



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



# **Návodky do cvičení *Technologie úpravy vody* 2022**

prof. Dr. Ing. Miroslav Kyncl  
Ing. Jitka Chromíková, Ph.D.

VŠB TECHNICKÁ  
UNIVERZITA  
OSTRAVA

HORNICKO  
GEOLOGICKÁ  
FAKULTA

KATEDRA  
ENVIRONMENTÁLNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

## Obsah

<b>STABILITA VOD (AGRESIVITA VOD).....</b>	<b>3</b>
Teoretický úvod .....	3
1.    Koroze.....	3
2.    Inkrustace .....	4
3.    Výpočtové metody .....	5
4.    Korozní testy.....	9
5.    Odkyselování .....	10
Laboratorní úloha 1: Stabilizace vod .....	12
Laboratorní úloha 2: Stabilizace vod přes odkyselovací hmotu .....	14
Literatura .....	16
<b>KOAGULACE/FLOKULACE.....</b>	<b>17</b>
Teoretický úvod .....	17
1.    Stabilita koloidních částic .....	17
2.    Destabilizace.....	17
3.    Agregace .....	18
4.    Separace .....	19
5.    Koagulanty.....	20
6.    Standardní zkušební postupy .....	21
Laboratorní úloha 3: Sklenicové testy koagulace.....	25
Laboratorní úloha 4: Test agregace.....	27
Literatura .....	28
<b>ODŽELEZOVÁNÍ A ODMANGANOVÁNÍ PODZEMNÍCH VOD.....</b>	<b>29</b>
Teoretický úvod .....	29
1.    Metody odstraňování manganu a železa z vod.....	29
2.    Výukový modul – CE 586 Precipitation and flocculation.....	32
Laboratorní úloha 5: Odmanganování vod, oxidační metody.....	36
Laboratorní úloha 5: Odželezování a odmanganování vod, pokročilé oxidační metody .....	37
Laboratorní úloha 6: Odželezování vod s intenzifikací.....	38
Laboratorní úloha 7: Odželezování vod – poloprovozní ověření .....	40
Literatura .....	42

## STABILITA VOD (AGRESIVITA VOD)

### Cíle cvičení:

- Osvojení metod pro stanovení stability (agresivity vod) – výpočtové a laboratorní metody.
- Popis a charakteristika vybraných indikátorů stability (agresivity) vod.
- Seznámení se základními chemickými metodami stabilizace (okyselení).

### Teoretický úvod

Jednou z důležitých vlastností z pohledu úpravy vod a distribuce upravených vod je tzv. stabilita (agresivita). Jde o predikci chování systému na základě informací o podmínkách provozu systému a využití základních informací při řízení provozu pomocí různých proměnných jako je např. pH, teplota, konduktivita, KNK (alkalita), ZNK (acidita), a další. Výsledky slouží k odvození optimálních podmínek úpravy vod, podmínkách provozu distribuční sítě apod.

Z plynů rozpuštěných ve vodě má po technické stránce největší význam agresivní oxid uhličitý a kyslík. Odstraňování agresivního oxidu uhličitého se provádí nejen z důvodů jeho korozivních účinků, ale i z důvodů hygienických. Agresivní vody mohou rozpouštět železo, měď a zinek z vodovodního potrubí. Chemické korozi podléhá především beton a materiály obsahující  $\text{CaCO}_3$ . Kovové materiály trubních řádů podléhají především elektrochemické korozi, jejíž rychlost závisí na koncentraci rozpuštěného kyslíku, hodnotě pH a iontovém složení vody.

Ukazatele stability (přítomnost agresivních a korozivních látek) jsou mimo jiné zakomponovány ve Směrnici EU 2020/2184 (směrnice o pitné vodě) do skupiny tzv. indikátorových ukazatelů, kdy je třeba v případě jejich překročení posoudit, zda jejich nedodržení představuje nějaké riziko pro lidské zdraví. Z indikátorových ukazatelů pro jakost vod jsou dle směrnice určeny tři hlavní indikátorové ukazatele – pH,  $\text{Cl}^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Žádný způsob monitoringu stability (agresivity) přitom neposkytuje všechna potřebná data k vlastnímu hodnocení stability vod. Vhodné je použití několika způsobů. K nejznámějším způsobům patří kuponové testy, měření lineárního polarizačního odporu, měření proudového napětí. Z výpočtových metod jde o výpočet různých indexů na základě známého složení vod.

Z pohledu stability vod se tedy setkáváme s pojmy koroze a inkrustace:

### 1. Koroze

Korozi lze definovat jako chemické, elektrochemické nebo mikrobiologické rozrušování materiálu vlivem okolního prostředí. Je podmíněna řadou činitelů, např. pH, teplotou, tlumivou kapacitou, obsahem rozpuštěného kyslíku a oxidu uhličitého ve vodě, iontovým složením vody, obsahem organických látek, velikostí styčné plochy, povrchovými vlastnostmi korozních produktů, hydraulickými podmínkami a eventuálně přítomností některých mikroorganismů.

Rychlost a intenzita korozivních procesů na stěnách potrubí závisejí především na koncentraci hydrogenuhlíčitanových, uhličitánových a vápenatých iontů. Zvýšené koncentrace uvedených iontů rychlost koroze zpomalují. Působí tak inhibičně. Odstranění  $\text{CO}_2$  za současného zvýšení

hodnoty pH, koncentrace  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$  má na snížení korozivních pochodů pozitivní účinek.

Korozi lze dle činitelů rozdělit na:

- Chemickou korozi způsobují např. chloridy a sírany, které jsou nebezpečné zejména pro beton, kde jsou schopny reagovat s pojivovou složkou betonu (hydratovaný hlinitan vápenatý) za vzniku ettringitu, jejíž rozpínající se molekuly narušují pevnost betonu. U kovových materiálů potrubí zejména výskyt chloridů i o malých koncentracích poškozuje ochranný film, který chrání potrubí před korozí.
- Mikrobiologická koroze se vyskytuje v prostředí, kde se voda zdržuje delší dobu s nedostatečnou (nebo nulovou) koncentrací zbytkového chloru. Mikroorganismy přitom mohou sami působit korozivně, nebo mohou výrazně ovlivňovat rychlost již probíhající chemické koroze. Pro zabránění mikrobiální činnosti v distribučních systémech pitné vody se používá dávkování chloru.

Dále rozlišujeme korozi vnitřní a vnější. U vnitřní koroze se korozí rozrušený materiál může buď uvolňovat do roztoku (do distribuované pitné vody) nebo může tvořit nánosy (inkrusty) na vnitřní straně potrubí. Proces koroze ovlivňuje tedy nejen jakost dopravované vody, ale samotné distribuční zařízení a může docházet k:

- zhoršení kvality pitné vody;
- vytváření vhodných podmínek pro tvorbu biofilmu – sekundární zhoršení kvality vody z pohledu biologických ukazatelů;
- zhoršení hydraulických podmínek pro dopravu pitné vody ke spotřebiteli;
- snížení životnosti jednotlivých zařízení distribuční sítě – zvýšení počtu havárií a zvětšení ztrát vody v rozvodném systému.

## 2. Inkrustace

Inkrustace látek v potrubí je úzce spojená s korozí, kdy dochází k ukládání zkorodovaného materiálu či látek vyluhovaných z vody na vnitřní straně potrubí a tím pádem i k jeho zanášení. V tomto případě mluvíme o tzv. korozivní inkrustaci.

Další formování nánosů ovlivňují kromě zmiňované koroze některé kvalitativní parametry vody – pH, teplota, tlumivá kapacita vody, alkalita, rozpuštěný kyslík, způsob úpravy vody apod. V potrubí s pitnou vodou jde především o usazeniny uhličitanu vápenatého a málo rozpustných sloučenin železa. Nánosy mohou nepříznivě ovlivnit jakost vody v distribučním potrubí např. změnou barvy. Jsou také živnou půdou pro mikroorganismy a dále se na nich mohou akumulovat další látky.

Vznik a účinnost ochranné vrstvy trubních materiálů byla donedávna přisuzována pouze  $\text{CaCO}_3$ . V roce 1980 byla zpracována studie, která poukazuje na příznivý pasivační účinek sraženiny  $\text{FeCO}_3$  (sideritu) vedle  $\text{CaCO}_3$ , a to především u vod s hodnotou  $\text{pH} < 8,5$ . Mezi druhotné reakce patří hydrolýza  $\text{Fe}^{2+}$  iontů a málo disociovaného  $\text{FeCO}_3$  (s). Je-li ve vodě přítomen kyslík, dochází k oxidačním reakcím až na  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , event.  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , případně až k přeměně na  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetit). Magnetit se bude tvořit především na stěnách potrubí dopravující vodu s vysokou tlumivou kapacitou.

Mezní a optimální složení vody dopravované potrubím (betonové, ocelové, litinové) jsou z hlediska agresivity vody a podmínek pro vytvoření ochranné vrstvy v potrubí dány TNV 75 71221. Požadavky na jakost vody dopravované potrubím z plastů a skla se vzhledem k vysoké chemické odolnosti těchto materiálů nespecifikuje.

### 3. Výpočtové metody

Pro hodnocení stability (agresivity) vody existuje několik výpočtových metod. Je třeba říci, že všechny výpočty mají omezené použití. Výpočty pomocí Lehmannových-Reussových tabulek jsou považovány za historické, avšak díky jednoduchosti výpočtu jsou stále ještě používány na mnohých pracovištích. Používají se zejména pro málo mineralizované vody s převahou vápníku a hydrogenuhličitanů. Častěji jsou využívány přesnější výpočty, a sice stanovení Langelierova saturačního indexu, Ryznerova indexu stability vody a indexu agresivity

#### *Langelierův index stability*

Nebo též Langelierův saturační index (LSI), se často používá jako indikátor pro stanovení tendence agresivity vody. Setkáme se také s označením Sytostní index (SI) a kalcit index. Váže se k ukládání vápenato-uhličitanového filmu, který může izolovat potrubí, boilers a další vybavení od kontaktu s vodou. Pokud tato ochranná vrstva není vytvořena, voda je považována za agresivní a může se objevit koroze.

LSI je omezeně použitelný pouze pro určení stability u vod, jejichž alkalita (KNK) je vyšší než 40 mg.l<sup>-1</sup>, mají dostatečný obsah iontů Ca<sup>2+</sup>, koncentraci RL do 10 mg/l a jejich pH je v rozmezí 6,5 až 9,5.

Langelierův index je založen na rovnici pro pH, která udává rozdíl skutečného pH a pH roztoku v rovnováze s CaCO<sub>3</sub>. Rovnice má tvar:

$$LSI = pH - pH_s$$

K dosažení co nejpřesnějšího měření se musí u saturační hodnoty pHs zohlednit také obsah vápníku, hodnota celkové alkality (KNK<sub>4,5</sub>) a iontová síla vody. Ta se odvíjí od teploty vody a koncentraci rozpuštěných solí. Výpočet pHs pak vypadá takto:

$$pH_s = \log \frac{K_s}{K_2} + 2,5\sqrt{\mu} + 6,0 - \log c(Ca^{2+}) - \log c(HCO_3^-)$$

Vztah mezi iontovou silou  $\mu$  a koncentrací RL (mineralizace vody v mg/l) se určí ze vztahu:

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot c_{RL}$$

Tabulka 1: Závislost hodnoty  $\log K_s/K_2$  na teplotě a koncentraci RL

RL (mg/l)	teplota (°C)					
	0	10	20	25	50	60
0	2,20	2,09	1,99	1,94	1,73	1,65
40	2,33	2,22	2,21	2,07	1,86	1,76
80	2,37	2,26	2,16	2,11	1,90	1,82
120	2,41	2,30	2,20	2,15	1,94	1,86
160	2,43	2,32	2,22	2,17	1,96	1,88
200	2,46	2,35	2,25	2,20	1,99	1,91
240	2,49	2,38	2,28	2,23	2,03	1,94
280	2,51	2,40	2,30	2,25	2,05	1,96
320	2,53	2,42	2,32	2,27	2,07	1,98
360	2,54	2,43	2,33	2,28	2,08	1,99
400	2,56	2,45	2,35	2,30	2,10	2,01
480	2,59	2,49	2,39	2,33	2,13	2,04
560	2,62	2,51	2,41	2,36	2,16	2,07
640	2,65	2,54	2,44	2,39	2,19	2,10
720	2,67	2,56	2,46	2,41	2,21	2,12
800	2,68	2,58	2,48	2,42	2,22	2,13

Je-li:

- $pH_s = pH$  aktuální, voda je ve vápenato-uhličitanové rovnováze,  $CaCO_3$  se tedy nebude ani srážet, ani rozpouštět;
- $pH_s < pH$  aktuální, LSI je pozitivní číslo, voda má inkrustující účinky a je neagresivní;
- $pH_s > pH$  aktuální, LSI je záporné číslo, voda je nesaturovaná a rozpouští  $CaCO_3$ , je tedy agresivní.

V praxi se navrhuje LSI mírně pod rovnováhu, tedy na hodnotu rovnou přibližně (-0,2).

### 3.1. Ryznarův index stability (RSI)

Odvozený z empirických pozorování. Používá se hlavně pro určení stability vod v energetice (chladicí vody) a nabývá pouze kladných hodnot. Zatímco Langelierův index udává absolutní hodnotu stability roztoku bez ohledu na postavení ve škále pH, Ryznarův index navíc fixuje optimální stav do určité oblasti pH.

Hodnoty RSI vyjadřují tendenci vody ke korozi nebo inkrustaci.

$$RSI = 2pH_s - pH$$

$$pH_s = (pK_2 - pK_s + py_1 + py_2) + pm_{Ca} + pm_{HCO_3}$$

Tabulka 2: Rozdíl disociační konstanty kyseliny uhličitě a součinu rozpustnosti  $\text{CaCO}_3$  v závislosti na teplotě vody

T [°C]	0	10	20	25	50	60	70	80	90
$\text{p}K_2 - \text{p}K_s$	2,20	2,09	1,99	1,94	1,73	1,65	1,58	1,5	1,44

$$py_1 + py_2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot A \cdot S^{1/2}$$

A

konstanta pro vodné roztoky (0,509 při 25°C)

S

solnost (mg/l)

$$S = K_{25C} \cdot f$$

f

součinitel 0,7 pro přírodní vody,  
0,5 pro vodu upravenou

$\text{pm}_{\text{Ca}}$  obsah  $\text{Ca}^{2+}$  (mmol/l)

$\text{pm}_{\text{HCO}_3}$  obsah  $\text{HCO}_3^-$  (mmol/l)

Vyhodnocení RSI:

RSI	
< 4,0	Úsady nelze tolerovat
4,0-5,0	Silná tvorba úsad
5,0 – 6,0	Významná tvorba úsad
6,0-7,0	Mírná tvorba úsad nebo mírná koroze
7,0-7,5	Významná koroze
7,5-9,0	Silná koroze
>9,0	Korozi nelze tolerovat

### 3.2. Index agresivity (AI)

Byl vyvinut primárně pro azbestocementová potrubí. Občas nahrazuje Langelierův index jako indikátor agresivity vody, jelikož je jednodušší na výpočet. Nezohledňuje však efekty teploty a rozpuštěných solí, je proto méně přesný

Index je odvozený od aktuálního pH, tvrdosti vody (C) a celkové alkality –  $\text{KNK}_{4,5}$  (D). Lze použít pro výpočet pro vody s teplotou v rozmezí mezi 4 do 27 °C rovnicí:

$$AI = \text{pH}_{\text{aktuální}} + C + D = \text{pH}_{\text{aktuální}} + \log_{10}(\text{Ca}^{2+}) - \log(\text{alk})$$

Je-li:

- $AI > 12$ , je voda v rovnováze
- $AI < 12$ , je voda agresivní

### 3.3. Výpočet agresivního oxidu uhličitěho pomocí Lehmannových-Reussových tabulek

Toto stanovení vychází z vypočtených hodnot celkové alkality ( $\text{KNK}_{4,5}$ ) a acidity ( $\text{ZNK}_{8,3}$ ). Agresivní oxid uhličitý (koncentrace v  $\text{mmol.l}^{-1}$ ) se vypočte ze vztahu:

$$\text{CO}_{2agr} = G - 22m$$

G

odečtená hodnota z tabulky

$$S = 44p + 22m$$

p

acidita ( $\text{ZNK}_{8,3}$ )

m

alkalita ( $\text{KN}_{4,5}$ )

Tabulka 3: Výpočet koncentrací agresivního CO<sub>2</sub> na vápenec podle Lehmann a Reusse

S	G	S	G	S	G	S	G
10	10	60	55,7	110	90,2	160	118,1
12	12,0	62	57,2	112	92,2	162	119,1
14	13,9	64	58,8	114	93,4	164	120,1
16	15,9	66	60,4	116	94,6	166	121,0
18	17,8	68	62,0	118	95,8	168	122,0
20	19,8	70	63,5	120	97,0	170	123,0
22	21,7	72	65,0	122	98,1	172	123,9
24	23,7	74	66,5	124	99,2	174	124,7
26	25,6	76	68,0	126	100,4	176	125,7
28	27,5	78	69,5	128	101,5	178	126,6
30	29,4	80	71,0	130	102,6	180	127,5
32	31,2	82	72,4	132	103,7	182	128,4
34	33,1	84	73,8	134	104,8	184	129,2
36	34,9	86	75,2	136	105,9	186	130,2
38	36,8	88	76,6	138	106,9	188	131,0
40	38,6	90	78,0	140	108,1	190	131,9
42	40,3	92	79,3	142	109,1	192	132,7
44	42,1	94	80,8	144	110,2	194	133,7
46	43,9	96	82,1	146	111,2	196	134,4
48	45,6	98	83,3	148	112,2	198	135,2
50	47,3	100	84,6	150	113,2	200	136,0
52	49,0	102	85,9	152	114,2	210	141,6
54	50,7	104	87,2	154	115,3	220	145,6
56	52,4	106	88,4	156	116,3	230	149,8
58	54,0	108	89,7	158	117,3	240	153,8

#### 3.4. Larsonův index

Jak již bylo zmíněno v úvodu, k indikátorovým ukazatelům stability vod se řadí také sírany a chloridy. Tyto indikátory lze z výpočtových metod posoudit na základě Larsonova indexu. Byl odvozen k výpočtu relativního korozivního chování chloridů a síranů k ochrannému filmu hydrogenuhličitanů v potrubí z měkké oceli.

Larsonův koeficient se počítá podle rovnice:

$$LR = \frac{2[SO_4^{2-}] + [Cl^-]}{[HCO_3^-]}$$

Výsledky indexu se hodnotí následovně:



- $LR < 0,8$ : chloridy a sírany se nebudou pravděpodobně chovat agresivně;
- $0,8 < LR < 1,2$ : chloridy a sírany mohou ovlivnit tvorbu ochranného filmu na stěnách potrubí a objeví se koroze;
- $LR > 1,2$ : se zvyšujícím indexem se zvyšuje i koroze potrubí.

#### 4. Korozní testy

Mnohem přesnější pro určení „stability vod“ jsou laboratorní testy a testy „in situ“ (kuponové testy).

##### 4.1. Testy „in situ“

Postup **kupónových testů** (testy „in situ“) je určen dle TNV 75 7121 s výpočtem korozivního úbytku. Testy spočívají v osazení korozních destiček přímo do rozvodné sítě:

- Před vložením do potrubí se destičky zváží s přesností na 0,0005 gramů.
- Poté se upevní do držáku a zasunou do potrubí.
- Po vyjmutí se destičky vysuší při 105°C a zváží s inkrustačními nánosy.
- Nánosy jsou následně omyty kyselinou chlorovodíkovou, opláchnuty destilovanou vodou a kupony se opětovně vysuší.
- Po vychlazení v exikátoru se zváží.

Z naměřených hodnot se dá poté stanovit:

- korozní úbytek jednotlivých destiček;
- celkový korozní úbytek;
- korozní rychlost;
- hmotnost inkrustací.



Obrázek 1: Kuponový test

##### 4.2. Laboratorní testy

U laboratorních testů jde o stanovení srážecího potenciálu, který se podobá stanovení Heyerovou zkouškou:

- Ke 250 ml vzorku vody přidáme 2 g drceného mramoru ( $\text{CaCO}_3$ );
- necháme 5 dnů reagovat v temnu při teplotě 25 °C;
- vzorek poté přefiltrujeme a ve filtrátu stanovíme hodnoty pH,  $\text{KNK}_{4,5}$ ,  $\text{ZNK}_{8,3}$ ,  $\text{KNK}_{8,3}$  a koncentrace vápníku;

- získané hodnoty odečteme od počátečních hodnot.

Srážecí potenciál lze definovat rovnicí:

$$\Delta c(\text{Ca}^{2+}) = c_0(\text{Ca}^{2+}) - c_r(\text{Ca}^{2+})$$

$c_0(\text{Ca}^{2+})$

počáteční koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  vzorku vody

$c_r(\text{Ca}^{2+})$

koncentrace iontů  $\text{Ca}^{2+}$  ve vzorku vody v rovnovážném stavu

Heyerova zkouška slouží k přímému stanovení agresivního oxidu uhličitého ve vodě a ke stanovené agresivity vody (IS):

$$\text{CO}_{2,\text{agresivní}} = 0,5 * [(KNK_{4,5})_0 - (KNK_{4,5})_r]$$

$$IS = pH - pH_s$$

pH původní pH vzorku vody

pH<sub>s</sub> pH vzorku vody po Heyerově zkoušce

Pozn.: IS se vyhodnocuje obdobně jako LSI

## 5. Odkyselování

Odkyselování vod je technologický proces, při kterém se z přírodních vod odstraňuje agresivní oxid uhličitý. Setkáváme se s ním zejména při úpravě podzemních vod na vodu pitnou a provozní. Mnohdy bývá provozně řešen s odželezováním a odmanganováním.

Odkyselování vod je možno provádět dvěma způsoby:

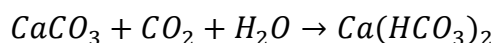
- Mechanické odkyselování, kdy se jedná pouze o odstranění agresivního  $\text{CO}_2$  provzdušněním.
- Chemické odkyselování, které je doprovázeno změnou koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ) iontů.

**Mechanické odkyselování** je vhodné pro vody, které obsahují vyšší koncentrace  $\text{CO}_2$ , iontů  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  a  $\text{HCO}_3^-$ . Při tomto způsobu úpravy se sice z vody odstraní korozivně působící agresivní  $\text{CO}_2$ , avšak voda se na druhé straně obohatí kyslíkem, který korozi podporuje.

Mezi **chemické způsoby odkyselování** patří filtrace vody přes odkyselovací hmotu a dávkování vápenného mléka (výjimečně hydroxid sodný a uhličitán sodný).

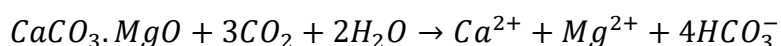
Nejznámější odkyselovací hmotou je mramorová drť ( $\text{CaCO}_3$ ) – nadrcený mramor se zrnitostí 3 až 5 mm. Vzhledem k malé odkyselovací aktivitě mramoru je možné pracovat pouze při malých filtračních rychlostech (max. do 3 m/h) z důvodu potřebné dostatečně dlouhé doby kontaktu vody s odkyselovacím materiálem min. 10 minut.

Při odkyselování vody filtraci přes mramorovou drť vzrůstá na každých 10 mg/l volného oxidu uhličitého koncentrace hydrogenuhlitanů v odkyselené vodě o 0,454 mmol/l, tj. o 27,7 mg/l. Odkyselování pomocí mramorové drti není vhodné pro vody s větší koncentrací vápníku a hořčíku a pro vody obsahující železo a mangan (vzhledem k možnému zanesení filtrační vrstvy vyloučenými hydratovanými oxidy železa a manganu). Reakce probíhá dle rovnice:



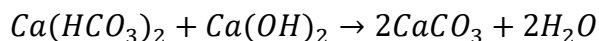
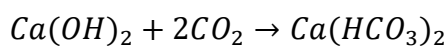
Další odkyselovací hmotou je polovypálený dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), který je vhodný i pro „měkké vody“. Jde o umělý materiál, který se vyrábí tepelnou úpravou přírodního dolomitu při teplotách 650 až 800°C. Vzniká tak směs uhličitanu vápenatého a hořečnatého se vzorcem  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgO}$ , jehož reakční rychlost je až trojnásobná oproti mramoru.

Při odkyselování pomocí alkalických dolomitických hmot vzrůstá na každých 10 mg/l volného  $\text{CO}_2$  koncentrace hydrogenuhličitanů cca o 0,35 mmol/l, tj. o 21,4 mg/l (cca o 23 % méně než při použití mramorové drtě). Používané filtrační rychlosti jsou minimálně 3 x vyšší než v případě mramoru, přesahují i 10 m/h. Důvodem vyšších filtračních rychlostí je velká odkyselovací aktivita materiálu, která je příčinou krátké doby kontaktu vody s náplní, v praxi postačuje pouze několik minut. Reakce probíhá dle rovnice:



Filtry se navrhují otevřené i uzavřené, přitom u otevřených filtrů by filtrační rychlost neměla překročit 5 m/h a v uzavřených 10 m/h. Výsledky odkyselovacích laboratorních pokusů filtrace přes odkyselovací hmoty je možné přenést do provozního měřítka pouze v případě, kdy laboratorní model byl provozován za stejných, v provozu očekávaných, hydraulických parametrů.

Chemické způsoby odkyselování zahrnují odstranění agresivního  $\text{CO}_2$  nejčastěji dávkováním hydroxidu vápenatého ve formě vápenného mléka. Reakce probíhá:



Během chemického způsobu odkyselování vody dochází ke změně koncentrací iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . Proto je tento způsob úpravy vhodný zejména pro vody s nízkou koncentrací  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . Současně dochází k odželezování a částečně i odmanganování.

Obecně lze říci, že volba vhodné metody na odstranění agresivního oxidu uhličitého z vody závisí na hodnotě  $\text{KNK}_{4,5}$  (celkové alkalitě).

Tabulka 4: Volba stabilizace vody na základě stanovené hodnoty  $\text{KNK}_{4,5}$

$\text{KNK}_{4,5} < 1 \text{ mmol/l}$	Chemické odkyselení
$\text{KNK}_{4,5} > 2 \text{ mmol/l}$	Odkyselení mechanickým způsobem
$1 < \text{KNK}_{4,5} < 2 \text{ mmol/l}$	Odkyselení oběma způsoby

## Laboratorní úloha 1: Stabilizace vod

### Zadání

Stanovte stabilitu/agresivitu vybraného vzorku podzemních vod dle vybraných ukazatelů stability. Proveďte stabilizaci chemickým způsobem – odkyselování dávkováním vápenné vody. Výsledky úpravy poté vyhodnoťte a navrhnete optimální dávku reagentu pro stabilizaci.

### **Použité chemikálie**

- Vápenná voda

### Postup

#### 1. Analýza surové vody

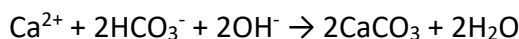
- pH,
- $c(\text{CO}_2)_{\text{volný}} = \text{ZNK}_{8,3}$ , celková acidita
- $c(\text{HCO}_3^-) = \text{KNK}_{4,5}$ , celková alkalita
- $c(\text{CO}_2)_{\text{agr}}$  pomocí Lehmannových-Reussových tabulek,
- $c(\text{Ca}^{2+})$ ,
- $c(\text{RL})$ .

#### 2. Stanovení dávky vápenné vody

Po přidavku hydroxidu vápenatého do vody obsahující volný oxid uhličitý mohou probíhat reakce:



Přebytkem hydroxidu vápenatého dochází k částečnému odstranění iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{HCO}_3^-$ :



- Vypočtete teoretickou dávku hydroxidu vápenatého:  
k odstranění 1 mg agresivního  $\text{CO}_2$  je zapotřebí 0,84 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  resp. 0,636 mg CaO
- Stanovte přesnou koncentraci vápenné vody (cca 10g CaO nebo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v 1000ml  $\text{H}_2\text{O}$ )
  - do titrační baňky odpipetujete 10 ml suspenze,
  - titruje HCl 0,1 mol/l na fenolftalein.
  - 1ml HCl o koncentraci 0,1 mol/l odpovídá 3,705mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tj. 2,804mg CaO.

#### 3. Odkyselování vod

Základní teoretická dávka hydroxidu vápenatého ( $D_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ ) se orientačně vypočítá z množství  $\text{CO}_{2\text{agr}}$ .

- k pěti vzorkům o objemu 1 000 ml za stálého míchání (60 ot/min) přidejte 0,5; 1,0; 1,5; 1,75 a 3,0 násobky  $D_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ .
- Po 5minutovém míchání vzorky zfiltrujte přes papírový filtr.
- Ve filtrátu stanovte  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{KNK}_{4,5}$ ,  $\text{ZNK}_{8,3}$ , RL, agresivní  $\text{CO}_2$  a pH.

#### 4. Vyhodnocení

Na základě provedených analýz vypočtete  $\text{pH}_s$  a Langelierův index stability LSI. Vypočtete jednotlivé formy  $\text{CO}_2$ . Vyhodnocení запиšte do tabulky. Podle LSI určete, zda je voda agresivní

či inkrustující nebo je ve vápenato-uhličitanové rovnováze. Navrhněte optimální dávku pro stabilizaci daného vzorku vody.

Tabulka vyhodnocení výsledků:

VZOREK	$D_{\text{Ca(OH)}_2}$ mg/l	$c(\text{HCO}_3^-)$ mmol/l	$c(\text{CO}_2)_{\text{volný}}$ mg/l	$c(\text{CO}_2)_{\text{agr}}$	pH	pH <sub>s</sub>	LSI
SUROVÁ VODA							
1							
2							
3							
4							
5							

## Laboratorní úloha 2: Stabilizace vod přes odkyselovací hmotu

### Zadání:

Stanovte stabilitu/agresivitu vod na základě výpočtové metody (LSI) a na základě Heyerovy zkoušky (IS). U surového vzorku vody stanovte koncentraci agresivního oxidu uhličitého výpočtem s použitím Lehmannových-Reussových tabulek a výpočtem z výsledků Heyerovy zkoušky.

Provedte stabilizaci vzorku vody filtrací přes mramorovou drť ( $\text{CaCO}_3$ ) – stabilizaci ověřte na dvou filtračních rychlostech – maximální a minimální. Koncentraci agresivního  $\text{CO}_2$  a stabilitu/agresivitu vody po úpravě ověřte opět Heyerovou zkouškou. Vypočtěte charakteristiky kolony.

### Použité chemikálie

- $\text{CaCO}_3$

### Postup:

#### 1. Analýza surové vody

- pH,
- $c(\text{CO}_2 \text{ volný}) = \text{ZNK}_{8,3}$ , celková acidita,
- $c(\text{HCO}_3^-) = \text{KNK}_{4,5}$ , celková alkalita,
- $c(\text{RL}_{105})$ ,
- $c(\text{Ca}^{2+})$ ,
- $c(\text{CO}_2)_{\text{agr}}$  – pomocí Lehmannových-Reussových tabulek
- $c(\text{CO}_2)_{\text{agr}}$  – Heyerova zkouška
- Langelierova saturačního index (LSI)
- saturační index (IS) dle Heyera.

#### 2. Stabilizaci filtrací přes $\text{CaCO}_3$

- Laboratorní kolonu naplňte odkyselovací hmotou ( $\text{CaCO}_3$ ).
- $\text{CaCO}_3$  propláchněte 1 l vodovodní vody.
- Pod kolonu umístěte zásobník odkyselované vody.
- Postupně kolonou prolévejte surovou vodu po objemech 500 ml. První objem 500 ml vylijte.
- Postupujte od minimální rychlosti průtoku po maximální rychlost průtoku.
- Rychlost průtoku regulujte výpustným ventilem.
- Zaznamenávejte čas průtoku daného objemu (500 ml) upravované vody.
- V upravené vodě stanovte pH,  $\text{KNK}_{4,5}$  a  $\text{ZNK}_{8,3}$
- Dále určete stabilitu vody (IS) a  $c(\text{CO}_2)_{\text{agr}}$  pomocí Heyerovy zkoušky.

#### 3. Hydraulické zatížení kolony

Při provozu kolon se počítá s jejich hydraulickým zatížením, u filtračních procesů nazývaných filtrační rychlost. Hydraulické neboli plošné zatížení je definováno objemovým množstvím protékající vody (Q) na plochu průtočného profilu (P) za časovou jednotku (t).

V laboratorním provedení se stanoví průtočné množství  $Q$  (ml) za určitou dobu ( $t$ ) v minutách.

Průtočná plocha  $P$  se stanoví z průměru kolony:

$$P = \left(\pi \frac{D}{2}\right)^2 \quad (\text{cm}^2)$$

Průtočná rychlost se vypočte:

$$v_1 = \frac{Q}{p \cdot t} \quad (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$$

Přepočtené plošné zatížení se provede:

$$v = 0,6 \cdot v_1 \quad (\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$$

#### 4. Heyerova zkouška

- do láhve o objemu 250 ml se zabroušenou zátkou nadávkovat 2g  $\text{CaCO}_3$ ;
- láhev naplnit vodou a uzavřít bez přítomnosti vzduchové bubliny;
- promíchání a umístění do termostatu;
- po min. 5 dnech stanovení pH a  $\text{KNK}_{4,5}$ .

Výpočet agresivního  $\text{CO}_2$ :

$$CO_{2, \text{agresivní}} = 0,5 * [(KNK_{4,5})_0 - (KNK_{4,5})_r]$$

Stabilita vod:

$$IS = pH - pH_s$$

pH      původní pH vzorku vody

pH<sub>s</sub>    pH vzorku vody po Heyerově zkoušce

Vyhodnocení výsledků

VZOREK	v	c( $\text{HCO}_3^-$ )	c( $\text{CO}_2$ )volný	c( $\text{CO}_2$ )agresivní		IS	LSI
				výpočet [mg/l]	Heyer [mg/l]		
VSTUP	—						
1							
2							
3							
4							
5							
6							

## Literatura

1. PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
2. NOVÁK, J. a kol. *Příručka provozovatele vodovodní sítě*. Vyd. 1. Líbeznice u Prahy: Medim, 2003. ISBN 80-238-9946-5.
3. HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. 2. přepracované a rozšířené vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-873-3.
4. TNV 75 7121. *Požadavky na jakost vody dopravované potrubím*. Praha: Hydroprojekt CZ a.s., 2002.
5. Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2020/2184 ze dne 16. prosince 2020 o jakosti vody určené k lidské spotřebě (přepracované znění).
6. ČSN 75 7373 Jakost vod – Výpočet forem výskytu oxidu uhličitého.
7. HOSEINZADEH, E., et al. Evaluation of Corrosion and Scaling Potential of a Water Treatment Plant. *Arch Hyg Sci.*, 2013, vol 2, p. 41–47.
8. LARSON, T. E., SKOLD, R. V. Laboratory studies relating mineral water quality of water to corrosion steel and cast iron. *Corrosion*, 1958, roč. 14, č. 6, s. 285–288.



## KOAGULACE/FLOKULACE

### Cíle cvičení:

- Prohloubení praktických znalostí procesů koagulace a flokulace.
- Osvojení metodiky „sklenicových testů“ a metodiky „agregačních testů“.
- Seznámení s popisem vzniklých agregátů a návrhem separačního stupně.

### Teoretický úvod

Koagulace patří k základním procesům sloužícím k odstranění koloidních a makromolekulárních organických látek z vod při její úpravě na vodu pitnou a užitkovou. U makromolekulárních látek jde především o látky huminového charakteru, které se do vod dostávají převážně z horních částí toků z rašelinišť a slatin a v dolních částech toku z dnových sedimentů a biologickou činností organismů. Koloidní a zákalotvorné hlinitokřemičitany a jíly se do povrchových vod dostávají především splachem v období zvýšené srážkové činnosti.

Podstatou procesu je destabilizace částic, jejich agregace a následná separace. Koagulací rozumíme destabilizaci částic jednoduchými solemi (termín odvozen od coagula – málo husté agregáty). Flokulací pak rozumíme dominantní mechanismus tvorby agregátů (agregace). Separací se rozumí oddělení agregovaného podílu od upravené vody základními procesy jako je filtrace, sedimentace a flotace.

### 1. Stabilita koloidních částic

Nečistoty v povrchové vodě jsou proti samovolné koagulaci stabilizovány mechanismy, které zabráňují jejich shlukování do větších celků separovatelných z vod mechanickými procesy, jako je sedimentace a filtrace. Rozeznáváme kinetickou (sedimentační) stabilitu a agregátní stabilitu.

*Kinetická stabilita* zajišťuje schopnost uchovávat rovnoměrné rozdělení částic v celém objemu. Jde o odolnost částic vůči působení gravitačního nebo odstředivého pole při nezměněném stupni disperzity. Kinetická stabilita je určena negativním nábojem koloidních částic. *Agregátní stabilita* je schopnost disperzního systému zachovávat stupeň disperzity, schopnost odolávat procesům, které vedou k agregaci. Agregátní stabilita je určena povahou interakcí při srážkách částic. Převažují-li přitažlivé síly, pak dochází k agregaci. Převažují-li odpuzivé síly, pak dochází k destabilizaci. Samotnou míru a povahu interakce mezi částicemi určuje charakter a velikost náboje. Původ náboje částic je dán:

- rozpouštěním iontů;
- povrchovou ionizací;
- izomorfní substitucí;
- specifickou adsorpcí iontů.

### 2. Destabilizace

Teoreticky existuje několik způsobů, jak potlačit stabilitu. V praxi se používají hlavně dva:

- Změna pH vody. Ta se uplatňuje především při koagulaci organických makromolekul.
- Přídavek koloidu s opačným znaménkem povrchového náboje, než je polarita elektrické dvojvrstvy ve vodě přítomných částic.

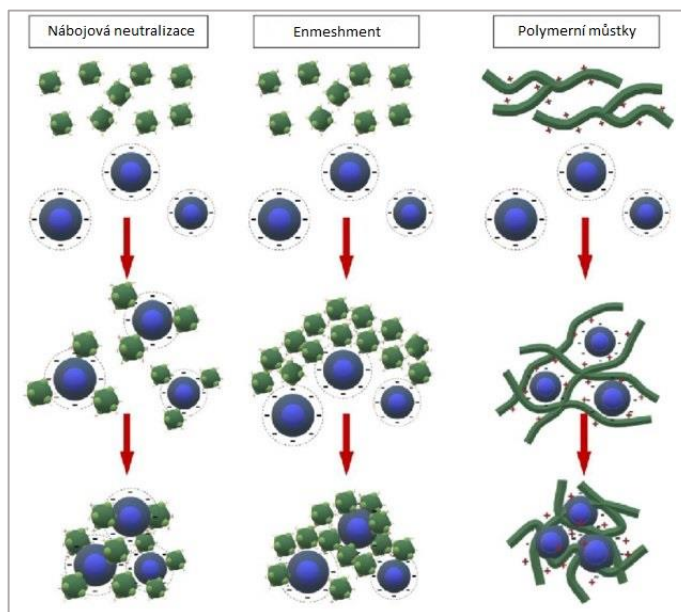
V zásadě existují čtyři mechanismy destabilizace. Jde o potlačení elektrické dvojvrstvy, nábojovou neutralizaci (uplatňující se při úpravě vod s použitím koagulačních činidel Al/Fe solí), enmeshment a destabilizace polymerů.

- Potlačení elektrické dvojvrstvy

- Nábojová neutralizace

Mnoho koloidních částic má při neutrálním pH (pH 6 až 8) negativní náboj. Produkty hydrolýzy Al/Fe solí a kationaktivní polymery mohou být úspěšně použity pro nábojovou neutralizaci. Dochází k tzv. specifické adsorpci. Negativní náboj povrchu koloidu je postupně neutralizován, dochází ke snižování energetické bariéry na hranici dosahu vdW sil

(dochází ke snížení zeta potenciálu). Tím dochází k destabilizaci koloidních částic. Další zvyšování dávky koagulantu Al/Fe solí vede k další specifické adsorpci, koloidní částice postupně získávají kladný náboj, dochází k opětovnému zvýšení energetické bariéry a postupné restabilizaci.



Obrázek 2: Základní mechanismy destabilizace

- Zachycení částic nečistot ve sraženině (enmeshment, sweep coagulation, sweep floc)  
Probíhá při použití vysokých dávek hydrolyzujících činidel, kdy je dávka činidla vyšší než rozpustnost amorfních hydroxidů Al a Fe.
- Destabilizace polymerů  
Jde o kombinaci různých mechanismů, z nichž jeden může převládat. Vždy probíhá adsorpce koloidních částic (pomocí elektrostatických, vdW, hydrofobních aj. sil). Následuje pak tvorba polymerních můstků (v případě neiontových polymerů) nebo k elektrostatické adsorpci.

### 3. Agregace

Jde o vzájemné spojování destabilizovaných částic ve větší celky, případně jejich adheze na povrchu jiných materiálů. Je nutné zdůraznit, že částice mohou agregovat, pokud vykazují adhezní schopnosti a pokud je umožněno jejich vzájemné setkávání (dochází-li k jejich srážkám).

Agregace podle transportních mechanismů:

- Perikinetická – transportním mechanismem je Brownův (difúzní) pohyb.
- Vertikální ortokinetická agregace (diferenční sedimentace) – pohyb částic vyvolaný tíhovou silou

- Horizontální ortokinetická agregace – suspenze vystavena smykovému napětí např. při míchání nebo proudění. V reálném systému jde o turbulentní proudění (hodnota gradientu rychlosti není ve všech místech míchaného objemu stejná)

Agregáty jsou shluky částic, které mají nejednoznačný tvar. Pro hodnocení vlastností agregátu je zavedena aproximace – koule s ekvivalentním průměrem  $D_{ekv}$ .

Základní vlastnosti agregátů jsou:

- pevnost (odolnost vůči rozbíjení);
- hustota a porosita;
- usazovací rychlost.

Všechny vlastnosti vloček jsou určeny:

- Vlivem gradientu rychlosti – s rostoucím gradientem rychlosti klesá průměrná velikost agregátů, agregáty jsou kompaktnější, roste hustota agregátů
- Vlivem doby míchání

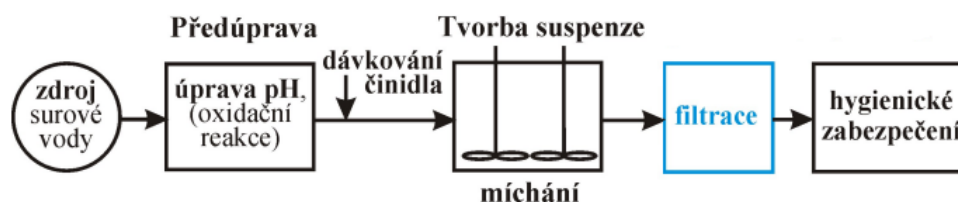
Vlastnosti vloček (agregátů) mají zásadní význam pro separaci.

#### 4. Separace

Jde o základní procesy jako je filtrace, sedimentace a flotace. Každý z těchto technologických kroků vyžaduje pro svou maximální účinnost vločky se zcela rozdílnými vlastnostmi (připravené různou intenzitou míchání).

- FILTRACE je vhodná pro malé agregáty o velikosti primárních a mikro-agregátů ( $<50-60 \mu\text{m}$ ) a s vysokou hustotou.
- SEDIMENTACE je vhodná pro velké homogenní agregáty ( $> 100 \mu\text{m}$ ) s vysokou hustotou a odolností vůči působení tečných sil.
- FLOTACE je vhodná pro vločky o velikosti desítek  $\mu\text{m}$ , optimálně  $25-50 \mu\text{m}$  s nízkou hustotou blízkou hustotě vody.

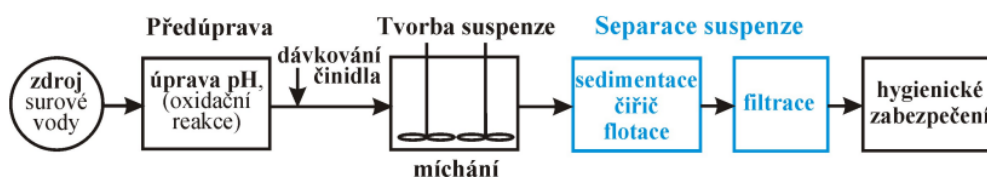
#### JEDNOSTUPŇOVÁ SEPARACE (PŘÍMÁ FILTRACE)



Pro přímou filtraci jsou vhodné agregáty o velikosti primárních a mikroagregátů ( $<50 - 60 \mu\text{m}$ ) s vysokou hustotou. Jde o agregáty, které jsou schopny kolmatovat filtrační náplň v celém objemu. Makroagregáty ( $> 100 \mu\text{m}$ ) nepravidelného tvaru s nízkou hustotou nejsou pro přímou filtraci vhodné. Makroagregáty nejsou schopny pronikat hlouběji do filtračního lože, příliš zatěžují horní vrstvu pískové náplně (prudký nárůst tlakových ztrát, zkrácení doby filtrace).

Obecně lze říci, že mikroagregáty vznikají při vysokých gradientech rychlosti míchání ve fázi agregace. Naopak makroagregáty vznikají při nízkých gradientech rychlosti míchání.

## DVOUSTUPŇOVÁ SEPARACE



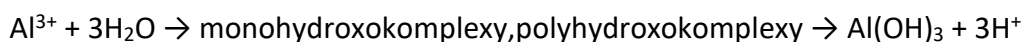
Jak již bylo uvedeno výše, u makroagregátů se volí dvoustupňová separace. Po nadávkování a homogenizaci destabilizačního činidla (koagulantu) je nejprve aplikován vysoký gradient rychlosti  $G = 100 - 400\text{s}^{-1}$ . Ze vzniklých mikroagregátů následným snížením gradientu rychlosti na  $G = 20 - 100\text{s}^{-1}$  vznikají makroagregáty. Nízké hodnoty gradientu jsou přitom aplikovány po dobu 5-30 minut. Takto vzniklé makroagregáty jsou odstraněny dvoustupňovou separací sedimentace – filtrace. Doba sedimentace musí být navržena pro nejmenší velikosti agregátů, u kterých je potřeba počítat s delší dobou sedimentace.

### 5. Koagulanty

Mezi základní koagulanty používané při úpravě vod patří soli hliníku a železa. Nejběžnější je přitom síran hlinitý.

Hliník může z pohledu koagulace fungovat různými způsoby – různé mechanismy destabilizace:

- Při použití nízkých dávek se uplatňuje převážně nábojová neutralizace. Koloid nesoucí opačný povrchový náboj, než je náboj nečistoty ve vodě, použitý při koagulaci, se připravuje dávkováním hlinité soli do upravované vody. V první fázi probíhá hydrolytická reakce:



Právě hydroxokomplexy a polyhydroxokomplexy jsou v kyselém prostředí opačně nabitým koloidem, který koaguluje s nečistotami ve vodě za vzniku primární částice. Tyto částice (primární částice) jsou sice ještě nepatrných rozměrů, ale jsou již elektroneutrální a za příznivých podmínek mohou bez zábran agregovat do větších celků. Současně se při hydrolyze koagulačního činidla snižuje hodnota pH vody, což má kladný vliv na koagulaci kyselých reagujících přirozených organických látek. Hodnoty pH nesmí však poklesnout pod určitou hodnotu, protože pak zůstává v roztoku příliš vysoká koncentrace základní složky hydrolyzujícího koagulantu.

- U vysokých dávek bývá primárním koagulačním mechanismem zachytávání do vysráženého hydroxidu hlinitého, tzv. enmeshment, sweep coagulation.

Při volbě Al/Fe koagulantu vycházíme především ze složení upravovaných vod. Pro úpravu vody s nízkou mineralizací (cca do 200 mg/l) jsou vhodné hlinité soli, pro více zasolené vody pak železité. S železitými koagulanty se pracuje do pH 5,3, s hlinitými do pH 5,8. Při úpravě povrchových vod na vodu pitnou se provádí zásadně koagulace v kyselém prostředí, která zajišťuje vysokou účinnost odstranění organických látek a zákalu. V praxi pak k neutralizaci iontů  $\text{H}^+$  postačuje přirozená neutralizační kapacita vody, případně je do vody dávkováno vápenné mléko.

Koagulace v alkalickém prostředí se používá při úpravě užitkových vod a napájecích vod (energetika). Mechanismus koagulace je přitom odlišný od koagulace v kyselém prostředí. Uplatňuje se zde především sorpce, srážení a koprecipitace.

## 6. Standardní zkušební postupy

### SKLENICOVÉ TESTY – JAR TEST

Základním testem pro optimalizaci základních technologických parametrů koagulace/flokulace při úpravě vody je sklenicový test (jar test), který je v celosvětovém měřítku používán po dlouhou dobu. Zkouška je vhodná zejména pro určení vhodného typu koagulantu, určení optimální dávky a optimálních podmínek jako je pH a intenzita/doba míchání.

Standardní aparatura pro sklenicovou koagulační zkoušku je znázorněna na následujícím obrázku. Tato aparatura se skládá ze šesti samostatných vsádkových reaktorů opatřených lopatkovými míchadly. Ideálně opatřených také výpustnými ventily pro zařazení filtrace.



Obrázek 3: Sklenicová koagulační zkouška

Sklenicovou zkoušku je možné provádět v mnoha modifikacích, v závislosti na provozních požadavcích. Níže jsou popsány jen vybrané modifikace.

V praxi je často aplikovaný postup stanovení optimální dávky koagulantu a následně optimální hodnoty pH:

1. Stanovení optimální dávky koagulačního činidla. Provádí se odstupňovaným dávkováním činidla do upravované vody bez úpravy pH
  - Do sady kádinek s rychle promíchávanou testovanou vodou se nadávkuje odstupňované množství koagulačního činidla.
  - Směs se rychle promíchává (homogenizační míchání) po dobu 30 až 60 sekund.
  - Potom následuje agregační míchání po dobu 20 až 30 minut pomalé míchání.
  - Po ukončení agregačního míchání se odeberou vzorky na analýzu a výsledky se vyhodnotí.
  - Pro charakteristiku upravené vody po separačním stupni přímé filtrace se odeberou vzorky po agregačním míchání s následnou centrifugací.
  - Pro charakteristiky upravené vody po separačním stupni sedimentace se vzorek odebere po 60minutové sedimentaci.

- Pro charakteristiku upravené vody po dvoustupňové separaci sedimentace/filtrace se vzorek odebere po 60minutové sedimentaci a centrifugaci.

## 2. Stanovení optimální hodnoty pH pro zjištěnou optimální dávku.

- Do kádinky s rychle promíchávanou testovanou vodou se nadávkuje optimální dávka koagulačního činidla.
- Současně se měří pH.
- Po ustálení pH se do testovaného vzorku postupně nadávkuje kyselina/zásada a zaznamenává se změna pH.

Další možností je nejdříve stanovení dávek činidel pro předúpravu reakčního pH a následné stanovení optimální dávky koagulantu:

## 3. Stanovení dávky činidla pro úpravu pH

- Ke vzorku surové vody se přidá vybraná dávka koagulačního činidla, promíchá se a současně se měří pH.
- Po ustálení pH se za současného míchání přidává činidlo pro úpravu pH a zaznamenávají se jeho změny.
- Zjištěné množství činidla pro úpravu pH bude pak dávkováno do surové vody před koagulačními testy.
- Tento postup se opakuje pro zvolený rozsah dávek koagulantu.

## 4. Současné stanovení optimální dávky koagulačního činidla a pH

- Do reakčních nádob se nadávkuje odstupňované množství reakční činidlo pro úpravu pH.
- Do reakčních nádob se doplní surová voda.
- Přidá se koagulační činidlo – do všech reakčních nádob stejná dávka.
- Reakční činidlo se dávkuje také do kontrolního vzorku (např. s demineralizovanou vodou) za účelem kontroly koncentrace nadávkovaného koagulantu.
- Po nadávkování koagulantu se zahájí homogenizační míchání po dobu 30-60 sekund.
- Následuje rychlé míchání odpovídající požadované hodnotě gradientu rychlosti a požadované době rychlého agregačního míchání.
- Následuje pomalé agregační míchání odpovídající požadované hodnotě gradientu rychlosti a požadované době rychlého agregačního míchání.
- Poté následuje separace agregátů a odebrání vzorku na analýzu.
- Výše jmenovaný postup se opakuje pro celý rozsah zvolených dávek koagulantu.

Výsledky sklenicových zkoušky je nejvýhodnější znázorňovat ve formě grafů popisujících závislost zbytkové koncentrace účinné složky koagulačního činidla ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) a zbytková koncentrace odstraňovaných znečišťujících příměsí (zákal,  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{TOC}$ ,...) na pH při různých dávkách koagulačního činidla. Z grafu se pak stanoví:

- **OPTIMÁLNÍ DÁVKA**, což je dávka koagulačního činidla, při které dochází k účinné koagulaci znečišťujících příměsí a je dosaženo maximálního snížení sledovaného parametru (zbytkové činidlo  $\text{Al/Fe}$ ,  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ , zákal,...).

- OBLAST OTPIMA je oblast v okolí optimální dávky kde se účinnost koagulace významně neliší.
- PROVOZNÍ DÁVKA se určuje v rámci oblasti optimálních dávek koagulačního činidla. Z ekonomického hlediska je samozřejmě výhodné volit minimální účinnou dávku. Provozní dávka by však neměla být volena na hranicích intervalu účinné úpravy vody, kdy např. malá změna v kvalitě surové vody může způsobit, že destabilizace nebude probíhat v oblasti optima.

#### Odhad dávky koagulačního činidla

Pro stanovení optimální dávky koagulačního činidla bylo navrženo mnoho výpočtů podle složení surové vody. Všechny tyto výpočty nemají obecnou platnost a optimální dávku je vždy nutné najít experimentálně. Obvykle se ale vychází ze zkušeností na daném provozu.

Pro odhad lze vycházet ze vzorců:

- pro dávku koagulačního činidla  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$  a  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , kde se předpokládá destabilizace pouze nábojovou neutralizací

$$D = 100 \cdot m \quad \begin{array}{ll} D & \text{dávka koagulačního činidla v mg/l} \\ m & \text{KNK}_{4,5}, \text{ celková alkalita v mmol/l} \end{array}$$

Jistého relativně přesného přiblížení je možné dosáhnout pouze u vod s obsahem zákalotvorných minerálních (jílovitých) suspenzí.

- pro odhad optimální dávky koagulačního činidla  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  pro koagulaci v alkalickém prostředí

$$D = (\text{KNK}_{4,5} + 3D_k + 2c\text{CO}_2) \cdot 28$$

- Odhad dávky koagulantu pro koagulaci povrchových vod vycházející z hodnot obsahu organických látek vyjádřeného ukazatelem  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$

$$D = A \cdot \text{CHSK}_{\text{Mn}} \quad \begin{array}{ll} A & \text{empirický faktor (4 až 20)} \end{array}$$

## TESTY AGREGACE

Jde o jednoduchý a rychlý test hodnocení účinnosti koagulace stanovením podílu neagregovaných příměsí/činidel a posouzení vzniklých agregátů na základě jejich sedimentačních rychlostí. Mimo sledování kvality vloček měřením zeta potenciálu, lze kvalitu suspenze sledovat pomocí koncentrace základní složky koagulantu (Fe nebo Al). Principem je odstředování vzorku suspenze v různých časových intervalech koagulačního sklenicového testu a analýza základní složky koagulantu ve fugátu. Poměr mezi agregovanou částí koagulačního činidla a celkovou koncentrací koagulačního činidla:

$$\alpha = \frac{C_{celk} - C_F}{C_{celk}}$$

Test je založený na rozdílné sedimentační rychlosti agregátů, které můžeme rozdělit na:

- Neagregovaný podíl částic (NA) odpovídá neodstranitelnému podílu.

$$P_{Na} = \frac{C_{F(60)}}{C_0}$$

$C_{F(60)}$  koncentrace Al (Fe) v odstředěném vzorku po 60 minutách sedimentace  
 $C_0$  celková koncentrace Al (Fe) v počátku sedimentace

- Primární agregáty (PR) jsou odstranitelné agregáty (např. přímou filtrací), jejichž doba sedimentace je delší než 60 minut (filtrační rychlost <0,01 mm/s).

$$P_{PR} = \frac{C_{60} - C_{F(60)}}{C_0}$$

$C_{F(60)}$  koncentrace Al (Fe) v odstředěném vzorku po 60 minutách sedimentace  
 $C_{60}$  celková koncentrace Al (Fe) ve vzorku po 60 minutách sedimentace

- Mikro agregáty (MI) jsou agregáty, které jsou odstranitelné prostou sedimentací v časovém rozmezí 5 až 60 minut (sedimentační rychlost 0,01 až 0,13 mm/s).

$$P_{MI} = \frac{C_5 - C_{60}}{C_0}$$

$C_5$  koncentrace Al (Fe) ve vzorku po 5 minutách sedimentace  
 $C_{60}$  celková koncentrace Al (Fe) ve vzorku po 60 minutách sedimentace

- Makro agregáty jsou agregáty, které jsou odstranitelné prostou sedimentací v době kratší 5 minut (sedimentační rychlost > 0,13 mm/s).

$$P_{MA} = \frac{C_0 - C_5}{C_0}$$

$C_5$  koncentrace Al (Fe) ve vzorku po 5 minutách sedimentace  
 $C_0$  celková koncentrace Al (Fe) v počátku sedimentace



### Laboratorní úloha 3: Sklenicové testy koagulace

#### Zadání

Proveďte koagulační sklenicový test s povrchovou vodou. Stanovte oblast optima a optimální dávku koagulačního činidla. Pro účel tohoto cvičení použijte koagulant  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ . Sledovaným parametrem kvality vody je pH, zákal a  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ .

#### Použité chemikálie

- 20%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$

#### Postup

##### 1. Analýza surové vody

Proveďte analýzu surové vody, stanovte tyto parametry:

- pH,
- zákal,
- $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ ,
- $\text{KNK}_{4,5}$ , celková alkalita.

##### 2. Stanovení základní dávky čířícího činidla

Hledaná dávka činidla pro koagulaci má být z ekonomických důvodů co nejnižší, ale přitom musí postačit k požadovanému vyčření vody. Dávka musí být přibližně úměrná velikosti znečištění dané vody.

Pro odhad základní dávky koagulantu 20%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  lze použít vzorec:

$$D = 100 \cdot m$$

D	dávka koagulačního činidla ( $\text{mg.l}^{-1}$ )
m	hodnota $\text{KNK}_{4,5}$ ( $\text{mmol.l}^{-1}$ )

##### 3. Provedení koagulačního sklenicového testu

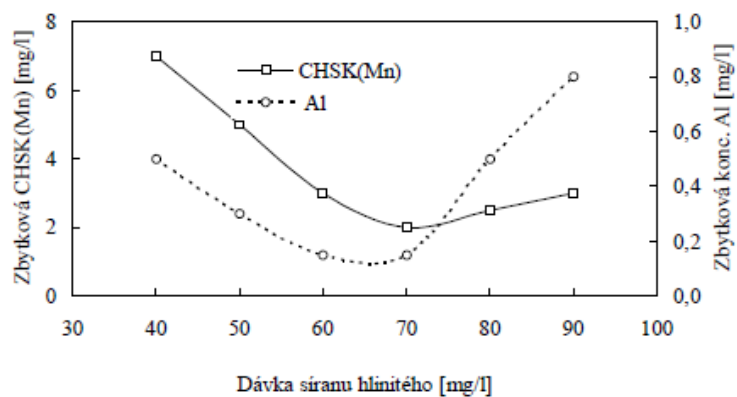
- Vypočtete tyto násobky základní dávky koagulačního činidla 20%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ :
  - 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 násobek.
- Do šesti skleněných kádinek nadávkuje 1000 ml surové povrchové vody a umístěte na míchací kolonu.
- Nastavte otáčky míchadel na hodnotu 250 ot/min
- Nadávkuje vypočtené dávky koagulantu.
- Důkladné promíchání vody s činidlem zajistěte po dobu cca 1 minuty při 250 ot/min (homogenizační míchání).
- Vzorek dále promíchejte při 5 ot.min<sup>-1</sup>, po dobu 20 min (agregátní míchání).
- Odeberte vzorek upravené vody, zfiltrujte a stanovte pH, zákal,  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ , a zbytkovou koncentraci hliníku  $c(\text{Al})$ .  
*Pozn. Charakteristika vzorku po zařazení přímé filtrace.*
- Vzorky nechte 60 minut sedimentovat.
- Po 60 minutách sedimentace vzorky přefiltrujte a stanovte pH, zákal,  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ , a zbytkovou koncentraci hliníku  $c(\text{Al})$ .  
*Pozn. Charakteristika vzorku po dvoustupňové separaci sedimentace/filtrace.*

#### 4. Stanovení optimální dávky koagulačního činidla

Stanovte optimální dávku koagulantu z grafické závislosti zbytkové koncentrace účinné složky koagulantu ( $\text{Al}^{3+}$ ) a zbytkové koncentrace znečištění (zákal a  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ ) na pH. Optimální hodnotu vyznačte v grafu.

$$\text{pH, CHSK}_{\text{Mn}}, c(\text{Al}), m \text{ hodnota} = f [D \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$$

Příklad grafického znázornění:



## Laboratorní úloha 4: Test agregace

### Zadání:

V návaznosti na již provedenou „Laboratorní úloha 2: Sklenicové testy koagulace“ proveďte laboratorní test agregace a popište charakteristiky agregátů vznikající během procesu flokulace (agregace). Navrhněte vhodný stupeň separace pro odstranění agregovaného podílu (přímá filtrace, sedimentace/filtrace, dvoustupňová filtrace, koagulační filtrace).

### Použité chemikálie

- 20%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$

### Postup

1. Do 4 skleněných kádinek nadávkujte koagulačního činidla, odpovídající optimální dávce, dle již provedeného testu koagulace.
2. Další sadu skleněných kádinek naplňte 1 000 ml surové povrchové vody a umístěte před kádinky s nadávkovaným koagulantem.
3. Nastavte otáčky míchadel na hodnotu 250 ot/min a přelijte odměřené množství surové vody do nádob s nadávkovaným koagulantem.
4. Důkladné promíchání vody s činidlem zajistěte po dobu cca 1 minuty při 250 ot/min.
5. Vzorek dále promíchávejte po dobu 20 min při:
  - 100 ot/min u vzorku 1,2
  - 50 ot/min u vzorku 3,4
6. Po 20 minutách vyndejte míchadla a vzorky nechte 60 minut sedimentovat.
7. Na začátku sedimentace odeberte vzorek vody na stanovení  $c(\text{Al}^{3+}) = C_0$ .
8. V 5. minutě sedimentace odeberte vzorek vody na stanovení  $c(\text{Al}^{3+}) = C_5$ .
9. V 60. minutě sedimentace odeberte vzorek vody na stanovení  $c(\text{Al}^{3+}) = C_{60}$ .
10. V 60. minutě odeberte vzorek vody na stanovení  $c(\text{Al}^{3+}) = C_{F(60)}$  po centrifugaci. Odstředivá rychlost 3 500 rpm, doba odstředění 20 minut.
11. Vypočtěte podíl vzniklých agregátů.
12. Charakterizujte vznikající agregáty v závislosti na rychlostním gradientu (rychlosti míchání) a navrhněte vhodný stupeň separace.

Název skupiny	Velikost agregátů mm	Charakteristika agregátů z hlediska testu agregace	Podíl agregátů výpočet	Vhodné separační technologie
Makro-agregáty	>1	Sedimentace < 5 minut	$P_{MA} = \frac{C_0 - C_5}{C_0}$	Sedimentace, filtrace
Mikro-agregáty	0.05 – 1	sedimentace 5 až 60 minut	$P_{MI} = \frac{C_5 - C_{60}}{C_0}$	Dvoustupňová filtrace
Primární agregáty	0.005 – 1	sedimentace 60 a 440 min.	$P_{PR} = \frac{C_{60} - C_{F(60)}}{C_0}$	Přímá filtrace
Neagregovaný podíl	<0.005	Částice, které nejsou ovlivněny gravitačním polem a neusadí se ani po dlouhé době.	$P_{NA} = \frac{C_{F(60)}}{C_0}$	Koagulační (agregační) filtrace

## Literatura

1. PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
2. PIVOKONSKÝ, Martin a kol. *Tvorba suspenze při úpravě vod*. Praha: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR (SOVAK ČR), 2011. ISBN 978-80-87140-18-5.
3. BACHE, D. H., Ross G. *Flocs in water treatment*. London: IWA Publishing, 2007. ISBN 978-1-84339-063-3.
4. PIVOKONSKÝ M. a kol. *Metodika laboratorních koagulačních/flokulačních testů pro optimalizaci úpravy vody. Certifikovaná metodika výsledků výzkumu, vývoje a inovací. Ústav pro hydrodynamiku, Akademie věd ČR*, 2019.  
[Optimalizace parametrů \(pH, dávky koagulačních činidel atd.\) koagulace/flokulace s ohledem na kvalitu surové vody \(cas.cz\)](#)
5. PIVOKONSKÝ, Martin, Petra VAŠATOVÁ, Jana NAČERADSKÁ a Lenka PIVOKONSKÁ. *Koagulace při úpravě vody: teorie a praxe*. Praha: Academia, 2020. ISBN 978-80-200-3116-7.
6. ZÁBRANSKÁ, Jana. *Laboratorní metody v technologii vody*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1997. ISBN 80-7080-272-3.
7. *Water treatment: principles and design*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, c2005. ISBN 0-471-11018-3.
8. STRNADOVÁ, Nina a Václav JANDA. *Technologie vody I. 2., přeprac. vyd.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-348-7.
9. PIVOKONSKÝ, Martin, Petra VAŠATOVÁ, Jana NAČERADSKÁ a Lenka PIVOKONSKÁ. *Koagulace při úpravě vody: teorie a praxe*. Praha: Academia, 2020. ISBN 978-80-200-3116-7.

## ODŽELEZOVÁNÍ A ODMANGANOVÁNÍ PODZEMNÍCH VOD

### Cíle cvičení:

- Prohloubení praktických znalostí procesů odželezování a odmanganování.
- Seznámení s možnostmi Intenzifikace procesu.
- Ověření laboratorních výsledků na výukovém modulu CE 586.

### Teoretický úvod

Princip většiny metod používaných pro odstraňování železa a manganu z podzemních vod spočívá v tom, že rozpustné iontové formy železa a manganu se převedou na nerozpustné sloučeniny a ty jsou z vody separovány vhodnými mechanickými procesy, jako je sedimentace a filtrace, popř. přímá filtrace.

Železo je převáděno do formy hydroxidu železitého  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  a mangan do formy oxidu-dihydroxidu manganitého  $\text{MnO}(\text{OH})_2$  nebo oxidu manganitého  $\text{MnO}_2$ . Rovnováha mezi rozpustnou a nerozpustnou formou je závislá nejen na pH a oxidačně redukčním potenciálu, ale také na teplotě, složení vody a reakční době (čím vyšší pH, tím kratší reakční doba).

Samotný způsob odstranění železa a manganu z podzemních vod je závislý na formě, ve které jsou dané prvky v upravované vodě přítomny. O zařazení sedimentace do úpravy vody rozhoduje koncentrace suspenzí v upravované vodě, tedy koncentrace železa a manganu v surové podzemní vodě:

- Jednostupňová filtrace - pokud je součet množství Fe a Mn menší než 5 mg/l.
- Dvoustupňová filtrace – pokud je součet množství Fe a Mn v podzemní vodě větší než 5 mg/l.
  1. stupeň – mohou se používat mikrofiltry, filtry (dvoustupňová filtrace), sedimentace, číření nebo flotace
  2. stupeň – filtrace

V případě, že se jedná o velké znečištění nebo při požadavku na vysokou kvalitu vody je také možné použít úpravu vody s vícestupňovou separací.

### 1. Metody odstraňování manganu a železa z vod

- alkalizace – vápenné mléko, uhličitán sodný, výjimečně hydroxid sodný (úprava vod pro energetiku)
- oxidace mechanická – provzdušňování
- oxidace chemická - chlor, manganistan draselný, ozón
- kontaktní odželezování a odmanganování
- iontová výměna
- membránové procesy

#### Alkalizace

Jelikož oxidace iontů  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Mn}^{2+}$  značně závisí na hodnotě pH, musí se většinou pro dosažení potřebného efektu voda alkalizovat. K tomu, aby srážení proběhlo přijatelnou rychlostí je zpravidla zapotřebí zvýšit pH vody alespoň na úroveň 8 – 8,5. Při takto vysokém pH dochází také k srážení hydrogenuhličitanů a vápenatých iontů (jako  $\text{CaCO}_3$ ), hořečnatých iontů a uhličitanu vápenatého.

### Oxidace mechanická – provzdušňování

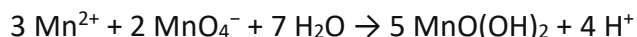
Jde o společný technologický postup odkyselení podzemních vod a odstranění železa. Při odkyselení dochází ke snížení obsahu agresivního  $\text{CO}_2$  a tím ke zvýšení pH, které je pro oxidaci železa a manganu limitující. Železo se snadno oxiduje při pH 7 až 7,5.

Mangan se snadno oxiduje až při pH kolem 9. Takových hodnot však při provzdušnění nelze dosáhnout. Pokud chceme využít oxidaci vzdušným kyslíkem i pro odstranění manganatých iontů z vody, je třeba provzdušněnou vodu filtrovat přes písek preparovaný vyššími oxidy manganu, které oxidační reakci katalyzují.

### Oxidace chemická – manganistanem draselným

Manganistan draselný působí jako silné oxidační činidlo, je silnějším oxidačním činidlem než chlor a je schopen zoxidovat jak železo, tak mangan. Při jeho redukci v neutrálním prostředí vzniká nerozpustný oxid manganitý či manganičitý. Konkrétně manganistanový anion ( $\text{MnO}_4^-$ ) oxiduje manganaté kationty ( $\text{Mn}^{2+}$ ) za vzniku oxidu manganičitého ( $\text{MnO}_2$ ) či oxidu manganitého ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), které jsou nerozpustné a mohou být lehce odfiltrovány. Vznikající sraženina nemá zpravidla jednotnou stechiometrickou strukturu a nelze jí přiřadit celočíselný vzorec.

Při odmanganování vody manganistanem draselným probíhá proces podle následující rovnice:



Reakce probíhající při oxidaci železa manganistanem draselným je následující:



Tato reakce probíhá velmi rychle, a to i v neutrální oblasti pH. Teoretická spotřeba  $\text{KMnO}_4$  na 1 mg  $\text{Fe}^{2+}$  je 0,567 mg, na 1 mg  $\text{Mn}^{2+}$  iontů je potřeba 1,92 mg  $\text{KMnO}_4$ . Obsahuje-li voda organické látky, spotřebuje se část manganistanu také na jejich zoxidování.

Výhodou metody je jednoduchost provedení a nenáročnost na technologické vybavení. Další výhodou je rychlý průběh reakce i v oblasti neutrálních hodnot pH, odstranění některých virů a na rozdíl od použití chloru dochází k redukci trihalogenmethanů (zdravotně závadných látek vznikajících při chloraci). Na druhou stranu je však manganistan draselný také spotřebováván i na další vedlejší oxidační reakce redukcí látek.

V praxi je odželezování oxidací vzdušným kyslíkem většinou prvním pracovním stupněm, kdy dochází současně k odkyselování vody, a následuje druhý stupeň odmanganování. Optimální dávka manganistanu draselného se v praxi může značně lišit od dávky teoretické (optimální dávka může být až o polovinu nižší než dávka teoretická). Vznikající hydratovaný oxid manganičitý má totiž katalytické účinky pro oxidaci manganatých iontů kyslíkem, čímž se provozní dávka oproti stechiometrii snižuje.

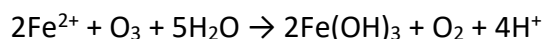
### Oxidace chemická – ozonizace

Oxidace ozonem patří mezi tzv. pokročilé oxidační procesy (Advanced Oxidation Processes – AOP), které jsou v současnosti intenzivně studovány pro možnost jejich využití v oblasti úpravy a čištění vod. Obecně lze tyto procesy rozdělit na:

- Chemické –  $O_3$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_3/Fe^{2+}$ ,  $H_2O_2/Fe^{2+}$
- Fotochemické –  $O_3/UV$ ,  $UV/H_2O_2$ ,  $UV/O_3/H_2O_2$

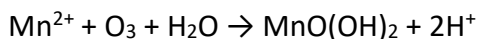
Ozon je silné oxidační činidlo a při úpravě pitné vody se běžně používá k odstranění jako dezinfekční činidlo, k odstranění senzorických vlastností a oxidaci kovů. Mimo to má i další využití, jako je např. pro oxidaci specifických organických látek. Jedná se o nejsilnější oxidační činidlo, které oxiduje železo i mangan do vyššího stupně za velmi krátkou dobu, bez ohledu na hodnotu pH vody. Při vyšších dávkách ozonu dochází k oxidaci manganu na vyšší oxidy manganu, což vytváří barevnost vody. Může dojít k oxidaci až do formy manganistanové, kdy je voda zabarvena do fialova.

Odželezování ozonem se používá u vod, v nichž je železo vázáno v organických komplexech např. s huminovými látkami. Tyto látky působí jako ochranné koloidy a brání vylučování vloček  $Fe(OH)_3$ :



Na oxidaci 1 mg/l  $Fe^{2+}$  je zapotřebí teoreticky 0,43 mg ozonu. Rychlost oxidace je nezávislá na počáteční koncentraci železa ve vodě a na teplotě, ale závisí na době kontaktu odželezované vody s ozonem a samotné koncentraci ozonu.

Oxidace  $Mn^{2+}$  ozonem probíhá velmi rychle podle následující reakce:



Na oxidaci 1 g  $Mn^{2+}$  je potřeba dávka ozonu 0,88 mg. Dávkování musí být takové, aby došlo k oxidaci  $Mn^{2+}$  jen na  $MnO_2$ , protože při přebytku ozonu vzniká rozpustný manganistan a voda se barví do fialova.

## 2. Výukový modul – CE 586 Precipitation and flocculation

Jednou z možností intenzifikace odstranění kovů z vod je po srážení zařazení procesu flokulace (jako intenzifikačního stupně) a sedimentace (jako separačního stupně). Tyto procesy jsou zahrnuty v rámci výukového modulu CE 586, na kterém se studenti seznámí s „poloprovozním“ režimem úpravy vody.

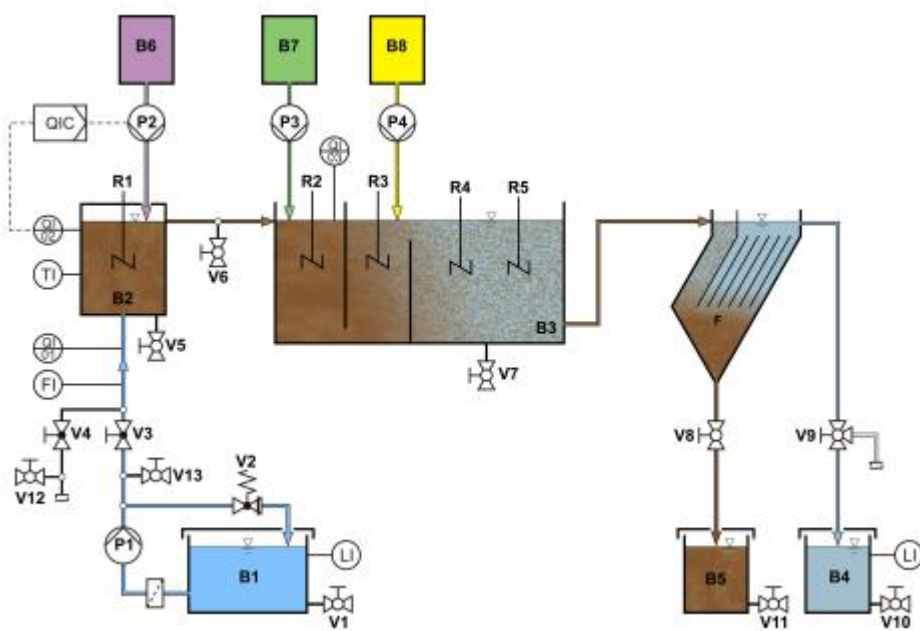
Jde o výukový modul navržený firmou G.U.N.T, která se zabývá navrhováním a distribucí vybavení pro vzdělávání nejen v oblasti technologie vody. Modul CE 865 spadá do kategorie fyzikálně-chemických procesů se zaměřením na odstranění rozpuštěných látek z vod procesy srážení, flokulace a sedimentace. Příkladem aplikace může být mimo odstraňování kovů z vod také odstraňování fosforu z vod.



Obrázek 4. Modul 865 Precipitation and flocculation

### Popis jednotky

Schematicky je jednotka znázorněna na následujícím obrázku. Měřící a řídicí jednotky jsou popsány na obrázku 6.



Obrázek 5: Schéma jednotky



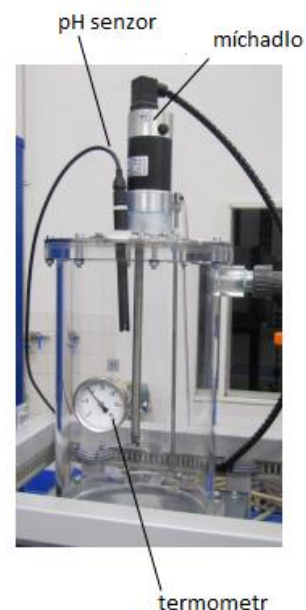
Hlavní komponenty			
B1	Nádrž na surovou vodu	F	Lamelový separátor
B2	Srážecí nádrž	P1	Čerpadlo surové vody
B3	Flokulační nádrž	P2	Dávkovací čerpadlo - srážecí činidlo
B4	Nádrž na upravenou vodou	P3	Dávkovací čerpadlo – koagulant
B5	Kalová nádrž	P4	Dávkovací čerpadlo - flokulant
B6	Nádrž na srážecí činidlo	R1.....R5	Míchadla
B7	Nádrž na koagulant		
B8	Nádrž na flokulant		

Přístrojové vybavení			
F1	Průtokový senzor (surová voda)	QI-02	pH senzor (srážecí nádrž)
LI	Senzor úrovně hladiny	QI-03	pH senzor (flokulační nádrž)
TI	Teplotní senzor	QIC	pH senzor kontrolní
QI-01	pH senzor (surová vody)		

Hlavními komponenty jednotky jsou – srážecí nádrž, flokulační nádrž a sedimentační nádrž (lamelová). Jednotka je poloautomatická – vybavená řídicí jednotkou, automatickými dávkovači reagentů, nastavitelnými míchadly a senzory sledovaných parametrů jako jsou průtoky, pH a teplota.

#### Srážecí nádrž

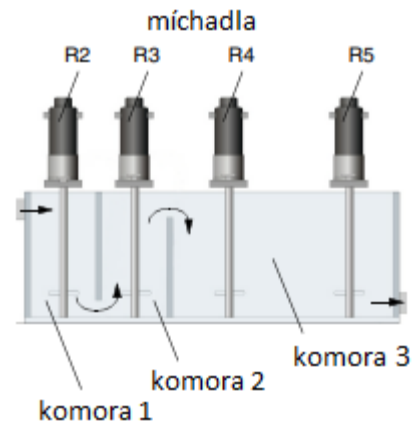
- Surová voda je čerpána ze zásobní nádrže (B1, obr. 5) do srážecí nádrže (B2, obr. 5).
- Kontrola průtoku je prováděna přes průtokoměr (F1, obr. 5).
- Do srážecí nádrže je dávkováno přes dávkovací čerpadlo srážecí činidlo.
- Nádrž je opatřena míchadlem s nastavitelnou rychlostí otáček.
- Dále je nádrž opatřena teploměrem a senzorem pH.
- Srážení může probíhat také s regulací pH.
- Ze srážecí nádrže voda dále odtéká do flokulační nádrže (B3, obr. 5)



#### Flokulační nádrž

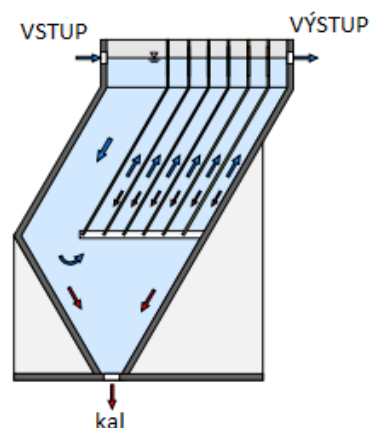
- Flokulační nádrž je rozdělena na 3 komory dvěma oddělovacími přepážkami.
- První dělicí přepážka je zapuštěná – voda z komory 1 do komory 2 proudí spodní částí nádrže.
- Druhá dělicí přepážka je přepadová – voda z komory 2 do komory 3 protéká přepadem.

- V komoře 1 se do upravované vody dávkuje koagulant – automaticky dávkován ze zásobní nádrže koagulantu dávkovacím čerpadlem s předem nastavenou hodnotou dávkování.
- V komoře 2 se do upravované vody dávkuje flokulant – automaticky dávkován ze zásobní nádrže flokulantu dávkovacím čerpadlem s předem nastavenou hodnotou dávkování.
- „Zrání vloček“ probíhá v komoře 3.
- Správný chod flokulace zajišťují míchadla osazená v jednotlivých komorách.
- Rychlost míchadel lze nastavit samostatně pro jednotlivé komory.
- Suspenze dále odtéká do lamelového separátoru (F, obr. 5).

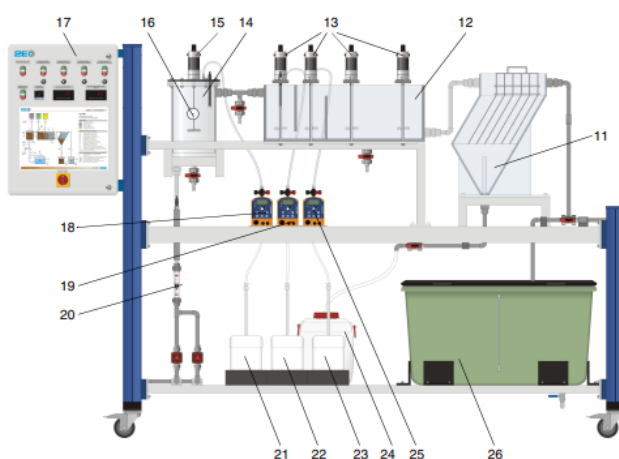


#### Lamelový separátor

- Lamelový separátor rozděljuje suspenzi na upravenou vodu a kal.
- Vyčištěná voda odtéká do nádrže na upravenou vodu (B4, obr. 5). K separaci kalu dochází vlivem sedimentace pevných látek.



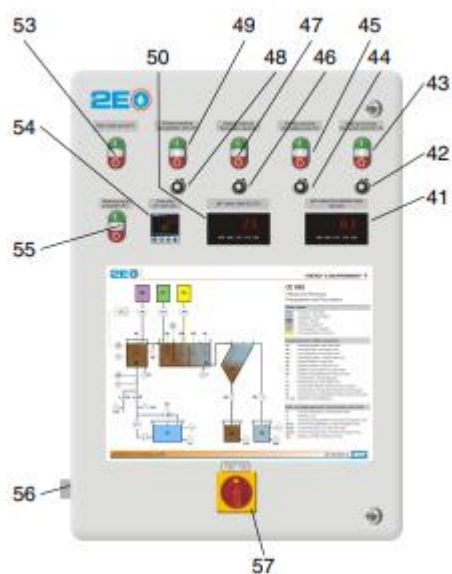
#### Jednotlivé komponenty s měřícími a řídicími jednotkami:



Obrázek 6: Měřící a řídicí jednotky

- |    |  |
|----|--|
| 11 | Lamelový separátor (F)                   |
| 12 | Flokulační nádrž (B3)                    |
| 13 | Míchadla – koagulace/flokulace (R2...R5) |
| 14 | Srážecí nádrž (B2)                       |
| 15 | Míchalo – srážení (R1)                   |
| 16 | Termometr                                |
| 17 | Rozvaděč                                 |
| 18 | Dávkovací čerpadlo – srážecí činidlo     |
| 19 | Dávkovací čerpadlo – koagulant           |
| 20 | Průtokoměr (FI) surové vody              |
| 21 | Zásobní nádrž srážecího činidla          |
| 22 | Zásobní nádrž koagulantu                 |
| 23 | Zásobní nádrž flokulantu                 |
| 24 | Kalová nádrž                             |
| 25 | Dávkovací čerpadlo – flokulant           |
| 26 | Nádrž na upravenou vodu (B4)             |

Rozvaděč – uspořádání a funkce:



- 41 Indikátor pH ve flokulační nádrži
- 42 Regulátor rychlosti otáček míchadel R4 a R5
- 43 Spínač pro míchadla R4 a R5
- 44 Regulátor rychlosti otáček míchadla R3
- 45 Spínač pro míchadlo R3
- 46 Regulátor rychlosti otáček míchadla R2
- 47 Spínač pro míchadlo R2
- 48 Regulátor rychlosti otáček míchadla R1
- 49 Spínač pro míchadlo R1
- 50 Indikátor pH surové vody
- 53 Spínač čerpadla surové vody P1
- 54 Regulátor hodnoty pH ve srážecí nádrži
- 55 Spínač čerpadla dávkování srážecího čerpadla
- 56 Zásuvka pro připojení čerpadla surové vody
- 57 Hlavní vypínač/nouzový vypínač

Regulátor pH pro srážecí reaktor:



Dávkovací čerpadla:



## Laboratorní úloha 5: Odmanganování vod, oxidační metody

### Zadání

Proveďte odmanganování ne vzorku podzemní vody oxidační metodou s použitím  $\text{KMnO}_4$ . Výsledky vyhodnoťte tabelárně i graficky. Stanovte optimální dávku, srovnajte s teoretickou (vypočtenou) dávkou.

### Použité chemikálie

- 1%  $\text{KMnO}_4$

### Postup

#### 1. Analýza surové podzemní vody

- pH,
- $c(\text{Mn})$

#### 2. Výpočet teoretické dávky oxidačního činidla ( $\text{KMnO}_4$ )

- Pro odhad dávky vycházejte z koncentrace Mn za předpokladu, že na odstranění 1 mg  $\text{Mn}^{2+}$  iontů je potřeba 1,92 mg  $\text{KMnO}_4$ .
- Pro testy použijte 1% roztok  $\text{KMnO}_4$ .

#### 3. Oxidace manganu

- Do 6ti kádinek nadávkujte 500 ml podzemní vody
- Do takto připravených vzorků nadávkujte tyto násobky teoretické dávky:
  - 0,5; 1,0; 1,2; 1,5; 1,75.
- Po nadávkování vzorky míchejte po dobu 15 minut při 150 ot/min.
- Vzorky zfiltrujte přes dobře propláchnutý filtr (bílá páska).
- Ve filtrátu stanovte pH a  $c(\text{Mn})$ .
- Výsledky zaznamenejte do tabulky a vyhodnoťte graficky závislost  $c(\text{Mn})=f(DK_{\text{MnO}_4})$

## Laboratorní úloha 5: Odželezování a odmanganování vod, pokročilé oxidační metody

### **Zadání:**

Provedte odmanganování a odželezování na vzorku podzemní vody se zaměřením na proces oxidace ozonizací. Pro ozonizaci použijte jednotku OT Mini (Ozontech s.r.o.). V upravené vodě mimo jiné stanovte zbytkovou koncentraci ozonu metodou indigo (popř. jodometrickou titrací). Závěrem výsledky odželezování a odmanganování vyhodnoťte a srovnejte s výsledky cvičení č. 2 (oxidace/alkalizace).

### **Postup:**

- Do 3 skleněných kádinek o objemu 2 000 ml nadávkujte 1000 ml podzemní vody.
- U vzorků přeměřte pH a ORP.
- Do skleněné kádinky se vzorkem vložte perlátor (připojený na generátor ozonu).
- Zapněte ozonizátor.
- Od momentu zapnutí ozonizátoru měřte čas.
- Vzorek 1 nechte probublávat po dobu 5 minut
- Vzorek 2 nechte probublávat po dobu 10 minut
- Vzorek 3 nechte probublávat po dobu 15 minut
- Ve vzorku přeměřte pH a ORP.
- Vzorky přefiltrujte.
- Ve filtrátu stanovte pH, ORP,  $c(\text{O}_3)$ ,  $c(\text{Fe})$  a  $c(\text{Mn})$ .
- Vyhodnoťte účinnost oxidace.

### Zadání

Proveďte laboratorní odželezování na vzorku podzemní vody alkalizací se zařazením stupně flokulace a dvoustupňovou separací – sedimentace a filtrace. Pro alkalizaci použijte roztok hydroxidu sodného, pro flokulaci flokulant polyakrilamid PolySepar<sup>®</sup>. Zároveň ověřte také případné zařazení koagulantu chloridu železitého.

Pro jednotlivé stupně úpravy (alkalizaci a flokulaci) stanovte optimální dávky a optimální hodnoty pH. Jednotlivé metody vyhodnoťte graficky.

Optimální dávky činidel a optimální oblasti pH budou sloužit jako vstupní hodnoty pro poloprovazní ověření odželezování na výukovém modulu CE 586 Precipitation and flocculation

### Použité chemikálie

- Alkalizační činidlo NaOH,  $c(\text{NaOH})=15\text{g/l}$
- Koagulant  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $c(\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O})=5\text{g/l}$
- Flokulant POLY SEPAR<sup>®</sup> PK19 H,  $c(\text{POLY SEPAR}^{\text{®}})=2\text{g/l}$

### Postup

#### 1. Analýza

- pH
- $c(\text{Fe})$

#### 2. Test alkalizace (srážení)

- Stanovte základní dávky ( $D_z$ ) NaOH pro odstranění železa z testované vody alkalizací. Do kádinky o objemu 1 litr nadávkujte 500 ml testované vody a srážecí činidlo NaOH tak, aby pH upravené vody bylo kolem 9.
- Do 6ti kádinek o objemu 1 litr nadávkujte 500 ml testované vody.
- Nadávkujte tyto násobky  $D_z$ :  
0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 a 1,2.
- Míchejte po dobu 5 minut při 250 ot/min.
- Poté přefiltrujte.
- Ve filtrátu stanovte pH a koncentraci  $c(\text{Fe})$ .
- Graficky vyhodnoťte závislost  $c(\text{Fe})/\text{pH}$ .
- Určete optimální pH a dávku  $D_{O(\text{NaOH})}$  pro srážení Fe z modelové vody.

#### 3. Srážení s přidavkem koagulantu

- Do 3 kádinek o objemu 1 litr nadávkujte 500 ml modelové vody.
- Do všech vzorků nadávkujte optimální dávku srážecího činidla ( $D_{O(\text{NaOH})}$ ).
- Míchejte po dobu 5 minut při 250 ot/min.
- Poté nadávkujte koagulant  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 
  - 5 ml/l
  - 10 ml/l
  - 15 ml/l
- Míchejte po dobu 1 minuty při 150 ot/min, poté 5 minut při 50 ot/min.
- Nechte 5 minut sedimentovat a poté přefiltrujte.

- Ve filtrátu stanovte pH a  $c(\text{Fe})$ .
- Určete optimální pH a dávku koagulantu  $D_{\text{O}(\text{FeCl}_3)}$ .

#### 4. Srážení/flokulace

- Do 3 kádinek o objemu 1 litr nadávkujte 500 ml testované vody.
- Do všech vzorků nadávkujte optimální dávku srážecího činidla ( $D_{\text{O}(\text{NaOH})}$ ).
- Míchejte po dobu 5 minut při 250 ot/min.
- Poté nadávkujte flokulant POLY SEPAR<sup>®</sup>
  - 10 ml/l
  - 22 ml/l
  - 15 ml/l
- Míchejte po dobu 1 minuty při 150 ot/min, poté 5 minut při 50 ot/min.
- Nechte 5 minut sedimentovat a poté přefiltrujte.
- Ve filtrátu stanovte pH a  $c(\text{Fe})$ .
- Určete optimální dávku flokulantu POLY SEPAR<sup>®</sup>  $D_{\text{O}(\text{P.S.})}$

#### 5. Srážení/flokulace s přidavkem koagulantu

- Do 3 kádinek o objemu 1 litr nadávkujte 500 ml modelové vody.
- Do všech vzorků nadávkujte optimální dávku srážecího činidla ( $D_{\text{O}(\text{NaOH})}$ ).
- Míchejte po dobu 5 minut při 250 ot/min.
- Poté nadávkujte optimální dávku koagulantu  $D_{\text{O}(\text{FeCl}_3)}$ .
- Míchejte po dobu 1 minuty při 150 ot/min, poté 5 minut při 50 ot/min.
- Poté nadávkujte flokulant POLY SEPAR<sup>®</sup>
  - 10 ml/l
  - 22 ml/l
  - 15 ml/l
- Míchejte po dobu 1 minuty při 150 ot/min, poté 5 minut při 50 ot/min.
- Nechte 5 minut sedimentovat a poté přefiltrujte.
- Ve filtrátu stanovte pH a  $c(\text{Fe})$ .
- Určete optimální dávku flokulantu POLY SEPAR<sup>®</sup>  $D_{\text{O}(\text{P.S.})}$

## Laboratorní úloha 7: Odželezování vod – poloprovozní ověření

### Zadání:

S použitím výukového modulu CE 586 proveďte odželezování/odmanganování podzemních vod s použitím NaOH srážení/alkalizace, flokulantu POLY SEPAR<sup>®</sup> a případně koagulantu FeCl<sub>3</sub>. Pro nastavení optimálních dávek a optimálních hodnot pH vycházejte z laboratorní úlohy „Odželezování vody s intenzifikací“.

### Použité chemikálie

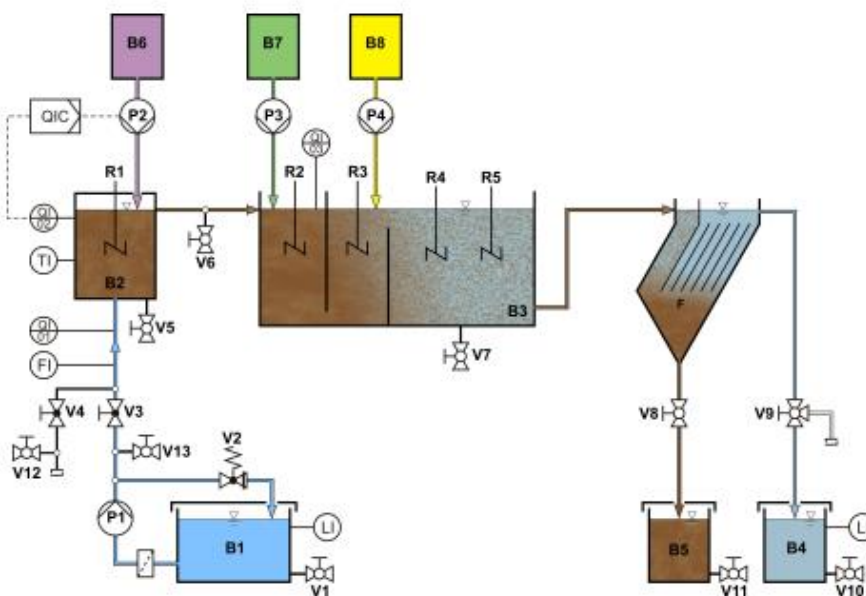
- Alkalizační činidlo NaOH,  $c(\text{NaOH})=15\text{g/l}$
- Koagulant FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O,  $c(\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O})=5\text{g/l}$
- Flokulant POLY SEPAR<sup>®</sup> PK19 H,  $c(\text{POLY SEPAR}^{\text{®}})=2\text{g/l}$



**Pro práci s modulem na odstranění železa a manganu z podzemních vod je třeba mít laboratorně stanoveny a ověřeny dávku srážecího činidla, resp. pH na které je třeba vodu při srážení upravit!!!!**

**Práce s modulem jen pod dozorem vyučujícího!!!!**

Schéma jednotky CE 568





## Pracovní postup:

1. Do zásobní nádrže B1 nadávkuje 100 l podzemní vody.
2. Zapněte hlavní vypínač.
3. Pro technologický uzel srážení (B8) zadejte na regulátoru pH požadovanou hodnotu pH.  
*Pozn. Jde o hodnotu  $D_{O(NaOH)}$  zjištěnou z předešlé laboratorní úlohy*
4. Zapněte čerpadlo surové vody (P1) a nastavte průtok 60 l/h pomocí ventilu V3.
5. Vyčkejte do naplnění srážecí nádrže (B2) a naplnění 1. a 2. komory flokulační nádrže (B3).
6. Zapněte míchadlo R1 ve srážecí nádrži na stupeň 5, míchadla R2 a R3 ve flokulační nádrži na stupeň 5.
7. Poté zapněte dávkovací čerpadlo srážecího činidla (P2).
8. Sledujte srážecí nádrž B2 a referenční/aktuální hodnotu pH na regulátoru.
9. Při dosažení aktuálního pH na hodnotu referenční zapněte dávkovací čerpadlo koagulantu P3 se současným nastavením hodnoty průtoků.  
*Pozn. Hodnoty průtoků se stanoví na základě potřebných optimálních dávek určených v předešlé laboratorní úloze.*
10. Sledujte flokulační nádrž.
11. Zapněte míchadla R4 a R5 na stupeň 3 v momentě, kdy je plná komora 3 flokulační nádrže.
12. Poté zapněte dávkovací čerpadlo flokulantu se současným nastavením hodnoty průtoků.  
*Pozn. Hodnoty průtoků se stanoví na základě potřebných optimálních dávek určených v předešlé laboratorní úloze.*
13. Průběžně sledujte
  - srážecí nádrž – aktuální/referenční pH;
  - flokulační nádrž – pH v komoře 1, podle kterého příp. upravte průtok koagulantu.*Pozn. Optimální pH bylo zjištěno v předešlé laboratorní úloze*
14. V 10. minutě provozu modulu odeberte vzorek vstupní vody B1 a upravené vody (B4) pro analýzu pH a c(Fe). V upravené vodě stanovte pH a c(Fe) také po filtraci.
15. Ve 30. minutě provozu modulu odeberte vzorek upravené vody (B4) pro analýzu pH a c(Fe). V upravené vodě stanovte pH a c(Fe) také po filtraci.
16. Snižte nastavenou hodnotu průtoků koagulantu/flokulantu na polovinu.
17. Ve 40. minutě provozu modulu odeberte vzorek upravené vody (B4) pro analýzu pH a c(Fe). V upravené vodě stanovte pH a c(Fe) také po filtraci.
18. V 60. minutě provozu modulu odeberte vzorek upravené vody (B4) pro analýzu pH a c(Fe). V upravené vodě stanovte pH a c(Fe) také po filtraci.
19. Po ukončení testu vypněte všechny čerpadla a míchadla
20. Vyhodnoťte účinnost odželezování.

	Srážecí reaktor		Flokulační reaktor			Upravená voda z lamelového separátoru			Upravená voda po filtraci		
	NaOH ml.h <sup>-1</sup>	pH –	pH –	koagulant ml.h <sup>-1</sup>	flokulant ml.h <sup>-1</sup>	pH	Fe mg.l <sup>-1</sup>	R (%)	pH	Fe mg.l <sup>-1</sup>	R (%)
10. min											
30. min											
40. min											
60. min											

## Literatura

1. PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
2. *Water treatment: principles and design*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, c2005. ISBN 0-471-11018-3.
3. ZÁBRANSKÁ, Jana. *Laboratorní metody v technologii vody*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1997. ISBN 80-7080-272-3.
4. STRNADOVÁ, Nina a Václav JANDA. *Technologie vody I. 2., přeprac. vyd.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-348-7.
5. MITTASCH, P., et al. *Experimental Instructions CE 586 Precipitation and Flocculation*, G.U.N.T., Gerätebau.



Toto dílo podléhá licenci [Creative Commons Uveďte původ-Zachovejte licenci 4.0 Mezinárodní License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

