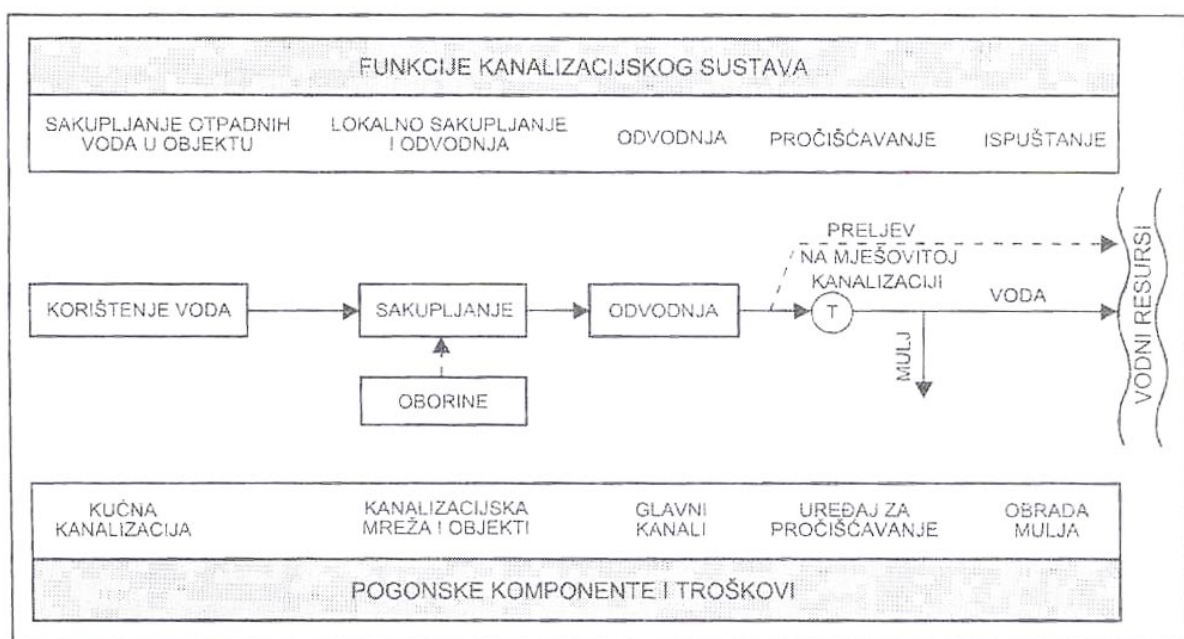


Projektiranje sustava odvodnje (kanalizacijskih sustava)

Sustav odvodnje čini skup građevinskih objekata koji služe za što brže odstranjivanje otpadnih voda iz čovjekove neposredne okoline i njihovo odvođenje do uređaja za pročišćavanje ili direktnog ispusta u odgovarajući prijemnik.

Otpadne vode su sve vode koje su upotrijebljene u određene namjene i pri tome su pokupile dodatna zagađenja. Pod pojmom otpadnih voda podrazumijevaju se i oborinske vode dospjele u sustave odvodnje kao i tuđe vode.



Slika 1 Shematski prikaz kanalizacijskog sustava

Osnovu cijelog proračuna predstavlja **analiza mjerodavnih količina otpadnih voda** koje je potrebno prikupiti i odvesti sustavom odvodnje. Analiza se temelji na podacima o potrošnji vode i oborinama. S obzirom na porijeklo i karakter zagađenja, otpadne vode možemo razvrstati u četiri osnovne grupe:

- Kućanske (sanitarne) otpadne vode
- Industrijske otpadne vode
- Oborinske vode
- Tuđe vode

1) Kućanske otpadne vode su vode upotrijebljene u kućanstvu, javnim i uslužnim ustanovama (zdravstvene stanice, bolnice,

policijske postaje, škole i dr.) i ostalim neproizvodnim djelatnostima. Daljnja podijela kućanskih otpadnih voda bi bila na:

- fekalne vode (iz sanitarnih uređaja)
- potrošne vode (od pranja, kuhanja, osobna higijena itd.)

U postupku određivanja mjerodavnih količina kućanskih otpadnih voda potrebno je poznavati:

- broj stanovnika za predviđeno projektno razdoblje N
- specifični dotok otpadne vode q_{sp} (l/st/d)

Broj stanovnika N ovisi o lokalnim i općim socijalno - ekonomskim faktorima, te vremenski nije stalan. Definira se na temelju donešenog prostornog plana za usvojeno projektno razdoblje (20 – 50 godina). Ukoliko takav plan ne postoji, broj stanovnika se procjenjuje na bazi predvidive stope prirasta uz korištenje sljedeće jednadžbe:

$$N_p = N_s \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^{PR}$$

gdje je:

N_p prognozirani broj stanovnika

N_s sadašnji broj stanovnika

p godišnji postotak prirasta

PR projektno razdoblje

Specifični dotok otpadne vode q_{sp} (l/st/d) definira se kao srednji dnevni dotok po jednom stanovniku. Ovisi o nizu faktora kao što su: standard življenja, cijena i kvaliteta vode, klimatske prilike, sanitarno-tehnička opremljenost stanova i izgrađenosti sustava odvodnje.

Tip otpadnih voda	Količina (l/stan/dan)
Kuhinjske	20 – 40
Sanitarne	35 – 95
Tuševi	35 – 105
Otpadne vode od pranja	30 – 60
UKUPNO	120 - 300

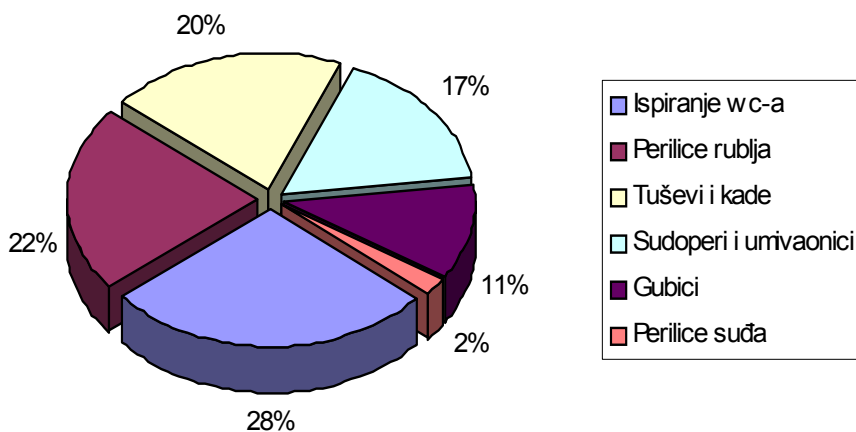
Tablica 1 Specifična potrošnja vode u kućanstvu

Veličina naselja	Specifični dotok otpadnih voda (l/stan/dan)
< 5.000	150
5.000 – 10.000	180
10.000 – 50.000	220
50.000 – 250.000	260
> 250.000	300

Tablica 2 Specifična potrošnja vode u kućanstvu prema ATV – A118

Tip objekta	Jedinica	Specifični dotok (litara/jedinica/dan)	
		raspon	prosjeak
Stambeni prostor (stan, kuća)	stanovnik	150 – 300	190
Ured	zaposlenik	26 – 61	49
Škola – osnovna	učenik	19 – 64	42
Škola – srednja	učenik	38 – 79	57
Zdravstvena ustanova	zaposlenik	19 – 57	38
	krevet	470 – 910	630
Starački dom	zaposlenik	19 – 57	38
	stanovnik	190 – 450	340
Restoran (klasični)	zaposlenik	30 – 45	38
	gost	30 – 38	34
Restoran (fast-food)	zaposlenik	30 – 45	38
	gost	11 – 30	23
Caffe bar	zaposlenik	30 – 45	38
	gost	8 – 15	11
Hotel (motel)	zaposlenik	30 – 49	38
	gost	150 – 230	190
Kamp	gost	50 – 350	150
Javni wc	korisnik	11 – 23	19
Trgovački centar (trgovina)	zaposlenik	26 – 49	38
	parkirno mjesto	4 – 11	8
Industrija (manji proizvodni pogon)	zaposlenik	26 – 61	49
Kino	sjedalo	8 – 15	11
Servisne stanice	zaposlenik	34 – 57	49
	automobil	30 – 57	45

Tablica 3. Specifični dotok otpadnih voda za različite objekte



Slika 2. Udio pojedinih sanitarnih predmeta i uređaja u ukupnoj potrošnji vode u kućanstvu

U slučajevima kada se specifični dotok otpadnih voda računa na osnovu podatka o potrošnji vode treba imati u vidu da se dio pitke vode troši za namjene koje ne podliježu odvodnji (piće, pranje auta, polijevanje vrtova i gubici na vodovodnoj mreži). Ispitivanjima je utvrđeno da specifični dotok otpadnih voda u prosjeku iznosi 85-90% specifične dnevne potrošnje. Ovisno o karakteru naselja i održavanju vodoopskrbnih objekata mogući su i drugačiji omjeri.

Na temelju podataka o broju stanovnika za predviđeno projektno razdoblje i specifičnom dotoku otpadnih voda može se odrediti **srednji dnevni protok otpadnih voda $Q_{sr,dn}$ (l/d)**:

$$Q_{sr,dn} = q_{sp} \cdot M_k$$

Kod hidrauličkog dimenzioniranja sustava odvodnje mjerodavne su sljedeće količine vode:

a) **Maksimalni dnevni protok otpadnih voda $Q_{max,dn}$ (l/d)** dobije se kao umnožak srednjeg dnevnog protoka i koeficijenta najveće dnevne neravnomjernosti:

$$Q_{max,dn} = K_d \cdot Q_{sr,dn}$$

b) **Maksimalni satni protok $q_{max,h}$ (l/h)** u odnosu na $Q_{max,dn}$ izražava se koeficijentom najveće satne neravnomjernosti:

$$q_{max,h} = \frac{K_h \cdot Q_{max,dn}}{24} = \frac{K_h \cdot K_d \cdot Q_{sr,dn}}{24}$$

Veličina naselja	Specifični dotok otpadnih voda (l/stan/dan)	Maksimalni satni protok	
		Umnožak koeficijenata dnevne i satne neravnomjernosti	$q_{max,h}$ (l/sec/1000 stan)
< 5.000	150	2,88	5,0
5.000 – 10.000	180	2,40	5,0
10.000 – 50.000	220	1,96	5,0
50.000 – 250.000	260	1,66	5,0
> 250.000	300	1,44	5,0

Tablica 4. Maksimalni satni protok kućanskih otpadnih voda prema ATV – A118

KATEGORIJA POTROŠAČA	K_1	K_2	K_1/K_2
Naselje seoskog tipa	2,00	0,40	5,00
Naselje mješovitog tipa	1,70	0,50	3,40
Naselje gradskog tipa:			
• do 10.000 stanovnika	1,50	0,60	2,50
• 10.000 do 50.000 stanovnika	1,40	0,65	2,20
• 50.000 do 100.000 stanovnika	1,30	0,70	1,90
• preko 100.000 stanovnika	1,25	0,70	1,80
Turistički objekti:			
• de luxe i A kategorija	1,40	0,60	2,35
• ostale kategorije	1,60	0,60	2,70
• privatni smještaj	1,80	0,50	3,60
• kampovi	2,00	0,40	5,00
• bolnice i sanatoriji	1,50	0,60	2,50
• stoka	1,50	0,60	2,50

K_1 – koeficijent maksimalne dnevne, odnosno mjesečne neravnomjernosti;
 K_2 – koeficijent minimalne dnevne, odnosno mjesečne neravnomjernosti.

Tablica 5. Koeficijent dnevne neravnomjernosti

KATEGORIJA POTROŠAČA	K_3	K_4	K_3/K_4
Naselje seoskog tipa	3,00	0,10	30,00
Naselje mješovitog tipa	2,40	0,10	24,00
Naselje gradskog tipa:			
• do 10.000 stanovnika	1,80	0,25	7,00
• 10.000 do 50.000 stanovnika	1,60	0,30	5,50
• 50.000 do 100.000 stanovnika	1,50	0,30	5,00
• preko 100.000 stanovnika	1,40	0,35	4,00
Turistički objekti:			
• de luxe i A kategorija	2,50	0,25	10,00
• ostale kategorije	2,20	0,25	9,00
• privatni smještaj	2,20	0,25	9,00
• kampovi	2,30	0,00	
• bolnice i sanatoriji	2,20	0,00	
• stoka	3,00	0,10	

K_3 – koeficijent maksimalne satne neravnomjernosti;
 K_4 – koeficijent minimalne satne neravnomjernosti.

Tablica 6. Koeficijent satne neravnomjernosti

2) Industrijske otpadne vode

Korištenjem voda u različitim tehnološkim procesima nastaju industrijske otpadne vode. Njihova svojstva bitno se razlikuju od onih kod kućanskih otpadnih voda. Jedino su vode iz sanitarnih uređaja u industriji jednakih svojstava kao i kućanske otpadne vode. Mjerodavne količine industrijskih otpadnih voda teško je generalno odrediti zbog primjene različitih tehnoloških procesa. Iz tog se razloga svaka industrija mora posebno analizirati. U stručnoj literaturi mogu se naći brojni podaci o količinama industrijskih otpadnih voda, izraženi uglavnom kao količina vode po jedinici proizvoda. Imajući u vidu da se tehnološki procesi s vremenom usavršavaju što utječe na promjenu potrošnje vode, literaturni podaci mogu poslužiti kao orijentacijski pokazatelji. Anketnim ispitivanjem jednostavno se mogu utvrditi mjerodavne količine otpadnih voda kod postojećih industrija. Kod planiranih postrojenja problem je znatno složeniji.

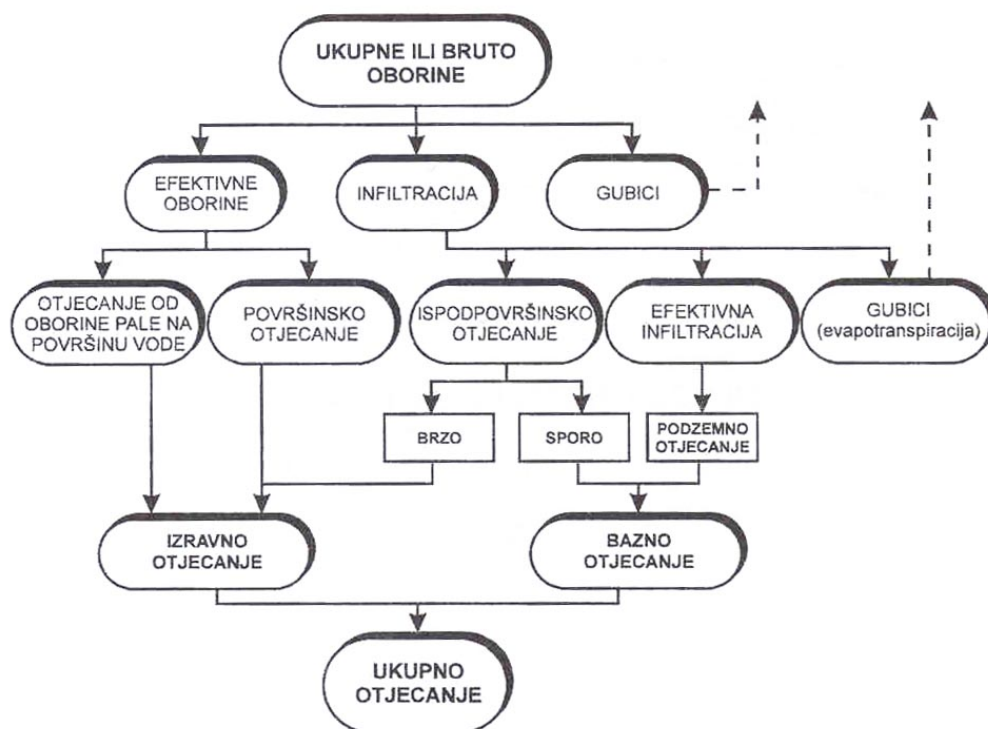
Ukoliko se ne raspolaže informacijama na osnovu kojih bi se mogla odrediti količina otpadnih voda iz pojedine industrije, ATV-A-118 predlaže sljedeće jedinične količine:

- tehnološki procesi s malom potrošnjom – 0,5 lit/sec/ha
- tehnološki procesi sa srednjom potrošnjom – 1,0 lit/sec/ha
- tehnološki procesi s velikom potrošnjom – 1,5 lit/sec/ha

Poznavanje količina otpadnih voda iz pojedinih tehnoloških procesa nije dostatno za određivanje mjerodavne protoke. Prilikom rješavanja odvodnje industrijskih otpadnih voda od osnovnog je značaja poznavanje režima ispuštanja iz pojedinih tehnoloških procesa.

3) Oborinske vode

Određivanje mjerodavnih količina oborinskih voda koje dotječu u sustav odvodnje hidrološki je problem koji se svodi na određivanje maksimalnog (vršnog) protoka i cjelokupnog hidrograma otjecanja. Vršni protok je mjerodavan za dimenzioniranje kanala, a cjelokupni hidrogram za dimenzioniranje objekata na kanalskoj mreži (crpne stanice, preljevi, bazeni za izjednačavanje protoka i dr.



Slika 3. Shematski prikaz procesa transformacije bruto oborine u hidrogram otjecanja

Pojedine komponente u sklopu ciklusa otjecanja ovise o hidrogeološkim i hidrološkim karakteristikama promatranog područja

Proračun vršnog protoka najčešće se određuje primjenom **racionalne jednadžbe**:

$$Q_{\max} = i(t_c, PR) \cdot A \cdot c \quad (\text{l/s})$$

gdje je:

Q_{\max} vršni protok

i intenzitet oborina (l/sec/ha)

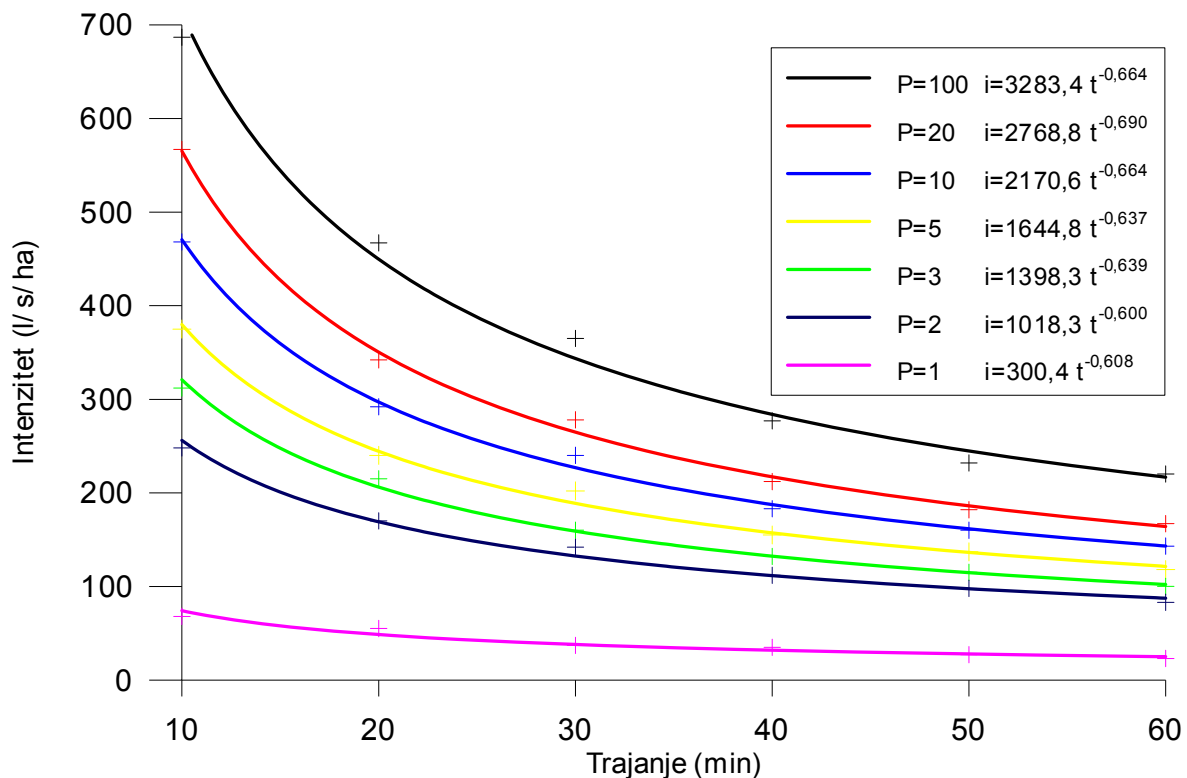
A površina slivnog područja (ha)

c koeficijent otjecanja

Racionalna metoda se primjenjuje za male slivove (do 10,0 km²). Pretpostavka je da se maksimalno otjecanje u kontrolnom profilu pojavljuje kada cjelokupno slivno područje sudjeluje u formiranju otjecanja (vrijeme trajanja oborine je jednako vremenu koncentracije). Druga pretpostavka je da je intenzitet oborina jednak na čitavom slivu.

Proračun vršnog protoka prema racionalnoj metodi svodi se na određivanje mjerodavnog intenziteta oborina (ITP-krivulje) i određivanje koeficijenta otjecanja.

Intenzitet oborina je u funkciji njihovog trajanja, odnosno vremena koncentracije t_c i perioda ponavljanja PR. Međusobni odnos intenziteta, trajanja i ponavljanja prikazuje se ITP-krivuljama.



Slika 4. ITP krivulje za povratne periode od 1 do 100 godina

Vrijeme koncentracije predstavlja vrijeme potrebno da elementarni efektivni volumen pale oborine s najudaljenije točke sliva dospije do mjesta opažanja u vodotoku.

Izbor **povratnog razdoblja** temelji se na ekonomskoj analizi uspoređivanja šteta i troškova izgradnje. Kod nas se najčešće koriste sljedeća vremena ponavljanja:

- sekundarna mreža PR = 1 god
- glavna mreža PR = 2 god
- glavni kanali PR = 5 god
- važni dijelovi grada PR = 5-50 god

Koeficijent otjecanja predstavlja odnos efektivne oborine i ukupne oborine pale na slivno područje. Ovisi o karakteristikama slivnog

područja (hidrogeološkim, klimatskim, topografskim, evapotranspiraciji, tipu tla-vrsti površine).

KARAKTERISTIKE PODRUČJA	C * **
Područja ureda, trgovina i sl.: <ul style="list-style-type: none"> • stari dio grada • predgrađe 	0,7-0,95 0,5-0,7
Područja stanovanja: <ul style="list-style-type: none"> • rijetka izgradnja obiteljskih kuća • gusta izgradnja obiteljskih kuća • gusta stambena izgradnja 	0,3-0,5 0,4-0,6 0,6-0,8
Industrijska područja: <ul style="list-style-type: none"> • područja rjeđe izgradnje • područja guste izgradnje 	0,3-0,7 0,6-0,9
Parkovi, groblja i slično	0,10-0,25
Igrališta i slično	0,20-0,35
Željeznički kolodvori	0,20-0,40
Neizgrađene površine	0,10-0,30

Tablica 7. Koeficijent otjecanja prema opisu područja

KARAKTERISTIKE POVRŠINE	C
Ulice: <ul style="list-style-type: none"> • asfalt • beton • cigla • tucanik 	0,70-0,95 0,80-0,95 0,70-0,85 0,25-0,45
Šetnice, pločnici i slično: <ul style="list-style-type: none"> • betonske ili asfaltne • pločnik sa spojnica • mozaik od kamenih ploča i sl. 	0,75-0,85 0,70-0,80 0,40-0,55
Krovovi	0,75-0,95
Tratine, prirodne površine	
Pjeskoviti teren: <ul style="list-style-type: none"> • ravan, 2% • srednji nagib, 2-7% • strm, 7% i više 	0,05-0,10 0,10-0,15 0,15-0,20
Tratine, prirodne površine	
Teško, manje propusno tlo: <ul style="list-style-type: none"> • ravno, 2% • srednje, 2-7% • strmo, 7% i više 	0,13-0,17 0,18-0,22 0,25-0,35

Tablica 8. Koeficijent otjecanja prema vrsti površine

Kada su unutar slivno područja prisutne različite vrste površina, proračunava se srednji koeficijent otjecanja prema formuli:

$$C_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

gdje su

C_1, C_2, \dots, C_n koeficijenti otjecanja različitih vrsta površina

A_1, A_2, \dots, A_n pripadajuće površine

Najprecizniji proračun oborinskih voda zasniva se na korištenju numeričkih simulacijskih modela.

4) Tuđe vode

To su sve vode koje dopijevaju u sustav odvodnje, a nisu uzete u obzir kod određivanja količina kućanskih i industrijskih otpadnih voda. U tu grupu spadaju podzemne vode koje se procjeđuju u kanalsku mrežu kroz spojeve i pukotine, oborinske vode koje se ulijevaju kroz poklopce revizijskih okana i druge otvore i ilegalni priključci kućanskih ili oborinskih voda.

Tuđe vode se ne uzimaju u obzir kod mješovite kanalizacije, već jedino kod proračuna razdjelne kanalizacije. Količina tuđih voda ovisi o hidrogeološkim i hidrološkim karakteristikama područja, kvaliteti izvedbe sustava odvodnje (vrsta i kvaliteta spojeva, upotrijebljeni materijali), održavanje kanalizacijske mreže i sl.

S obzirom na navedene utjecaje, količine tuđih otpadnih voda variraju od mjesta do mjesta i teško ih je precizno odrediti. Najčešće se izražavaju kao određeni postotak srednjeg dnevnog protoka svih otpadnih voda. Mogu se još izraziti u *lit/sec/ha* promatranog područja ili u *lit/sec/km* kanalizacijske mreže.

Primjer 1.

Za naselje s planiranim mješovitim sustavom odvodnje odrediti mjerodavnu količinu otpadnih voda za hidrauličko dimenzioniranje glavnog kolektora. Odabrano projektno razdoblje iznosi $PR=25$ godina, a sadašnji broj stanovnika $N_0=10000$. Specifičnu potrošnju vode za kućanske potrebe kao i maksimalnu satnu potrošnju uzeti prema smjernicama ATV-A118 (tablica 4). Zadani su još godišnji postotak prirasta stanovništva $p=1,5\%$ i ukupna površina slivnog područja $A=20,0$ ha, sa sljedećim veličinama pojedinih vrsta površina i pripadnim vrijednostima koeficijenata otjecanja:

$$A_1 = 10,0 \text{ ha}, \quad c_1=0,70$$

$$A_2 = 8,0 \text{ ha}, \quad c_2=0,45$$

$$A_3 = 2,0 \text{ ha}, \quad c_3=0,20$$

Mjerodavni intenzitet oborina iznosi $i=165$ l/sec/ha
Naselje je bez industrijskog pogona.

Primjer 2.

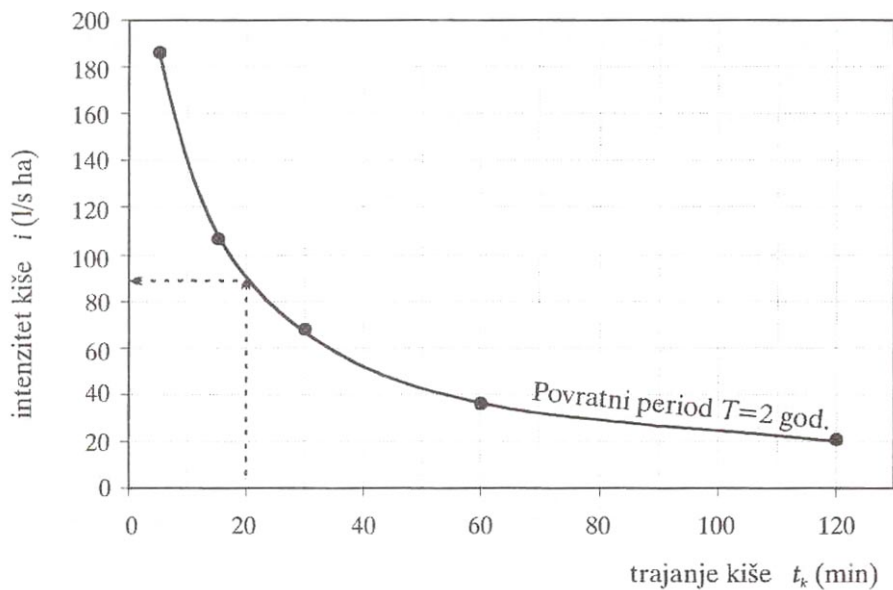
U tablici su date maksimalne visine pale oborine u zavisnosti od vremena trajanja oborine, uređene po opadajućem nizu, za period 1966-1977 (12 godina). Za sliv površine 20,0 ha vrijeme koncentracije iznosi 20 min. Slivno područje je definirano kao rijetka izgradnja obiteljskih kuća.

Treba odrediti maksimalni protok oborinskih voda sa sliva, ako je uzeta mjerodavna kiša sa periodom ponavljanja od 2 god.

Trajanje kiše (min)	Visina pale kiše P (mm)												
	5	8,9	7,4	6,8	6,5	5,9	5,6	5,2	4,9	4,8	4,3	4,0	3,8
15	17,5	13,5	13,1	11,1	10,2	9,6	9,4	9,1	8,5	7,9	7,6	7,0	
30	19,0	17,1	16,3	15,2	14,1	12,2	11,8	11,5	10,4	9,5	9,2	8,6	
60	21,6	18,5	17,7	16,5	14,9	13,0	12,8	12,1	11,3	10,6	9,8	9,5	
120	26,5	24,1	19,0	16,8	15,5	15,1	14,3	13,9	12,1	12,0	11,9	11,7	

Rješenje:

ITP-krivulja.



Hidraulički proračun

Od trenutka ulaska u sustav odvodnje, otpadna voda mijenja svoje karakteristike i sastav što utječe na otjecanje unutar sustava i sigurnost njegova rada. To je rezultat različitih procesa koji se odvijaju u kanalizacijskoj mreži. Svi procesi, odnosno promjene ovise o nizu faktora koji su također promjenjivi, te ih je vrlo teško pouzdano predvidjeti u proračunu. Iz tog se razloga kod proračuna sustava odvodnje koriste najvjerojatniji ulazni podaci koji su znatno opterećeni pretpostavkama.

Može se reći da projektiranje sustava odvodnje nije samo rezultat teoretskih znanja, već daleko više iskustva. Kod proračuna se primjenjuje cijeli niz smjernica koje su nastale kao rezultat praktičnih dugogodišnjih iskustava kao i pojednostavljenja teorijskih znanja. Smjernice su samo dobra polazna osnova za projektiranje, odnosno donošenje projektnih odluka i rješenja, koje uvijek treba prilagođavati lokalnim karakteristikama i iskustvima. To posebno vrijedi za smjernice koje su razvijene u drugim zemljama i koje su rezultat njihovih dugogodišnjih iskustava.

Karakteristični protoci u sustavu odvodnje

Protjecanje unutar sustava odvodnje karakterizira veliki broj mogućih istovremenih oblika protoka:

Oblik protoka	Kriterij	Oblik protoka	Kriterij
Stacionaran	$\frac{\delta(\cdot)}{\delta t} = 0$	Nestacionaran	$\frac{\delta(\cdot)}{\delta t} \neq 0$
Jednolik	$\frac{\delta(\cdot)}{\delta x} = 0$	Promjenljiv	$\frac{\delta(\cdot)}{\delta x} \neq 0$
Trajan	$q = 0$	Prekidan	$q \neq 0$
Mirni	$Fr < 1$	Silovit	$Fr > 1$
Laminaran	$Re < 2320$	Turbulentan	$Re > 2320$
Jednofazni	Otpadna voda	Višefazni	Otpadna voda + zrak

gdje je:

$\frac{\delta(\cdot)}{\delta t}$ – promjene dimenzija protoka (Q , h , v itd.) u jedinici vremena t ;

$\frac{\delta(\cdot)}{\delta x}$ – promjene dimenzija protoka (Q , h , v itd.) duž kanala x ;

q – bočni dotok po jedinici dužine kanala;

Fr – Froudeov broj;

Re – Reynoldsov broj.

Tablica 9. Oblici protoka u kanalizacijskim kolektorima

Iako u stvarnosti ne postoji jedan trajniji karakteristični režim tečenja, u proračun se unose pojednostavljena koja za posljedicu nemaju velike pogreške. Pogreške koje se unose u proračun preko ulaznih parametara (mjerodavne količine otpadnih voda, pogonska hrapavost itd.) su mnogo veće.

U skladu s tim, kod proračuna se pretpostavlja da se radi o stacionarnom, jednolikom tečenju.

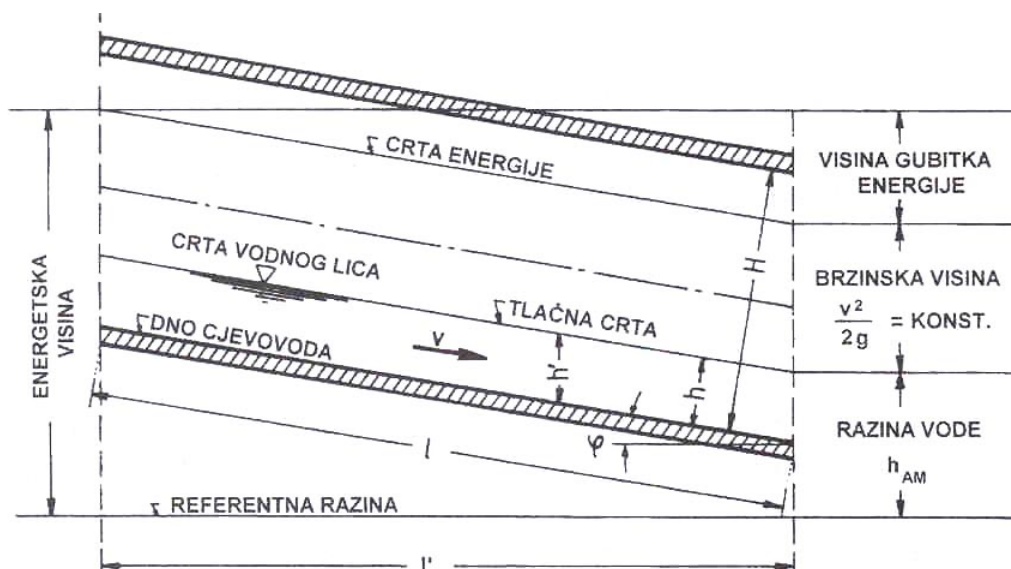
U odnosu na mjerodavne količine otpadnih voda i karakteristikama kanalizacijske mreže (materijal, topografski uvjeti itd.) provodi se hidrauličko dimenzioniranje. Projektirani sustav odvodnje u svakom trenutku mora omogućiti nesmetanu odvodnju otpadnih voda.

Hidrauličko dimenzioniranje kanalizacijske mreže provodi se na maksimalnu satnu količinu otpadnih voda, po pripadajućim dionicama mreže.

S obzirom na režim tečenja u kanalizacijskoj mreži, odnosno njenom dijelu, moguće su dvije vrste proračuna:

- hidraulički proračun tečenja sa slobodnim vodnim licem
- hidraulički proračun tečenja pod tlakom

Hidraulički proračun tečenja sa slobodnim vodnim licem je najčešći slučaj tečenja. Provodi se uz pretpostavku jednolikog, stacionarnog tečenja (konstantna dubina vode, isti uzdužni pad dna kanala, vodnog lica i linije energije).



Slika 5. Jednoliko tečenje u djelomično ispunjenom kanalu (cijevi)

Osnovna jednađba za proračun jednolikog tečenja je Chezyjeva formula za brzinu, koja uz supstituciju Manningovag koeficijenta hrapavosti poprima oblik:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{m/s})$$

pa je protok jednak:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Koeficijent hrapavosti, n, ovisi o vrsti cijevnog materijala i stanju unutrašnjih stijenci cijevi.

Karakter površine	Stanje površine dobro	Stanje površine obično	Stanje površine loše
Betonski kanali cementna glazura	0,012	0,013	0,015
Betonski kanali dobra oplata	0,0125	0,0135	0,0155
Betonski kanali gruba betonska obloga	0,020	0,022	0,025
Zemljani kanali čvrsti materijali	0,020	0,023	0,025
Zemljani kanali obični čisti kanali	0,022	0,024	0,0275
Kanali u stijeni	0,030	0,033	0,035
Zidani kanali lomljeni zidani kamen	0,030	0,033	0,035
Zidani kanali tesani kamen	0,014	0,015	0,017
Zidani kanali opeka	0,012	0,013	0,015

Tablica Vrijednosti koeficijenata hrapavosti po Manningu

Međutim, danas je u praksi sve prisutnija upotreba Darcy-Weisbachove i Colebrook-Whiteove jednađbe, budući da je tečenje u kanalizacijskoj mreži zalazi u turbulentno prijelazni režim.

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g}$$

gdje su:

- λ koeficijent trenja
- L duljina dionice (m)
- v srednja brzina strujanja (m/s)
- D unutarnji promjer cjevovoda (m)
- g ubrzanje uslijed sile teže (m/s²)
- I pad energetske linije

Izraz za koeficijent trenja mijenja se ovisno o režimu otjecanja. Kod dimenzioniranja kanalizacijske mreže proračun se provodi u skladu s Colebrook-Whiteovom formulom općeg oblika:

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

gdje je:

ε apsolutna hidraulička hrapavost (mm)

Re Reynoldsov broj

Kombinirajući gornje dvije jednačbe dobije se izraz:

$$v = -2 \sqrt{2gDI} \cdot \log \left(\frac{2,51 \cdot v}{D \sqrt{2gDI}} + \frac{\varepsilon/D}{3,71} \right)$$

Za cijevi okruglog presjeka protok je jednak:

$$Q = \frac{D^2 \pi}{4} \left[-2 \sqrt{2gDI} \cdot \log \left(\frac{2,51 \cdot v}{D \sqrt{2gDI}} + \frac{\varepsilon/D}{3,71} \right) \right]$$

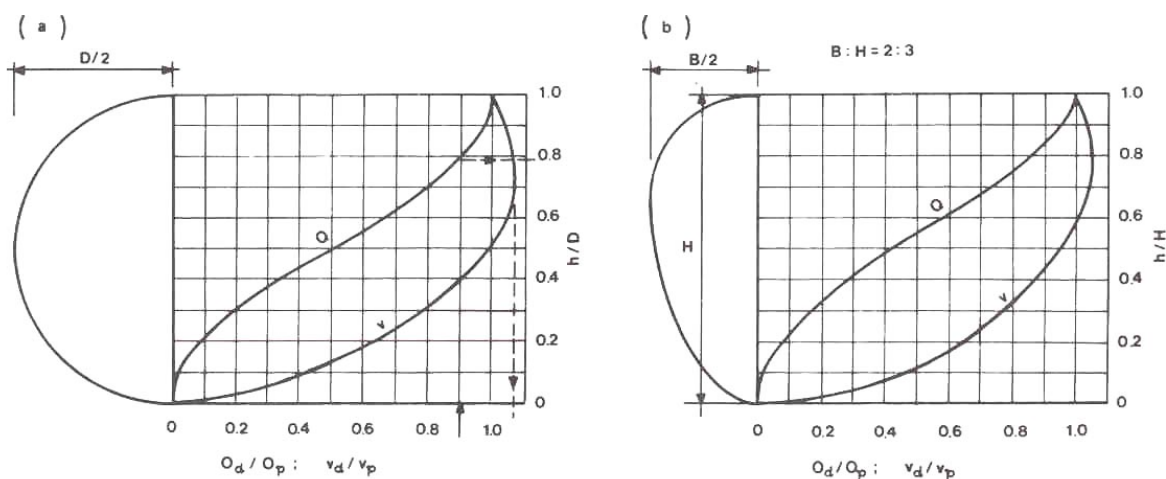
Protok se također određuje iz jednačbe kontinuiteta:

$$Q = v \cdot A$$

Zbog jednostavnosti proračuna koriste se tablice koje su izrađene u funkciji profila, brzine, kapaciteta, hidrauličkog gradijenta i hrapavosti. Gornje jednačbe se koriste za proračun kanalizacijskih cijevi ispunjenih do vrha, dok se za djelomično ispunjene cijevi koriste funkcije:

$$\frac{v_d}{v_p} = f_1 \left(\frac{h_d}{h_p} \right) \qquad \frac{Q_d}{Q_p} = f_1 \left(\frac{h_d}{h_p} \right)$$

$$\frac{v_d}{v_p} = f_1 \left(\frac{R_d}{R_p} \right)^{5/8} \qquad \frac{Q_d}{Q_p} = \frac{A_d}{A_p} \left(\frac{R_d}{R_p} \right)^{5/8}$$



Hidraulički parametri kanalizacionjskih cijevi za proračun djelomično ispunjenih profila

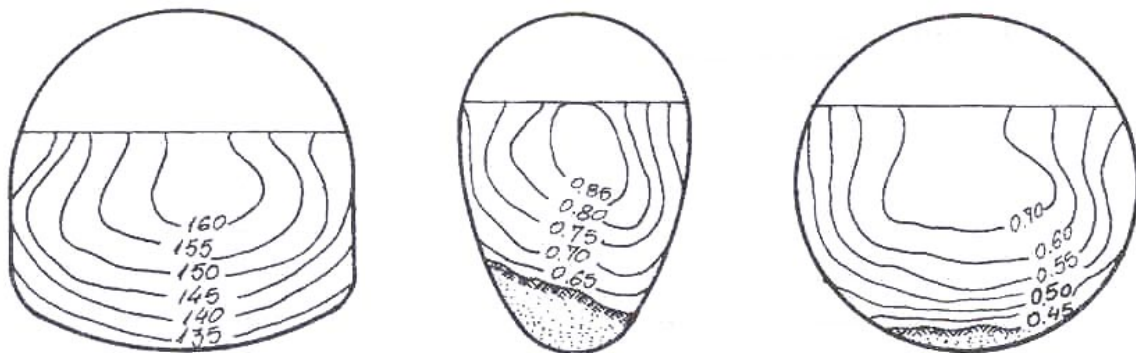
Lokalni gubici u kanalizacionjskim kolektorima ne ulaze u proračun jer su uključeni u pogonsku hrapavost. Ova preporuka ne vrijedi za pojedine prateće objekte (sifoni, ispusti itd.) i tlačne cjevovode kada se svi lokalni gubici moraju uzimati pojedinačno.

Ograničenja projektnih parametara

a) ograničenje brzina

U sustavima odvodnje nisu poželjne ni male ni velike brzine. Male brzine tečenja pogoduju taloženju i mogućnosti začepjenja, a usljed velikih brzina dolazi do abrazije cijevi (djelovanjem suspenzija u vodi). Iz tog se razloga provodi ograničenje minimalnih i maksimalnih brzina.

Na slici 5. je prikazan raspored brzina u poprečnom profilu kolektora. Vidi se da su pridnene brzine najmanje i da procesi taloženja i abrazije ovise promarno o njima. Ali zbog jednostavnosti proračuna, ograničenje se provodi na srednju brzinu.



Slika 6. Raspored brzina u poprečnom profilu kolektora

Kod tečenja (jednolikog) sa slobodnim vodnim licem brzina toka je u funkciji hrapavosti, pada i hidrauličkog radijusa. Za istu vrstu cijevnog materijala i isti pad, brzina je jedino u funkciji hidrauličkog radijusa, odnosno oblika ili poprečnog presjeka kanala.

Minimalne brzine

Za proračun kritične brzine (kod koje neće doći do taloženja organskih i anorganskih suspenzija) koristi se formula Fedorova:

$$v_{krit} = 1,57 \sqrt[n]{R}$$

$$n = 3,5 + 0,5R$$

Prema njemačkim standardima ATV-A-110E vrijednosti minimalno dopuštenih brzina kod kojih neće doći do taloženja u kanalizacionim kolektorima dane su u tablici 10.

Širina kanala ili promjer (mm)	Kritična brzina (m/s)	Kritični pad (‰)
150	0,48	2,72
200	0,50	2,04
250	0,52	1,63
300	0,56	1,51
350	0,62	1,48
400	0,67	1,45
450	0,72	1,48
500	0,76	1,40
600	0,84	1,37
700	0,91	1,33
800	0,98	1,31
900	1,05	1,29
1000	1,12	1,26
1100	1,18	1,25
1200	1,24	1,24
1300	1,28	1,22
1400	1,34	1,20
1500	1,39	1,19
1600	1,44	1,18
1800	1,54	1,16
2000	1,62	1,14
2400	1,79	1,10
2600	1,87	1,10
2800	1,96	1,09
3000	2,03	1,08

Tablica 10. Najmanje dozvoljene brzine u okruglim kanalima za $h=D/2$

U mnogim je slučajevima teško zadovoljiti ove veličine najmanjih brzina, pa se dopuštaju i manje brzine.

Kod mješovite i oborinske kanalizacije, najmanja dozvoljena brzina za kolektore ispunjene 50% profila ili više iznosi:

$$v_{\min} = 0,6 \quad m/s$$

Za kanalizaciju kućanskih otpadnih voda:

$$v_{\min} = 0,5 \quad m/s$$

Kao najmanja brzina za kolektore kućanskih otpadnih voda iznimno se dopušta:

$$v_{\min} = 0,3 \quad m / s$$

jer kod nje još uvijek neće doći do taloženja organskih tvari, međutim, doći će do taloženja anorganskih tvari.

Maksimalne brzine

Ograničavanje maksimalnih brzina provodi iz razloga zaštite cijevi od abrazije (struganja i ispiranja stijenki i spojeva).

Jedna od preporuka je da maksimalne brzine ne bi trebale prelaziti vrijednosti:

$$2,5 - 3,0 \quad m/s$$

Osobine cijevnog materijala također utječu na maksimalno dozvoljene brzine. Za pojedine vrste cijevnog materijala dopuštaju se sljedeće maksimalne brzine:

- betonske cijevi $v_{\max} = 3,0 \quad m / s$
- armiranobetonske cijevi $v_{\max} = 4,0 \quad m / s$
- azbestno-cementne cijevi $v_{\max} = 4,5 \quad m / s$
- PVC cijevi $v_{\max} = 5,0 \quad m / s$
- čelične cijevi $v_{\max} = 7,0 \quad m / s$

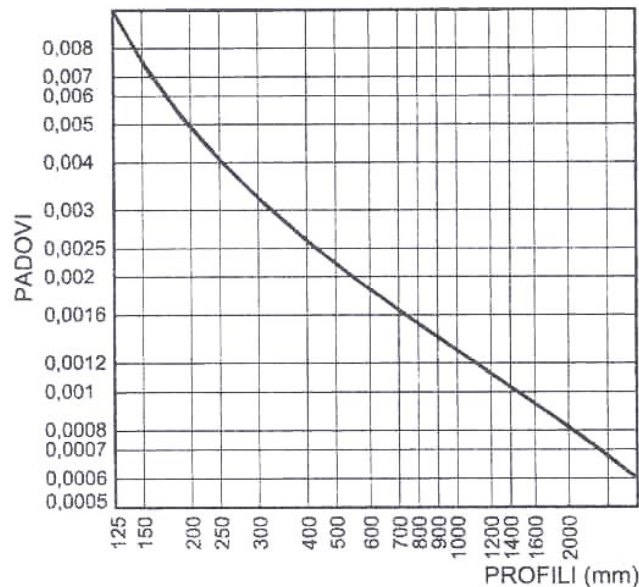
Ove bi se brzine trebale koristiti jedino na kraćim dionicama, a ne u dugim kanalima.

Ograničenje uzdužnih padova

Uzdužni padovi i brzine su izravno funkcionalno ovisni. Prema tome, kada se govori o minimalnim i maksimalnim brzinama, može se govoriti i o minimalnim i maksimalnim padovima. Brzina u cjevovodu je posljedica uzdužnog nagiba cijevi, pa se projektiranje pojednostavljuje uz poznavanje ograničenja padova. Padovi su u funkciji oblika i veličine profila, kao i veličine hrapavosti cijevnog materijala. Usvojena se vrijednost uzdužnog pada mora uvijek provjeriti preko brzine.

Minimalni padovi

Korištenjem formule Fedorova za minimalne brzine i uvrštavanjem ograničenja za pojedine okrugle profile u formulu za brzine, dobiju se pripadajući uzdužni padovi:



Slika 7. Minimalni padovi u funkciji profila prema formuli Fedorova

Slični rezultati mogu se dobiti korištenjem jednostavne empirijske formule:

$$I_{\min} = \frac{1}{D}$$

gdje je:

D unutarnji promjer kanalizacijske cijevi (mm)

I_{\min} minimalni uzdužni pad kanala

Maksimalni padovi

Za orijentaciju se također može koristiti empirijska formula:

$$I_{\max} = \frac{1}{D}$$

gdje je:

D unutarnji promjer kanalizacijske cijevi (dm)

I_{\min} minimalni uzdužni pad kanala

U svakom graničnom i konkretnom slučaju minimalne i maksimalne padove treba izračunati na temelju minimalno i maksimalno dopuštenih brzina toka.

Ograničenje minimalnih profila

U sastavu otpadnih voda često se nalaze i krupne otpadne tvari koje mogu uzrokovati začepljenje cjevovoda ili uzrokovati smanjenje slobodnog profila kanala. Iz tog se razloga ograničava korištenje minimalnih profila, neovisno o njihovom zadovoljenju minimalne brzine toka i ispunjenosti profila.

Kao minimalni profili u svim uobičajenim uvjetima, koriste se sljedeći:

- odvodnja kućanskih otpadnih voda $\varnothing_{\min}=250 - 300$ mm**
- mješoviti i oborinski sustav odvodnje $\varnothing_{\min}=300 - 400$ mm**

Ograničenje visine punjenja kanalizacijskih cijevi

Tečenje vode kanalizacijskim cijevima najčešće je tečenje sa slobodnim vodnim licem (ispravno priključenje kućnih priključaka, odnošenje plivajućih tvari, odzračivanje kanala i sl.).

U tu svrhu se provodi ograničavanje visine punjenja kolektora, ovisno o veličini kolektora. Preporučuju se sljedeće visine punjenja za okrugle profile:

D = 250 – 300 mm	$h_p=0,60 D$
D = 350 – 450 mm	$h_p=0,70 D$
D = 500 – 900 mm	$h_p=0,75 D$
D > 900 mm	$h_p=0,80 D$

gdje je:

h_p visina punjenja

D promjer cijevi

Kod svih drugih oblika poprečnog presjeka kanala vrijede sljedeća ograničenja:

$H < 300 \text{ mm}$	$h_p = 0,60 H$
$H = 300 - 450 \text{ mm}$	$h_p = 0,70 H$
$H = 450 - 900 \text{ mm}$	$h_p = 0,75 H$
$H > 900 \text{ mm}$	$h_p = 0,80 H$

gdje je:

h_p visina punjenja

H visina kanala

U skladu s tim računski visina punjenja (za njerodavni protok) mora biti jednaka ili manja od maksimalno dopuštenih veličina.

Kod oborinskih i mješovitih sustava odvodnje maksimalni protok traje relativno kratko, tako da se dopušta potpuno punjenje kanala.

Ograničenje dubine ugradnje kanala

Dubina ugradnje kanala ovisi o nizu faktora: klimatskim prilikama (dubina smrzavanja), hidrogeološkim osobinama tla, iznosu vanjskog opterećenja, dubini priključaka, položaju ostalih instalacija, veličini profila kanala, materijalu i načinu izvedbe kanala.

Prilikom određivanja optimalne dubine ugradnje potrebno je sagledati sve faktore.

Kod određivanja najmanje dubine ugradnje kanala potrebno je najprije definirati najniža mjesta na predviđenoj trasi.

Ukoliko lokalne prilike dopuštaju, preporučuju se sljedeće minimalne dubine polaganja, do tjemena cijevi d_{\min} :

- teren do IV. kategorije $d_{\min} = 1.2 \text{ m}$
- teren V. ili VI. kategorije $d_{\min} = 1.0 \text{ m}$




Maksimalne dubine polaganja su isključivo stvar ekonomskih proračuna. Dubine do 6 m se smatraju prihvatljivima.

Primjer 3. (Osnove hidrotehnike – Živko Vuković)

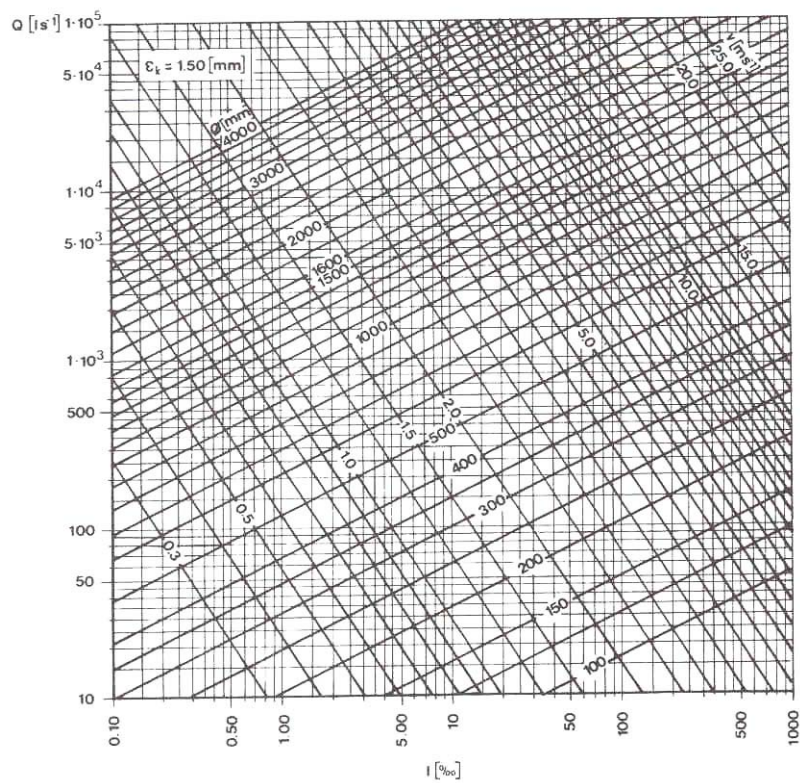
Odrediti hidrauličke parametre glavnog kolektora (brzinu, dubinu vode i stupanj punjenja) za mjerodavnu količinu otpadnih voda, $Q=1880$ l/sec. Proračun provesti korištenjem:

- a) Colebrook-Whiteove formule ($\epsilon_k=1,5$ mm)
- b) Chezy-Manningove formule ($n=0,014$)

Cijev je okruglog poprečnog presjeka od betona, s padom dna $I=2\text{‰}$

$\epsilon_k = 1.50$ [mm]		Q [$l\ s^{-1}$], v [$m\ s^{-1}$]							
I [‰]									
1.95		2.00		2.05		2.10			
Q	v	Q	v	Q	v	Q	v		[mm]
									
2.3	0.29	2.3	0.29	2.3	0.30	2.4	0.30	100	
4.1	0.34	4.2	0.34	4.3	0.35	4.3	0.35	125	
6.8	0.38	6.8	0.39	6.9	0.39	7.0	0.40	150	
14.6	0.46	14.8	0.47	15.0	0.48	15.2	0.48	200	
26.5	0.54	26.8	0.55	27.1	0.55	27.5	0.56	250	
43.0	0.61	43.5	0.62	44.1	0.62	44.6	0.63	300	
64.7	0.67	65.6	0.68	66.4	0.69	67.2	0.70	350	
92.3	0.73	93.5	0.74	94.6	0.75	95.8	0.76	400	
126	0.79	128	0.80	129	0.81	131	0.82	450	
167	0.85	169	0.86	171	0.87	173	0.88	500	
270	0.95	273	0.97	277	0.98	280	0.99	600	
405	1.05	410	1.07	416	1.08	421	1.09	700	
576	1.15	584	1.16	591	1.18	598	1.19	800	
786	1.24	796	1.25	806	1.27	816	1.28	900	
1 037	1.32	1 050	1.34	1 064	1.35	1 076	1.37	1 000	
1 333	1.40	1 350	1.42	1 367	1.44	1 383	1.46	1 100	
1 675	1.48	1 697	1.50	1 718	1.52	1 739	1.54	1 200	
2 067	1.56	2 094	1.58	2 120	1.60	2 146	1.62	1 300	
2 511	1.63	2 543	1.65	2 575	1.67	2 606	1.69	1 400	
3 010	1.70	3 048	1.72	3 086	1.75	3 124	1.77	1 500	
3 565	1.77	3 611	1.80	3 656	1.82	3 700	1.84	1 600	
4 855	1.91	4 917	1.93	4 979	1.96	5 039	1.98	1 800	
6 399	2.04	6 481	2.06	6 562	2.09	6 641	2.11	2 000	
8 213	2.16	8 318	2.19	8 422	2.22	8 524	2.24	2 200	
10 314	2.28	10 446	2.31	10 576	2.34	10 705	2.37	2 400	
12 717	2.40	12 879	2.43	13 040	2.46	13 198	2.49	2 600	
15 437	2.51	15 634	2.54	15 829	2.57	16 021	2.60	2 800	
18 488	2.62	18 724	2.65	18 957	2.68	19 188	2.71	3 000	
									
268	0.93	271	0.94	275	0.96	278	0.97	500/750	
433	1.05	439	1.06	445	1.08	450	1.09	600/900	
651	1.16	659	1.17	667	1.19	676	1.20	700/1 050	
925	1.26	937	1.27	949	1.29	960	1.31	800/1 200	
1 261	1.36	1 278	1.37	1 293	1.39	1 309	1.41	900/1 350	
1 664	1.45	1 685	1.47	1 706	1.49	1 727	1.50	1 000/1 500	
2 686	1.62	2 721	1.65	2 755	1.67	2 788	1.69	1 200/1 800	
4 026	1.79	4 077	1.81	4 128	1.83	4 178	1.86	1 400/2 100	

Tablica 5.4.:IV Tabelarni prikaz hidrauličkih parametara potpuno ispunjenih kanalizacijskih cijevi okruglog i jajolikog oblika profila prema formuli Colebrook - Whitea, [07]



Slika 5.4.:10 Nomogram hidrauličkih parametara potpuno ispunjenih kanalizacijskih cijevi okruglog oblika profila prema formuli Colebrook - Whitea, [07]

KRIVULJA PUNJENJA ZA OKRUGLI POPREČNI PRESJEK

