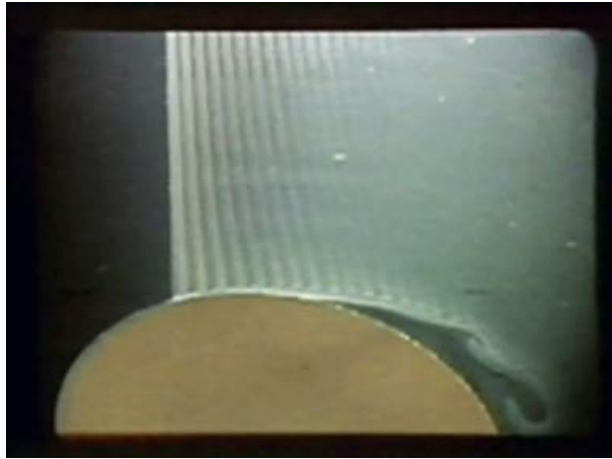


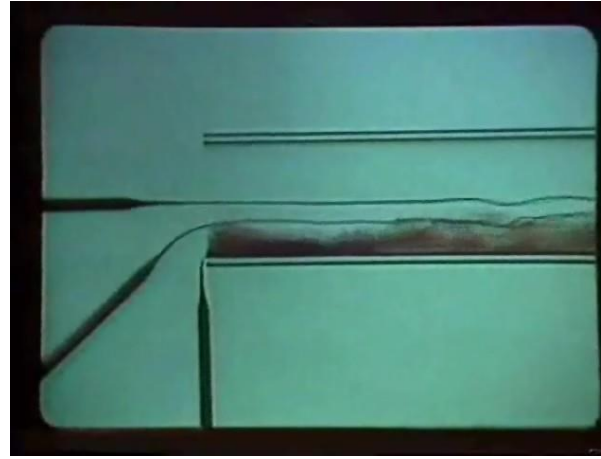
Határrétegek

Dr. Tomor András
BME Áramlástan Tanszék
2020. március 2.

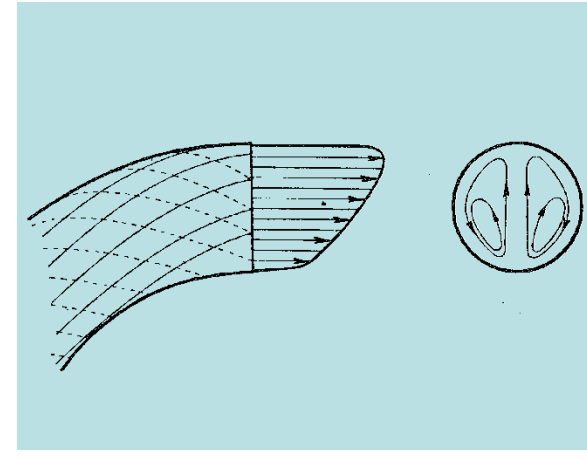
Határréteggel kapcsolatos jelenségek



[Shapiro]



[Shapiro]



[Schlichting 20.25]

Leválás:

- Szabad nyíróréteg keletkezik;
- Jelentősen módosul a nyomásmegoszlás, nő az ellenállás;
- Szárnyak felhajtóerejének létrejötté is és drasztikus csökkenése is.

Turbulencia:

- A sebesség szabálytalan ingadozása;
- A határréteg megvastagodása
- Felületi transzporttényezők (pl. hőátadás, borsúrlódás) növekedése;
- A határréteg jobban ellenáll a leválásnak.

Szekunder áramlás:

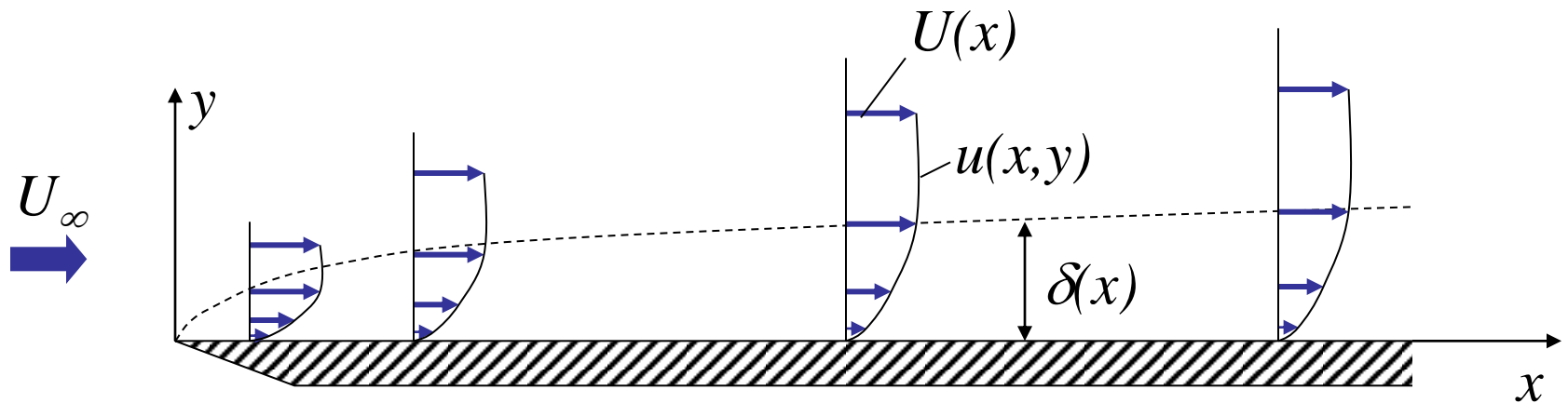
- Folyadékforgalom a nagy és kisnyomású oldal között;
- Áramlás irányú örvényesség keletkezése;
- Keveredés erősödik, az ülepedő részecskék átrendeződnek a fenéken.

Kiszorítás: Virtuálisan megnő a test vagy szárny vastagsága.

A határréteg koncepció

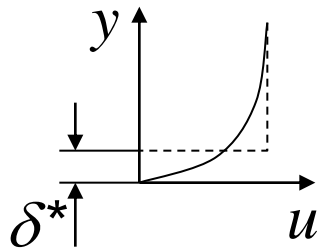
Ha a viszkozitás nagyon kicsi, a fali súrlódás csak egy vékony, δ vastagságú rétegben gyakorol hatást az áramlásra.

2D stacionárius áramlásra szorítkozunk: $\underline{v} = u \underline{e}_x + v \underline{e}_y$



A határréteg vastagsága

Definíció:



$$\delta : \quad u(\delta) = 0.99U$$

$$\delta^* : \quad U\delta^* = \int_0^{\infty} (U - u(y)) dy \quad \text{kiszorítási vastagság}$$

Pl. 0 állásszögű sík lap esetén: $\delta \cong 3.26\delta^*$

δ becsülhető, ha a tehetetlenségi erő és a viszkozus erő között egyensúlyt feltételezünk a határréteg szélén ($y=\delta$). ν a kinematikai viszkozitás:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \cong \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

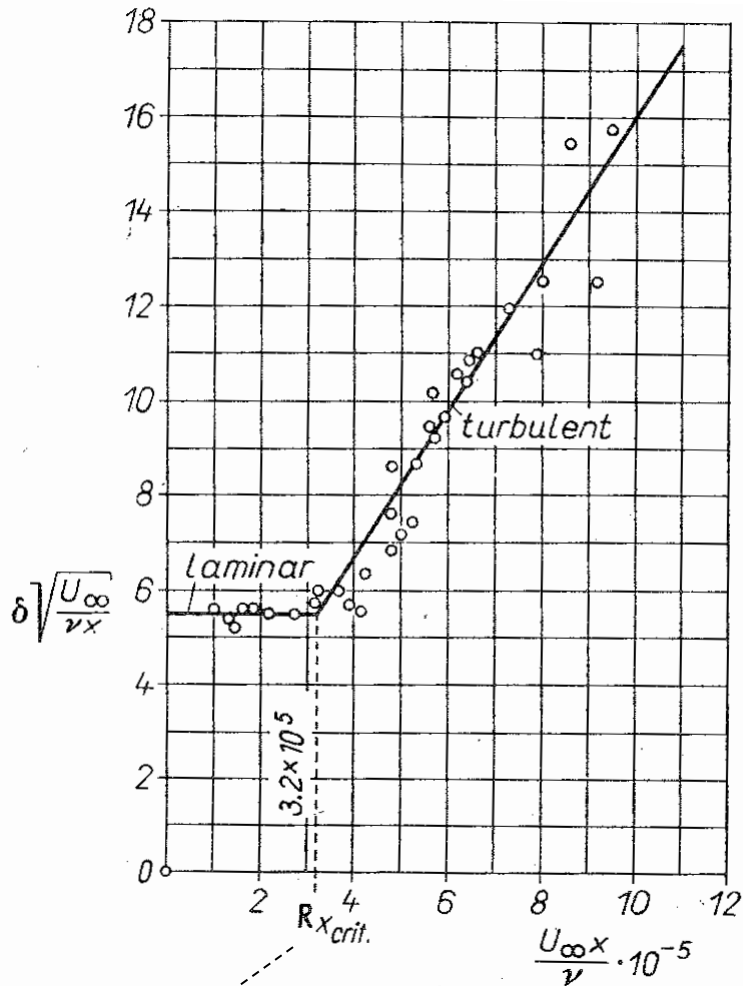
$$U_{\infty} \frac{U_{\infty}}{x} \sim \nu \frac{U_{\infty}}{\delta^2}$$

$$\frac{\delta}{x} \sim \sqrt{\frac{\nu}{U_{\infty} x}}$$

$Re_x^{-0.5}$

A határéteg vastagság változása 0 állásszögű síklapon

[Schlichting 2.16]



$$Re_{x,krit} = 3.2 \times 10^5$$

A Reynolds-számot kétféleképpen definiálhatjuk:

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu}$$

$$Re_\delta = \frac{U_\infty \delta}{\nu}$$

Lamináris határretegére tehát:

$$\frac{Re_\delta}{Re_x} = \frac{\delta}{x} = 5.64 Re_x^{-0.5}$$

$$Re_\delta = 5.64 Re_x^{0.5}$$

Re_{krit} síklapon és csőben

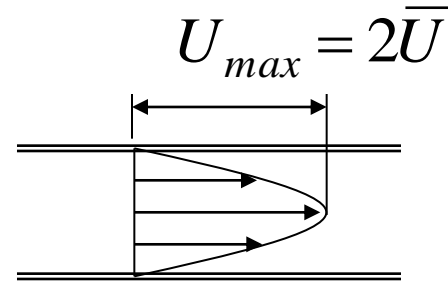
Hasonlítsuk össze a kritikus Reynolds-szám értékét síklap és cső esetén!

Síklap esetén:

$$Re_{x,crit} = 3.2 \times 10^5 \quad \longrightarrow \quad Re_{\delta,crit} = 5.64 Re_{x,crit}^{0.5} = 3200$$

Lamináris áramlásban az átlagsebesség:

A cső sugara tekinthető a határréteg
Vastagságának, így:



$$Re_{\delta,crit} = \frac{U_{max} \delta}{\nu} = \frac{UD}{\nu} = 2300$$

Határrétegegyenlet

A külső nyomás behatol a határrétegbe.

Ezért a nyomás csak az x koordináta függvénye, a nyomásgradiens pedig a külső áramlás sebessége alapján kiszámítható.

$$p(x) \quad \longrightarrow \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = U \frac{dU}{dx}$$

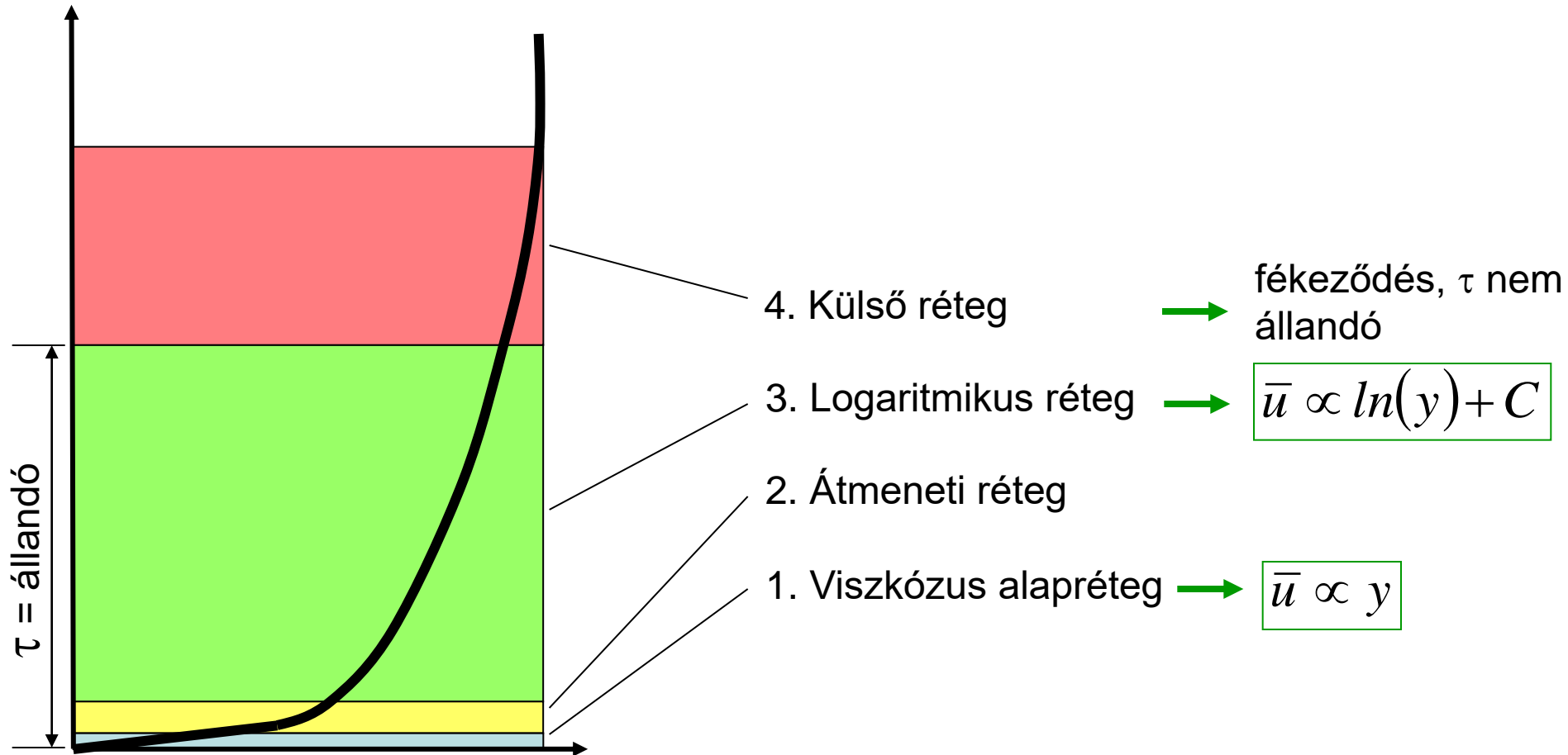
$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U \frac{dU}{dx} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Ez a határrétegegyenlet lamináris áramlásra.

Mezőváltozóink:
 $u(x,y)$ és $v(x,y)$

A turbulens határréteg szerkezete



Sebesség profilok

Viszkózus alapréteg

$$\tau = \rho \nu \frac{d\bar{u}}{dy} = \tau_w$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$(u^*)^2 = \nu \frac{d\bar{u}}{dy}$$

$$\frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{u^* y}{\nu} = y^+$$

$$0 < y_+ < 5 \quad (..10)$$

Logaritmikus réteg

$$\tau = \rho \ell^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \cong \tau_w$$

$$\ell = \kappa y$$

$$(u^*)^2 = \kappa^2 y^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2$$

$$\frac{d\bar{u}}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \frac{dy}{y}$$

$$\frac{\bar{u}}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u^* y}{\nu_0} \right) + C$$

$$(30..) \quad 60 < y_+ < 300$$

y^+

Kármán
konstans:

$$\kappa = 0.4$$

Sima lapra:

$$C = 5.45$$

(C érdesség-
függő)

Hidraulika

Hidraulikai rendszerek a műszaki életben

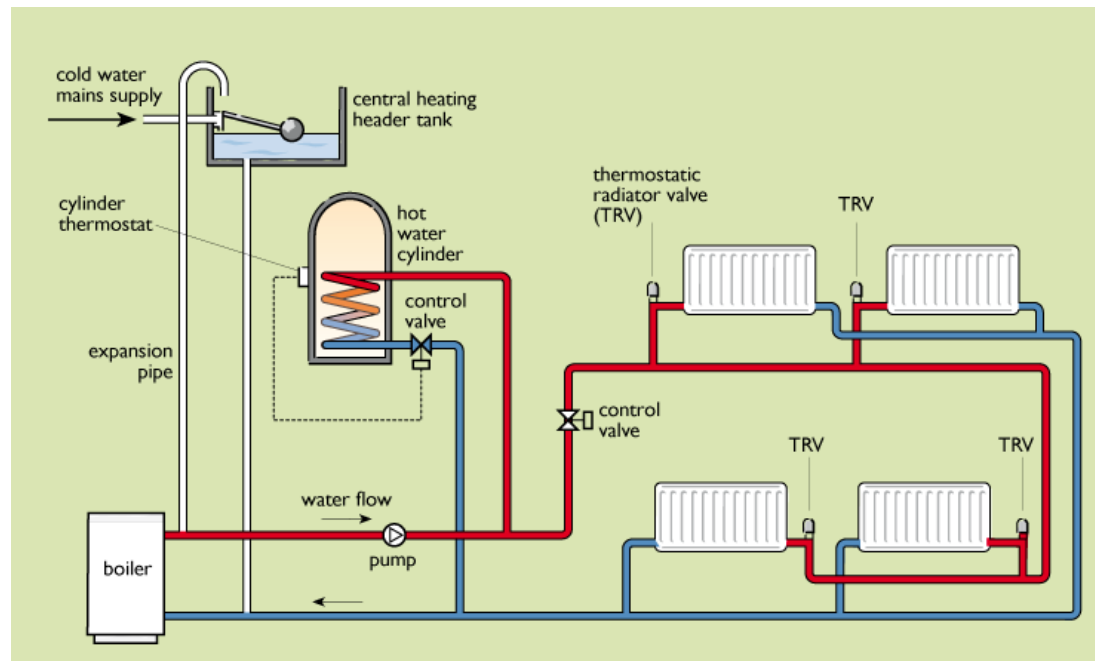
Hidraulikai rendszer – csőhálózat, csőáramlás

Nem feltétlenül víz (viszonylag kis nyomáskülönbségű levegő üzemű, gázüzemű rendszerek is) – az áramló közeg összenyomhatatlannak tekinthető. (Összenyomható közegek esetén: gázdinamika)

Műszaki alkalmazások

Hidraulikai rendszerek, csőáramlások a műszaki élet majdnem minden területén

Fűtési rendszer



Hidraulikai rendszerek a műszaki életben

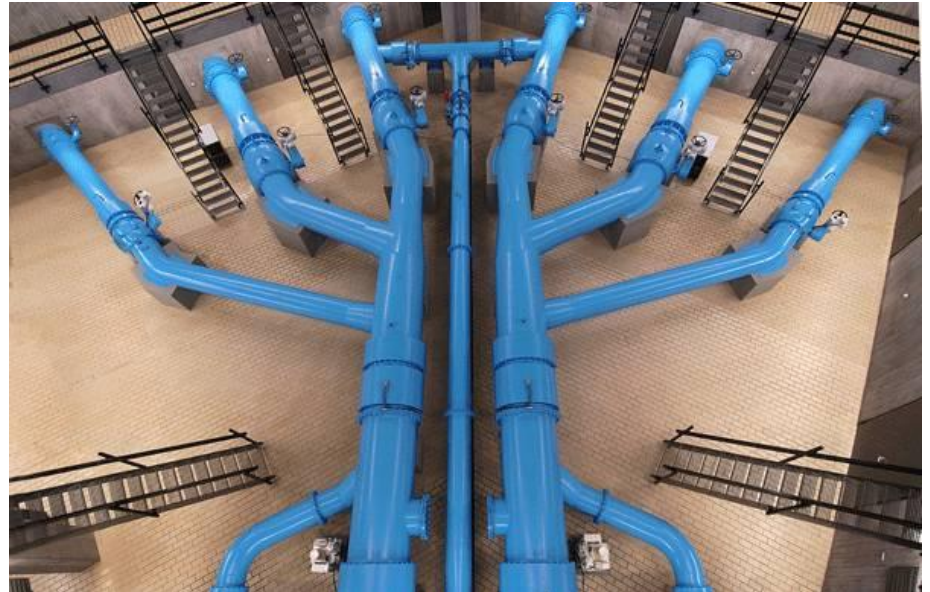
Műszaki alkalmazások – folytatás

Légtechnika, szellőzőrendszer



[2] <http://www.gazkemeny-legtechnika.hu/legtechnika.html>

Víz- és szennyvízkezelés



[3] http://www.automation.at/detail/optimal-es-ressourcenmanagement-mit-zenon_44132

Hidraulikai rendszerek a műszaki életben

Műszaki alkalmazások – folytatás

Erőművek



[4] <http://tuyenlam.com/chi-tiet-tin/663-lap-dat-cac-he-thong-duong-ong-trong-nha-may-dien>

Vegyipar

(sok esetben
a csövezés a
teljes beruházási
költség kb 1/3-a)



Gazdaságos
csőátmérő



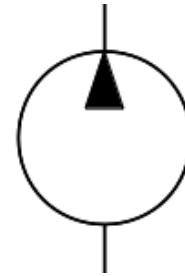
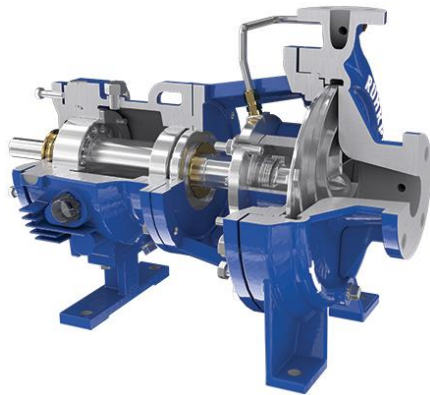
[5] <https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-piping-system/>

Hidraulikai rendszerelemek

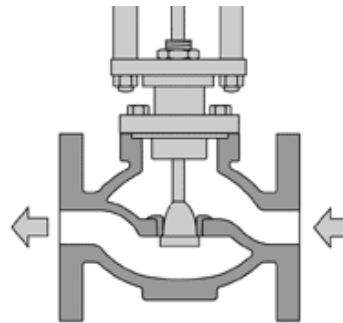
Hidraulikai rendszerelemek csoportosítása: aktív, passzív

Aktív hidraulikai komponensek

Szivattyúk (levegő üzemű rendszereknél ventilátorok)



Szabályozó szelepek

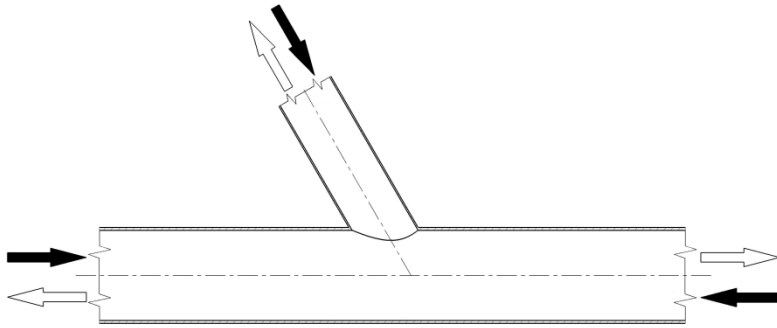


Egyéb (pl.: hidraulikus munkahengerek)

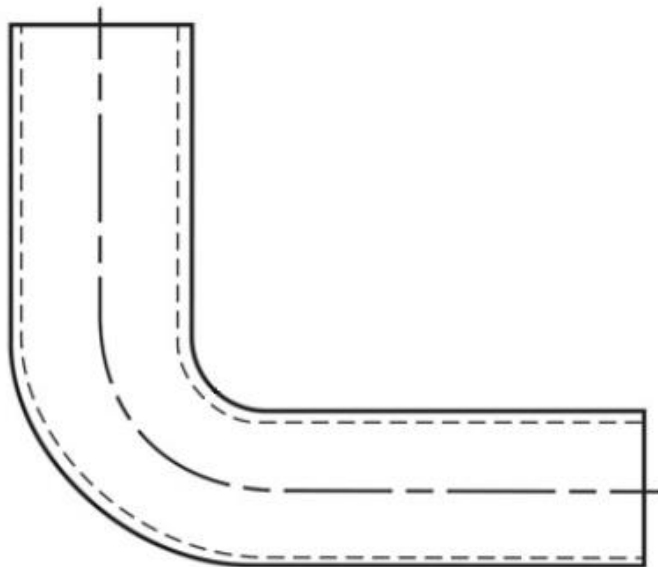
Hidraulikai rendszerelemek

Passzív hidraulikai komponensek

Elágazások



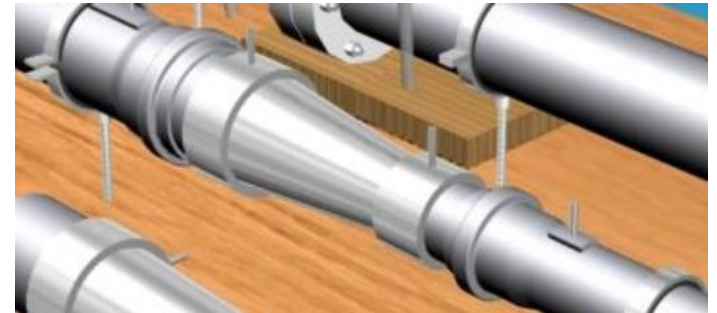
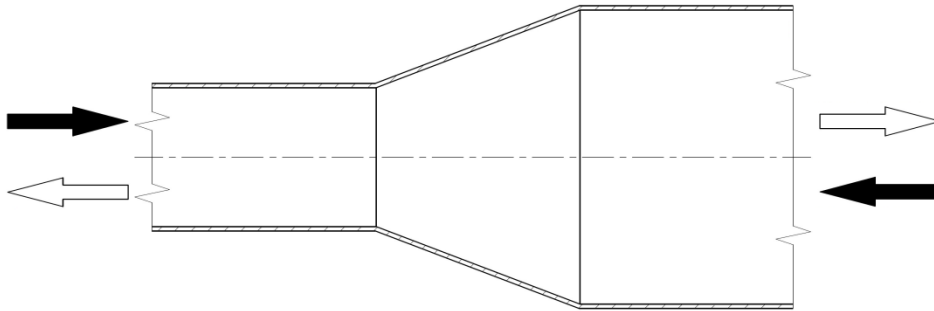
Csőívek, könyökök



Hidraulikai rendszerelemek

Passzív hidraulikai komponensek

Keresztmetszet-átmenetek (diffúzor, konfúzor, hirtelen keresztmetszet-változás)



Egyenes csőszakaszok

Tartályok

Egyéb (pl.: rácsok, áramlásegyenletesítők, szűrők, stb...)



Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Szivattyú vagy ventilátor → munkaközeg szállítása

Meghatározott térfogatáramot kívánunk szállítani – legyőzve a rendszer veszteségeit



Rendkívül fontos a rendszerben fellépő veszteségek ismerete, pontos számítása

Hidraulikai rendszerelemeken fellépő veszteségek

Mi a veszteség egy hidraulikai rendszerben?

Bernoulli-egyenlet (Euler-egyenlet vonal menti integrálásával kapható meg):

$$\int_1^2 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} d\vec{s} + \int_1^2 \text{grad} \frac{v^2}{2} d\vec{s} - \int_1^2 \vec{v} \times \text{rot} \vec{v} d\vec{s} = \int_1^2 \vec{g} d\vec{s} - \int_1^2 \frac{1}{\rho} \text{grad} p d\vec{s}$$

Ez lényegében az energiamegmaradás törvénye.

Mi marad a Bernoulli-egyenletből stacionárius (időben állandósult) csőáramlás esetén?

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + U_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + U_2$$

Veszteségmentes esetben érvényes!

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Veszteséges Bernoulli-egyenlet:

$$\frac{\rho}{2} v_1^2 + p_1 + \rho U_1 = \frac{\rho}{2} v_2^2 + p_2 + \rho U_2 + \Delta p'$$

veszteséges tag

Az egyes veszteségek jellemezhetők veszteségtényezőkkel.

Néhány veszteségtípushoz tartozó veszteségtényező lehetséges definíciója:

Csőúrlódási: $\Delta p'_{cső} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Alaki: $\Delta p'_{alaki} = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Diffúzor: $\Delta p'_{diff} = (1 - \eta_{diff}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_{be}^2 - v_{ki}^2) = \zeta_{diff} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{be}^2$

η_{diff} : diffúzor hatásfok, ζ_{diff} : veszt. tény.

Borda-Carnot (hirtelen keresztmetszet-bővülés): $\Delta p'_{BC} = \frac{\rho}{2} (v_1 - v_2)^2$

Kilépési: $\Delta p'_{ki} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Beömlési: $\Delta p'_{be} = \zeta_{be} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

A veszteségtényező:

$$\Delta p'_{cső} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad \Delta p' = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Sok esetben nem konstans, több paraméter függvényének tekinthető.

Fontos ismerni, hogy a veszteségtényezők hogyan függnek az egyes paramétereiktől



veszteségcsökkentés

Összenyomhatatlan newtoni közegek egyfázisú áramlása esetében – kör keresztmetszetű csővezetékét feltételezve – az egyes hidraulikai elemek veszteségtényezőinek paraméterfüggése:

Egyenes csőszakaszok – csősúrlódás

A csősúrlódási tényező az alábbiaktól függ:

- csőfal (hidraulikailag sima/érdes, érdességmagasság)
- Reynolds-szám

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

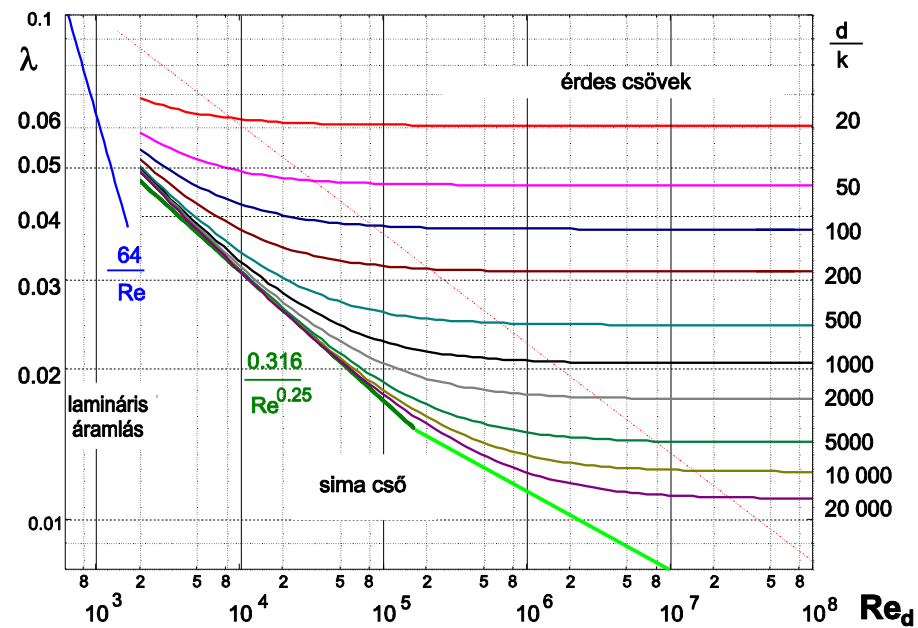
Reynolds-szám: tehetetlenségi erők és viszkózus (súrlódásból származó) erők aránya

Alacsony Reynolds-számokon: viszkózus erők dominálnak → súrlódás jelentősebb

Magasabb Reynolds-számokon: tehetetlenségi erők dominálnak

Csőúrlódási tényező meghatározása

Moody-diagram

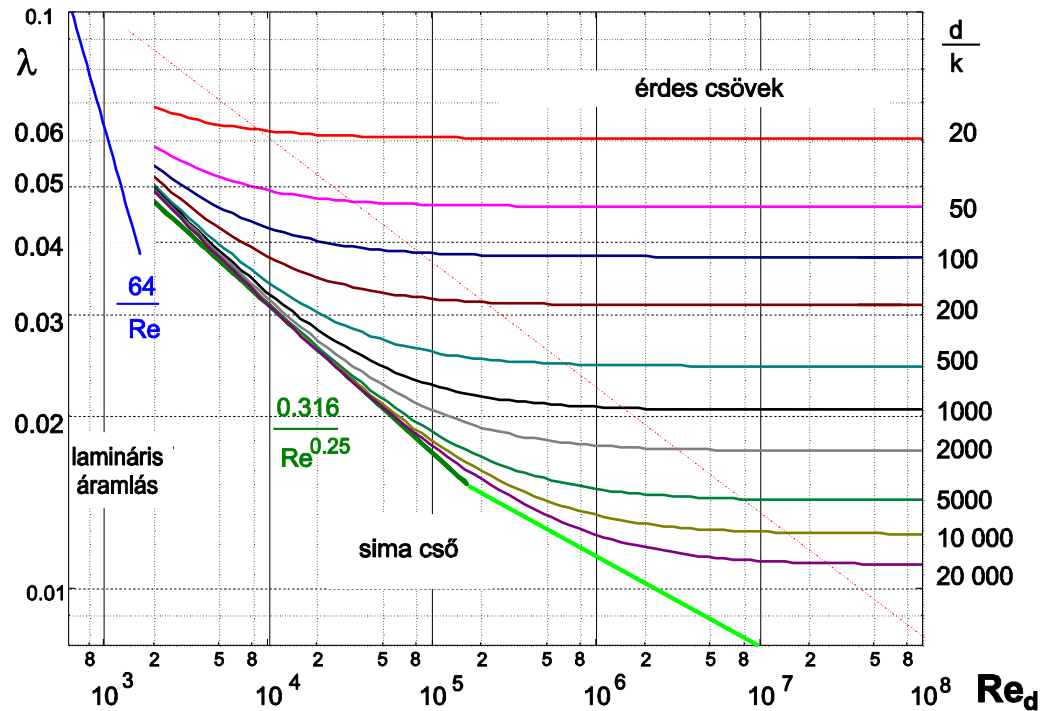


A lamináris áramlásokban arányaiban nagyobb a csőúrlódási veszteség.

Ipari alkalmazások többsége turbulens áramlás.

Lamináris alkalmazási példák: mikrofluidika, kis méretű üzemanyagcellák, stb...

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek



Egy határ Reynolds-szám fölött λ csak a relatív érdességtől függ.

Egy határ relatív érdesség (k/d) alatt λ csak a Reynolds-számtól függ (hidraulikailag sima csövek).

Lehetőségek λ csökkentésére:

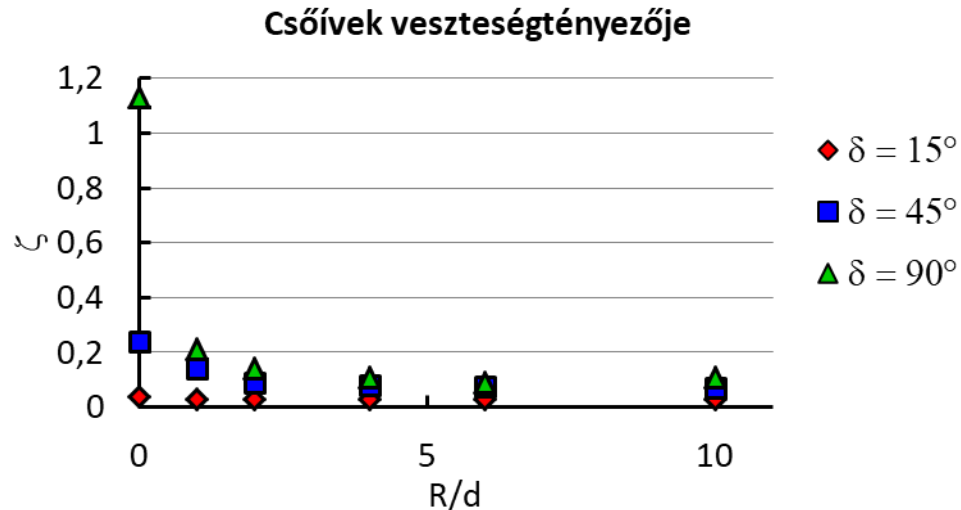
- **relatív érdesség csökkentése** (egyéb elemek esetében is hasznos)
- **Reynolds-szám növelése** (sebesség növelés \rightarrow nagyobb veszteség!)

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

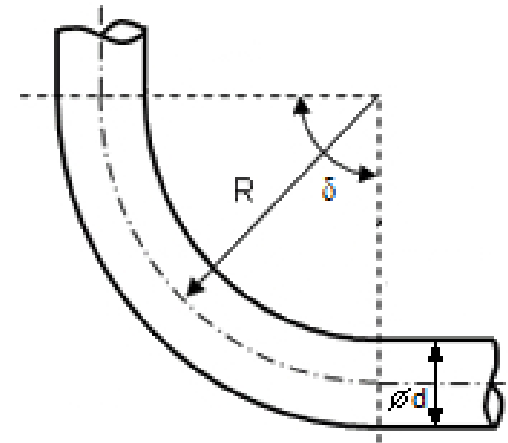
Csőívek

Csőívek esetén a veszteségtényező az alábbiaktól függ:

- csőív fala (hidraulikailag sima/érdes, érdességmagasság)
- Iránytörés (δ)
- relatív görbületi sugár (R/d)



[6] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai



Lehetőségek ζ csökkentésére:

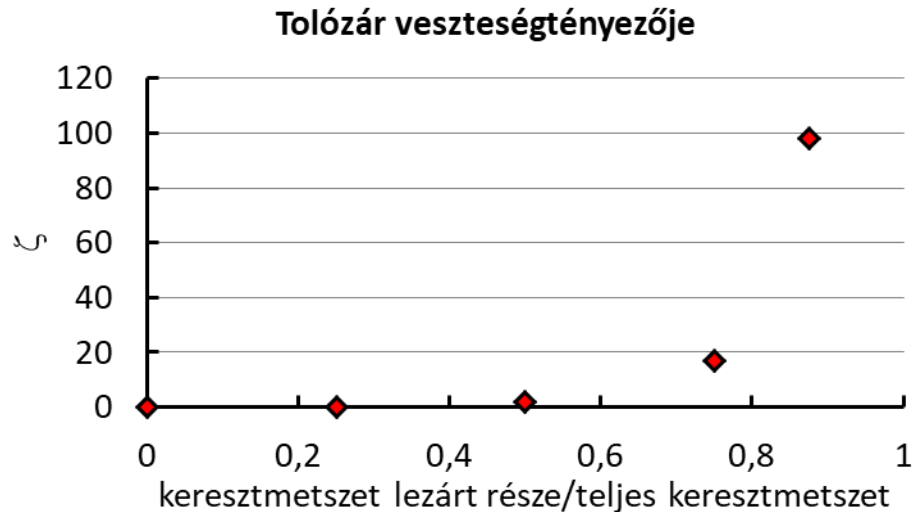
- **relatív érdesség csökkentése**
- **iránytörés csökkentése**
- **relatív görbületi sugár növelése (egy bizonyos határig)**
- **terelőlapát alkalmazása ($\delta = 90^\circ$ -os könyök esetén ezzel kb. tizedére csökkenthető a veszteség)**

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Szabályozó- és zárószerelvények

Szabályozó- és zárószerelvények (pl.: tolózárak, csappantyúk és szelepek) esetén a veszteségtényező elsősorban a zárás mértékétől függ.

Egy tolózár veszteségtényezője a zárás mértékének függvényében:



[6] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai



Lehetőségek ζ csökkentésére/növelésére:

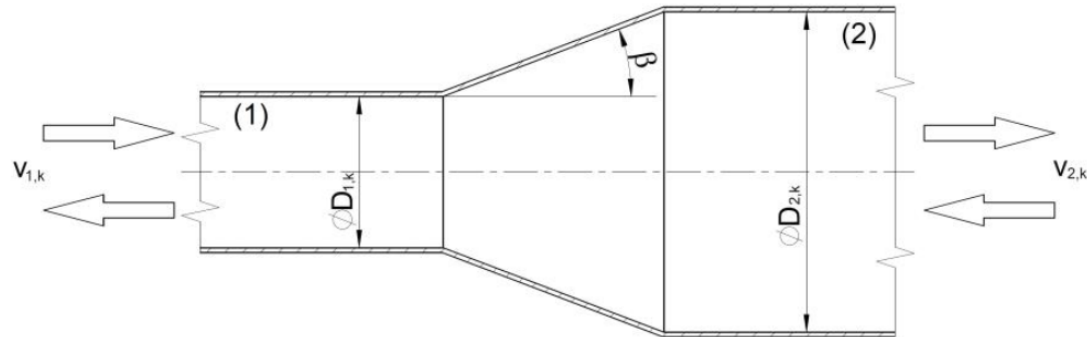
- **zárás mértékének változtatása**

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Keresztmetszet-átmenetek (diffúzor, konfúzor, hirtelen keresztmetszet-változás)

Keresztmetszet-átmenetek esetén a veszteségtényező az alábbiaktól függ:

- keresztmetszetviszony
- félnyílásszög (félkúpszög)



Ugyanolyan geometriai kialakítás esetén a keresztmetszet-bővülések veszteségtényezője nagyobb, mint a keresztmetszet-szűküléseké.

Fontos szempont a csőszűrlődés \rightarrow a diffúzorhatásfok például jellemzően 7° -os kúpszög közelében a legmagasabb (gyártási, költségi okokból sok esetben 15° körüli kúpszög választása javasolt).

Lehetőségek ζ csökkentésére:

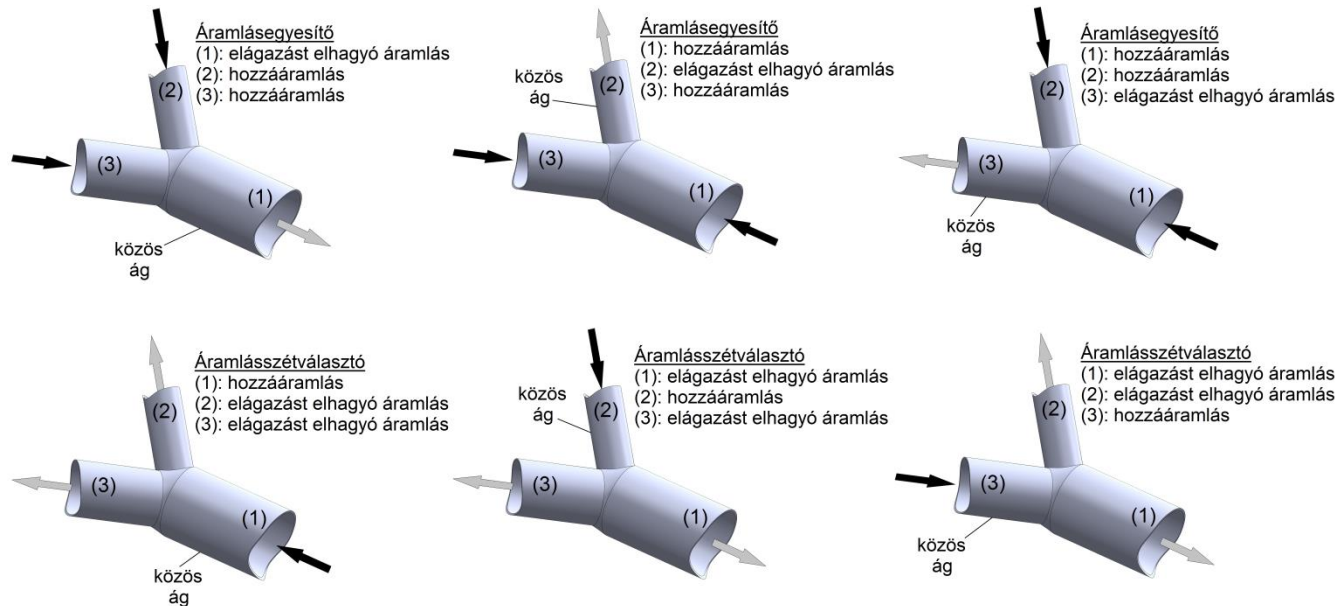
- **keresztmetszetviszony csökkentése** (sok esetben nem lehetséges)
- **kúpszög csökkentése** ($\sim 7^\circ$ -ig)

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Elágazások

Három elágazások esetén a veszteségtényezők (2 van) az alábbiaktól függenek:

- áramlásirányok (áramlásegyesítő vagy -szétválasztó elágazások)



- az egyes ágakra jellemző térfogatáramok arányai
- ágak keresztmetszeteinek aránya
- ágak egymással bezárt szöge

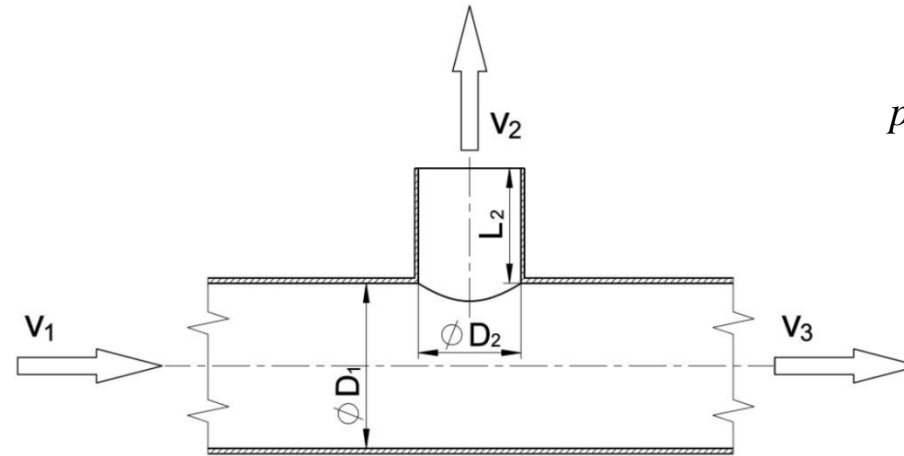
$$\Delta p_{t13} = p_{t1} - p_{t3} = C_{t1} \frac{\rho}{2} v_{\text{ref}}^2$$

$$\Delta p_{t23} = p_{t2} - p_{t3} = C_{t2} \frac{\rho}{2} v_{\text{ref}}^2$$

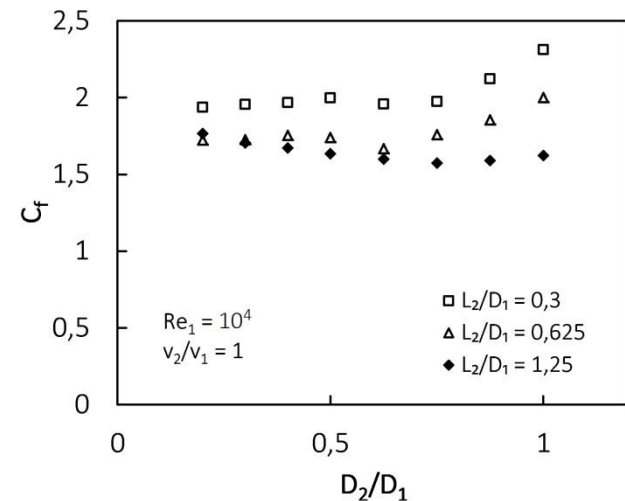
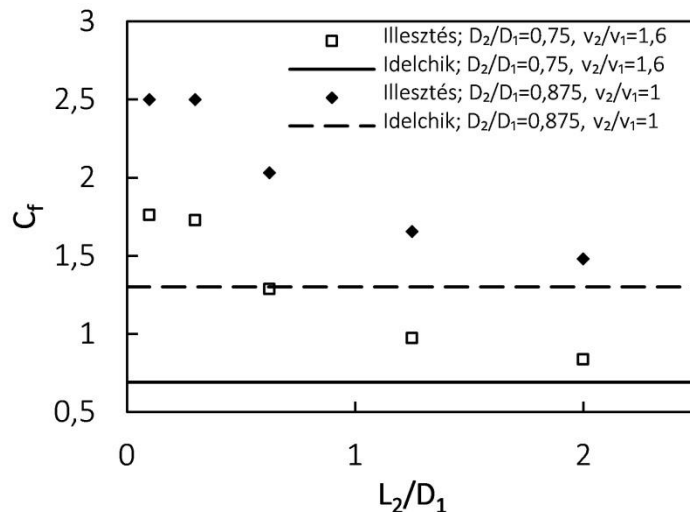
Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

Hengeres csövön kialakított kiömlőcsonk

Hengeres csövön kialakított kiömlőcsonk esetén a kiömlőcsonk hosszának és a cső átmérőjének aránya szintén hatással van a veszteségtényező értékére.



$$p_{t1} - p_{t2} = C_f \frac{\rho}{2} v_2^2$$



Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

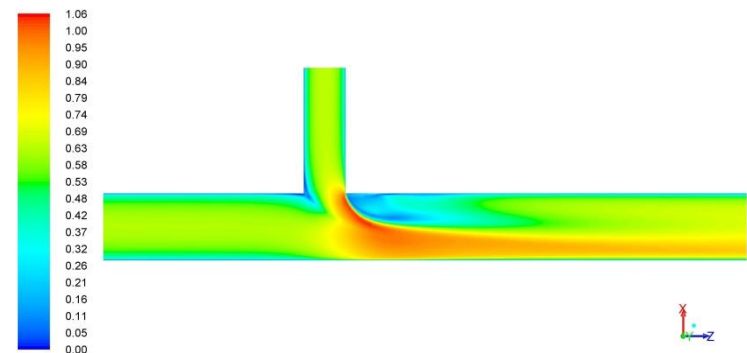
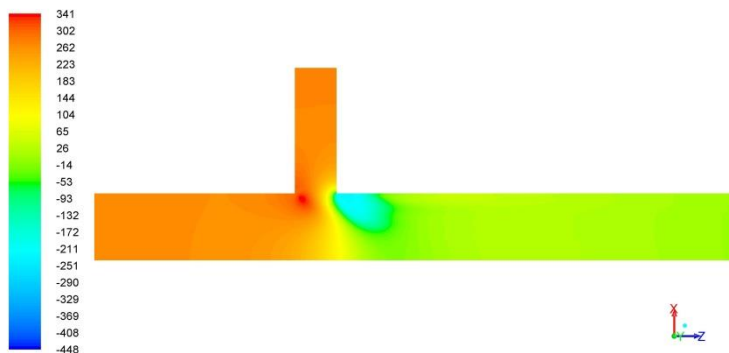
Egyéb, veszteséget befolyásoló tényezők:

- Az adott hidraulikai elem lekerekítésekkel rendelkezik → lekerekítések sugarai
- Elágazás esetén az ágak száma (háromnál több ág is előfordulhat)
- Csatorna keresztmetszete (kör vagy téglalap)
 - Kör keresztmetszet előnyei:
 - Hengeres csövek esetében a keresztmetszet területének és kerületének aránya nagyobb. Emiatt egyrészt kisebb anyagköltséggel gyártható egy ugyanakkora keresztmetszetű vezeték, másrészt üzem közben kisebb a csősúrlódási veszteség.
 - Kör keresztmetszetű csövek esetében kisebb a külső és belső nyomásterhelések hatására bekövetkező deformáció. A hengeres csövek összességében jobb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkeznek.
 - Kör keresztmetszetű csövekhez standard illesztések széles választéka áll rendelkezésünkre.
- Az áramlási sebesség csökkentésével csökkenthetők a veszteségek
- A veszteségtényezők nagymértékben függenek a belépő sebességprofiloktól
- Reynolds-számtól való függés is tapasztalható, azonban sok esetben – a turbulens tartományban – ez elhanyagolható: vagy ténylegesen nagyon kicsi, vagy a rendszer többi bizonytalanságához képest kicsi

Hidraulikai hálózatokban fellépő veszteségek

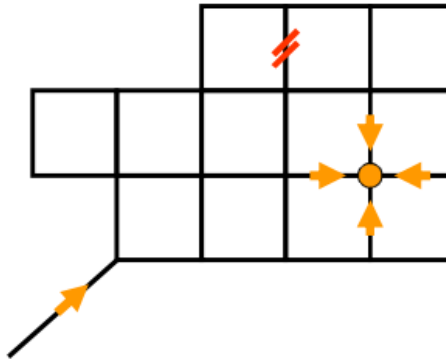
Veszteségtényezők meghatározására alkalmas módszerek:

- Szakirodalom (cikkekben, könyvekben sok adat áll rendelkezésünkre, pl.: I. E. Idelchik: Handbook of Hydraulic Resistance)
- Áramlástan mérés technika:
 - Statikus nyomásmérés a cső falán; ha állandó a cső keresztmetszete, a statikus nyomásesés megegyezik az össznyomáseséssel
 - Össznyomás közvetlen mérése (pl.: Pitot-cső)
- CFD – meghatározott tartomány modellezése, nyomások lekérdezése a hidraulikai elem előtti, illetve utáni felületeken



Hidraulikai hálózatok számítása

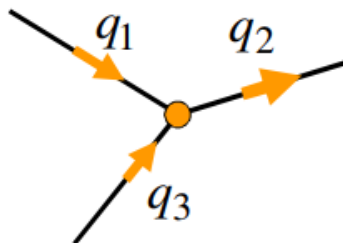
Hurkolt hálózatok



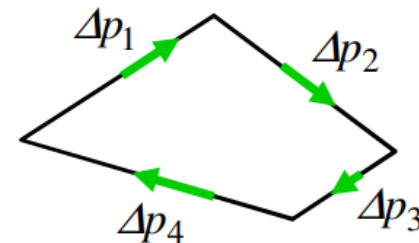
A Kirchhoff-törvények érvényesek:

I.) A csomópontba befolyó tömegáramok (állandó sűrűség esetén térfogatáramok) összege megegyezik az onnan elfolyó tömegáramok összegével.

II.) Bármely zárt hurokban a nyomáskülönbségek előjeles összege nulla.



Csomóponti egyenletek (törvények)



Hurokegyenletek (Huroktörvények)

Hidraulikai hálózatok számítása

Cross-módszer

Egyszerűen implementálható iteratív megoldási módszer hurkolt hálózatok számításához.

A Cross-módszer két jellegzetes mozzanata:

1)Állítsuk be a térfogatáramok értékeit és irányait oly módon, hogy azok a csomóponti egyenleteknek eleget tegyenek! (pl.: legyen minden térfogatáram 0!)

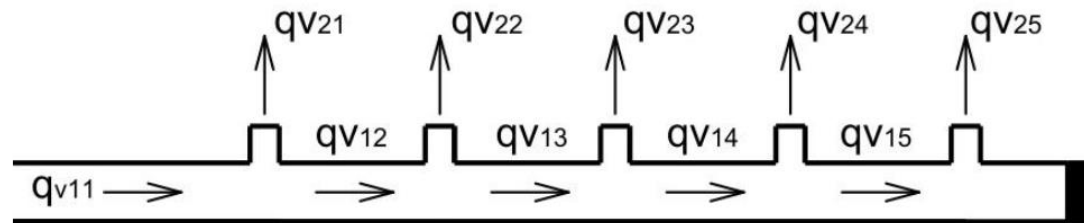
2)A huroktörvények ekkor nem teljesülnek → korrekció

Hurkonként egy-egy korrekciót alkalmazunk – módosítva az ágáramokat. A csomóponti törvények nem sérülhetnek a korrekció hatására.

A hurkok közös ágaiban a korrekció az egyik hurokból nézve más, mint a másik hurokból ⇒ a hálózaton többször végig kell haladni a megkívánt pontosság eléréséig (iteráció).

Elosztócsövek

Épületgépészetben és energetikai rendszerekben gyakran alkalmazott, fontos elem:
Elosztócső



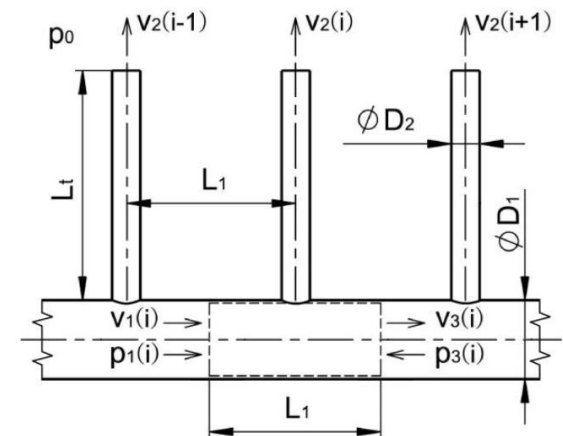
Alkalmazási példák: szellőzőrendszerek, hőcserélők, stb...

Az elosztórendszerek tervezésénél az egyik alapvető szempont rendszerint a folyadék-bevezetés egyenletességének biztosítása \rightarrow egyenletes tartózkodási idő megvalósítása, nagy örvények kialakulásának elkerülése (pl.: helyiség átszellőztetése).

Sok esetben kifejezetten az örvénymentes áramlást létrehozó betáplálás a cél (pl.: Gellérthegyi víztároló).

Elosztócső modellezése, térfogatáram-eloszlás meghatározása:

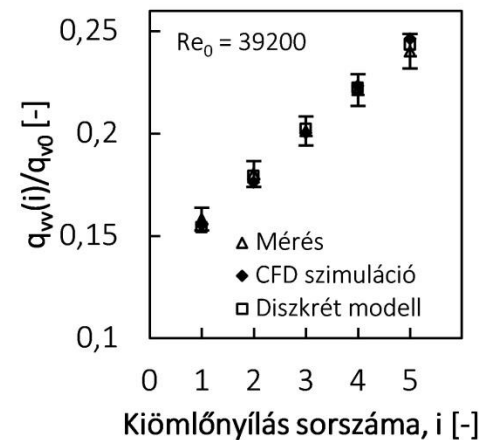
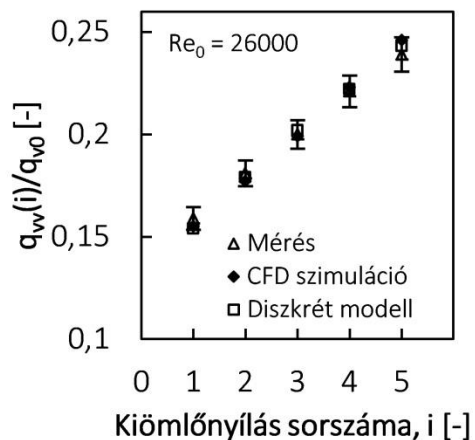
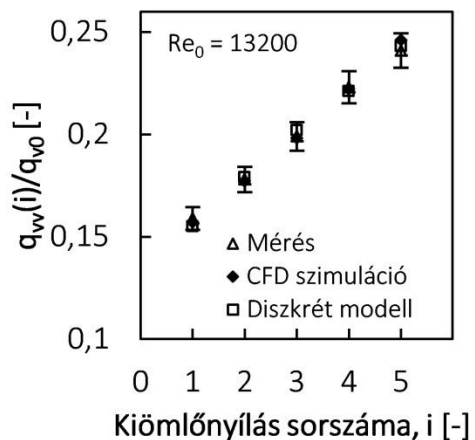
- Mérés
- CFD
- Hidraulikai modell (hurkolt hálózatmodell, diszkrét modell)



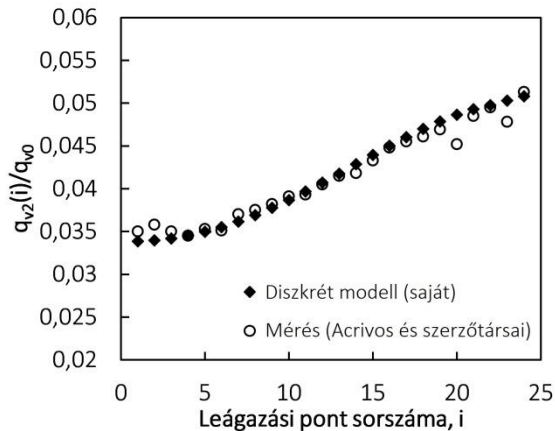
Elosztócsövek

Dimenziótlan térfogatáram-eloszlás az elosztócső mentén, ha a főág átmérője állandó és az oldalágak kialakítása azonos (és nincs kifejezetten nagy túlnyomás a főágban):

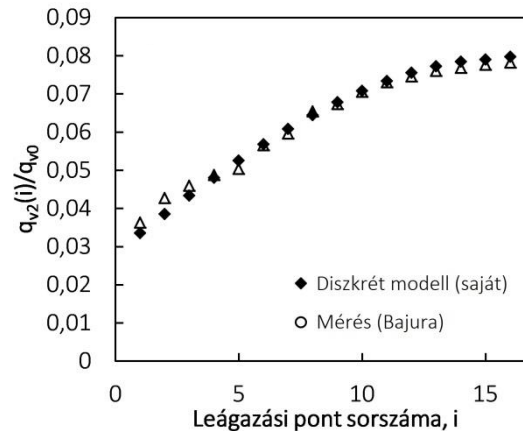
5 kiömlőnyílás:



24 leágazási pont, 24 kiömlőnyílás:



16 leágazási pont, 64 kiömlőnyílás:

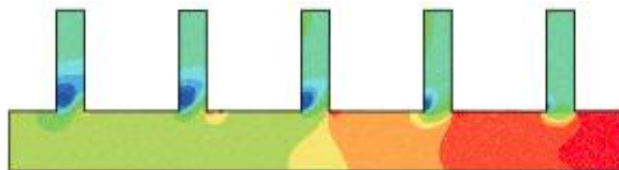


Elosztócsövek

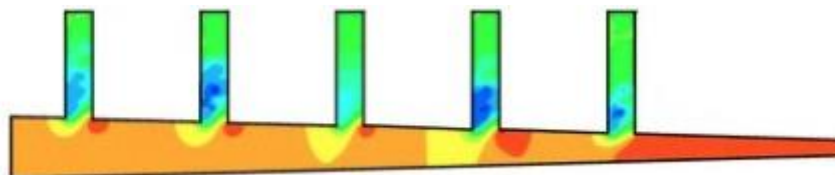
Lehetőségek az egyenletes kiáramlás biztosítására:

- Nagyobb túlnyomás alkalmazása az elosztóvezetékben (csökkentve ezzel az energiahatékonyságot)
- Változó (jellemzően csökkenő) keresztmetszetű elosztóvezeték alkalmazása

Nyomáseloszlás egy állandó keresztmetszetű elosztócső mentén:



Nyomáseloszlás egy változó keresztmetszetű elosztócső mentén:



[7] Jafar M. Hassan, Thamer A. Mohamed, Wahid S. Mohammed, and Wissam H. Alawee: Modeling the Uniformity of Manifold with Various Configurations, Journal of Fluids, Volume 2014, Article ID 325259, 8 pages

- Veszteségtényezők hangolása:
 - Leágazások hosszának változtatása a cső mentén
 - Leágazások átmérőjének változtatása a cső mentén
 - Leágazások geometriai kialakításának változtatása a cső mentén
 - Rácsozat, változtatható fojtás alkalmazása a kilépéseknél
 - Csőfal érdességének változtatása (inkább elméleti lehetőség)

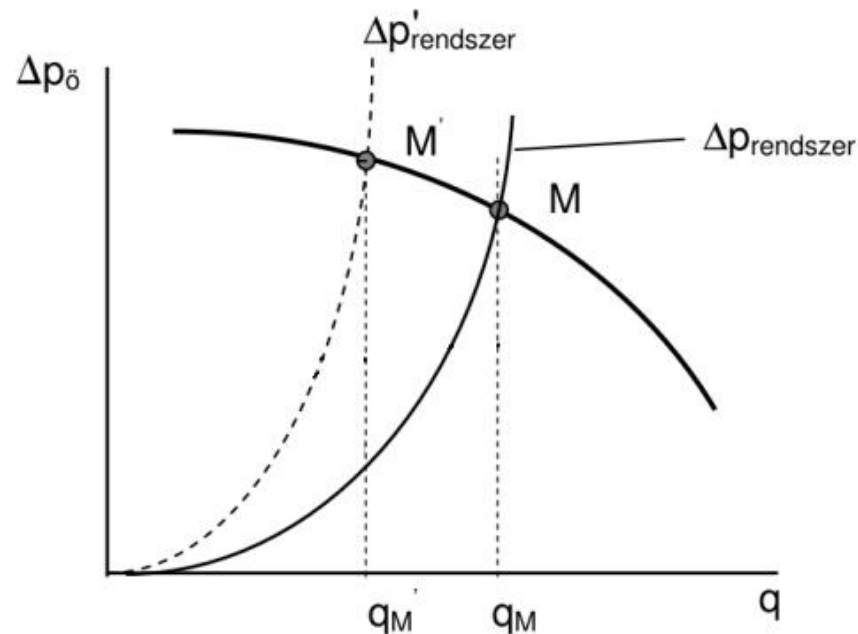
Hidraulikai rendszer

Ventilátor jelleggörbe – rendszer jelleggörbe

Metszéspont: munkapont

A hidraulikai elemek cseréjével vagy a szabályozható elemek (pl.: szelepek) állításával a rendszer jelleggörbéje eltolódik.

A fordulatszám változtatásával a ventilátor jelleggörbe tolódik el.



Tudja-e működtetni a rendszert a ventilátor? (A ventilátor kiválasztása körültekintést igényel.)
Megvan a ventilátor, de a rendszer nyomásesése túl nagy -> rendszerelemek cseréje, ha lehet.