

## Izbor cevnog materijala prilikom projektovanja cevovoda pod pritiskom

Miloš Ivetić<sup>1</sup>  
Milica Kovačević<sup>2</sup>

APSTRAKT: Tržište cevnih materijala je razvijeno i nudi širok asortiman različitih materijala koji mogu biti upotrebljeni prilikom izgradnje mreže cevovoda ili derivacionih cevovoda u kojima se transportuje voda pod pritiskom. Posmatrajući cevovode koji su deo vodovodnih i irigacionih sistema ili su energetske derivacije, u najčešćoj primeni su različiti polimeri plastičnih materijala (polietilen – PE, glasfiber poliester – GRP), čelik i nodularni liv. Izbor odgovarajućeg materijala može zavistiti od većeg broja parametara kao što su namena cevovoda, radne karakteristike cevovoda, potrebna otpornost na različita mehanička dejstva (unutrašnji pritisak, spoljašnje opterećenje, abrazija) i pojedini morfološki uslovi koji se javljaju prilikom izvođenja radova (prisustvo podzemne vode, mehaničke karakteristike fundamenta i sl.). Ponekad neki od pomenutih parametara znatno sužavaju izbor ali često je izbor odgovarajućeg cevnog materijala stvar tehno-ekonomske analize.

Ključne reči: cevovod pod pritiskom, cevni materijal, vodovodni sistem, irigacioni sistem, derivacije, tehno-ekonomska analiza

## Selection of appropriate pipe material as part of pressure pipelines design

ABSTRACT: The pipe materials market is developed and offers a wide range of different materials that can be used in the construction of pipeline networks or derivation pipelines in which pressurized water is transported. Considering pipelines that are part of water supply and irrigation systems or they are powerplant pipelines, the most commonly used materials are various types of plastic materials (PolyEthylene - PE, Glassfiber Reinforced Polyester - GRP), steel and ductile iron. The choice of appropriate material may depend on many parameters such as the purpose of the pipeline, the required exploitation performances of the pipeline, the required resistance to various mechanical effects (internal pressure, external load, abrasion) and certain morphological conditions that occur during the pipeline installation (presence of groundwater, mechanical characteristics of the foundation, etc.). Sometimes some of the mentioned parameters significantly narrow the choice, but often the choice of the appropriate pipe material is a matter of techno-economic analysis.

Keywords: pressure pipeline, pipe material, water supply system, irrigation system, derivations, techno-economic analysis

---

<sup>1</sup> Miloš Ivetić, mast.inž.građ, Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., [mivetic@ephydro.com](mailto:mivetic@ephydro.com)

<sup>2</sup> Milica Kovačević, mast.inž.građ, Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., [mkovacevic@ephydro.com](mailto:mkovacevic@ephydro.com)

## 1 Uvod

Poslednjih decenija je došlo do značajnog razvoja industrije za proizvodnju cevnih materijala. Nekada su provodnici vode mahom proizvedeni od različitih metala (olovo, bakar, aluminijum), betona, keramike, azbest-cementa pa i drveta. Pojedini navedeni materijali i dalje imaju primenu u posebnim slučajevima, dok je sve masovnija primena različitih plastičnih materijala i legura gvožđa u vidu livenih i čeličnih materijala.

Najznačajniji pomak je napravljen u proizvodnji plastičnih materijala. Ovi materijali se generalno odlikuju velikom glatkoćom koja omogućava povoljne hidrauličke uslove, malom težinom, mogućnošću lake i brze montaže, kao i otpornošću na koroziju i hemijsko dejstvo vode i okolnog tla. U mnoštvu plastičnih polimera, po masovnosti primene mogu se izdvojiti Poli-Vinil-Hlorid (PVC), Poli-Etilen (PE), Poli-Propilen (PP), Glasfiber Plastika (GRP).

S druge strane, čelični i liveni cevovodi imaju velike čvrstoće što može biti presudno kod odabira cevnog materijala u slučaju izuzetno visokih pritisaka, u nepovoljnim morfološkim uslovima ili u uslovima postojanja značajnih spoljašnjih opterećenja.

Analizom materijala dostupnih na aktuelnom tržištu, izdvojena je nekolicina materijala koja predstavljaju prilično konvencionalna rešenja kada su u pitanju cevovodi za transport vode pod pritiskom u vodovodnim i irigacionim sistemima, energetskim derivacijama i potisnim cevovodima crpnih stanica različite namene. U nastavku je prikazana uporedna analiza sledećih cevnih materijala:

- Polietilen visoke gustoće (**PEHD – PolyEthylene High Density**);
- Glasfiber Plastika (**GRP – Glassfiber Reinforced Plastic**);
- Molekularno orijentisani Poli-Vinil-Hlorid (**PVC-O**);
- Nodularno liveno gvožđe (Duktil)
- Čelik.

## 2 Tehničko-tehnološke karakteristike materijala

U slučaju postojanja različitih ograničenja prilikom projektovanja sistema pod pritiskom, izbor cevnog materijala se ponekad može izvršiti na osnovu sagledavanja opštih tehničko-tehnoloških karakteristika cevnih materijala. Ova ograničenja mogu proisteći iz radnih karakteristika cevovoda, otpornosti na mehanička i hemijska dejstva vode i spoljašnje sredine, morfologije podloge ili uslova ugradnje. U nastavku su prikazana svojstva materijala koja pri specifičnim uslovima izgradnje mogu dati prevagu pojedinim materijalima.

### 2.1 Struktura i osnovna fizičko-mehanička svojstva materijala

#### 2.1.1 Polietilen

Polietilen (PE) je makromolekularni proizvod koji se dobija polimerizacijom etilena. Pronađen je 1898.g. od strane nemačkog hemičara Hansa fon Pekmana, a danas predstavlja najprimenjeniji plastični materijal u svetu.

Hidrotehničke cevi se izrađuju od polietilena visoke gustoće (PEHD) koji se dobija polimerizacijom etilena pod niskim pritiskom (6-7 bari) i niskom temperaturom (60-70°C), uz prisustvo katalizatora Ziegler-Natta. Ovi uslovi omogućuju manje granjanje molekule i bolju interakciju između njih, što za rezultat daje bolje mehaničke karakteristike nego kod polietilena niske gustoće.

HDPE je neproziran materijal. Za proizvodnju 1 kg HDPE se koristi 1,75 kg sirove nafte, pa je koštanje ovog materijala dobrim delom u vezi sa kretanjem cene pomenutog resursa.

Materijal je termoplastičan, što znači da se može oblikovati pri određenim temperaturama i zadržavati novodobijene oblike prilikom hlađenja. Pored toga, termoplastičnost omogućuje varenje ovog materijala, odnosno spajanje nezavisnih delova pod uticajem visoke temperature. Cevi su

otporne na trajne temperature od -30°C do 60°C, dok kratkotrajno mogu izdržati i temperature do 80°C. Važno je napomenuti da iako je otporan na više temperature, temperature iznad 20°C dovode do redukcije mehaničkih svojstva materijala.

Pojam „visoka gustoća“ se odnosi na polietilene zapreminske mase u rasponu 941-960 kg/m<sup>3</sup>. HDPE je veoma hemijski otporan materijal i sam po sebi nije toksičan pa se može koristiti u cevovodima za pitku vodu. Ima niske koeficijente elektro i toplotne provodljivosti pa se smatra dobrim izolatorom. Iako ima slabije performanse kada su u pitanju UV otpornost i uticaj oksidacije, uz dodatak agenasa može biti otporan na UV zračenje i oksidaciju, a samim tim pogodan za površinsku instalaciju cevovoda.

Cevni materijal je veoma gladak, što smanjuje hidrauličke gubitke. Pored toga ima visoku otpornost na abraziju i ne dozvoljava hvatanje kamenca što doprinosi očuvanju hidrauličkih performansi tokom eksploatacije.

Osnovna fizička svojstva se mogu pregledno sagledati u Tabela 1.

Tabela 1. Osnovna fizička svojstva HDPE materijala

Table 1. Basic physical properties of HDPE material

<i>Svojstvo</i>	<i>Jed. Mere</i>	<i>Vrednost</i>
Gustina	kg/m <sup>3</sup>	941-960
Čvrstoća na zatezanje	Mpa	20-25
Modul elastičnosti	MPa	1000-1300
Poissonov Koeficijent	-	0,45
Koeficijent linearnog istezanja	mm/m <sup>°K</sup>	0,18
Tačka omekšanja po Vicat-u	°C	72-77
Toplotna provodljivost na 20°C	W/m <sup>°K</sup>	0,38-0,40
Površinski otpor	Ωm	>10 <sup>14</sup>

### 2.1.2 Glasfiber plastika

Primena staklenih vlakana u industriji je počela tridesetih godina 20.veka, a nedugo nakon toga došlo je i do proizvodnje plastike ojačane vlaknima stakla. Proizvodnja i primena ovog materijala u industriji cevi počela je sredinom 20. veka.

GRP, kako je skraćenica ovog materijala, je kompozitni materijal koji se sastoji od matrice polimera i staklenih vlakana. Obično se koristi matrica polimera epoksi, vinilester ili poliester termostabilne smole (najčešće poliester). Smola je odgovorna za ekološku i hemijsku otpornost proizvoda, vezivno je sredstvo za staklena vlakna i definiše oblik GRP materijala. Staklena vlakna su zadužena za čvrstoću kompozitnog materijala. Vlakna mogu biti nasumično raspoređena ili pogodno orijentisana u strukturi materijala (cevi). Najčešća vrsta staklenih vlakana koja se koriste za GRP je E-staklo, koje je alumino-borosilikatno staklo. Pored pomenutog stakla, česta je primena i C-stakla koje je znatno otpornije na dejstvo kiselina. Uz smolu i staklo standardno se upotrebljava i kvarcni pesak koji predstavlja vrstu punioca, katalizatori i aditivi. Suština kombinovanja materijala jeste uzimanje najboljih osobina od svakog od njih. Plastična smola ima značajnu otpornost na pritisak, dok su staklena vlakna veoma otporna na zatezanje.

GRP materijal se proizvodi primenom nekoliko postupaka. Najčešće primenjeni postupci su namotavanje vlakana i centrifugalno livenje. Na Slika 1 je prikazan tipičan poprečni presek zida GRP cevi.



Slika 1. Tipični strukturni presek GRP cevi

Figure 1. Typical structural section of GRP pipe

Sa Slika 1 se uočava slojevitost strukturnog preseka zida GRP cevi. Spoljašnji (1) i unutrašnji (6) sloj su veoma tanki i formiraju se od mešavine smole i stakla. Uloga ovih slojeva je zaštita cevi od uticaja fluida i okolne sredine. Pored pomenutih slojeva, u nekim aplikacijama dodatnu zaštitu pruža i granicni sloj (5) koji je formiran od seckanog stakla i smole. Spoljašnji (2) i unutrašnji strukturni (4) sloj pored smole sadrže kontinualno stakleno vlakno i seckano stakleno vlakno. Ovi slojevi su zaduženi za visoke vrednosti mehaničkih svojstava. Jezgro (3) je sastavljeno od smole, silicijumskog peska, seckanih staklenih vlakana i kontinualnih staklenih vlakana. Jezgro pored mehaničkih svojstava daje krutost strukturi cevi.

Jedna od osnovnih karakteristika GRP materijala jeste velika mehanička otpornost, naročito u poređenju sa specifičnom masom materijala. Ovaj materijal je izuzetno otporan na hemijska dejstva fluida i okolne sredine pa se može koristiti za transport najrazličitijih vrsta fluida. GRP je otporan na koroziju, UV zračenje i promene temperature, pa je pored podzemnih, česta primena ovog materijala i kod nadzemnih instalacija. Može se koristiti i kao vatrostalan materijal u aplikacijama koje zahtevaju otpornost na vatru i visoke temperature. Njegova unutrašnjost je veoma glatka što ga čini veoma efikasim kada su u pitanju hidraulički gubici pritiska prilikom tečenja fluida u cevi. U Tabela 2 su prikazane osnovne fizičke karakteristike GRP cevi.

Tabela 2. Osnovna fizička svojstva GRP materijala

Table 2. Basic physical properties of GRP material

<i>Svojstvo</i>	<i>Jed. Mere</i>	<i>Vrednost</i>
Gustina	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	1800-2100
Čvrstoća na zatezanje (kružna)	<i>Mpa</i>	130-700
Čvrstoća na zatezanje (aksijalna)	<i>Mpa</i>	30-60
Modul elastičnosti	<i>MPa</i>	6000-24000
Izduženje do granice kidanja	%	1,5-2
Koeficijent linearnog istezanja	<i>mm/m<sup>°K</sup></i>	0,024-0,030
Maksimalna temperatura fluida	<i>°C</i>	50
Toplotna provodljivost	<i>W/m<sup>°K</sup></i>	0,14-0,25

### 2.1.3 Molekularno orijentisani PVC

PVC je materijal koji se dobija se radikalnom polimerizacijom vinil-hlorida, najčešće u vodenoj suspenziji, pri 50 do 70°C i pritisku od 7-13 bara. Zvanično je otkriven 1872.g. od strane nemačkog hemičara Eugena Baumana. PVC cevi predstavljaju krutu verziju PVC materijala, a sa njihovom

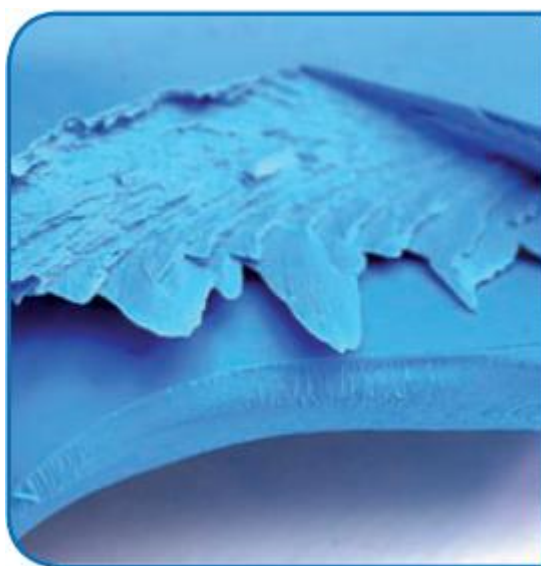
proizvodnjom se počelo još u prvoj polovini 30ih godina 20.og veka i to za potrebe izgradnje Olimpijskog kompleksa u Berlinu. Danas se standardne PVC cevi mahom koriste u kanalizacionim i drenažnim sistemima (tečenje sa slobodnom površinom), dok je ređa primena u sistemima po pritiskom.

Standardni PVC materijal je zapravo amorfni polimer u kojem su molekuli nasumično smešteni. Međutim, u određenim uslovima pritiska, temperature i brzine, rastezanjem materijala moguće je orijentisati molekule polimera u istom smeru u kojem se materijal rasteže. U zavisnosti koji se parametri procesa koriste i koja je količina rastezanja, dobiće se niži ili viši stepen orijentacije. Rezultat je PVC-O, plastika sa strukturom u slojevima koji se mogu videti na prvi pogled, a čije su mehaničke karakteristike znatno poboljšanje u odnosu na standardni PVC materijal.



Slika 2. Uticaj orijentacije molekula na polimernu strukturu

Slika 2. Influence of molecule orientation to polymer structure



Slika 3. Struktura standardnog PVC (dole) i molekularno orijentisanog PVC materijala (gore)

Slika 3. Structure of standard PVC (below) and molecularly oriented PVC material (above)

Postupak molekularne orijentacije značajno povećava fizičke i mehaničke karakteristike PVC-a i daje mu niz izvanrednih svojstava, a da pritom ne menja prednosti izvornog polimera. Na taj način se dobija plastika koja je izvanredna kada su u pitanju otpornost na trenje (spoljne i unutrašnje) i zamor materijala, izuzetne fleksibilnosti i otpornosti na udarce.

PVC-O cevi su potpuno otporne na koroziju, imaju odličnu otpornost na hemijska dejstva fluida i spoljašnje sredine i odlični su toplotni i električni izolatori. Osnovna fizička svojstva se mogu videti u Tabela 3.

Tabela 3. Osnovna fizička svojstva PVC-O materijala

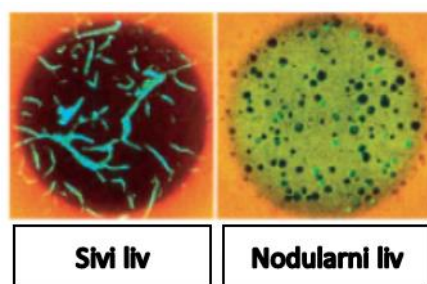
Table 3. Basic physical properties of PVC-O material

<i>Svojstvo</i>	<i>Jed. Mere</i>	<i>Vrednost</i>
Gustina	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	1350-1460
Čvrstoća na zatezanje (kružna)	<i>Mpa</i>	>85
Čvrstoća na zatezanje (aksijalna)	<i>Mpa</i>	>48
Modul elastičnosti	<i>MPa</i>	>4000
Tvrdoća po Shore-u na 20°C	-	81-85
Poissonov Koeficijent	-	0,35-0,41
Toplotna provodljivost	<i>W/m<sup>°K</sup></i>	0,16-0,21
Tačka omekšanja po Vicat-u	<i>°C</i>	>80
Koeficijent linearnog istezanja	<i>mm/m<sup>°K</sup></i>	0,08
Poprečni otpor na 20°C	<i>Ω/m</i>	>10 <sup>18</sup>

### 2.1.4 Nodularno liveno gvožđe

Livena gvožđa su legure gvožđa sa više od 2,0% ugljenika. Livena gvožđa u osnovi imaju nisku plastičnost i relativno malu otpornost prema udaru. Koriste se zbog dobrih svojstava livenja, širokog opsega čvrstoće i tvrdoće, u većini slučajeva dobre obradivosti rezanjem. Ako je potrebno popraviti neka svojstva, livena gvožđa se dodatno legiraju. Kao pratēci legirajuēi elementi najēeēe se koriste silicijum, mangan, hrom i nikel. Zavisno od oblika ugljenika u mikrostrukturi ohlaēenog gvožđa, ono se deli na sivo (C je u obliku grafita) i belo (C je u obliku cementita) liveno gvožđe.

Nodularno (duktilno, žilavo) liveno gvožđe je poboljšana verzija sivog livenog gvožđa. Nastaje dodavanjem magnezijuma (ili Cerijuma) u rastopljeni liv neposredno pred izlivanje. Na taj naēin se omogućuje izdvajanje grafita u obliku nodula (kuglica), umesto u obliku listiēa ili pahuljica kako je sluēaj kod sivog liva. Nodularni liv ima znatno veēu ēvrstoēu i žilavost od sivog liva, što je posledica izdvojenog grafita u obliku nodula i smanjenog sadržaj sumpora i fosfora.



Slika 4. Struktura sivog i nodularnog livenog gvožđa

Slika 4. Structure of of gray and nodular cast iron

Gvozdene cevi od sivog liva se koriste već 200 godina. Zbog svojih nedostataka, poslednjih decenija je proizvodnja ovih cevi potisnuta, a umesto njih u ekspanziji je proizvodnje cevovoda od nodularnog liva.

Osnovne karakteristike cevovoda od nodularnog liva (duktila) jesu izuzetna mehaniēka svojstva (zatezna ēvrstoēa, otpornost na unutrašnji pritisak i vakum, spoljašnje optereēenje i udarce) daleko iznad svih platiēnih cevovoda, što im daje veliku pouzdanost. Iako su cevi od duktila veoma otpornije na koroziju od cevovoda izraēenih od sivog liva, da bi se zaštitile u potpunosti od ove pojave koriste

se postupak galvanizacije u kome se dodaje metalizirani cink ili aluminijum, premazuju se bitumeskim premazima ili se oblažu polietilenskim, polipropilenskim ili poliuretanskim zaštitnim slojem. Sa unutrašnje strane, cevi se oblažu slojem cementnog maltera koji ih štiti od korozije i u isto vreme smanjuje hrapavost površine u dodiru sa vodom.



Slika 5. Tipični strukturni presek duktilne gvozdene cevi

Figure 5. Typical structural section of ductile iron pipe

Nepovoljnost kod instaliranja cevovoda od livenog gvožđa jeste velika elektroprovodljivost. Osnovna fizička svojstva cevovoda od nodularnog liva su prikazana u tabeli Tabela 4.

Tabela 4. Osnovna fizička svojstva nodularnog livenog gvožđa

Table 4. Basic physical properties of nodular cast iron

<i>Svojstvo</i>	<i>Jed. Mere</i>	<i>Vrednost</i>
Gustina (samo liv, bez zaštitnih slojeva)	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	7100-7250
Čvrstoća na zatezanje (granica razvlačenja)	<i>MPa</i>	270-420
Čvrstoća na pritisak	<i>MPa</i>	2970
Izduženje do granice kidanja	<i>%</i>	5÷10
Modul elastičnosti	<i>GPa</i>	165-180
Tvrdoća	<i>MPa</i>	1150-3200
Poissonov Koeficijent	-	0,27-0,28
Toplotna provodljivost	<i>W/m<sup>°K</sup></i>	36
Temperatura topljenja	<i>°C</i>	1130-1250
Koeficijent linearnog istezanja	<i>mm/m<sup>°K</sup></i>	0,011
Poprečni otpor na 20°C	<i>Ω/m</i>	49-56x10 <sup>-8</sup>

## 2.1.5 Čelik

Čelik je po definiciji legura gvožđa i ugljenika sa sadržajem ugljenika manjim od 2,1%. Ovaj materijal se koristi od davnina u različitim sferama života. Osnovna prednost ovog materijala u odnosu na sve druge od kojih se vrši konvencionalna proizvodnja cevi jesu značajno veće mehaničke otpornosti.

Prilikom proizvodnje, postizanje željenih mehaničkih svojstava zavisi o tri međusobno povezana faktora: hemijskog sastava (kombinacija legirajućih elemenata), plastične prerade i termičke obrade. Prema proizvodnom procesu razlikuju se dve vrste čeličnih cevi:

- Bešavne cevi koje se proizvode od valjanog čelika
- Šavne cevi koje se proizvode uzdužnim ili spiralnim varenjem

Osnovna karakteristika čelika jeste izuzetna čvrstoća (otpornost na lom i elastičnost). Zbog svojih mehaničkih karakteristika, čelik se naročito koristi u sistemima sa značajno velikim pritiscima i u uslovima koji zahtevaju značajne otpore dinamičkim uticajima i savijanjima.

Najveća mana čeličnih cevovoda jeste osetljivost na hemijske i elektrolitičke uticaje, odnosno na pojavu korozije. Kako bi se pojava korozije izbegla, čelične cevi se premazuju zatitnim premazima na bitumenskoj, cementnoj ili plastičnoj osnovi i vrši se katodna zaštita cevi. Osnovna fizička svojstva čeličnih cevovoda su prikazana u tabeli Tabela 5.

Tabela 5. Osnovna fizička svojstva čelika

Table 5. Basic physical properties of steel

<i>Svojstvo</i>	<i>Jed. Mere</i>	<i>Vrednost</i>
Gustina (samo liv, bez zaštitnih slojeva)	kg/m <sup>3</sup>	7850-8000
Čvrstoća na zatezanje (granica razvlačenja)	MPa	250
Izduženje do granice kidanja	%	21
Modul elastičnosti	GPa	200-207
Tvrdoća (Brinell)	-	131
Poissonov Koeficijent	-	0,28-0,30
Toplotna provodljivost	W/m <sup>°K</sup>	54
Temperatura topljenja	°C	1371-1540
Koeficijent linearnog istezanja	mm/m <sup>°K</sup>	0,015
Poprečni otpor na 20°C	Ω/m	14x10 <sup>-8</sup>

## 2.2 Hidraulički kapacitet cevovoda

Hidraulički kapacitet cevovoda je definisan površinom unutrašnjeg poprečnog preseka cevi i koeficijentom koji reprezentuje hrapavost, tj otpore duž cevi. Izvođenjem elementarnih hidrauličkih jednačina može se uočiti da je proticaj u cevovodu  $Q$ , koji zavisi od karakteristika cevovoda, proporcionalan unutrašnjem prečniku cevi  $d$  stepenovanom na vrednost 8/3 i obrnuto proporcionalan Manningovom koeficijentu trenja  $n$ :

$$Q = f \left( \frac{d^{8/3}}{n} \right) \quad (1)$$

Ovo znači da je neophodno svesti različite cevne materijale različitih dimenzija na hidraulički parametar  $d^{8/3}/n$  kako bi se mogla izvršiti realna komparacija njihovih hidrauličkih kapaciteta.

### 2.2.1 Komparacija nominalnih i unutrašnjih prečnica cevovoda

U proizvodnji cevnog materijala postoje standardne oznake za određene veličine otvora cevovoda koje se nazivaju nominalnim prečnicima – DN. Zavisno od materijala, nominalni prečnik može označavati spoljni prečnik (HDPE, PVC-0), unutrašnji prečnik ili dimenziju koja je približna jednoj ili obema pomenutim veličinama.

U konvencionalnoj proizvodnji HDPE cevovoda nominalni prečnik (DN) označava spoljašnju dimenziju cevi (OD – Outer Diameter). Na tržištu se najčešće mogu naći cevovodi sa nominalnim prečnikom počev već od 16 mm, pa sve do DN≤630÷800 mm. Pojedini proizvođači raspolažu sa cevima nominalnih prečnika do 1200 mm, a po porudžbini se mogu naručiti i veći. Treba napomenuti da se kod HDPE cevovoda povećanje mehaničkih svojstava cevi postiže povećanjem debljine zida.

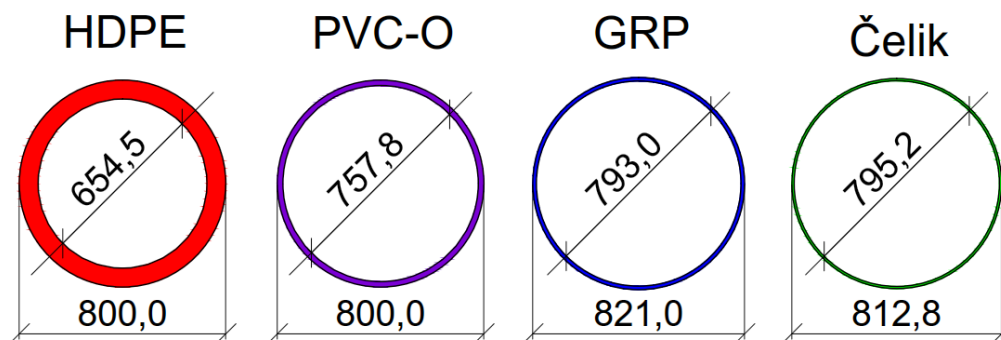


Ovo za posledicu ima da je u velikom broju slučajeva razlika između nominalnog (spoljašnjeg) i unutrašnjeg prečnika značajna. Odnos nominalnog (spoljašnjeg) prečnika i debljine zida je izražen koeficijentom SDR (Standard Dimension Ratio). SDR koeficijent je jedinstven za sve nominalne prečnike unutar jedne klase pritiska PN. Na primer, za PN6 koeficijent SDR iznosi cca 27,6, za PN10 on je približno 17, za PN16 približno 11, dok je za cevovode klase pritiska PN20, SDR jednak 9.

Kada govorimo o GRP cevovodima, konvencionalna proizvodnja podrazumeva nominalne prečnike u rasponu od 100 (50) mm, pa sve do 4000 mm. Kod GRP cevovoda, nominalni prečnik približno odgovara unutrašnjem prečniku cevi (razlike su obične nekoliko mm). Debljina cevovoda nije značajna u odnosu na nominalni prečnik i nema značajnih povećanja debljine zida sa porastom prečnika i/ili klase pritiska.

PVC-O cevovodi su relativno novi na domaćem tržištu. Kod ovih cevovoda, kao i kod HDPE, oznaka DN se odnosi na spoljni prečnik. Prema katalogskoj ponudi španske kompanije „MOLECOR Tecnologia“, ovi cevovodi su dostupni za nominalne prečnike manje ili jednake 1200 mm. Iako debljina zida raste sa povećanjem DN i PN, ova pojava nije tako izražena kao kod HDPE cevovoda. Ovo za rezultat ima da su unutrašnji prečnici PVC-O cevovoda značajno veći od unutrašnjih prečnika HDPE cevovoda istih DN i PN.

Nominalni prečnici čeličnih cevovoda označavaju zaokruženu približnu vrednost spoljnog prečnika. Čelični cevovodi se proizvode sa tipskim vrednostima spoljašnjeg prečnika (npr. za DN150, OD iznosi 159 mm; za DN500, OD iznosi 508 mm). Konvencionalna proizvodnja čeličnih cevi za potrebe hidrotehnike uglavnom podrazumeva cevovode nominalnih prečnika manjih od 600 mm. Cevi sa većim prečnicima se mogu raditi po porudžbini. Debljine zidova se mogu dobiti proračunom i usvojiti prema proizvodnom katalogu. S obzirom na male potrebne debljine zida cevi, unutrašnji prečnici ne odstupaju znatno od vrednosti DN.



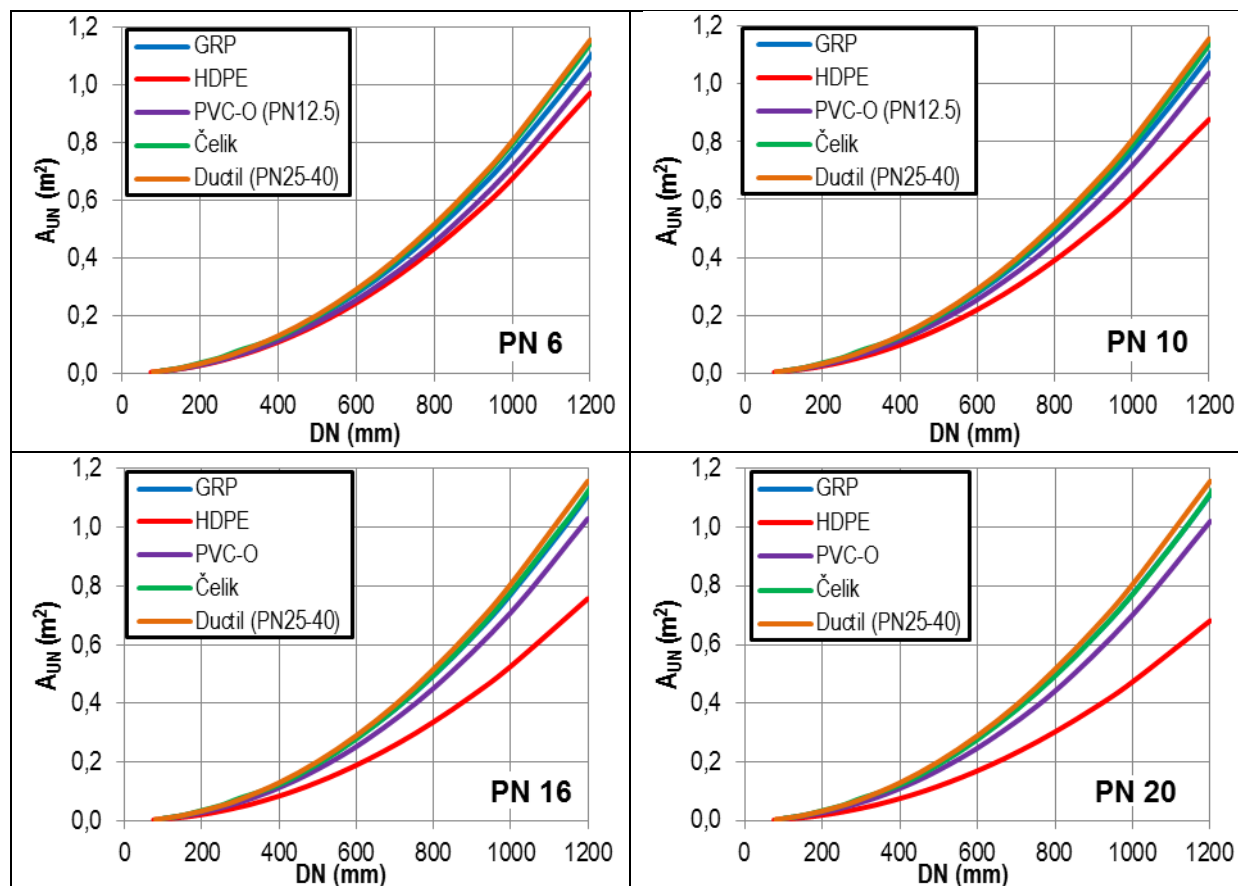
Slika 6. Dimenzije unutrašnjih i spoljašnjih prečnika (mm) cevovoda DN800/PN16 za različite cevne materijale

Figure 6. Inner and outer diameter dimensions (mm) of DN800 / PN16 pipes for different pipe materials

Cevi od nodularnog liva se proizvode uglavnom u rasponu nominalnih prečnika od 50 do 800 (1200) mm. Kao i kod nekih drugih, cevi većeg prečnika mogu biti izrađene po porudžbini. Nominalni prečnikom su označene približne vrednosti unutrašnjih prečnika cevi, ali s obzirom na male debljine zidova, one često ne odstupaju mnogo ni u odnosu na spoljašnje (ugradbene) prečnike cevovoda. S obzirom na kvalitet i mehanička svojstva cevi od nodularnog liva, proizvodni program uglavnom podrazumeva samo cevovode klase pritiska većih od 25 bari.

Na Slika 6 se mogu videti razlike u unutrašnjim prečnicima cevovoda DN800 / PN16 za različite cevne materijale. Dimenzije se mogu neznatno razlikovati u zavisnosti od proizvođača. Sa Slika 6 se jasno uočava velika mana HDPE cevovoda, a to je da cevovodi proizvedeni od ovog materijala svoje mehaničke sposobnosti postižu značajnim debljinama zida cevi. Inovativna tehnologija proizvodnje PVC-O cevovoda doprinosi da mehaničke karakteristike cevovoda ne zavise previše od debljine zidova cevi, iako je primetno povećanje debljine cevovoda sa porastom DN i PN. Tehnologija proizvodnje GRP cevovoda je takva da mehaničke sposobnosti ne zavise previše od

debljine cevovoda. Povećanje mehaničkih sposobnosti kod GRP cevovoda se postiže povećanjem sadržaja staklenih vlakana unutar strukture zida cevi. Čelik sa svojim izuzetnim mehaničkim karakteristikama omogućava izuzetno tanke zidove cevi i pri većim DN i PN.



Slika 7. Zavisnost površine unutrašnjeg poprečnog preseka cevi od vrste materijala, DN i PN

Figure 7. Area of the pipe's inner cross section in a function of the material type, DN and PN

Sa Slika 7 se može uočiti da u istoj klasi pritiska, sa porastom nominalnog prečnika dolazi do porasta odstupanja između efektivnih površina poprečnih preseka HDPE i drugih cevovoda. Ova odstupanja su značajnija sa porastom klase pritiska cevovoda. Duktilni cevovodi (nodularni liv) su nezavisni od klase pritiska jer njihova konvencionalna proizvodnja podrazumeva cevovode jedne klase pritiska koja zavisi od prečnika varira između PN25 i PN50, a ponekad i više. Porast DN i PN nema apsolutno veliki značaj na redukciju površine efektivnog poprečnog preseka čeličnih i GRP cevovoda. Kod PVC-O cevovoda, redukcija efektivne površine poprečnog preseka postoji ali ona nije ni približno značajna kao kod HDPE cevovoda. Važno je napomenuti da je trenutno na domaćem tržištu minimalna klasa pritiska PVC-O cevovoda koja je dostupna jednaka PN12,5.

### 2.2.2 Komparacija Maningovih koeficijenata trenja

Jedna od najbitnijih karakteristika proizvedenog cevnog materijala jeste hrapavost unutrašnje strane zida cevi, koja direktno utiče na kapacitet cevovoda. Različiti proizvođači u svojim specifikacijama daju različite parametre koji reprezentuju ovu karakteristiku. Najčešći reprezent hrapavosti cevovoda jeste apsolutna hrapavost  $k$ , izražena u milimetrima. Pored ovog parametra, kao reprezent hrapavosti u specifikacijama proizvođača pojavljuju se Maningov koeficijent trenja  $n$  i

Hazen-Vilijamsova konstanta  $C$ . U Tabela 6 su prikazane apsolutne hrapavosti  $k$  za nove cevi, definisane od strane proizvođača.

Tabela 6. Apsolutna hrapavost  $k$  za različite materijale

Table 6. Absolute roughness  $k$  for different materials

Materijal	HDPE	GRP	PVC-O	Čelik	Duktil*
$k$ (mm)	0,005-0,010	0,01-0,03	0,006-0,012	0,05-0,1	0,01-0,05

\* hrapavost duktilnih cevi reprezentuje sloj cementnog morta sa unutrašnje strane cevi

Iz prikazanih vrednosti parametra  $k$  se mogu videti neki relativni odnosi hrapavosti pojedinih materijala. Međutim, ove vrednosti važe za nove cevi i ne uzimaju u obzir neravnine kao što su ispupčenja na spojnica cevi. Tokom eksploatacije dolazi do erodiranja unutrašnje površine cevi usled abrazije i hemijskog dejstva fluida unutar cevi. Ovo za posledicu ima povećanje prikazanih vrednosti apsolutne hrapavosti u cevi, ne računajući spojnice. Treba napomenuti da su plastične cevi otpornije od legura gvožđa kada su u pitanju abrazija i hemijsko dejstvo vode, pa samim tim imaju manje degradacije glatkoće tokom vremena.

Kako bi se realno sagledali eksploatacioni uslovi i izvršila komparacija hidrauličkog kapaciteta između cevi izrađenih od različitih cevni materijala, za svaki cevni materijal definisani su Maningovi koeficijenti trenja (otpora) –  $n$ . Ovi koeficijenti se odnose na eksploatacione karakteristike i definisani su na osnovu preporuka proizvođača, iskustva i aproksimativne zavisnosti Maningovog koeficijenta  $n$  od apsolutne hrapavosti  $k$  za oblast turbulentnog strujanja [3]:

$$n = \frac{k^{1/6}}{26} \quad (2)$$

Tabela 7. Maningov koeficijenti hrapavost  $n$  za različite materijale

Table 7. Manning roughness coefficients  $n$  for different materials

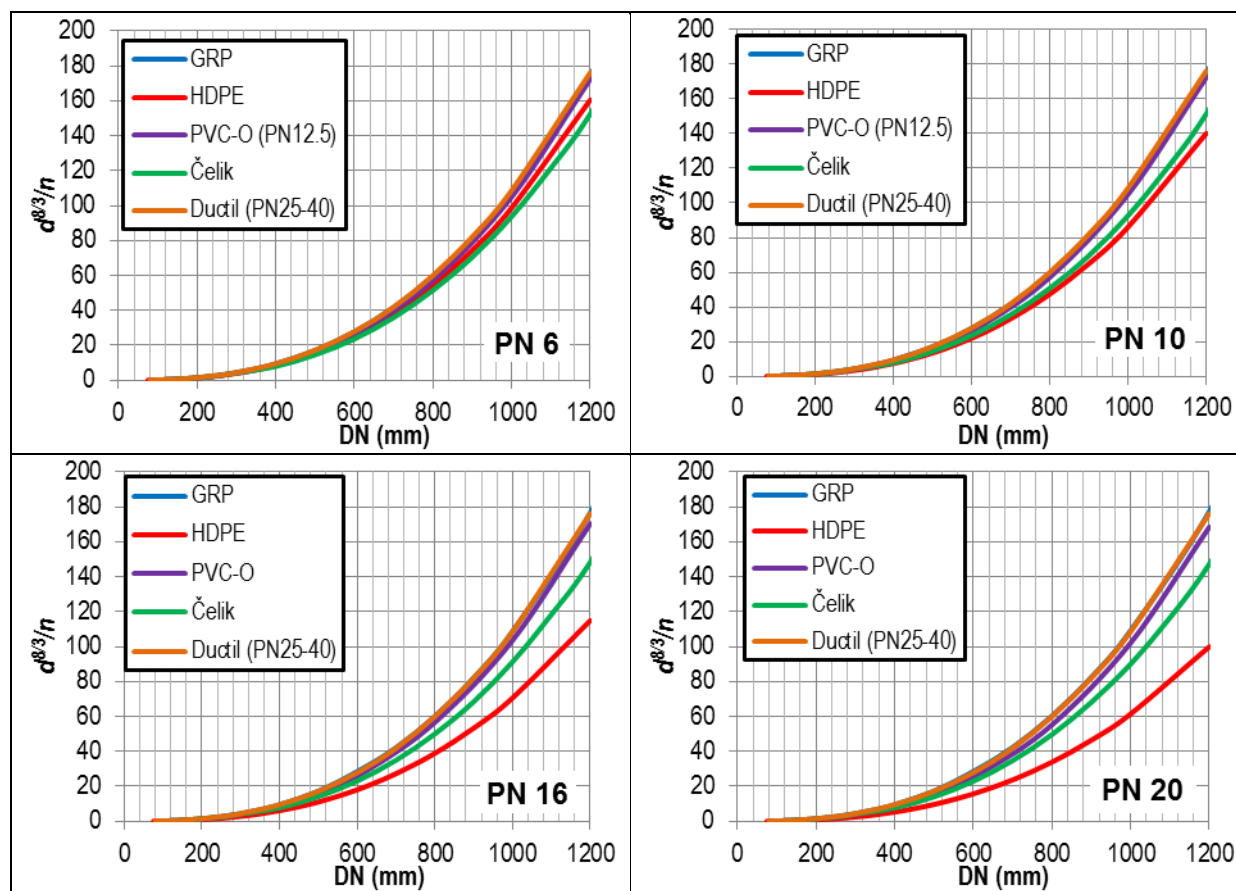
Materijal	HDPE	GRP	PVC-O	Čelik	Duktil*
$n$ (m <sup>-1/3</sup> s)	0,0083	0,0090	0,0084	0,0108	0,0095

\* hrapavost duktilnih cevi reprezentuje sloj cementnog morta sa unutrašnje strane cevi

Bitno je napomenuti da su u jednačini (2) korišćene apsolutne hrapavosti koje prema literaturi i iskustvu odgovaraju eksploatacionom stanju cevovoda, a ne karakteristikama novih pojedinačnih cevi. U Tabela 7 su prikazani približni Maningovi koeficijenti hrapavosti korišćenji u daljim analizama.

### 2.2.3 Komparacija hidrauličkog kapaciteta

Komparacija hidrauličkog kapaciteta cevovoda je izvršena komparacijom hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$ . Na Slika 8 su prikazane vrednosti zavisnosti pomenutog hidrauličkog parametra zavisno od tipa cevi, nominalnog prečnika i klase pritiska cevni materijala.



Slika 8. Zavisnost hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  od vrste materijala, DN i PN

Figure 8. Relation of hydraulic parameter  $d^{8/3}/n$  with material type, DN and PN

Poređenjem Slika 7 i Slika 8 može se sagledati uticaj hrapavosti na hidraulički kapacitet cevovoda. Može se uočiti da je kapacitet čeličnog cevovoda u celom rasponu nominalnih prečnika manji od kapaciteta HDPE cevovoda za cevovode klase pritiska PN6, iako su odgovarajući unutrašnji prečnici čeličnih cevovoda veći. Kako PN raste, smanjuje se unutrašnji prečnik HDPE cevovoda, koji je ipak dominantni činilac razmatranog hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$ . U svim razmatranim klasama pritiska najveće kapacitete po nominalnim prečnicima poseduju GRP i duktilne cevi. Što se tiče PVC-O cevovoda, njihovi kapaciteti po DN ne zaostaju znatno za pomenutim GRP i duktilnim cevovodima. Razlog tome je racionalna debljina zida i velika glatkoća njegove površine.

### 2.3 Unutrašnji pritisak vode i spoljašnje opterećenje

Otpornost na unutrašnji pritisak vode i na spoljašnje opterećenje su često glavni faktori koji određuju vrstu materijala cevovoda koji će se ugraditi u određeni sistem.

#### 2.3.1 Otpornost na unutrašnji pritisak vode

Otpornost na unutrašnji pritisak vode ili drugog fluida se definiše klasom pritiska PN, odnosno nominalnim pritiskom (Pressure Nominale). Broj iza oznake PN označava najveći dozvoljeni pritisak izražen u barima (1 bar=1 atmosfera=10 mvs=10.000 Pa) kojim fluid može dejstvovati na unutrašnji zid cevi, kontinualno u normalnim radnim uslovima. Prilikom proizvodnje cevi postoje i određeni koeficijenti sigurnosti koji predstavljaju odnos maksimalnog pritiska koji cev u eksploatacionim uslovima može izdržati i nominalnog pritiska PN (Tabela 8).

Tabela 8. Koeficijenti sigurnosti  $n$  za različite materijale

Table 8. Manning roughness coefficients  $n$  for different materials

Materijal	HDPE	GRP	PVC-O	Čelik*	Duktil
$K$	1,25	1,4	1,4	min 1,0	3,0

\* Zavisno od načina dimenzionisanja cevovoda

Konvencionalne klase pritiska koje se najčešće nalaze u proizvodnim asortimanima fabrika su PN6, PN10, PN16, PN20, PN25, PN32 i PN40. Pored navedenih, često se sreću i cevni materijali sa oznakama PN4, PN8, PN12,5, PN50, pa i oni sa većim klasama pritiska za pojedine proizvodne materijale.

HDPE cevovodi se proizvode najčešće u klasama pritiska do PN32. Zbog velike potrebne debljine zidova, za nominalne prečnike koji su veći od DN400, retko se mogu sresti proizvodi klase pritiska veće od PN20.

GRP cevovodi imaju širok raspon nominalnih pritisaka i prečnika. Do klase pritiska PN32 mogu se naći cevi nominalnih prečnika do 1600 mm. Najveći nominalni prečnici (do DN4000) se uglavnom proizvode u klasama pritiska PN16 ili manje.

PVC-O cevi su na našem tržištu trenutno dostupne do nominalnih pritisaka PN25 i to za cevi sa  $DN \leq 800$  mm. Cevovodi DN1200 imaju najveću klasu pritiska PN16.

Duktilni cevovodi se proizvode u jedinstvenim klasama pritiska. Uglavnom cevi sa  $DN \leq 400$  mm pripadaju klasi pritiska PN40 (ili PN50). Za cevovode nešto većih prečnika, tipa do DN600 (eventualno DN800) standardne klase pritiska iznose PN30. Za najveće prečnike sprovedna klasa pritiska je uglavnom PN25, eventualno PN20.

Čelični cevovodi se dimenzionišu prema konkretnim zahtevima. Kod njih se bira debljina zida koja je u skladu sa maksimalnim pritiskom koji se može javiti u cevovodu [1].

Još jedna od bitnih pojava vezana za otpornost na dejstvo unutrašnjeg pritiska fluida jeste hidraulički udar. Prilikom hidrauličkog pritiska može doći do pojave nadpritiska koji prevazilazi maksimalne pritiske koje cev može izdržati shodno svojim koeficijentima sigurnosti. Vrednost natpritiska  $\Delta p$  je shodno jednadžini Žukovskog (3) [2] direktno proporcionalna vrednosti brzine širenja elastičnog talasa  $a$  u materijalu od kojeg je napravljena cev.

$$\Delta p = \frac{a \times \Delta v}{g} [mvs] \quad (3)$$

gde je  $g$  - gravitaciona brzina, a  $\Delta v$  - promena brzine kretanja fluida u cevi.

Vrednost brzine širenja elastičnog talasa  $a$  se dobija na osnovu jednačine (4) [2] :

$$a = \frac{1425}{\left(1 + \frac{K}{E} \times \frac{ID}{s_{min}}\right)} [m/s] \quad (4)$$

gde su  $K$  – zapreminski modul elastičnosti vode,  $E$  – modul elastičnosti materijala od kojeg je napravljena cev,  $ID$  – spoljašnji prečnik razmatranog cevovoda,  $s_{min}$  – minimalna debljina zida cevi.

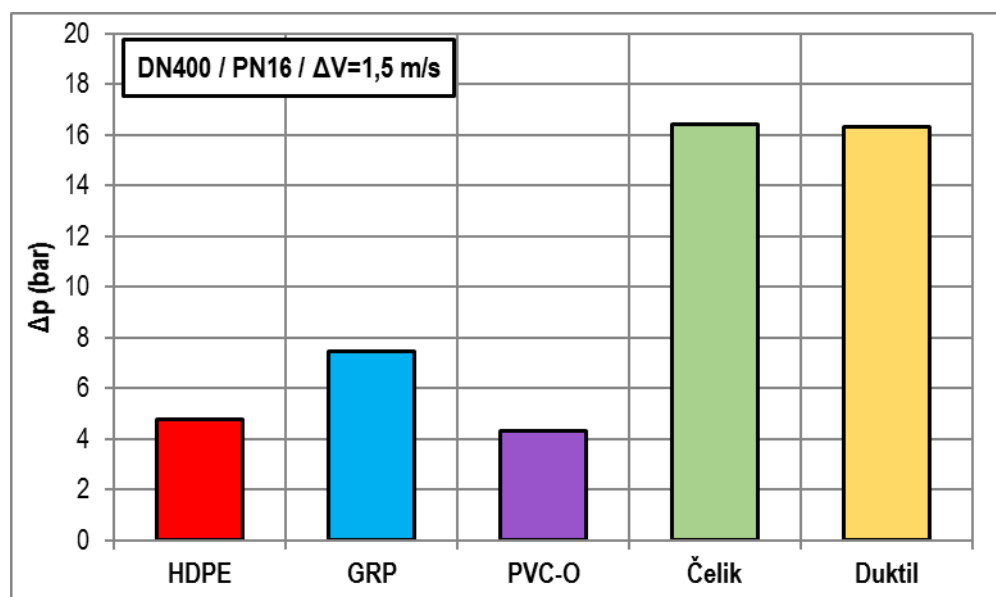
Korišćenjem reprezentativnih vrednosti promenljivih iz jednačine (4) za cevi PN16, sračunate su referentne vrednosti brzine širenja elastičnog talasa (Tabela 9). Ova vrednost je najmanja za cevovode izrađene od PVC-O materijala i iznosi oko 282 m/s (nezatne razlike između z različite nominalne prečnike). Nešto veću vrednost parametra  $a$  imaju cevi od HDPE materijala i ova vrednost iznosi cca 313 m/s, nezavisno od nominalnog prečnika. Kada su u pitanju GRP cevovodi, sračunata vrednost paramtera  $a$  se kreće u rasponu od 478,2 do 543,8 m/s. Najveće vrednosti brzine širenja elastičnog talasa imaju čelični i duktilno liveni cevovodi. Kod ovih cevovoda predmetni parametar varira oko vrednosti 1000 m/s (uglavnom ispod 1100 m/s).

Tabela 9. Vrednosti brzine širenja elastičnog talasa za cevi klase pritiska PN16

Table 9. Elastic wave propagation velocity values for PN16 pressure class pipes

Materijal	HDPE	GRP	PVC-O	Čelik	Duktil
DN250	313,1	543,8	282,6	1092,9	1128,3
DN400	313,1	488,8	282,6	1073,8	1065,6
DN800	313,1	478,2	281,0	1015,6	995,8

Kako bi se pokazao red veličine natpritiska koji se javlja u cevovodima PN16, korišćenjem jednačine (3) i sa vrednostima brzine  $a$  za DN400 sračunate su vrednosti natpritiska koji se javlja pri trenutnom zatvaranju cevovoda u kome se voda kreće brzinom 1,5 m/s (Slika 9).



Slika 9. Vrednosti natpritiska pri trenutnom zatvaranju cevovoda DN400/PN16 i brzini vode 1,5 m/s

Figure 9. Overpressure values during instant closing of DN400 / PN16 pipeline at water speed 1.5 m/s

Sa Slika 9 se uočava da su vrednosti natpritiska u čeličnom i duktilnom cevovodu reda veličine radnog pritiska. Treba napomenuti da je nominalni pritisak duktilne cevi DN400 zapravo PN40 što govori o većoj debljini cevi koja indukuje veću brzinu širenja talasa, a samim tim i natpritisak. Najmanji natpritisak u cevi se javlja u PVC-O cevovodima - 4,32 bara što odgovara oko 27% vrednosti nominalnog pritiska. Nešto veći natpritisak se javlja kod HDPE cevovoda – 4,8 bari što odgovara cca 30% nominalnog pritiska. U GRP cevima prilikom hidrauličkog udara dolazi do pojave natpritiska koji je u slučaju PN16 nešto manji od 47% nominalnog pritiska.

### 2.3.2 Otpornost na spoljašnje opterećenje

Otpornost na spoljašnje opterećenje se iskazuje preko krutosti cevi, odnosno njene sposobnosti da preuzme temeno opterećenje najčešće od zemlje i/ili saobraćaja. Krutost cevi se najčešće izražava pomoću koeficijenta/oznake SN koji se deklariše kao obodna krutost cevi (ring nominal stiffness). Krutost cevi je proizvod modula elastičnosti prstenastog savijanja materijala zida cevi i momenta inercije jedinice dužine cevi (5) [4].

$$SN = \frac{E \times I}{(OD - s)^3} = \frac{E \times s^3}{12 \times (OD - s)^3} [N / m^2] \quad (5)$$

gde su E – modul elastičnosti materijala, s – debljina zida cevi, OD – spoljni prečnik cevi.



Slika 10. Izgled aparature za testiranja obodne krutosti SN

Figure 10. Appearance of the apparatus for testing the ring stiffness SN

Proizvođači HDPE punozidnih cevovoda obično ne ističu ovu karakteristiku kao osnovnu kada su u pitanju karakteristike cevi. Vrednost SN je u direktnoj vezi odnosa nominalnog (spoljnog prečnika) i debljine zida cevi. S obzirom da cevi svih dijametara unutar jedne klase pritiska imaju isti pomenuti odnos, tako im je ista vrednost SN. Proračunska vrednost SN varira zavisno od karakteristika osnovnog materijala (modul elastičnosti). U Tabela 10 su prikazani rasponi proračunske vrednosti SN za HDPE cevi zavisno od PN, odnosno koeficijenta SDR.

Tabela 10. Vrednosti SN zavisno od PN kod HDPE cevi

Table 10. SN values in a function of PN of HDPE pipes

PN	6	10	16	20
<i>minSN (kN/m<sup>2</sup>)</i>	3,7	14,2	58,3	113,9
<i>maxSN (kN/m<sup>2</sup>)</i>	6,4	24,4	100,0	195,3

Iz Tabela 10 se vidi da su sa povećanjem klase pritiska, odnosno debljine zida HDPE cevi, značajno veće obodne krutosti cevovoda.

Kada je u pitanju obodna krutost GRP cevovoda, ona predstavlja deo asortimana serijske proizvodnje. GRP cevi, nezavisno od PN se obično proizvode sa obodnim krutostima 1250, 2500, 5.000 i 10.000 N/m<sup>2</sup>. Po porudžbini se izrađuju i cevi obodne krutosti 20.000 N/m<sup>2</sup> ili druge.

PVC-O cevovodi imaju definisane debljine zidova i obodne krutosti SN za svaku od nominalnih klasa pritiska PN. Zavisnost parametra SN od PN je prikazana u Tabela 11.

Poređenjem tabela 10 i 11 se može uočiti da HDPE cevi imaju znatno veće obodne krutosti u odnosu na PVC-O cevi iste nominalne klase pritiska. Razlog ovome jeste što i pored boljih mehaničkih svojstava PVC-O cevi (modul elastičnosti) debljina zida HDPE cevovoda je značajno veća

nego kod PVC-O cevodova. Ipak, vrednosti SN za PVC-O cevi su sasvim dovoljne kada je u pitanju instalacija cevodova u zemljištu sa konvencionalnim dubinama ukopavanja (<3÷4 m dubine) i opterećenjem od drumskog saobraćaja.

Tabela 11. Vrednosti SN zavisno od PN kod PVC-O cevi

Table 11. SN values in a function of PN of PVC-O pipes

PN	12,5	16	20	25
<i>minSN (kN/m<sup>2</sup>)</i>	5,0	7,0	11,0	20,0

Značajne vrednosti modula elastičnosti čelika i nodularnog liva doprinose velikim obodnim krutostima cevodova napravljenih od ovih materijala. Dimenzionisanje čeličnih cevodova prema unutrašnjim prečnicima nekad ima za posledicu previše male debljine zidova, sa kojima se i pored velikih vrednosti modula elastičnosti postižu relativno male vrednosti obodne krutosti. U tabeli 12 su prikazane zavisnosti obodnih krutosti SN čeličnih i duktilnih cevodova DN400 i DN800 zavisno od PN. Debljine zidova čeličnih cevodova su dimenzionisane prema unutrašnjem pritisku (probni) primenom kotlovske formule i dodavanjem sigurnosnih 2 mm zbog potencijalne korozije. Usvojeni materijal je čelik Č0361, a vrednosti debljine zidova su usvojene na osnovu proizvodnih kataloga. Duktilni cevodovi su nepromenljivi u datom opsegu PN jer im je stvarna vrednost PN veća.

Tabela 12. Vrednosti SN zavisno od PN za čelične i duktilne cevi

Table 12. SN values in a function of PN of steel and ductil iron pipes

Materijal / PN	SN (kN/m <sup>2</sup> )			
	6	10	16	20
Čelik DN400	12,2	16,8	46,6	66,7
Čelik DN800	2,9	8,1	22,4	33,0
Duktil DN400	54,6	54,6	54,6	54,6
Duktil DN800	23,0	23,0	23,0	23,0

Tabela 12 pokazuje da čelični cevodovi dimenzionisani na male unutrašnje pritiske (PN6) nemaju značajne vrednosti obodne krutosti (ali ne i beznačajne). Sa porastom PN i debljine zida logično raste krutost cevi, dok sa povećanjem nominalnog prečnika vrednosti SN opadaju.

## 2.4 Transport, ugradnja i eksploatacioni vek cevodova

### 2.4.1 Transport cevi

Na cenu ugrađenog cevodova može uticati cena transporta cevi od mesta proizvodnje do gradilišta. Ovo u mnogome zavisi od razdaljine između mesta proizvodnje i gradilišta, dostupnih vidova transporta (drumski, železnički, brodski) ali i od dimenzija i načina pakovanja cevi.

HDPE cevodovi manjih prečnika (DN<110mm) se zbog svoje savitljivosti mogu pakovati na koturovima na koje staje 50-100 m cevi, zavisno od DN. Veći DN od 110 mm zahtevaju proizvodnju i pakovanje u šipkama dužina 6-12 m.

GRP cevodovi se proizvode u šipkama dužina 3, 6 i 12 m, dok pojedini proizvođači pružaju mogućnost proizvodnje šipki dužina do 18 m. Velika pogodnost GRP cevodova je mogućnost transporta cevodova različitih nominalnih prečnika jedan u drugome (Slika 11). Ovo može bitno da utiče na cenu transporta cevodova kod mrežnih sistema koji imaju veći broj projektovanih nominalnih prečnika u sklopu jedne lokacije.





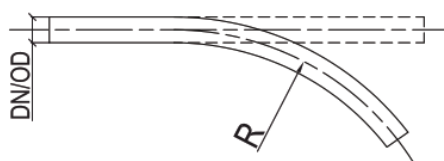
Slika 11. Pakovanje GRP cevodova različitih nominalnih prečnika

Figure 11. Packing of different nominal diameters GRP pipes

PVC-O cevi se proizvode u šipkama približne dužine 6 m, kao i većina duktilnih cevi kod kojih je prisutna i proizvodna dužina 3 m. Čelične cevi pored pomenute dimenzije mogu se proizvoditi i transportovati u dužinama od 12 m.

#### 2.4.2 Trasiranje i ukopavanje cevodova

Jedan od najzahtevnijih projektantskih zadataka jeste definisanje trase cevodova. Trasa po pravilu mora biti što kraća kako bi se minimizirali hidraulički gubici. Pritom treba voditi računa o što manjem broju horizontalnih i vertikalnih preloma trase koji uglavnom iziskuju izgradnju anker blova za stabilizaciju krivina. Cilj trasiranja je da niveleta cevodova u što većoj meri prati liniju terena kako bi se minimizirao obim zemljanih radova, a da s druge strane takva niveleta ne zahteva ugradnju velikog broja vazušnih ventila i ispusta na lokalno najvišim i najnižim delovima cevodova.



Slika 12. Krivljenje trase HDPE cevodova

Figure 12. Bending of HDPE pipeline route

HDPE cevodovi su verovatno najzahvalniji za trasiranje. Cevi se najčešće spajaju zavarivanjem u kontinualnu cev. Zahvaljujući svojim mehaničkim karakteristikama, ove cevodove je moguće kriviti do određenog stepena bez upotrebe fazonskih komada (Slika 12). Najveći dozvoljeni radijus krivine je obično  $20 \times \text{DN(OD)}$ , osim za cevodove sa tanjim zida (PN6) kod kojih je neophodno da radijus krivine bude veći ili jednak  $30 \times \text{DN(OD)}$ .

Pored HDPE cevodova, PVC-O cevodovi imaju nešto manju mogućnost savijanja samih cevi radi postizanja veće zakrivljenosti trase. Uz krivljenje cevi, na svakoj spojnici, odnosno na rastojanju od cca 6 m moguće je izvršiti defleksiju pravca trase za  $2^\circ$ , nezavisno od nominalnog prečnika cevodova.



Slika 13. Krivljenje trase PVC-O cevovoda na spojnica

Figure 13. Bending of PVC-O pipeline route using joint deflection

GRP cevovodi takođe imaju mogućnost preloma trase u spojnica. Za manje DN i PN su dozvoljeni veći stepeni defleksije. Tako za cevovode  $PN \leq 16$  bari, najčešće sretane granične vrednosti ugla defleksije ( $\alpha$ ) su zavisno od DN prikazane u Tabela 13.

Tabela 13. Uobičajene vrednosti ugla defleksije na spojnica GRP cevovoda

Table 13. Common values of deflection angle at GRP pipeline joints

DN (mm)	$\leq 500$	$500 < DN \leq 900$	$900 < DN \leq 1800$	$> 1800$
$\alpha$ (°)	3	2	1	0,5

Slično GRP cevovodima, moguće su promene pravca trase cevovoda na mestu spojnica, zavisno od tipa spojnice koja se koristi i proizvođača. Za cevovode manjih DN moguće su vrednosti promene pravca na spojnica i za  $5^\circ$ . Kako rastu vrednosti DN, tako opada mogući ugao defleksije, pa je za najveće vrednosti DN (oko DN1000) na spojnica moguća promena pravca za manje od  $1^\circ$ .

Čelični cevovodi mogu imati fleksibilne nastavke kao i duktilni, ali se češće nastavljaju zavarivanjem.

Što se tiče ukopavanja cevovoda, ono zavisi od više faktora, među kojima su dubina mržnjenja, opterećenje sa površine terena, morfologija i sastav tla.

Prema važećim domaćim standardima, dubina ukopavanja javnih mreža ne treba biti manja od 80 cm, što predstavlja minimalnu vertikalnu razdaljinu između površine terena i vrha cevi.

Ukopavanje cevi shodno opterećenju je posledica statičkog proračuna u kome figurišu ranije prikazani parametar obodne krutosti, površinsko opterećenje i fizičko-mehaničke karakteristike zemljišta i ostalih materijala ispod, oko i iznad cevi. Površinsko opterećenje je najčešće saobraćajnog porekla. Uticaj površinskog opterećenja se smanjuje povećanjem dubine ukopavanja, ali u tom slučaju raste opterećenje od nadsloja zemlje iznad cevi. Ako imamo površinsko opterećenje, cevovodi sa većom obodnom krutošću dozvoljavaju manja ukopavanja. Veća krutost cevovoda omogućava i ukopavanja dublja od 4 m, kod kojih je dominantno opterećenje od nadsloja zemlje. Sa stanovišta opterećenja, optimalna dubina ukopavanja se kreće od 1,0 do 2,0 m, osim u izuzetnim slučajevima. Većina razmatranih cevovoda sa svojim obodnim krutostima je u stanju da podnese ukopavanja dubina od 1 do 4 m dubine.

### 2.4.3 Ugradnja cevovoda

Pod ugradnjom cevovoda mogu se uvrstiti monterski radovi na spajanju cevi i njihovoj montaži u rov, kao i svi neophodni zemljani, tesarski, armirački i betonski radovi. Građevinski radovi najčešće obuhvataju iskop i podgrađivanje rova za polaganje cevovoda, pripremu podloge, formiranje posteljice, zasipanje cevovoda nekoherentnim sitnozrnim materijalom, zatrpavanje rova sa nabijanjem zemlje iz iskopa, kao i eventualni odvoz viška materijala iz iskopa. Pored ovih radova, ne računajući izgradnju objekata (šahtova različite namene) duž trase cevovoda, često su neophodni armirački i betonski radovi na izradi anker blokova.

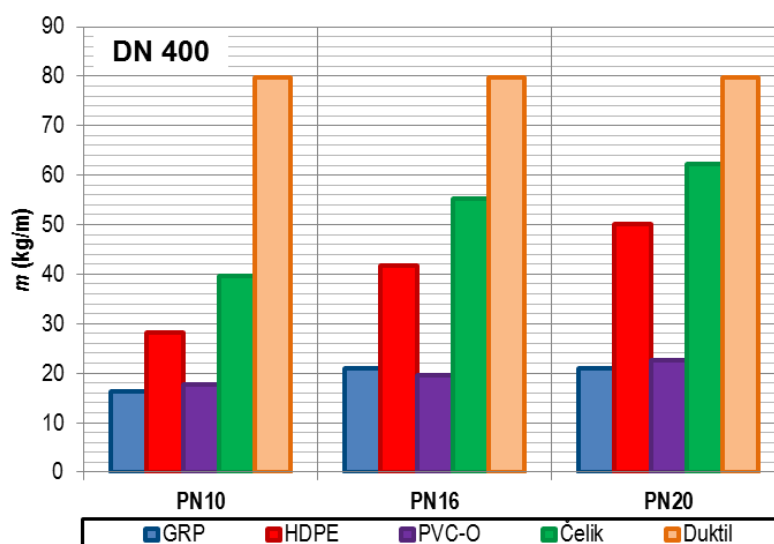
Spajanje cevovoda se vrši zavisno od tipa cevovoda. Polietilenske cevi se spajaju uglavnom varenjem koje može biti sučeono (tope se i spajaju krajevi dve cevi) ili elektrofuziono (oko krajeva dve cevi se topi fazonski komad za njihovo spajanje). Ređe se ove cevi spajaju prirubničkim spojem. Često se, naročito za manje cevovode, varenje cevi vrši na površini terena gde je manevar olakšan, a

zatim se cevi simultano, deo po deo spuštaju u prethodno pripremljene rovove. Varenje je praktično jer se njime omogućava kontinuitet cevovoda i izbegava potencijalno slabo mesto na spoju dve cevi. S druge strane proces varenja ima svoje trajanje koje donekle usporava radni proces ugradnje cevovoda. Varenje HDPE cevovoda može biti skupo, naročito za veće prečnike cevovoda.

GRP cevi se proizvode bez naglavaka za međusobno spajanje. Spoj ovih cevi se omogućava prstenastom spojnicom sa zaptivkama koja obavija spoj dve cevi. Krajevi cevi naležu do gumenog graničnika (stopera), a oko obe cevi naleže po jedan gumeni prsten za zaptivanje. Montaža se vrši na prethodno pripremljenoj posteljici rova, gde se cevi građevinskom mehanizacijom uguravaju u prsten spojnice. Postoji mogućnost integrisanja GRP ili čeličnih prirubnica univerzalnih dimenzija za spajanje dve GRP cevi, spajanje GRP cevi sa cevima drugog materijala ili hidromehaničkom opremom. Pored navedenih vrsta spojeva, posebna vrsta GRP cevi koje se nazivaju biaksijalne cevi se spaja cevi putem prstenaste spojnice koja se lepi oko krajeva cevi. Na taj način se postiže kruta veza cevovoda koji funkcioniše spregnuto i redukuje potrebu za izgradnjom anker blokova.

Spojnice za spajanje PVC-O cevi su integrisane u cevi i podrazumevaju naglavak na kraju cevi u koji naleže ravni deo druge cevi. U sklopu naglavka je integrisan polipropilenski prsten sa gumenim delom koji služe za sprečavanje pomeranja tokom montaže i obezbeđuju vodonepropusnost spoja. Ova vrsta spoja omogućava laku i brzu montažu cevovoda, naročito uzimajući u obzir njihovu malu težinu.

Čelične cevi se uglavnom spajaju varenjem, a mogu imati i naglavke ili se spajati prirubicama.



Slika 14. Jedinične težine cevi DN400 za pojedine cevne materijale

Figure 14. Unit weights of DN400 pipe for different pipe materials

Duktilne cevi se spajaju pomoću integrisanih prirubnicama sa zaptivanjem na krajevima cevi ili vezom na muf koja podrazumeva naglavke na krajevima cevi i prsten za zaptivanje. Postoje i pojedine vrste spojnice na muf koje omogućuju zaključavanje cevovoda i spregnuta pomeranja spojenih cevi. Na taj način se može izbeći česta ugradnja anker blokova na promenama pravca.

Brzina montaže cevovoda dosta zavisi i od težine cevi koja se ugrađuje. Težina HDPE cevovoda značajno varira zavisno od klase pritiska PN. Izuzev duktilnih koje su dimenzionisane na velike klase pritiska, najmanju zavisnost težine od klase pritiska imaju GRP cevi. S druge strane, debljina zida, kao i težina GRP cevi zavisi od SN faktora koji je veći za veće debljine zidova cevi. Na Slika 14 su prikazane jedinične težine cevi DN400 izrađene od pojedinih materijala, kako bi stekao uvid u relativne odnose između njih. Za težinu GRP cevi korišćene su vrednosti materijala SN5000 za PN10, a za PN16 i PN20 su korišćene vrednosti SN10000.

Slika 14 pokazuje da su daleko najlakše PVC-O i GRP cevi. Duktilne cevi su dimezionisane za veće pritiske i očekivano imaju najveću težinu. Težina HDPE i čeličnih cevi značajno raste sa povećanjem PN, s tim što su čelične cevi nešto teže.

Razlike u količini zemljanih radova mogu nastati u potrebnim dimenzijama rova za polaganje cevovoda, vrsti materijala kojim se zasipa cev i u broju anker blokova duž trase cevovoda.

Plastični cevovodi generalno ne zahtevaju velike širine rovova za njihovu ugradnju, dovoljno je da oko cevi postoji dovoljno prostora da se izvrši pravilno nabijanje nasutog materijala (min 20 cm). Slično je i kod duktilnih cevovoda sa vezom na muf. Kada su u pitanju čelični cevovodi, potreban je nešto malo veći prostor za manevrisanje prilikom varenja cevovoda.

Razlike u dubinama rovova su uslovljene neopohodnom dubinom ukopavanja koja je u slučaju postojanja saobraćajnog opterećenja obrnuto proporcionalna obodnoj krutosti. HDPE cevovodi generalno imaju zavidne krutosti i ne zahtevaju velike dubine ukopavanja, kao ni čelični i duktilni cevovodi. Nešto malo veće dubine su nekad potrebne u slučaju ugradnje GRP i PVC-O cevovoda.

Plastične cevi, pa i duktilne se po pravilu zatrpavaju sitnozrnim nekoherentnim materijalom (najčešće peskom) oko cevi i do 30ak cm iznad vrha cevi. Na taj način se zid cevi štiti od mogućih oštećenja koja mogu nastati prilikom zasipanja neselektiranim materijalom iz iskopa. Čelične cevi nisu toliko osetljive pa je moguća ugradnja neselektiranog materijala iz iskopa oko cevi.

Odstupanje od pravila kod plastičnih cevi čine PVC-O cevi koje se najčešće mogu ugrađivati bez peščane zaštite, uz zasipanje delimično selektiranim materijalom iz iskopa. Ovo je posledica njihove strukture koja je veoma otporna na površinska oštećenja i koja ne dozvoljava širenje eventualne pukotine u dubinu zida cevi. Na Slika 15 se mogu videti metode testiranja PVC-O cevi na površinska oštećenja. Sa slike se vidi kako i nakon prelaska bagera i udara kamena težine 250 kg sa visine 2,5 m zidovi cevi ostaju funkcionalni i u stanju da sprovode vodu pod pritiskom bez pojave curenja.



Slika 15. Testiranje PVC-O cevi na mehanička oštećenja

Figure 15. Testing of PVC-O pipes for mechanical damage

Specijalna edicija HDPE cevi sa oznakom RC (Resistance to Crack) omogućava ugradnju cevi bez potrebe za zasipanjem peskom. Modifikovani proces proizvodnje u odnosu na standardni omogućava otpornost cevi na dejstvo tačkastog opterećenja i brzo širenje eventualno nastale pukotine. Odsustvo potrebe za ugradnjom peščanog materijala doprinosi mnogo bržem i jeftinijem izvođenju zemljanih radova.



Slika 16. Instalacija HDPE\_RC cevi u rov bez posteljice

Figure 16. Installation of HDPE\_RC pipe in the trench without bed

Što se tiče količine anker blokova, ona je ubedljivo najmanje potrebna u slučaju instalacije HDPE cevovoda kod kojih se krivine mahom savlađuju krivljenjem samih cevi. PVC-O cevi zbog svoje savitljivosti i mogućnosti promene pravca na spojnica u velikoj meri oslobađaju od potrebe za izgradnjom anker blokova. GRP i duktilne cevi imaju mogućnost promene pravca na spojnica (ekstremno do 5%), dok je za veće promene pravca neophodna ugradnja fazonskih komada ubetoniranih u anker blokove. I za GRP i duktilne cevi postoje aplikacije koje omogućavaju spregnuto funkcionisanje više cevi u nizu i izostanak potrebe za anker blokovima. U pojedinim slučajevima, duktilni i čelični cevovodi za manje skretne uglove (<10%) mogu izdržati skretne sile bez ugradnje anker blokova.

#### 2.4.4 Eksploatacioni vek cevovoda

Svi plastični cevovodi deklariraju rok trajanja na 50 godina, iako mali broj njih daje zvaničnu garanciju. Naravno, ovaj vek trajanja podrazumeva adekvatno projektovane, pravilno ugrađene i eksploatisane cevovode. HDPE i GRP cevovodi imaju tradiciju ugradnje koja je duža od 50 godina i pojedine cevi koje su ugrađene 50-ih godina 20.og veka i danas su funkcionalne.

Liveni cevovodi imaju najdužu tradiciju ugradnje i korišćenja u sistemima pod pritiskom. Karakteristike cevovoda nodularnog (duktilnog) liva koje uključuju spoljašnje u unutrašnje antikorozivne zaštite, omogućuju eksploatacioni vek duži od 50 godina (80 godina).

Čelični cevovodi zbog svoje slabe otpornosti na koroziju, često imaju najkraći rok trajanja. Procenjeni eksploatacioni vek čeličnog cevovoda iznosi 30 godina.

### 3 Tehno-ekonomska analiza

Kada na osnovu uslova izgradnje ne postoje jasni indikatori za izbor cevovodnog materijala, izbor se najčešće svodi na najpovoljnije rešenje. U izboru najpovoljnijeg rešenja nalizirani su HDPE (PE100), HDPE\_RC (PE100), GRP (poliester), PVC-O 500, duktilni liveni i čelični cevovodni materijal. Raspon analiziranih vrednosti DN je od 75 do 1400 mm, dok su u analizu uvrštene klase pritiska PN6, PN10, PN16 i PN20.

Kako bi se analizirani materijali mogli uporediti, izvršena je tehno-ekonomska analiza instalacije cevovoda u zemljištu II i III kategorije. Analiziran je slučaj sa srednje teškim saobraćajnim

opterećenjem, kako bi se istakle razlike između cevovoda sa različitim obodnim krutostima (dubina ukopavanja).

### 3.1.1 Određivanje jediničnih cena

Tehno-ekonomska analiza se svela na procenu jediničnog koštanja izgradnje cevovoda za svaki od razmatranih cevni materijala. U sklopu jedinične cene su uvrštene sledeće pozicije:

- Cevni materijal
  - ✓ Nabavka cevi
  - ✓ Nabavka fittinga
  - ✓ Transport
  - ✓ Montaža
- Građevinski radovi
  - ✓ Iskop
  - ✓ Podgrada rova
  - ✓ Planiranje dna
  - ✓ Izrada posteljice od peščano-šljunkovitog materijala
  - ✓ Zasipanje cevi peščano-šljunkovitim materijalom ili selektiranim materijalom iz iskopa
  - ✓ Zatrpavanje preostalog dela rova materijalom iz iskopa
  - ✓ Odvoz viška materijala na deponiju približne udaljenosti 5 km

Radi određivanja nabavke cevovoda, izvršeno je ispitivanje tržišta slanjem upita komercijalnim službama svih relevantnih kompanija koje se bave prodajom cevnog materijala na srpskom tržištu. Poslednja aktuelizacija cena je izvršena u periodu od juna do avgusta 2021.g. Većina firmi u svojim ponudama uvrštava i cenu transporta koja za tržište Srbije ne zavisi previše od tačne lokacije gradilišta. S obzirom da cene za pojedine proizvode variraju u širokom opsegu, za analizu su usvojene najpovoljnije tržišne cene ali isključivo od renomiranih proizvođača sa odgovarajućim referencama:

- HDPE i HDPE\_RC – Peštan doo, Srbija
- GRP – Grandpipe, Turska (uvoznik i zastupnik za Srbiju – Vatra doo)
- PVC-O – Molecor Tecnologia, Španija (uvoznik i prodavac – Mima komerc doo)
- Duktil – PAM Saint Gobain, Francuska i JINDAL SAW, Italija (prodavac – Mima komerc doo)

Izuzetak u postupku formiranja nabavne cene čine čelični cevovodi za koje je umesto komercijalnih ponuda gotovih cevi, koštanje određeno na osnovu jedinične težine svake cevi i tržišnih cena čelika za takav oblik proizvoda. Treba napomenuti da je za cenu GRP cevovoda usvojena cena za SN10000 materijal.

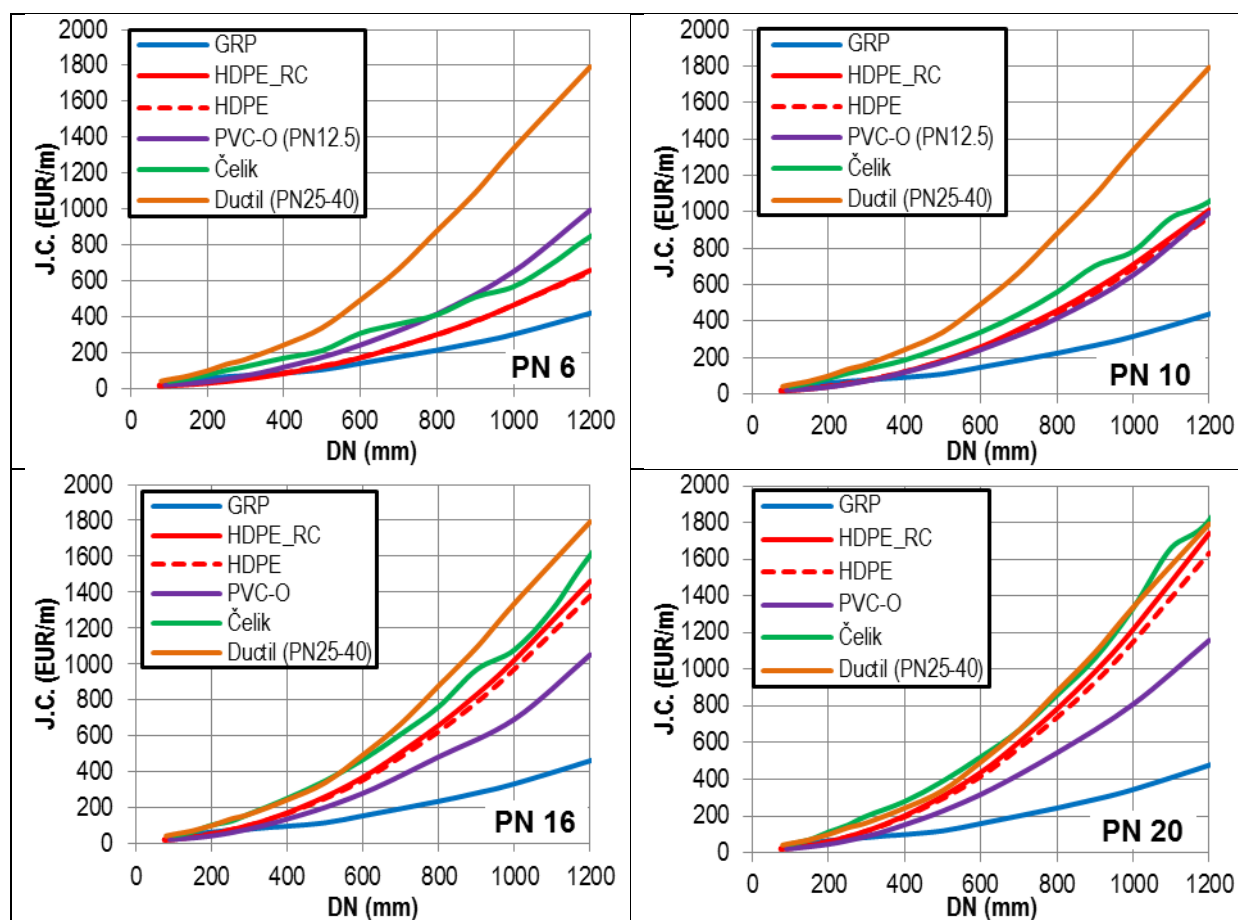
Koštanje fittinga i montaže su usvojeni procentualno u odnosu na koštanje cevnog materijala. Kao reference za određivanje procentualnog udela nabavke fittinga i montaže cevovoda su korišćeni podaci sa realizovanih i/ili projekata u završnim fazama izrade tehničke dokumentacije, pre svih:

- Deponija Vinča (>10km cevovoda pod pritiskom,  $25 \leq DN \leq 560\text{mm}$ )
- Sistem za navodnjavanje Negotinske nizije (>30 km cevovoda pod pritiskom,  $110 \leq DN \leq 1100\text{mm}$ )
- Sistem za navodnjavanje Koceljeva (cca60km cevovoda pod pritiskom,  $125 \leq DN \leq 800\text{mm}$ )
- Sistem za navodnjavanje Ub (cca60km cevovoda pod pritiskom,  $140 \leq DN \leq 1200\text{mm}$ )

Potrebne količine svih zemljanih radova, kao i za podgrađivanje rova su sračunate na osnovu konstruisanih dimenzija tipskih rovova za svaki razmatrani cevovod. Konstrukcije rovova su formirane na osnovu preporuka proizvođača. Količina materijala za anker blokove je procenjena na osnovu iskustvenih podataka iz gore pomenutih projekata u skladu sa tipom cevnog materijala, DN i PN.

### 3.1.2 Rezultati analize

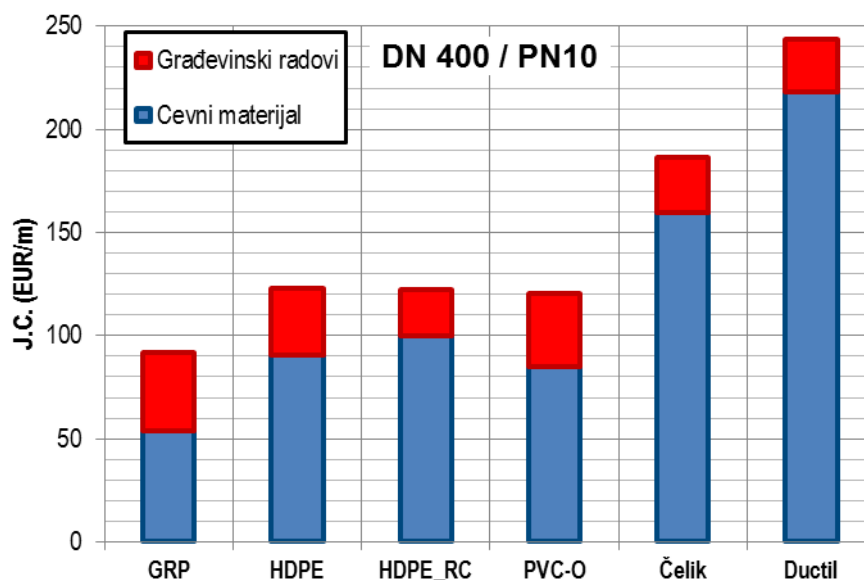
Slika 17 daje okvirni prikaz isplativosti primene pojedinih cevnih materijala zaviso od DN i PN. U slučaju PN6, za manje prečnike (<400mm) najisplativija je primena HDPE, a zatim PVC-O materijala, iako minimalna proizvodna klasa pritiska PVC-O materijala iznosi PN12.5. Kada su u pitanju veći prečnici (>400mm), ubedljivo najpovoljnija je instalacija GRP cevodova. Razlika u isplativosti između GRP i ostalih cevodova se povećava sa porastom PN. Koštanje HDPE cevodova se izjednačuje sa PVC-O cevodovima već za PN10, dok sa daljim povećanjem PN koštanje HDPE cevodova postaje znatno nepovoljnije od PVC-O. Logično, duktilni cevodovi dimenzionisani na veće pritiske su daleko najskuplji, sve dok ih ne uporedimo sa koštanjima ostalih materijala dimenzionisanih na slične vrednosti PN. Veoma je bitno napomenuti da su ovi dijagrami samo indikativni i da ne daju preciznu sliku o isplativosti upravo zbog različitih hidrauličkih kapaciteta istih DN različitih cevni materijala.



Slika 17. Zavisnost jediničnog koštanja cevodova od vrste materijala, DN i PN

Figure 17. Relation of pipeline unit cost with material type, DN and PN

Slika 18 govori u strukturi jediničnog koštanja jednog od cevodova (DN400/PN10). Sa slike se uočava da je HDPE\_RC cevod nešto povoljniji od običnog HDPE cevodova, iako je sam cevni materijal za oko 10% skuplji ali su jeftiniji zemljani radovi zbog izostanka nasipanja peska. Duktilni, čelični pa i HDPE cevod imaju manje dubine ukopavanja pa je obim zemljanih radova manji nego kod PVC-O i GRP cevodova. Bez obzira na to, zbog niske cene samog cevni materijal GRP cevod je najpovoljniji, a za njim sledi PVC-O cevod.



Slika 18. Struktura koštanja cevovoda DN400/PN10

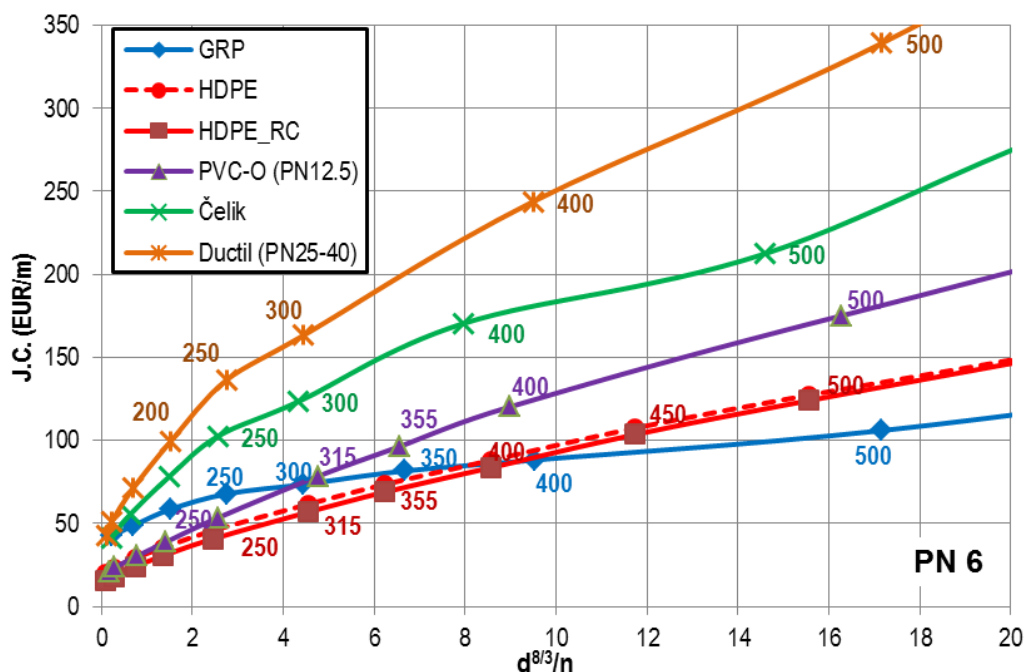
Figure 18. Cost structure of DN400 / PN10 pipeline

Do sada smo u analizi govorili o nominalnim prečnicima. Iz poglavlja 2.2 se može videti koliko se nominalni i unutrašnji prečnici mogu razlikovati i koliko to može uticati na kapacitet pojedinih cevovoda. Da bi se ove razlike anulirale, prvo je izvršeno poređenje jediničnih cena u zavisnosti od unutrašnjih prečnika cevovoda, a zatim je izvršena i fina analiza poređenja jediničnih koštanja različitih cevni materijala u zavisnosti od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$ , koji reprezentuje hidraulički kapacitet cevovoda. Rezultati obe analize daju gotovo identične rezultate iako se parametar  $n$  (Manningov koeficijent hrapavosti) nešto razlikuje od materijala do materijala. U nastavku u prikazani dijagrami zavisnosti jediničnog koštanja cevovoda od njihovog hidrauličkog kapaciteta.

Slika 19 opisuje zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  za cevovode PN6. Pojedine vrednosti DN su istaknute na dijagramu, kako bi se stekao uvid u vezu DN i parametra  $d^{8/3}/n$ . Rezultati govore da je za nominalne prečnike manje od 400 mm, najisplativija upotreba HDPE\_RC cevovoda. Nešto nepovoljniji su obični HDPE cevovodi, koji sa porastom prečnika postaju povoljniji od HDPE\_RC, jer kod većih prečnika je dominantno koštanje cevni materijala, a ne građevinskih radova. Za vrednosti DN preko 400mm najpovoljnija je primena GRP cevovoda. Isplativost GRP cevovoda značajno raste sa porastom DN, što se može videti i na Slika 17.

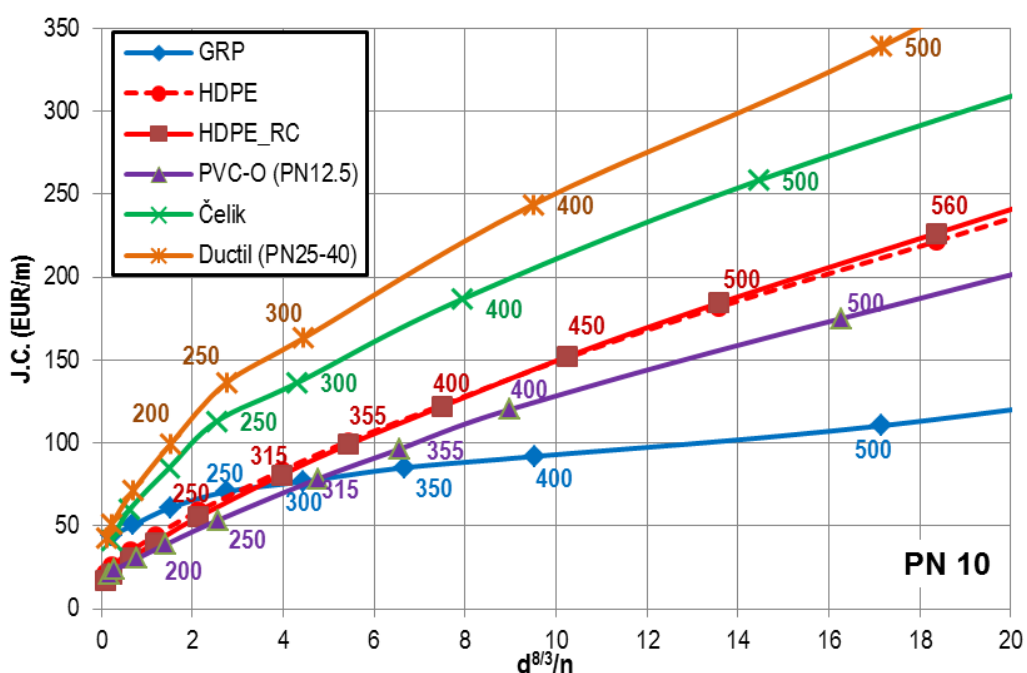
Slika 20 pokazuje odnos koštanja različitih cevni materijala za klasu pritiska PN10. Poređenjem sa Slika 19 se vidi koliko je značajan porast jedinične cene HDPE cevovoda istih hidrauličkih performansi sa porastom PN. Osnovni razlog tome je značajno povećanje debljine zida cevi koje uzrokuje smanjenje hidrauličkog kapaciteta usled smanjenja unutrašnjeg prečnika, a pored toga i povećanje cene materijala. Za cevi PN10, u slučaju DN manjih od 300(315)mm, najpovoljnija je izgradnja PVC-O cevovoda. Za cevi većeg prečnika od DN300(315) primat opet imaju GRP cevi, čija isplativost raste sa porastom prečnika. Treba napomenuti da su PVC-O cevi minimalne klase pritiska PN12,5 i da im je u pomenutoj PN isplativost sigurno značajnija.





Slika 19. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  za PN6

Figure 19. Relation of pipeline unit cost with hydraulic parameter  $d^{8/3}/n$  for PN6

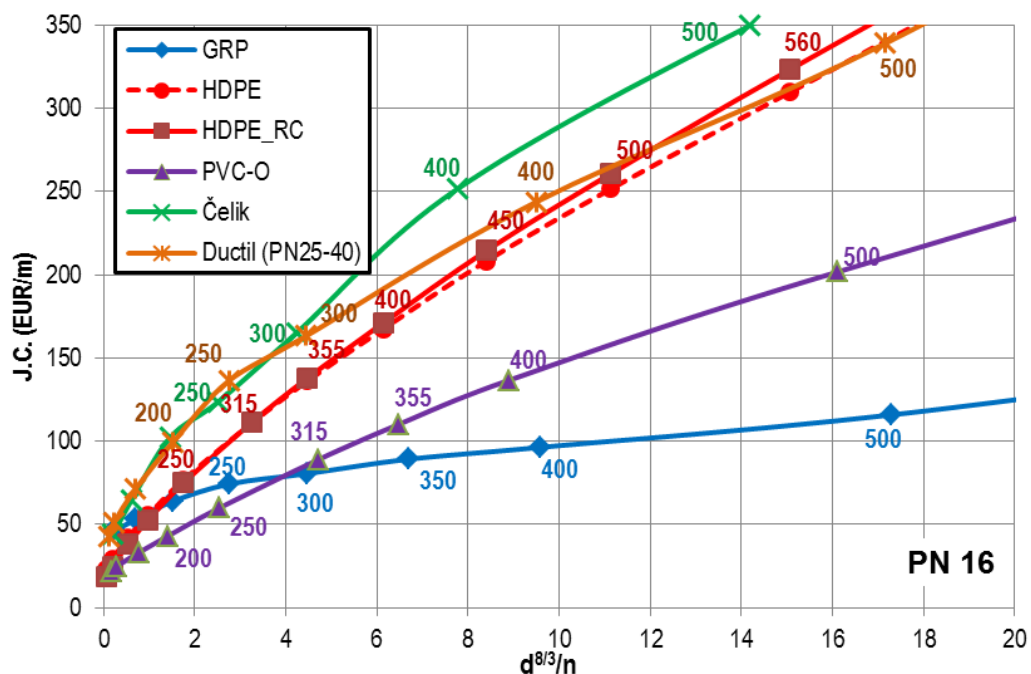


Slika 20. Zavisnost jediničnog koštanja cevovoda od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  za PN10

Figure 20. Relation of pipeline unit cost with hydraulic parameter  $d^{8/3}/n$  for PN10

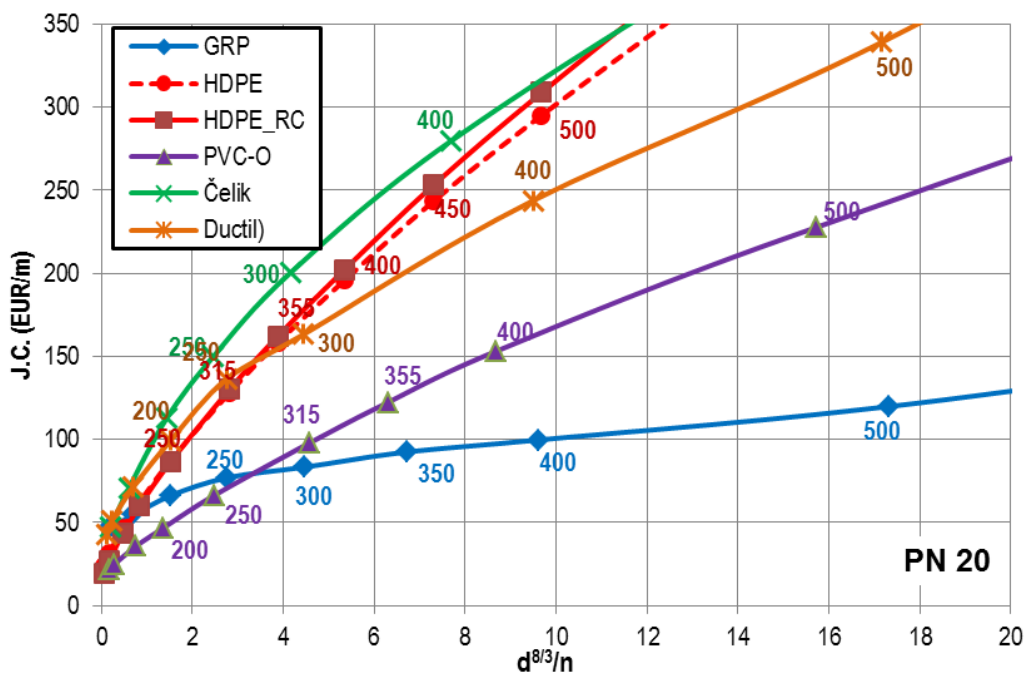
Kada su u pitanju cevovodi PN16 (Slika 21) rezultati su još nepovoljniji po HDPE cevovode, koji za veće prečnike imaju isplativost sličnu čeličnim i duktilnim cevovodima. Za manje prečnike od cca 300(315)mm i dalje je najisplativija primena PVC-O cevovoda, dok je za veće prečnike neprikosnoven GRP materijal.

Na Slika 22 se vidi kako za cevi PN20 primena HDPE cevodova postaje nepovoljnije rešenje od duktilnih cevodova za DN preko 315 mm. Za manje prečnike, ovaj put od 250-280mm, najpovoljnije rešenje je i dalje PVC-O cevni materijal. GRP cevodovi sa povećanjem klase pritiska pokazuju svoju dominaciju u isplativosti nad drugim cevni materijalima.



Slika 21. Zavisnost jediničnog koštanja cevodova od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  za PN16

Figure 21. Relation of pipeline unit cost with hydraulic parameter  $d^{8/3}/n$  for PN16



Slika 22. Zavisnost jediničnog koštanja cevodova od hidrauličkog parametra  $d^{8/3}/n$  za PN20

Figure 22. Relation of pipeline unit cost with hydraulic parameter  $d^{8/3}/n$  for PN20

## Zahvalnica

Ovom prilikom se zahvaljujemo na saradnji kompanijama za proizvodnju i trgovinu cevnim materijalima koje su nam omogućile tehničku podršku i podatke od značaja za realizaciju ovog rada:

- Peštan doo, Aranđelovac
- Pipelife Serbia doo, Beograd
- Hobas Rohre GMBH, Austrija
- Grandpipe, Turska
- Poliester Cevi doo, Priboj
- Mima Komerc doo, Beograd
- Vatra doo, Stara Pazova
- CMC Group doo, Beograd

Pored pomenutih kompanija, zahvalnost dugujemo i kompanijama za izvođenje građevinskih radova koje su nam pružile sve potrebne informacije iz oblasti ugradnje cevovoda i prateće opreme:

- Energoprojekt Niskogradnja ad, Beograd
- Telekomunikacija doo, Blace
- PEK-ING doo, Beograd
- Hidrovod doo, Pančevo

## Literatura

1. Đorđević B. (1984), *Korišćenje vodnih snaga: objekti hidroelektrana*, Naučna knjiga, Beograd.
2. Ivetić M. (1996), *Računska hidraulika: tečenje u cevima*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
3. Kapor R. (2015), *Hidraulika*, Akademska misao, Beograd.
4. The European Standard 13244 (2002), *Plastics piping systems for buried and above-ground pressure systems for water for general purposes, drainage and sewerage - Polyethylene (PE)*