

Sít' výzkumných institucí a podniků pro infrastrukturu

Forschungs- und Unternehmensnetz für Infrastrukturen
RENI-100686680



Otevřené síťové kolokvium

Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu pro jeho využití v bariéře hlubinného úložiště radioaktivních odpadů

Netzwerk-Kolloquium

Untersuchung der termo-hydromechanischen Eigenschaften von Bentonit für dessen Verwendung in der Barriere eines Tiefenlagers für radioaktive Abfälle

23. února 2026, 14:00, Albertov 6 a online

23. Februar 2026, 14.00, Albertov 6 und online

Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu pro jeho využití v bariéře hlubinného úložiště radioaktivních odpadů

Jan Najser

Seminář UHIGUG, 23.2.2026

Obsah

- Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů
- Bentonit a jeho role v hlubinném úložišti
- Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu
 - Vnitřní struktura bentonitu
 - Hydro-mechanické vlastnosti
 - Schopnost homogenizace
 - Vliv teploty na hydro-mechanické chování
- Závěr

Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

- Smyslem budování hlubinných úložišť je bezpečná forma uložení vysoce radioaktivního odpadu (vyhořelé palivo z jaderných elektráren)
- Jaderné elektrárny provozuje v současné době cca 30 zemí
- Koncept hlubinného úložiště ve stabilním geologickém prostředí je (viz např. stanovisko Mezinárodní agentury pro atomovou energii) jediný udržitelný způsob bezpečného uložení vysoce radioaktivního odpadu
- V současnosti neexistuje na světě žádné provozované úložiště tohoto typu. Odpad je zatím uložen v meziskladech v areálech jaderných elektráren
- Hlubinné úložiště je v řadě ohledů zcela unikátní stavbou (bezpečnost, životnost)

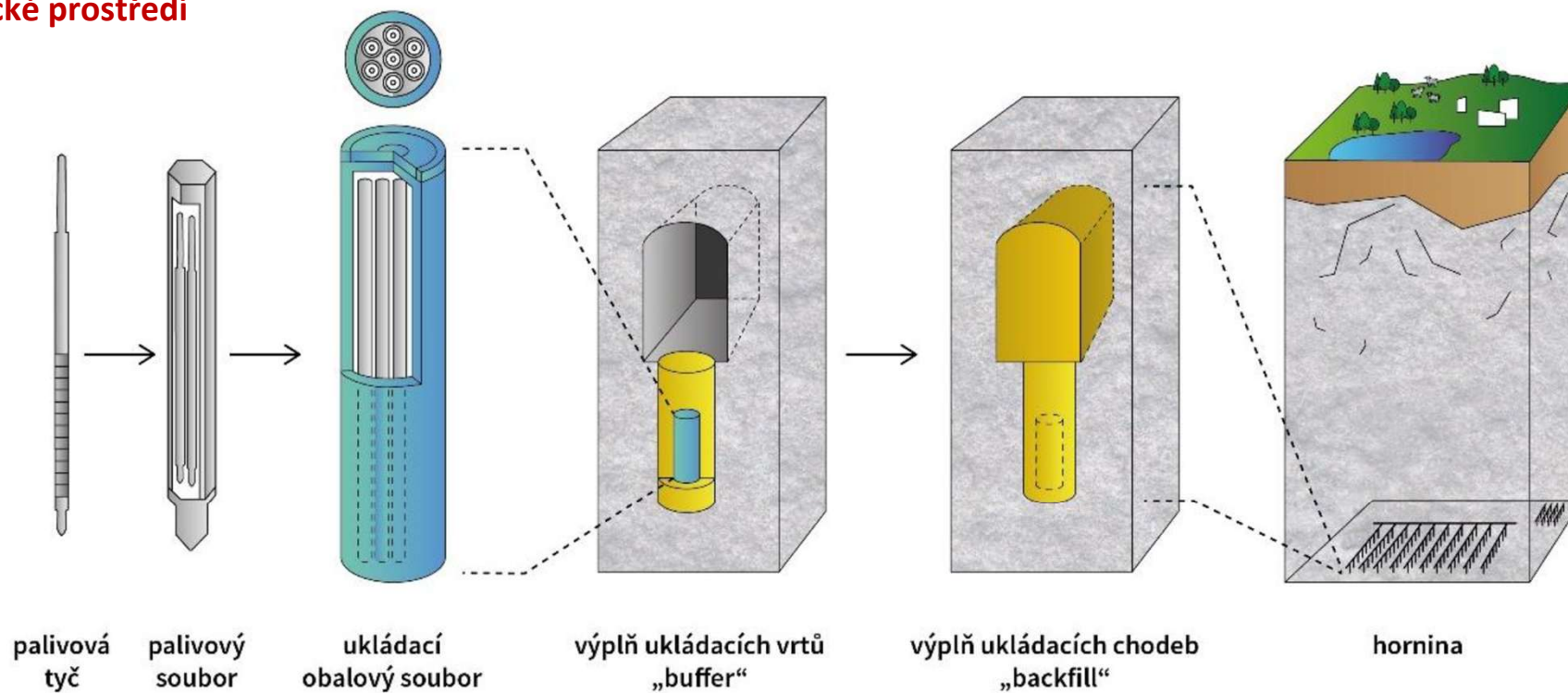
Každá země je zodpovědná za bezpečné uložení radioaktivního odpadu, který vyprodukuje. Podmínky v jednotlivých zemích se liší, každá země by proto měla provádět vlastní výzkum hledající optimální parametry hlubinného úložiště.

V ČR je zodpovědnou institucí SÚRAO (Správa úložišť radioaktivních odpadů), jejímž úkolem je mimo jiné koordinace přípravy na výstavbu hlubinného úložiště.

Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

MULTIBARIÉROVÝ SYSTÉM HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

1. Obalový kontejner
2. Bentonitové těsnění
3. Geologické prostředí



Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

MULTIBARIÉROVÝ SYSTÉM HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

1. Obalový kontejner

- Slouží k dlouhodobé izolaci vyhořelého paliva od okolního prostředí
- Vyroben z oceli (např. Belgie, Kanada, Japonsko, Francie...) nebo mědi (např. Kanada, Švédsko, Finsko...)
- V ČR se plánuje kombinace uhlíkové a nerezové oceli
- Tvar válce o průměru 0,4 - 2,1 m a délky 1,3 - 6 m
- Automatizovaný systém ukládání
- Očekávaná životnost vlastního kontejneru je tisících až desítkách tisíc let

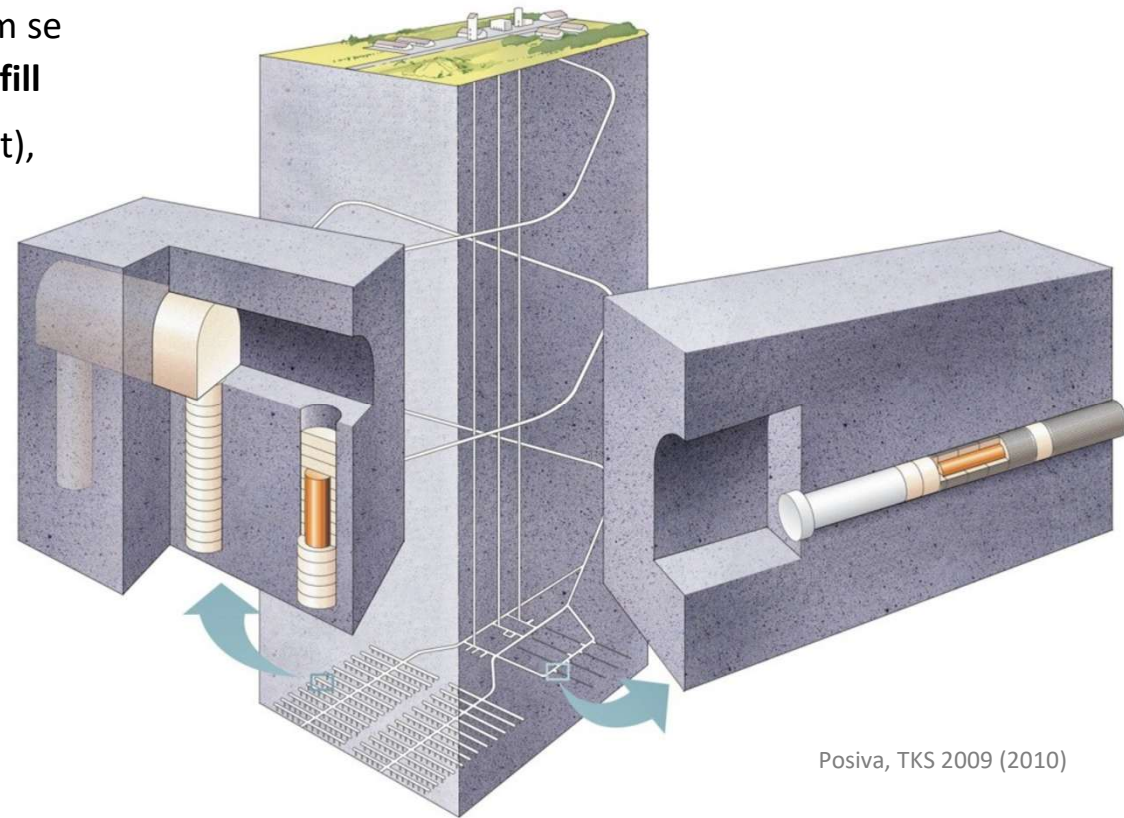


Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

MULTIBARIÉROVÝ SYSTÉM HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

2. Bentonitové těsnění

- Různé typy uvažovaných bentonitů v různých zemích
- Bentonitové těsnění vlastního vrtu (studny) s kontejnerem se nazývá **buffer**, výplň přístupových chodeb se nazývá **backfill**
- Bentonit musí být v co nejhutnější formě (nízká pórovitost), aby měl optimální vlastnosti (nízká hydraulická vodivost, vysoký bobtnací potenciál...)
- Nejčastěji se uvažuje o umístění bentonitu ve formě **lisovaných bloků** (cihel) nebo **pelet**
- Forma bentonitové výplně závisí i na designu úložiště (**vertical x horizontal placement**)



Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

MULTIBARIÉROVÝ SYSTÉM HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ

3. Geologické prostředí

- Cílem je umístit úložiště v kompaktní hornině s minimem puklin a minimálním transportním potenciálem v seismicky klidné oblasti
- V závislosti na geologických podmínkách jednotlivých zemí se uvažuje o třech typech geologického prostředí:
krystalinikum, jíl, sůl
- Hloubka úložiště bude ve vyšších stovkách metrů pod terénem (500 - 1000 m)

země	geologické prostředí
Finsko	krystalinikum
Švédsko	krystalinikum
Francie	jíl
Belgie	jíl
Německo	jíl / sůl / krystalinikum
Švýcarsko	jíl
Maďarsko	Jíl
USA	tuf / sůl
Kanada	jíl / krystalinikum
Japonsko	jíl / krystalinikum
Čína	krystalinikum

Hlubinná úložiště radioaktivních odpadů

SITUACE V ČR – AKTUÁLNÍ ČASOVÝ HARMONOGRAM

Jaderné elektrárny mohou být dle EU považovány za nízkoemisní zdroje energie. Jednou z podmínek však je mít hlubinné úložiště v provozu do roku 2050 → urychlení původního časového plánu pro výstavbu úložiště.

- 2020 - redukce počtu uvažovaných lokalit na 4
- 2028-30 - výběr konečné lokality pro hlubinné úložiště
- cca 2030 - průzkumná díla
- cca 2040 - výstavba
- cca 2050 - zahájení provozu



Bentonit a jeho role v hlubinném úložišti

BENTONIT

- reziduální hornina vznikající jako produkt zvětrávání vulkanických hornin
- bohatá na jílové minerály skupiny smektitu
- montmorillonit tvoří obvykle 60-90% mineralogického složení bentonitu
- typicky se bentonity dělí na Na- a Ca- (Ca-Mg) typ

VLASTNOSTI

- Ve srovnání s jinými zeminami jsou vlastnosti ve většině ohledů extrémní
- extrémně vysoká: bobtnací kapacita, plasticita, stlačitelnost, sorpční kapacita
- extrémně nízká: hydraulická vodivost, pevnost

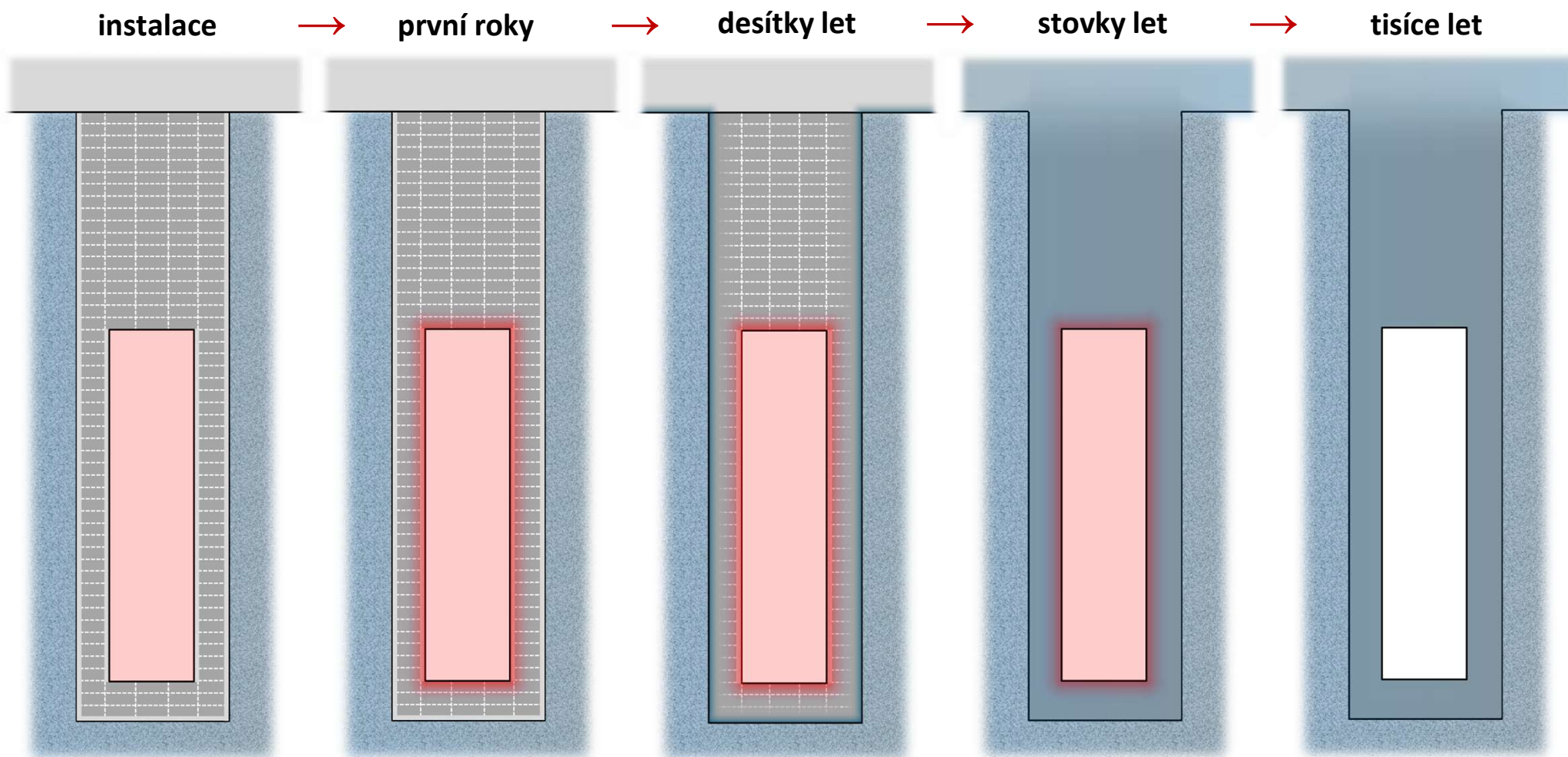
VYUŽITÍ

V geotechnické praxi se uplatňují ve formě stabilizační suspenze (bentonitový výplach) nebo jako izolační vrstva (např. těsnění skládek, hrází) nebo jako sorbent (likvidace ekologických havárií).

Další využití: podestýlky, keramický průmysl, slévárenství, jako plastifikátor (farmaceutika, nátěry)...

Bentonit a jeho role v hlubinném úložišti

Vývoj okrajových podmínek v HÚ:

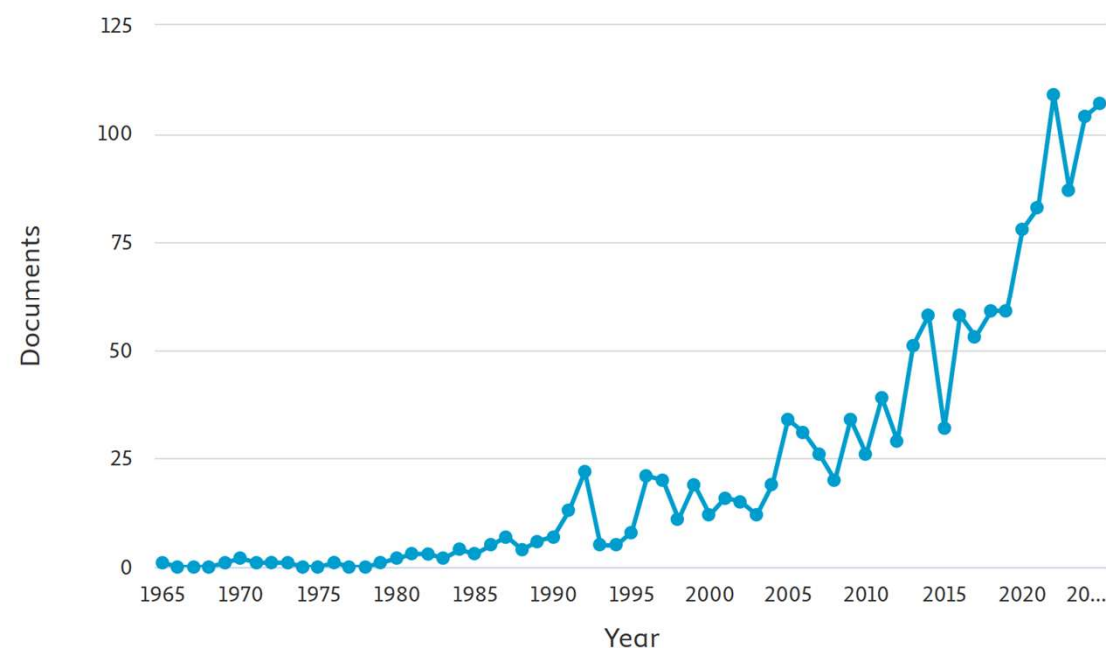


Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu

Mimořádně atraktivní téma pro výzkum:

- Mnoho dílčích oblastí, na které lze výzkum zaměřit
- Rostou technické možnosti experimentálního vybavení
- Mimořádný společenský význam
- V současné době velmi aktuální
- Obdobná situace je v desítkách dalších zemí
- Dostupná finanční podpora pro výzkum (ČR, EU)

Documents by year



Scopus:

```
(( TITLE-ABS-KEY ( bentonite* ) AND SRCTITLE ( geotech* OR geomech* OR "soil mech*" OR "soil* foundation*" )) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE, "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "re" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "no" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "er" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "le" ) ) )
```

Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu

ale... :

- Komplikovaný materiál s extrémním chováním, komplexní vnitřní strukturou, extrémní ulehlost – lisované vzorky
- Složité okrajové podmínky zkoušek - řízená kontrola vlhkosti, vysoké teploty, zajištění konstantního objemu
- Nutnost vyvíjení specializovaného zkušebního vybavení - komerčně dostupné přístroje pro mechaniku zemin jsou nedostatečné
- Speciální zkušební postupy – řada základních „pravidel“ používaných v mechanice zemin neplatí např.:
 - hustota vody je 1 g/cm^3
 - sušením při 105°C odstraníme vodu z pórového prostředí
 - zrna jsou považována za nestlačitelná
 - stlačitelnost zkušebních přístrojů je ve srovnání se stlačitelností zeminy zanedbatelná
 - standardizovaná metodika zkoušek

Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu

BENTONIT ČERNÝ VRCH (BCV)

- Ca-Mg bentonit z lokality Černý Vrch
- Průmyslově těžen společností Keramost, a.s.
- Referenční materiál pro výzkum bentonitové bariéry hlubinného úložiště v ČR



www.keramost.cz

mineralogické složení:

Ca/Mg montmorillonit	70%
křemen	11%
kaolinit	5%
illit	4%
Mg-kalcit	4%
goethit	3%

materiálové vlastnosti:

w_L	135%
w_p	48%
specifická hmotnost	2.76 g/cm ³
CEC	61 meq/100 g

Výzkum termo-hydro-mechanických vlastností bentonitu

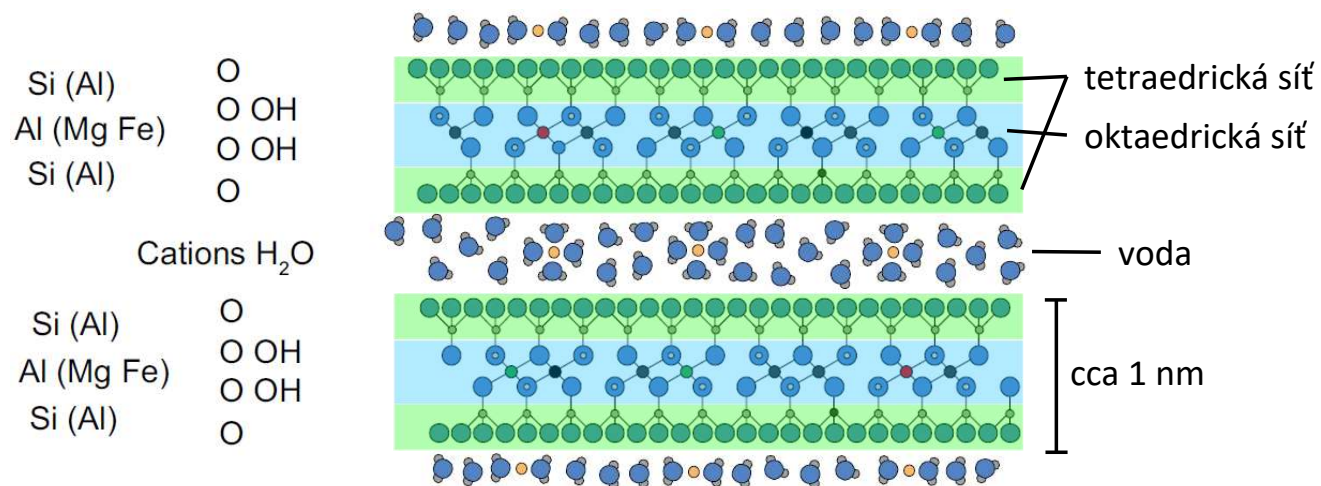
OKRUHY VÝZKUMU

- Vnitřní struktura bentonitu
- Hydro-mechanické vlastnosti
- Schopnost homogenizace bentonitu
- Vliv teploty na hydro-mechanické chování

Vnitřní struktura bentonitu

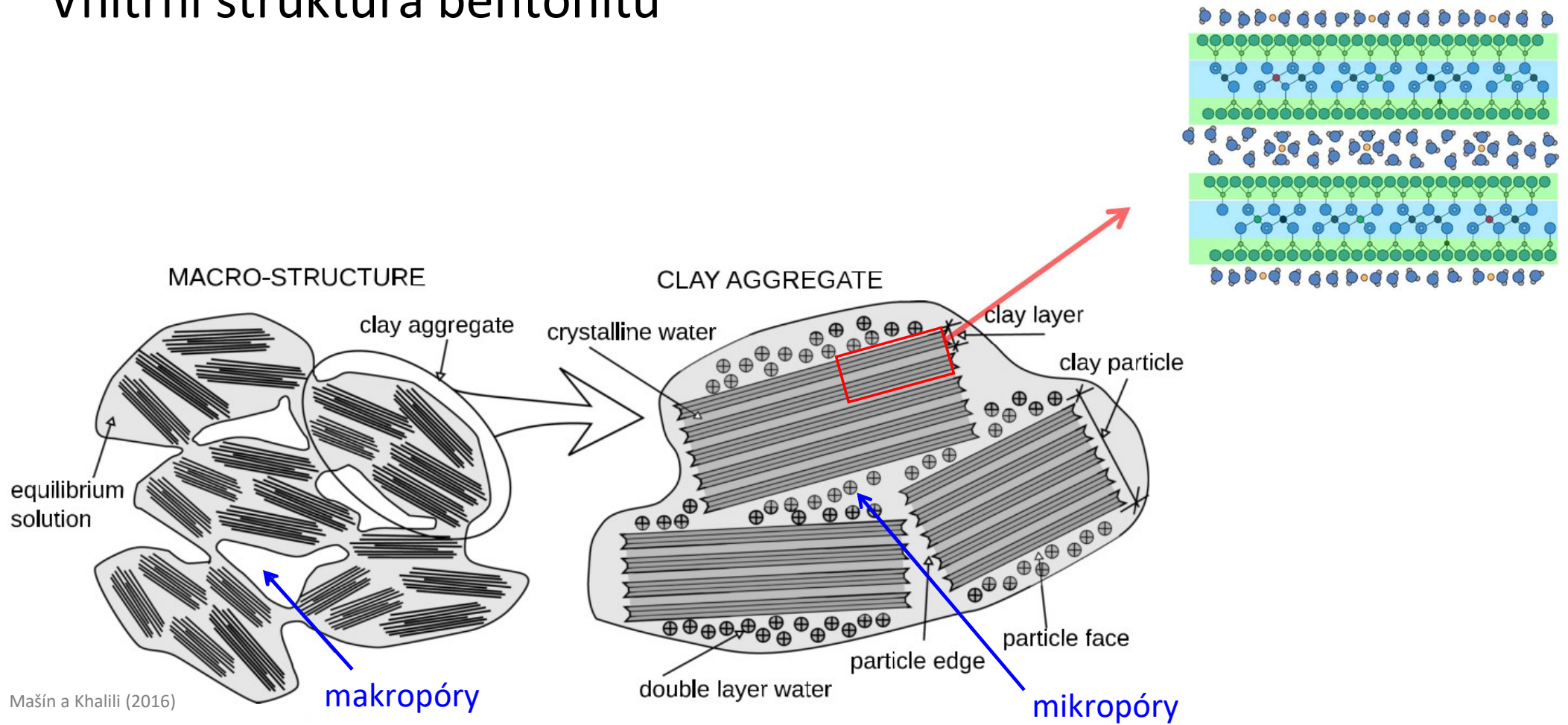
STRUKTURA MONTMORILLONITU

Základní uspořádání vrstev:



upraveno podle Karnlanda et al. (2006)

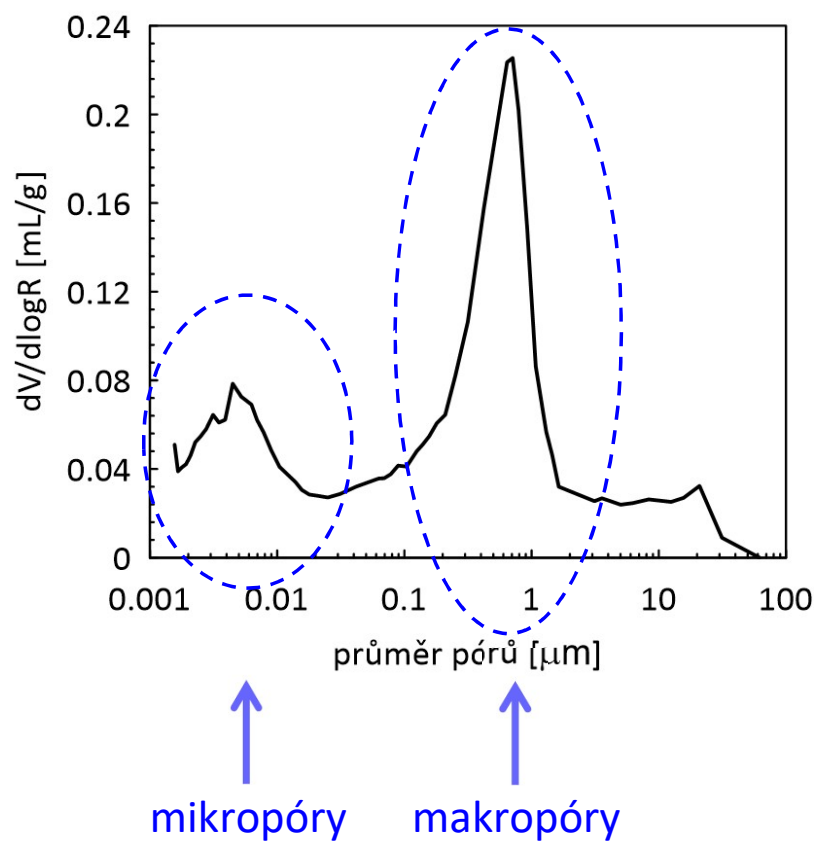
Vnitřní struktura bentonitu



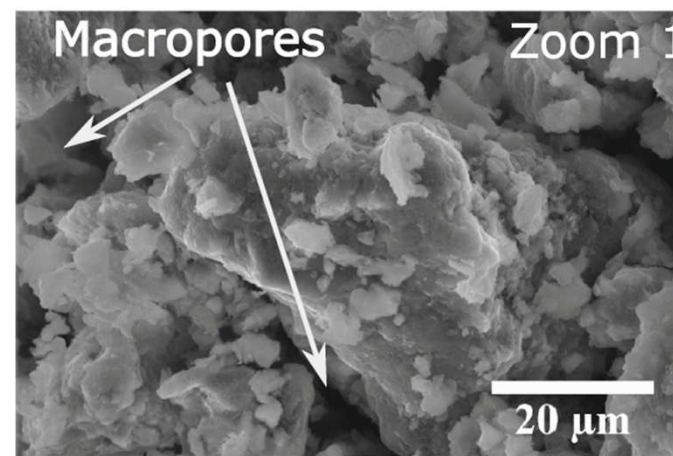
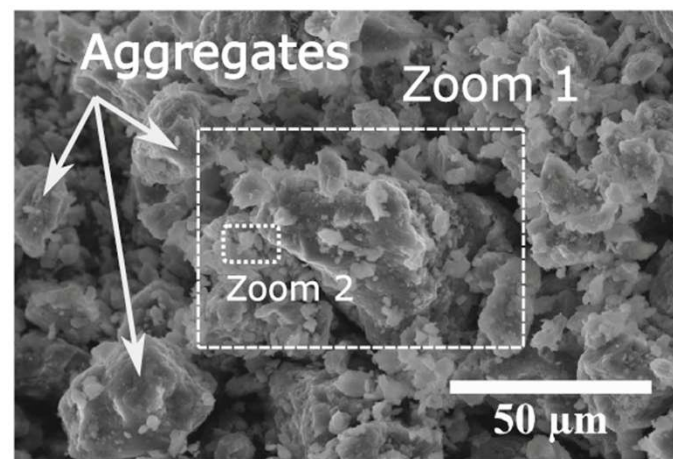
Mašín a Khalili (2016)

Vnitřní struktura bentonitu

Kvantifikace pomocí rtuťové porozimetrie:

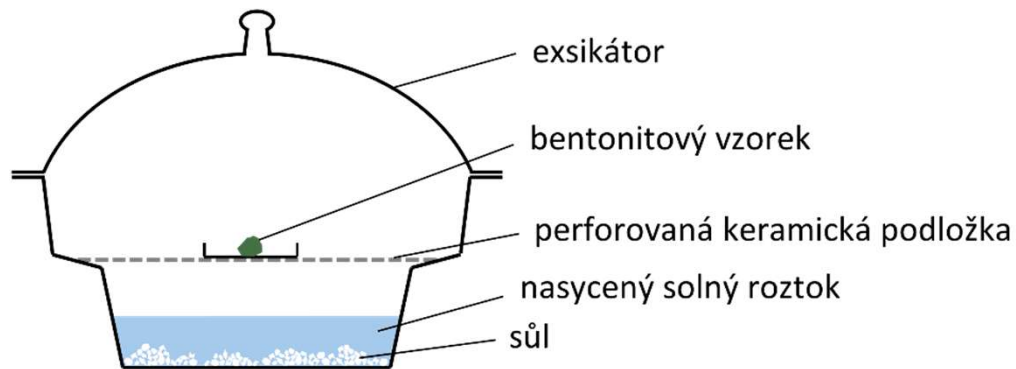


Vizualizace pomocí ESEM:

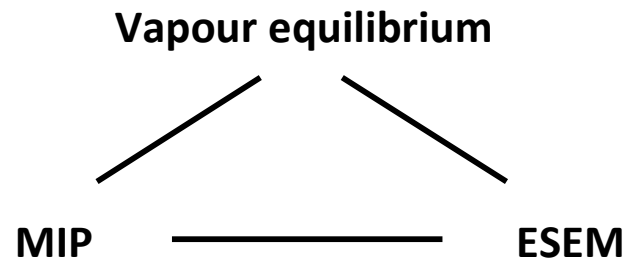


Vnitřní struktura bentonitu

Metoda vapour equilibrium – rovnoměrná a kontrolovaná změna vlhkosti bentonitu:



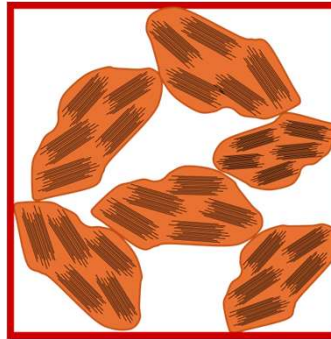
sůl	relativní vlhkost vzduchu (%)	sání (MPa)	vlhkost vzorku (%)
$\text{LiCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$	12,0	286,7	4,7
CH_3COOK	23,1	198,14	6,8
$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33,1	149,51	9,0
K_2CO_3	43,2	113,50	10,7
NaBr	59,1	71,12	12,7
NaCl	75,5	38,00	15,6
KCl	85,1	21,82	17,9
K_2SO_4	97,6	3,29	24,3



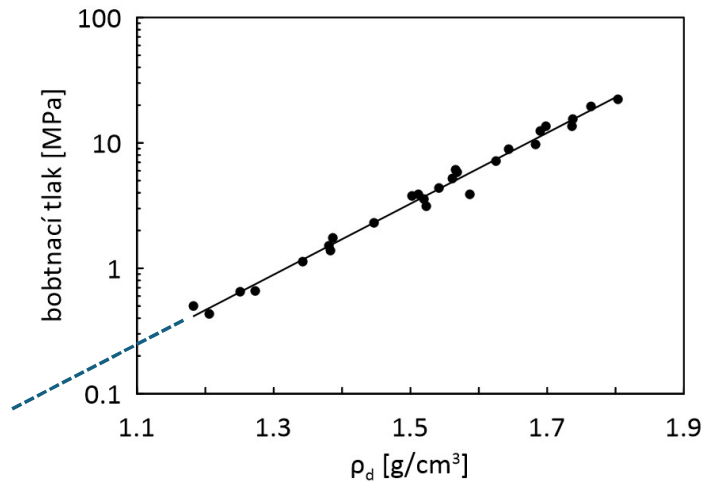
→ představa o vývoji struktury při mechanickém namáhání, při změně vlhkosti, za různých okrajových podmínek

Vývoj struktury při mechanickém zatěžování

- Vstupní materiál má velmi otevřenou strukturu



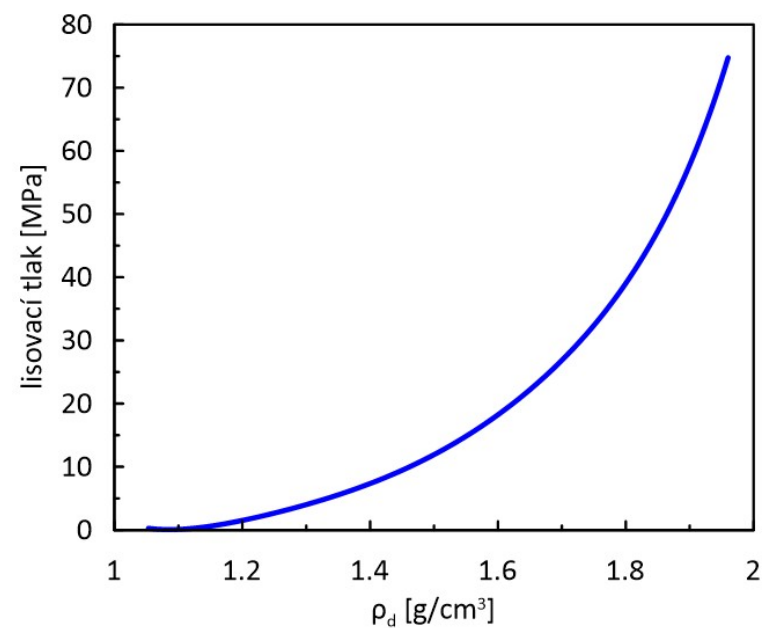
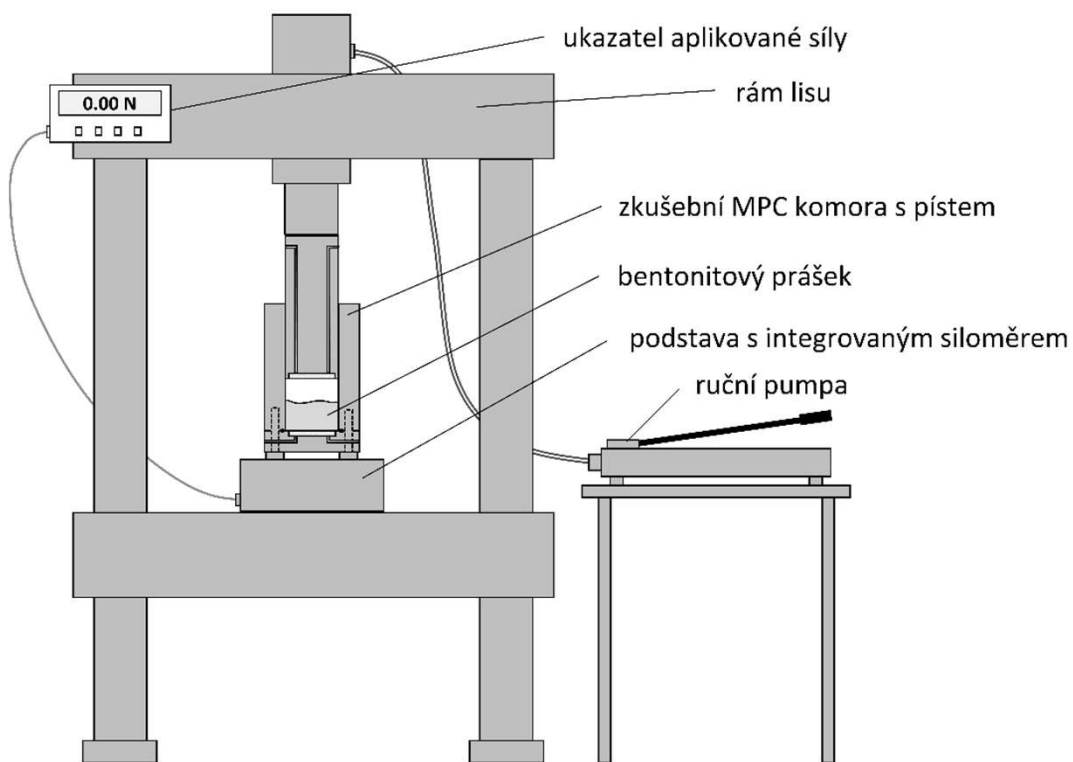
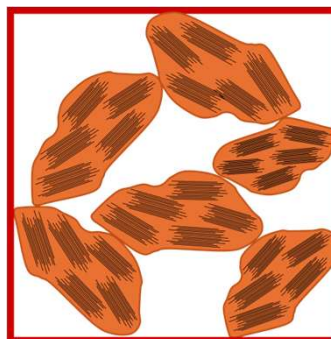
ρ_d cca 0.7 g/cm^3 , pórovitost 75% →



→ žádný bobtnací tlak

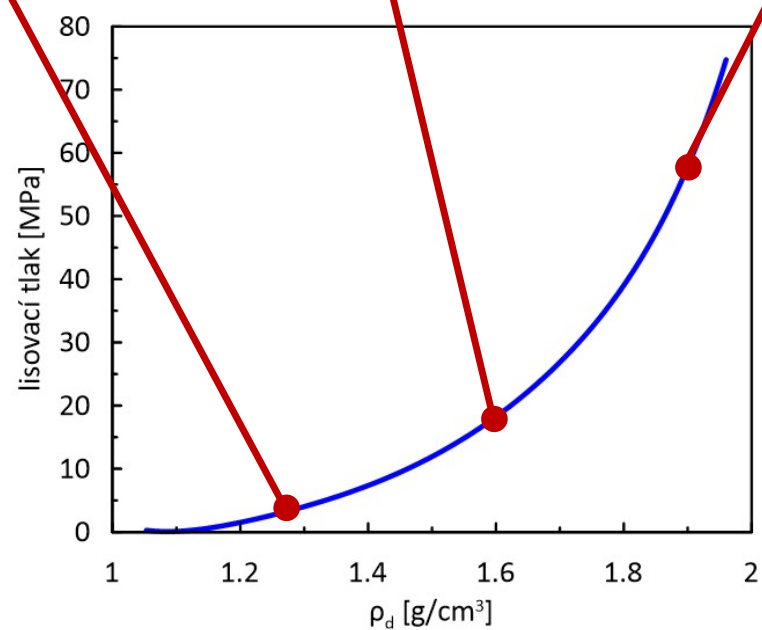
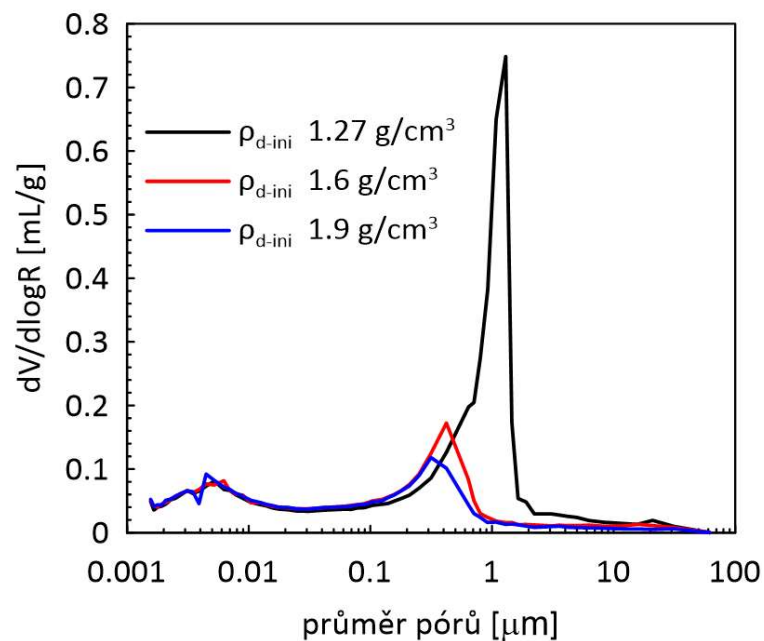
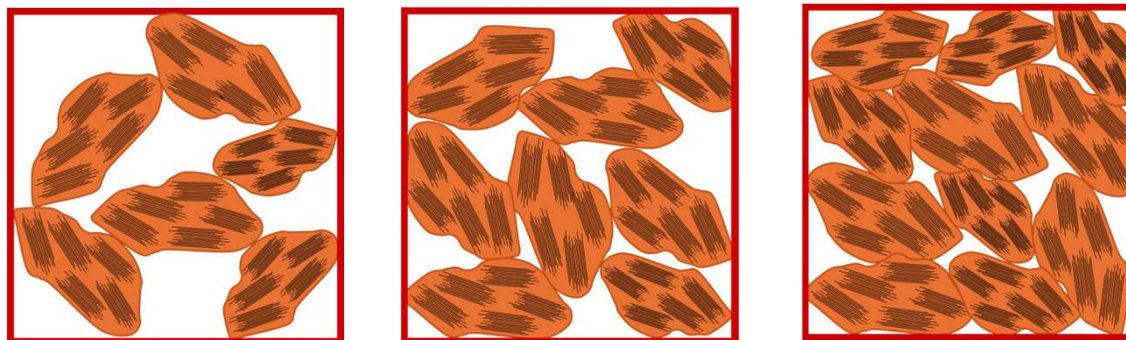
Vývoj struktury při mechanickém zatěžování

- Vstupní materiál má velmi otevřenou strukturu
- Hutnění se provádí lisováním



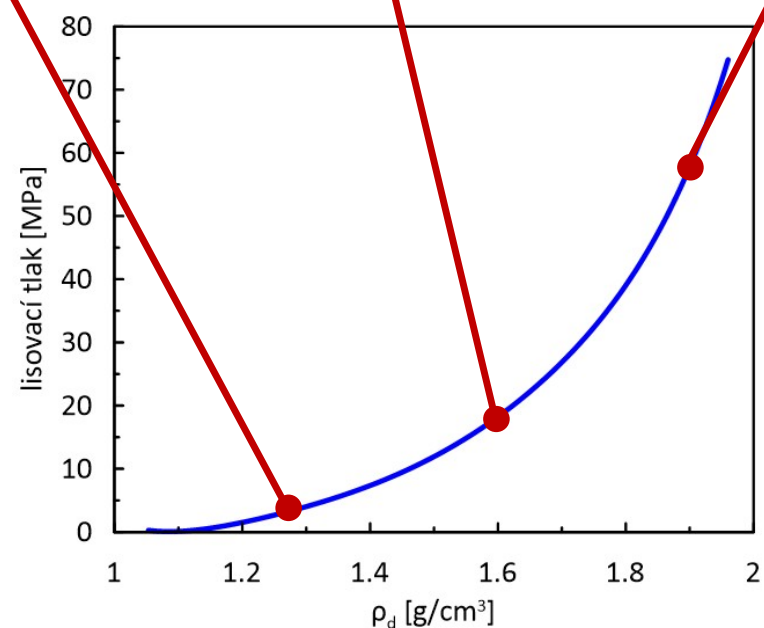
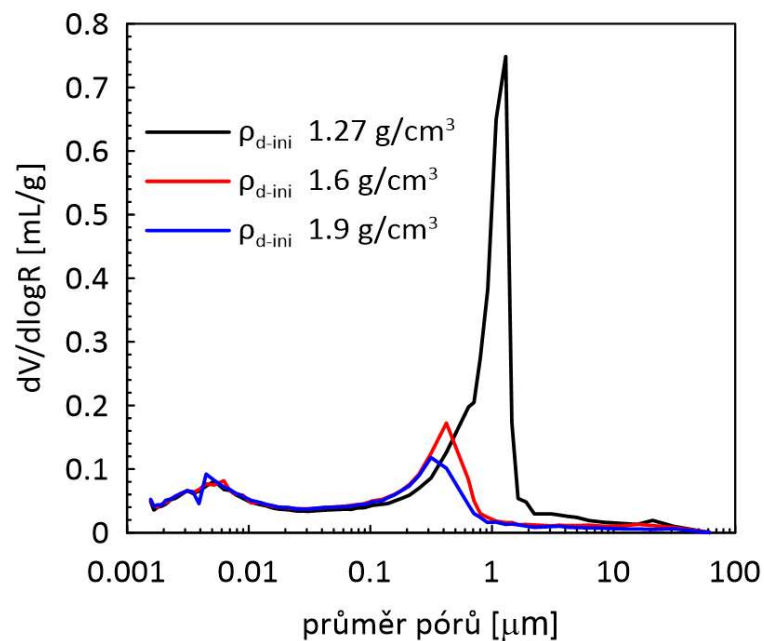
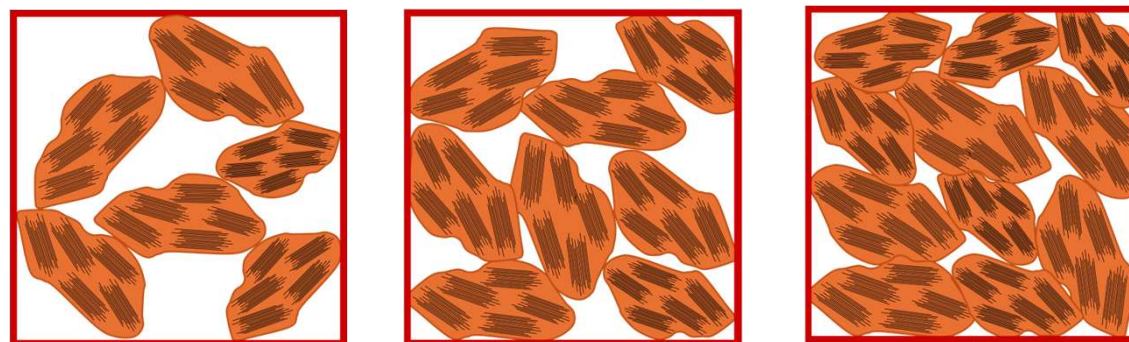
Vývoj struktury při mechanickém zatěžování

- Vstupní materiál má velmi otevřenou strukturu
- Hutnění se provádí lisováním



Vývoj struktury při mechanickém zatěžování

- Vstupní materiál má velmi otevřenou strukturu
- Hutnění se provádí lisováním



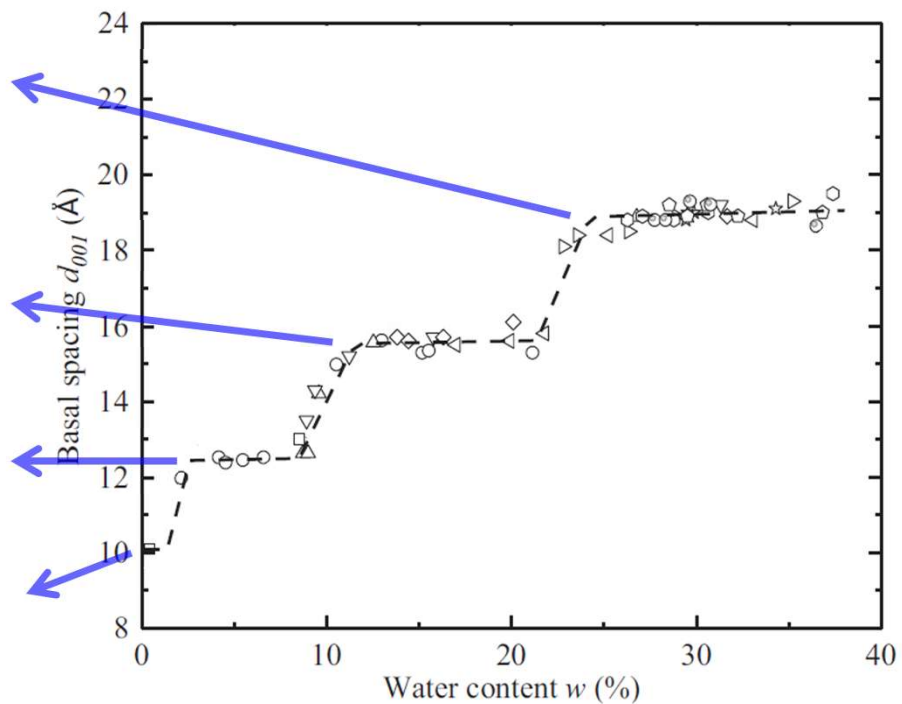
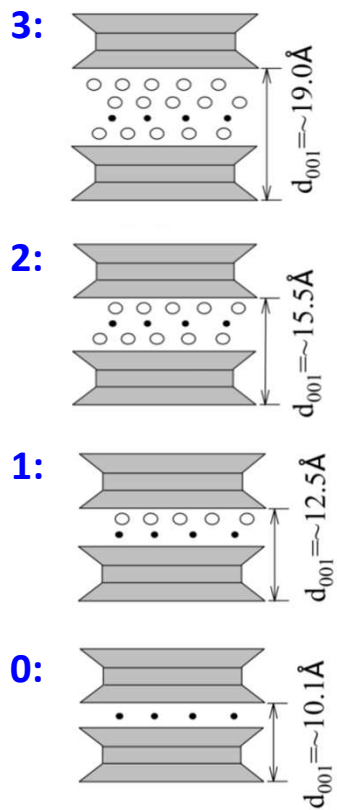
→ při mechanickém zatěžování se redukuje makropóry, vnitřní struktura agregátů se ale nemění

Vývoj struktury při změně vlhkosti

CHOVÁNÍ JÍLOVÉHO „ZRNA“ PŘI ZMĚNĚ VLHKOSTI

**počet vrstev
molekul vody:**

**vzdálenost montmorillonitových vrstev v Ca-bentonitu
s rostoucí vlhkostí:**

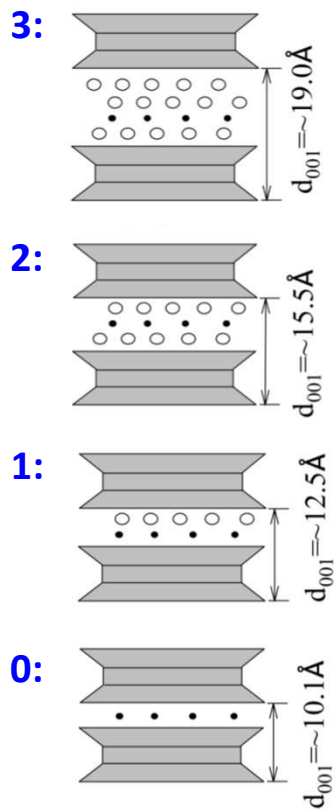


upraveno podle Wanga et al. (2006)

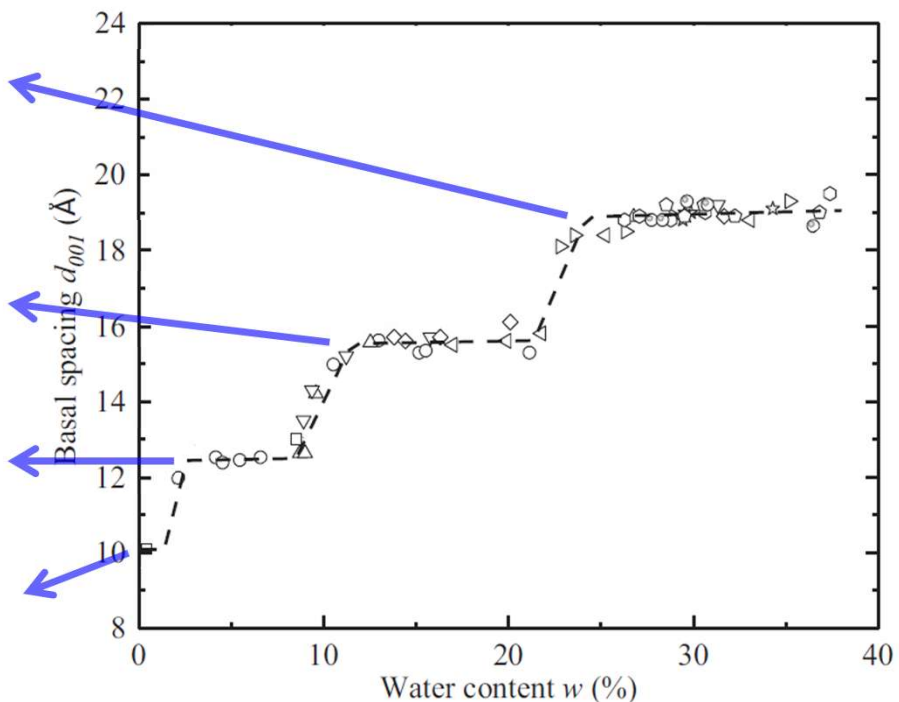
Vývoj struktury při změně vlhkosti

CHOVÁNÍ JÍLOVÉHO „ZRNA“ PŘI ZMĚNĚ VLHKOSTI

počet vrstev
molekul vody:

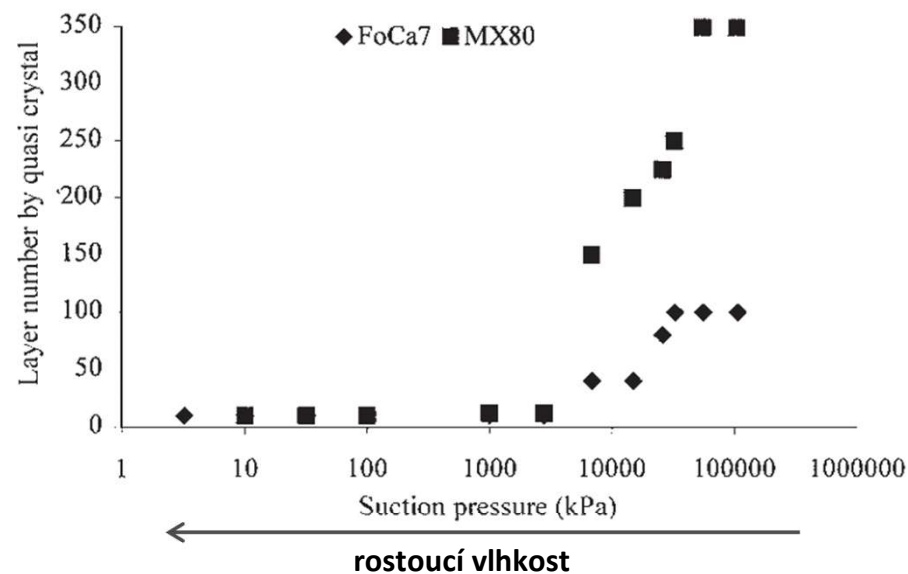


vzdálenost montmorillonitových vrstev v Ca-bentonitu
s rostoucí vlhkostí:



upraveno podle Wanga et al. (2006)

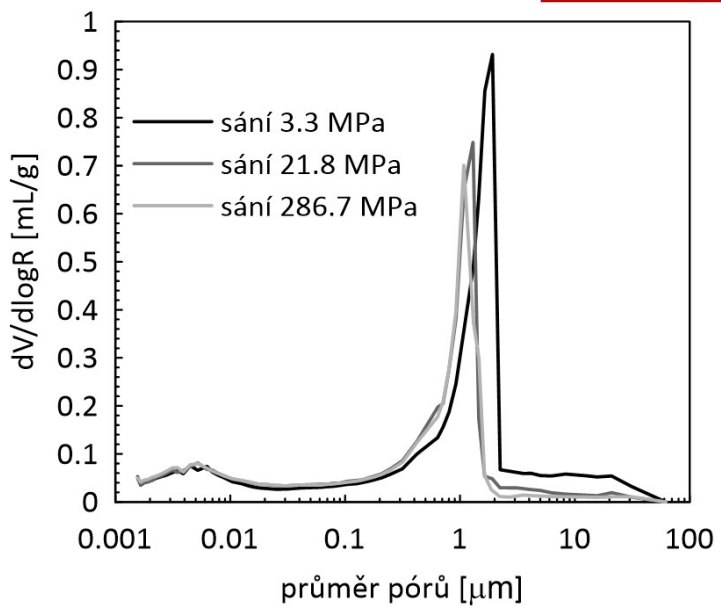
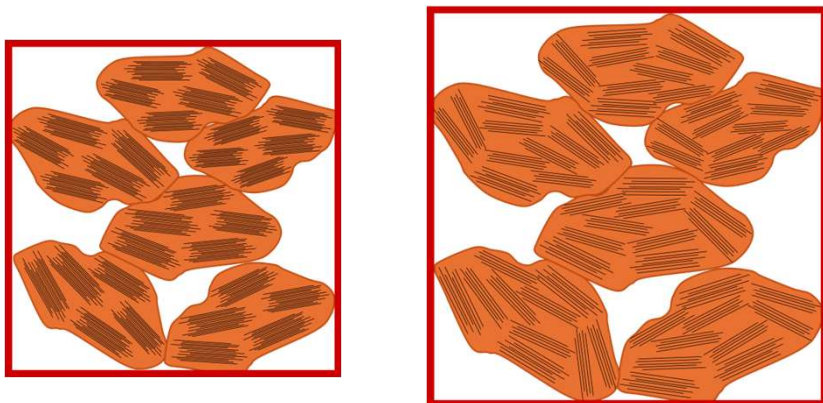
počet montmorillonitových vrstev tvořící „zrno“:



Saiyouri et al. (2004)

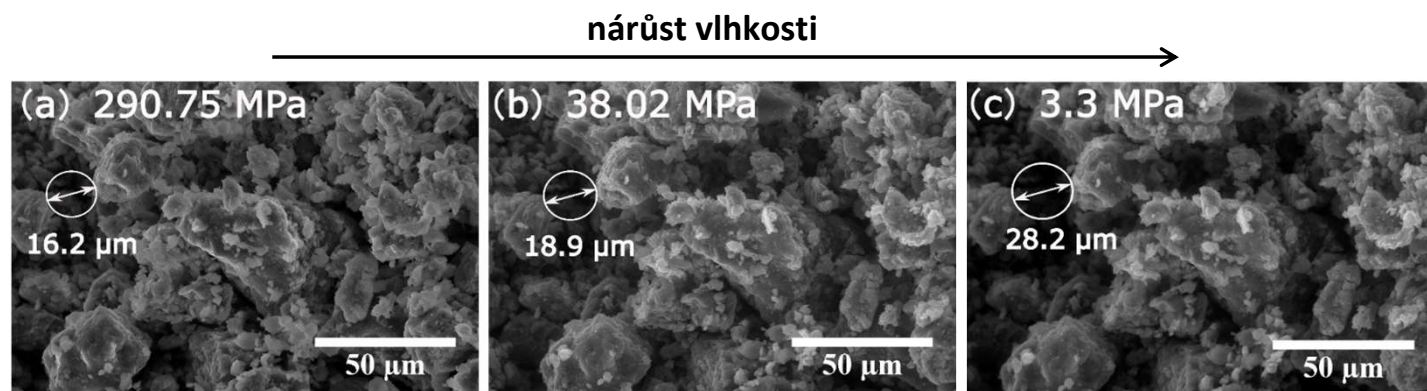
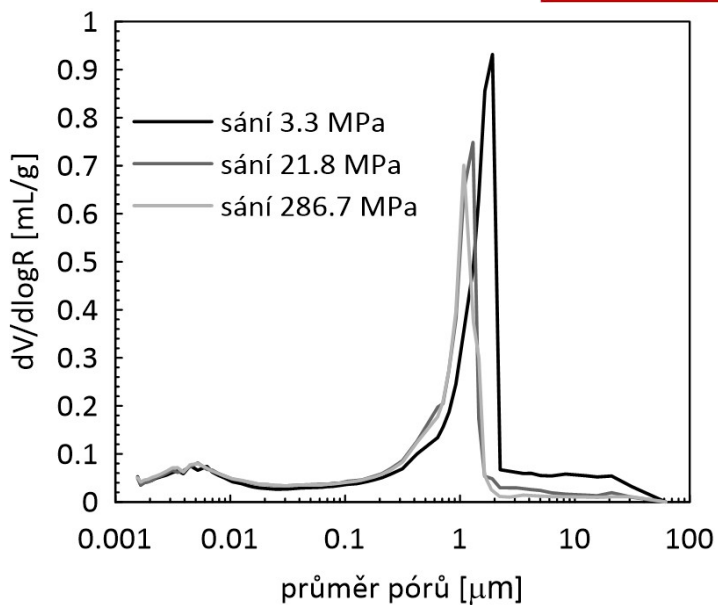
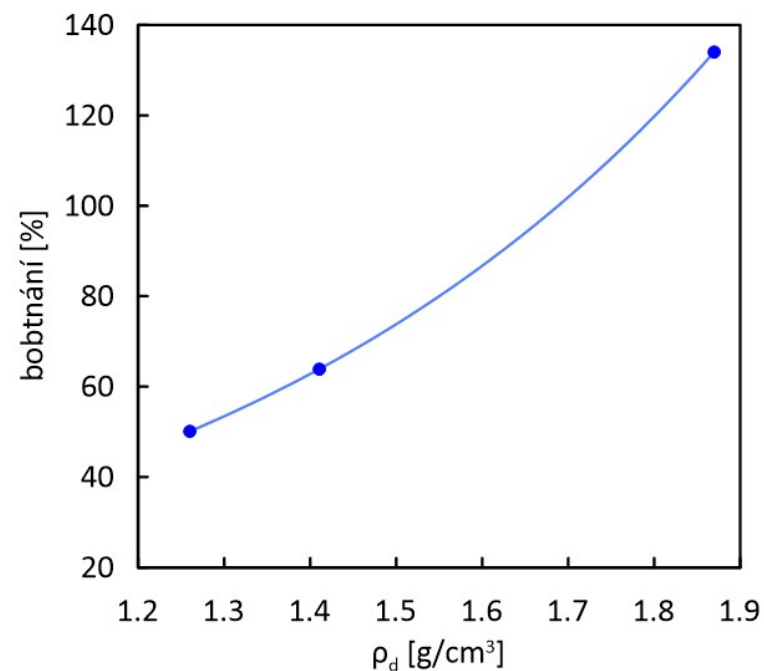
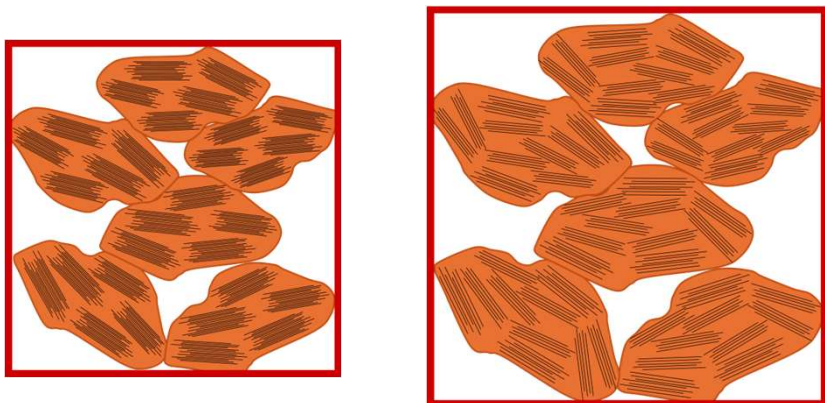
Vývoj struktury při změně vlhkosti

MOŽNOST VOLNÉHO BOBTNÁNÍ



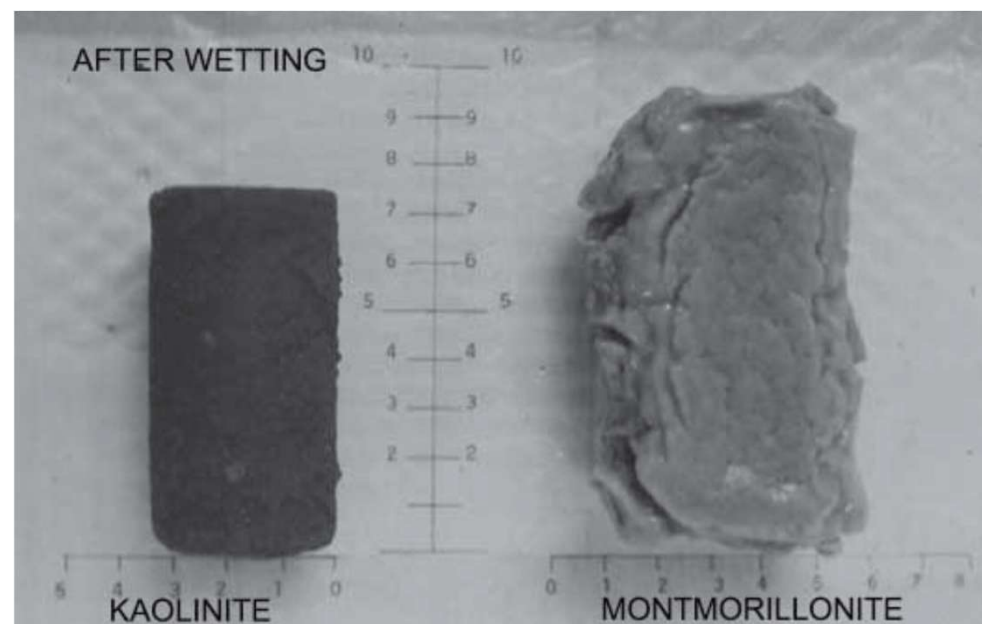
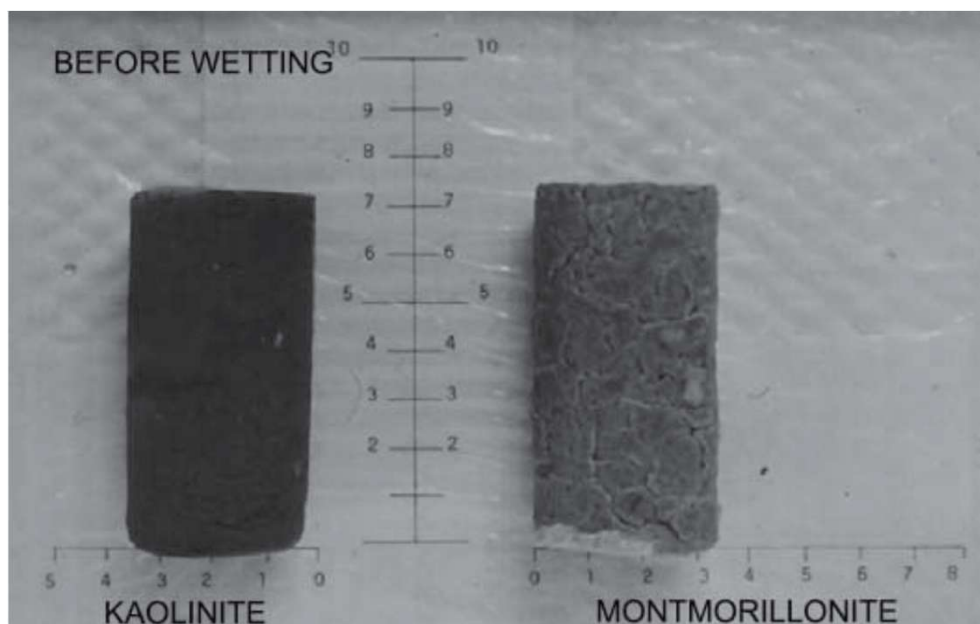
Vývoj struktury při změně vlhkosti

MOŽNOST VOLNÉHO BOBTNÁNÍ



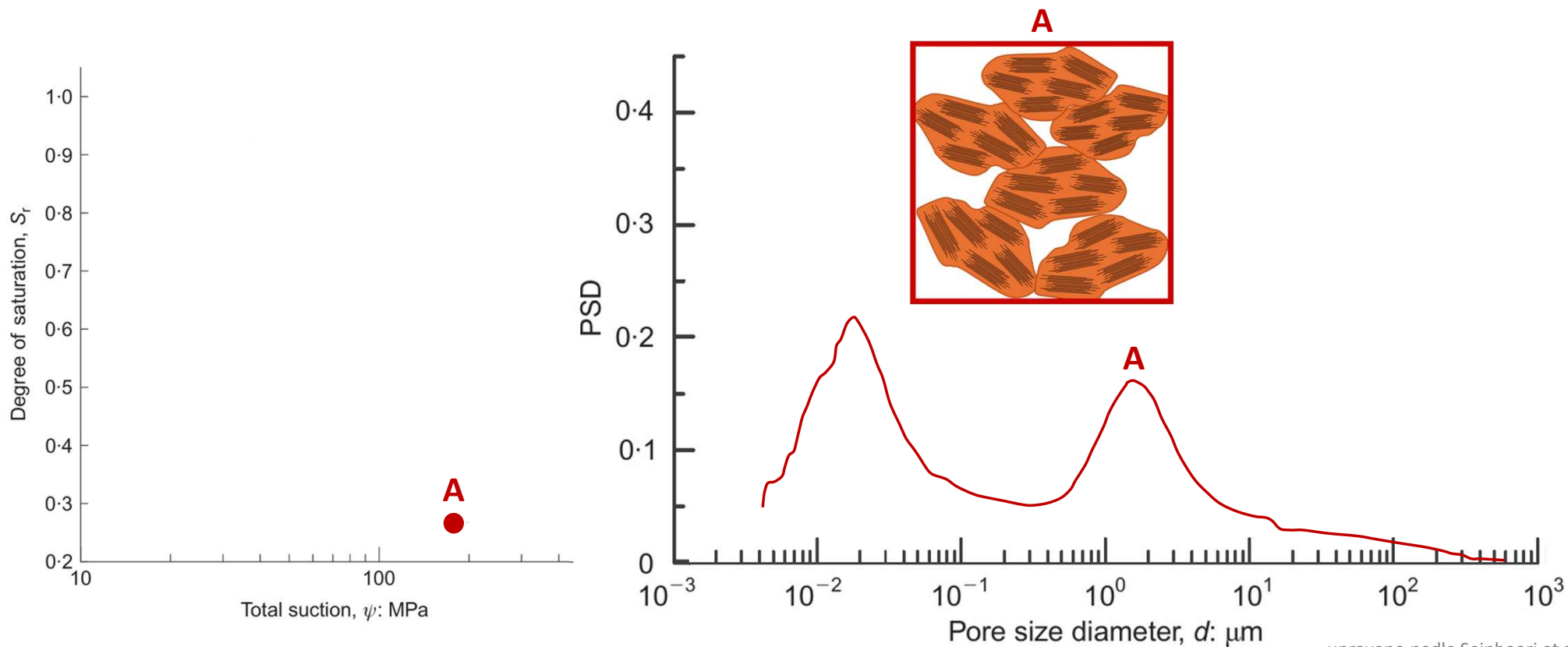
Vývoj struktury při změně vlhkosti

MOŽNOST VOLNÉHO BOBTNÁNÍ



Vývoj struktury při změně vlhkosti

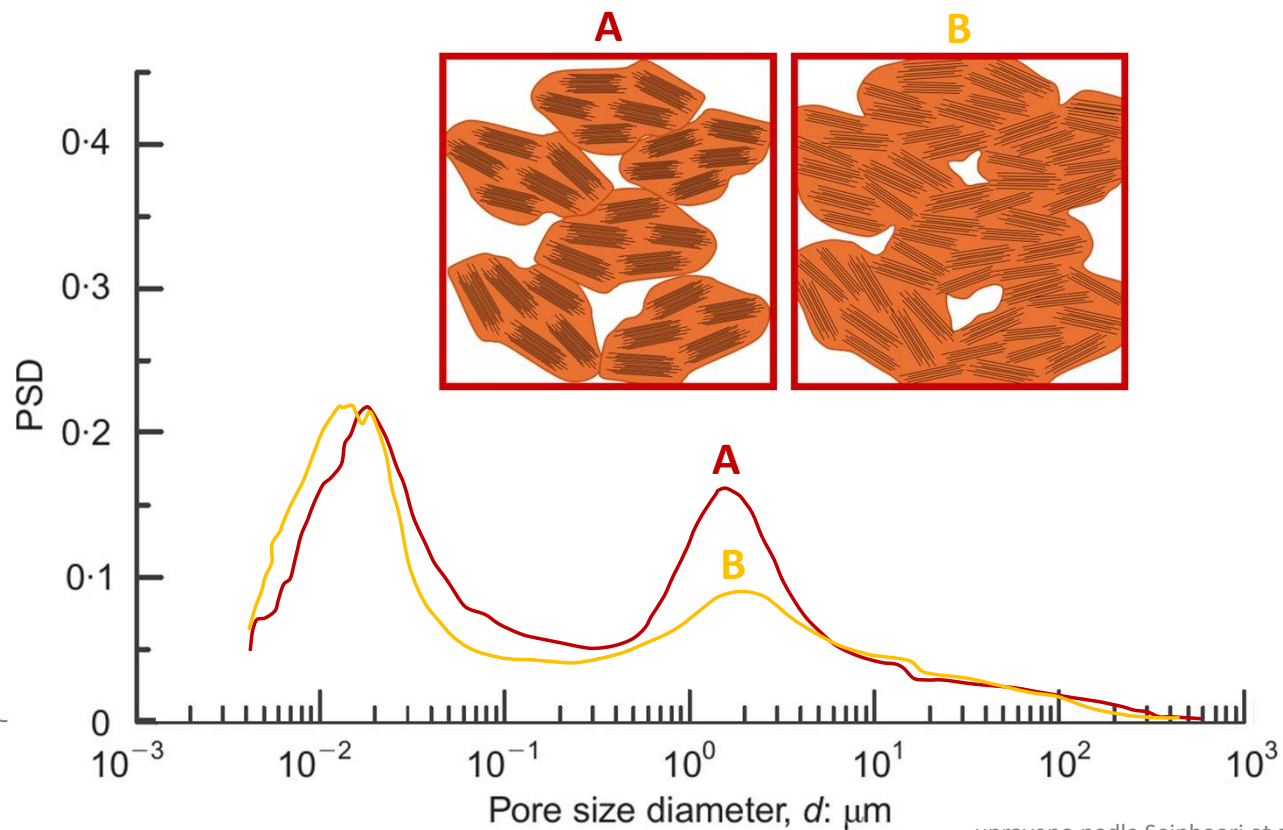
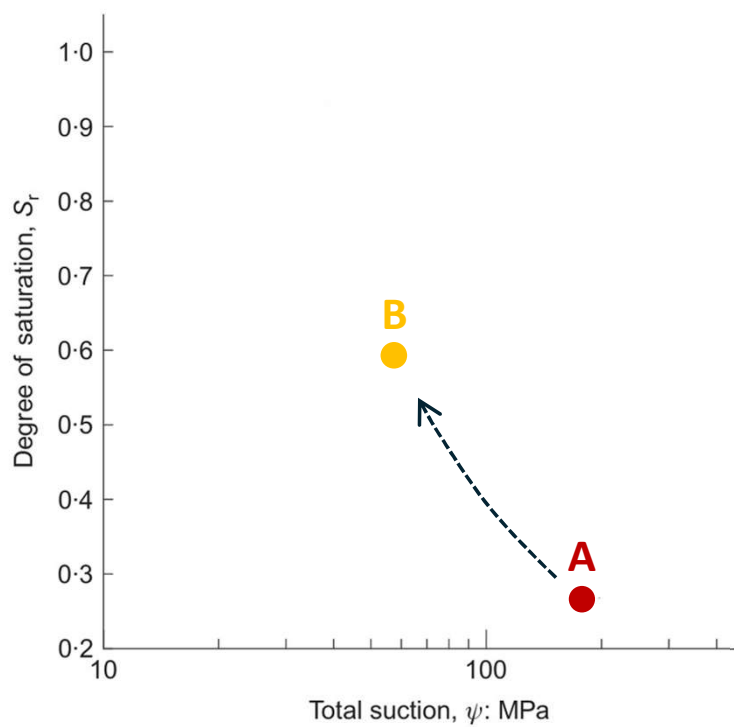
PODMÍNKA KONSTANTNÍHO OBJEMU



upraveno podle Seiphoori et al. (2004)

Vývoj struktury při změně vlhkosti

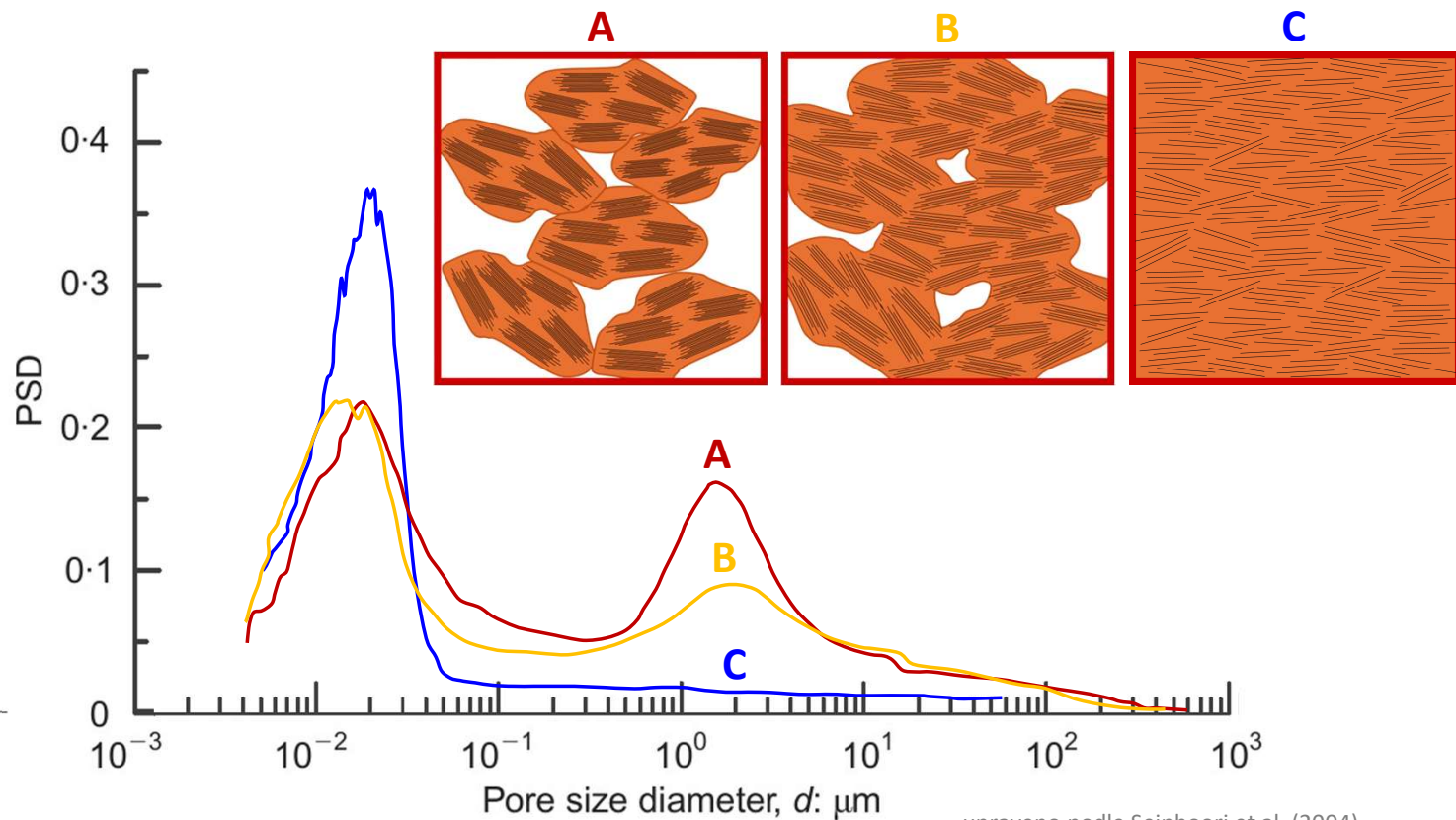
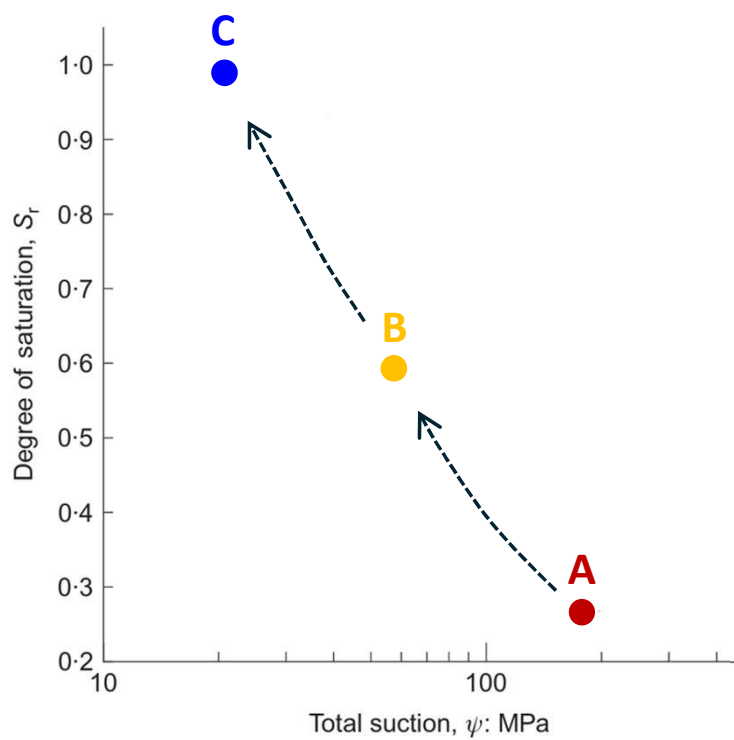
PODMÍNKA KONSTANTNÍHO OBJEMU



upraveno podle Seiphoori et al. (2004)

Vývoj struktury při změně vlhkosti

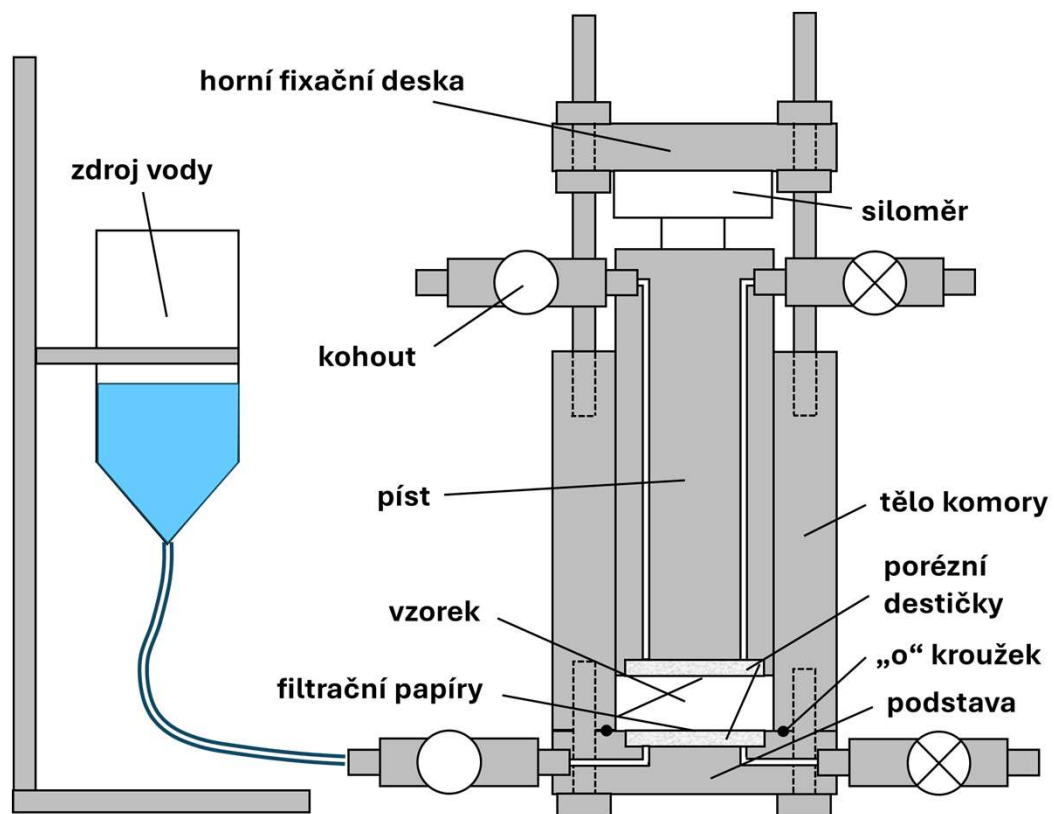
PODMÍNKA KONSTANTNÍHO OBJEMU



Výzkum hydromechanických vlastností

„MPC“ KOMORY

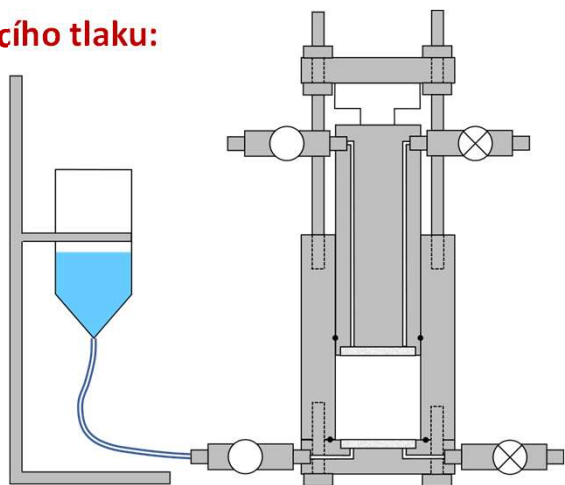
Konfigurace pro měření bobtnacího tlaku:



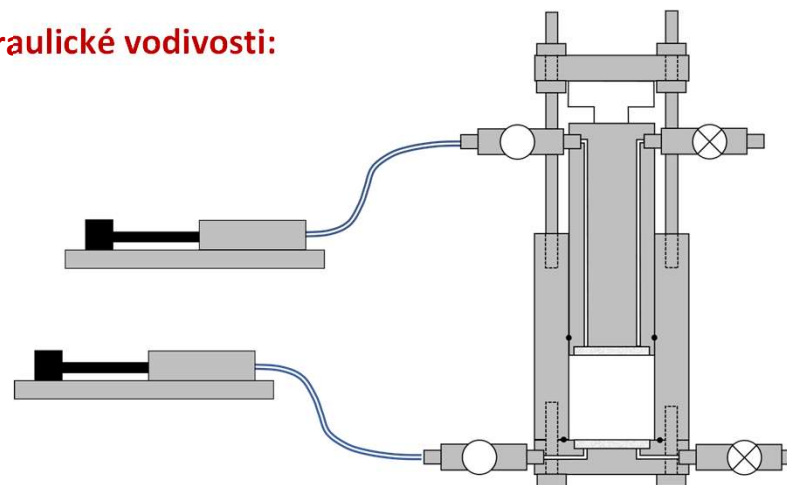
Výzkum hydromechanických vlastností

„MPC“ KOMORY

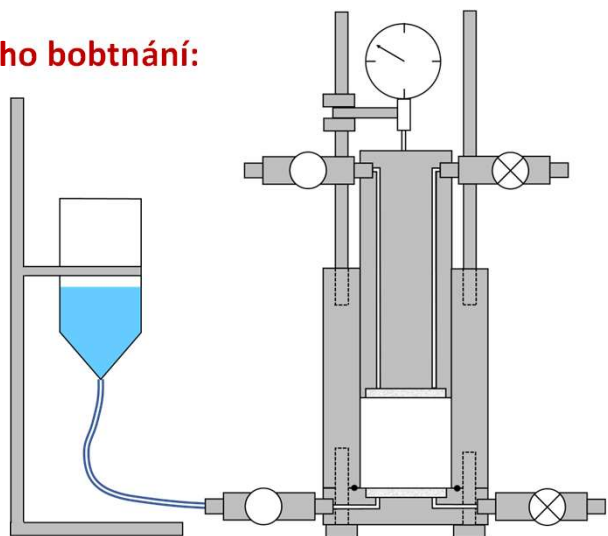
měření bobtnacího tlaku:



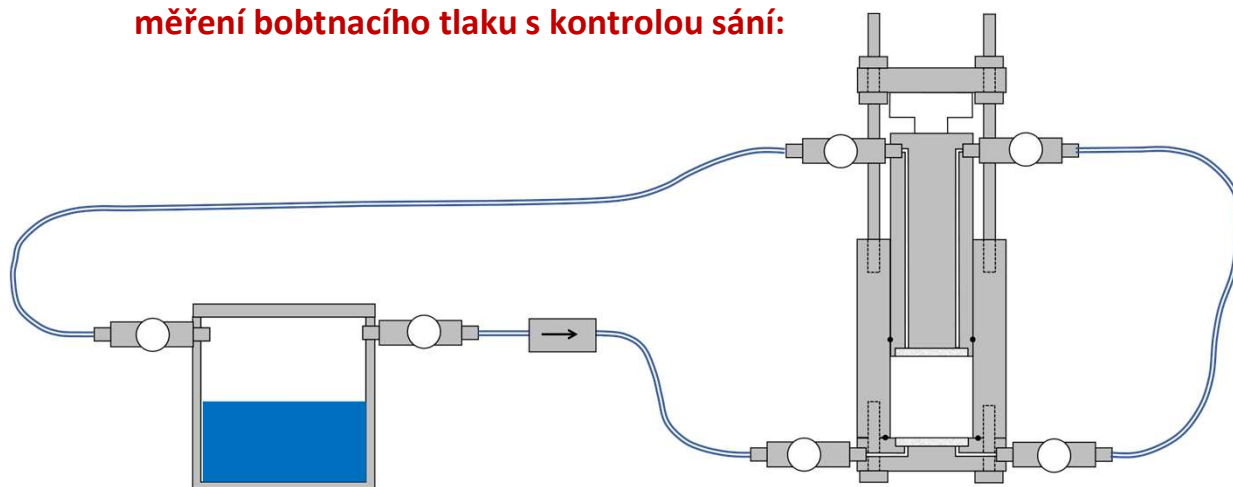
měření hydraulické vodivosti:



měření volného bobtnání:

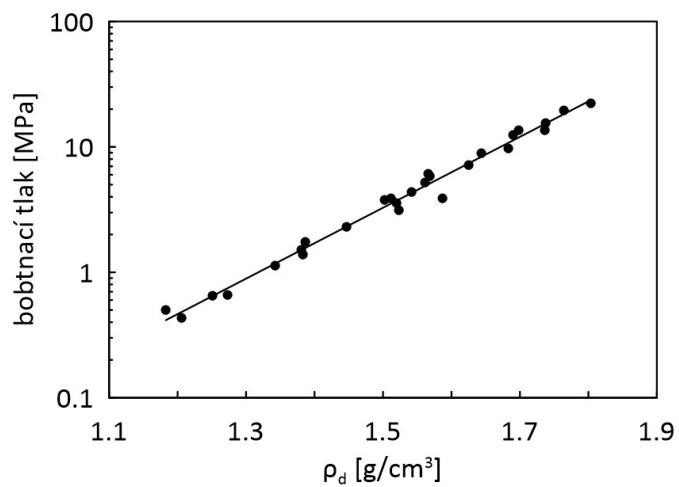


měření bobtnacího tlaku s kontrolou sání:

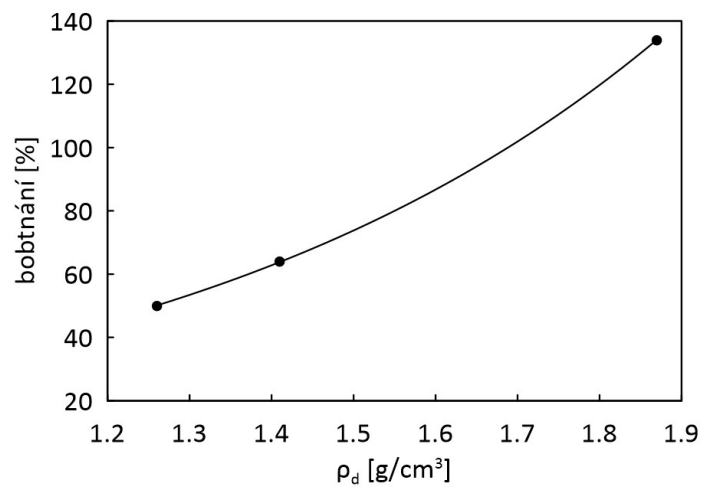


Výzkum hydromechanických vlastností

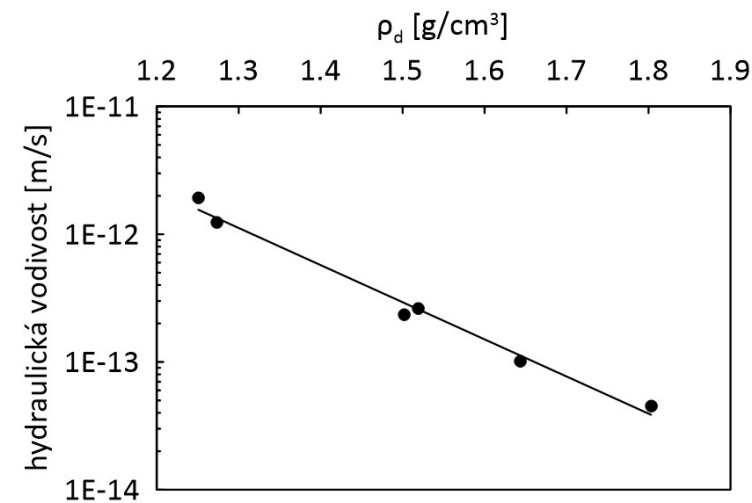
bobtnací tlak:



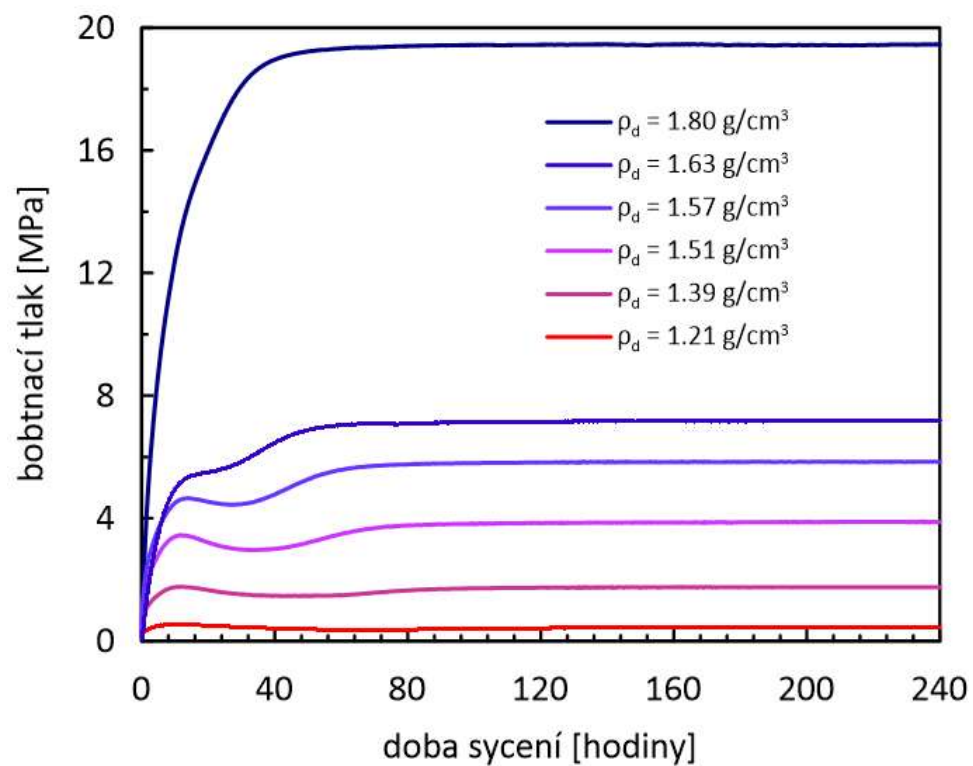
volné bobtnání:



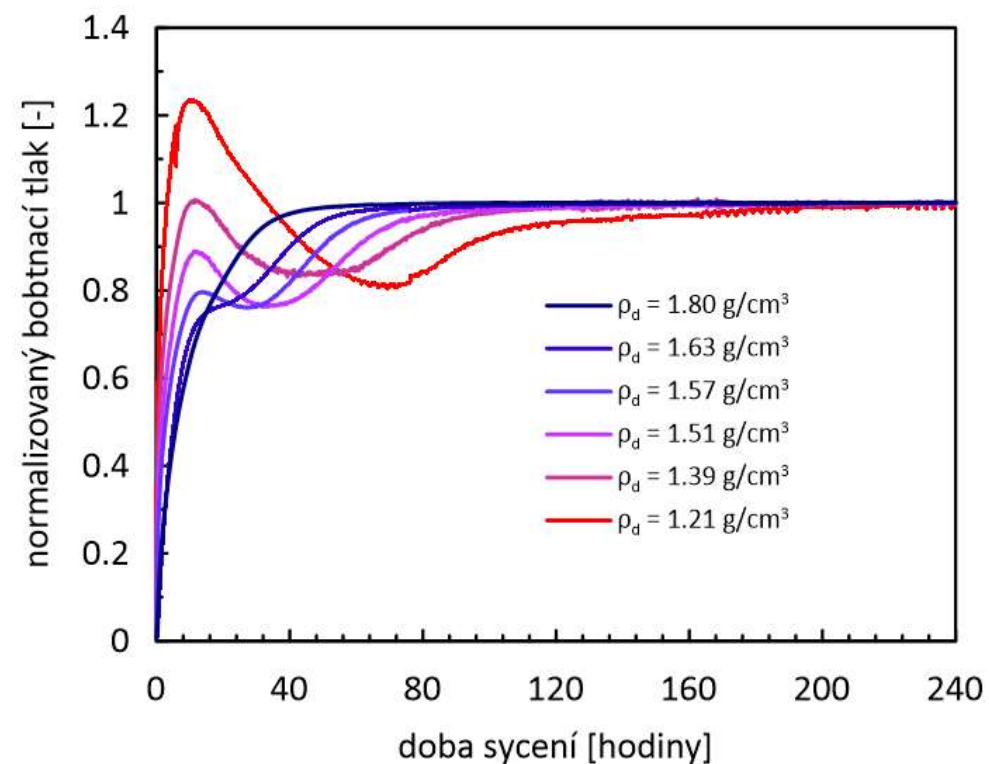
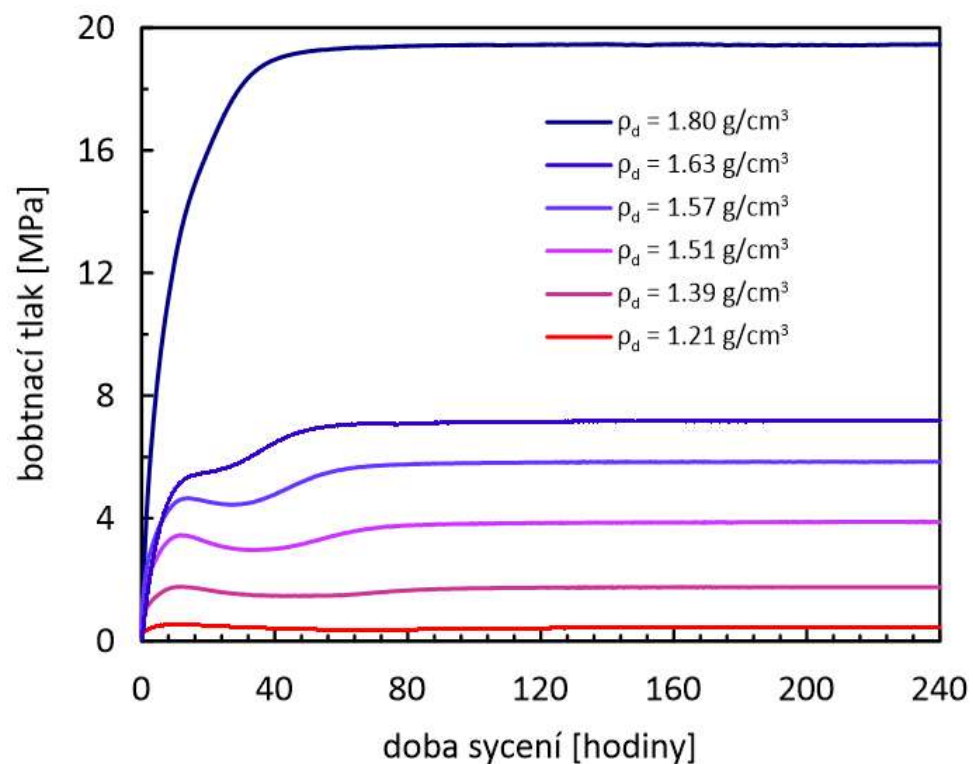
hydraulická vodivost:



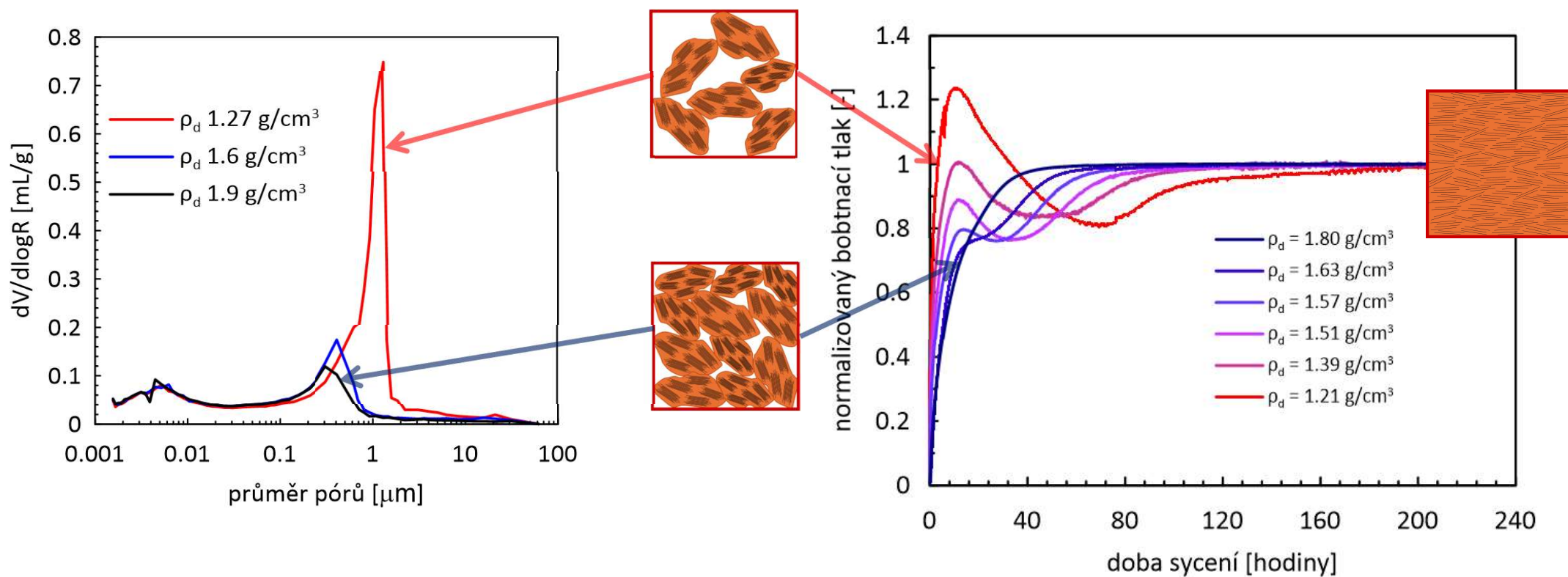
Vliv struktury na vývoj bobtnacího tlaku bentonitu



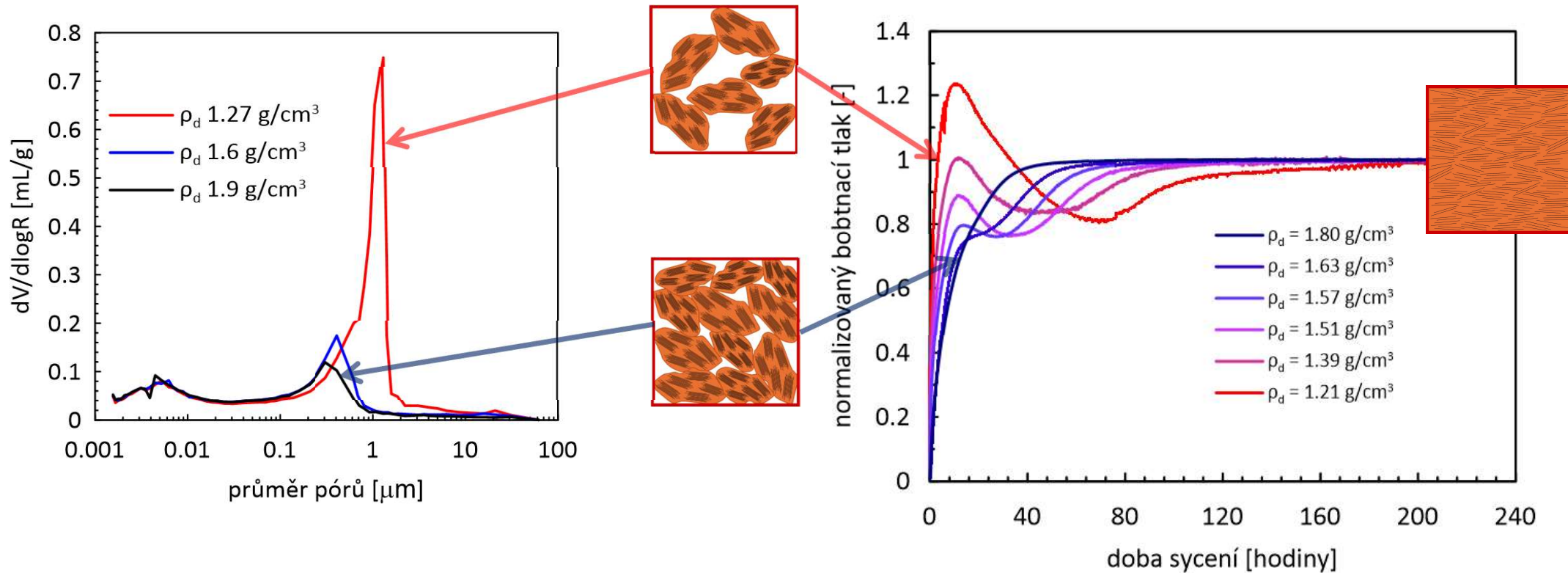
Vliv struktury na vývoj bobtnacího tlaku bentonitu



Vliv struktury na vývoj bobtnacího tlaku bentonitu



Vliv struktury na vývoj bobtnacího tlaku bentonitu



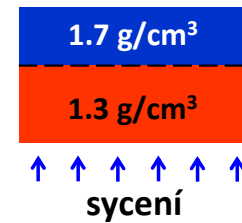
- Během syčení za konstantního objemu dochází ke kolapsu struktury – uzavírání makropórů
- Velikost kolapsu závisí na počátečním objemu makropórů, tedy počáteční objemové hmotnosti

Schopnost homogenizace

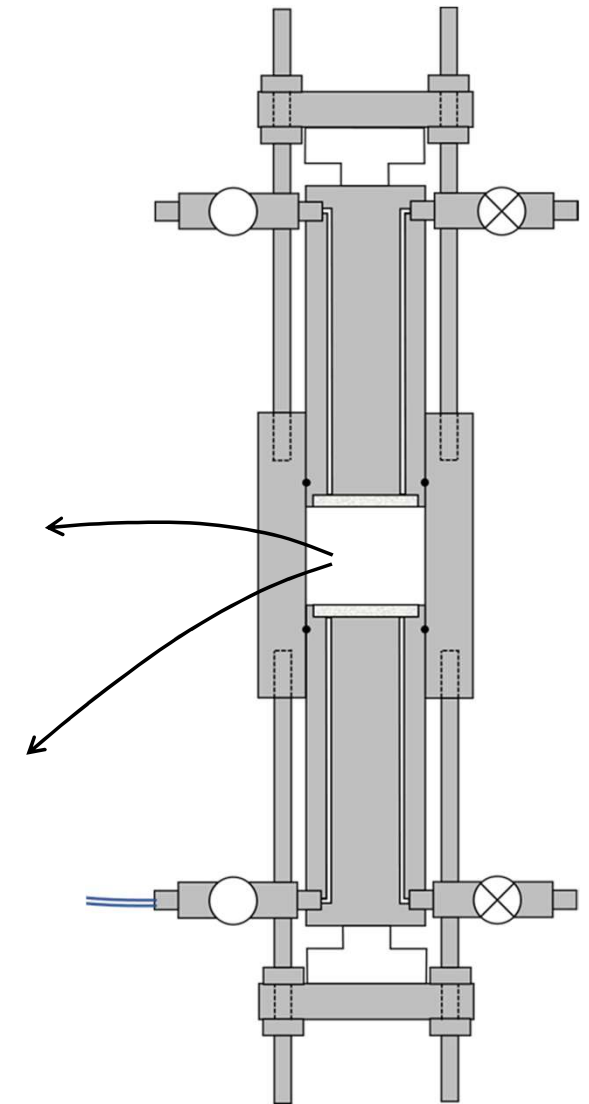
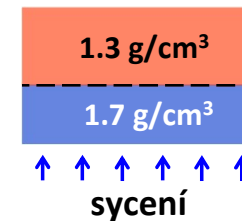
- Vzorky tvořené dvěma vrstvami s odlišnými ρ_d
- Laboratorní program zahrnoval 3 páry vzorků s různými kombinacemi ρ_d
- Každý pár tvořen identickými vzorky sycenými z opačného směru

uspořádání MPC komor pro homogenizační zkoušky:

vzorek 1:

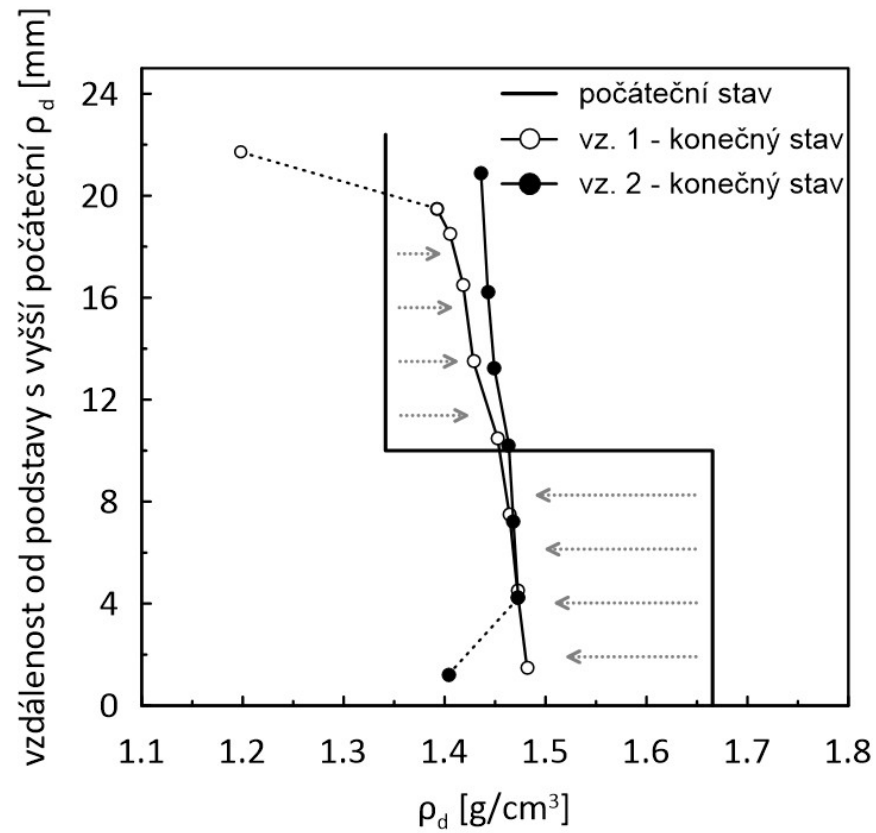


vzorek 2:

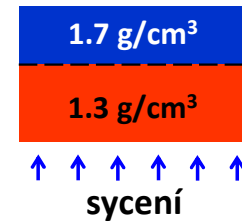


Schopnost homogenizace

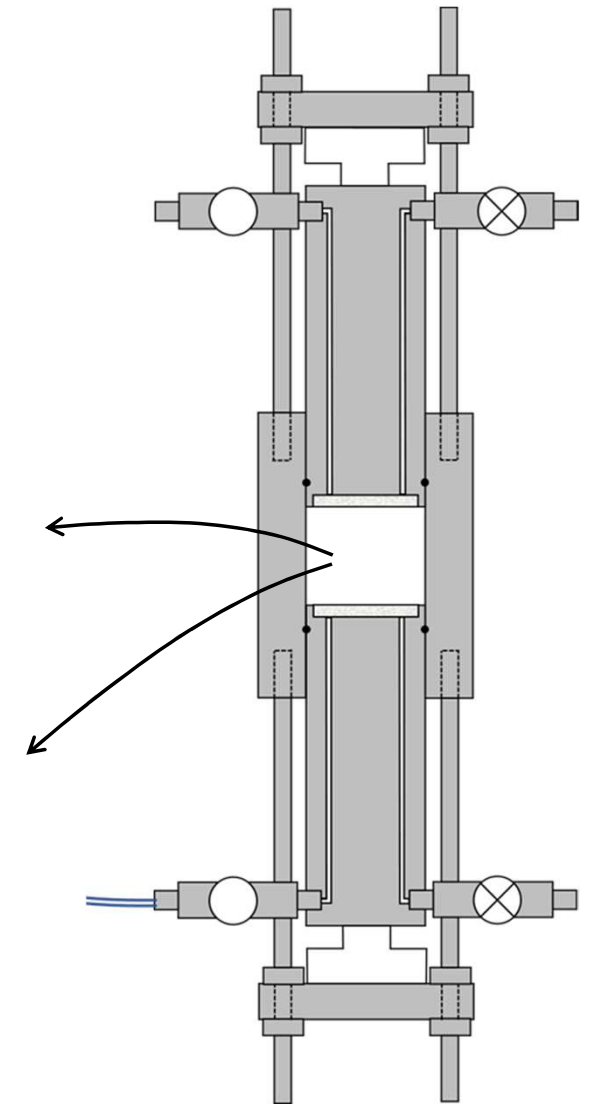
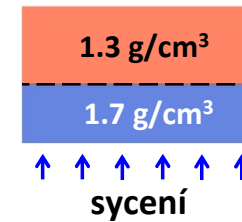
uspořádání MPC komor pro homogenizační zkoušky:



vzorek 1:



vzorek 2:



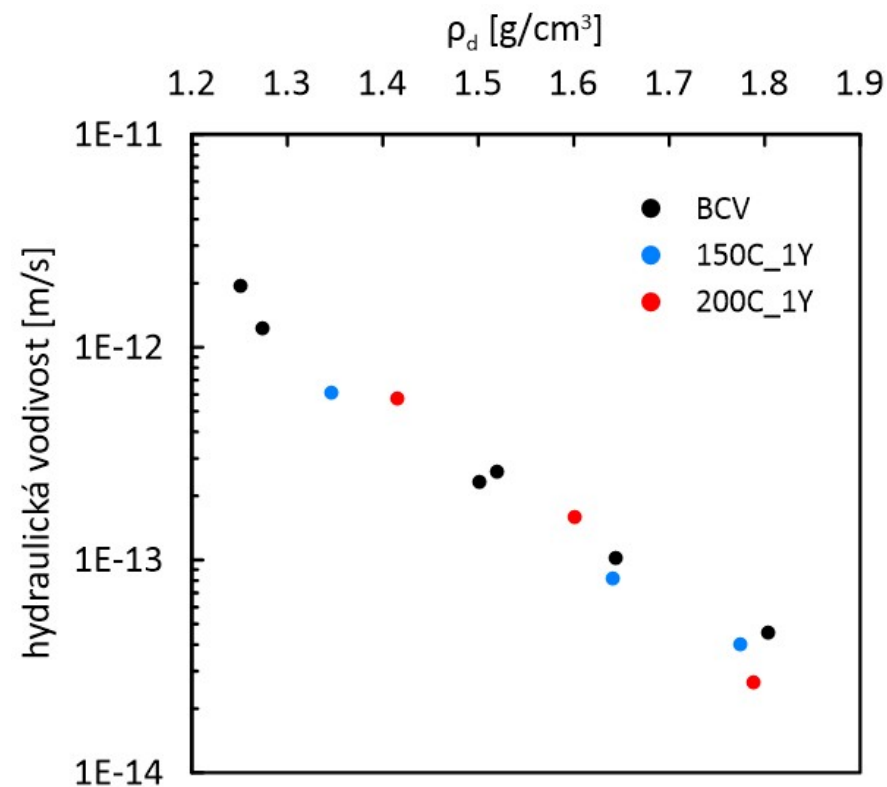
Vliv teploty na chování bentonitu

DVA RŮZNÉ SMĚRY VÝZKUMU

1. zkoušky při laboratorní teplotě po předchozím tepelném zatěžování:
bentonit vystaven vysokým teplotám (150°C, 200°C) po dobu 1 roku

- minimální vliv na bobtnací potenciál
- malý vliv na hydraulickou vodivost
- snížení retenční kapacity

...z pohledu využití v hlubinném úložišti nepředstavují tyto změny zásadní problém

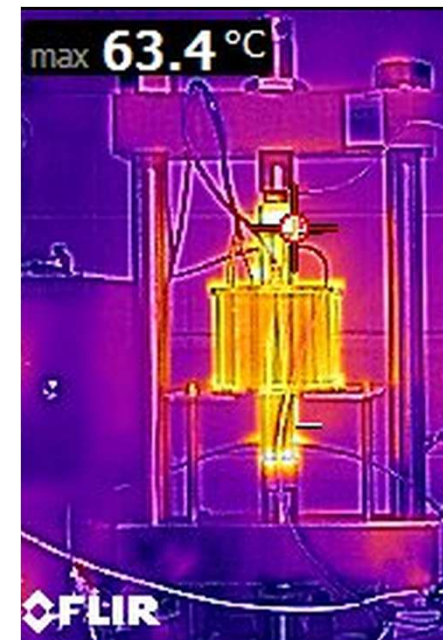
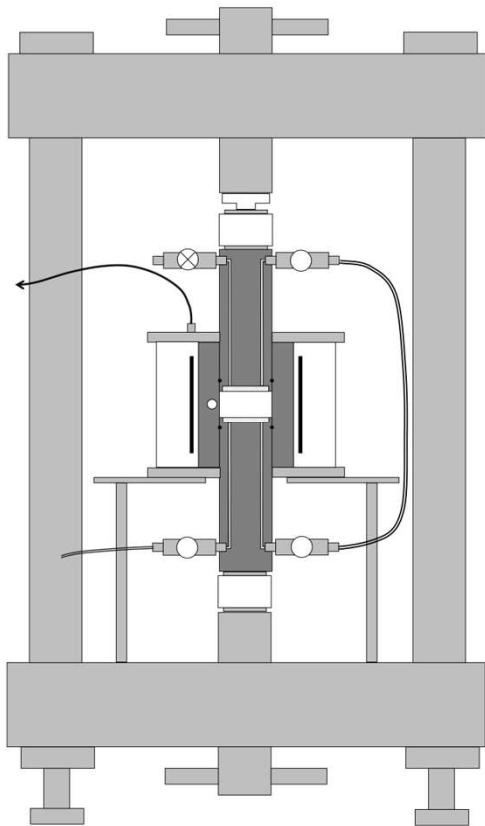


Vliv teploty na chování bentonitu

DVA RŮZNÉ SMĚRY VÝZKUMU

2. zkoušky při vysokých teplotách - přímé měření bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti při teplotách do 150°C

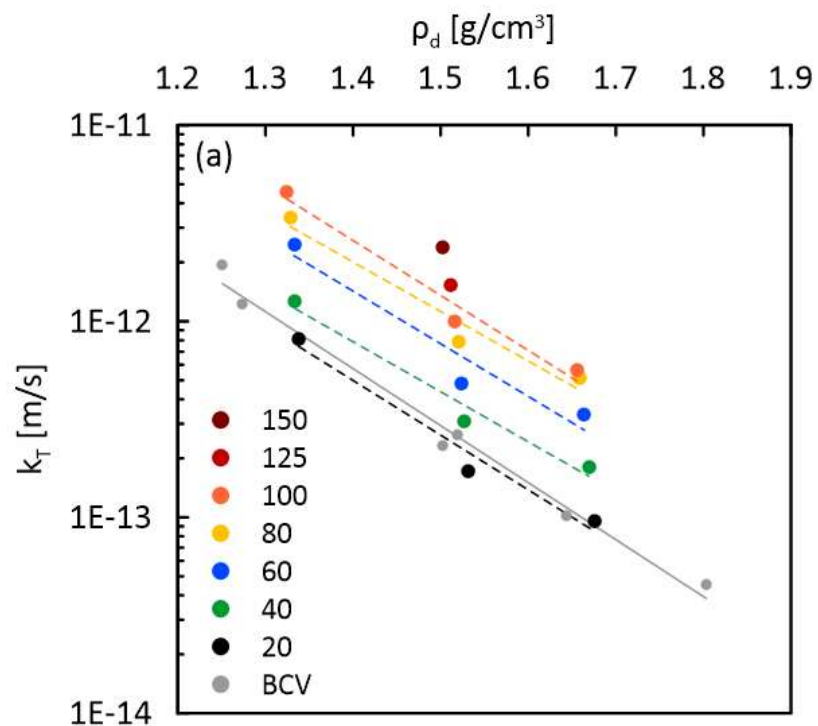
T-MPC komory pro zkoušky za vysokých teplot:



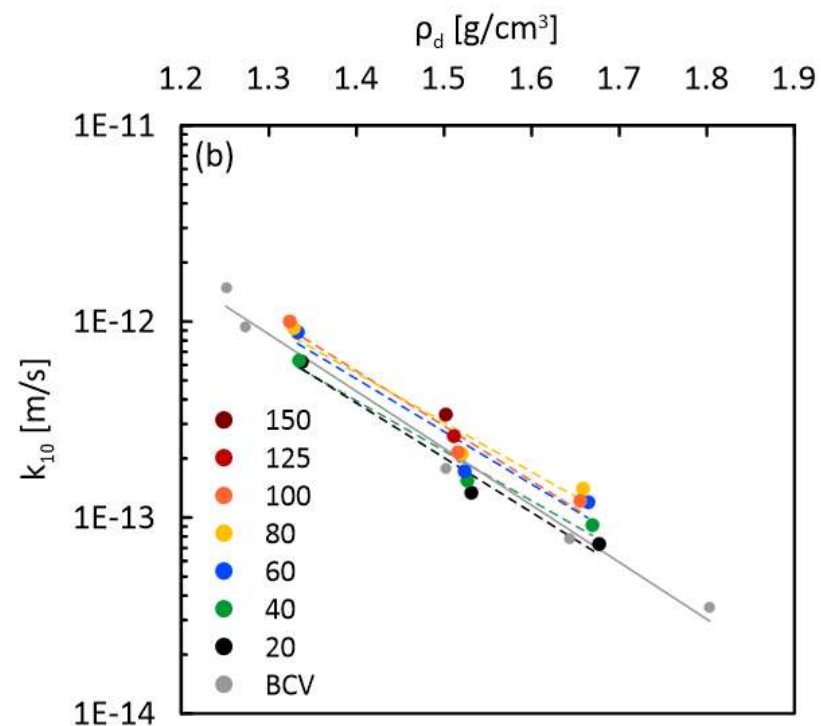
Vliv teploty na chování bentonitu

HYDRAULICKÁ VODIVOST PŘI ZVÝŠENÝCH TEPLOTÁCH:

Včetně změn vlastností vody:

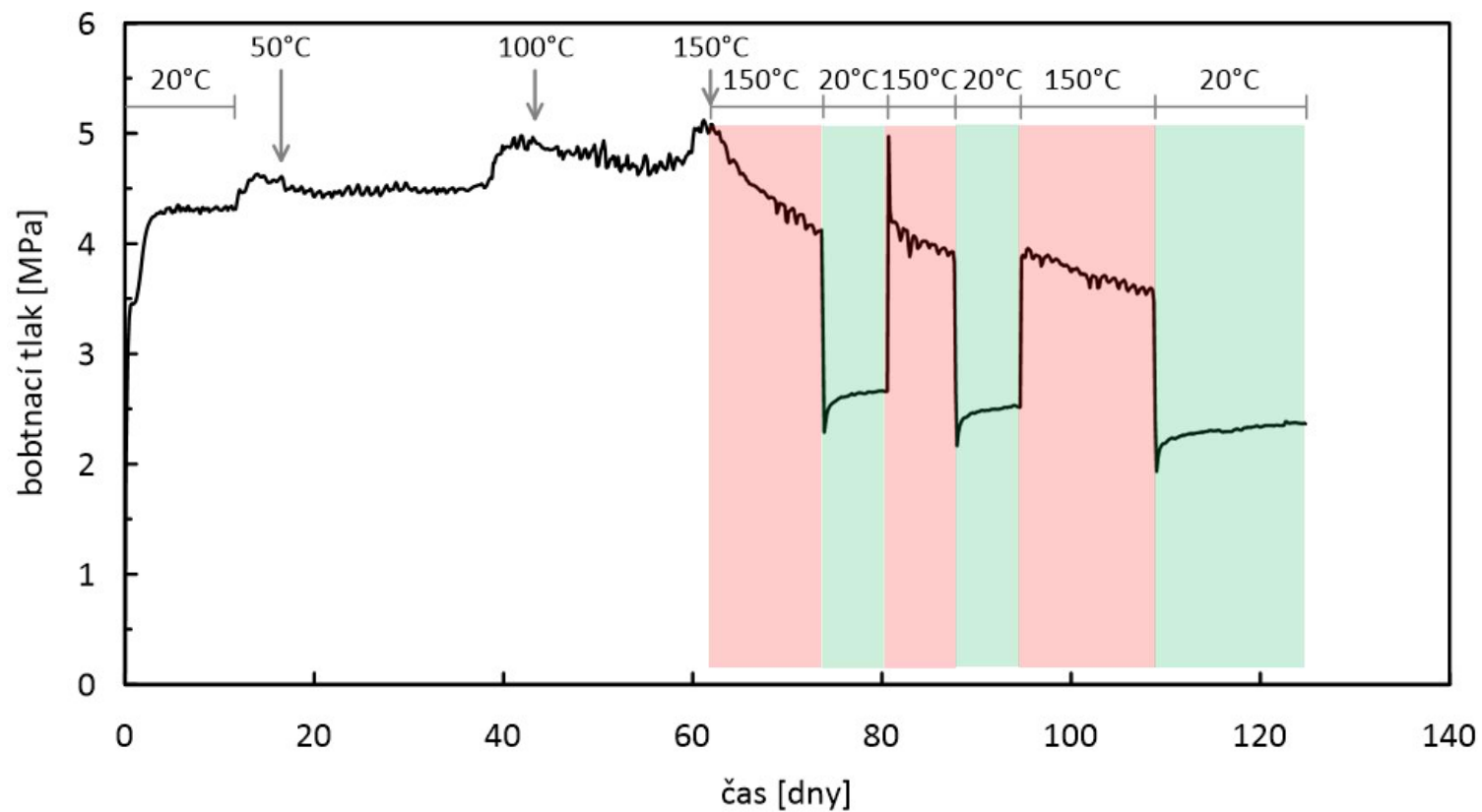


Bez vlivu změn vlastností vody:



Vliv teploty na chování bentonitu

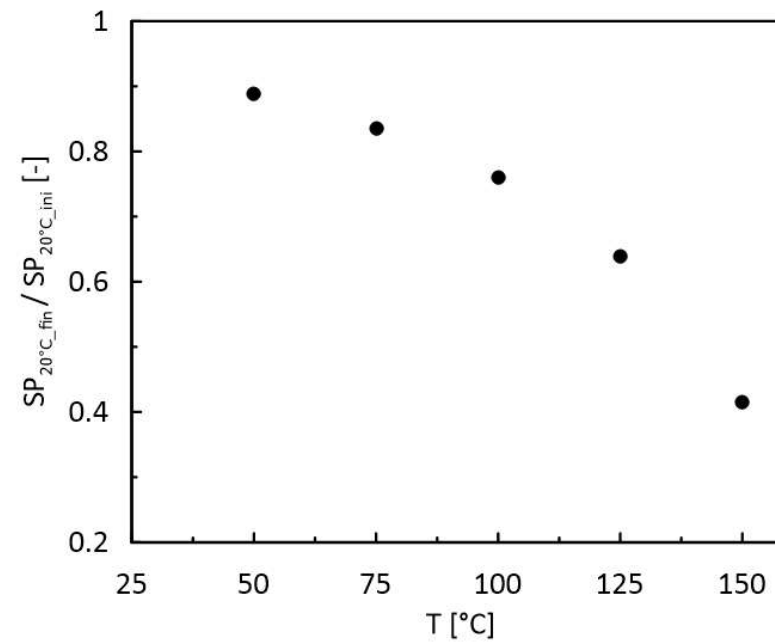
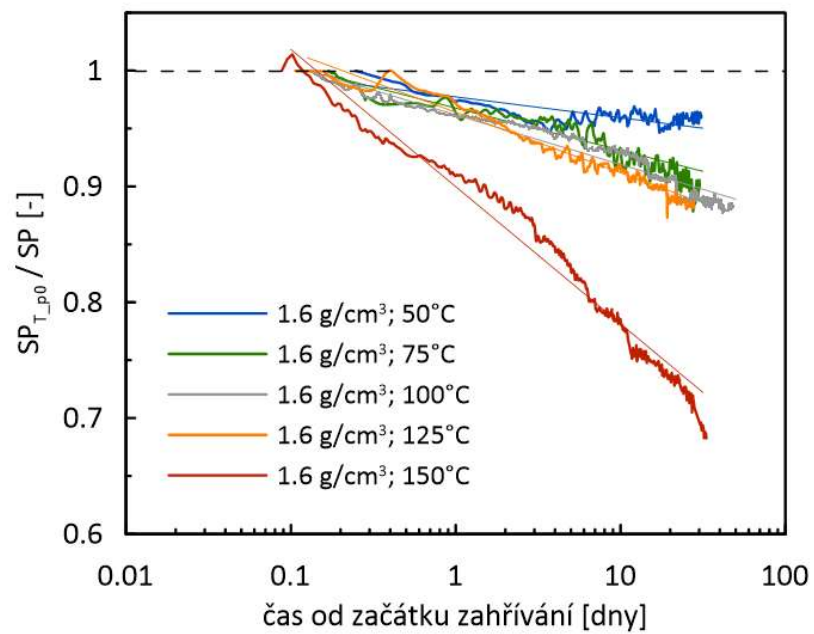
BOBTNACÍ TLAK PŘI ZVÝŠENÝCH TEPLOTÁCH:



→ při vysokých teplotách pokles bobtnacího tlaku s časem - RELAXACE

Vliv teploty na chování bentonitu

VÝZKUM TEPLOTNÍ RELAXACE:



→ pokles bobtnacího tlaku v čase má logaritmický charakter

→ rychlost poklesu se zvyšuje s rostoucí teplotou

Shrnutí

- Na PŘF byla vybudována nová laboratoř pro THM charakterizaci bentonitů v souvislosti s plánovaným úložištěm radioaktivních odpadů
- Proběhla komplexní hydromechanická charakterizace bentonitu BCV doplněná o mikrostrukturní analýzu
- Výsledky se úspěšně využily ke kalibraci konstitutivního modelu
- Výzkum homogenizace prokázal velmi dobrou schopnost homogenizace bentonitu BCV v průběhu sycení
- Vliv teploty na hydromechanické vlastnosti bentonitu BCV nelimituje zásadním způsobem jeho využití v bariéře hlubinného úložiště
- Pomocí pokročilých zkoušek za vysokých teplot se podařilo nově identifikovat a popsat teplotní relaxaci bentonitu

Publikace

1. Sun, H., Mašín, D., Najser, J., Neděla, V., Navrátilová, E. (2019). Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting-drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. **Geotechnique**, 69(8), 713-726. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.253>
2. Sun, H., Mašín, D., Najser, J., Neděla, V., Navrátilová, E. (2020). Fractal characteristics of pore structure of compacted bentonite studied by ESEM and MIP methods. **Acta Geotechnica**, 15, 1655–1671. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00857-z>
3. Sun, H., Mašín, D., Najser, J., Scaringi G. (2020). Water retention of a bentonite for deep geological radioactive waste repositories: High-temperature experiments and thermodynamic modeling. **Engineering Geology**, 269, 105549. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105549>
4. Laufek, F., Hanusová, I., Svoboda, J., Vašíček, R., Najser, J., Koubová, M., Čurda, M., Pticen, F., Vaculíková, L., Sun, H., Mašín, D. (2021). Mineralogical, geochemical and geotechnical study of BCV 2017 bentonite—the initial state and the state following thermal treatment at 200 °C. **Minerals**, 11(8), 871. <https://doi.org/10.3390/min11080871>
5. Sun, H., Scaringi, G., Mašín, D., Najser, J. (2022). An experimental investigation on the swelling behavior of compacted B75 bentonite. **Engineering Geology**, 296, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106452>
6. Svoboda, J., Mašín, D., Najser, J., Vašíček, R., Hanusová, I., Hausmannová, L. (2023). BCV bentonite hydromechanical behaviour and modelling. **Acta Geotechnica**, 18, 3193–3211. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01689-0>
7. Najser, J., Mašín, D., Svoboda, J., Vašíček, R., Hanusová, I., Hausmannová, L., Kruis, J., Krejčí, T., Sun, H. (2023). The homogenisation behaviour of BCV bentonite – A laboratory and numerical study. **Applied Clay Science**, 241, 106969. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106969>
8. Najser, J., Mašín, D. (2024). An experimental study on thermal relaxation of BCV bentonite. **Applied Clay Science**, 254, 107374. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107374>.
9. Villar, M. V., Cernochova, K., Cuevas, J., Gens, A., Gimeno, N., Graham, C., Harrington, J., Kaspar, V., Kaufhold, S., Leupin, O., Mašín, D., Najser, J., Olin, M., Reijonen, H., Šachlová, Š., Sayenko, S., Svensson, D., Svoboda, J., Vettese, G., Yliharju, J., Zlobenko, B. (2025). State of the art on thermo-hydro-mechanical behaviour of clay buffers at high temperature. **Frontiers in Nuclear Engineering** 4.

Poděkování

ŘEŠITELSKÝ TÝM NA PŘF UK

David Mašín

Marian Takáč

Adam Charvát (DP, BP)

Kryštof Mach (DP)

Haiquan Sun (PhD)

Pavλίna Slezáková (DP)

Bianca Georgina Severini

MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZY

I. Sedlářová (VŠCHT), V. Neděla (AV ČR), A. Ďuriš (katedra biochemie PŘF UK)

PARTNERSKÉ INSTITUCE

SÚRAO, CEG ČVUT, ČGS, ÚJV ŘEŽ

Poděkování

FINANČNÍ PODPORA

	Poskytovatel	Název projektu	Doba řešení
běžící projekty	SÚRAO	Relaben - Stress relaxation of bentonite at high temperatures	2025-2027
	ERC SEP-210993224	EURAD 2 - European Partnership on Radioactive Waste Management 2	2024-2029
	MŠMT, EU - OP JAK špičkový výzkum	Přírodní a antropogenní georizika	2024-2028
ukončené projekty	TAČR TK01030031	Bentonite barrier 200°C	2018-2025
	ERC H2020 NFRP-2018-6	EURAD European Joint Programme on Radioactive Waste Management	2019-2023
	UK UNCE/SCI/006	Centre for Geosphere Dynamics	2018-2023
	TAČR TK01010063	Numerical modelling and laboratory characterisation of bentonite barrier for radioactive waste disposals in the Czech Republic	2018-2022
	ERC H2020 NFRP-2016-2017 745942	"BEACON" Bentonite Mechanical Evolution	2017-2021

Literatura

- Hausmannová, L., Dohnálková, M., Matušková, E, Lahodová, Z. a Augusta, J. (2023). Technické řešení hlubinného úložiště 2023. SÚRAO TZ 711/2023, Praha.
- Karnland, O., Olsson, S. a Nilsson, U. (2006). Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Technical Report No. TR-06-30, SKB.
- Mašín, D. a Khalili, N. (2016). Swelling phenomena and effective stress in compacted expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(1): 134-147.
- Nelson, J.D., Chao, K.C., Overton, D.D. a Nelson E.J. (2015). *Foundation engineering for expansive soils*. John Wiley & Sons.
- Posiva (2010). Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants; Review of Current Status and Future Plans for 2010 –2012, Posiva report TKS-2009, Posiva, Finland.
- Saiyouri, N., Tessier, D. a Hicher, P.Y. (2004). Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays. *Clay Minerals*, 2004, 39 (4), 469- 479.
- Seiphoori, A., Ferrari, A. a Laloui, L. (2014). Water retention behaviour and microstructural evolution of MX-80 bentonite during wetting and drying cycles. *Geotechnique*, 64(9), 721–734.
- Sun, H., Mašín, D., Najser, J., Neděla, V. a Navrátilová, E. (2019). Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting-drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. *Geotechnique*, 69(8), 713-726.
- Vondrovic, L. et al. (2020). Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. TZ 465/2020, SÚRAO, Praha.
- Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y. a Chen, Q. (2006). Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure, *Canadian Geotechnical Journal*, 57(6), 921-932.

Děkuji za pozornost