

# Paleoseismologie, její metody a příklady využití



# Paleoseismologie

Co?

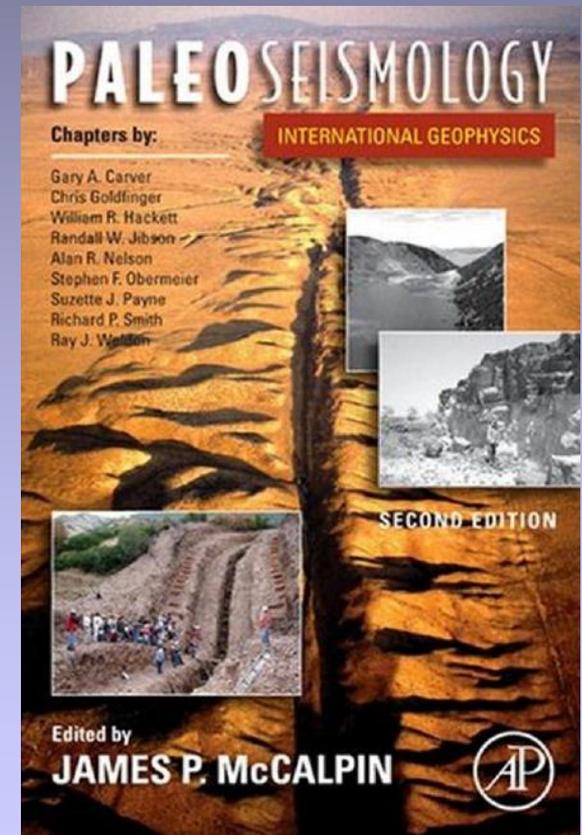
- zkoumá chování seismogenních zlomů v minulosti

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

Seismologové - pracují s daty naměřenými instrumentálně během zemětřesení

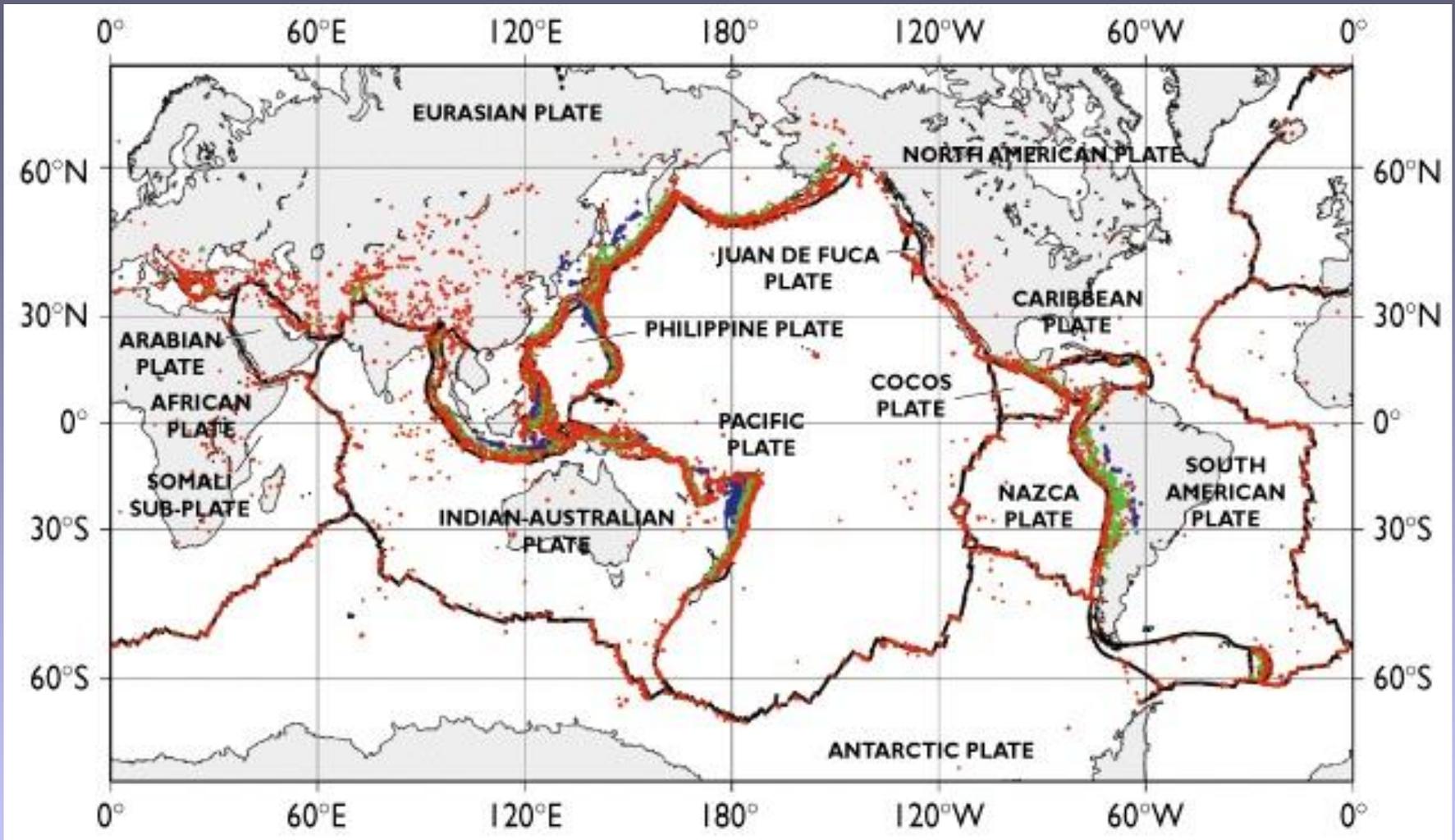
X

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)

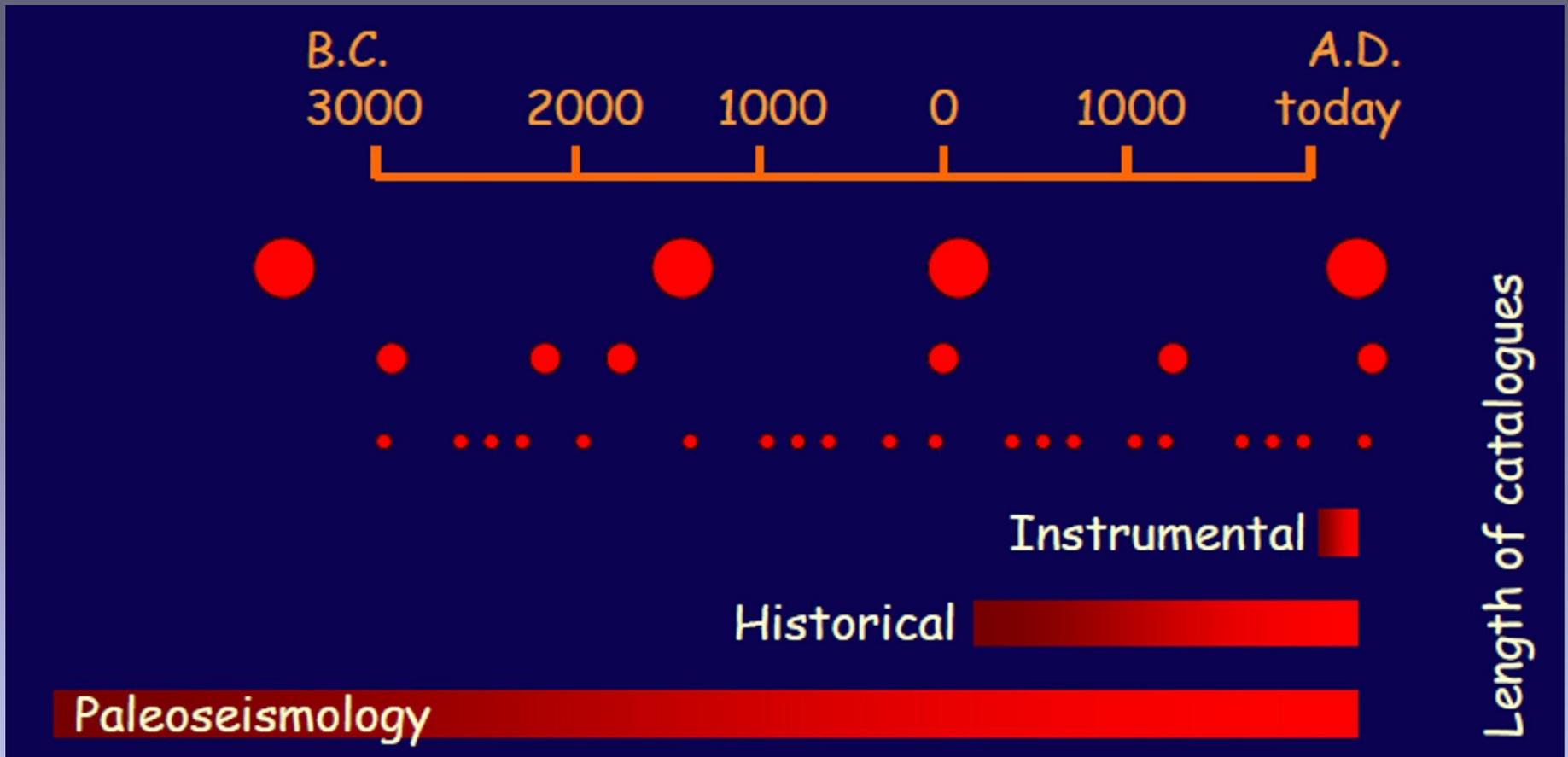
Většina zemí - záznam zemětřesení pouze několik stovek let  
(historická a instrumentální seismicita)

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

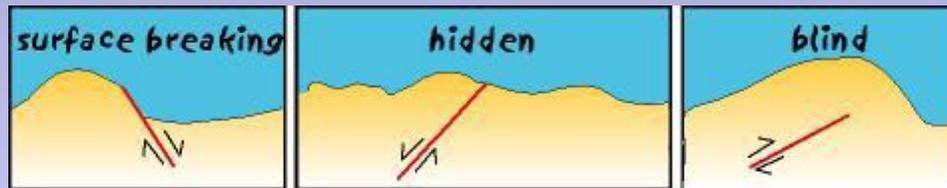
Hodnocení seismického ohrožení- založeného pouze na krátkém historickém záznamu - 2 problémy

- ❖ 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)

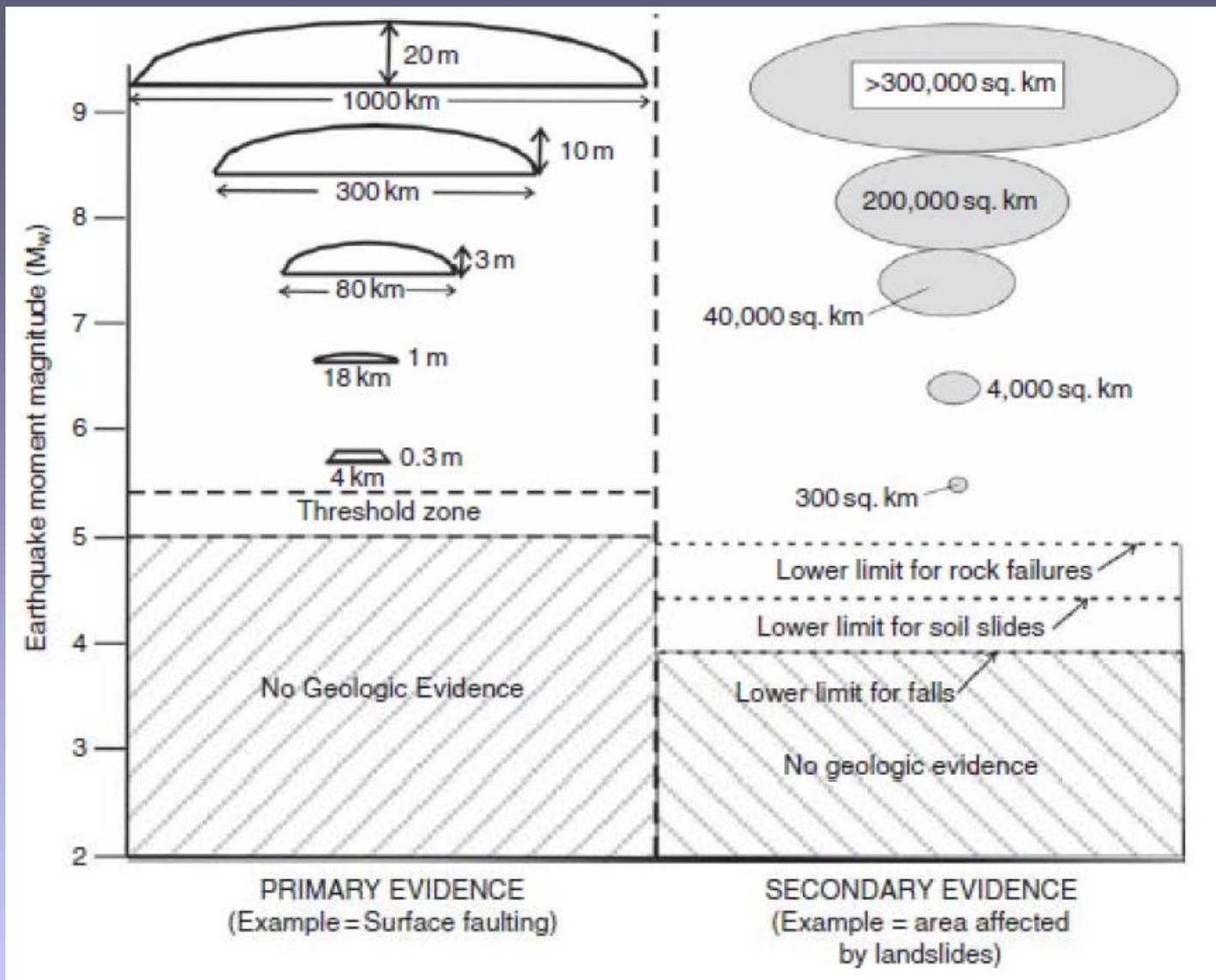


paleoseismologie rozšiřuje záznam zemětřesení směrem do minulosti, katalogy historických zemětřesení často příliš krátké ve srovnání s průměrným recurrence time

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

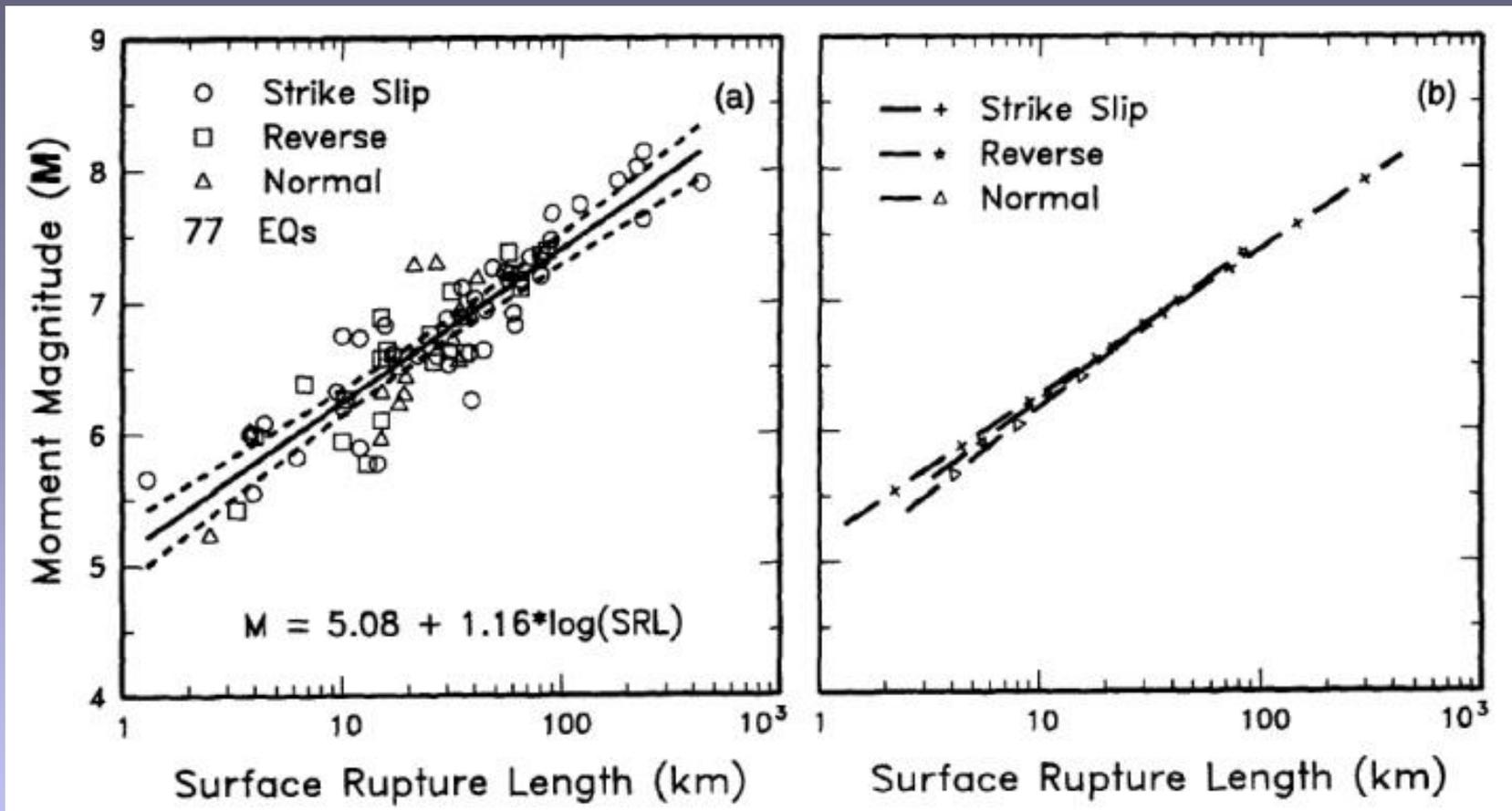


Menší zemětřesení - geologický projev zřídka vytvoří či zachová  
Typ zlomů - poklesy  $M \geq 6,3$ ; horizontální posuny v j. Kalifornii -  $M = 6,25-6,5$ ,  
Hloubka seismogenní kůry - hlubší potřebuje větší  $M$ ,  
Loma Prieta 1989  $M=6,9$ , 2m slip v hloubce 18-3km, žádná povrchová ruptura  
Gujarat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

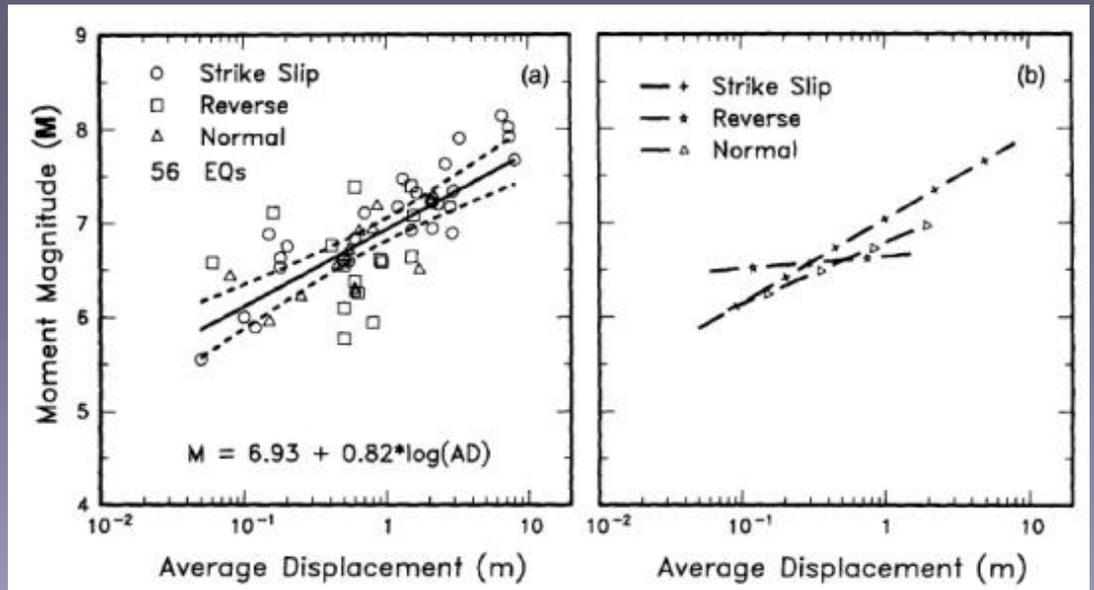
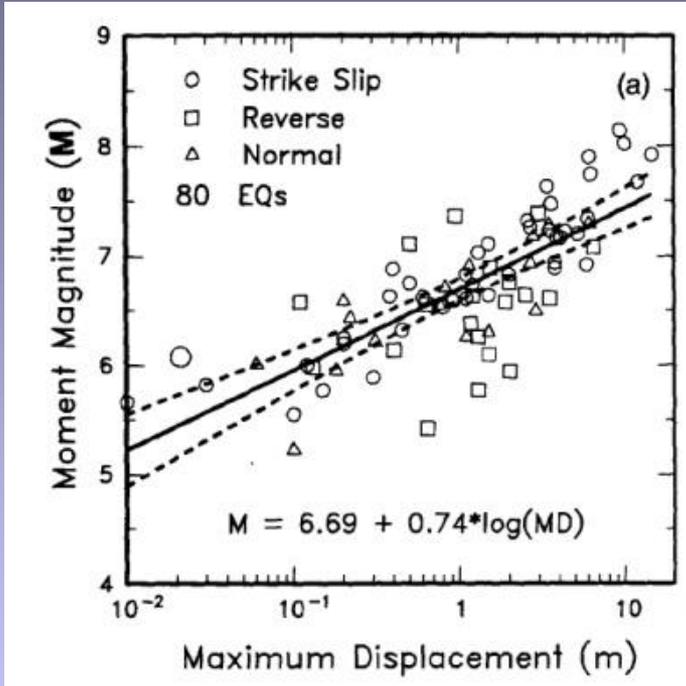


Empirické vztahy odvozeny z historických zemětřesení, menší  $M_w$   
 - prehistorická zemětřesení - lze studovat jen s větším  $M_w$

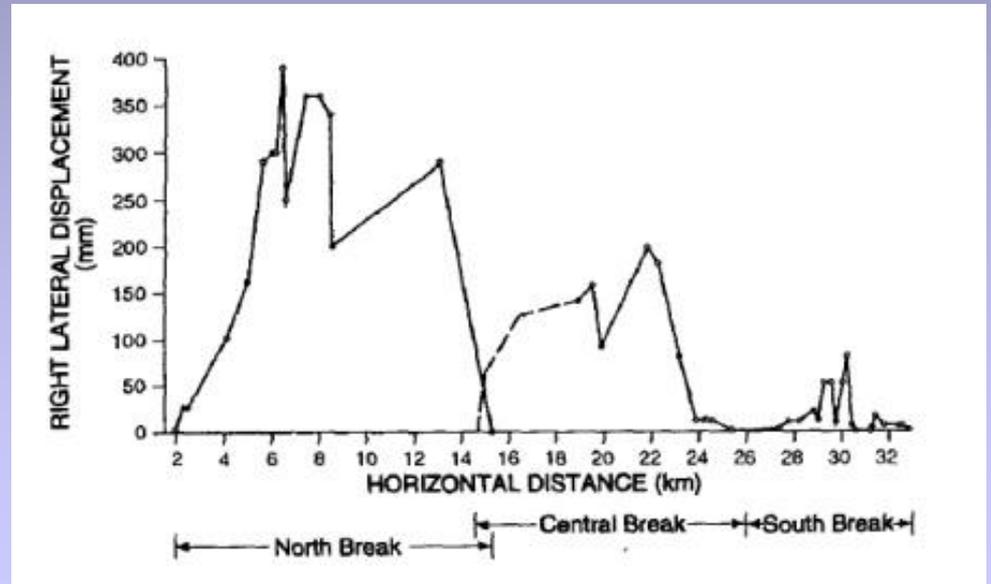
Empirické vztahy: délka zlomu, velikost posunu, velikost magnituda, např. zlom o délce 80km vygeneruje zemětřesení  $M_w=7,5$  a posun okolo 3m



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

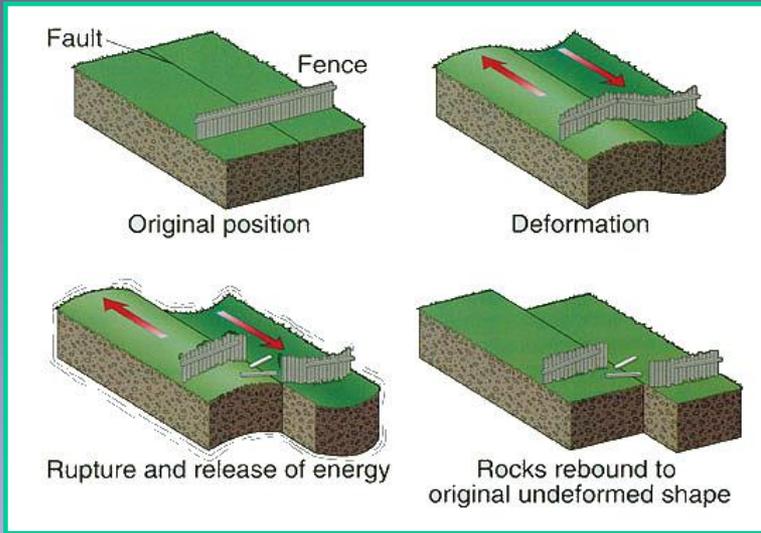


Průměr mnohočetných měření posunů podél zlomu

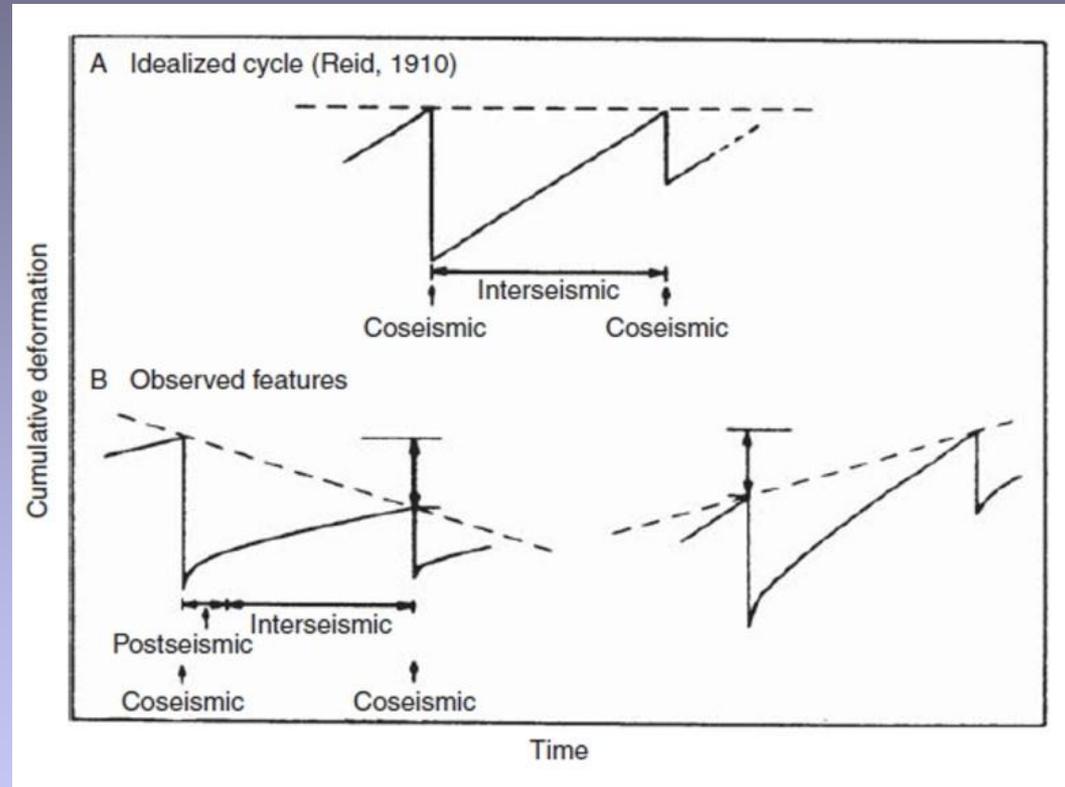


9. 4. 1968, Borego Mts, CA

# Seismický cyklus – elastický model



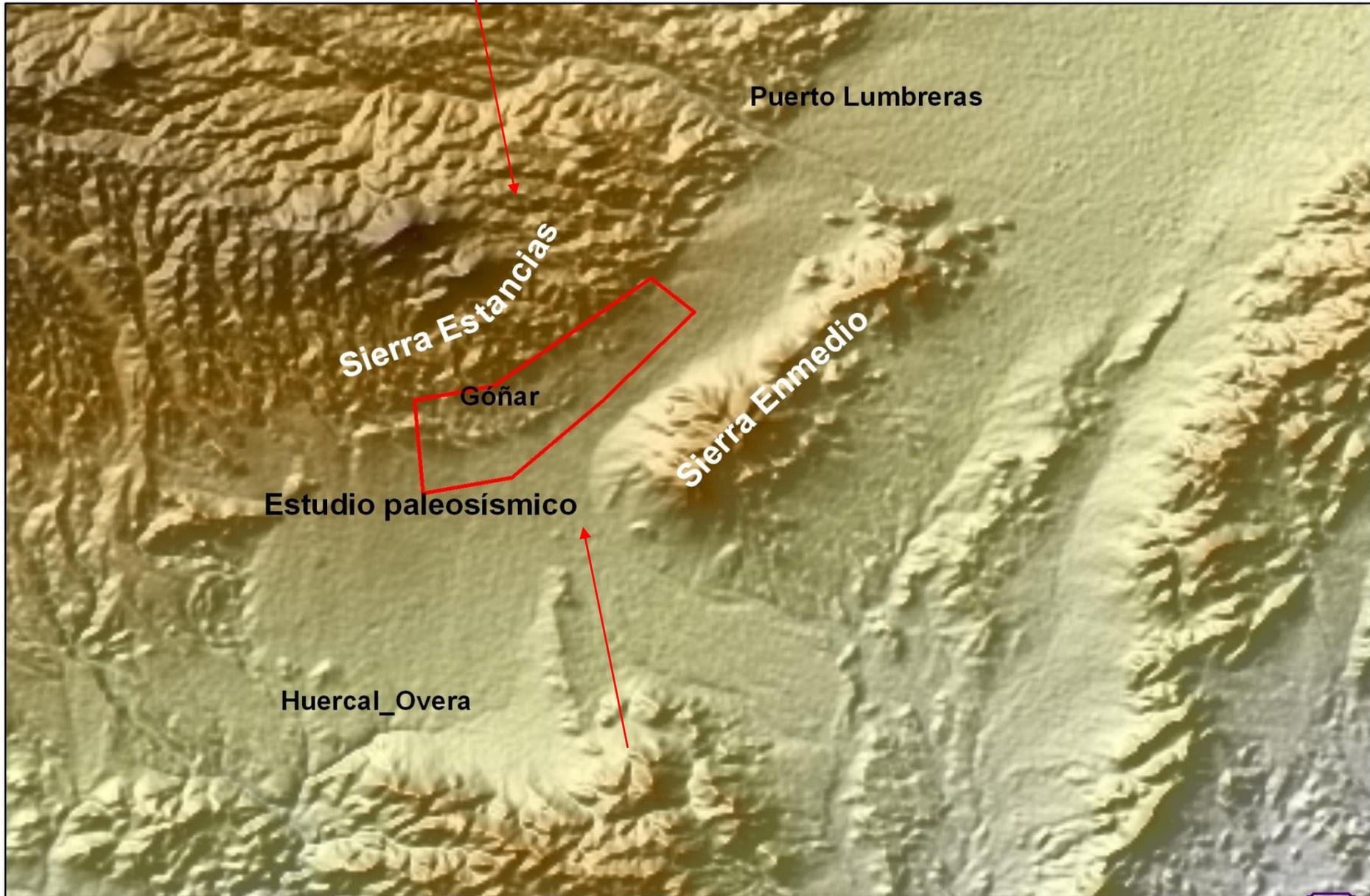
Idealizovaný cyklus -  
charakteristické zemětřesení



Earthquake deformation cycle

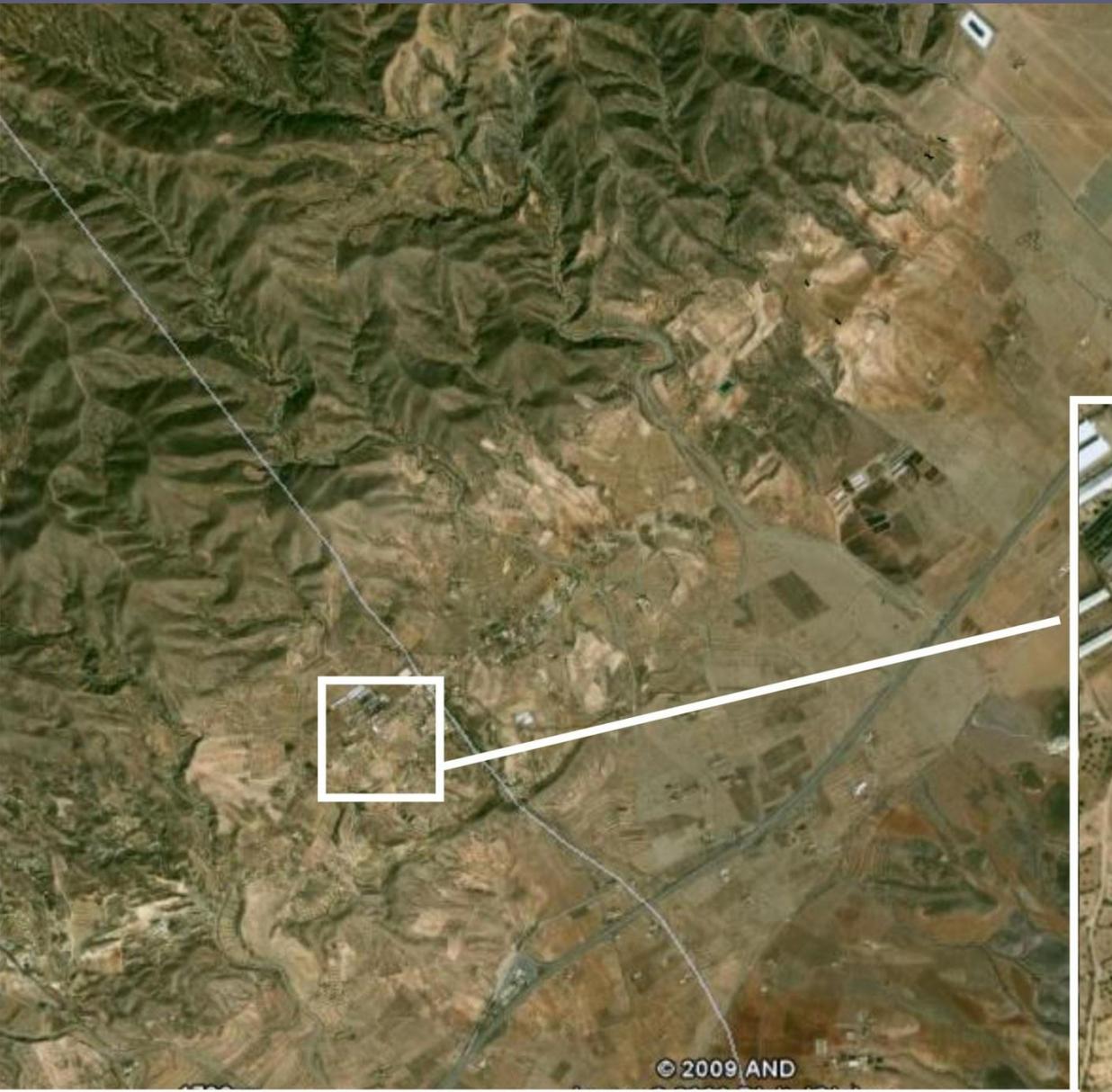
# Paleoseismologické studium zlomů

- ❖ 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



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

# 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

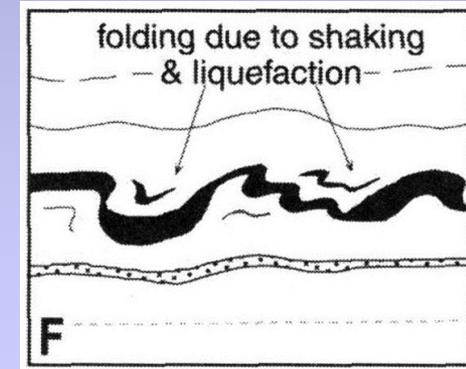
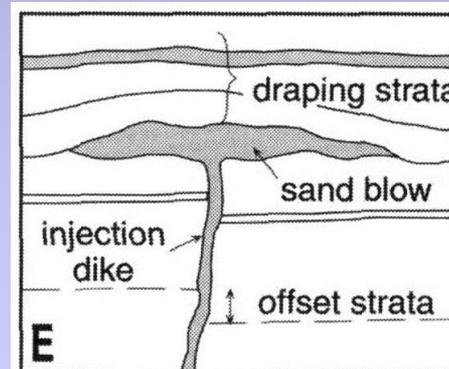
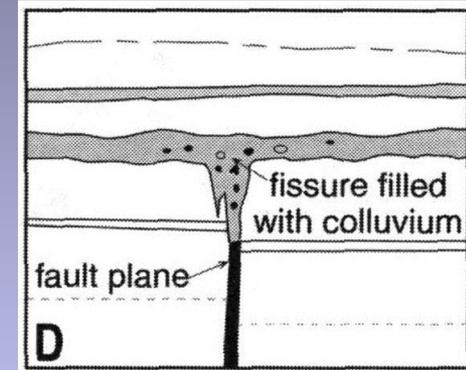
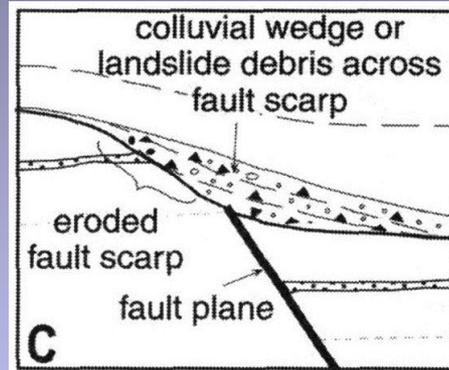
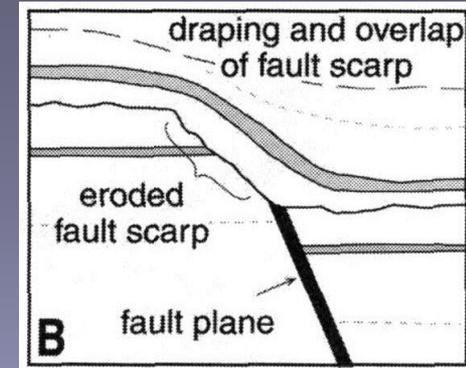
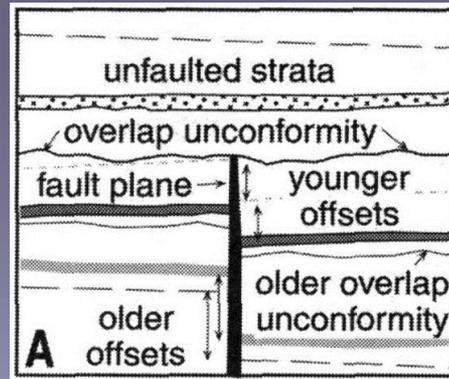
❖ datovatelný materiál - určení chronologie pohybů



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??

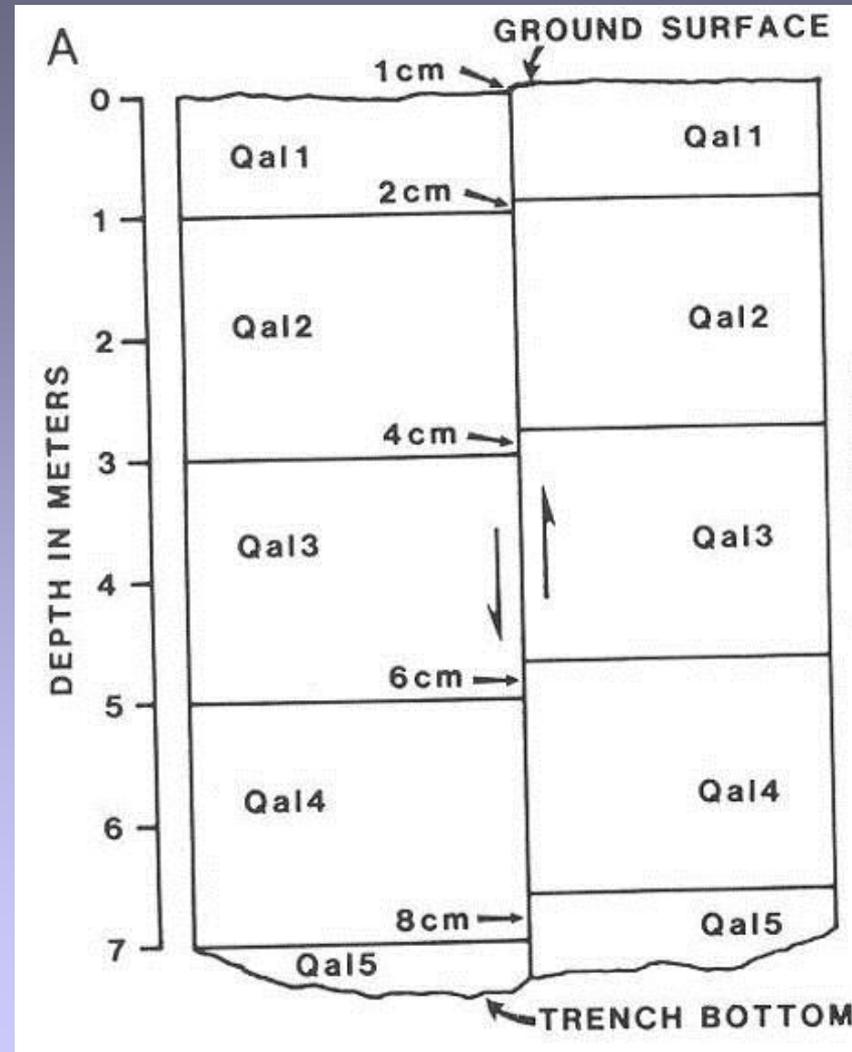
Retrodeformace

4 události – vertikální posun v průměru 2cm

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

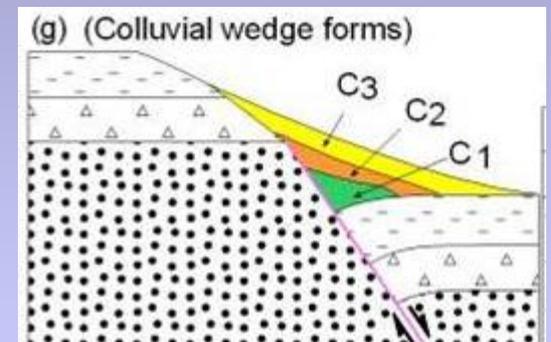
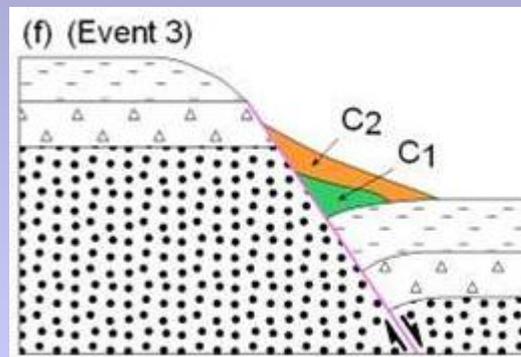
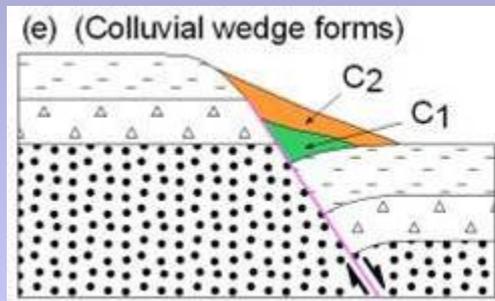
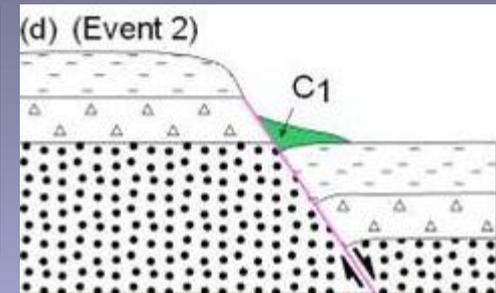
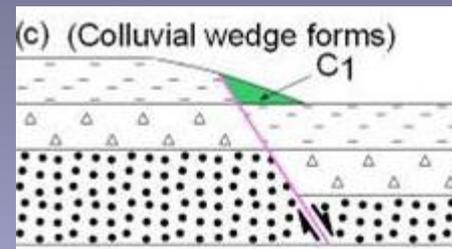
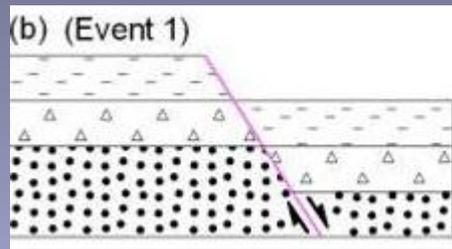
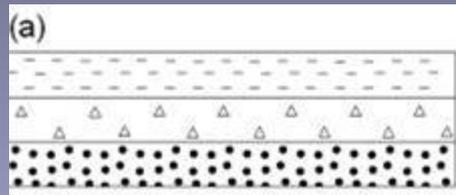
Nejmladší (Qal1) má jen jeden event → 2 cm na bázi, ale 1 cm na povrchu !

Povrchová eroze



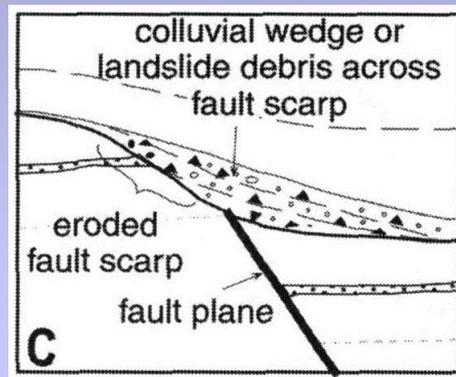
# Poklesy

## Coluvial wedge

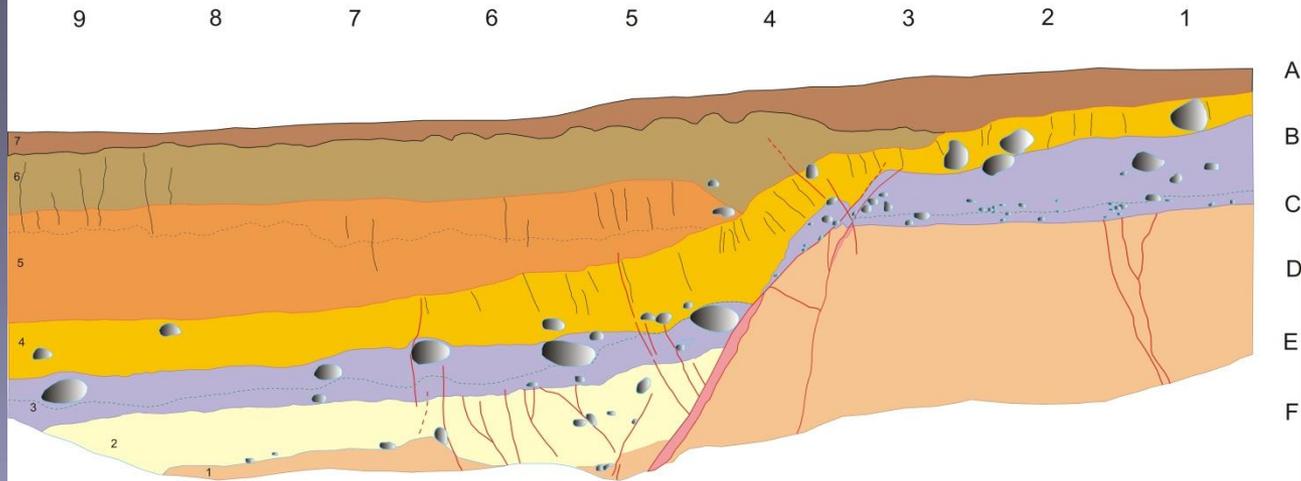




Gravitační  
nestabilita,  
materiál tvořící  
wedge pochází z  
fault scarp



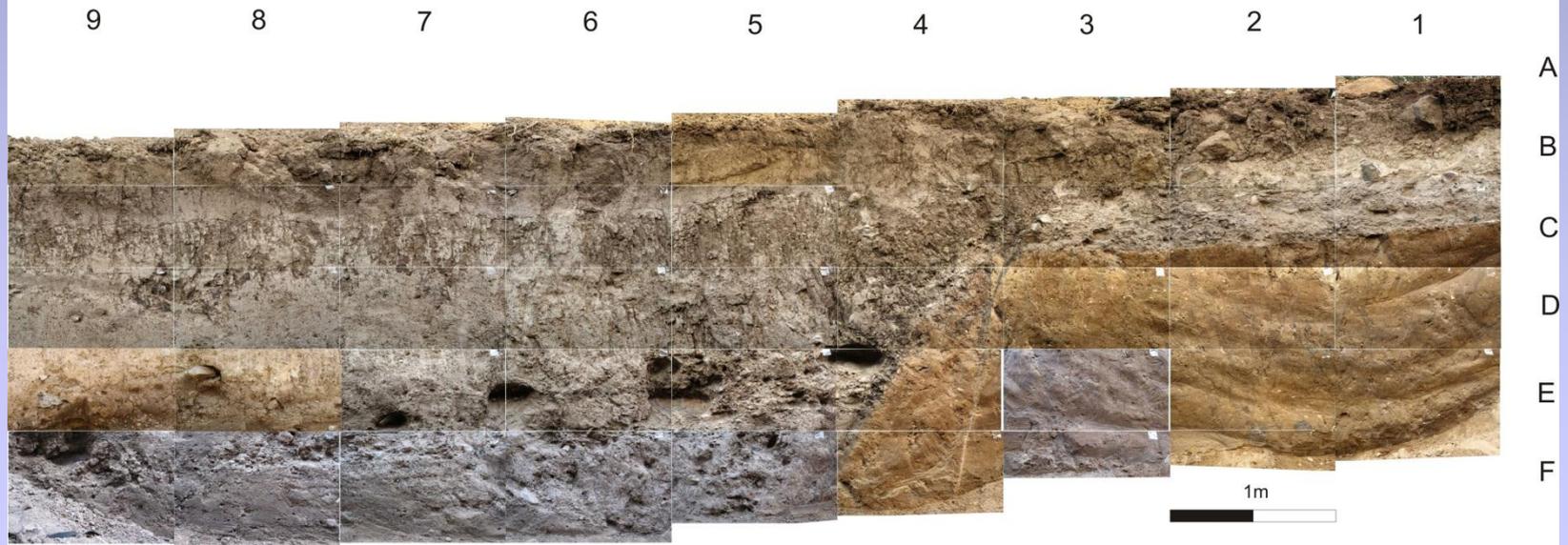
Trench Juanacatlán (1) - East wall



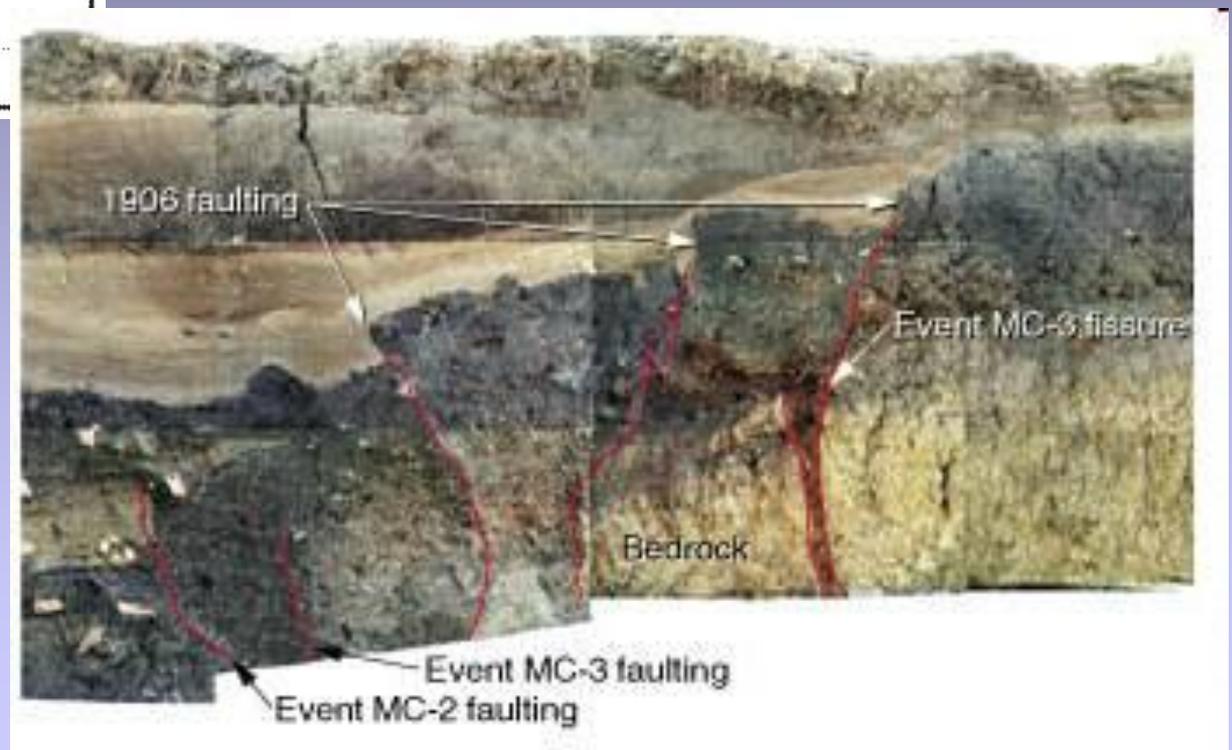
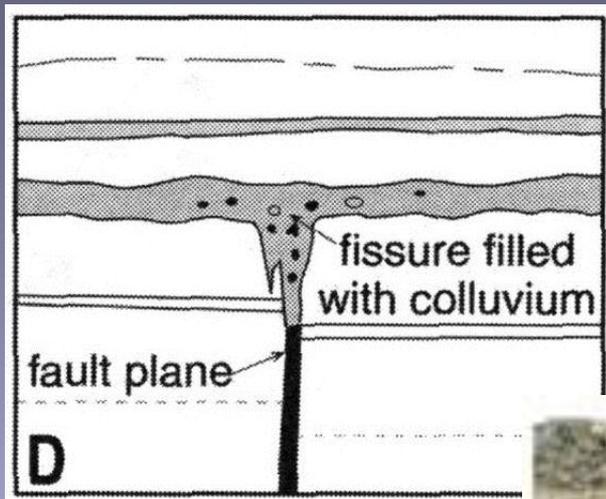
**Legend**

- |  |   |
|--|---|
|  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

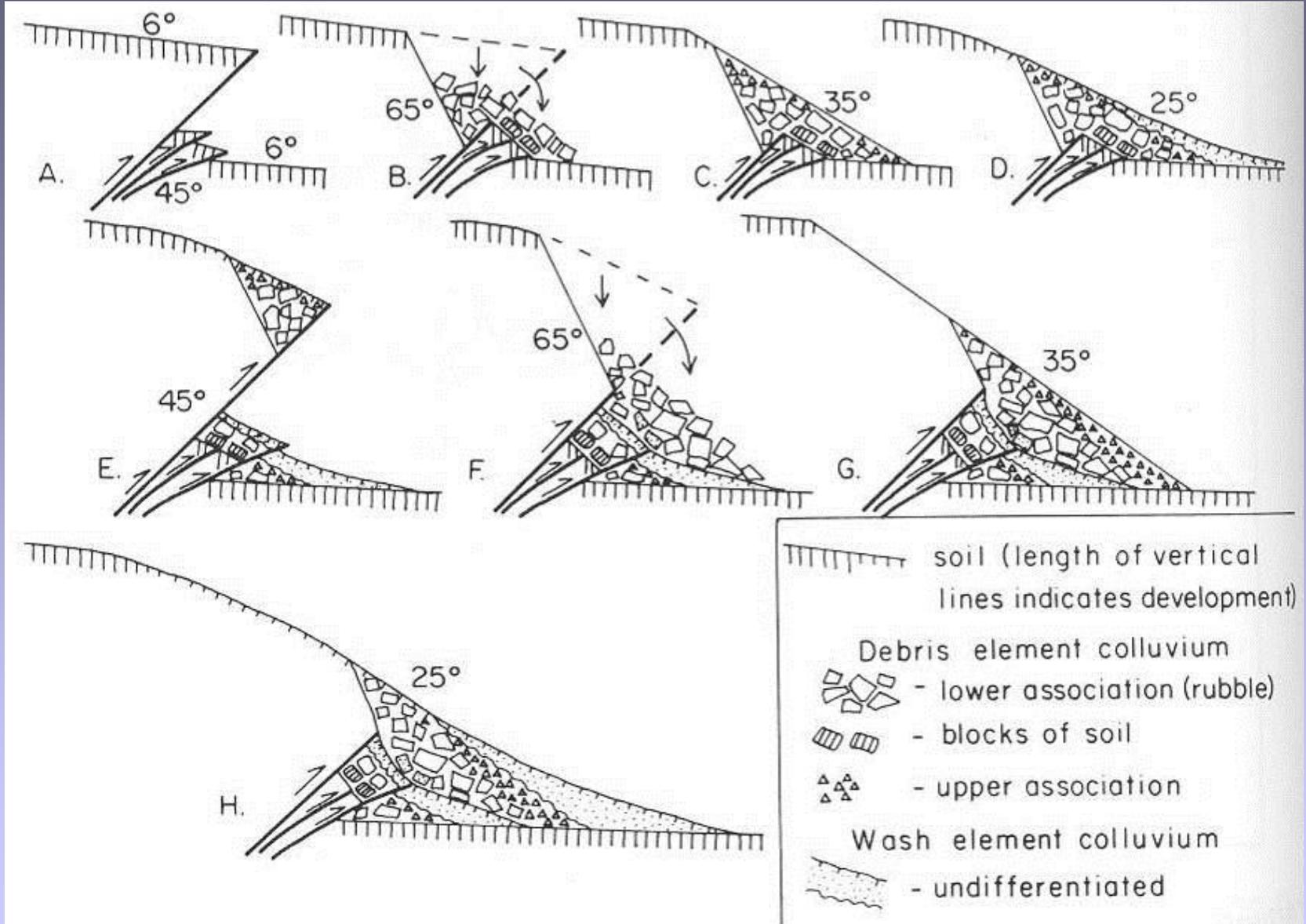


Přesmyky

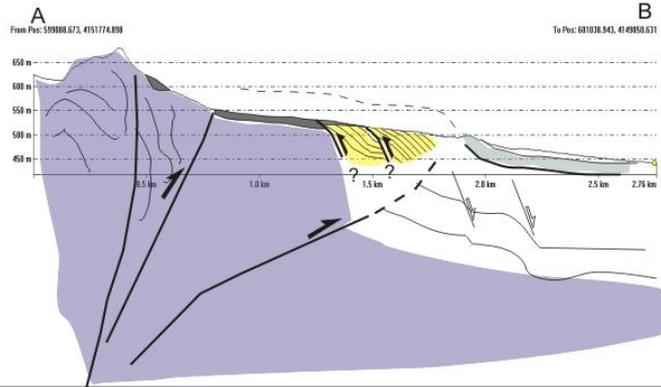
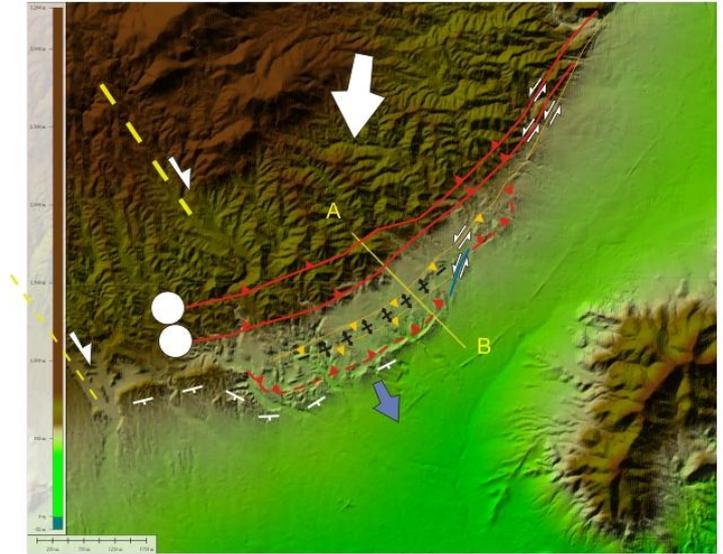


Suusamyr, 1992,  $M=7,4$   
Kyrgyzstan

# Přesmykové zlomy - coluvial wedge

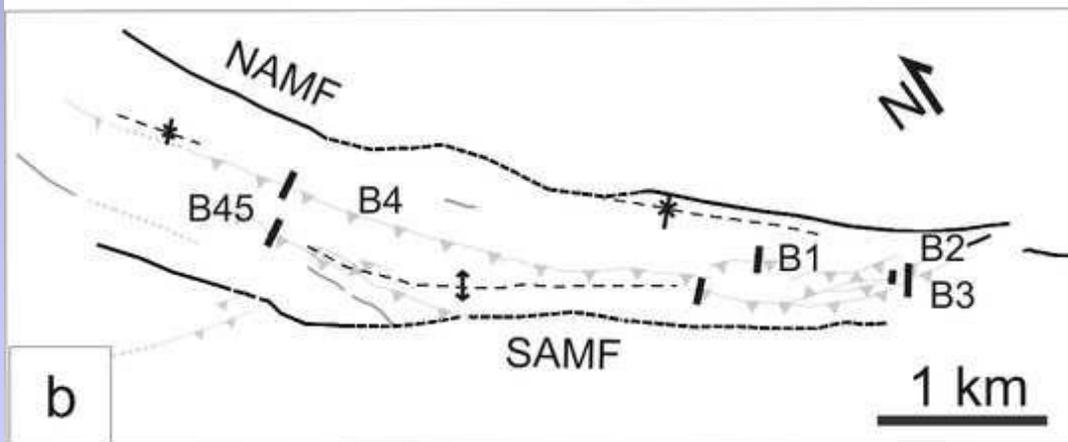
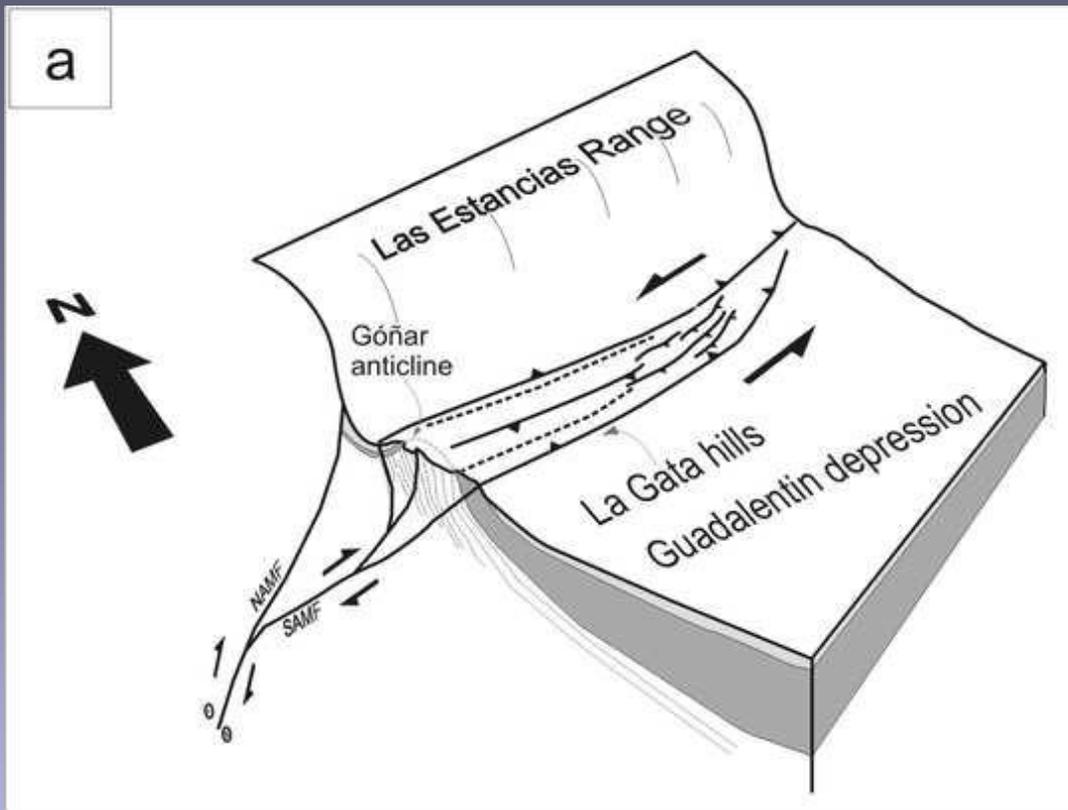






Alhama de Murcia fault

Typy pohybů - podle směru tlaku











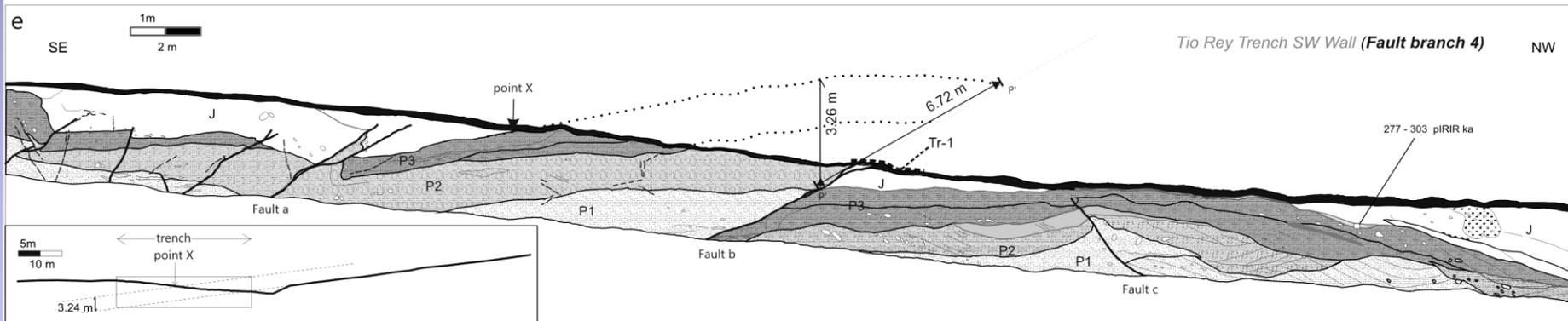
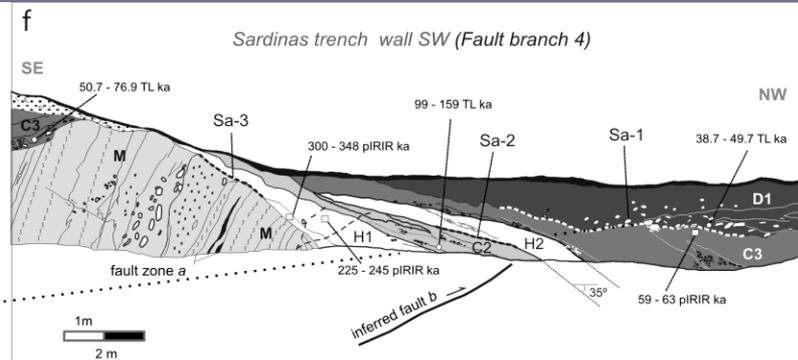
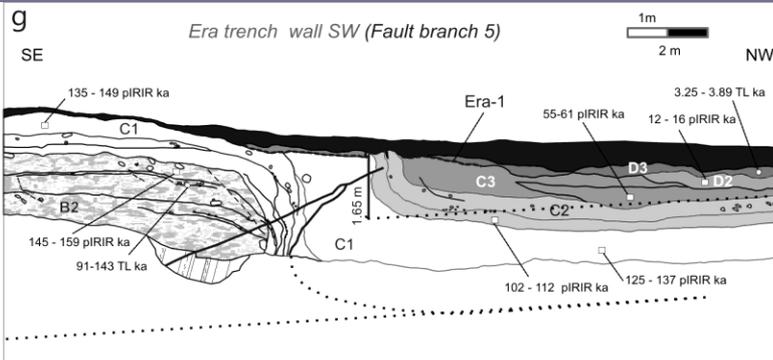


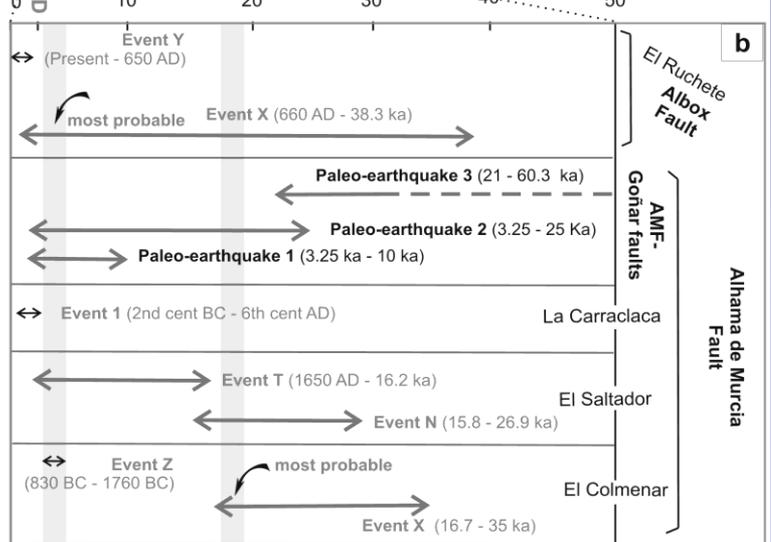
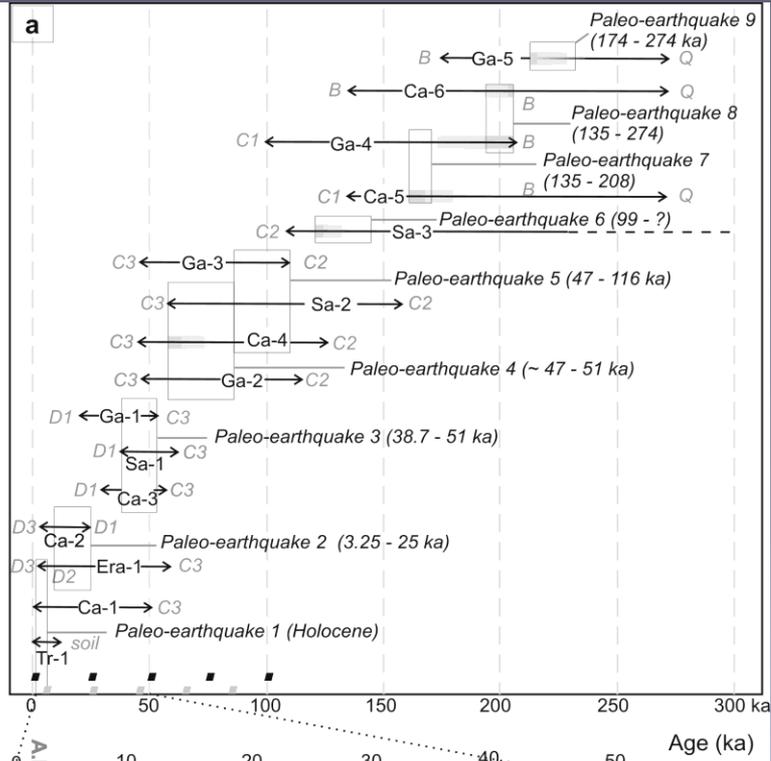


**Legend (part 2)**

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

  -  plRIR
  -  TL





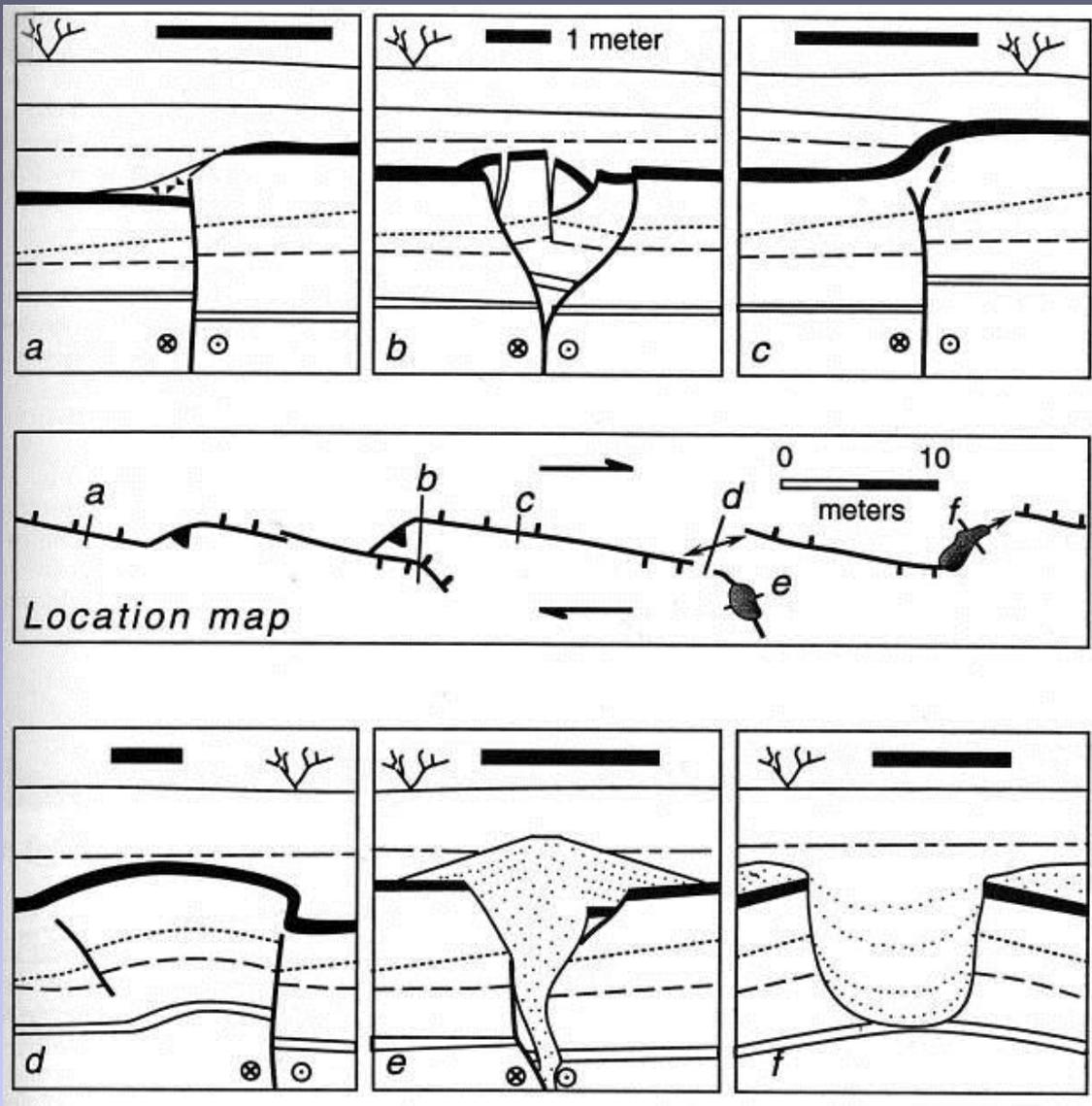
## Horizontální posuny



Carboneras fault, Spain



Borego fault, El Mayor 2010





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



# Zlomová zóna Carboneras

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

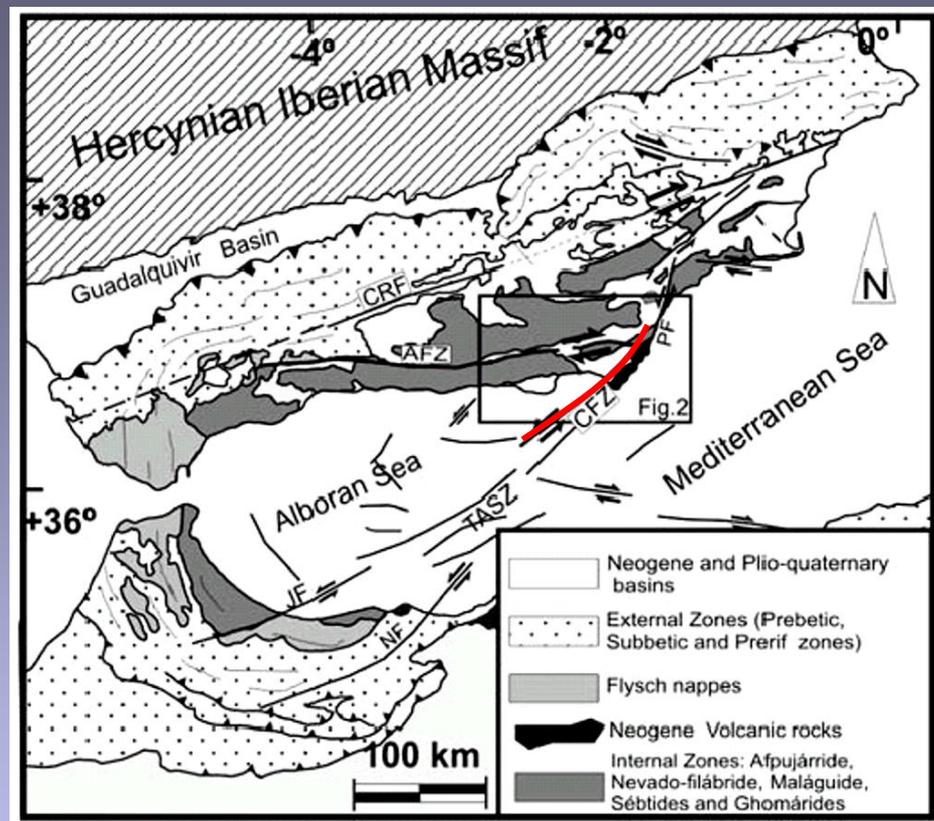
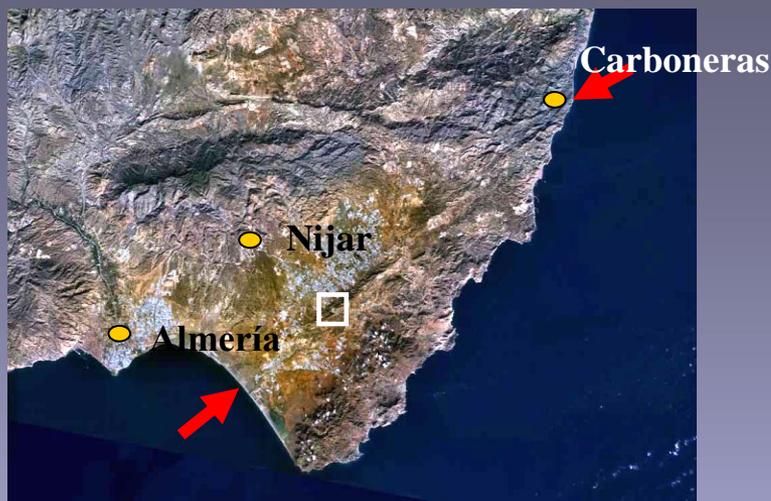
Masana E. et al.

**Carboneras**



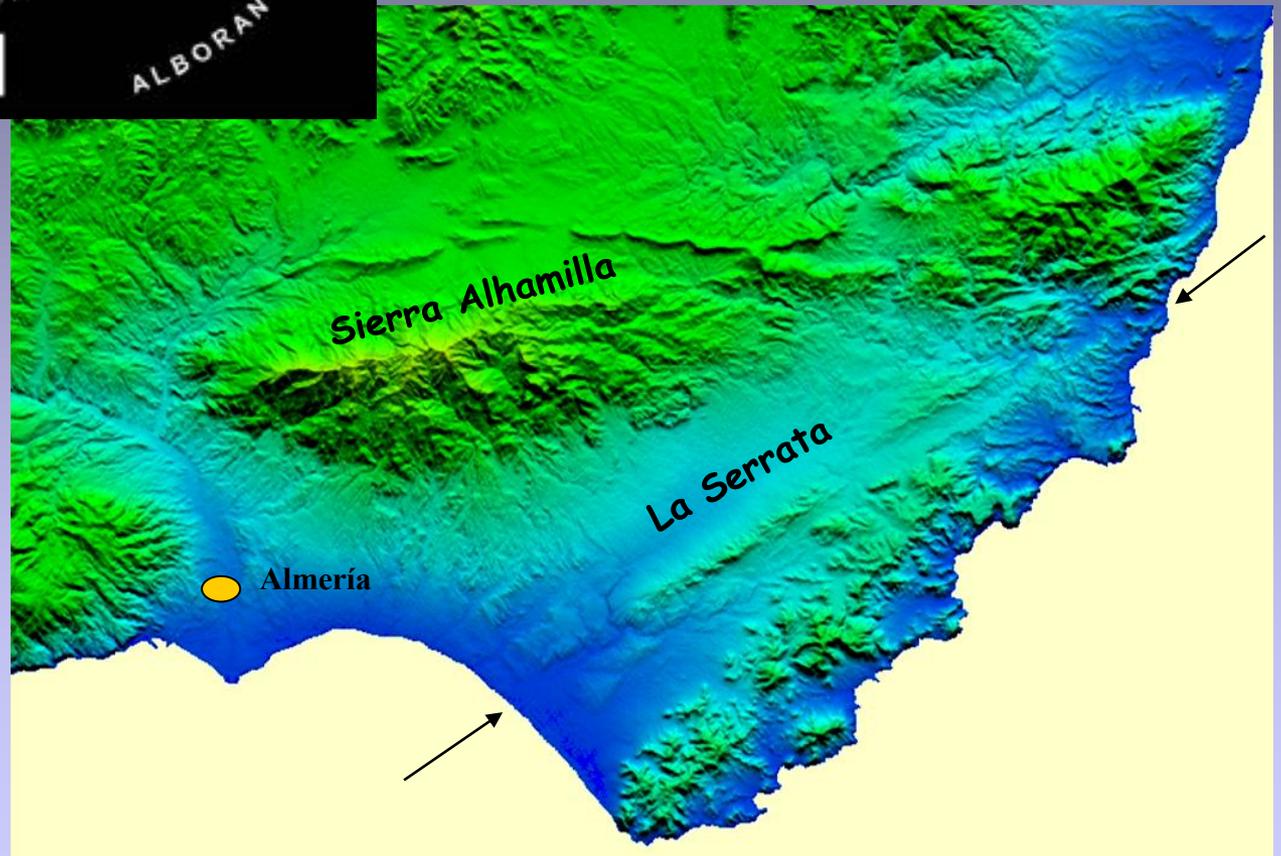
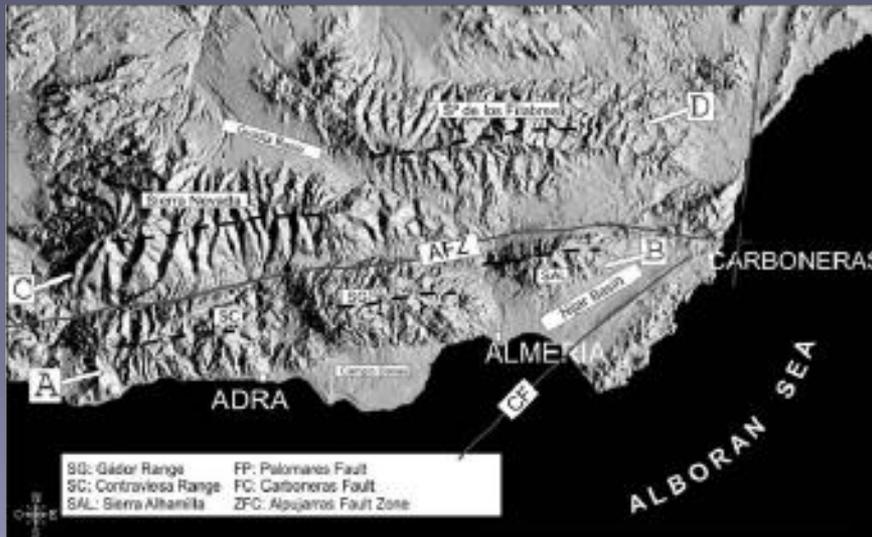
- kolizní zóna Africké a Evropské desky
- jižní okraj alpského orogénu
- součást Bétické Kordilery

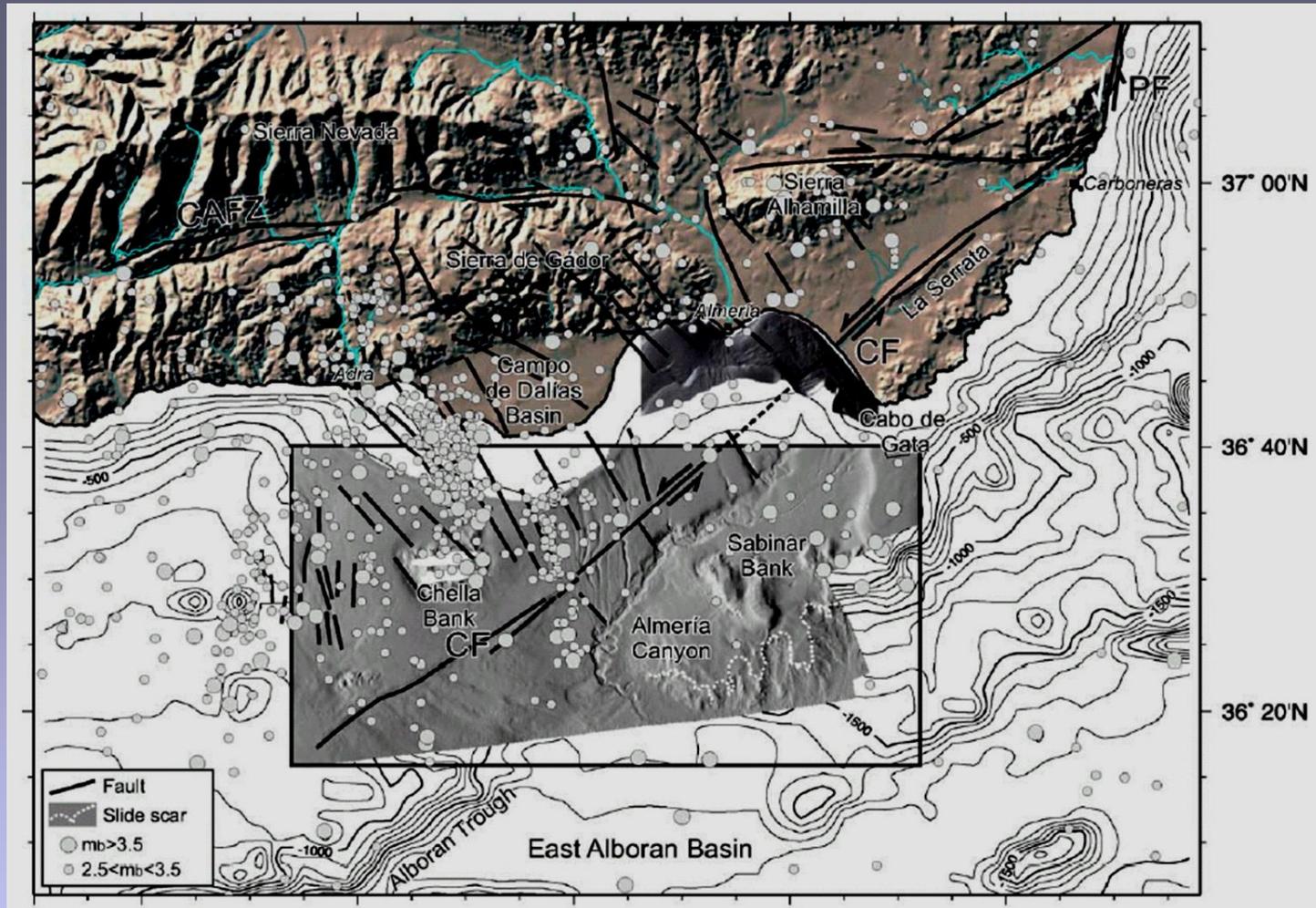
- vnější zóna (příkrovová stavba - mezozoické-terciérní horniny) paleookraj Iberské desky
- vnitřní zóna - metamorfované komplex+ neogenní a kvartérní sed. - mezhorské pánve omezené zlomy SV - JZ



**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)

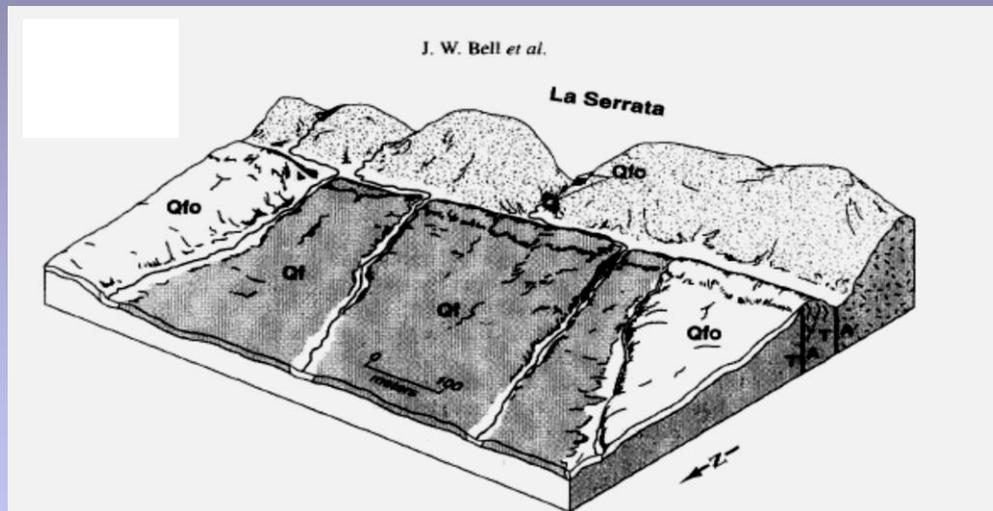




- ❖ seismicita - jv. okraj Iberského pol. - stálá mělká zemětřesení  $M < 5,5$  (příčné zlomy v současnosti - Carboneras - bez seismicity)
- ❖ posl. 2 tis. let - nejméně 50 silných zemětřesení

# Dřívější výzkumy v 90. letech

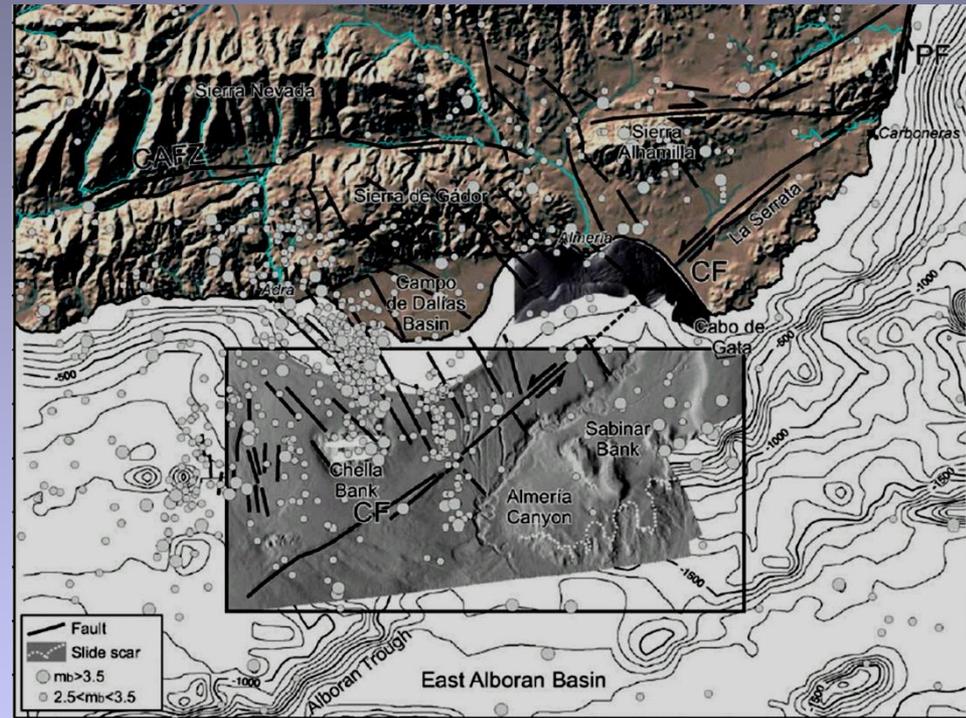
- 1) studium dokladů levostranných pohybů radiometricky datovaných pobřežních marinních teras a studium jejich recentního výzdvihu
- 2) měření a datování levostranného pohybu na základě offsetu vodních toků

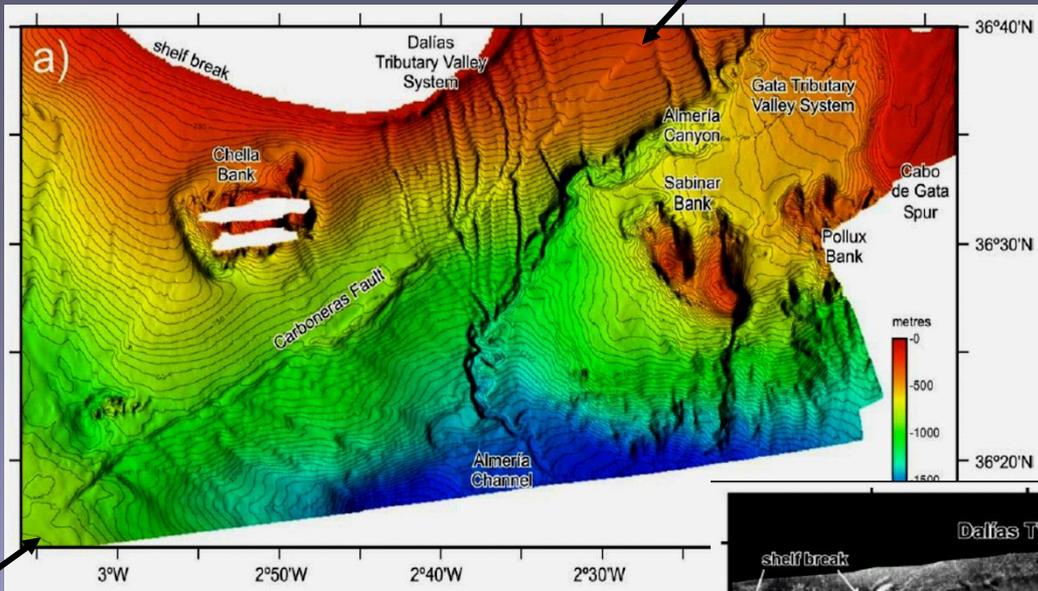


pohyby v pozdním kvartéru - relativně pomalé, převážně vertikální,  
horizontální pohyby 80-100m offset toků La Serraty - starší než  
100 tis. let

# IMPULS: Metody studia zlomu Carboneras na moři

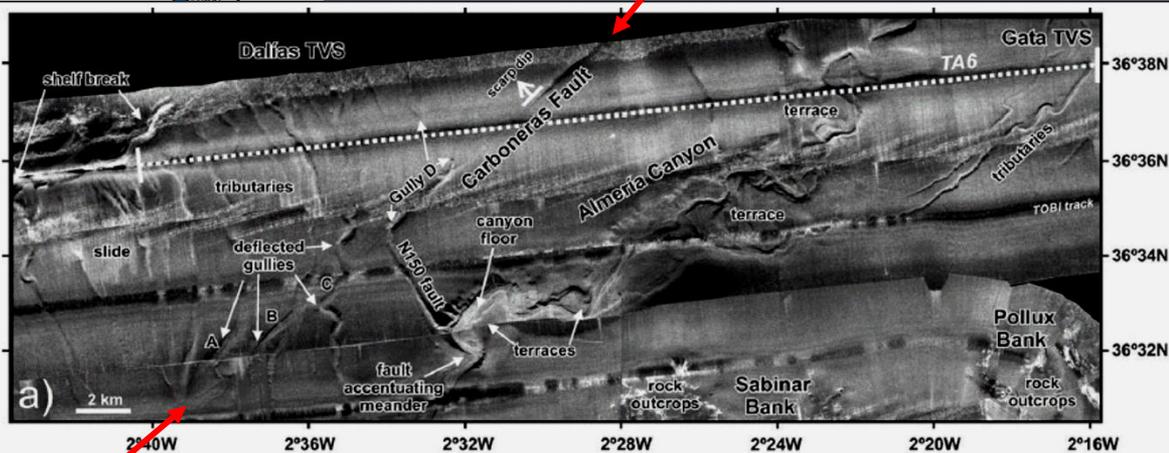
- ❖ batymetrie
- ❖ boční sonografie (sidescan sonograph TOBI)
- ❖ reflexní seismika s vysokým rozlišením
- ❖ analýza vzorků mořských sedimentů
- ❖ datování



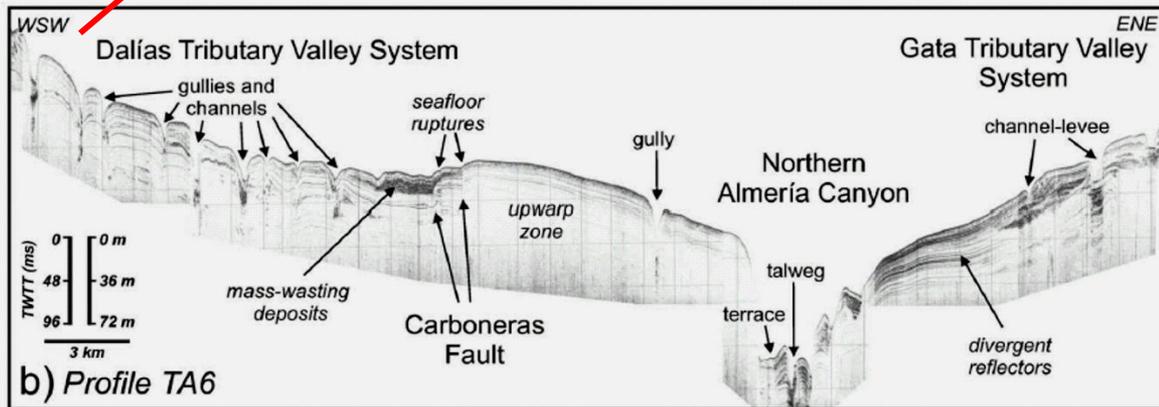


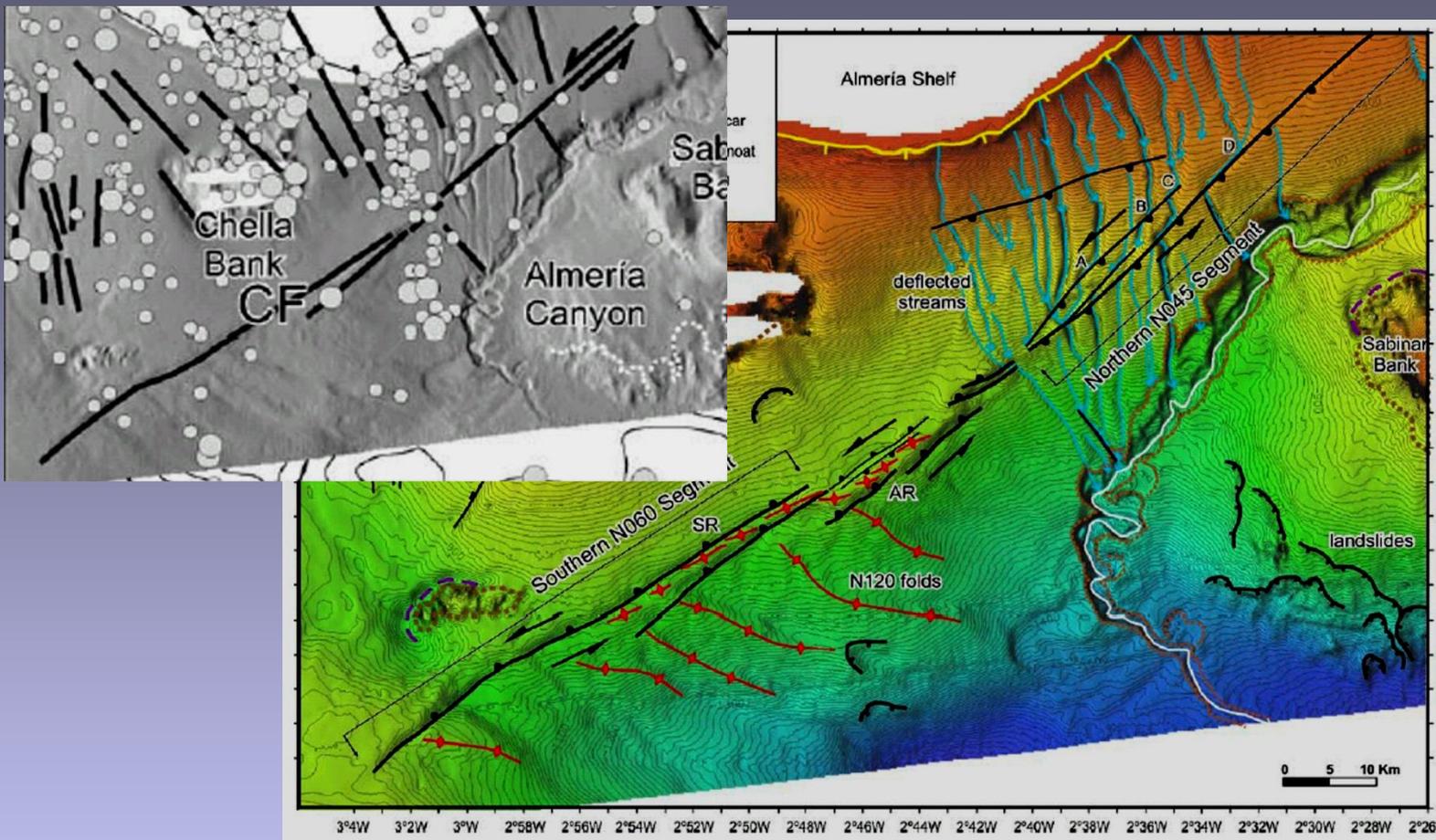
batymetrie

sonografie s vysokým rozlišením



seismické profilování



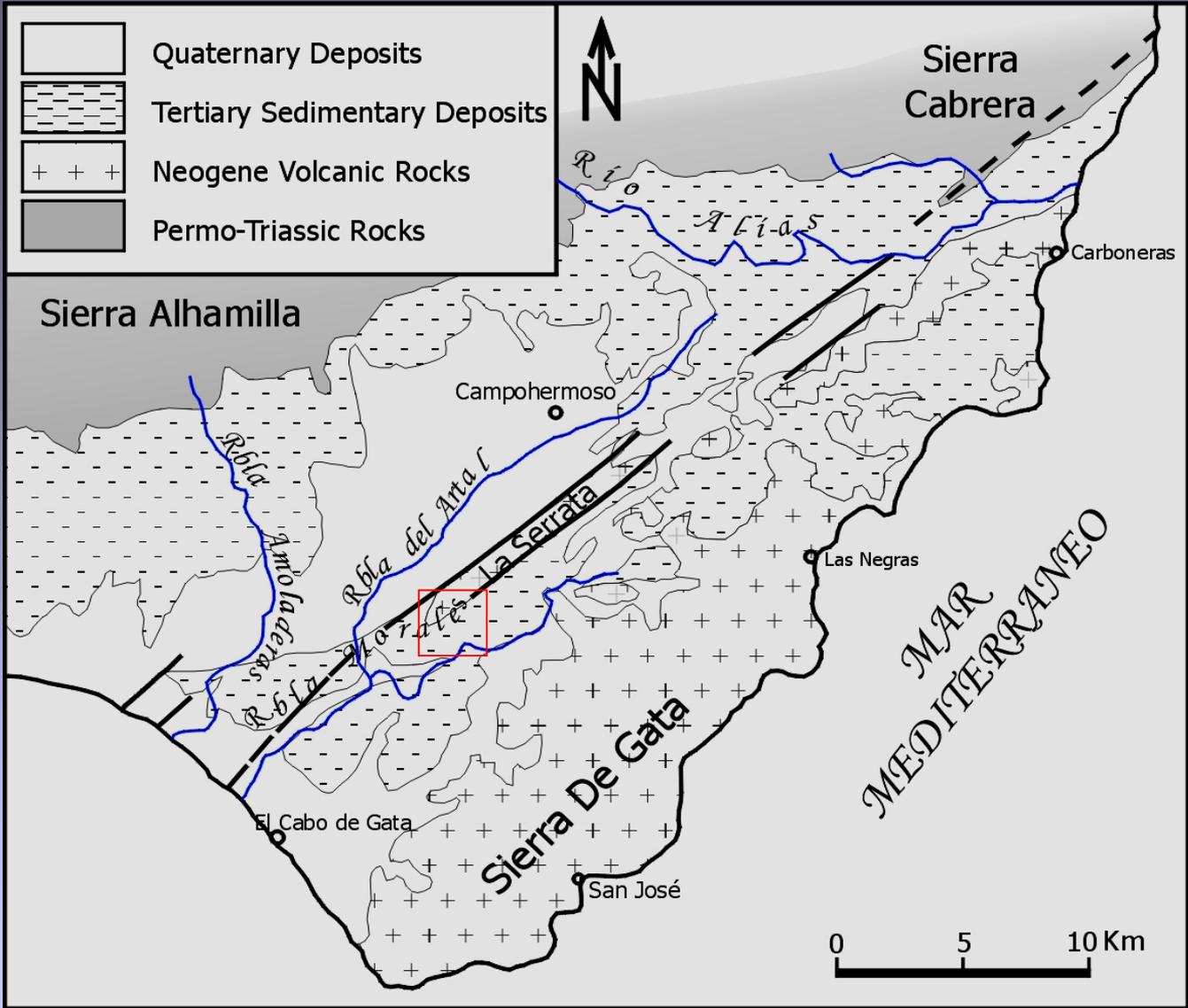


Zóna Carboneras - 5-10 km široká, 100 km dlhá, subvertikální zlomy, odvodňovací sít' okraje pevniny je **deflektovaná**, morfológie = tvary vzniklé horizontálnými pohyby na pevnině - **pressure ridges, water gaps**, porušené pozdně **holocenní sedimenty, sesuvy-epicentra**.

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

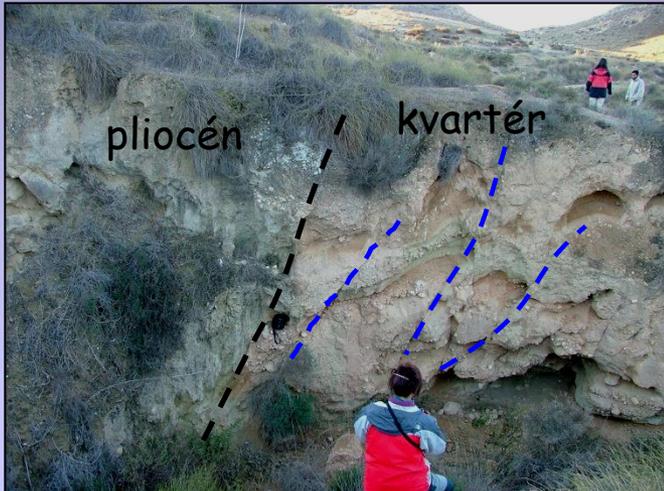
# Metody studia zlomu Carboneras na pevnině

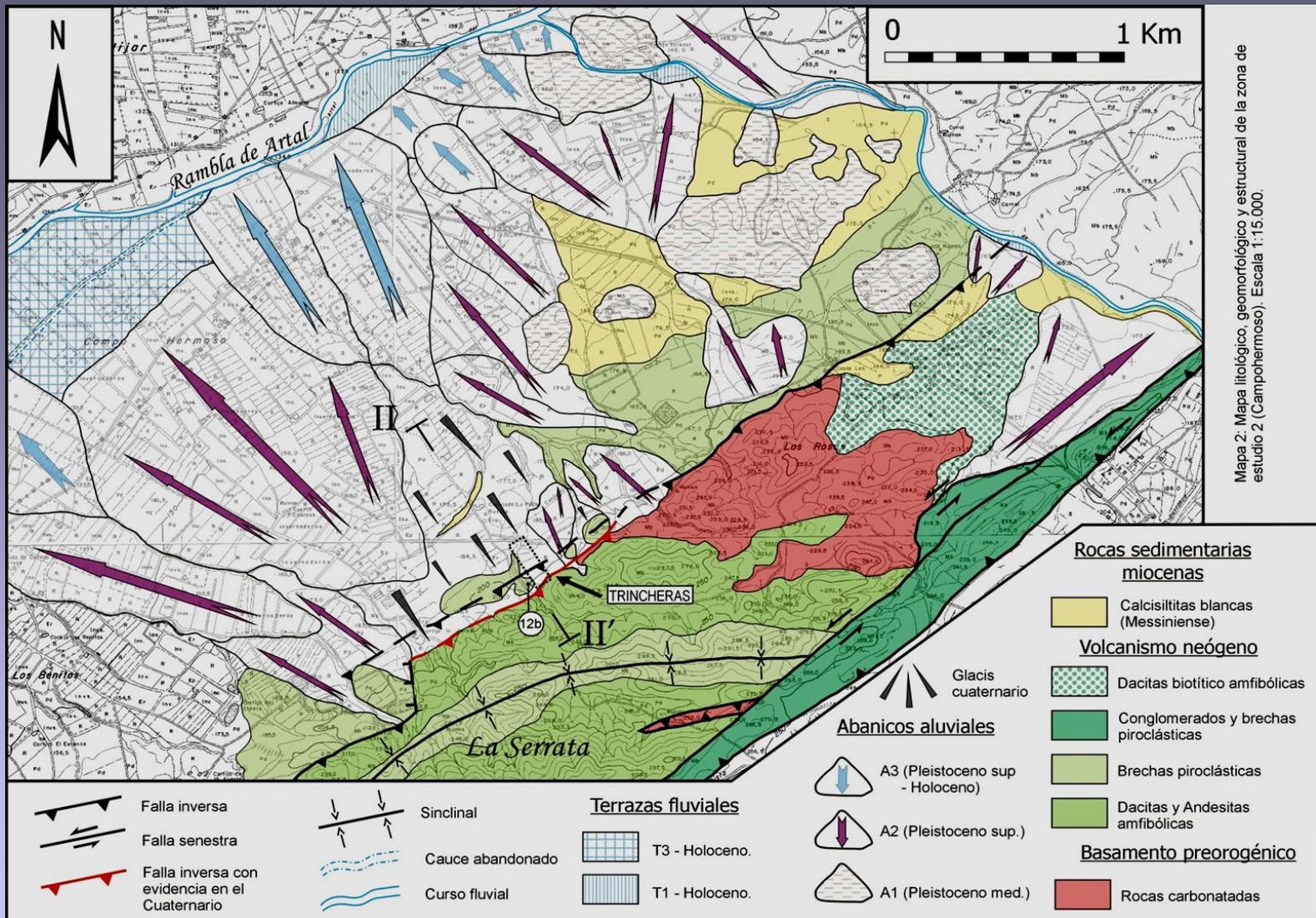
- ❖ fotointerpretace - letecké snímky
- ❖ geomorfologické mapování (dislokované tvary reliéfu)
- ❖ strukturní mapování (průběh zlomu)
- ❖ sedimentologie (rozlišení generací aluviálních kuželů)
- ❖ mikrotopografie (totální stanice)
- ❖ geofyzika (georadar, elektrotomografie – zachycení zlomu a hladiny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



El Hacho  
2005

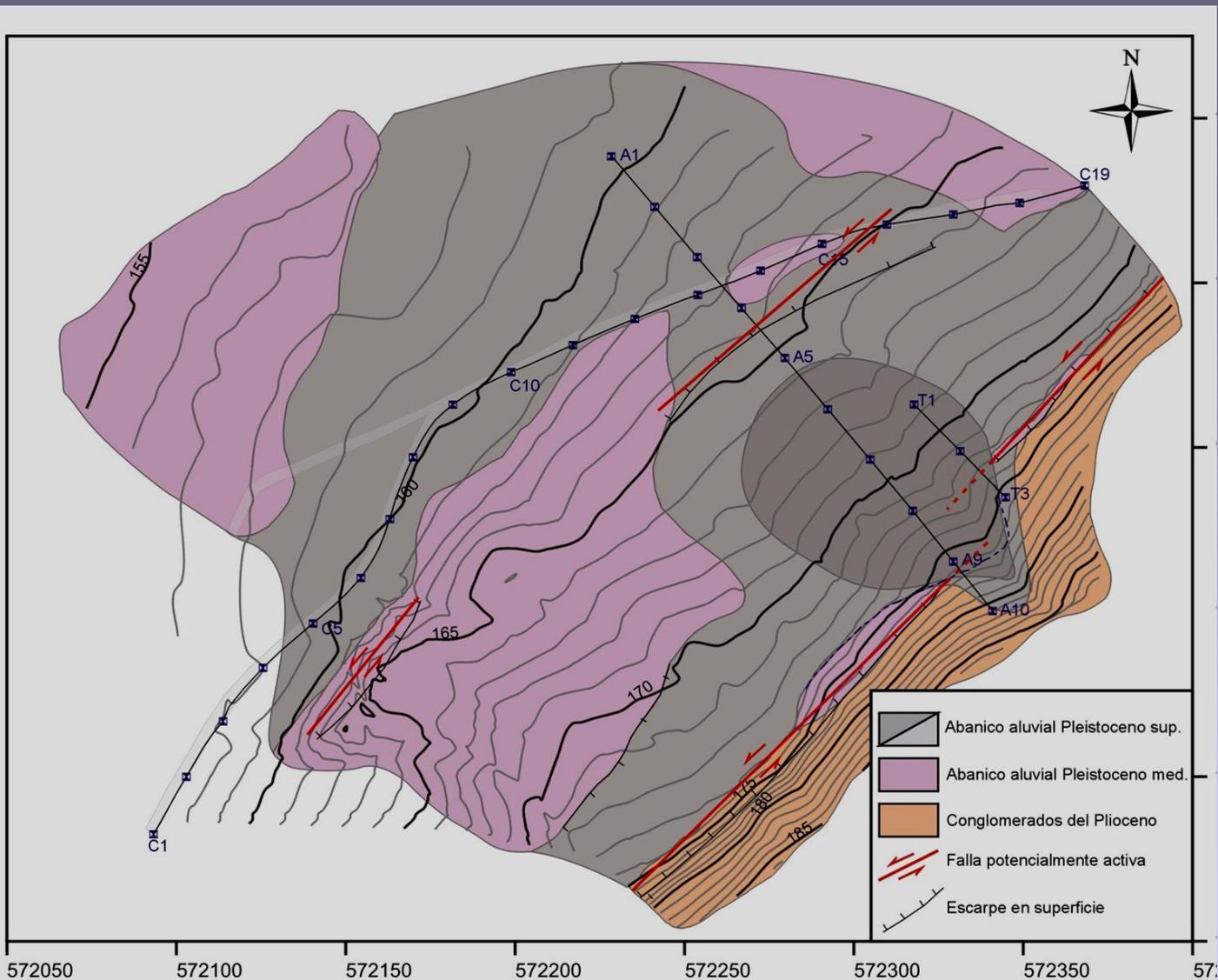
# La Serrata





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

# Paleoseismologické rýhy



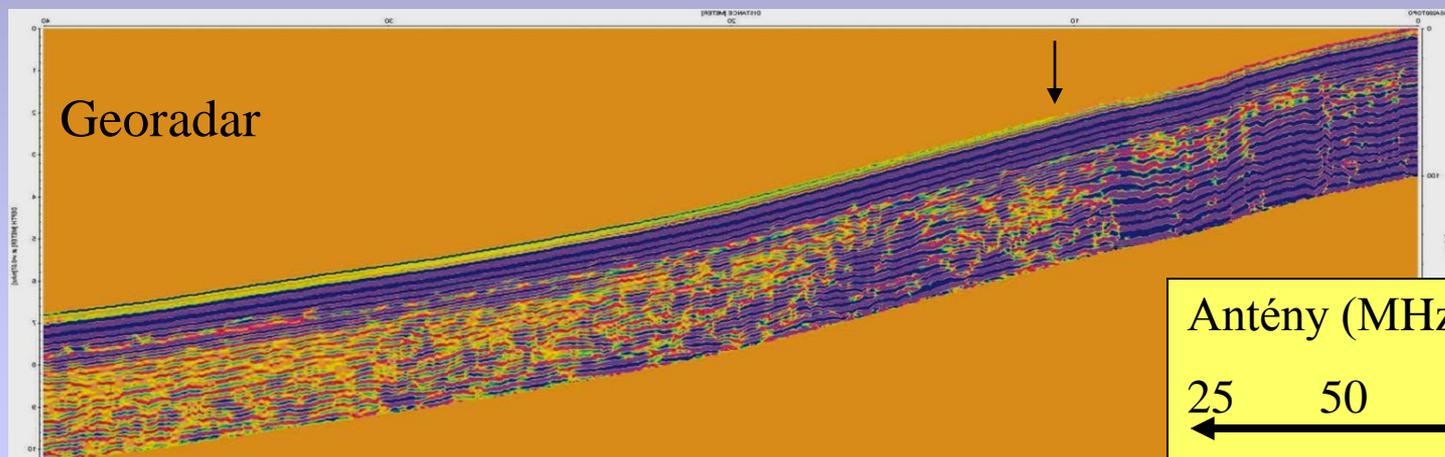
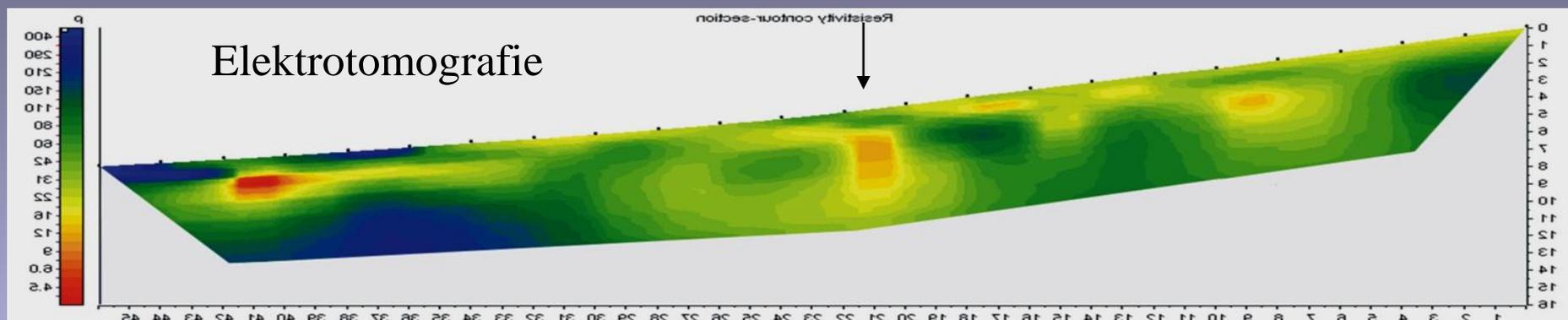
❖ všechny 3  
generace  
kuželů  
(chronologie)

❖ patrné  
terénní stupně  
(0,7m)

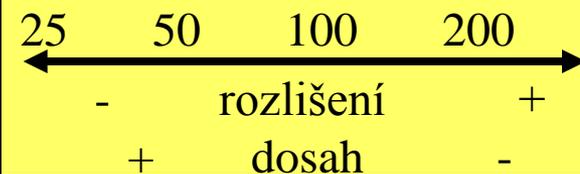


# Geofyzika

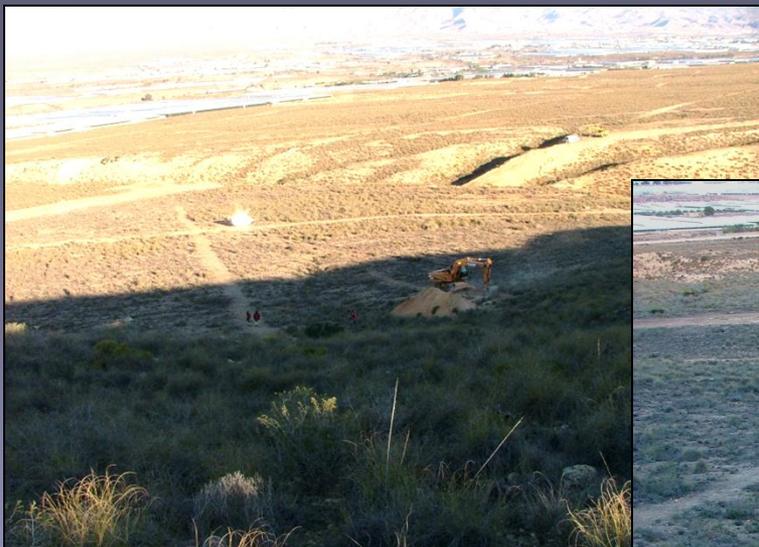
zachycení pozice zlomu a hloubkových poměrů (materiál)



Antény (MHz):



listopad 2005

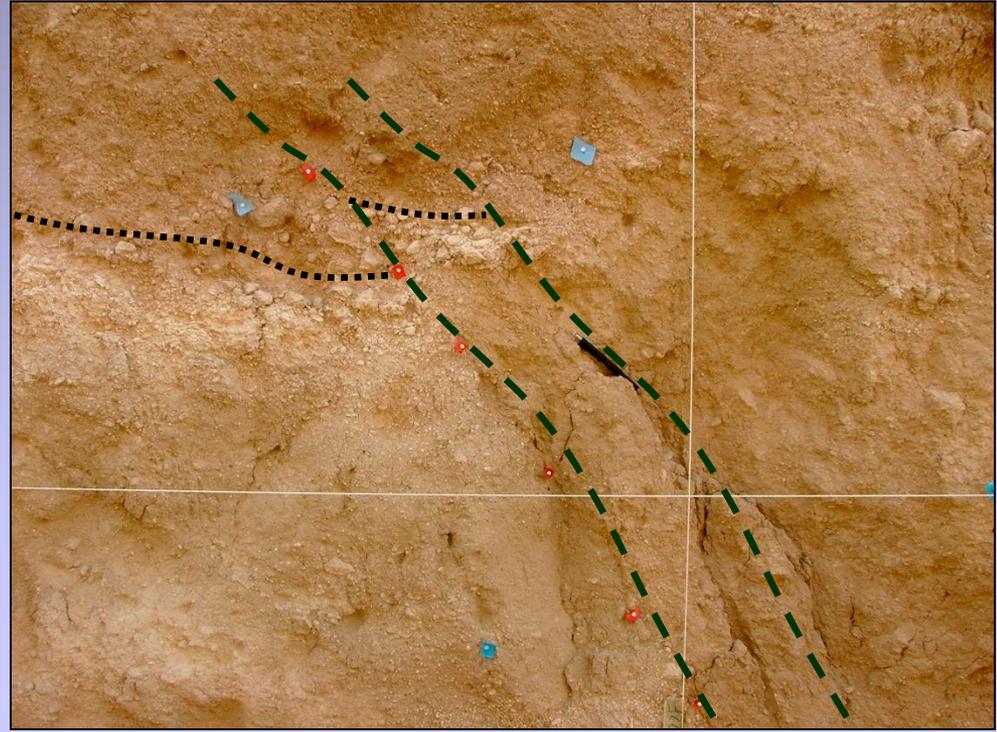
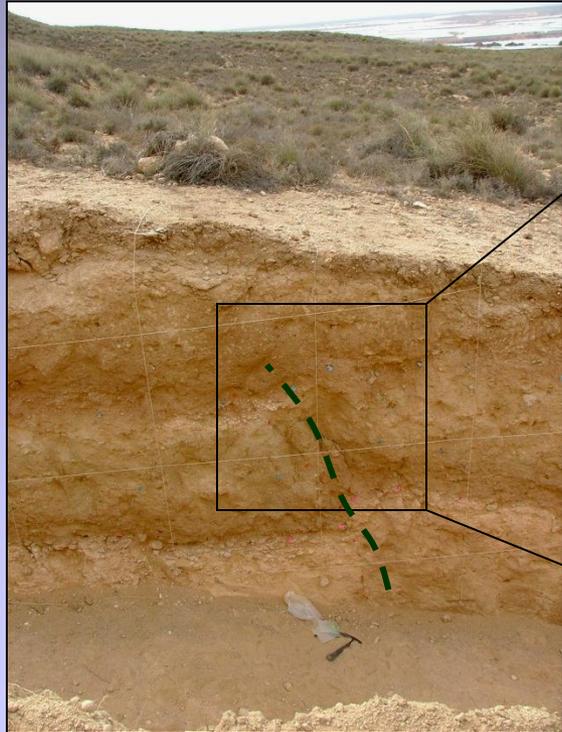


# čištění, sítě



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

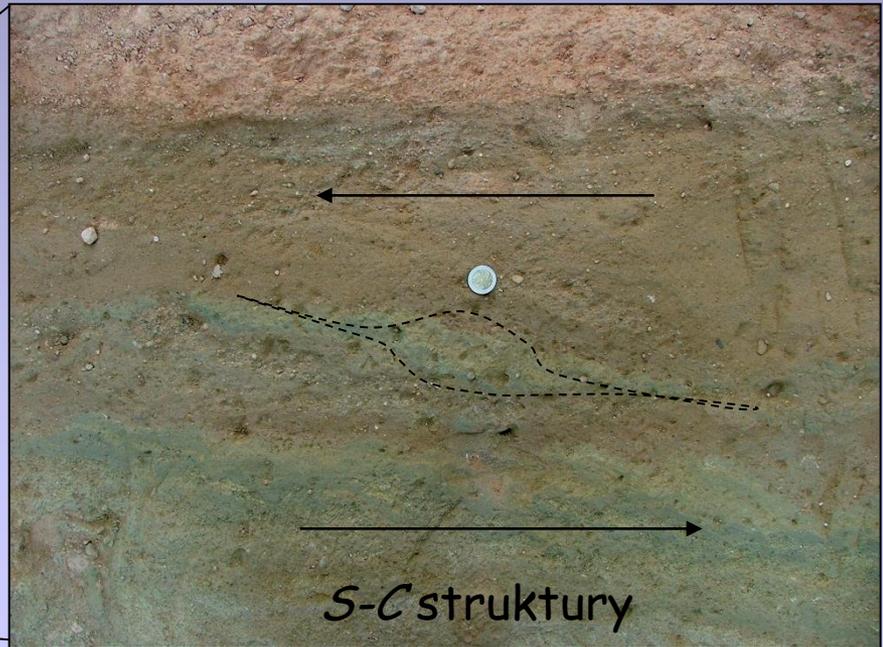


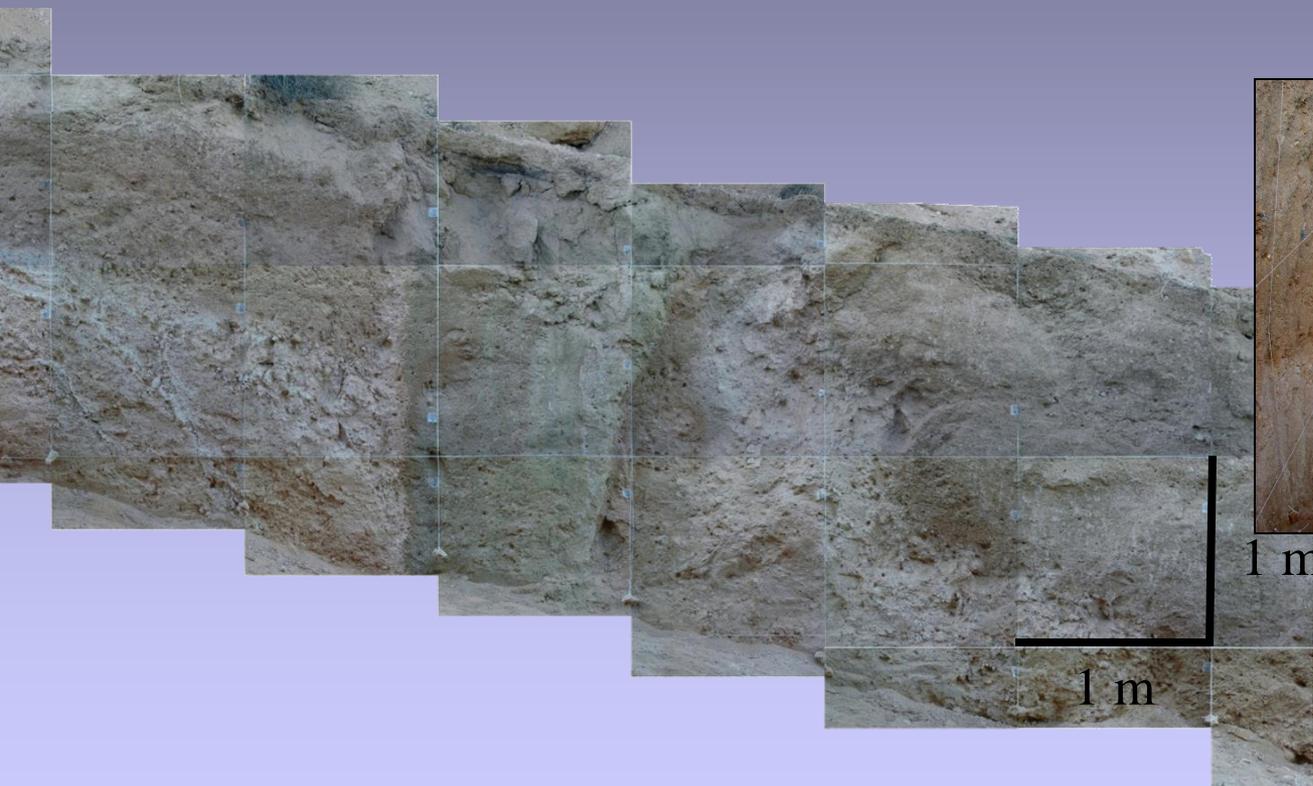
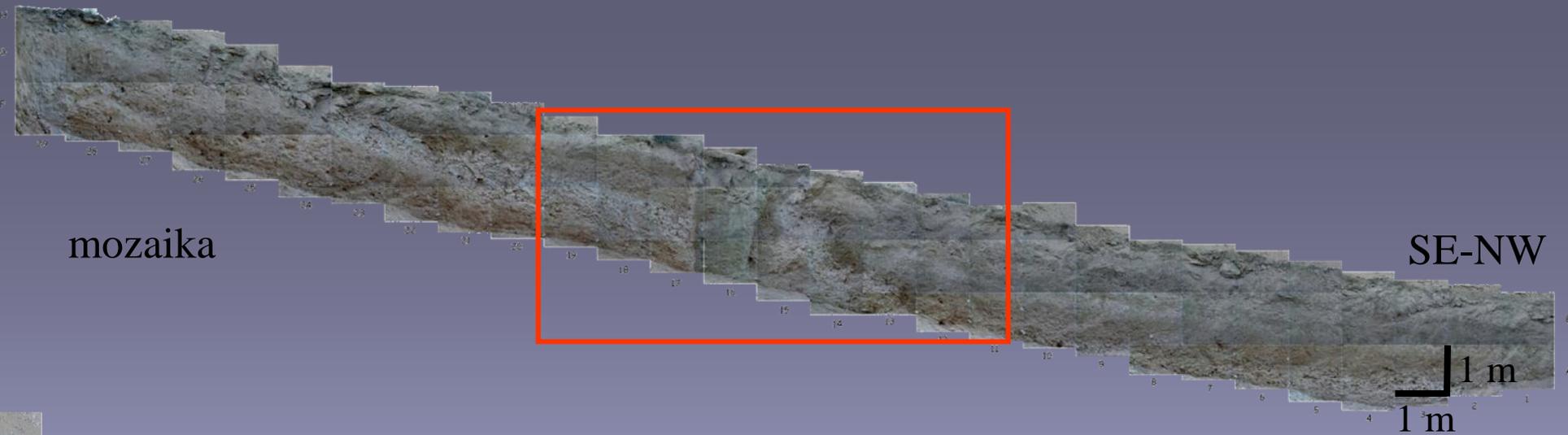


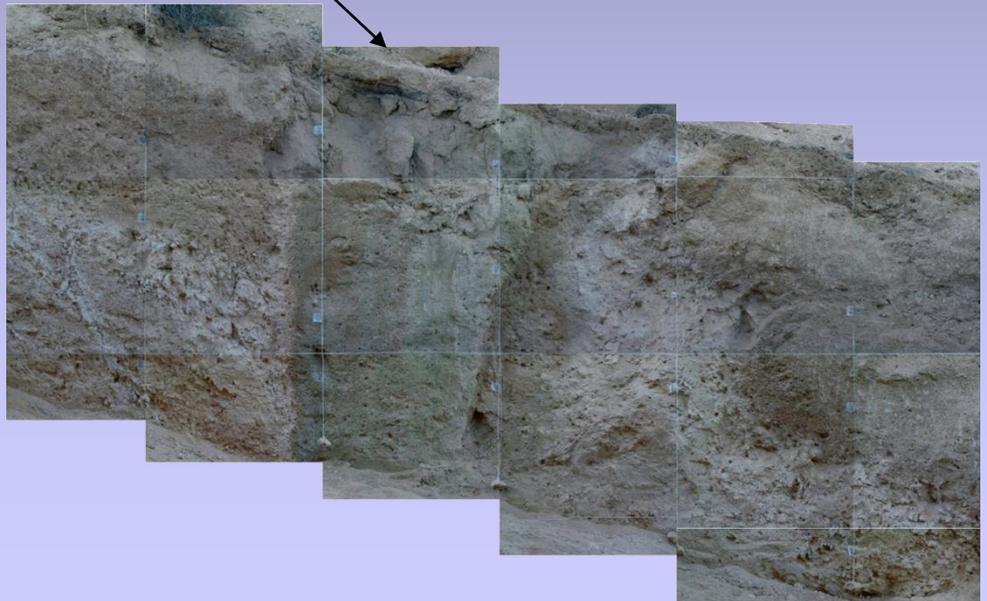
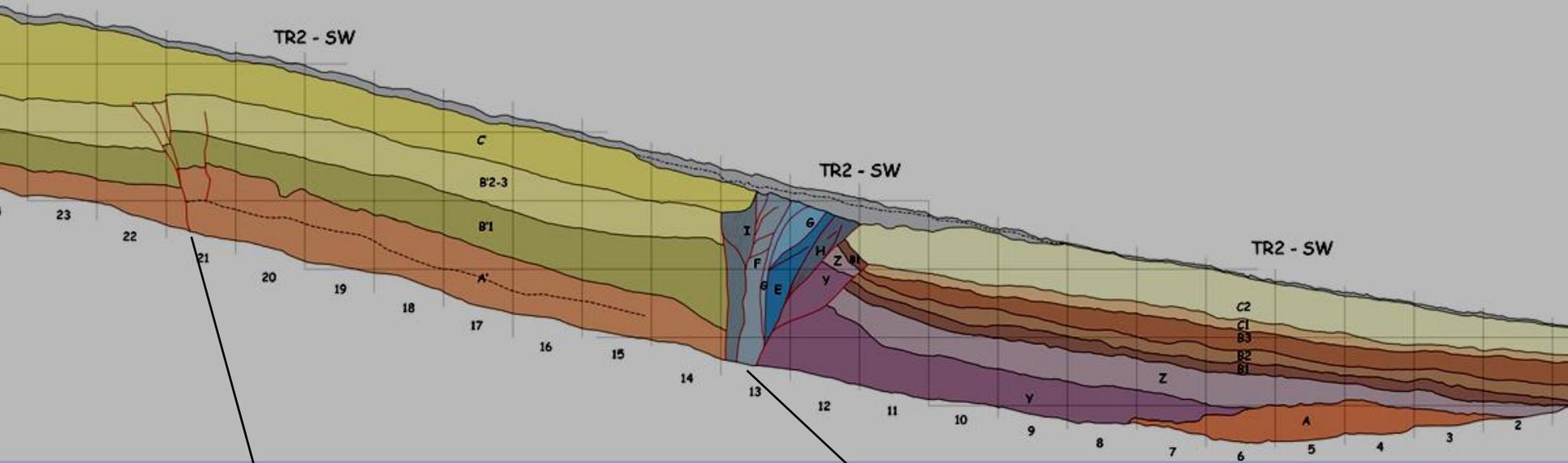


- složitější struktura
  - flower structure
  - transpresní režim
- horizontální posuny s vertikální složkou
- opakované pohyby





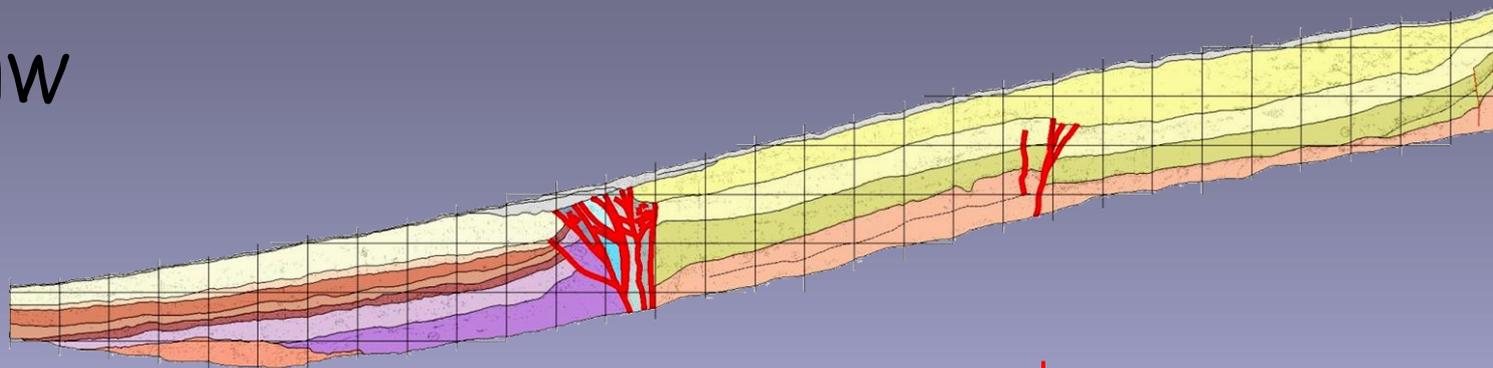




# situace in situ X geofyzika

NW

SE



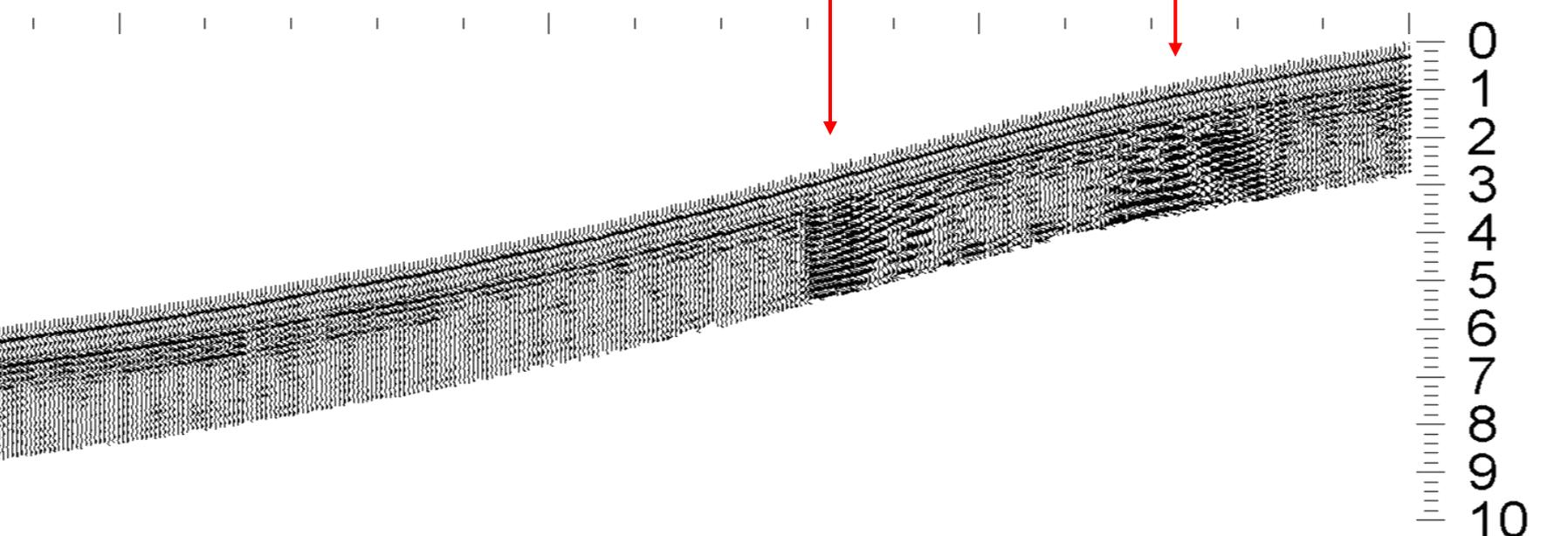
vzdálenost (m)

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

- ❖  **$^{14}\text{C}$  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



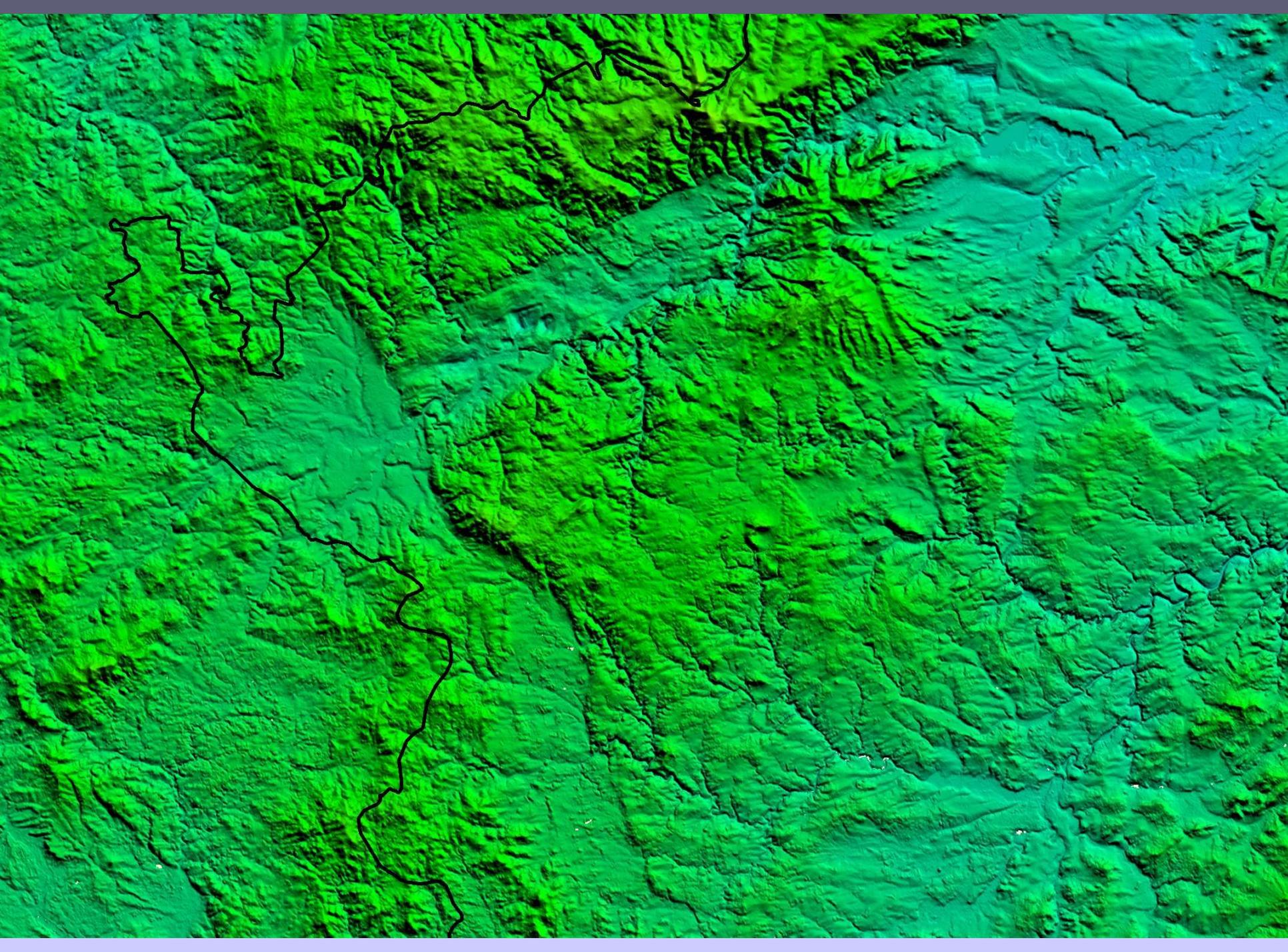


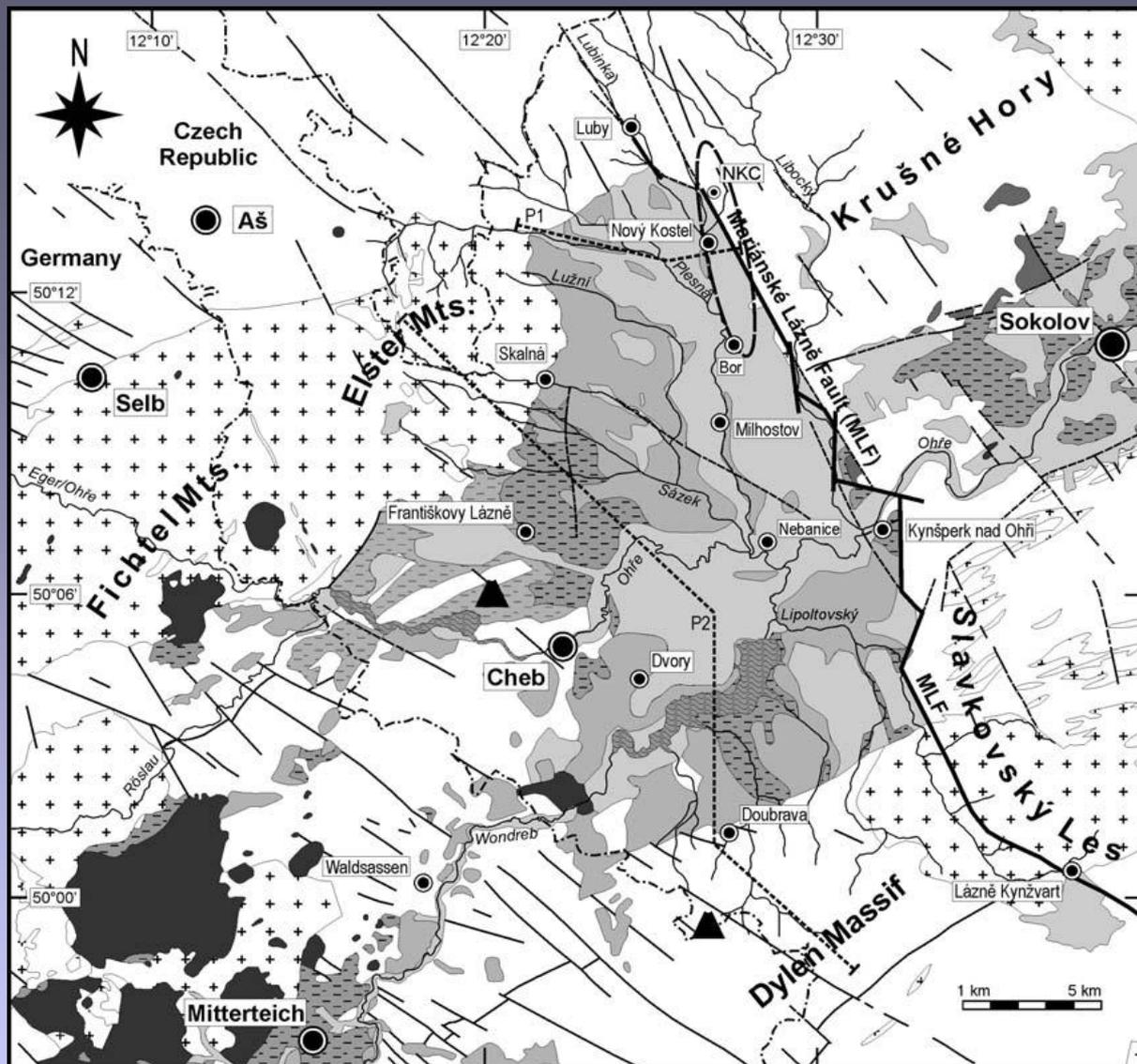
# CHART OF THE INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007 - ESI 07

| 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<br><br>DAMAGING<br><br>DESTRUCTIVE<br><br>VERY DESTRUCTIVE<br><br>DEVASTATING | I-III | Offset   | Length                       | Width   | Length   | ENVIRONMENTAL EFFECTS ARE VERY RARE AND CANNOT BE USED AS DIAGNOSTIC |   |  |   |                                  |                              |  |
|  | A     | IV   | ABSENT                       | ABSENT  | Rare and local                                 | Rare and local   | Only deformed levels (seismites)                          | cm   | Temporary level changes                               |                                  | Rare and local               | Geological frequent and exceptionally geomorphological<br>Geological and geomorphological characteristic |
|  |       | VII  | Rare and local               | Permanent ground dislocations (< 10 cm)                       | mm   | 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>                                       | 50 cm   | dm   | Temporary sea-level changes                           |                                  | Local within epicentral zone |  |
|  |       | VIII   | dm                           | < 1 m   | dm   | 10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>                      | 1 m   | 1 m  | Waves < 1 m   | Temp. turbidity changes          | 100 km <sup>2</sup>          |  |
|  | B     | X  | dm                           | < 10 m  | m  | 10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>                      | 0.5 m   | 3-5 m  | Temp. F+Q changes                                     | 1,000 km <sup>2</sup>            |                              |  |
|  |       | XI   | metric                       | > 10 m  | > 1 m  | > 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>                                     | 0.5 m   | > 10 m   | Temp. temperature changes                             | 5,000 km <sup>2</sup>            |                              |  |
| XII  |       | > 100 km   | > 10 m                       | m   | Far-field (200-300 km) significant landsliding | 0.5 m  | Tsunamis  | Permanent river changes                              | 10,000 km <sup>2</sup>                                |                                  |                              |  |
| C  | XII   | > 100 km   | > 10 m                       | > 5 m   | Giant Landslides                               |  | Giant waves   | Permanent river changes                              | 50,000 km <sup>2</sup>                                |                                  |                              |  |
|  |       | 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 | Baso-level changes in springs, rivers, aquifers      | Tree branches and tree-trunk falling, rupture, etc... |                                  |                              |  |

**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





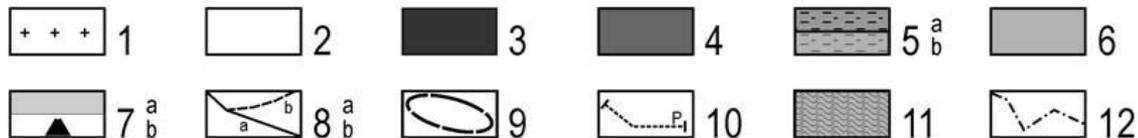
## Mariánské Lázně fault (MLF)

normal fault with dextral strike-slip displacement

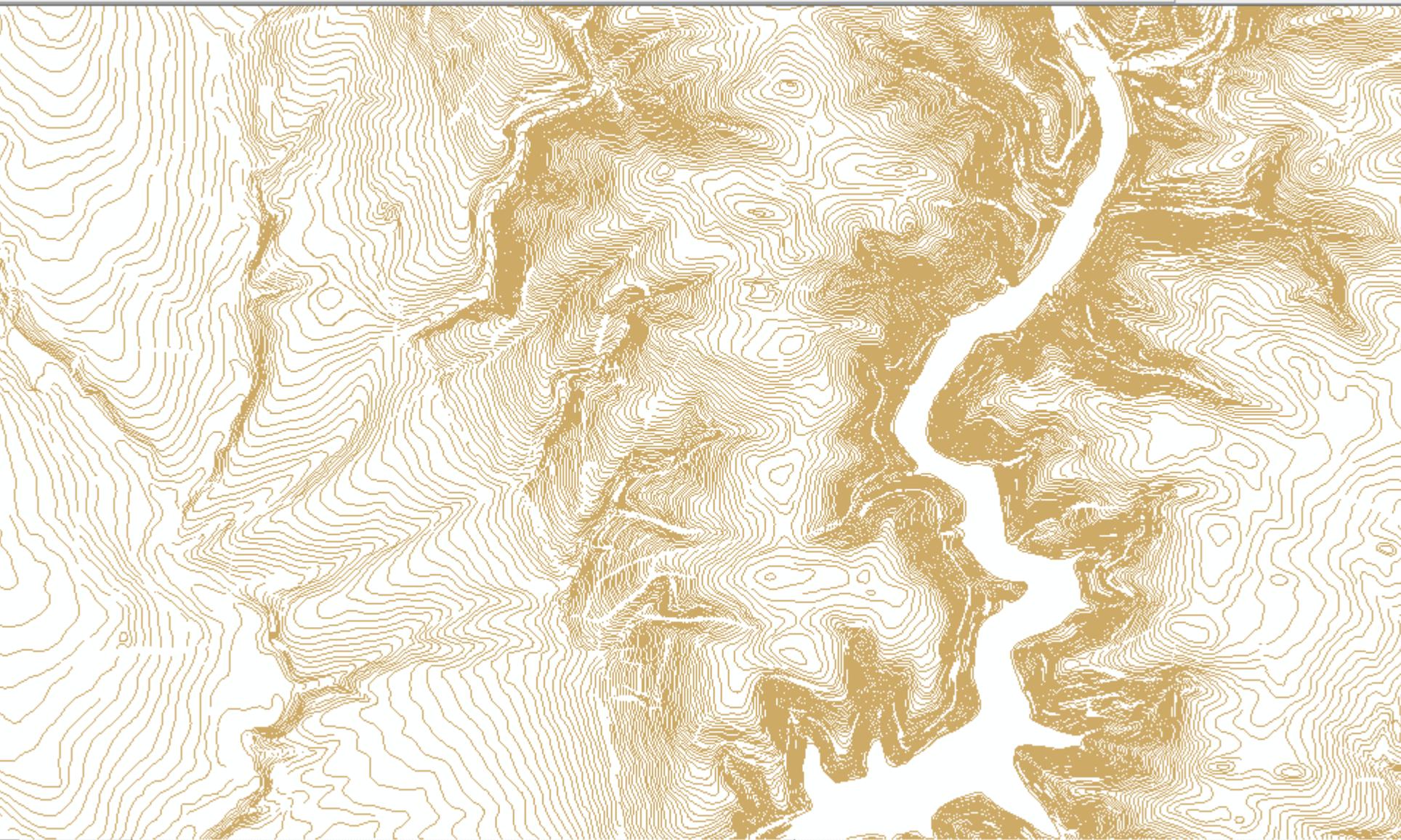
Pitra et al. (1999),  
Grünthal et al. (1990),  
Švancara (2000)

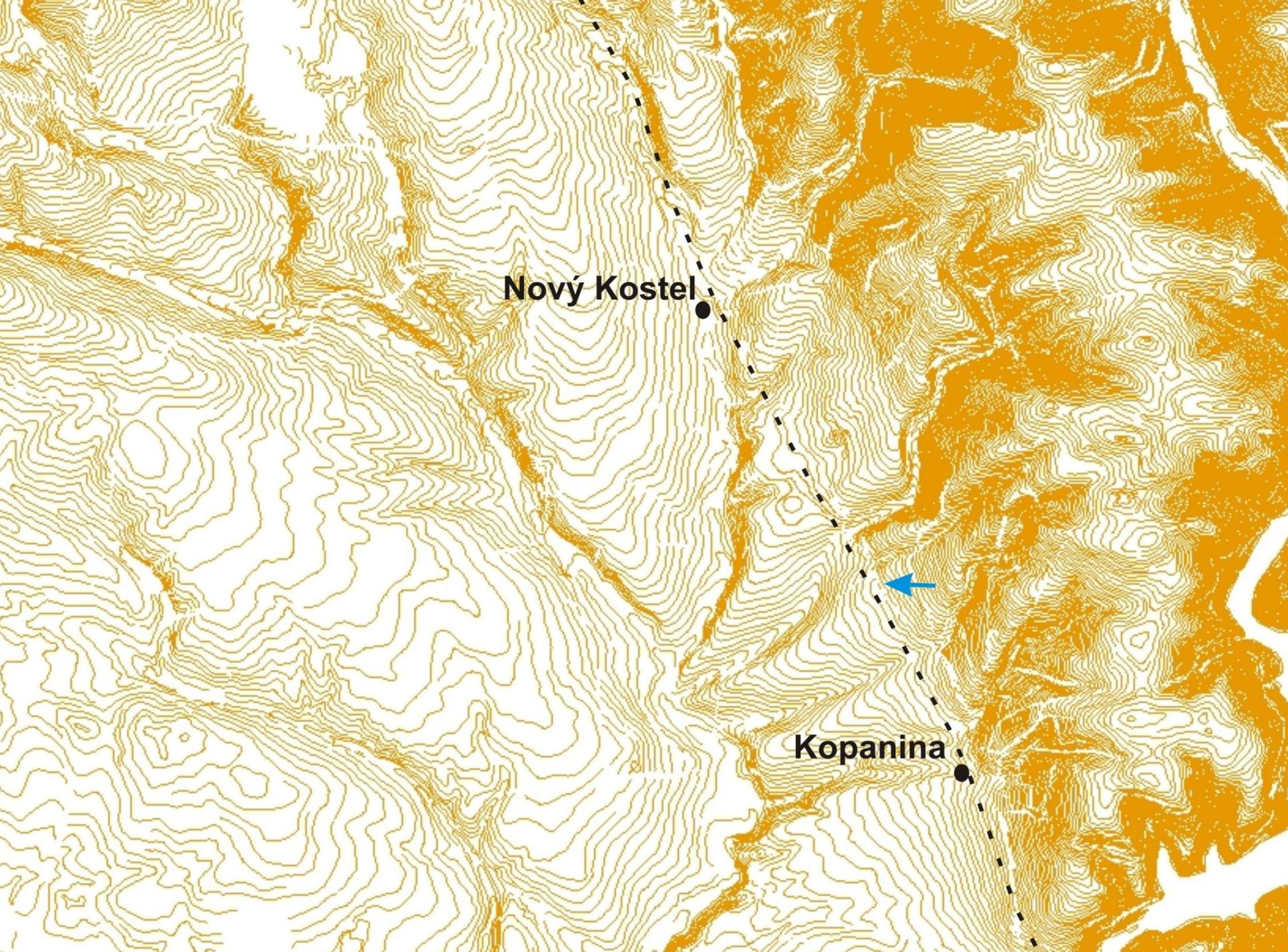
sinistral strike-slip fault  
with max. horizontal  
stress orientation in NW-  
NNW direction

Špičák (1988),  
Schunk et al. (2005)



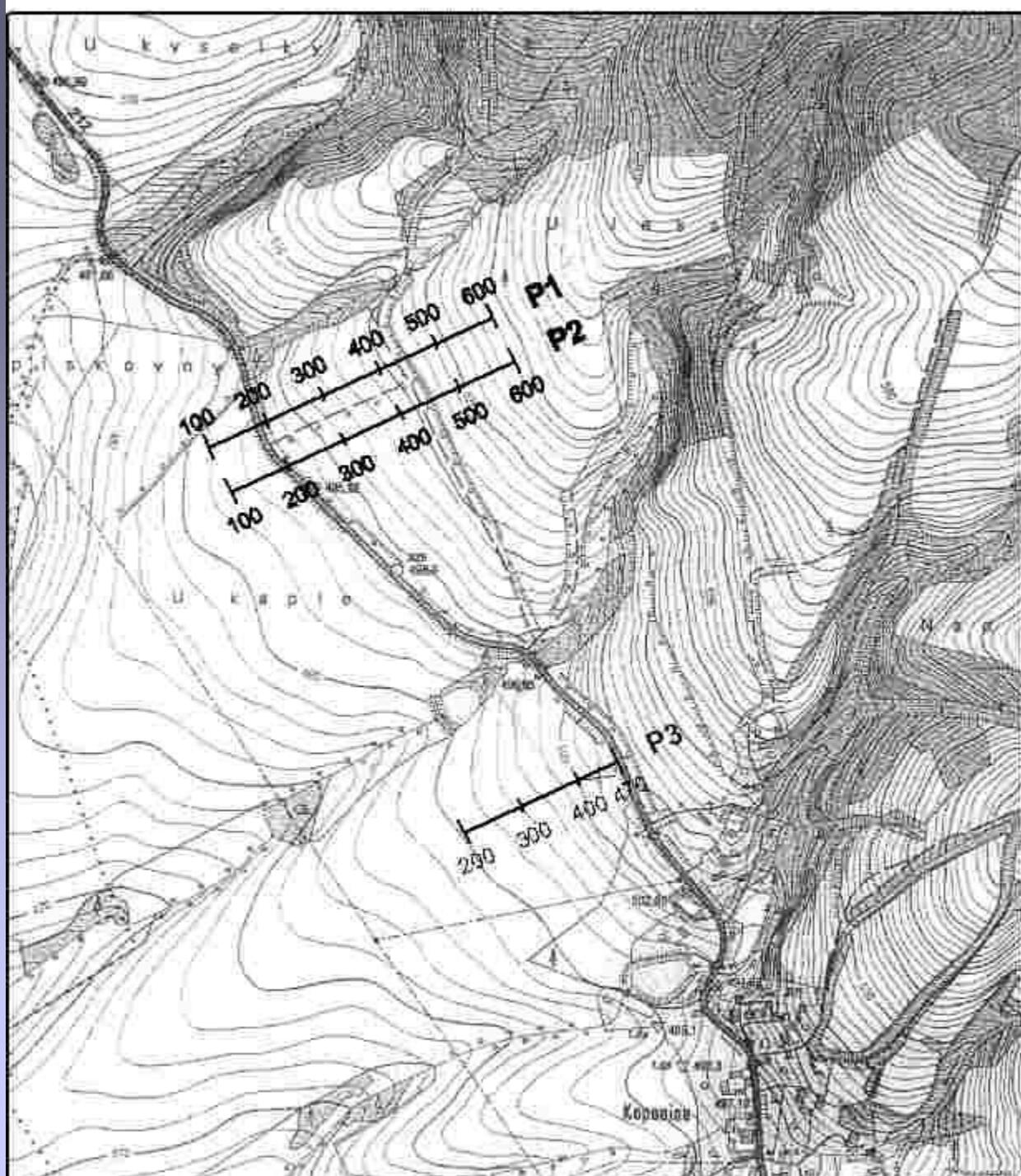






**Nový Kostel**

**Kopanina**



# KOPANINA

## KOMBINOVANÉ PROFILOVÁNÍ

### MAPA PROFILŮ 1 - 2

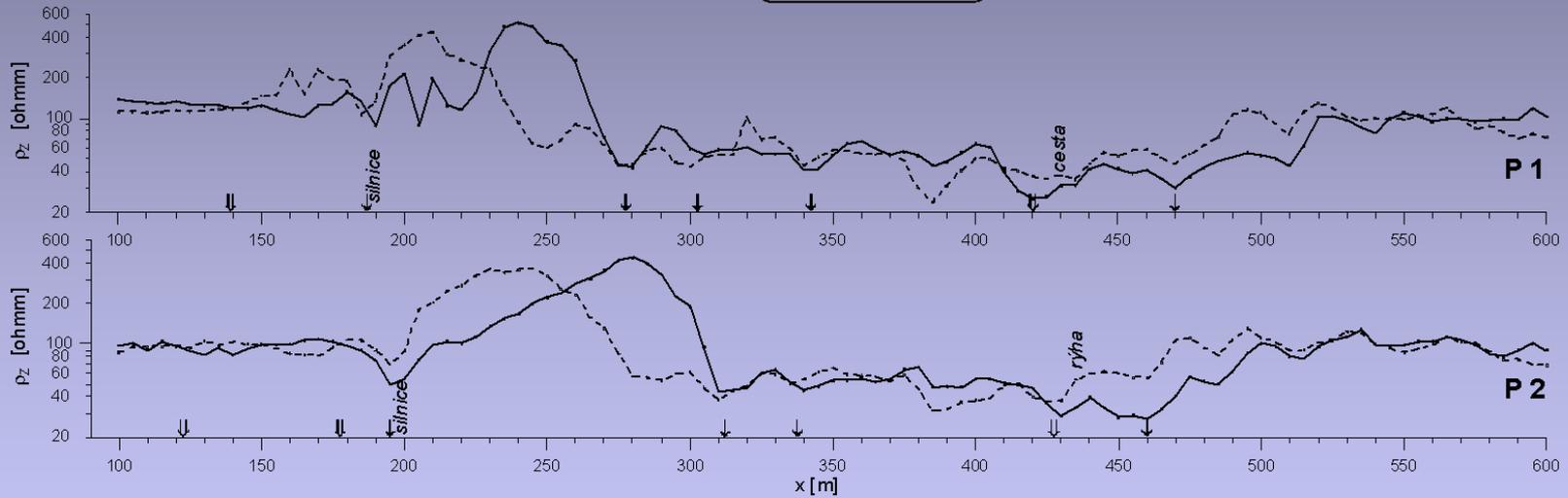
1 : 2000



A 20 M 10 N  
M 10 N 20 B

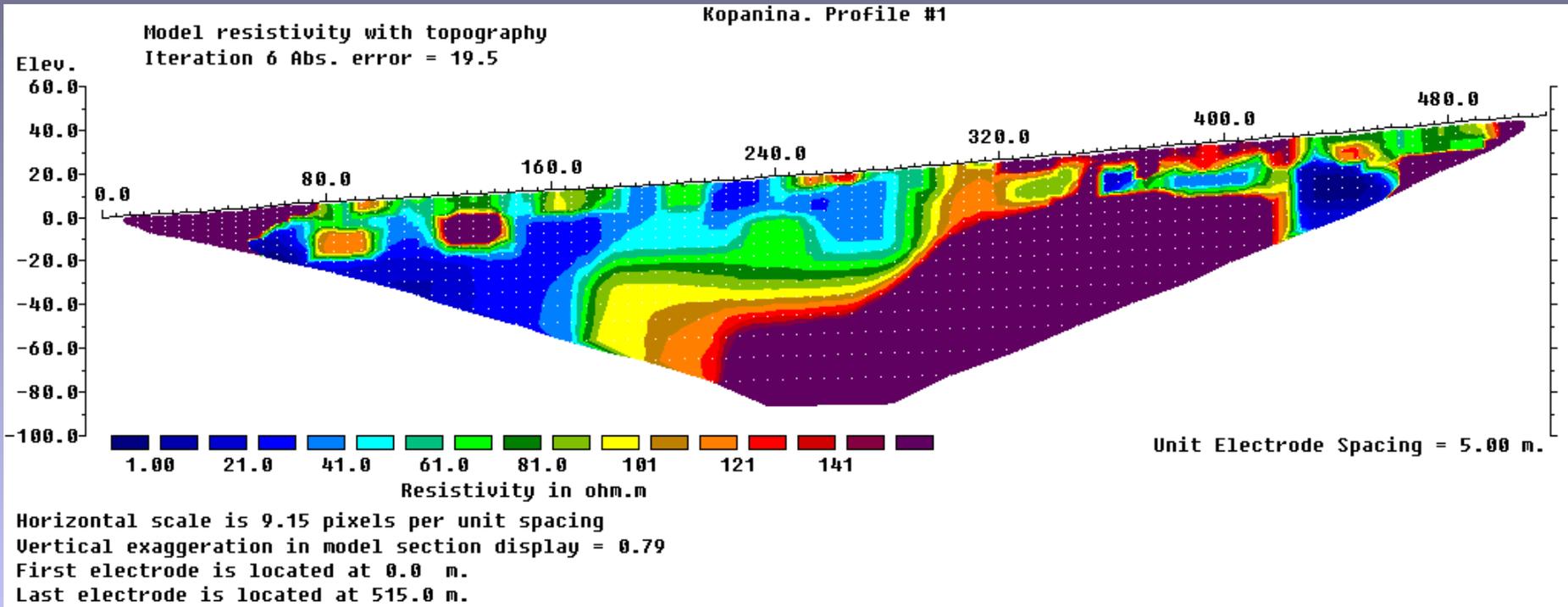


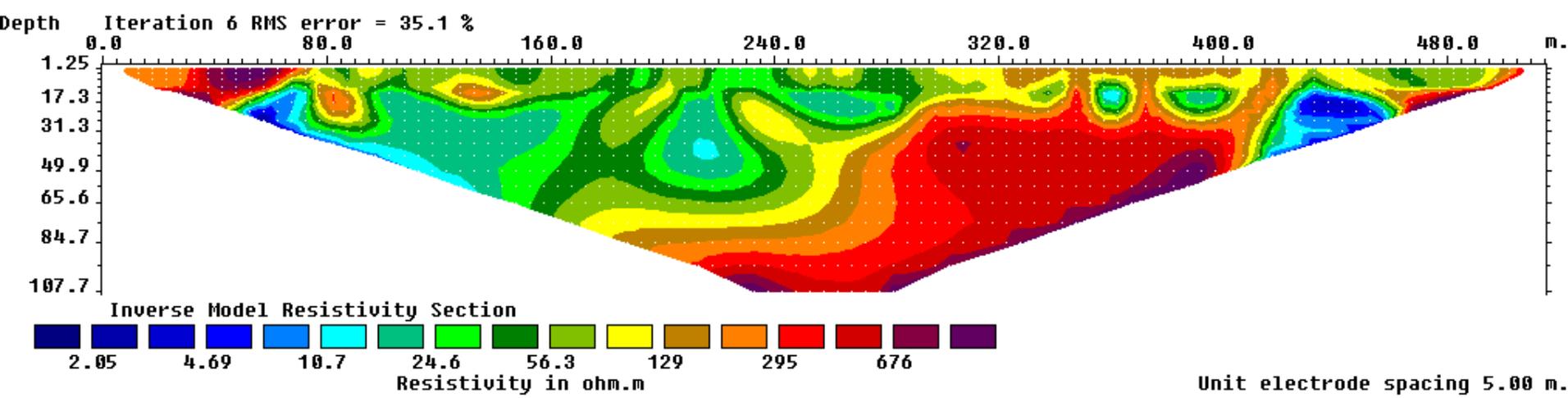
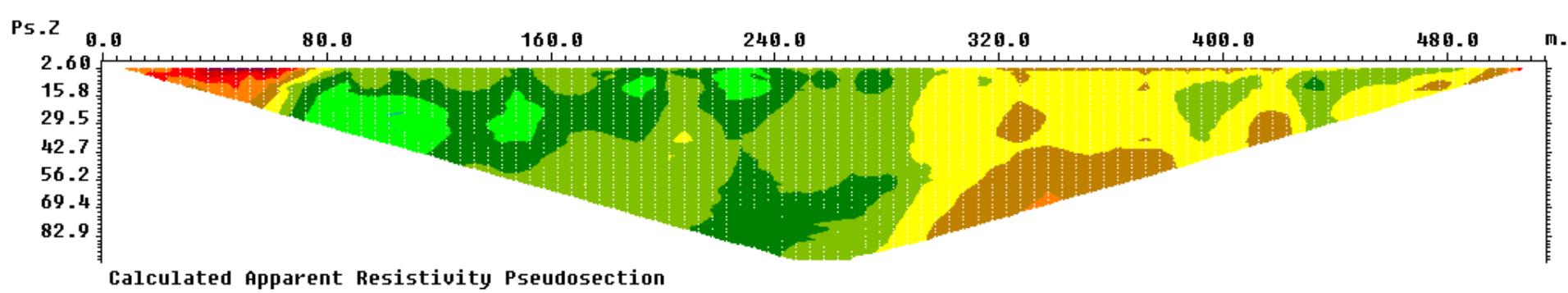
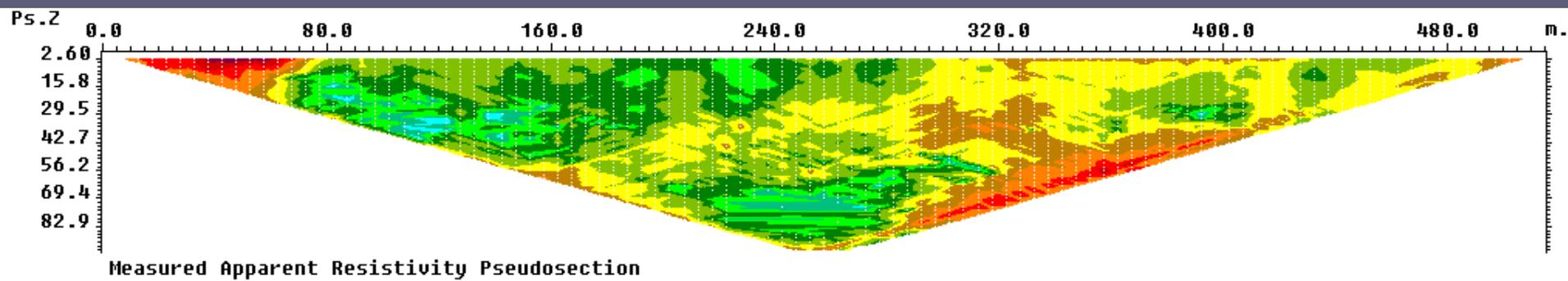
⇓ VÝRAZNÝ VODIČ  
↓ MĚLKÝ VODIČ



Obr. 2

# Elektrická tomografie - multikabel

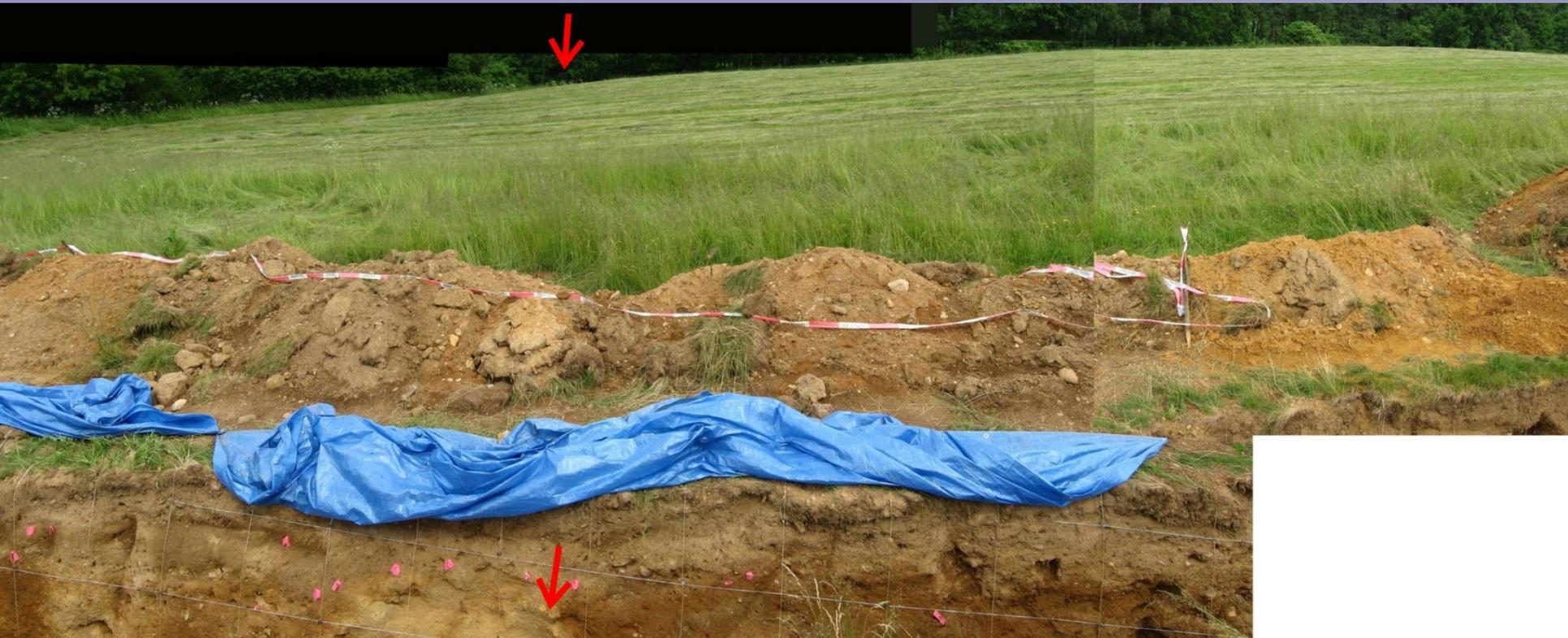




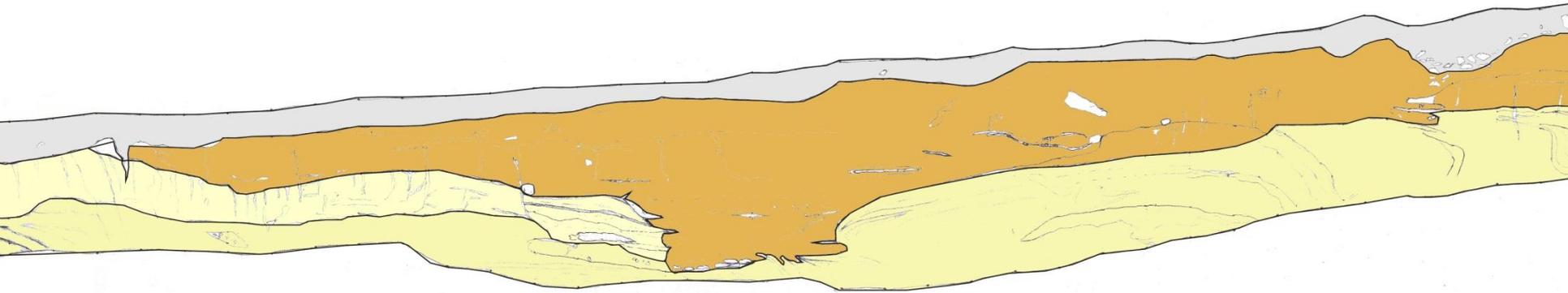


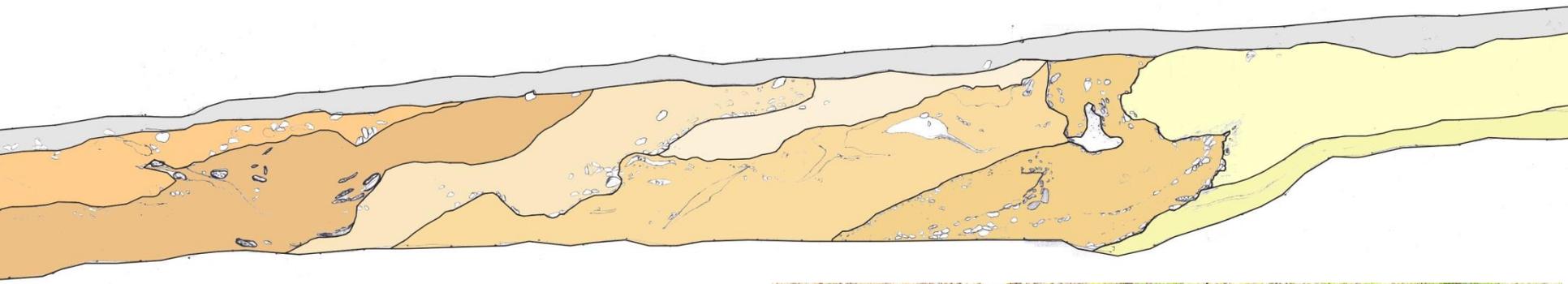


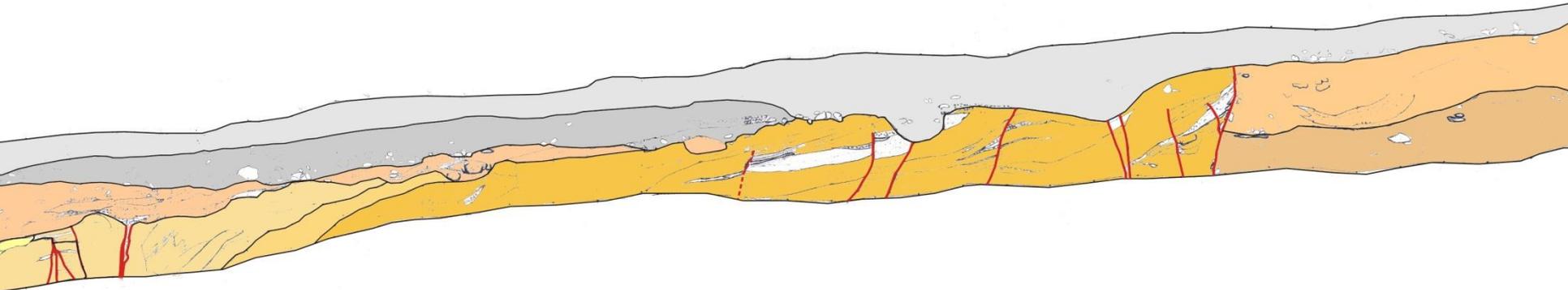








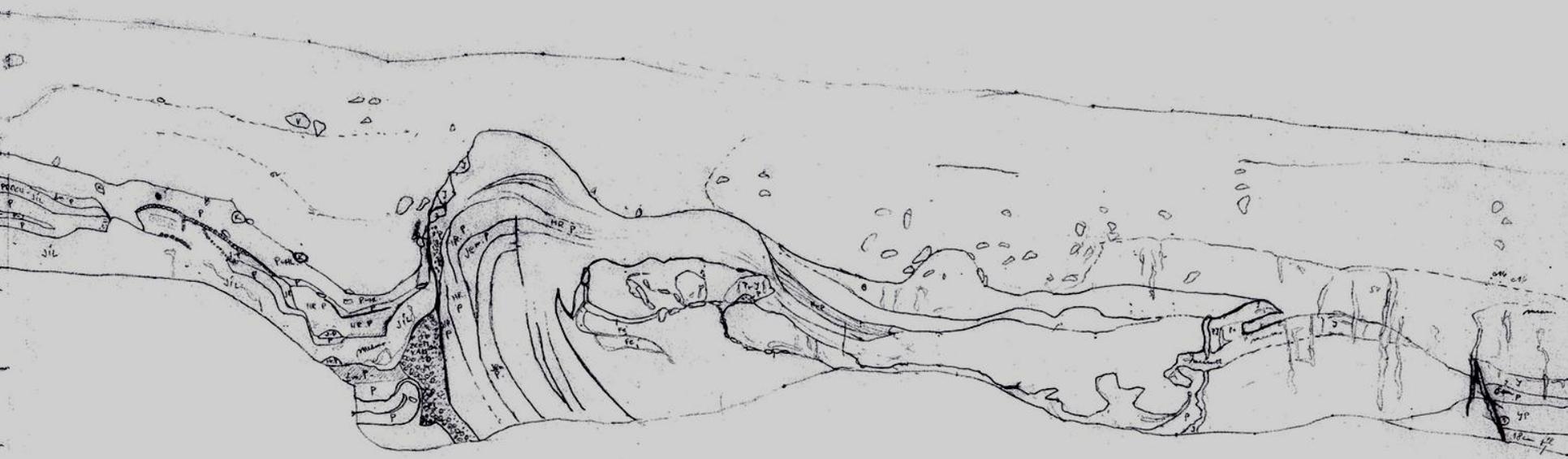






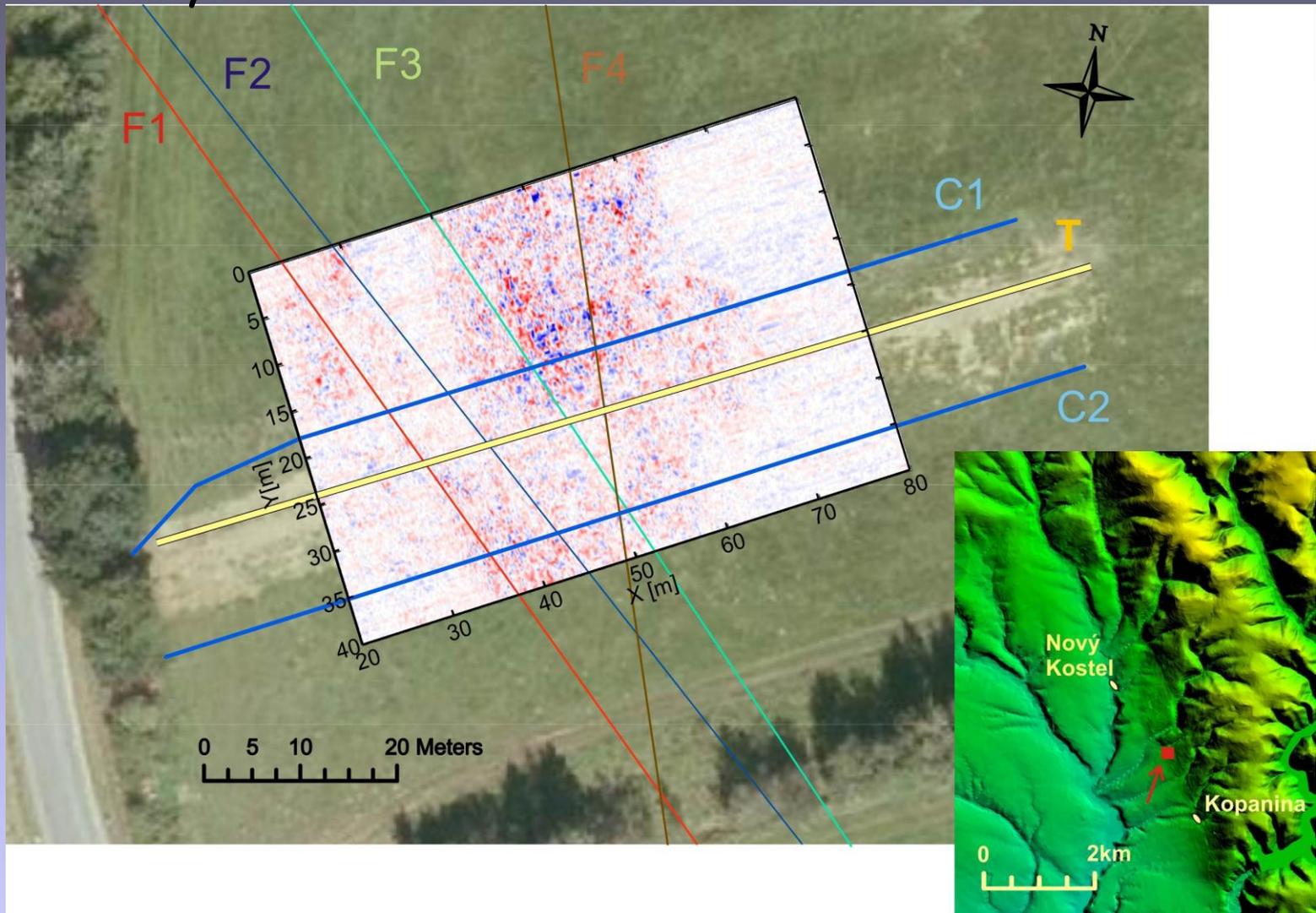






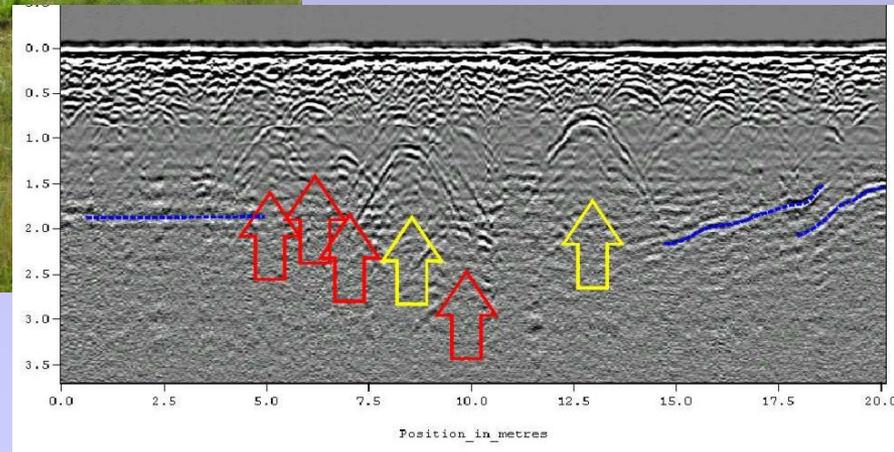


# Geofyzika



# GPR - ground penetration radar - georadar

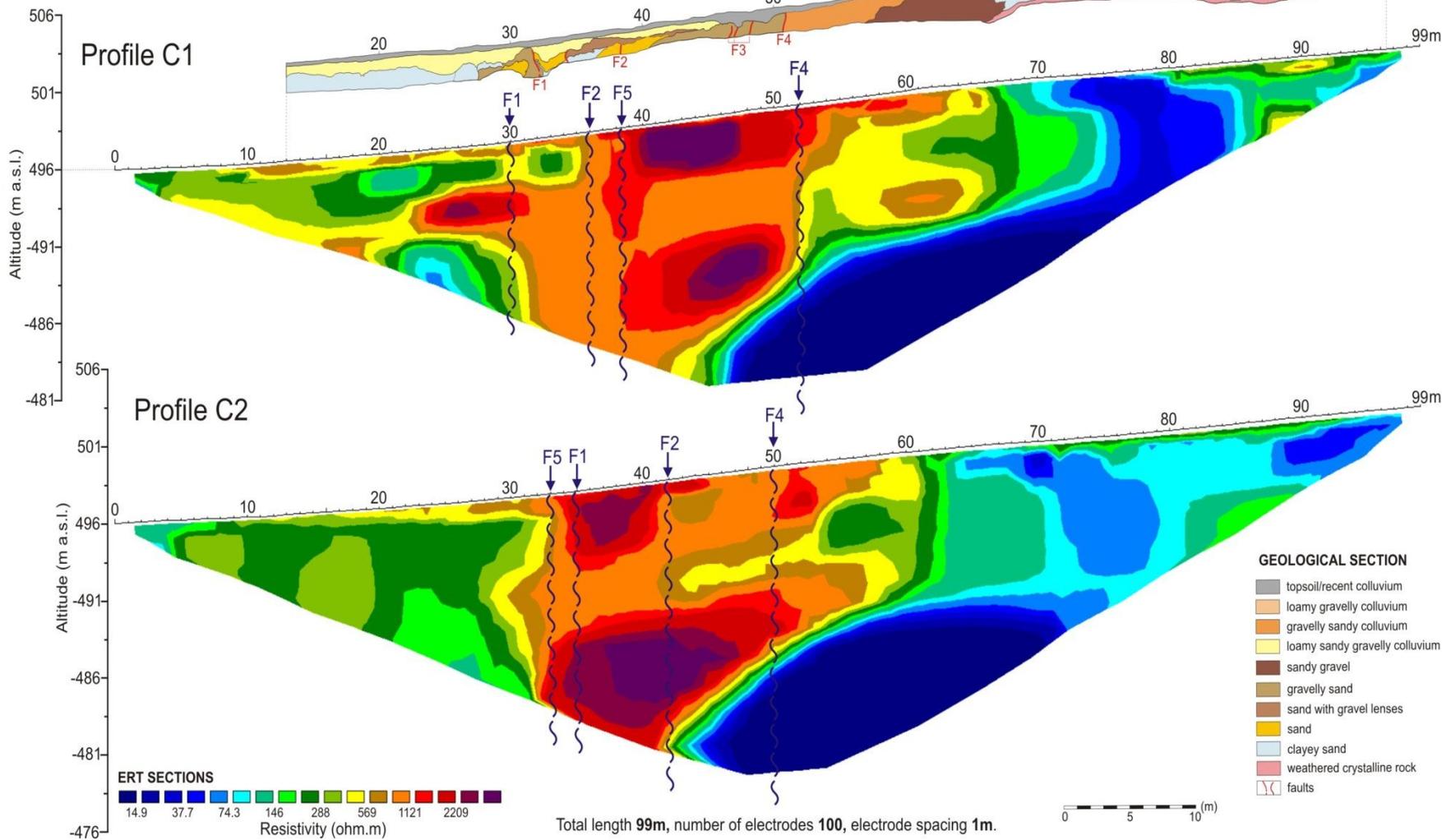
2 antény - vysílač a přijímač - vysílá elektromagnetické záření v rádiovém spektru vln (1mm - tis.km) - odraz od objektů pod povrchem



WSW

# KOPANINA 1

ENE

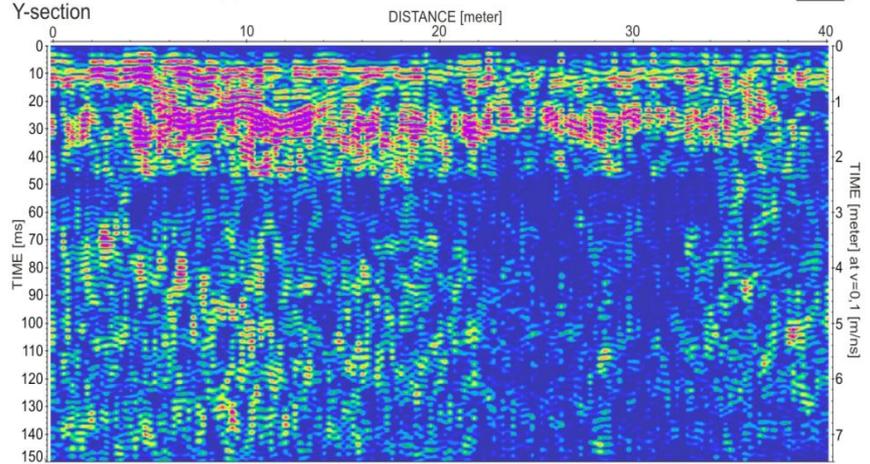
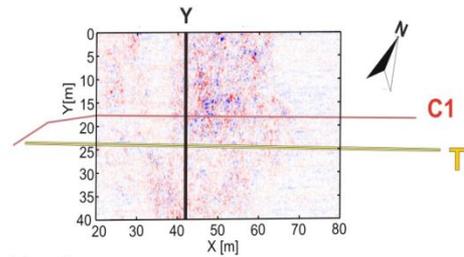
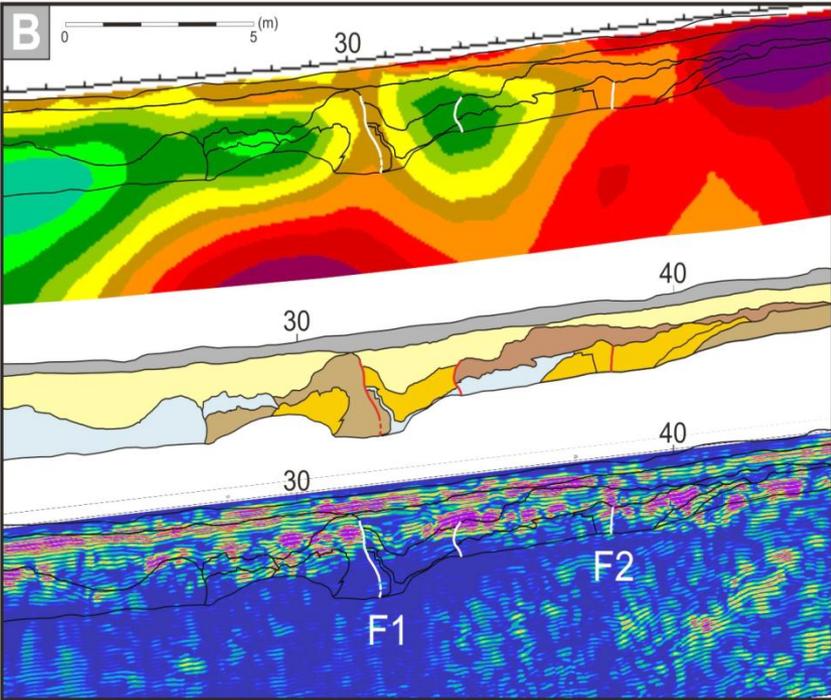
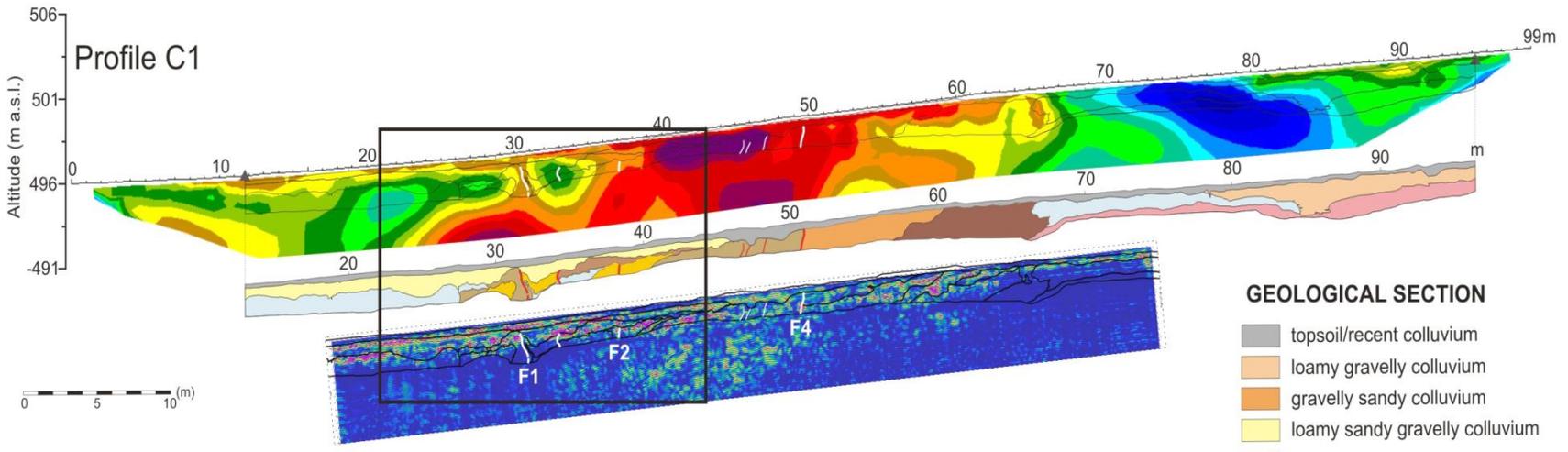


**A**

WSW

KOPANINA 1

ENE



2,2 - 4 m

4 - 6,2m

