

Charakter vysoce propustné porozity v turosských kolektorech ve východní části české křídové pánve



Jiří Starý¹, Jiří Bruthans¹, Jana Schweigstillová², Jakub Mareš¹, Martin Procházka³, Svatopluk Šeda⁴, Tomáš Novotný⁴

¹ Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Česká republika

² Česká akademie věd v.v.i., Ústav struktury a mechaniky hornin, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8, Česká republika

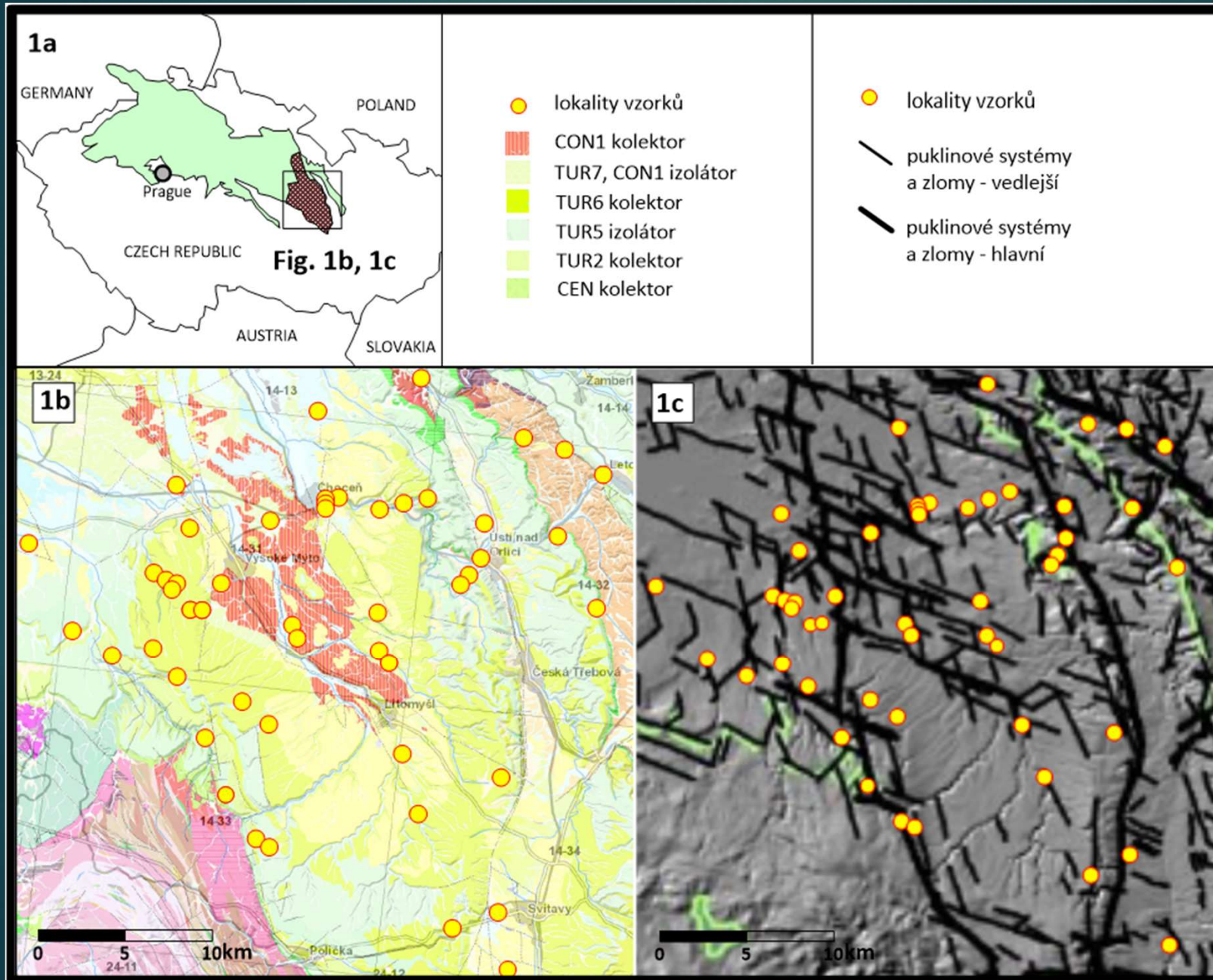
³ SG Geotechnika a.s., Geologická 988/4, Hlubočepy, 152 00 Praha 5, Česká republika

⁴ FINGEO s.r.o., Litomyšlská 1622, 565 01, Choceň

Úvod a cíl práce

- ▶ Výzkum se soustředil na oblast východočeské křídly, kde zejména **rajony** vysokomýtská a ústecká synklinála mají na svém území jedny z nejvýznamnějších vodárenských zdrojů v rámci České republiky. Východní část české křídlové pánve také vykazuje existenci největších křídlových pramenů v ČR
- ▶ Přes obrovský vodohospodářský význam východočeských křídlových kolektorů jsou značné mezery v chápání, jakou porozitu zde podzemní voda při svém proudění využívá a jak tato porozita vznikla
- ▶ Výzkum hojně využívá hydrokarotážních dat pro cílené odběry vzorků z hlavních přítokových zón významných vrtných děl
- ▶ **Cíl práce:**
 - **syntéza dostupných karotážních a hydrodynamických dat** v konkrétních vrtech; za současného využití **loužicích experimentů** na vzorcích z vrtných jader **specifikovat a popsat vysoce propustnou porozitu v polohách hlavních vodárensky využívaných kolektorů**
 - formou studia povrchových výchozů a loužicích testů **vypracovat konceptuální model vzniku otevřených puklin a kanálů**

Vymezení zájmové oblasti

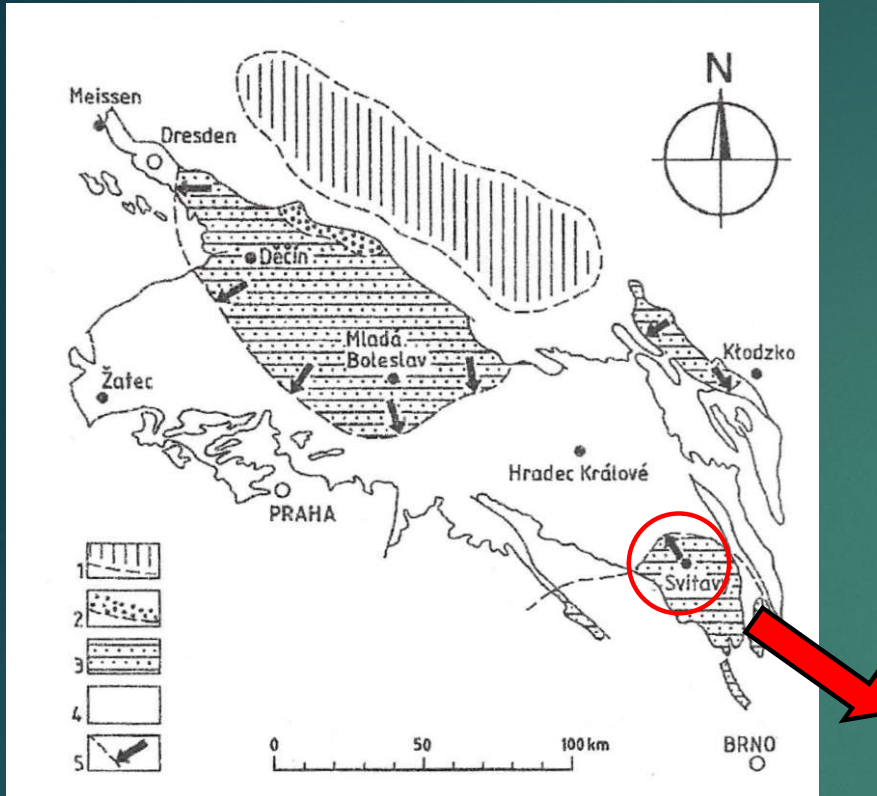


1a) lokalizace studovaného areálu v rámci České republiky a české křídové pánve

1b) topografická a geologická mapa na mapovém základě snímků Lidar

1c) morfostrukturní analýza puklinových systémů a zlomů křídových sedimentů na podkladu DMR 25.

Litofaciální a stratigrafické začlenění oblasti



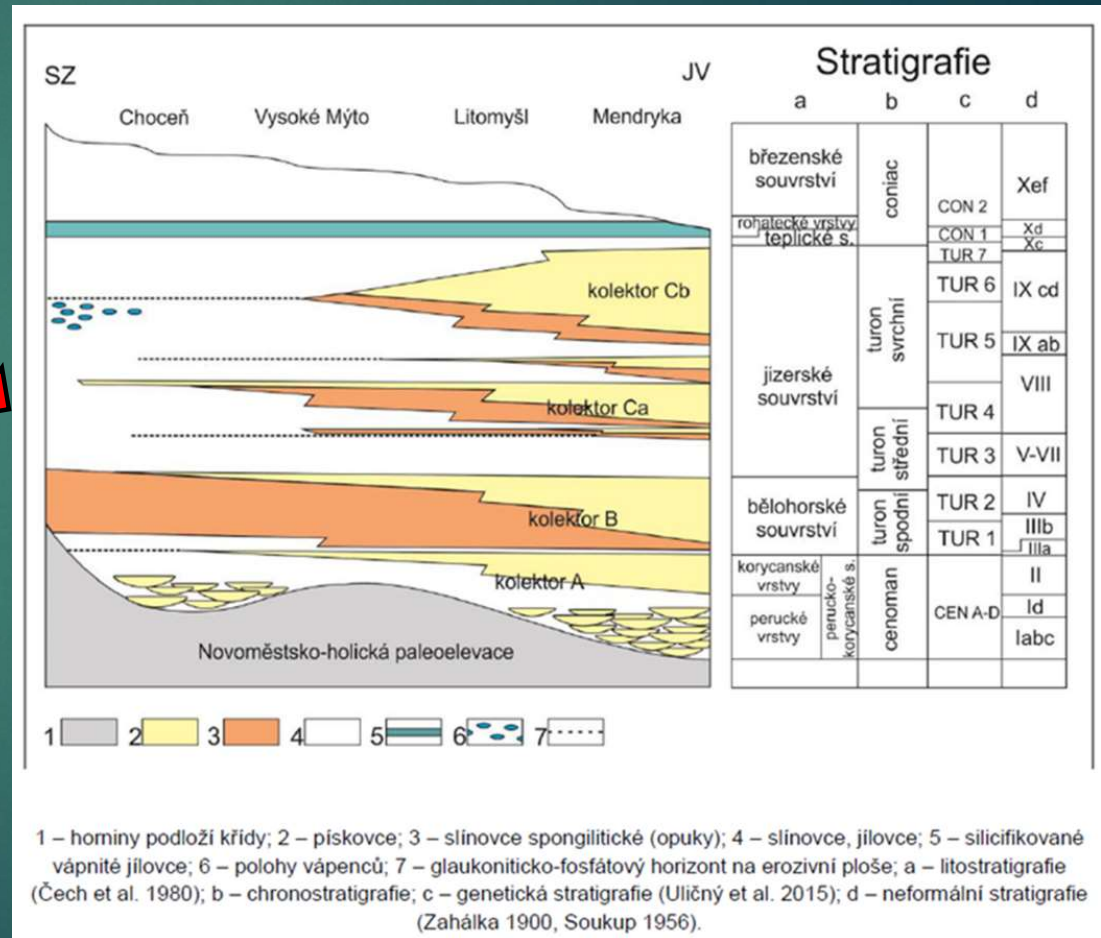
progradační - obsahuje především siliciklastický materiál hrubší frakce

pánevní - převažují karbonáty a slínovce (Herčík et al. 1999).

přechodní facie - široká škála

litotypů:

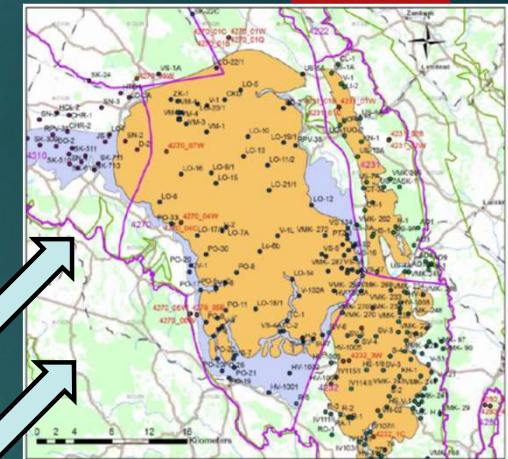
spongilitické slínovce a pískovce, křemité spongility, rohovce, pískovce - jemnozrnné až střednězrnné vápnité pískovce, vápence s různým podílem jemnozrnné matrix a vápnitého či křemičitého tmelu.



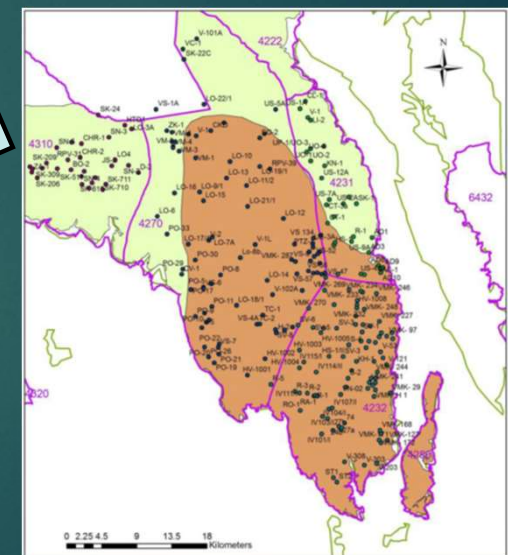
Zdroj: Kadlecová et al. (2016)

Litostratigrafické začlenění studovaných kolektorů

litostratigrafie (Čech et al. 1980)	stáří	stratigrafie (Soukup 1952)	litologie	hydrogeologický charakter	
březenké souvrství Kbz	C O N	Xef	vápnité jílovce	regionální izolátor	
rohatecké vrstvy Kr	I A C	Xd	silicifikované vápnité jílovce (inoceramové opuky)	nevýznamný puklinový kolektor Dr	
teplické souvrství Kt		Xabc	vápnité jílovce, slínovce	izolátor D/C	
jízerské souvrství Kj	T	IXcd	vápnité (kalliasosové) pískovce až prachovce; slínovce, vápence	puklinový kolektor Cb; na S od Tiché Orlice přechází v izolátor	
	U		střední	IXab	slínovce až jílovité vápence
	R	VIII		písčité slínovce, prachovce, na J pískovce	puklinový kolektor Ca, na S převážně izolátor
	O	V–VII		slínovce	izolátor C/B; v okolí Poličky uprostřed izolátoru C/B je lokální kolektor písčitých slínovců
	N				
bělohorské souvrství Kb		spodní	IV	spongilitické vápnité pískovce a prachovce	puklinový kolektor B
			IIIb	spongilitické a prachovité slínovce	izolátor B/A
			IIIa	slínovce	
perucko-korycanské souvrství Kpk	C E N O M A N	korycanské vrstvy	pískovce, slepence převážně s jílovitým tmelem, polohy jílovců	průlinovo-puklinový kolektor A	
		perucké vrstvy			I



Plošné vymezení subkolektorů Ca (šedě) a Cb (hnědě)



Rozsah kolektoru B s vyznačením facie vápnitých pískovců s rohovci (hnědě) a spongilitických prachovců (zeleně)

Vztah litostratigrafie a hydrogeologického charakteru (přehled kolektorů a izolátorů) v HGR 4270 dle Kadlecové et al. (2016)

Metodika odběru a zpracování vzorků

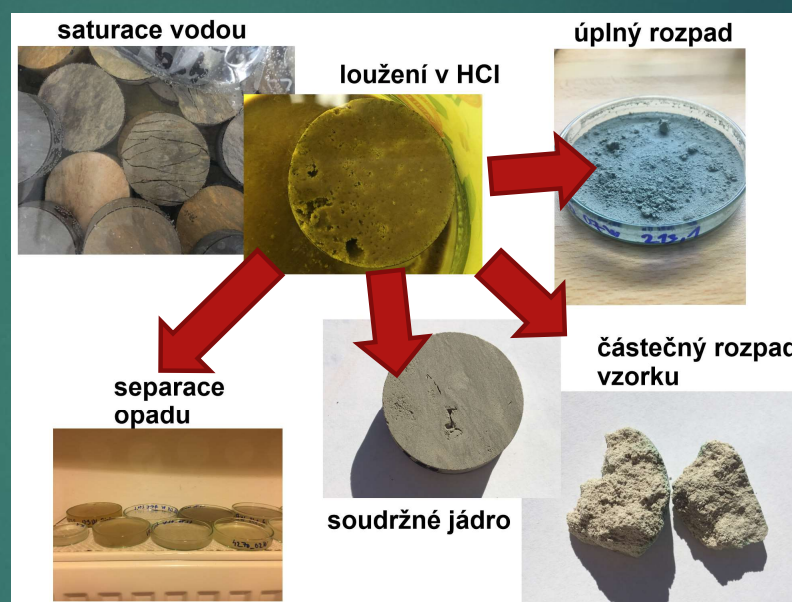
- ▶ odebírány vzorky z povrchových výchozů i vrtných jader, vždy v páru



- ▶ obsah CaCO_3 – metoda kalcimetrie (coulometricky CO_2 , oxidy-analýza FAAS), kalcit – molární výpočet

- ▶ jádra – saturace vodou, loužení v 10% HCl – určení obsahu rozpustné složky, porozity a míry rozpadu

- ▶ leštěné vzorky – obsahy Ca, Si, Na, K, Al analyzovány mikrosondou (SEM-EDS) - vizualizace distribuce karbonátu, křemene, živců a jílových minerálů



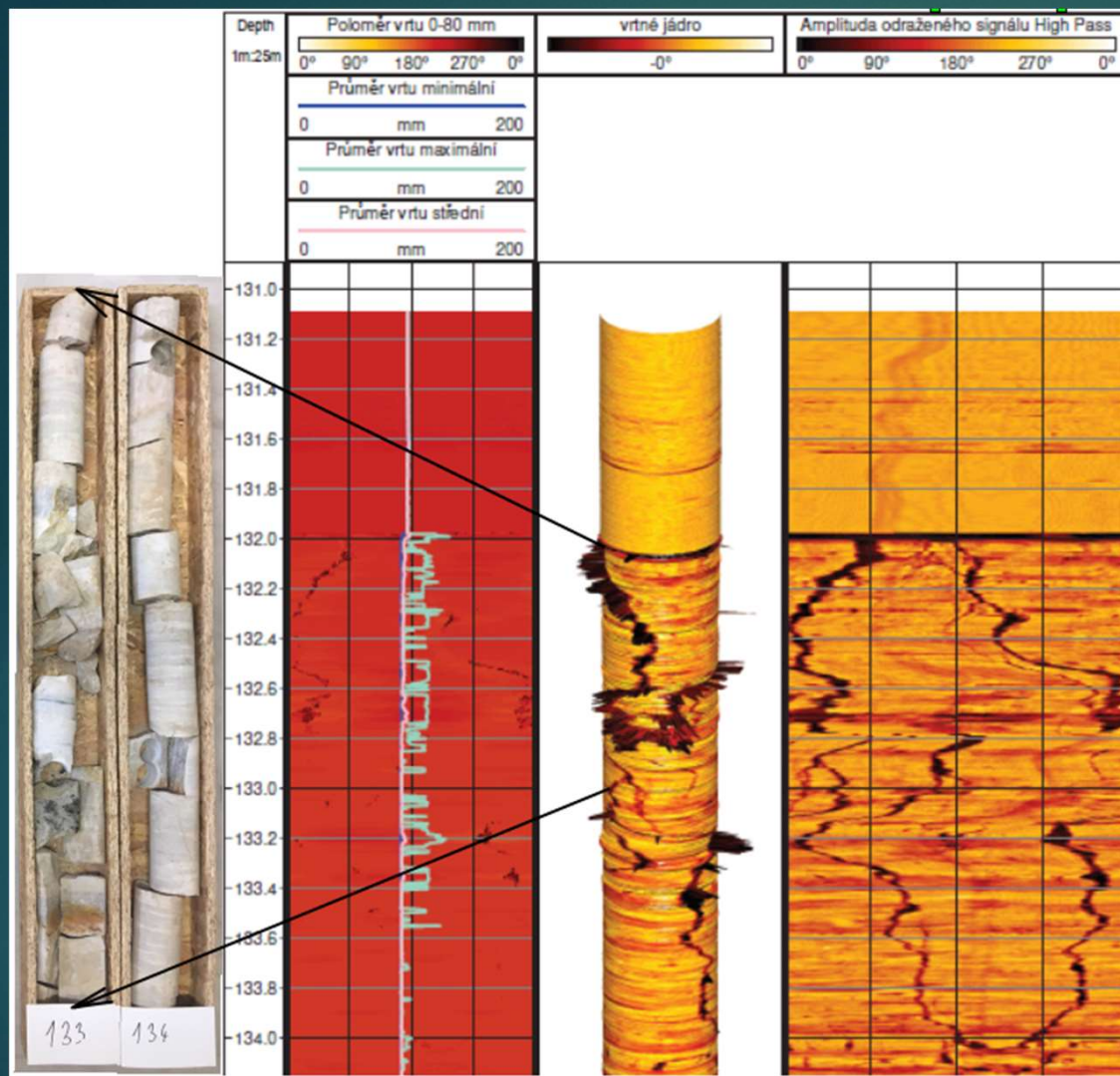
metoda založená na Archimédově zákonu - metoda trojího vážení pro získání parametrů V , m_s , ρ , n

označení	význam	jednotka/rozměr
m_{1n}	hmotnost suchého vzorku před loužením	g
m_{1s}	hmotnost nasyceného vzorku před loužením	g
m_{2n}	hmotnost suchého vzorku po loužení	g
m_{2s}	hmotnost nasyceného vzorku po loužení	g
m_0	Hmotnost nesoudržné složky	g
ρ	zdánlivá objemová hmotnost	g/cm^3
V	zdánlivý objem vzorku	cm^3
n_1	přibližná porozita před loužením	% (obj.)
n_2	přibližná porozita po loužení	% (obj.)
Δn	rozdíl porozity n_1-n_2	% (obj.)
RS	podíl rozpustných složek	% (hm.)
Y	míra rozpadu	% (hm.)

$$Y = m_{2n} / (m_{2n} + m_0)$$

$$RS = [(m_{1n} - m_{2n}) / m_{1n}] \cdot 100 [\%]$$

Akustický skener a další využití hydrokarotážní metody



Dále byly využity zejména metody:

- kavernometrie
- rezistivimetrie (metoda ředění označené kapaliny, metoda čerpání nebo nálevu označené kapaliny)
- průtokoměry
- fotometrie
- TV prohlídky
- neutron-neutron karotáž
- gama karotáž



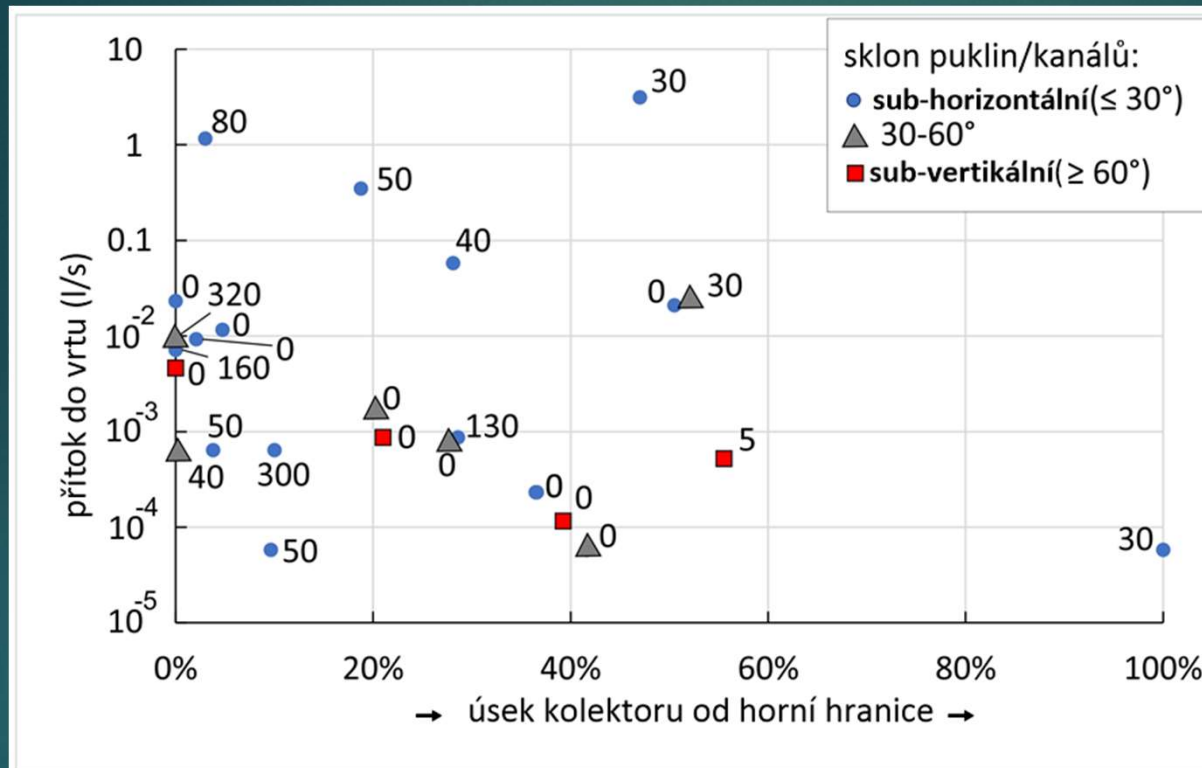
Na základě měření akustickým skenerem lze identifikovat poruchy a jejich prostorovou orientaci (směr a sklon puklin nebo vrstevních rozhraní), kaverny a kanály, jejich tvar a šířku rozevření.

Zdroj: Procházka et al., 2015

Podklady z akustických a dalších hydrokarotážních měření byly převzaty zejména z akce Rebilance zásob podzemních vod ČR a následně interpretovány společně s výsledky loužicích testů.

Výsledky

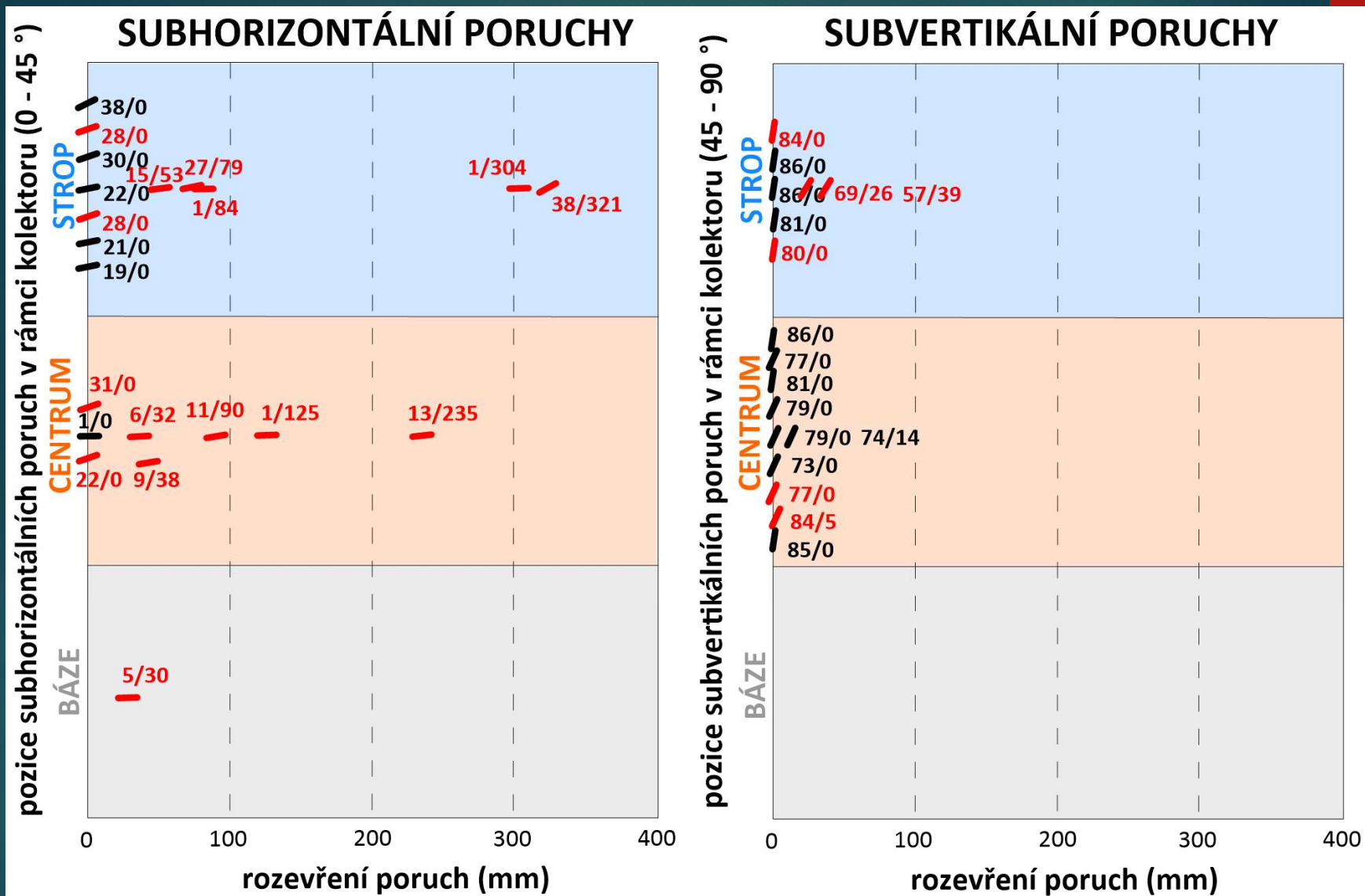
Vyhodnocení pozice a funkce poruchových systémů ve vrtech dle akustické karotáže



zásadní zjištění:

v případě subhorizontálních poruch byly dokumentovány přítokové zóny celkem u 71 % těchto poruch (zejména přítoky > 0.1 l/s), v případě subvertikálních je to pouze 35 %.

- Celkem 13 přítokových zón pochází z otevřených poruch, 8 přítoků bylo registrováno v úsecích sevřených poruch.
- Poměr otevřených puklin v centrální a stropní části kolektorů je celkem vyrovnaný a činí 6 resp. 7. V bazální části kolektorů nejsou identifikovány téměř žádné pukliny.
- Na rozhraní izolátorů a kolektorů mohou vznikat výrazné preferenční zóny proudění podzemní vody, jedná se převážně o poruchové zóny podmíněné rozpouštěním a mechanickým účinkem tlakové vody.



Červeně jsou znázorněny **aktivní poruchové zóny** (s přítoky podzemní vody), černě **pasivní poruchy**, kde nebyly hydrokarotážními metodami přítoky detekovány. Čísla u značek poruch zobrazují sklon/rozevření poruchy.

Hlavní přítoky podzemní vody jsou vázány na rozevřené převážně subhorizontální pukliny.

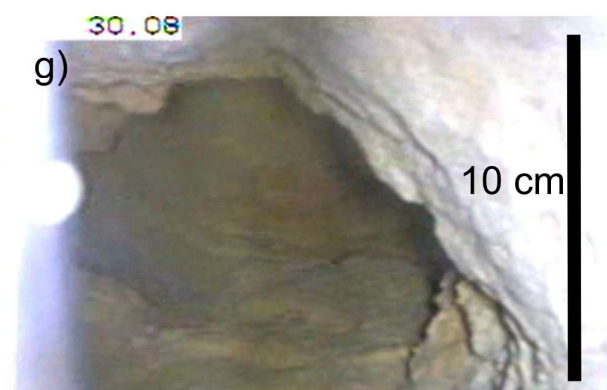
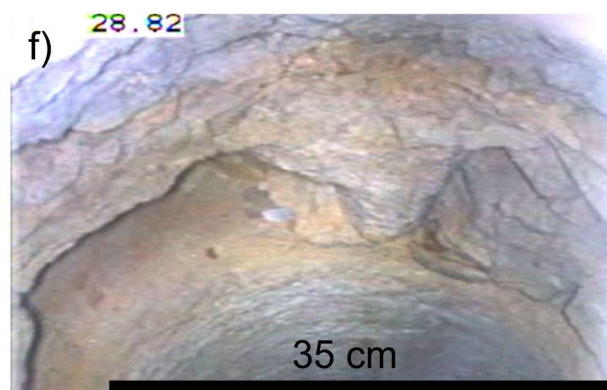
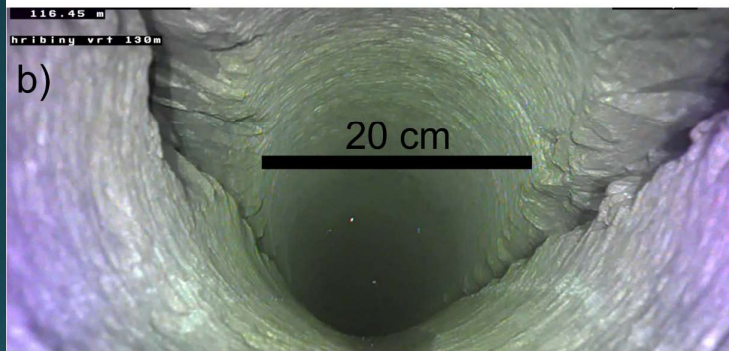
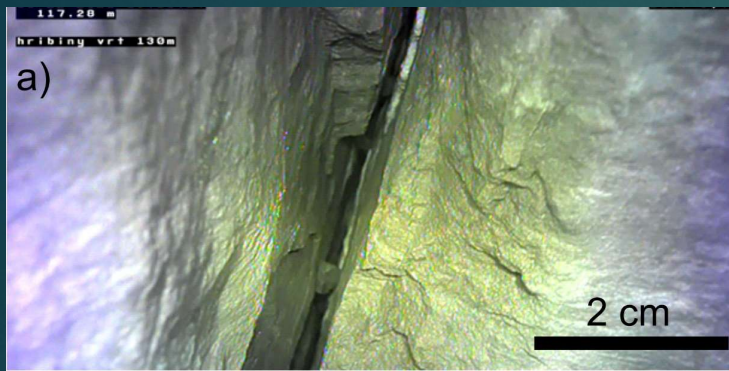
Příklady subhorizontálních a subvertikálních aktivních přítokových zón do studovaných vrtů

Obr. a,b,c) - Hřibiny-
Ledská – kolektor B –
přítok 5 -10 l/s

Obr. d) - Lubná –
kolektor Cb báze-
přítok 0,05 l/s

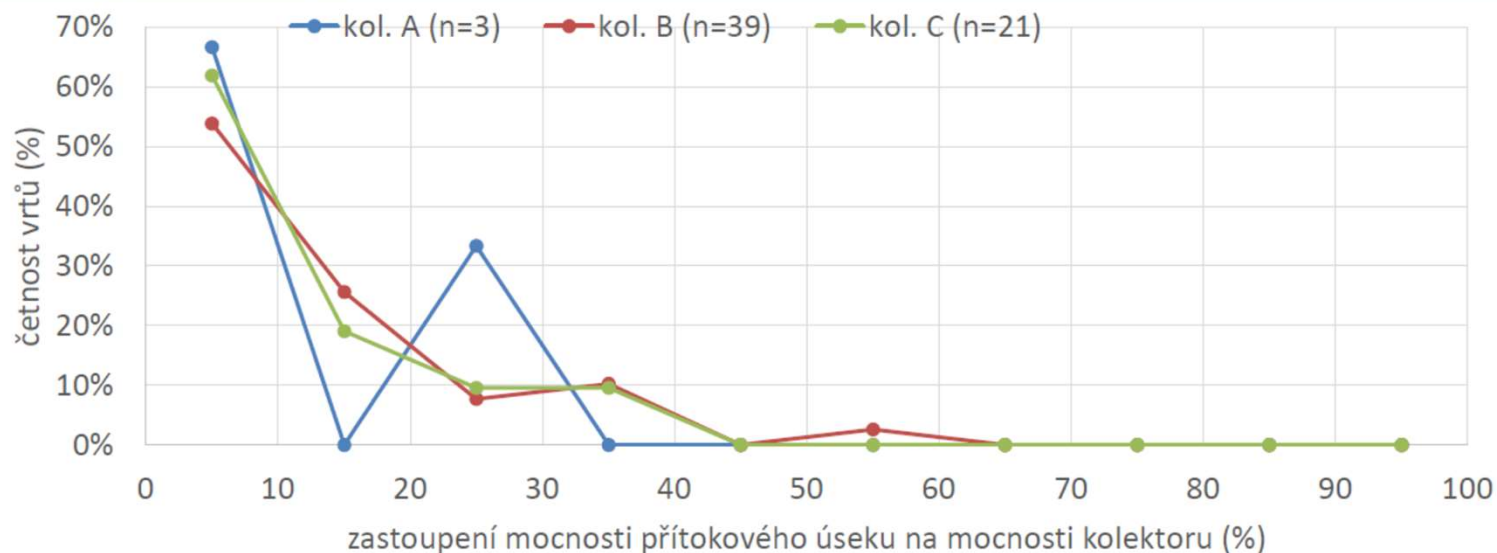
Obr. e) Javorníček –
kolektor C

Obr. f,g) Perla 06 Ústí
n.O. – kolektor Cb
centrální část – přítoky
36 l/s)



Lokalizace a charakter hlavních přítoků do vrtů byl studován na 65 vrtech.

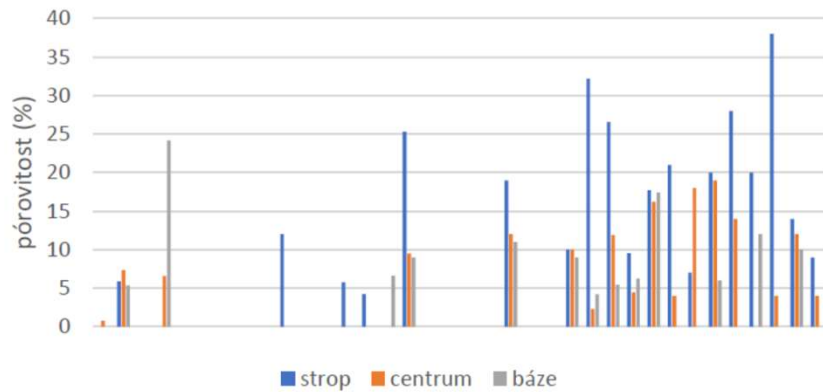
- v turonských kolektorech dochází k hlavním přítokům v průměru jen z **10%** **mocnosti kolektoru**
- převažují přítoky 0,5-1 l/s na metr přítokové zóny, ale v **12-18 %** případů **byly dokumentovány extrémní přítoky s vydatností přes 10 l/s na metr přítokové zóny**
- nejvydatnější vrty mívají **vysokou výtlačnou výšku** hladiny podzemní vody vůči stropu studovaných kolektorů



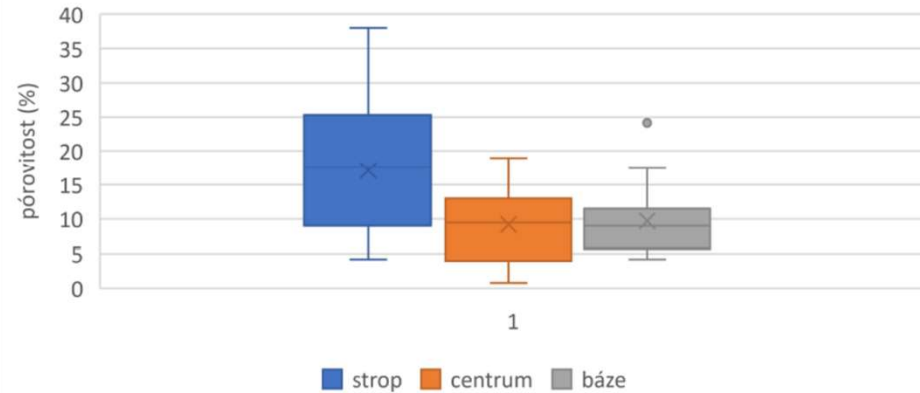
Graf podílu
mocnosti
přítokových zón
vůči celkové
mocnosti
kolektorů

Grafické závislosti pórovitosti a obsahu CaCO_3 na poloze vzorků v rámci kolektorů B, Ca a Cb

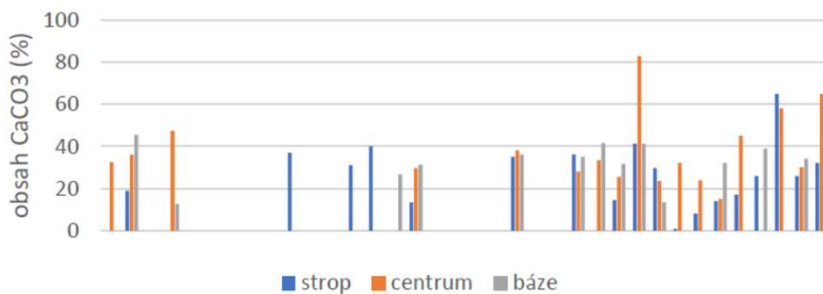
Graf závislosti pórovitosti na poloze v rámci kolektorů B, Ca a Cb



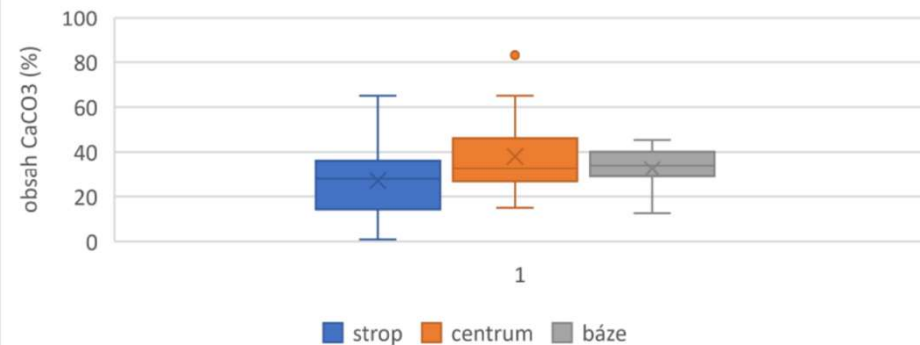
Krabicový graf závislosti pórovitosti na poloze v rámci kolektorů B, Ca a Cb



Graf závislosti obsahu CaCO_3 na poloze v rámci kolektorů B, Ca a Cb

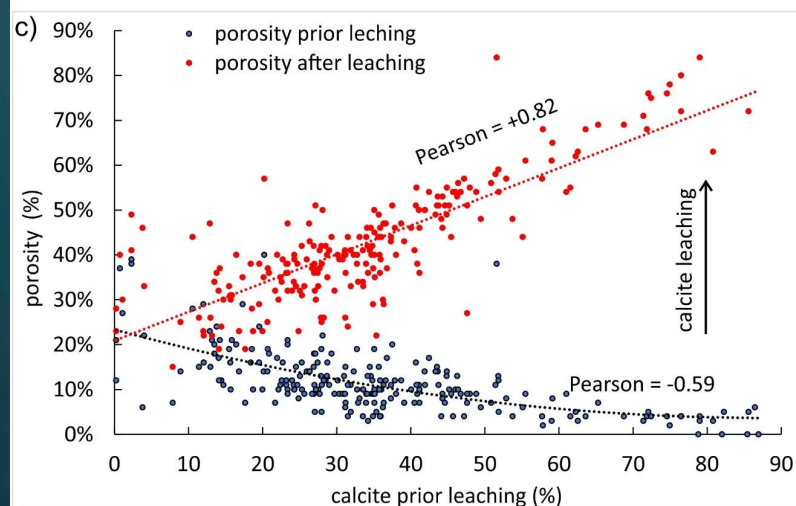
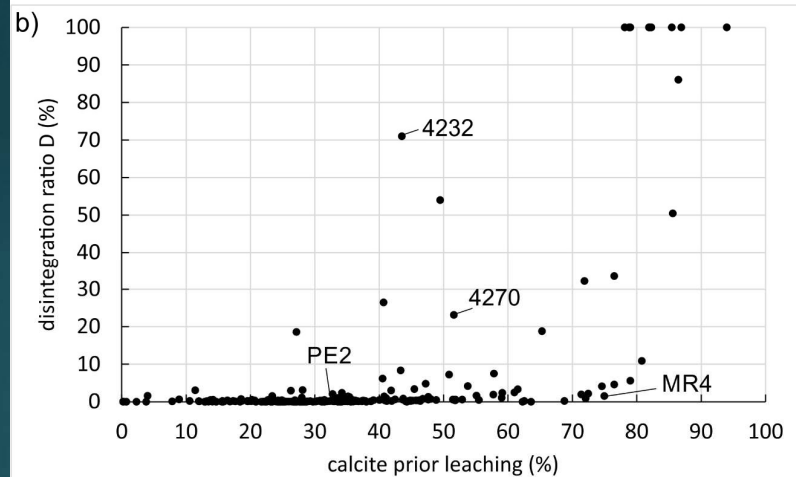
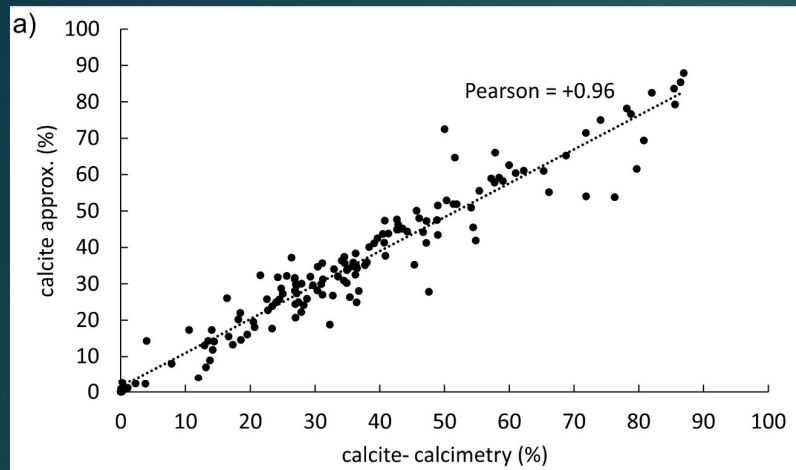


Krabicový graf závislosti obsahu CaCO_3 na poloze v rámci kolektorů B, Ca a Cb



Data z celkem 12 vrtů v rámci výzkumu východočeské křídly ukazují, že nejvyšší porozita byla dokumentována v prostoru stropu kolektorů, nejvyšší obsah CaCO_3 při bázi kolektorů. Pokles obsahu CaCO_3 - vykompenzován nárůstem pórového prostoru.

Prouděním podzemní vody došlo k vyloužení kalcitu a tím k nárůstu porozity horniny.



Obsah CaCO_3 ve vzorcích z vrtů - široké rozmezí 0,3 – 86,9 % hm, průměrně činí 35,8 % hm. Obsah CaCO_3 ve vzorcích z povrchových výchozů je srovnatelný - rozpětí 0 – 85,4 % hm, prům. činí 36,4 % hm (graf a).

Graf b) - velmi nízká míra rozpadu vzorků a překvapivě vysoká stabilita vzorků, které před loužením obsahovaly až 80 % hm !! CaCO_3

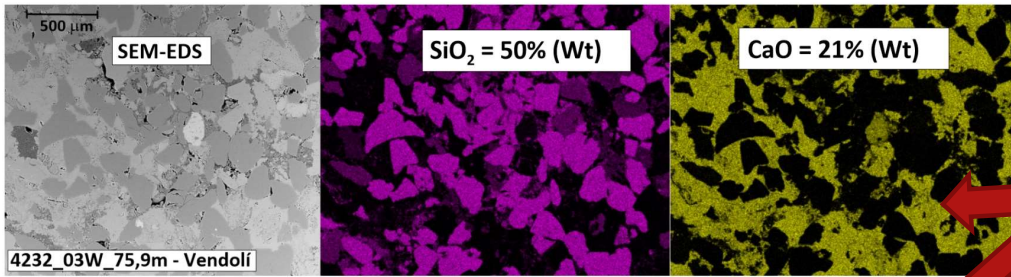
➔ 20 % zbývajícího materiálu udrží stabilní strukturu horniny !! ➔

Hranice kritického obsahu kalcitu, která vede k úplnému rozpadu, je velmi vysoká (79-86 hm. %).

Vyluhování CaCO_3 vede spíše ke zvýšení pórovitosti na neobvykle vysoké hodnoty než k rozpadu vzorků (graf c).

Na základě těchto zjištění byla u vybraných vzorků ze všech skupin (nestabilní, středně stabilní a extrémně stabilní po loužení v HCl) provedena **analýza mikrosondou (SEM-EDS)**.

Vzorek 4232_03W-75,9 m - středně zrnitý vápnitý křemitý pískovec

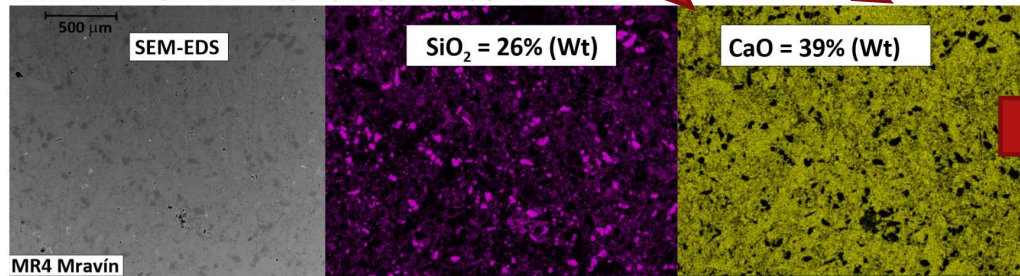


míra rozpadu 71 %

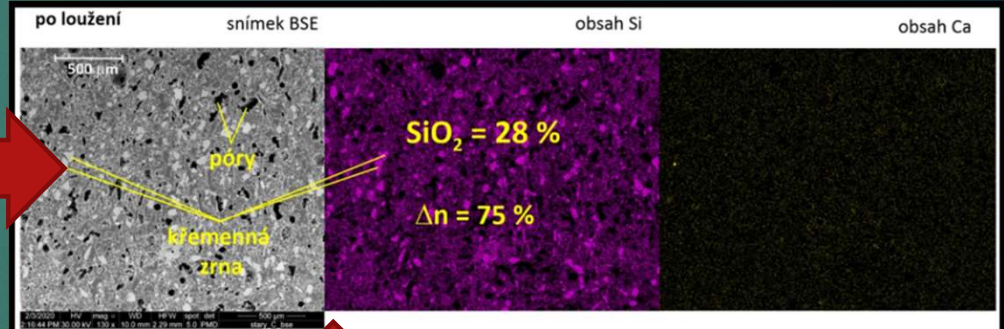
Snímky z vrtu Vendolí během a po loužení zachycují kompletní rozpuštění vápnité složky a následný výrazný rozpad vzorku bez podpůrné struktury křemičitého tmelu.

Na snímcích Si jsou u nevyloženého vzorku MR4 jsou dobře patrná relativně rovnoměrně rozptýlená „plovoucí“ křemenná zrna o velikosti do 100 µm v křemičitém a kalcitovém tmelu, póry v hornině nejsou viditelné.

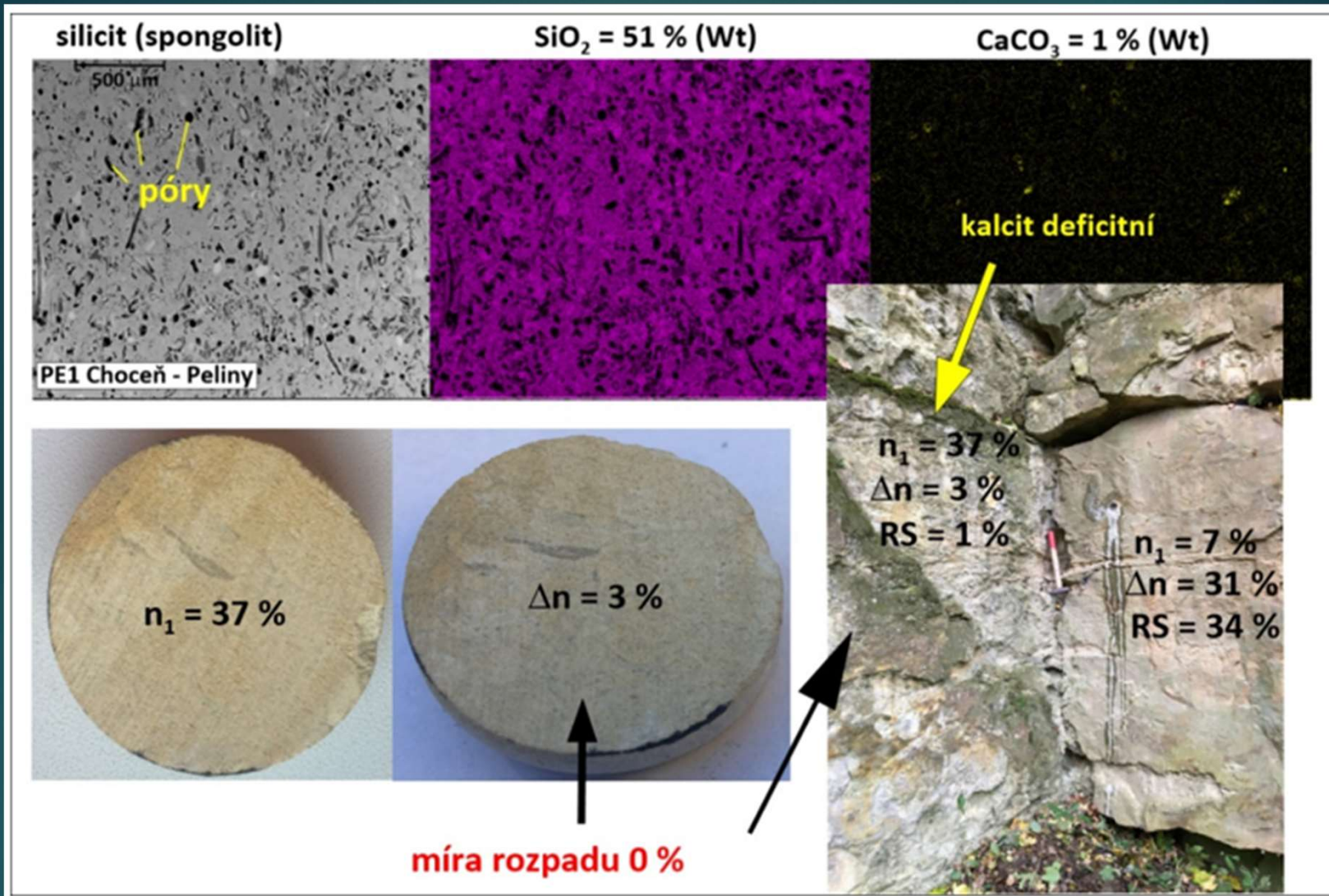
Vzorek MR4 - jemně zrnitý vápnitý křemitý pískovec



míra rozpadu 1,5 %



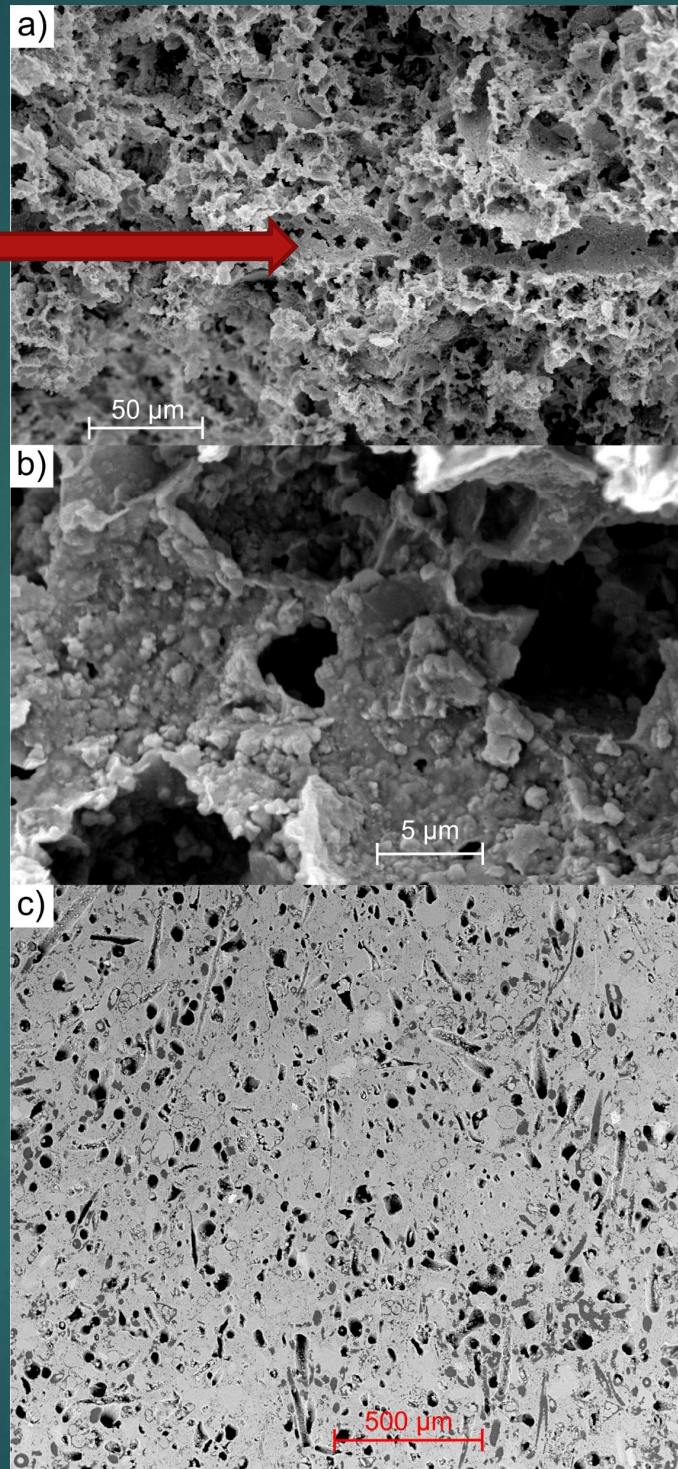
Po vyloužení rozpustné složky výrazně vyniká reliéf křemičitého tmelu, včetně širokých pórů o průměru až 200 µm, které jsou celkem rovnoměrně rozmístěny.



Snímky SEM a fotodokumentace vzorků PE1. Na snímku BSE je patrná výrazná porézní struktura silicitu (původně vápnitého pískovce) a na dalších snímcích SEM významný rozdíl mezi obsahy SiO_2 a CaCO_3 ve vzorku před loužením. Na fotodokumentaci výchozu je patrný zjevný makroskopický rozdíl mezi porušenou zónou postiženou dekalifikací a masivní nenarušenou horninou.

trubicovité otisky jehlic
mořských hub -
původně tvořeny
biogenním opálem,
který se při diagenézi
rozpustil

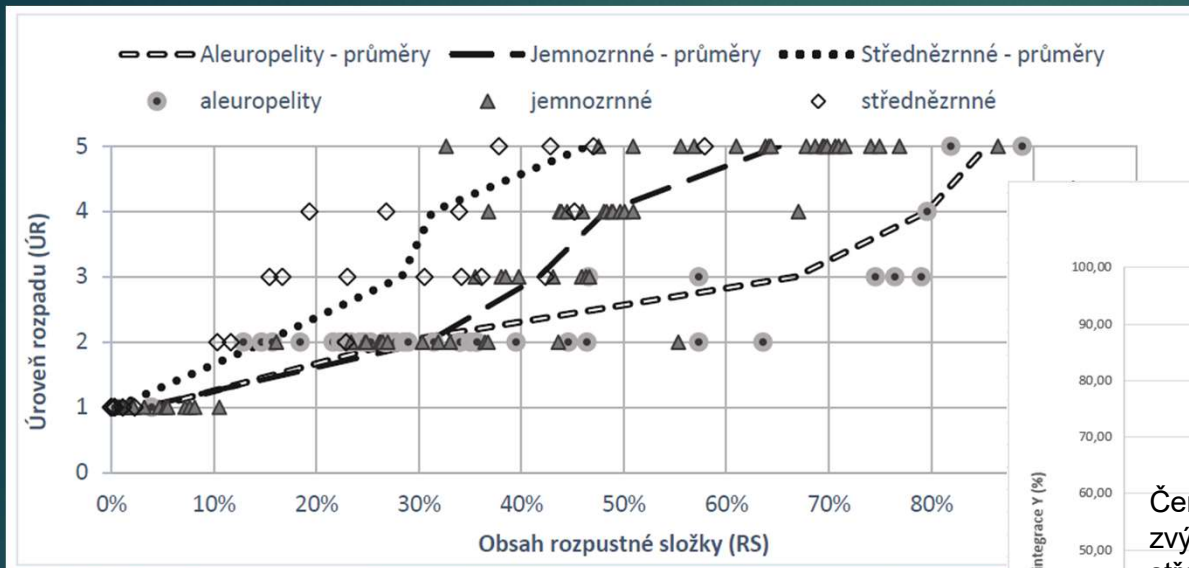
**Vzorek z
výchozu PE2
po loužení v
HCl, 78 %
pórovitost**



Mikrokrystalický
křemitý tmel ve
vápnitých pískovcích
má zásadní vliv na
vyšší soudržnost a
odolnost vzorků vůči
rozpouštění.

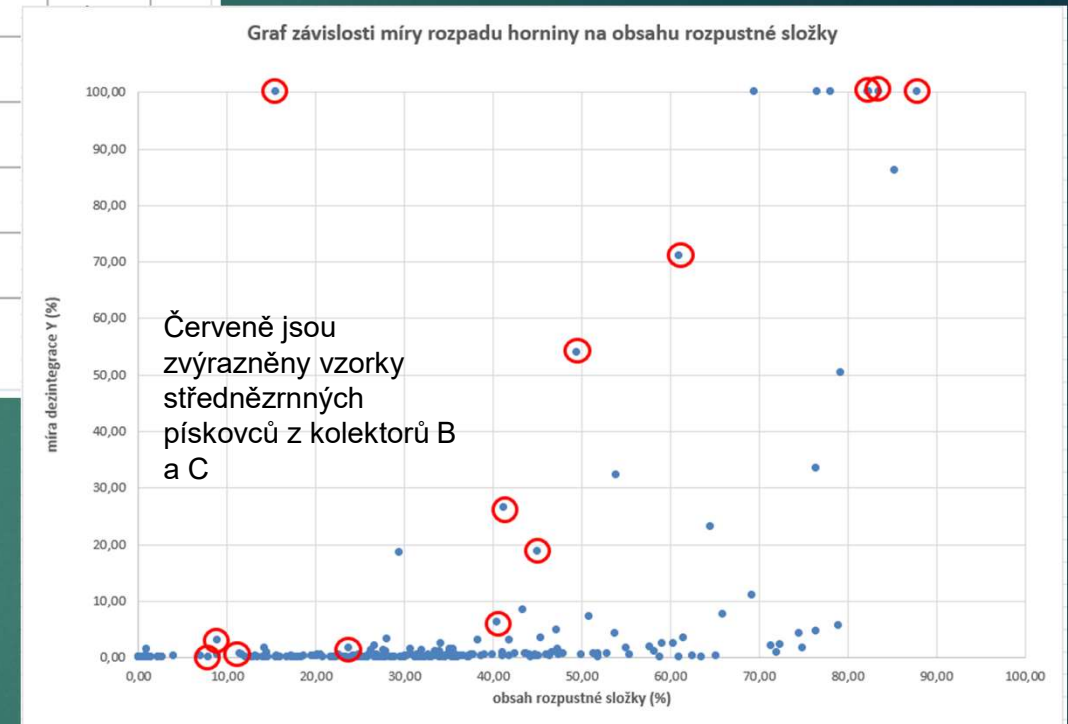
Detailní pohled
odhaluje specifické
prostorové uspořádání
mikrokrystalického
křemene,
který tmelí křemenná
zrna dohromady a tvoří
pěnovitou
podpůrnou strukturu v
jemnozrnných kalcitem
bohatých polohách.
Proto i při vyloužení
78% hmoty horniny
stále drží pohromadě.

Porovnání potenciálu krasovění východočeské křídly s dalšími oblastmi české křídové pánve



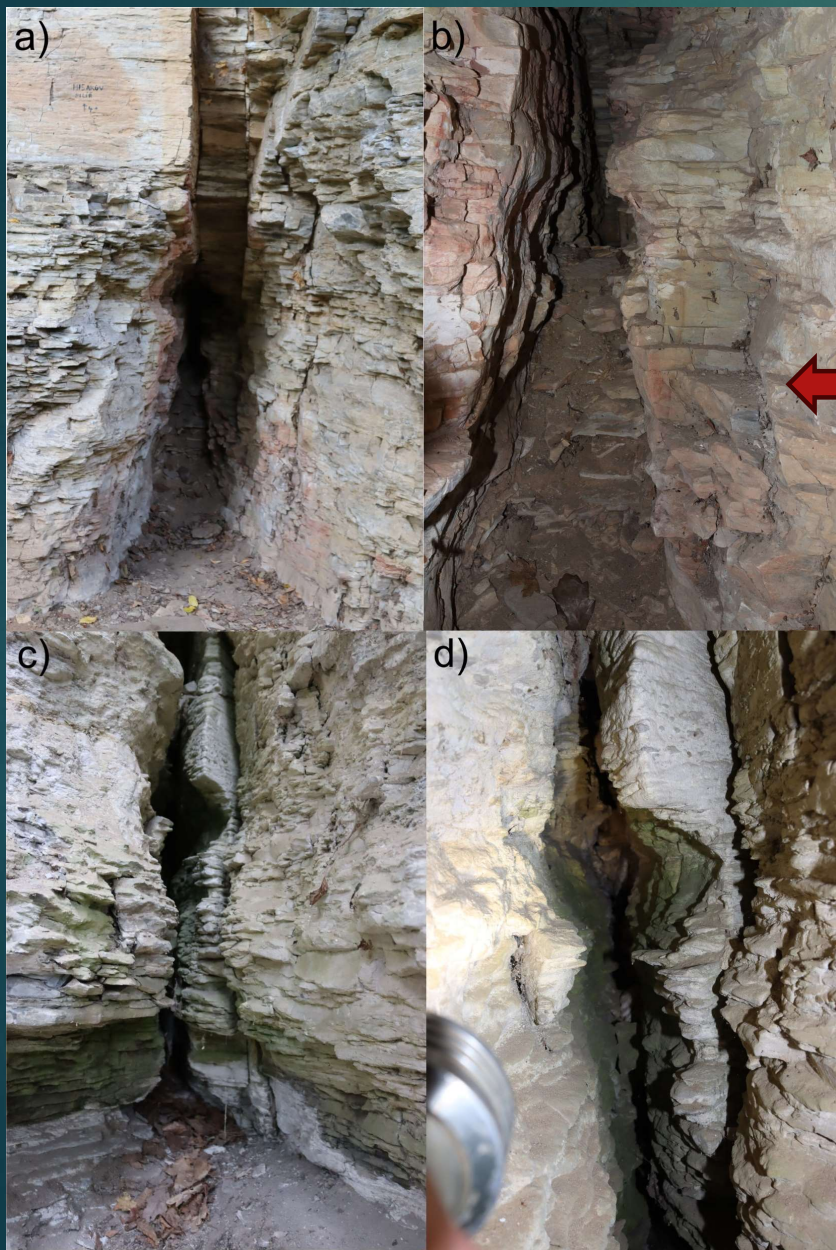
Celá ČKP (Balák 2015)

Východočeská křída (Starý 2024)



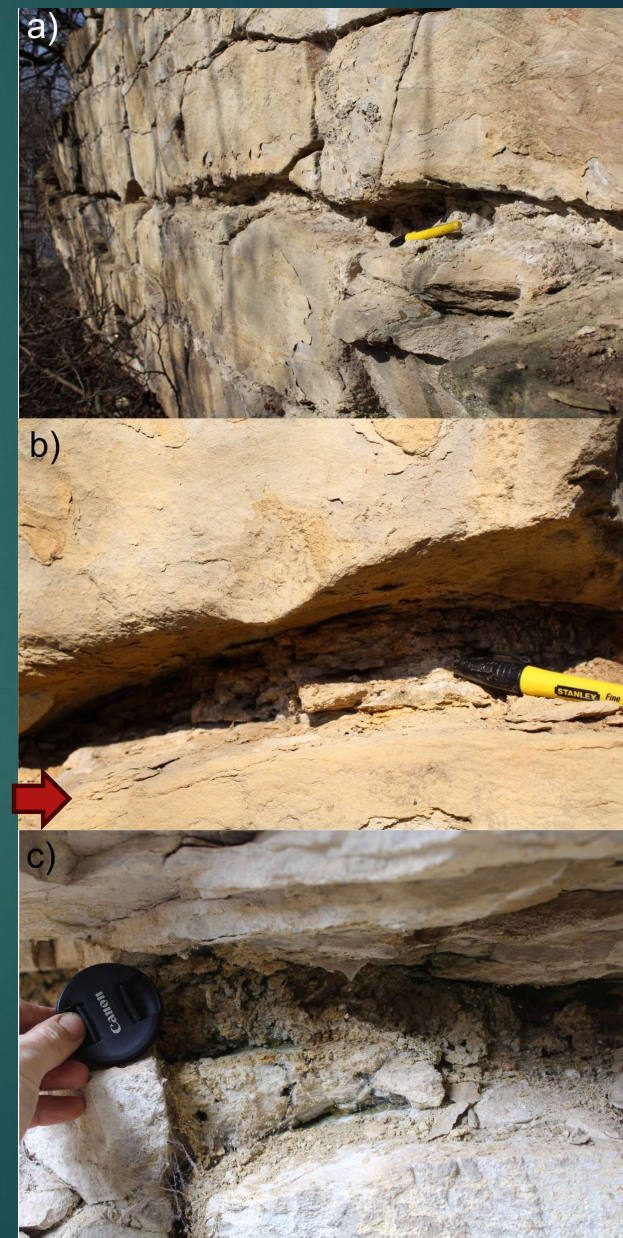
- výrazně nižší míra rozpadu u vzorků z východočeské křídly (9 % vzorků mělo míru rozpadu nad 10 %, oproti vzorkům z oblasti západní části české křídové pánve (39 – 49 % vzorků mělo míru rozpadu nad 10 %))
- hlavním faktorem ovlivňujícím míru rozpadu je konstituce a typ horninového tmelu, který je zejména u spongilitických slínovců a jemnozrnných pískovců ve východočeské křídě poměrně soudržný a představuje významný zpevňující faktor studovaných hornin

Otevřené pukliny a kanály na povrchových výchozech a konceptuální model jejich vzniku

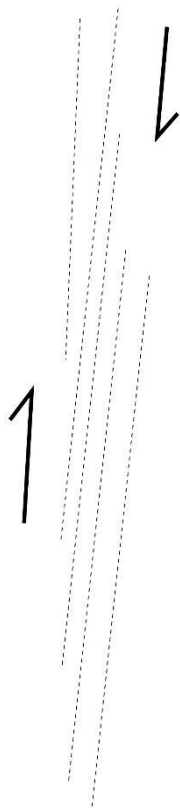


Vertikálně protažené dutiny na povrchových výchozech kolektoru B u Nového Města nad Metují, a) celkový pohled, b) detail, c) celkový pohled, d) detail

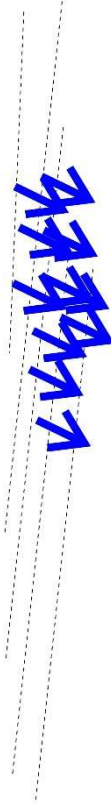
Příklady zcela rozvětralého a rozpadavého materiálu na vrstevních plochách, jehož vymytím mohou vznikat subhorizontální otevřené trhliny pozorované karotáží v přítokových kavernách vrtů. a), b) Choceň nad nádražím, kolektor Cb, c) Nové Hrady kolektor B



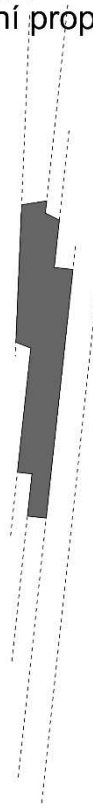
a) vytvoření shluku subvertikálních puklin během tektonického postižení horniny



b) puklinovou zónu intenzivněji proudí podzemní voda a vyluhuje kalcit



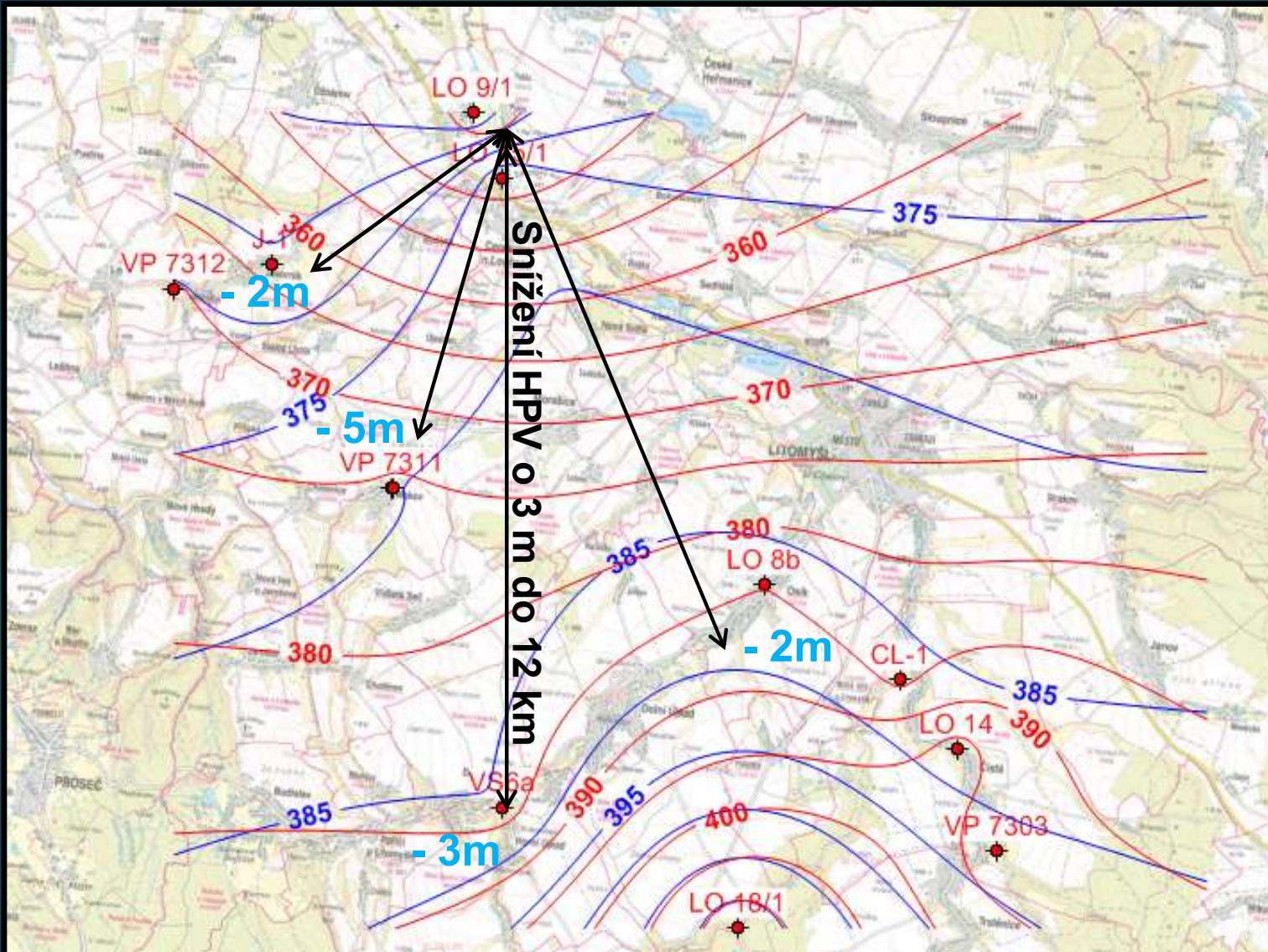
c) při zestrmení hydraulického spádu se lehké vyloužené úlomky horniny vyplavují proudem podzemní vody, vzniká otevřený puklinový kanál s extrémní propustností



Model vzniku vysoce propustných puklinových kanálů na základě všech získaných dat:

a) V první fázi vznikají tektonickým postižením četné shluky subvertikálních puklin, kde mezi nejbližšími paralelními puklinami je vzdálenost jen první cm; b) tyto zóny jsou přednostně využívány pro proudění podzemní vody, která vyluhuje veškerý kalcit z kalcitem bohatých poloh. Protože materiál obsahuje křemičitý tmel, nerozpadá se ani při obsahu CaCO_3 okolo 80 %, ale hustota horniny po vyloužení výrazně klesá; c) pokud dojde na vyloužené puklinové zóně k zestrmení hydraulického gradientu, malé a lehké úlomky horniny jsou z puklinové zóny vyplavovány podzemní vodou, čímž vzniká otevřený puklinový kanál s extrémní průtočností i v desítkách l/s.

Hydroizohypsy hladiny podzemní vody ve spodnoturonské zvodni dne 11.9.2017 (modře – před zahájením čerpací zkoušky na vrtu Lo-15/1 Pekla) a dne 20.9.2017 (červeně) při odběru 47 l/s

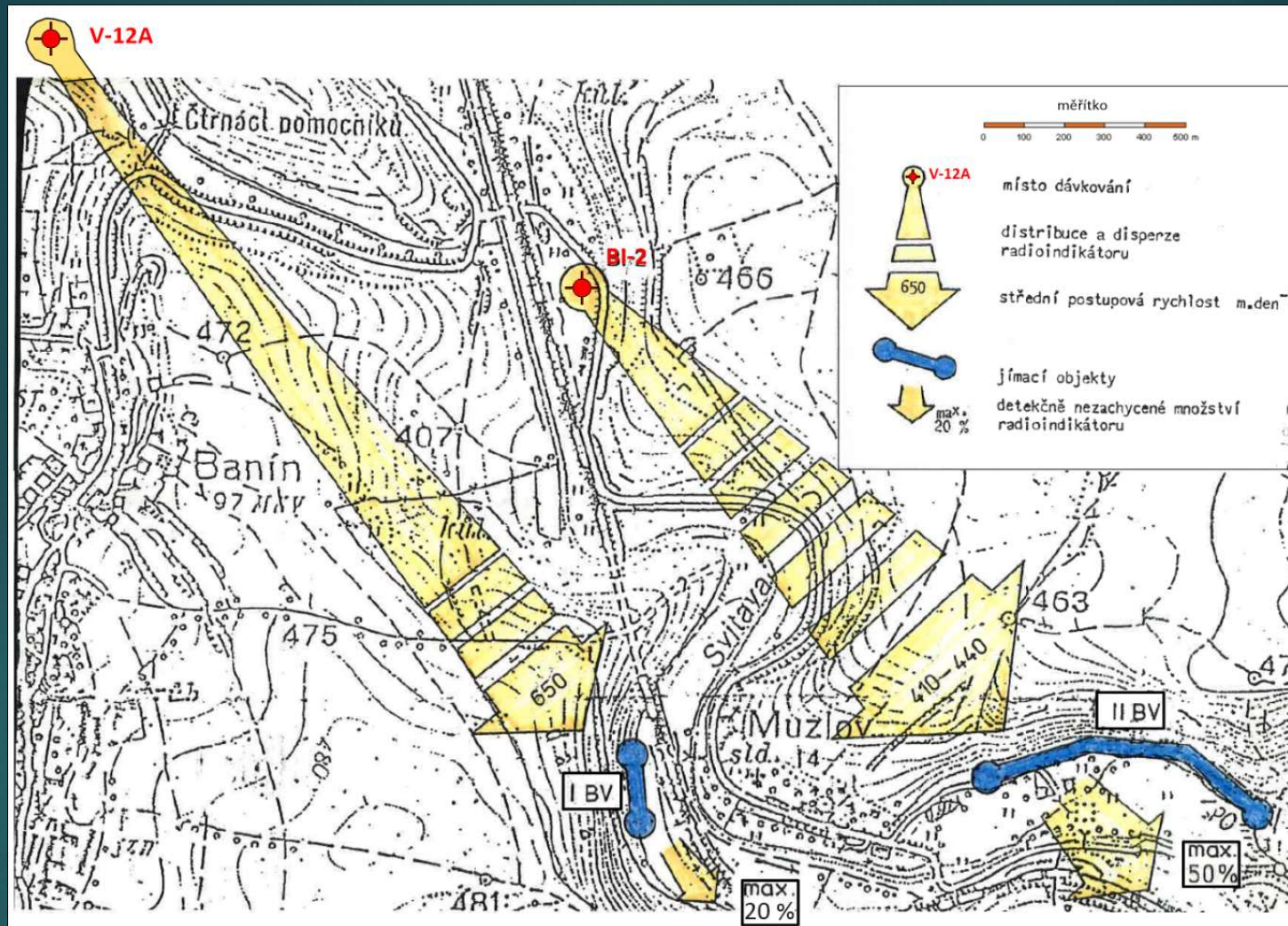


(upraveno dle: Novotný 2017)

Během 9 dnů čerpání dochází ke všesměrnému snížení hladiny podzemní vody do vzdálenosti až 12 km.

Důvodem je existence sítě extrémně vodivých poruch nejen subvertikálního sklonu (labský, orlický směr) ale i subhorizontálního sklonu rovnoběžného s vrstvevními plochami.

Stopovací zkouška v jímacím území Březová nad Svitavou



(převzato: Pavliš et al. 1983)

Vysoká rychlost proudění z archivních stopovacích zkoušek provedených v 80. letech v jímacím území Březová nad Svitavou ukázala že otevřené pukliny či kanály netvoří jen krátké izolované úseky, ale naopak rozsáhlý propojený systém, kterým rychlostí stovek metrů za den proudí na vzdálenost nejméně 2 km stovky l/s k největším pramenům ve východočeských křídových synklinálách.

Porovnání studované oblasti s jinými oblastmi ve světě

Krasové zvětrávání ve východočeské křídě - dvoustupňový proces:

- 1) vznik rezidua vyluhováním kalcitu
- 2) reziduum vyplavováno za vyšších hydraulických gradientů



Typické jevy ghost-rock krasu

otevřené pukliny a další kanály tvoří propojenou síť s rychlostí proudění ve stovkách m za den na vzdálenost minimálně kilometrů

Typický jev při stopovacích zkouškách v ghost rock krasu – rychlé objevení stopovače, ale jeho značná disperze



Podobně porušené zóny se vyskytují:

- v horninách psací křídly (chalk v Anglii; Maurice et al. 2006) s porozitou 30 – 50 % a rychlostí proudění 0,5-7 km/den na vzdálenost až 20 km (Maurice et al. 2010);
- v jemnozrnných siliciklasticko-karbonátových paleozoických sedimentech v Minnesotě a Wisconsinu (Runkel et al. 2006), kde mají také výrazně větší rozevření pukliny paralelní s vrstevními plochami (až 30 cm) než vertikální (do 5 cm). Souvrství St. Lawrence - střední rychlosti proudění 35-600 m/den; souvrství Lone Rock - 35-750 m/den na vzdálenost až 5 km.



obdobné jako střední rychlosti proudění v ústecké synklinále 410-650 m/den

Závěr

Průměrný obsah kalcitu v kolektorech B, Ca, Cb dosahuje 35 %. Průměrná pórovitost v turonských kolektorech před loužením dosahuje jen 12 % a klesá s obsahem kalcitu, po loužení dosahuje průměrná porozita 43 % a u 26% vzorků dokonce přesahuje 50%.

Ukázalo se že v turonských kolektorech dochází k přítokům v průměru jen v 10% mocnosti kolektoru. Převažují přítoky 0,5-1 l/s na metr přítokové zóny, ale ve 12-18 % případů byly dokumentovány extrémní přítoky s vydatností $\gg 10$ l/s na metr přítokové zóny. Přítokové zóny jsou převážně vázány na až desítky cm široké kaverny. Zhodnocení dat z akustické karotáže ukázalo, že převažují přítoky ze subhorizontálních kaveren a poruch (71 % poruch má přítok), zatímco u subvertikálních kaveren má přítok jen 35 % poruch.

Na základě loužících experimentů, mikroskopického studia hornin po loužení, hydrokarotážních měření i pozorování tvaru kanálů ve vrtech a povrchových výchozech byly nově popsány 3 mechanismy vzniku otevřených a silně propustných puklinových kanálů v subvertikálním i subhorizontálním směru.

Nejpropustnější porozita ve východočeských křídových synklinálách má krasový původ, byť pro vznik kanálů na subvertikálních puklinových zónách je zároveň nutné tektonické porušení horniny. Jedná se o typický ghost-rock krasový proces.



DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Především děkuji Jiřímu Bruthansovi za jeho ochotu a velmi cenné odborné i praktické rady a Janě Schweigstilové za pořízení snímků z elektronové mikrosondy.

Dále děkuji za vlídné poskytnutí přínosných podkladů a cenné rady Martinovi Procházkovi, Svatoplukovi Kořalkovi, Svatoplukovi Šedovi, Tomáši Novotnému, Zdeňkovi Štaffenovi a Danielovi Smutkovi.

Za vybraná karotážní data díky také společností VaK Jablonné nad Orlicí, VaK Litomyšl a VaK Vysoké Mýto.