

Paleoseismologie, její metody a příklady využití



Paleoseismologie

Co?

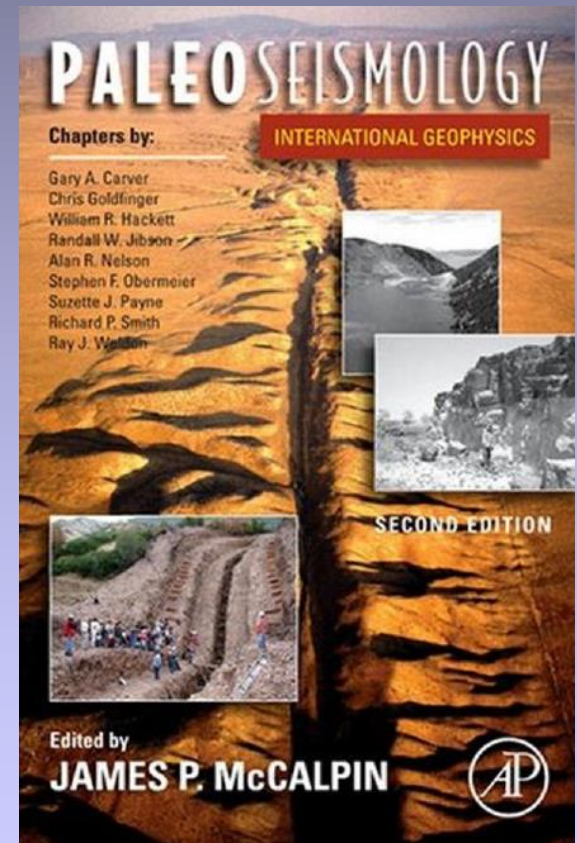
- zkoumá chování seismogenních zlomů v minulosti

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

Seismologové - pracují s daty naměřenými instrumentálně během zemětřesení

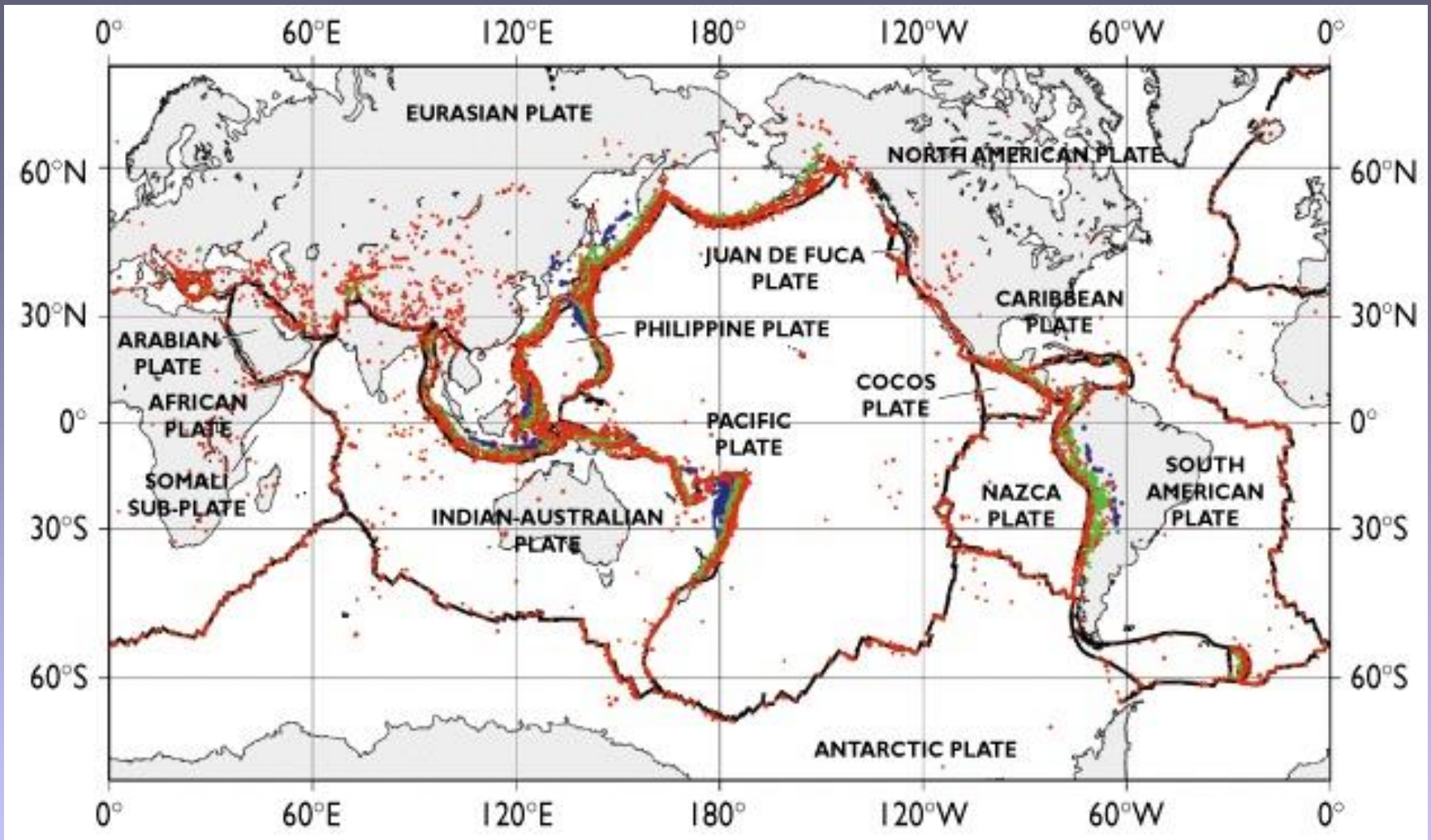
X

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)

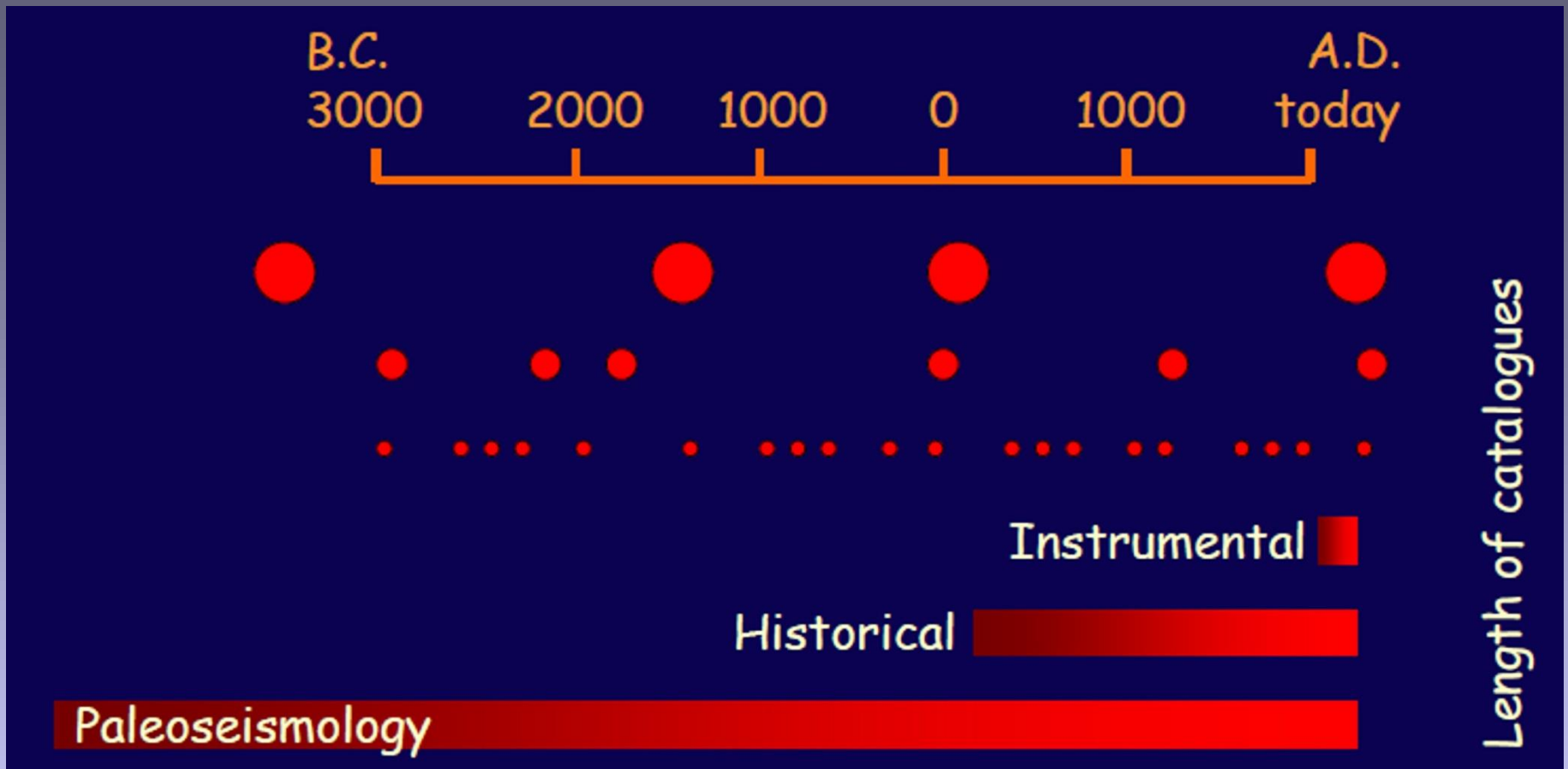
X aktivní zlomy, projevující se v geologii a morfologii, bez historického záznamu velkých zemětřesení

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

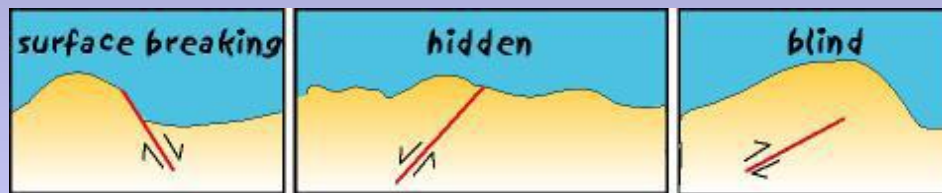
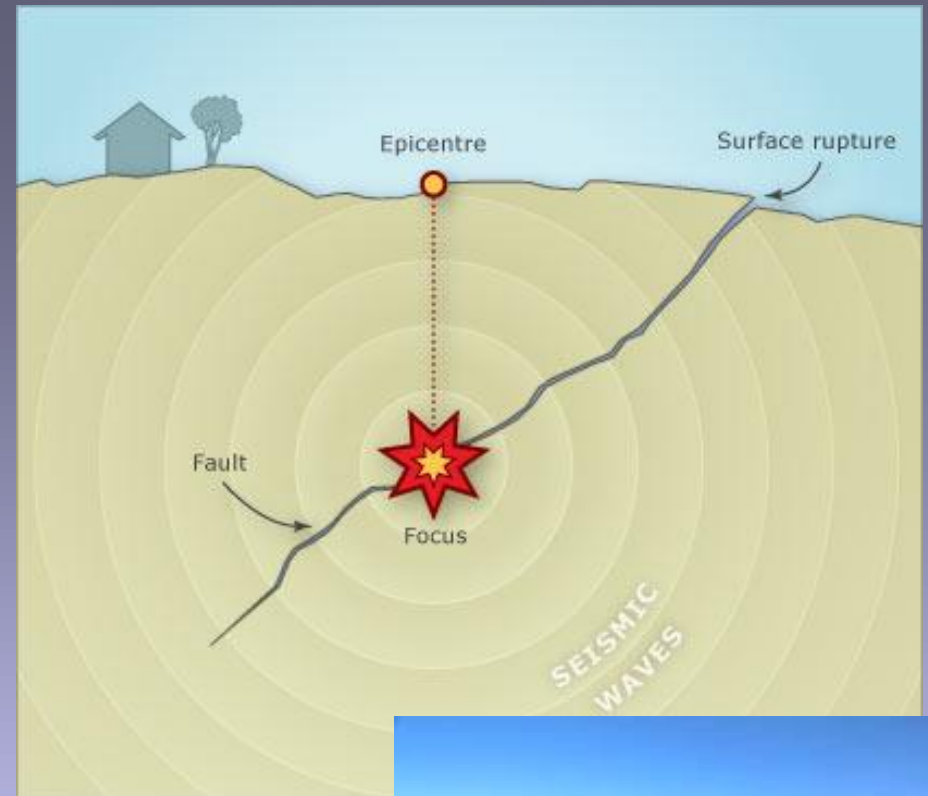
❖ přecenění pravděpodobnosti budoucího zemětřesení na zlomu, na kterém došlo k velkému zemětřesení v historické době, ale má dlouhý recurrence interval (uvolněná energie)

❖ podcenění v oblastech, kde jsou zlomy seismogenní, ale není historický záznam (akumulace napětí)

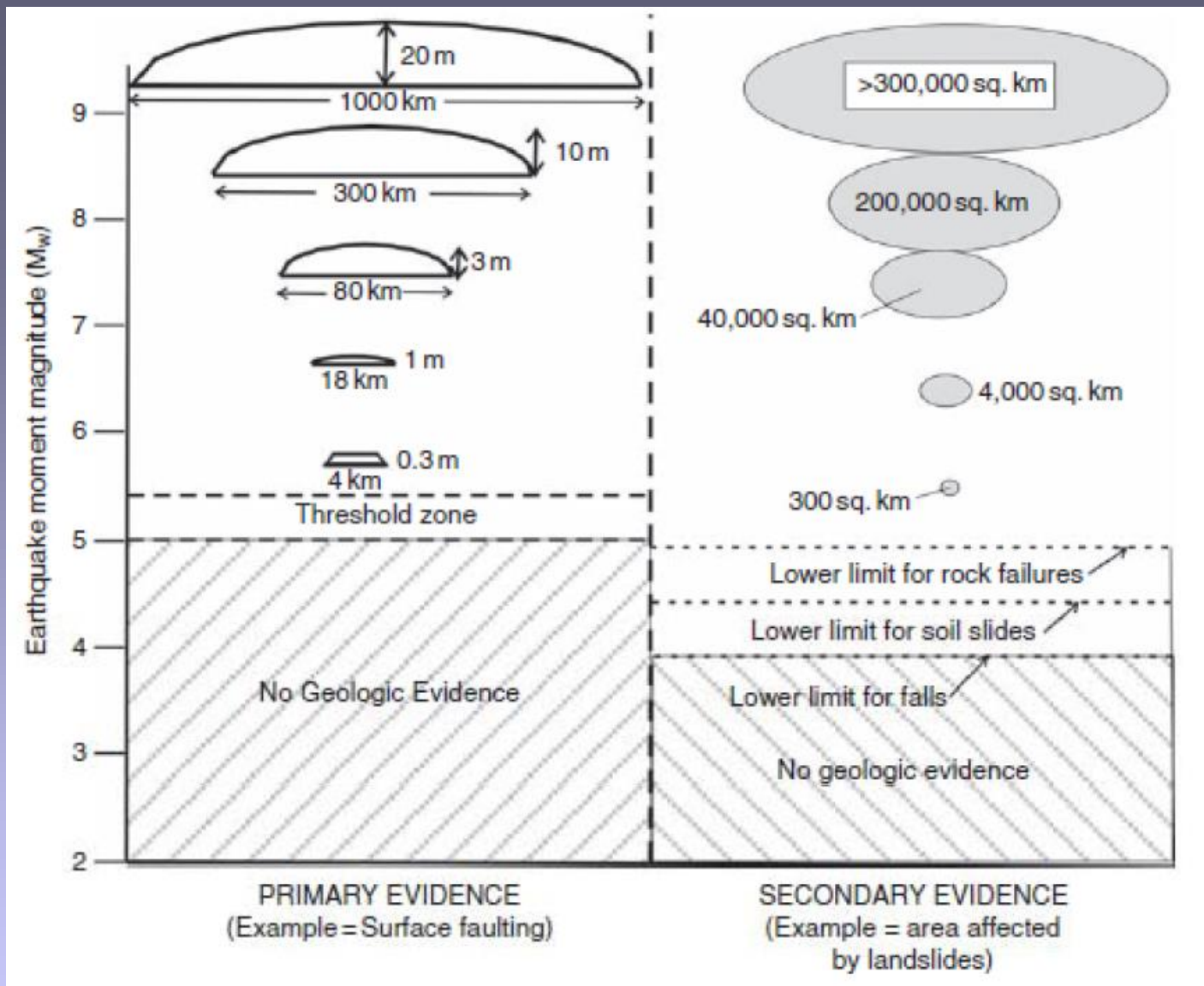


paleoseismologie rozšiřuje záznam zemětřesení směrem do minulosti, katalogy historických zemětřesení často příliš krátké ve srovnání s průměrným recurrence time

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

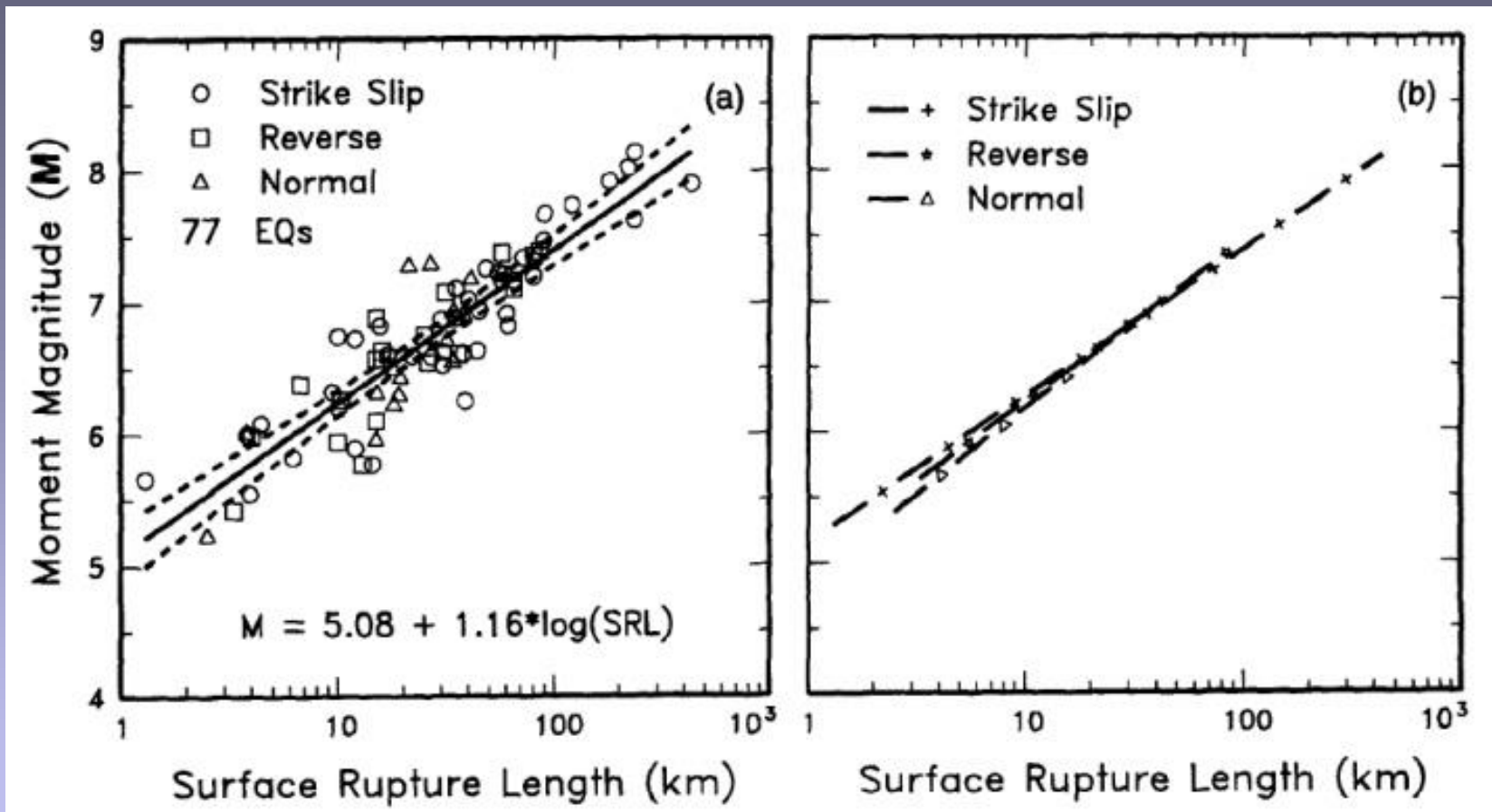


Menší zemětřesení - geologický projev zřídka vytvoří či zachová
Typ zlomů - poklesy $M \geq 6,3$; horizontální posuny v j. Kalifornii - $M = 6,25-6,5$,
Hloubka seismogenní kůry - hlubší potřebuje větší M ,
Loma Prieta 1989 $M=6,9$, 2m slip v hloubce 18-3km, žádná povrchová ruptura
Gujarat 2001 $M=7.7$,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

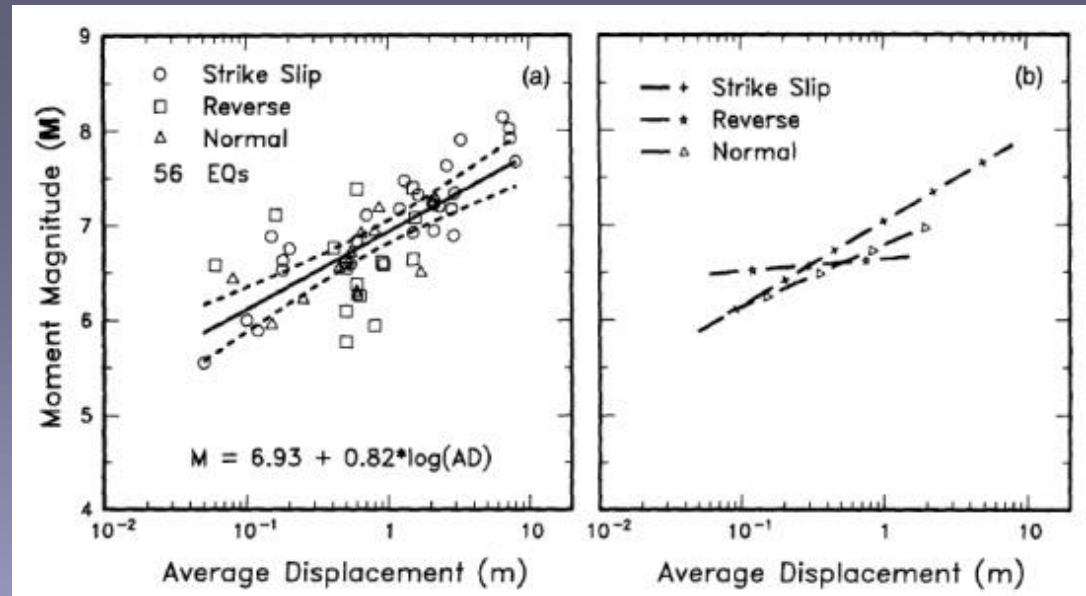
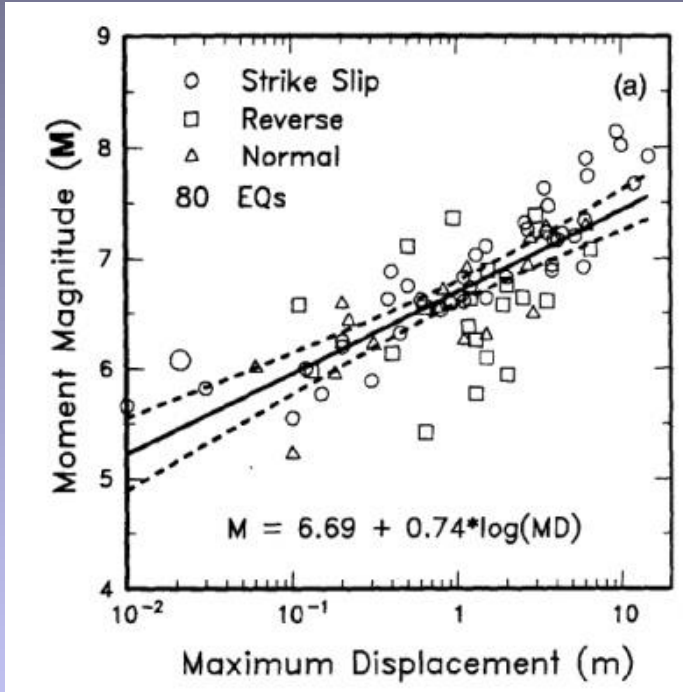


Empirické vztahy odvozeny z historických zemětřesení, menší M_w
 - prehistorická zemětřesení - lze studovat jen s větším M_w

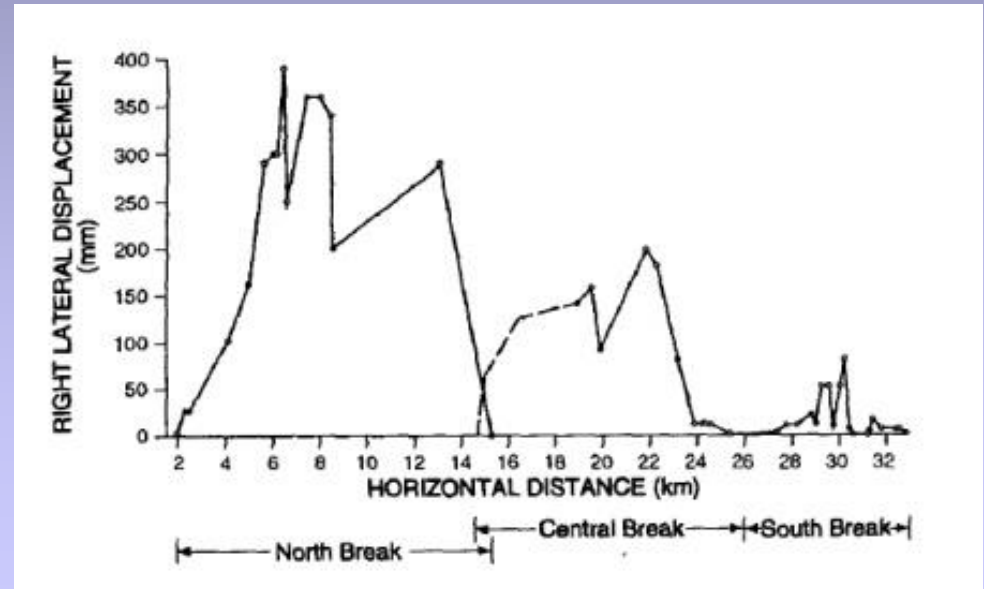
Empirické vztahy: délka zlomu, velikost posunu, velikost magnituda, např. zlom o délce 80km vygeneruje zemětřesení $M_w=7,5$ a posun okolo 3m



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

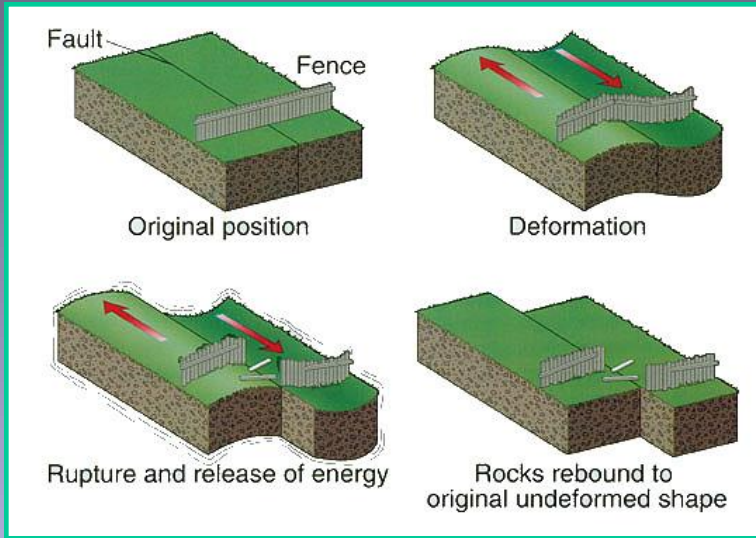


Průměr mnohočetných měření posunů podél zlomu

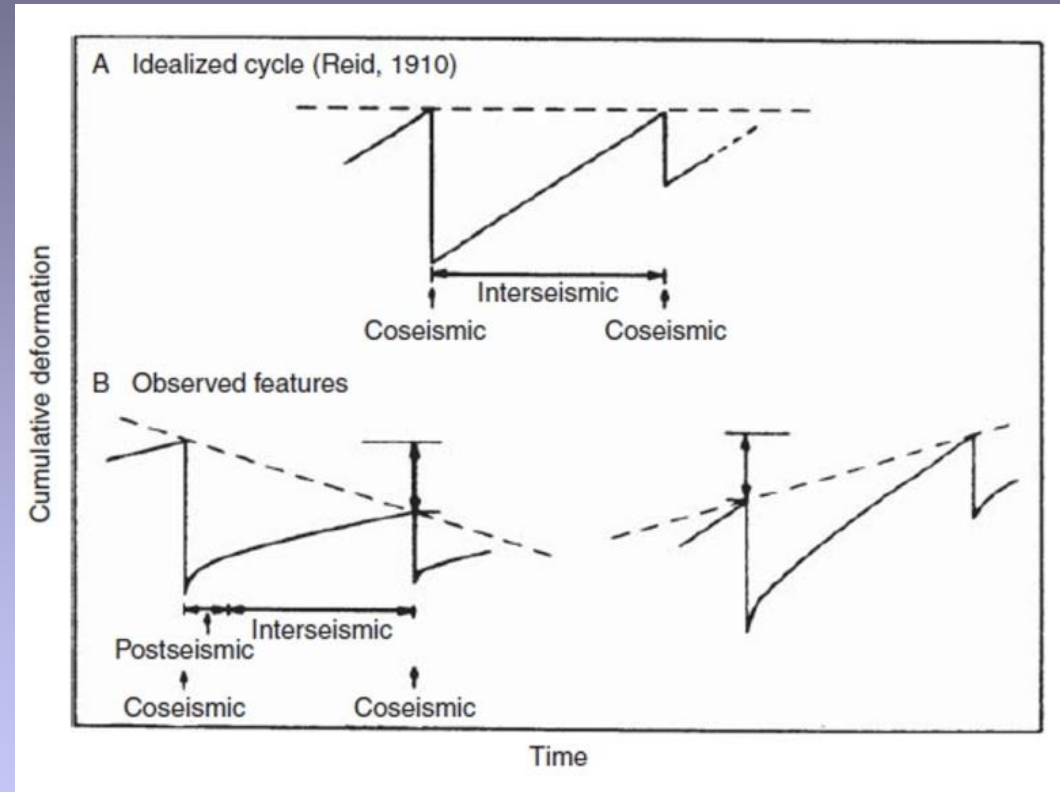


9. 4. 1968, Borego Mts, CA

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

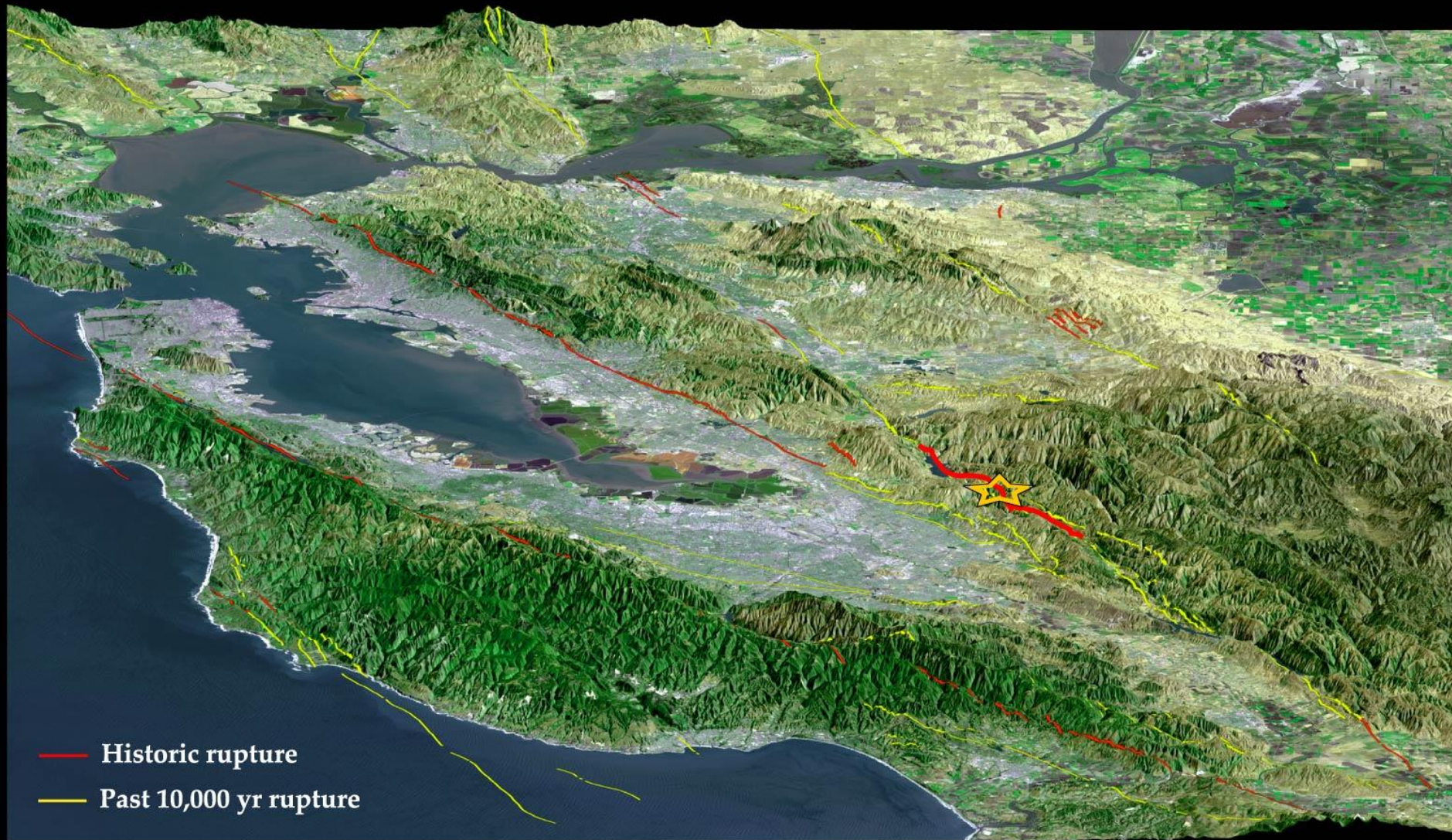
Bay area shocks during the 75 years before 1906



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



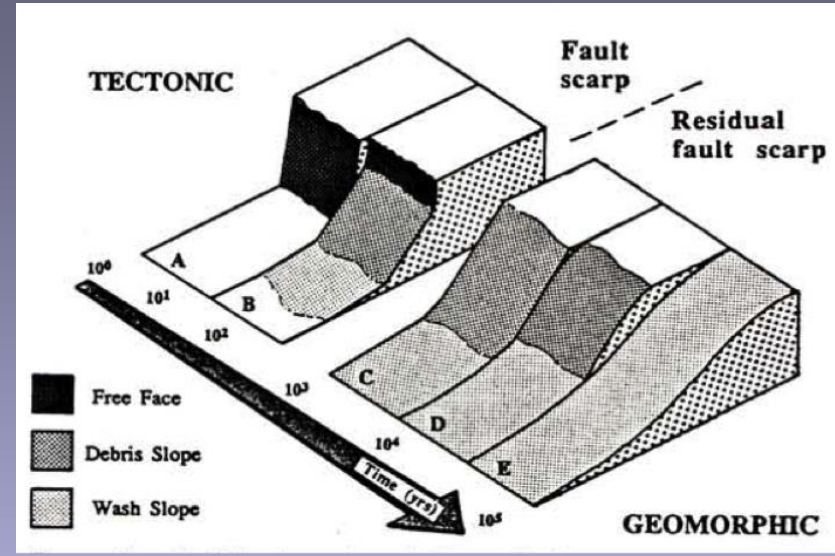
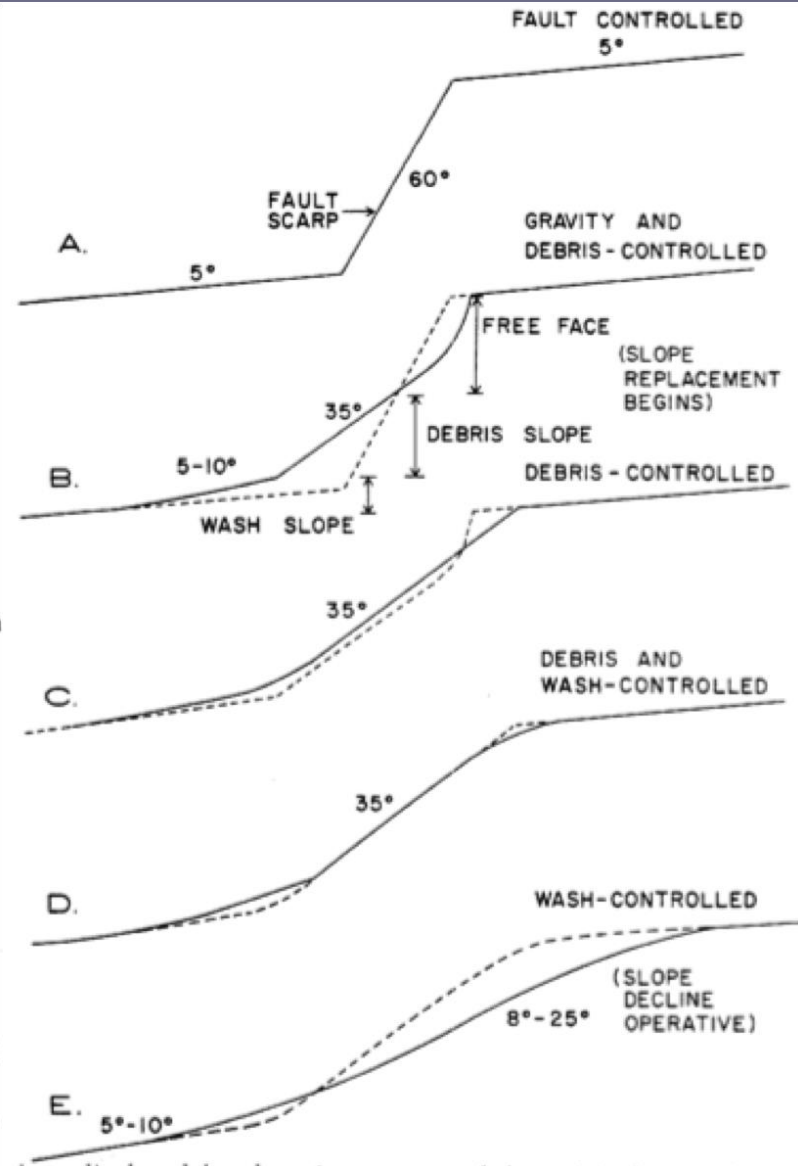
❖ v sedimentech jemnozrnných, vrstevnatých - dobře rozeznatelné posuny vrstev, ne příliš mocných (hloubka)

- aluviální kužely, jezerní sedimenty X přívalový proud

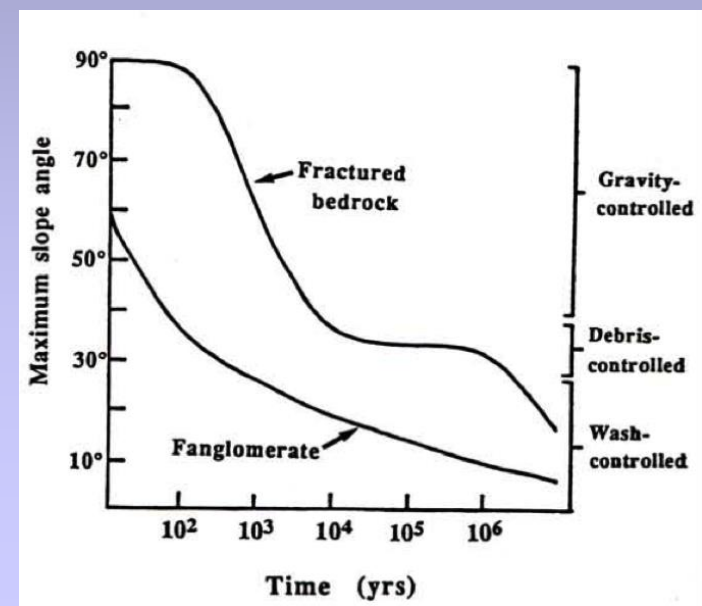
❖ datovatelný materiál - určení chronologie pohybů

Poklesové zlomy

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

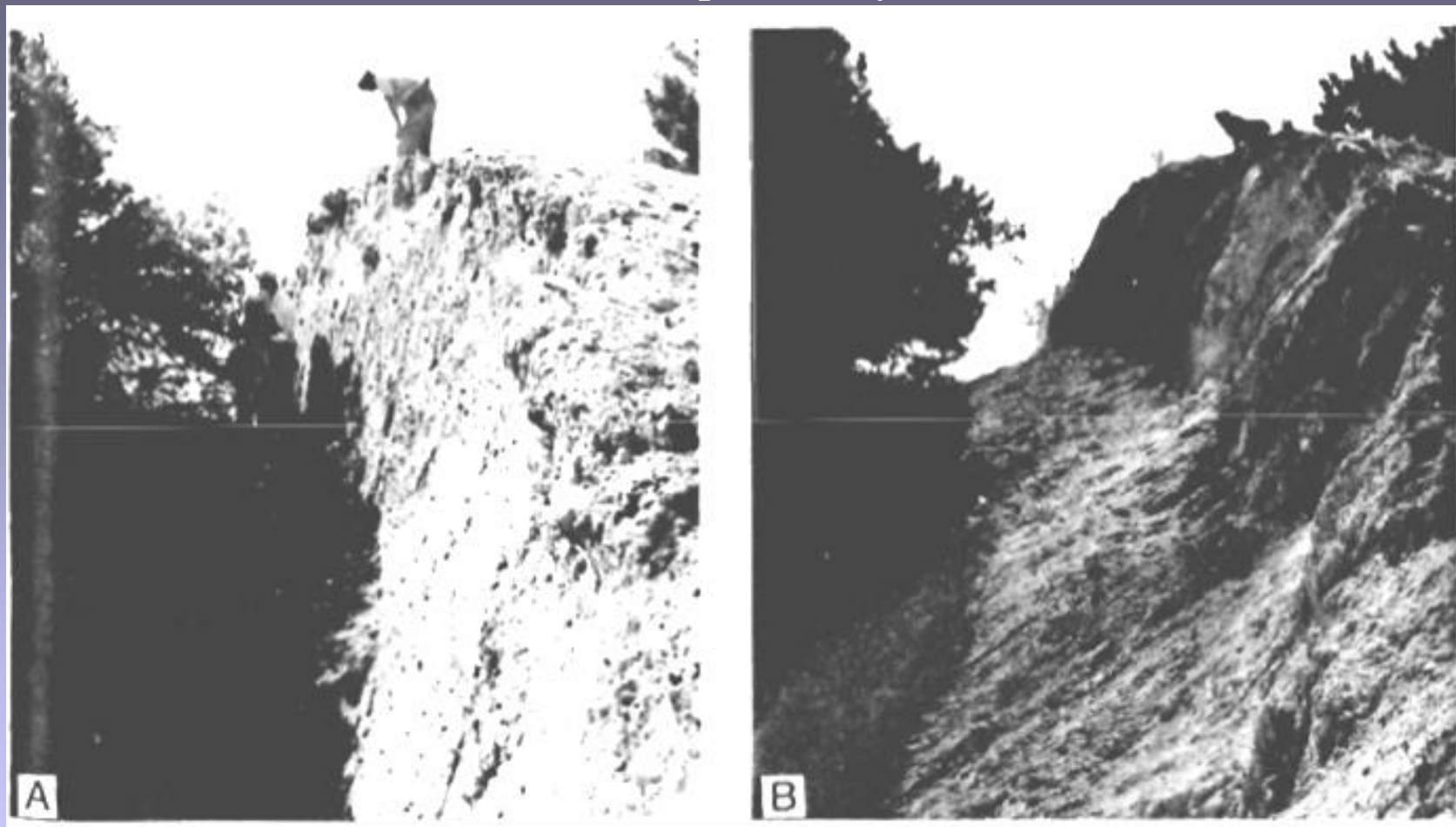


Stewart, Hancock, 1990



Wallace, 1977

Fallon-Stillwater earthquake, July 6th, 1954 M 6.6



Wallace, 1977

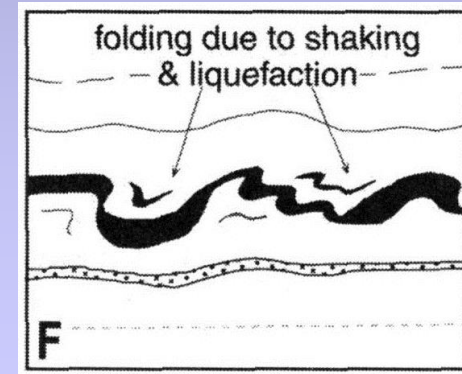
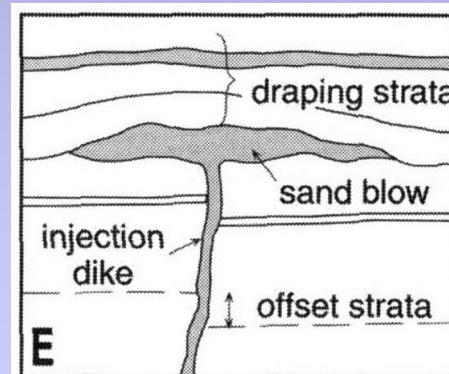
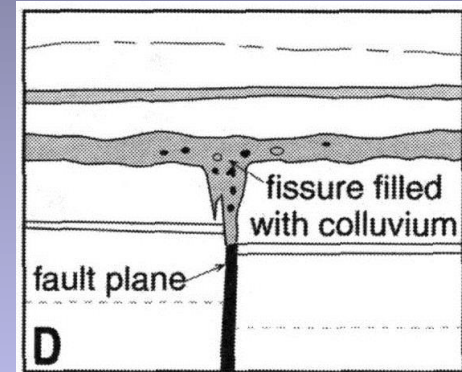
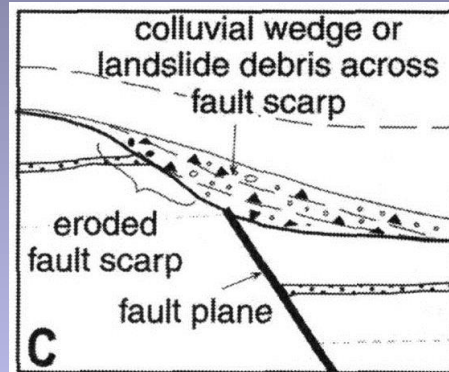
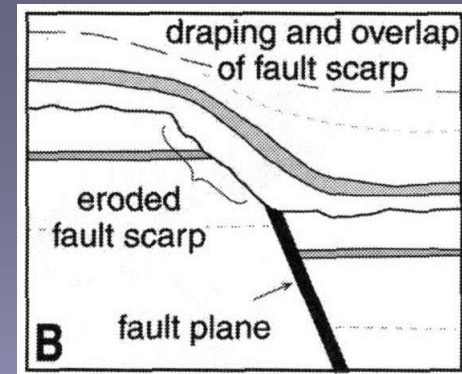
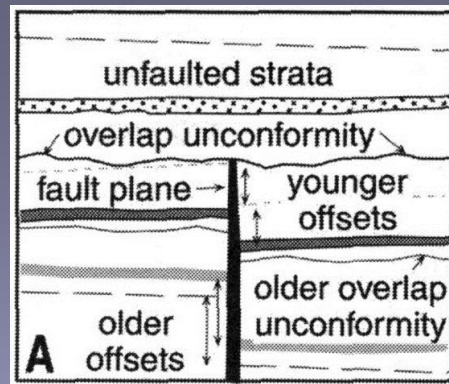
1954 a 1974 - několika metrový ústup svahu na zlomové ploše



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??

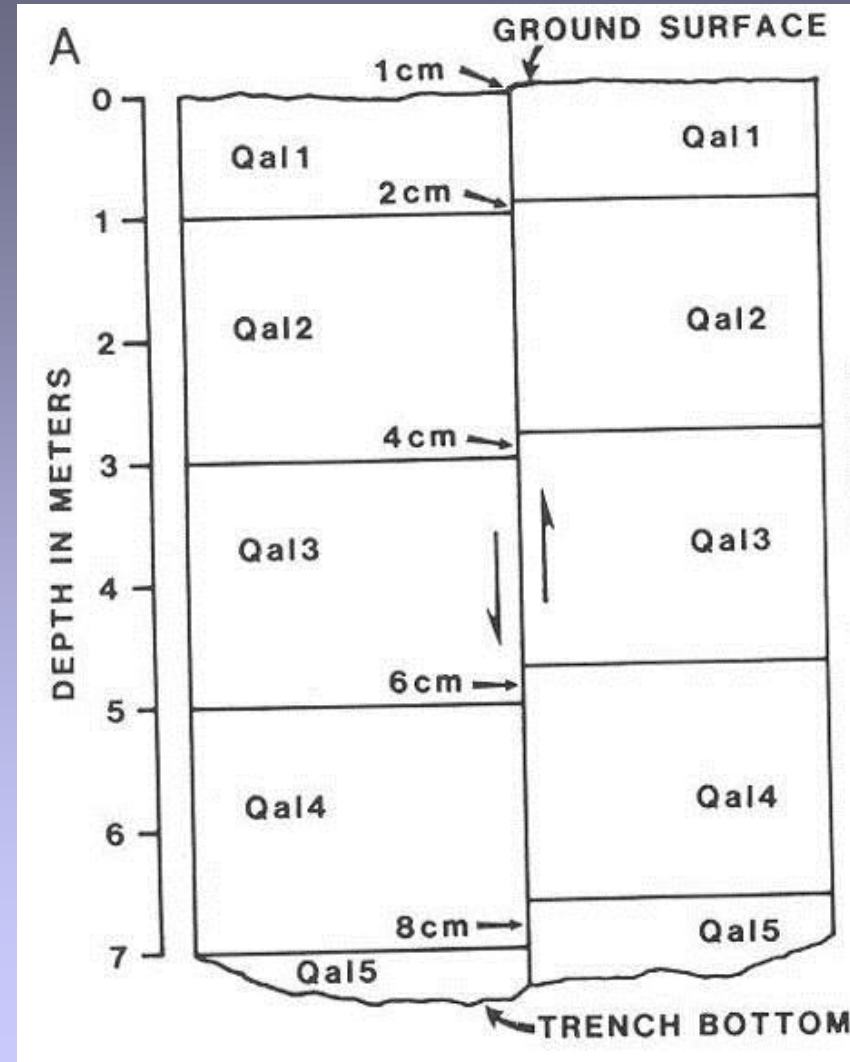
Retrodeformace

4 události – vertikální posun v průměru 2cm

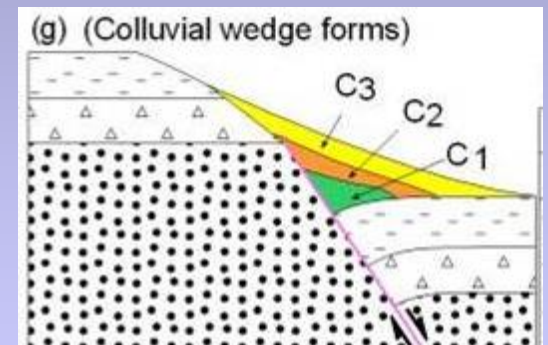
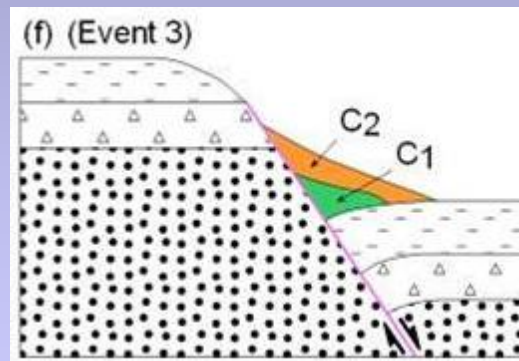
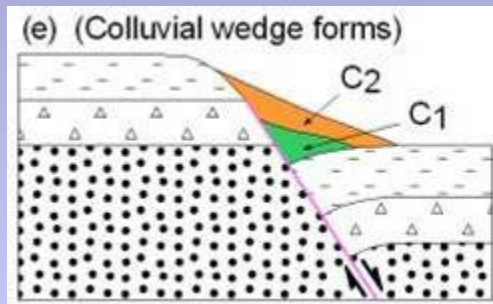
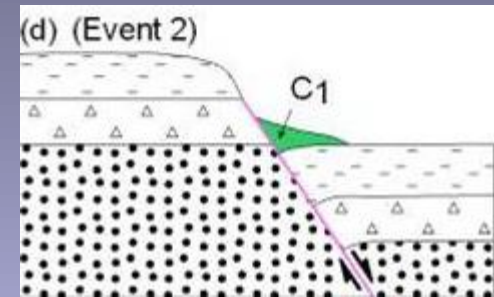
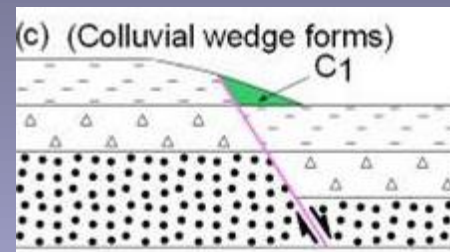
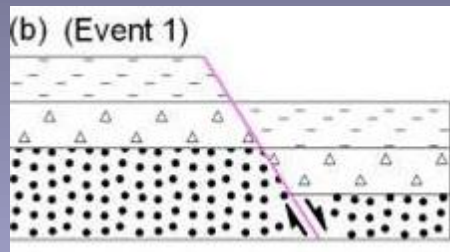
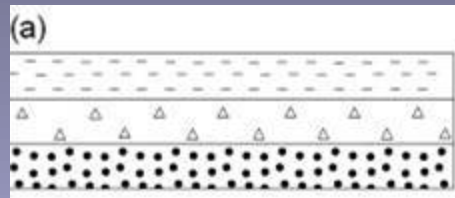
Nejstarší vrstva - (Qal5) zaznamenal všechny 4, kumulovaně 8cm

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

Povrchová eroze

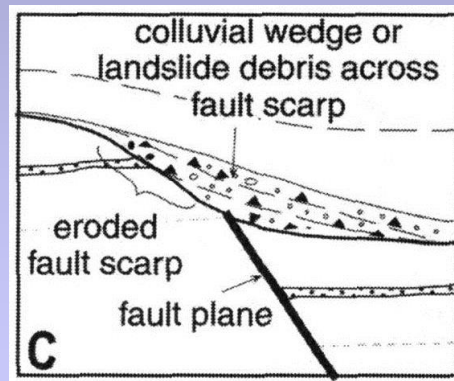


Coluvial wedge Retrodeformace - počet událostí

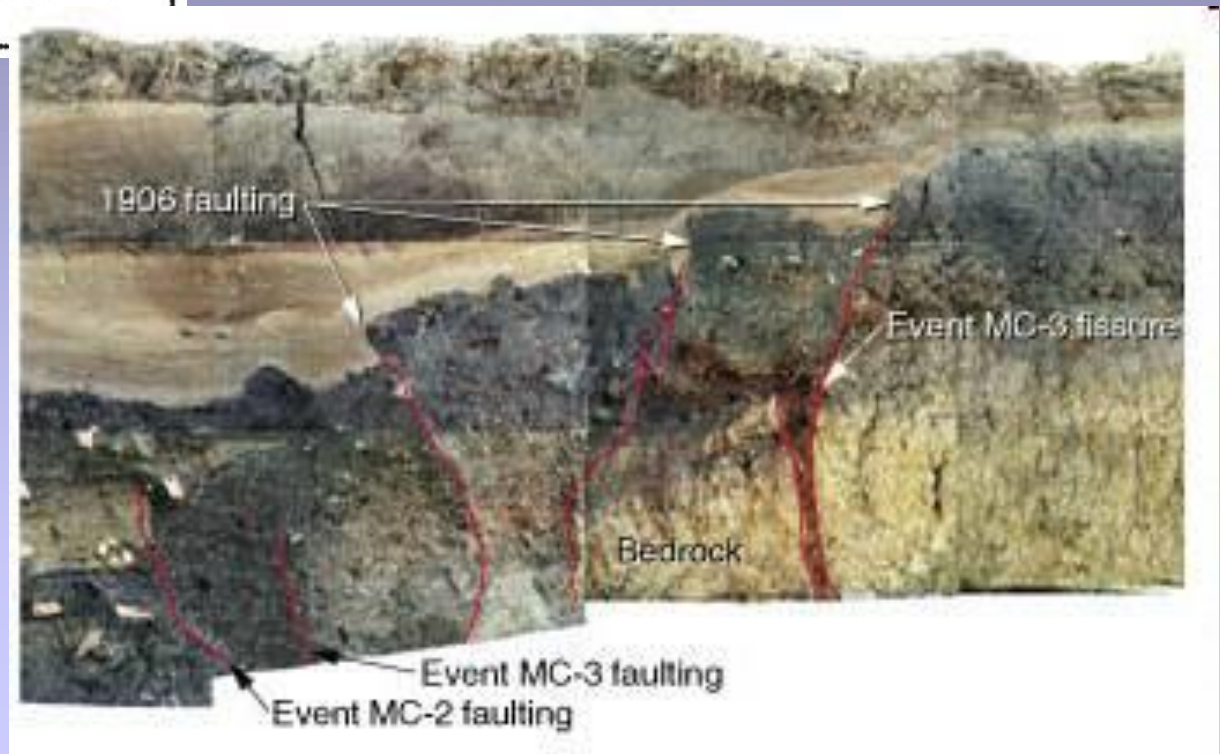
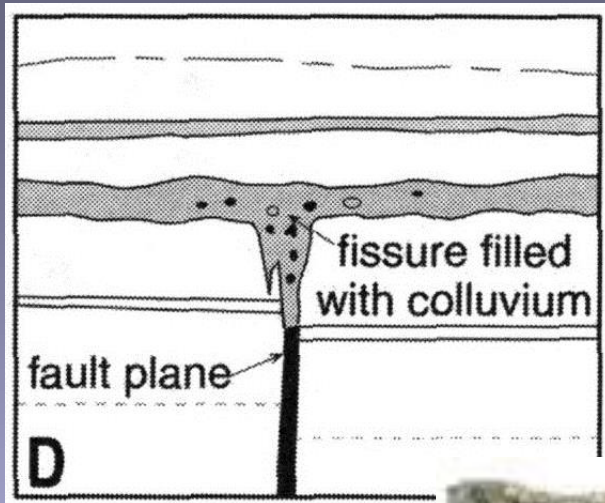




Gravitační
nestabilita,
materiál tvořící
wedge pochází z
fault scarp



- Vyplnění trhlin



fault scarp na přesmyku

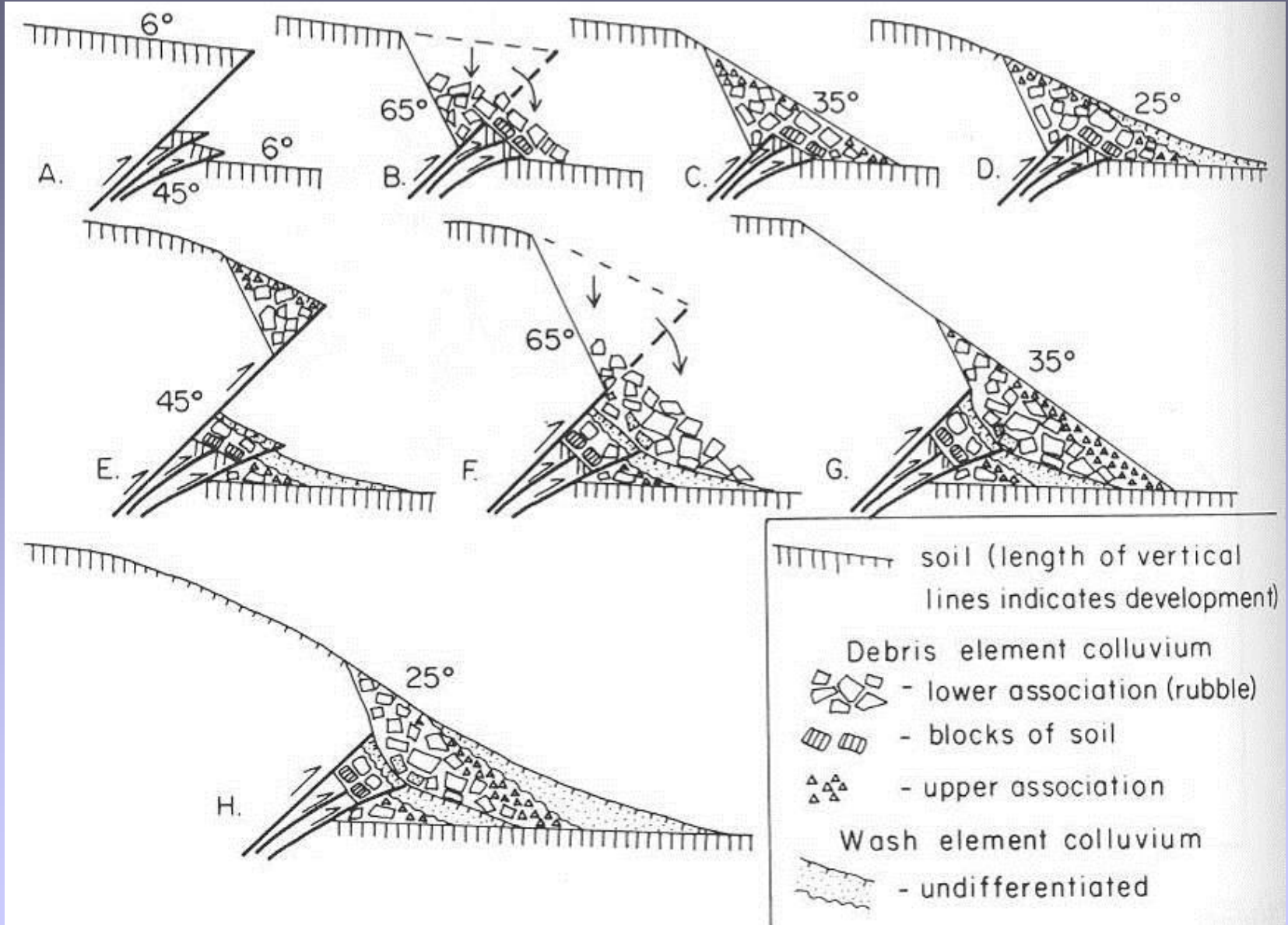


Chichi earthquake 1999, Taiwan



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

Přesmykové zlomy - coluvial wedge



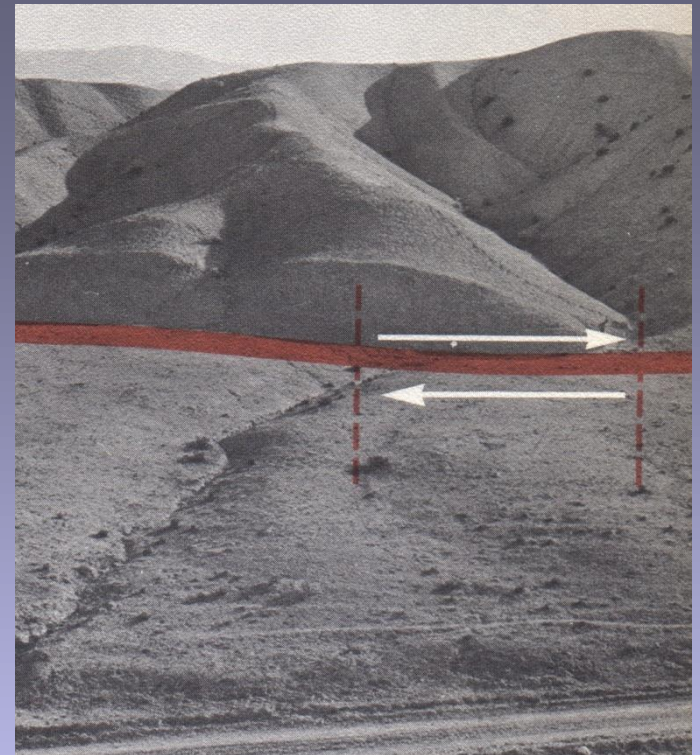
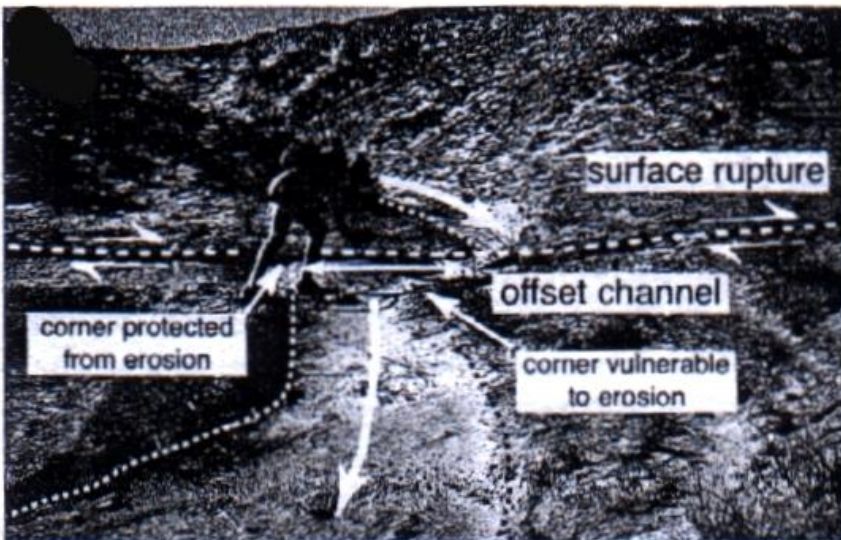
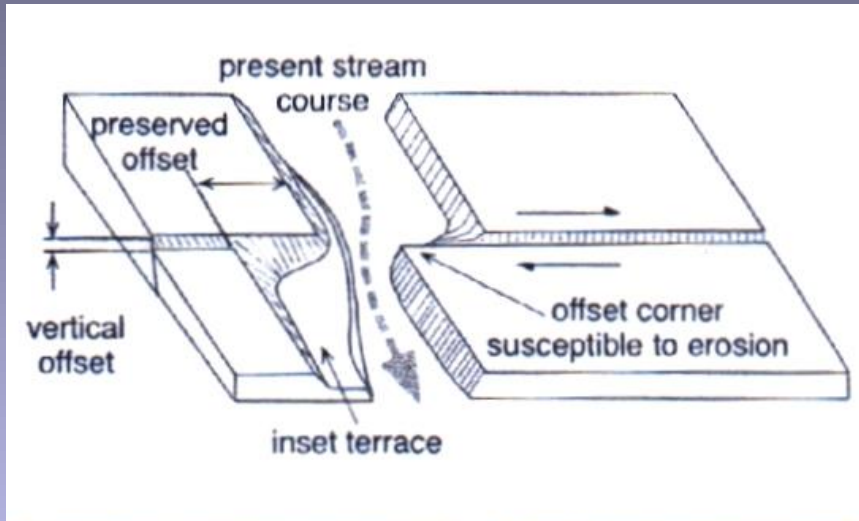


Alhama de Murcia fault, Španělsko



Horizontální posuny:

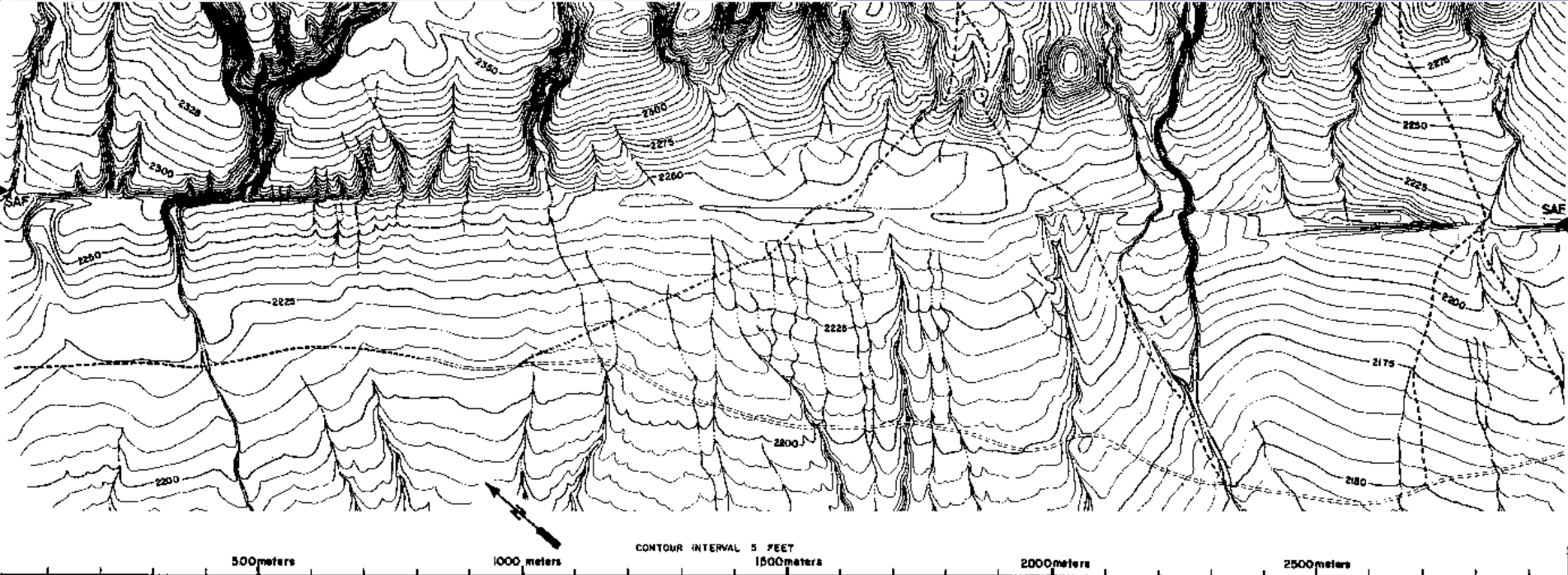
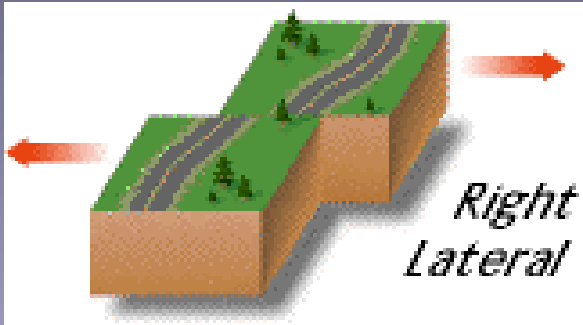
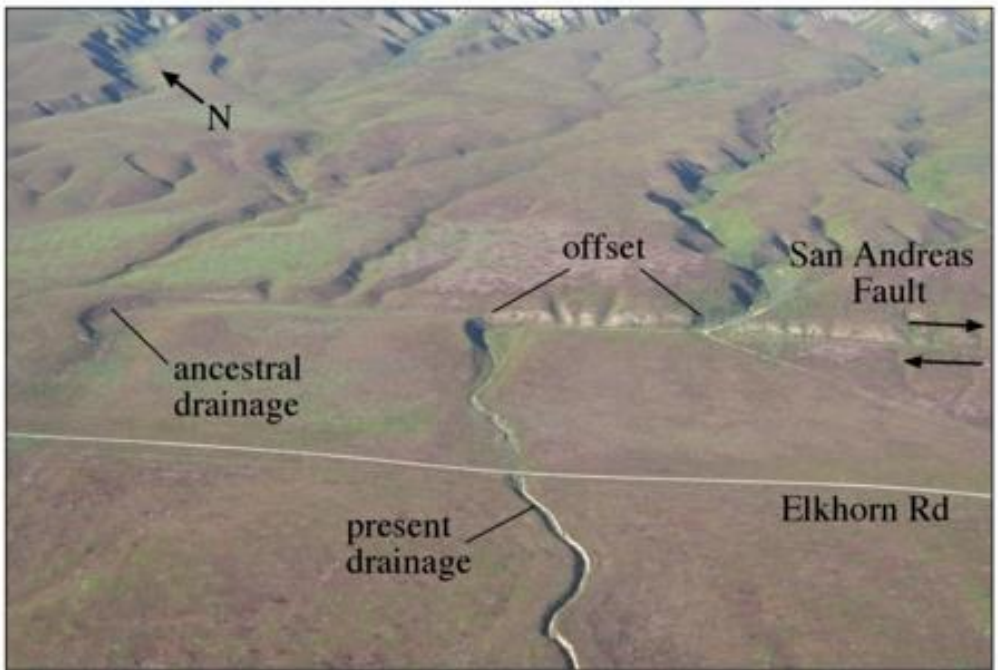
offsety (posuny) vodních koryt, údolních svahů, menších náplavových kuželů, hřbítků, strží, akumulací přivalových proudů, terasových stupňů

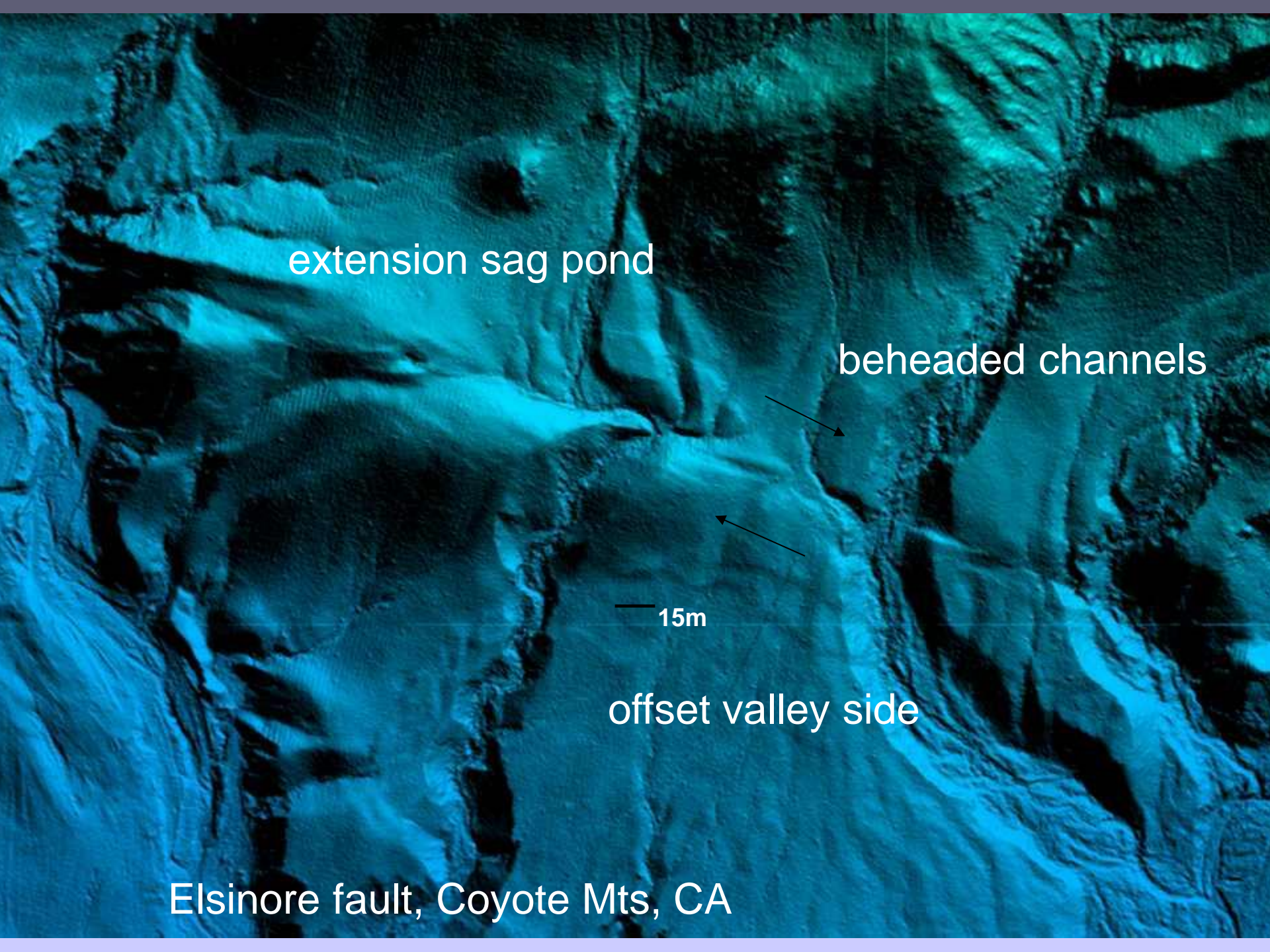




Imperial fault, 1940 $M=7$, 6m offset, 60km

San Andreas Fault, Carrizo plain, CA





extension sag pond

beheaded channels

15m

offset valley side

Elsinore fault, Coyote Mts, CA

offset and beheaded channel



fault

2m

offset channel



offset valley side



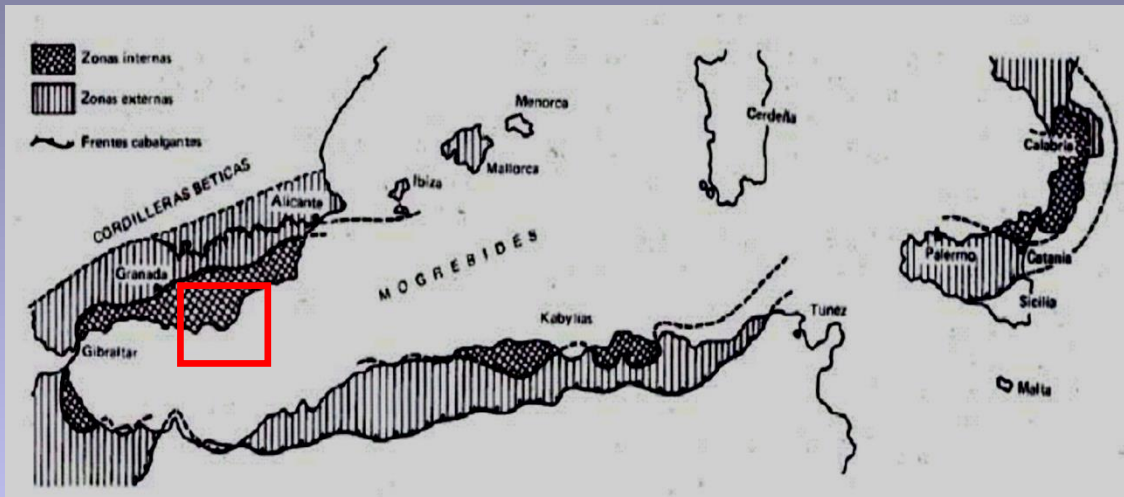
Měření offsetu = magnitudo,
rychlost pohybů

Zlomová zóna Carboneras

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

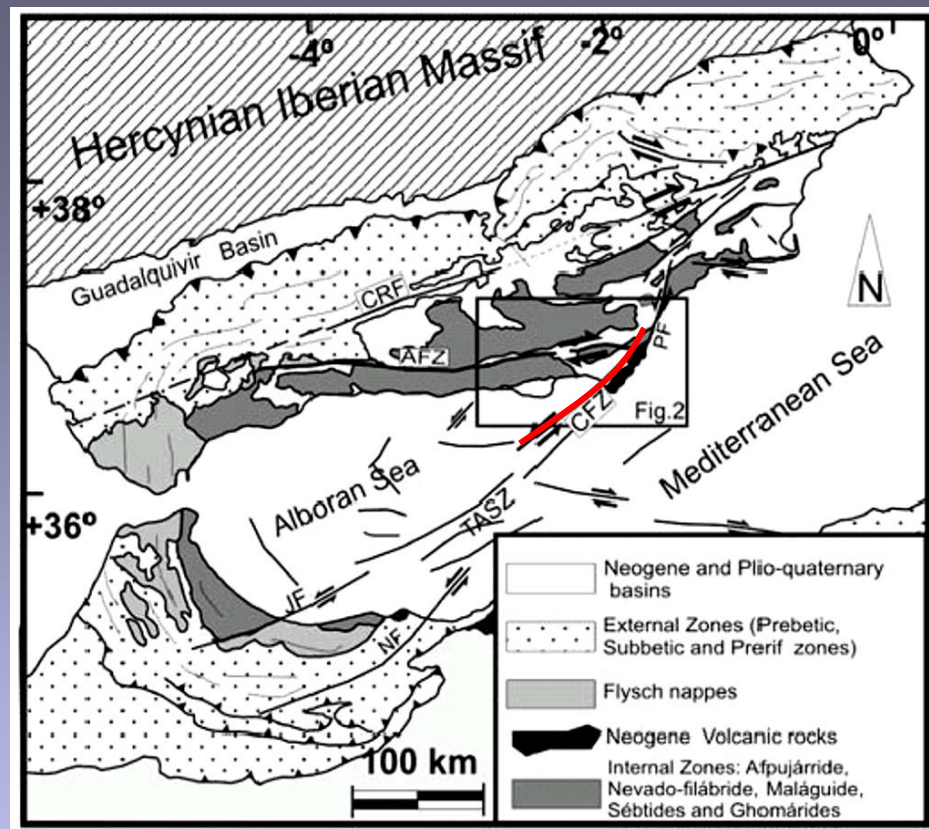
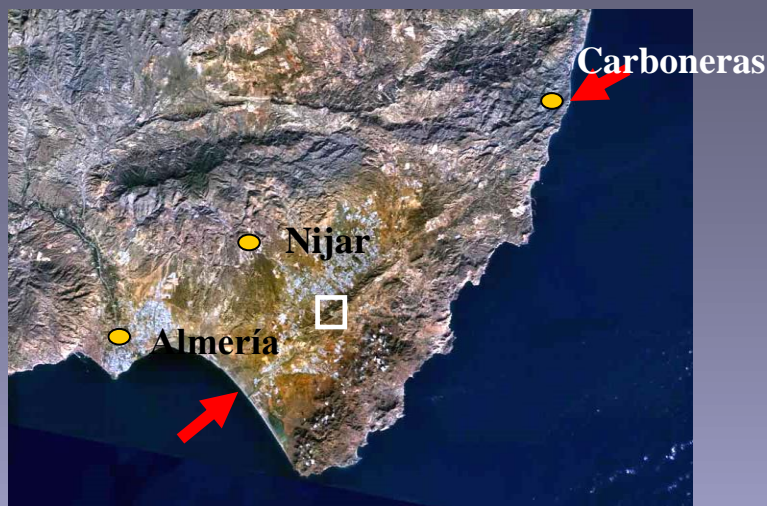
Masana E. et al.

Carboneras



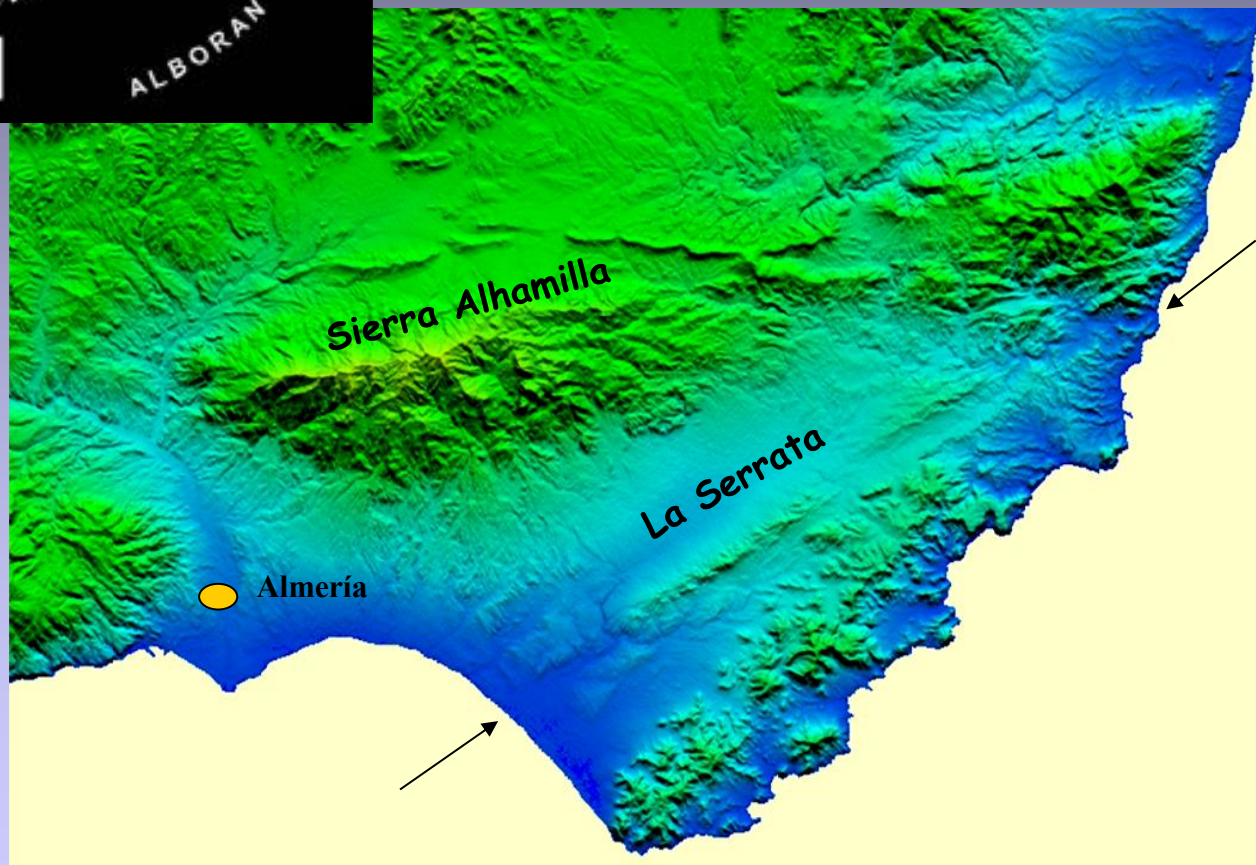
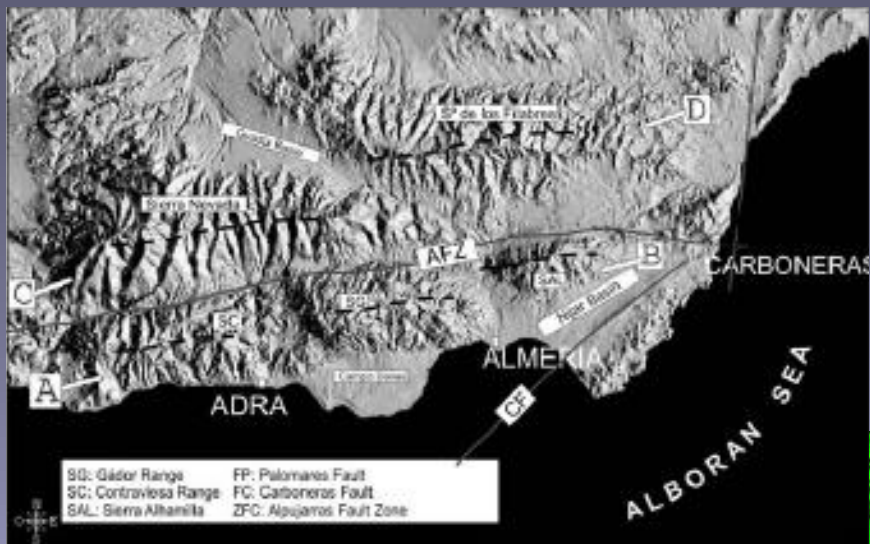
- kolizní zóna Africké a Evropské desky
- jižní okraj alpského orogénu
- součást Bétické Kordilery

- vnější zóna (příkrovová stavba - mezozoické-terciérní horniny) paleookraj Iberské desky
- vnitřní zóna - metamorfované komplex+ neogenní a kvartérní sed. - mezihorské pánve omezené zlomy SV - JZ



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

- ❖ 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)

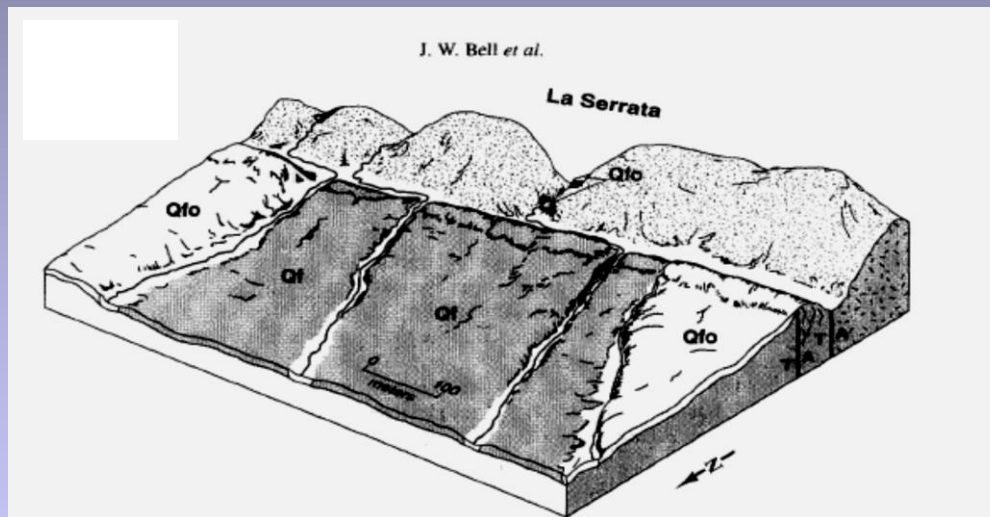




- ❖ seismicita - jv. okraj Iberského pol. - stálá mělká zemětřesení $M < 5,5$ (příčné zlomy v současnosti - Carboneras - bez seismicity)
- ❖ posl. 2 tis. let - nejméně 50 silných zemětřesení

Dřívější výzkumy v 90. letech

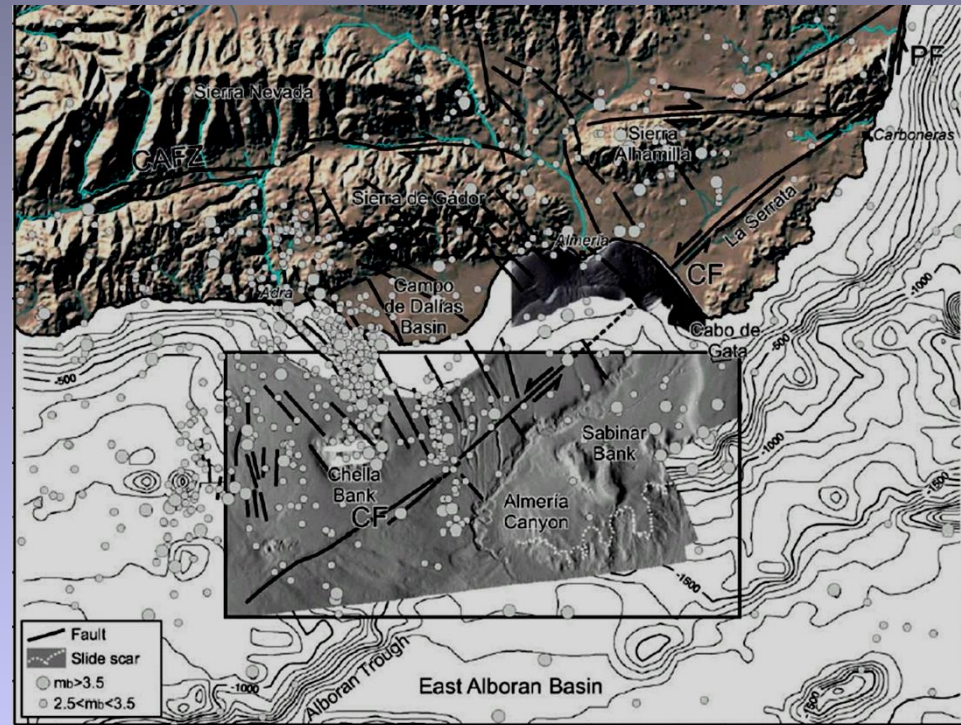
- 1) studium dokladů levostranných pohybů radiometricky datovaných pobřežních marinních teras a studium jejich recentního výzdvihu
- 2) měření a datování levostranného pohybu na základě offsetu vodních toků

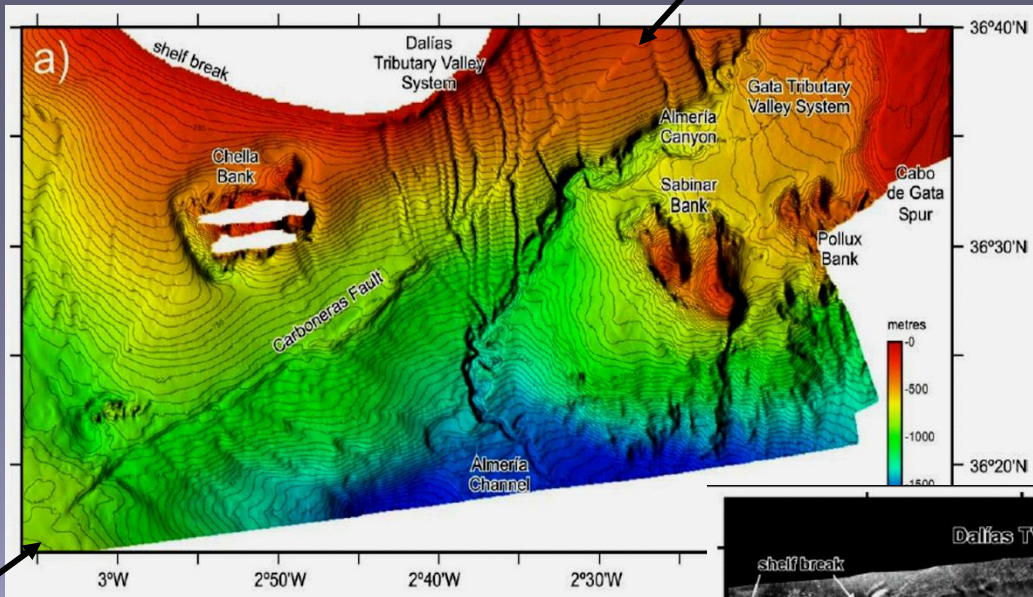


pohyby v pozdním kvartéru - relativně pomalé, převážně vertikální, horizontální pohyby 80-100m offset toků La Serraty - starší než 100 tis. let

IMPULS: Metody studia zlomu Carboneras na moři

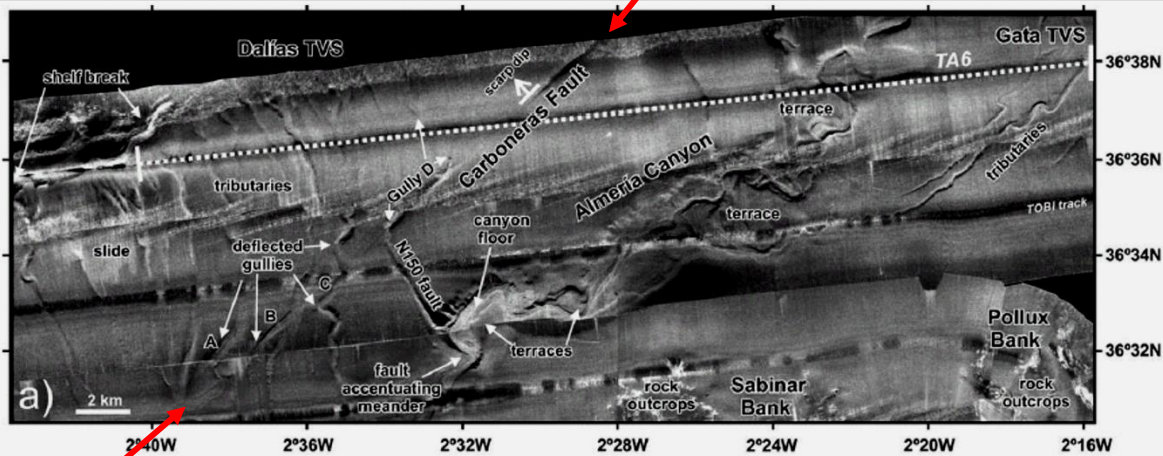
- ❖ batymetrie
- ❖ boční sonografie (sidescan sonograph TOBI)
- ❖ reflexní seismika s vysokým rozlišením
- ❖ analýza vzorků mořských sedimentů
- ❖ datování



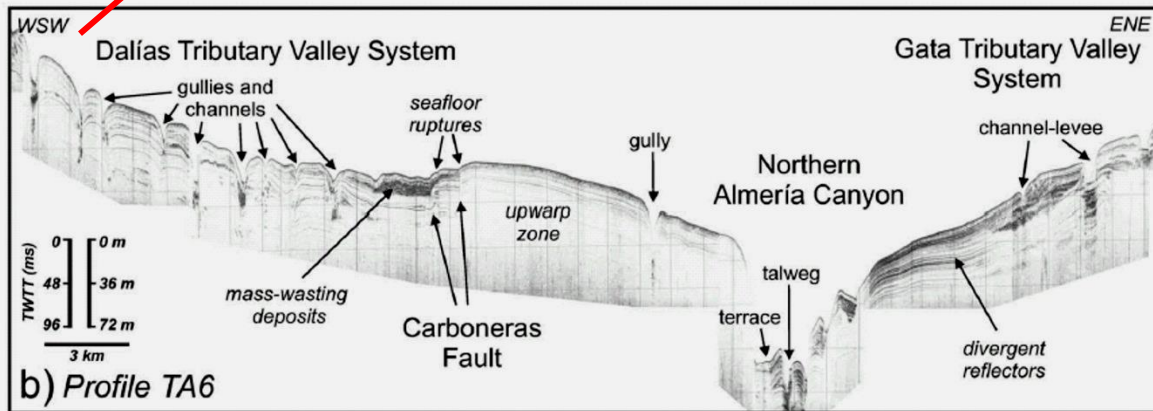


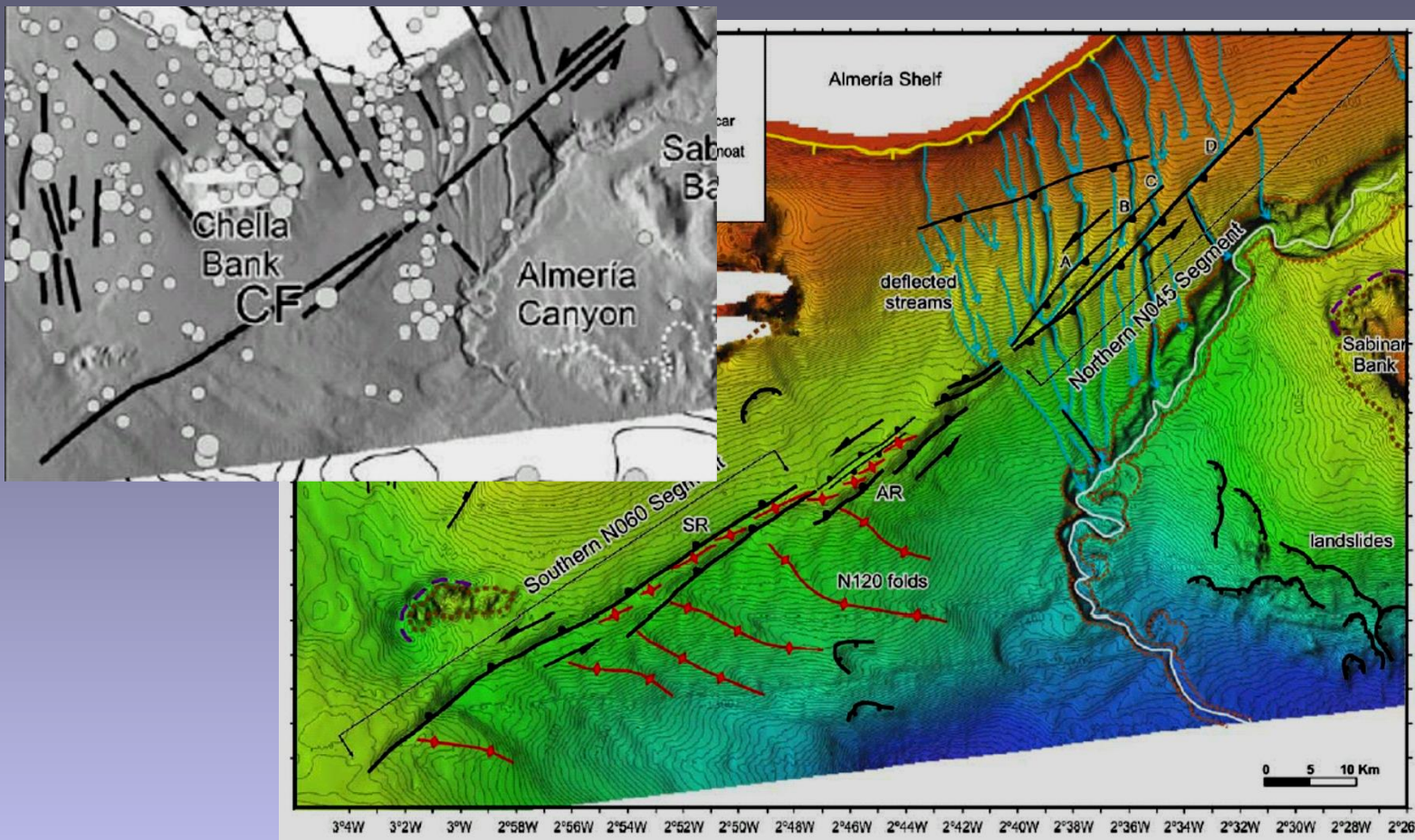
batymetrie

sonografie s vysokým rozlišením



seismické profilování





Zóna Carboneras - 5-10 km široká, 100 km dlhá, subvertikální zlomy, odvodňovací sít' okraje pevniny je **deflektovaná**, morfológie = tvary vzniklé horizontálnými pohyby na pevnině - **pressure ridges, water gaps**, porušené pozdně **holocenní sedimenty, sesuvy-epicentra**.

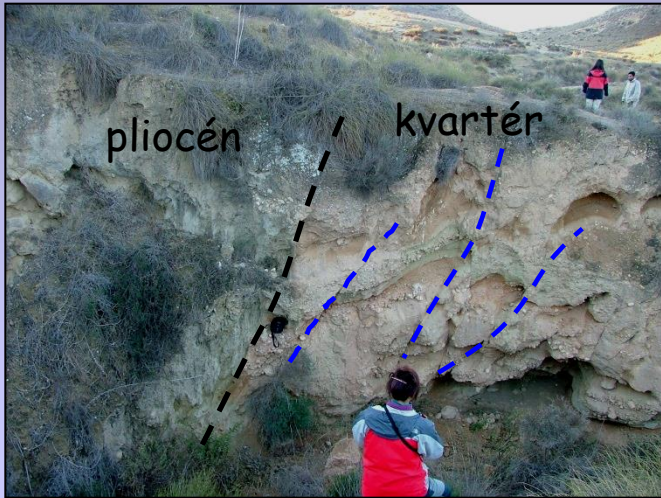
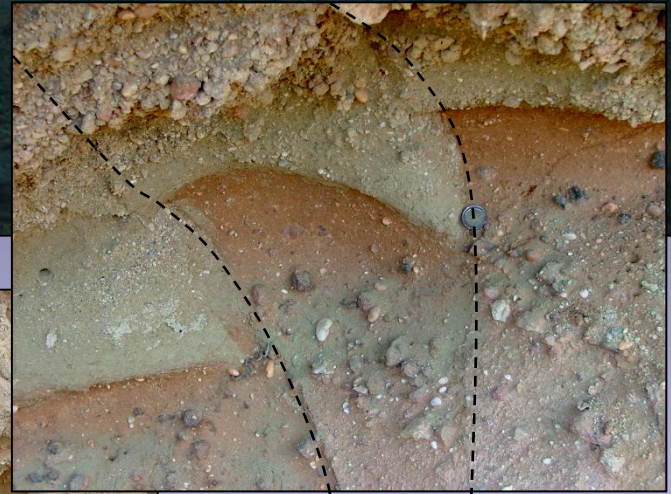
Seismický a tsunami hazard - $M \leq 7,2$ (1522 zemětř. Almería)
 x instrumentální seismicita na Carboneras nízká

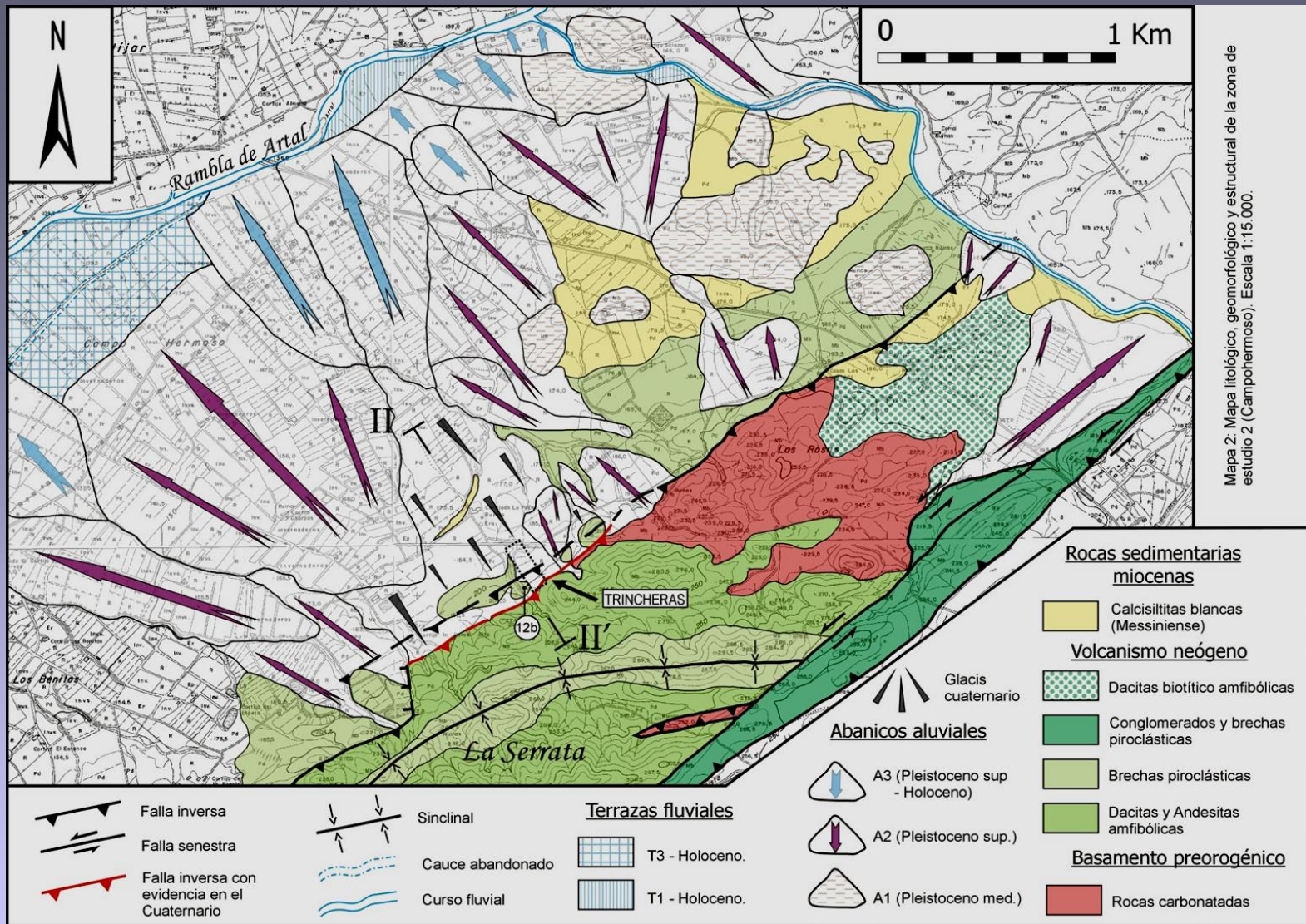
Metody studia zlomu Carboneras na pevnině

- ❖ 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

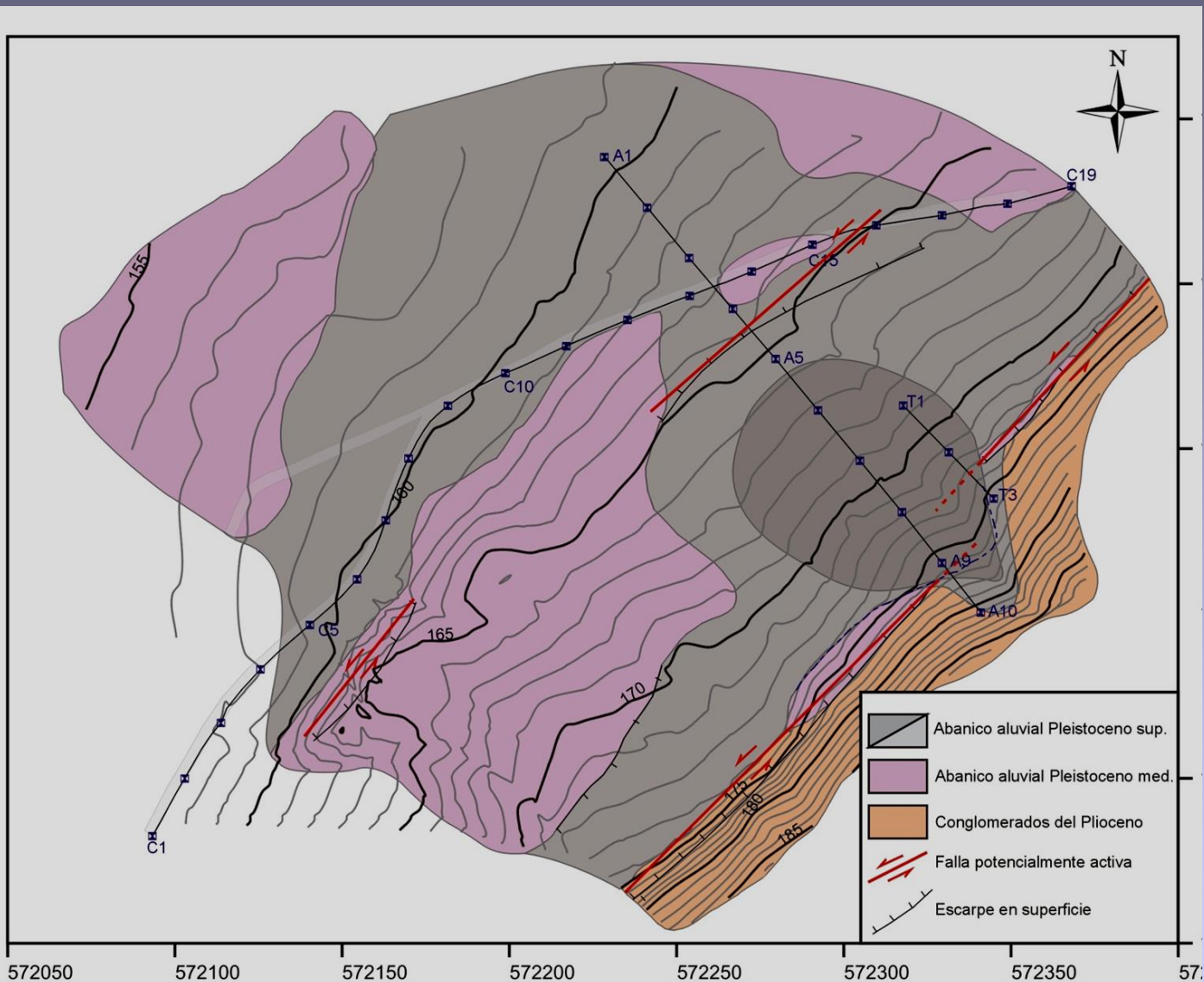
La Serrata





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

Paleoseismologické rýhy



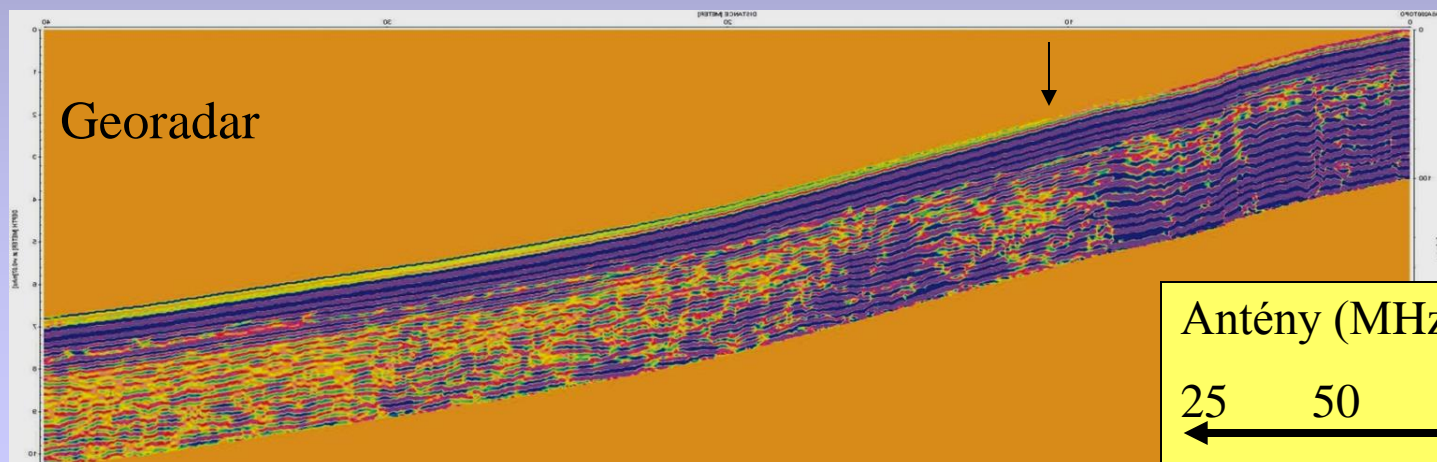
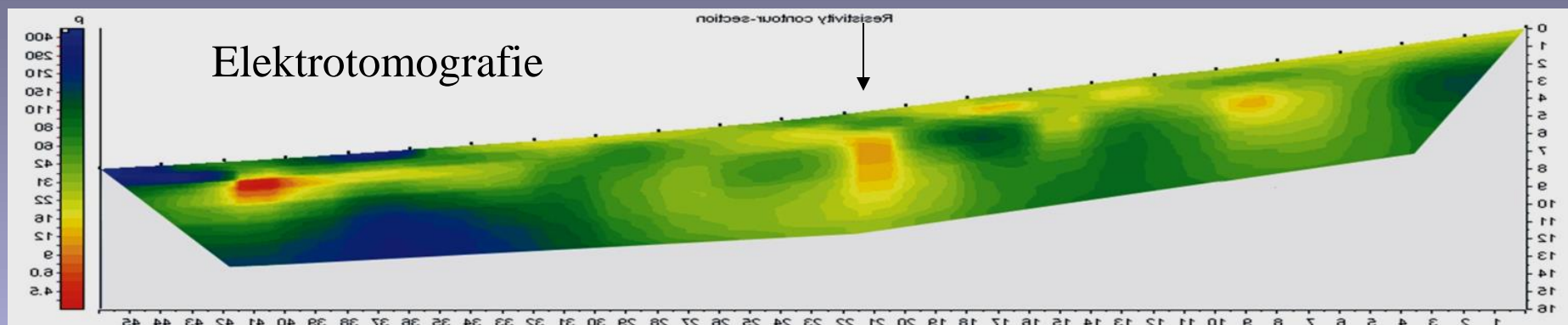
❖ všechny 3 generace kuželů (chronologie)

❖ patrné terénní stupně (0,7m)

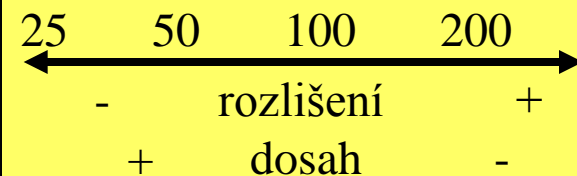


Geofyzika

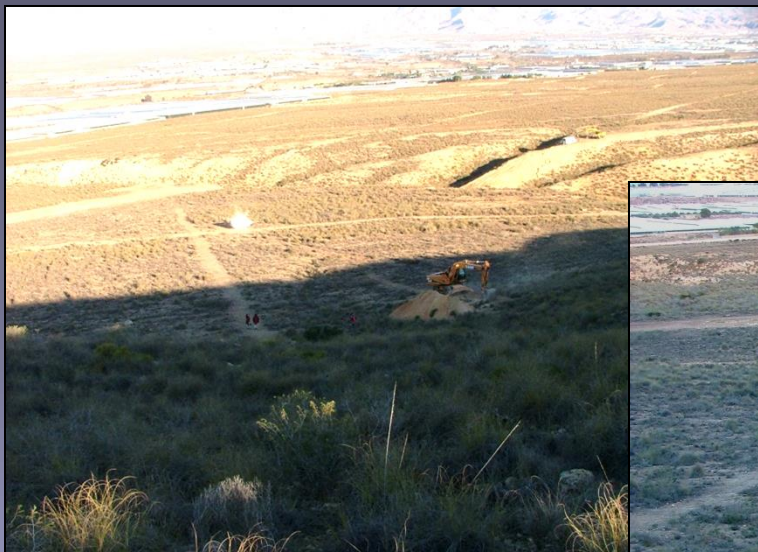
zachycení pozice zlomu a hloubkových poměrů (materiál)



Antény (MHz):



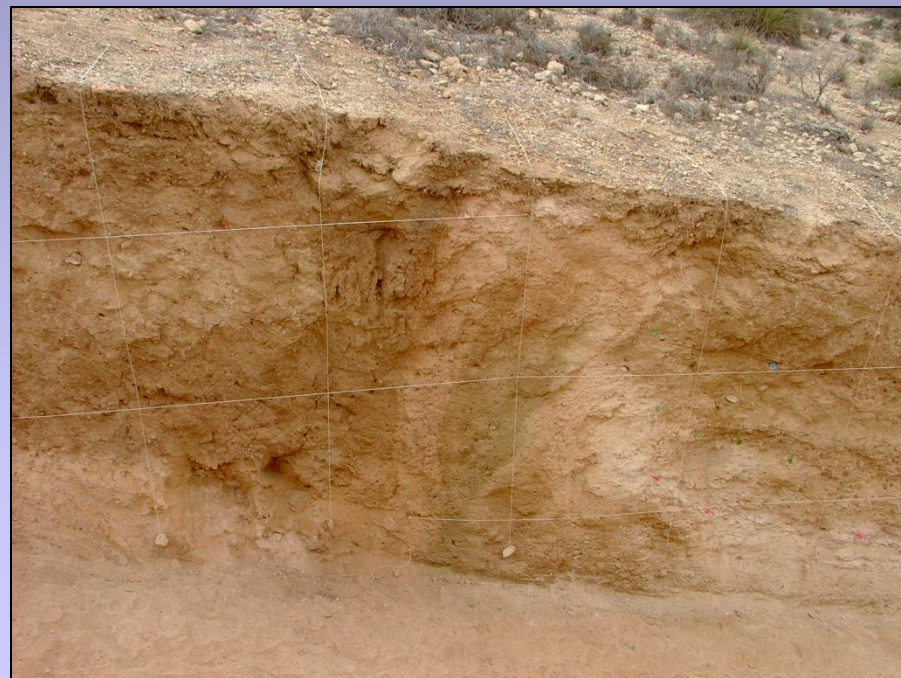
listopad 2005

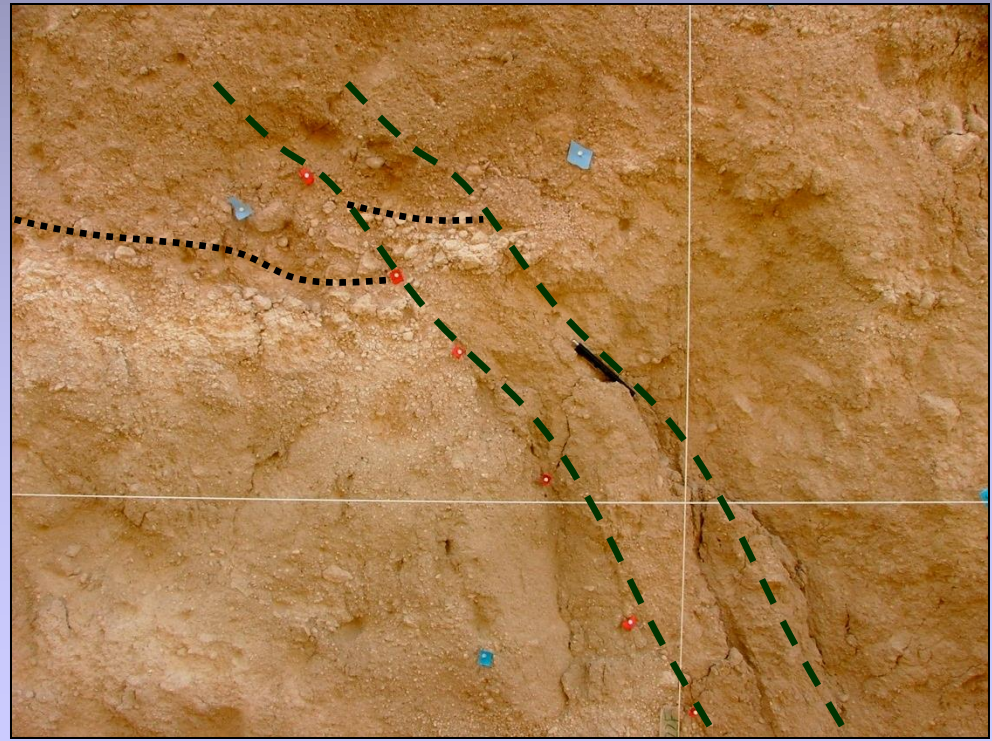
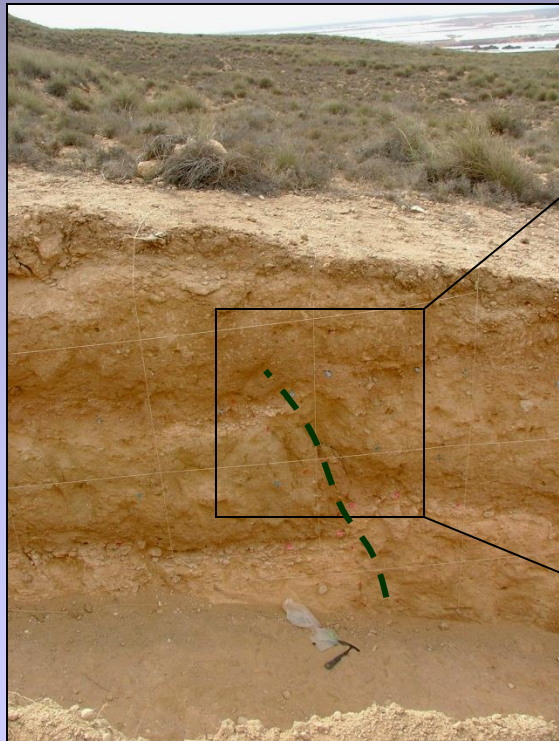


čištění, sítě



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

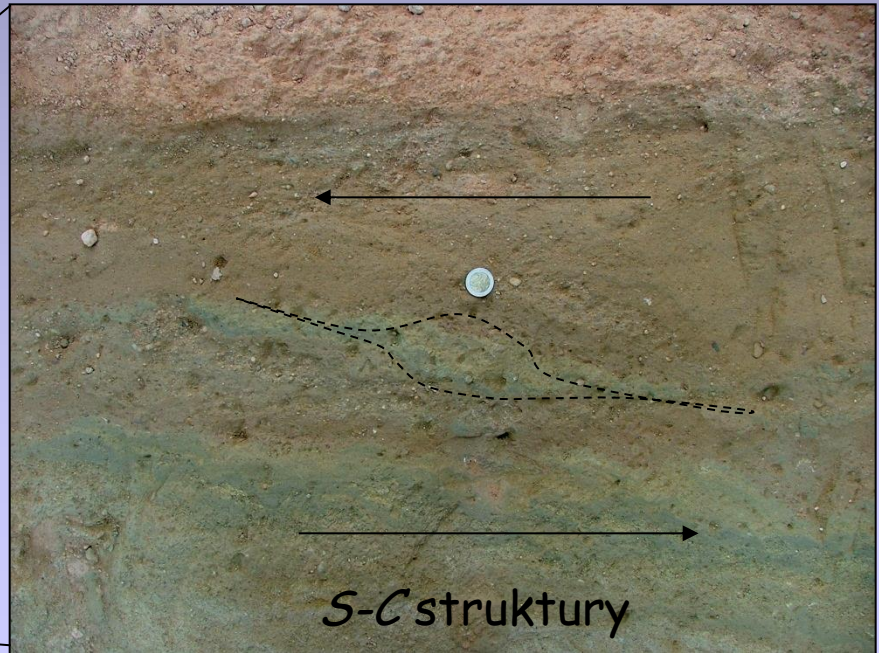


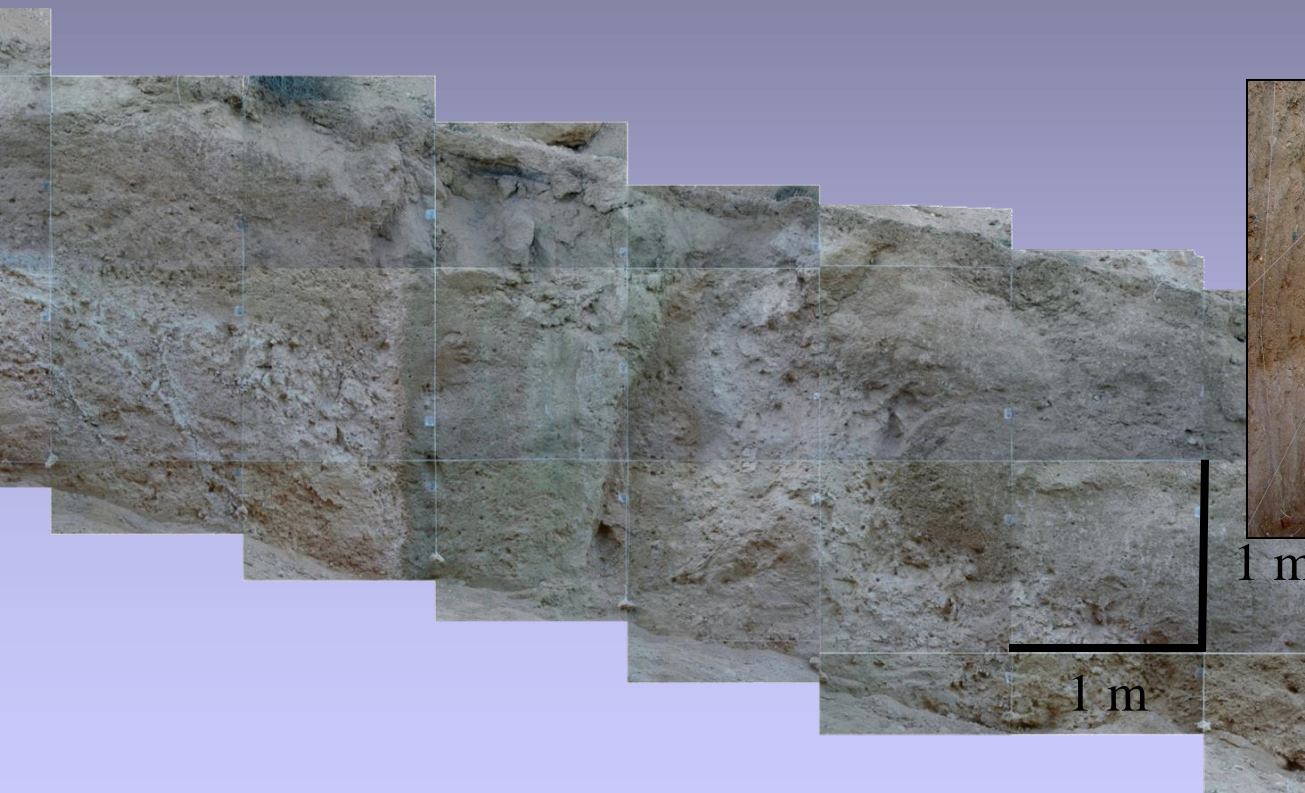
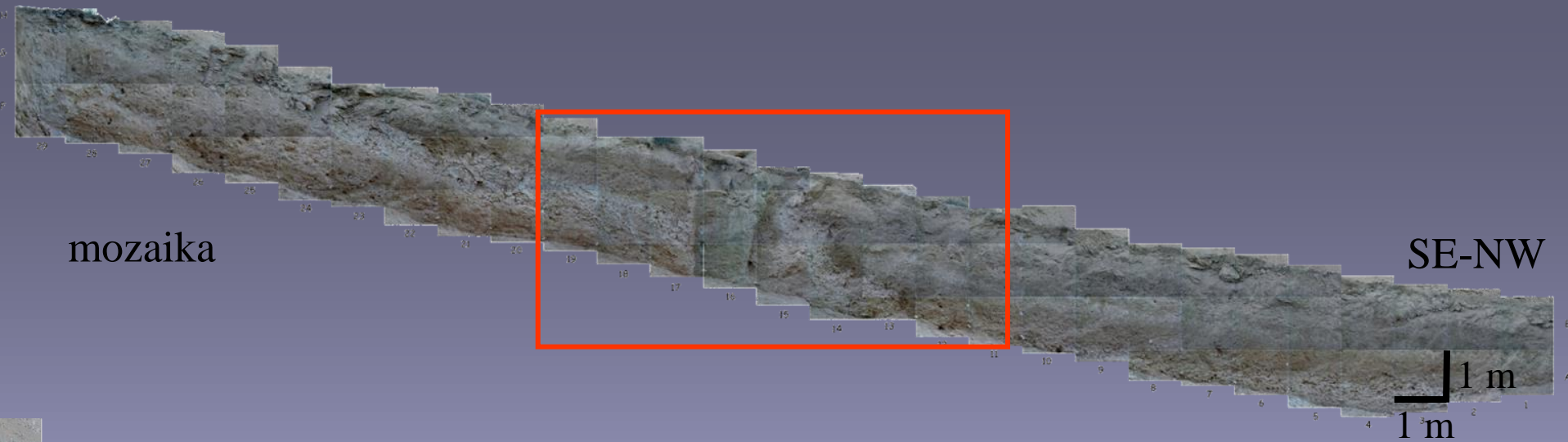


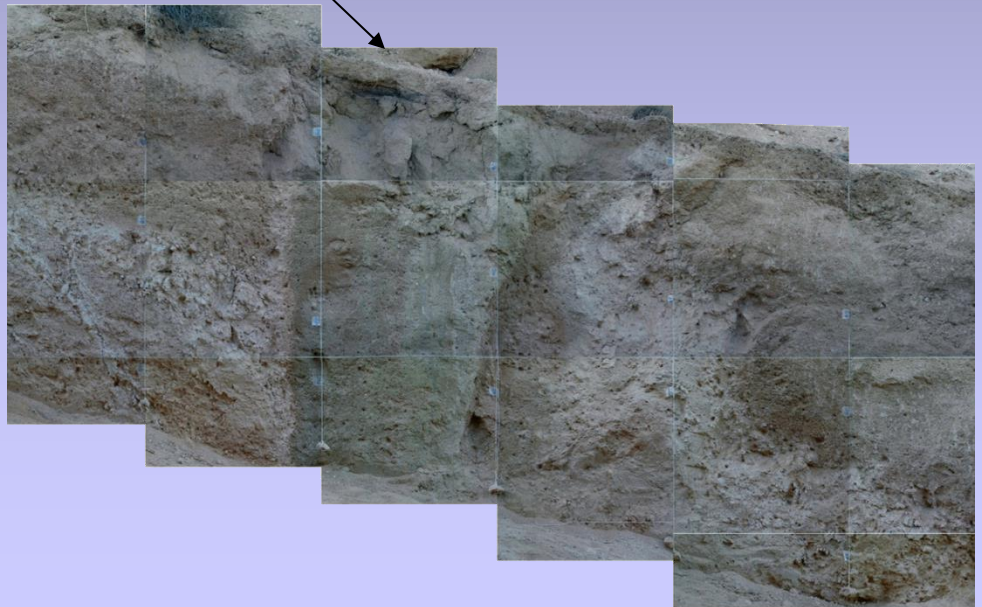
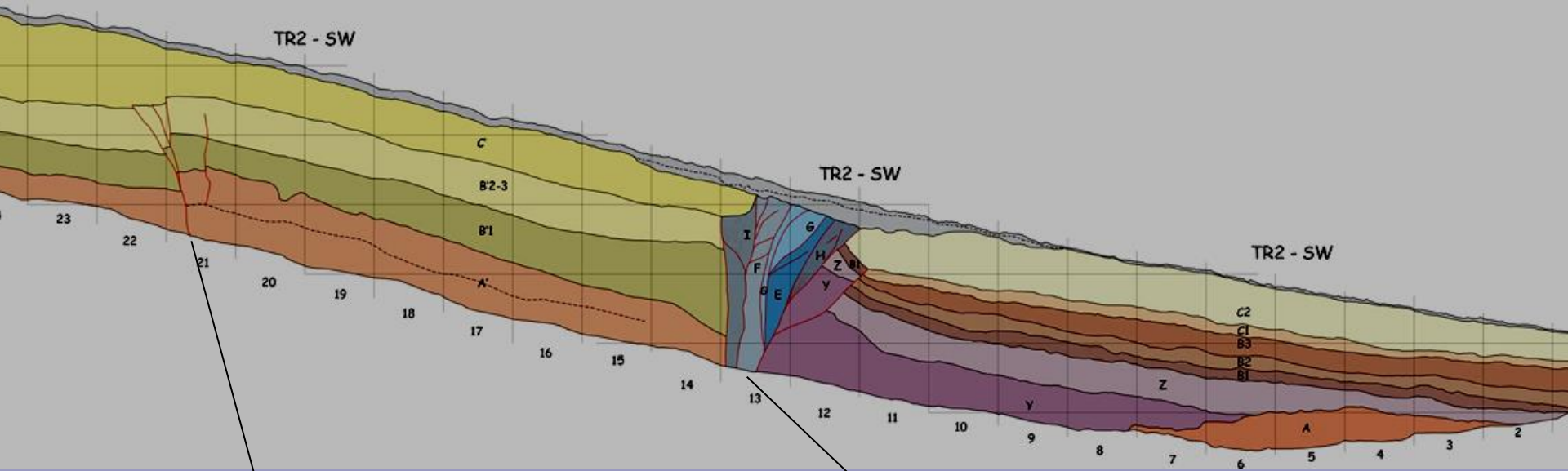


- složitější struktura
 - flower structure
 - transpresní režim
- horizontální posuny s vertikální složkou
- opakované pohyby





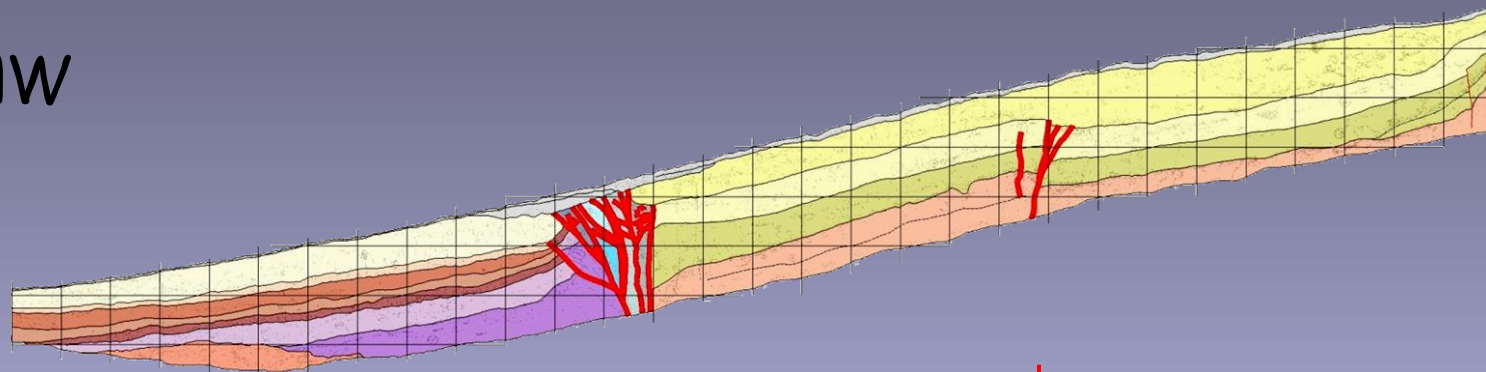




situace in situ X geofyzika

NW

SE



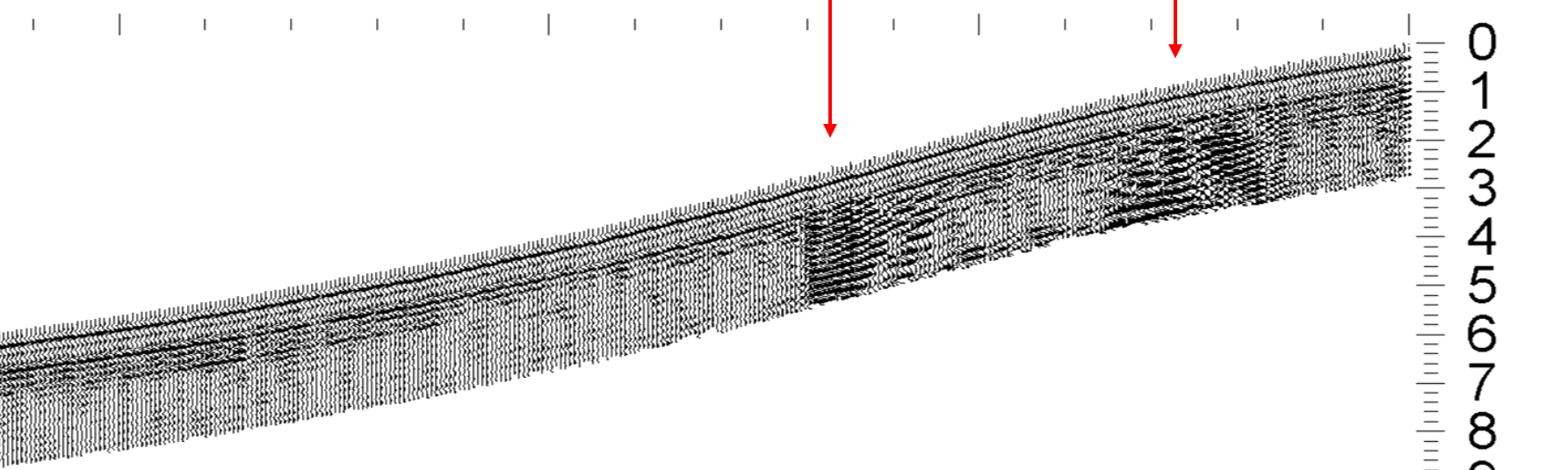
vzdálenost (m)

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

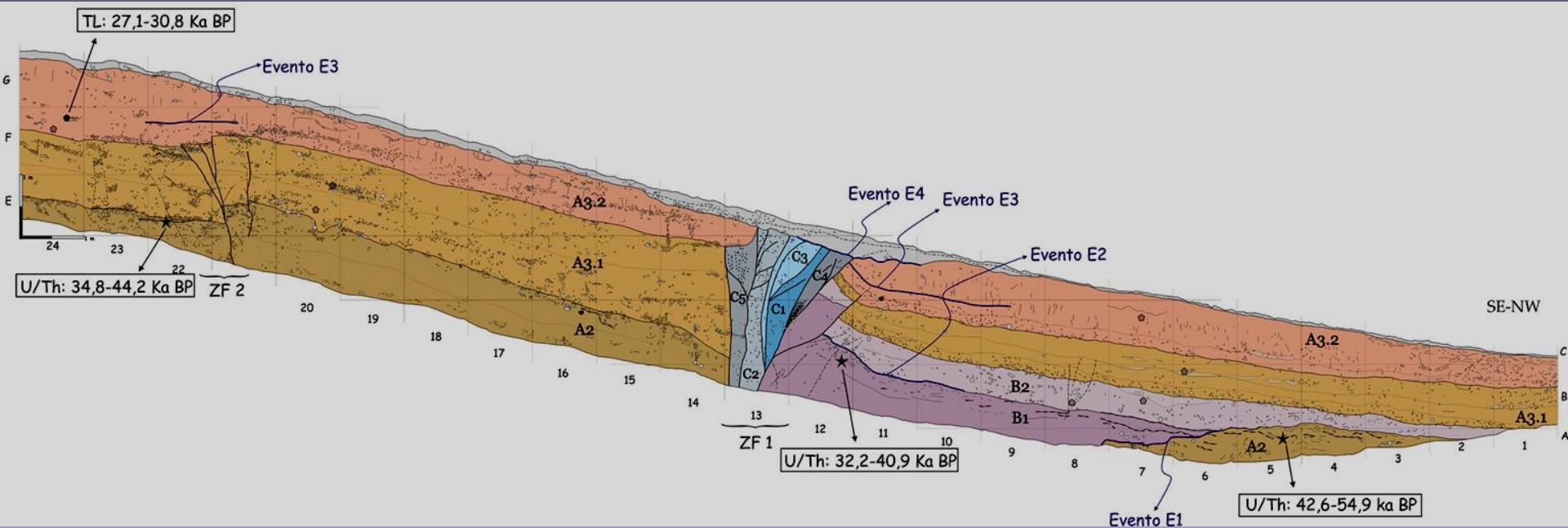
- ❖ **^{14}C radiouhlíková metoda** → organický materiál a karbonát. schránky (dosah 40 tis. let) - **uhlíky, gastropodi**

C^{14} - v živých organismech, doplňován z prostředí, rozpadá se, po smrti organismu se mění poměr C^{14} /stabilnímu C^{12} - 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 vrací 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, fluivální, 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 Carboneras



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

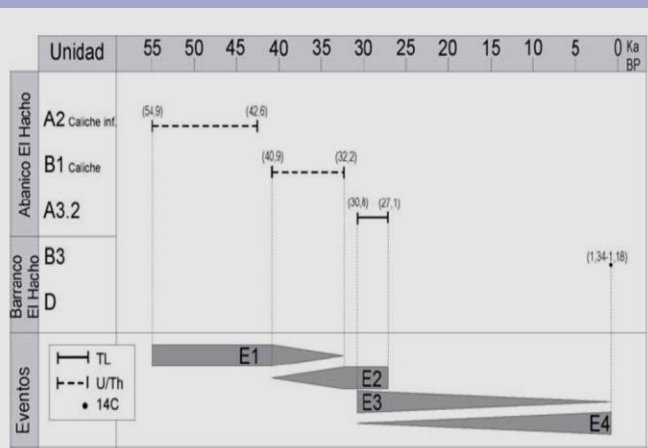
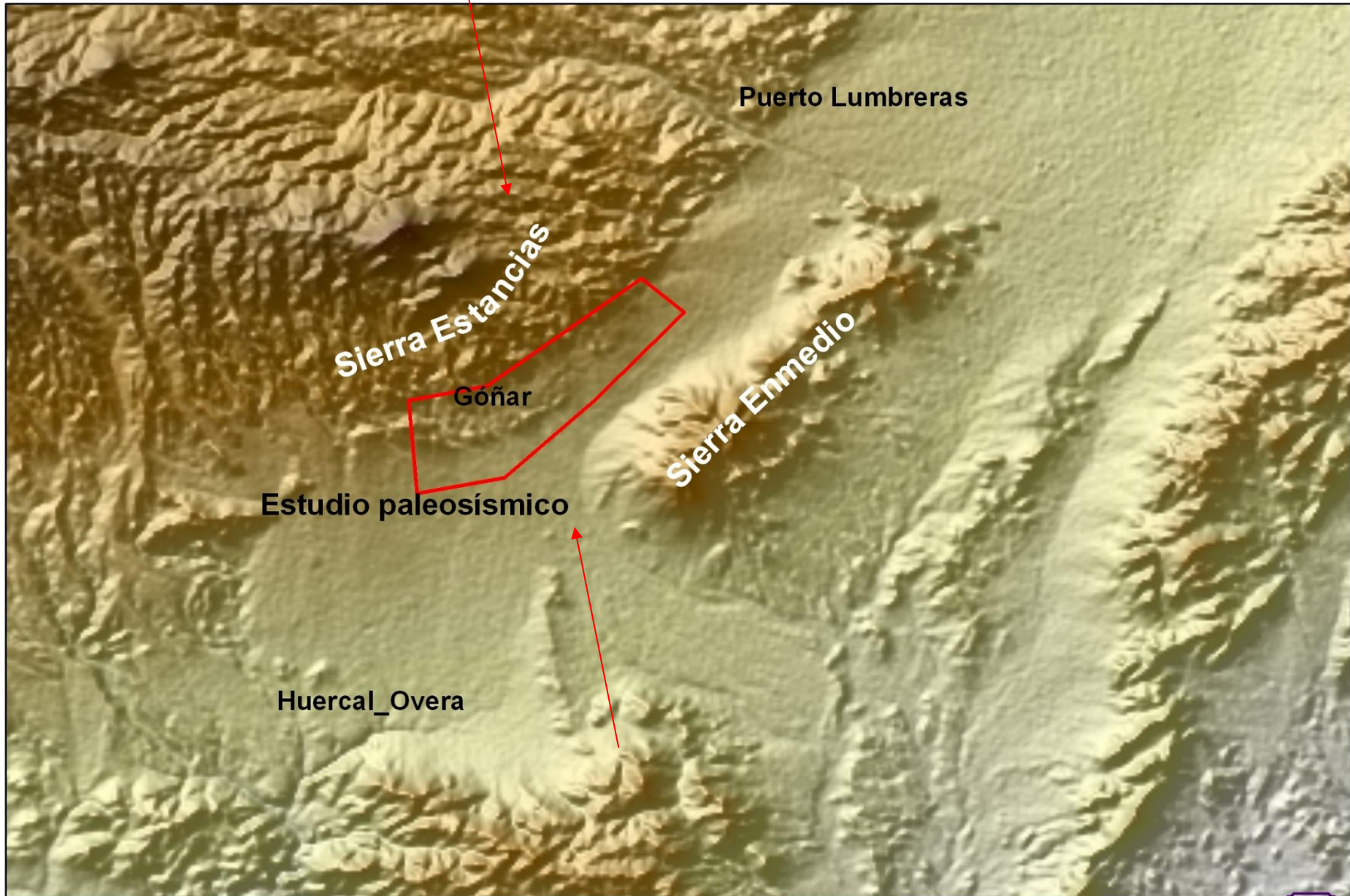




CHART OF THE INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007 - ESI 07

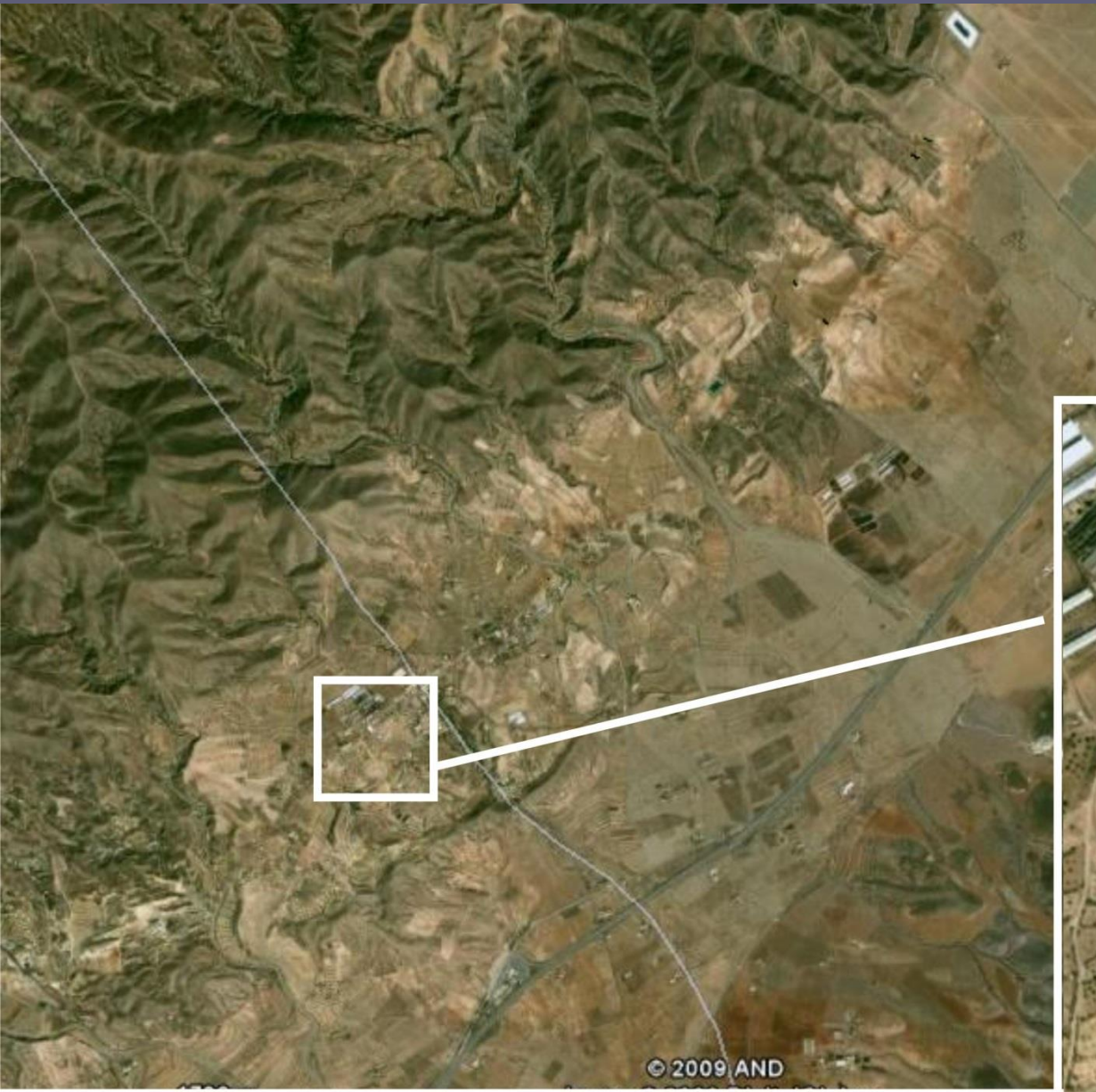
		PRIMARY EFFECTS		SECONDARY EFFECTS WITH GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL RECORD				OTHER SECONDARY EFFECTS WITH MINOR GEOLOGICAL RECORD		AFFECTED AREA AND TYPE OF RECORD	
		SURFACE RUPTURES	TECTONIC UPLIFT/SUBSID	GROUND CRACKS	SLOPE MOVEMENTS	LIQUEFACTION PROCESSES	ANOMALOUS WAVES AND TSUNAMIS	HYDROGEOLOGICAL ANOMALIES	TREE SHAKING	Affected Area	Type of RECORD
		Offset	Length	Width	Length	ENVIRONMENTAL EFFECTS ARE VERY RARE AND CANNOT BE USED AS DIAGNOSTIC					
OBSERVED	I-III										
	IV	ABSENT	ABSENT	Rare and local	Rare and local						
DAMAGING	V										
	VI										
DESTRUCTIVE	VII	Rare and local	Permanent ground dislocations (< 10 cm)	mm	cm	Only dewatered levels (seismites)	cm	Temporary level changes		Rare and local	
	VIII	cm	hm	dm	cm	1 m	50 cm	Temporary sea-level changes		Local within epicentral zone	
DESTRUCTIVE	IX										
	X	dm	km	m	dm	0.5 m	1 m	dm	Temp. turbidity changes	100 km ²	
VERY DESTRUCTIVE	XI	metric	10-100 km	> 1 m	> 10 m	0.5 m	0.5 m	3-5 m	Temp. F+Q changes	1,000 km ²	
	XII										
DEVASTATING	XIII										
	XIV										
		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	Geological frequent and exceptionally geomorphological

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.

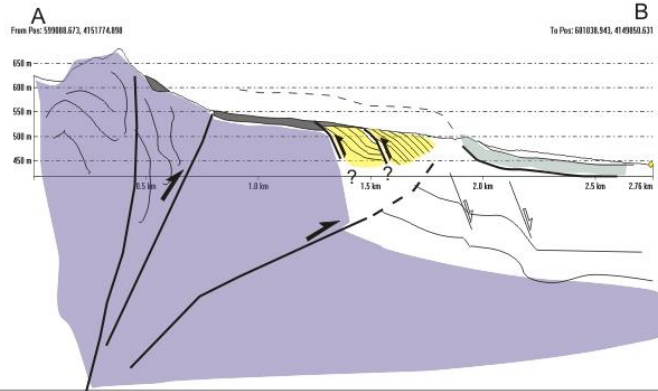
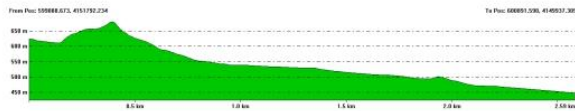
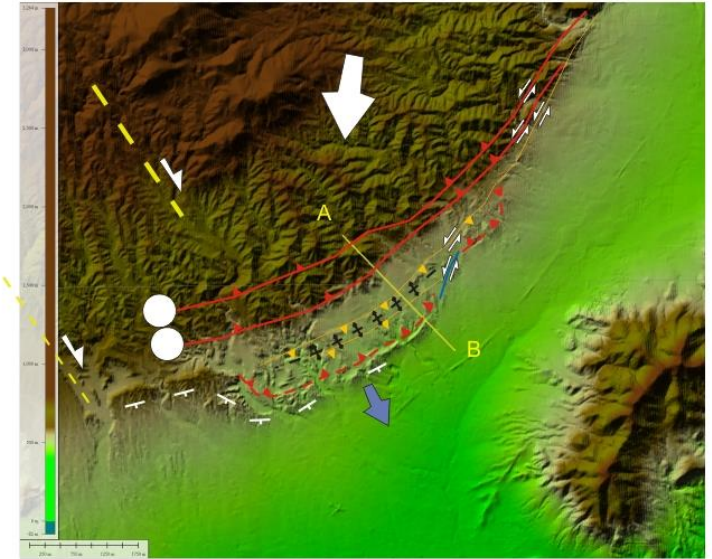
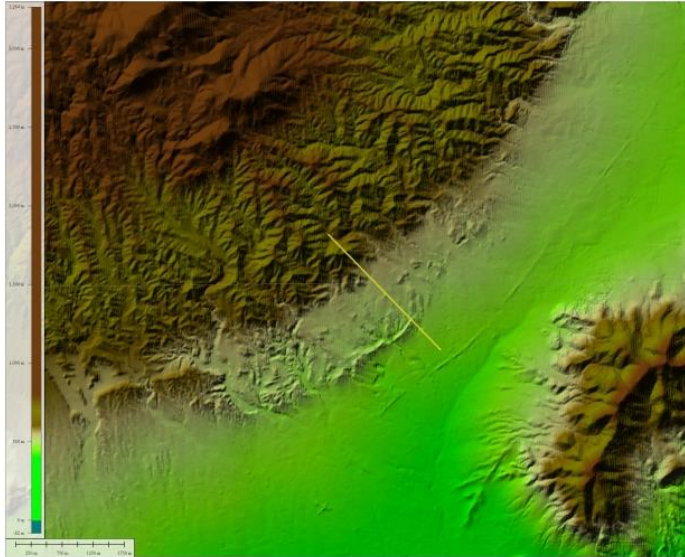


Alhama de Murcia fault

Trincheras en el terreno de Rosario Ayala y junto al camino del cementerio

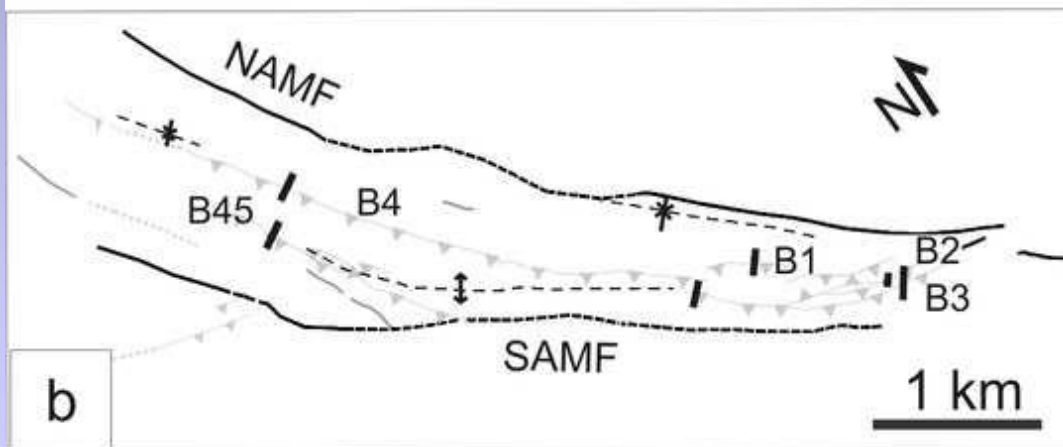
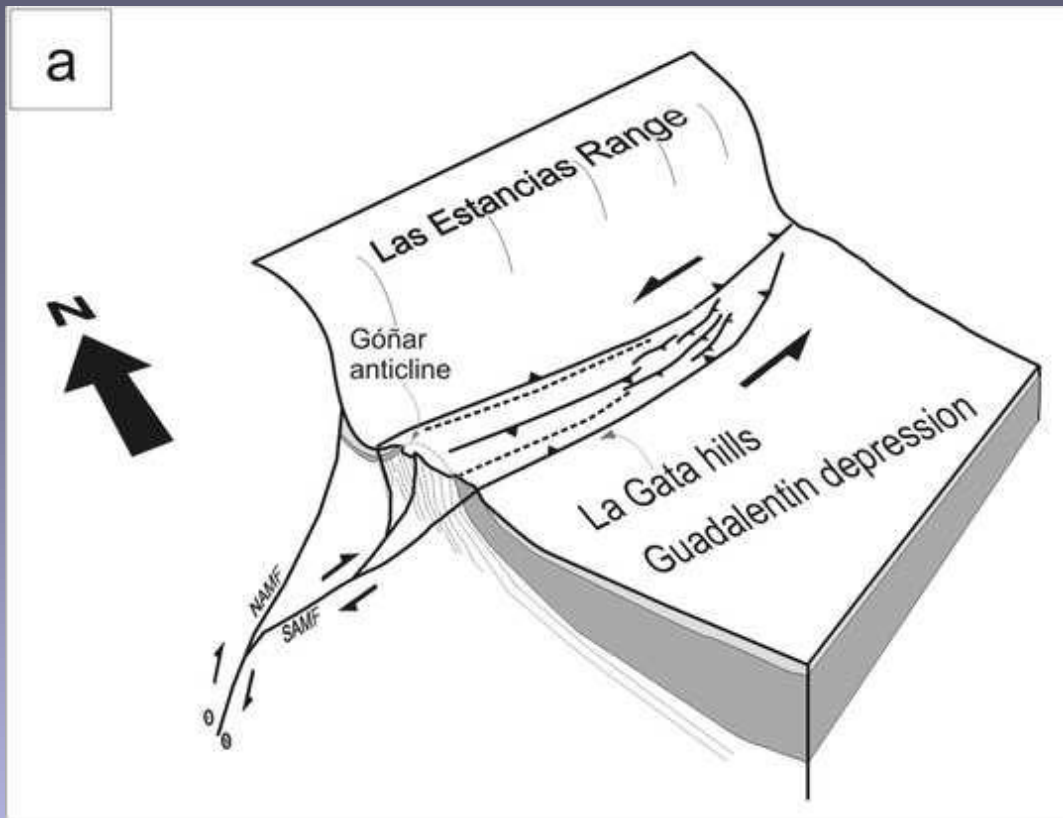


Analýza leteckých snímků, terénní mapování zlomů, tvarů porušených pohybech



Alhama de Murcia fault

Typy pohybů - podle směru tlaku









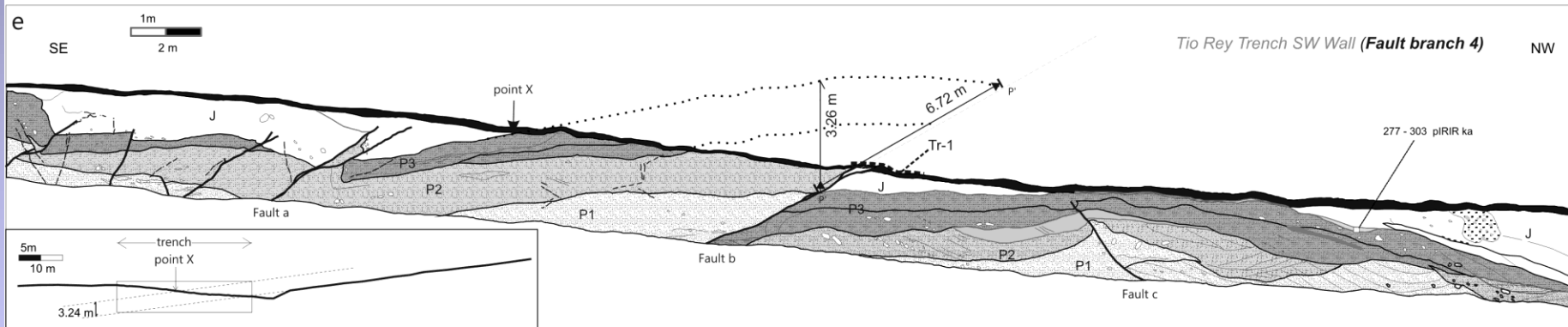
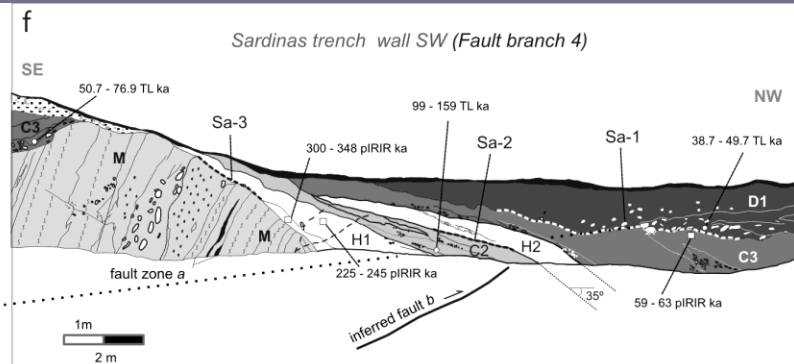
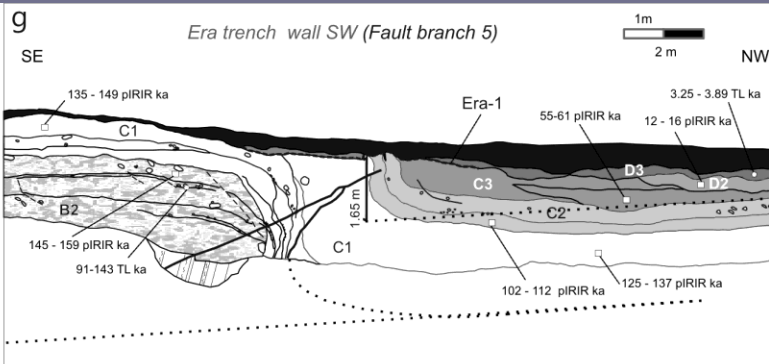


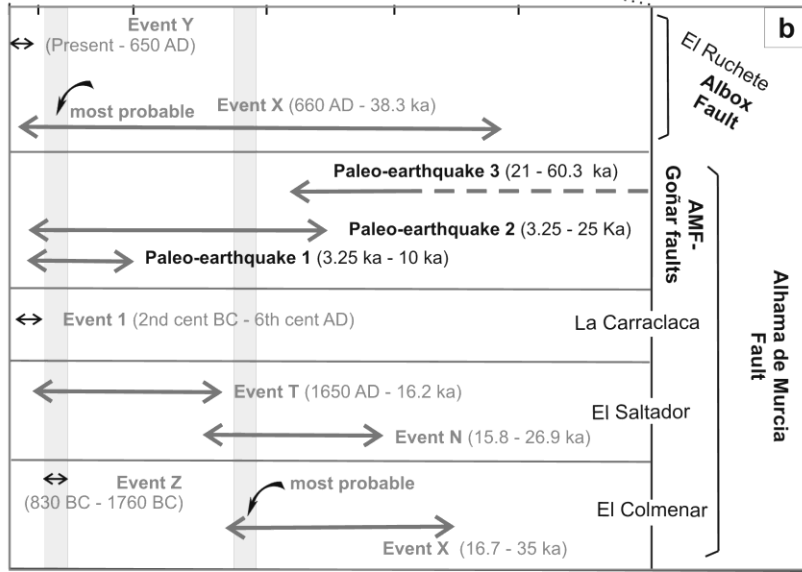
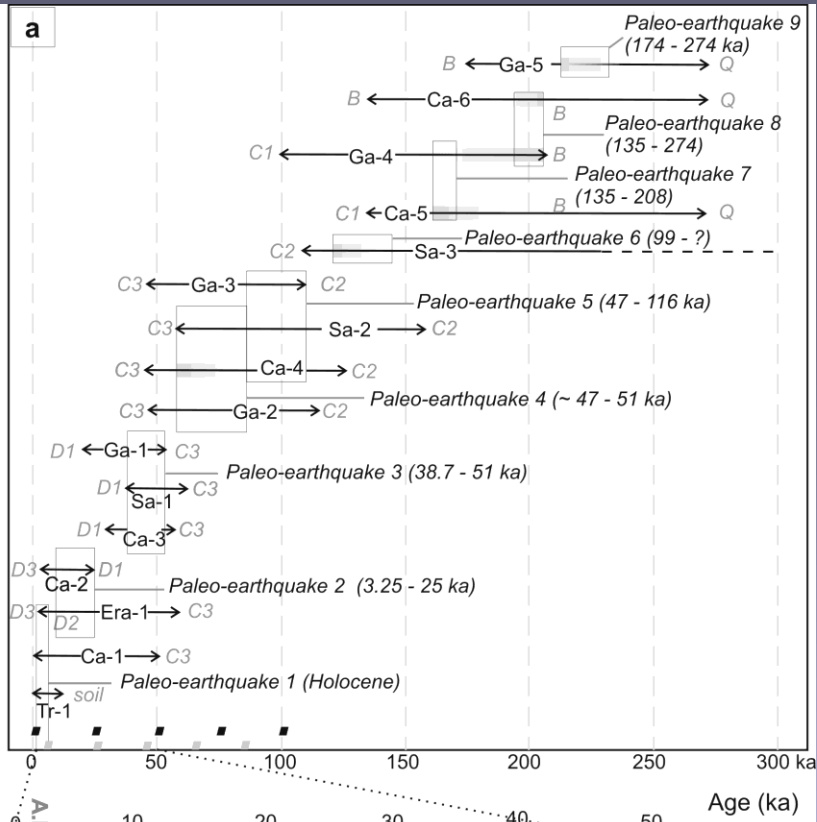




Legend (part 2)

- Slip-marker
 - Event horizon
 - Stratigraphic contact
 - Fracture
 - Fault
 - Colluvial wedges
- Samples**
- plRIR
 - TL





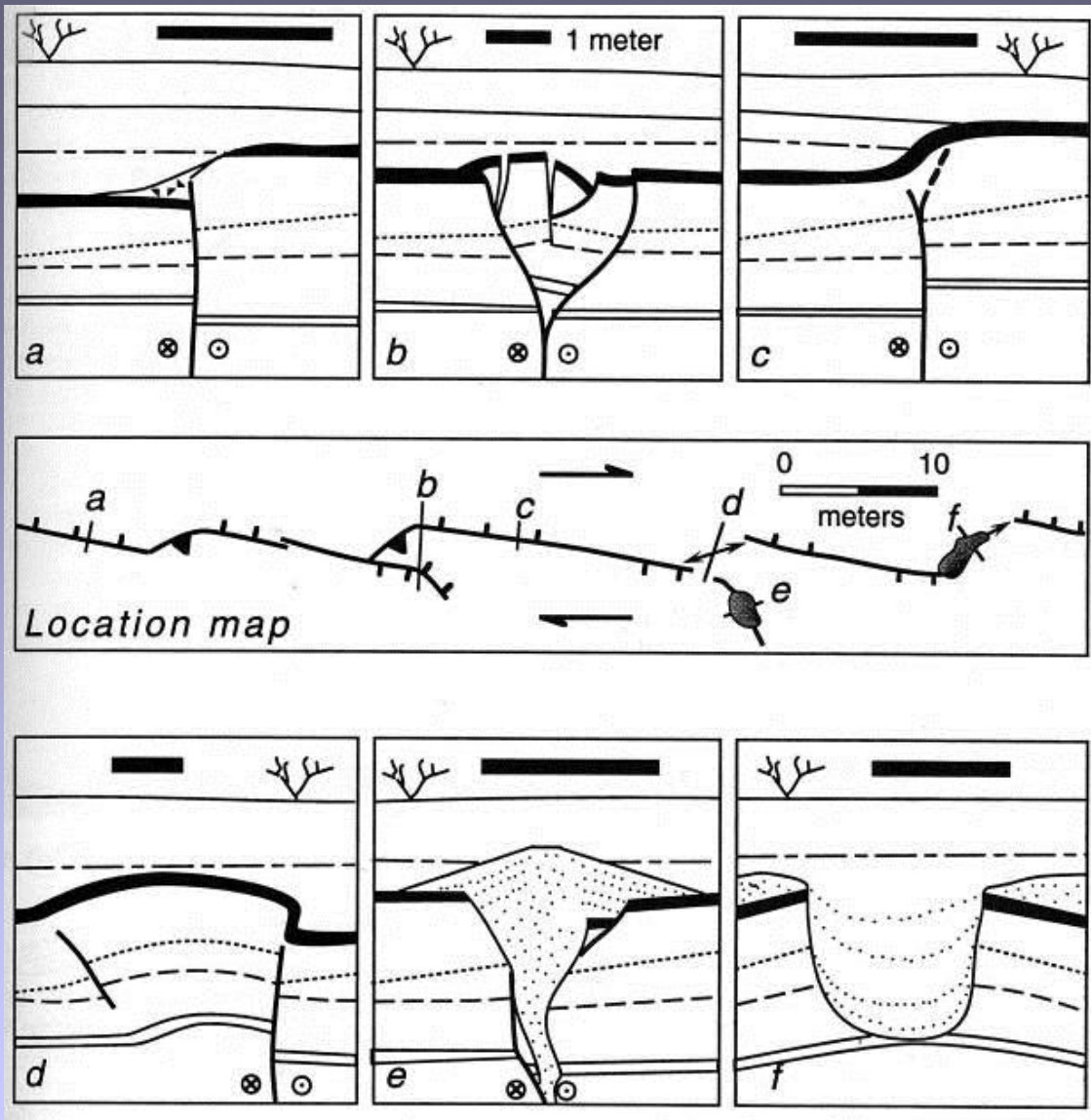
Horizontální posuny



Carboneras fault, Spain



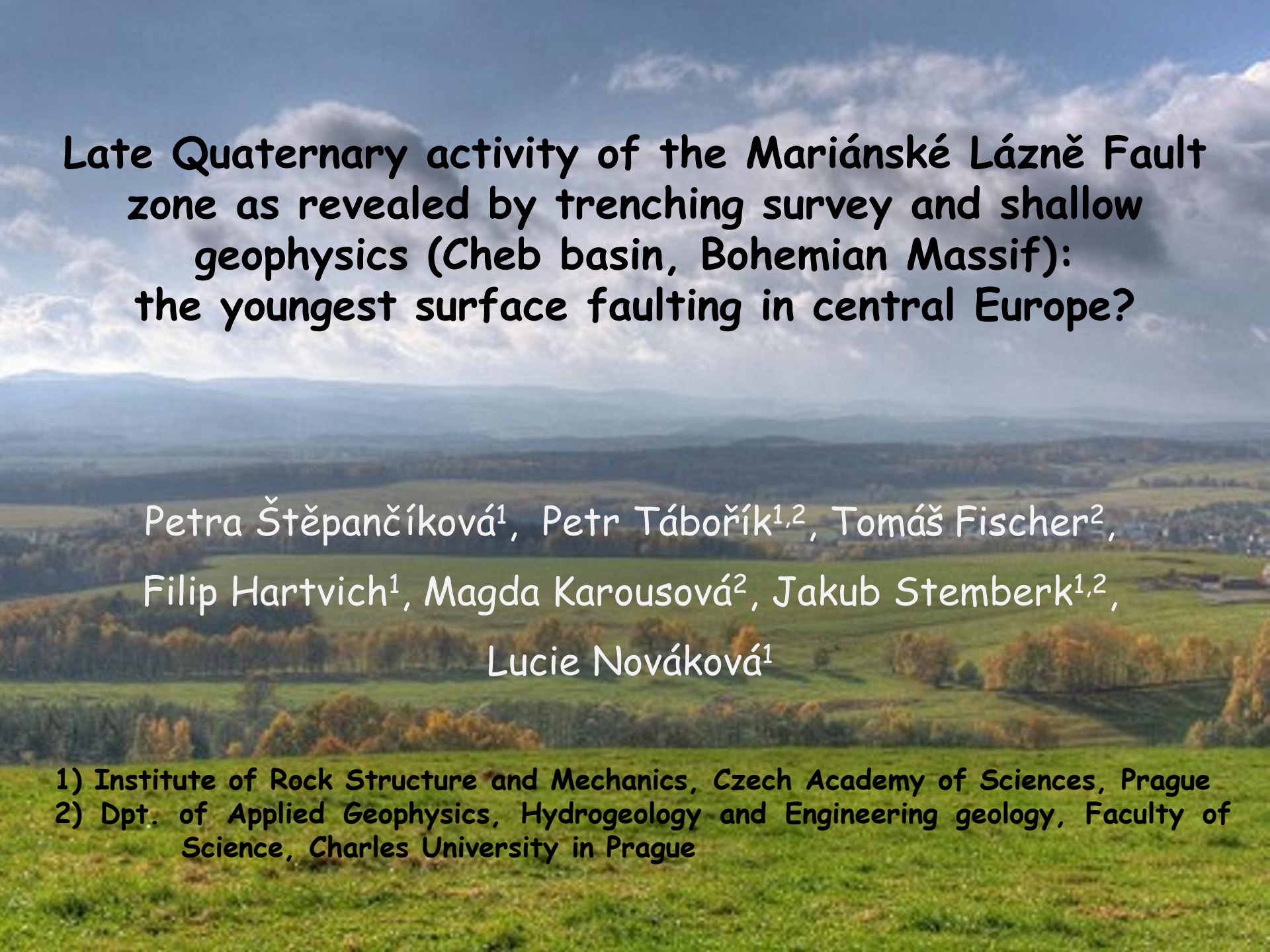
Borego fault, El Mayor 2010





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

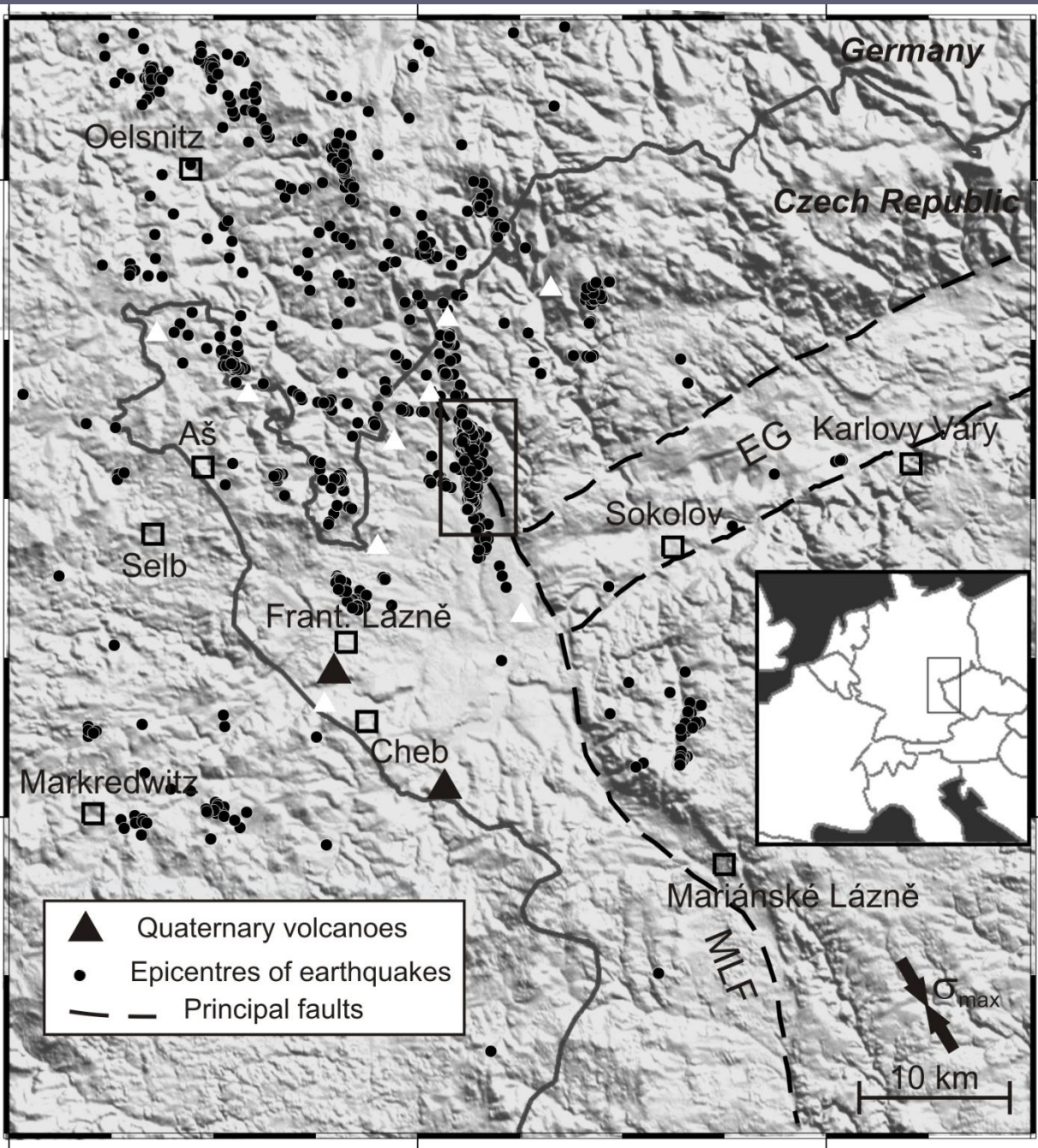




Late Quaternary activity of the Mariánské Lázně Fault zone as revealed by trenching survey and shallow geophysics (Cheb basin, Bohemian Massif): the youngest surface faulting in central Europe?

Petra Štěpančíková¹, Petr Tábořík^{1,2}, Tomáš Fischer²,
Filip Hartvich¹, Magda Karousová², Jakub Stemberk^{1,2},
Lucie Nováková¹

- 1) Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences, Prague
- 2) Dpt. of Applied Geophysics, Hydrogeology and Engineering geology, Faculty of Science, Charles University in Prague



Cheb basin

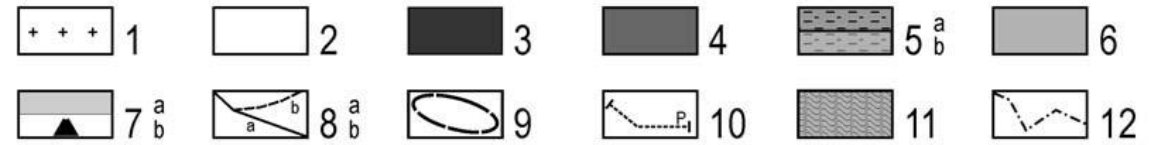
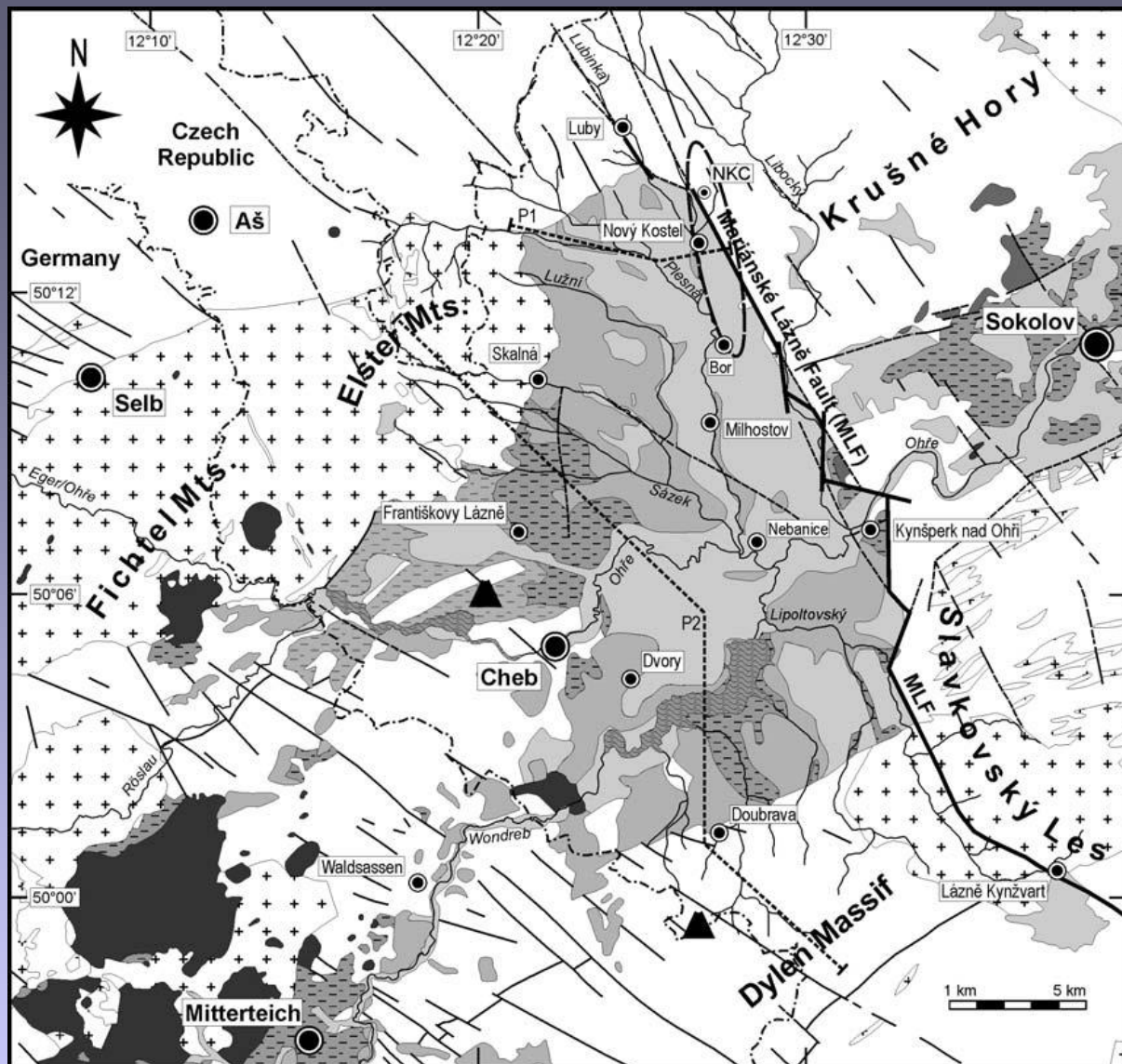
part of Miocene Eger rift

West-Bohemia/Vogtland
seismoactive area

Nový Kostel earthquake
swarm focal zone

Emanations of mantle-
derived CO₂

Mid Pleistocene volcanism



Mariánské Lázně fault (MLF)

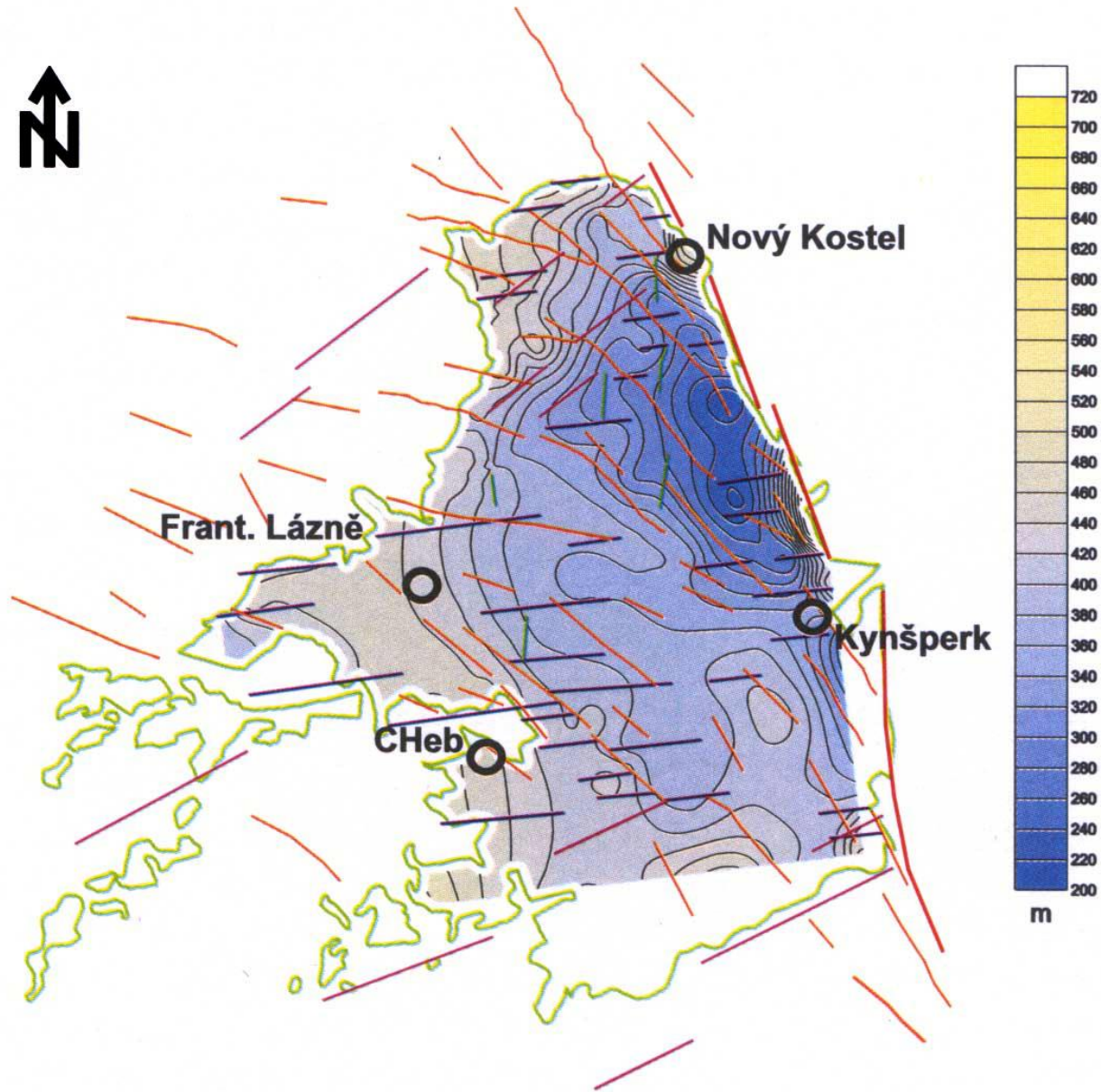
normal fault with dextral strike-slip displacement

Pitra et al. (1999),
Grünthal et al. (1990),
Švancara (2000)

sinistral strike-slip fault

Špičák (1988),
Peterek et al. (2011)

Present-day max.
horizontal stress
orientation - NW-NNW

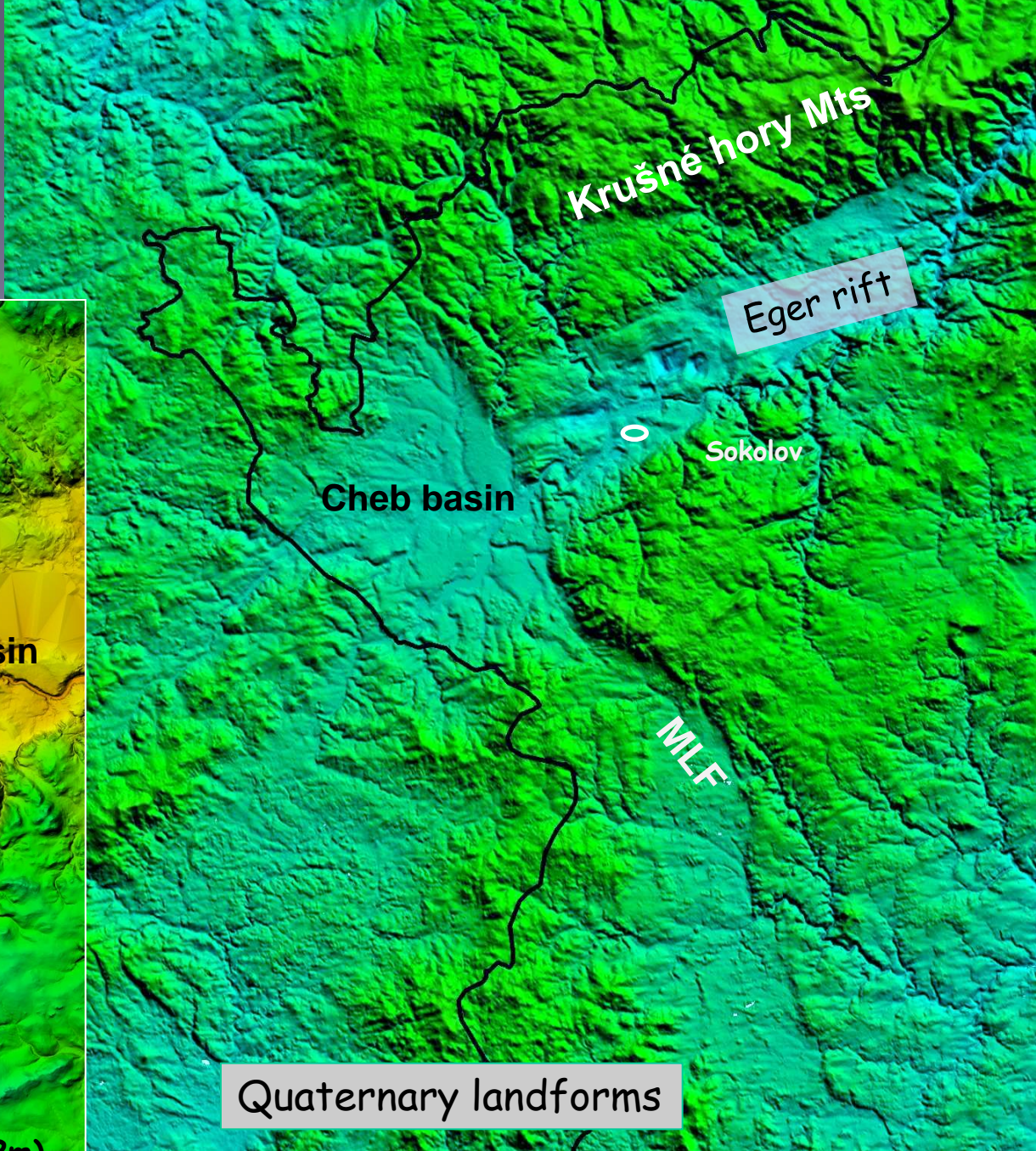
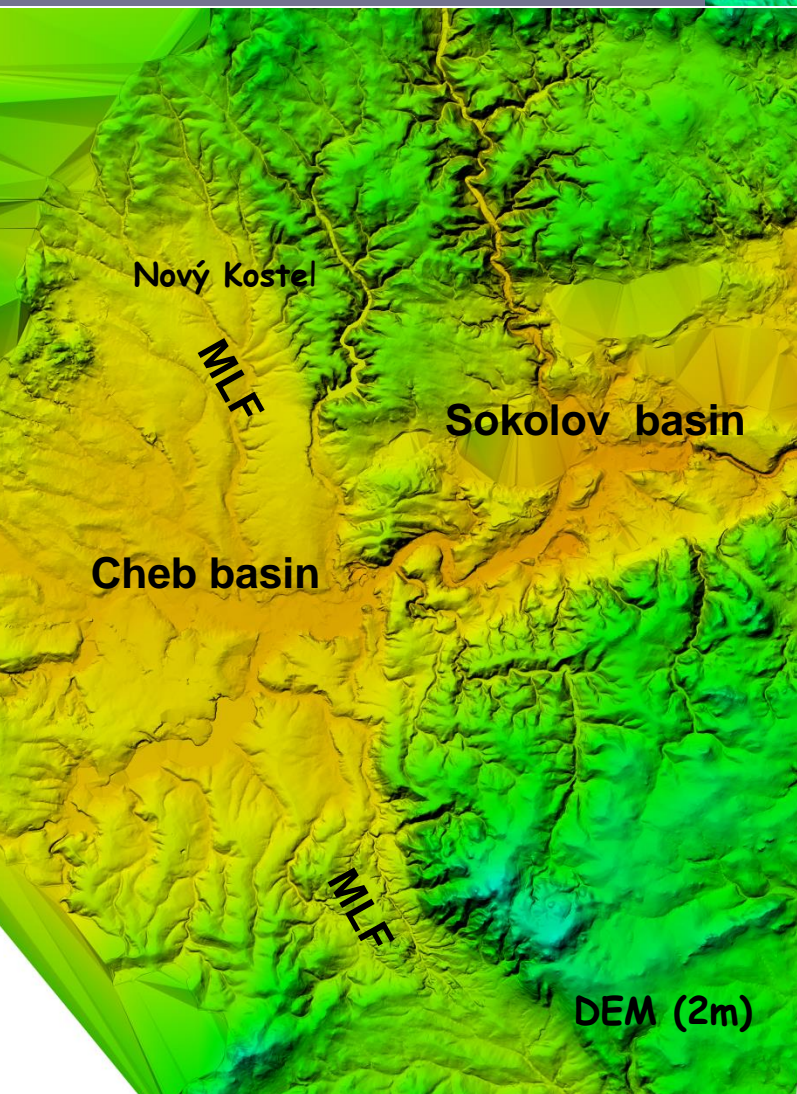


10 km

Izopach map of Plio-Quaternary Vildstejn Formation

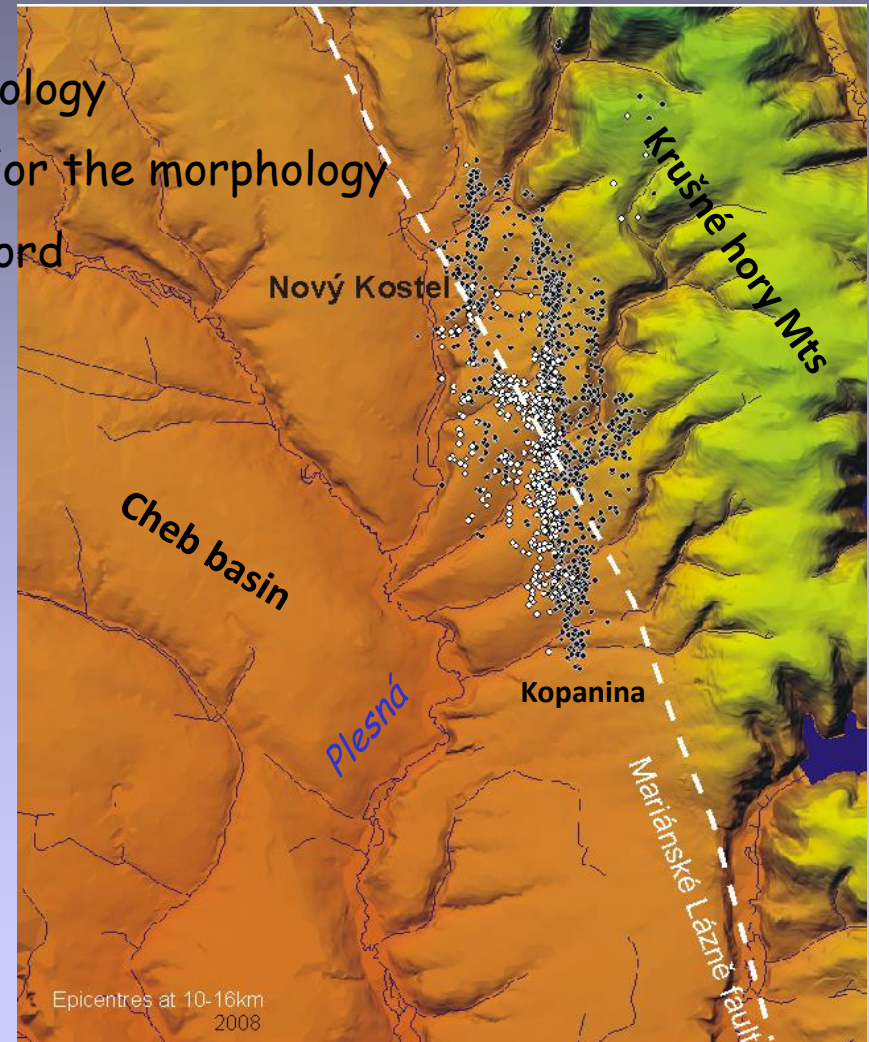
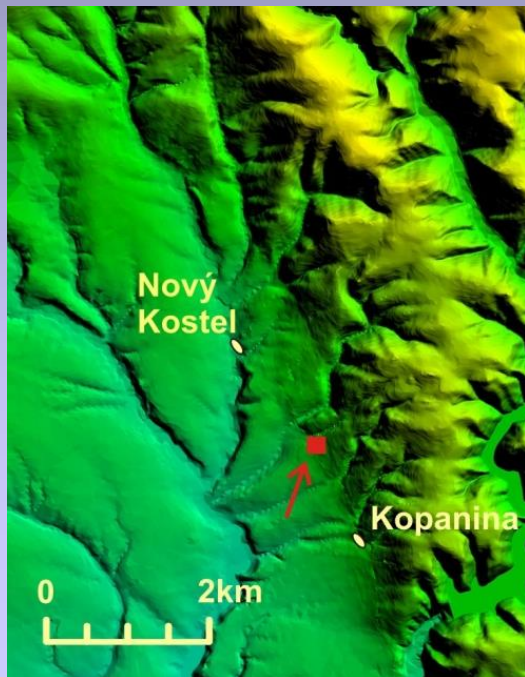
Mariánské Lázně fault (MLF)
morphologically pronounced

Northern segment -
Eastern Marginal Fault of ChB
(Špičáková et al. 2000)



SRTM (90m)

- Hypocentres of earthquakes related to a NNW-SSE striking and WSW-dipping fault - **Počátky-Plesná Fault Zone** (hard to trace in geology)
- No morphological expression - earthquake swarms not large enough to rupture the surface
- **Mariánské lázně fault (NW-SE)**- morphology
- ? Morphogenic earthquakes responsible for the morphology
($M_w > 5.5 - 6$) - observable in geological record
(McCalpin, ed. 2009: Paleoseismology)





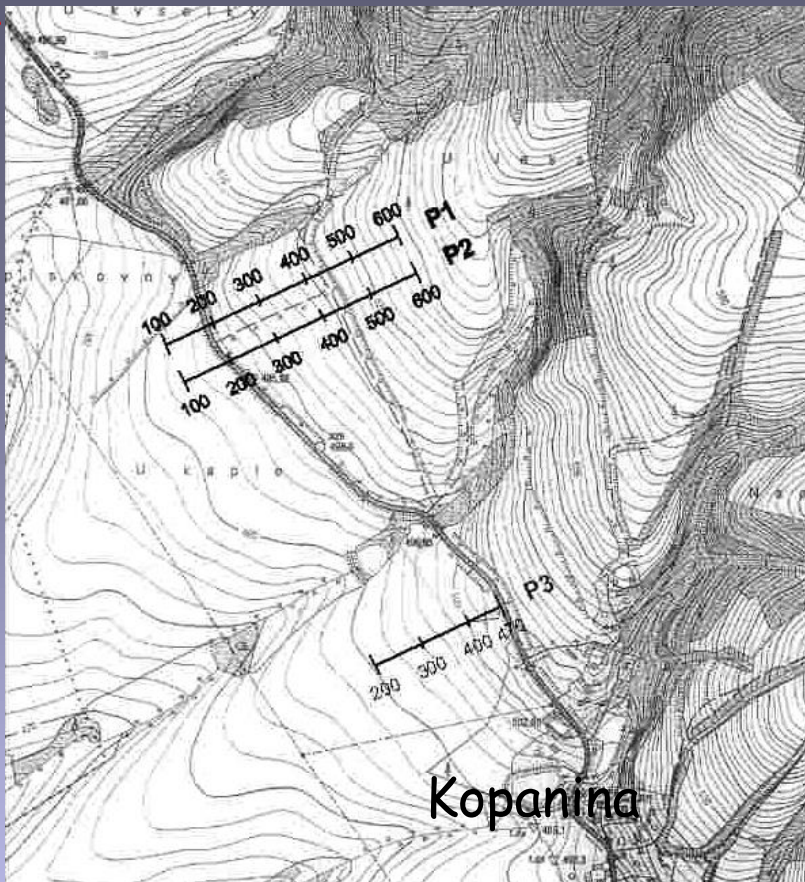
Paleoseismological trenching - geological record of pre-historic earthquakes

NovýKostel

Series of sub-parallel valleys become deeply incised into uplifted blocks and MLF controls the most recent morphology of the marginal slope.

Kopanina

LIDAR

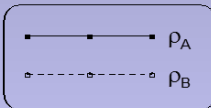


Pre-trenching geophysical survey

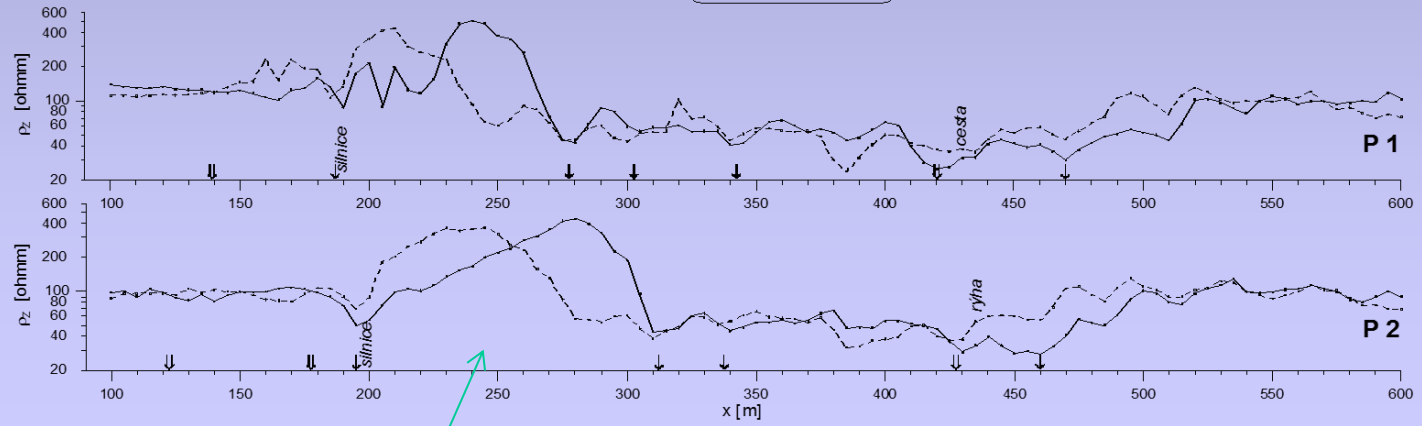
Combining geoelectrical profile

Electric resistivity tomography

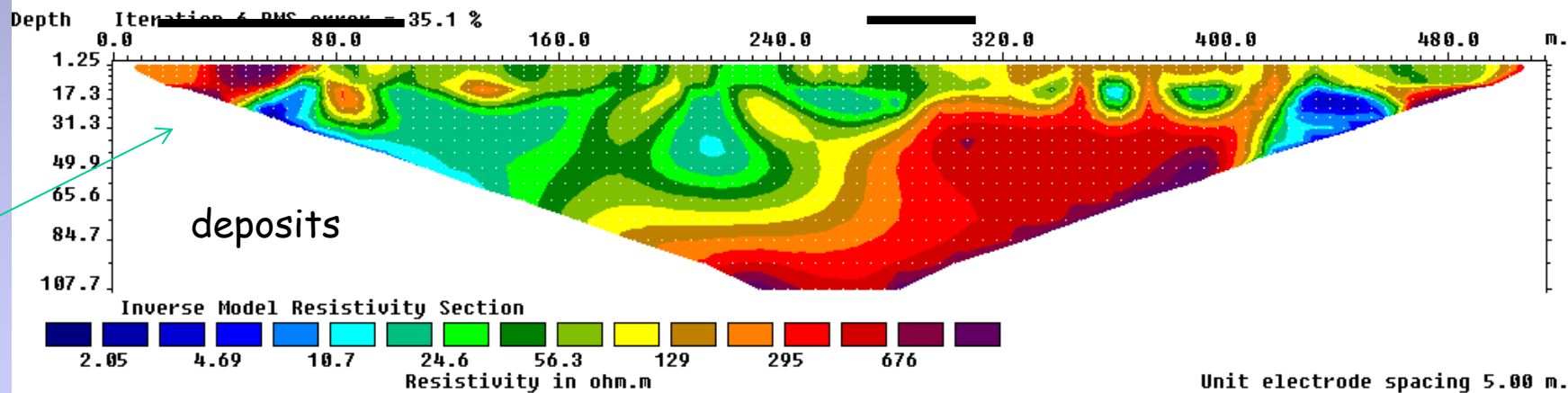
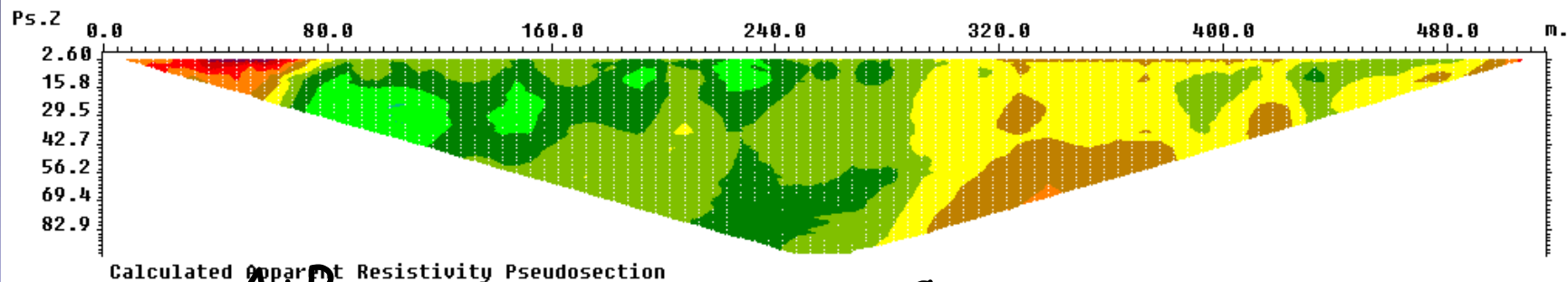
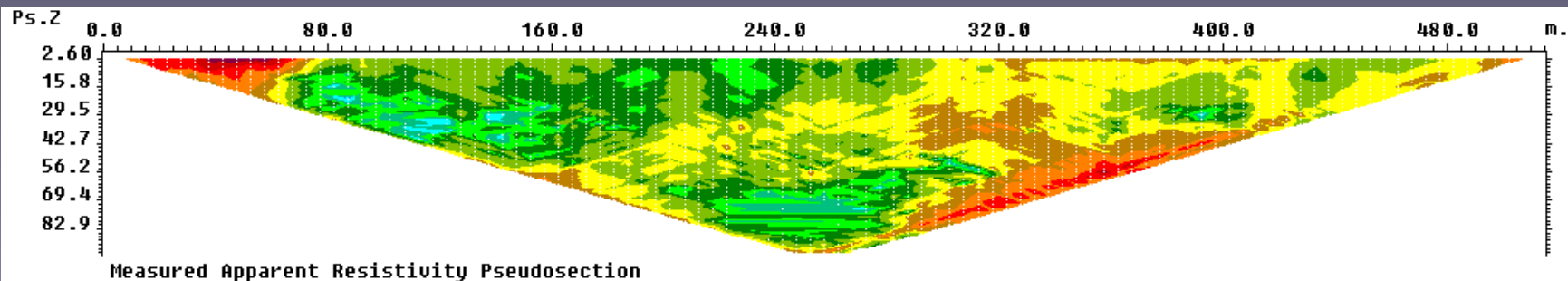
1 : 2000



↓↓ VÝRAZNÝ VODIČ
 ↓ MĚLKÝ VODIČ

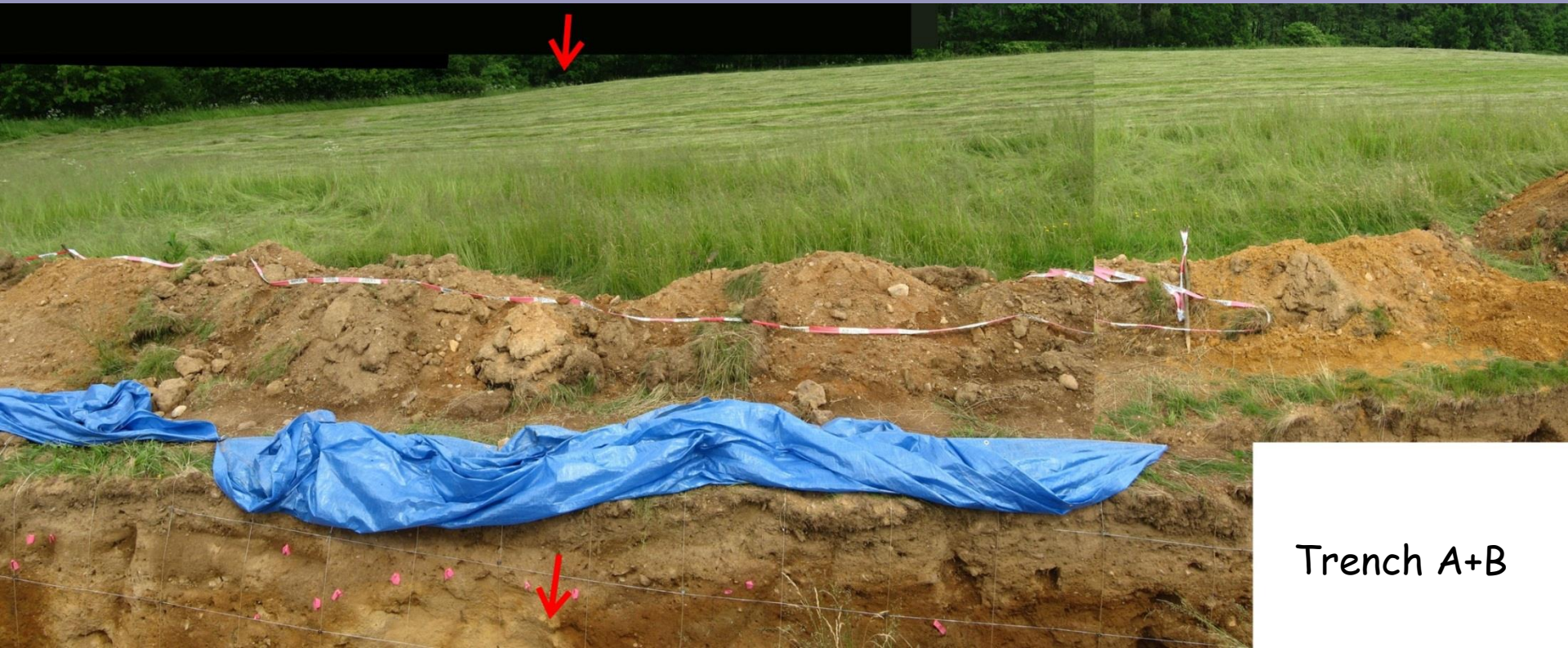


Electric resistivity tomography





Gentle convex morphology on the foot of the marginal slope



Trench A+B

100 m long, 1.5-2.5 m deep

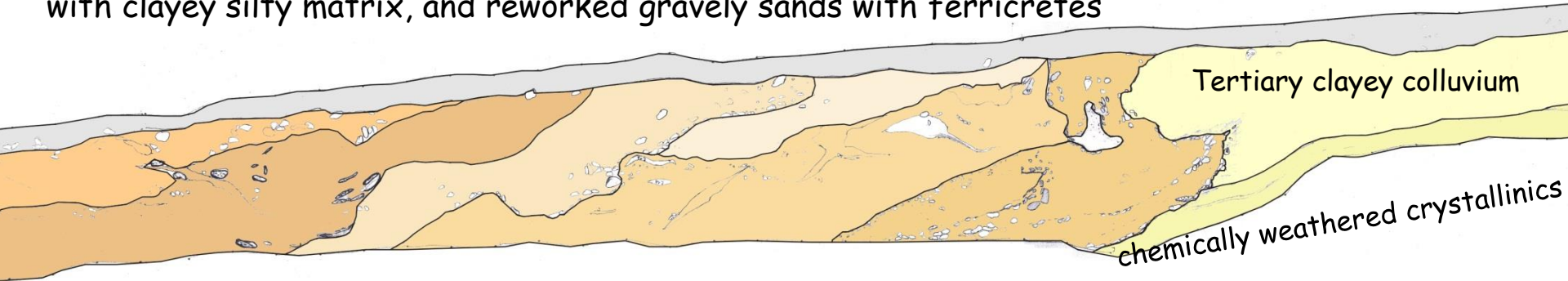


0.5m reference grid

SW

NE

Basal conglomerates with ferric cement, heterogenous units of poorly sorted sandy gravels with clayey silty matrix, and reworked gravely sands with ferricretes



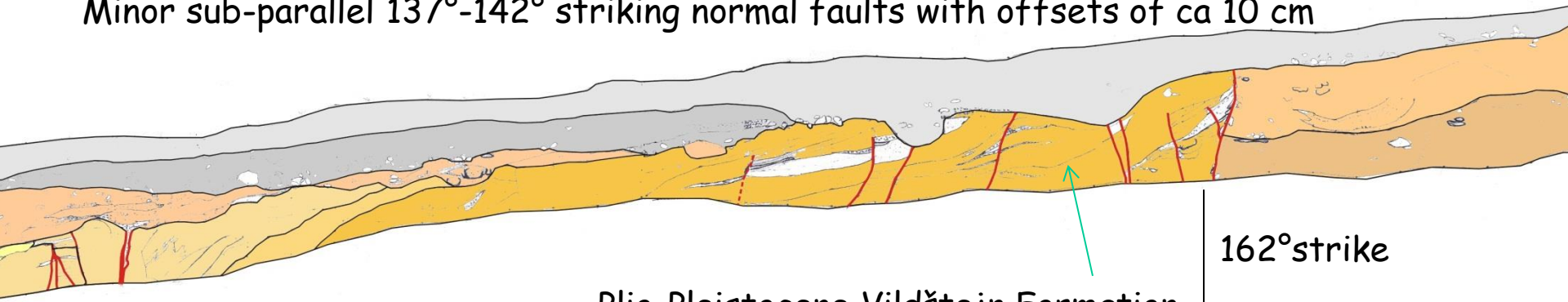
Inclined layers of basal conglomerates, gravels and sands



Oligocene Staré Sedlo Formation

Diagonally stratified fine gravels and sands

Minor sub-parallel 137° - 142° striking normal faults with offsets of ca 10 cm



Plio-Pleistocene Vildštejn Formation

162° strike

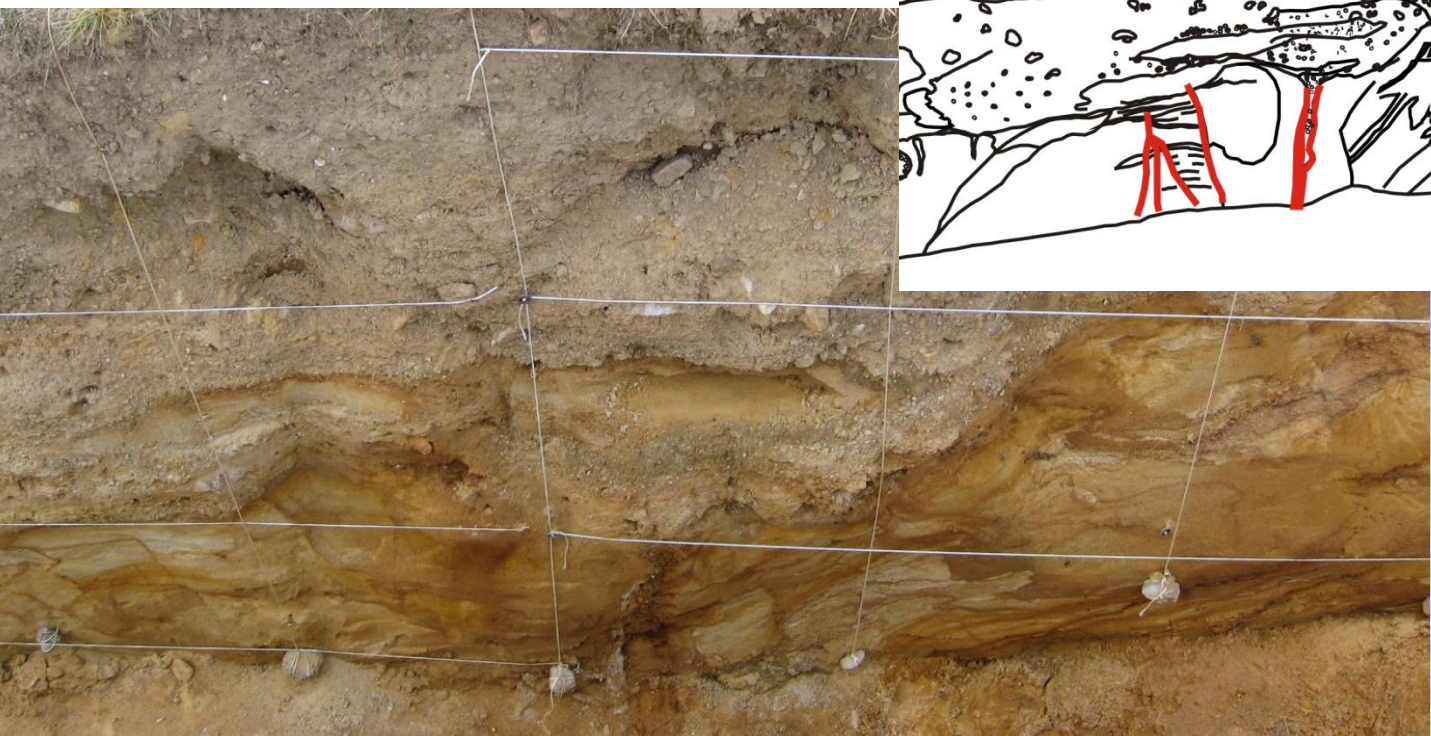
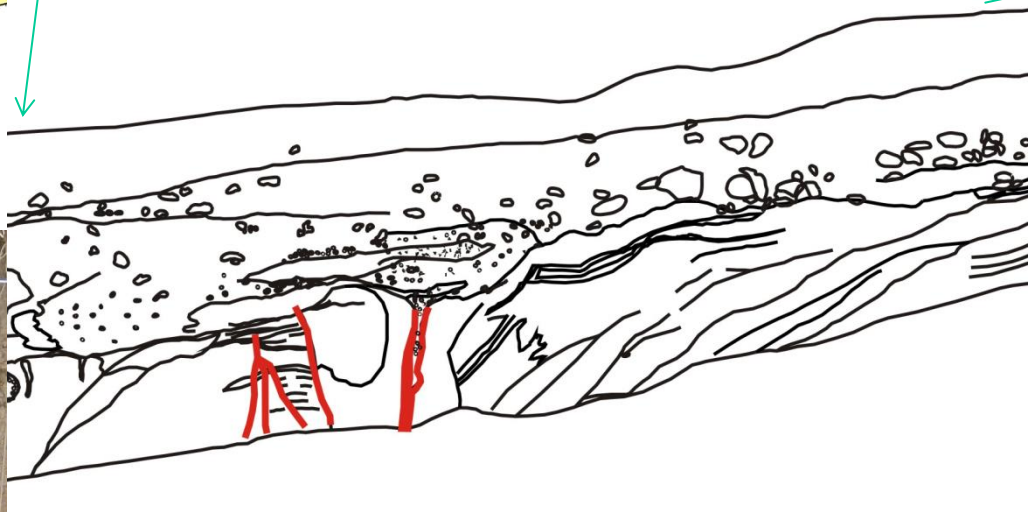
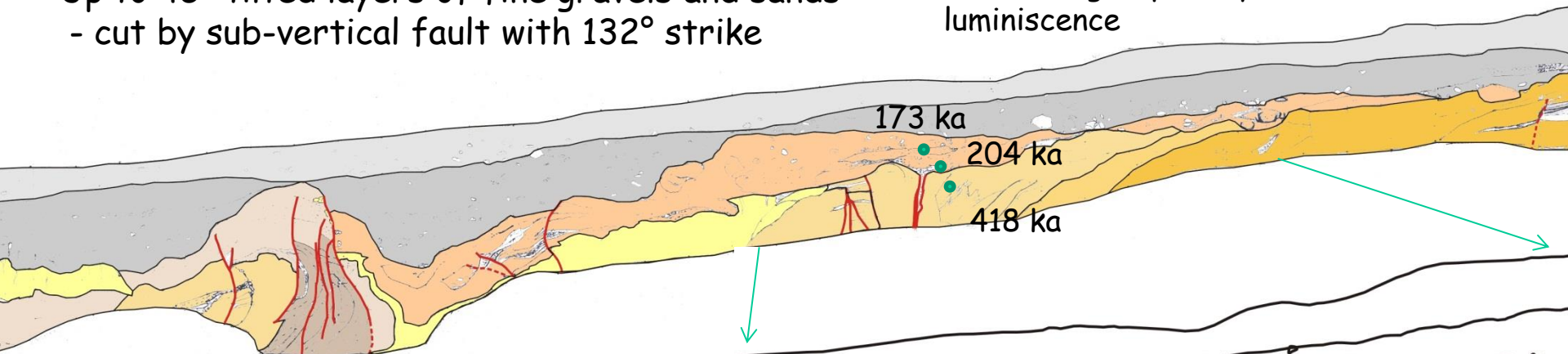


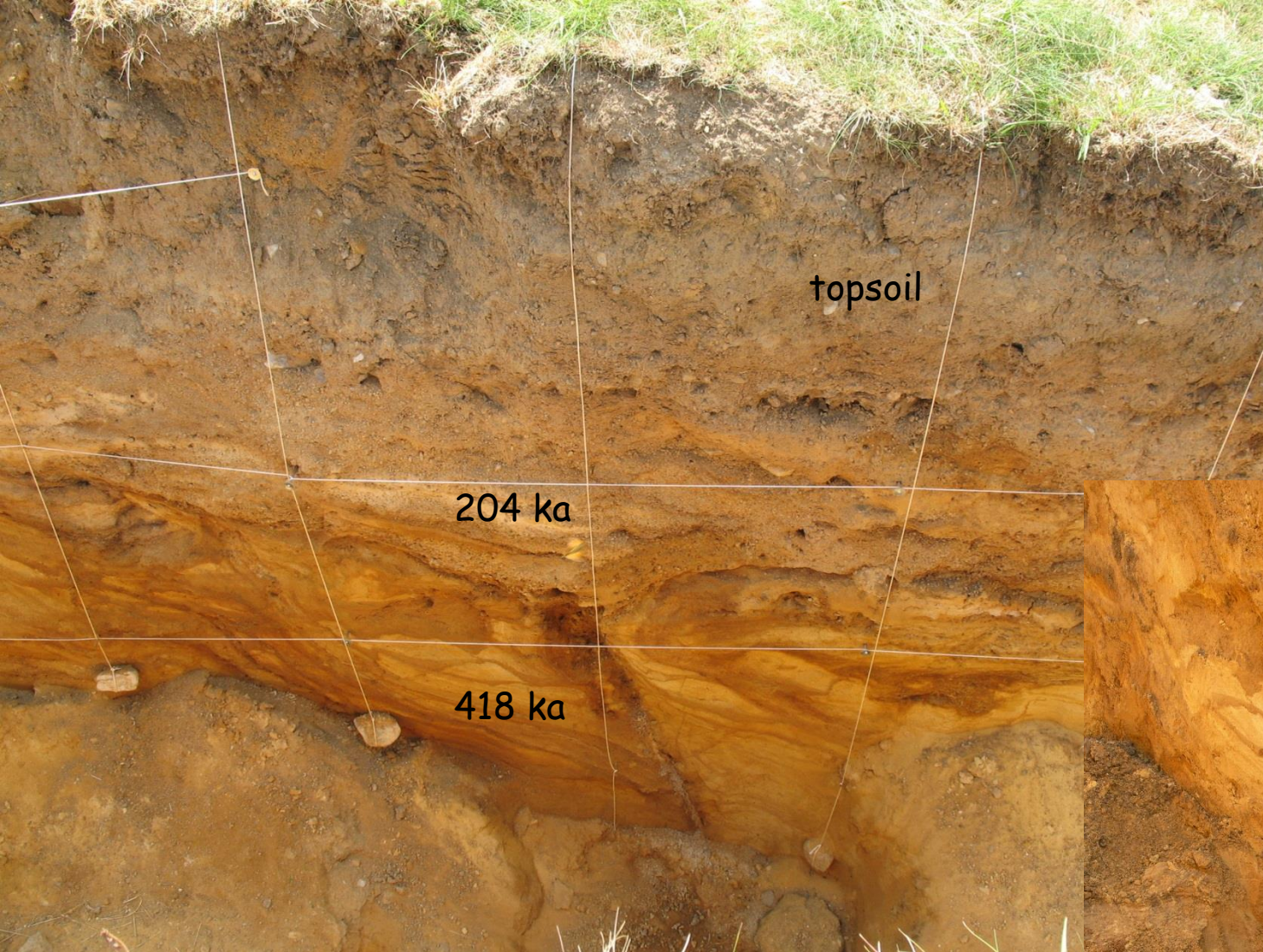


Downhill - younger deposits + younger faults

Up to 45° tilted layers of fine gravels and sands
- cut by sub-vertical fault with 132° strike

OSL dating - optically stimulated
luminiscence



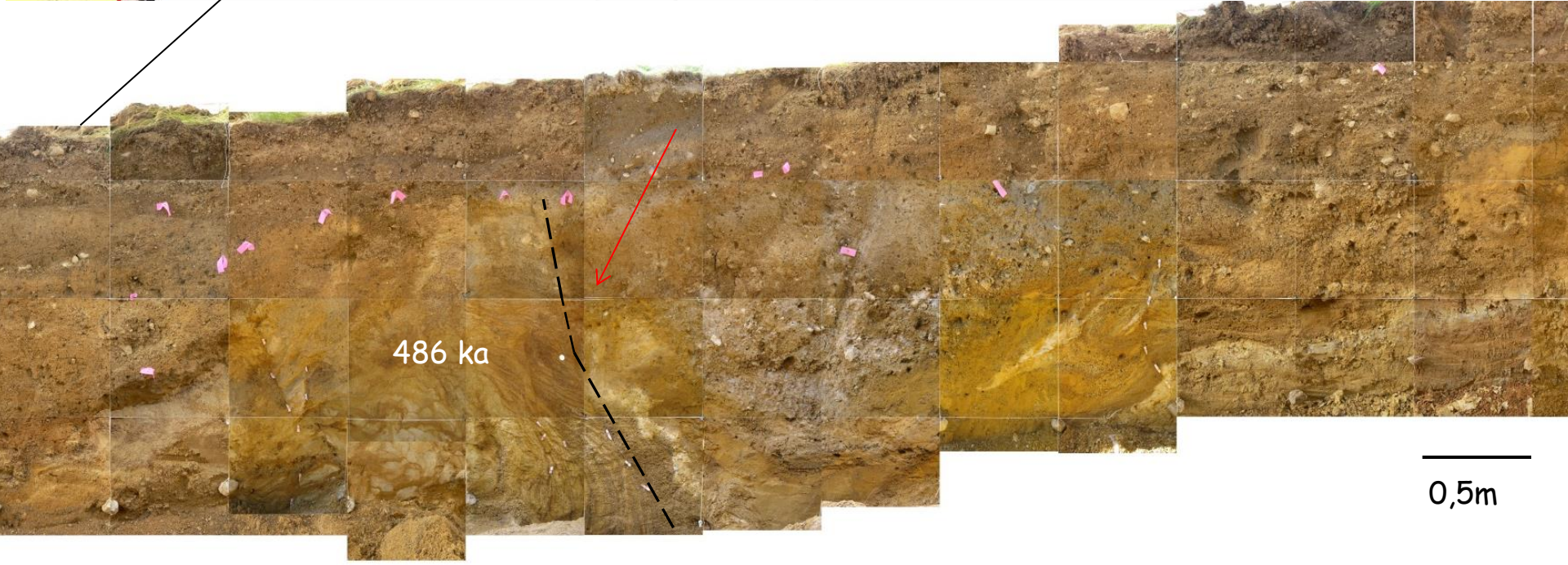
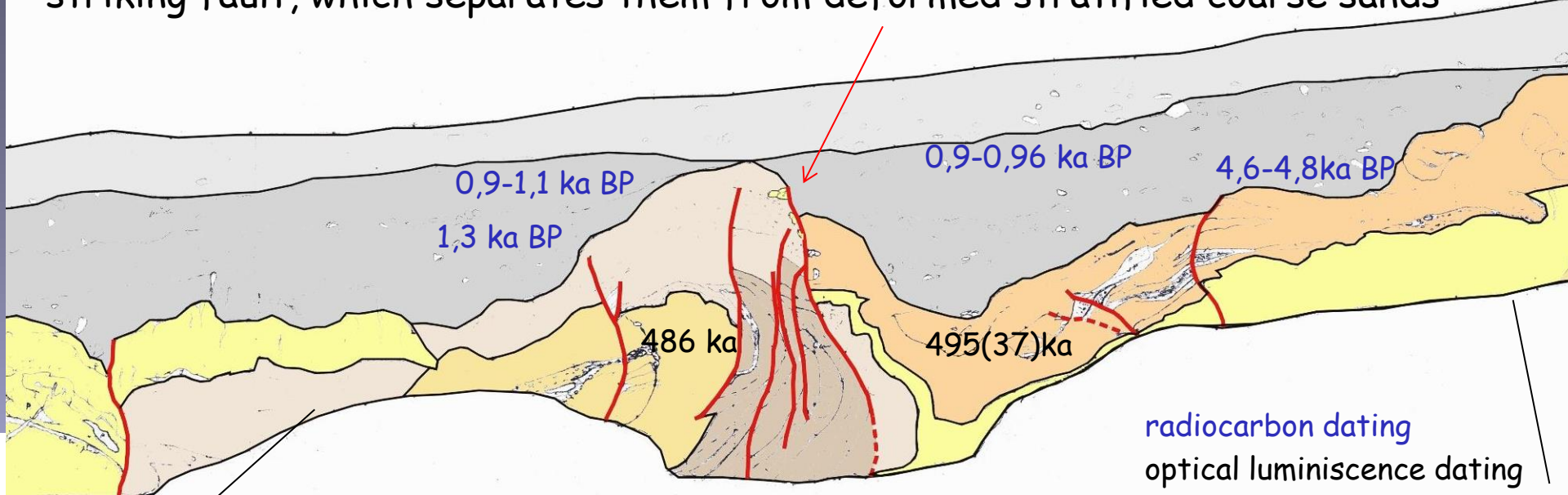


Fault filled with white clay and accompanied by distinctive iron mineralization penetrating along the fault

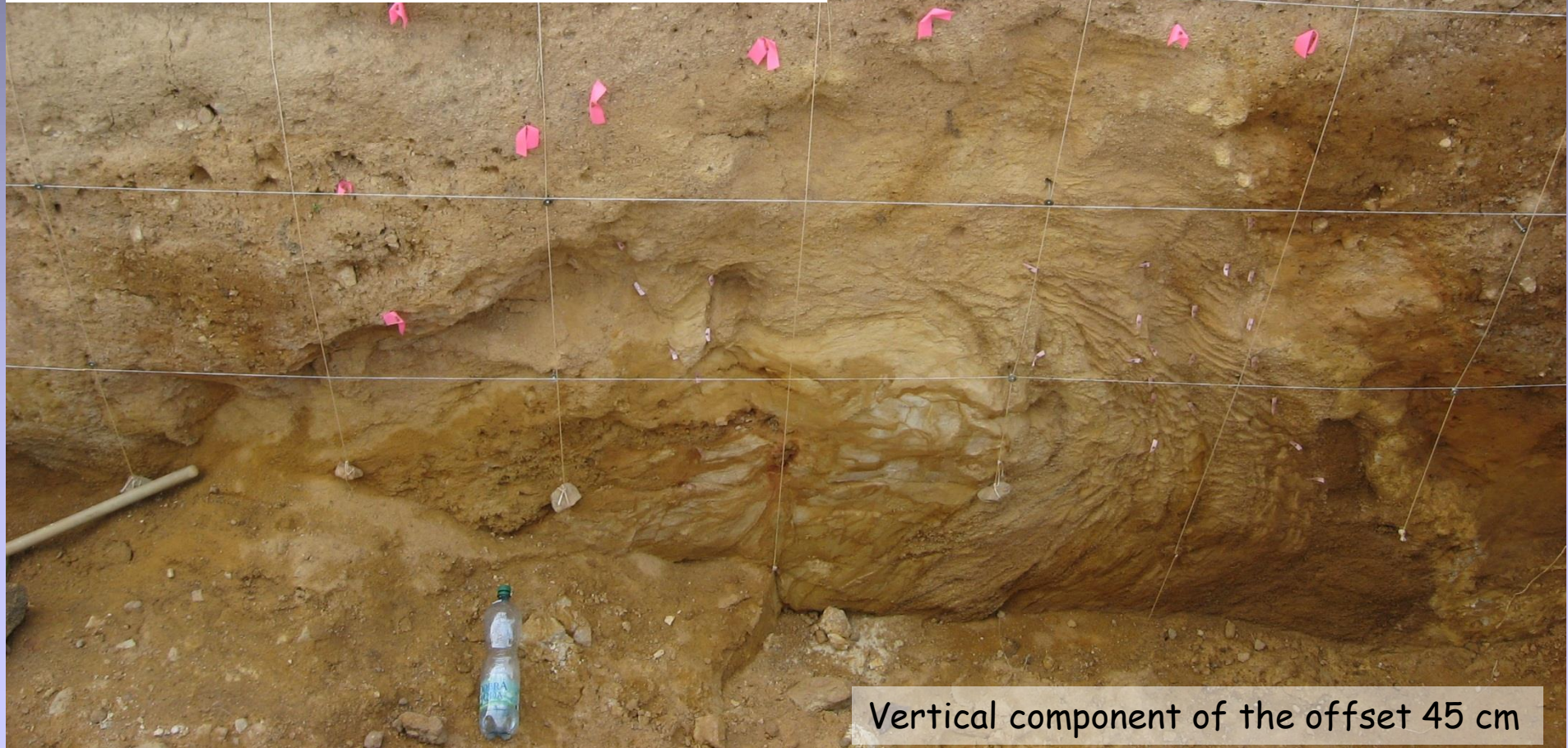
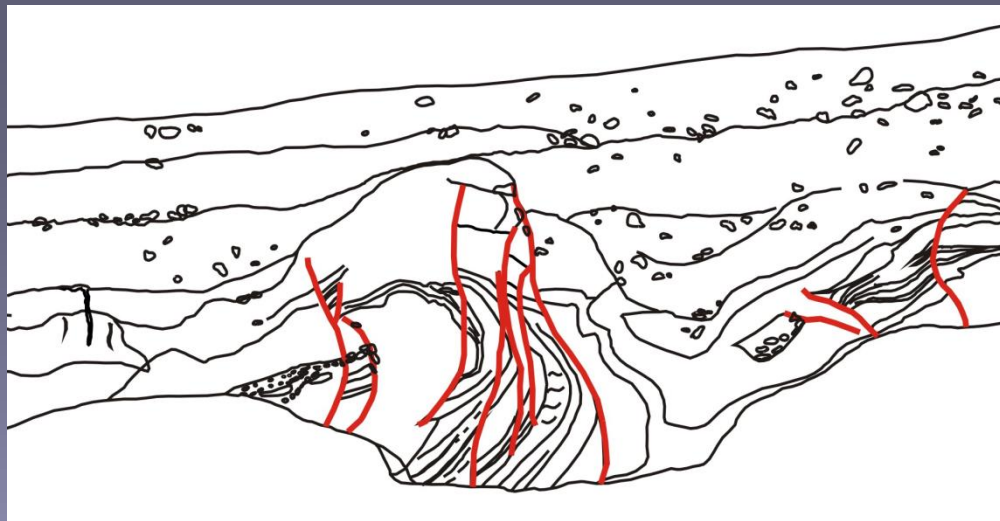
„Lincation” - strike and dip of aligned magnetic minerals
in the clay - 155/20° (AMS)



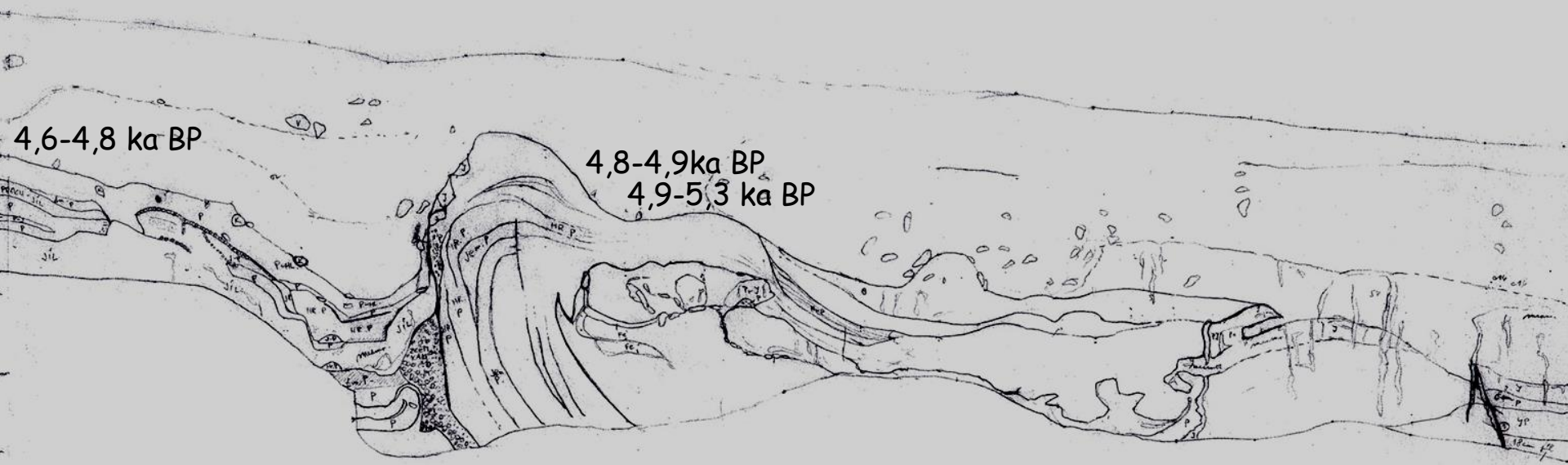
Layers of clayey sand to clay - downwarped and deformed by the youngest 134° striking fault, which separates them from deformed stratified coarse sands



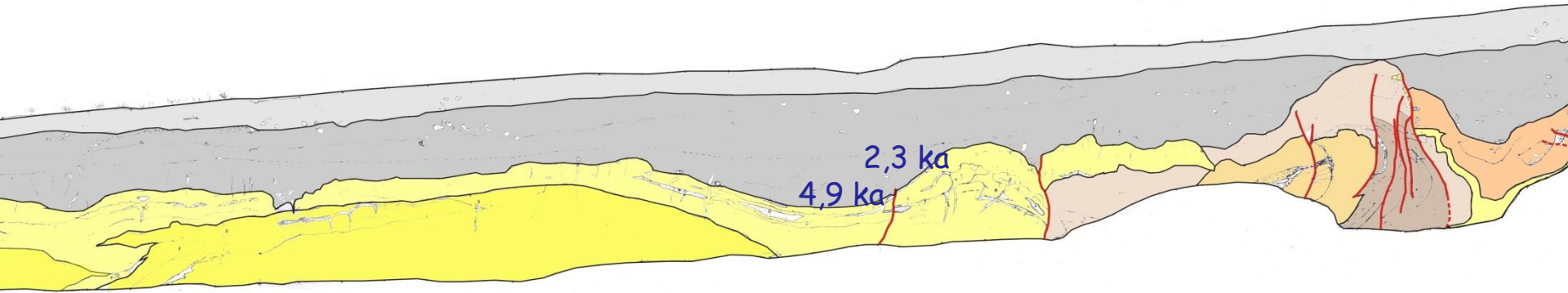




Vertical component of the offset 45 cm

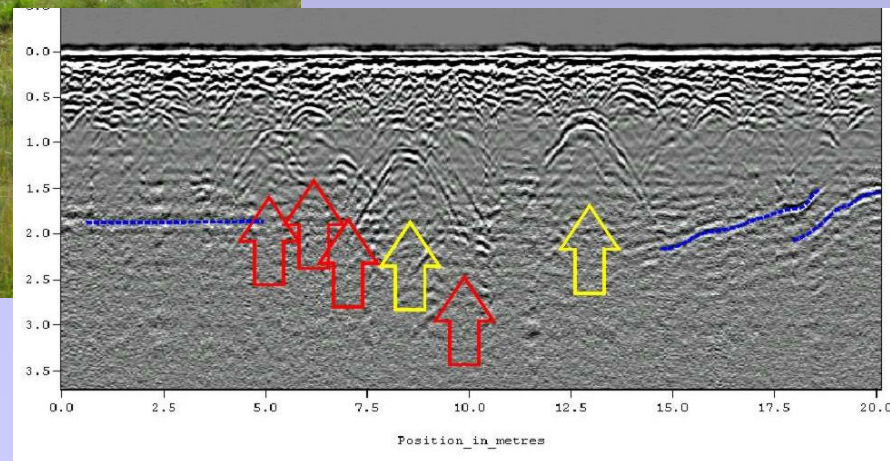


clayey sand to clay is overlain by loamy gravelly colluvium

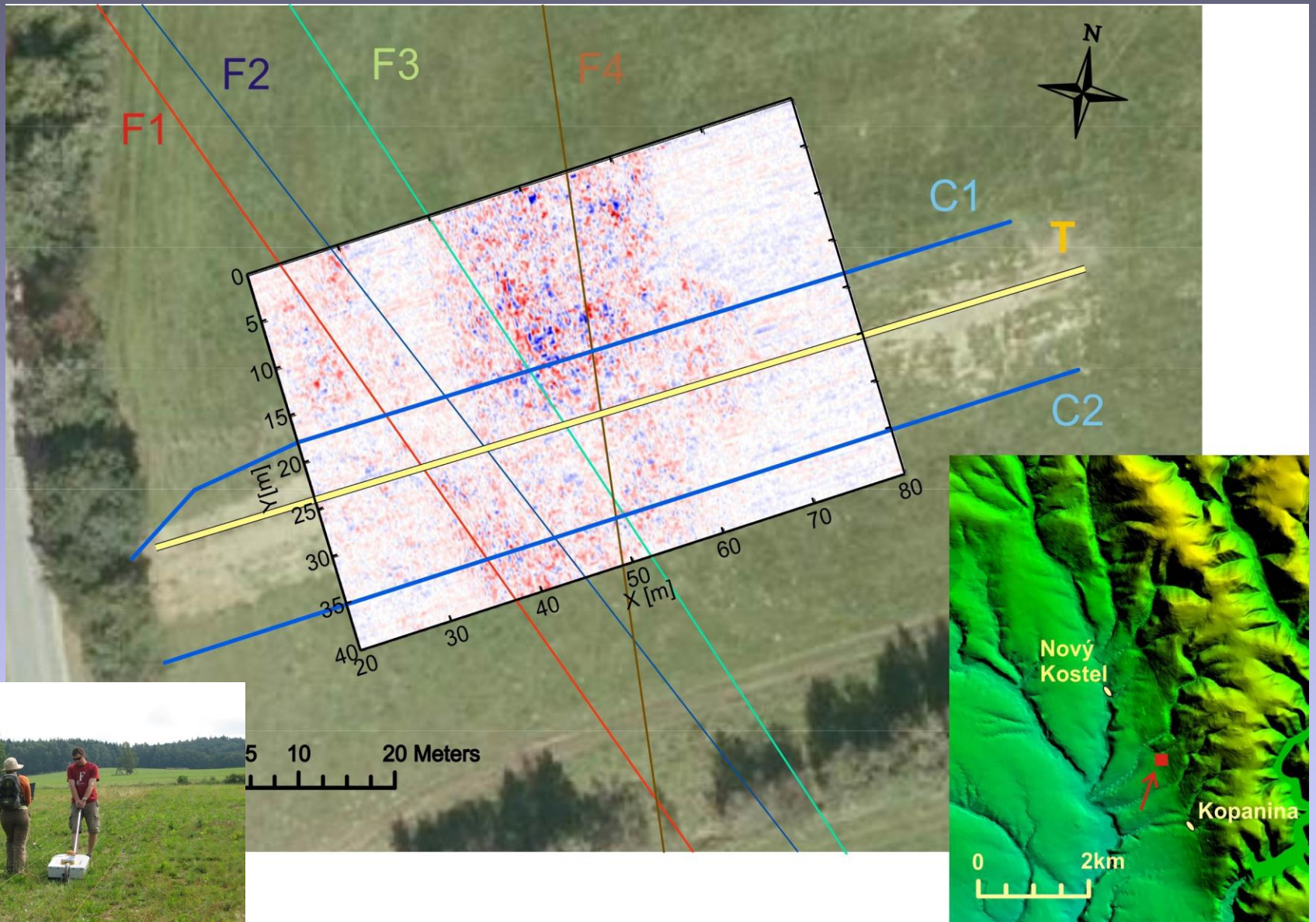


GPR - ground penetration radar - georadar

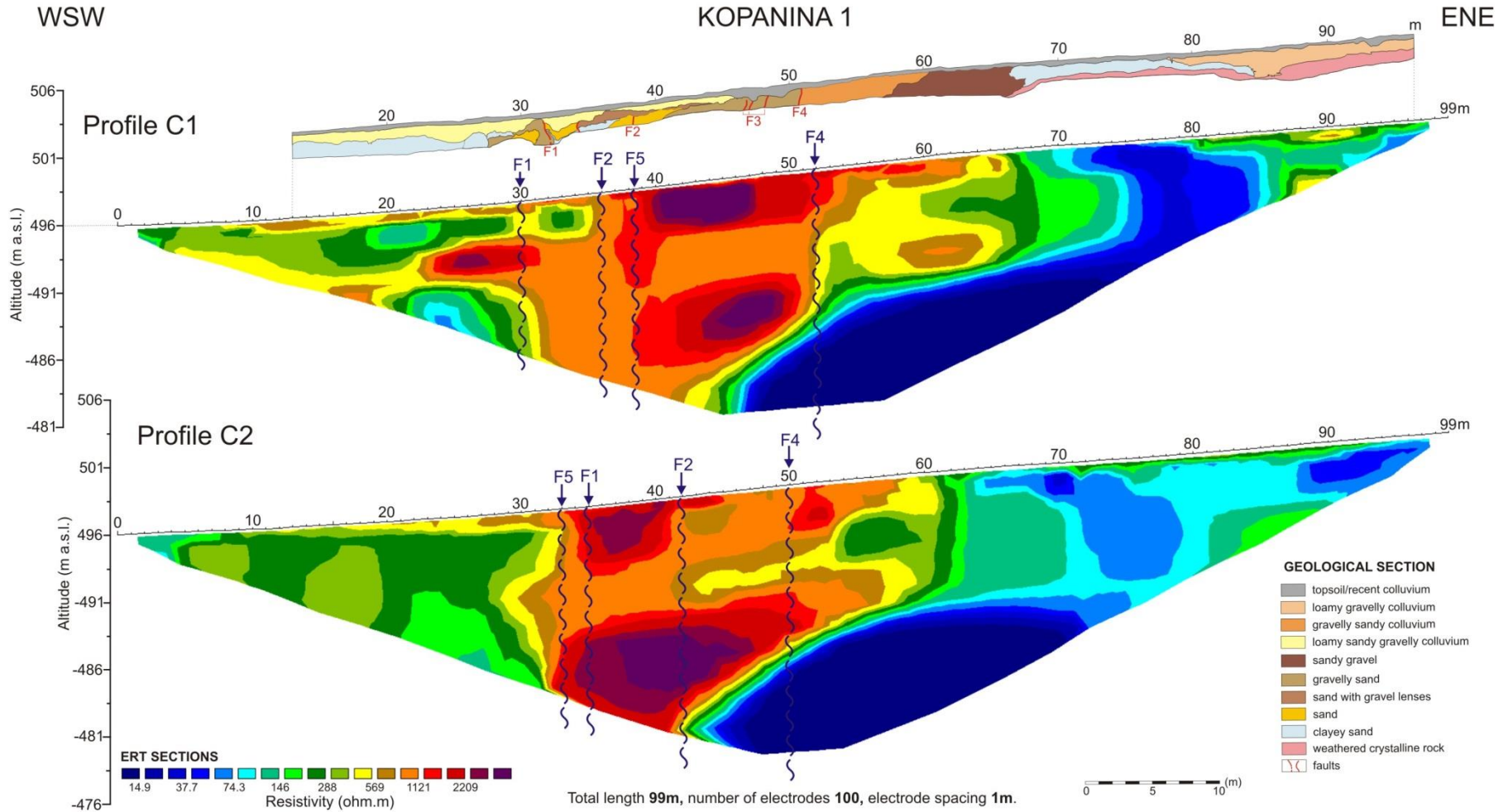
2 antény - vysílač a přijímač - vysílá elektromagnetické záření v rádiovém spektru vln (1mm - tis.km) - odraz od objektů pod povrchem



3D Ground penetrating radar + ERT electrotomography

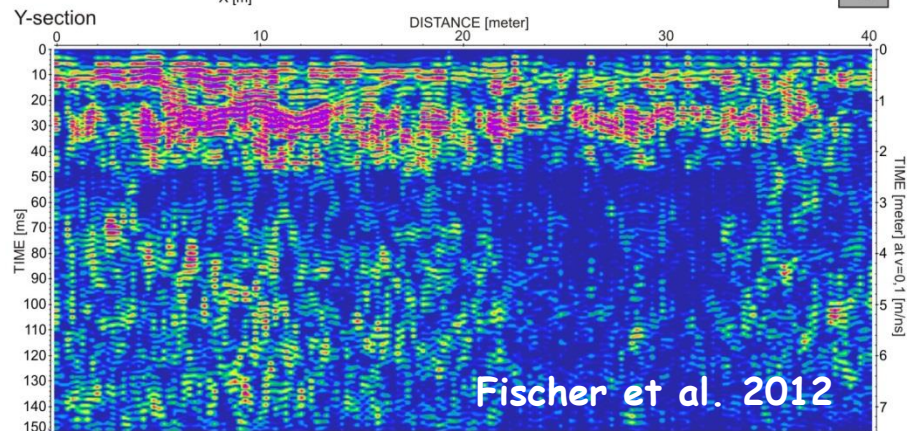
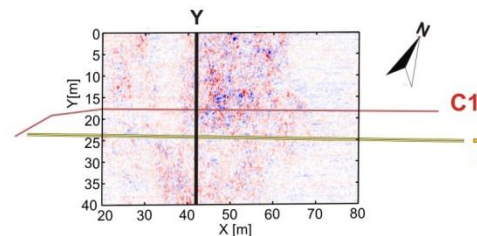
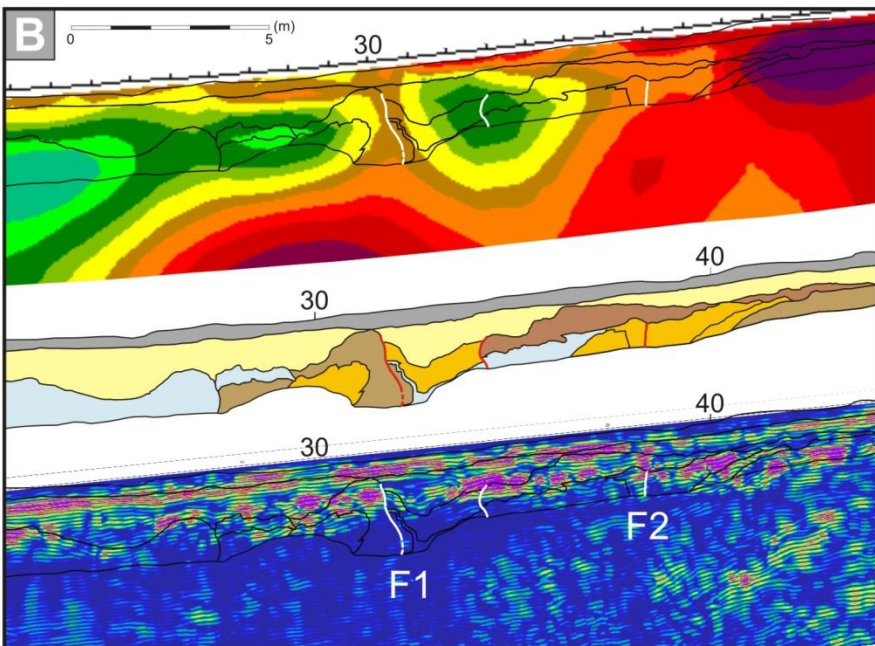
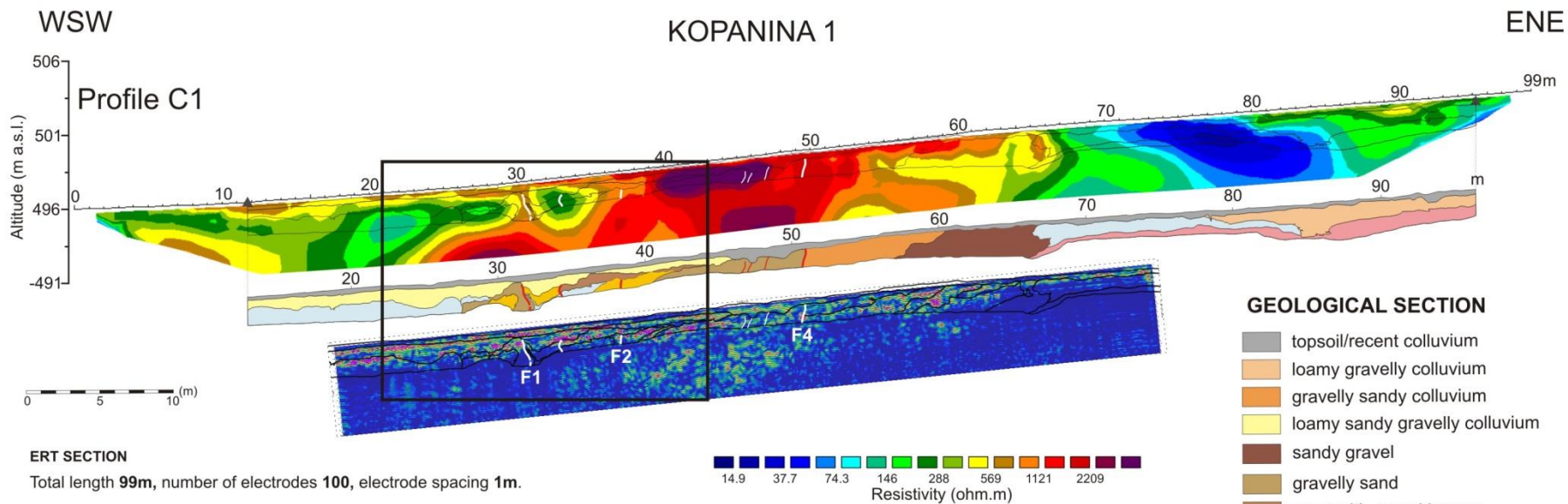


2D-ERT sections & logged fault system

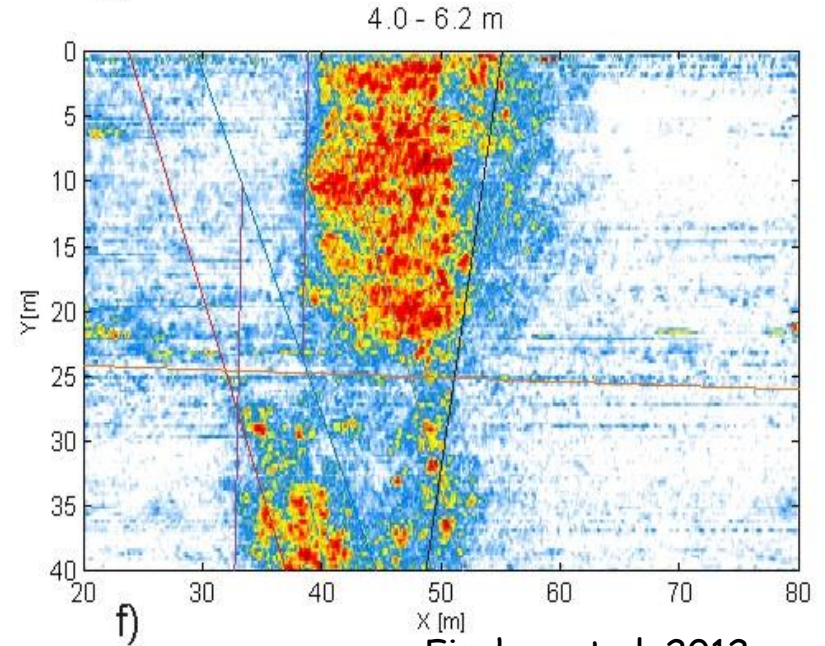
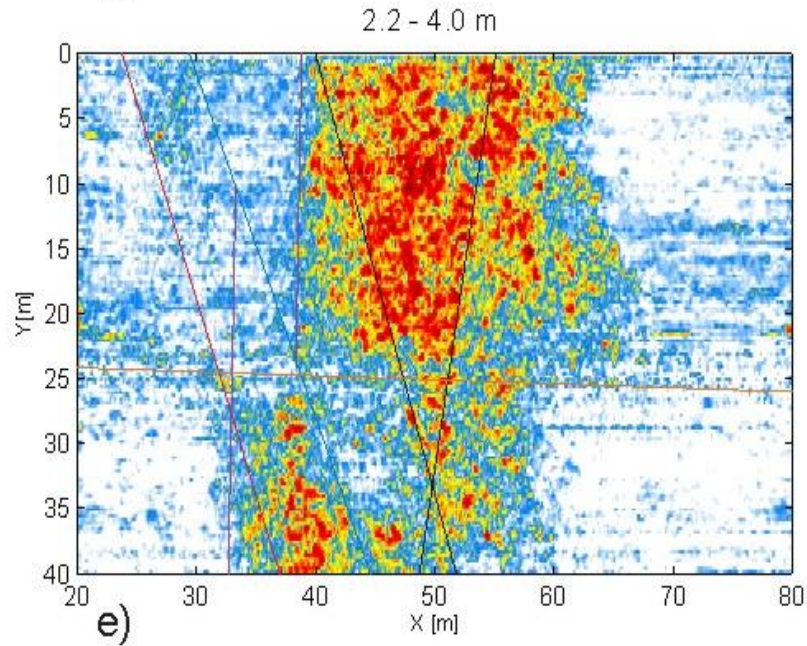
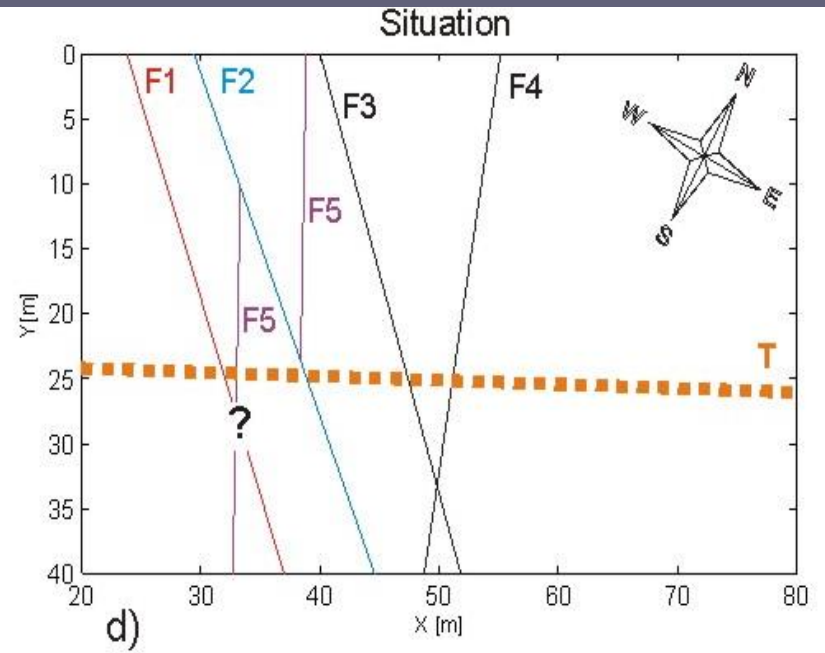
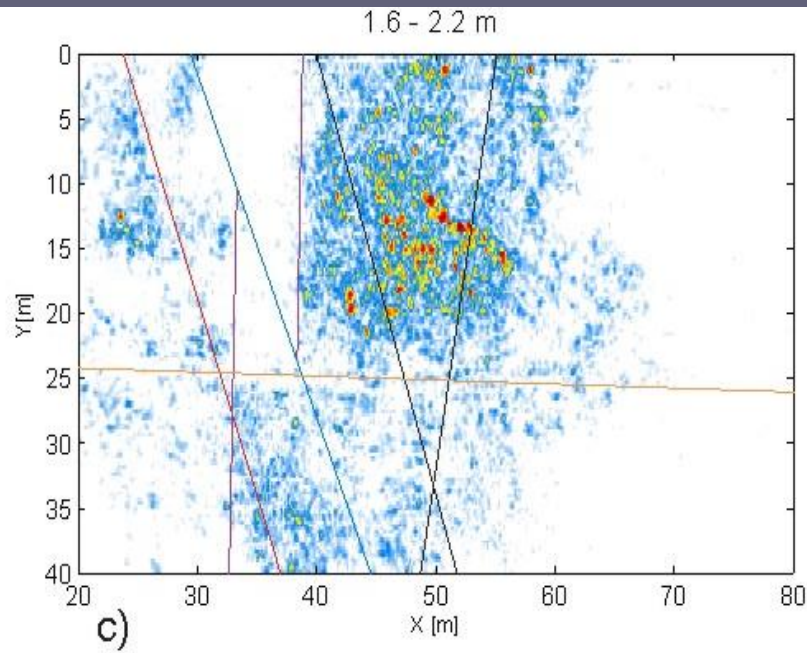


ERT vs GPR vs geology & tectonics

A

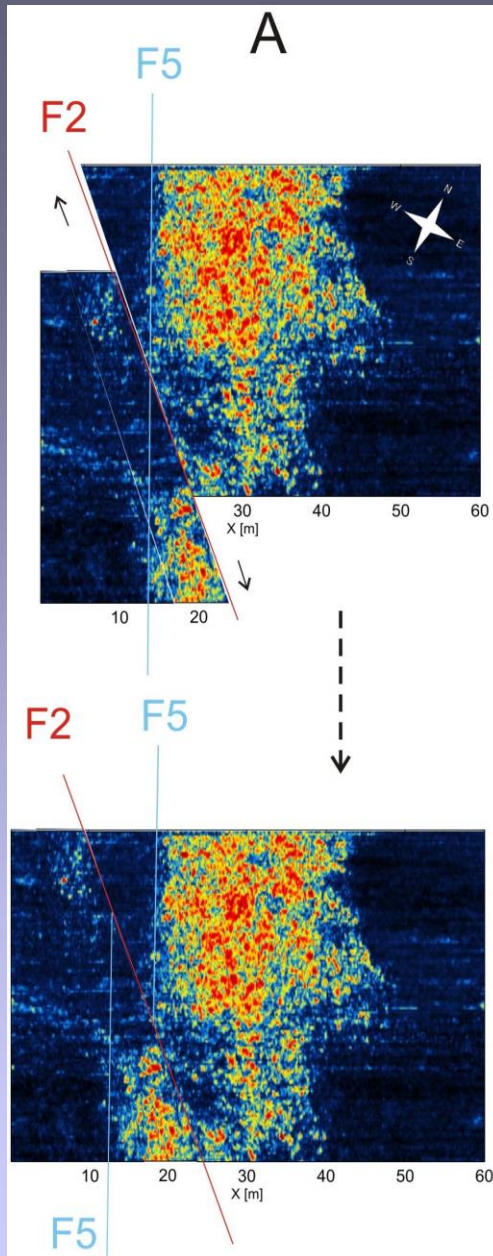


Stacked time slices



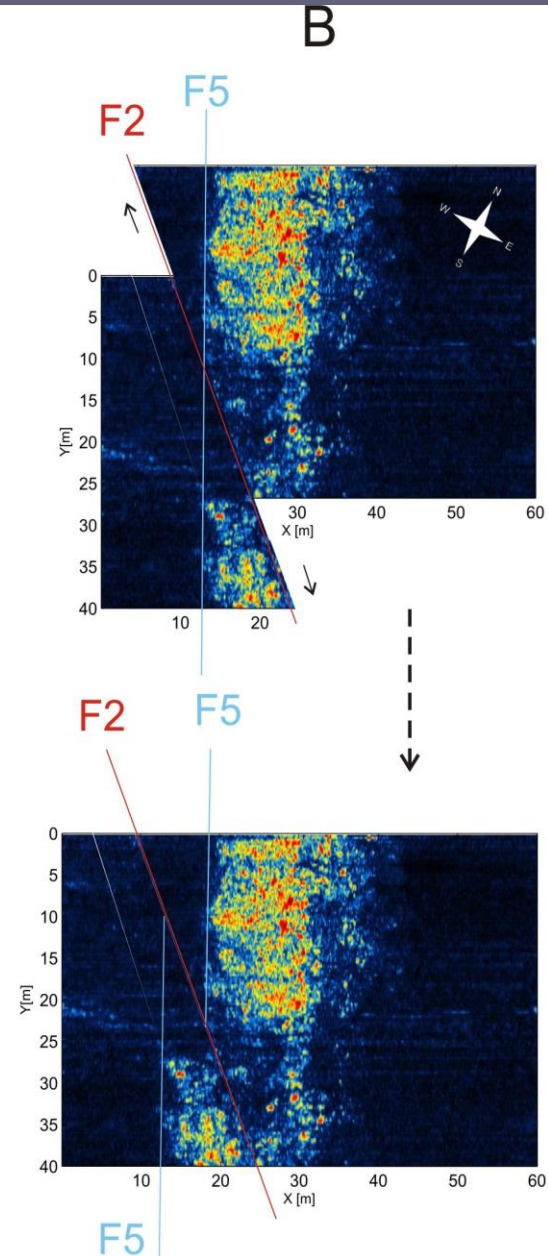
depth of 2,2 - 4 m

depth of 4 - 6,2m



before

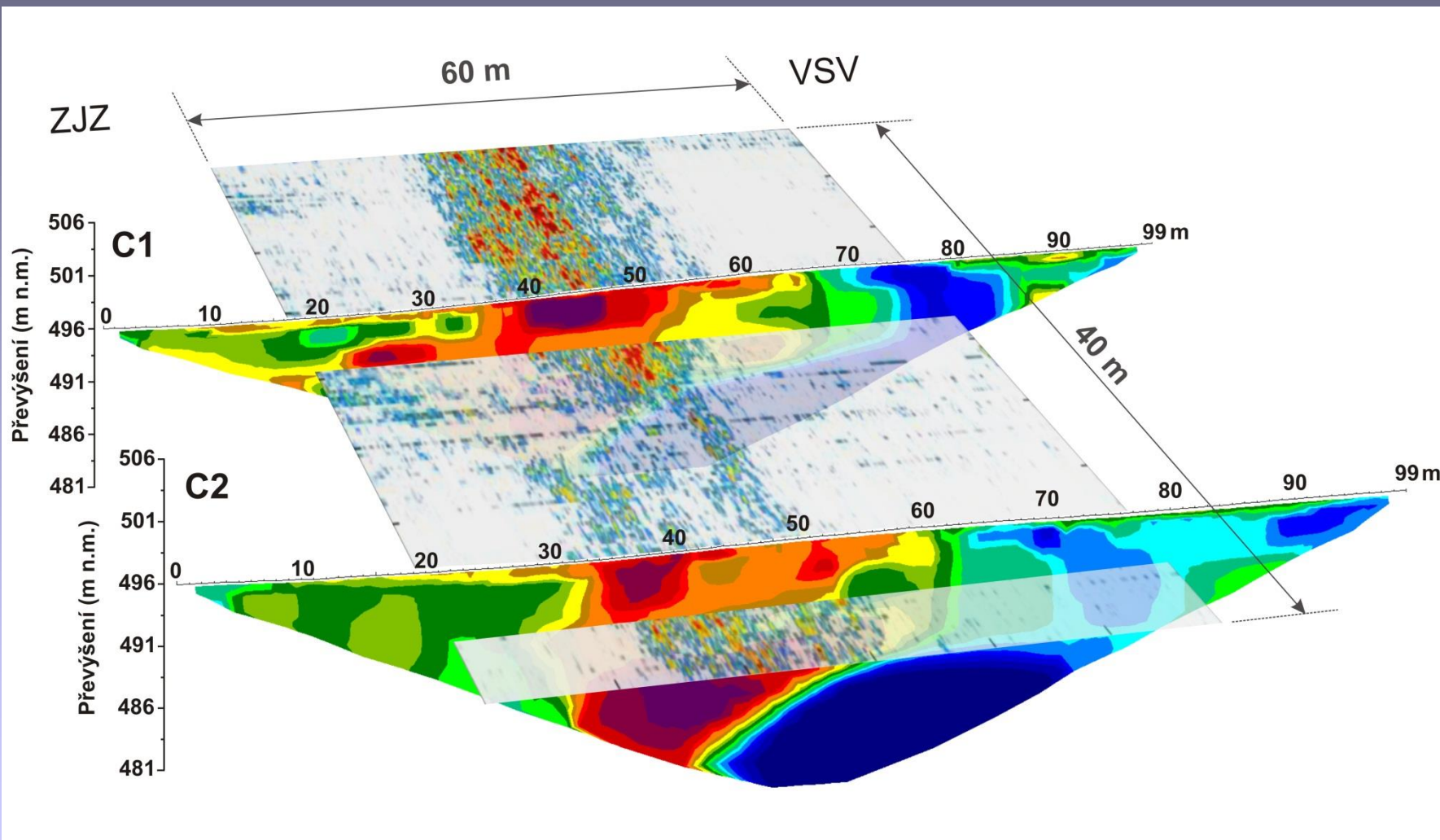
after



Dextral strike-slip on younger faults

Fischer et al. 2012

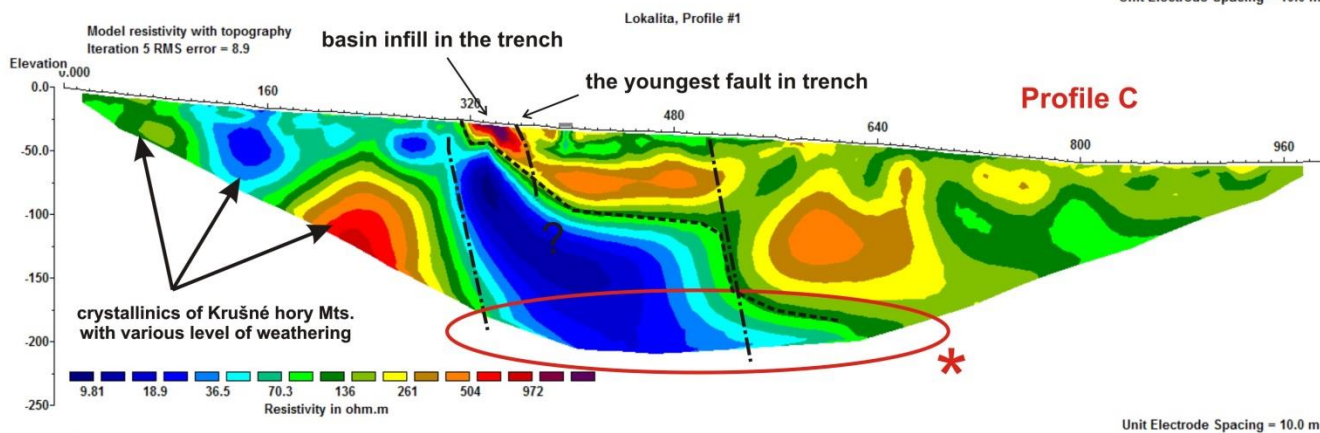
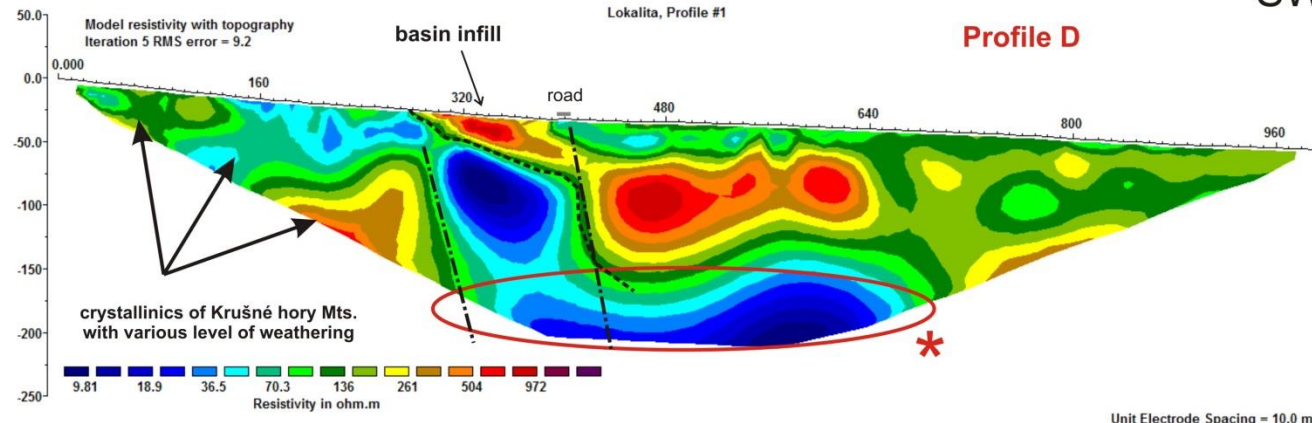
GPR & ERT průzkum – zlomová tektonika (Kopanina, Západní Čechy)



Wenner-Schlumberger, 990/10m

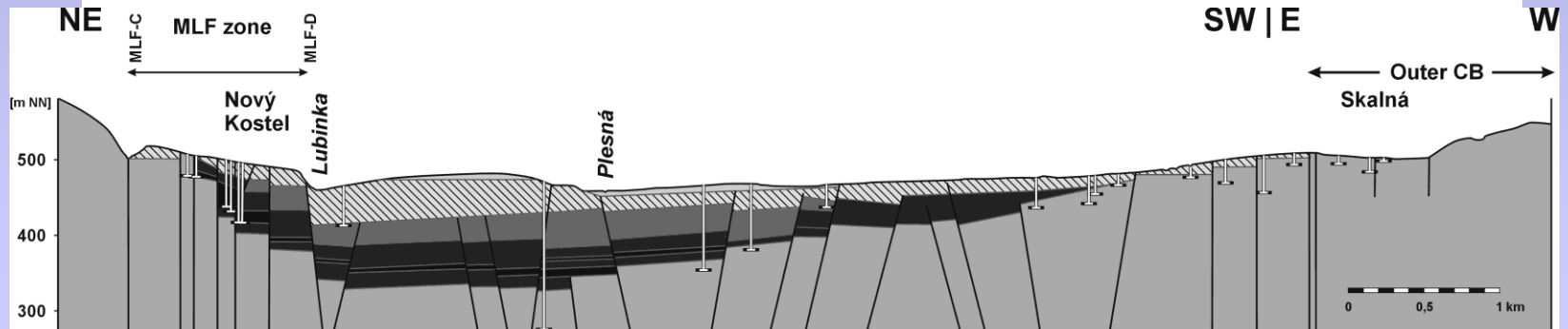
NE

SW



Horizontal scale is 12.98 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 1.00
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 990.0 m.

* be aware of higher RMS errors, some points missing, less density,



Quaternary Vildštejn formation Cypris formation coal seam formation (black = coal seam) Variscan basement

Preliminary conclusions:

Late Pleistocene - Holocene dextral? strike-slip
but no present-day seismicity on Mariánské lázně Fault

Based on empirical relationships (Wells, Coppersmith 1994)

Displacement vs Magnitude

Fault Length vs Magnitude (length of youngest linear morphological features)

= prehistoric earthquakes responsible for the described deformations would correspond to $M_w = 6.3$

The youngest tectonic movements (postdating 4.600 BP) with surface rupturing detected in central Europe so far!

Further possible work:

- assess the horizontal offsets to specify the maximum potential magnitude for MLF and slip-rate

3D trenching - fault-parallel trenching and detailed 3D GPR on other segments



Thank you for your attention....