

Teorie koagulace a flokulace při úpravě vody



Tvorba suspenze = **DESTABILIZACE** + **AGREGACE** (tvorba agregátů = vloček)

Jiná terminologie = **KOAGULACE** + **FLOKULACE**

VÝZNAM?

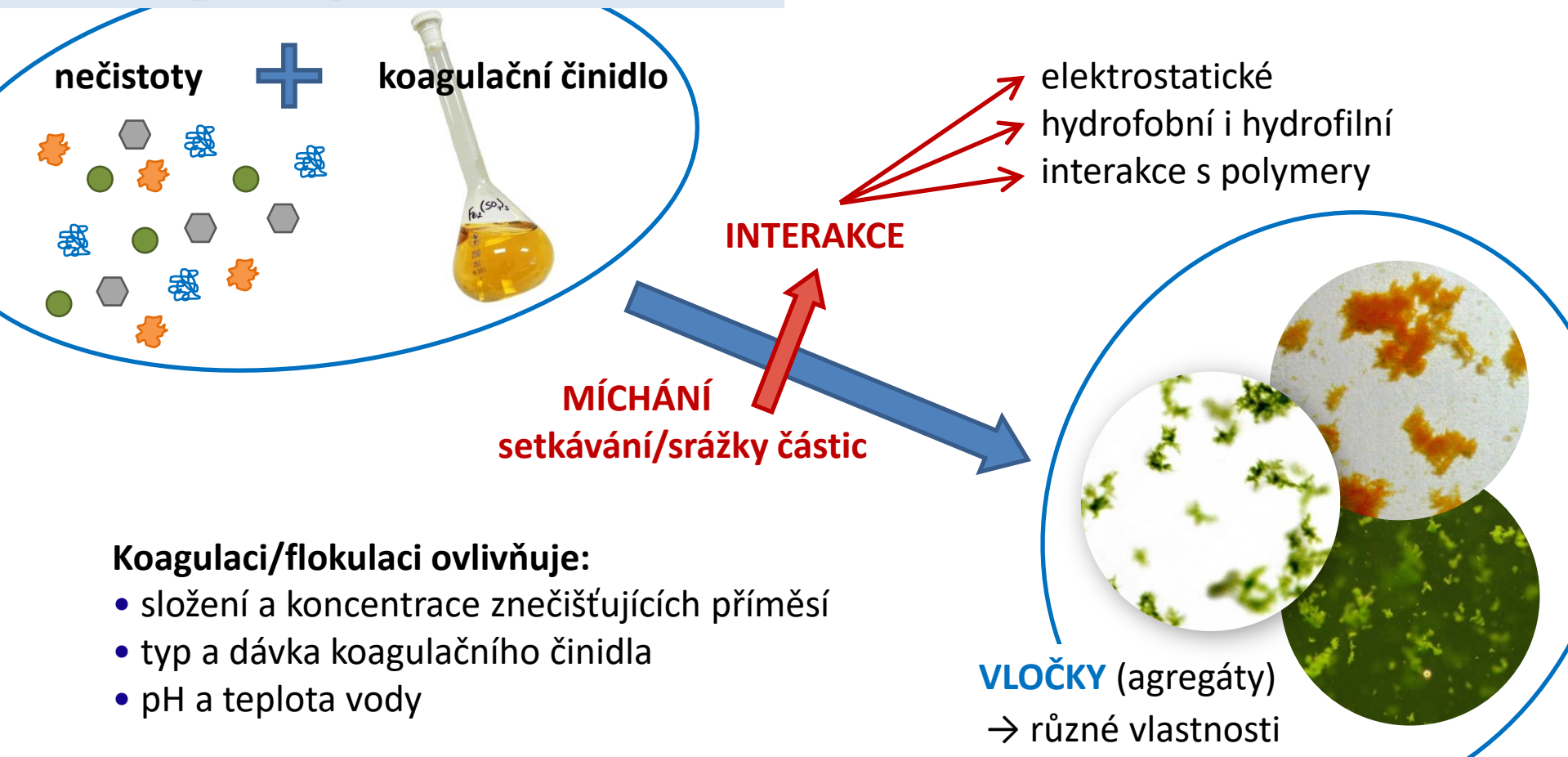
- úprava vody:**
- koagulace = destabilizace dávkováním vhodných činidel
 - flokulace = tvorba agregátů (vloček = angl. *flocs*) dosahovaná mícháním

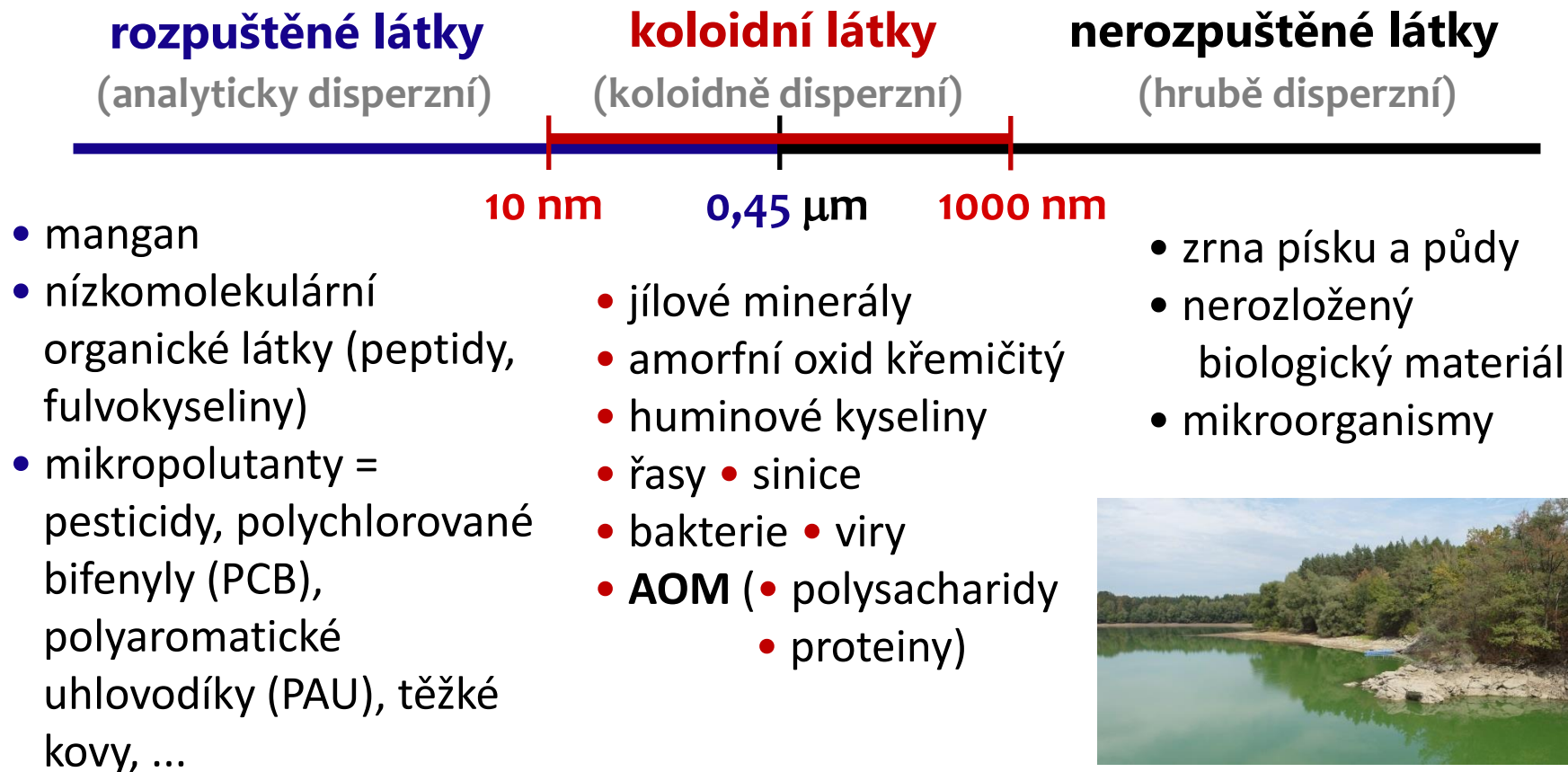
koloidní chemie:

- koagulace = destabilizace částic jednoduchými solemi nebo nábojovou neutralizací
→ malé husté agregáty (*coagula*)
- flokulace – dominantním mechanismem = tvorba polymerních můstků
→ větší a méně husté agregáty (*flocs*)

česká literatura:

- koagulace = celý proces tvorby suspenze při úpravě vody





Kinetická (sedimentační) stabilita

= schopnost uchovávat rovnoměrné rozdělení částic v celém objemu

= **odolnost částic vůči působení gravitačního nebo odstředivého pole** při nezměněném stupni disperzity

- **hrubé disperze** (nízký s. d.)
= kineticky **nestálé**, sedimentují
- **analytické disperze** (vysoký s. d.)
= kineticky vysoce **stálé**, nesedimentují
- **koloidní disperze** = přechodné, mezi

Agregátní stabilita

= **schopnost disperzního systému zachovávat stupeň své disperzity**

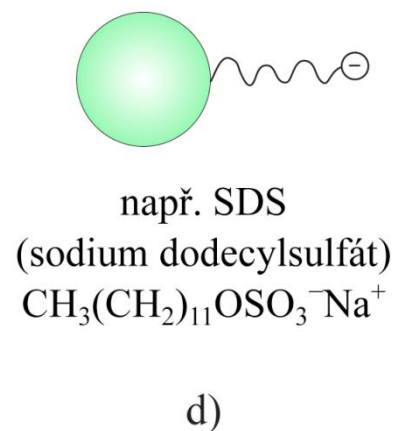
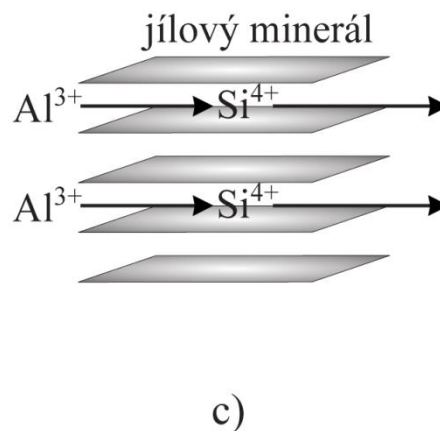
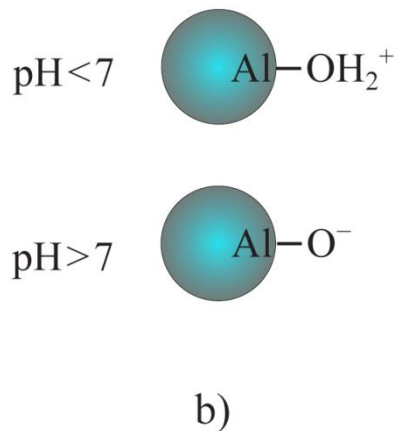
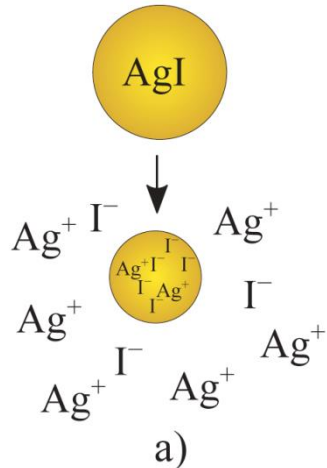
= schopnost odolávat procesům, které vedou k agregaci

– určena povahou **interakcí** při srážkách částic – převažují-li:

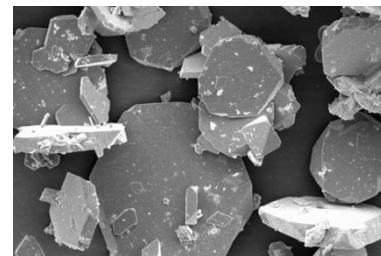
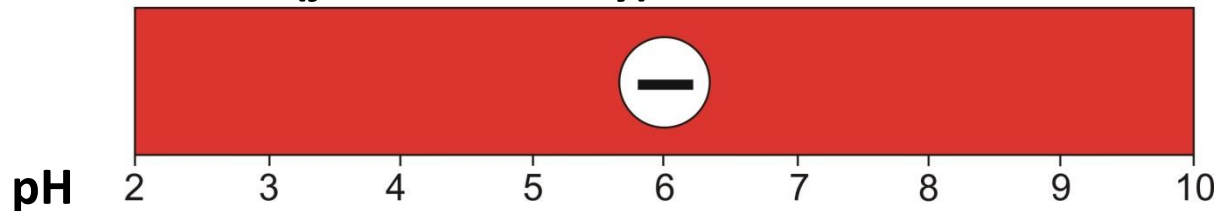
- **přitažlivé síly** → **agregace**
- **odpudivé síly** → systém zůstává **dispergovaný**

- většina částic obsažených ve vodě nese **povrchový náboj**
- **charakter a velikost náboje** určuje **povahu a míru interakcí** mezi částicemi
= ovlivňuje jejich **agregátní stabilitu**
- původ náboje dán:

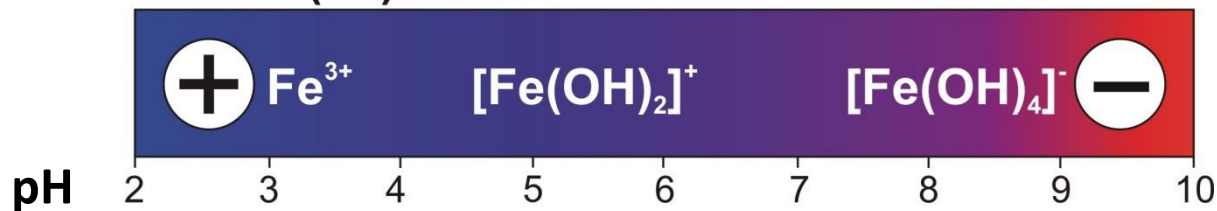
a) rozpouštěním iontů **b) povrchovou ionizací** **c) izomorfní substitucí** **d) specifickou adsorpcí iontů**



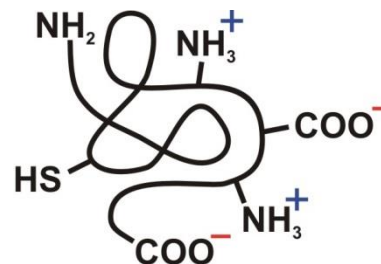
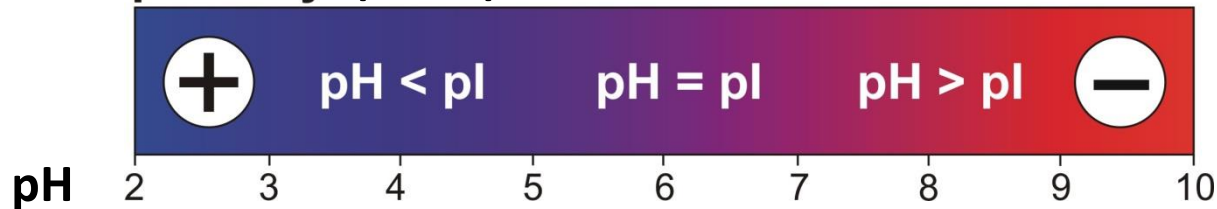
kaolin (jílové minerály)



činidlo (Fe)



proteiny (AOM)



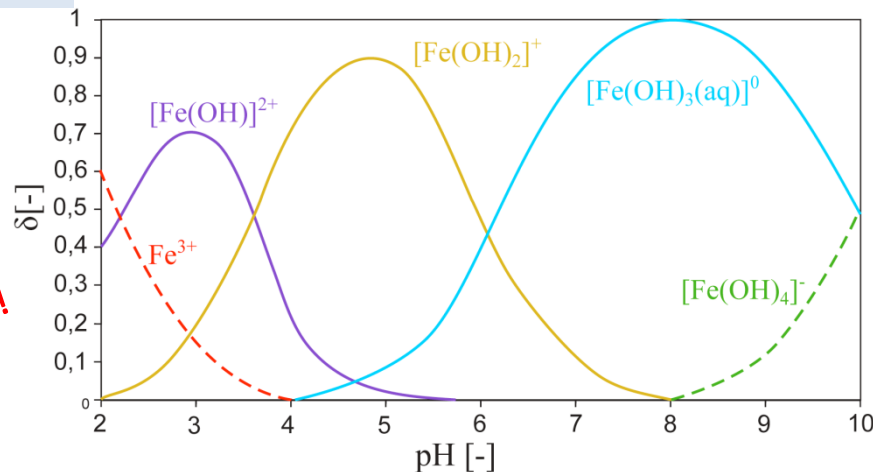
= soli Al a Fe

– ve vodě **hydrolyza** solí Fe^{3+} (Al^{3+}):

$\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{monohydroxokomplexy}$

$\rightarrow \text{polyhydroxokomplexy} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{3H}^+$

snížení pH !!!



nutná kontrola pH !!!

→ pro zvýšení pH (alkalizaci):

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (vápno) = vápenné mléko (suspenze)
nebo **vápenná voda** (roztok), případně **NaOH** ,
 NaHCO_3 nebo Na_2CO_3 (soda)

→ pro snížení pH (okyselení): **H_2SO_4**

- ✓ síran železnatý **$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$**
- ✓ chlorid železitý **$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**
- ✓ chlorsíran železitý **FeClSO_4**
- ✓ síran železitý **$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$**
- ✓ síran hlinitý **$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$**
- ✓ hlinitan sodný **NaAlO_2**

- ✓ **polyaluminium chlorid (PAC, PACI)**
= nejpoužívanější
- ✓ **polyaluminium sulfát (PAS)**
- ✓ **síran polyželezitý (polyferric sulphate – PFS)**

– vznikají částečnou polymerizací Fe a Al solí
=> obsahují produkty hydrolýzy Fe/Al = kladně nabitě polynukleární komplexy

– příprava – dávkováním louhu k Fe/Al soli
v určitém poměru:

molární poměr $[\text{OH}]/[\text{Al/Fe}]$ = bazicita



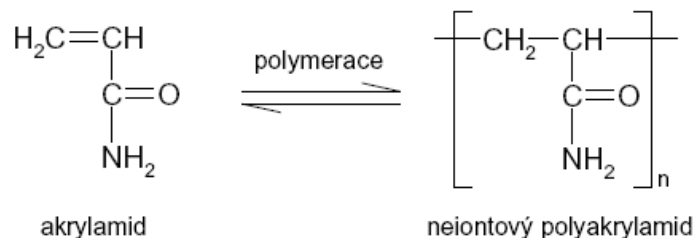
Item Type					
	Appearance	Al_2O_3	Basicity	Insoluble	Types
PAC-01	White powder	28-30%min	45-55%	0.3% max	Spray dried
PAC-02	Light yellow powder		45-85%	0.5% max	Spray dried
PAC-031	Yellow powder		50-90%	1.5% max	Spray dried
PAC-L	Colorless to light yellow liquid	5-18%	40-85%	0.5%max	Liquid type

= typické hydrofilní koloidy rozpustné ve vodě o MH = $10^4 - 10^7$

= také pomocná agregační činidla

- aniontové
- kationtové
- amfolytické
- neiontové

vznik
disociací
funkčních
skupin



- přírodní

semena Moringy olejodárné, škroby, guaranové gumy, taniny, chitosan, alginát sodný

- syntetické

polyakrylamid a jeho kopolymery s kyselinou polyakrylovou, kvartérní amoniové sloučeniny - např. poly-DADMAC, polyethyleniminy, aj.

- aktivovaný oxid křemičitý

= aniontový polyelektrolyt – příprava neutralizací vodního skla Na_2SiO_3 kyselinou sírovou → amorfní oxid křemičitý

- van der Waalsovy síly

- elektrická dvojvrstva

elektrostatické interakce

(společné působení popisuje **DLVO** teorie)

- hydrofobní interakce

- hydratační interakce

solvatační (strukturní) interakce

- stérické interakce

- polymerní můstky

- depleční interakce

interakce s polymery

= univerzální přitažlivé síly krátkého dosahu, mezi všemi atomy, molekulami, ionty, koloidními částicemi i makro-objekty

– tři typy interakcí dipól-dipól (=> elektrostatická podstata):

- **Keesomovy-vdW (orientační) síly** = interakce mezi polárními molekulami, tj. dvěma **permanentsními dipóly**
- **Debyeovy-vdW (indukční) síly** – **permanentsní dipól indukuje opačný dipól** v druhé molekule
- **Londonovy-vdW (disperzní) síly** = interakce **indukovaný dipól – indukovaný dipól**, mezi všemi atomy a molekulami vč. neutrálních (CO_2), **nulový průměrný dipólový moment**, ale **nenulový okamžitý dipólový moment**

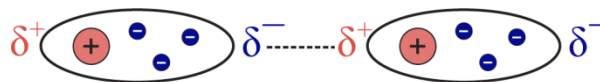
Polarizace neutrálních atomů



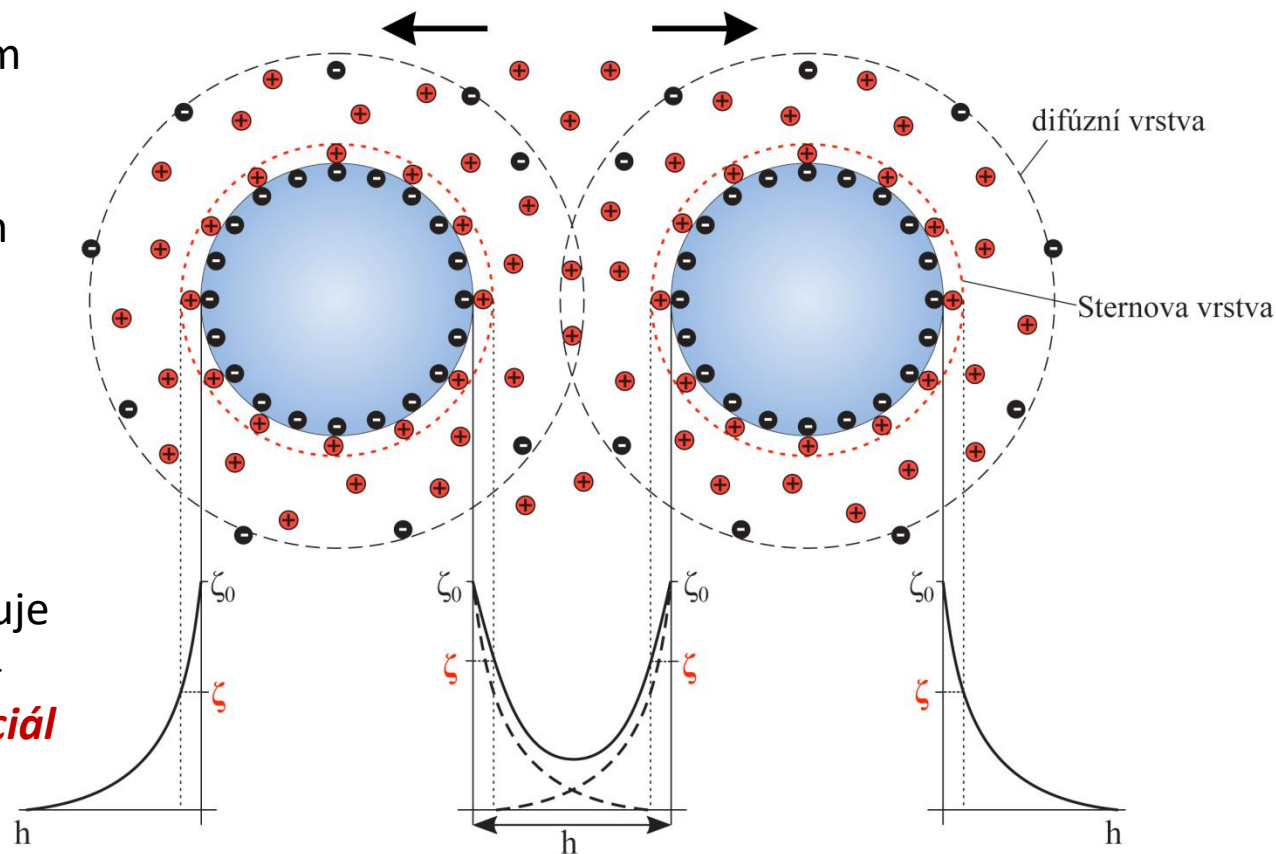
symetrická distribuce

asymetrická distribuce

Londonova-van der Waalsova interakce



- **povrchový náboj** (především hydrofobních) částic – vyrovnáván ekvivalentním množstvím opačně nabitých iontů (= **protiiontů**)
- **náboj koloidní částice + obal protiiontů = elektrická dvojvrstva**
- **pohybové rozhraní** – odděluje Sternovu a difúzní vrstvu → tzv. **elektrokinetický potenciál** (**ζ -potenciál**)



Derjaguin a **Landau** (1941) + **Verwey** a **Overbeek** (1948)

– popisuje koagulaci (destabilizaci) nabitých koloidních částic stabilizovaných elektrickou dvojvrstvou pomocí elektrolytů opačného náboje

= **balance vzájemného působení přitažlivých van der Waalsových a odpudivých elektrostatických sil**

$$E = E_{el} + (-E_{vdW})$$

POZOR! Při použití hydrolyzujících Al/Fe solí tvořících sraženinu (tj. při úpravě vody) se tento mechanismus destabilizace NEUPLATŇUJE !!!

„velké“ vzdálenosti částic

=> rozpouštědlo = kontinuum

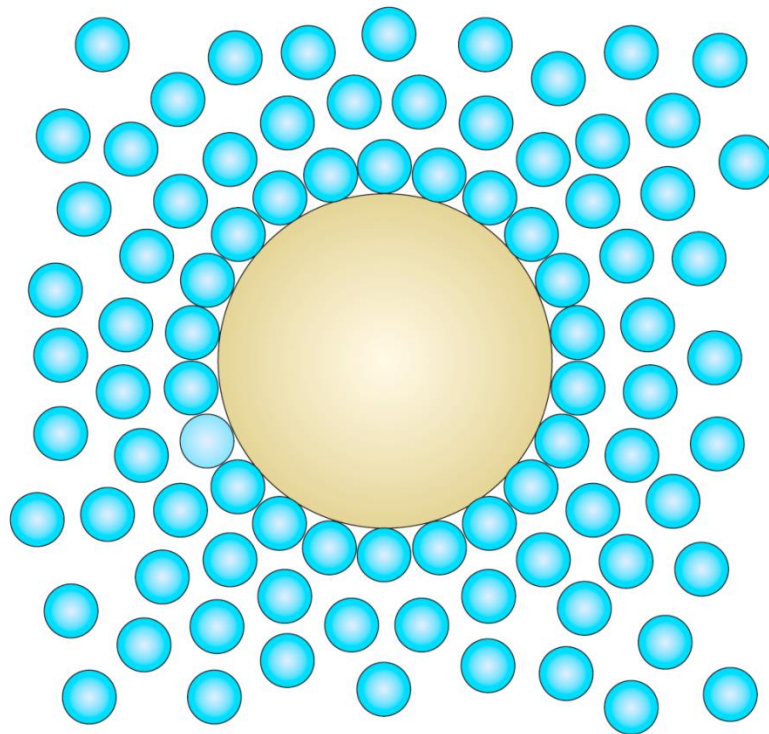
=> vdW a elektrostatické interakce

„malé“ vzdálenosti částic

=> diskrétní charakter kapaliny

=> molekuly rozpouštědla mají tendenci se v blízkosti cizího povrchu uspořádávat

= tvorba vrstev paralelních s povrchem

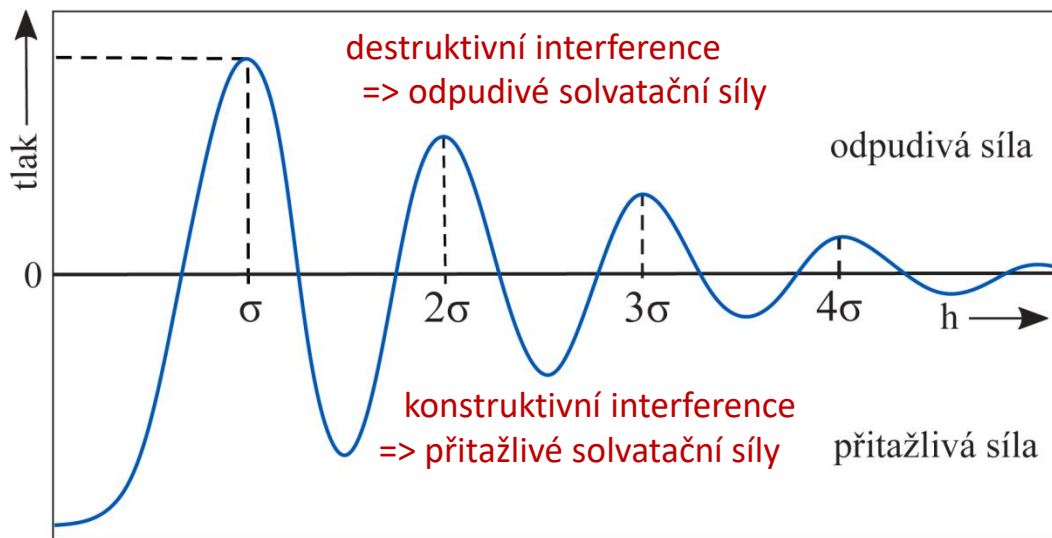
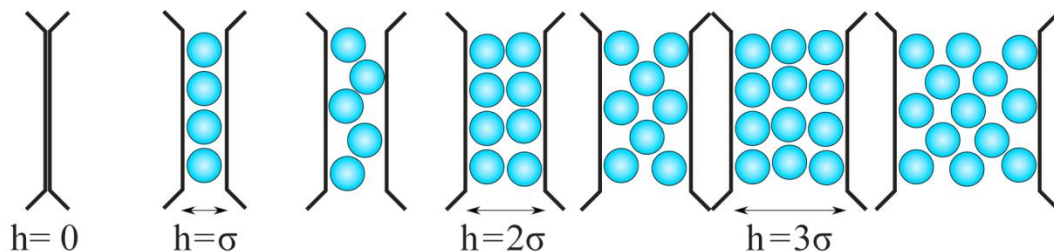


= důsledek porušení nebo změny uspořádání molekul rozpouštědla při přiblížení dvou povrchů

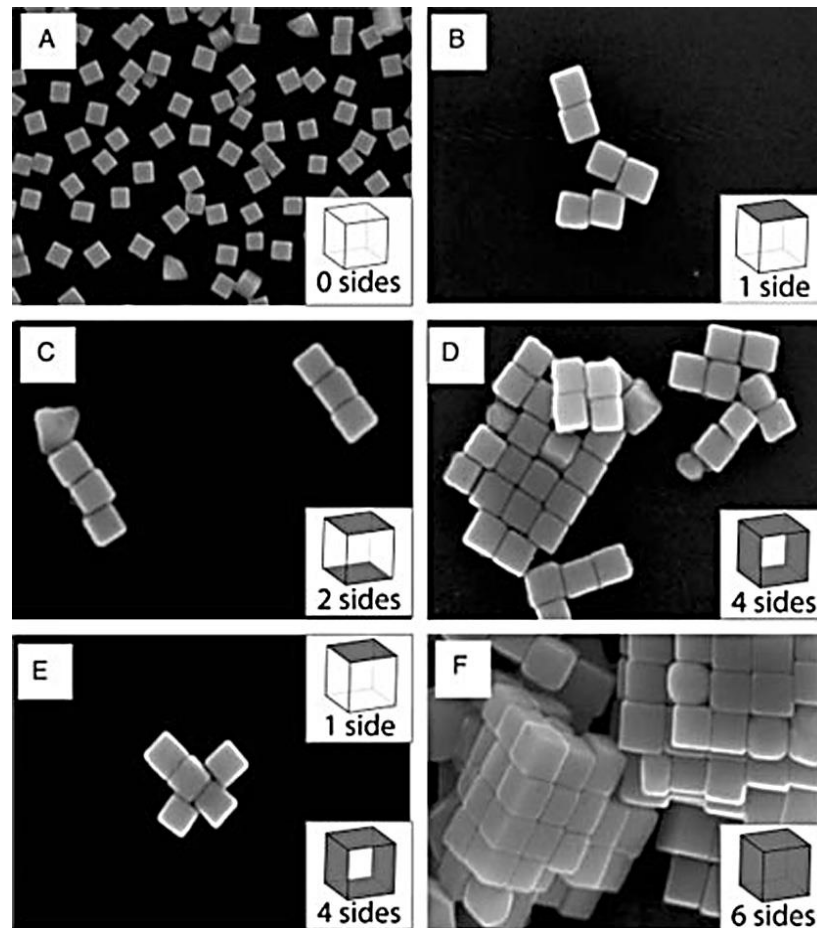
- při překrytí solvatačních vrstev dvou částic dochází k interferenci oscilačních změn hustoty molekul rozpouštědla

Hydrofilní povrchy → **odpudivé hydratační síly**

Hydrofobní povrchy → **přitažlivé hydrofobní síly**

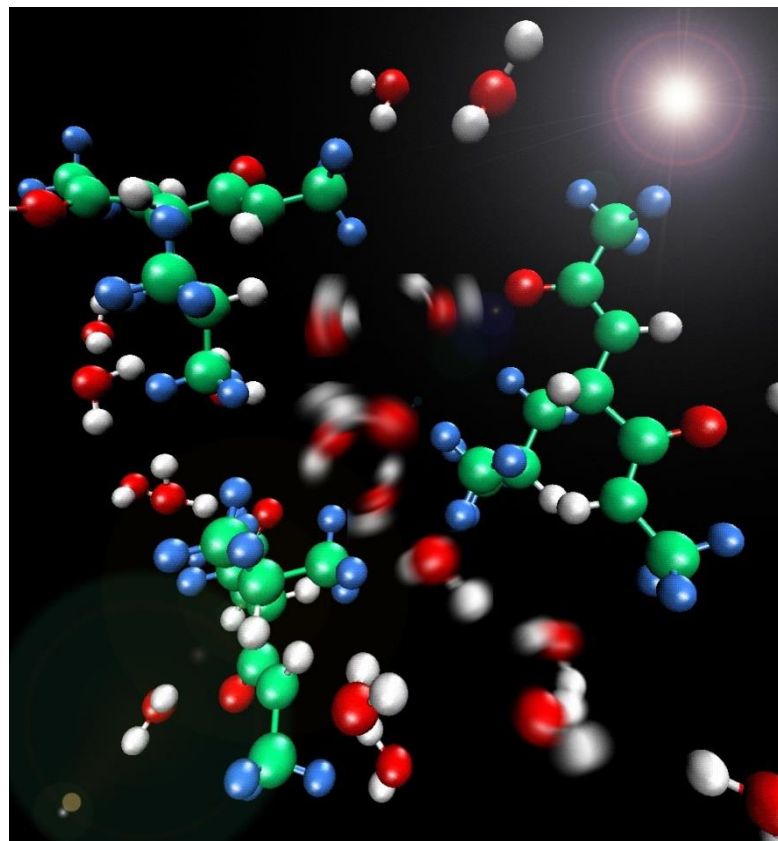


- *hydrofobní částice ve vodě* –
neposkytují vazebné místo pro vodíkovou vazbu => brání přirozené tendenci vody se strukturně uspořádat => entropicky nevýhodná orientace molekul vody
 - pro snížení celkové volné energie systému – **migrace molekul vody z blízkosti hydrofobních částic do volného objemu**
- => vzniká **přitažlivá „síla“ mezi hydrofobními povrchy**



SEM snímky nanokrychlíček stříbra s různým počtem hydrofobních stěn

- vzniká, pokud jsou molekuly vody silně vázány k povrchu obsahujícímu hydrofilní skupiny (tj. iontové, amfiontové nebo H-vazebné skupiny)
- je určena **energií potřebnou k porušení sítě vodíkových vazeb a/nebo k dehydrataci dvou povrchů při jejich vzájemném přiblížení**

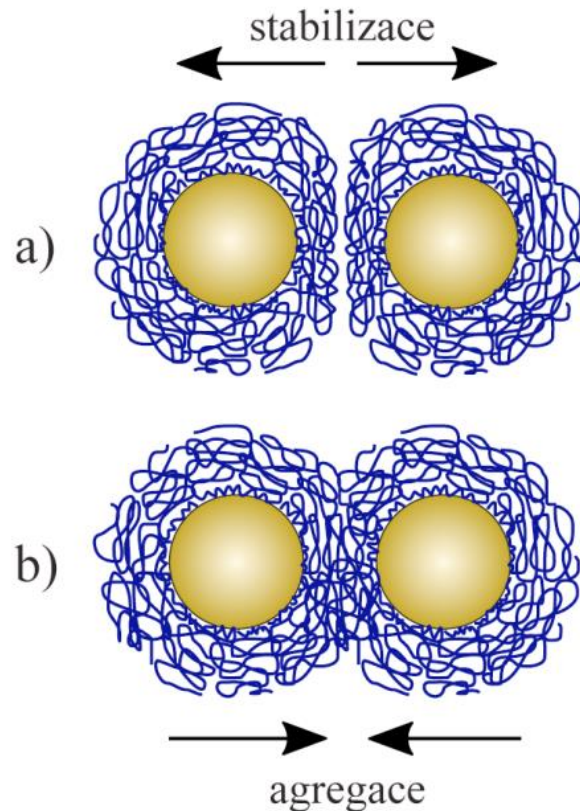


Model hydratace proteinů

- způsobeny polymery, které se **silně adsorbují** (fyzikálně nebo chemicky) na povrchu koloidních částic a současně jsou **rozpustné v disperzním prostředí**

a) dobré rozpouštědlo - preferovány kontakty mezi segmenty polymerů a molekulami rozpouštědla

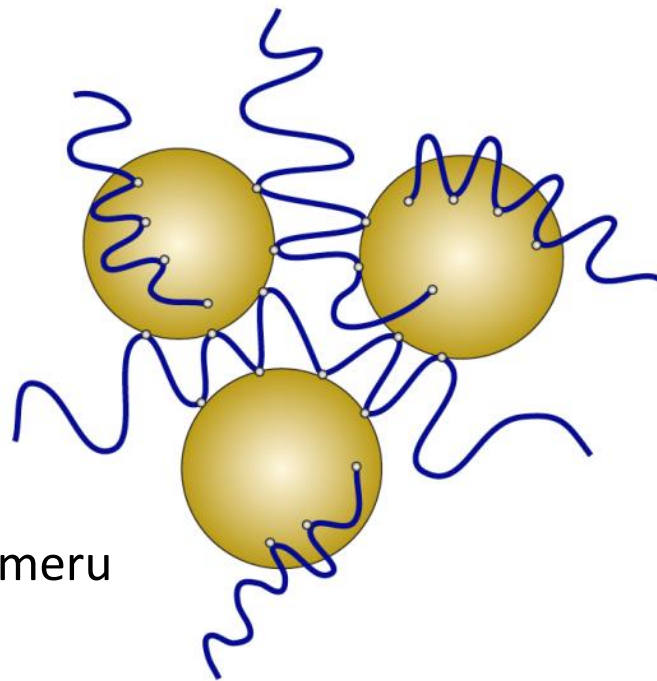
b) špatné rozpouštědlo – preference vzájemných kontaktů mezi segmenty polymerních řetězců



- polymer se adsorbuje zároveň na dvě (nebo více) koloidní částice – **spojení částic** pomocí tzv. **polymerního můstku** => mohou agregovat i částice, které se primárně odpuzují

podmínky tvorby můstků:

- *optimální množství polymeru*
 - příliš nízké koncentrace – nedostatek polymeru
 - vysoké koncentrace => stérická stabilizace
- *dostatečně velký volný povrch částice*
- *přiměřený rozměr* polymerních můstků (překlenutí vzdálenosti, na kterou působí mezičásticové odpudivé síly)

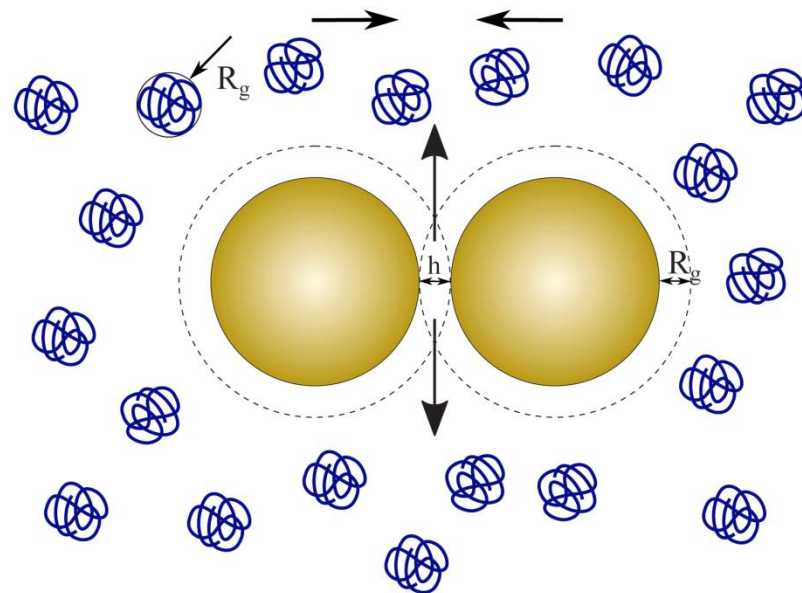


- vznik pokud jsou koloidní částice v roztoku **polymeru, který se na povrchy částic neadsorbuje nebo je jimi odpuzován (*non-adsorbing polymer*)**
- příčiny vzniku nebyly dosud uspokojivě objasněny

- **zjednodušený model:**

$h \gg D_g$ (průměr molekuly polymeru) $\Rightarrow$ **nulová výsledná síla**

$h < D_g \Rightarrow$ vytěsňování polymeru z mezery mezi částicemi $\Rightarrow$ snížení osmotického tlaku v mezeře vzhledem k okolnímu prostoru $\Rightarrow$ rozdíl osmotických tlaků „odsává“ molekuly rozpouštědla z mezery – vzniká **přitažlivá síla** (dosah přibližně roven poloměru polymeru R_g)



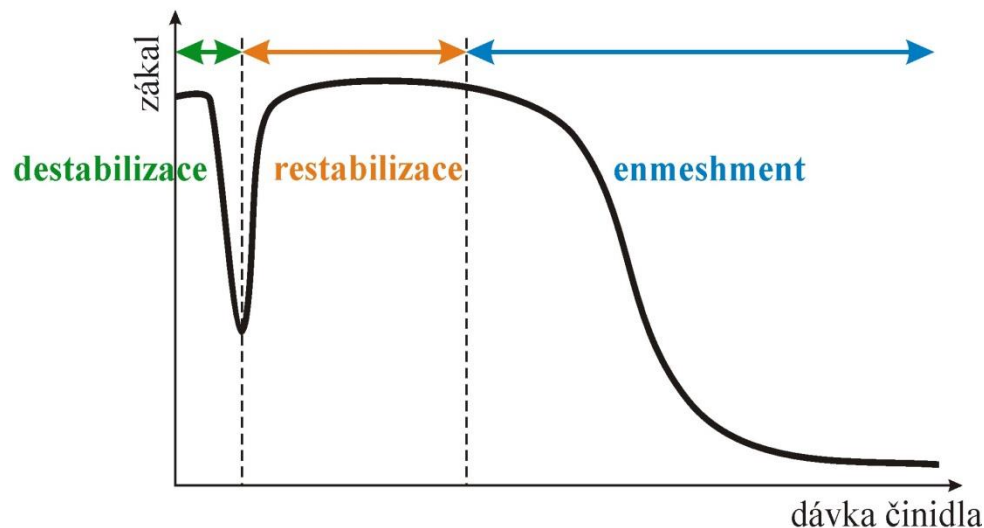
- **stabilizovaný systém** – *převažují odpudivé síly* (např. elektrická dvojvrstva, stérické interakce, hydratace)
- **destabilizace** = taková **změna systému**, kdy se *začnou projevovat (převládat) přitažlivé síly* (např. vdW síly, hydrofobní efekty, tvorba polymerních můstků)
- při přiblížení (setkání) částic pak může docházet k **agregaci**

MECHANISMY:

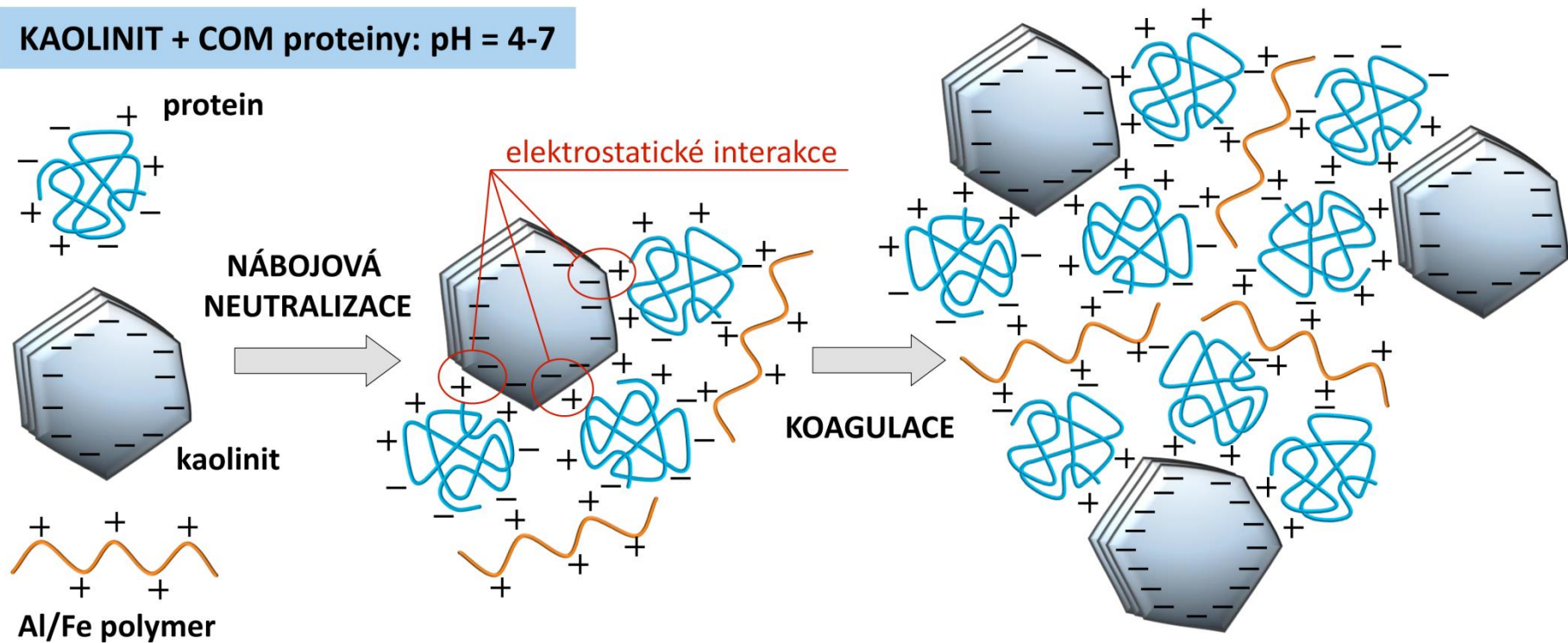
- o potlačení elektrické dvojvrstvy – při úpravě vody se téměř neuplatňuje
- o nábojová neutralizace
- o zachycování částic nečistot ve sraženině (enmeshment, sweep coagulation)
- o destabilizace polymery

- mnoho **koloidních částic** v surové vodě – při běžném pH – **negativní náboj** => **elektrostatické interakce** – přitahování **kladně nabitých produktů** hydrolýzy Al/Fe solí = tzv. **specifická adsorpce**
- **náboj** povrchu koloidu – postupně **neutralizován** => snižování energetické bariéry na hranici dosahu vdW sil => **destabilizace**

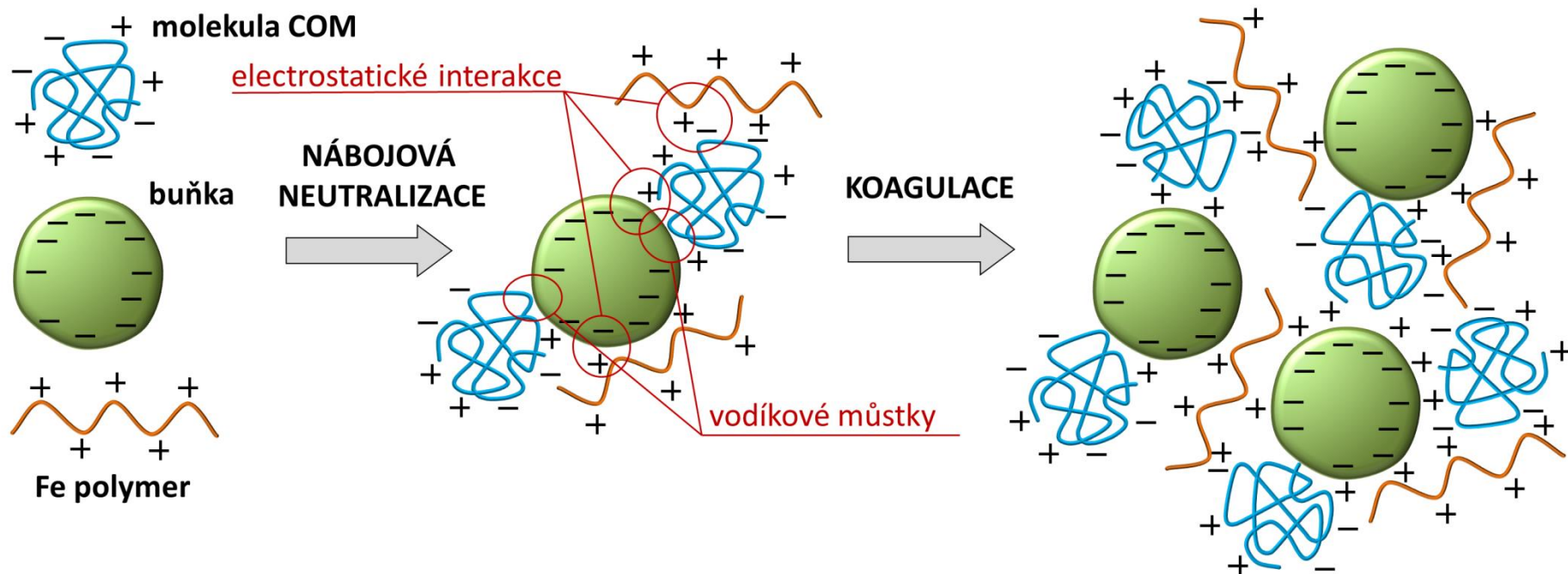
- další zvyšování dávky + další adsorpce
=> koloidní částice získávají kladný náboj
=> opětovné zvýšení energetické bariéry
=> **restabilizace**



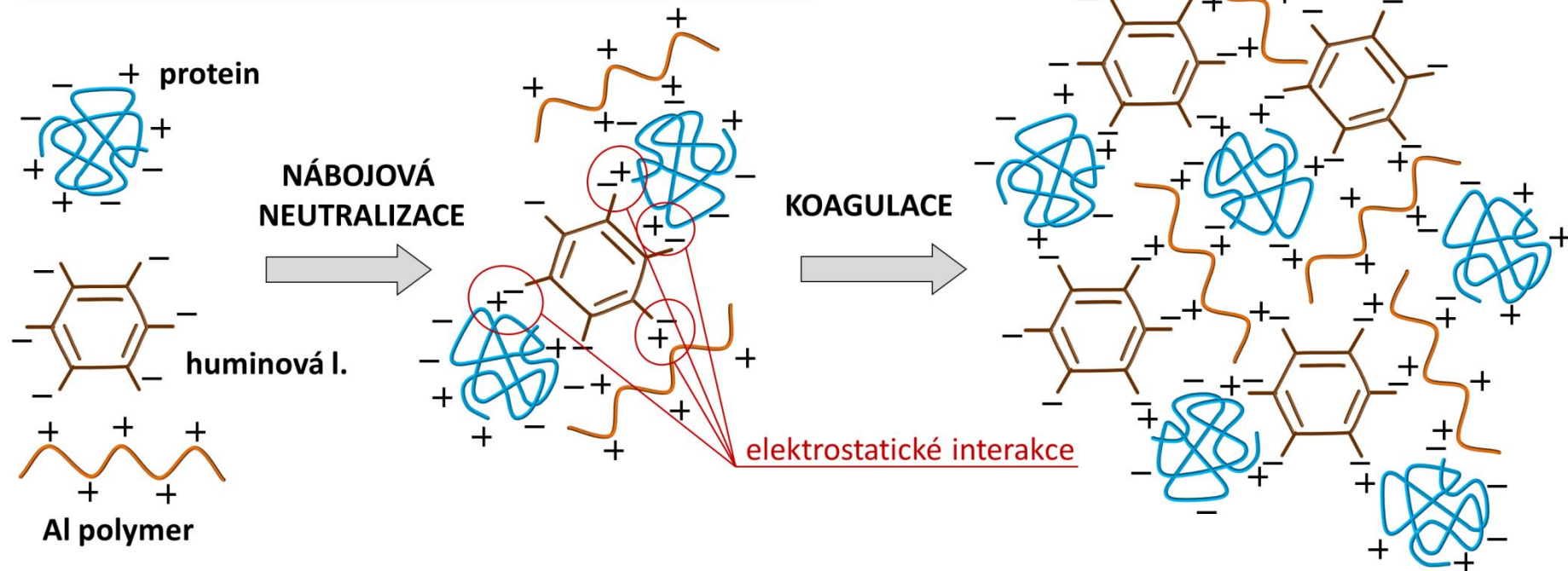
KAOLINIT + COM proteiny: pH = 4-7



BUŇKY + COM: pH = 5-6.5



HUMINOVÉ LÁTKY + COM proteiny: pH = 5.5-6.2



= zachycování částic nečistot ve sraženině

- při použití vysokých dávek hydrolyzujících činidel
(dávky > rozpustnost amorfních hydroxidů Al a Fe)

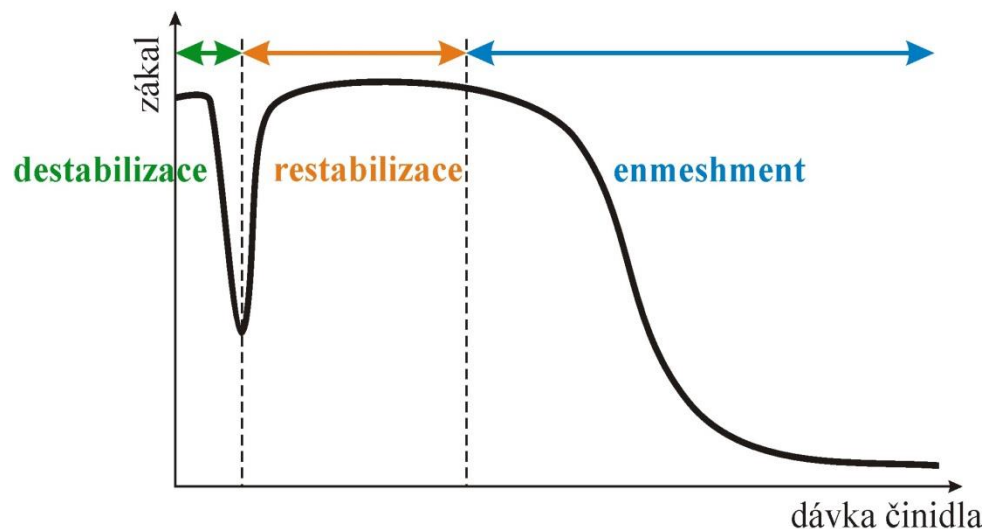
výhoda: tento způsob „destabilizace“

nezávisí na typu nečistoty

(bakterie, jíly, organické látky aj.)

nevýhoda: *velká produkce kalu*

tvořeného především amorfními
hydratovanými oxidy kovů

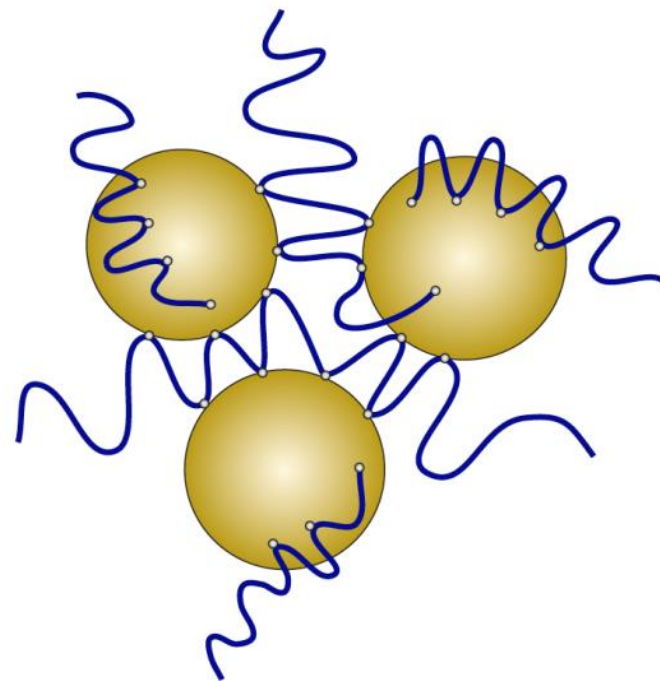


- **kombinace různých mechanismů**, z nichž jeden může převládat
- vždy – **adsorpce polymeru na koloidní částici** (pomocí elektrostatických, vdW, hydrofobních aj. sil)

1) tvorba polymerních můstků

= **polymer bridging**

- především v případě neiontových polymerů



2) polymer a koloid = opačně nabité => elektrostatická adsorpce

a) elektrostatický „patch“ model

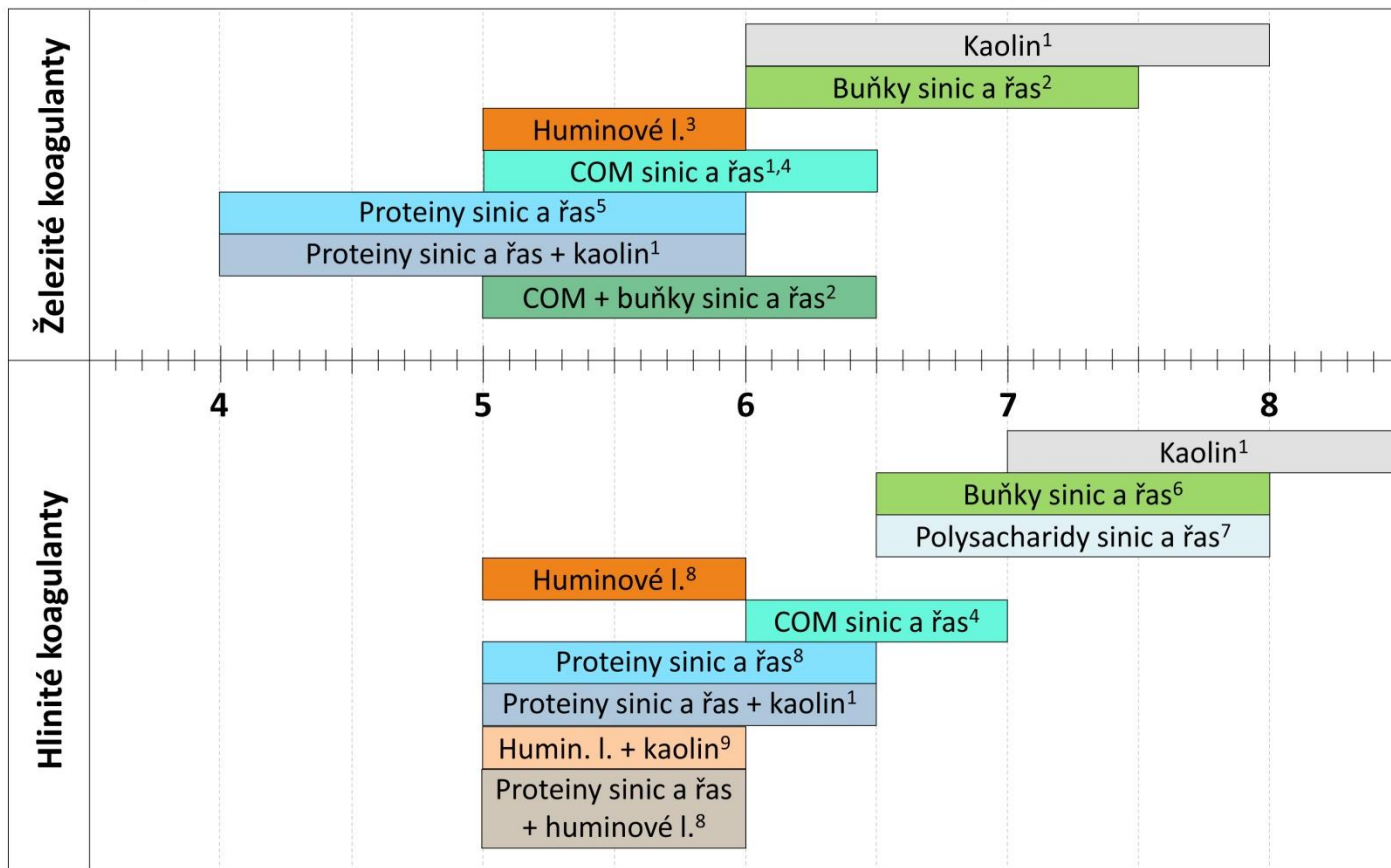
- nízké koncentrace polymeru – **adsorpce polymeru pouze na část povrchu (*patch*)** opačně nabité koloidní částice
- pokud ***nábojová hustota polymeru > koloidu*** => místo s polymerem (***patch***) – opačný náboj než zbytek koloidu – další elektrostatická interakce s opačně nabitým koloidem (neobsahuje polymer) => **spojování částic ve větší celky**

b) nábojová neutralizace – stechiometrický poměr nábojů koloidu a polymeru (nadbytek polymeru – restabilizace = důsledek opětovného získání náboje nebo stérických efektů)

**Hodnota pH
zásadně
ovlivňuje
účinnost
koagulace!!!**

Proč?

**pH určuje
náboj a formy
nečistot
i činidel**



Agregace = vzájemné spojování destabilizovaných částic ve větší celky, případně jejich adheze na povrchu jiných materiálů

Částice mohou agregovat, pokud vykazují *adhezní schopnosti* a pokud je umožněno jejich *vzájemné setkání*, dochází-li k jejich *srážkám*.

agregace podle transportních mechanismů:

- **perikinetická** – způsobená *Brownovým pohybem*
- **ortokinetická - vertikální** – způsobená gravitační silou = *diferenční sedimentace*
- **ortokinetická - horizontální** – způsobená *pohybem/prouděním kapaliny* (mícháním)

kinetika procesu – popisuje agregaci pomocí rychlostí změn počtu agregátů

$$J_{ij} = \alpha k_{ij} n_i n_j$$

J_{ij} = frekvence srážek (*collision frequency*) na jednotku objemu za jednotku času

α = účinnost srážek (nebo také *koefficient účinnosti agregace*)

k_{ij} = *koefficient rychlosti srážek (collision rate coefficient)* = rychlostní konstanta

n_i a n_j = počet agregátů (na jednotku objemu) o velikosti i a j , přičemž „velikostí“ je zde míněn počet primárních částic tvořících agregát (= i -násobné a j -násobné agregáty)

Díky rozdílným interakcím mezi částicemi, ne všechny srážky vedou k tvorbě agregátů → **faktor účinnosti srážek α** :

silné odpudivé síly => ze žádné srážky nevznikne agregát => **$\alpha \approx 0$**

převažují přitažlivé síly a nevyskytuje energetická bariéra => **$\alpha \rightarrow 1$**

– transportním mechanismem **Brownův (difúzní) pohyb**

Smoluchowského rovnice - popis frekvence srážek způsobených Brownovým pohybem, za předpokladu jedné centrální částice, do které ostatní částice naráží

$$J_{ij} = 4\pi R_{ij} D_{ij} n_i n_j$$

$$D_i = \frac{k_B T}{6\pi R_i \eta}$$

$$D_j = \frac{k_B T}{6\pi R_j \eta}$$

$$k_{ij} = \frac{2k_B T}{3\eta} \frac{(R_i + R_j)^2}{R_i R_j} \quad (\text{pro } R_i \sim R_j) = 4$$

J_{ij} - **frekvence srážek**, tj. celkový počet srážek mezi částicemi i a j v jednotkovém objemu za jednotku času,

R_{ij} - **limitní/efektivní poloměr (poloměr srážky)**, tj. vzdálenost středů částic, při které dojde k jejich kontaktu ($R_{ij} = R_i + R_j$)

D_{ij} - **vzájemný difúzní koeficient** ($D_{ij} = D_i + D_j$)

k_B - Boltzmanova konstanta,

T - absolutní teplota

η - dynamická viskozita kapaliny

$$k_{ij} = \frac{8k_B T}{3\eta}$$

Pro částice přibližně stejné velikosti platí, že koeficient rychlosti srážek k_{ij} je téměř nezávislý na jejich velikosti!

= **diferenční sedimentace** – pohyb částic vyvolán tíhovou silou

Stokesův vztah pro **sedimentační rychlost** u_s kulové částice:

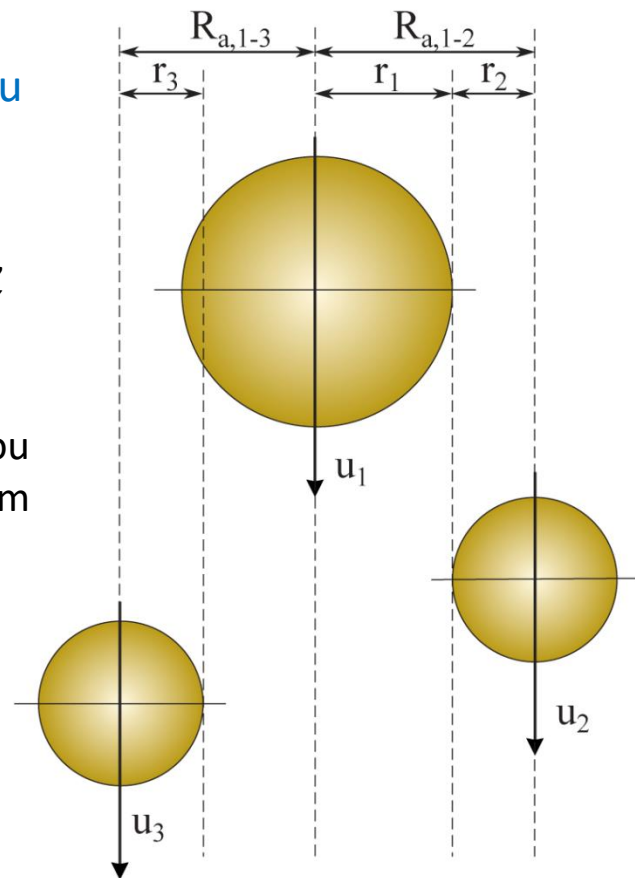
$$u_s = \frac{2gR^2}{9\eta}(\rho_s - \rho_f)$$

R - poloměr částice, ρ_s - hustota částice,
 ρ_f - hustota vody, g - gravitační zrychlení
 η - dynamická viskozita vody

Objem vztažený k časovému intervalu, kdy může dojít k setkání dvou částic, je dán součinem efektivní plochy tvaru kruhu s průměrem $R_i + R_j$ ($S = \pi(R_i + R_j)^2$) a rozdílu rychlostí dvou částic ($u_i - u_j$)

$$\frac{V}{t} = \pi(R_i + R_j)^2(u_i - u_j) = k_{ij}$$

$$k_{ij} = \frac{2\pi g}{9\eta}(\rho_s - \rho_f)(R_i + R_j)^3(R_i - R_j)$$

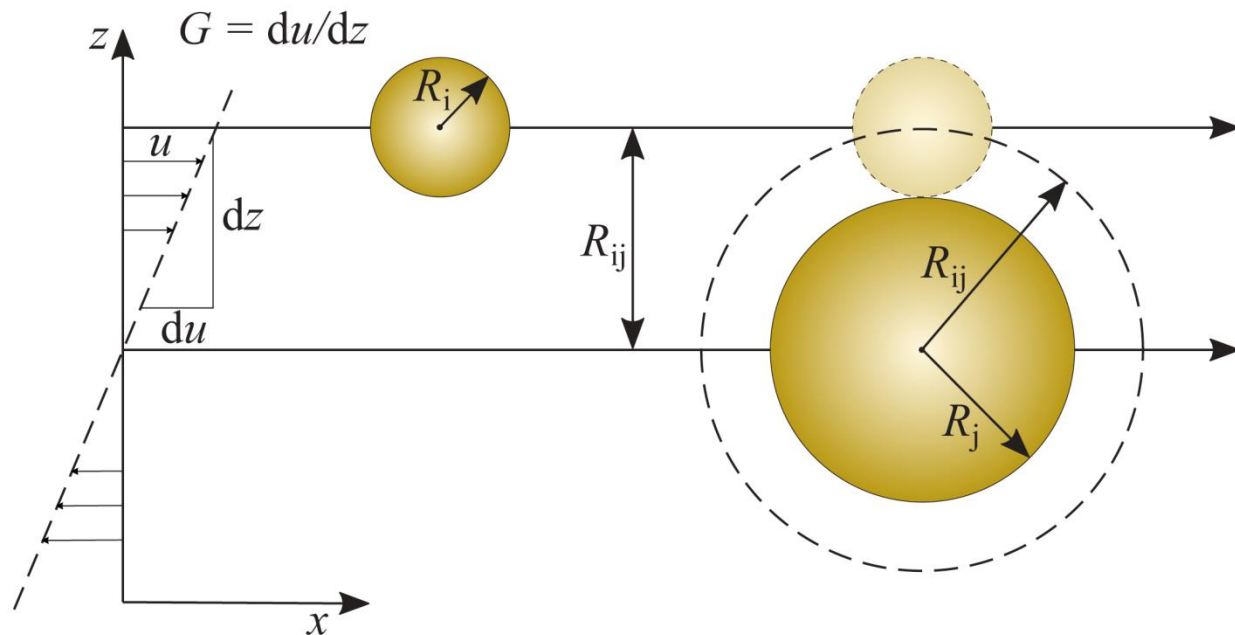


- suspenze vystavena **smykovému napětí** (**smyku - shear**), např. při **míchání nebo proudění** => transport částic ovlivňuje na rychlost jejich srážek

Smoluchovski (1916, 1917):

- 1) kulovité částice
- 2) rovnoměrný laminární smyk (proudění)

$$k_{ij} = \frac{4}{3} G (R_i + R_j)^3$$



Smoluchowského ortokinetická rovnice – laminární proudění

reálné míchací systémy – turbulentní proudění => hodnota gradientu rychlosti není ve všech místech míchaného objemu stejná – **lokální gradienty rychlosti**

=> v praxi hodnota G nahrazena tzv. **středním gradientem rychlosti $\bar{G}$**

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{\langle \varepsilon \rangle}{\nu}} = \sqrt{\frac{P}{V\eta}} = \sqrt{\frac{\Delta p}{\eta t}}$$

mechanické míchání

hydraulické míchání

$\langle \varepsilon \rangle$ - střední rychlost disipace kinetické energie

ν - kinematická viskozita

P - příkon míchadla

V - objem kapaliny (vody)

η - dynamická viskozita

t - čas

Δp - tlaková ztráta

Zjednodušující předpoklady při popisu kinetiky agregace

- ✓ koeficient účinnosti srážek (kolizní koeficient) $\alpha = 1$,
- ✓ pohyb částic je zapříčiněn laminárním prouděním kapaliny,
- ✓ všechny částice v suspenzi mají stejnou velikost,
- ✓ částice mají kulovitý tvar,
- ✓ nedochází k rozbíjení částic,
- ✓ při kolizi se střetávají vždy pouze dvě částice

Realita

- ✓ koeficient účinnosti srážek (kolizní koeficient) $\alpha < 1$,
- ✓ pohyb částic je zapříčiněn turbulentním prouděním kapaliny,
- ✓ částice v suspenzi mají různou velikost,
- ✓ částice vesměs nemají kulovitý tvar,
- ✓ částice podléhají rozbíjení,
- ✓ při kolizi se střetává různý počet částic

reálné podmínky (**turbulentní proudění**):

$G \neq \text{konst.}$ (prostorově ani časově)

Agregace a rozbíjení agregátů dány poměrem
tečných (F_t) a adhezních (J) sil:

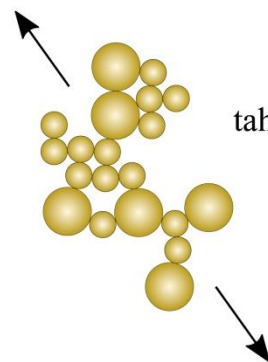
$F_t < J \Rightarrow$ agregace, vytvořené agregáty
odolávají tečným silám

a) $F_t \ll J$ spojení v místě prvního kontaktu
 $\Rightarrow$ agregáty = **porézní, nepravidelné**

b) $F_t \sim J$ posouvání částic v agregátu
do energeticky stabilních pozic
 $\Rightarrow$ **restrukturalizace**
 $\Rightarrow$ agregáty = **kompaktní, pravidelné**

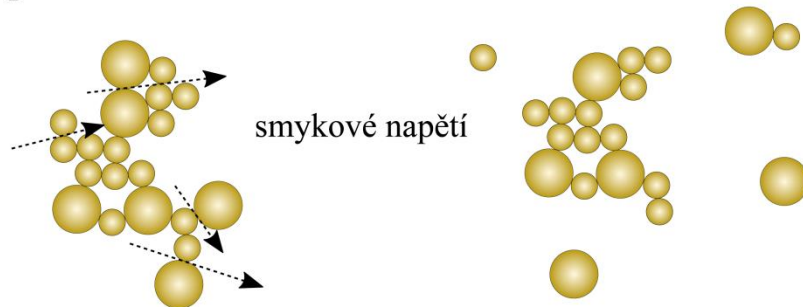
$F_t > J \Rightarrow$ rozbíjení agregátů (různé mechanismy)

1) rozpad agregátů



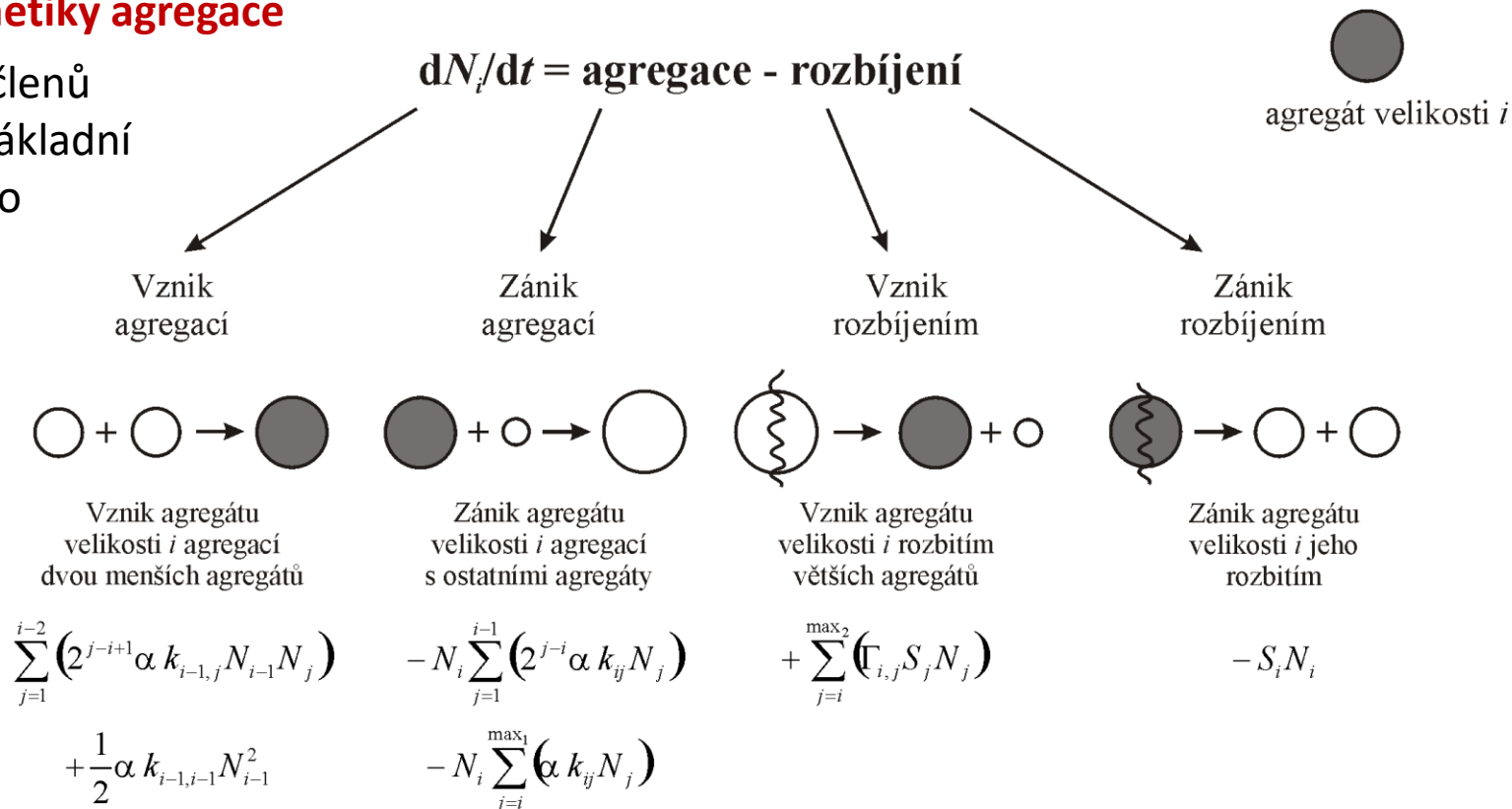
mechanizmy rozbíjení:

2) povrchová eroze



Modelování kinetiky agregace

– např. přidání členů
„rozbíjení“ do základní
Smoluchovského
kinetické
rovnice

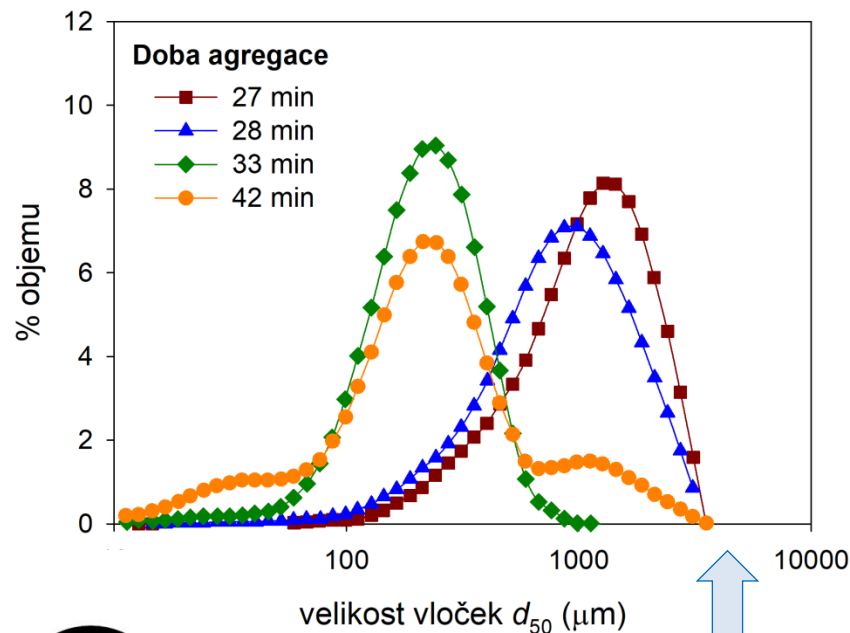
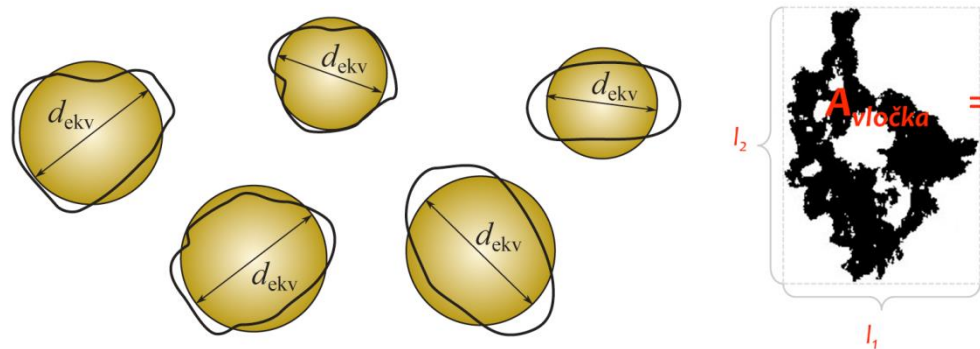


Velikost a velikostní distribuce

Agregáty = shluky částic, nejednoznačně definovaný tvar => **aproximace = koule**

→ **ekvivalentní průměr d_{ekv}**

Určení ekvivalentního průměru částice (agregátu)



Velikostní distribuce vloček v různých časech „růstové křivky“ při $G = 167 \text{ s}^{-1}$. Osa x je v logaritmickém měřítku

Pevnost (odolnost vůči rozbíjení)

– hodnocení pevnosti vloček pomocí:

✓ **koeficient pevnosti vloček γ** (*floc strength coefficient*)

d_{max} = maximální průměr agregátů v systému

C a γ = konstanty

$$d_{max} = C \cdot G^{-\gamma}$$

✓ **pevnostní faktor** (*strength factor* = SF)

d_1 = velikost vloček před rozbitím

d_2 = velikost vloček ihned po ukončení fáze rozbíjení

$$SF (\%) = \frac{d_2}{d_1} \times 100$$

✓ **pevnost vloček σ** (*floc strength, hydrodynamic disturbance*)

ρ_f = hustota vody, ν = kinematická viskozita

ε = lokální rychlost disipace energie na jednotku hmotnosti

d = průměr maximální délky agregátů v daném čase měřený pomocí obrazové analýzy

$$\sigma = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{\rho_f \varepsilon^{3/4} d}{\nu^{1/4}}$$

Hustota a porosita

- vyplývá ze struktury agregátů
- ovlivněna podmínkami jejich tvorby
- ovlivňuje účinnost separace i vlastnosti vodárenských kalů

$$\rho_{ef} = \rho_a - \rho_f = (1 - \varepsilon)(\rho_0 - \rho_f)$$

$$\varepsilon = \frac{V_a - V_p}{V_a} = 1 - \frac{V_p}{V_a}$$

ρ_a = hustota agregátu
 ρ_f = hustota kapaliny
 ρ_0 je hustota primárních částic
 ε je porosita agregátu
 V_a je celkový objem agregátu
 V_p je objem všech primárních částic obsažených v agregátu

Usazovací (sedimentační) rychlost

- určuje se experimentálně
- teoretické stanovení značně nepřesné
- ovlivňuje účinnost separace

VLASTNOSTI AGREGÁTŮ

PŘITAŽLIVÉ SÍLY

dány složením a koncentrací složek agregátů a pH

koagulační činidlo

- dávka (koncentrace)
- typ (= Al/Fe/jiná sůl vs. polymer)
- forma výskytu → náboj (vliv pH)

nečistoty

- koncentrace
- molekulová hmotnost (velikost)
- funkční skupiny → náboj (vliv pH)

TEČNÉ SÍLY

dány parametry míchání

- intenzita míchání (→ gradient rychlosti)
- rozložení tečných sil v míchaném objemu
- doba zdržení v míchané nádrži (= čas agregace)

struktura

velikost

tvar

hustota

SEPARACE AGREGÁTŮ

- SEDIMENTACE • FLOTACE • FILTRACE

různé separační procesy vyžadují agregáty s různými vlastnostmi

1) Vliv složení vloček – nečistot obsažených ve vodě a použitého koagulačního činidla

PACl < Al < Fe < Ti < organické polymery



velikost vloček roste

čím je vyšší
koncentrace činidla,
tím jsou vločky větší

jíly (kaolinit) < NOM (huminy) < AOM/COM (proteiny, polysacharidy)



velikost vloček roste

Velikost vloček při $G = 40 \text{ s}^{-1}$

K = kaolinit

Al/Fe = koagulační činidlo

COM = Cellular Organic Matter

K+Al



K+Fe



COM+Al



K+COM+Al



COM+Fe



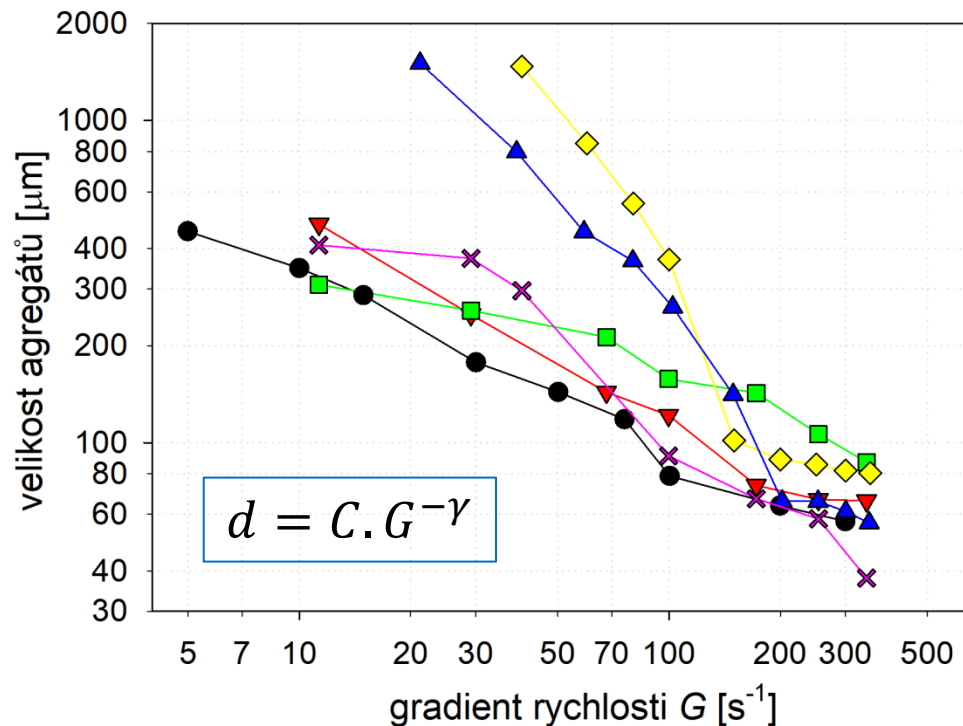
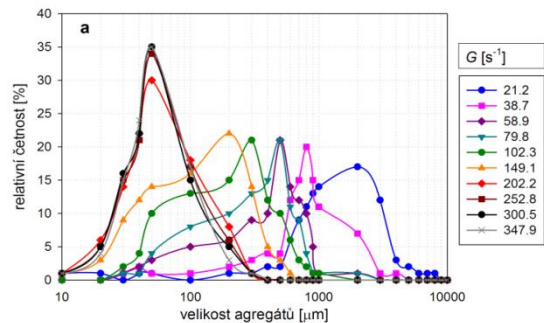
K+COM+Fe



2) Vliv gradientu rychlosti (intenzity míchání)

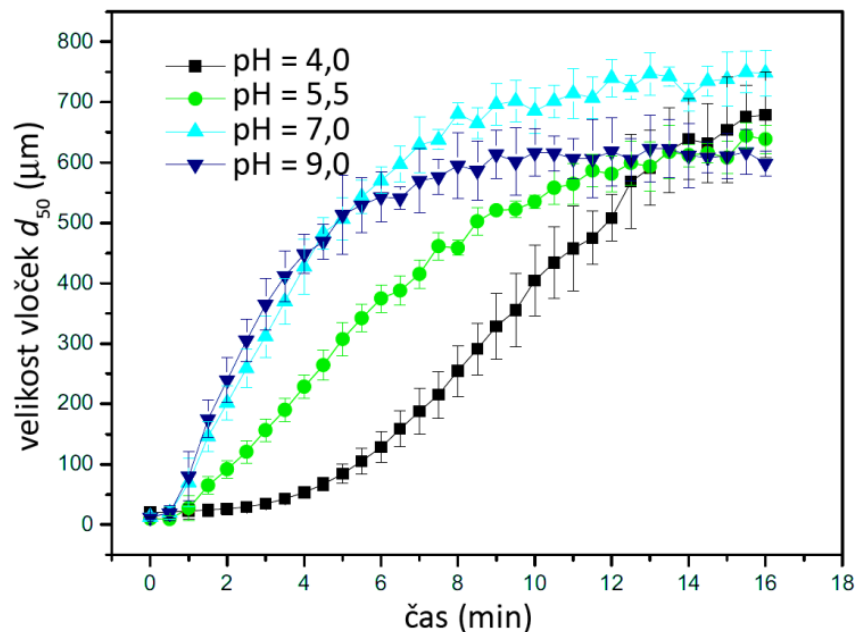
s rostoucím
gradientem rychlosti:

- **klesá** průměrná **velikost** agregátů
- **velikostní homogenizace** agregátů
- kompaktnější agregáty
- **roste hustota** agregátů

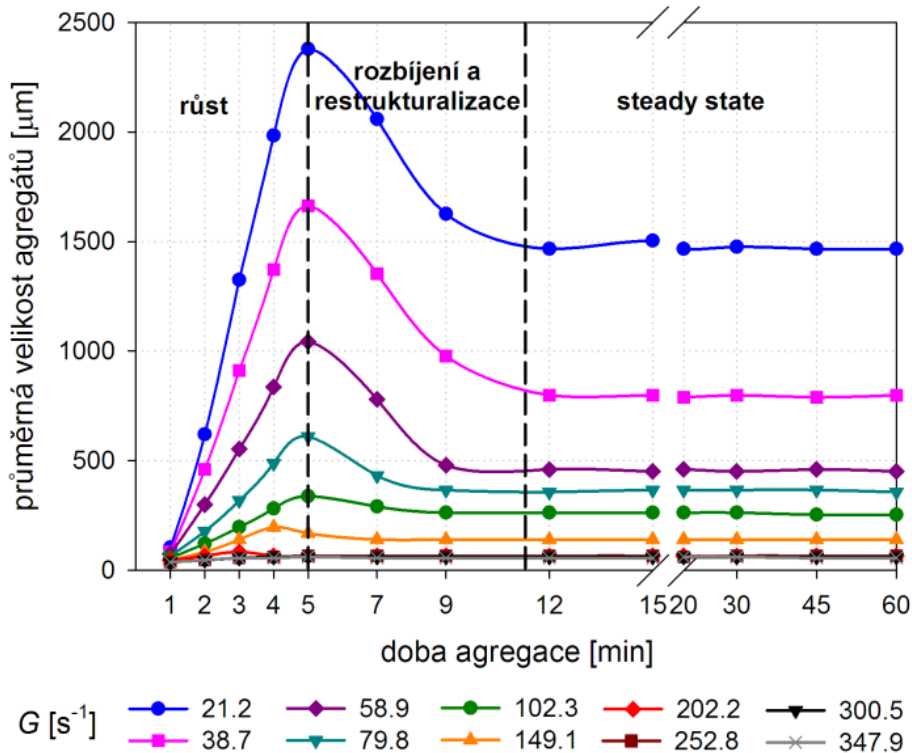


- Bouyer (2004) - Al + bentonit
- ▲ Bubáková (2013) - Fe + přírodní voda
- ▼ Li (2006) - Al + kaolinit
- ✕ Wang (2009) - Al + huminové kyseliny
- Li (2006) - polyakrylamid + kaolinit
- ◆ Mutl (2006) - Fe + přírodní voda

3) Vliv doby míchání



Různý trend růstu agregátů v závislosti na pH



Fáze časového vývoje velikosti agregátů

= ZÁSADNÍ PRO SEPARACI !!!

separační procesy = **sedimentace**, popřípadě **flotace**, a/nebo **filtrace**

Každý z těchto technologických kroků vyžaduje pro svou maximální účinnost vločky se zcela rozdílnými vlastnostmi !!! = připravené různou intenzitou míchání

FILTRACE

malé agregáty o velikosti primárních a mikro-agregátů (obecně **< 50–60 μm**) a s **vysokou hustotou**

SEDIMENTACE

velké homogenní agregáty (**> 100 μm**) s **vysokou hustotou** a odolností vůči působení tečných sil

FLOTACE

vločky o velikosti desítek μm , optimálně **25–50 μm** s **nízkou hustotou** blízkou hustotě vody



- 1) **homogenizační** – aplikace bezprostředně po nadávkování činidel
 - cíl = jejich účinná a rychlé dispergace v upravovaném objemu vody
 - $G = \text{cca } 300 \text{ s}^{-1}$
 - doba zdržení $t = 10\text{--}60 \text{ s}$

- 2) **agregační** – aplikace v průběhu agregace za účelem vzájemných kontaktů jednotlivých částic či agregátů
 - a) **rychlé** – tvorba **primárních částic** a **mikro-agregátů**
 - $G = 100\text{--}400 \text{ s}^{-1}$
 - $t = \text{dosažení velikostní homogenizace agregátů (steady state)}$
 - b) **pomalé** – tvorba **makro-agregátů**
 - $G = 20\text{--}100 \text{ s}^{-1}$
 - $t = 5\text{--}30 \text{ min.}$