

Paleoseismologie, její metody a příklady využití



Paleoseismologie

Co?

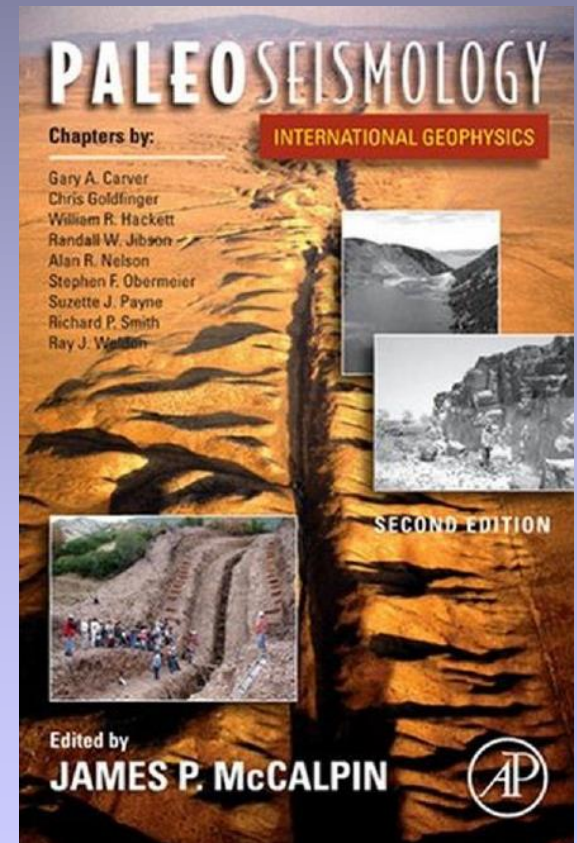
- zkoumá chování seismogenních zlomů v minulosti

Paleoseismologie studuje prehistorická zemětřesení - výskyt v prostoru, čase a jejich velikost.

Seismologové - pracují s daty naměřenými instrumentálně během zemětřesení

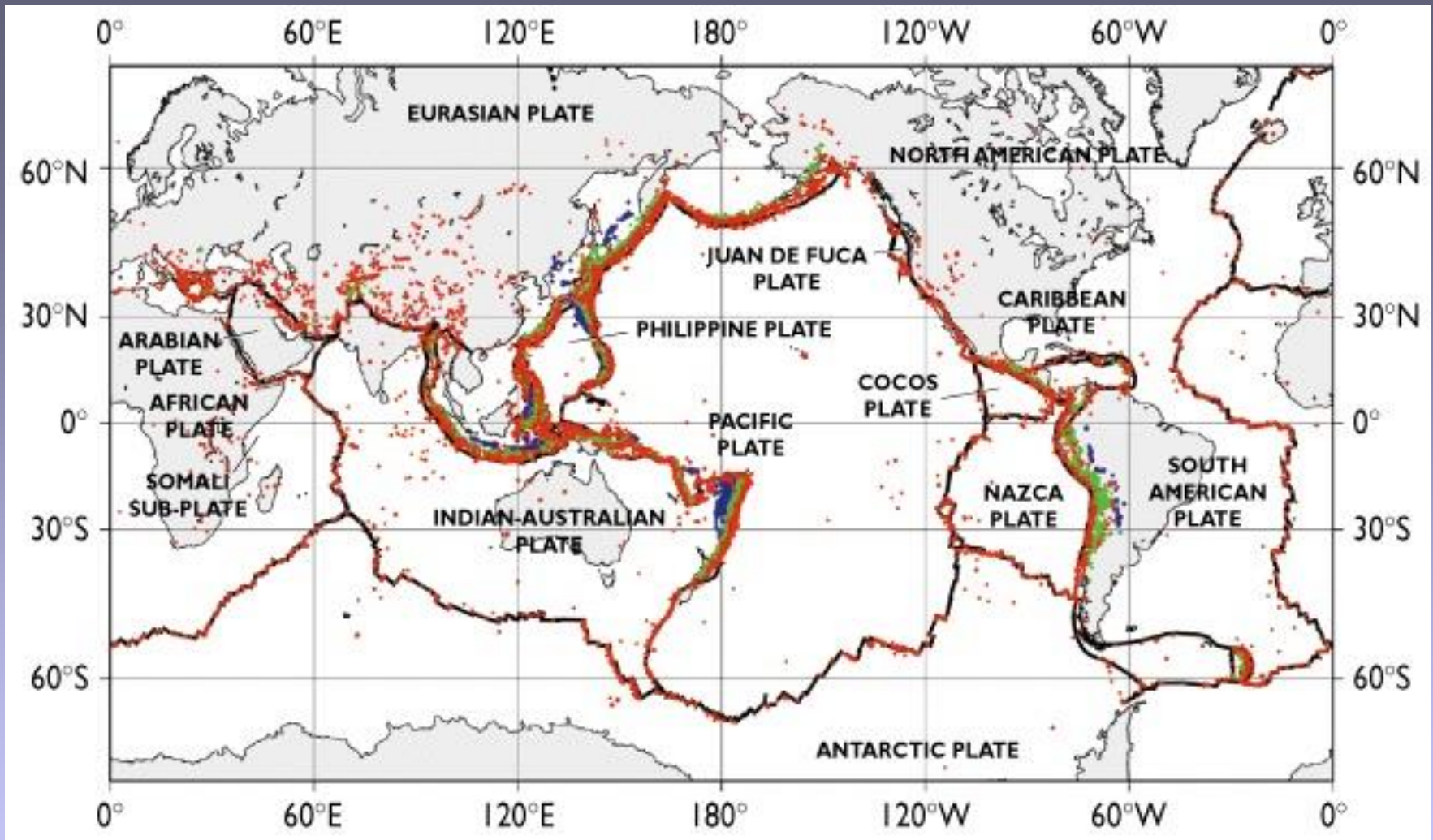
X

Paleoseismologové interpretují **geologické jevy** vyvolané během jednotlivých paleozemětřesení.



McCALPIN, J. (2009). *Paleoseismology*. San Diego: Academic Press.

Proč?



Současná seismicita - rozhraní litosférických desek, vnitrodeskové oblasti
Katastrofická zemětřesení - v oblastech na tektonických zlomech bez známé současné/historické seismicity - v rámci seismického cyklu delší interval opakování (recurrence interval) (Čína, Nový Zéland)

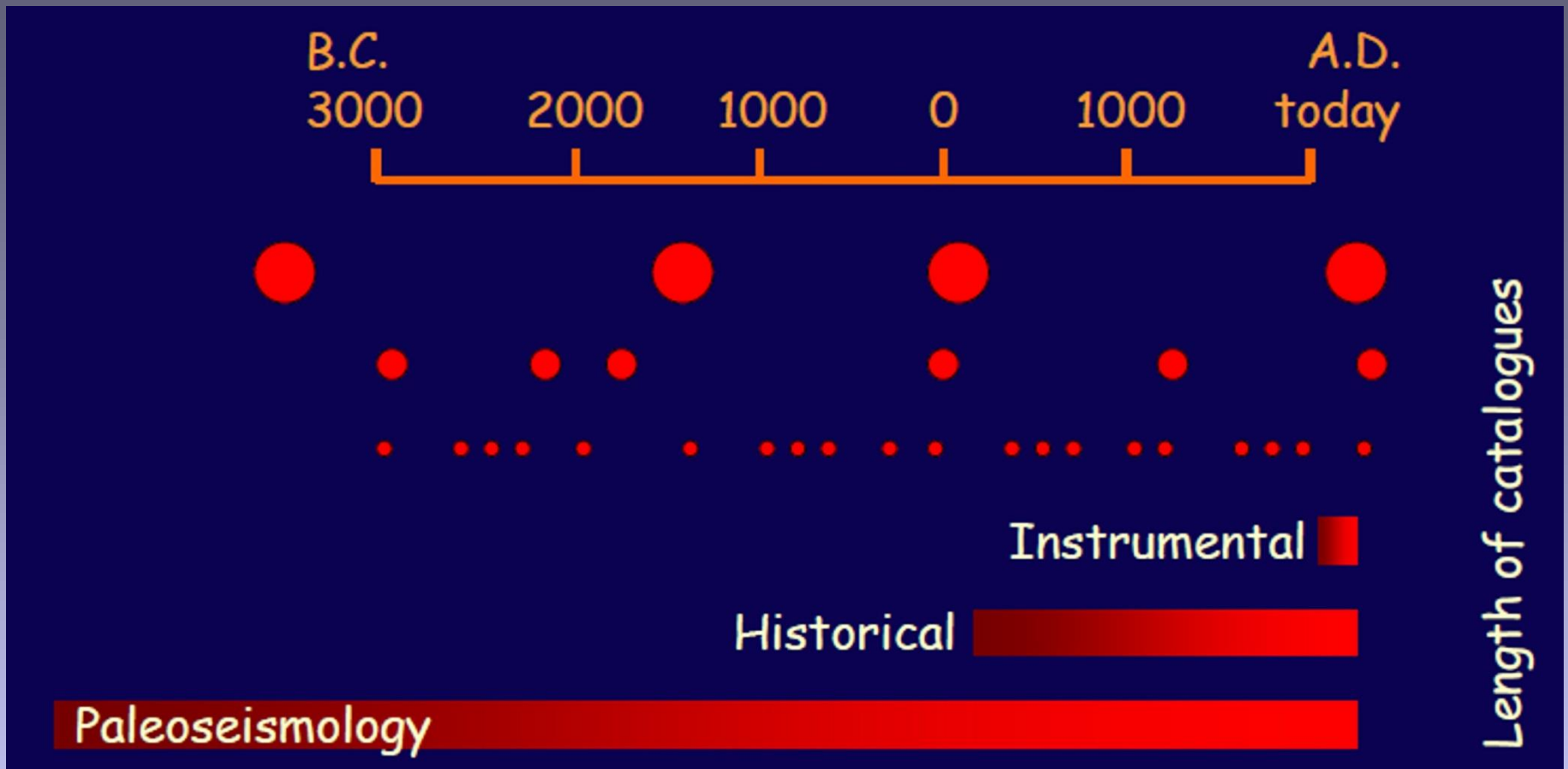
Většina zemí - záznam zemětřesení pouze několik stovek let (historická a instrumentální seismicita)

X aktivní zlomy, projevující se v geologii a morfologii, bez historického záznamu velkých zemětřesení

Čína a Střední Východ - záznam tisíc a více let, přesto nedostatečný na zaznamenání všech seismogenních zlomů; zlom aktivní milióny let - i 3tis let zahrnující záznam pokrývá pouze zlomek historie zlomu

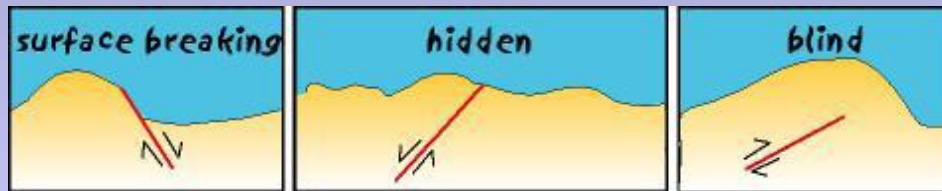
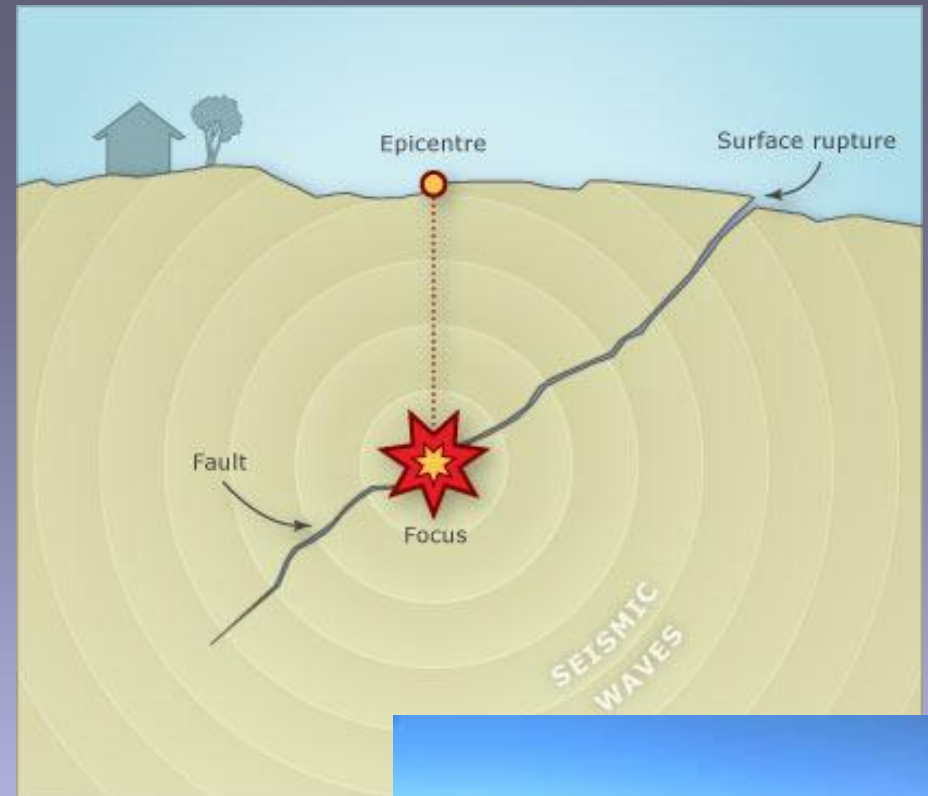
Hodnocení seismického ohrožení- založeného pouze na krátkém historickém záznamu - 2 problémy

- ❖ přecenění pravděpodobnosti budoucího zemětřesení na zlomu, na kterém došlo k velkému zemětřesení v historické době, ale má dlouhý recurrence interval (uvolněná energie)
- ❖ podcenění v oblastech, kde jsou zlomy seismogenní, ale není historický záznam (akumulace napětí)

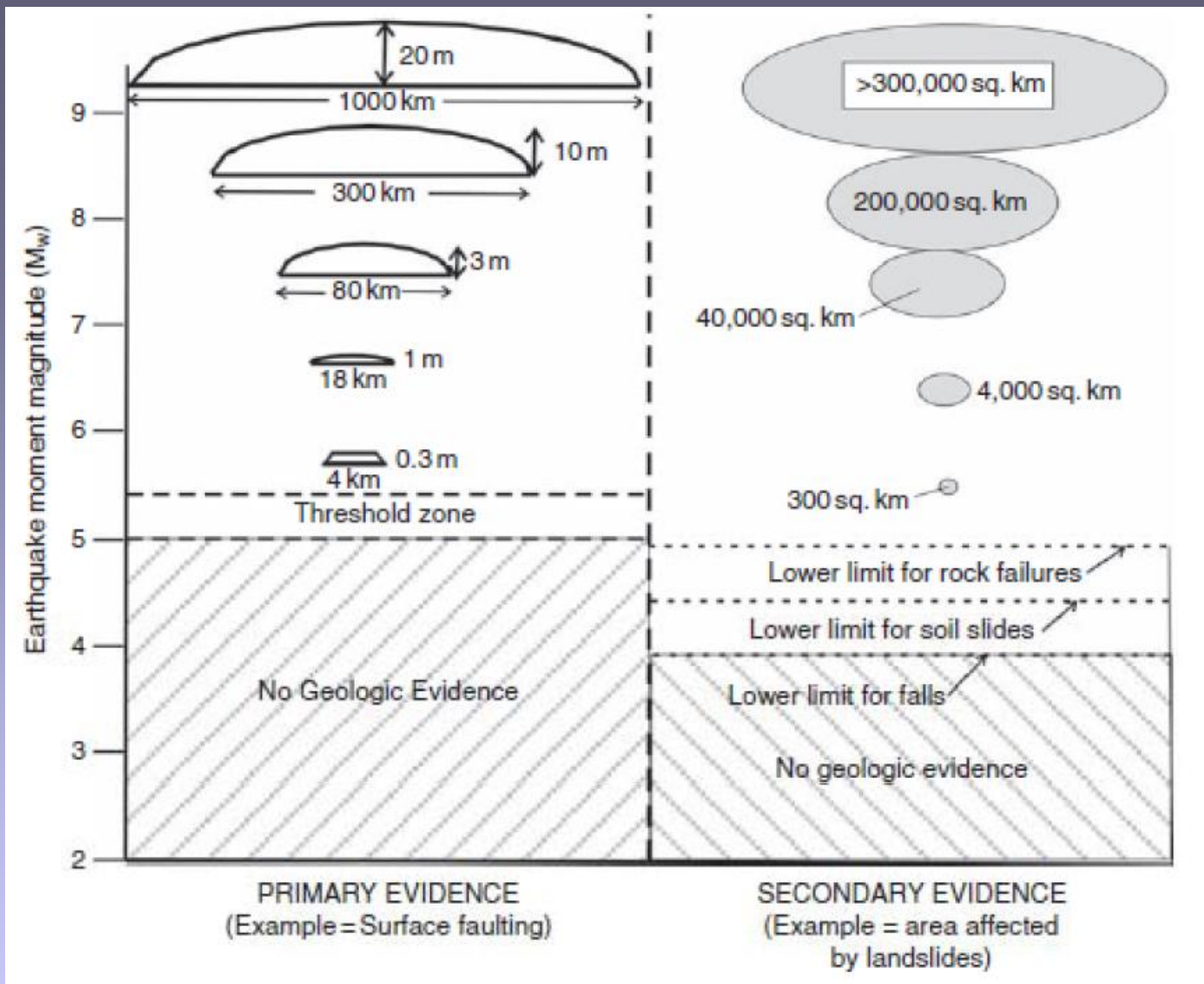


paleoseismologie rozšiřuje záznam zemětřesení směrem do minulosti, katalogy historických zemětřesení často příliš krátké ve srovnání s průměrným recurrence time

Předpoklad - zemětřesení větší než $M > 6$ může vytvořit **permanentní deformaci na povrchu** → topografická nerovnováha → **nové procesy eroze a akumulace** → nové formy a struktury → geologický záznam zemětřesení

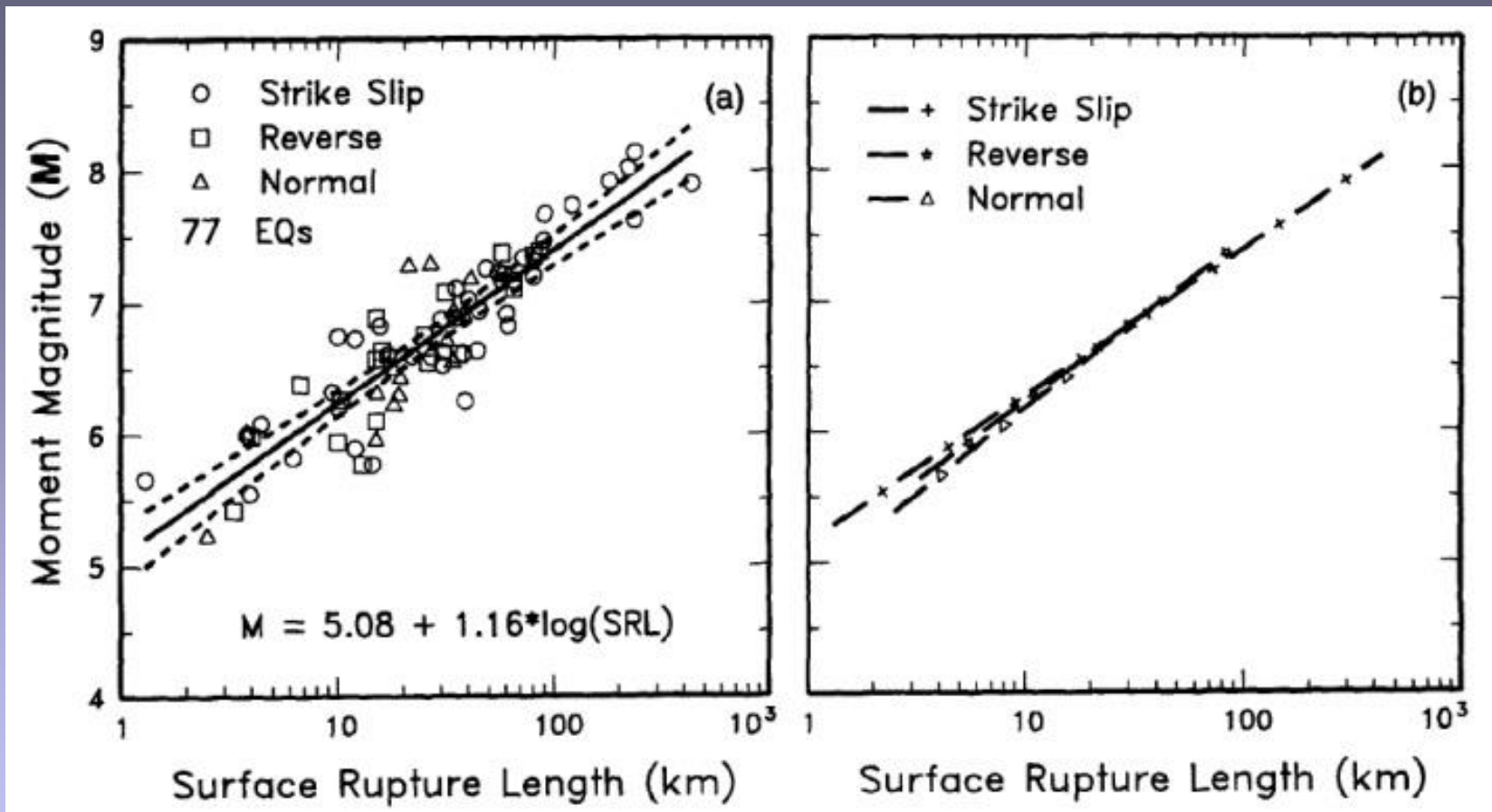


Menší zemětřesení - geologický projev zřídka vytvoří či zachová
 Typ zlomů - poklesy $M \geq 6,3$; horizontální posuny v j. Kalifornii - $M = 6,25-6,5$,
 Hloubka seismogenní kůry - hlubší potřebuje větší M ,
 Loma Prieta 1989 $M=6,9$, 2m slip v hloubce 18-3km, žádná povrchová ruptura
 Gujarat 2001 $M=7.7$, blind fault, 1-4m v hloubce 15-9km,

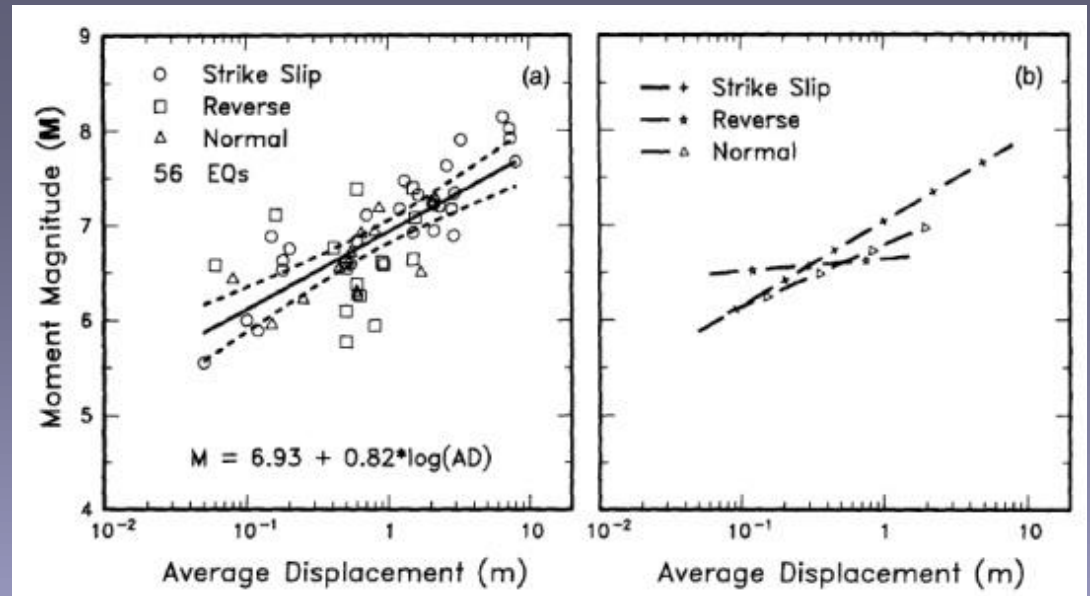
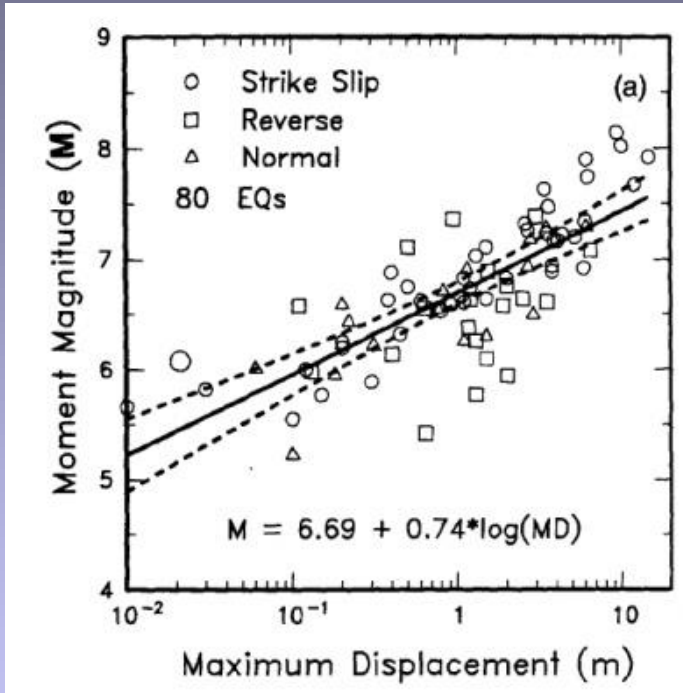


Empirické vztahy odvozeny z historických zemětřesení, menší M_w
 - prehistorická zemětřesení - lze studovat jen s větším M_w

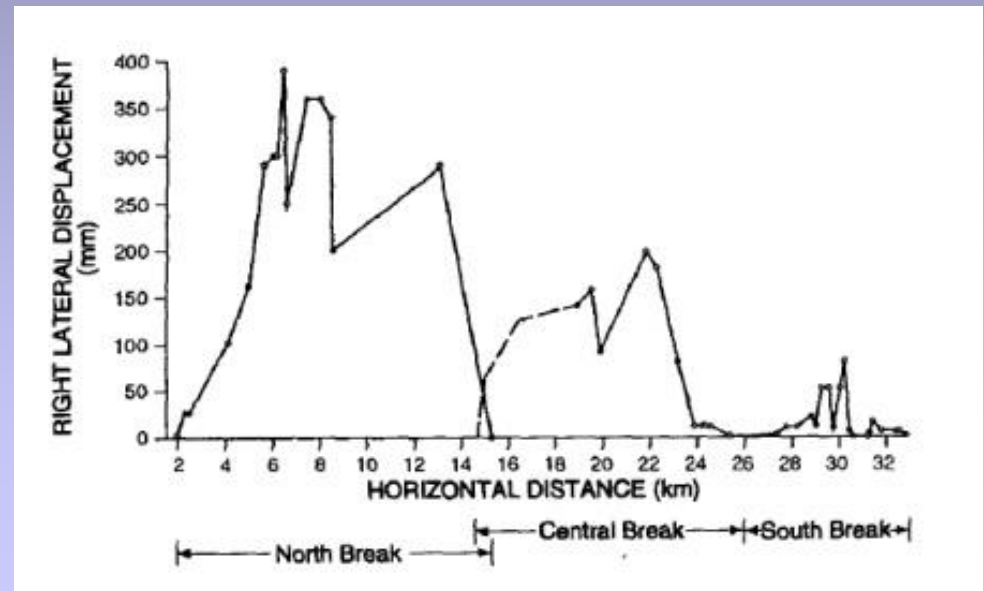
Empirické vztahy: délka zlomu, velikost posunu, velikost magnituda, např. zlom o délce 80km vygeneruje zemětřesení $M_w=7,5$ a posun okolo 3m



Empirické vztahy - historická zemětřesení, (421), ohnisko <40km, $M_w > 4,5$
 Wells, and Coppersmith 1992

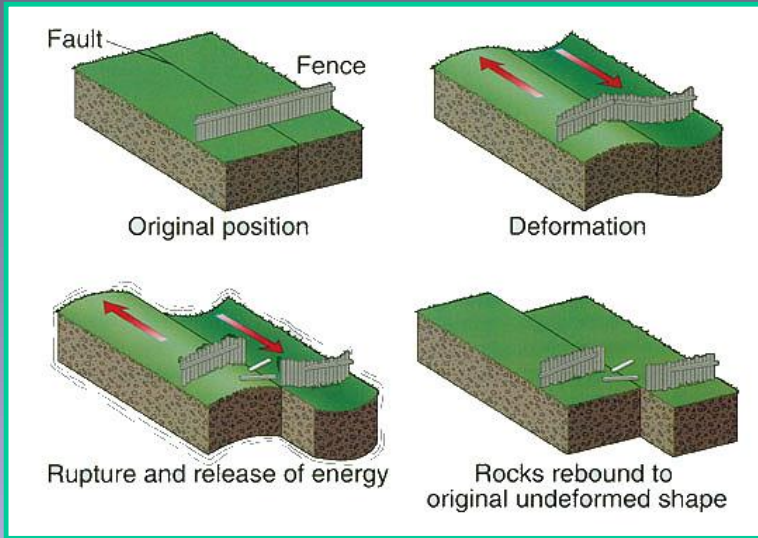


Průměr mnohčetných měření posunů podél zlomu

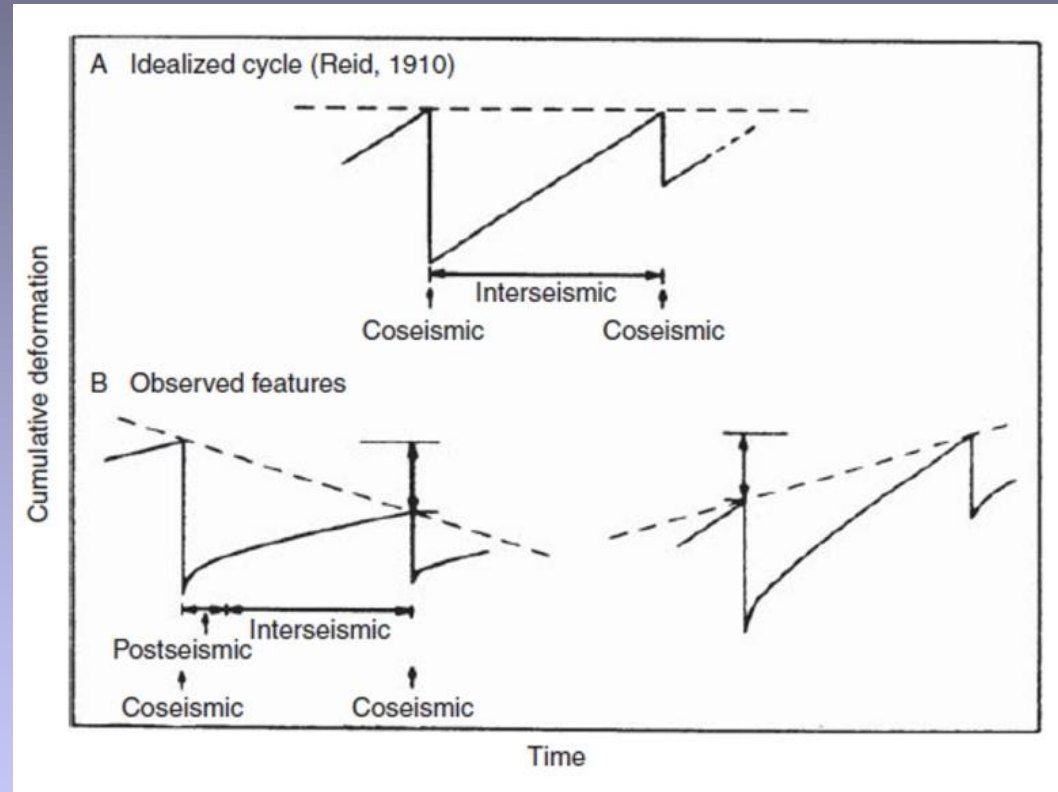


9. 4. 1968, Borego Mts, CA

Seismický cyklus – elastický model



Idealizovaný cyklus -
charakteristické zemětřesení



Earthquake deformation cycle

Paleoseismologické studium zlomů

- ❖ Lokalizace a geometrie zlomu (geomorfologické a geologické mapování)
- ❖ Slip rate - rychlost zlomu (= posun : čas)
- ❖ Slip per event - charakteristický posun při jednotlivých EQ
- ❖ Recurrence period - interval opakování (při opakovaných EQ), frekvence EQ
- ❖ Elapsed time - čas uplynutý od posledního EQ
- ❖ Maximální magnitudo

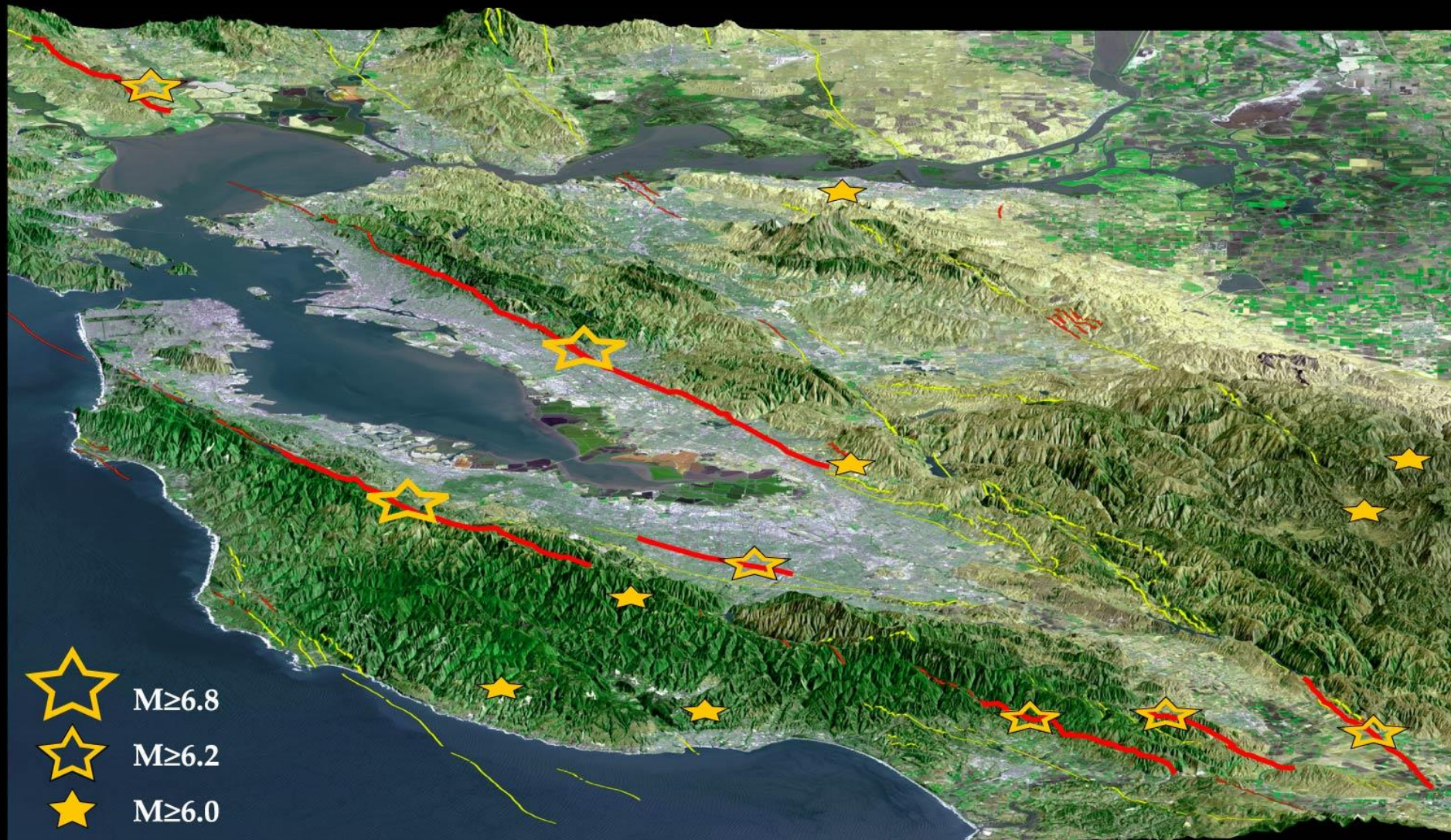
Rekonstrukce chronologie pohybů

- ❖ stratigrafické, strukturní, geomorfologické, biologické, archeologické doklady
- ❖ datování dislokovaných tvarů / jiných indikátorů pohybu - charakteristika proběhlých pohybů
- ❖ datování vícenásobných pohybů na daném zlomu - recurrence interval, dlouhodobější slip-rate, variabilita pohybů při zemětřeseních



prognóza lokalizace a magnituda budoucího zemětřesení

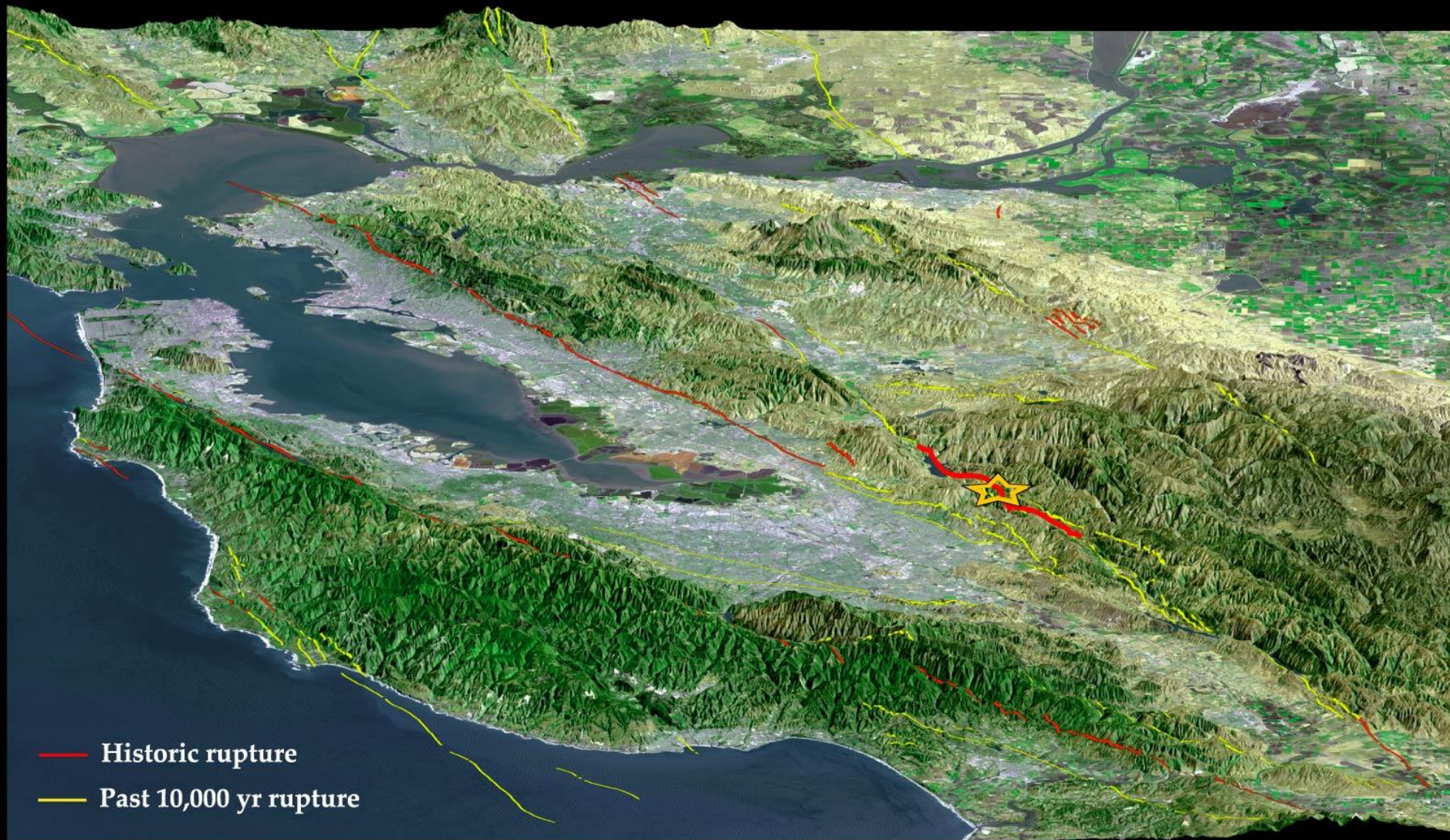
Bay area shocks during the 75 years *before* 1906



from *Stein* (Nature, 2003)

Earthquakes from *Bakun* [1999] and *Ellsworth* [1990]

Bay area shocks during the 75 years *after* 1906



from *Stein* (Nature, 2003)

1911 M=6.2 shock from *Bakun* [BSSA, 1999]

Přímé pozorování dislokovaných tvarů, posunutých objektů - na povrchu, v odkryvech, v umělých rýhách

a) na povrchu

b) umělé rýhy (trench) - jeden ze základních nástrojů pro sběr paleoseismických dat pro hodnocení seismického rizika



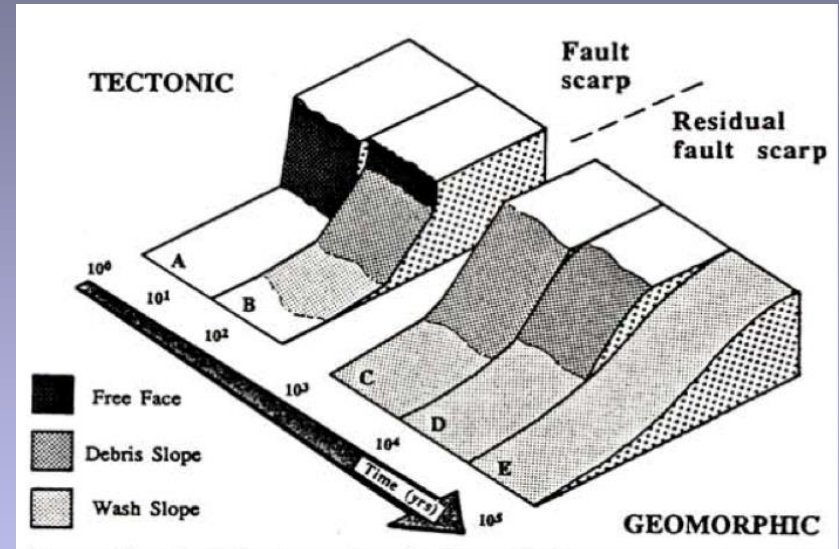
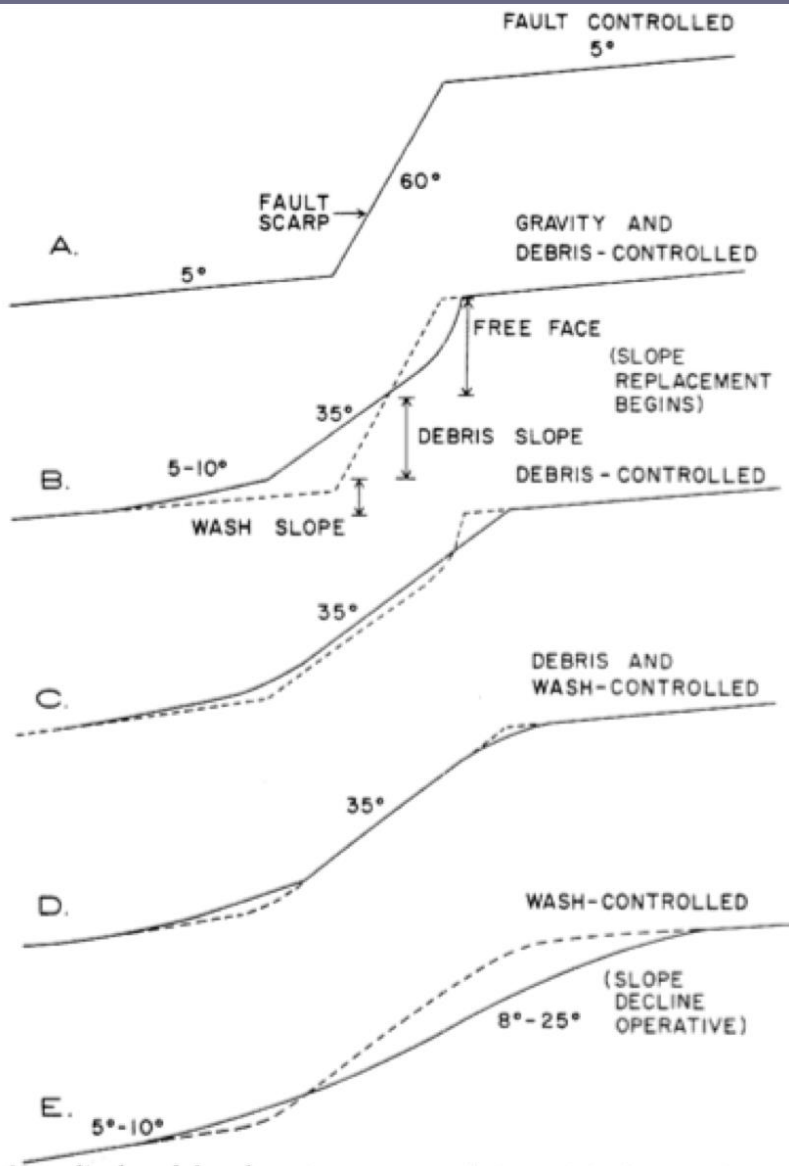
❖ v sedimentech jemnozrnných, vrstevnatých - dobře rozeznatelné posuny vrstev, ne příliš mocných (hloubka)

- aluviální kužely, jezerní sedimenty X přívalový proud

❖ datovatelný materiál - určení chronologie pohybů

Poklesové zlomy

Na povrchu - zlomový svah - fault scarp (degradace zlomového svahu v čase



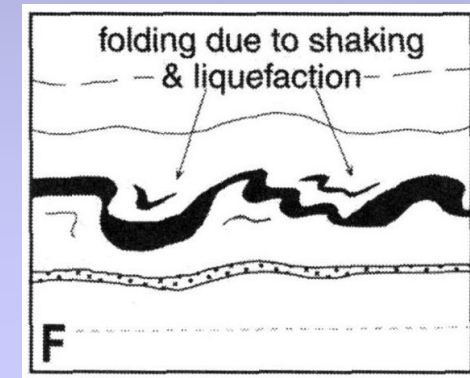
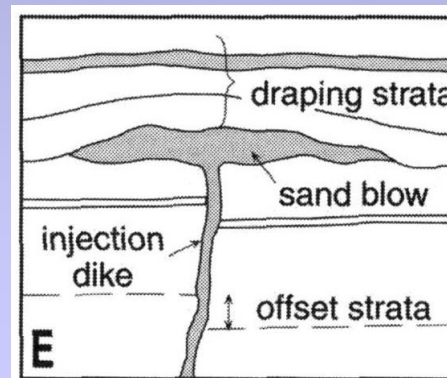
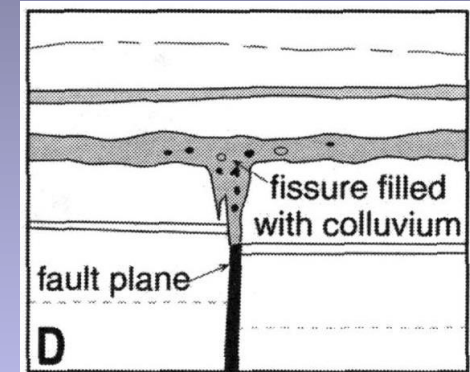
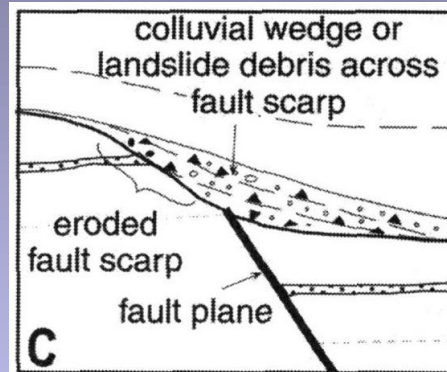
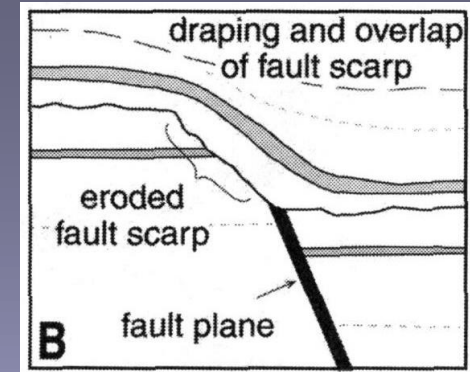
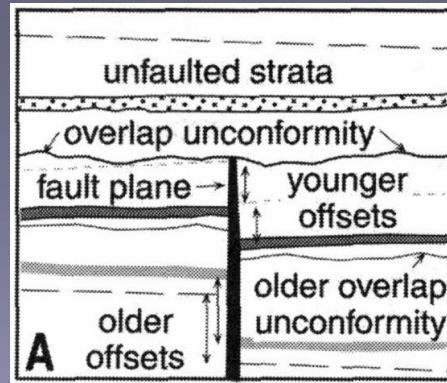
Stewart, Hancock, 1990



Krupnik fault , Bulgary, 1904 M=7,8

V rýhách - doklady zemětřesení v geologickém záznamu

- Rozdíly v kumulativním offsetu
- Překrytý fault scarp
- Coluvial wedge- typický doklad náhlého pohybu
- Trhliny vyplněné nadložním materiálem
- Sand dyke (klastická žíla) - materiál injikovaný při otřesech
- Vrstvy s likvefakcí



Opakované pohyby

Rozdíly v kumulativním offsetu

? Kolik zemětřesení máme??

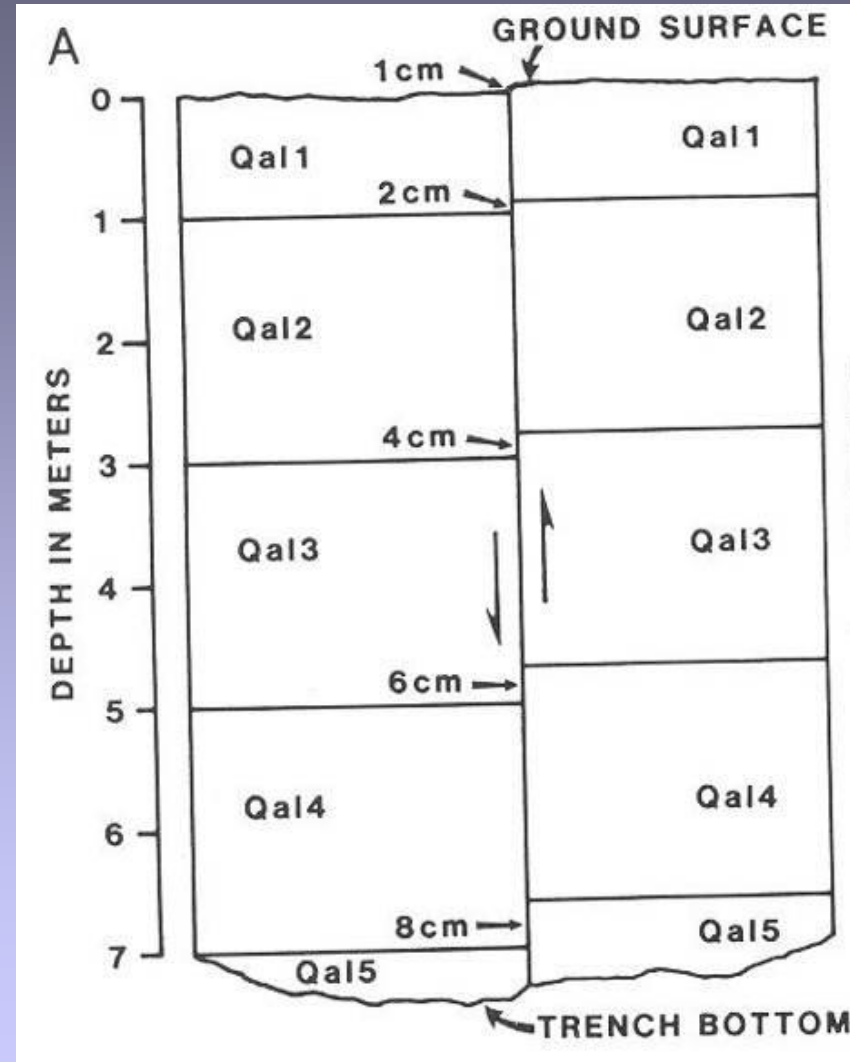
Retrodeformace

4 události – vertikální posun v průměru 2cm

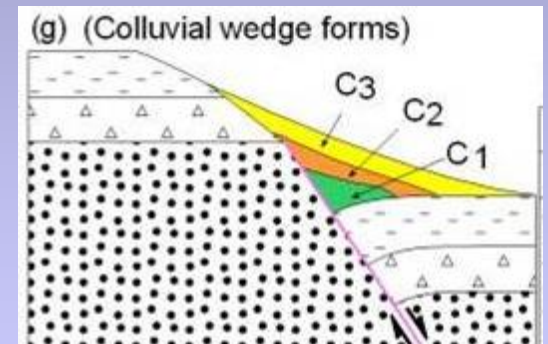
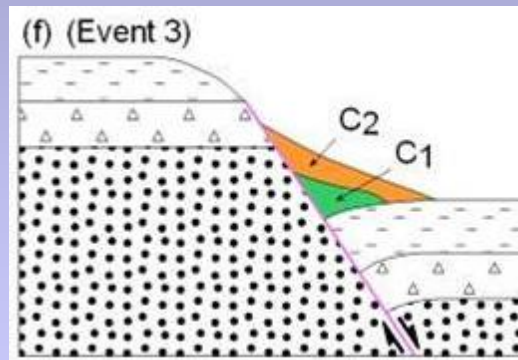
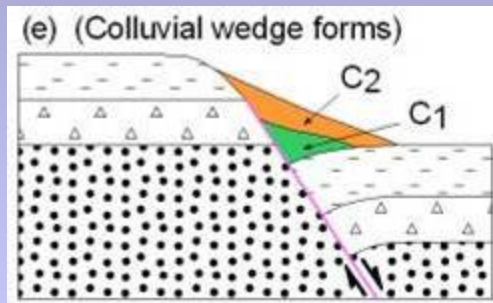
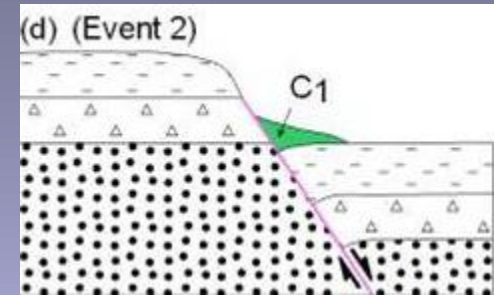
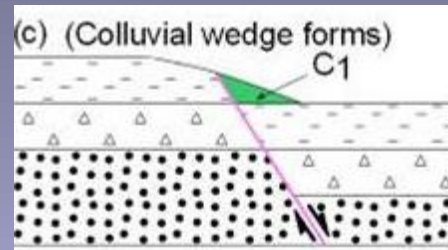
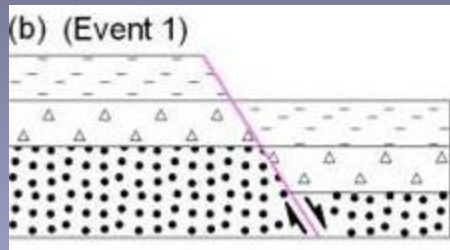
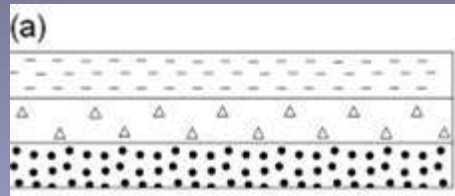
Nejstarší vrstva - (Qal5) zaznamenal všechny 4, kumulovaně 8cm

Nejmladší (Qal1) má jen jeden event → 2 cm na bázi, ale 1 cm na povrchu !

Povrchová eroze

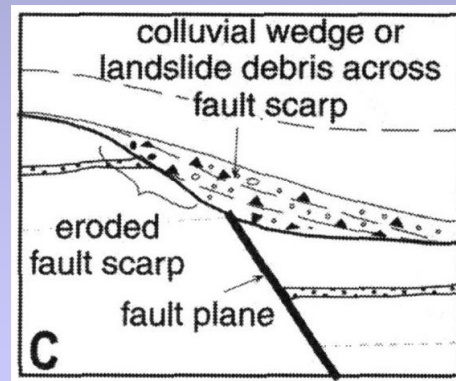


Coluvial wedge Retrodeformace - počet událostí

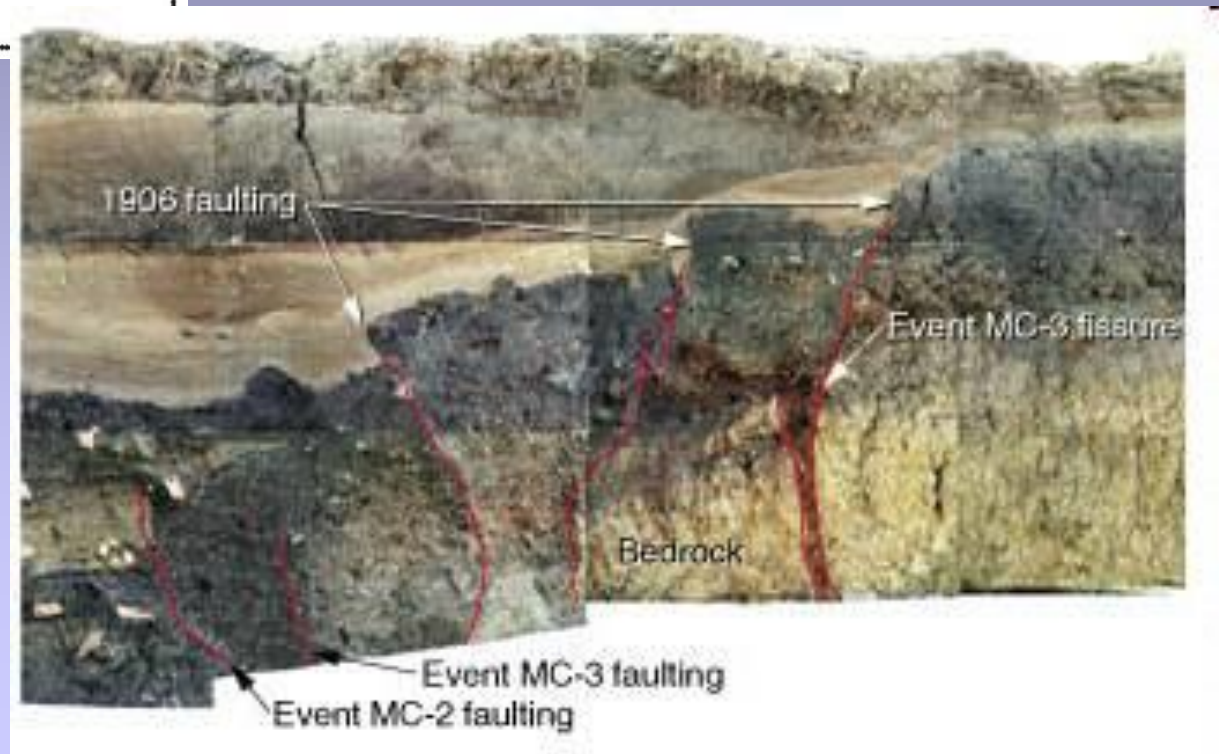
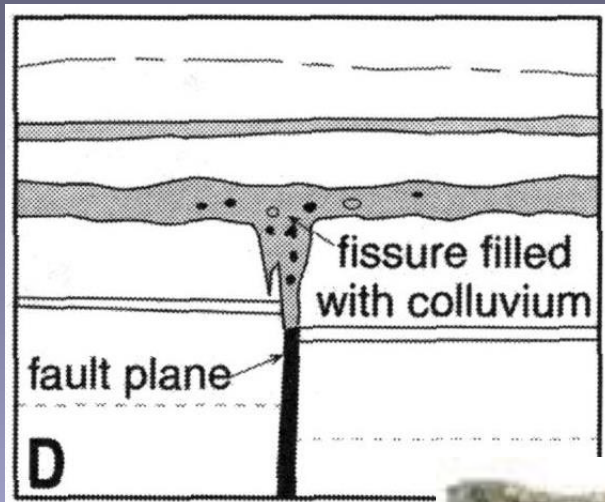




Gravitační
nestabilita,
materiál tvořící
wedge pochází z
fault scarp



- Vyplnění trhlin



fault scarp na přesmyku

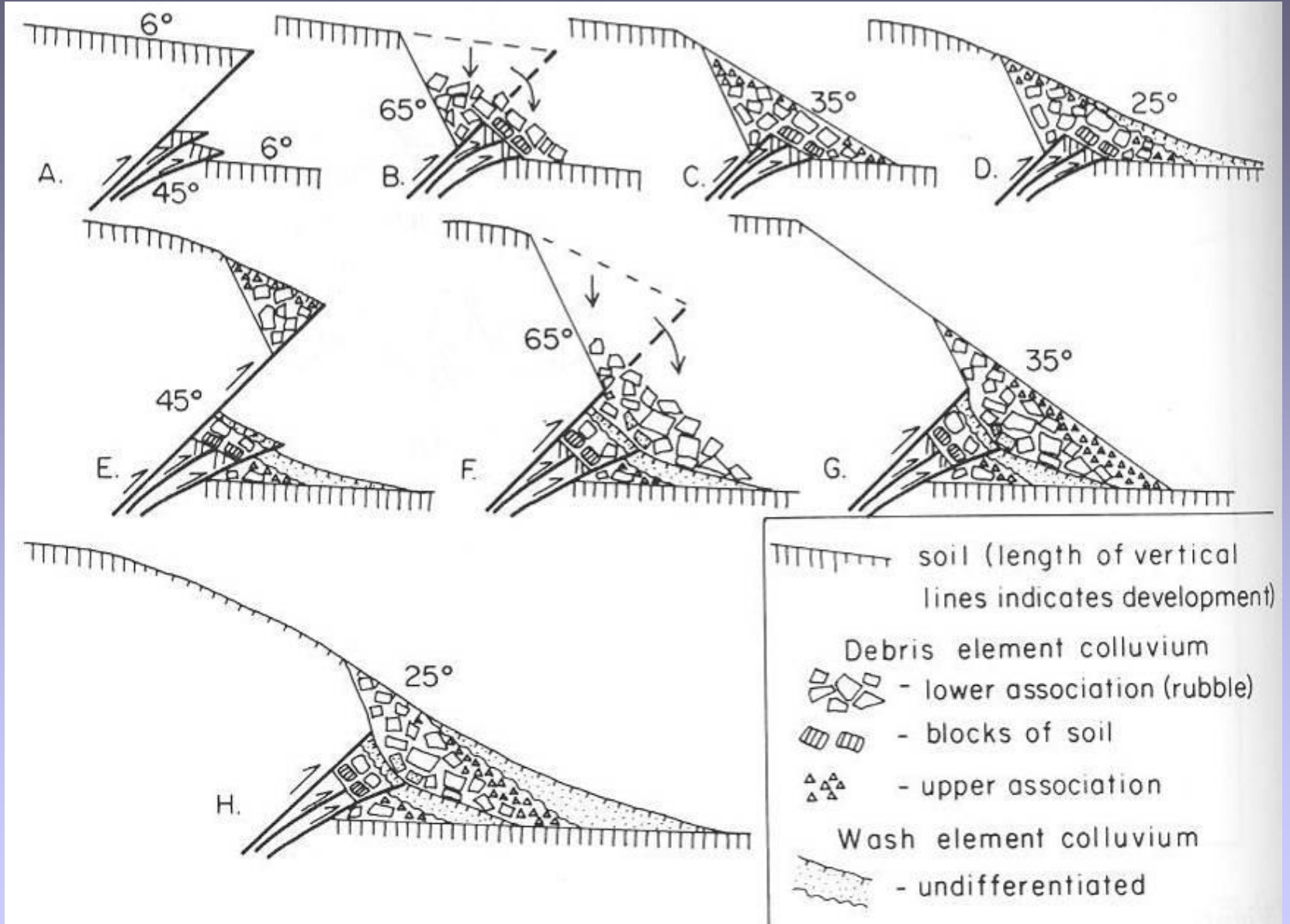


Chichi earthquake 1999, Taiwan



Suusamyr, 1992, $M=7,4$
Kyrgyzstan

Přesmykové zlomy - coluvial wedge



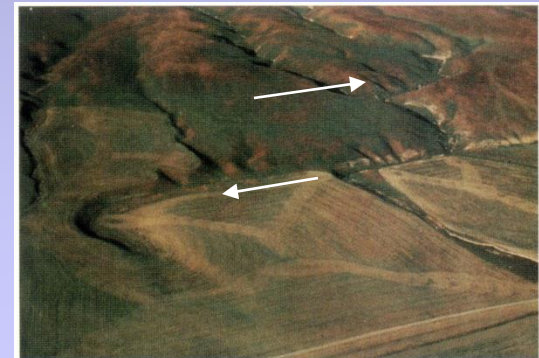
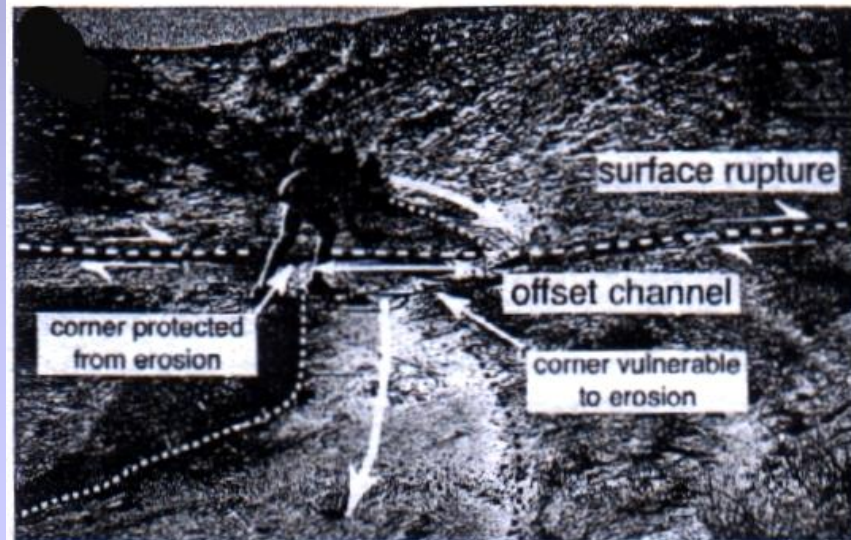
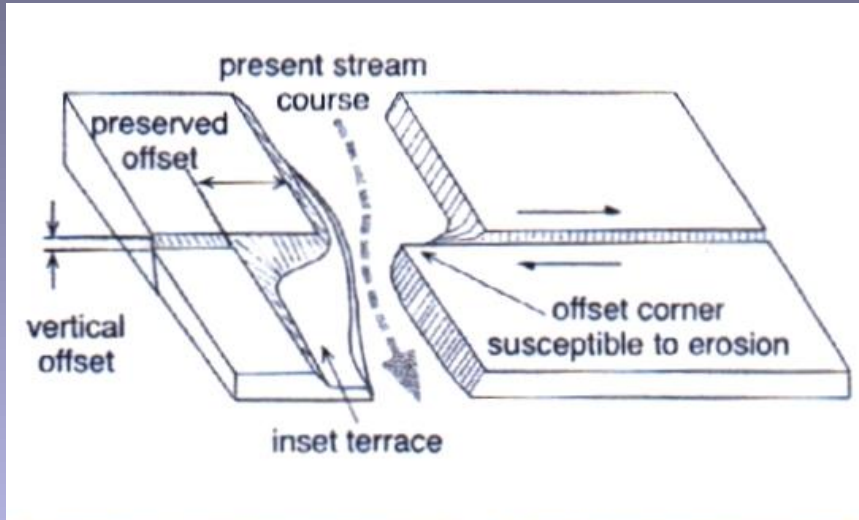


Alhama de Murcia fault, Španělsko



Horizontální posuny:

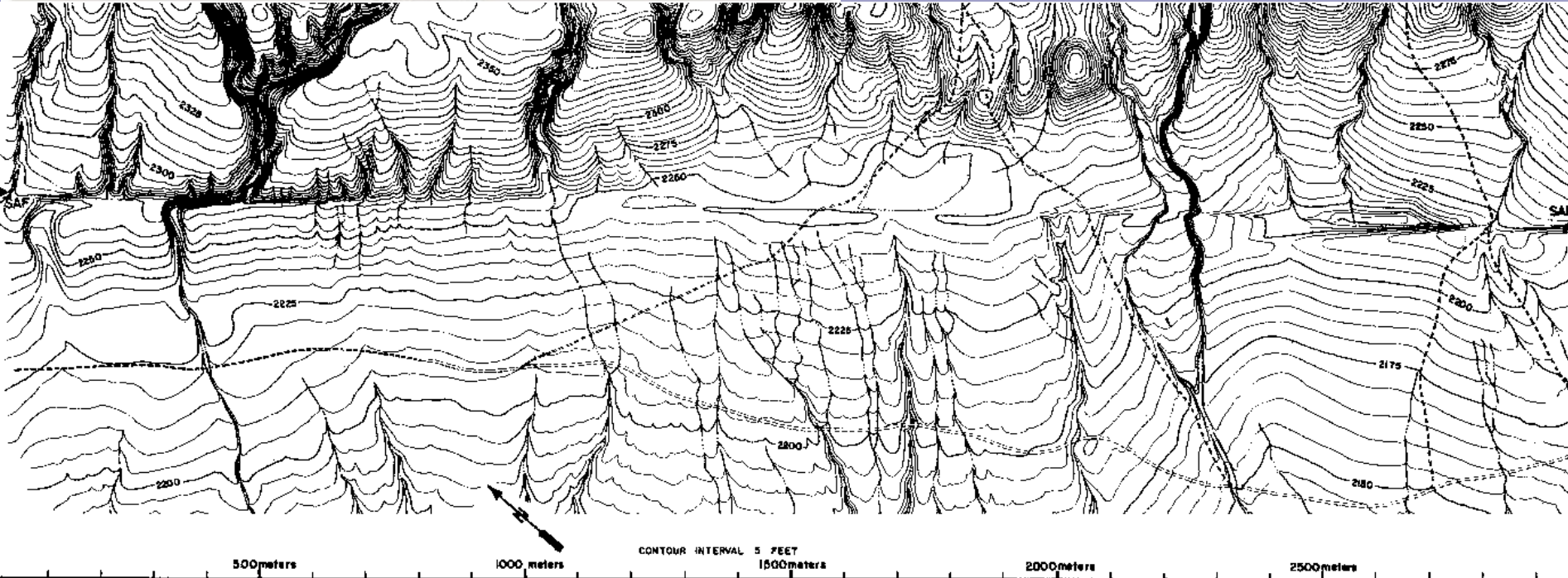
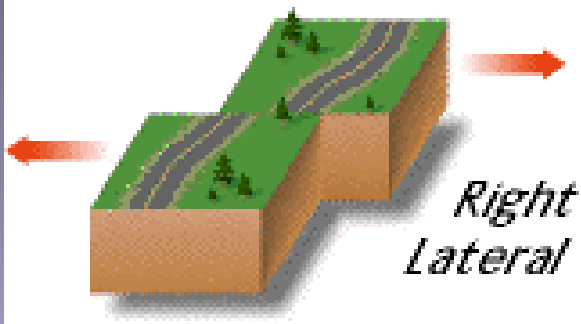
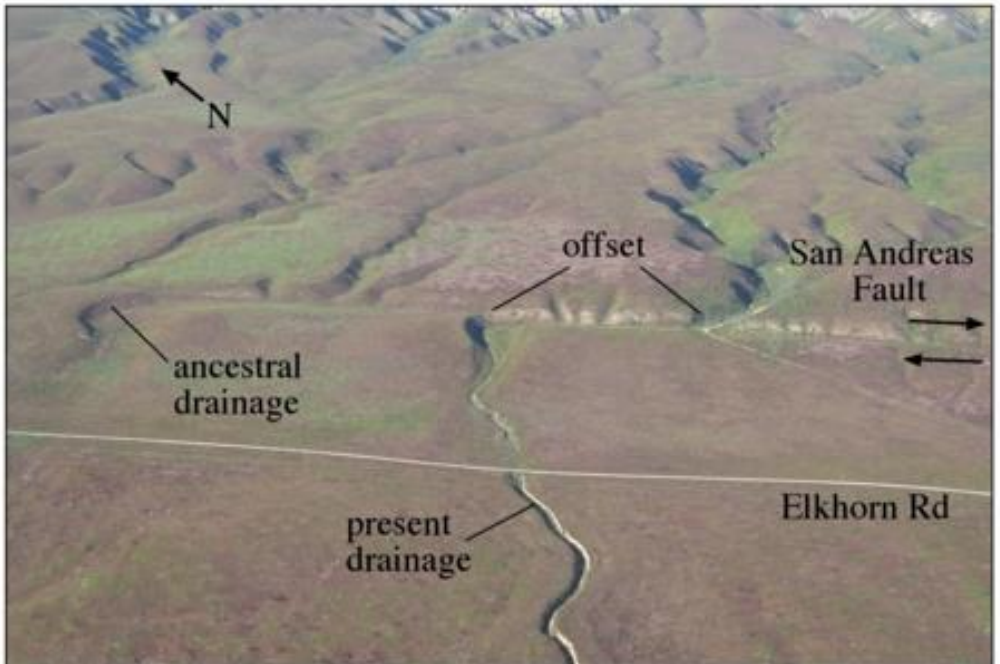
offsety (posuny) vodních koryt, údolních svahů, menších náplavových kuželů, hřbítků, strží, akumulací přivalových proudů, terasových stupňů





Imperial fault, 1940 $M=7$, 6m offset, 60km

San Andreas Fault, Carrizo plain, CA



offset channel



offset valley side



Měření offsetu = magnitudo,
rychlost pohybů

Příkladové studie

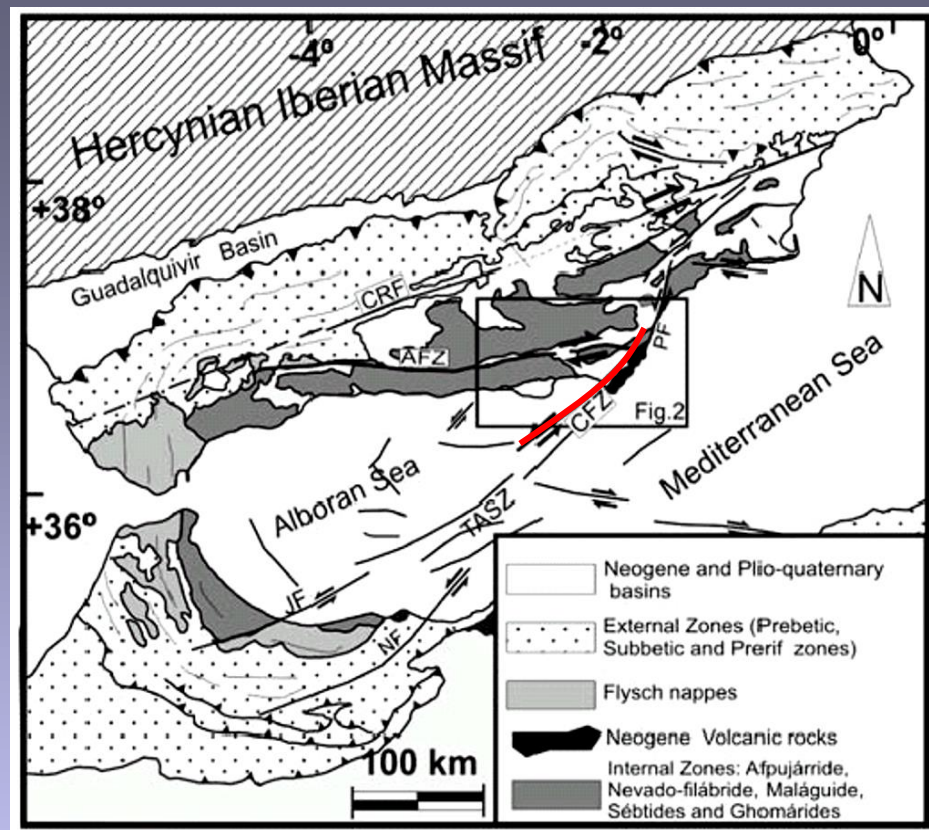
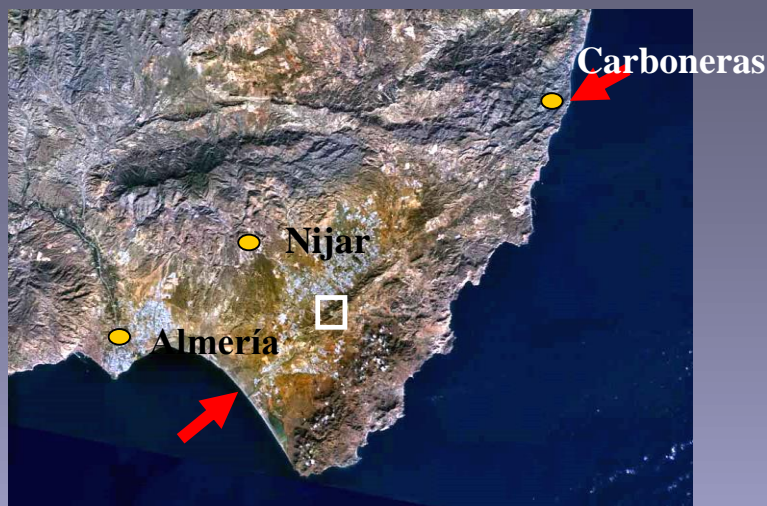
Zlomová zóna Carboneras

Projekt IMPULS: South Iberian margin
paleoseismological integrated study of large
active structures

Carboneras

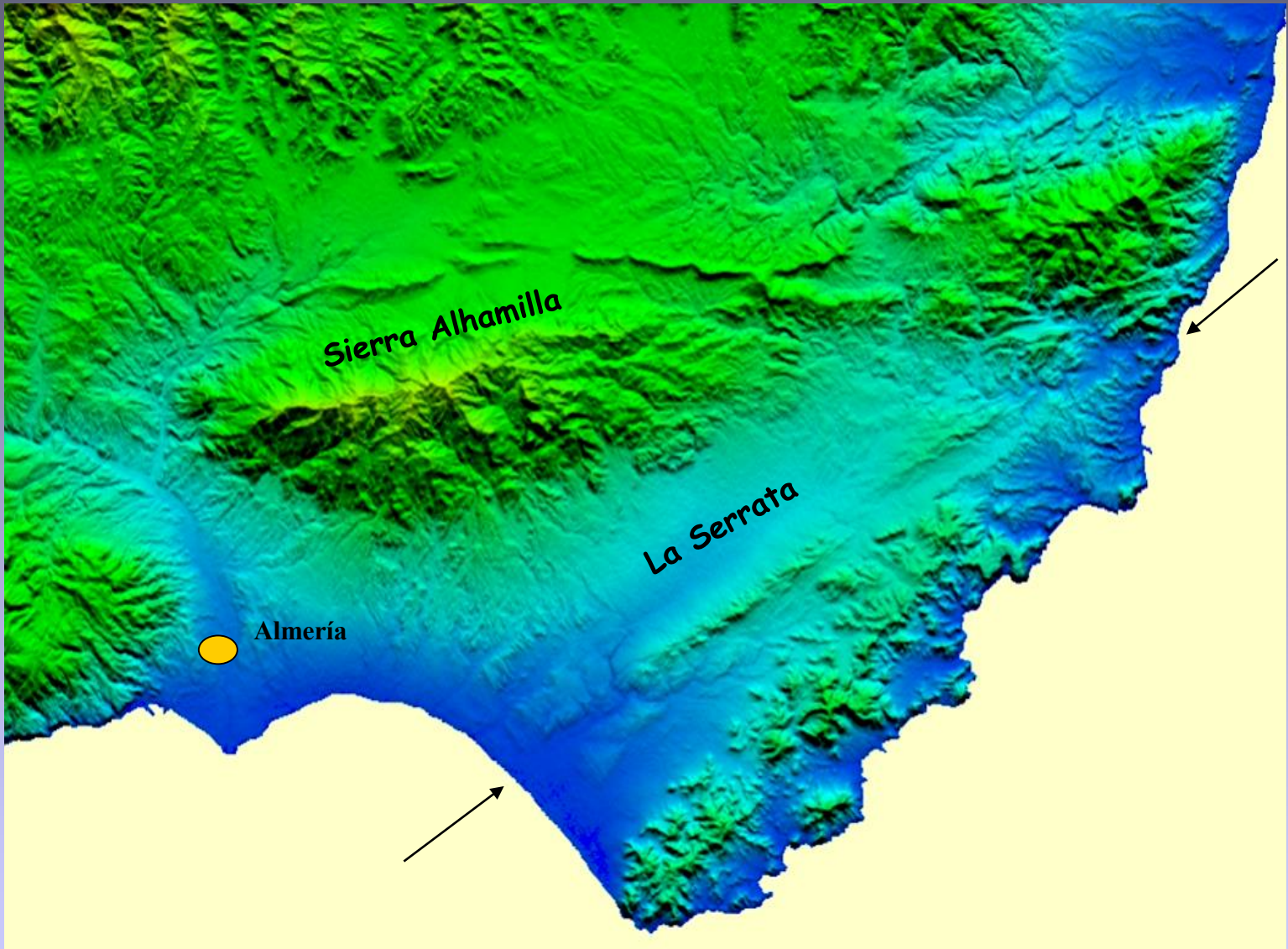


- kolizní zóna Africké a Evropské desky
- jižní okraj alpského orogénu
- součást Bétické Kordilery



Carboneras - vznik v poslední etapě kolize vnitřní a vnější zóny Bétické Kordilery ve spodním miocénu (20Ma)

- ❖ miocén až kvartér - rotace hlavního tlaku v regionu
 - poklesy - stř. miocén - součást procesů riftingu - vulkanismus
 - přesmyky - spod. pleistocén (vznik menších pohoří např. La Serrata)
 - horizontální pohyby - levostranné (až do současnosti)

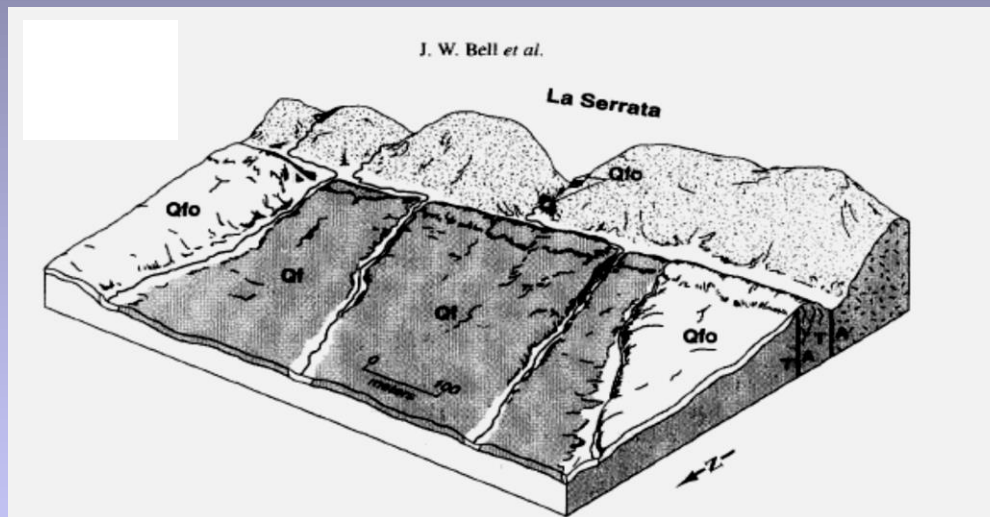




- ❖ seismicita - jv. okraj Iberského pol. - stálá mělká zemětřesení $M < 5,5$ (příčné zlomy v současnosti - Carboneras - bez seismicity)
- ❖ posl. 2 tis. let - nejméně 50 silných zemětřesení

Dřívější výzkumy v 90. letech

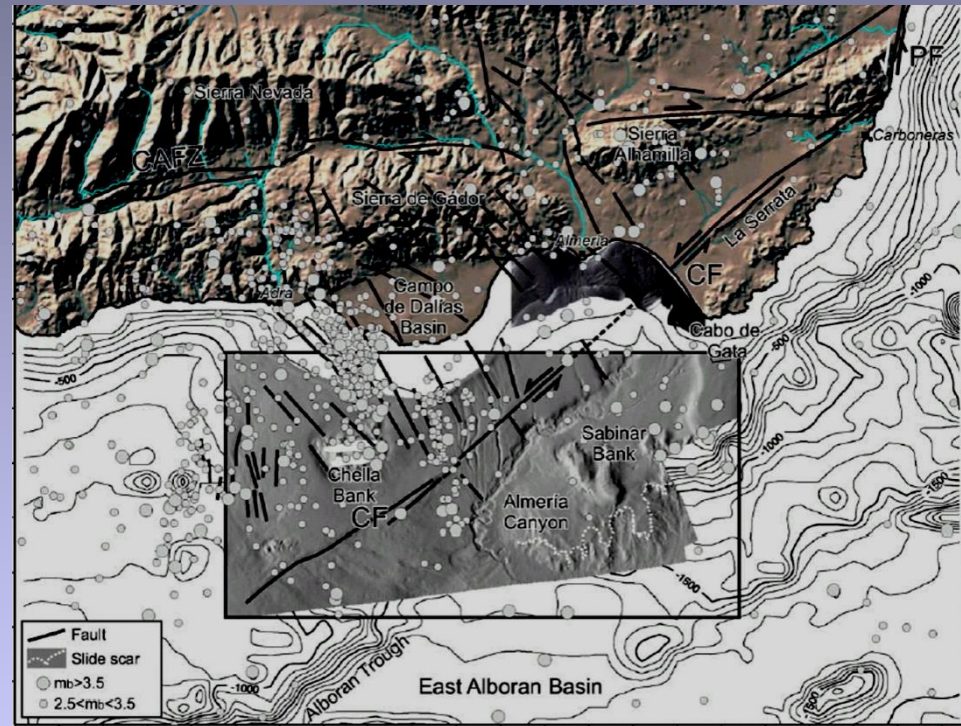
- 1) studium dokladů levostranných pohybů radiometricky datovaných pobřežních marinních teras a studium jejich recentního výzdvihu
- 2) měření a datování levostranného pohybu na základě offsetu vodních toků

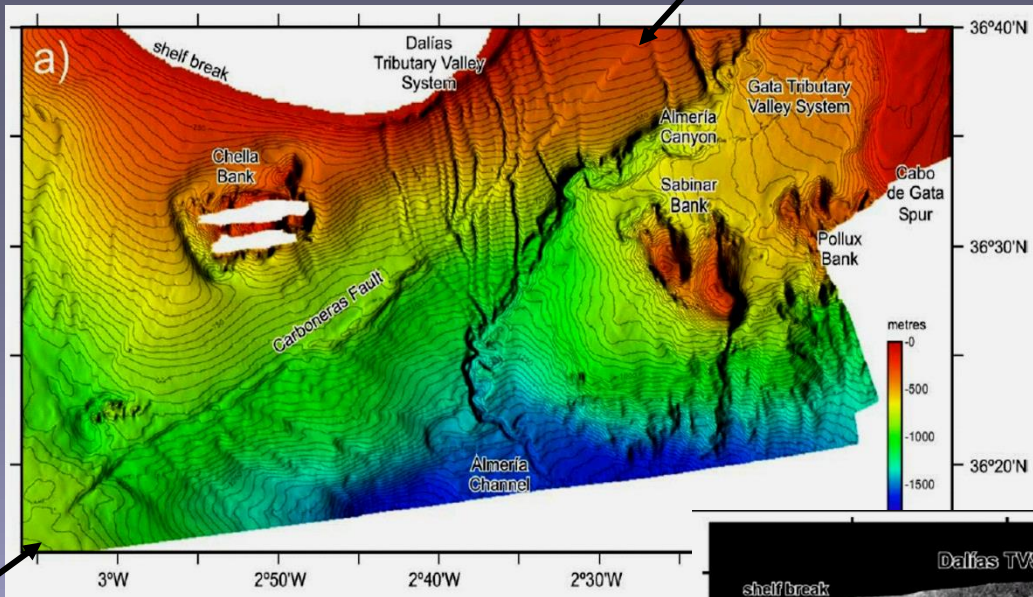


pohyby v pozdním kvartéru - relativně pomalé, převážně vertikální,
horizontální pohyby 80-100m offset toků La Serraty - starší než
100 tis. let

IMPULS: Metody studia zlomu Carboneras na moři

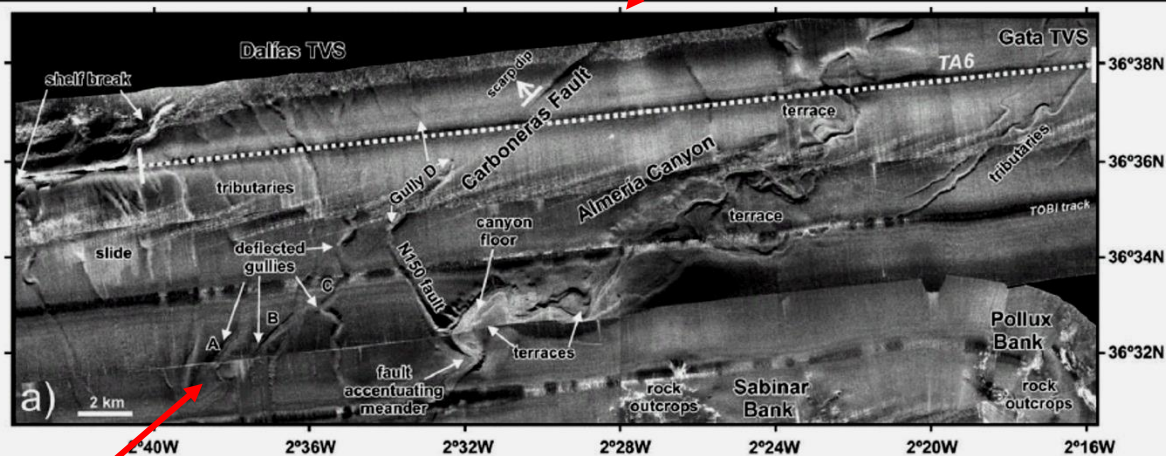
- ❖ batymetrie
- ❖ boční sonografie (sidescan sonograph TOBI)
- ❖ reflexní seismika s vysokým rozlišením
- ❖ analýza vzorků mořských sedimentů
- ❖ datování



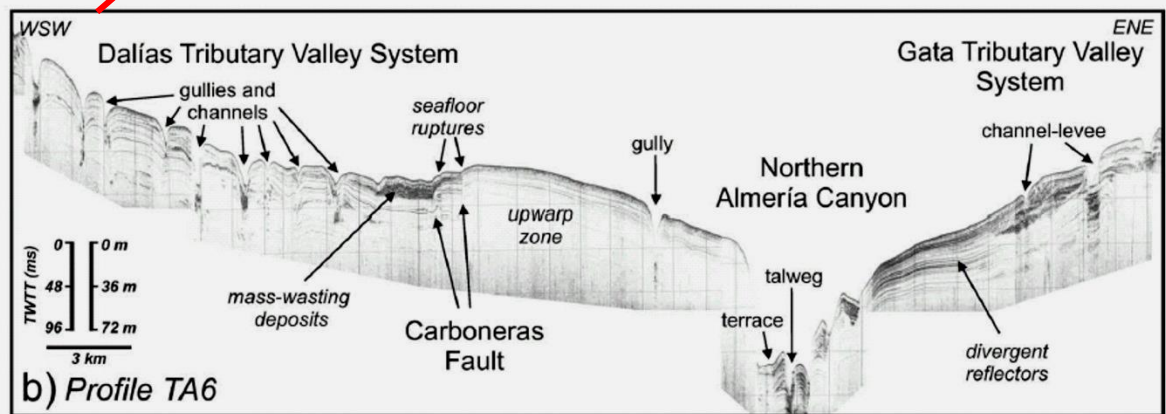


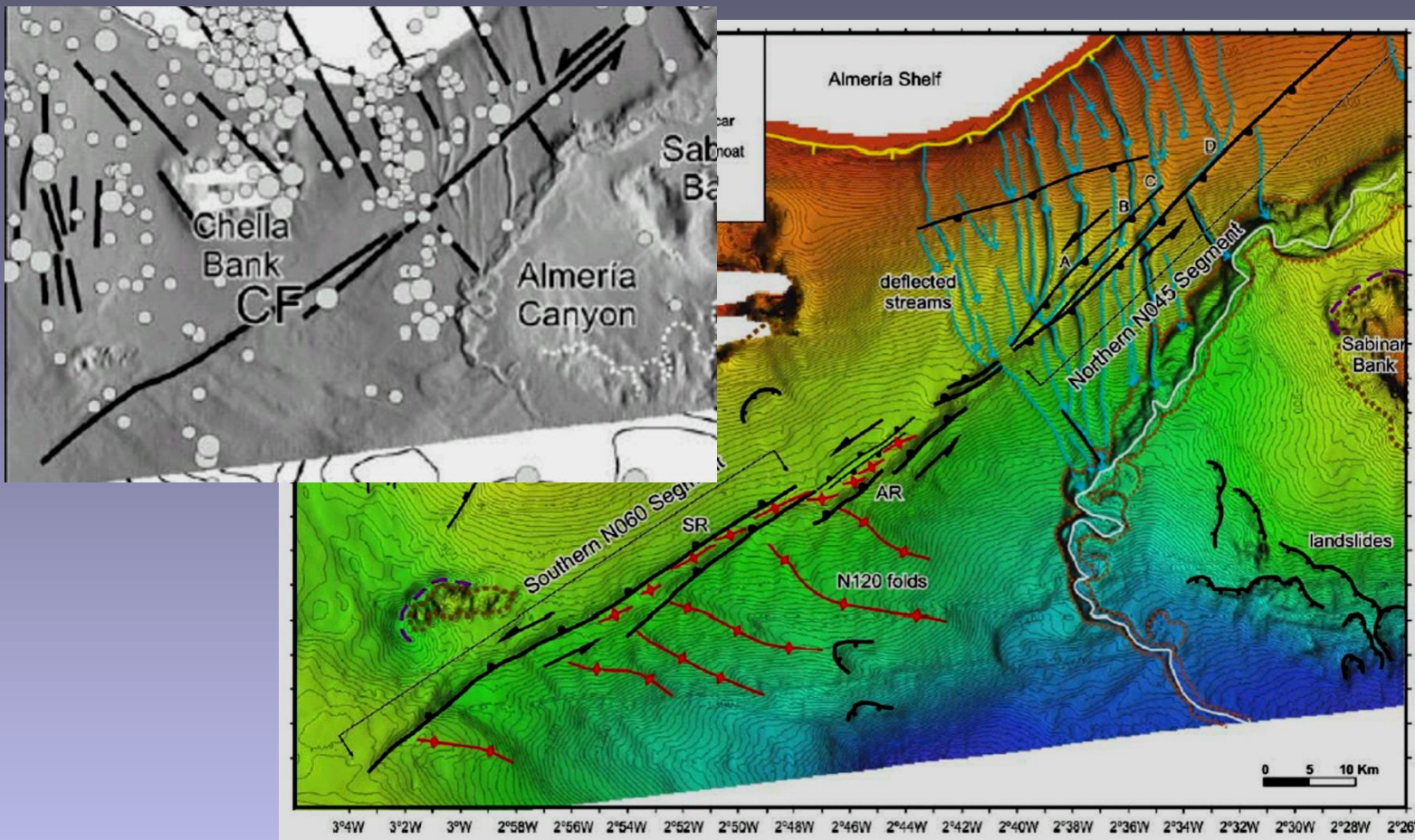
batymetrie

sonografie s vysokým rozlišením



seismické profilování





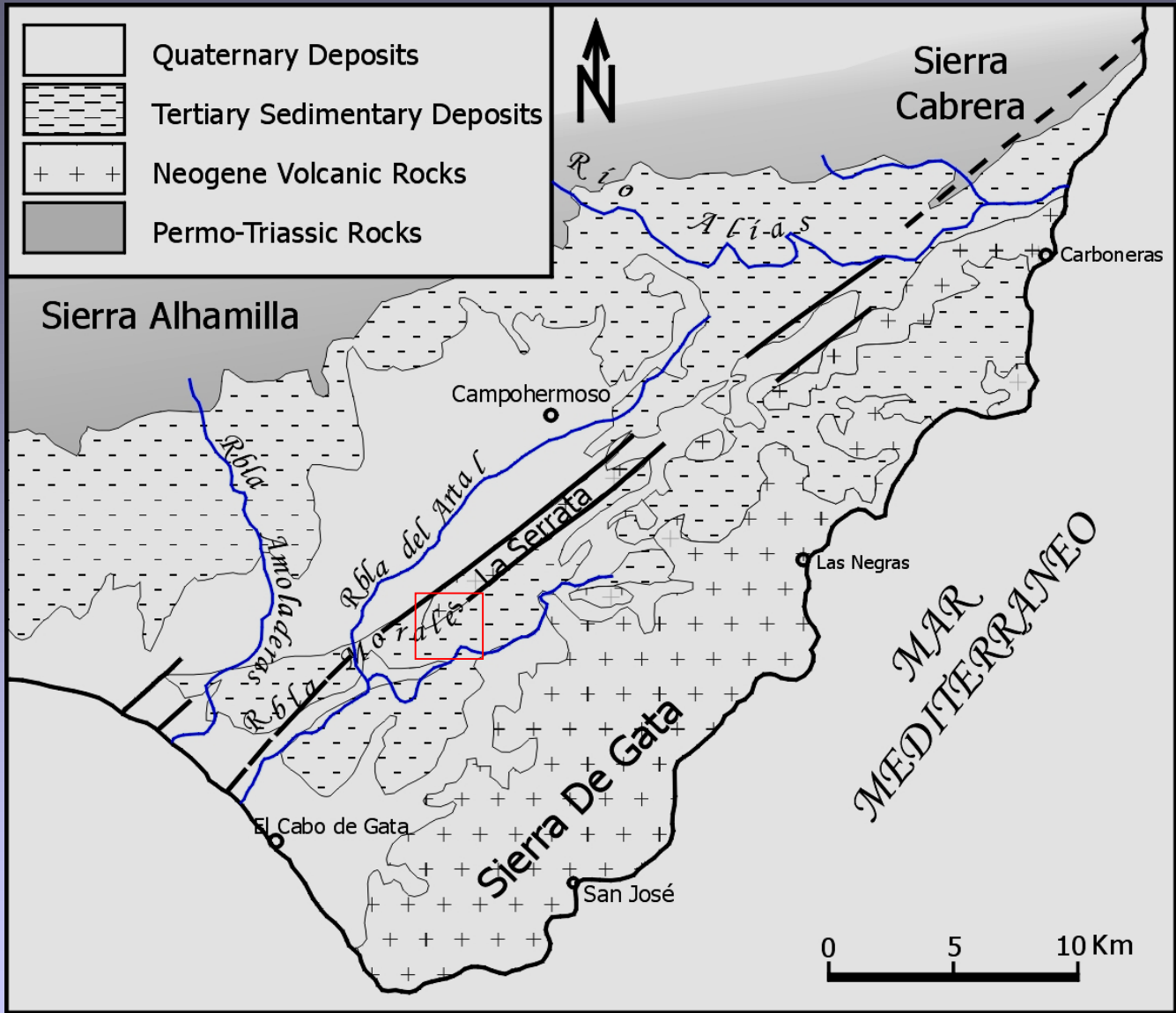
Zóna Carboneras - 5-10 km široká, 100 km dlouhá, subvertikální zlomy, odvodňovací síť okraje pevniny je **deflektovaná**, morfologie = tvary vzniklé horizontálními pohyby na pevnině - **pressure ridges, water gaps**, porušené pozdně **holocenní sedimenty, sesuvy-epicentra**.

Seismický a tsunami hazard - $M \leq 7,2$ (1522 zemětř. Almería)
 x instrumentální seismicita na Carboneras nízká

Metody studia zlomu Carboneras na pevnině

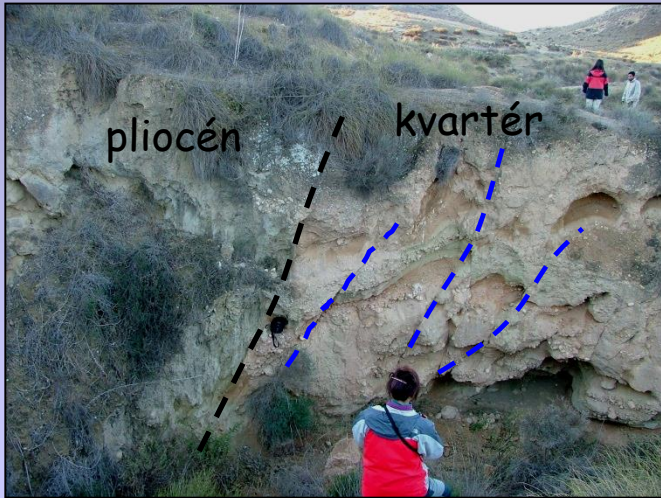
- ❖ fotointerpretace - letecké snímky
- ❖ geomorfologické mapování (dislokované tvary reliéfu)
- ❖ strukturní mapování (průběh zlomu)
- ❖ sedimentologie (rozlišení generací aluviálních kuželů)
- ❖ mikrotopografie (totální stanice)
- ❖ geofyzika (georadar, elektrotomografie – zachycení zlomu a hladiny podz. vody)

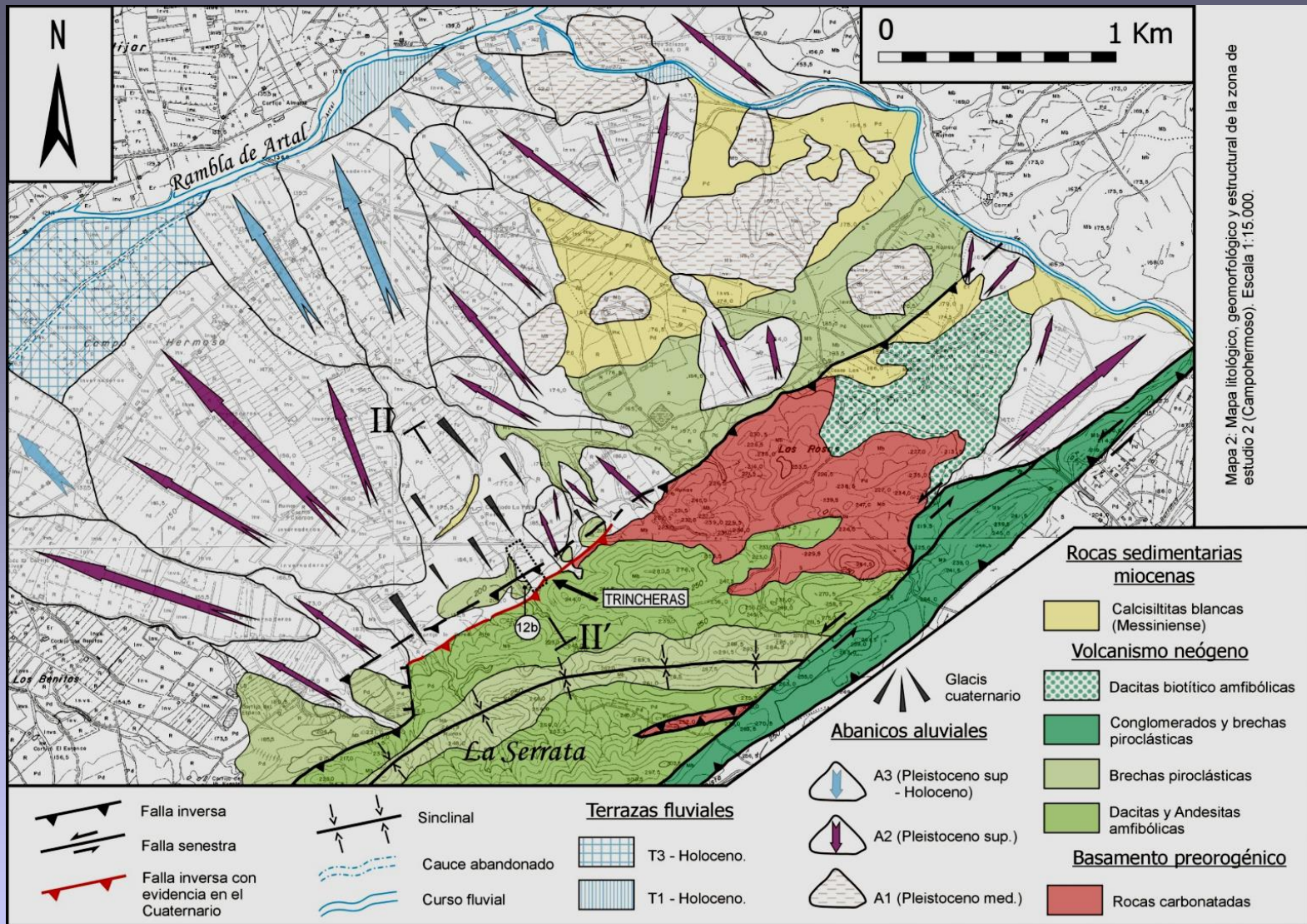
- ❖ **paleoseismologické rýhy**
- ❖ datování materiálu porušeného zlomem



El Hacho
2005

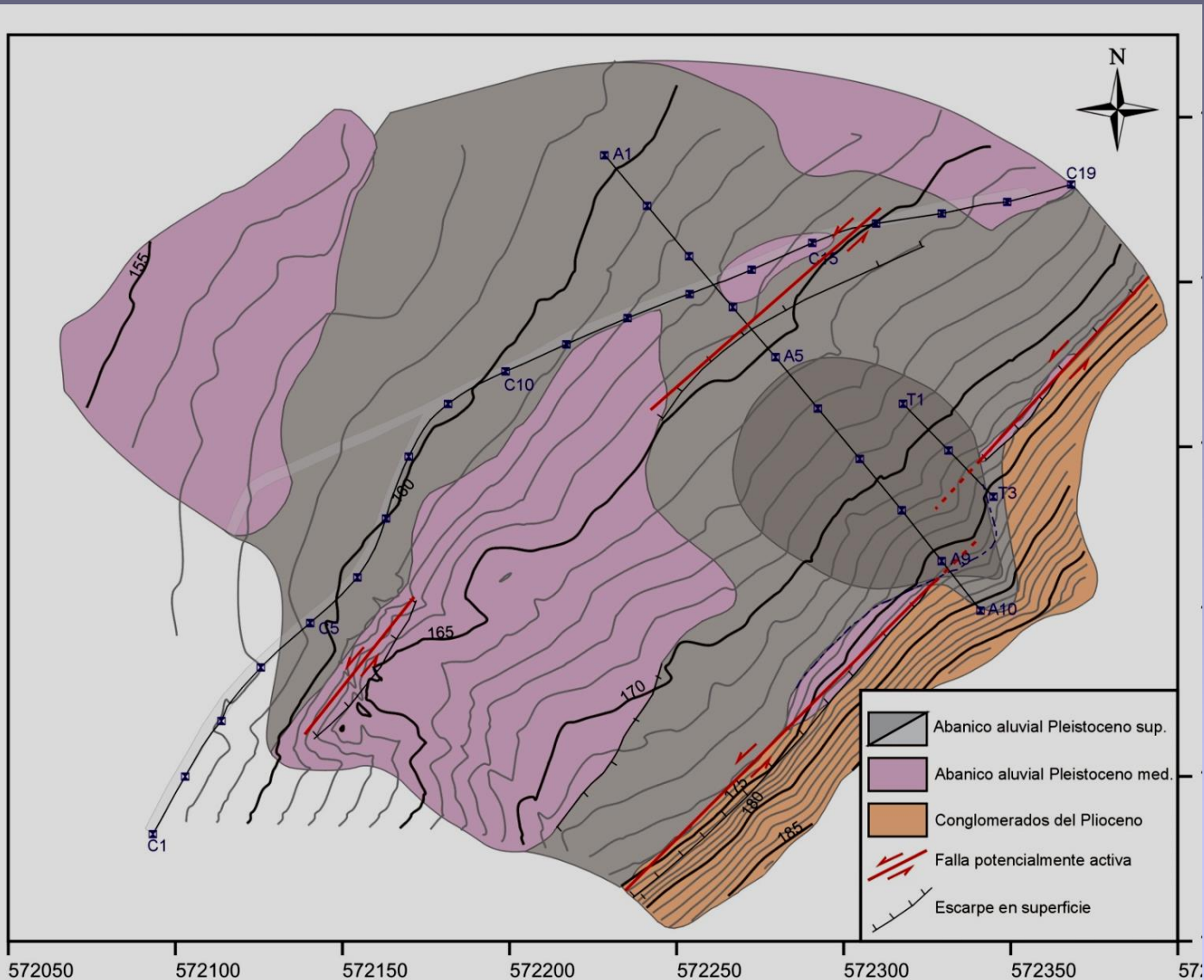
La Serrata





3 generace aluviálních kuželů - stř. a svrch. pleistocén/holocén
 - 3 různé fáze pohybu na zlomu (degradace-akumulace)

Paleoseismologické rýhy



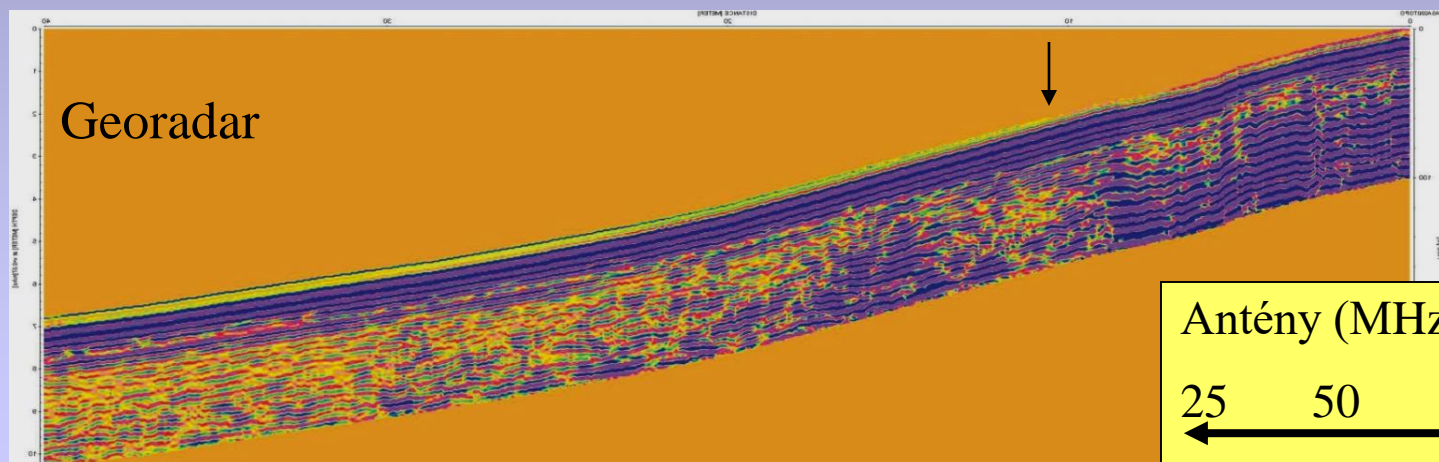
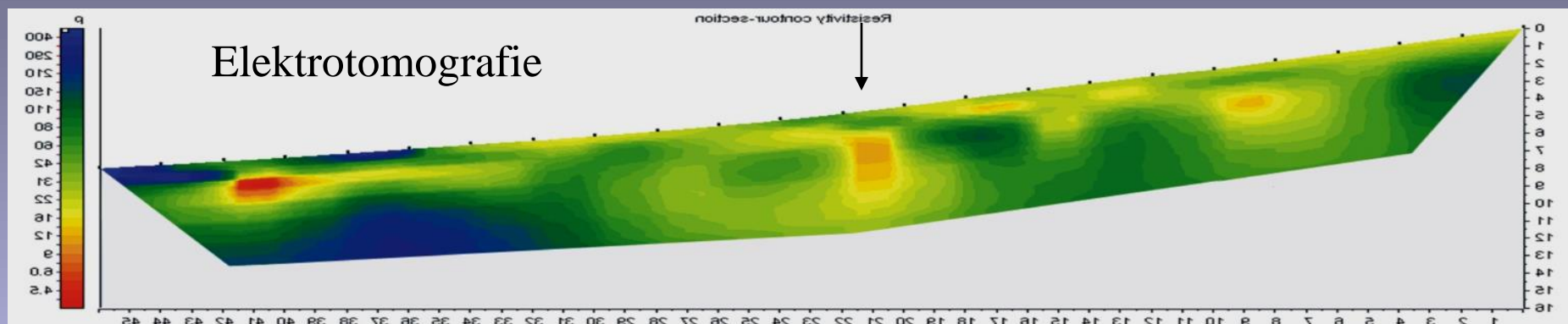
❖ všechny 3 generace kuželů (chronologie)

❖ patrné terénní stupně (0,7m)

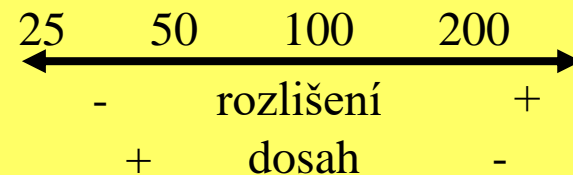


Geofyzika

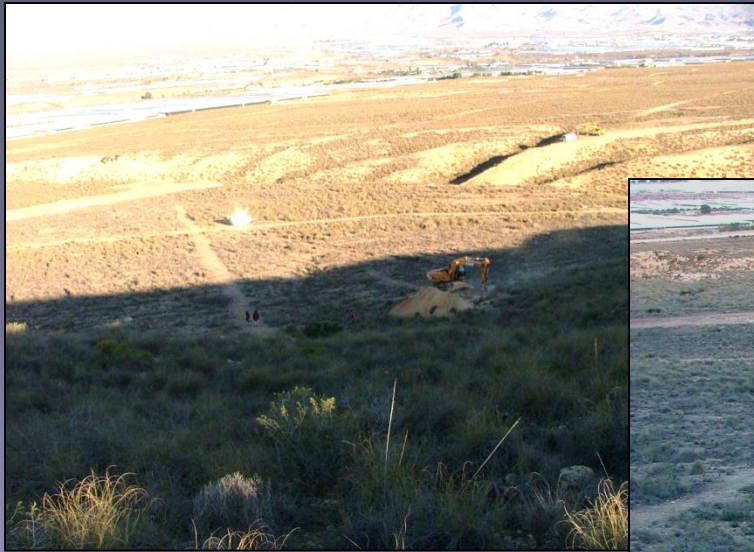
zachycení pozice zlomu a hloubkových poměrů (materiál)



Antény (MHz):



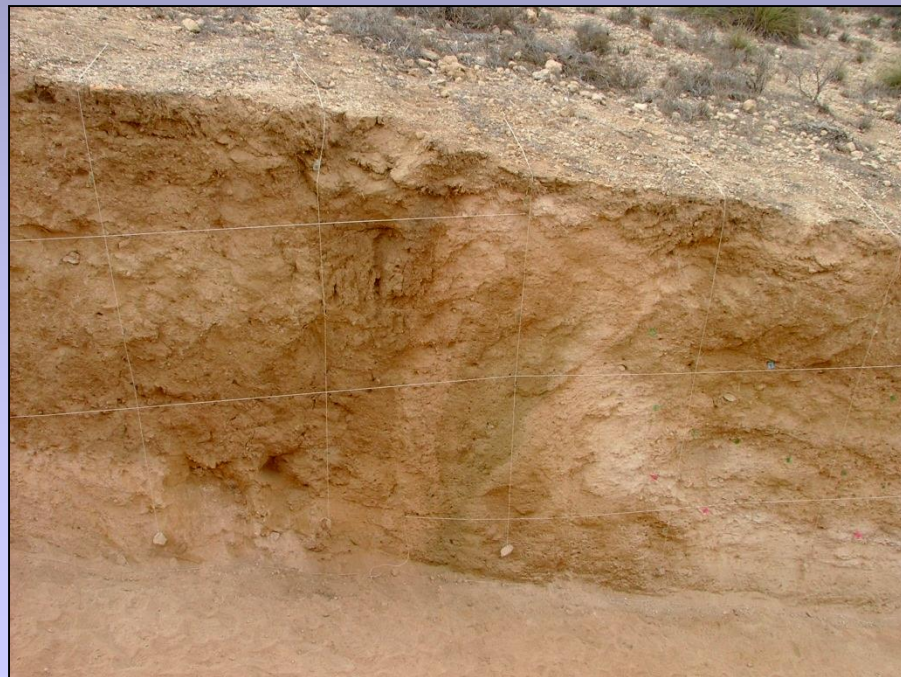
listopad 2005

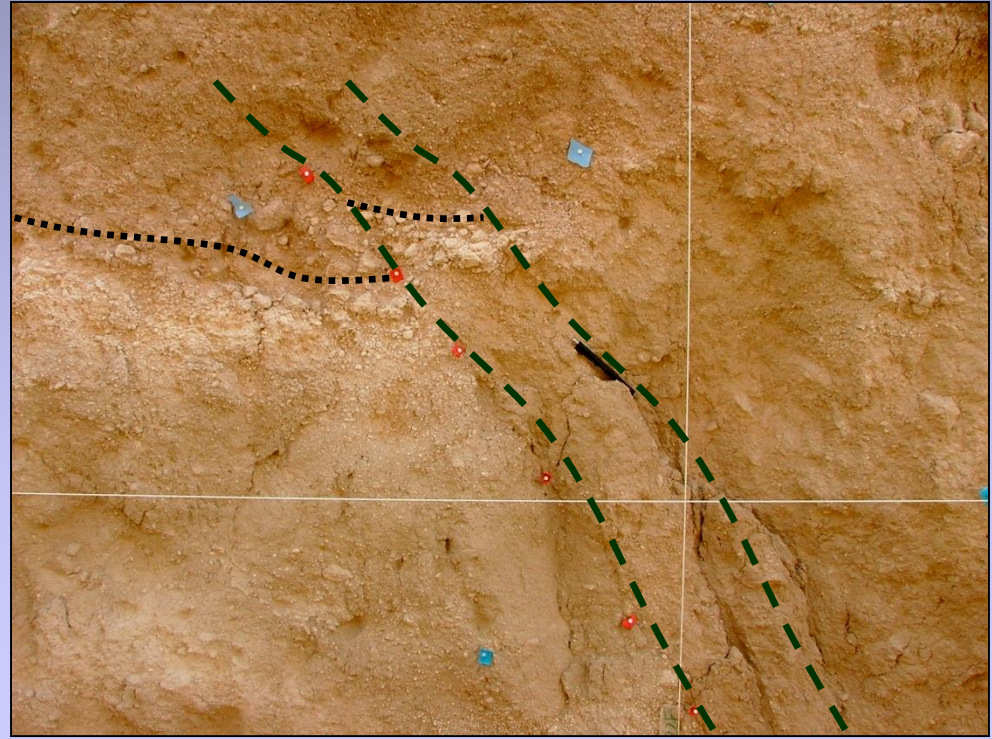
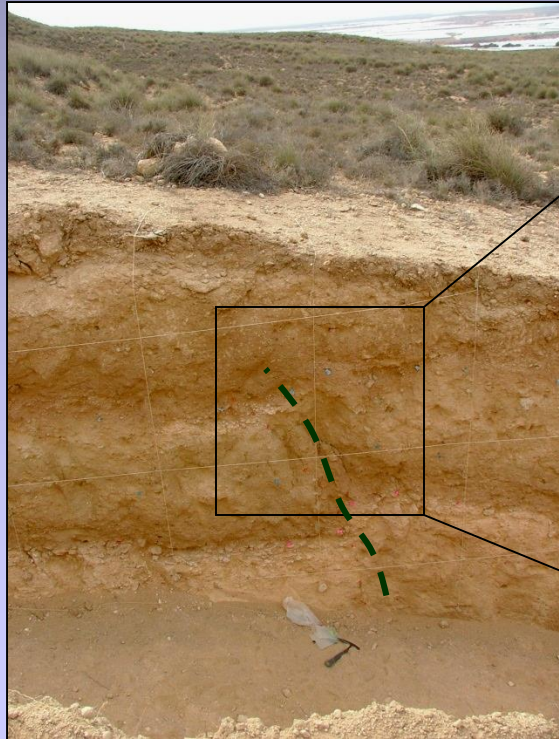


čištění, sítě



rozpoznání sedim. vrstev (al. kužely), identifikace dislokací

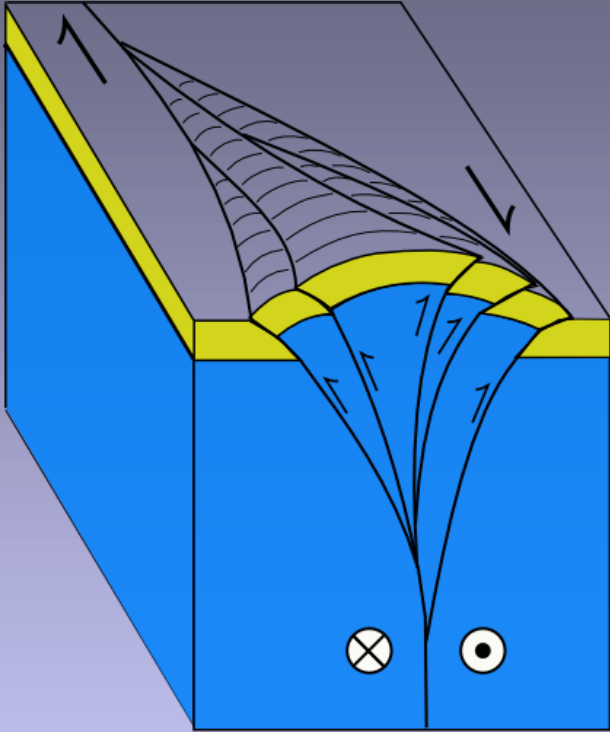




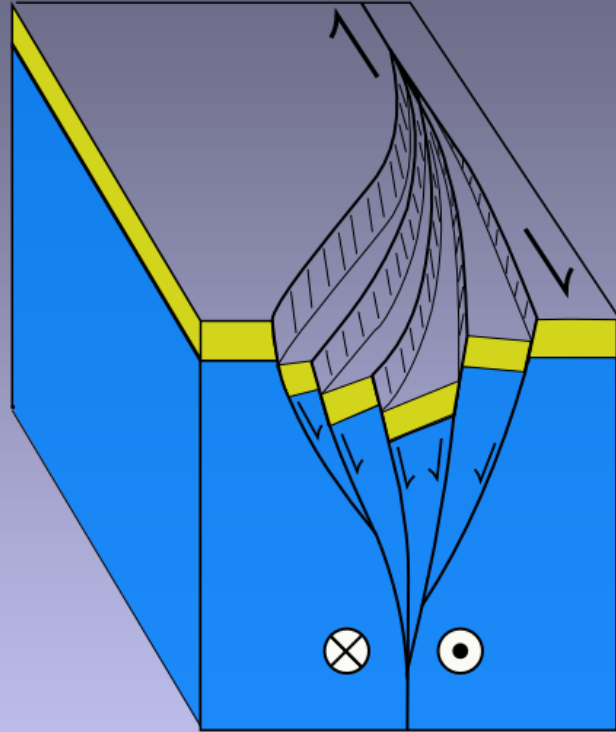


- složitější struktura
 - flower structure
 - transpresní režim
- horizontální posuny s vertikální složkou
- opakované pohyby

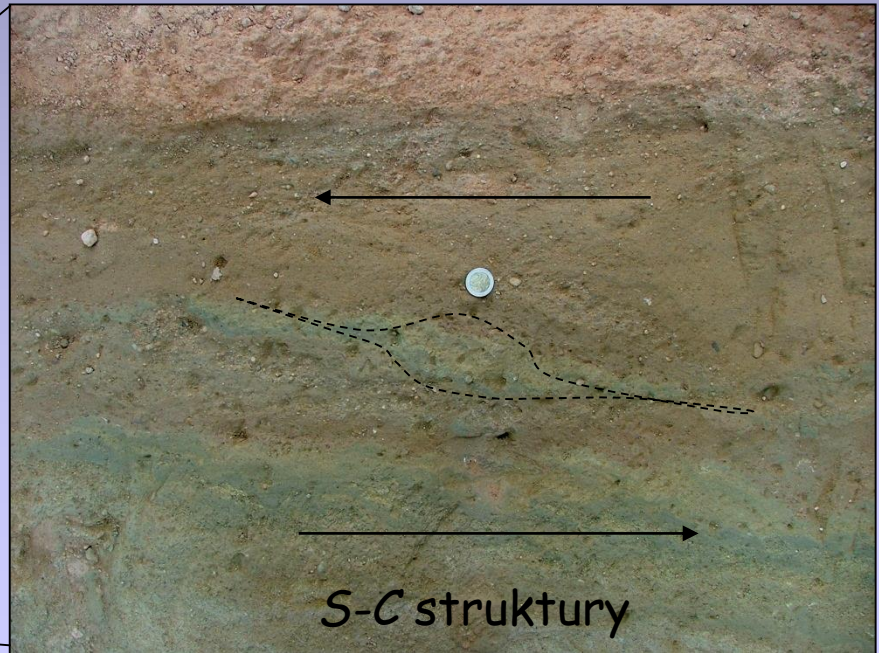


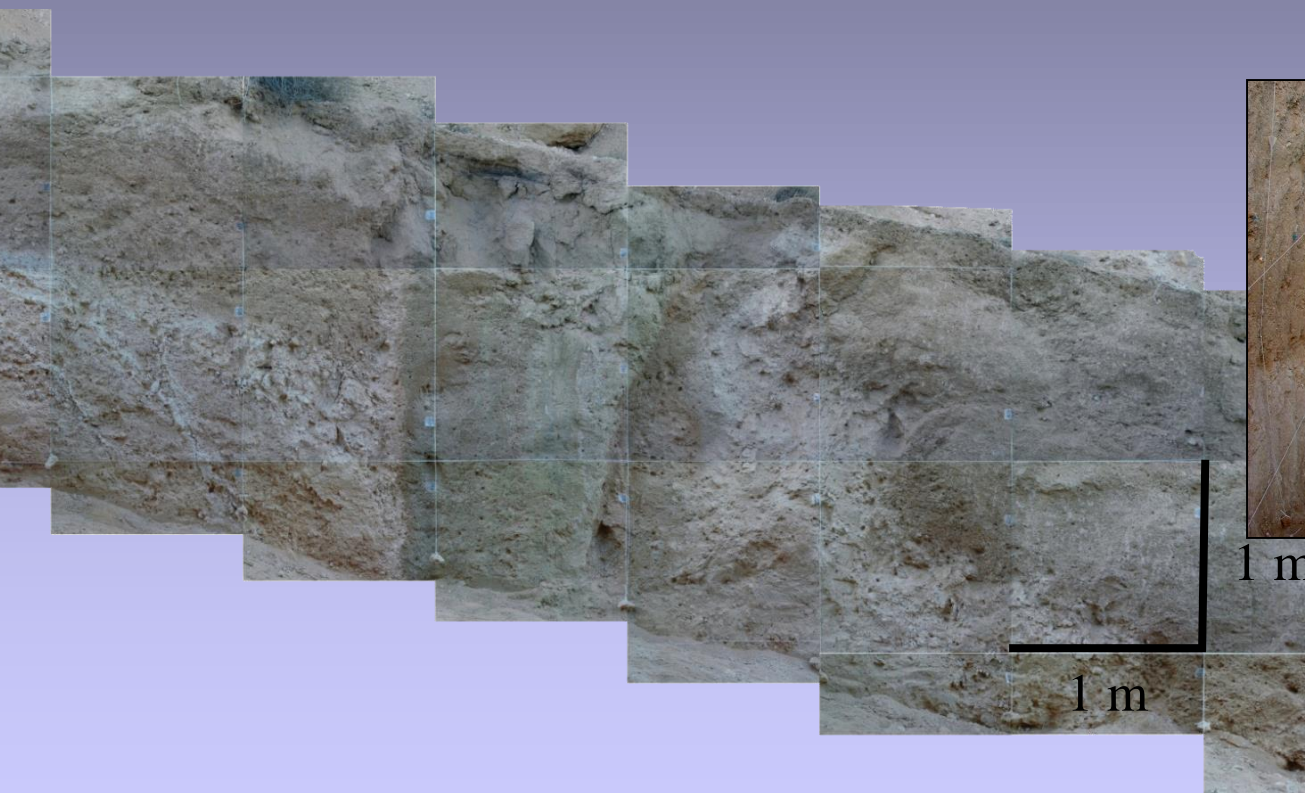
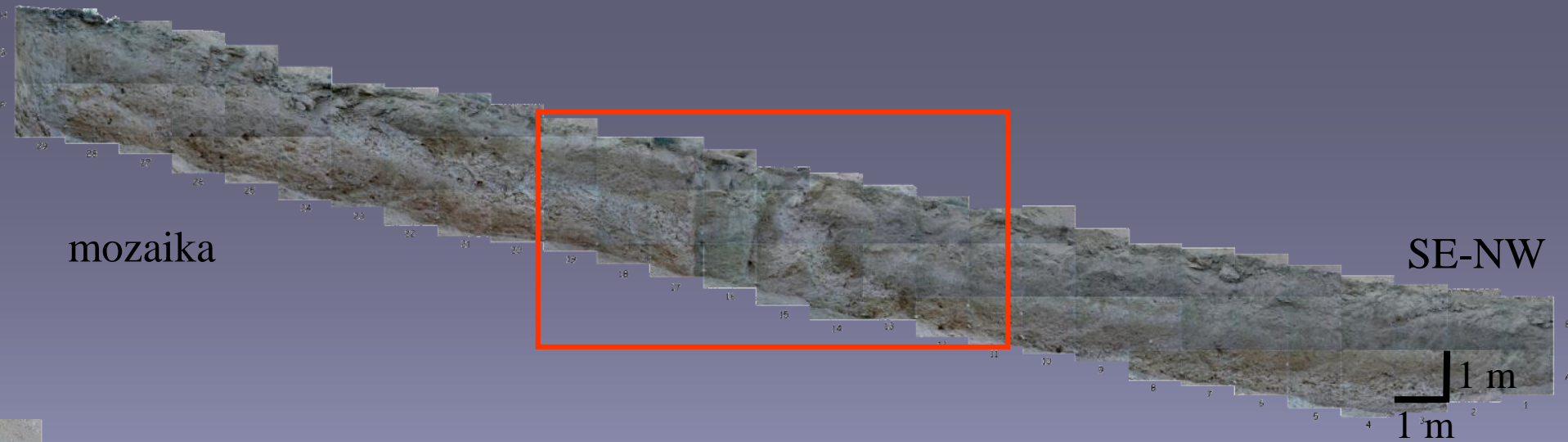


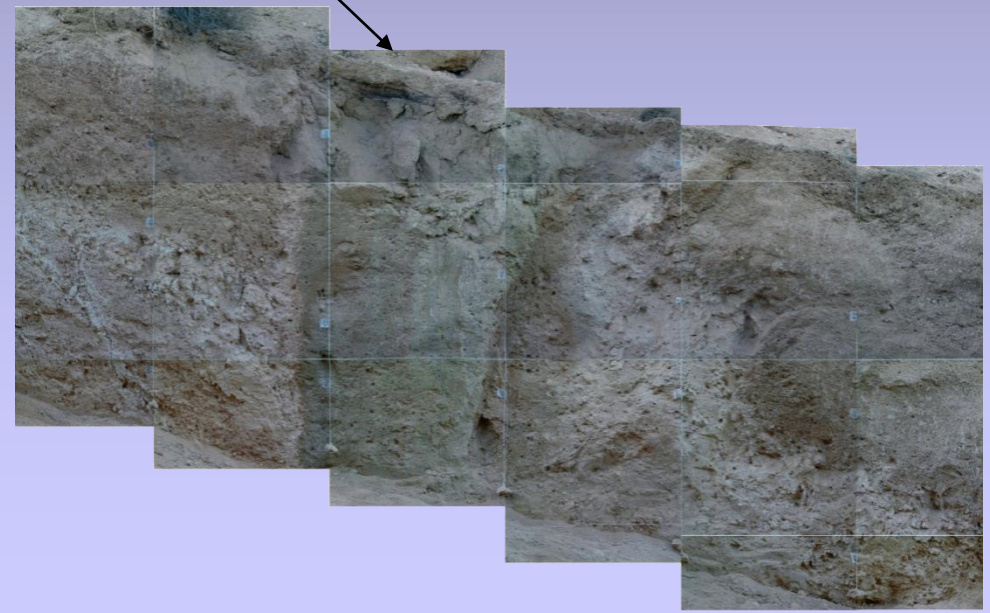
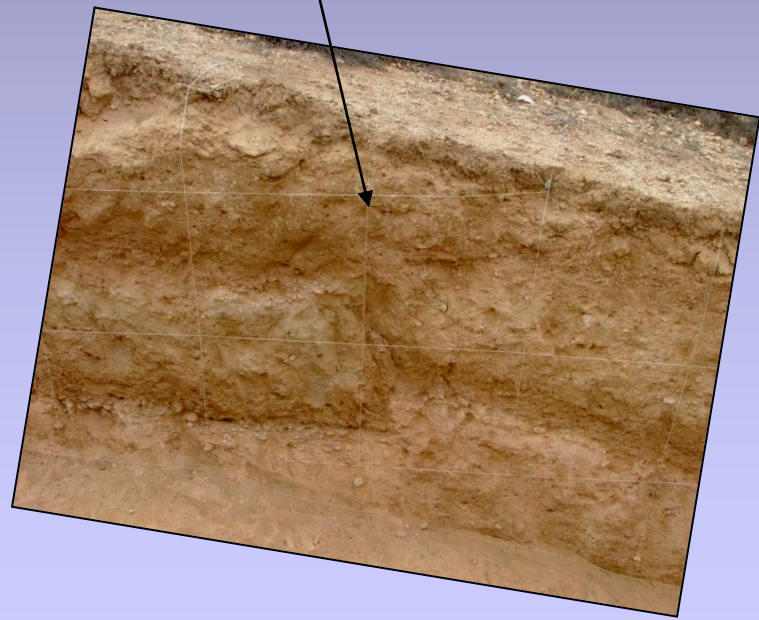
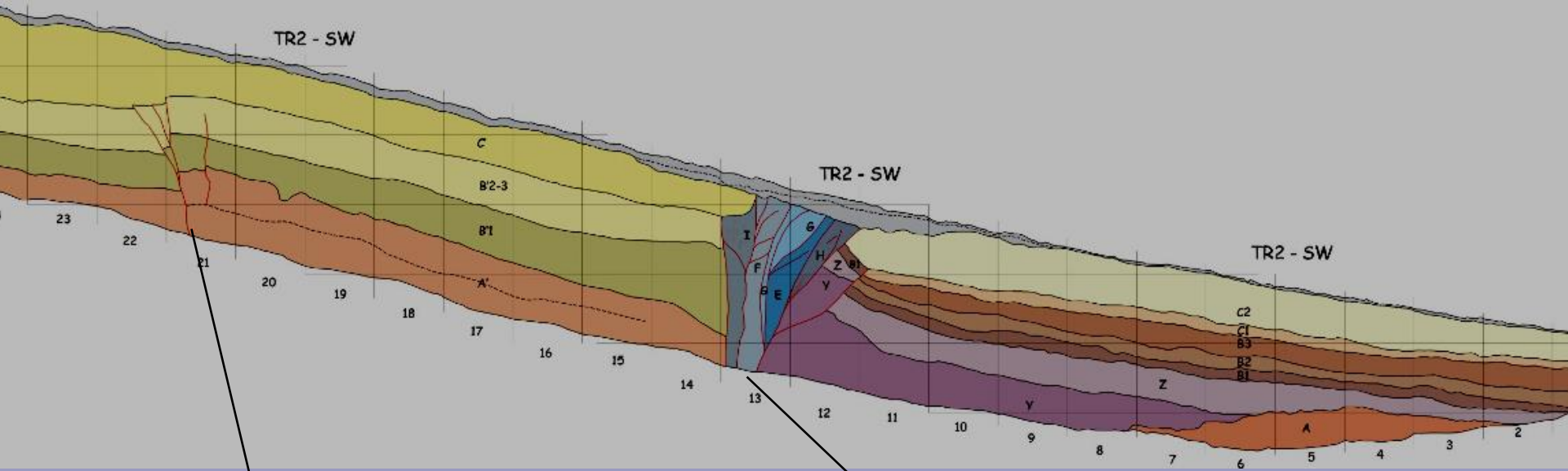
Positive Flower



Negative Flower



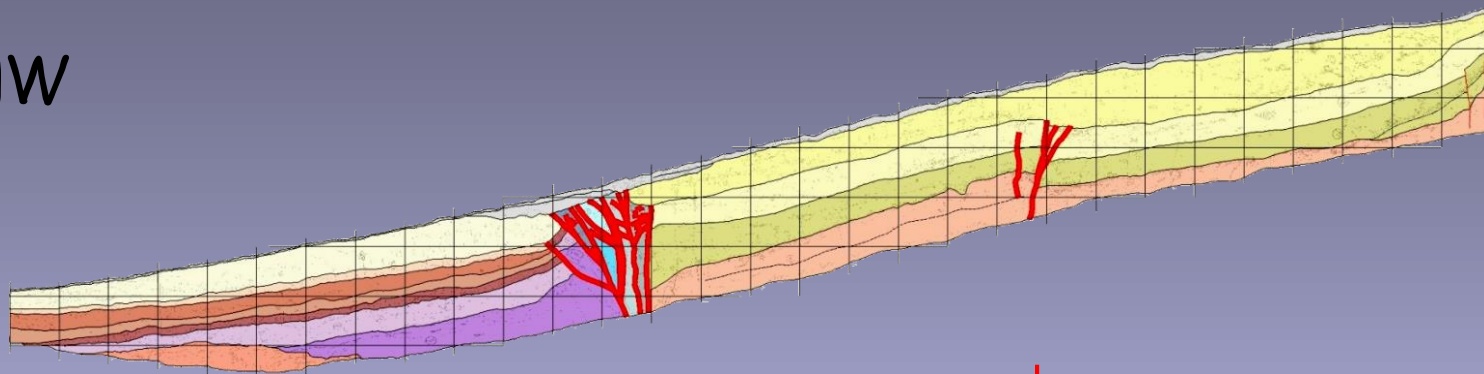




situace in situ X geofyzika

NW

SE



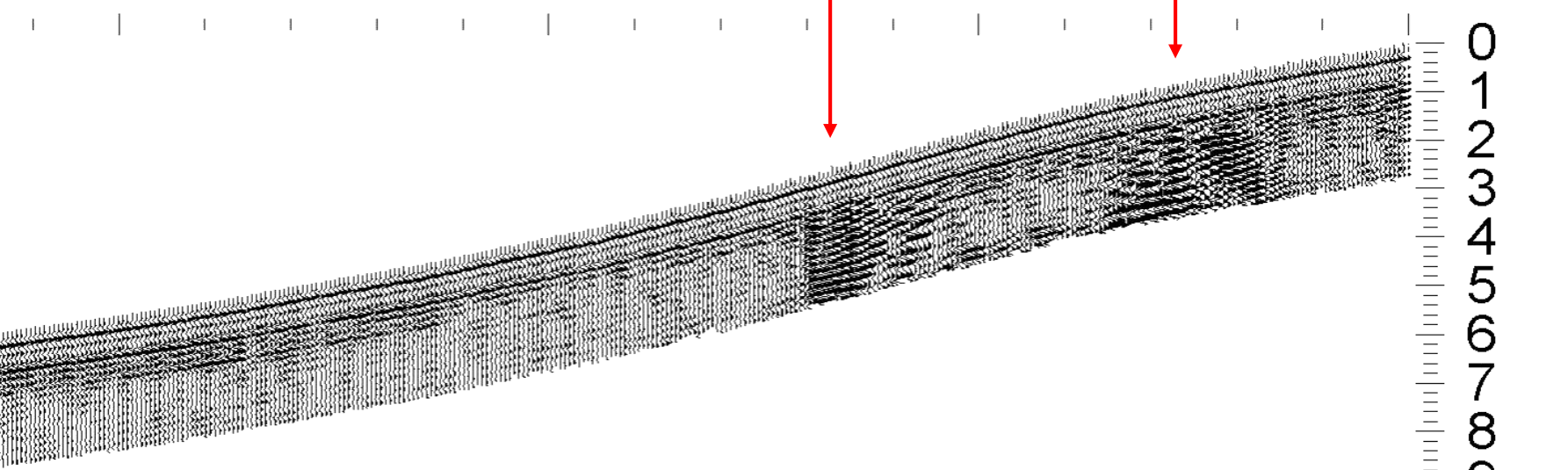
vzdálenost (m)

130

140

150

160



hloubka (m) $v=0.07\text{m/s}$

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

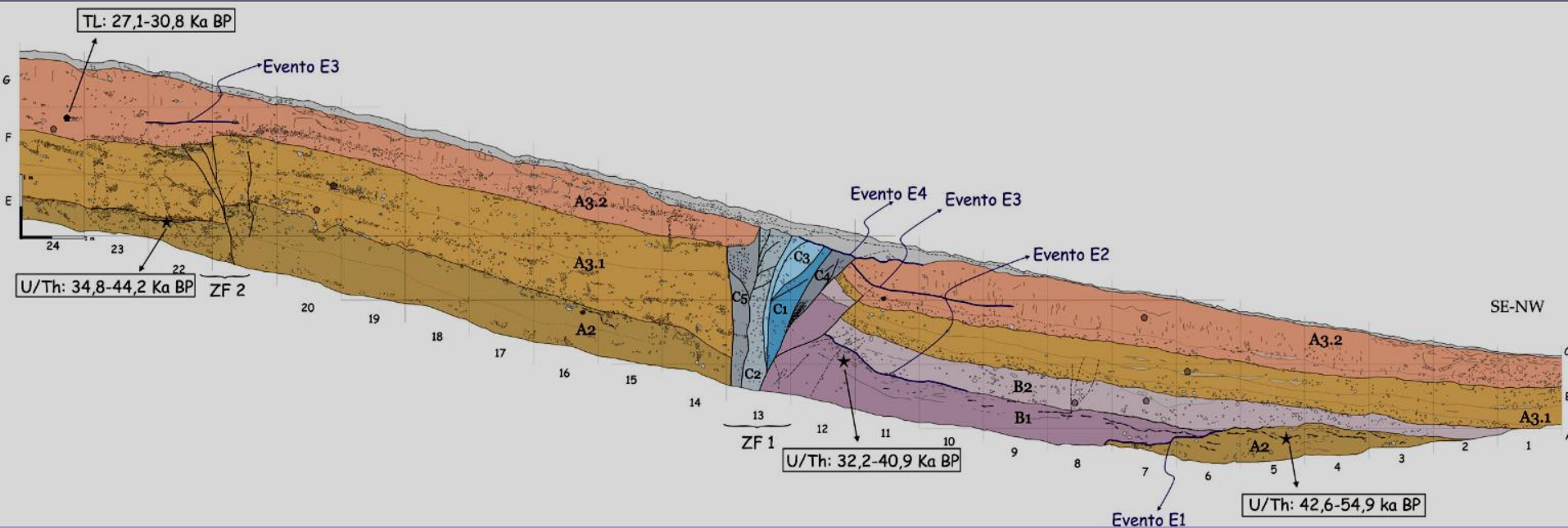
Datování - materiál porušený seismickou událostí

- ❖ **^{14}C radiouhlíková metoda** → organický materiál a karbonát. schránky (dosah 40 tis. let) - **uhlíky, gastropodi**
 ^{14}C - v živých organismech, doplňován z prostředí, rozpadá se, po smrti organismu se mění poměr ^{14}C /stabilnímu ^{12}C - kdy byl org. vyřazen z koloběhu
- ❖ **opticky stimulovaná luminiscence OSL** - každý materiál obsahuje určité množství radioaktivních prvků (U, Th, ^{40}K). Radioaktivní záření uvolňuje elektrony ze struktury minerálu v zrnech písku a ty se hromadí v místech poruch jeho krystalické mřížky. Zahřátím (termoluminiscence) nebo ozářením viditelným světlem (OSL-vybuzení, stimulování světlem) se elektrony vracejí zpět do elektronových obalů - materiál světélkuje. Čím je materiál starší (čím delší čas uplynul od posledního zahřátí či ozáření), tím více se mezitím stačil »nabít«. Reset - signál na nule při posledním osvětlení. Po ukončení uložení sedimentů - signál se díky radioaktivnímu rozpadu začne zvyšovat. Luminiscence uvolňovaná aktivací světlem v laboratoři - úměrná stáří sedimentu - od kdy se tam začaly hromadit ty elektrony - kdy to bylo vynulované (dosah 250-300 tis. let),
- ❖ **termoluminiscence TL**, → jemnozrnné sedimenty, fluvální, eolické (100 tis. let)
- ❖ **U/Th** → karbonatický materiál (dosah 300 tis. let) - **laminární caliche**

❖ interpretace výkresů, hodnocení typu a hodnoty pohybu
————→ rekonstrukce deformace (retrodeformace)

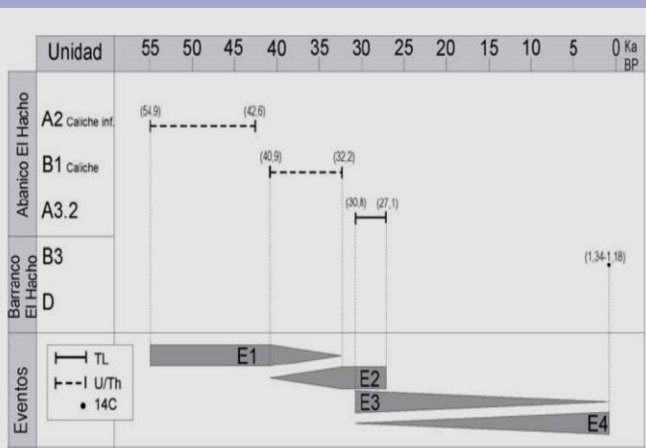
❖ laboratorní výsledky datování

————→ celková rekonstrukce chronologie tektonické
aktivity na zlomu



Analýza rýh a datování v zóně La Serrata

- B₁, B₂ - coluvial wedge (degradace povrchu po náhlém pohybu) - zemětřesení
- Min. 4 seismické události - posl. 50 tis. let
- Interval opakování - minimálně 14 tis. let
- Poslední událost - minim. před 1310 lety
- Empirické vztahy magnitudo X hodnota posunu - 2 události - minim. M= 6,59 a 6,97

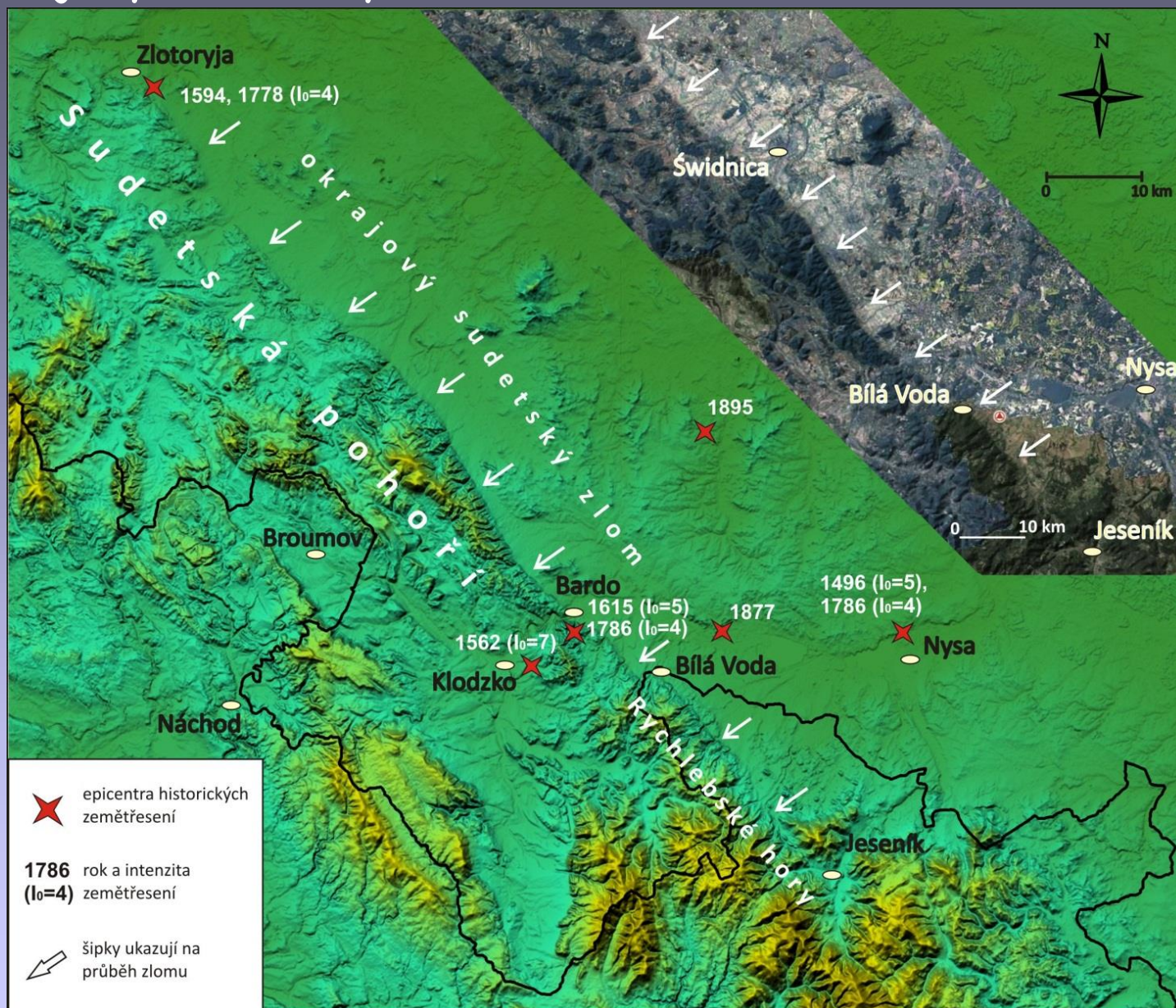




2005

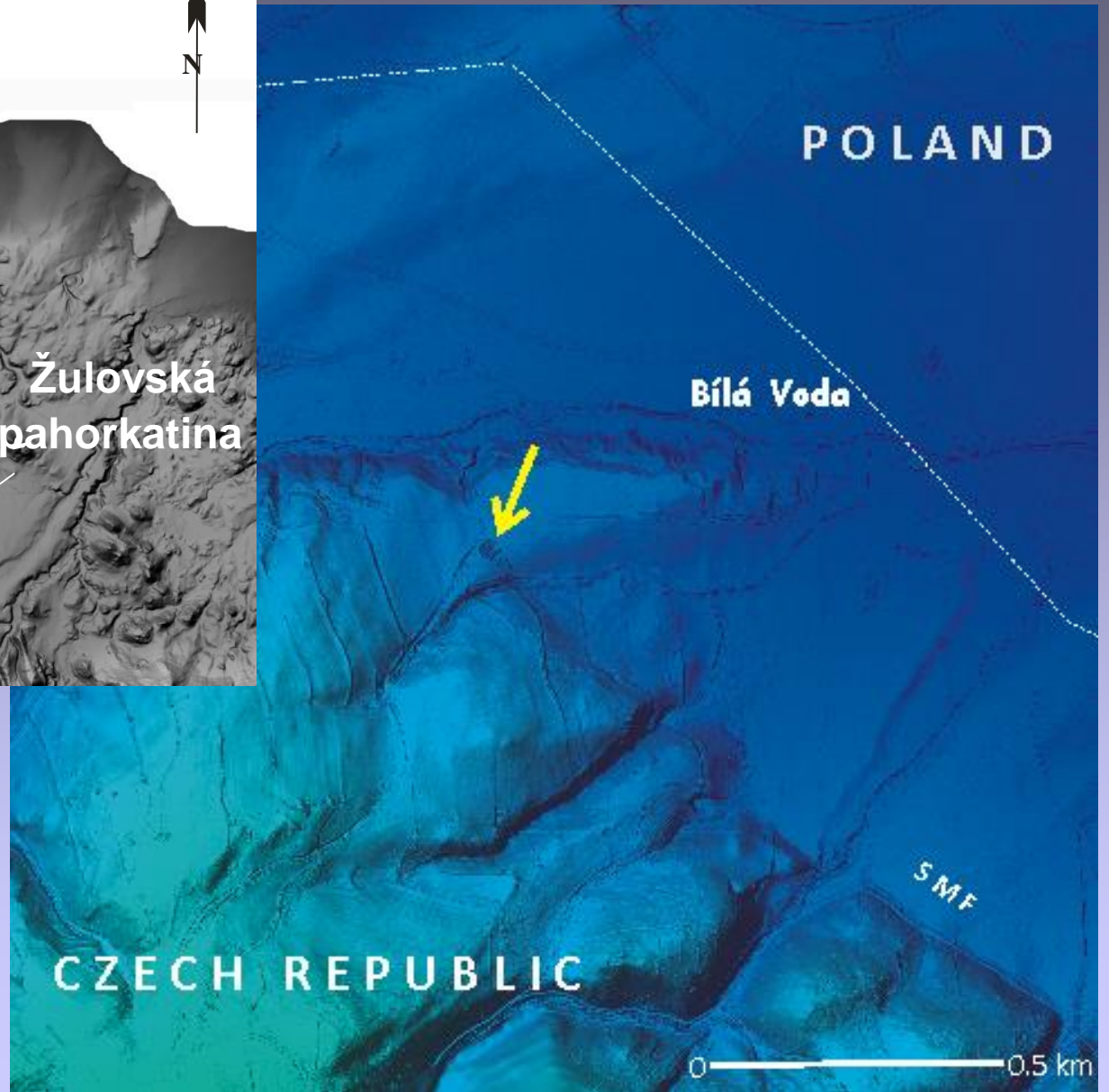


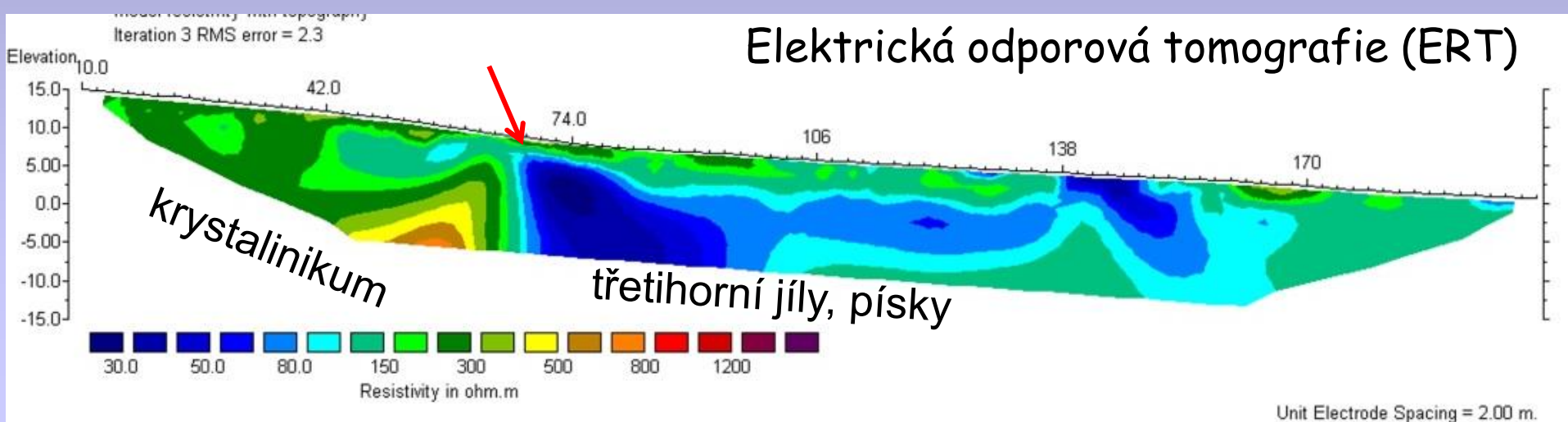
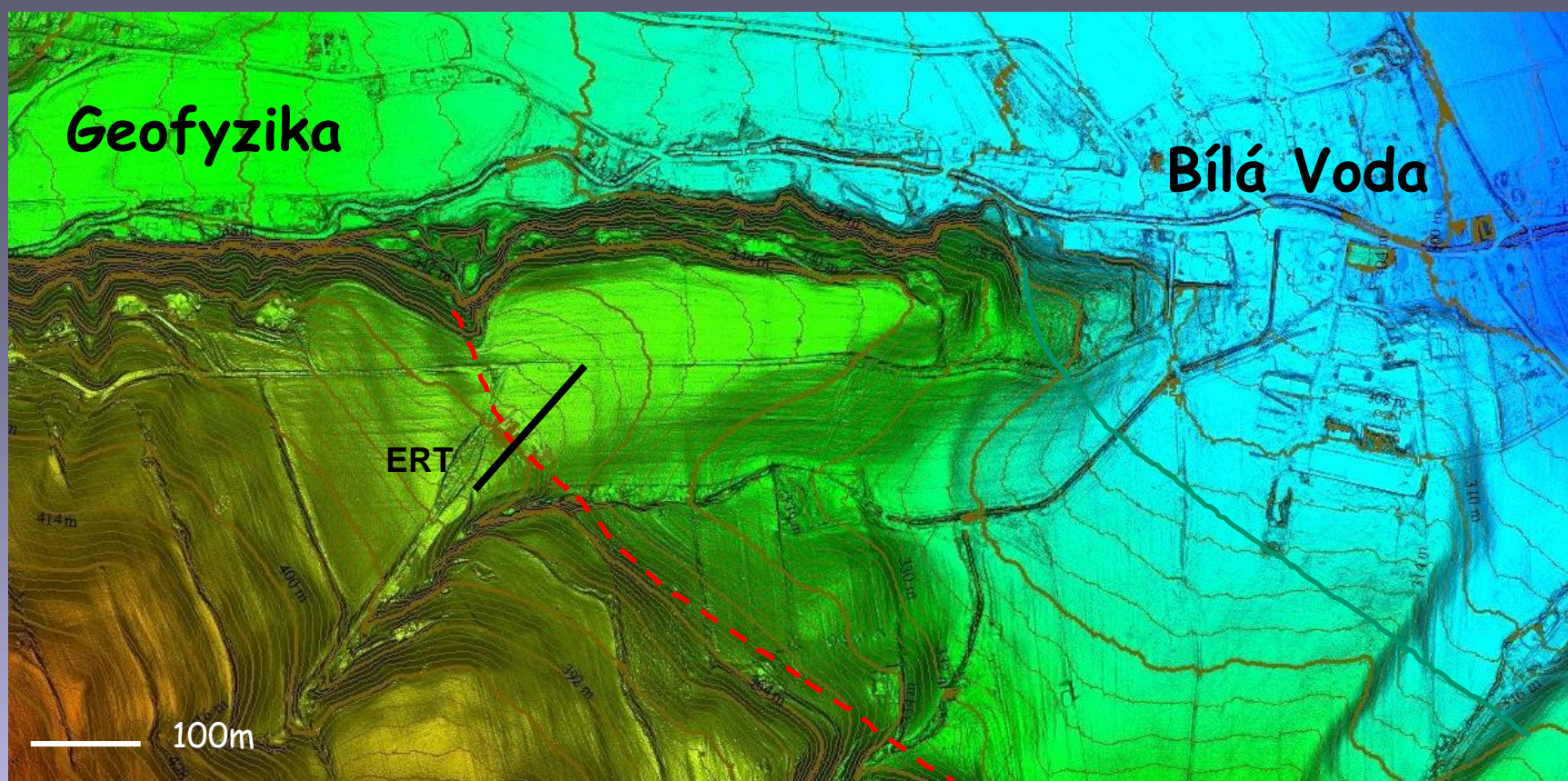
Okrajový sudetský zlom



Mw > 6 morfogenní zemětřesení - zlom praskne až k povrchu (McCalpin, 1996)

Bílá Voda



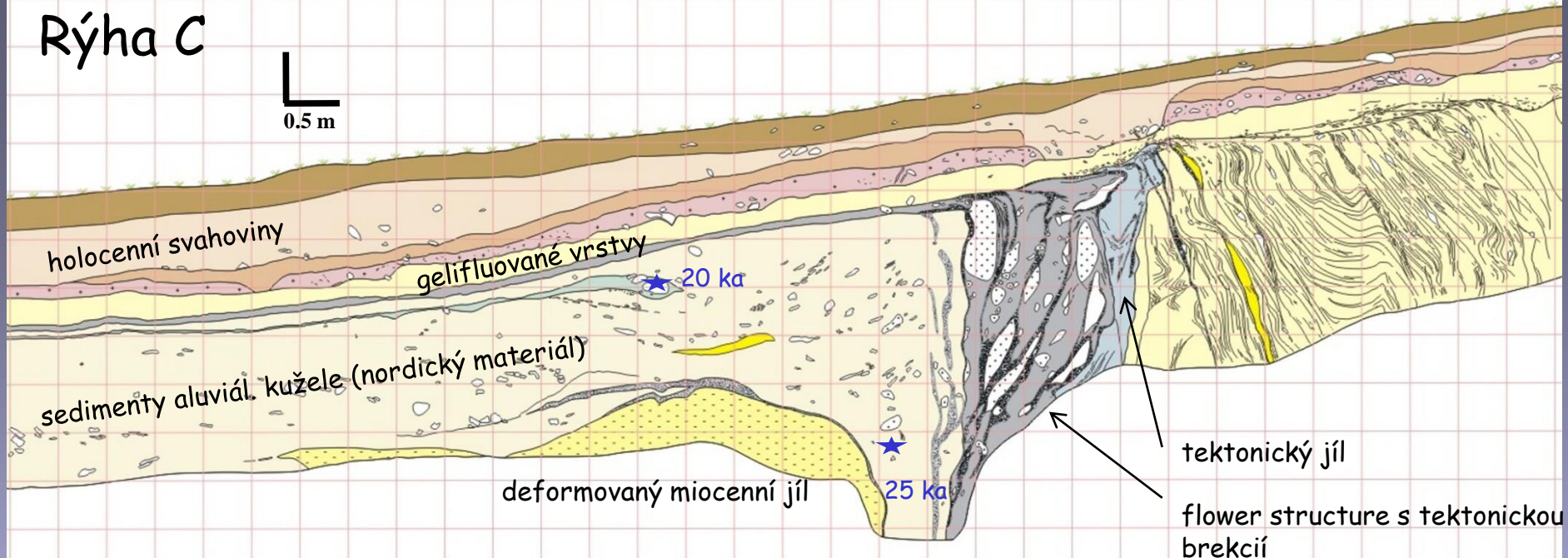


Průzkumné rýhy (trenching)

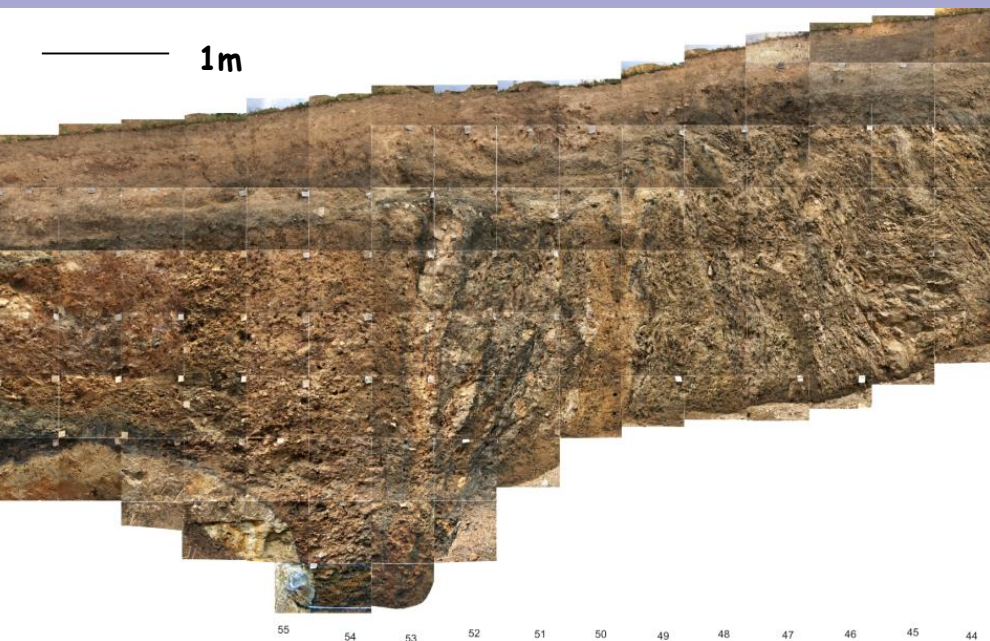


Rýha C

0.5 m



okrajový sudetský zlom - opakované pohyby - strike-slip v kvartéru



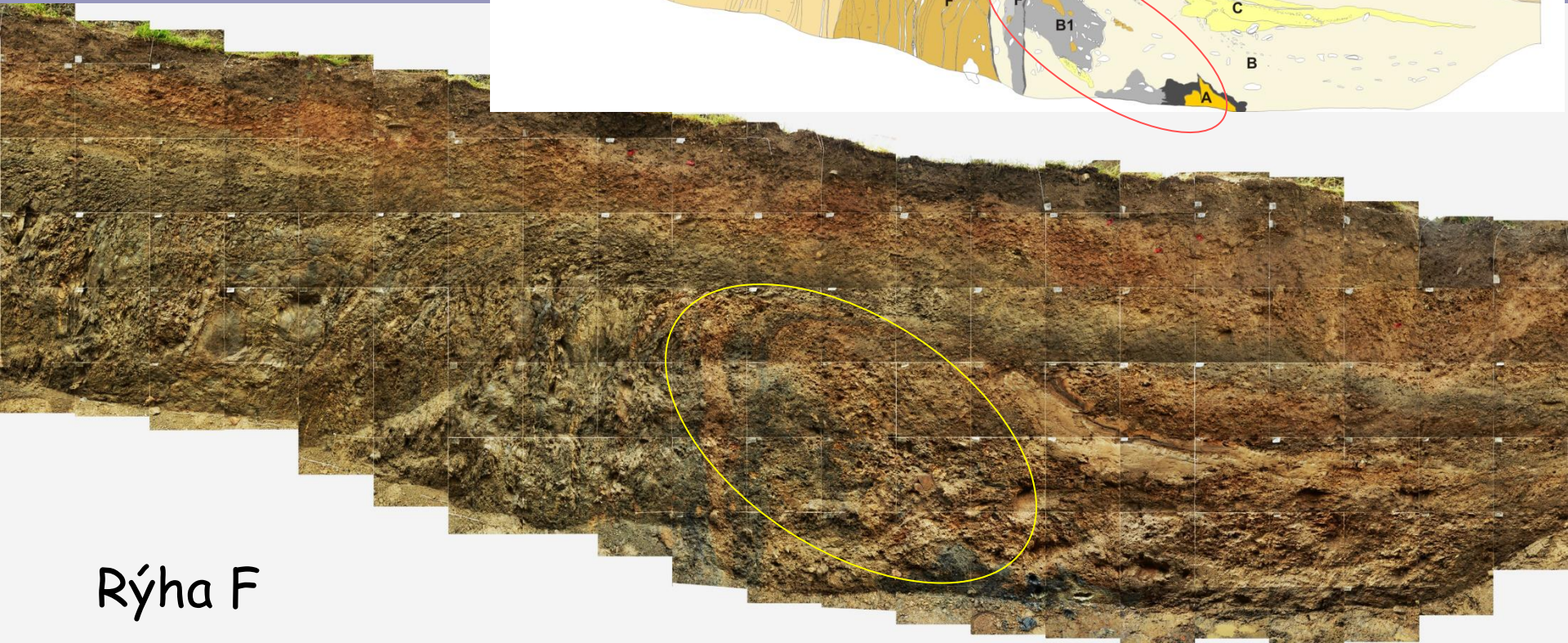
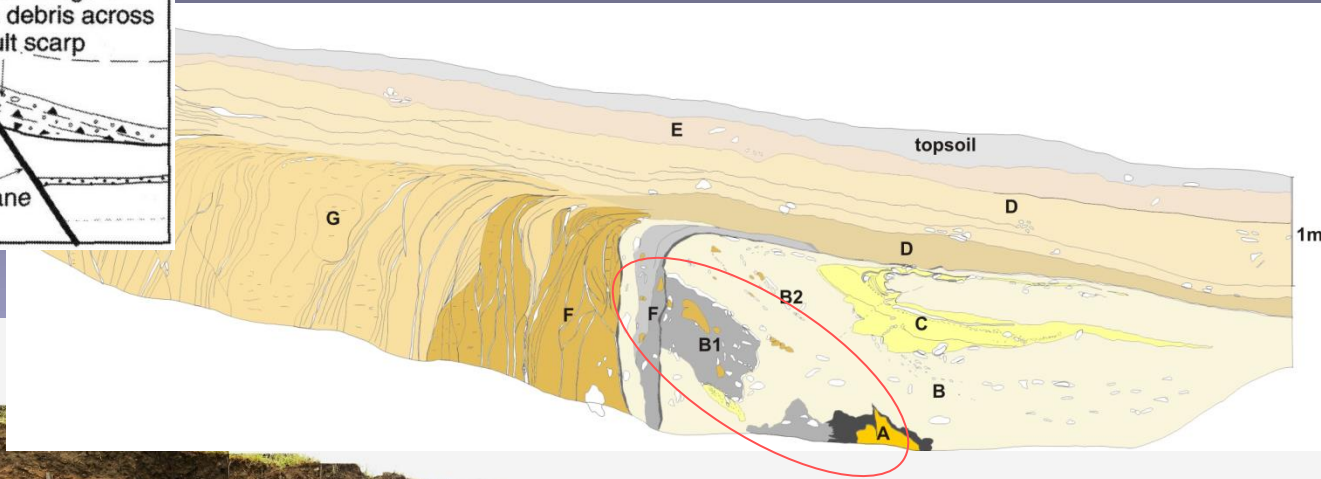
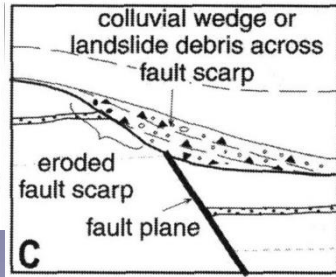
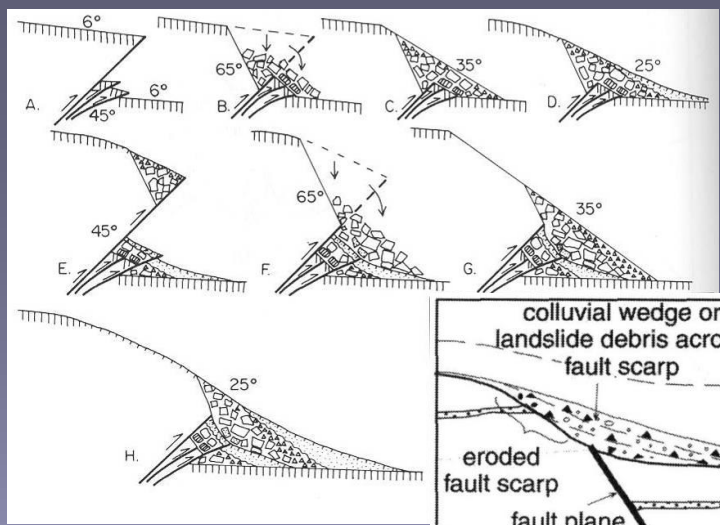
flower structure
tektonický jíł - 3 generace
(starší zlomy 145° - 150° ,
mladší zlomy 135°)

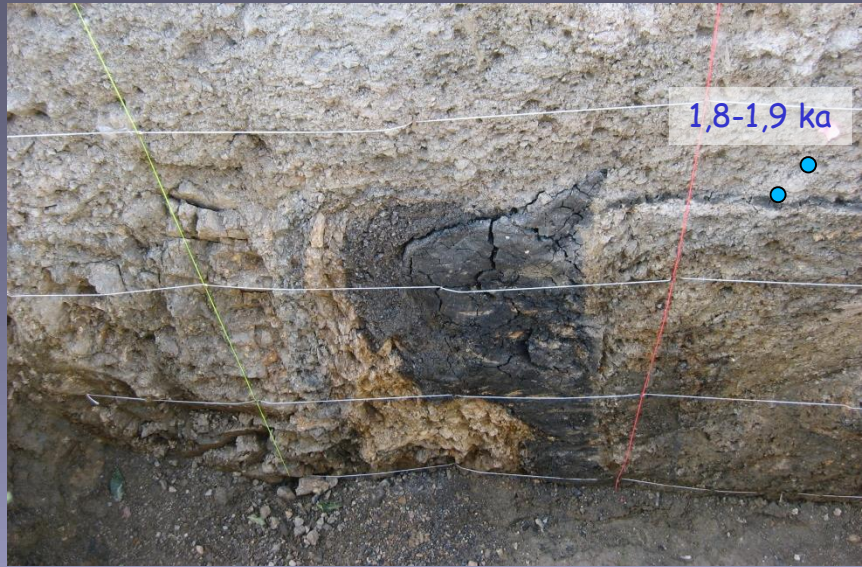
odlišné horniny, žádné
„matching points“
(přesmyk ani pokles)

Dokumentované deformace

- rychlé pohyby

Koluviální klín (colluvial wedge) na zlomu -
indikátor rychlého pohybu (zemětřesení)





Fluvial-slope deposits

- Top soil
- Silt (with scattered pebbles)

- Silt

Geliflucted colluvium

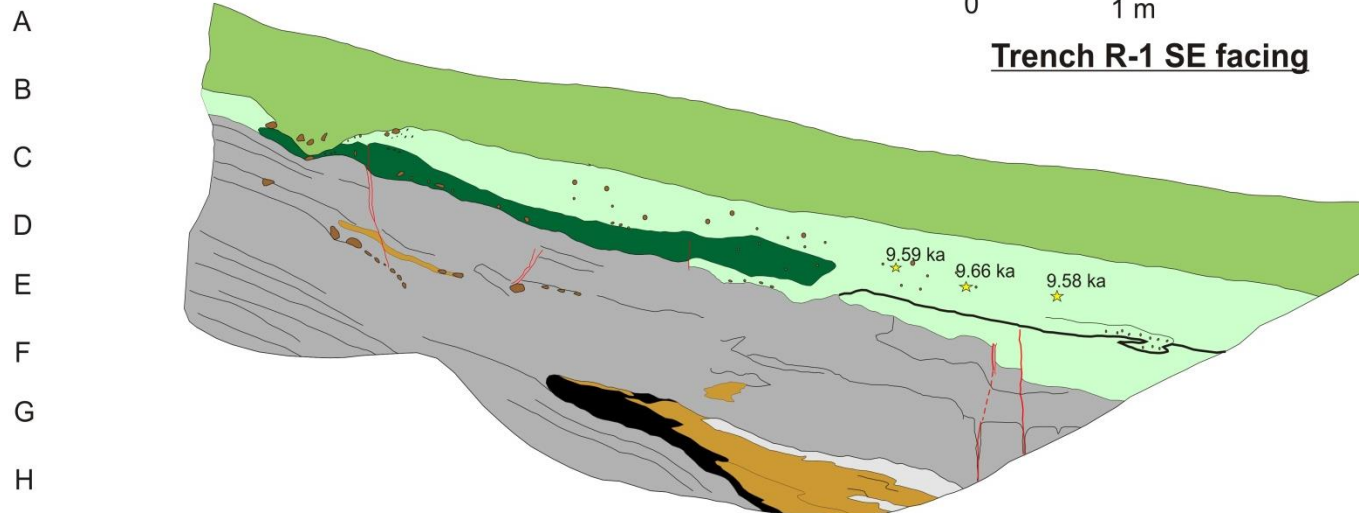
- Transition layer
- Angular pebbles + cobbles (matrix almost absent)
- Clasts (mainly schists) clast-supported with silty matrix
- Ocre clay
- Orange clay + clasts
- Black/white clay

Miocene reworked

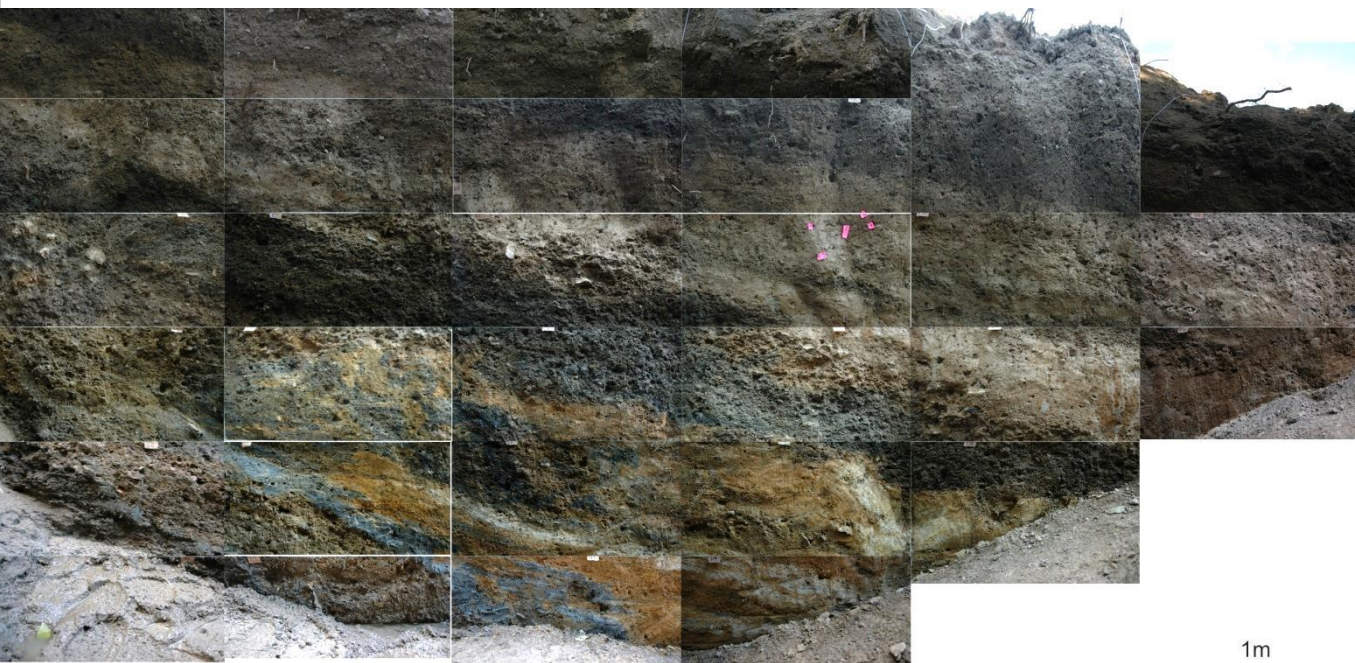
3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

0 ————— 1 m

Trench R-1 SE facing

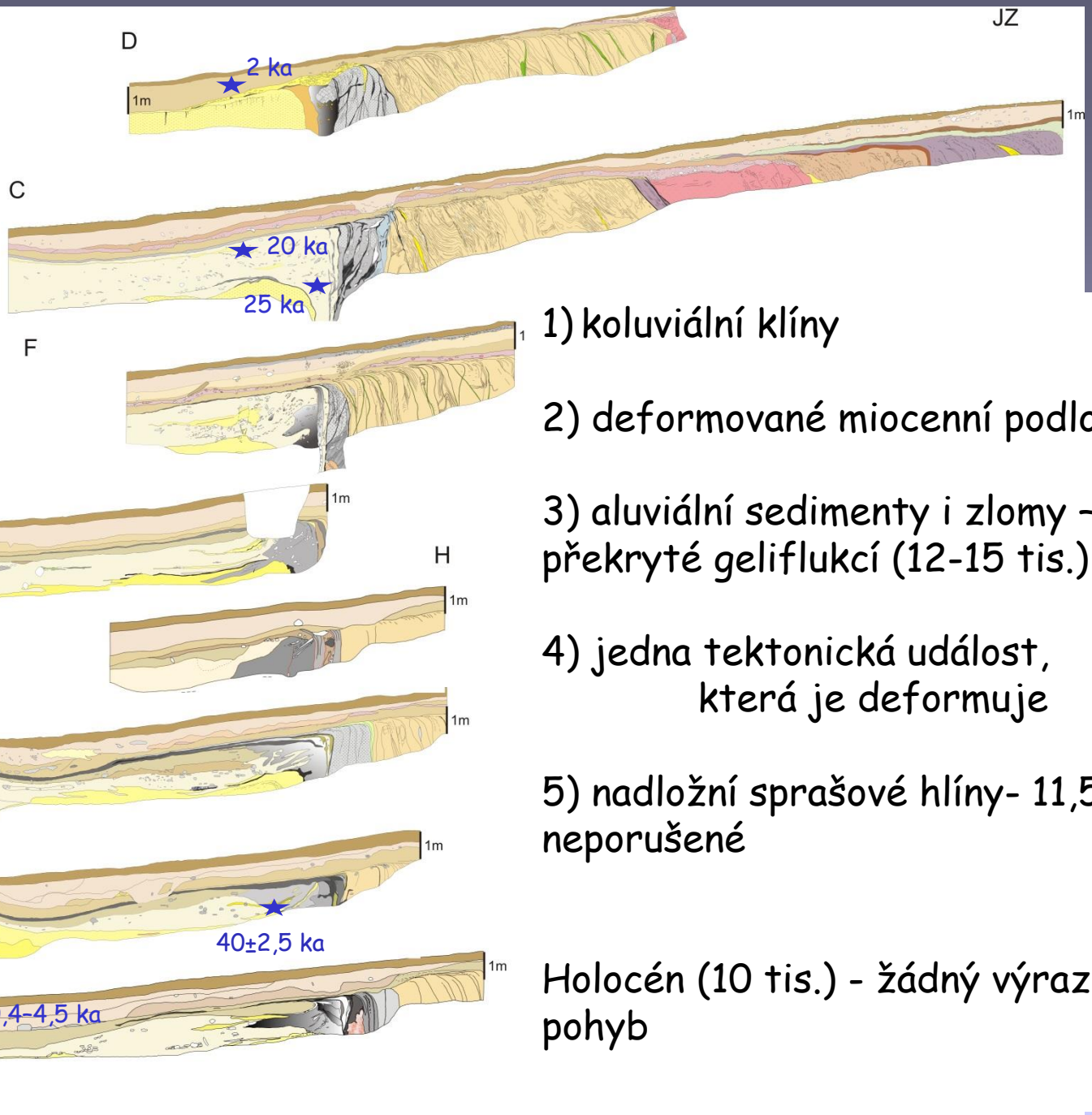


R1

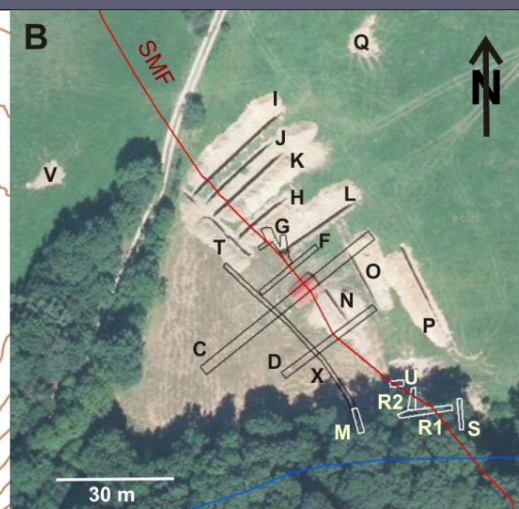
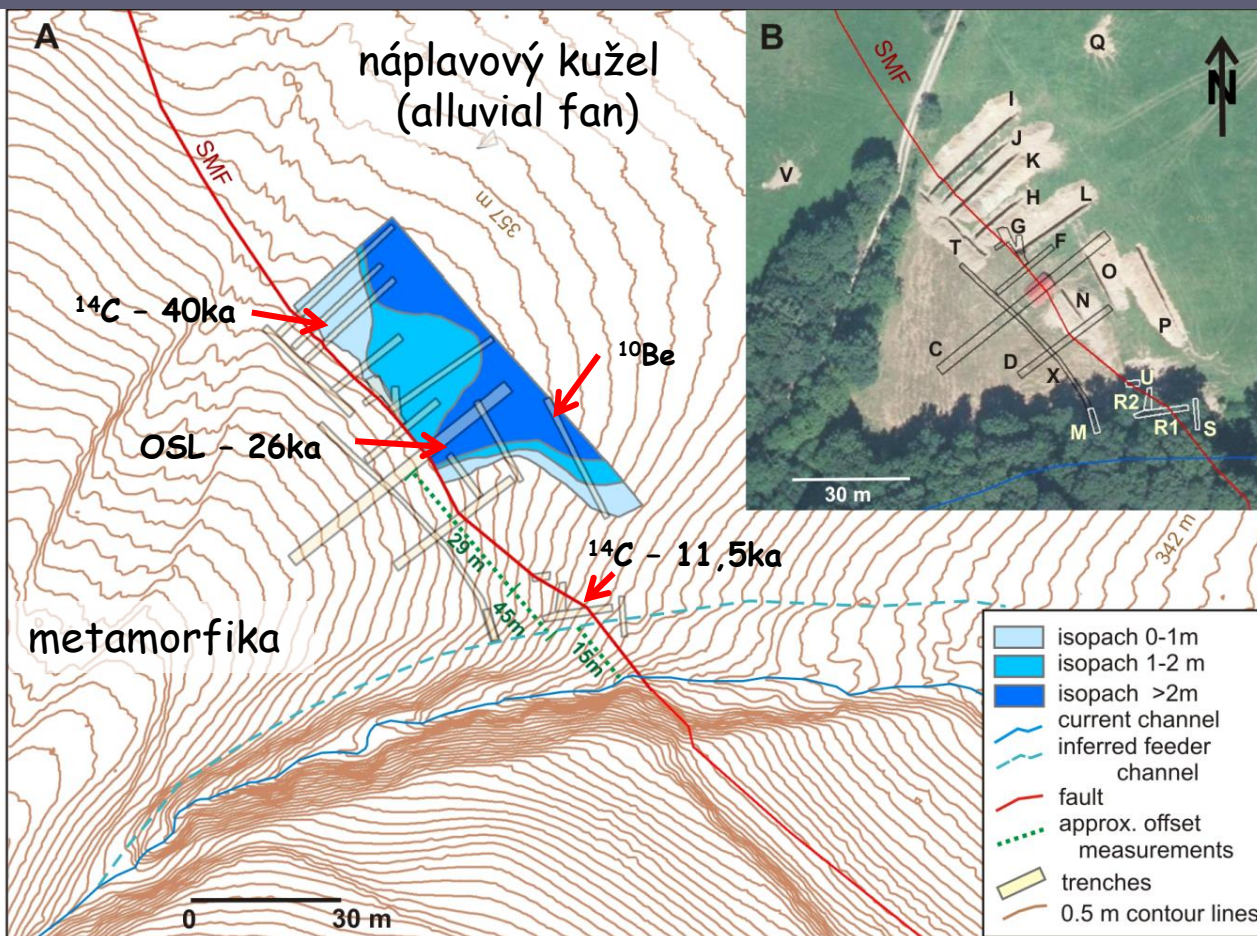


Sprašové hlíny 11,5 tis. let již neporušené





- 1) koluviální klíny
 - 2) deformované miocenní podloží
 - 3) aluviální sedimenty i zlomy - překryté geliflukcí (12-15 tis.)
 - 4) jedna tektonická událost, která je deformuje
 - 5) nadložní sprašové hlíny- 11,5 tis. neporušené
- Holocén (10 tis.) - žádný výrazný pohyb



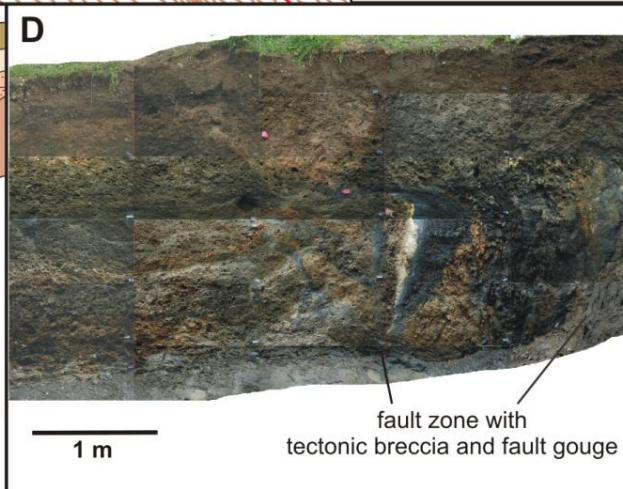
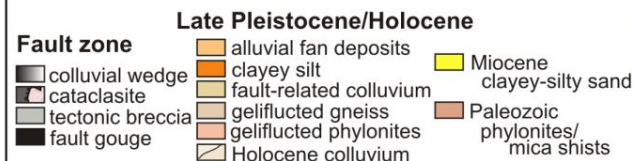
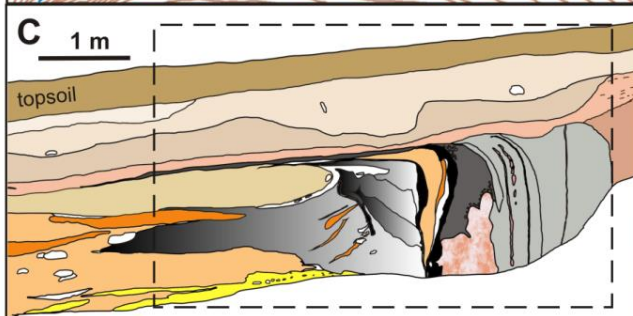
Přetátný
náplavový kužel

Stáří - 40 tis. let

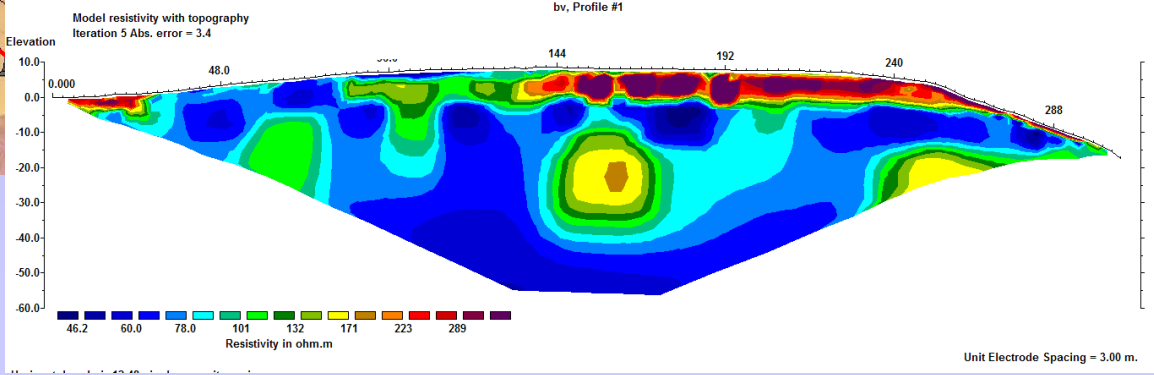
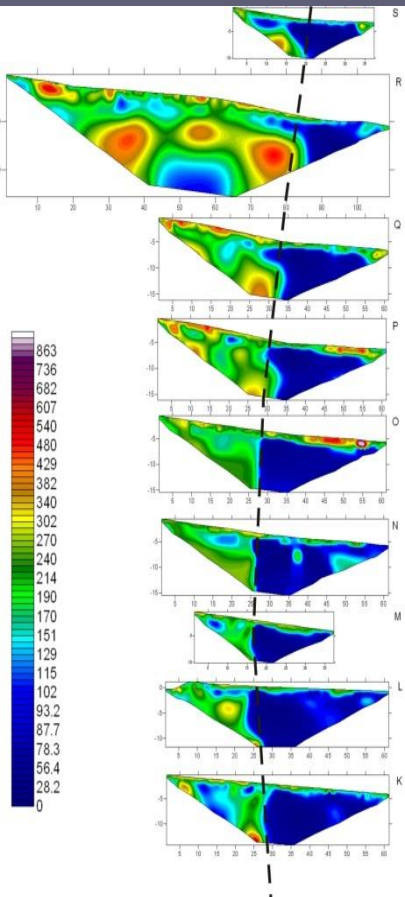
Apex kužele 26 tis.

Neporušené spraš. hlíny -
11,5 tis.

Nejbližší zdroj -
údolí 37± 8 m

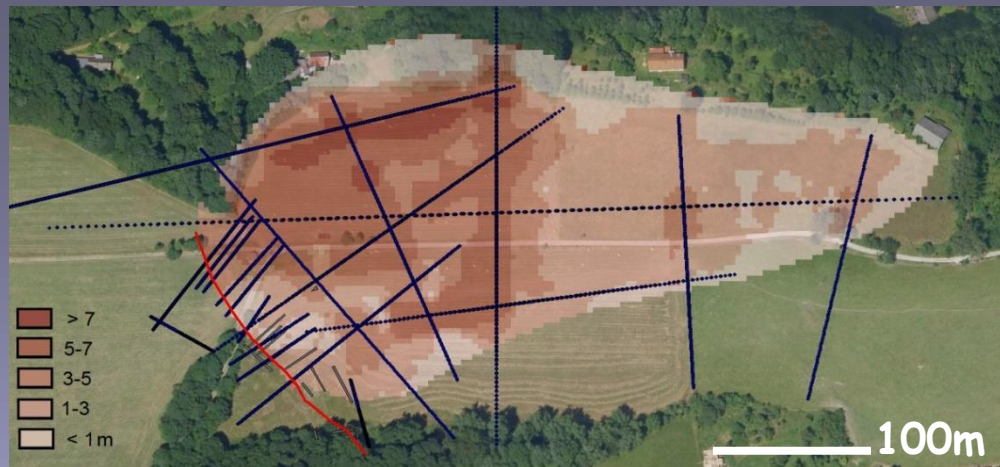


Geofyzikální profily (27 ERT - elektrická odporová tomografie) + rýhy



Vymapování kuželu na základě ERT sedimentů aluviálního kužele

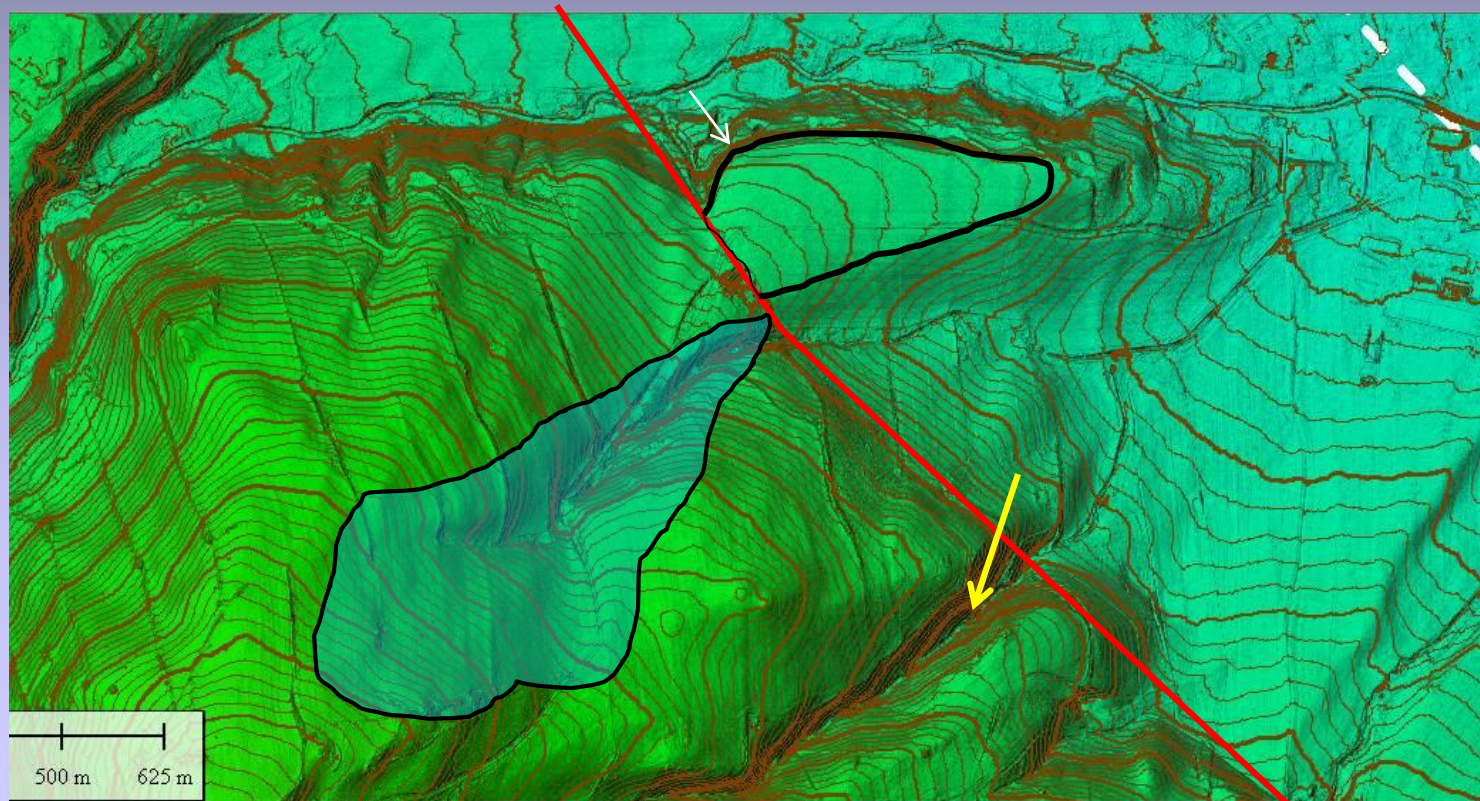
Isopachová mapa - ERT profily



Objem sedim. kužele -
cca 230.000 m³

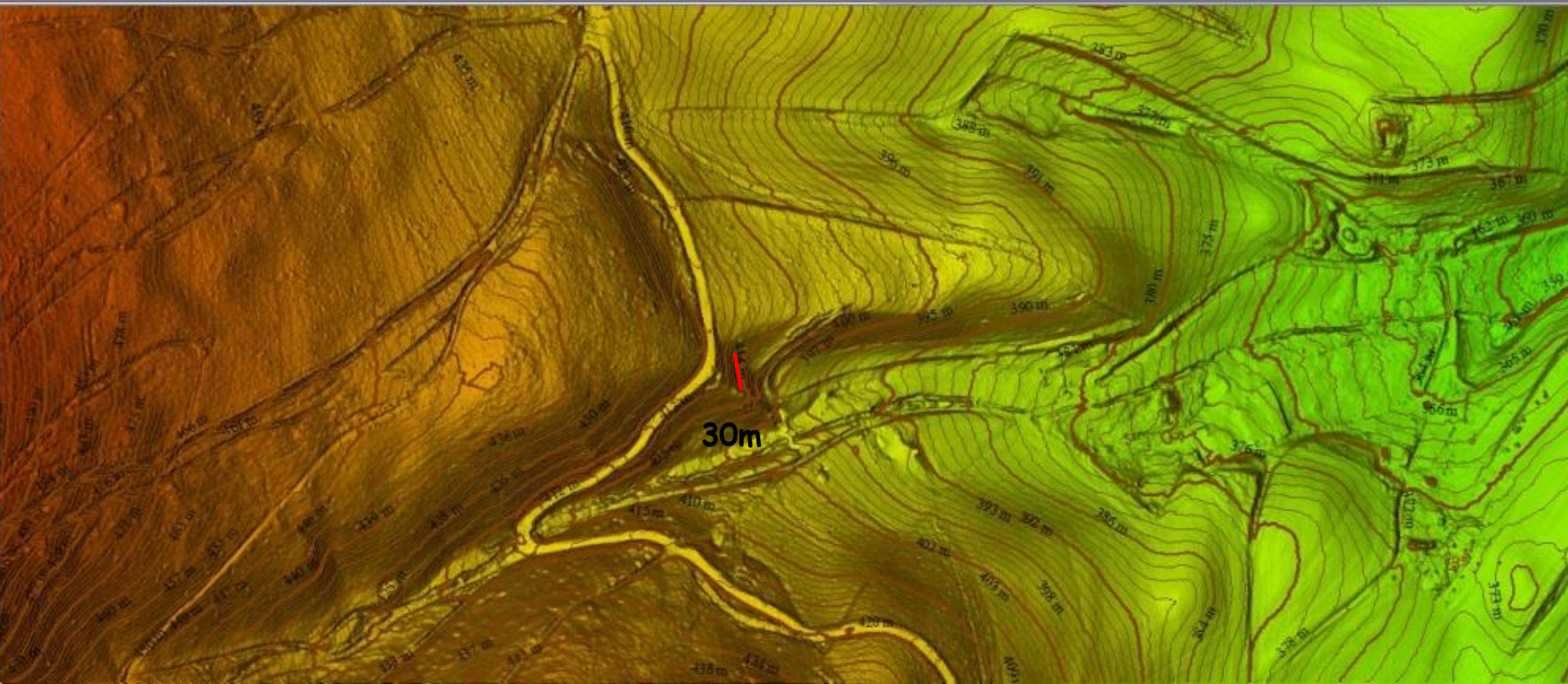
Materiál erodovaný ze
„zdrojového údolí“
cca 170.000 m³

-levostranný posun

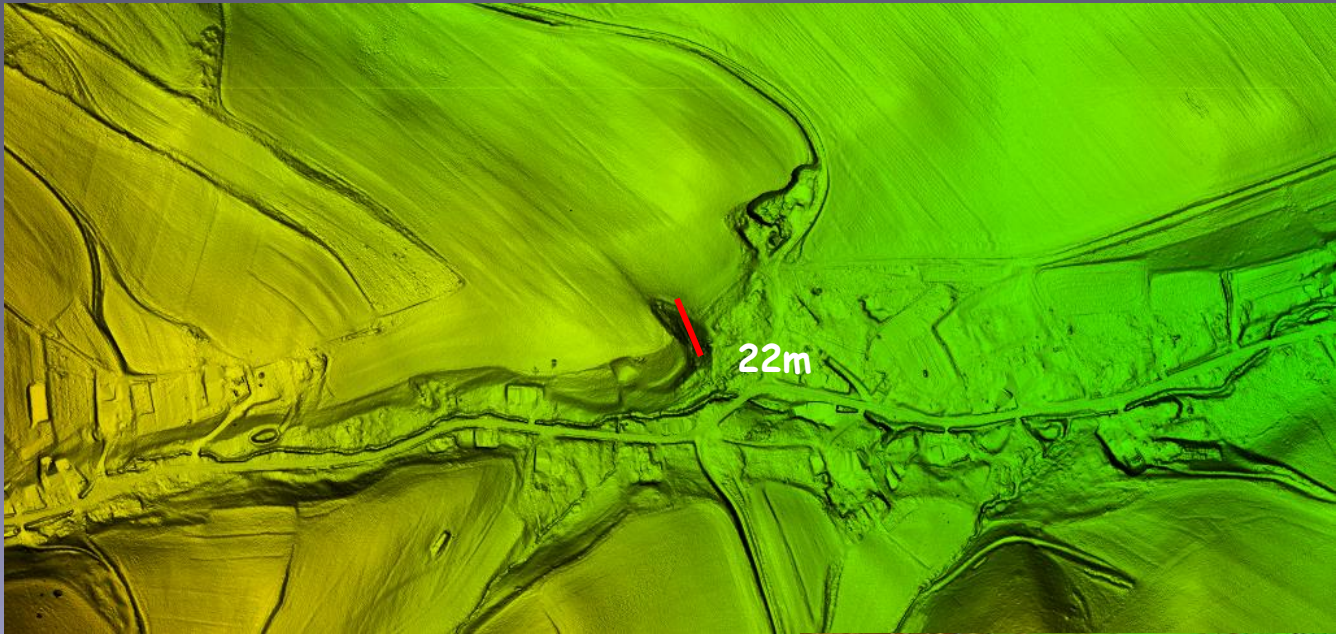


DEM z LiDARu
0.5m grid, 5 - 50 points/m²

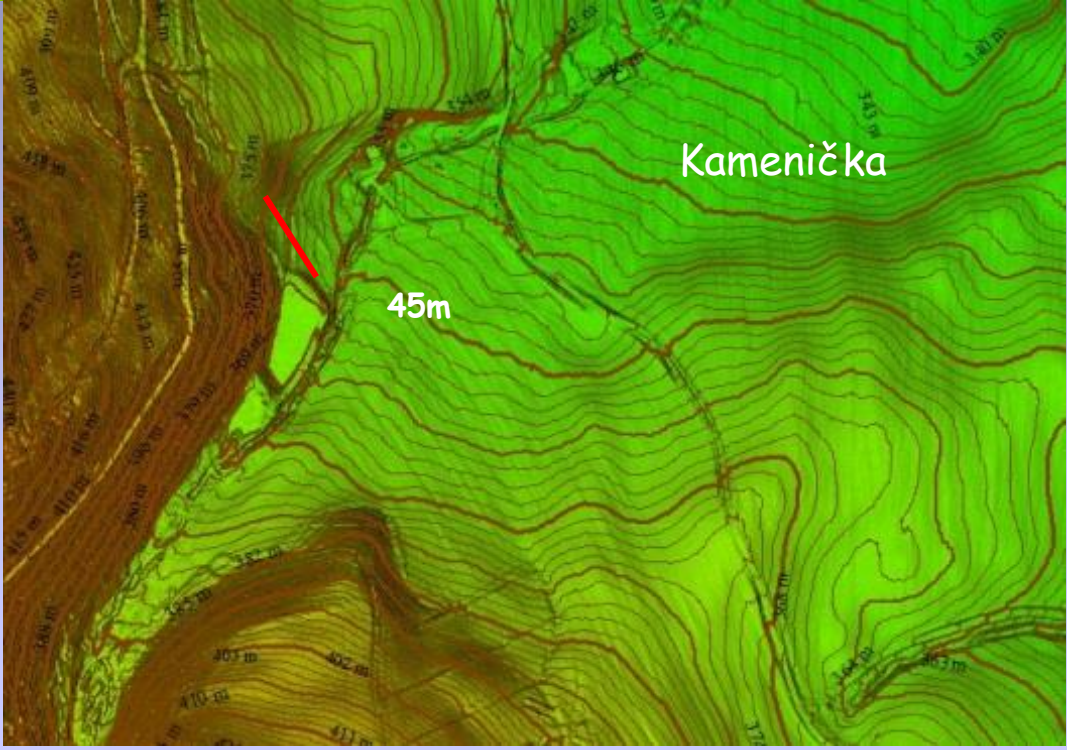
Levostranný posun - doklad z morfologie



Levostranně posunutý údolní svah

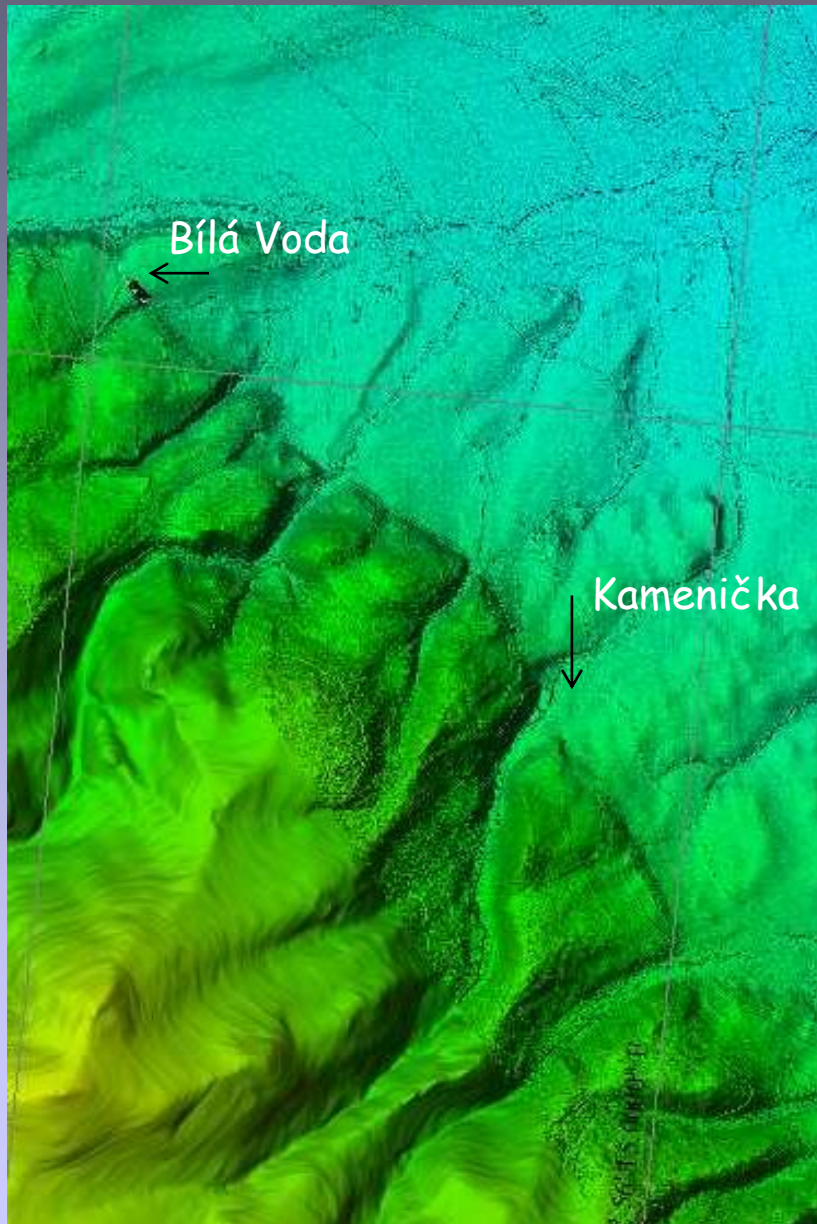


Levostranný posun údolního svahu

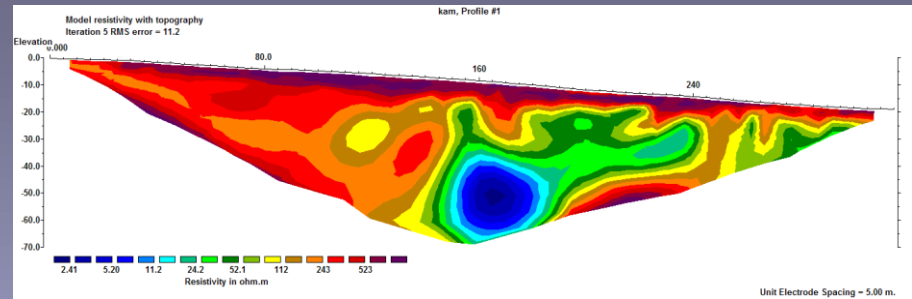


Kamenička

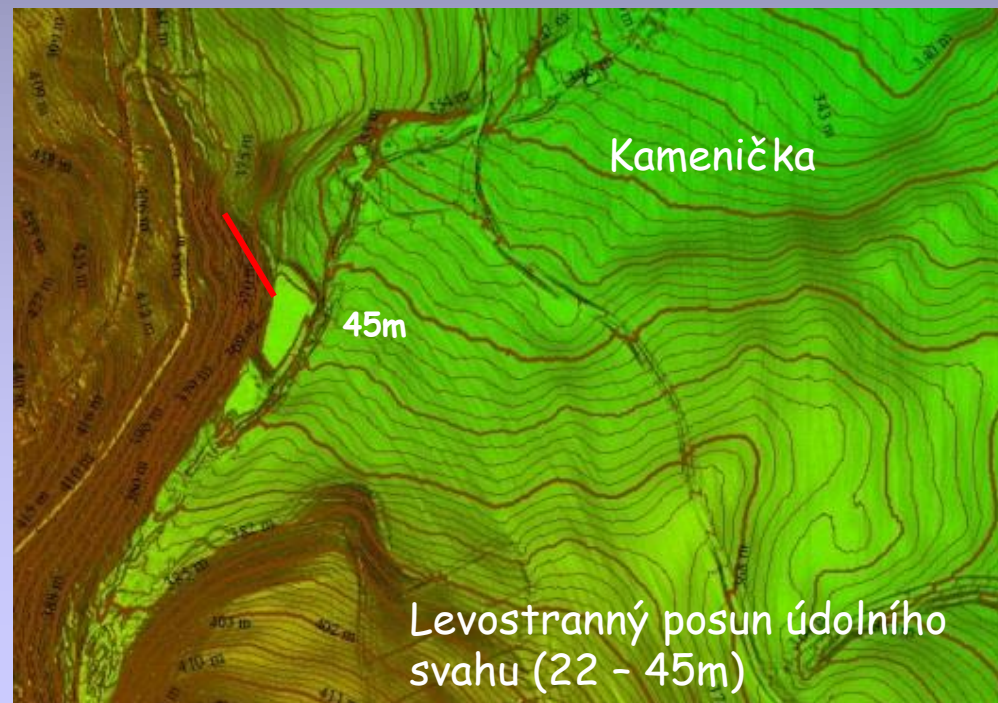
Paleoseismický + geofyzikální průzkum 2014 - lokalita Kamenička



Morfologie + geofyzika



2013 - 4 ERT profilů



- Levostranně posunutý aluviální kužel o 30-60 m
- 26 tis. a 11 tis. lety (LGM) - 3 až 4 větší zemětřesení
- Slip-rate 1,9 to 3 mm/yr během LGM,

0 = během holocénu

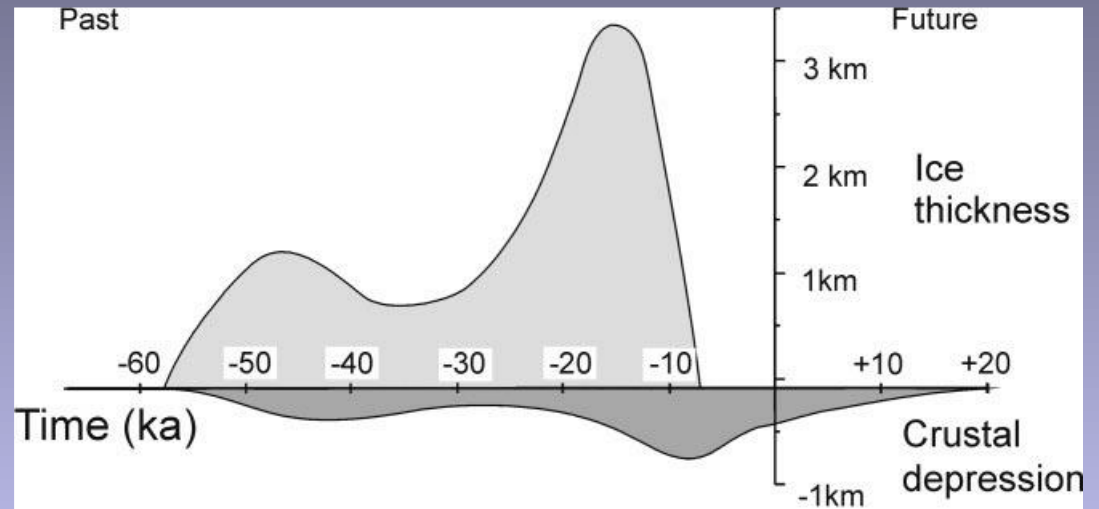
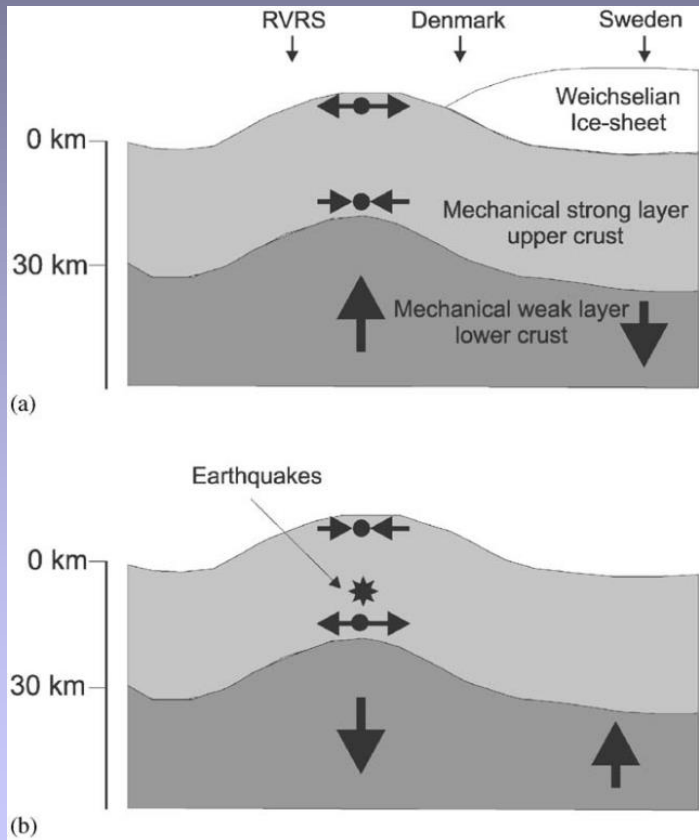
Předsudetský blok - pokles aktivity směrem k holocénu -
(Przybylski 1998), rekonstrukce říčních teras
(Štěpančíková et al. 2008) -

spojováno se zatížením a odlehčením ledovcem (ice-loading)

Mechanické modely - vliv zatížení ledovcem na deformaci zemské kůry

Forebuldge - 300-500km od okraje ledovce

Největší deformace 150km od okraje - kolaps forebuldge

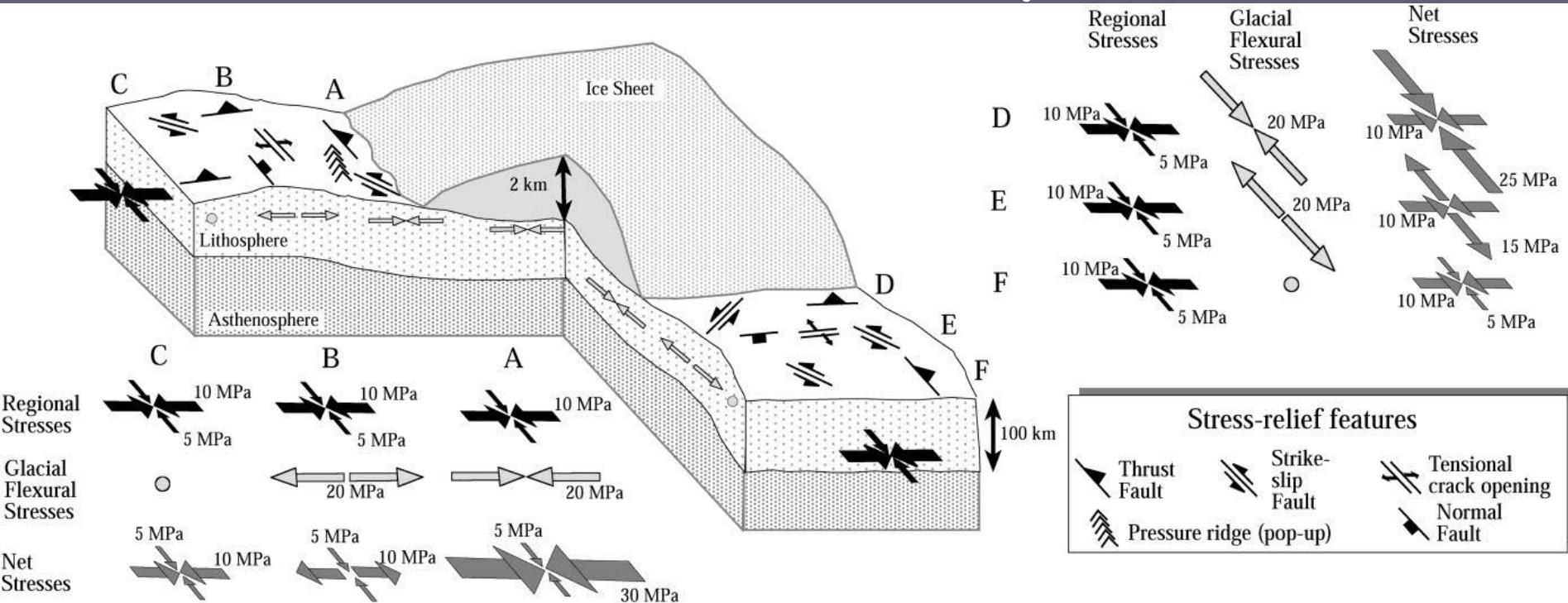


Fennoscandia během posledního glaciálu (Weichselian)

Stewart et al. (2000)

(Johnston et al., 1998; Muir-Wood, 2000)

Velikost a rozsah ledovce - hraje roli

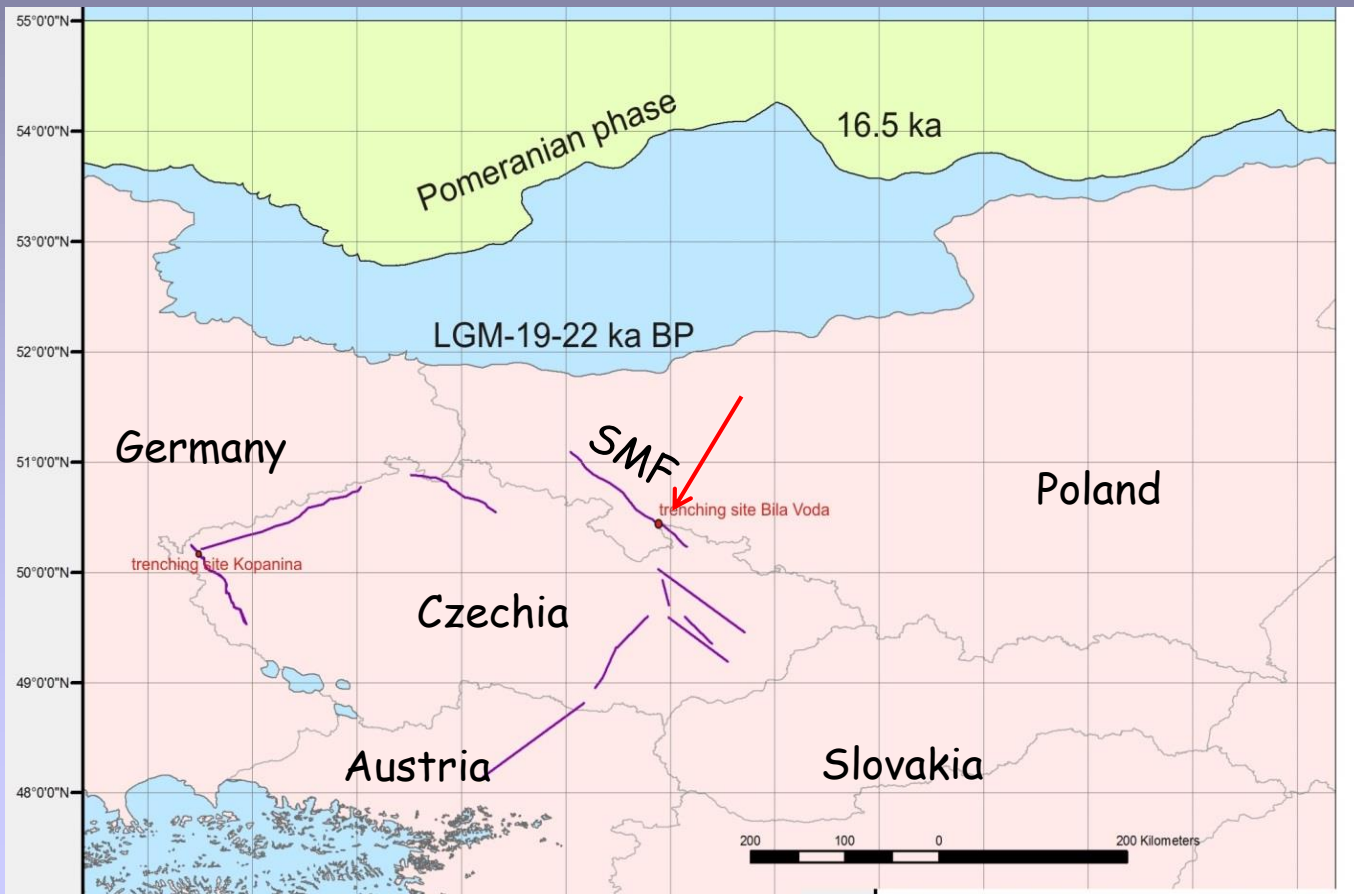


Regiony s největší mocností ledovce a regiony na okraji ledovce z posledního glaciálu - nejdramatičtější doklady zemětřesení

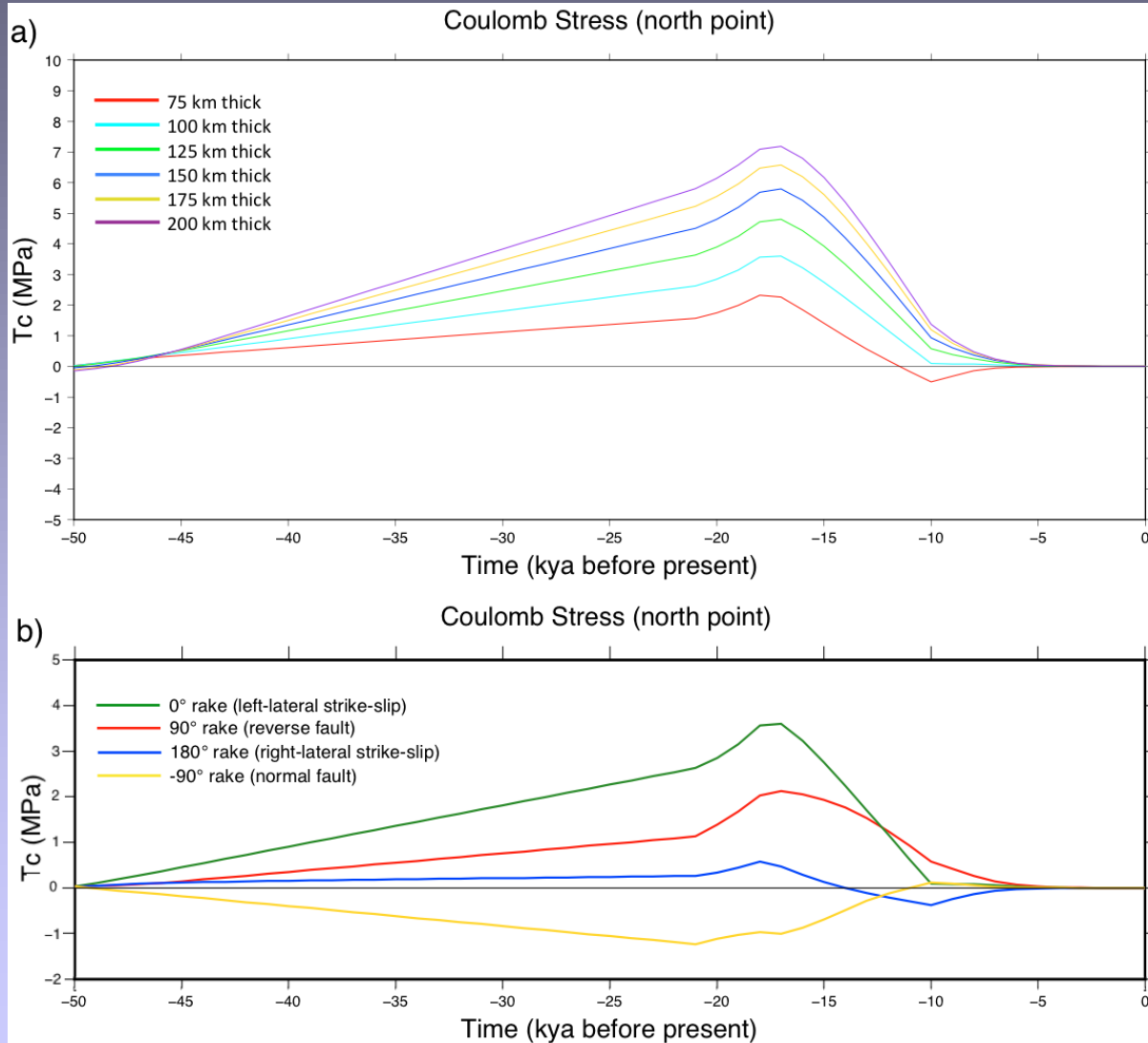
Reakce pláště na velké fluktuace hmoty ledovce a na změny hmoty mezi oceánem a pevninou - deformace kůry měřitelné stovky km od okraje ledovce

Bílá Voda

- Poslední kontinent. ledovec - Elsterian 2 (400-460 ka)
- Late Glacial Maximum (LGM) 20-25 ka - (Weichselian) - 150-160 km od lokality Bílá Voda



Modelování ice-loading pro okrajový sudetský zlom



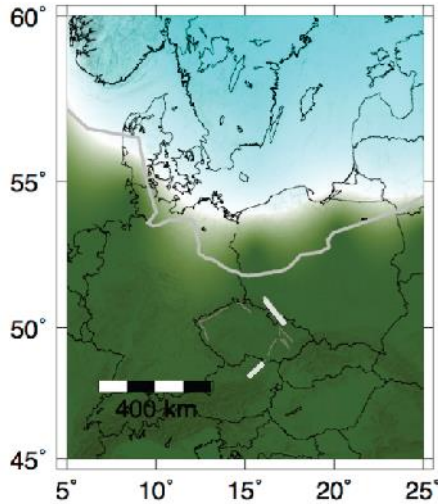
Posl. 50 tis. let -
postup ledovce

Coulomb stress o
~1 Mpa/4000yrs
Stress
accummulation
rate ~.25 kPa/yr

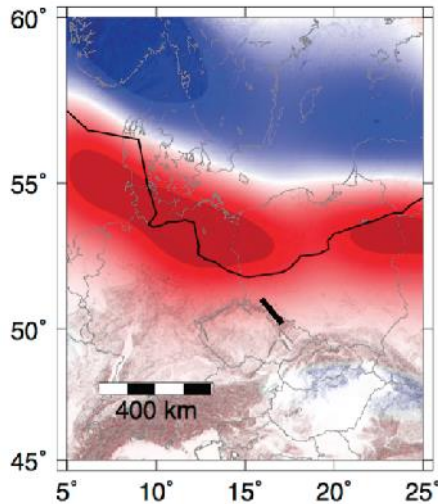
Coulomb stress
- různá kinematika

Before LGM

Glacial Load 25 ka

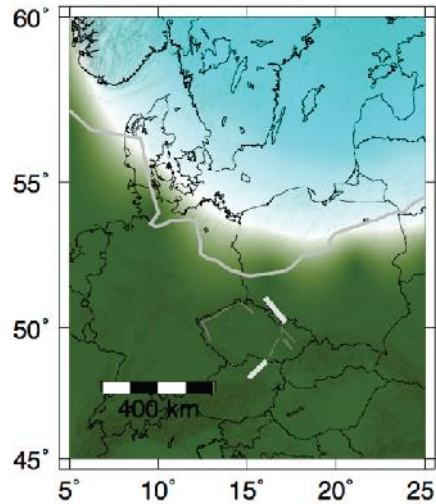


Coulomb Stress (MPa) 25 ka

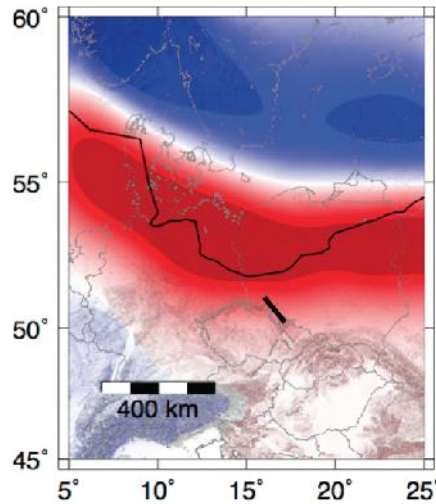


During LGM

Glacial Load 18 ka

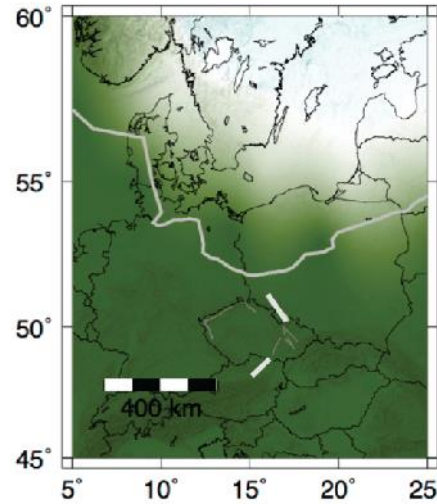


Coulomb Stress (MPa) 18 ka

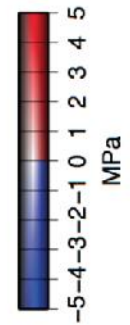
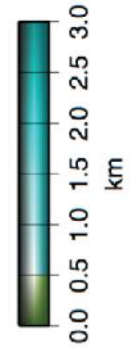
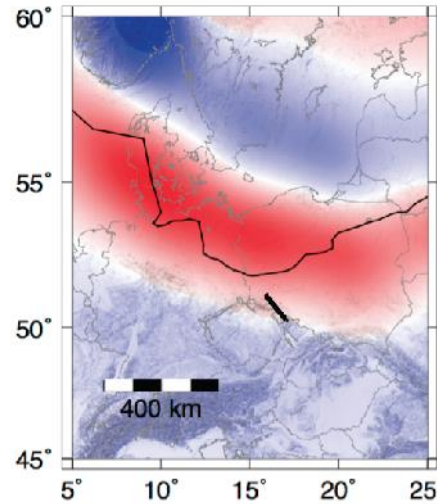


After LGM

Glacial Load 12 ka

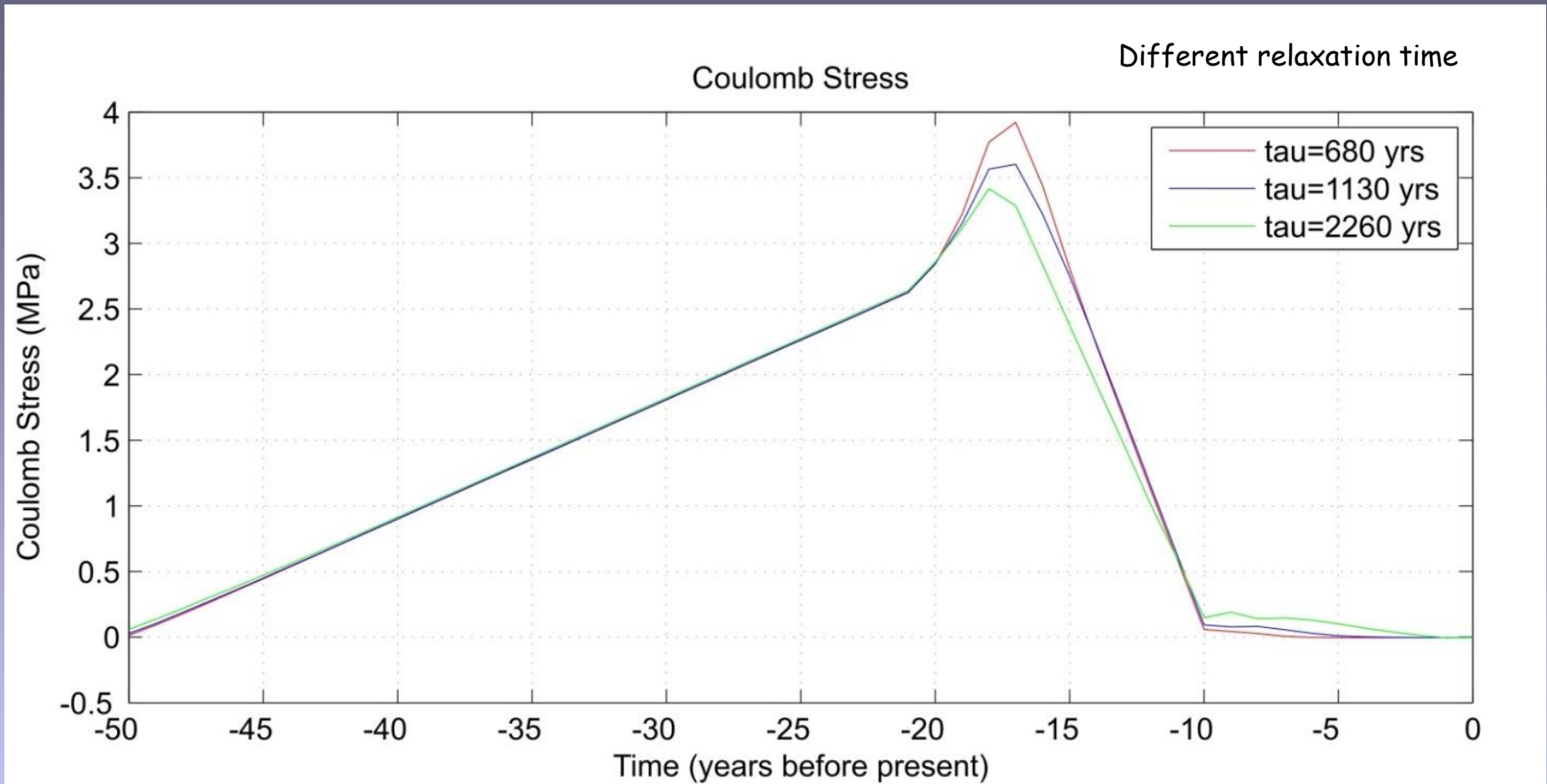


Coulomb Stress (MPa) 12 ka



• Mocnost ledovce a coulomb stress

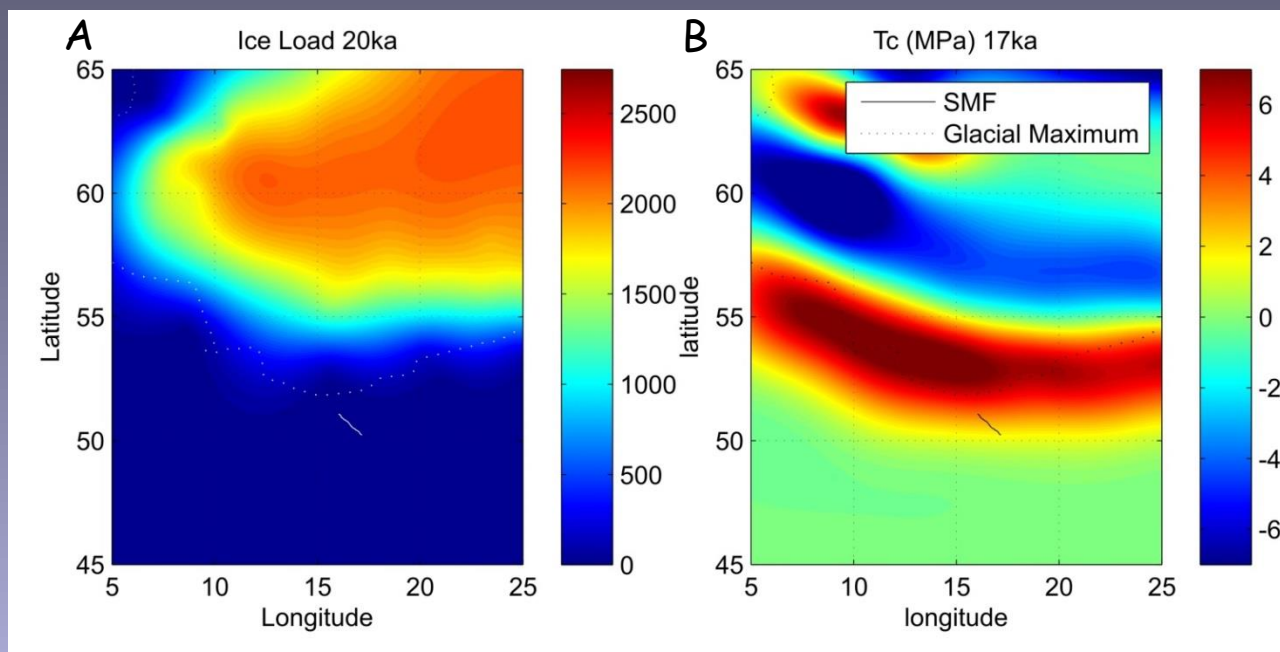
Vývoj Coulomb stressu během posledních 50 tis. let



Po 21 ka - velký nárůst Coulomb stresu způsobený zatížením ledovce

Coulomb stress - nárůst o ~ 1 MPa za 4000 let, odpovídá to rychlosti akumulace napětí - (stress accumulation rate) $\sim 0,25$ kPa/yr.

Sumarizovaný stress model



100 km mocnost litosféry; 3 různé relaxační doby, korespondující k limitám viskozity astenosféry

- A) Ice loading - 20 ka, ~ glacial maximum OSZ - vně zásahu ledovce
- B) Resolved Coulomb stress na ploše OSZ - 17 ka (~ coulomb stress max) vůči 80ka (bez ledu)
- C) **Positivní Coulomb stress podporuje** - levostranný pohyb, negativní Coulomb stress inhibuje levostranný pohyb

OSZ na okraji forebuldge spojeného s hlavním postupem ledovce, stejně však nárůst Coulomb stress o ~2-4 MPa relativně vůči období bez ledovce (80ka i 0ka).

Závěr

- Levostranné pohyby koncem pleistocénu, za min. posl. 40tis. let 30-60 m posun
- Mezi 26 tis. a 11 tis. lety 3 až 4 velká zemětřesení o magnitudu $M 6,5$
- Žádný výrazný pohyb v holocénu; zrychlené pohyby koncem pleistocénu - slip-rate 1,9-3 mm/rok
- Zrychlení během LGM pravděp. způsobené zatížením ledovcem
- V současnosti napětí paralelní se zlomem (NNW-SSE) - nepříznivé pro reaktivaci

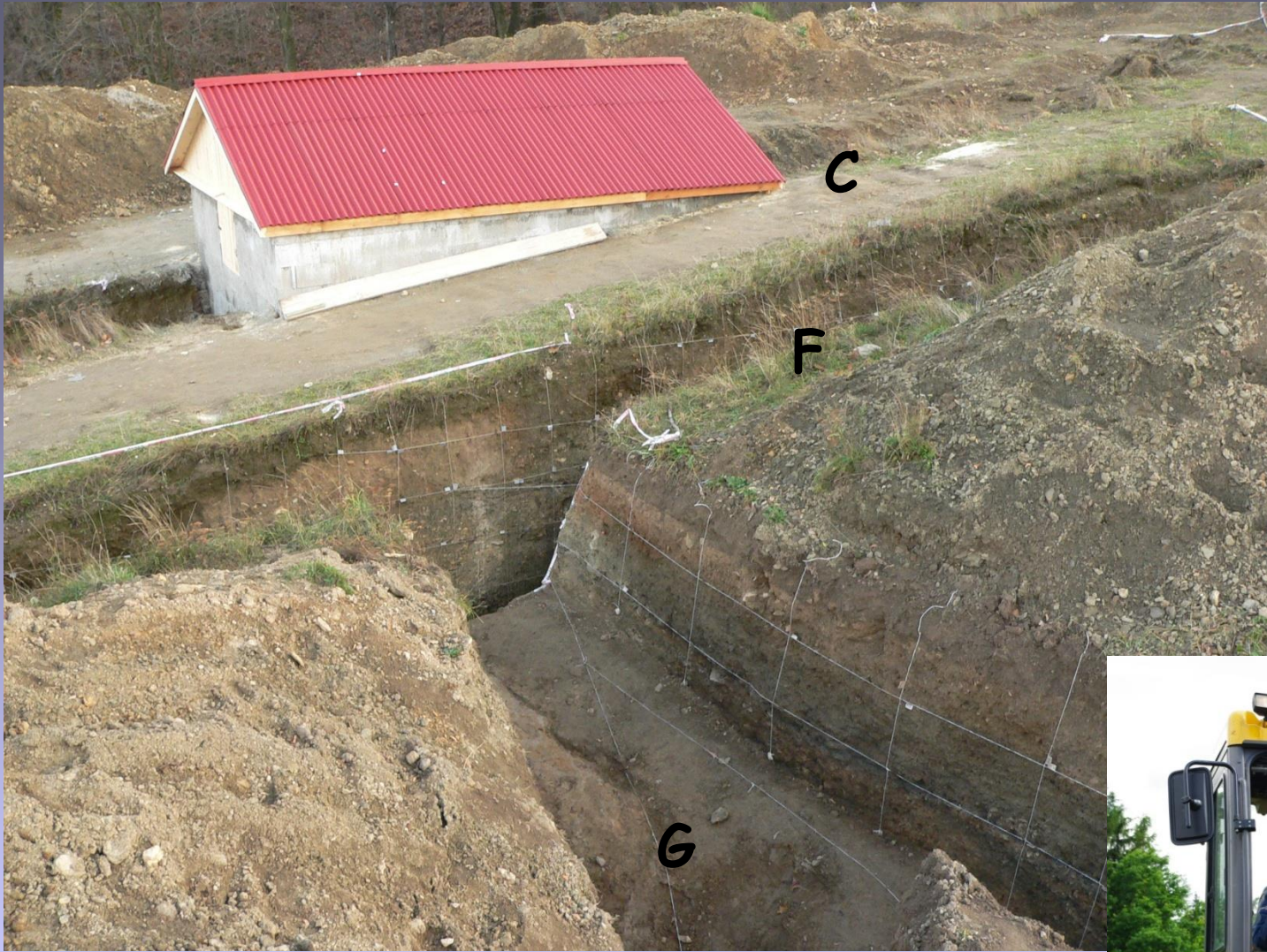


CHART OF THE INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007 - ESI 07

ESI-2007		PRIMARY EFFECTS		SECONDARY EFFECTS WITH GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL RECORD				OTHER SECONDARY EFFECTS WITH MINOR GEOLOGICAL RECORD		AFFECTED AREA AND TYPE OF RECORD	
		SURFACE RUPTURES	TECTONIC UPLIFT/SUBSID	GROUND CRACKS	SLOPE MOVEMENTS	LIQUEFACTION PROCESSES	ANOMALOUS WAVES AND TSUNAMIS	HYDROGEOLOGICAL ANOMALIES	TREE SHAKING	Affected Area	Type of RECORD
OBSERVED	I-III	Offset	Length	Width	Length	ENVIRONMENTAL EFFECTS ARE VERY RARE AND CANNOT BE USED AS DIAGNOSTIC					
	IV	ABSENT	ABSENT	Rare and local	Rare and local	Only dewatered levels (seismites)	cm	Temporary level changes		Rare and local	
DAMAGING	A										
	VII	Rare and local	Permanent ground dislocations (< 10 cm)	mm	mm	50 cm	dm	Temp. turbidity changes		Local within epicentral zone	
DESTRUCTIVE	B										
	VIII	cm	hm	dm	cm	1 m	1-2 m	Temp. temperature changes		100 km ²	
DESTRUCTIVE	X	dm	km	m	dm	0.5 m	3-5 m	Temp. spring drying H ₂ O		1,000 km ²	
	XI	metric	10-100 km	> 1 m	m	> 5 m	> 10 m	Permanent river changes		5,000 km ²	
DEVASTATING	C										
	XII	> 100 km	> 10 m	> 5 m	m	> 5 m	Tsunamis	Giant waves		10,000 km ²	
		Dip and strike-slip offset of coseismic ruptures	Permanent ground dislocation	Width and length of cracks and fractures in soils and rocks	Bulk volume of mobilised material	Dimension of liquified levels and sand boils	Transitory sea-level changes, standing waves and Tsunamis	Base-level changes in springs, rivers, aquifers	Tree branches and tree-trunk falling, rupture, etc...	50,000 km ²	

KEY REFERENCES: Michetti, A.M., et al., 2007. Environmental Seismic Intensity scale - ESI 2007. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 74. Servizio Geologico d'Italia, APAT, Rome, Italy*
 Silva, P.G., et al., 2008. Catalogue of the geological and environmental effects of earthquakes in Spain in the ESI-2007 Macroseismic scale. *Geotemas, 10, 1063 - 1066, SGE, Spain*
 Reicherter, K., Michetti, A.M., Silva, P.G., 2009. Palaeoseismology: Historical and Prehistorical Records of Earthquake Ground Effects for Seismic Hazard Assessment. *Geol. Soc. London, Spec. Pub., 316 1-10. London, U.K.*