

Dimenzování teplovodních otopných soustav

Ing. Michal Kabrhel, Ph.D.

Základní fyzikální vztahy

- * Množství tepla Q (W)

$$\dot{Q} = \dot{M} \cdot c \cdot \Delta t$$

Hmotnostní průtok (kg/s) Teplotní rozdíl (K) Měrná tepelná kapacita (J/kg.K)

Jedná se o množství energie za určité časové období. Při stacionárním posouzení kdy M je v (kg) množství tepla je v (J). Platí $1\text{kWh}=3,6 \times 10^6 \text{ J}$

- Odvozený hmotnostní průtok M (kg/h;kg/s)

$$M = \frac{Q}{c \cdot \Delta t}$$

Voda $c=4186\text{J/kg.K}=1,163\text{Wh/kg.K}$

$$M = \frac{Q}{1,163 \cdot \Delta t} = 0,86 \frac{Q}{\Delta t} \quad (\text{kg/h})$$

Neplatí pro nemrznoucí směsi.

Hydrostatický tlak

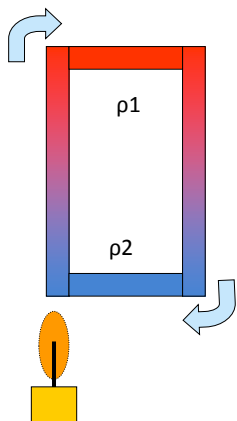
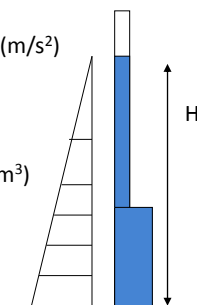
- * Hydrostatický tlak p (Pa)

$$p = H \cdot \rho \cdot g$$

Výška sloupce vody (m)

Tíhové zrychlení (m/s^2)

Hustota vody (kg/m^3)



- Vztlak p_p (Pa)

$$p_p = H \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)$$

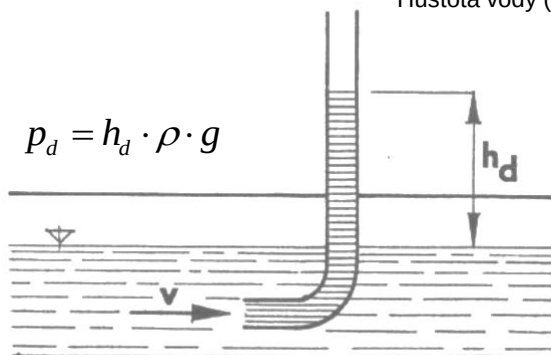
Dynamický tlak

- * Dynamický tlak p_D (Pa) - představuje energii proudící tekutiny

$$p_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2$$

Rychlost proudění vody (m/s)

Hustota vody (kg/m^3)



Tlaková ztráta

* Tlaková ztráta třením p_{zt} (Pa)

Součinitel tření $\lambda = f(Re, k/d)$

Rychlost proudění (m/s)

Délka potrubí (m)

Tlakový spád (Pa/m)

Hustota vody (kg/m³)

Průměr potrubí (m)

Dynamický tlak (Pa)

$$p_{zt} = l \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = R \cdot l$$

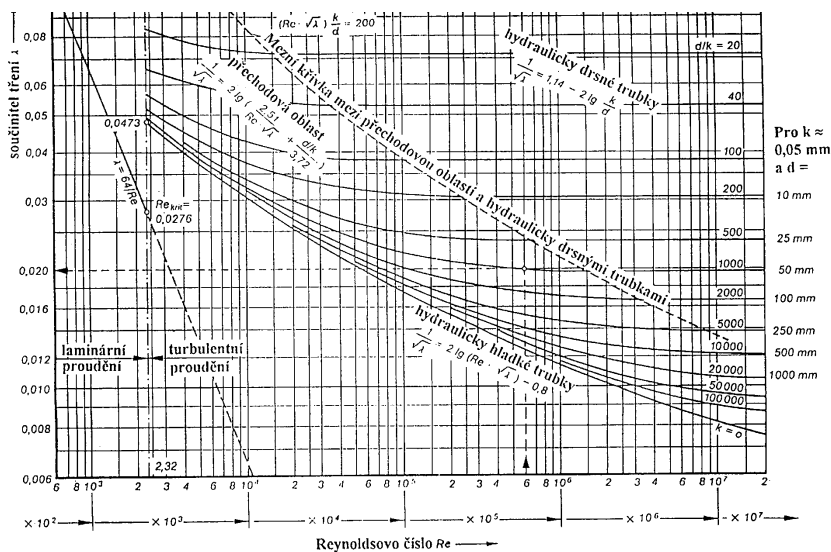
• Tlakový spád R (Pa/m)

Reynoldsovo číslo vyjadřuje způsob proudění tekutiny v potrubí. Ten je ovlivněn rychlostí proudění w a viskozitou tekutiny ν (m²/s).

$$R = \frac{8 \cdot \lambda \cdot M^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot d^5}$$

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

Stanovení součinitele tření



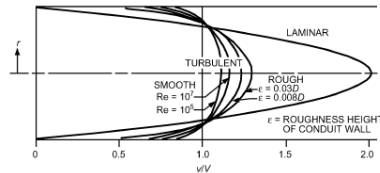
Součinitel tření

- Laminární proudění $Re < 2320$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

- Turbulentní proudění $Re > 4000$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{k}{3,71d} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right]$$



Ekvivalentní drsnost stěny potrubí (m)

- Přechodová oblast $2320 < Re < 4000$

$$\lambda = \lambda_{2320} + \frac{\lambda_{4000} - \lambda_{2320}}{4000 - 2320} \cdot [Re - 2320]$$

Tlaková ztráta

- * Tlaková ztráta třením p_{zt} (Pa)

Součinitel tření $\lambda = f(Re, k/d)$

Rychlost proudění (m/s)

$$p_{zt} = l \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = R \cdot l$$

Délka potrubí (m)

Tlakový spád (Pa/m)

Hustota vody (kg/m³)

Dynamický tlak (Pa)

Průměr potrubí (m)

- Tlakový spád R (Pa/m)

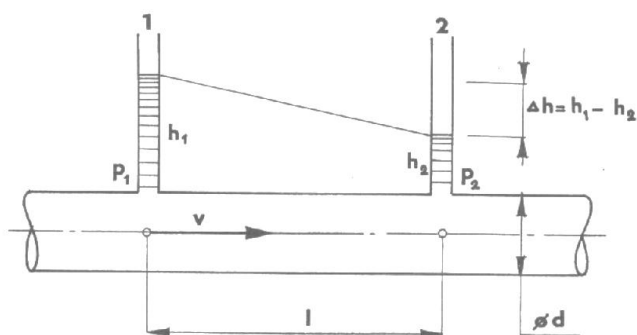
Reynoldsovo číslo vyjadřuje způsob proudění tekutiny v potrubí. Ten je ovlivněn rychlostí proudění w a viskozitou tekutiny ν .

$$R = \frac{8 \cdot \lambda \cdot M^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot d^5}$$

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

Tlaková ztráta

- * Tlaková ztráta úseku délky l



p_{zt} - závisí zejména na rychlosti proudění.

Tlaková ztráta

- * Tlaková ztráta místními odpory p_{zm} (Pa)

$$p_{zm} = \sum_{i=1}^n \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = Z$$

Rychlost proudění (m/s)

Místní ztráta (Pa)

Hustota vody (kg/m³)

Součinitel místního odporu

- Místní ztráta Z (Pa)

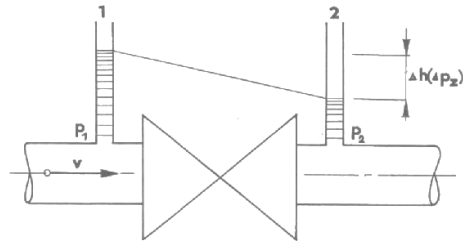
$$Z = \frac{8 \cdot \sum_{i=1}^n \xi \cdot M^2}{\pi^2 \cdot \rho \cdot d^5}$$

Zjištěn experimentálně (např. Cihelka).
Závisí na rozměrech daného prvku. Pro
armatury nyní uváděna kv hodnota.

Tlaková ztráta

- * Tlaková ztráta místními odpory p_{zm} (Pa)

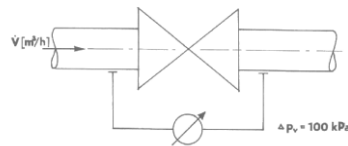
$$p_{zm} = \sum_{i=1}^n \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = Z$$



- Jmenovitý průtok armaturou k_v (m³/h)

$$\Delta p = 0,1 \cdot \left(\frac{m}{k_v} \right)^2 \quad (\text{kg/h})$$

$$k_v = \frac{10 \cdot V}{\sqrt{\Delta p_z}} \quad \begin{matrix} \leftarrow (\text{m}^3/\text{h}) \\ \leftarrow (\text{kPa}) \end{matrix}$$



Tlaková ztráta

- * Celková tlaková ztráta p_c (Pa)

$$p_{cz} = p_{zt} + p_m = R \cdot l + Z$$

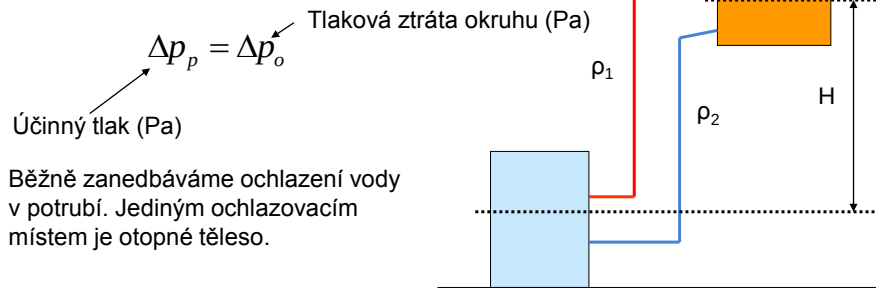
Tlaková ztráta třením (Pa)

Tlaková ztráta místními odpory (Pa)

Dvoutrubková OS s přirozeným oběhem

- * Pohyb vody v otopné soustavě (OS) zajišťuje přirozený vztlak vody způsobenými rozdílnými hustotami topného média.

$$p_p = H \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)$$

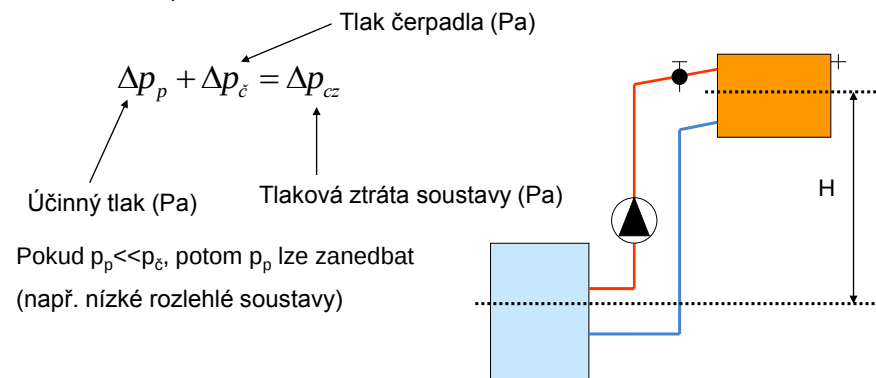


Výpočet začínáme nejnejpříznivějším okruhem.

Stanovíme předběžný tlakový spád soustavy.

Dvoutrubková OS s nuceným oběhem

- * Pohyb vody v otopné soustavě (OS) zajišťuje přirozený vztlak vody a oběhové čerpadlo.



Vysoké objekty - $T(^{\circ}\text{C})$ a $m(\text{kg/h})$ nestálé $\rightarrow$ uvažujeme 50-70% účinného tlaku.

$$(0,5 - 0,7) \cdot \Delta p_p + \Delta p_{\check{c}} = \Delta p_{cz}$$

Výpočet OS

- * Předběžný tlakový spád R_p

Dispoziční tlak (Pa) $\rightarrow$ $R_p = \frac{\Delta p \cdot (1 - a)}{\sum l}$ $\leftarrow$ Podíl místních odporů na celkové ztrátě (Pa/m)

Délka okruhu, systému (m) $\rightarrow$ $\sum l$

$$a = \frac{\sum Z}{\sum (R \cdot l + Z)}$$

Druh soustavy	a
Venkovní rozvody	0,1 - 0,2
OS v rozsáhlých budovách	0,2 - 0,3
Běžné OS v obytných budovách	0,3 - 0,4
OS po rekonstrukcích starých budov	0,4 - 0,55

Teplonosná látka	w (m/s)	Průměrná w (m/s)
OS s přirozeným oběhem	0,05 - 0,3	0,2
OS s nuceným oběhem	0,2 - 1	0,6

Metody výpočtu OS

- * Metoda optimálních rychlostí
 - * Volba ekonomické rychlosti $\rightarrow$ průměry základního úseku $\rightarrow$ tlaková ztráta — návrh čerpadla
 - * Výpočet dalších úseků dle čerpadla ($w=0,3-0,9$ m/s)
- Metoda ekvivalentních délek
 - Zejména pro dálkové horkovodní sítě (poměr d/λ při vyšších teplotách konstantní)

Ekvivalentní délka (m) $\rightarrow$ $l_{ekv} = \sum \xi \cdot \frac{d}{\lambda}$

$$p_{cz} = R \cdot (l + l_{ekv})$$

Metody výpočtu OS

- Metoda ekonomického tlakového spádu
 - Omezíme maximální rychlost
 - Výpočet provedeme dle zvoleného R (Pa/m)

Potrubní síť	w (m/s)	R_{EK} (Pa/m)
obytné budovy - přípojky k tělesům, stoupací potrubí	0,3 - 0,7	60 - 110
obytné budovy - horizontální rozvody v technických prostorech	0,8 - 1,5	110 - 200
obytné budovy - venkovní rozvody CZT	2,0 - 3,0	200 - 400
průmyslové objekty - přípojky k tělesům, stoupací potrubí	0,8 - 2,0	110 - 250
průmyslové objekty - venkovní rozvody CZT	2,0 - 3,0	200 - 400

Rámec výpočtu otopné soustavy

Vyhláška č. 193/2007 Sb. kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu

- Teplota teplé vody ≤ 90 °C (případně 115 °C)
- Teplota zpátečky ≤ 70 °C
- Vstupní teplota vody do tělesa:
 - Nucený oběh ≤ 75 °C
 - Přirozený oběh ≤ 90 °C

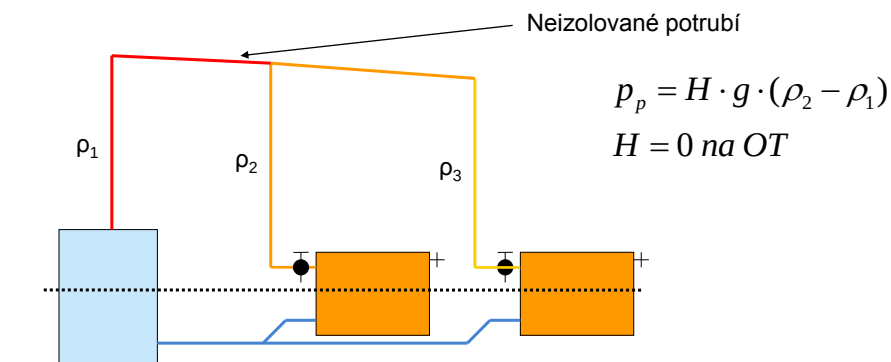
Návrh dimenzí potrubí přehled

- * Přirozený oběh
 - * metoda daného tlaku
 - * účinný tlak + přídavný vztlak
 - * etážová soustava ?
- * Nucený oběh
 - * metoda ekonomického tlakového spádu
 - * 60 až 200 Pa.m-1
 - * metoda optimálních rychlostí
 - * 0,05 až 1,0 m.s-1 (!!! Hluk)
 - * metoda daného tlaku
 - * čerpadlo + přídavný vztlak, 10-70 kPa

19

Etážová OS s přirozeným oběhem

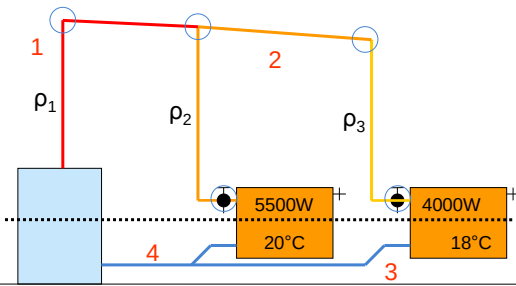
- * Otopná tělesa leží přibližně v rovině kotle.
- * Účinný tlak vyvozen ochlazením vody v potrubí.



Návrh dle předběžných rozměrů.

Kontrola tlaků nejdelšího a nejkratšího okruhu.

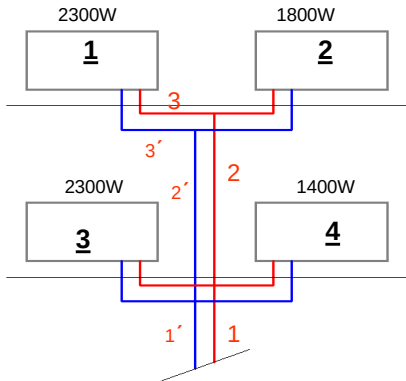
Etážová OS s přirozeným oběhem



1. Ochlazení na otop. tělesech
2. Určení ochlazovacích míst
3. Hmotnostní průtok v úsecích (tab.)
4. Předběžné dimenze (tab.)
5. Výpočet teplot v úsecích
6. Výpočet účinných tlaků
7. Kontrola tlakových ztrát

č.ú.	m	L	d	w	R	R.L	Σξ	Z	Σ(R.L+Z)
	kg/h	m	mm	m/s	Pa/m	Pa		Pa	Pa
1	418.0	5	50	0.06	1	5	1.5	3	8
2	191	10	32	0.06	1.8	18	6	11	29
3	191	8	32	0.07	1.8	14	3	7	22
4	418	5	50	0.06	1	5	2	4	9
									67

Výpočet dvoutrubkové OS



OS 85/65°C

Výpočet okruhu tělesa 1.

č.ú.	m	L	d	w	R	R.L	Σξ	Z	Σ(R.L+Z)
	kg/h	m	mm	m/s	Pa/m	Pa		Pa	Pa
1	335.0	1.4	20	0.26	55	77	1	34	111
1/	335.0	0.7	20	0.26	55	39	1	34	72
2	176	3	15	0.26	75	225	3	101	326
2/	176	3	15	0.26	76	228	1	34	262
3	99	5.5	10	0.24	95	523	3	86	609
3/	99	5.5	10	0.24	95	523	5.5	158	681
									2061

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy

* Výpočet

- * Teplotní – určuje teploty v jednotlivých otopných tělesech při výpočtových podmínkách
- * Hydraulický – určuje nastavení armatur, dimenze potrubí a parametry čerpadla

23

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy

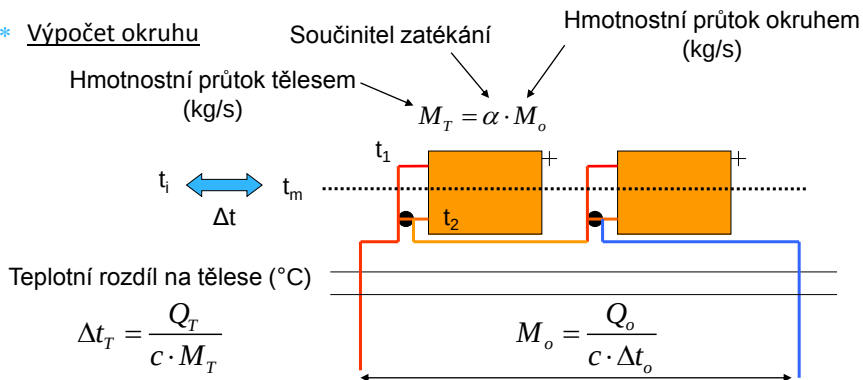
Vstupní údaje

- * Rozdělení na okruhy, způsob oběhu, zapojení (směšovací, jezdecké)
- * Tepelný výkon okruhu Q_o [W]
- * Teplotní spád okruhu δt_o [K] (10-15 K)
- * Součinitel zatékání do tělesa α [-] (0,3-0,5)

24

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy

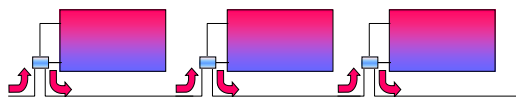
* Výpočet okruhu



Výkon tělesa - přepočet ze standardních podmínek (kW) $\rightarrow Q_T = Q_N \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^m$

Střední teplota libovolného tělesa (°C) $\rightarrow t_{mT} = t_1 - \frac{\Delta t_o \cdot \sum Q_i}{Q_o} - 0,5 \cdot \frac{Q_T}{c \cdot M_T}$

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy



1. Hmotnostní průtok okruhem M_o

$$M_o = \frac{Q_o}{c \cdot \Delta t_o}$$

2. Návrh profilu potrubí (podle R nebo v)

3. Ztráty místními odpory vyjádříme pomocí ekvivalentní délky l_{ekv}

$$l_{ekv} = \sum \xi \cdot \frac{d}{\lambda}$$

4. Výpočtová délka okruhu L

$$L = l + l_{ekv}$$

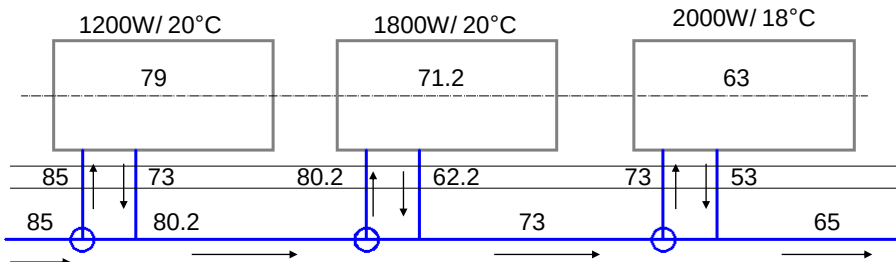
5. Tlaková ztráta okruhu Δp_c ,
n - počet těles, Δp_u - tlaková ztráta uzlu tělesa

$$\Delta p_o = L \cdot R + n \cdot \Delta p_u$$

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy

OS 85/65°C, $Q_0=5000\text{W}$

$$t_{1T} = \alpha_T \cdot t_1 + (1 - \alpha_T) \cdot t_2$$



	Q_T	t_i	α_T	M_T	Δt_T	t_{1T}	t_{mT}
	W	°C	---	kg/h	°C	°C	°C
1	1200	20	0.4	86	12	85	79
2	1800	20	0.4	86	18	80.2	71.2
3	2000	18	0.4	86	20	73	63

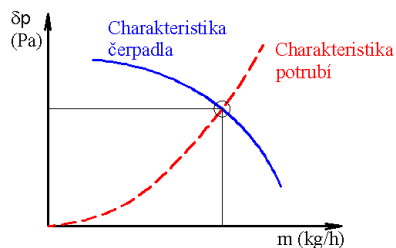
Návrh čerpadla

- * Hmotnostní průtok + dopravní tlak
- * Návrh čerpadla dle výkonu

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot H}{\eta} = \frac{\Delta p \cdot V}{\eta}$$

Jmenovitý výkon čerpadla (W) Dopravní tlak (Pa) Dopravní množství (m^3/s) Účinnost čerpadla (W)

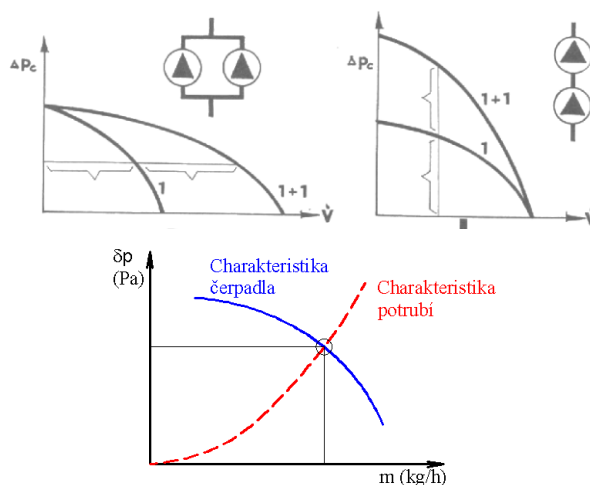
Skutečný výkon čerpadla zvolit o 10-20% větší než vypočtený.



1m v.s.=10kPa
Pozor na tlakové ztráty
termostatických ventilů a jejich
hlučnost (do 20kPa).

Návrh čerpadla

* Návrh čerpadla



Výpočetní programy

- * **Komerční** - zpravidla kvalitní profesionální řešení, stabilní verze programu, podpora v případě chyby programu, odborná školení, otevřená databáze výrobků.
- * **Firemní** – databáze výrobků omezeny, velké rozdíly v kvalitě a podpoře uživatelů, obtížné řešení chyb. Kvalita závislá na verzi.
- * **Ostatní** – zcela individuálně hodnotitelné. Studentské programy, pomůcky projektantů.

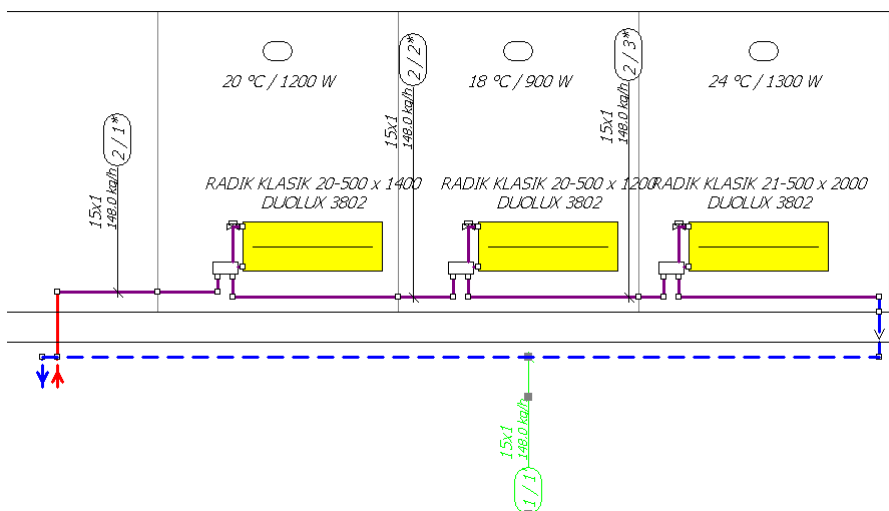
Pouze textový výstup X Textový i grafický výstup

Kvalita programu předběžně posouditelná dle úrovně manuálu a uvedení příkladů řešení a verze programu.

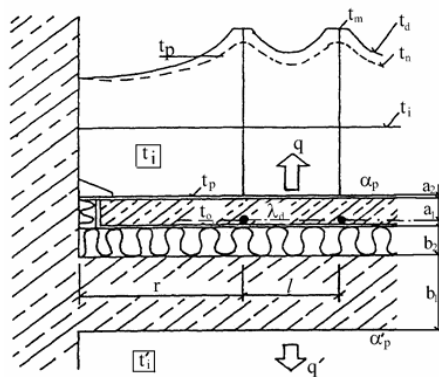
Výpočetní programy

	Typ	větev	úsek	hm.tok [kg/h]	délka [m]	DN [mm]	R [Pa/m]	dP třením [Pa]	w [m/s]	vřaz. odp.	dP vřaz. odp.	dP suma [Pa]	t1 °C	t2 °C
1	P	Copper	1	1	250.4	1.00	18	111	0.36	0.0	0	111	80.0	80.0
2	P	Copper	1	2	128.0	3.30	15	92	0.28	0.3	11	313	80.0	79.8
3	P	Copper	1	3	70.6	1.19	12	113	0.26	3.0	96	231	79.8	79.7
4		Vent.vl.						kv=0.41	nast: 4	2.0		3137		
5	P	Copper	1	4	57.4	0.81	12	79	0.21	3.0	64	127	79.8	79.7
6		Vent.vl.						kv=0.32	nast: 4	1.3		3397		
7	P	Copper	1	5	69.9	1.10	12	111	0.25	2.0	63	185	80.0	79.9
8		Vent.vl.						kv=0.37	nast: 4	1.7		3703		
9	P	Copper	1	6	52.5	0.91	12	68	0.19	2.0	35	97	80.0	79.9
10		Vent.vl.						kv=0.27	nast: 4	1.0		3958		
11	Z	Copper	1	1'	250.4	1.00	18	116	0.35	0.0	0	116	60.0	60.0
12	Z	Copper	1	2'	128.0	3.30	15	96	0.27	1.1	40	358	60.1	60.0
13	Z	Copper	1	3'	70.6	1.34	12	120	0.25	3.0	95	256	60.2	60.1
14		VEKOLUX						kv=1.48				236		
15	Z	Copper	1	4'	57.4	1.26	12	83	0.21	3.0	63	168	60.2	60.1
16		VEKOLUX						kv=1.48				156		
17	Z	Copper	1	5'	69.9	1.26	12	118	0.25	1.5	47	195	60.2	60.1
18		VEKOLUX						kv=1.48				231		
19	Z	Copper	1	6'	52.5	1.34	12	72	0.19	1.5	26	122	60.2	60.1
20		VEKOLUX						kv=1.48				130		

Výpočet jednotrubkové otopné soustavy



Podlahové vytápění



$$Q_{PC} = S_p \cdot (q + q')$$

Q_{pc} - tepelný příkon otopné plochy

$$q = \alpha_p \cdot (t_p - t_i)$$

t_p - závisí na rozteči trubek l

$$q' = \Lambda_b \cdot \frac{\alpha_p'}{\Lambda_a} \cdot (t_p - t_i) + \Lambda_b \cdot (t_i - t_i')$$

Λ - tepelná propustnost vrstev nad a pod trubkami

t_m - střední teplota teplé vody

t_p - střední povrchová teplota podlahy

t_i - teplota vzduchu

$t_p = 27$ až 28 °C u místností pro trvalý pobyt (obytné místnosti, kanceláře)

$t_p = 30$ až 32 °C u pomocných místností, kde člověk jen příležitostně přechází (předsíně, chodby, schodiště)

$t_p = 32$ až 34 °C u místností, kde člověk převážně chodí bos (plovárny, lázně, koupelny)

Závěr

Michal Kabrhel
michal.kabrhel@fsv.cvut.cz