

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV**



**PROBLEMATIKA TLAKOVÝCH ZTRÁT  
TVAROVEK PŘI PROJEKCI VZDUCHOTECHNIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vypracoval:**

**Bc. František Augustin**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Miroslav Urban, Ph.D.**

**Školní rok:**

**2020/2021**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Augustin Jméno: František Osobní číslo: 456781Zadávající katedra: K125 – Katedra technických zařízení budovStudijní program: MagisterskýStudijní obor: Budovy a prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Problematika tlakových ztrát tvarovek při projekci vzduchotechnikyNázev diplomové práce anglicky: Issue of pressure losses of duct fittings in the design of ventilation

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce bude obsahovat tyto jednotlivé části:

1. Rešeršní část v rozsahu:

Teoretická část – shrnutí základních typů tvarovek a potrubí používaných pro VZT rozvody, přístup k dimenzování VZT rozvodů, teoretický výpočet tlakových ztrát.

Praktická část – způsoby výpočtu tlakových ztrát vybrané větve z projektové části DP, vycházející z různých zdrojů hodnot  $\xi$  a dalších výpočtových SW s následným vyhodnocením.

2. Projektová část v rozsahu: na základě závěrů rešeršní části bude zpracovaný projekt vzduchotechniky.

- výpočtová část (výpočet tl. ztrát potrubní sítě, návrh dimenzí, akustické posouzení)

- výkresová část (půdorysy, řezy, detaily)

- textová část (technická zpráva)

Seznam doporučené literatury:

Chyský, Hemzal - Větrání a klimatizace-technický průvodce

Günter Gebauer, Helena Horká a Olga Rubinová - Vzduchotechnika

ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001, ASHRAE, Atlanta.

RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., SCHRAMEK, E. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miroslav Urban, Ph.D.Datum zadání diplomové práce: 21.9.2020Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

# SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: František Augustin

Název diplomové práce: Problematika tlakových ztrát tvarovek při projekci vzduchotechniky

Základní část: Rešerše a projektové řešení podíl: 100 %

Formulace úkolů:

Rešerše: Problematika tlakových ztrát tvarovek při projekci vzduchotechniky - porovnání výpočetních přístupů. Budou porovnány způsoby výpočtu tlakových ztrát vybrané větve z projektové části DP, vycházející z různých zdrojů hodnot  $\xi$  a dalších výpočtových SW s následným vyhodnocením

Projekt: předmětem projektu bude zpracování projektové dokumentace vzduchotechniky s přihlédnutím ke zjištěním výplývajícím z rešerše. Rozsah projektu bude předpokládat podrobnou dokumentaci vč. výpočtové části.

Podpis vedoucího DP: ..... Datum: .....

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Jilemnici, dne 31.12.2020

---

František Augustin

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé DP, panu Ing. Miroslavu Urbanovi, Ph.D., za odborné vedení v projektech během magisterského studia. Obrovský dík patří rodičům za finanční podporu při studiu a přítelkyni za trpělivost. V neposlední řadě také všem blízkým a spolužákům.

## Obsah

0	Úvod.....	3
1	Teoretická část .....	5
1.1	Rozvody vzduchotechniky .....	5
1.1.1	Přímé potrubí.....	5
1.1.2	Tvarovky potrubí.....	24
1.2	Výpočet potrubní sítě.....	34
1.2.1	Základní rovnice.....	34
1.2.2	Proudění vzduchu potrubím .....	35
1.2.3	Metodika návrhu vzduchovodů.....	36
1.2.4	Tlakové ztráty.....	39
2	Praktická část .....	42
2.1	Výpočetní způsoby .....	42
2.2	Výpočet externí tlakové ztráty.....	46
2.3	Vyhodnocení.....	46
3	Závěr .....	49

## **Anotace:**

Diplomová práce se zabývá tématem vzduchotechnických rozvodů nuceného větrání v obytných budovách a jejich výpočty.

Rešeršní část shrnuje základní informace o používaných typech potrubí a tvarovek. Stručně je popsán přístup k dimenzování potrubní sítě a teoretický postup výpočtu tlakových ztrát. Závěrem jsou porovnány různé způsoby výpočtu tlakových ztrát na konkrétním příkladu.

Druhá část práce řeší návrh projektu vzduchotechniky horského hotelu ve stupni pro provedení stavby.

Cílem práce je poukázat na odlišné hodnoty součinitelů vřazených odporů z různých zdrojů a jejich možný vliv na návrh a energetickou spotřebu ventilátoru.

**Klíčová slova:** *větrání, vzduchotechnika, potrubí, tvarovky, tlakové ztráty*

## **Abstract:**

This diploma thesis deals with ductwork of mechanical ventilation systems in residential buildings and its related design calculations.

The research part summarizes the basic info about the main types of ducts and duct fittings. The approach for designing duct systems along with theoretical calculation of pressure losses are briefly described. Various pressure loss calculation methods were compared on a particular case.

The second part of this thesis contains a detail design documentation of ventilation system in a mountain resort hotel.

The aim of this work is to point out varying values of pressure loss coefficients of duct fittings from different sources and their potential effect on design and energy consumption of a fan.

**Key words:** *ventilation, ventilation system, ductwork, duct fittings, pressure loss*

## 0 Úvod

V současné době je projekt vzduchotechniky nedílnou součástí projektové dokumentace téměř každé novostavby. To se odvíjí od skutečnosti, že v březnu roku 2020 se promítla do našich národních předpisů směrnice 2018/844/EU (EPDB III) o energetické náročnosti budov, která požaduje, aby veškeré projekty novostaveb byly budovami s téměř nulovou spotřebou energie. Tento pojem představuje nejen vysoké nároky na kvalitu obálky budovy, ale vyžaduje také nízkou energetickou náročnost technických systémů. Nová směrnice zároveň klade důraz na kvalitu vnitřního prostředí. Z toho vyplývá, že zabývat se projektem vzduchotechniky v obytných budovách by mělo být klíčové již od samotného počátku návrhu.

Systém řízeného větrání je jeden z ukazatelů energetické náročnosti budovy dle hodnocení PENB. V porovnání se systémem osvětlení nebo vytápění, je větrací systém pocitově nejméně postřehnutelný, nicméně na rozdíl od svítidel či otopných těles funguje téměř nepřetržitě. To je samozřejmě doprovázeno neustálým chodem ventilátoru, který se při nesprávném návrhu může negativně projevit na výsledné účinnosti technických systémů budovy a navyšovat tak hodnotu celkové roční dodané energie. V chladných oblastech může energetická spotřeba ventilátorů v moderních budovách tvořit 15 až 20 % celkové spotřeby energie budovy. [1]

Vysoká potřeba energie pro pohon ventilátoru se odvíjí od počtu jeho otáček, které se mohou měnit v závislosti na proměnném požadavku průtoku vzduchu a s ním související tlakové ztráty. Tomu se dá předejít již při samotném konceptu systému větrání. V první řadě je důležité navrhnout bilanci výměny vzduchu takovou, aby splňovala nezbytné hygienické a vlhkostní požadavky, ale zároveň je výrazně nepřevyšovala. Z takto předem určených a redukováných průtoků pak vyplývá hospodárny návrh rozměrů potrubí a rychlost proudění větracího vzduchu. Neméně důležitými faktory jsou členitost a délka trasy vzduchovodů, které jsou zpravidla hlavním zdrojem externí tlakové ztráty sítě.

Mimo potrubních ztrát třením, tvoří převážnou část tlakové ztráty hlavně vřazené odpory. Pokud se jedná o komerční tvarovky se specifickou funkcí, které jsou v projektu méně četné (tlumiče, klapky, ohřívače aj.), jsou jejich rozměry přesně popsány a součinitel místní ztráty lze odečíst z technických podkladů od výrobce. Tyto hodnoty bývají stanoveny na přesných zkušebních tratích a vzhledem k nízkému počtu zkoušených vzorků se dá počítat s relativně vysokou přesností měření a získaných výsledků.



Nicméně v projektu se vyskytují také tvarovky potrubí, které zde figurují v daleko vyšším počtu, např. kolena, přechody, rozbočky, odbočky apod. Na rozdíl od výše zmiňovaných komponentů jsou výrobně jednodušší a tím pádem i tvarově rozmanitější. Ty nejpoužívanější lze dohledat v odborných publikacích, kde jsou uvedeny s jasně definovanými rozměry a jejich hydraulickými vlastnostmi, které vyjadřuje součinitel místní tlakové ztráty  $\xi$  (-).

Problémem ale je, že některé hodnoty  $\xi$  se v různých publikacích liší, i když by se mělo jednat o totožné tvarovky. Zároveň se často vyrábějí specifické kusy na zakázku a sjednotit, popsat, laboratorně změřit a doplňovat všechny rozměrové varianty do jednoho souboru je takřka nadlidský úkol.

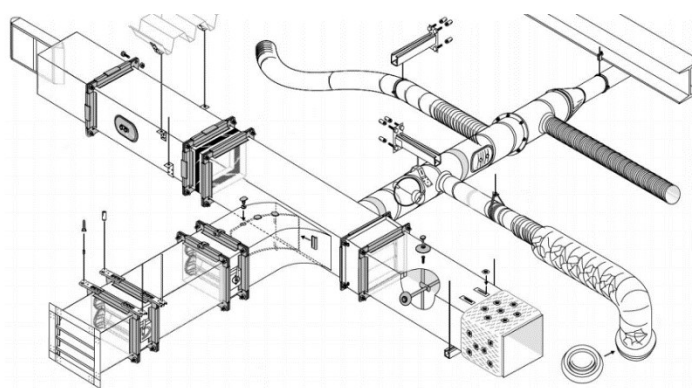
Existuje proto více různých zdrojů, z kterých lze, při výpočtu tlakové ztráty sítě, vycházet. Jako obecně nejsprávnější jsou považována data, která publikoval Idelchick již v roce 1960 a jehož výsledky měření některých tvarovek jsou doposud uváděny i v Handbook of ASHRAE. Dalším podkladem pro výpočet, s poněkud odlišnými hodnotami  $\xi$ , může být například německý průvodce vytápěním a klimatizací (Schramek, Recknagel). [2] Z výše zmiňovaných publikací čerpají data také některé výpočetní softwary a ostatní psané zdroje. Projektant vzduchotechniky se proto při výpočtu potrubní sítě ocitá v nejasné situaci. K dispozici má několik způsobů, jak určit výslednou tlakovou ztrátu, která by měla předurčit návrh ventilátoru a zaregulování soustavy, ale není pevně stanoveno, z kterého zdroje vycházet.

Cílem práce tedy bude doporučit, ale především přiblížit různé možnosti výpočtu tlakových ztrát a upozornit na možný dopad jejich odlišných výsledků, které by se projeví na výsledném návrhu a energetické spotřebě ventilátoru.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Rozvody vzduchotechniky

Vzduchovody jsou stěžejní částí každého systému vzduchotechniky. Slouží k dopravě čerstvého vzduchu od ventilátoru až k uživateli a odvádí znehodnocený vzduch ven z budovy. Ze všech zařízení techniky prostředí, jsou tou rozměrově nejobjemnější složkou, což vyžaduje nezbytnou koordinaci rozvodů zejména s profesí stavby – rozměrné instalační šachty, světlá výška, prostor v podhledu apod. Historicky prošly vzduchovody řadou materiálových, výrobních i montážních změn, které se odvíjí od nároků současných budov na kvalitu prostředí a celkového zjednodušení výrobního a montážního procesu. Konkrétně lze hovořit například o nahrazování azbestocementových komponentů za kovové a plastové materiály, vzestup výrobních CNC strojů nebo výhradně kluzné ukládání vzduchovodů pro omezení přenosu hluku a vibrací. Správný návrh větracích rozvodů se projeví nejen na koncovém uživateli, který vnímá zejména subjektivní pocit přítomnosti čerstvého vzduchu, ale také například tichým provozem, částečnou bezúdržbovostí, vysokou mechanickou a chemickou odolností nebo nízkými náklady na provoz.



Obrázek 1. Ilustrační obrázek.

### 1.1.1 Přímé potrubí

V této podkapitole budou popisovány pouze přímé potrubní prvky. Z hydraulického hlediska mají jednu společnou vlastnost a tou je, že do výsledné externí tlakové ztráty přispívají pouze jejich třecí složkou.

#### 1.1.1.1 Kruhové kovové potrubí

*Obecně*

Zřejmě první věcí, která se laikovi vybaví, když se řekne pojem vzduchotechnika, je právě potrubí kovového vzhledu s kruhovým průřezem. V porovnání se čtyřhranným potrubím je

výhodnější hned v několika ohledech. Jedním z nich je výrobní cena. Je to dáno jednak jednodušším a rychlejším procesem výroby, ale také nižší spotřebou materiálu díky menšímu obvodu jinak obsahově stejných průřezů. Menší obvod průtočné plochy působí kladně také z aerodynamického hlediska, kdy menší plocha vnitřního potrubí přirozeně klade menší odpor proudícímu vzduchu a lze tak při výpočtu dosáhnout nižší hodnoty tlakové ztráty. Zároveň jsou menším zdrojem aerodynamického hluku a je proto možné dimenzovat potrubí na vyšší dopravní rychlost. Méně se zanášejí prachem a mastnotou. Vzniklé montážní spoje vykazují vyšší těsnost. V neposlední řadě je důležité zmínit mnohem jednodušší způsob montáže a s ní spojenou cennou úsporu času a peněz. Zmiňované výhody jsou podrobněji porovnány s potrubím čtyřhranného průřezu v následující tabulce.

Tabulka 1. Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým pro stejný průtok  $2600 \text{ m}^3/\text{h}$  a stejný průřez  $0,12 \text{ m}^2$ . [3]

průřez potrubí	rozměr	obvod	poměr stran	hmotnost	tlaková ztráta	cena montáže
-	m	%	-	%	%	%
kruhový	$d = 0,4$	89	-	66	90	66
čtvercový	$0,355 \times 0,355$	100	1,0	100	100	100
obdélníkový	$0,25 \times 0,5$	106	2,0	116	107	114
	$0,16 \times 0,8$	135	5,0	158	143	174
	$0,1 \times 1,25$	190	12,5	231	222	350

### Výroba

Velkovýroba kruhových vzduchovodů probíhá především na automatizovaných strojích. Nejčastější výrobní materiál je pozinkovaný plech v tloušťce od 0,5 až 1,5 mm s vrstvou pozinkování  $275 \text{ g/m}^2$ . Tloušťka záleží na vyráběném průměru potrubí. Dle charakteru větraného prostoru je pak možno navrhnout varianty například z nerez, hliníku, mědi nebo aluzinku. Jmenovité rozměry průřezu jsou standardizovány –  $d = 63, 80, 100, 125, 140, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800, 2000, 2250, 2500$  (mm).



Obrázek 2. Kruhové potrubí, ilustrační foto.

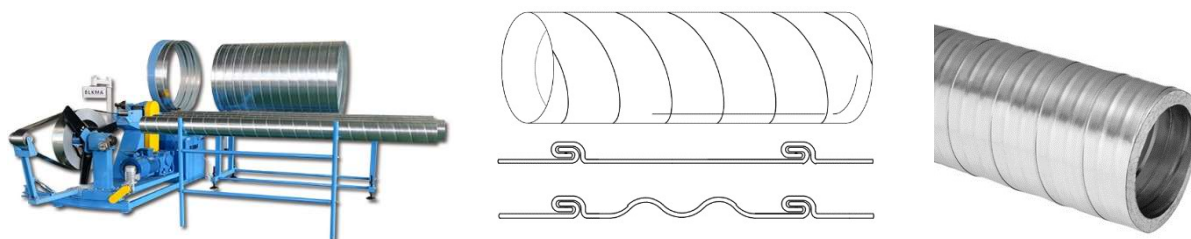
Hladké kruhové potrubí se zakružuje z tabule plechu, která zároveň předurčí jeho výslednou délku – standardně 500 až 1000 mm. Výrobní podélný spoj se spojuje švovým odporovým svařováním nebo falcováním ležatého drážkového lemu, kterému ale musí předcházet jeho samotné tvarování. Celý proces výroby tak v obou případech vyžaduje nezbytnou složku lidské obsluhy. Potrubí s podélně svařovaným spojem je vhodné pro velké průměry nebo větší tloušťky plechu. Výrobní průměr může být až do  $d = 2250$  mm.



Obrázek 3. Hladké kruhové potrubí – zakružovací stroj; ležatý lem před falcováním; falcování podélného spoje.

Asi nejrozšířenějším typem vzduchovodu je tzv. spiro potrubí. Vyrábí se šroubovitým stáčením z cívky plechu šířky 137 mm. Výrobní délka může být libovolná, avšak záleží na délce podpěrného stolu a přepravních možnostech, nejběžněji však 3000 mm. Průměry mohou být od 63 až 1600 mm. Celý proces výroby probíhá výhradně automaticky na CNC stroji, včetně konečného dořezu plazmovou řezačkou nebo kroužkovým nožem. Spiro potrubí může být stáčeno bez nebo s dvojitým prolisem, který dodatečně zvyšuje jeho mechanickou odolnost a tuhost.

Zajímavým a praktickým řešením je předizolovaná verze spiro potrubí již z výroby. Vyrábí se v provedení s jednoduchou vnější nebo dvojitou stěnou, které kryjí izolaci před vnějším namáháním. Takto izolované potrubí má především akustické a tepelně technické benefity. Omezuje šíření hluku od ventilátoru a proudění a umožňuje tak počítat s vyšší dopravní rychlostí. Odpadá povinnost aplikovat při montáži izolaci, která zabraňuje kondenzaci na povrchu. V případě jednostranného obložení je izolace opatřena akrylovým nátěrem, který zamezuje šíření plísně a bakterií uvnitř vzduchovodu.



Obrázek 4. Spiro potrubí – výrobní stroj; detail výrobních spojů; předizolované potrubí s dvojitou stěnou.

## Montáž

Návrh montážních závěsů se odvíjí od délky, průměru a tloušťky použitého plechu potrubí. Nejčastěji se používají kruhové závěsy, které jsou proloženy EPDM tlumící gumou. Jsou přichyceny k závitovým tyčím, pomocí kterých se provádí výškové a horizontální vyrovnání. Závitové tyče se kotví do montážních kovových profilů nebo přes spojovací matice na svorníkovou kotvu v nosné konstrukci. Jejich výhodou je možnost jak vodorovné, tak svislé instalace například v instalačních šachtách.

Pokud je kruhové potrubí použito jako páteřní rozvod od střešní jednotky, ukotvuje se taktéž do kruhových závěsů, které jsou kotveny do montážní konstrukce na střešních patkách.

Další možností je použití pozinkovaných ZV závěsů, které se upevňují k hřbetu potrubí pomocí samovrtných šroubů. Do nosné konstrukce jsou ukotveny stejným způsobem jako kruhové závěsy. Nevýhodou je, že umožňují pouze vodorovnou instalaci. ZV závěsy sice obsahují tlumící prvek, ale z hlediska přenosu vibrací jsou méně vhodné. Jednoduchou montáž dále představuje použití např. závěsných pásek nebo závěsných ocelových lanek.



Obrázek 5. Závěsy kruhového potrubí – kruhový závěs; ZV závěs; perforovaná montážní páska.

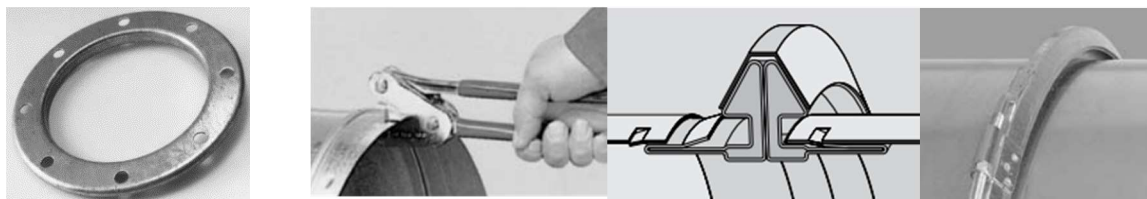
## Spojování

Montážní spoje potrubních prvků a tvarovek mohou být přírubové nebo nepřírubové. Příruby se vyrábějí lisované nebo úhelníkové. Rozměry kruhových přírub jsou podrobněji předepsány v ČSN EN 12220.

Lisovaná příruba se k potrubí může upevnit bodovým svařováním, nýty nebo samovrtnými šrouby. Následně se styčné plochy přírub spojují šrouby M8 až M10 s vloženým těsnícím materiálem, kterým nejčastěji bývá neoprenová nebo butylová páska.

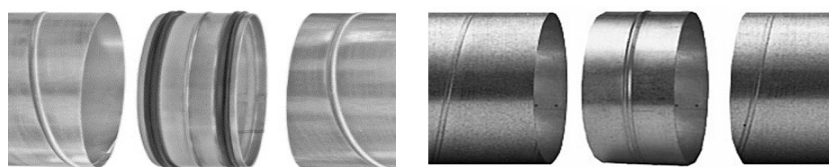
Úhelníkové příruby se k potrubí upevňují na lem nebo na místě vytvořenými prolisy v potrubí od speciálních kleští. Následné spojení je provedeno stahovacím kruhem bez nutnosti použití dalších spojovacích prvků. Využití nacházejí příruby zejména u velkých průřezů z těžšího plechu.





Obrázek 6. Montážní spoje kruhového potrubí – Lisovaná příruba; příprava prolisů a stahovací kruh úhelníkové příruby.

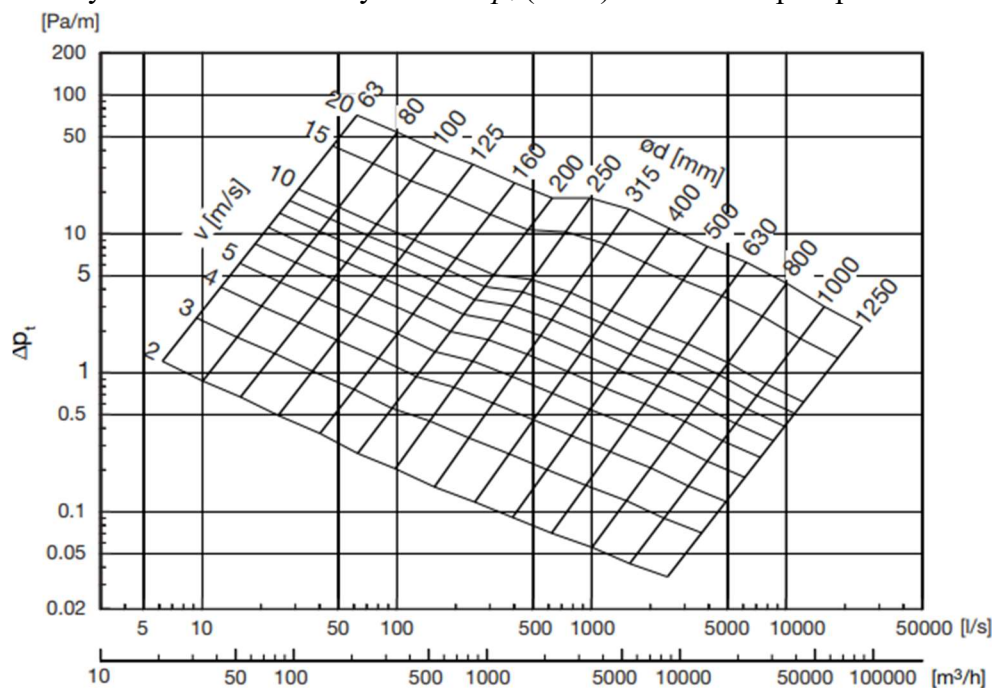
Častějším způsobem spojování jsou bezpřírubové spoje, kdy se využívá vsuvných spojek. Spojky mohou být dodatečně opatřeny dvojbrýtým nebo kruhovým těsněním z EPDM pryže. Jejich zajištění v troubě je provedeno samovrtnými šrouby nebo zacvakávacími zámky. Řešení je výhodné zejména jeho rychlou montáží a je-li provedeno správně, tak i vysokou třídou těsnosti D (Eurovent). V případě použití spojek bez těsnící gumy je nutno opatřit spoj samolepící hliníkovou páskou. Požadavky týkající se pevnosti a těsnosti kovového potrubí kruhového průřezu jsou uvedeny v ČSN EN 12237.



Obrázek 7. Vsuvné spojky s těsněním a bez těsnění.

### Tlakové ztráty

Z hydraulického hlediska mají kruhové průřezy nejlepší vlastnosti. Z nomogramu níže jsou patrné hodnoty měrné tlakové ztráty třením  $\Delta p_t$  (Pa/m) kruhového spiro potrubí.



Obrázek 8. Nomogram pro určení měrné tlakové ztráty kruhového spiro potrubí.

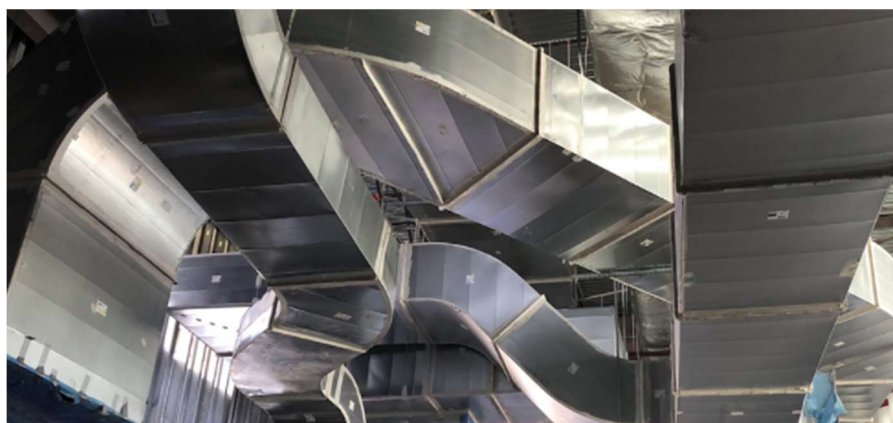
## Shrnutí

Kruhové kovové potrubí	
Výhody	Nevýhody
Snadná a rychlá výroba	Objem (vedení rozvodů, přeprava, skladování, ...)
Nízké výrobní náklady	
Snadná a rychlá montáž	
Nízké montážní náklady	
Vysoká těsnost	
Mechanická a chemická odolnost	
Aerodynamické vlastnosti	
Nízká hmotnost	

### 1.1.1.2 Čtyřhranné kovové potrubí

#### Obecně

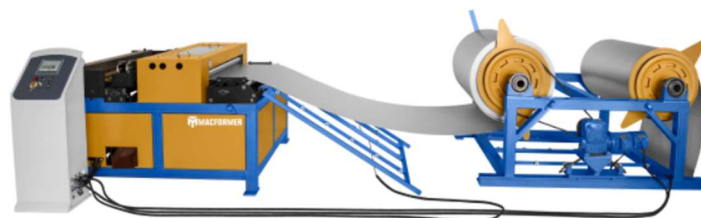
Ve srovnání s kruhovým potrubím čtyřhranné průřezy tolika výhodami nedisponují, přesto se ale stále hojně navrhuje a realizují. Je to především díky jeho rozměrovým vlastnostem. Průřez je možné navrhovat zploštělý, což umožňuje instalaci potrubí v místech, kde by kruhové průřezy použít nešlo. Mnohdy jde například o omezené prostorové možnosti ve strojovně vzduchotechniky nebo potřebu vypořádat se s dodržáním světlé výšky v podzemních garážích či umožnit vedení vertikálního rozvodu ve špatně navržené instalační šachtě. Obecně se doporučuje navrhovat rozměry stran o poměrech  $0,25 \leq A/B \leq 4,0$ . Pokud je totiž průřez moc plochý, projeví se to výrazně na výsledné tlakové ztrátě a provozních nákladech celého systému. Dříve se u nás vyráběla převážná část vzduchovodů právě čtyřhranných, protože je lze snadno vyrobit za pomoci štípaček, ohýbačky a kladiva, nicméně dnes je výroba převážně zautomatizovaná. Výrobní požadavky na pevnost a těsnost čtyřhranných vzduchovodů jsou předepsány v ČSN EN 1507.



Obrázek 9. Čtyřhranné potrubí, ilustrační foto.

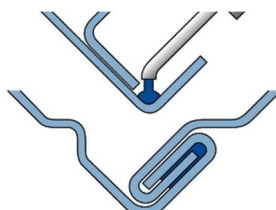
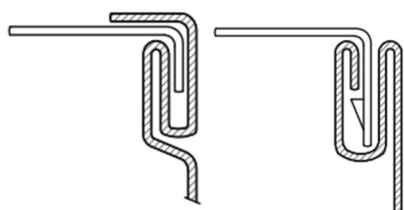
## Výroba

Převážná část potrubních prvků je z pozinkovaného plechu s vrstvou pozinkování 275 g/m<sup>2</sup>, variantní provedení mohou být například z hliníku nebo nerezové oceli. Proces výroby je v porovnání s kruhovým potrubím rozsáhlejší, alespoň co do počtu nezbytných procesů pro jeho dokončení.



Obrázek 10. Automatická linka na výrobu čtyřhranného potrubí.

Tloušťky stěn potrubí odpovídají DIN 24190 a určují se vždy podle většího jmenovitého rozměru průřezu. [4] Jmenovité světlosti dílů jsou standardizované a vyrábí se v podobných rozměrových řadách jako kruhové potrubí, nejčastěji o délce 1500 mm. Pásky plechu mohou být opatřeny trapézovými prolisy pro zvýšení tuhosti. Po zohýbání plechu na požadovaný rozměr průřezu se poté plech spojuje jedním nebo dvěma podélnými spoji – záleží, jestli jde o troubu z dvou dílů tvaru L nebo jeden zohýbaný kus plechu. Podélné spoje mohou být například typu “Pittsburgh” nebo “snaplock” s prolisy. Pro dodržení požadavků na těsnost spoje, může být lem, těsně před uzavřením, strojně opatřen tmelící hmotou.



Obrázek 11. Podélné spoje – “Pittsburgh” a “button-punch snaplock”; “Pittsburgh” spoj s tmelem; proces uzavírání lemu.

Příčné montážní spojování jednotlivých potrubních komponentů se provádí pomocí přírub. Jejich montáž probíhá již ve výrobě a jejich rozměry, počet a velikosti šroubů jsou normalizovány podle průřezu. [4] Obecně lze provádět tři typy přírubových spojů.

Jednoduchým řešením je spojení dvou protilehlých stran pomocí násuvné “C” lišty a zbylých dvou stran pomocí “S” lišty. Lišty se nasouvají na předem připravené lemy a zajistí se pouhým záhybem na sousední stranu potrubí. Vzniklý spoj tak nevyžaduje žádné další spojovací prvky.

Nejčastější metodou je spojování pomocí přírubových lišt a rohovníků. Z nich sestavený rámeček se osadí na potrubí a zajistí vruty, bodovými sváry nebo lisováním. Netěsnosti se



zatmelí akrylovým tmelem. Styčné plochy přírub se opatří neoprenovým těsněním a zajistí stahovacími svorkami nebo nasouvacími “C” lištami, příp. nacvakávací rychlospojkou. Rohy přírub se poté dodatečně zajistí M8 šrouby.

Dalším možným řešením příčného spoje je tzv. TDF/TDC systém, kde je příruba vytvarována přímo z potrubí. Pouze se zajistí nasouvacími “C” lištami, svorkami nebo vruty, dodatečně se spojí rohovými šrouby a opatří těsnícím materiálem. Sice odpadá nutnost osazení rámečku z přírubové lišty a proces výroby i montáže je tak podstatně rychlejší, ale celý spoj je tvořen pouze dvěma stěnami plechu, tudíž nemusí vykazovat takovou pevnost jako předchozí dva zmiňované spoje.



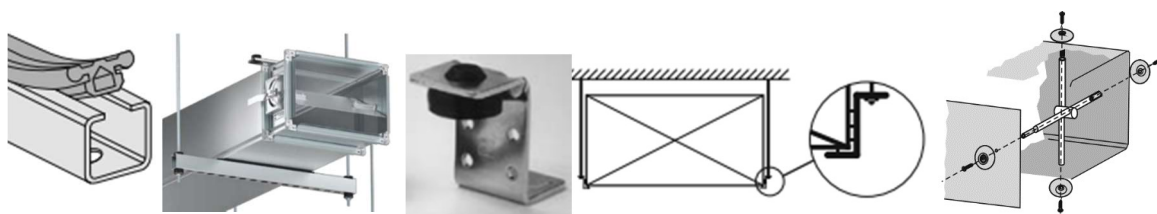
Obrázek 12. Příčné spoje – Nasuvné "C" a "S" lišty; zasunutí rohovníku do lišty; stahovací svorka; TDC bezpřírubový profil.

### Montáž

Uchycení do konstrukce je v podstatě stejné jako u kruhového potrubí. Místo kruhových objímek jsou ale používány montážní lišty s prokládanou tlumící gumou. Dalším způsobem může být použití jednoduchých ZL a ZZ závěsů. Obecně se požadavky na uložení potrubí a pevnost závěsů řídí dle ČSN EN 12236.

V potrubí o rozměru cca 1400 mm a více je nutné zamezit chvění plechových stěn, které může být způsobeno vysokou rychlostí proudění nebo dopravním tlakem. To způsobuje nežádoucí hluk, který se může šířit potrubím až k uživateli. Proto se používají příčné trubičkové výztuhy o průměru 3/8“ pro zamezení vibrací.

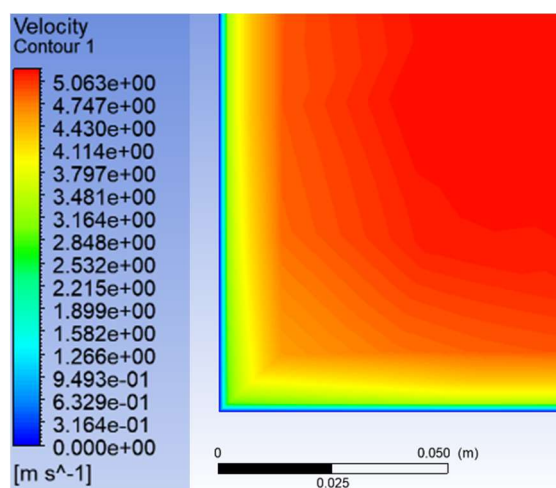
Důležitým faktorem určujícím výslednou těsnost systému a rizika s ní spjaté, je u čtyřhranných průřezů montážní kázeň. Jelikož jsou v častých případech, k provedení příčného spoje, používány přírubové lišty, je důležité dodržet správný pracovní postup a lišty precizně osadit a dodatečně dotmelit v kritických spojkách, zejména v místech spojů s rohovníky.



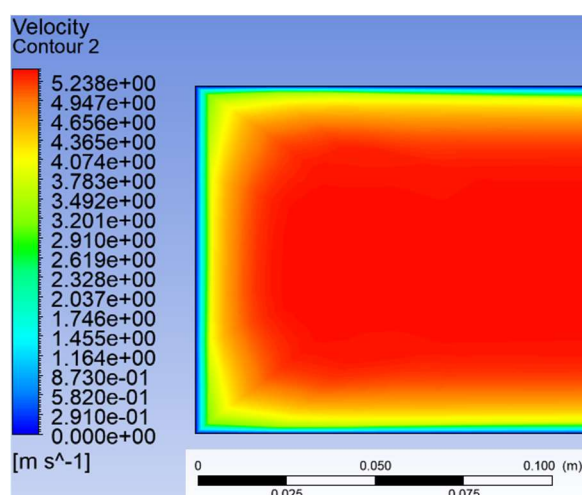
Obrázek 13. Montáž čtyřhranného potrubí – Montážní lišta; ZZ závěs; trubičková výztuha.

### Tlakové ztráty

Zřejmou nevýhodou čtyřhranného průřezu je jednak jeho větší obvod, ale hlavně ostrý tvar rohů. Lze to doložit na následujícím příkladu. Jde o potrubí z pozinkovaného plechu o rozměrech 400x250 mm ( $\varepsilon = 0,15$  mm), kde je určena počáteční rychlost proudění  $w = 5$  m/s. Právě v rozích je možné pozorovat patrný pokles průtočné rychlosti, kde dochází mimo jiné i k poklesu statického tlaku  $p_s$ , respektive k tlakové ztrátě třením  $\Delta p_t$ . Zhruba 40 mm od kraje potrubí je již vidět začínající pozvolný pokles středové rychlosti a cca 10 mm od stěny je zřejmý pokles o 1 až 1,3 m/s. Rychlost u stěn je poté nulová (podrobněji popsáno v podkapitole 1.2.2). Pro srovnání je dále uveden příklad s potrubím plochého průřezu o rozměrech 400x100 mm, kde oblast s klesající rychlostí představuje poměrně značnou část průtočného profilu.



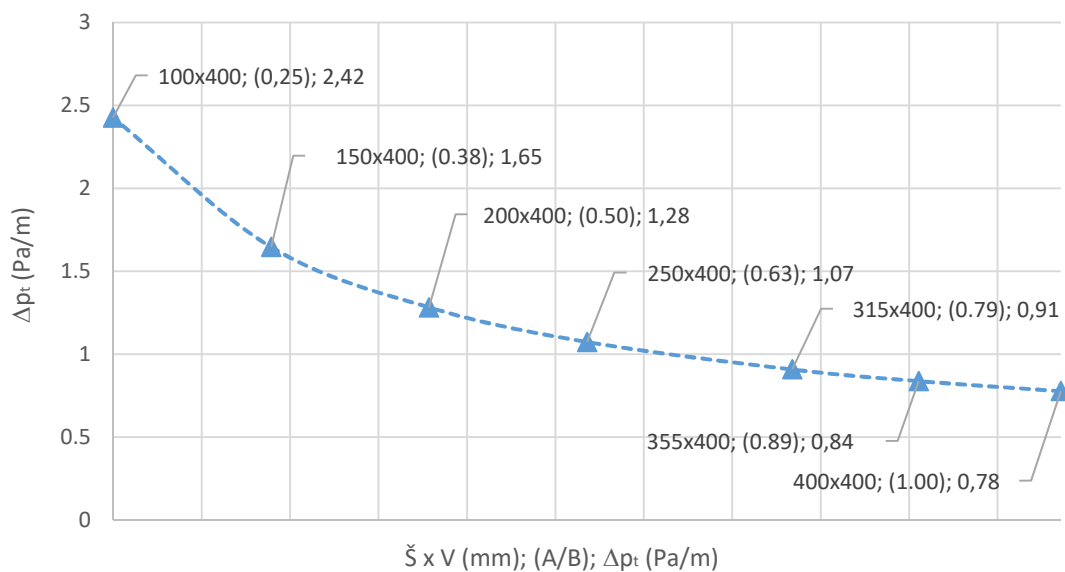
Obrázek 14. Detail rychlostního profilu v rohu potrubí 400x250 mm.



Obrázek 15. Detail rychlostního profilu v potrubí 400x100 mm.

Konkrétní hodnoty ukazuje následující příklad. Graf popisuje průběh měrných tlakových ztrát pozinkovaného potrubí ( $\varepsilon = 0,15$  mm) o různých rozměrech. Rychlost je pro všechny případy konstantní  $w = 5$  m/s a fyzikální vlastnosti vzduchu také, tudíž i dynamický tlak  $p_d$ . Z toho plyne, že hodnota ztráty třením závisí z malé části na součiniteli třecích ztrát  $\lambda$  (-), ale zejména na hydraulickém průměru  $d_h$  (podrobněji v 1.2.4.1), který je určen rozměry. Ploché průřezy tedy mohou být z hlediska úspory světlé výšky přínosné, nicméně se projeví negativně na provozních nákladech a případné produkci nežádoucího hluku.

Podrobný popis výpočtu tlakové ztráty třením je popsán v podkapitole 1.2.4.1.



Graf 1. Měrná tlaková ztráta čtyřhranných průřezů o rychlosti  $w = 5 \text{ m/s}$ .

## Shrnutí

Čtyřhranné kovové potrubí	
Výhody	Nevýhody
Nízký průřez (adaptace stavbě)	Složitější a delší proces výroby
Mechanická a chemická odolnost	Vyšší výrobní náklady
	Složitější a delší proces montáže
	Vyšší montážní náklady
	Lidský faktor při montáži (těsnost)
	Aerodynamické vlastnosti
	Vyšší hmotnost (příruby, více materiálu,...)

### 1.1.1.3 Oválné kovové potrubí

#### Obecně

Na českém trhu poměrně nová, zatímco v západních zemích již zcela rozmohlá alternativa za potrubí čtyřhranného průřezu. V podstatě se jedná o zploštělé kruhové potrubí, které vykazuje podobné aerodynamické vlastnosti jako kruhový průřez, tzn. nižší tlakové ztráty a tichý provoz. Zároveň ale disponuje i velkou výhodou čtyřhranných průřezů, což je jejich nízká výška a možnost přizpůsobit se tak lépe stavbě. Ve srovnání se čtyřhranným potrubím je proces výroby daleko rychlejší. Stejně tak je snazší i montáž rozvodů, která probíhá na stejném principu jako kruhové potrubí.

Tato fakta celkově představují daleko nižší výrobní, montážní, ale i provozní náklady, než kterých by byl schopen dosáhnout systém rozvodů větrání se čtyřhranným potrubím. Jedná se tedy o velice atraktivní systém a to jak z pohledu investora, tak pro výrobce. Bude zajímavé pozorovat, zdali výrobní vývoj přinese kompletní nahrazení čtyřhranných potrubí těmi oválnými. Alespoň výše zmíněné přednosti tomu tak naznačují.



Obrázek 16. Oválné potrubí, ilustrační foto.

### Výroba

Proces výroby začíná u hotové kruhové trouby, ať už hladké či spiro, která se osadí na čelisti formovacího stroje, tzv. ovalizéru, a roztáhne se. Velikost roztažení a výšku výsledného průřezu určují průměry tvarovacích čelistí. Stroj je schopen tvarovat kruhové potrubí o průměru 450 až 1500 mm, do délky 3000 mm a tloušťky plechu 0,4 až 1,2 mm.



Obrázek 17. Výroba oválného potrubí – ovalizér.

### Montáž

Montážní proces je v podstatě stejný jako u kruhového potrubí. K zavěšení se využívá tvarovaných závěsů s gumovým proložením, rovných montážních profilů jako u čtyřhranných průřezů nebo závěsných lanek. Vzhledem k absenci přírub je hmotnostně lehčí než čtyřhranné potrubí, což představuje snadnější montáž, případně méně kotvicích prvků a s nimi spojené

náklady. Spojuje se pomocí vsuvných spojek s pryžovým těsněním nebo bez něj, stejně tak jako u kruhového potrubí. Oproti čtyřhrannému potrubí s přírubami je tak celý proces montáže výrazně urychlen a je zaručena daleko vyšší třída těsnosti celého systému (D dle Eurovent).

### *Tlakové ztráty*

Jak již bylo zmíněno, oválný průřez má podobné aerodynamické vlastnosti jako kruhový. Při výrobě, kdy je kruhový profil zploštěn, je sice zachována délka obvodu, avšak u plochy tomu tak není. Ve skutečnosti se obsah zmenší v závislosti na požadované výšce průřezu a tím pádem se změní i jeho vlastnosti. Tato skutečnost se projeví na výsledné hodnotě hydraulického průměru  $d_h = 4.S/O$  (m), který bude ve výsledku nižší, než u původního kruhového průřezu. To by znamenalo zvýšení dopravní rychlosti, zvýšení tlakových ztrát, hluku, provozních nákladů apod., než jak by tomu bylo u výrobního (kruhového) prvku.

Proto je nutné při výpočtu vycházet z doložených podkladů od výrobce, který uvádí přesné výrobní rozměry a z nich je poté možno hodnotu  $d_h$  odvodit. Níže uvedená pomůcka převádí oválné rozměry  $A \times a$  (mm) na průměry potrubí  $d$  (mm), o přibližně stejných hodnotách  $d_h$ .

ISO R20 Series Standard Spiral Duct Size Range	Circular - Flat Oval Design Equivalents										
	Depth of Duct - Nominal B mm										
Diameter mm	76	102	127	152	203	254	305	356	406	457	508
160	320										
180	401										
200	521	386									
224		467	371								
250			452	399							
280				478							
315				638							
355				800	610						
400				1039	770	582					
450					932	742	632				
500					1171	902	792				
560						1143	955	846	737		
630						1626	1196	1006	897	787	
710						1950	1598	1326	1138	1029	919
800								1727	1539	1270	1161
900									1941	1671	1483
1000											1885

Width of Duct A mm

Obrázek 18. Rozměrové řady oválného potrubí, vyjádřené průměrem kruhového průřezu o podobné hodnotě hydraulického průměru  $d_h$ .



## Shrnutí

Oválné kovové potrubí	
Výhody	Nevýhody
Snadná a rychlá výroba	Nový produkt (“nedůvěra“)
Nízké výrobní náklady	Složitější výroba tvarovek (vypalování)
Snadná a rychlá montáž	
Nízké montážní náklady	
Vysoká těsnost	
Mechanická a chemická odolnost	
Aerodynamické vlastnosti	
Nízká hmotnost	
Nízký průřez (adaptace stavbě)	

### 1.1.1.4 Ohebné vzduchovody

#### Obecně

Použití ohebných vzduchovodů je ve velké míře hojně navrhováno jako snadný způsob dopojení potrubí na koncové distribuční prvky. Lze s nimi vyřešit mnohdy komplikované křížení více rozvodů, kdy jejich tvarová poddajnost nahradí mnohé potrubní tvarovky. Převážně bývají kruhového průřezu a nejčastěji se vyrábí z hliníkové nebo laminátové fólie, nerez, ošetřeného polyesteru, polyuretanu či měkčených plastů. Materiálová variabilita tak představuje širokou škálu využití v mnoha různých provozech.

Vyznačují se velmi snadnou montáží a nízkou výrobní cenou. Při skladování jsou stlačeny do minimální délky, což znamená další finanční úspory na uskladnění a přepravu. V případě, kdy jsou provedeny s izolační vrstvou, disponují kvalitními akustickými a tepelně technickými parametry. U větracích systémů menšího rozsahu jsou schopny nahradit i veškeré potrubní rozvody.



Obrázek 19. Ohebné potrubí, ilustrační foto.

Nevýhodou mohou být rizika, která vzniknou nedůsledným procesem montáže – například příliš ostrý poloměr zahnutí nebo prověšení, zdeformování průřezu, nedostatečné těsnění u spojů s tvarovkami a kruhovým potrubím apod.

### *Výroba*

Ohebné vzduchovody se dodávají v jednoduchém jednovrstvém provedení nebo s vrstvou izolantu, která buďto plní funkci ohebného tlumiče hluku nebo slouží jako tepelný izolant pro zamezení možné kondenzace na povrchu. Výrobní rozměry jsou stejné řady jako kruhové potrubí, ovšem z důvodu nižší tuhosti stěn je maximální možný průměr omezen, kde poté záleží na výrobním materiálu. Například v případě nerezových stáčených pásů (Semiflex) může být průřez v rozmezí 76 až 610 mm a dodávají se standardně v délkách 3 až 10 m. Rozměry a mechanické požadavky na ohebné potrubí jsou stanoveny v ČSN EN 13180.

Pro přehlednost lze ohebné vzduchovody rozdělit na ohebné a částečně ohebné. Dále pak na tepelně izolované, akusticky izolované a neizolované.

Vnitřní stěna částečně ohebného potrubí (Semiflex) se vyrábí ze spirálovitě stáčeného profilovaného pásu z tenkého hliníku o tloušťce 100 mikronů. Pásky jsou falcovány s tzv. “triplelock“ zámkem, proto je potrubí polotuhé a poměrně drží svůj tvar. Na druhou stranu tak může být náchylné na promáčknutí při montážním procesu. Teplotní odolnost může být v rozmezí od -30 až do 250 °C a pracovní přetlak až 3000 Pa.

Oproti tomu, konstrukce ohebného potrubí je provedena z volně stáčené hliníkové spirály se znatelnou roztečí, která je kryta hliníkovou nebo laminátovou fólií (Aluflex), případně vrstvy PVC a polyamidové tkaniny (Greyflex). Umožňují tak větší rádiusy zahnutí a větší variabilitu vedení. Na druhou stranu jsou omezeny dopravním tlakem a teplotou a hrozí u nich deformace kruhového průřezu například vlivem prověšení, což by se projevilo na tlakové ztrátě.

Jako izolant je použita nejčastěji vlna z minerálních vláken tloušťky 25 mm s objemovou hmotností do 16 kg/m<sup>2</sup>. Pokud je vnitřní krycí vrstva provedena jako perforovaná (Sonoflex), disponuje potrubí podobnými vlastnostmi, jako jsou klasické tlumiče hluku a je možné jej navrhovat do kancelářských či školních prostorů nebo o vysoké dopravní rychlosti.

V případě, kdy je potřeba využít tepelně technických vlastností izolantu, tvoří vnitřní část několik tenkých hliníkových vrstev s laminátovým vyztužením, které působí jako parozábrana, jež zabraňuje difuzi vodních pár do vnějšího prostředí a jejich případnou kondenzaci (Termoflex).



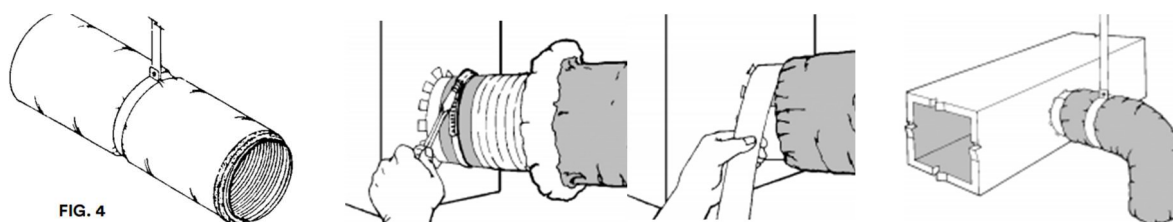
Obrázek 20. Ohebné hadice – Semiflex, Aluflex, Greyflex, Sonoflex, Termoflex.

### Montáž

Rozdělování proudu vzduchu a příp. prodlužování hadic se provádí za pomoci kovových kruhových tvarovek. Spoje se opatří stahovací plastovou páskou nebo nejlépe kovovou objímkou a dodatečně přelepí hliníkovou těsnící páskou. Stejným způsobem probíhá napojení i na distribuční prvky.

Často se díky své nízké hmotnosti pouze pokládají na konstrukci podhledu s izolantem, nicméně při případné budoucí manipulaci s podhledovou konstrukcí by mohlo takto dojít k deformaci jejich průřezu. To by se mohlo projevit na vzrůstu tlakové ztráty odbočky a distribuční prvek by tak nepřiváděl požadovaný objem vzduchu.

Pokud to umožňuje prostor, mělo by se potrubí vždy volně zavěsit a to tak, aby středový průvis nebyl větší než 50 mm. Rozteč zavěšení by měla být 1,5 až 3 m, například na perforovanou montážní pásku, ideálně mimo přímý kontakt s potrubím přenášejícím teplotně náročné látky. Stejně tak bývají předepsány minimální možné poloměry zaoblení, které jsou  $r = 0,8 \cdot D$  pro hliníkové a plastové materiály. [5]



Obrázek 21. Zásady montáže flexibilního potrubí.

### Tlakové ztráty

Už ze samotných vlastností ohebného potrubí, jako je pružnost a stlačitelnost, je zřejmé, že měrná ztráta třením nebude v každé instalaci totožná. Potrubí může být oproti návrhu uloženo například s náhlým odskokem, nemusí být po celé délce v nataženém stavu, místy může být sešlápnutý průřez nebo špatně utěsněný přechod na kovové potrubí apod. S takovými scénáři je potřeba vždy počítat a v projektu zohlednit, ovšem není to tak snadný úkol.

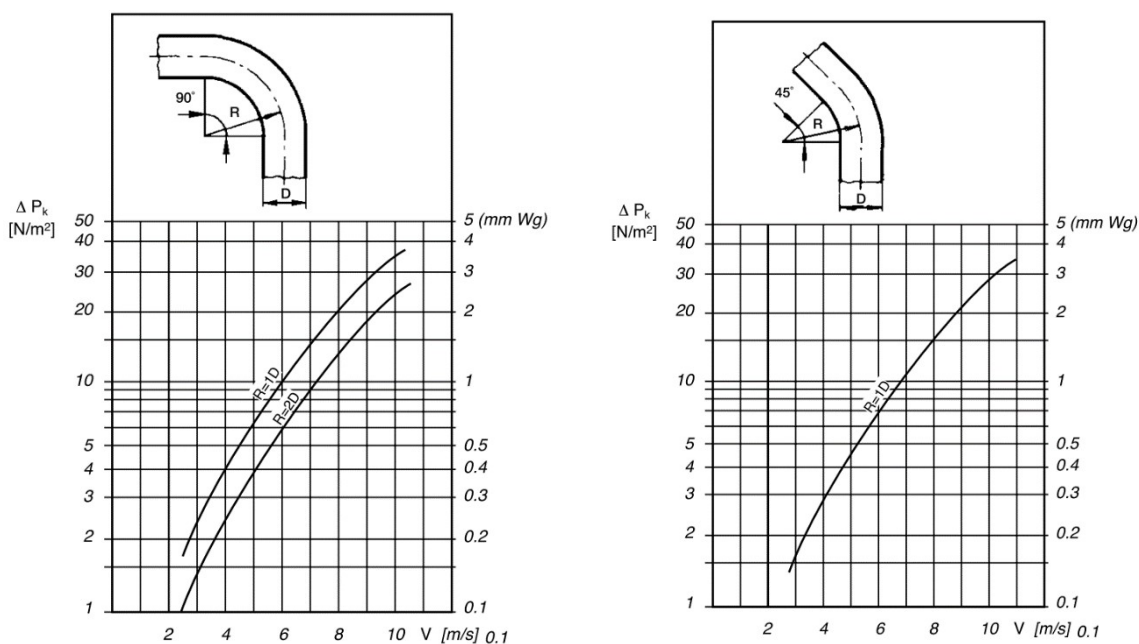


Jeden z problémů spočívá v tom, že vzhledem k výše zmíněným rizikům není možné předem přesně určit hodnotu ekvivalentní drsnosti  $\varepsilon$  (-), jako tomu může být u tuhých kovových potrubí. V některých odborných publikacích je sice možné hodnoty  $\varepsilon$  dohledat, ale data se značně odlišují, v některých případech až čtyřnásobně. [6] Uváděny jsou například hodnoty  $\varepsilon = 0,6$  až  $6$  mm [7] nebo  $\varepsilon = 1,0$  až  $4,66$  mm [6] pro případ plně nataženého potrubí. To vede k nesprávnému určení součinitele třecích ztrát  $\lambda$  (-), který ovlivňuje výslednou tlakovou ztrátu.

Druhý problém vychází taktéž z důsledků nesprávné montáže, jelikož když je plocha průřezu jakkoli stlačena nebo snížena, dochází k růstu  $\varepsilon$ , což opět ovlivňuje  $\lambda$ . [6] Zároveň se snižuje i hydraulický průměr  $d_h$  (m).

Jedním z možných výpočtových přístupů může být přímé převzetí hodnoty měrné tlakové ztráty od technických podkladů výrobce. Ovšem tato měření vychází také z plně napnutého stavu hadice a k případné kompresi potrubí v reálné situaci nepřihlížejí.

V praxi se tyto skutečnosti často zanedbávají, nicméně je potřeba si uvědomit, že finální podoba projektu vzniká až na stavbě a nikoli na papíře. Podrobný výpočet, zohledňující výše zmíněné poznatky, může procento odchylky reálného stavu od návrhu pouze snížit, ale nikoli eliminovat. Z toho vyplývá, že k problematice projektování ohebných vzduchovodů je potřeba přistupovat s dostatečnou rezervou.



Obrázek 22. Návrhové nomogramy od výrobce pro 90° a 45° oblouky ohebných hadic.

## Shrnutí

<b>Ohebné vzduchovody</b>	
Výhody	Nevýhody
Snadná a rychlá montáž	Mechanická odolnost
Flexibilita vedení	Tlaková ztráta
Akustické vlastnosti	Lidský faktor při montáži (průvis, promáčknutí,...)
Tepelně-technické vlastnosti	Obtížnější čištění
Levné řešení	
Chemická odolnost	
Skladnost	
Nízká hmotnost	

### 1.1.1.5 Ostatní vzduchovody

Následující stručný přehled shrnuje typy potrubí, které jsou v praxi běžně navrhovány. Jedná se o různé materiálové modifikace a kombinace výše popsaných potrubních prvků a jde spíše o specifické firemní produkty, než o univerzální a celosvětově vyráběné typy potrubí.

#### *Obecně*

V méně rozsáhlých systémech větrání, kde je uživatelem samotný investor, je rozumné a logické projektovat vždy varianty cenově dostupnějších vzduchovodů. Řeč je například o rodinných domech. Pro většinu lidí celoživotní závazek, který pro mnoho z nich představuje nesmírně velkou investici. Proto je víc než pochopitelné, že pokud se investor podrobněji zajímá o investiční náklady na zařízení techniky prostředí, pak většinou vyžaduje levné, ale pokud možno účinné a funkční řešení vzduchotechnického systému. Následující prvky většinou tento požadavek splňují a zároveň také nekladou příliš velké nároky na manuální zručnost při jejich montáži, což může být pro některé svépomocné stavebníky určitá výhoda.

#### *Ohebné PE hadice*

Často bývají rozvody větrání v RD provedeny z dvojstěnové polyetylenové hadice s hladkým vnitřním povrchem, který se oproti vnějšímu povrchu s vruby lépe čistí. Vedení je zpravidla v podhledu, v izolační vrstvě podlahy nebo v případě dřevostaveb i ve stěnách. Navrhují se o malých průměrech, často kolem  $d = 100$  mm, a to tak, že vždy jimi proudí pouze ten objem vzduchu, který je pak na konci přiváděn do prostoru distribučním prvkem. V rozsáhlejších objektu tak může ve výsledku vzniknout až příliš dlouhá a zahuštěná síť potrubí.

Rozdělení páteřního rozvodu z větrací jednotky do několika potrubí menšího průřezu probíhá v tzv. rozdělovacích boxech s regulačními prvky. Z hlediska tlakových ztrát to asi není úplně efektivní způsob, ale účel splňuje. Jak moc toto řešení ovlivňuje provozní náklady proto zůstává otázkou.

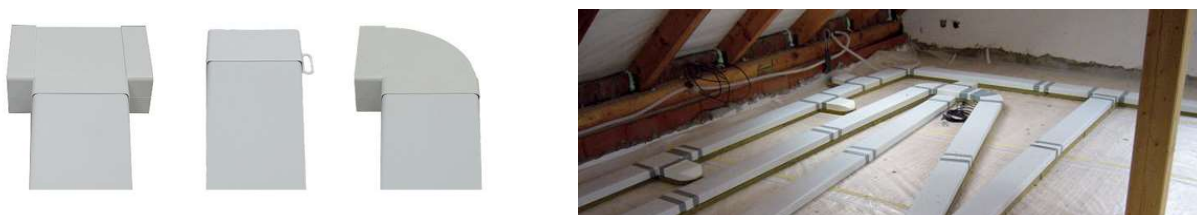
Výrobky jsou certifikovány na max. pracovní tlak a podtlak 2000 Pa s rozmezím teplot -20 až 60 °C, což je pro RD více než dostačující. Vzhledem k podobnému systému těsnění jako u spiro potrubí, vykazují PE hadice vysokou těsnost třídy D (EN 12237). Průřezy mohou být kruhového, ale i oválného tvaru, které umožňují uložení do skladby podlahy. Případné spojování potrubí se provádí pomocí násuvných vnějších spojek.



Obrázek 23. PE ohebné hadice – pomůcka pro dimenzování; typická instalace systému.

#### Potrubí z PVC

Vyrábí se v provedení s jednoduchou stěnou, a to se čtyřhranným průřezem do výšky 60 mm nebo s kruhovým průřezem do  $d = 150$  mm. Z hlediska montáže, uložení a způsobu rozdělení vzduchu jde v podstatě o podobný systém jako výše zmiňované PE potrubí s dvojitou stěnou. Rozdíl je v těsnění spojů, kdy je použita vnější spojka s hliníkovou páskou. Výhodou je dlouhá životnost a chemická odolnost plastů.

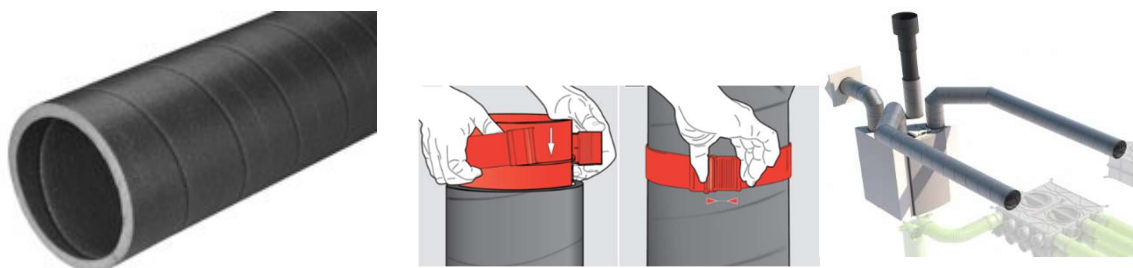


Obrázek 24. Čtyřhranné PVC potrubí – tvarovky a potrubí; typická instalace systému.

#### Kruhové potrubí z EPE

Další alternativou pro menší instalace může být tmavé potrubí z pěnového polyetyleny (EPE). Řeší najednou jak problém tepelných ztrát, tak i problém šíření hluku od ventilátoru a proudění. Stěny potrubí jsou tloušťky 16 mm a součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_p = 0,041$  W/m.K. Tvarovky jsou stejného materiálu a spojují se pomocí vnitřních spojek s následným vnějším zajištěním

speciální objímkou. Potrubí vykazuje těsnost třídy C (EN 12237). Často je realizováno pouze jako přívodní prvek čerstvého vzduchu, v kombinaci s předchozími dvěma typy výše.

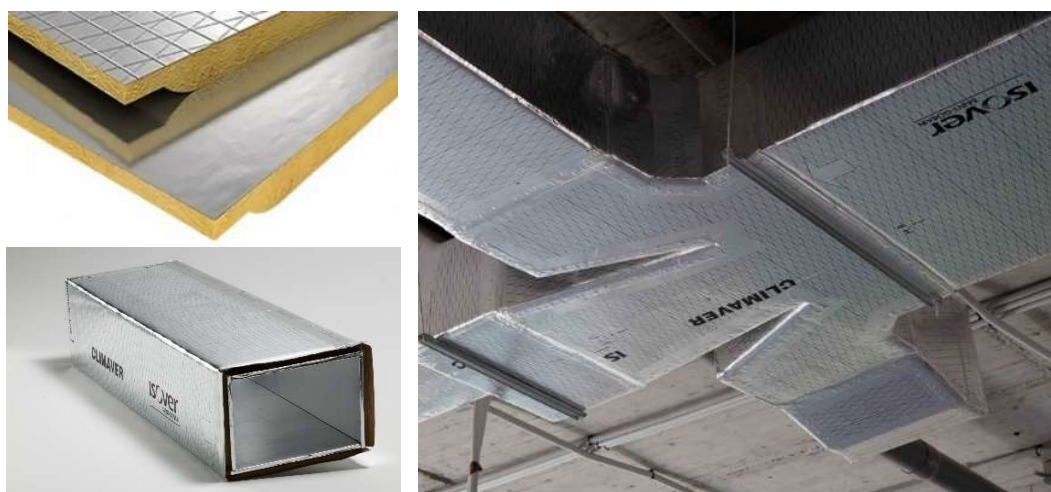


Obrázek 25. Kruhové potrubí z EPE – montážní spojování; typická instalace systému.

### Čtyřhranné potrubí ze skelné vlny

Obdobným systémem je čtyřhranné potrubí, které tvoří výhradně tepelný izolant z desek skelné vlny lisovaných za tepla a tvrzených pryskyřicemi. Tloušťka desek je 25 až 40 mm a standardní rozměry jsou 3000 x 1210 mm. Desky mají z vnitřní strany polep ze skelné tkaniny a z vnější jsou opatřeny hliníkovou fólií.

Samotná výroba jednotlivých komponentů potrubí probíhá většinou přímo na stavbě, kde jsou jednotlivé výrobní dílce nařezány z desek pomocí různých typů řezných nožů a poté poskládány do požadovaného potrubního prvku. Desky jsou už z výroby opatřeny perem a drážkou. Podélné spoje se poté pouze přisponkují, opatří těsnící páskou a dále opatří výztužnými profily. Vedení a montáž potrubí ke konstrukci jsou totožná jako u kovového potrubí čtyřhranného průřezu. Vzhledem ke svým rozměrům je vhodnější spíše pro rozsáhlejší systémy vzduchotechniky.



Obrázek 26. Skládané potrubí ze skelné vlny – detail konstrukční desky; složená trouba; typická instalace systému.

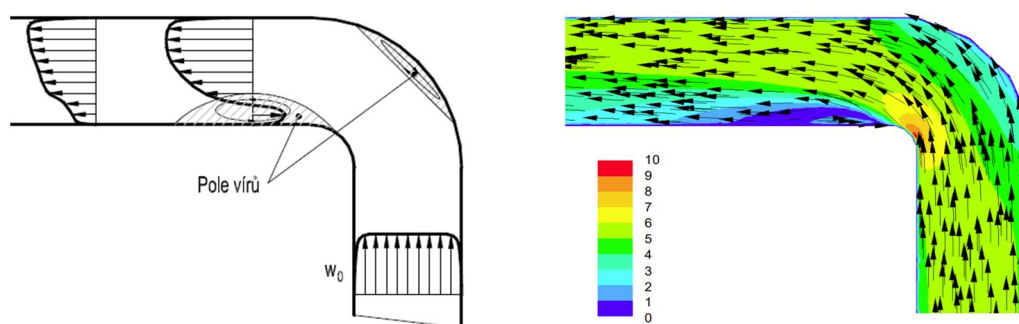
## 1.1.2 Tvarovky potrubí

### Obecně

Potrubní tvarovky jsou nedílnou součástí vzduchovodů. Slouží ke změně směru a rychlosti proudění nebo k rozdělení či spojení proudu vzduchu. Jedná se o tvarově rozmanité potrubní prvky, které podléhají odlišným výrobním a rozměrovým požadavkům v závislosti na oblasti produkce. Výroba ve vyspělých státech se většinou řídí podle technických norem. V Evropě jsou tvarovky rozměrově definovány normami EN 1505 a EN 1506. Ve Spojených státech, Kanadě, Austrálii a Brazílii zase mezinárodním obchodním sdružením SMACNA (Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association).

Tvarovky se podílejí významnou měrou na výsledné externí tlakové ztrátě sítě. Pokud je větraný objekt plošně či výškově rozsáhlý, je potřeba volit především prvky s nízkou tlakovou ztrátou – tzn. větší poloměr zaoblení kolen bez ostrých hran, zaoblené náběhy ve styku dvou potrubí, upřednostnění kruhového průřezu před čtyřhranným, příp. vodící plechy v obloucích apod.

Všechny tyto tvarové úpravy mohou příznivě ovlivnit narušení rychlostního profilu proudění, ke kterému by jinak mohlo docházet v geometricky “ostrých” tvarovkách. V kritických místech tvarovky totiž zpravidla dochází ke vzniku vírových polí, která mají zásadní vliv na deformaci rychlostního profilu, jenž se snaží po průchodu tvarovkou postupně opět ustálit. Tento jev, spolu s vlivem tření, způsobuje místní tlakovou ztrátu  $\Delta p_m$  (Pa). [2] Zanedbatelný vliv tření a aerodynamické, resp. geometrické vlastnosti tvarovky, společně popisuje součinitel místního odporu  $\xi$  (-).



Obrázek 27. Rychlostní profily při proudění v koleni; CFD model s rychlostními konturami a vektory. [2]

Koeficienty  $\xi$  lze nalézt v mnoha odborných publikacích nebo návrhových podkladech od výrobce. Jejich stanovení probíhá převážně experimentálně, ale existuje mnoho prací, které určují hodnoty  $\xi$  za pomoci CFD počítačových simulací. U měření na reálné zkušební trati je

nezbytná její výstavba, která může být časově a finančně nákladná, zatímco při simulačních výpočtech jsou kladeny vysoké nároky zejména na hardware. Výhodou CFD výpočtů je možnost stanovení součinitele  $\xi$  na základě rozdílů celkových tlaků, což je při experimentu na reálném modelu velice náročné a pracné. Nejčastěji se totiž hodnoty  $\xi$  vyvozují z rozdílů tlaků statických. [2]

V následující podkapitole budou pro vybrané typy tvarovek porovnávány hodnoty součinitele místního odporu  $\xi$  z různých zdrojů. Těch je samozřejmě nespočet, nicméně pro účel této práce postačí porovnat dostupné tuzemské zdroje, doplněné o data z německého průvodce vytápěním a klimatizací a obecně uznávané hodnoty z příručky od ASHRAE. Je na místě předem zdůraznit, že cílem nebude ověřit jejich správnost či pokrýt veškeré typy tvarovek, ale pouze poukázat na zjevné odchylky hodnot  $\xi$  v literatuře u těch nejpoužívanějších typů.

Konkrétně půjde o data z následujících publikací:

- 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2001. ISBN 978-1883413880.
- CHYSKÝ, J. a HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace*. Vyd. 3., zcela přepracované. Brno: BOLIT-B Press, 1993. Česká matice technická, č. spisu 457, roč. 48 (1993). ISBN 80-901574-0-8.
- SCHWARZER, J. a ZMRHAL, V. *Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings*. Glasgow: In. Proc. of Building Simulation, IBPSA, 2009.
- HIRŠ, J. a GEBAUER, G. *Vzduchotechnika v příkladech*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-486-9.
- CENTNEROVÁ, L. a PAPEŽ, K. *Technická zařízení budov 30: vzduchotechnika: cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02251-X.
- MAURER, K. *Vzduchotechnická zařízení: pro 3. a 4. ročník SPŠ stavební[sic] studijního oboru TZB*. Vyd. 3., přeprac., (V Sobotáles vyd. 1.). Praha: Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86817-21-7.
- DRKAL, F., LAIN, M., SCHWARZER, J., ZMRHAL, V. *Vzduchotechnika. Přednáškové texty pro předmět pro studijní program Inteligentní budovy*. 2009.
- SCHRAMEK, E. R., RECKNAGEL, H. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 92/93*. München: Oldenbourg Industrieverlag, 1992. ISBN 3-486-26212-2

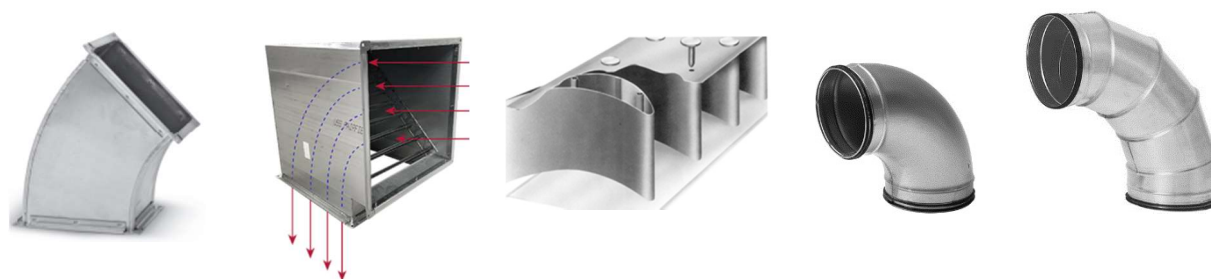


### 1.1.2.1 Oblouky

Velkou roli z hlediska tlakových ztrát hraje u kolen poloměr oblouku  $r$  (m) a zaoblení vnitřního a vnějšího rohu. Obecně platí, že čím je poloměr  $r$  větší, tím je součinitel  $\xi$  menší a tím pádem i hodnota tlakové ztráty.

Čtyřhranná kolena mohou být řešena více způsoby. Liší se provedením vnějšího a vnitřního zaoblení. Ostré zaoblení, na vnější straně kolena, zabírá prostorově méně místa než pozvolný oblouk. Stejně tak se používají zkosené varianty oblouku, ovšem na úkor vyšších ztrát, které lze redukovat instalací vodících lopatek. Ostré oblouky jsou také nežádaným zdrojem hluku.

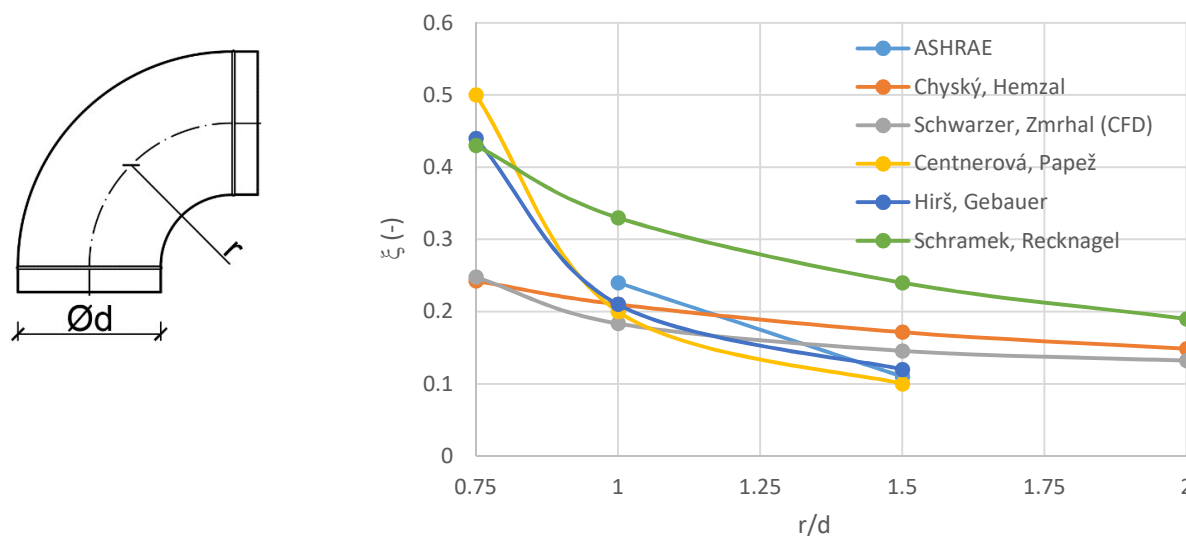
Kruhová kolena mohou být hladká či segmentová. Produkce hladkých kolen běžně bývá do průměru  $d = 200$  až  $250$  mm. Větší průřezy jsou pak skládány ze třech, pěti nebo sedmi segmentů, které se vypalují CNC plazmou a dodávají oblouku tuhost.



Obrázek 28. 45° oblouk; ostré koleno s vodícími lopatkami; kruhová kolena – hladká, segmentová.

#### Příklad č. 1 – Oblouk 90°, hladký, kruhový průřez ( $d = 200$ mm)

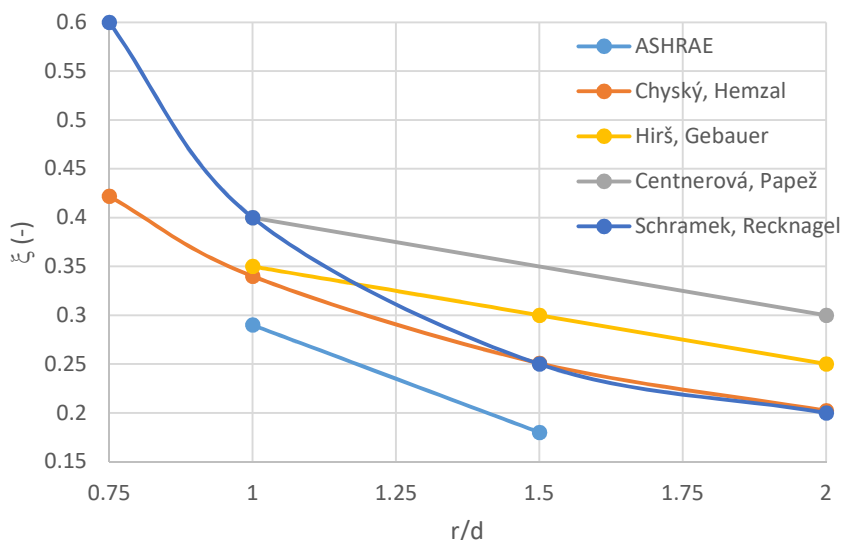
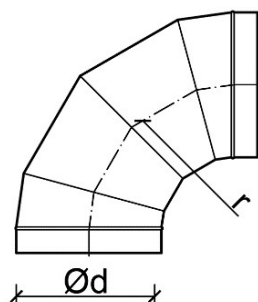
Křivky jsou takřka souběžné, až na data z německého průvodce. U menšího poměru  $r/d$ , kdy je koleno příliš ostré, je poté vidět značný rozptyl hodnot  $\xi$ .



Graf 2. Oblouk 90°, hladký, kruhový průřez.

**Příklad č. 2** – Oblouk 90°, segmentový, kruhový průřez ( $d = 315 \text{ mm}$ )

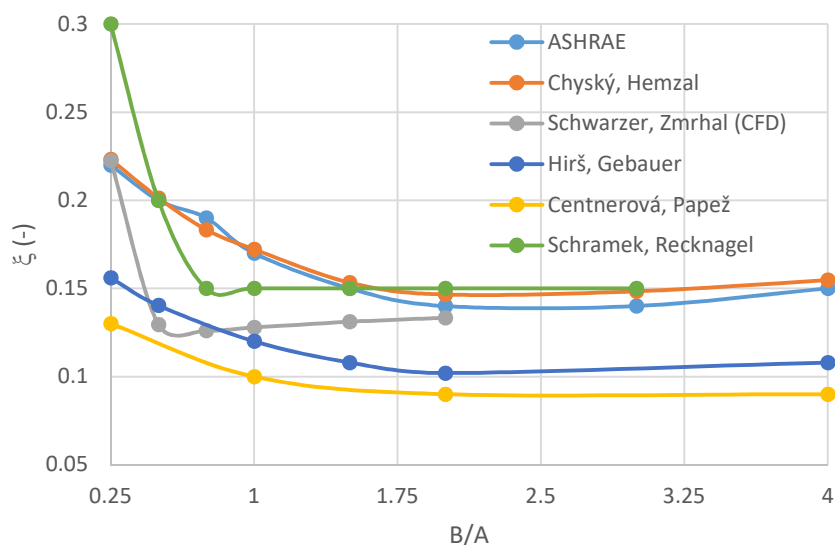
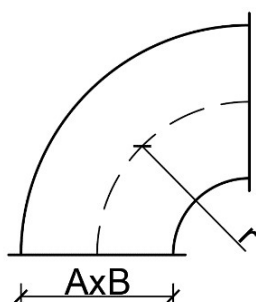
Křivky nabývají velmi podobného směru vzrůstu, nicméně se pohybují v poměrně odlišných úrovních. Tento patrný rozdíl může být zapříčiněn např. odlišným počtem segmentů oblouku v jednotlivých zdrojích. Ne všechny publikace totiž počet segmentů zohledňují.



Graf 3. Oblouk 90°, segmentový, kruhový průřez.

**Příklad č. 3** – Oblouk 90°, vnější i vnitřní zaoblení, čtyřhranný průřez ( $r/A = 1,5$ )

Nárůst veličin  $\xi$  je podobného charakteru, ale opět v poněkud odlišných úrovních. Data určená pomocí CFD jsou výrazně odchylena od typického trendu vzrůstu experimentálně určených součinitelů. Podobný tvar křivky, v oblasti nízkého průřezu, sdílí také německý průvodce.

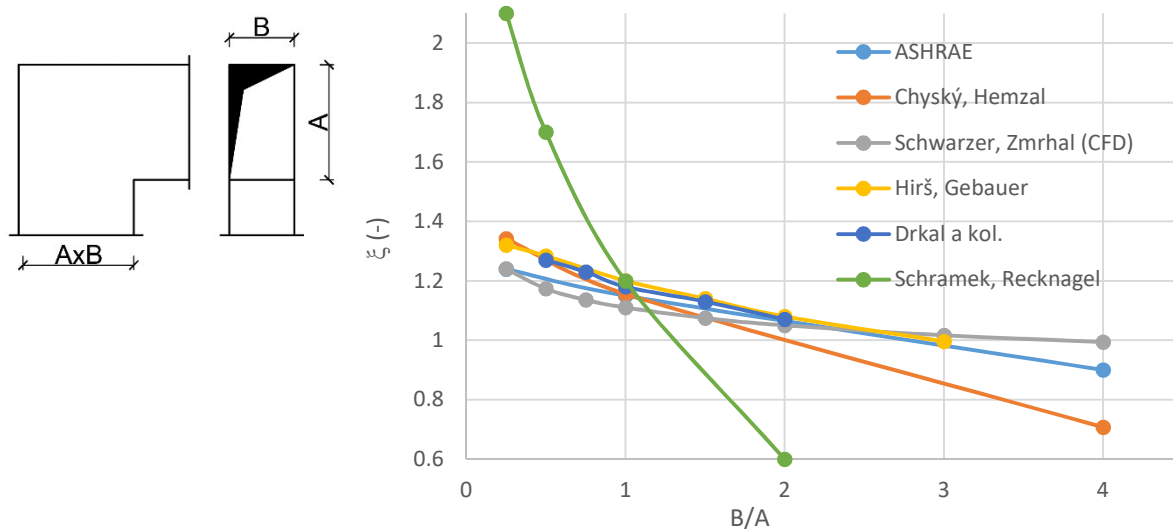


Graf 4. Oblouk 90°, vnější i vnitřní zaoblení, čtyřhranný průřez.



#### Příklad č. 4 – Oblouk 90°, vnější i vnitřní roh ostrý, čtyřhranný průřez, bez lopatek

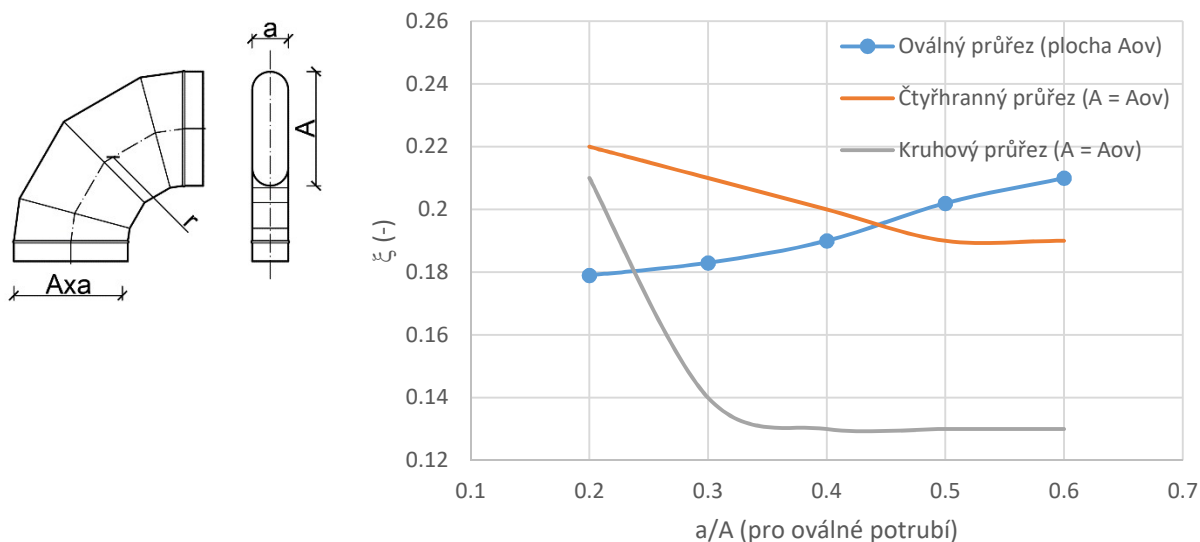
Z hlediska tlakových ztrát a produkce hluku se jedná o nevhodnou tvarovku, avšak prostorově může vyřešit složité a stísněné prostory. Hodnoty  $\xi$  se razantně odlišují v německém průvodci. V ostatních případech jsou naopak téměř shodné. Ve srovnání s předchozím příkladem (se zaoblenými rohy) se jejich součinitelé zvýšily až čtyřnásobně.



Graf 5. Oblouk 90°, vnější i vnitřní roh ostrý, čtyřhranný průřez.

#### Příklad č. 5 – Oblouk 90°, segmentový, oválný průřez ( $r/A = 1,5$ ; resp. $r/d = 1,5$ )

Příklad níže slouží jen jako ukázka kladných hydraulických vlastností oválného průřezu. Graf srovnává oválný segmentový oblouk s příklady č. 2 a 3. Varianty oblouků byly voleny se stejným poloměrem zaoblení a přibližně podobnou plochou/výškou průřezu. Zde se potvrzují výše uvedená tvrzení, kde se oválný průřez jeví oproti čtyřhrannému jako výhodnější řešení. Hodnoty  $\xi$  jsou pro všechny případy převzaty z příručky od ASHRAE. [8]



Graf 6. Oblouk 90°, segmentový, oválný průřez.

### 1.1.2.2 Odbočky/rozbočky

V projektu větrání se jedná o velmi početné typy tvarovek, jejichž úlohou je rozdělování nebo spojování proudu vzduchu. V případě přírodního potrubí se z hlediska tlakových ztrát jeví jako vhodné řešení použití odbočky pod úhlem 45° ve směru proudění. Další vhodná úprava spočívá zejména v zaoblení náběhových rohů.

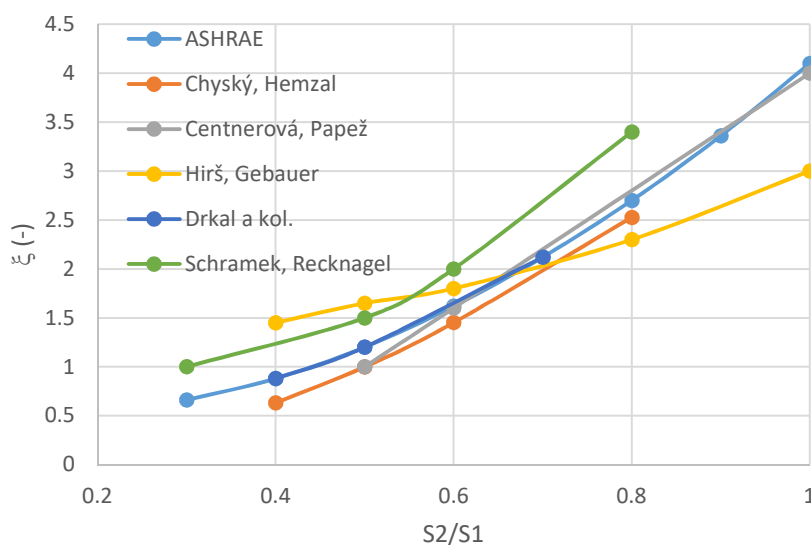
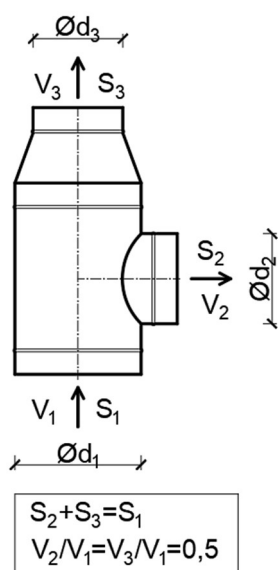
Obecně se dají odbočky rozlišovat podle tvaru na T-kusy, Y-kusy a křížové rozbočky (angl. “tees“, “wyes“ a “cross tees“).



Obrázek 29. Typické rozbočky – T-kus; kalhotový kus; Y-kus 45°; odbočka s redukcí.

#### Příklad č. 6 – T-kus 90°, odbočka (přívod), kruhový průřez, bez zaoblených hran

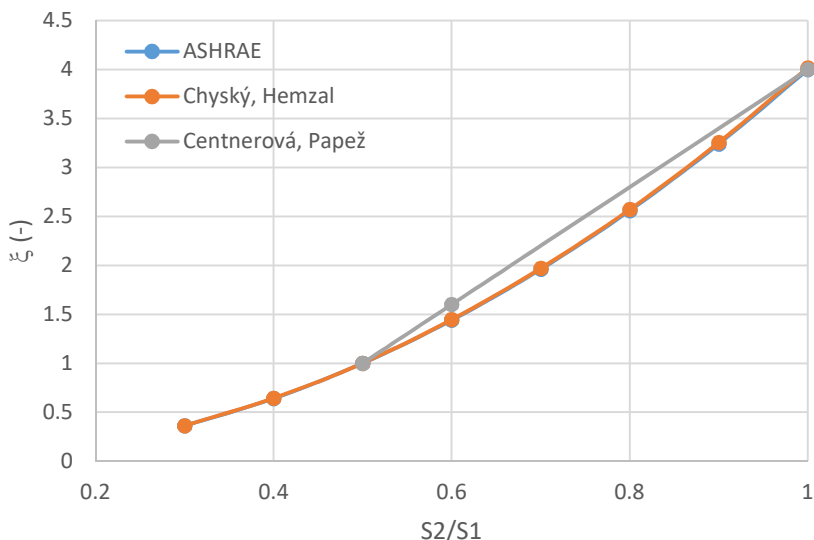
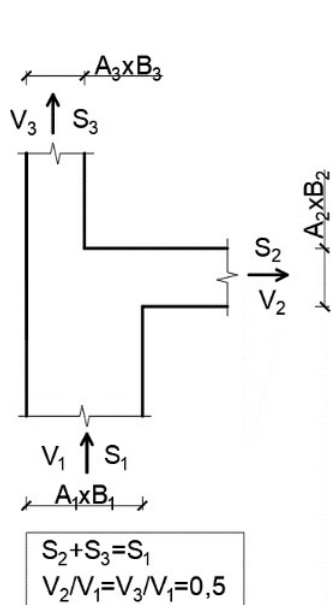
Jedná se o velmi často využívaný prvek k rozdělení a spojení proudu. Hodnoty  $\xi$  se zde, až na jeden posuzovaný zdroj, téměř shodují. Důležitým faktorem je zaoblení náběhových hran v místě styku potrubí. Osazení sedlového kusu je v tomto případě řešeno pouhým vsazením trouby do připraveného otvoru v potrubí většího průměru, kde se oba kusy poté odporově svařují. Tvarovky se zaoblenými náběhy se provádí s již vylisovaným sedlovým kusem.



Graf 7. T-kus 90°, odbočka (přívod), kruhový průřez.

### Příklad č. 7 – T-kus 90°, odbočka (přívod), čtyřhranný průřez, bez zaoblených hran

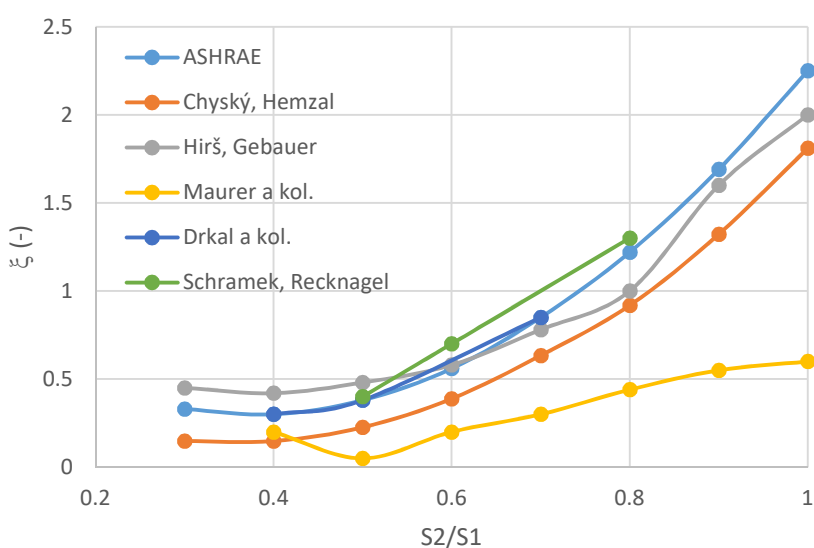
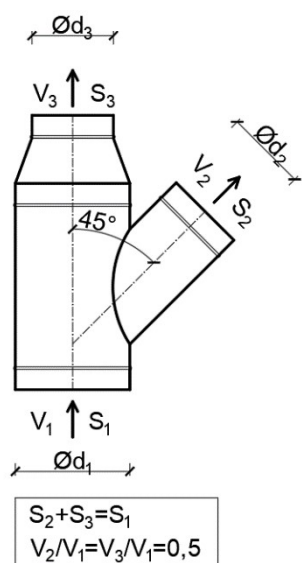
Tento příklad je zjednodušeným vyjádřením odbočky, která může být provedena buď jako samostatná tvarovka nebo jako improvizovaná odbočka ze čtyřhranného potrubí.



Graf 8. T-kus 90°, odbočka (přívod), čtyřhranný průřez.

### Příklad č. 8 – Y-kus 45°, odbočka (přívod), kruhový průřez

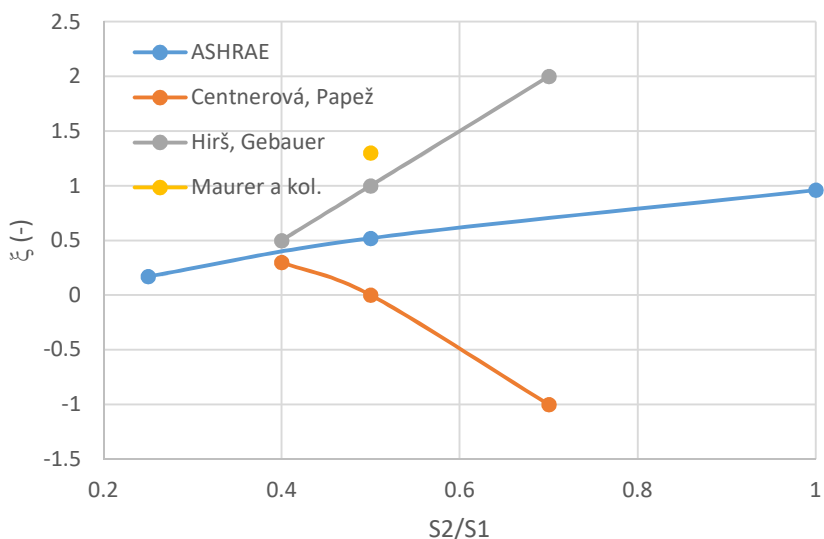
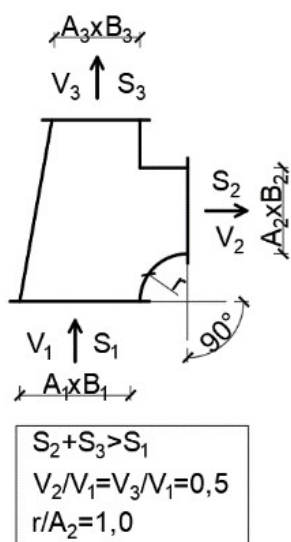
Jedná se o vhodnější řešení tvarovky z příkladu č. 6. Křivky součinitele  $\xi$  jsou, až na jeden případ, relativně souběžné. V porovnání s ostrým kruhovým t-kusem jsou hodnoty součinitelů až dvojnásobně nižší.



Graf 9. Y-kus 45°, odbočka (přívod), kruhový průřez.

### Příklad č. 9 – Y-kus 90°, odbočka (přívod), čtyřhranný průřez, zaoblená náběhová hrana

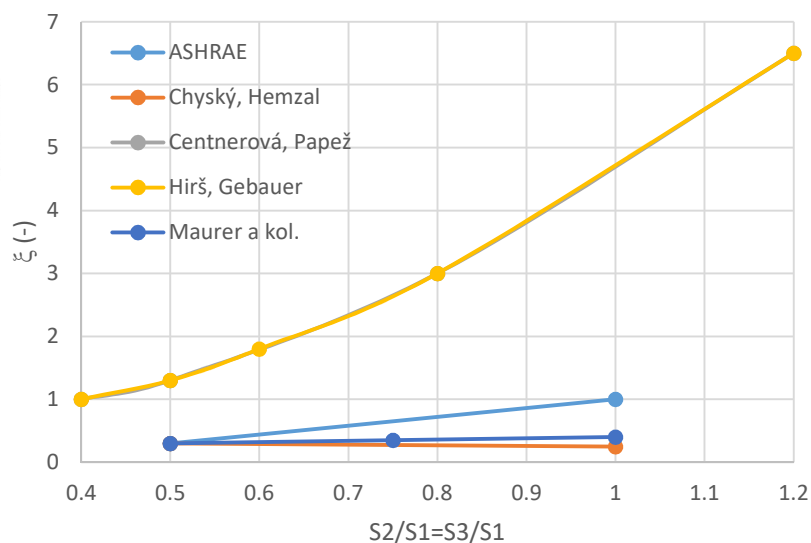
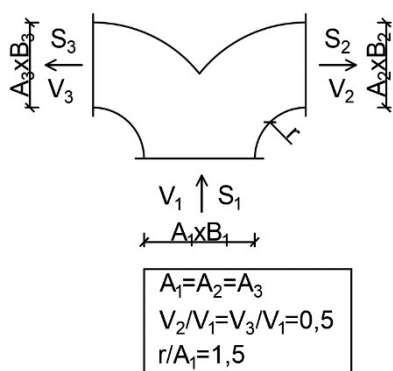
Tvarovka podobného vzhledu (s náběhem) se velmi často využívá na stoupacím potrubí v instalačních šachtách, případně může být doplněna o redukce na obou výstupních koncích. Nicméně v literatuře není tak snadno dohledatelná. Dva z níže posuzovaných zdrojů mají dokonce prohozené tabulky hodnot součinitelů se sací variantou odbočky, proto je v grafu očitá nesrovnalost u dvou křivek.



Graf 10. Y-kus 90°, odbočka (přívod), čtyřhranný průřez.

### Příklad č. 10 – Kalhotový kus (přívod), čtyřhranný průřez

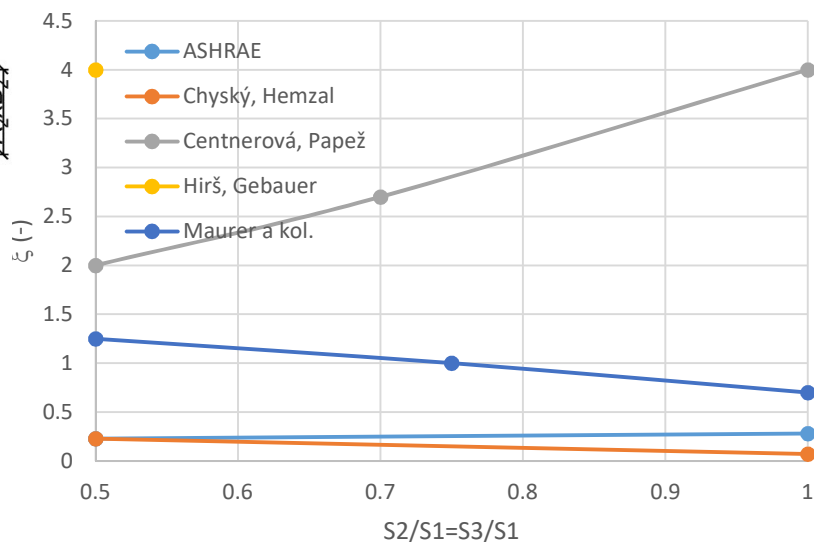
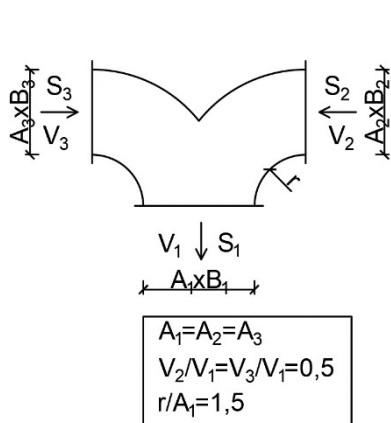
Výhodou této tvarovky je, že rozděluje proud vzduchu na dva přibližně stejné objemy větracího vzduchu o stejném dopravním tlaku, bez potřeby další dodatečné regulace. Co se týče podobnosti součinitelů, lze hovořit o značném odchýlení dvou zdrojů, které měly jistě nesoulady již v předchozím příkladu.



Graf 11. Kalhotový kus (přívod), čtyřhranný průřez.

### Příklad č. 11 – Kalhotový kus (odvod), čtyřhranný průřez

Spojení dvou proudů pomocí totožné čtyřhranné tvarovky jako v předchozím příkladu. Dva zdroje, s totožnými hodnotami  $\xi$ , jsou opět značně odchylené.



Graf 12. Kalhotový kus (odvod), čtyřhranný průřez.

#### 1.1.2.3 Redukce/přechody

Používají se výhradně ke změně velikosti/typu průřezu.

Rozhodující hodnoty ztrát u redukci vznikají zejména na přívodu, kdy se plocha průřezu zpravidla zmenšuje. Redukce i přechody mohou být v provedení koncentrickém či excentrickém (v ose/mimo osu).

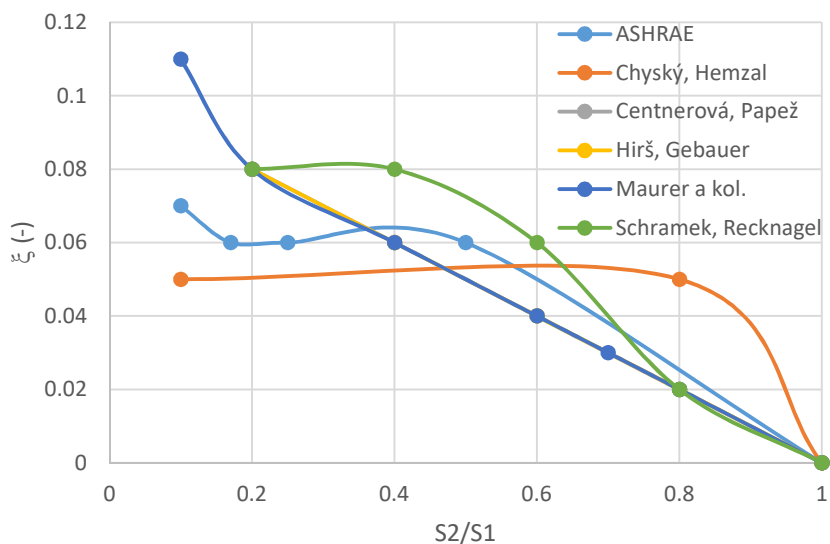
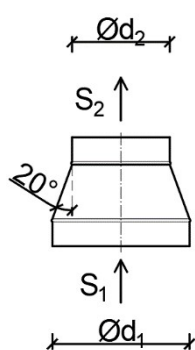
V literatuře se většinou nevyskytují hodnoty ztrátových součinitelů pro přechody z kruhového na čtyřhranné potrubí a naopak. V tomto případě zůstává otázkou, zdali je správným postupem vycházet z naměřených hodnot pro redukce. Jediným zdrojem z výše jmenovaných publikací, který přechody zvláště řeší, je databáze tvarovek od ASHRAE. [8]



Obrázek 30. Přechod; excentrické redukce; koncentrická redukce.

### Příklad č. 12 – Redukce (přívod), kruhový průřez

V případě redukci jsou hodnoty ztrátových součinitelů v porovnání např. s odbočkami téměř zanedbatelné. Logicky platí, že čím je průřez 2 menšího obsahu, tím je tlaková ztráta vyšší. V grafu je opět možné pozorovat drobné odlišnosti, nicméně hodnoty  $\xi$  jsou stále velmi malé.



Graf 13. Redukce (přívod), kruhový průřez.

### Závěr

Porovnávané publikace vykazují zjevný nesoulad součinitelů místních odporů. Otázkou zůstává, jak moc tyto nesrovnalosti dokáží ovlivnit výsledný návrh ventilátoru, proces regulace soustavy nebo provozní spotřebu energie. Možnou odpověď lze nalézt v kapitole č. 2.

## 1.2 Výpočet potrubní sítě

### 1.2.1 Základní rovnice

Pro návrh samotných dimenzí vzduchovodů je nutno vycházet ze známých fyzikálních vztahů, popisujících mechaniku tekutin.

Navzdory tomu, že je vzduch stlačitelná tekutina, je pro běžné výpočty ve vzduchotechnice jeho stlačitelnost zanedbána. [7] Vlastnosti vzduchu tedy popisuje jeho tlak  $p$  (Pa), teplota  $T$  (K) a hustota  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), která se mění v závislosti na jeho teplotě podle stavové rovnice

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

kde  $r = 287,1$  J/kg.K je plynová konstanta pro suchý vzduch.

Důležitou vlastností vzduchu je jeho kinematická viskozita  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s), která je definována poměrem dynamické viskozity ( $\mu = 1,76 \cdot 10^{-5}$  Pa.s) a jeho hustoty  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>).

Pro ustálené proudění platí rovnice kontinuity, která vyjadřuje skutečnost, že hmotnostní průtok  $M$  (kg/s) se po celé délce potrubí nemění a po úpravě ji lze vyjádřit ve tvaru

$$M = S \cdot w \cdot \rho \rightarrow \rho \cdot V = S \cdot w \cdot \rho \rightarrow V = S \cdot w \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Dalším vztahem je rozšířená verze Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon zachování energie proudící tekutiny v potrubí. Popisuje změnu celkové energie mezi dvěma průřezy 1 a 2 součtem statické, polohové a dynamické energie a nabývá tvaru

$$p_{s1} + h_1 \cdot \rho \cdot g + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_{s2} + h_2 \cdot \rho \cdot g + \frac{\rho}{2} w_2^2 + \Delta p_{z1,2}$$

kde  $h_1$  a  $h_2$  (m) jsou výšky uvažovaných průřezů a při malých rozdílech je možné tyto členy zanedbat. Následnou úpravou lze odvodit tvar, který popisuje tlakové poměry v potrubí – součet statického a dynamického tlaku je roven tlaku celkovému a vzniklá tlaková ztráta mezi dvěma průřezy  $\Delta p_{z1,2}$  (Pa) je rovna jeho úbytku

$$p_{s1} + p_{d1} = p_{s2} + p_{d2} + \Delta p_{z1,2}$$

To znamená, že při konstantním průřezu, kdy je  $p_d$  (Pa) = konst., se tlakové ztráty pokrývají ze statického tlaku  $p_s$  (Pa).

## 1.2.2 Proudění vzduchu potrubím

Rychlostní profil proudu vzduchu v potrubí není konstantní. Sousedící vrstvy vzduchu se po sobě vzájemně posouvají a rychlejší vrstva je bržděna třecí silou, působící mezi nimi. Vlivem vazkosti je rychlost proudu u stěny nulová a směrem k ose vzduchovodu vzrůstá. [3] Tvar rychlostního profilu závisí na charakteru proudění, které může být laminární nebo turbulentní. Rozmezi mezi laminárním a turbulentním prouděním definuje Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_s \cdot d_h}{\nu} \quad (-)$$

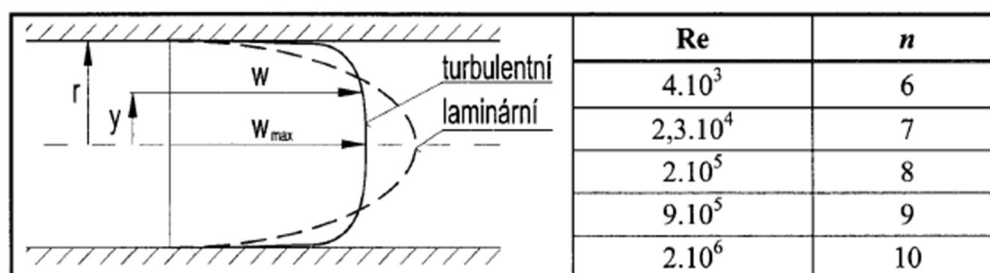
kde  $w_s$  (m/s) je střední rychlost proudění podle průřezu,  $d_h$  (m) je hydraulický průměr potrubí a  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s) je kinematická viskozita, která při teplotě vzduchu 20 °C a tlaku 100 kPa nabývá hodnotu  $\nu = 1,532 \cdot 10^{-5}$ . [9]

Za laminární se dá proud vzduchu považovat, pokud je kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{krit} \leq 2300$ . Je-li  $2300 < Re < 3000$ , jedná se o přechodovou oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním. Při hodnotách  $Re_{krit} \geq 3000$ , nastává proudění turbulentní, kdy se částice vzduchu pohybují neuspořádaně napříč průřezem a účinek třecích sil je podstatně větší než u proudění laminárního charakteru. [7] Se vzrůstající rychlostí a hydraulickým průměrem Reynoldsovo číslo roste.

Ve vzduchovodech sloužících pro větrání a klimatizaci je počítáno téměř vždy s prouděním turbulentním. Lze to jednoduše ověřit na příkladu, který se často může vyskytovat na konci větve odvodního potrubí – kruhové potrubí o průměru  $d = 125$  mm, dopravující hodinovou dávku vzduchu 25 m<sup>3</sup> ( $w = 0,57$  m/s), má hodnotu  $Re = 4610$ , tzn. turbulentní. Rychlostní profil turbulentního proudění lze vyjádřit vztahem

$$\frac{w}{w_{max}} = \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{1/n}$$

kde  $w_{max}$  (m/s) je maximální rychlost v ose vzduchovodu,  $n$  (-) je exponent závislý na  $Re$  a  $r$  (m) je poloměr vzduchovodu.



Obrázek 31. Profil lam. a turbulent. proudění a závislosti exponentu n na Re. [7]



U turbulentního proudění bývá poměr střední rychlosti  $w_s$  (m/s) k osově rychlosti  $w_{max}$  (m/s) v rozmezí 0,80 až 0,85 a se vzrůstajícím  $Re$  se zvětšuje. [4]

### 1.2.3 Metodika návrhu vzduchovodů

#### *Obecně*

Počátek projektu se odvíjí od jasného vymezení požadovaných vlastností a funkcí, které lze od navrhovaného systému vzduchotechniky očekávat. Návrh zcela závisí na charakteru a rozsahu větraného prostoru, z něhož vyplývají technické, materiálové a provozní vlastnosti systému. Nezbytnou součástí projekční fáze je koordinace se souvisejícími profesemi.

Samotný návrh sítí sestává z návrhu vedení tras jednotlivých větví, dimenzování úseků (volba rychlosti, stanovení rozměrů, výpočet tlakových ztrát), výpočtu přirozeného útlumu a vlastního hluku, regulace soustavy, stanovení dopravního tlaku ventilátoru a příp. návrhu tepelné izolace.

Návrhových přístupů pro dimenzování potrubních tras existuje více. Nejpoužívanějším způsobem je metoda rychlostí. V souvislosti s požadavkem na nízkonákladový provoz je vhodné použít metodu stálého tlakového spádu. Poměrně pracným přístupem se může jevit metoda zisků statického tlaku, u které je cílem udržet stejný statický tlak před každou vyústí a zajistit tak rovnoměrný přívod vzduchu. Dalšími způsoby jsou např. metoda dynamických tlaků nebo složitá iterační T-metoda. [8; 10]

Vzhledem ke skutečnosti, že úsporný a tichý provoz a stejně tak všechny výše zmiňované návrhové metody úzce souvisí s rychlostí proudění, bude v této práci popsána pouze metoda rychlostí.

#### *Návrh metodou rychlostí*

Jedná se o poměrně rychlou a spolehlivou metodu dimenzování potrubí. Její aplikace je možná jak ve větvených vzduchovodech pro přívod, tak i pro odvod. Spočívá ve volbě doporučených rychlostí proudění, které zohledňují riziko vzniku nadměrného hluku. Doporučené hodnoty se tedy odvíjí od charakteru prostoru, v němž je navrhované potrubí vedeno.

Metoda řeší i ekonomickou stránku věci. Při volbě nižších rychlostí vzejde z procesu dimenzování potrubí s velkými průřezy. Investičně tak bude náročnější, ovšem vzhledem k nízké spotřebě energie naopak provozně výhodnější. Při volbě vyšších rychlostí tomu bude naopak. Potrubí bude vycházet menších rozměrů, tudíž investiční náklady budou nižší, nicméně vzrostou tlakové ztráty sítě a s ní i provozní náklady na chod ventilátorů.

Níže uvedené tabulky shrnují doporučené rychlosti proudění pro obytné a veřejné stavby, a to jak z hlediska tlakových ztrát, tak z hlediska hluku.

Tabulka 2. Doporučené a maximální rychlosti proudění (m/s) při nízkotlakém rozvodu podle účelu větraného prostoru. [3]

Použití zařízení	Hluk. hladina dB	rychlost		se zřetelem na tlakové ztráty			
		doporuč.	max.	u ventilátoru		konce větví	
				přívod	odvod	přívod	odvod
Byty	20 až 35	3	5	5	4	3	3
Hotelové pokoje, lůžkové pokoje nemocnic	25 až 40	4	5	7,5	6,5	6	5
Malé kanceláře, ředitelské místnosti, knihovny, čítárny	35 až 45	5	6	10	7,5	8	6
Divadla, posluchárny	30 až 50	4	6	6,5	5,5	5	4
Velké kanceláře, prvotřídní restaurace, prvotřídní obchody, banky	45 až 55	6	7,5	10	7,5	8	6
Běžné obchody, kavárny	40 až 60	5	9	10	7,5	8	6

Tabulka 3. Doporučené a maximální rychlosti proudění (m/s) při nízkotlakém rozvodu podle řešeného úseku. [3]

Druh budovy		Obytná		Veřejná	
Doporučená rychlost (m/s)		střední	max.	střední	max.
potrubí	za ventilátorem (tlumičem)	5	8,5	7,5	11
	hlavní stoupačky	3,5 až 4,5	6	5 až 6,5	8
	odbočky rozvodu v podlaží	3	5	3 až 4,5	6,5
	odvod vzduchu	3,5	4,5	4	5,5
elementy	venkovní žaluzie pro nasávání	2,5	4	2,5	4,5
	filtry*)**)	1	1,5	1,5	2
	ohříváče**)	2,2	2,5	2,5	3
	pračky*)**)	2,5 až 3	3,5 až 4	2,5 až 3	3,5 až 4
	chladiče**)	2,2	-	2,5	-

\*) Neudává-li rychlost výrobce zařízení.  
\*\*) Rychlosti jsou v obrysovém průřezu.

Návrh rozvodů začíná rozmístěním distribučních prvků s požadovanými hmotnostními průtoky.

Následně jsou vyústky spojeny předběžným náčrtem tras se strojovnou vzduchotechniky. Vedení tras je nutné provádět s ohledem na konstrukční a prostorové možnosti objektu. Trasy by měly být, pokud možno, co nejkratší, nejméně větvené a bez zbytečných zahnutí z důvodu snížení tlakové ztráty. Je vhodné již předběžně zohlednit spojování větví s přibližně stejnými délkami a průtoky tak, aby se minimalizoval počet větví vyžadujících dodatečnou regulaci.

Hlavní větev trasy se rozdělí na jednotlivé úseky a vedlejší větve na další podúseky. Úsekem se rozumí část trasy se stejným hmotnostním průtokem, případně se stejným hydraulickým

průměrem  $d_h$  (m). Úseky se číslovají. Z praxe se jeví ideálním postupem číslování od konce hlavní větve směrem k ventilátoru.

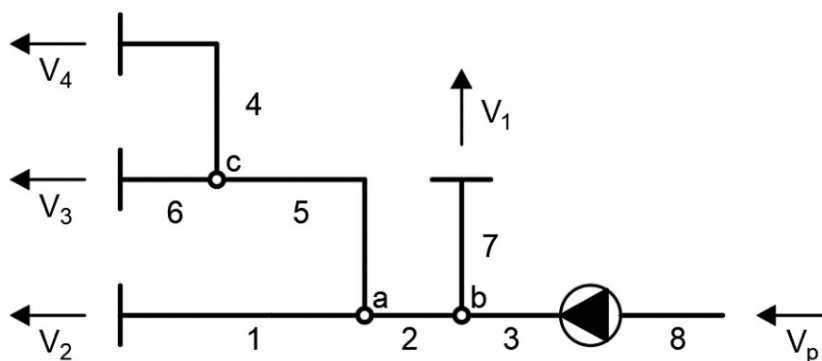
Stejným směrem následně probíhá i dimenzování potrubí, kde lze postupovat dvěma způsoby. Prvním řešením je předběžné stanovení doporučených rychlostí v jednotlivých úsecích. Na jejich základě je poté určen průměr/rozměr potrubí s ohledem na vyráběné normalizované rozměry. Následně je zpětně dopočtena skutečná rychlost proudění.

Nejčastěji se výpočet provádí pomocí tabulkových editorů, a proto se jednodušším řešením jeví dimenzování způsobem, kdy se přímo zadávají normalizované rozměry potrubí, které ihned předurčí skutečnou rychlost proudění. Odpadá tak proces jejího zpětného dopočítávání. Postup je stejný i pro vedlejší větve. V obou případech výpočtu by měla rychlost proudění směrem k ventilátoru vzrůstat. To platí pro přívodní i odvodní potrubí.

Následně je stanoven útlum hluku elementů sítě spolu s výpočtem vlastního hluku jednotlivých prvků potrubí. Pokud to situace vyžaduje, jsou navrženy tlumiče hluku s požadovaným útlumem.

Ze skutečných rychlostí se poté stanoví tlaková ztráta hlavní větve. Obdobným způsobem se také stanoví tlakové ztráty ve vedlejších větvích. Cílem je dosáhnout stejné ztráty odbočky jako je ztráta od konce hlavní větve po napojení řešené odbočky. V případě, že tomu tak není, je buďto upravena dimenze odbočky nebo navržen regulační prvek.

Na obrázku je uveden příklad, kdy je hlavní větev představena úseky č. 4, 5, 2, 3, 8. Ventilátor tak musí pokrýt tlakovou ztrátu  $\Delta p_z = \Delta p_{z,4} + \Delta p_{z,5} + \Delta p_{z,2} + \Delta p_{z,3} + \Delta p_{z,8}$  a zajistit objemový průtok  $V_p = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$ . Zároveň je nutné docílit stavu, aby tlakové ztráty byly v každém spojovacím uzlu shodné, např. v bodě "b" platí  $\Delta p_{z,4} + \Delta p_{z,5} + \Delta p_{z,2} = \Delta p_{z,7}$  nebo v bodě "a" zase  $\Delta p_{z,4} + \Delta p_{z,5} = \Delta p_{z,1}$  apod.



Obrázek 32. Schéma rozdělení úseků sítě.

Z výsledné tlakové ztráty hlavní větve se určí dopravní tlak ventilátoru  $\Delta p_z = \Delta p_c$ . Pokud je ventilátor umístěn v jednotce, je potřeba k externí tlakové ztrátě sítě  $\Delta p_{ext}$  (Pa) dodatečně přičíst i tlakovou ztrátu prvků větrací jednotky (filtry, ohřívače, apod.). Často totiž výrobci jednotek uvádějí pouze hodnoty  $\Delta p_{ext}$ . [7]

## 1.2.4 Tlakové ztráty

Při proudění vzduchu potrubím se vlivem vazkosti přemění část mechanické energie na teplo. V případě nestlačitelné tekutiny se projeví úbytek mechanické energie úbytkem tlaku, který představuje tlakovou ztrátu. Tlakové ztráty lze rozlišit podle jejich vzniku, a to na ztráty třením a ztráty místní. Ztráty třením nabývají hodnoty při proudění po celé délce vzduchovodu a ve srovnání s místními ztrátami jsou u moderních vzduchovodů několikanásobně nižší. Ztráty místní vznikají při narušení rychlostního profilu proudu. [10]

### 1.2.4.1 Tlakové ztráty třením

Odpor, kterým působí přímé potrubí na proudící tekutinu, způsobuje úbytek jejího tlaku, respektive ztrátu třením  $\Delta p_t$  (Pa). Ta závisí na několika faktorech, uvedených ve vztahu

$$\Delta p_t = \lambda \frac{1}{d_h} l \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

kde  $\lambda$  (-) představuje součinitel tření a  $d_h$  (m) je hydraulický průměr, který se určí ze vztahu  $d_h = 4 \cdot S/O$  (m). Po dosazení lze odvodit výsledný tvar pro kruhový průřez

$$d_h = 4 \frac{\pi \cdot d^2 / 4}{\pi \cdot d} = d$$

a pro čtyřhranný průřez

$$d_h = 4 \frac{A \cdot B}{2 \cdot (A + B)} = \frac{2AB}{A + B}$$

kde  $A$  a  $B$  (m) jsou šířka a výška průřezu čtyřhranného potrubí.

Součinitel tření  $\lambda$  závisí na Reynoldsově čísle  $Re$  (-), typu proudění a v případě turbulentního proudění i na poměrné drsnosti potrubí  $k = \varepsilon/d_h$  (-). V odborných publikacích lze najít vícero výpočetních vztahů, jak stanovit hodnotu  $\lambda$ . Za nejpřesnější metodu je obecně považován Colebrookův-Whiteův vztah, který ovšem vyžaduje složitý iterační postup. Pro technickou praxi se proto jeví jako ideální volba výpočet podle Swameeho. [11]

Tabulka 4. Ekvivalentní drsnost stěn vzduchovodů. [7]

$$\lambda = \frac{1,319}{\left[ \ln \left( \frac{k}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} ; \text{ kde } k = \frac{\varepsilon}{d_h}$$

Provedení vzduchovodu	$\varepsilon$ (mm)
Pozinkovaný plech	0,15
Betonový kanál, hladký povrch	0,5
Betonový kanál, hrubý povrch	1 až 3
Potrubí z platu	0,007
Ohebné hadice	0,6 až 6

U čtyřhranného potrubí je dodatečně nezbytné korigovat hodnotu součinitele tření  $\lambda$ , získaného ze vztahu podle Swameeho, korekčním činitelem  $C$  [3]

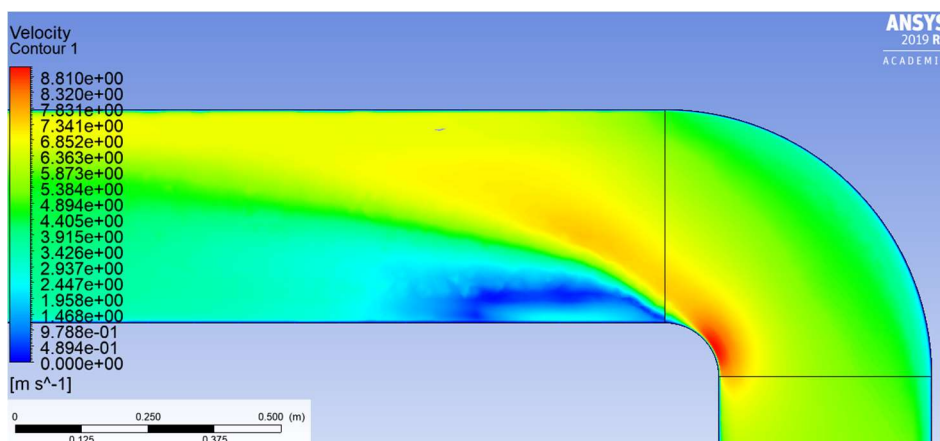
$$\lambda_0 = C \cdot \lambda$$

kde  $\lambda_0$  (-) je výsledný ztrátový součinitel pro čtyřhranné potrubí. Hodnota korekce  $C$  závisí na  $Re$ , jelikož ji možno použít pouze za předpokladu turbulentního proudění

$$C = 1,1 - 0,1 \frac{b}{a}$$

#### 1.2.4.2 Tlakové ztráty místních odporů

Místní tlakové ztráty vznikají při každém narušení proudu vzduchu. Zpravidla tomu je u tvarovek či jiných specifických potrubních komponentů. Vlivem geometrických změn v průřezu dochází k deformaci rychlostního profilu a následnému vzniku vírových oblastí s téměř nulovou rychlostí proudění. Důsledkem je zmenšení průtočného průřezu s následným lokálním zvýšením rychlosti proudění. A protože je tlaková ztráta místní (stejně jako ztráta třením) závislá na druhé mocnině rychlosti, roste její hodnota exponenciálně. [10] Obrázek níže zobrazuje rychlostní profil u čtyřhranného oblouku, kde je patrný úplav proudění v místě vnitřního zaoblení.



Obrázek 33. CFD model čtyřhranného oblouku.  $AxB = 400x100$  mm;  $r/A = 0,75$ ;  $w_p = 5$  m/s.

Místní odpory se tedy na výsledné externí tlakové ztrátě projeví mnohonásobně více než ztráty třením. Aerodynamické vlastnosti tvarovky popisuje součinitel vřazených odporů  $\xi$  (-), který lze odečíst z odborné literatury nebo návrhových podkladů od výrobce. Tlakovou ztrátu místního odporu tedy lze získat ze vztahu

$$\Delta p_m = p_d \cdot \xi = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \xi \text{ (Pa)}$$

Kde  $p_d$  (Pa) představuje dynamický tlak.

Hodnoty součinitele  $\xi$  jsou specifické pro každou rozměrovou variantu tvarovky. Podrobněji jsou popsány v podkapitole 1.1.2.

Výsledná tlaková ztráta  $\Delta p_z$  (Pa) je dána součtem ztrát třením a ztrát místních odporů.

$$\Delta p_z = \Delta p_t + \Delta p_m = \left( \lambda \frac{1}{d_h} l \frac{\rho \cdot w^2}{2} \right) + \left( \frac{\rho \cdot w^2}{2} \xi \right) = \left( \lambda \frac{l}{d_h} + \Sigma \xi \right) \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

## 2 Praktická část

V této kapitole budou stručně popsány tři možné způsoby výpočtu tlakových ztrát. Poté budou porovnány na konkrétním příkladu, který je převzatý z projektové části této práce. Závěrem budou výsledky jednotlivých variant podrobněji rozebrány.

### 2.1 Výpočetní způsoby

**Varianta č. 1 –** Výpočetní software Duct Fitting Database (ASHRAE) + MS Excel

Americká asociace ASHRAE je autorem rozsáhlé databáze tvarovek, která čítá celkem 220 kusů kruhových, čtyřhranných a oválných průřezů. Seznam je přehledně rozdělen na přívodní, odvodní a obecné tvarovky. Každý kus má své specifické označení a je patřičně rozměrově a graficky definován.

**Input**

Diameter (Dc, mm)	300
Diameter (Db, mm)	150
Diameter (Ds, mm)	250
Flow Rate (Qc, L/s)	750
Flow Rate (Qb, L/s)	150
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.200

**Output**

Branch	
Velocity (Vb, m/s)	8.5
Vel Pres at Vb (Pvb, Pa)	43
Loss Coefficient (Cb)	1.80
Branch Pressure Loss (Pa)	78
Main	
Velocity (Vs, m/s)	12.2
Velocity (Vc, m/s)	10.6
Vel Pres at Vs (Pvs, Pa)	90
Vel Pres at Vc (Pvc, Pa)	68
Loss Coefficient (Cs)	0.15
Main Pressure Loss (Pa)	13

Calculate

Supply\Round\Junctions, Diverging\Tee\Non-Conical Branch\90 degree

Obrázek 34. ASHRAE Duct Fitting Database.

Na základě uživatelem zadaných rozměrů tvarovky a objemového průtoku vzduchu, provádí program lineární, příp. bilineární interpolaci součinitelů místních ztrát z tabulkových hodnot databáze. Následně vypočte i místní tlakovou ztrátu řešeného prvku. V programu je možné si veškeré tabulky hodnot, z nichž výpočet vychází, zobrazit. Odborných publikací a autorů měření je zde citováno vícero, nicméně u většiny tvarovek kruhového a čtyřhranného průřezu nejčastěji figuruje jako autor uváděných hodnot již zmiňovaný Idelchik (1986), z čehož je zřejmé, že zjištěné data jsou počinem experimentálních měření.

Pro srovnávací výpočet byly v 1. variantě, pro určení ztráty místních odporů, použity výše zmiňované hodnoty  $\xi$  a pro výpočet ztráty třením byl třecí součinitel  $\lambda$  určen na základě vztahu dle Swameeho (pro čtyřhranné potrubí dodatečně  $\lambda_0$  (viz 1.2.4.1)). Souhrnný výpočet byl poté prováděn v tabulkovém procesoru MS Excel, jehož grafická podoba a uspořádání závisí především na projekčních preferencích uživatele. Jistou výhodou tohoto způsobu může být libovolné přizpůsobení a zjednodušení výpočtu pomocí vlastního makra.

Vstupní údaje				Návrh rozměrů		Výpočet tlakových ztrát třením						Ztráta úseku		
č.ú.	V	L	typ potrubí	AxB	Ød	S	w	d <sub>n</sub>	Re	λ	R	Δp <sub>t</sub>	Δp <sub>m</sub>	Δp <sub>t</sub> +Δp <sub>m</sub>
	m <sup>3</sup> /h	m	-	mm	mm	m <sup>2</sup>	m/s	mm	-	-	Pa/m	Pa	Pa	Pa
0	500	11.6	spiro		250	0.049	2.83	250	46 172	0.0231	0.44	5.08	26.88	31.97
1	1270	5.0	spiro		355	0.099	3.56	355	82 589	0.0205	0.43	2.17	3.98	6.15
2	2040	3.3	4hr	630 x 250		0.158	3.60	358	84 065	0.0217	0.46	1.53	1.84	3.37
3	2680	7.7	4hr	710 x 250		0.178	4.19	370	101 235	0.0212	0.60	4.58	5.74	10.33
4	3320	5.3	4hr	710 x 250		0.178	5.20	370	125 411	0.0206	0.89	4.71	76.70	81.41
5	3320	13.3	4hr	710 x 250		0.178	5.20	370	125 411	0.0206	0.89	11.81	44.93	56.74
6	70	3.1	spiro		125	0.012	1.58	125	12 928	0.0310	0.37	1.14	20.65	21.79
7	320	3.3	spiro		225	0.040	2.24	225	32 833	0.0247	0.33	1.07	1.71	2.79
8	770	2.3	spiro		315	0.078	2.74	315	56 432	0.0220	0.31	0.72	12.03	12.75
9	250	2.8	spiro		200	0.031	2.21	200	28 858	0.0256	0.37	1.03	59.12	60.16
10	450	1.5	spiro		250	0.049	2.55	250	41 555	0.0236	0.36	0.54	23.56	24.11
11	160	1.4	spiro		160	0.020	2.21	160	23 086	0.0271	0.49	0.69	59.13	59.81
12	320	1.4	spiro		200	0.031	2.83	200	36 938	0.0245	0.58	0.81	0.62	1.43
13	480	1.4	spiro		225	0.040	3.35	225	49 250	0.0231	0.68	0.96	0.86	1.82
14	640	1.5	spiro		250	0.049	3.62	250	59 100	0.0223	0.69	1.04	9.15	10.19

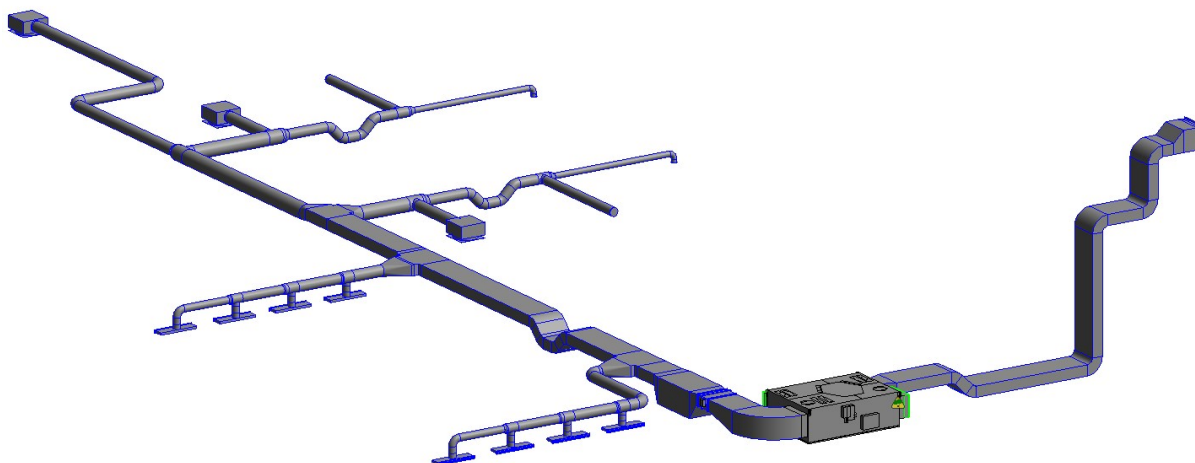
Obrázek 35. Příklad možného uspořádání návrhové tabulky v Excelu. Uvedená data popisují návrh rozměrů potrubí a výpočet tlakových ztrát třením pro úseky řešené větve z příkladu.

## Varianta č. 2 – Revit MEP (Autodesk)

V posledních letech je tento vysoce propracovaný software velkým tématem nejen v oblastech architektury a stavitelství, ale také i mezi jednotlivými obory TZB. Mezi užitečné funkce patří bez pochyby synchronizace veškerých úprav ve všech zobrazeních v rámci celého projektu, což minimalizuje lidskou chybu. Navíc probíhá celý proces návrhu ve 3D zobrazení, které umožňuje předběžný náhled na skutečnou podobu stavby a umožňuje lépe řešit kolize



jednotlivých profesí. Další nespornou předností Revitu jsou také rozsáhlé informace, které může uživateli o vypracovaném modelu poskytnout. Konkrétně pro projektanty vzduchotechniky mohou být atraktivní například automatické výkazy materiálu, automatické označení pozic nebo funkce dimenzování rozvodů s výpočtem tlakových ztrát.



Obrázek 36. Model přívodního potrubí wellness provozu v programu Revit MEP 2020.

Důležité je zmínit, že Revit při výpočtu tlakových ztrát místních odporů vychází právě z hodnot  $\xi$  výše zmiňované databáze od ASHRAE, tudíž místní ztráty by mohly s variantou č. 1 přibližně korespondovat. Nicméně pro výpočet součinitele tření  $\lambda$ , používá Revit velice zjednodušenou formulaci, jinak složitějšího iteračního tvaru, Colebrook-Whiteovy rovnice [12] a tím pádem je výsledná externí tlaková ztráta třením počítána s jistou odchylkou a možnými nepřesnostmi ve výsledcích. Ovšem je na místě zdůraznit, že ztráta třením je oproti místní ztrátě většinou minoritní.

Neméně důležitou poznámkou je, že pro správný výpočet tlakových ztrát tvarovek je nutné si v ovládacích panelech přenastavit desetinný oddělovač na tečku, jelikož v případě defaultní čárky si Revit nepochopitelně vypočítá hodnoty místních ztrát v řádech tisíců kPa.

Rozmanitost jednotlivých tvarovek je určena dostupnými rodinami prvků, což může v některých případech být poněkud omezující. Jsou-li údaje o součiniteli  $\xi$  nebo výsledné ztrátě prvku předem známy, je možné definovat tyto hodnoty ručně. Revit umí uživateli zobrazit případné kolize potrubí, nedopojené prvky či kritickou cestu celé potrubní sítě. Dále umožňuje i následný export provedeného výpočtu tlakových ztrát u jednotlivých potrubních prvků.

### Varianta č. 3 – Výpočetní aplikace na [www.qpro.cz](http://www.qpro.cz) (Ing. Karel Vopálka)

Jedná se o internetovou výpočetní aplikaci, kterou zcela jistě každý český projektant alespoň viděl, použil či aktivně používá. Zadání vstupních dat je snadné, rychlé a intuitivní. Stejně tak i celková orientace v celém rozhraní. Je proto zřejmé, že na úkor své jednoduchosti, nelze od aplikace očekávat možnost jakékoli podrobnější formy zadání s ohledem na různé tvarové modifikace prvků, nicméně pro rychlý a orientační výpočet tlakové ztráty je program dostačující a napsán zdařile. Shodou okolností i výpočetní kalkulačka na stránkách [www.remak.eu](http://www.remak.eu), je dle uspořádání nejspíše prací stejného autora. Výpočetní algoritmy jsou z velké části originální, ale jejich závislosti jsou stanoveny na základě hodnot uvedených v odborné literatuře. [13] Na případné nepřesnosti ve výpočtu, s ohledem na výše zmiňované skutečnosti, ale autor dopředu upozorňuje.

Pro srovnávací výpočet byla ve variantě č. 3 použita také kalkulačka ztráty třením z totožného webu. Avšak i zde autor poukazuje na drobné nepřesnosti výpočtu, které porovnává s tabulkami ekvivalentních průměrů a průřezovým nomogramem tlakového spádu. Zjištěné odchylky jsou při malých rychlostech proudění pouze do 15 %, tudíž opět zanedbatelné. [14]

Výběr výpočtu pro standardní typy tvarovek:

- OBECNÝ VÝPOČET
- ZMĚNA PRŮŘEZU, PŘECHODY
- RŮZNÉ POTRUBNÍ PRVKY
- ODBOČKY A ROZBOČKY

Nastavení typu tvarovky: Oblouk čtyřhranný

Rozměr A (D): 400 mm

Rozměr B: 250 mm

Poloměr R (r): 200 mm

Úhel: 90 [°stupně]

Hustota vzduchu: 1.2 kg/m<sup>3</sup>

Rychlost proudění: 5 m/s

Průtok: 1800 m<sup>3</sup>/h

Součinitel místního odporu: 0.211 (-)

**VYPOČÍTAT** **VYMAZAT**

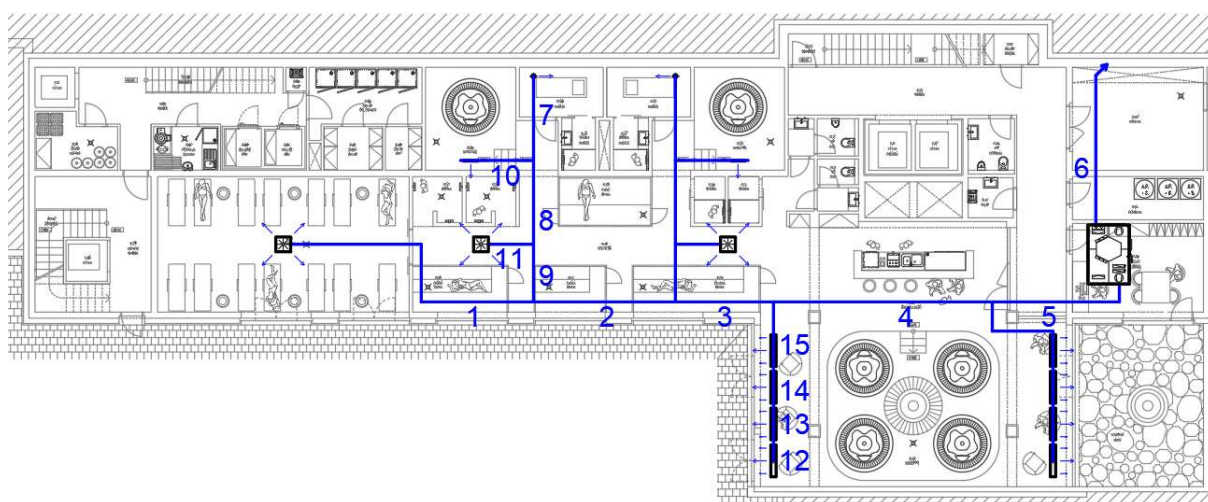
Tlaková ztráta - výsledek: 3.16 Pa

Obrázek 37. Výpočetní aplikace pro tlakové ztráty místních odporů z [www.qpro.cz](http://www.qpro.cz).

## 2.2 Výpočet externí tlakové ztráty

### Příklad

Jedná se o přívodní větev podstropní vzduchotechnické jednotky, která obhospodařuje suterénní prostory wellness zařízení v hotelu ve Špindlerově Mlýně. Jednotka přivádí objem čerstvého vzduchu  $V_e = 3\,320 \text{ m}^3/\text{h}$  se sacím potrubím o délce 13,0 m a nejdelším přívodním úseku o délce 35,0 m. Rozvody jsou kombinací spiro potrubí a čtyřhranného průřezu z pozinkovaného plechu. Potrubí s upraveným vzduchem je vedeno v jedné výškové úrovni a sání je vyvedeno do druhého podlaží nad střechu garáže. Celkově byly rozvody rozděleny na 15 výpočtových úseků. Distribučními prvky jsou talířové ventily, vířivé anemostaty, šterbinové vyústě a potrubní mřížky.



Obrázek 38. Schéma řešené přívodní větve wellness provozu s rozdělením na výpočetní úseky.

Výchozím podkladem pro srovnávací výpočty byl 2D výkres z AutoCADu. Vytvořit naprosto totožný model v Revitu je samozřejmě nemožné, nicméně snahou bylo se alespoň co nejvíce přiblížit navrženým typům tvarovek a délce všech potrubních prvků, čehož bylo dosaženo. Proto je rozumné uvažovat následující porovnání pouze jako orientační. Ovšem vzhledem ke zmiňovaným odlišnostem variantních výpočtových přístupů, si lze udělat alespoň předběžný obrázek o procentuálních odchylkách jednotlivých variant.

## 2.3 Vyhodnocení

Je důležité zmínit, že tlakové ztráty všech distribučních prvků, požární klapky a tlumiče hluku byly pro všechny případy stanoveny dle návrhových nomogramů výrobců s pevnou hodnotou tlakové ztráty, tudíž do tohoto konkrétního srovnání nijak nezasahují.

Tabulka 5. Porovnání výsledných externích tlakových ztrát pro jednotlivé větve.

Úseky řešených větví	Varianta č. 1			Varianta č. 2			Varianta č. 3		
	ASHRAE databáze + MS Excel			Revit MEP			QPRO webová aplikace		
	$\sum\Delta p_m$	$\sum\Delta p_t$	$\sum\Delta p_m + \sum\Delta p_t$	$\sum\Delta p_m$	$\sum\Delta p_t$	$\sum\Delta p_m + \sum\Delta p_t$	$\sum\Delta p_m$	$\sum\Delta p_t$	$\sum\Delta p_m + \sum\Delta p_t$
-	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
1;2;3;4;5;6	160.08	29.88	189.96	135.59	19.30	154.89	152.74	27.87	180.61
7;8;9;2;3;4;5;6	167.59	27.73	195.32	135.59	17.30	152.89	155.48	25.71	181.19
10;8;9;2;3;4;5;6	206.06	27.62	233.68	136.49	17.10	153.59	157.01	25.52	182.53
11;9;2;3;4;5;6	168.79	26.06	194.85	133.39	16.10	149.49	152.52	23.92	176.44
12;13;14;15;4;5;6	197.14	24.60	221.74	176.59	14.40	190.99	187.97	22.70	210.67

**Legenda:**

maximum  $\sum\Delta p_m$  – součet veškerých místních tlakových ztrát v řešených úsecích  
kritická trasa  $\sum\Delta p_t$  – součet veškerých třecích tlakových ztrát v řešených úsecích

Z výše spočtených hodnot lze vyvodit tyto závěry:

- Výsledky třecích ztrát spočtené v programu Revit jsou řádově o 30 až 40 % odlišné, resp. nižší, než ve zbylých dvou variantách. Vzhledem ke zjednodušenému tvaru výpočetního vztahu součinitele  $\lambda$ , který je v Revitu implementován, se tato chyba dala očekávat.
- Hodnoty výsledků výpočtových variant č. 1 a 3 vycházejí s odchylkou do 10 %, což je vzhledem ke zjednodušenému provedení kalkulačky QPRO překvapující.
- Ve všech případech výpočtu mají ztráty místních odporů 80 až 90% podíl na celkové externí tlakové ztrátě. Pro předběžný návrh ventilátoru může být tento údaj přínosný.
- I když je zdroj ztrátových součinitelů  $\xi$  v Revitu stejný jako ve variantě č. 1, přesto se hodnoty liší o 15 až 20 %, což se vymyká počátečnímu předpokladu.
- Výrazná odchylka maxima místních ztrát u varianty č. 1 je zapříčiněna T-kusem na úseku č. 10, který vykazuje ztrátu přes 38 Pa. V ostatních variantách je jeho ztráta pouze v řádech jednotek Pa. Z tohoto důvodu vychází u varianty č. 1 i odlišná kritická trasa, než která je u obou variant č. 2 a 3.

*Vliv na návrh ventilátoru a energetickou náročnost*

Zdali odchylky externích tlakových ztrát, vypočtených dle řešených variant, mají nějaký zásadní dopad na spotřebu elektrické energie, lze zjistit podle hodnoty měrného příkonu ventilátoru  $P_{SFP}$  (W.s/m<sup>3</sup>), který vyjadřuje podíl potřebné elektrické energie pro pohon

ventilátorů  $P$  (W) a objemového množství proudícího vzduchu  $q_v$  ( $m^3/s$ ). Stejně tak ho lze vyjádřit i podílem dopravního tlaku ventilátoru  $\Delta p$  (Pa) a jeho účinnosti  $\eta$  (-). [1] Detailněji je popsán v ČSN EN 16798-3 a v obecném tvaru ho lze zapsat následovně:

$$P_{SFP} = \frac{P}{q_v} = \frac{\Delta p}{\eta} \left( \frac{W}{m^3/s} = Pa \right)$$

V řešeném příkladu, byly pro jednotlivé varianty zjištěny specifikace přívodního ventilátoru pomocí návrhového softwaru společnosti Atria. Typ EC ventilátoru s frekvenčním měničem zůstal pro všechny varianty stejný. Pouze hodnoty frekvence otáček a dodávaného příkonu se logicky zvyšovaly spolu s tlakovou ztrátou. Velmi nepatrně (v řádech 1,0 až 2,0 dB) se v některých oktávových pásmech zvýšily i hodnoty akustického výkonu.

Porovnání je velmi zjednodušené, jelikož nezohledňuje například podíl cirkulačního vzduchu, který by ve wellness provozu figuroval zejména v zimním období. Princip výpočtu by ale zůstal v podstatě stejný. Jistou roli v navýšení energetické spotřeby může hrát i netěsnost vzduchovodů. [1]

Tabulka 6. Vlastnosti navržených ventilátorů pro jednotlivé varianty výpočtu.

Varianta		$q_v$	$\Delta p_{ext,tot}$	$\Delta p_{int,tot}$	$f$	$P$	$P_{SFP}$	$\eta_{tot}$
č.	popis	$m^3/h$	Pa	Pa	ot./min	W	W.s/ $m^3$	%
1	ASHRAE D. F. D.	3 320	234	236	2 278	1 122	1 217	38.6
2	Revit MEP	3 320	191	236	2 230	1 056	1 145	37.3
3	QPRO	3 320	211	236	2 252	1 086	1 178	38.0

**Legenda:**

$\Delta p_{ext,tot}$  – celková externí tlaková ztráta vzduchovodů a vnějších součástí

$\Delta p_{int,tot}$  – celková tlaková ztráta vnitřních součástí vzduchotechnické jednotky

$P_{SFP}$  – měrný příkon ventilátoru

$\eta_{tot}$  – celková účinnost ventilátoru na základě celkových tlaků

Výsledné hodnoty měrného příkonu ventilátoru  $P_{SFP}$  se liší nepatrně, zhruba do 6 %. Pro konkrétní číselné srovnání lze například určit předpokládané hodnoty potřeby energie:

Přiváděný objem vzduchu, vztažený na podlahovou plochu wellnessu, je  $12,5 m^3/h.m^2$ . Pokud by provozní doba jednotky byla např. 7 200 h za rok, tak měrná roční potřeba energie na pohon přívodního ventilátoru za rok činí  $30,43 kWh/m^2.rok$  pro variantu č. 1 a pro variantu č. 2 je  $28,63 kWh/m^2.rok$ , čili rozdíl  $1,8 kWh/m^2$ . Ve fázi projektové přípravy, například při tvorbě PENB, by se tento rozdíl dal považovat jako zanedbatelný.

### 3 Závěr

Hodnoty součinitelů místních ztrát se v různých publikacích poměrně liší. Častým problémem u většiny zdrojů je nedostatečná specifikace řešené tvarovky. Většinou je totiž naznačena pouze jednoduchým náčrtem, bez jakýchkoli doplňujících informací o konstrukčním provedení. Právě tyto detaily, jako je např. zaoblení ostrých rohů, počet segmentů, zkosení odbočujícího ramena apod. mohou značným způsobem ovlivnit výsledný obraz proudění a zvyšovat tak součinitel  $\xi$ .

Tyto nesrovnalosti se sice mohou projevit na odlišné, resp. vyšší externí tlakové ztrátě, ale ve finále nemají na spotřebu energie až tak významný vliv. Mnohem důležitějším faktorem potenciálních úspor provozních nákladů se tedy zdá být zejména návrh distribučních prvků s nízkou tlakovou ztrátou nebo volba vhodného ventilátoru s elektronicky komutovanými (EC) motory o vysoké účinnosti a s plynulou regulací otáček, namísto indukčních (AC) motorů.

Výše zjištěné a popisované nesrovnalosti v literatuře a obecně v kterýchkoli návrhových pomůckách, by se daly vyhodnotit jedním závěrem. Vzhledem k rychlému nástupu a neustálému vývoji softwarů podporujících BIM (Building Information Modeling) projektování, jako je např. výše zmiňovaný Revit nebo ArchiCAD, je zřejmé, že dříve či později bude tato forma projekce tou suverénně nejrozšířenější, ne-li jedinou používanou. BIM projekt umožňuje nejen sdružení veškerých oborových specialistů do jednoho modelu stavby, ale zahrnuje i nepřehledné množství informací a dat. Pro projektanty vzduchotechniky je tedy více než logickým krokem všech těchto nabízených předností naplno využít. Stejně tak jako všechna programem poskytovaná návrhová data. Protože ať už bude zdroj těchto dat odkudkoliv, bude pro všechny uživatele stejný, čímž by se výpočty rozvodů dokázaly v průběhu let dokonale sjednotit.

## Použitá literatura

1. SCHILD, P.G. a MYSEN, M. Doporučení pro měrný příkon ventilátoru (SFP) a účinnost vzduchotechnických systémů – I. In: *TZB-info* [online]. Topinfo, 2001 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/uspory-energie-vetrani-klimatizace/11079-doporuceni-pro-merny-prikon-ventilatoru-sfp-a-ucinnost-vzduchotechnicky-systemu-i>
2. ZMRHAL, V. a SCHWARZER, J. *Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings*. [online] Glasgow: In. Proc. of Building Simulation, IBPSA, 2009.
3. CHYSKÝ, J. a HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace*. Vyd. 3., zcela přepracované. Brno: BOLIT-B Press, 1993. Česká matice technická, č. spisu 457, roč. 48 (1993). ISBN 80-901574-0-8.
4. MAURER, K. *Vzduchotechnická zařízení: pro 3. a 4. ročník SPŠ stavební[sic] studijního oboru TZB*. Vyd. 3., přeprac., (V Sobotáles vyd. 1.). Praha: Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86817-21-7.
5. Installation Requirements. In: *ADC Flexible Duct Performance & Installation Standards, 5th Edition* [online]. Schaumburg, Illinois 60195: AIR DUCT COUNCIL, 1961 – 2020, 9 – 20 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://flexibleduct.org/images/ADC~IR5E.pdf>
6. ABUSHAKRA, B., WALKER, I. a SHERMAN, M. *Compression Effects on Pressure Loss in Flexible HVAC Ducts* [online]. 2004, 10(3), 275-289 [cit. 2020-10-30]. ISSN 1078-9669. Dostupné z: doi:10.1080/10789669.2004.10391104
7. DRKAL, F. a ZMRHAL, V. *Větrání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05181-8.
8. *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition*. Atlanta: ASHRAE, 2001. ISBN 978-1883413880.

9. Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. In: *TZB-info* [online]. Topinfo, 2001 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>
10. DRKAL, F., LAIN, M., SCHWARZER, J., ZMRHAL, V. *Přednáškové texty pro předmět Vzduchotechnika pro studijní obor Inteligentní budovy*. 2009. Dostupné z: <http://www.ib.cvut.cz/>
11. HEMZAL, K. Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. *Vytápění, větrání, instalace*. Společnost pro techniku prostředí, z. s., 1992 – 2020, 2003(1), 30 – 32.
12. Pressure Drop Calculation | Revit Products 2017 | Autodesk Knowledge Network. *Home | Autodesk Knowledge Network* [online]. Copyright © Copyright 2020 Autodesk Inc. All rights reserved [cit. 11.12.2020]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/Revit-Model/files/GUID-D1D409B3-41B2-4E19-8248-1117BED1A8C3-htm.html>
13. VOPÁLKA, K. Příklad výpočtu tlakové ztráty místními odpory. *QPRO* [online]. Chlumeck nad Cidlinou: projekční kancelář Qpro, 2006 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.qpro.cz/Priklad-vypoctu-tlakove-ztraty-mistnimi-odpory>
14. VOPÁLKA, K. Příklad výpočtu tlakových ztrát v potrubí. *QPRO* [online]. Chlumeck nad Cidlinou: projekční kancelář Qpro, 2006 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.qpro.cz/Priklad-vypoctu-tlakovych-ztrat-v-potrubu>



## Použité obrázky

### Obrázek 1.

- Návrh trasy vzduchotechnického potrubí. In: *Katedra technických zařízení budov* [online]. Praha: ČVUT v Praze Fakulta stavební [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/62/navrh-trasy-vzt-potrubi.pdf>

### Obrázek 2.

- Global HVAC Ductwork Market 2020: Expected Development, Share, Demand And Study Of Key Players- Research Predictions 2026 – Galus Australis. *Galus Australis* [online]. Dostupné z: <https://galusaustralis.com/2020/08/870398/global-hvac-ductwork-market-2020-expected-development-share-demand-and-study-of-key-players-research-predictions-2026-2/>

### Obrázek 3.

- Electric Calender — Macformer. *Macformer - HVAC* [online]. Dostupné z: <https://macformer.com/product/electric-calender/>
- Seaming Applications | RAS Systems. *Precision Sheet Metal Fabrication Machinery | RAS Systems | RAS Systems* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.ras-systems.com/products/forming/lockforming-machines-speedyseamer/seaming-applications/>
- Seam Closing Machine - Macformer. *Macformer - HVAC* [online]. Dostupné z: <https://macformer.com/product/seam-closing-machine/>

### Obrázek 4.

- Spiral Duct Forming Machine & Tube Former, Spiral Tube Making Machine | BLKMA. *BLKMA: Auto Duct Production Line, Square & Spiral & Round Duct Making Machine* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.blkma.com/products/spiral-tube-forming-machine.html>
- Duct systems and components. In: *AccuDuct Catalog* [online]. AccuDuct Mfg., 2005 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://www.accuduct.com/pdfs/catalog.pdf>
- SRI lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/sri.aspx>

### Obrázek 5.

- Komponenty pro výrobu a montáž vzduchotechnických zařízení. In: *Katalog vzduchotechniky, 2. vydání (07/2017)* [online]. KEBEK, 1992 – 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [http://www.kebek.cz/KEBEK\\_Vzduchotechnika.pdf](http://www.kebek.cz/KEBEK_Vzduchotechnika.pdf)
- Komponenty pro výrobu a montáž. In: *Katalog* [online]. VZ-system [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [http://www.vz-system.cz/doc/Katalog\\_VZ\\_system.pdf](http://www.vz-system.cz/doc/Katalog_VZ_system.pdf)

Obrázek 6.

- Komponenty pro výrobu a montáž vzduchotechnických zařízení. In: *Katalog vzduchotechniky*, 2. vydání (07/2017) [online]. KEBEK, 1992 – 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [http://www.kebek.cz/KEBEK\\_Vzduchotechnika.pdf](http://www.kebek.cz/KEBEK_Vzduchotechnika.pdf)

Obrázek 7.

- Complete Seal Fittings | Sheet Metal Connectors. *HVAC Sheet Metal Connectors | Spiral Ductwork Suppliers* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.smcduct.com/spiral-pipe-and-fittings/complete-seal-fittings/>
- Spiral Pipe Connector (Non-Gasketed) | Sheet Metal Connectors. *HVAC Sheet Metal Connectors | Spiral Ductwork Suppliers* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.smcduct.com/product/spiral-pipe-and-fittings/standard-spiral-pipe-connector-non-gasketed/>

Obrázek 8.

- SR lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/sr.aspx>

Obrázek 9.

- Do you know the types of elbows used in rectangular duct?. *Conklin Metal Industries | Metal, HVAC and Duct Fab Supplies* [online]. Dostupné z: <https://www.conklinmetal.com/do-you-know-the-types-of-elbows-used-in-rectangular-duct/>

Obrázek 10.

- Duct Manufacture Auto Line III - Macformer. *Macformer - HVAC* [online]. Dostupné z: <https://macformer.com/product/duct-manufacture-line/>

Obrázek 11.

- Duct systems and components. In: *AccuDuct Catalog* [online]. AccuDuct Mfg., 2005 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://www.accuduct.com/pdfs/catalog.pdf>
- Air ducts. *Home* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.ras-online.de/en/industries/air-ducts/>

Obrázek 12.

- Duct systems and components. In: *AccuDuct Catalog* [online]. AccuDuct Mfg., 2005 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://www.accuduct.com/pdfs/catalog.pdf>
- Komponenty pro výrobu a montáž. In: *Katalog* [online]. VZ-system [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [http://www.vz-system.cz/doc/Katalog\\_VZ\\_system.pdf](http://www.vz-system.cz/doc/Katalog_VZ_system.pdf)
- TDC vs. TDF Profile. *Conklin Metal Industries | Metal, HVAC and Duct Fab Supplies* [online]. Dostupné z: <https://www.conklinmetal.com/tdc-tdf-which-is-the-better-profile/>

Obrázek 13.

- Komponenty pro výrobu a montáž vzduchotechnických zařízení. In: *Katalog vzduchotechniky, 2. vydání (07/2017)* [online]. KEBEK, 1992 – 2020 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: [http://www.kebek.cz/KEBEK\\_Vzduchotechnika.pdf](http://www.kebek.cz/KEBEK_Vzduchotechnika.pdf)

Obrázek 16.

- Flat Oval Spiral Duct for HVAC Duct Systems | Fabricator | Fort Worth, TX. *Spiral Round/Flat Oval, Rectangular & Industrial Duct | Fabricator | Texas* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.spotusa.com/products/spiral-flat-oval-duct/>

Obrázek 17.

- Oval Duct Forming Machine | Duck Forming | SBKJ. *Ductwork Making Machines Manufacturer | SBKJ* [online]. Dostupné z: <http://ductworkmachinery.com/2-1-4-ovalizer-sbhf-3100.html>
- Flat Oval Spiral Duct - YouTube. *YouTube* [online]. Copyright © 2020 Google LLC [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=yqE9zKtOk\\_8](https://www.youtube.com/watch?v=yqE9zKtOk_8)

Obrázek 18.

- Flat Oval Tube and Fittings. In: *Heating, Ventilating & Air Movement Equipment* [online]. HAS-Vent [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://www.hotchkissairsupply.co.uk/pdf/Tech/FLAT%20OVAL%20TUBE.pdf>

Obrázek 19.

- *Building Energy Codes Program | BECP* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: [https://www.energycodes.gov/sites/default/files/documents/cn\\_commercial\\_duct\\_insulation\\_sealing.pdf](https://www.energycodes.gov/sites/default/files/documents/cn_commercial_duct_insulation_sealing.pdf)

Obrázek 20.

- Ohebné hadice. *ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o.* [online]. 2003 – 2009 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/uplny-sortiment/produkty/prislusenstvi-ohebne-hadice-tvarovky/ohebne-hadice>

Obrázek 21.

- *ATCO Rubber Products, Inc - Atco Rubber Products - Flex Duct Systems* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.atcoflex.com/uploads/4/9/4/0/49403973/installinstructions.pdf>

Obrázek 22.

- *SAFID - Home* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.safid.com/pdf/Flexible%20Duct.pdf>

Obrázek 23.

- Plastové potrubí Air Excellent | ŠTORC. *Naše systémy vytápění, větrání a ohřevů fungují po mnoho let na řadě objektů ...* | ŠTORC [online]. Copyright ©2017 ŠTORC TZB s.r.o. [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.storc.cz/produkty/vetrani/vzduchotechnicke-potrubni-rozvod-air-excellent/>
- I svépomocí lze správně a odborně instalovat větrací rekuperační jednotku - ESTAV.cz. *ESTAV.cz - Architektura. Stavba. Bydlení.* [online]. Copyright © Copyright [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/8287.i-svepomoci-lze-instalovat-vetraci-rekuperacni-jednotku-odborne>

Obrázek 24.

- Čtyřhranné potrubí plastové 110x55mm/0,5m. *Ventilátory Svítidla LED žárovky Elektromateriál - Moje-elektro.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.moje-elektro.cz/ctyrhranne-potrubni/12409-ctyrhranne-potrubni-plastove-110x55mm05m.html>
- Typy a vlastnosti větracích systémů v rodinných domech | ASB Portal. *ASB-portal.cz | odborný portál | architektura, stavebnictví, byznys* [online]. Copyright © Jaga Media, s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vetrani-a-klimatizace/typy-avlastnosti-vetracich-systemu-vrodinnych-domech>

Obrázek 25.

- Izolované EPE potrubí Aerfoam (HR-WTW) - SORKE. *SORKE - SORKE* [online]. Dostupné z: <https://www.sorke.cz/potrubni/izolovane-epe-potrubni-aerfoam-hr-wtw->
- Dovodni in odvodni sistem UBBINK - AERFOAM | Klima Remty. *Celoviti sistemi in naprave za klimatizacijo bivalnih in poslovnih prostorov.* [online]. Copyright © REMTY [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.klima-remty.si/resitve/prezracevanje/dovodni-in-odvodni-sistem-ubbink-aerfoam-371>

Obrázek 26.

- IZOLACE ARAX | CLIMAVÉR®. *IZOLACE ARAX | Dodávka a montáž izolací* [online]. Dostupné z: <https://arax.cz/climaver/>

Obrázek 28.

- *Systemy wentylacji i rekuperacja* | Alnor [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.alnor.com.pl/assets/files/katalogi-grupy/EN/SQUER-ventilation-ducts-and-fittings-Alnor.pdf>
- Turning Vane. *Conklin Metal Industries | Metal, HVAC and Duct Fab Supplies* [online]. Dostupné z: <https://www.conklinmetal.com/turning-vane/>

- BU 90° lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/bu-90deg.aspx>
- BSFU90 lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/bsfu-90deg.aspx>

Obrázek 29.

- TCPU KORT lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: [http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/tcpu\\_1645.aspx](http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/tcpu_1645.aspx)
- YVU45° lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/yvu45deg.aspx>
- TVU45° lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/tvu45deg.aspx>
- KLIMAT – HVAC ducts. *Klimat - vzduchotechnika, výroba štvorhranného a spiro potrubia* [online]. Copyright ©2013 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: [http://www.klimat.sk/index\\_en.php?p=rectangular](http://www.klimat.sk/index_en.php?p=rectangular)

Obrázek 30.

- *Systemy wentylacji i rekuperacja | Alnor* [online]. Copyright © [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <https://www.alnor.com.pl/assets/files/katalogi-grupy/EN/SQUER-ventilation-ducts-and-fittings-Alnor.pdf>
- RLU lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/rlu.aspx>
- RCLU lindab.com. *Document Moved* [online]. Copyright © Lindab 2020 [cit. 29.10.2020]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/rclu.aspx>

Obrázek 34.

- ASHRAE, Inc. *Duct Fitting Database*, Version 5.0.0 [software]. 2008

Obrázek 36.

- Autodesk, Inc. Revit, 2020 [software]. 2019

Obrázek 37.

- VOPÁLKA, K. Výpočet místních odporů pro oblouky a kolena. *QPRO* [online]. Chlumeck nad Cidlinou: projekční kancelář Qpro, 2006 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.qpro.cz/Tlakova-ztrata-mistnimi-odpory-Strana-2>