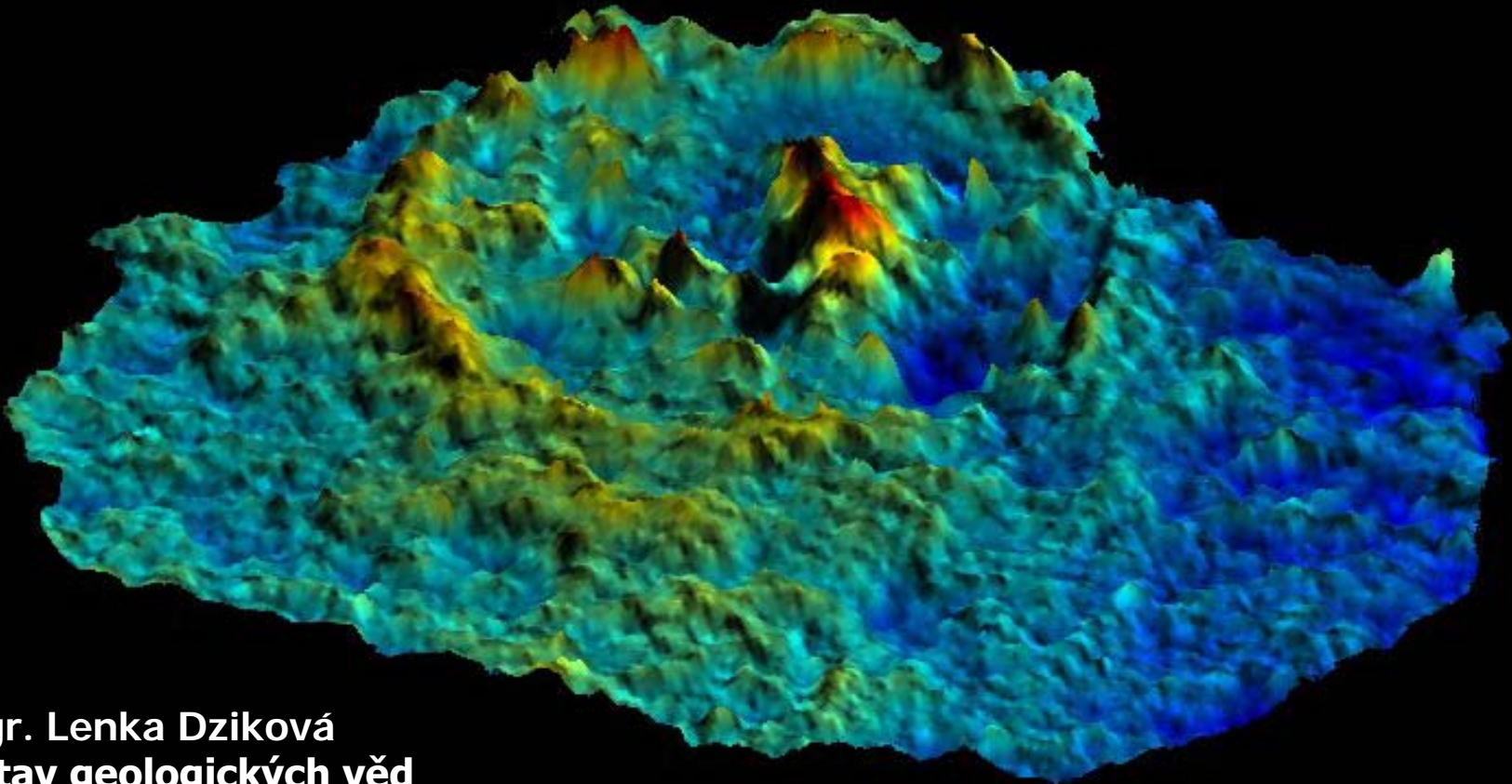


Meteority a impaktní krátery

Část II.



Mgr. Lenka Dziková
Ústav geologických věd
Přírodovědecká fakulta
Masarykova univerzita Brno (2010)

Tato přednáška je součástí grantu
FRVŠ 2430/2010

Obsah přednášky

- Impaktní krátery – definice, rozmístění na Zemi
- Impaktní kráter – vznik
- Impaktní krátery – terminologie
- Impaktní eventy – vyhynutí
- Prevence impaktové události
- Air burst
- Podmínky šokové metamorfózy
- Projevy šokové met. v horninách a minerálech
- Šokově přeměněné horniny (impaktity)
- Ekonomický význam impaktních kráterů

Impaktní kráter – definice

- Impaktní kráter (meteoritický kráter, impaktní struktura, pánev) je produktem srážky dvou vesmírných těles velmi rozdílných velikostí, kdy kráter vzniká na povrchu většího tělesa (tzv. target body, terčové, cílové těleso) dopadem menšího tělesa (projektilu, impaktoru; meteoroidy, planety-asteroidy, kometární jádra). V případě, že dvě tělesa se svou velikostí příliš neliší, dochází nejčastěji ke kompletnímu zničení (rozpadu) obou těles.

- Prohlubeň přibližně kruhového tvaru na povrchu všech pevných těles v planetární soustavě - planet, měsíců a planetek

- Velikost od několika mikronů až do velikosti přes tisíc kilometrů u velkých impaktivních pánví

- Dno typického impaktního kráteru leží níže než jeho okolí. Jeho vyvýšený okraj se prudce svažuje do středu kráteru a vnějším směrem pouze pozvolna

- Velikost kráteru především záleží na velikosti dopadajícího tělesa, na jeho rychlosti při dopadu a jeho složení. Velikost kráteru je také významně ovlivňována charakterem cílového tělesa.



Nejznámější kráter na Zemi-Barringerův kráter v Arizoně (nebo také Meteor crater)

Impaktní krátery na Zemi

Zdroj: www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html



Na Zemi je dnes potvrzeno **178** impaktních struktur (k 21.12.2010)

Impaktní kráter – vznik

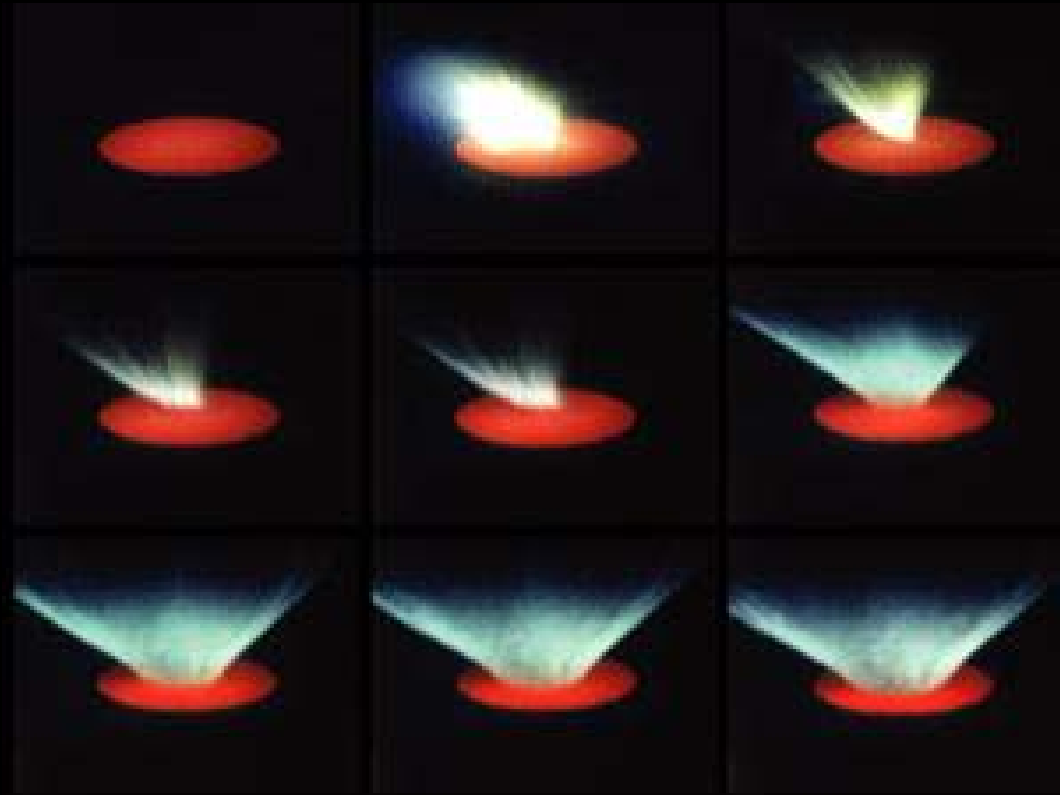
- Nejvíce impaktních kráterů na povrchu planet a měsíců ve Sluneční soustavě pochází z období jejího dotváření v době asi před 4,5 – 4 miliardami let. V této době probíhalo intenzivní tzv. kosmické bombardování.

- Samotný impaktní proces, při kterém impaktní kráter vzniká, se dá rozdělit do několika fází:

dotyk, komprese

vznik dutiny

dotváření vyhloubeného prostoru



(Pokus o napodobení impaktového procesu-vystřelování kuliček do jemnozrného materiálu)

Impaktní kráter – vznik

1. fáze: Dotyk a komprese

Probíhá nejkratší dobu, dochází k přeměně kinetické energie impaktoru na energii sesimických vln a teplo. V místě dopadu dochází ke stlačení hornin (vzniká přechodná dutina) a jejich šokové a tepelné přeměně. Materiál obou těles se vlivem zahřátí roztaví a částečně vypaří a ve formě rychlých výtrysků (jetů) je vyvržen po balistických drahách do stran.

Kinetická energie $E = \frac{1}{2} mv^2$

kde m je hmotnost impaktoru a v jeho rychlost.

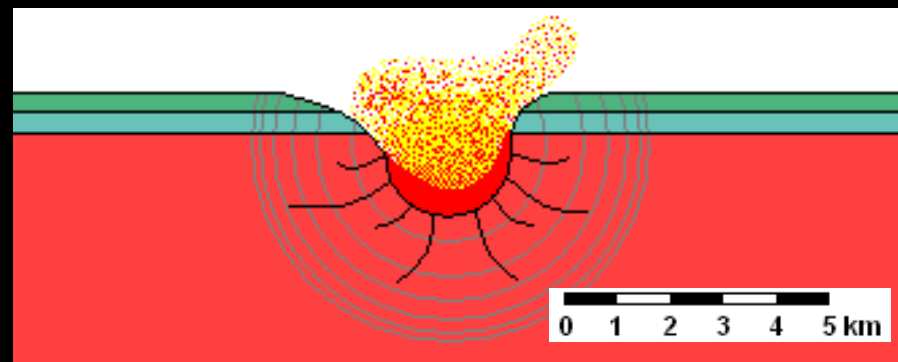
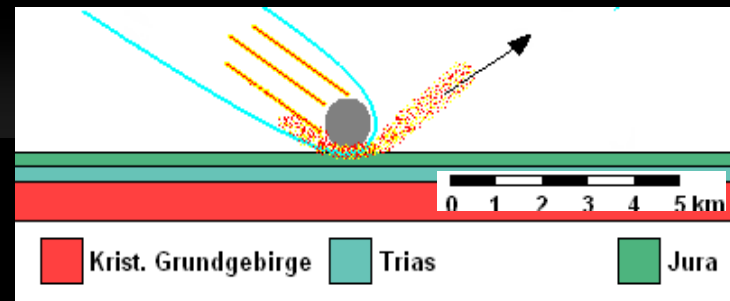
Rychlost dopadajících kosmických těles na Zemi:

~11-72 km/s

(30,29 rychlost oběhu Země kolem Slunce,

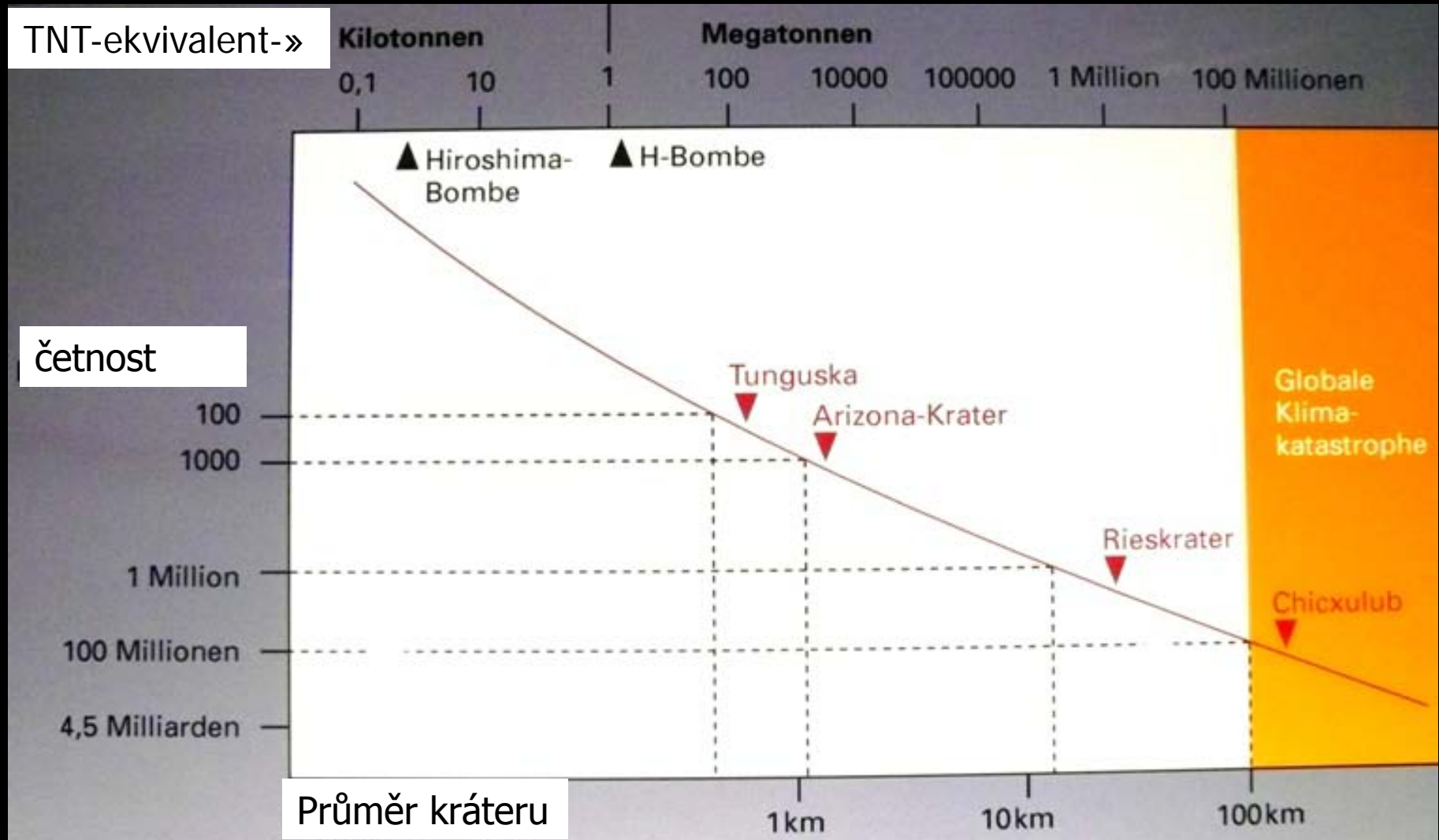
42,11 km/s úniková rychlost ze Sluneční soustavy ve vzdálenosti 1AU, s narůstající vzdáleností od Slunce se úniková rychlost zmenšuje; podle původní dráhy impaktoru se rychlosti sčítají nebo odčítají)

Příklad: Pokud by na Zemi dopadlo těleso o velikosti 1 km a mělo rychlost 15 km/s, pak by se při dopadu uvolnilo více jak 4×10^{17} kJ, což odpovídá 100 tisícům megatunám TNT, což představuje 5 milionkrát vyšší energii, než jaká byla uvolněna u prvních atomových bomb (20 kt TNT). Podobná energie by způsobila zemětřesení o síle vyšší než ~8,5 stupňů RichtEROVY škály.



Impaktní kráter – vznik

1. fáze: Dotyk a komprese



Impaktní kráter – vznik

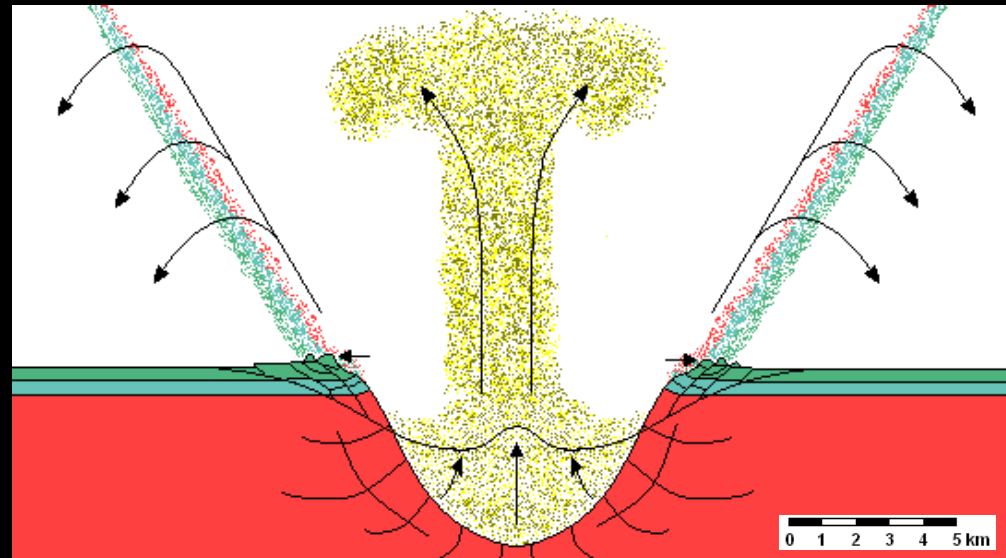
2. fáze: Vznik dutiny

Dochází k uvolnění (dekompresi) vlivem zeslábnutí šokové vlny a stlačený horninový materiál je opět vyzdvižen nebo vyvržen do okolí po balistických drahách (ejecta blanket). Podle velikosti dopadajícího tělesa může tato fáze trvat jen několik sekund až minut - čím větší je dopadající těleso, tím větší množství materiálu bylo roztaveno.

Množství energie uvolněné při impaktech je tak obrovské, že se jedná o krátery spíše výbuchové než dopadové (které vznikají v případě malých rychlostí-do cca 500 m/s, kdy dojde pouze k rozhrnutí podložního materiálu).

Proto má většina kráterů kruhový tvar, přestože většina impaktujících těles nedopadá kolmo k povrchu těles. Tvar kráteru může být protáhlý, pokud těleso dopadá na povrch pod šikmým úhlem a zároveň nízkou rychlostí, nebo u vysokorychlostních pádů pod úhlem nižším než 10° .

Velikost kráteru je 10-15x větší než je velikost tělesa před dopadem.



Impaktní kráter – vznik

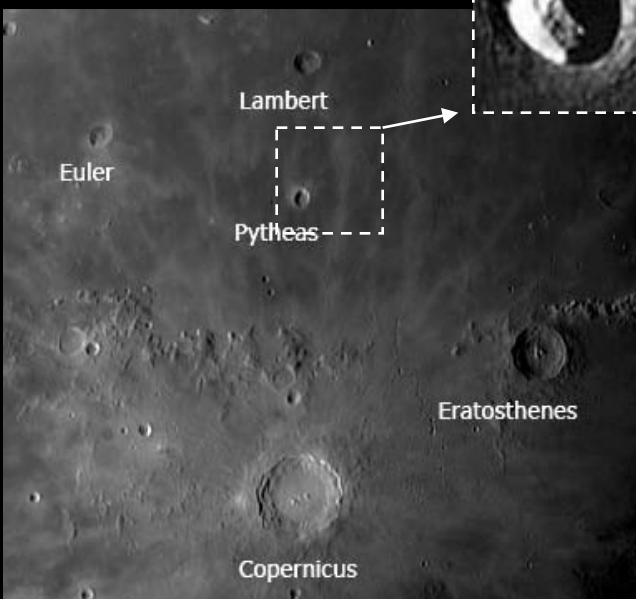
Na úhlu dopadu impaktoru závisí i výsledný charakter vyvrženin tvořících radiální paprsky (ejecta blanket). Pokud je úhel nižší než 45° , dojde k vyvržení materiálu převážně ve směru přiletu impaktoru a ve směru proti němu ejecta chybí (obr. uprostřed). Pod 20° může vznikat tzv. motýlkovité rozmístění (obr. vpravo).



Vertikální a ukloněný impakt (45°), laboratorní simulace

Impaktní kráter – vznik

Vyvržený materiál cestuje po balistických drahách a po dopadu na povrch může vyvolat sekundární impaktní krátery. Tento jev můžeme pozorovat například na Měsíci u kráteru Koperník (dole) nebo Tycho (vpravo)



Impaktní kráter – vznik

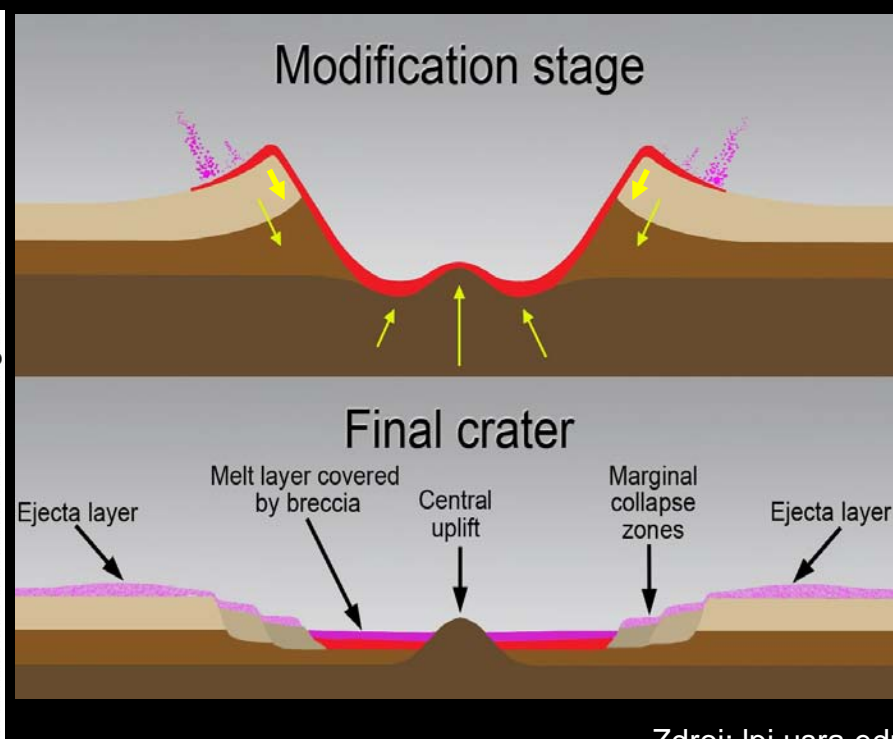
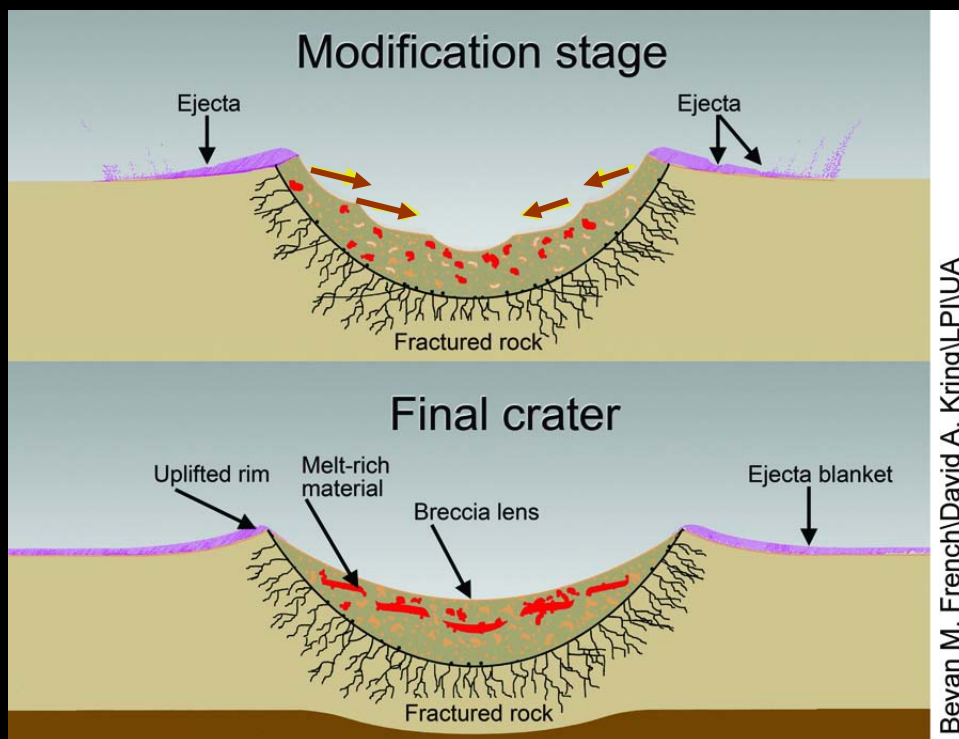
3. fáze: Dotváření tvaru kráteru (modifikace)

Vyvržený materiál se začne vlivem gravitace vracet zpět do vyhloubené dutiny.

U jednoduchých kráterů dojde jen k sesutí materiálů ze stěn kráteru (vlevo).

U velkých komplexních kráterů se stlačené podloží v místě dopadu elasticky vypruží zpět nahoru a vytvoří se středový pahorek (~kapka dopadnuvší na hladinu vody).

Gravitačním hroucením mohou vznikat terasovité útvary na valech kráteru. Usazením vyvrženého materiálu, vytvořením okraje a případně středového pahorku je impaktní proces ukončen.



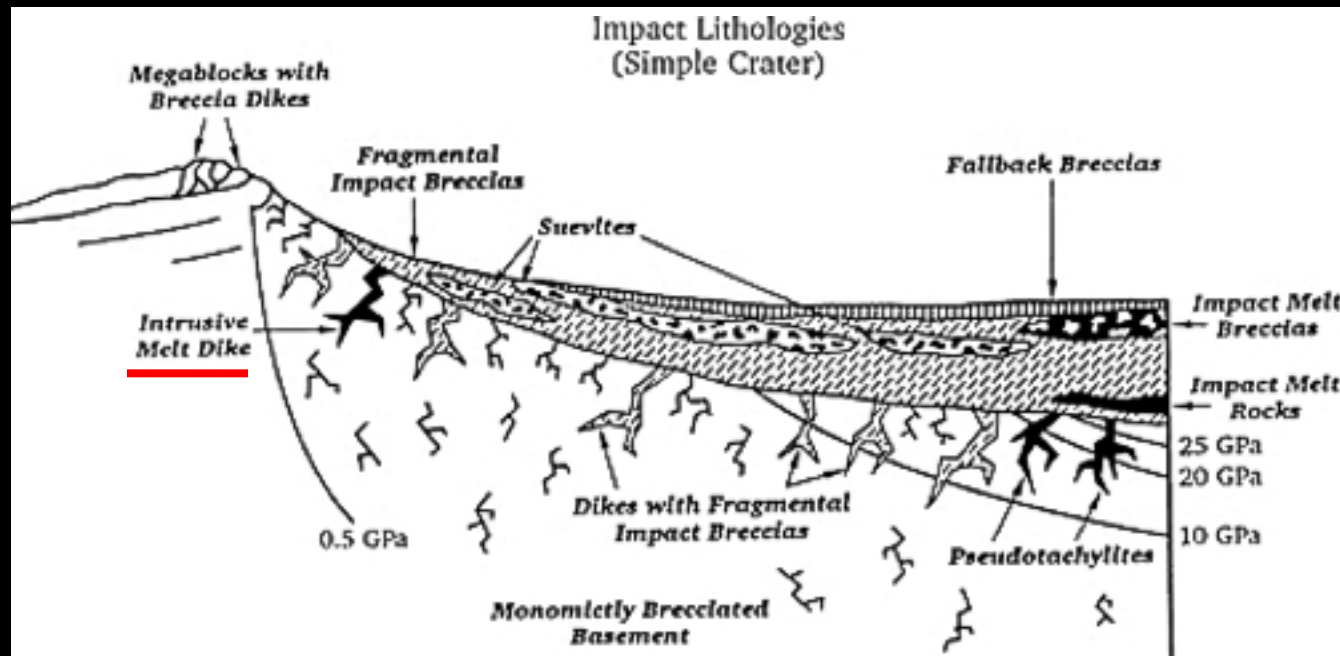
Bevan M. French | David A. Kring | LP/IIUA

Impaktní kráter – vznik

3. fáze: Dotváření tvaru kráteru (modifikace)

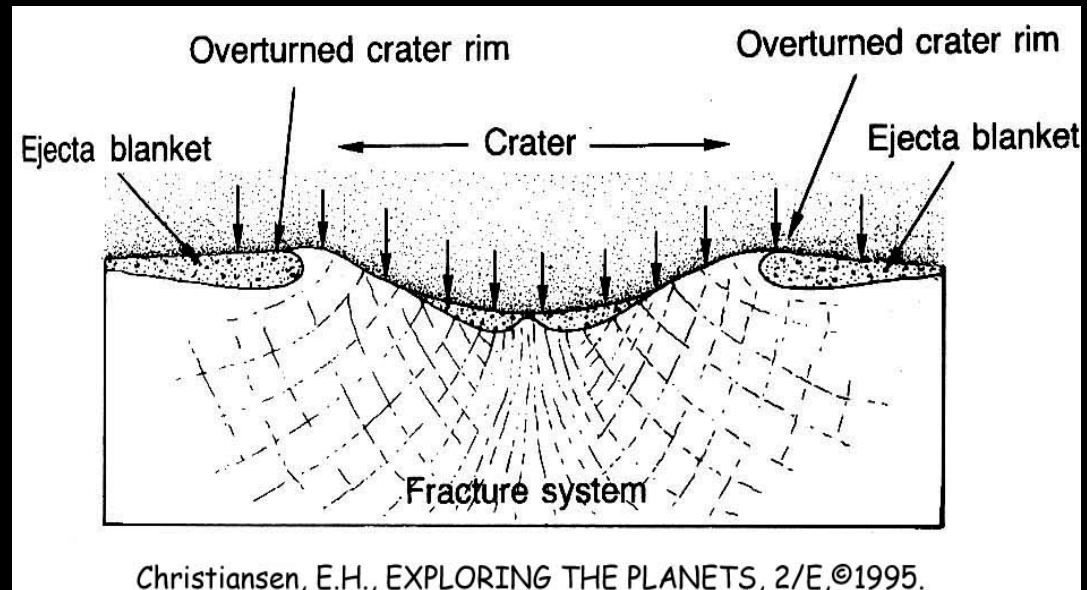
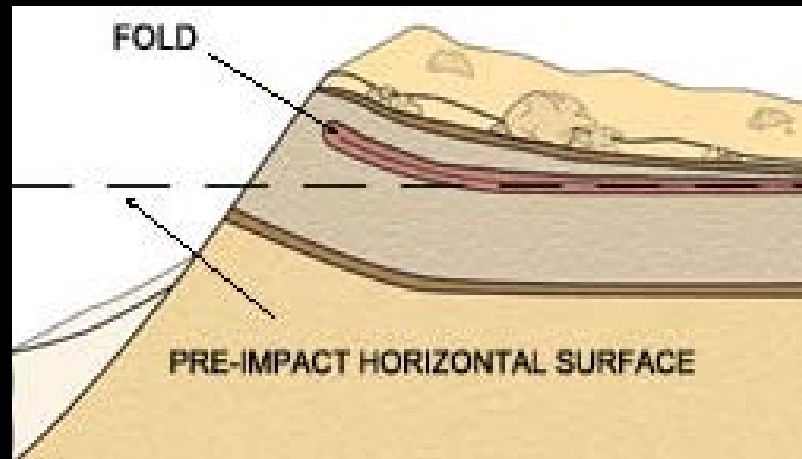
Primární, souvislá ejecta (blanket), která se pohybovala po balistických drahách, mohou být u komplexních kráterů překryta sekundárními vrstvami hornin (ejecta layers), které pronikly na povrch trhlinami z podloží. Tento jev je častý např. na Marsu a Měsíci, ale i na Zemi najdeme zástupce tohoto typu (Chicxulub, Haughton a Ries).

V případě např. Riesu by primární balistická ejecta blanket mohla reprezentovat impaktivá brekcie a nadložní vrstvy jsou tvořeny impaktivou taveninou (impact melt rock) vznikající ve finální fázi vzniku kráteru). Tyto sekundární uloženiny jsou odvozeny od hlubších úrovní podloží a jsou více šokově přeměněny než nadložní balistická ejecta.



Impaktní kráter – vznik

V průběhu impaktu bývá častým jevem převrácený sled hornin, kdy nadložní horniny jsou starší než podložní.



Simulovaný impakt - model



Impaktní kráter – vznik

- Video-simulace impaktového procesu

Vysokorychlostní digitální snímání (500 snímků za sekundu) vertikálního impaktu způsobeného měděnou kuličkou (rychlost 4.5 km/s) do jemnozrnného rozdrobeného materiálu (pemza), boční pohled



Impaktní kráter – vznik

- Video-simulace impaktového procesu

Vysokorychlostní digitální snímání (500 snímků za sekundu) vertikálního impaktu způsobeného měděnou kuličkou (rychlost 4.5 km/s) do jemnozrnného rozdrobeného materiálu (pemza), pohled shora



Impaktní krátery-terminologie

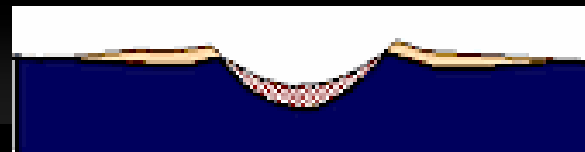
V závislosti na mnoha faktorech (velikost obou těles, rychlost a složení impaktoru, úhel dopadu, složení terčových hornin aj.) mohou vznikat různé typy kráterů:

Mikrokrátery

- způsobené nárazem mikrometeoroidů
- na tělesech bez přítomnosti atmosféry
- velikost kráterů μm -cm



Impaktní krátery-terminologie



V závislosti na mnoha faktorech (velikost obou těles, rychlost a složení impaktoru, úhel dopadu, složení terčových hornin aj.) mohou vznikat různé typy kráterů:

Jednoduché krátery

jsou menších rozměrů (do cca 10 km), mísovitého tvaru a bez centrálního pahorku. Jsou vyplněny sesunutým materiálem ze svahů kráteru.

<http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/craters/>

Wolf Creek, Western Australia, Australia

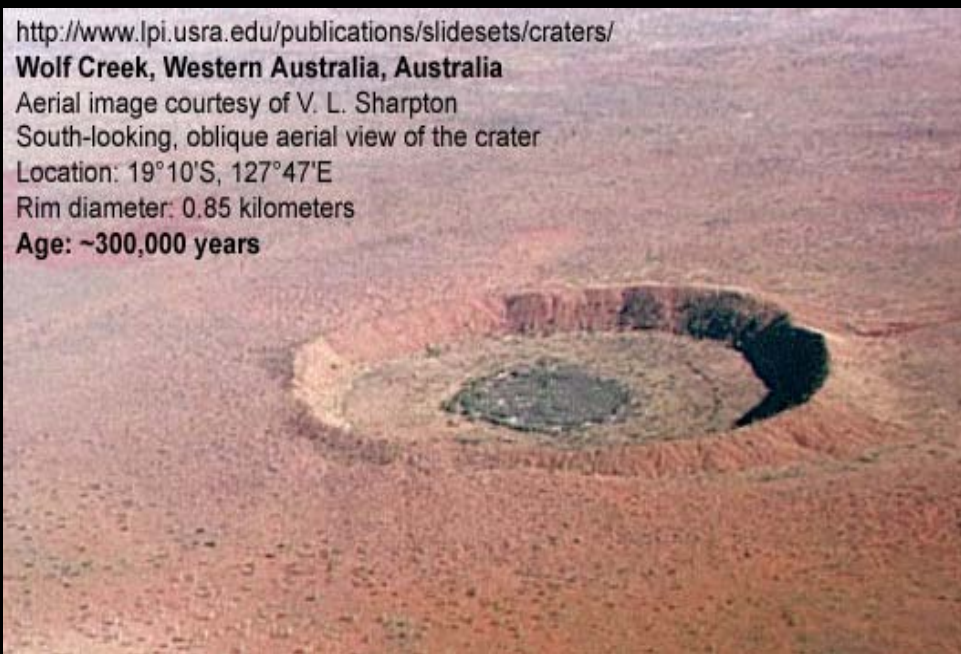
Aerial image courtesy of V. L. Sharpton

South-looking, oblique aerial view of the crater

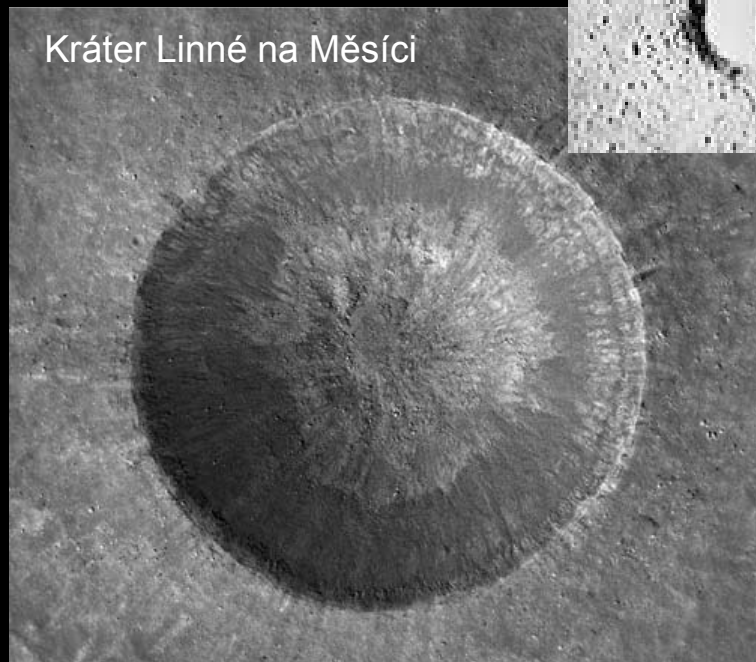
Location: 19°10'S, 127°47'E

Rim diameter: 0.85 kilometers

Age: ~300,000 years



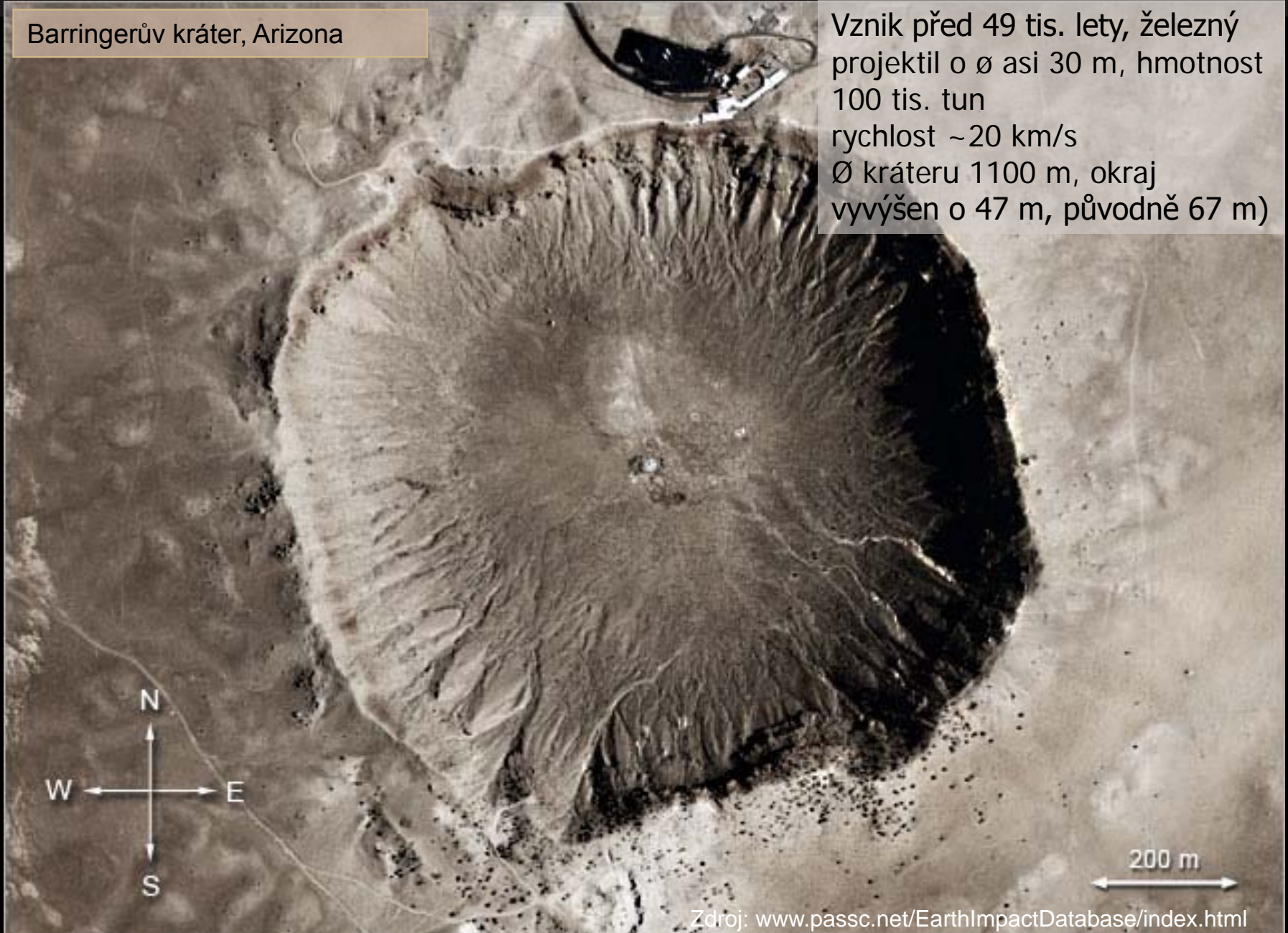
Kráter Linné na Měsíci



Impaktní krátery-terminologie

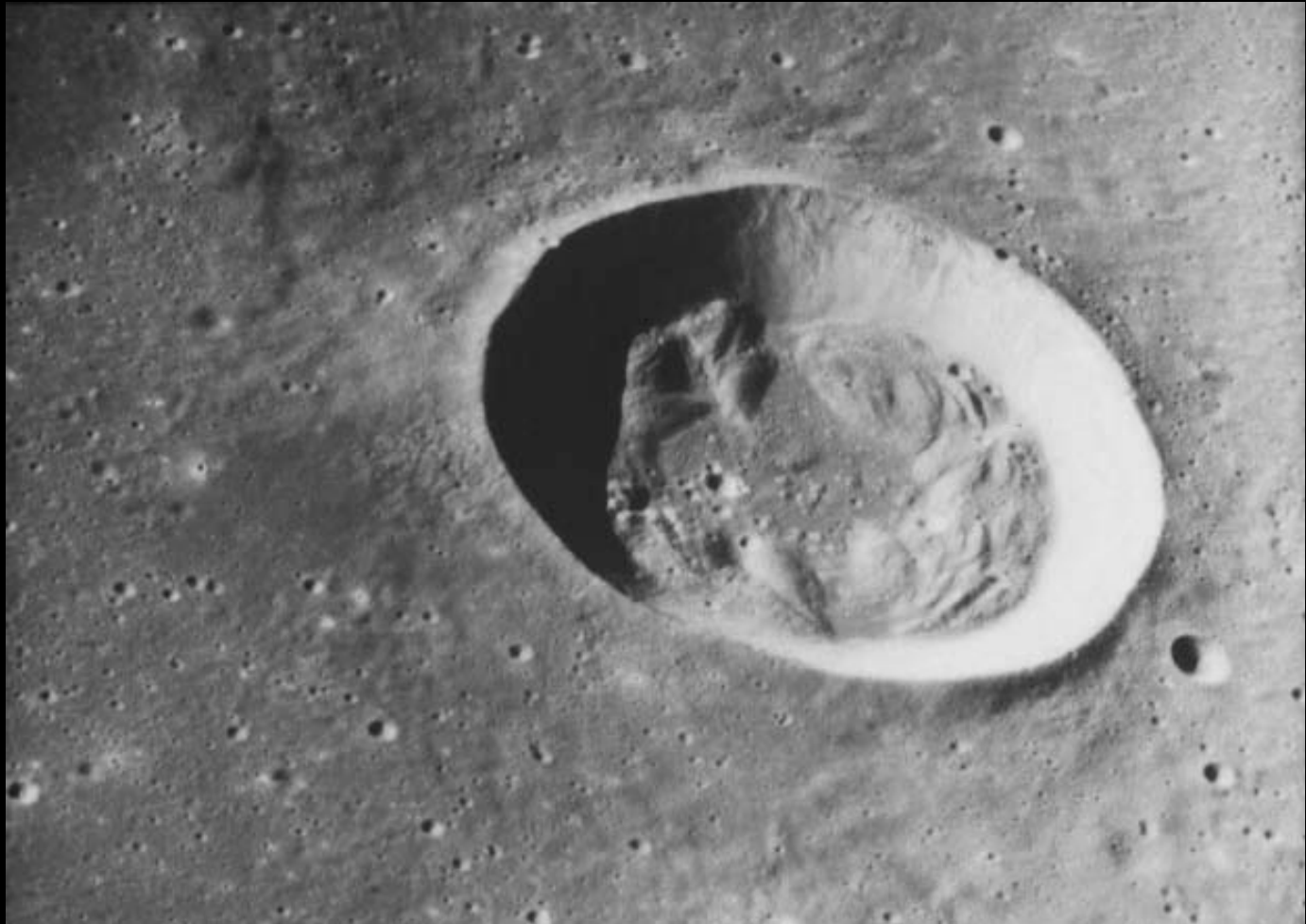
Barringerův kráter, Arizona

Vznik před 49 tis. lety, železný projektil o \varnothing asi 30 m, hmotnost 100 tis. tun
rychlost ~ 20 km/s
 \varnothing kráteru 1100 m, okraj vyvýšen o 47 m, původně 67 m)



Impaktní krátery-terminologie

Některé větší krátery nemají přesně definované parabolické dno a jsou proto označovány za **přechodové** mezi jednoduchými a komplexními krátery.

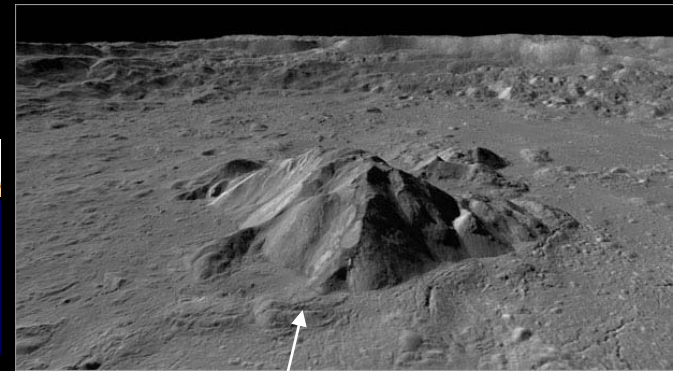
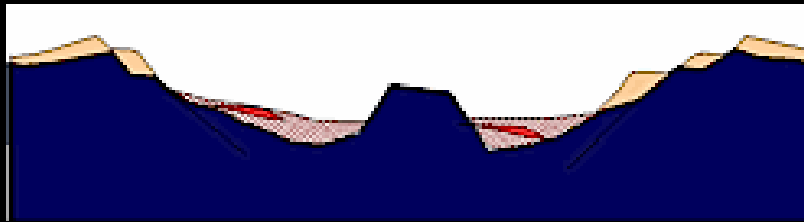


Kráter Bessel na Měsíci (průměr 16 km)

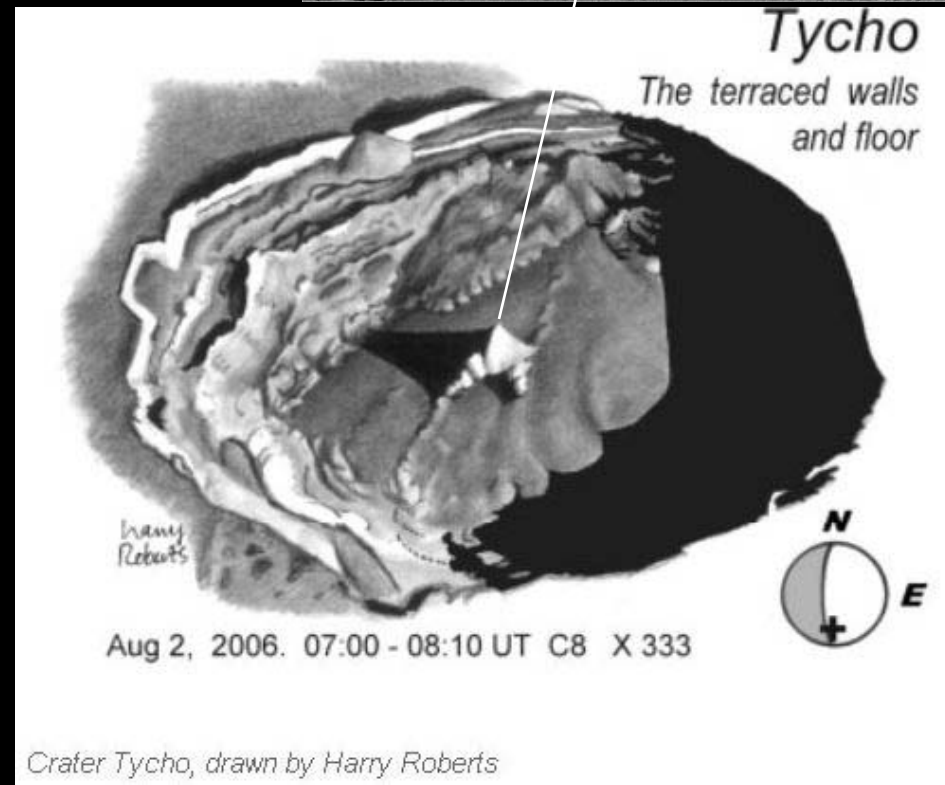
Impaktní krátery-terminologie

Komplexní krátery

jsou větších rozměrů a mají centrální pahorek nebo skupinku pahorků terasovité uspořádání vnitřních stěn valů-gravitační sesuvy středový pahorek je často rozdělen na několik kopců.



Středový pahorek kráteru
Nicholson na Marsu

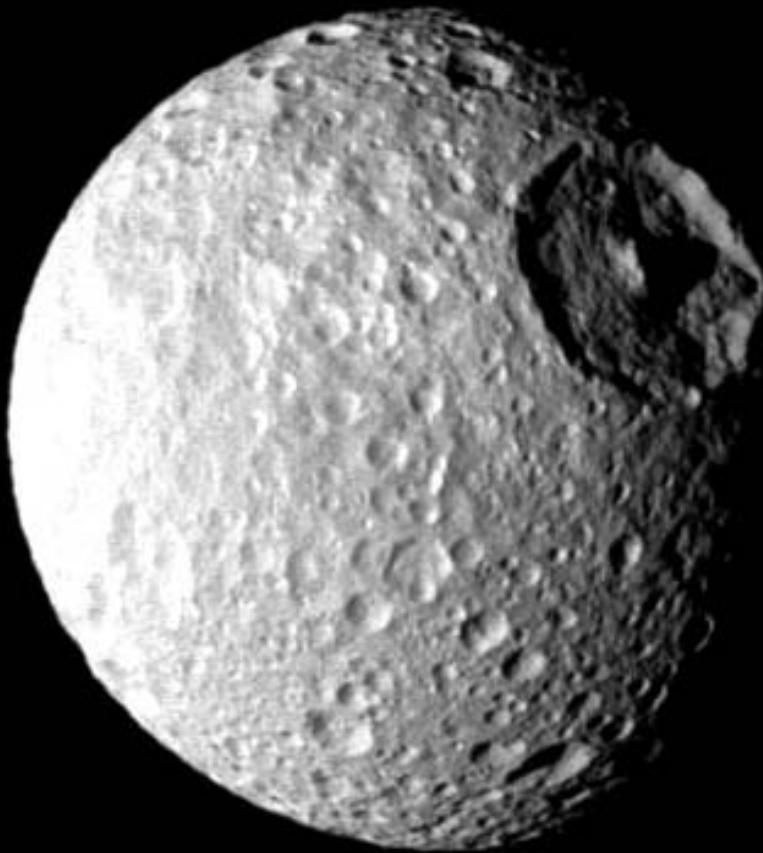


Crater Tycho, drawn by Harry Roberts

Impaktní krátery-terminologie

Saturnův měsíc **Mimas** (ø390 km) a jeho kráter **Herschel** (ø 130km). Vlivem impaktu došlo vzhledem k malému rozměru měsíce k deformaci a popraskání kůry na opačné straně měsíce.

Kráter Herschel



Opačná strana měsíce



Impaktní krátery-terminologie

Shoemaker-Levy 9

Duální, vícenásobné krátery

na povrchu těles může vzniknout současně soustava dvou a více kráterů:

- tzv. binární tělesa (podvojná, gravitačně zachycená)
 - v případech, kdy se těleso rozpadne při průletu atmosférou
 - v případě velmi šikmých dopadů (těleso se odrazí a opět dopadne, „žabky“)
- (Příklady: Ries, Clearwater lakes)

Binární asteroidy se vyskytují „všude“, zvláště hojné jsou mezi NEOs, většina v hlavním pásu asteroidů, 15 ± 4 % NEO jsou binární

Clearwater Lakes, Kanada, průměry: 32 a 22 km



Krátery na Ganymedovi (190 km dlouhý řetězec)



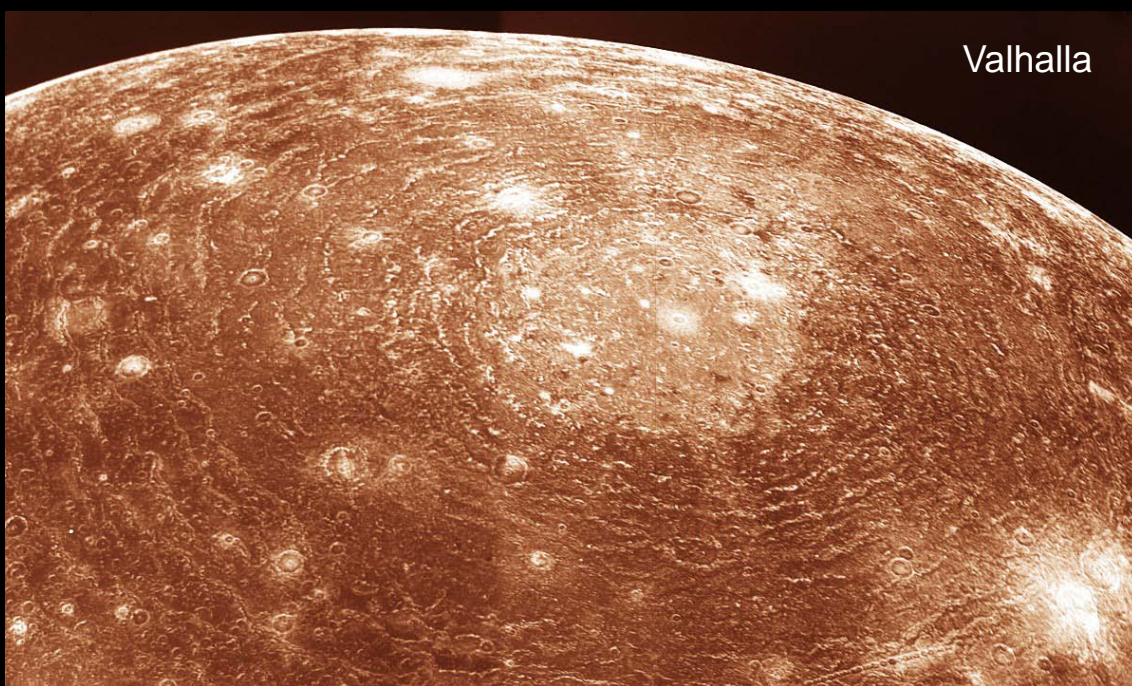
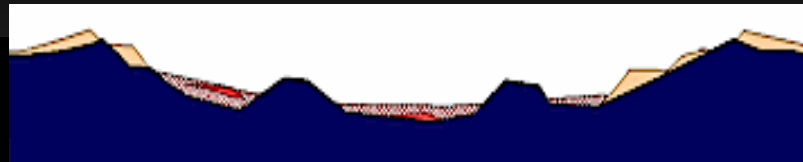
Messier a Messier A
na Měsíci

Impaktní krátery-terminologie

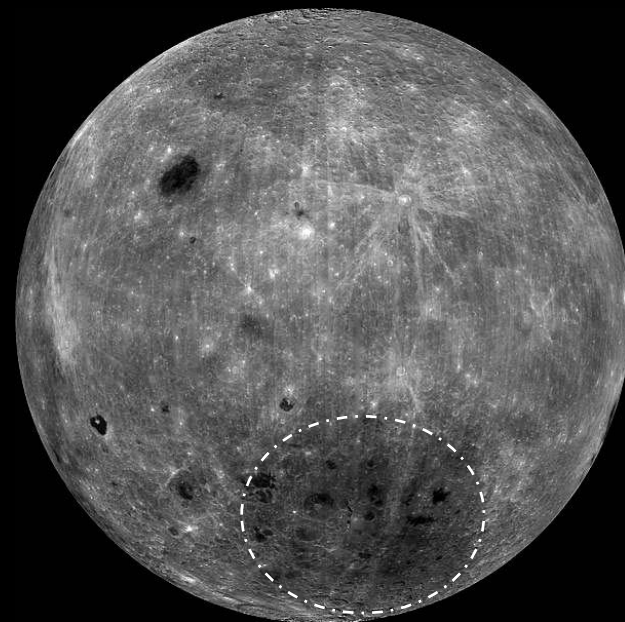
Impaktivní pánve

- velké impaktní struktury (stovky km v průměru).
- častý jev-několik kruhových valů-tzv. multiringové pánve (horniny se chovají plasticky, podobný efekt jako kapka, která dopadne na vodní hladinu), rovněž dochází k opětovnému zhroucení centrálního pahorku).

Největší multiringová pánev ve SS je **Valhalla** na Jupiterově měsíci Callisto. Centrální rovina má průměr 360 km, zatímco vnější kruhový val má průměr 2600 km. Největší impaktní struktura na Měsíci je pánev **South-pole Aitken** s průměrem ~2500 km a hloubkou 13 km.

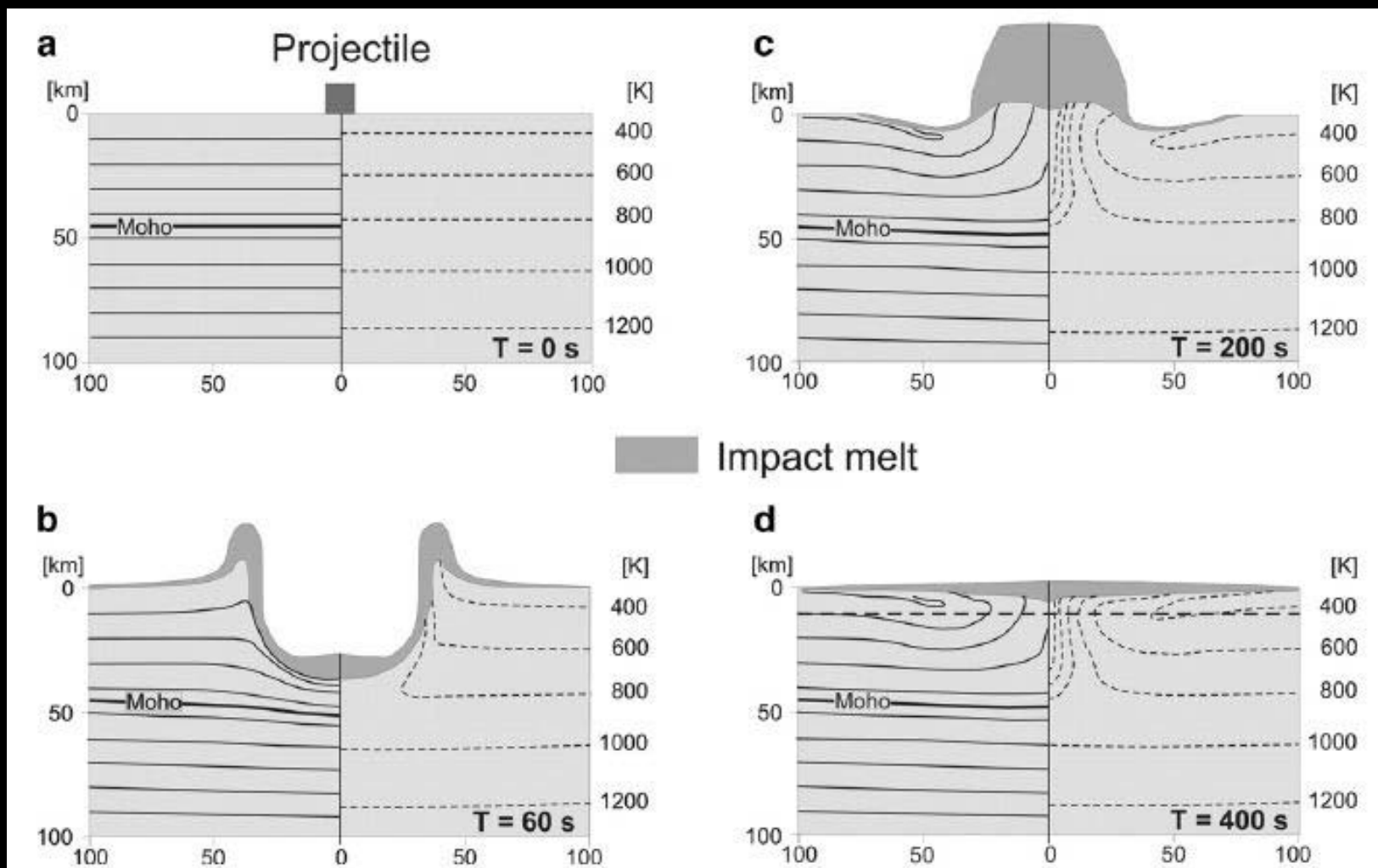


Valhalla



South pole-Aitken

Impaktní krátery-terminologie

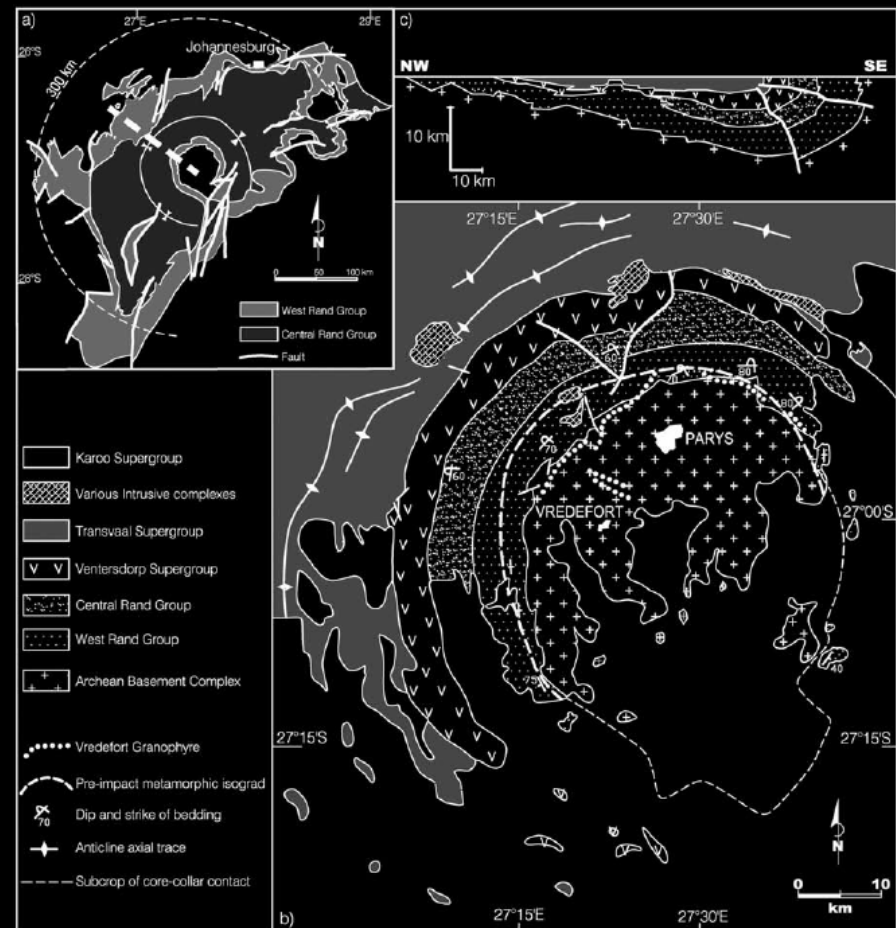


Fáze impaktního procesu založeny na hydrokódovém modelování u velkých kráterů (nad 200 km, Vredefort). Plná linie značí chování stratigrafických vrstev a tečkovaná linie označuje izotermy.

Impaktní krátery-terminologie

Vredefort dome (Jihoafrická republika)

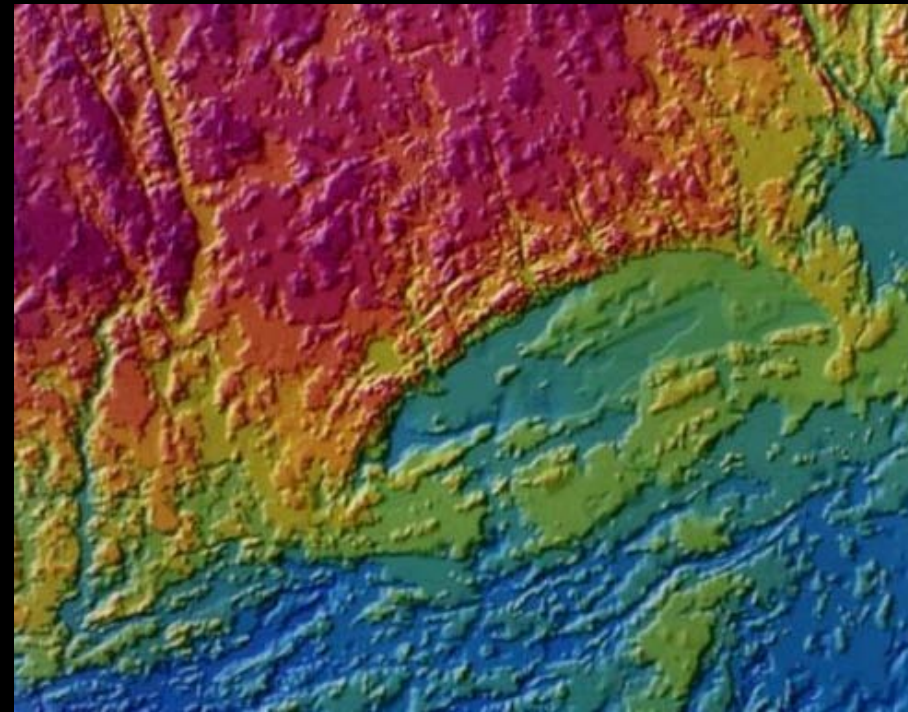
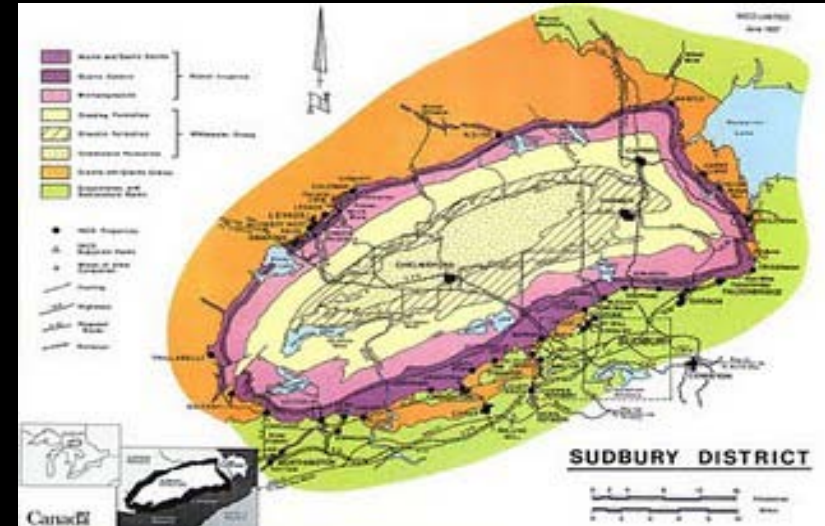
- největší potvrzený impaktní kráter na Zemi (250-300 km)
- stáří ~2 mld. let (2. nejstarší kráter po kráteru Suavjärvi v Rusku -2,4 mld. let, 16 km)
- těleso jenž jej vytvořilo mělo rozměry asi 5-10 km



Impaktní krátery-terminologie

Pánev Sudbury

Druhá největší impaktní struktura na Zemi (Ø 200 km)
a jedna z nejstarších ~ 1,8 mld. let
nynější rozměry 62x30x15 km, původně ~250 km

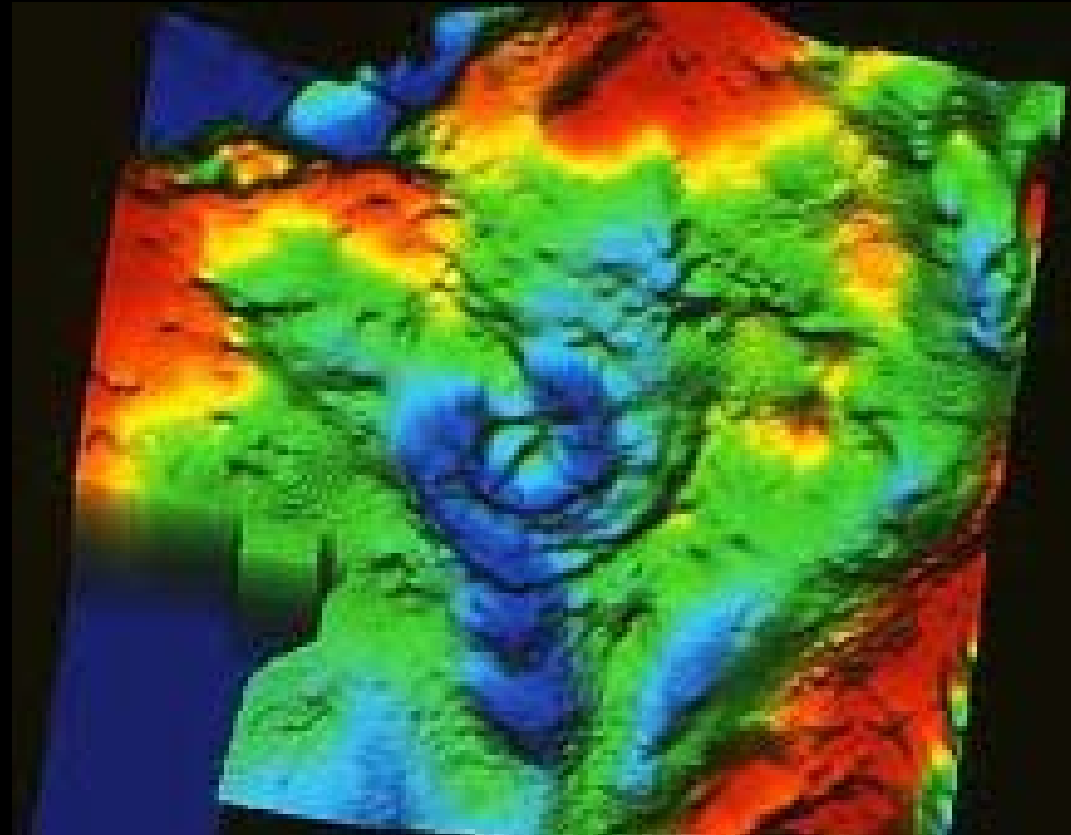
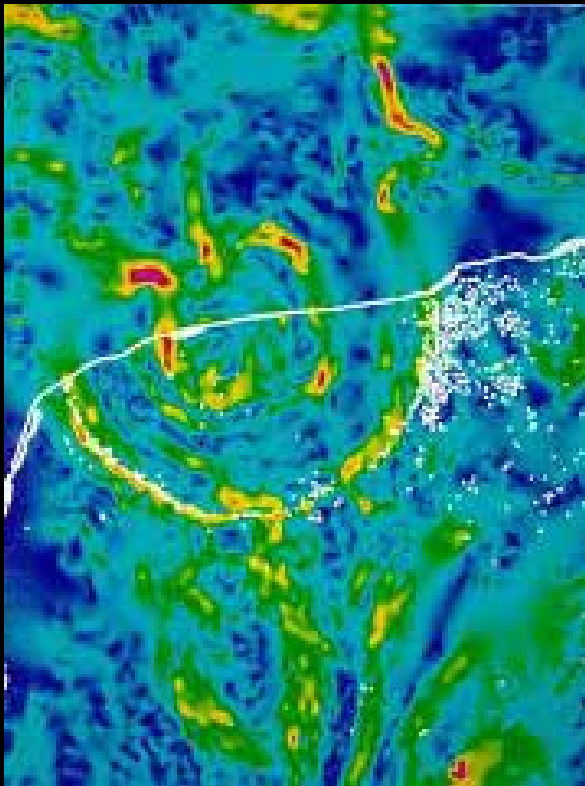


Impaktní krátery-terminologie

Chicxulub (poloostrov Yucatán, Mexiko (u města Chicxulub, podle kterého je pojmenován)

Třetí největší impaktní struktura na Zemi (\varnothing 180 km), velikost impaktoru >10 km. Stáří ~ 65 Ma.

Kráter byl objeven na základě geofyzikálního průzkumu zálivu (hledání ropných ložisek). Impaktní událost, která dala vzniknout Chicxulubu, byla hlavní příčinou velkého vymírání na přelomu křída/terciér (K-T).

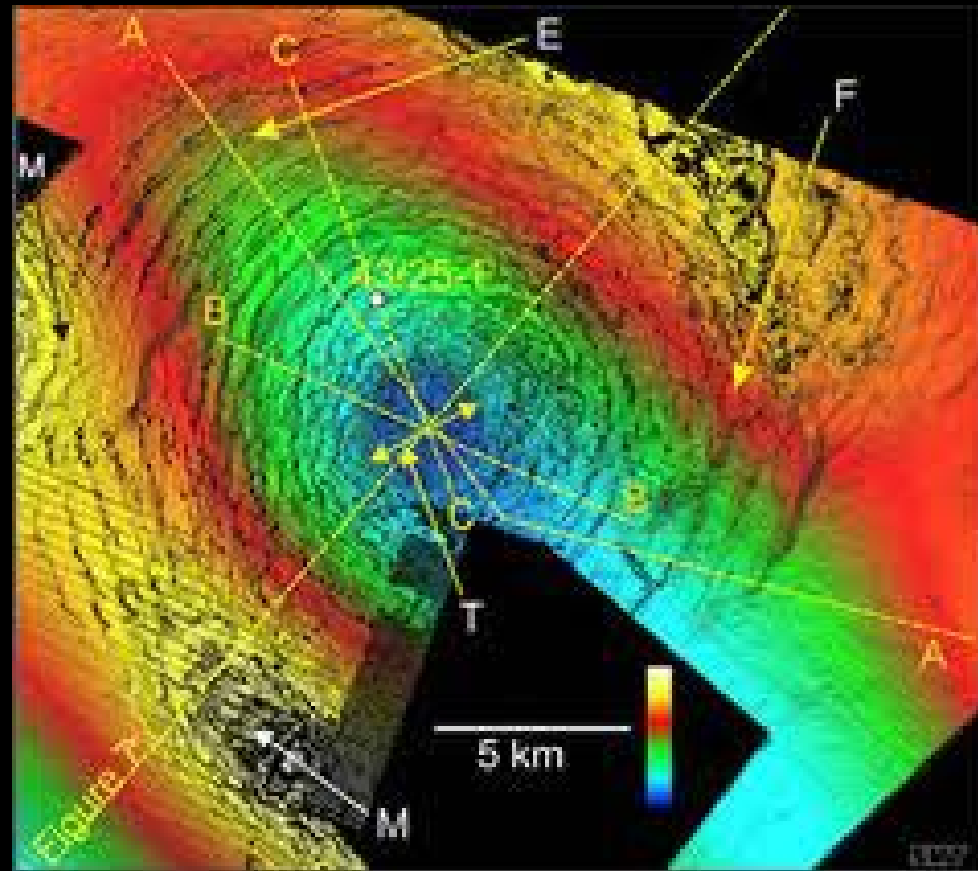


Impaktní krátery-terminologie

Energie uvolněná při impaktu byla ekvivalentem **100 000** gigatun TNT. Silné **tsunami** (důkazem zbytky vyplavené vegetace a hornin z tehdejšího břehu na karibském a severoamerickém pobřeží)

Zprávy o konkrétním rozpadu planetky **298 Baptistina**- před 160 miliony lety. Fragmenty této planetky možná dopadly po mnoha milionech let na Zemi (kde vytvořili kráter Chicxulub) a na Měsíc, kde vytvořily kráter Tycho.

Ze stejné doby také známo **více kráterů** (fragmenty asteroidu?)-kráter **Boltyš** (ø24 km, Ukrajina, stáří ~65 Ma) a kráter **Silverpit** (ø20 km, Severní moře, stáří 60–65 Ma, obr. vpravo). Další krátery, které by dopadly do tehdejšího oceánu Tethys, by se do současnosti nemusely dochovat, protože by je přikryly různé tektonické pohyby.



Impaktní eventy-vyhynutí-hranice K/T (-65 Ma)

Alvarez L., Alvarez W., Asar F., Michel H. (1980): Iridium Anomaly Approximately Synchronous with Terminal Eocene Extinctions.

Iridium- nabohaceno ve vrstvě s usazenin z konce křídý, až 100x vyšší koncentrace než v podložních a nadložních vrstvách. Ir je v zemské kůře vzácný prvek (váže se na železo a v průběhu vývoje planety kleslo do zemského jádra)-nabohacení pochází z mimozemského tělesa



Ir vrstva, Raton, Colorado



Luis a Walter Alvarez, K-T hranice, Gubbio, Itálie, 1981

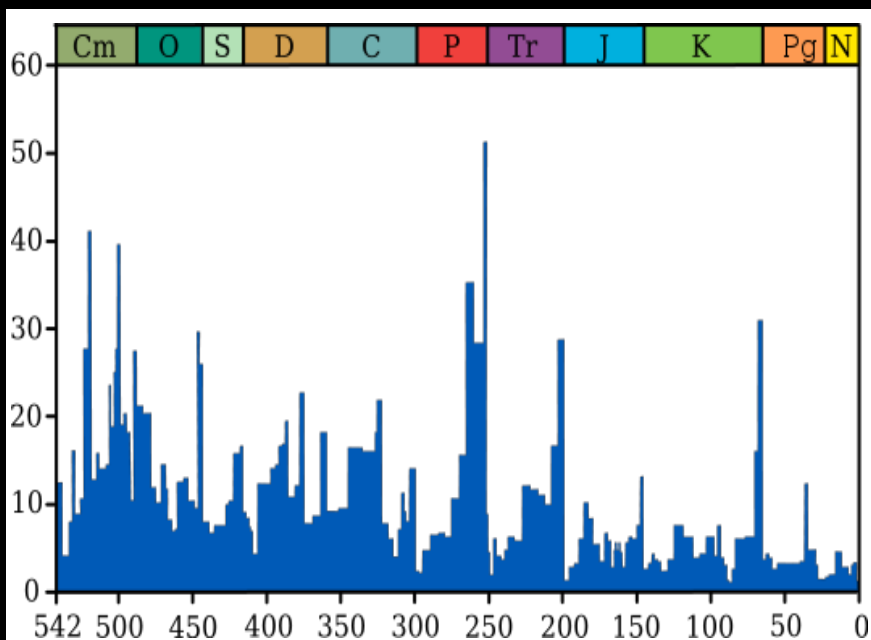


K-T hranice, Trinidad Lake State Park, Colorado

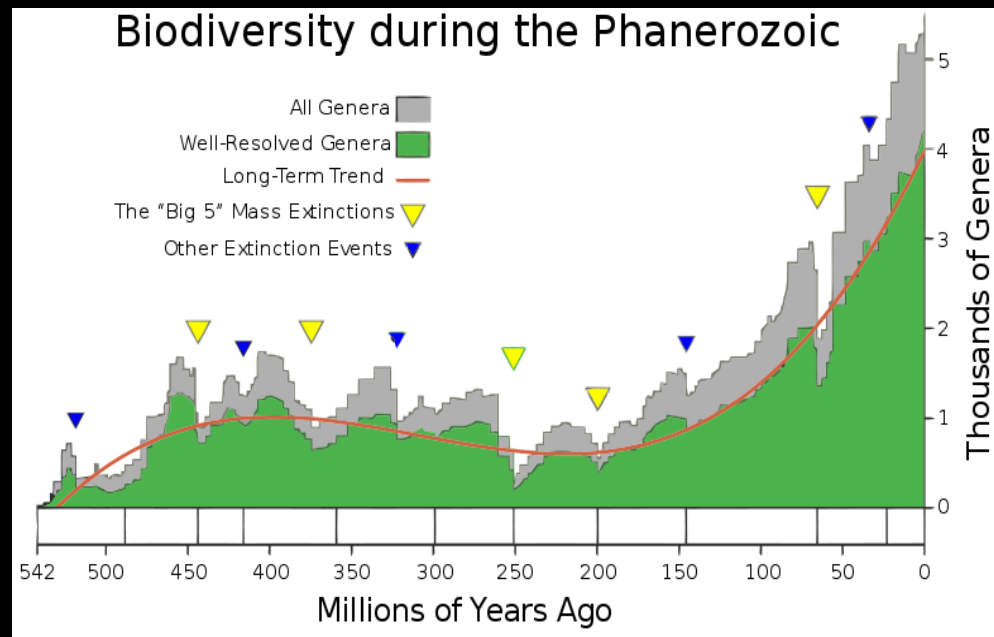
Impaktní eventy-vyhynutí-hranice K/T (-65 Ma)

Fosílie

- dinosauři-maastricht-populace na konci křídý-velcí dinosauři (Tyrannosaurus, Triceratops,...) - dostatek potravy, poté dinosauři náhle vyhnuli („dead clade walking“), ptakoještěři
- rostlinné fosílie-před vymíráním půda bohatá na pyl krytosemenných rostlin-poté málo pylu, hojné výtrusy kapradin
- mořský plankton (kokolity, měkkýši, nanoplankton)-rychlý úbytek na konci křídý, úplné vymizení amonitů



Graf zachycující procento vymírajících rodů mořských živočichů v daných časových obdobích (pouze org. schopny tvořit fosílie).



Biodiverzita života v průběhu fanerozoika (žluté Δ pět největších vymírání, šedá barva-všechny druhy

Impaktní eventy-vyhynutí

Další možné důvody vymírání

Impaktní eventy by dokázaly vysvětlit pouze velmi rychlé a náhlé vymizení organismů (deset let po dopadu), zároveň se někteří vědci domnívali, že je málo pravděpodobné, aby jediná událost mohla vést k tak masivnímu vymírání tak širokého spektra organismů, proto se brali v úvahu i jiné další možné příčiny podporující celosvětové vymírání organismů.

zvýšený vulkanismus (**Dekanské trapy**, Indie, doba trvání 800 tis. let, ± 65 Ma)-prach, S aerosoly-snížení fotosyntézy; CO₂-skleníkový efekt.

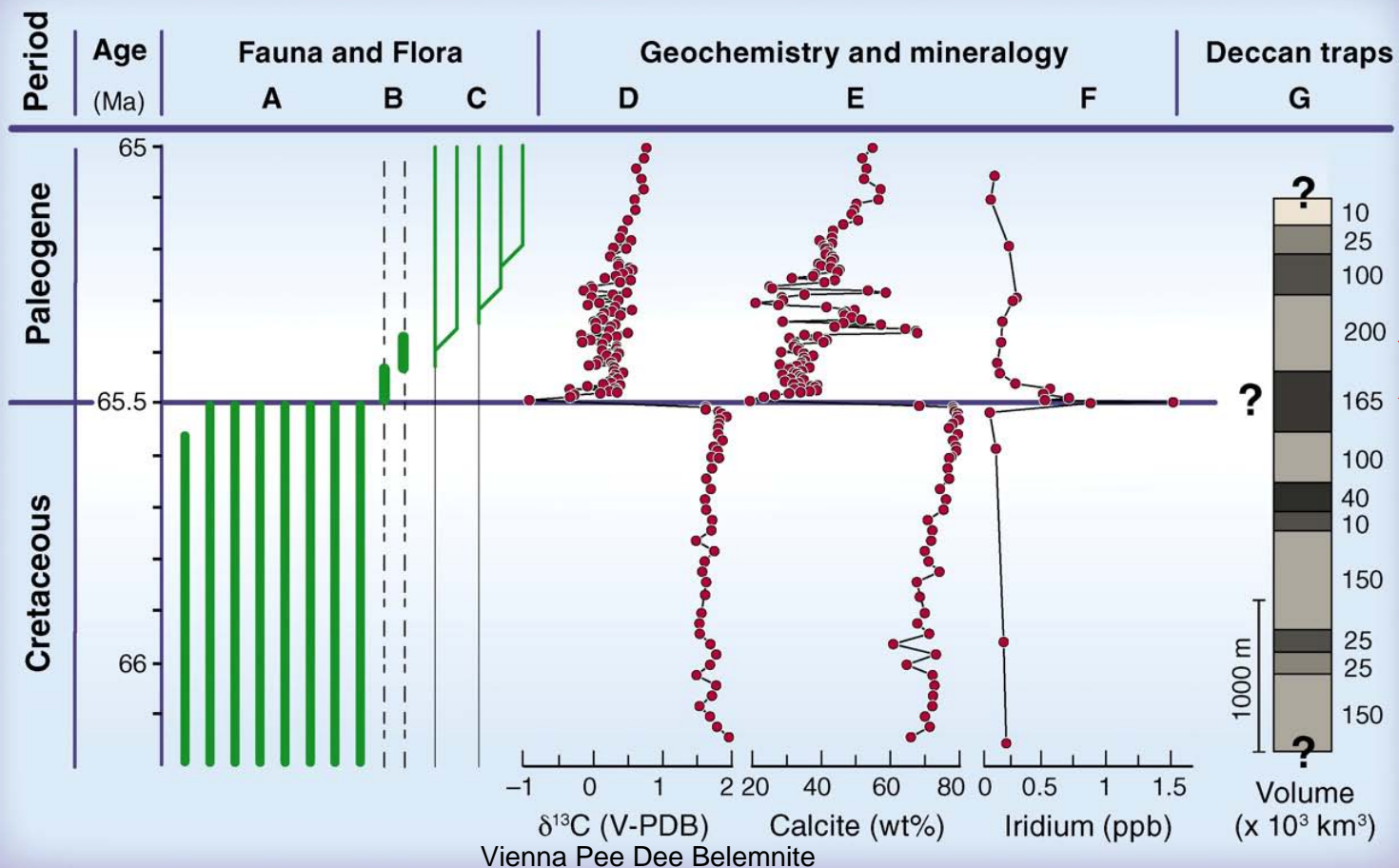
X velké impaktní události mohou svou kinetickou energií indukovat vznik nebo zvýšení aktivity vulkanické činnosti (např. Vredefort-Bushveld BIC formation - bohaté PGE).

snížení mořské hladiny- v období maastrichtu došlo k největšímu poklesu hladiny moří v rámci druhohor, pravděpodobně došlo ke snížení aktivity středooceánských hřbetů-pod vlastní vahou poklesly



Impaktní eventy-vyhynutí

2010: Mezinárodní panel vědců potvrdil na základě 20 let výzkumu, že hlavním důvodem masového vyhynutí na rozhraní K-T je impakt Chicxulub



negativní $\delta^{13}\text{C}$ anomálie (D)
 Karbonátová sedimentacev mořích (E)
 Nabohacení PGE (F)

Stratigrafie a schematické znázornění biotických událostí v období kolem K-T hranice a korelace s geochemickými a mineralogickými daty z jader ODP 207 (Ocean Drilling Program, Atlantik) a hlavní erupce Dekanských trapů.
 P. Schulte et al. (2010), Science

Impaktní eventy-vyhynutí

Důvody vymírání při velkých impaktních eventech

-lesní **požáry** na celé planetě (prach, SO₂, úbytek vegetace)

-**prach v atmosféře**-úbytek slunečního záření až na jeden rok-úbytek fytoplanktonu a některých rostlin-základ potravního řetězce-úbytek býložravců-masožravců; naopak všežravci, hmyzožravci, mrchožrouti měli potravy dostatek (savci, krkodýli, mořské organizmy žijící u dna živící se detritem)

-**kys. sírová v atmosféře**-až na deset let mohla omezit sluneční záření (až 20%), původ z hornin v místě dopadu-kontinent. šelf (sádrovec).

-při dopadu byly do zemské atmosféry vyvrženy velké kusy hornin- při zpětném průletu atmosféru na zem vyvolaly velmi **silnou tepelnou vlnu a infračervené záření**, s délkou trvání několika hodin (to mohlo zabít všechny organizmy tomuto záření vystavené) a navíc způsobit celosvětové ohňové bouře (vysoký obsah kyslíku v pozdní křídě). Požáry mohly způsobit nárůst koncentrace CO₂- **skleníkový efekt**- další vlna vymírání skupin organismů, které první fáze přežily.



Impaktní eventy-vyhynutí

Video <http://www.youtube.com/watch?v=dNRTtLLuNM8>

Prevence impaktové události

NEO — Near Earth Object (blízkozemní objekt, přísluní nižší než 1,3 AU)

PHOs — Potentially hazardous objects

NASA: -1992: program na objevení, ověření a sledování objektů s dráhou křížící dráhu Země

-2008: objeveno že 90% ze všech NEO s velikostí nad 1 km je rizikových (potenciální srážky se Zemí, menší tělesa by globálně neohrozila život na Zemi)

-2009: objeveny další objekty (nad 2 km), stále nejsou identifikována všechna tělesa, nyní několik tisíc objektů

Bylo objeveno mnoho potenciálně nebezpečných planetek, jako např. **Apophis**, kde byla 3% šance, že by se v roce 2029 mohla srazit se Zemí (270 m). Na základě nových pozorování byla srážka vyloučena.



PHO **Toutatis** ($4,5 \times 2,4 \times 1,9$ km !) proletěl v roce 2004 kolem Země ve vzdálenosti pouze 2,3x větší než vzdálenost Země-Měsíc.

Prevence impaktové události

Dva základní postupy pro snížení rizika při srážce Země s cizím tělesem:

- fragmentace na menší části
- zpomalení nebo odchylení pomocí energetických zdrojů (elektromagnetický, kinetický, gravitační, solárně-termální, nukleární)

Problémy:

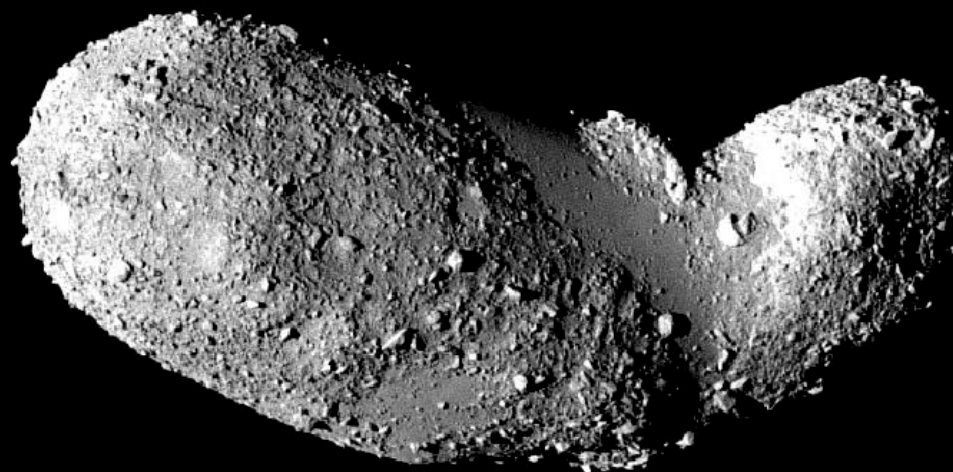
Více menších těles může mít při srážce se Zemí rovněž globálně destruktivní účinky (energie zůstane stejná v případě jednoho velkého tělesa / více menších těles)

Metody:

Přímé-nukleární zásah je levný (relativně), rychlý a účinný, ale pouze v případě pevných těles (exploze na povrchu nebo poblíž povrchu), ne v případě nepevných těles (komety, „rubble pile“—» shluky balvanů držící pohromadě vlastní gravitací, hrozí exploze uvnitř a dezintegrace).

Nepřímé-přístroje by putovaly k tělesu dlouhou dobu a neměly by možná dostatek času k odchylení nebo zbrždění jeho dráhy.

Binární tělesa



První identifikovaný „Rubble pile“ asteroid Itokawa 25143

Prevence impaktivé události, NEO

USA-2005: zákon – „The George E. Brown, Jr. Near-Earth Object Survey Act“ o detekci, popisu, katalogizaci a charakterizaci NEOs a komet.

„**Spaceguards**“ (ochrané projekty):

Země:

1996-**LINEAR**: 65% všech NEO, N. Mexiko

1980-**SPACEWATCH**-Kitt Peak, Arizona

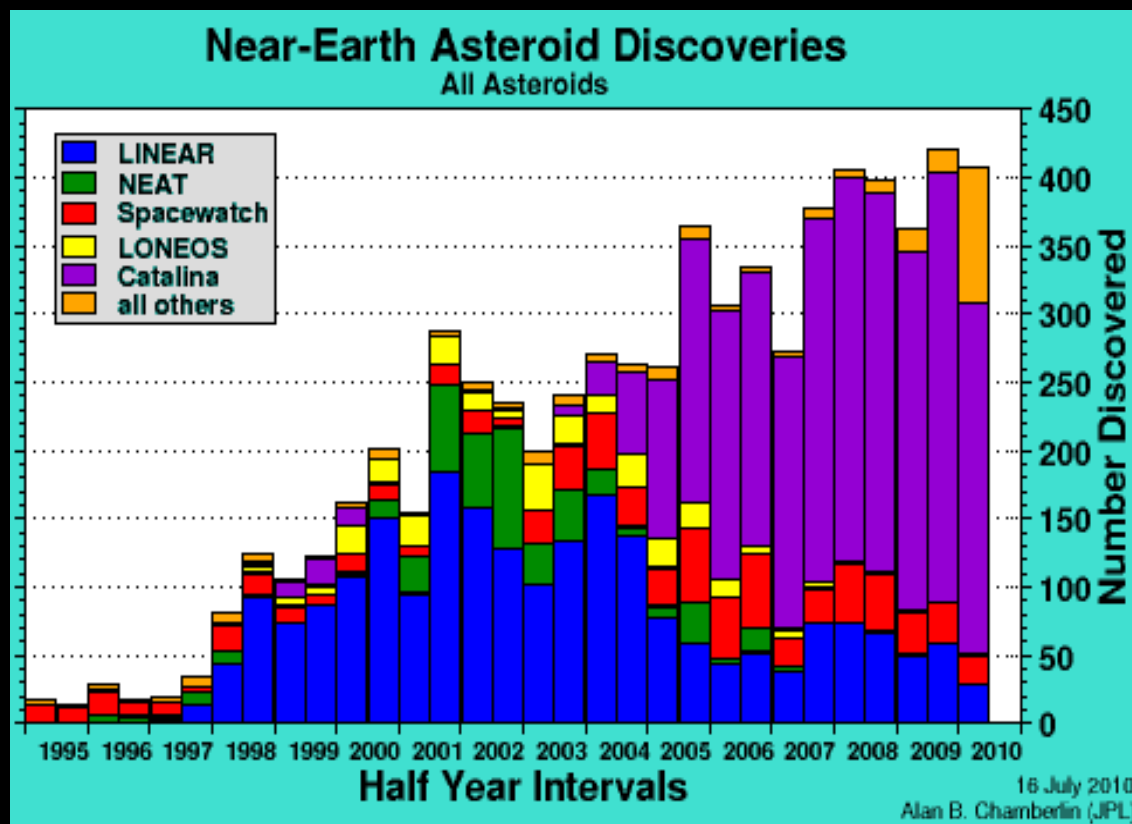
NEAT (Near Earth Asteroid Tracking)

LONEOS (Lowell Observatory NEOs)

oběžná dráha:

WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)

NEOSSAT aj.



Prevence impaktivní události, NEO

Monitoring je důležitý-několik ukázek ohrožení Země:

1972: objekt-známý jako The Great Daylight 1972 Fireball-o velikosti 10 m byl pozorován a nafilmován při průletu atmosférou nad USA. Šlo o tečný průlet, objekt se „odrazil“ od atmosféry a pokračoval dále do vesmírného prostoru. Kdyby dopadl na povrch Země, energie by dosáhla ekvivalentu několika atomových bomb.

1989: objekt o \varnothing 300 m, 4581 Asclepius, minul Zemi o 700 tis. km v místech, kde se před pouhými 6 hod nacházela Země (pro představu vzdálenost Země-Měsíc je 360-405 tis. km). Kdyby došlo k impaktu, energie by byla 1000x vyšší, než energie nejsilnější atomové bomby.

2004: \varnothing 30 m asteroid 2004 FH, 43 tis. km (1/10 vzdálenosti Z-M). Předpokládá se, že k takovému „setkání“ může docházet každé dva roky.

2004: 2004 FU162 – pouze 6,5 tis. km! Protože byl malý (6 m), rozpadl by se při průletu atmosférou. Tento objekt byl detekován pouhou hodinu před průletem.

2009: 2009 DD45, vzdálenost 72 tis. km, velikost přibližně 35 m.

2010: 2010 AL30, vzdálenost 122 tis. km, velikost 10–15 m. Kdyby zasáhl Zemi, v atmosféře by vznikla exploze (air burst) o ekvivalentu 50-100 kT (Hiroshima -13-18kT).

+Air burst: **1908 Tunguska**, **2008 TC3**

Air burst (výbuchy nad povrchem Země)

Tunguský kráter?

Zatím nebyl potvrzen, ale italský tým vědců vedený L. Gasperinim od r. 2006 tvrdí, že objevil dopadový kráter. Jde o téměř kruhové jezero Čeko, nacházející se asi 8 km od epicentra exploze. Jezero o průměru 300 m má velmi neobvyklý příkrý trychtýřovitý profil. Na rozdíl od ostatních jezer v této oblasti má velmi strmé stěny, svažující se do hloubky 50 m. Ve středu jezera, asi 10 m pod usazeninami, objevili „hutnější hmotu“, o níž si myslí, že může být fragmentem tělesa, které narazilo do Země. Kráter ale možná vyhloubil pouze fragment původního tělesa, které explodovalo v atmosféře. Předpokládaná hmotnost a velikost tělesa je 1.5×10^6 kg (průměr ~10 m).

Další události:

13.8., 1930, Curuçá River, Brazílie

31.5., 1965, jihovýchodní Kanada

17.10., 1966, jezero Huron, USA

5.2., 1967, Vilna, Kanada

22.10., 1979, Indický oceán

19.1., 1993, Lugo, severní Itálie

6.6., 2002, Středozemní moře, Řecko-Libye



Air burst (výbuchy nad povrchem Země)

30.6., 1908, Tunguska, 60 km z-svz od Vanavary, Krasnojarsk, 10–15 megatun TNT, výška exploze 8.5 km

V oblasti přibližně 2000 km² bylo vyvráceno a přelámáno kolem 60 milionů stromů. Zvuk výbuchu, seizmické efekty a zjasnění noční oblohy bylo zaznamenáno ve velké části Evropy a celé střední Asii. Většina vědců je přesvědčena, že se jednalo o kamennou planetku, která explodovala ve výšce 5 – 10 km nad zemským povrchem.

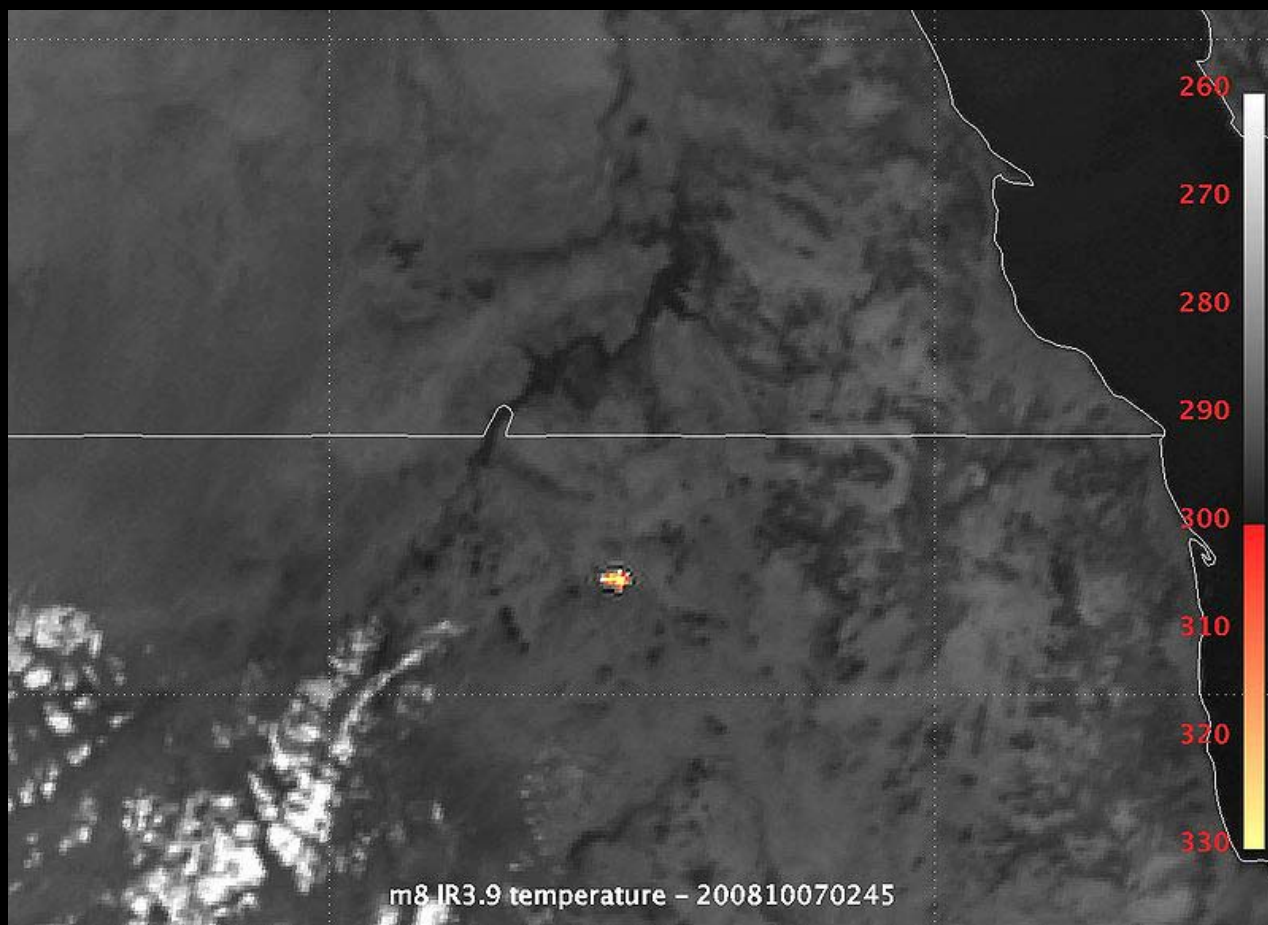
V roce 1983 publikoval Z. Sekanina práci, která kritizovala původně myšlený kometární původ tělesa, protože kometa by vybuchla mnohem výše než v 10 km. Tělesem měla být kamenná planetka. Tento názor ve vědecké obci nyní převažuje.



Air burst (výbuchy nad povrchem Země)

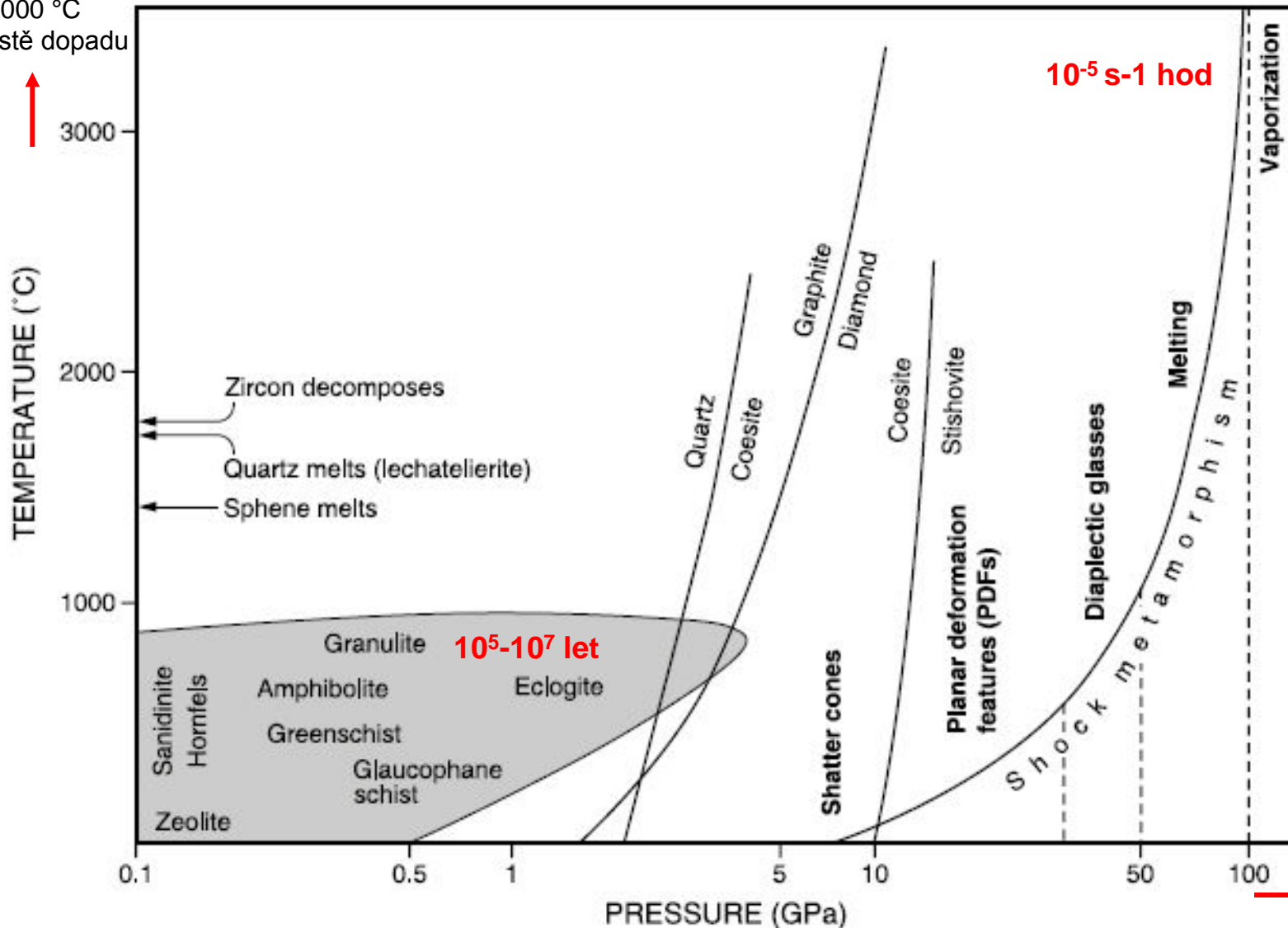
7.11., 2008, Nubijská poušť, Súdán, 0.9–2.1 ktun TNT. Objekt byl identifikován před dopadem (jde o první podobný případ) a označen jako **2008 TC3**. Systematické hledání fragmentů - nalezeno 10,5 kg (600 fragmentů). Původní těleso 2-5 metrů. Exploze 37 km nad povrchem. Jednalo se o vzácný typ meteoritu (ureilit, název podle místa prvního nálezu ve vesnici Novy Urey v Rusku). V těchto fragmentech byly nalezeny aminokyseliny-stavební kameny života). Ureility pravděpodobně vznikly ze Sluneční pramlhoviny v rané fázi formování Sluneční soustavy.

IR snímky výbuchu,
Meteosat 8 /Eumetsat



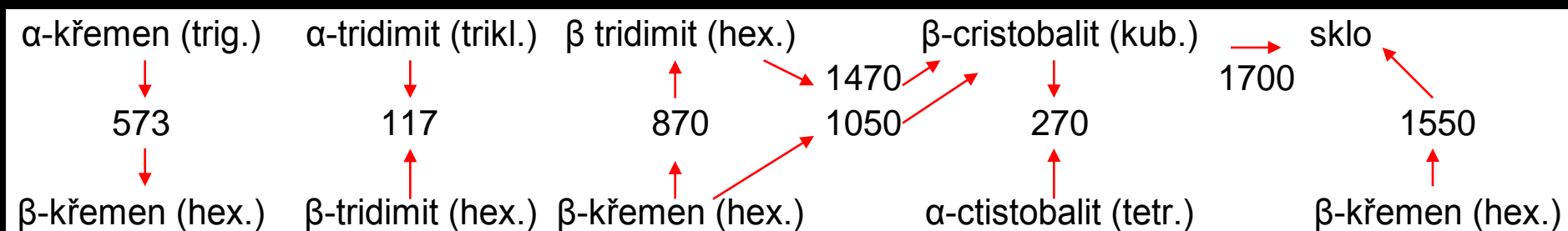
Podmínky šokové metamorfózy

>10 000 °C
v místě dopadu

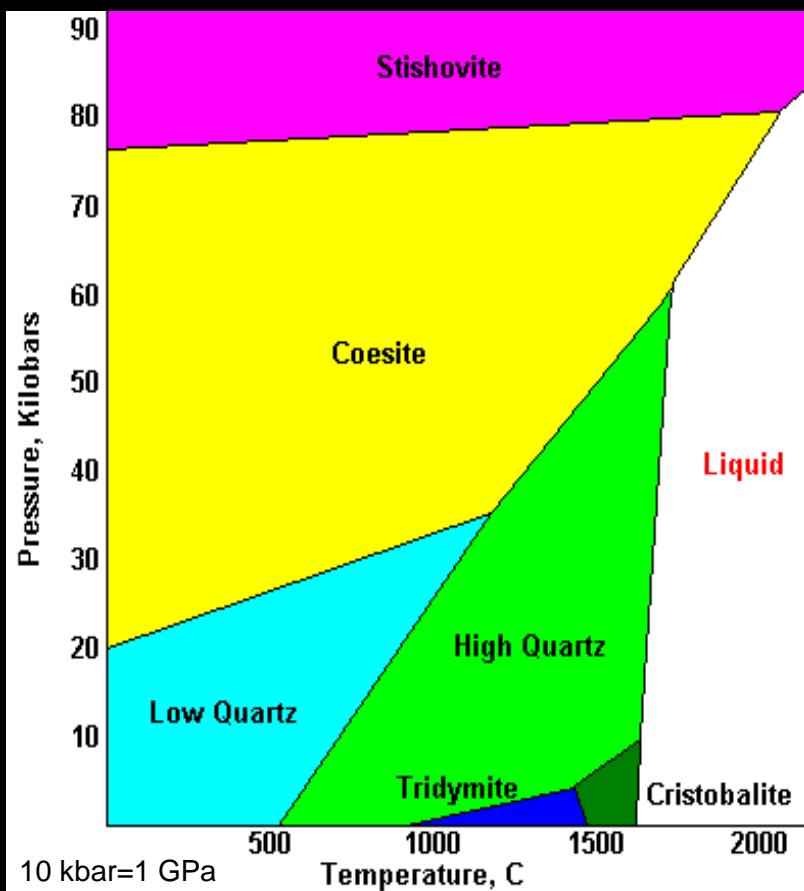


Obr. pT diagram porovnávající podmínky šokové a normální korové metamorfózy v horninách (p je v logaritmické škále).

Podmínky šokové metamorfózy



Obr. Fázové přeměny SiO₂ (ve °C)



Tab. Efekty při šokové metamorfóze

tlak (Gpa)	teplota (°C)	efekty
>2	<100	drcení hornin, brekciace, tříštivé kužely
2-3	700	křemen-coesit (monoklinický)
5-7	100	drcení křemene
~10	100	PDFs v křemeni
>8	>1200	křemen-stišovit (tetragonální)
~13	700	grafit-diamant
~35	300	diaplektické sklo, maskelynit (živcové sklo)
~45	900	tavení živců
~60	>1500	>horninové tavení, <rychlá krystalizace taveniny
80-100	>2500	horninová skla kondenzovaná z páry

Graf. pT podmínky fázových změn SiO₂

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

Shatter cones (tlak 2-30 GPa)

tříštivé kužely (vznikají v podloží impaktních událostí nejčastěji v jemně zrnitých sedimentárních horninách-vápencích, pískovcích, ale mohou vznikat i v jiných horninách)

Kónický tvar, přesličkovité rýhování



Shatter cone v granitu, kráter Rochechouart, Francie.

Shatter cone v dolomitu, kráter Steinheim, Německo.

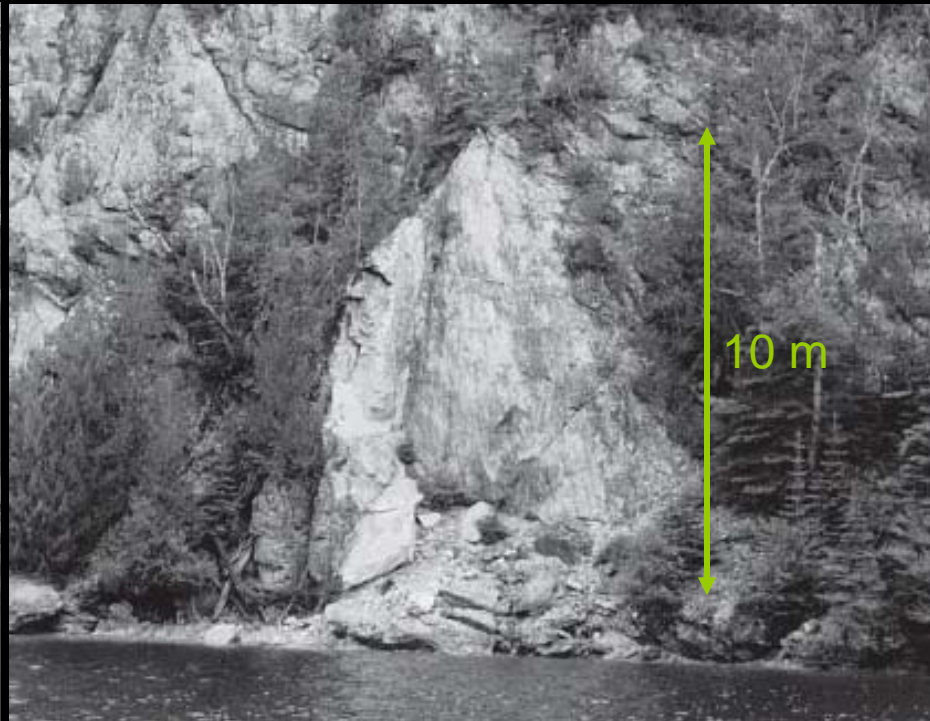
(Foto: L. Dziková)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

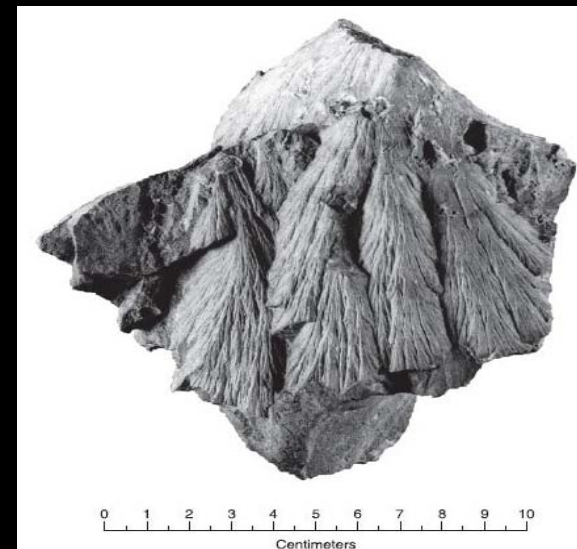


Sudbury, kvarcit (Kanada)

(French 1998)



Lake Superior, metavulkanity,
(Kanada)



Haughton, vápenec (Kanada)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

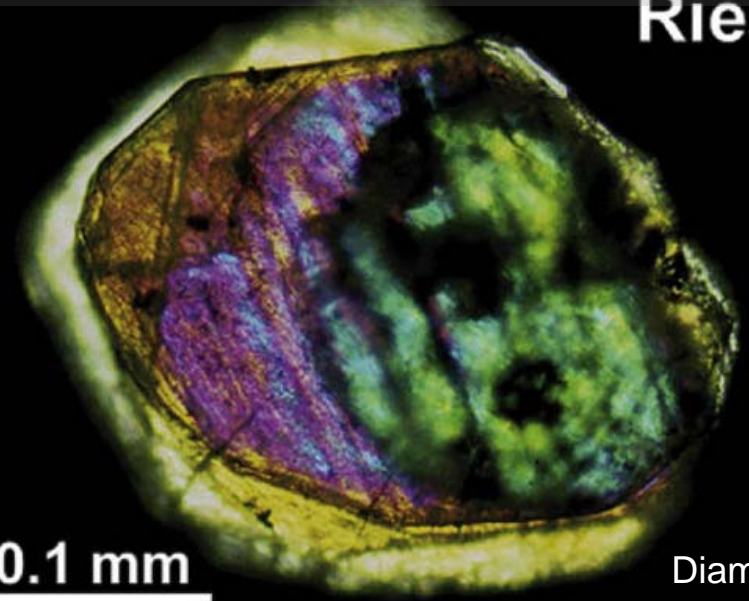
Ries

Vysokotlaké minerální polymorfy:

Coesit

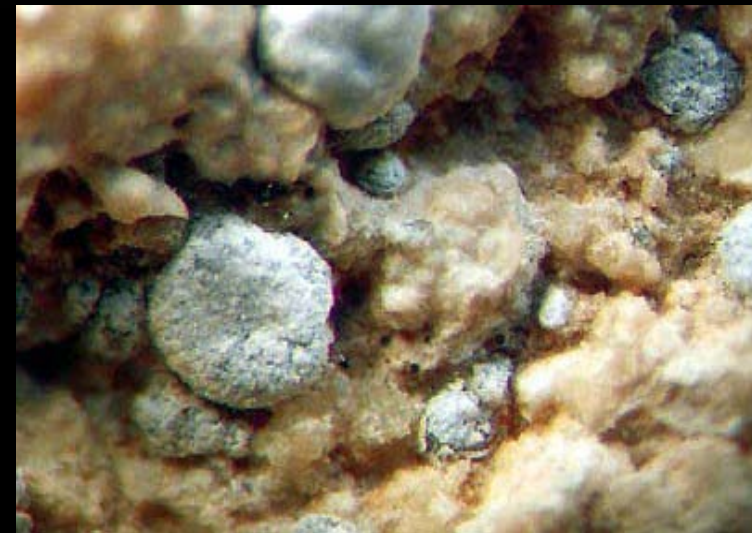
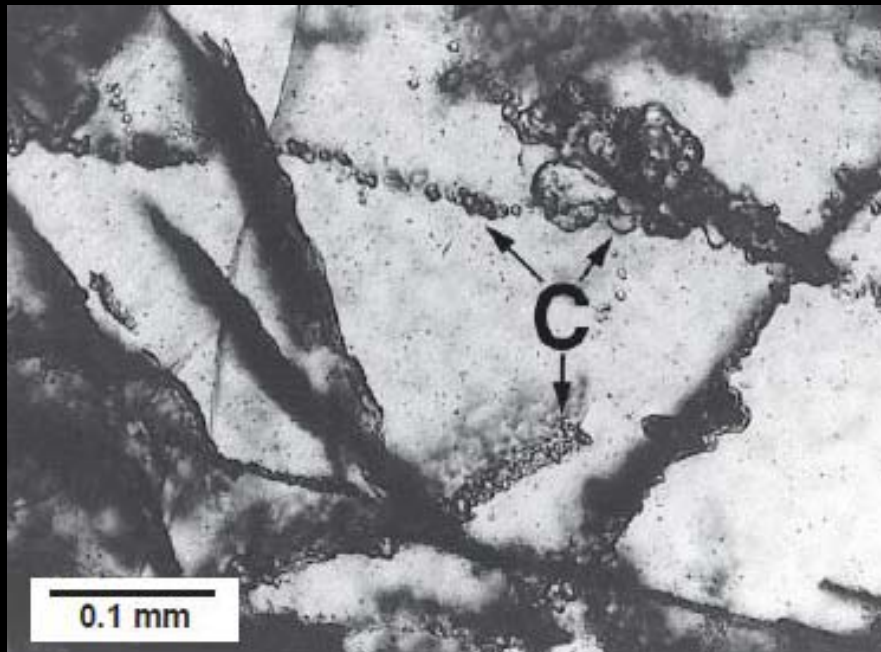
Stishovit

Diamant



Diamant

Coesit v diaplektickém skle, Ries (Německo)



Stišovit

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

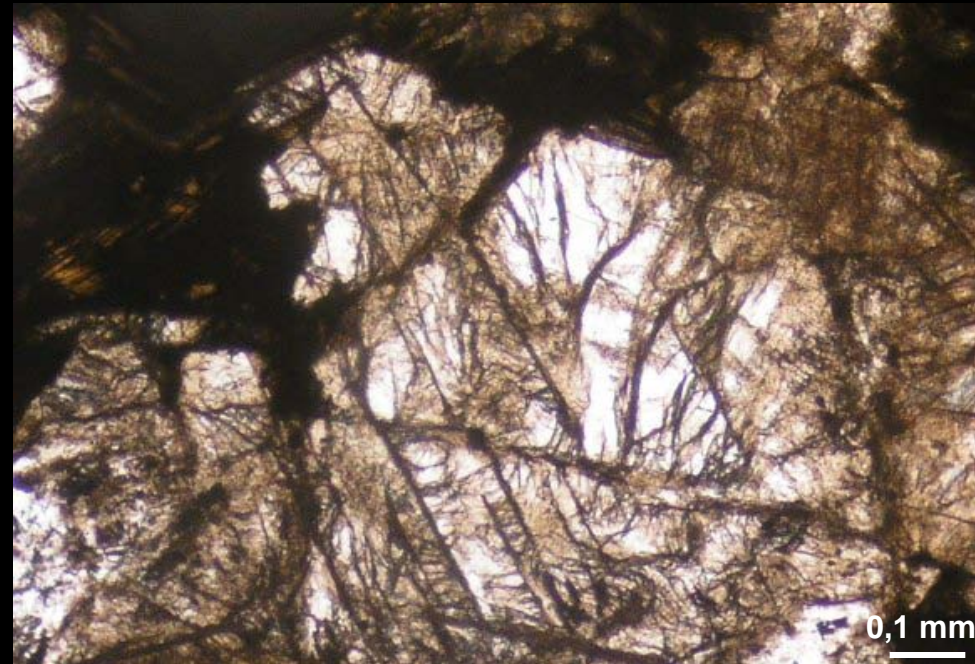
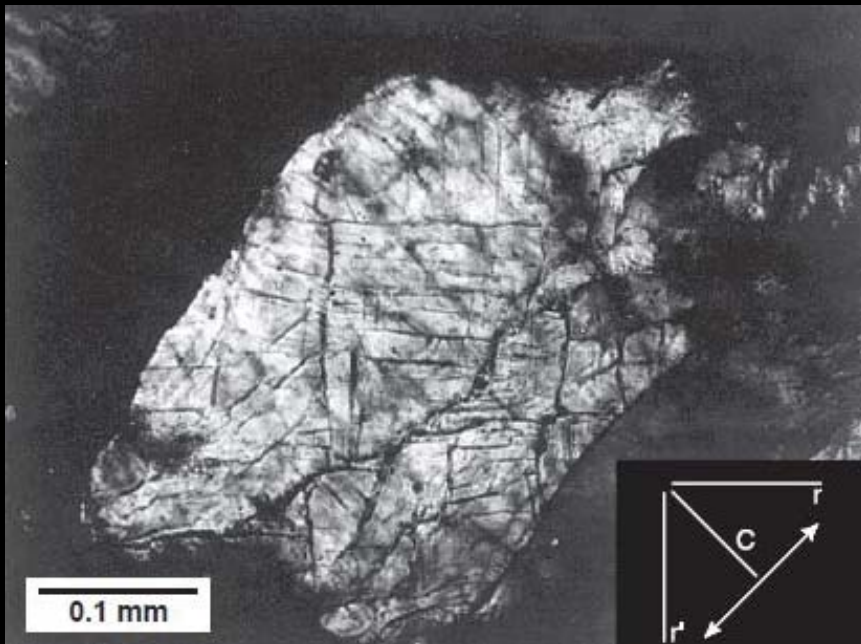
Planární mikrostruktury: nejčastěji prezentovány na křemenných zrnech (křemen je normálně neštěpný), ale vyskytují se i v ostatních minerálech (např. živcích, px, amf, apa, sill, gr, zirk)

- **Planární praskliny** (planar fractures, 5-8 GPa)

paralelní praskliny/štěpnost

typicky 5-10 μm široké, 15-20 μm dlouhé

někdy se vyskytují i v neimpaktivě postižených horninách, proto nemohou sloužit jako kritérium pro impaktivní události, ovšem v impaktivních strukturách jsou velmi dobře vyvinuté a rozšířené a poukazují na vysoké tlaky.



Štěpnost křemen, Barringerův kráter (French 1998)

Živec, granitový úlomek ze suevitu, Ries

Foto: L. Dziková

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

- **PDF** (Planar Deformation Features; planární deformační znaky; dříve také „planar features, shock lamellae“)

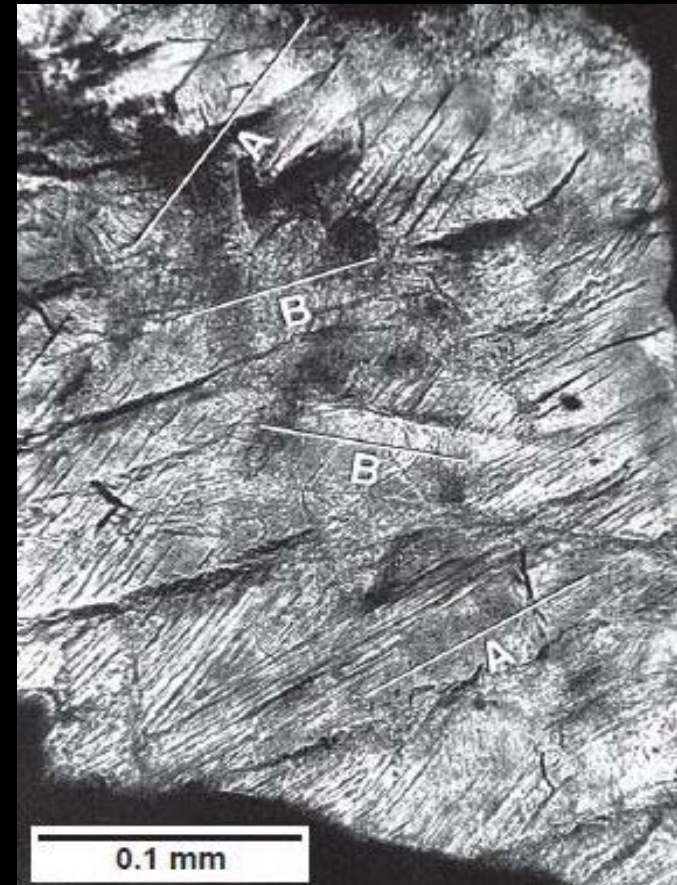
Soustava extrémně úzkých paralelních planárních útvarů (šířka 2-3 μm , planární destičky vysoce deformovaného nebo amorfního křemene a jsou orientovány paralelně ke krystalovým rovinám křemene, zejména $c(0001)$)

Nachází se pouze v šokově postižených horninách - důkaz impaktu

TABLE 4.4. Typical crystallographic orientations of planar microstructures in shocked quartz (modified from Stöffler and Langenhorst, 1994, Table 3, p. 164).

Symbol	Miller Indexes	Polar Angle (Angle Between Pole to Plane and Quartz c-axis)
c	* (0001)	0°
ω, ω'	* $[10\bar{1}3], [01\bar{1}3]$	23°
π, π'	* $[10\bar{1}2], [01\bar{1}2]$	32°
r, z	* $[10\bar{1}1], [01\bar{1}1]$	52°
m	$[10\bar{1}0]$	90°
ξ	$[11\bar{2}2], [2\bar{1}\bar{1}2]$	48°
s	$[11\bar{2}1], [2\bar{1}\bar{1}1]$	66°
a	$[11\bar{2}0], [2\bar{1}\bar{1}0]$	90°
	* $[22\bar{4}1], [42\bar{2}1]$	77°
t	$[40\bar{4}1], [04\bar{4}1]$	79°
k	$[51\bar{6}0], [6\bar{1}\bar{5}0]$	90°
x	$[51\bar{6}1], [6\bar{5}\bar{1}1]$	82°
	$[6\bar{1}\bar{5}1], [15\bar{6}1]$	
—	$[31\bar{4}1], [43\bar{1}1]$	78°
	$[4\bar{1}\bar{3}1], [13\bar{4}1]$	
—	$[21\bar{3}1], [32\bar{1}1]$	74°
	$[3\bar{1}\bar{2}1], [12\bar{3}1]$	

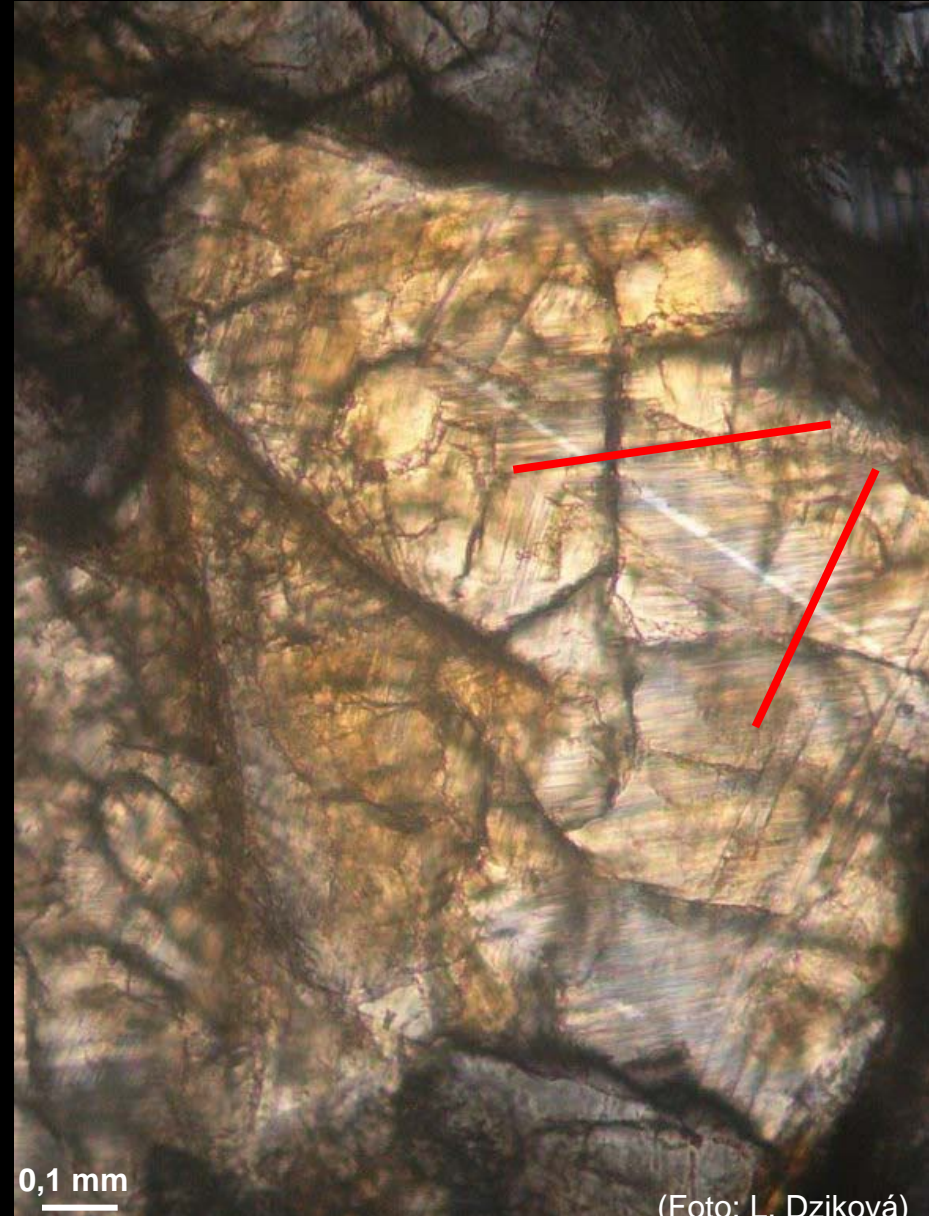
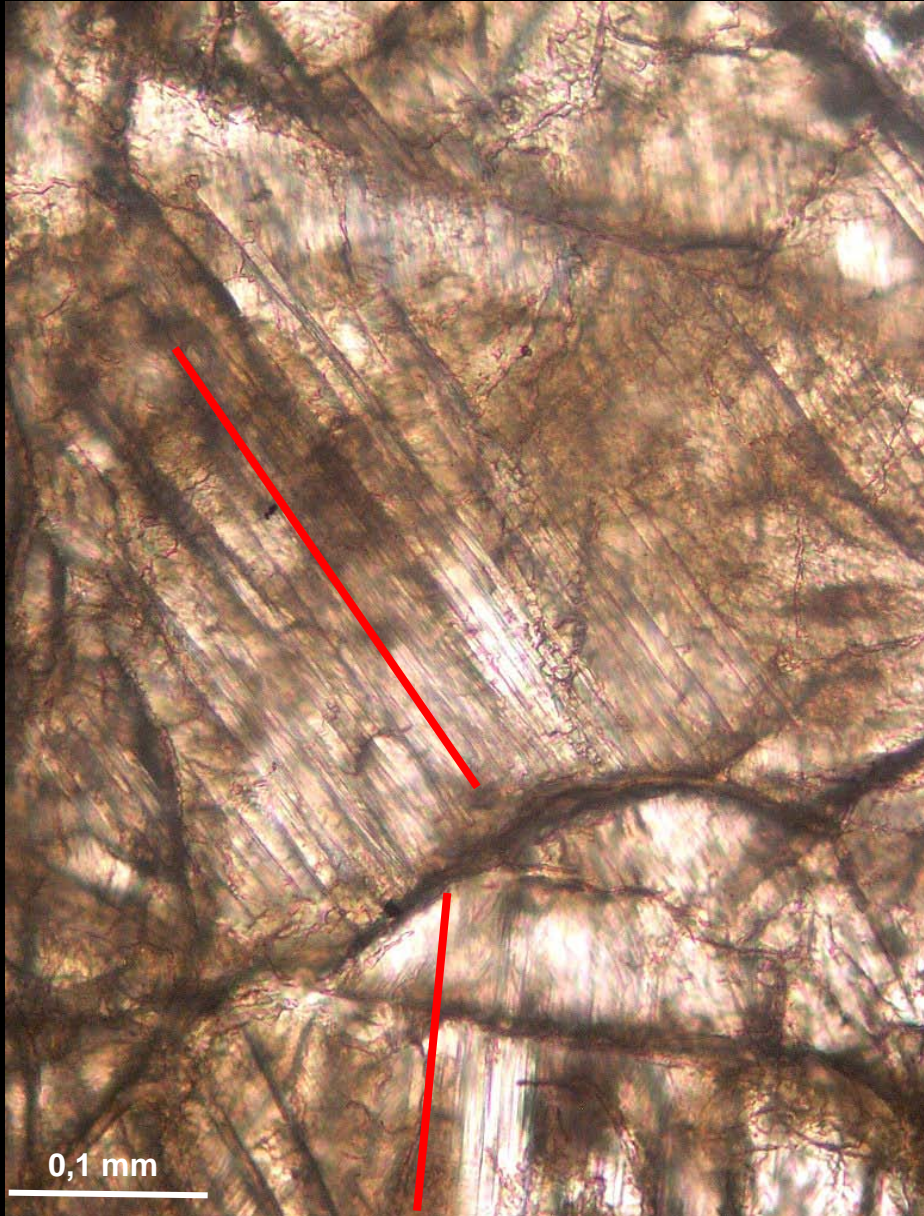
*Prominent planes in typical shock fabrics.



Zdroj: French (1998)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

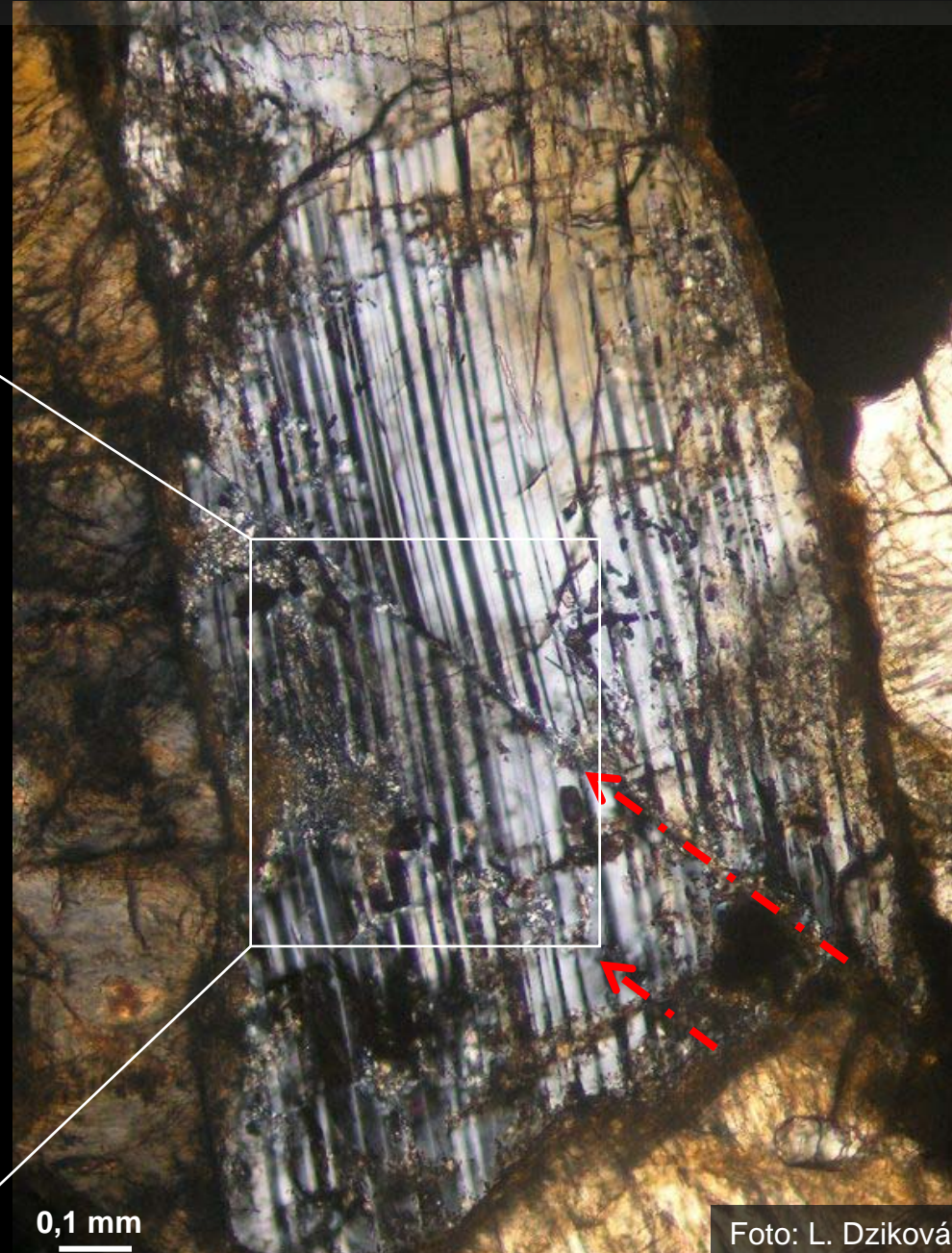
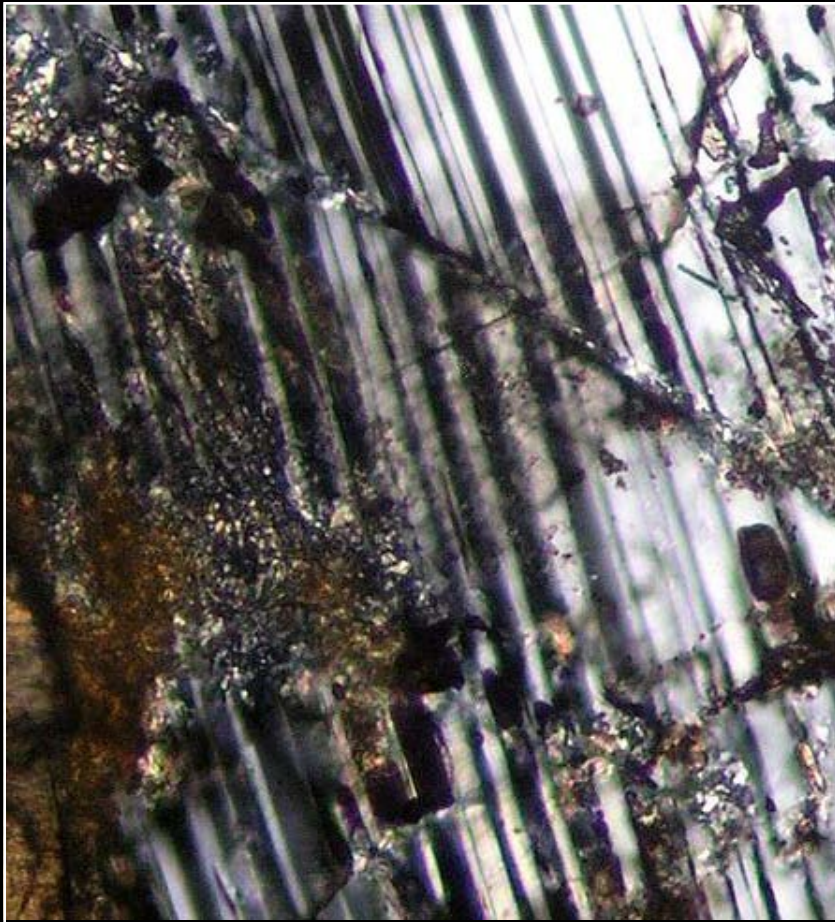
PDF v živci, granitový fragment ze suevitu, Ries



(Foto: L. Dziková)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

Živec (granitový fragment ze suevitu, Ries). Dvojčatění živce (tmavé/světlé lamely, téměř svislé) jsou deformovány podél paralelních trhlin (zvýrazněno)



0,1 mm

Foto: L. Dziková

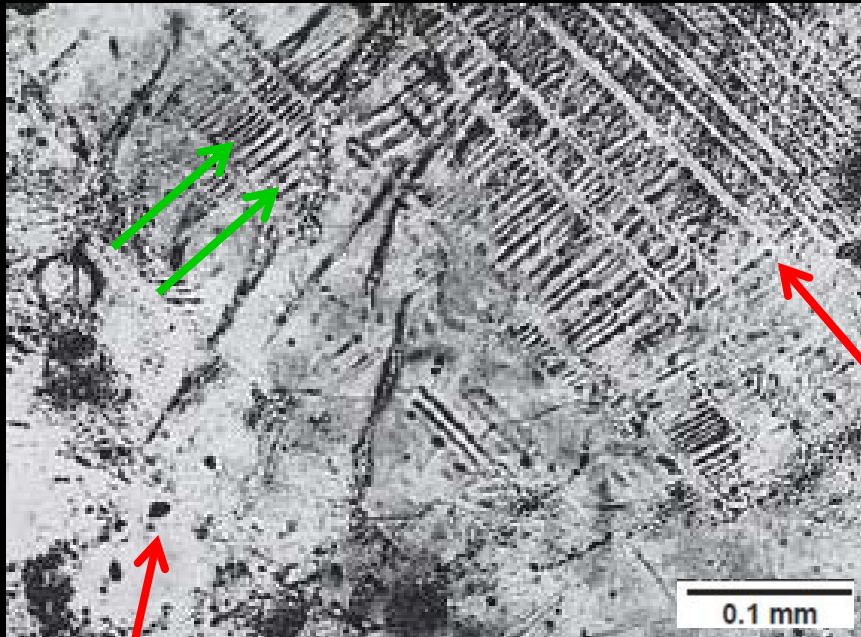
Projevy šokové met. v horninách a minerálech

Diaplektická skla:

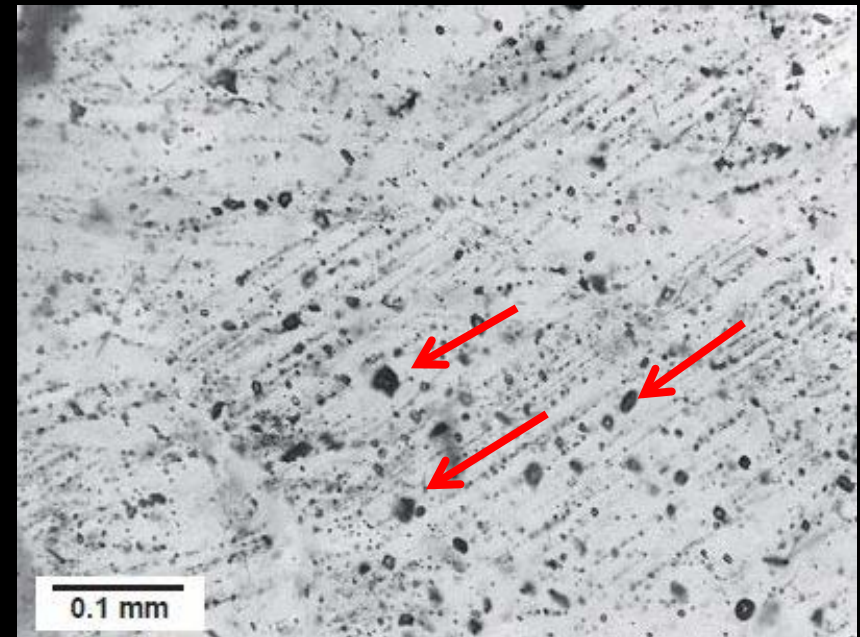
Diaplektické sklo-nevzniká tavením, pouze působením vysokého tlaku (impakty, nukleární výbuchy). Sklo si zachovává původní strukturu krystalu a tvar zrna, je opticky izotropní, ale studium pomocí rtg. difrakce a IR spektroskopie ukázalo na částečné zachování uspořádané atomové struktury krystalu (Arndt et al. 1982). Někdy nemusí být přeměna kompletní, ale jen částečná. Diapl. skla jsou nestabilní, někdy může docházet k tzv. dekorování PDF (rekrytalizace na mikrokryсталinní agregáty).

Křemen a živec jsou nejčastějšími minerály přeměněnými na diaplektické sklo.

Živcové diapl. sklo se nazývá **maskelynit** (poprvé objeven v meteoritech).



Maskelynit (čirý, vyznačené červenou šipkou),
původní dvojčatné lamely (ve směru zelených), Ries

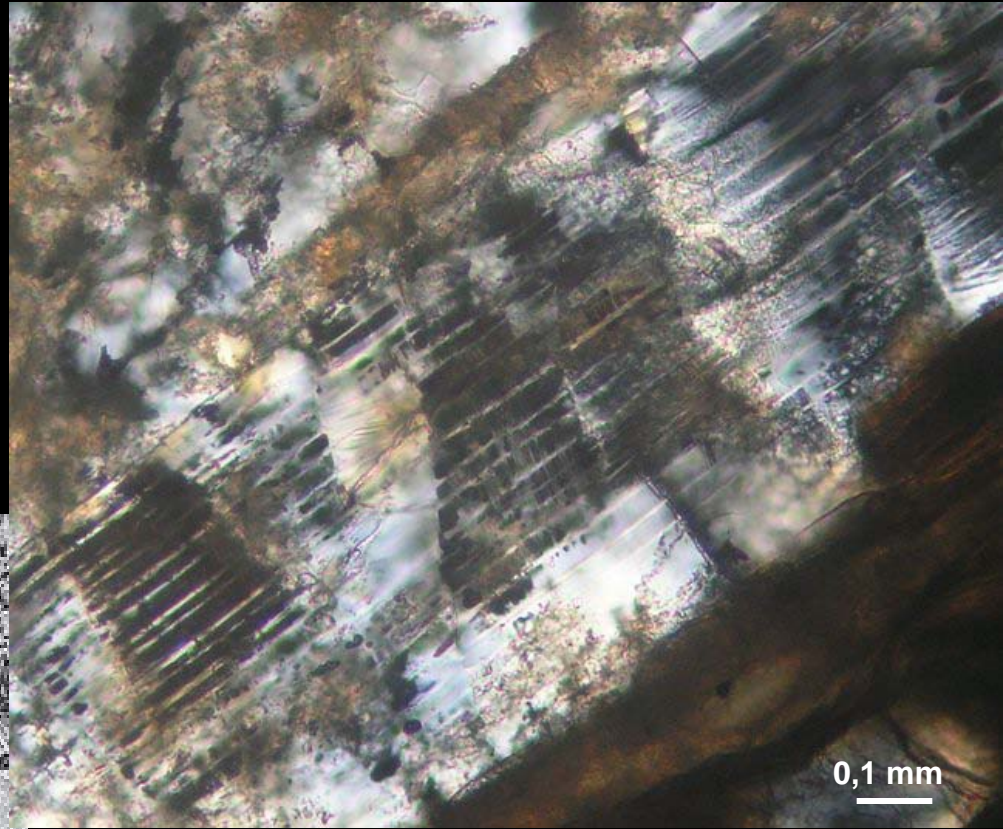


Křemen, dekorované PDF (Sudbury, Canada)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech



Miskelynit (čirý, vyznačené červenou šipkou),
původní dvojčatné lamely (ve směru zelených), Ries



Živec, v granitovém úlomku ze suevitu, Ries
(Foto: L. Dziková)

Zdroj: French (1998)

Projevy šokové met. v horninách a minerálech

„toasting“ - zhnědnutí křemenných zrn působením vysokého tlaku

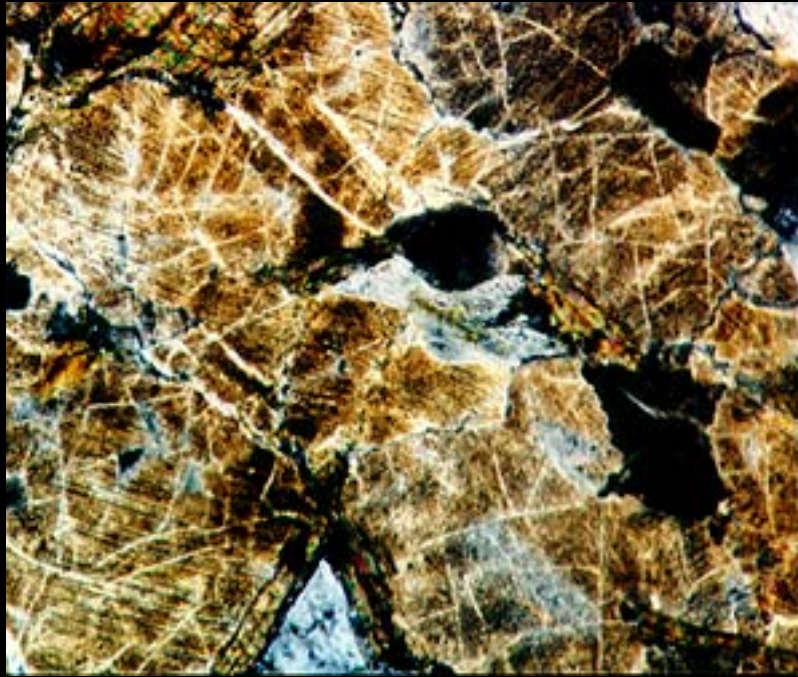
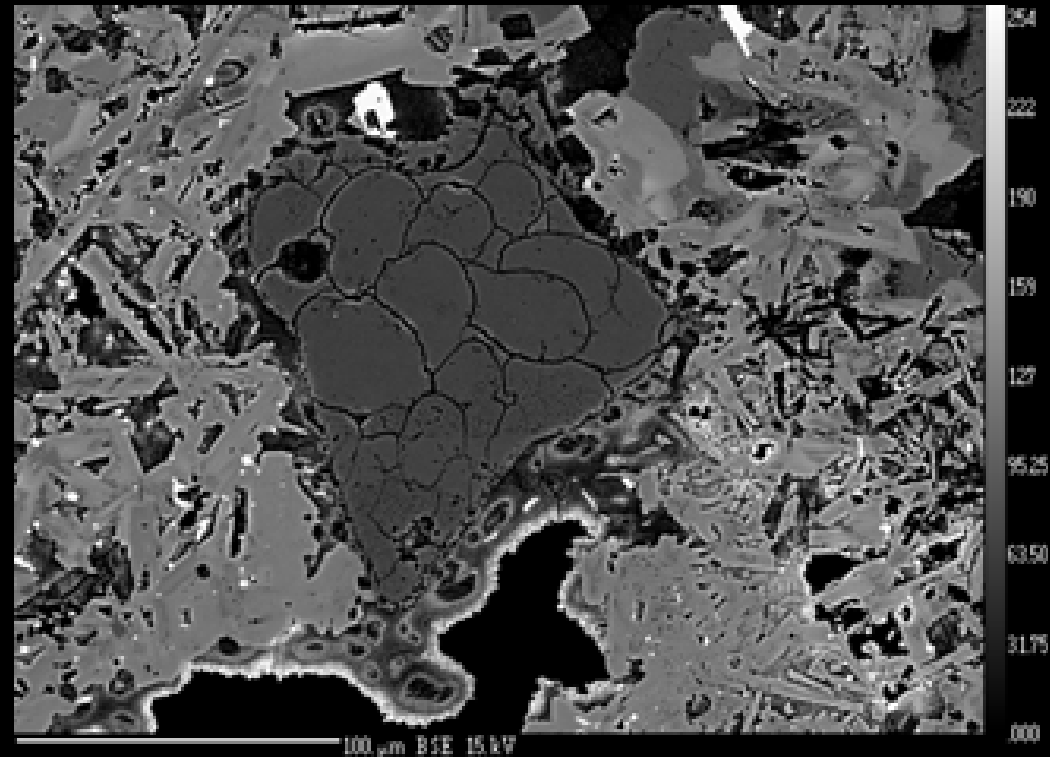


Foto www.rst.gsfc.nasa.gov



„balónová“ struktura v křemeni

Foto: L. Dziková

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Během impaktu je vytvořena řada horninových typů-brekcie, taveniny a šokově přeměněné horniny. Souhrný název impaktity-všechny horniny postižené nebo vytvořené v průběhu impaktové události.

KLASIFIKACE NA ZÁKLADĚ POZICE HORNIN VŮČI KRÁTERU:

Horniny kráterového dna a pod ním:

Paraautochtónní, lithické brekcie, souvislé terčové horniny)

Allogenní (allochtónní)-kráterová výplň (brekcie, taveniny) + ejecta

Pseudotachylity

Horniny uvnitř kráteru-kráterová výplň (brekcie):

Lithické brekcie (úlomky hornin)

Brekcie s obsahem skla:

suevity

impac melt breccias (impaktně tavené brekcie)

impact melt rocks (impaktní taveniny)

Kráterový val a okolí:

Allogenní horniny

Ejecta (vyvrženiny):

proximální (<5x průměr kráteru)

distální (>5x průměr kráteru)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

KLASIFIKACE NA ZÁKLADĚ MATERIÁLU HORNIN:

Paraautochtonní – lokální horniny (nepřemístěné). Zachovaná původní stratigrafie a struktura.

Allogenní – multihorninové, různý původ hornin

BREKIE:

Charakter úlomků: **Lithické brekcie** (pouze úlomky hornin)

Suevitické brekcie (obsahují sklo a úlomky hornin)

Litologie úlomků: **Monomiktní** (jeden typ horniny)

Polymiktní (více typů hornin)

Charakter matrix: **Klastická** (oddělené klasty)

Taveninová (klasty spojeny taveninou)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

impaktní útvar	velikost	provenience	stupeň metamorfózy	vzhled, prostředí	struktura
impaktní tavenina	<0,2-0,5 m	krystalické h.	IV., 550-1000 kbar	inkluze v suevitech, velká samostatná tělesa	polymiktní (směs hornin a min. klastů)
suevit	<0,2-0,5 m	krystalické-sedimentární h.	0-IV., < ~1000 kbar	centrální dutina, megabloková zóna	polymiktní
brekcie (žíly)	<0,2-0,5 m	krystalické-sedimentární h.	0-II., < ~350 kbar	podložní i povrchová megabloková zóna	polymiktní
krystalická brekcie	<0,5-1 m	krystalické h.	0-II., < ~350 kbar	nepřímá tělesa, v pestré brekcií či na ní, centrální dutina	polymiktní
pestrá brekcie	<25 m	sedimentární-krystalické h.	0-II., < ~350 kbar	megabloková zóna	polymiktní
megabloková zóna	~25-1000 m	všechny stratigr. jednotky	0-I., < ~50-100 kbar	podloží, vnitřní val, megabloková zóna	monomiktní
brekciovitě a roztříštěné autochtonní h.	–	všechny stratigr. jednotky	0, < ~50 kbar	nepřímá kráterové podloží	monomiktní

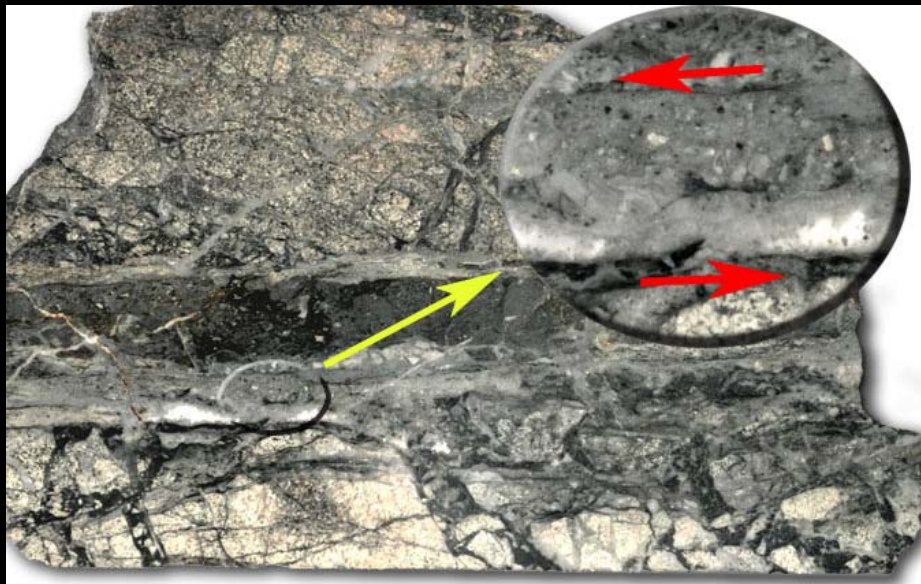
Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Pseudotachylity

Typ impaktové brekcie. Nepravidelná tělesa, žilový charakter, horninové klasty jsou uzavřeny v husté, afanitické matrix (černá, černo-zelená barva, sklovitý charakter-název podle bazaltového skla tachylitu). Výskyt i na tektonických zlomech, při impaktových událostech vznik při kompresní fázi vzniku kráteru a při vyzdvižení centrálního pahorku. Umístění pod povrchem uvnitř kráteru. Patrné jsou po obnažení dna-kráter Vredefort v J. Africe a imp. pánev Sudbury v Kanadě



Zaoblené klasty ruly v tmavé matrix (Vredefort, jižní afrika, šipka označuje propisku)



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Lithické brekcie

Brekcie bez skla, v malých i velkých impaktních kráterech, mocnost až stovky metrů, výplň kráteru i blízké okolí.

Lithické brekcie se skládají z horninových a minerálních úlomků v jemnozrné matrix ze stejného materiálu. Velkost úlomků od cca 1 mm do desítek metrů.



Lithická brekcie, kráter Brent (Canada)

French (1998)

0.1 mm

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Bunte breccia (pestrá brekcie)

Polymiktní lithická brekcie (Ries)



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

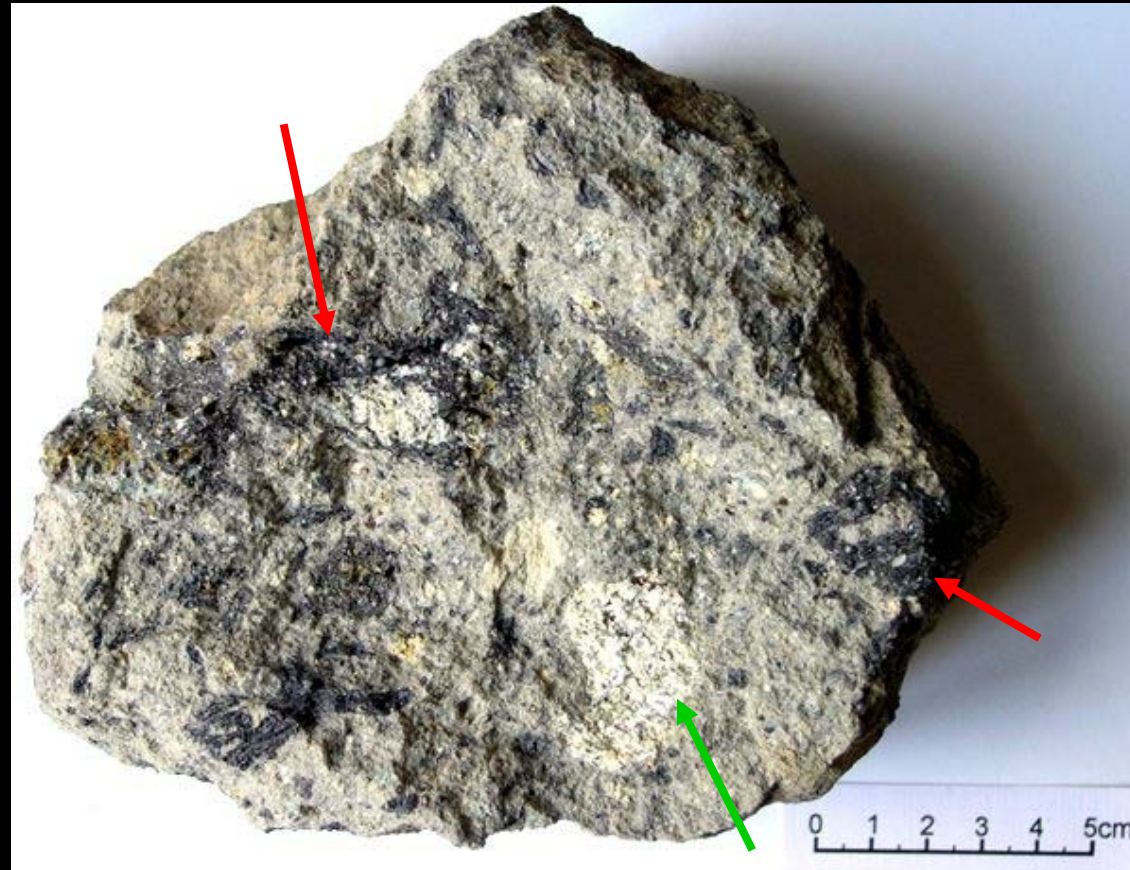
Suevity (brekcie s obsahem taveniny)

Úlomky hornin a minerálů spolu s tělesy sklovité taveniny jsou uzavřeny v klastické jemnozrné matrix podobného složení. Většina úlomků a minerálních fragmentů jsou šokově postižené. Tyto brekcie slouží nejčastěji jako indikátor impaktové události.

Název poprvé použit pro brekcie v kráteru Ries. Suevity se zde nachází jak uvnitř kráteru (fallback suevites), tak i vně (ejecta nebo fallout suevite, až 40 km od kráteru).

Suevity obsahují sklovitá tělesa (flädly, podobné sopečným bombám, aerodynamické tvarování, viz červené šipky). Velikost většinou Xcm (až 20 cm), ale i < mm. Obsah v suevitu je většinou 5-15%, ale vzácně i více-až 50%.

Sklo v suevitech je heterogenní, polymiktní-obsahuje směs horninových (zelená šipka) a minerálních klastů.



Suevit, Ries (foto: L. Dziková)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)



Suevit, Otting, Ries

(foto: L. Dziková)



Velká sklovité bomby,
suevit, Otting, Ries

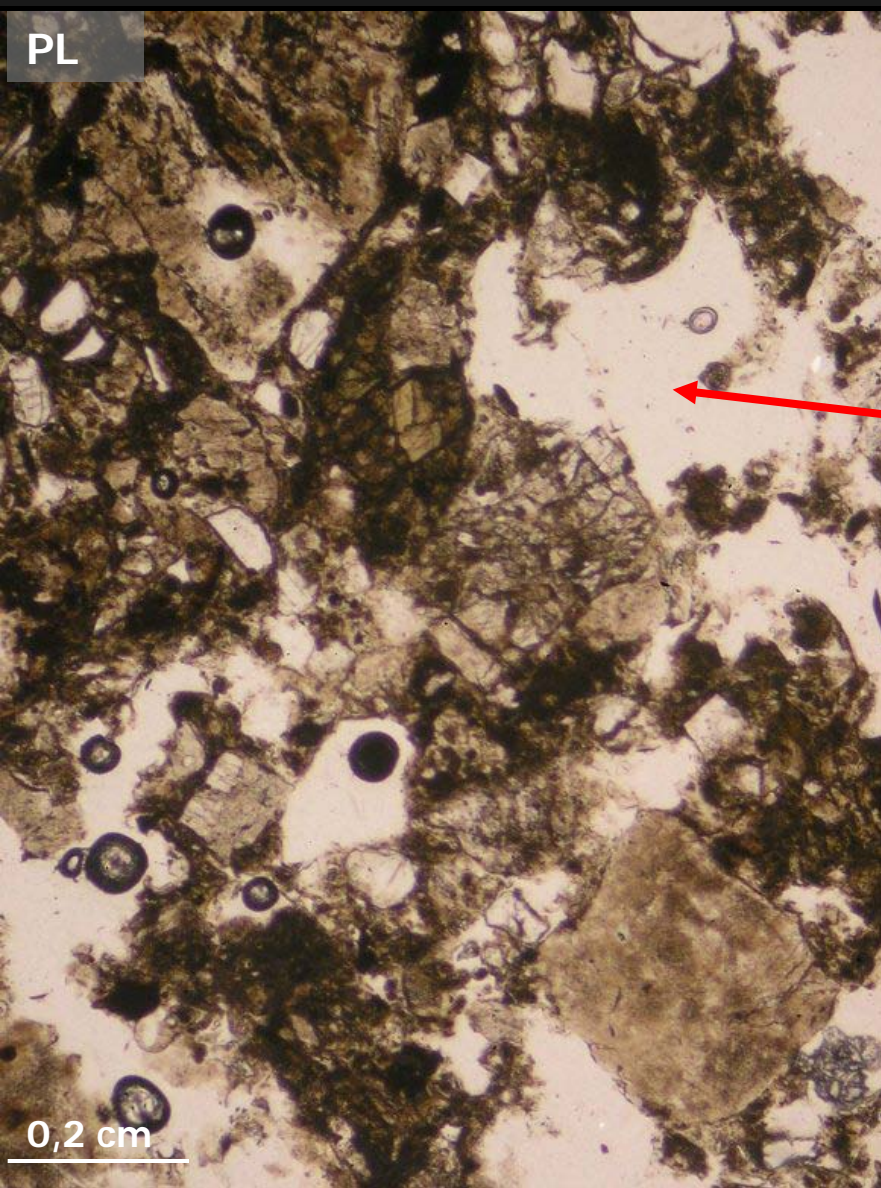
Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Degazační kanály, suevit, Otting, Ries



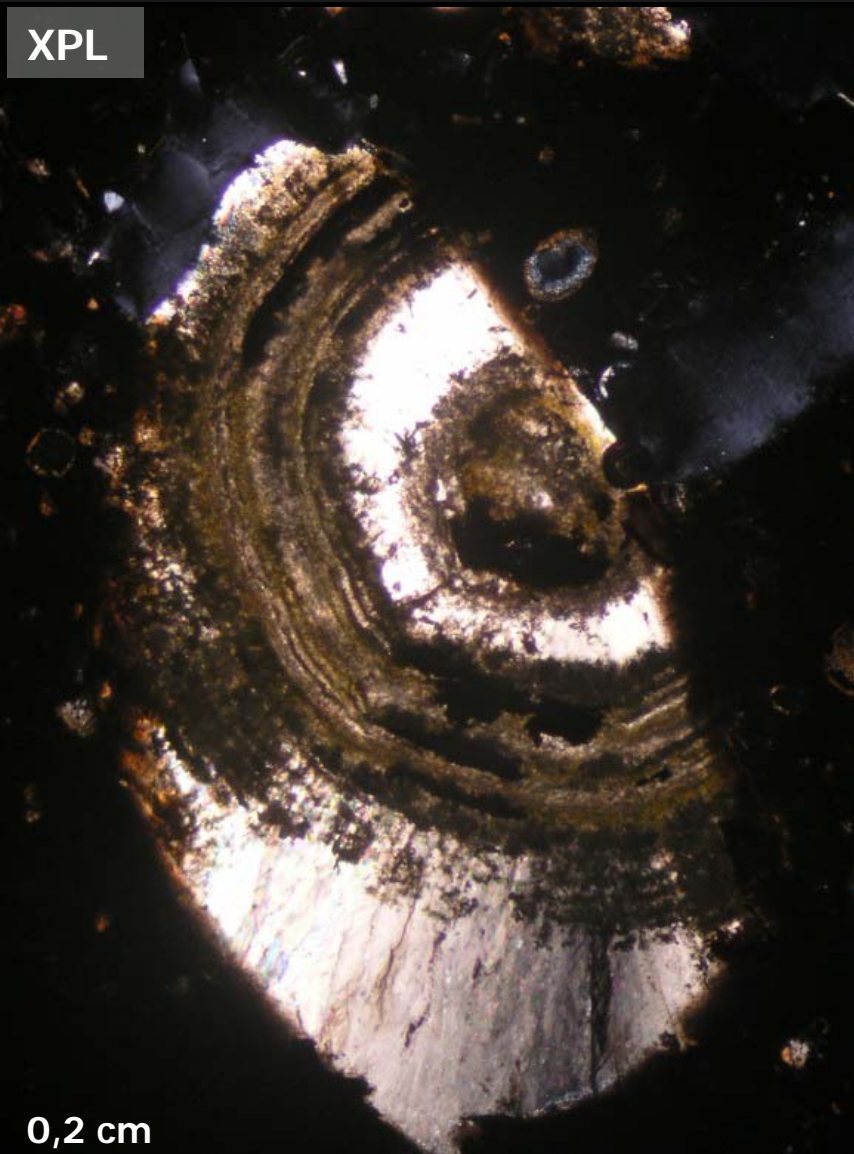
(foto: L. Dziková)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)



sklo

Šokově přeměněné horniny (impaktity)



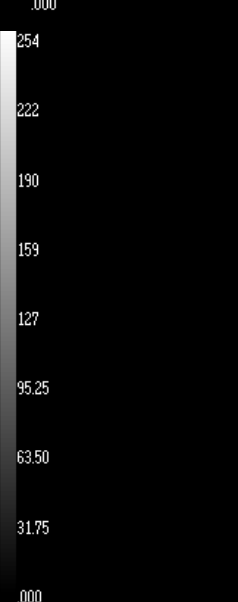
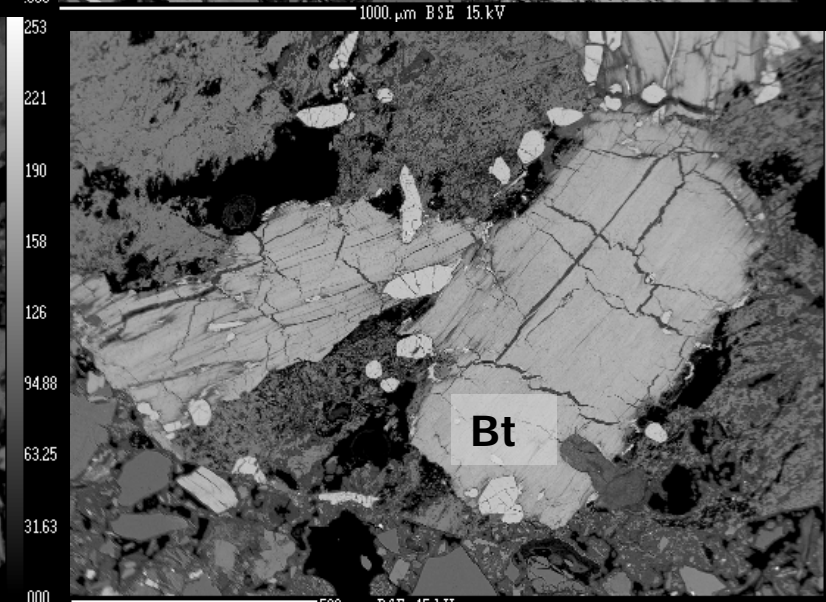
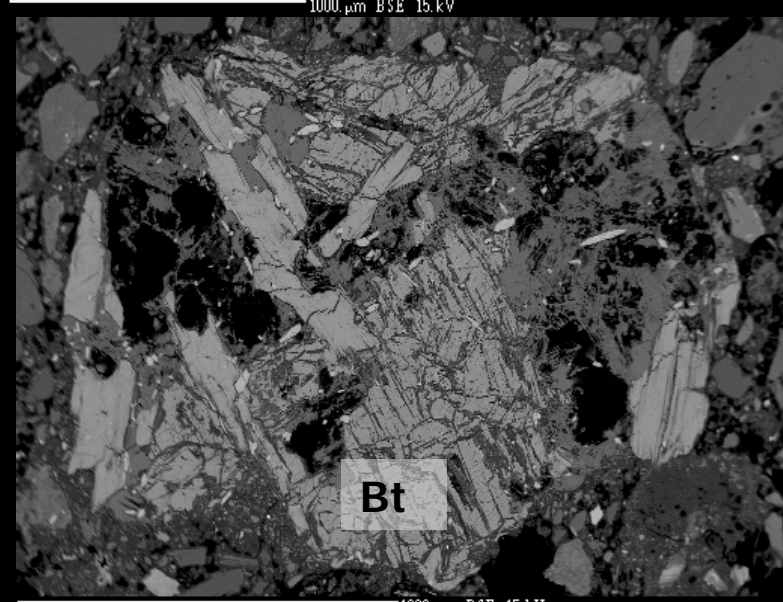
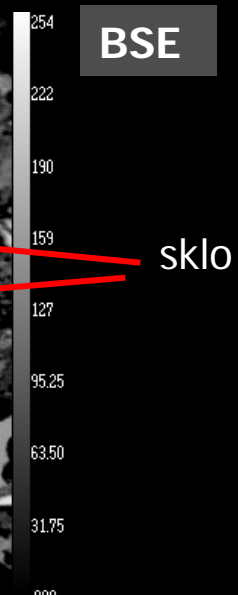
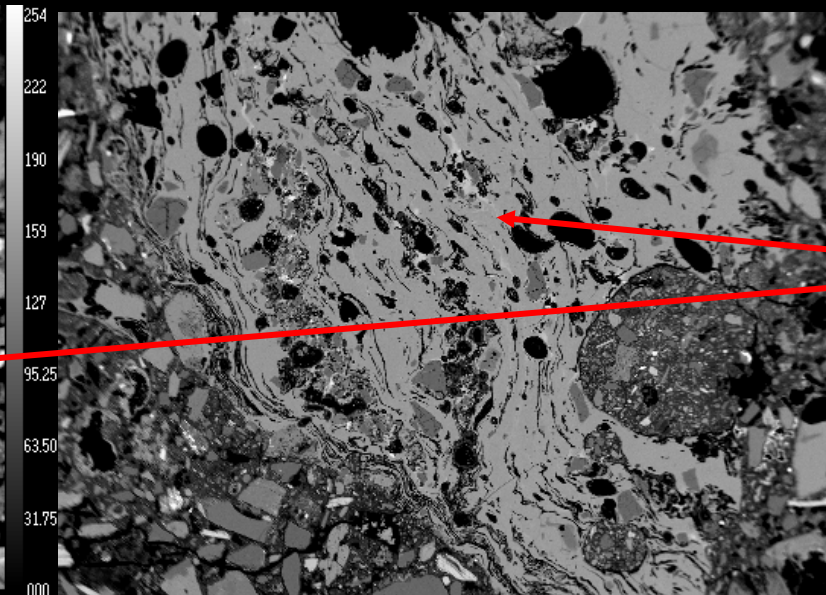
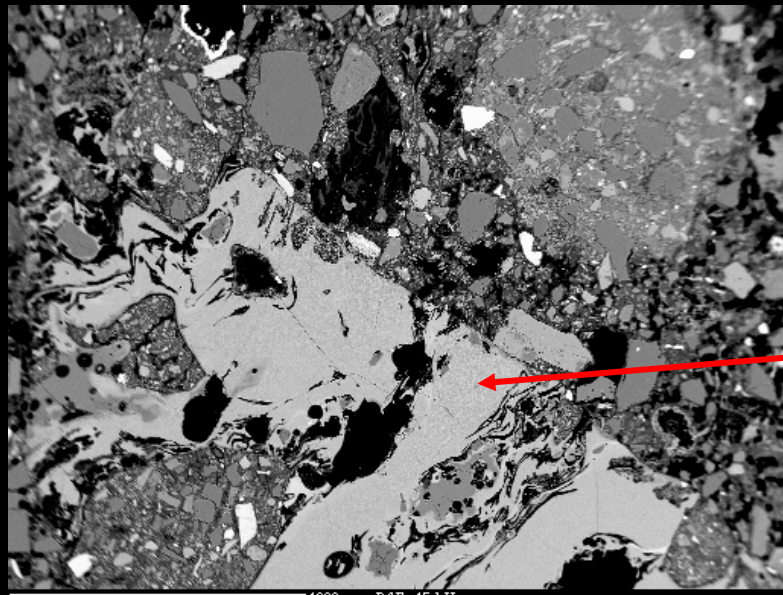
Sekundární karbonátová výplň pórů, suevit, Otting, Ries



Křemen, suevit, Otting, Ries

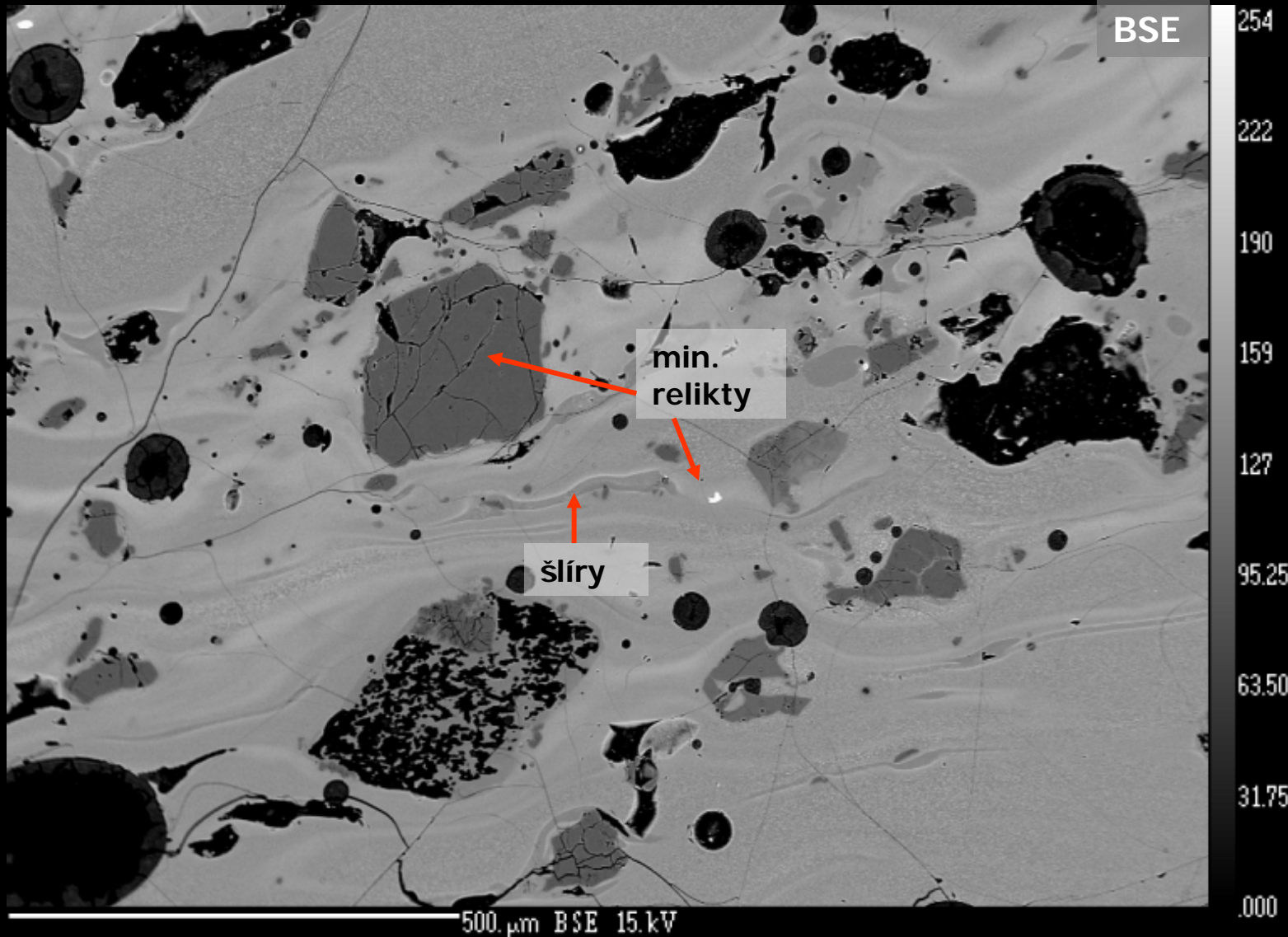
(foto: L. Dziková)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)



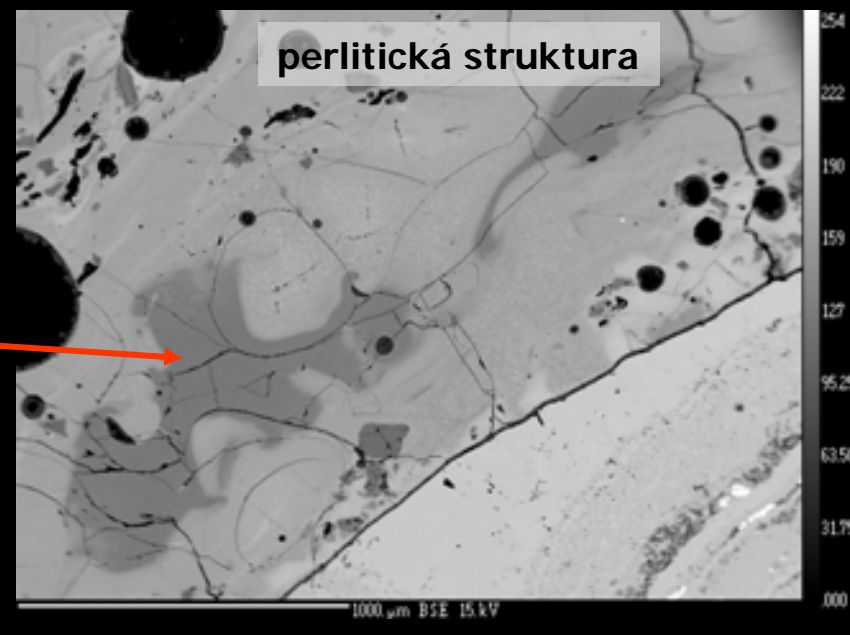
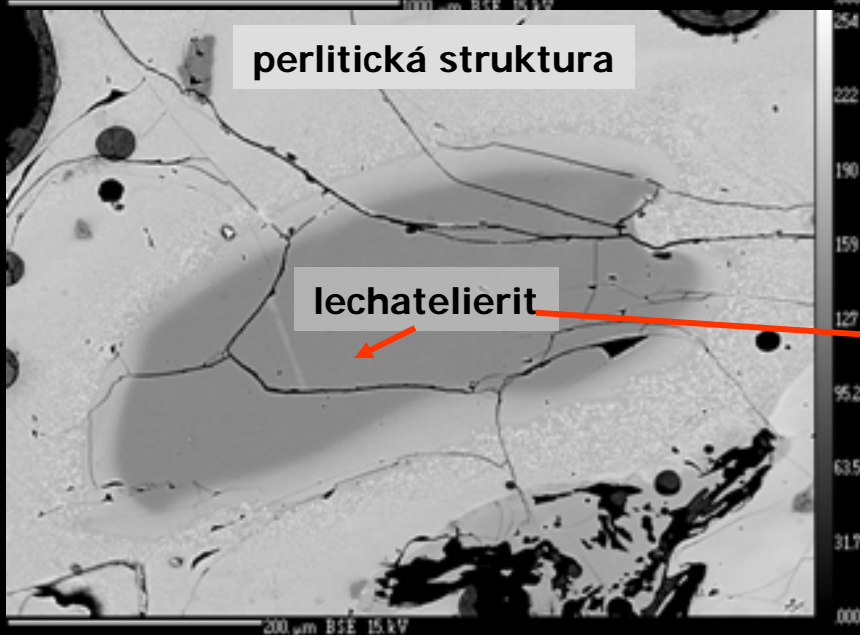
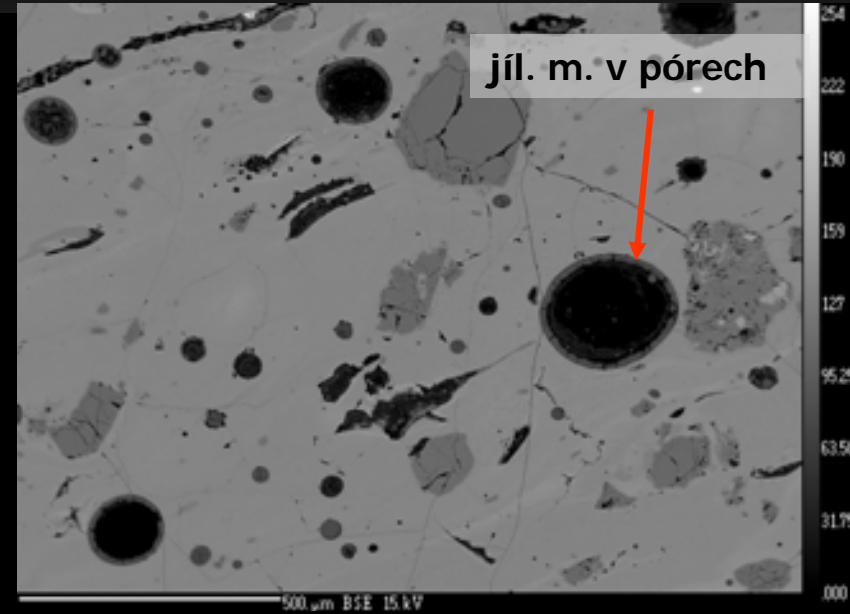
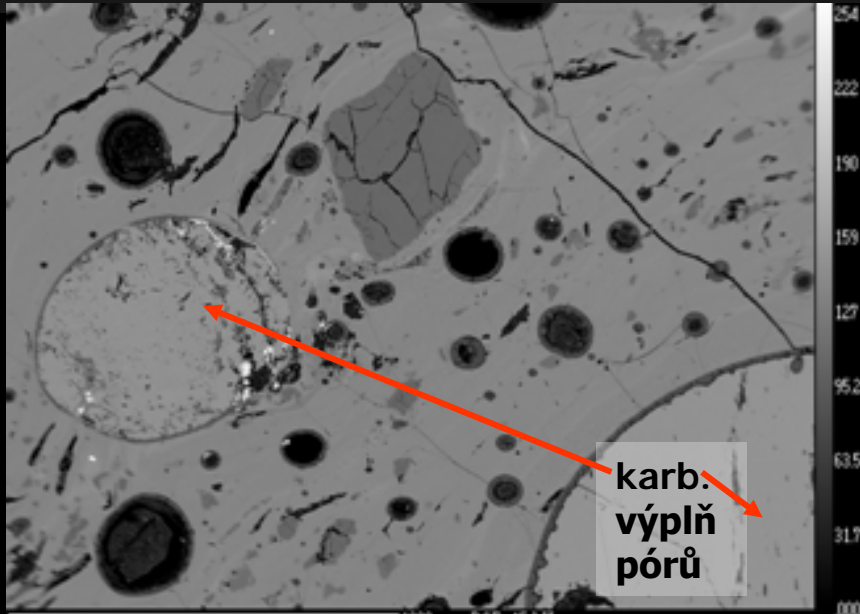
Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Impaktní sklo (ze suevitů; Ottingen, fluidální textura, vysoká heteorgenita-chemické šlíry, minerální relikty, vysoká porozita, perlitická struktura)



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

BSE

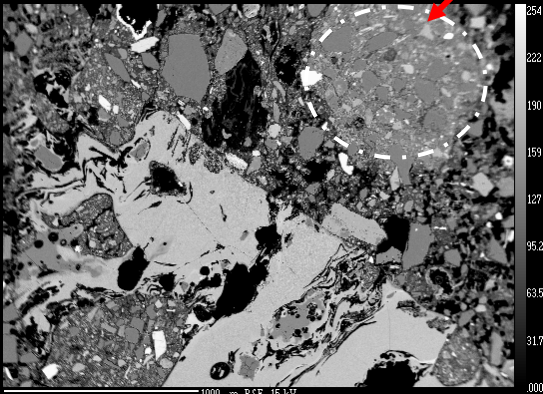


Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Melt-matrix breccias (brekcie s taveninovou matrix)

Tavenina zde není obsažená jako samostatná tělesa, ale jako matrix (25-75 %). Tavenina jako sklovitý materiál až kompletně krystalinní hornina. Fragменты hornin a materiálů jsou šokově postižené nebo roztavené.

Vyskytují se jako uzavřeniny v suevitech nebo jako samostatná tělesa spíše žilného charakteru. Pokud se obsah taveniny ještě zvýší, jedná se o tzv. **impact melt rocks** (taveninové horniny). Tavenina je zde dominantní, úlomky jsou zde pouze málo nebo chybí úplně. Vysoká pórovitost.



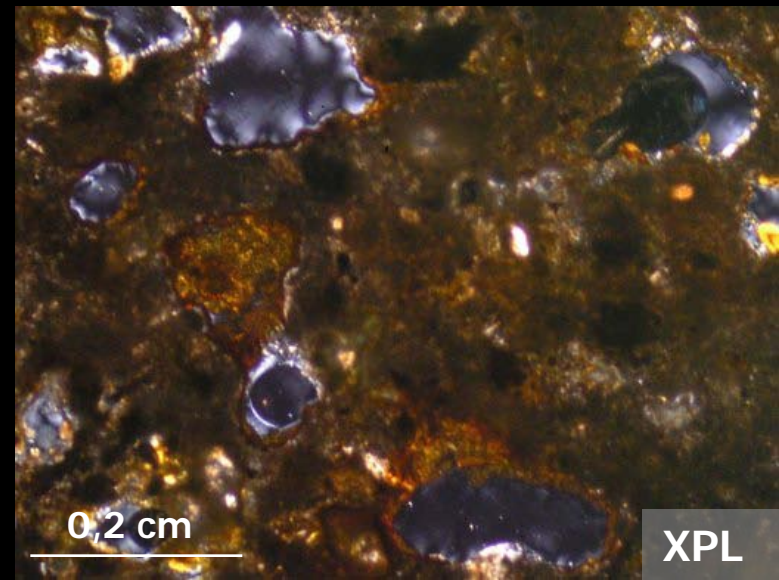
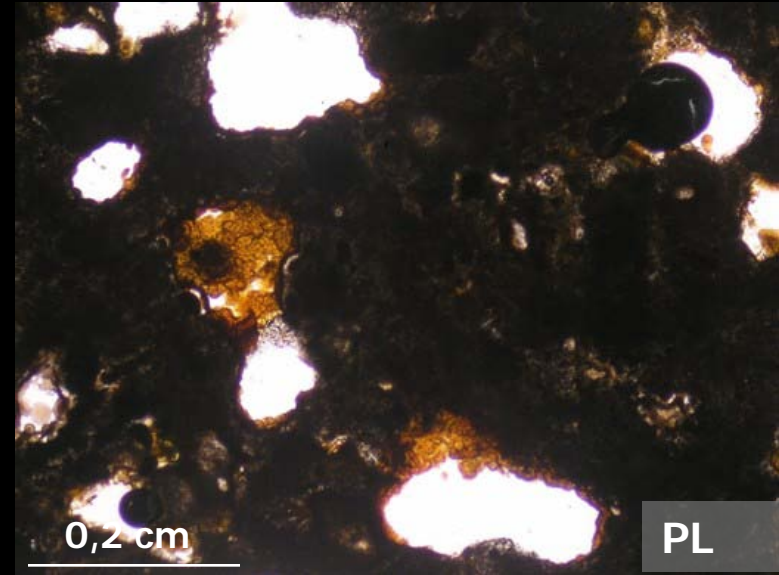
(foto: L. Dziková)

Impact melt rocks,
Polsingen, Ries

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Impact melt rocks (tavené horniny)

Ries, Polsingen-„red suevite“ (červeně zbarvená h., vysoký obsah hematitu)
vysoce porézní



(foto: L. Dziková)

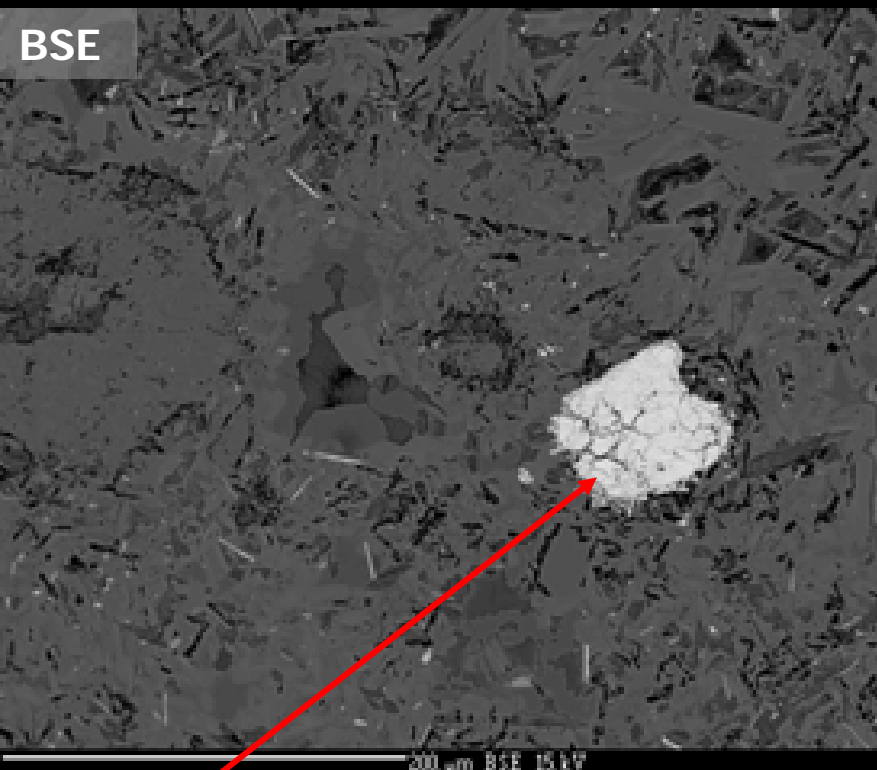
Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Ries, Polsingen-„red suevite“

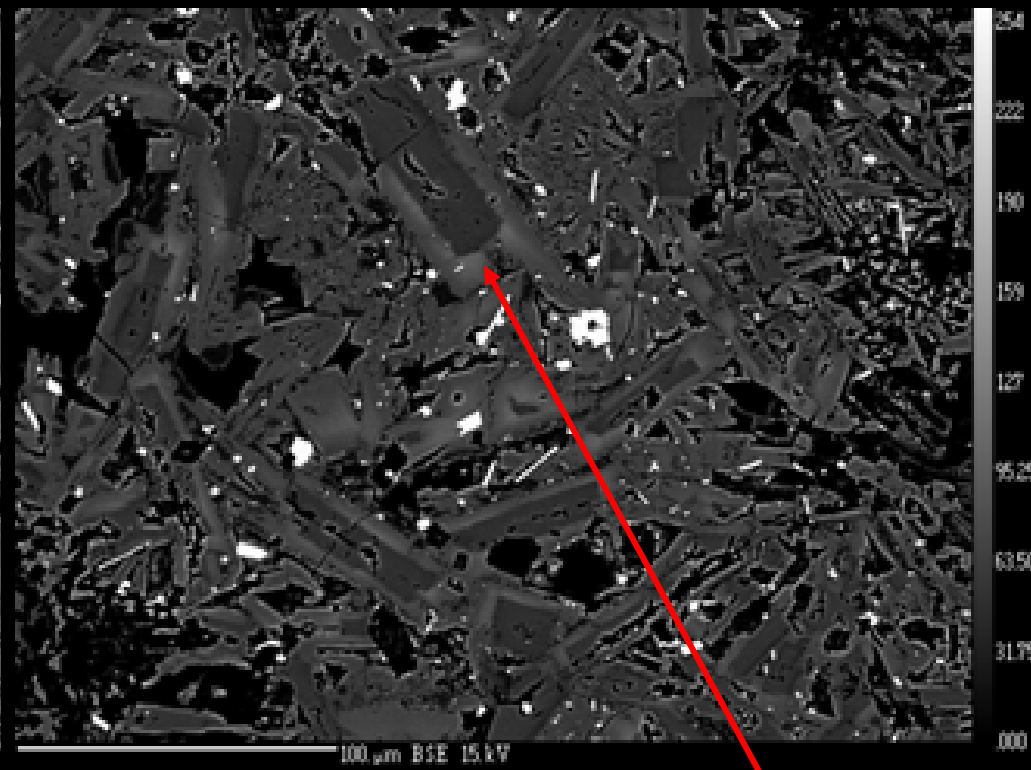


Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Ries, Polsingen-„red suevite“

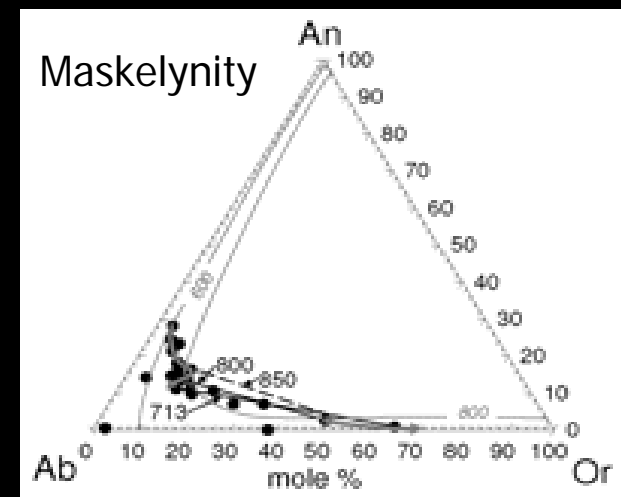
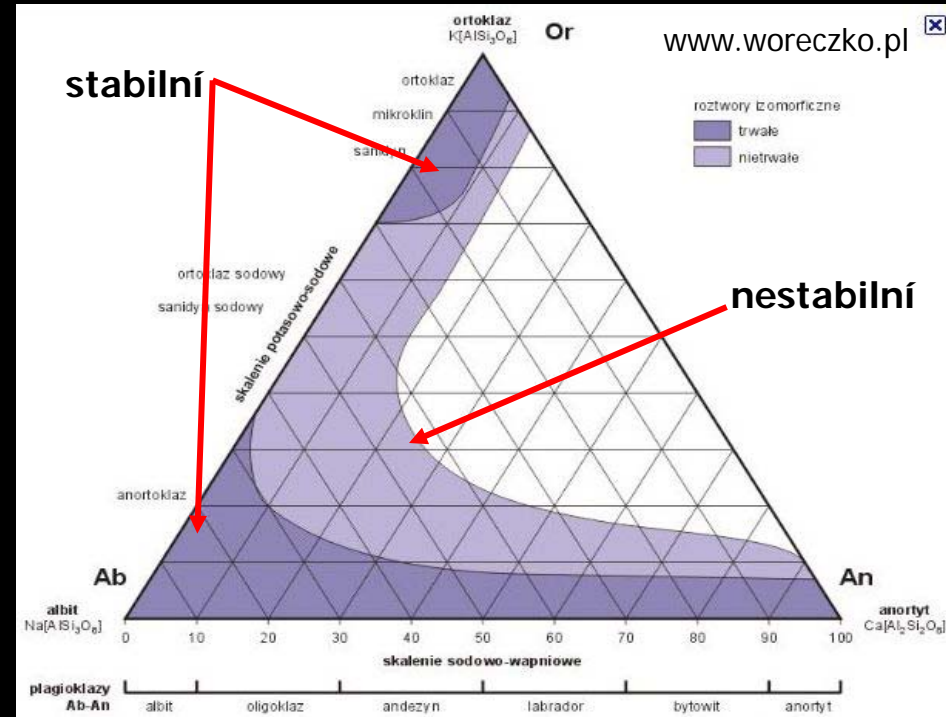
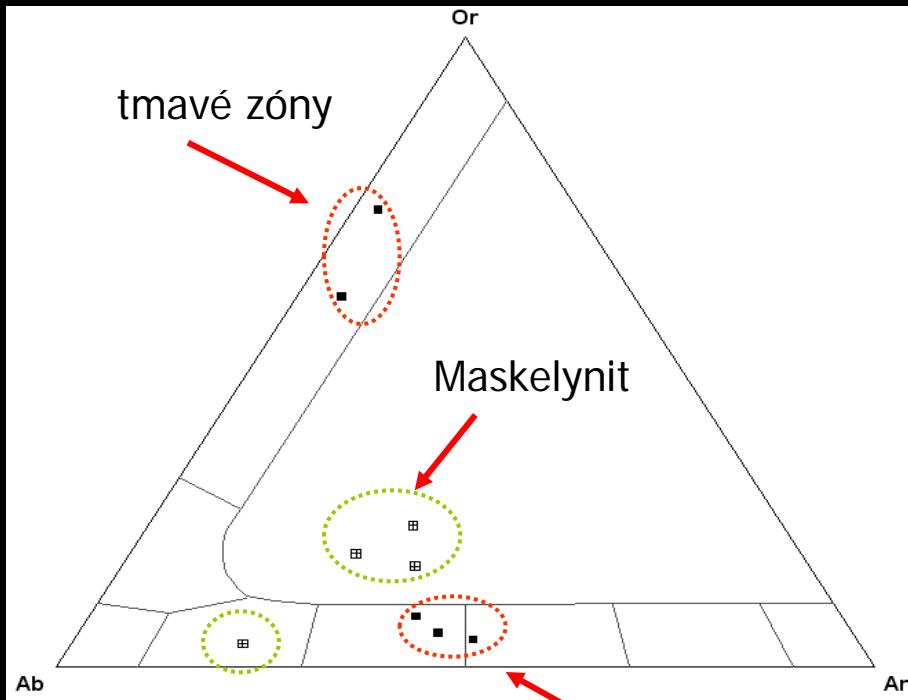


Zirkon



Základní hmotu tvoří zejména živce (zonální)

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

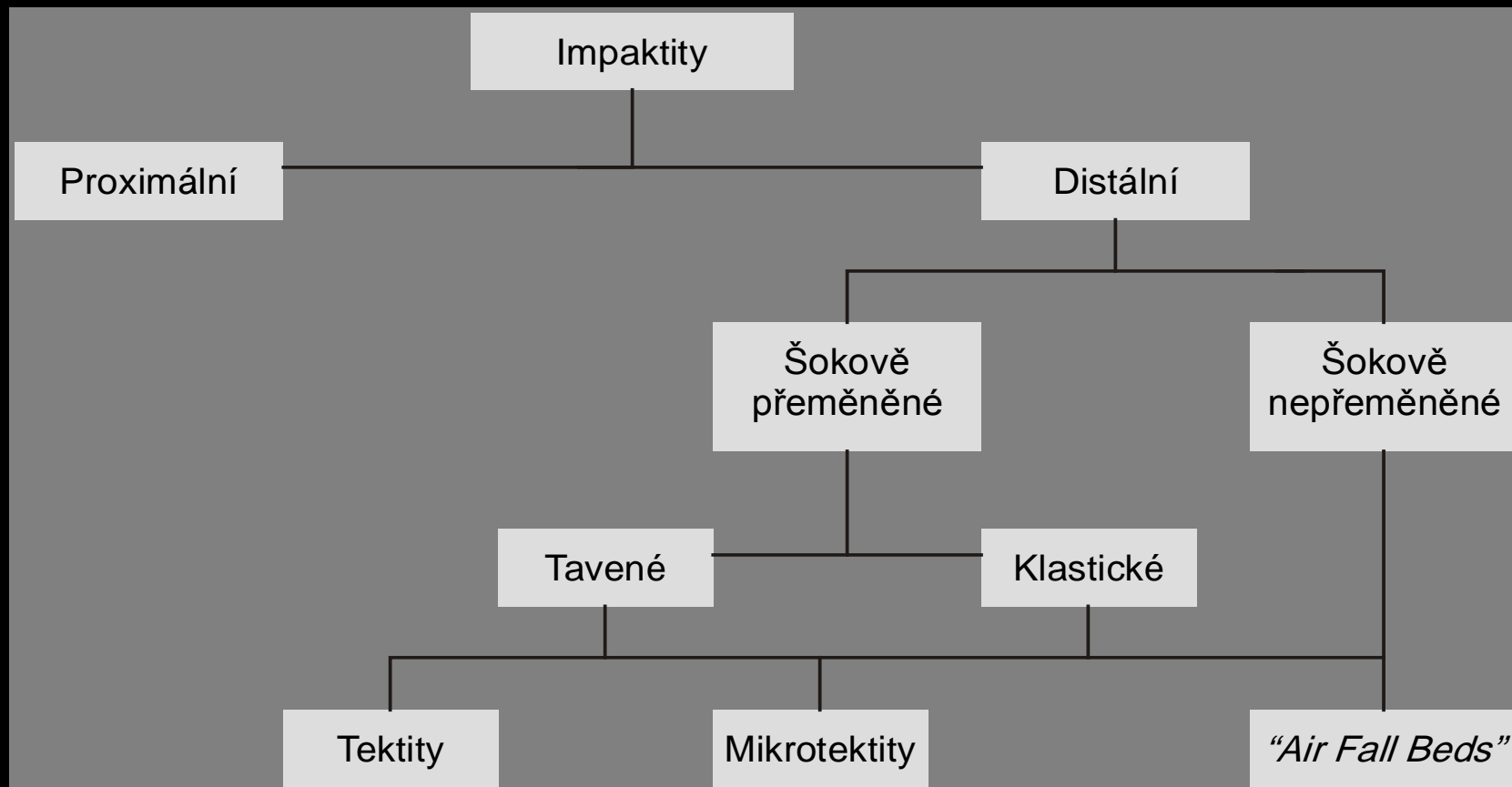


Ries, Poldingen-„red suevite“ a Otting.

Analýzy zonálních živců z impact melt rock (Poldingen, v červeně označených elipsách). Zeleně označené živce z granitového úlomku ze suevitu (Otting).

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Distální impaktity



Vybraná část klasifikace impaktitů podle Stöfflera a Reimolda (2006, zkráceno a upraveno).

„Air Fall Beds“ jsou šokově přeměněné či nepřeměněné (tavené nebo klastické) částice uložené díky interakci s atmosférou na velké části povrchu Země.

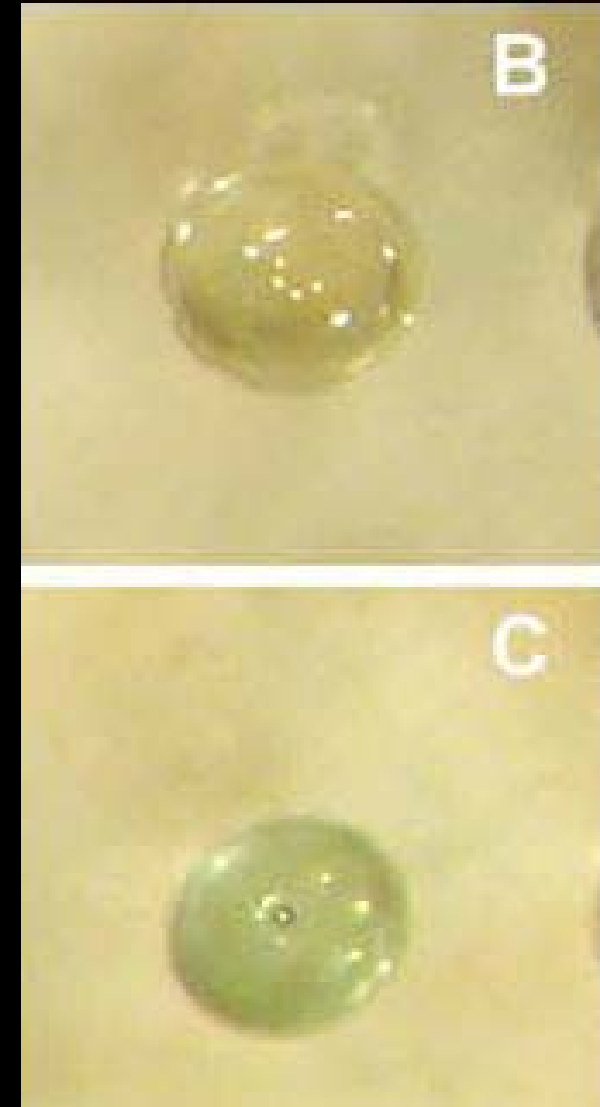
Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Distální impaktity

Mikrotektity

Mikrotektity jsou malé (do 1 mm) sklovité produkty impaktních událostí. Většinou jsou kulovitěho tvaru, někdy mohou mít tvar kapek nebo tyčinek. Nachází se v sedimentech moří a oceánů (hlubokomořské vrty), ale i na pevnině (Antarktida).

Mikrotektity jsou známy u všech pádových polí, kromě středoevropského. Je to způsobeno značným kontinentálním zvětráváním, kdy malé skleněné mikrotektity zřejmě nemohly být zachovány.

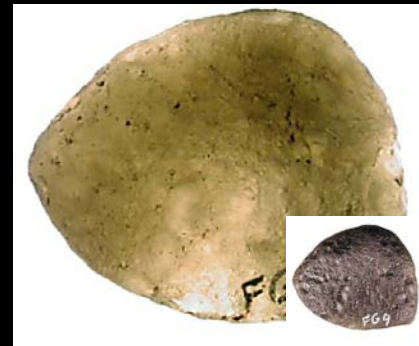


Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Tektity

Pojem tektit zavedl Fr. Eduard Suess v roce 1890 podle řeckého slova „tektós“ (zn. tavený)

- přírodní sklo impaktního původu
- relativně homogenní (jednotný chemizmus)
- bohaté na SiO₂ (65 – 85%)
- vysoký poměr Al / K+Na
- velmi nízký obsah vody (<0,02 hm. %)
- nízký obsah těkavých látek
- málo uzavřenin (lechatelierit)
- z povrchového, porézního, nezpevněného materiálu
- nízký tlak v bublinách (utuhnutí ve vyšší nadmořské výšce)



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Pádová pole tektitů:

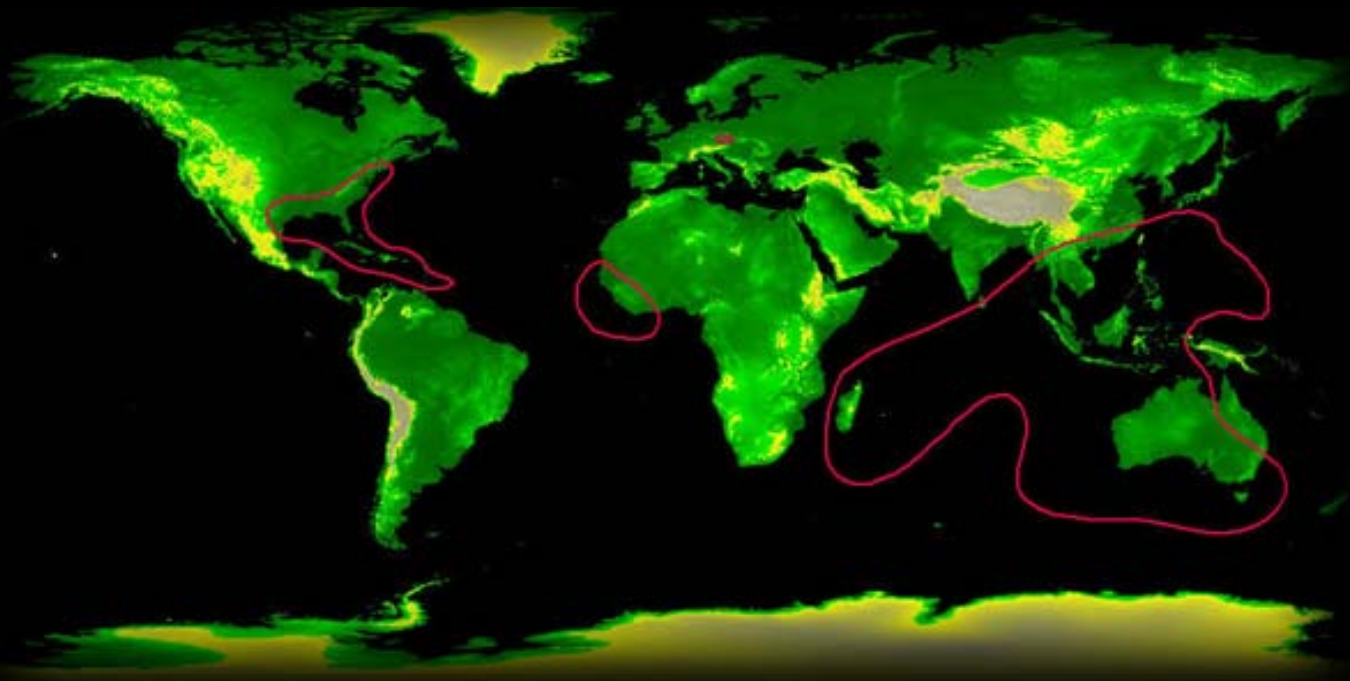
Australsko-asijské (indočínity, australity, filipínity, javaniity apod., stáří cca **0,7 Ma**, matečný kráter - zatím nepotvrzen)

Pobřeží slonoviny

(Ivory coast, ivority): stáří cca **1 Ma**, matečný kráter – **Bosumtwi** (Ghana)

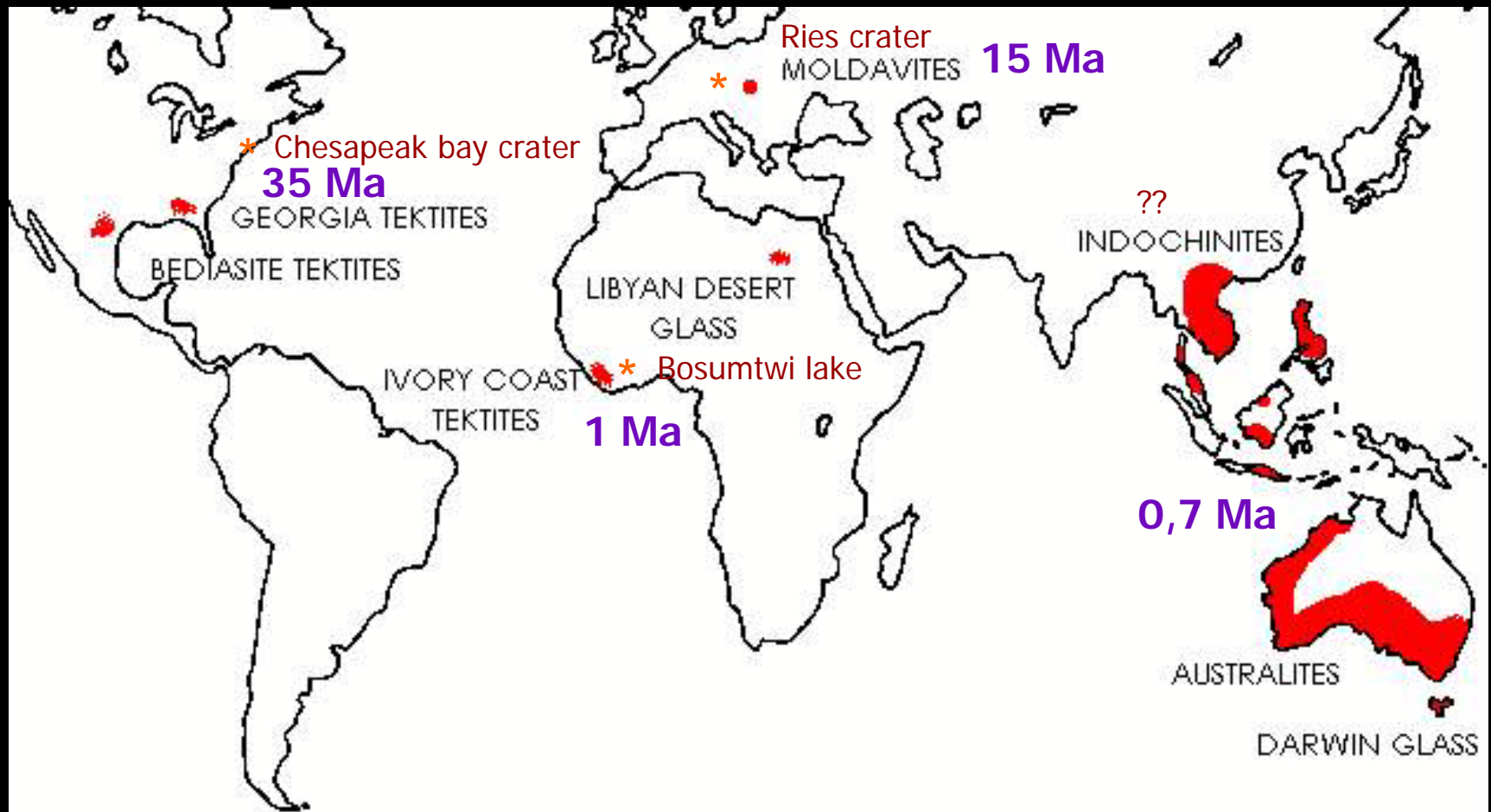
Středoevropské (vltavíny): stáří cca **15 Ma**, matečný kráter – **Ries** (Německo)

Severoamerické (georgiaity, bediasity): stáří **35 Ma**, matečný kráter – **Chesapeake bay** (USA)



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Pádová pole tektitů:



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Vltavíny

- mateřským kráterem je **Ries** v Německu (24 km), vltavíny jsou produkty přetavení svrchních, převážně písčitých, sedimentů
- pádová pole vzdálená 200-450 km

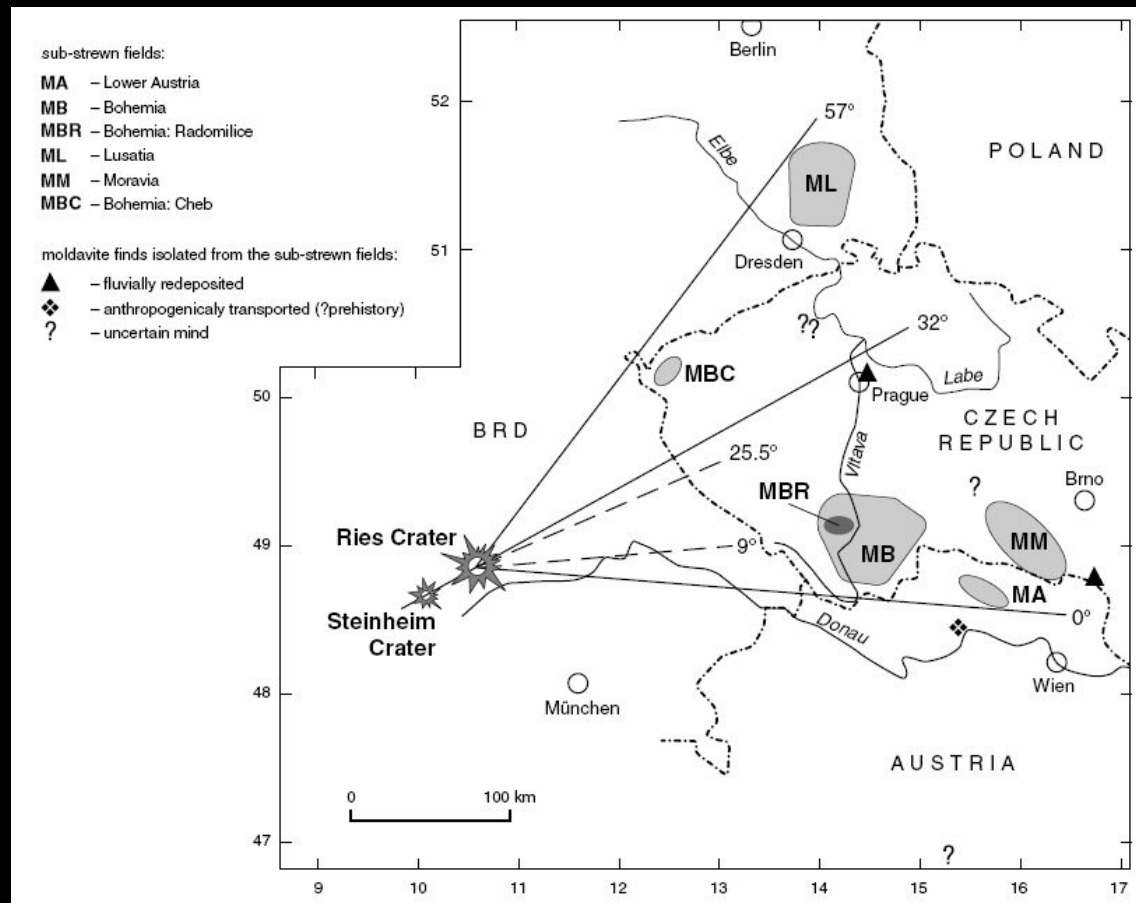


Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Vltavíny

Vltavíny se vyskytují na území České republiky, Rakouska a Německa. Na území České republiky se nacházejí na třech ne zcela souvisejících oblastech – v jižních Čechách, na jihozápadní Moravě a v okolí Chebu.

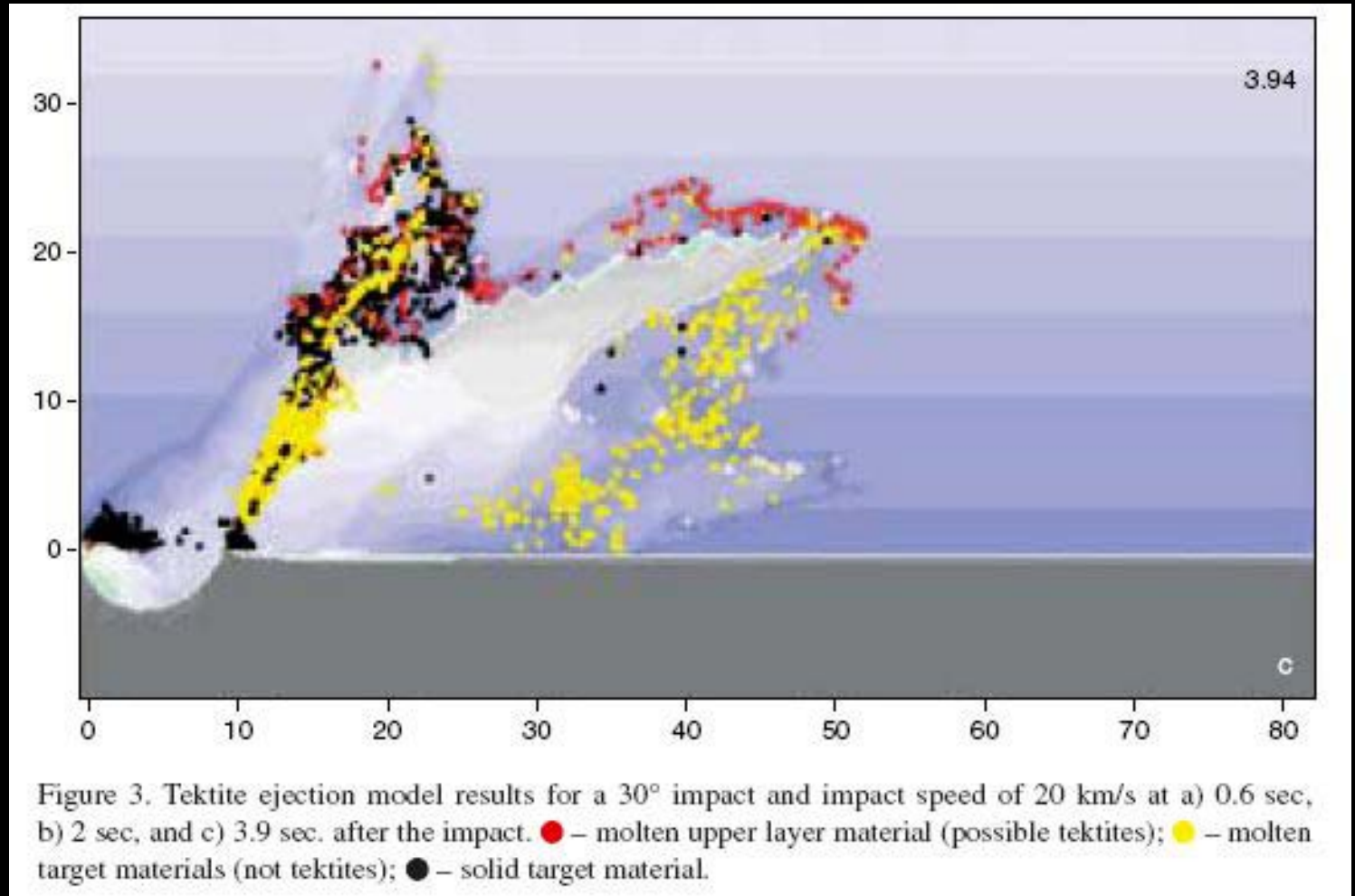
Vltavíny na území Rakouska se nacházejí v oblasti Hornu, nedaleko moravských nalezišť v okolí Znojma. Doposud bylo nalezeno přibližně dvacet kusů. Na území Německa v oblasti Lužice se od roku 1967 našlo více jak 300 vltavínů.



Nachází se na území přibližně 1 300 km² sv. od Drážďan. I když existuje jistá odlišnost vltavínů z jednotlivých oblastí (koroze, velikost, tvar, barva), předpokládáme jejich stejnou genezi (stejně stáří, podobný chemizmus).

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Vltavíny



Artemieva et al. (2002)

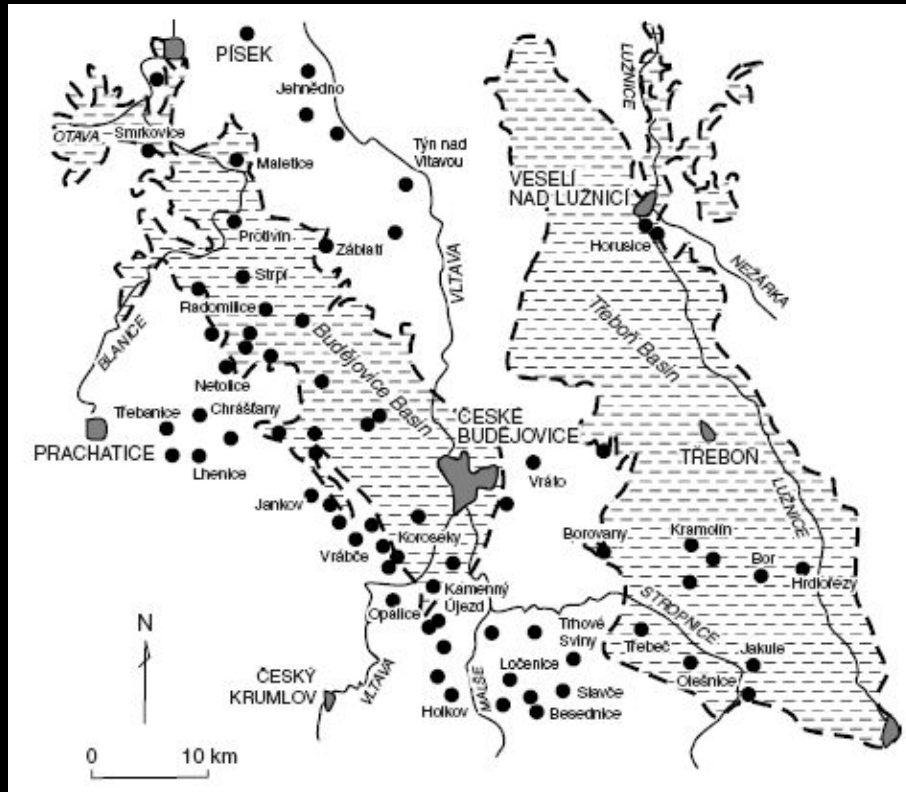
Model vzniku vltavínů:

červená-vltavíny, žlutá-přetavené horniny (impaktní skla), černá-nepřetavené horniny

Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Vltavíny

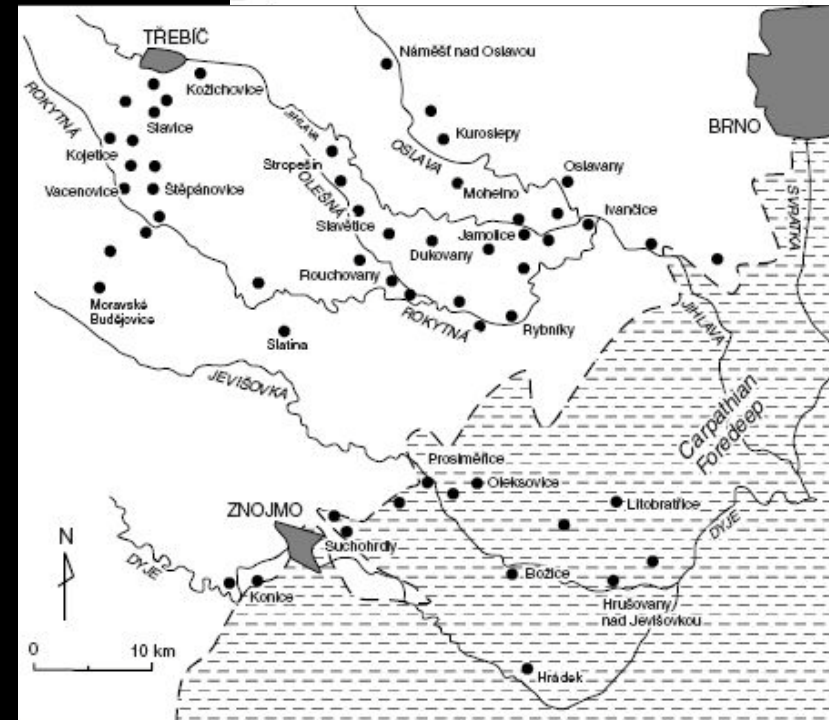
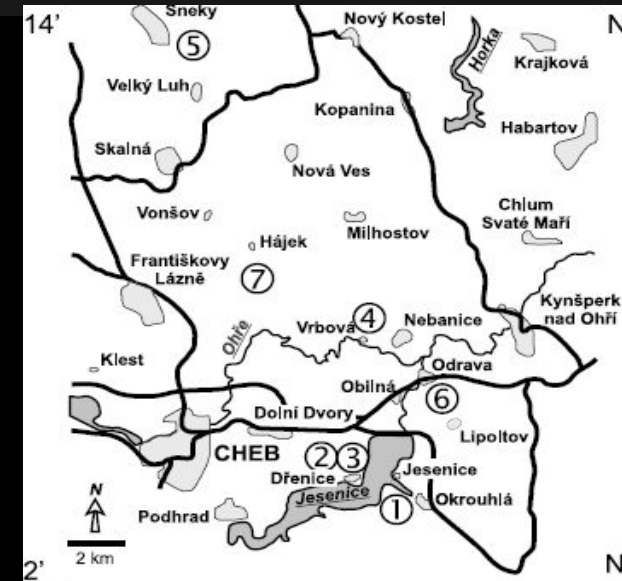
Trnka a Houzar (2002), Skála et al. (2009)



Jihočeské lokality ((V rámci jihočeských vltavínů se ještě vyčleňuje tzv. Radomilická oblast)

Moravské lokality

Chebské lokality



Šokově přeměněné horniny (impaktity)

Více informací i impaktních sklech se dozvíte v prezentaci k předmětu

Přírodní skla (autor L. Dziková):

http://www.sci.muni.cz/prirodni_skla/



Ekonomický význam impaktních kráterů

Impaktové události vedly k vytvoření geologických struktur, jež následně mohou mít ekonomický význam. Jen severoamerické impaktové struktury vydělají kolem 5 mld. \$/rok.

Mezi těžené materiály patří např.

stavební kámen

diamanty

uran

uhlovodíky

rudy

Díky rozrušení matečných hornin vzniknou brekciovitě zóny, které fungují jako pasti pro ropu a plyn.

Jiné typy brekcií jsou využívány jako stavební kámen (př. Ries, Německo; Rochechouart, Francie).

Někdy jsou krátery vyplněny sedimenty ekonomického významu (diatomity, sádrovec, Pb-Zn rudy apod. (Ragozinka, Rusko; Lake St. Martin, Kanada; Crooked Creek; USA).

Impakty mohou vyvolat vulkanickou činnost (extrémní zahřátí kůry-kontaminace korovými materiály).

Největším producentem (2 mld.\$) je pánev Sudbury v Kanadě, která je největším producentem Ni-Cu-PGE rud na Zemi (vázány na SIC-Sudbury igneous complex).



Kostel ze suevitu, Nördlingen, Německo



Zajímavá videa:

<http://www.youtube.com/watch?v=dNRTtLLuNM8&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=UFs-W0twxKg&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=-zvCUmeoHpw>

<http://www.youtube.com/watch?v=Qy8RzTfn9t4>

http://www.youtube.com/watch?v=VHH8cXM4_n4&feature=related





Workshop Nördlingen 2010

“The Ries Crater, the Moon, and the Future of Human Space Exploration”

Geological excursion to the Ries impact crater

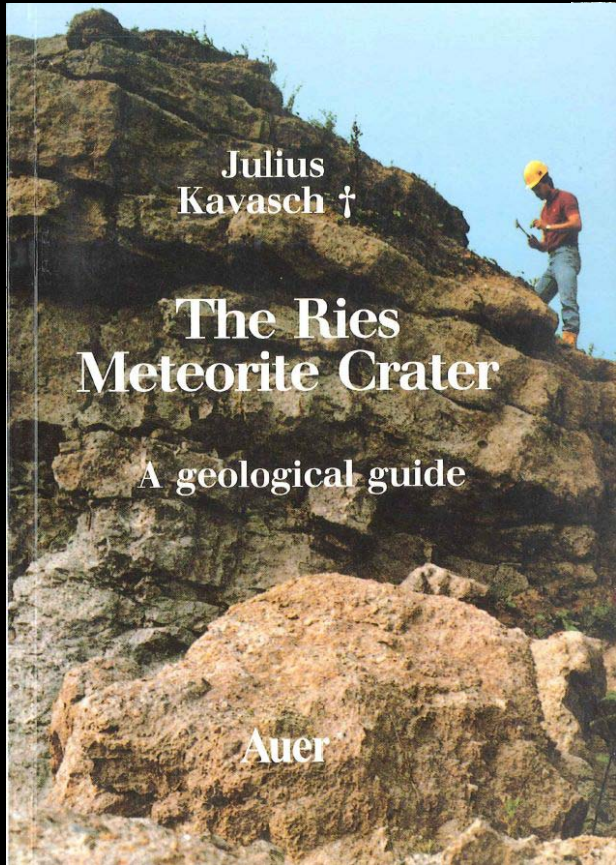
June 27, 2010

“On the track of the Apollo 14 and 17 astronauts of August 1970”

Excursion leaders: Dieter Stöffler, Sabine Heuschkel, Thomas Kenkmann, Jean Pohl, and Gisela Pösges

Guidebook compiled by Dieter Stöffler

with contributions by Natalya A. Artemieva, Thomas Kenkmann, Jean Pohl, Gisela Pösges, and Kai Wünnemann

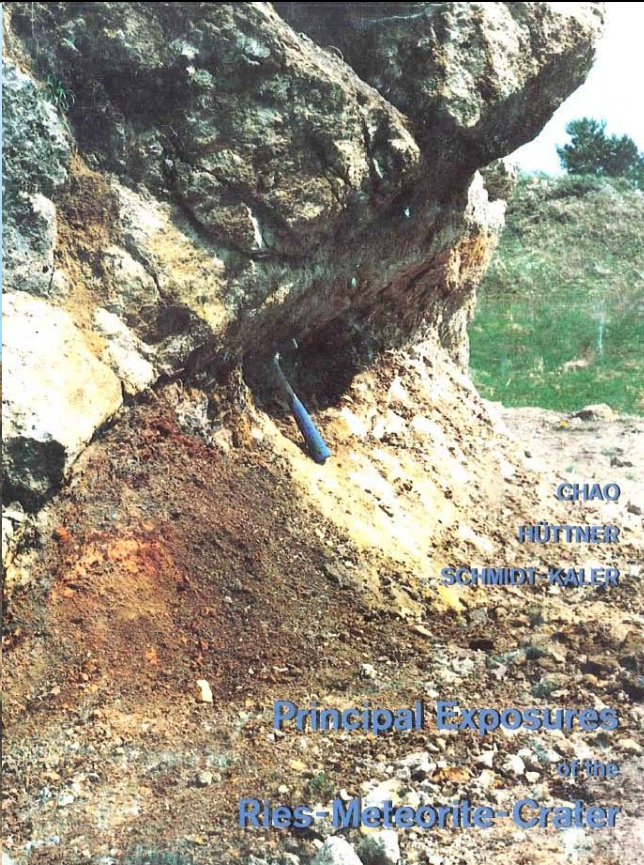


Julius Kavasch †

The Ries Meteorite Crater

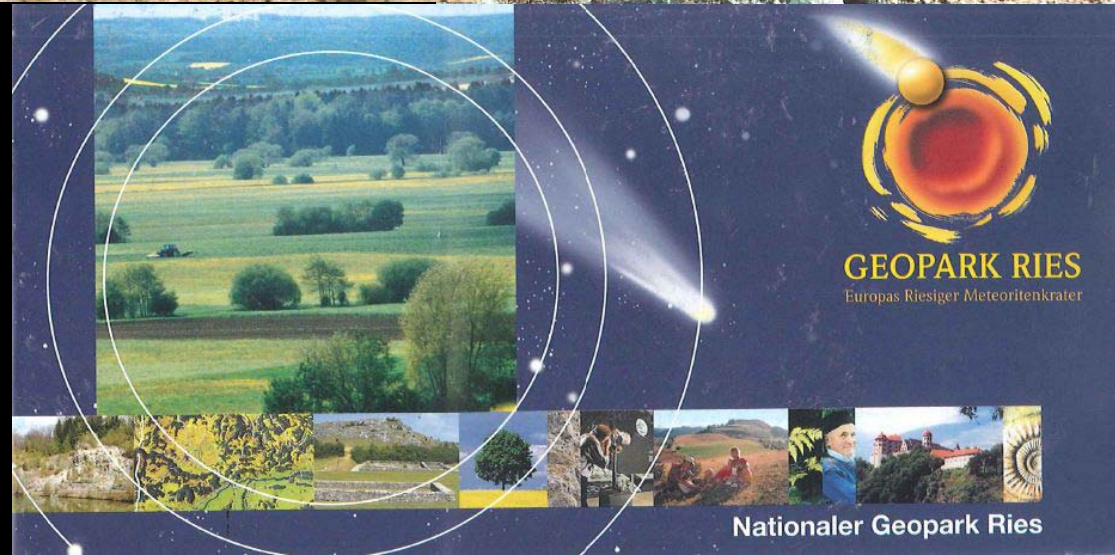
A geological guide

Auer



CHAO
HÜTTNER
SCHMIDT-KALER

Principal Exposures
of the
Ries-Meteorite-Crater



GEPARK RIES
Europas Riesiger Meteoritenkrater

Nationaler Geopark Ries

DEIKOVA

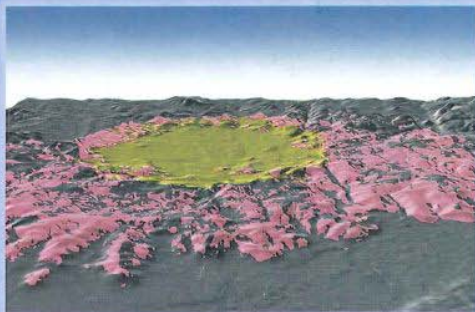
Meteoritenkrater Nördlinger Ries

Meteorite crater Nördlinger Ries

Geologische Karte - *Geologic map*

1:100 000

Mit Kurzerläuterungen
with brief description

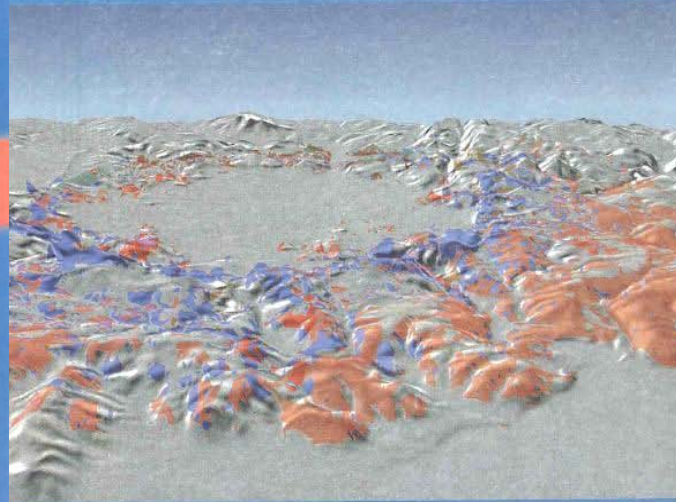


Bayerisches Geologisches Landesamt

DEIKOVA

GEOLOGISCHE KARTE DES RIESES

1:50 000



Mit Kurzerläuterung auf der Rückseite



Bayerisches Geologisches Landesamt

Bayerisches Geologisches Landesamt München 2005

DEIKOVA

Steinheim
am Albuch

...im Ries Meteoritenkrater



Meteorkrater - Rundwanderweg

NATURWELT METEORKRATER

Literatura

- Alvarez L., Alvarez W., Asar F., Michel H. (1980): Iridium Anomaly Approximately Synchronous with Terminal Eocene Extinctions. *Science*, Vol. 216, no. 4548, p. 886-888.
- Arndt J., Hummel W., and Gonzalez-Cabeza I. (1982) Diaplectic labradorite glass from the Manicouagan impact crater. I. Physical properties, crystallization, structural and genetic implications. *Phys. Chem. Minerals*, 8, 230-239.
- Bottke W.F., Vokrouhlický D., Nesvorný D. (2007): An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature* 449, 48-53.
- Claeys P. a Goderis S. (2007): Solar System: Lethal billiards. *Nature*, 449, 30-31
- F. M. McCubbin a H. Nekvasil (2008): Maskelynite-hosted apatite in the Chassigny meteorite: Insights into late-stage magmatic volatile evolution in martian magmas. *American Mineralogist*, 93, 676-684
- Folco L., D'Orazio M., Tiepolo M., Tonariny S., Ottoliny L., Perchiazzi N., Rochette P., Glass B.P. (2009): Transartactic Mountain microtektites: Geochemical affinity with Australasian microtektites. –*Geochim. Cosmochim. Acta* 73, s. 3694-3722.
- French B. M. (1998): Traces of catastrophes. A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. LPI, Houston.
- Gasperini L., Alvisi F., Biasini G., Bonatti E., Longo G., Pipan E., Ravaioli M., Serra R. (2007): A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova*, Vol. 19, Issue 4, 245-251.
- Ivanov, B.A. a Deutsch, A. (1999): Sudbury impact event: cratering mechanics and thermal history. *Geological Society of America Special Paper 339*, Boulder, Colorado.
- Jenniskens P. et al. (2009): The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. *Nature* 458, 485-488
- Koeberl, C. a Anderson, R. R., 1996, Manson and company: Impact structures in the United States, in Koeberl, C., and Anderson, R. R., eds., *The Manson Impact Structure, Iowa: Anatomy of an Impact Crater: Boulder, CO, Geological Society of America Special Paper 302*, 468 p.
- Pohl J., Stöffler D., Gall H., Ernst K. (1977): The Ries impact crater. In *Impact and explosion cratering*, edited by Roddy D. J., Pepin R. O. and Merrill R. B. New York: Pergamon press, 343-404.
- Pravec, P., et al. (2006): Photometric survey of binary near-Earth asteroids, *Icarus*, 181, 63-93.
- Rampino M.R. a Haggerty B.M. (1996): The "Shiva Hypothesis": Impacts, mass extinctions, and the galaxy. *Earth, Moon and Planets*, 72, 1-3, 441-460.
- Rohde R.A. a Muller, R.A. (2005): Cycles in fossil diversity. *Nature* 434 208-210.
- Sekanina Z. (1983): The Tunguska Event: No Cometary Signature in Evidence. *Astronomical Journal* Vol. 88 No. 9, 1383-1414.
- Skála R., Strnad L., McCammon C., Čada M. (2009): Moldavites from the Cheb basin, Czech republic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, s. 1145-1179.
- Stöffler D. a Reimold W. U. (2006): Geological setting, properties, and classification of terrestrial impact formations. *First Int. Conf. on Impact Crater. in the Solar System (Noordwijk 2006)*, 73-77.
- Trnka M. a Houzar S. (2002): Moldavites: a review. – *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77, No. 4, 283-302.
- Weaver K. F. (1986): Meteorites-Invaders From Space. *The National Geographic*. 390-418.
- Wright A.J., Parnella J., Ames D.E. (2010): Carbon spherules in Ni-Cu-PGE sulphide deposits in the Sudbury impact structure, Canada. *Precambrian Research* 177, 23-38.