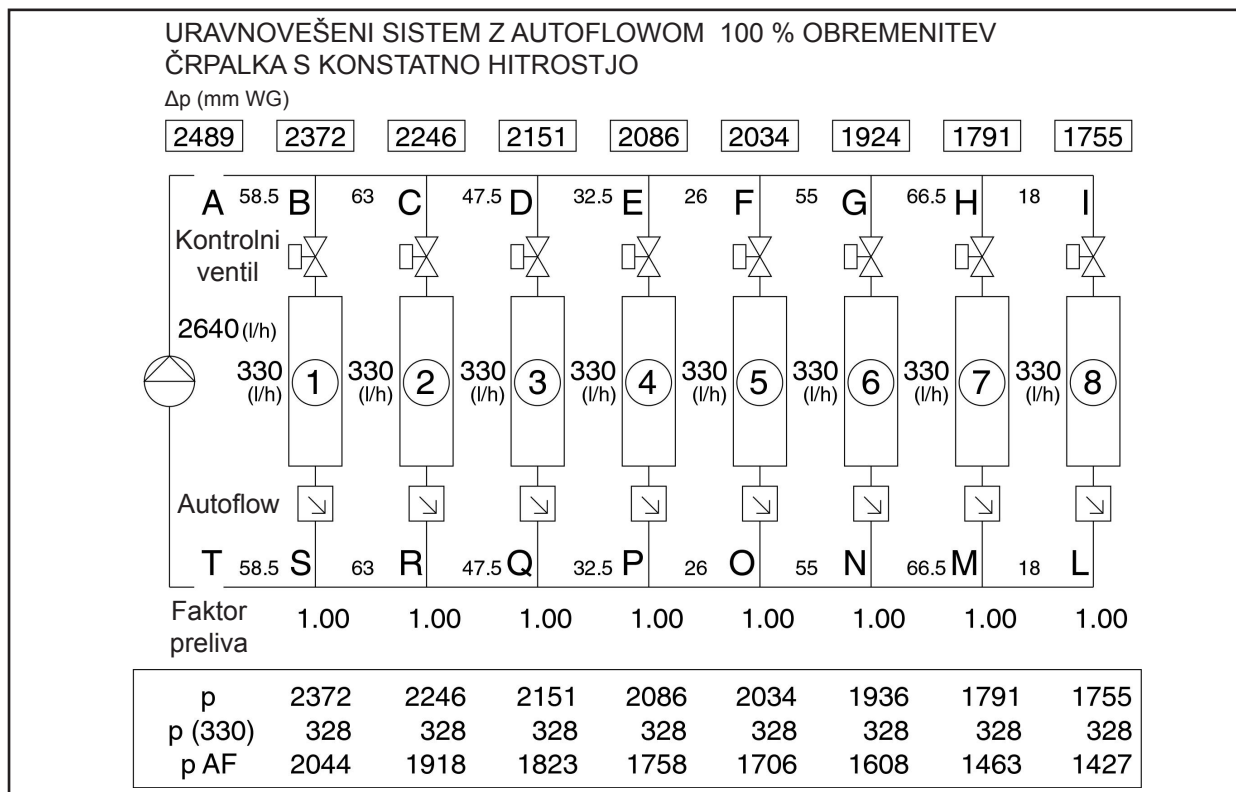
Pri izbiri črpalke je treba tlak v njej izračunati s pomočjo vsote padcev tlaka v najbolj oddaljenem krogotoku in minimalnega diferenčnega tlaka naprave Autoflow.

### Primer

Ob upoštevanju prejšnjega primera se naprave Autoflow namestijo namesto ventilov za ročno uravnovešanje. Za analogijo se navajajo le relativni podatki o končnih obratovalnih pogojih (Shema 7).

Izračuni, izvedeni v tem primeru, so podani tudi na strani 46 drugega zvezka Caleffijevih priročnikov.

Shema 7



S pomočjo naprave Autoflow se vzpostavi popolnoma uravnovešen krogotok.

## Pripombe

$\Delta p$  na Autoflowu v zadnjem stranskem krogotoku znaša 1427 mm WG, zaradi česar je Autoflow na minimumu svojega kontrolnega območja.

Bližje ko so stranski krogotoki črpalke, bolj narašča  $\Delta p$  na Autoflowu v različnih stranskih krogotokih.

Zato je vzmet Autoflowa bolj stisnjena.

$$G = 2640 \text{ l/h}$$

$$\Delta p = 2489 \text{ mm WG}$$

V tem primeru se z uporabo Autoflowa razlika v skupnem tlaku v krogotoku poveča.

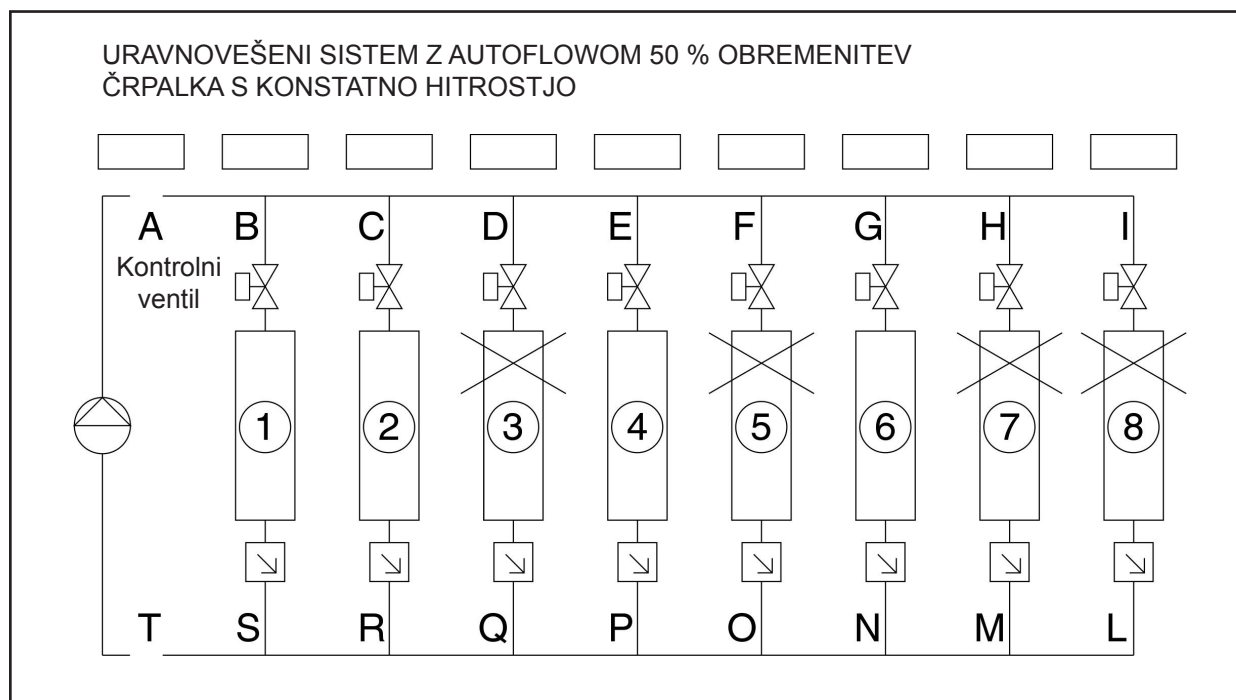
To povečanje pa je treba ovrednotiti na celotni instalaciji.

## Delna obremenitev

Shema 8 pojasnjuje, kaj se zgodi, če sistem deluje ob delni obremenitvi.

Pri rokovanju s kontrolnimi ventili je simulirano zaprtje terminalov iz prejšnjega primera.

Shema 8

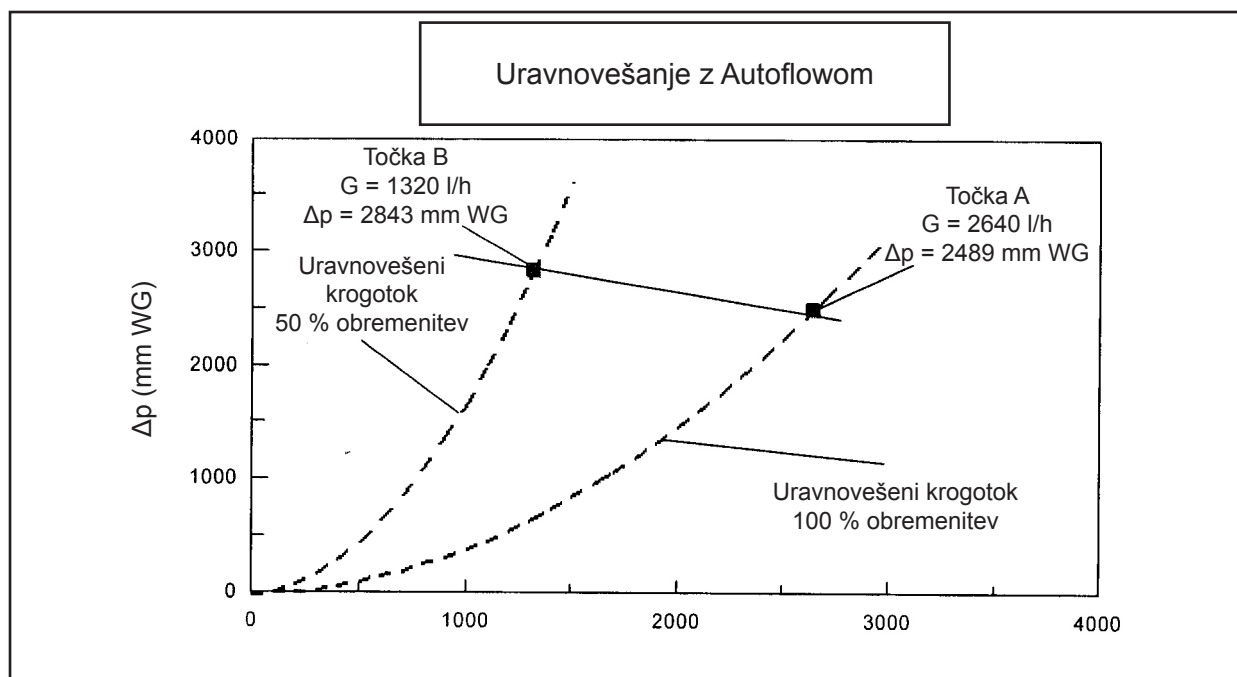


Pod temi novimi pogoji je izpeljan graf, ki prikazuje različne obratovalne točke (Slika 15).

**Opozorilo:** Zaradi različnih nazivnih obratovalnih točk  $\Delta p$ -G je karakteristična krivulja črpalke v tem primeru drugačna od krivulje črpalke z ventili za ročno uravnovešanje.

## Obratovne točke krogotoka z Autoflowom: polna obremenitev in delna obremenitev

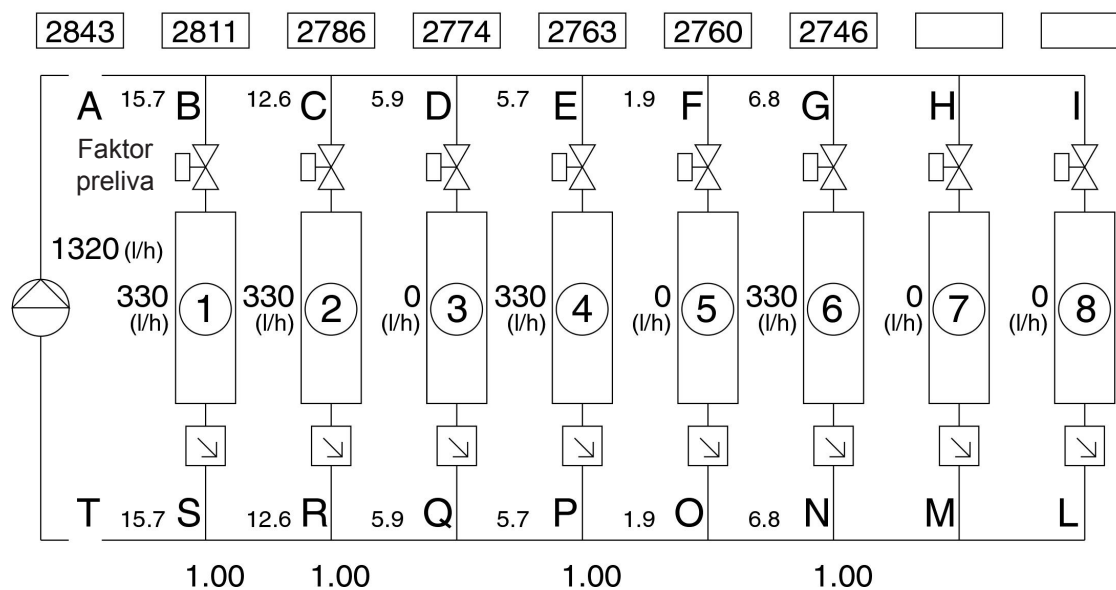
Slika 15



Spodaj so navedeni novi pogoji delovanja dinamičnega uravnovešenega krogotoka z Autoflowom (Shema 9).

Shema 9

URAVNOVEŠENI SISTEM Z AUTOFLOWOM 50 % OBREMENITEV  
 ČRPALKA S KONSTANTNO HITROSTJO  
 $\Delta p = \text{mm WG}$



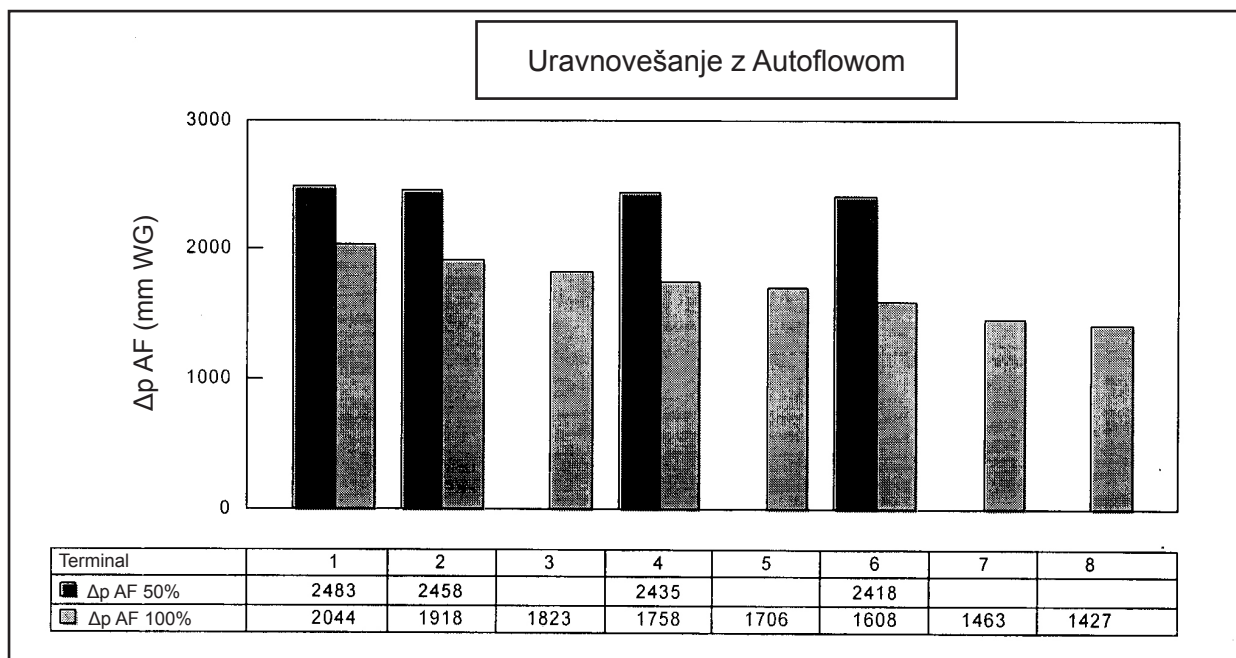
Pretok ostaja konstanten pri svoji nazivni vrednosti.

Autoflow absorbira nadtlak zaradi zaprtja kontrolnih ventilov (Slika 16).

V spodnjem grafu je naveden trend tega nadtlaka, da se navede povzetek tega fizikalnega pojava.

### $\Delta p$ , ki ga absorbira Autoflow

Slika 16



### Pripombe:

Pri delni obremenitvi je povečanje  $\Delta p$ , ki ga absorbira Autoflow (AF), sorazmerno večje za krogotok 6 kot za krogotok 1. Zato:

- manjše kot je število priključenih krogotokov, večji je diferenčni tlak, ki ga mora absorbirati Autoflow;
- večje kot je število priključenih krogotokov, manjši je maksimalni diferenčni tlak, ki ga mora absorbirati Autoflow;

### $D = \Delta p_{maks} - \Delta p_{min}$

s 50 % obremenitvijo:  $D = 2483 - 2418 = 65 \text{ mm WG}$

s 100 % obremenitvijo:  $D = 2044 - 1427 = 617 \text{ mm WG}$

- večje kot je število priključenih krogotokov, večja je razlika  $D$  med diferenčnim tlakom na različnih napravah Autoflow ( $617 > 65$ ).



## Ročno uravnovešanje – črpalka s spremenljivo hitrostjo

Če v ročno uravnovešanem krogotoku uporabljamo črpalke s spremenljivo rotacijsko hitrostjo za izpolnjevanje novih zahtev delne obremenitve sistema, se zgodi naslednje:

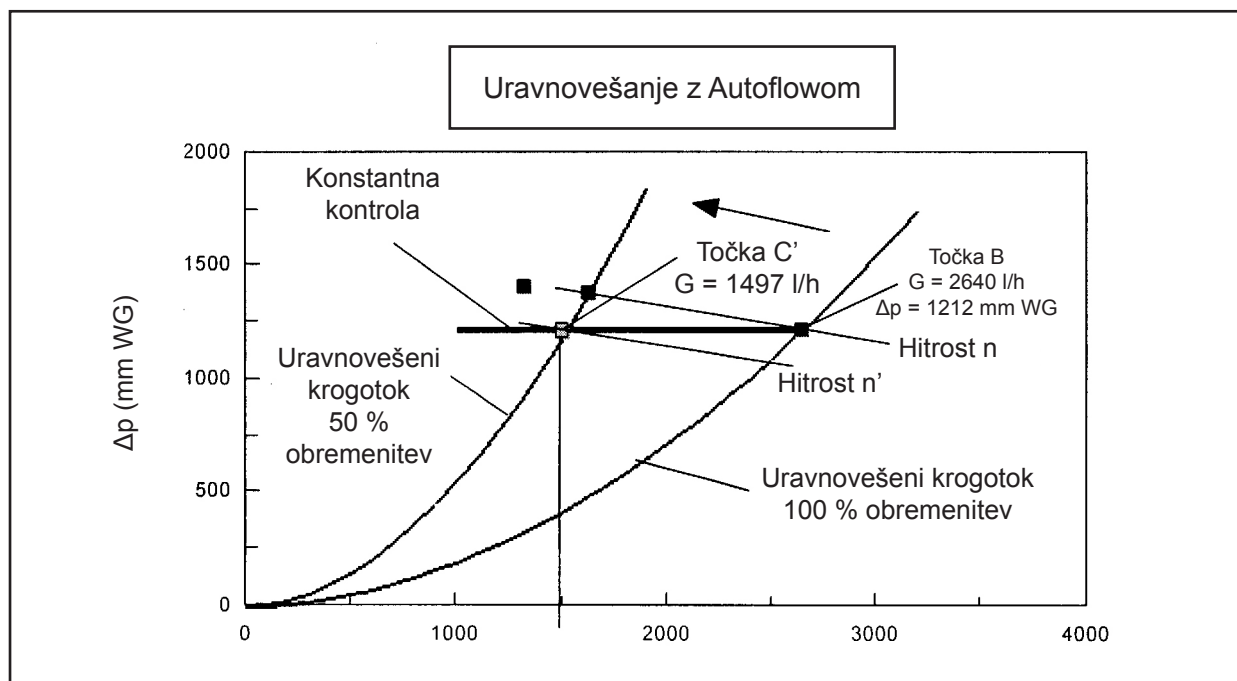
### Primer 1 – Konstantna kontrola

Črpalke zmanjša hitrost in s tem tudi pretok, pri čemer **vzdržuje konstantni  $\Delta p$** .

Tej metodi pravimo **konstantna kontrola** (Slika 17).

### Črpalke s spremenljivo hitrostjo in konstantno kontrolo

Slika 17



### Nova hitrost črpalke je $n'$ .

V tem primeru je nova obratovalna točka točka C' z  $\Delta p = 1212$  mm WG.

Enako vrednost ima točka B, ki ustreza uravnovešenemu krogotoku, ki obratuje pri 100 % obremenitvi.

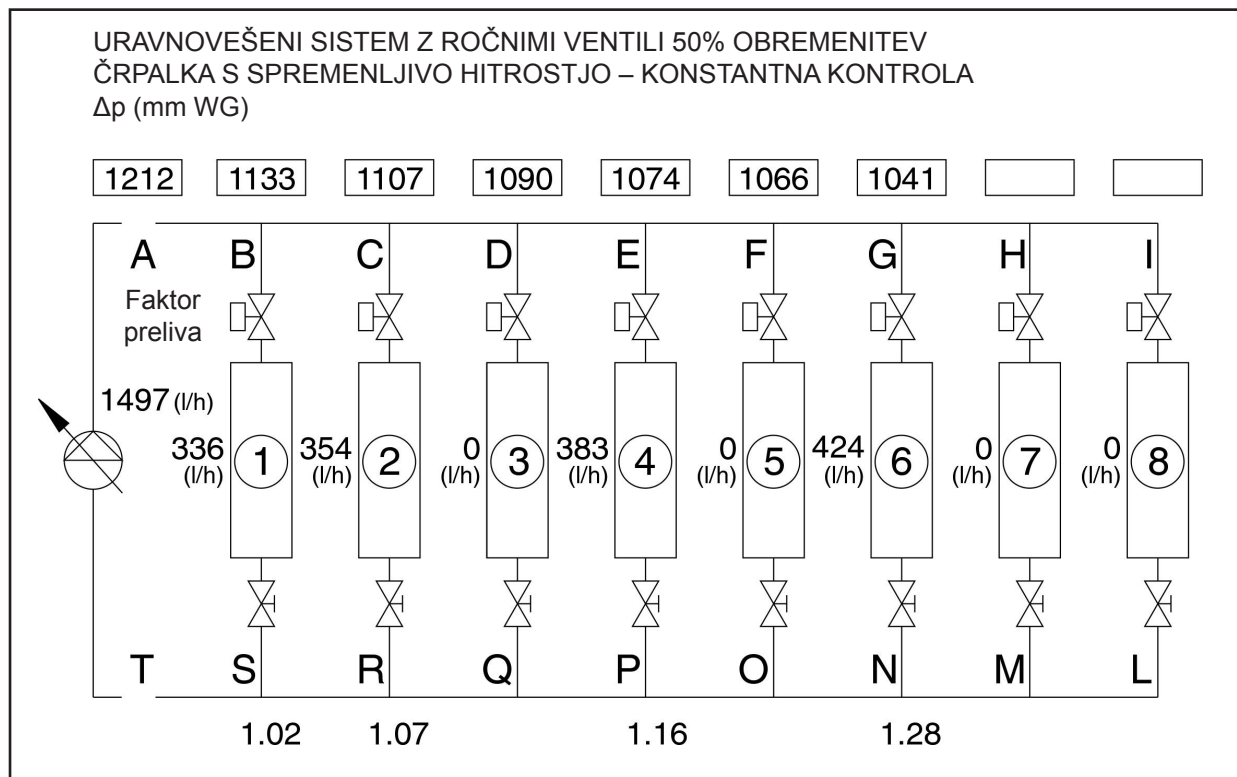
Pretok, ki ustreza točki C', je določen s stičiščem krivulje krogotoka pri delni obremenitvi in črte  $\Delta p =$  konstanten.

V tem primeru je pretok  $G = 1497$  l/h.

## Pretoki

V shemi so navedene nove vrednosti pretokov v stranskih krogotokih pod novimi pogoji (Shema 10).

Shema 10



Shema kaže, da se faktorji preлива zmanjšujejo, kar pomeni prednost v primerjavi s črpalko s konstantno hitrostjo. Vendar pa so še vedno  $> 1$ .

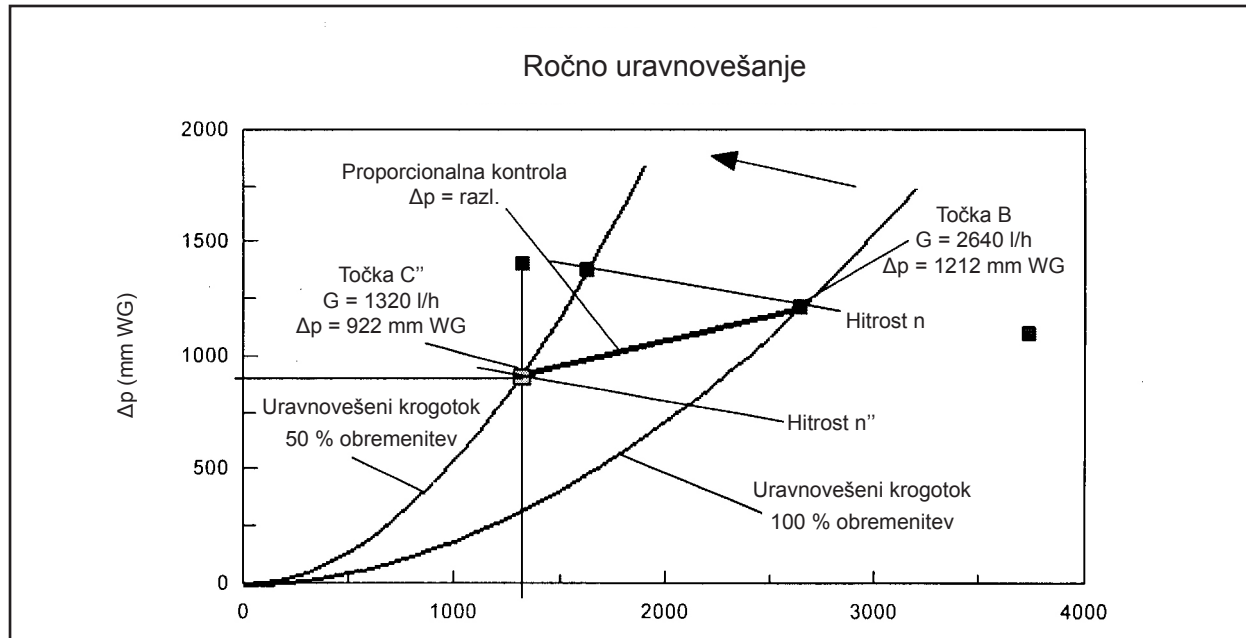
Tudi v tej situaciji z ročnim uravnovanjem krogotoka ni mogoče doseči načrtovanega pretoka v več različnih krogotokih.

## Primer 2 – Proporcionalna kontrola

Črpalka spremeni rotacijsko hitrost tako, da zmanjša **pretok** in **tlak**. Tej metodi pravimo **proporcionalna kontrola** (Slika 18).

**Črpalka s spremenljivo hitrostjo in proporcionalno kontrolo.**

Slika 18



Pod temi pogoji so stranski krogotoki oskrbovani s teoretičnim nazivnim pretokom, ki ustreza 50 % delni obremenitvi.

To pomeni  $G = 1320 = 330 * 4$  l/h.

Novo točko C' lahko najdemo na stičišču krivulje krogotoka pri delni obremenitvi in črte pri stopnji konstantnega pretoka  $G = 1320$  l/h.

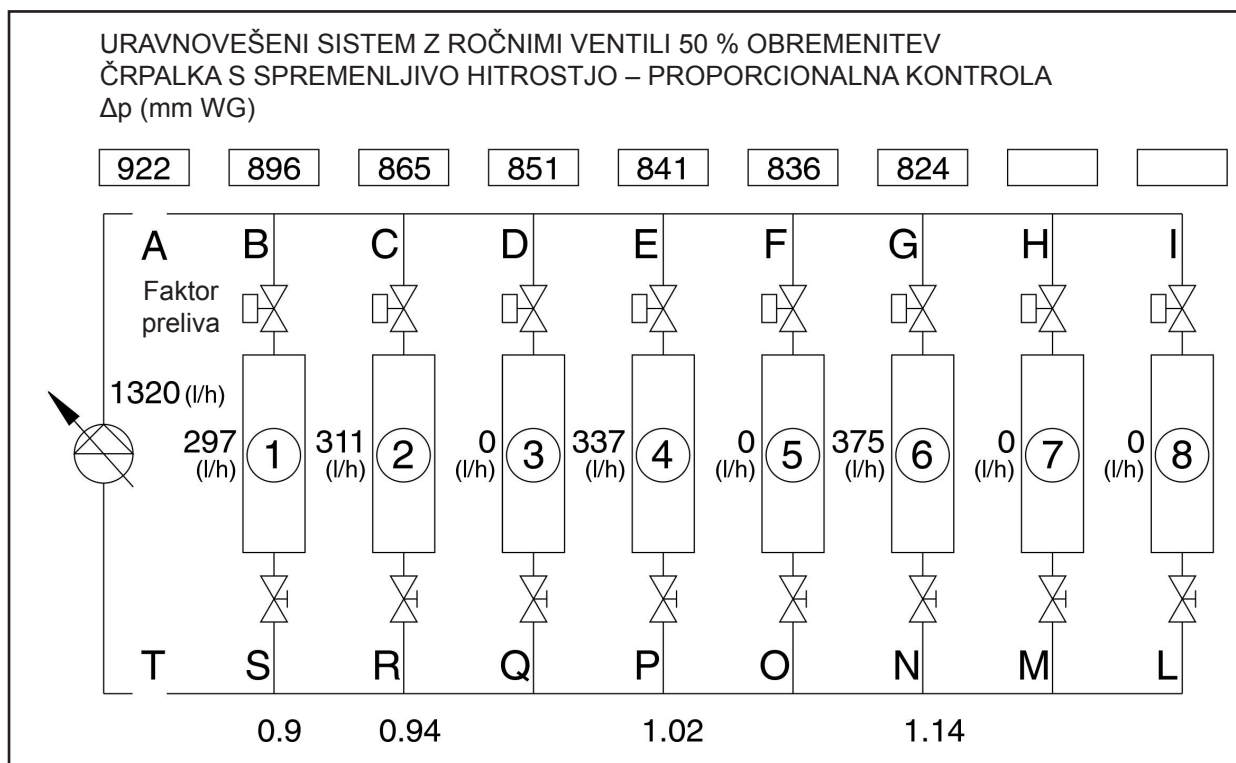
Nova vrednost  $\Delta p$  znaša:  $\Delta p = 922$  mm WG

**Nova hitrost črpalke je n''.**

## Pretoki

V tem primeru je o novih vrednostih pretokov stranskih krogotokov mogoče tudi sklepati (Shema 11).

Shema 11



Niti v tem primeru niso dosežene vrednosti načrtovanega pretoka v stranskih krogotokih, saj se v prvih terminalih ne pojavljajo zgolj težave v zvezi s prekomernim polnjenjem, marveč tudi težave z **nezadostnim polnjenjem**.

Te težave povzročajo ročno uravnovešanje navedenih krogotokov glede na nazivne vrednosti pretoka in  $\Delta p$ .

V prvem stranskem krogotoku pri polni obremenitvi so bili, na primer, ugotovljeni naslednji pogoji:

$\Delta p = 1095$  mm WG; now  $\Delta p = 896$  mm WG

Zato se pretok zniža za 10 %.

Ko se zniža raven delne obremenitve sistema, te različice pretoka narastejo v primerjavi z nazivnimi vrednostmi.

V danem primeru je bila uporabljena črpalka z notranjim senzorjem  $\Delta p$  med vhom in izhodom.

Izbira položaja senzorja  $\Delta p$  vpliva na izbiro vrste kontrole; še zlasti je treba upoštevati, da z namestitvijo senzorja  $\Delta p$  v najbolj oddaljeni krogotok dosežemo najnižjo možno porabo energije, a ta rešitev hkrati povzroči težave zaradi nezadostnega polnjenja najbližjih terminalov. [8]

**Zatorej, tudi če črpalko s spremenljivo hitrostjo uporabljamo v ročno uravnovešanem sistemu, problem vzdrževanja načrtovanega pretoka ostaja, če se obratovalni pogoji spreminjajo.**

## Uravnovešanje z Autoflowom – črpalka s spremenljivo hitrostjo

Ravno nasprotno pa, če bi bil kot alternativa ventilom za ročno uravnovešanje uporabljen **Auto-flow**, do takšnih težav ne bi prišlo.

Autoflow **bi se samodejno prilagodil** novim pogojem obremenitve sistema s tem, da **bi se stisnil v primeru povečanega  $\Delta p$  in sprostil v primeru zmanjšane  $\Delta p$** , obenem pa še vedno ohranjal enak pretok v stranskem krogotoku.

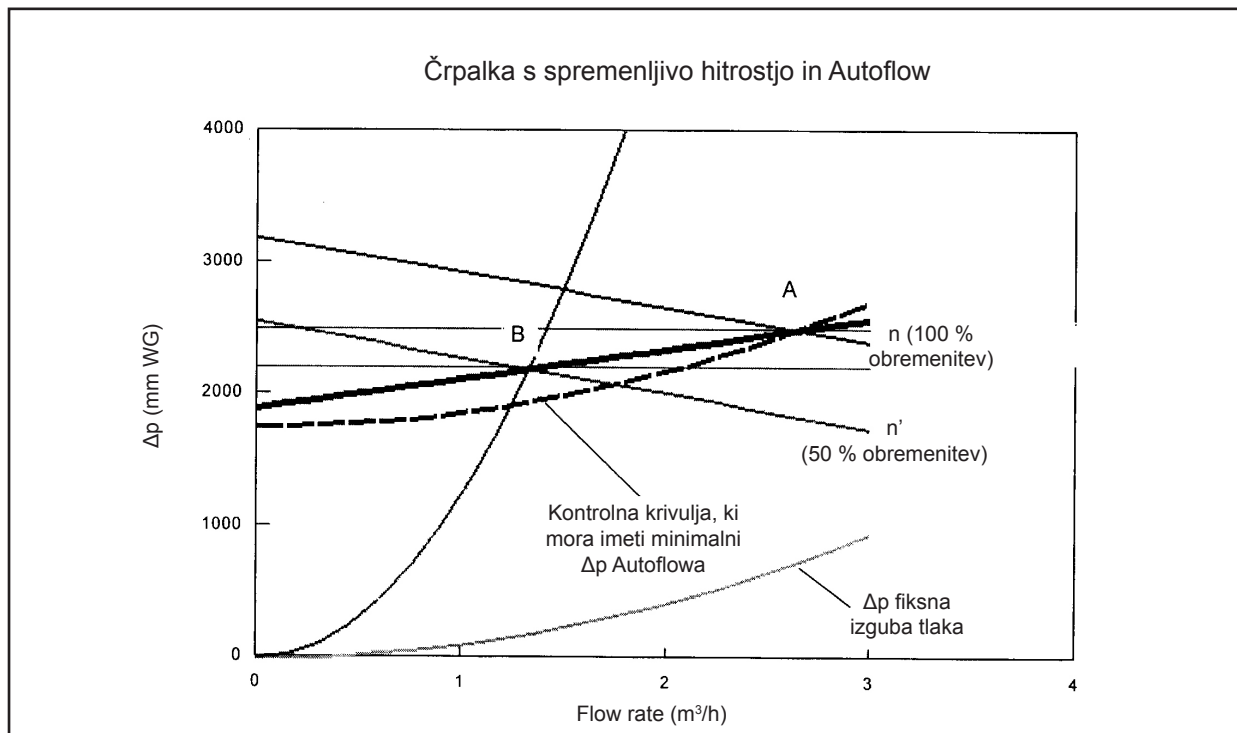
Edini pogoj je, da mora Autoflow imeti minimalni začetni  $\Delta p$ , v skladu z zmanjšanjem tlaka v črpalki ob delni obremenitvi.

**Ko črpalka zmanjša hitrost, je treba zagotoviti, da bo Autoflow ob vsakem času podvržen  $\Delta p$  znotraj svojega kontrolnega območja.**

Ali enostavneje rečeno: dovolj bo že zagotavljati minimalni obratovalni  $\Delta p$  pod kakršnimi koli pogoji obremenitve za Autoflow v krogotoku, ki je najbolj oddaljen od črpalke (Slika 19).

### Minimalni obratovalni $\Delta p$

Slika 19



Točka, ki na grafu predstavlja nove pogoje obremenitve (točka **B**) **mora zato vedno biti nad prekinjeno krivuljo.**

Dejansko se nanaša na najbolj oddaljeni krogotok in obratuje tako, da se bo v tem krogotoku ohranjal enak  $\Delta p$  (fiksni  $\Delta p = 328 \text{ mm WG} + \text{minimalni } \Delta p \text{ Autoflowa} = 1400 \text{ mm WG}$ ).

Če je  $\Delta p$  v tem krogotoku konstanten, bo konstanten tudi pretok.

Če obstaja minimalni obratovalni  $\Delta p$  na Autoflowu, bo pretok naziven.

Torej, če je Autoflow v najbolj oddaljenem krogotoku podvržen minimalnemu obratovalnemu  $\Delta p$ , so vsi drugi Autoflowi podvrženi  $\Delta p$  znotraj kontrolnega območja.

**Tudi v tem primeru bo pretok skozi vsak Autoflow ostal konstanten pri svoji nazivni vrednosti.**

## Energijski prihranek

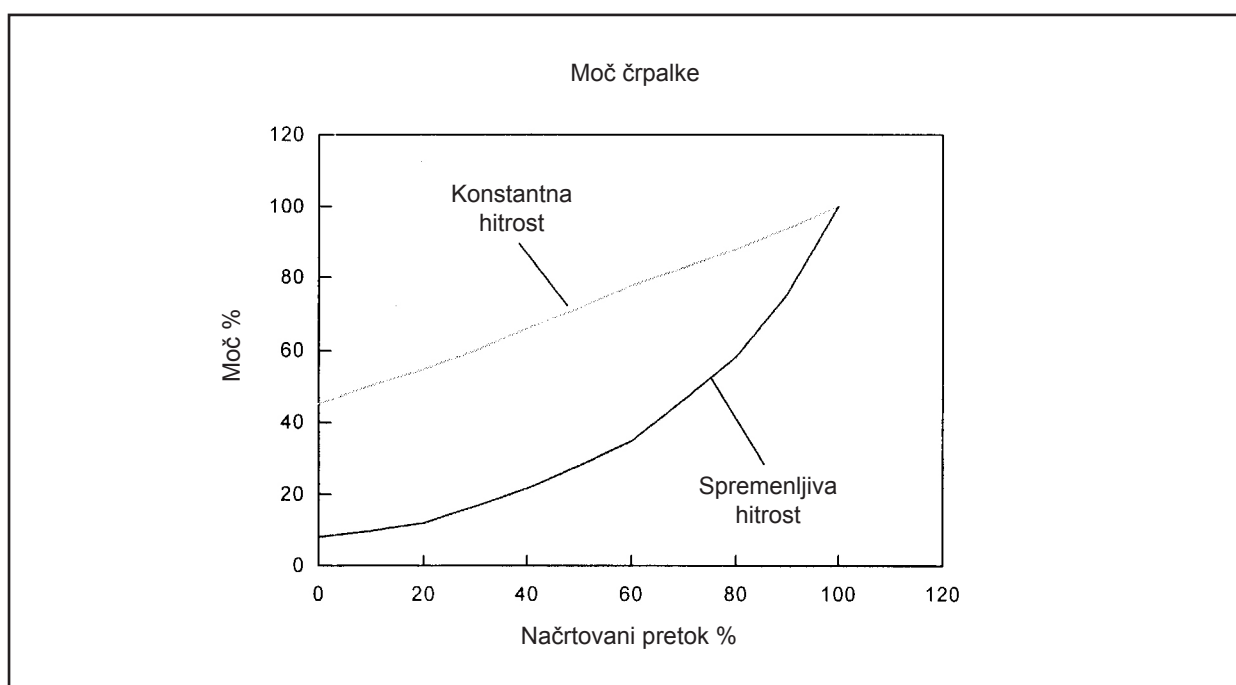
Uporaba črpalke s spremenljivo hitrostjo omogoča zniževanje vhodne moči ob zmanjšanju obremenitve sistema.

To znižanje je prikazano v grafu, kjer je podana primerjava vhodnih moči v primeru zmanjšane pretoka pod obratovalnimi pogoji pri konstantni ali spremenljivi hitrosti (Slika 20).

Na primer: s črpalko s konstantno hitrostjo in pretokom, enakim 50 % nazivne vrednosti, bo moč enaka 75 % moči pod pogoji polne obremenitve; s črpalko s spremenljivo hitrostjo pa bo vhodna moč enaka 30 % moči pod pogoji polne obremenitve.

### Primerjava: črpalka s konstantno in spremenljivo hitrostjo

Slika 20



## Ugotovitve

V tabeli spodaj so povzeti rezultati uravnovešanja krogotokov, ki so bili pridobljeni z analizo praktičnega primera.

Vrsta krogotoka	Vrsta črpalke	Stopnja obremenitve	Faktor preliva - skupno	Maksimalni faktor preliva - stranski krogotok	% vhodne moči
Neuravnovešen	Konstantna hitrost	100%	1.42	1.81	168%
Uravnovešen z ročnimi ventili	Konstantna hitrost	100%	1.00	1.00	100%
Uravnovešen z ročnimi ventili	Konstantna hitrost	50%	1.23	1.40	81%
Uravnovešen z Autoflowom	Konstantna hitrost	100%	1.00	1.00	100%
Uravnovešen z Autoflowom	Konstantna hitrost	50%	1.00	1.00	75%
Uravnovešen z ročnimi ventili	Spremenljiva hitrost	50%	1.00	0.9-1.14	30%
Uravnovešen z Autoflowom	Spremenljiva hitrost	50%	1.00	1.00	30%

## Uporaba krogotokov z Autoflowom v sistemih

Spodaj so podane tipične sheme klimatskih sistemov, v katerih so predstavljeni regulatorji Autoflow.

V vseh shemah obstaja potreba po ohranjanju konstantnega pretoka na določenih točkah hidravličnega krogotoka, da se izpolnijo različne, vendar natančno določene in znane zahteve.

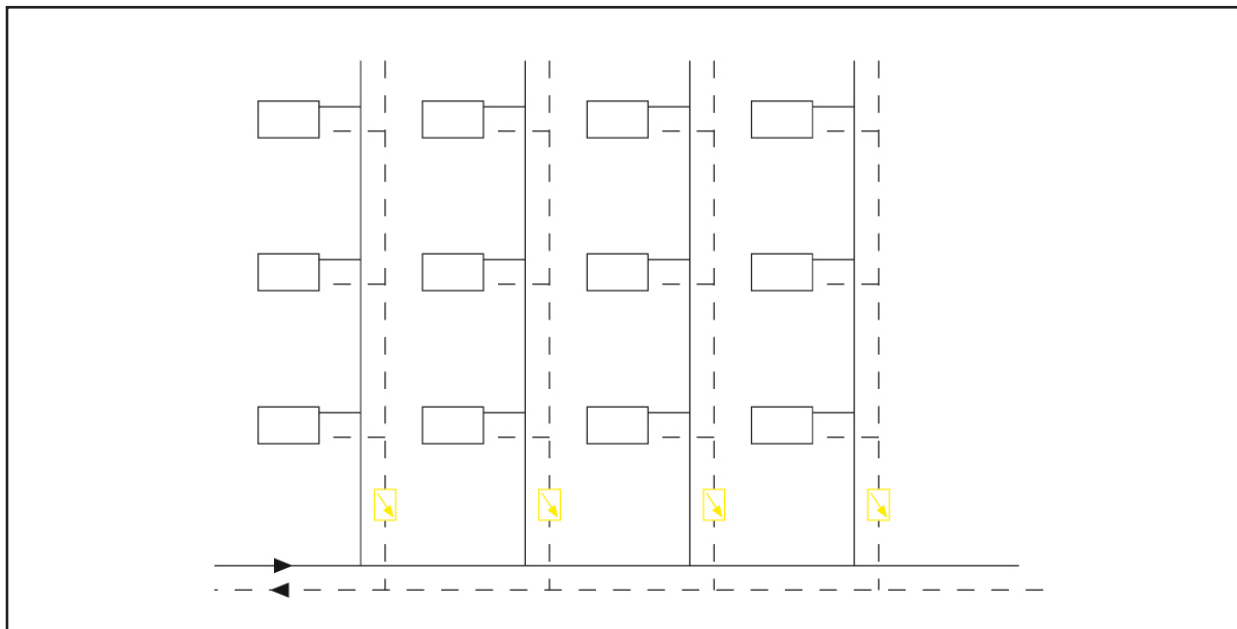
Isto načelo glede shem s potrebnimi spremembami se lahko uporabi za druge aplikacije, ki bi nadomestile tradicionalne klimatske sisteme, kot so denimo industrijsko procesni, hladilno, kemijsko in hidravlično distribucijski sistemi in podobno.

V klimatskih sistemih se krogotoki z Autoflowom uporabljajo predvsem za zagotavljanje zahtevanih pretokov v dvižnih ceveh, vejah ali terminalih.

Uporabljajo se lahko bodisi s tripotnimi ali z dvopotnimi kontrolnimi ventili, in sicer v krogotokih s konstantnim kakor tudi spremenljivim pretokom.

### Uravnovešanje z Autoflowom pri dvižni cevi

Slika 21



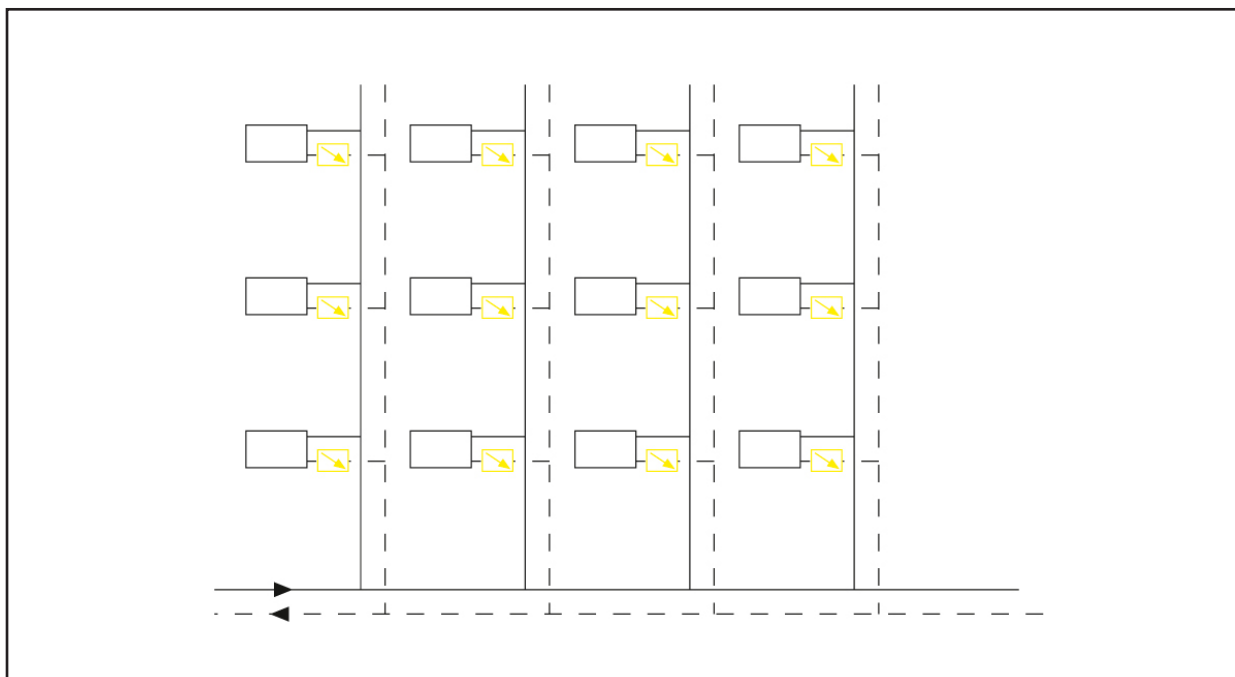
Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev krogotoka.

Njihova funkcija je distribuirati zahtevani pretok skozi dvižne cevi.

Neravnovesja v distribuciji pretokov v dvižnih ceveh lahko nastopijo iz razlogov, navedenih v preučitvi preprostih krogotokov. Zato se ti krogotoki običajno uporabljajo v stavbah z več kot petimi ali šestimi nadstropji.

## Uravnovešanje z Autoflowom pri vsakem terminalu

Slika 22



Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev krogotoka.

Naprave Autoflow lahko distribuirajo zahtevane pretoke skozi vsak terminal.

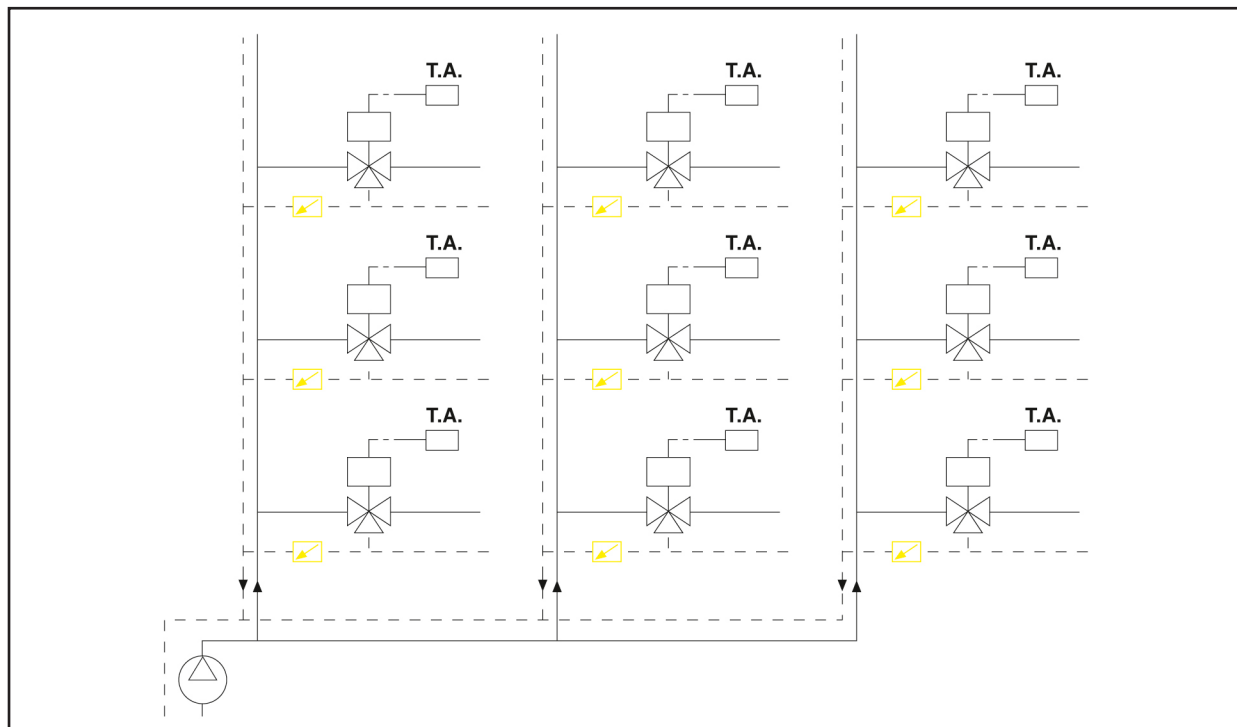
Zavoljo širokega kontrolnega območja regulatorjev Autoflow ni potrebno uravnovešati dvižnih cevi med seboj.

Tudi v primeru uporabe ročnih ventilov bi bilo potrebno dvižne cevi uravnovešati, in sicer z namestitvijo dodatnega ventila za uravnovešanje na vsako dvižno cev.



## Krogotoki s tripotnimi ventili: uravnovešanje z Autoflowom

Slika 23

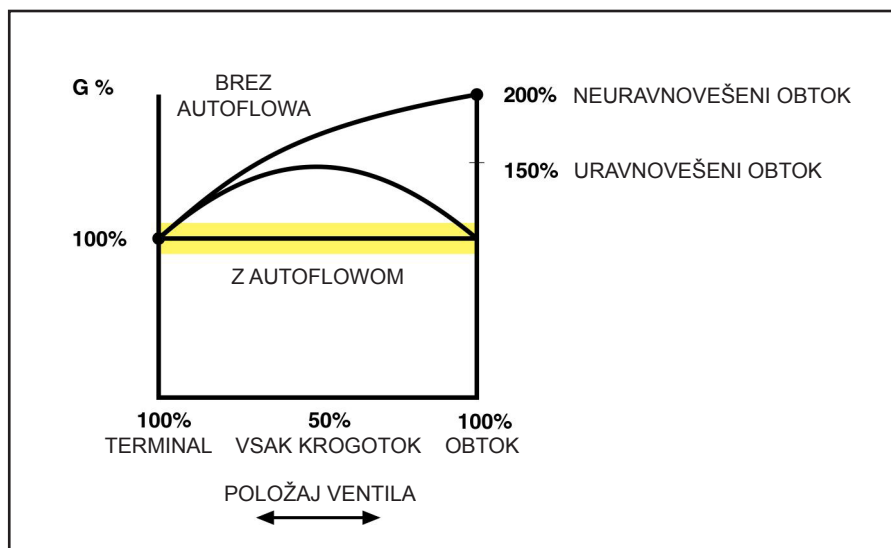


Autoflow, ki je nameščen na povratno cev območnih krogotokov, ohranja konstanten pretok v vsaki veji, bodisi z odprtimi ali zaprtimi ventili.

V tem primeru ni potrebno uravnovešati obtoka tripotnih ventilov, ker Autoflow samodejno absorbira morebitne padce tlaka na odprtem prehodu, ki vodi v območje ali obtok.

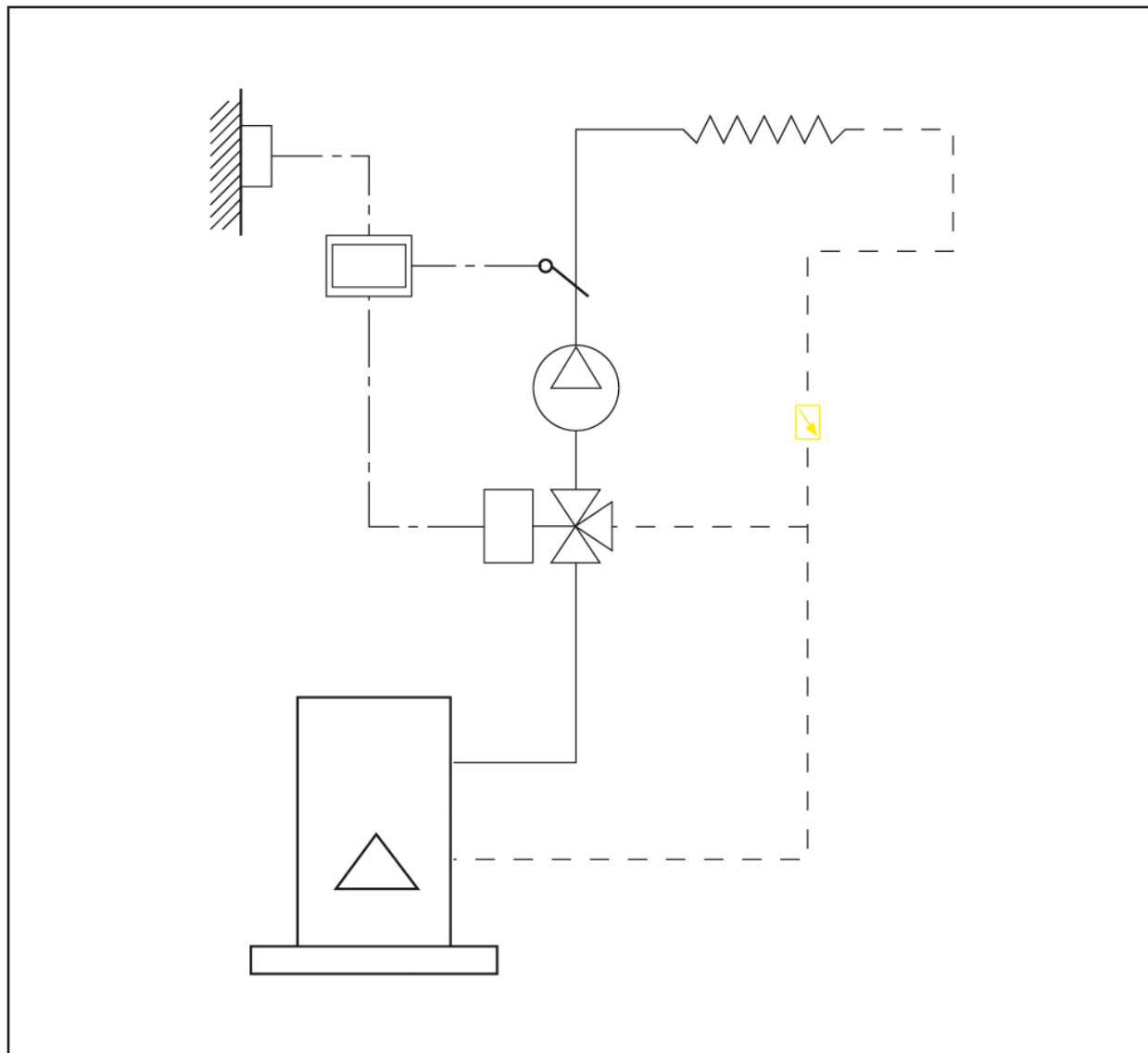
Poleg tega v primeru moduliranja tripotnih ventilov Autoflow ohranja konstanten skupni pretok tudi, kadar so tesnila ventilov v vmesnih položajih. [5]

Slika 24



## Temperaturna kontrola: uravnovešanje z Autoflowom

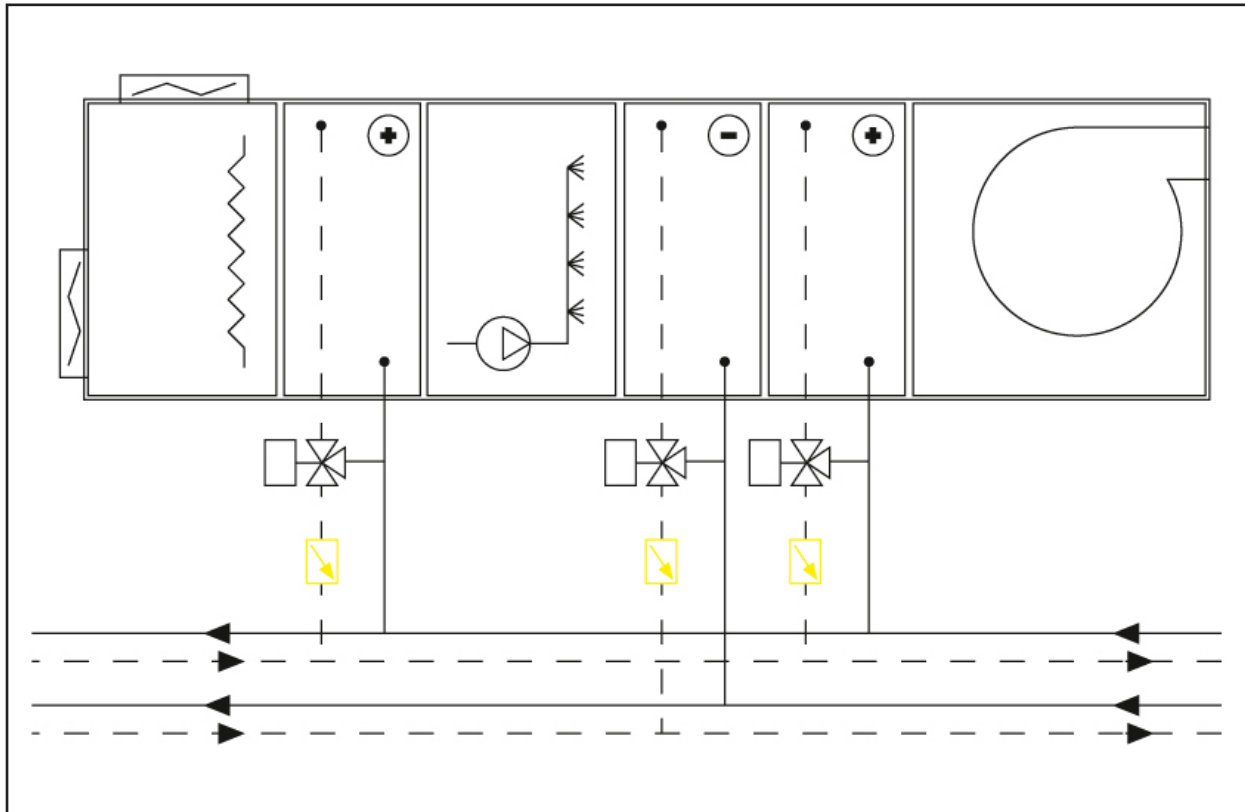
Slika 25



Autoflow ohranja pretok krogotoka konstanten, ne glede na to, ali je ventil odprt ali zaprt.

## Kontrola konvektorjev s tripotnimi ventili: uravnovešanje z Autoflowom

Slika 26



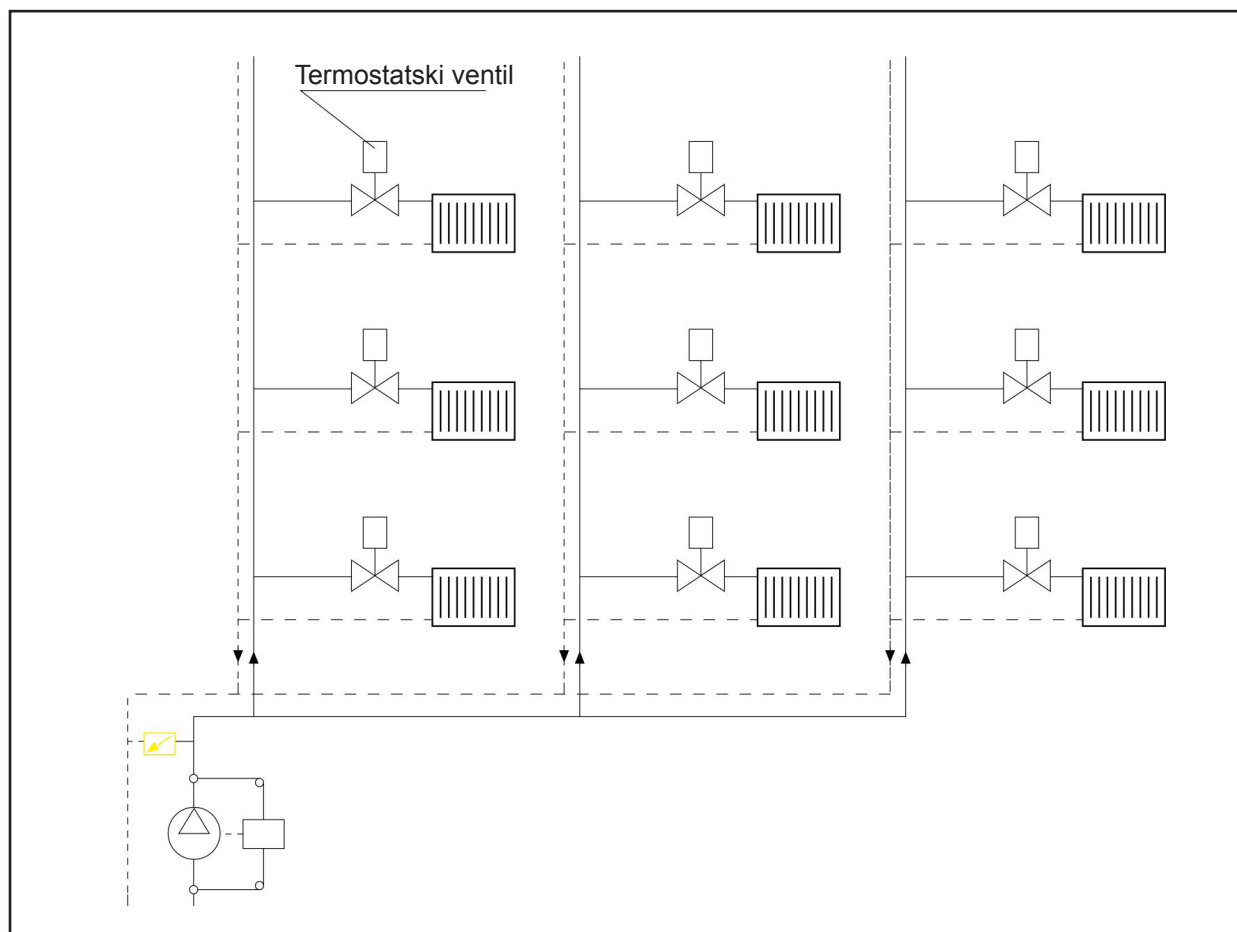
Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev krogotoka.

Autoflow ohranja pretoke distribucijskih krogotokov konstantne, ne glede na to, ali so ventili odprti ali zaprti.

Poleg tega v primeru moduliranja tripotnih ventilov Autoflow ohranja konstantni skupni pretok tudi, kadar so tesnila ventilov v vmesnih položajih.

## Naprava za omejevanje diferenčnega tlaka, nameščena na začetku krogotoka in obtok z Autoflowom

Slika 27



Ta ureditev se v glavnem uporablja za majhne sisteme z radiatorji, ki so opremljeni s termostatskimi ventili.

- Nastavitev tlaka omejevalne naprave:

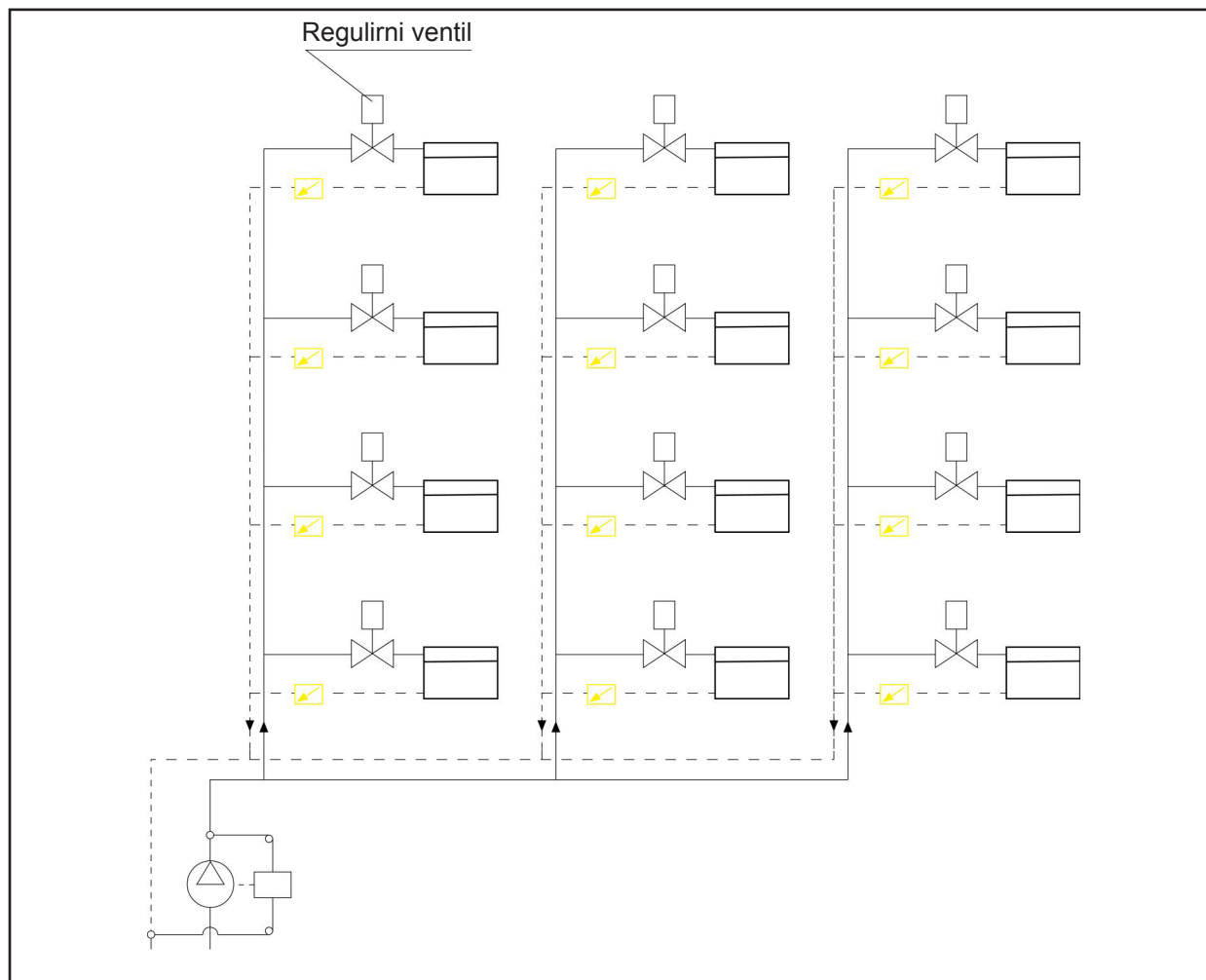
Priporočljiva vrednost tlaka naj bi bila približno 10 % višja od diferenčnega tlaka (pri odprtih ventilih) med točkama krogotoka, na kateri so nameščeni tlačni priključki omejevalne naprave.

### Pripomba:

Obtok z Autoflowom se uporablja za zagotavljanje minimalnega pretoka tudi, kadar so termostatski ventili zaprti. Ta pretok je potreben za preprečevanje toplotne inercije grelnika, ki povzroča lokalno pregrevanje fluida, in obratovanje pregrevalnega termostata ali drugih varnostnih naprav, kot so ventil za gorivo ali temperaturno kontrolirani varnostni ventili.

## Kontrola z dvopotnimi ventili in črpalko s spremenljivo hitrostjo: uravnotežanje z Autoflowom

Slika 28



Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev krogotoka.

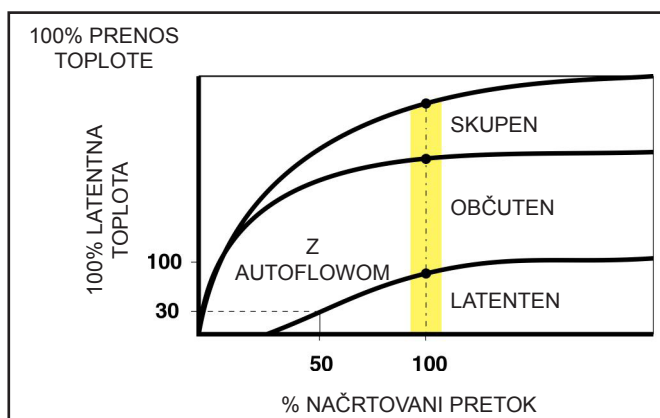
Ta ureditev se v glavnem uporablja za sisteme z ventilatorskimi konvektorji in modularnimi kontrolnimi ventili.

Autoflow stabilizira pretok skozi terminal.

V sistemu z dvopotnimi ventili in črpalko s spremenljivo hitrostjo brez samodejnega ponovnega uravnotežanja sistema pri zmanjšani obremenitvi (tj. brez Autoflowa) se lahko zgodi, da pretok v terminalih ni zadosten.

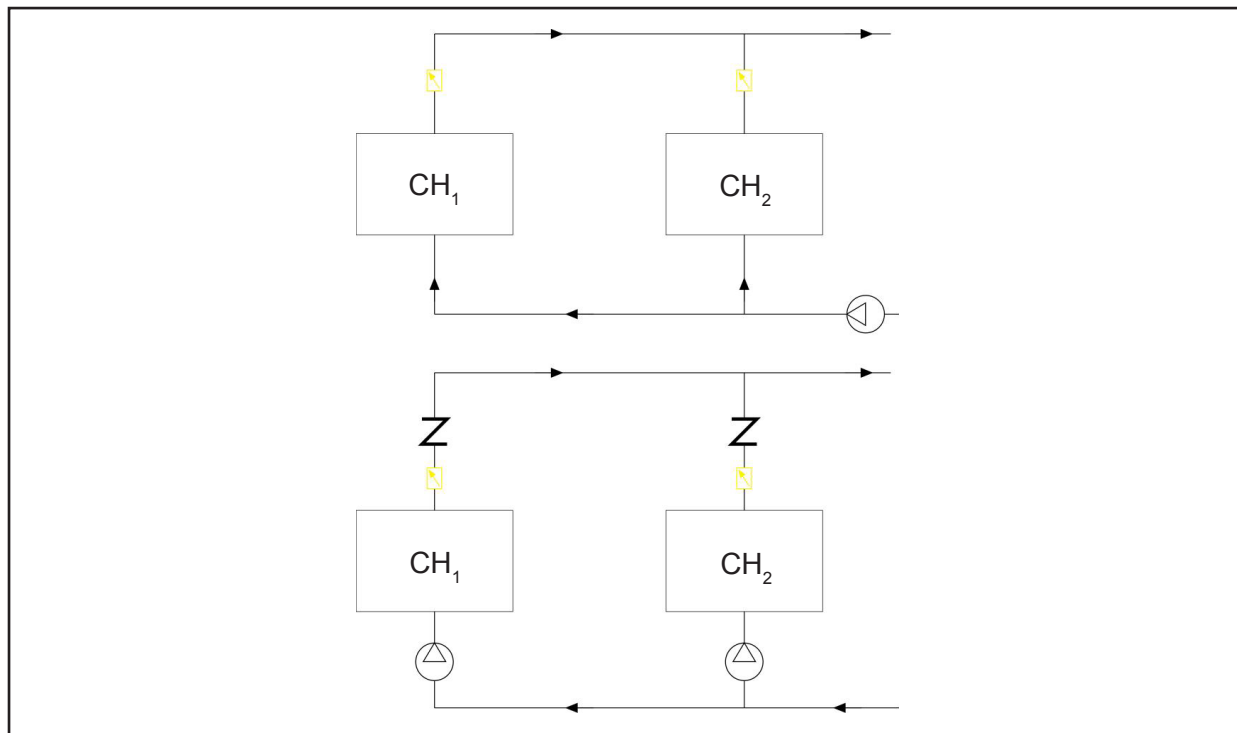
Takšna situacija, na primer, občutno zmanjša zmožnost razvlažitve terminalov. [6]

Slika 29



## Centralna naprava za hlajenje vode: uravnotežanje z Autoflowom

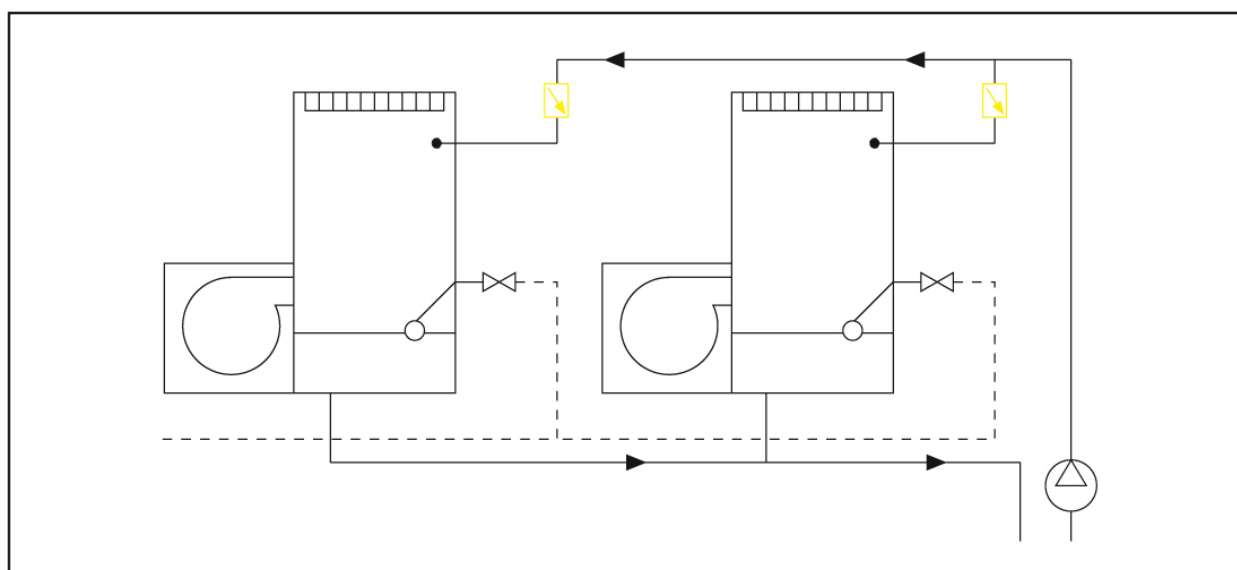
Slika 30



Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev za uravnotežanje krogotokov, ki napajajo uparjalnike ali kondenzatorje ohlajevalnikov. Na izmenjevalnikih toplote je pretok vedno konstanten, tudi kadar so ohlajevalniki izklopljeni, kar omogoča najboljšo učinkovitost obratovanja.

## Hladilni stolpi: uravnotežanje z Autoflowom

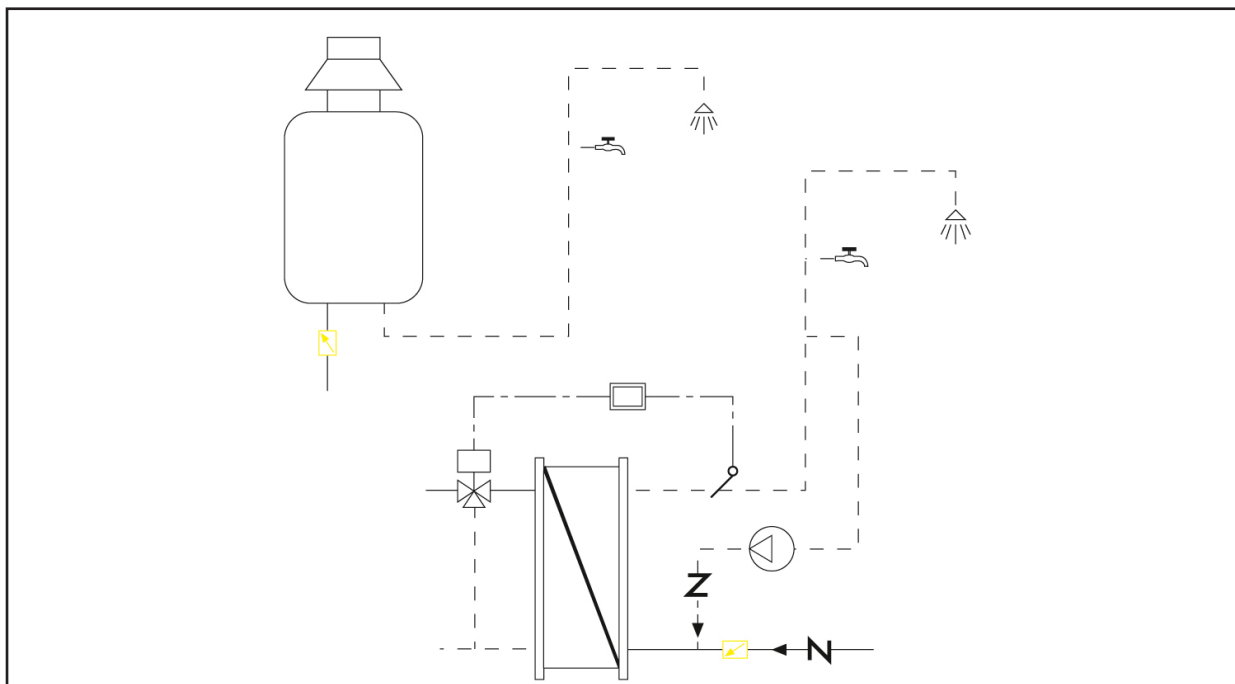
Slika 31



Naprave uravnotežajo krogotoke, ki napajajo hladilne stolpe.

## Proizvodnja sanitarne vode: omejevanje z Autoflowom

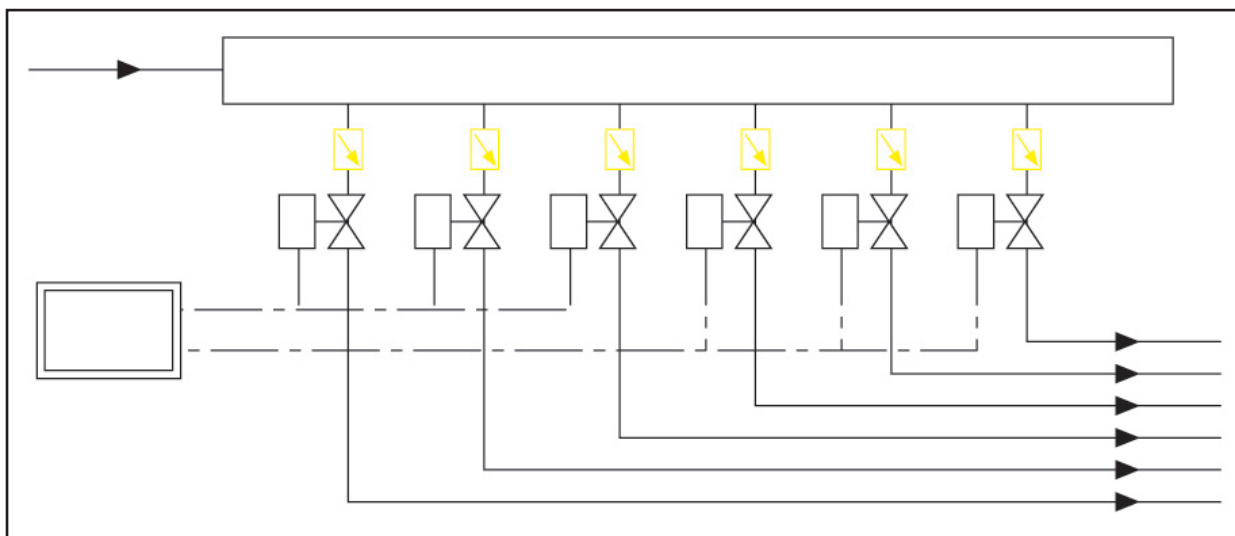
Slika 32



Autoflow omejuje pretok tople vode v trenutnih proizvodnih sistemih ali v proizvodnih sistemih z omejeno zmogljivostjo.

## Vodovodni sistemi: omejevanje z Autoflowom

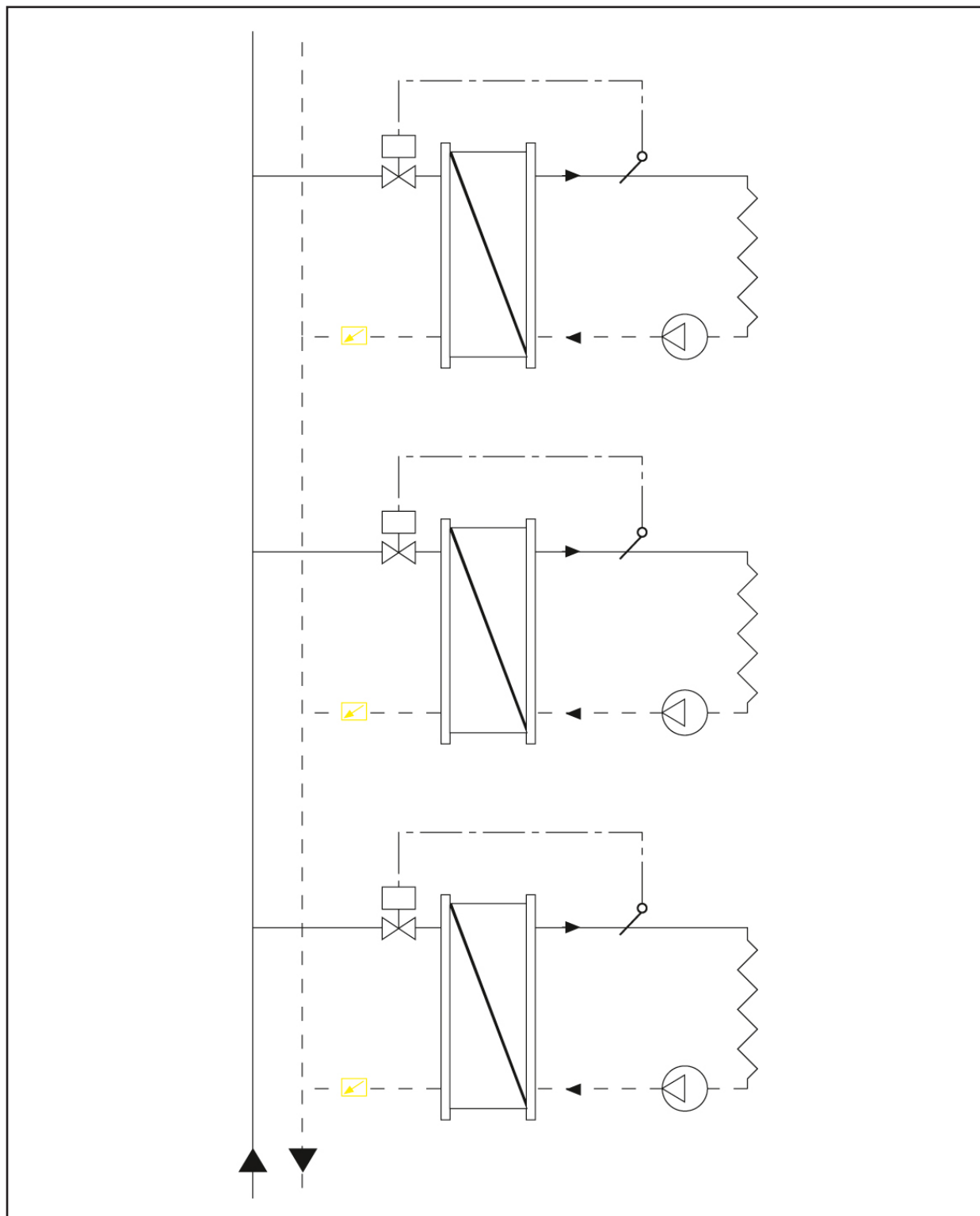
Slika 33



Za omejitev pretoka vode in uravnovešanje različnih krogotokov v namakalnih sistemih.

## Sistemi za daljinsko ogrevanje: uravnovešanje z Autoflowom

Slika 34



Naprave Autoflow so nameščene na povratno cev krogotoka za uravnovešanje različnih sekundarnih naprav in omejevanje zmogljivosti sistemova za daljinsko ogrevanje na nazivno vrednost. Tako je zagotovljena optimalna učinkovitost obratovanja izmenjevalnikov toplote.



*Tehnično poročilo*  
*dodatek*

*DINAMIČNO URAVNOVEŠANJE*  
*HIDRONIČNIH SISTEMOV*

*SAMODEJNI REGULATOR PRETOKA*  
*AUTOFLOW*

## VSEBINA

### 1. RAZDELEK

<b><i>Karakteristike krogotokov</i></b>	<b><i>str. 44</i></b>
Karakteristične krivulje .....	44
Vedenje pretoka v krogotoku .....	45
Izračun karakteristik krogotoka.....	46
Stabilnost krogotoka .....	48
Relativno neravnovesje .....	49
Soodvisnost .....	49
Avtoriteta .....	49
<b><i>Karakteristike črpalk</i></b>	<b><i>str. 50</i></b>
Karakteristične krivulje .....	50
Druge krivulje .....	51
<b><i>Obratovanje krogotoka s črpalko</i></b>	<b><i>str. 53</i></b>
Obratovalna točka .....	53
Sprememba v obratovalni točki .....	54
Teoretična točka – dejanska točka .....	55
<b><i>Črpalka s spremenljivo hitrostjo</i></b>	<b><i>str. 56</i></b>
Delovanje .....	56

### 2. RAZDELEK

<b><i>Uravnovešeni krogotok z ročnimi ventili pri delni obremenitvi</i></b>	<b><i>str. 57</i></b>
Izračun Z, sistem pri delni obremenitvi .....	58
Nova obratovalna točka .....	59
Izračun pretokov .....	59
<b><i>Uravnovešeni krogotok z Autoflowom pri delni obremenitvi</i></b>	<b><i>str. 60</i></b>
Nadtlaki v Autoflowu .....	61
<b>LITERATURA</b>	<b><i>str. 62</i></b>

## 1. razdelek

### Karakteristike krogotokov

#### Karakteristične krivulje

Voda, ki se dovaja v krogotok, je podvržena izgubi tlaka zaradi pretakanja skozi cevovode in druge raznovrstne komponente.

Ta izguba tlaka je razlika med tlakom na začetni točki napajalnih cevi in tlakom na končni točki povratnih cevi.

Tesno je povezana s pretokom skozi krogotok, ki poteka v skladu s spodnjo enačbo:

$$\Delta p = Z * G^2 \quad \text{kjer je: } \Delta p = \text{izguba tlaka}$$

$$G = \text{pretok}$$

V tej enačbi je **Z karakteristična vrednost krogotoka**. Odvisna je zgolj od kompozicije samega krogotoka. [3]

Na primer:

za cev dolžine  $l$  je:  $Z = z * l$  kjer je  $z$  koeficient, ki je odvisen zgolj od premera cevi;

za omejeno upornost  $x$  je:  $Z = x * m$  kjer je  $m$  koeficient, ki je odvisen zgolj od premera cevi

Če poznamo obratovalno točko krogotoka  $\Delta p$ - $G$ , lahko za eno karakteristiko sistema  $Z$  izvedemo krivuljo (parabolično), ki prikazuje različico  $\Delta p$  kot funkcijo  $G$ .

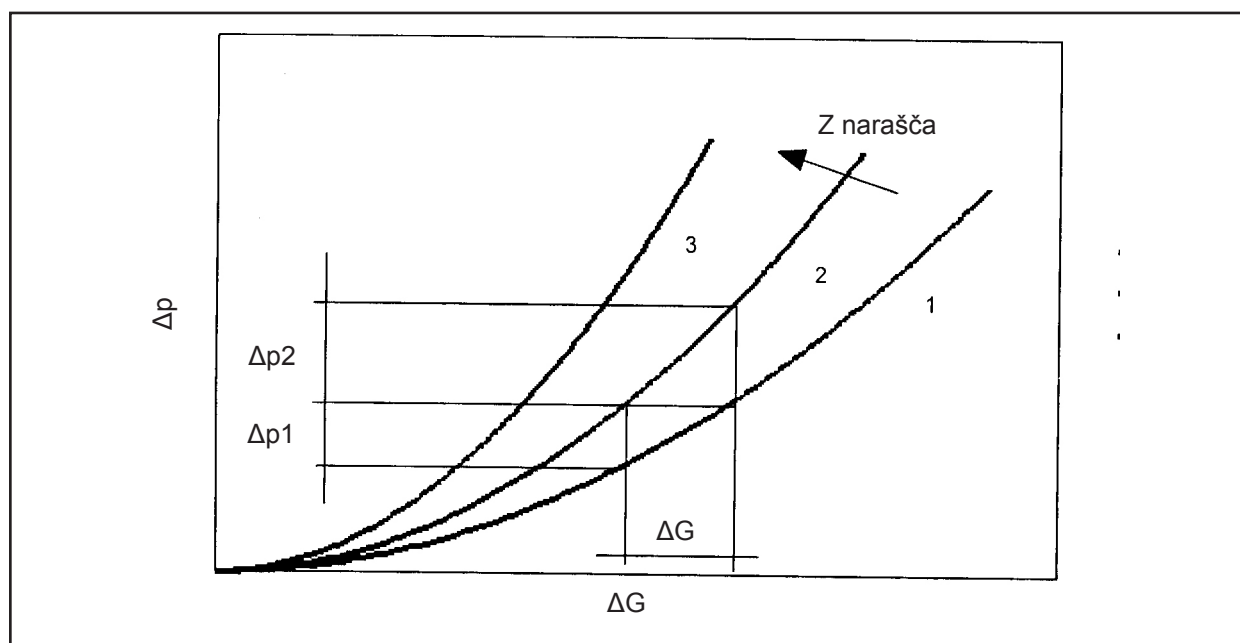
V zaprtem krogotoku je najvišja točka parabole pri izhodišču osi.

Ta krivulja ima naslednji **fizikalni pomen**:

z neprekinjenim ohranjanjem krogotoka pod enakimi pogoji in zgolj spreminjanjem pretoka je mogoče določiti ustrezno izgubo tlaka.

Dejansko ostaja  $Z$  v tem primeru konstanten; je parameter, ki določa natanko to krivuljo.

Slika 1



Spremenljiva odprtost ventilov po drugi strani ustvarja nove pogoje, s tem pa tudi nove vrednosti  $Z$ . Še zlasti zmanjšani pretok fluida povzroči povečanje upornosti krogotoka, s tem pa tudi vrednosti  $Z$ . Iz grafa na Sliki 1 je razvidno, da nižja kot je vrednost  $Z$ , manjši bo vpliv variacij v pretoku na padec tlaka v krogotoku.

Dejansko je variacija pretoka enaka:  $\Delta G, \Delta p_1 < \Delta p_2$ .

Glavna težava je v iskanju metode izračunavanja vsake nove karakteristike krogotoka za vsak položaj zapornih in regulirnih naprav.

### Vedenje pretoka v krogotoku

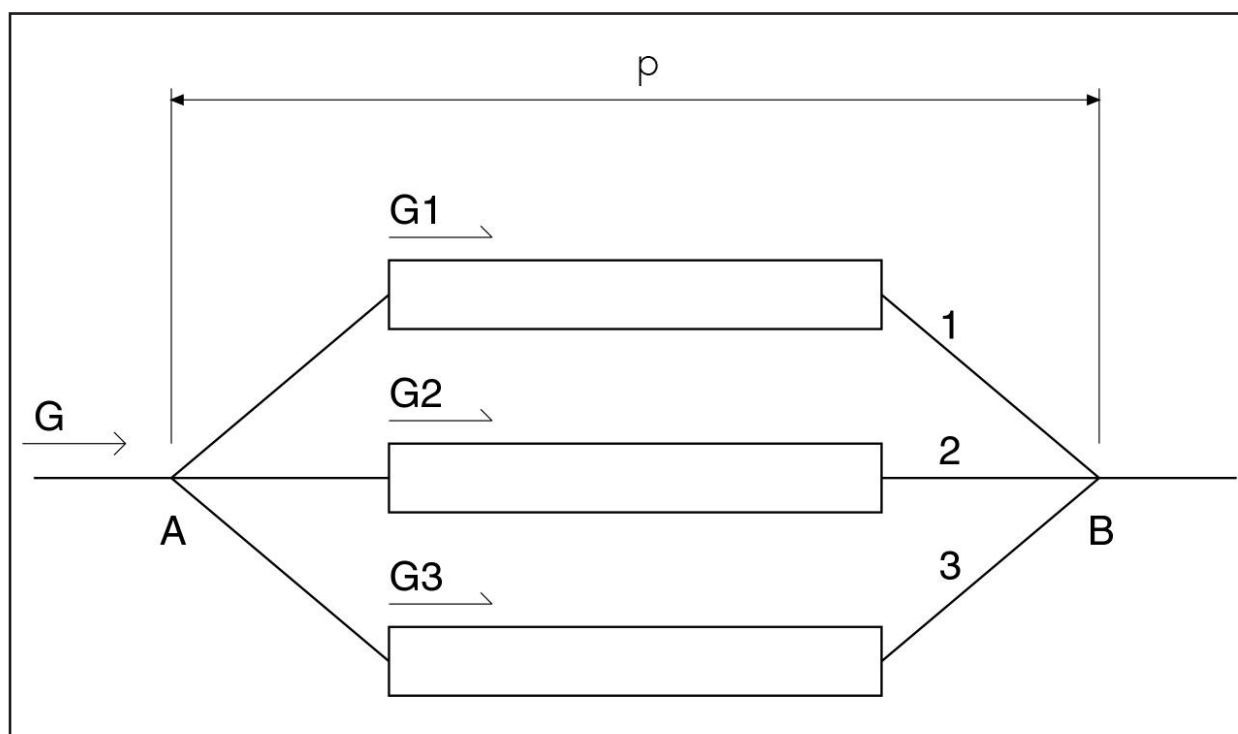
Morda ne bi bilo odveč opozoriti na osnovne zakone pretakanja fluida v krogotoku (Slika 2): [4]

- 1) vsota pretokov, ki vstopijo v vozlišče je enaka vsoti pretokov, ki iz njega izstopajo;
- 2) padec tlaka med dvema vozliščema ima enako vrednost, ne glede na pot fluida.

Omembe vredna sta še naslednja zakona:

- 1) pretok med dvema povezanima vozliščema (A-B) se razdeli na dva ločena pretoka, da je padec tlaka enak v obeh vejah povezave;
- 2) variacija karakteristike ene ali več vej vedno povzroči variacijo skupne karakteristike in distribucije pretokov.

Slika 2



$$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

## Izračun karakteristike krogotoka

Karakteristiko krogotoka lahko izračunamo na več načinov.

Izračun, ki ga v nadaljevanju predlagamo, ni natančno določena metoda, temveč niz zlahka razumljivih in izvedljivih operacij.

Ta metoda še zlasti omogoča hitro preverjanje hidravličnih neravnovesij, ki nastopijo, kadar so regulirni ventili zaprti ali odprti.

Za izračun karakterističnega  $Z$  krogotoka je treba slednjega razdeliti na večje število osnovnih vej. Vsaka od teh je lahko kompozicija zaporedno ali vzporedno razporejenih elementov, medtem ko hkrati ostaja analogna z elektrotehniko.

## Zaporedno razporejeni elementi

Slika 3

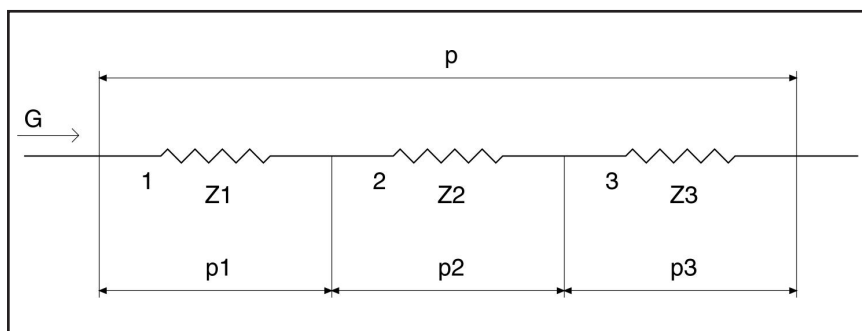


Tabela 1

Zaporedje
$\Delta p = Z \cdot G^2$
$G = G_1 = G_2 = G_3$
$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 =$
$Z_1 \cdot G^2 + Z_2 \cdot G^2 + Z_3 \cdot G^2 =$
$(Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot G^2 =$
$Z \cdot G^2$
$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$

To pomeni, da je treba za izračun vrednosti  $Z$  za vejo, ki jo tvorijo zaporedni elementi, zgolj izvesti seštevek različnih vrednosti  $Z$  (Tabela 1).

## Vzporedno razporejeni elementi

Slika 4

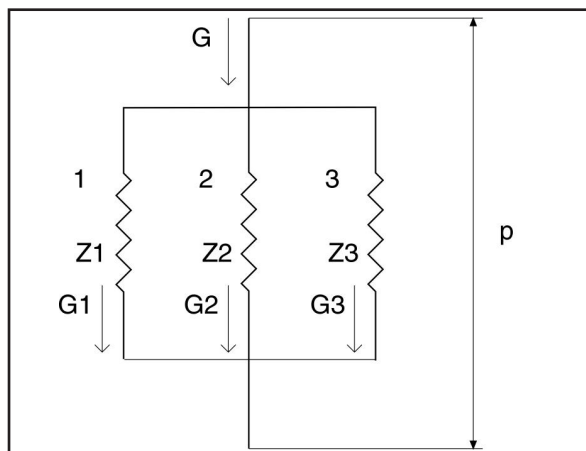


Tabela 2

Vzporedje	
$p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3$	
$G = G_1 + G_2 + G_3$	
$\Delta p = Z_1 \cdot G_1^2$	$G_1 = (\Delta p / Z_1)^{0,5}$
$\Delta p = Z_2 \cdot G_2^2$	$G_2 = (\Delta p / Z_2)^{0,5}$
$\Delta p = Z_3 \cdot G_3^2$	$G_3 = (\Delta p / Z_3)^{0,5}$
$\Delta p = Z \cdot G^2$	
$G = (\Delta p / Z_1)^{0,5} + (\Delta p / Z_2)^{0,5} + (\Delta p / Z_3)^{0,5} =$	
$\Delta p^{0,5} \cdot (1/Z_1^{0,5} + 1/Z_2^{0,5} + 1/Z_3^{0,5})$	
$G = (\Delta p / Z)^{0,5} = \Delta p^{0,5} \cdot 1/Z^{0,5}$	
$1/Z^{0,5} = 1/Z_1^{0,5} + 1/Z_2^{0,5} + 1/Z_3^{0,5}$	

V tem primeru je za izračun vrednosti  $Z$  treba upoštevati recipročnost različnih elementov (Tabela 2). Če poznamo  $\Delta p$  veje, njen pretok ter karakteristike veje in enega od elementov, lahko izračunamo pretok skozi ta element.

Tabela 3

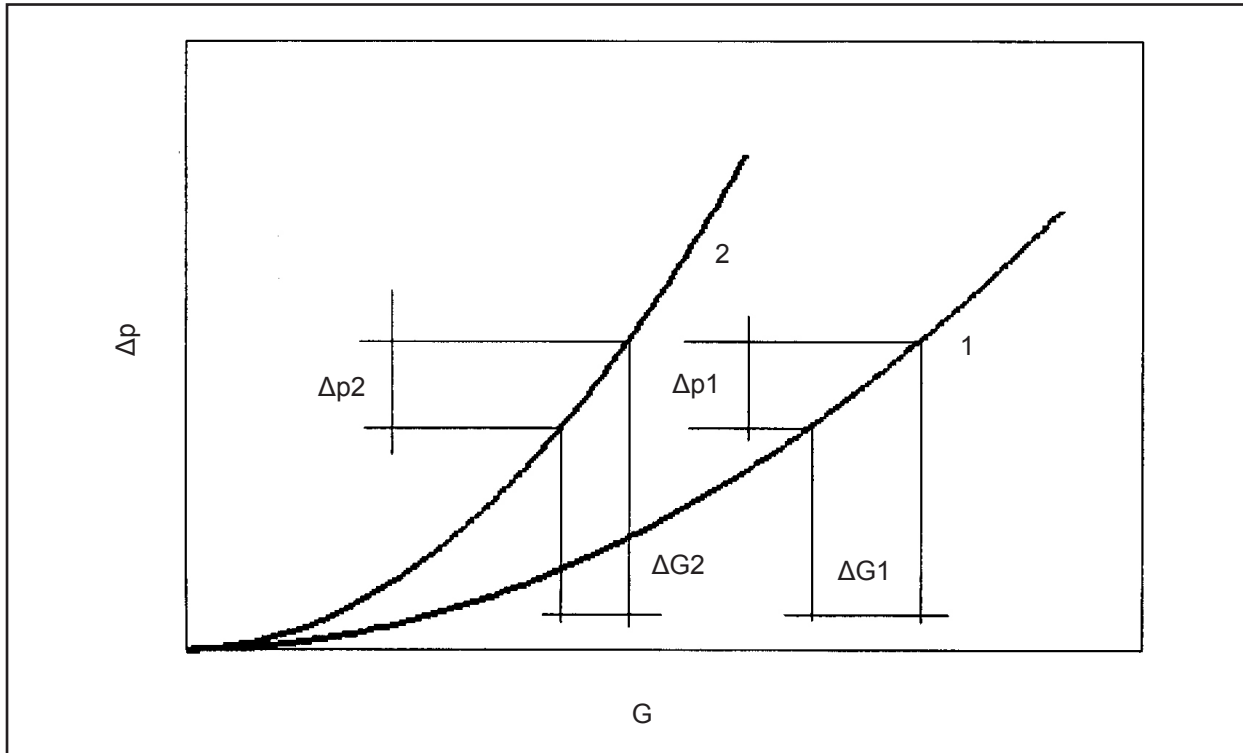
Pretoki
$G_i/G = (\Delta p/Z_i)^{0,5} / (\Delta p/Z)^{0,5} = (Z/Z_i)^{0,5}$
$G_i = G \cdot (Z/Z_i)^{0,5}$

S pomočjo te formule lahko izračunamo nov pretok v elementu, kadar se skupni pretok v veji spreminja, ne da bi se spreminjale vrednosti  $Z$  (tako v veji kakor tudi v elementu) (Tabela 3).

### Stabilnost krogotoka

En krogotok je stabilnejši od drugega, kadar enaka variacija padca tlaka  $\Delta p$  povzroči manjšo variacijo pretoka  $\Delta G$  (Slika 5).

Slika 5



Iz grafa je razvidno, da je:

$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad Z_2 > Z_1$
$\Delta G_1 > \Delta G_2$
Krogotok št. 2 je stabilnejši

### **Relativno neravnovesje**

V primeru variacije diferenčnega tlaka v vzporednem krogotoku je relativno neravnovesje med temi krogotoki manj zaznavno, kadar imajo slednji podobne karakteristike (skorajda identičen Z).

Če so vrednosti Z identične v več krogotokih, ima variacija pretoka v vsakem elementu enako relativno vrednost.

### **Soodvisnost**

Pri vzporednih krogotokih je tveganje neuravnovešenega elementa večje, kadar ima skupna veja relativno visoko izgubo tlaka (visoko vrednost Z).

V tem primeru so krogotoki zelo soodvisni.

Ravno nasprotno pa, če je padec tlaka v skupni veji zanemarljiv v primerjavi s tistim v enem od zaporednih krogotokov, ni nikakršnega tveganja pojava relativnega neravnovesja. V takšnem primeru vsak krogotok obratuje skoraj povsem neodvisno od obratovanja drugih krogotokov.

### **Avtoriteta**

Na tem mestu lahko hidravlično avtoriteto opredelimo kot razmerje med izgubo tlaka v določenem elementu in skupnim padcem tlaka v krogotoku (slednji je enak tlaku v črpalki, kar bomo prikazali v nadaljevanju).

Višja kot je avtoriteta elementa, bolj neodvisno bo njegovo obratovanje.

Postopka uravnovešanja in kalibriranja bosta lažja, saj bosta povsem neodvisna od uravnovešanja in kalibriranja drugih elementov.

Vzemimo za primer terminal, opremljen s kontrolnim ventilom, ki ima nizko hidravlično avtoriteto.

Če je ta terminal del sistema, kjer se vsi kontrolni ventili zapirajo, z izjemo ventila na tem terminalu, bo delovanje tega ventila zelo moteno zaradi porasta diferenčnega tlaka, ki se pojavi v tem krogotoku.

V primeru visoke avtoritete delovanje ventila ni bistveno moteno, saj je povišanje diferenčnega tlaka omejeno.



## Karakteristike črpalk

V ogrevalnem, hladilnem ali klimatskem sistemu je funkcija črpalke krožiti vodo od proizvodne enote, ki je lahko grelnik ali ohlajevalnik, do terminalov.

Črpalka mora vzpostaviti določen pretok vode pod določenimi tlačnimi pogoji, da zagotovi uporabnost vzdolž distribucijskega krogotoka.

Med vsemi različnimi vrstami črpalk bo v tem poročilu analizirano vedenje centrifugalne črpalke, ki se v glavnem uporablja za tovrstno aplikacijo.

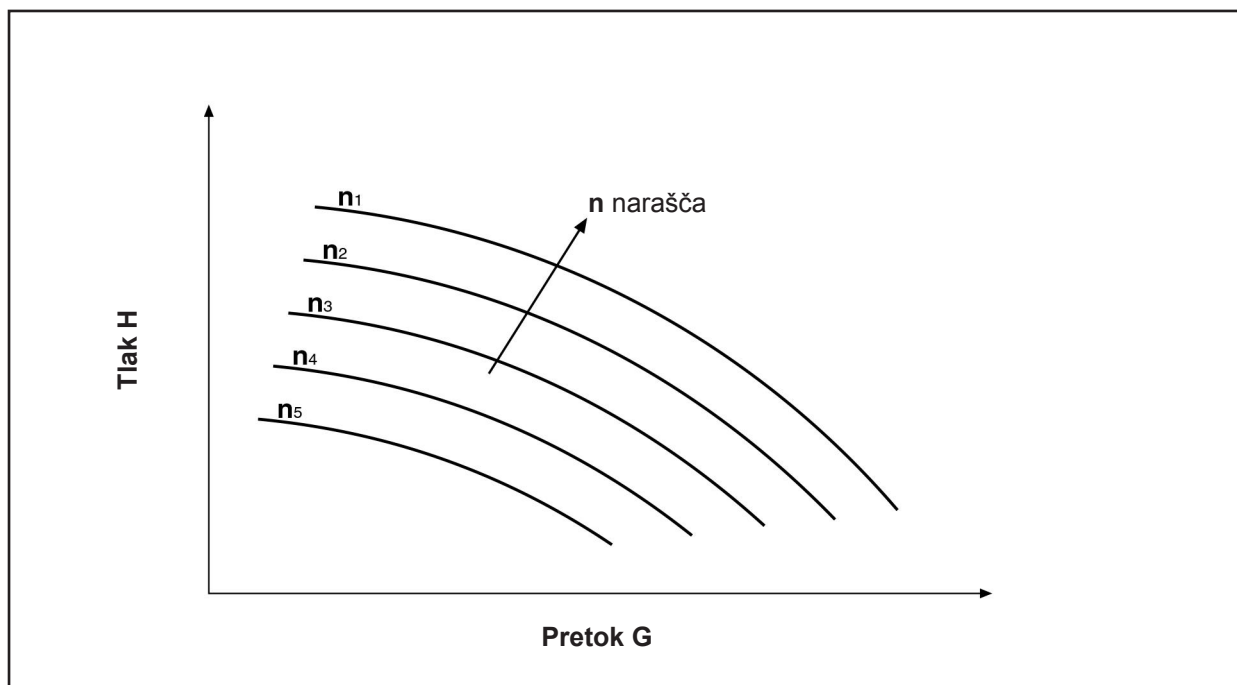
Poskusno določene podatke o karakteristikah črpalke nazorno predstavlja proizvajalec.

## Karakteristične krivulje

Karakteristična krivulja črpalke prikazuje **odnos med tlakom in pretokom**, kar omogoča izbiro črpalke, ki najbolj izpolnjuje zahteve krogotoka. Tlak v črpalki je količina, ki nakazuje napajalno energijo fluida; lahko je prikazana tudi v smislu tlaka. [4]

**Za vsako rotacijsko hitrost  $n$  obstaja karakteristična krivulja.**

Slika 6



Iz Slike 6 je razvidno, da se ob zmanjšanju hitrosti znižata tudi maksimalni praznilni tlak in maksimalni pretok (z  $n_1$  na  $n_5$ ).

S preprosto operacijo prenosa lahko iz ene krivulje izvedemo drugo.

## Druge krivulje

Razen tega lahko proizvajalec, ki je odgovoren za nastavitve pretoka, poskusno določi krivulje, ki so povezane z drugimi količinami. S tem projektantu omogoča boljše razumevanje vedenja črpalk pod različnimi obratovalnimi pogoji (Slika 7).

### Vhodna moč – krivulja pretoka

Vhodna moč je odvisna od obratovalnih karakteristik, pretoka in tlaka v črpalki; je pravzaprav vhodna moč na gredi črpalke.

$$P = \frac{\rho \cdot G \cdot H}{367,2 \cdot \eta}$$

Kjer je: P = vhodna moč črpalke, kW

$\rho$  = gostota fluida, kg/dm<sup>3</sup>

G = pretok, m<sup>3</sup>/h

H = tlak, m WG

$\eta$  = učinkovitost, brez dimenzij

### Efektivnost – krivulja pretoka

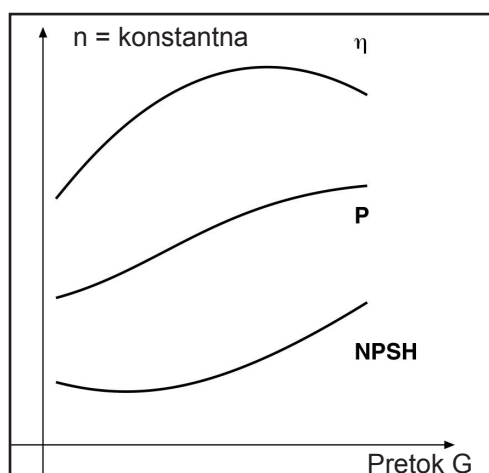
Efektivnost črpalke je razmerje med močjo, ki napaja fluid v smislu pretoka, tlakom in vhodno močjo na gredi.

$$\eta = \frac{P_{\text{vhodna}}}{P_{\text{izhodna}}}$$

### NPSH – krivulja pretoka

Vrednosti NPSH (Net Positive Suction Head; neto pozitivna sesalna višina) predstavljajo minimalni zajamčeni tlak pri vходу v črpalko, ki je potreben za preprečevanje kavitacijskih poškodb.

Slika 7



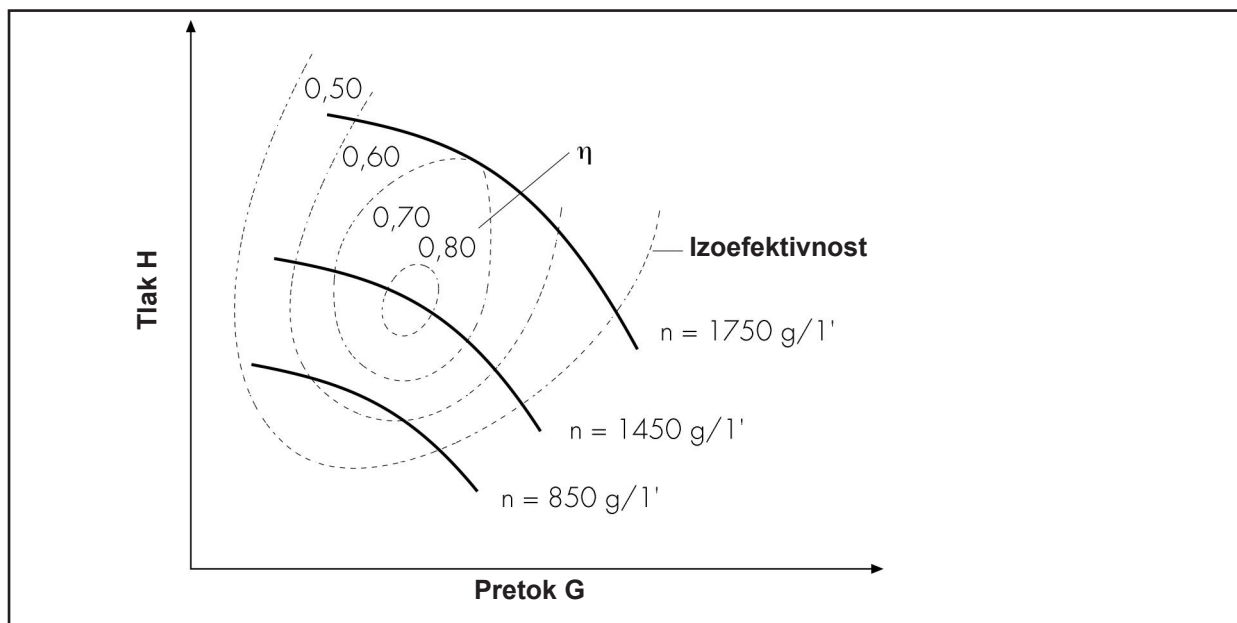
Še zlasti je očitno, da **krivulja vhodne moči P vedno narašča s pretokom G** in ohranja konstantno rotacijsko hitrost n.

Efektivnost  $\eta$  pa ima maksimalno vrednost ob določeni vrednosti pretoka G: kadar pretok G odstopi od te vrednosti, upade tudi vrednost učinkovitosti.

### Krivulje izoefektivnosti

Zanimivo bi bilo v isti graf vključiti karakteristične krivulje, ki bi prikazale učinkovitost črpalk ob različnih rotacijski hitrosti, pretoku in tlaku. Te krivulje, imenovane izoefektivnost, prikazujejo nekatera območja, kjer so učinkovitosti konstantne (Slika 8).

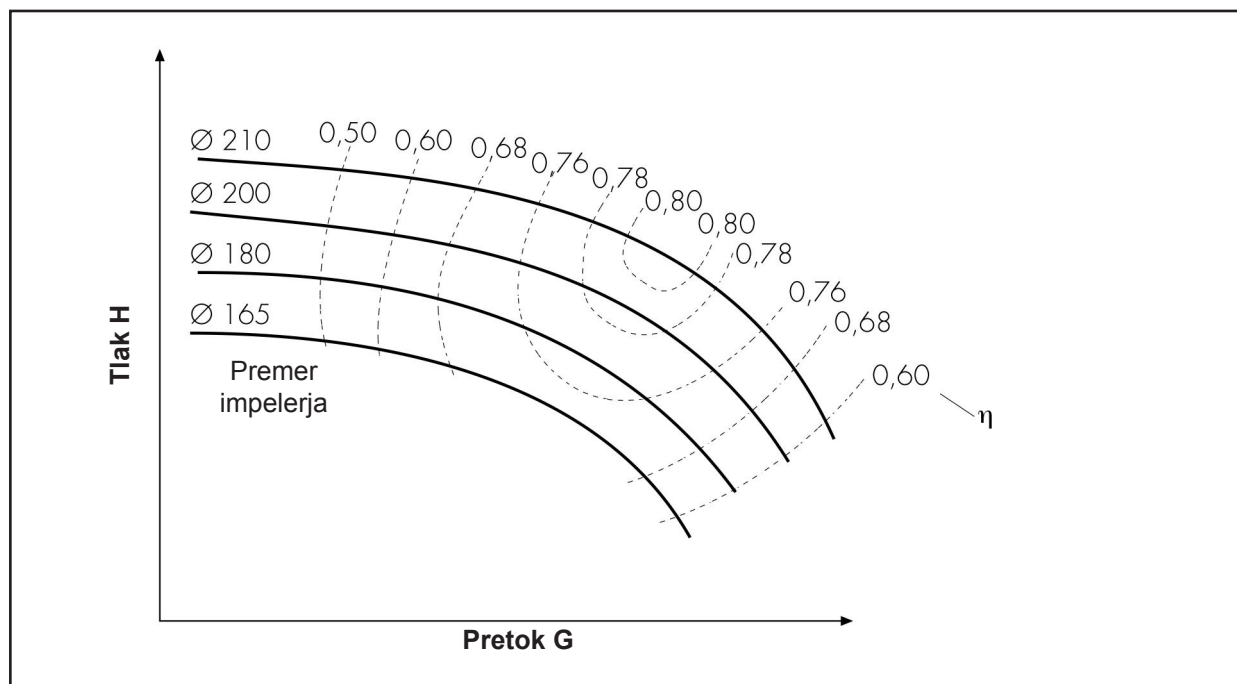
Slika 8



Iz Slike 8 je razvidno, v kolikšni meri se območje maksimalne učinkovitosti zmanjša in kako ta učinkovitost upade, čim za malenkost odstopi od najvišje učinkovitosti, ne glede na to ali pretok narašča ali upada.

Proizvajalci v mnogih primerih predložijo tudi krivulje, iz katerih je razvidno delovanje črpalke z različnimi premeri impelerja ob ohranjanju konstantne rotacijske hitrosti (Slika 9).

Slika 9



## Obratovanje krogotoka s črpalko

### Obratovalna točka

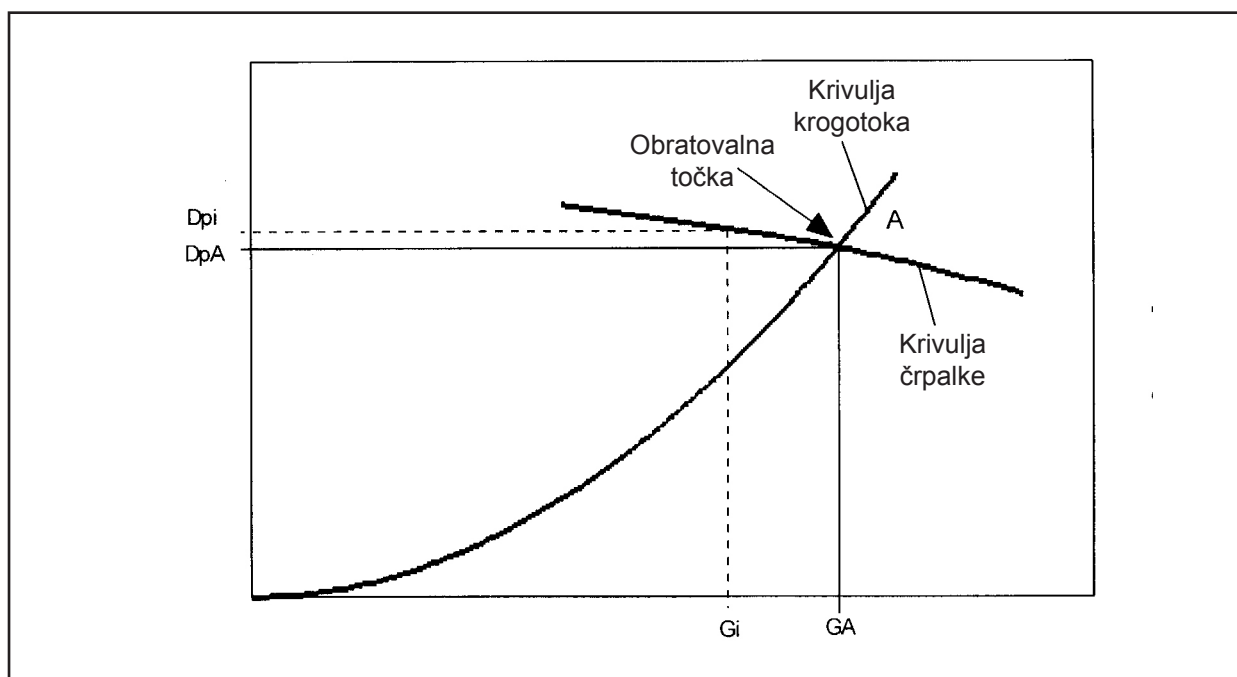
Kot je že bilo prikazano zgoraj, ima črpalka obratovalno karakteristiko, ki ponazarja odnos med pretokom in tlakom.

To krivuljo je poskusno določil proizvajalec, ki je s spreminjanjem pretoka izmeril ustrezní tlak.

V praksi lahko te variacije pretoka pridobimo s spreminjanjem upornosti ob izpraznitvi črpalke.

Ob nameščanju črpalke v krogotok lahko slednjega smatramo v smislu že zgoraj omenjene upornosti.

Slika 10



Obratovalna točka A je točka ravnovesja med črpalko in krogotokom (Slika 10).

Ta točka ustreza:

**$\Delta p$  črpalke =  $\Delta p$  krogotoka**

**G črpalke = G krogotoka**

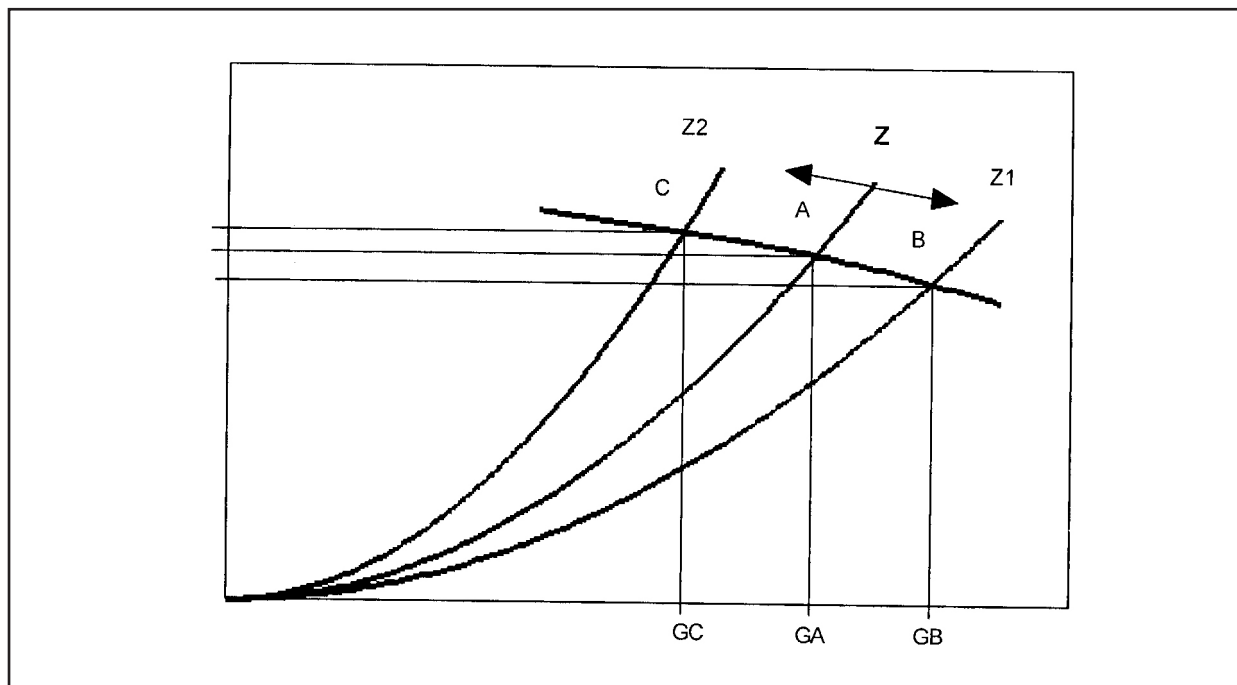
Če poznamo karakteristiko črpalke in karakteristiko krogotoka, lahko to skupno točko brez težav določimo na sečišču obeh krivulj na grafu.

## Sprememba obratovalne točke

V primeru variacije katere koli zaporne ali regulirne naprave se karakteristična krivulja krogotoka spreminja glede na novo vrednost  $Z$ .

Ta operacija določi novo obratovalno točko (Slika 11).

Slika 11



Obratovalna točka se premakne od A do B ali C in določi ustrezne pretoke in tlake:

od A do B                    odpiranje ventilov                    ( $Z_1 < Z$ )

od  $G_A$  do  $G_B$                      $G_B > G_A$                      $\Delta p_B < \Delta p_A$

daje nižji razpoložljivi diferenčni tlak za zagotovitev pretoka  $G_B$ ;

od A do C                    zapiranje ventilov                    ( $Z_2 > Z$ )

od  $G_A$  do  $G_C$                      $G_C < G_A$                      $\Delta p_C > \Delta p_A$

daje višji razpoložljivi diferenčni tlak za zagotovitev pretoka  $G_C$ .

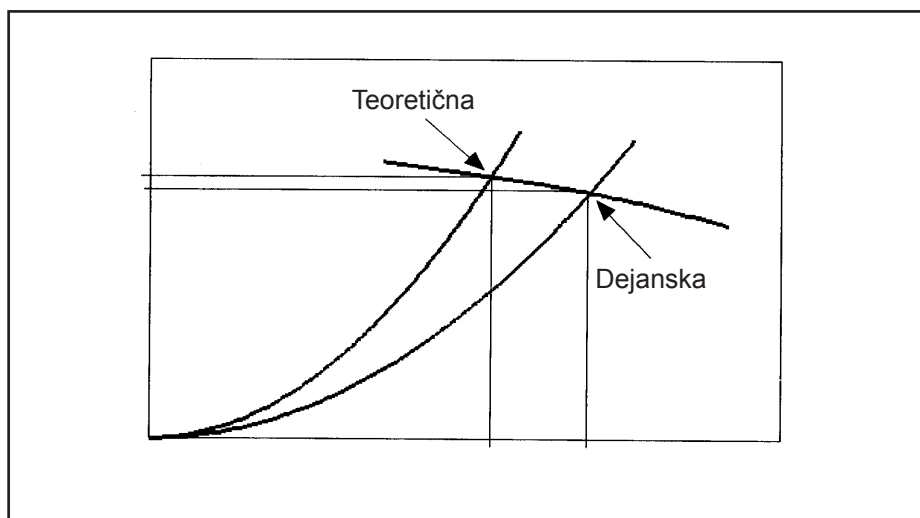
### Teoretična točka – Dejanska točka

Pogosto se zgodi, da se med razvijanjem projekta upošteva večje število varnostnih faktorjev pri izračunavanju  $\Delta p$ .

Običajno je pri nameščenem sistemu izguba tlaka v projektantski fazi višja, kot se izkaže v dejanski rabi, zaradi česar se obratovalna točka pomakne proti desni.

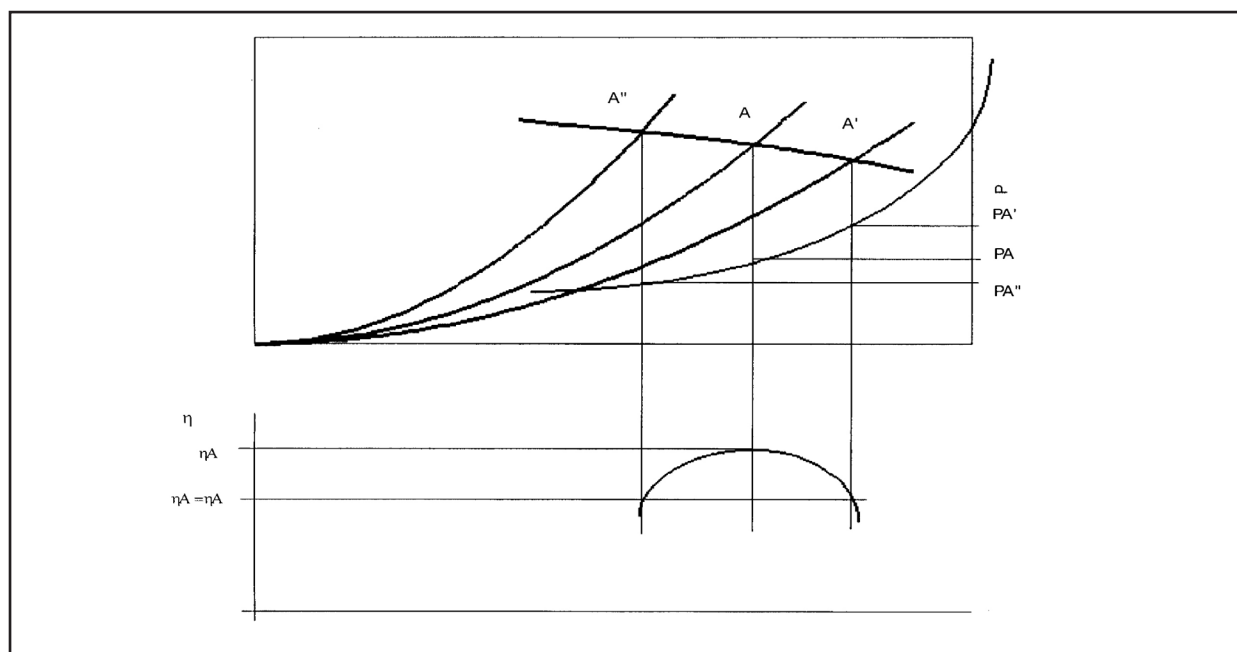
Zato je dejanski pretok višji od teoretičnega (Slika 12).

Slika 12



Takšna situacija je nesprejemljiva, saj mora črpalka delovati z manjšo učinkovitostjo, hkrati pa porabiti več energije (Slika 13).

Slika 13



Iz slike je lepo razvidno, da je  $\eta_{A'} = \eta_{A''}$ . Vendarle pa sta vhodna moč in poraba energije pri točki  $A''$  manjši kot pri točki  $A'$ .

$PA'' < PA'$ .

## Črpalka s spremenljivo hitrostjo

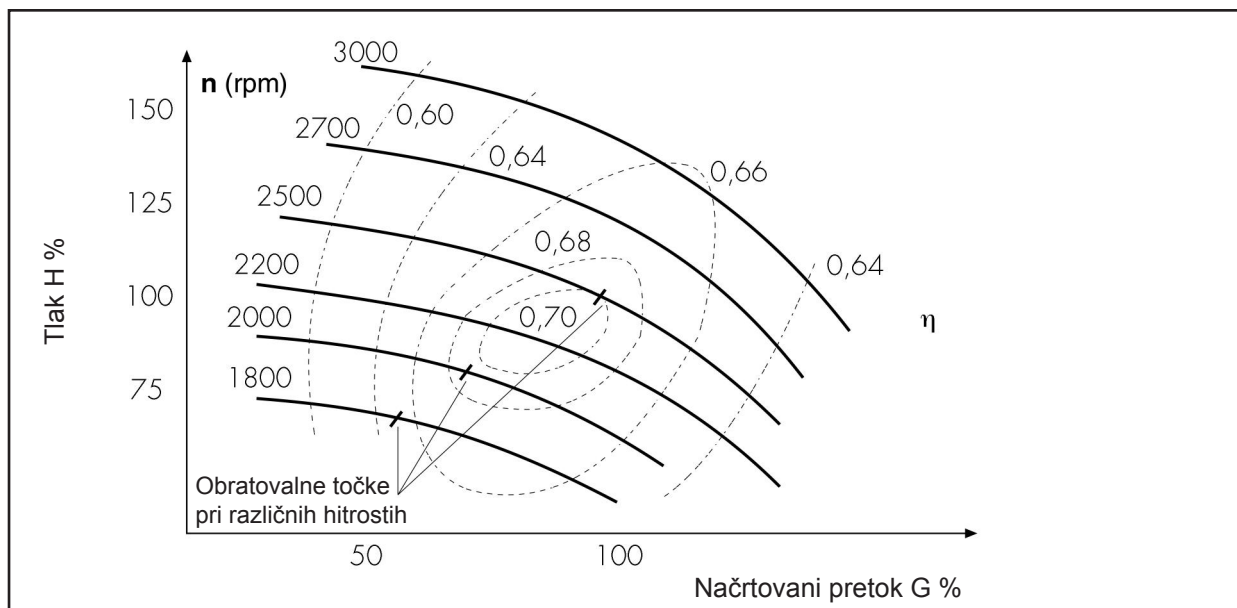
### Obratovanje

Ker je območje maksimalne učinkovitosti v nekaterih primerih precej omejeno, je morda koristno omogočiti takšno obratovanje črpalke, med katerim se rotacijska hitrost zmanjša, kadar je po zmanjšanju obremenitve sistema potrebno **začasno znižanje pretoka in tlaka**.

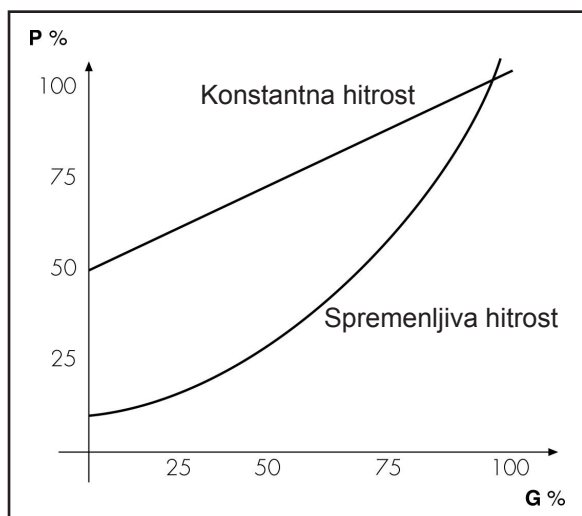
Hitrost črpalke se samodejno zmanjša glede na signal senzorja  $\Delta p$ , ki je nameščen vzdolž krogotoka. V tem primeru lahko črpalka med obratovanjem pri konstantni hitrosti dejansko zagotovi nižji tlak, kot je potrebno (Slika 14).

Vhodna moč je nižja.

Slika 14



Slika 15



**Energijski prihranek** je lahko razviden iz grafa, ki prikazuje vhodno moč med obratovanjem pri konstantni ali spremenljivi hitrosti (Slika 15).

Na primer:

$G = 50\%$

Prazl  $30\%$

$P_{konst} 75\%$

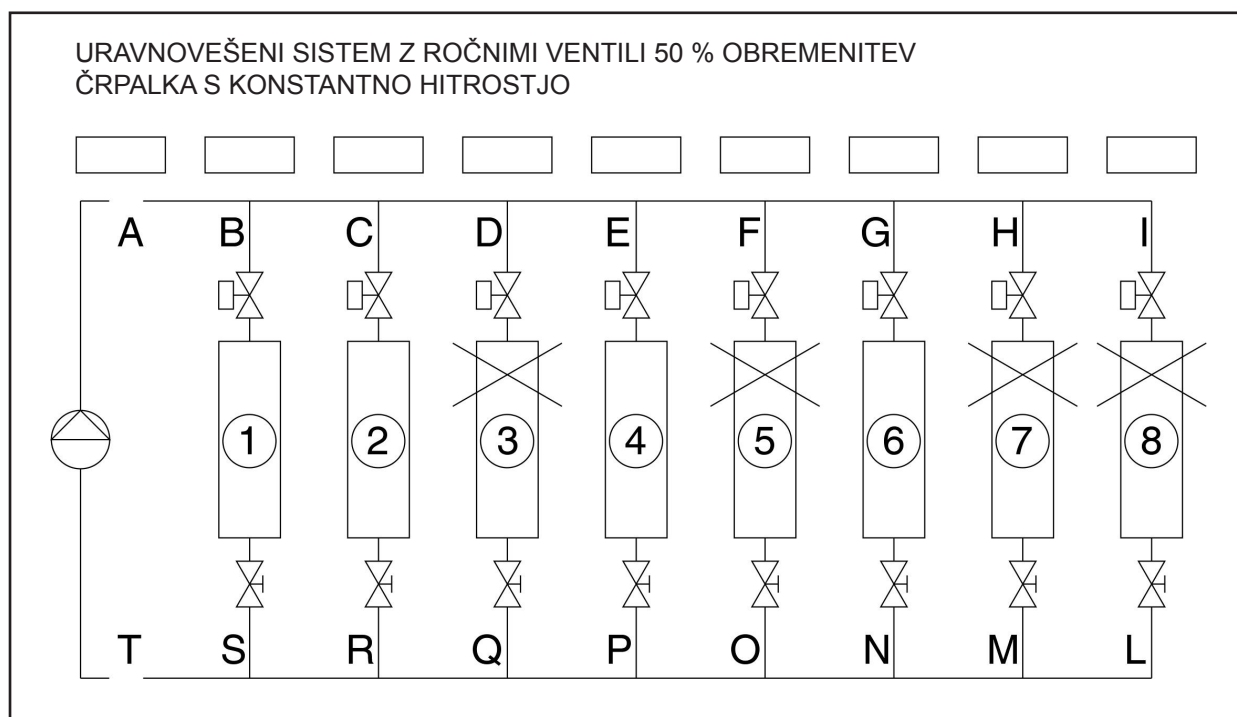
V tem primeru je izvedena primerjava s kontrolnim senzorjem  $\Delta p$  črpalke, nameščenim na najbolj oddaljenem krogotoku; ta položaj zagotavlja najnižje možne stroške obratovanja črpalke. [8]

## 2. razdelek

### Uravnovešeni krogotok z ročnimi ventili pri delni obremenitvi

Za lažje razumevanje, kaj se zgodi v primeru delnega zaprtja krogotoka, zapremo nekaj terminalov iz prejšnjega primera.

Shema 1



Da spoznamo nove obratovalne pogoje, moramo izračunati skupno točko med karakteristiko črpalke in krogotoka. Pri tem moramo poznati vrednost  $Z$ , ki je značilna za novo situacijo.

S pomočjo izračunov, ki smo jih izvedli za dimenzioniranje krogotoka, dobimo vrednosti  $Z$ , pri čemer so znani  $\Delta p$  in  $G$  vsakega terminala in vsake veje.

Vrednosti  $Z$  lahko dobimo s pomočjo enačbe  $\Delta p = Z * G^{1,9}$  (Tabela 1).

(V tem primeru uporabimo eksponent 1,9, ki je poskusno določen, ker je kot takšen bolj reprezentativen za dejanski sistem). [3]



## Z-vrednosti krogotoka

Tabela 1

TERMINAL	P (mm w.g.)	G (l/h)	Z	STRANSKA VEJA	P (mm w.g.)	G (l/h)	Z
1	1095	330	0,017957159	AB-ST	58,5	2640	1,8454E-05
2	969	330	0,01589055	BC-RS	63	2310	2,5614E-05
3	874	330	0,014332928	CD-QR	47,5	1980	2,5883E-05
4	809	330	0,013266978	DE-PQ	32,5	1650	2,5041E-05
5	757	330	0,012414218	EF-PO	26	1320	3,0611E-05
6	647	330	0,01061303	FG-NO	55	990	0,00011186
7	514	330	0,008429205	GH-MN	66,5	660	0,00029221
8	478	330	0,007838832	HI-LM	18	330	0,00029519

### Izračun Z, sistem pri delni obremenitvi

Koeficient Z, ki je karakterističen za nove obratovne pogoje, lahko izračunamo z uporabo zakonov, ki veljajo za zaporedno in vzporedno razporejene krogotoke. S pomočjo enakih pravil smo te vrednosti lahko določili tako za uravnovešeni kakor tudi za neuravnovešeni krogotok.

V primeru spodaj so navedene različne operacije izračunavanja pri delni obremenitvi.

V krogotokih, kjer je pretok znižan na 0,  $Z = \infty$  (brezkončen).

Tabela 2

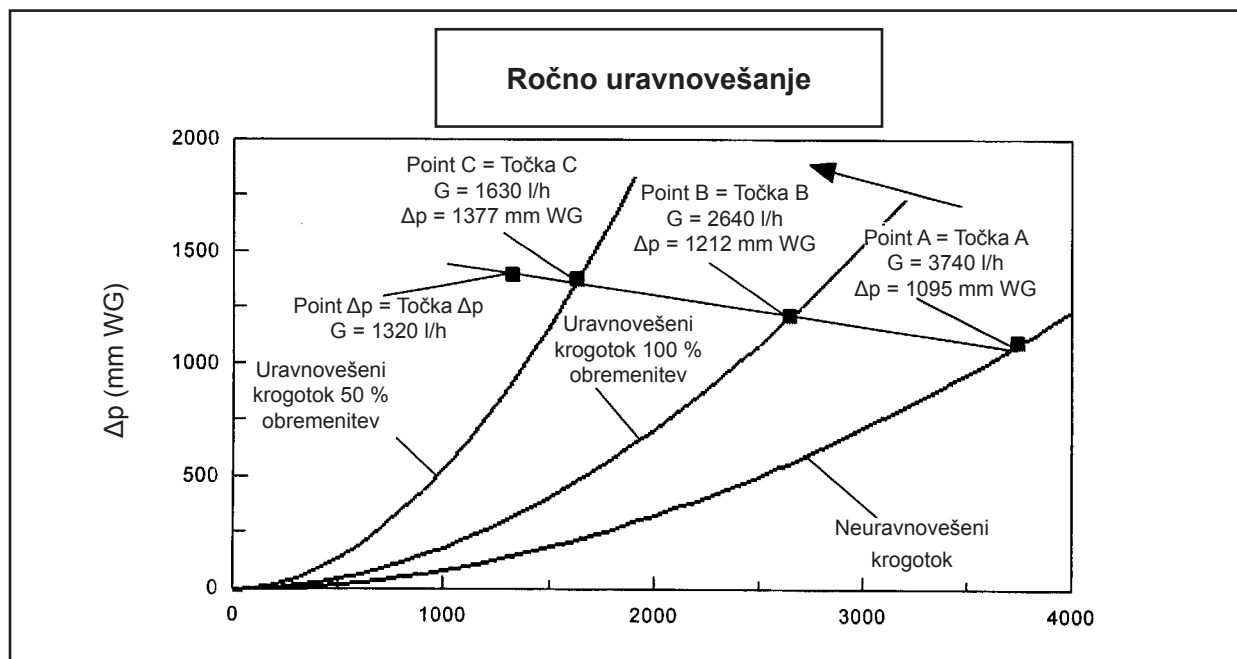
ČRTA	SESTAV	IZRAČUN	$1/Z^{0.525}$	Z*(Sestavljen)
6				0.0106103
FG-6-ON	Zaporedje	$Z+ZFG+ZON=0.0106103+2 \cdot 0.00011185$		0.010834
EF-OP	Zaporedje	$Z+ZEF+ZOP=0.01083400+2 \cdot 0.00003061$		0.001089522
4	Vzporedje	$1/Z^{0.525}+1/Z4^{0.525}=1/0.01089522^{0.525}+1/0.0132675^{0.525}$	20.398952	0.003202645
DE-PQ	Zaporedje	$Z+ZDE+ZPQ=0.003202645+2 \cdot 0.00002504$		0.003252725
CD-QR	Zaporedje	$Z+ZCD+ZQR=0.003252725+2 \cdot 0.00002588$		0.003304485
2	Vzporedje	$1/Z^{0.525}+1/Z2^{0.525}=1/0.003304485^{0.525}+1/0.015891^{0.525}$	28.86468	0.00165329
BC-RS	Zaporedje	$Z+ZBC+ZRS=0.00165329+2 \cdot 0.00002561$		0.00170451
1	Vzporedje	$1/Z^{0.525}+1/Z1^{0.525}=1/0.00170451^{0.525}+1/0.017957^{0.525}$	36.657465	0.00104868
AB-TS	Zaporedje	$Z+ZAB+ZTS=0.00104868+2 \cdot 0.00001845$		0.00108558
			ZTOT	0.00108558

## Nova obratovalna točka

Če poznamo koeficient Z, ki je karakterističen za novo situacijo, lahko izvedemo ustrezno krivuljo.

### Obratovalna točka: polna obremenitev, delna obremenitev.

Slika 1



Sečišče s krivuljo črpalke je nova točka ravnovesja, in sicer pri:

$$G = 1630 \text{ l/h}$$

$$\Delta p = 1377 \text{ mm WG}$$

## Izračunavanje pretokov

Če poznamo skupni pretok in vrednosti Z vsake linije, lahko izračunamo nove pretoke za vse veje in terminale.

Za vsak terminal se uporablja formula iz Tabele 3.

Tabela 3

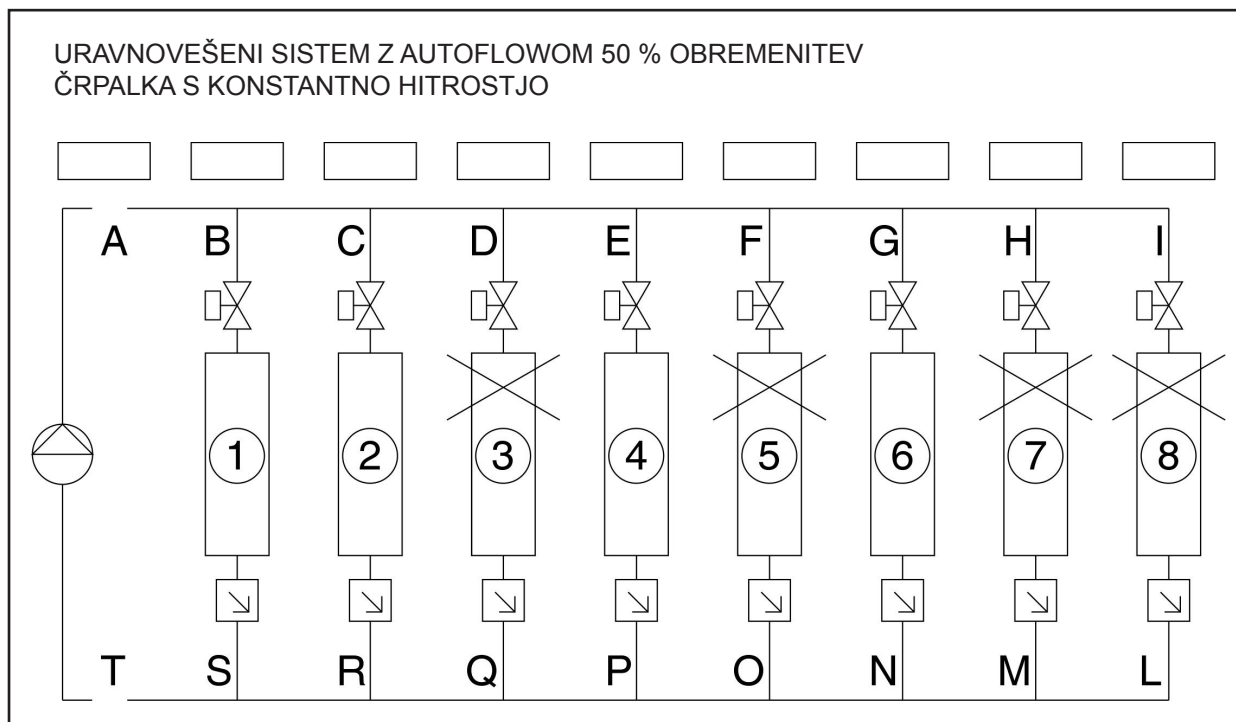
FORMULA		
$G_i = G \cdot (Z/Z_i)^{0.525}$		
TERMINAL	IZRAČUN	G (l/h)
1	$1630 \cdot (.00104868 / .017957)^{0.525}$	367
2	$1263 \cdot (.00165329 / .015891)^{0.525}$	384
4	$879 \cdot (.003202645 / .013267)^{0.525}$	417
6	879-417	462

Nove vrednosti pretokov so predstavljane v shemi krogotoka.

## Uravnovešeni krogotok z Autoflowom pri delni obremenitvi

V shemi spodaj je prikazano, kaj se zgodi, če sistem obratuje pri delni obremenitvi. Kontrolni ventili zaprejo enake terminale kot v prejšnjem primeru.

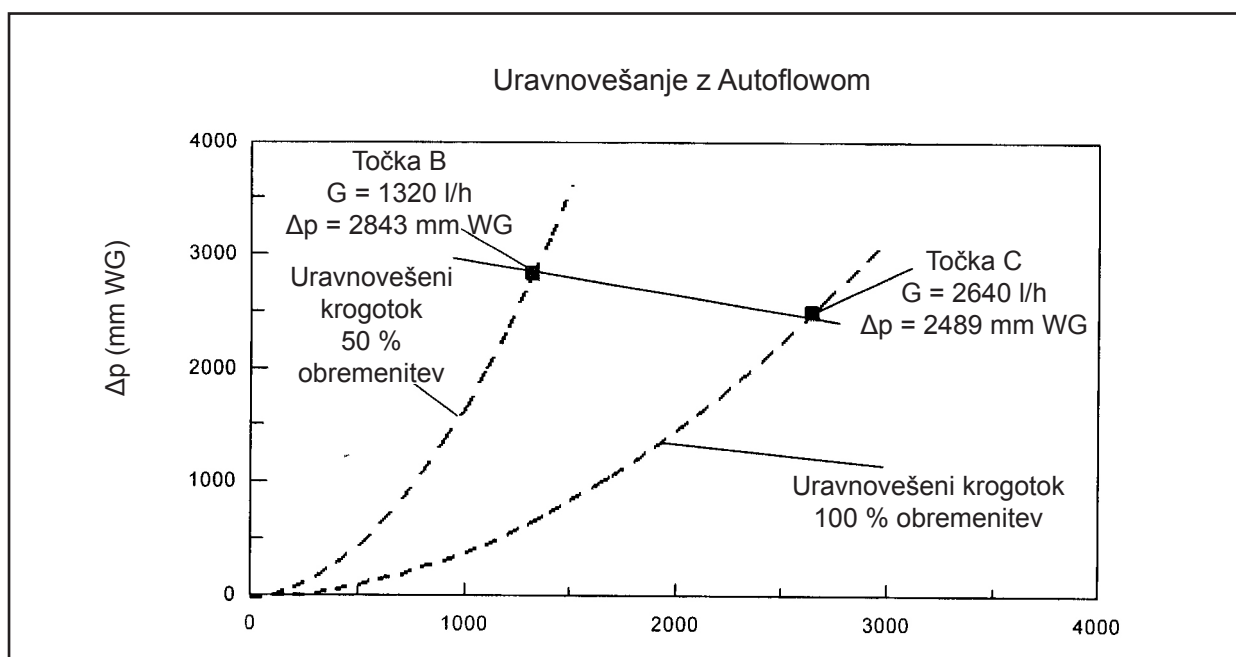
Shema 2



V grafu so tudi tokrat prikazane različne obratovalne točke. Karakteristična krivulja črpalke je drugačna od tiste v predhodnem primeru, ker so nazivne obratovalne točke  $\Delta p$ -G drugačne.

## Obratovalne točke krogotoka z Autoflowom: polna obremenitev, delna obremenitev

Slika 2



Na podlagi izpeljave naslednjih izračunov je mogoče določiti nadtlak, **ki ga mora naprava Autoflow absorbirati, da znova vzpostavi načrtovane nazivne pogoje v sistemu.**

Za razliko od primera z uravnovešenim krogotokom z ročnimi ventili, ki obratuje pri delni obremenitvi, dinamični značaj regulatorja ne dovoljuje preprostih ugotovitev v zvezi z vrednostmi Z.

Vendar pa omogoča pridobivanje natančne vrednosti pretoka, ki je skladen z zahtevano delno obremenitvijo.

S pomočjo le-teh lahko potem določimo novo obratovalno točko krivulje črpalke in izračunamo nove vrednosti diferenčnega tlaka v vsakem krogotoku.

## Nadtlaki v Autoflowu

Tabela 4

### Izračunavanje nadtlakov v Autoflowu

$\Delta p_{AT}=2843$	
$\Delta p_1=\Delta p_{AT}-2 \cdot \Delta p_{AB}=\Delta p_{AT}-2 \cdot Z_{AB} \cdot G \cdot 1.9=2843-2 \cdot 15.7=$	2811
$\Delta p_2=\Delta p_1-2 \cdot \Delta p_{BC}=2811-2 \cdot 12.60=$	2786
$\Delta p_4=\Delta p_2-2 \cdot \Delta p_{CD}-2 \cdot \Delta p_{DE}=2786-2 \cdot 5.9-2 \cdot 5.7=$	2763
$\Delta p_6=\Delta p_4-2 \cdot \Delta p_{EF}-2 \cdot \Delta p_{FG}=2763-2 \cdot 1.9-2 \cdot 6.8=$	2746

## $\Delta p$ v Autoflowu

Tabela 5

TERMINAL	$\Delta p$ v krogotoku (mm WG)	$\Delta p$ v veji (mm WG)	$\Delta p$ AF (mm WG)	$\Delta p$ AF (100 %) (mm WG)	$\Delta p$ AF ekstra (mm WG)
1	2811	328	2483	2044	439
2	2786	328	2458	1918	540
4	2763	328	2435	1758	677
6	2746	328	2418	1608	810

Rezultati izračuna so podani v shemi krogotoka.

## LITERATURA

- [1] Mario Doninelli  
DISTRIBUTION NETWORK  
Caleffi Handbooks n°1
- [2] Mario Doninelli  
DESIGN PRINCIPLES OF HYDRONIC HEATING SYSTEMS  
Caleffi Handbooks n°2
- [3] Pierre Fridmann  
EQUILIBRAGE THERMO-HYDRAULIQUE DES INSTALLATION DE CHAUFFAGE  
Les Edition Parisienne Revue Chaud Froid Plomberie
- [4] MISURE, BILANCIAMENTO E COLLAUDO DEI CIRCUITI ...  
CIP Corsi Istruzione Permanente AICARR
- [5] TECHNICAL ASPECTS OF BALANCING HYDRONIC SYSTEMS  
Technical Report Flow Design Inc.
- [6] SYSTEM & EQUIPMENT 1992  
APPLICATIONS 1995  
ASHRAE Handbooks
- [7] THE PROS AND CONS OF BALANCING A VARIABLE WATER ...  
ASHRAE Journal October 1990
- [8] VARIABLE SPEED/VARIABLE VOLUME  
Technical Report ITT