

Paleoseismologie, její metody a příklady využití



Paleoseismologie

Co?

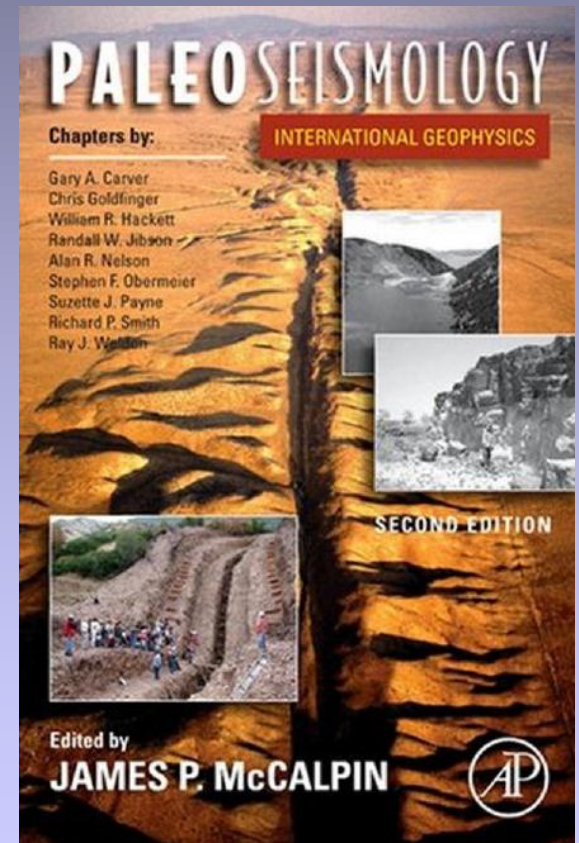
- zkoumá chování seismogenních zlomů v minulosti

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

Seismologové - pracují s daty naměřenými instrumentálně během zemětřesení

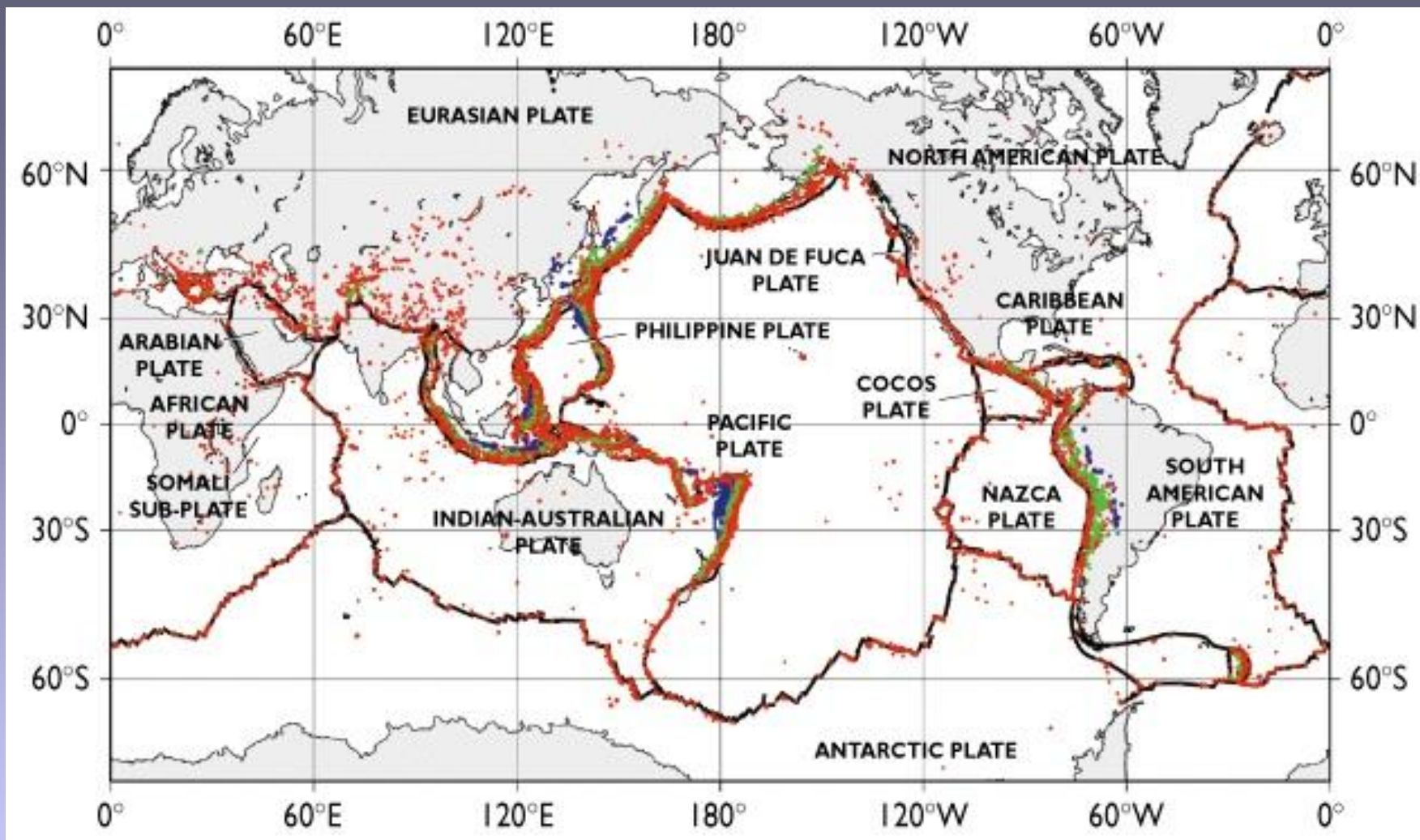
X

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



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

Proč?



Současná seismická - 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)

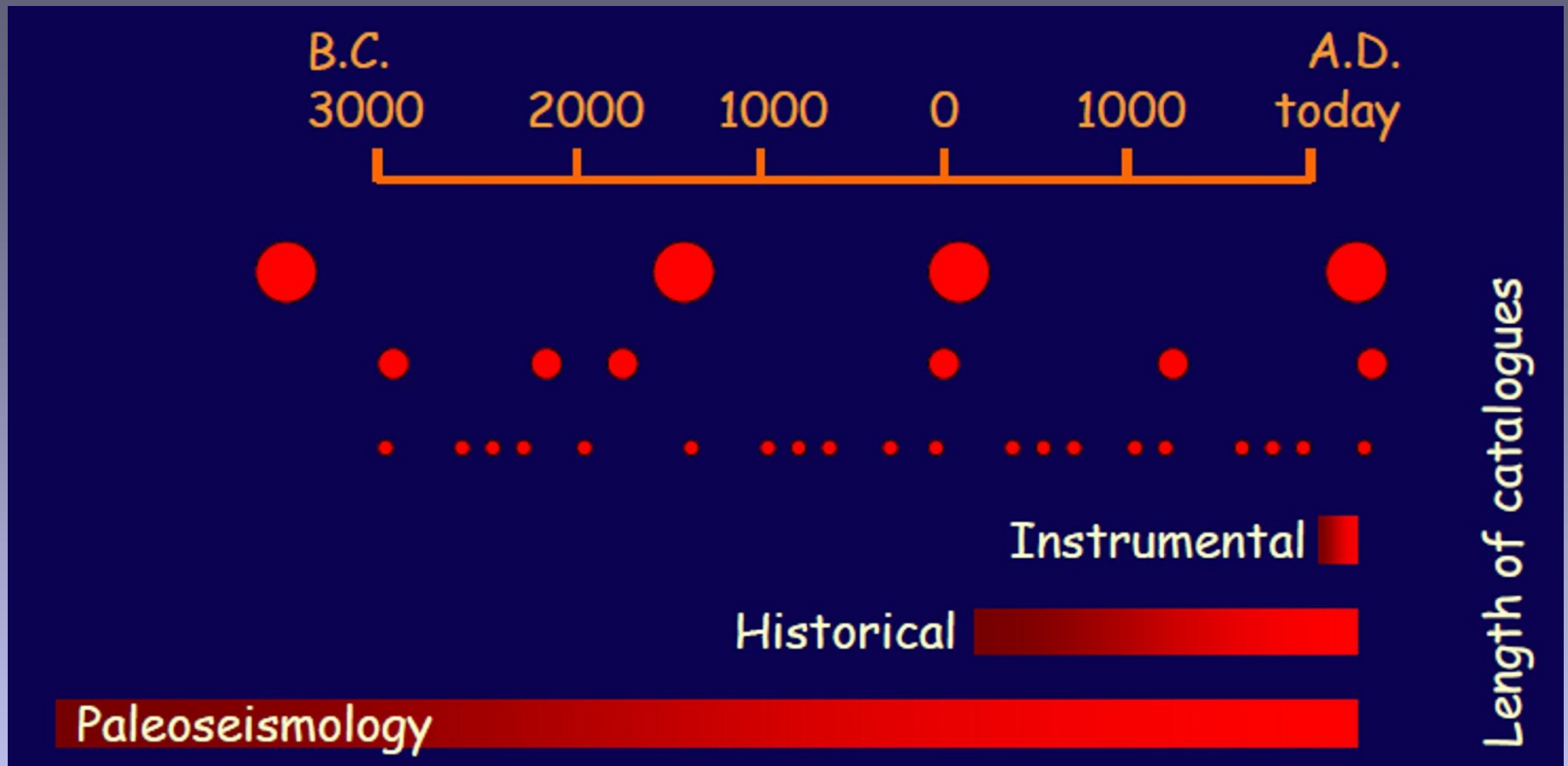
X aktivní zlomy, projevující se v geologii a morfologii, bez historického záznamu velkých zemětřesení

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

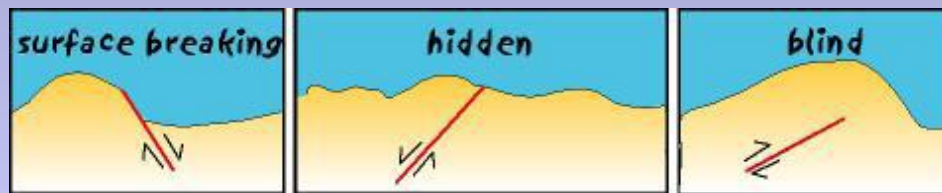
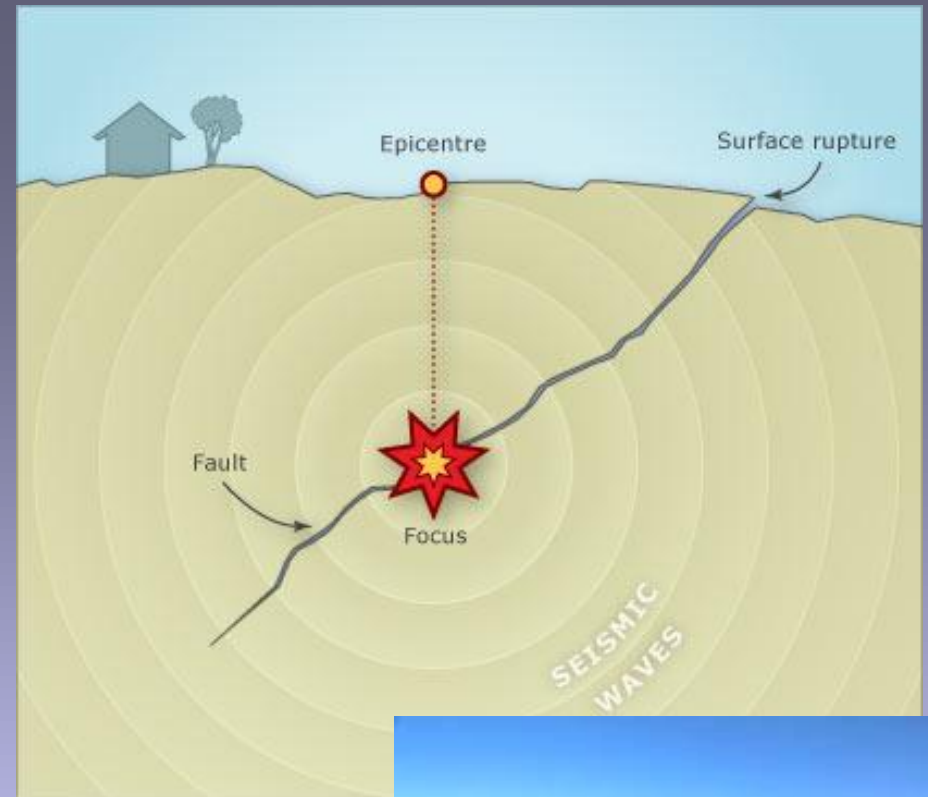
- ❖ přecenění pravděpodobnosti budoucího zemětřesení na zlomu, na kterém došlo k velkému zemětřesení v historické době, ale má dlouhý recurrence interval (uvolněná energie)

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

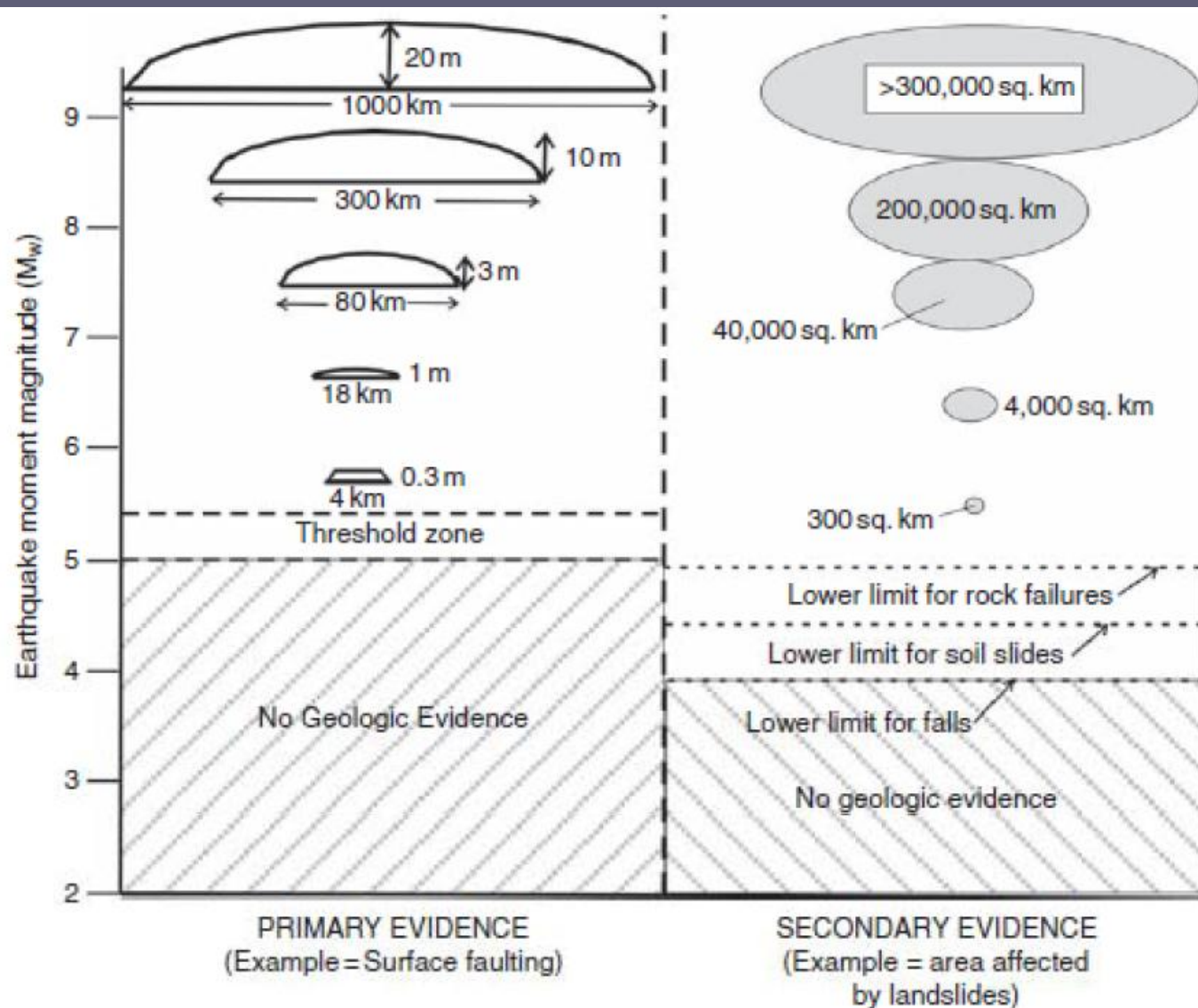


paleoseismologie rozšiřuje záznam zemětřesení směrem do minulosti, katalogy historických zemětřesení často příliš krátké ve srovnání s průměrným recurrence time

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

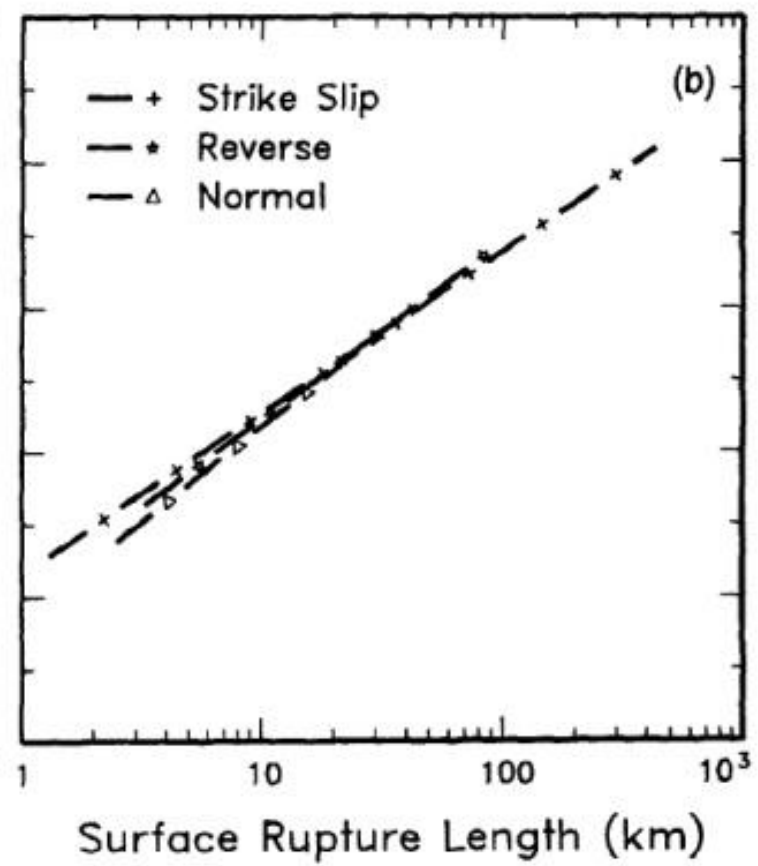
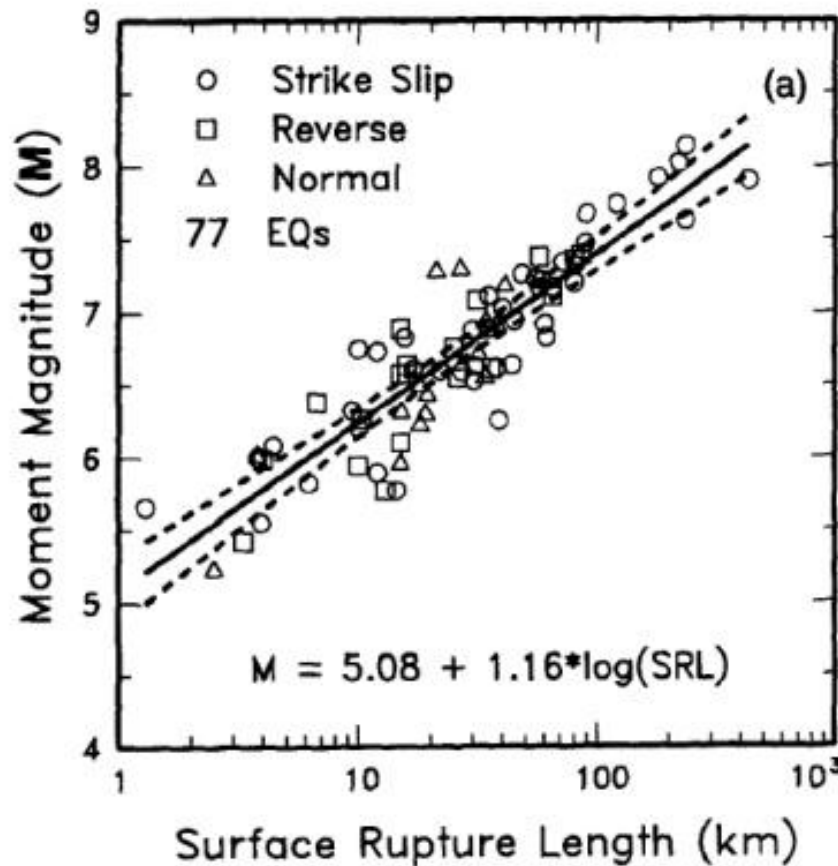


Menší zemětřesení - geologický projev zřídka vytvoří či zachová
 Typ zlomů - poklesy $M \geq 6,3$; horizontální posuny v j. Kalifornii - $M = 6,25-6,5$,
 Hloubka seismogenní kůry - hlubší potřebuje větší M ,
 Loma Prieta 1989 $M=6,9$, 2m slip v hloubce 18-3km, žádná povrchová ruptura
 Gujarat 2001 $M=7.7$,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

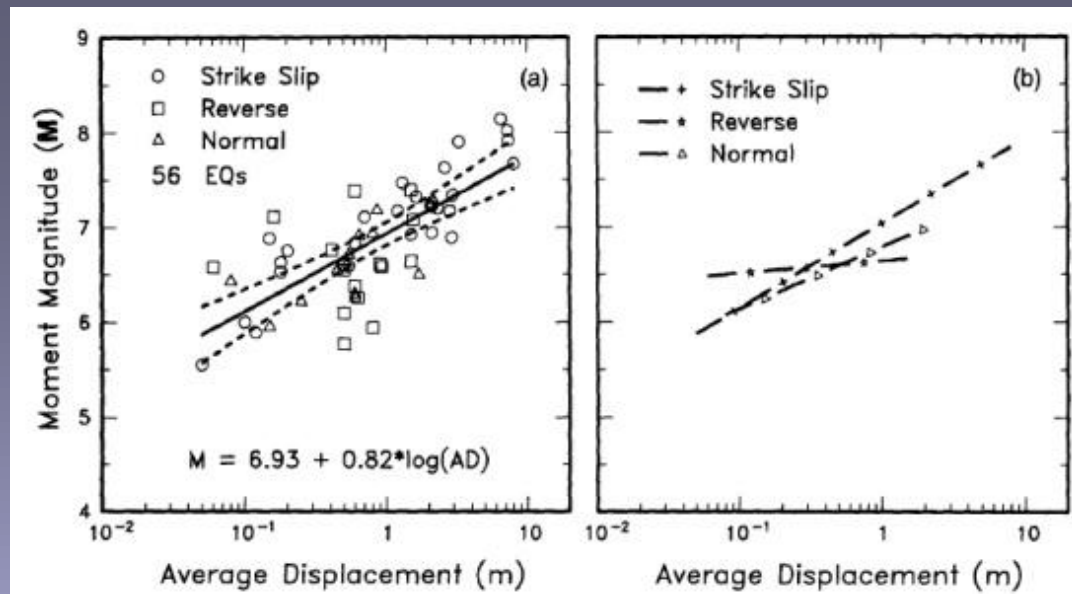
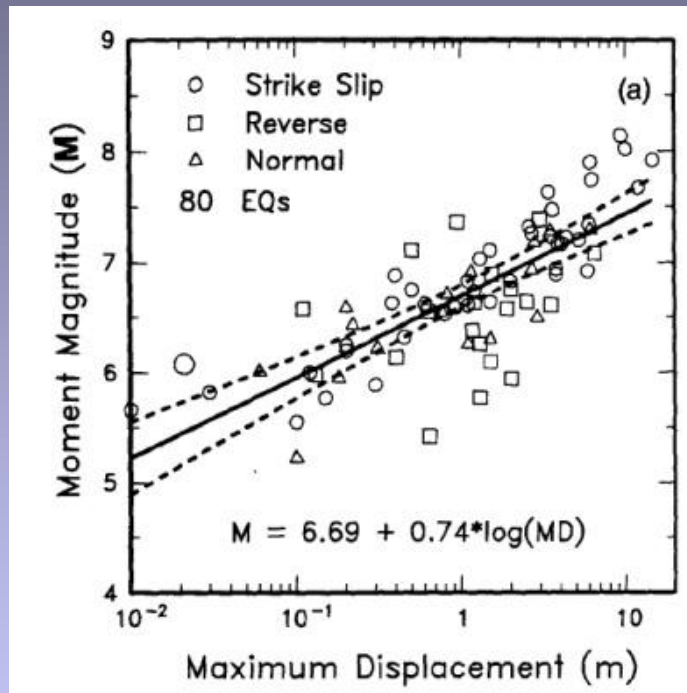


Empirické vztahy odvozeny z historických zemětřesení, menší M_w
 - prehistorická zemětřesení - lze studovat jen s větším M_w

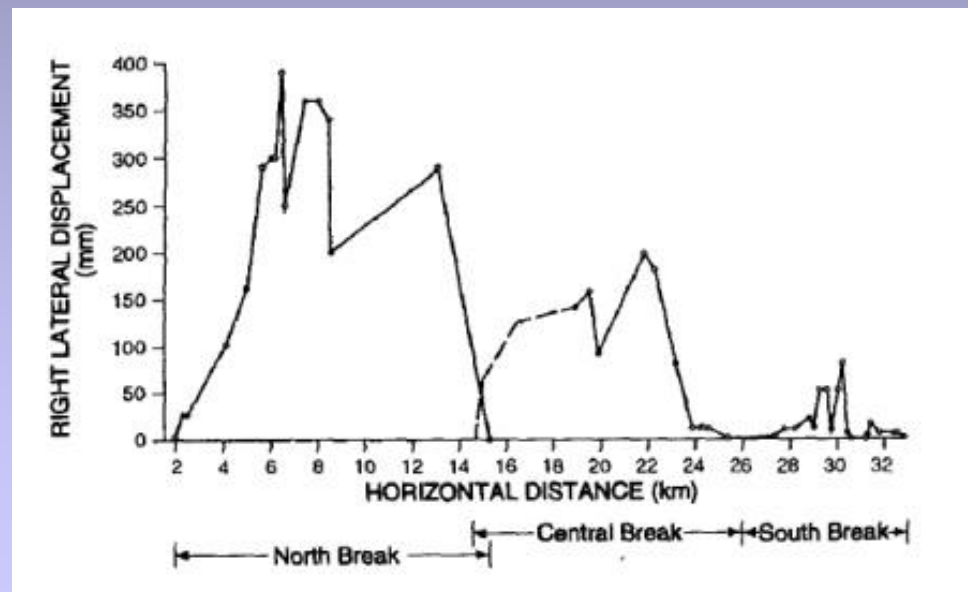
Empirické vztahy: délka zlomu, velikost posunu, velikost magnituda, např. zlom o délce 80km vygeneruje zemětřesení $M_w=7,5$ a posun okolo 3m



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

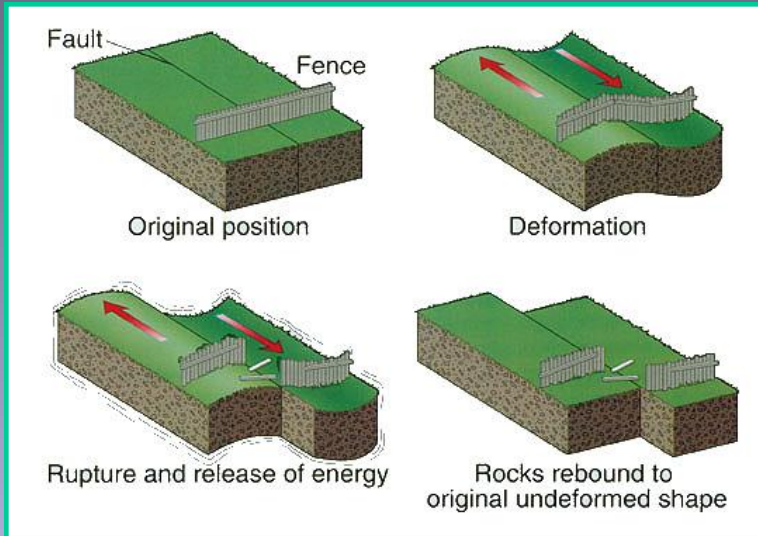


Průměr mnohočetných měření posunů podél zlomu

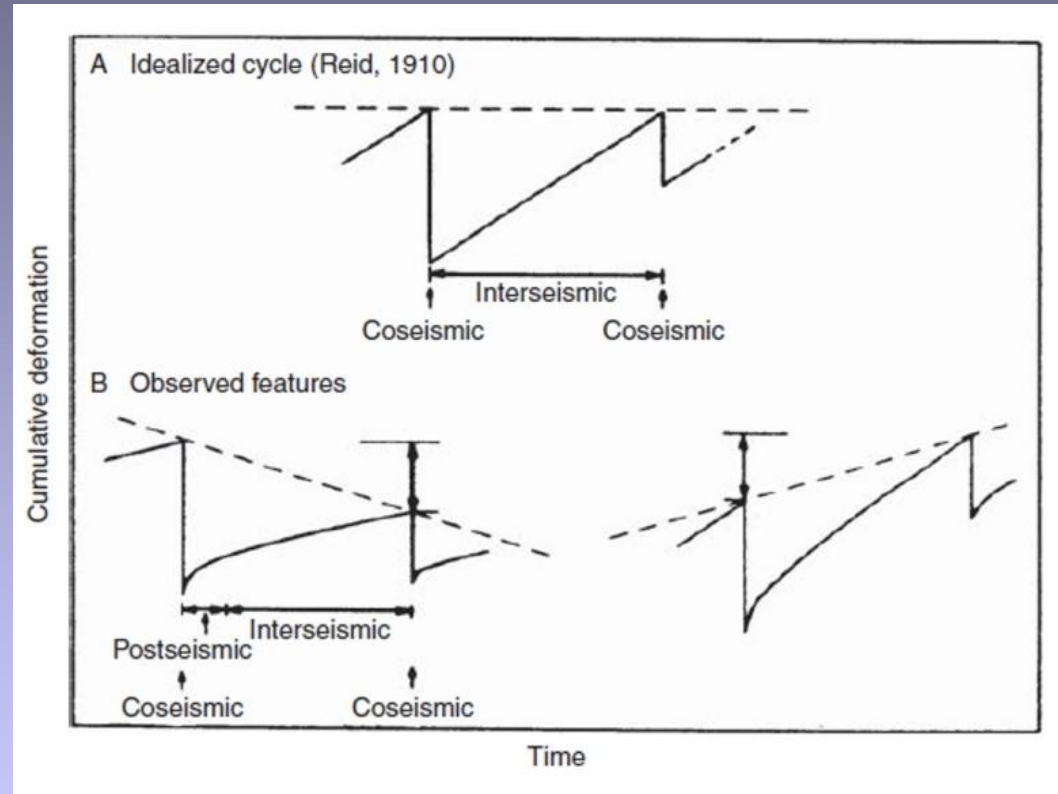


9. 4. 1968, Borego Mts, CA

Seismický cyklus – elastický model



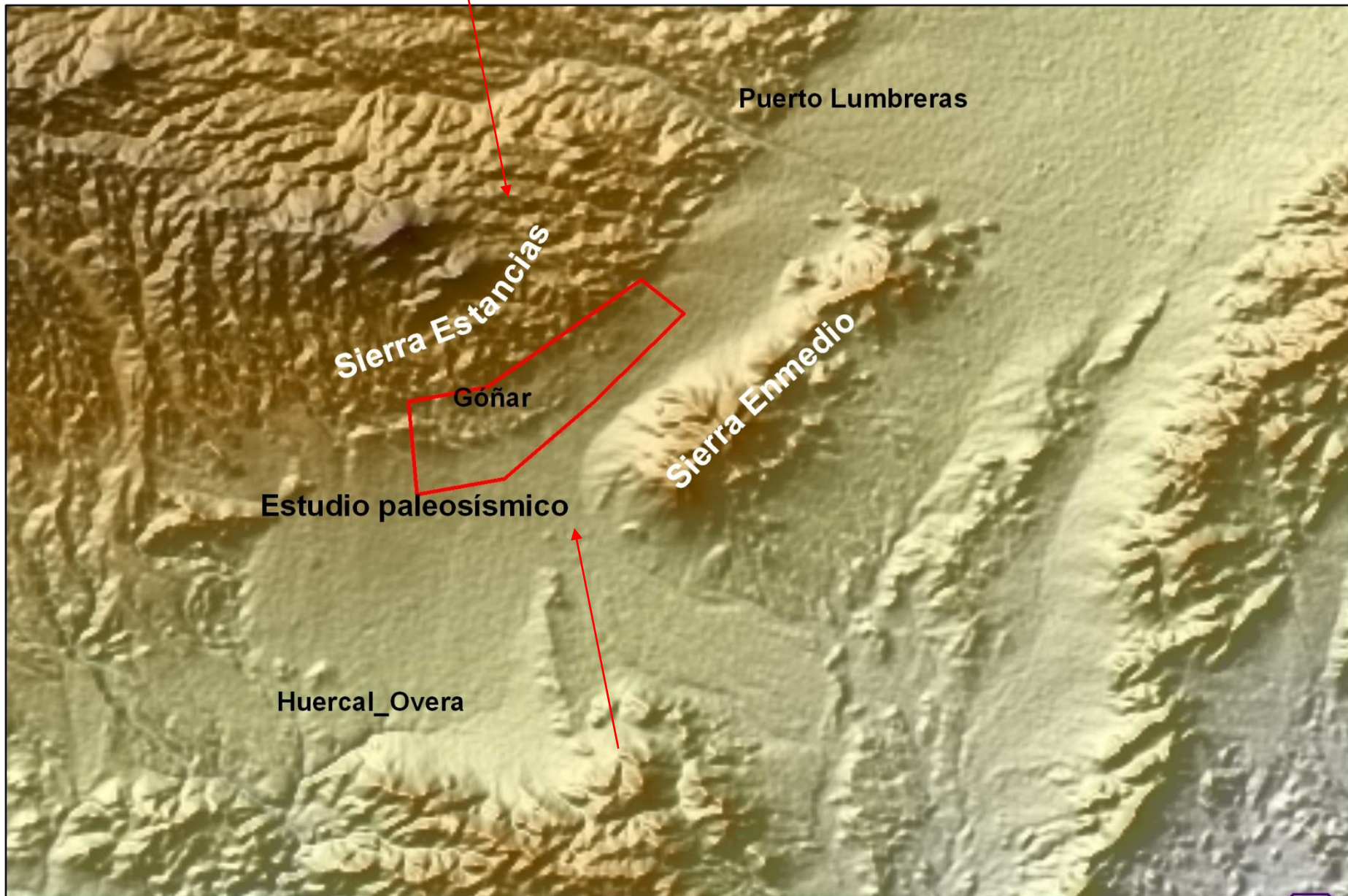
Idealizovaný cyklus -
charakteristické zemětřesení



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



Alhama de Murcia fault

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



© 2009 AND



Analýza leteckých snímků, terénní mapování zlomů, tvarů porušených pohybech

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

Metody rekonstrukce chronologie zemětřesení

přímé / nepřímé doklady

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

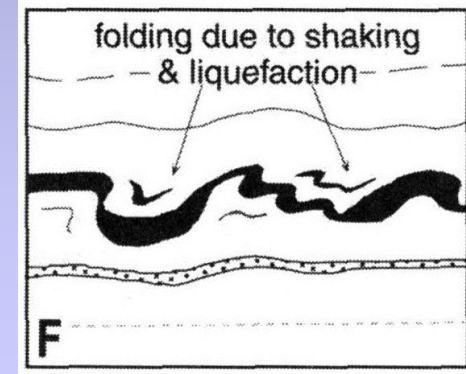
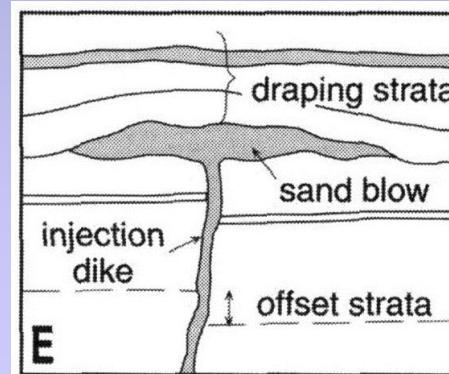
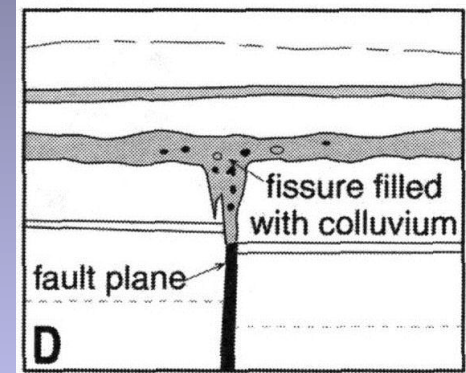
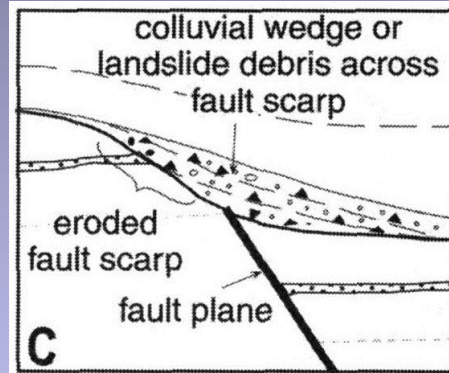
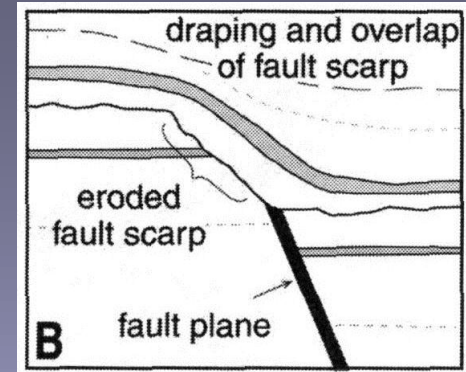
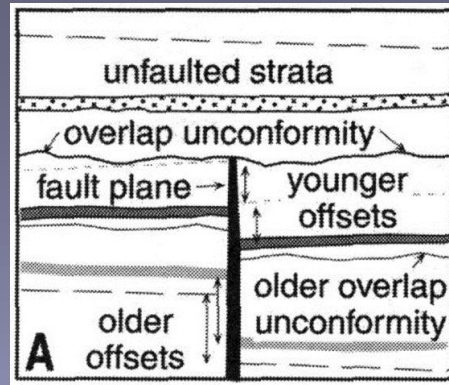
❖ datovatelný materiál - určení chronologie pohybů



Krupnik fault , Bulgary, 1904 M=7,8

Doklady zemětřesení v rýhách

- 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??

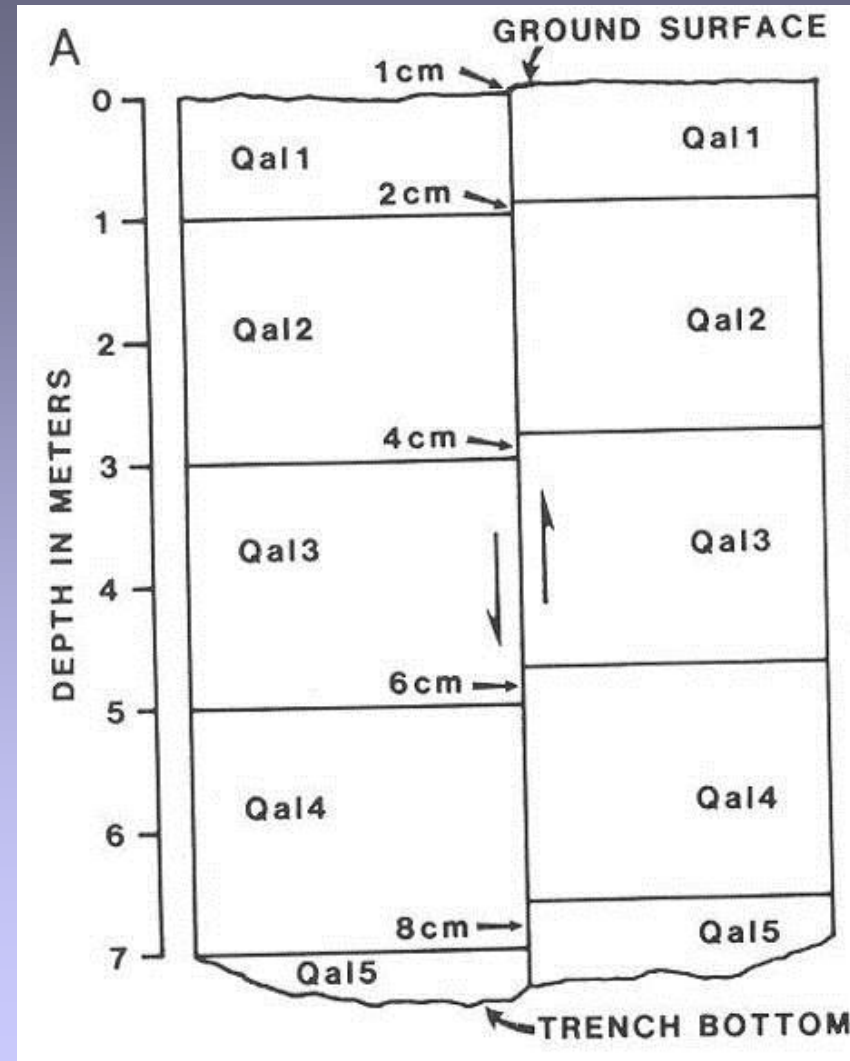
Retrodeformace

4 události – vertikální posun v průměru 2cm

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

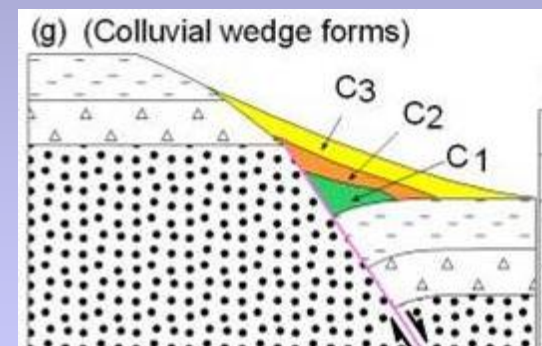
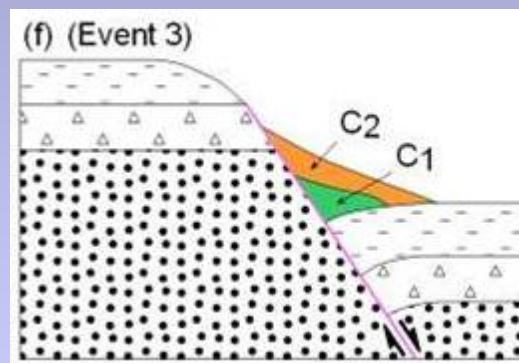
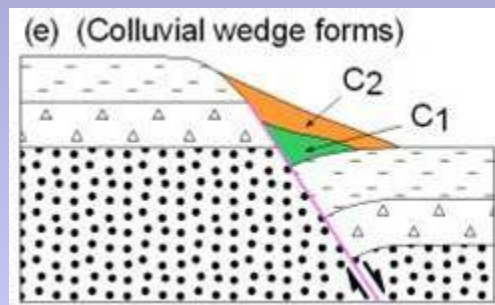
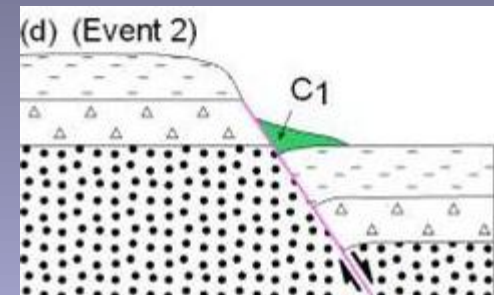
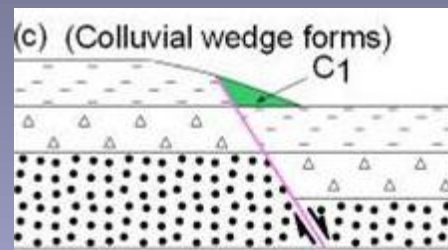
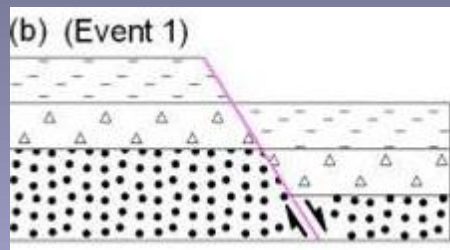
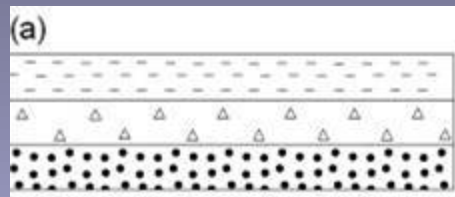
Nejmladší (Qal1) má jen jeden event → 2 cm na bázi, ale 1 cm na povrchu !

Povrchová eroze



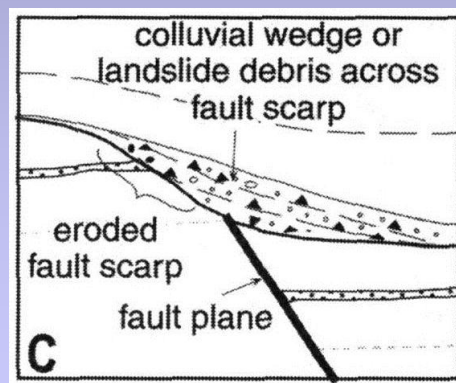
Poklesy

Coluvial wedge

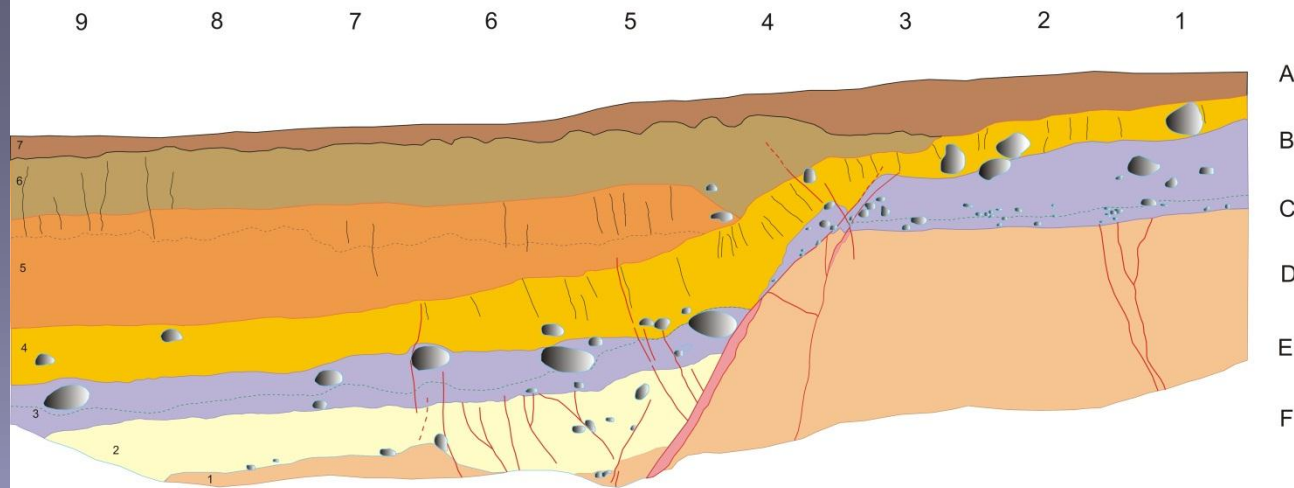




Gravitační
nestabilita,
materiál tvořící
wedge pochází z
fault scarp



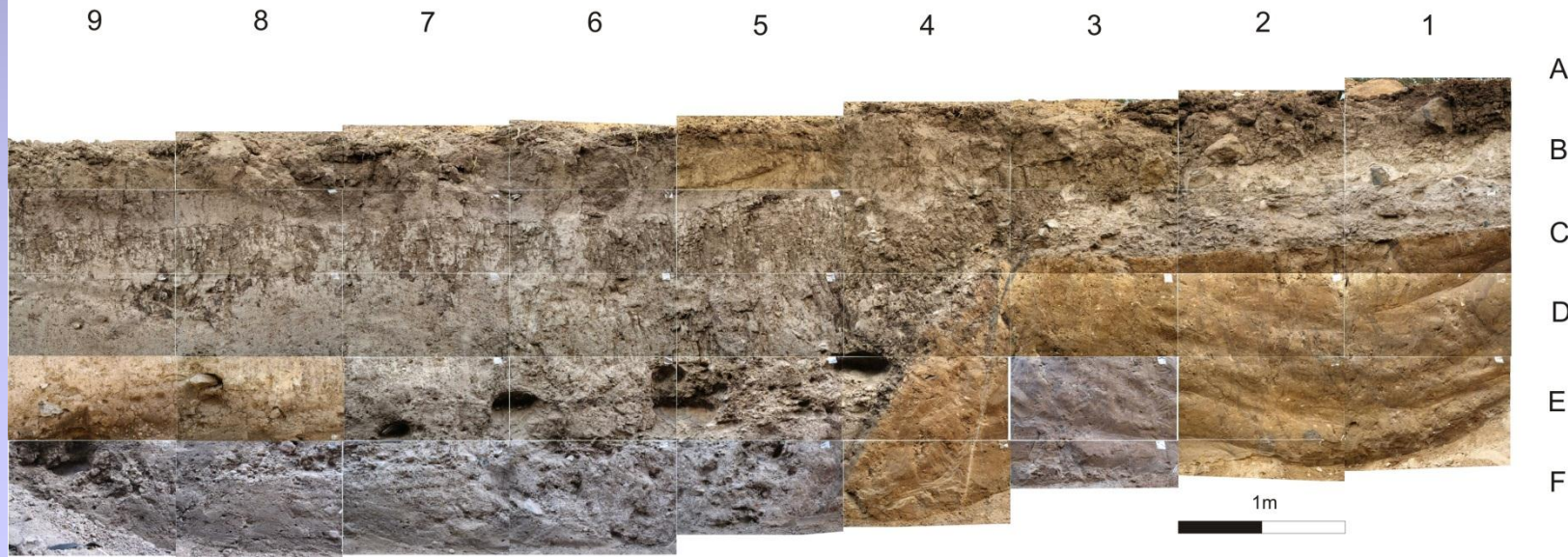
Trench Juanacatlán (1) - East wall



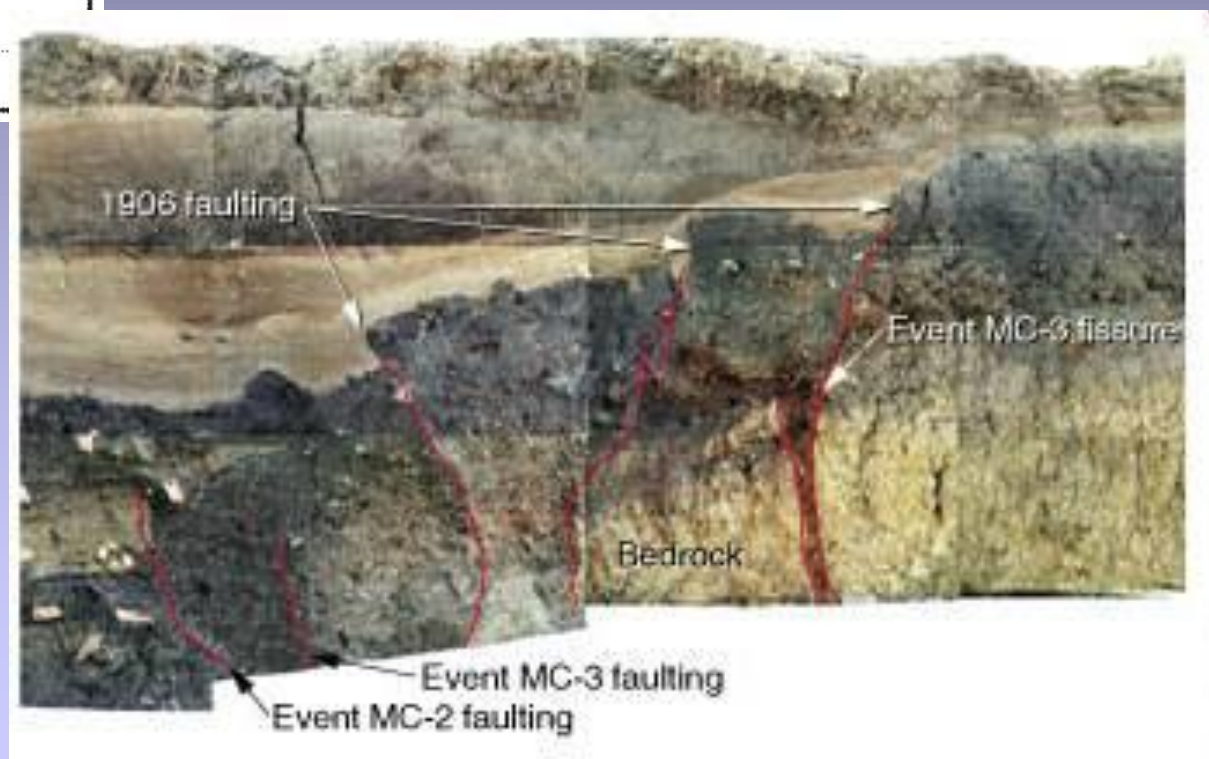
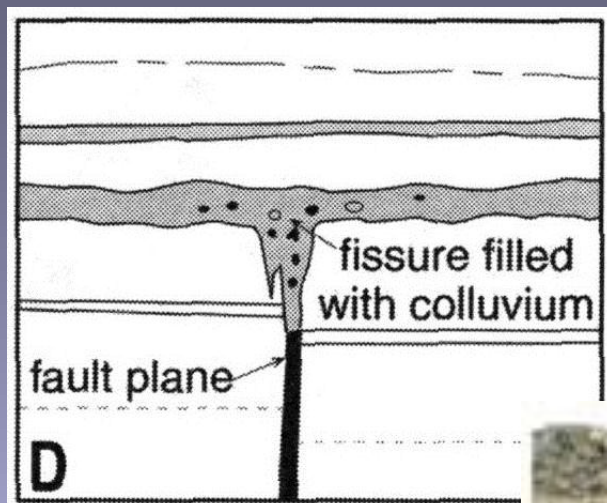
Legend

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| ignimbrite | mudflow with paleosol I |
| alluvial deposits | mudflow with soil |
| mudflow | topsoil |
| mudflow with pal | |

Trinchera Juanacatlán - Pared Este (1)



- Vyplnění trhlin



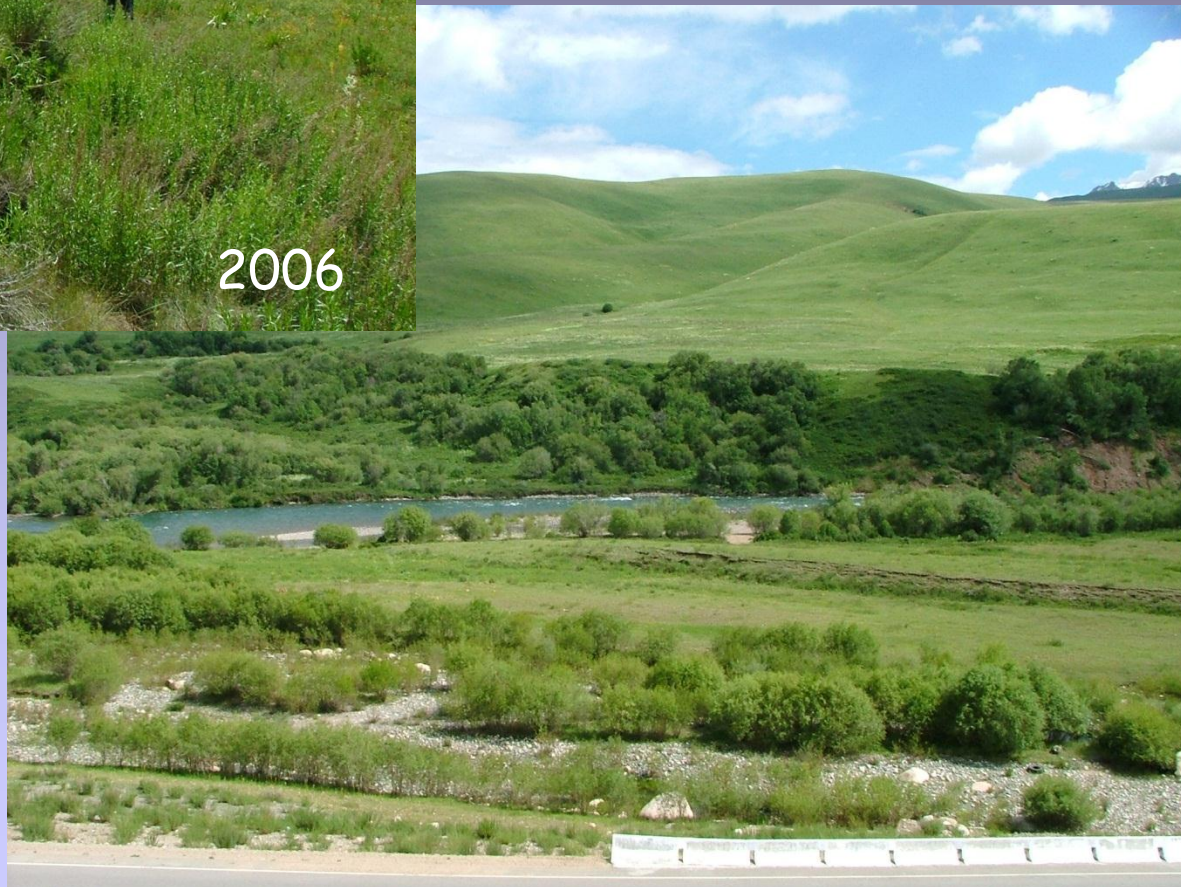
Aremogna-Cinquemiglia fault - Itálie



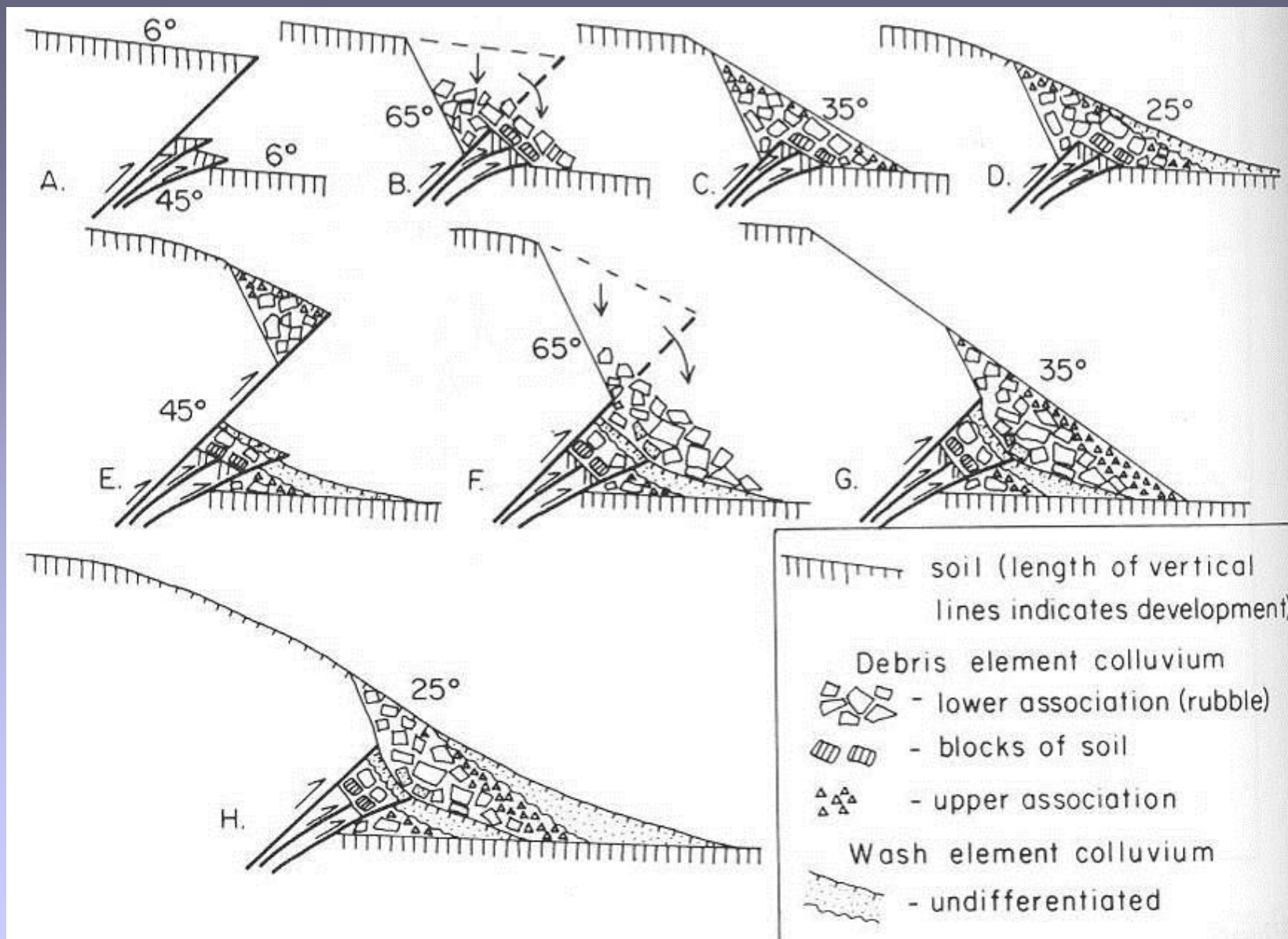
Přesmyky

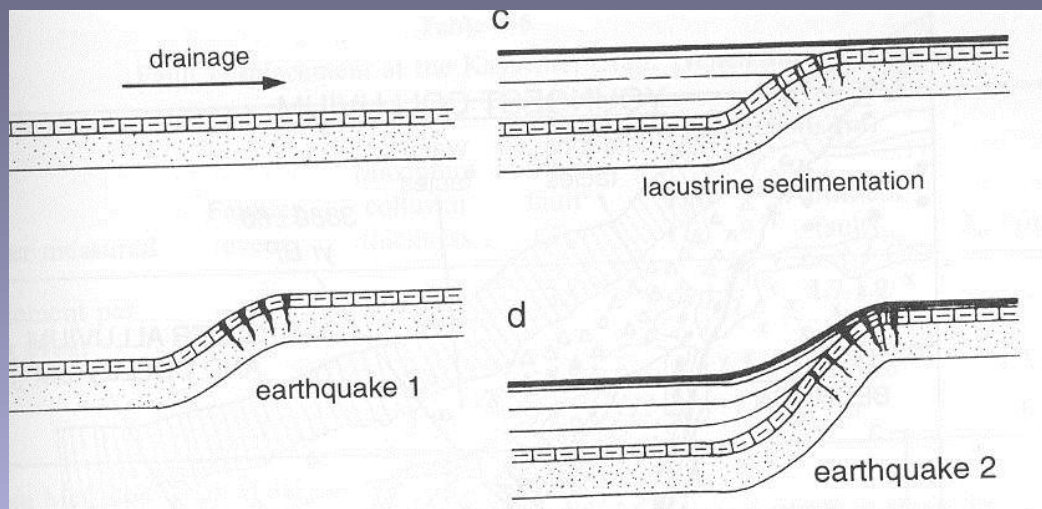
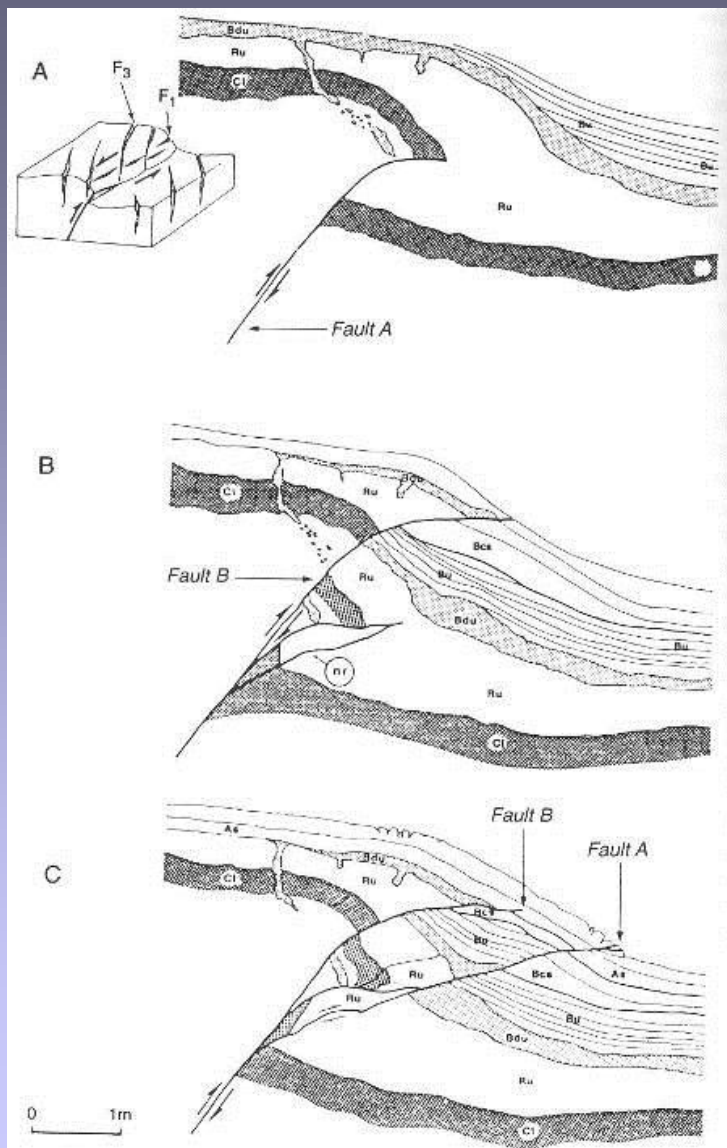


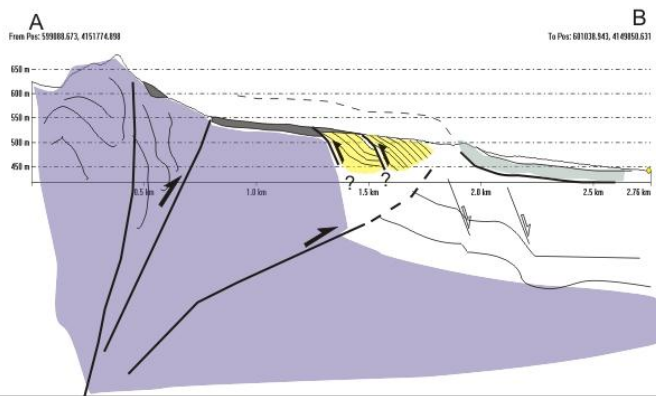
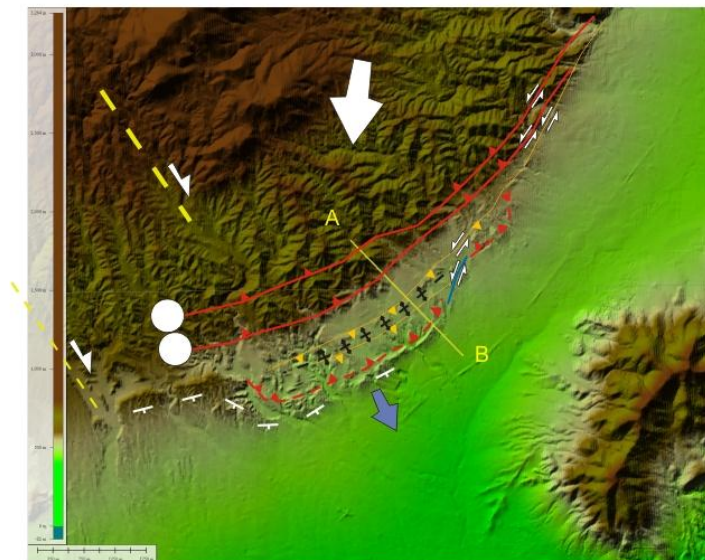
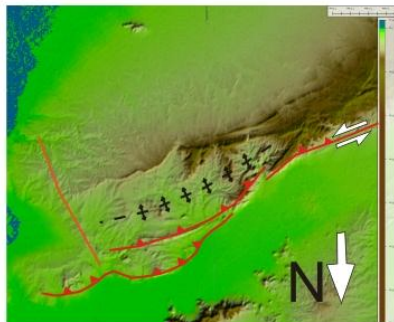
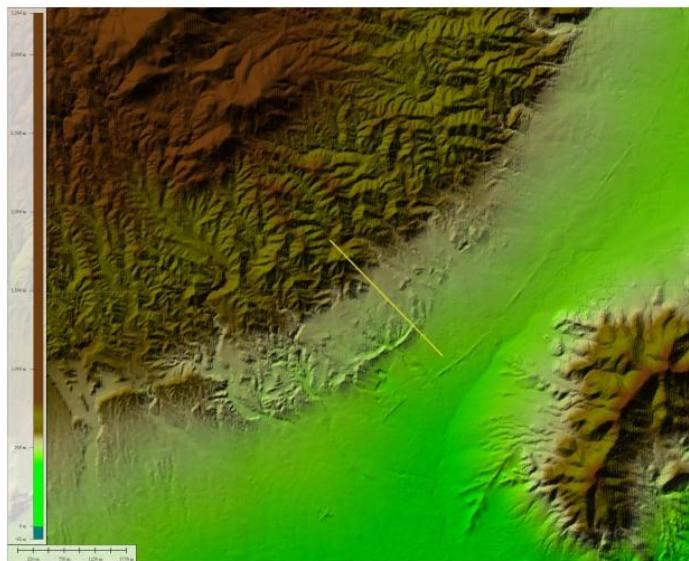
Suusamyr, 1992, $M=7,4$
Kyrgyzstan



Přesmykové zlomy - coluvial wedge



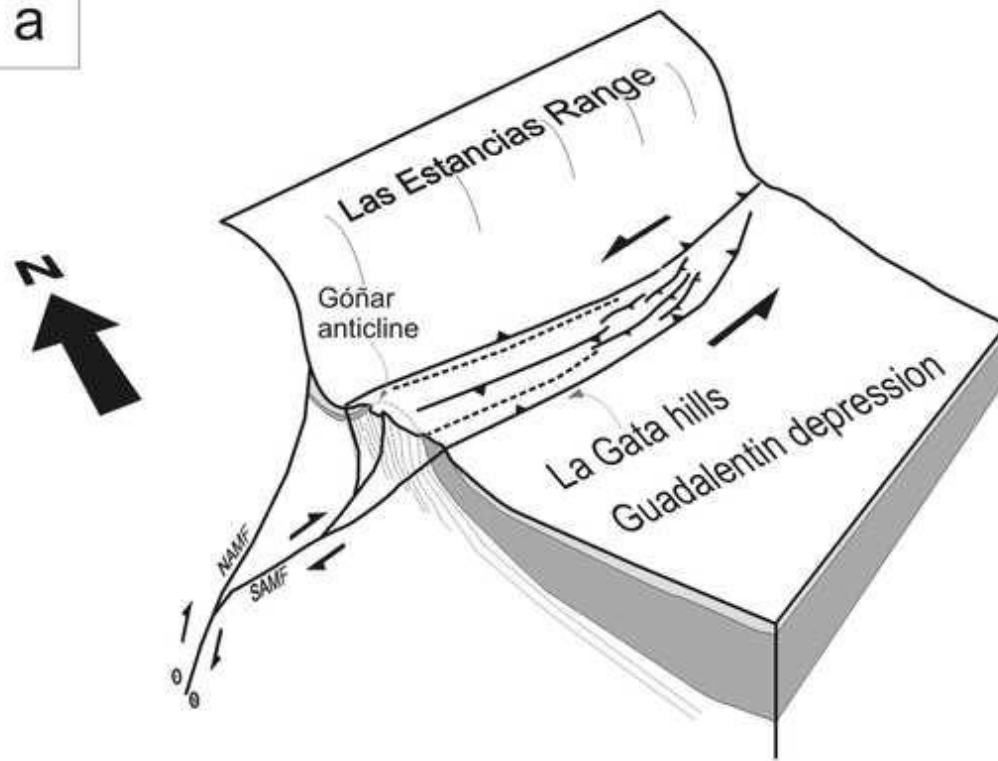




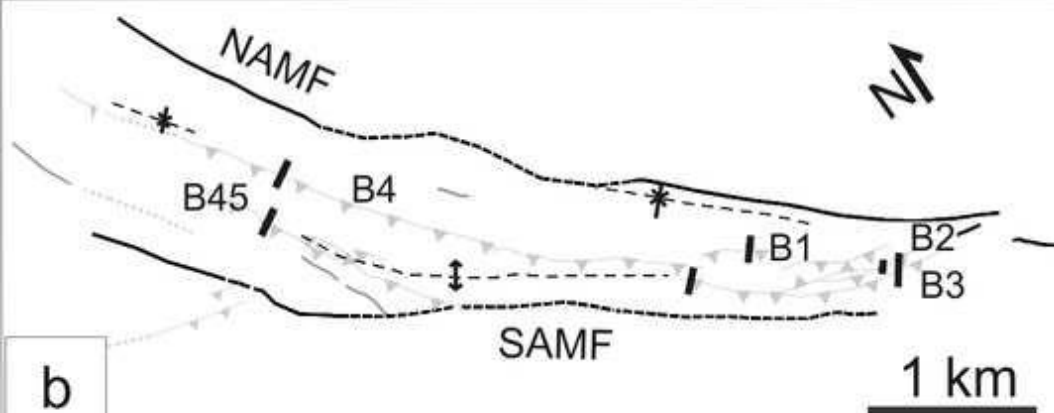
Alhama de Murcia fault

Typy pohybů - podle směru tlaku

a



b







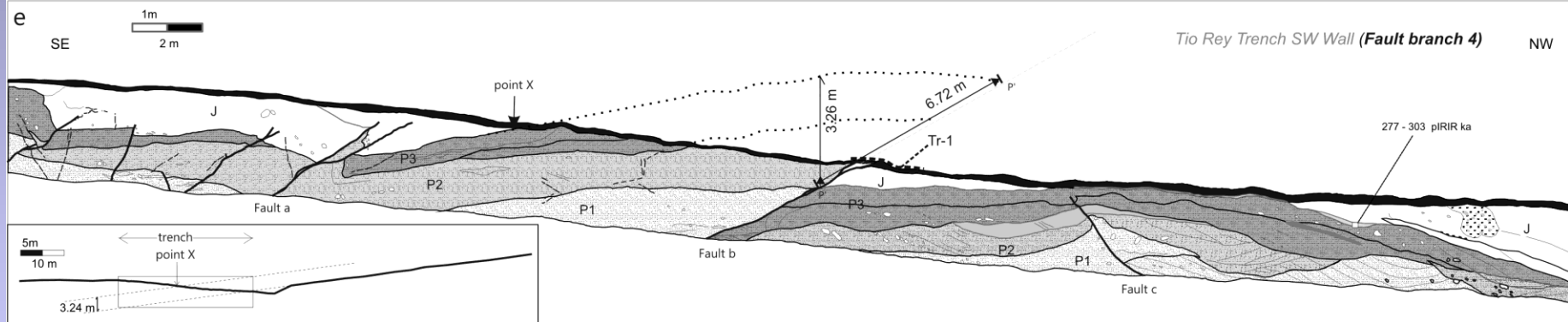
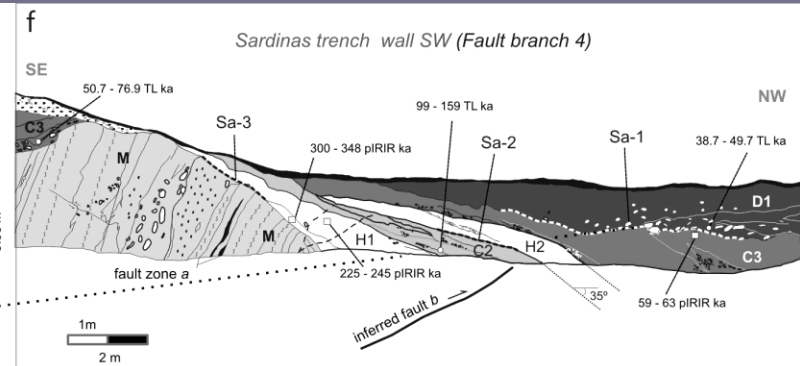
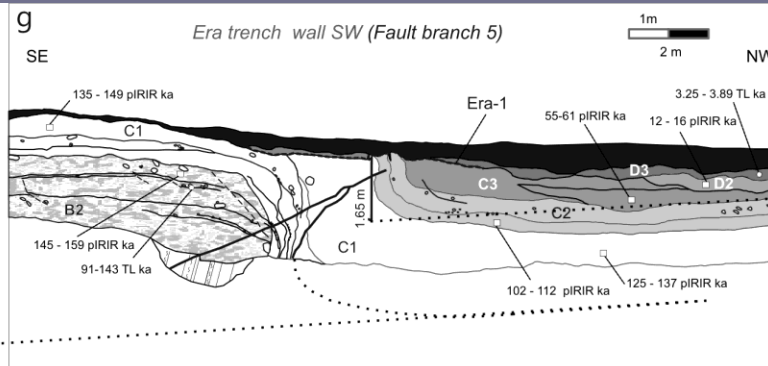
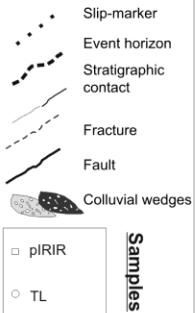


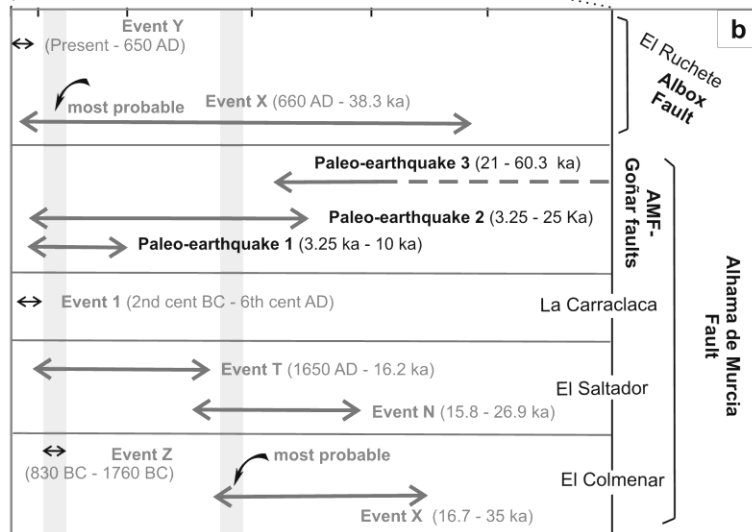
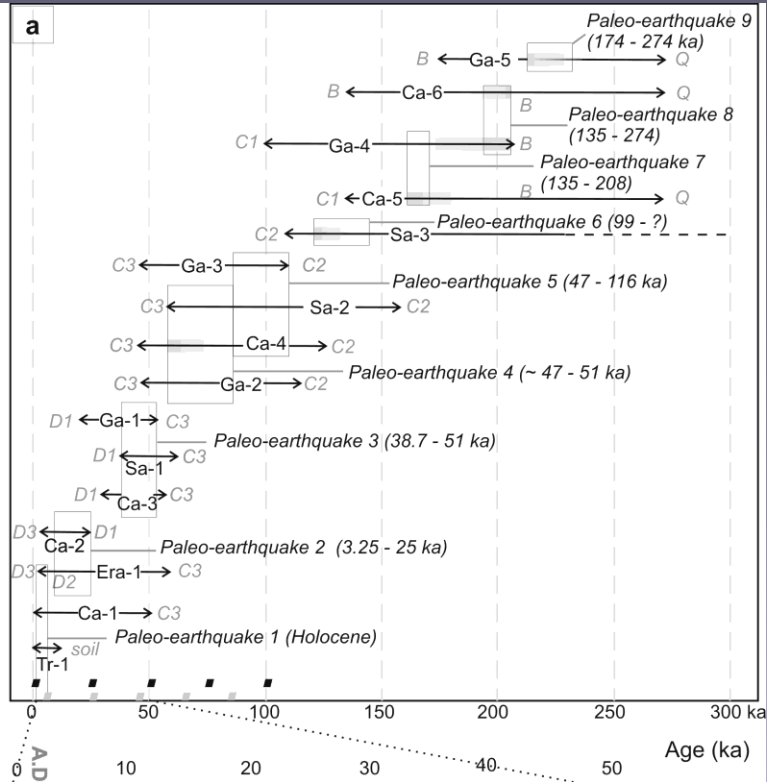






Legend (part 2)





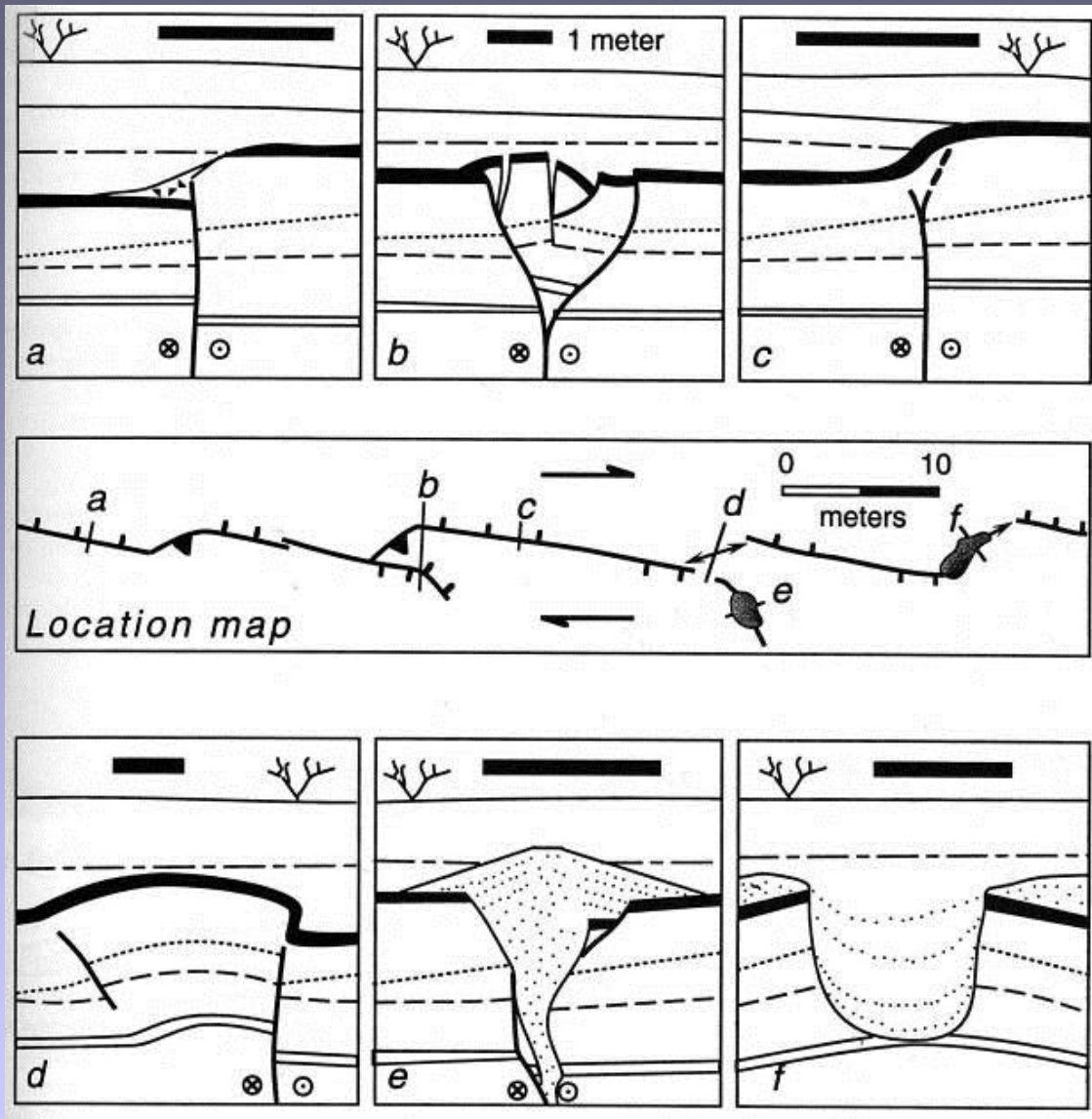
Horizontální posuny



Carboneras fault, Spain



Borego fault, El Mayor 2010





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

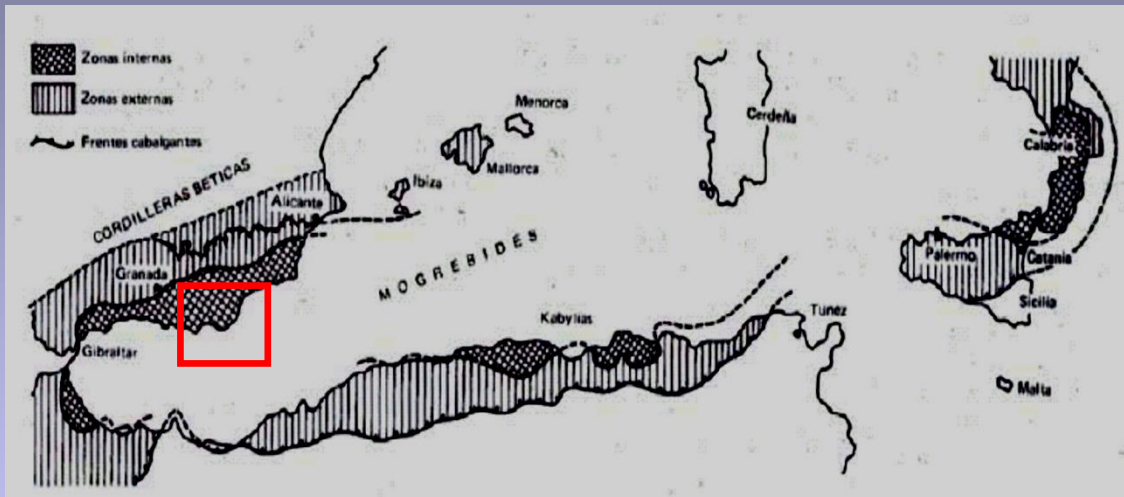


Zlomová zóna Carboneras

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

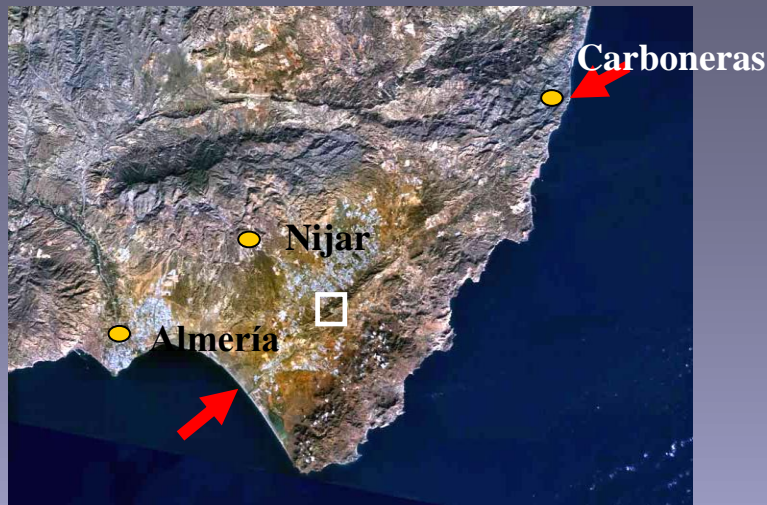
Masana E. et al.

Carboneras

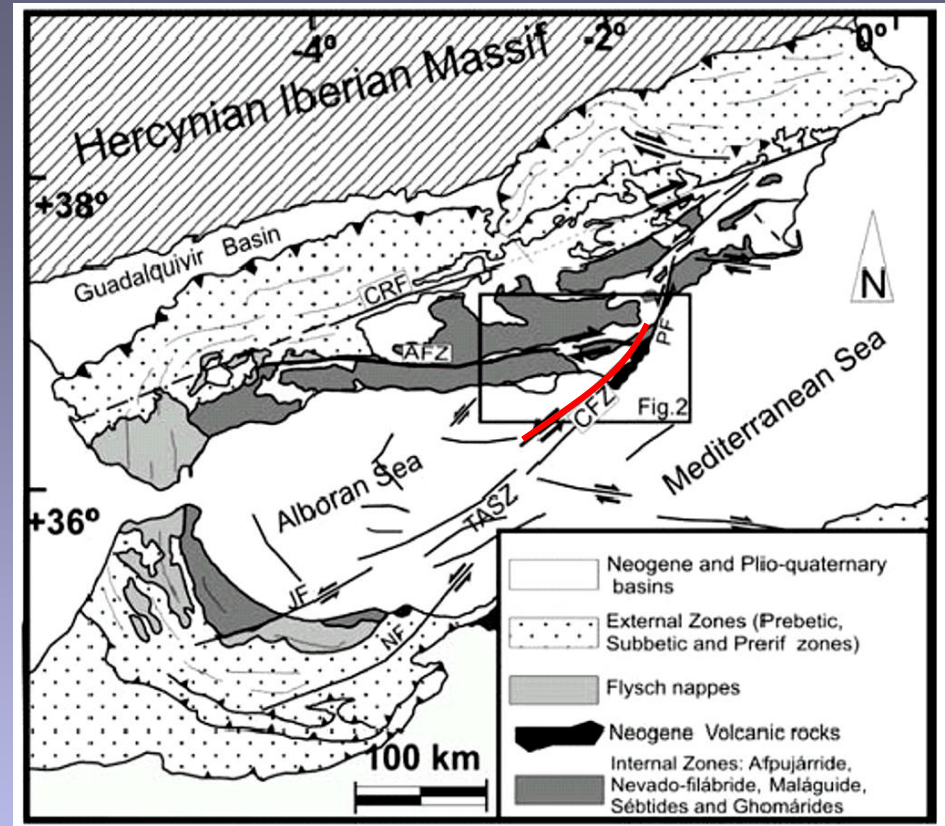


- kolizní zóna Africké a Evropské desky
- jižní okraj alpského orogénu
- součást Bétické Kordilery

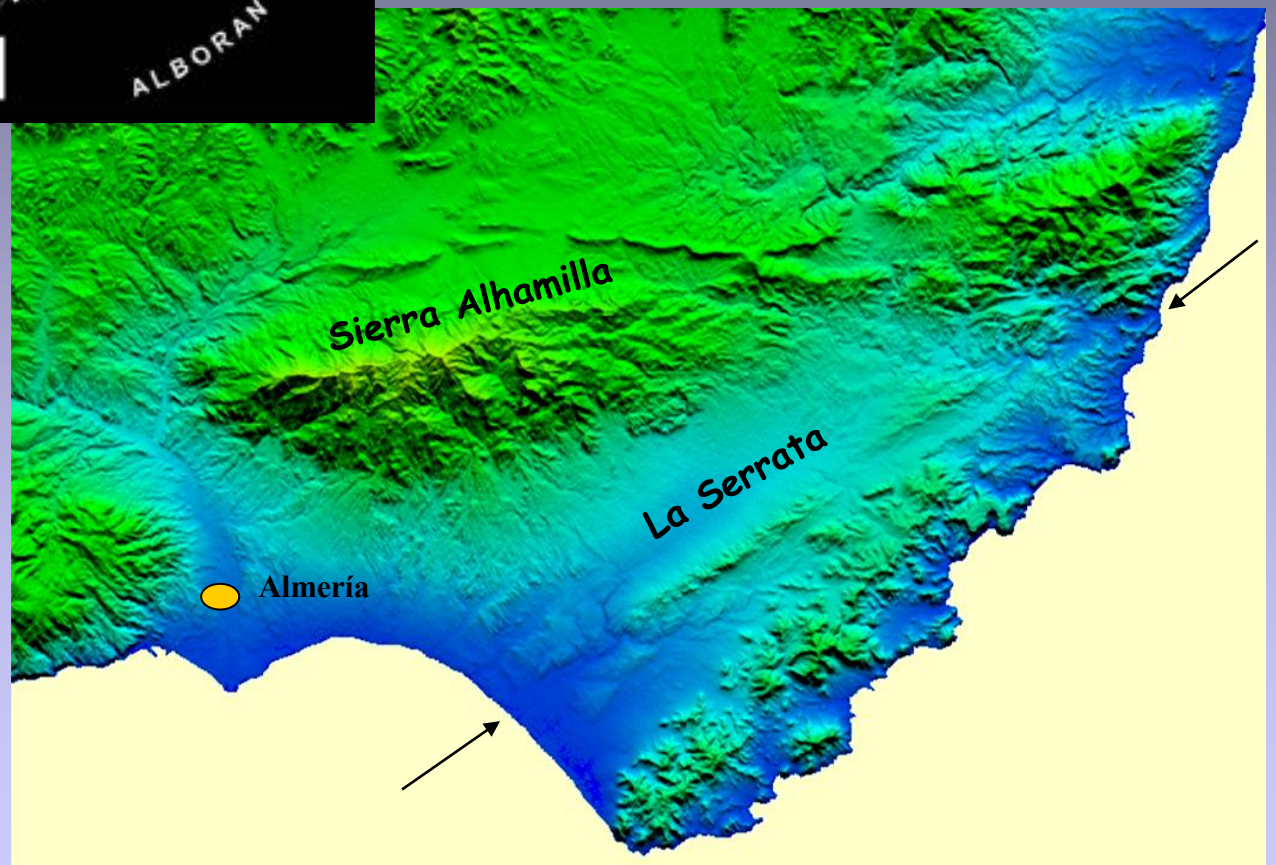
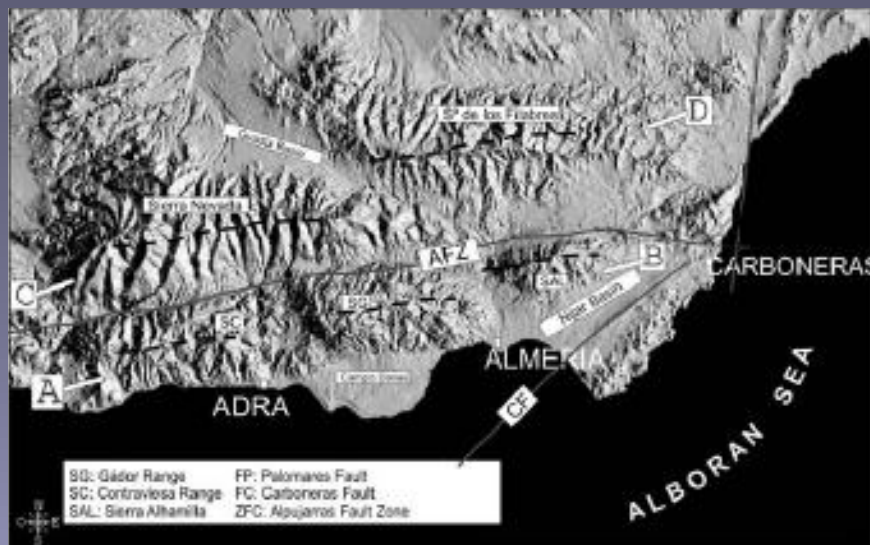
- vnější zóna (příkrovová stavba - mezozoické-terciérní horniny) paleookraj Iberské desky
- vnitřní zóna - metamorfované komplex+ neogenní a kvartérní sed. - mezhorské pánve omezené zlomy SV - JZ

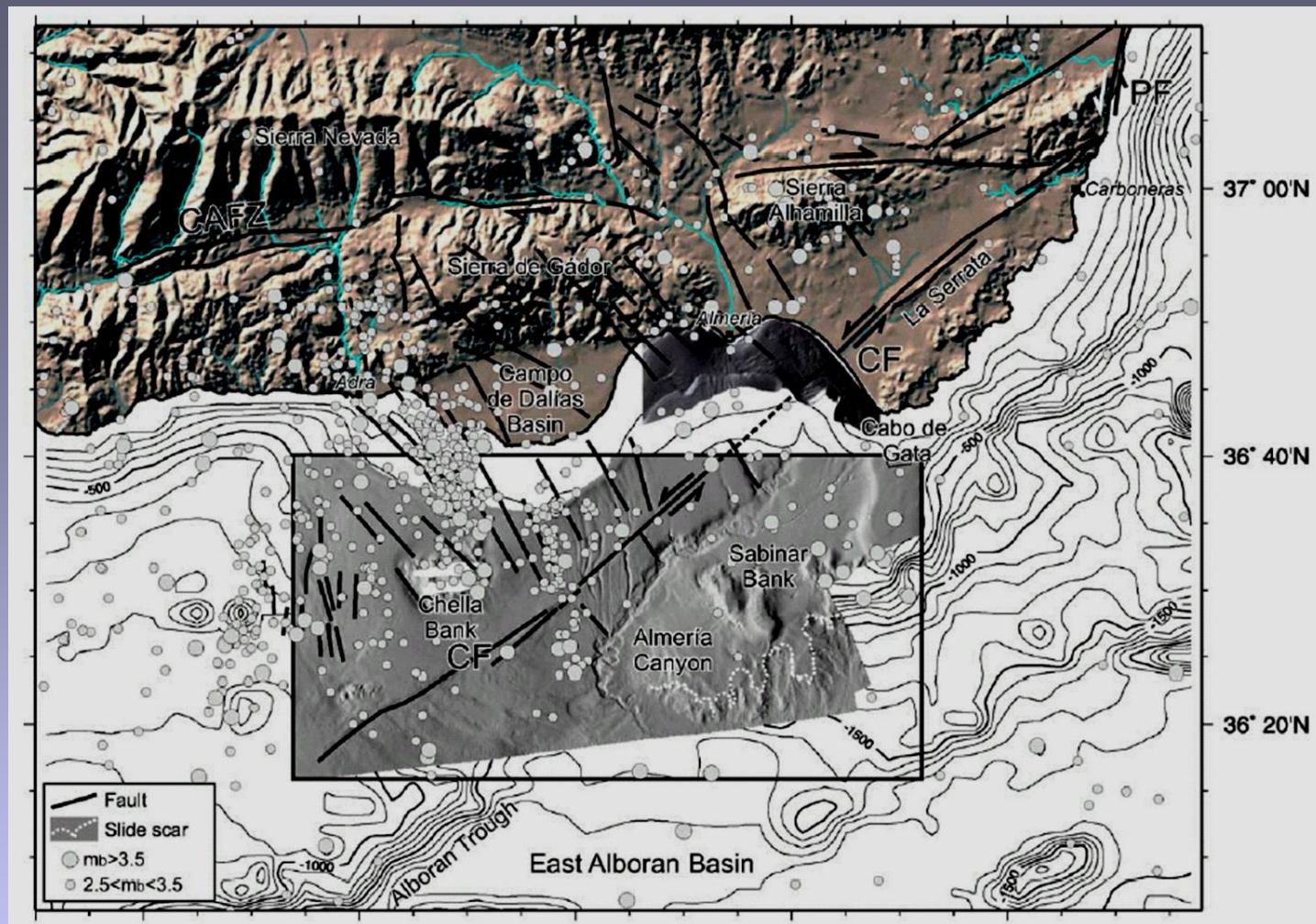


Carboneras - vznik v poslední etapě kolize vnitřní a vnější zóny Bétické Kordilery ve spodním miocénu



- ❖ 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)

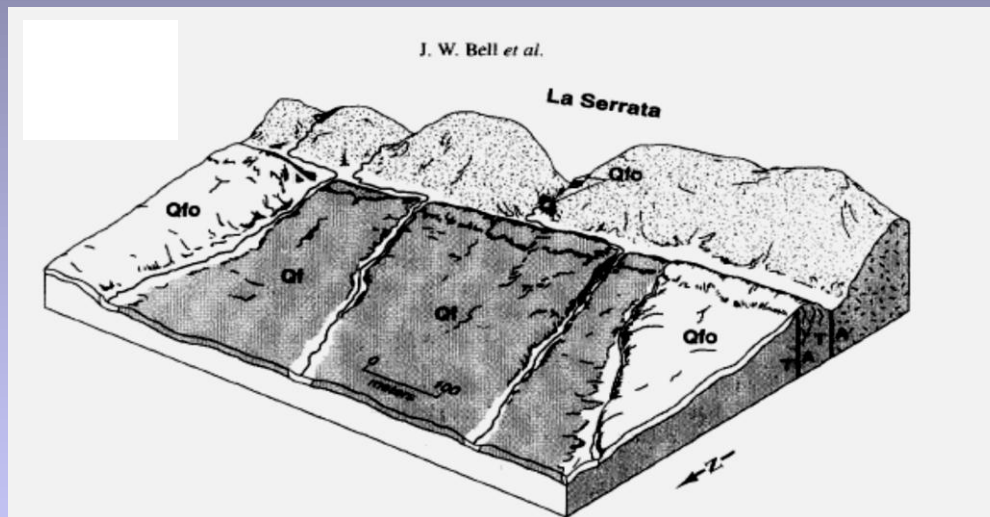




- ❖ seismicita - jv. okraj Iberského pol. - stálá mělká zemětřesení $M < 5,5$ (příčné zlomy v současnosti - Carboneras - bez seismicity)
- ❖ posl. 2 tis. let - nejméně 50 silných zemětřesení

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

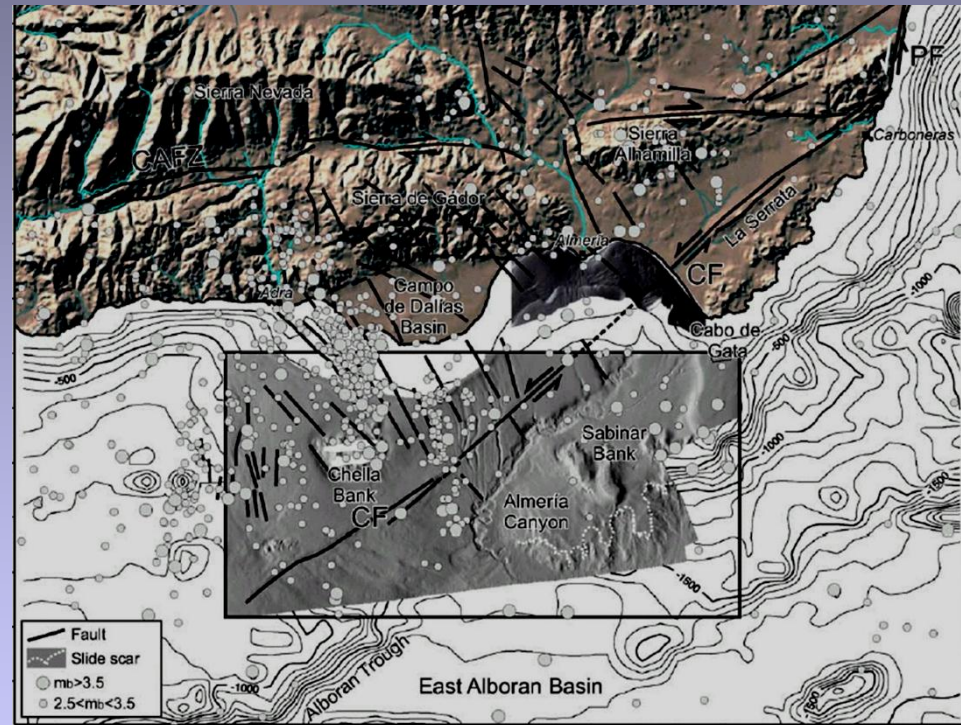


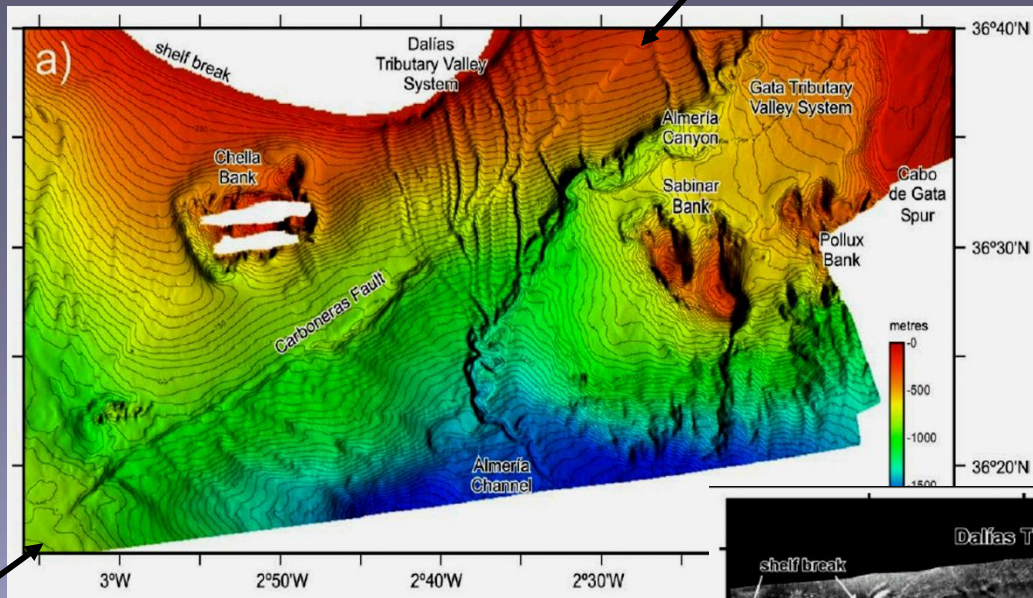
pohyby v pozdním kvartéru - relativně pomalé, **převážně vertikální**,
horizontální pohyby 80-100m offset toků La Serraty - starší než
100 tis. let

IMPULS:

Metody studia zlomu Carboneras na moři

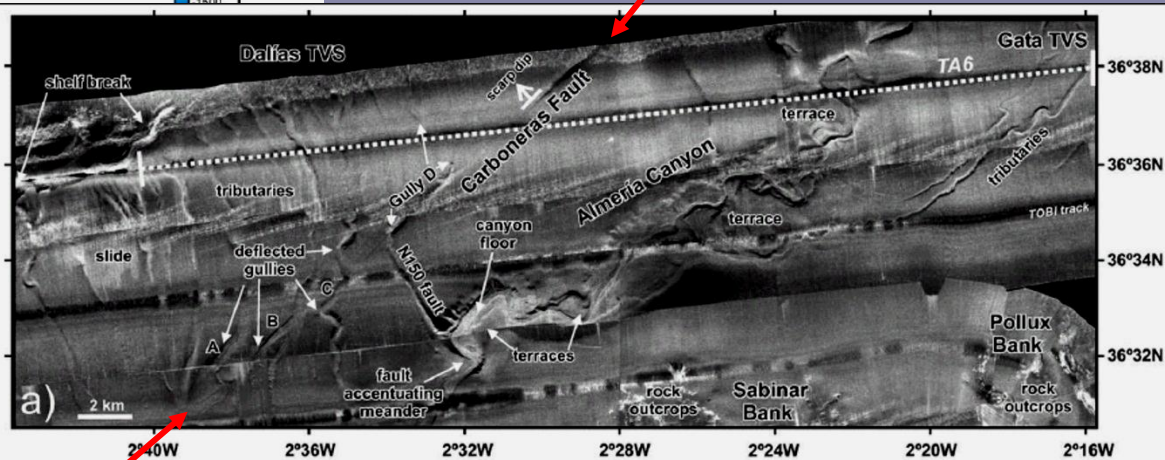
- ❖ batymetrie
- ❖ boční sonografie (sidescan sonograph TOBI)
- ❖ reflexní seismika s vysokým rozlišením
- ❖ analýza vzorků mořských sedimentů
- ❖ datování



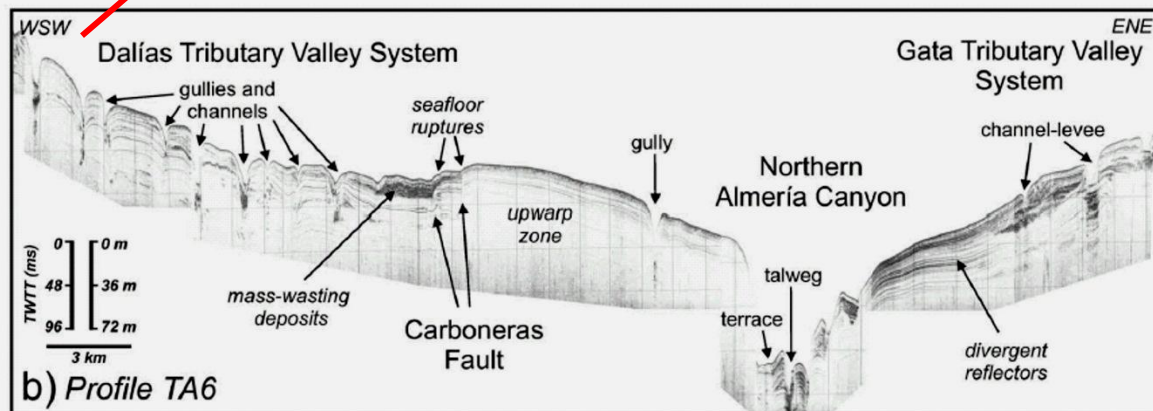


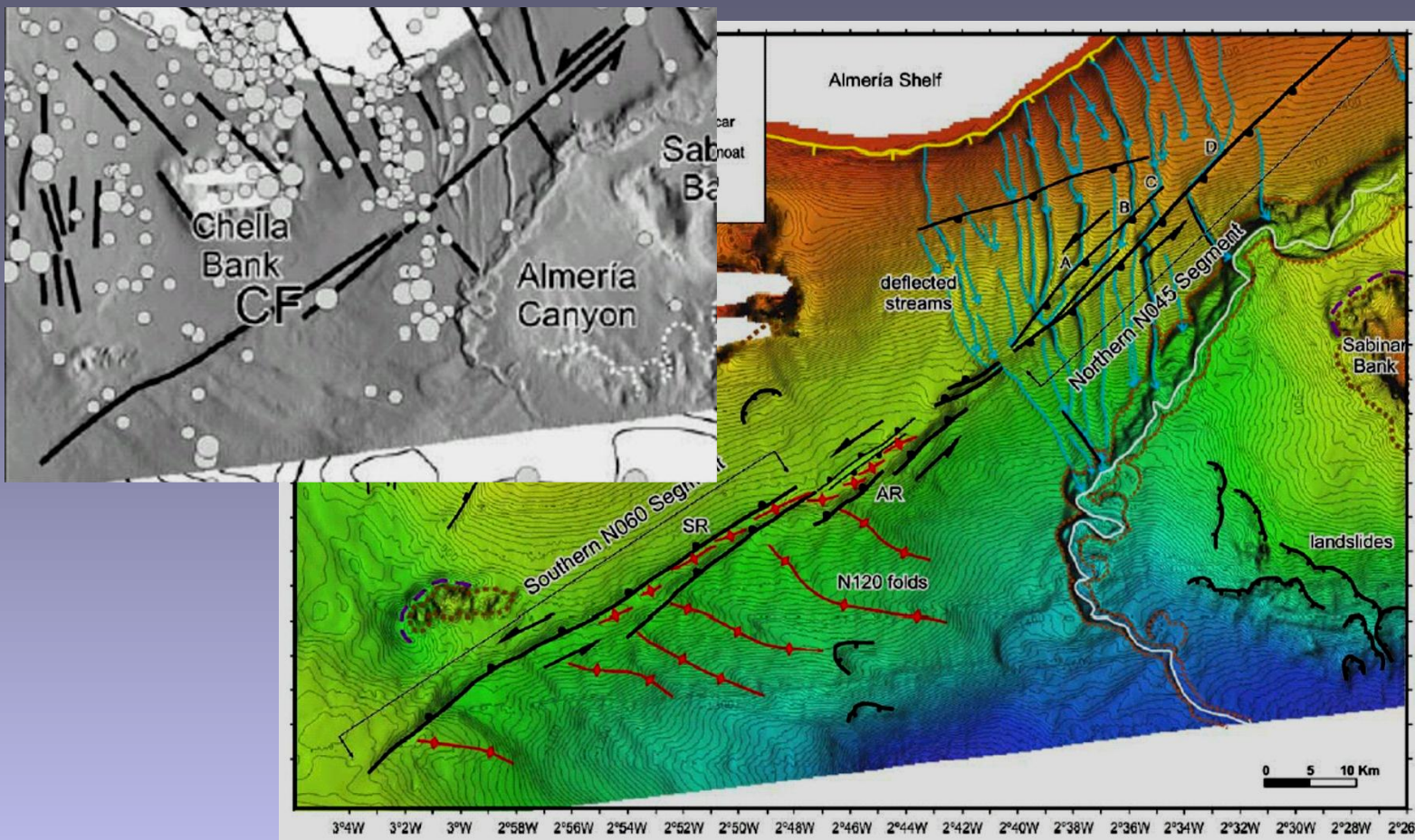
batymetrie

sonografie s vysokým rozlišením



seismické profilování



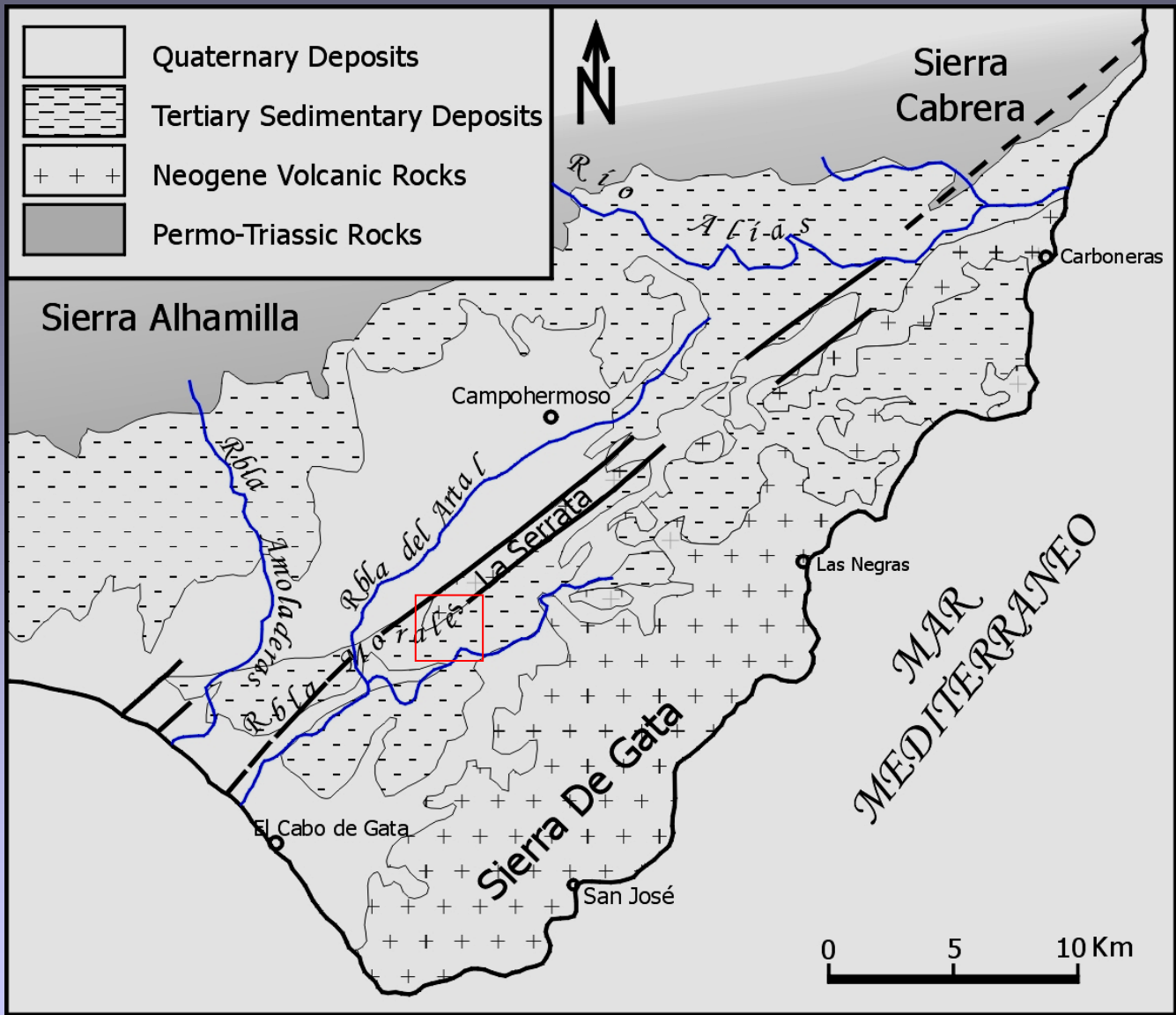


Zóna Carboneras - 5-10 km široká, 100 km dlhá, subvertikálne zlomy, odvodňovací sít' okraje pevniny je **deflektovaná**, morfológie = tvary vzniklé horizontálnymi pohybmi na pevnině - **pressure ridges, water gaps**, porušené pozdne **holocenné sedimenty**, **sesuvy**-epicentra.

Seismická a tsunami hazard - $M \leq 7,2$ (1522 zemetř. Almería)
 x instrumentálná seismicita na Carboneras nízká

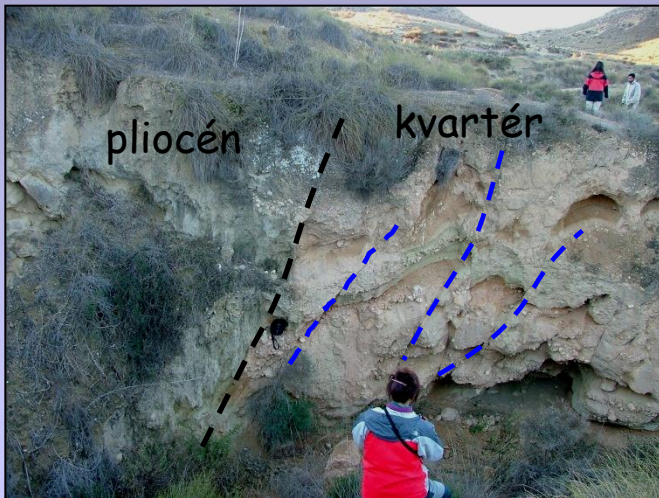
Metody studia zlomu Carboneras na pevnině

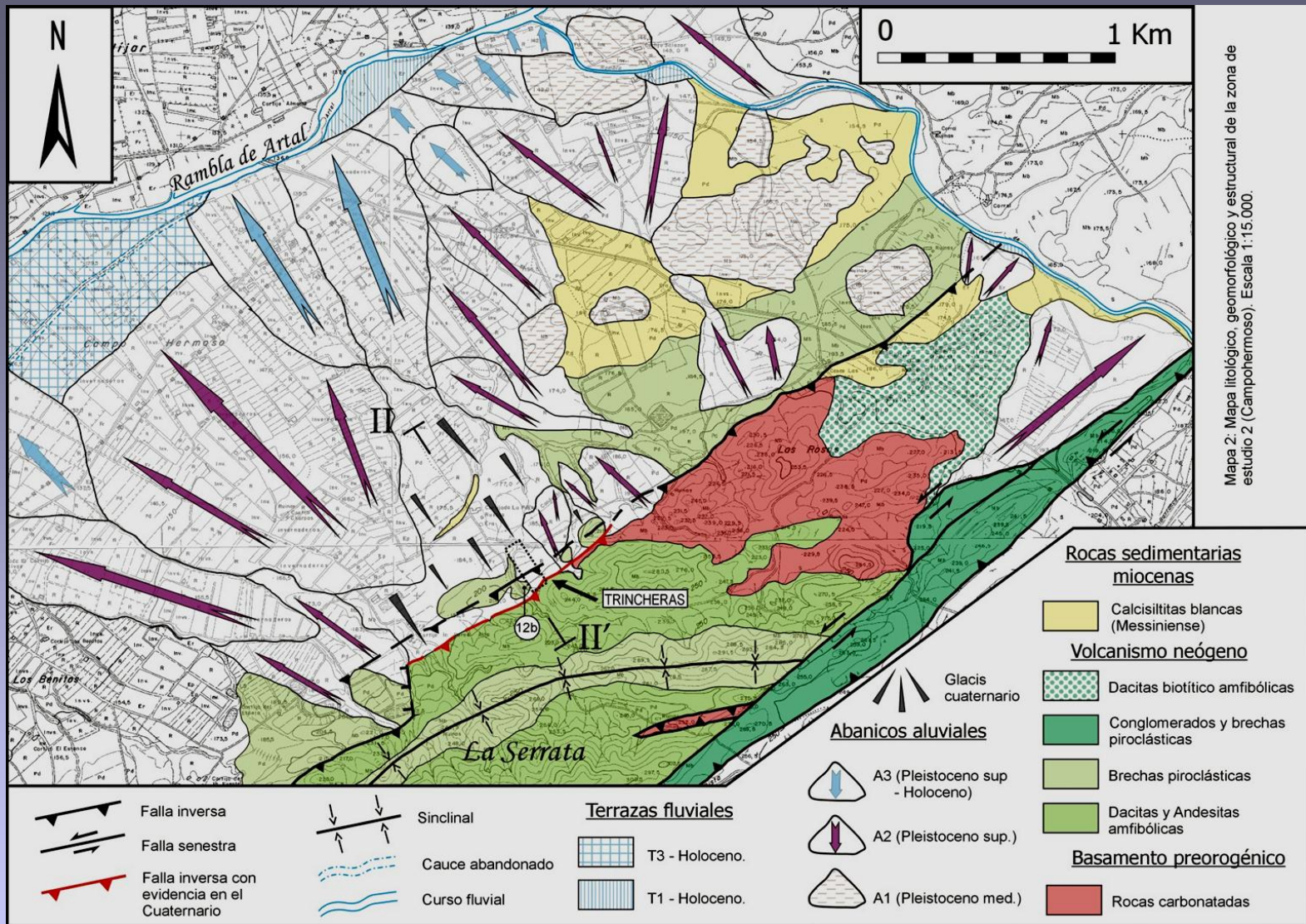
- ❖ fotointerpretace - letecké snímky
- ❖ geomorfologické mapování (dislokované tvary reliéfu)
- ❖ strukturní mapování (průběh zlomu)
- ❖ sedimentologie (rozlišení generací aluviálních kuželů)
- ❖ mikrotopografie (totální stanice)
- ❖ geofyzika (georadar, elektrotomografie – zachycení zlomu a hladiny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



El Hacho
2005

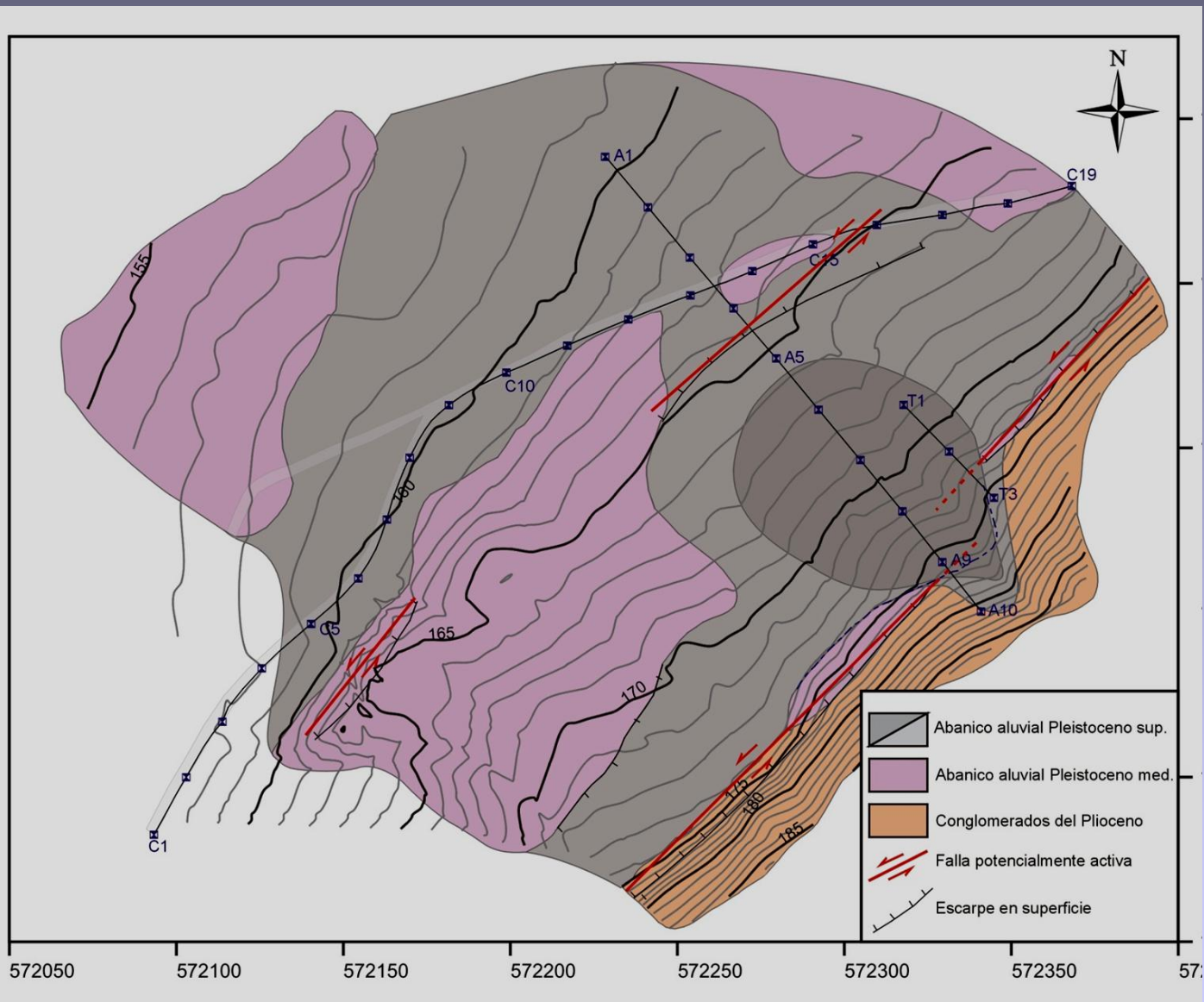
La Serrata





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

Paleoseismologické rýhy



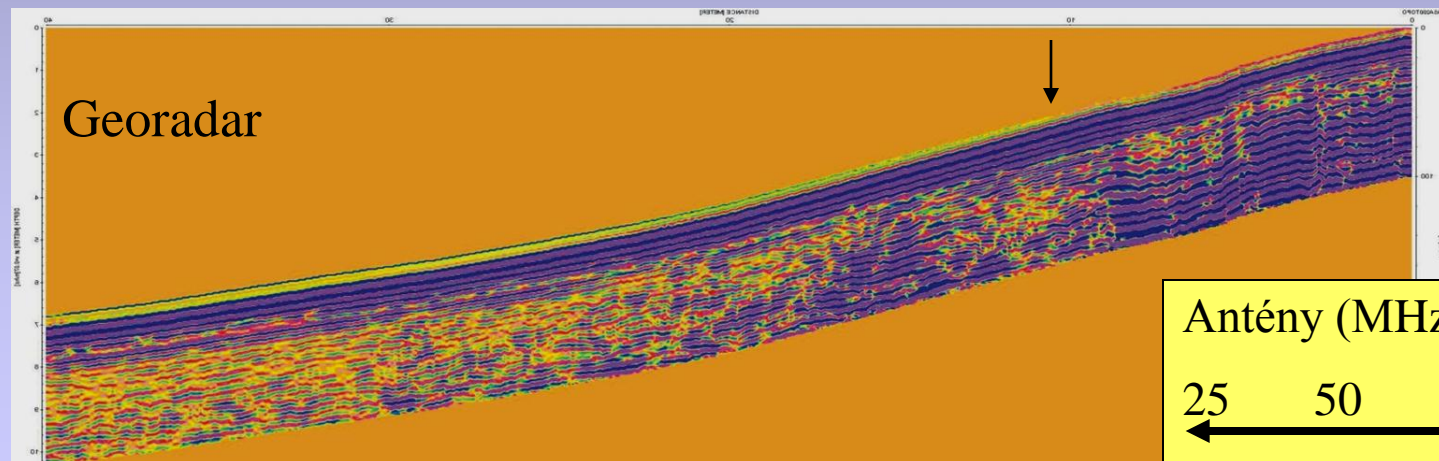
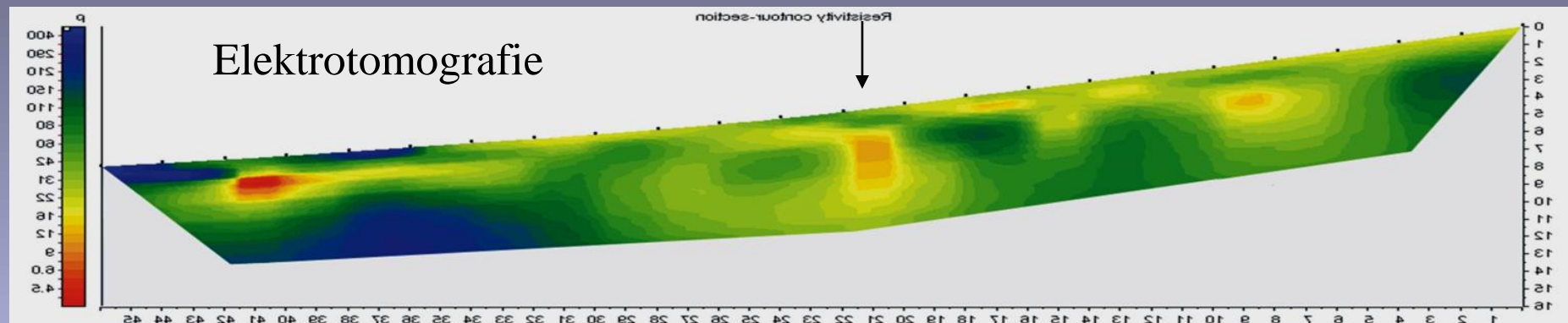
❖ všechny 3
generace
kuželů
(chronologie)

❖ patrné
terénní stupně
(0,7m)

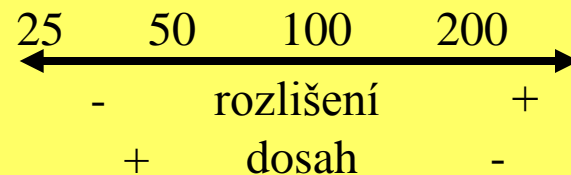


Geofyzika

zachycení pozice zlomu a hloubkových poměrů (materiál)



Antény (MHz):



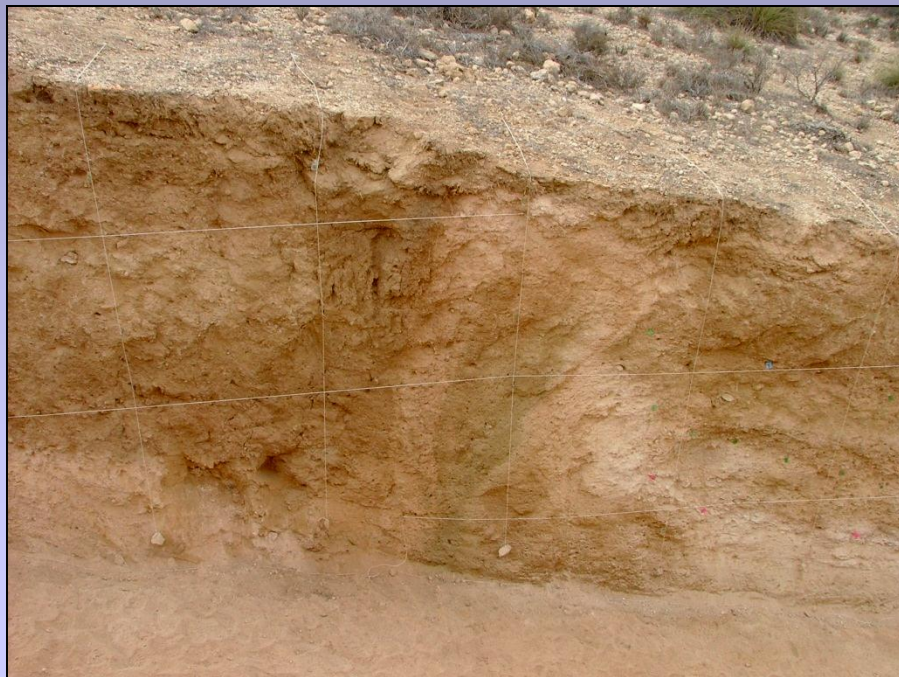
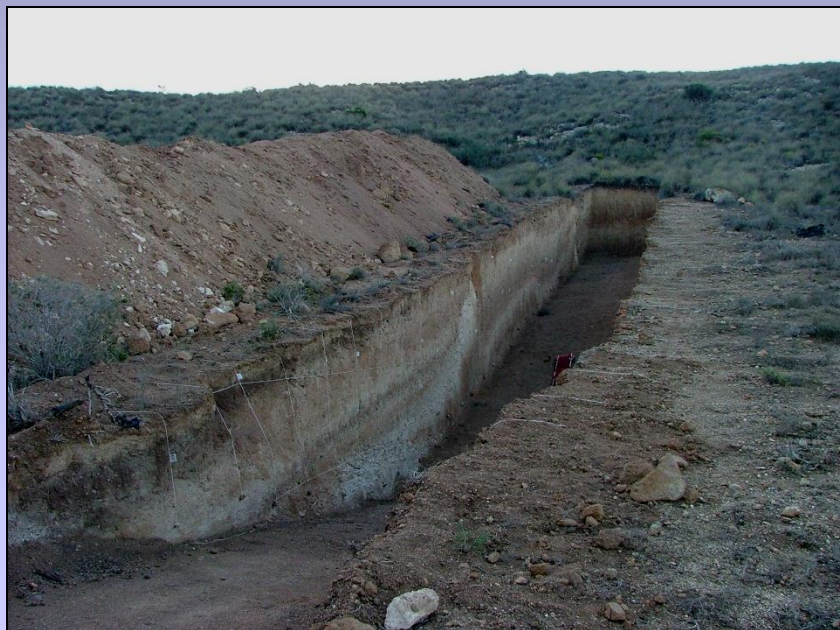
listopad 2005

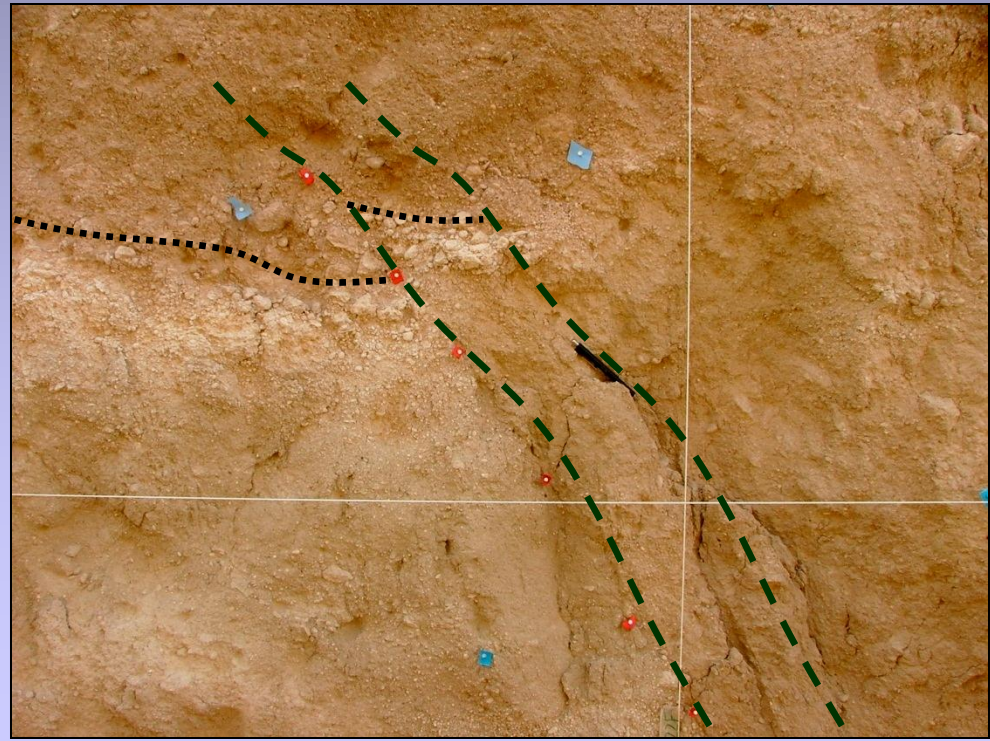
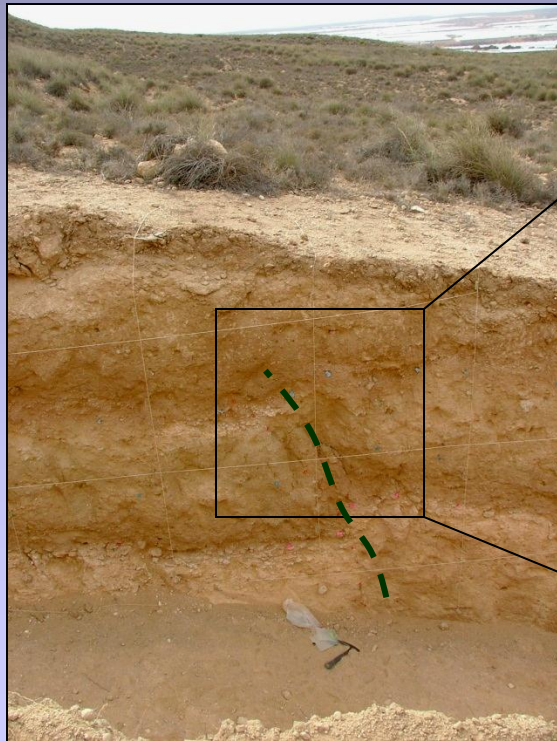


čištění, sítě



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

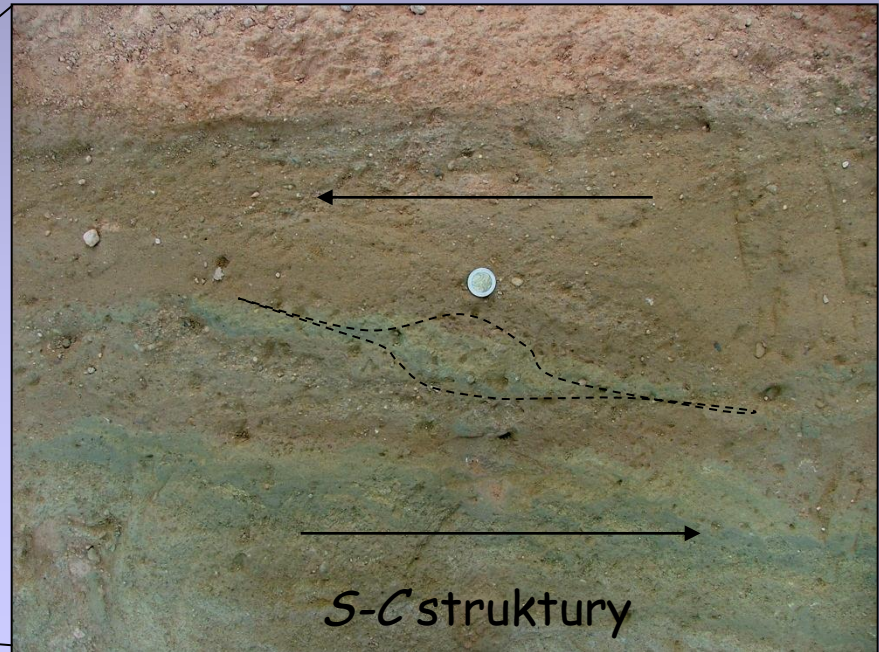


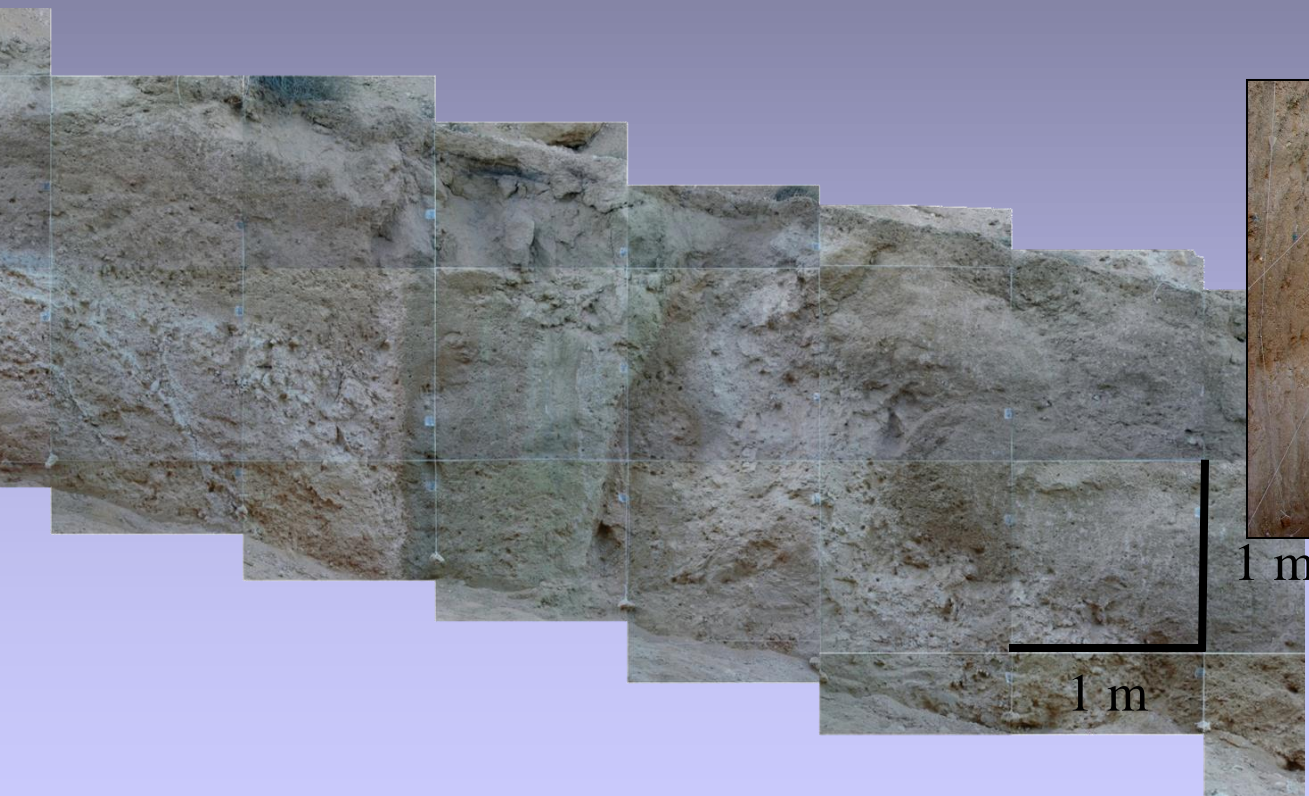
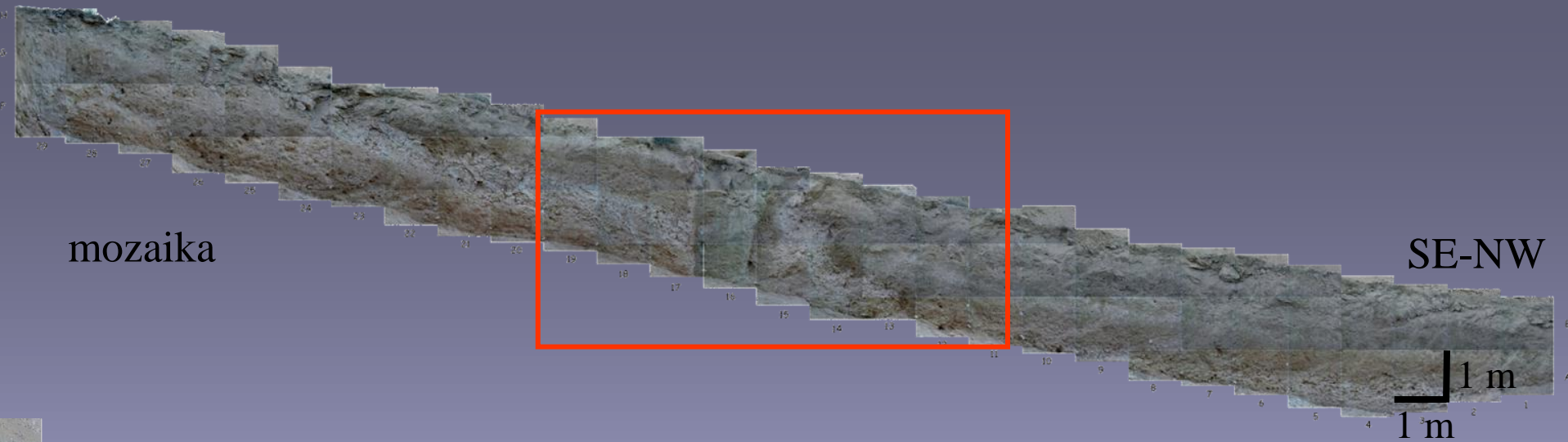


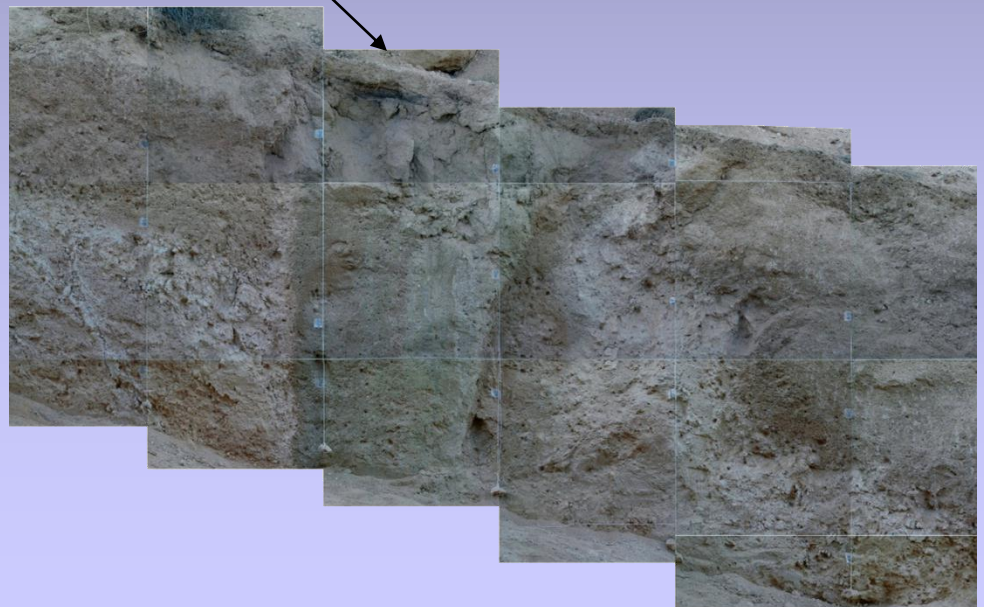
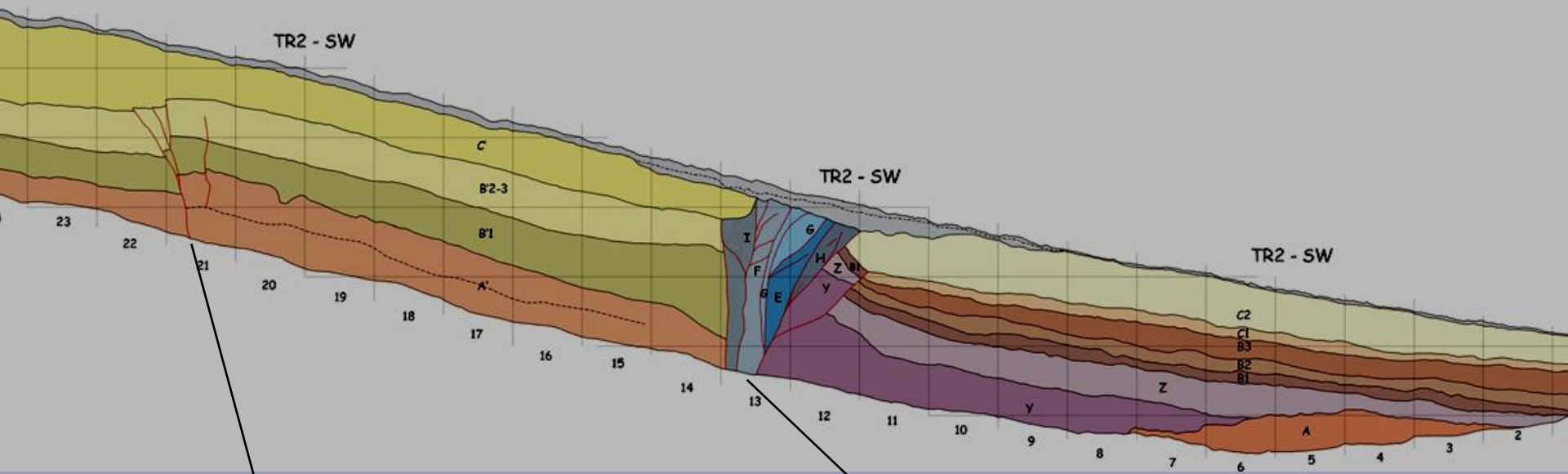


- složitější struktura
 - flower structure
 - transpresní režim
- horizontální posuny s vertikální složkou
- opakované pohyby





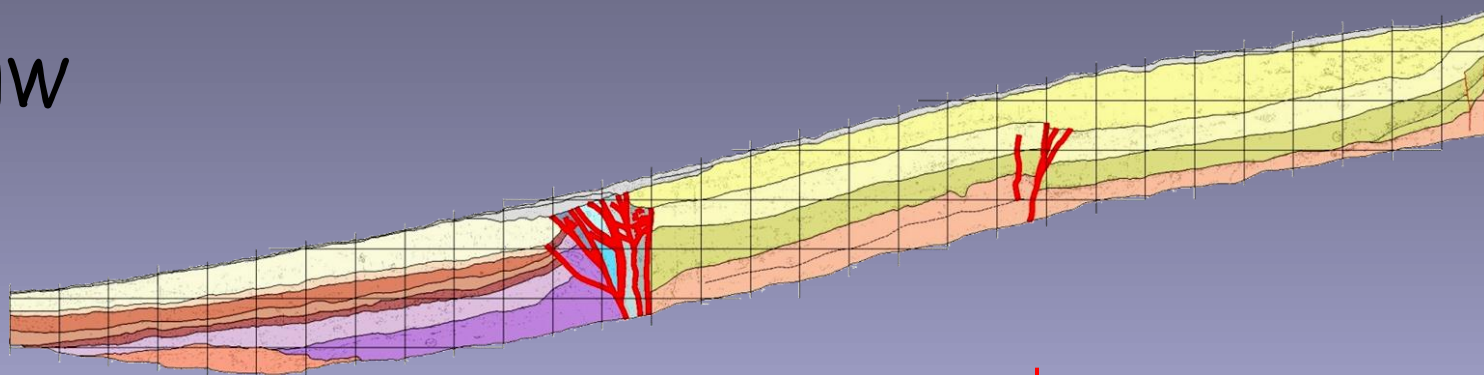




situace in situ X geofyzika

NW

SE



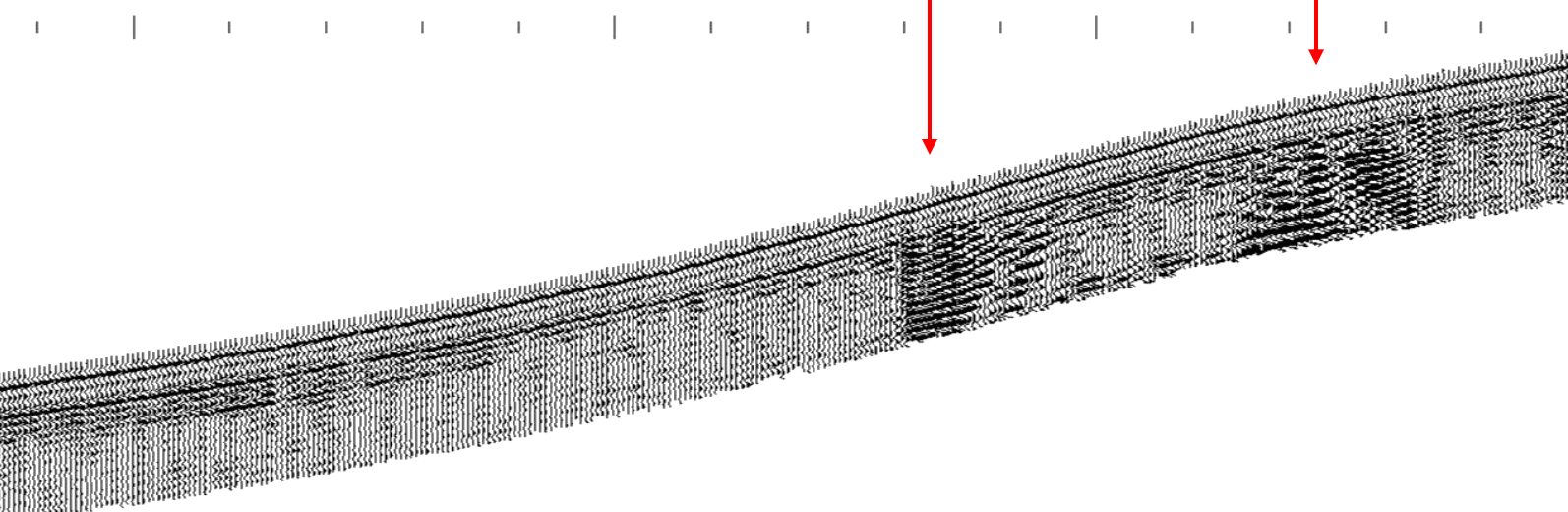
vzdálenost (m)

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**

$\text{C}14$ - v živých organismech, doplňován z prostředí, rozpadá se, po smrti org. se mění poměr $\text{C}14$ /stabilnímu $\text{C}12$ - kdy byl org.vyřazen z koloběhu

- ❖ **opticky stimulovaná luminiscence OSL** - elektrony polapené krystalovou mřížkou v zrnech písku - uvolňovány světelnou aktivací či vybuzením (stimulování světlem). 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 - do kdy se tam začaly hromadit ty elektrony - kdy to bylo vynulované (dosah 250-300 tis. let)
- ❖ **termoluminiscence TL**, → jemnozrnné sedimenty (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

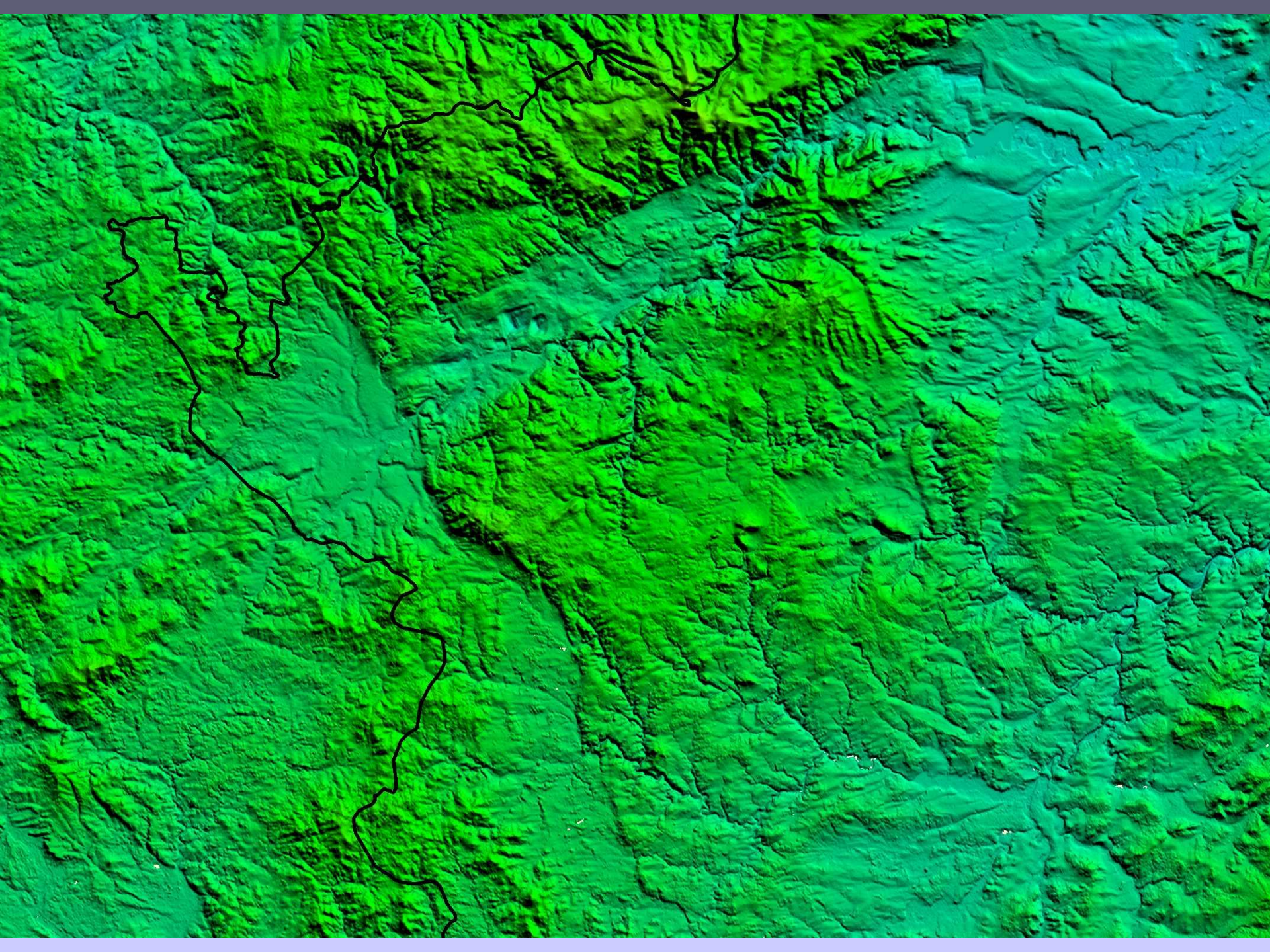


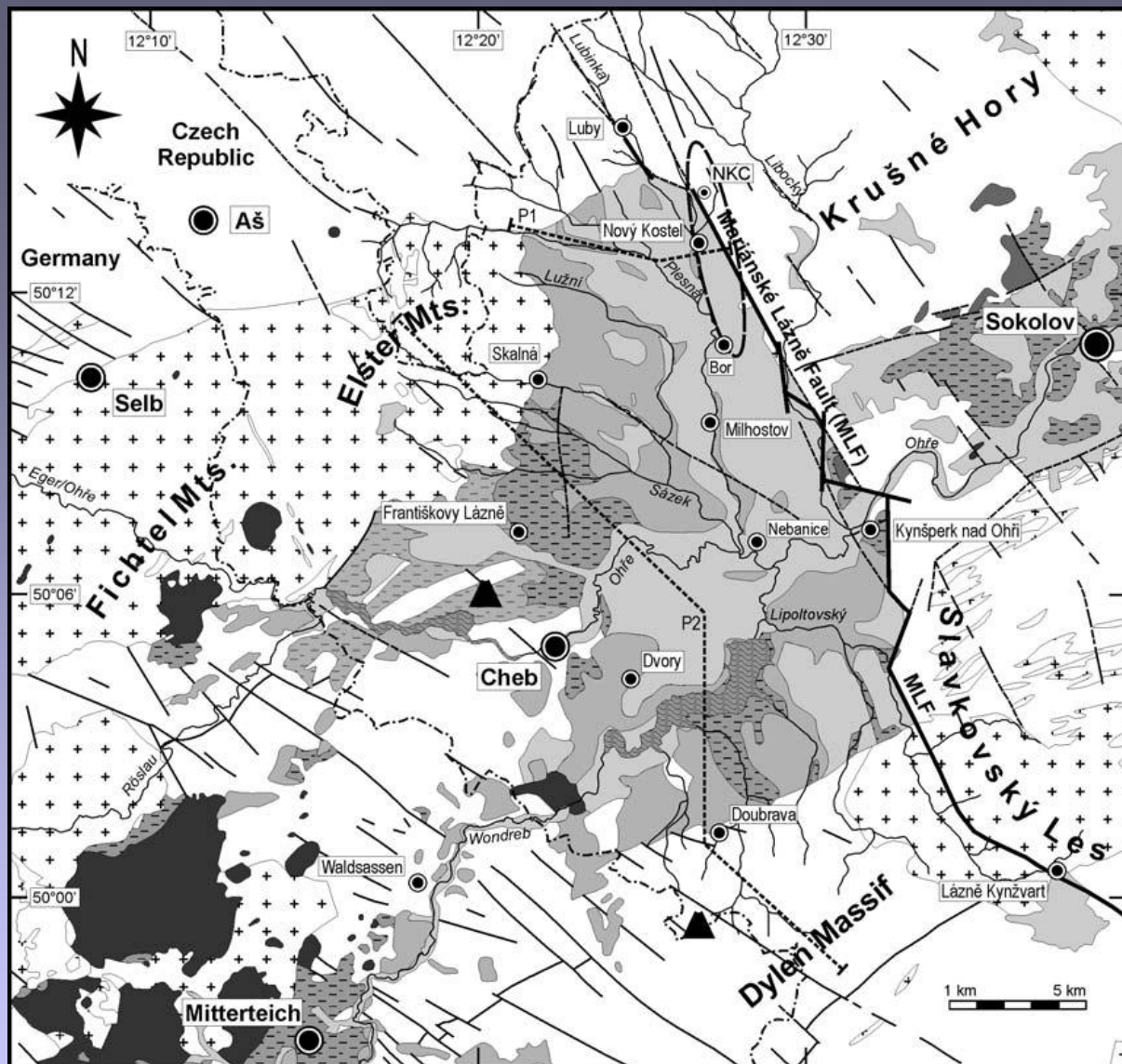
CHART OF THE INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007 - ESI 07

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 DAMAGING DESTRUCTIVE VERY DESTRUCTIVE DEVASTATING	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 deformed levels (seismites)	cm Temporary sea-level changes	Temporary level changes Temp. turbidity changes Temporary F+Q changes		Rare and local	Geological frequent and exceptionally geomorphological
	VII	Rare and local	Permanent ground dislocations (< 10 cm)	mm	10 ³ m ³	1 cm	50 cm	Waves < 1 m		Local within epicentral zone	
	VIII	cm	< 1 m	dm	10 ² -10 ³ m ³	1 m	1 m	Temp. temperature changes		100 km ²	
	X	dm	< 10 m	m	10 ⁵ -10 ⁶ m ³	0.5 m	3-5 m	Temp. spring drying		1,000 km ²	
	XI	10-100 km	> 10 m	> 1 m	> 10 ⁴ m ³	> 5 m	> 10 m	Permanent river changes		5,000 km ²	
	XII	> 100 km		> 5 m	Far-field (200-300 km) significant landsliding	0.5 m	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	Geological and geomorphological characteristic and frequently 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.

Příklad paleoseismologické studie z Mariánsko-lázeňského zlomu





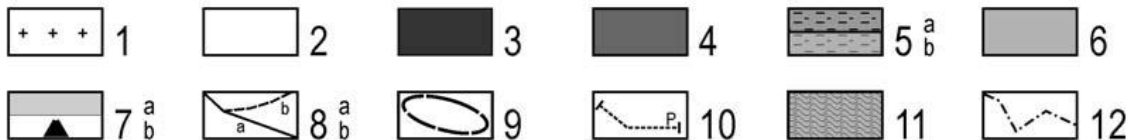
Mariánské Lázně fault (MLF)

normal fault with dextral strike-slip displacement

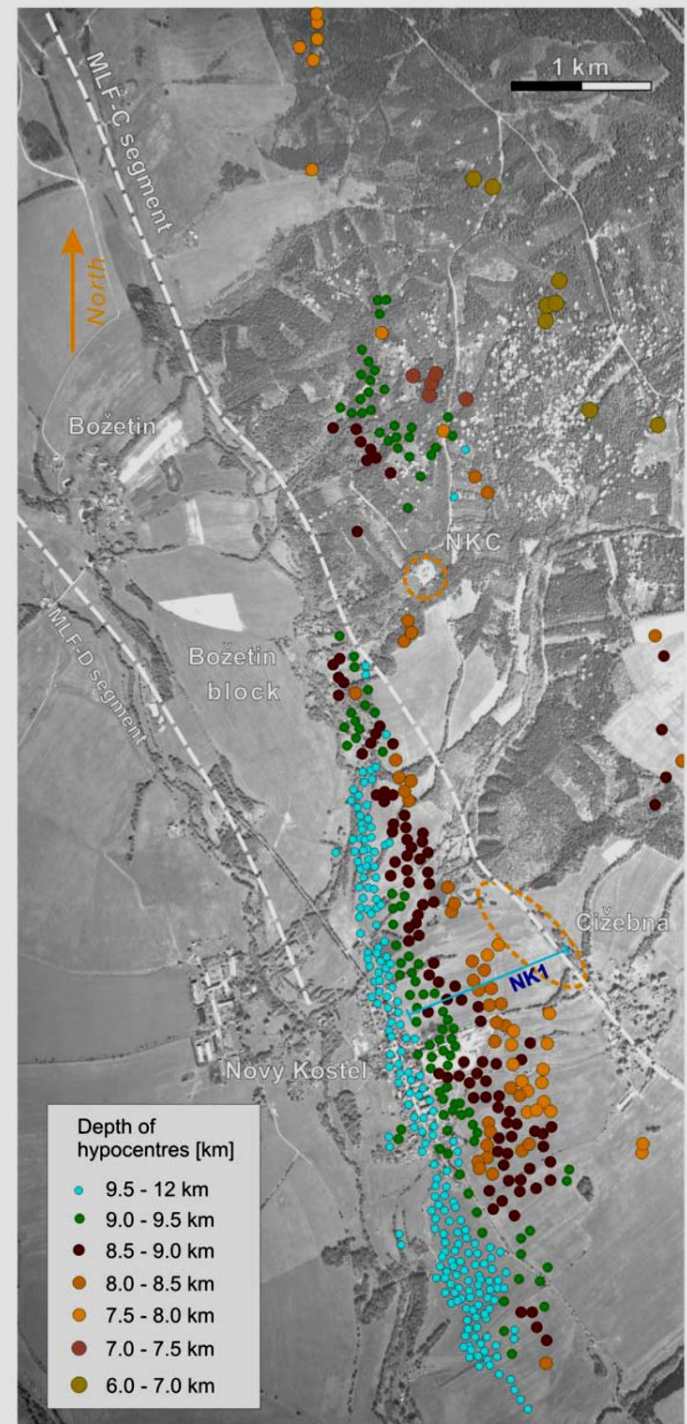
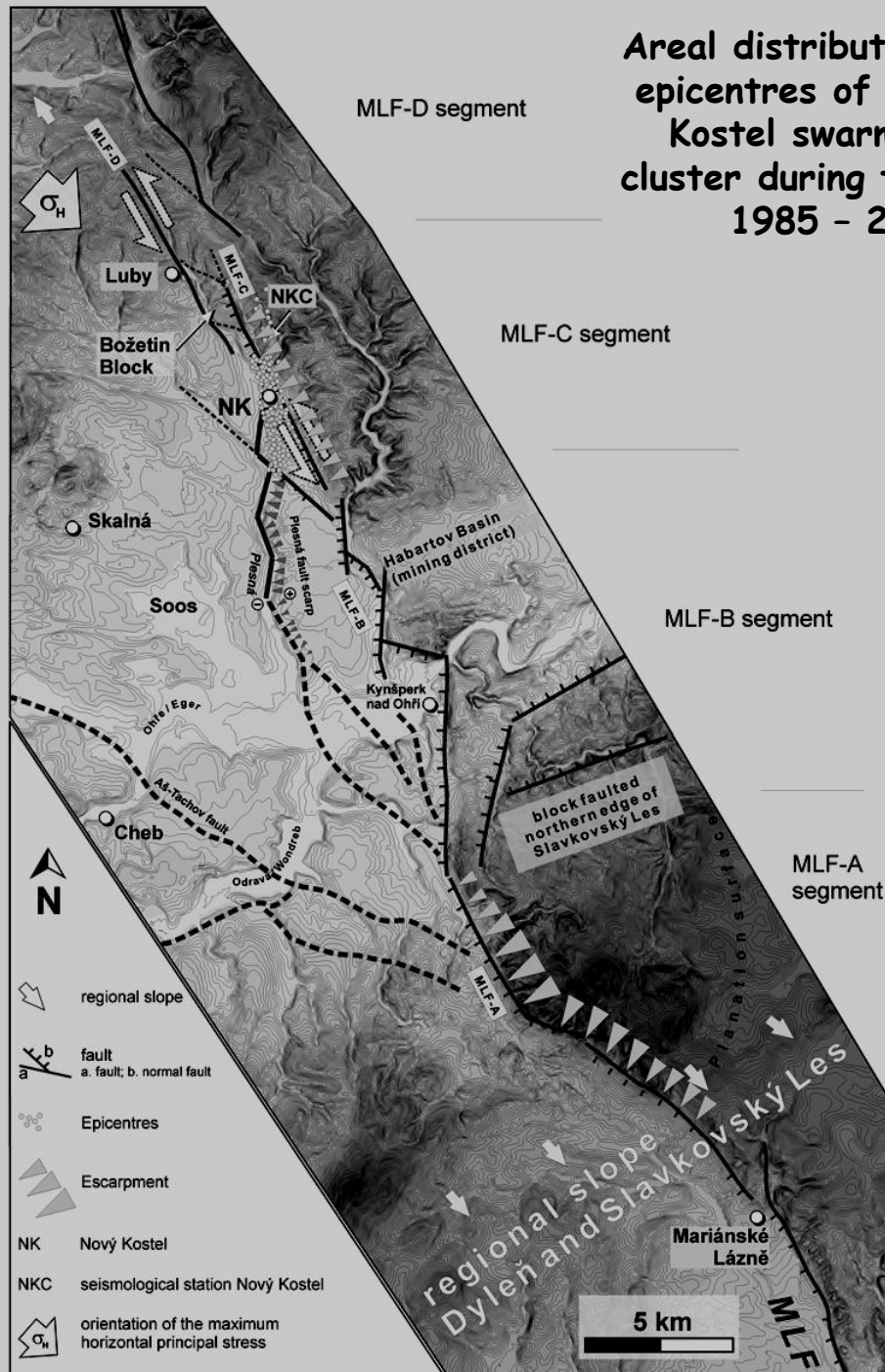
Pitra et al. (1999),
Grünthal et al. (1990),
Švancara (2000)

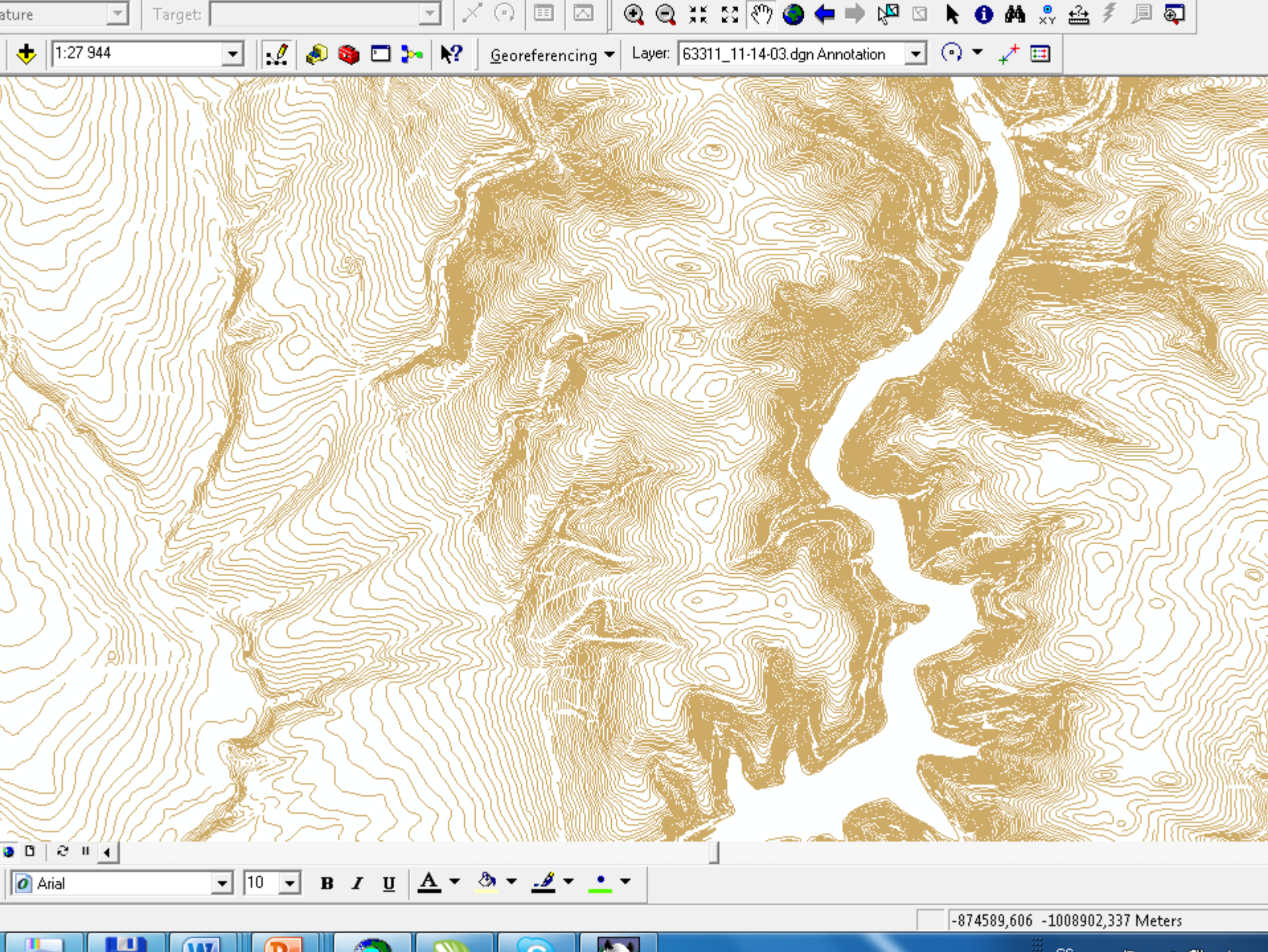
sinistral strike-slip fault
with max. horizontal
stress orientation in NW-
NNW direction

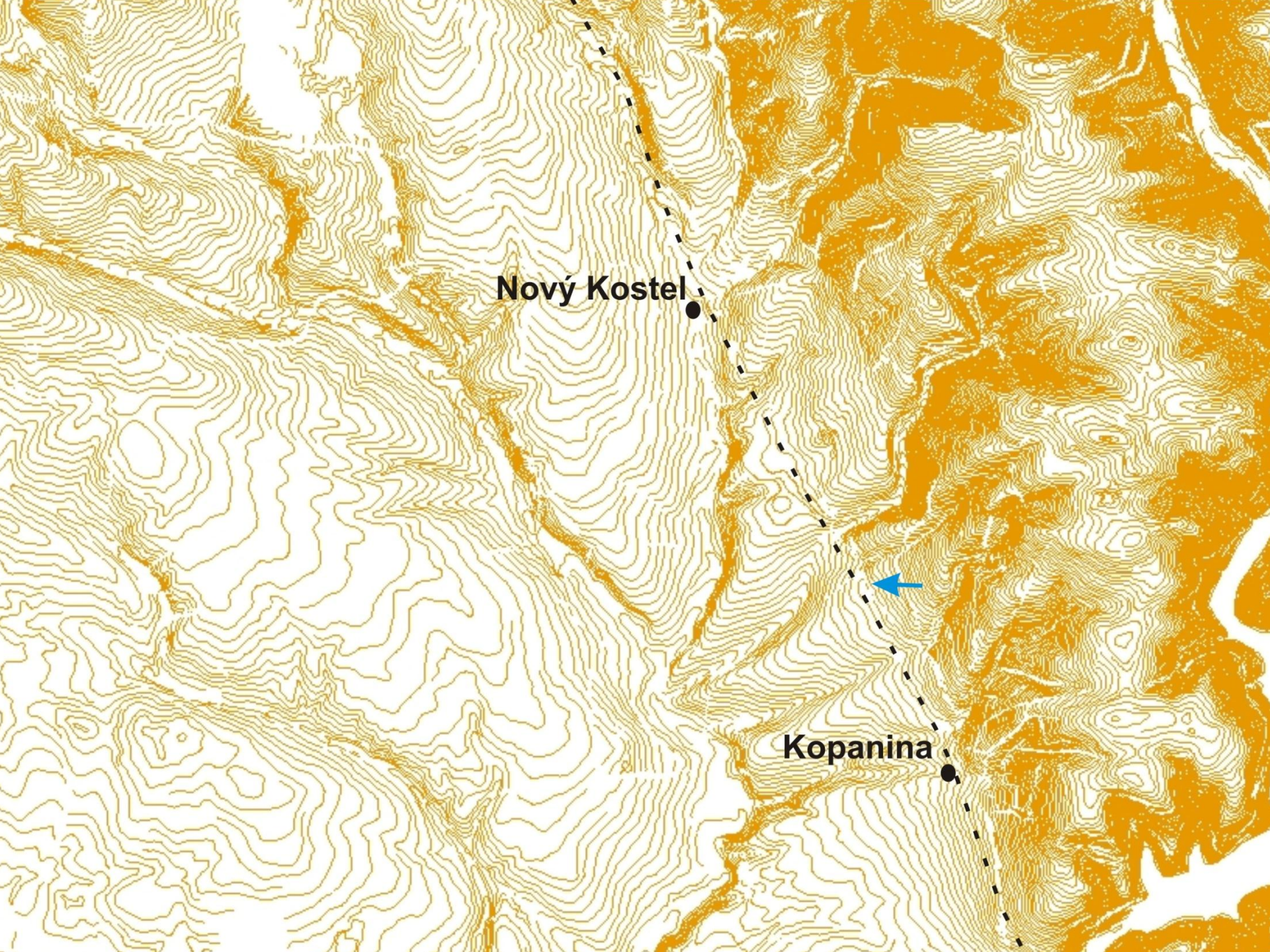
Špičák (1988),
Schunk et al. (2005)



Areal distribution of the epicentres of the Nový Kostel swarm quake cluster during the period 1985 - 2001

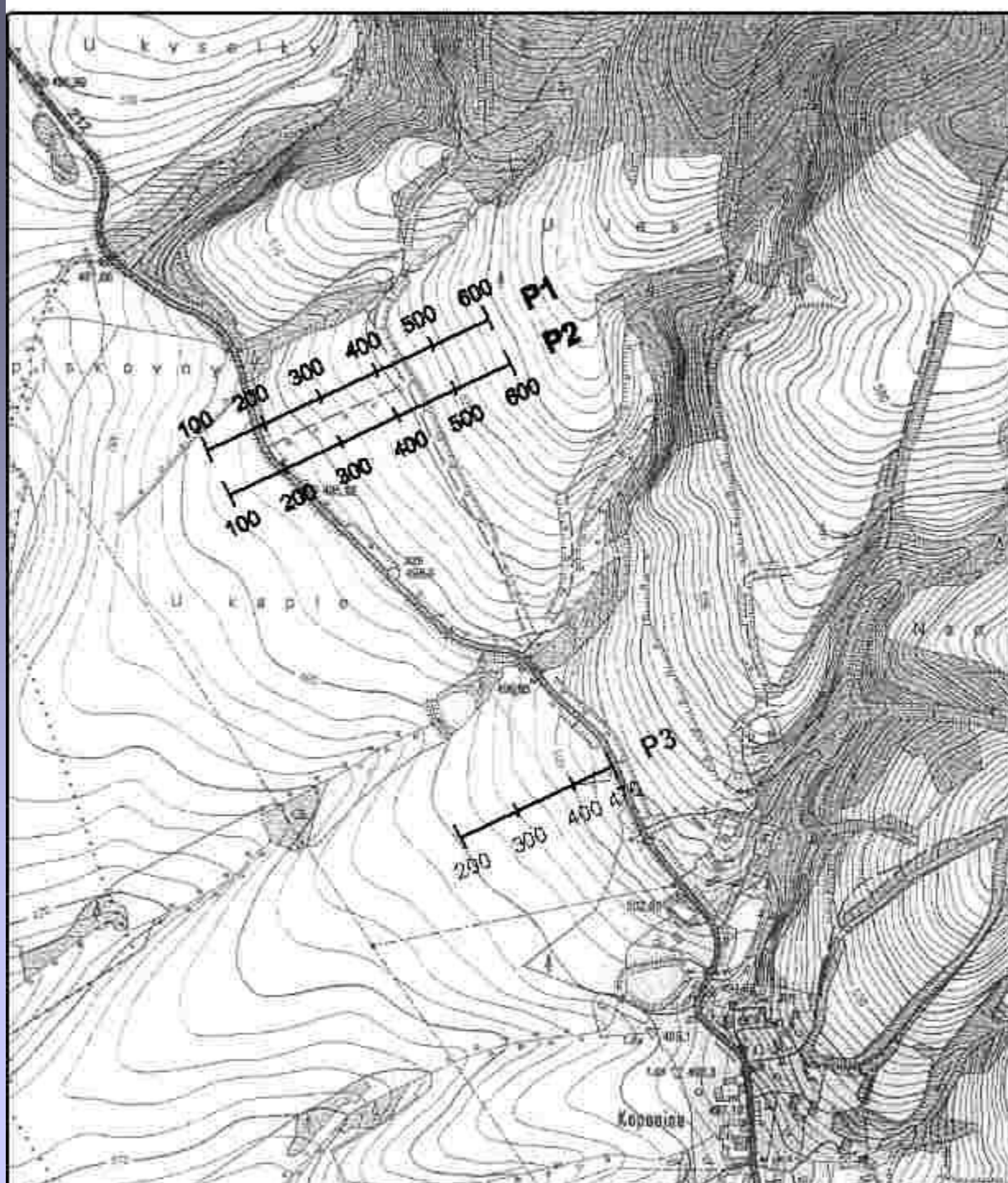






Nový Kostel

Kopanina



KOPANINA

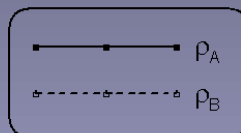
KOMBINOVANÉ PROFILOVÁNÍ

MAPA PROFILŮ 1 - 2

1 : 2000

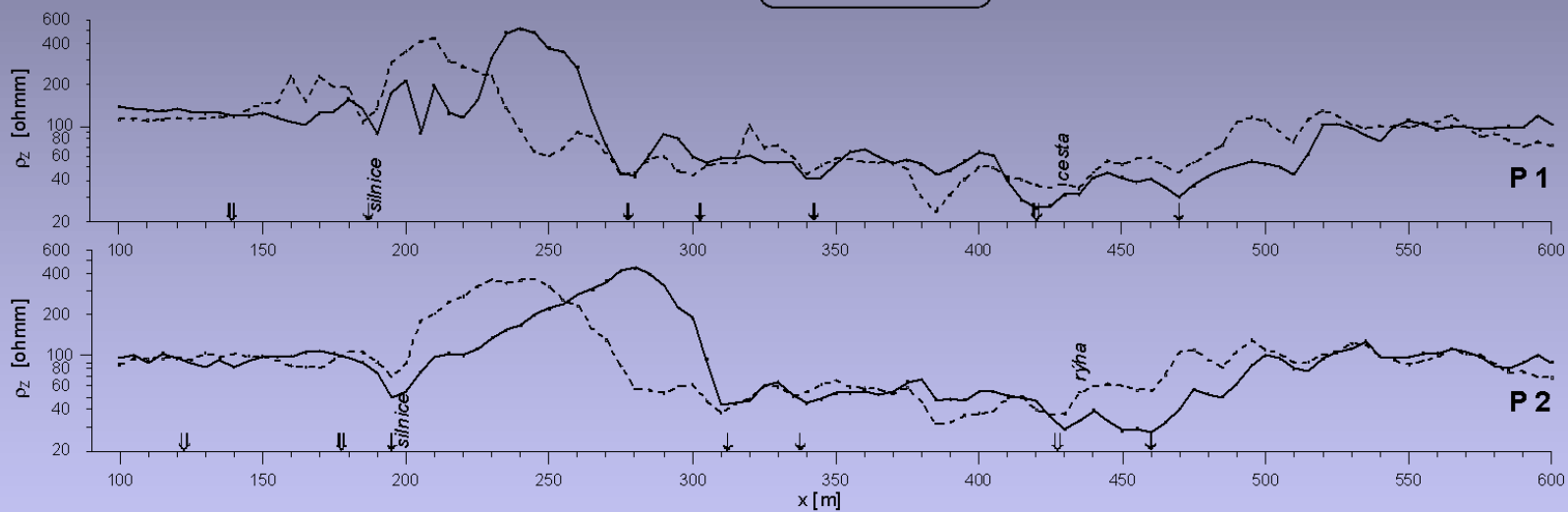


A 20 M 10 N
M 10 N 20 B

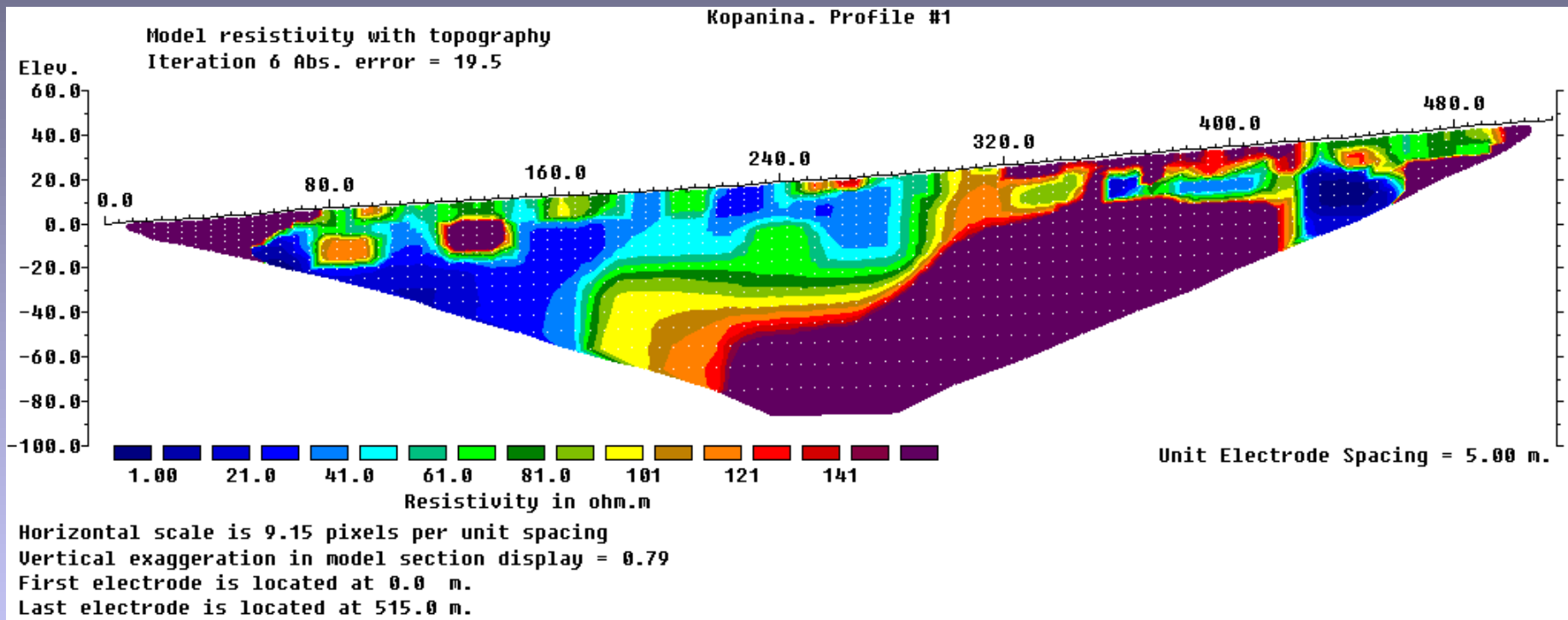


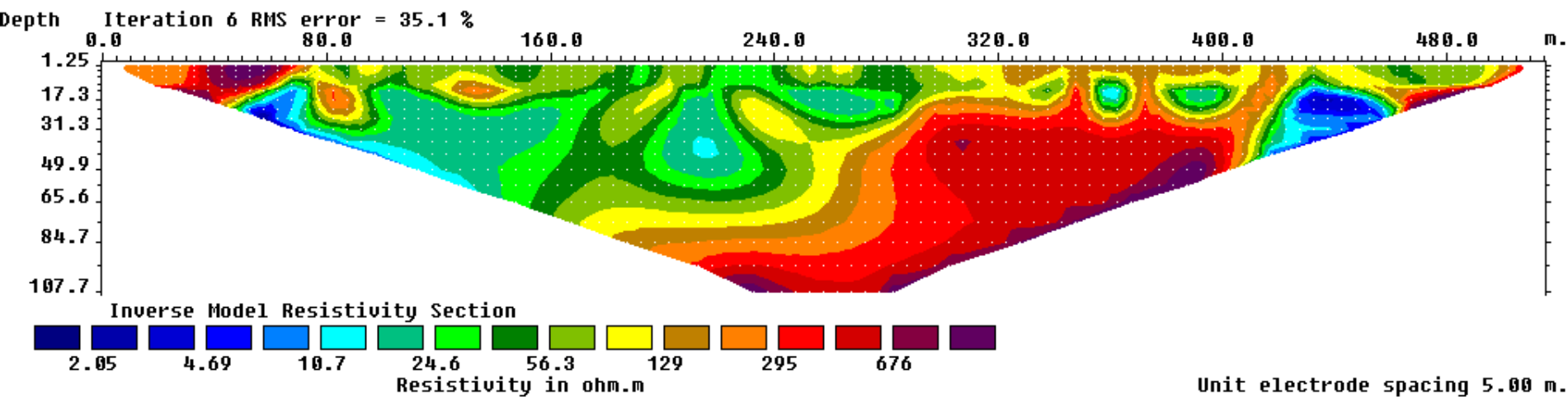
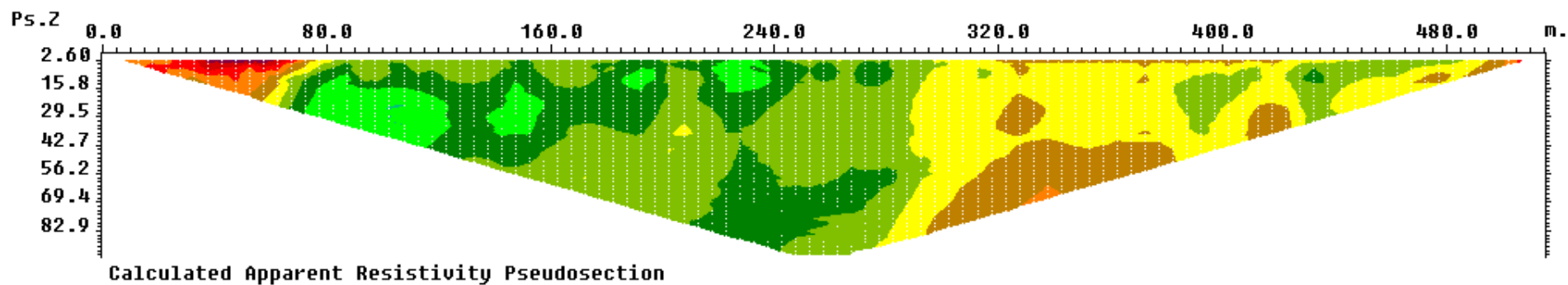
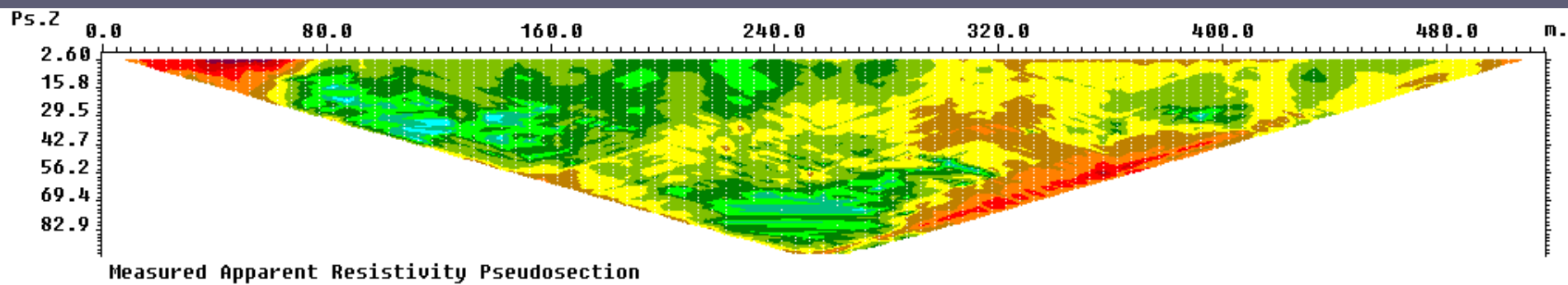
⇓ VÝRAZNÝ VODIČ

↓ MĚLKÝ VODIČ



Elektrická tomografie - multikabel

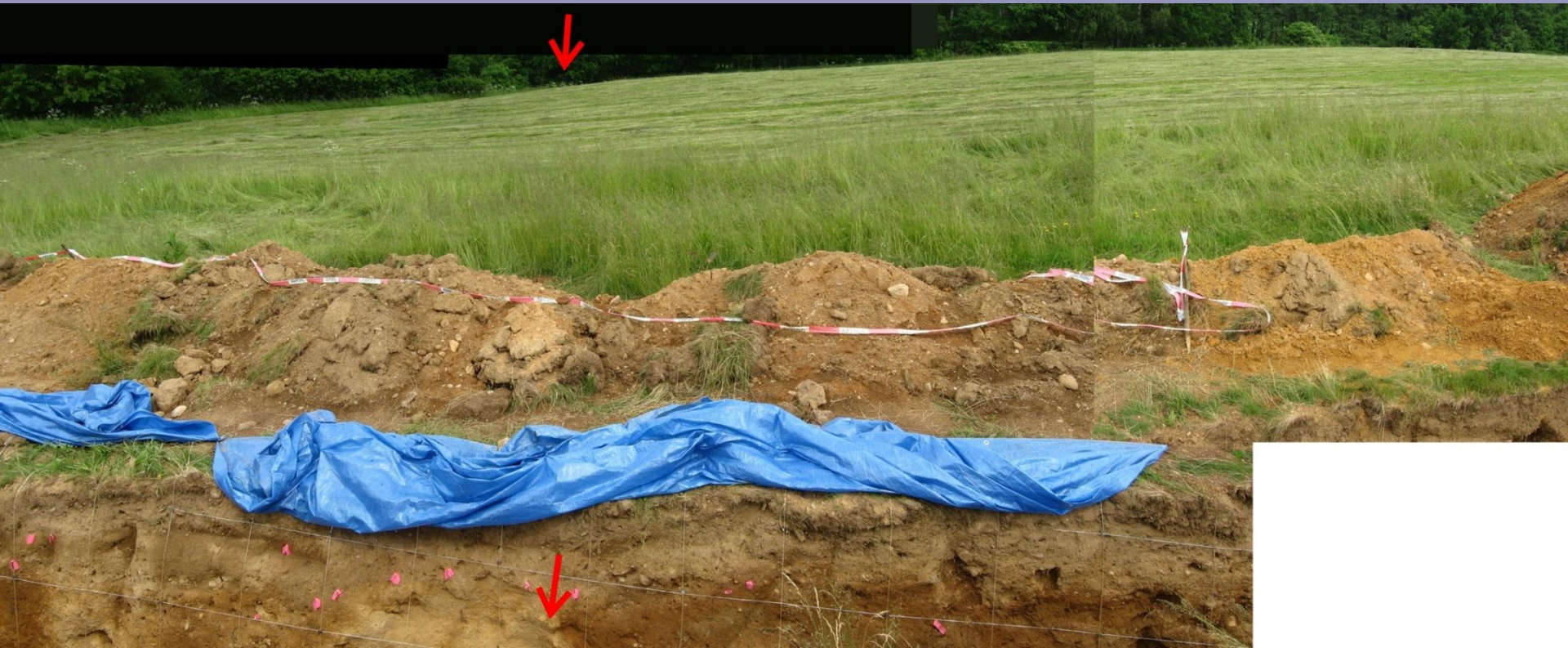




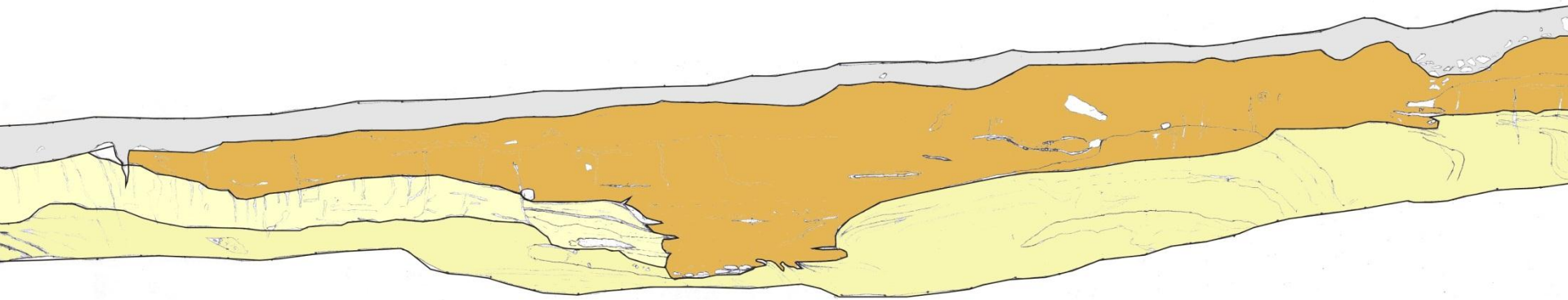


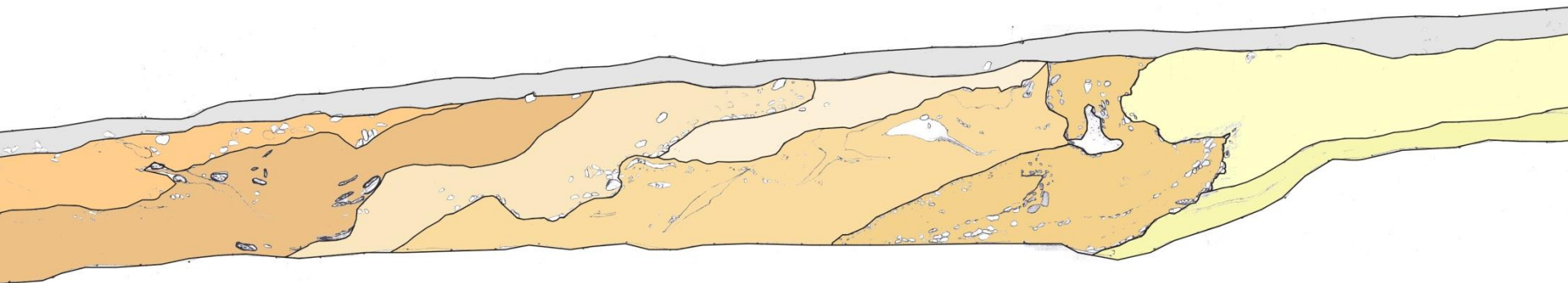


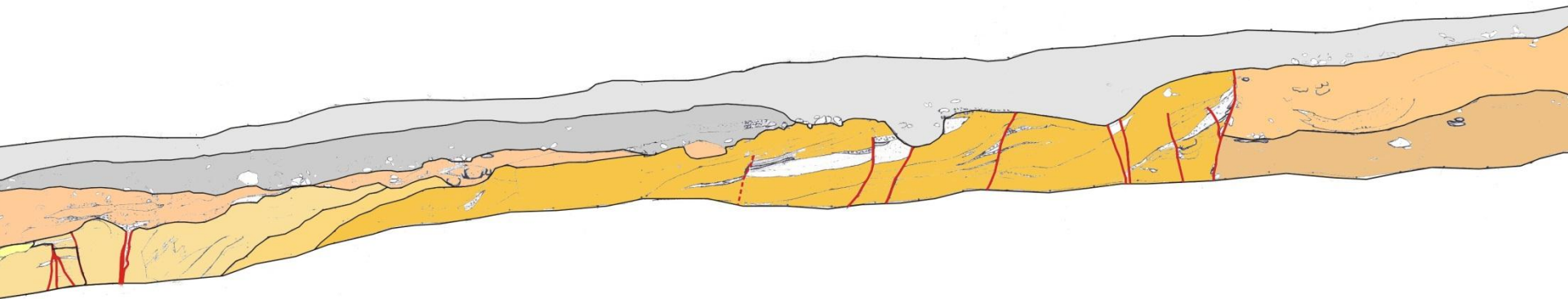








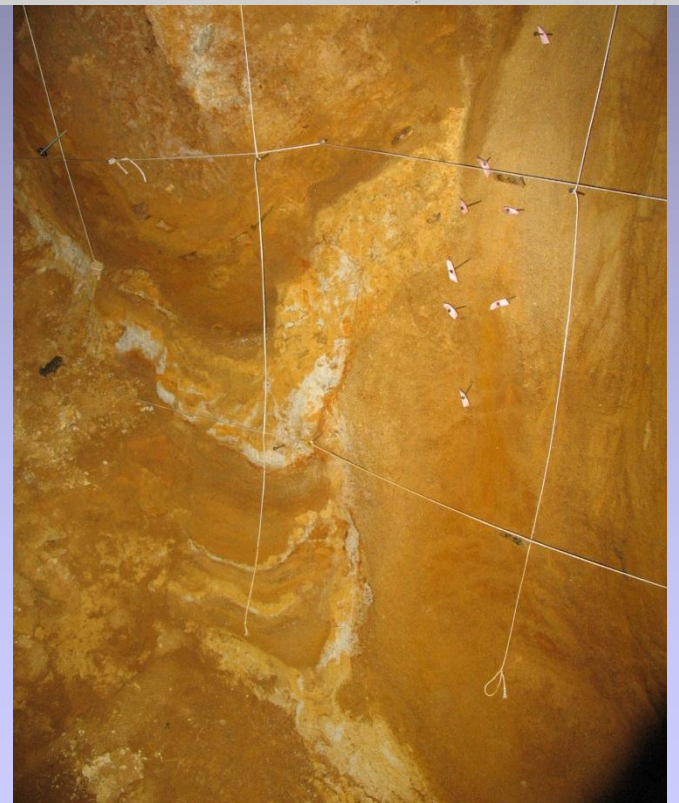


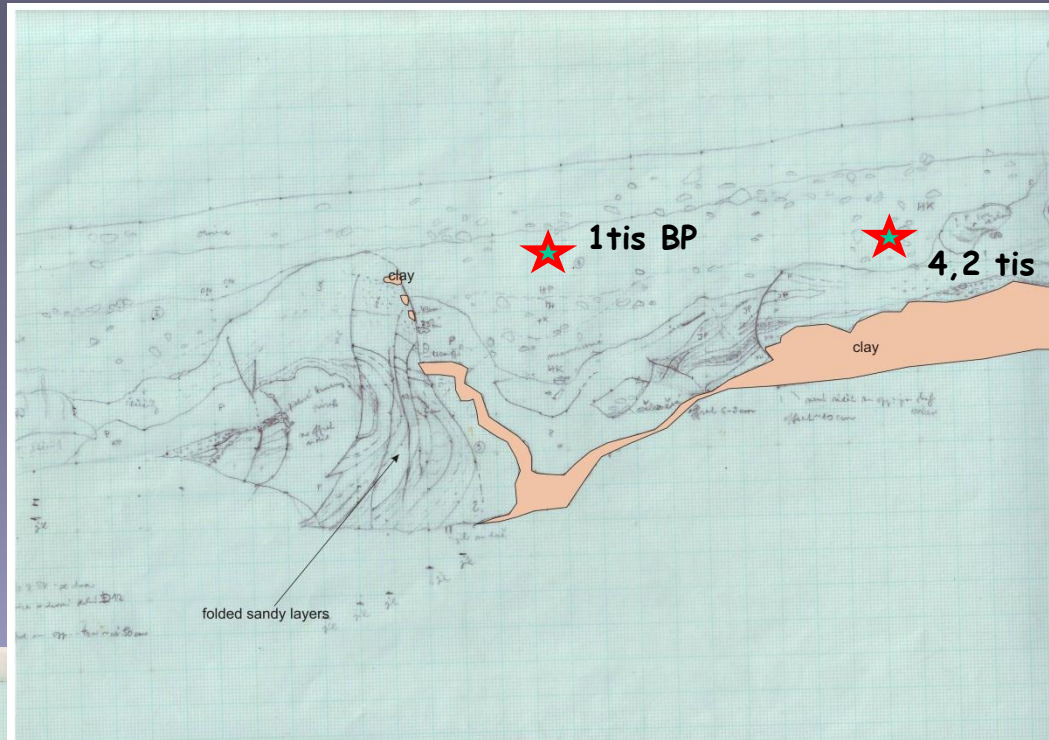




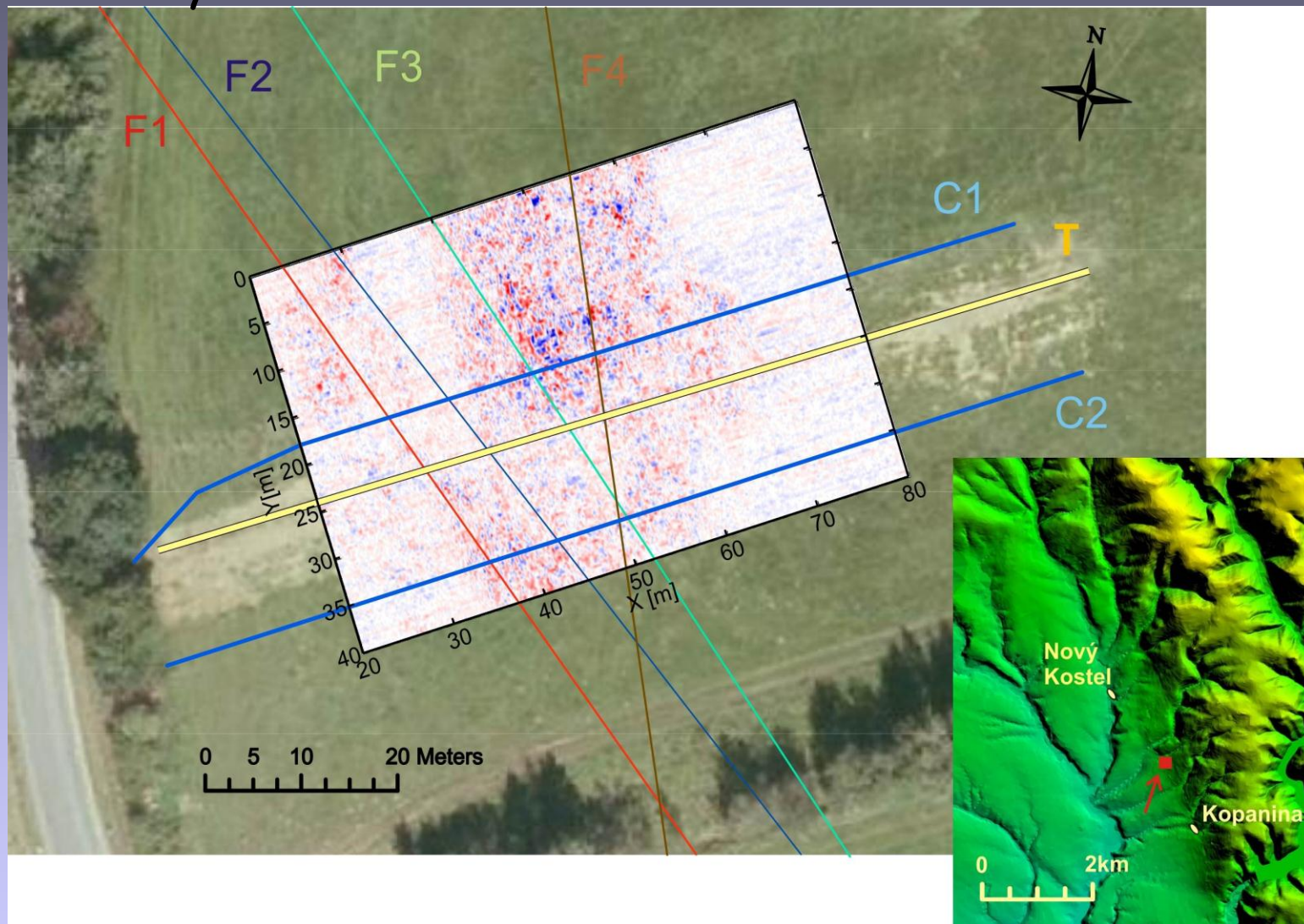






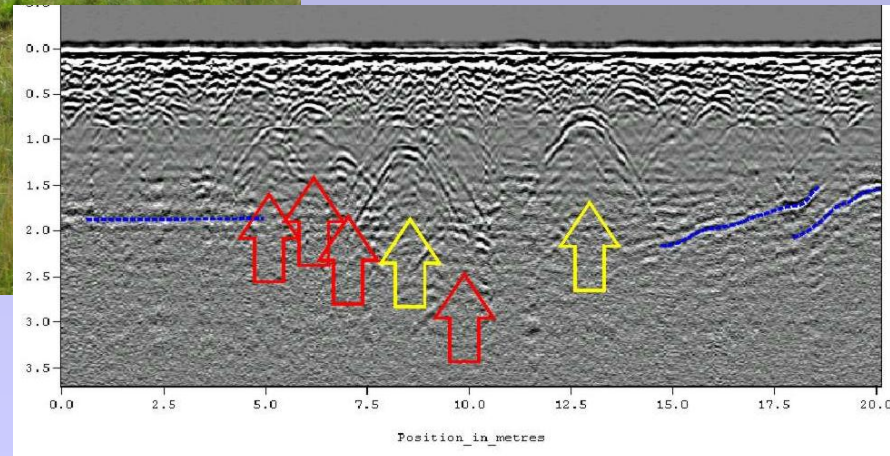


Geofyzika



GPR - ground penetration radar - georadar

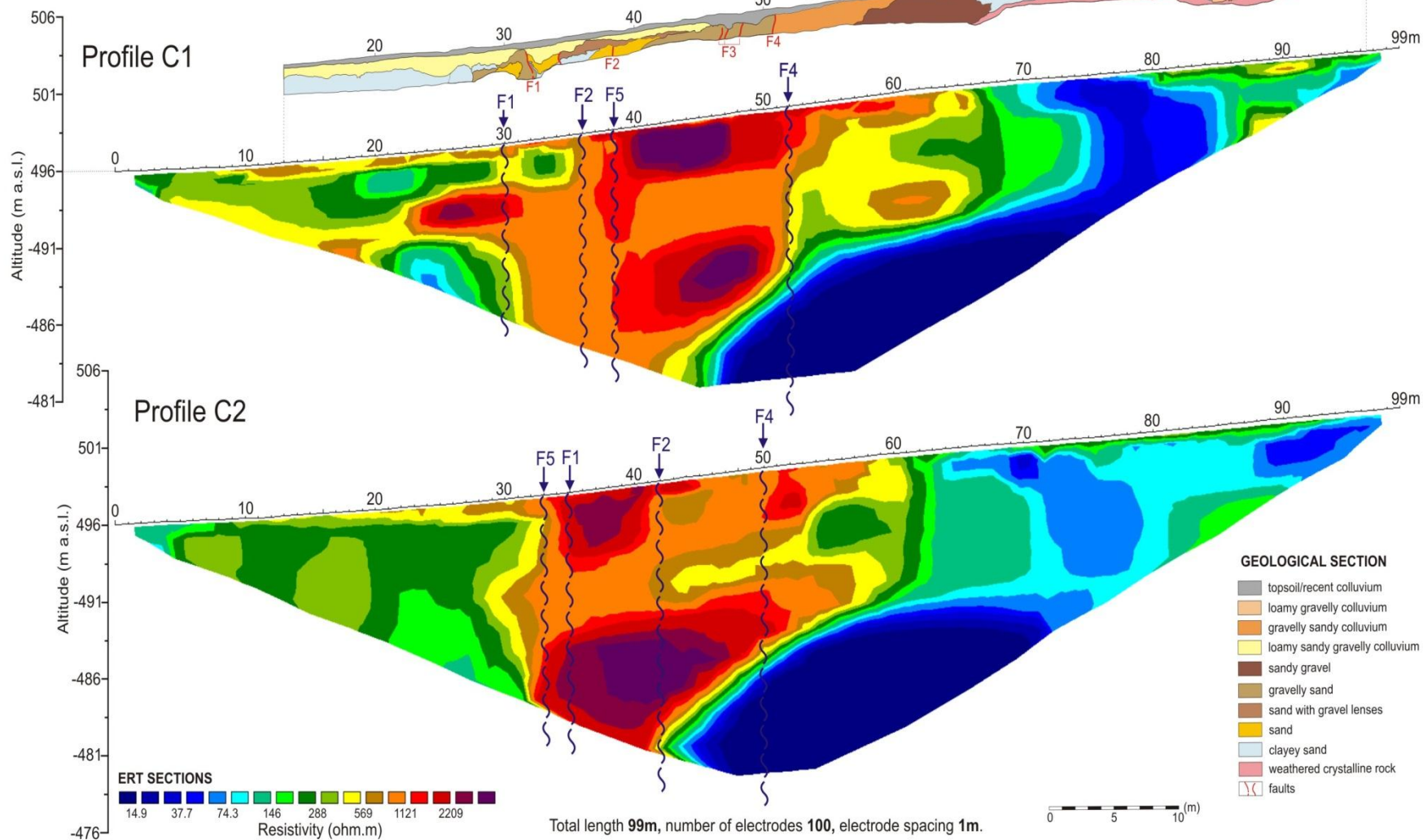
2 antény - vysílač a přijímač - vysílá elektromagnetické záření v rádiovém spektru vln (1mm - tis.km) - odraz od objektů pod povrchem



WSW

KOPANINA 1

ENE

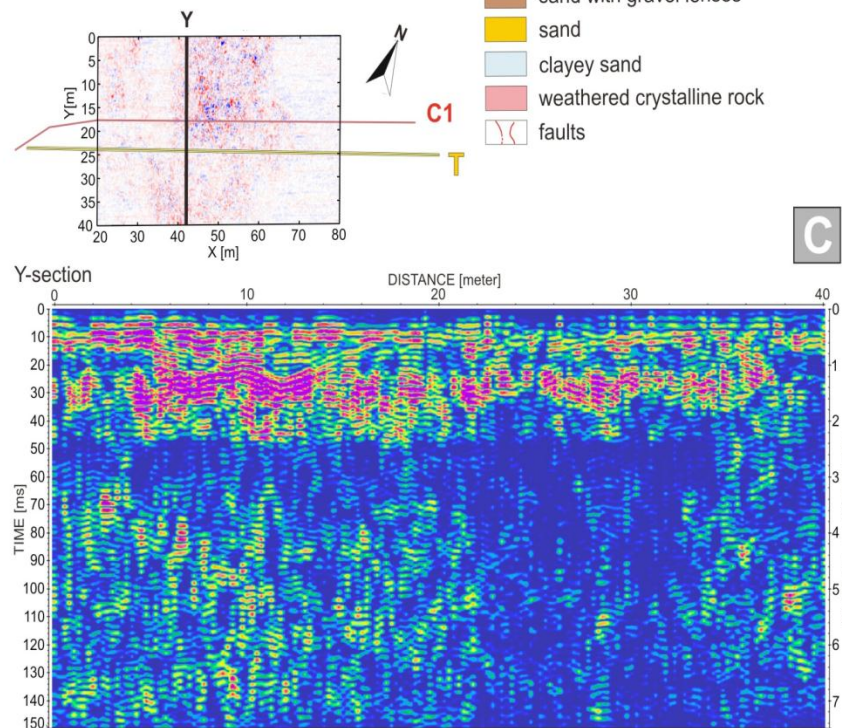
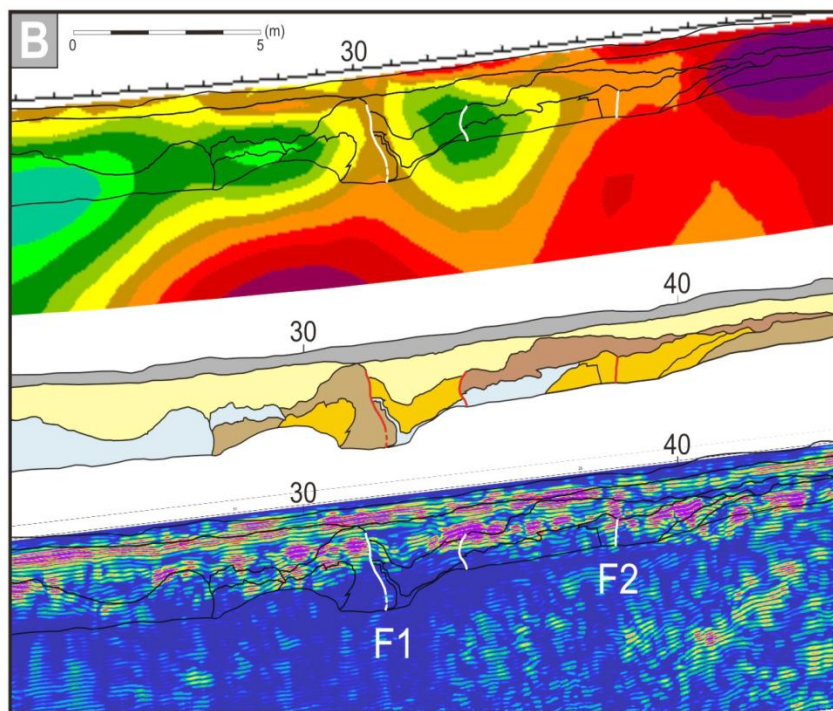
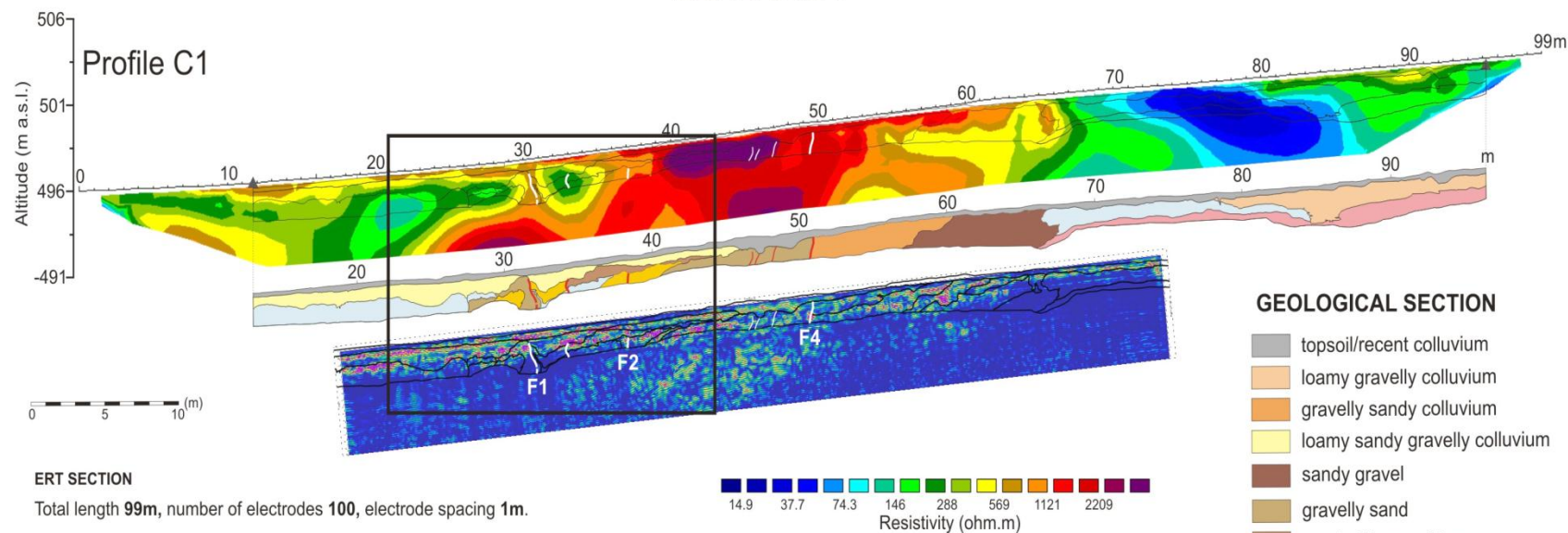


A

WSW

KOPANINA 1

ENE



2,2 - 4 m

4 - 6,2m

