



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ZÁKAL VODY VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH

DISCOLORATION EVENTS IN THE WATER-SUPPLY NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ŠTĚPÁN JANČA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Cílem této práce je shrnutí dostupných poznatků v oblasti analýzy výskytu zákalu ve vodovodní síti a následný návrh metody měření potenciálu vzniku zákalu na případové studii. V první části práce je zpracována formou rešerše problematika současného stavu jakosti pitné vody ve veřejných vodovodech se zaměřením na zákal, vznik zákalu a legislativní úprava ukazatelů pitné vody a způsoby měření potenciálního výskytu zákalu. V druhé části práce je vypracována metodika na měření potenciálu vzniku zákalu ve vodovodní síti. Metodika je aplikována v případové studii tlakového pásma Hrbová, které je součástí distribuční sítě města Vsetín. V rámci případové studie je vypracována statistická analýza odběrů a matematický model tlakového pásma Hrbová.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zákal, vodovodní síť, potenciál vzniku zákalu

SUMMARY

The aim of this thesis is to summarize the available knowledge on the occurrence and formation of turbidity in the water supply system and the design and application of methodology for measuring the potential occurrence of turbidity in the water supply. Problems of the current state of the quality of drinking water in public water supply systems, with a focus on the occurrence of cataract formation turbidity legislative change indicators of drinking water in the Czech Republic and abroad, and potential methods of measuring turbidity is described in the first part of the thesis. In the second part of the paper is a methodology for measuring the potential of turbidity in the water supply network. The methodology is applied in the case study Hrbová pressure zone, which is part of the distribution network of city Vsetín. The case study of the thesis is a statistical analysis and mathematical model of consumption of pressure zone Hrbová.

KEYWORDS

Turbidity, water-supply networks, potential of turbidity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANČA, Štěpán. *Zákal vody ve vodovodních sítích*. Brno, 2013. 89 s., 15 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.1.2013

.....
podpis autora
Štěpán Janča

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Ručkovi, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práce, rady a konzultace.

Tato diplomová práce byla řešena v rámci projektu TAČR. ALFA č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“.

OBSAH

ABSTRAKT	2
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	3
PODĚKOVÁNÍ	5
1 ÚVOD	8
1.1 TAČR č. TA02020604.....	8
1.2 Cíle práce.....	9
1.3 Současný stav problematiky	9
1.4 Jakost vody ve veřejných vodovodech	10
1.4.1 Hodnoty zákalu a železa v pitné vodě v roce 2010.....	12
2 ZÁKAL VODY	17
2.1 Legislativní úprava ukazatele zákalu pitné vody v ČR	18
2.1.1 Odběr vzorků pitné vody pro rozbor	18
2.2 Limity zákalu ve veřejných vodovodech v zahraničí	21
2.3 Měření zákalu vody	23
2.3.1 Krácené a úplné rozborů	24
2.3.2 Semikvantitativní způsoby měření zákalu	24
2.3.3 Kvantitativní metody měření zákalu optickými turbidimetry.....	25
2.3.4 Princip měření zákalu	25
2.3.5 Chemikálie a činidla	27
2.4 Přístroje používané pro Kvantitativní měření zákalu	27
2.4.1 Stolní zákaloměry	28
2.4.2 Přenosné turbidimetry.....	31
2.4.3 Online turbidimetry	33
2.1 Použitá měřicí technika	36
3 ZÁKAL VODY VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH	38
3.1 Vznik zákalu ve vodovodní síti	39
3.1.1 Koroze	40
3.1.2 Hydraulické poměry v síti	40
3.1.3 Kvalita dopravované vody	41
3.1.4 Údržba a technický stav vodovodní sítě	41
3.2 Metody měření potenciálu vzniku zákalu ve vododnní síti	42
3.2.1 Přímé metody.....	42
3.2.2 Efektivní metody	43
3.2.3 Koncentrační metody.....	49
3.3 Nejčastější prvky způsobující zákal ve vodovodním potrubí.....	51
3.3.1 Železo	51

3.3.2	Mangan.....	53
3.3.3	Hliník.....	54
3.3.4	O ₂	54
3.3.5	pH.....	54
4	ZVOLENÝ POSTUP A METODIKA.....	56
5	PŘÍPADOVÁ STUDIE	58
5.1	Popis systému zásobování.....	58
5.1.1	Skupinový vodovod Stanovnice	58
5.1.2	Město Vsetín.....	59
5.1.3	Tlakové pásmo Hrbová.....	60
5.2	Současný stav	64
5.2.1	Terénní průzkum	66
5.3	Statistická analýza průtoků	67
5.4	Hydraulická analýza tlakového pásma hrbová.....	72
5.4.1	Vstupní podklady a informace.....	72
5.4.2	Matematický model	72
5.5	Aplikace zvolené metodiky na zjištění potenciálu vzniku zákalu	74
5.5.1	Měřicí hydrantový nástavec.....	77
5.5.2	Měření zákalu ve vodovodní síti.....	77
5.5.3	Další postup.....	79
6	ZÁVĚR.....	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87
	SEZNAM PŘÍLOH	88
	SUMMARY.....	89

1 ÚVOD

V současné době je kladen čím dál větší důraz odběratelů na kvalitu pitné vody. Důvodem může být zvyšující se vodné a stočné, které se v současné době pohybuje v některých oblastech České republiky za hranicí 80 Kč/m³. Tím pádem zákazníci očekávají odpovídající kvalitu pitné vody, za kterou v poslední době platí čím dál více peněz. Vodárenské společnosti v Anglii zaznamenávají ročně něco mezi 3000 až 6000 stížností zákazníků z důvodů nevyhovující jakosti pitné vody, zejména zákalu. Pro vodárenské společnosti to určitě není příjemné, už jen z důvodu možné horší pověsti a reputace. Ukázka zákalu, se kterou se může v určitých případech spotřebitel setkat je znázorněna na Obr. 1. Je tedy na místě zabývat se touto problematikou, pochopit vznik a šíření zákalu a v neposlední řadě zjistit, jak tento problém odstranit nebo nejlépe mu úplně předejít. Vodárenské společnosti budou naléhavěji potřebovat mechanismy této události pochopit a aplikovat získané poznatky na rozvoji metod a technik pro zlepšení kvality pitné vody.

Ve své diplomové práci se budu zabývat zákalem ve vodovodních sítích. Práci lze rozdělit na dvě hlavní části.

V první kapitole je popsána obecně formou rešerše literatury problematika zákalu ve vodovodní síti. Zvláště se zde zaměřuji na současný stav problematiky a jakost vody ve veřejných vodovodech. V další části je popsán i legislativní pohled na tuto problematiku. V této části je popsána přesná definice zákalu a legislativní úprava ukazatele zákalu pitné vody ČR a zároveň v této části srovnávám i limity zákalu ve veřejných vodovodech v zahraničí. Na závěr této kapitoly jsou detailně popsány metody měření zákalu a popsány jednotlivé přístroje určené k měření zákalu.

V další části se věnuji konkrétně zákalu ve vodovodních sítích, definici zákalu, co to vlastně zákal je a jakou roli má v dnešní době. Zaměřuji se na vznik zákalu ve vodovodních sítích a na jednotlivé mechanismy, které vzniku zákalu napomáhají, jako je koroze, nedostatečné hydraulické poměry ve vodovodním potrubí a kvalita dopravované vody. Dále jsou detailněji popsány postupy a metody měření vzniku a přítomnosti zákalu vody ve vodovodním potrubí.

V poslední části je vypracována případová studie analýzy potenciálního vzniku zákalu a aplikována metoda na zjištění potenciálního vzniku zákalu ve vodovodním potrubí jednoho z tlakových pásem vodovodní sítě města Vsetín. Součástí případové studie je vypracování statistické analýzy průtoků a hydraulické analýzy, jejíž součástí je i matematický model tlakového pásma Hrbová.

Diplomová práce je řešena v návaznosti na projekt aplikovaného výzkumu TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“.

1.1 TAČR Č. TA02020604

Projekt „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“ je součástí programu Technologické agentury České republiky. Technologická agentura ČR v současné době centralizuje státní podporu aplikovaného výzkumu a vývoje, která byla v minulosti roztržena mezi velký počet poskytovatelů. TAČR zabezpečuje přípravu a realizaci programů aplikovaného výzkumu, vývoje a inovací včetně programů pro potřeby státní správy, veřejných soutěží ve výzkumu, vývoji a inovacích na podporu projektů a zadávání veřejných zakázek. (Technologická agentura ČR, 2012)

Projekt je součástí podprogramu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje Alfa. Program Alfa se zaměřuje na výzkum a vývoj zejména v oblasti progresivních technologií, materiálů a systémů, energetických zdrojů a ochrany životního prostředí. Doba trvání programu je v letech 2011 až 2016, tedy 6 let.

Projekt TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“ je zaměřen na problematiku veřejného zásobování pitnou vodou a klade si za cíl vyvinout a implementovat do reálného vodárenského provozu sadu nástrojů:

- odbornou metodiku,
- speciální měřidlo,
- softwarovou aplikaci

Tyto nástroje provozovatelům vodovodů umožní předcházet vzniku zákalu ve vodovodních sítích, efektivně je odkalovat a řídit tak jakost vody v síti. Výsledným efektem bude zvýšení jakosti pitné vody dodávané veřejnými vodovody a snížení materiálové a energetické náročnosti provozu. Zahájení řešení tohoto projektu bylo 1.1.2012 a ukončení řešení je naplánováno na 31.12.2014. Projekt je řešen ve spolupráci Vysokého učení technického v Brně, inženýrské společnosti PROVOD s.r.o. a společnosti Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s.

1.2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je shrnutí dostupných poznatků v oblasti analýzy výskytu zákalu ve vodovodní síti formou rešerše. Získané poznatky dále aplikuji na návrh metodiky pro měření potenciálního výskytu zákalu ve vodovodní síti. Metodika bude aplikována na případové studii.

V první části práce je zpracována formou rešerše problematika současného stavu jakosti pitné vody ve veřejných vodovodech se zaměřením na zákal, vznik zákalu a legislativní úprava ukazatelů pitné vody a způsoby měření zákalu. Zvláště se budu zaměřovat na faktory způsobující zákal a metody pro měření potenciálního výskytu zákalu.

V druhé části práce je zpracována případová studie pro predikci potenciálního vzniku zákalu na části vodovodní sítě města Vsetín. Součástí případové studie je matematický model a statistická analýza průtoků. V návaznosti na tuto kapitulu bude vytvořena metodika pro analýzu potenciálu vzniku zákalu metodou potenciální resuspenze RPM.

1.3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Délka vodovodní sítě v České republice v roce 2010 činila 73 448 km. Uvádí se, že v témže roce dosáhla zásobovanost obyvatel pitnou vodou 93,1 % z celkového počtu obyvatel, což činí 9,79 mil. zásobovaných obyvatel. Počet vodovodních přípojek se zvýšil o 32 158 ks a dosáhl počtu 1 955 956 ks. Počet osazených vodoměrů se zvýšil o 30 377 ks a dosáhl počtu 1 965 297 ks. Na jednu vodovodní přípojku připadá 5,00 napojených obyvatel. (Ministerstvo zemědělství, 2011)

V současné ani minulé době není v České republice projekt, který by se zabýval problematikou umožňující předcházet vzniku zákalu a efektivnímu odkalování vodovodního potrubí a tím zvýšení jakosti vody co se týče omezení výskytu zákalu.

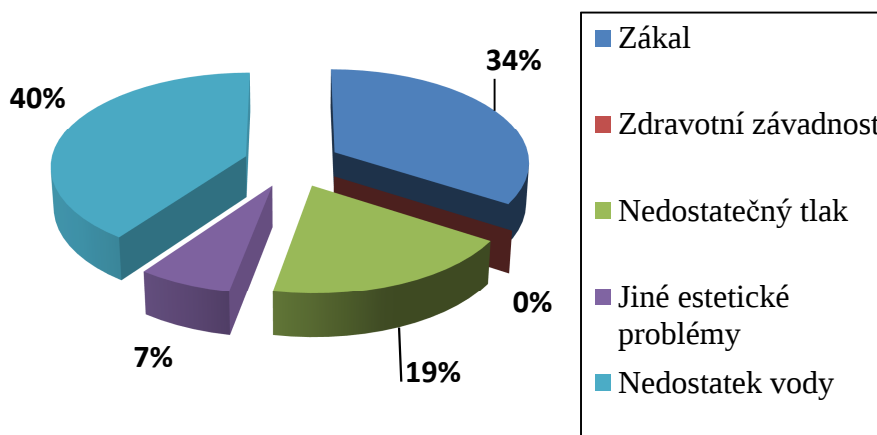


Obr. 1 - Ukázka zákalu na kohoutku, se kterým se v určitých případech musí potýkat zákazníci vodárenských společností

1.4 JAKOST VODY VE VEŘEJNÝCH VODOVODECH

Zákal patří mezi základní jakostní ukazatele pitné vody. Zákal ve vodě vytváří nepříznivé zbarvení a je často objektem stížností zákazníků vodárenských společností. Rozdělení stížností popisuje Obr. 2. Dle průzkumu společnosti REWAB v roce 2004 ve Velké Británii se uvádí, že zákal v pitné vodě je hlavní příčinou většiny stížností zákazníků vodárenských společností.

Z výsledků zmiňovaného pětiletého výzkumu, který se prováděl ve Velké Británii v roce 2004 vyplynulo, že jsou stížnosti zákazníků ze 34 % způsobeny zakalením vody. Zbývajících 19 % stížností připadá na nedostatečný tlak, 40 % na nedostatek vody a 7 % na její jiné estetické problémy (Vreeburg, 2007). Není zcela korektní vztahovat výsledky takových výzkumů do podmínek ČR, nicméně stále zůstává pravdou, že zákal dává vodě nežádoucí vzhled a snižuje důvěru odběratelů v její kvalitu i poskytovanou službu, i když je z převážné části způsoben zdravotně nezávadnými látkami. Kalná voda působí dojmem, že není dostatečně kvalitní, zejména pokud jde o vodu pro pitné účely. Nejběžnější důvod zbarvení a zakalení vody je spojen s korozí litinových trubek, vyšších koncentrací železa, vniknutí vnější znečištěné vody do potrubí a dalších mnoha faktorů, které budou popsány dalších v kapitolách.



Obr. 2- Typické rozdělení stížností zákazníků vodárenských společností během 5 let ve Velké Británii (Vreeburg, 2007)

V České republice provádí monitoring jakosti pitné vody Státní zdravotní ústav ve spolupráci s krajskými hygienickými stanicemi. Monitoring je realizován podle Usnesení vlády České republiky č. 369 z roku 1991. Data jsou zpracována a uveřejněna v informačním systému PiVo (IS PiVo) provozovaném Ministerstvem zdravotnictví ČR. Zákon o ochraně veřejného zdraví ukládá, že výsledky všech rozborů pitné vody provedených podle tohoto zákona, musí být vloženy do IS PiVo. V této zprávě jsou zpracovány údaje popisující jakost pitné vody v celé České republice. (Státní zdravotní ústav, 2011)

Od roku 2004 jsou většinovým zdrojem dat pro národní zprávu o jakosti pitné vody rozborů zjišťované provozovateli. Tyto rozborů jsou předepsané v určité četnosti a rozsahu platnou legislativou. Provozovatelé jsou povinni získané údaje převést do elektronické podoby a předat je orgánu ochrany veřejného zdraví, čili je vložit přímo do IS PiVo. Stejná povinnost se vztahuje na zdravotní ústavy při provádění rozborů hygienického dozoru.

IS PiVo je tedy neveřejná webová aplikace, oprávnění uživatelé k ní mají přístup prostřednictvím běžného internetového prohlížeče. Správcem IS je Ministerstvo zdravotnictví ČR, provozován je Koordinačním střediskem pro rezortní zdravotnické informační systémy.

Z údajů shromážděných v IS PiVo je sestavena základní roční databáze, do níž jsou zařazeny výsledky stanovení ukazatelů jakosti pitné vody, které charakterizují běžný stav monitorované vodovodní sítě. Závažným podkladem pro hodnocení jakosti pitné vody je Vyhláška Ministerstva zdravotnictví České republiky č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody v platném znění, která je harmonizována s evropskou směrnicí Rady 98/83/EC o jakosti vody určené pro lidskou spotřebu.

Základní jednotkou pro posuzování jakosti pitné vody ve veřejném vodovodu je zásobovaná oblast definovaná vyhláškou č. 252/2004 Sb.: určené území více, jednoho nebo části katastrálního území, ve kterém je lokalizována rozvodná síť, ve které pitná voda

pochází z jednoho nebo více zdrojů a její jakost je možno považovat za přibližně stejnou. Voda v této rozvodné síti je dodávána jedním provozovatelem, popřípadě vlastníkem vodovodu pro veřejnou potřebu.

V souladu s vyhláškou č. 252/2004 Sb. musí být vzorky pitné vody pro kontrolu odebírány tak, aby byly reprezentativní pro jakost pitné vody spotřebovávané během celého roku a pro celou vodovodní síť. Odběr se provádí v místech, kde mají být splněny požadavky na jakost pitné vody, tj. tam, kde pitná voda vytéká z kohoutků určených k odběru pro lidskou spotřebu. (Státní zdravotní ústav, 2011)

1.4.1 Hodnoty zákalu a železa v pitné vodě v roce 2010

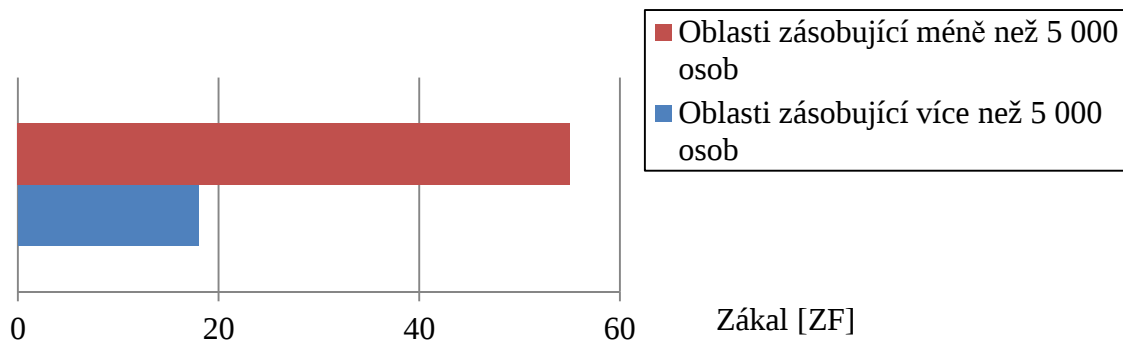
Na následujících stránkách jsou interpretovány statistické hodnoty zákalu a železa v pitné vodě a počty analýz provedené v roce 2010 Státním zdravotním ústavem a uveřejněny ve Zprávě o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2010. V Tabulce 1 a 2 jsou uvedeny hodnoty zákalu a celkové počty jednotlivých analýz. V Tabulce 3 a 4 jsou analogicky stejně jako v předchozích dvou tabulkách uvedeny hodnoty železa a počty analýz. Nejznámější proces spojovaný s jevem zákalu je historická koroze kovového potrubí. Mnoho odborných autorů, kteří se zabývají a studují korozi kovových vodovodních potrubí se domnívá, že je to hlavní příčina zákalu nacházejícího se v pitné vodě. Proto v následující části budu akcentovat z dostupných analýz jak zákal, tak i železo obsažené ve vzorcích vody na kterých byla provedena kontrola.

Zákal

V tabulkách jsou uvedeny parametrické (aritmetický a geometrický průměr) i neparametrické (medián, 10 % a 90 % kvantily) charakteristiky souborů, minimální a maximální nalezené hodnoty, celkový počet provedených analýz, počet výsledků pod mezí stanovitelnosti (<MS) a počet stanovení nevyhovujících limitní hodnotě příslušného ukazatele (>LH). Nálezy pod mezí stanovitelnosti jsou při výpočtech charakteristik souborů nahrazovány poloviční hodnotou meze stanovitelnosti. V souborech obsahujících relativně značný podíl takovýchto výsledků je vypovídací schopnost vypočtených charakteristik snížena a při jejich interpretaci je tedy nutno k této skutečnosti přihlídnout. (Státní zdravotní ústav, 2011)

Tabulka 1- Hodnoty zákalu v pitné vodě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

	jednotka	min. hodnota	max. hodnota	aritm. průměr	geom. P	median	kvantil	
							10%	90%
<i>Oblasti zásobující více než 5 000 osob</i>	ZF	0,00	18,00	0,44	0,31	0,25	0,25	0,69
<i>Oblasti zásobující méně než 5 000 osob</i>		0,00	55,00	0,56	0,36	0,38	0,19	0,95
<i>Oblast pro všechny celkem</i>		0,00	55,00	0,51	0,34	0,30	0,20	0,85
<i>Ve veřejných a komerčních studních</i>		0,00	37,60	0,85	0,37	0,40	0,08	1,60

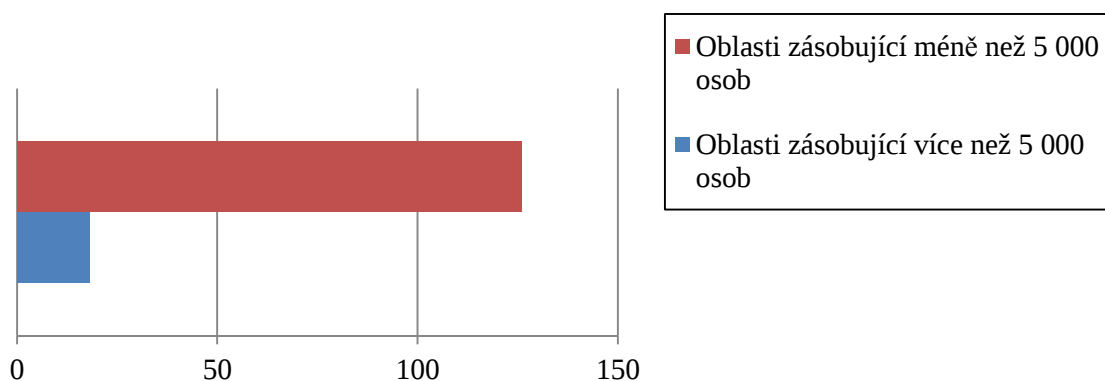


Obr. 3 - Max. hodnoty zákalu naměřených ve vzorcích v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

Tabulka 2 – Počty provedených analýz zákalu v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

	<MS ¹⁾	>LS ²⁾	celkový počet provedených analýz
	<LOQ	>LV	
Oblasti zásobující více než 5 000 osob	5547	18	11506
Oblasti zásobující méně než 5 000 osob	7107	126	17713
Oblast pro všechny celkem	12654	144	29219
Ve veřejných a komerčních studních	1587	103	4670

¹⁾ Mez stanovitelnosti, ²⁾ Nevyhovující limitní hodnota



Obr. 4 - Počet analýz zákalu nevyhovující limitní hodnotě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

Při porovnání údajů pro větší oblasti a menší oblasti se ukazuje, že v menších oblastech do 5 000 zásobovaných obyvatel jsou nálezy překročených limitních hodnot ukazatele zákalu několikanásobně vyšší a četnější. V České republice je limitní hodnota

zákalu stanovena vyhláškou 252/2004 Sb. na hodnotu 5 ZF resp. 1 ZF při úpravě povrchové vody.

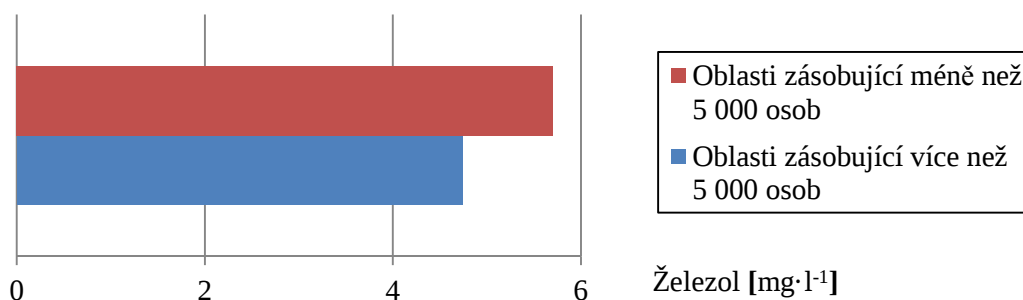
Z rozborů zákalu pro oblasti zásobující méně než 5 000 obyvatel vyplývá, že cca 0,7% z odebraných vzorků nesplňuje vyhláškou stanovený limit. Pro oblasti zásobující více jak 5 000 obyvatel vyplývá, že pouze cca 0,15% z odebraných vzorků nesplňuje limity. Celkově vyplývá, že pouze přibližně 0,5% ze všech odebraných vzorků překročilo vyhláškou stanovený limit pro zákal. Zákal vody tedy není problém se kterým by se zákazníci potkávali často, ale spíše jev krátkodobý.

Železo

Výskyt železa v pitné vodě v mnoha případech ovlivňuje výskyt zákalu, proto zde uvádím hodnoty výskytu železa v pitné vodě v roce 2010 viz. Tabulka 3 a Obr.5. V České republice je koncentrace Fe v pitné vodě limitována mezní hodnotou (MH) 0,2 mg·l⁻¹.

Tabulka 3 - Hodnoty železa v pitné vodě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

	jednotka	min. hodnota	max. hodnota	aritmetický průměr	geom. P	median	kvantil	
							10%	90%
Oblasti zásobující více než 5 000 osob	mg·l ⁻¹	0,001	4,740	0,081	0,053	0,050	0,015	0,175
Oblasti zásobující méně než 5 000 osob		0,001	5,700	0,080	0,045	0,040	0,010	0,180
Oblast pro všechny celkem		0,001	5,700	0,080	0,048	0,049	0,015	0,180
Ve veřejných a komerčních studních		0,000	8,340	0,106	0,042	0,034	0,010	0,211

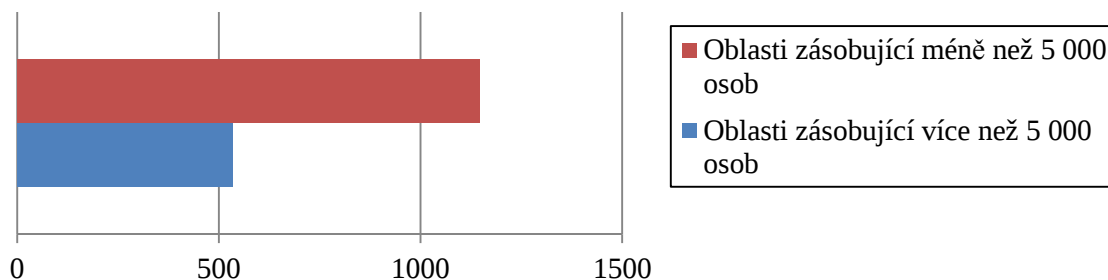


Obr. 5 - Max. hodnoty železa naměřených ve vzorcích v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

Tabulka 4 - Vyhodnocení provedených analýz v oblasti výskytu železa v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

	<MS ¹⁾	>LS ²⁾	celkový počet provedených analýz
	<LOQ	>LV	
Oblasti zásobující více než 5 000 osob	3080	534	11956
Oblasti zásobující méně než 5 000 osob	6892	1147	18414
Oblast pro všechny celkem	9972	1681	29219
Ve veřejných a komerčních studních	1766	490	4712

- 1) Mez stanovitelnosti
2) Nevyhovující limitní hodnota



Obr. 6 - Počet analýz výskytu železa nevyhovující limitní hodnotě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)

Oblasti zásobující více jak 5 000 obyvatel nesplňovaly mezní hodnotu $0,2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ danou vyhláškou Ministerstva zdravotnictví ČR č. 252/2004 Sb., což je přibližně 4,5% odebraných vzorků. Oblasti zásobující méně jak 5 000 obyvatel na tom byly ještě hůře a mezní hodnotu nesplňovalo 6,2% odebraných vzorků. Celkově nesplňovalo mezní hodnotu 5,8% odebraných vzorků.

Shrnutí

Specifičnost zákalu spočívá v tom, že se ve vodovodním potrubí objevuje většinou pouze nárazově ve formě tzv. zákalových událostí, které jsou iniciovány obvykle vnějším zásahem do systému, který vyvolá náhlou změnu hydraulických podmínek. Trvale však voda ve vodovodních sítích kalná není. Důkazem jsou výše zmíněné výsledky rozborů kvality pitné vody v ČR za rok 2010, které byly publikovány ve zprávě Ministerstva zdravotnictví ČR (Státní zdravotní ústav, 2011). Z nich vyplývá, že pouze cca 0,5 % ze

všech odebraných vzorků překročilo vyhláškou stanovený limit pro zákal (to platí i pro barvu) a 5,8% ze všech odebraných vzorků překročilo limit pro železo. Zvýšený zákal vody tedy obvykle není problém trvalého charakteru, ale jev dočasný. Zřejmě také proto ve vodárenských společnostech v ČR zatím nejsou zaváděny systematické programy pro prevenci vzniku zákalových událostí, pokud nepočítáme standardní odkalování dle provozních řádů.

2 ZÁKAL VODY

Zákal lze definovat jako snížení průhlednosti (transparence) vody nerozpuštěnými látkami. Čiřost vody je jedním ze základních požadavků na jakost pitné a užitkové vody. Zákal vody je způsoben anorganickými nebo organickými látkami (zpravidla koloidně dispergovanými), které mohou být buď přirozeného nebo antropogenního původu. Jde např. nejčastěji o jílové minerály, hydratované oxidy kovů (především železa a manganu), zcela ve výjimečných případech bakterie, plankton (řasy a sinice), detrit (jemně dispergované zbytky těl rostlin a živočišných organismů) aj. (Pitter, 1999)



Obr. 7 - Ukázka zákalu pitné vody – na levém obrázku zakalení vody ihned po incidentu. Na pravém obrázku vzorky zákalu po usazení.

I když je zákal způsoben zdravotně nezávadnými látkami, dává vodě nežádoucí vzhled (viz Obr. 7), což je významné zejména při hodnocení jakosti pitné a užitkové vody. Bílý zákal, který někdy dočasně vzniká při vypouštění vody z vodovodního potrubí je způsoben bublinkami vzduchu, který se uvolňuje z vody v důsledku snížení tlaku a změny teploty vody v potrubí. Zákal se vyjadřuje v empirických, a to buď turbidimetrických formazinových jednotkách (ZFt) nebo nefelometrických formazinových jednotkách (ZFn), které jsou bezrozměrné. Tuto jednotku uvádí ČSN EN ISO 7027 *Jakost vod – stanovení zákalu*. Dále se v práci budu řídit touto normou a uvádět zákal v jednotkách ZF.

Zákal ve vodě bývá ve většině případů v Evropě měřen v jednotkách FNU (Formazine Nephelometric Units) přístroji, které jsou nakalibrovány formazinem. Formazin je jednoznačně definovaný zákalový standard. Jednotky FNU jsou oficiální mezinárodně uznávané jednotky měření zákalu. Můžeme se setkat v různých případech i s jednotkami NTU (Nephelometric Turbidity Unit), ZF, TEF nebo SiO₂, případně v pivovarech s jednotkami EBC. Lze říci, že pokud přístroj měří v souladu s normou ČSN EN ISO 7027 *Jakost vod – stanovení zákalu*, platí následující vztahy (Pišan, 2010):

$$1 \text{ ZF} = 1 \text{ TEF} = 1 \text{ NTU} = 1 \text{ FNU}$$

$$1 \text{ EBC} = 4 \text{ ZF}$$

$$3,25 \text{ SiO}_2 = 1 \text{ ZF}$$

Typická míra zakalení je pro pitnou vodu 0,02 ZF až 0,5 ZF, pro deionizovanou vodu 0,02 ZF, pro povrchovou vodu 0,05 ZF až 10 ZF a pro odpadní a silně znečištěnou vodu je to 70 ZF až 2000 ZF. (Vernier, 2011)

Nejstarším přístrojem pro stanovení zákalu vody byl Jacksonův turbidimetr. Výsledky se vyjadřovaly v jednotkách JTU (Jackson turbidimetr units), které však nelze vztahovat k jiným jednotkám zákalu. Později se jako porovnávací standard používala suspenze SiO_2 (křemeliny) a výsledky se vyjadřovaly v mg SiO_2 v 1 litru vody. Protože při přípravě suspenze SiO_2 nebyla velikost částic přesně reprodukovatelná, přešlo se na vyjadřování inzenzity zákalu ve formazinových jednotkách. Kalibrace na formazin se provádí tak, aby 1 ZF odpovídal 1 mg SiO_2 v 1 litru, takže numericky jsou údaje stejné. Kromě symbolu ZF_n se v americké literatuře používá symbol NTU (nephelometric turbidity unit), popř. FNU (formazin nephelometric unit). (Pitter, 1999)

2.1 LEGISLATIVNÍ ÚPRAVA UKAZATELE ZÁKALU PITNÉ VODY V ČR

Vyhláškou ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. se stanovují hygienické limity mikrobiologických, biologických, fyzikálních, chemických a organoleptických ukazatelů jakosti pitné vody dodávané distribučním vodovodem. Tato vyhláška také stanovuje rozsah a četnost kontroly dodržení jakosti pitné vody a požadavky na metody kontroly jakosti vody. V zásadě pitná voda nesmí obsahovat mikroorganismy, parazity a látky jakéhokoli druhu v koncentraci, která by mohla ohrozit veřejné zdraví.

Zákal v pitné vodě je požadován vyhláškou č. 252/2004 Sb., která stanovuje mezní hodnotu pro zákal v pitné vodě 5 ZF, respektive pro upravovanou povrchovou vodu 1 ZF za úpravnou vod.

Vyhláška 252/2004 v § 14 Přílohy 1 Mikrobiologické, biologické, fyzikální, chemické a organoleptické ukazatele pitné vody a jejich hygienické limity dále určuje, že v případech úpravy povrchové vody by voda vycházející z úpravní neměla překročit hodnotu 1,0 ZF. Jednotka se v protokolu uvádí podle použité metody stanovení: $\text{ZF}(t)$ nebo $\text{ZF}(n)$, kde t znamená turbidimetrickou a n nefelometrickou metodu.

U pitné vody je tedy mezní hodnota zákalu 5 ZF. U stolní a kojenecké vody je mezní hodnota přísnější, jen 2 ZF. Průměrná hodnota zákalu pitných vody v ČR je asi 1,0 ZF a lze se setkat i s maximálními hodnotami 20 ZF, výjimečně i více. (Vyhláška 252/2004, 2004)

2.1.1 Odběr vzorků pitné vody pro rozbor

Minimální roční četnost odběrů a rozborů vzorků pitné vody pro provádění kontroly jakosti vody závisí na počtu obyvatel zásobované vodovodem při spotřebě $200 \text{ l} \cdot \text{os}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ a na objemu vody rozváděné či produkované v zásobní oblasti. V Tabulce 5. jsou uvedeny minimální četnosti odběrů. V případě, že objem vody neodpovídá počtu obyvatel dle hodnot uvedených v tabulce, je směrodatný rozhodující počet zásobovaných obyvatel.

Tabulka 5 - Minimální roční četnost odběru a rozsah rozborů vzorků pitné vody (mimo balené) dle vyhlášky č. 252/2004 Sb. § 14 Příl. 4.

Počet obyvatel zásobované oblasti, při spotřebě 200 l·os·d ⁻¹	Objem vody rozváděné či produkované v zásobní oblasti [m ³ ·den ⁻¹]	Roční počet vzorků pro krácený rozbor	Roční počet vzorků pro úplný rozbor
≤ 50	≤ 10	1	1 za dva roky
> 50 ≤ 20	> 10 ≤ 20	2	1
> 100 ≤ 500	> 10 ≤ 100	3	1
> 500 ≤ 5000	> 100 ≤ 1 000	4	2
> 5 000 ≤ 50 000	> 1 000 ≤ 10 000	4+3 na každých 1 000 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených z celkového objemu)	1 + 1 na každých 3 300 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených) z celkového objemu
> 50 000 ≤ 500 000	> 10 000 ≤ 100 000	4+3 na každých 1 000 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených z celkového objemu)	3 + 1 na každých 10 000 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených z celkového objemu)
> 500 000	> 100 000	4+3 na každých 1 000 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených z celkového objemu)	10 + 1 na každých 25 000 m ³ ·den ⁻¹ (včetně nedokončených z celkového objemu)

Mimo odběry uvedené v Tabulce 5 se provádějí kontroly kvality pitné vody v případech přerušení zásobování vodou na více než 24 hodin nebo nových částí vodovodů, které mají být uvedeny do provozu nebo po opravě havárie vodovodu, která by mohla ovlivnit jakost dopravované vody ve vodovodu. Před uvedením nového zdroje pitné vody do provozu musí být proveden úplný rozbor upravené pitné vody. Výsledky rozboru nesmějí být starší než 6 měsíců.

Vzorky pitné vody se pro kontrolu odebírají tak, aby byly reprezentativní pro jakost pitné vody spotřebovávané během celého roku a pro celou vodovodní síť. Počet míst odběru musí být roven nejméně počtu krácených rozborů podle přílohy č. 4. U vodovodů zásobujících více než 5000 obyvatel musí být počet míst odběru roven nejméně 80 % počtu krácených rozborů.

Místa odběru vzorků musí být volena tak, aby více než 50 % míst odběru nebylo trvalých, ale měnilo se každý rok. Měnící se místa odběru se vybírají metodou náhodného výběru nebo jinou vhodnou metodou, která zaručí, že žádný ze zásobovaných objektů nebude vyloučen z možnosti kontroly. Odběr vzorků pitné vody se provádí v místech, kde mají být splněny požadavky na jakost vody. Jedná-li se o ukazatele antimon, arsen, benzen, beryllium, bor, bromičnany, dusičnany, fluoridy, chloridy, kyanidy, ozon, pesticidní látky, rtuť, selen a sírany, u nichž se nepředpokládá, že by se jejich koncentrace mohla během distribuce mezi úpravnou a místem spotřeby zvyšovat, mohou být vzorky pitné vody odebírány buď na výstupu z úpravní, nebo na vhodných místech vodovodní sítě, například na vodojemu, pokud tím prokazatelně nevznikají změny u naměřené hodnoty daného ukazatele. (Vyhláška 252/2004 Sb, 2004)

Odběr vzorků pro stanovení ukazatelů teplé vody (s výjimkou cíleného epidemiologického šetření) se provádí po odpuštění vody po dobu 1 minuty. Teplota teplé

vody po odtočení by neměla klesnout pod 50 °C (optimálně nad 55 °C) z důvodu minimalizace rozvoje legionel v rozvodu vody.

Vyhláškou 252/2004 je rovněž stanoven rozsah kontroly pitné vody. V kráceném rozboru se stanovuje 23 vybraných ukazatelů (včetně zákalu), v úplném pak všechny jmenované v příloze č. 1 vyhlášky.

2.2 LIMITY ZÁKALU VE VEŘEJNÝCH VODOVODECH V ZAHRANIČÍ

Tabulka 6 - Přehled legislativně stanovených maximálních hodnot zákalu v zahraničí

Země	Jednotky	Maximální hodnota zákalu	Poznámka
Česká republika	ZF	5	Jedná se o mezní hodnotu stanovenou vyhláškou 252/2004 Sb. V případech úpravy povrchové vody by voda vycházející z úpravní neměla překročit hodnotu 1,0 ZF. ([1] Česká republika, 2004)
Spojené státy americké	NTU	1	Zákal je měřítkem kvality vody. Používá se jako měřítko filtrační účinnosti a určení kvality pitné vody. Vyšší úrovně zákalu jsou často spojeny s vyššími riziky výskytu nemocí, které působí na organismus. Jako jsou například viry, paraziti a některé bakterie. Tyto mikroorganismy mohou způsobit příznaky jako je nevolnost, křeče, průjem, bolesti hlavy a další související příznaky. (US EPA, 2012)
Spojené království Velké Británie a Severního Irska	NTU	4	Hodnota je uváděna na kohoutku u spotřebitele.
	NTU	1	Hodnota je uváděna na výstupu z úpravní vody. (2000 No. 3184, 2007)
Austrálie	NTU	5	V případě bez bakteriální dezinfekce.
		1	S bakteriální dezinfekcí. (National Health and Medical Research Council, 1996)
Kanada	NTU	1	V případě biologické filtrace.
		3	V případě pomalé nebo náplavné filtrace.
		0,3	V případě membránové filtrace. (Fpt Committee on Drinking Water, 2010)
Evropská unie	-	Pro spotřebitele přijatelný	V případech úpravy povrchových vod by členské státy měly usilovat, aby hodnota tohoto ukazatele nepřesáhla 1,0 NTU ve vodě na výstupu z úpravní. (Evropská unie, 1996)
Nový Zéland	NTU	2,5	Obecné hodnoty, záleží na estetickém významu. (NZ drink water standards, 2010)
Německo	NTU	1	dle DIN EN 27027 C2
Slovensko	ZF	5	Jedná se o mezní hodnotu stanovenou vyhláškou č. 354/2006. (Slovenská republika, 2006)
Polsko	NTU	1	
Rakousko	NTU	1	dle DIN EN 27027 C2

Spojené státy americké

Spojené státy americké se řídí v oblasti kvality pitné vody doporučením agentury EPA (Environmental Protection Agency). EPA vyžaduje z důvodu omezení výskytu zákalu tato pravidla pro vodovodní systémy využívající povrchovou nebo podzemní vodu:

- hygienicky zabezpečovat vodu (desinfekce),
- filtrovat vodu.

U systémů používající konvenční nebo přímou filtraci se v žádném případě nesmí:

- Zakalení vody vyskytnout větší než 1 ZF.
- Ve vzorcích odebíraných pro měření zákalu vody musí být zákal menší nebo roven 0,3 ZF v nejméně 95 procentech vzorcích odebraných za měsíc. (US EPA, 2012)

Spojené království Velké Británie a Severního Irska

Jakost pitné vody v Anglii a Walesu je řízena směrnicí 2000 No. 3184, která stanovuje zákal jako měřítko kvality vody. Udává, že zákal je obvykle způsoben rozvřenými minerály. Je také důležitý jako ukazatel u kontroly parametrů při úpravě vody. Z tohoto důvodu má Anglie dvě části normy pro zákal.

První část normy pro pitnou vodu, která opouští úpravnu vody. Maximální hodnota zákalu je stanovena na 4,0 ZF. Tato norma se snaží zajistit, aby proces úpravy fungoval správně.

Druhá část normy se vztahuje na místo odběru vody u spotřebitele, tedy na kohoutku. Tato hodnota je vyšší, protože zákal se může objevit z důvodu průtoku vody vodovodním potrubím a instalatérskými rozvody v domech. (2000 No. 3184, 2007)

Austrálie

Na základě vzhledu by zákal neměl překročit hodnotu 5 ZF. Pokud se používá protibakteriální desinfekce je požadováno, aby byla hodnota zákalu v pitné vodě menší než 1 ZF. (National Health and Medical Research Council, 1996)

Kanada

Vodovodní systémy v Kanadě jsou zařazeny, co se týče limitů zákalu do tří skupin, které se liší zdrojem vody k úpravě. Pokud je to možné, měli by být systémy konstruovány tak, aby hodnota zákalu byla na co nejnižší úrovni, v ideálním případě na pod hodnotou 0,1 ZF. Není-li možné toto splnit, liší se limity zákalu dle použité filtrace (Fpt Committee on Drinking Water, 2010):

- Pro biologickou filtraci může být maximální hodnota znečištění 0,3 ZF aspoň v 95% odebraných vzorcích za každý kalendářní měsíc. Zákal by nikdy neměl překročit hodnotu 3,0 ZF.
- U pomalé filtrace přes písek nebo křemelinu by zákal neměl být menší než 1,0 ZF v 95% vzorcích pitné vody odebrané za jeden měsíc. Zákal by nikdy neměl překročit hranici 3,0 ZF.
- U membránové filtrace by zákal měl být roven nebo menší 0,1 ZF v 99% odebraných vzorcích během měsíce a neměl by nikdy překročit hodnotu 0,3 ZF.

Slovenská republika

Slovenská republika se řídí nařízením vlády ze sbírky zákonů č. 354/2006, kterou se stanovují požadavky na vodu určenou k lidské spotřebě a kontrolu kvality vody určené

pro lidskou spotřebu. Toto nařízení určuje analýzu zákalu jako součást minimálního rozboru pitné vody. (Slovenská republika, 2006)

Německo a Rakousko

V Německu a v Rakousku je kvalita pitné vody regulována prostřednictvím směrnice „O jakosti vody určené k lidské spotřebě“ (98/83/ES). V Rakousku tato odpovídající změna byla přijata 21.08.2001, v Německu tato směrnice vstoupila v platnost v lednu 2003. Dodržování předpisů pro kvalitu pitné vody je kontrolováno zdravotnickými orgány. V Německu se zabývá standardizací a certifikací procesů a materiálů v oblasti pitné vody uskupení DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches).

2.3 MĚŘENÍ ZÁKALU VODY

V České republice se kontrolou jakosti pitné vody zabývá vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb., ve které se stanovují hygienické požadavky pitné vody dodávané distribučním vodovodem. Tato vyhláška také stanovuje rozsah a četnost kontroly dodržení jakosti pitné vody a požadavky na metody kontroly jakosti vody.

Tato norma specifikuje čtyři metody stanovení zákalu ve vodě:

- a) měření průhlednosti zkušební trubicí (vhodné pro čisté vody)
- b) měření průhlednosti zkušební deskou (vhodné pro povrchové vody)
- c) měření rozptýleného záření, vhodné pro vody s nízkým zákalem (například pro pitnou vodu)
- d) měření útlumu zářivého toku, vhodnější pro velmi zakalené vody (například odpadní nebo znečištěné vody)

Podle přílohy 6, § 14, vyhlášky 252/2004 Sb. použité analytické metody pro stanovení zákalu musí být minimálně schopny stanovit koncentrace zákalu s přesností a pravdivostí detekce 25% z limitního ukazatele 1,0 ZF. Mez detekce je také 25% limitní hodnoty ukazatele. Výsledek musí být vyjádřen nejméně stejným počtem desetinných míst, jako je uvedeno u limitní hodnoty ukazatele zákalu.

Norma ČSN EN ISO 7027 *Jakost vod – stanovení zákalu* uvádí dva základní způsoby měření zákalu:

- Semikvantitativní metody měření zákalu
- Kvantitativní metody měření zákalu

Nerozpuštěné látky jednak snižují intenzitu procházejícího záření a jednak rozptylují záření nerovnoměrně všemi směry. Proto se zákal stanoví buď měřením útlumu zářivého toku procházejícího kapalinou, nebo měřením intenzity rozptýleného záření. Semikvantitativně lze stanovit zákal měřením průhlednosti zkušební trubicí (tzv. průhledová zkouška) nebo zkušební deskou. V obou případech se udává výška kapaliny, při které jsou vzor písma, zkušební značka nebo deska jasně patrné při průhledu shora. Tyto metody se obvykle používají pro první orientaci in situ a povrchové vody.

Kvantitativně se měří buď turbidimetricky útlum zářivého toku procházejícího kapalinou nebo nefelometricky intenzita záření rozptýleného kapalinou. Metoda měření útlumu zářivého toku (turbidimetrie) je vhodná pro silněji zakalené vody. Stanovení však ruší barvotvorné látky. Jejich vliv lze podstatně omezit měřením v infračervené oblasti spektra ($\lambda > 800$ nm). Výsledky stanovení zákalu se uvádějí v porovnání s kalibračním standardem. Jako kalibrační standard se používá suspenze formazinu. Formazin je

polymerní produkt reakce síranu hydrazinia a hexamethylentetraminu. Není komerčně dostupný a musí se připravit předem.

2.3.1 Krácené a úplné rozborů

Účelem krácených rozborů je získávat pravidelné informace o stabilitě vodního zdroje a účinnosti úpravy vody, zvláště dezinfekce (pokud je prováděna), mikrobiologické jakosti a organoleptické vlastnosti vody, a to za účelem zjištění, zda jsou dodržovány limitní hodnoty stanovené touto vyhláškou nebo orgánem ochrany veřejného zdraví na základě zákona.

Účelem úplných rozborů je získávat informace potřebné ke zjištění, zda limitní hodnoty všech ukazatelů stanovených touto vyhláškou nebo na základě § 4 odst. 6 zákona č. 258/2000 Sb., ve znění zákona č. 274/2003 Sb. orgánem ochrany veřejného zdraví jsou dodržovány. Předmětem úplného rozboru jsou všechny ukazatele uvedené v příloze č. 1 (s přihlédnutím k poznámkám k těmto ukazatelům uvedeným v téže příloze) s výjimkou případů, kdy je orgánem ochrany veřejného zdraví stanoveno na základě zákona jinak. (Vyhláška 252/2004 Sb, 2004)

2.3.2 Semikvantitativní způsoby měření zákalu

Norma ČSN EN ISO 7027 *Jakost vod – stanovení zákalu* uvádí a doporučuje jako jednu metodu z mnoha pro stanovení zákalu měření průhlednosti. Norma uvádí dva způsoby měření:

- Měření průhlednosti zkušební trubicí,
- Měření průhlednosti zkušební deskou.

Tyto způsoby jsou vhodnější pro měření zákalu povrchových vod, z tohoto důvodu dále popíši jen obecně princip.

Měření průhlednosti zkušební trubicí

Používá se zkušební trubice z bezbarvého skla dlouhá 600 mm ± 10 mm, vnitřního průměru 25 mm ± 1 mm, se stupnice dělenou po 10 mm. Součástí trubice by měl být těsně přiléhající kryt na ochranu před postranním světlem. Zdrojem světla je 3W nízkovoltová žárovka s wolframovým vláknem k osvětlení vzoru písma nebo zkušební značky.

Je bezpodmíněčně nutné, aby zkoušky prováděli podle normy ČSN EN ISO 7027 *Jakost vod – stanovení zákalu* náležitě kvalifikovaní pracovníci. Vzorek se důkladně promíchá a nalije se do zkušební trubice. Hladina vzorku se postupně snižuje, dokud není vzor písma nebo zkušební značka jasně patrná v průhledu shora. Výška kapaliny se odečte na stupnici trubice. Změřená výška kapaliny se udává na nejbližších 10 mm, spolu s údajem o použitém přístroji (jméno výrobce).

Měření průhlednosti zkušební deskou

Tento způsob je vhodný zejména ke zkouškám in situ. Používá se zejména pro určení zákalu povrchových vod. Jako přístroj se používá zkušební deska, vyrobená z litého bronzu a potažená bílým plastem, připevněná na řetízek nebo na tyč. V typickém provedení jde o disk o průměru 200 mm, do kterého je vyvrtáno šest děr, každá o průměru 55 mm, rozmístěných na kružnici průměru 120 mm. Deska se na řetízku nebo na tyči spouští do vody tak hluboko, dokud je při pohledu shora právě postřehnutelná. Změří se

délka ponořené části řetízku nebo tyče. Zkouška se několikrát opakuje. Vyjádření výsledků se uvádí hloubkou ponořené desky. (ČSN EN ISO 7027, 2000)

2.3.3 Kvantitativní metody měření zákalu optickými turbidimetry

Voda zbarvená rozpuštěnými látkami je homogenním systémem, který pouze snižuje intenzitu záření jím procházejícího. Voda, která obsahuje pevné nerozpuštěné látky, snižuje intenzitu dopadajícího záření a tyto částice vytvářejí ve vodě zákal. Kromě toho přítomné nerozpuštěné látky rozptylují záření nerovnoměrně všemi směry. Měření intenzity rozptýleného světla a stanovení úrovně zákalu poskytují spolehlivou informaci o koncentraci pevných částic ve vodě. Čím více je ve vodě pevných částic, tím větší je intenzita rozptýleného světla a indikovaná hodnota zákalu.

2.3.4 Princip měření zákalu

V případě průchodu světelných paprsků čistou vodou je trajektorie těchto paprsků přímá a relativně nerozptýlená. Jakmile jsou ve vodě přítomny molekuly pevných částic, světelný paprsek je ovlivňován těmito molekulami. Částičky pevných látek absorbují světelnou energii a odkláníjí a vyzařují světelný paprsek do všech směrů. (United States Environmental Protection Agency, 1999)

Norma ČSN EN ISO 7027 pro měření zákalu vody popisuje obecný princip stanovení míry zákalu jako porovnání koeficientu spektrálního útlumu $\mu(\lambda)$ s kalibračním standardem. Dopředu směřující rozptyl záření vyvolaný částicemi snižuje záření tak, že společný koeficient spektrálního útlumu $\mu(\lambda)$ je dán součtem spektrálního rozptylového koeficientu $s(\lambda)$ a spektrálního adsorpčního koeficientu $\alpha(\lambda)$:

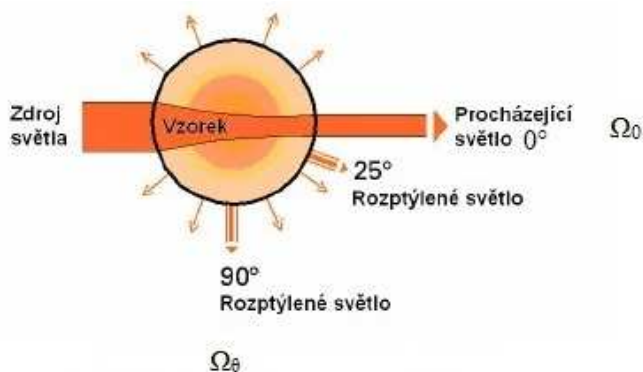
$$\mu(\lambda) = s(\lambda) + \alpha(\lambda)$$

Aby bylo možné získat hodnotu spektrálního rozptylového koeficientu $s(\lambda)$ samotného, musí být znám spektrální adsorpční koeficient $\alpha(\lambda)$. Má-li být stanoven spektrální adsorpční koeficient rozpuštěné látky, lze v některých případech nerozpuštěné látky odfiltrovat, to se ale nedoporučuje vzhledem k možným rušivým vlivům. Z tohoto důvodu je třeba tedy porovnávat výsledky stanovení zákalu s kalibračním standardem. (ČSN EN ISO 7027, 2000)

Intenzita rozptýleného záření závisí na:

- vlnové délce dopadajícího záření,
- úhlu měření a na tvaru,
- optických vlastnostech a distribuci velikosti částic nerozpuštěných látek ve vodě.

Dále se norma ČSN EN ISO 7027 zmiňuje o dvou způsobech měření, a to měření útlumu i procházejícího záření a měření rozptýleného záření. Podrobný srovnání a popis metod je v Tabulce 7. Při měření útlumu procházejícího záření závisí naměřená hodnota na aperturním úhlu Ω_0 zářivé účinnosti přicházejícího čidla. Měří-li se rozptýlené záření, závisí naměřená hodnota na úhlu θ a aperturním úhlu Ω_0 . Měřicí úhel θ je úhel mezi směrem dopadajícího záření a směrem měřeného rozptýleného záření (viz. Obr. 8).



Obr. 8 - Princip měření zákalu

Tabulka 7 - Popis metod měření zákalu turbidimetrem dle ČSN EN ISO 7027

	<i>Metoda měření rozptýleného záření</i>	<i>Metoda měření útlumu záření</i>
Požadavky na turbidimetr	a) vlnová délka dopadajícího záření ¹⁾ , musí být 860 nm ²⁾	a) vlnová délka dopadajícího záření ¹⁾ , musí být 860 nm ²⁾
	b) šířka spektrálního pásu dopadajícího záření, $\Delta\lambda$, se musí rovnat nebo být menší než 60 nm	b) šířka spektrálního pásu dopadajícího záření, $\Delta\lambda$, se musí rovnat nebo být menší než 60 nm
	c) vstupní záření musí být rovnoběžné a jakákoliv sbíhavost nesmí překročit 1,5°	c) vstupní záření musí být rovnoběžné a jakákoliv sbíhavost nesmí překročit 2,5°
	d) měřicí úhel, θ , svíraný optickými osami dopadajícího a rozptýleného záření, musí být $90^\circ \pm 2,5^\circ$	d) měřicí úhel (tolerance odchylky optické osy) dopadajícího a rozptýleného záření musí být $0^\circ \pm 2,5^\circ$
	e) aperturní úhel, Ω_0 , má být ve vzorku vody mezi 20° až 30°.	e) aperturní úhel, Ω_0 , má být ve vzorku vody mezi 20° až 30°.
Vyjadřování výsledků	a) je-li zákal menší než 0,99 ZF _n , na nejbližší 0,01 ZF _n	a) je-li zákal 40 ZF _t až 99 ZF _t , na nejbližší 1 ZF _t
	b) je-li zákal 1,0 ZF _n , až 9,9 ZF _n na nejbližší 0,1 ZF _n	b) je-li zákal větší než 100 ZF _t , na nejbližších 10 ZF _t
	c) je-li zákal 10 ZF _n až 40 ZF _n , na nejbližší 1 ZF _n	Výsledky se uvádějí v turbidimetrických formazinových jednotkách (ZF _t)
	Výsledky se uvádějí v nefelometrických formazinových jednotkách (ZF _n)	

Pozn.:

¹⁾ Zdrojem monochromatického záření mohou být žárovky s wolframovým vláknem s monochromátory a filtry, diody a lasery. Stále se však ještě používají některé starší přístroje vybavené žárovkami s wolframovým vláknem, ale bez monochromátorů nebo filtrů (polychromatické zdroje). I když reprodukovatelnost takových přístrojů bývá nižší ve srovnání s přístroji poskytujícími monochromatické záření, lze je používat pro denní kontrolu a sledování zákalu vody ve vodárnách a úpravnách. Používají-li se různé přístroje nejsou ovšem výsledky srovnatelné.

²⁾ Měření při 860 nm poskytuje menší intenzitu rozptýleného záření ve srovnání s měřením prováděnými při nižších vlnových délkách.

2.3.5 Chemikálie a činidla

K přípravě kalibračních formazinových suspenzí se používají chemická činidla. Všechny chemikálie musí být zaručeně analytické jakosti. K přípravě formazinových suspenzí se používá 2x přefiltrovaná destilovaná voda. Dále jako chemické činidlo se používá formazin $C_2H_4N_2$. Formazin se získává rozpuštěním 5,0 g hexamethyltetraminu v přibližně 40 ml vody. Vzniká zásobní suspenze. Zásobní suspenze se ředí přefiltrovanou destilovanou vodou pomocí pipet tak, aby byly získány kalibrační suspenze se zákaly (ZF_n) potřebného rozsahu k měření rozptýleného záření. Tyto suspenze jsou stále pouze jeden den. Je možné použít i komerčně dostupné standardy suspenzí na bázi divinylbenzenstyrenu, pokud byla ověřena jejich ekvivalence s čerstvě připravenými formazinovými suspenzemi. Tyto standardy jsou údajně stále až jeden rok. Ověřování komerčně dostupných standardů porovnáváním s formazinem musí být prováděno vždy po šesti měsících. Kritéria přijatelného ověření musí vycházet z paralelních triplicátních zkoušek ověřovaných druhotných standardů v pěti koncentracích. (ČSN EN ISO 7027, 2000)

2.4 PŘÍSTROJE POUŽÍVANÉ PRO KVANTITATIVNÍ MĚŘENÍ ZÁKALU

Zákaloměry lze v současné době rozdělit na tři běžně používané typy.

- Stolní turbidimetry,
- Přenosné turbidimetry,
- On-line turbidimetry.

Stolní a přenosné turbidimetry se používají k analýze zákalu ze vzorku vody, který se odebere většinou ručně např. z potrubí. Stolní přístroje se používají stacionárně, zejména v laboratořích a nejsou určeny k přenášení. On-line přístroje bývají instalovány v oblasti proudění vody, např. na potrubí a umožňují průběžně analyzovat proudící vodu. Při použití on-line měřičů je požadováno, aby se dodržovalo postupu a instalace těchto zařízení v souladu s dodržováním podmínek daných výrobcem a zabránilo se tak výskytu chyb měření (vzduchové bubliny, usazeniny).

2.4.1 Stolní zákaloměry

Většina stolních turbidimetrů je určena pro široké použití a mají schopnost měřit velmi znečištěné vzorky vody s výrazným zakalením. Jsou uzpůsobeny výlučně pro použití v laboratořích. Měření s těmito přístroji vyžaduje pečlivé dodržování předepsaných postupů výrobcem při odebírání vzorků z důvodu snížení chyb. Vzorky se odebírají do předem připravených a čistých kyvet, které se poté vloží do přístroje. Stolní zákaloměry by měly být skladovány a provozovány v bezpečném a chráněném prostředí. Musí být zabráněno vstupu vlhkosti, aby nedocházelo ke kondenzaci a také, aby nedocházelo k hromadění prachu uvnitř zákaloměru. Stolní turbidimetry jsou také velmi náchylné na teplotní extrémy. Teplota by měla být v místnosti kontrolovatelná a ustálená mezi 0°C a 50°C. Stolní turbidimetry jsou procesorem řízené přístroje které většinou pracují na nefelometrickém principu. Jako zdroj světla se nejčastěji používá wolframová lampy nebo LED dioda v oblasti 860 nm, což vyhovuje evropské normě ISO 7027. Dále jsou popsány vybrané stolní turbidimetry a porovnány mezi sebou v Tabulce 8.

HACH LANGE 2100AN

Turbidimetr 2100AN firmy Hach Lange je stolní, mikroprocesorem řízený přístroj, pracující na nefelometrickém principu. Čtyřdetektorový systém umožňuje přesná měření komplikovaných vzorků, eliminaci zabarvení, dlouhodobou stabilitu kalibrace, vynikající linearitu v rozsahu do 10 000 NTU. Jeden detektor je umístěn pod úhlem 90° (ISO specifikace) na zdroj světla - wolframovou lampu, další detektory měří odražené a průchozí světlo. K dispozici jsou módy měření hodnot zákalu, barvy s dodávaným interferenčním filtrem 455 nm, absorbance, transmittance a 2 uživatelské kalibrace. Turbidimetr je vybaven funkcí průměrování a volbou měření v modu RATIO pro hodnoty vyšší než 40 NTU. Výsledek je zobrazován na digitálním displeji v jednotkách NTU, jednotky barvy, A, %T, EBC a nephelos. Přístroj měří v rozsahu 0-10 000 NTU s volbou měření auto nebo manual. Přesnost měření je $\pm 2\%$ v rozsahu do 1000 NTU, $\pm 5\%$ v rozsahu 1000 - 4000 NTU a 10% v rozsahu 4000 – 10 000 NTU. Rozlišení displeje je 0.001 na nejnižším rozsahu. Je osazen rozhraním RS 232, zabudovanou tiskárnou pro tisk měřených hodnot a validačních údajů a vstupem na vzduch proti rosení kyvet. Jako příslušenství lze objednat manuální nebo automatickou průtočnou kyvetu a soupravu filtrů pro měření v absorbančním módu. Kalibrace se provádí na primární formazínové standardy StablCal. S použitím interferenčního filtru 860 nm je možno měřit zákal dle specifikace ISO. (Hach Lange, 2012)



Obr. 9 - Stolní turbidimetr HACH LANGE 2100AN (Hach Lange, 2012)

HI 83414

Turbidimetr HI 83414 firmy Hanna - Verkon měří dva z nejdůležitějších parametrů pitné vody: zákal a celkový / volný chlór. Je speciálně navržen pro přesné a spolehlivé měření kvality vody u vzorků se slabým zákalem a malou koncentrací chlóru. Splňuje požadavky standardních metod pro turbimetrická a kolorimetrická měření a USEPA. Obdobou Turbidimetru HI 83414 je Turbidimetr HI 88703, který se používá jen pro měření turbidity a je určen zejména pro specializované stanice měřící jenom jeden parametr. Splňuje požadavky standardních metod pro turbimetrická a kolorimetrická měření a USEPA a také zaručuje přesné a spolehlivé měření zákalu i při velmi nízkých hodnotách. (Verkon – Hanna, 2012)



Obr. 10 - Stolní turbidimetr HI 83414 (Verkon – Hanna, 2012)

CyberScan TB 1000

Turbidimetr CyberScan firmy helago.cz je konstruován speciálně pro měření zákalu ve vodě. Přístroj je schopen automaticky měnit rozsah do 1000 NTU a je také schopen vícebodové automatické kalibrace (až 3 body). Součástí přístroje je snadno čitelný LCD displej se zabudovaným reálným zdrojem času, autodiagnostika a schopnost přístroje dávkování vzorků vody bez použití kyvet (volitelné příslušenství). Turbidimetry CyberScan TB 1000 vyhovují i nejnáročnějším požadavkům současné servisní laboratorní i vědecké praxe. Splňují kritéria specifikovaná USEPA metodou 180.1 pro NTU měření a ISO 7027 (infračervený model TB IR1000). Aplikace tohoto přístroje je vhodná v

oblastech: vodárenství a úprava odpadních vod; petrochemie; galvanické pokovování a výroba nápojů. V nabídce firmy jsou dva modely s rozdílnými zdroji světla. Výše popsaný model CyberScan TB 1000 používá jako zdroj světla klasické wolframové žárovky, kdežto typ TB IR 1000 používá infračervený zdroj světla. (Helago s.r.o, 2012)



Obr. 11 - Stolní turbidimetr CyberScan TB 1000 (Helago s.r.o, 2012)

Tabulka 8 - Parametry stolních turbidimetrů

	Hach Lange 2100 AN	HI 83414
Princip měření:	Nefelometrický, poměrový	nefelometrický,
Měřicí módy:	Zákal, absorbance, transmittance, barva 455 nm	Zákal, obsah volného chlóru
Rozsah:	0 - 10 000 NTU	0 - 4 000 NTU
Přesnost:	+/- 2% hodnoty nebo +/- 0,01 v rozsahu 0-1000 NTU, +/- 5% v rozsahu 1000-4000 NTU, +/-10% v rozsahu 4000-10000 NTU	+/-2% údajů plus 0,02 NTU, +/- 5% údajů nad 1000 NTU
Rozlišení:	0,001 NTU na nejnižším rozsahu	0,01 NTU
Zdroj světla:	Wolframová lampa	Wolframová lampa
Odezva:	6,8 -14 sek.	-
Displej:	LED, 4 znaky	LED
Objem vzorku:	30 ml	-
Kyvety:	Kulaté s ryskou, 25 mm Ø	-
Provozní podmínky:	0-40 °C, 0-90% RH při 25°C	0-50°C, max. 95% RH nekondenzující
Napájení:	230 V/50 Hz	230 V/50 Hz nebo 115 V / 60 Hz 20W
Konstrukce:	odolný plast - polykarbonát	plast
Hmotnost:	cca 5,5 kg	2,5 kg

	CyberScan TB 1000
Princip měření:	nefelometrický, nepoměrový
Měřicí módy:	Zákal
Rozsah:	0 - 1 000 NTU
Přesnost:	+/- 1% odečtu + 0,01 NTU
Rozlišení:	0,01 NTU (0 - 9,99 NTU), 0,1 NTU (10 - 99,9 NTU)
Zdroj světla:	Wolframová lampa, infračervený zdroj
Odezva:	6 sek.
Displej:	LCD
Objem vzorku:	30 ml
Kyvety:	-
Provozní podmínky:	-
Napájení:	-
Konstrukce:	plast
Hmotnost:	-

2.4.2 Přenosné turbidimetry

Jsou přístroje, které obvykle v malém pouzdře zahrnují kombinaci turbidimetru a fotometru, případně pH metru. Nachází široké uplatnění jak ve vodárenství a čištění odpadních vod, tak i v ochraně životního prostředí, průmyslových provozech a laboratořích. Přenosné turbidimetry bývají většinou vodotěsné a jsou přizpůsobeny pro práci v terénu. Z toho také plyne velká mobilita zařízení a nenáročnost na obsluhu. Zařízení bývá většinou napájeno několika AA alkalickými bateriemi z čehož plyne, že zařízení lze bez problému provozovat v terénu. Jako zdroj bílého světla bývá používána wolframová žárovka. V případě zdroje infračerveného světla bývá používána infračervená LED dioda. Přístroje dostupné na našem trhu splňují specifikace EN ISO 70207 a USEPA 180.1.

WTW pHotoFlex Turb

WTW pHotoFlex Turb je přístroj, který v malém přenosném pouzdru zahrnuje kombinaci fotometru, turbidimetru a pH-metru. Nachází široké uplatnění jak ve vodohospodářských aplikacích a ochraně životního prostředí, tak i v průmyslových provozech a laboratořích. Monochromátor je filtrový s šesti vlnovými délkami. V přístroji je uloženo přes 130 metod, které jsou optimalizované pro běžně dostupné reagenční sady WTW, navíc lze vložit 100 vlastních metod. Pro měření zákalu je vestavěna IR dioda pro nefelometrické měření zákalu (90°), které odpovídá požadavkům norem DIN20027/ISO7027. Optická měření lze provádět v kulatých kyvetách průměru 16 nebo 28 mm. Pro měření pH lze připojit jakoukoliv standardní pH-elektrodu s konektorem DIN a banánkovým výstupem teplotního snímače. Přístroj lze zakoupit samostatný bez příslušenství nebo ve velice praktickém transportním kufříku s pracovní deskou, ve kterém je obsažena pH elektroda SenTix 41 se stojánkem, dávkovací pipeta 5 ml, prázdné kyvety, pufrové roztoky pH 4.01 a 7.01, kabel pro spojení s PC. Jako volitelné příslušenství se

rovněž nabízí laboratorní stanice LabStation, která z přenosného přístroje učiní úsporné laboratorní (stolní) řešení. (Verkon, 2012)



Obr. 12 - WTW pHotoFlex Turb (Verkon, 2012)

Hach Lange 2100Q / 2100Q IS

Přístroj pracuje na bázi analytické metody. Poměrové turbidimetrické měření využívá primární signál nefelometricky rozptýleného světla (90°) vůči signálu vysílaného rozptýleného světla. Tento dvou-detektorový optický systém kompenzuje barvu vzorku, kolísání světelného zdroje, rozptýlené světlo a zabezpečuje stabilní výkon a přesnost v širokém měřicím rozsahu i v terénních podmínkách.

Přístroj 2100Q IS splňuje normu ISO 7027. Zdrojem světla je LED dioda emitující světlo o vlnové délce 860 nm. Jako detektor slouží v přístroji křemíková fotodioda. Jedná se o přenosný turbidimetr zaměřený na snadnou kalibraci a verifikaci naměřených dat. Přístroj pracuje na bázi 1 – bodové kalibrace funkcí RapidCal a nabízí tak zjednodušené řešení pro měření nízkých hodnot zákalu. Přenos dat mezi turbidimetrem a například osobním počítačem probíhá přes USB + napájecí modul a tím pádem je rychlý a flexibilní. Výhodou je, že není potřebný žádný další speciální software na přenos dat. Všechna data lze jednoduše odeslat do modulu a pak stáhnout přes USB kabel do počítače, kde lze data zpracovat v libovolném tabulkovém editoru (např. MS Excel). Přenosný turbidimetr 2100Q / 2100Q IS má vestavěný inovační Rapidly Settling Turbidity režim (RST, rychle se usazující zákal), který poskytuje přesná a opakovatelná měření pro rychle sedimentující vzorky. Jedinečný algo- rytmus vypočítává zákal ze série automatického snímání a eliminuje zbytečná měření a odhady.

Přístroj je schopen zaznamenat a uložit až 500 naměřených hodnot, které jsou poté ihned k dispozici v přístroji. Uložené informace zahrnují: datum a čas, identifikaci obsluhy, režim načítání, identifikaci vzorku, číslo vzorku, jednotky, čas kalibrace, stav kalibrace, chybová hlášení a výsledek. Přístroj 2100Q plní soulad s normou EPA metoda 180.1. Přístroj 2100Q IS plní soulad s normou ISO 7027. Jako světelný zdroj je u přístroje 2100Q použita wolframová žárovka, u přístroje 2100Q IS je zdrojem LED dioda při 860 nm. (Hach Lange, 2012)



Obr. 13 – Přenosný turbidimetr Hach Lange 2100Q IS (Hach Lange, 2012)

Tabulka 9 - Parametry přenosných turbidimetrů

	<i>WTW pHotoFlex Turb</i>	<i>Hach Lange 2100 Q IS</i>
Princip měření:	Nefelometrické (90°)	Nefelometrické (90°)
Měřicí módy:	Zákal, pH	Zákal
Rozsah:	0 - 1 100 NTU	0 - 1 000 NTU
Přesnost:	+/-0,01 NTU nebo +/- 2% z měř. Hodnoty	+/-2% z naměřené hodnoty plus rozptýlené světlo v rozsahu 0 -1 000 NTU
Rozlišení:	0,01 NTU	0,01 NTU v nejnižším rozsahu
Zdroj světla:	infračervený zdroj	LED dioda
Odezva:	-	-
Displej:	LCD	LCD
Objem vzorku:	-	15 ml
Kyvety:	Kulaté s ryskou, 28 mm Ø nebo 16 mm Ø	25 mm x 60 mm kulaté
Provozní podmínky:	- 5 °C až 100°C	0 - 50°C
Napájení:	4x AA baterie (3000 měření)	4x AA baterie, napájecí modul 110 - 230 V
Konstrukce:	plast	plast, IP 67
Hmotnost:	700 g	527 g

2.4.3 Online turbidimetry

Online turbidimetry se používají pro bezkontaktní měření ve volně padajícím proudu vody, v bypassu pomocí sondy nebo na filtrech laserovým turbidimetrem.

Charakteristickou vlastností a výhodou těchto přístrojů je online měření, kdy se měří zákal nezávisle na průtoku. To znamená, že v reálném čase nám jsou schopny změřit hodnoty zákalu například ve vodovodní síti bez nutnosti osobního odběru vzorku a výsledné informace poslat například na dispečink. Aplikace této technologie je vhodná pro měření:

- Zákalu v surové vodě
- Monitoring a řízení flokulace
- Řízení a monitoring filtrace
- Řízení praní filtrů
- Monitoring vodojemů a vodovodních sítí
- Procesy úpravy vody, pitné vody a vody pro průmyslové aplikace

Výhodou bezkontaktního měření je eliminace problémů se znečištěním optických okének, ve kterých jsou snímače a které bývá důsledkem usazování nerozpuštěných látek a chemických sloučenin. Nároky na údržbu jsou tak sníženy na minimum. Jelikož jsou falešné odrazy světla významně redukovány, je možné měřit precizně i extrémně nízké množství zákalu, dokonce pod 0,01 ZF.

Sigrist WTM 500

Vzorek vody vstupuje do nádrže přístroje, kde se udržuje stálý průtok vody. Protože má nádrž přepadovou hranu, jsou eliminovány změny tlaku na vstupu a vzorek vody přepadává přes hranu do odpadní části, přičemž vytváří souvislý a konstantní proud vody. V nádrži před přepadem se odstraňují i případné bublinky vzduchu, takže měření není těmito bublinkami vzduchu ovlivněné. Paprsek infračerveného světla prochází přes vzorek vody v ose proudění při přesně určené vlnové délce. Fotodetektory měří intenzitu rozptýleného světla pod 90° úhlem v dvou různých rovinách. Tato konfigurace kompenzuje efekt vlivu zabarvení vody na výsledek měření. Možný posun paprsku světla nebo zeslabení intenzity lampy vlivem času je eliminováno třetím fotodetektozem, který kontinuálně měří intenzitu zdroje světla.

Přístroj WTM 500 je kalibrován s formazínem na jednotky ZF. Kalibrace uživatelem se kontroluje automaticky v nastavitelných intervalech anebo manuálně. Na kontrolu nastavení uživatelem je zabudovaný skleněný standard, na který se optika manuálně anebo automaticky natačí a měří intenzitu rozptylu světla. Přesnost a dlouhá stabilita měření zákaloměru umožňuje měření a kalibraci bez nutnosti přerušení procesu. Fotometr WTM 500 je ovládaný pomocí vyhodnocovače SIREL. Vyhodnocovač má zabudovaný dvouřádkový LCD displej a umožňuje jednoduchý přístup do nastavení přístroje, konfigurace a údržby zákaloměru. Měření pracuje na principu odrazu světla pod úhlem 90°. (Technoprocur, 2011)



Obr. 14 - Online turbidimetr Sigrist WTM 500 (Technoprocur, 2011)

Hach Lange 1720E SC

Jedná se o spolehlivý analyzátor zákalu do by-passu, který se kalibruje na primární formalínové standardy StablCal. Hach Lange 1720E SC je nejrozšířenější procesní turbidimetr ve vodárenství v ČR. Je oblíbený díky dobré citlivosti na malé částice (zdroj bílého světla) a kvalitnímu odstranění bublinek. Vhodné pro aplikace: surová voda, za pískovými filtry, vstupní kontrola pitné vody, vodojemy. Přístroj je schopen analyzovat nízký zákal díky optimalizované technologii čidla. Díky měřicímu rozsahu od 0,0001 do 100 NTU se čidlo hodí k měření čirých a mírně zakalených vod. (Hach Lange, 2012)



Obr. 15 - online turbidimetr Hach Lange 1720E SC (Hach Lange, 2012)

Tabulka 3 - Parametry online turbidimetrů

	<i>Sigrist WTM 500</i>	<i>Hach Lange 1720E SC</i>
Princip měření:	ve volně padajícím proudu, nefelometrické, rozptýlení světla pod úhlem 90°	nefelometrické, rozptýlení světla pod úhlem 90°
Měřicí módy:	zákal	zákal
Rozsah:	8 volně nastavitelných: 0-0,1/ 0-0,3/ 0-1/ 0-3/ 0-10/ 0-30/ 0-100/ 0-500 FNU	0,0001 - 100 NTU
Přesnost:	-	+/- 0,0015 NTU nebo +/- 2% (0-10 NTU), +/- 5% (10-40 NTU), +/-10% (40-100 NTU)
Měřená vlnová délka:	880 nm	860 nm
Rozlišení:	0,001 FNU	0,0001 - 9,999 / 10,000-99,999
Zdroj světla:	infračervený zdroj	wolframová lampa
Odezva:	-	6s
Displej:	LCD	LCD
Průtok vzorku:	2,5 - 7 l/min	Min. 0,25 l/min, max. 0,75 l/min
Vstup, výstup vzorku:	hadice průměr 16/25 mm	Vstup: 1/4", Odtok: 1/2"
Provozní podmínky:	0°C - 40°C	+2°C až +50°C
Napájení:	85...264 V/ 4763 Hz	-
Konstrukce:	POM/PVC	Polystyren odolný proti poleptání

2.1 POUŽITÁ MĚŘICÍ TECHNIKA

Během měření v části případové studie byl použit turbidimetr firmy Hach Lange 2100Q IS. Přístroj pracuje na bázi analytické metody. Poměrové turbidimetrické měření využívá primární signál nefelometricky rozptýleného světla (90°) vůči signálu vysílaného rozptýleného světla. Tento dvou-detektorový optický systém kompenzuje barvu vzorku, kolísání světelného zdroje, rozptýlené světlo a zabezpečuje stabilní výkon a přesnost v širokém měřicím rozsahu v terénních podmínkách.

Přístroj 2100Q IS splňuje normu ISO 7027. Zdrojem světla je LED dioda emitující světlo o vlnové délce 860 nm. Jako detektor slouží v přístroji křemíková fotodioda.

Důležitou součástí, která předchází měření je kalibrace přístroje. Přístroj lze kalibrovat pro přesnější měření na několik úrovní:

- RapidCal™ kalibruje v jediném kroku pro záznam dle legislativních předpisů v nízkých úrovních od 0 – 40 ZF
- Kalibrace celého rozsahu od 0 – 1000 ZF
- Kalibrace dle stupně zakalení.

Pro nejlepší přesnost se doporučuje používat během kalibrace při všech odečtech stejnou kyvetu nebo čtyři kyvety s ověřenými shodnými optickými vlastnostmi. Kyveta se zasune do prostoru pro uložení kyvety tak, aby kosočtverec nebo orientační značka odpovídala vyvýšené orientační značce před prostorem pro uložení kyvety.

Před kalibrací by měl být každý standard rovnoměrně promíchán. Před zasunutím se doporučuje každý standard otočit opatrně dnem vzhůru.

Dvou- bodová kalibrace

Jako první se do přístroje zasune standard 20 ZF StablCal a uzavře se víko. Po stisknutí tlačítka „načítat“ se na displeji po chvíli objeví stabilizace a následně ukáže výsledek. Tento celý proces se opakuje ještě se standardem 100 ZF StablCal a následně se standardem 800 NTU StablCal. (Hach Lange, 2009)

Režimy měření

Normální

Normální režim načítá a průměruje tři načtené hodnoty. Výsledek se zobrazí po načítání na displeji.

Průměr signálu

Režim průměr signálu kompenzuje odchylky načítání způsobené průchodem částic ve vzorku přes dráhu světla. Když se signál zprůměrovává, na displeji se objeví ikona X-práh. Režim Průměr signálu měří 12 krát a začíná ukazovat průměr po třech načítání. Konečný výsledek je průměrem všech 12 načítání. (Hach Lange, 2009)

Rapidly Settling Turbidity

Režim Rapidly Settling je určen pro rychle se usazující zákal. Vypočítává a nepřetržitě upřesňuje načítání zákalu vzorku až do 95% intervalu spolehlivosti na základě akumulovaného trendu hodnot naměřených v reálném čase. Režim RST se nejlépe používá na vzorcích, které se rychle usazují, a jejichž hodnota se neustále mění. Načítání je založeno na správně připraveném vzorku, který je při zahájení homogenní. Obvykle se tento režim používá u vzorků, u kterých je hodnota zákalu větší než 20 ZF. Vzorek se musí důkladně promíchat otočením dnem vzhůru před vložením do měřidla. (Hach Lange, 2009)

Příprava kyvet se vzorkem před měřením

Kyvety se vzorkem a víčka musí být mimořádně čisté a nesmí být poškrábané. Před odebráním vzorku by se měl očistit vnější i vnitřní povrch omytím v čistícím prostředku na laboratorní sklo. Pokračuje se vícenásobným omytím v destilované vodě. Po důkladném očištění se na kyvetu nanese malá vrstva silikonového oleje, která se rovnoměrně rozetře speciálně dodávanou utěrkou.

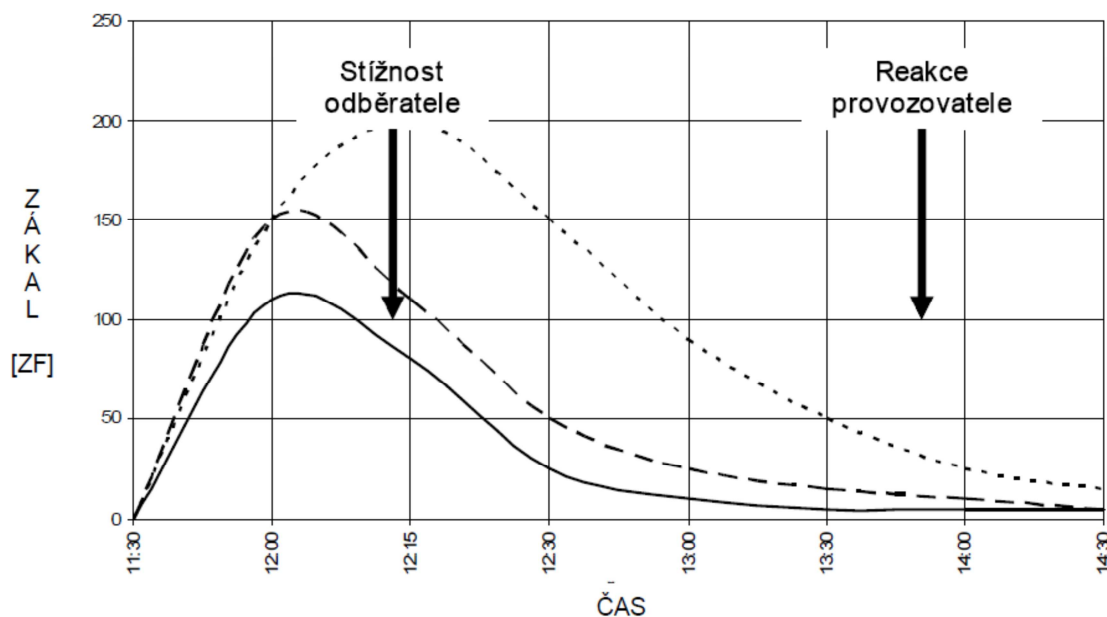
Drobné nedokonalosti nebo škrábance na povrchu kyvety způsobují zvyšování rozptylu světla. Pro zamaskování těchto nedokonalostí se používá nanášení tenké vrstvy silikonového oleje na vnější vrstvu kyvety.



Obr. 16 – Používaný turbidimetr Hach Lange 2100 Q IS s kyvetou (Hach Lange, 2009)

3 ZÁKAL VODY VE VODOVODNÍCH SÍTÍCH

K přímé konzumaci se spotřebuje jen cca 2 % celkového objemu odebrané vody a běžný odběratel si uvědomí její jakost a existenci vodárenského aparátu před svým kohoutkem pouze v okamžiku, kdy nastane nečekaná odstávka zásobování nebo se prudce zhorší kvalita vody, což bývá způsobeno nejčastěji zákalom. V případě stížnosti odběratele na zákalovou událost, přichází většinou reakce provozovatele pozdě. viz Obr. 17.



Obr. 17 - Typický průběh zákalové události v čase (Ručka a kol., 2007)

Zákal se ve vodovodním potrubí objevuje většinou nárazově ve formě tzv. zákalových událostí, které jsou iniciovány obvykle vnějším zásahem do systému, který vyvolá náhlou změnu hydraulických podmínek. Vlivem náhlých změn hydraulických podmínek v síti dochází k odtržení jemného sedimentu od stěn potrubí. Zabarvení pitné vody je spojeno s pohybem usazených částic skrz vodovodní potrubí. (Ručka a kol., 2007) Částice vyskytující se v potrubí mají různou velikost, hustotu a původ. Tyto částice se do vodovodní sítě mohou dostat jako zbytková koncentrace anorganických a organických částic z nedostatečně nebo nevhodně upravené surové vody nebo mohou být pozůstatkem látek používaných během úpravy pitné vody, jako je například písek z pomalé filtrace.

Základními podmínkami vzniku zákalové události jsou:

- Přítomnost jemného suspendovaného nebo usazeného materiálu v potrubí;
- Náhlá změna hydraulických poměrů v potrubí;

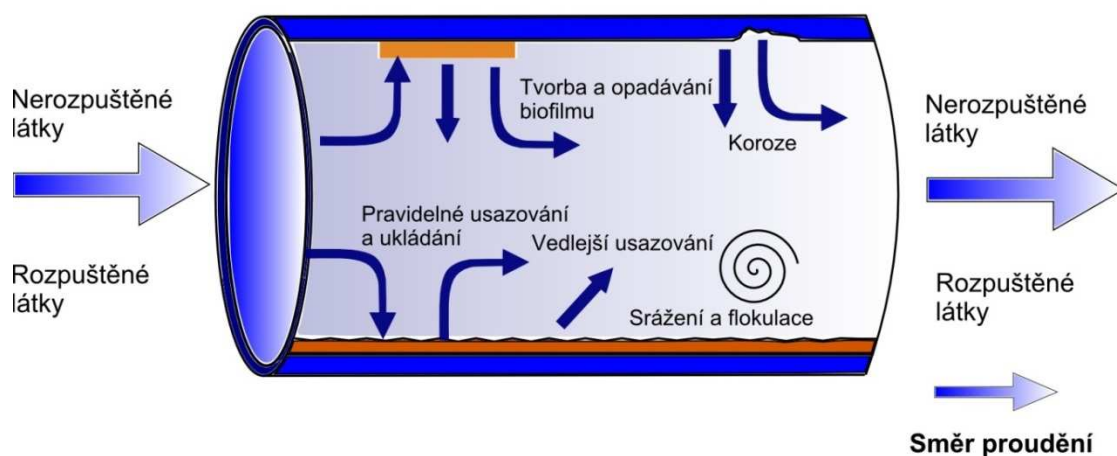
3.1 VZNIK ZÁKALU VE VODOVODNÍ SÍTI

Jemný sediment v potrubí vzniká a akumuluje se převážně z těchto důvodů (viz. Obr. 18):

- Korozi kovových povrchů;
- Rozpadem a opadáváním vytvořených biofilmů;
- Doběhem chemických procesů z úpravny vody (srážení a flokulace);
- Rozvíření jemně usazených materiálů z vnějšího prostředí při opravách nebo z důvodu netěsností potrubí (podtlak, přísátí)
- Rozvíření jemně usazených sedimentů přítomných v dopravované vodě z důvodu nedostatečné úpravy.

V důsledku nedostatečného proudění vody se tyto částice usazují ve vodojemu nebo se usazují až v potrubí, na jehož stěnách tvoří vrstvu jemných sedimentů.

Ve vodovodním potrubí mohou být jemné sedimenty přítomny i při správném způsobu provozování a kvalitní úpravě vody, což může být způsobeno zanesením jemných částic do sítě někdy dříve v minulosti. Velikost částic, které se v distribuční síti vyskytují závisí na použité technologii úpravy vody. Mikrofiltrací se odstraní částice až velikosti okolo $1 \cdot 10^{-7}$ m, reversní osmózou zrna o průměru $< 1 \cdot 10^{-9}$ m. V ČR nejběžněji používanou otevřenou nebo tlakovou filtrací lze odstranit částice do průměru $1 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-5}$ m. Převládající velikost částic zákalu v pitné vodě je $< 5 \cdot 10^{-5}$ m s průměrným zrnem $1 \cdot 10^{-5}$ m a také s podstatným množstvím částic pod $5 \cdot 10^{-6}$ m. Přítomnost, objem a tloušťku vrstvy jemných sedimentů v potrubí nelze v provozu prakticky nijak kvantitativně měřit. Provozní praxe vychází z počtu stížností odběratelů na kalnou vodu, kterým přizpůsobují periodicitu odkalování. (Ručka, 2007)



Obr. 18 - Proces transportu a usazování částic ve vodovodním potrubí (Vreeburg, 2007)



Obr. 19 - Akumulovaný sediment na stěnách ocelového potrubí

Celkově lze konstatovat, že mechanismy vedoucí k zákalové události jsou složité a v mnoha případech komplikované. Zákalová událost nastane, když se do vody uvolní materiál přisedlý na stěnách a dně potrubí viz. Obr. 19. K tomu dojde při zvýšení průtoku, což má za následek zvýšení hodnoty smykového napětí u stěn potrubí, narušení rovnováhy doposud soudržných vrstev sedimentů, jejich rozrušení a uvolnění do proudu vody. Intenzita zákalové události bude záviset na rozdílu smykového napětí dlouhodobě před incidentem a během něj.

Základní faktory ovlivňující potenciální vznik zákalu lze tedy rozdělit na korozi kovových povrchů potrubí, hydraulické poměry ve vodovodní síti, kvalitu dopravované vody a celkový technický stav vodovodní sítě.

3.1.1 Koroze

S korozi se můžeme setkat u vodovodních potrubí, které jsou provedeny z kovových materiálů a nebo do nich z kovových potrubí přitéká voda, která by mohla unášet suspendované částice koroze kovů. Zejména se jedná o potrubí z oceli s neupraveným vnitřním povrchem v provozu >20 let bez údržby a oprav nebo s úpravou povrchu (pozinkování, vystýlka) s dobou provozu více než 60 let. Ke korozi výrazně přispívá dopravovaná voda nevhodných chemických vlastností ($\text{pH} < 6,5$, nebo $\text{Ca} + \text{Mg} < 1,5 \text{ mmol/l}$). (Ručka a kol., 2007)

3.1.2 Hydraulické poměry v síti

Z důvodu nedostatečné rychlosti proudění může docházet k výraznému ulpívání jemných suspendovaných částic na stěnách potrubí po celém jeho obvodu. K tomuto jevu dochází již při rychlostech pod $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Ručka, 2009). Mocnost usazených sedimentů je limitně dána dosažením rovnováhy mezi tečným napětím proudící kapaliny a kohezními silami přisedlého materiálu. V případě dlouhodobě nízkých rychlostí $\leq 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo dokonce tam, kde voda stagnuje, převažují gravitační síly, dochází k výraznému akumulování jemného sedimentu a může na stěnách potrubí vznikat biofilm. Lze říci, že limitující jsou pro mocnost usazené vrstvy maximální hodinové průtoky, které způsobují ztenčení vrstvy a mírnou resuspendaci materiálu. Z tohoto důvodu jsou problematické všechny úseky, kde se rychlost dlouhodobě vyskytuje menší než $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Většinou se

jedná o předimenzované úseky, konce potrubí, dlouhé přípojky nebo úseky delší dobu uzavřené z důvodu opravy.

3.1.3 Kvalita dopravované vody

Ohledně zdroji částic a růstu částic, je důležité pochopit hydraulické chování částic pohybující se v potrubí. Výzkum v Anglii prokázal opakované šíření jemných částic bez ohledu na podmínky v síti a zdroj vody. Ze získaných vzorků zakalené vody bylo zjištěno, že rozměr částic je převážně menší než 0,050 mm, s průměrnou velikostí kolem 0,010 mm a významným počtem částic v rozsahu velikosti 0,005 mm (Vreeburg, 2012). Je nepravděpodobné, že samotné gravitační usazování bude dostatečné pro akumulaci těchto částic od turbulentních sil vzniklých i při nejnižších průtocích v rámci vodovodní sítě. I nejnižší průtoky patrně stačí k překonání gravitačních usazovacích sil. Toto platí zejména pro nejmenší částice nalezené ve vzorku zakalené vody.

Typická velikost částic nalezených běžně ve vodovodním potrubí je mezi 1 až 25 μm . Hustotu těchto částic je obtížné přesně určit, ale je velmi pravděpodobné, že je velmi nízká, ať už se jedná o částice organického původu nebo hydroxidů železa. Dle Berlamonta se může hustota částic obsažených ve vodovodní síti pohybovat v rozmezí 1050 kg/m^3 až 2600 kg/m^3 . Nižší hodnoty představují organické částice a suspendované částice koroze kovů, vyšší hodnoty představuje například písek. (Vreeburg, 2012)

Z hlediska vzniku zákalu je v upravené vodě rozhodující obsah železa a manganu. V ČR je koncentrace Fe v pitné vodě limitována mezní hodnotou (MH) 0,2 mg/l , ale např. v UK jsou předepsány maximální koncentrace železa 0,1 mg/l , navrhována je dokonce hranice 0,05 mg/l . Přísnější limity jsou stanoveny s cílem omezit tvorbu železitých sedimentů v distribučních sítích. Jílovité koloidně dispergované anorganické látky mohou do vodovodní sítě vstupovat s podzemní vodou, která je čerpána z přetěžovaného podzemního zdroje a dochází u něj k sufozi. Hodnota zákalu u vody, která do sítě vstupuje by proto neměla rozhodně překročit mezní hodnotu zákalu 5 ZF. V případě poruchy funkce úpravní vody může mít voda nevhodné vlastnosti již na výstupu z úpravní vody. Například z filtrace, buď je nedostatečná nebo se do vody uvolní znečištění při praní, filtrační cyklus je příliš dlouhý nebo jsou užívány železité soli jako koagulanty a jejich zbytky jsou obsaženy v upravené vodě.

3.1.4 Údržba a technický stav vodovodní sítě

Stěžejní význam má pravidelné a správně prováděné odkalení vodovodních řadů. Tím se rozumí zvolit takový postup, aby byla dodržena následující tři pravidla:

- Čistá voda před,
- Správná rychlost proudění,
- Správná doba trvání odkalování.

Pozornost je třeba věnovat také čištění akumulačních nádrží vodojemů a čerpacích stanic, kde se může na jejich dně a stěnách tvořit biofilm a nános sedimentů, které se při rozvívání mohou s dopravovanou vodou dostávat do sítě. (Ručka a kol., 2007)

3.2 METODY MĚŘENÍ POTENCIÁLU VZNIKU ZÁKALU VE VODODNÍ SÍTI

Zakalení vody je definováno jako snížení průhlednosti vody nerozpuštěnými látkami. Čirotost vody je jedním ze základních požadavků na jakost pitné vody. Zákal vody je způsoben anorganickými nebo organickými jemně rozptýlenými látkami (zpravidla koloidně dispergovanými), které mohou být buď přirozeného, nebo antropogenního původu. Jde v případě vodovodního potrubí např. nejčastěji o jílové minerály, hydratované oxidy kovů (především železa a manganu), zcela ve výjimečných případech organické látky jako např. bakterie, plankton (řasy sinice), jemně dispergované zbytky těl rostlin a živočišných organismů. (Pitter, 1999)

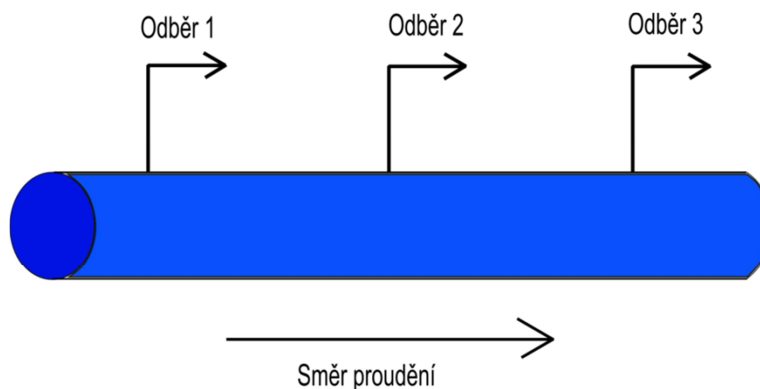
Jemné částice v potrubí při normálních poměrech se vyrovnávají s velmi nízkými koncentracemi a velmi zřídka vedou k přímým problémům. Nepřímé zákalové problémy způsobené resuspenzí akumulovaných částic by měli být studovány a měřen jejich vliv na zákal vody. Metody určené k měření lze rozdělit do těchto kategorií (Vreeburg, 2012):

- *Přímé metody*
Tato metoda analyzuje různé parametry. Přicházející a odcházející voda je přímo a on-line analyzována. Příkladem je kontinuální monitoring zákalu nebo měření koncentrace částic.
- *Efektivní metody*
Tyto metody měří a kvantifikují efekt dlouhodobých procesů ve vodovodní síti. Základním příkladem může být monitoring biofilmu a jeho růstu. V této kategorii je rozvinutá metoda Resuspension Potential Measurement (RPM, Měření potenciálu resuspenze)
- *Koncentrační metody*
Tyto metody slouží ke stanovení koncentrace částic obsažených v pitné vodě a k lepší analýze stanovení složení těchto částic.

3.2.1 Přímé metody

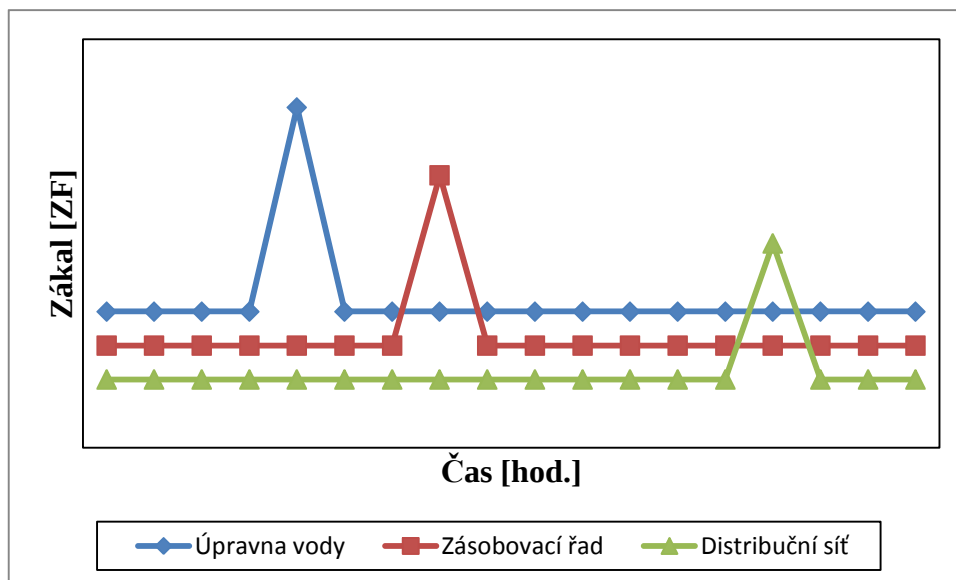
Vzhledem k procesům uvedených na Obr. 18, které se vyskytují ve vodovodní síti, se kvalita vody během přepravy vodovodní sítí mění. Změna kvality vody může být přímo měřena parametry, jako je zákal a obsah jemně suspendovaných částic. Během přepravy se v některých případech suspendované a koloidní částice usazují nebo naopak se částice do vody v potrubí dostávají z koroze kovových materiálů potrubí. Vzniká tedy rozdíl mezi příchozí a odchozí kvalitou vody v potrubí. Je tedy nutné tyto rozdíly sledovat a posuzovat.

Zjednodušeně lze říci, že se sleduje ve vodovodní síti vzorek vody, který s určitou naměřenou hodnotou zákalu opouští úpravnu vody. Toto trasování je nutné zejména u úpraven, kde se kvalita vody mění v různých ročních obdobích nebo v rámci dnů a hodin. Na Obr. 20 je znázorněno schéma průběžného monitorování kvality vody na vodovodní síti.



Obr. 20 - Schéma průběžného monitorování kvality vody

Modré potrubí znázorňuje vodovodní síť, na které je v různých místech sledována kvalita vody. První odběrné místo bývá většinou umístěno na potrubí vycházející z úpravně vody. Ostatní sledovaná místa jsou umístěna dále po směru proudu na vodovodní síti a zaznamenávají změny v kvalitě vody. Průběžné monitorování zákalu může odhalit ve vodovodní síti procesy uvedené na Obr. 18. Na Obr. 21 je znázorněn typický model šíření zákalu. V grafu jsou zaznamenány tři odběrná místa a to na úpravně vody, zásobovací řadu a distribuční síti. Jedná se o model, kdy dochází na výtoku z úpravně vody k zaznamenání větší hodnoty zákalu. Po určitém čase je dále na vodovodní síti zaznamenán zvýšený zákal, ale oproti předchozí hodnotě na úpravně se jedná o pokles zákalu způsobený postupným usazováním jemných suspendovaných částic na stěny potrubí.



Obr. 21 - Typický model průběžného monitorování zákalu

3.2.2 Efektivní metody

Výše zmíněné přímé metody určené ke stanovení změn kvality vody nám udávají jaké procesy se dějí ve vodovodní síti. Následkem těchto procesů, které probíhají ve

vodovodních sítích je akumulování nebo zvržení sedimentů, což zvyšuje riziko stížností. Účel efektivních metod je zaměřen na stanovení samotného zákalového rizika a určení potenciálu vzniku zákalu. Zákalová událost vede zákazníky ke stížnostem, které jsou často spojeny s hydraulickými událostmi, narušením běžného hydraulického stavu ve vodovodní síti. V mnoha případech je zřejmá souvislost s hydraulickými událostmi a detailní studie těchto událostí většinou odhalují základní hydraulické narušení poměrů v potrubí. Typickými hydraulickými incidenty je únik vody do vnějšího prostředí během poruchy na potrubí, použití hydrantu nebo uzavření uzávěrů v souvislosti s údržbou. Všechny tyto jevy mají za výsledek změnu průtoku a rychlosti v potrubí. (Vreeburg, 2007).

Mezi efektivní metody, které se obvykle používají, patří metoda RPM která bude podrobněji popsána dále.

Metoda potenciální resuspenze RPM

Metoda potenciální resuspenze je metoda používaná v zahraničí, konkrétně velmi rozvinutá v Holandsku. Metoda je vyvinutá za účelem stanovení schopnosti pohybu částic v potrubí. Princip metody vychází z jevu resuspenze částic, která je způsobena hydraulickými změnami v potrubí. Tato metoda je zaměřená především na přítomnost a pohyb usazenin prostřednictvím vodovodní sítě. Jako příklad zásahu do hydraulických poměrů může být čištění potrubí, porucha na vodovodním potrubí nebo výjimečný odběr na požárním hydrantu. Metoda je určena k aplikaci pro distribuční vodovody s typicky malým průměrem potrubí v rozmezí přibližně 50 až 200 mm. Většina potrubí by se v praxi měla pohybovat v průměru 100 až 125 mm.

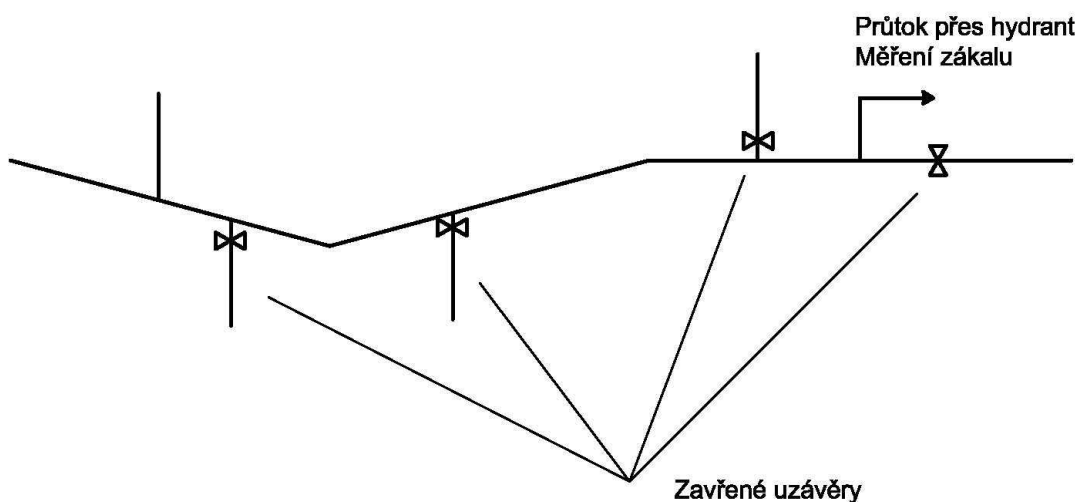
Obecně lze říci, že je metoda RPM založena na kontrolovaném zvyšování rychlosti v potrubí. Nárůst zákalu, který se po dobu zvyšování rychlosti proudění měří je následně převeden do koeficientu RPM. Nárůst rychlosti je stanoven na $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a je připočten k maximální rychlosti vyskytující se v potrubí. Tento nárůst rychlosti byl stanoven empiricky (Vreeburg, 2004) a je optimální rychlostí, kdy začíná docházet ke zvýšení hodnoty smykového napětí u stěn potrubí, narušení rovnováhy doposud soudržných vrstev sedimentů, jejich rozrušení a uvolnění do proudu vody. Hlavním rozdílem v porovnání nárůstu rychlosti během poruchy nebo při použití hydrantu během požáru je, že změna rychlosti při této metodě je pozvolná. V případě použití hydrantu během požáru může rychlost v potrubí o průměru 100 mm narůst nejméně o $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zvýšené smykové napětí způsobené nárůstem rychlosti o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vyvolává v potrubí pohyb usazených částic, které ovlivňují zákal vody. Metodu RPM je vhodné aplikovat pro potrubí o průměru 50 – 200 mm, z důvodu menšího rozdílu smykového napětí způsobeného jednotnou rychlostí. Velikost zákalu je během aplikace metody měřena a převedena do hodnotících koeficientů pro resuspenzní potenciál. Tento resuspenzní potenciál má zřejmou souvislost s aktuálním zákalovým rizikem.

Obecná pravidla pro použití metody potenciální resuspenze jsou:

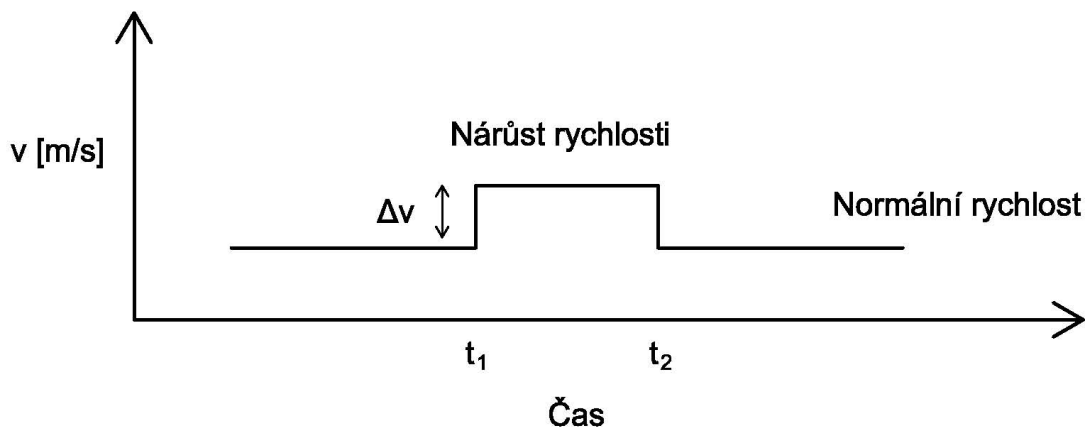
- Je nutné izolovat potrubí, pro které bude provedena analýza vzniku zákalu metodou potenciální resuspenze. Izolovaná délka potrubí by měla dosáhnout alespoň délky 315 m, v lepším případě více. V tomto izolovaném úseku potrubí vyvoláme nárůst rychlosti o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Otevřením požárního hydrantu dosáhneme vyvolání rychlosti tak, aby přesáhla o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ rychlost maximální po dobu 15 min. Poté se zredukuje průtok na normální hodnotu.

- Monitoring zákalu probíhá po dobu 15 minut během zvýšené rychlosti a i po uzavření hydrantu, dokud se nevrátí hodnota zákalu na běžnou úroveň. (Vreeburg, 2004)

Princip této metody je schématicky znázorněn na Obr. 22 a Obr. 23 na části vodovodního potrubí, kde jsou uzavřeny uzavěry a je otevřený hydrant přes který je vyvolána zvýšená průtočná rychlost a měření zákal.



Obr. 22 - Princip metody potenciální resuspenze na části vodovodního potrubí



Obr. 23 - Nárůst rychlosti oproti původní rychlosti po určitou dobu

Výsledné hodnoty získané z metody RPM jsou hodnoty zákalu odpovídající stavu potrubí. Typický příklad je znázorněn na Obr. 24: Průběh křivky je rozdělen do čtyř oblastí:

- Základní úroveň zákalu.
- Počáteční zvýšení zákalu na začátku hydraulických změn v potrubí.
- Rozmach zákalu během hydraulických změn v potrubí.
- Usazovací čas a navrácení zákalu na původní úroveň.

Základní úroveň zákalu

V potrubí se před procedurou, kdy dochází ke změně hydraulických poměrů, nachází určitá základní úroveň zákalu. Tato základní úroveň zákalu může být způsobena zdrojem vody a může nám napovědět o původu a zdroji zákalu v potrubí. Původní úroveň zákalu slouží i k rozhodnutí, kdy došlo k znovusazení zvržených částic do původního stavu po zvýšení rychlosti, která se vrátila do normálních podmínek.

Počáteční zvýšení zákalu na začátku hydraulických změn v potrubí

Ihned po zvýšení rychlosti a hydraulickém rušení vzroste úroveň zákalu na určitou hranici. Tento nárůst ukazuje okamžitý pohyb usazenin v potrubí s výsledným dosažením maximálního vrcholu zákalu. Hodnota zákalu dosažená v této fázi je maximální.

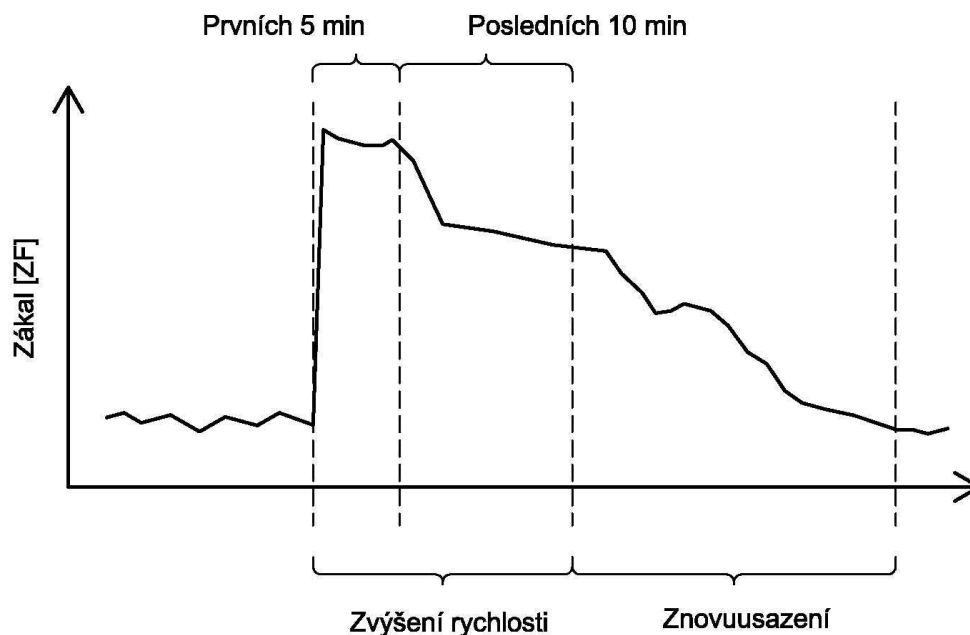
Rozmach zákalu během hydraulických změn v potrubí

Hydraulické rušení probíhající 15 minut umožňuje zákalu dostat se na určitou stabilní úroveň. Pokud zákal zůstane na vyšších hodnotách blízko první pětiminutové úrovně, pak je míra usazenin značná a složení zákalu je homogenní. Tento průběh indikuje vysoké riziko zákalové události. V mnoha případech ale během 15 minutového hydraulického rušení zákal postupně klesá. Toto mohou vysvětlit tři jevy:

- V potrubí jsou přítomny relativně malé částice těžších usazenin. Vyvolaný silnější průtok podporuje počáteční zvržení těžších usazenin.
- Špatně izolované nebo kratší úseky potrubí. Pokud je úsek kratší než 315 metrů, dochází k odčerpání vody ze směru, kde již odkalování proběhlo.
- Nedostatečná rychlost. Nárůst rychlosti je menší než $0,35 \text{ m.s}^{-1}$, z toho důvodu nedojde k dostatečnému zvýšení smykového napětí a rozrušení vrstvy sedimentu do proudu vody.

Usazovací čas a navrácení zákalu na původní úroveň

Po uzavření hydrantu trvá určitou dobu, než se zákal ustálí na původní úrovni. Dostatek času je důležitý pro vyvarování se zákalové události nebo dokonce stížnosti zákazníků. Pokud zákal zůstane vysoký po delší dobu, vzniká riziko zaznamenání zákalu na kohoutku zákazníky a případné stížnosti.



Obr. 24 - Typický průběh křivky zákalu během metody RPM rozdělený na čtyři oblasti

V závislosti na průběhu křivky znázorněné na Obr. 24 je metoda RPM založena na hodnocení pěti ukazatelů zákalové stopy:

- Absolutní maximální hodnoty zákalu během prvních pěti minut hydraulického rušení;
- Průměrné hodnoty zákalu během prvních pěti minut hydraulického rušení;
- Absolutní maximální hodnoty zákalu během posledních deseti minut hydraulického rušení;
- Průměrné hodnoty zákalu během posledních deseti minut hydraulického rušení;
- Čas potřebný k ustálení zákalu do původních hodnot.

Každý ukazatel je hodnocen na stupnici od 0 do 3, kde je 0 nejnižší a také nejlepší hodnocení a 3 je nejvyšší a také nejhorší hodnocení. Nejnižší hodnota je ekvivalentem k situaci, kde není potenciální vznik resuspenze a zákalu, nejvyšší hodnota je rovna situaci, kdy je výrazné riziko vzniku a šíření zákalu. Následující Tabulka 10 je stejná pro všechny úseky dané oblasti.

Tabulka 10 - Příklad hodnocení metody RPM pro zjištění potenciálního výskytu zákalu. Hodnocení pěti ukazatelů čtyřmi hodnotami.

	0	1	2	3
Absolutní maximum v prvních 5 min	<0,3 ZF	0,3-1,0 ZF	1,0-2,4 ZF	>2,4 ZF
Průměr v prvních 5 min	<0,3 ZF	0,3-1,0 ZF	1,0-2,4 ZF	>2,4 ZF
Absolutní maximum v posledních 10 min	<0,3 ZF	0,3-1,0 ZF	1,0-2,4 ZF	>2,4 ZF
Průměr v posledních 5 min	<0,3 ZF	0,3-1,0 ZF	1,0-2,4 ZF	>2,4 ZF
Potřebný čas k ustálení	< 5 min	5-15 min	15-60 min	>60 min

Tuto tabulku lze měnit pro každou oblast. Rozsah hodnot se přizpůsobí v závislosti na použitém turbidimetru, na místě měření a účelu měření. Tabulku lze modifikovat i pro případ sestavení odkalovacího plánu, kdy provozovatel hledá úseky s enormním výskytem potenciálního zákalu a s urgentní nutností odkalení. V tomto případě může tabulka vypadat následovně (viz Tabulka 11)

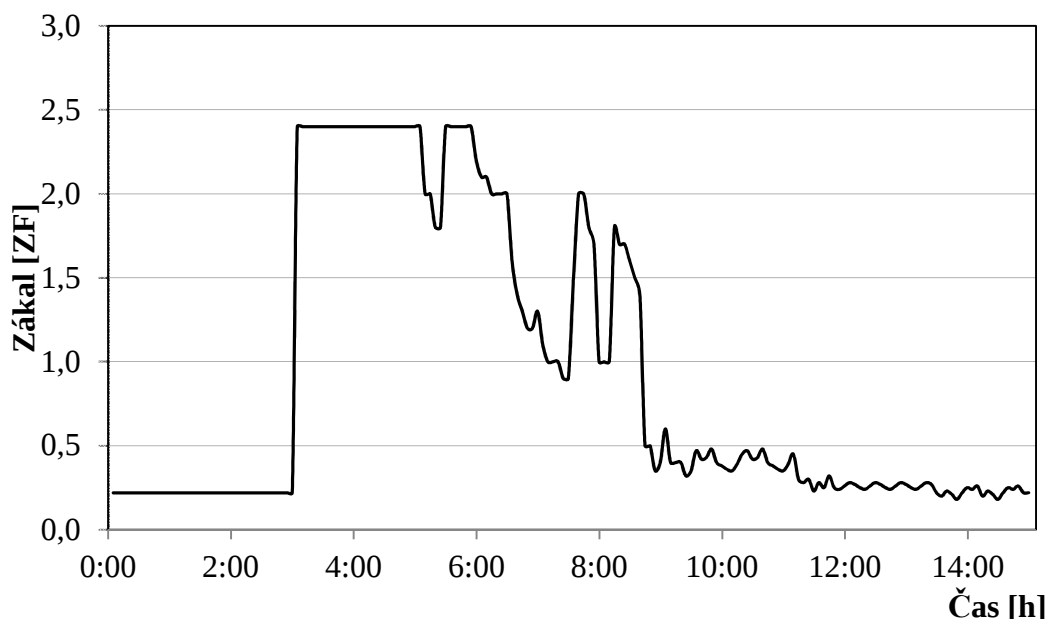
Tabulka 11 - Příklad hodnocení metody RPM pro určení optimálního úseku potrubí na odkalení

	0	1	2	3
Absolutní maximum v prvních 5 min	<5 ZF	5-10 ZF	10-40 ZF	>40 ZF
Průměr v prvních 5 min	<5 ZF	5-10 ZF	10-40 ZF	>40 ZF
Absolutní maximum v posledních 10 min	<5 ZF	5-10 ZF	10-40 ZF	>40 ZF
Průměr v posledních 5 min	<5 ZF	5-10 ZF	10-40 ZF	>40 ZF
Čas	< 5 min	5-15 min	15-60 min	>60 min

Turbidimetry měří na různém principu, starší modely mohou pro stejnou zákalovou událost ukazovat jiné hodnoty zákalu. Hodnotící kritéria lze přizpůsobit vybavení a požadavkům jednotlivých vodárenských společností.

Typický průběh hodnocení RPM

Na Obr. 25 je znázorněn příklad RPM s maximální velikostí zákalu 2,4 ZF, vzorkovací frekvence jsou dvě minuty. K ohodnocení potenciálního vzniku zákalu bude brána Tabulka 10. Základní zákal je konstantní a poměrně nízký na úrovni 0,22 ZF. Nárůst rychlosti probíhá od 3:00 do 3:15. Během prvních 5 minut a následujících 10 minut můžeme vidět hodnoty vystupující vysoko nad maximum 2,4 ZF. To vede k výsledku, že první 4 položky jsou ohodnoceny maximální hodnotou, 3 body. Čas ustálení je několik hodin, což opět vede k ohodnocení posledního ukazatele hodnotou nejhorší, tj. 3 body. Celkový součet skóre tedy činí 15 bodů. Přes počáteční skutečnost, že původní hodnota zákalu v tomto úseku byla jen 0,22 ZF, vyplývá, že tento úsek obsahuje vysokou míru zákalu usazeného na stěny potrubí, který se i při mírnějších hydraulických změnách od stěn odtrhává do proudu vody.



Obr. 25 - Příklad zákalu v závislosti na čase vyvolaného metodou RPM

Na obr. 25 je zobrazena křivka zákalu vyvolána metodou RPM. Maximální mezní hodnota je nastavena na 2,4 ZF a riziko potenciálního výskytu zákalu je 15 bodů. Nárůst rychlosti proudění v potrubí proběhl v čase 3:00 – 3:15.

Metoda RPM je vhodná pro vyhodnocení potenciálního vzniku zákalu. Dokáže určit, v jakých úsecích vodovodního potrubí se vyskytuje sedimentovaný zákal na stěnách potrubí.

3.2.3 Koncentrační metody

V této části krátce popíši některé metody za účelem zjištění koncentrace zákalu. Rozdíl ve vodovodním potrubí mezi úrovní příchozích a odchozích částic je popsán v předchozí kapitole. Pro posouzení koncentrace zákalu je nutné zjistit objemové a chemické vlastnosti částic vyskytujících se v zákalu. Dále popíši dvě metody používané k určení koncentrace zákalu a to TILVS (Time-Integrated Large Volume Sampling) a Homeflow.

TILVS (Time-Integrated Large Volume Sampling)

Metoda TILVS funguje na principu dávkování malého průtoku dávkovacím čerpadlem na filtrační membránu. Díky kontinuálnímu průtoku je možné testovat vzorky větších objemů s menšími koncentracemi. Čerpadlo pod tlakem čerpá vodu na membránu, která zachycuje zákal. Průtok se může pohybovat od 0,5 – 4,0 l/hod s celkovou dobou provozu 19 – 72 hod. v závislosti na obsahu zákalu. Průtok by měl být zvolen tak, aby nedocházelo během 24 hod. pod tlakem 10 barů k ucpání membránového filtru. Velikost pórů na membránových filtrech se používá 0,45 – 1,2 μm a jako materiál se používá acetát celulózy. Filtrační membrány se před měřením oplachují v demineralizované vodě a suší se při 105°C. Veškeré sklo a plast, který přijde do styku s vodou je ošetřen před použitím roztokem naředěné 1:10 kyseliny dusičné. (Vreeburg, 2007)



Obr. 26 - Jednotka TILVS. Na levé straně obrázku je čerpadlo a na pravé straně membránová filtrační jednotka (Vreeburg, 2007)

Homeflow

Další experimentální koncentrační technika se nazývá Homeflow, vyvinutý Kiwa Water Research. Na obr. 27 je zobrazeno zařízení. Původně bylo toto zařízení vyvinuto pro účely biologické analýzy ukazatelů pitné vody. Použitá čerpadla mají minimální vliv na turbulence vody, z čehož vyplývá, že vliv turbulencí na zákal je opravdu malý. Přístroj je založen na podobném principu, jako mechanismy určené k dialýze ledvin, kdy dochází k proudění přes membránu.



Obr. 27 -Přístroj na měření koncentrace zákalu Homeflow (Vreeburg, 2007)

Přístroj se skládá z nerezové ocelové recirkulační nádoby, do které se přivádí čerpadlem voda. Průtok je řízen plovákem osazeným v nádobě. V nádobě se nachází membrána, přes kterou proudí voda. Průtok přes filtr je omezen na 0,8 – 0,9 l/hod.

Koncentrovaný vzorek na membráně je vysušen při teplotě 105°C. Zbytek analýzy probíhá analogicky podle metody TILVS. (Vreeburg, 2007)

Je nutno zdůraznit, že metody jako TILVS a Homeflow jsou stále ve vývoji a do budoucna je potřeba techniku dále rozvinout. Základem by měla být komplexní databáze s příslušnými hodnotami sloužící k lepší interpretaci výsledků.

3.3 NEJČASTĚJŠÍ PRVKY ZPŮSOBUJÍCÍ ZÁKAL VE VODOVODNÍM POTRUBÍ

Zákal ve vodě je způsoben suspendovanými nebo koloidními částicemi, které brání ve vodě propustnosti světelných paprsků. To může být způsobeno organickými, anorganickými částicemi nebo kombinací obou. Mikroorganismy (bakterie, viry a prvoci) jsou obvykle spojovány s mikrobiálně kontaminovanou vodou. Zákal v některých podzemních zdrojích vod je důsledkem vysokého obsahu jílu, kříd nebo srážení redukováného železa a dalších oxidů v okamžiku, kdy se anaerobní voda čerpá na povrch a dojde do styku s kyslíkem. V tomto případě se podzemní voda provzdušní a dojde k oxidaci železa dvojmocného na železo trojmocné. V distribučním systému může dojít k zákalové události v důsledku narušení hydraulického režimu, což má za následek rozvříení sedimentů a biofilmů usazených na stěnách potrubí, ale i vniknutí vně znečištěné vody dovnitř distribučního systému.

Kromě toho může zákal vážně narušit účinnost desinfekce poskytnutím ochrany organismům. Mnoho úsilí je tedy při úpravě vody věnováno odstranění částic zákalu před desinfekcí. Nejedná se pouze o zvýšení účinnosti desinfekce chemickými desinfekčními přípravky, jako jsou chlor a ozon, ale je základním krokem pro zvýšení efektivity fyzikálních metod desinfekce, jako je UV záření, protože propustnost světelných paprsků je narušena částicemi (World Health Organization, 2011).

Základními prvky, které nejčastěji mohou přímo ovlivňovat zákal a vyskytují se v určitých případech ve vodovodním potrubí (v závislosti na zdroji a materiálu vodovodního potrubí) je železo, mangan, hliník a O_2 .

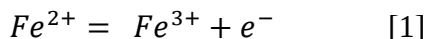
3.3.1 Železo

Železo se do vodovodního potrubí může dostat dvěma způsoby a to ze zdroje upravované vody (zejména podzemní) a korozí kovových materiálů.

V případě anaerobních podzemních vod, jako zdroje surové vody mohou tyto vody obsahovat zvýšené koncentrace železa až několik miligramů na litr, aniž by bylo pozorovatelné nějaké zakalení při čerpání surové vody do úpravný. V bezkyslíkatém prostředí, které je obvyklé pro podzemní vody je železo stále v oxidačním stupni II a vyskytuje se v železnatých sloučeninách. V rozpustné formě se vyskytuje jako železnaté ionty Fe^{2+} . K málo rozpustným sloučeninám patří hydroxid železnatý $Fe(OH)_2$ a uhličitán železnatý $FeCO_3$. (Malá, J. Malý J., 2006) O rozpustnosti železnatých sloučenin rozhoduje především pH prostředí.

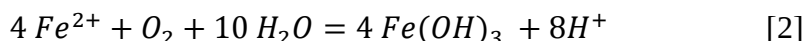
Při vysokém pH dochází k částečnému rozpouštění hydroxidu železnatého za tvorby hydrokomplexu, a proto se od $pH > 12$ koncentrace Fe^{2+} v roztoku s růstem pH zvyšuje. (Malá, J. Malý J., 2006)

Železo v oxidačním stupni II může být oxidováno na železo v oxidačním stupni III a naopak (Malá, J. Malý J., 2006):



O tom, kterým směrem bude oxidačně-redukční děj probíhat, rozhoduje přítomnost oxidačních látek (schopných přijímat elektrony) nebo redukčních látek schopných elektrony uvolňovat.

Ve vodárenské praxi se zdrojem podzemní vody se požaduje převedení Fe^{II} na Fe^{III} , čehož lze dosáhnout působením oxidačními látkami, jako je molekulární (vzdušný) kyslík, chlor, ozon, peroxid vodíku, manganistan draselný apod. Oxidaci Fe^{II} vzdušným kyslíkem, popisuje souhrnná rovnice (Malá, J. Malý J., 2006):



Principem oxidačního procesu je tedy oxidace Fe^{II} na Fe^{III} a následná hydrolyza železitých solí na málo rozpustný hydroxid železitý (viz. rovnice 2). Hydroxid železitý se poté odstraní filtrací případně předřazenou sedimentací.

Ve vodách obsahující rozpouštěný kyslík je nejstabilnější formou železo v oxidačním stupni III. Železité soli hydrolyzují za vzniku hydroxidu železitého podle zjednodušené rovnice (Malá, 2005):



V pitné vodě je koncentrace železa limitována mezní hodnotou 0,2 mg/l jednak z důvodu chuťových, ale zejména pro nebezpečí ucpání vodovodního potrubí, i proto že vyloučené železo ve formě suspenze hydroxidu železitého dává vodě hnědé zbarvení. I nízké koncentrace Fe ve vodě mohou být příčinou nadměrného rozvoje železitých bakterií, které jsou schopny využívat energii uvolněnou oxidací Fe^{II} , a to za podmínek, při nichž oxidace molekulárním kyslíkem neprobíhá nebo probíhá, ale jen velice pomalu. Železité bakterie, v nichž se ukládá produkt oxidace, jímž je $Fe(OH)_3$, ucpávají potrubí a způsobují zákal. (Malá, J. Malý J., 2006)

Koroze je u kovových vodovodních potrubí hlavní příčinou vyšších koncentrací železa. Koroze je způsobena agresivitou vody, která je ovlivněna obsahem kyslíku i dalších agresivních plynů, množstvím a typem rozpuštěných solí, přítomností organických látek a mikroorganismů, pH, teplotou, rychlostí proudění a obsahem pevných částic.

Agresivita pitné vody je z velké části závislá na složení přírodní vody, ze které je upravena. Pitná voda by měla mít rovnovážné složení, obsah solí 250 až 350 $mg \cdot l^{-1}$ a obsah chloridů do 20 $mg \cdot l^{-1}$. (Novák, 2010) V rozvodech pitné vody vznikají často objemné korozní produkty železa a vzniká výrazné poškození vnitřních stěn kovového potrubí viz. Obr. 28.

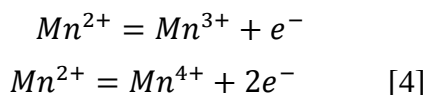


Obr. 28 -Na levém obrázku je zachycena koroze ocelového potrubí s korozními produkty, na pravém obrázku je znázorněno totéž ocelové potrubí s výrazným poškozením povrchu po odstranění korozních produktů. (Novák, 2010)

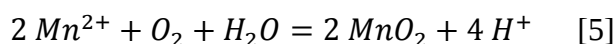
Sloučeniny železa nejsou pro zdraví člověka škodlivé, ale vytvářejí negativní technologický a organoleptický problém. Z hlediska technického se jedná o vznik řady poruch (inkrustace) na zařízení a potrubí v důsledku jejich zanášení a ucpávání sraženinami železa a manganu po oxidaci jejich primární dvoumocné formy.

3.3.2 Mangan

Mangan doprovází v přírodě obvykle železo. V přírodních vodách se vyskytuje mangan ve sloučeninách s oxidačním stupněm II, III a IV. V povrchových vodách je zpravidla obsažen v koncentracích menších $0,1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. V podzemní vodě se mangan vyskytuje v oxidačním stupni II. Dále se mangan Mn^{2+} vyskytuje ve formě manganatých sloučenin, mezi které patří $\text{Mn}(\text{OH})_2$ a MnCO_3 . Forma výskytu manganatých sloučenin závisí převážně na pH prostředí. V prostředí obsahujících rozpuštěný kyslík nebo jinou oxidující látku, jsou manganaté sloučeniny při dostatečně vysokém pH nestálé a oxidují na sloučeniny oxidačního stupně III nebo IV. (Malá, J. Malý J., 2006)



Odstraňování manganu probíhá oxidací nebo na iontoměničích. Nejčastěji se používá oxidace vzdušným kyslíkem nebo kombinace vzdušného kyslíku a manganových bakterií. Záměrem je oxidace manganatých sloučenin na hydratované oxidy a hydroxidy manganu vyšších oxidačních stupňů, které jsou ve vodě málo rozpustné a tudíž je lze odstranit například filtrací. Oxidace vzdušným kyslíkem probíhá podle rovnice (Malá, J. Malý J., 2006):



Ve Vyhlášce 252/2004 Sb., stanovující požadavky na kvalitu pitné, je mezní hodnota pro mangan $0,05 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

V přítomnosti manganových bakterií probíhá biochemická oxidace Mn^{II} na Mn^{III} a Mn^{IV} i za podmínek, které jsou pro chemickou oxidaci nedostatečné. Bakterie využívají energii uvolňovanou při této oxidaci, přičemž produkty oxidace ukládají na svých buňkách. (Malá, J. Malý J., 2006) Z tohoto důvodu je toto významné u vodovodů obsahující vyšší koncentrace Mn^{II} , kde dochází k postupnému vylučování oxidů manganu a zanášení vodovodního potrubí, což vede ke zvýšenému riziku zákalu při následném odstranění vzniklých sedimentů.

3.3.3 Hliník

Přirozeně se vyskytující hliník, stejně jako hliníkové soli používané jako koagulanty při úpravě pitné vody, jsou hlavními zdroji hliníku v pitné vodě. Přítomnost hliníku v pitné vodě v koncentracích vyšších než $0,1 - 0,2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ často vede ke stížnostem spotřebitelů z důvodu usazování hydroxidu hlinitého. Z tohoto důvodu je důležité optimalizovat zbytkové obsahy hliníku vstupující do distribučního systému.

Při dobrých podmínkách lze v běžném provozu dosáhnout koncentrací hliníku nižší než $0,1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Dostupné výsledky z analýz nepotvrzují poškození zdraví při zvýšených koncentracích hliníku v pitné vodě.

3.3.4 O_2

Rozpuštěný kyslík se v pitné vodě běžně vyskytuje. V žádném případě není rozpuštěný kyslík sám o sobě lidskému organismu nebezpečný a sám o sobě také nezpůsobuje zákal, může však způsobit zvýšenou korozi kovových potrubí a může ovlivňovat oxidační procesy v potrubí. Jeho výskyt je ovlivněn mnoha faktory, jako jsou zdroje surové vody, teplota vody, typ úpravy, chemické nebo biologické procesy, které probíhají v distribuční síti. Vyčerpání rozpuštěného kyslíku ze surové vody může podpořit mikrobiální redukci dusičnanů na dusitany a sírany. To může také způsobit zvýšení koncentrace železa z důvodu zvýšené koroze potrubí a následné zakalení pitné vody na kohoutku.

Z plynů rozpuštěných ve vodě má největší vliv na korozi kyslík, což je dáno tím, že koroze ve vodách je většinou řízena rychlostí redukce kyslíku. Důležitá je i rovnoměrnost přístupu kyslíku k povrchu – není-li přístup rovnoměrný, vznikají články s diferenční aerací a následkem je lokální napadení pod objemnou vrstvou rzi. (Novák, 2010)

3.3.5 pH

pH samo o sobě nemá žádný přímý vliv na zákal. Pouze v případě že se v pitné vodě ve vodovodním potrubí vyskytují sloučeniny např. železa, může vliv pH ovlivnit podmínky pro vznik zákalu.

V případě že se v pitné vodě vyskytují železnaté sloučeniny má pH výrazný vliv na rozpustnost těchto sloučenin. Při vysokém pH dochází k částečnému rozpouštění hydroxidu železnatého za tvorby hydrokomplexu, a proto se od $\text{pH} > 12$ koncentrace Fe^{2+} ve vodě s růstem hodnoty pH opět zvyšuje. (Malá, J. Malý J., 2006)

Rozpustnost Fe^{III} je určena rozpustností hydroxidu železitého a hodnotou pH. V prokysličené vodě o $\text{pH} > 6$ je rozpustnost železa malá. Čím je pH roztoku tedy vyšší,

tím je oxidace Fe^{II} na Fe^{III} snadnější. Při vyšší hodnotě pH jsou vhodné podmínky pro vyloučení železa ve formě $\text{Fe}(\text{OH})_3$. (Malá, J. Malý J., 2006) Tento proces ovlivněný zvýšenou hodnotou pH může mít za následek následné usazování $\text{Fe}(\text{OH})_3$ na stěny potrubí.

4 ZVOLENÝ POSTUP A METODIKA

Vzhledem k tomu, že je diplomová práce řešena v návaznosti na projekt aplikovaného výzkumu TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“, byla vytvořena aktivní spolupráce se společností Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s. Provozovatel vodovodní sítě poskytl svůj distribuční vodovodní systém pro vypracování studie. Tento projekt je zaměřen na problematiku veřejného zásobování pitnou vodou a klade si za cíl vyvinout a implementovat do reálného vodárenského provozu sadu nástrojů, které provozovatelům vodovodů umožní předcházet vzniku zákalu ve vodovodních sítích, efektivně je odkalovat a řídit tak jakost vody v síti.

Cílem diplomové práce je sestavení metodiky pro analýzu potenciálu vzniku zákalu na tlakovém pásmu Hrbová. V této části diplomové práce se zabývám popsáním metodiky pro měření potenciálu vzniku zákalu. Tuto metodiku následně aplikuji na případovou studii tlakového pásma Hrbová. V návaznosti na tuto metodiku bude poté možné sestavit odpovídající odkalovací plán, který zajistí, co se týče zákalu, bezproblémový provoz vodovodní sítě.

V rámci případové studie jsem spolupracoval se společností Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s. Jako místo studie bylo zvoleno tlakové pásmo Hrbová, které je součástí distribuční sítě města Vsetín. Toto tlakové pásmo bylo zvoleno z důvodu:

- výrazného zastoupení kovového potrubí, které se vyskytuje v délce 3,8 km z celkové délky 7,5 km části vodovodní sítě,
- relativně velkého stáří potrubí,
- značného předimenzování potrubí, v současné době se spotřeba vody čím dál více snižuje, což má za následek klesající průtoky a rychlosti v potrubí a z toho plynoucí vyšší riziko usazování jemných suspendovaných částic na stěny potrubí.

Stávající provozní praxe

Ze současné praxe většiny vodárenských společností vyplývá, že s problematikou zákalu nemají tyto společnosti příliš zkušeností. Odkalování probíhá náhodně bez odkalovacího plánu a bez následné evidence. Většinou se odkalují pouze koncové uzly. Odkaluje se nedostatečným nízkým průtokem z důvodu obavy rozkalení sítě.

V provozní praxi nelze prakticky přítomnost, objem a tloušťku vrstvy jemných sedimentů v potrubí nijak kvantitativně měřit. Provozní praxe tedy vychází až z počtu stížností odběratelů na kalnou vodu, kterým přizpůsobují periodicitu odkalování. Cílem této případové studie je vytvoření metodiky, která by dokázala vytvořit postup, jehož výsledkem by byla mapa s vyznačenými kritickými úseky kde, může docházet k potenciálnímu vzniku zákalu. Následně lze v návaznosti na tuto metodiku sestavit optimální odkalovací plán a vyhnout se situacím, kdy dochází k zákalovým událostem.

Hypotéza

Částice a usazeniny obsažené v pitné vodě se ve vodovodním potrubí akumulují pravděpodobně jako výsledek nevyvážených hydraulických poměrů. Potřeba vody se přes den liší a v závislosti na tom se liší i průtočná rychlost v potrubí. Obzvláště v koncových částech vodovodní sítě se stává, že voda většinou stojí nebo stagnuje. Také na velkých rozváděcích a příváděcích řadech se rychlost proudící vody může různě měnit v závislosti

na průtoku. Z důvodu nedostatečné rychlosti proudění, kdy voda v potrubí dosahuje rychlosti $\leq 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo tam, kde voda dokonce stagnuje, může docházet k výraznému ulpívání jemných suspendovaných částic na stěnách potrubí po celém jeho obvodu. Při výrazných hydraulických změnách (porucha na potrubí, odběr z hydrantu během požáru), kdy se mnohonásobně zvýší rychlost proudění v potrubí, může dojít k náhlému zviření usazené vrstvy a následné zákalové události.

Lze říci, že limitující jsou pro mocnost usazené vrstvy maximální hodinové průtoky Q_h , které způsobují ztenčení vrstvy a mírnou resuspendaci materiálu. Z tohoto důvodu jsou problematické všechny úseky, kde se rychlost dlouhodobě vyskytuje menší než $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Hypotéza je tedy taková, že pokud se rychlost ve vodovodní síti v relativně krátkém časovém úseku dostatečně zvýší, dojde k zabránění dlouhodobějšímu usazování jemných suspendovaných částic na stěny potrubí. Zkoumaným parametrem bude tedy maximální rychlost vyskytující se během dne a týdne ve vodovodní síti a tato rychlost bude porovnána s kritickou rychlostí, kdy dochází k usazování částic a tvorbě rizika zákalové události.

Statistická analýza

V první části případové studie je provedena statistická analýza odběrů. Jako vstupní data do této analýzy jsou odběry z VDJ Hrbová během jednoho roku. Cílem této statistické analýzy průtoků bude zjištění, jaké průtoky jsou dosaženy nebo překročeny aspoň 1x denně a 1x týdně.

Jako výsledek z této statické analýzy průtoků budou dva zatěžovací stavy a to:

- Zatěžovací stav – Průtok, který je dosažen, nebo překročen aspoň 1x denně
- Zatěžovací stav – Průtok, který je dosažen, nebo překročen aspoň 1x týdně

Matematický model

Výsledné průtoky pro oba zatěžovací stavy budou dosazeny do matematického modelu vodovodní sítě vytvořeného v programu EPANET 2 a vypočítány odpovídající rychlosti v potrubí. Na výsledný matematický model bude navržena metodika pro měření potenciálu vzniku zákalu.

Na základě této analýzy byly zpřesněny uzlové odběry vody, které reprezentují odběry vody domácnostmi a průmyslem. Z celkového odběru vody z napájecího uzlu tlakového pásma Hrbová byly do dílčích uzlových odběrů transformovány metodou jednoho součinitele c_1 podle počtu obyvatel. Na tomto podkladě byl vytvořen matematický model tlakového pásma Hrbová.

Zvolená metoda RPM

Pro případovou studii tlakového pásma Hrbová byla zvolena metodika RPM přejatá ze zahraničí, konkrétně z Nizozemí.

Tato metoda je zaměřená především na přítomnost a potenciální vznik zákalu ve vodovodní síti. Metoda je určena k aplikaci pro distribuční vodovody s typicky malým průměrem potrubí v rozmezí přibližně 50 až 200 mm. Většina potrubí by se v praxi měla pohybovat v průměru 100 až 125 mm.

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE

V této části diplomové práce je vypracována případová studie analýzy potenciálního vzniku zákalu a aplikována metoda na zjištění potenciálního vzniku zákalu ve vodovodním potrubí tlakového pásma Hrbová. Tlakové pásmo je součástí distribuční sítě města Vsetín. V první části této kapitoly je popsán systém zásobování města Vsetín, konkrétní tlakové pásmo Hrbová a současný stav trubní sítě tlakového pásma Hrbová. V rámci případové studie je v další části této kapitoly vypracována statistická analýza průtoků a hydraulická analýza, jejíž součástí je i matematický model tlakového pásma Hrbová.

5.1 POPIS SYTÉMU ZÁSOBOVÁNÍ

V následující části je popsán systém zásobování pitnou vodou města Vsetín a detailněji popsán současný stav tlakového pásma Hrbová. Provozování vodovodní sítě v okrese Vsetín má na starost společnost Vodovody a kanalizace Vsetín a.s. Hlavní a jako páteřní distribuční systém zásobování obyvatel okresu Vsetín je skupinový vodovod Stanovnice, který zásobuje i město Vsetín.

5.1.1 Skupinový vodovod Stanovnice

Skupinový vodovod Stanovnice je tvořen vodovodním řadem včetně nezbytných vodojemů mezi městy Karolinka, Vsetín, Poteč, Valašské Meziříčí a Rožnov pod Radhoštěm. Tento skupinový vodovod, jehož zdroji jsou úpravna vody Karolinka a část prameniště Vsetín - Ohrada, dodává pitnou vodu do jednotlivých místních vodovodů.

Převážná část výroby pitné vody je zabezpečována třemi úpravami povrchové vody Karolinka, Valašské Meziříčí, Rožnov pod Radhoštěm, prameništěm podzemní vody Vsetín – Ohrada a prameništěm podzemní vody Kelč s následujícími výkony (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012):

- Úpravna vody Karolinka, která upravuje surovou vodu z vodárenské nádrže Stanovnice. Úpravna má výkon $250,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Úpravna vody Valašské Meziříčí s celkovým výkonem $90,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, která upravuje surovou vodu z řeky Bečvy,
- Jímací území Rožnov pod Radhoštěm o výkonu $45,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$
- Jímací území Vsetín – Ohrada o výkonu celkem $45,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$
- Jímací území Kelč.

Tyto zdroje zabezpečují 97,1 % celkové výroby pitné vody ve společnosti. Jako doplňující zdroje pro menší obce je používáno 9 pramenišť a vodních zdrojů podzemní vody. Tyto malé místní zdroje zabezpečují 2,9 % celkové výroby pitné vody ve společnosti. (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012) Rozdělení podílu jednotlivých zdrojů na výrobě pitné vody za rok 2011 je uvedeno v Tabulce 12 .

Tabulka 12- Výroba pitné vody ve zdrojích v roce 2011 (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012)

Místo	Výroba vody v tis. m ³	% podílu na celkové výrobě	Zdroj
ÚV Karolinka	3702,9	57,2	Povrchová voda
ÚV Val. Meziříčí	501,2	7,7	Povrchová voda
Vsetín - Ohrada	1588,4	24,5	Podzemní voda
Rožnov p. Radhoštěm	476,4	7,4	Podzemní voda
Kelč	12,5	0,2	Podzemní voda
místní zdroje	188,8	2,9	Podzemní voda
Celkem	6470,2	100	

5.1.2 Město Vsetín

Celková délka vodovodní sítě města Vsetín činí 78,9 km. Z výše uvedených zdrojů je město Vsetín zásobené převážně z ÚV Karolinka a jímacího území Vsetín – Ohrada.

Surová voda do ÚV Karolinka je přiváděna z vodárenské nádrže Stanovnice. Surová voda z vodárenské nádrže Stanovnice je přiváděna do flokulačních nádrží s dávkováním koagulantu a osazenými nornými stěnami, z nichž je odváděna na otevřené pískové rychlofiltry a následně na GAU-filtry. Upravená voda je následně hygienicky zabezpečena oxidem chlorigitým. V úpravně je následně voda akumulována v nádržích 1500 a 1200 m³. ÚV je po kompletní rekonstrukci dokončené v roce 2003. Upravená voda je z ÚV dopravována páteřním řadem, který se rozděluje u obce Janová na severní větev (Vsetín, Valašské Meziříčí) a jižní větev (Horní Lideč, Valašské Klobouky). Pitná voda z úpravny vody Karolinka je přiváděna vodovodním přivaděčem DN 600 do VDJ Ústí 2 x 2000 m³ a odtud je vodovodním přivaděčem DN 600 dopravována přes katastrální území Vsetín, přes Jablůnku do Valašského Meziříčí a Rožnova pod Radhoštěm. Vodovodními řady odbočujícími z vodovodního přivaděče DN 600 jsou zásobovány vodojemy: VDJ IBV Ohrada 250 m³, VDJ Díly (přerušovací komora) 2 x 25 m³, VDJ Sychrov DTP 2 x 2000 m³, VDJ Sychrov HTP 2 x 250 m³, VDJ Hrbová 2 x 400 m³, VDJ Bobrky II 2 x 100 m³ a VDJ Bobrky I (přerušovací komora) 1x15 m³. (Ministerstvo zemědělství. 2007)

Jímací území Vsetín – Ohrada s celkovou kapacitou $Q=45 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Jímací území tvoří 7 vsakovacích studní DN 1500 hloubky 7-8 m z roku 1957, z nichž je voda odváděna násoskovými řady do sběrné studny u ČS Ohrada. Z čerpací stanice Ohrada je voda čerpána přes rozvodnou síť města do VDJ Bečevná 2x1500 m³, odkud je zásobován střed města Vsetín. Z VDJ Bečevná je čerpací stanicí plněn VDJ Rokytnice 2x250 m³, z nějž je voda dále předávána do skupinového vodovodu Syrákov. (Ministerstvo zemědělství. 2007)

5.1.3 Tlakové pásmo Hrbová

Z VDJ Hrbová o objemu $2 \times 400 \text{ m}^3$ je zásobeno tlakové pásmo Hrbová – Jasénka o celkové délce vodovodního potrubí 7,5 km. Na tlakovém pásmu se nachází automatická tlaková stanice (ATS) pro posílení tlaků. Tlakové pásmo zásobuje dle mého průzkumu 2900 obyvatel. Mezi odběratele patří především domácnosti. Žádní významní velkoodběratelé s odběrem větším než $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ve spotřebišti nejsou. Vodovodní síť je zastoupena několika druhy materiálů – OC, LT, PVC a PE viz. Tabulka 15. Stáří vodovodní sítě se pohybuje mezi lety 1968 – 2001 viz. Tabulka 14.

Nejnižší položené místo na tlakovém pásmu Hrbová se nachází na kótě 345,70 m n. m.. Ve výšce 406,00 m n. m. se nachází ATS, odkud se čerpá voda do výšky 441,00 m n. m. což je i zároveň nejvyšší místo na vodovodní síti.

Tlakové poměry

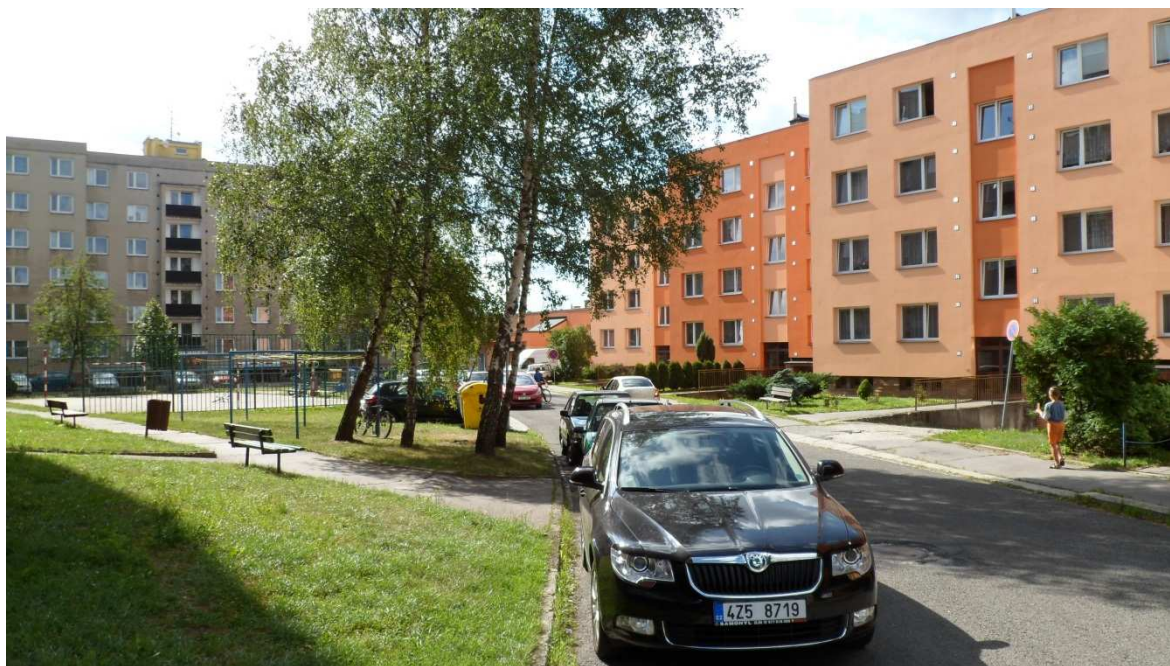
Tlakové poměry se ve vodovodní síti pohybují dle matematického modelu při běžných průtocích od 60 m v. sl. na nejnižším místě tlakového pásma, po 26 m v. sl. na nejvyšším místě tlakového pásma.

Charakter zástavby

V oblasti tlakového pásma Hrbová je zástavba převážně rodinného charakteru. Vyjímkou jsou ulice Mládí a Dolní Jasénka, kde se nachází sídliště s počtem 20 panelových domů s 6 až 8 podlažími. Tyto dvě oblasti hrají významnou roli ve spotřebě pitné vody na tlakovém pásmu Hrbová.



Obr. 29 - Charakter zástavby, panelové domy, část ulice Dolní Jasénka



Obr. 30 - Charakter zástavby, panelové domy, část ulice Mláď



Obr. 31 - Charakter zástavby, rodinné domy, část ulice Na Výsluní

Tabulka 13 - Spotřeba vody pro tlakové pásmo Hrbová (Ručka, 2009)

č. TP	Tlakové pásmo	$Q_p [l \cdot s^{-1}]$	$Q_m [m^3 \cdot den^{-1}]$	$Q_h [l \cdot s^{-1}]$	$Q_{max} [l \cdot s^{-1}]$
8	Hrbová, Jasénka	2,94	301,1	6,5	9,8
81	Jasénka ATS	0,06	8,1	0,28	---

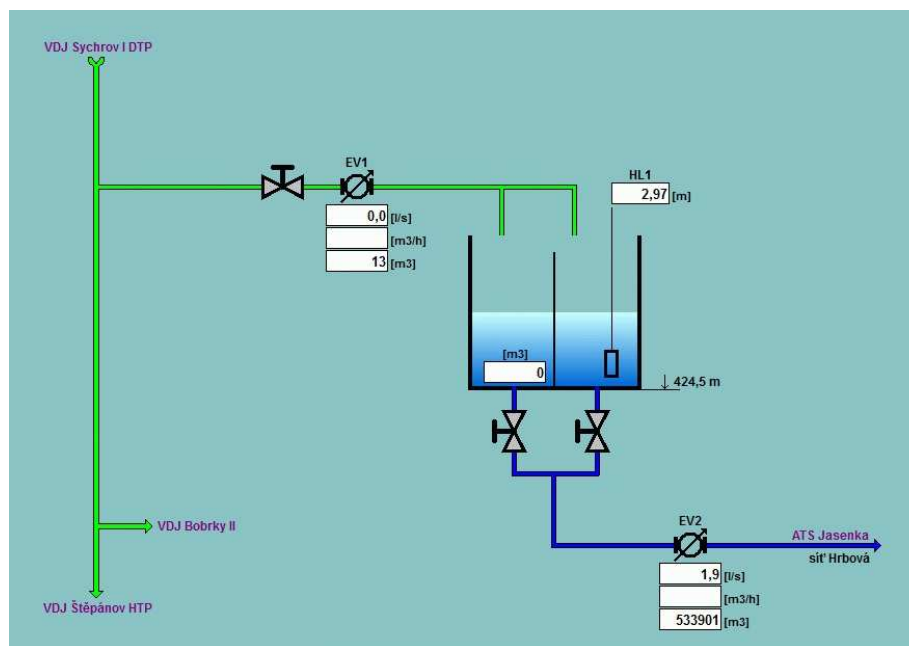
V Tabulce 13 je uvedena spotřeba vody pro tlakové pásmo Hrbová a část pásma zásobovaného přes ATS Jasénka – Babyka.



Obr. 32 - Výhled na část zásobené oblasti tlakového pásma Hrbová

VDJ Hrbová

VDJ Hrbová (viz. Obr. 34) má objem $2 \times 400 \text{ m}^3$ a výšku dna 424,5 m n. m. V případě maximálního naplnění dosahuje kóta maximální hladiny 428,3 m n. m. (Ručka, 2009) Do tohoto vodojemu je přiváděna voda z VDJ Sychrov I. potrubím DN 600, které dále pokračuje do VDJ Bobrky II a VDJ Štěpánov. Z tohoto VDJ je pitnou vodou zásobována zástavba místní části Hrbová a místní části Jasénka. Schéma je znázorněno na Obr. 33. Pro zásobování pitnou vodou části zástavby RD lokality Haganov - Babyka je pro posílení tlakových poměrů vybudována AT stanice.



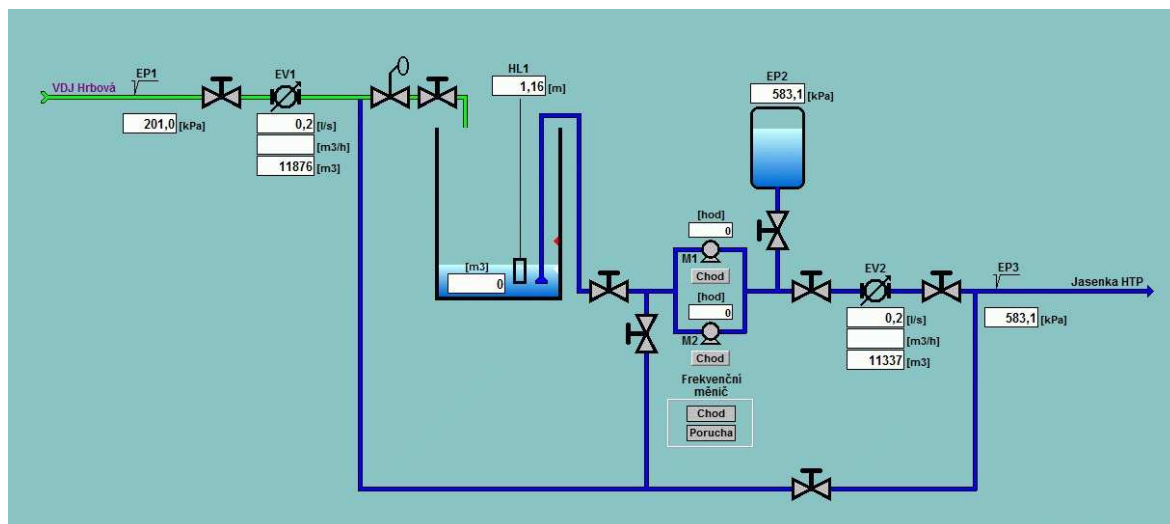
Obr. 33 - Schéma Vodojemu Hrbová (Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s.)



Obr. 34 - VDJ Hrbová

ATS Jasénka - Babyka

Pro posílení tlakových poměrů je vybudována v lokalitě Jasénka - Babyka ve výšce 406,00 m n. m. automatická tlaková stanice za účelem zvýšení tlaku ve vodovodní síti. Tlaková stanice zásobuje pitnou vodou část lokality Haganov. Schéma automatické tlakové stanice je znázorněno na Obr. 35. Zástavba je rodinného charakteru a dle mého průzkumu je v této části zásobeno pitnou vodou 120 obyvatel.



Obr. 35 - Schéma ATS Jasénka - Babyka (Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s.)

5.2 SOUČASNÝ STAV

Vnitřní profily, materiál a stáří potrubí

Vnitřní profily trubních úseků, materiál a stáří potrubí byly převzaty z GIS databáze provozovatele vodovodní sítě VaK Vsetín. Délky jednotlivých skupin potrubí jsou uvedeny v následujících tabulkách 14 a 15. Uvedené tabulky nezahrnují vodovodní přípojky.

Tabulka 14 - Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle materiálu a stáří potrubí [m] (Ručka, 2009)

Materiál / rok položení	≤1970	1971- 1980	1981- 1990	1991- 2000	2001- 2012	Celkem [m]
OC	0	196,3	0	0	0	196,3
LT	172,3	2041,4	1483,7	0	70,6	3768
PE	0	343,6	0	0	0	343,6
PVC	0	899,8	1413,3	149,5	746,4	3209
Celkem [m]	172,3	3481,1	2897	149,5	817	7516,9

Tabulka 15 - Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle DN a materiálu potrubí [m] (Ručka, 2009)

DN / materiál	50	80	100	150	200	Celkem [m]
OC	0	0	0	43,4	152,9	196,3
LT	113,2	322,8	2333,2	504,6	494,2	3768
PE	0	0	61,4	282,2	0	343,6
PVC	0	820,7	1050,3	513	825	3209
Celkem [m]	113,2	1143,5	3444,9	1343,2	1472,1	7516,9

Hydraulická drsnost potrubí

Hydraulické ztráty třením po délce jsou v modelu počítány dle vztahu Darcy-Weisbach. Absolutní hydraulická drsnost potrubí „k“ byla stanovena pro každý trubní úsek na základě jeho stáří a druhu materiálu. Koeficient „k“ zahrnuje také místní ztráty. Drsnosti jednotlivých skupin potrubí byly stanoveny ve studii hydraulické analýzy vodovodní sítě města Vsetín vypracované Ing. Ručkou, dle publikace National Research Council, 2006.

Kvalita pitné vody ve vodovodní síti

Z hlediska vzniku zákalu je nutné znát i kvalitu dopravované vody. Hodnoty mikrobiologických ukazatelů uvedené v Tabulce 16 splňují příslušné limity stanovené vyhláškou č.252/2004 Sb. Tabulka je rozdělena podle zdroje, ze kterého je příslušná část města zásobena.

Zákal vody se pohybuje na mírně vyšší hodnotě, než je stanovený průměr uvedený v kapitole 1.2.1. Kvalita pitné vody ve vodovodní síti se pohybuje na dobré úrovni.

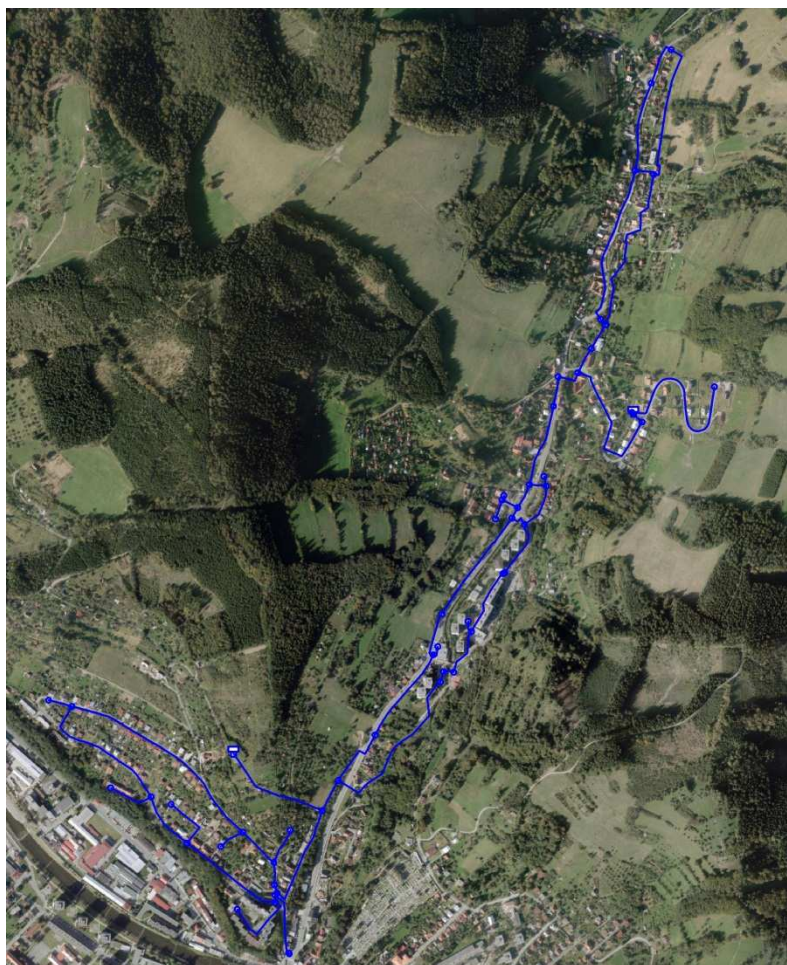
Dále je nutno zmínit z uvedených hodnot i výskyt železa, který velmi úzce souvisí a v mnoha případech ovlivňuje výskyt zákalu. Koncentrace železa se pohybuje hluboko pod mezní hodnotou 0,2 mg/l a i pod průměrem z odebraných vzorků Státního zdravotního ústavu.

Tabulka 16-Hodnoty základních ukazatelů kvality pitné vody ve vodovodní síti města Vsetín (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012)

Město	Zdroj pitné vody	Zákal [ZF]	pH	Tvrdost [°N]	Tvrdost Ca+Mg [mmol/l]	Železo Fe [mg/l]	Dusičnany NO ₃ [mg/l]	Dusitany NO ₂ [mg/l]
Vsetín	Vsetín-Ohrada	<1,5	7,44	10,9	1,95	<0,02	10	<0,005
	Karolinka+Vsetín	<1,5	7,64	5,9	1,05	0,05	3,3	<0,005
Limity dle vyhl. 252/2004 Sb.		5	6,5- 9,5	---	0,9-5,0	0,2	50	0,5

5.2.1 Terénní průzkum

V rámci případové studie byl v období září 2012 proveden terénní průzkum, kdy jsem se blíže seznámil s oblastí tlakového pásma. Cílem tohoto seznámení bylo bližší určení typu zástavby a upřesnění počtu zásobovaných obyvatel pitnou vodou na jednotlivých úsecích. Na základě této analýzy jsou zpřesněny uzlové odběry vody, které reprezentují odběry vody domácnostmi a průmyslem. Z celkového odběru vody z napájecího uzlu tlakového pásma Hrbová jsou do dílčích uzlových odběrů transformovány odběry domácnostmi metodou jednoho součinitele c_1 podle počtu obyvatel. Žádní významní velkoodběratelé s odběrem větším než $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ve spotřebišti nejsou.



Obr. 36 - Schéma tlakového pásma Hrbová

Drobné domácí odběry, které se realizují v rámci daného trubního úseku, se přesunuly do jeho krajních uzlů. Pro rozdělení těchto odběrů byl každému trubnímu úseku určen koeficient c_1 , který zastupuje počet napojených obyvatel. Na základě součinitele c_1 jsou vypočteny hodnoty uzlových odběrů, viz. příloha 5. Koeficient c_1 je určen na základě terénního průzkumu, kdy jsem na jednotlivých úsecích určil typ zástavby a následně počet osob. Na tlakovém pásmu Hrbová se vyskytuje několik typů zástavby:

- Rodinné domy (260 ks)
- Bytové a panelové domy (20 ks)
- Obchod, restaurace
- Mateřská škola

Obchod, restaurace a mateřská škola jsou zařazeny mezi drobné odběratele na základě menšího odběru vody nepřesahující $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Délka tlakového pásma vodovodní sítě Hrbová, na kterém je proveden matematický model činí 7,5 km. Na tomto tlakovém pásmu jsou zastoupeny materiály jako litina, PVC, ocel a PE. Jednotlivé délky zastoupených materiálů jsou uvedeny viz. Tabulka. 15.

5.3 STATISTICKÁ ANALÝZA PRŮTOKŮ

Pokud rychlost ve vodovodním potrubí za určitý časový interval překročí určitou hranici, kdy dojde k překročení kritické rychlosti, omezí se tvorba sedimentů na stěnách vodovodního potrubí. Za kritickou rychlost je považována rychlost $<0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Ručka, 2009) při které již dochází k usazování jemných částic. Jako časový interval je určen 1 den a 1 týden. Zkoumaným parametrem je tedy maximální rychlost vyskytující se ve vodovodní síti a tato rychlost je porovnávána s kritickou rychlostí, kdy dochází k usazování částic a tvorbě rizika zákalové události. K tomuto účelu je provedena statistická analýza průtoků.

Cílem této statistické analýzy průtoků je tedy zjištění, jaké průtoky jsou dosaženy nebo překročeny alespoň 1x denně a 1x týdně. Jako výsledek z této statistické analýzy průtoků jsou dva zatěžovací stavy pro:

- Průtok, který je dosažen, nebo překročen aspoň 1x denně
- Průtok, který je dosažen, nebo překročen aspoň 1x týdně

Od provozovatele Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s. jsem obdržel data za rok 2010. Jedná se o odtoky z VDJ Hrbová měřené automatickým monitorovacím systémem SCADA. Tento systém měří odtoky z vodojemu v intervalech po 5. minutách, 12x za hodinu. Z těchto 12 měření vyhodnotí systém jednou za hodinu minimální, průměrné a maximální odtoky a zapíše je do databáze. Tyto tři zaznamenané hodnoty jsou reprezentovány hodnotou datum, hodina. Získané hodnoty jsou seřazeny chronologicky. První záznam je uveden od 2.1.2010 4:00 a poslední 31.12.2010 23:00. Tabulka 17. ukazuje část získaných dat z monitorovacího systému SCADA.

Tabulka 17 - Získaná data z monitorovacího systému SCADA (vzorek – ukázka)

Datum	VDJ Hrbová EV2- Odběr síť Hrbová Minimum ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)	VDJ Hrbová EV2- Odběr síť Hrbová Průměr ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)	VDJ Hrbová EV2- Odběr síť Hrbová Maximum ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)
2.1.2010 4:00	0,2	0,56	0,6
2.1.2010 5:00	0,6	0,76	0,9
2.1.2010 6:00	0,6	0,86	0,9
2.1.2010 7:00	1,4	1,94	2
2.1.2010 8:00	2,4	4,2	3,8
2.1.2010 9:00	4,7	5,4	5,6
2.1.2010 10:00	6,1	6,24	6,8
2.1.2010 11:00	5,5	6,13	6,1
....			

První krok spočívá ve statickém vyhodnocení údajů získaných od provozní společnosti. Z důvodu zjištění maximálních hydraulických poměrů probíhající v potrubí jsem pracoval pouze s maximálními odtoky z vodojemu. V tabulce 17. se jedná o třetí sloupec. Celkově se jedná o 8431 hodnot, které jsou seřazeny chronologicky.

Otázkou zůstává vhodná volba šířky intervalu, neboť počet intervalů nesmí být ani malý (ztrácí se značná část informací o rozdělení) ani velký (snížení přehlednosti a zastření některých charakteristik rozdělení). Počet intervalů i byl tedy zvolen na základě vztahu:

$$i=10.\log n$$

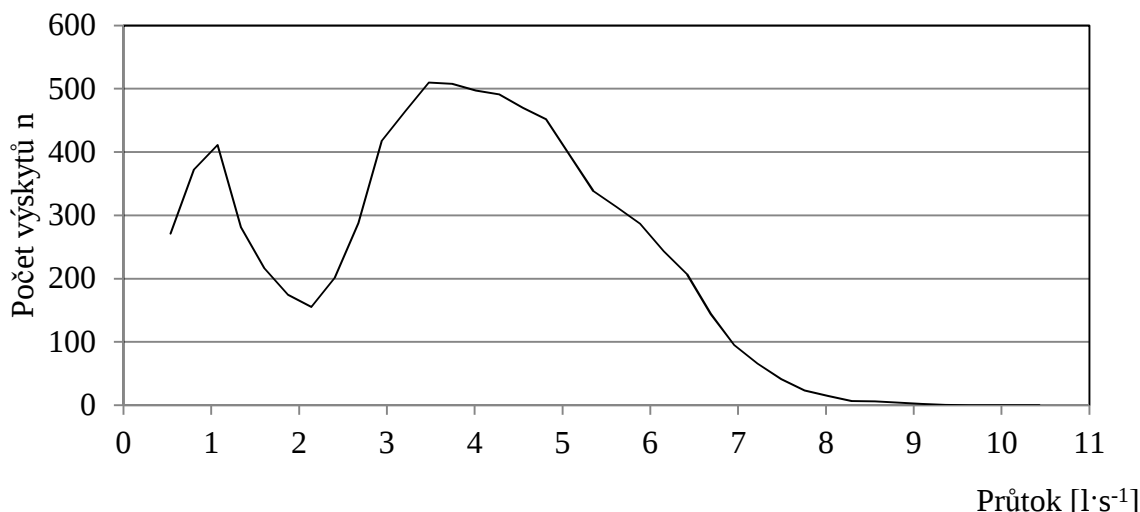
ipočet intervalů

npočet měření (8431)

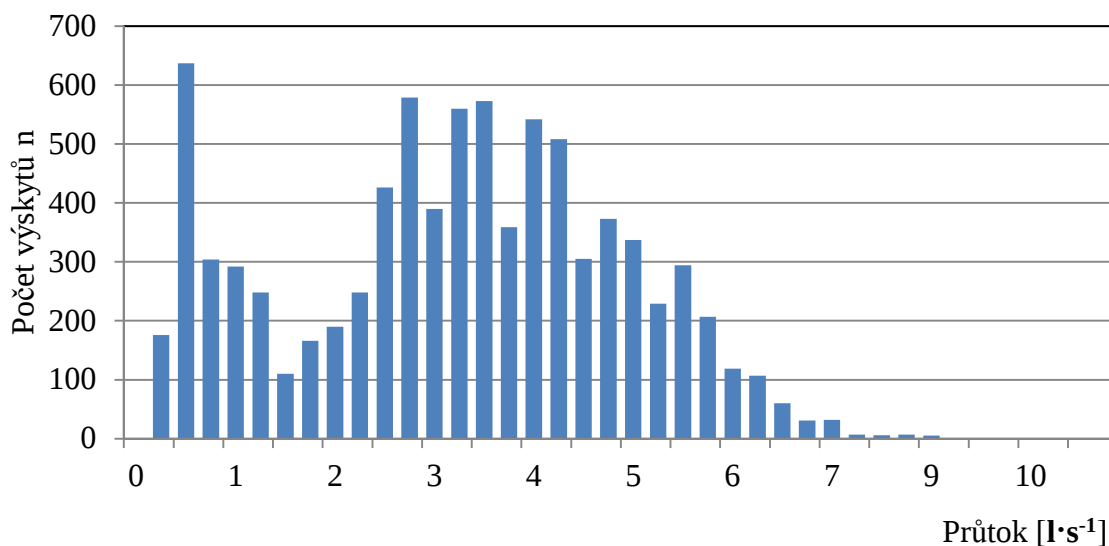
Tabulka 18 - Statistická analýza průtoků

<i>i</i>	<i>Zatěžovací stav</i>	<i>Rozsah průtoků [l · s⁻¹]</i>		<i>Počet výskytů n</i>	<i>Procentuální vyjádření [%]</i>	<i>Křivka překročení [%]</i>	<i>Křivka nedostoupení [%]</i>
1		0,00	0,27	1	0,01	99,99	0,01
2		0,27	0,54	176	2,09	97,90	2,10
3		0,54	0,80	637	7,56	90,35	9,65
4		0,80	1,07	304	3,61	86,74	13,26
5		1,07	1,34	292	3,46	83,28	16,72
6		1,34	1,61	248	2,94	80,33	19,67
7		1,61	1,87	110	1,30	79,03	20,97
8		1,87	2,14	166	1,97	77,06	22,94
9		2,14	2,41	190	2,25	74,81	25,19
10		2,41	2,68	248	2,94	71,87	28,13
11		2,68	2,94	426	5,05	66,81	33,19
12		2,94	3,21	579	6,87	59,95	40,05
13		3,21	3,48	390	4,63	55,32	44,68
14		3,48	3,75	560	6,64	48,68	51,32
15		3,75	4,01	573	6,80	41,88	58,12
16		4,01	4,28	359	4,26	37,62	62,38
17		4,28	4,55	542	6,43	31,19	68,81
18		4,55	4,82	508	6,03	25,17	74,83
19		4,82	5,08	305	3,62	21,55	78,45
20		5,08	5,35	373	4,42	17,13	82,87
21		5,35	5,62	337	4,00	13,13	86,87
22		5,62	5,89	229	2,72	10,41	89,59
23		5,89	6,15	294	3,49	6,93	93,07
24	1. zatěžovací stav - 6,48 l · s⁻¹	6,15	6,42	207	2,46	4,47	95,53
25		6,42	6,69	119	1,41	3,06	96,94
26		6,69	6,96	107	1,27	1,79	98,21
27		6,96	7,22	60	0,71	1,08	98,92
28	2. zatěžovací stav - 7,57 l · s⁻¹	7,22	7,49	31	0,37	0,71	99,29
29		7,49	7,76	32	0,38	0,33	99,67
30		7,76	8,03	7	0,08	0,25	99,75
31		8,03	8,29	6	0,07	0,18	99,82
32		8,29	8,56	7	0,08	0,09	99,91
33		8,56	8,83	5	0,06	0,04	99,96
34		8,83	9,10	1	0,01	0,02	99,98
35		9,10	9,36	1	0,01	0,01	99,99
36		9,36	9,63	0	0,00	0,01	99,99
37		9,63	9,90	0	0,00	0,01	99,99
38		9,90	10,17	0	0,00	0,01	99,99
39		10,17	10,43	0	0,00	0,01	99,99
40		10,43	10,70	1	0,01	0,00	100,00

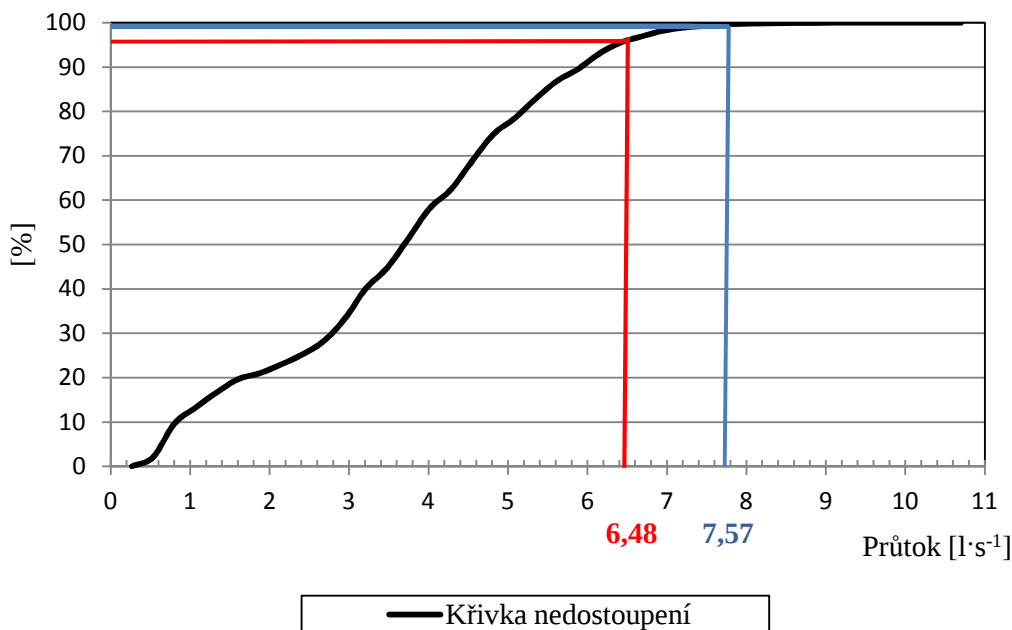
Maximální odběr z VDJ Hrbová, který byl dosažen za rok 2010 je $10,7 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato hodnota slouží jako horní hranice. V tabulce 18 je rozdělen maximálně dosažený průtok $10,7 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ z VDJ Hrbová za rok 2010 rovnoměrně do 40 intervalů v rozsahu $0,27 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Ke každému intervalu jsem přiřadil počet výskytů odpovídajícího průtoku zaznamenaný systémem SCADA. V dalším sloupci je procentuální vyjádření, ze kterého vychází křivka nedostoupení. Z tabulky 18 jsem si vyjádřil histogram (viz Obr. 38) respektive empirickou hustotu pravděpodobnosti viz. Obr. 37. Na vodorovné ose je průtok z VDJ Hrbová. Na svislé ose jsou znázorněny počty jednotlivých zastoupených intervalů z Tabulky 18.



Obr. 37 - Empirická hustota pravděpodobnosti



Obr. 38- Histogram



Obr. 39 - Empirická distribuční funkce

Výsledkem je rozdělení získaných dat do 40 velikostně stejných intervalů. Výsledkem tedy jsou dva zatěžovací stavy a to:

- 1. Zatěžovací stav - průtok, který je dosažen nebo překročen alespoň 1x denně,
- 2. Zatěžovací stav - průtok, který je dosažen nebo překročen alespoň 1x týdně.

1. Zatěžovací stav

Průtok, který je s pravděpodobností 95,83% dosažen nebo je překročen alespoň 1x za den je 6,48 l·s⁻¹

2. Zatěžovací stav

Průtok který je s pravděpodobností 99,40% dosažen nebo je překročen alespoň 1x za týden je 7,57 l·s⁻¹

Na tyto dva zatěžovací stavy jsem provedl hydraulickou analýzu, popsanou v následující kapitole, za účelem zjištění maximálních rychlostí proudění, která se vyskytnou v daném časovém intervalu.

5.4 HYDRAULICKÁ ANALÝZA TLAKOVÉHO PÁSMÁ HRBOVÁ

V rámci provedené hydraulické analýzy je použit matematický model tlakového pásma Hrbová. Model zahrnuje všechny důležité objekty vodovodu, kterými je vodojem a čerpací stanice. Model neobsahuje vodovodní přípojky ani vnitřní vodovody.

Model tlakového pásma Hrbová je součástí matematického modelu distribuční vodovodní sítě města Vsetín v rozsahu 78,9 km, který byl zpracován pro hydraulickou analýzu vodovodní sítě města Vsetín (Ručka, 2009). Na základě měření tlaků a průtoků v síti byl model distribuční vodovodní sítě města Vsetín verifikován pro 48 časových kroků a reprezentuje chování vodovodní sítě během jednoho pracovního dne a jednoho dne pracovního klidu (tedy kvazi-stacionární model pro 2x 24 h).

Cílem této hydraulické analýzy je simulovat stávající tlakové a průtokové poměry ve vodovodní síti pro dva samostatně nezávislé zatěžovací stavy. Jedná se tedy o stacionární model. Výsledky hydraulické analýzy sítě slouží pro návrh metodiky na zjištění potenciálu vzniku zákalu.

Výsledné průtoky pro oba zatěžovací stavy jsou následně dosazeny do matematického modelu tlakového pásma vytvořeného v programu EPANET 2 a jsou vypočítány maximální rychlosti v potrubí.

5.4.1 Vstupní podklady a informace

Pro stavbu modelu a následnou hydraulickou analýzu jsou použity následující podklady a informace:

Topologie sítě pro hydraulický model – digitální verze situace rozvodných vodovodních řadů, mapa materiálů a profilů. Exportováno z GIS, který je ve správě VaK Vsetín. Stav ke dni 22.11.2010. (Ručka, 2009)

Stáří sítě – rok instalace jednotlivých úseků byl zjištěn z GIS, který je ve správě VaK Vsetín. Zpracovateli byl poskytnut on-line přístup pro nahlížení do GISu.

Výškopis a polohopis spotřebiště – byl dodán polohopis a výškopis spotřebiště. Údaje byly převzaty z GIS, který je ve správě VaK Vsetín.

Koeficient c_{11} – každý úsek vodovodní sítě byl ohodnocen podle hustoty osídlení (odběry domácností). Ohodnocení provedl zpracovatel studie z terénního průzkumu.

5.4.2 Matematický model

Z dostupných dat byl sestaven matematický model celé vodovodní sítě města Vsetín, ze kterého je pro účely této práce použit model tlakového pásma Hrbová. Model nezahrnuje domovní přípojky.

Matematický model je sestaven v závislosti na následujících parametrech:

- Hydraulická drsnost potrubí (viz. kapitola 5.2),
- Vnitřní profily potrubí (viz. tabulka 15 a příloha 3)
- Materiál potrubí (viz. tabulka 14 a příloha 4)
- Stáří potrubí (viz. tabulka 14 a příloha 4)

- Nadmořské výšky uzlů (viz příloha 3). Nadmořské výšky jednotlivých výpočtových uzlů odpovídají výšce terénu v daném místě.

V přílohách jsou graficky znázorněny jednotlivé charakteristiky. Jedná se o schéma vodovodní sítě s nadmořskými výškami a DN (příloha 3), schéma vodovodní sítě s vyznačenými materiály potrubí a stářím (příloha 4), schéma vodovodní sítě s vyznačenými uzlovými odběry a koeficientem c_1 (příloha 5).

Jedná se o dva statické modely, které byly vytvořeny v softwarovém prostředí EPANET 2.0 a charakterizují chování systému během dvou zatěžových stavů průtoku, které se vyskytují alespoň 1x denně a 1x týdně.

- 1. Zatěžovací stav – průtok $6,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, který je dosažen nebo překročen alespoň 1x denně,
- 2. Zatěžovací stav – průtok $7,57 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, který je dosažen nebo překročen alespoň 1x týdně.

Popis matematického modelu

Matematický model tlakového pásma Hrbová je napájen z VDJ Hrbová o objemu $2 \times 400 \text{ m}^3$. VDJ má výšku dna 424, 5 m n. m. Model se skládá z 57 úseků o celkové délce 7,5 km a 53 uzlů. Nejnižše položený uzel je ve výšce 345,70 m n. m. a nejvýše položený uzel je ve výšce 410,25 m n. m. Ve výšce 406,00 m n. m. je umístěna automatická čerpací stanice. Nadmořské výšky jednotlivých výpočtových uzlů odpovídají výšce terénu v daném místě.

Výstup z matematického modelu

Pro všechny uzly a úseky jsou uvedeny výstupy charakteristik z matematického modelu v přílohách 3, 4 a 5.

Z výsledků prvního zatěžovacího stavu na první pohled vyplývá, že rychlost v potrubí se pohybuje v rozsahu $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v potrubí které vede z VDJ Hrbová až $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na koncových úsecích. Ve většině úseků je tedy rychlost proudění v potrubí nedostatečná a je výrazně pod hranicí kritické rychlosti $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Může zde tedy docházet k výraznému usazování jemných částic a tvorbě potencionálního sedimentu.

Podrobně jsou všechny údaje uvedeny v přílohách 1 a 2.

Pro účely návrhu metody potenciálního vzniku zákalu je uvažován první zatěžovací stav pro průtok $6,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, který se vyskytuje nebo je překročen alespoň 1x denně z důvodu nejpriznivější varianty pro potenciální vznik zákalu.

5.5 APLIKACE ZVOLENÉ METODIKY NA ZJIŠTĚNÍ POTENCIÁLU VZNIKU ZÁKALU

Při analýze vzniku potenciálního zákalu se budu řídit metodikou RPM popsanou podrobně v kapitole 3.2.2. Při metodě RPM dochází k nárůstu rychlosti o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oproti stávající rychlosti. Při tomto nárůstu rychlosti v potrubí dochází ke zvýšení hodnoty smykového napětí u stěn potrubí, narušení rovnováhy doposud soudržných vrstev sedimentů, jejich rozrušení a uvolnění do proudu vody.

Metoda je vhodná k aplikaci pro menší distribuční vodovody nebo tlaková pásma s typicky malým průměrem potrubí v rozmezí přibližně 50 až 200 mm, což odpovídá rozsahu vyskytujícího se potrubí na tlakovém pásmu Hrbová.

Při aplikaci metody RPM je nutno dodržovat určitá obecná pravidla, která zajistí požadované výsledky:

- Izolovat jednotlivé úseky potrubí, na kterých bude provedena metoda RPM. Izolovaná délka potrubí by měla dosahovat alespoň délky 315 m.
- V tomto izolovaném úseku potrubí se vyvolá nárůst rychlosti o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oproti rychlosti stávající. Zvýšení průtočné rychlosti se docílí otevřením požárního hydrantu.
- Nárůst rychlosti bude probíhat po dobu 15 min. Poté se hydrant pomalu uzavře a průtok v potrubí se zredukuje na normální hodnotu.
- Monitoring zákalu probíhá po dobu 15 minut během zvýšené rychlosti a i po uzavření hydrantu, dokud se nevrátí hodnota zákalu na běžnou úroveň.

Každý úsek bude odkalován přes vlastní hydrant, na kterém se budou také zároveň odebírat vzorky zákalu. Odkalování probíhá přes speciálně vyvinutý nástavec, popsáný v následující kapitole 5.5.1.

V některých případech bude nutno uzavřít šoupátka, aby nedocházelo k nežádoucímu okružovému proudění. Celý postup metodiky se bude řídit podle navrženého postupu. Jednotlivé úseky, na kterých se bude postupně provádět analýza potenciálního vzniku zákalu jsou podrobně znázorněny v přílohách 7.

Tlakové pásmo Hrbová je rozděleno na 21 úseků o minimální délce úseku 315 m (viz Obr. 40). V těchto úsecích se vyvolá přes hydrant nárůst rychlosti o $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu 15 minut. V případové studii se vyskytuje několik úseků, na kterých nebylo možno z důvodu rozmístění hydrantů dodržet podmínku minimální vzdálenosti 315 m izolovaného potrubí. Jedná se o úseky - č/délka - 18/158, 19/178, 21/60. Na těchto úsecích se vyvolá stejný rychlostní nárůst $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale jen po dobu 7 minut. V případové studii se vyskytlo několik míst, na kterých není možné potrubí odkalit, respektive nejsou na koncových větvích osazeny hydranty ani jiné armatury. Naštěstí se jedná pouze o krátké koncové úseky v délce několika desítek metrů.

V závislosti na průběhu zákalové křivky popsané v kapitole 3.2.2 je hodnoceno 5 ukazatelů zákalové stopy:

- Absolutní maximální hodnoty zákalu během prvních pěti minut hydraulického rušení;
- Průměrné hodnoty zákalu během prvních pěti minut hydraulického rušení;
- Absolutní maximální hodnoty zákalu během posledních deseti minut hydraulického rušení;
- Průměrné hodnoty zákalu během posledních deseti minut hydraulického rušení;

- Čas potřebný k ustálení zákalu do původních hodnot.

Každý ukazatel je hodnocen na stupnici od 0 do 3, kde je 0 nejnižší a také nejlepší hodnocení a 3 je nejvyšší a také nejhorší hodnocení. Nejnižší hodnota je ekvivalentem k situaci, kde není potenciální vznik resuspenze a zákalu, nejvyšší hodnota je rovna situaci, kdy je výrazné riziko vzniku a šíření zákalu. Hodnocení metody RPM pro zjištění potenciálního výskytu zákalu je uvedeno v tabulce 19.

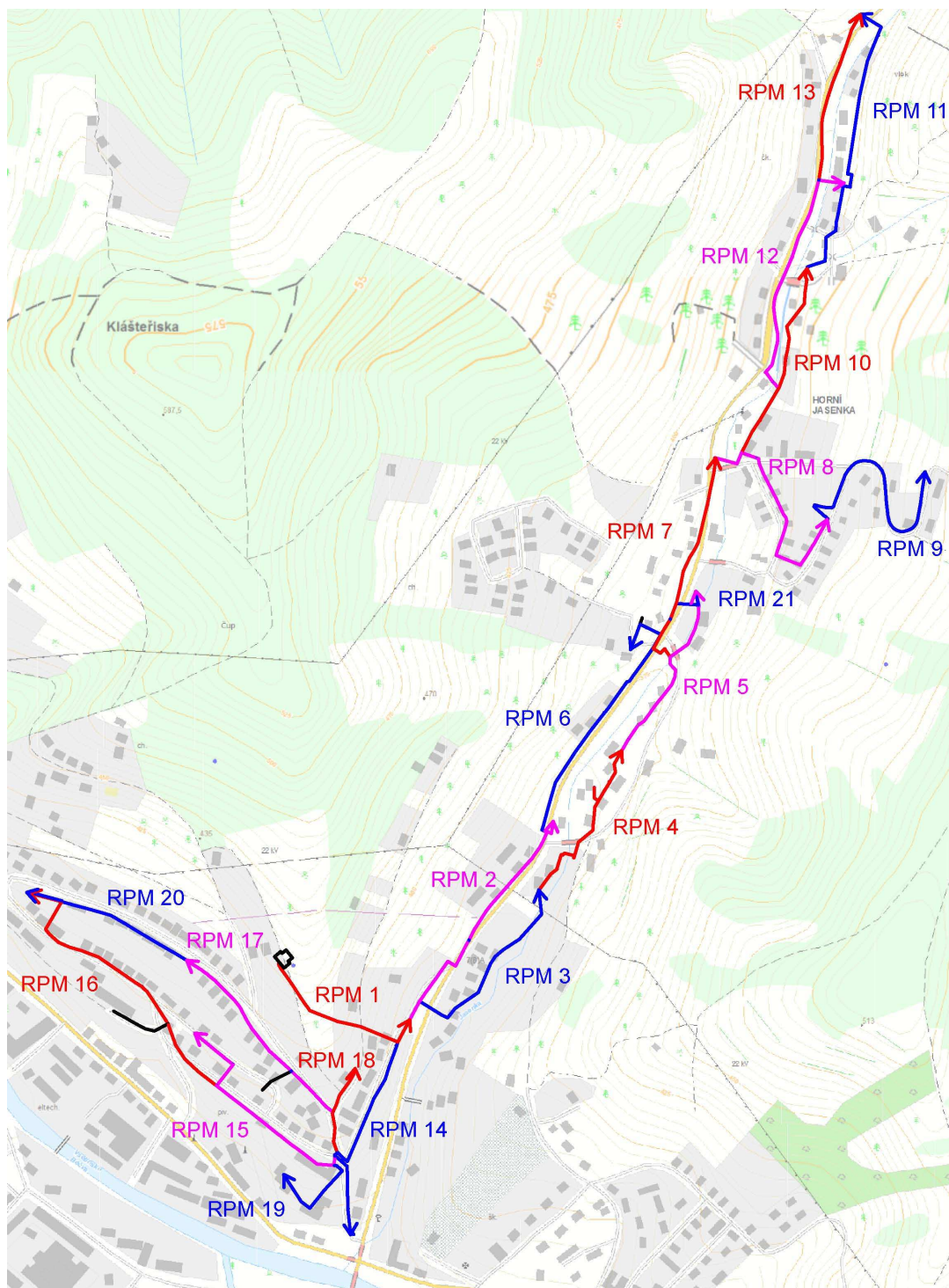
Tabulka 19 - Hodnotící tabulka RPM metody pro tlakové pásmo Hrbová

	0	1	2	3
Absolutní maximum v prvních 5 min	<0,5 ZF	0,5-2,5 ZF	2,5-5,0 ZF	>5,0 ZF
Průměr v prvních 5 min	<0,5 ZF	0,5-2,5 ZF	2,5-5,0 ZF	>5,0 ZF
Absolutní maximum v posledních 10 min	<0,5 ZF	0,5-2,5 ZF	2,5-5,0 ZF	>5,0 ZF
Průměr v posledních 5 min	<0,5 ZF	0,5-2,5 ZF	2,5-5,0 ZF	>5,0 ZF
Čas	< 5 min	5-15 min	15-60 min	>60 min

Hodnotící ukazatele:

- 0 – Žádný nebo velmi nízký potenciální výskyt zákalu v měřeném úseku
- 1 – Velmi nízký potenciál výskytu zákalu
- 2 – Střední potenciál výskytu zákalu
- 3 – Vysoký potenciální výskyt zákalu

Na základě výše uvedené tabulky se hodnotí každý úsek, tedy absolutní maximum v prvních 5 min.



Obr. 40 -Schéma metody RPM na tlakovém pásmu Hrbová, postup analýzy na jednotlivých úsecích

Hranice jednotlivých intervalů zákalu v tabulce 19 byly zvoleny nízko, jelikož se neočekává příliš vysoký výskyt sedimentů v potrubí. Výstupem jsou tabulky hodnotící úseky s ohledem na potenciální výskyt zákalu, podle kterých bude možno efektivně určit míru zákalu a riziko zákalové události. V návaznosti na tuto metodu lze následně efektivně vypracovat zákalový plán vhodný pro určitý úsek potrubí zvlášť.

5.5.1 Měřicí hydrantový nástavec

Pro aplikaci metody RPM v terénu a odkalování vodovodního potrubí byl vyvinut speciální měřicí hydrantový nástavec. Nástavec je vyvinut v rámci projektu aplikovaného výzkumu TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“ Ing. Ručkou. Tento specializovaný nástavec je zapsán jako užitný a průmyslový vzor v databázi průmyslových vzorů úřadu průmyslového vlastnictví. Zařízení je vyvinuto k měření zákalu ve vodovodní síti. Zařízení lze osadit na podzemní hydranty a následně se přes toto zařízení provádí odkalení vodovodního potrubí. Kontinuálně zařízení zaznamenává hydrodynamický tlak ve vodovodní síti a průtok. Součástí zařízení je i kohout, přes který probíhá během odkalení odběr vzorků zákalu k následovnému měření.



Obr. 41- Měřicí hydrantový nástavec

5.5.2 Měření zákalu ve vodovodní síti

V první fázi projektu aplikovaného výzkumu TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“, jejíž součástí je tato diplomová práce proběhlo v říjnu 2012 měření na tlakovém pásmu Hrbová. Cílem tohoto měření bylo odzkoušení funkčnosti užitého vzoru měřicího hydrantového nástavce a seznámení se s používanými odkalovacími metodami provozovatele.

Před samotným měřením v praxi byl měřicí hydraulický nástavec nakalibrován v laboratořích VUT FAST. Odzkoušení nástavce v praxi proběhlo na tlakovém pásmu Hrbová. Použití nástavce v praxi je zdokumentováno na fotografiích níže (viz Obr. 42 a Obr. 43).



Obr. 42 - Měřicí hydrantový nástavec v provozu osazený na hydrantu



Obr. 43 - Detail osazeného měřicího hydrantového nástavce

Nástavec byl odzkoušen celkem na čtyřech hydrantech za spolupráce pracovníka provozovatele vodovodní sítě. Odkalovalo se dle postupu provozovatele. Provozovatel odkaluje sporadicky, bez odkalovacího plánu a přesného postupu, který by dodržoval průtokem přibližně $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Odzkoušení tedy proběhlo dle postupu provozovatele. Po nasazení nástavce na hydrant se vodovodní potrubí velmi krátce odkaluje z důvodu vyčištění krátkého úseku

přípojky mezi hydrantem a vodovodním řadem. V této části se vyskytuje většinou velké množství sedimentu z důvodu téměř stagnující rychlosti vody. Tento proces krátkého odkalení se nezaznamenává, slouží pouze pro účel zpřesnění následujícího měření zákalu ve vodovodním řadu.

Následné odkalení a měření se provádělo při průtoku $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Vzorky se odebírají přes kohout do předem pečlivě očištěné kyvety o objemu 15 ml. Kyveta se následně vkládá do přenosného turbidimetru Hach Lange 2100 Q IS a měří se míra zákalu ve stupních ZF. Pro nejlepší přesnost se doporučuje používat během měření při všech odečtech stejnou kyvetu. Kontinuálně s odběrem vzorků probíhá odečet hydrodynamického tlaku z tlakoměru a průtoku z objemového průtokoměru osazeného na měřícím hydrantovém nástavci. Údaje se zaznamenávají do předem připraveného formuláře. Tento proces se opakuje každé dvě minuty. Analogicky se pokračuje na dalších hydrantech tlakového pásma.

Stejným postupem by se pokračovalo v případě měření zákalu při aplikaci navržené metody RPM určené k analýze potenciálu vzniku zákalu.

5.5.3 Další postup

Vzhledem k rané fázi projektu a přicházející zimy je aplikace metody měření potenciálního vzniku zákalu v terénu na případové studii plánována na příští rok v rámci pokračování projektu TAČR č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“. Dalším důvodem je nutná úzká spolupráce s provozovatelem a zařazení měřících procesů do jeho pracovního rozvrhu.

V navazující části projektu bude na základě navržené metody RPM aplikován postup pro zjištění potenciálního zákalu v úsecích vodovodního potrubí tlakového pásma Hrbová. Dalším podrobnějším způsobem bude řešena problematika šíření zákalu a pohyb zákalu vodovodním potrubím. Výsledky těchto studií budou sloužit k návrhu a vypracování efektivního odkalovacího plánu, který zajistí provozovateli udržení stávající a lepší jakosti pitné vody.

6 ZÁVĚR

Vzhledem ke zvyšujícímu se stočnému a vodnému, které nepochybně v minulosti a současnosti probíhá a probíhat bude, spotřebitelé očekávají od provozovatele kvalitní služby zahrnující distribuci pitné vody v odpovídajícím množství a kvalitě. Mezi významné prvky ovlivňující kvalitu vody z hlediska organoleptických vlastností patří zákal pitné vody. Spotřebitelé se setkávají se zákalem vody při nárazových a nečekaných událostech, což je pro provozovatele nepříjemné. Je tedy čím dál více nutné zabývat se problematikou zlepšování a optimalizace procesů, ovlivňující kvalitu dopravované vody.

Tato práce je řešena v návaznosti na projekt aplikovaného výzkumu TAČR. č. TA02020604 „Nástroje pro prevenci vzniku zákalu ve vodovodních sítích“. Tento projekt je zaměřen na vývoj sady nástrojů (odbornou metodiku, speciální měřidlo a softwarovou aplikaci), které lze implementovat do reálného vodárenského provozu. Tyto nástroje budou provozovatelům pomáhat předcházet vzniku zákalu ve vodovodních sítích, efektivně je odkalovat a řídit tak jakost pitné vody v síti. Cílem tohoto projektu je zvýšení jakosti pitné vody, dodávané veřejnými vodovody a snížení materiálové a energetické náročnosti provozu.

Tato práce shrnuje dostupné poznatky v oblasti analýzy výskytu zákalu. Získané poznatky jsou aplikovány na návrh metody, určené pro zjištění potenciálního výskytu zákalu na případové studii vodovodní sítě.

Provozovatel vodovodní sítě v současné době většinou dokáže zajistit spotřebiteli odpovídající kvalitu i požadované množství pitné vody. Postupem času se tato situace může měnit, vzhledem k postupnému stárnutí vodovodního potrubí (zvýšená koroze kovového potrubí) a dalším příčinám. Otázka zákalu bude v budoucnosti čím dál více aktuálnější. Ze současné praxe většiny vodárenských společností vyplývá, že s problematikou zákalu nemají příliš zkušeností. Odkalování probíhá náhodně bez odkalovacího plánu a bez následné evidence. Většinou se odkalují pouze koncové uzly.

V první části práce je formou rešerše popsána problematika zákalu ve veřejných vodovodech. Je zde popsán současný stav problematiky a interpretovány statistické výsledky rozborů jakosti vody, provedených Státním zdravotním ústavem a Ministerstvem zdravotnictví za rok 2010. Interpretace je zaměřena na hodnoty zákalu a železa v pitné vodě. Z výsledků vyplývá, že se zákal ve vodovodním potrubí objevuje pouze sporadicky, většinou ve formě tzv. zákalových událostí, které jsou iniciovány obvykle vnějším zásahem do systému, který vyvolá náhlou změnu hydraulických poměrů. Trvale se však zákal ve vodovodních sítích nevyskytuje, což potvrzují výsledky rozborů jakosti vody. Celkem bylo vyhodnoceno pro stanovení hodnot zákalu a železa přes 63 000 vzorků, z nichž vyplývá, že pouze cca 0,5% ze všech odebraných vzorků překročilo Vyhláškou 252/2004 Sb. stanovený limit pro zákal, tedy hodnotu 5 ZF. Stanovený limit pro železo 0,2 mg·l⁻¹ překročilo 5,8% ze všech odebraných vzorků. Zvýšený zákal vody tedy obvykle není problém trvalého charakteru, ale jev dočasný. Zřejmě také proto ve vodárenských společnostech v ČR zatím nejsou zaváděny systematické programy pro prevenci vzniku zákalových událostí.

V další kapitole se zabývám legislativní úpravou ukazatele zákalu pitné vody v ČR a ve vybraných zemích (Spojené státy americké, Spojené království Velké Británie, Austrálie atd.) Maximální hodnoty zákalu v zahraničí, jak stanovují jednotlivé legislativní předpisy se pohybují od hodnot 1 ZF do 5 ZF. Limit v České republice stanovený vyhláškou Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. požaduje mezní hodnotu zákalu 5 ZF, respektive pro upravovanou povrchovou vodu vytékající z úpravny 1 ZF. Na základě

tohoto srovnání lze vypočítávat do budoucna možné snížení a zpřísnění mezní hodnoty podle vzoru okolních států a především Evropské unie. Typická míra zakalení pitné vody v optimálně fungující vodovodní síti se dle společnosti Vernier pohybuje v rozmezí 0,02 ZF až 0,5 ZF.

V poslední části rešerše uvádím principy měření zákalu turbidimetrem. Jsou zde porovnány parametry používaných turbidimetrů rozdělené do kategorií stolní turbidimetru, přenosné turbidimetru a on-line turbidimetru. Následuje postup měření zákalu turbidimetrem v terénu a popis turbidimetru Hach Lange 2100Q IS, který je používán během praktické části v případové studii.

V kapitole 3 se věnuji konkrétně zákalu vody ve vodovodních sítích. Podrobně jsou v této části rozepsány mechanismy vzniku a šíření zákalu vodovodním potrubím. Jsou zde podrobně rozepsány jednotlivé vlivy na výskyt zákalu, jako je koroze kovových potrubí, hydraulické podmínky a kvalita dopravované vody. Mezi základní podmínky vzniku zákalu ve vodovodním potrubí je přítomnost jemného suspendovaného nebo usazeného materiálu a náhlá změna hydraulických podmínek, která vyvolá odtržení jemného sedimentu od stěn potrubí a následný pohyb vodovodním potrubím. Jemný sediment v potrubí vzniká především z důvodu koroze kovových potrubí, rozpadem a opadáváním biofilmu, doběhem chemických procesů z úpravy vody, nedostatečnou úpravou vody a infiltrací materiálu z vnějšího prostředí při opravách vodovodního potrubí. Jemné sedimenty se ve vodovodním potrubí vyskytují i z dlouhodobého hlediska, kdy rychlost nepřekročí hodnotu $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V důsledku nedostatečného proudění vody se jemně suspendované částice usazují na stěny v potrubí a tvoří vrstvu jemných sedimentů.

V další kapitole se věnuji metodám pro měření potenciálu vzniku zákalu ve vodovodní síti. Nejvíce se zaměřuji na popis a podrobné vysvětlení metody na zjištění potenciální resuspenze RPM, která je použita na případové studii.

V kapitole 5 je vypracována případová studie analýzy potenciálního vzniku zákalu ve vodovodním potrubí tlakového pásma Hrbová, které je součástí distribuční sítě města Vsetín. V rámci případové studie je vypracována statistická analýza průtoků a hydraulická analýza, jejíž součástí je i matematický model tlakového pásma Hrbová.

Město Vsetín je zásobeno skupinovým vodovodem Stanovnice. Celková délka vodovodní sítě města Vsetín činí 78,9 km a je zásobeno převážně z ÚV Karolinka a jímacího území Vsetín – Ohrada. Podrobnosti o zásobování oblasti jsou uvedeny v kapitole 5.1. Tlakové pásmo Hrbová – Jasénka, na kterém je provedena případová studie, je zásobeno z VDJ Hrbová o objemu $2 \times 400 \text{ m}^3$. Celková délka vodovodního potrubí tlakového pásma Hrbová činí 7,5 km. Na tlakovém pásmu se nachází automatická tlaková stanice pro posílení tlaků.

V rámci případové studie byl v období září 2012 proveden terénní průzkum. Cílem tohoto terénního průzkumu bylo bližší určení typu zástavby a upřesnění počtu zásobovaných obyvatel. Výsledkem je přesný počet obyvatel: 2900 obyvatel. Na základě určení počtu obyvatel jsou zpřesněny uzlové odběry vody. Odběry, které se realizují v rámci daného trubního úseku se přesunuly do krajních uzlů. Pro rozdělení těchto odběrů je každému trubnímu úseku určen koeficient c_1 , který zastupuje počet napojených obyvatel. V rámci případové studie byla zohledněna taková kritéria, jako jsou vnitřní profily, materiál a stáří potrubí.

Pokud rychlost ve vodovodním potrubí za určitý časový interval překročí určitou hranici, kdy dojde k překročení kritické rychlosti, omezí se tvorba sedimentů na stěnách vodovodního potrubí. Za kritickou rychlost je považována rychlost $< 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Ručka, 2007), při které již dochází k usazování jemně suspendovaných částic. Z důvodu zjištění

vyskytujících se maximálních rychlostí je provedena statistická analýza průtoků. Cílem statistické analýzy je zjištění jaké průtoky jsou dosaženy nebo překročeny alespoň 1x denně a 1x týdně. Data pro tuto analýzu byla získána z monitorovacího systému SCADA od provozovatele. Výstupem ze statistické analýzy je histogram a křivka nedostoupení, ze které byly určeny dvojice průtoků. Průtok, který je dosažen nebo překročen alespoň 1x za den je $6,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, průtok který je dosažen nebo překročen alespoň 1x za týden je $7,57 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Na tyto dva zatěžovací stavy je provedena hydraulická analýza prostřednictvím matematického modelu za účelem zjištění maximálních rychlostí proudění, která se vyskytnou v daném časovém intervalu.

V rámci hydraulické analýzy je použit matematický model tlakového pásma Hrbová. Model zahrnuje všechny důležité objekty vodovodu, kterými je vodojem a čerpací stanice. Cílem hydraulické analýzy je simulovat stávající tlakové a průtokové poměry pro dva zatěžovací stavy. Jedná se tedy o stacionární model. Matematický model slouží pro návrh metodiky na zjištění potenciálního vzniku zákalu, zvláště pro ověření tlakových poměrů. Model byl vyhotoven na základě podkladů: stáří sítě, topologie sítě, výškopis a polohopis spotřebiště. Odběry byly rozděleny dle koeficientu c_1 , určeného podle počtu napojených obyvatel. Z výsledků matematického modelu vyplývá, že rychlost ve většině úseků při prvním zatěžovacím stavu se pohybuje v rozsahu $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Může zde tedy docházet k výraznému usazování jemných částic a tvorbě potenciálního sedimentu. Pro návrh metodiky na zjištění potenciálního vzniku zákalu je uvažován první zatěžovací stav pro průtok $6,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, který se vyskytuje nebo je překročen alespoň 1x denně z důvodu nejprůzračnější varianty pro vznik zákalu.

Pro analýzu potenciálního vzniku zákalu byla zvolena metodika potenciální resuspenze RPM. Tato metoda je zaměřená především na přítomnost a potenciální vznik zákalu ve vodovodní síti. Metoda je určená k aplikaci pro distribuční vodovody s typicky malým průměrem potrubí v rozmezí přibližně 50 až 200 mm. Metoda potenciální resuspenze RPM je založená na kontrolovaném zvyšování rychlosti v potrubí. Tento nárůst rychlosti simuluje zásah do hydraulických podmínek vodovodní sítě, který nastává během zákalových událostí, např. čištění potrubí, porucha na vodovodním potrubí nebo výjimečný odběr na požárním hydrantu během požáru. Nárůst rychlosti je stanoven na $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a je připočten k maximální rychlosti vyskytující se v potrubí. Tento nárůst byl stanoven empiricky (Vreeburg, 2004) tak, aby při tomto nárůstu docházelo ke zvýšení smykového napětí u stěn potrubí a následného narušení rovnováhy doposud soudržných vrstev sedimentů. Nárůst zákalu, který se během zvýšení rychlosti v potrubí měří je následně převeden do koeficientu RPM, který hodnotí jednotlivé úseky vzhledem k výskytu zákalu.

Výstupem navržené metodiky RPM je ohodnocení jednotlivých úseků tlakového pásma Hrbová, co se týče potenciálu vzniku zákalu. Metodika dokáže určit, ve kterých úsecích vodovodního potrubí se vyskytuje sedimentovaný zákal na stěnách potrubí a který může potenciálně způsobit v budoucnosti zákalovou událost. Výsledkem práce je návrh metodiky pro zjištění potenciálního výskytu zákalu ve vodovodní síti, která zajistí provozovateli zjištění aktuálního stavu zákalu ve vodovodním potrubí. V návaznosti na tuto metodiku bude možné snadno vypracovat a zvolit co nejefektivnější odkalovací postup.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍCH ZDROJŮ

- [1] 2000 No. 3184, Water, England and Wales, *The Water Supply (Water Quality) Regulations*. 2007.
- [2] ČSN EN ISO 7027. *Jakost vod - Stanovení zákalu*. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [3] Evropská unie. Směrnice rady 98/83/ES: o jakosti vody určené k lidské spotřebě. In: 1998.
- [4] Fpt Committee on Drinking Water . *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*. 2010.
- [5] Hach Lange. *2100Q and 2100Qis: Základní uživatelská příručka*. Hach Company, 2009.
- [6] Hach Lange. *Přenosné fotometry DR/800*. 2010. [cit. 2012-06-11]
- [7] Hach Lange. *STOLNÍ TURBIDIMETR HACH 2100AN*. 2012 [cit. 2012-06-11]
Dostupné z: www.hach-lange.cz
- [8] Hach Lange: Turbidimetry. *Hach Lange - Turbidimetry* [online]. 2012 [cit. 2012-07-09]. Dostupné z: <http://www.hach-lange.cz>
- [9] Helago s.r.o. *CyberScan TB 1000* [online]. 2012 [cit. 2012-06-14]. Dostupné z: www.helago-cz
- [10] Malá, J. Malý, J. *Chemie a technologie vody*. Studijní opora, modul 1, 2, 3 [online] Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2006
- [11] Malá, Jitka. *Složení a vlastnosti přírodních vod: Modul 1*. Brno: VUT FAST, 2005.
- [12] Ministerstvo zemědělství. *Plán rozvoje vodovodů a kanalizační území České republiky: Zlínský kraj*. 2007.
- [13] Ministerstvo zemědělství. *Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce 2010*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2011. ISBN 978-80-7084-992-7.
- [14] National Health and Medical Research Council . *Australian Drinking Water Guidelines*. 1996. ISBN 0 642 24462 6.
- [15] National Research Council. *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. 2006. ISBN 0-309-10306-1.
- [16] Novák, Pavel. *Korozní účinky prostředí na kovy*. In: *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. 2010 [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/1_3.pdf
- [17] NZ drink water standards. Envirolab-LTD. *Drinking Water* [online]. 2010 [cit. 2012-08-01]. Dostupné z: www.envirolab-ltd.co.nz
- [18] Pišan, Josef. Technoprocur CZ, spol. s.r.o. *Využití provozních fotometrů pro kontinuální měření parametrů vody*. 2010, 10 s.
- [19] Pitter, Pavel. *Hydrochemie*. Praha: Praha, 1999. ISBN 80-03-00525-6.
- [20] Ručka, Jan, Ladislav Tuhovčák a Veronika Kadlecová. *Zákal ve vodovodní síti, metody predikce jeho vzniku a šíření*. In: s. 6. 2007
- [21] Ručka, Jan. *Riziková analýza vodárenských distribučních systémů: disertační práce*. Brno, 2009. 143 s., 2 s. příloh. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí disertační práce Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
- [22] Slovenská republika. *Nariadenie vlády ktorým sa ustanovujú požiadavky na vodu určenú na ľudskú spotrebu*. In: č. 354/2006. 2004.
- [23] Státní zdravotní ústav. *Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2010*. Praha, 2011. ISBN 978-80-7071-118-3.

- [24] Technologická agentura ČR. *Technologická agentura České republiky* [online]. 2012 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: www.tacr.cz
- [25] Technoprocur. *Sigrist: turbidimetr WTM 500* [online]. 2011 [cit. 2012-07-09]. Dostupné z: http://www.technoprocur.cz/underwood/download/files/SIGRIST_AquaScat.pdf
- [26] United States Environmental Protection Agency. EPA Guidance Manual Turbidity Provisions. [online]. 1999 [cit. 2012-06-11]. Dostupné z: nepis.epa.gov
- [27] US EPA. National primary drinking water regulations. US EPA. [online]. 2012 [cit. 2012-07-31]. Dostupné z: www.water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm
- [28] Verkon - Hanna. *Verkon.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-06-11]. Dostupné z: www.verkon.cz
- [29] Verkon. *WTW PhotoFlex Turb* [online]. 2012 [cit. 2012-07-08]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/fotometry-kapesni-photoflex-wtw/>
- [30] Vernier: Turbidity Sensor. VERNIER. *Vernier.cz* [online]. 2011 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/TRB-BTA>
- [31] Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s., Pitná voda. [online]. 2012 [cit. 2012-12-20]. Dostupné z: www.vakvs.cz
- [32] Vreeburg, Joannes. *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*. Technische Universiteit Delft: Gildeprint BV, 2007. ISBN 978-90-74741-91-0.
- [33] Vyhláška 252/2004 Sb. Česká republika. In: 252/2004. MZ, 2004.
- [34] World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality FOURTH: Guidelines for drinking-water quality - 4th ed.* Malta: Gutenberg, 2011. ISBN 978 92 4 154815 1.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Ukázka zákalu na kohoutku, se kterým se v určitých případech musí potýkat zákazníci vodárenských společností	10
Obr. 2- Typické rozdělení stížností zákazníků vodárenských společností během 5 let ve Velké Británii (Vreeburg, 2007).....	11
Obr. 3 - Max. hodnoty zákalu naměřených ve vzorcích v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	13
Obr. 4 - Počet analýz zákalu nevyhovující limitní hodnotě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	13
Obr. 5 - Max. hodnoty železa naměřených ve vzorcích v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	14
Obr. 6 - Počet analýz výskytu železa nevyhovující limitní hodnotě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	15
Obr. 7 - Ukázka zákalu pitné vody – na levém obrázku zakalení vody ihned po incidentu. Na pravém obrázku vzorky zákalu po usazení.	17
Obr. 8 - Princip měření zákalu.....	26
Obr. 9 - Stolní turbidimetr HACH LANGE 2100AN (Hach Lange, 2012).....	29
Obr. 10 - Stolní turbidimetr HI 83414 (Verkon – Hanna, 2012).....	29
Obr. 11 - Stolní turbidimetr CyberScan TB 1000 (Helago s.r.o, 2012).....	30
Obr. 12 - WTW pHotoFlex Turb (Verkon, 2012)	32
Obr. 13 – Přenosný turbidimetr Hach Lange 2100Q IS (Hach Lange, 2012)	33
Obr. 14 - Online turbidimetr Sigrist WTM 500 (Technoprocure, 2011).....	34
Obr. 15 - online turbidimetr Hach Lange 1720E SC (Hach Lange, 2012).....	35
Obr. 16 – Používaný turbidimetr Hach Lange 2100 Q IS s kyvetou (Hach Lange, 2009).....	37
Obr. 17 - Typický průběh zákalové události v čase (Ručka a kol., 2007).....	38
Obr. 18 - Proces transportu a usazování částic ve vodovodním potrubí (Vreeburg, 2007).....	39
Obr. 19 - Akumulovaný sediment na stěnách ocelového potrubí.....	40
Obr. 20 - Schéma průběžného monitorování kvality vody	43
Obr. 21 - Typický model průběžného monitorování zákalu	43
Obr. 22 - Princip metody potenciální resuspenze na části vodovodního potrubí	45
Obr. 23 - Nárůst rychlosti oproti původní rychlosti po určitou dobu	45
Obr. 24 - Typický průběh křivky zákalu během metody RPM rozdělený na čtyři oblasti ..	47
Obr. 25 - Příklad zákalu v závislosti na čase vyvolaného metodou RPM.....	49
Obr. 26 - Jednotka TILVS. Na levé straně obrázku je čerpadlo a na pravé straně membránová filtrační jednotka (Vreeburg, 2007)	50
Obr. 27 -Přístroj na měření koncentrace zákalu Homeflow (Vreeburg, 2007).....	50

Obr. 28 -Na levém obrázku je zachycena koroze ocelového potrubí s korozními produkty, na pravém obrázku je znázorněno totéž ocelové potrubí s výrazným poškozením povrchu po odstranění korozních produktů. (Novák, 2010)	53
Obr. 29 - Charakter zástavby, panelové domy, část ulice Dolní Jasénka	60
Obr. 30 - Charakter zástavby, panelové domy, část ulice Mládí	61
Obr. 31 - Charakter zástavby, rodinné domy, část ulice Na Výsluní	61
Obr. 32 - Výhled na část zásobené oblasti tlakového pásma Hrbová	62
Obr. 33 - Schéma Vodojemu Hrbová (Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s.)	63
Obr. 34 - VDJ Hrbová.....	63
Obr. 35 - Schéma ATS Jasénka - Babyka (Vodovody a kanalizace Vsetín, a.s.).....	64
Obr. 36 - Schéma tlakového pásma Hrbová	66
Obr. 37 - Empirická hustota pravděpodobnosti	70
Obr. 38- Histogram	70
Obr. 39 - Empirická distribuční funkce	71
Obr. 40 -Schéma metody RPM na tlakovém pásmu Hrbová, postup analýzy na jednotlivých úsecích	76
Obr. 41- Měřicí hydrantový nástavec	77
Obr. 42 - Měřicí hydrantový nástavec v provozu osazený na hydrantu	78
Obr. 43 - Detail osazeného měřícího hydrantového nástavce	78

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1- Hodnoty zákalu v pitné vodě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011)	12
Tabulka 2 – Počty provedených analýz zákalu v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	13
Tabulka 3 - Hodnoty železa v pitné vodě v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	14
Tabulka 4 - Vyhodnocení provedených analýz v oblasti výskytu železa v roce 2010 (Státní zdravotní ústav, 2011).....	15
Tabulka 5 - Minimální roční četnost odběru a rozsah rozborů vzorků pitné vody (mimo balené) dle vyhlášky č. 252/2004 Sb. § 14 Příl. 4.	19
Tabulka 6 - Přehled legislativně stanovených maximálních hodnot zákalu v zahraničí	21
Tabulka 7 - Popis metod měření zákalu turbidimetricky dle ČSN EN ISO 7027	26
Tabulka 8 - Parametry stolních turbidimetrů	30
Tabulka 9 - Parametry přenosných turbidimetrů	33
Tabulka 10 - Příklad hodnocení metody RPM pro zjištění potenciálního výskytu zákalu. Hodnocení pěti ukazatelů čtyřmi hodnotami.	47
Tabulka 11 - Příklad hodnocení metody RPM pro určení optimálního úseku potrubí na odkalení.....	48
Tabulka 12- Výroba pitné vody ve zdrojích v roce 2011 (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012).....	59
Tabulka 13 - Spotřeba vody pro tlakové pásmo Hrbová (Ručka, 2009)	62
Tabulka 14 - Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle materiálu a stáří potrubí [m] (Ručka, 2009).....	64
Tabulka 15 - Celková délka jednotlivých skupin potrubí podle DN a materiálu potrubí [m] (Ručka, 2009).....	65
Tabulka 16-Hodnoty základních ukazatelů kvality pitné vody ve vodovodní síti města Vsetín (Vodovody a kanalizace Vsetín a.s., 2012)	65
Tabulka 17 - Získaná data z monitorovacího systému SCADA (vzorek – ukázka)	67
Tabulka 18 - Statistická analýza průtoků.....	69
Tabulka 19 - Hodnotící tabulka RPM metody pro tlakové pásmo Hrbová	75

SEZNAM PŘÍLOH

1. Hydraulická analýza TP Hrbová - 1. Zatěžovací stav
2. Hydraulická analýza TP Hrbová – 2. Zatěžovací stav
3. Schéma vodovodní sítě – nadmořské výšky a DN
4. Schéma vodovodní sítě – materialy potrubí a stárí
5. Schéma vodovodní sítě – uzlové odběry a koeficient c_1
6. Postup měření potenciálu vzniku zákalu
- 7.A Mapa měření potenciálu vzniku zákalu – TP Hrbová M 1:2000
- 7.B Mapa měření potenciálu vzniku zákalu – TP Hrbová M 1:2000
- 7.C Mapa měření potenciálu vzniku zákalu – TP Hrbová M 1:2000
- 7.D Mapa měření potenciálu vzniku zákalu – TP Hrbová M 1:2000
- 7.E Mapa měření potenciálu vzniku zákalu – TP Hrbová M 1:2000

SUMMARY

The aim of this thesis is to summarize the available knowledge on the occurrence and formation of turbidity in the water supply system and the design and application of methodology for measuring the potential occurrence of turbidity in the water supply. The thesis is tackled by building on an applied research project No. TAČR TA02020604 "Tools for the prevention of turbidity in water networks." The project is in collaboration Brno University of Technology Faculty of Civil Engineering, Engineering Company Provod s.r.o. and Water and Sewerage Company Vsetín a.s.

Problems of the current state of the quality of drinking water in public water supply systems, with a focus on the occurrence of cataract formation turbidity legislative change indicators of drinking water in the Czech Republic and abroad, and potential methods of measuring turbidity is described in the first part of the thesis. Development of a mathematical model of pressure band Hrbová statistical analysis and elaboration of withdrawals from the reservoir is also included.

Methodology for the measurement of turbidity potential is applied to a case study Hrbová pressure zone which is part of the distribution network of Vsetín. Resuspension potential methodology RPM was chosen to analyze the potential of turbidity. This method is focused on the present and potential development of turbidity in the water supply network. The method is designed for application to the distribution mains with small diameter pipeline typically in the range of approximately 50 to 200 mm. Result of this work is the proposal for a methodology to determine the potential occurrence of turbidity in the water supply network to ensure that the operator of the current status of turbidity in the water pipes. Following this methodology will be easy to prepare and choose the most effective sludge process.