



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

KONTROLA MĚŘICÍ SCHOPNOSTI PRŮTOKOMĚŘŮ HYDRAULICKÝCH OKRUHŮ LABORATOŘE PROSTŘEDNICTVÍM ULTRAZVUKOVÝCH SENZORŮ

CHECKING THE MEASUREMENT CAPABILITY OF THE FLOWMETERS IN THE LABORATORY VIA
ULTRASONIC SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

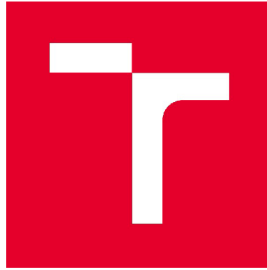
Martin Vítů

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Vítů
Název	Kontrola měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře prostřednictvím ultrazvukových senzorů
Vedoucí práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

[1] ČSN EN ISO 6817. Měření průtoku vodivých kapalin v uzavřených profilech – Metoda užívající indukční průtokoměry, březen 1997

[2] Ďado, S., Bejček, L., Platil, A. Měření průtoku a výšky hladiny, BEN – technická literatura, ISBN 80-7300-156-X, Praha 2005

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro trvalé měření okamžitého průtoku v měrných tratích hydraulických okruhů laboratoře jsou používány indukční průtokoměry, které jsou pravidelně kalibrovány. Ukazuje se, že v období mezi jednotlivými kalibracemi je třeba provádět pravidelnou kontrolu jejich měřicí schopnosti. Tu lze provést za pomoci senzorů pro měření rychlostí v uzavřeném potrubí. Tyto senzory využívají ultrazvukových metod stanovení rychlostí, resp. průtoku. V rámci zpracování bakalářské práce budou na několika tratích laboratoře instalovány předmětné senzory a provedena porovnávací měření.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá teorií stanovení průtoku, resp. proteklého množství za pomoci ultrazvukových průtokoměrů. Pomocí laboratorního měření byla stanovena relativní závislost mezi přenosnými ultrazvukovými a v laboratoři pevně instalovanými indukčními průtokoměry. Výsledky měření slouží pro mezikalibrační kontrolu laboratorních indukčních průtokoměrů. Práce obsahuje řadu tabelárních a grafických výstupů zpracovaných a vyhodnocených dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultrazvukový průtokoměr, indukční průtokoměr, měření průtoku, senzor

ABSTRACT

The main topic of the work is the theory of flow determination, in other words setting a flow rate using ultrasonic flowmeters. The relative dependence between ultrasonic and laboratory base inductive flowmeters was determined. Results of measurement are being used for intercalibration control of laboratory flowmeter rates. The work contains several tabular and graphical outputs of processed and evaluated data.

KEYWORDS

Ultrasonic flowmeter, inductive flowmeter, flow measurement, sensor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Martin Vítů *Kontrola měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře prostřednictvím ultrazvukových senzorů*. Brno, 2019. 61 s., 22 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Kontrola měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře prostřednictvím ultrazvukových senzorů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

Martin Vítů

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Kontrola měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře prostřednictvím ultrazvukových senzorů* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Martin Vítů

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za pomoc, odborné vedení, podnětné připomínky a cenné rady, které mi výrazně pomohly při vypracování bakalářské práce. Současně bych rád poděkoval i pracovníkům společností DHI a.s. a NIVUS GmbH za technickou podporu při provádění mých měření. Dále bych chtěl poděkovat rodičům a všem, kteří mi byli oporou během celého mého studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Proudění kapaliny	11
2.1	Druhy proudění	11
2.1.1	Laminární proudění	11
2.1.2	Proudění v přechodné oblasti	11
2.1.3	Turbulentní proudění	12
2.2	Typy proudění	12
2.2.1	Proudění s volnou hladinou	12
2.2.2	Tlakové proudění	12
3	Rozdělení průtokoměrů	13
3.1	Metody měření průtoku	13
3.1.1	Přímé měření	13
3.1.2	Nepřímé měření	13
3.2	Typy průtokoměrů	13
4	Ultrazvukové senzory průtoku	20
4.1	Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů	20
4.2	Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu	20
4.3	Dopplerovy průtokoměry	21
4.4	Korelační ultrazvukové průtokoměry	21
4.5	Výhody ultrazvukových senzorů	23
5	Cíl a motivace práce	25
6	Posuzované typy průtokoměrů	26
6.1	Trubní průtokoměr NIVUS Full Pipe	26
6.1.1	Popis konstrukce	27
6.1.2	Výběr místa a podmínky instalace senzoru	28
6.1.3	Vyhodnocovací jednotka	30
6.2	Trubní průtokoměr NIVUS Clamp-on	31
6.2.1	Popis konstrukce	32
6.2.2	Výběr a podmínky měřicího místa	35
6.2.3	Vyhodnocovací jednotka	37
6.2.4	Zvolení vzájemné polohy senzorů	38
7	Měření	41
7.1	Hydraulický okruh laboratoře	41
7.2	Měřicí prostory	43

7.2.1	První měřicí prostor.....	43
7.2.2	Druhý měřicí prostor.....	46
7.3	Postup měření.....	48
7.4	Vyhodnocení měření.....	50
7.5	Výstup měření.....	54
8	Závěr.....	58
9	Použitá literatura.....	59
10	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	60
11	Seznam příloh.....	61

1 ÚVOD

Měření průtoku patří mezi měření neelektrických veličin. V současné době je průtok velmi často sledovanou veličinou, měření průtoku se používá například v domácnosti pro stanovení proteklého množství pitné vody, ve zdravotnictví pro měření průtoku krve nebo v potravinářském a chemickém průmyslu. Princip měření průtoku se v neposlední řadě odvíjí od měřeného média (jeho fyzikálních a chemických vlastností), od velikosti předpokládaného průtoku a typu proudění kapaliny.

Důležitým faktorem měření je četnost kalibrace daných průtokoměrů. Zanedbání kalibrace může mít negativní vliv na přesnost měření, naopak častá kalibrace způsobuje výraznou finanční a provozní náročnost. Klíčové je určení okamžiku v němž má být průtokový snímač kalibrován.

Předložená práce se bude zabývat kontrolou měřicí schopnosti indukčních průtokoměrů instalovaných v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně pomocí přenosných vybraných ultrazvukových senzorů. Ukázalo se, že v období mezi jednotlivými kalibracemi indukčních průtokoměrů je potřeba provádět jejich pravidelnou tzv. mezikalibrační kontrolu. Jedním z cílů práce bude vytvoření postupu, jak má kontrola probíhat, jaké okrajové podmínky se mají při instalaci jednotlivých typů ultrazvukových průtokoměrů dodržet a na co je při kontrole měřicí schopnosti měřidel nutné dbát.

Práce je rozdělena do 11 kapitol. První část je teoretická, přibližující problematiku stanovení průtoku, resp. proteklého množství, následuje praktická část, která čtenáře seznámí s detaily vybraných ultrazvukových průtokoměrů, popisem a vyhodnocením měření. V závěru práce se nachází přílohová část obsahující tabelární a grafické výstupy.

2 PROUDĚNÍ KAPALINY

V následující kapitole jsou popsány druhy a typy proudění, které mají rozhodující vliv na volbu způsobu měření průtoku.

2.1 Druhy proudění

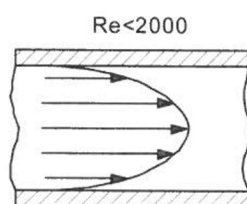
Druh proudění kapaliny v potrubí ovlivňuje funkci průtokoměru. Charakter proudění je závislý na třecích a setrvačných silách v kapalině, tento vztah je vyjádřen Reynoldsovým číslem (Re):

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad (2.1)$$

kde ν je rychlost [$m \cdot s^{-1}$], D je průměr trubice [m] a ν je viskozita kapaliny [$m^2 \cdot s^{-1}$]. [1]

2.1.1 Laminární proudění

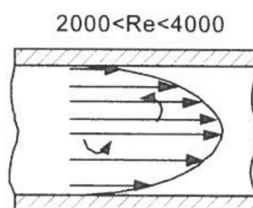
U laminárního proudění se částice tekutiny pohybují po rovnoběžných drahách, proudnice se nijak nekříží. Třecí síly potrubí způsobují, že rychlost je rozdělena parabolicky s nejmenší rychlostí na okraji a největší v ose potrubí. [1]



Obr. 2.1 Rychlostní profil laminárního proudění [2]

2.1.2 Proudění v přechodné oblasti

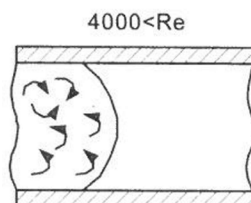
V přechodové oblasti se může nacházet laminární proudění, které se při jakémkoliv vnějším impulzu může změnit na turbulentní, z toho plyne, že se zde mohou nacházet obě proudění současně. [1]



Obr. 2.2 Rychlostní profil přechodné oblasti [2]

2.1.3 Turbulentní proudění

U turbulentního proudění záleží na příčném výkyvu a mísení částic kapaliny. Jev zvětšuje tangenciální napětí a ztráty. V příčném průřezu jsou rychlosti vyrovnanější než u laminárního proudění. [1]



Obr. 2.3 Rychlostní profil turbulentního proudění [2]

2.2 Typy proudění

Mimo druhy proudění můžeme taktéž rozlišit jejich typy, které dělíme podle místa vzniku.

2.2.1 Proudění s volnou hladinou

U proudění s volnou hladinou je povrch hladiny v bezprostředním kontaktu s ovzduším a na hladinu působí zpravidla atmosférický tlak. Proudění nastává v otevřených průtočných profilech (koryta řek, kanály, žlaby), ale i v uzavřených profilech (potrubí, propustky, stoky), pokud nejsou zcela zaplněny kapalinou. [1]

2.2.2 Tlakové proudění

Tlakové proudění vzniká v uzavřených profilech (v potrubí, ve štybce, ale i v násosce) tehdy, protéká-li kapalina plným průřezem a v každém měřeném místě je tlak různý (menší nebo větší) od tlaku atmosférického. Tlaková čára udává ve všech profilech potrubí situaci a hodnotu tlakové výšky. [1]

3 ROZDĚLENÍ PRŮTOKOMĚRŮ

Princip průtokoměrů, respektive jejich senzorů, je založen na transformaci změřené rychlosti proudění nebo její kinetické energii na průtok kapaliny. Měření může probíhat v otevřeném kanále s volnou hladinou (vyžaduje specifické metody) nebo v tlakově uzavřeném potrubí, proto existuje mnoho metod měření průtoků. [2]

Tato práce se zabývá kontrolou měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře, z tohoto důvodu se dále nebudeme způsoby měření průtoků v otevřených korytech věnovat.

3.1 Metody měření průtoků

Pro pochopení této práce je nutné znát základní metody měření průtoků, proto si je krátce představíme.

3.1.1 Přímé měření

Přímé měření průtoků je možné dávkovacími senzory rozdělující kapalinu na přesně dané díly přenášené ve směru proudění. Tyto senzory se opírají o princip objemové metody. Základem konstrukce jsou odměrné nádoby a jejich automatické plnění a vyprazdňování. Některé přístroje jsou založeny na hmotnostní metodě, při které se část protékané látky zváží pro zjištění průtoků. [2]

3.1.2 Nepřímé měření

Nepřímé měření spočívá v přepočtovém vztahu, kde je vystupující hodnota průtokoměru závislá na měřených veličinách (kinetické energii nebo rychlosti proudění kapaliny). [2]

3.2 Typy průtokoměrů

Průřezové průtokoměry

Průtokoměry tohoto typu jsou převážně založeny na principu zachování energie popsanou Bernoulliho rovnicí. Základem je snížení tlaku pomocí zrychlení proudění ve zúženém místě. Průtok je vyhodnocován z naměřených rozdílných statických tlaků pomocí diferenčního tlakoměru nebo z rozdílu celkového a statického tlaku před a za zúžením. Jako škrticí orgán se využívá dýza, clona, Venturiho trubice, Dallova trubice, V-kužel nebo škrticí orgán typu klínový segment. [2] [3]

Clony jsou nejjednodušším a nejlevnějším způsobem škrcení. Mají tvar desky s otvorem vložené kolmo na proudící kapalinu. Dokáží dosáhnout nejistoty měření v řádu zlomků procent. Malou skupinou průřezových průtokoměrů jsou průtokoměry kolenové. [2] [3]

Rychlostní průtokoměry

Objemový průtok se stanovuje vynásobením plochy průtočného průřezu s naměřenou hodnotou místní nebo průměrnou rychlostí proudění.

Hlavním prvkem těchto přístrojů je Pitotova trubice, která byla vynalezena v roce 1732 Henrim Pitotem. Jedná se o spojení dvou trubic, jedna ukazuje hodnotu statického tlaku, druhá hodnotu tlaku celkového. Pitotovy trubice se převážně používají pro turbulentní proudění při $Re > 20\,000$, kdy je rychlostní profil plochý, ale lze je využít už při $Re > 4\,000$. [2] [3]

S klasickou Pitotovou trubicí nelze měřit průměrnou rychlost, proto se využívají trubice s více otvory. Další možností je Prandtlůva trubice, u které jde o atypické uspořádání Pitotovy trubice přizpůsobené tak, aby se oba tlaky měřily přibližně ve stejném místě. [2] [3]

Průtokoměry se používají zejména v letectví. [2]

Průtokoměry s proměnným průřezem

Průtokoměry s proměnným průřezem v podstatě spadají do skupiny průtokoměrů, které fungují na principu tlakové difference, liší se tím, že je tlakový rozdíl na průtokoměru konstantní a plovák je nadnášen rychlostí proudění. Síla vytvořená dynamickým tlakem kapaliny působí zdola nahoru, proti ní působí tíha plováku zmenšená o vztlak kapaliny, až jsou tyto síly v rovnováze, plovák se zastaví. Poloha plováku se měří různými senzory (např. senzory s optickými vlákny) nebo bočně nanesenou stupnicí. [2] [3]

Klasický vzhled sestavy (kuželovitá trubice a rotující plováček) není jedinou variantou, dalšími možnostmi mohou být válcovité trubice, kuželovitý trn, pružinový průtokoměr, průtokoměr s vychýlenou kapkou aj. Malou skupinou průtokoměrů s proměnným průřezem jsou rotometry používající se na silně zásadité látky, fluor, fluorovodík, horkou vodu a roztavené kovy. [2] [3]

Turbínové a lopatkové senzory průtoku

Tyto senzory mají v ose tělesa lopatkový rotor s vhodně zakřivenými plochými lopatkami. Protékající tekutina uvádí oběžné kolo do rotačního pohybu. Počet otáček je přímo úměrný množství proteklé kapaliny. Otáčky za jednotku času udávají okamžitý průtok. Počet lopatek se pohybuje v rozmezí 6–20 a je volen podle aplikace a rozsahu. Měřený objemový průtok se neliší od objemového množství a není přímo závislý na hmotnosti tekutiny. Otáčky rotoru

mohou být měřeny kontaktně (převodem z osy rotoru) i bez kontaktně (opticky, magnetickým převodem). [2] [4]

Turbínové průtokoměry pracují spolehlivě v rozmezí $4\,000 < Re < 20\,000$. V klasickém provedení turbínového průtokoměru je vložen před a za rotor usměrňovač proudění pro zajištění homogenity rychlostního pole. Mezi turbínové průtokoměry řadíme například průtokoměry s tangenciálním vtokem, zásuvné, se dvěma protiběžnými rotory a bezložiskové. [2] [4]

Vrtulové (šroubové) průtokoměry jsou levnější a méně účinnou podskupinou (nejistota měření asi 2 %), při rychlostech pod $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ přestávají fungovat. [2] [4]

Objemové průtokoměry

Objemové průtokoměry přímo měří objem nebo hmotnost tekutiny. Měření může probíhat dvěma způsoby – spojitým nebo diskrétním. Při spojitém měření se akumuluje tekutina za jednotku času a následně se odměrný prostor vyprazdňuje tak, aby měření proběhlo plynule. U diskrétního režimu se tekutina dělí na konečné objemové dávky (dávkovací průtokoměry). Protékající tekutina na úkor trvalé ztráty tlaku a kinetické energie naplňuje a následně vyprazdňuje objemově přesně vymezené prostory. Vážením těchto dávek se získá kvantovaný hmotnostní průtok. Objemové měřiče se vyznačují malou nejistotou měření, podmínkou je správné odplynění kapaliny, proto patří mezi skupinu fakturačních a kalibračních průtokoměrů. Průtokoměrů tohoto typu je velká škála, nejčastější jsou pak oválové, tělesové (piškotové) a s krouživým pístem (prstencové). [2]

Deformační průtokoměry

Tyto průtokoměry jsou založeny na deformaci pružného členu (reakční deska) způsobenou kinetickou energií tekutiny. Reakční deska může mít tvar kruhového terčíku, pádla nebo nosníku, pokud je terčík symetrický, můžeme měřit průtok oběma směry. Odporové tenzometry se využívají pro náročnější měření deformace nosníku s terčíkem umístěným v trubce. Naopak, pro méně náročné úkoly se používají zavěšené reakční desky, jejichž změny polohy po proudu se měří pomocí senzorů úhlových vychylek. [2]

Deformační průtokoměry dosahují při měření hodnotu nejistoty kolem 5 %. Při snižování průtoků se přesnost přístrojů snižuje, ale změnou rozměrů a tvaru deformačního členu lze hodnotu nejistoty zvýšit na dostačující. Přístroje patří do malé skupiny (téměř univerzálních) průtokoměrů, jsou vhodné pro měření znečištěných a korosivních tekutin a tekutin obsahujících pevné částice. [2]

Průtokoměry se značením tekutiny (směšovací)

Rychlostním průtokoměrem, které v primitivním podání byly používány již starověkými civilizacemi, říkáme směšovací průtokoměry. Předmět unášen tekutinou byl nejjednodušším provedením měření, nyní se místo něj přimísí vhodná látka do proudící tekutiny. Pro různé fáze proudění jsou vhodné různé značkové látky, proto je možné měřit průtok vířivým směšováním. Metoda značení tekutin se užívá například pro kalibraci instalovaných průtokoměrů, kvantifikaci úniku kapaliny nebo určení rozložení průtoku v síti potrubí. Výhodou procesu je minimální ovlivnění proudící kapaliny směšovací látkou, nevýhodou je to, že pro měření nelze vždy zajistit dokonalé smíchání. Metoda není vhodná pro průběžné měření. V praxi používané průtokoměry na bázi značení proudící tekutiny jsou založené na:

- určení průtoku z rychlosti šíření přimísené látky – metoda postupové doby;
- určení průtoku ze zředování značkové látky – integrační metoda, metoda s průběžnou injektáží;
- korelační metodě měření průtoku – např. ultrazvukový korelační průtokoměr. [2]

Fluidikové průtokoměry

Fluidikové průtokoměry jsou založeny na aero-hydrodynamických principech a vyznačují se některými výhodnými vlastnostmi. Jsou spolehlivé v těžkých pracovních podmínkách (při vysokých teplotách, vibracích, velkém zrychlení, silném elektromagnetickém poli apod.), mají dlouhou dobu životnosti a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou fluidikových průtokoměrů je citlivost na pulzní proudění, nutnost přímého úseku (25 DN před senzorem a 5 DN za senzorem) a fakt, že aplikace samotného principu průtoku je stále ve vývoji. K ovládnutí průtokoměrů se využívá vzájemného působení proudu tekutiny, aerodynamických jevů a snímače. Fluidikové průtokoměry dle [2] můžeme mít:

- vířivé – základem je měření frekvence Kármánových vírů vznikajících za obtékaným tělesem, snímačem může být například ultrazvuk nebo termistor;
- vířivé – vychází z principu uvedení proudící kapaliny do rotujícího pohybu pomocí pevně vložených lopatek a následné snímání šroubového pohybu jádra proudu;
- oscilační – měření je založeno na předpokladu využití uměle vytvořeného pulzního proudu kapaliny ve zpětnovazebním kanálu fluidikového zesilovače.

Hmotnostní průtokoměry na principu Coriosovy síly

Tyto průtokoměry využívají změny momentu hybnosti síly (rezonanční kmitání trubice) v čase. Přístroje měří velice přesně a výsledek je v podstatě nezávislý na fyzikálních jevech (teplotě, tlaku, viskozitě). Měřicí trubice, může být zakřivená i přímá, velký vliv má tloušťka stěn. [2]

Základní rozdělení trubic: dvojitě přímé paralelní trubice, dvojitě souosé přímé trubice, průtokoměry s měřicí trubicí ve tvaru oblouku a měřicí trubice s deformací v krutu. [2]

Tepelné průtokoměry

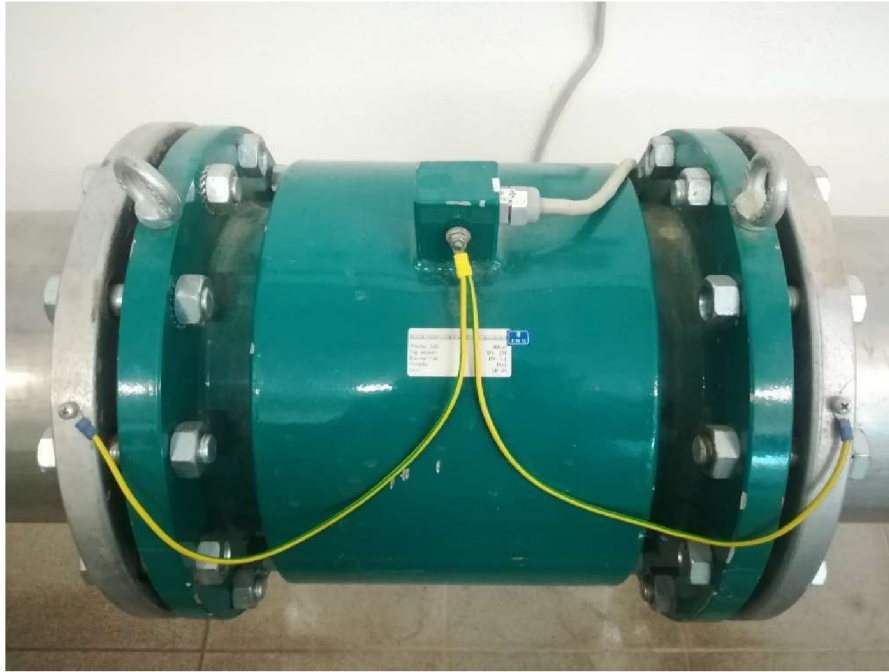
Průtokoměry založeny na výměně tepla mezi čidlem (zdrojem tepelné energie) a proudící tekutinou ve vazbě na hmotnostním průtoku nazýváme tepelné. Hodí se pro kapaliny se známým složením a vlastnostmi, převážně pro plyny nebo malé průtoky kapalin. [2]

Mezi výhody patří možnost přímého měření hmotnostního průtoku, přesnost a rychlost měření. Nevýhodou může být například citlivost na znečištění měřené kapaliny nebo nutnost průtokoměr překalibrovat při změně média. Měřiče mohou být zásuvné nebo určené pro přímou vestavbu do potrubí a dělíme je dle [2] na:

- termo-anemometry – měří ochlazení ohřivaného tělesa měřidla (vinutý drátek nebo fólie);
- kalorimetrické snímače průtoku – měří oteplení proudící tekutiny pomocí vyhřívacího elementu.

Elektromagnetické indukční průtokoměry

Jelikož základem této práce je měření, které mezi sebou porovnává hodnoty vykazované indukčními a ultrazvukovými průtokoměry, budeme se indukčním sensorům věnovat více podrobně.

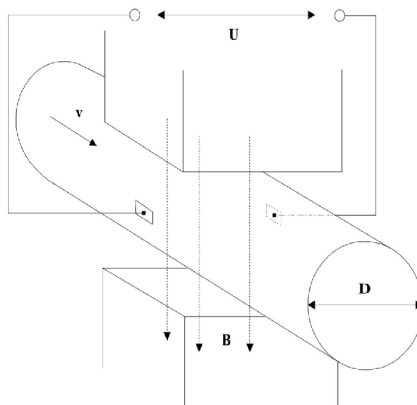


Obr. 3.1 Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99

Tyto senzory jsou založeny na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukci. Faradayův zákon popisuje indukování elektrického napětí pomocí pohybujícího se elektricky vodivého tělesa (vodivá kapalina v potrubí) v magnetickém poli. Obecně platí pro toto napětí vztah:

$$U = B \cdot D \cdot v, \quad (3.1)$$

kde U je indukované napětí, B je magnetická indukce, D je vzdálenost elektrod (průměr potrubí) a v je vektor střední průtočné rychlosti. [5] [2]



Obr. 3.2 Princip elektromagnetického průtokoměru [5]

Z rovnice plyne, že jsou-li průměr potrubí (D) a magnetická indukce (B) konstantní, pak vzniklé napětí je přímo úměrné střední rychlosti proudění. Protékající kapalina musí mít určitou

minimální elektrickou vodivost a průtokoměrem protéká kolmo na směr magnetického pole. [5] [2]

Magnetické pole se vytváří pomocí elektromagnetu, nejčastěji složeným soustavou dvou cívek umístěných naproti sobě v elektricky a magneticky stísněném krytu a v jistém úseku podél osy potrubí. [5] [6]

Použití elektromagnetických indukčních průtokoměrů je vhodné tam, kde se měřené hodnoty dále zpracovávají pro účely měření (dávkování, směšování atd.). Oblast použití je pestrá – od zemědělství a chemického průmyslu, až po vodní hospodářství (měření průtoku pitné a odpadní vody). Velkými výhodami jsou:

- nezávislost na fyzikálních vlastnostech kapaliny (teplotě, tlaku, hustotě, viskozitě a obsahu pevných látek);
- nezávislost na síťovém rušení a kolísání napájecího napětí;
- nezpůsobují žádnou tlakovou ztrátu;
- nemění konzistenci měřené kapaliny. [6]

Tyto průtokoměry jsou spolehlivé, jen pokud je dosažena minimální vodivost kapaliny, a to $> 20 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ u demineralizované studené vody a $> 5 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ u ostatních vod. Dalším problematickým vlivem může být rychlost (min. $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a max. $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ustálení průtoku (uklidňovací délka 5 DN před snímačem a 3 DN za ním) a v neposlední řadě musí být profil snímače zcela zaplněn vodou, to znamená, že musí být instalován v podmínkách tlakového proudění. [6]

Nežádoucí jevy ovlivňující přesnost měření jsou například: vzduchové bubliny (tzv. zaplynování měřené kapaliny), víření kapaliny ve snímači, silné bludné zemní proudy a pevné částice z magnetických kovů v kapalině. [6]

4 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY PRŮTOKU

Ultrazvukové průtokoměry jsou hlavním tématem této práce, proto mají vlastní samostatnou kapitolu.

4.1 Rozdělení ultrazvukových průtokoměrů

Tyto průtokoměry lze rozdělit podle vyhodnocení ultrazvukového signálu na dvě hlavní skupiny:

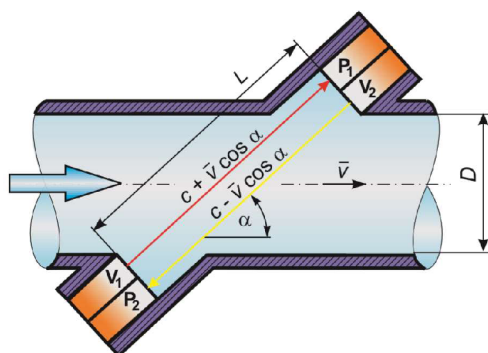
- průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu a
- průtokoměry využívající Dopplerův jev. [7] [2]

Obě základní rozdělení mohou mít podrobnější způsob členění, například podle uspořádání měničů na jednoráhové, dvoudráhové, třídráhové a vícedráhové, ale nejdůležitějším dělením pro nás je dělení z hlediska montáže průtokoměru do potrubního systému, a to:

- in-line, kde je snímač zásuvný a smáčený kapalinou nebo
- clamp-on, kde je snímač přikládán na stěnu potrubí (bezdotykové měření). [7] [2]

4.2 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu

V tomto případě jde o generování (pomocí vysílače) a přijímání (pomocí přijímače) ultrazvukového vlnění. Nejčastěji se využívá piezoelektrický měnič, který může pracovat jak ve funkci vysílače ultrazvukového signálu, tak i jeho přijímače. Frekvence ultrazvukového vlnění závisí na rezonanční frekvenci měniče, a většinou je v rozmezí (0,5 – 1) MHz. [7] [2]



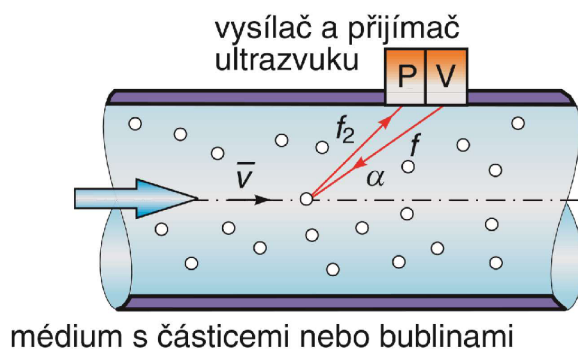
Obr. 4.1 Princip ultrazvukového průtokoměru s vyhodnocením doby průchodu signálu [7]

Průtokoměr je tvořen měřicí trubicí se zabudovaným vysílačem a přijímačem ultrazvukového signálu (může jich být i více). Častou možností je diferenční zapojení trubic, a to tak, že je ultrazvukový signál vysílán nejen ve směru proudění kapaliny, ale také proti jeho směru

(viz obr. 4.1). Tento typ průtokoměru není závislý na složení média (teplota a tlak kapaliny). Citlivost měření se může zvětšit pomocí prodloužení dráhy mezi vysílačem a přijímačem, k tomu se využívá odrazení od stěny potrubí nebo zabudované odrazové plochy (reflektor). [7] [2]

4.3 Dopplerovy průtokoměry

Průtokoměry založené na Dopplerově jevu vyhodnocují změnu frekvence ultrazvukové vlny odražené od nehomogenních částic (pevné částice, bubliny plynu v kapalině a další) unášených proudem kapaliny, to znamená, že průtokoměry tohoto typu nemohou bez těchto částic pracovat. [7] [2]



Obr. 4.2 Princip Dopplerova průtokoměru [7]

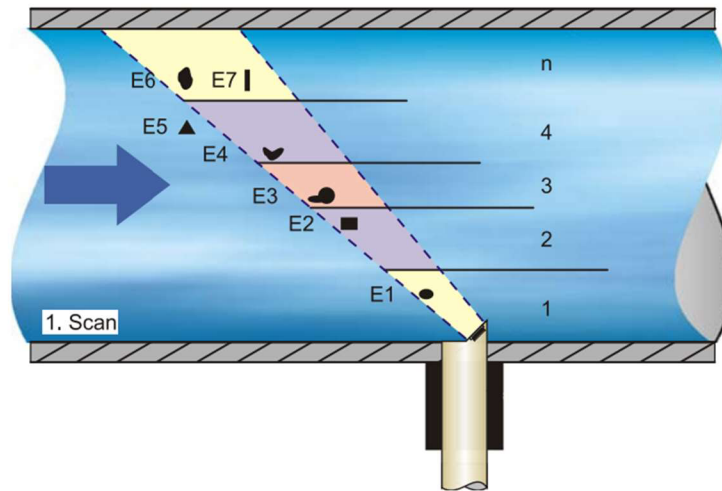
Ultrazvukový signál má být vysílán o co největší frekvenci, avšak příliš velká frekvence může vést k problémům s utlumením, proto se do proudící kapaliny pomocí vysílače vysílá zpravidla signál o frekvenci 1,2 MHz při smočeném měniči a 0,64 MHz při příložném měniči. Takto vyslaný signál se odráží od nehomogenních částic a poté se zachycuje přijímačem, který vyhodnocuje změnu frekvence přijatého signálu. [7] [2]

Pro tuto práci jsou důležitou podskupinou Dopplerových průtokoměrů korelační ultrazvukové průtokoměry, proto si je dále popíšeme podrobněji.

4.4 Korelační ultrazvukové průtokoměry

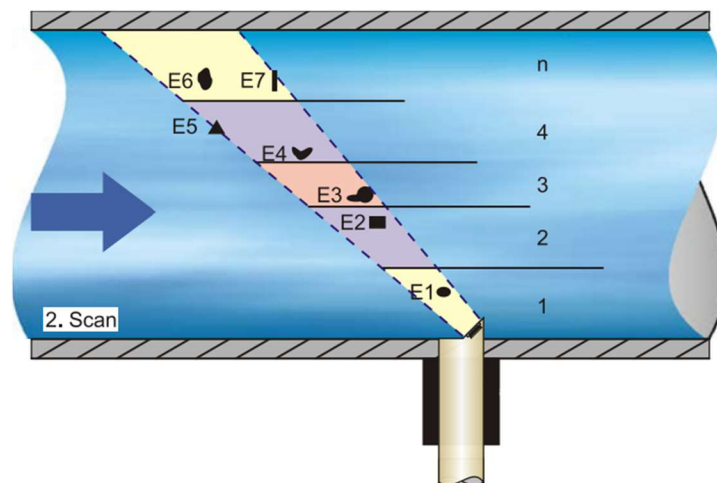
V korelačních ultrazvukových průtokoměrech se převážně využívá piezoelektrický měnič, který má definovaný sklon vysílání signálu směrem proti proudu toku kapaliny. Jak už bylo popsáno dříve, všechny částice (vzduchové bubliny, pevné částice) v dráze vyslaného signálu odráží malé množství tohoto ultrazvukového signálu. V závislosti na tvaru a velikosti částic dochází k určitému a specifickému odrazovému signálu. Množství odražených signálů povede

k odrazovému obrazu (viz obr 4.3). Tento odrazový obraz je poslán do zabudovaného digitálního signálového procesoru (DSP). [8]



Obr. 4.3 První odeslání signálu [8]

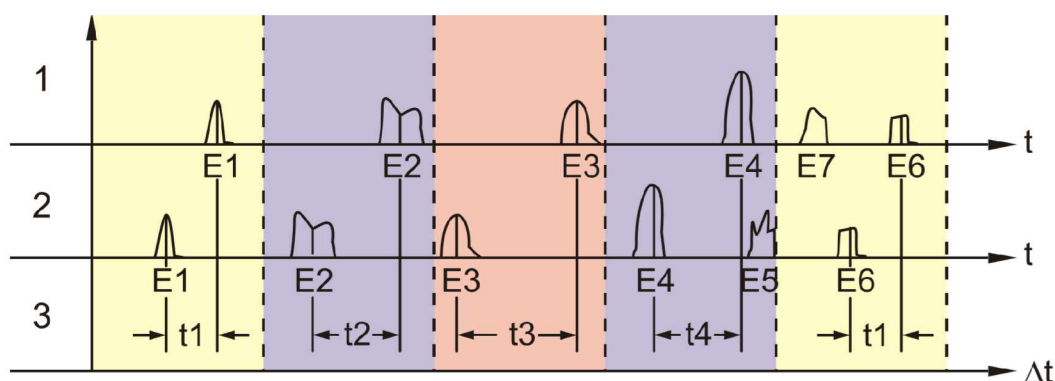
Po určité době je do média zaslán druhý ultrazvukový výboj. Nově generovaný odrazový obraz je také uložen do DSP (viz obr. 4.4). [8]



Obr. 4.4 Druhé odeslání signálu [8]

Unášené částice se od prvního měřicího bodu posunou ve směru proudění, výsledkem je tedy zkreslený obrazec odrazů, to lze vidět na obrázku 4.5. Současně se objeví i mírně odlišné odrazy, které vyplývají ze skutečnosti, že se některé částice otáčejí a mají tedy i jiný tvar odrazu. Některé částice již nejsou v měřicím „okně“ a jiné se naopak do tohoto okna dostanou. [8]

DSP dohlíží na podobnosti ve vzorcích odrazů s využitím korelační metody. Všechny vzniklé rozdíly signálu jsou vyřazeny, ponechány a vyhodnoceny jsou pouze dva podobné a časově odsazené signály. [8]



Obr. 4.5 Odražené signály a vyhodnocení [8]

Měřicí okna přibývají nebo ubývají v závislosti na vnitřním průměru potrubí (těchto oken může být až 16 o různých délkách), poté se v každém daném okně zjišťuje zpoždění signálu. [8]

Na základě úhlu paprsku a intervalu mezi přenášeným signálem a zpožděním signálu může být rychlost určená v každém měřicím okně. Výsledkem matematického řetězení jednotlivých rychlostí proudění v průřezném profilu je akustická trajektorie, která se zobrazí přímo na displeji. [8]

Pokud v místě měření známe vstupní data (geometrii potrubí a rozložení rychlostí), lze vykreslit i trojrozměrné rychlostní pole. Z daného rychlostního pole dopočítáme průměrnou rychlost a po vynásobení s průřeznou plochou získáme hledaný průtok. [8]

4.5 Výhody ultrazvukových senzorů

Univerzální použití

Ultrazvukové průtokoměry se mohou používat pro obousměrné proudění kapaliny, lze jimi měřit nejen obyčejné kapaliny a plyny, ale také například saturované a přehřáté páry. Je možné je použít nejen pro ultračisté tekutiny, ale i pro silně agresivní vody s velkým obsahem pevných částic. [2]

Malé tlakové ztráty

Příložné průtokoměry nezpůsobují žádné tlakové ztráty v potrubí, zásuvné pouze minimální. [2]

Žádné pohyblivé součástky, jednoduchá údržba

Na rozdíl od ostatních typů průtokoměrů (hmotnostních, turbínových) nemají žádné pohyblivé součástky, pracují bezhlučně a není potřeba jejich častá recalibrace. Instalace přístroje na místo je jednoduchá, avšak musí být nainstalován s určitou přesností. [2]

Široký rozsah měření

Rychlost média může být v rozsahu $(0,1 - 30) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, provozní teplota $(-170 - 500) \text{ }^\circ\text{C}$, pro smáčené snímače může provozní tlak činit až 20 MPa a pro příložné bez omezení. [7]

Některé ultrazvukové průtokoměry nejsou nijak závislé na vlastnostech měřené tekutiny a jsou schopny měřit několik veličin současně. [2]

5 CÍL A MOTIVACE PRÁCE

Pro trvalé měření okamžitého průtoku a proteklého množství jsou v měrných tratích hydraulických okruhů laboratoře používány indukční průtokoměry. Kontrolu správnosti jejich měřicí schopnosti však kromě pravidelné kalibrace nemůžeme žádným jiným způsobem provést, a navíc je příliš častá kalibrace finančně a provozně náročná. Ukazuje se, že v období mezi jednotlivými kalibracemi je potřeba provádět jinou pravidelnou tzv. mezikalibrační kontrolu jejich měřicí schopnosti. Tu lze provést za pomoci senzorů využívajících ultrazvukové metody pro měření průtoku v uzavřeném potrubí. Instalaci těchto ultrazvukových průtokoměrů na potrubí protiproudě před stávající indukční průtokoměry je tak možné provést porovnání hodnot vykazovaných oběma typy měřidel.

Tato práce je rozdělena na dvě základní části, a to na část teoretickou a praktickou.

Předchozí kapitoly (2,3 a 4) spadají do části teoretické, ve které jsou nejdříve přiblíženy typy a druhy proudění kapalin, poté následuje část o metodách měření průtoku a popis různých typů průtokoměrů.

Následující kapitoly spadají do části praktické zabývající se kontrolou měřicí schopnosti průtokoměrů hydraulických okruhů laboratoře prostřednictvím ultrazvukových senzorů.

Základem prací bylo měření v laboratoři zvolenými ultrazvukovými průtokoměry. Charakteristika, způsob měření, místo instalace a jejich funkčnost jsou popsány v následující kapitole. Původním záměrem bylo využít pouze první z daných průtokoměrů, ale po negativních zkušenostech při některých režimech proudění na začátku našeho měření byl využit i druhý disponibilní průtokoměr.

Měření probíhalo v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, a to na dvou měrných trubních profilech laboratoře F1 před měrnými tratěmi, konkrétně před žlabem 24 a venkovním měrným žlabem. Následovalo vyhodnocení naměřených hodnot a jejich analýza.

Cílem praktické části bylo vytvoření přehledného formuláře k opětovné kontrole měřicí schopnosti indukčních průtokoměrů.

6 POSUZOVANÉ TYPY PRŮTOKOMĚRŮ

Při měření byly využity dva typy ultrazvukových průtokoměrů, každý pracující na jiném principu, v této kapitole budou tyto typy podrobněji popsány.

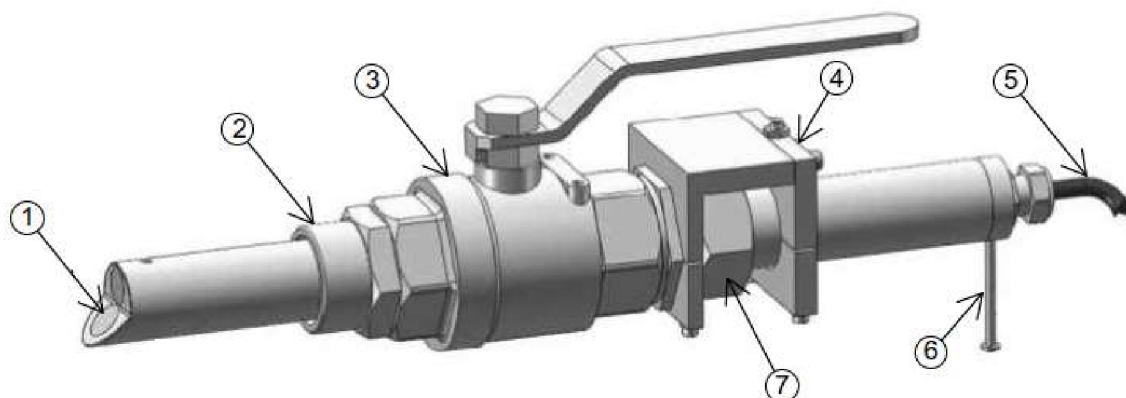
6.1 Trubní průtokoměr NIVUS Full Pipe

Jedná se o průtokoměr společnosti NIVUS GmbH, označený jako Full Pipe, v dalším popisu bude používána zkratka NFP (viz obr 6.1 a 6.2). Průtokoměr se využívá pro instalaci na zcela zaplněné potrubí a na mírně až silně znečištěnou vodu. Průtokoměr pracuje na principu, který je popsán v kapitole 4.3 Korelační ultrazvukové průtokoměry.



Obr. 6.1 Trubní průtokoměr NFP

6.1.1 Popis konstrukce



Obr. 6.2 Schéma měřícího zařízení NFP [9]

1. Vysílací a přijímací senzory
2. Upevňovací návarek
3. Kulový ventil
4. Pojistný prvek senzoru
5. Datový kabel
6. Pomocný instalační šroub M4
7. Šroubový spoj senzoru

Vysílací a přijímací senzory (1) musí směřovat proti proudu kapaliny. [9]

Upevňovací návarek (2) s 1½“ závitem slouží k našroubování a upevnění senzoru k potrubí. Návarek se musí připevňovat k danému potrubí dle materiálu, ze kterého je vyrobeno. K ocelovému potrubí a potrubí z HDPE se návarek přivaří, k potrubí z PVC se přilepí nebo připojí laminováním. [9]

Kulový ventil (3) je nerezový a pomocí něj lze provádět demontáž (montáž) z potrubí bez tlakového režimu proudění. [9]

Pojistný prvek (4) zajišťuje bezpečné držení senzoru ve správné poloze a zabraňuje jeho vytlačení způsobené zvýšením tlaku nebo hydraulickým rázem. Šroubový spoj (7) je součástí pojistného prvku. [9]

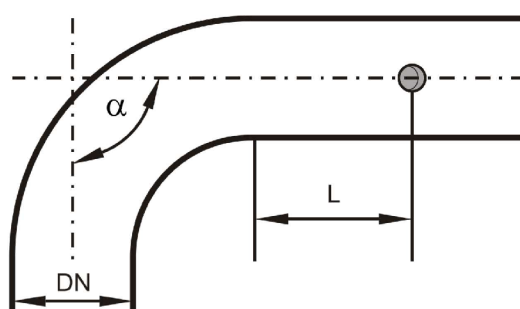
Datový kabel (5) je veden přímo do vyhodnocovací jednotky a je pokrytý vrstvou odolnou proti organickým rozpouštědlům, kyselinám a louhům.

Pomocný instalační šroub (6) slouží k zajištění správného nasměrování senzoru, musí směřovat po proudu kapaliny. [9]

6.1.2 Výběr místa a podmínky instalace senzoru

Místo montáže vysílače musí být vybráno podle určitých kritérií. Musí se jednat o jasné a definované hydraulické podmínky, proto je potřeba věnovat zvláštní pozornost minimálním vzdálenostem (uklidňovacím délkám) při instalaci. [9]

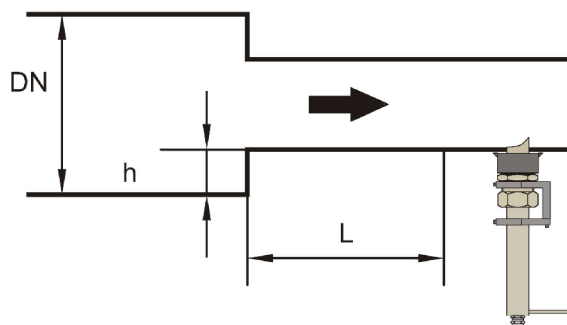
Je tedy nezbytné vyhýbat se místům se stupni, překážkám, změnám profilů a bočním přítokům před i za měrným místem. [9]



	$v \leq 1 \text{ m/s}$	$v > 1 \text{ m/s}$
$\alpha \leq 15^\circ$	$L \geq \text{min. } 3 \times \text{DN}$	$L \geq \text{min. } 5 \times \text{DN}$
$\alpha \leq 45^\circ$	$L \geq \text{min. } 5 \times \text{DN}$	$L \geq \text{min. } 10 \times \text{DN}$
$\alpha \leq 90^\circ$	$L \geq \text{min. } 10 \times \text{DN}$	$L \geq \text{min. } 15\text{-}20 \times \text{DN}$

Obr. 6.3 Pozice senzoru s minimálními rozměry uložení za kolenem [9]

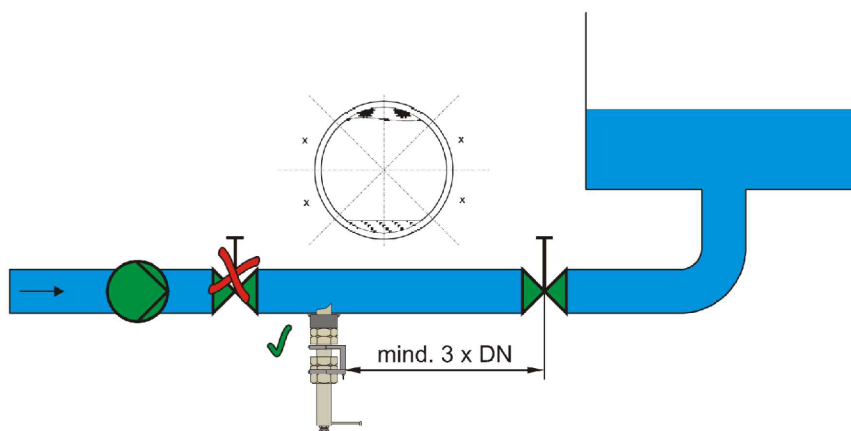
Měrné místo musí být zvoleno tak, aby v něm za normálních provozních podmínek nevznikla žádná sedimentace (písku, kalu, prachu). Je proto nutné v případě proudění znečištěných kapalin dodržovat v místě instalace minimální rychlost. [9]



$h \leq 5\% \text{ z DN}$	$L \geq \text{min. } 3 \times \text{DN}$
$h > 5\% \text{ z DN}$	$L \geq \text{min. } 5 \times \text{DN}$
$h \geq 30\% \text{ z DN}$	$L \geq \text{min. } 10 \times \text{DN}$

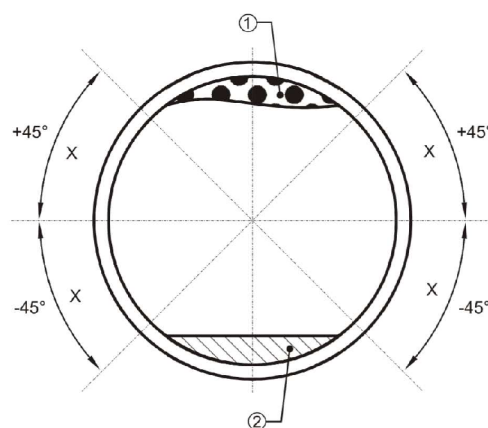
Obr. 6.4 Pozice senzoru s minimálními rozměry uložení za zúžením [9]

V měřeném místě by nemělo docházet ke změně plochy průtočného průřezu. Uklidňovací délka potrubí před snímačem musí být minimálně 5 DN a za snímačem musí být délka minimálně 2 DN. Pokud nastávají špatné hydraulické podmínky pro měření, je nutno tuto délku zvětšit. [9]



Obr. 6.5 Uložení v blízkosti uzávěrů [9]

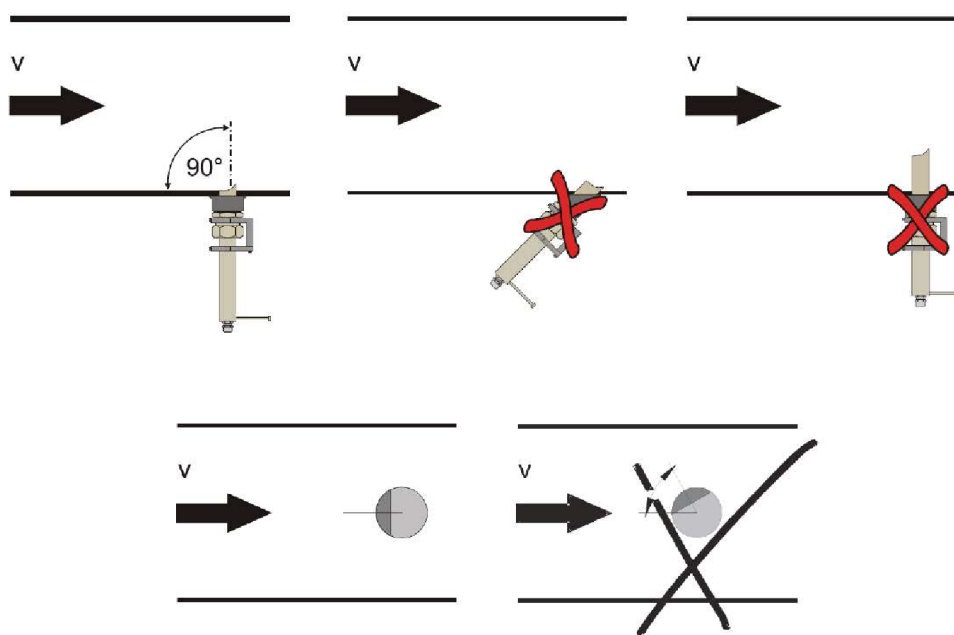
V případě horizontálně uloženého potrubí by se neměla používat horní a spodní část potrubí jako montážní místo (viz obr 6.6), vzniká nebezpečí znečištění nebo vzduchové bubliny, což má za následek chybu měření. [9]



- X = Doporučená pozice senzoru
- 1 = Riziko vzduchových bublin
- 2 = Riziko ukládání sedimentu

Obr. 6.6 Doporučený prostor pro instalaci [9]

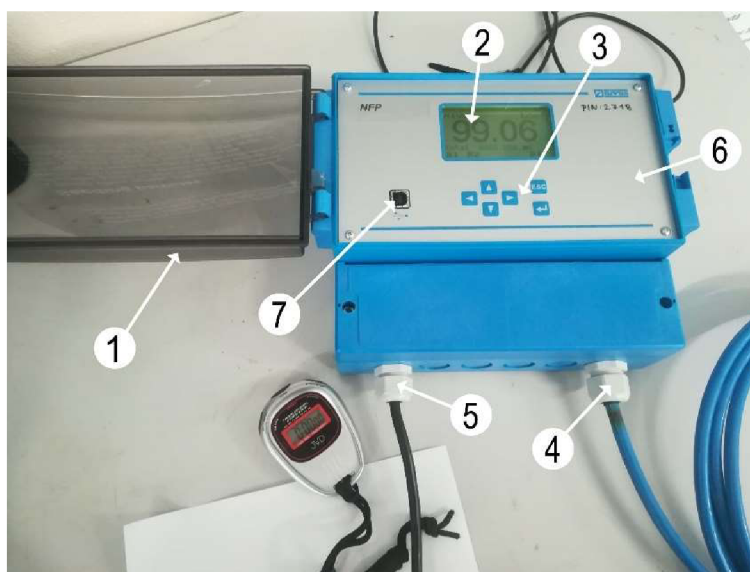
Snímač musí být pevně a těsně upevněn. Zešikmená strana senzoru musí směřovat proti směru proudění. Trubní senzor se upevňuje na dodaný kruhový návarek s těsnicími prvky. Je důležité, aby horizontální část snímače byla instalována v jedné rovině se stěnou potrubí, jak lze vidět na obrázku 6.7. [9]



Obr. 6.7 Příklady správné a špatné instalace senzoru [9]

6.1.3 Vyhodnocovací jednotka

Na trhu je více druhů vyhodnocovacích jednotek společnosti NIVUS GmbH kompatibilních s námi používanými průtokoměry, v této práci byly používány dvě z nich. S jednou se pracovalo hned od prvního měření (obr. 6.8), ta bude popsána v této podkapitole a druhou nám oficiální distributor pro Českou republiku společnost DHI a.s. dodal později a bude popsána v kapitole 6.2 Trubní průtokoměr NIVUS Clamp-on.



Obr. 6.8 NFP jednotka pro vyhodnocování údajů

1. Ochranná dvířka
2. Display
3. Klávesnice
4. Vstup pro datový kabel
5. Vstup pro napájecí kabel
6. Hlavní ochranný kryt
7. Vstup pro USB-B

Místo instalace vyhodnocovací jednotky musí být vybráno podle určitých kritérií a to:

- nesmí se nacházet na přímém slunci (jinak je nutný speciální ochranný kryt);
- jednotka by neměla být poblíž tepelného zdroje (okolní teplota by měla být maximálně +40 °C);
- v okolí místa nesmí být zdroje silného elektromagnetického záření (např. frekvenční měniče, elektromotory);
- nutnost vyvarování se kontaktu s korozivními chemikáliemi nebo plyny;
- jednotka musí být ochráněna před vibracemi, mechanickými rázy a radioaktivním zářením. [8]

Hlavní ochranný kryt (6) je vybaven kabelovými otvory, některé z nich jsou přišroubované a některé jsou uzavřené jako náhradní díly. Tyto otvory jsou různých velikostí, aby bylo možné použít kabely jiných průměrů. Nevyužívané otvory je nutno před uvedením do provozu zaslepit. [8]

NFP jednotka má podsvícený grafický displej (2) s rozlišením 128x64 pixelů. Pod displejem zobrazujícím informace o měření se nachází 6 tlačítek (3) pro zadání požadovaných cílů. Klávesnice je z důvodu mechanické a elektronické ochrany zcela uzavřena plastovou membránou s nerasmazatelným označením. [8]

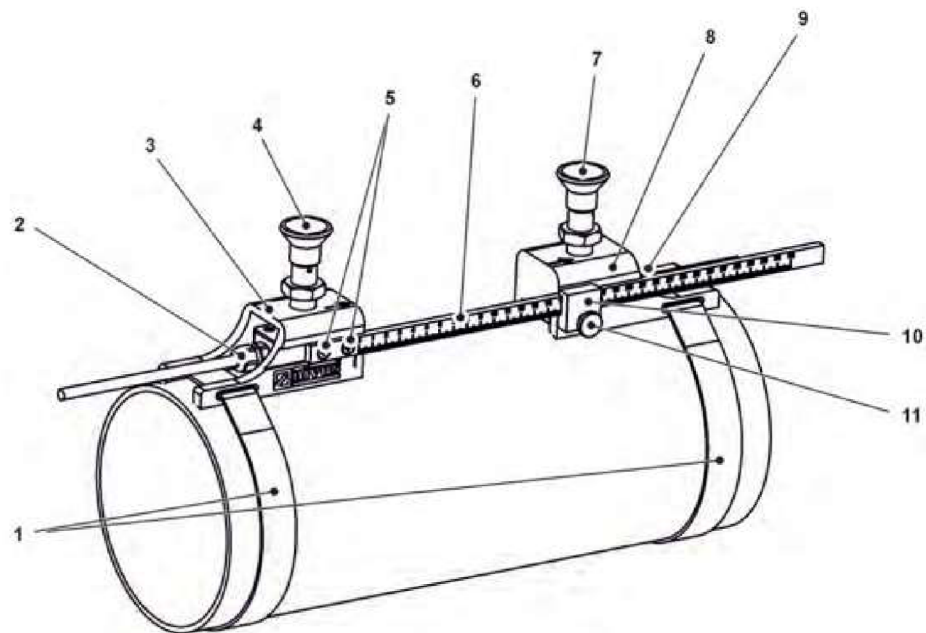
6.2 Trubní průtokoměr NIVUS Clamp-on

Opět se jedná o průtokoměr společnosti NIVUS GmbH, tentokrát označený jako Clamp-on (typ NIC-CO01), lze ho vidět na obrázku 6.9 a 6.10. Průtokoměr se využívá pro dodatečnou montáž na zcela zaplněné potrubí, převážně k měření průtoku vody. Není ovlivněn teplotou ani tlakem systému. Průtokoměr pracuje na principu, který je popsán v kapitole 4.2 Průtokoměry s vyhodnocením doby průchodu signálu.



Obr. 6.9 Trubní průtokoměr NIVUS Clamp-on

6.2.1 Popis konstrukce



Obr. 6.10 Schéma upevňovacího systému [10]

1. Upínací pásy
2. Snímač NIVUS Clamp-on (NIC-CO01)
3. Levá senzorová patka

4. Levý pojistný šroub
5. Šrouby
6. Pravitko
7. Pravý pojistný šroub
8. Pravá sensorová patka
9. Snímač NIVUS Clamp-on (NIC-CO01)
10. Přidržovací blok
11. Tlakový šroub

Pro správnou instalaci snímačů je nutné použít upevňovací systém (viz obr. 6.10), který je vhodný pro potrubí maximálního průměru 2 500 mm.

Upevňovací systém obsahuje co nejpřesnější pravitko (6), to se dodává v délce 32 cm nebo 78 cm, v závislosti na průměru potrubí. Pravitko je z levé strany připevněno šrouby (5). Z pravé strany je pravitko zasunuté do přidržovacího bloku (10), ve kterém je vložen tlakový šroub (11) sloužící k zajištění přesné vzdálenosti snímačů.

Upínací pásy (1) jsou důležité pro pevné udržení snímače na daném místě. Délka pásů je závislá na průměru potrubí, a to do DN 1000 v délce 3,5 m, do DN 2000 v délce 6,5 m a do DN2500 v délce 10 m. Dodávané pásy od výrobce jsou kovové, ale oficiální distributor pro ČR nám doporučil použít plastové stahovací pásky, z důvodu lepší manipulace a lepší nastavitelnosti.

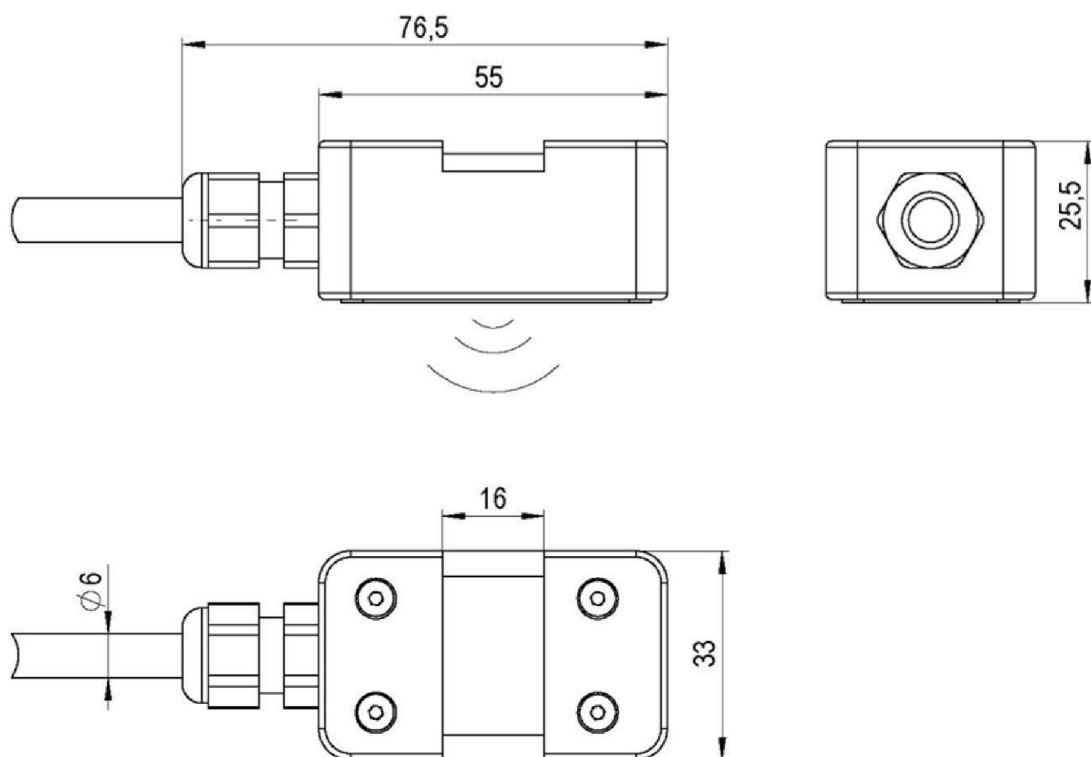
Senzorové patky (3)(8) slouží k udržení senzoru ve správné poloze při instalaci, dokud nebudou použity upínací pásy a snímače nebudou připevněny na stálo. Ke spojení senzorů a sensorových patek slouží nastavitelné pojistné šrouby (4)(7).

Na snímačích NIVUS Clamp-on (2)(9) najdeme šipku, která určuje směr proudění kapaliny v potrubí. Šrouby nacházející se ve snímači slouží k jeho revizi a rozložení (obr. 6.11 a 6.12).



Obr. 6.11 Detail senzoru

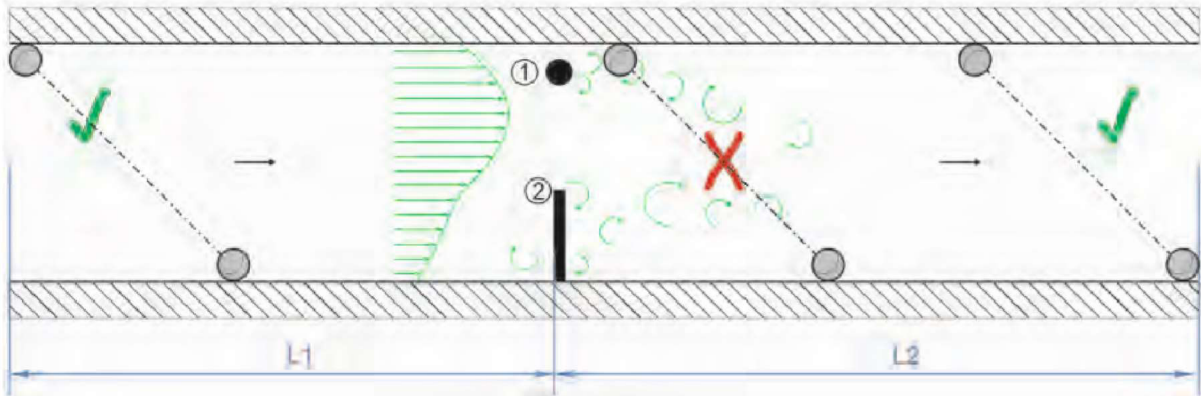
Dále ze snímače vede datový kabel přímo do vyhodnocovací jednotky. Kabel je řádně označen číslovkou, aby nedošlo k záměně senzorů, nesmí být zkrácen a při výměně musí zůstat typ a délka kabelů shodná pro oba senzory.



Obr. 6.12 Rozměry senzoru v mm [11]

6.2.2 Výběr a podmínky měřicího místa

Stejně jako u NFP, tak i u Clamp-on průtokoměrů je důležité místo montáže senzorů a musí být vybráno podle určitých kritérií. Taktéž se musí jednat o jasné a definované hydraulické podmínky, a proto je potřeba věnovat zvláštní pozornost minimálním vzdálenostem (uklidňovacím délkám) při instalaci. [10]



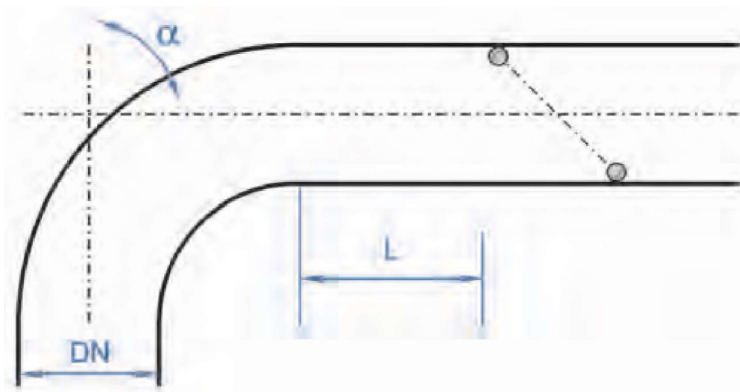
Obr. 6.13 Pozice senzoru v blízkosti překážky [10]

1,2 – překážka

L_1 – minimálně 5DN (v případě, že rychlost proudění je větší než $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

L_2 – minimálně 10DN (v případě, že rychlost proudění je větší než $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Je tedy důležité vyhýbat se schodům, překážkám, armaturám, změnám profilů a bočním přítokům před i za měřným místem. [10]

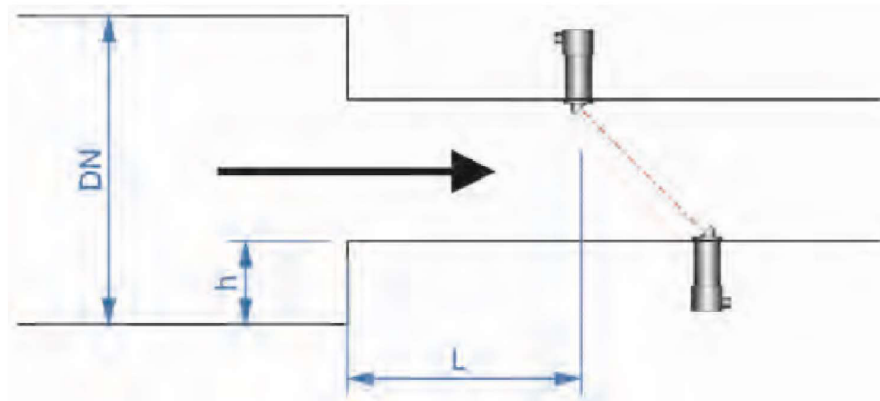


	$v < 1 \text{ m/s}$	$v > 1 \text{ m/s}$
$\alpha < 15^\circ$	$L > \text{min. } 3x \text{ DN}$	$L > \text{min. } 5x \text{ DN}$
$\alpha \leq 45^\circ$	$L \geq \text{min. } 5x \text{ DN}$	$L \geq \text{min. } 10x \text{ DN}$
$\alpha \leq 90^\circ$	$L \geq \text{min. } 10x \text{ DN}$	$L \geq \text{min. } 15\dots 20x \text{ DN}$

Obr. 6.14 Pozice senzoru s minimálními rozměry uložení za kolenem [10]

Při měření v potrubí musí být měřicí úsek zvolen tak, aby nedocházelo k usazení (písku, kalu apod.) vznikajícím při standartních provozních podmínkách. Vyvarovat by se mělo i změnám plochy průtočného profilu. [10]

Uklidňovací délka potrubí před snímačem musí být minimálně 5DN a za snímačem minimálně 2DN. Pokud nastávají špatné hydraulické podmínky pro měření, je nutno tuto délku zvětšit. [10]



$h \leq 5\% \text{ of DN}$
 $h > 5\% \text{ of DN}$
 $h > 30\% \text{ of DN}$

$L \geq \text{min. } 3x \text{ DN}$
 $L \geq \text{min. } 5x \text{ DN}$
 $L \geq \text{min. } 10x \text{ DN}$

Obr. 6.15 Pozice senzoru s minimálními rozměry uložení za zúžením [10]

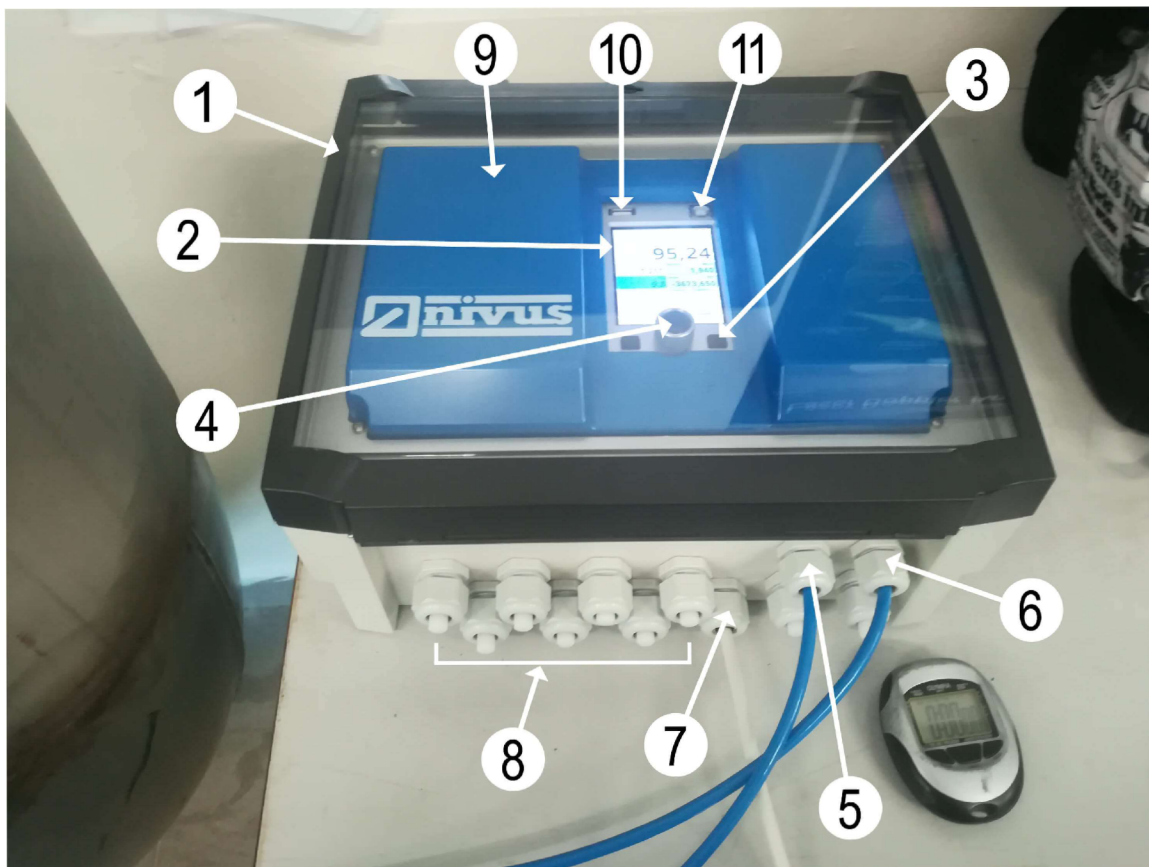
Vlivy na měření:

- je-li ultrazvukový signál přenášený vodou, část energie ultrazvukové vlny je ztracena a signál je zeslaben. Výsledkem tohoto útlumu je pokles intenzity přijímaného signálu ve srovnání s původním signálem. Pokud je tento útlum signálu vysoký, měření může selhat. Příčinou tohoto útlumu může být viskozita vody nebo rozptýlení signálu při dopadu na pevnou částici;
- velké množství vzduchových bublin (zavzdušnění);
- rychlost ultrazvukového signálu ve vodě se bude měnit v závislosti na změnách hustoty, teploty nebo obsahu solí. [10]

Pro zajištění přesnosti měření je nutné použít vhodnou akustickou spojovací pastu. Tato pasta musí být aplikována mezi povrch senzoru a vnější stěnu potrubí. Vrstvy nátěrů, pozinkování nebo koroze mohou snížit přesnost měření, proto musí být před instalací řádně odstraněny. [10]

6.2.3 Vyhodnocovací jednotka

K senzorům Clamp-on byla od distributora dodána jiná vyhodnocovací jednotka (NivuFloe 600) než u snímače NFP, tato jednotka bude přiblížena v následující kapitole (obr. 6.16).



Obr. 6.16 Jednotka pro vyhodnocování údajů (NivuFloe 600)

1. Ochranná dvířka
2. Display
3. Vedlejší tlačítka
4. Joystick s hlavním tlačítkem
5. Vstup pro první datový kabel
6. Vstup pro druhý datový kabel
7. Vstup pro napájecí kabel
8. Slepé (náhradní) vstupy pro kabeláž
9. Hlavní ochranný kryt
10. Vstup pro USB-A
11. Vstup pro USB-B

Ochranná dvířka (1) se otvírají tak, aby při upevnění jednotky na zeď bylo otvírání praktické a jednoduché.

V této vyhodnocovací jednotce se nachází barevný displej (2), který neukazuje pouze měřené hodnoty, ale lze nastavit i grafické znázornění měřených dat.

Levé tlačítko (3) slouží ke vstupu do menu nebo podnabídky. Pomocí joysticku (4) se uživatel pohybuje po ikonkách a tlačítko nacházející se na něm slouží pro potvrzení nabídky. Pravé tlačítko slouží k zadávání numerických hodnot nebo pro přeskočení z jednoho senzoru na druhý.

Nad displejem se nachází dva USB vstupy. USB-A (10) slouží k přenosu dat, zálohování parametrů a aktualizaci zařízení, USB-B (11) slouží k servisnímu režimu. Pod hlavním ochranným krytem (9) se nacházejí další rozhraní, která slouží například k připojení k počítačové síti.

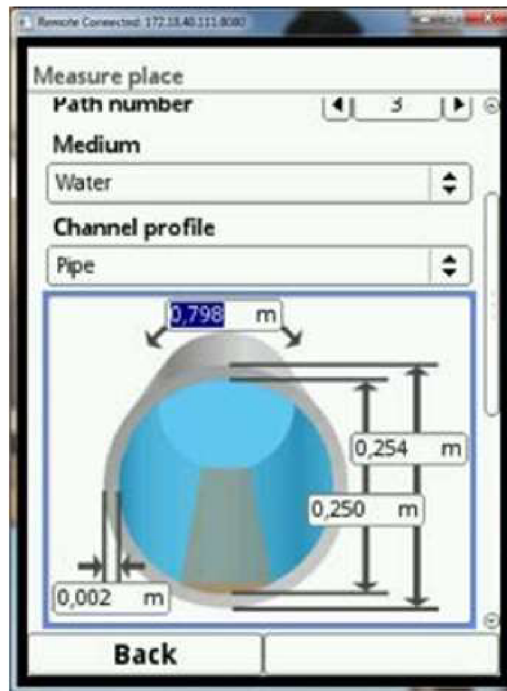
Místo instalace vyhodnocovací jednotky musí být vybráno podle určitých kritérií, a to:

- maximální teplota okolí +80 °C;
- minimální teplota okolí -30 °C;
- maximální vlhkost okolí musí být do 80 %, na přístroji by neměla nastávat kondenzace;
- přístroj by měl být chráněn před korozivními výpary a výpary organických rozpouštědel;
- přístroj by měl být chráněn před radioaktivním a silným elektromagnetickým zářením a také přímým slunečním zářením. [12]

6.2.4 Zvolení vzájemné polohy senzorů

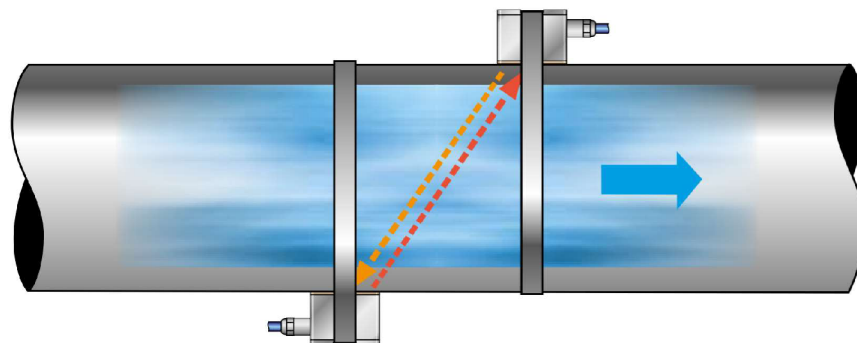
Před zadáním polohy senzorů a jejich uspořádáním je nutné zadat do vyhodnocovací jednotky některé parametry. Níže uvedené parametry jsou potřebné pro nastavení místa měření:

- vnější průměr, vnitřní průměr nebo obvod potrubí;
- tloušťka stěny potrubí;
- materiál stěny;
- měřené médium (typ kapaliny). [12]

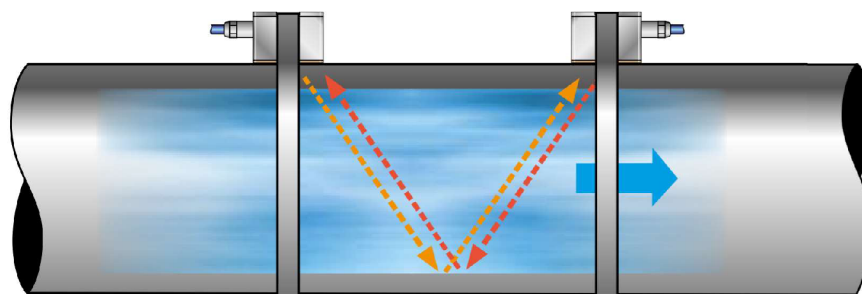


Obr. 6.17 Okno pro nastavení vstupních podmínek [12]

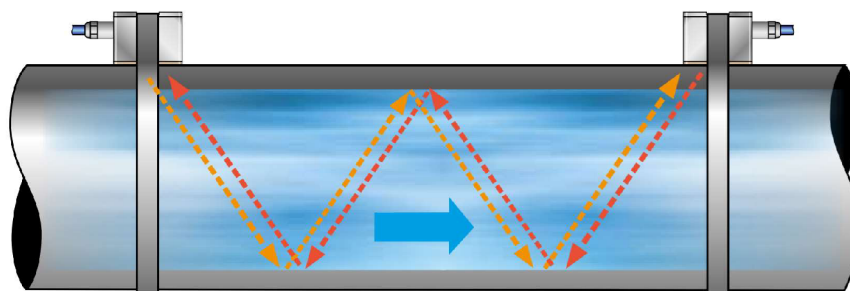
Na základě těchto parametrů vypočítá jednotka polohu senzoru a délku dráhy potřebnou pro budoucí měření. Instalace je možná ve třech variantách (*Z* režim (obr. 6.18), *V* režim (obr. 6.19), *W* režim (obr. 6.20)). V případě našeho měření byla zvolena první varianta, režim *Z*. [12]



Obr. 6.18 Poloha senzorů – *Z* režim [12]



Obr. 6.19 Poloha senzorů – *V* režim [12]



Obr. 6.20 Poloha senzorů – W režim [12]

Oba senzory průtokoměru musí být namontovány podle dané geometrie a musí být srovnány tak, aby byly „naproti“ sobě, k tomu se využívá přesné posuvné měřidlo. Uspořádání senzorů závisí na hydraulických podmínkách, geometrii potrubí a vlastnostech příslušného měřicího místa. [10]

7 MĚŘENÍ

Všechna měření probíhala v budově F1 patřící Fakultě stavební. V této kapitole bude popsáno vybavení laboratoře ve smyslu [13] (hydraulické okruhy, měřicí tratě), umístění stávající měřicí techniky, umístění ultrazvukových průtokoměrů, postup a dosažené výsledky měření.

7.1 Hydraulický okruh laboratoře

První část měření probíhala na měrném žlabu 24, ten lze vidět vpravo na obrázku 7.1, na kterém byl v době měření nainstalován model přehrady Nové Heřminovy. Hydraulický měrný žlab má jmenovitou šířku 2,4 m, délku 15 m a hloubku 0,9 m. Maximální kapacita žlabu je $230 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, ale jak bylo zmíněno, ve žlabu se nacházel model, který kapacitu žlabu omezil na maximálních $180 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento žlab je napojen na hydraulický okruh laboratoře.

Druhá část měření probíhala na venkovním měrném žlabu (obr. 7.1 – nalevo), který je také napojen na hydraulický okruh laboratoře pomocí potrubí DN300.



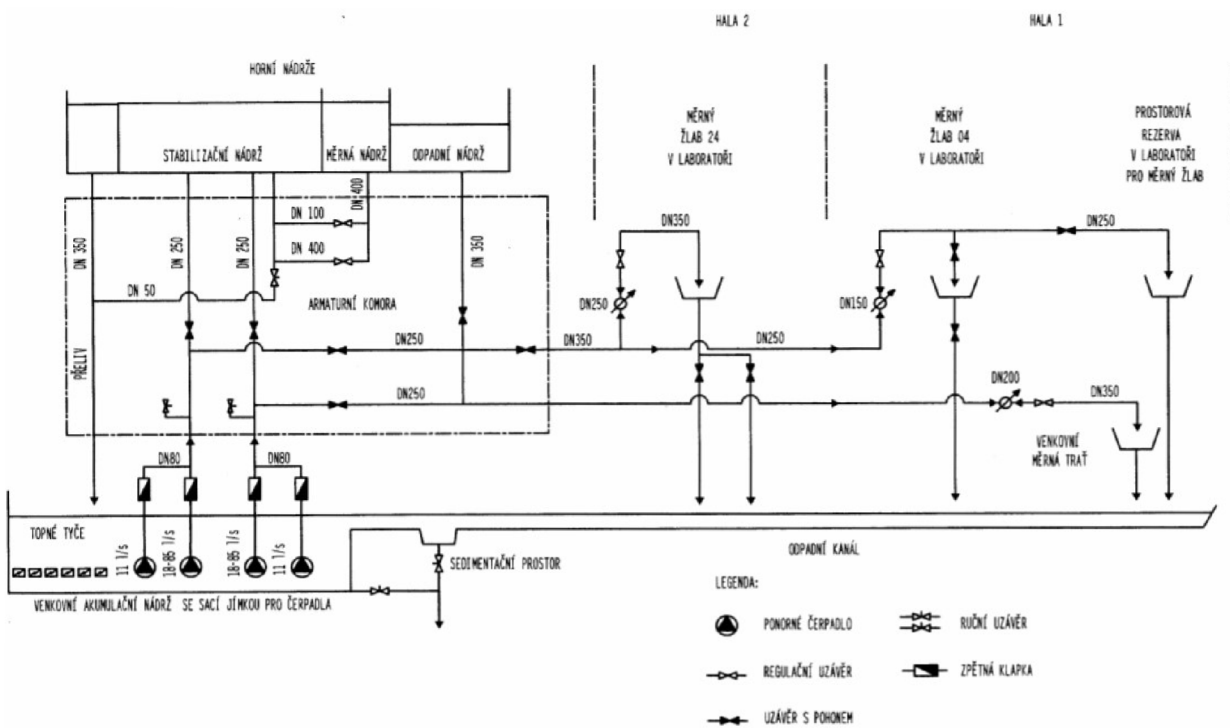
Obr. 7.1 Zleva venkovní měrný žlab a zprava měrný žlab 24

Hydraulický okruh funguje v recirkulačním provozu napojeným na akumulární nádrž o objemu 50 m^3 , ze které se voda do systému čerpá. V akumulární nádrži se nachází sací jímka pro čtyři ponorná čerpadla značky Flygt. Čerpadla jsou odstředivého typu, dvě malá o kapacitě

$2 \times 11 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a zbylá dvě jsou větší, o kapacitě $2 \times 85 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, řízena pomocí měniče frekvence. Na regulaci teploty vody je v akumulární nádrži nainstalováno 6 topných tyčí o výkonu celkovém 24 kW.

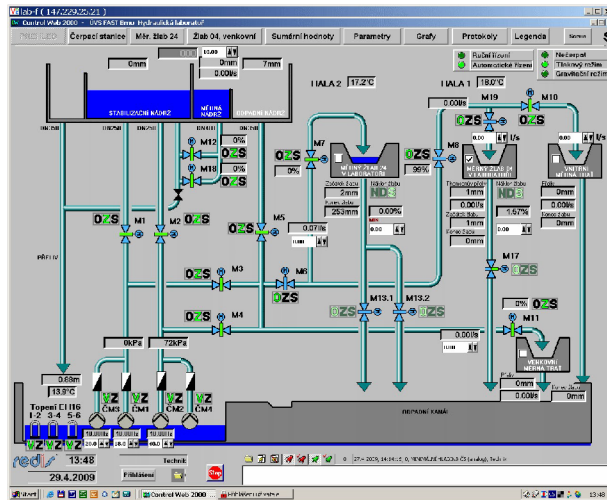
Součástí hydraulického okruhu je také stabilizační, měrná a odpadní nádrž, pracující pouze v gravitačním provozu, ty pro naše měření nebyly použity.

Rozvodné potrubí a armatury jsou vyrobeny z nekorozivního materiálu zaručujícího tlakovou a průtočnou kapacitu hydraulického okruhu. Rozvodné potrubí má v různých částech laboratoře rozdílné světlosti.



Obr. 7.2 Schéma hydraulického okruhu laboratoře

Ovládání celého systému je zajištěno řídicím systémem (SIMATIC S7 – 300) a vizualizačním počítačem nacházejícím se ve velínu. Jelikož je tento systém připojen k počítačové síti, bylo možné ho ovládat dálkově na notebooku pomocí programu VNCViewer, což je patrné z obrázku 7.3.



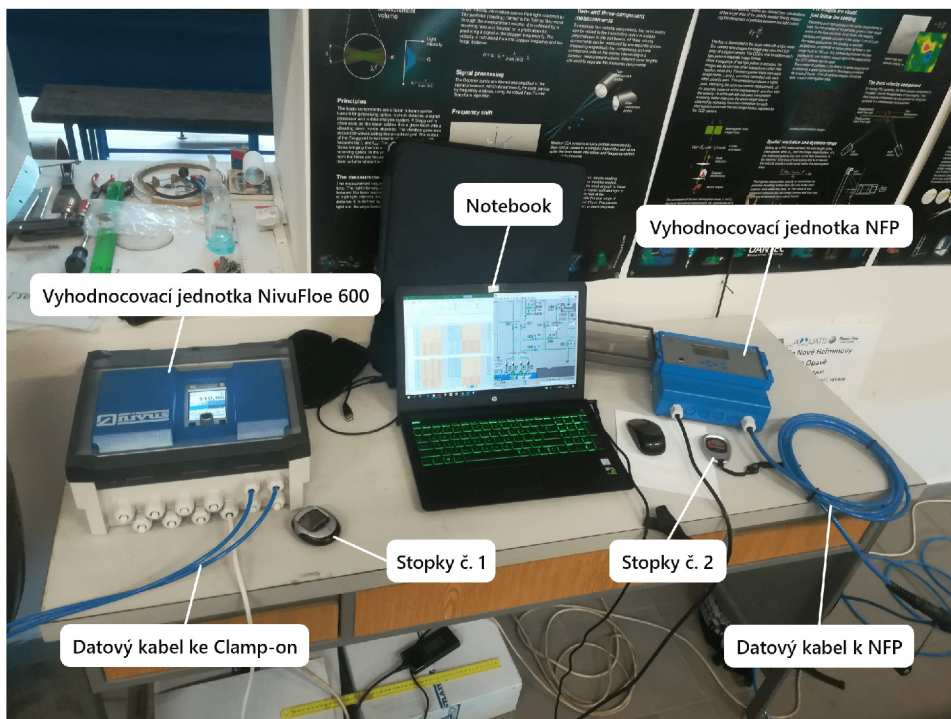
Obr. 7.3 Ovládání hydraulického okruhu programem VNCViewer

7.2 Měřicí prostory

Při samotném měření bylo důležité zvolit správnou měřicí pozici tak, aby dané měření probíhalo co nejpraktičtěji a nejjednodušeji.

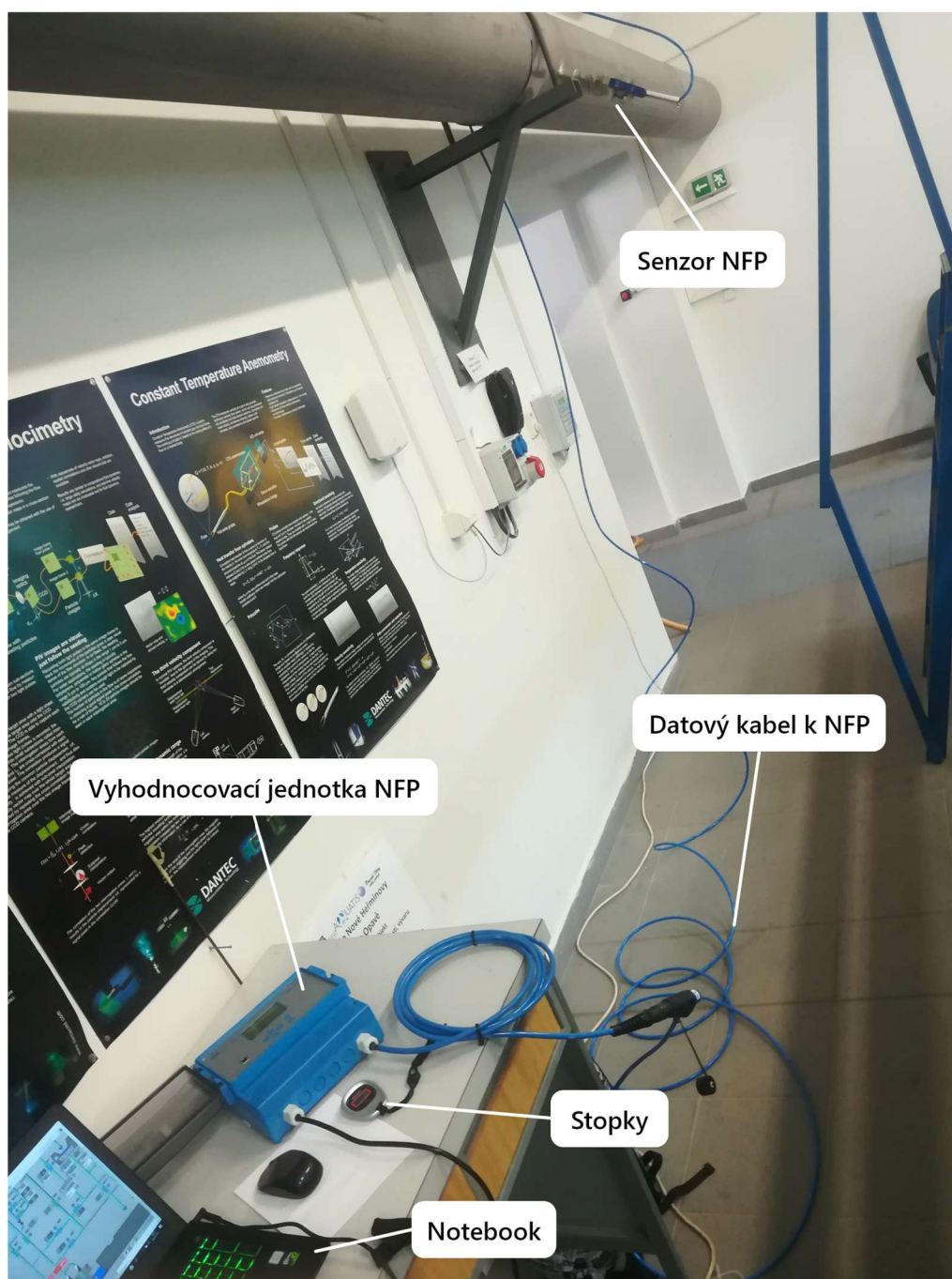
7.2.1 První měřicí prostor

Jak už bylo zmíněno dříve, měřicí prostory byly zvoleny dva. Na obrázku 7.4 lze vidět první z nich, prostor byl využíván při měření na měrném žlabu 24.



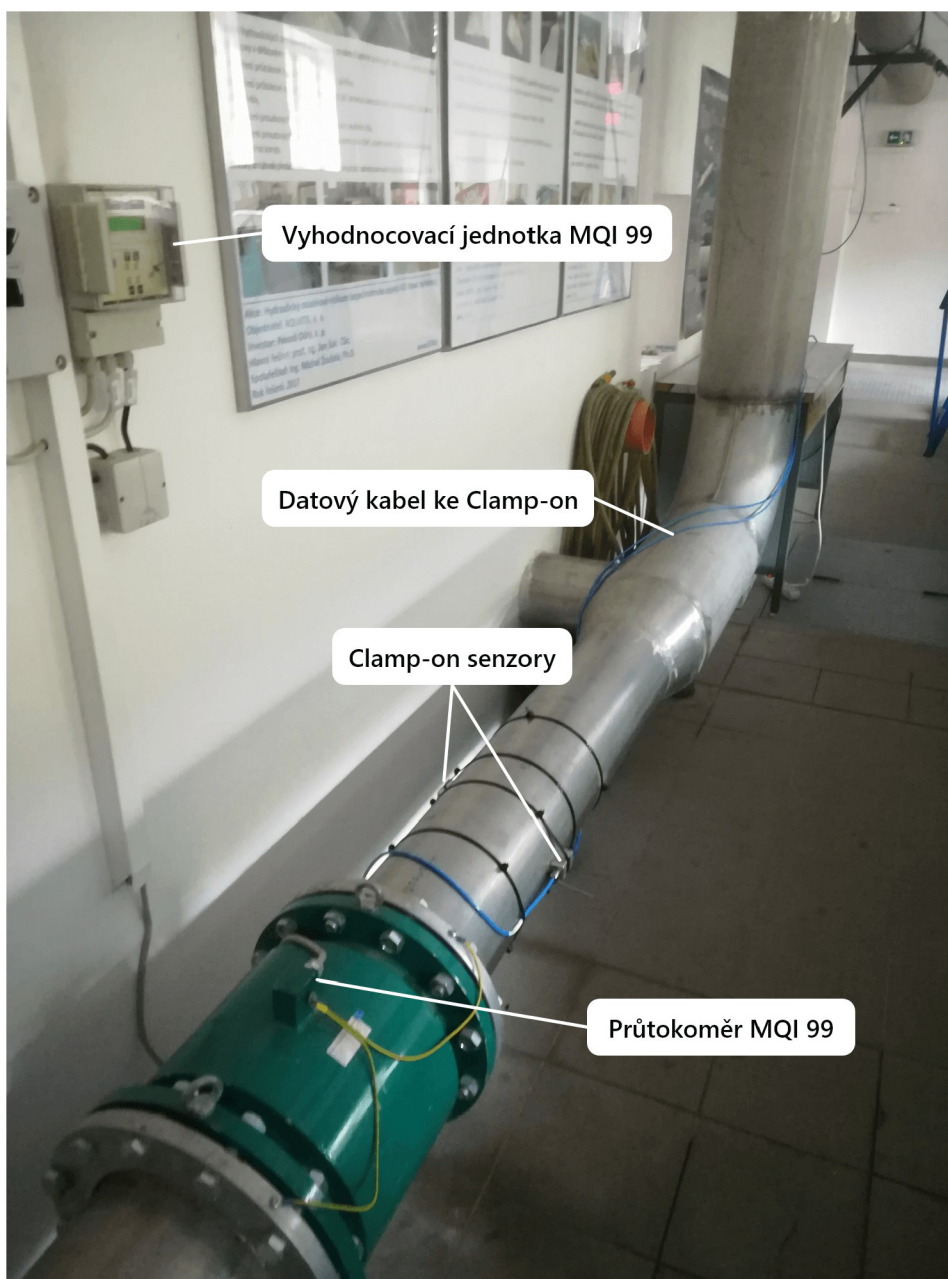
Obr. 7.4 První měřicí prostor – měrný žlab 24

Nalevo je umístěna vyhodnocovací jednotka (NivuFloe 600) popisována v podkapitole 6.2.3, která je přímo spojena se senzory Clamp-on (kapitola 6.2). Uprostřed se nachází notebook, pomocí kterého probíhalo ovládání laboratoře a záznam zjištěných dat. Na pravé straně měřicího prostoru se nachází druhá řídicí jednotka (NFP) popsána v podkapitole 6.1.3. Tato jednotka je spojena se senzorem NFP (kapitola 6.1) pomocí datového kabelu, což lze vidět na obrázku 7.4. U každé vyhodnocovací jednotky se nacházejí stopky k měření času. Senzor NFP je umístěn na potrubí s jmenovitou vnitřní světlostí 349,6 mm a tloušťkou stěny 3 mm (obr. 7.5). Druhý senzor (Clamp-on) je nainstalován dále po proudu za zúžením, na potrubí s jmenovitou vnitřní světlostí 250 mm a tloušťkou stěny 3 mm (obr. 7.6).



Obr. 7.5 Umístění senzoru NFP a zapojení do vyhodnocovací jednotky

V blízkosti senzoru se nachází stávající, námi kontrolovaný indukční průtokoměr, jeho principy jsou popsány v podkapitole 3.2, jedná se o průtokoměr společnosti ELA, spol. s r. o. typu MQI 99. Průtokoměr je zde nainstalován nastálo. Jak už bylo zmíněno dříve, ultrazvukové průtokoměry jsou v laboratoři umístěny pro kontrolu měřicí schopnosti tohoto průtokoměru. Vyhodnocovací jednotka průtokoměru MQI 99 je pevně přišroubována na zdi, jak lze vidět na obrázku 7.6. Při měření touto soustavou se pro stanovení průtoku, resp. proteklého objemu za daný čas využívaly další digitální stopky.



Obr. 7.6 Umístění MQI 99 průtokoměru a vyhodnocovací jednotky

Průtokové hodnoty zjištěné z vyhodnocovací jednotky byly následně korigovány přepočtem na základě kalibračního listu č. 137/16, který byl dodán po kalibraci společností ENBRA, a. s.

Obsahem kalibračního listu je tabulka hodnot průtoků a k nim vztažené relativní chyby (Tabulka 7.1.).

Tabulka 7.1 Kalibrace

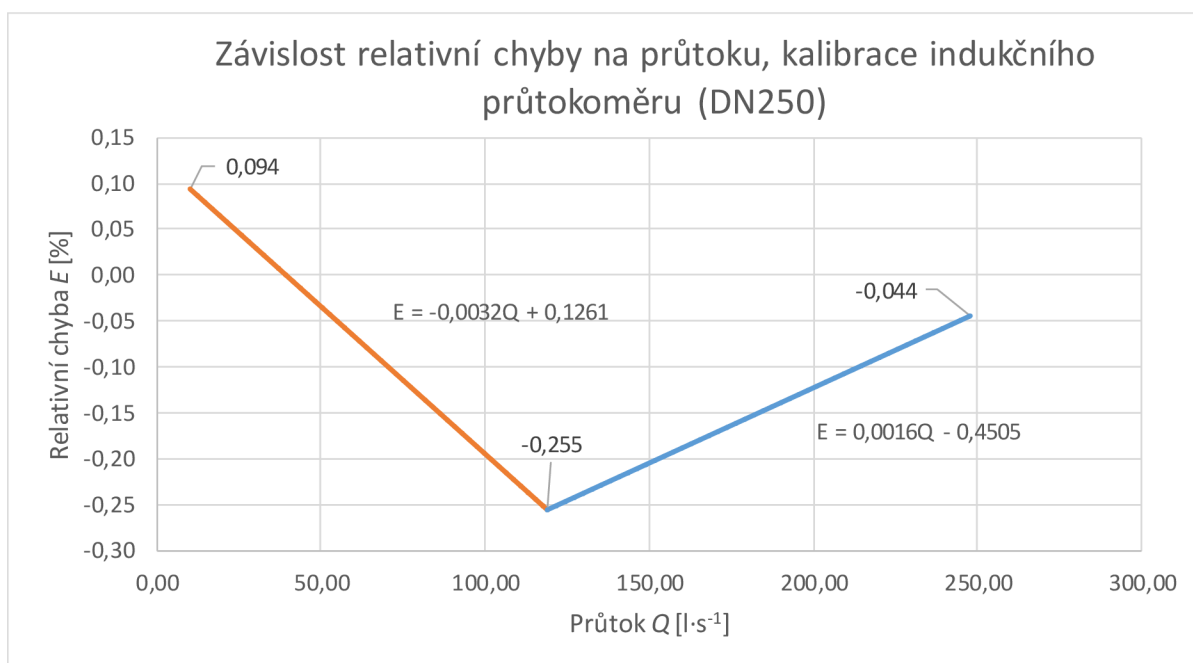
č. 137/16		
Q	Q	E
[m ³ ·h ⁻¹]	[l·s ⁻¹]	[%]
892	247,78	-0,044
429	119,17	-0,255
36,1	10,03	0,094

Na základě obdržných hodnot v tabulce byl vytvořen graf závislosti relativní chyby na průtoku (Graf 7.1). Vynesené body se proložily lineárními spojnicemi trendů a byly vytvořeny dvě rovnice a to:

$$E = -0,0032Q + 0,1261, \quad (7.1)$$

$$E = 0,0016Q - 0,4505, \quad (7.2)$$

při použití těchto rovnic lze při jakémkoliv zkoumaném průtoku získat danou relativní chybu.

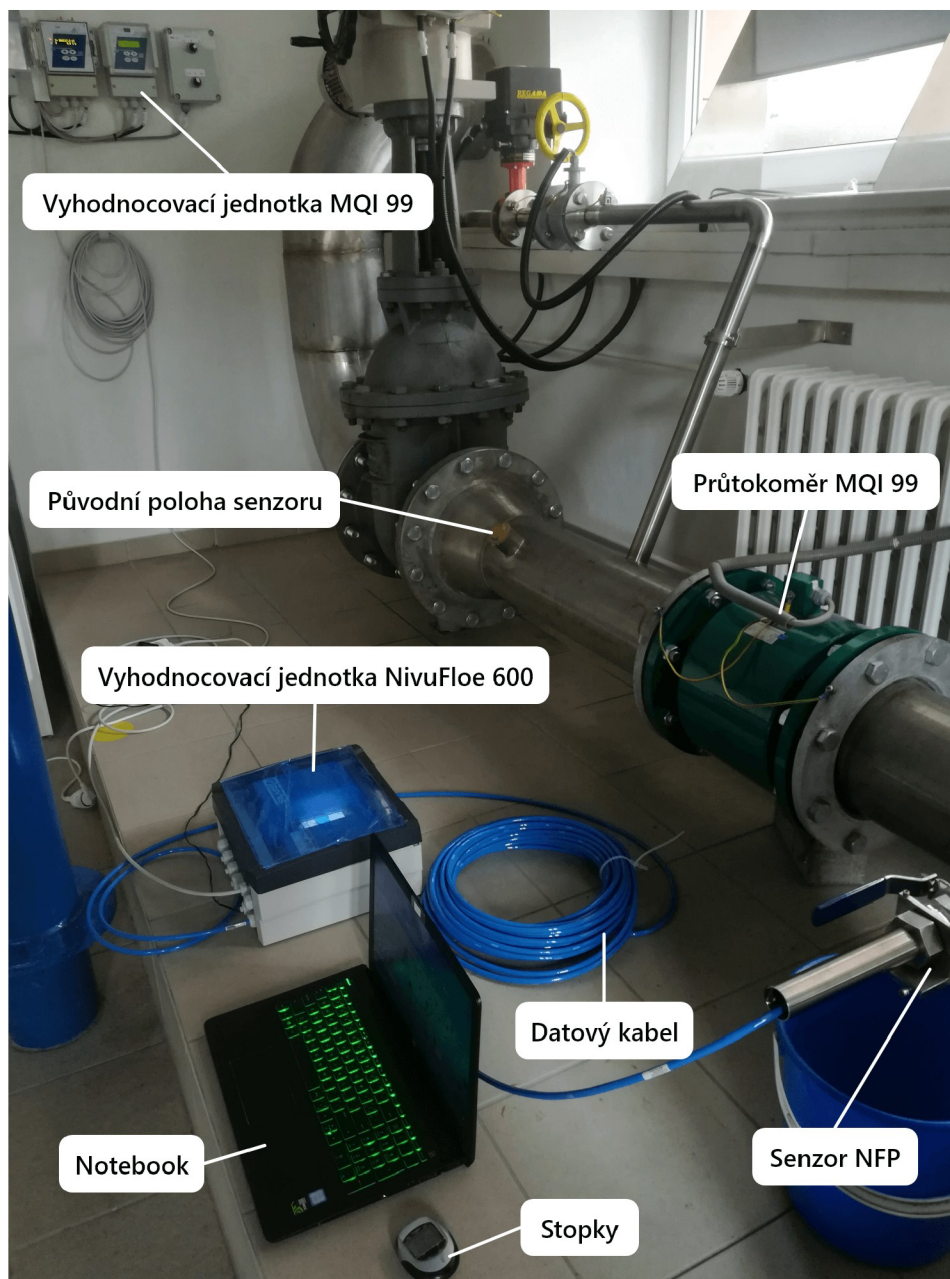


Graf 7.1 Závislost relativní chyby na průtoku – kalibrace

7.2.2 Druhý měřicí prostor

Na obrázku 7.7 lze vidět druhý měřicí prostor, ten byl využíván při měření na venkovním měrném žlabu.

Uprostřed je umístěn přenosný počítač, vedle kterého se nachází vyhodnocovací jednotka NivuFlo 600 (podkapitola 6.2.3) zapojena datovým kabelem do průtokoměru NFP. Na tomto obrázku lze vidět, že tato vyhodnocovací jednotka je kompatibilní se senzorem Clamp-on i NFP senzorem. NFP senzor je umístěn na potrubí se jmenovitou vnitřní světlostí 200 mm a tloušťkou stěny 3 mm.



Obr. 7.7 Druhé měřicí místo – venkovní měrný žlab

Průtokoměr měl být původně umístěn dále po proudu, ale po konzultaci s odborníky ze společnosti NIVUS GmbH bylo umístění změněno, protože na daném místě by mohlo docházet k narušení měřicí schopnosti vlivem poproudě instalovaného difuzoru. NFP senzor tak byl přemístěn protiproudě před kontrolovaný indukční průtokoměr.

Po proudu za NFP senzorem je umístěn kontrolovaný indukční průtokoměr společnosti ELA, spol. s r. o. typu MQI 99 napojený na vyhodnocovací jednotku. Průtoky jsou taktéž korigovány za pomoci výsledků z kalibračního listu (č. 052/18), tyto podklady se nacházejí v přílohách práce P_K2.

7.3 Postup měření

V následujících odstavcích bude podrobně popsán postup měření a skutečnosti, se kterými jsme se museli v jeho průběhu vypořádat.

V tabulce 7.2 je pro lepší a jednodušší orientaci v textu uveden kompletní přehled jednotlivých měření. Každé měření má pro lepší orientaci vlastní popisný kód (číslo měření _ název žlabu _ název průtokoměru _ datum měření), který bude využíván v následujících odstavcích a grafech, příklad lze vidět v posledním sloupci tabulky.

Tabulka 7.2 Rozřazení měření

Skupina	Měrný žlab	Typ průtokoměru	Průměr potrubí	Průtoky		Rychlosti	Dvojice	Číslo měření	Datum měření	Kód označení							
			[mm]	[l·s ⁻¹]	[m ³ ·s ⁻¹]	[m·s ⁻¹]											
1	24	NFP	349,6	20–180	0,02–0,18	0,21–1,88	1	M1	21.08.2018	M1_24_NFP_21.8.18							
								M3	23.08.2018	M3_24_NFP_23.8.18							
							2	M5	02.10.2018	M5_24_NFP_2.10.18							
								M6	02.10.2018	M6_24_NFP_2.10.18							
							3	M7	08.10.2018	M7_24_NFP_8.10.18							
							4	M14	08.04.2019	M14_24_NFP_8.4.19							
								M15	08.04.2019	M15_24_NFP_8.4.19							
							2	Venkovní	NFP	200,0	20–170	0,02–0,17	0,64–5,41	5	M8	18.03.2019	M8_VEN_NFP_18.3.19
M9	18.03.2019	M9_VEN_NFP_18.3.19															
6	M16	08.04.2019	M16_VEN_NFP_8.4.19														
	M17	08.04.2019	M17_VEN_NFP_8.4.19														
3	24	Clamp-on	250,0	20–180	0,02–0,18	0,41–3,67								7	M10	18.03.2019	M10_24_CLAMP_ON_18.3.19
															M11	18.03.2019	M11_24_CLAMP_ON_18.3.19
							8	M12	08.04.2019	M12_24_CLAMP_ON_8.4.19							
								M13	08.04.2019	M13_24_CLAMP_ON_8.4.19							
Vyřazená	Vnitřní	NFP	349,6	10–80	0,01–0,08	0,10–0,83	9	M12	21.08.2018	M2_VNI_NFP_21.8.18							
								M14	23.08.2018	M4_VNI_NFP_23.8.18							

Postup měření byl z velké části identický pro oba měřicí prostory. Pro všech 17 jednotlivých měření, která jsme realizovali, byl sestaven formulář, který je znázorněn na obrázku 7.8. V záhlaví jsou uvedeny informace o datu měření, typech měřidel a průměru potrubí, na kterém se daný průtokoměr nacházel.

Celý průtočný rozsah se vždy rozdělil na 11 až 17 úrovní v závislosti na typu měrné trati.

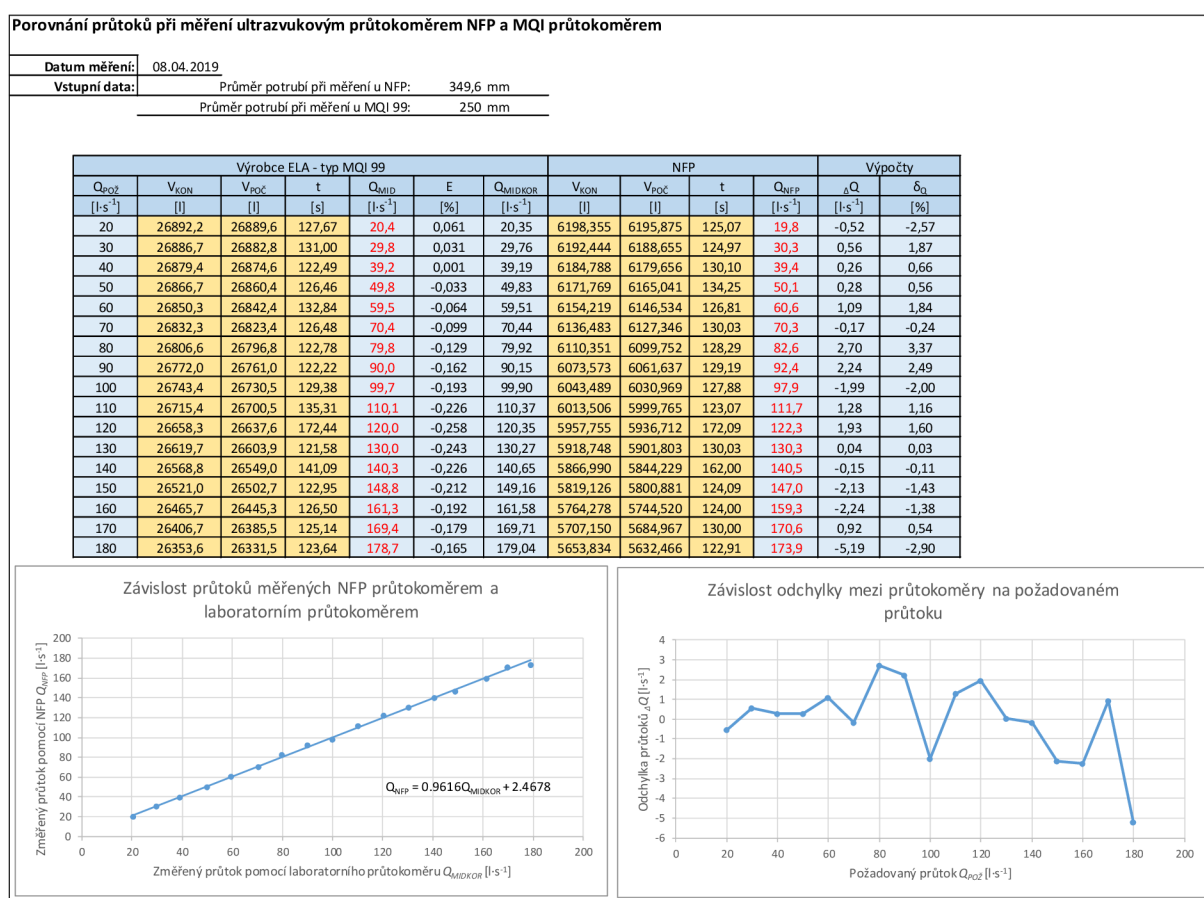
U měrného žlabu 24 byl rozsah průtoků od 20 l·s⁻¹ do 180 l·s⁻¹. U spodní hranice byl původní záměr 10 l·s⁻¹, ale při prvních měření se ukázalo, že NFP není na daném profilu potrubí schopen tak nízké průtoky, resp. rychlosti bezchybně zaznamenat a vyhodnotit. Horní hranice byla dána kapacitou žlabu.

Při měření na venkovní měrné trati byla opět spodní hranice 20 l·s⁻¹, avšak horní hranice se zregulovala na 170 l·s⁻¹. Důvodem byly vykazované vysoké rychlosti

(pohybující se okolo $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) způsobené příslušným profilem potrubí (DN200), na kterém se ultrazvukový průtokoměr nacházel.

Každá průtoková úroveň (řádek) obsahovala informaci o vykazovaném počátečním a koncovém objemu daného průtokoměru, o naměřeném čase, o dopočítaném skutečném průtoku, u MQI průtokoměrů informaci o korekci na základě informací z kalibračního listu, a nakonec výstupní vyhodnocená data.

Snahou bylo vždy měřit dvakrát jedním ultrazvukovým průtokoměrem na jednom žlabu v jednom dni. Měření probíhalo nejdříve sestupně (např. od $180 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $20 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) a druhé měření pak naopak vzestupně. Následující dvojice měření stejného průtokoměru na shodném žlabu proběhla vždy s odstupem několika týdnů až měsíců, viz tabulka 7.2 (datum měření).



Obr. 7.8 Formulář jednotlivých měření

Vlastní měření probíhalo tak, že se nastavil průtok daného řádku pomocí programu VNCViewer (obr 7.3), po ustálení tohoto průtoku byla zapsána hodnota objemu $V_{POČ}$, který již průtokoměrem protekl, a to zároveň u MQI i ultrazvukového průtokoměru. Současně se zaznamenáním počátečního objemu byly spuštěny stopky, pro každý průtokoměr byly použity vlastní. Po uplynutí minimálně 120 sekund (zvoleno z důvodu redukce chyby měření) byly stopky zastaveny a byl opět zapsán objem kapaliny V_{KON} . Poté se změřené objemy

vzájemně odečetly a vydělily se daným časem t pro získání průtoku Q_{MID} , Q_{NFP} , resp. Q_{C-O} , tento postup byl aplikován pro všechny typy průtokoměrů vztahem (7.3).

$$Q = \frac{V_{KON} - V_{POČ}}{t} \quad (7.3)$$

U MQI průtokoměrů byly k dispozici kalibrační listy, proto byly vypočtené průtoky z měřidla adekvátně korigovány Q_{MIDKOR} .

Ve formuláři měření (obr. 7.8) se dále uvádí odchylka ΔQ mezi zkoumanými průtokoměry definovaná vztahem (7.4) a relativní odchylka δ_Q definovaná vztahem (7.5).

$$\Delta Q = Q_{NFP} - Q_{MIDKOR} \quad (7.4)$$

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q_{MIDKOR}} \cdot 100 \quad (7.5)$$

Z uvedených měření byly průběžně sestavovány grafy, které lze vidět ve spodní části obrázku 7.8. Na prvním z nich je závislost průtoku vykazovaného ultrazvukovým průtokoměrem Q_{NFP} nebo Q_{C-O} na průtokoměr MQI 99 Q_{MIDKOR} , na druhém je zobrazena závislost odchylky na průtoku nastaveném v laboratoři $Q_{POŽ}$.

Grafy sloužily pro okamžitou kontrolu správnosti měření. První graf byl proložen funkcí lineárního typu, ta dostatečným způsobem získané parametry vystihuje.

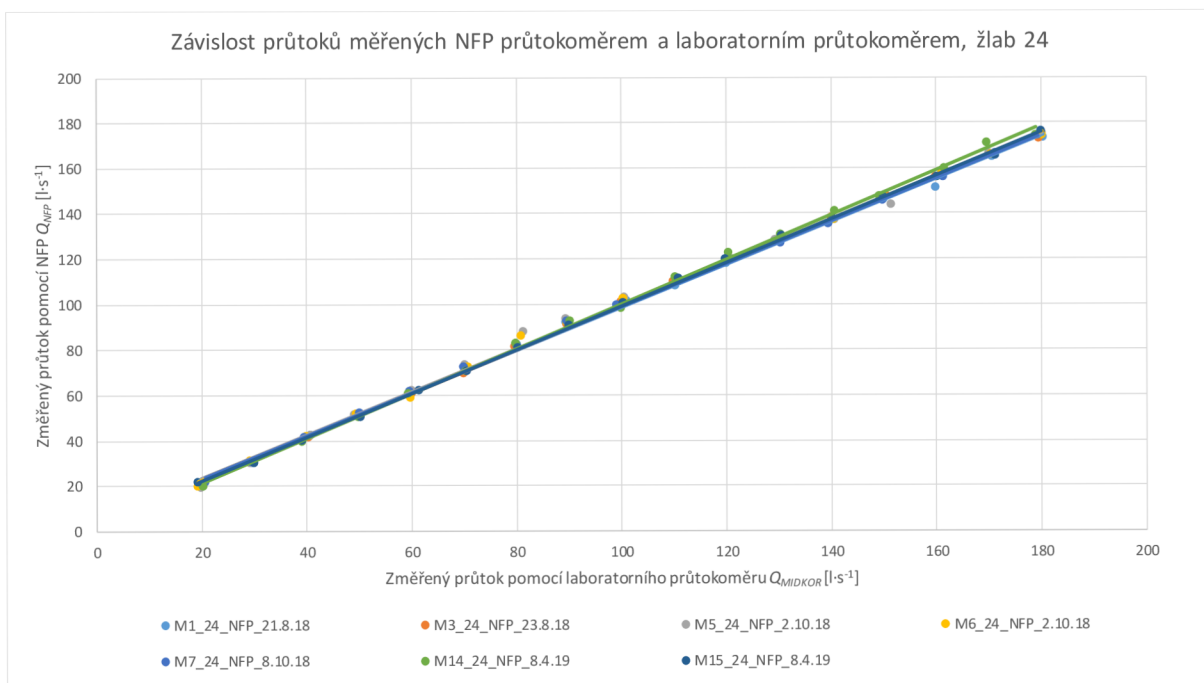
7.4 Vyhodnocení měření

Podle postupu uvedeného v podkapitole 7.3 bylo provedeno celkem 17 měření.

Jelikož měření M2_VNI_NFP_21.8.18 a M4_VNI_NFP_23.8.18 probíhala na měrné trati, která byla později z provozních důvodů laboratoře odstraněna a nebylo tak možné s odstupem času měření opakovat, nebudeme s nimi dále konkrétněji pracovat, lze je však nalézt v přílohách této práce.

Pro lepší orientaci se jednotlivá měření rozdělila do skupin dle toho, o jaké typy kontrolních ultrazvukových průtokoměrů se jedná (NFP nebo Clamp-on), a na kterém měrném žlabu měření probíhalo (viz tabulka 7.2). V následujícím textu se bude pracovat s nejpočetnější skupinou měření (M1, M3, M5, M6, M7, M14 a M15) probíhajících na měrném žlabu 24 pomocí NFP senzoru, ostatní výstupy v podání grafů a tabulek se nachází v přílohové části této práce.

Závislost průtoků vykazovaných jednotlivými ultrazvukovými průtokoměry na laboratorních indukčních průtokoměrech byla zpracována již ve formuláři měření (obr. 7.8), ale pro upřesnění byly lineární trendy daných skupin vloženy do společných jednotlivých grafů, jako je graf 7.2 a přílohy P_S1_G1, P_S1_G2, P_S1_G3.



Graf 7.2 Závislost průtoků měřených pomocí NFP a MQI

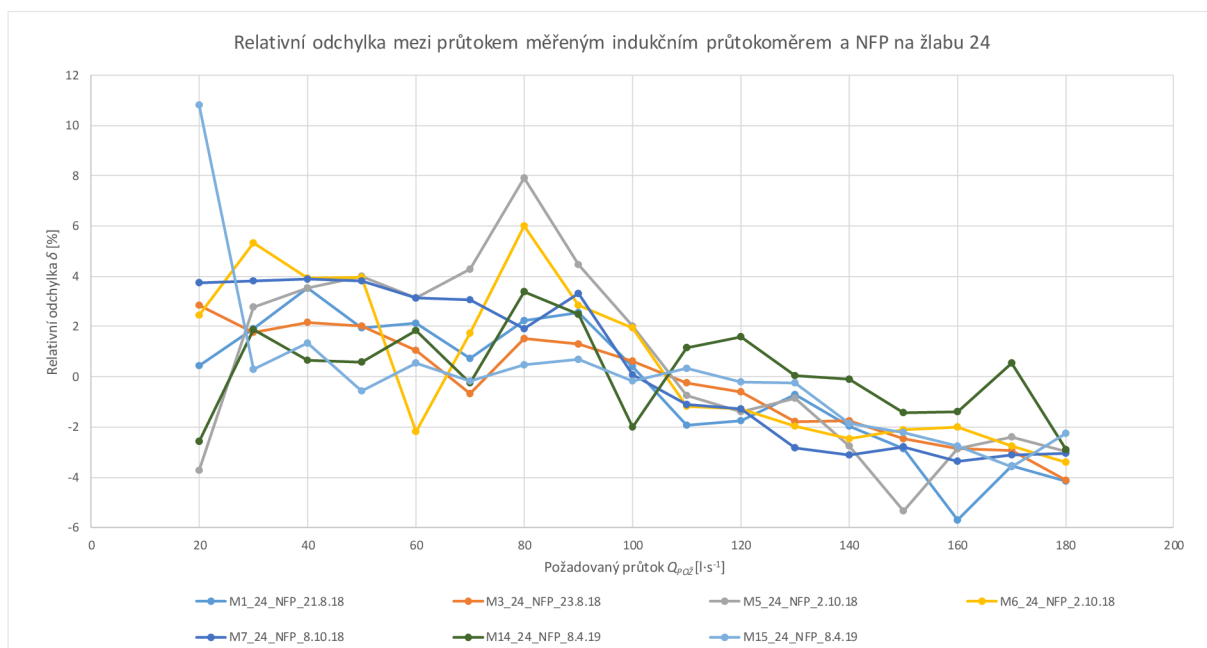
Každý lineární trend je pak vyjádřen vlastní rovnicí tvaru (7.6), tyto rovnice jsou uvedeny v tabulce 7.3.

$$Q_{NFP} = a \cdot Q_{MIDKOR} + b \quad (7.6)$$

Tabulka 7.3 Rovnice lineárních trendů

Číslo měření	Rovnice spojnic trendů:
M1	$Q_{NFP}=0.944Q_{MIDKOR}+4.094$
M2	$Q_{NFP}=0.9956Q_{MIDKOR}+0.4271$
M3	$Q_{NFP}=0.9578Q_{MIDKOR}+3.1774$
M4	$Q_{NFP}=1.0158Q_{MIDKOR}-0.3949$
M5	$Q_{NFP}=0.9477Q_{MIDKOR}+4.7204$
M6	$Q_{NFP}=0.9545Q_{MIDKOR}+3.8988$
M7	$Q_{NFP}=0.946Q_{MIDKOR}+4.3759$
M8	$Q_{NFP}=1.0043Q_{MIDKOR}-4.7815$
M9	$Q_{NFP}=0.9871Q_{MIDKOR}-3.4657$
M10	$Q_{C-O}=0.9353Q_{MIDKOR}+0.9032$
M11	$Q_{C-O}=0.9242Q_{MIDKOR}+1.5918$
M12	$Q_{C-O}=0.935Q_{MIDKOR}+1.1148$
M13	$Q_{C-O}=0.9388Q_{MIDKOR}+0.9375$
M14	$Q_{NFP}=0.9885Q_{MIDKOR}+1.3944$
M15	$Q_{NFP}=0.963Q_{MIDKOR}+2.693$
M16	$Q_{NFP}=0.9865Q_{MIDKOR}-2.4638$
M17	$Q_{NFP}=0.9799Q_{MIDKOR}-3.4864$

Daleko výstižnější zobrazení závislosti mezi NFP a MQI 99 průtokoměrem je pomocí relativní odchylky (viz vztah 7.5) závislé na požadovaném průtoku laboratoře, to lze vidět v grafu 7.3 a v přílohách P_S2_G1 a P_S2_G2.



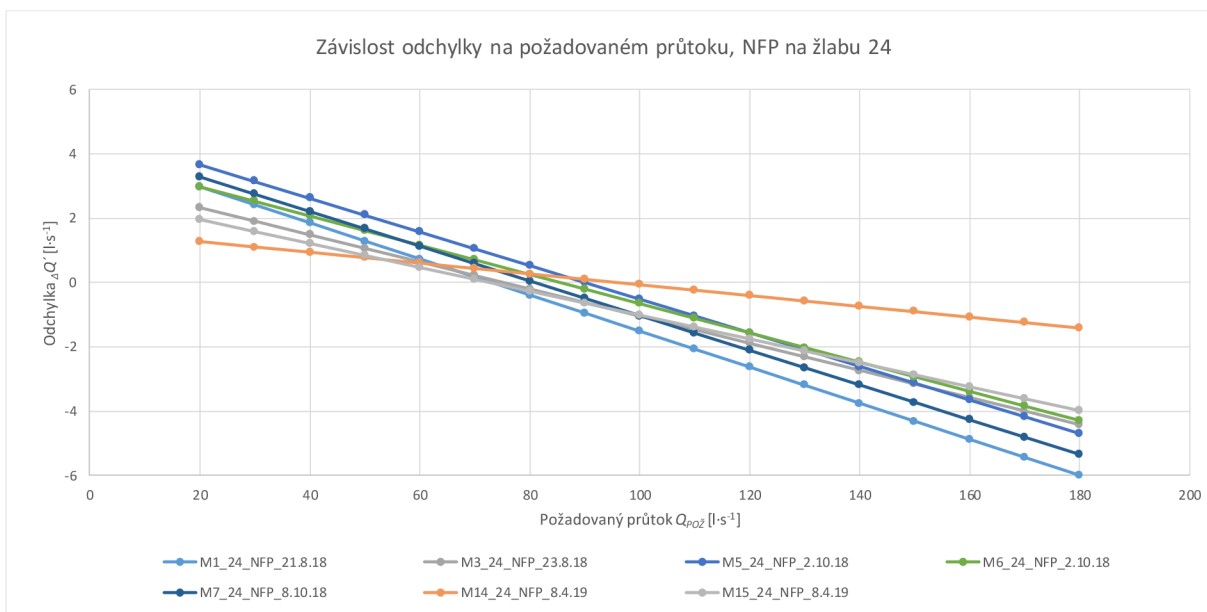
Graf 7.3 Relativní odchylka mezi NFP a MQI

Nejprve bylo plánováno pro závěrečné porovnání a vyhodnocení použít tzv. E_n číslo, které je blíže specifikováno v normě EN ISO 17043 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na zkoušení způsobilosti [14]. Jelikož jednotlivá měření jsou časově náročná a tento postup je založen na porovnání dvou jednorázových nezávislých měření, bylo od tohoto způsobu upuštěno.

Do všech rovnic lineárních trendů se za Q_{MIDKOR} dosadily požadované průtoky $Q_{POŽ}$. Dále se pracovalo jen s těmito hodnotami a křivkami. Data se porovnávala s uměle vytvořenou teoretickou křivkou 1:1, tj. $Q_{NFP} = Q_{POŽ}$.

Chyby jednotlivých měření lze nejjednodušeji graficky vyjádřit dle odchylky (vztah 7.7) od požadovaného průtoku $Q_{POŽ}$. Daná odchylka se může promítnout i do záporných hodnot (viz graf 7.4).

$$\Delta Q' = Q_{NFP} - Q_{POŽ} \quad (7.7)$$



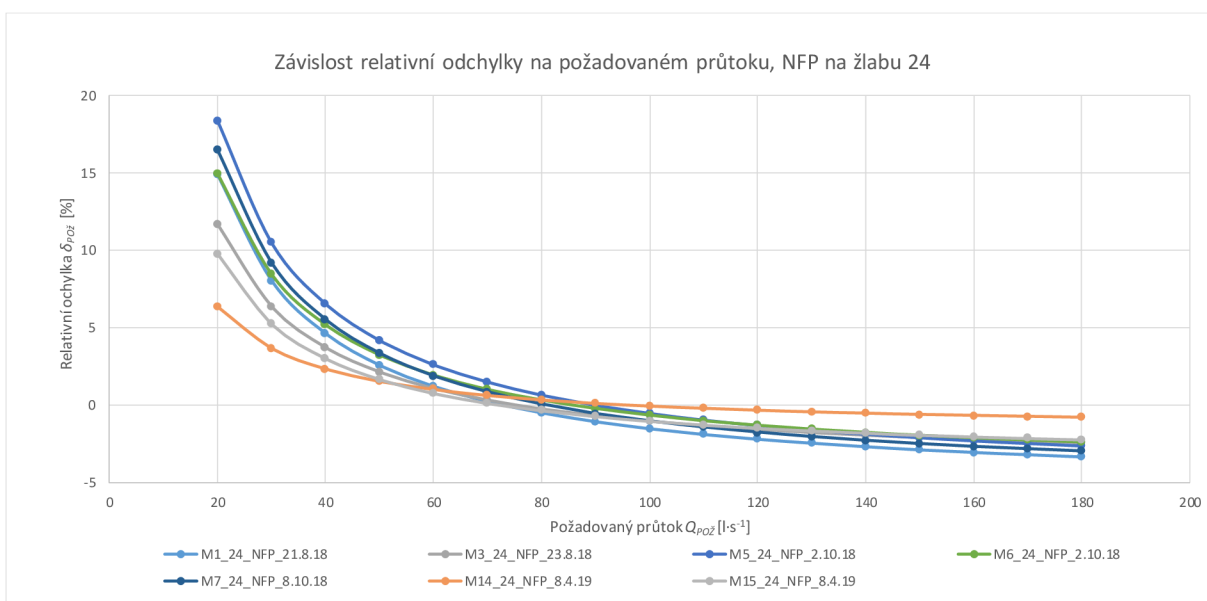
Graf 7.4 Odchylka mezi NFP a požadovaným průtokem

Lepší možností vyjádření přesnosti shody je pomocí relativní odchylky $\delta_{POŽ}$ vztažené k požadovanému průtoku $Q_{POŽ}$ dle vztahu:

$$\delta_{POŽ} = \frac{\Delta Q'}{Q_{POŽ}} \cdot 100, \quad (7.8)$$

kde $\Delta Q'$ je rozdíl průtoků a $Q_{POŽ}$ je požadovaný průtok laboratoří.

Grafické znázornění relativní odchylky je zobrazeno v grafu 7.5, tato odchylka byla základem pro výstupní část této práce.



Graf 7.5 Relativní odchylka mezi NFP a požadovaným průtokem

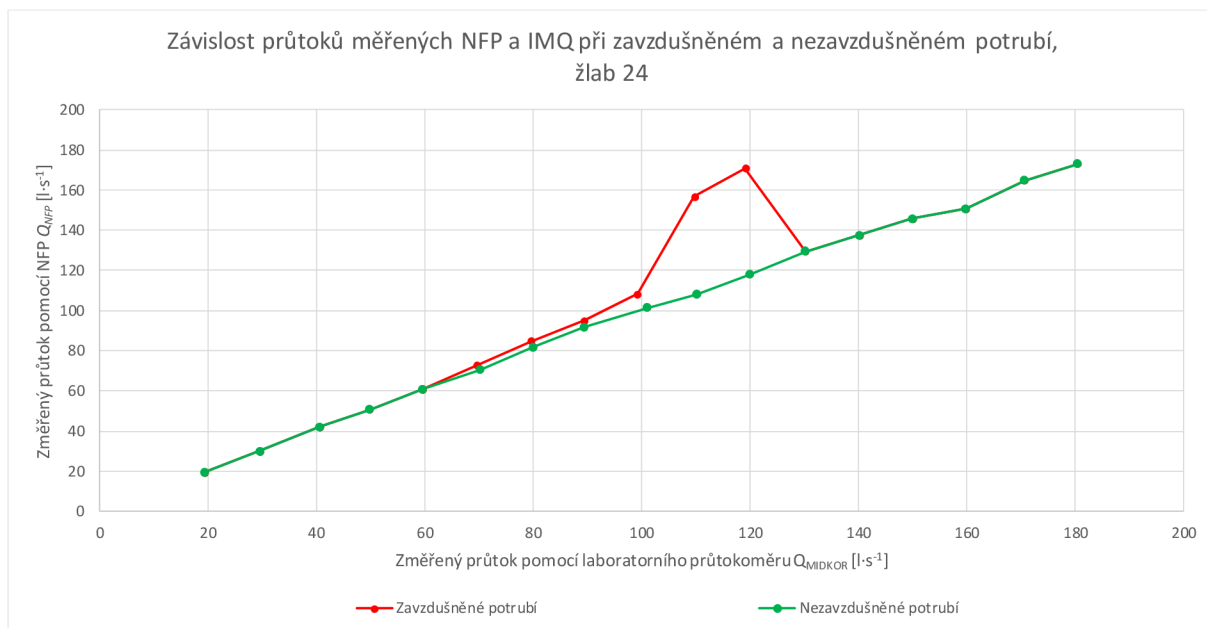
7.5 Výstup měření

Jak je patrné z dat uvedených v práci, hodnoty měřené pomocí ultrazvukových a indukčních průtokoměrů se neshodují, nicméně práce se zabývá pouze dlouhodobou stabilitou (reprodukovatelností) relativního porovnání jednotlivých průtokoměrů. Tato stabilita by měla být za neměnných okrajových podmínek mezi danými průtokoměry v čase „konstantní“.

Odchyłka měřených dat pomocí ultrazvukových a indukčních průtokoměrů může být způsobena více faktory, například při měření na venkovním okruhu se NFP senzor musel přesunout protiproudě před MQI, relativně blízko poproudě za 90° koleno, které způsobuje deformaci proudových vláken a snižuje tak absolutní přesnost měření NFP senzoru viz požadavky na instalaci (obr. 6.3).

Při prvních měřeních na venkovním žlabu vykazovala vyhodnocovací jednotka NFP výrazně chybné hodnoty (hrubé chyby) nebo docházelo ke kompletnímu kolapsu (byla vykazovaná nulová hodnota průtoku). Toto chování nastávalo už při rychlostech přes 2 m·s⁻¹. Odborníci ze společnosti NIVUS GmbH se domnívali, že příčinou může být špatná poloha senzoru, což vedlo následně k protiproudění přemístění senzoru. Při následujícím měření však stále docházelo ke kolapsu, proto společnost NIVUS GmbH nechala jednotku zkontrolovat svými IT specialisty. Programátoři na základě našeho měření našli ve SW vyhodnocovací jednotky chybu, kterou následně odstranili. Měřicí rozsah se následně rozšířil až k 5 m·s⁻¹.

NFP senzor umístěný na potrubí DN350 taktéž vykazoval chybné hodnoty, a to při přepínání laboratorních čerpadel. Zapnutí dalšího čerpadla pro zvýšení průtoku (přibližně při 100 l·s⁻¹) v okruhu laboratoře způsobilo zavzdušnění systému a senzor NFP tak vykazoval chybné hodnoty. V grafu 7.6 jsou znázorněny dvě křivky vystihující tento pozorovaný jev.



Graf 7.6 Porovnání zavzdušněného a nezavzdušněného potrubí měřné trati

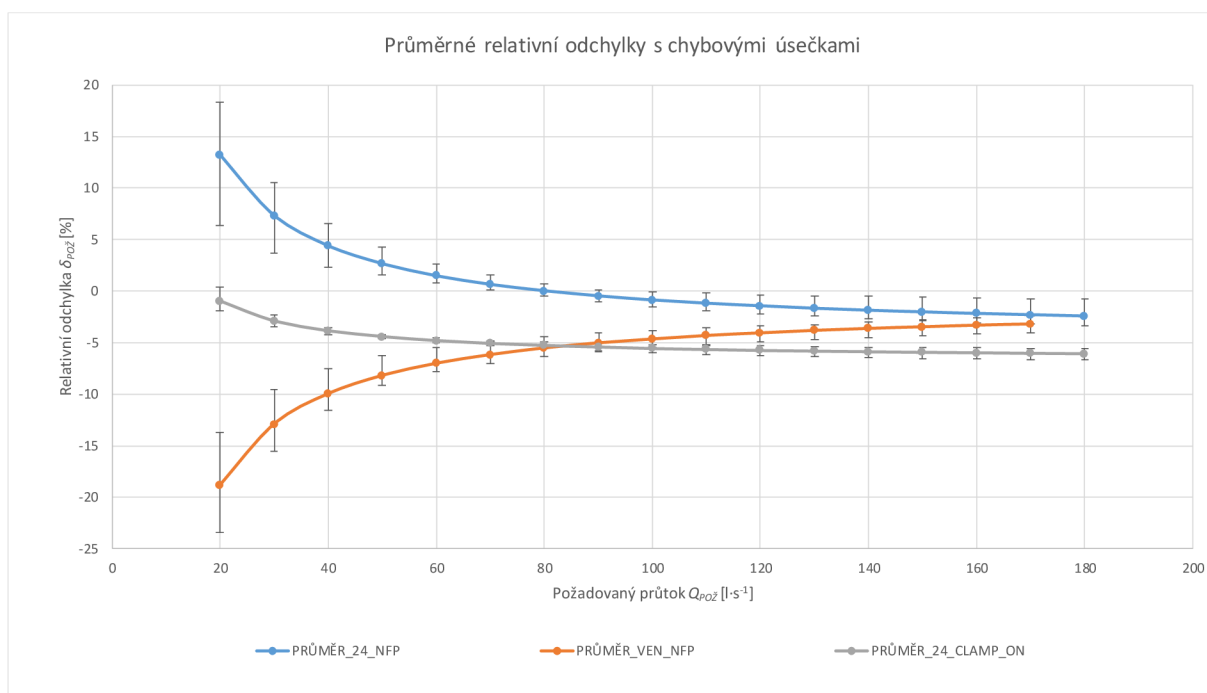
Jak už bylo několikrát zmíněno, tato práce se zabývá kontrolou měřicí schopnosti indukčních průtokoměrů instalovaných v laboratoři pomocí průtokoměrů ultrazvukových a vytvoření podkladů, které lze rychle a snadno aplikovat při budoucí kontrole. Nejlepším způsobem se ukázalo využití relativní odchylky prezentované na grafu 7.5 v předchozí podkapitole.

Relativní odchylka byla spočtena celkem pro 15 měření. Po rozdělení měření do skupin popsanych v předchozí podkapitole, byly vytvořeny samostatné grafy a tabulky, příkladem je tabulka 7.4 pro 1. skupinu, ostatní jsou v příloze P_S4_T1 a P_S4_T2.

Tabulka 7.4 Relativní odchylky vykazované laboratoři

Průtok [l·s ⁻¹]	Relativní odchylky vykazované laboratoři [%], průtokoměr NFP na žlabu 24								PRŮMĚR_24_NFP
	M1_24_NFP_21.8.18	M3_24_NFP_23.8.18	M5_24_NFP_2.10.18	M6_24_NFP_2.10.18	M7_24_NFP_8.10.18	M14_24_NFP_8.4.19	M15_24_NFP_8.4.19		
20	14,87	11,67	18,37	14,94	16,48	6,36	9,77	13,21	
30	8,05	6,37	10,50	8,45	9,19	3,68	5,28	7,36	
40	4,64	3,72	6,57	5,20	5,54	2,35	3,03	4,43	
50	2,59	2,13	4,21	3,25	3,35	1,54	1,69	2,68	
60	1,22	1,08	2,64	1,95	1,89	1,01	0,79	1,51	
70	0,25	0,32	1,51	1,02	0,85	0,62	0,15	0,67	
80	-0,48	-0,25	0,67	0,32	0,07	0,34	-0,33	0,05	
90	-1,05	-0,69	0,01	-0,22	-0,54	0,11	-0,71	-0,44	
100	-1,51	-1,04	-0,51	-0,65	-1,02	-0,06	-1,01	-0,83	
110	-1,88	-1,33	-0,94	-1,01	-1,42	-0,21	-1,25	-1,15	
120	-2,19	-1,57	-1,30	-1,30	-1,75	-0,33	-1,46	-1,41	
130	-2,45	-1,78	-1,60	-1,55	-2,03	-0,43	-1,63	-1,64	
140	-2,68	-1,95	-1,86	-1,77	-2,27	-0,52	-1,78	-1,83	
150	-2,87	-2,10	-2,08	-1,95	-2,48	-0,60	-1,90	-2,00	
160	-3,04	-2,23	-2,28	-2,11	-2,67	-0,67	-2,02	-2,15	
170	-3,19	-2,35	-2,45	-2,26	-2,83	-0,73	-2,12	-2,27	
180	-3,33	-2,45	-2,61	-2,38	-2,97	-0,78	-2,20	-2,39	

V každé skupině se spočetly průměrné hodnoty relativních odchylek, k nim se následně přiřadily kladné a záporné chybové úsečky vystihující za daného průtoku maximální a minimální hodnotu vykazovanou v rámci příslušné skupiny a tvoří tak pásmo tolerovaného „dovoleného“ rozsahu, viz graf 7.7.



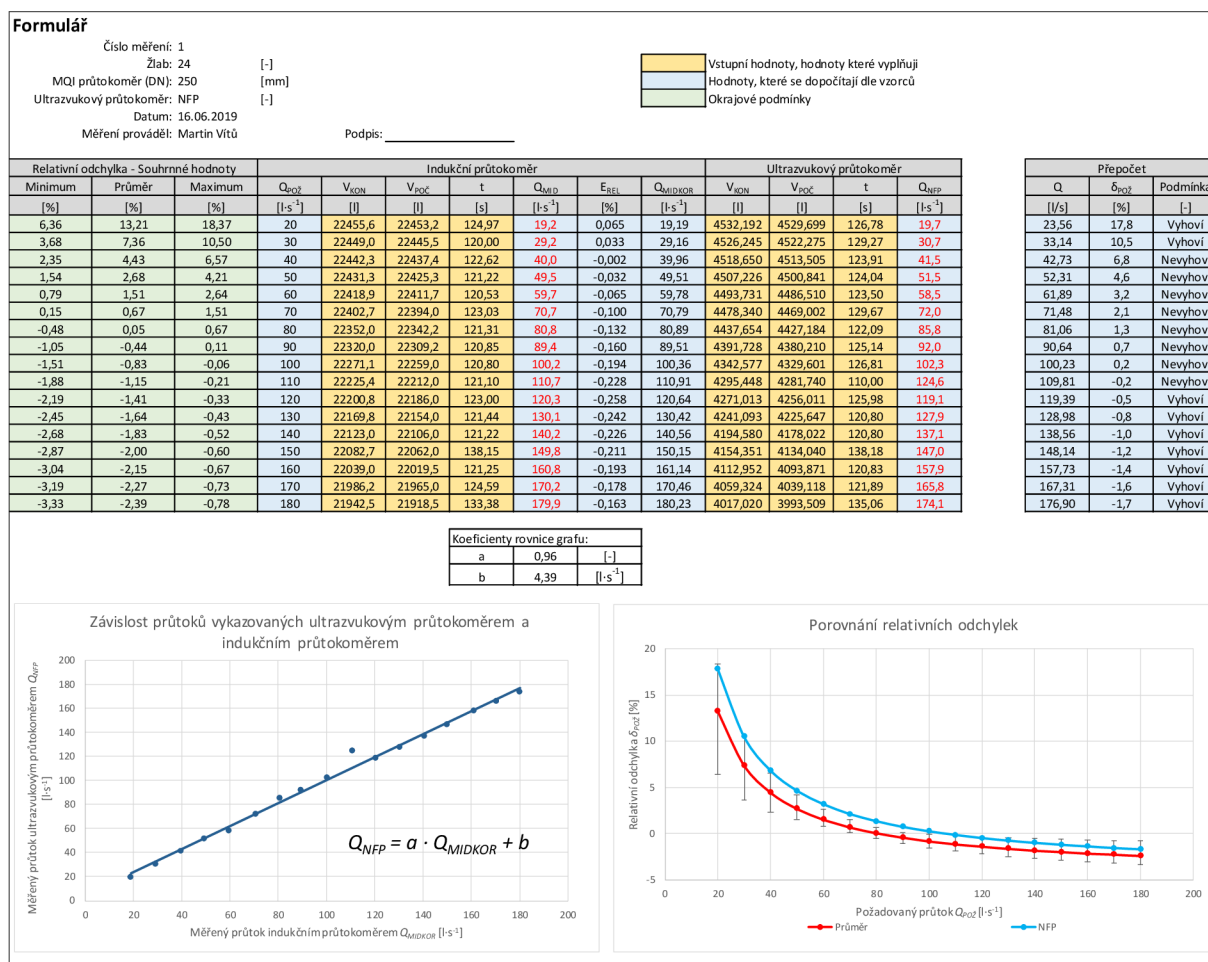
Graf 7.7 Průměrné relativní odchylky s chybovými úsečkami

V grafu lze pozorovat vykazované průměrné relativní chyby a toleranční pásma jednotlivých ultrazvukových průtokoměrů na příslušných měrných tratích laboratoře, v přílohách P_S5_G1, G2, G3 se křivky nacházejí odděleně a detailněji. Všechny okrajové hodnoty byly využity ke zpracování třech kontrolních formulářů. Tyto formuláře budou používány pracovníky laboratoře k pravidelné kontrole indukčních průtokoměrů, jeden takový formulář je na obrázku 7.9, ostatní se nachází v přílohách P_F1 a P_F2.

V hlavičce formuláře se nachází důležité informace o měření, například číslo měření, název žlabu, o jaký typ indukčního a ultrazvukového průtokoměru se jedná, datum měření a informace o autorovi měření.

Průtokový rozsah byl rozdělen do 17 a 16 řádků po $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ dle měrné trati, na které bude probíhat měření. Rozsah průtoku je volen od $20 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $180 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (resp. $170 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$).

Sloupce (podbarvené zelenou barvou) na levé straně obsahují vstupní data pro vytvoření okrajových podmínek. Sloupce označené žlutou barvou budou doplněny při měření (postup popsán v podkapitole 7.3.).



Obr. 7.9 Kontrolní formulář

Pomocí naměřených hodnot z obou průtokoměrů bude vytvořen lineární trend (vystižený parametry a a b) sloužící k okamžité kontrole probíhajícího měření. Dále se automaticky dopočítá linearizovaný průtok (sloupec Q) vztahem (7.6) a relativní odchylka (sloupec $\delta_{POŽ}$) vztahem (7.8). Takto určená relativní odchylka se vynese do pravého grafu z obrázku 7.9 a porovná se s toleranční oblastí grafu, k přesnějšímu porovnání slouží poslední sloupec nacházející se ve formuláři obsahujícím funkci s textem „vyhoví“ nebo „nevyhoví“.

Pokud hodnoty relativní chyby nespádají do určeného intervalu, měly by se elektromagnetické indukční průtokoměry typu MQI 99 instalované na měrné trati laboratoře zaslat k překalibrování určené společnosti obsluhou laboratoře.

8 ZÁVĚR

Na začátku práce byly zjednodušeně popsány typy a druhy proudění, způsoby a druhy měření, jednotlivé typy průtokoměrů s jejich stručnými popisy a informace o jejich měřicích schopnostech. Tyto podklady byly důležité k pochopení praktické části bakalářské práce.

Praktická část je nejdříve věnována dvěma ultrazvukovým průtokoměrům, a to konkrétně NIVUS Full Pipe a NIVUS Clamp-on. Byly podrobně popsány technické parametry průtokoměrů, jejich funkčnost, omezující podmínky, varianty míst instalace, postup měření s ultrazvukovými senzory a jejich příslušenství.

Dále se práce zabývala vlastním měřením, při kterém byla nalezena chyba ve vnitřním SW kódu vyhodnocovací jednotky NFP. Společnost NIVUS GmbH chybu uznala a na základě naměřených dat opravila.

Následně byla pomocí relativní odchylky zjištěna závislost ultrazvukových průtokoměrů na průtokoměrech indukčních, které jsou instalovány v laboratoři. Určená závislost byla využita k důležitému výstupu ve formě třech kontrolních formulářů pro budoucí ověřování přesnosti indukčních měřidel.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [2] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIN. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
- [3] *ELUC* [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/962>
- [4] *Datacon* [online]. Olomouc: Perus, 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.datacon.cz/turbinove-prutokomery-hoffer-a-jejich-vlastnosti.html>
- [5] *Magneticko-indukční průtokoměr MQI99: Uživatelská příručka*. Brno, 2008.
- [6] KADLEC, Karel. *Indukční průtokoměr: Princip, vlastnosti a použití*. Atoma [online]. 2012, 10-13 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9933.pdf
- [7] KADLEC, Karel. *Ultrazvukové průtokoměry: Princip, vlastnosti a použití*. Atoma [online]. 2013, 14-17 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf
- [8] *Instruction Manual for Measurement System NFP. 2*. German: NIVUS, 2009.
- [9] *Installation Instruction Pepe and Wedge Sensors: Installation Instruction for Correlation and Doppler Sensors. 3*. German: NIVUS, 2012.
- [10] *Installation Instruction Transit Time Sensors. 2*. German: NIVUS, 2018.
- [11] *Technical Instructions for Transit Time Sensors. 2*. German: NIVUS, 2017.
- [12] *Instruction Manual: Flow Measurement Transmitter NivuFloe 600. 2*. German: NIVUS, 2019.
- [13] *Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně: LVV* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/index.html>
- [14] *ČSN EN ISO/IEC 17043. Posuzování shody: Všeobecné požadavky na zkoušení způsobilosti*. Řídicí centrum CENELEC, 2010.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam symbolů a označení

Popis	Označení	Jednotky
Délka	L	[m]
Doba měření	t	[s]
Indukované napětí	U	[V]
Konečný objem	V_{KON}	[l]
Magnetická indukce	B	[T]
Odchylka průtoků	ΔQ	[l·s ⁻¹]
Odchylka průtoků vztažena ke $Q_{POŽ}$	$\Delta Q'$	[l·s ⁻¹]
Parametr popisující přímku	b	[l·s ⁻¹]
Počáteční objem	$V_{POČ}$	[l]
Průměr trubice	D	[mm]
Průtok korigovaný vykazovaný MQI	Q_{MIDKOR}	[l·s ⁻¹]
Průtok požadovaný laboratoří	$Q_{POŽ}$	[l·s ⁻¹]
Průtok vykazovaný MQI	Q_{MID}	[l·s ⁻¹]
Průtok vykazovaný ultrazvukovým průtokoměrem Clamp-on	Q_{C-O}	[l·s ⁻¹]
Průtok vykazovaný ultrazvukovým průtokoměrem NFP	Q_{NFP}	[l·s ⁻¹]
Relativní odchylka	δ	[%]
Relativní odchylka v kalibračním listu	E	[%]
Relativní odchylka vztažena ke $Q_{POŽ}$	$\delta_{POŽ}$	[%]
Reynoldsovo číslo	Re	[-]
Rychlost	v	[m·s ⁻¹]
Směrnice přímky	a	[-]
Úhel	α	[°]
Viskozita kapaliny	ν	[m ² ·s ⁻¹]
Výpočet statistiky výkonnosti	E_n	[-]

Použité zkratky

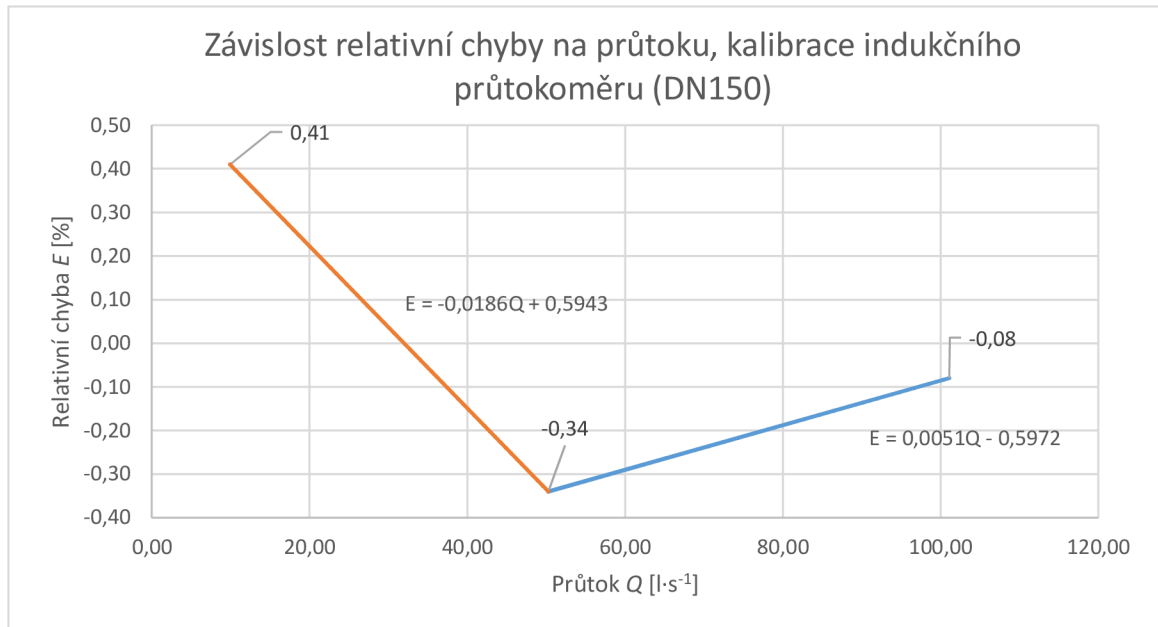
Popis	Označení
Česká republika	ČR
Průměr potrubí	DN
Digitální signálový procesor	DSP
Polyethylen s vysokou hustotou	HDPE
Magneticko-indukční průtokoměr	MQI
NIVUS Full Pipe – Ultrazvukový průtokoměr	NFP
Polyvinylchlorid	PVC
Software	SW

11 SEZNAM PŘÍLOH

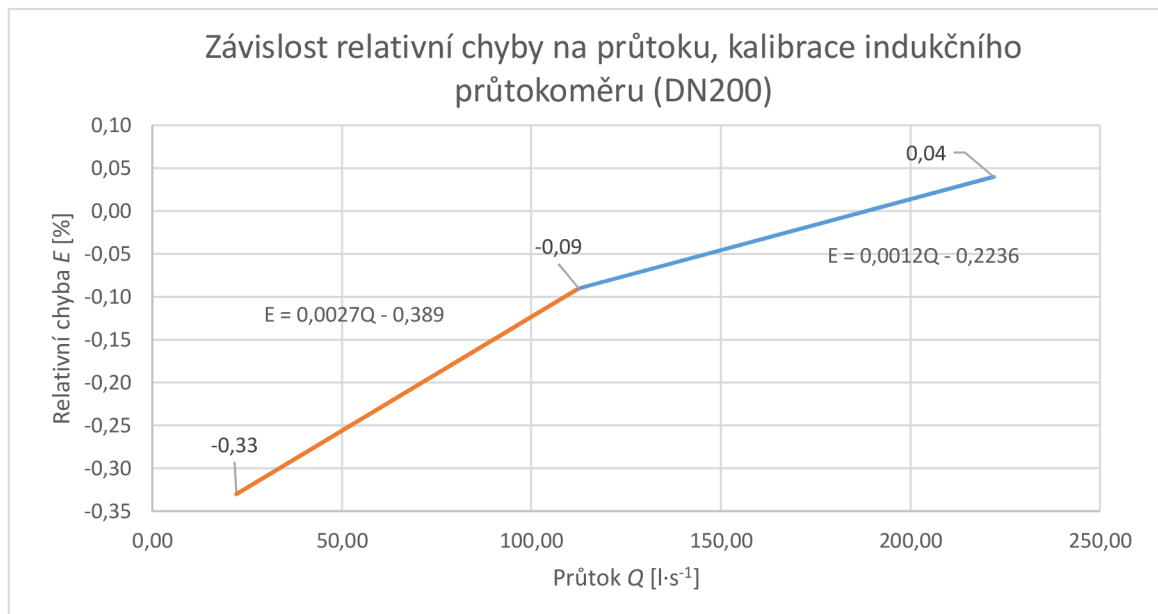
- P_K1 – Kalibrační podklady pro MQI 99 DN150
- P_K2 – Kalibrační podklady pro MQI 99 DN200
- P_S1_T1 – Naměřené průtoky pomocí NFP a MQI na měrném žlabu 24
- P_S1_T2 – Naměřené průtoky pomocí NFP a MQI na venkovním měrném žlabu
- P_S1_T3 – Naměřené průtoky pomocí Clamp-on a MQI na měrném žlabu 24
- P_S1_T4 – Naměřené průtoky pomocí NFP a MQI na vnitřním měrném žlabu
- P_S1_G1 – Závislost průtoků měřených NFP průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, venkovní žlab
- P_S1_G2 – Závislost průtoků měřených Clamp-on průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, žlab 24
- P_S1_G3 – Závislost průtoků měřených NFP průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, vnitřní žlab
- P_S2_T1 – Tabulka relativních odchylek mezi průtokem měřeným indukčním průtokoměrem a ultrazvukovým průtokoměrem
- P_S2_G1 – Graf relativní odchylky mezi NFP a MQI na venkovním žlabu
- P_S2_G2 – Graf relativní odchylky mezi Clamp-on a MQI na žlabu 24
- P_S3_T1 – Tabulka odchylky mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, NFP na žlabu 24
- P_S3_T2 – Tabulka odchylky mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, NFP na venkovním žlabu
- P_S3_T3 – Tabulka odchylky mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, Clamp-on na žlabu 24
- P_S3_G1 – Závislost odchylky na požadovaném průtoku, NFP na venkovním žlabu
- P_S3_G2 – Závislost odchylky na požadovaném průtoku, Clamp-on na žlabu 24
- P_S4_T1 – Tabulka relativní odchylky vykazované laboratoří, NFP na venkovním žlabu
- P_S4_T2 – Tabulka relativní odchylky vykazované laboratoří, Clamp-on na žlabu 24
- P_S4_G1 – Závislost relativní odchylky na požadovaném průtoku, NFP na venkovním žlabu
- P_S4_G2 – Závislost relativní odchylky na požadovaném průtoku, Clamp-on na žlabu 24
- P_S5_G1 – Průměrná relativní odchylka s chybovými úsečkami, NFP na žlabu 24
- P_S5_G2 – Průměrná relativní odchylka s chybovými úsečkami, NFP na venkovním žlabu
- P_S5_G3 – Průměrná relativní odchylka s chybovými úsečkami, Clamp-on na žlabu 24
- P_F1 – Kontrolní formulář pro NFP průtokoměr a venkovní měrný žlab
- P_F2 – Kontrolní formulář pro Clamp-on průtokoměr a měrný žlab 24

PŘÍLOHOVÁ ČÁST

č. 48/2018		
Q	Q	E
[m ³ ·h ⁻¹]	[l·s ⁻¹]	[%]
364	101,11	-0,08
181	50,28	-0,34
35,7	9,92	0,41



č. 052/18		
Q	Q	E
[m ³ ·h ⁻¹]	[l·s ⁻¹]	[%]
799	221,94	0,04
405	112,50	-0,09
79,9	22,19	-0,33



P_S1_T1

Naměřené hodnoty pomocí NFP a MQI na měrném žlabu 24 [l·s ⁻¹]														
Měření	M1_24_NFP_21.8.18		M3_24_NFP_23.8.18		M5_24_NFP_2.10.18		M6_24_NFP_2.10.18		M7_24_NFP_8.10.18		M14_24_NFP_8.4.19		M15_24_NFP_8.4.19	
Datum	21.08.2018		23.08.2018		02.10.2018		02.10.2018		08.10.2018		08.04.2019		08.04.2019	
Potrubí	DN250	DN350	DN250	DN350	DN250	DN350	DN250	DN350	DN250	DN350	DN200	DN200	DN200	DN200
Průtok	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}
20	19,46	19,54	19,61	20,15	19,88	19,14	19,19	19,66	20,64	21,42	20,35	19,83	19,38	21,47
30	29,59	30,16	29,89	30,40	29,26	30,07	29,16	30,71	29,49	30,61	29,76	30,32	30,03	30,12
40	40,70	42,14	40,31	41,19	40,69	42,12	39,96	41,52	39,55	41,09	39,19	39,45	39,22	39,75
50	49,87	50,84	49,76	50,77	49,15	51,11	49,51	51,48	50,17	52,08	49,83	50,12	50,32	50,03
60	59,64	60,91	59,93	60,60	59,98	61,86	59,78	58,47	59,54	61,39	59,51	60,60	61,46	61,80
70	70,16	70,66	69,89	69,47	70,09	73,09	70,79	72,01	69,97	72,11	70,44	70,27	70,52	70,39
80	80,07	81,84	79,69	81,00	81,26	87,68	80,89	85,76	80,02	81,56	79,92	82,62	80,20	80,57
90	89,45	91,74	89,61	90,92	89,33	93,32	89,51	92,04	89,61	92,57	90,15	92,39	89,91	90,54
100	101,04	101,43	99,98	100,79	100,52	102,55	100,36	102,33	99,15	99,23	99,90	97,90	100,34	100,15
110	110,20	108,07	109,91	109,87	110,57	109,73	110,91	109,61	110,56	109,32	110,37	111,65	110,85	111,22
120	119,99	117,86	120,35	119,93	121,19	119,50	120,64	119,08	120,86	119,30	120,35	122,28	119,85	119,60
130	130,30	129,38	129,73	127,70	129,24	128,15	130,42	127,86	130,43	126,76	130,27	130,32	130,47	130,13
140	140,17	137,40	140,00	137,85	140,67	136,77	140,56	137,07	139,41	135,04	140,65	140,50	140,22	137,58
150	149,97	145,68	150,69	147,25	151,43	143,36	150,15	146,99	149,74	145,55	149,16	147,03	149,99	146,65
160	159,90	150,79	159,97	155,66	160,81	156,17	161,14	157,92	161,34	155,91	161,58	159,34	160,04	155,64
170	170,69	164,62	170,35	165,65	170,00	165,92	170,46	165,77	171,34	165,98	169,71	170,64	171,22	165,11
180	180,47	172,94	179,59	172,45	180,25	174,87	180,23	174,08	179,39	173,91	179,04	173,85	179,99	175,93

Naměřené hodnoty pomocí NFP a MQI na venkovním měrném žlabu [l·s ⁻¹]									
Měření	M8_VEN_NFP_18.3.19		M9_VEN_NFP_18.3.19		M16_VEN_NFP_8.4.19		M17_VEN_NFP_8.4.19		
Datum	18.03.2019		18.03.2019		08.04.2019		08.04.2019		
Potrubí	DN200	DN200	DN200	DN200	DN250	D250	DN250	D250	
Průtok	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	
20	20,40	12,89	20,25	18,45	21,54	18,96	21,59	18,95	
30	30,51	27,94	30,62	27,62	30,70	27,65	30,57	27,23	
40	40,93	36,95	40,04	36,15	39,71	34,76	40,49	34,84	
50	50,21	47,47	50,36	47,48	50,61	46,94	49,92	45,87	
60	60,82	57,11	60,66	56,31	60,77	56,77	61,59	56,46	
70	70,29	66,19	70,84	63,96	72,08	68,72	70,95	65,54	
80	80,77	75,93	80,18	75,70	79,84	76,66	80,30	74,63	
90	91,05	85,72	90,36	83,33	90,37	87,74	89,71	81,93	
100	99,67	93,69	100,77	93,86	100,61	95,57	100,74	94,77	
110	110,27	103,60	110,05	103,54	111,10	106,17	110,38	105,26	
120	120,30	114,50	119,45	114,08	119,71	117,87	120,02	114,60	
130	130,26	131,19	130,92	129,96	128,68	128,07	129,95	126,46	
140	140,48	140,30	139,71	139,29	139,31	138,04	141,86	134,74	
150	150,63	149,09	149,75	147,53	150,47	149,33	150,07	147,23	
160	160,13	156,28	159,86	153,91	160,67	154,83	160,09	151,97	
170	170,07	160,76	169,87	160,22	170,72	158,85	169,35	160,57	

P_S1_T2

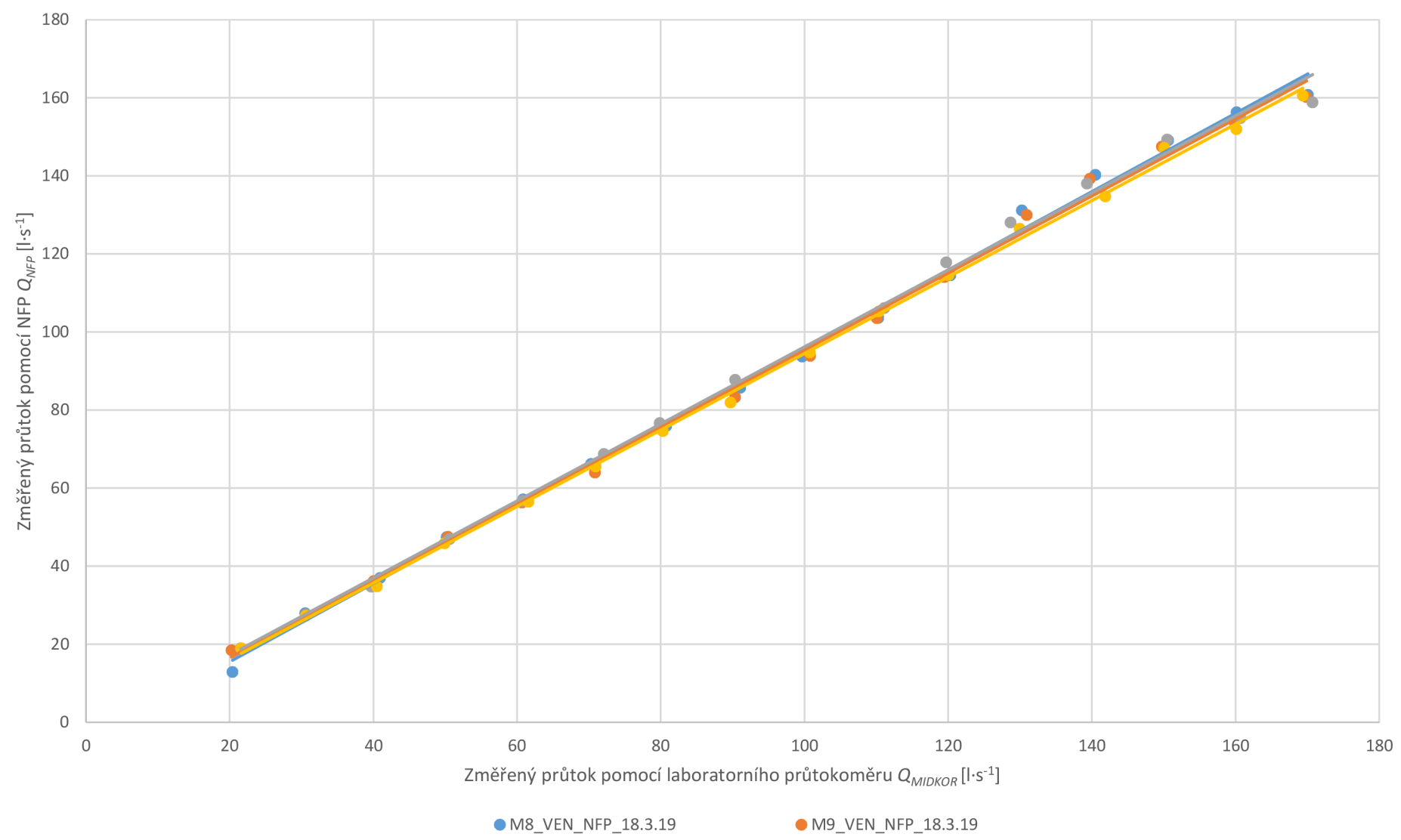
P_S1_T3

Naměřené hodnoty pomocí Clamp-on a MQI na měrném žlabu 24 [l·s ⁻¹]								
Měření	M10_24_CLAMP_ON_18.3.19		M11_24_CLAMP_ON_18.3.19		M12_24_CLAMP_ON_8.4.19		M13_24_CLAMP_ON_8.4.19	
Datum	18.03.2019		18.03.2019		08.04.2019		08.04.2019	
Potrubí	DN250	D250	DN250	D250	DN250	DN350	DN250	DN350
Průtok	Q _{MIDKOR}	Q _{C-O}	Q _{MIDKOR}	Q _{C-O}	Q _{MIDKOR}	Q _{C-O}	Q _{MIDKOR}	Q _{C-O}
20	19,74	18,36	19,52	18,81	20,35	18,93	19,38	18,62
30	29,67	28,93	29,99	29,37	29,76	29,03	30,03	29,13
40	39,55	38,07	39,47	38,33	39,19	38,27	39,22	37,45
50	49,43	47,24	49,95	47,12	49,83	48,42	50,32	47,23
60	59,70	57,67	59,94	55,90	59,51	56,69	61,46	57,89
70	69,66	66,25	69,69	64,68	70,44	66,86	70,52	66,39
80	79,97	75,30	79,65	74,98	79,92	76,50	80,20	75,46
90	89,78	85,06	89,82	86,84	90,15	85,21	89,91	88,07
100	99,51	93,46	99,59	97,46	99,90	95,73	100,34	96,36
110	109,82	104,60	109,97	104,53	110,37	104,69	110,85	105,28
120	119,58	111,48	119,72	112,19	120,35	110,51	119,85	114,64
130	129,78	123,49	130,35	120,76	130,27	120,47	130,47	126,09
140	140,34	132,55	140,07	130,75	140,65	137,90	140,22	130,71
150	150,40	140,16	149,99	139,81	149,16	140,40	149,99	140,35
160	160,36	149,83	159,76	146,80	161,58	149,91	160,04	151,52
170	169,60	160,48	169,77	159,49	169,71	161,41	171,22	160,46
180	179,86	169,43	179,70	167,61	179,04	167,75	179,99	169,12

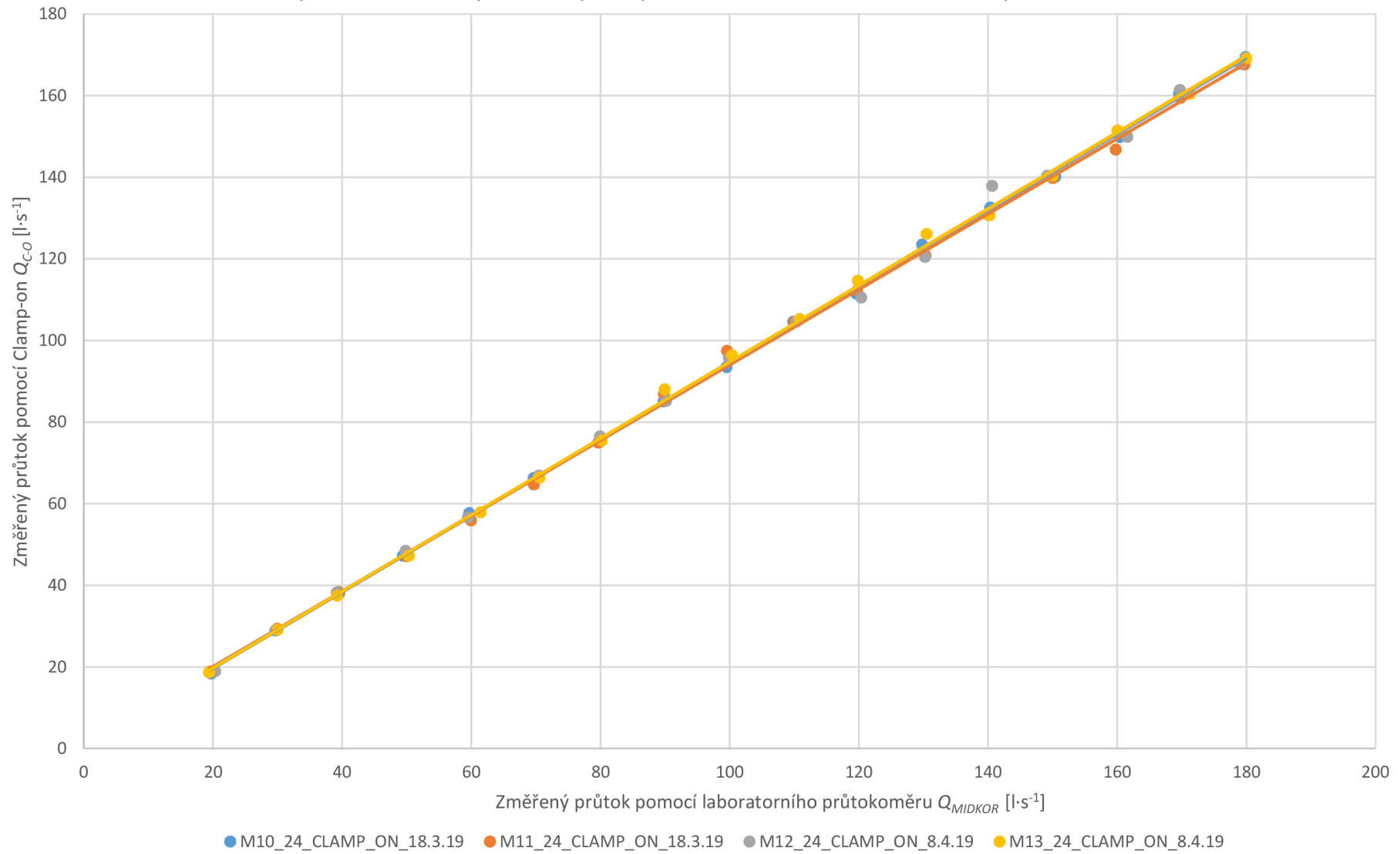
Naměřené hodnoty pomocí NFP a MQI na venkovním měrném žlabu [l·s ⁻¹]				
Měření	M2_VNI_NFP_21.8.18		M4_VNI_NFP_23.8.18	
Datum	21.08.2018		23.08.2018	
Potrubí	DN150	DN350	DN150	DN350
Průtok	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}	Q _{MIDKOR}	Q _{NFP}
80	79,99	80,81	81,82	83,29
70	70,73	68,82	70,13	69,64
60	60,26	60,66	60,57	60,55
50	50,35	51,59	50,84	51,53
40	40,17	40,75	40,41	41,17
35	35,31	35,58	35,42	36,21
30	30,11	31,07	30,47	30,93
25	25,03	25,08	25,36	26,63
20	20,64	20,82	20,04	19,52
15	14,91	15,24	15,46	14,58
10	10,78	10,62	11,44	10,56

P_S1_T4

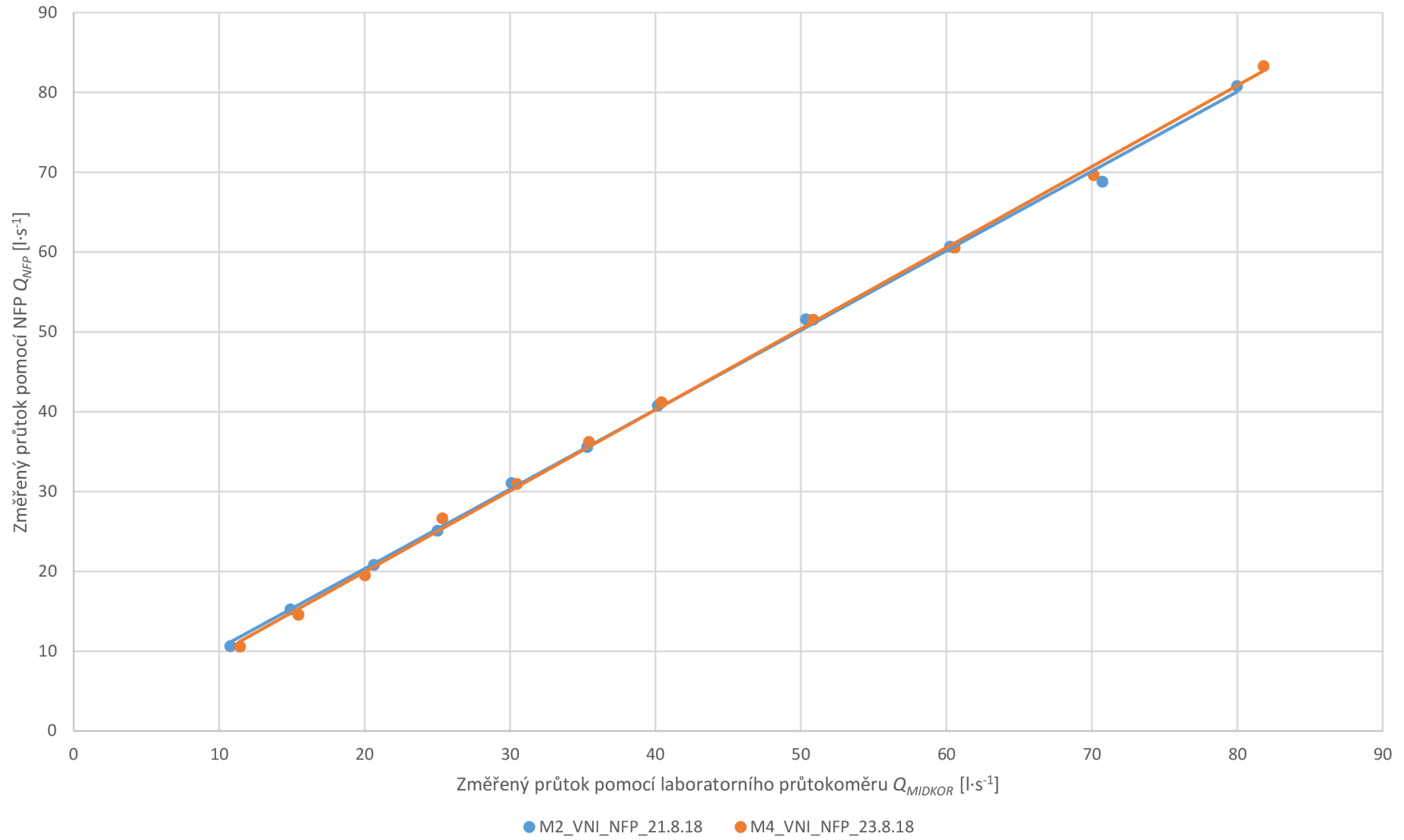
Závislost průtoků měřených NFP průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, venkovní žlab



Závislost průtoků měřených Clamp-on průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, žlab 24



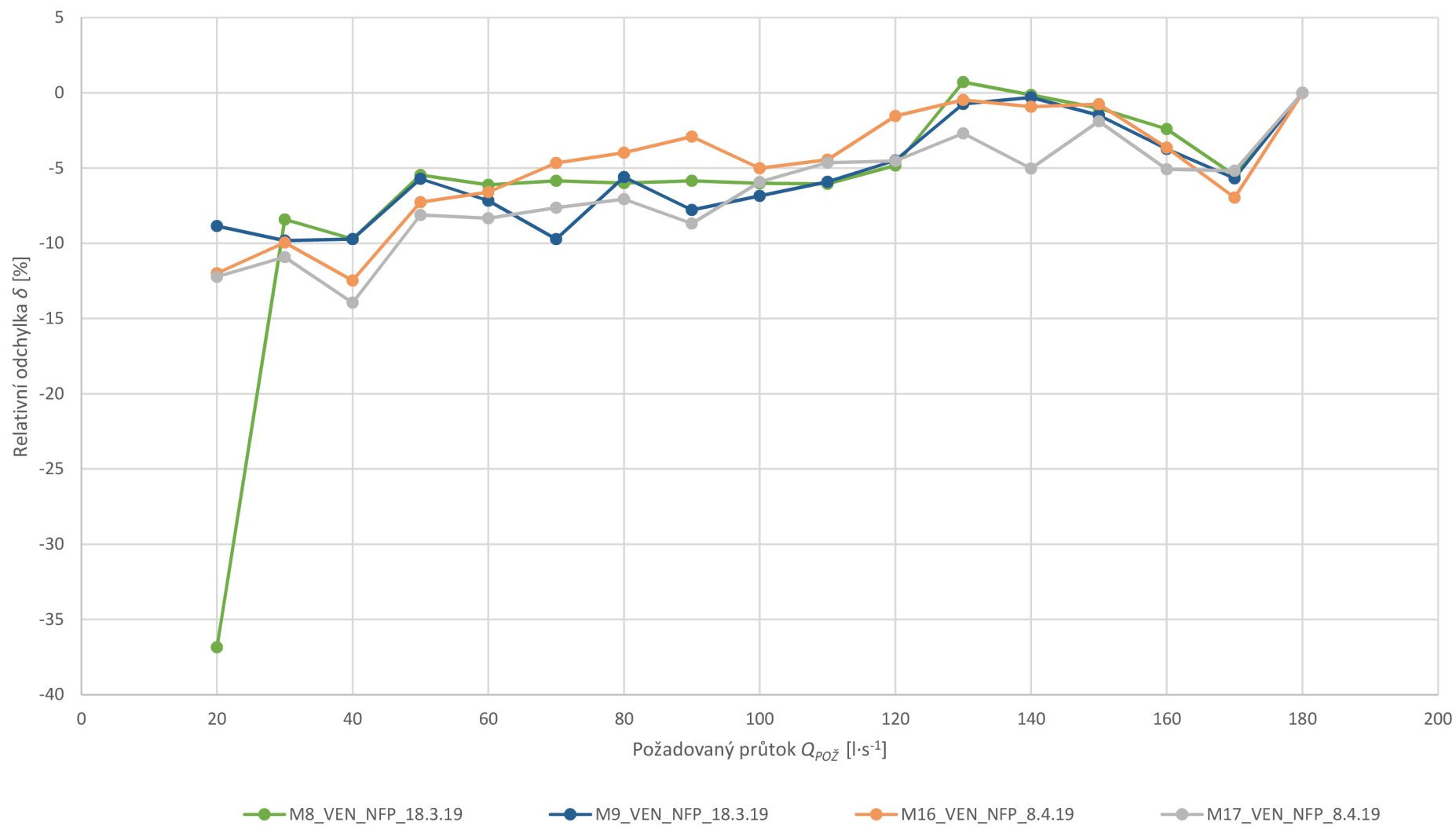
Závislost průtoků měřených NFP průtokoměrem a laboratorním průtokoměrem, vnitřní žlab



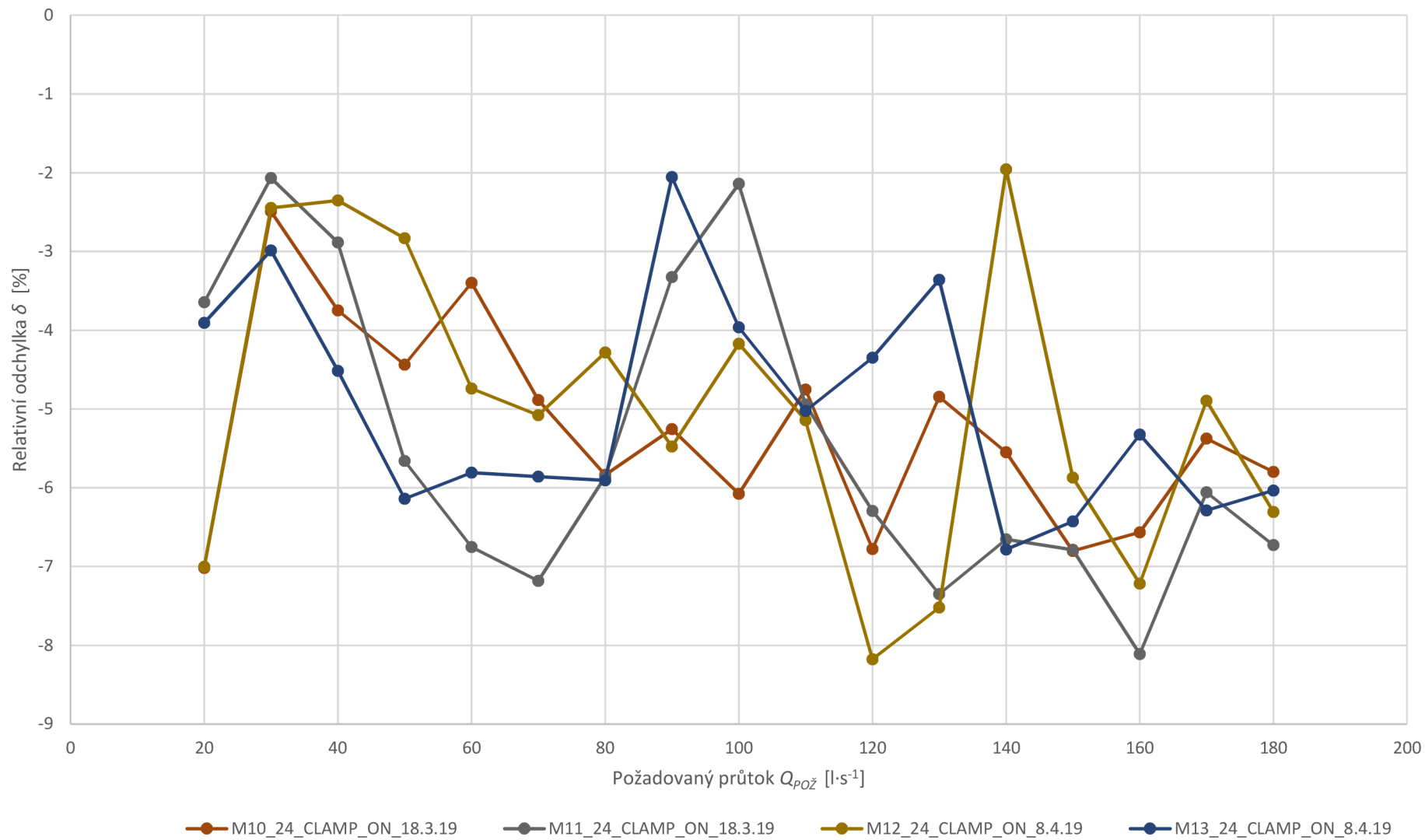
Průtok [l·s ⁻¹]	Relativní odchylka mezi průtokem měřeným indukčním průtokoměrem a ultrazvukovým průtokoměrem [%]							
	M1_24_NFP_21.8.18	M3_24_NFP_23.8.18	M5_24_NFP_2.10.18	M6_24_NFP_2.10.18	M7_24_NFP_8.10.18	M8_VEN_NFP_18.3.19	M9_VEN_NFP_18.3.19	M10_24_CLAMP_ON_18.3.19
20	0,44	2,83	-3,73	2,46	3,75	-36,84	-8,85	-7,02
30	1,92	1,76	2,76	5,33	3,81	-8,42	-9,82	-2,49
40	3,54	2,16	3,53	3,91	3,89	-9,71	-9,71	-3,75
50	1,93	2,00	3,98	3,96	3,81	-5,46	-5,71	-4,44
60	2,11	1,05	3,14	-2,18	3,12	-6,11	-7,17	-3,40
70	0,71	-0,69	4,29	1,74	3,06	-5,84	-9,71	-4,89
80	2,22	1,51	7,91	6,01	1,92	-5,99	-5,59	-5,84
90	2,56	1,30	4,47	2,83	3,30	-5,85	-7,78	-5,26
100	0,38	0,62	2,02	1,96	0,08	-6,00	-6,85	-6,08
110	-1,94	-0,26	-0,75	-1,17	-1,13	-6,05	-5,92	-4,75
120	-1,77	-0,61	-1,40	-1,29	-1,30	-4,82	-4,49	-6,78
130	-0,71	-1,81	-0,85	-1,96	-2,82	0,72	-0,73	-4,85
140	-1,98	-1,76	-2,78	-2,48	-3,14	-0,13	-0,31	-5,55
150	-2,86	-2,49	-5,33	-2,11	-2,80	-1,02	-1,49	-6,80
160	-5,70	-2,88	-2,88	-2,00	-3,36	-2,41	-3,72	-6,57
170	-3,55	-2,93	-2,40	-2,75	-3,13	-5,48	-5,69	-5,37
180	-4,17	-4,13	-2,99	-3,41	-3,06	-	-	-5,80

Průtok [l·s ⁻¹]	Relativní odchylka mezi průtokem měřeným indukčním průtokoměrem a ultrazvukovým průtokoměrem [%]						
	M11_24_CLAMP_ON_18.3.19	M12_24_CLAMP_ON_8.4.19	M13_24_CLAMP_ON_8.4.19	M14_24_NFP_8.4.19	M15_24_NFP_8.4.19	M16_VEN_NFP_8.4.19	M17_VEN_NFP_8.4.19
20	-3,64	-7,00	-3,91	-2,57	10,80	-11,98	-12,21
30	-2,07	-2,45	-2,99	1,87	0,30	-9,95	-10,91
40	-2,88	-2,35	-4,52	0,66	1,34	-12,47	-13,95
50	-5,66	-2,83	-6,14	0,56	-0,57	-7,26	-8,11
60	-6,75	-4,74	-5,81	1,84	0,55	-6,59	-8,33
70	-7,18	-5,08	-5,86	-0,24	-0,19	-4,67	-7,63
80	-5,86	-4,28	-5,91	3,37	0,46	-3,98	-7,07
90	-3,33	-5,48	-2,06	2,49	0,69	-2,91	-8,68
100	-2,14	-4,17	-3,96	-2,00	-0,19	-5,02	-5,93
110	-4,94	-5,14	-5,03	1,16	0,33	-4,43	-4,64
120	-6,30	-8,18	-4,35	1,60	-0,20	-1,54	-4,52
130	-7,35	-7,52	-3,36	0,03	-0,26	-0,47	-2,68
140	-6,65	-1,96	-6,78	-0,11	-1,88	-0,91	-5,02
150	-6,79	-5,87	-6,43	-1,43	-2,23	-0,76	-1,89
160	-8,11	-7,22	-5,32	-1,38	-2,75	-3,64	-5,08
170	-6,06	-4,90	-6,29	0,54	-3,57	-6,96	-5,18
180	-6,73	-6,31	-6,04	-2,90	-2,25	-	-

Relativní odchylka mezi průtokem měřeným indukčním průtokoměrem a NFP na venkovním žlabu



Relativní odchylka mezi průtokem měřeným indukčním průtokoměrem a Clamp-on na žlabu 24



Průtok [l·s ⁻¹]	Odchylka mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, NFP na žlabu 24 [l·s ⁻¹]						
	M1_24_NFP_21.8.18	M3_24_NFP_23.8.18	M5_24_NFP_2.10.18	M6_24_NFP_2.10.18	M7_24_NFP_8.10.18	M14_24_NFP_8.4.19	M15_24_NFP_8.4.19
20	2,97	2,33	3,67	2,99	3,30	1,27	1,95
30	2,41	1,91	3,15	2,53	2,76	1,11	1,58
40	1,85	1,49	2,63	2,08	2,22	0,94	1,21
50	1,29	1,07	2,11	1,62	1,68	0,77	0,84
60	0,73	0,65	1,58	1,17	1,14	0,60	0,47
70	0,17	0,22	1,06	0,71	0,60	0,44	0,10
80	-0,39	-0,20	0,54	0,26	0,06	0,27	-0,27
90	-0,95	-0,62	0,01	-0,20	-0,48	0,10	-0,64
100	-1,51	-1,04	-0,51	-0,65	-1,02	-0,06	-1,01
110	-2,07	-1,46	-1,03	-1,11	-1,56	-0,23	-1,38
120	-2,63	-1,89	-1,56	-1,56	-2,10	-0,40	-1,75
130	-3,19	-2,31	-2,08	-2,02	-2,64	-0,56	-2,12
140	-3,75	-2,73	-2,60	-2,47	-3,18	-0,73	-2,49
150	-4,31	-3,15	-3,12	-2,93	-3,72	-0,90	-2,86
160	-4,87	-3,57	-3,65	-3,38	-4,26	-1,07	-3,23
170	-5,43	-4,00	-4,17	-3,84	-4,80	-1,23	-3,60
180	-5,99	-4,42	-4,69	-4,29	-5,34	-1,40	-3,97

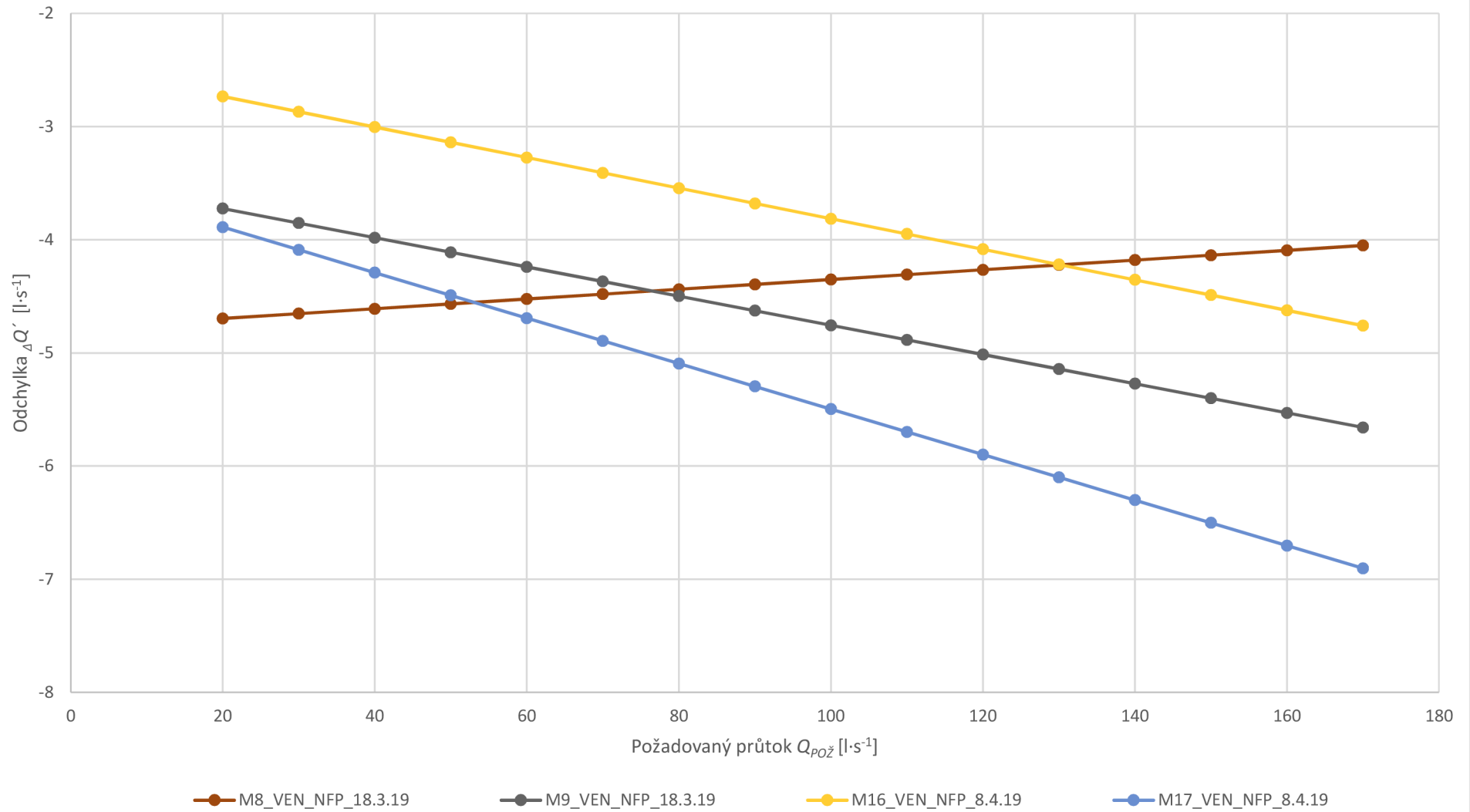
P_S3_T2

Průtok	Odchylka mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, NFP na venkovním žlabu [$l \cdot s^{-1}$]			
[$l \cdot s^{-1}$]	M8_VEN_NFP_18.3.19	M9_VEN_NFP_18.3.19	M16_VEN_NFP_8.4.19	M17_VEN_NFP_8.4.19
20	-4,70	-3,72	-2,73	-3,89
30	-4,65	-3,85	-2,87	-4,09
40	-4,61	-3,98	-3,00	-4,29
50	-4,57	-4,11	-3,14	-4,49
60	-4,52	-4,24	-3,27	-4,69
70	-4,48	-4,37	-3,41	-4,89
80	-4,44	-4,50	-3,54	-5,09
90	-4,39	-4,63	-3,68	-5,30
100	-4,35	-4,76	-3,81	-5,50
110	-4,31	-4,88	-3,95	-5,70
120	-4,27	-5,01	-4,08	-5,90
130	-4,22	-5,14	-4,22	-6,10
140	-4,18	-5,27	-4,35	-6,30
150	-4,14	-5,40	-4,49	-6,50
160	-4,09	-5,53	-4,62	-6,70
170	-4,05	-5,66	-4,76	-6,90

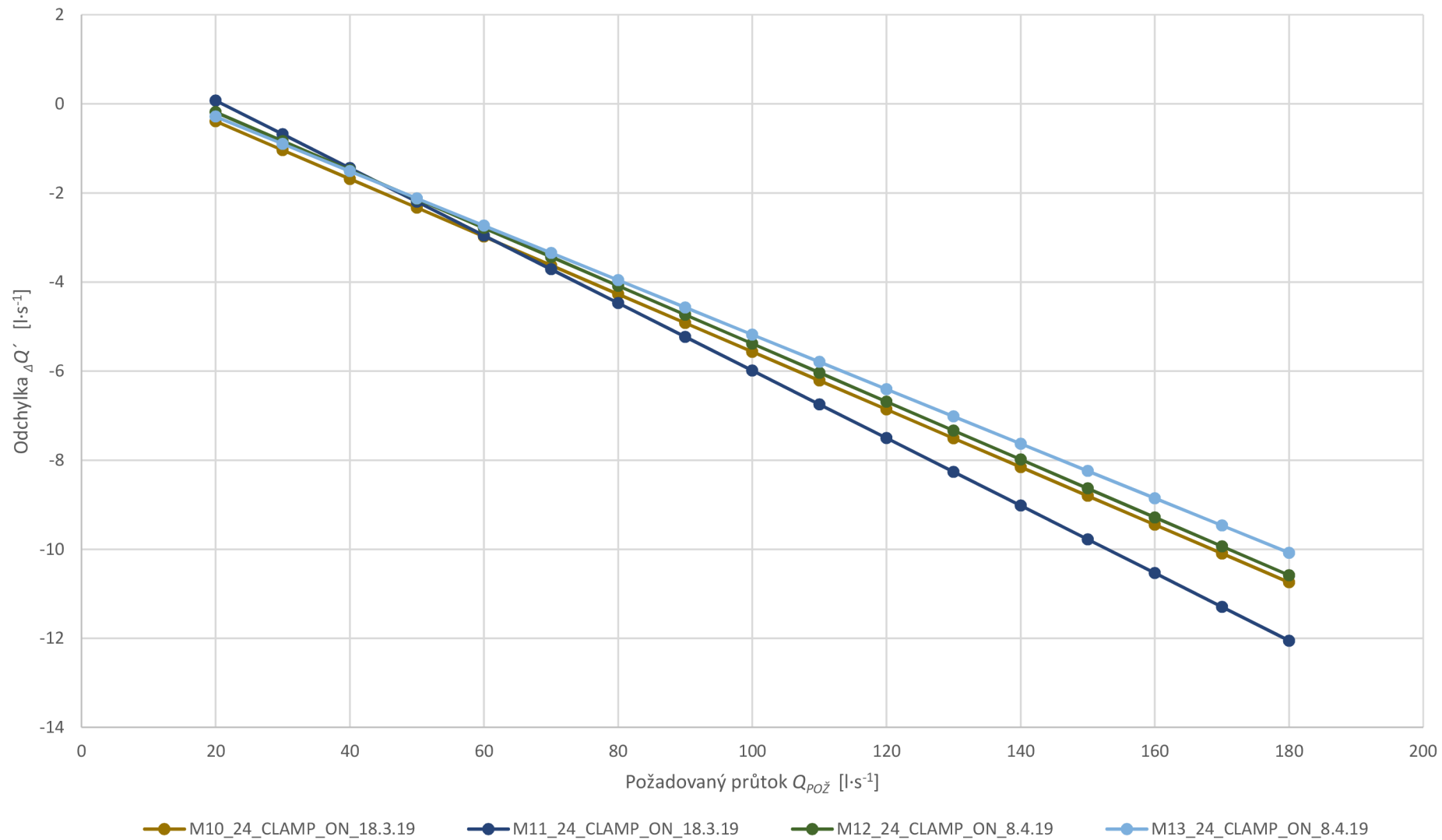
Průtok	Odchylka mezi linearizovaným a požadovaným průtokem, Clamp-on na žlabu 24 [$l \cdot s^{-1}$]			
[$l \cdot s^{-1}$]	M10_24_CLAMP_ON_18.3.19	M11_24_CLAMP_ON_18.3.19	M12_24_CLAMP_ON_8.4.19	M13_24_CLAMP_ON_8.4.19
20	-0,39	0,08	-0,19	-0,29
30	-1,04	-0,68	-0,84	-0,90
40	-1,68	-1,44	-1,49	-1,51
50	-2,33	-2,20	-2,14	-2,12
60	-2,98	-2,96	-2,79	-2,73
70	-3,63	-3,71	-3,44	-3,35
80	-4,27	-4,47	-4,09	-3,96
90	-4,92	-5,23	-4,74	-4,57
100	-5,57	-5,99	-5,39	-5,18
110	-6,21	-6,75	-6,04	-5,79
120	-6,86	-7,50	-6,69	-6,41
130	-7,51	-8,26	-7,34	-7,02
140	-8,15	-9,02	-7,99	-7,63
150	-8,80	-9,78	-8,64	-8,24
160	-9,45	-10,54	-9,29	-8,85
170	-10,10	-11,29	-9,94	-9,47
180	-10,74	-12,05	-10,59	-10,08

P_S3_T3

Závislost odchylky na požadovaném průtoku, NFP na venkovním žlabu



Závislost odchylky na požadovaném průtoku, Clamp-on na žlabu 24



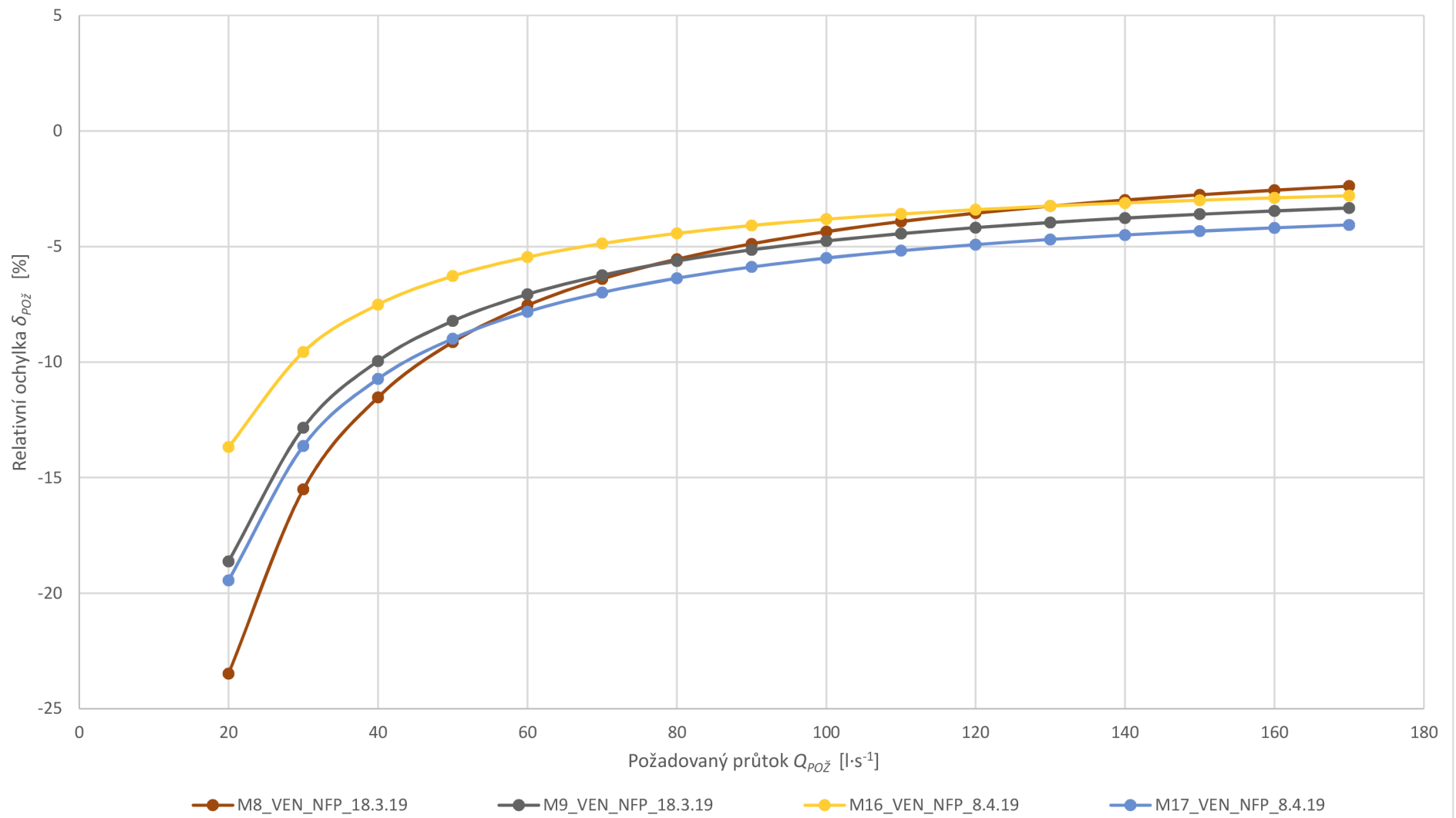
P_S4_T1

Průtok	Relativní odchylky vykazované laboratoří [%], průtokoměr NFP na venkovním žlabu				
[l·s ⁻¹]	M8_VEN_NFP_18.3.19	M9_VEN_NFP_18.3.19	M16_VEN_NFP_8.4.19	M17_VEN_NFP_8.4.19	PRŮMĚR_VEN_NFP
20	-23,48	-18,62	-13,67	-19,44	-18,80
30	-15,51	-12,84	-9,56	-13,63	-12,89
40	-11,52	-9,95	-7,51	-10,73	-9,93
50	-9,13	-8,22	-6,28	-8,98	-8,15
60	-7,54	-7,07	-5,46	-7,82	-6,97
70	-6,40	-6,24	-4,87	-6,99	-6,13
80	-5,55	-5,62	-4,43	-6,37	-5,49
90	-4,88	-5,14	-4,09	-5,88	-5,00
100	-4,35	-4,76	-3,81	-5,50	-4,60
110	-3,92	-4,44	-3,59	-5,18	-4,28
120	-3,55	-4,18	-3,40	-4,92	-4,01
130	-3,25	-3,96	-3,25	-4,69	-3,79
140	-2,99	-3,77	-3,11	-4,50	-3,59
150	-2,76	-3,60	-2,99	-4,33	-3,42
160	-2,56	-3,46	-2,89	-4,19	-3,27
170	-2,38	-3,33	-2,80	-4,06	-3,14

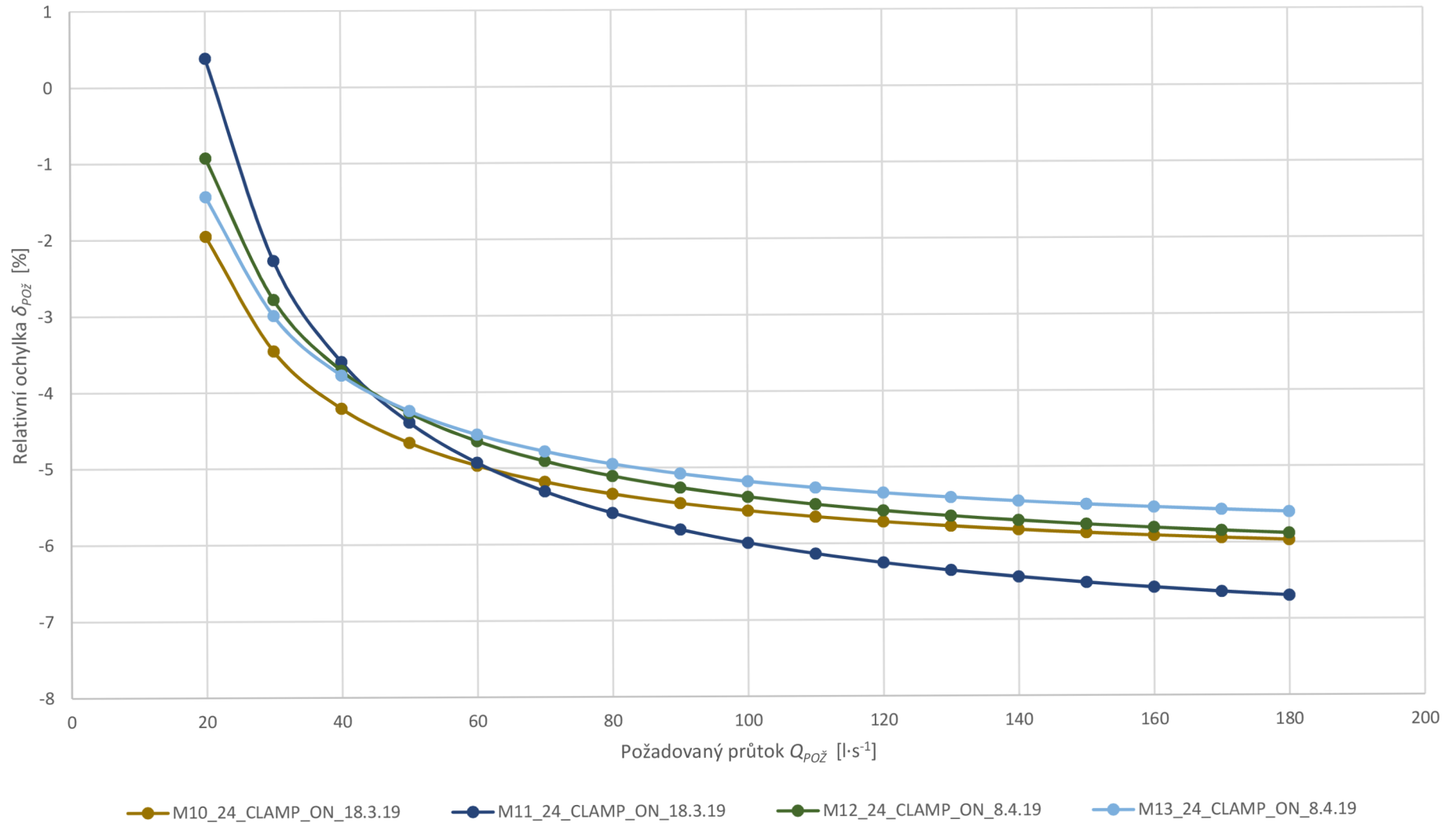
Průtok	Relativní odchylky vykazované laboratoří [%], průtokoměr Clamp-on na žlabu 24				
[l·s ⁻¹]	M10_24_CLAMP_ON_18.3.19	M11_24_CLAMP_ON_18.3.19	M12_24_CLAMP_ON_8.4.19	M13_24_CLAMP_ON_8.4.19	PRŮMĚR_24_CLAMP_ON
20	-1,95	0,38	-0,93	-1,43	-0,98
30	-3,46	-2,27	-2,78	-3,00	-2,88
40	-4,21	-3,60	-3,71	-3,78	-3,83
50	-4,66	-4,40	-4,27	-4,25	-4,39
60	-4,96	-4,93	-4,64	-4,56	-4,77
70	-5,18	-5,31	-4,91	-4,78	-5,04
80	-5,34	-5,59	-5,11	-4,95	-5,25
90	-5,47	-5,81	-5,26	-5,08	-5,40
100	-5,57	-5,99	-5,39	-5,18	-5,53
110	-5,65	-6,13	-5,49	-5,27	-5,63
120	-5,72	-6,25	-5,57	-5,34	-5,72
130	-5,78	-6,36	-5,64	-5,40	-5,79
140	-5,82	-6,44	-5,70	-5,45	-5,86
150	-5,87	-6,52	-5,76	-5,50	-5,91
160	-5,91	-6,59	-5,80	-5,53	-5,96
170	-5,94	-6,64	-5,84	-5,57	-6,00
180	-5,97	-6,70	-5,88	-5,60	-6,04

P_S4_T2

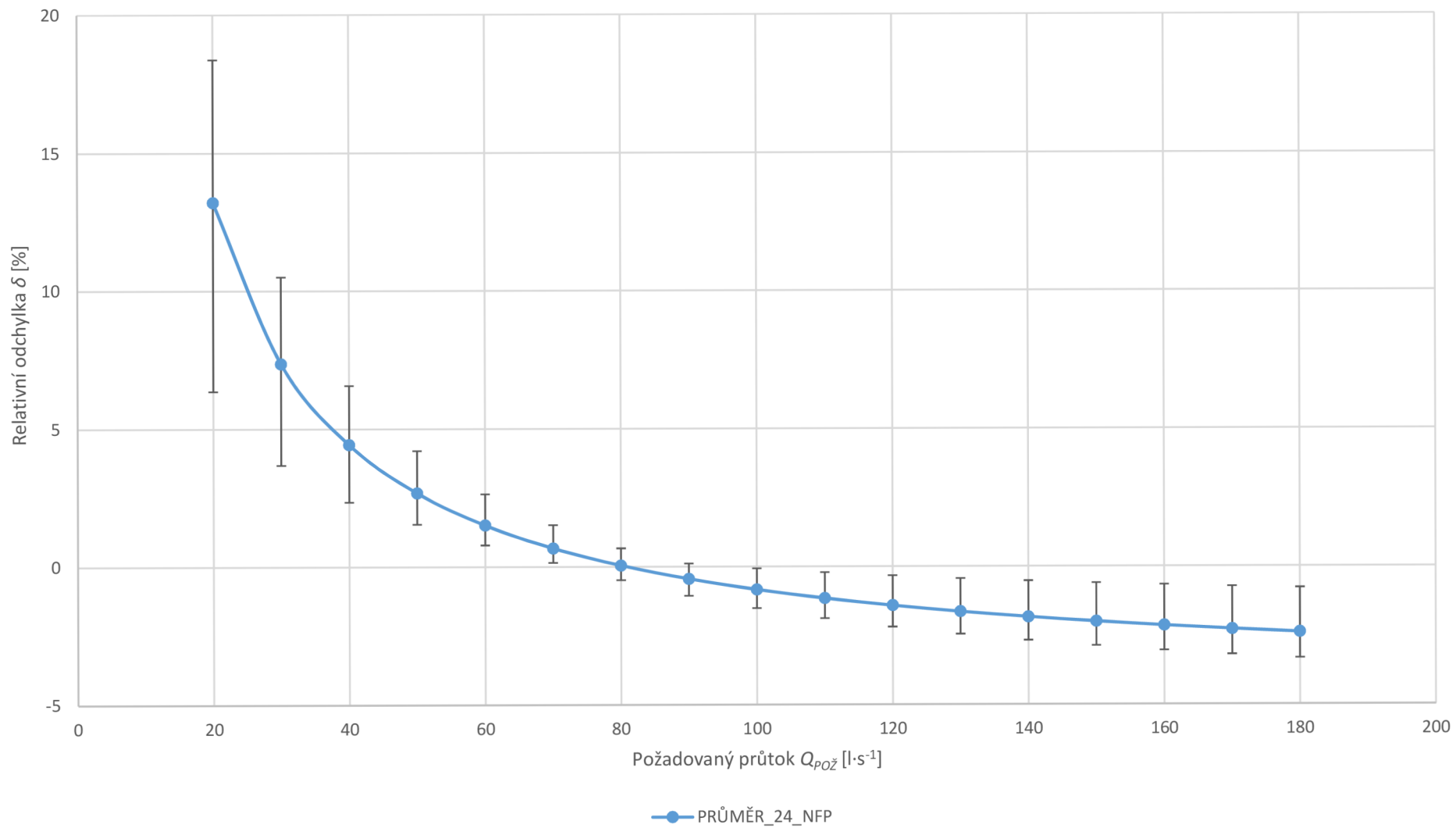
Závislost relativní odchylky na požadovaném průtoku, NFP na venkovním žlabu



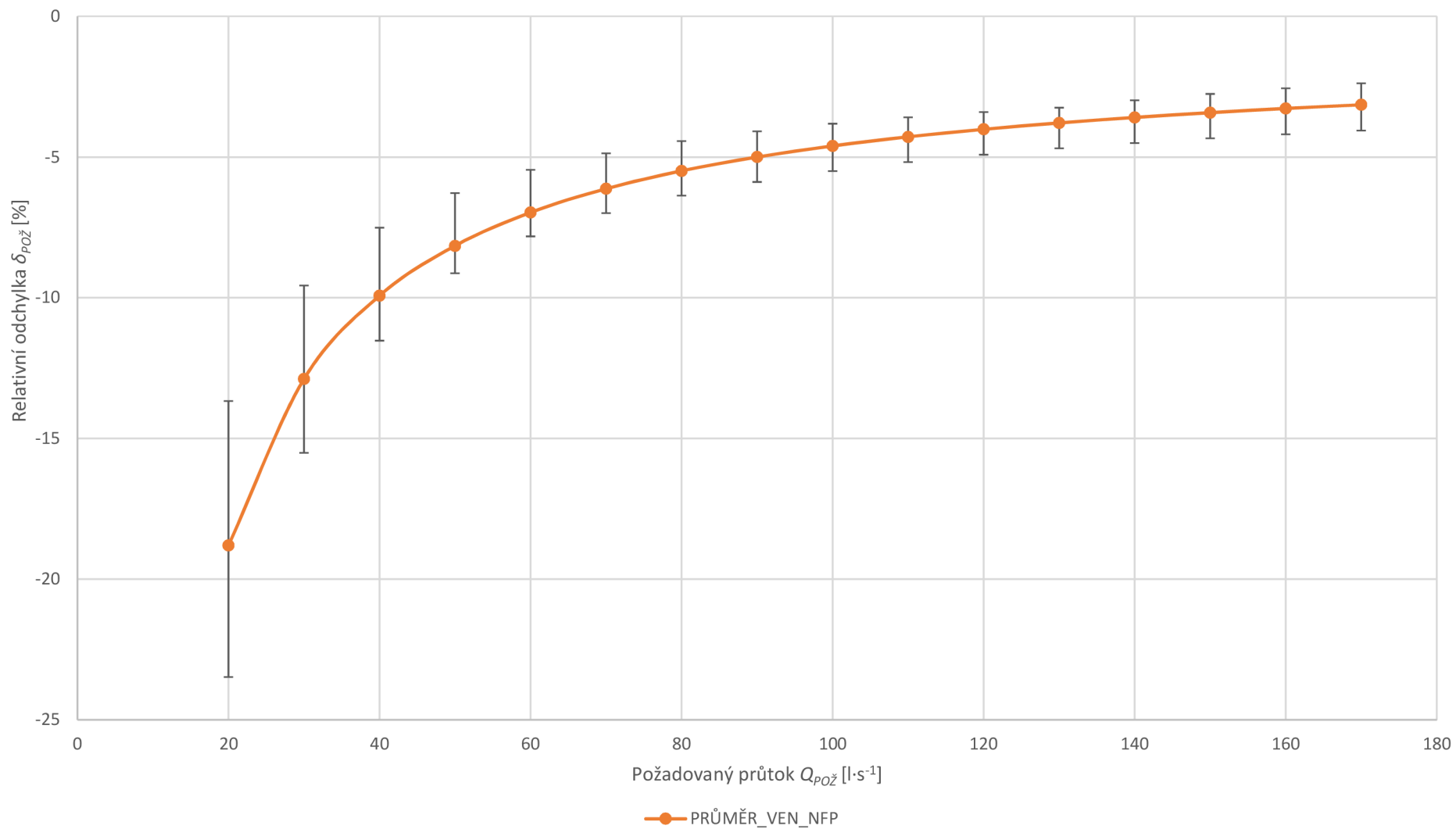
Závislost relativní odchylky na požadovaném průtoku, Clamp-on na žlabu 24



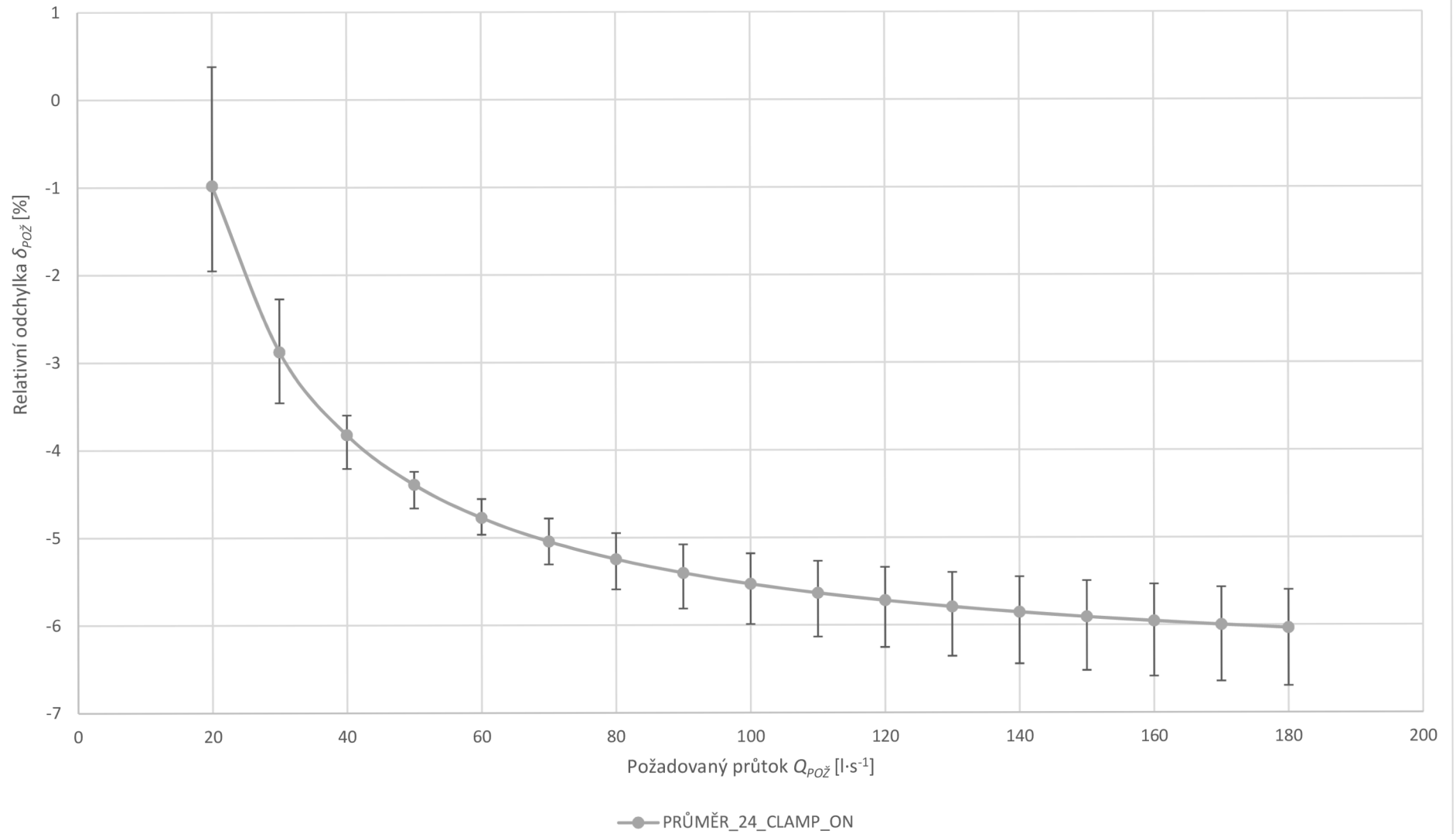
Průměrná relativní odchylka s chybovými úsečkami, NFP na žlabu 24



Průměrná relativní odchylka s chybovými usečkami, NFP na venkovním žlabu



Průměrná relativní odchylka s chybovými úsečkami, Clamp-on na žlabu 24



Formulář

Číslo měření: 2
 Žlab: Venkovní [-]
 MQI průtokoměr (DN): 200 [mm]
 Ultrazvukový průtokoměr: NFP [-]
 Datum: 16.06.2019
 Měření prováděl: Martin Vítů

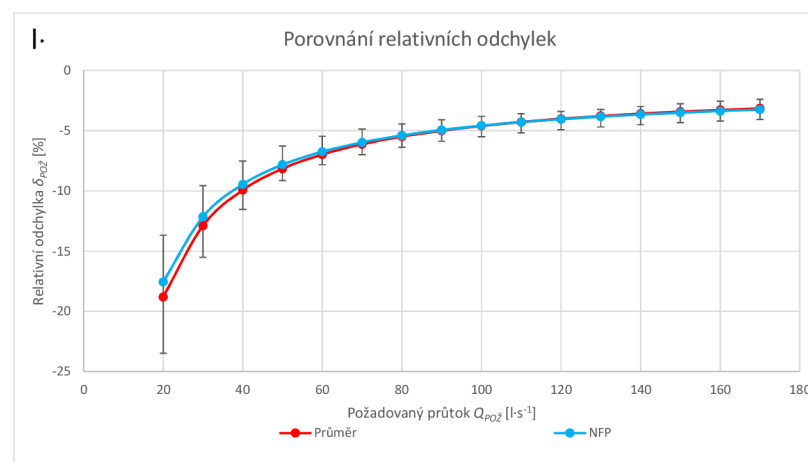
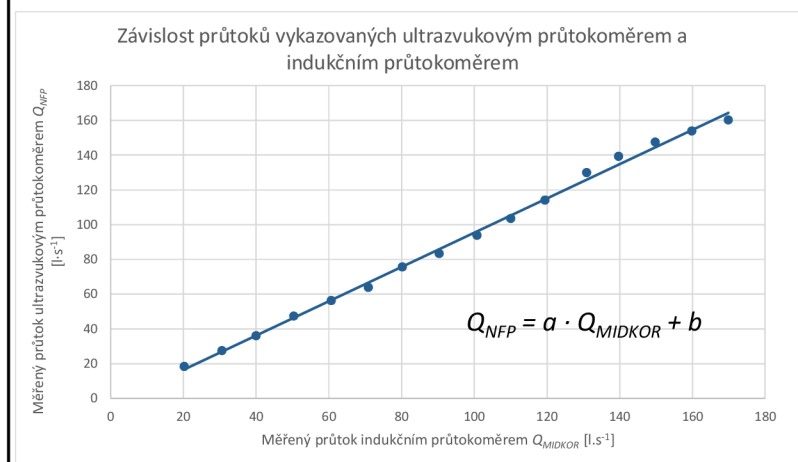
Podpis: _____

Vstupní hodnoty, hodnoty které vyplňuji
 Hodnoty, které se dopočítají dle vzorců
 Okrajové podmínky

Relativní odchylka - Souhrnné hodnoty			Indukční průtokoměr							Ultrazvukový průtokoměr				
Minimum	Průměr	Maximum	Q _{POŽ}	V _{KON}	V _{POČ}	t	Q _{MID}	E _{REL}	Q _{MIDKOR}	V _{KON}	V _{POČ}	t	Q _{NFP}	
[%]	[%]	[%]	[l·s ⁻¹]	[l]	[l]	[s]	[l·s ⁻¹]	[%]	[l·s ⁻¹]	[l]	[l]	[s]	[l·s ⁻¹]	
-23,48	-18,80	-13,67	20	5109,3	5106,7	128,85	20,2	-0,335	20,25	4462,508	4460,249	122,41	18,5	
-15,51	-12,89	-9,56	30	5124,2	5120,4	124,47	30,5	-0,307	30,62	4474,326	4471,009	120,11	27,6	
-11,52	-9,93	-7,51	40	5134,7	5129,7	125,22	39,9	-0,281	40,04	4483,543	4479,129	122,09	36,2	
-9,13	-8,15	-6,28	50	5148,6	5142,2	127,41	50,2	-0,253	50,36	4494,953	4489,106	123,14	47,5	
-7,82	-6,97	-5,46	60	5165,4	5157,6	128,87	60,5	-0,226	60,66	4510,171	4503,299	122,03	56,3	
-6,99	-6,13	-4,87	70	5189,3	5180,8	120,22	70,7	-0,198	70,84	4532,043	4524,178	122,96	64,0	
-6,37	-5,49	-4,43	80	5211,5	5201,6	123,68	80,0	-0,173	80,18	4552,473	4543,244	121,91	75,7	
-5,88	-5,00	-4,09	90	5238,8	5227,8	121,91	90,2	-0,145	90,36	4577,588	4567,522	120,80	83,3	
-5,50	-4,60	-3,81	100	5269,7	5256,6	130,15	100,7	-0,117	100,77	4605,588	4594,144	121,92	93,9	
-5,18	-4,28	-3,59	110	5299,5	5286,1	121,87	110,0	-0,092	110,05	4633,645	4620,893	123,16	103,5	
-4,92	-4,01	-3,40	120	5334,3	5319,9	120,65	119,4	-0,080	119,45	4666,659	4652,831	121,21	114,1	
-4,69	-3,79	-3,25	130	5373,6	5357,0	126,88	130,8	-0,067	130,92	4703,790	4687,926	122,07	130,0	
-4,50	-3,59	-2,99	140	5407,3	5389,4	128,19	139,6	-0,056	139,71	4737,458	4720,465	122,00	139,3	
-4,33	-3,42	-2,76	150	5441,0	5421,4	130,94	149,7	-0,044	149,75	4770,623	4751,918	126,79	147,5	
-4,19	-3,27	-2,56	160	5480,0	5459,0	131,41	159,8	-0,032	159,86	4807,281	4788,639	121,12	153,9	
-4,06	-3,14	-2,38	170	5526,2	5504,7	126,59	169,8	-0,020	169,87	4852,080	4831,574	127,99	160,2	

Přepočet		
Q	δ _{POŽ}	Podmínka
[l·s ⁻¹]	[%]	[-]
16,49	-17,6	Vyhoví
26,36	-12,1	Vyhoví
36,22	-9,4	Vyhoví
46,09	-7,8	Vyhoví
55,95	-6,7	Vyhoví
65,82	-6,0	Vyhoví
75,68	-5,4	Vyhoví
85,55	-4,9	Vyhoví
95,42	-4,6	Vyhoví
105,28	-4,3	Vyhoví
115,15	-4,0	Vyhoví
125,01	-3,8	Vyhoví
134,88	-3,7	Vyhoví
144,75	-3,5	Vyhoví
154,61	-3,4	Vyhoví
164,48	-3,2	Vyhoví

Koefficienty rovnice grafu:		
a	0,99	[-]
b	-3,24	[l·s ⁻¹]



Formulář

Číslo měření: 1
 Žlab: 24 [-]
 MQI průtokoměr (DN): 250 [mm]
 Ultrazvukový průtokoměr: Clamp-on [-]
 Datum: 16.06.2019
 Měření prováděl: Martin Vítů

Podpis: _____

	Vstupní hodnoty, hodnoty které vyplňuji
	Hodnoty, které se dopočítají dle vzorců
	Okrajové podmínky

Relativní odchylka - Souhrnné hodnoty			Indukční průtokoměr							Ultrazvukový průtokoměr				
Minimum	Průměr	Maximum	Q _{POZ}	V _{KON}	V _{POČ}	t	Q _{MID}	E _{REL}	Q _{MIDKOR}	V _{KON}	V _{POČ}	t	Q _{C-O}	
[%]	[%]	[%]	[l·s ⁻¹]	[l]	[l]	[s]	[l·s ⁻¹]	[%]	[l·s ⁻¹]	[l]	[l]	[s]	[l·s ⁻¹]	
-1,95	-0,98	0,38	20	25623,7	25621,3	121,50	19,8	0,063	19,74	-4241,765	-4244,004	121,98	18,4	
-3,46	-2,88	-2,27	30	25619,1	25615,5	121,31	29,7	0,031	29,67	-4246,438	-4249,975	122,27	28,9	
-4,21	-3,83	-3,60	40	25611	25605,9	128,96	39,5	0,000	39,55	-4254,339	-4258,975	121,79	38,1	
-4,66	-4,39	-4,25	50	25599,6	25593,4	125,47	49,4	-0,032	49,43	-4265,443	-4271,306	124,12	47,2	
-4,96	-4,77	-4,56	60	25587,7	25580,5	120,68	59,7	-0,065	59,70	-4277,061	-4284,090	121,88	57,7	
-5,31	-5,04	-4,78	70	25572,1	25563,7	120,71	69,6	-0,097	69,66	-4292,085	-4300,167	121,99	66,3	
-5,59	-5,25	-4,95	80	25556,2	25546,0	127,72	79,9	-0,129	79,97	-4307,626	-4316,750	121,17	75,3	
-5,81	-5,40	-5,08	90	25536,4	25525,4	122,72	89,6	-0,161	89,78	-4326,172	-4336,454	120,88	85,1	
-5,99	-5,53	-5,18	100	25514,4	25502,4	120,82	99,3	-0,192	99,51	-4347,077	-4358,545	122,70	93,5	
-6,13	-5,63	-5,27	110	25474,7	25461,0	125,03	109,6	-0,225	109,82	-4384,890	-4397,531	120,85	104,6	
-6,25	-5,72	-5,34	120	25449,3	25434,7	122,41	119,3	-0,260	119,58	-4408,576	-4422,047	120,84	111,5	
-6,36	-5,79	-5,40	130	25416,3	25399,3	131,31	129,5	-0,243	129,78	-4439,802	-4456,119	132,13	123,5	
-6,44	-5,86	-5,45	140	25384,5	25367,5	121,41	140,0	-0,226	140,34	-4469,704	-4485,887	122,09	132,5	
-6,52	-5,91	-5,50	150	25348,5	25329,0	129,93	150,1	-0,210	150,40	-4503,990	-4522,228	130,12	140,2	
-6,59	-5,96	-5,53	160	25312,0	25292,6	121,21	160,1	-0,194	160,36	-4538,002	-4556,105	120,82	149,8	
-6,64	-6,00	-5,57	170	25275,0	25253,5	127,00	169,3	-0,180	169,60	-4572,323	-4592,558	126,09	160,5	
-6,70	-6,04	-5,60	180	25233,3	25212,0	118,62	179,6	-0,163	179,86	-4611,707	-4632,364	121,92	169,4	

Přepočít		
Q	δ _{POZ}	Podmínka
[l·s ⁻¹]	[%]	[-]
19,61	-2,0	Vyhoví
28,96	-3,5	Vyhoví
38,32	-4,2	Vyhoví
47,67	-4,7	Vyhoví
57,02	-5,0	Vyhoví
66,38	-5,2	Vyhoví
75,73	-5,3	Vyhoví
85,08	-5,5	Vyhoví
94,44	-5,6	Vyhoví
103,79	-5,6	Vyhoví
113,14	-5,7	Vyhoví
122,50	-5,8	Vyhoví
131,85	-5,8	Vyhoví
141,20	-5,9	Vyhoví
150,56	-5,9	Vyhoví
159,91	-5,9	Vyhoví
169,26	-6,0	Vyhoví

Koefficienty rovnice grafu:		
a	0,94	[-]
b	0,90	[l·s ⁻¹]

