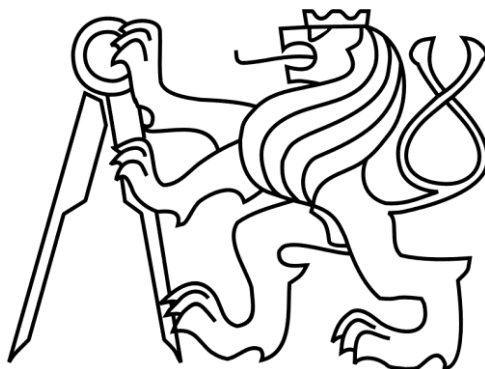


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra zdravotního a ekologického inženýrství



ELIMINACE ŽELEZA VE VODOVODNÍ SÍTI

Diplomová práce

BC. JAKUB ŠEFC

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Iva Čiháková CSc.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Šefc

Jméno: Jakub

Osobní číslo: 395957

Zadávací katedra: Katedra zdravotního a ekologického inženýrství

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Eliminace železa ve vodovodní síti

Název diplomové práce anglicky: Elimination of iron in water supply network

Pokyny pro vypracování:

Téma bude zpracováno na základě rešerše zahraničních i domácích zdrojů, odborné literatury a aktuální situace provozovatele v řešené lokalitě.

Pomocí modelu průtoku vody v síti bude zpracován pohyb železa a navrženo hospodaření s vodou a návrh provozování konkrétní oblasti ve vodovodní síti.

Diplomant se zaměří na materiálovou nedostatečnost stávajícího vedení a vliv provozování na výslednou kvalitu pitné vody.

Práce bude také zaměřena na ekonomický faktor - snižování VNF (vody nefakturované) a to především složky VS (vlastní spotřeba).

Seznam doporučené literatury:

Aktuální ČSN a EN, SOVAK, Pitter, P. Hydrochemie

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Iva Čiháková, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 5.10.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

5.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí doc. Ing. Ivy Čihákové CSc.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především paní docentce Ing. Ivě Čihákové CSc., která byla mojí vedoucí práce. Děkuji za odborné rady, připomínky, názory, užitečné informace a vřelý přístup.

Déle bych rád poděkoval mým rodičům za jejich podporu.

Eliminace železa ve vodovodní síti

Elimination of iron in water supply network

Abstrakt:

Výskyt železa ve vodě a s ním spojená koroze železa je jeden z nejsložitějších a nejnákladnějších problémů, kterým čelí inženýrské sítě pro rozvod a distribuci pitné vody. Na korozi má vliv velký počet parametrů, včetně kvality vody a jejího složení, druh proudění, biologická aktivita a inhibitory koroze. Aby mohlo být navrženo co nejefektivnější řešení, je zapotřebí nejprve porozumět a pochopit celý problém výskytu a chování železa ve vodě, a to zejména ve vodě pitné. Proto je nutné se nejprve zabývat genezí železa ve vodě a jejím důsledkům.

Tato práce je rozdělena do tří základních částí. První část pojednává o korozi železa ve vodovodním potrubí pro distribuci pitné vody, jejích příčinách a důsledcích. Druhá část je zaměřena na řešení a prevenci tohoto problému. Třetí část se zabývá problémem z praxe na vodovodní síti v obci Kramolna.

Klíčová slova: *Zásobování pitnou vodou, Kramolna, železo ve vodě, eliminace železa, koroze potrubí, inkrustace*

Abstract:

The incidence of iron in the water and its associated corrosion of iron is one of the most complex and costly problems, which utilities for transmission and distribution of drinking water is facing. Corrosion affects a large number of parameters, including water quality and composition, type of flow, biological activity and corrosion inhibitors. In order to design the most effective solution, it is necessary to first understand and grasp the problem of occurrence and the behavior of iron in the water, especially drinking water. Therefore, at first it is necessary to deal with the genesis of iron in water and its consequences.

This work is divided into three basic parts. The first part discusses the corrosion of iron water pipe for the distribution of drinking water, its causes and consequences. The second part is focused on solving and preventing the problem. The third part deals with the problem from practice on the water supply network in the village Kramolna.

Keywords: Drinking water supply, Kramolna, iron in the water, eliminating iron pipe corrosion, encrustation

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Rešerše.....	4
2.1	Zahraniční literatura	4
2.2	Domácí literatura.....	5
3	Železo.....	7
3.1	Charakteristické obecné informace	7
3.1.1	Geneze železa	7
3.2	Výskyt ve vodách	8
3.2.1	Formy výskytu ve vodách	10
3.3	Hydrochemie	15
3.3.1	Vlastnosti a význam železa	17
3.3.1.1	Železnaté vody	19
3.3.2	Požadavky na jakost pitné vody	19
4	Koroze	19
4.1	Koroze ocelového potrubí	19
4.1.1	Druhy koroze materiálu.....	20
4.1.2	Faktory ovlivňující korozi.....	20
4.1.2.1	Vliv pH.....	21
4.1.2.2	Zásaditost	22
4.1.2.3	Tlumivá kapacita vody	22
4.1.2.4	Rozpuštěný kyslík	23
4.1.2.5	Inkrustace	24
4.1.2.6	Uhličitan vápenatý.....	24
4.1.2.7	Siderit	24
4.1.2.8	Zelená koroze	24
4.1.3	Ukazatele koroze	25
4.1.3.1	Kalcit index	25
4.1.3.2	Larsonův index (Larson Index).....	25
4.1.3.3	Zbytkové dezinfekční činidlo.....	26
4.1.3.4	Fosfátové Inhibitory	26
4.1.3.5	Polyfosforečnany.....	26
4.1.3.6	Orthofosforečnan.....	26
4.1.3.7	Bimetalické (zinek) fosforečnany	27
4.1.3.8	Křemičitany	27
4.1.3.9	Stáří potrubí.....	27
4.1.3.10	Rychlost proudění	28
4.1.3.11	Doba stagnace	28
4.1.3.12	Biologická aktivita	28
4.1.3.13	Teplota.....	28
4.1.3.14	Přírodní organické látky	29
4.1.3.15	Volný CO ₂	29
4.1.3.16	Magnetické efekty	29

4.2	Vliv pH na rychlost oxidace	30
4.2.1	Koroze ocelového a litinového potrubí	32
4.2.1.1	Mechanismy koroze	34
4.2.1.2	Produkty koroze a další minerály vyskytující se v potrubí	35
4.2.1.3	Shrnutí	35
4.2.2	Inkrustace	35
4.2.2.1	Inkrustace v potrubí.....	36
4.2.2.2	Inkrustační struktura.....	37
4.2.2.3	Shrnutí a závěry.....	39
5	Opatření proti korozi a inkrustaci.....	41
5.1	Odkalování	41
5.1.1	Odvzdušnění.....	42
5.1.2	Plán odkalování	43
5.1.3	Odběr vzorků.....	43
5.1.4	Vliv hydrauliky potrubí při odkalování.....	44
5.1.4.1	Výhody sekčních uzávěrů	44
5.1.4.2	Vliv průměru vypouštěcího potrubí	45
5.1.5	Požadavky na odkalování řadu.....	45
5.1.5.1	Stanovení optimálních hydraulických podmínek.....	46
5.1.6	Strategie odkalování sítě respektující tvorbu usazenin	46
5.1.6.1	Přístup.....	47
5.2	Čištění vodovodního potrubí.....	48
5.2.1	Legislativní požadavky na jakost pitné vody	48
6	Praktická část: vodovod Kramolna	49
6.1	Vodovod - současný stav.....	50
6.1.1	Zhodnocení současného stavu sítě	51
6.1.2	Popis problému.....	51
6.1.3	Stávající vliv provozování.....	53
6.1.3.1	Výsledky vzorkování.....	53
6.1.4	Model sítě.....	55
6.1.4.1	Postup modelování	56
6.1.5	Cenové varianty - VNF vs. vyvložkování	60
6.2	Závěr.....	Chyba! Záložka není definována.
7	Závěr.....	62
	Literatura	64
	Seznam obrázků	70
	Seznam tabulek.....	71

1 Úvod

Potrubí, a to především litinové, je používáno k dopravě pitné vody po dobu více než 500 let: koroze železného potrubí je problémem trvajícím stejně tak dlouhou dobu. Americká společnost Water Works (AWWA) odhaduje, že tento problém bude v průběhu příštích 20 let stát americké vodárny 325 miliard dolarů. Tato hodnota AWWA je postavena na odhadu US Environmental Protection Agency (USEPA), která odhaduje náklady 77,2 miliard \$ pro servis a výměnu distribučních soustav během příštích 20 let. V České republice je celkem 72 793 km vodovodních řadů, z toho největší zastoupení mají plasty (48,6 %) a kovové materiály (47,5 %) [2]. Pro porovnání, například v USA je zastoupení materiálu v následujících poměrech: litina (38 %), tvárná litina (22 %) a ocel (5 %), ostatní tvoří plasty (35 %). [2] V roce 1997 zjistil průzkum 100 největších výzkumných prací asociace American Water Foundation (AWWARF), že "nejběžnější problém distribuční soustavy je koroze litinového potrubí." [1]

Koroze železného potrubí v distribučním systému může způsobit tři odlišné, ale související problémy. Za prvé, potrubní hmota je degradována oxidací na rozpustné formy železa nebo tvorbou inkrustace. Za druhé, inkrustace může vytvořit i velké nárůstky, které zvyšují ztráty a pokles kapacity potrubí. A za třetí, uvolňování rozpustných částic železa a jeho vedlejších produktů do vody snižuje jeho estetickou kvalitu a často vede ke stížnostem spotřebitelů na "červenou vodu". Vodní hospodářství se musí zabývat všemi těmito aspekty koroze.

Pro tyto problémy existují příslušná řešení. Provozovatel sítě má na výběr z několika možností, jak na vzniklou situaci reagovat. V první řadě je nutné nalézt „jádro“ problému a neřešit jen jeho následky. Například pokud máme velmi vysoké hodnoty železa u spotřebitele, bude lepší, pokud vyčistíme kritický úsek řadu od inkrustů a nánosů železa, než když budeme jen častěji odkalovat.

V obci Kramolna se s podobným problémem potýkají. Jsou zde často překračovány limitní hodnoty železa ($0,20 \text{ mg.l}^{-1}$). Provozovatel zahájil systematické, pravidelné odkalování, což problém z části zlepšilo, ale nevyřešilo úplně. Proto byl celý problém zkoumán podrobněji a je rozebrán ve třetí části této práce.

2 Rešerše

2.1 Zahraniční literatura

Na problematiku výskytu železa ve vodovodním potrubí se zaměřuje odborná studie *Review of Iron Pipe Corrosion in Drinking Water Distribution Systems* [1] (Přehled železné koroze potrubí v distribučních systémech na pitnou vodu) od autorů Laurie S. McNeill a Marc Edwards. Z této práce byla pro diplomovou práci použita především kapitola: Faktory ovlivňující korozi. Tato americká studie shrnuje sto sedmdesát studií, knih, přednášek a dalších odborných článků o problematice výskytu železa ve vodovodní síti, a to především ve formě koroze a jejích produktů. Vychází z amerických a kanadských poznatků, nicméně z jejího obsahu lze řadu informací aplikovat stejně tak pro vodovodní síť v České republice. Hlavním cílem této studie je porovnat dosavadní studie a materiály o korozi ve vodovodním potrubí. Lze se v ní setkat s informacemi o základních chemických reakcích týkajících se železa. Jsou v ní uvedeny poznatky o všech faktorech ovlivňujících korozi, od vlivu pH, přes tlumivou kapacitu vody až po vliv polyfosforečnanů a rychlosti proudění. Okrajově je zmíněn vliv inkrustace, který je ovšem podrobně rozebírán v článku *Iron Corrosion Scales: Model for Scale Growth, Iron Release, and Colored Water Formation* [2] (Korozní inkrustace: Model pro růst inkrustace, uvolňování železa a tvorbu obarvené vody), který napsali Pankaj Sarin (Oklahoma State University), Darren A. Lytle (United States Environmental Protection Agency), Waltraud M. Kriven (University of Illinois, Urbana-Champaign) a V. L. Snoeyink. Z tohoto článku byly použity informace o inkrustaci ve vodovodním potrubí, o kterých tento článek velmi podrobně pojednává. Jsou zde rozebírány reakce probíhající na molekulární úrovni, které ovšem v konečném důsledku způsobují růst inkrustů a ovlivňují tak kvalitu dopravované vody. Velmi dobře je zde rozebrána samotná struktura inkrustů, která se skládá ze čtyř základních vrstev: korodovaný materiál, porézní jádro, podvrstva a horní povrchová vrstva. Každá z těchto vrstev má svoje specifické vlastnosti, které se podílejí na celkovém chování inkrustů a jejich reakcích v dopravované vodě. Jejich vliv je velmi značný a pochopení celého procesu inkrustace je důležité pro vyhodnocení celkového stavu jakéhokoliv zkoumaného kovového potrubí.

V rámci této práce byla prostudována i další literatura, jako například *Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen* [3] (Uvolňování železa z korodovaného potrubí ve vodovodním potrubí pro pitnou vodu: Vliv rozpuštěného kyslíku), která se zabývá především působením rozpuštěného kyslíku na

rozpuštění inkrustací a tím obohacování přepravované vody o železo. Autoři studie zjistili, že pokud se sníží množství rozpuštěného kyslíku ve vodě, klesne i koncentrace rozpuštěného železa.

Pro diplomovou práci byl zajímavým přínosem článek *The Importance of Temperature In Assessing Iron Pipe Corrosion in Water Distribution Systems* [4] (Význam teploty při posuzování železné koroze potrubí ve vodě distribučních systémů) též od autorů Laurie S. McNeill a Marc Edwards. Článek zkoumá vliv teploty a potvrzuje mínění, že teplota, jak se očekávalo, hraje významnou roli při korozních reakcích železného potrubí v rozvodech pitné vody. Zkoumá teplotní dopady na řadu parametrů, které jsou důležité pro vnitřní korozi potrubí, včetně fyzikálních vlastností roztoku, termodynamických a fyzikálních vlastností železné inkrustace, chemických reakcí a biologické aktivity. Kromě toho uvádí, že kolísání teplot a teplotních gradientů může vést k novým korozím hodných zřetele personálu pro úpravu pitné vody.

Reliability of underground pipelines subject to corrosion [5] (Spolehlivost podzemních potrubí podléhající korozi), M. Ahammed and R. E. Melchers. Tato práce se zabývá odhadem spolehlivosti podzemních potrubí při plnění své funkce za vnějšího i vnitřního zatížení a odolností vůči korozi, a to vnitřní, vnější, nebo obojí. Tyto faktory mají vliv na pevnost potrubí a jeho odolnost vůči příslušnému zatížení. Jak bylo očekáváno, potvrdilo se, že spolehlivost potrubí se postupem času snižuje. Koroze je jev, ve kterém panuje značná nejistota. Jedním ze způsobů, který umožňuje jeho zkoumání, je modelování prostřednictvím pravděpodobnostního modelu úbytku materiálu jako nelineární funkce času. Tento přístup je prozkoumán v této práci spolu s použitím nelineární funkce prvního řádu s předpoklady pro atmosférickou korozi. Tento model ukazuje chování materiálu při namáhání vyplývajícím z vnějšího zatížení a vnitřního tlaku, čímž funkce mezního stavu vyjadřuje hranici mezi správnou funkčností a selháním systému. Pravděpodobnost selhání systému je pak hodnocena pomocí technik vyvinutých pro strukturální analýzy spolehlivosti.

2.2 Domácí literatura

Důležitou domácí publikací, ve které je mnoho užitečných informací je *Hydrochemie* [6] od pana profesora Pittera. Z ní byly k danému tématu použity především kapitoly vztahující se k železu a jeho sloučeninám. Například přímo kapitola *Železo* zahrnuje základní poznatky z oboru chemie a hydrochemie. To znamená genezi železa, jeho formy výskytu ve vodách, vlastnosti a význam železa ve vodách. Jsou zde uvedeny i základní chemické reakce, jako

například oxidace železa. Důležitou kapitolou jsou Požadavky na jakost pitné vody a Legislativa, která shrnuje současné normy a vyhlášky pro pitnou vodu.

Kvalitně zpracovaná práce, jejíž část, která se týká železa ve vodě, byla použita pro diplomovou práci, nese název Geochemie interakcí ryzího železa a zinku v povrchových podmínkách [7], od slovenského kolegy Ing. Dominika Puczoka. Je zde kladen důraz především na pozinkované potrubí, ale jsou zde dobře zpracovány některé informace o chování železa ve vodním prostředí. Například zde dobře shrnuje poznatky o fungování dvojmocného a trojmocného železa, které se ve vodním prostředí vyskytuje nejčastěji.

Současné poznatky v oblasti železa velmi dobře shrnuje práce Železo a jeho sloučeniny [8], kterou napsal brněnský kolega Karel Krpoun. Je v ní uvedeno velké množství informací a poznatků o železe samotném a to především z chemického pohledu. Pro tuto práci byla především užitečná kapitola: Vybrané sloučeniny železa ve druhém a třetím oxidačním stupni, která ještě více rozvíjí to, co mírně rozebírá Ing. Puczok ve své práci Geochemie interakcí ryzího železa a zinku v povrchových podmínkách [7].

Ke stejné problematice, tentokrát však přímo v kontextu s odkalováním je článek Optimalizace odkalování a vypouštění příváděcích řadů – zamýšlíme se nad hydraulikou potrubí? [9] Kde je rozebíráno, že provádět optimální odkalování vodovodních řadů je jednou z podmínek zajištění dobré kvality dopravované vody. Zvláště dnes, kdy je spotřeba vody v porovnání s minulostí nízká, musí stát požadavek na dobré odkalování řadů v popředí zájmu provozovatelů vodovodů. Příspěvek se zabývá nutnými požadavky na vypouštění, odkalování a opravování příváděcích řadů.

Dobrym zdrojem informací je měsíčník vydávaný sdružením oboru vodovodů a kanalizací České republiky (SOVAK ČR). Zde jsou publikovány nejnovější poznatky v oboru vodovodů a kanalizací. V této práci byly využity především tyto články: Vodovodní řady a kanalizační stoky v ČR – analýza dat [10], kde autor přináší veškeré informace ohledně materiálů potrubí, jeho stáří a délek, použitých na území České republiky. Je z něho zřejmé, že více jak polovina potrubí, používaná pro distribuci pitné vody v České republice (déle ČR), je z kovových materiálů, a to především z oceli a litiny. Jakost pitné vody dodávané veřejnými vodovody v české republice v roce 2007 [11], uvádí zjištění, že hodnocení dodržování limitních hodnot jednotlivých ukazatelů jakosti pitné vody, daných vyhláškou 252/2004 Sb. v roce 2007, byla ve větších oblastech zásobujících více než 5 000 obyvatel nejčastěji překračována mezní hodnota železa. V menších zásobovaných oblastech bylo poměrně časté překročení mezních hodnot nalezeno u ukazatelů pH (15 %), železa (8,7 %) a manganu (7,4 %).

3 Železo

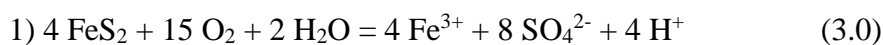
3.1 Charakteristické obecné informace

Železo je díky stálosti atomových jader značně rozšířené v celém vesmíru [12]. Na Zemi je železo nejrozšířenějším těžkým kovem. Železo je také jedním z nejrozšířenějších prvků v zemské kůře, kde se nachází jen ve formě sloučenin: hematit (krevet) Fe_2O_3 , limonit (hnědel) $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, magnetit (magnetovec) Fe_3O_4 , siderit (ocelek) FeCO_3 a pyrit (křez železný) FeS_2 . Malá množství doprovázejí rudy jiných kovů, nachází se též v půdě, minerálních vodách jako $(\text{Fe}(\text{HCO}_3)_3)$ atd. [13] [14].

V povrchových vodách se běžným rozpouštěním těchto rud však vody obohacují jen málo. Rozpouštění železa napomáhá přítomnost CO_2 a huminových látek. Proto vyšší koncentrace železa nacházíme především v kyselých vodách z rašelinišť. Mimořádně vysoké koncentrace železa v kyselých důlních vodách jsou zase výsledkem rozkladu siřičkové rudy např. pyritu. Množství železa ve vodách ovlivňuje zejména pH prostředí, hodnota oxidačně-redukčního potenciálu a množství komplexotvorných látek ve vodě. Značnou roli hrají i bakterie při biochemických procesech [14].

3.1.1 Geneze železa

Nejrozšířenější železné rudy jsou pyrit FeS_2 , lepidokrokit (krevet) Fe_2O_3 , magnetovec Fe_3O_4 , limonit Fe_2O_3 a siderit FeCO_3 . Železo je v malé koncentraci obsaženo také v řadě přírodních hlinitokřemičitanů. Pouhým rozpouštěním uvedených látek, aniž by docházelo k chemickým reakcím, se vody obohacují železem jen málo. Rozpouštění ale napomáhá přítomnost oxidu uhličitého a huminových látek (komplexace). Mimořádně vysoké koncentrace železa lze nalézt v kyselých důlních vodách obsahujících kyselinu sírovou, která vznikla oxidací sulfidické rudy pyritu. V mechanismu oxidace pyritu se uplatňují chemické i biochemické procesy. Biochemická oxidace probíhá za přítomnosti chemolitotrofních mikrobů *Thiobacillus* nebo *Ferrobacillus*. [15] Oxidaci pyritu lze vystihnout touto sumární rovnicí



K rozkladu pyritu může docházet i v anoxických podmínkách a to ve vodách, které obsahují větší množství CO₂, a to podle rovnice:



Antropogenním zdrojem železa v přírodních a užitkových vodách mohou být některé průmyslové odpadní vody (např. z mořiren kovů, válcoven, drátoven aj.) a korozní procesy ve vodovodním potrubí. Železo je hlavním kovem tvořícím součást dnových sedimentů, jeho obsah se pohybuje až v desítkách gramů v 1 kg sušiny a do kapalně fáze může přecházet v důsledku remobilizačních procesů.

3.2 Výskyt ve vodách

V malých koncentracích je železo běžnou součástí přírodních i užitkových vod, většinou jako mikrokomponenta. Koncentrace železa většinou převyšuje koncentraci manganu. Například v tocích povodí Vltavy se poměr charakteristických hmotnostních koncentrací p(Fe) : p(Mn) pohybuje od 2,2 do 9,0 [14]. Výsledky analýz značně závisejí na předúpravě vzorku. Sloučeniny železa se po oxidaci snadno hydrolyzují, postupně vylučují hydratovaný oxid železitý, částečně koloidně dispergovaný, částečně ve formě suspenze. Porovnávat lze proto jen výsledky získané za stejných podmínek úpravy vzorku. Při nedostatečném odstranění nerozpuštěných forem (včetně koloidních) údaje neodpovídají rozpustnosti málo rozpustných sloučenin železa [14].

Železo je díky svým horizontálním podobnostem součástí skupiny tzv. triády železa. Triádu železa tvoří tyto prvky: železo (Fe), kobalt (Co) a nikl (Ni). Prvky triády jeví v kovové podobě i ve svých sloučeninách řadu shodných vlastností, jako např. obvyklý oxidační stav +II v jednoduchých sloučeninách. Železo vystupuje také v oxidačním stavu +III a často tomuto stavu dává přednost. Kobalt rovněž snadno přechází do oxidačního stavu +III. V tomto stavu je v komplexních sloučeninách velmi stabilní [13].

Železo se ve vodách vyskytuje ve dvou oxidačních stupních, a to:

- V oxidačním stupni +II, kde je zastoupen jako dvojmocný kation Fe^{2+} , který se vyskytuje v anoxickém a redukčním prostředí,
- V oxidačním stupni +III jako trojmocný kation Fe^{3+} , který je stabilnější formou ve vodách obsahujících kyslík.

V oxidačním stupni +II se železo vyskytuje ve formách jako bílý hydroxid $\text{Fe}(\text{OH})_2$, při zvýšeném obsahu CO_2 jako FeCO_3 , při zvýšeném obsahu síry jako FeS . Množství rozpuštěného Fe^{2+} přitom záleží na rozpouštění a srážení těchto minerálů, přímo navazující na pH prostředí a obsah CO_2 a kyslíku.

V anoxickém vodním prostředí se kromě rozpuštěného kationtu Fe^{2+} vyskytují i hydroxokomplexy $[\text{FeOH}]^+$ a v silně alkalickém prostředí asociáty $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^0$ a $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, v prostředí s CO_2 se v malém množství mohou vyskytovat asociáty $[\text{FeHCO}_3]^+$ a $[\text{FeCO}_3]^0$ v přítomnosti chloridů a síranů zase asociáty $[\text{FeCl}]^-$ a $[\text{FeSO}_4]^0$. V okysličených vodách se železo vyskytuje ve formách zejména jako červenohnědá sraženina - $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (amorfní hydroxid železitý) a jako $\alpha\text{-FeOOH}$ (goethit) a $\gamma\text{-FeOOH}$ (lepidokrokit), nebo Fe_2O_3 (kryptokrystalický hematit), které jsou v tomto prostředí nejstabilnější formou. Rozpustnost trojmocného kationtu železa v oxických podmínkách je dána hlavně rozpustností hydroxidu železitého. Nejvyšší koncentrace Fe^{3+} jsou proto v silně kyselém prostředí s pH pod 2.

Mezi hlavní rozpuštěné formy železa v oxickém prostředí v závislosti na pH, patří: Fe^{3+} , jehož koncentrace nejsou běžně výrazné, dále komplexy $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$, $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{Fe}(\text{OH})_3]^0$, $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$, který se vyskytuje až nad hodnotami pH 10. Ve vodním prostředí železo hydrolyzuje a vytváří nejprve mononukleárních hydroxokomplexy, které dále přecházejí do polynukleárních hydroxokomplexů. Tvoří se dimer $[\text{Fe}_2(\text{OH})_2]^{4+}$, který dále reaguje a vznikají složitější řetězce, např. $[\text{Fe}_2(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_7]^{3+}$, který takto tvoří koloidní hydroxopolymery, z nichž se pak vylučuje sraženina amorfního hydroxidu železitého. Tvorba komplexů se projevuje zabarvením vody do žluta, později až do červenohnědé barvy, z níž se finálně srážejí minerály, zejména hydratovaný oxid železitý $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

V některých případech při zvýšených koncentracích síranů se mohou ve vodách vyskytovat asociáty $[\text{FeSO}_4]^+$, při zvýšeném obsahu chloru chlorokomplexy $[\text{FeCl}]^{2+}$ a $[\text{FeCl}_4]^-$, a za přítomnosti fosforečnanu $[\text{FeHPO}_4]^+$ a $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)]^{2+}$. Se železem, zejména

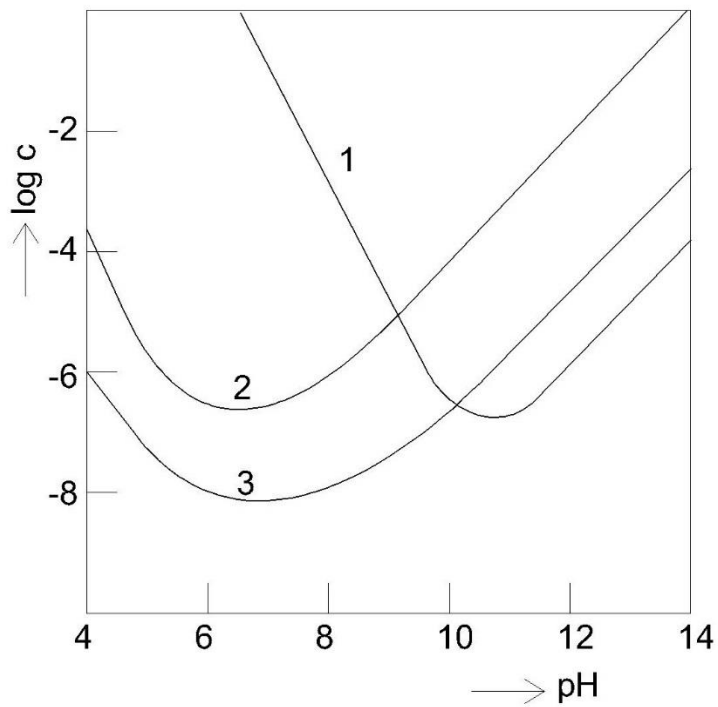
s Fe^{3+} , tvoří komplexy i organické látky a to huminové látky, především fulvokyseliny. Huminové látky pocházejí z rozkladu organické hmoty. Najdeme je hlavně na rašeliništích nebo v prostředí půd, kde vážou železo a způsobují zrychlenou migraci železa mezi horizonty [7].

3.2.1 Formy výskytu ve vodách

Formy výskytu rozpuštěného a nerozpuštěného železa ve vodách jsou závislé na hodnotě pH, oxidačně-redukčním potenciálu a komplexotvorných látkách přítomných ve vodě. Analyticky lze odlišit celkové železo, rozpuštěné železo, nerozpuštěné železo a železo organicky vázané. Železo se vyskytuje ve vodách v oxidačním stupni +II nebo +III. V bezkyslíkatém (anoxickém) redukčním prostředí podzemních vod a v povrchových vodách u dna nádrží a jezer se vyskytuje železo v oxidačním stupni +II. V takovém případě je rozpustnost Fe^{II} limitována rozpustností $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$, $\text{FeCO}_3(\text{s})$, event. $\text{FeS}(\text{s})$ v závislosti na složení vody a na okolních podmínkách.

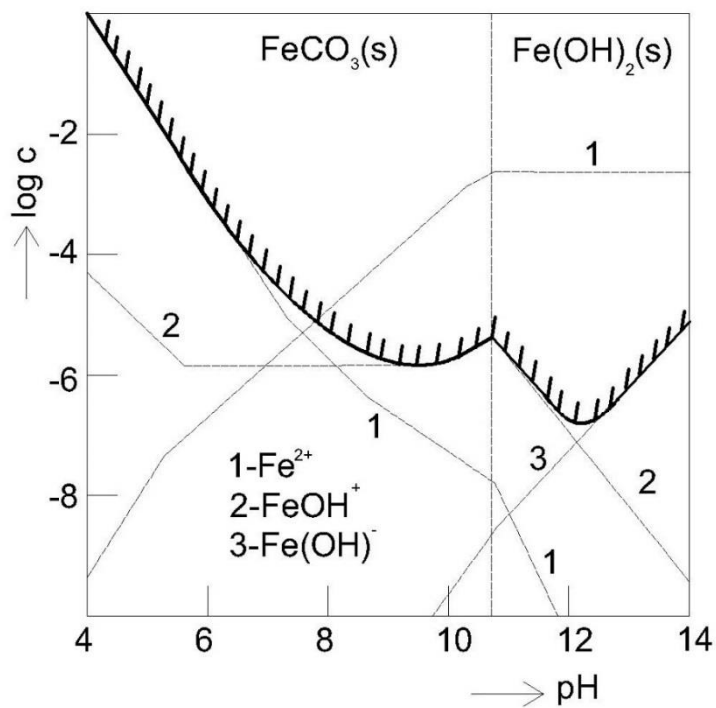
Rozpustnost $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$ v porovnání s rozpustností hydratovaných oxidů Al a Fe^{III} je znázorněna na obr. 3-1. Rozpustnost $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$ je poněkud větší než rozpustnost $\text{Fe}(\text{OH})(\text{s})$, zejména v kyselé oblasti. Fe^{II} lze jako hydratovaný oxid železnatý eliminovat z vody účinně teprve ve více alkalickém prostředí, při hodnotách pH asi nad 9. Minimum rozpustnosti u amorfního $\text{Fe}(\text{OH})_2$ je mezi hodnotami pH 1 až 11, u amorfního $\text{Fe}(\text{OH})_3$ asi v rozmezí hodnot pH 6,5 až 7,5 a u amorfního $\text{Al}(\text{OH})_3$ v rozmezí pH asi 6 až 7. V silně alkalické oblasti je $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ poněkud rozpustnější než $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$.

U vod obsahujících vyšší koncentrace celkového oxidu uhličitého je rozpustnost v neutrální oblasti limitována rozpustností $\text{FeCO}_3(\text{s})$. Diagram rozpustnosti systému $\text{Fe}^{\text{II}} - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ je na obr.3-2 a diagram oblastí převažující existence na obr. 3-3. V anoxických podmínkách hlubinných podzemních vod obsahujících rozpuštěné formy oxidu uhličitého přichází za určitých podmínek v úvahu vylučování Fe^{II} jako $\text{FeCO}_3(\text{s})$ (siderit). Srážení sideritu FeCO_3 však probíhá jen zvolna a vyžaduje značné přesycení. V neutrálním prostředí se dosahuje chemické rovnováhy až i po několika měsících. Proto se někdy ve vodách FeCO_3 ani nevylučuje, ačkoliv jsou pro to vhodné termodynamické podmínky, a jako tuhá fáze přichází v úvahu především $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$ [15].



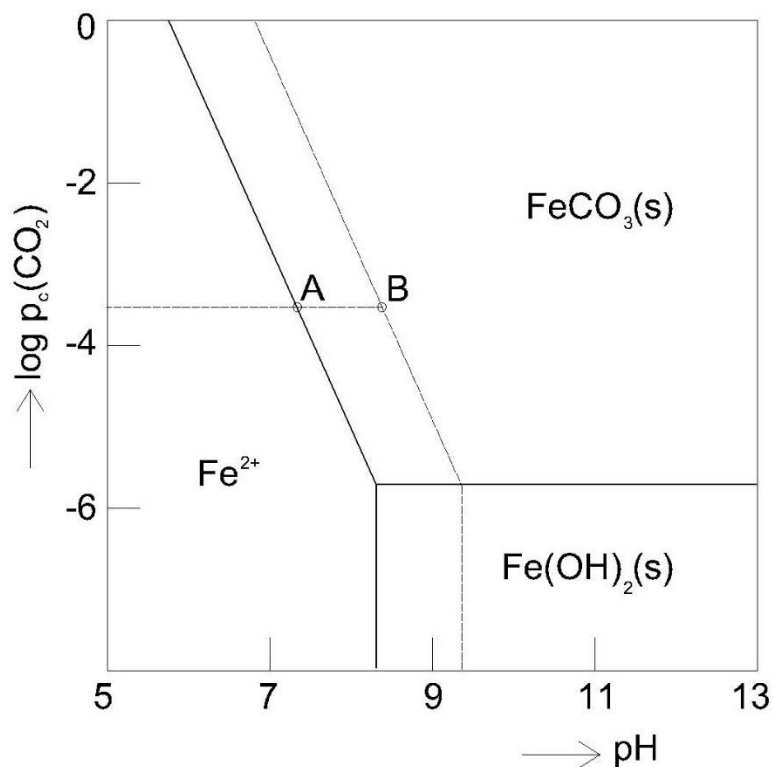
Obrázek 3-1; Diagram rozpustnosti amorfních hydroxidů

Legenda: 1 - Fe(OH)_2 ; 2 - Al(OH)_3 ; 3 - Fe(OH)_3 ; c - látková koncentrace (mol l^{-1}) [14]



Obrázek 3-2; Diagram rozpustnosti systému $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ [14]

Při koncentraci celkového CO_2 1 mmol l^{-1} za nepřítomnosti rozpuštěného kyslíku, $I=0$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$; c - látková koncentrace (mol l^{-1}); 1 - Fe^{2+} ; 2 - $[\text{FeOH}]^+$; 3 - $[\text{Fe}(\text{OH})_3]^-$; 4 - distribuční křivka CO_3^{2-} [16].



Obrázek 3-3; Diagram oblastí převažující existence systému Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$ a $\text{FeCO}_3(\text{s})$, Při $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $I=0$ [14]

Otevřený systém, který je v rovnováze s $\text{CO}_2(\text{g})$ při různém relativním tlaku p_r a za nepřítomnosti rozpuštěného kyslíku. Koncentrace celkového železa $c(\text{Fe})_T = c(\text{Fe}^{2+}) = 1 \text{ mmol l}^{-1}$. Čárkovaně jsou vyznačeny oblasti existence pro $c(\text{Fe})_T = c(\text{Fe}^{2+}) = 0,01 \text{ mmol l}^{-1}$ [14].

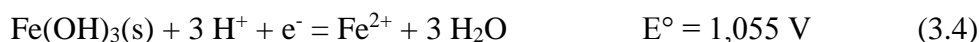
Hydroxid železnatý je bílé barvy a je stálý jen v anoxických podmínkách. Vyskytuje se ve dvou formách, amorfni a krystalické, které se liší rozpustností. Velmi lehce se oxiduje kyslíkem rozpuštěným ve vodě, postupně mění barvu na zelenou až hnědou tvorbou hydratovaného oxidu železitého. Rovněž $\text{FeCO}_3(\text{s})$ se za přítomnosti kyslíku snadno oxiduje a hydrolyzuje. Redukční vlastnosti $\text{Fe}(\text{OH})_2$ se někdy využívá v technologii vody, např. při odbarvování odpadních vod obsahujících diazenová barviva (azobarviva).

Ve vodách obsahujících sulfan a jeho iontové formy může být rozpustnost železa limitována v širokém rozmezí hodnot pH rozpustností $\text{FeS}(\text{s})$, který má v porovnání s FeCO_3

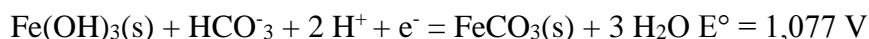
mnohem menší součin rozpustnosti. Avšak při vysoké koncentraci celkového CO₂ a velmi nízké koncentraci sulfidické síry může oblast existence FeS(s) zaniknout.

V organicky neznečištěných vodách obsahujících hydrogenuhličitany jsou převládající formou výskytu rozpuštěného Fe^{II} hydratované ionty Fe²⁺, popř. též hydroxokomplex [FeOH]⁺. Při vyšších koncentracích chloridů a v kyselé oblasti se mohou tvořit některé chloroželeznatany, např. [FeCl]⁺. V síranových vodách může být přítomen asociát [FeSO₄(aq)]⁰.

Ve vodách obsahujících rozpuštěný kyslík, je železo v oxidačním stupni +III nejstabilnější formou výskytu. Závislost forem výskytu Fe^{II} a Fe^{III} na hodnotě pH a oxidačně-redukčním potenciálu lze znázornit na diagramu oblastí převažující existence. Schopnost Fe^{II} a Fe^{III} podléhat reverzibilní oxidaci a redukci má významnou úlohu v chemii a biologii přírodních vod a při odželezování vody. Oxidace Fe^{II} na Fe^{III} probíhá poměrně snadno podle oxidačně-redukčních rovnic:



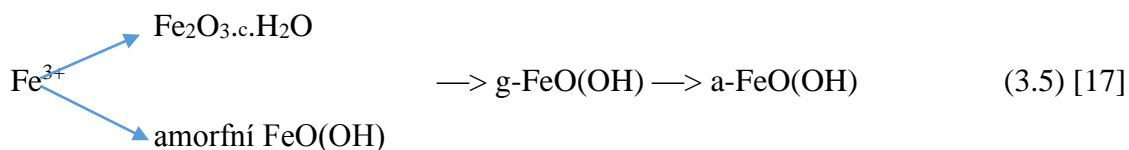
Oxidace uhličitanu železnatého na hydroxid železitý probíhá podle rovnice:



Mezi hlavní rozpuštěné formy Fe^{III} ve vodách patří v závislosti na hodnotě pH částice Fe³⁺, [Fe(OH)]²⁺, [Fe(OH)₂]⁺, [Fe(OH)₃(aq)]⁰, [Fe(OH)₄]⁻, popř. dimer [Fe₂(OH)₂]⁴⁺. Jednoduchý iont Fe³⁺ může v roztoku převládat teprve při hodnotách pH pod 2, kdežto u kationtu Al³⁺ je tomu již při hodnotách pH pod 4. Aniontový hydroxokomplex dominuje u hliníku již při hodnotách pH nad 8, kdežto u železa až při hodnotách pH nad 10. Je to způsobeno rozdílnými hodnotami hydrolytických konstant obou iontů [14].

Rozpustnost železa v oxických podmínkách je dána rozpustností hydratovaného oxidu železitého. Na rozdíl od Al(OH)₃(s) pravděpodobně neexistuje definovaný hydroxid Fe(OH)₃(s), červenohnědou sraženinu vznikající srážením železitých solí zásadami lze obecně popsat jako hydratovaný oxid železitý Fe₂O₃·cH₂O nebo amorfni FeO(OH)(s), resp. amorfni Fe(OH)₃. Za různých podmínek (teploty, stáří sraženiny) se mohou tvořit sloučeniny α-FeO(OH) (goethit), γ-FeO(OH) (lepidokrokrit), α-Fe₂O₃ (hematit) a γ-Fe₂O₃. Základní

přeměny, které mají význam v hydrochemii a technologii vody a které probíhají ve vodách v neutrální nebo slabě kyselé oblasti, lze znázornit asi takto:

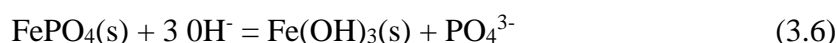


Za vyšších teplot se nakonec tvoří α -Fe₂O₃. Celkový proces stárnutí sraženiny probíhá sice podle uvedeného schématu několik měsíců, avšak již po 12 dnech může být přítomno až 12 % modifikace α -FeO(OH). Uvedené modifikace se liší rozpustností, adsorpční mohutností pro různé kationty, anionty a organické látky a hodnotami pH nulového bodu náboje [14].

Diagram rozpustnosti systému Fe^{III}-H₂O v porovnání s jinými hydratovanými oxidy byl uveden na obr. 3:1. Při výpočtu se nepřihlíželo k tvorbě polynukleárních komplexů. Hydratovaný oxid železitý patří mezi nejméně rozpustné sloučeniny tohoto typu. Jeho tvorby se využívá pro velmi účinné odželezování vody pouhým provzdušňováním. Využívá se podstatně menší rozpustnosti Fe(OH)₃(s) proti Fe(OH)₂(s). Za oxických podmínek je proto možné udržet ve vodě jen velmi nízké koncentrace skutečně rozpuštěného železa v pravém roztoku, obvykle asi pod 1 mmol l⁻¹ (tj. asi pod 60 mg l⁻¹), pokud nejsou přítomné anorganické nebo organické komplexotvorné látky. To, že se i po odželeznění nacházejí ve vodě vyšší koncentrace železa, je způsobeno tím, že se vzorky vody filtrují membránovými filtry o velikosti pórů 0,45 nm, kterými prochází část koloidně dispergovaného hydratovaného oxidu.

Uhličitán železitý není dosud znám, protože se ihned hydrolyzuje na hydroxid. Ve vodách obsahujících rozpuštěnou sulfidickou síru se v alkalickém prostředí sráží černý sulfid, který je pravděpodobně směsí FeS + S (Fe₂S₃ je velmi nestálý). FeS je obvyklou příčinou tmavého zbarvení říčních usazenin a biologických kalů. FeS(s) se v oxických podmínkách postupně oxiduje a hydrolyzuje na hydratovaný oxid železitý. V kyselých vodách se Fe^{III} může sulfidickou sírou redukovat na Fe^{II}.

Rovnovážná koncentrace rozpuštěného Fe^{III} může být za určitých podmínek limitována také přítomností fosforečnanů, avšak vliv rozpustnosti FePO₄(s) se projevuje teprve při hodnotách pH asi pod 5 a při koncentraci fosforečnanů asi nad 0,1 mmol l⁻¹. Při hodnotách pH nad 5 se FePO₄(s) zvolna hydrolyzuje na Fe(OH)₃(s) za současného uvolnění fosforečnanových iontů:



Rovnovážná konstanta této reakce je dána poměrem součinů rozpustnosti obou tuhých složek a odpovídá poměru látkových koncentrací $c(\text{PO}_4^{3-}) : c^3(\text{OH}^-)$. Při hodnotě pH 6 musí být koncentrace fosforečnanů vyšší než 2 mmol l^{-1} , aby byla rozpustnost Fe^{III} limitována rozpustností $\text{FePO}_4(\text{s})$; v takové koncentraci se však fosforečnany v přírodních vodách nevyskytují. Tvorba $\text{FePO}_4(\text{s})$ se ale v technologii vody používá pro chemické odstraňování sloučenin fosforu z vody. V anoxických podmínkách mohou fosforečnany reagovat s rozpustnými formami Fe^{II} za vzniku málo rozpustného $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (vivianitu). Nutno dodat, že většinou vznikají sloučeniny nestechiometrického složení (hydroxid-fosforečnany) [14].

Přídavek křemičitanů se někdy využívá k zamezení vylučování hydratovaných oxidů Fe i Mn. Při obsahu Si 15 až 20 mg l^{-1} se z přírodních vod s koncentrací Fe do asi 3 mg l^{-1} vylučují hydratované oxidy Fe a Mn obtížně.

Také mnoho organických látek má schopnost tvořit rozpustné komplexy s Fe^{II} a především s Fe^{III} , čímž lze také vysvětlit vyšší koncentrace rozpuštěných forem železa v přírodních vodách, než odpovídá teoretickému výpočtu.

V přírodních vodách přichází v úvahu především tvorba komplexů s huminovými látkami a fulvokyselinami s menší relativní molekulovou hmotností (asi pod 700), se vzrůstající hmotností se schopnost ke komplexaci zmenšuje. Tato komplexace vede k rychlejší migraci železa v půdě, což se týká především komplexů Fe^{III} s fulvokyselinami. U obdobných komplexů s Fe^{II} není tento vzrůst příliš výrazný. Vysvětlením je rozdílný povrchový náboj komplexů v koloidní disperzi a náboj půdních částic. Bylo zjištěno, že komplexy huminových látek se železem podléhají fotolýze a do prostředí se uvolňují jednoduché iontové formy. Obdobně je tomu také u hliníku [14].

3.3 Hydrochemie

V atmosférických vodách (zejména v oblastech s neznečištěnou atmosférou) jsou koncentrace Fe velmi nízké. Průměrné koncentrace železa ve srážkách v oblasti Čertova jezera (Šumava) se v letech 1992 až 1995 pohybovaly v rozmezí od $0,03$ do $0,09 \text{ mg l}^{-1}$ [14]. Poněkud vyšší koncentrace železa se vyskytují ve vodách z rašelinišť, pravděpodobně v důsledku přítomnosti vyšších koncentrací huminových látek.

V povrchových vodách se železo vyskytuje obvykle v obsahu setin až desetin mg l^{-1} , voda většiny toků v ČR obsahuje železa průměrně méně než $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ ($8,95 \text{ mmol l}^{-1}$). V roce 1999 kolísaly v šesti profilech Labe koncentrace Fe od $0,20 \text{ mg l}^{-1}$ do $0,48 \text{ mg l}^{-1}$ [14].

Průměrné koncentrace železa v pěti šumavských jezerech se pohybovaly v letech 1997-1998 od 0,07 mg l⁻¹ do 0,14 mg l⁻¹ [19] a část tohoto železa byla organicky vázaná. V mořské vodě se nacházejí koncentrace železa v rozmezí 0,01 mg l⁻¹ až 0,2 mg l⁻¹.

V nádržích a jezerech dochází k **vertikální stratifikaci železa** (totéž platí pro mangan). V období letní a zimní stagnace se ve spodních vrstvách vody u dna (hypolimniu), kde je voda s největší hustotou, hromadí rozpuštěné i nerozpuštěné formy železa v koncentraci dosahující někdy až jednotek mg l⁻¹, ačkoliv ve svrchních vrstvách (epilimniu) mohou být zjištěny jen setiny mg l⁻¹. U dna nádrží dochází k redukčním pochodům za vzniku Fe^{II}. Během jarní a podzimní cirkulace se Fe^{III} rozptyluje po celém objemu vody v nádrži a u povrchu se stykem s rozpuštěným kyslíkem oxiduje na Fe^{III} a potom hydrolyzuje. Vyloučený hydratovaný oxid železitý postupně sedimentuje, a tím dochází k úbytku železa po celé vertikále. Pokud jsou u dna nádrže anoxické podmínky, redukuje se Fe^{III} na Fe^{II}, které se snáze uvolňuje do roztoku, a koloběh se opakuje (pokud není přítomen sulfan a jeho iontové formy, které vážou železo do málo rozpustného FeS(s) jenž je zadržován v sedimentech).

V **podzemních vodách**, které neobsahují rozpuštěný kyslík, se může vyskytovat rozpuštěné železo v oxidačním stupni II v koncentracích dosahujících i desítek mg l⁻¹. Z těchto vod se obvykle již při pouhém zatřepání vylučuje sraženina hydratovaného oxidu železitého. Ve vodách silně kyselých (např. důlních) nebo obsahujících organicky vázané formy Fe^{II} k tomu však nedochází. Příkladem velkých koncentrací železa v prostých podzemních vodách mohou být zdroje pro úpravu vody v Tlumačově (asi 17 mg l⁻¹), v Novém Bohumíně (asi 40 mg l⁻¹) a v Mirošově (asi 12 mg l⁻¹). Důlní vody vyplňující prostory po těžbě hnědého uhlí s vyššími obsahy pyritu obsahují železo v koncentraci do 300 mg l⁻¹ (5,37 mmol l⁻¹) a sírany v koncentraci do 2 000 mg l⁻¹. Vody ložisek kamencových a kyzových břidlic a sulfidických rud obsahují železo v koncentracích převyšujících i 1 000 mg l⁻¹. To se týká i kyselých vulkanických vod. [14]

Zatímco koncentrace železa může výjimečně dosahovat až 40 mg l⁻¹ (Luhačovice, vrt BV1), koncentrace manganu nad 1,0 mg l⁻¹ jsou výjimkou a bývají obvykle v setinách až desetínách mg l⁻¹ [14]. Ve většině minerálních vod se koncentrace železa pohybují řádově v jednotkách mg l⁻¹. Minerální vody s koncentrací železa nad 10 mg l⁻¹ (0,179 mmol l⁻¹) se nazývají **železnaté** a mají svůj balneologický význam. Je to např. řada pramenů v Mariánských a Františkových Lázních [20].

V pitných vodách v osmi regionech ČR byly zjištěny tyto průměrné koncentrace železa a manganu (mg l^{-1}) [16]:

	<u>podzemní původ</u>	<u>povrchový původ</u>
Fe	0,196 až 0,723	0,036 až 0,453
Mn	0,041 až 0,209	0,014 až 0,136

Podle údajů SZÚ (Státní zdravotní ústav v Praze) byla v pitné vodě na výstupu z vodáren v ČR průměrná koncentrace železa $0,06 \text{ mg l}^{-1}$ a manganu $0,02 \text{ mg l}^{-1}$ [16]. Je však nutné dodat, že v důsledku korozních procesů může být koncentrace železa ve vodovodní síti podstatně vyšší a u Fe může přesahovat i 1 mg l^{-1} .

Podle očekávání jsou ve všech výše uvedených případech koncentrace železa vyšší než koncentrace manganu. Povrchové vody obsahují nižší koncentrace těchto prvků než podzemní vody, protože se obvykle nacházejí v oxických podmínkách a dochází k oxidaci těchto prvků, následně hydrolyze a k vylučování tuhých fází Fe^{III} , resp. $\text{Mn}^{\text{III+IV}}$. Pouze v redukčních anoxických nebo v anaerobních podmínkách mohou být koncentrace železa v povrchových vodách vyšší než ve vodách pod zemským povrchem. Vysoká koncentrace železa, v jednotkách až desítkách gramů v 1 litru, bývá zjištěna v některých kyselých průmyslových odpadních vodách z hutnictví železa a z mořiren [14].

3.3.1 Vlastnosti a význam železa

Vyšší koncentrace železa přítomné ve vodách mohou způsobit především technické závady tím, že materiály, se kterými přichází železo do styku (textilie, papír, keramické materiály, potraviny), zbarvuje žlutě až hnědě. Z hygienického hlediska ovlivňuje negativně organoleptické vlastnosti vody, barvu, chuť i zákal. Negativně mohou ovlivňovat chuť vody a způsobovat její zákal již koncentrace železa asi nad $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ ($8,954 \text{ mmol l}^{-1}$). I menší koncentrace Fe^{II} ve vodě mohou být příčinou nadměrného rozmnožování železitých bakterií, jež ucpávají potrubí a při jejichž odumírání voda zapáchá. Z uvedených důvodů je mezní hodnota železa v pitné vodě $0,2 \text{ mg l}^{-1}$. Výjimku tvoří vody, ve kterých je obsah železa dán geologickým podložím.

Obecným imisním standardem pro povrchové vody je koncentrace železa 2 mg l^{-1} ($35,8 \text{ mmol l}^{-1}$). Ve vodě vhodné pro závlahu se udává jako přípustná koncentrace železa 10 mg l^{-1}

(179 mmol l⁻¹). V průmyslových odpadních vodách vypouštěných do městské kanalizace není koncentrace železa limitována. [14]

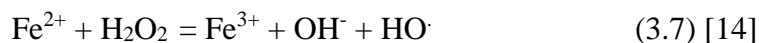
Železo je závadné ve vodě určené pro chov ryb, protože Fe^{II} se na alkalicky reagujících žábrách oxiduje a hydrolyzuje. Nerozpustné sloučeniny Fe^{III}, pak pokrývají žaberní lístky a snižují respirační plochu žaber, takže mohou ryby uhynout udušením. Někdy mohou ryby ohrožovat železité bakterie, které se mohou rozvíjet na žábrách. Pro chov kaprovitých ryb lze doporučit, aby koncentrace rozpuštěného železa nepřekročila 0,2 mg l⁻¹, a pro chov lososovitých ryb 0,1 mg l⁻¹.

Ve vodách **pro zásobování průmyslu** je železo rovněž nevhodné. Kromě zbarvení materiálu může narušovat i některé technologické procesy (např. v barvárnách reakcí s organickými barvivy, v bělárnách mohou nerozpuštěné formy katalyzovat rozklad H₂O₂ natolik, že může dojít až k proděravění tkaniny). Pro provozní vody v zušlechťovacích provozech bavlnářského, hedvábnického a vlnářského průmyslu bývá proto požadavek na koncentraci přísnější než pro vody pitné, např. vody pro bělení smějí obsahovat železa nejvýše 0,1 mg l⁻¹. To se týká i výroby kvalitního psacího papíru, viskóznové stříže a některých odvětví potravinářského průmyslu (např. konzerváren).

Železo může participovat na **fotochemických reakcích** probíhajících v povrchových vodách. Například EDTA, která bývá součástí některých pracích a čisticích prostředků, je biologicky těžko rozložitelná a přetrvává v prostředí velmi dlouho. Komplex EDTA s Fe^{III}, v povrchových vodách způsobuje fotochemické transformace, kdy se EDTA oxiduje a Fe^{III} redukuje. Tato přímá fotolýza se týká i dalších hydrofilních organických látek [14].

(EDTA: EDTA je široce užívaná zkratka pro organickou sloučeninu kyselinu ethylendiamintetraoctovou (z angl. ethylenediaminetetraacetic acid) a její soli. EDTA je polyaminokarboxylová kyselina s chemickým vzorcem [CH₂N(CH₂CO₂H)₂]₂. EDTA patří mezi chelatační činidla, což v praxi znamená, že je schopná vytvářet komplexní sloučeniny s ionty kovů. Toho se využívá například při odstraňování tvrdosti vody, což je hojně využíváno v pracích a mycích prostředcích [21].)

V technologii vody se používají sloučeniny železa nejenom pro úpravu a čištění vod koagulací, ale také pro čištění některých průmyslových odpadních vod jejich chemickou oxidací. Pro tento účel se využívá **Fentonova reakce** založená na reakci Fe^{II} s peroxidem vodíku, kterou lze schematicky znázornit takto:



3.3.1.1 Železnaté vody

Železnaté vody jsou po vývěru a provzdušnění charakteristické vznikem rezavých sraženin a povlaků hydratovaných oxidů železa. Železo je v minerálních vodách nežádoucí příměsí, vylučování hydratovaných oxidů působí potíže v podstatě při veškerém lázeňském provozu. Vlastnosti železnatých vod závisejí na převládajícím aniontu. V hydrogen-uhlíčitanových železnatých minerálních vodách se může udržet v rozpuštěné formě až i několik desítek mg Fe v 1 litru vody a v silněji kyselých síranových železnatých vodách až i několik set mg Fe v 1 litru.

3.3.2 **Požadavky na jakost pitné vody**

Problém zásobování nezávadnou pitnou vodou byl zpočátku výhradně problémem epidemiologickým, proto byla původně hlavní pozornost věnována možnosti fekálního znečištění. V posledních desetiletích však nabývá stále více na významu také znečištění toxickými chemickými látkami, anorganickými, organickými a radionuklidy. Dobrá pitná voda musí však obsahovat látky nezbytné nebo prospěšné pro život a musí vyhovovat i z hlediska organoleptického. Asi čtvrtinu potřebných esenciálních minerálních látek ve využitelné formě získává člověk především z vody. Proto je v současné době posuzování jakosti pitné vody komplexním problémem [17].

4 **Koroze**

4.1 **Koroze ocelového potrubí**

S problémem, se kterým se často setkáváme na kovových vodovodních systémech, je koroze způsobená přepravovanou vodou. S vnitřní korozí potrubí způsobenou vzájemným působením přepravované vody a materiálu potrubí se setkávají všichni provozovatelé vodovodů, ať už ve větší nebo menší míře. Od jejího působení v nemalé míře závisí bezproblémový provoz vodovodních sítí. Je proto pochopitelné, že provozovatelé sledují korozi, zvláště pokud dochází ke změně původního provozování vodovodního systému [15].

4.1.1 Druhy koroze materiálu

Koroze materiálu a kovů obecně začíná v momentě, když přijde do styku s korozivními činiteli, zejména vzduchem a vodou. V případě potrubí závisí rychlost koroze od tvorby korozních produktů na jeho povrchu. Čím více tato vrstva zabraňuje výměně iontů, tím je vrstva účinnější.

Podle normy ČSN EN 12502 [22] se na kovovém povrchu mohou vyskytnout 4 typy koroze, a to:

- **Rovnoměrná** (plošná) koroze: Nejčastější typ koroze, který probíhá rovnoměrně na celém povrchu materiálu. V závislosti na podmínkách prostředí jako např. rychlost toku, pH atd., se buď tvoří produkty koroze na celém povrchu ve formě pasivní vrstvy, nebo se netvoří vůbec a v tom případě má proces koroze rychlý průběh.

- **Bodová** (důlková) koroze: Je typ koroze, při kterém se na povrchu materiálu tvoří jamky, které jsou ostře ohraničené vůči nezkorodované ploše. Tvoří se na základě defektů v kovovém povlaku. Je jedním z projevů procesu změny polarity.

- **Selektivní koroze**: Je typ koroze, kde dochází k přednostní korozi podél hranic zrn v zinkové vrstvě.

- **Bimetalická koroze**: Projevuje se zvýšenou korozi některých částí systému oproti druhým. Je působena rozdílem v potenciálech v elektrochemické řadě napětí kovů.

4.1.2 Faktory ovlivňující korozi

Koroze železa je velmi složitý proces. Vzhledem k vysoké proměnlivosti podmínek v distribuční soustavě, může být konkrétní faktor rozhodující v jednom systému, ale relativně nedůležitý v systému jiném. Koroze sama o sobě má několik různých projevů a mohou být hodnoceny v mnoha ohledech. Předchozí studie o korozi se zaměřily na různé aspekty koroze: degradace potrubí (měřená ztrátou hmotnosti), tvorba inkrustů (měřeno hlavní ztrátou nebo měřením velikosti inkrustů), a vedlejších produktů (měřeno koncentrací železa, barvy, barvení, zákalu nebo počtem stížností zákazníků).

Tabulka 1 - Přehled účinků různých faktorů na železnou korozi. [23]

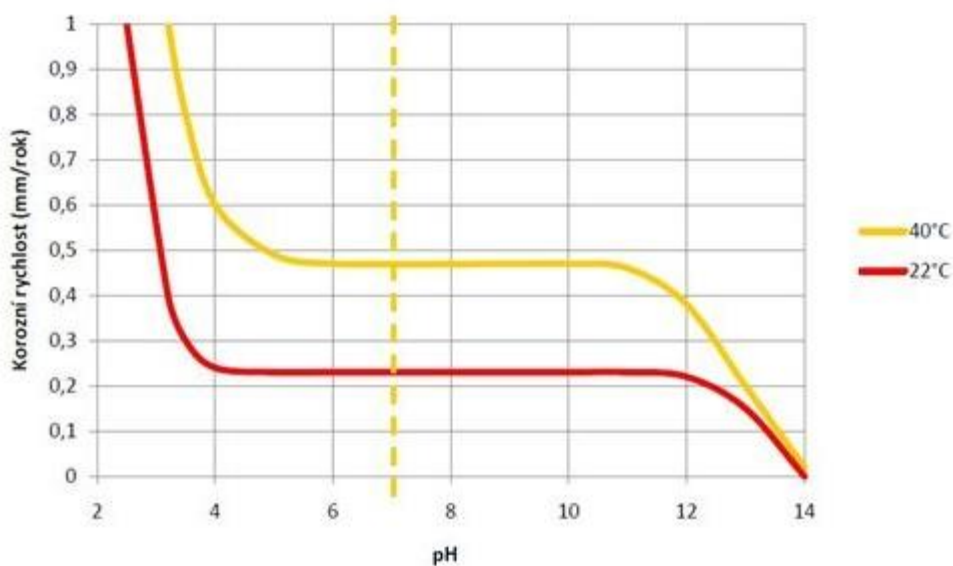
Faktor	Potenciální vliv na:		
	Míra koroze	Růst inkrustace	Vedlejší produkt
Zvýšení pH	-	-	+
Zvýšení zásaditosti	+	-	+
Zvýšení intenzity pufru	+	?	?
Zvýšení rozpuštěného kyslíku	-	±	±
Vápencová vrstva	+	-	±
Sideritová vrstva	+	?	+
Vrstva zelené rzi	+	?	+
Zvýšení Larsonova Indexu	±	±	±
Zvýšení zbytkové dezinfekce	-	?	-
Fosfátové inhibitory	±	±	±
Křemičitany	+	+	±
Stáří potrubí	+	-	+
Rychlost vody	-	±	±
Stagnace vody	?	?	-
Mikrobiální aktivita	-	-	-
Nárůst teploty	-	?	-
Rozpuštěná měď	-	?	?
NOM	+	+	-
Volný CO ₂	-	?	-

Legenda: „+“ = příznivý vliv; „-“ = negativní vliv; „±“ = smíšené výsledky; „?“ = není známo

4.1.2.1 Vliv pH

Bylo zjištěno, že úbytek hmotnosti potrubí, se zvyšuje s rostoucím pH v rozmezí od 7 do 9,8. Naproti tomu ke snížení vedlejších produktů koroze došlo při zvýšení pH. Nicméně, jedna studie zjistila, že koncentrace železa poklesla a přitom hodnota pH byla zvýšena z 5,8 na 9,2 [23].

Závislost rychlosti koroze na pH a teplotě



Obrázek 4-1; Závislost korozní rychlosti nelegované oceli ve vodě s obsahem rozpuštěného kyslíku na pH při různé teplotě [24]

4.1.2.2 Zásaditost

Zvyšující se alkalita zpravidla vede ke snížení ztráty hmotnosti potrubí a rychlosti koroze. Také bylo přijato méně stížností zákazníků na „červenou vodu“, když byla zásaditost udržována v množství nad 60 mg l⁻¹ jako CaCO₃ [23].

4.1.2.3 Tlumivá kapacita vody

Vyšší tlumivá kapacita vody je často spojena se zvýšenou zásaditostí, ačkoli oba parametry nejsou přesně ekvivalentní. Nicméně, jejich vliv na korozi se zdá být pravděpodobný. Některé studie zjistily, že maximální ztráta hmotnosti u vzorků z litiny byla při minimální hodnotě pufru (pH 8,4). Pravděpodobně proto, že vyšší intenzita pufru zeslabuje změny pH v důsledku koroze reakce při anodové a katodové oblasti [23].

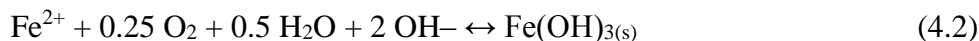
Poznámka: pufr - je konjugovaný pár kyseliny nebo zásady a jejich soli, který je schopný udržovat v jistém rozmezí stabilní pH po přidání kyseliny či zásady do systému. Pufry jsou obvykle směsí slabých kyselin a jejich solí, nebo směsí slabých bází a jejich solí. Pufrační kapacita je maximální, pokud je koncentrace obou konjugovaných složek pufru stejná, tj. při pH rovném pKa pufru [25].

4.1.2.4 Rozpuštěný kyslík

Rozpuštěný kyslík (Dissolved oxygen - DO) je důležitým akceptorem elektronů v korozi železa:



DO může hrát také roli při oxidaci železa (Fe^{2+}) například:



Koncentrace kyslíku může mít různé účinky na korozi železa. Jak se dalo očekávat, rychlost koroze se zvyšuje s rostoucí koncentrací DO. DO má také vliv na koncentraci železa a tvorbu inkrustace. Vyšší zákal (náhražka za koncentraci železa) byl pozorován při nižším kyslíkovém nasycení, ale je také známo, že voda bez DO nebude inkrustovat. DO je také zodpovědný za schopnost pufování iontů, včetně fosfátů a inhibice koroze. Například ve vodě s $\text{DO} < 1 \text{ mg l}^{-1}$, měl roztok s fosfáty vyšší rychlost koroze než ve vodách s 1-6 mg.l^{-1} DO, kde byl tento trend obrácen [3].



Obrázek 4-2; Vliv rozpuštěného kyslíku ve vodě na korozní rychlost nelegované oceli za různých teplot [24]

4.1.2.5 Inkrustace

Míra koroze železného materiálu má jen malý vztah k množství železa, které je ve skutečnosti uvolňováno do vody, a to především z důvodu ukládání oxidovaného železa nebo jiné sloučeniny do inkrustací, které slouží jako velký rezervoár vedlejších produktů koroze. Inkrustace je typicky složená z mnoha různých sloučenin, a je tedy velmi heterogenní. Tato vrstva může poskytovat pasivaci (ochranu) omezením difúze kyslíku na povrch kovu a zpomaluje korozní reakci. Nicméně, inkrustace může rovněž přispívat uvolňováním železa do vody. To zahrnuje částice z rozpuštěných inkrustů, stejně jako částice, které se oddělují od povrchu. Žel, je obtížné modelovat toto chování. Inkrusty jsou často slabě krystalizované a heterogenní, takže předpověď rozpustnosti je velmi složitá. Celý proces je velmi složitý a je závislý na faktorech, jako je odolnost inkrustů, přilnavost, rychlost vody a teplotní změny.

Je zřejmé, že tvorba inkrustů je komplikovaný proces, který závisí na různých fyzikálních a chemických podmínkách, a to v každém jednotlivém systému. Nicméně, existuje několik známých typů inkrustací, které mají vliv na korozi železa [1].

4.1.2.6 Uhličitan vápenatý

Srážení tenké vrstvy ochranného uhličitanu vápenatého (CaCO_3 , vápenec) byla nejdříve navržená metoda pro kontrolu koroze železa. Tato metoda byla populární v devadesátých letech minulého století.

4.1.2.7 Siderit

Sideritový model předpokládá, že siderit snižuje tvorbu inkrustů železa. Siderit (FeCO_3), snižuje tvorbu inkrustů více než ochranné vrstvy oxidovaného železa, jako je goethit (FeOOH) nebo hematit (Fe_2O_3). Siderit byl nalezen v mnoha železných inkrustech. Je zajímavé si povšimnout, nesouladu týkajícího se sideritu při studiu čistého železa ve vysokých koncentracích roztoků uhličitanu (nikoliv v pitné vodě). Dvě takové studie došly k závěru, že siderit je klíčem k vytvoření ochranné vrstvy inkrustů [26] [27].

4.1.2.8 Zelená koroze

"Green rust" je obecný název pro sloučeniny železa, které obsahují dvojmocné i trojmocné železo, jakož i jiné ionty, jako je uhličitan, chlorid a síran. Zelené rzi byly

identifikovány v korozních produktech železa a oceli a předpokládá se, že mohou působit podobně jako siderit a tvořit hustý ochranný film [1].

4.1.3 Ukazatele koroze

4.1.3.1 Kalcit index

Langelier Index (také Sytostní Index, nebo SI) býval nesprávně používán jako všelék metody pro řešení problémů s korozi, protože byl navrhnut již v roce 1936. I když tato metoda byla úspěšná u některých inženýrských sítí, v žádném případě to není univerzální způsob, jak se vypořádat s korozi. Langelier nikdy neurčil konkrétní index pro použití této metody, a tím i poukázal na její omezení v některých vodách.

Přes navrhované úpravy Langelierova indexu a jeho dalšího používání v řadě inženýrských nástrojů, uvádí AWWA: "Ve světle mnoha empirických důkazů bylo vyvráceno domnělé spojení mezi LI [Langelier Index] a korozi, a tato praxe by měla být opuštěna." Podobně i další kalcit indexy, které byly navrženy (Ryznar Index (RI), Aggressiveness Index (AI), Momentary Excess (ME), Driving Force Index (DFI), a Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP)), mají pouze omezené použití v potlačení koroze [1].

4.1.3.2 Larsonův index (Larson Index)

Studie zaměřené na Larsona [57][58] zjistily, že poměr chloridu a síranu k hydrogenuhlíčitanu je významný, jak je uvedeno v Larsonově Indexu:

$$\text{Larsonův index} = \frac{2[SO_4] + [Cl]}{[HCO_3]}$$

Čím vyšší index, tím více je voda korozivní. Několik studií [59][60] kvalitativně potvrdilo tyto výsledky nahlášením, že zvýšením chloridu a síranu, vyvolá zvýšený úbytek hmotnosti potrubí (i když nikdy přímo netestovali přesnost Larsonova indexu). Přítomnost síranu nebo chloridu ve vodě vede k tvorbě "Fe-Cl a nebo Fe-SO₄ komplexů" v inkrustaci, kde zvyšují nárůst Fe²⁺ difúzí, což způsobuje zvýšení koncentrace železa ve vodě. Několik dalších studií [61][62] však zjistilo protichůdné účinky, včetně toho, že sulfát inhibuje rozpouštění oxidů železa, což vede ke snížení koncentrace železa. Přítomnost síranu a chloridu způsobila

vytvoření další ochranné vrstvy na ocelovém povrchu. Koncentrace síranu a chloridu neměla žádný vliv na úbytek hmotnosti litiny [1].

4.1.3.3 Zbytkové dezinfekční činidlo

Obecně platí, že zbytky dezinfekce zvyšují rychlost koroze. Bylo zjištěno, že monochloramin je méně agresivní než volný chlór. Pokud jde však o mikrobiálně indukovanou korozi, vyšší dezinfekční zbytky mohou korozi snížit [1].

4.1.3.4 Fosfátové Inhibitory

Inhibitory na bázi fosfátu byly přidávány k pitné vodě, již od roku 1900. Fosfáty byly poprvé použity, aby se zabránilo nadměrnému srážení kalcitu. Mechanismus tohoto přístupu předpokládal, že sorpce na jádrech uhličitanu vápenatého, zabraňuje krystalům kalcitu v růstu mimo koloidní rozsah. Vědci později zjistili, že tyto fosfáty někdy mohou zabránit korozi a problémům s „červenou vodou“ [1].

4.1.3.5 Polyfosforečnany

Kondenzované fosforečnanové řetězce, obecně známé jako polyfosfáty, byly první sloučeniny fosforu, které byly použity k potlačení koroze. Jako originální polyfosforečnan byl použit Calgon (známý jako hexametafosfát sodný, skelný fosfát, nebo meta-sklo). Četné studie zjistily, že polyfosforečnan předchází korozi a redukuje červenou vodu. Prevence proti korozi a kontrola červené vody jsou ve skutečnosti dva velmi odlišné jevy, ale tento rozdíl byl často přehlížen. Mnohé prospěšné výsledky pro korozi jsou jednoduše kvůli stabilizaci železných částic, což způsobuje snížení vizuálního pozorování "červené vody." To vedlo výzkumníky k tvrzení, že uvolňování vedlejších produktů železa se snížilo, i když se ve skutečnosti, koncentrace železa a dokonce i rychlost koroze mohla zvýšit [1].

4.1.3.6 Ortofosforečnan

Na rozdíl od polyfosfátů, ortofosforečnany jsou přidávány proti tvorbě vodního kamene, ale ne proti uvolňování železa. Je často přehlíženo, že polyfosfáty se časem mění na ortofosforečnany, takže výsledky mnoha studií polyfosforečnanu by mohly být zkresleny přítomností ortofosforečnanů [1].

4.1.3.7 Bimetalické (zinek) fosforečnany

V roce 1960, výrobci začali míchat poly a ortofosforečnany s 5 až 25% zinku za vzniku bimetalových fosforečnanů, tvrdící, že přítomnost zinku zrychluje tvorbu polyfosfátového filmu nebo že ortozinek nebo zinkový polyfosfátový film jsou lepší, než pravidelné fosfátové vrstvy pro inhibující korozi. Tyto sloučeniny byly přidávány pro snížení koroze ve srovnání s normálním fosfátem nebo polyfosforečnanem. Několik studií [28] [29] [30] [31] však nenalezlo výhodu fosfátů zinku ve srovnání s běžným fosfátem. Navíc nedávné obavy ohledně nakládání zinku na čistírnách odpadních vod poněkud omezily používání těchto fosforečnanů zinku [1].

4.1.3.8 Křemičitany

Silikátové sloučeniny byly nejprve používány pro zlepšení koagulace, pro jejich schopnost adsorbovat částice a snižovat povrchový náboj. Tyto vlastnosti byly brzy aplikovány na disperzi železných částic v distribuční soustavě. Jedna z prvních studií [60] zjistila, že přírodní oxid křemičitý přítomný ve vodě se koncentruje v ochranné vrstvě železa, v inkrustech. Bylo také zjištěno, že přídavek silikátových inhibitorů snižuje rychlost koroze železa. A také, že silikáty jsou přidávány pro snížení oxidace Fe^{2+} , protože difúze železa přes silikátový film je pomalejší, než přes železné okuje. Silikáty, tvoří samostatný omezující film na zkorodovaném železném povrchu, který se štěpí, když se zastaví dávkování oxidu křemičitého. Bylo zjištěno, že kov již musí být poněkud zkorodovaný, protože ochranná vrstva se skládá z oxidu železitého a křemičitanu. Stejně tak, železo musí být oxidováno, aby mohlo být křemičitanem izolováno. Přidání silikátů může také zvýšit hodnotu pH, která je obecně prospěšná proti tvorbě železné korozi. Křemičitany jsou přirozeně přítomné v mnohých vodách, a mohou mít účinky podobné přidaným inhibitorům křemičitanů [1].

4.1.3.9 Stáří potrubí

Doba, po kterou je potrubí používáné, výrazně ovlivňuje jeho korozivní vlastnosti. Obecně platí, že obsah železa a rychlost růstu koroze ze začátku stoupá, ale poté postupně klesá s mírou inkrustace. Avšak umístění zlomového bodu se velmi liší a záleží na kvalitě vody a dalších podmínkách [1].

4.1.3.10 Rychlost proudění

Obecně se má za to, že rychlost proudění ovlivňuje především dva faktory: zvýšený průtok poskytuje více kyslíku pro korozní reakce, ale také může urychlit vysrážení ochranné vrstvy. Například studie [32] měkké oceli zjistila, že úbytek hmotnosti se zvyšuje s rostoucí rychlostí průtoku vody, kdy je DO nasycen. Jiné studie však zjistily, hustší ochrannou vrstvu, při vyšších průtocích vody. Ale v případě, že rychlost je příliš vysoká, může voda uvolňovat ochranné vrstvy - inkrusty [1].

4.1.3.11 Doba stagnace

Bylo prokázáno, že koncentrace železa se zvyšuje s delší dobou stagnace. Jedna studie z Holandska [33] zjistila, že zákal v distribučním systému z litinového potrubí vyvrcholil během noci, poté se potřeba vody zvýšila a v časných ranních hodinách doba stagnace klesla.

4.1.3.12 Biologická aktivita

Mikroby jsou přítomny v mnoha distribučních systémech a mohou různými způsoby ovlivňovat železnou korozi. Bakterie byly nalezeny v železných hrbolcích - inkrustech. Růst bakteriálního biofilmu na stěně potrubí může sloužit jako bariéra proti korozi, ale biofilm může také produkovat aerační buňky, což vede ke změnám v koncentraci kyslíku a elektrickém potenciálu. Biopolymery v biofilmu také mohou pohlcovat rozpuštěné kovy. Různé bakterie mohou ovlivnit uvolňování železa tím, že redukují Fe^{3+} nebo oxidují Fe^{2+} .

Bakterie mohou také spotřebovávat kyslík, způsobovat lokální pH gradienty, a vytvářet leptavé metabolity jako je H_2S nebo fosfid* železnatý. Role biologické aktivity ve vodním potrubí může být smíšená, ale pro většinu aspektů koroze železa je obecně považována za škodlivou. Není překvapující, že v případech, kdy tato činnost je dominantní, biocidy, jako je chlór účinně snižují celkové problémy s korozi navzdory jejich oxidačním vlastnostem [1].

*Poznámka: fosfid - Fosfidy jsou sloučeniny fosforu s nějakým méně elektronegativním prvkem nebo prvky. Dvouprvkové sloučeniny tvoří fosfor s většinou prvků s výjimkou rtuti, olova, antimonu, bismutu, telluru a polonia [34].

4.1.3.13 Teplota

Vliv teploty na korozi železa je často přehlížen. Mnoho parametrů, které mají vliv na korozi, se mohou s teplotou měnit: rozpuštěný kyslík (DO), rozpustnost, vlastnosti

roztoku (např. viskozita a iontová mobilita), oxidační rychlost dvojmocného železa, termodynamické vlastnosti inkrustace (což vede ke vzniku různých sloučenin), a biologická aktivita. Kromě toho, heterogenní inkrustované železo vytvořené na potrubí může mít velké rozdíly ve fyzikálních vlastnostech, jako je hustota inkrustů (jak je popsáno v poměru PBR Pilling-Bedworth) a koeficient tepelné roztažnosti. Jsou-li inkrusty vystaveny teplotním gradientům, mohou tyto rozdíly způsobit mechanická napětí, což vede k jejich odlupování nebo k vytváření trhlin.

Pouze několik studií zkoumalo úlohu v distribučním systému při různých teplotách. V jedné studii bylo zjištěno, že úbytek hmotnosti u železných vzorků byl nižší při teplotě 13°C v porovnání s 20°C [4]. Jiné studie zjistily nižší koncentraci železa a méně stížností zákazníků na červenou vodu během chladnějších zimních měsíců. Na konci dvou pilotních studií jsou vidět vrcholy zákalu a koncentrace železa, které s teplotními změnami korelují [4].

4.1.3.14 Přírodní organické látky

Několik studií [35] [36] [37] zjistilo, že přírodní organické látky (NOM) snižují rychlost koroze pozinkované oceli i litiny. Bylo rovněž zjištěno, že NOM podporují tvorbu ochranné vrstvy a mění oxidačně redukční potenciál redukcí Fe^{3+} koloidů na rozpustný Fe^{2+} . NOM také mohou vytvářet komplex s ionty kovů [1].

4.1.3.15 Volný CO_2

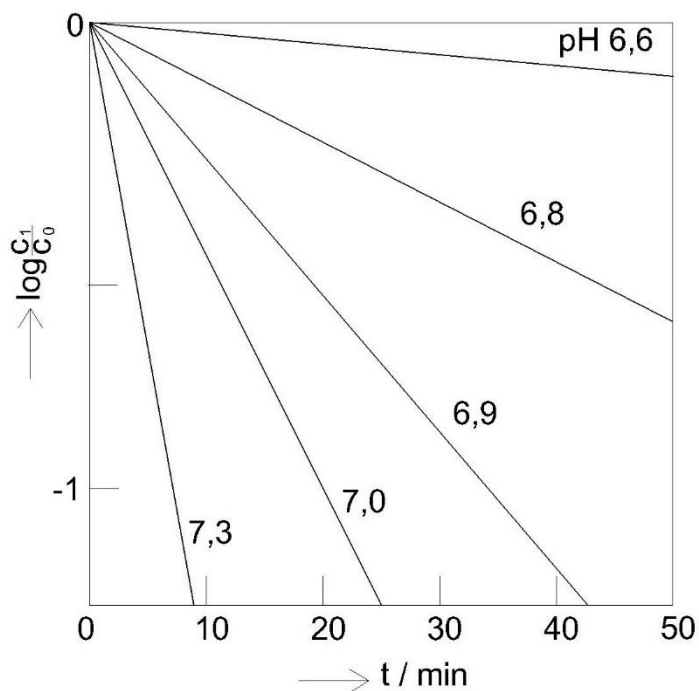
Je dobré zdůraznit význam "volného CO_2 ", což je součet kyseliny uhličitě a rozpuštěného oxidu uhličitého. Volné formy CO_2 povrchových komplexů oxidu železa, zvyšují rozpustnost železa a tím i rostoucí koncentrace železa i rychlost koroze [1].

4.1.3.16 Magnetické efekty

Některé oxidy železa jsou magnetické, jako je například magnetit, zatímco jiné, jako je hematit, nejsou. Jedna zajímavá teorie je, že vysrážené železo je přitahováno zpět na povrch potrubí magnetickou silou, takže množství rozsahu zarůstání závisí na jeho magnetických vlastnostech [1] [38].

4.2 Vliv pH na rychlost oxidace

Při konstantní hodnotě pH a koncentraci kyslíku probíhá oxidace železa podle kinetické rovnice prvního řádu. **Závislost rychlosti oxidace na hodnotě pH je velmi značná a rozhoduje o rychlosti tohoto procesu**, protože počáteční koncentrace železa je dána a koncentrace rozpuštěného kyslíku závisí na jeho parciálním tlaku ve vzduchu, který je rovněž konstantní (obr. 4:4). Ve výše uvedeném rozsahu hodnot pH se rychlost oxidace při vzrůstu hodnoty pH o jednotku zvyšuje asi stonásobně. Při hodnotách pH pod 5 se rychlost oxidace zpomaluje a při hodnotách pod 3 je již rychlost velmi malá a v podstatě konstantní. Naopak při hodnotách pH nad 8 může být rychlost oxidace tak značná, že může být bržděna rychlostí difúze kyslíku do roztoku. Zdá se, že v silněji alkalických oblastech má oxidace železa pravděpodobně charakter autokatalytického procesu [22].



Obrázek 4-3; Závislost rychlosti oxidace Fe^{II} na hodnotě pH

Na ose y je poměr látkových koncentrací Fe^{II} v čase t a v čase $t = 0$ [14].

Rychlost oxidace $Fe(II)$ závisí na formách jeho existence, zejména jednoduchého iontu Fe^{2+} a hydroxokomplexů $[Fe(OH)]^+$ a $[Fe(OH)_2(aq)]^0$. Při hodnotách pH pod 4 převládá koncentrace jednoduchého iontu Fe^{2+} , rychlost oxidace je nízká a v podstatě nezávisí na hodnotě pH. Při hodnotách pH mezi 5 a 8 se koncentrace dihydroxoželeznanu rychle zvyšuje, rychlost oxidace značně stoupá a v silně alkalickém prostředí je již na hodnotě pH nezávislá.

Hydrolyzované formy Fe(II) se snáze oxidují v pořadí $[\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{aq})]^\circ > [\text{Fe}(\text{OH})]^\circ > \text{Fe}^{2+}$. Rychlostní konstanta oxidace dihydroxokomplexu je asi o pět řádů vyšší než rychlostní konstanta monohydroxokomplexu.

Oxidaci železa mohou významně ovlivňovat různé anionty a kationty, v závislosti na stabilitě jejich komplexů vznikajících s Fe^{II} nebo Fe^{III} . Vznikají-li stabilnější komplexy s Fe^{III} , rychlost oxidace stoupá, a naopak. Síraný a chloridy tedy oxidaci zpomalují, kdežto hydrogenuhličitaný proces urychlují. Negativní vliv síranů se někdy vysvětluje tvorbou iontového asociátu $[\text{FeSO}_4(\text{aq})]^\circ$.

Kromě anorganických látek mají na rychlost oxidace Fe^{II} rozpuštěným kyslíkem ve vodě vliv i látky organické, především **humínové látky a třísloviny**, které oxidaci zpomalují, neboť mají komplexotvorné i redukční vlastnosti. Jev je to složitý a závisí na stabilitě komplexů s Fe^{II} i s Fe^{III} . Výsledkem komplexotvorných, oxidačně-redukčních a katalytických procesů je to, že v huminových vodách může přetrvávat v roztoku Fe^{II} i za přítomnosti rozpuštěného kyslíku poměrně dlouho. Vliv tříslovin je ještě výraznější než huminových látek, protože jsou silnějšími redukčními činidly [22].

Dalším faktorem ovlivňujícím oxidačně-redukční procesy, je **světlo**, protože na redukci Fe^{III} organickými látkami se pravděpodobně podílejí i fotochemické reakce [39]. Například na některých jezerech byla pozorována během dne vzrůstající koncentrace Fe^{II} ve vodě v obdobích intenzivního slunečního svitu, jako důsledek fotochemického reduktivního rozpouštění hydratovaného oxidu železitého. Tento proces byl výrazný zejména v kyselém prostředí [40].

Uvedené procesy mají význam při oxidaci Fe^{II} , které se vyskytuje v anoxických podmínkách podzemních vod, v hypolimniu eutrofizovaných nádrží a jezer a v důlních vodách. Při vývěru podzemních vod na povrch, při podzimní a jarní cirkulaci stojatých vod a při odtoku důlních vod do vod povrchových dochází v oxických podmínkách k rychlejší nebo pomalejší oxidaci na Fe^{III} , jeho hydrolyze a vzniku amorfního $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$, jehož stárnutím se tvoří g- $\text{FeO}(\text{OH})$ a a- $\text{FeO}(\text{OH})$ (viz dříve).

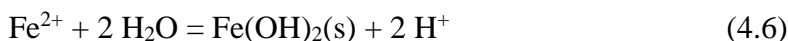
V technologii úpravy vody bylo navrženo i využití sloučenin **železa v oxidačním stupni +VI**. **Železany** jsou velmi dobrými oxidačními, koagulačními a dezinfekčními činidly. Udávané hodnoty oxidačně-redukčního potenciálu E° dosahují až 2,2 V, což je vyšší hodnota než pro ozon [22].

4.2.1 Koroze ocelového a litinového potrubí

Rozhodujícím faktorem při korozi ocelového a litinového potrubí je především celkové složení vody, přítomnost kyslíku a oxidu uhličitého. Koroze může být buď rovnoměrná (plošná), způsobená kyselým prostředím, nebo bodová (důlková), způsobená rozpuštěným kyslíkem. Tyto typy koroze jsou vyvolány elektrochemickými procesy. Místo na kovu se zápornějším potenciálem je anodou, kde převládá rozpouštění kovu. Naopak místo na kovu s větší hodnotou elektrochemického potenciálu je katodou.

V případě oceli nebo litiny probíhají na anodě a katodě reakce na sobě závislé, které lze přibližně zapsat asi takto:

Anoda:



Postupně dochází k transformaci amorfních tuhých fází za vzniku např. FeO(OH) (goetitu), Fe₂O₃ a Fe₃O₄ (magnetitu).

Katoda:



Elektrony vznikající na anodě, reakce (4.5), jsou spotřebovávány katodickou depolarizační reakcí (4.9). Depolarizátorem je kyslík rozpuštěný ve vodě, který je akceptorem elektronů. Hovoří se o korozi kyslíkovou depolarizací, jejíž charakteristickým rysem je rozpouštění železa na plošně omezených místech (důlková koroze). Obdobný depolarizační vliv má chlor a chlornany. Proto vyšší zbytkové koncentrace aktivního chloru po dezinfekci vody obvykle korozi stimulují.

Na katodě se v povrchové vrstvě vody zvyšuje hodnota pH, reakce (4.9). Reakcí hydrogenuhličitanů s hydroxidovými ionty se tvoří ionty uhličitanové, reakce (3.10). Je-li překročena hodnota součinu rozpustnosti CaCO₃, vylučuje se na katodě za určitých podmínek dobře ulpívající **ochranná vrstva kalcitu**, reakce (4.11). Proto má řešení

vápenato-uhličitanové rovnováhy při hodnocení agresivních účinků vody mimořádný význam.

Koroze oceli a litiny je poměrně složitý proces, komplex elektrochemických a chemických procesů probíhajících na anodě a katodě. Koncepce vzniku ochranné vrstvy uhličitanu vápenatého na povrchu katody je sice zjednodušením celého procesu koroze, avšak s přihlédnutím k dále uvedeným vlivům umožňuje alespoň kvalitativní odhad agresivních účinků vody na ocel a litinu.

Vylučování stabilní ochranné vrstvy CaCO_3 ovlivňují některé další faktory:

- Procesy probíhající ve vodě se poněkud liší od procesů probíhajících v tenké vrstvě přiléhající k povrchu kovu, v níž se mohou uplatňovat i procesy sorpční (v povrchové vrstvě může dojít dříve k přesycení vody kalcitem).

- Odolnost ochranné vrstvy závisí také na rychlosti vylučování (kinetice tvorby) CaCO_3 . Podle okolností se může vylučovat buď mikrokrystalická, nebo naopak poměrně propustná makrokrystalická vrstva.

- Za určitých podmínek může docházet i k tvorbě $\text{FeCO}_3(\text{s})$ jako součásti ochranné vrstvy na anodických místech (tzv. sideritový model).

- Vylučování ochranné vrstvy závisí také na rychlosti proudění vody v potrubí (**koroze vzniká často v místech, kde voda v potrubí stagnuje a současně se vyčerpává rozpuštěný kyslík**). Rychlost proudění by neměla být menší než $0,2 \text{ m s}^{-1}$ a nejlepší je, je-li větší než 1 m s^{-1}

- Chloridy a sírany stimulují rychlost koroze (pravděpodobně adsorpcí na anodických místech).

- Vápník a hydrogenuhličitanu podporují vznik ochranných vrstev a navíc potlačují nepříznivý vliv chloridů a síranů.

- Organické látky mohou podle svého složení působit pozitivně i negativně na rychlost koroze.

- Významným parametrem je tlumivá kapacita vody (viz str. 19)

- Význam má i koncentrace kyslíku ve vodě (ve vodě neobsahující rozpuštěný kyslík nemůže probíhat kyslíková depolarizace na katodě). Koncentrace kyslíku by neměla být nižší než 4 mg l^{-1} .

- Významnou roli má teplota vody. Se zvyšující se teplotou vzrůstají i korozní rychlosti.

Při rozbořech usazenin v ocelovém a litinovém potrubí se ukázalo, že ochranné vrstvy obsahují kromě kalcitu (CaCO_3) také siderit (FeCO_3). Byl vytvořen tzv. sideritový model tvorby ochranných vrstev [41]. Pro účinnou ochranu ocelového nebo litinového potrubí je nezbytný vznik kalcitu i sideritu. Za přítomnosti kyslíku se siderit oxiduje na goethit $\text{FeO}(\text{OH})$, který tvoří dobře ulpívající vrstvy. Na význam **tlumivé kapacity** vody ukázal Stumm [48]: čím je větší, tím se snáze tvoří dobře ulpívající vrstvy kalcitu. Významně se uplatňuje i při výkladu sideritového modelu [42].

Chloridy a sírany stimulují rychlost koroze a naopak inhibují pasivaci. Jejich vliv se někdy vysvětluje adsorpcí na anodických místech, kde se pak nemohou tvořit pasivační vrstvy. Hovoří se o hydroxidovém, chloridovém, síranovém mechanismu anodického rozpouštění. Udává se, že koncentrace chloridů a síranů by neměly ve vodě překročit hodnotu 50 mg l^{-1} . Negativní vliv chloridů a síranů se zmenšuje s rostoucí koncentrací hydrogenuhličitanů (pravděpodobně v důsledku kompetitivní adsorpce). Korozní rychlost závisí také na poměru mezi součtem koncentrací chloridů a síranů a hodnotou $\text{KNK}_{4,5}$ ($\text{ANC}_{4,5}$). [42]

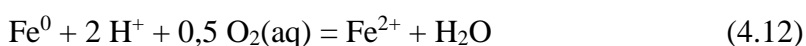
Značný vliv na korozi potrubí má **teplota vody**. Se vzrůstající teplotou vody se značně zvyšují i korozní rychlosti. Při dvojnásobném zvýšení teploty (např. z 6°C na 12°C) byly při korozních zkouškách zjištěny průměrně dvojnásobné korozní úbytky [43].

4.2.1.1 Mechanismy koroze

Ocel je ve vodním prostředí vodovodního potrubí chráněna vrstvou zinku. Po odstranění vrstvy se železo vylučuje ve formě Fe^{+III} za vzniku směsi aquakomplexů, koloidních částic rozpuštěných ve vodě, které jsou technicky popisovány jako "červená voda" a usazenin, tvořených z hydroxidů, hydratovaných oxidů a v malém množství i karbonátů. Výskyt dalších sloučenin železa ve vodě je malý, protože pitná voda prochází úpravou a je zbavena látek, s nimiž by se železo mohlo vázat [7].

Průběh reakcí můžeme zapsat takto:

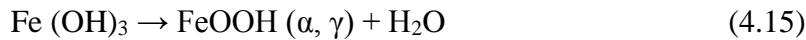
Železo prvotně oxiduje na dvojmocný kation Fe^{2+} a vzápětí na trojmocný kation Fe^{3+} [7].



Postupně trojmocné železo reaguje s vodou za vzniku hydroxidu železitého



Stárnutím sraženiny však u původního hydroxidu dochází k dehydrataci a změně na oxohydroxidy: goethit (α -FeOOH) a lepidokrokit (γ -FeOOH), později na oxid železitý (hematit).



4.2.1.2 Produkty koroze a další minerály vyskytující se v potrubí

Výsledkem koroze železa je pórovitá vrstva červenohnědé barvy, která je z mineralogického hlediska složená z limonitu, přesněji z goetit (α -FeOOH) a lepidokrokitu (γ -FeOOH), dále je přítomen hematit (Fe_2O_3) a vyskytuje se i siderit (FeCO_3). Tato pórovitá vrstva není přilnavá a vyplavuje se z potrubí spolu s "červenou vodou", což je směs stejných produktů, ale suspendovaných ve vodě. Červená voda se vyskytuje, zejména pokud voda v potrubí stagnuje nebo je rychlost průtoku velmi malá. Pórovité prostředí produktů navíc vytváří ideální prostředí pro množení bakterií, které vodu znehodnotí [7].

4.2.1.3 Shrnutí

Korodování potrubí je velice komplikované a je ovlivněno prakticky každou fyzikální, chemickou a biologickou vlastností vody. Tato kapitola uvádí souhrn klíčových faktorů, které provozovatelé musí vyhodnocovat s cílem zmírnit problémy s korozí železa.

4.2.2 **Inkrustace**

Produktem vnitřní koroze kovových potrubí je inkrustace. Interakce zkorodovaného povrchu železného potrubí s vodou je důležitá, protože může vést k vážnému zhoršení kvality vody a poškození trubního materiálu. V této kapitole je popsán vznik a růst inkrustů a jejich reakce, které vedou k problémům souvisejícím s obarvováním vody. Většina korozních inkrustů má charakteristické strukturní rysy, jako je volně držená horní povrchová vrstva, a vrstvy s porézním jádrem. Podle tohoto předpokladu se očekává, že inkrustace roste zevnitř prostřednictvím korozivní reakce, tj. konverze kovového železa na železnaté ionty. Průměrný oxidační stav železa se zvyšuje s rostoucí vzdáleností od stěny potrubí. Struktura

inkrustů a inkrustační reakce umožňují dvojmocnému železu uvolnění do přepravované vody, kde prochází konverzí na částice oxidu železitého, který je příčinou obarvené vody. Struktura inkrustace a její složení hraje důležitou roli při reakcích inkrustů, které vedou k uvolnění železa nebo snížení pórovitosti inkrustace, která je důležitým faktorem při snižování množství železa uvolňovaného do vody. Předpokládá se, že koncepční návrh, který je zde uvedený, bude použit jako základ pro změnu kvality vody, aby se minimalizovala tvorba barevné vody, a jako vodítko pro další výzkum [2].

4.2.2.1 Inkrustace v potrubí

Železná koroze ve vodovodní síti má mimořádný význam. Koroze může zničit potrubí, pohlcovat oxidanty a dezinfekční prostředky, vytvářet inkrusty, které zvyšují drnost a tím i energii potřebnou pro dodávání vody, podporovat růst biofilmu a vyrábět suspenze železných částic, které tvoří pitnou vodu červené, hnědé nebo žluté barvy, což působí špinavý vzhled. Po le-tech používání v rozvodech pitné vody, je litinové potrubí většinou pokryto usazeninami korozních produktů. Zatímco faktory, které mají vliv na korozi čistých železných povrchů, byly rozsáhle studovány, chemie inkrustů, které se tvoří na povrchu potrubí, a rozsáhlé reakce, které vedou k vytvoření barevné vody, nejsou tak dobře známy. Proto hlavním cílem této části bylo zamyslet se nad tvorbou a růstem inkrustů a jejich reakcemi, které vedou k obarvené vodě [2].



Obrázek 4-4; Řez litinového potrubí z obce Kramolna z roku 1958, jasně patrná inkrustace

4.2.2.2 Inkrustační struktura

Rychlosti koroze kovů jsou zpočátku vysoké, ale rychle se snižují, jak povlaková vrstva roste a zajišťuje zvýšení odolnosti proti korozi. Koroze železa ve vodním prostředí, může být rovnoměrná na povrchu kovu nebo může být omezena na konkrétní místa, jako například u bodové koroze. Koroze může růst a vytvářet „nádory“ nebo hrbolky. Tyto hrbolky mohou růst a dospět až do bodu, kdy se dostanou do vzájemného kontaktu a dávat tak vzhled souvislé vrstvy inkrustace. Vzhledem k tomu, že struktura inkrustace a její růst jsou ve vzájemném vztahu, je pečlivá analýza inkrustové struktury koroze velmi důležitá, protože může poskytnout značnou možnost nahlédnout do mechanismu růstu inkrustace a najít tak vhodné řešení.

Složení a struktura inkrustů v rozvodech pitné vody závisí na druhu kovu a složení vody. Jejich vznik se pravděpodobně řídí několika faktory, které zahrnují řadu kvalitativních parametrů, jako je pH, alkalita, tlumivá kapacita vody, přírodní organické hmoty (NOM) a koncentraci DO. Faktory, jako jsou: druhy proudění vody, sezónní výkyvy teplot, mikrobiologická aktivita, a postupy pro úpravy vody, jako je používání inhibitorů koroze, může také ovlivnit tvorbu ochranné vrstvy proti korozi a její růst. Korozní inkrusty nalezené v železných a ocelových potrubích, mají originální vlastnosti pro každou síť. Nicméně, inkrusty získané z různých zdrojů mají jisté podobnosti.

Sloučeniny, které byly nalezeny v železné korozní inkrustaci často zahrnují goetit α -(FeOOH), lepidokrokit γ -FeOOH, magnetit (Fe₃O₄), maghemit (α -Fe₂O₃), oxid železnatý (FeO), siderit (FeCO₃), hydroxid železnatý (Fe(OH)₂), hydroxid železitý (Fe(OH)₃), uhličitan vápenatý (CaCO₃) a zelené rzi. Zelené rzi jsou hydratované barevné železité sloučeniny, které obsahují Cl⁻, SO₄²⁻ nebo CO₃²⁻ anionty jako součást jejich složení. Na dřívějších studiích bylo zjištěno, že železné inkrusty mají charakteristické rysy, které zahrnují: 1) zkorodovaný materiál 2) porézní jádro, které obsahuje kapalnou a pevnou část 3) relativně hustou podvrstvu, která pokrývá porézní jádro a poskytuje strukturální integritu, pro tvorbu inkrustace 4) povrchovou vrstvou, jako vrstvou na rozhraní inkrustů a vody. Schéma struktury inkrustů je zobrazeno na Obr. 4-6 [2].

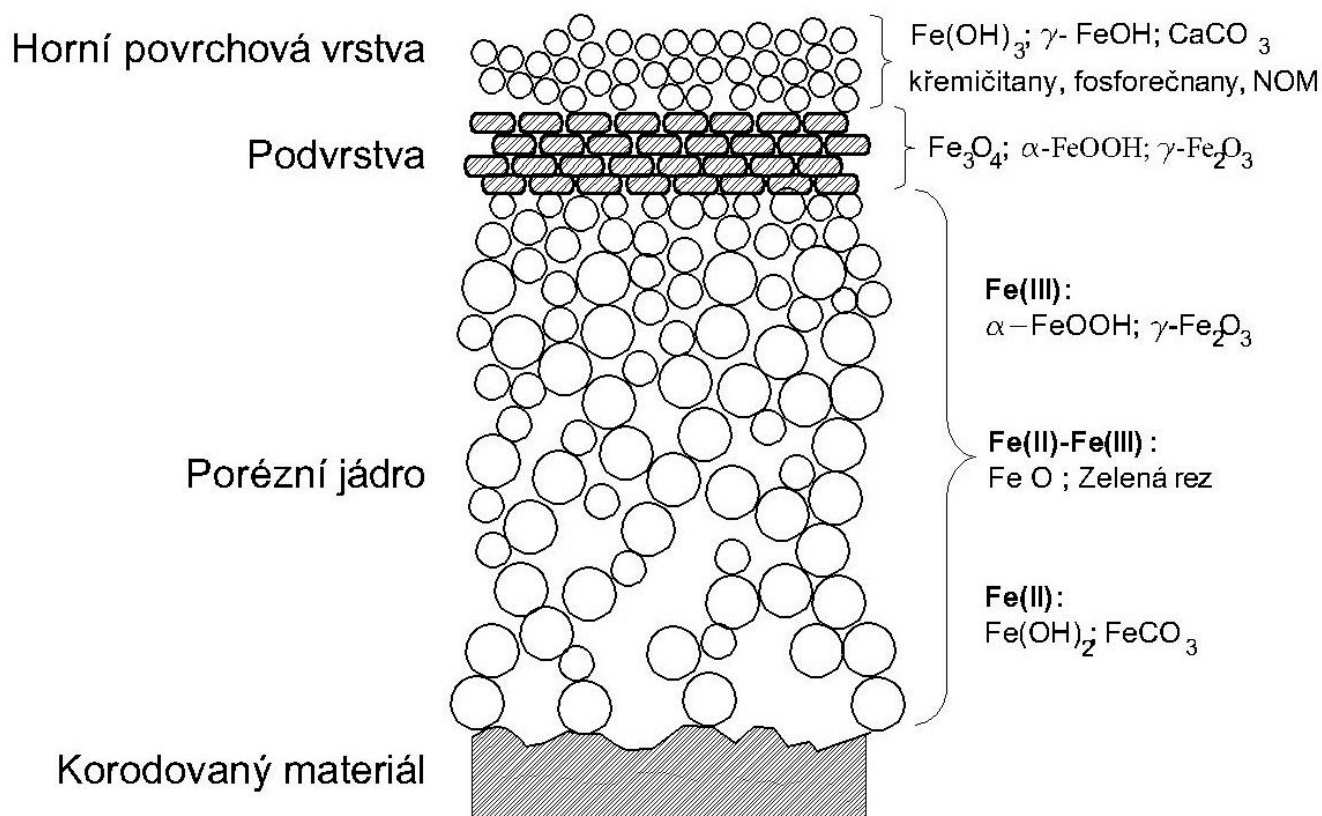
Korodovaný materiál

Zkorodovaný kovový povrch pod inkrustací se nazývá zkorodované podloží. To je zdroj železa, který se nachází v korozních inkrustech. Poté, co se vytvoří typické korozní nárůstky, roste další koroze pomalou rychlostí asi 0,5 mm/rok.

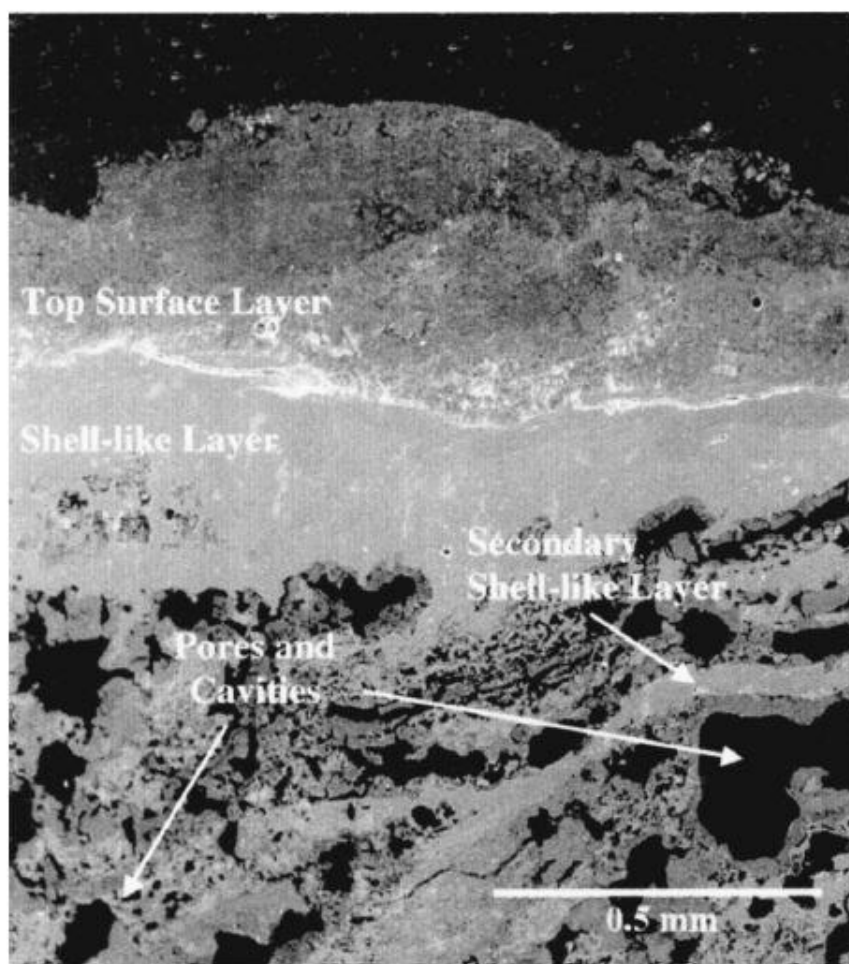
Porézní jádro

Jádro inkrustů je porézní hmota, která se skládá z aglomerátů menších částic, různých morfologií, jako jsou destičky a vláknité, nebo kulovité struktury. V předešlých studiích korozních inkrustů železných/ocelových potrubích byly, α -FeOOH, Fe₃O₄, α -Fe₂O₃ a FeCO₃ identifikovány jako dílčí fáze. Chemické analýzy ukázaly vysokou koncentraci Fe^{II} v této části inkrustace. Fe^{II} je přítomen v jádru buď jako pevná látka, jako je Fe(OH)₂, Fe₃O₄ a FeCO₃, nebo rozpuštěné železo ve vodě v dutinách pórů inkrustace. Zelená rez, hydráty železa a železnany jsou další fáze, které mohou být nalezeny uvnitř jádra.

Inkrustační hmota má obvykle vysoké procento hydroxidu železnatého. Když je mokrá inkrustace vystavena vzduchu, tento hydroxid železnatý se rychle oxiduje na železité sloučeniny. Obecně se předpokládá, že oblasti inkrustů nejbližší stěny potrubí mají vyšší množství dvojmocného železa. Póry a dutiny uvnitř struktury jádra jsou běžné. Dutiny mohou vyplývat z kyselých podmínek, které zabraňují srážení oxidů a hydroxidů. Rastrovací elektronový mikroskop SEM ukazuje obraz příčného průřezu korozní inkrustace (obr 4:8).



Obrázek 4-5 Schéma inkrustační struktury ukazující charakteristické vlastnosti a složení korozních inkrustů nalezených v železných/ocelových vodovodních potrubích [2]



Obrázek 4-6; Obr. Snímek z mikroskopu ukazuje póry a dutiny různých velikostí, které se vyskytují uvnitř inkrustace [2].

4.2.2.3 Shrnutí

Korozní inkrusty ovlivňují interakci zkorodovaného železného potrubí s vodou. Strukturu a složení inkrustace je třeba chápat s cílem vysvětlit reakce korozních inkrustů, které vedou k uvolnění železa a růstu inkrustace. Železné korozní inkrusty jsou porézní usazeniny, s hustou podvrstvou v horní části inkrustů, která obklopuje měkké porézní jádro. Porézní jádro má vysoké procento železných fází (např., $\text{Fe}(\text{OH})_2$ a FeCO_3), které se mohou snadno rozpustit a tak produkovat velké množství Fe^{2+} . Podvrstva je tvořena poměrně nerozpustnými železitými částicemi, jako je magnetit a goethit. Růst inkrustace je výsledkem pokračující koroze stěny potrubí, která pokračuje za přítomnosti kyslíku. Při redukci kyslíku probíhá inkrustace na povrchu nebo uvnitř inkrustů. Vodič elektronů mezi anodou (stěna potrubí) a katodou (místem redukce kyslíku) vede přes inkrusty, a závisí na jejich složení. Voda přítomná v pórech inkrustů slouží jako elektrolyt pro transport iontů pro zachování elektroneutality v inkrustaci. Proto porézní vodivé inkrusty jsou přinejmenším ochranou proti další korozi potrubí. Navíc, pokud nejsou oxidační činidla přítomny ve vodě, koroze

kovového potrubí může být udržována redukcí korozi složek inkrustace, a jejím výsledkem je vyšší Fe^{II} obsaženým uvnitř inkrustů.

K uvolňování železa také dochází při rozpouštění železnatých složek inkrustace, a železnaté ionty difundují do přepravované vody. Struktura pórů inkrustace určuje snadnost, s níž železo může difundovat ven z inkrustů v reakci na jakosti vodních podmínek. Důležité reakce inkrustace, které vedou k uvolnění železa, jsou následující:

1. Při kontaktu oxidantů s inkrusty, probíhá korozní reakce kontinuálně na rozhraní kov-inkrustace. Produkt Fe^{II} zůstává v roztoku a v hrbolcích pórů, adsorbuje se na Fe^{III} částice v inkrustech, kde se oxiduje a tvoří pevnou látku Fe^{III} . Také může pronikat ven do transportované vody a tvořit částice Fe^{III} .

2. Stagnace vody vede k rychlému vyčerpání oxidantů v těsné blízkosti inkrustace, protože reagují se složkami inkrustace. Díky tomu jsou oxidanty blízko inkrustů vyčerpány a železnaté ionty mohou difundovat ven z inkrustace do přepravované vody. Porézní inkrusty a anoxické podmínky dovolují značné uvolňování množství železa do vody.

3. Vyšší průtok a rychlost zvyšují rychlost hromadné dopravy oxidačních činidel na povrch inkrustace a mohou snížit rychlost uvolňování železa oxidací železitých iontů, protože difundují ven z inkrustace, jako například vysrážením produktu pevného Fe^{III} . Jednoduše řečeno, jestliže voda stagnuje, potrubí tolik nekoroduje.

4. Když železné ionty narazí na kyslík nebo jiné oxidační činidlo ve vodě, rychle jsou oxidovány na železnany, které jsou buď usazovány jako částice na povrchu inkrustace nebo jsou transportovány přímo ke spotřebiteli. Částice usazené na povrchu mohou být resuspendovány hydraulickým působením tekoucí vody.

Vliv parametrů kvality vody na uvolňování železa z korozních inkrustů je primárně určen modifikací vlastností korozních inkrustů, zejména pórovitostí a rozpustností inkrustačních částí [2].

5 Opatření proti korozi a inkrustaci

Pokud se provozovateli na vodovodní síti vyskytne problém ve formě zvýšených hodnot železa, má na výběr z několika možností jak na vzniklou situaci reagovat. V první řadě je nutné zajistit plynulý chod provozované sítě, aby spotřebitel nebyl omezen, a to v co nejkratším možném čase. Nejde-li problém vyřešit důsledně, je nutné zavést alespoň některá opatření, která problém zmírní a umožní tak provozovat síť v přijatelných podmínkách.

Dalším krokem je celková analýza daného problému a návrh možností, jak problém vyřešit. První a do jisté míry nejlevnější možností je intenzivnější odkalování vodovodní sítě. Do jisté míry proto, že je možné se dostat do stavu, kdy se bude odkalovat tak často, jak to jen půjde, a provozní náklady na odkalování se vyrovnají a posléze cenově přesáhnou další možnosti, například rekonstrukci problémového řadu.

5.1 Odkalování

Základním úkonem pravidelné údržby vodovodní sítě je odkalování vodovodního řadu. Je velmi důležité jak pro zajištění potřebné kvality pitné vody, tak pro ochranu vodovodního potrubí před korozi a jeho zanesením korozními produkty a inkrusty. Přestože je pitná voda dodávaná veřejným vodovodem kvalitní a splňuje přísné požadavky platných právních předpisů, dochází při jejím styku s různými materiály potrubí a při změnách tlaku během distribuce vody k celé řadě fyzikálně chemických i mikrobiologických procesů. Výsledkem je tvorba sraženin a usazenin železa, srážení vodního kamene či dalších nerozpuštěných sloučenin. Může také docházet k zachytávání a rozvoji mikroorganismů na stěnách potrubí. Tyto procesy mohou způsobit nežádoucí změny v chemických i biologických vlastnostech vody, např. problémy s barvou vody, zákalem, přítomností mechanických nečistot, s chutí a pachem vody a mohou také komplikovat dodávku vody [44].

Provádět optimální odkalování vodovodních řadů je jednou z podmínek zajištění dobré kvality dopravované vody. Zvláště v dnešní době, kdy se spotřeba pitné vody snižuje, dochází k prodlužování doby zdržení v distribuční síti, snížení rychlosti proudění vody v potrubí a k poklesu koncentrace volného chloru. Odkalování je proplach potrubí proudem vody, který strhává ze stěn potrubí některé sedimenty a biofilm. Při odkalování provozovatel řeší vypuštění odkalované vody. To se provádí buď přímo do terénu, dle geologických poměrů, nebo do kanalizace, pokud to situace dovoluje. Odkalování se provádí min. 2x

ročně, zpravidla však 3x až 4x za rok, podle aktuální kvality vody. Vzhledem k tomu, že velký průtok vody při odkalování může vést k přechodnému ovlivnění tlaku a průtoku vody a ke krátkodobému zhoršení její kvality vlivem uvolněných nečistot, jsou před zahájením odkalování informováni zástupci města. Účinnost odkalování je kontrolována laboratorními rozbory pravidelně odebíraných vzorků vody. Kromě plošného odkalování sítě, je prováděno také lokální odkalování v případě náhlého zhoršení kvality vody nebo vždy po opravě poruchy vodovodu.

V potrubích vodovodních sítí, kterými protéká voda rychlostí menší než $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Dr. Andreas Korth [39]), se tvoří usazeniny, jejichž složky se mohou snadno mobilizovat. Hlavním zdrojem těchto usazenin jsou částice vnášené do soustavy spolu s pitnou vodou a uvolňované z produktů koroze, pokud v nechráněných kovových potrubích probíhají korozivní procesy.

Odkalování spolu s odvzdušňováním vodovodní sítě a příváděcích a zásobovacích řadů jsou provozně velmi důležitou činností. Zanedbávání této činnosti může negativně ovlivňovat kvalitu vody ve vodovodní síti i průtokové poměry – zavzdušněním potrubí je ovlivňován průtočný profil a průtok vody může být i zcela přerušen. Nárůst tlakových ztrát v zavzdušněném potrubí může při čerpání druhotně zvyšovat spotřebu elektrické energie a snižovat čerpané množství vody. Vzduch hromadící se v nejvyšších místech (vrcholech) může při určitých provozních stavech též přispívat ke vzniku hydraulických tlakových rázů s následkem možných poruch potrubí.

Pravidelné vypouštění určitého objemu vody z koncových větví vodovodů nebo-li odkalování, je často jedinou možností, jak zajistit chemickou a bakteriologickou nezávadnost vody i v těch částech vodovodní sítě, kde dochází k nedostatečnému proudění a přílišné stagnaci vody v potrubí. Správná volba frekvence odkalování a rychlosti proudění při proplachu vychází z charakteru znečištění potrubí, velikosti a množství odběrů z koncových větví, důležitosti odběratelů napojených na odkalovanou síť a jejich citlivost na pokles tlaku, či přerušeni dodávky vody, při vlastním procesu odkalování. V naprosté většině případů vychází volba četnosti a razance odkalování z dlouholetých zkušeností provozních pracovníků [45].

5.1.1 Odvzdušnění

Problémy při distribuci vody nemusí způsobovat jen nahromaděné mechanické nečistoty, korozní produkty a inkrusty, ale i nahromaděný vzduch v potrubí. Ten může rovněž snižovat průtok a zmenšovat tlak vody. Kromě toho může být vzduch v potrubí strháván do rozváděné

vody a působit bílé zakalení, které může být spotřebiteli negativně vnímáno v obavě, že jde o důsledek vysoké koncentrace chlóru. Z tohoto důvodu je potřeba pravidelně z potrubí vypouštět také vzduch, což se provádí odvzdušňováním sítě tím, že vzduch z potrubí vypustí otevřením vzdušníků či hydrantů v nejvyšších místech sítě, kde se přirozeně hromadí. Někde jsou pro tento účel instalovány i automatické odvzdušňovače. Odvzdušnění se provádí vždy zároveň s odkalením tak, aby po ukončení prací byla kvalita dodávané vody co nejlepší [44].

5.1.2 Plán odkalování

Ke snížení kvality vody v potrubí a tedy k nutnosti odkalení dochází zpravidla nerovnoměrně v průběhu kalendářního roku. V letním období stoupá teplota vody a zlepšují se podmínky pro bakteriální znečištění. Ale například vodovody v rekreačních oblastech mají přes léto dostatečné odběry a k problémům dochází mimo hlavní sezónu, kdy se voda v potrubí pohybuje minimálně. Zvolit vhodné období k provádění odkalení, a to za podmínek omezeného počtu pracovníků určených pro tuto činnost, si přímo vyžaduje plánování této činnosti. Nejvhodnější dobou pro sestavení plánu odkalování je zimní období, ve kterém se odkalování hydranty obvykle provádí jen v mimořádných případech, neboť tato činnost je zkomplikována teplotami pod bodem mrazu. Při tvorbě plánu odkalování je užitečné vycházet ze zkušeností z minulého období, brát v úvahu nově zjištěné opakující se závady v kvalitě vody, nově zprovozněné vodovody, ale i druh a stav trubního materiálu a případnou vnitřní výstelku [46].

5.1.3 Odběr vzorků

Většinou je po odkalení odebírán vzorek pro chemický nebo bakteriologický rozbor vody a jeho výsledky jsou shromažďovány a později statisticky zpracovávány tak, aby bylo možné jednak stanovit účinnost provedeného odkalování, jednak vytipovat místa s opakovanými problémy v kvalitě vody. Statistika závad a problémů v kvalitě vody je též podkladem pro zvolení intenzity odkalování nebo navržení razantnější metody čištění potrubí než je jen odkalování. Mimo pravidelné a plánované odkalování vodovodního řadu se provádí odkalování nárazové, dle aktuální potřeby, vyvolané různými mimořádnými provozními příčinami např. po opravě havárií vodovodního řadu, při výskytu zvýšeného zákalu vody v potrubí, při zjištění mikrobiologických závad ve vodovodní síti, tedy obecně

při odstraňování závad a problémů v kvalitě vody, které vzniknou druhotně při dopravě vody ve vodovodní síti. Opět je třeba zdůraznit, že po odkalení a proplachu potrubí je nutné provedení kontroly kvality vody odběrem vzorků. O provedeném odkalování je nutno vést příslušné záznamy [46].

5.1.4 Vliv hydrauliky potrubí při odkalování

Při výstavbě nebo rekonstrukci vodovodních řadů musíme dbát na to, aby bylo možné řady optimálně odkalit, vypustit v reálném čase a zároveň tyto manipulace nesmí ohrozit obsluhu. V ideálním případě to znamená, že příváděcí řady musí být rozděleny sekčními uzávěry na snadno vypustitelné sekce. V proplachovaném řadu musí být dosažena rychlost alespoň $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro odstranění volných sedimentů. Rychlost ve vypouštěcím potrubí by neměla být vyšší než $2 - 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto podmínky nejsou často na stávajících řadech dodrženy a tím komplikují provoz vodovodů.

Možnost dobré manipulace při odkalování a vypouštění příváděcích řadů a rozvodných sítí je podmínkou pro efektivní provozování vodovodu, rychlé opravy vzniklých poruch a dostatečné odstraňování volných usazenin v potrubí, které jinak mohou způsobovat problémy v podobě hnědé až červené vody, bakteriálního oživení v síti apod. Správně navržené zařízení, jako je rozdělení do sekcí, sekční šoupátka a vhodné velikosti výpustného potrubí, umožňuje provozovateli optimálně reagovat jak na výskyt poruch zařízení, tak předcházet problémům s kvalitou vody. Mnoho vodovodů je takto správně vybavených, ale stále existuje mnoho vodovodů, které neodpovídají současným požadavkům na efektivní provoz. Dobré fungování hydraulického systému vyžaduje dobrou znalost jeho hydraulických vlastností [9].

5.1.4.1 Výhody sekčních uzávěrů

Pro rychlé a efektivní provedení opravy na příváděcím řadu je nutné vypustit opravované potrubí v co nejkratším čase. V praxi by bylo nejlepší, kdyby bylo možné opravované potrubí vypustit např. během 1-3 hodin. Pokud na dlouhém příváděcím řadu neexistují sekční uzávěry, je nutné vypouštět celý řad. To je časově náročné, a pokud se k tomu přidá fakt, že na příváděcím řadu o průměru 600, 800 nebo více mm jsou umístěny výpustná potrubí o průměru 200 mm, je zřejmé, že tím bude ovlivněna doba vypouštění vody z řadu. V praxi to znamená, že příváděcí řad musí být vybaven sekčními uzávěry ve vzdálenostech po 800 – 2000 m. Vypouštění řadu se díky sekčním uzávěrům omezí na vypouštění jedné

sekce. Řad je vypuštěn rychleji, zároveň spoříme vodu, kterou bychom jinak vypouštěli z celého řadu. Sekční uzávěry mají ještě další funkci. Při odkalování řadu umožňují upravit hydraulické podmínky tak, aby bylo dosaženo optimálních podmínek pro odkalení [9].

5.1.4.2 Vliv průměru vypouštěcího potrubí

Dalším faktorem, který ovlivňuje dobu vypouštění, je průměr vypouštěcího potrubí. Například vypouštěcí potrubí o průměru 200 mm je zcela nedostatečné pro vypouštění potrubí většího průměru. Při velkém tlakovém spádu vznikají v takovém výpustném potrubí vysoké rychlosti a potrubí menšího průměru představuje zbytečně velkou tlakovou ztrátu, která snižuje rychlost vypouštění a efekt odkalení. Malý průměr výpustného potrubí je problémem také při malém spádu, kdy zpomaluje výtok vody. Zdá se optimální, aby rozměry výpustného potrubí byly takové, aby rychlost vody dosahovaly 2-2,5 m.s⁻¹. Představte si obsluhu, která v takovém místě otvírá uzávěr na výpustném potrubí. V extrémním případě může dojít až k ohrožení zdraví obsluhy [9].

5.1.5 **Požadavky na odkalování řadu**

Cílem odkalování řadu je vypuštění volných sedimentů, které se v potrubí nashromáždí. Jedná se zejména o produkty korozního původu a o částice, které vznikají, pokud v potrubí dobíhají procesy úpravy vody. Místa s nahromaděním volných sedimentů způsobují jak problémy s barvou, chutí a pachem vody, tak mohou být živnou půdou pro růst mikroorganismů. Za předpokladu, že je dobře vybudován celý systém sekčních uzávěrů, vzdušníků, ručního odvzdušnění a výpustného potrubí, je možné docílit snadnějšího odstranění těchto sedimentů. Sekční uzávěry na potrubí slouží k oddělení odkalované části od části, která již byla odkalená.

Situaci je možno si představit na typickém příkladu. Jsou dva vodojemy s výškovým rozdílem 30 m s přiváděcím řadem, který vede přes hluboké údolí. Odkalení bude prováděno postupně od horního vodojemu směrem dolů. Uzavře se první sekční uzávěr směrem od vodojemu. Voda se vypustí nad sekčním uzávěrem. Tímto uspořádáním se dosáhne lepšího odkalení zejména v těch místech, kde by voda tekla k výpusti z obou vodojemů. Odkalení se provádí tak, aby byl k dispozici co největší hydraulický spád. Volné sedimenty je možné odstranit hydraulicky, odkalováním. Minimální rychlost pro odkalení volných sedimentů v potrubí se pohybuje kolem 0,5 m.s⁻¹.

Odstranění volných sedimentů je možné provést proplachováním. Pokud by bylo nutné odstranit pevně přisedlé inkrusty na potrubí, je potřeba použít buď mechanického čištění, nebo čištění v kombinaci voda – vzduch. Kombinované čištění voda - vzduch se poměrně často používá na území bývalého východního Německa. Je přitom třeba zvláštní opatrnosti a dobře zaškolená obsluha tak, aby rázy, které vznikají při čištění, neroztrhaly potrubí [9].

5.1.5.1 Stanovení optimálních hydraulických podmínek

Optimální hydraulické podmínky pro vypouštění a odkalení řadů je možné stanovit dvěma způsoby. Buď empiricky, což znamená řadou pokusů při vypouštění a odkalení. Tento způsob je ovšem velmi neefektivní. Výhodnější je vytvoření a použití matematického modelu. Za předpokladu, že matematický model je v rukou zkušeného uživatele, se dočkáme stručných a přehledných výsledků. Výstupy modelování umožňují předem navrhnout vhodné parametry vypouštěcího potrubí a dalších zařízení na vodovodní řad a vhodné postupy při odkalování a vypouštění potrubí. Správný postup zahrnuje vytvoření hydraulického modelu ustáleného stavu a ověření jeho parametrů. Na základě ověřeného modelu se provede stanovení kapacity jednotlivých výpustných potrubí. V dalším kroku se navrhnou postupy vypouštění a odkalování potrubí tak, aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Po této fázi může následovat vytvoření časově proměnného modelu pro dispečerské řízení vodovodu či vodárenské soustavy. Z něho vychází model kvality vody, který je většinou omezen na modelování obsahu volného chlóru [9].

5.1.6 Strategie odkalování sítě respektující tvorbu usazenin

Množství nepřichycených usazenin, které se kumulují v potrubí, je determinováno stávající rychlostí průtoku vody, přičemž v důsledku snižování rychlosti průtoku dochází k exponenciálnímu nárůstu potenciálu tvorby usazenin. Hnědé zbarvení vody souvisí, ve většině případů, s mobilizací nepřichycených usazenin. Těmito usazeninami může být způsoben výskyt mimořádných mikrobiálních jevů ve vodě, který může podporovat množení různých organismů (např. berušek vodních).

V praxi jde o to, aby usazeniny, které se mohou snadno mobilizovat, byly z vodovodní sítě odstraněny dříve, než začnou negativně ovlivňovat kvalitu přepravované vody. Vhodný přístup k odkalování (proplachování) sítě respektující stav konkrétní sítě sestává z následujících kroků:

- a) vypracování systematického plánu odkalování
- b) systematické odkalování sítě s evidencí množství usazenin v potrubí
- c) propočet intervalů odkalování

Způsob propočtu intervalů odkalování sítí vyvinulo v posledních letech německé Technologické centrum voda (TZW- Technologiezentrum Wasser, Německo) na základě výzkumných a poradenských projektů zaměřených na praxi. Cílem je, aby provozovatel sám dokázal provádět odkalování sítě v souladu s jejím aktuálním stavem [47].

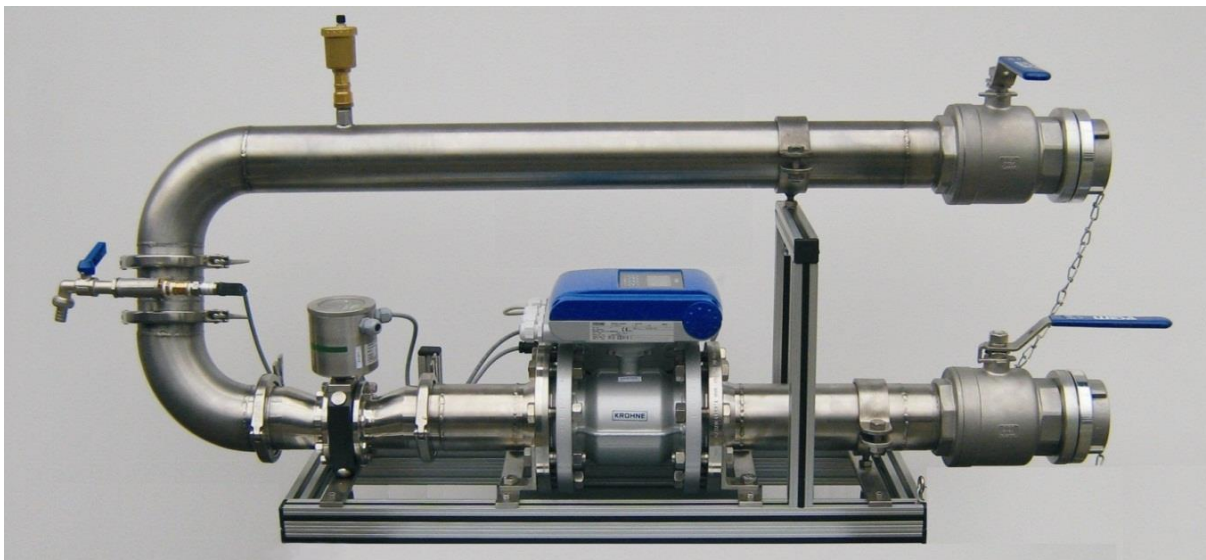
5.1.6.1 Přístup

Zvláštní význam pro efektivní odstraňování volných usazenin z vodovodní sítě má způsob jakým se odkalování provádí. Odkalování sítě by se mělo provádět systematicky, vždy čistou vodou a jedním směrem. Tento způsob zpravidla docílí vysokou rychlost proplachování a nedochází k mobilizaci usazenin v okolních potrubích. Předtím, než se přistoupí k vlastnímu odkalování, je třeba sestavit plán. Ten bude obsahovat sled potrubí, která je třeba odkalit, a sled šoupátek, jimž je nutné manipulovat.

Potrubí, které má být odkaleno, musí vždy navazovat na potrubí, které již bylo proplachováno (odkaleno). Tak se na začátek potrubí, které se má odkalit, dostává vždy čistá voda, protože před ním ležící potrubí již bylo vyčištěno (odkaleno). Během odkalování pak již nedochází ke vnášení nečistot z předsunutých potrubí do potrubí právě odkalovaného.

Podle zkušeností TZW je možné s týmem dvou pracovníků provádět systematické odkalování propojené vodovodní sítě o délce potrubí 15 až 20 km týdně.

Pro stanovení intervalů odkalování, které budou respektovat skutečný stav dané sítě, je nutné zjistit rychlost tvorby usazenin v jednotlivých potrubích určitého spotřebiště. To znamená určit míru zanášení potrubí. To je možné učinit například instalováním zkušebního úseku potrubí „FlushInspect“, který vyvinulo TZW v rámci výzkumného projektu Spolkového ministerstva pro vzdělání a výzkum (BMBF) spolu s firmou FAST (obrázek 5-1). Pomocí tohoto testovacího úseku potrubí se kontinuálně zaznamenává zákal ve vodě z odkalování a další relevantní parametry. Vzhledem k tomu, že při jednosměrném odkalování se usazeniny vynášejí podle svého umístění v potrubí, umožňuje propojení křivek zákalu se souřadnicemi potrubí zobrazit reálný stav usazenin v poměru 1:1 [47].



Obrázek 5-1; Testovací úsek potrubí pro diagnostiku vody při odkalování [47].

5.2 Čištění vodovodního potrubí

Ve většině případů je možné pouhým proplachem (vodou či směsí vody se vzduchem) docílit dobrého čistícího účinku – podmínkou však je dostatečně vysoká rychlost průtoku (alespoň 2 až 3 ms⁻¹). Není-li pouhým proplachem možné odstranit nečistoty ulpěné na stěnách potrubí, teprve pak je vhodné přikročit k dalším formám mechanického čištění [48].

Cílem čištění vodovodního potrubí je odstranění cizích předmětů a především nánosů a inkrustací. Tyto faktory zvyšují drsnost stěn a snižují průtočný profil. To se v provozu projevuje zvýšením tlakových ztrát a zmenšením průtočnosti potrubí.

Při čištění potrubí používáme následující postupy: u potrubí o průměru 50 - 250 mm provádíme mechanické čištění nástroji upevněnými na rotační hřídeli. U potrubí o průměru 150 - 1000 mm hydraulicko-mechanické čištění neupoutanými nástroji ovládanými vysílačem [34].

5.2.1 Legislativní požadavky na jakost pitné vody

Pitná voda musí splňovat mikrobiologické, biologické, chemické, fyzikální a radiologické požadavky. V ČR jsou požadavky shrnuty ve vyhlášce Ministerstva zdravotnictví č. 187/2005 Sb., kterou se mění vyhláška č. 252/2004 Sb., určující hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. Hodnoty ukazatelů jsou stanoveny jako nejvyšší mezní hodnoty (NMH), mezní hodnoty (MH) a doporučené hodnoty

(DH). V úvahu se bralo také doporučení Světové zdravotnické organizace (WHO) z roku 1993 [49] a 2004 [50] a Směrnice EU z roku 1998 [51]. Mezní hodnota pro obsah železa v pitné vodě je $0,20 \text{ mg.l}^{-1}$.

6 Praktická část: vodovod Kramolna

Tato část diplomové práce je zaměřena na vodovodní síť obce Kramolna. Navazuje na druhou část bakalářské práce *Zásobování vodou města Náchoda a okolí* [52]. Závěrem bakalářské práce bylo doporučeno prodloužit čas odkalování a udělat několik podrobnějších vzorkování během odkalování a z toho určit nejlepší čas pro efektivnější odkalování.

Jako jeden z hlavních podkladů pro tuto práci byl vypracován podrobný podélný profil, který pomohl odhalit určité nedostatky a přispěl tak k lepšímu pochopení celé situace, viz dále.



Obrázek 6-1; Litinové potrubí Kramolna DN 100, malé, ale viditelné inkrusty.



Obrázek 6-2; Potrubí Kramolna – detail inkrustů.

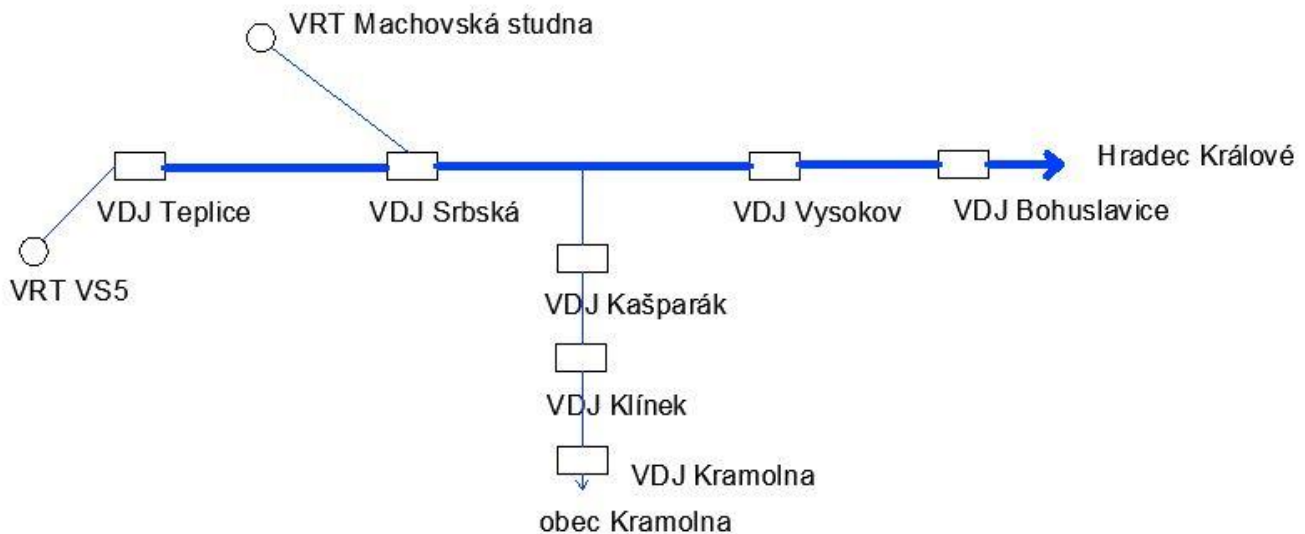
6.1 Vodovod - současný stav

Vlastníkem a provozovatelem vodovodu Kramolna je společnost Vodovody a kanalizace Náchod, a.s. Vodovod zásobuje pitnou vodou obyvatele a ostatní odběratele v obci. Vodovod je napojen na skupinový vodovod Teplice n. M. – Náchod – Bohuslavice, konkrétně část provozního celku Náchod – Bohuslavice.

Počet zásobovaných trvale bydlících obyvatel: 896

Počet přípojek: 415

Vodovod Kramolna je zásoben z vodojemu Kramolna 100+250 m³ s d. v. 483,0 m n. m., kam je voda postupně dopravována z vodojemů Vysoká Srbská 1 500 m³ s d. v. 495,60 m n.m., U Nemocnice 1 200 m³ s d. v. 407,0 m n.m. a nakonec VDJ a přečerpávací stanice Vinohrady a Na Klínku 200 m³ s d. v. 440,50 m n. m.



Obrázek 6-3; Schéma sítě Náchodsko [52].

6.1.1 Zhodnocení současného stavu sítě

Množství vody v jímacích objektech je pro stávající i výhledový počet obyvatel dostatečné. Voda dodávaná do spotřebiště je hygienicky upravována oxidem chloričitým ve vodojemu Vysoká Srbská, který je hlavním vodojemem ve vztahu k Náchodu. Kvalita vody je v souladu s vyhláškou MZdr č. 187/2005 Sb. Objem akumulované vody ve vodojemech zabezpečí pokrytí minimálně 60 % maximální denní potřeby vody. Současný stav vodovodních řadů odpovídá platným normám po stránce technického uspořádání, možnosti manipulace na síti, vnitřních průměrů potrubí a zajištění požárního odběru. Vodovod je zaveden do všech částí zásobovaných obcí a sídelních jednotek. Vodovod je napojen na radiový dispečink provozovatele vodovodu [52].

6.1.2 Popis problému

V místní vodovodní síti Kramolny, napojené na systém zásobování vodou z Polické křídové pánve, bylo od jara roku 2014 nahlášeno několik problémů s kvalitou pitné vody. Ve většině případů se jednalo o zákal a červono-hnědou barvu ve vodovodní síti. Dle VAKu

to bylo způsobené hromadným napouštěním bazénů v obci, neboť zvýšili mnohonásobně běžné průtoky v potrubí a tím i rozmísení či stržení sedimentu v potrubí.

V minulých letech to byl problém jen pár jarních měsíců, ale v roce 2014 se problém rozšířil do celého roku. Z tohoto důvodu odpovědný orgán Vodovody a kanalizace Náchod a.s. zahájil od pololetí roku (9. 9. 2014) výrazně intenzivnější odkalování celé sítě. Došlo k uzavření několika uzávěrů z důvodu rozdělení lokality na dvě části pro lepší způsob odkalování a vytipování případné problémové části vodovodu. Nicméně problém se nepodařilo vyřešit úplně, ale jen zmírnit.

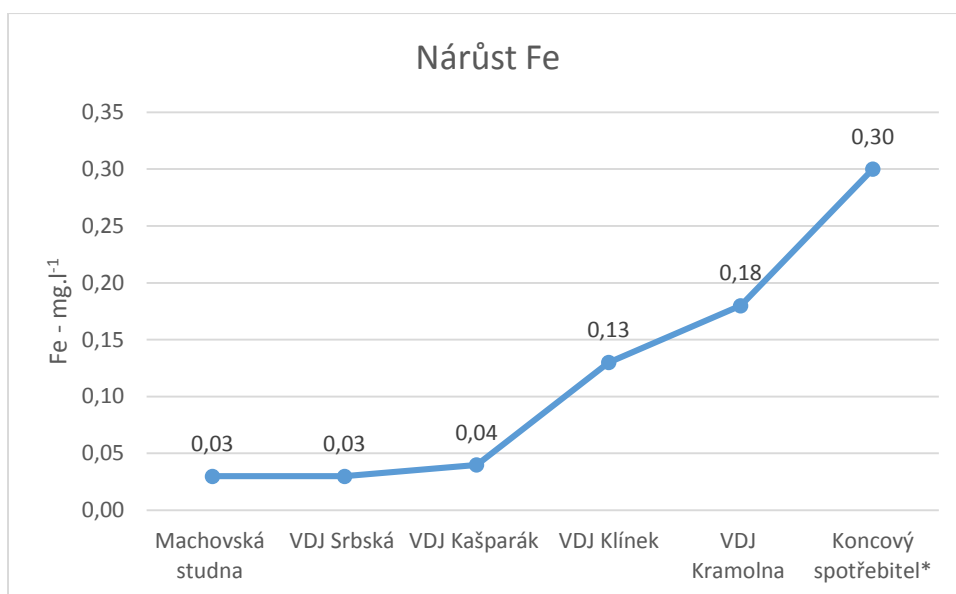
Průběžným měřením se zjistilo, že se ve vodě vyskytuje nadlimitní množství železa (Fe); v průměru $0,45 \text{ mg.l}^{-1}$, kdy limit je $0,20 \text{ mg.l}^{-1}$ [53].

Pro úplné pochopení dané situace je doporučeno prostudovat druhou část bakalářské práce *Zásobování vodou města Náchoda a okolí* [53], kde je celý problém mapován a rozebírán.

Jakost pitné vody dodávané veřejnými vodovody v České republice v roce 2007 [54], uvádí zjištění, že hodnocení dodržování limitních hodnot jednotlivých ukazatelů jakosti pitné vody daných vyhláškou č. 252/2004 Sb. v roce 2007 byla ve větších oblastech zásobujících více než 5 000 obyvatel nejčteněji překračována mezní hodnota železa. V menších zásobovaných oblastech bylo poměrně časté překročení mezních hodnot nalezeno u ukazatelů pH (15 %), železa (8,7 %) a manganu (7,4 %). Z toho vyplývá, že problém na Kramolně není ojedinělý, nýbrž spíše reprezentativní.

Tabulka 2; Přehled koncentrací Fe (mg.l^{-1}) v síti [53].

Název	Fe (mg.l^{-1})
Vrt TS5	0,04
Machovská studna	0,03
VDJ Srbská	0,03
VDJ Kašparák	0,04
VDJ Klínek	0,13
VDJ Kramolna	0,18
Koncový spotřebitel*	0,30



Obrázek 6-4; Nárůst koncentrace Fe ve vodovodní síti [53].

Průměrná průtočná rychlost v potrubí se pohybuje okolo hodnoty $0,83 \text{ m.s}^{-1}$. Průměrný průtok při odkalování byl 13 l.s^{-1} a průměrný čas odkalování byl 23 minut.

Pro lepší zmapování a pochopení celého problému byl vytvořen podrobný a přehledný podélný profil (viz příloha).

6.1.3 Stávající vliv provozování

Původně se na Kramolně vodovodní síť odkalovala 2-3x za rok, ale po nahlášených problémech provozovatel VAK Náchod zahájil intenzivnější odkalování. V roce 2014 a 2015 každých čtrnáct dní a v roce 2016 jednou za měsíc. Na začátku bylo vzorkováno na třinácti místech, v roce 2016 už jen na deseti. Tímto způsobem provozu se daří VAKu držet průměrné hodnoty u spotřebitele kolem hodnoty koncentrace železa $0,16 \text{ mg.l}^{-1}$.

6.1.3.1 Výsledky vzorkování

Od 11.6. 2014 bylo na Kramolně prováděno pravidelné vzorkování u spotřebitele, které probíhá až do dnešních dnů. Od 9.9. 2014 bylo vzorkováno i při odkalování, ale to žel po několika měsících přestalo. Z dostupných výsledků vzorkování vychází následující tabulka:

Tabulka 3; Hodnoty Fe v síti Kramolna (mg.l^{-1})

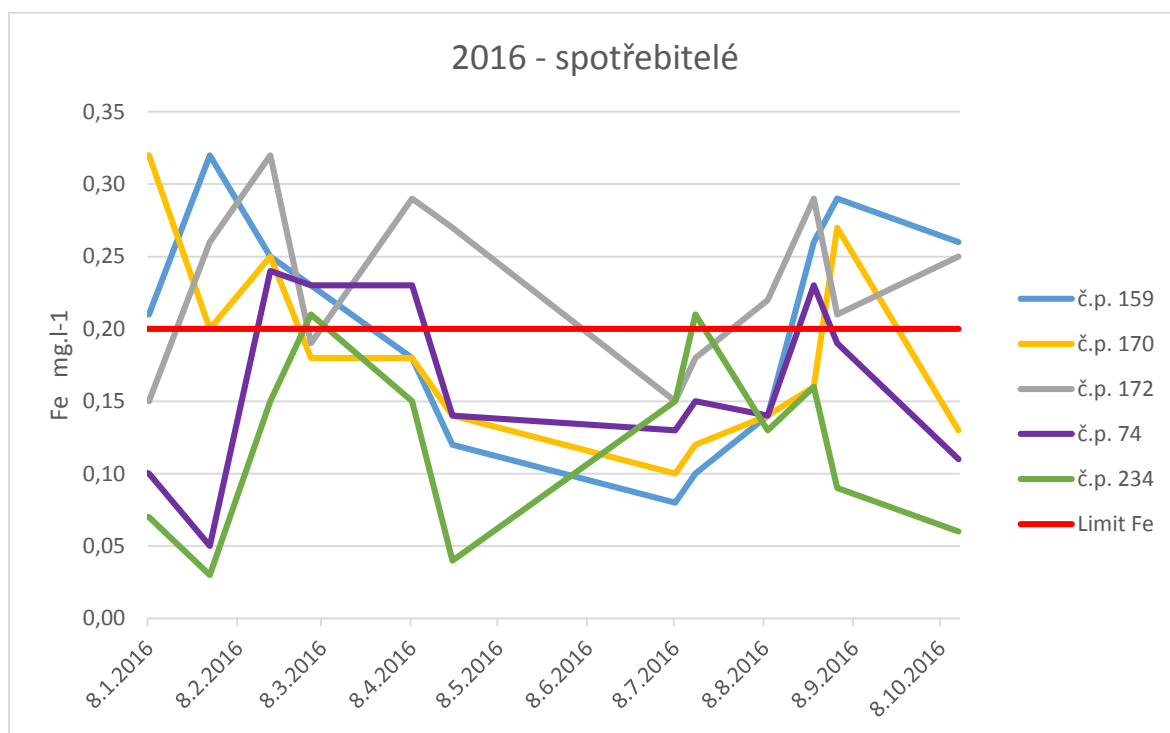
Rok	Průměr	Max.	Min.
2014	0,23	0,48	0,11
2015	0,17	0,31	0,08
2016	0,16	0,25	0,09

Max. - nejvyšší dosažená průměrná hodnota železa Fe ve sledovaném bodě

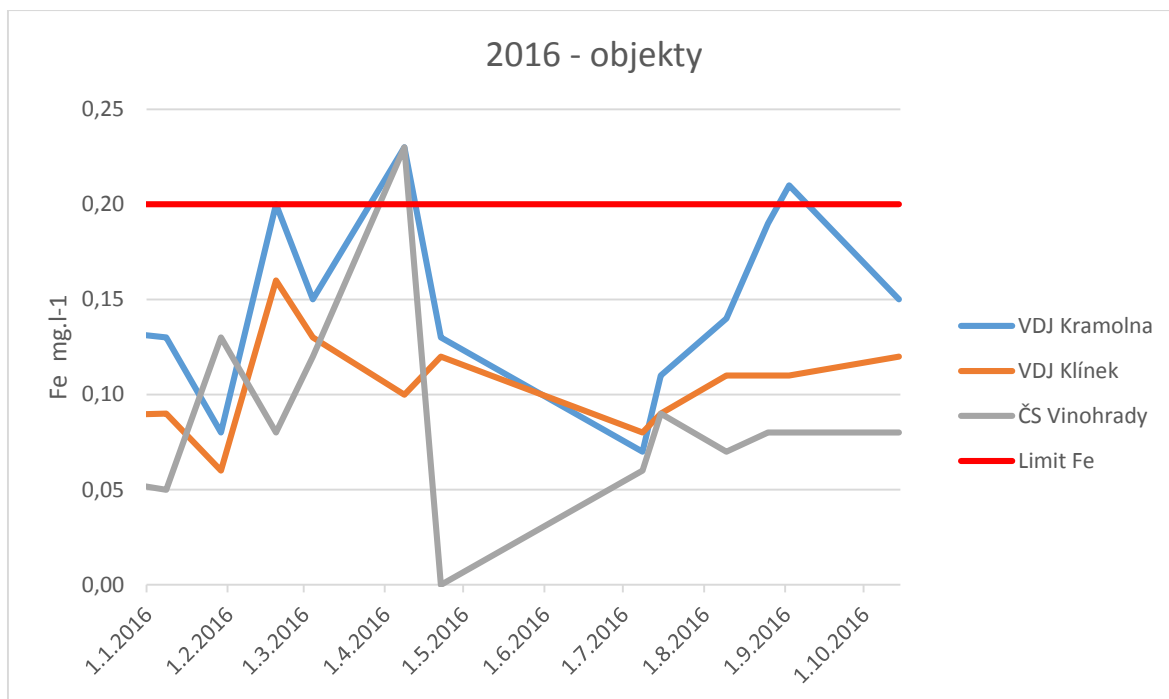
Min. - nejnižší dosažená průměrná hodnota Fe ve sledovaném bodě

Průměr – průměrná hodnota Fe ze všech sledovaných bodů za daný rok

Z uvedených dat vyplývá, že intenzivní odkalování je efektivní nástroj pro snížení obsahu železa ve vodovodní síti, nicméně stále není výjimkou překročení hranice $0,20 \text{ mg.l}^{-1}$, viz následující grafy vybraných objektů.



Obrázek 6-5; Graf zobrazující koncentraci Fe (mg.l^{-1}) ve vodě u spotřebitelů na Kramolně v roce 2016.



Obrázek 6-6; Graf zobrazující koncentraci Fe (mg.l⁻¹) v hlavních vodárenských objektech.

Z těchto grafů můžeme vyčíst, že hodnota 0,2 mg.l⁻¹ je překračována především v jarních a podzimních měsících. Na jaře je to z části způsobeno hromadným napouštěním rodinných bazénů, kterých je na Kramolně poměrně hodně. Nicméně provozovatel, a především spotřebitelé, by uvítali snížení celkové hodnoty železa v síti.

6.1.4 Model sítě

Pomocí programu Epanet byl vytvořen počítačový model hlavních řadů na Kramolně. Z důvodu malého množství získaných dat je jen orientační, a pokud bude mít provozovatel zájem, je možné ho dále rozvíjet a s jeho pomocí lokalizovat nejrizikovější části potrubí.

Pokud by měl být model co nejvíce podobný skutečnosti, bylo by potřeba mnohem více dat a mapování jednotlivých odběrných míst a uzlů. To může být námětem pro samostatnou diplomovou práci, a proto v této kapitole bude jen nastíněno možné řešení.

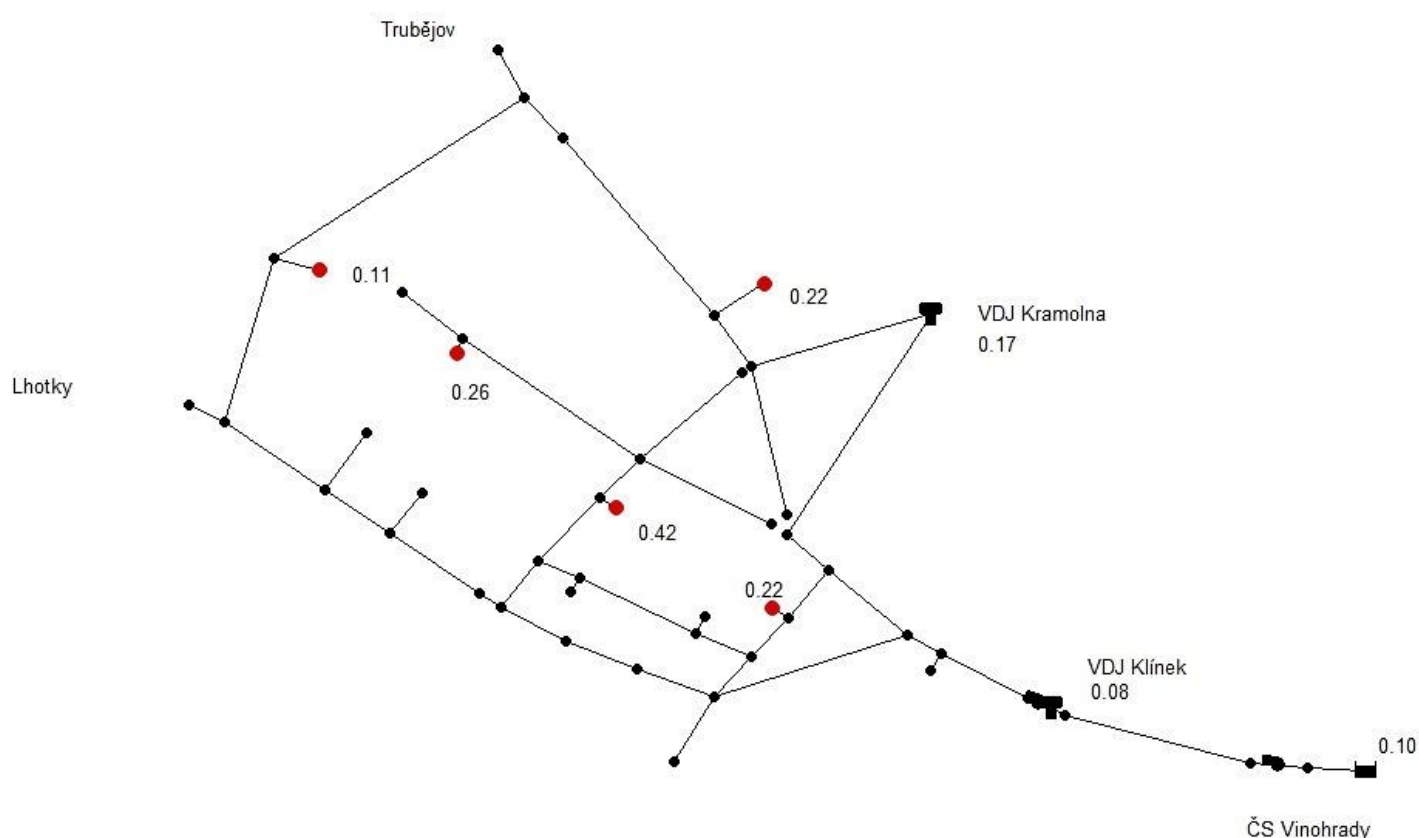
Tento model tvoří základovou část dalšího modelování. S jeho pomocí lze vytipovat konkrétní místa, která by měla být dále pozorována a zkoumána.

Cílem modelu je podrobněji zjistit chování železa ve vodovodní síti na Kramolně a zjistit, ve kterých místech je koncentrace železa nejvyšší. Právě kvůli nedostatku informací není možné problémové úseky určit pouhou zkušeností zaměstnanců.

6.1.4.1 Postup modelování

Od společnosti VAK Náchod byla převzata základní data. Jednalo se především o výsledky rozborů vzorků při odkalování a od spotřebitelů. Chybějící informace o průtocích a spotřebách v síti byly vypočítány z pohybu hladiny na VDJ Kramolna. Podle zastavěného území byly přiděleny k příslušným bodům sítě.

Nejprve byl vymodelován základní kvazi-ustálený model s hlavními řady a uzly. K dispozici byly dva reálné podklady, pohyb hladiny ve VDJ a vyfakturování vodného. Z nich byla odvozena celková potřeba vody a také jednotlivé průměrné potřeby vody pro jednotlivé nemovitosti. Model byl oproti realitě zjednodušen způsobem zprůměrování a shlukování nemovitostí. Následně byly dané hodnoty přiřazeny příslušným bodům v modelu. Model byl kalibrován na průměrné hodnoty z roku 2016.



Obrázek 6-7; Vodovodní síť Kramolny v Epanetu s průměrnými hodnotami železa za rok 2016

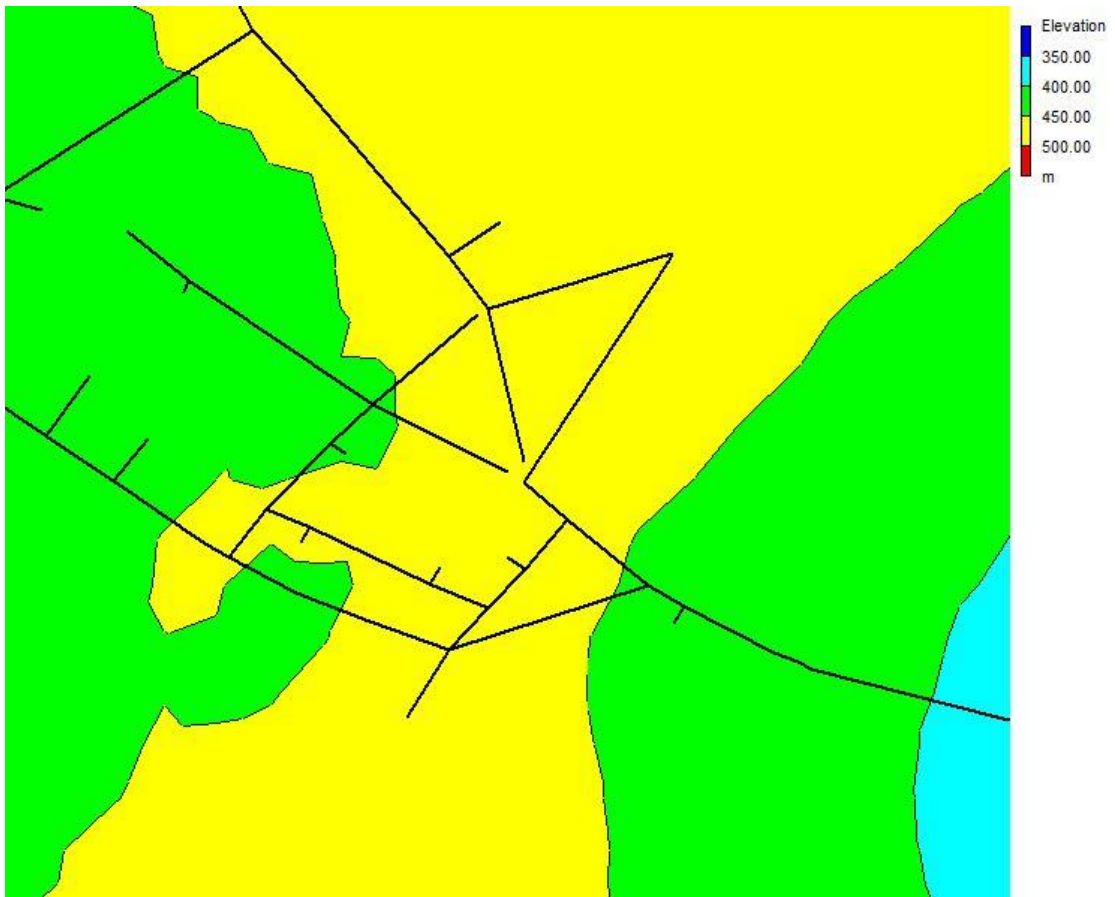
Dalším krokem bylo nastavení jednotlivých koeficientů pro model chování železa ve vodovodní síti. Postupným systematickým zadáváním a porovnáváním výstupů s naměřenými hodnotami z terénu byly určeny nejvhodnější koeficienty. Koeficienty, které nejlépe připodobňují model skutečnosti, jsou v tabulce 4 devětem sloupci.

Tabulka 4 - Koeficienty pro model v programu Epanet

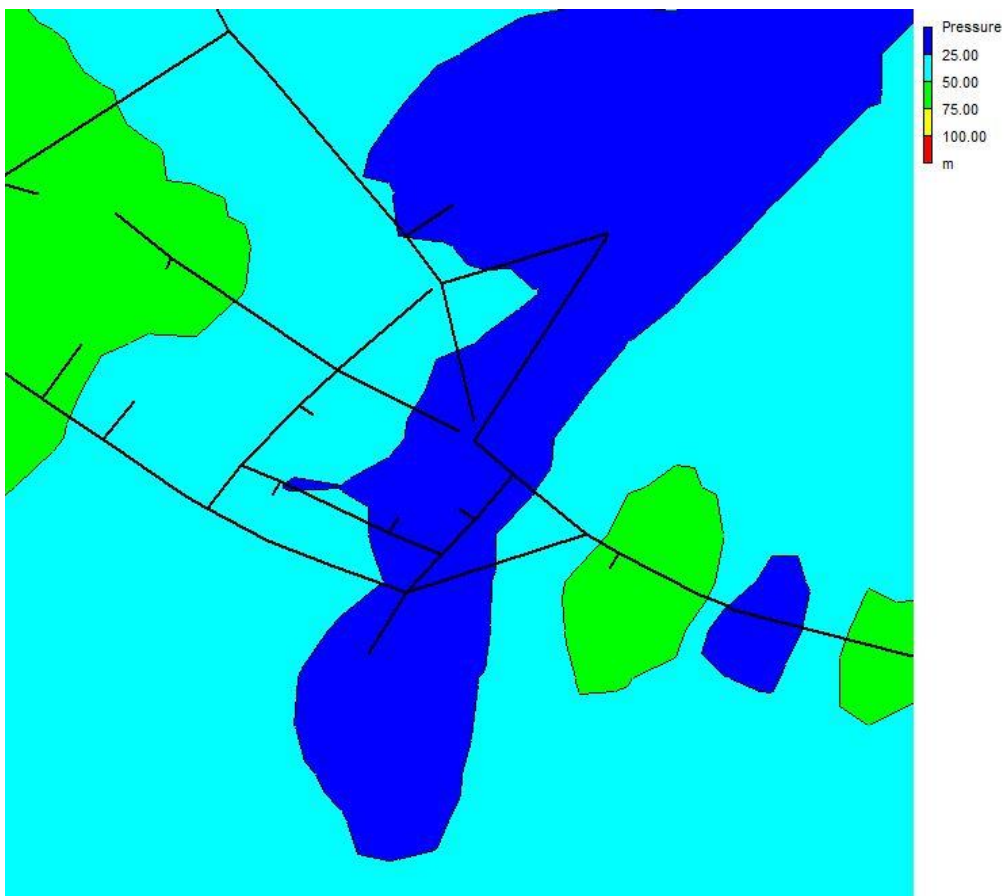
Nastavení modelu	Číslo modelové situace	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Bulk reaction order	1	5	10	5	5	5	1	1	5
	Wall reaction order	First	First	First	First	First	First	First	First	First
	Global bulk koeff.	0.04	0.04	0.04	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02
	Global walk koeff.	0.03	0.03	0.03	0,02	0,02	0,02	0	0	0,02
	Limiting Concentration	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0
	Wall Coeff. Correlation	0	0	0	0	0,1	0,075	0,075	0,13	0,09

Č.bodu	Naměřené hodnoty	Hodnoty z modelu v čase 478 h								
35	0,1	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,12	0,11	0,11
34	0,15	0,38	0,22	0,22	0,18	0,19	0,14	0,21	0,18	0,15
30	0,19	0,25	0,21	0,21	0,17	0,18	0,14	0,16	0,16	0,18
31	0,25	0,38	0,27	0,27	0,2	0,21	0,16	0,21	0,22	0,2
32	0,19	0,54	0,31	0,31	0,23	0,24	0,15	0,23	0,2	0,19
33	0,17	0,51	0,32	0,32	0,23	0,26	0,16	0,19	0,21	0,17
20	0,13	0,66	0,45	0,45	0,29	0,25	0,21	0,32	0,33	0,24

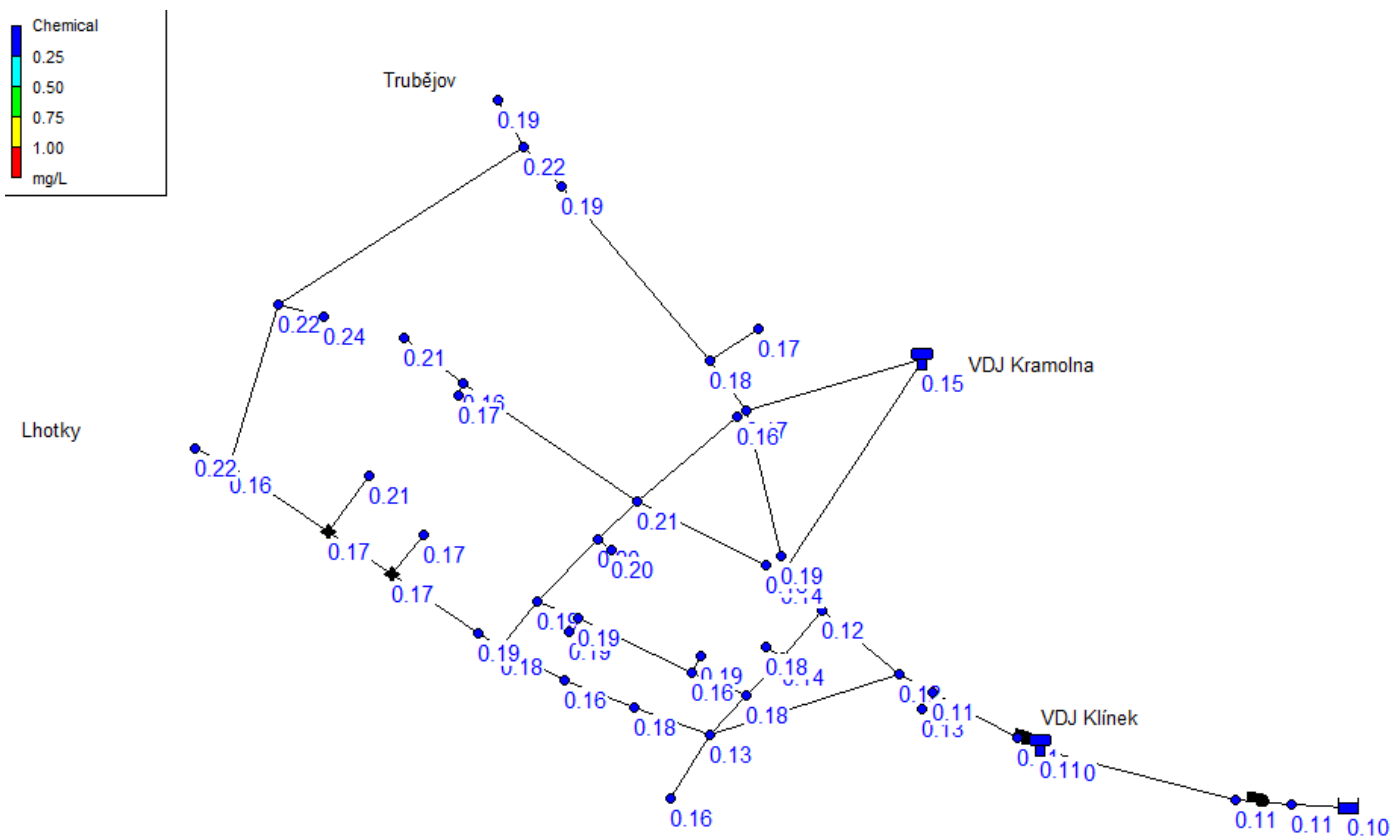
Č.bodu	Naměřené hodnoty	Hodnoty z modelu v čase 804 h								
35	0,1	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11
34	0,15	0,54	0,25	0,25	0,19	0,2	0,14	0,23	0,18	0,15
30	0,19	0,45	0,25	0,25	0,19	0,2	0,18	0,29	0,24	0,15
31	0,25	0,71	0,35	0,35	0,24	0,26	0,2	0,32	0,3	0,18
32	0,19	0,63	0,3	0,3	0,21	0,22	0,18	0,29	0,25	0,17
33	0,17	0,69	0,37	0,37	0,25	0,28	0,16	0,18	0,2	0,21
20	0,13	1,23	0,57	0,57	0,33	0,35	0,2	0,28	0,31	0,27



Obrázek 6-8; Výškové poměry v síti, obec Kramolna



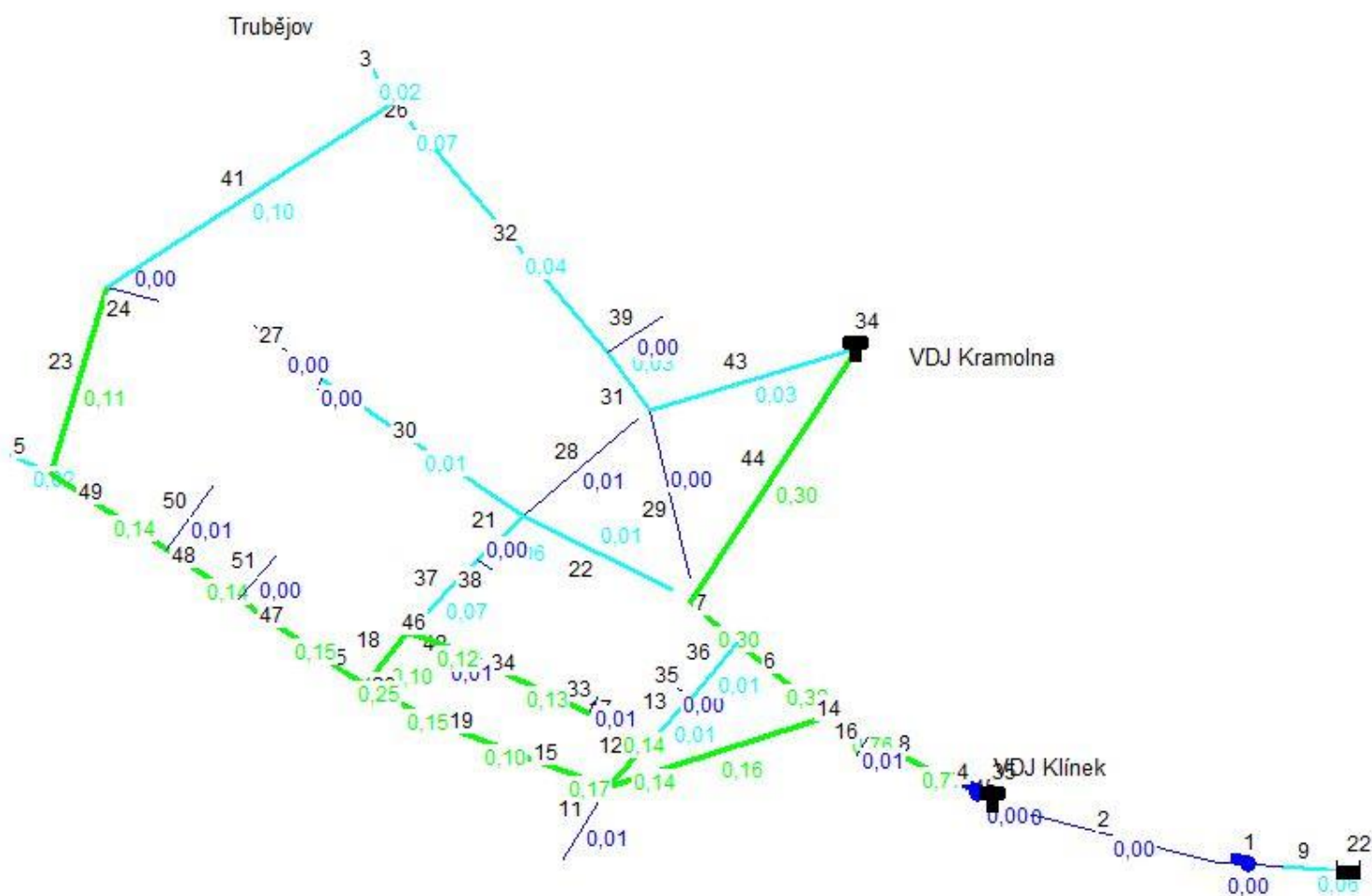
Obrázek 6-9; Tlakové poměry v síti, obec Kramolna



Obrázek 6-10; Model sítě Kramolna s hodnotami Fe v jednotlivých bodech sítě (mg.l⁻¹)

Dle vypracovaného modelu je nárůst koncentrace železa ve všech úsecích více méně konstantní. S ohledem na určitou nepřesnost modelu tedy není možné říci, že je jeden konkrétní úsek potrubí, který by bylo vhodné sanovat. Pravděpodobně se železo v celé síti uvolňuje stejnoměrně.

Největším problémem bylo dosáhnout odpovídající hodnoty v bodě 20, který odpovídá č.p. 234. Zde v modelu vyházelí státe vyšší hodnoty než odpovídá skutečnosti. Místo je napojeno na řad z pvc a tím se tedy mění i rovnice, která na zbytku sítě vyhovuje. Nicméně to není takový problém, protože zde se potrubí sanovat nebude.



Obrázek 6-11: Schéma sítě s hodnotami rychlostí proudění vody v potrubí v m/s.

Model ukázal poměrně nízké rychlosti proudění vody v potrubí. Hodnoty se většinou pohybují kolem $0,1-0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, někdy i pod $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. To může být důvod pro vyšší koncentrace železa v celé síti.

6.1.5 Cenové varianty - VNF vs. vyvločkování

Průměrný průtok při odkalování byl $13 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a průměrný čas odkalování byl 23 minut. To vychází 18 m^3 na jeden hydrant. Celkově se odkalovalo z devíti hydrantů, to znamená přibližně 162 m^3 . Voda předaná stojí $7,72 \text{ Kč}\cdot\text{m}^3$ bez DPH, asi takové jsou náklady na vypuštěnou vodu při odkalení + práce zaměstnanců. ($280 \text{ Kč}\cdot\text{hod}$) + vodné ($37,1 \text{ Kč}\cdot\text{m}^3$). V případě, že celé odkalování trvá 6 hodin je celková cena za odkalení přibližně 2900 Kč . Je-li odkalováno jednou za čtrnáct dní tzn. 25x za rok, celková cena za rok je necelých $65\,000 \text{ Kč}$. V případě, že bychom odkalenou vodu prodali, je ztráta kolem 300 tis. Kč .

Na Kramolně je přibližně 6900 metrů litinového potrubí (Počítáno od ČS Vinohrady po změnu potrubí na PVC).

Rekonstrukce potrubí, jeho roztržením a vtažením nového potrubí, stojí cca:

Tabulka 5; Cenový přehled rekonstrukce potrubí

	m	Kč/m	tis. Kč
LT 150	1310	4000	5 240
LT 125	2406	3750	9 020
LT 100	2436	3500	8 526
LT 80	755	3000	2 265
Celkem	6907		25 051

Tabulka 6; Přehled nákladů na odkalování

Průtok při odkalení	13	l.s ⁻¹
Průměrný čas odkalení	23	min
Odkal. Objem z 1 hydrantu	17,94	m ³
Počet odkal. hydrantů	9	
Celk. objem odkal. vody	161,46	m ³
Cena vody	7,72	Kč/m ³ bez dph
Stočné	21,98	Kč/m ³ bez dph
Stočné za jedno odkalení	3548	Kč
Práce 2 zaměstnanců	280	Kč/hod
Celkem za jedno odkalení	6 475	Kč
Počet odkalení za rok	25	
Celk. objem odakl vody	4 036,5	m ³
Celkové náklady za rok	161 884	Kč
Vodné	37,1	Kč/m ³
Ušlý zisk za rok	118 592	Kč
Celková ztráta za rok	280 476	Kč

Orientační odhad: Pokud by provozovatel vyměnil 1000 m krizového úseku potrubí, např. DN 100, tak by se to provozovateli „vrátilo“ za 12,5 roku.

6.2 Shrnutí

Cílem této části práce bylo lokalizovat úseky potrubí, ve kterých nejvíce stoupá koncentrace železa. Nejprve byly zmapovány a prozkoumány všechny dostupné podklady od provozovatele VAK Náchod. Na jejich základě byl vytvořen počítačový model v programu Epanet. Pomocí průměrných koncentrací známých v sedmi sledovaných bodech, byl domodelován zbytek vodovodní sítě v obci Kramolna.

Dle dostupných dat jsou nejkritičtější úseky přímo v obci Kramolna (nárůst až $0,18 \text{ mg.l}^{-1}$), ale je dobré si povšimnout nárůstu koncentrace už od VDJ Kašparák po VDJ Klínek, kde je průměrný nárůst koncentrace železa kolem $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$.

Podle počítačového modelu v programu Epanet je nárůst v celé síti více méně rovnoměrný. Hodnoty narůstají v setinách mg.l^{-1} . Nebyl určen žádný „nejkritičtější“ úsek potrubí, ze kterého by bylo uvolňováno velké množství železa do přepravované vody. Jde tedy pravděpodobně o problém celého litinového řadu.

Model ukázal nízké rychlosti přepravované vody, která se v některých částech řadu pohybuje jen kolem $0,07 \text{ m.s}^{-1}$ (dle modelu). V těchto částech pravděpodobně dochází k usazování železa v potrubí a k jeho vyluhování do pitné vody. To vysvětluje vyšší koncentrace železa v celé obci Kramolna.

Jako řešení se nabízí následující postup: Vypracovat plán pro co nejefektivnější odkalování na základě podrobného vzorkování při odkalování a tím odkalování co nejvíce zefektivnit. Pokud by nedošlo k dostatečnému zlepšení, nebo by to bylo pro VAK příliš nákladné (popřípadě by docházelo k přílišnému „plýtvání“ pitné vody) je doporučeno najít pomocí podrobnějšího modelu části potrubí, které jsou největším zdrojem železa a ty sanovat. Nabízí se metody bezvýkopových technologií, například vyčištění potrubí a jeho vnitřní nástřík cementovou směsí nebo polyuretanovou hmotou. Většina potrubí je předimenzovaná, takže se nabízí metoda zavlečení nového potrubí do potrubí stávajícího.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nejprve shrnout nejnovější poznatky o korozi železa ve vodovodním potrubí a chemicko-fyzikální mechanismus železa ve vodě. Za další, dopad tohoto jevu na stav vodovodní sítě a kvalitu pitné vody a možná řešení tohoto problému. V poslední části byla řešena praktická situace v obci Kramolna.

Eliminace železa ve vodovodní síti spočívá především v komplexním přístupu k danému problému. Nejprve je nutná analýza problému, tedy geneze, uvolňování a hromadění železa ve vodovodním potrubí. Provozovatel má na výběr ze tří hlavních řešení:

- úprava kvality vody (především její korozivní účinky),
- intenzivní odkalování,
- sanace vodovodního řadu.

Korodování potrubí je ovlivněno prakticky každou fyzikální, chemickou a biologickou vlastností vody. Tato práce uvádí souhrn klíčových faktorů, které provozovatelé musí vyhodnocovat s cílem zmírnit problémy s korozi železa. Charakteristickou součástí výskytu železa v potrubí jsou korozní inkrusty, které ovlivňují interakci zkorodovaného železného potrubí s vodou. Strukturu a složení inkrustace je třeba studovat s cílem lepšího porozumění reakcím podílejících se na vzniku korozních inkrustů, které vedou k uvolnění železa a růstu inkrustace.

Pomocí programu Epanet byl vytvořen průtokový model vodovodní sítě na Kramolně, pomocí kterého byl zmapován pohyb železa a následně navrhnuo řešení pro hospodaření s vodou. Model neukázal žádný konkrétní úsek potrubí, který by byl nejkritičtější, ale je z něho patrné, že voda se v celé síti pohybuje poměrně pomalu, okolo $0,1-0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v některých řadech i méně. Tím dochází k vyluhování železa do přepravované vody a následnému zvyšování jeho koncentrace v řadech z litiny. Síť se skládá z 1310 m LT150, 2406 m LT125, 2436 m LT100 a 755 m LT80. Zbylé potrubí dlouhé 2905 m je z PVC. Litinové řady byly pokládány mezi lety 1956-1958 a pro dnešní potřebu vody jsou předimenzované, což potvrzují i malé rychlosti vody v potrubí.

Voda čerpaná na Kramolnu má dobré vlastnosti a tedy není nijak upravována, pouze hygienicky zabezpečována dávkováním oxidu chloričitého. Z tohoto důvodu se práce úpravou kvality vody nezabývala.

Pro odkalení byla vypočítána spotřeba vody $161,46 \text{ m}^3$ za jedno odkalení a tedy $4\,036,5 \text{ m}^3$ za rok. To je pro srovnání potřeba vody na jeden den pro 27 000 obyvatel. Návrh celkové sanace, veškerého litinového potrubí, vychází z aktuální ceny cca na 25 051 000 Kč. V případě minimálně desetiletého provozování s proplachováním sítě je možné stanovit jeho náklady na 2 804 760 Kč, které jsou srovnatelné s cenou sanace části litinového potrubí o délce 800 m a průměru 100 mm, což činí 11,5% délky řadů. Sanováním řadů je vhodné zahájit v nejkritičtějších částech řadů. Tyto úseky vyhledat ještě podrobnější sítí vstupních dat a s pomocí modelu, který byl vytvořen.

Literatura

- [1] Laurie S. MCNEILL a Marc EDWARDS. *Review of Iron Pipe Corrosion in Drinking Water Distribution Systems*. 2010, 25.
- [2] SARIN, P., D. A. LYTLE, W. M. KRIVEN, M.A. BECKETT, W.M. KRIVEN a J.A. CLEMENT. Iron Corrosion Scales: Model for Scale Growth, Iron Release, and Colored Water Formation. *Journal of Environmental Engineering*. 2004, 130(4), 364-373. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:4(364). ISSN 0733-9372. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:4\(364\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:4(364))
- [3] SARIN, P., V.L. SNOEYINK, J. BEBEE, K.K. JIM, M.A. BECKETT, W.M. KRIVEN a J.A. CLEMENT. Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen. *Water Research*. 2004, 38(5), 1259-1269. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.022. ISSN 00431354. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135403006626>
- [4] MCNEILL, Laurie S. a Marc EDWARDS. *The Importance of Temperature In Assessing Iron Pipe Corrosion in Water Distribution Systems*. 2006, 16.
- [5] M. AHAMMED a R. E. MELCHERS. *Reliability of underground pipelines subject to corrosion: Reviewed by the Pipeline Division*. 2000, 14.
- [6] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [7] PUCZOK, Dominik. *GEOCHEMIE INTERAKCÍ RYZÍHO ŽELEZA A ZINKU V POVRCHOVÝCH PODMÍNKÁCH: Rešerše k diplomové práci*. Brno, 2013. Diplomová práce. Masarykova univerzita přírodovědecká fakulta ústav geologických věd. Vedoucí práce Doc. RNDr. Josef Zeman, CSc.
- [8] KRPOUN, KAREL. *ŽELEZO A JEHO SLOUCENINY*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. IVANA PILÁTOVÁ, CSc.
- [9] MACEK, Lubomír. *Optimalizace odkalování a vypouštění příváděcích řadů: zamýšlíme se nad hydraulikou potrubí?*. České Budějovice: Aquion, 2001, 7.
- [10] FRANK, Karel. Vodovodní řady a kanalizační stoky v ČR – analýza dat: *Časopis Sovak*. Praha 1: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR, 2011, (3). ISSN 1210-3039. Dostupné také z: <http://www.sovak.cz/stranka/archiv-casopisu-sovak-2011>
- [11] KRATZER, Karel a František KOŽÍŠEK. JAKOST PITNÉ VODY DODÁVANÉ VEŘEJNÝMI VODOVODY V ČESKÉ REPUBLICE V ROCE 2007. *Časopis Sovak*. Praha 1: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR, 2008, (9). ISSN 1210-3039. Dostupné také z: <http://www.sovak.cz/stranka/archiv-casopisu-sovak-2008>

[12] GRENEOOD, N.N., EARNSHAW, A.: *Chemie prvků : Svazek II*. Prof. Ing, Jursíka F,CSc a kolektiv. 1. vyd. Praha : Informatorium, 1993. 1635 s. ISBN 80-85427-38-9.

[13] KAŠPÁREK, F., PASTOREK, R., ŠINDĚLÁŘ, Z. BŘEZINA, F.: *Anorganická chemie*. 2. vyd. Olomouc : VUP, 2001. 394 s. ISBN 80-244-0311-0.

[14] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9. Str. 95-105. Dostupné také z: <https://www.researchgate.net/publication/228767470>

[15] DUBOVÁ, Vanda, Jozef KRIŠ a Ján ILAVSKÝ. Korózia ocelového potrubia diaľkovodného systému. *Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava: Katedra zdravotného inžinierstva*.

[16] Kratzer K., Kožíšek F.: *Zdravotní důsledky a rizika znečištění pitné vody*, Odborná zpráva za rok 1996. Státní zdravotní ústav 1997

[17] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9. Str. 436. Dostupné také z: <https://www.researchgate.net/publication/228767470>

[18] Purcell T.W., Petters J.J.: *Environ. Toxicol. Chem.* 17, 539 (1998)

[19] Zýka V.: *Geochemie pitných vod ČSR*. Sborník geologických věd. Sv. 18, Praha 1982

[20] Nevoral V., Lstibůrková M.: *Sborník Hydrochémia* 91, 112 (1991)

[21] EDTA. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/EDTA>

[22] ČSN EN 806 [1-5] (2002 – 2012): *Vnitřní vodovod pro rozvod vody určené k lidské spotřebě*

[23] Clement, J.A. & Schock, M.R. Buffer Intensity: What Is It and Why It's Critical for Controlling Distribution System Water Quality. *Proc. AWWA Water Quality Technology Conference, Paper 4B-6*. San Diego, CA (1998).

[24] ČERVENÝ, Jaroslav a Viktor Kreibich VIKTOR KREIBICH. Koroze v potrubních systémech. In: *Tlakinfo.cz*[online]. 2011 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1827>

[25] PUFR. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pufr>

- [26] Blengino, J.M.; Keddad, M.; Labbe, J.P. & Robbiola, L. Physico-chemical Characterization of Corrosion Layers Formed on Iron in a Sodium Carbonate-Bicarbonate Containing Environment. *Corrosion Sci.*, 37:4:621 (1995).
- [27] Simpson, L.J. & Melendres, C.A. Surface-Enhanced Raman Spectroelectrochemical Studies of Corrosion Films on Iron in Aqueous Carbonate Solution. *Journal Electrochem. Soc.*, 143:7:2146 (1996).
- [28] Huang, D.J.-S. Polyphosphate For Corrosion Control in Water Distribution System. University of Missouri, Columbia, MO (1980).
- [29] Williams, S.M. The Use of Sodium Silicate and Sodium Polyphosphate to Control Water Problems. *Water Supply*, 8:195 (1990).
- [30] Wagner, I. & Kuch, A. The Influence of Water Parameters on Corrosion Rate, Scale Deposition and Iron (III) Uptake in Unprotected Iron Pipes. *Water Supply*, 2:3/4:SS 11 (1984).
- [31] Swayze, J. Corrosion Study at Carbondale, Illinois. *Journal AWWA*, 75:2:101 (1983).
- [32] Pisigan Jr., R.A. & Singley, J.E. Influence of Buffer Capacity, Chlorine Residual, and Flow Rate on Corrosion of Mild Steel and Copper. *Journal AWWA*, 79:2:62 (1987).
- [33] van Rijsbergen, D.; van den Hoven, T.; van der Kooij, D. & Vreeburg, J. Water Quality in Distribution. National Report, The Netherlands. *Water Supply*, 16:1/2:115 (1998).
- [34] Regenerace vrtů a potrubí. Vodní zdroje Holešov a.s. [online]. 2015 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.vzh.cz/sluzby-pro-firmy/regenerace-vrtu-a-potrubu>
- [35] Guidelines for Drinking-water Quality. Third Edition. World Health Organization, Geneva 2004
- [36] EU. Proposal for Council Directive Concerning the Quality of Water Intended for Human Consumption. 95/C 131/03. *Off. Journal of the Europ. Com.*, C 131, Vol. 30 (1995). Council Directive 98/83EC of 3. 11. 1998
- [37] Čapková A., Pitter P.: *Sborník Hydrochémia* 86, 207 (1986)
- [38] Baylis, J.R. Cast-Iron Pipe Coatings and Corrosion. *Journal AWWA*, 45:8:807 (1953).
- [39] Waite T.D., Morel F.M.M.: *Eviron. Sci. Technol.* 18, 860 (1984)
- [40] Stumm W., Morgan J.J.: *Aquatic Chemistry*. 3. vydání, Wiley, New York 1996

- [41] Podhorský J., *Stabilizace vody a význam postupu při její dopravě zásobovacím potrubím*. Publikace MŽP ČR č. 73, Praha 1990
- [42] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0. str. 457-459.
- [43] MELICH I., *Časopis Sovak*. Praha 1: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR, 2008, (4) str. 65. ISSN 1210-3039. Dostupné také z: <http://www.sovak.cz/stranka/archiv-casopisu-sovak-1995>
- [44] VAŠEK, Petr. K čemu slouží odkalování a odvzdušňování? [online]. In: [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: http://www.cesbrod.cz/media/17/05_pdf/odkalovani.pdf
- [45] HEJTMAN, J. Zlepšování procesů hospodaření s vodou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Alois Fiala, CSc.
- [46] KOŽÍŠEK, František, Jiří KOS a Petr PUMANN. HYGIENICKÉ MINIMUM PRO PRACOVNÍKY VE VODÁRENSTVÍ [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.khszlin.cz/wcd/pages/extranet/tiskove-zpravy/hok-min.pdf>
- [47] KORTH, A. Strategie odkalování sítě respektující tvorbu usazenin. Vodovod.info - vodárenský informační portál[online]. 12.6.2014, 06/2014, [cit. 2014-06-12]. Dostupný z WWW: <<http://vodovod.info>>. ISSN 1804-7157
- [48] ŠAŠEK, Jaroslav, František KOŽÍŠEK, Petr PUMANN a Hana JELIGOVÁ. ZÁSADY SPRÁVNÉ PRAXE PŘI VÝSTAVBĚ A OPRAVÁCH VODOVODNÍ SÍTĚ Z HLEDISKA PREVENCE MIKROBIOLOGICKÉ KONTAMINACE VODY [online]. In: . České Budějovice, 2014 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.wet-team.cz/files/konference/2014/Sbornik%20PV2014/Pitna%20voda%202014-37-%C5%A0a%C5%A1ek.pdf>
- [49] WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. Vol. 1. Recommendation. Ženeva 1993
- [50] Guidelines for Drinking-water Quality. Third Edition. World Health Organization, Geneva 2004
- [51] EU. Proposal for Council Directive Concerning the Quality of Water Intended for Human Consumption. 95/C 131/03. Off. Journal of the Europ. Com., C 131, Vol. 30 (1995). Council Directive 98/83EC of 3. 11. 1998
- [52] PRVK Královéhradeckého kraje [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://mapy.kr-kralovehradecky.cz/vak/PDF/KARTY/16891.pdf>
- [53] ŠEFC, Jakub. *Zásobování vodou města Náchoda a okolí*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT Praha FSV.

[54] KRATZER, Karel - KOŽÍŠEK, František, *Jakost pitné vody dodávané veřejnými vodovody v České republice v roce 2007*. Časopis Sovak. Praha 1: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR, 2008, (9). ISSN 1210-3039. Dostupné také z: <http://www.sovak.cz/stranka/archiv-casopisu-sovak-2008>

Seznam příloh

A – Situace Kramolna

B – Situace Kramolna k přehlednému podélnému profilu

C – Přehledný podélný profil

D - Přehledný podélný profil s hydranty

Seznam obrázků

Obrázek 3-1; Diagram rozpustnosti amorfních hydroxidů.....	11
Obrázek 3-2; Diagram rozpustnosti systému $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ [14]	11
Obrázek 3-3; Diagram oblastí převažující existence systému.....	12
Obrázek 4-1; Závislost korozní rychlosti nelegované oceli ve vodě s obsahem rozpuštěného kyslíku na pH při různé teplotě [24].....	22
Obrázek 4-2; Vliv rozpuštěného kyslíku ve vodě na korozní rychlost nelegované oceli za různých teplot [24].....	23
Obrázek 4-3; Závislost rychlosti oxidace Fe^{II} na hodnotě pH.....	30
Obrázek 4-4; Řez litinového potrubí z obce Kramolna z roku 1958.....	36
Obrázek 4-5 Schéma inkruštní struktury ukazující charakteristické vlastnosti a složení korozních inkruštů nalezených v železných/ocelových vodovodních potrubích [2].....	38
Obrázek 4-6; Obr. Snímek z mikroskopu ukazuje póry a dutiny různých velikostí, které se vyskytují uvnitř inkruštace [2].	39
Obrázek 5-1; Testovací úsek potrubí pro diagnostiku vody při odkalování [47].....	48
Obrázek 6-1; Litinové potrubí Kramolna DN 100, malé, ale viditelné inkrušty	49
Obrázek 6-2; Potrubí Kramolna – detail inkruštů.	50
Obrázek 6-3; Schéma sítě Náchodsko [52].	51
Obrázek 6-4; Nárůst koncentrace Fe ve vodovodní síti [53].....	53
Obrázek 6-5; Graf zobrazující Fe (mg.l^{-1}) ve vodě u spotřebitelů na Kramolně.....	54
Obrázek 6-6; Graf zobrazující koncentraci Fe (mg.l^{-1}) v hlavních vodárenských objektech.....	55
Obrázek 6-7; Vodovodní síť Kramoln v Epanetu s hodnotami železa za rok 2016.....	56
Obrázek 6-8; Výškové poměry v síti, obec Kramolna	58
Obrázek 6-9; Tlakové poměry v síti, obec Kramolna	58
Obrázek 6-10; Model sítě Kramolna s hodnotami Fe (mg.l^{-1})	59
Obrázek 6-12; Schéma sítě s hodnotami rychlostí proudění vody v potrubí v m/s.....	60

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled účinků různých faktorů na železnou korozi.....	21
Tab. 2: Přehled koncentrací Fe (mg.l^{-1}) v síti.....	52
Tab. 3: Hodnoty Fe v síti Kramolna (mg.l^{-1}).....	54
Tab. 4: Koeficienty pro model v programu Epanet	57
Tab. 5: Cenový přehled rekonstrukce potrubí.....	61
Tab. 6: Přehled nákladů na odkalování	61