

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



**MIKROFORMY PÍSKOVCOVÉHO RELIÉFU A JEJICH VYUŽITÍ
PRO RELATIVNÍ DATOVÁNÍ**

**MICROFORMS OF SANDSTONE RELIEF AND THEIR USING IN
RELATIVE DATING**

(Bakalářská práce)

Klára Krbcová

Vedoucí práce: RNDr. Marek Křížek, Ph.D.

Praha, 2011.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Mikroformy pískovcového reliéfu a jejich využití pro relativní datování“ vypracovala sama a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje.

V Praze dne 24. 5. 2011

.....
Klára Krbcová

Děkuji svému vedoucímu práce RNDr. Marku Křížkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad v dané problematice a za pomoc při zpracování této práce.

Zadání bakalářské práce

Klára Krbcová

Téma práce

Mikroformy pískovcového reliéfu a jejich využití pro relativní datování

Cíle práce

Cílem práce je na základě rešerše odborné literatury vypracovat přehled mikro-mezoforem vznikajících v pískovcovém reliéfu a definovat způsob jejich využití pro určení stáří jednotlivých částí pískovcových skalních stěn, resp. jednotlivých roklí.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Použité pracovní metody: rešerše odborné literatury, rekognoskační pochůzky, pilotní terénní výzkum - na vybrané lokalitě Kokořinska identifikovat přítomnost či nepřítomnost jednotlivých mikroforem a jejich kvalitu a kvantitu.

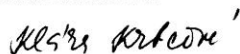
1. krok – na základě rešerše literatury vypracovat, co nejúplnější přehled (katalog – včetně charakteristik, způsobu vzniku, , popisu, obrázku případně fotografie) mikro-mezoforem reliéfu /pozn.: tady je možné využít částečně práce R. Mikuláše in *Sandstone landscapes, ale chtělo by to poměrně podstatně doplnit o další tvary, jako skalní věže, okna atd. z článků, případně z encyklopedií zejména zahraničních/.*
2. krok – na základě literatury popsat mechanismus zvětrávání a eroze na pískovcích, zaměřit se na typy zvětrávání a rychlosti zvětrávání a odnosu /pozn. nezapomenout na zhodnocení vlivu klimatických (včetně mikroklimatických podmínek, expozice, ale i v kontextu globálních změn klimatu)/. Jinými slovy je nutné popsat rychlost vzniku jednotlivých forem, alespoň odhadem.
3. krok – ve vybrané části Kokořinska /pozn. stačí vybrat 1-2 doly/. Zrevidovat přítomnost /přítomnost hodnotit, z hlediska počtu, zda se jedná o ojedinelý tvar či skupinu tvarů do 10, resp. 100 tvarů, zde je nutné vyjádřit relativní pokryvnost stěny daným mikrotvarem v daném úseku, např. 30%, zde bude nutné promyslet jak definovat úsek (který je nutné chápat jako homogenní blok), je nutné aby byla zvlášť brána jednotlivá patra, ale stejně tak je nutné počítat i s horizontálním (délkovým) dělením daného patra, to jistě bude záviset od volby konkrétních dolů, dle mé představy by bylo nejvhodnější horizontální (délkové) dělení buď podle sklonu podélného profilu příslušné části údolního dna a nebo dělení na třetiny či čtvrtiny, (nejmladší část) horní část, střední část, dolní část/ jednotlivých mikro-mezoforem vzhledem k jejich pozici v rámci dolu (zejména v kontextu expozice a výšky nad údolním dnem a polohy v samotném dole /v určité výši stupně/. Na základě jejich výskytu a dokonalosti vývoje stejných /pozn. vyberou se takové mikro-mezoforem, které jsou vyvinuté téměř všude, pak se přesně mormometricky (jejich max. a min. průměr hloubka) proměří (pomocí posuvného měřidla či metru) a srovnají se (vždy bude nutné proměřit cca 40 tvarů na studovaném úseku/, ale i různých mikro-mezoforem lze definovat rychlost jejich tvorby a tedy relativnímu času (stáří) příslušné části skalní stěny.

Zájmové území: Kokořinsko

Datové zdroje: informační zdroje, vlastní morfometrická měření.

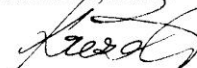
Datum zadání: 1.10.2010

Klára Krbcová



Podpis studenta

RNDr. Marek Křížek, Ph.D.



Podpis vedoucího práce

ABSTRAKT – Mikroformy pískovcového reliéfu a jejich využití pro relativní datování

Mikroformy a meziformy jsou nedílnou součástí pískovcového reliéfu. Jejich vznik je podmíněn souborem různých procesů, mezi ty hlavní patří zvětrávání a eroze. Pomocí rešerše literatury byla nejprve přiblížena definice pískovců a různé pohledy na jejich klasifikaci, diagenezi a rozšíření.

Další částí práce je popis mechanismu zvětrávání a eroze na pískovcích. Na základě převládajícího vúdčího procesu při vzniku jednotlivých tvarů byly tvary rozděleny do kategorií. Důraz byl kladen především na jejich popis, způsob vzniku, vývojová stádia a rozšíření.

V praktické části byly hodnoceny vybrané mikrotvary na území rokle Apatyka, která je součástí CHKO Kokořínska. Terénní výzkum byl zaměřen zejména na voštiny, které se v rokli Apatyka vyskytují hojně a tudíž umožňují komplexní analýzu jejich polohy jak v rámci jednotlivých skalních výchozů, tak i v rámci jednotlivých částí rokle. Pomocí vhodně zvolených metod bylo zjištěno, že areály voštin se nacházejí primárně ve východním kvadrantu, s klesající výškou skalního výchozu jejich pokryvnost klesá a jejich výskyt při úpatí a v blízkosti hran skalních výchozů je značně omezen. Další část terénního výzkumu se zaměřuje na relativní datování jednotlivých částí rokle právě pomocí voštin. Mezi nejstarší části patří uzávěrová část rokle a prostřední vertikální stupeň při ústí rokle. Nejmladší částí je prostřední část rokle a nejspodnější vertikální stupeň při ústí rokle.

Klíčová slova: pískovcový reliéf, relativní datování, zvětrávání

ABSTRAKT – Microforms of sandstone relief and their using in relative dating

Microforms and mesoforms play the main role in the sandstone relief. Their origin is conditioned by some processes, the main are weathering and erosion. Based on the background research, the deffinition, classification, diagenesis and occurrence of sandstones was described.

The second part of the bachelor thesis is focused on the mechanism of weathering and erosion. The microforms and mesoforms of the sandstone relief were divided into groups according to the guiding process of their origin. The description of the

sandstone forms, the way of their origin, the stage of development and their extension were described.

In the practical part of the bachelor thesis, the microforms in the gorge Apatyka in CHKO Kokořínsko were analyzed. The practical part was focused especially on honeycombs, because their extension in the gorge is huge and they enable the complex analyse of their location in the gorge and in the rock outcrops. Using suitable methods it was found, that the honeycombs are located primarily in the eastern quadrant, their coverage decrease with the decreasing height of the rock outcrops and their presence in the lowest and the highest parts of the rock walls is limited. The second part of the fieldwork was focused on the relative dating of the parts of the gorge with honeycombs. The odlest part of the gorge is situated in the closure part og the gorge and in the sekond vertical step in the mouth of the gorge. The youngest part is situated in the middle part of the gorge and in the lowest vertical level in the gorge's mouth.

Keywords: sandstone relief, relative dating, weathering

Obsah

1. Úvod	14
2. Fyzickogeografická charakteristika studovaného území	15
2. 1. Vymezení území a poloha	15
2. 2. Geologie	16
2. 3. Geomorfologie	17
2. 4. Klimatická charakteristika	22
2. 5. Pedologie	24
2. 6. Flóra a fauna	25
3. Definice a charakteristika pískovců	26
3. 1. Definice pískovců	26
3. 2. Hlavní strukturní a texturní znaky pískovců	27
3. 3. Klasifikace	28
3. 4. Sedimentační prostředí a diagenese pískovců	30
3. 4. 1. Sedimentace a sedimentační prostředí pískovců	30
3. 4. 2. Diagenese	34
3. 5. Rozšíření pískovců v České republice a ve světě	35
3. 5. 1. Pískovce v České republice	35
3. 5. 2. Pískovce v Evropě	37
3. 5. 3. Pískovce ve světě	38
4. Zvětrávání a eroze na pískovcích a tvary jimi vznikající	41
4. 1. Definice zvětrávání	41
4. 1. 1. Fyzikální zvětrávání	42
4. 1. 2. Chemické zvětrávání	44
4. 2. Eroze na pískovcích	44
4. 2. 1. Definice eroze	44
4. 2. 2. Eroze na pískovcích	45
4. 3. Rychlost zvětrávání a eroze	45
4. 4. Tvary vzniklé zvětráváním, erozí a dalšími procesy	47
4. 4. 1. Tvary vzniklé chemickým zvětráváním	48
4. 4. 1. 1. Pískovcová kupole	48
4. 4. 1. 2. Pseudoškrapy na pískovcích	49
4. 4. 1. 3. Skalní hodiny	50

4. 4. 1. 4. Skalní římsy a lišty	51
4. 4. 1. 5. Tafone	52
4. 4. 1. 6. Trubice a trubičky tvořené laminami železivce (a tvary jim podobné)	54
4. 4. 1. 7. Subhorizontální tunýlky, jeskyňky a horizontální trychtýře	55
4. 4. 1. 8. Skalní přehrádky	55
4. 4. 1. 9. Voštiny	56
4. 4. 2. Tvary vzniklé mechanickým zvětráváním	59
4. 4. 2. 1. Skalní brána	59
4. 4. 2. 2. Skalní okno	60
4. 4. 2. 3. Skalní věž	61
4. 4. 2. 4. Tor	61
4. 4. 3. Tvary a jevy vzniklé erozí	62
4. 4. 3. 1. Egutační jamky a pyramidy	62
4. 4. 3. 2. Skalní hřib	63
4. 4. 3. 3. Skalní mísa	64
4. 4. 3. 4. Skalní převis	65
4. 4. 3. 5. Skalní talíře a hroty	67
4. 4. 3. 6. Tvary vzniklé bioerozí	67
4. 4. 4. Tvary vázané na jiný vúdčí proces	68
4. 4. 4. 1. Tvary vázané na výskyt vrstevních ploch a puklin (jeskyně)	68
4. 4. 4. 2. Tvary vázané na změnu půdního pokryvu (šikmé římsy a zářezy)	70
4. 4. 4. 3. Tvary vzniklé v důsledku pronikání magmatu do horniny a ohřátí vody v puklinách a pórech	71
4. 4. 4. 3. 1. Proželezněné desky	71
4. 4. 4. 3. 2. Přikontaktní sloupky	73
5. Metody hodnocení mikrotvarů na pískovcích	74
6. Terénní výzkum	81
6. 1. Voštiny	81
6. 2. 1. Pozice areálu voštin v rámci jednotlivých skalních výchozů	81
6. 2. 2. Určování relativního stáří	83
6. 2. Další pískovcové mikroformy	88
7. Diskuze	92
7. 1. Pozice výskytu jednotlivých mikroforem	92

7. 2. Relativní stáří	94
7. 3. Zhodnocení metod	95
8. Závěr	96
9. Seznam použité literatury	97
10. Přílohy	103

Seznam tabulek

Tab. 1. Geomorfologické členění zájmového území.	18
Tab. 2. Vybrané charakteristiky klimatické oblasti MT 10.	23
Tab. 3. Průběh ročních období zájmového území, patřícího do kategorie MT 10.	23
Tab. 4. Strukturní a texturní znaky usazených hornin.	27
Tab. 5. Srovnání klasifikace pískovců dle zrnitostního složení.	29
Tab. 6. Tvary a mocnosti pískovcových těles různých sedimentačních prostředí.	34
Tab. 7. Typy pískovců a jejich původ v hlavních pískovcových oblastech ve světě.	39
Tab. 8. Typy a příčiny fyzikálního zvětrávání.	42
Tab. 9. Intervaly hodnot tepelné vodivosti pískovců v porovnání s prachovci, jílovými prachovci, jílovci a břidlicemi.	43
Tab. 10. Chemické reakce a jejich průběh.	44
Tab. 11. Přehled pískovcových tvarů podle primárního geomorfologického.	47
Tab. 12. Typologie pseudoškrápů podle tvaru a vzniku.	49
Tab. 13. Typologie voštin podle tvaru a vzniku.	57
Tab. 14. Stupně vývoje reliéfu voštin na mořské hrázi v Avonu, ve Velké Británii.	58
Tab. 15. Typologie pseudokrasových jeskyní.	70
Tab. 16. Tři typy proželezněných desek.	72
Tab. 17. Metoda hodnocení vápencových škrápů.	75
Tab. 18. Lokalizace stanovišť v jednotlivých stupních rokle.	79
Tab. 19. Vztah mezi jednotlivými částmi rokle v závislosti na kubatuře voštin.	87

Seznam obrázků

Obr. 1. Poloha rokle Apatyky.	15
Obr. 2. Vertikální členitost rokle Apatyky a přilehlých oblastí.	16
Obr. 3. Geologická stavba zájmového území a širšího okolí.	17
Obr. 4. Geomorfologická poloha studovaného území v rámci CHKO Kokořínska.	18
Obr. 5. Geomorfologická stavba jihovýchodní části Polomených hor.	20
Obr. 6. Sklonitostní poměry svahů rokle Apatyky a přilehlých oblastí.	21
Obr. 7. Orientace svahů ke světovým stranám v rokli Apatyka a přilehlých oblastech.	22
Obr. 8. Lokalizace studovaného území v rámci klimatických regionů v CHKO Kokořínsko.	23
Obr. 9. Půdy studovaného území a přilehlých oblastí.	24
Obr. 10. Klasifikace pískovců.	30
Obr. 11. Česká křídová pánev a hlavní pískovcová tělesa podle jednotlivých souvrství.	36
Obr. 12. Lokalizace pískovců v Evropě.	37
Obr. 13. Lokalizace hlavních pískovcových oblastí ve světě.	40
Obr. 14. Snížení ukazatele zbytkové pevnosti u pískovce vzhledem k hloubce od povrchu podloží.	46
Obr. 15. Pískovcová kupole v Zátyni na Kokořínsku.	48
Obr. 16. Tvary různých druhů pseudoškrapů.	50
Obr. 17. Skalní hodiny v oblasti Svídnické věže v nepřístupné oblasti Adršpašských skal.	51
Obr. 18. Skalní lišty s výskytem voštin, rokle Apatyka.	52
Obr. 19. Vznik a vývoj tafone.	53
Obr. 20. Trubicovité inkrustace u Borku v Jestřebské kotlině.	54
Obr. 21. A - Subhorizontální tunýlky a B - horizontální trychtýře.	55
Obr. 22. Skalní přehrádky.	56
Obr. 23. Tvar jednotlivých typů voštin.	58
Obr. 24. Pravčická brána u Hřenska.	59
Obr. 25. Skalní okno v hraně věže Tuhon, Kokořínsko.	60
Obr. 26. Skalní věže v oblasti U Tří obrů, Adršpašské skalní město.	61

Obr. 27. Vznik toru.	62
Obr. 28. A – egutační jamky a B – egutační pyramidy.	63
Obr. 29. Skalní hřib nad Slavným v Broumovských stěnách.	64
Obr. 30. Skalní mísy na pískovcovém bloku mezi věží Kozel a Kazatelnou, Chříby.	65
Obr. 31. Vývojové fáze skalního převisu.	66
Obr. 32. Skalní talíře a hroty.	67
Obr. 33. Postupná destrukce doupat blanokřídých.	68
Obr. 34. Jeskyně v Kravích dolech, Kostelec v Labských pískovcích.	69
Obr. 35. Šikmé římsy a zářezy v rokli pod Nedvězím, CHKO Kokořínsko.	91
Obr. 36. Tři typy proželezněných desek ve vztahu k žílám vulkanitu a v závislosti na štěpení pískovcové horniny.	72
Obr. 37. Přikontaktní sloupky na Dutém kameni u Cvikova.	73
Obr. 38. Některé potřebné parametry pro charakteristiku vápencových škrapů.	74
Obr. 39. První stádium vývoje areálu voštín s detailním výřezem snímku.	76
Obr. 40. Druhé stádium vývoje areálu voštín.	77
Obr. 41. Třetí stádium vývoje areálu voštín.	77
Obr. 42. Rokle Apatyka rozdělená do kategorií podle horizontálních a vertikálních stupňů s lokalizovanými stanovišti.	79
Obr. 43. Hodnoty azimutu 40 skalních výchozů, na kterých se měřené areály voštín nacházely.	81
Obr. 44. Rozložení četnosti výskytu voštín dle relativní vzdálenosti areálu voštín od hrany skalního výchozu.	82
Obr. 45. Hodnoty pokryvnosti areálu voštín v závislosti na relativní vzdálenosti areálu voštín od hrany skalního výchozu proložené křivkou trendu.	82
Obr. 46. Vzdálenost areálů voštín od hran skalních výchozů a výšky skalních výchozů ve vztahu k pokryvnosti skalních výchozů voštinami.	83
Obr. 47. Vztah mezi jednotlivými stádii vývoje voštín a jejich kubaturou.	84
Obr. 48. Vztah mezi kubaturou voštín a horizontálními částmi rokle.	85
Obr. 49. Vztah mezi kubaturou voštín a vertikálními stupni rokle.	86
Obr. 50. Vztah mezi kubaturou voštín a jednotlivými horizontálními i vertikálními částmi rokle.	87
Obr. 51. Vývojové stupně rokle podle relativního stáří.	88

Obr. 52. Lokalizace žlábkových pseudoškrapů, skalních hodin a skalních lišt v jednotlivých částech rokle Apatyky.	89
Obr. 53. Žlábkové pseudoškrapy nacházející se jen několik decimetrů od hrany skalního výchozu.	90
Obr. 54. Skalní hodiny a voštiny ve třetím stádiu vývoje.	90
Obr. 55. Skalní lišty.	91
Obr. 56. A – vývoj údolí (a – nejstarší část až e – nejmladší část), B – rychlost eroze a sesuvů směrem od údolního dna, přes údolní svah až k hranici údolí.	94

1. Úvod

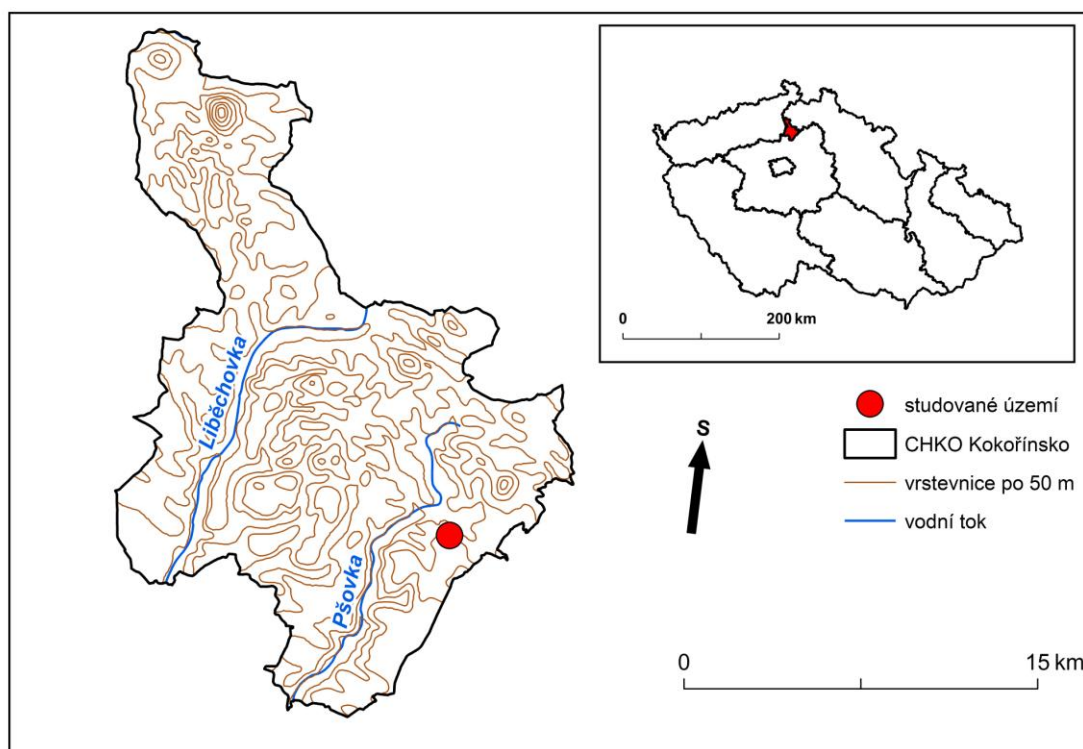
Oblast CHKO Kokořínsko, a tedy i v něm ležící studované území rokle Apatyky, je významnou oblastí výskytu pískovcového reliéfu. Pískovcový reliéf je tvořen kvádrovými pískovci středního turonu (Balatka, Loučková, Sládek, 1969). Na skalních výchozech této oblasti jsou vyvinuty mikroformy a mezofomy pískovcového reliéfu různého stádia vývoje, jejichž vznik je podmíněn různými vúdčími procesy. Mezi ty hlavní patří zvětrávání a eroze.

Cílem práce bylo popsat zvětrávání a erozi na pískovcích a kategorizovat mikroformy a mezofomy podle vúdčího procesu, který se uplatňuje při jejich vzniku. Podle vúdčího procesu a vývojových forem lze určit stádia vývoje jednotlivých tvarů. Na základě rešerše literatury, která popisuje jednotlivá vývojová stádia tvarů, byla tato metoda aplikována na voštiny v rokli Apatyka. Podle výskytu různě vyvinutých areálů voštin v jednotlivých částech rokle bylo určeno jejich relativní stáří.

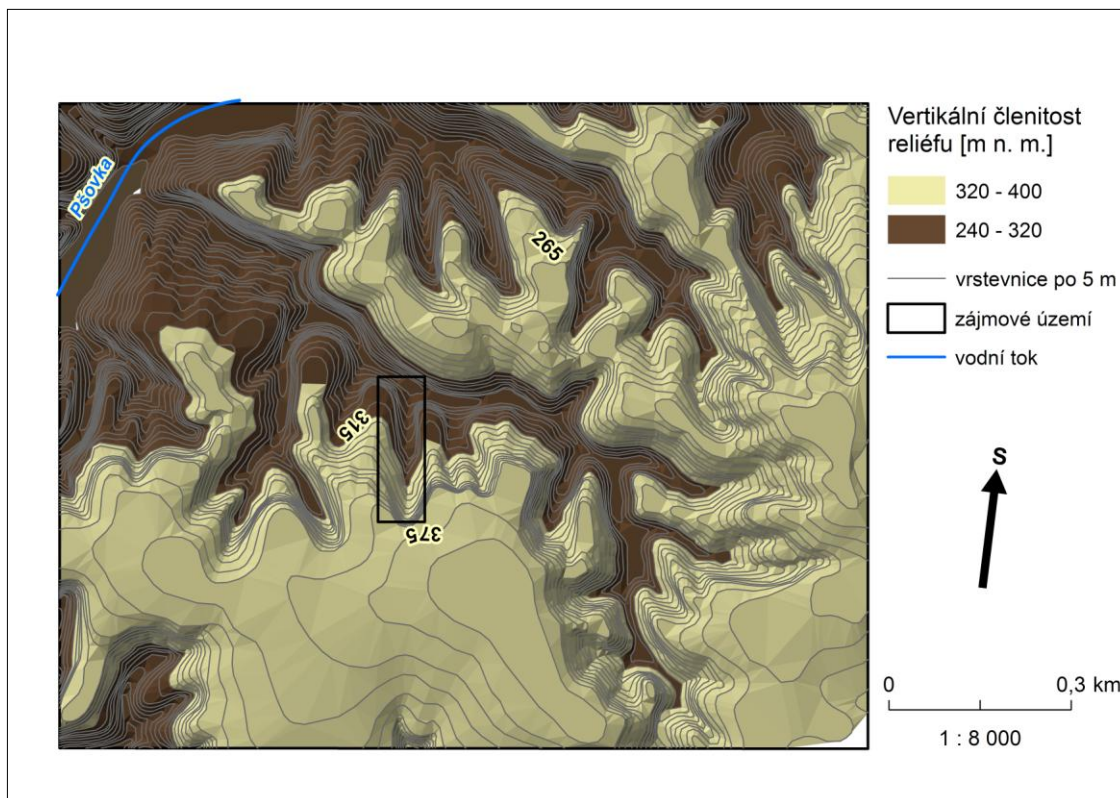
2. Fyzickogeografická charakteristika studovaného území

2. 1. Vymezení území a poloha

Studované území – rokle Apatyka - je součástí CHKO Kokořínsko, nachází se při jihozápadní hranici této oblasti (Obr. 1), mezi obcemi Vojtěchov a Mšeno. Rokle Apatyka ústí jako krátké boční údolí do rokle Močidla ve směru severojižním. Přilehlá rokle Močidla ústí do údolí řeky Pšovky. Nadmořská výška rokle Apatyky se pohybuje v intervalu 300 – 350 m n.m (Obr. 2). Délka rokle je zhruba 250 m.



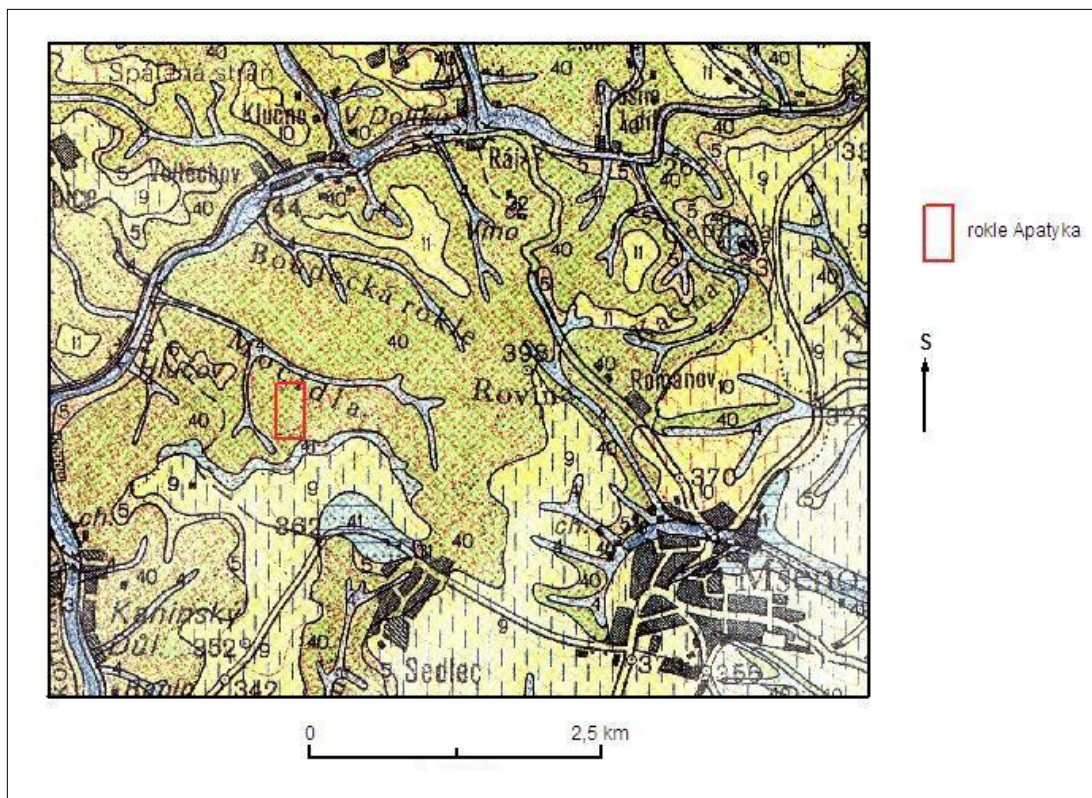
Obr. 1. Poloha rokle Apatyky.



Obr. 2. Vertikální členitost rokle Apatyka a přilehlých oblastí.

2. 2. Geologie

Celá oblast CHKO Kokořínsko, tedy i rokle Apatyka, je součástí české křídové pánve, ve které převažují usazeniny mořského původu, neboť zde docházelo k trvalému klesání v době svrchní křídý a s tím souvisela i transgrese cenomonského moře díky pohybům v alpsko-karpatské soustavě (Mísař et al., 1983). Moře postupně rozšiřovalo svůj areál v rozsáhlou mořskou pánev, tudíž byl proces sedimentace dlouhodobý a pozvolný. Ve čtvrtohorách dochází v CHKO Kokořínsko k akumulaci spraší a vátých písků, podél skalních měst se vytvořily pískové osypy (Balatka, Loučková, Sládek, 1969). Došlo také k modelaci údolí a k usazení písčitých a jílovitých naplavenin na dnech údolí.

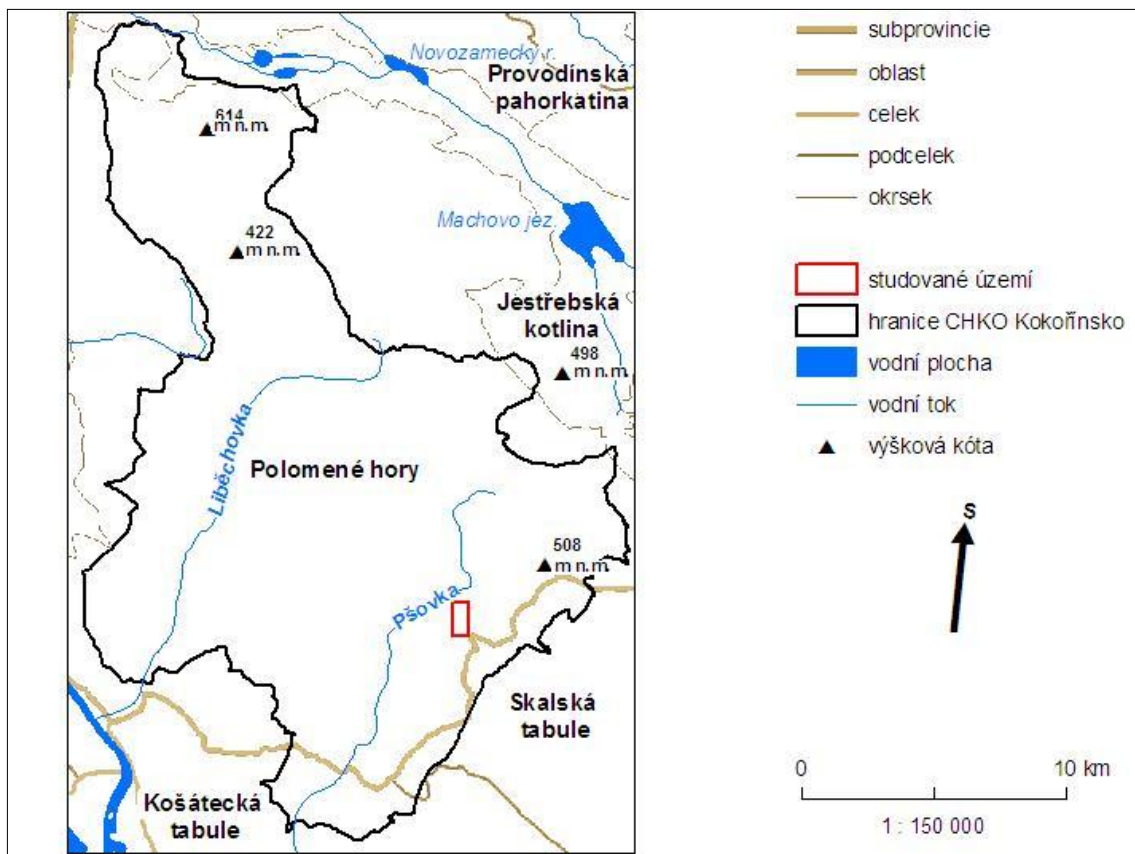


Obr. 3. Geologická stavba zájmového území a širšího okolí podle Pražáka et al. (1991, upraveno).

Z Geologické mapy 1 : 50 000 (Pražák et al., 1991) (Obr. 3) vyplývá že rokle Apatyka je tvořena čtvrtohorními křemennými pískovci. Křemenné pískovce mají vysoký podíl stabilních složek (hlavně křemene), vyznačují se také vysokým stupněm zralosti. Okolí studovaného území je tvořené kvartérními (holocenními a pleistocenními) deluvio – fluviálními, převážně písčito – hlinitými, sedimenty (přilehlá rokle Močidla) a na jihu je rokle obklopena křídovými vápnitými pískovci teplického souvrství, které ji oddělují od plošiny pokryté spraší.

2. 3. Geomorfologie

Rokle Apatyka, stejně jako celé CHKO Kokořínsko, patří dle geomorfologického členění ČR (Balatka a Kalvoda, 2006) k hercynskému systému. Zájmové území leží při jihovýchodní hranici okrsku Polomené hory (Obr. 4), která tvoří současně hranici mezi Severočeskou tabulí a Středočeskou tabulí. V Tab. 1 je uvedeno zařazení zájmového území do dílčích geomorfologických jednotek.



Obr. 4. Geomorfologická poloha studovaného území v rámci CHKO Kokořínska. Pozn. v mapě jsou vyznačeny pouze okrsky.

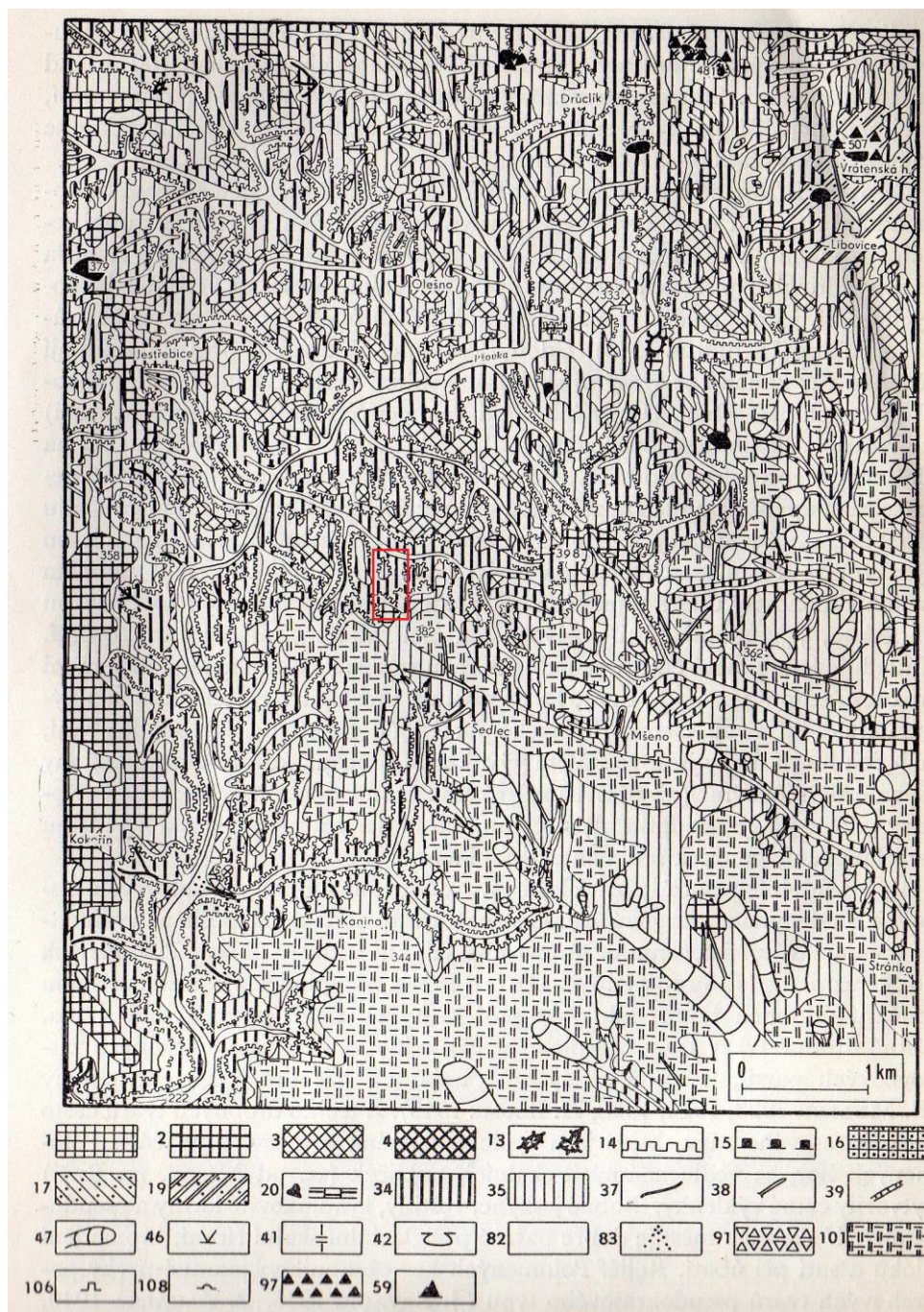
Tab. 1. Geomorfologické členění zájmového území dle Balatky a Kalvody (2006).

System	Hercynský
Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	Česká tabule (VI)
Oblast	Severočeská tabule (VI A)
Celek	Ralská pahorkatina (VI A – 1)
Podcelek	Dokeská pahorkatina (VI A – 1A)
Okrsek	Polomené hory (VI A – 1A – 1)
Podokrsek	Kokořínská vrchovina (VI A – 1A – 1a)
Část	Střezivojická část (VI A – 1A – 1a2)

Okrsek Polomené hory tvoří denudační reliéf (Balatka, Loučková, Sládek, 1969), složený zejména ze středněturonských kvádrových a vápničky pískovců (Balatka in Demek et al., 1965). Reliéf Polomených hor je rozčleněn hustou sítí údolí, která jsou hluboce zaříznutá, a mezi nimi se nacházejí strukturní plošiny (Balatka, Loučková, Sládek, 1969) (Obr. 5). Strukturní plošiny ve vyšších polohách jsou mladotřetihorního stáří a nacházejí se v průměru 130 – 220 m nad údolními nivami (Balatka in Demek et al., 1965). Nižší strukturní plošiny jsou podle Demka (1965) pleistocenního stáří. Leží ve výškách okolo 100 m nad údolními nivami. Méně časté jsou staropleistocenní strukturní plošiny, které jsou často kryty spraší a nacházejí se ve výškách 300 - 350 m n.m. Staropleistocenní strukturní plošiny se nacházejí jižně od rokle Apatyky.

Údolní svahy Polomených hor kopírují většinou směr puklin, které se postupně rozšiřují. Tento proces společně s procesem denudace okrajových částí strukturně denudačních plošin a za přispění vlivu pleistocenního mrazového zvětrávání vedl ke vzniku pískovcových skalních měst (Balatka in Demek, et al., 1965), která lze najít např. v Kokořínském dole, jehož částí je i rokle Apatyka.

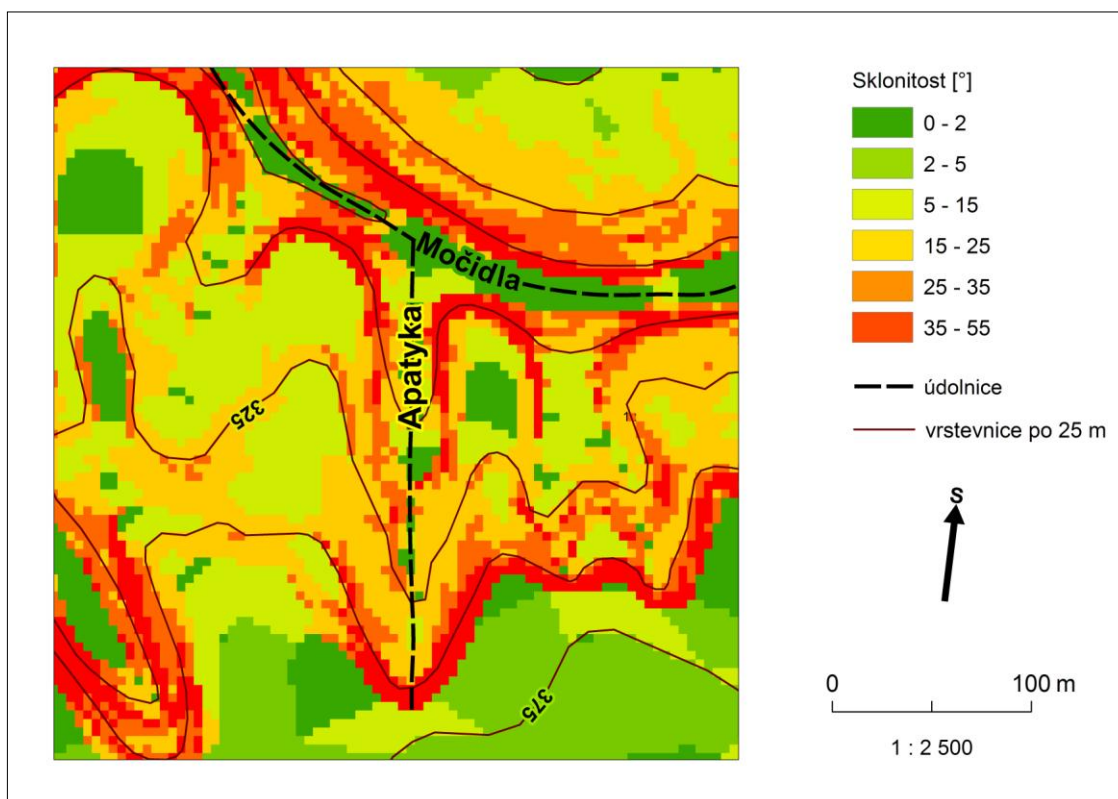
Skalní města mají často patrovitý charakter a probíhá na nich selektivní zvětrávání, které vede ke vzniku různých tvarů, jako jsou např. skalní pokličky, výklenky, voštiny atd. Dále jsou na nich patrné stopy po skalním řízení a hromadění bloků a sutí na jejich úpatí (Balatka in Demek et al., 1965).



Obr. 5. Geomorfologická stavba jihovýchodní části Polomených hor dle Balatky et al. (1965, upraveno). Pozn. Červený obdélník znázorňuje zájmové území.

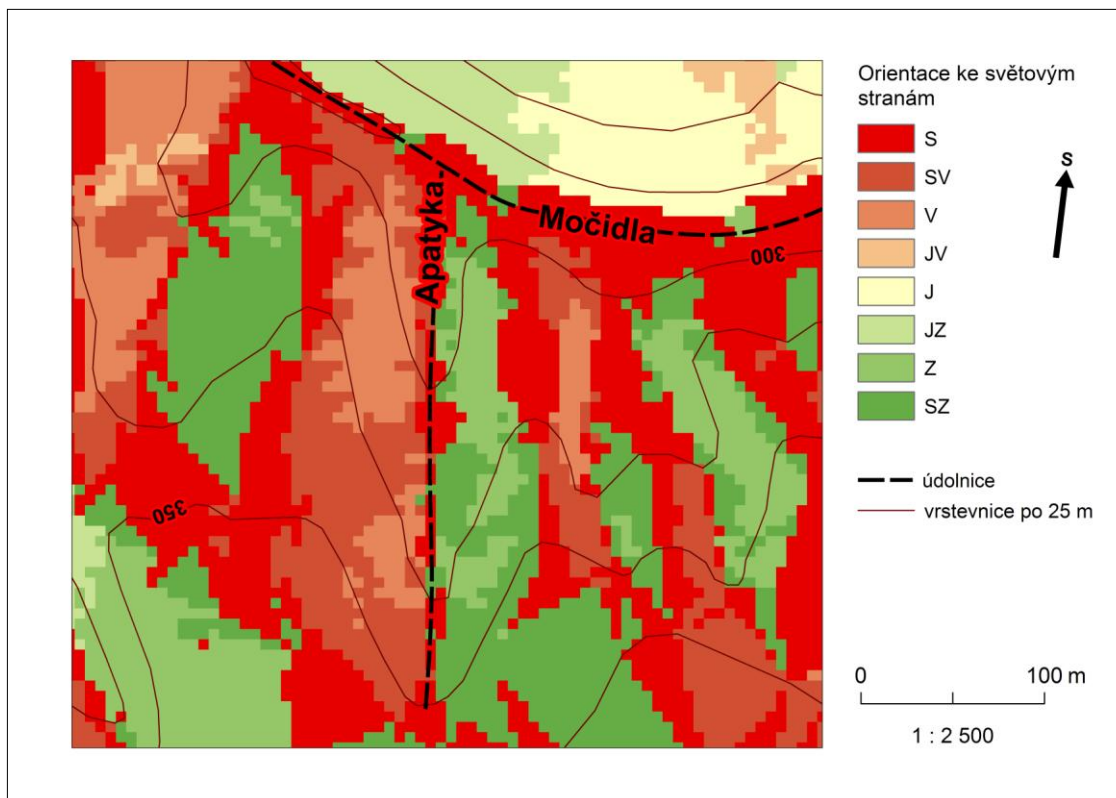
Vysvětlivky: 1 – vyšší úroveň strukturálních plošin neogenního stáří, 2 – nižší úroveň strukturálních plošin neogenního stáří, 3 – vyšší úroveň strukturálních plošin staropleistocenního stáří, 4 – nižší úroveň strukturálních plošin staropleistocenního stáří, 13 – suky, 14 – pískovcová skalní města, 15 – skalní věže, hříby, 16 – plošiny na lávových proudech a příkrovech, 17 – svahy na lávových proudech a příkrovech, 19 – svahy pod vulkanickými sukami, 20 – sopečné suky, 34 – příkře ukloněné svahy, 35 – mírně ukloněné svahy, 37 – erozní rýhy tvaru V, 38 – úvozy, 39 – široké strže s plochým dnem, 41 – výrazné stupně, 42 – obří hrnce, 46 – ústí visutých údolí, 47 – údolní sběrné mísy, 59 – mrazové suky, 82 – údolní nivy, 83 – náplavové kužely, 91 – suťové kužely, 97 – kamenná moře, 101 – plošiny na sprašových pokryvech, 106 – lomy, 108 – hliníky

V rokli Apatyka se nacházejí jak rovinné plochy o sklonu $0^\circ - 2^\circ$, tak srázy se sklonem $35^\circ - 55^\circ$ (Obr. 6). Svahy rokle jsou stupňovité. Uzávěrová část rokle je tvořena zejména srázy se sklonem $35^\circ - 55^\circ$. Prostřední část rokle (cca ve vzdálenosti 100 - 200 m od ústí rokle) je tvořena dvěma stupni, dno prostřední části rokle je tvořeno rovinnými až značně skloněnými plochami (sklon $5^\circ - 15^\circ$), druhý stupeň je tvořen příkře skloněnými plochami (se sklonem $15^\circ - 25^\circ$), ojediněle i velmi příkře skloněnými plochami (se sklonem $25^\circ - 55^\circ$). Ústí rokle je tvořeno třemi stupni, po obou stranách údolnice se vyskytují srázy, druhé patro je tvořeno příkře skloněnými plochami a třetí patro velmi příkře skloněnými plochami.



Obr. 6. Sklonitostní poměry svahů rokle Apatyky a přilehlých oblastí.

Svahy rokle Apatyky jsou orientované nejčastěji ve směru V – Z (Obr. 7). Svahy rokle Močidla, do níž rokle Apatyka ústí, jsou ukloněny k severu.

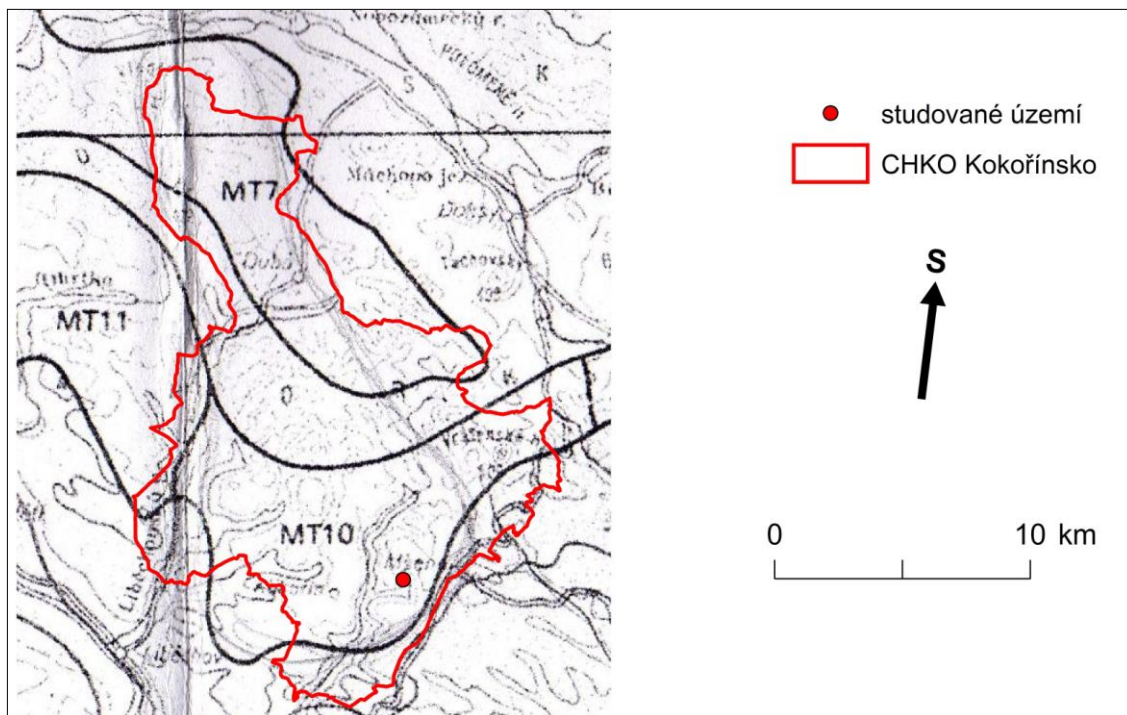


Obr. 7. Orientace svahů ke světovým stranám v rokli Apatyka a přilehlých oblastech.

2. 4. Klimatická charakteristika

Dle klimatické regionalizace ČR (Moravec a Votýpka, 1997) patří studované území do II. kategorie. Vegetační období trvá 160 – 177 dní, roční úhrn srážek se pohybuje nad hranicí 580 mm.

Podle Quitta (1971) se zájmové území řadí do kategorie MT 10 (mírně teplá oblast) (Obr. 8), (Tab. 2).



Obr. 8. Lokalizace studovaného území v rámci klimatických regionů v CHKO Kokořínsko dle Quitta (1971, upraveno).

Tab. 2. Vybrané charakteristiky klimatické oblasti MT 10 dle Quitta (1971, upraveno).

Počet letních dní	40 – 50
Počet mrazových dní	110 – 130
Počet ledových dní	30 – 40
Počet dní s průměrnou teplotou 10 °C a více	140 – 160
Průměrná teplota v lednu	-2 - -3°C
Průměrná teplota v červenci	17 – 18 °C
Průměrný počet dní se srážkami 1 mm a více	100 – 120
Suma srážek ve vegetačním období	400 – 450 mm
Suma srážek v zimním období	200 – 250 mm
Počet dní se sněhovou pokrývkou	50 - 60

Kategorie MT10 je charakteristická dlouhým létem a krátkou zimou (Tab. 3).

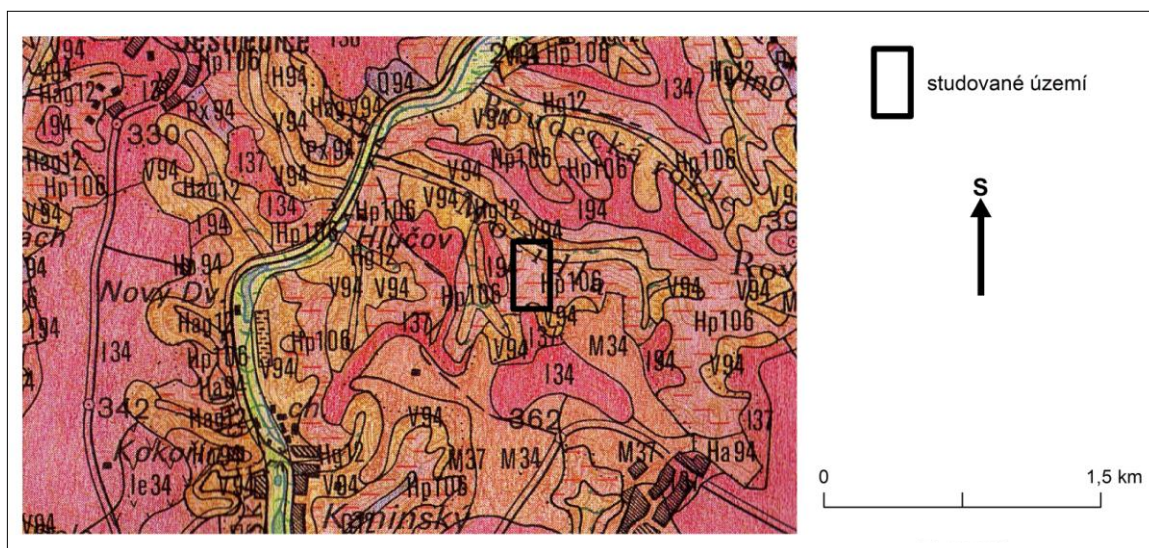
Tab. 3. Průběh ročních období zájmového území, patřícího do kategorie MT 10 podle Quitta (1971).

	Jaro	Léto	Podzim	Zima
MT 10	Mírně teplé	Dlouhé, teplé, mírně suché	Mírně teplý	Krátká, mírně teplá a velmi suchá, krátké trvání sněhové pokrývky

Rokle Apatyka, stejně jako přilehlá rokle Močidla, se vyznačují častými teplotními inverzemi. Při dně rokle je tedy vlhčeji a chladněji, než v horních partiích rokle. O tom vypovídá i patrovitě uspořádaná vegetace (rostliny, které by se logicky měly nacházet ve vyšších partiích rokle rostou při dně rokle a naopak).

2. 5. Pedologie

Dle Tomáška (2003) je studované území tvořeno hnědými půdami podzolovými. Podzolizace je podle Horníka et al. (1986) takový proces, při němž dochází k hlubokému chemickému rozkladu minerální části půdy, především vlivem kyselých humusových látek, k uvolnění sesquioxidů a k jejich přesunu z vrchní části půdy do spodní, kde se hromadí. Přilehlá rokle Močidla je tvořena hnědými půdami oglejenými a na plošině jižně od rokle Apatyky se vyskytují illimerizované půdy a hnědozemě (Obr. 9). Hlavní půdotvorný substrát vzniká fyzikálním rozpadem kyselých silikátových hornin (Tomášek, 2003).



Obr. 9. Půdy studovaného území a přilehlých oblastí dle Tomáška (2003, upraveno). Pozn. I – illimerizovaná půda, Hp – hnědá půda podzolová, Hag – hnědá půda kyselá oglejená, Px – podzol extrémní, V – surová půda, Ha – hnědá půda kyselá, M – hnědozem.

Hnědé půdy, neboli kambizemě, jsou tvořeny mělkým humusovým horizontem, pod kterým se nachází hnědá až rezivohnědá vrstva, ve které probíhá intenzivní půdní zvětvování (Tomášek, 2003). Pod touto vrstvou leží obvykle méně zvětralá hornina. Hnědé půdy jsou mělké, skeletovité, na pískovcích lehké, obsah humusu značně kolísá podle typu půdotvorného substrátu. Půdní reakce bývá slabě kyselá až kyselá.

2. 6. Flóra a fauna

Dle mapy potenciální přirozené vegetace (Neuhäuslová, 1998) by se v rokli Apatyka nacházely černýšové dubohabřiny. Jedná se o dubohabřiny s dominancí dubu zimního a habru, s příměsí lípy a dubu letního. Keřové patro v nich není dobře vyvinuté.

Dle Neuhäuslové in Chytrý, Kučera a Kočí (2001) je rokle Apatyka tvořena biotopem subkontinentálních borových doubrav. Ve stromovém patře se hojně vyskytuje borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a dub zimní (*Quercus petraea*). Zřejmě vlivem šíření smrkových monokultur zde roste i smrk ztepilý (*Picea abies*).

Jelikož jsou v rokli Apatyka časté teplotní inverze, dochází k azolálnímu rozložení vegetace. Při dně rokle rostou druhy typické pro vyšší polohy, v horních patrech se naopak vyskytují druhy nižších poloh.

Mezi nejčastější rostlinné druhy patří brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*), která pokrývá vyšší výškové stupně rokle, roste téměř v jejím uzávěru v nadmořské výšce okolo 350 m n.m. a tvoří zde souvislý porost. Další hojně se vyskytující rostlinou je sasanka hajní (*Anemone nemorosa*), jejíž výskyt je v rokli Apatyce analogický výskytu brusnice borůvky. Směrem k ústí rokle se vyskytuje kaprad' samec (*Dryopteris filix-mas*) a přibývá jehličnanů, jako je např. smrk ztepilý (*Picea abies*). Rokle je významná výskytem léčivých bylin, mezi něž patří např. přeslička (*Equisetum*).

Skalní doliny a rokle v CHKO Kokořínsko se vyznačují výskytem vzácných druhů pavouků, jako je např. sklípkánek černý (*Atypus piceus*). Dále se zde vyskytují druhy běžné pro lokalitu CHKO Kokořínsko, jako je např. čmelák zemní (*Bombus terrestris*), vosa obecná (*Vespula vulgaris*), ze savců se lze setkat se srncem obecným (*Capreolus capreolus*), nebo liškou obecnou (*Vulpes vulpes*).

3. Definice a charakteristika pískovců

3. 1. Definice pískovců

Pískovce a písky se v petrografickém názvosloví nazývají psamity (Kukal, 1985), přičemž písky jsou nezpevněné sedimenty a pískovce jsou zpevněné sedimenty. Do skupiny psamitů patří horniny, jejichž podstatnou složkou jsou klastická zrna o velikosti 0,0625 – 2 mm (Pettijohn et al., 1972). Tato klasifikace klastických zrn vychází z Wentworthovy stupnice, která uvádí, že pískovce tvoří převážně klastická zrna o velikosti 1/16 – 2 mm (Alling, 1943). Young et al. (2009) uvádí průměr pískovcových částic v intervalu 0,063 – 2 mm a popisuje pískovce jako sedimentární horniny, ve kterých dominují fragmenty o velikosti pískovcových zrn. Velikost pískovcových zrn závisí na hornině, z které pískovec vznikl, a na schopnosti odolávat abrazi. Velikost pískovcových zrn dále závisí na transportním médiu a na vzdálenosti, na jakou je písek přenášen (Young et al., 2009).

Pískovce se skládají z kamenných zrn, křemenných zrn, živcových zrn, primárního matrix a tmelu (Tucker, 2003). Na základě zastoupení jednotlivých typů zrn se pískovce mohou dělit na nezralé a zralé. Pískovce nezralé obsahují nestabilní kamenná a živcová zrna, pískovce zralé se skládají zejména ze zrn křemenných, ovšem mohou se objevit i zrna kamenná a živcová, a velmi zralé pískovce jsou tvořeny převahou křemenných zrn (Tucker, 2003).

Pískovce patří k nejrozšířenějším sedimentům na světě a tvoří 24 % objemu sedimentů v platformách a 25 % v geosynklinálách (Ronov in Kukal, 1986). Poldevaart (1955) in Pettijohn et al. (1972) tvrdí, že pískovce tvoří ¼ kontinentálních sedimentů. Předpokládá, že objem těchto sedimentů je $176 \times 10^6 \text{ km}^3$, tím pádem objem všech pískovců na kontinentech je $44 \times 10^6 \text{ km}^3$. Hmotnost těchto kontinentálních bloků odhadl na 480×10^{15} tun. Poldevaart (1955) in Pettijohn et al. (1972) předpokládal, že jedno zrnko písku má hmotnost 0,0014 gramů, tím pádem bude na zemském povrchu $85,7 \times 10^{24}$ zrn písku.

Demek (1987) přiřazuje objem sedimentů v rámci zemské kůry jen 5 %, přičemž pískovce jsou na povrchu pevniny zastoupeny 15 %.

3. 2. Hlavní strukturní a texturní znaky pískovců

Určení strukturních a texturních znaků horniny (Tab. 4) slouží k jejich zařazení a klasifikaci do různých skupin.

Tab. 4. Strukturní a texturní znaky usazených hornin dle Petránka (1963).

Strukturní znaky	Texturní znaky
Velikost klastických částic	Nerovnosti vrstevních ploch
Tvar a opracování klastických částic	Vrstevnatost
Povrch klastických zrn	Barva usazených hornin
Pojivo	Zvrstvení
Základní hmota	Skluzové textury
Tmel	Konvolutní textury
Ooidy a oolity	Orientace sedimentárních složek
Pisoidy a pisolity	Konkrece, hlízy a hlíznatá textura
Sférolity	Útvary vzniklé vyplňováním dutin apod.
Pórovitost	Závalky
Propustnost	Stylolity
	Kuželová textura

Z hlediska odolnosti pískovce vůči zvětrávání mají největší význam základní hmota (matrix) a tmel, resp. pojivo, proto se tato práce zaměří na tyto strukturní znaky.

Základní hmota, neboli matrix je primární složkou usazené horniny, je zřetelně jemnozrnější než hrubší částice v ní uzavřené (Petránek, 1963). Základní hmota se skládá z klastických a autigenních částic (Kearey, 1993). Podíl základní hmoty, neboli matrix, slouží jako jeden ze způsobů klasifikace pískovců (viz kapitola 3. 3. Klasifikace).

Tmel je chemogenní složkou, druhotně se vylučující mezi zrny, v pórech i v základní hmotě již usazené horniny (Petránek, 1963). Zpevnění horniny závisí právě na vlastnostech tmelu. Tmel se podle Nicholse (2009) skládá z minerálů, které se vysráží mezi póry. Tmel je tedy odlišného původu, než matrix. Tmel lze klasifikovat z mnoha hledisek. Petránek (1963) klasifikuje tmel podle mineralogického složení (kalciový, křemenný, opálový aj.), podle množství a způsobu výskytu (pórovitý, povlakový, dotykový aj.) a podle vnitřní stavby (regenerační, korosní, krustifikační aj.).

Při klasifikaci tmelu bude v této práci používáno dělení dle Nicholse (2009) a Harkera (2006), kteří klasifikují tmel na pískovcích na křemenný, karbonátový, tmel jílových minerálů a tmel železitý.

Křemenný tmel se objevuje u křemenných pískovců. Projevuje se přerůstáním křemene na povrch křemenných zrn. Křemen se sráží z tekutin v pórech a tvoří jádra na povrchu křemenných zrn a tím dochází k růstu křemenných krystalů (Nichols, 2009). Vlivem přerůstání lze obtížně rozlišit velikosti původních zrn. Karbonátový tmel se nejčastěji objevuje u vysoce porézních pískovců a je tvořen mozaikou do sebe zapadajících krystalů živcového vápence, jejichž velikost může být různá (Nichols, 2009). Karbonátový tmel se stává dobrým pojivem teprve pokud dojde k jeho rozpuštění. Tmel jílových minerálů je nejčastěji tvořen minerály patřícími do skupiny illitů a smektitů (Nichols, 2009). Nejčastěji je vysrážen z tekutin v pórech. Železitý tmel se objevuje buď samostatně, nebo ve spojení s vápenitým tmelem. Nejčastější složkou železitého tmelu je oxid železa červené a hnědé barvy, který tvoří tenkou vrstvu okolo každého zrna (Harker, 2006).

Pojivem se označuje strukturně odlišná, jemnozrnější složka sedimentárních hornin (Petránek, 1963). Pojivem se rozumí taková základní hmota sedimentární horniny, u níž je obtížné rozpoznat, zda se jedná o tmel nebo o matrix.

3. 3. Klasifikace

Od klasifikace se očekává objektivní a diskrétní rozdělení pískovců podle složení do několika tříd, které by se měly přirozeně lišit svou genezí, sedimentačním prostředím, tektonickým režimem nebo proveniencí (Kukal, 1986). V praxi se používají různé modifikace klasifikací a to podle Kukala (1986) ze dvou důvodů: správná klasifikace by totiž měla rozdělit určitý soubor podle přirozených hranic, nebo by rozdělení souborů do menších skupin mělo být aspoň trochu rovnovážné.

Petránek (1963) a Kukal (1986) používají rozdělení na jemnozrné, střednězrné a hrubozrné pískovce. Hranice mezi jemnozrným a střednězrným pískovcem je 0,25 mm a mezi střednězrným a hrubozrným 0,50 mm. Někdy je navrhována hranice mezi střednězrným a hrubozrným pískovcem i 0,75 mm nebo 1 mm. Ovšem pískovce, jejichž střední velikost zrna je např. 0,75 mm, obsahují i větší zrna, dodávající hornině vysloveně hrubozrný vzhled (Petránek, 1963). Podle Adamoviče a Kidstona in Härtel et al., (2007) se pískovce podle zrnitosti dělí na velmi jemnozrné, jemnozrné,

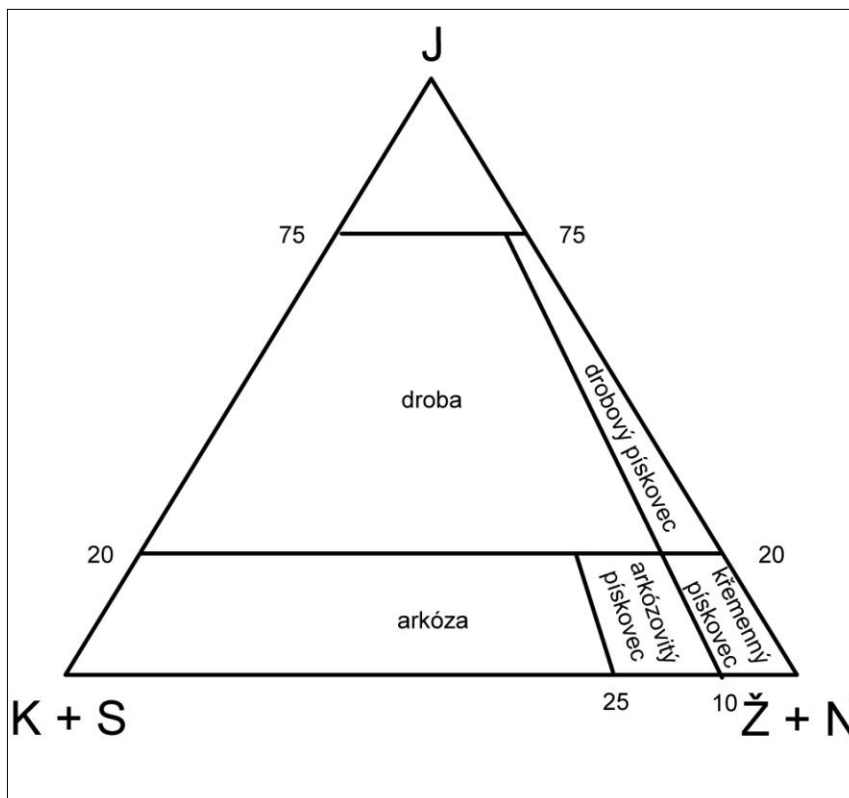
středně zrnité, hrubozrnné a velmi hrubozrnné (Tab. 5). Toto dělení vychází již z Wentworthovy stupnice a je používané mnoha zahraničními autory.

Tab. 5. Srovnání klasifikace pískovců dle zrnitostního složení podle Adamoviče a Kidstona in Härtel et al. (2007), Kukala (1986) a Petránka (1963).

Adamovič a Kidston (2007)		Kukal (1986), Petránek (1963)	
1/16 – 1/8 mm	Velmi jemnozrnný	0,05 – 0,25 mm	Jemnozrnné
1/8 – 1/4 mm	Jemnozrnný		
1/4 – 1/2 mm	Středně zrnitý	0,25 – 0,50 mm	Střednězrnné
1/2 - 1 mm	Hrubozrnný		
1 – 2 mm	Velmi hrubozrnný	0,50 – 2 mm	Hrubozrnné

Pískovce lze dále dělit podle podílu matrix. Toto dělení se používá hlavně ve světové klasifikaci. Pískovce se dělí na arenity (mající méně než 15 % matrix) a wacky (mající nad 15 % matrix) (Young et al., 2009). Podrobnější dělení přináší Adamovič a Kidston in Härtel et al., (2007), kteří řadí wacky pouze do 75 % matrix a nad 75 % matrix je nazývají jílovci.

Pro vyjádření složení pískovců lze použít podle Kukala (1986) nejjednodušší trojúhelníkový graf. Vrcholy tohoto grafu jsou matrix (jíl, prach a slídy), křemen + úlomky stabilních hornin a živce + úlomky nestabilních hornin (Obr. 10). Stabilní úlomky hornin jsou tvořeny křemeny nebo modifikacemi oxidu křemičitého (silicity, rohovce, kvarcity apod.), ke křemenu jsou řazeny díky stejnému chování při sedimentaci. Nekřemenné úlomky se naopak chovají jako živce.



Obr. 10. Klasifikace pískovců podle Petránka (1963). Pozn. N – nestabilní složky (živce, úlomky nestabilních hornin aj.), S – stabilní složky (křemen, úlomky křemenců aj.), J – jílovitý podíl. Čísla naznačují podíl stabilních, nestabilních a jílovitých složek.

Podle zastoupení matrix znázorněné v trojúhelníkového diagramu (Obr. 10) se pískovce dělí do dvou základních skupin. Droby a drobové pískovce mají nad 20 % matrix. Křemenné pískovce, arkózovité pískovce a arkózy mají pod 20 % matrix. Tyto základní skupiny lze dále dělit dle procenta zastoupení nestabilních složek na křemenné a drobové pískovce, které mají do 10 % nestabilních složek a na arkózové pískovce a droby, mající od 10 do 25 % nestabilních složek, a nad 25 % mají arkózy a droby.

3. 4. Sedimentační prostředí a diagenese pískovců

3. 4. 1. Sedimentace a sedimentační prostředí pískovců

Pískovce patří do skupiny sedimentárních, neboli usazených hornin. Sedimenty vznikají rozrušením starších hornin, transportem horninového materiálu i vyloužených látek a usazením (Kukal, 1986). Sedimenty vznikají v různých sedimentačních prostředích, jejichž vlastnosti mají vliv na složení sedimentů. Tucker (2001) definoval osm typů prostředí, ve kterých pískovce vznikají: fluviaální prostředí, pouštní prostředí,

jezerní neboli lakustrinní prostředí, deltové prostředí, mořské příbřežní (litorální) prostředí, mělkomořské šelfové prostředí, prostředí hlubokomořské a glaciální prostředí. O prostředí, v jakém sediment vzniká, vypovídá nejlépe jeho zvrstvení. Podle vnitřní stavby jednotlivých vrstev uvádí Petránek (1963) několik typů zvrstvení: horizontální, šikmé, zvlněné, čočkovité, a nezřetelné.

Horizontální zvrstvení je podle Petránka (1963) charakteristické paralelním střídáním vrstviček a lamin přibližně přímočarého průběhu. Vzniká sedimentací ze suspenze nebo chemogenním vylučováním minerálních látek z roztoku a u pískovců není nejobvyklejší. *Šikmé zvrstvení* je charakteristicky ukloněné vzhledem k sedimentačnímu povrchu. Pokud jsou přítomny dvě jednotky s protiklonnými vrstvami, jedná se o zvrstvení křížové (Kukal, 1986). Šikmé zvrstvení vzniká jak ve vodním prostředí, tak i na souši. Je podmíněno přítomností určitých nerovností v povrchu, jako jsou např. písečné valy apod. Tímto typem zvrstvení jsou charakteristické např. pískovce vzniklé v pouštním prostředí. *Zvlněné zvrstvení* je charakteristické pro sedimenty ukládané v litorálním nebo lakustrinním prostředí. Vzniká vlněním vody a to buď bez přítomnosti horizontální pohybové složky (bez proudění), nebo s přítomností mírného proudění (Petránek, 1963). Podle toho jsou sedimenty buď zvlněné souměrně, nebo se velikosti a rozložení vrcholů a depresí vln mění. *Čočkovité zvrstvení* je svým tvarem podobné čočkovité vrstevnatosti. Čočkovité zvrstvení se vyskytuje např. u hrubozrnných pískovců, obsahujících čočky valounů (Petránek, 1963). *Nezřetelné zvrstvení* se vyskytuje např. v mělkomořských sedimentech, kde se vyskytují nezvrstvené jemnozrnné pískovce (Petránek, 1963).

Podle Petránka (1963) se dají typy zvrstvení rozlišovat i podle prostředí, ve kterém k sedimentaci dochází. Jedná se o zvrstvení eolického typu, zvrstvení dočasných toků, říční typ zvrstvení, deltový a litorální typ. Tucker (2001) rozlišuje více typů sedimentárních prostředí.

1) *Fluviální prostředí* se vyznačuje uloženinami vlastního řečiště, údolních niv, aluviálních rovin, dejekčních kuželů apod. Pískovce zformované ve fluviálním prostředí se často vyznačují šikmým nebo křížovým zvrstvením. Fluviální sedimenty mohou obsahovat zrnitostně odlišné čočky, např. jílovité (Petránek, 1963). Texturně a kompozičně mohou být nezralé i zralé, což závisí jak na jejich původu, tak i na klimatu, ve kterém sedimentace probíhá, a délce transportu. Velikosti pískovcových zrn se zmenšují směrem po proudu, jehož směr sleduje i lepší vytříděnost. Nejběžnějšími typy pískovců v tomto prostředí jsou arenity.

2) *Pouštní prostředí* je charakteristické dlouhým obdobím sucha, nedostatkem srážek, velkými teplotními rozdíly a častými a silnými větry. Pískovce vzniklé v pouštním prostředí jsou jemnozrné až hrubozrné, o velikosti pískovcových zrn v intervalu 0,1 – 1 mm. Většina má však střední velikost zrna v rozmezí 0,14 – 0,27 mm (Kukal, 1986). Pískovce vzniklé v tomto prostředí jsou většinou velmi dobře vytríděné. Lepší vytríděnost se projevuje po směru větru, tímto směrem se také zmenšuje jejich velikost. Pískovcová zrna jsou zakulacená a mají obroušený povrch (Petránek, 1963). Sedimenty mívají často šikmé zvrstvení. Nejběžnějším typem jsou křemenné arenity.

3) Vlastnosti sedimentů *lakustrinního*, neboli *jezerního prostředí* závisí na typu jezera (tektonické, glaciální apod.) a na vodě, která jezero vyplňuje (sladká, slaná, brakická). Pískovce uložené v lakustrinním prostředí se často vyznačují laminárním horizontálním zvrstvením a malou mocností (Petránek, 1963).

4) *Prostředí delt řek*. Deltové uloženi jsou děleny na tři části: uloženi deltové roviny nad hladinou, uloženi deltové roviny pod hladinou a uloženi spodní části delty. Petránkovo (1963) členění obsahuje navíc uloženi svahu delty. Na rovině delty nad hladinou vody se vyskytují fluviální, lakustrinní a bažinné sedimenty. Na rovině delty pod hladinou vody vznikají písečné uloženi, které jsou složeny z dobře vytríděného písku. Na jejich vzniku se podílí proudy různých směrů a vlnění. Spodní část delty se nachází přímo ve styku s mořem, takže se zde mísí sladká říční voda se slanou mořskou vodou. Na tomto rozhraní se často tvoří pískové přesypy, které jsou křížově uloženy, a pískovcové čeřiny mající také křížové zvrstvení.

5) *Litorální prostředí* zahrnuje oblast při okraji moře, která je ohraničena linií nejvyššího přílivu a linií nejnižšího odlivu (Petránek, 1963). Pískovce mořského příbřežního (litorálního) prostředí jsou nejčastěji křemičité arenity, mající oblá zrna, jsou dobře vytríděné a vyznačují se vysokou zralostí. V místech, kde řeky přinášejí nevytríděný materiál, nebo tam, kde pobřeží sekundárně klesá, se mohou objevit méně vytríděné sedimenty, jako jsou droby (Petránek, 1963). Sedimenty litorálního prostředí se vyznačují šikmým zvrstvením, které v tomto prostředí převládá.

6) *Prostředí mělkomořského šelfu*¹ se rozkládá od linie nejnižší hladiny při odlivu až k hornímu okraji kontinentálního svahu, tedy do hloubky asi 200 m (Petránek, 1963).

¹ Sedimenty hlubokomořského prostředí se ukládají pod hranici pevninského šelfu (Kukal, 1986). V tomto prostředí nepůsobí významně ani vlnění, ani vodní proudy (kromě turbiditních proudů). Prostředí hlubokých moří se vyznačuje dvěma pohyby: mořskými skluzy a sesuvy, jimiž jsou transportovány velké masy sedimentů. Toto prostředí se obecně vyznačuje nezralými sedimenty, nejčastěji se jedná o droby.

Oblasti mělkomořských šelfů se tedy nacházejí trvale pod hladinou moře. V těchto místech vznikají písečné čeřiny, políčka a přesypy. Rozmístění materiálu a jeho vytřídění závisí na hloubkových poměrech a na činnosti příboje, vlnění vody i účincích vodních proudů (Petránek, 1963).

7) *Glaciální prostředí* zahrnuje vlastní území ledovce a jeho nejbližší okolí. Podle Kukala (1986) jsou glaciální pískovcové sedimenty charakteristické rýhováním, mohou se na nich vyskytovat výčnělky, intendance nebo semiparalelní stupně. Pískovce vzniklé v glaciálním prostředí jsou často nevytříděné a nezvrstvené.

Kukal (1986) uvádí další alternativu typologie sedimentačního prostředí, a to podle sledování tvaru pískovcových těles (Tab. 6). Toto dělení je hojně využíváno naftovými sedimentology, aby mohli zjistit tvar těles propustných sedimentů mezi nepropustnými sedimenty.

Tab. 6. Tvary a mocnosti pískovcových těles různých sedimentačních prostředí dle Kukala (1986, upraveno).

Prostředí	Tvar a mocnost pískovcových těles
Aluviální	Silně protažená tělesa. Šířka až 45 km, komplikovaný tvar. Obvykle není zachováno celé těleso. Lineární textury jsou rovnoběžné s protažením tělesa, lokálně dochází k odchýlkám.
Přilivové plošiny	Protažená tělesa. Délka nebývá větší než 1 000m. Průběh mírně zohýbaný. Šikmé zvrstvení rovnoběžné k protažení.
Pískové bariéry	Protažená tělesa, šířka do několik desítek metrů až několik kilometrů. Mocnost 6 – 20 m. Těleso přímé nebo mírně ohnuté. Směry lineárních textur často nezávislé na tvaru tělesa.
Hlubší šelf	Velmi nepravidelné tvary, různá orientace protažení vzhledem k březní linii. Proměnlivá orientace lineárních textur.
Hlubší pánve a turbidity	Silně protažená tělesa, mocnost až několik kilometrů. Dokonalý souhlas mezi orientací lineárních textur a protažením tělesa (výjimkou jsou deskovitá tělesa).
Eolické kontinentální prostředí	Kupovité, čočkovité nebo deskovité tvary, mocné až 200 m, tvar někdy ohnutý. U dun šikmé zvrstvení kolmé na protažení tělesa.

3. 4. 2. Diagenese

Pískovce se od písků liší svým zpevněním. Ke vzniku pískovců dochází během procesu diagenese, který zahrnuje všechny procesy probíhající v sedimentu po jeho uložení a před jeho zpevněním (Kukal, 1986). Podle Petránka (1963) se pod pojmem diagenese rozumí souhrn nejrůznějších procesů probíhajících uvnitř usazeniny, při kterých dochází ke zmenšování objemu sedimentu. Diagenezi dělí Kukal (1986) na mechanickou (kompakce) a chemickou. Během mechanické diagenese dochází ke zmenšování porózy písků, což závisí na velikosti zrna a na obsahu nestabilních složek. Hrubozrnné písky tedy ztrácí porózu rychleji, než jemnozrnné (Kukal, 1986). Během

mechanické diagenese dojde k určitému zpevnění sedimentu, k úplnému zpevnění však dojde až za spoluúčasti chemické diagenese, která výrazně působí až ve větších hloubkách pohřbení (hloubky větší než 1 000 m). Chemická diagenese zahrnuje reakce mezi pevnými částicemi a kapalnými částicemi, které se nacházejí v pórech (Chilingarian, Wolf, 1992). Chemická diagenese má svůj určitý teoretický sled, ale jednotlivé procesy se mohou i několikrát opakovat. Podle Kukala (1986) je sled procesů chemické diagenese následující:

1. raně diagenetické rozpouštění vápenatých bioklastů;
2. raně diagenetické tmelení kalcitem, orientované obrůstáním křemenných zrn;
3. tvorba jílového tmelu;
4. zatlačování křemene karbonáty;
5. dolomitizace, druhé stadium vzniku křemičitého tmelu, změny v jílových minerálech;
6. rozklad nestabilních klastů;
7. decementace, rozpouštění karbonátového tmelu;
8. pozdně diagenetická silicifikace a karbonatizace.

Procesu, při němž dochází k přeměně nezpevněného sedimentu ve zpevněný, se říká litifikace, je to jeden z projevů diagenese. V první fázi dojde k usazení pískových zrn. Zrna jsou nejprve transportována (např. vodou), dokud nedosáhnou erozní báze. Potom následuje vytlačení vody z mezizrnových prostorů díky tlaku nadložních sedimentů. Vlivem tohoto tlaku se pískovcová zrna orientují do polohy úspornějšího uspořádání. Tlak sedimentů způsobuje vytvoření bodového tmelu (např. křemičitého), který vzniká tlakovým rozpouštěním křemenných zrn (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010).

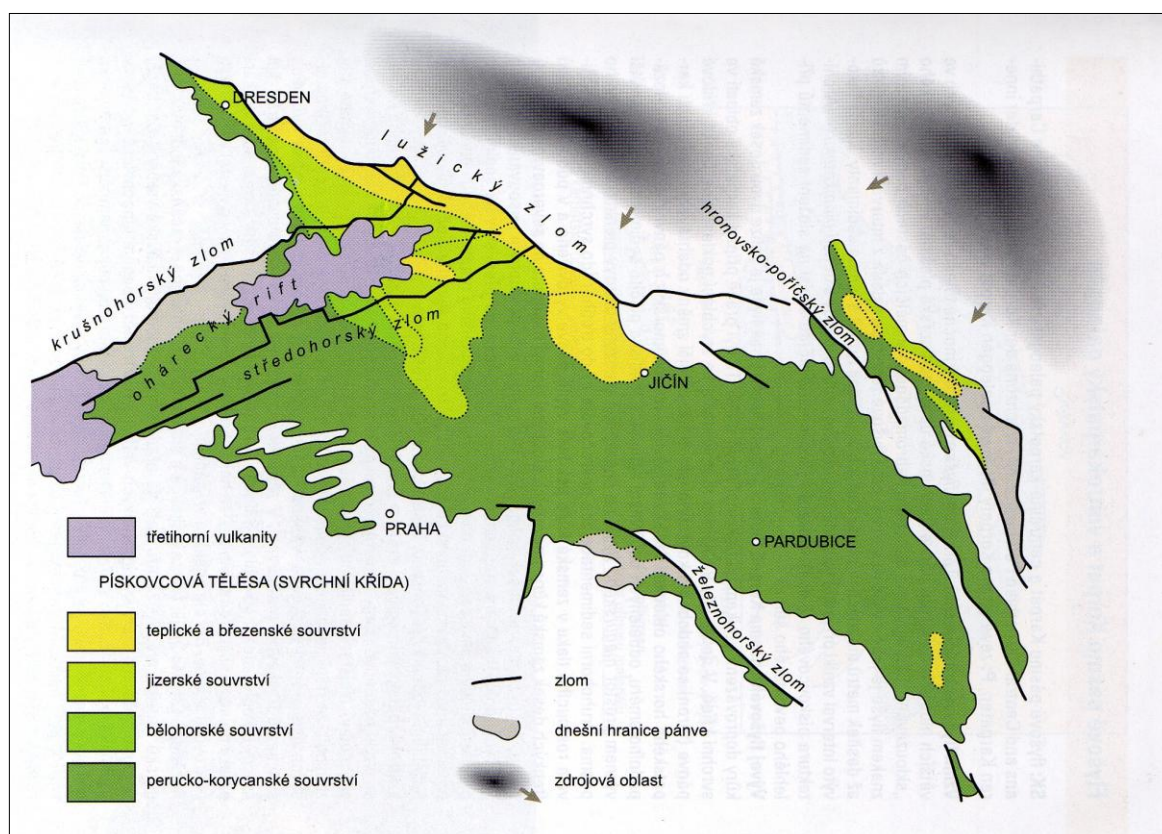
3. 5. Rozšíření pískovců v České republice a ve světě

3. 5. 1. Pískovce v České republice

Pískovce se v České republice vyskytují ve dvou hlavních oblastech, a to v České křídové pánvi a v karpatském flyši. Dalšími oblastmi výskytu pískovců jsou oblasti jezerních a říčních pánví, vyplněné usazeninami karbonu a permu.

Česká křídová pánev (Obr. 11) je území mající tvar lichoběžníku sahajícího od Drážďan až po oblast severozápadní Moravy (Chlupáč et al., 2002). Pískovce se zde uložily v důsledku křídové transgrese. Nacházejí se především při severní polovině pánve, jejich mocnost je v celém rozsahu pánve minimálně 30 – 60 m (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Součástí České křídové pánve jsou facie kvádrových pískovců

(oblast mezi Drážďany a Mladou Boleslaví), které jsou svým litologickým vývojem a kvádrou odlišností náchylné k hluboké erozi a dávají prostor pro vznik skalních měst (Chlupáč et al., 2002). Geneze facie kvádrou pískovců je sporná. Buď vznikla uloženinami deltového typu, nebo díky putujícím velkým podmořským dunám (Chlupáč et al., 2002).



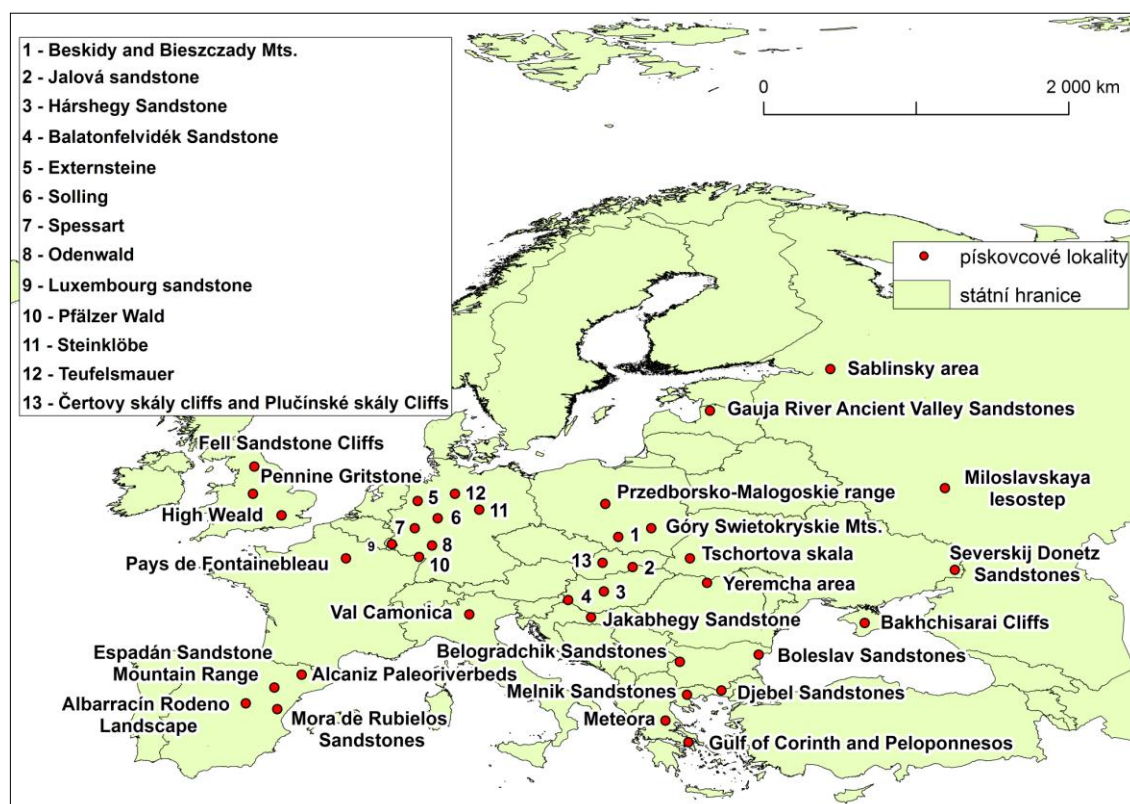
Obr. 11. Česká křídová pánev a hlavní pískovcová tělesa podle jednotlivých souvrství dle Adamoviče, Mikuláše a Cílka (2010).

Oblast karpatského flyše je další významnou oblastí výskytu pískovců v České republice. Nejvýznamnější lokality výskytu pískovců jsou magurská skupina příkrovů a vnější skupina příkrovů. V magurské skupině jde o račanskou jednotku, do které spadá na pískovce bohaté soláňské souvrství, které má typický flyšový vývoj a vyšší částí s pískovci patří již do paleocénu (Chlupáč et al., 2002). Ve vnější skupině příkrovů se jedná zejména o godulské souvrství, istebňanské souvrství a klementske souvrství. Godulské souvrství se jeví jako rytmický flyš glaukonitických pískovců, istebaňské souvrství je reprezentováno arkózovitými a drobovitými pískovci a v klementsém souvrství se nacházejí vápnité pískovce (Chlupáč et al., 2002).

Další pískovcovou oblastí jsou oblasti limnických pánví, vyplněné usazeninami karbonu a permu (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Do karbonských usazenin limnických pánví patří kladenské souvrství a do něj spadající radnické vrstvy a nýřanské vrstvy, kumburské souvrství, semilské souvrství a odolovské souvrství (Chlupáč et al., 2002). Do permských limnických pánví bohatých na pískovce se řadí chotěvické souvrství, trutnovské souvrství a orlická pánev (Chlupáč et al., 2002).

3. 5. 2. Pískovce v Evropě

Prakticky největším a nejspojitějším pískovcovým územím ve střední Evropě je právě Česká křídová pánev. Ostatní lokality střední Evropy jsou spíše izolované a nejsou spojené v rozsáhlá území (Obr. 12). V Německu stojí za zmínku pískovce křídového stáří, jimiž jsou tvořeny regiony Teufelsmauer (Sasko – Anhaltsko) a Externsteine (Severní Vestfálsko) (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007). V Polsku jsou nejznámější regiony tvořené křídovo – paleogenním flyšem se silně zvrstvenými pískovci, jako jsou např. Beskidy a Bieszczady, a triasové pískovce, které tvoří Góry Swietokrzyskie (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007).



Obr. 12. Lokalizace pískovců v Evropě dle Härtela, Adamoviče, Mikuláše in Härtel et al. (2007).

K jednomu z nejznámějších pískovcových oblastí západní Evropy patří francouzské Fontainebleau a lucemburské pískovce, které jsou blízké svou stavbou pískovcům České křídové pánve (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007). Odlišné jsou permské pískovce v italských Alpách, které byly následně zhlazeny würmskými ledovci (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007). Další významné pískovcové oblasti lze najít ve Španělsku (Sierra de Spadán) a ve Velké Británii (High Weald, Pennine Gritstone, okolí města Glossop, New Red Sandstone area, Fell Sandstone Cliffs).

Ve východní Evropě jsou nejzajímavější pískovcové oblasti devonského stáří v Lotyšsku (Guaja River Ancient Valley Sandstones) a karbonské pískovce v centrálním Rusku (Siliye kamni, Urochishche Zarkaly) (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007).

V jižní Evropě je významnou pískovcovou oblastí řecká Meteora, tvořená oligocenními a miocenními pískovci. Dalšími významnými oblastmi jsou Belogradnichk a Boleslav Sandstones (Bulharsko), tvořené pískovci jurského stáří (Härtel, Adamovič a Mikuláš in Härtel et al., 2007).

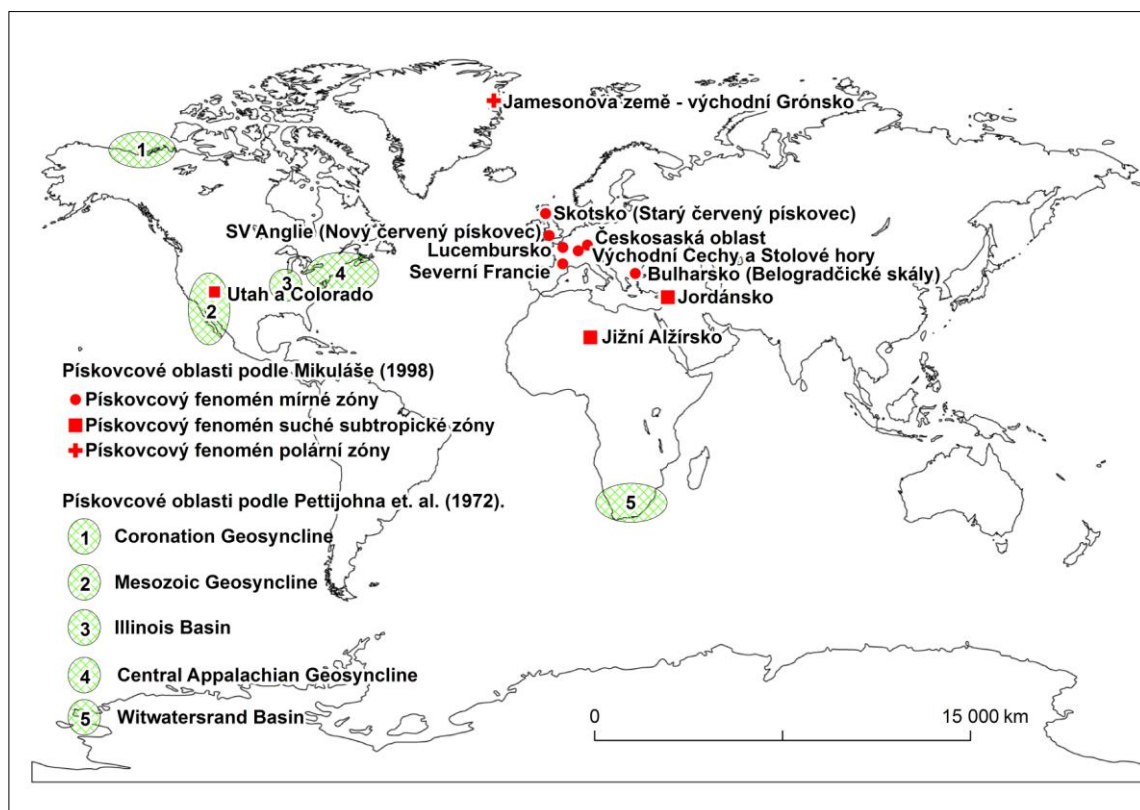
K významným pískovcovým oblastem severní Evropy patří oblast devonských pískovců na Špicberkách a oblast devonských pískovců v Estonsku. Mezi nejvýznamnější pískovcové regiony Špicberků patří Siktefjeller Group a Red Bay Group (Ramberg, 2008). V Estonsku se nachází významná oblast devonských pískovců mezi městy Pärnu – Puurmani – Mustvee.

3. 5. 3. Pískovce ve světě

Pískovcových oblastí ve světě je mnoho, proto je třeba vybrat pouze ty nejdůležitější, plošně nejrozsáhlejší. Pettijohn et al. (1972) popisuje výskyt pískovců zejména v sedimentárních pánvích, které dělí do pěti kategorií (Tab. 7) (Obr. 13).

Tab. 7. Typy pískovců a jejich původ v hlavních pískovcových oblastech ve světě dle Pettijohna et al. (1972).

Název pánve	Typy pískovce	Původ pískovců	Rozloha
Coronation geosyncline, okres Mackenzie, Kanada	Křemenné arenity a živcové wacky	Eolický, aluviální, odvozené z orogenního pásu	97 000 km ² (Allan, 1978)
Central Appalachian geosyncline	Kamené a křemenné arenity, wacky	Aluviální, marinní, mělkomořský	400 000 km ² (Yadov, 2004)
Mesozoic geosyncline v Kalifornii	wacky	Odvozené z aktivních vulkanických zdrojů, tektonický, odvozené z hluboce erodovaných vyvěřelin	neuveveno
Witwatersrand Basin, Jižní Afrika	Křemenné arenity, kamenné arenity	Erozní	38 850 km ²
Illinois basin a přilehké oblasti	Křemenné arenity, kamenné arenity	Marinní, fluviální	129 000 km ²



Obr. 13. Lokalizace hlavních pískovcových oblastí ve světě podle Pettijohna et al. (1972) a Mikuláše (1998).

Mikuláš (1998) lokalizoval hlavní pískovcové oblasti světa odlišným způsobem (Obr. 13). Hlavní pískovcové oblasti byly stanoveny a rozděleny do tří kategorií podle příslušnosti k určité klimatické zóně. Jednotlivá zařazení do určité klimatické zóny vypovídá o předpokládaných majoritních procesech, které na pískovcích probíhají. Pískovcový fenomén se nevyskytuje v tropické zóně díky vysoké rychlosti eroze, která znemožňuje vznik pískovcových mikroforem (Mikuláš, 1998).

4. Zvětrávání

4. 1. Definice zvětrávání

Zvětráváním se rozumí takové procesy, které rozrušují horninu a vytváří na ní zvětralinovou kůru (Demek, 1987). Podle Petránka (1963) se jako zvětrávání označují změny ve složení a vývoji hornin, nastávající v místě výskytu na povrchu nebo v blízkosti povrchu země, a to působením povrchových činitelů (atmosféry, vody, ledu, kolísání teploty, činnosti organismů). Dixon (in Goudie, 2004) definuje zvětrávání jako skupinu procesů zodpovědných za rozpad materiálů na zemském povrchu nebo v jeho blízkosti. Ke zvětrávání dochází podle Dixona in Goudie (2004) z důvodu odlišných podmínek při vzniku horniny a následných podmínek na zemském povrchu.

Proces zvětrávání se dělí na zvětrávání fyzikální (mechanické) a chemické. V případě fyzikálního zvětrávání dochází k rozrušování materiálu mechanickým a fyzikálním způsobem, v případě chemického zvětrávání probíhá rozrušení zásluhou chemických reakcí, nejčastěji se jedná o hydrolýzu, rozpouštění, vzájemnou výměnu kationtů, oxidaci a redukci.

Na pískovcích lze najít oba typy zvětrávání, míra zvětrávání se odráží od odolnosti horniny vůči zvětrávání. Nagle (2000) uvádí odolnost pískovce vůči zvětrávání mezi 7 – 14 kg/m². Odolnost pískovce závisí na množství a druhu tmelu, na zrnitosti a pórovitosti, klimatu a také na mechanických vlastnostech (Sweevers, Delalieux, Grieken, 1998). Dle těchto autorů jsou pískovce uložené větrem méně stmelené, než pískovce uložené ve vodě, a tím jsou i méně odolné vůči zvětrávání. Množství a druh tmelu je další důležitý faktor ovlivňující odolnost pískovce vůči zvětrávání. Pískovce obsahující křemenný tmel jsou více odolné, než ty s železitým tmelem. Nejméně odolné jsou pískovce s karbonátovým tmelem. Pórovitost je další faktor ovlivňující zvětrávání na pískovcích. Young (in Goudie, 2004b) tvrdí, že pokud jsou póry vyplněny křemenným tmelem, zvětrávání je omezeno pouze na povrchovou vrstvu, díky odolnosti křemene vůči zvětrávání.

Zvětrávání má také vliv na pevnost pískovce. Ta se pohybuje u silně zpevněného pískovce okolo 200 MPa, u slabě zpevněného 20 MPa a u velmi slabě zpevněného jen 2 MPa (Young in Goudie, 2004b). Podle Younga (in Goudie, 2004b) má proces zvětrávání vliv na snížení pevnosti pískovce. Rozdíl může činit dvojnásobné až trojnásobné snížení.

Podle Younga (in Goudie, 2004b) se převládající typ zvětrávání liší zejména podle mineralogického složení pískovců. Např. v arkózových pískovcích je primární proces chemické zvětrávání živců. U křemenných pískovců převládá chemický rozklad křemičitého tmelu. Typ zvětrávání je také ovlivněn schopností vody pronikat do pískovce.

Nishiyama a Matsukura (2006) zjistili následující dopady zvětrávání na pískovce: s délkou trvání zvětrávání dochází ke zvýšení objemu pórů a následnému spojení pórů v pískovcích, množství jílových minerálů v matrix klesá s délkou zvětrávacího procesu a pevnost pískovců klesá s dobou zvětrávacího procesu.

4. 1. 1. Fyzikální zvětrávání

Fyzikální zvětrávání je rozrušování hornin mechanickým a fyzikálním způsobem (Demek, 1987). Vede k různě intenzivnímu rozpadu hornin, při kterém nenastává změna chemismu zvětralin (Petránek, 1963). Nejčastější typy fyzikálního zvětrávání jsou termické zvětrávání, exfoliace, mrazové zvětrávání, solné zvětrávání a zvětrávání vlivem organického rozpínání (Demek, 1987, Turkington in Goudie, 2004b, Horník et al., 1986). Každý typ mechanického zvětrávání je způsoben jinými procesy (Tab. 8)

Tab. 8. Typy a příčiny fyzikálního zvětrávání podle Demka (1987), Turkington in Goudie (2004b) a Horníka et al. (1986).

Typ zvětrávání	Příčina zvětrávání
Termické zvětrávání	Napětí vyvolané odlišnou teplotou na povrchu hornina a několik centimetrů pod jejím povrchem
Exfoliace	Napětí vzniklé odlehčením díky ztrátě mocnějšího pokryvu horniny
Mrazové zvětrávání	Zvýšení objemu mrznoucí vody v pórech a puklinách
Solné zvětrávání	Tlak vlivem růstu krystalů soli nejčastěji obsažené v kapilární vodě
Zvětrávání vlivem organického rozpínání	Např. pronikání kořenů rostlin do puklin

Tepelné zvětrávání závisí podle Gerrarda (1988) zejména na tepelné vodivosti hornin. Gerrard (1988) uvádí, že interval tepelné vodivosti pískovců je vyšší, tím pádem mohou dosahovat poměrně vysokých povrchových teplot. Rozpětí hodnot tepelné vodivosti pískovců vzhledem k dalším horninám, jako jsou např. prachovce, jílovce atd.,

je uvedené v Tab. 9. Tepelné zvětrávání vzniká nejčastěji vlivem intenzivního slunečního osvětlení (např. v pouštních oblastech), ale může vznikat i díky zahřívání ohněm. Jak se oheň šíří, vytváří na pískovcových horninách drobné oděrky, které se poté odlupují. Intenzivní požáry mohou způsobit odlupování až do hloubky 2 cm (Young in Goudie, 2004b).

Tab. 9. Intervaly hodnot tepelné vodivosti pískovců v porovnání s prachovci, jílovými prachovci, jílovcí a břidlicemi podle Schöna (1996) in Aplin, Fleet a Macquaker (1999).

Typ horniny	Tepelná vodivost [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Autor
Pískovec	0,90 – 6,5	Cermak & Rybach, 1982
	1,88 – 4,98	Jessop, 1990
	0,38 – 5,17	Dortman (in Schön, 1996)
Prachovec	2,47 – 2,84	Jessop, 1990
Jílový prachovec	1,70 – 3,40	Cermak & Rybach, 1982
Jílovec	0,60 – 4,00	Cermak & Rybach, 1982
Břidlice	0,55 – 4,25	Cermak & Rybach, 1982

Exfoliace probíhá na pískovcích zcela běžně, jejím produktem jsou exfoliační šupiny. Jejich velikosti závisí na typu pískovce podle odolnosti. Běžná mocnost exfoliačních šupin je od 0,2 m do 2 – 3 m, v případě vápnitých pískovců je mocnost pouze 5 – 15 cm (Adamovič, Mikuláš, Cílek. 2010).

Mrazové zvětrávání nebo mrazové tříštění je pro pískovce typické spíše v menší míře. Takový proces se nazývá mikrogelivace (Migón, 2006). Míra mrazového zvětrávání na pískovcích však může být ovlivněna i přítomností některých solí. Williams a Robinson (in Williams a Robinson, 2001) prokázali, že přítomnost některých solí (např. soli kamenné) zvyšuje účinek mrazového zvětrávání. To se může dít např. díky hromadění soli ve svrchních vrstvách horniny v důsledku jejího zpevnování. Voda poté, co zmrzne, nemůže expandovat do svrchních vrstev, je uzavřena uvnitř horniny a vytváří tlak, který zvyšuje napětí a to pak způsobuje její rozpad (French, 2007).

Solné zvětrávání se projevuje narůstáním krystalů soli po odpaření kapilární slané vody. V tropických oblastech je významným zdrojem soli netopýří trus (Hasono et al., 2006). Solné zvětrávání, a to nejen na pískovcích, je úzce spjato s následnou exfoliací. Nejběžnější solí, která krystalizuje v pískovcích, je kalcit CaCO_3 (Hasono et al., 2006).

Zvětrávání způsobené tlakem kořenů a organickým růstem je vázáno na pukliny. Skrz ně prostupují např. kořeny rostlin nebo lišejníky a oddělují části pískovcové horniny, které následně odpadávají jako celé bloky.

4. 1. 2. Chemické zvětrávání

Při chemickém zvětrávání se mění chemické a minerální složení horniny (Horník et al., 1986), což je způsobeno rozmanitými reakcemi mezi plyny a kapalinami atmosféry, povrchovými a podzemními vodami, horninami a organismy zemské kůry (Náprstek, 1985). Hlavním činitelem chemického zvětrávání je voda. Chemické zvětrávání je způsobeno chemickými reakcemi, z nichž nejvýznamnější jsou hydrolýza, oxidace, redukce a hydratace. Každá z těchto reakcí má specifický průběh (Tab. 10).

Tab. 10. Chemické reakce a jejich průběh podle Demka (1987) a Horníka et al. (1986).

Název reakce	Průběh reakce
Hydrolýza	Složitější látky se štěpí účinkem vody v jednodušší
Oxidace a redukce	Vzrůst nebo pokles elektronu ve sloučenině způsobuje rozklad
Hydratace	Bezvodné nerosty se mění přijetím vody na vodné

Chemické zvětrávání obecně závisí na klimatu (v teplém klimatu s dostatkem srážek probíhá chemické zvětrávání rychleji), vegetačním pokryvu a odolnosti hornin vůči zvětrávání. Odolnost pískovce vůči chemickému zvětrávání závisí zejména na typu pískovce a jeho tmelu. Pískovce tvořené nerozpustnými produkty chemického zvětrávání jsou mineralogicky zralé, např. křemenné pískovce, zatímco arkózy a droby jsou nezralé, protože obsahují živce a úlomky hornin, které nebyly rozpuštěné chemickým zvětráváním (McLeish, 1992).

4. 2. Eroze na pískovcích

4. 2. 1. Definice eroze

Eroze je proces, při kterém dochází k oddělování, pohybu a ukládání jakéhokoli materiálu. Eroze je podle Huggetta (2007) soubor veškerých destruktivních procesů, pomocí nichž jsou produkty zvětrávání vyzvednuty na povrch. Tyto procesy jsou

způsobeny transportními médii, jako jsou led, voda a vítr. Lupia-Palmeri in Goudie (2004) zahrnuje pod pojmem eroze všechny exogenní procesy nebo skupiny procesů, které jsou zaměřeny na zhlazování reliéfu Země.

Hlavním erozním činitelem je působení klastického materiálu, který je unášen tekoucí vodou (popř. vlnami nebo proudy), ledem a větrem. Podle prostředí, ve kterém eroze probíhá, se rozlišuje eroze říční, mořská, jezerní, ledovcová a větrná. Hlavní projevy eroze jsou vymílání, koraze, abraze a obrušování. Některé tvary mohou vznikat i selektivní erozí, která je způsobena různou odolností hornin vůči erozi.

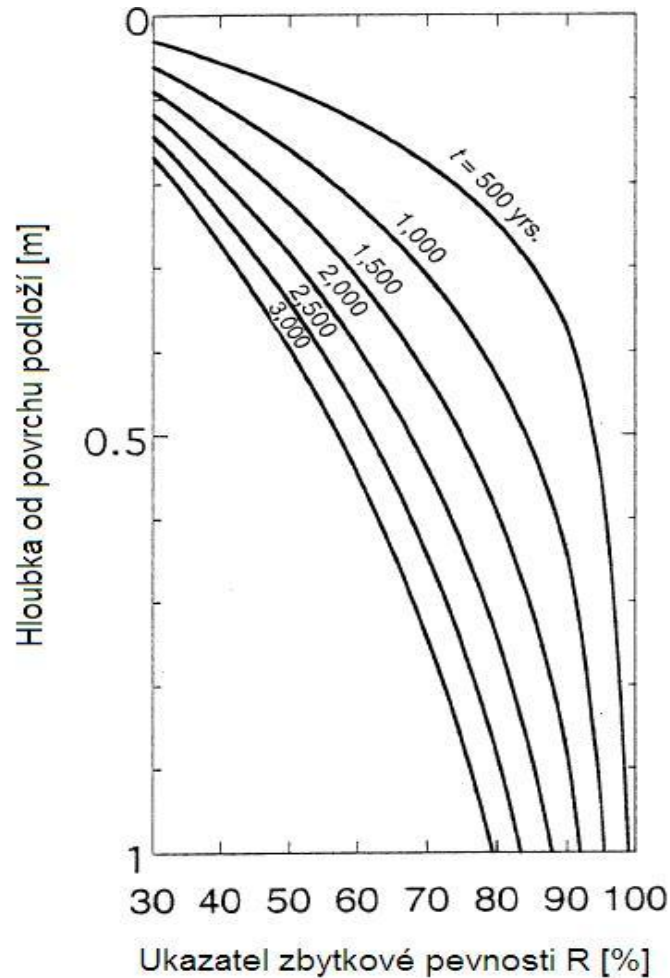
4. 2. 2. Eroze na pískovcích

Erozi na pískovcích lze pozorovat ve všech jejích typech. Míra eroze se stejně jako u zvětrávání liší v důsledku odolnosti pískovce vůči erozi, což je dáno zejména druhem tmelu. Nejodolnějším typem je pískovec s křemičitým tmelem (Kogel et al., 2006). Dobře odolávají i pískovce s železitým tmelem (Noel a Fielder, 2001). Procesem eroze vznikají na pískovcích rozličné tvary, na jejichž vzniku se obvykle podílí i některý z procesů zvětrávání.

4. 3. Rychlost zvětrávání a eroze

Rychlost zvětrávání a eroze závisí podle Huggeta (2007) na typu horniny, klimatu, topografii, organismech a čase. Náprstek (1985) zmiňuje jako faktory ovlivňující zvětrávání zejména klima, minerální složení a strukturu horniny, reliéf, vegetaci a čas.

Vztah mezi rychlostí zvětrávání na pískovcích a časem není lineární. Hachinohe, Hiraki a Suzuki (1999) nazvali celkový stupeň zvětrávání *ukazatelem zbytkové pevnosti* horniny, který definovali jako poměr tvrdosti zvětralých a nezvětralých částí podloží (Obr. 14). Při vynesení rychlosti zvětrávání do grafu došli k závěru, že rychlost zvětrávání se logaritmicky snižuje s časem.



Obr. 14. Snížení ukazatele zbytkové pevnosti u pískovce vzhledem k hloubce od povrchu podloží podle Hachinohea, Hiraki a Suzuki (1999). Pozn. Ukazatel zbytkové pevnosti je výsledkem výpočtu $R = (N_p/N_{pf}) * 100$, kde N_p značí měřenou hodnotu průniku jehly penetrometru [kgf/mm] a N_{pf} značí průměrnou hodnotu průniku jehly penetrometru [kgf/mm].

Rychlost zvětrávání závisí na druhu pískovce a na geomorfologické odolnosti pískovce. Křemičitý pískovec je odolnější vůči zvětrávání, než třeba vápenitý, proto rychlost zvětrávání v případě křemičitého pískovce bude nižší, než rychlost zvětrávání v případě vápenitého pískovce (Huggett, 2007). Obecně jsou pískovce poměrně odolné vůči zvětrávání (Demek, 1987), ale pískovce s křemenným tmelem se řadí spíše k odolným horninám.

Rychlost zvětrávání je také ovlivněna klimatem, nejvíce pak množstvím srážek. Zejména platí, že zvětrávání probíhá rychleji v teplém humidním klimatu, proto při určování relativního stáří tvarů by měly být změny klimatu zohledněny. Rychlost

zvětrávání pískovců v suchém mírném klimatu bude okolo 5 mm/1 000 let, oproti tomu v humidním tropickém klimatu bude řádově vyšší (Burley, Worden, 2003).

4. 4. Tvary vzniklé zvětráváním, erozí a dalšími procesy

Tvary vyvinuté na pískovcích se dají rozdělit podle geneze. Při jejich vzniku často působí několik procesů zároveň, ovšem zpravidla jeden je vůdčí. Základními geomorfologickými procesy vytváření různých tvarů na pískovcích jsou chemické a mechanické zvětrávání a eroze, nebo se jedná o tvary vázané na jiný vůdčí proces, doprovázený výše uvedenými procesy (Tab. 11).

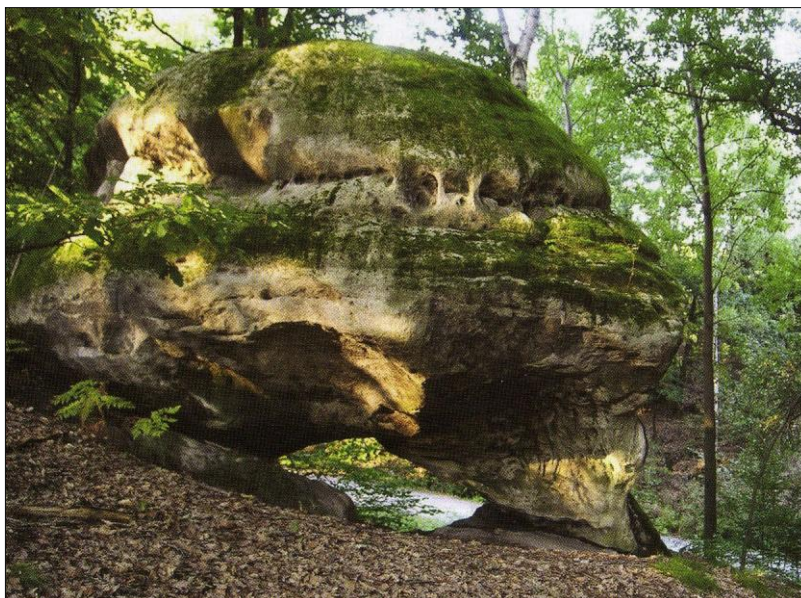
Tab. 11. Přehled pískovcových tvarů podle primárního geomorfologického procesu dle Adamoviče, Mikuláše, Cílka (2010), Mikuláše in Härtel et al. (2007), Mikuláše in Jenč a Šoltysová (2006), Twidalea (2002).

Chemické zvětrávání	Mechanické zvětrávání	Eroze	Tvary vázané na jiný vůdčí proces
Pískovcová kupole	Skalní brána	Egutační jamky a pyramidy	Tvary vázané na výskyt vrstevních ploch puklin (jeskyně)
Pseudoškrapy na pískovcích		Skalní hřib	Tvary vázané na změnu půdního pokryvu (šikmé římsy a zářezy)
Skalní hodiny	Skalní okno	Skalní mísa	Tvary vzniklé v důsledku pronikání magmatu do horniny a ohřátí vody v puklinách a pórech (proželezněné desky a příkontaktní sloupky)
Skalní římsy a lišty		Skalní převis	
Subhorizontální tunýlky, jeskyňky a horizontální trychtýře			
Tafone	Skalní věž	Skalní talíře a hroty	
Trubice a trubičky tvořené laminami železivce	Tor		
Skalní přehrádky		Tvary vzniklé bioerozí	
Voštiny			

4. 4. 1. Tvary vzniklé chemickým zvětráváním

4. 4. 1. 1. Pískovcová kupole

Pískovcová kupole je polokulovitý tvar, který je tvořen nízkou, většinou pravidelnou kupolí (Obr. 15) (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Cílek (in Härtel et al., 2007) i Twidale (2002) přisuzují vznik těchto tvarů tzv. dvoufázovému vývoji. Pískovcové kupole se nejprve formují pod povrchem a jsou pohřbené pod kvartérními sedimenty, poté jsou odkryty následným procesem eroze. Díky vodě, která postupovala podél puklin, docházelo k chemickému zvětrání pískovce. Pískovec se měnil na písek, který byl následně erodován a došlo k exhumaci pískovcové kupole (Twidale, 2002). Adamovič, Mikuláš a Cílek (2010) popisují vznik skalních kupolí v důsledku odpadávání exfoliačních šupin.



Obr. 15. Pískovcová kupole v Zátyni na Kokořínsku. Foto: Václav Cílek in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Cílek (in Härtel et al., 2007) datuje vznik pískovcových kupolí na českých pískovcích do paleogénu až neogénu. Zvětrávání vedoucí ke vzniku skalních kupolí začalo ale již v teplém a vlhkém období pozdního mezozoika .

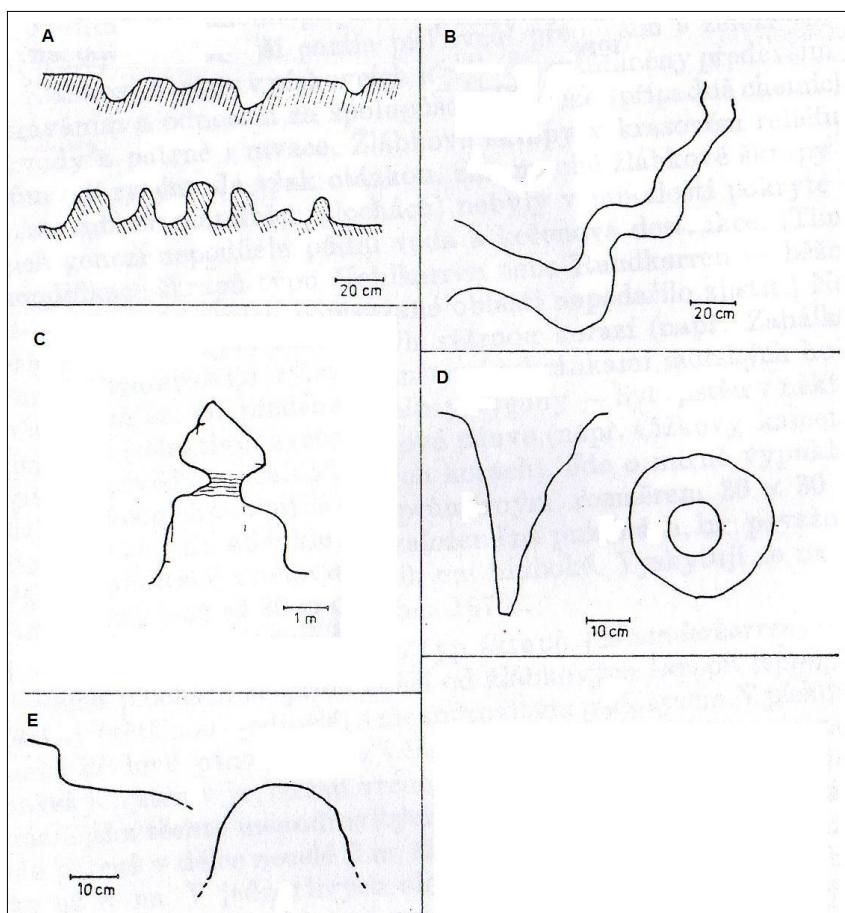
Jednotlivé vývojové fáze pískovcových kupolí lze jen těžko pozorovat, neboť fáze vývoje probíhala pod povrchem. Dnes lze pozorovat již odkryté a zformované pískovcové kupole.

4. 4. 1. 2. Pseudoškrapy na pískovcích

Pseudoškrapy jsou drobné tvary skalního povrchu, které vznikají působením atmosférických činitelů (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Jedná se o tvary, jejichž velikost a tvar se může lišit, vzniklé jako výsledek procesu zvětrávání (Goldie in Goudie, 2004). Pseudoškrapy jsou tvarově a někdy i geneticky analogické škrapům v krasových horninách, proto na ně lze uplatnit jejich typologii a terminologii (Vítek, 1982). Na jejich vzniku se nejvíce podílí chemické zvětrávání pomocí srážkové vody (Rubín, Balatka et al., 1986), která rozpouští křemitý tmel v pískovcích. K rozrušení dochází nejlépe pod sněhovou pokrývkou nebo pod vegetačním krytem (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Podle tvaru a vzniku se dají pseudoškrapy na pískovcích rozdělit na několik základních typů (Tab. 12), které se liší svým vzhledem (Obr. 16). Vítek (1982) řadí k pseudoškrapům pro komplexnost i skalní mísy a skalní hříby, které jsou v této práci popsány samostatně, neboť se od pseudoškrapů svým vzhledem nápadně odlišují.

Tab. 12. Typologie pseudoškrapů podle tvaru a vzniku dle Vítky (1982).

Typy pseudoškrapů	Charakteristika tvaru	Vznik
Žlábkové	Soustava žlábků s ostrými hřbítky	Mechanické a chemické působení stékající vody
Meandrovité	Soustava žlábků a hřbítků s meandrovitým půdorysem	Mechanické a chemické působení stékající vody v závislosti na struktuře horniny
Stěnové	Mělké žlábků a hřbítky, velmi tenké hřebínky	Eroze stékající vody a nivace
Hrotovité	Ostré výčnělky z horninového podkladu	Modelování exogenními vlivy do ostrých forem
Jamkové	Oválné a šterbinové jamkovité prohlubně	Vlivem vegetace (lišejníků, mechorostů, trav a dřevin)
Šlápotovité	Ploché prohlubně s ostře omezenými stěnami	Destrukce pískovce v důsledku gelivace a pronikáním vody podél spár a puklin



Obr. 16. Tvary různých druhů pseudoškrapů dle Vítka (1982). Pozn. A – žlábkové pseudoškrapy, B – meandrovité pseudoškrapy, C – hrotovitý pseudoškrap v horní části hřibovité skalky, D – jamkový pseudoškrap, E – šlápotovitý pseudoškrap

Pseudoškrapy se podle Rubína, Balatky et al. (1986) vyskytují ve všech klimatických oblastech. Nejvyvinutější jsou ve vlhkých tropech, kde dochází díky vysokým teplotám k rychlejším chemickým reakcím, což je způsobeno také dostatkem vody, jejíž přítomnost hraje ve vývoji pseudoškrapů významnou roli. Tito autoři také odhadují stáří pseudoškrapů do desítek tisíc let.

4. 4. 1. 3. Skalní hodiny

Skalní hodiny jsou označovány jako svisle orientované sloupky v pískovcích, které shora i zdola přecházejí v plynulý skalní masív a připomínají svým tvarem přesýpací hodiny (Obr. 17) (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Skalní hodiny vznikají v důsledku selektivního zvětrávání a eroze.



Obr. 17. Skalní hodiny v oblasti Svidnické věže v nepřístupné oblasti Adršpašských skal. Foto: Oldřich Jenka in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Jako počáteční stádium vývoje skalních hodin je vytvoření jamek nebo voštin. Na tyto tvary působí eroze, takže dojde k jejich prohlubování, ale na sloupek mezi nimi působí chemické procesy, jimiž se sloupek stává odolnější a erozi nepodléhá v takové míře. Výsledkem je propojení sousedních dutin (popř. voštin) (Mikuláš in Härtel et al., 2007) a vznik skalních hodin.

Skalní hodiny se vyskytují ve všech klimatických oblastech. Jelikož je podle Mikuláše (in Härtel et al., 2007) jejich vznik vázán na výskyt voštin, nebudou zřejmě obvyklé v arktické zóně, kde se voštiny také hojně nevyskytují.

4. 4. 1. 4. Skalní římsy a lišty

Skalní římsy a lišty jsou podle Rubína, Balatky et al. (1986) souvislé výstupky až drobné stupínky na skalních stěnách. Skalní římsy jsou přitom v řádu decimetrů, skalní lišty v řádu centimetrů (Obr. 18). Křížek (2011) uvádí tloušťku skalních říms v Rusavské hornatině od několika centimetrů až po 0,5 m. Prvotní předpoklad pro vznik skalních říms je přítomnost odolnějších vrstev pískovce, které vznikají srážením křemenného tmelu. Poté na takovýto tvar začne působit solné zvětrávání svrchních vrstevních ploch pískovce (Mikuláš in Härtel et al., 2007).



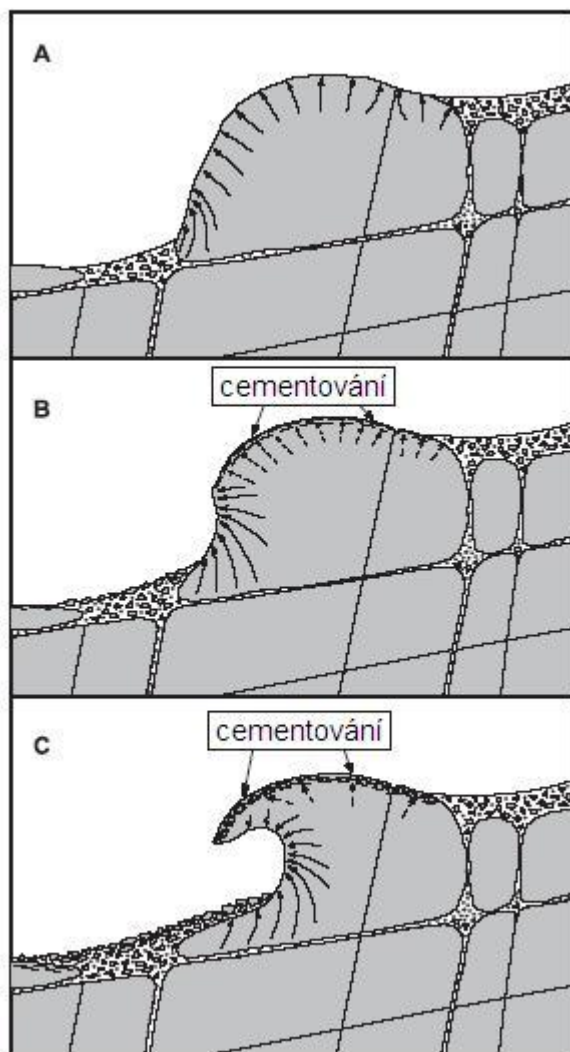
Obr. 18. Skalní lišty s výskytem voštin, rokle Apatyka.

V první fázi vývoje lze tedy pozorovat drobné zářezy, vzniklé selektivním zvětráváním. Méně odolné vrstvy zvětrávají rychleji, než ty s vyšší odolností (a tedy i s pevnějším tmelem). Postupně se tyto zářezy mění v římsy nebo lišty. Tento proces podle Rubína, Balatky et al. (1986) trvá tisíce až desetitisíce let, v závislosti na odolnosti pískovce. Většina skalních říms a lišt je dle těchto autorů čtvrtohorního stáří.

Skalní římsy a lišty se nacházejí ve všech klimatických oblastech (Rubín, Balatka et al., 1986). Podle Křížka (2001) vznikají skalní římsy v Rusavské hornatině v období Holocénu.

4. 4. 1. 5. Tafone

Tafoni jsou konkávní tvary na površích pískovcových skal, mající nepravidelný tvar (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Hlavním předpokladem vzniku tafonů je cementace svrchní vrstvy, což vzniká vyluhováním a následným vysrážením tmelu. V místech, kde nedojde k cementaci v důsledku orientovaného pohybu kapilární vody, začne působit solné zvětrávání (Obr. 19) (Mustoe in Schwarz, 2005). Svrchní část je nejčastěji cementována silikátovými inkrustacemi nebo kysličníky železa (Rubín, Balatka et al., 1986).



Obr. 19. Vznik a vývoj tafone dle Hejla (2005, upraveno). Pozn. A.) trasa migrace kapilární vody po dešti, B.) cementace povrchu a koncentrace toku kapilární vody směrem k místu s vyšší rychlostí zvětrávání, C.) vznik tafone díky působícím zvětrávacím procesům

Tafoni se vyvíjejí téměř ve všech klimatických oblastech. Mustoe (in Schwarz, 2005) dokládá přítomnost tafonů v arktickém klimatu, v aridním a semiaridním klimatu i v mírném klimatu. Cílek et al. (in Härtel et al., 2007) však uvádí, že výskyt tafonů v arktické zóně není příliš obvyklý, protože zde není optimální klima pro cementaci jejich povrchu díky nízkému vodnímu výparu. Jelikož vytvoření cementovaného povrchu je vázané na vlhkost, tafoni se také zřídka vyskytují v extrémně suchém prostředí (Mustoe in Schwarz, 2005).

4. 4. 1. 6. Trubice a trubičky tvořené laminami železivce (a tvary jim podobné)

Tyto tvary mají podobu trubiček, říms nebo desek, které jsou ohraničené laminami železivce (Obr. 20). Jejich vznik probíhá hluboko pod zemským povrchem (v řádu metrů až desítek metrů) a spouštěcím činitelem je pohyb spodní vody a vodních roztoků různého složení a teploty, který vede ke srážení nejčastěji železitého tmelu nebo křemene (Mikuláš in Jenč a Šoltysová, 2006).



Obr. 20. Trubicovité inkrustace u Borku v Jestřebské kotlině. Foto: Jiří Adamovič in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Vývojová stádia těchto tvarů lze jen těžko pozorovat, neboť k jejich vzniku dochází pod povrchem. Na skalním povrchu je lze pozorovat až po jejich zdvihu nebo obnažení v důsledku působících erozních procesů (Mikuláš in Jenč a Šoltysová, 2006).

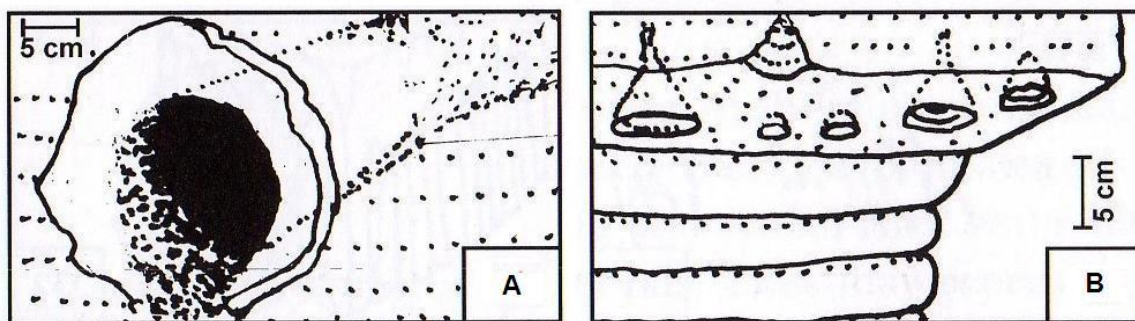
Trubice a trubičky tvořené laminami železivce (a další tvary se stejnou genezí) se nebudou nacházet v aridních a v chladných podmínkách, neboť vznik je podmíněn pohybem vody (ta v aridních oblastech není hojná), která má výrazné chemické účinky. V arktické zóně probíhají chemické procesy velice pomalu, protože voda je vázána v permafrostu a je tedy v pevném skupenství.

4. 4. 1. 7. Subhorizontální tunýlky, jeskyňky a horizontální trychtýře

Vnější parametry těchto tvarů zcela korespondují s jejich názvy. Na jejich vzniku se podílí chemické rozpouštění tmelu v důsledku fixace tras vody v pískovci. Ve spolupráci s erozními procesy se mohou objevit i na skalním povrchu (Mikuláš in Härtel et al., 2007).

I u těchto tvarů lze jen těžko pozorovat vývojová stádia, protože první fáze se děje uvnitř pískovce (Mikuláš in Härtel et al., 2007). Na skalních stěnách lze pozorovat již výsledek celého procesu rozpouštění. Viditelně lze pozorovat pouze erozní zvětšování vzniklého tvaru.

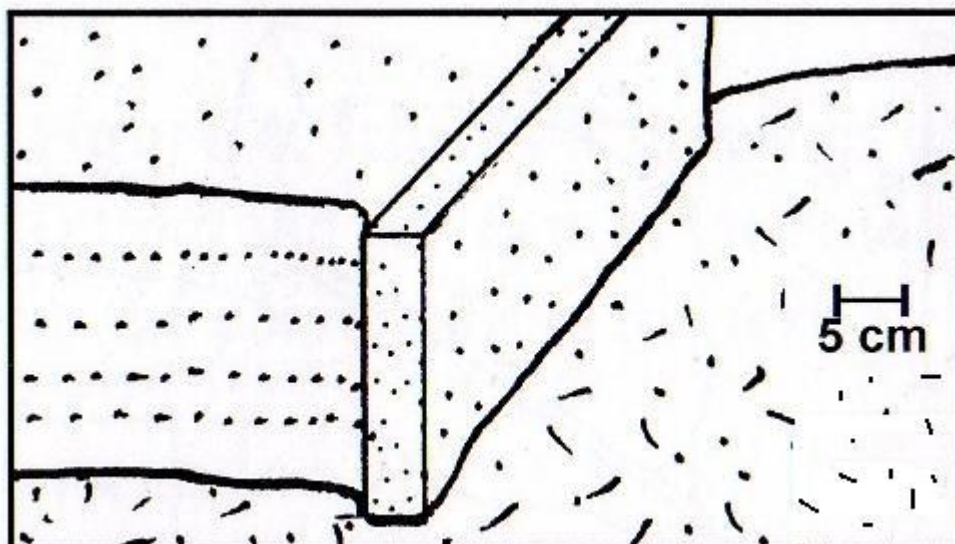
Subhorizontální tunýlky, jeskyňky a horizontální trychtýře (Obr. 21) mají zřejmě velice podobné podmínky vzniku jako trubice a trubičky tvořené laminami železivce, neboť i zde se na vzniku podílí chemické procesy a přítomnost vody.



Obr. 21. A - Subhorizontální tunýlky a B - horizontální trychtýře dle Mikuláš (in Härtel et al., 2007).

4. 4. 1. 8. Skalní přehrádky

Skalní přehrádky jsou rezidui nedestruovaných skalních kůr na pískovcích. Mají tvar svislých desek a jsou tvořené většinou v křemenných pískovcích (Mikuláš in Härtel et al., 2007) (Obr. 22). Skalní přehrádky vznikají chemickým zvětráváním a jsou tvořeny postupně zpevňovaným tmelem, který vzniká vypařováním vody z roztoků (Mikuláš in Jenč a Šoltysová, 2006).



Obr. 22. Skalní přehrádky dle Mikuláš (in Härtel et al., 2007).

Vývojová stádia skalních přehrádek lze rozlišit podle narůstající mocnosti svislých desek, která se pohybuje od 1 do 10 cm (Mikuláš in Härtel et al., 2007).

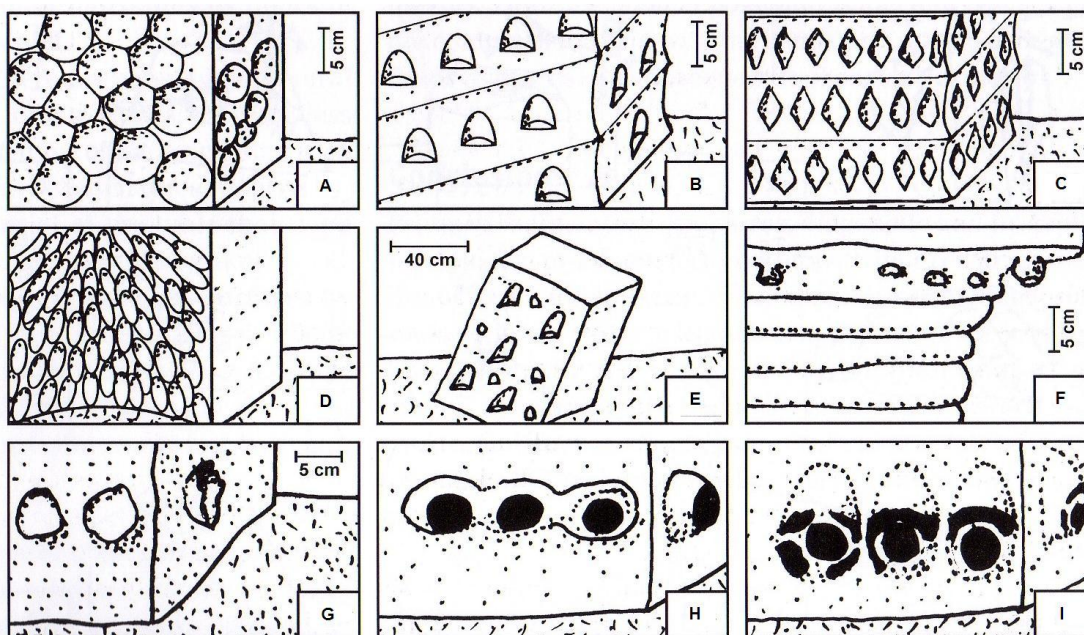
Vznik skalních přehrádek je podmíněn přítomností vody v chemických roztocích, proto bude jejich výskyt omezen převážně na humidní a mírné klimatické zóny, než na zóny arktické a aridní.

4. 4. 1. 9. Voštiny

Pod pojmem voštiny se rozumí dutiny malého měřítka, které jsou od sebe odděleny úzkými stěnami a vytvářejí povrch připomínající včelí plástve (Turkington in Goudie, 2004a). Voštiny vznikají zejména chemickým zvětráváním (Rubín, Balatka et al., 1986). Při jejich vzniku se uplatňují tyto procesy: srážení křemitého tmelu a krystalizace solí (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Díky srážení křemitého tmelu dochází ke zpevnování pískovce a působením solného zvětrávání nezpevněné partie pískovce zvětrávají. V důsledku různé intenzity výše uvedených procesů a působením i dalších vlivů vznikají na pískovcích různé typy voštin (Tab. 13), (Obr. 23).

Tab. 13. Typologie voštin podle tvaru a vzniku dle Adamoviče, Mikuláše, Cílka (2010).

Typ voštin	Charakteristika tvaru	Vznik
Kulovité	Dutá polokoule	Krystalizace soli v prohlubních a srážení křemitého tmelu v okolí
Kukaňovité	Tvar ptačí kukaně	Vliv gravitace prostřednictvím stékající vody nebo zadržené vody
Sklípkovité	Tvar gotické klenby	
Rombické	Kosočtverečný tvar	
Voštiny zpevněné skalní kůrou	Bubliny, ouška, vosí hnízda, kroužky, mřížky	Zpevňování povrchu srážením tmelu a solná eroze
Voštiny ovlivněné horninovým tlakem	Delší osa není rovnoběžná s vektorem gravitace	Vliv horninového tlaku
Stenomorfni	Nepravidelná tvar, rozmístění dáno systémem (např. pevnějších žilek)	Přejímají části tvarů druhotných struktur
Epigenetické	Nepravidelná síť důlků	Ovlivněné bioerozí, lidskou činností
Reorientované voštiny	Deformovaný tvar	Reorientace díky skalnímu řízení



Obr. 23. Tvar jednotlivých typů voštin dle Mikuláše (in Härtel, 2007). Pozn. A – kulové voštiny, B – kukaňové voštiny, C – rombické voštiny, D – voštiny ovlivněné horninovým tlakem, E – reorientované voštiny, F - voštiny zpevněné skalní kůrou (bubliny), G - voštiny zpevněné skalní kůrou (vosí hnízda), H - voštiny zpevněné skalní kůrou (ouška), I - voštiny zpevněné skalní kůrou (kroužky).

Ve vývoji voštin lze rozlišit 9 stádií (Mattershead 1994 in Huggett, 2007) (Tab.14).

Tab. 14. Stupně vývoje reliéfu voštin na mořské hrázi v Avonu, ve Velké Británii dle Mattersheada (1994, in Huggett, 2007).

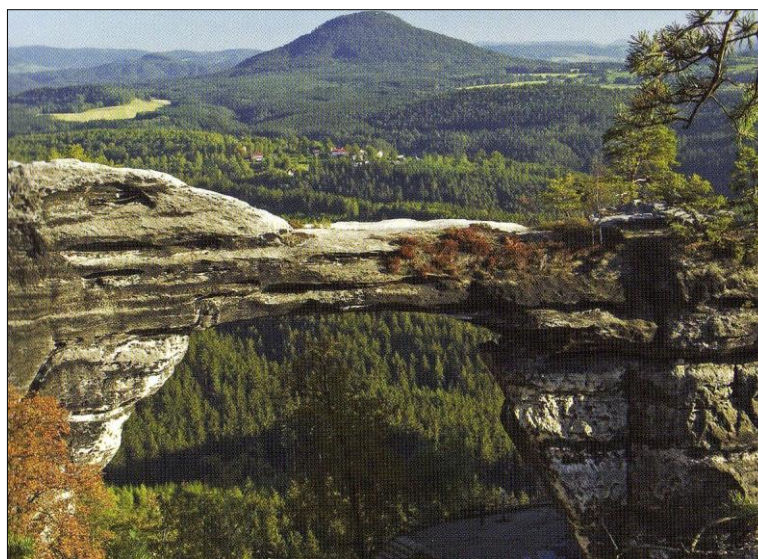
Stupeň vývoje	Charakteristika
1	Žádné viditelné formy zvětrávání
2	Izolované kruhové jamky
3	Jamky pokrývají víc jak 50 % plochy skalní stěny
4	Výskyt voštin
5	Voštiny pokrývají víc jak 50 % plochy skalní stěny
6	Voštiny v některých místech způsobují rozpad skalní stěny
7	Voštiny způsobují rozsáhlejší rozpad skalní stěny
8	Povrch skalní stěny je z 50 % pokryt rozrušeným povrchem
9	Povrch je zcela rozrušen

Voštiny jsou nejlépe vyvinuty v semiaridním a příbřežním prostředí, protože jsou zde hojné zásoby soli a dobře zde funguje cyklus zvlhčování a vysoušení (Huggett, 2007). V arktických oblastech není výskyt voštin obvyklý, a pokud se vyskytují, tak spíše nepravidelně (Cílek et al. in Härtel, 2007). Huggett (2007) též uvádí, že rychlost zvětrávání při tvorbě voštin je nejméně 1 mm /rok. Podle Adamoviče, Mikuláše a Cílka (2010) vznikají dobře vyvinuté voštiny staletí až tisíciletí.

4. 4. 2. Tvary vzniklé mechanickým zvětráváním

4. 4. 2. 1. Skalní brána

Skalní brána je mohutná skalní perforace, jejíž dno je zhruba v úrovni terénu (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010) (Obr. 24). Skalní brány jsou na pískovcích dobře vyvinuty, protože pískovec je v některých partiích dostatečně propustný a tím umožňuje selektivní (zejména mechanické) zvětrávání (Young in Goudie, 2004a). V aridních oblastech bývá vývoj podporován větrnou erozí.



Obr. 24. Pravčická brána u Hřenska. Foto: Oldřich Jenka in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Na skalních branách lze pozorovat různá vývojová stádia. V první fázi dojde k zúžení pískovcového masívu, např. propojením dvou protilehlých převisů (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010), čímž dojde k jeho zatížení. V druhé fázi dochází ke vzniku obloukovitých puklin. Ty vznikají jako výsledek napětí, které působí na spodní část zúženého masívu (Young in Goudie, 2004a). Napětí může být někdy tak vysoké, že dojde k odlomení celé obloukovité desky. Podél puklin poté působí různé typy

zvětrávání a mechanická eroze (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010) a tím se prostor skalní brány zvětšuje.

Skalní brány na pískovcích se vyvíjejí ve všech klimatických oblastech. Nejčastěji se však vyskytují v aridních a semiaridních oblastech, kde je jejich vývoj urychlen intenzivní větrnou erozí (Rubín, Balatka et al., 1986).

4. 4. 2. 2. Skalní okno

Skalní okno je skalní perforace, jejíž dno leží ve visuté poloze nad úpatím stěny (Rubín, Balatka et al., 1986) (Obr. 25). Skalní okno vzniká tehdy, pokud dojde ke spojení dutin, které leží naproti sobě, nebo na křížení svislé pukliny se snadněji zvětrávajícími vrstvami pískovce (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Vznik těchto dutin může být podmíněn zejména selektivním zvětráváním (častěji mechanickým) a významnou roli hraje i větrná eroze.



Obr. 25. Skalní okno v hraně věže Tuhon, Kokořínsko. Foto: Radek Mikuláš in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

V případě skalních oken lze pozorovat několik vývojových stádií. Nejprve se objeví protilehlé dutiny, které se procesem zvětrávání a eroze začnou prohlubovat, až dojde k jejich spojení.

Výskyt skalních oken není podmíněn klimatickými podmínkami, nacházejí se v humidních, aridních a semiaridních oblastech (Rubín, Balatka et al., 1986).

4. 4. 2. 3. Skalní věž

Skalní věže jsou masivní skály oddělené od okolního masívu, mající tvar podobný sloupu či věži (Obr. 26) (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Skalní věže vznikají podle Huggetta (2007) abrazí, solným zvětráváním a podpovrchovým zvětráváním. Jejich vznik je podmíněn přítomností měkkých a lehčích vrstev horniny. Migón (in Goudie, 2004) popisuje vznik skalních věží v důsledku erozního působení vody. Podle Twidalea (2002) vznikají mnohé skalní věže dvoufázovým vývojem, tzn. nejprve je tvar formován pod povrchem zejména mechanickým zvětráváním (solným, nebo mrazovým), které probíhá podél puklin, a poté je exhumován erozí.



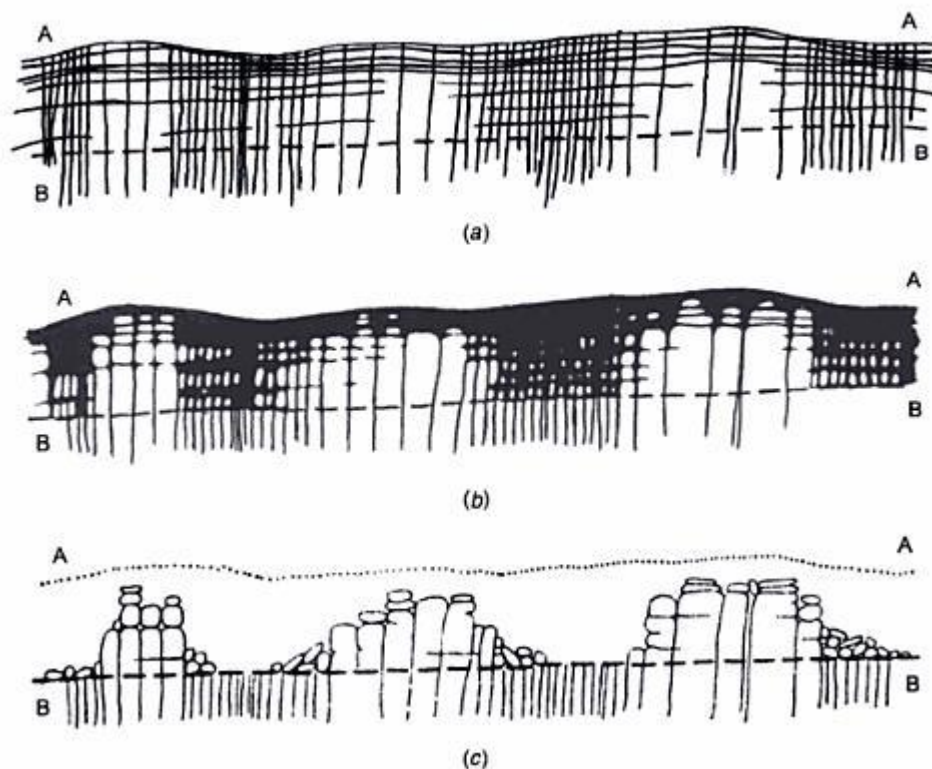
Obr. 26. Skalní věže v oblasti U Tří obrů, Adršpašské skalní město. Foto: Oldřich Jenka in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Skalní věže lze najít v různých typech klimatu a to jak v aridním, tak i v humidním (Huggett, 2007).

4. 4. 2. 4. Tor

Tory jsou podle Monkhouse (2007) izolované skály hradovitěho tvaru tyčící se nad okolní povrch. Adamovič, Mikuláš a Cílek (2010) popisují tory jako samostatně stojící věže na izometrickém, nebo mírně ukloněném půdorysu. Podle Křížka (2003) se pod pojmem tor nazývá izolovaná skála, popř. skalní hradba, která vznikla díky periglaciálním procesům stejně jako mrazový srub, ale oproti němu má zřetelně

vyvinutou plošinu kryoplanační terasy. Rubín, Balatka et al. (1986) popisuje dvě fáze vzniku torů (Obr. 27). V první fázi (v období neogénu) dochází k rozrušení povrchu horniny zejména chemickým zvětráváním, čímž vznikly zvětraliny pokrývající odolnější vrstvy hornin. V druhé fázi (konec třetihor a čtvrtohory) došlo k odnosu zvětralin a k odkrytí skalních výchozů, které byly následně přemodelovány mrazovým zvětráváním.



Obr. 27. Vznik toru podle Lintona (1955) in Migón (2006). Pozn. a.) odolnější jádra hornin nacházející se několik desítek metrů pod povrchem, b.) vznik zvětralinového pokryvu o proměnné mocnosti, c.) snížení erozní báze a odstranění zvětralin, linie A – zvětralinový plášť, linie B – bazální zvětrávací plocha.

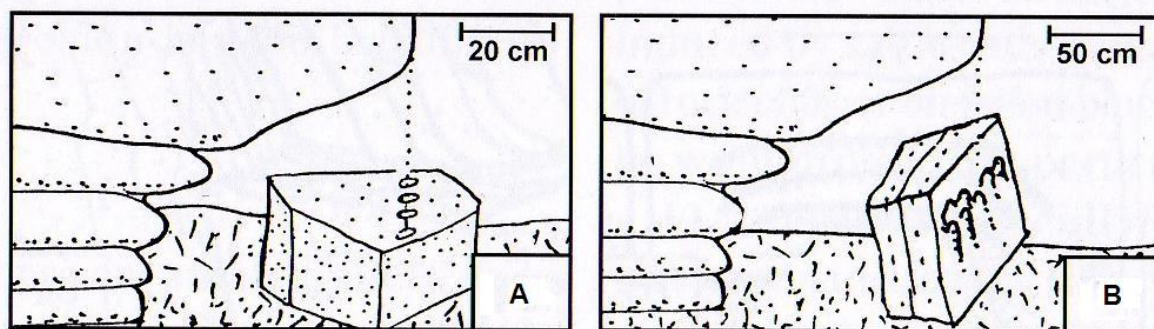
Dle Migóně (2006) se tory nacházejí ve všech klimatických pásech, lze je najít ve velmi chladném klimatickém pásu až po vlhký tropický pás a pouštní oblasti.

4. 4. 3. Tvary vzniklé erozí

4. 4. 3. 1. Egutační jamky a pyramidy

Egutační jamky a pyramidy jsou si velice podobné genezí, liší se pouze vzhledem. Egutační jamky jsou mělké, kráterovité jamky, kdežto egutační pyramidy mají tvar nepravidelného kužele nebo věže (Obr. 28) (Mikuláš in Härtel et al, 2007). Oba tvary

vznikají vodní erozí, nejčastěji vznikají působením vody, která stéká po skalních hranách a odkapech (Mikuláš in Jenč a Šoltysová, 2006). Liší se pouze tím, že povrch, na kterém vznikají jamky, je kolmý na proud stékající vody, kdežto povrch, na kterém vznikají skalní pyramidy, je ukloněn šikmo.

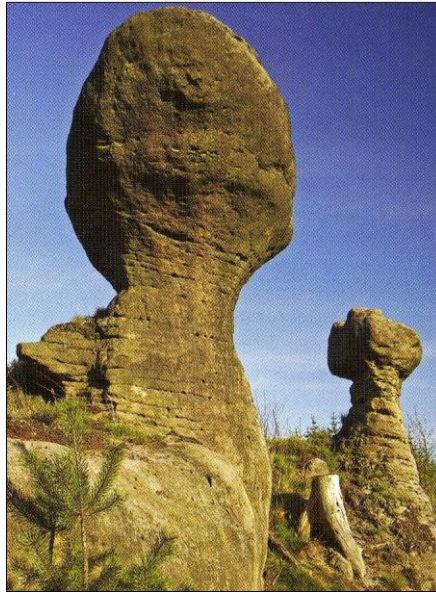


Obr. 28. A – egutační jamky a B – egutační pyramidy dle Mikuláše (in Härtel et al., 2007).

Vývojové fáze těchto tvarů lze pozorovat velmi dobře, nejprve se začnou tvořit jen nepatrné důlky, které se postupně prohlubují, až dojde k vytvoření egutačních jamek nebo pyramid. Důležité je, aby voda stékala na stejná místa, což může být zapříčiněno např. vznikem odtokových žlábků.

4. 4. 3. 2. Skalní hřib

Skalní hřib je mezofорма hřibovitého tvaru, horní část (hlava) přečnává spodní část (nohu) (Obr. 29) (Rubín, Balatka et al., 1986). Pokud mají skalní hřiby deskovitý tvar „hlavy“, nazývají se pokličky (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Vznik skalních hřibů je podmíněn klimatem, ve kterých se původní hornina nachází. V teplých a vlhkých oblastech vznikají skalní hřiby na pískovcích zejména destruktivní činnosti vlhkosti vzlínající z půdního krytu, tedy erozí (Cílek in Cílek a Kopecký, 1998). Skalní hřiby mohou vznikat i selektivním zvětráváním (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). V aridních oblastech vznikají skalní hřiby větrnou erozí (abrazí) (Rubín, Balatka et al., 1986).



Obr. 29. Skalní hřiby nad Slavným v Broumovských stěnách. Foto: Oldřich Jenka in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

V podmínkách mírného klimatu tedy nejprve dojde k rozčlenění pískovce na horizontální bloky, které vykazují odlišnou odolnost vůči zvětrávání. V horních partiích je přítomen odolnější tmel, nejčastěji železitý, nebo křemenný (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010), který je odolnější vůči zvětrávání a erozi. Při procesu zvětrávání dochází k odnosu méně odolných partií, které se nacházejí spíše ve spodních partiích.

Skalní hřiby se vyskytují v humidní, aridní i mírné zóně.

4. 4. 3. 3. Skalní mísa

Skalní mísy jsou definovány jako oválné či kruhové prohlubně vodorovných nebo téměř vodorovných skalních ploch, které jsou přístupny atmosférickým srážkám (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Vitek (1982) označuje jako skalní mísy mísovité prohlubně ve vodorovných nebo mírně skloněných svazích. Hugget (2007) definuje skalní mísy jako uzavřené kruhové, nebo oválné prohlubně (o šířce několika centimetrů až metrů), které se tvoří na plochých nebo mírně ukloněných površích (Obr. 30). Křížek (2001) uvádí šířku skalních mís v Rusavské hornatině řádově od 20 cm do 60 cm, jejich hloubka se pohybuje od 15 do 70 cm.



Obr. 30. Skalní mísy na pískovcovém bloku mezi věží Kozel a Kazatelnou, Chříby. Foto: Radek Mikuláš in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Podle Mikuláše (in Härtel et al., 2007) vznikají skalní mísy zejména působením vody, konkrétně působením kapek deště a krup, které mají dostatečnou mechanickou energii pro odstranění uvolněných pískovcových zrn. Voda nahromaděná v depresích má korozivní účinky a působí také díky procesu zamrznání v chladných měsících. Ideálním prostředím pro vznik je v mírně nebo silně stmelených pískovcích (Mikuláš in Härtel et al., 2007), které jsou dobře rozpustné, ale méně propustné pro vodu.

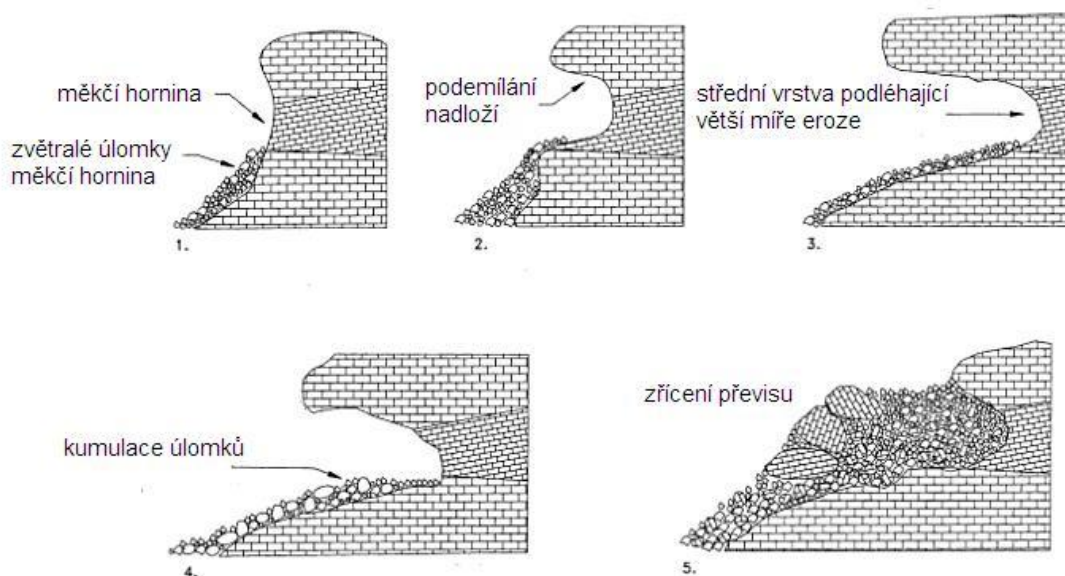
Počáteční vývojová fáze má podobu malé deprese, ve které se začne hromadit voda. V depresi je voda zadržována a vytváří dobré podmínky pro zvětrávání (Huggett, 2007). Díky zvětrávání a mechanickému působení zamrzlé vody přeměněné v led se skalní mísa prohlubuje.

Skalní mísy se nejčastěji vyskytují v humidním a tropickém pískovcovém reliéfu (Mikuláš in Härtel et al., 2007), protože jejich výskyt je podmíněn mechanickou silou atmosférických srážek. Lze je však zcela běžně najít i v mírné klimatické zóně. Křížek (2001) datuje vznik skalních mís v Rusavské hornatině do období Holocénu.

4. 4. 3. 4. Skalní převis

Skalní převis je skalní výběžek tvořící přirozené přístřeší (Rubín, Balatka et al., 1986). Skalní převisy mohou vznikat několika způsoby: exfoliací a mechanickým působením mořských vln při pobřeží (Kusimba a Kusimba, 2003), solným zvětráváním

(Adamovič, Mikuláš a Cílek, 2010), v oblastech středně vlhké temporální zóny (např. ČR) je nejčastějším důvodem vzniku skalních převisů destruktivní činnost vlhkosti vztlínající z půdního krytu, tedy eroze (Cílek in Cílek a Kopecký, 1998). Rapp a Hill (2006) popisují vznik převisu v pěti stadiích (Obr. 31).



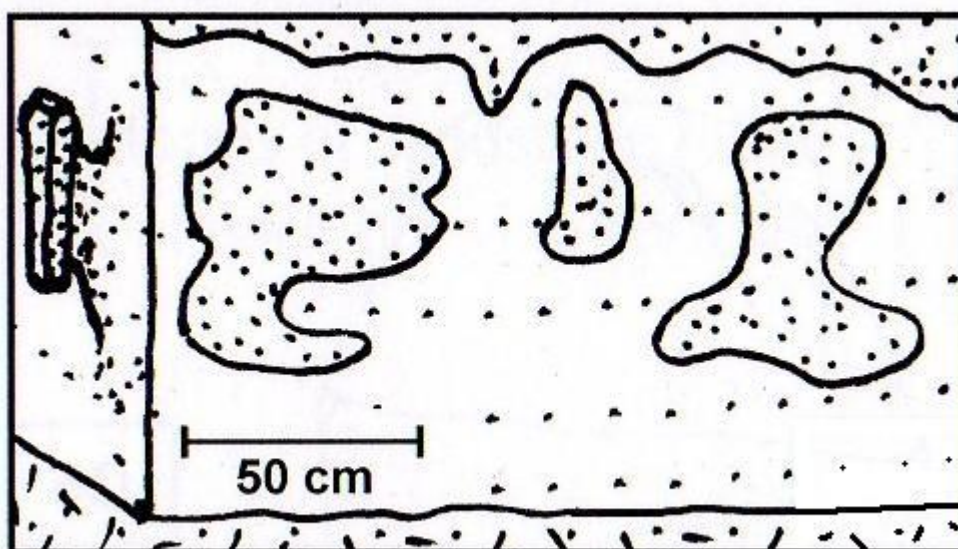
Obr. 31. Vývojové fáze skalního převisu dle Rappa a Hilla (2006, upraveno). Pozn. 1) zvětvávání skalního výchozu, měkčí hornina střední vrstvy zvětvává rychleji. 2) dochází k podemílání nadloží horniny, 3) díky rychlejšímu procesu eroze na středních měkčích partiích a hromadění úlomků se začíná tvořit dno skalního převisu, 4) fáze usazování úlomků, 5) vlivem pokračujícího podemílání stropu převisu dojde k jeho zhroucení.

Vlivem odlehčení mohou vznikat na povrchu skalního výchozu exfoliační šupiny, které se postupně vlivem gravitace odlupují a utváří tak skalní převis. Dalším způsobem vzniku je díky působení vody, v tomto případě zejména boční erozí vodního toku. Vlivem působení kapilární vody a solného zvětvávání vznikají spíše menší a střední převisy (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Kapilární voda dostávající se do pórů je slaná a při jejím odpaření dochází k růstu krystalů soli. Tento proces vytváří v hornině napětí a dochází k jejímu rozrušení. Převisy také vznikají v horninově kontrastních partiích, zejména na lépe propustných hrubozrnných pískovcích (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010).

Podle Cílka et al. (in Härtel et al., 2007) je vznik většiny evropských skalních převisů datován do pleistocénu. Podle dostupných zdrojů nejsou skalní převisy na pískovcích klimaticky omezené.

4. 4. 3. 5. Skalní talíře a hroty

Skalní talíře a hroty jsou izolované povrchy na skalních stěnách, mající tvar právě talířů či hrotů (Obr. 32) (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Vznikají ze skalních přehrádek zejména solnou erozí, která je doprovázena i jinými mechanickými procesy (Mikuláš in Härtel et al., 2007).



Obr. 32. Skalní talíře a hroty dle Mikuláše (in Härtel et al., 2007).

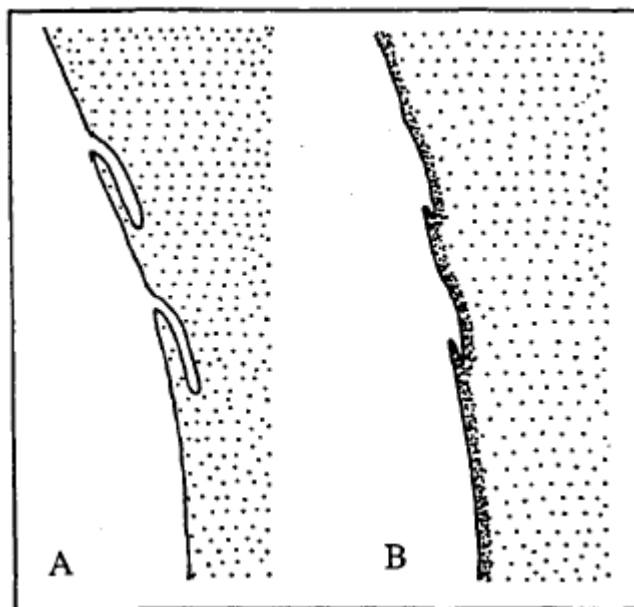
Na povrchu skalních přehrádek dochází k rozrušení solnou erozí a výsledkem je vznik skalních talířů a hrotů. Přítomnost skalních talířů a hrotů vede následně k selektivní destrukci skalního masívu (Cílek, Baroň, Langrová, 2003).

4. 4. 2. 6. Tvary vzniklé bioerozí

Bioeroze zahrnuje procesy rozrušování horniny činností živočichů a rostlin. Výsledky bioeroze mohou být doupata blanokřídlých, stromové žlábký, stromové vějíře a stromové kotle (Mikuláš in Jenč a Šoltysová, 2006).

Doupata blanokřídlých vznikají vykousáváním pískovce pomocí hmyzích kusadel. Nejčastějším původcem je včela rodu hedvábnic (*Colletes*) (Adamovič, Mikuláš, Cílek,

2010). Nejčastěji tato doupata směřují kolmo do skály, nebo, pokud je pískovec zpevněn skalní kůrou, kopírují její průběh paralelně s povrchem skály (Mikuláš a Cílek, 1998). V průběhu času dojde k obnažení a k destrukci těchto tunýlků (Obr. 33).



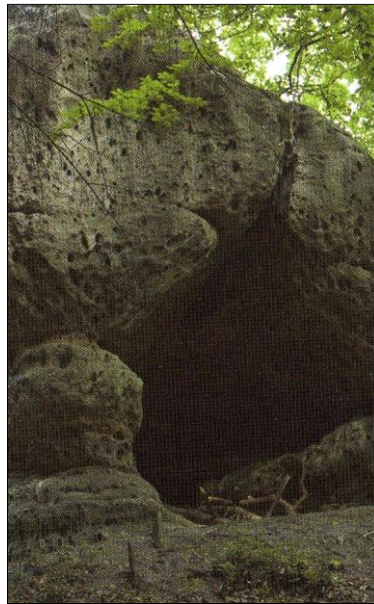
Obr. 33. Postupná destrukce doupat blanokřídých dle Mikuláše a Cílka (1998). Pozn. A – doupě na převislé části skalní stěny bez výskytu skalních kůr, B – částečná degradace struktury vlivem zvětrávání, dochází k cementování zbývajících částí doupat.

Stromové žlábký a vějíře vznikají třením kmene stromu o skalní stěnu (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Jejich vzhled je totožný jejich názvu. V těchto tvarech mohou dále vznikat jiné mikroformy reliéfu, jako jsou např. voštiny.

4. 4. 4. Tvary vázané na jiný vúdčí proces

4. 4. 4. 1. Tvary vázané na výskyt vrstevních ploch a puklin (jeskyně)

Podle Adamoviče, Mikuláše a Cílka (2010) jsou jeskyně přirozené lineární dutiny s tmavými partiemi a po celé délce je umožněn lidský vstup (Obr. 34).



Obr. 34. Jeskyně v Kravích dolech, Kostelec v Labských pískovcích. Foto: Jiří Adamovič in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Vznik jeskyní je vázán na pukliny, které vykazují menší geomorfologickou odolnost a jsou postupně rozvolňovány (Křížek, 1999). Podél puklin dochází k odnosu zvětralého materiálu. Při vývoji jeskyní se často uplatňují ještě další procesy, jako jsou např. sufóze či svahové pohyby (Stejskal, 2005). Ford in Goudie (2004) popisuje vznik pseudokrasových jeskyní v důsledku sufóze, mrazového zvětrávání, nebo vodní eroze. Ford, Williams (2007) a Cílek et al. (in Härtel et al., 2007) popisují vznik jeskyní v křemenných pískovcích díky chemickému rozpouštění křemenného tmelu, méně rozpustná zrna bývají odnášena nejčastěji vodní erozí. Dle těchto autorů jsou zrna o velikosti pískových zrn odnášena mechanickou korazí a tím přispívají k prohlubování jeskyně. Vitek (1983) klasifikoval šest druhů pseudokrasových jeskyní podle jejich geneze (Tab. 15).

Tab. 15. Typologie pseudokrasových jeskyní dle Vítka (1983).

Typ jeskyně	Způsob vzniku
Puklinová	Vázán na existenci svislých a šikmých puklin
Vrstevní	Rozklad a odnos méně odolných vrstevních ploch
Rozsedlinová	Pohyb skalních bloků v důsledku gravitačního odsedání
Talusové	Kryogenní rozpad
Jeskynní výklenky	Mechanické zvětrávání v méně odolných vrstvách
Kombinované	Kombinace výše uvedených procesů

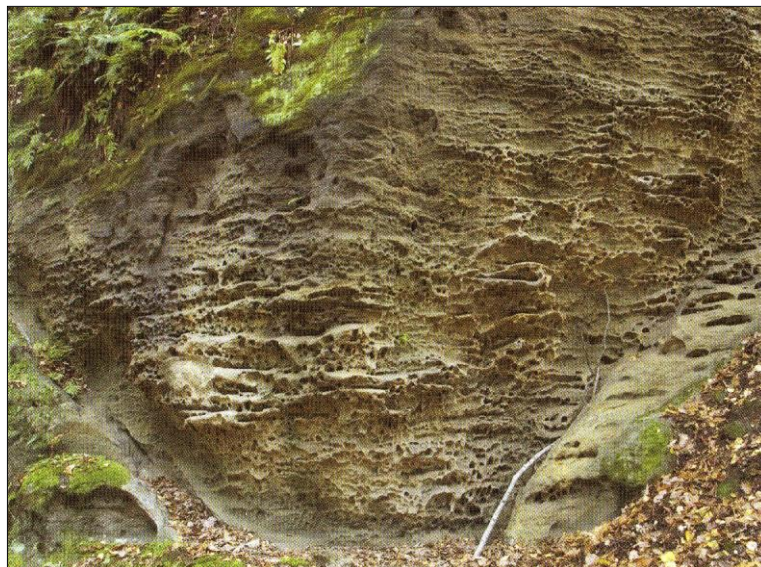
Vývojová stádia jeskyní jsou jen těžko odhadnutelná. V rané formě vývoje se vyskytovaly pouze jamky a kanálky, které se díky chemickému rozpouštění a působením vodní eroze zvětšovaly, až začaly formovat samotnou jeskyni.

Pískovcové jeskyně se hojně vyskytují v humidním tropickém klimatu, kde díky vyšší teplotě dochází k rychlejšímu rozpouštění tmelu, čemuž napomáhá i proudící drenážní voda (Gillieson, 1996). Pískovcové jeskyně se podle Cílka et al. (in Härtel et al., 2007) vyskytují dále v aridním a mírném klimatu, v arktické zóně výskyt nezmiňují. Podle typu pískovce se nejlépe vyvinuté formy jeskyní nacházejí v křemenných pískovcích a v arkózách, nejméně v drobách (Gillieson, 1996).

4. 4. 4. 2. Tvary vázané na změnu půdního pokryvu (šikmé římsy a zářezy)

Šikmé římsy a zářezy jsou šikmé, zaoblené římsy (nebo zářezy) ve výšce několika decimetrů až několika metrů nad půdním pokryvem ve svislých nebo mírně ustupujících pískovcových stěnách (Obr. 35) (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Jiná definice dle dostupných zdrojů není, protože tyto tvary nebyly kromě Mikuláše (2001) dosud publikovány. Na skalní výchoz působí různé erozní a zvětrávací procesy, díky nimž dochází k ústupu skalní stěny. Určitá část skalního výchozu se však nachází pod půdním pokryvem a tudíž je proti těmto vlivům chráněna. Po odkrytí určité části skalního výchozu lze pozorovat konvexní tvary, jako jsou právě šikmé římsy a zářezy.

Šikmé římsy a zářezy umožňují pozorovat vývoj jednotlivých etap změny půdního pokryvu (Mikuláš, 2001). Dle tohoto tvrzení by mohly být šikmé římsy porovnávány jako letorosty a tím by bylo umožněno i jejich relativní datování.



Obr. 35. Šikmé římsy a zářezy v rokli pod Nedvězím, CHKO Kokořínsko. Foto: Jiří Adamovič in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

4. 4. 4. 3. Tvary vzniklé v důsledku pronikání magmatu do horniny a ohřátí vody v puklinách a pórech

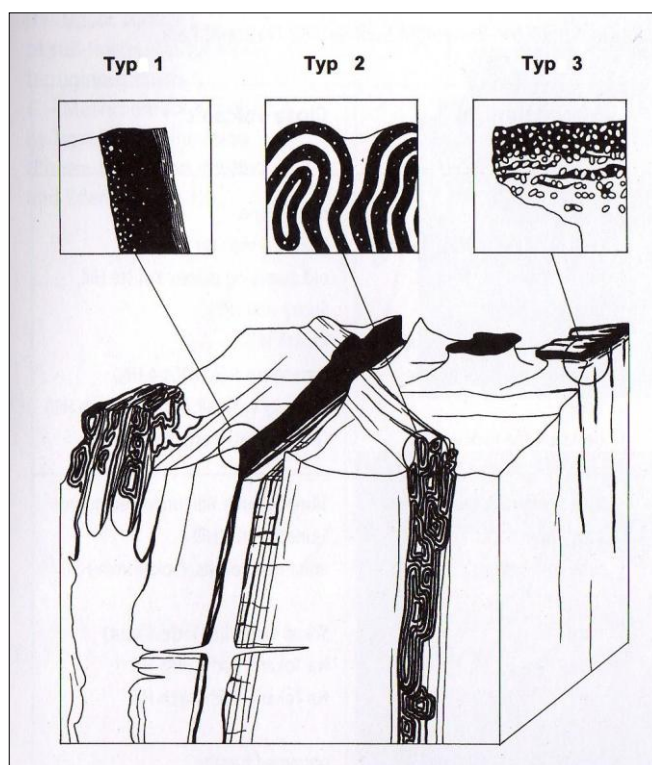
4. 4. 4. 3. 1. Proželezněné desky

Proželezněné desky mají podobu deskovitých těles železitého pískovce nebo železivce (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2007). Tato tělesa jsou odolnější vůči zvětrávacím a erozním procesům. Vznikají v důsledku pronikání magmatu do sedimentárních pánví. Díky vysoké teplotě magmatu (běžně o několika stovkách °C) dojde k ohřátí vody v pórech a puklinách, která poté začne stoupat a umožňuje srážení různých chemických prvků (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2007). Následně dochází k oxidaci a vysrážení železa a ke vzniku železitých inkrustací.

Proželezněné desky lze podle Vařilové (in Härtel et al., 2007) dělit na tři typy podle morfologie (Tab. 16), (Obr. 36). Ta závisí na orientaci a stupni lomu, na velikosti pískovcových zrn, propustnosti horniny a také na charakteru a vzdálenosti zdroje magmatu.

Tab. 16. Tři typy proželezněných desek podle Vařilové (in Härtel, 2007).

Typ proželezněné desky	Charakteristika
Typ 1	Subvertikální rovinná tělesa o šířce několika centimetrů, vázané na kontakt čedičové žíly s pískovcem, často vyplňují prostory pukliny.
Typ 2	Nepravidelné, tenké, paralelní krusty, kruhy a trubice, subvertikálně uložené o šířce několika metrů.
Typ 3	Subhorizontálně uložené vrstvy vázané na paralelní souvrství s poruchovými zónami.



Obr. 36. Tři typy proželezněných desek ve vztahu k žílám vulkanitu a v závislosti na štěpení pískovcové horniny dle Adamoviče, Ulricha a Peroutky (2001) in Vařilová in Härtel et al. (2007).

Podle Rubína, Balatky et al. (1986) se proželezněné desky vyskytují nejčastěji v savanovém tropickém pásu, v subtropích a v humidní zóně mírných šířek.

4. 4. 4. 3. 2. Přikontaktní sloupky

Přikontaktní sloupky jsou čtyřboké až šestiboké sloupky drobných rozměrů o délce do několika metrů a šířce několika decimetrů (Obr. 37) (Rubín, Balatka et al., 1986).



Obr. 37. Přikontaktní sloupky na Dutém kameni u Cvikova. Foto: Jiří Adamovič in Adamovič, Mikuláš, Cílek (2010).

Přikontaktní sloupky vznikají kontaktní přeměnou, kdy nejprve docházelo k přetavení pískovce v důsledku styku s neovulkanickou lávou a poté došlo k jeho chladnutí a tuhnutí (Rubín, Balatka et al., 1986). Novější názory na vznik tohoto tvaru toto tvrzení zpochybňují. Adamovič, Mikuláš a Cílek (2010) popisují vznik přikontaktních sloupků díky tepelným projevům při vstupu magmatu do zvodnělého pískovce, což je spojeno se zvětšením objemu přehřáté vody a vodní páry. Toto tvrzení dokládá přítomnost vody v pórech pískovce v době magmatické intruze. Young (2008) dokazuje chemické změny horniny při vzniku přikontaktních sloupků, které jsou však patrné pouze do vzdálenosti 1 m od styku s magmatickou horninou.

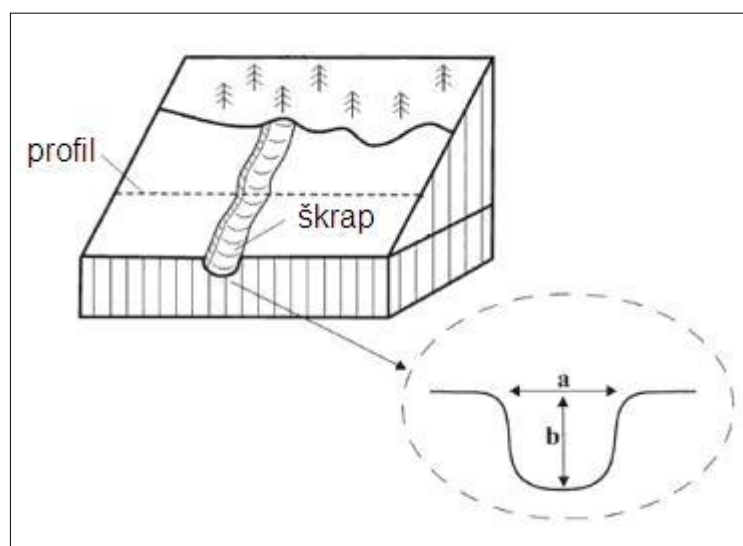
Přikontaktní sloupky se nacházejí nejčastěji v oblastech kontinentálních riftů, které umožňují průnik magmatu a ohřátí porézní vody v pískovcích. V České republice je jejich vznik vázán na období hlavní vulkanické fáze Českého masívu, tedy na období oligocénu až spodního miocénu, místy ještě na období svrchního miocénu (Rubín, Balatka et al., 1986).

5. Metody hodnocení mikrotvarů na pískvcích

Celkové hodnocení mikrotvarů v daném území slouží k porovnání stupně jejich vývoje. Dále slouží ke zhodnocení klimatických a dalších vlivů, které působí na vývoj tvarů.

Hodnocení pískvcových mikrotvarů je postaveno na podobných principech, jako hodnocení mikrotvarů v krasových horninách. Veress (2010) uvádí metodiku hodnocení vápencových škrapů, která se dá použít i pro hodnocení mikrotvarů na pískvcích. Měřené charakteristiky je však nutné upravit cíli měření.

Při využití metodiky měření podle Veresse (2010) je nejprve nutné stanovit tzv. profil, což je linie kolmá na rovinu tvořenou vápencovými škrapy (Obr. 38). Parametry měření vápencových škrapů jsou uvedeny v Tab. 17.



Obr. 38. Některé potřebné parametry pro charakteristiku vápencových škrapů podle Veresse et al. (2008) in Veress (2010, upraveno). Pozn. a – šířka škrapů, b – hloubka škrapů.

Tab. 17. Metoda hodnocení vápencových škrapů dle Veresse (2010, upraveno).

	Parametry měření	Charakteristika
1	Šířka škrapů	Vzdálenost mezi jednotlivými hřebítky škrapu
2	Hloubka škrapů	Vzdálenost od nejhlubšího místa škrapu po pomyslnou rovinu tvořenou jeho hřebítky
3	Počet škrapů	Počet škrapů v profilu na vzdálenost 50 cm
4	Index tvaru	Poměr mezi šířkou a hloubkou jednotlivých škrapů v profilu
5	Specifická šířka škrapů	Poměr mezi celkovou šířkou všech škrapů v profilu a délkou profilu
6	Specifická hloubka škrapů	Poměr mezi indexem tvaru a délkou profilu
7	Hustota škrapů	Poměr mezi celkovým počtem škrapů v profilu a délkou profilu

V této práci je cílem určení relativního stáří vybraných mikroforem (voštin) a stanovení jejich obecného výskytu jak v rámci skalních výchozů, tak v rámci rokle. Na vybraných mikroformách (voštinách) byly určovány následující charakteristiky (Příloha 1):

1) Šířka voštin [cm] - maximální vzdálenost mezi okraji voštiny. Měření bylo provedeno přiložením milimetrového měřidla k okrajům voštiny a následně byla odečtena délka.

2) Hloubka voštin [cm] - vzdálenost od nejhlubšího místa voštiny k pomyslnému středu na spojnici jejích okrajů. Měření bylo prováděno pomocí milimetrového měřidla, které bylo přiloženo kolmo na rovinu povrchu skalního výchozu směrem do nejhlubšího místa voštiny.

3) Stupeň vývoje voštin - lze použít jednotlivé stupně vývoje dle Mattersheada (1994, in Huggett, 2007) (Tab. 13, kapitola 4. 4. 1. 9. Voštiny), který určuje stupeň vývoje dle pokryvnosti voštin na skalní stěně. V případě rokle Apatyky byla vývojová

stádia určována podle šířky a hloubky voštin, neboť se zde vyskytují dobře vyvinuté voštiny, které ale pokrývají menší část skalní stěny, tudíž by se podle Mattersheada (1994, in Huggett, 2007) řadily k méně vyvinutým. S hloubkou a šířkou voštin roste jejich stáří. V případě rokle Apatyky byly stanoveny tři stupně vývoje (Obr. 39, 40, 41).



Obr. 39. První stádium vývoje areálu voštin s detailním výřezem snímku. Na skalní stěně se objevují chaoticky uspořádané důlky o malé hloubce (několik milimetrů až centimetr), areál s voštinami prvního stádia vývoje je vyznačen červeným kruhem.



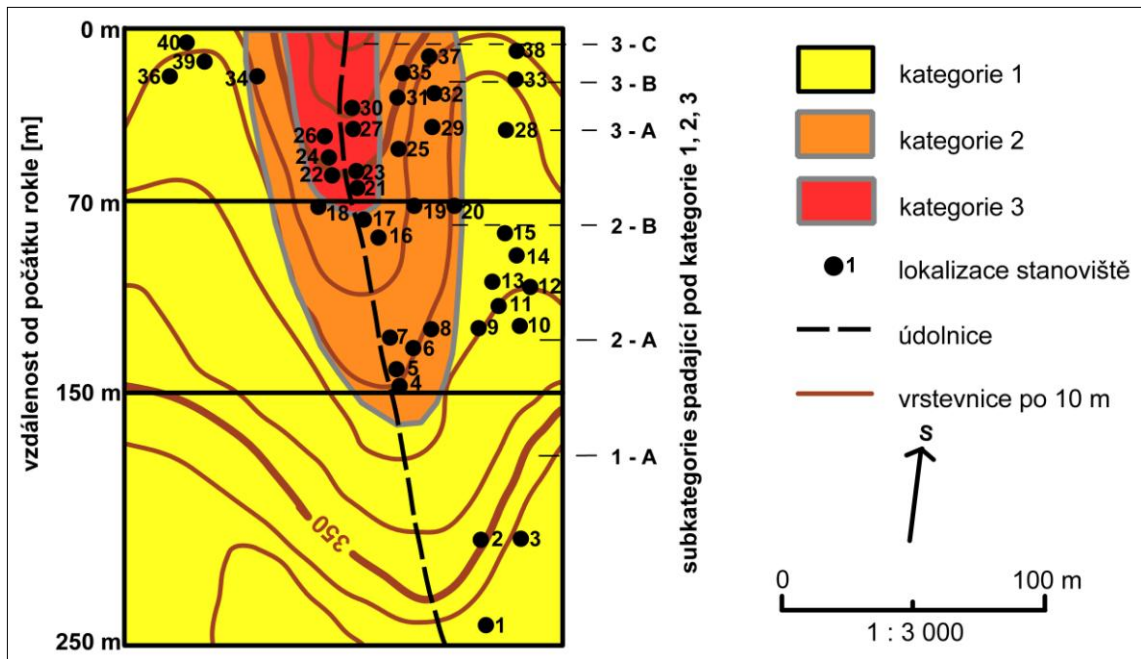
Obr. 40. Druhé stádium vývoje areálu voštiny. Na skalní stěně lze pozorovat dobře vyvinuté voštiny, areál s voštinami druhého stádia vývoje je vyznačen červeným oválem.



Obr. 41. Třetí stádium vývoje areálu voštiny. Dochází k intenzivnímu propojování a ke vzniku skalních hodin a mříží, areál s voštinami třetího stádia vývoje je vyznačen červeným oválem.

- 4) Pokryvnost skalního výchozu voštinami [%] – procentuální obsah plochy skalního výchozu pokrytého voštinami. Nejprve byla odhadnuta plocha skalního výchozu a následně plocha areálu voštin, které skalní výchoz pokrývají.
- 5) Hustota areálu voštin na jednotku plochy [m^2] - počet voštin na 1 metr dlouhé vodorovné a 1 metr dlouhé svislé úsečce. Poté byly tyto hodnoty vynásobeny a převedeny na plošnou míru.
- 6) Poloha v rámci jednotlivých horizontálních a vertikálních částí rokle - horizontální části rokle byly určeny z mapového podkladu DMÚ 1 : 25 000, každá horizontální část rokle byla charakteristická určitými vertikálními stupni rokle, které byly určeny na základě reálného výskytu úrovní jednotlivých pískovcových pater, což se projevuje i výraznou změnou průběhu příčného profilu.
- 7) Vzdálenost areálu voštin od hrany skalního výchozu [m] – jedná se o vzdálenost mezi nejvyšším bodem skalní stěny a horní hranicí areálu voštin. Měření bylo provedeno pásmovým měřidlem. Pokud byl skalní výchoz pro toto měření nepřístupný, byla výška odhadnuta.
- 8) Azimut skalního výchozu [$^{\circ}$] – jedná se o azimut skalního výchozu, na kterém se areály voštin nacházely. Měření azimutu skalních výchozů bylo prováděno buzolou.
- 9) Výška skalního výchozu [m] – jedná se o celkovou výšku skalního výchozu od hrany skalního výchozu k jeho úpatí.

Pro přehlednost byla rokle Apatyka rozdělena do tří horizontálních částí podle vzdálenosti od počátku rokle. V těchto částech byly odlišeny úrovně podle vertikální členitosti rokle (Obr. 42). Tato kategorizace byla využita při určení relativního stáří jednotlivých částí rokle. V rokli Apatyka bylo provedeno celkem 400 měření na 40 stanovištích (Tab. 18). Jednotlivá stanoviště byla definována jako samostatně stojící izolované skalní výchozy, tzn. nebyly s jinými skalními výchozy nad zemským povrchem jakkoli propojeny. Na každém ze 40 skalních výchozů bylo provedeno 10 měření a následně byl vypočten průměr z každé metriky (popř. charakteristiky), který charakterizoval skalní výchoz jako celek.



Obr. 42. Rokle Apatyka rozdělená na části podle horizontálního a vertikálního členění se stanovišti, na nichž probíhala měření. Pozn. Horizontální části rokly jsou značeny čísly (1, 2, 3), vertikální úrovně jsou značeny písmeny (A, B, C).

Tab. 18. Lokalizace stanovišť v jednotlivých stupních rokly.

Stupeň rokly	Počet stanovišť
1A	3
2A	7
2B	10
3A	6
3B	7
3C	7

Pro zhodnocení pozice areálu voštin v rámci jednotlivých skalních výchozů byly naměřené metriky zpracovány následovně:

1) Z hodnot azimutu jednotlivých skalních výchozů byla vytvořena četnostní růžice.

2) Pro určení relativní polohy voštin v rámci jednotlivých skalních výchozů byly spočítány kumulativní četnosti výskytu areálů voštin v jednotlivých kategoriích relativní vzdálenosti od hrany skalního výchozu. Hodnoty relativní vzdálenosti od hrany skalního výchozu [%] byly rozděleny do kategorií po deseti procentech.

3) Závislost mezi absolutními vzdálenostmi areálů voštin od hran skalních výchozů a pokryvností byla určena Pearsonovým korelačním koeficientem. Stejným způsobem byla zhodnocena závislost mezi výškou skalních výchozů a pokryvností skalního výchozu voštinami.

4) Pro zhodnocení pokryvnosti skalního výchozu voštinami je třeba dát tuto veličinu do vztahu k relativní vzdálenosti od hrany skalního výchozu.

Při určení relativního stáří jednotlivých částí rokle se vycházelo z předpokladu: čím je stupeň rokle starší, tím by měly být jeho mikroformy lépe vyvinuté, protože k jejich dokonalejšímu vývoji bylo zapotřebí více času. Objem (kubatura) voštiny byl aproximován součinem její šířky a hloubky. Dále je třeba prokázat závislost mezi stádiem vývoje voštin a kubaturou voštin. Tato závislost byla zjišťována jednocestnou ANOVou s Post-hoc Fisher testem (LSD), protože stádium vývoje je kategoriální veličina a kubatura voštin je spojitá veličina. Kritický obor Fisherova testu je založen na porovnání maximálního a minimálního odhadu rozptylu (Zvára, 2008). Fisherův test tedy ověřuje, zda jsou závislosti mezi veličinami signifikantní na hladině významnosti $p = 0,05$. Stejným způsobem byly stanoveny závislosti mezi kubaturou voštin a jednotlivými (vertikálními i horizontálními) částmi rokle. Signifikace analýza rozptylu byla testována F-testem a signifikace mezi jednotlivými částmi rokle byla testována t-testem. Jednocestná ANOVA a korelační matice byly sestaveny M. Křížkem v programu STATISTICA 6.

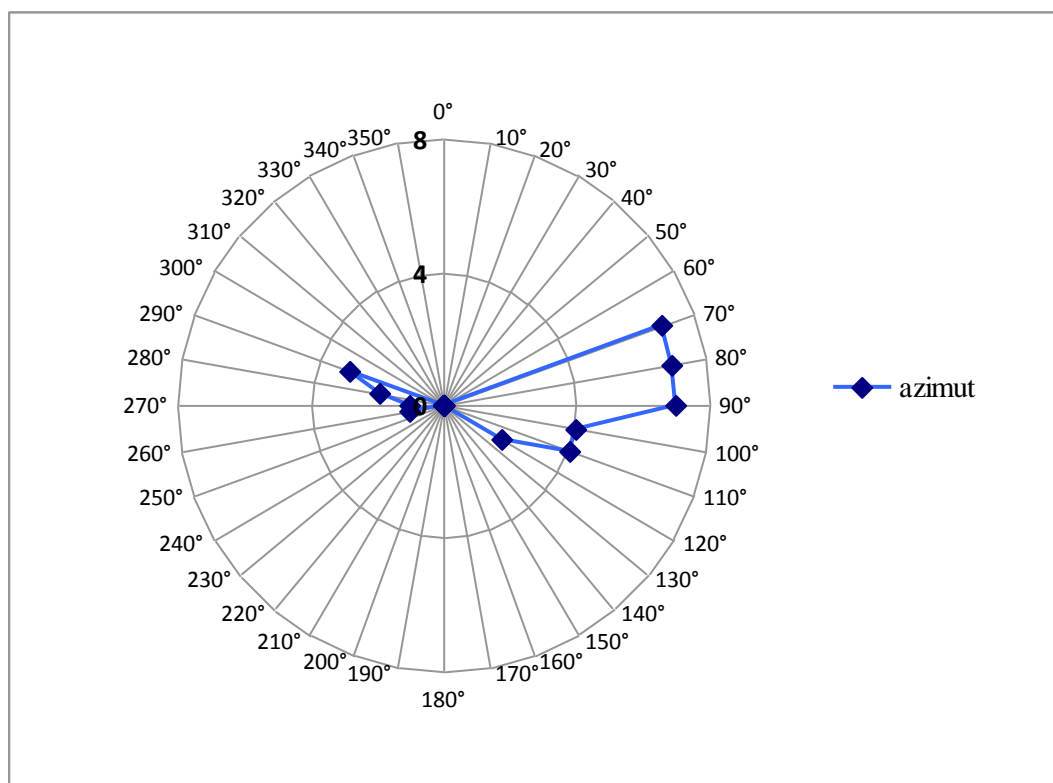
6. Terénní výzkum

6. 1. Voštiny

Terénní výzkum byl proveden dne 24. dubna 2011. Cílem tohoto výzkumu bylo stanovení obecného výskytu vybraných mikroforem - voštin a odhadnutí relativního stáří jednotlivých částí rokle.

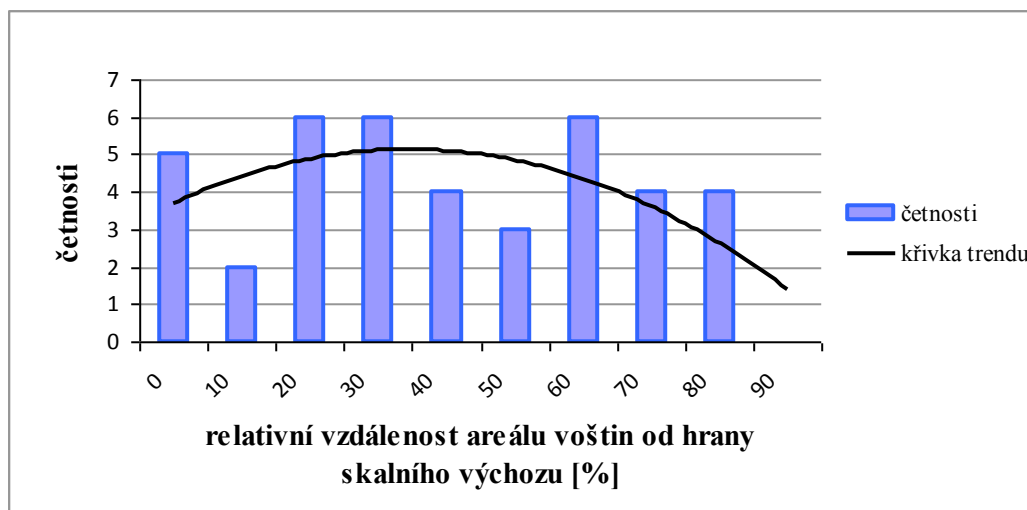
6. 1. 1. Pozice areálu voštin v rámci jednotlivých skalních výchozů

Primární azimut voštin se nachází ve východním kvadrantu, sekundární směr voštin leží v západním kvadrantu. Hodnoty azimutu skalních výchozů byly zaneseny do četnostní růžice (Obr. 43).



Obr. 43. Hodnoty azimutu 40 skalních výchozů, na kterých se měřené areály voštin nacházely.

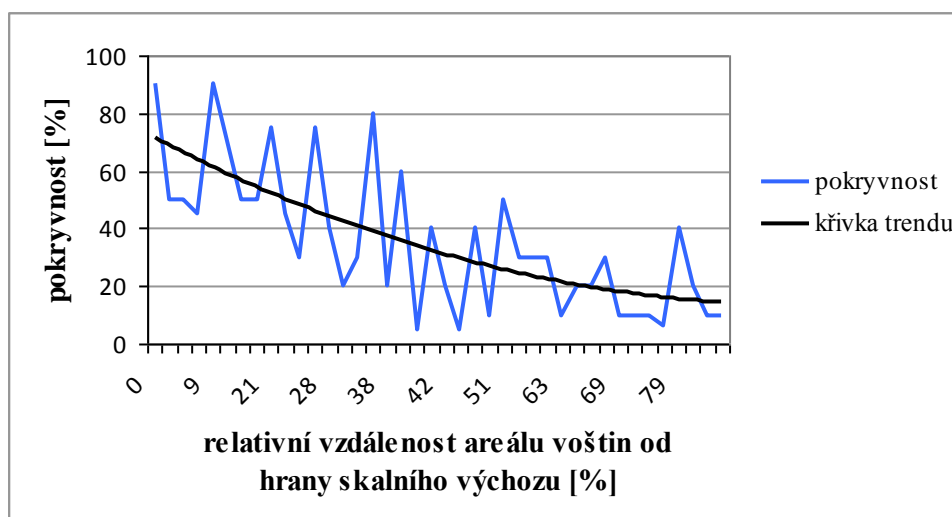
Areály voštin se nejčastěji nacházejí v relativní vzdálenosti 20 – 70 % od hrany skalního výchozu a to bez ohledu na to, jak je skalní výchoz vysoký (Obr. 44). Lze tedy říci, že jejich výskyt v nejsvrchnějších a nejspodnějších partiích skalních stěn je minimální.



Obr. 44. Rozložení četnosti výskytu voštin dle relativní vzdálenosti areálů voštin od hran skalních výchozů.

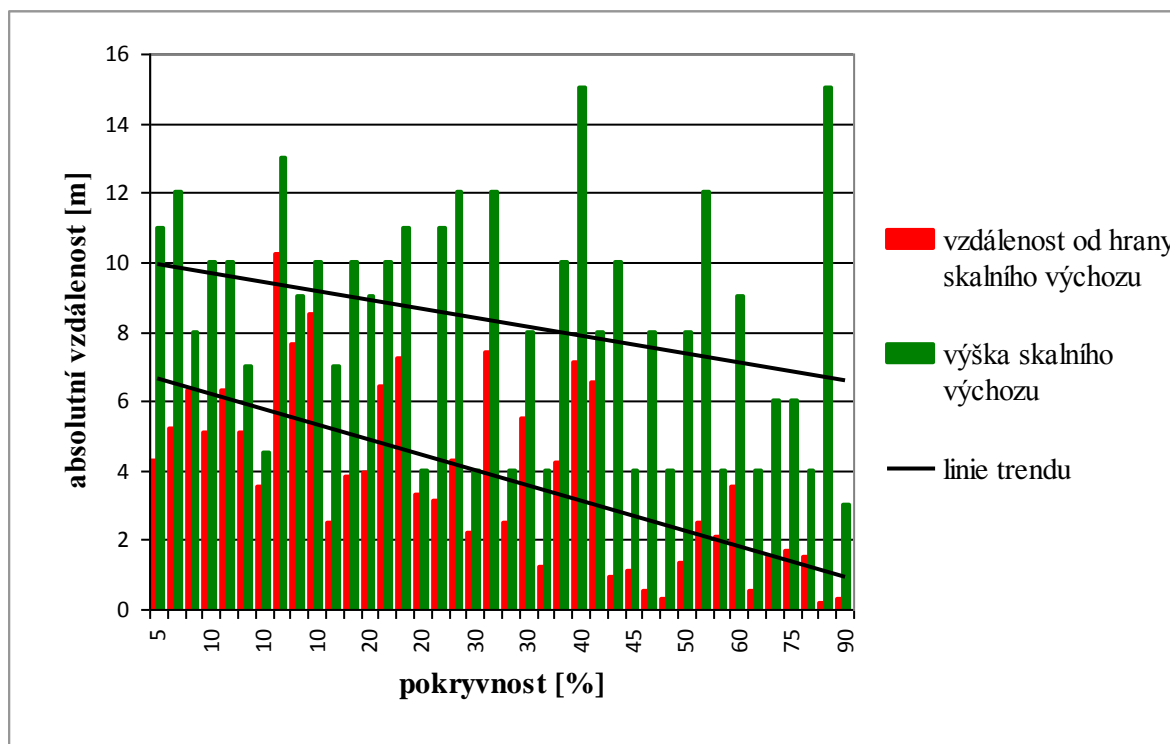
Absolutní vzdálenosti areálů voštin od hran skalních výchozů nejsou závislé na výškách skalních výchozů. Pearsonův korelační koeficient vyšel v tomto případě 0,05.

Pokryvnost voštin rapidně klesá s rostoucí relativní vzdáleností od hran skalních výchozů. Tedy největší pokryvnost voštinami lze zaznamenat ve svrchních partiích skalních stěn a to bez ohledu na to, jak je skalní výchoz vysoký (Obr. 45). Ve spodních částech skalních stěn jsou již areály voštin téměř nevýznamné z hlediska celkové pokryvnosti skalního výchozu areály voštin.



Obr. 45. Pokryvnost areálu voštin v závislosti na relativní vzdálenosti areálu voštin od hrany skalního výchozu proložená křivkou trendu.

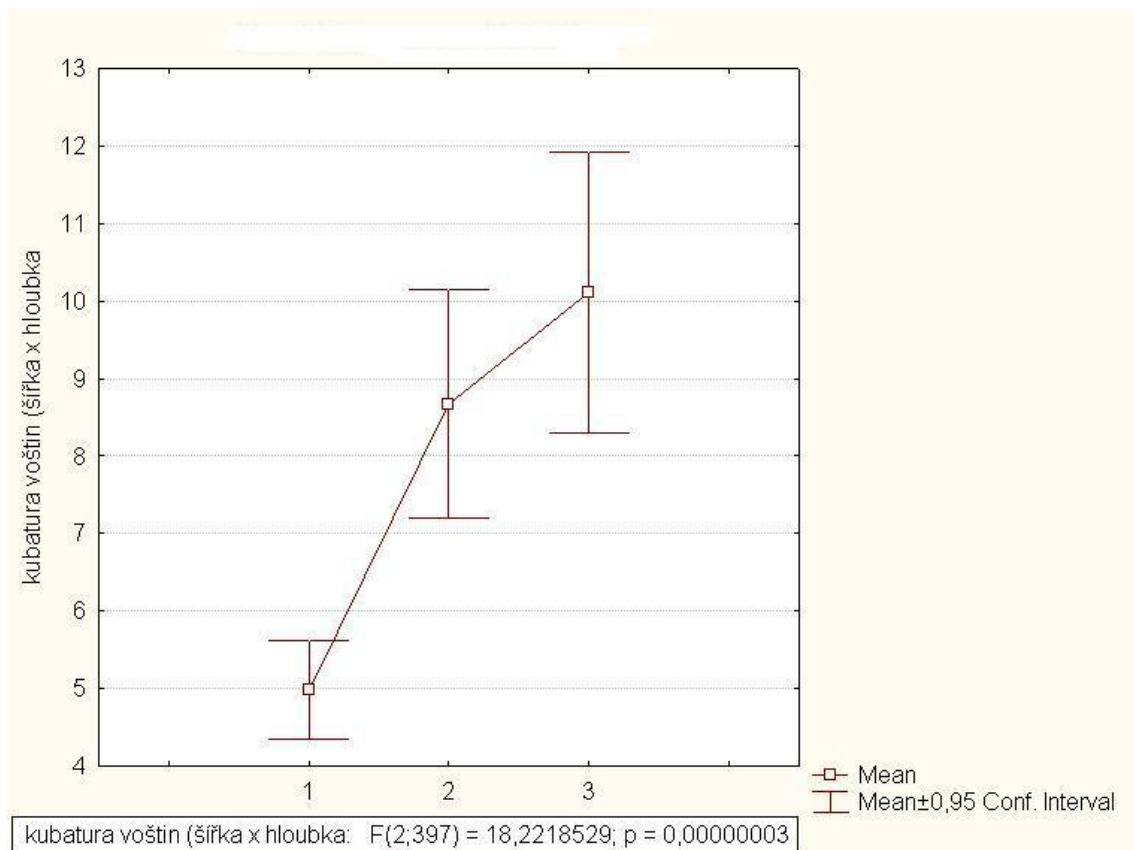
Pearsonův korelační koeficient pro vztah mezi pokryvností jednotlivých skalních výchozů voštinami a výškami skalních výchozů vyšel $-0,27$. Pearsonův korelační koeficient pro vztah mezi pokryvností jednotlivých skalních výchozů voštinami a vzdáleností areálů voštin od hran skalních výchozů vyšel $-0,70$. Pokryvnost skalních výchozů areály voštin se snižuje s klesající výškou skalních výchozů i s klesající vzdáleností areálů voštin od hran skalních výchozů (Obr. 46).



Obr. 46. Vzdálenost areálů voštin od hran skalních výchozů a výšky skalních výchozů ve vztahu k pokryvnosti skalních výchozů voštinami. Pozn. horní linie značí linii trendu pro výšky skalních výchozů, dolní linie je linie trendu pro vzdálenost od hrany skalního výchozu.

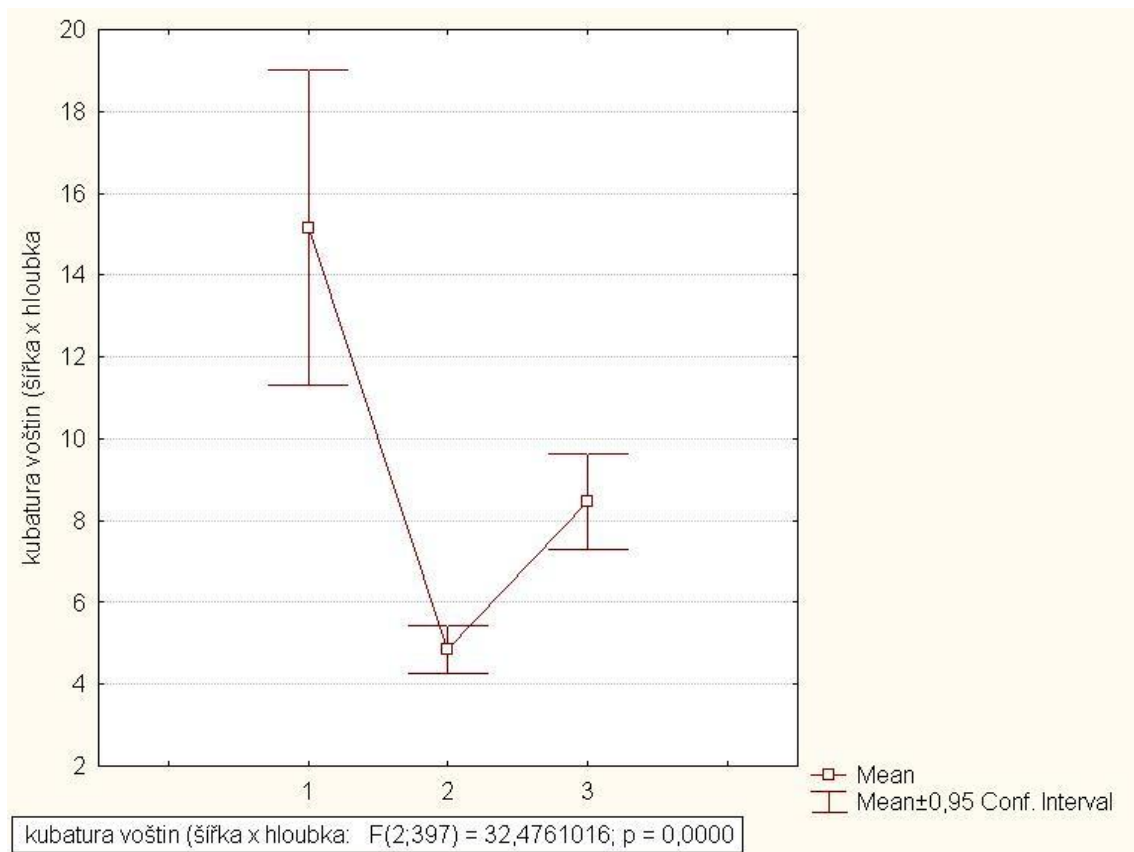
6. 1. 2. Určování relativního stáří

Po zjištění vzájemné závislosti mezi kubaturou voštin a stádiem vývoje voštin pomocí jednocestné ANOVy s Post-hoc Fischer testem LSD bylo prokázáno následující: 1) rozdíl mezi prvním a druhým stupněm vývoje voštin je signifikantní, 2) rozdíl mezi prvním a třetím stádiem vývoje voštin je také signifikantní, 3) rozdíl mezi druhým a třetím stádiem vývoje voštin již signifikantní není (hladina významnosti $p = 0,2254$) (Obr. 47).



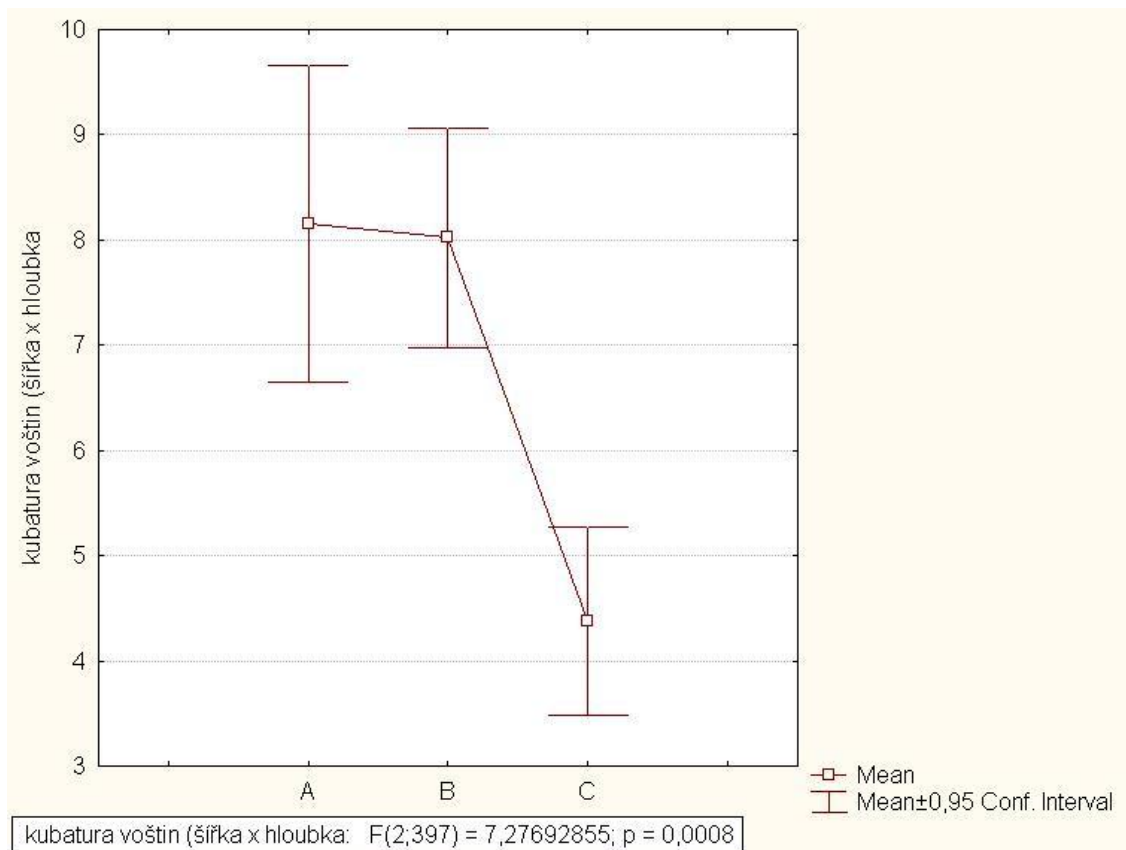
Obr. 47. Vztah mezi jednotlivými stádii vývoje voštin a jejich kubaturou. Pozn. 1 – první stádium vývoje voštin, 2 – druhé stádium vývoje voštin, 3 – třetí stádium vývoje voštin.

Pomocí jednocestné ANOVy s Post-hoc Fischer testem LSD byla zjišťována závislost mezi kubaturou voštin a jednotlivými horizontálními a vertikálními částmi rokle. Vztah mezi jednotlivými horizontálními částmi rokle (1, 2, 3) a kubaturou voštin je signifikantní (Obr. 48). Voštiny s nejvyšší hodnotou kubatury, tedy i nejlépe vyvinuté, se nacházejí v části rokle 1, tedy v uzávěrové (horní) části rokle.



Obr. 48. Vztah mezi kubaturou voštin a horizontálními částmi rokle.

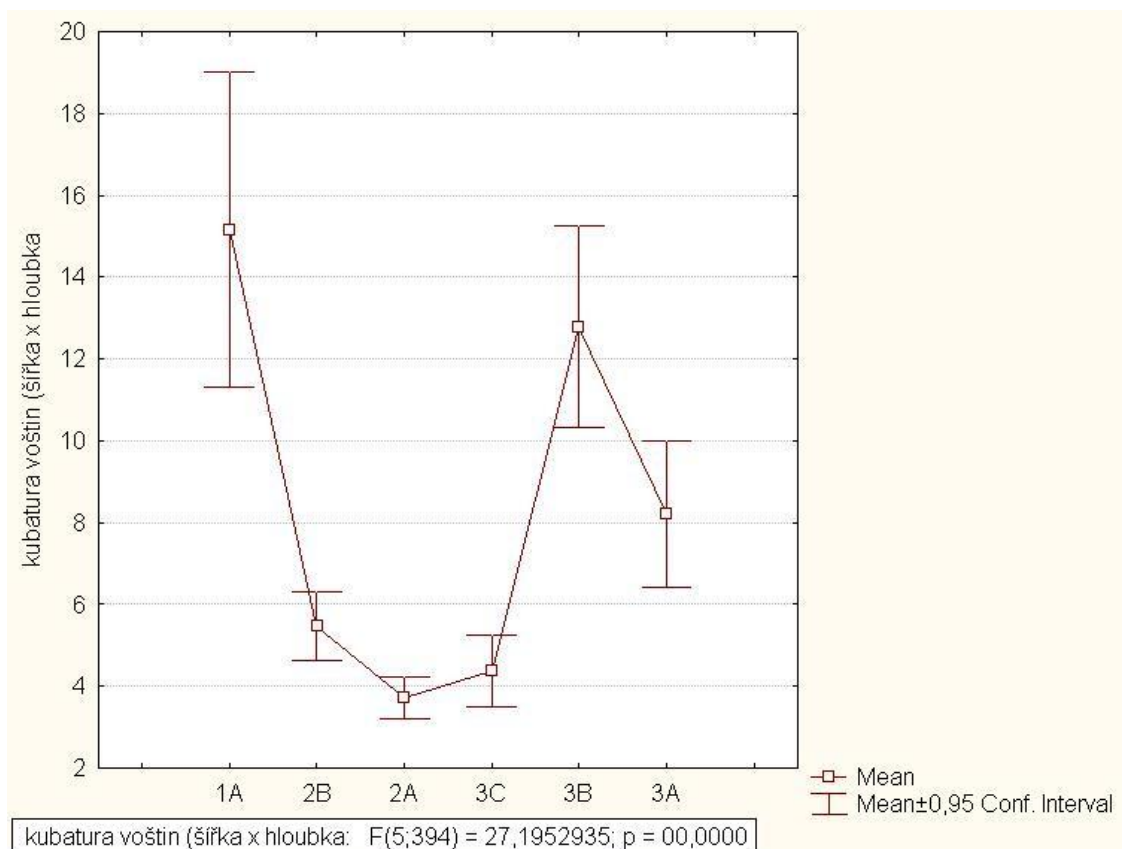
Stejným způsobem (jednocestná ANOVA s Post-hoc Fischer testem LSD) byl zjišťován vztah mezi kubaturou voštin a vertikálním profilem rokle. Tento vztah je signifikantní pouze mezi vertikálním stupněm C a ostatními částmi rokle, tedy stupni A a B (Obr. 49).



Obr. 49. Vztah mezi kubaturou voštin a vertikálními stupni rokle.

Obecně lze tedy říci, že nejméně vyvinuté voštiny se nacházejí ve vertikálním stupni C, který představuje nejhlubší část rokle. Voštiny s větší kubaturou se nacházejí na vertikálních stupních A a B.

Nakonec byl zkoumán vztah mezi kubaturou voštin a jednotlivými horizontálními a vertikálními částmi rokle (Obr. 50), (Tab, 19).

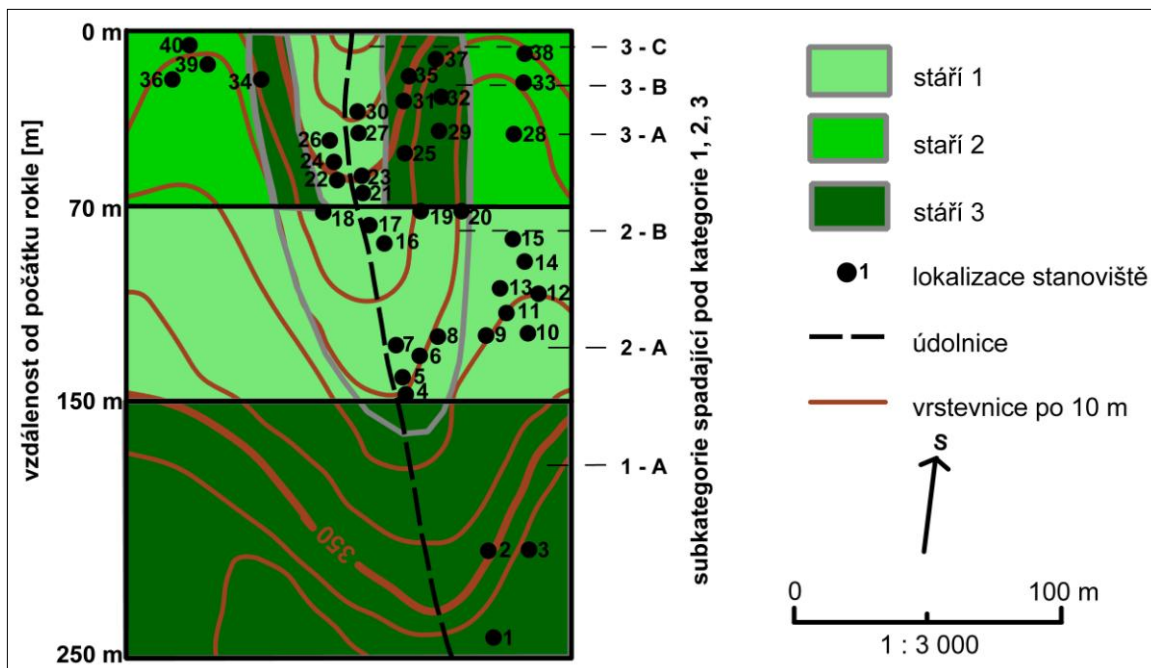


Obr. 50. Vztah mezi kubaturou voštin a jednotlivými horizontálními i vertikálními částmi rokle.

Tab. 19. Vztah mezi jednotlivými částmi rokle v závislosti na kubatuře voštin. Pozn. červená čísla značí signifikantní vztah.

kategorie	1A	2B	2A	3C	3B	3A
1A		0,000000	0,000000	0,000000	0,094058	0,000002
2B	0,000000		0,095891	0,277944	0,000000	0,008704
2A	0,000000	0,095891		0,563301	0,000000	0,000178
3C	0,000000	0,277944	0,563301		0,000000	0,000888
3B	0,094058	0,000000	0,000000	0,000000		0,000075
3A	0,000002	0,008704	0,000178	0,000888	0,000075	

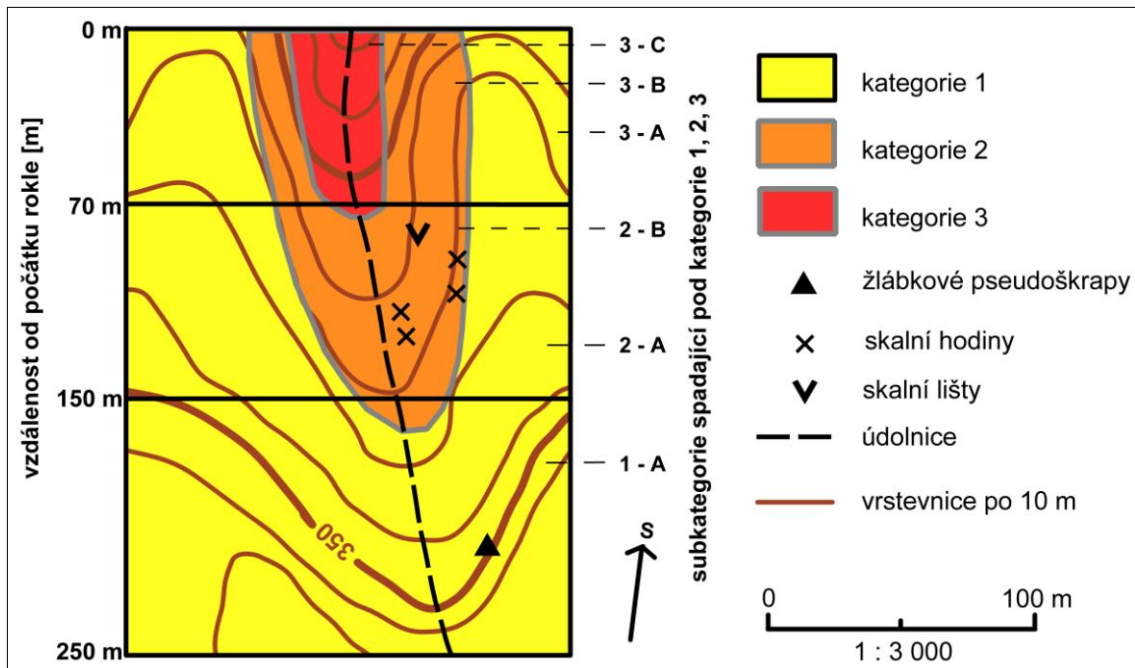
Jelikož rozdíly mezi některými částmi rokle nejsou signifikantní, byly určeny tři stupně stáří rokle Apatyky skládající se z částí rokle, které vykazují signifikantní rozdíly oproti ostatním částem rokle. Jako nejstarší byla určena část 1A a 3B, mladší část je tvořena stupněm 3A a nejmladší část rokle je tvořena stupni 2A, 2B a 3C (Obr. 51).



Obr. 51. Vývojové stupně rokle podle relativního stáří. Pozn. Stáří 3 odpovídá nejstarším částem rokle, stáří 1 odpovídá nejmladším částem rokle, stáří 2 odpovídá takovým částem rokle, které jsou relativně starší, než části rokle připadající do kategorie stáří 1 a relativně mladší, než části rokle připadající do kategorie stáří 3.

6. 2. Další pískovcové mikroformy

V rokli Apatyka se nacházejí kromě voštin ještě další mikroformy. Některé jsou dobře vyvinuté, jiné jsou teprve v počátečním stádiu vývoje. K těm nejvýznamnějším patří žlábkové pseudoškrapy, skalní hodiny a skalní lišty (lokalizace na Obr. 52).



Obr. 52. Lokalizace žlábkových pseudoškrapů, skalních hodin a skalních lišt v jednotlivých částech rokle Apatyky.

Téměř v údolním uzávěru rokle Apatyky se na skalním výchozu s azimutem 75° a výškou okolo 12 m nacházejí žlábkové pseudoškrapy (Obr. 53). Nejlépe vyvinuté jsou v horní části skalní stěny (horní hranice areál žlábkových pseudoškrapů se nachází cca 0,5 m od hrany skalního výchozu). Vzdálenost mezi jednotlivými hřebítky je okolo 10 cm. Postupně, směrem ke spodní části skalní stěny se žlábkové pseudoškrapy stávají méně vyvinuté a okolo 1 – 2 metrů nad zemí jsou téměř v počátečním stádiu vývoje. Jejich šířka je zde okolo 30 cm a hloubka v průměru 1 cm. Jedná se o ojedinělý tvar, další místa výskytu v rokli Apatyka nejsou.



Obr. 53. Žlábkové pseudoškrapy nacházející se jen několik decimetrů od hrany skalního výchozu. Pozn. Areál se žlábkovými pseudoškrapy je vyznačen červeným oválem.

Výskyt skalních hodin je podmíněn výskytem dobře vyvinutých areálů voštín (stupeň vývoje 3) (Obr. 54). Rozměr skalních hodin v celé roklí je v řádu centimetrů.



Obr. 54. Skalní hodiny a voštiny ve třetím stádiu vývoje. Pozn. skalní hodiny jsou vyznačeny červeným oválem.

V rámci celé rokly se nejedná o ojedinělý tvar, ale skalní hodiny se nacházejí pouze ve stupni rokly 2B s azimutem skalních výchozů okolo 90°. Jsou převážně vyvinuty na šikmo ukloněných skalních stěnách, které svým vzhledem připomínají počáteční stádia vývoje skalních převisů. Nejčastěji jsou skalní hodiny v rokli Apatyka dobře vyvinuté. Sloupky skalních hodin jsou úzké, většinou dosahují tloušťky do 2 cm. V některých případech lze pozorovat jejich postupnou destrukci.

Skalní lišty (Obr. 55) jsou vyvinuty ve střední části rokly (stupeň 2B) na skalním výchozu s azimutem 80°. Skalní lišty ční ze skalního výchozu do vzdálenosti cca 2 cm. Nad nimi a pod nimi se vyvíjejí voštiny, které kopírují průběh skalních lišt. Nejlépe vyvinuté jsou skalní lišty ve střední části skalní stěny, směrem k patě skalního výchozu a k hraně skalního výchozu se zmenšují. Jedná se o zcela ojedinělý tvar. V jiných částech rokly Apatyka se skalní lišty nevyskytují.



Obr. 55. Skalní lišty. Pozn. Vybraný areál skalních lišt je vyznačen červeným oválem.

7. Diskuze

7. 1. Pozice výskytu jednotlivých mikroforem

Primární azimut voštin se nacházel ve východním kvadrantu (azimut v intervalu 70°- 90°), čili na závětrné straně rokle. To je možné vysvětlit tím, že voštiny se obecně nacházejí v sušších oblastech (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010), kde nedochází k vymývání soli srážkovou vodou. (Goudie in Goudie, 2004). Na návětrné straně rokle (tedy v západním kvadrantu) dochází k rychlejší destrukci voštin vlivem srážkové vody.

Nejčtenější výskyt areálů voštin je zhruba mezi 20 – 70 % od hrany skalního výchozu, ve svrchních a spodních částech skalních stěn se voštiny vyskytují minimálně. To může být způsobeno zejména vzlínáním půdní vlhkosti ve úpatních částech skalních výchozů a destruktivní činností srážkové vody ve svrchních částech skalních výchozů, tedy poblíž jejich hrany (Mikuláš, 2001). Při úpatí skalního výchozu je relativní vlhkost vzduchu vyšší, než relativní vlhkost nasycených solných roztoků (Goudie in Goudie, 2004). Pískovec je v této části skalního výchozu méně odolný. Pokud tedy dojde k vývoji voštin, jsou vlivem půdní vlhkosti rychle destruovány. Naopak ve svrchních částech skalních výchozů jsou areály voštin (pokud zde vůbec vzniknou) destruovány erozí srážkové vody (Mikuláš in Härtel et al., 2007).

Pokryvnost skalního výchozu areály voštin klesá s rostoucí relativní vzdáleností voštin od hrany skalního výchozu. Tento předpoklad platí i pro vztah mezi pokryvností skalního výchozu a absolutní vzdáleností voštin od hrany skalního výchozu. Zjištěná vlastnost může být vysvětlena odlišnou odolností pískovce v různých částech skalního výchozu (Mikuláš, 2001). V nižších částech skalních výchozů je obsažena voda (zdrojem vody v pískovcích je podzemní voda), díky níž je pískovec méně odolný vůči zvětrávání (Adamovič a Kidston in Härtel et al., 2007). Areály voštin, vzniklé v nižších částech skalních výchozů, tak rychleji zanikají. Destrukce voštin je podporována i vzlínáním půdní vlhkosti.

Pokryvnost skalního výchozu areály voštin se snižuje s klesající výškou skalních výchozů. To může být způsobeno tím, že s klesající výškou skalních výchozů se zmenšuje oblast vhodná pro vznik voštin. Oproti tomu se zvětšuje oblast působení půdní vlhkosti v dolních částech skalních výchozů a oblast ovlivněná erozní činností vody v blízkosti hran skalních výchozů.

Dobře vyvinuté žlábkové pseudoškrapy se v rokli Apatyka nacházejí v horní části skalní stěny při hraně skalního výchozu. Skalní výchoz, na kterém byly pseudoškrapy zaznamenány, se nacházel v nejvyšším vertikálním stupni rokle. Zde je zřejmý přímý účinek srážkové vody, která rozpouští pískovcový tmel a umožňuje tak vznik žlábkových pseudoškrapů (Vítek, 1982). Vedle chemického zvětrávání je srážková voda schopna i mechanického rozrušení (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010).

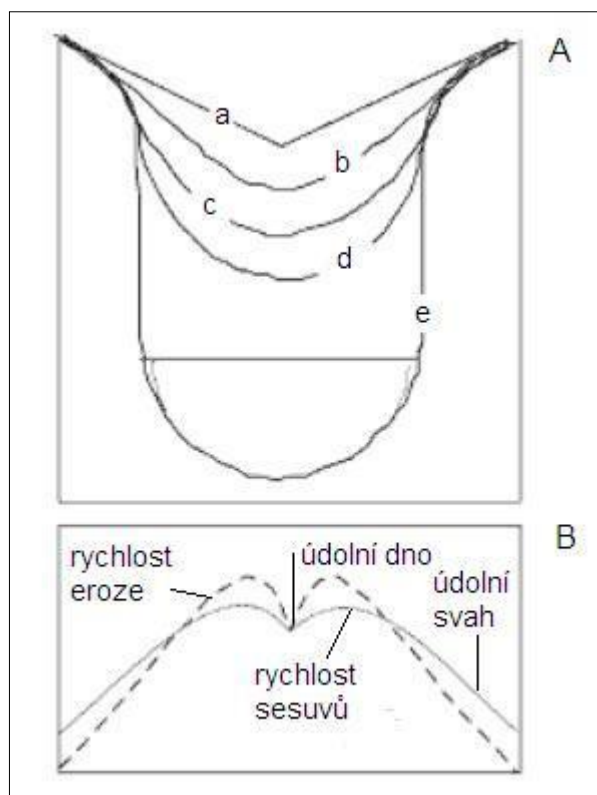
Skalní hodiny jsou vázané na výskyt dobře vyvinutých voštin (Mikuláš in Härtel et al., 2007). Postupně dochází ke spojování sousedních důlků a ke vzniku skalních hodin. Skalní hodiny v rokli Apatyka se nejčastěji objevují v převislých skalních stěnách, ve kterých nedochází k vymývání soli srážkovou vodou (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Skalní hodiny se nacházejí v prostřední části rokle (stupeň 2B), což poukazuje na předpoklad, že tato část rokle bude vývojově mladší. Tento předpoklad lze vysvětlit popsáním jednotlivých vývojových stádií skalních hodin. Skalní hodiny, jak je popisuje Rubín, Balatka et al. (1986), nejsou konečným vývojovým stádiem tohoto tvaru. Postupně totiž dochází k destrukci sloupků a závěrečné stádium vývoje nelze na skalních výchozech pozorovat. Přítomnost skalních hodin v prostřední části rokle Apatyky tedy dokazuje, že tato část rokle bude vývojově mladší, neboť skalní hodiny nejsou prozatím viditelně destruovány.

Skalní lišty se v rokli Apatyka nacházejí pouze na jediném skalním výchozu, který se nachází v prostřední části rokle (stupeň 2B), což indikuje vývojově mladší část rokle. Toto tvrzení lze opět vysvětlit jednotlivými vývojovými stádii skalních lišt. Skalní lišty nejsou konečným vývojovým stádiem tohoto tvaru. Postupně dochází vlivem zvětrávání a eroze k jejich destrukci. Přítomnost skalních lišt v prostřední části rokle Apatyky tedy dokazuje, že tato část rokle bude vývojově mladší, neboť skalní lišty nejsou prozatím viditelně destruovány a lze je velice dobře pozorovat. Na vzniku skalních lišt se uplatňuje proces tvoření odolnějších a méně odolných partií pískovce v důsledku zpevňování tmelu (Mikuláš in Härtel et al., 2007). Nejlépe jsou skalní lišty vyvinuty ve střední části skalní stěny. Vznik skalních lišt ve spodních partiích skalního výchozu je narušen vzlínáním půdní vlhkosti, která brání působení solného zvětrávání napomáhajícího při vzniku skalních lišt (Mikuláš, 2001). V horních partiích při hraně skalního výchozu naopak brání vzniku skalních lišt srážková voda.

7. 2. Relativní stáří

Pro určení relativního stáří jednotlivých částí rokle bylo primárně využito voštín. Výsledky pak byly konfrontovány s dalšími mikrotvary, konkrétně se skalními hodinami a skalními lištami. Nejstarší části Apatyky (stanovené na základě vyvinutosti voštín) se nacházejí v horní třetině rokle (stupeň 1A) a v ústí rokle (stupeň 3B). Nejmladší částí Apatyky (stanovené na základě vyvinutosti voštín a potvrzené výskytem skalních lišt a skalních hodin) jsou stupně 2A, 2B a dále stupeň 3C.

Vývoj údolí je podle Andersona a Andersonové (2010) následující: nejprve se vyvine mělké údolí tvaru V. Zpětná a boční eroze vedou k sesouvání svahů a tak dochází k prohlubování údolí do tvaru U (Obr. 56).



Obr. 56. A – vývoj údolí (a – nejstarší část až e – nejmladší část), B – rychlost eroze a sesuvů směrem od údolního dna, přes údolní svah až k hranici údolí podle Andersona a Andersonové (2010, upraveno).

Nejstarší část rokle Apatyky má tvar doširoka otevřeného písmena V (stupeň 1A v uzávěrové části rokle). V této části se uplatňuje solné zvětrávání, které vede ke vzniku voštín, i chemické zvětrávání srážkovou vodou, což potvrzuje vznik pseudoškrapů (Rubín, Balatka et al., 1986). V nejstarší části rokle nebude ve velké míře působit

vzlínání půdní vlhkosti, neboť voštiny jsou v této části dobře vyvinuté a pokrývají téměř celé skalní stěny.

Dle modelu podle Andersona a Andersonové (2010) by nejmladší část rokle měla odpovídat horizontální části rokle 3, resp. stupni 3C. Z výsledků měření plyne, že část rokle 3C patří mezi nejmladší části rokle, tudíž tento předpoklad je splněn. Při ústí rokle jsou strmé skalní stěny a na obou údolních svazích se nacházejí vysoké skalní výchozy, na nichž se voštiny téměř nevyskytují. V tomto stupni rokle se výrazně uplatňuje vzlínání půdní vlhkosti, které destruuje téměř jakékoli náznaky vzniku mikroreliefu. K nejmladším částem Apatyky patří dále stupně 2A a 2B. To je potvrzeno nejen výskytem méně vyvinutých voštin, ale i výskytem skalních hodin a lišt. K pomalejšímu vývoji voštin (i dalších mikroforem) zde může docházet např. vlivem zpětné a boční eroze.

7. 3. Zhodnocení metod

Metoda hodnocení relativního stáří pomocí kubatury se v případě voštin osvědčila. Byla prokázána závislost mezi kubaturou voštin a jednotlivými stádii vývoje voštin. Tato metoda by mohla být vhodná i pro určení stádií vývoje některých dalších mikrotvarů, u nichž lze snadno stanovit jejich kubaturu (např. pseudoškrapy, skalní mísy). U některých tvarů je však obtížné stanovit kubaturu ve smyslu objemu. U těchto tvarů je nutné stanovit jinou metriku, která by byla závislá na stádiu vývoje tvaru (např. u skalních hodin by bylo možné využít poměr výšky a šířky jejich sloupku).

Signifikantní vztahy mezi jednotlivými částmi rokle vzhledem ke kubatuře voštin byly testovány jednocestnou ANOVou s Post-hoc Fischerovým testem. Nevýhodou jednocestné ANOVy s Post-hoc Fisherovým testem LSD je velká citlivost na splnění předpokladu normálního rozdělení (Zvára, 2008). Tento předpoklad závisí na četnostech výskytu jednotlivých mikroforem. Při využití této metody je tedy nutné využít takových mikroforem, které jsou ve studovaném území hojně rozšířeny.

8. Závěr

Nejdůležitější výsledky, vyplývající z výsledků práce, jsou následující:

- výskyt areálů voštin na skalních výchozech je ovlivněn expozicí vůči převládajícímu směru větru a srážkám
- výskyt areálů voštin v jednotlivých částech skalních stěn je ovlivněn zejména vztlínáním půdní vlhkosti a erozní činností vody
- vztlínání půdní vlhkosti působí při úpatí skalních stěn a na voštiny má destruktivní vliv
- erozní činnost srážkové vody se uplatňuje v blízkosti hran skalních výchozů, na vývoj voštin působí také destruktivně, oproti tomu napomáhá vzniku žlábkových pseudoškrapů
- pro zhodnocení relativního stáří jednotlivých částí rokle lze využít kubatury voštin, pokud je jejich rozšíření ve studovaném území hojné
- nejstarší část rokle se nachází v její uzávěrové části a je charakterizována nejlépe vyvinutými voštinami, které pokrývají téměř celou plochu skalní stěny
- mezi nejmladší části rokle patří spodní vertikální stupeň při ústí rokle, který je charakterizován nejméně vyvinutými voštinami a nízkou pokrývností areály voštin.

Pro zpřesnění výsledků by bylo nutné zvětšit počet stanovišť v daném území na maximum. Tím by se zvýšila vypovídací schopnost metody určování polohy daného tvaru i metoda určování relativního stáří. Rovněž by bylo dobré porovnat naměřené hodnoty s širším územím (např. s přilehlými roklemi) a zahrnout do výzkumu i další tvary, jejichž výskyt by byl ve studovaném území hojný.

9. Seznam literatury

- ADAMOVIČ, J., KIDSTON, J. (2007): Sandstones and their attributes. In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 13 – 24.
- ADAMOVIČ, J., MIKULÁŠ, R., CÍLEK, V. (2010): *Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky*. Academia, Praha, 459 s.
- ALLAN, R.J. (1978): Regional geochemical anomalies related to plate tectonic models for the Northwestern Canadian shield. *Journal of Geochemical Exploration*, 10, č. 3, 203-218 s.
- ALLING, H. (1943): A metrical grade scale of sedimentary rocks. *The journal of geology*, 51, č. 4, s. 259–269.
- ANDERSON, R.S., ANDERSON S.P. (2010): *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press, Cambridge, 637 s.
- APLIN, A.C., FLEET, A.J., MACQUAKER, J.H.S. (1999): *Muds and mudstones: physical and fluid-flow properties*. Geological Society, Oxford, 190 s.
- BALATKA, B. (1965): Ralská pahorkatina. In Demek, J. et al.: *Geomorfologie Českých zemí*. Československá akademie věd, Praha, s. 180 – 188.
- BALATKA, B., LOUČKOVÁ, J., SLÁDEK, J. (1969): *Vývoj pískovcového reliéfu České tabule na příkladu Polomených hor*. Academia, Praha, 38 s.
- BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): *Geomorfologické členění reliéfu Čech*. Kartografie Praha, Praha, 79 s.
- BURLEY, S.D. (1993): Secondary porosity. In Kearey, P.: *The encyclopedia of the solid earth science*. Wiley Blackwell, Oxford, s. 544 - 545.
- BURLEY, S.D., WORDEN, R.H. (2003): *Sandstone diagenesis: recent and ancient*. Wiley-Blackwell, Bodlin, 649 s.
- CÍLEK, V. (1998): Fyzikálně chemické procesy vzniku pískovcového pseudokrasu. In Cílek, V., Kopecký, J.: *Pískovcový fenomén: klima, život, reliéf*. Zlatý kůň, Praha, s. 134 – 153.
- CÍLEK, V. (2007): Climate, microclimate and paleoclimate of sandstone area of Central and North Bohemia. In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 97 - 104.

- CÍLEK, V. et al. (2007): The origin and development of sandstone landforms. In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 34 - 43.
- CÍLEK, V., BAROŇ, I., LANGOVÁ, A. (2003): Skalní kůry a povlakové minerály pískovců magurského flyše na Vsetínsku. *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 2002*, 10, č. 1, s. 22–24.
- DEMEK, J. (1987): *Obecná geomorfologie*. Československá akademie věd, Praha, 476 s.
- DIXON, J. (2004): Weathering. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 1108 - 1112.
- FRENCH, H.M. (2007): *The periglacial environment*. John Wiley and Sons, Chippenham, 458 s.
- FORD, D.C. (2004): Cave. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*, Routledge, London, s. 124 - 128.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley and Sons, Chippenham, 562 s.
- GERRARD, J. (1988): *Rocks and landforms*. Unwin Hyman, London, 366 s.
- GILLIESON, D.S. (1996): *Caves: processes, development, and management*. Wiley-Blackwell, Padstow, 324 s.
- GOLDIE, H. (2004): Karren. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*, Routledge, London, s. 583 – 585.
- GOUDIE, A.S. (2004): Salt weathering. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume,.* Routledge, London, s. 894 - 897.
- HARKER, A. (2006): *Petrology for students*. Adamant media corporation, Boston, 346 s.
- HACHINOHE, S., HIRAKI, N., SUZUKI, T. (1999): Rates of weathering and temporal changes in strength of bedrock of marine terraces in Boso Peninsula, Japan. *Engineering Geology*, 55, s. 29 – 43.
- HÄRTEL, H., ADAMOVIČ, J., MKULÁŠ, R. (2007): General overview of European sandstone landscapes. In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, 321 – 324 s.
- HEJL, E. (2005): A pictorial study of tafoni development from the 2nd millennium BC. *Geomorphology*, 64, 87–95.
- HORNÍK, S. et al. (1986): *Fyzická geografie II*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 319 s.

- HOSONO, T., UCHIDA, E., SUDA, CH., UENO, A., NAKAGAWA, T. (2006): Salt weathering of sandstone at the Angkor monuments, Cambodia: identification of the origins of salts using sulfur and strontium isotopes. *Journal of Archaeological Science*, 33, s. 1541–1551.
- HUGGET, R.J. (2007): *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, Oxon, 472 s.
- CHILINGARIAN, G.V., WOLF, K.H. (1992): *Diagenesi, III (Developments in sedimentology)*. Elsevier science, Amsterdam, 674 s.
- CHLUPÁČ, I. et al. (2002): *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 s.
- KOGEL, J.E., TRIVEDI, N.C., BARKER, J.M., KRUKOWSKI, S.T. (2006): *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Society of mining, metalurgy and exploration, Colorado, 1548 s.
- KŘÍŽEK, M. (1999): Povrchové a podpovrchové jevy na Čecheru v Hostýnských vrších. *Sborník české geografické společnosti*, 104, č. 3, s. 201 – 208.
- KŘÍŽEK, M. (2001): The Quaternary sculpturing of sandstones in the Rusavská hornatina Mts. *Acta Universitatis Carolinae – Geographica*, 36, č. 1, s. 99 – 109.
- KŘÍŽEK, M. (2003): Charakteristické vlastnosti mrazových srubů: zaměřeno na srovnání aktivních mrazových srubů ve světě a mrazových srubů v Rusavské hornatině. *Sborník české geografické společnosti*, 108, č. 4, s. 17–32.
- KUKAL, Z. (1985): *Návod k pojmenování a klasifikaci sedimentů*. Ústřední ústav geologický, Praha, 80 s.
- KUKAL, Z. (1986): *Základy sedimentologie*. Academia, Praha, 466 s.
- KUSIMBA, CH.M., KUSIMBA, S.B. (2003): *East African archaeology: foragers, potters, smiths, and travers*. UPenn Museum of Archaeology, USA, 226 s.
- LUPIA-PALMERI, E. (2004): *Erosion*. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 331 – 336.
- McLEISH, A. (1992): *Geological science*. Nelson Thornes, Cheltenham, 308 s.
- MIGÓN, P. (2004): Rock and earth pinnacle and pillar. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 876.
- MIGÓN, P. (2006): *Granite landscapes of the world*. Oxford university press, New York, 416 s.
- MIKULÁŠ, R. (1998): *Pískovcový fenomén*. Vesmír, 77, 278 – 283 s.
- MIKULÁŠ, R. (2001): *Poznámky ke vzniku některých prvků mikroreliefu pískovcových skal*. Ochrana Přírody, 56, č. 1, s. 19 – 21.

- MIKULÁŠ, R. (2007): Microforms of sandstone relief. In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 66 - 75.
- MIKULÁŠ, R. (2006): Mezoreliéf a mikrorelief pískovcových skalních měst a výchozů. In Jenč, P., Šoltysová L. (2006): *Pískovcový fenomén Českého ráje*. Základní organizace Českého svazu ochránců přírody Křížánky, Turnov, s. 51 - 62.
- MIKULÁŠ, R., CÍLEK, V. (1998): Terrestrial insect bioerosion and the possibilities of its fossilization (Holocene to Recent, Czech Republic). *Ichnos*, 5, s. 325 – 333.
- MÍSAŘ, Z. et al. (1983): *Geologie ČSSR I. – Český masív*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 333 s.
- MONKHOUSE, F.J. (2007): *A dictionary of geography*. Transaction Publisher, USA, 378 s.
- MORAVEC, D., VOTÝPKA, J. (1997): *Klimatická regionalizace České republiky, 1 : 500 000*. Karolinum, Praha , 87 s.
- MUSTOE , G. (2005): Tafone. In Schwarz, M.L.: *Encyclopedia of coastal science*. Springer, Netherlands, s. 940 – 941.
- NAGLE, H. (2000): *Advanced geography*. Oxford University Press, Spain, 464 s.
- NÁPRSTEK, V. (1985): *Všeobecná geologie – Zvětrávání a sedimentární horniny*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 134 s.
- NASHIYMA, K.; MATSUKURA, Y. (2006): Weathering rates and mechanisms causing changes in rock properties of sandstone. *The 10th IAEG International Congress*, 278, s. 1–6.
- NEUHÄUSLOVÁ, Z. (2001): Acidofilní doubravy – Subkontinentální borové doubravy. In Chytrý, M., Kučera, T., Kočí, M.: *Katalog biotopů České republiky*. Agetruta ochrany přírody a krajiny, Praha, s. 210 – 211.
- NEUHÄUSLOVÁ, Z. et al. (1998): *Mapa potenciální přirozené vegetace, 1 : 500 000*. Academia, Praha, 341 s.
- NICHOLS, G. (2009): *Sedimentology and stratigraphy*. Wiley Blackwell, Chichester, 432 s.
- NOEL, T.J., FIELDER, J. (2001): *Colorado, 1870-2000, revisited: the history behind the images*. Westcliffe Publisher, China, 319 s.
- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E., SIEVER, R. (1972): *Sand and sandstone*. Springer - Verlag, Berlin, 618 s.

- PETRÁNEK, J. (1963): *Usazené horniny*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 717 s.
- PRAŽÁK, J. et al. (1991): *Geologická mapa ČR, list 02-44 Štětí, 1 : 50 00*. ÚÚG, Kolín.
- PRIKRYL, P., TOROK, A. (2010): *Natural Stone Resources for Historical Monuments: Special Publication 333*. Geological Society, Chippenham, 256 s
- QUITT, E. (1971): *Klimatické oblasti Československa*. Academia, Brno, 73 s.
- RAMBERG, I.D. (2008): *The making of a land: geology of Norway*. Geological Society, Trondheim, 624 s.
- RAPP, G.R., HILL, CH.L. (2006): *Geoarchaeology: the earth-science approach to archaeological interpretation*. Yale University Press, USA, 339 s.
- RUBÍN, J., BALATKA, B., MALKOVSKÝ, M., VÍTEK, J. (1986): *Atlas skalních, zemních a půdních tvarů*. Academia, Praha, 385 s.
- STEJSKAL, V. (2005): Geomorfologické aspekty monitoringu pohybů skalních bloků v pseudokrasových lokalitách Ostaš, Hejda a Kočičí skály. *Sborník české geografické společnosti*, 110, č. 2, s. 82 - 90.
- SWEEDERS, H.; DELALIEUX, F.; VAN GRIEKEN, R. (1998): Weathering of dolomitic sandstone under ambient conditions. *Atmospheric Environment*, 32, č. 4, s. 733–748.
- TOMÁŠEK, M. (2003): *Půdy České republiky*. Česká geologická služba, Praha, 67 s.
- TUCKER, M.E. (2001): *Sedimentary petrology, An Introduction to the Origin of the Sedimentary Rocks*. Blackwell Science, Oxford, 272 s.
- TUCKER, M.E. (2003): *Sedimentary Rocks in the Field*. John Willey & Sons, Chichester, 244 s.
- TURKINGTON, A. (2004a): Cavernous weathering. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 128 - 130.
- TURKINGTON, A. (2004b): Mechanical weathering. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 657 – 659.
- TWIDALE, C. R. (2002): The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. *Earth-Science Reviews*, 57, s. 37–74.
- VAŘILOVÁ, Z. (2007): Occurrences of Fe-mineralization in sandstones of the Bohemian Switzerland National Park (Czech Republic). In Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (editoři): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 25 - 33.

- VERESS, M (2010): *Karst Environments: Karren Formation in High Mountains*. Springer. London, 230 s.
- VÍTEK, J. (1982): Typy škrapů v pískovcích České křídové pánve. *Československý kras*, 32, s. 41 – 51.
- VÍTEK, J. (1983): Classification of pseudokarst forms in Czechoslovakia. *International Journal of Speleology*, 13, s. 1– 18.
- WILLIAMS, R.B.G., ROBINSON, D.A. (2001): Experimental frost weathering of sandstone by various combination of salts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, s. 811 – 818.
- YADOV, P.R. (2004): *Prehistoric Life*. Discovery Publishing House, Delhi, 392 s.
- YOUNG, G. M., (2008): Origin of Enigmatic Structures: Field and Geochemical Investigation of Columnar Joints in Sandstones, Island of Bute, Scotland. *The Journal of Geology*, 116, s. 527 – 536.
- YOUNG, R.W. (2004a): Arch, Natural. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 31.
- YOUNG, R.W. (2004b): Sandstone geomorphology. In Goudie, A.S. (editor): *Encyclopedia of geomorphology, volume 2*. Routledge, London, s. 906 - 908.
- YOUNG, R.W., WRAY, R.A.L., YOUNG, A.R.M. (2009): *Sandstone landforms*. Cambridge university press, Cambridge, 314 s.
- ZVÁRA, K. (2008): *Biostatistika*. Karolinum, Praha, 213 s.

10. Přílohy

Příloha 1. Měřené veličiny v rokli Apatyka.

Skal- ní vých oz	Šíř- ka [cm]	Hloub- ka [cm]	Stu- peň vývo- je	Hus- tota na jednot- ku plochy [m ²]	Azi- mut skalní- ho výcho- zu [°]	Po- kryv- nost [%]	Vzdále- nost skalního výchozu od počátku rokle [m]	Vzdále- nost areálu voštin od hrany skalního výchozu [m]	Výška skalní- ho výcho- zu [m]
1	1,9	1,9	3	900	75	90	245	0,2	15
2	6,9	2	2	100	68	30	220	7,4	12
3	7,2	3,9	3	250	70	50	220	2,5	12
4	4,1	1,5	2	216	90	75	150	1,7	6
5	3,9	0,9	1	200	110	10	147	3,5	4,5
6	2,2	2,2	3	528	98	20	145	2,5	7
7	4	1,1	1	256	87	10	145	5,1	7
8	1,5	0,9	1	490	76	6	144	6,3	8
9	2	2,1	3	1100	68	50	144	1,3	8
10	6,3	2,8	2	288	89	30	144	5,5	8
11	3,3	0,5	1	200	73	50	130	2,1	4
12	2,1	1,5	1	200	85	30	123	2,5	4
13	3,1	2	2	1200	81	70	119	0,5	4
14	2,3	2,5	3	2500	115	50	105	0,5	8
15	3,4	0,9	1	900	95	40	100	6,5	8
16	2,1	0,7	1	600	80	30	90	2,2	4
17	2	3,2	3	2000	94	80	88	1,5	4
18	3,8	0,5	1	600	259	20	70	3,3	4
19	4,2	1,9	2	900	65	40	70	1,2	4
20	3,9	0,7	1	400	70	50	68	0,3	4
21	6,4	0,9	1	2000	110	45	65	1,1	4
22	3,1	0,5	1	600	286	20	60	6,4	10
23	5,8	2,1	2	100	104	45	60	0,9	10
24	4,3	0,8	1	400	276	60	58	3,5	9
25	9,7	2,3	2	100	69	90	55	0,3	3
26	1,5	1,5	2	2000	285	75	54	1,5	6
27	3,2	1,4	2	1200	97	40	52	4,2	10
28	9,9	2,2	2	200	74	10	52	8,5	10
29	3,2	1,5	2	400	85	10	51	7,6	9
30	2	0,4	1	800	90	5	45	4,3	11
31	3,3	2,8	3	1200	72	10	40	6,3	10
32	10,1	3,2	3	100	109	10	40	5,1	10
33	5,2	0,7	1	200	120	20	30	3,9	9

34	4,4	0,8	1	100	261	40	25	7,1	15
35	2,3	1,5	2	100	85	20	24	3,8	10
36	3,9	1,2	1	200	283	30	12	3,1	11
37	6,5	2,1	2	100	73	20	12	7,2	11
38	1,5	2,1	2	800	67	30	10	4,3	12
39	3,4	3,3	3	400	285	5	10	5,2	12
40	5,1	0,9	1	100	273	10	5	10,2	13