

Distribuzione e caratteristiche di deformazione e magmatismo durante il *rifting* e la rottura continentale in Etiopia



Giacomo Corti, IGG-CNR, Firenze

Progetto PRIN 2017: *Distribution of strain and magmatism during rifting*

UNIFI

Derek Keir (PI)

(geologia strutturale,
sismicità, sedimentologia)

UNIFI

Carolina Pagli

(geodesia, sismicità,
vulcanologia, petrologia,
geochimica)

CNR

Giacomo Corti

(geologia strutturale, modelling,
chimica dei minerali,
geochimica isotopica)

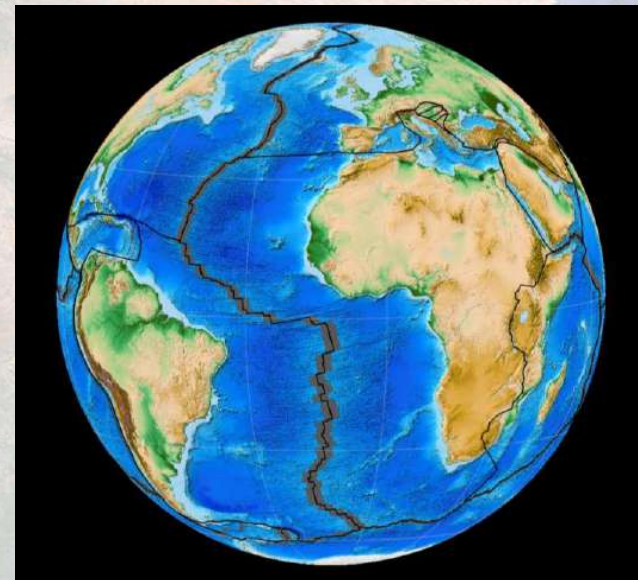
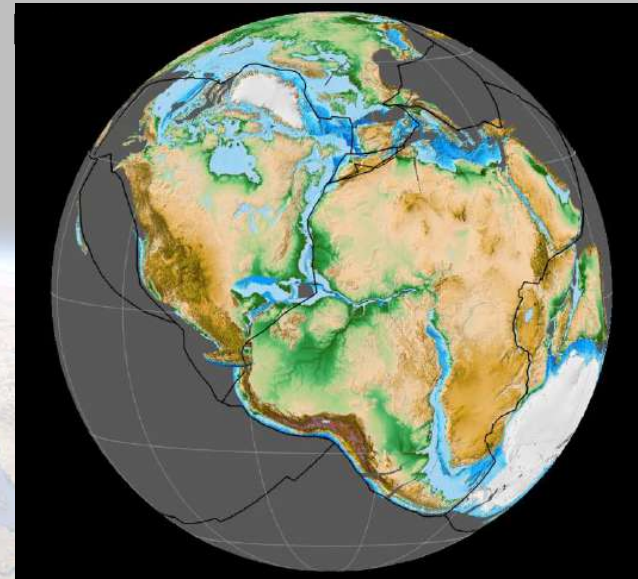
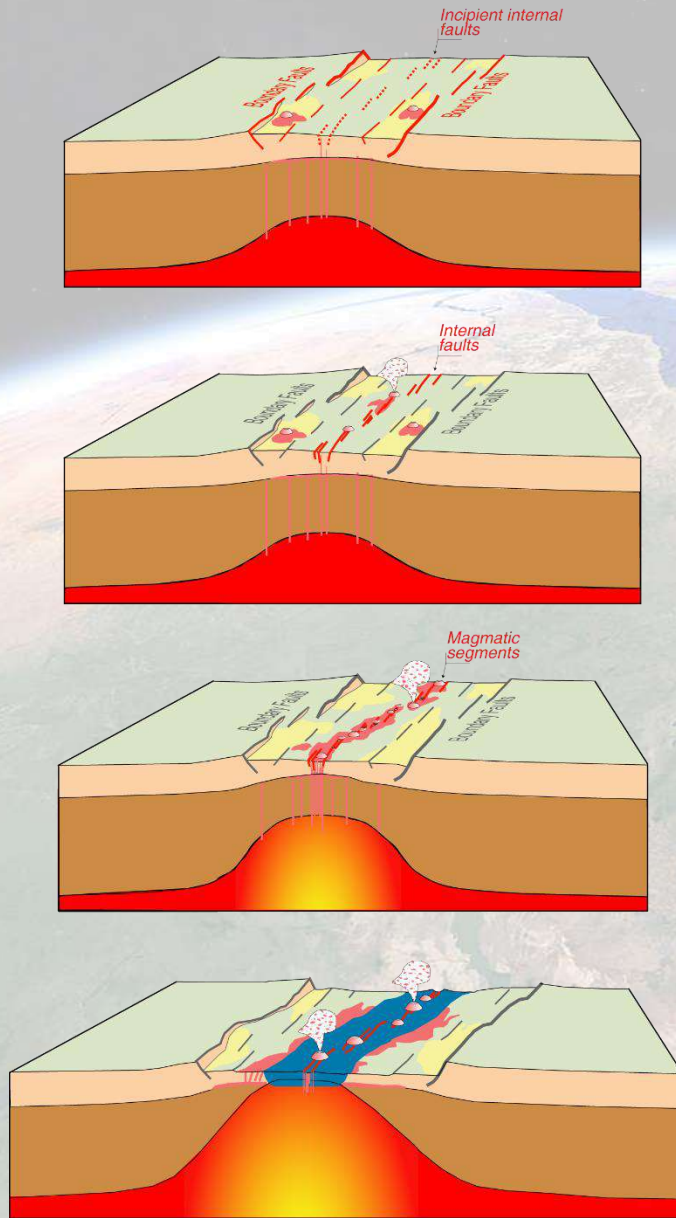
Eleonora Braschi

Giovanna Moratti

(Laura Pinarelli)

Assegno di ricerca (18m)

Rift valley: importanza scientifica



Importanza legata anche a rischi, georisorse, scoperte paleoantropologiche (culla dell'umanità), ecc.

- East African Rift
- Gulf of Aden
- Red Sea

L'Etiopia è un luogo ideale per studiare i processi di estensione e rottura continentale perchè:

-in differenti settori **registra tutti i differenti stadi evolutivi del processo** (dall'inizio dell'estensione alla formazione di nuove dorsali oceaniche)



- East African Rift
- Gulf of Aden
- Red Sea

L'Etiopia è un luogo ideale per studiare i processi di estensione e rottura continentale perchè:

- in differenti settori **registra tutti i differenti stadi evolutivi del processo** (dall'inizio dell'estensione alla formazione di nuove dorsali oceaniche)
- tali processi sono in attività e quindi si possono **monitorare e studiare "in diretta"**



..... East African Rift

..... Gulf of Aden

..... Red Sea

L'Etiopia è un luogo ideale per studiare i processi di estensione e rottura continentale perchè:

-in differenti settori **registra tutti i differenti stadi evolutivi del processo** (dall'inizio dell'estensione alla formazione di nuove dorsali oceaniche)

-tali processi sono in attività e quindi si possono **monitorare e studiare "in diretta"**



Erta Ale



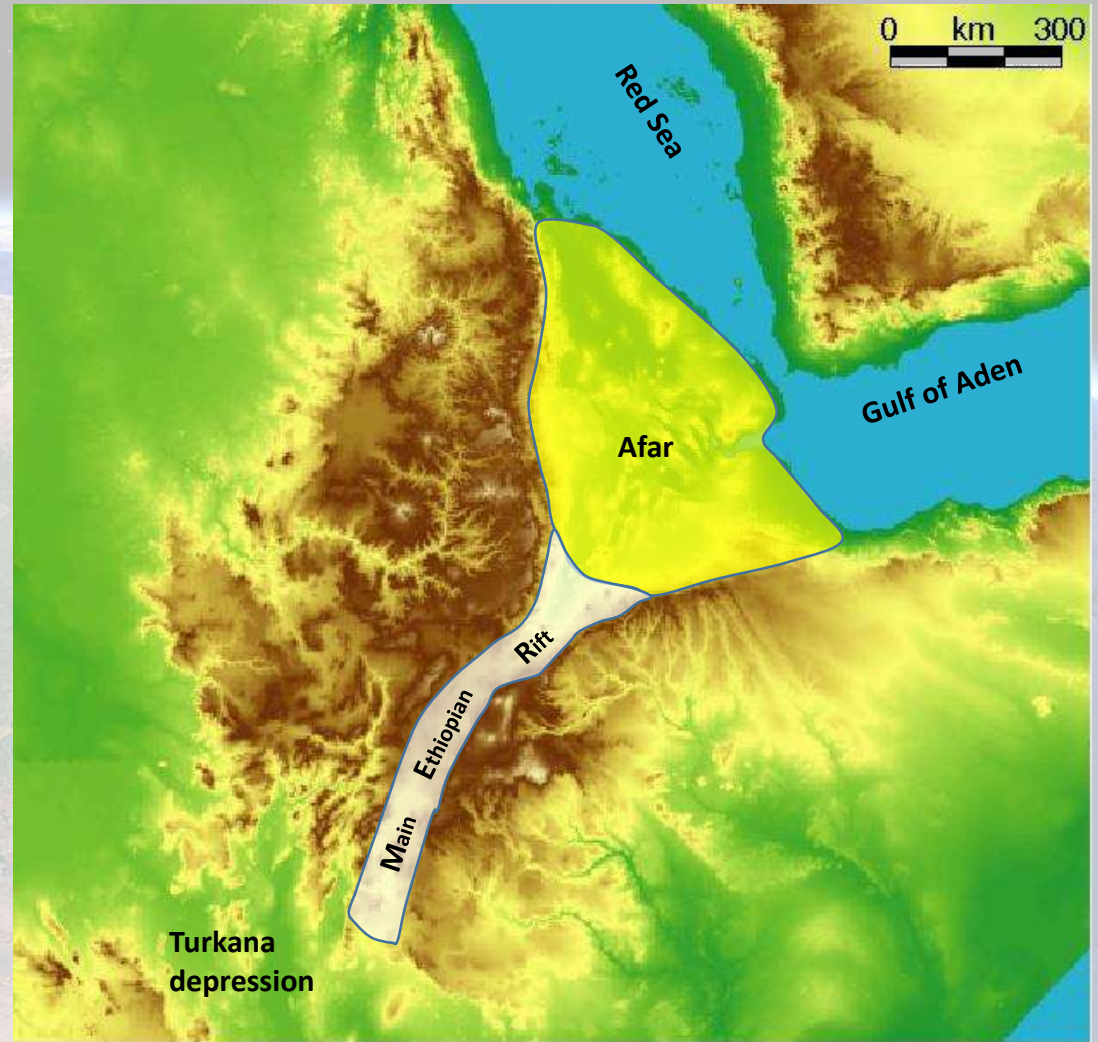
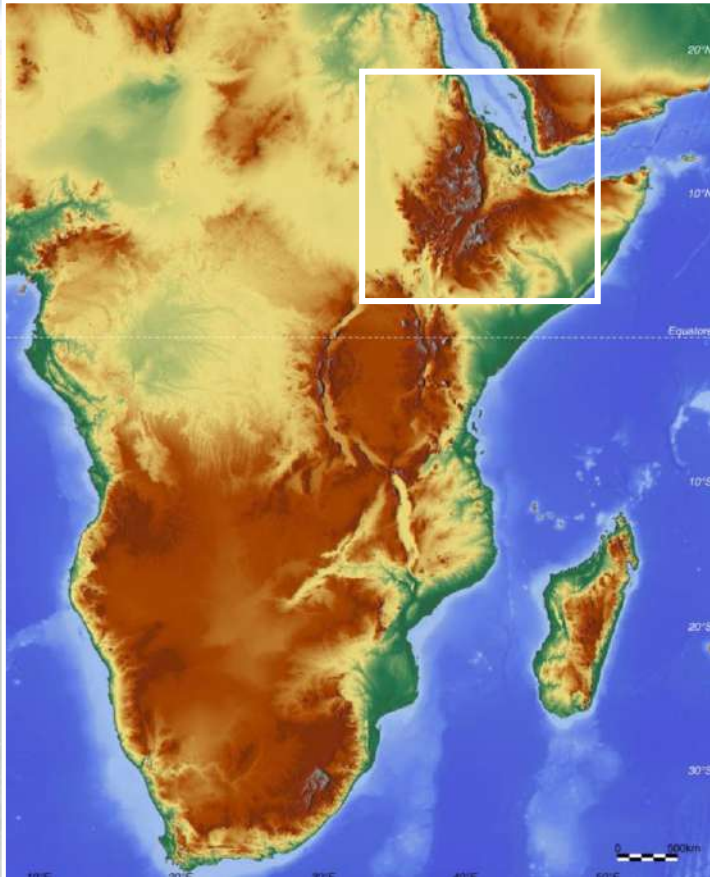
Presentazione

- Dalle fasi iniziali alla maturità del rifting: **Main Ethiopian Rift**
- Fasi finali del rifting e rottura continentale: **Afar**
- Domande aperte e progetto PRIN



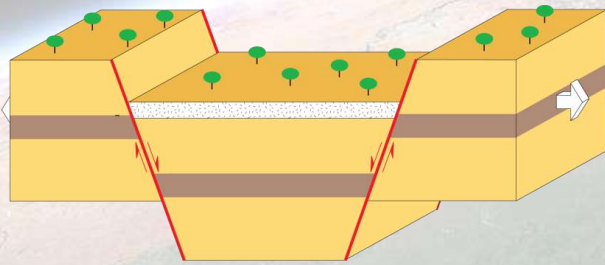
Rift Etiopico: caratteristiche generali

Rift Etiopico parte settentrionale del sistema di rift valleys africane che comprende **Afar** e **Main Ethiopian Rift**

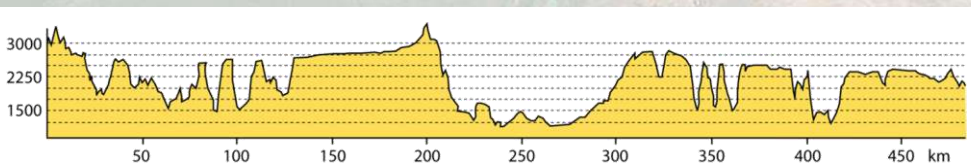
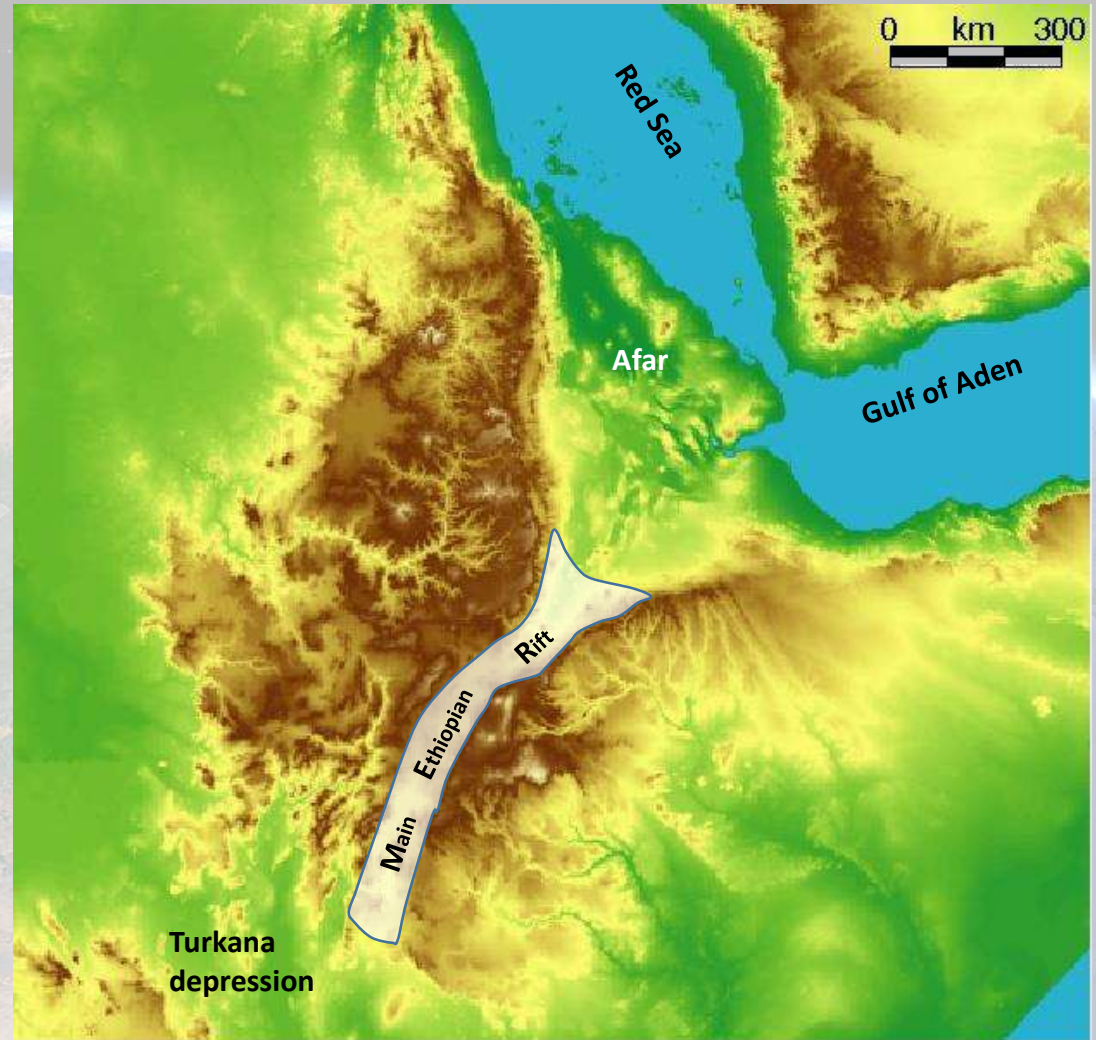


Rift Etiopico: caratteristiche generali

Tipica morfologia della *rift valley* è sviluppata nel cosiddetto **Main Ethiopian Rift**



Rift valley: "a linear valley with parallel and almost vertical sides, which has fallen owing to a series of parallel faults" (John W. Gregory, 1894)



[MER: rifting continentale meno evoluto]

Dallol, Etiopia

giovedì 15:00

Per lo più soleggiato

46 °C | °F

Precipitazioni: 0%

Umidità: 11%

Vento: 27 km/h

Temperatura Precipitazioni Vento



Afar: ampie zone sotto il livello del mare (**fino a -155m**)
Dallol (Afar settentrionale): temperatura media annuale (1960-1966) **34.6°C**



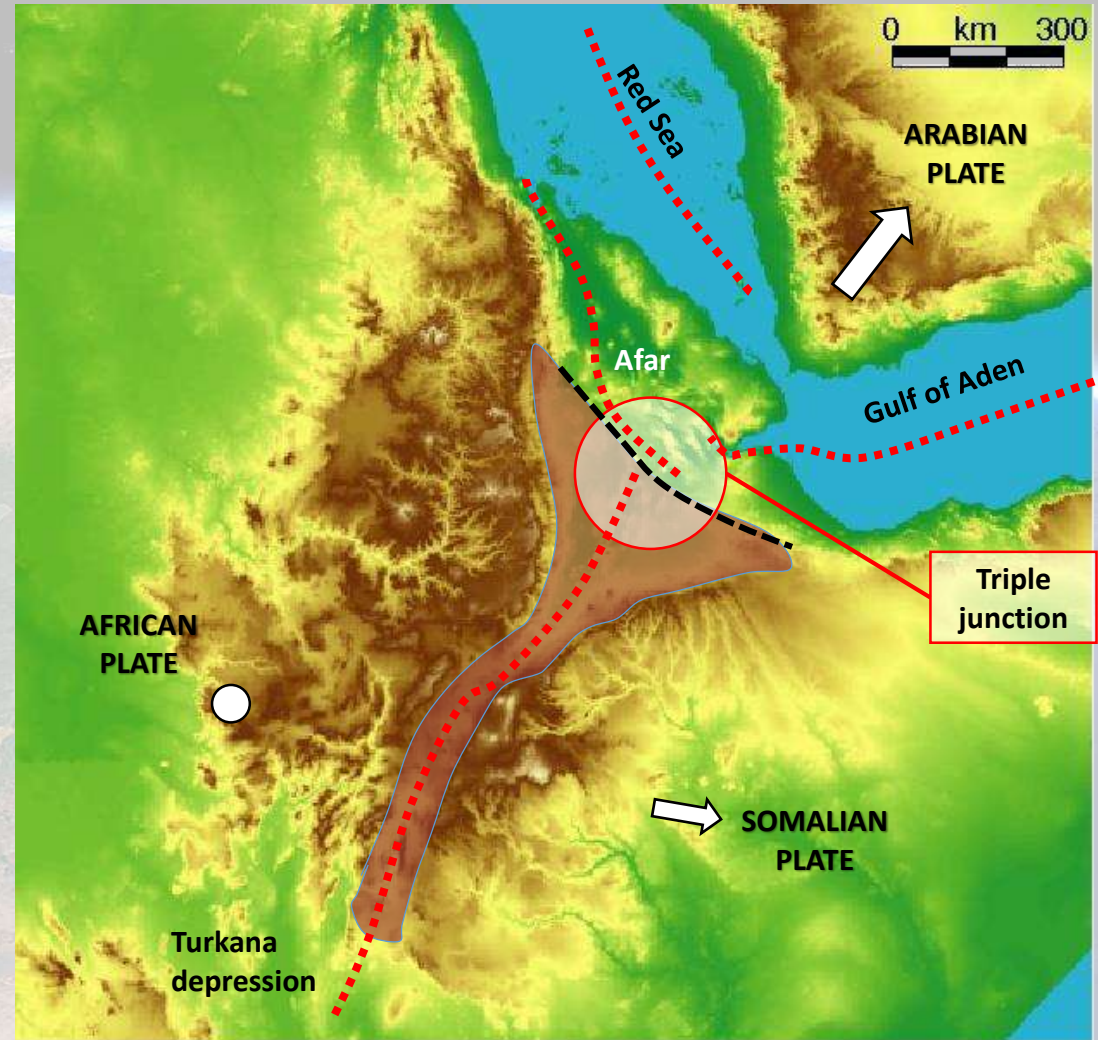
| Month | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Year |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Average high °C (°F) | 36.1 (97) | 36.1 (97) | 38.9 (102) | 40.6 (105.1) | 44.4 (111.9) | 46.7 (116.1) | 45.6 (114.1) | 45.0 (113) | 42.8 (109) | 41.7 (107.1) | 39.4 (102.9) | 36.7 (98.1) | 41.2 (106.1) |
| Daily mean °C (°F) | 30.3 (86.5) | 30.5 (86.9) | 32.5 (90.5) | 33.9 (93) | 36.4 (97.5) | 38.6 (101.5) | 38.7 (101.7) | 37.6 (99.7) | 37.3 (99.1) | 35.6 (96.1) | 33.2 (91.8) | 30.8 (87.4) | 34.6 (94.3) |
| Average low °C (°F) | 24.6 (76.3) | 24.6 (76.3) | 26 (78.8) | 27.1 (80.8) | 28.5 (83.3) | 30.4 (86.8) | 31.8 (89.2) | 31 (88) | 31.6 (88.8) | 29.6 (85.3) | 27.1 (80.8) | 25.7 (78.3) | 28.2 (82.7) |

Rift Etiopico: caratteristiche generali

Main Ethiopian Rift legato a moto relativo **Africa-Somalia** [4-6 mm/anno]

Afar (centrale-settentrionale) e sistema **Golfo di Aden-Mar Rosso** legati a moto relativo **Arabia-Africa/Somalia** [15-20 mm/anno]

Zona centrale dell'Afar **giunzione tripla** tra le placche Africana, Somala e Araba

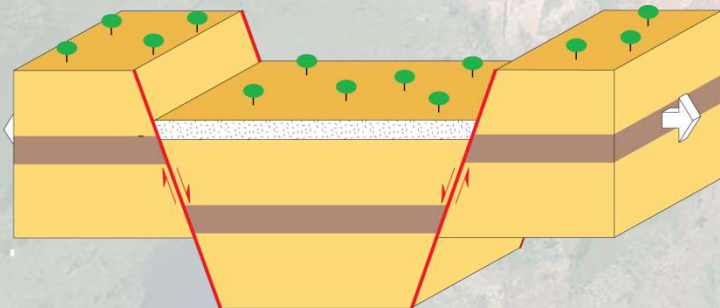


[Afar: rifting continentale evoluto e oceanizzazione incipiente]

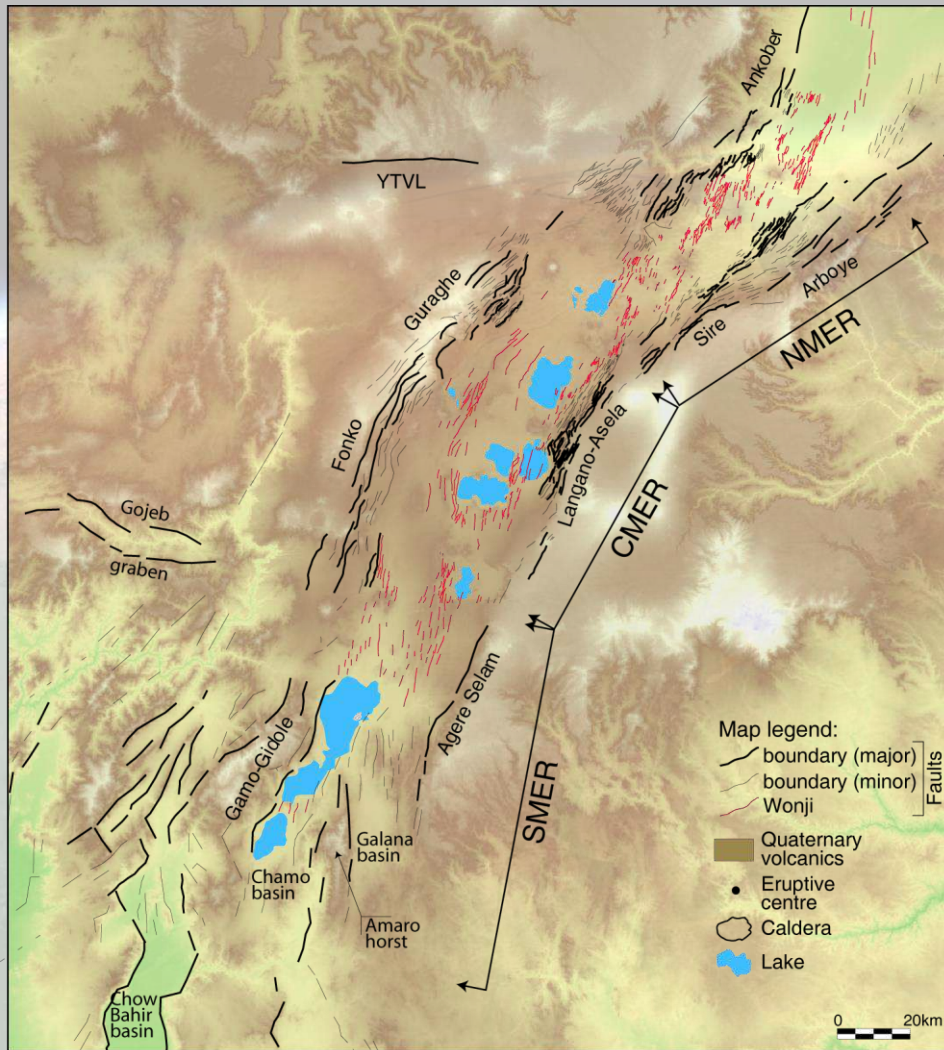
Main Ethiopian Rift: fasi iniziali del rifting

La **rift valley Etiopica** si imposta all'interno di un'area a topografia anomala e interessata dalla messa in posto di imponenti spessori di basalti per azione di una o più **mantle plume(s)**

Si imposta lungo una **zona di debolezza pre-esistente** (rift stretto, deformazione molto localizzata)



Main Ethiopian Rift: variazioni nello stile deformativo ed evolutivo



NORTHERN MER

Due sistemi di faglie : Faglie Bordiere (BF) e Faglie Assiali (AF)

SOUTHERN MER

Un sistema di faglie principale: Faglie Bordiere (BF) - AF assenti



Faglie bordiere: poche, lunghe e con importante rigetto verticale

Asela, margine orientale



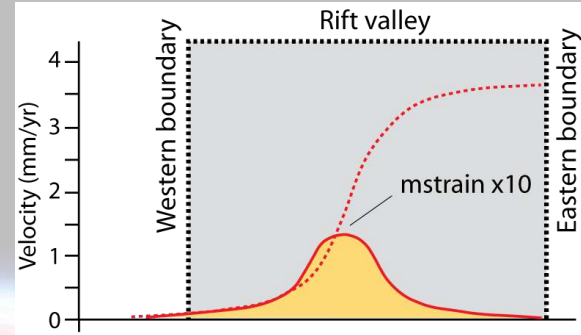
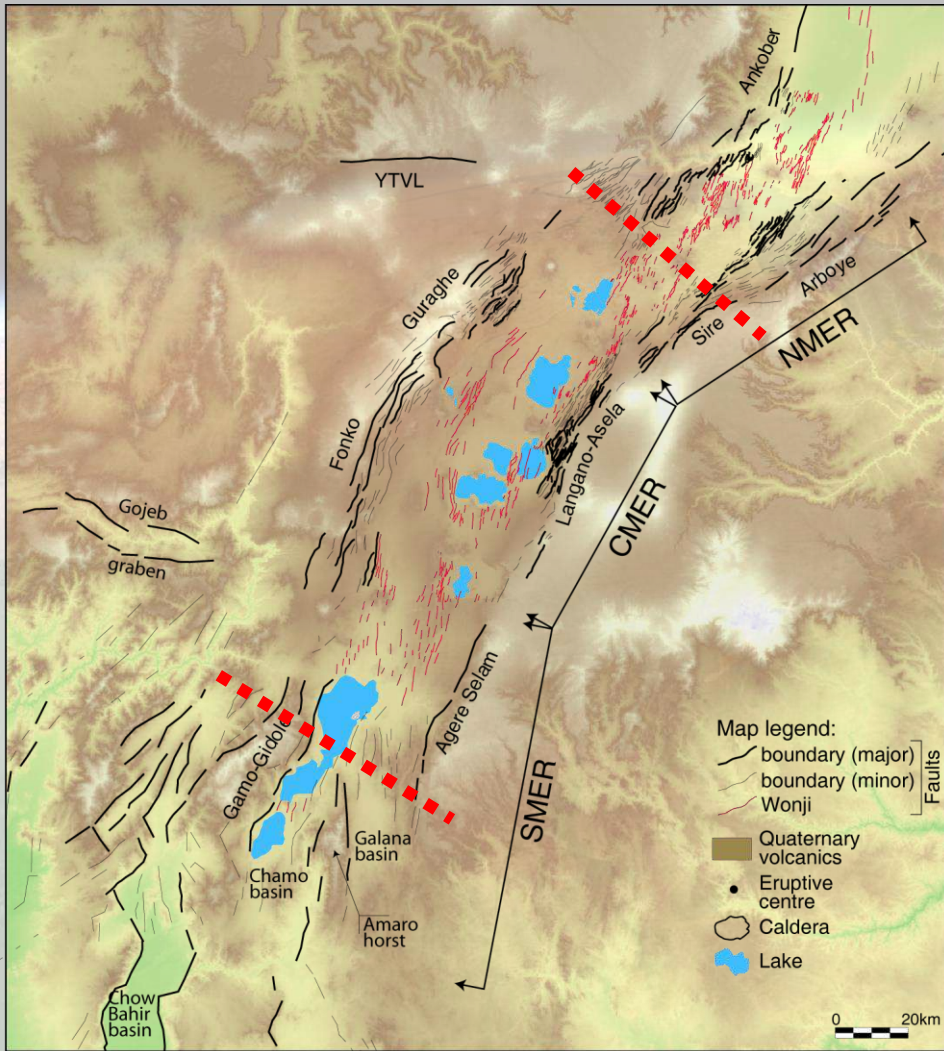
Faglie bordiere a Golja

Main Ethiopian Rift: caratteristiche delle faglie assiali



Faglie assiali: numerose, corte e con rigetto verticale limitato

Main Ethiopian Rift: variazioni nello stile deformativo ed evolutivo

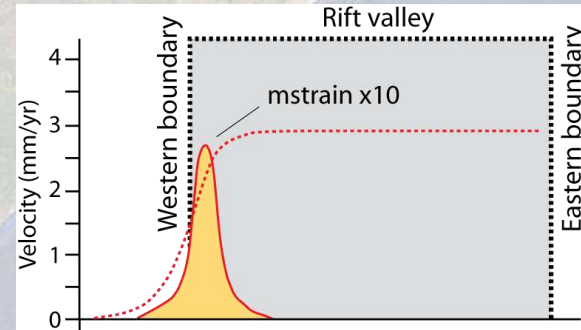


NORTHERN MER

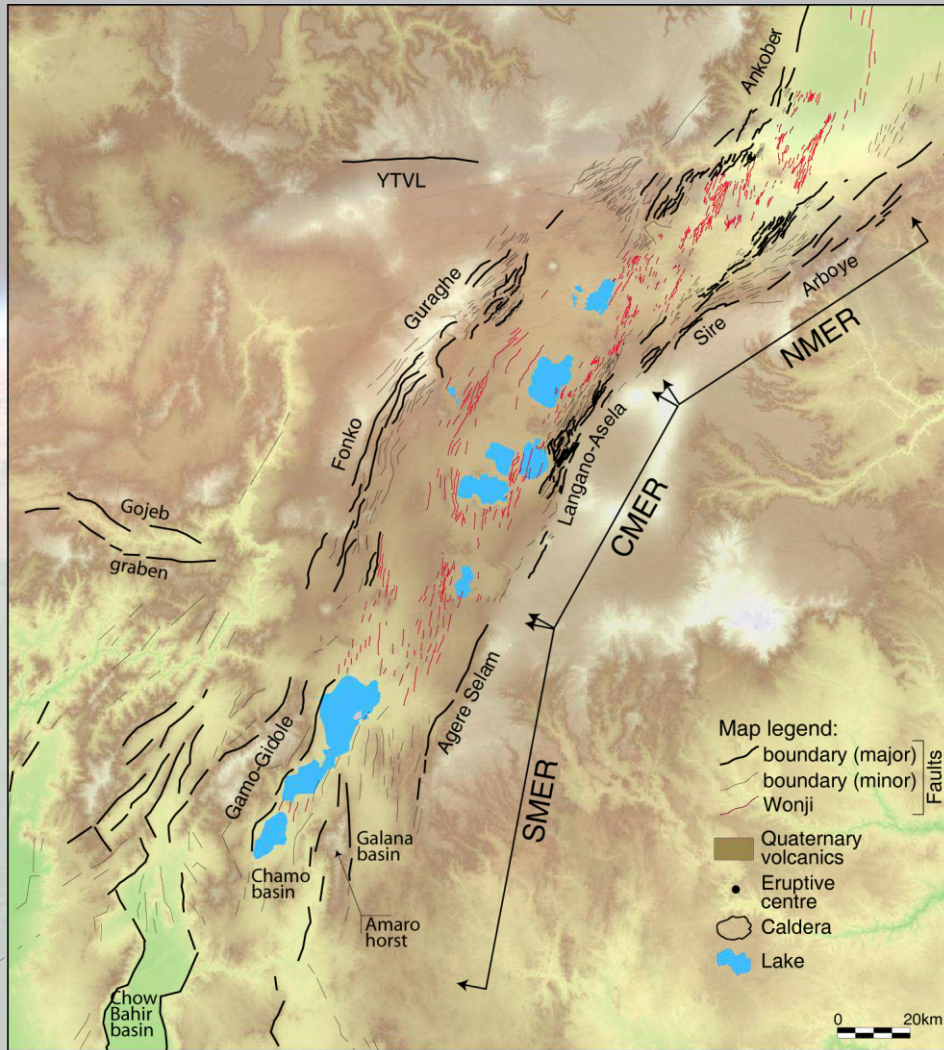
Due sistemi di faglie : Faglie Bordiere (BF) e Faglie Assiali (AF)

SOUTHERN MER

Un sistema di faglie principale: Faglie Bordiere (BF) - AF assenti



Main Ethiopian Rift: variazioni nello stile deformativo ed evolutivo



NORTHERN MER

Due sistemi di faglie : Faglie Bordiere (BF) e Faglie Assiali (AF)

Evoluzione a due fasi: 1° fase BF (12Ma-2Ma) – 2° fase AF (2Ma-presente)

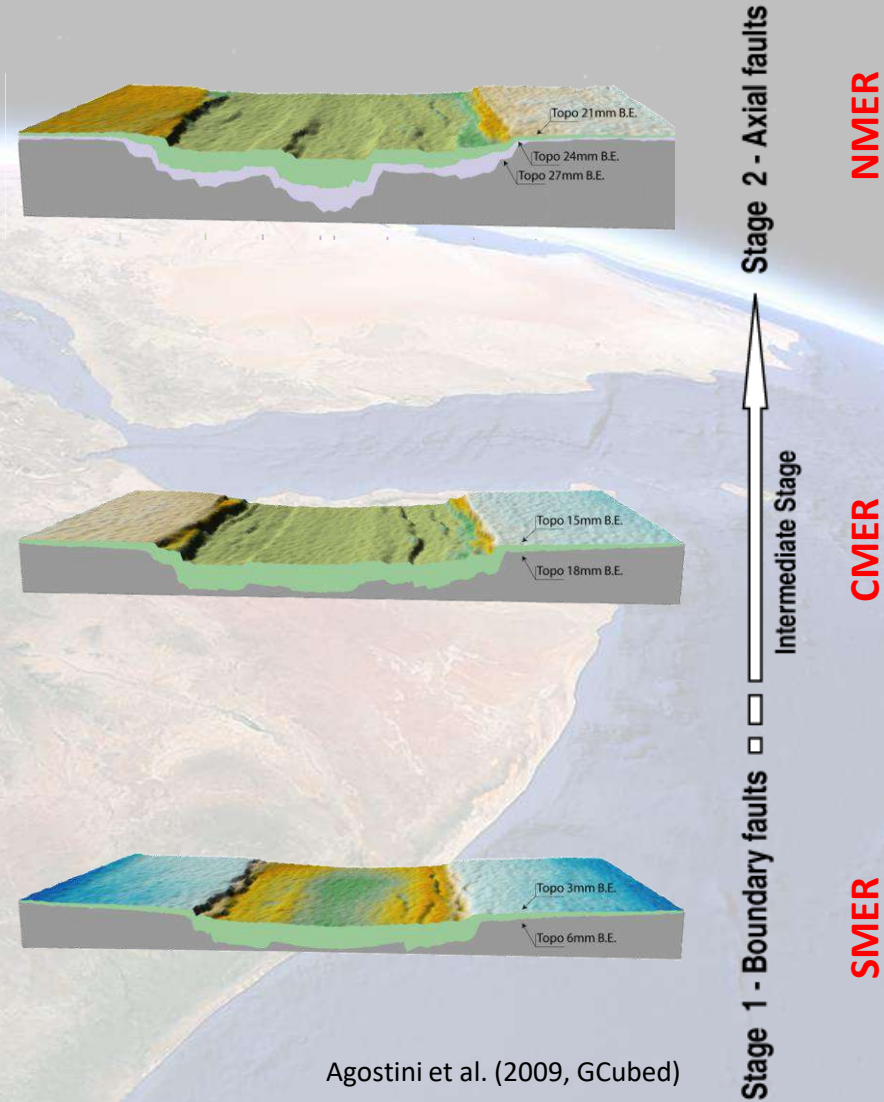
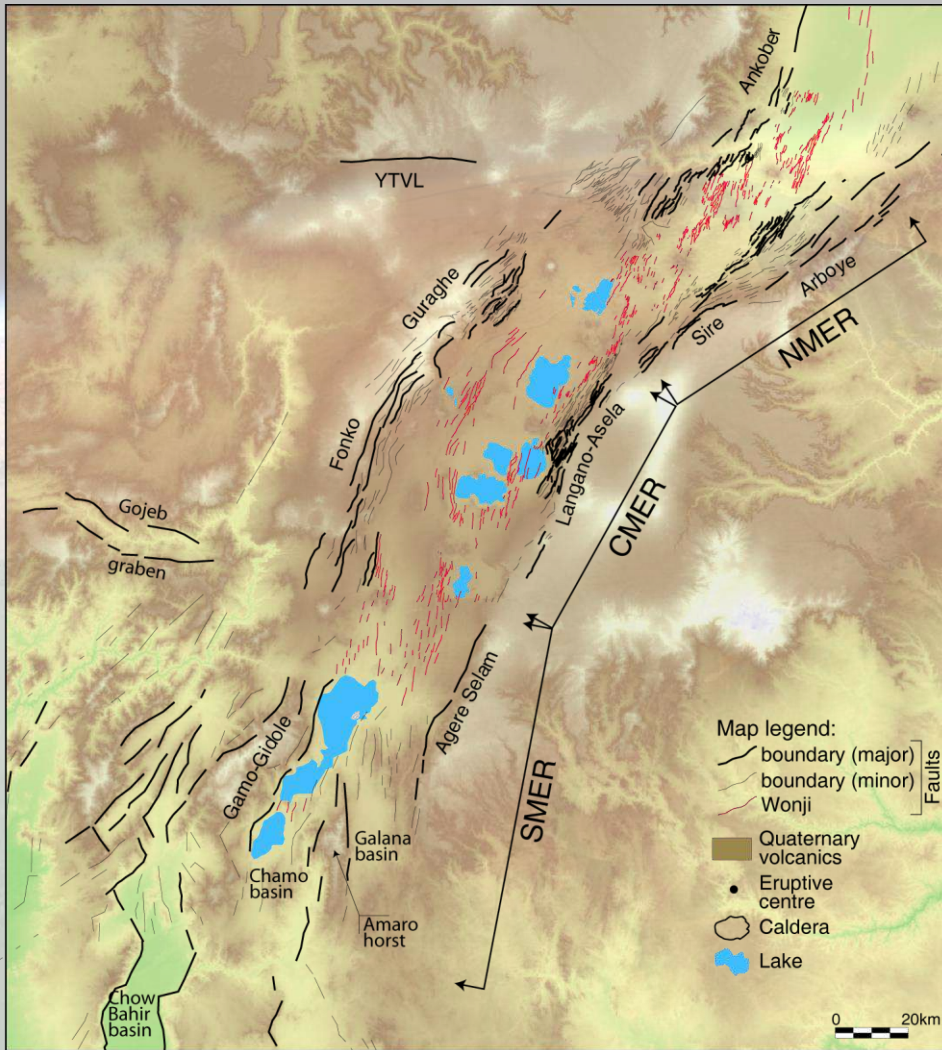
SOUTHERN MER

Un sistema di faglie principale: BF (12Ma(?)-presente) - AF assenti

Singola fase evolutiva

Main Ethiopian Rift: variazioni nello stile deformativo ed evolutivo

Queste variazioni sono state interpretate come legate ad una transizione da **fasi iniziali del rifting nel SMER** (deformazione in prossimità delle grandi scarpate marginali) a **rifting maturo nel NMER** (attività tettonica in prossimità della zona assiale) (e.g., Hayward and Ebinger, 1996; Agostini et al., 2011 EPSL)

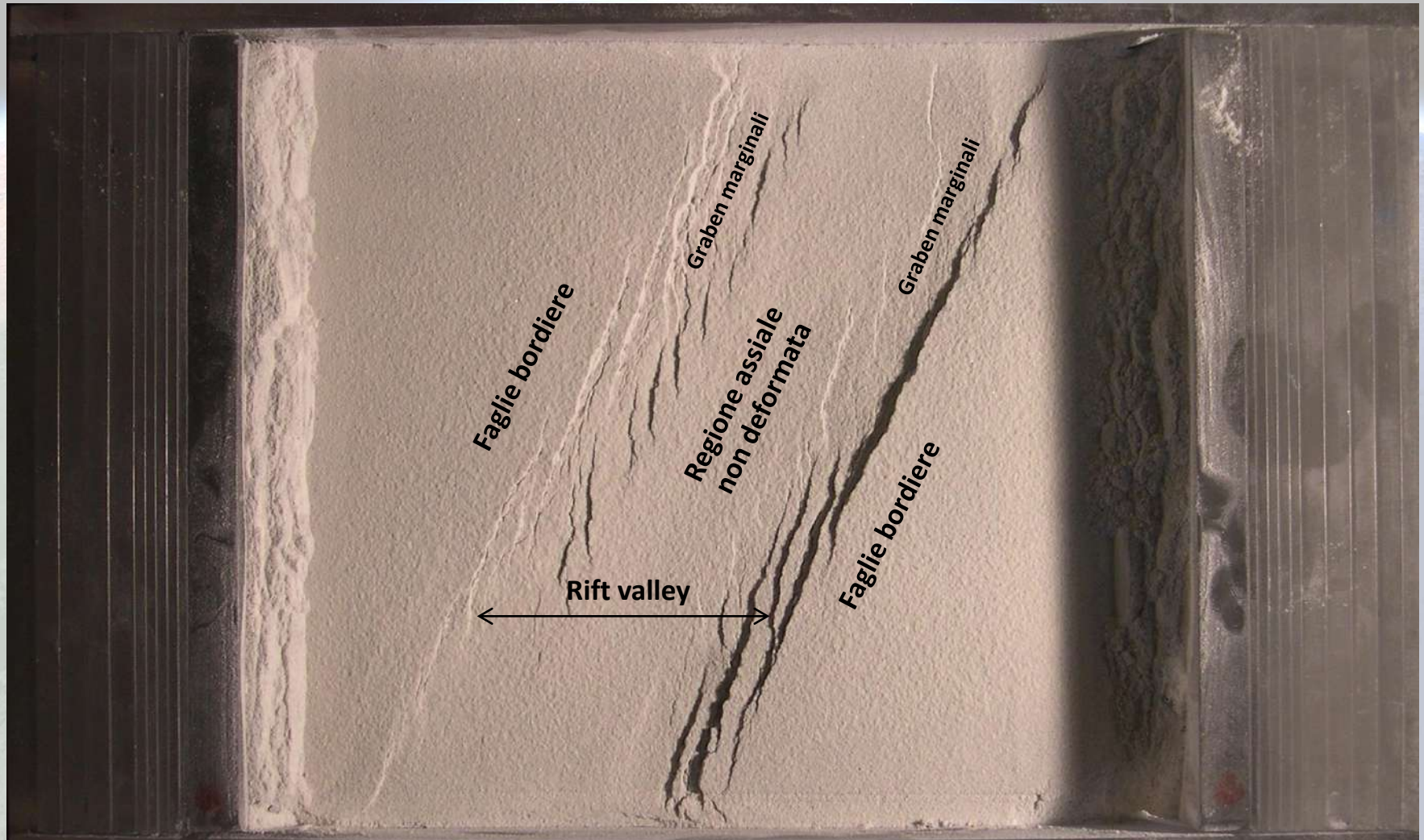
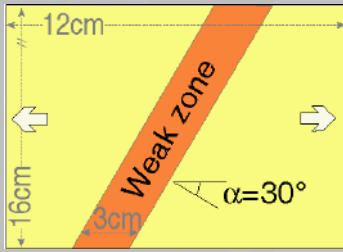


Agostini et al. (2009, GCubed)

Evoluzione del rifting: modelli di laboratorio in centrifuga

Corti (2008) Nature Geoscience

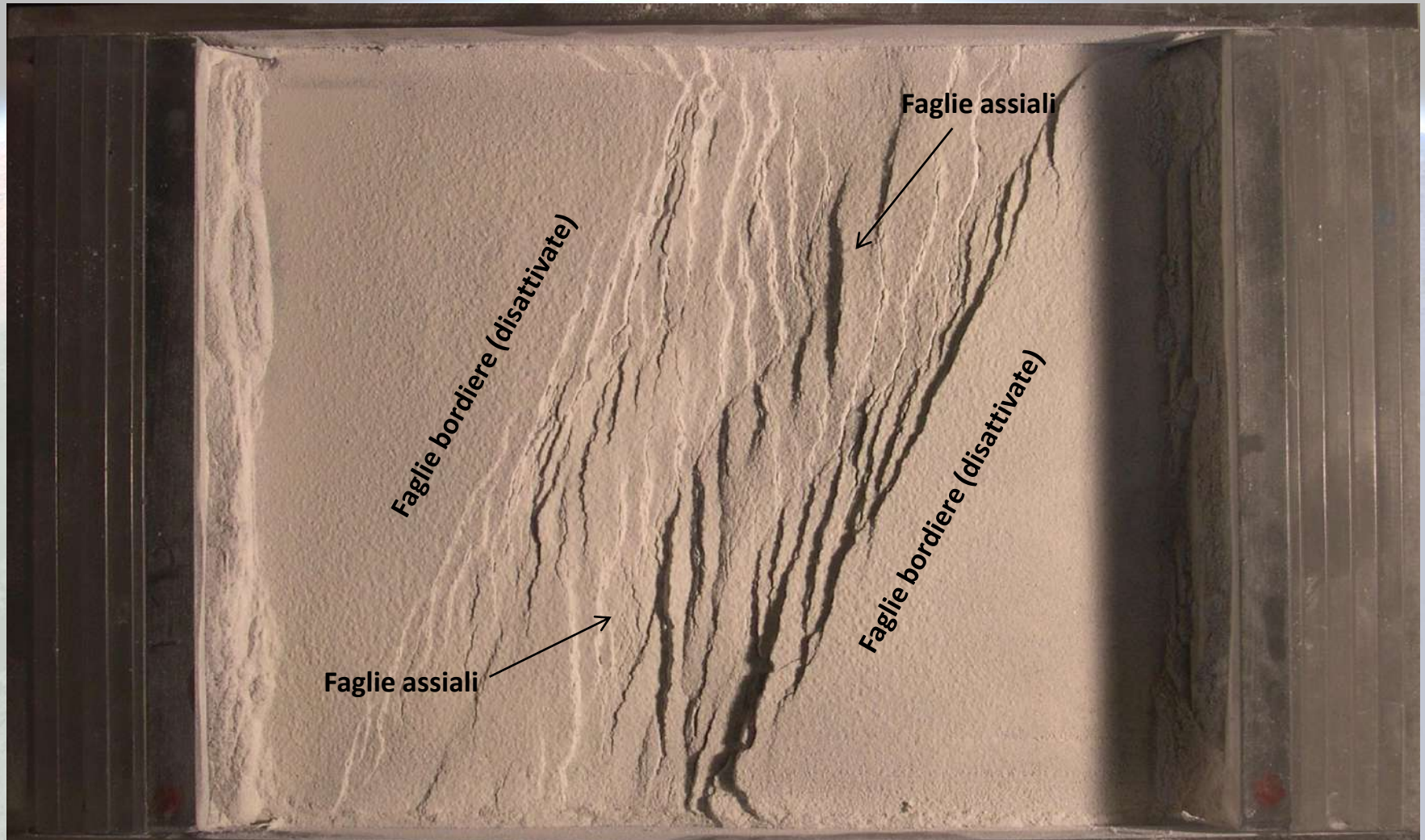
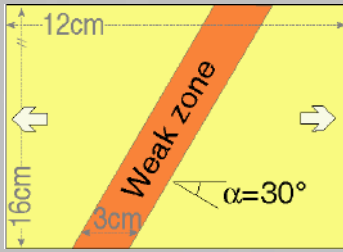
Agostini et al. (2009) GCubed



Evoluzione del rifting: modelli di laboratorio in centrifuga

Corti (2008) Nature Geoscience

Agostini et al. (2009) GCubed

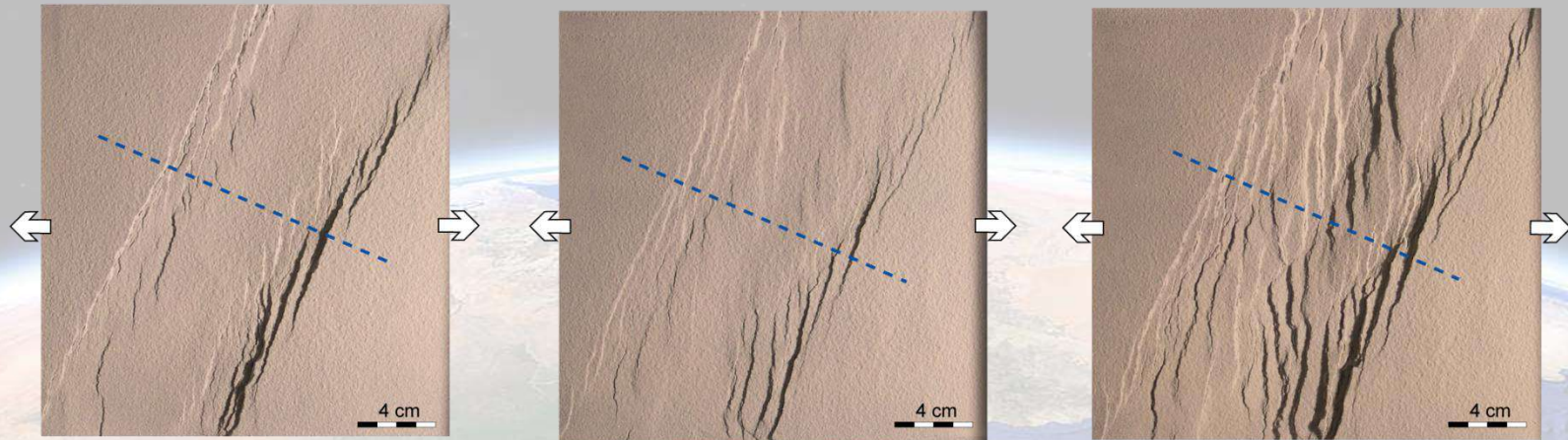


Evoluzione del rifting: modelli di laboratorio in centrifuga

Stage (1) Boundary faults



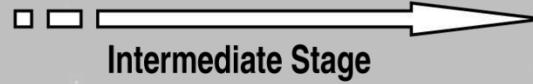
Stage (2) Internal faults



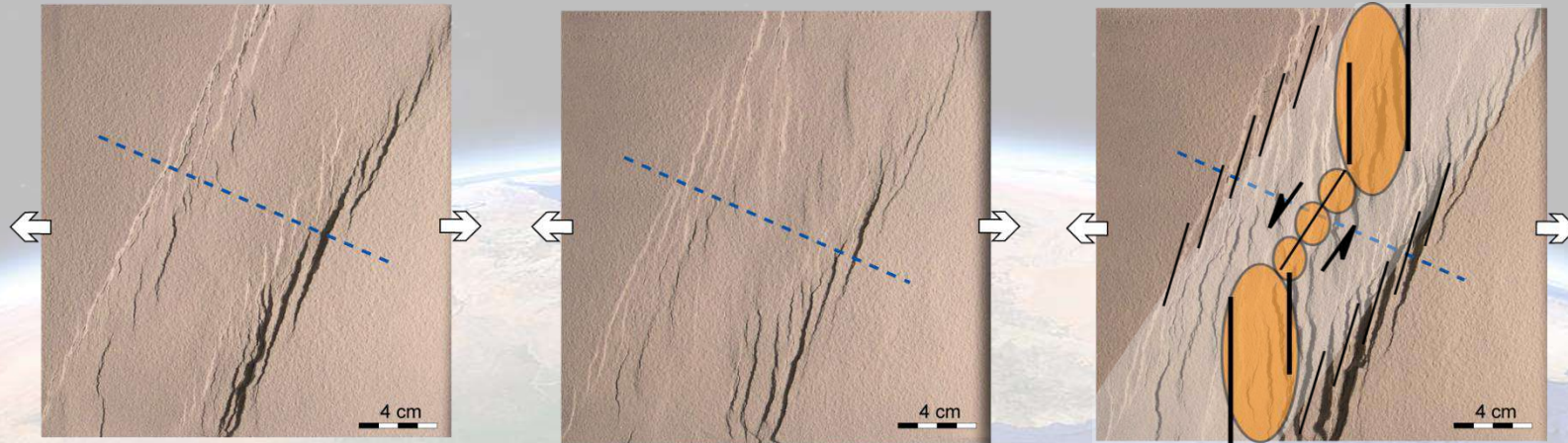
Attivazione (diacrona) dei due sistemi di faglie con orientazione diversa. Le faglie bordiere sono attive durante una porzione limitata di estensione; con il progredire dell'allontanamento delle pacche la deformazione migra nelle porzioni più deboli della litosfera (zona assiale assottigliata).

Evoluzione del rifting: modelli di laboratorio in centrifuga

Stage (1) Boundary faults



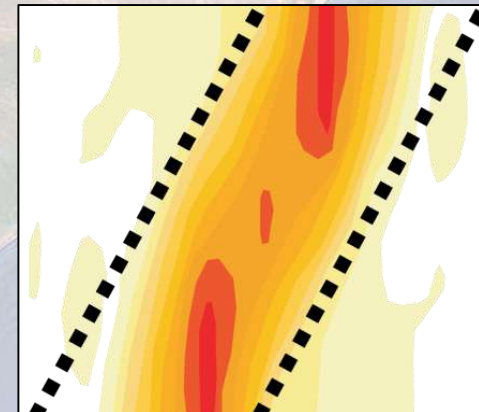
Stage (2) Internal faults



Attivazione (diacrona) dei due sistemi di faglie con orientazione diversa. Le faglie bordiere sono attive durante una porzione limitata di estensione; con il progredire dell'allontanamento delle pacche la deformazione migra nelle porzioni più deboli della litosfera (zona assiale assottigliata).

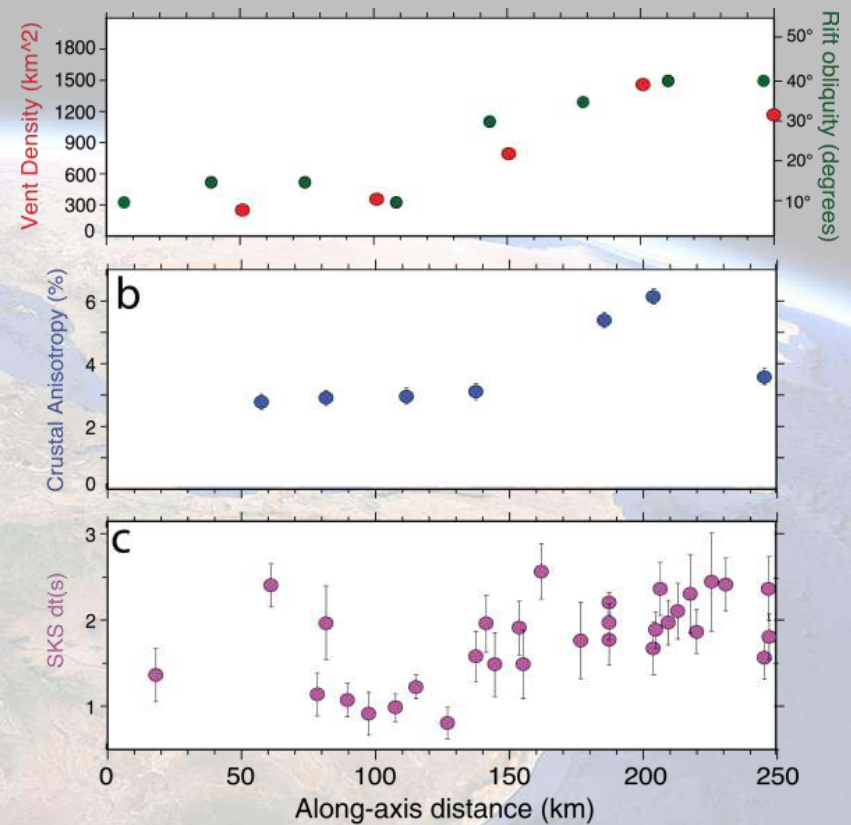
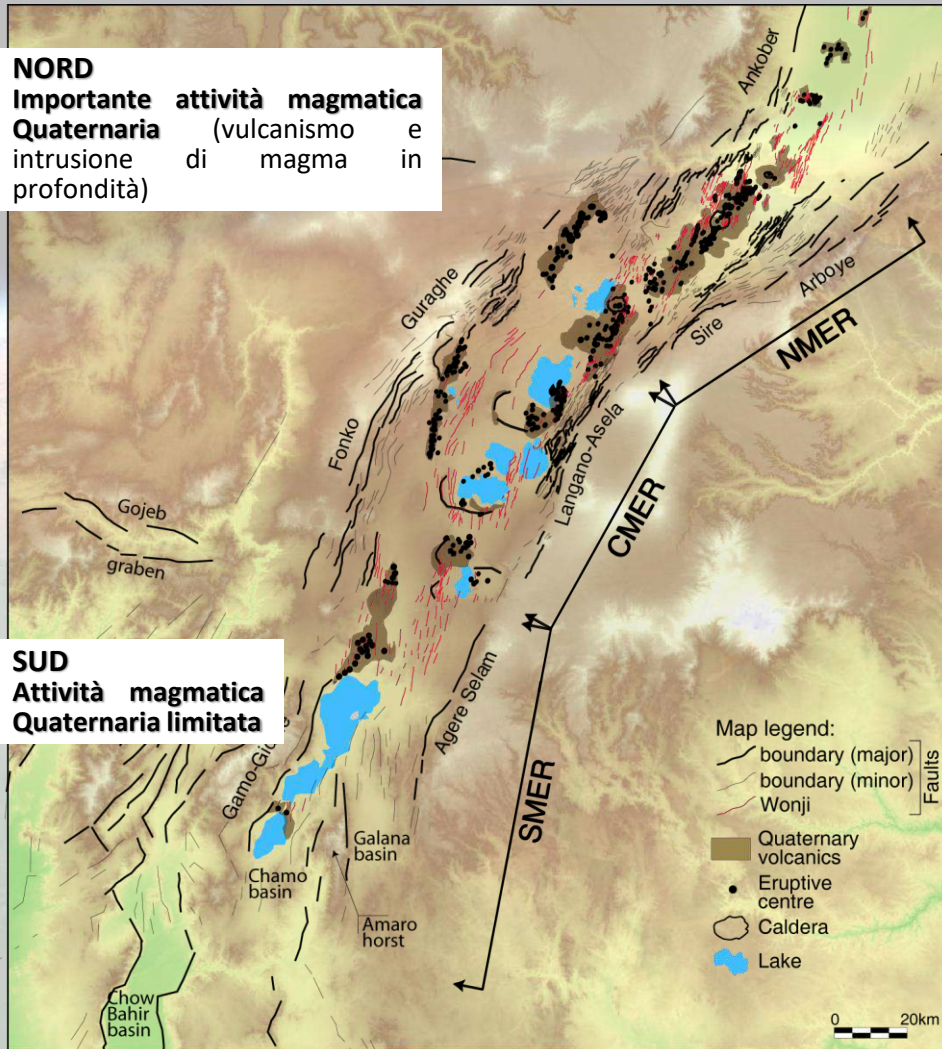
I segmenti di maggior assottigliamento corrispondono alle aree di massima produzione di magma (es. modelli numerici di Van Wijk, 2005).

Aree di max
assottigliamento/produzione
di magma in modelli
numerici (Van Wijk, 2005
GRL)



Main Ethiopian Rift: variazioni nel magmatismo Quaternario

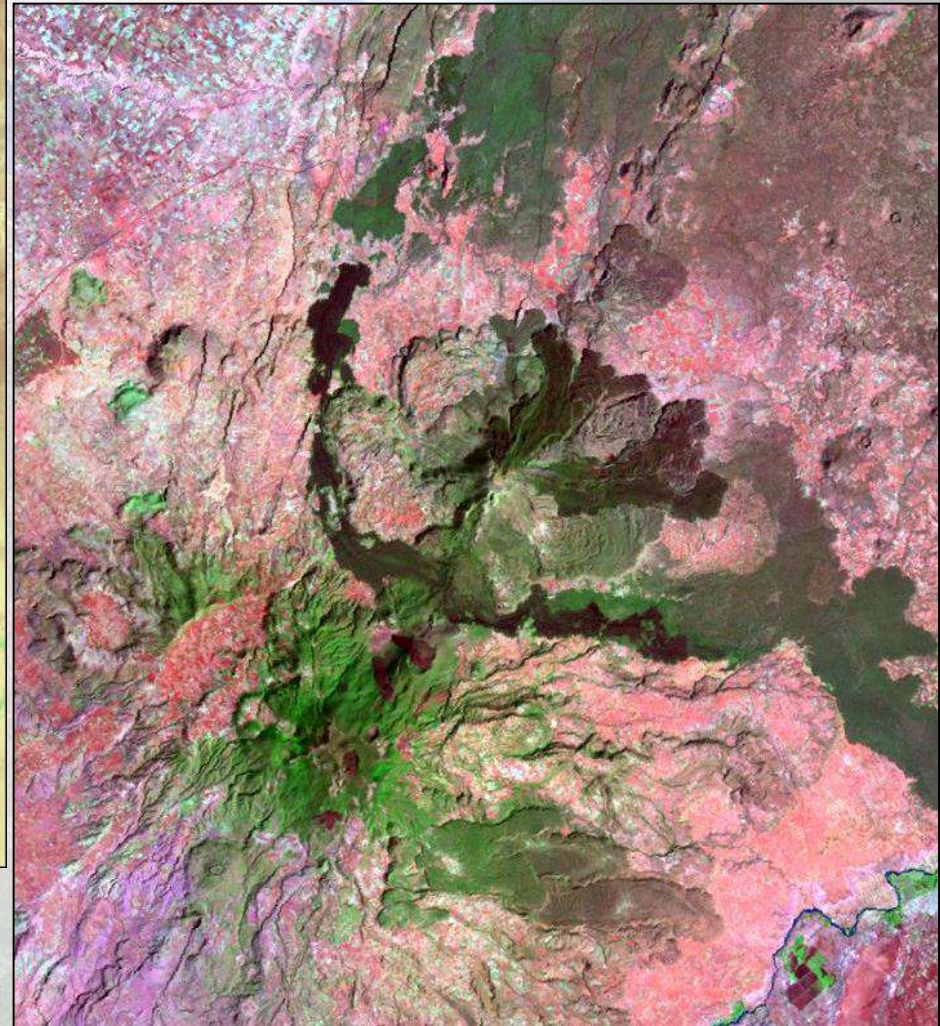
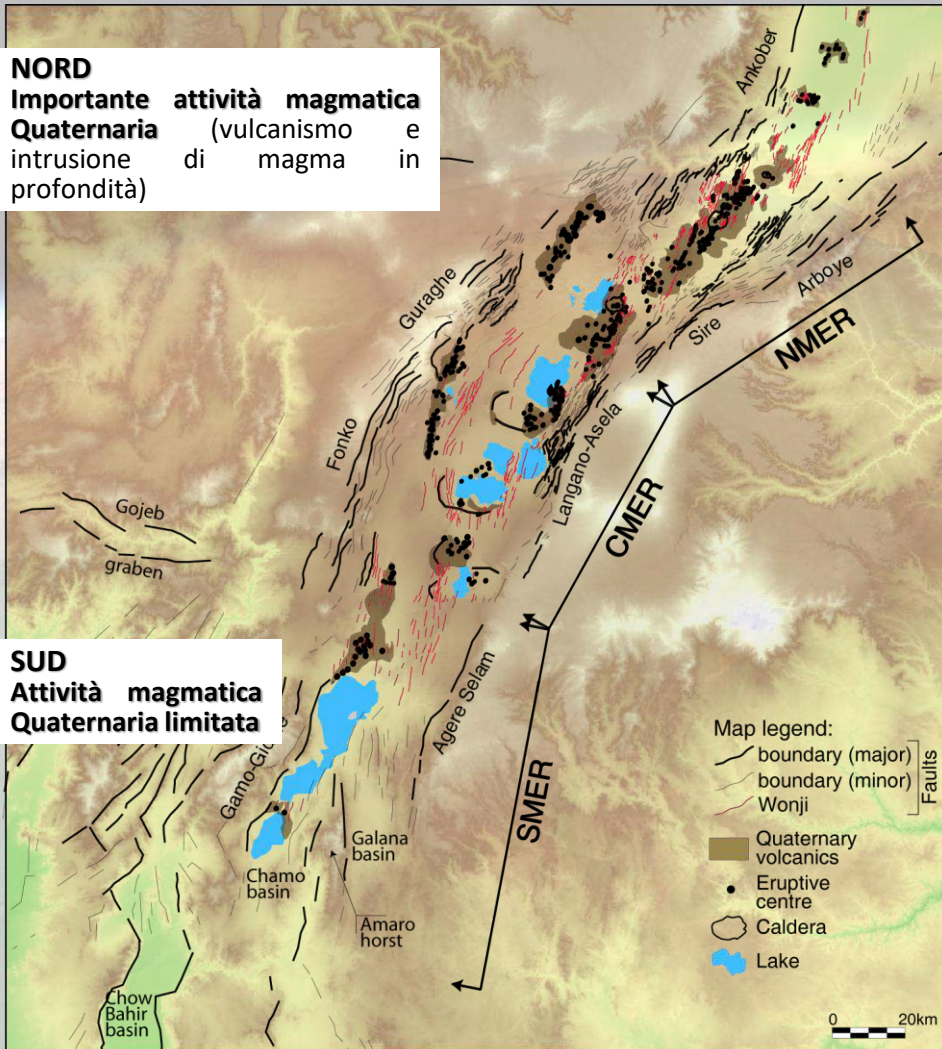
Importante variazione di vulcanismo e intrusione di magma lungo l'asse del rift



Evidenze geofisiche di aumento di intrusione e modificazione magmatica della litosfera da Sud a Nord (e.g., Keir et al., 2015 Tectonics)

Fagliazione e magmatismo nel Main Ethiopian Rift

Forte localizzazione dell'attività vulcanica Quaternaria in corrispondenza dei segmenti di faglie assiali nel MER settentrionale





Fantale



Green lake (Debre Zeit)

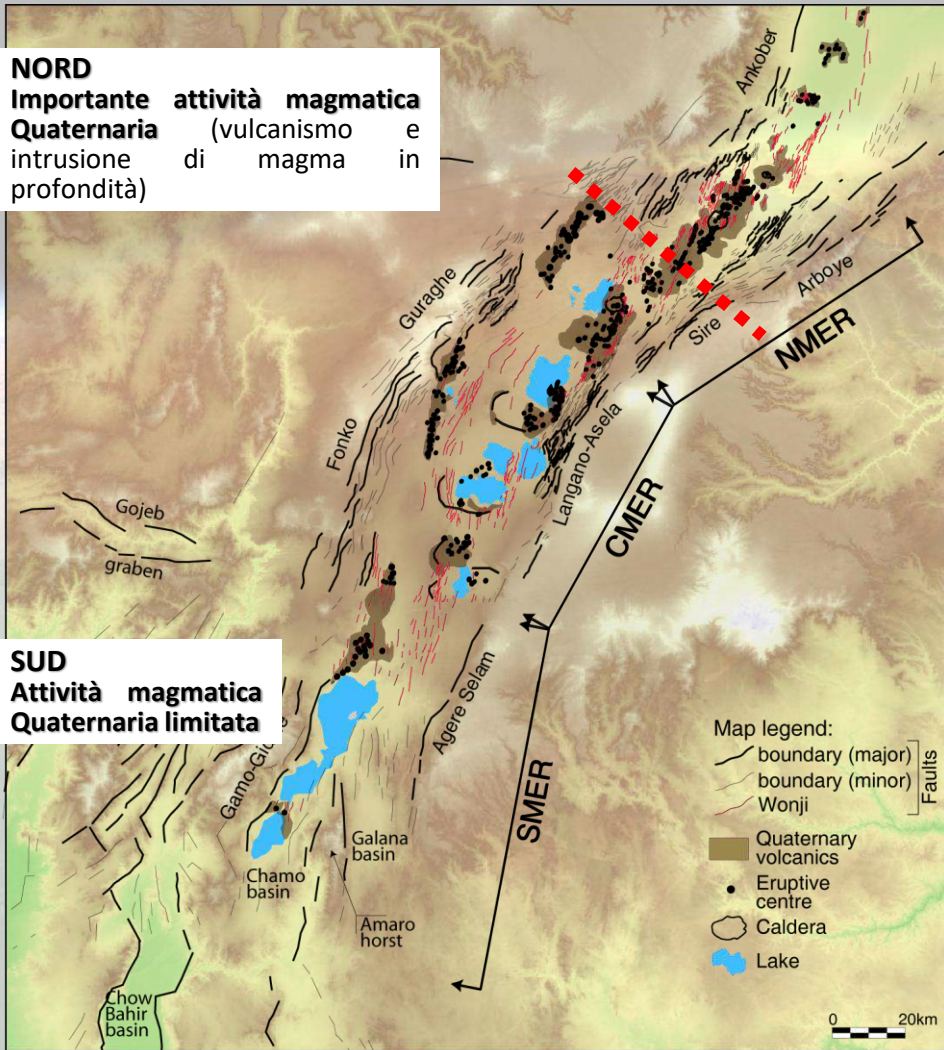
Kone



Fagliazione e magmatismo nel Main Ethiopian Rift

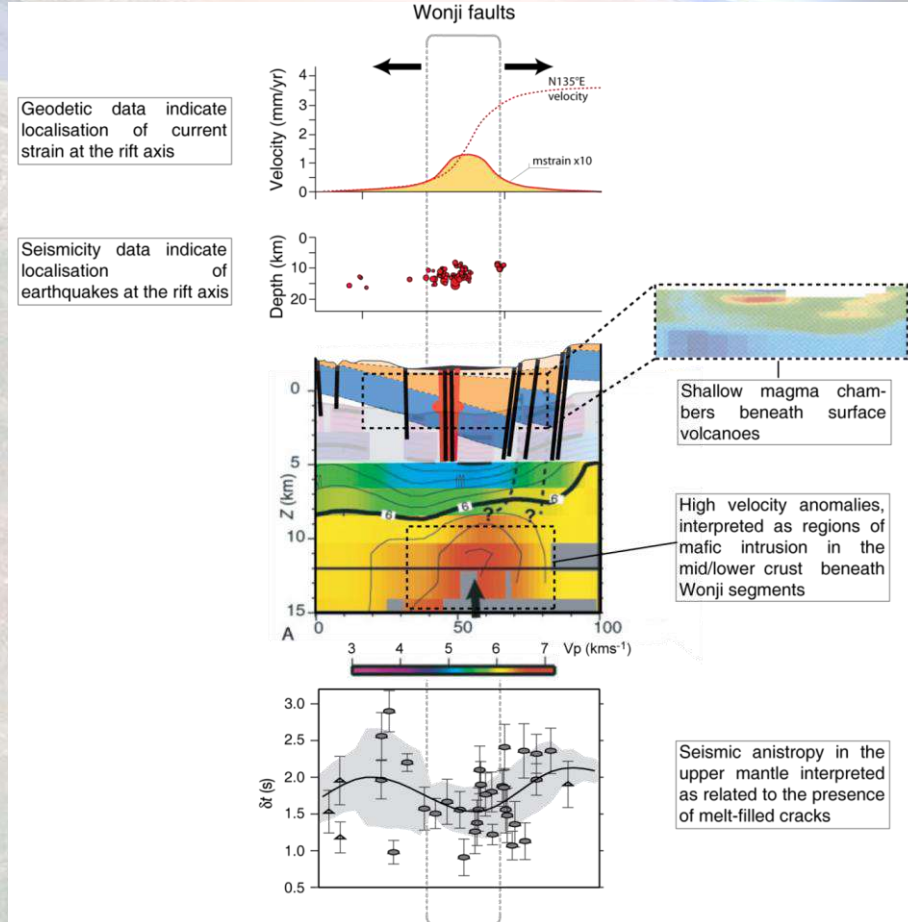
NORD
Importante attività magmatica Quaternaria (vulcanismo e intrusione di magma in profondità)

SUD
Attività magmatica Quaternaria limitata



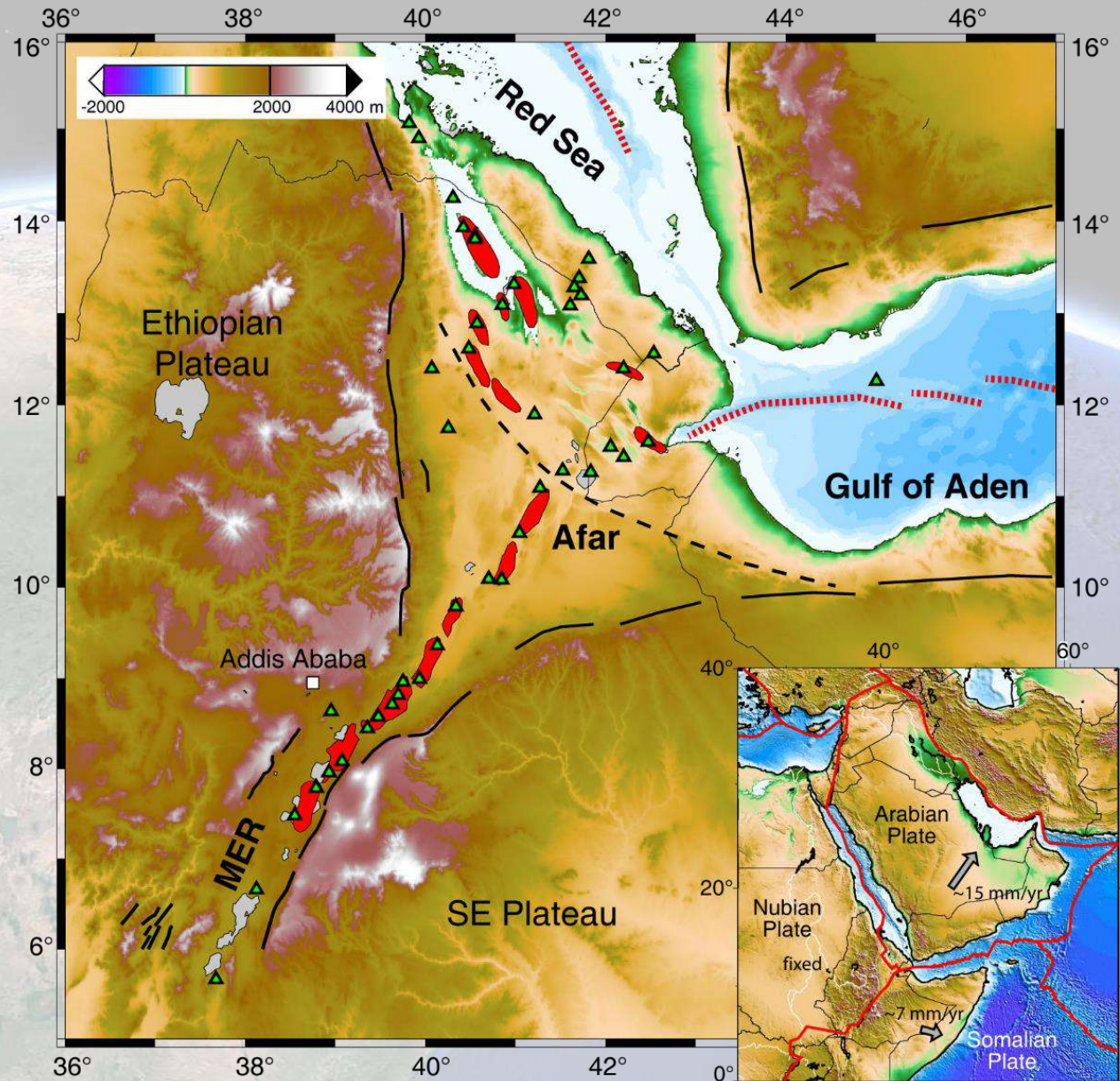
Forte localizzazione della deformazione [dati geodetici] e di **voluminosa intrusione di magma** in tutta la litosfera (fino a 75 km di profondità) [dati geofisici] sotto le faglie assiali (Wonji)

Localizzazione dell'attività vulcano-tettonica nei cosiddetti **segmenti magmatici** assiali



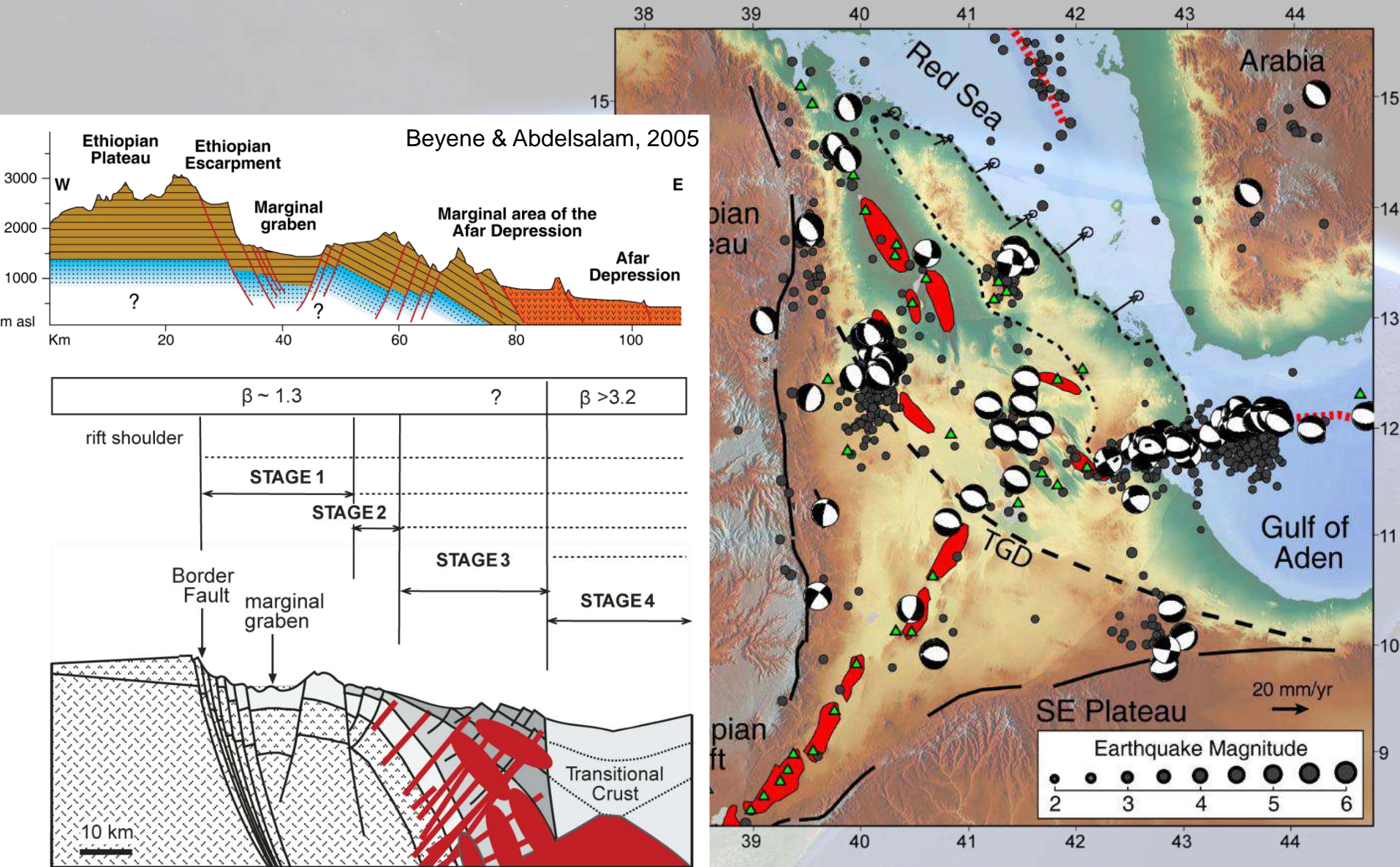
Segmenti magmatici: Main Ethiopian Rift e Afar

Segmenti magmatici
caratterizzano sia il MER
settentrionale che l'Afar
(Catene vulcaniche assiali)



Evoluzione del rifting in Afar

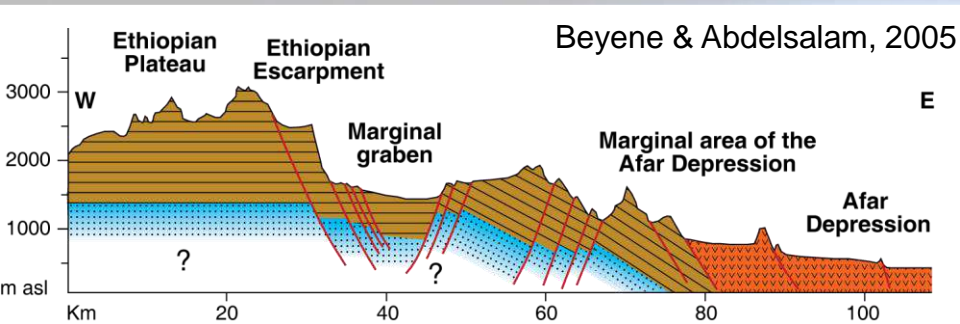
Propagazione delle deformazione dai margini verso la zona assiale della depressione (con formazione dei segmenti magmatici/catene vulcaniche assiali)



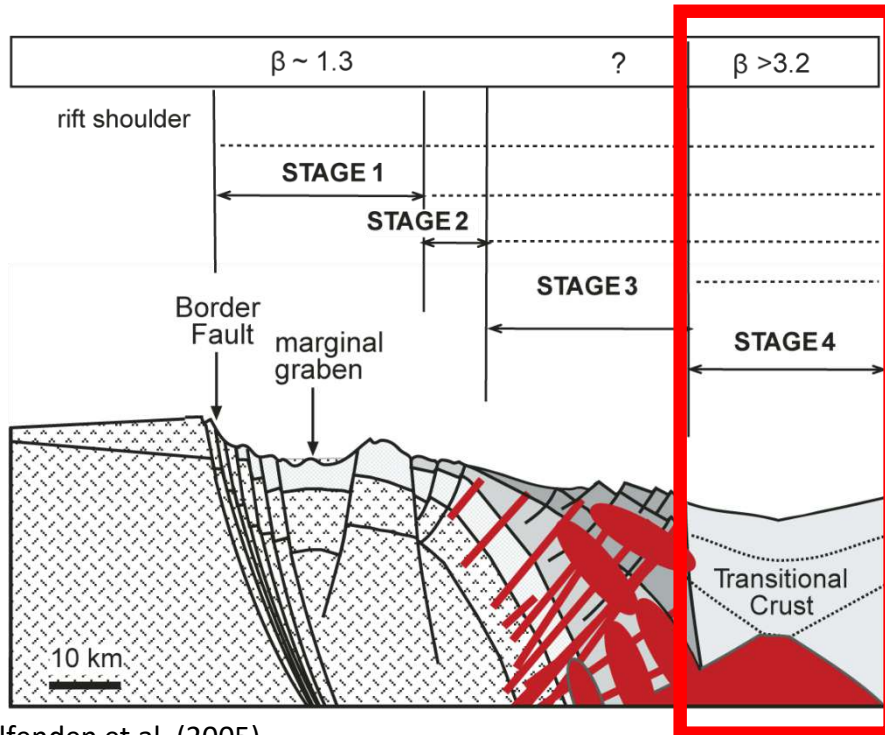


Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting

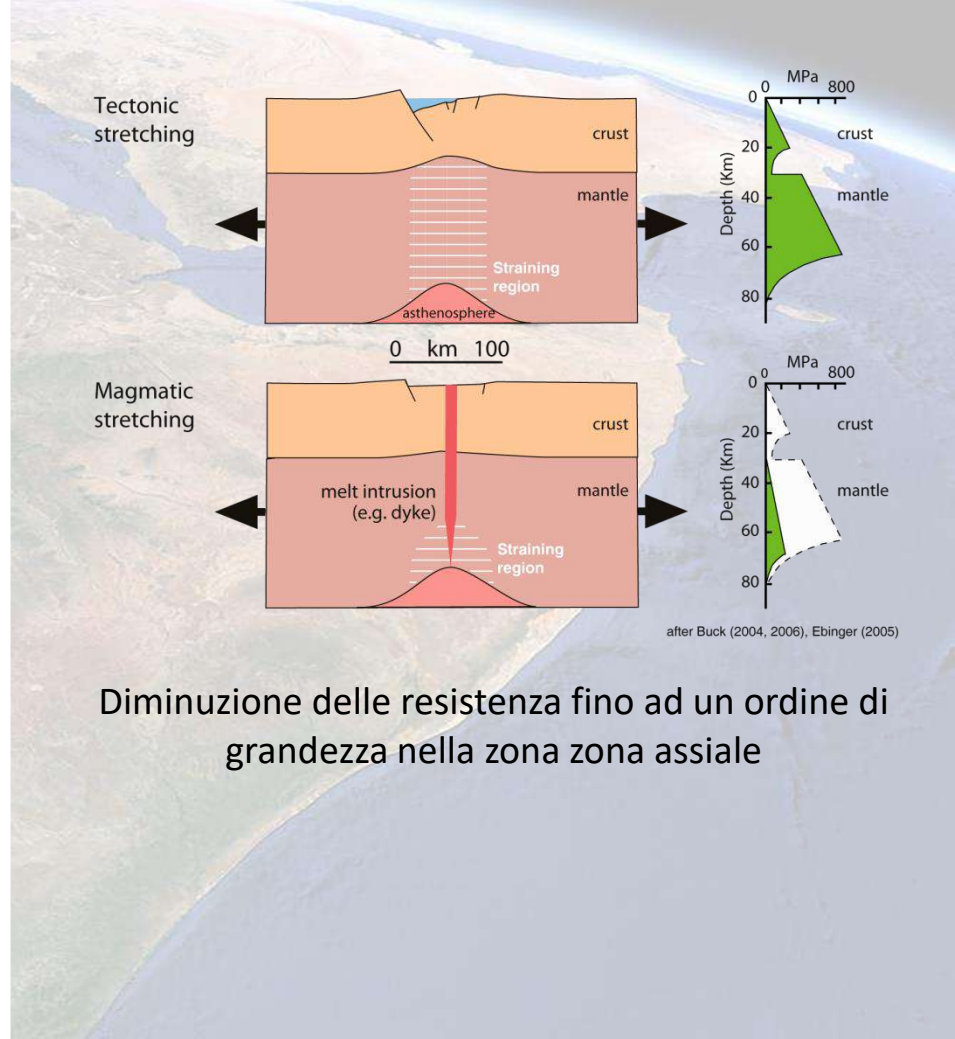
Voluminosa intrusione di magma in prossimità nei segmenti magmatici. Caratteristiche reologiche della crosta e del mantello fortemente modificate, con significativo indebolimento termo-meccanico della litosfera



Beyene & Abdelsalam, 2005



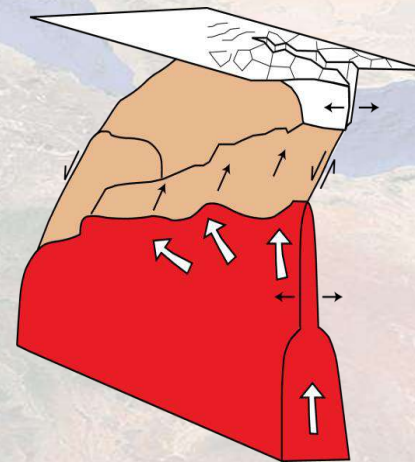
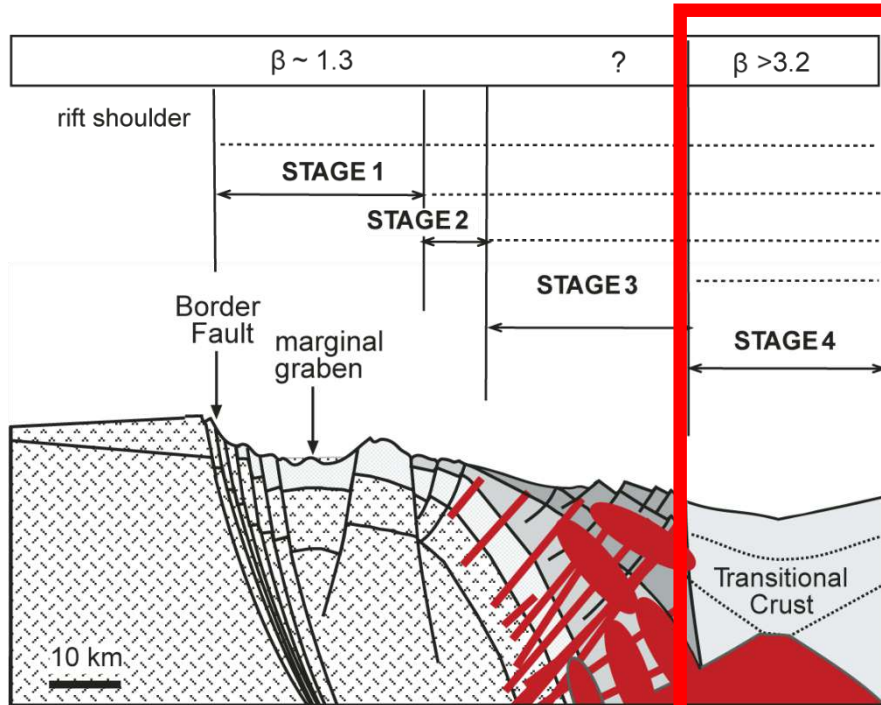
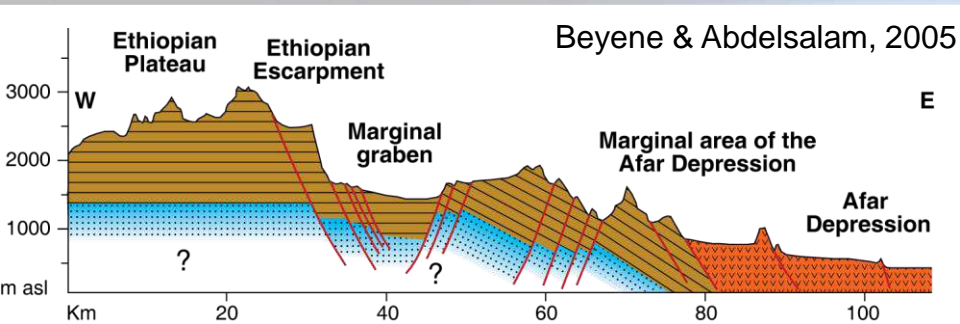
Wolfenden et al. (2005)



Diminuzione delle resistenza fino ad un ordine di grandezza nella zona zona assiale

Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting

In queste condizioni la deformazione estensionale è dominata da intrusione di magma basaltico nella crosta superiore e subordinata attività di fagliazione/fratturazione



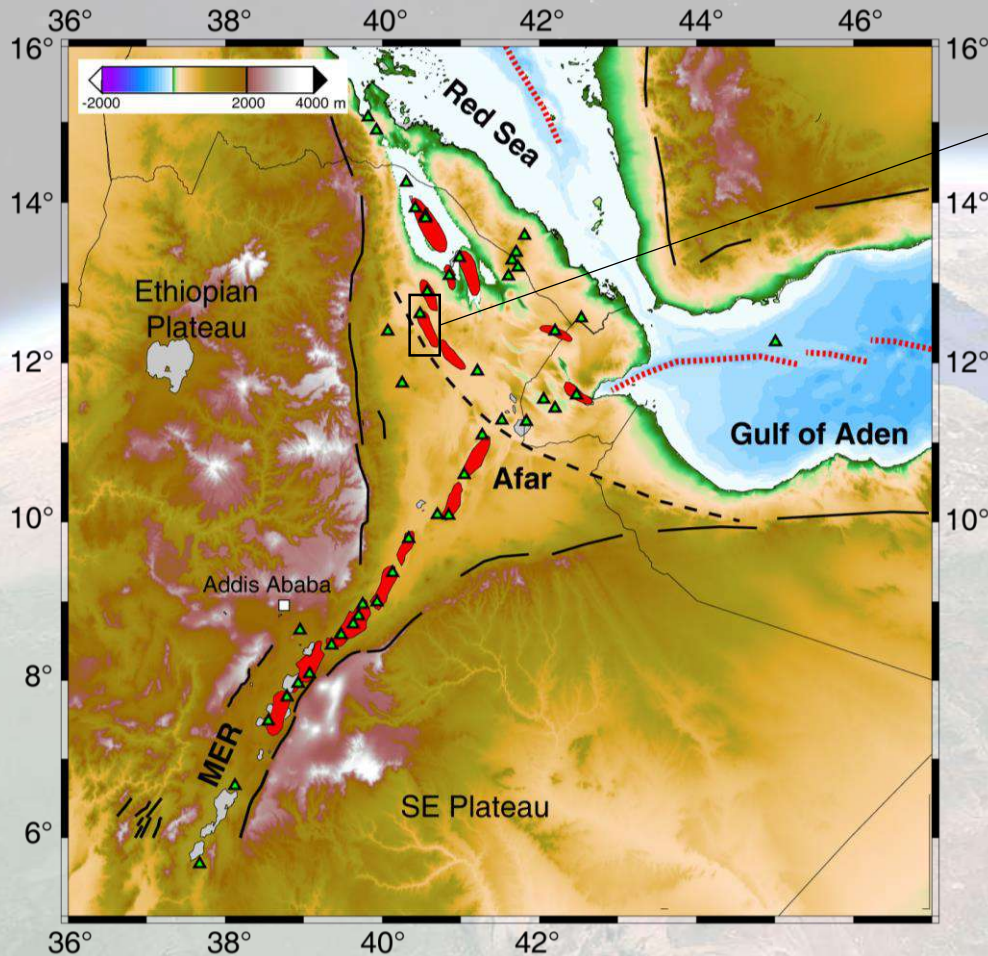
Fagliazione/fratturazione nella porzione più superficiale della crosta

Intrusione di magma in profondità

(Rowland et al., 2007 GJI)

La deformazione avviene in **brevi episodi di attività tettono-magmatica** (durata di pochi anni), intervallati da lunghi periodi di quiescenza (durata di centinaia di anni)

Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting



Evento tettono-magmatico di Dabbahu

Settembre 2005: messa in posto di un dicco lungo circa 60 km, eruzione fissurale in prossimità del vulcano Dabbahu e associata fagliazione/fratturazione

Repentina apertura del rift di circa 8 m

2005-2010: altri 13 dicchi intrusi nel segmento magmatico di Dabbahu, con tre eruzioni (2007, 2009, 2010)

Dinamica simile a eventi registrati in dorsali oceaniche (Islanda)

Dabbahu 2005-2010

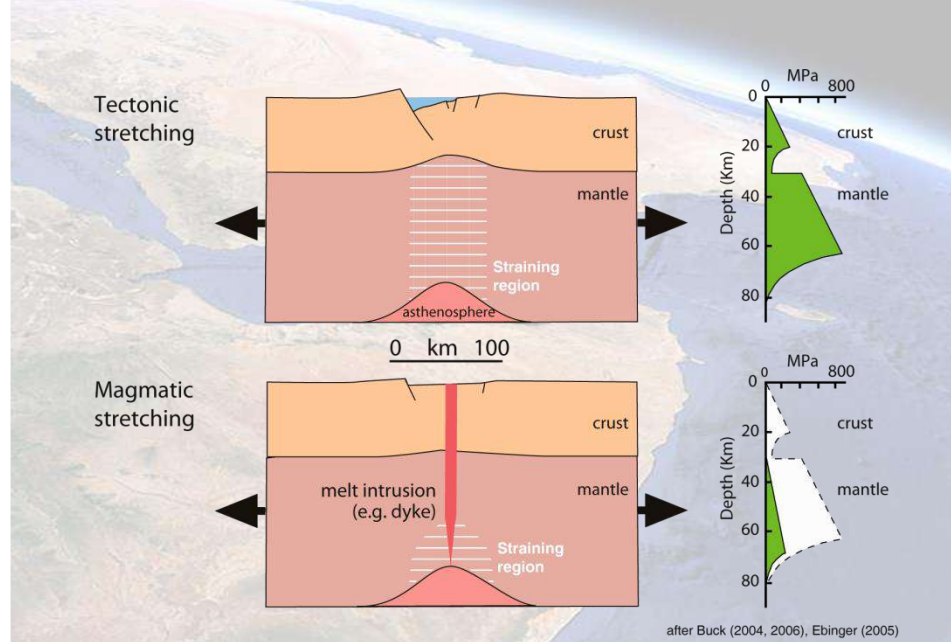
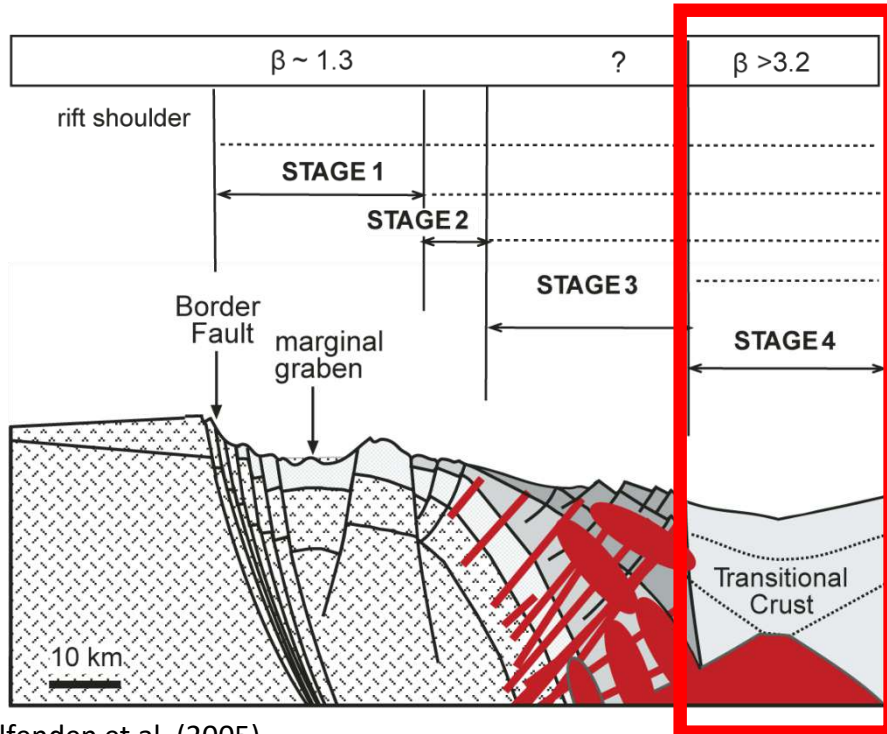
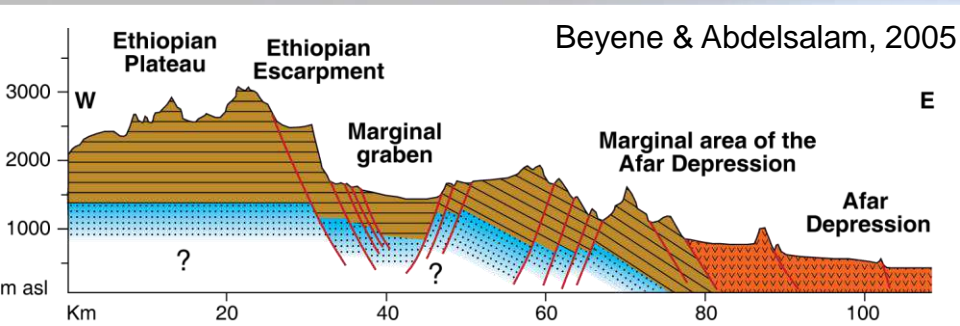


Dabbahu 2005-2010



Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting

Voluminosa intrusione di magma in prossimità nei segmenti magmatici. Caratteristiche reologiche della crosta e del mantello fortemente modificate, con significativo indebolimento termo-meccanico della litosfera

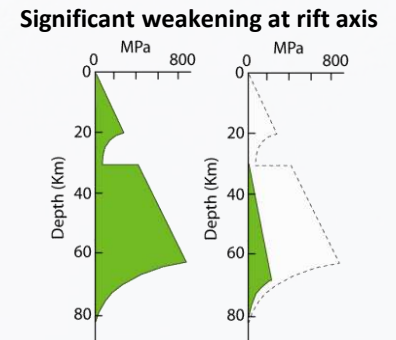
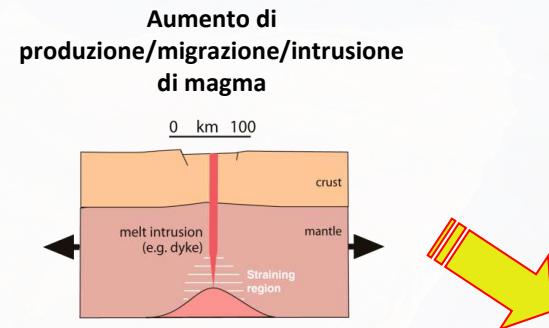
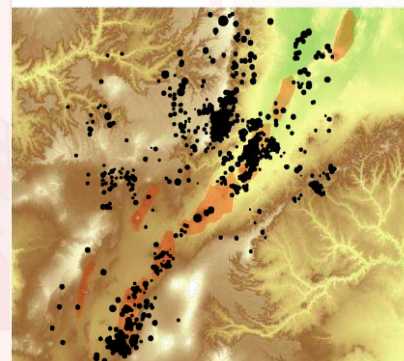
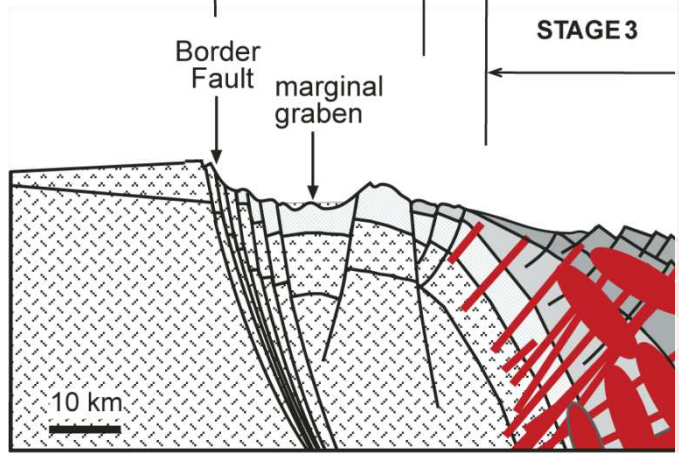
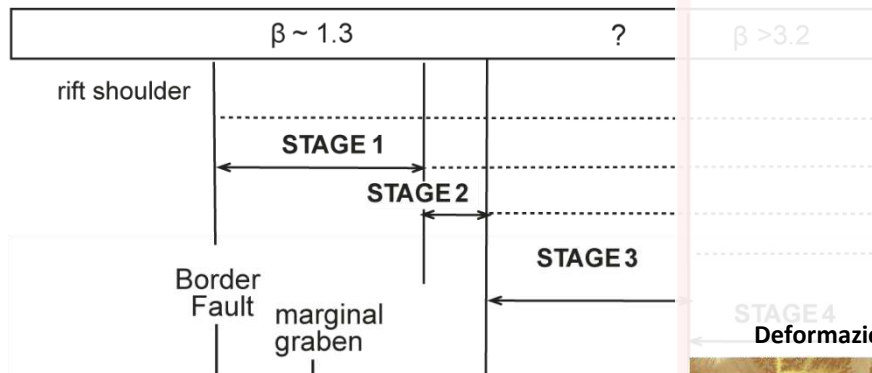
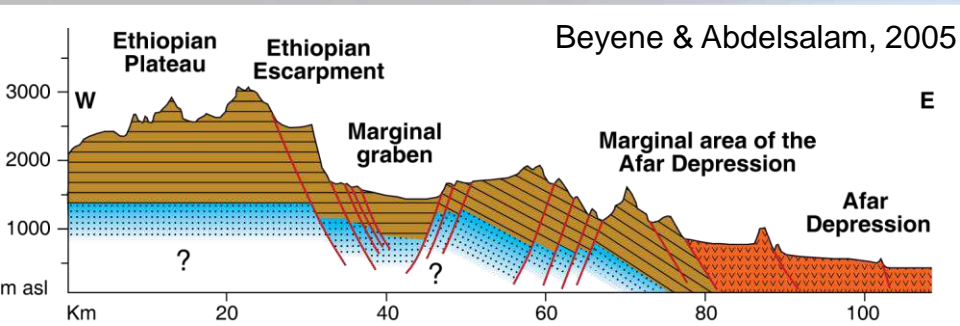


Diminuzione delle resistenza fino ad un ordine di grandezza nella zona zona assiale

[Moderato aumento della resistenza crostale al di fuori delle zone interessate dall'intrusione per metamorfismo dovuto alla perturbazione termica legata alla messa in posto del magma (Lavecchia et al. 2016 Tectonophysics)]

Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting

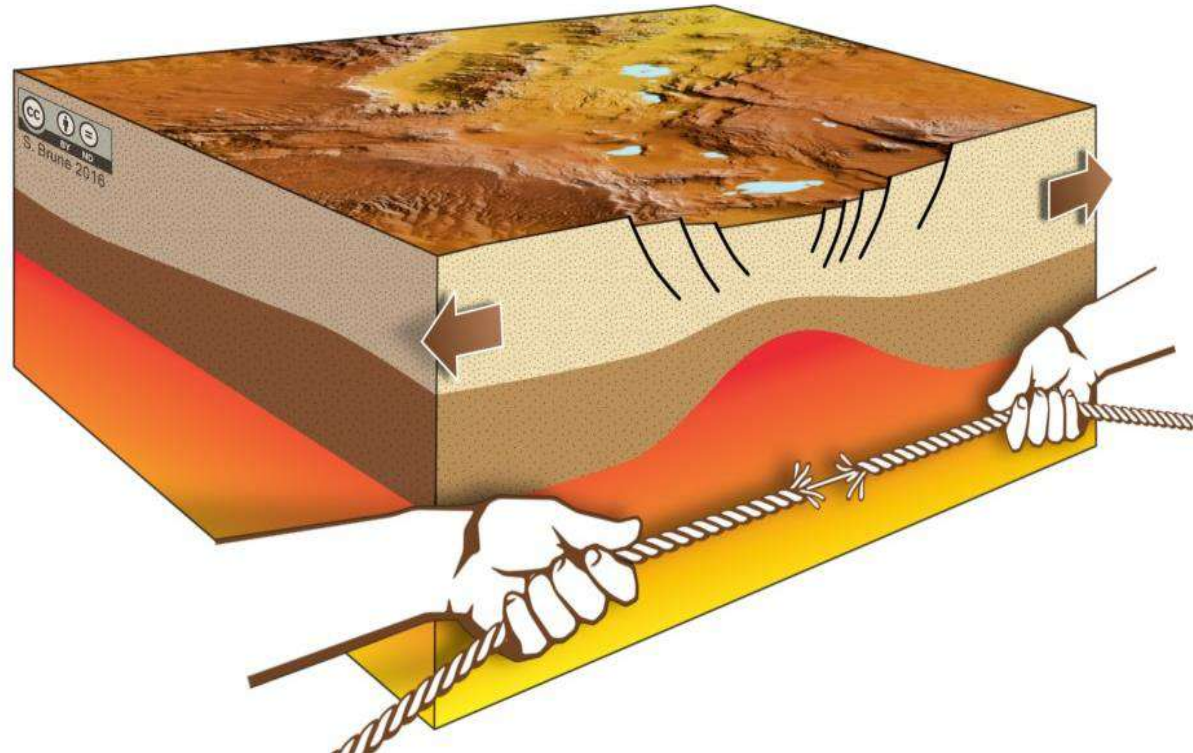
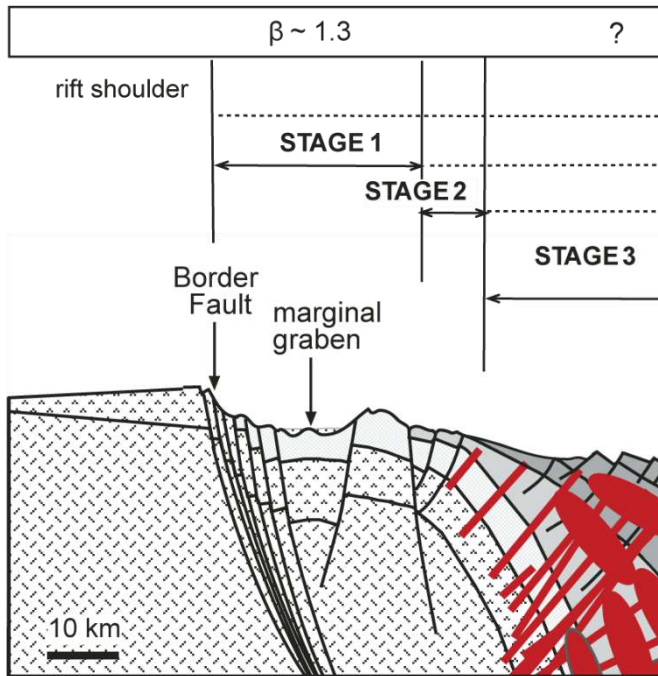
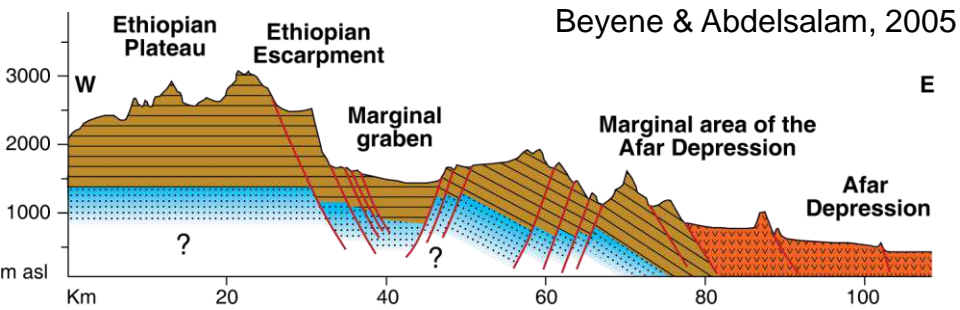
Ciò induce un processo che si auto-alimenta (**feedback positivo** tra deformazione localizzata – assottigliamento – produzione/migrazione/intrusione di magma – indebolimento) in grado di portare alla rottura continentale (attraverso **magma-assisted rifting**)



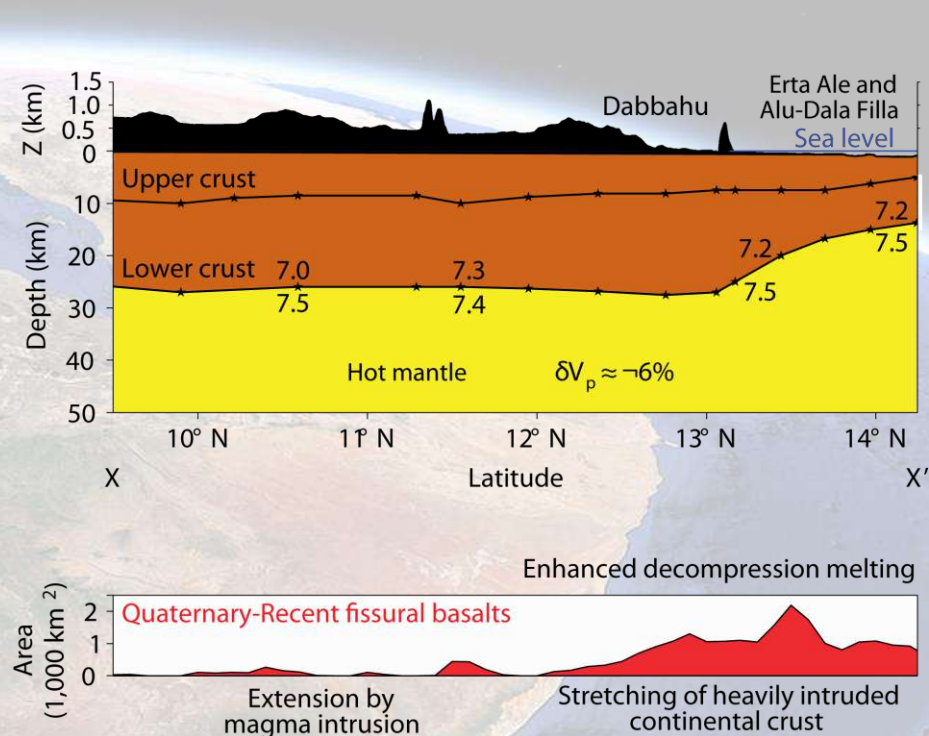
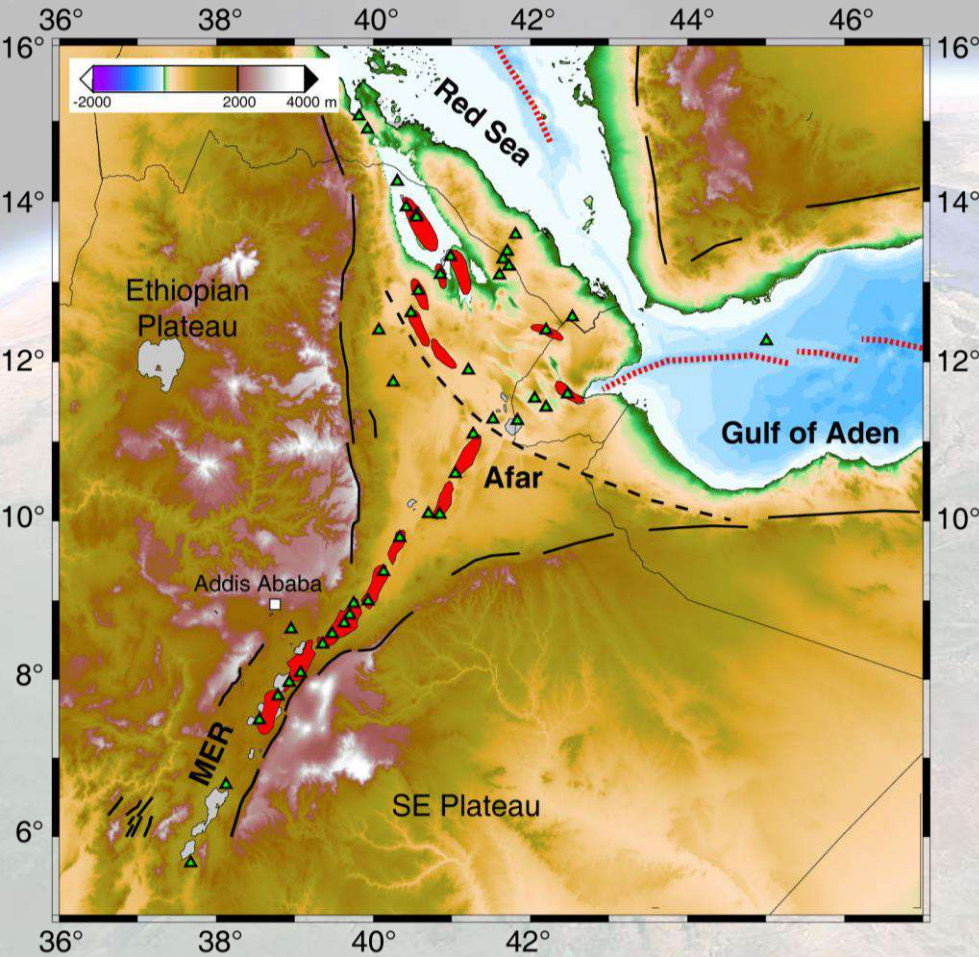
Wolfenden et al. (2005)

Magmatismo e deformazione nelle fasi finali del rifting

Ciò induce un processo che si auto-alimenta (**feedback positivo** tra deformazione localizzata – assottigliamento – produzione/migrazione/intrusione di magma – indebolimento) in grado di portare alla rottura continentale (attraverso **magma-assisted rifting**)

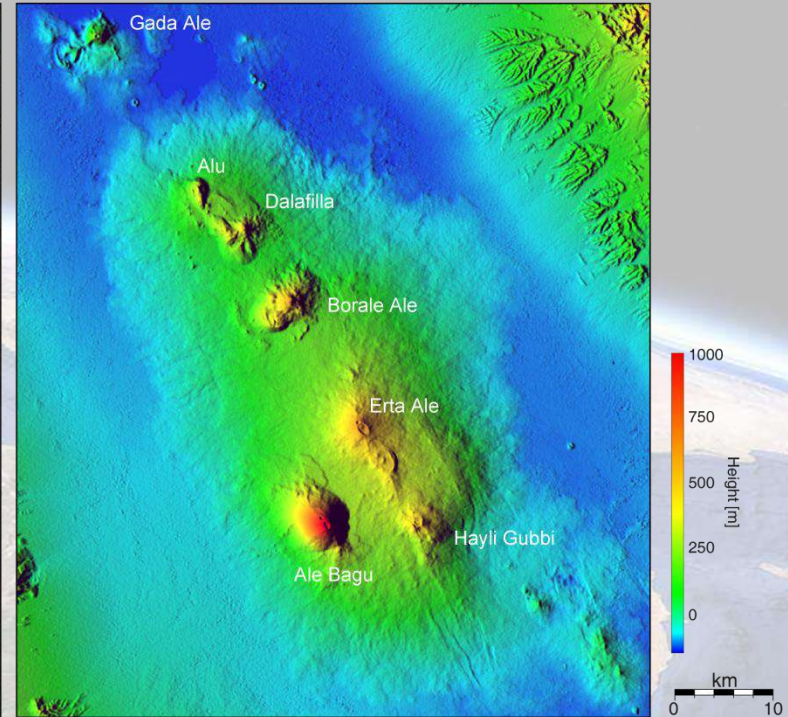


Magmatismo, deformazione e rottura continentale in Afar



Forte assottigliamento crostale, diminuzione della elevazione (molti settori si trovano sotto il livello del mare), aumento di fusione e produzione di basalti

Catene vulcaniche assiali e rottura continentale in Afar



Axial Volcanic Ranges (es. Erta Ale) rappresentano **segmenti di dorsale medio-oceanica** (a espansione lenta) emersi

nature
geoscience

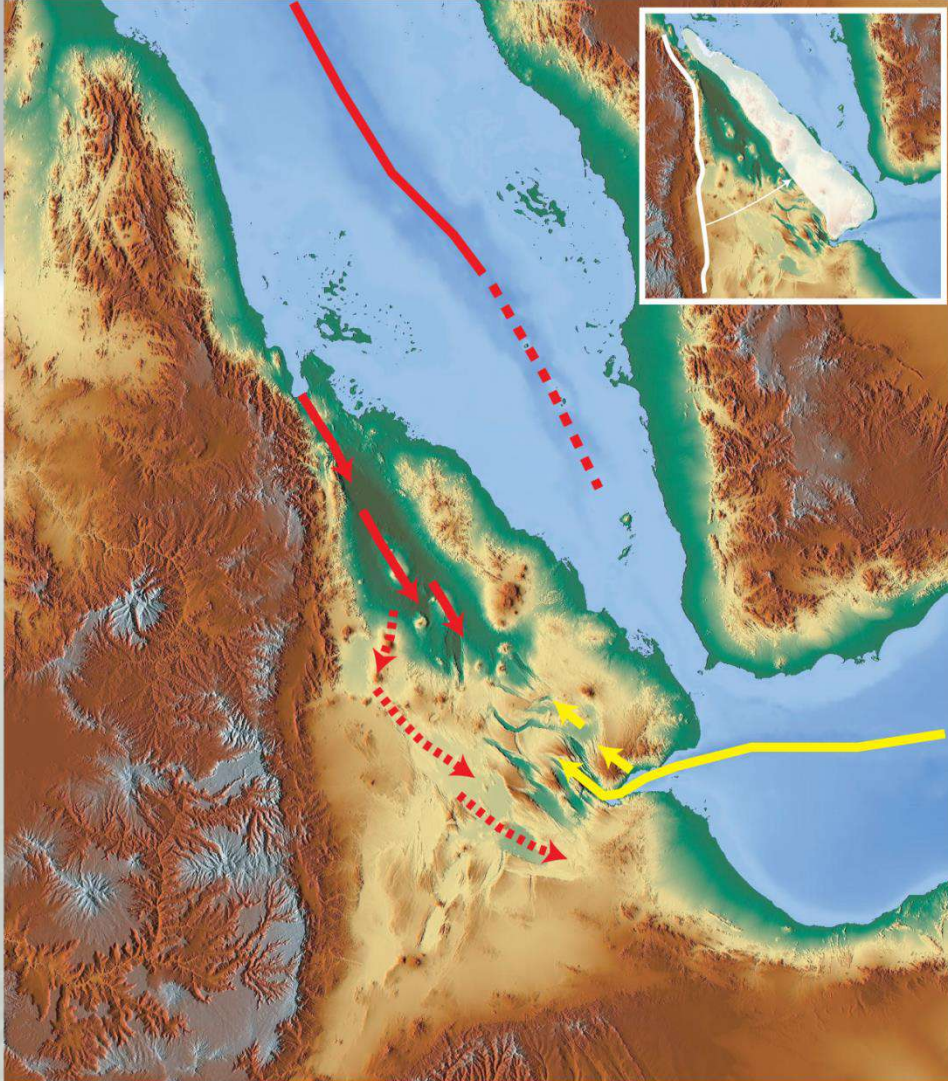
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 11 MARCH 2012 | DOI: 10.1038/NGE01414

Shallow axial magma chamber at the slow-spreading Erta Ale Ridge

Carolina Pagli^{1*}, Tim J. Wright¹, Cynthia J. Ebinger², Sang-Ho Yun³, Johnson R. Cann¹, Talfan Barnie⁴ and Atalay Ayele⁵

Rottura continentale in Afar



Axial Volcanic Ranges (es. Erta Ale) dell'Afar settentrionale rappresentano **segmenti emersi** di dorsale del **Mar Rosso**

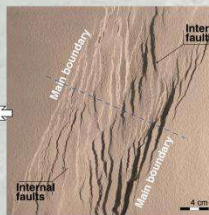
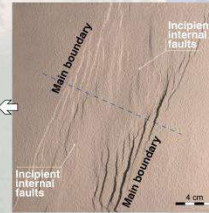
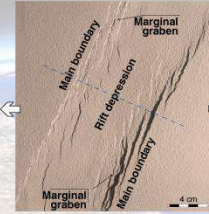
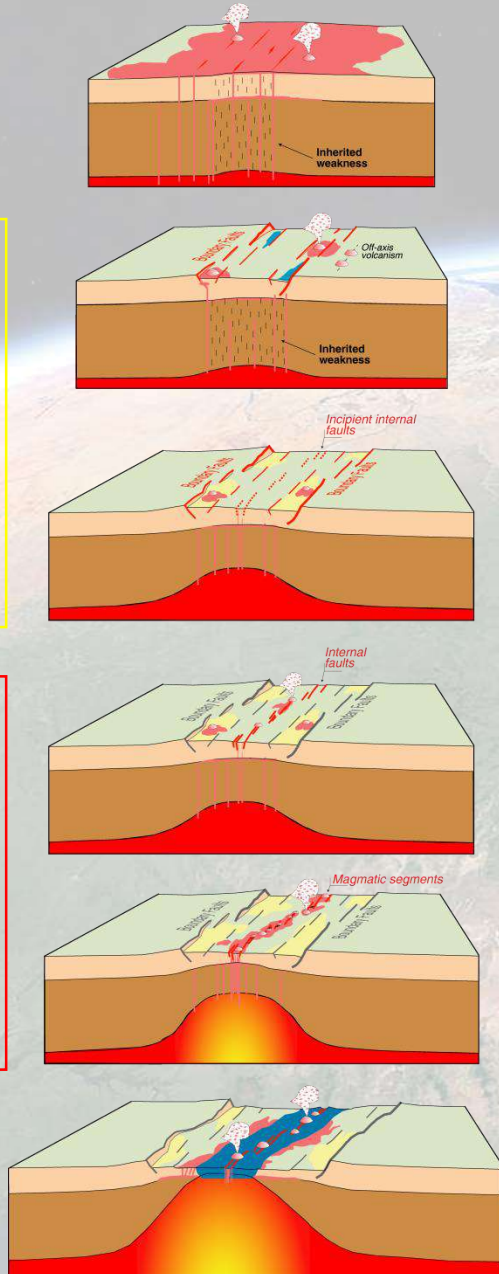


Lago Asal (Gibuti) rappresenta una propagazione a terra del dominio oceanico del **Golfo di Aden**

Rift valley e rottura continentale

Formazione della
rift valley

Deformazione della
rift valley



Stage 1
Boundary faults
Intermediate Stage
Stage 2
Internal faults

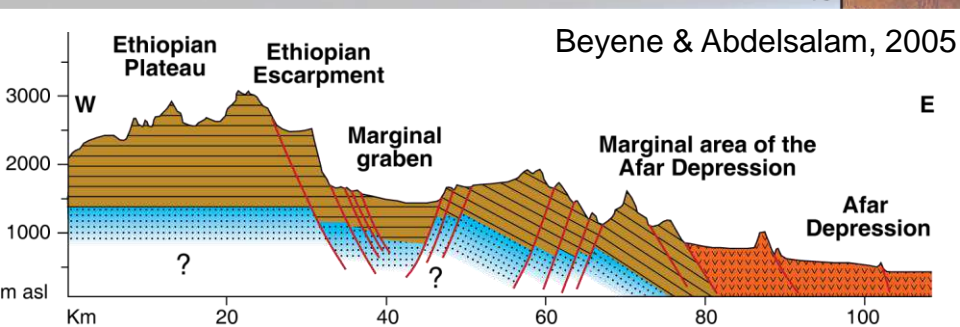
- Focusing of magma uprising along internal faults
- Strong modification of the continental lithosphere by extensive magma intrusion
- Strong feedback between magmatism and deformation
- Rupture of the continental lithosphere
- Magmatic segments acting as new oceanic spreading centers

Deformazione tettonica
(faglie)
MER centro-meridionale

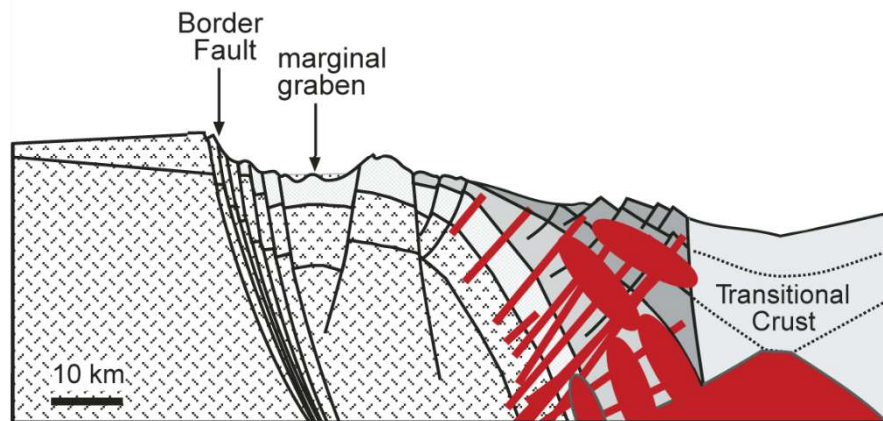
Deformazione magmatica
("magma assisted-rifting ") e
rottura continentale
MER settentrionale -> AFAR



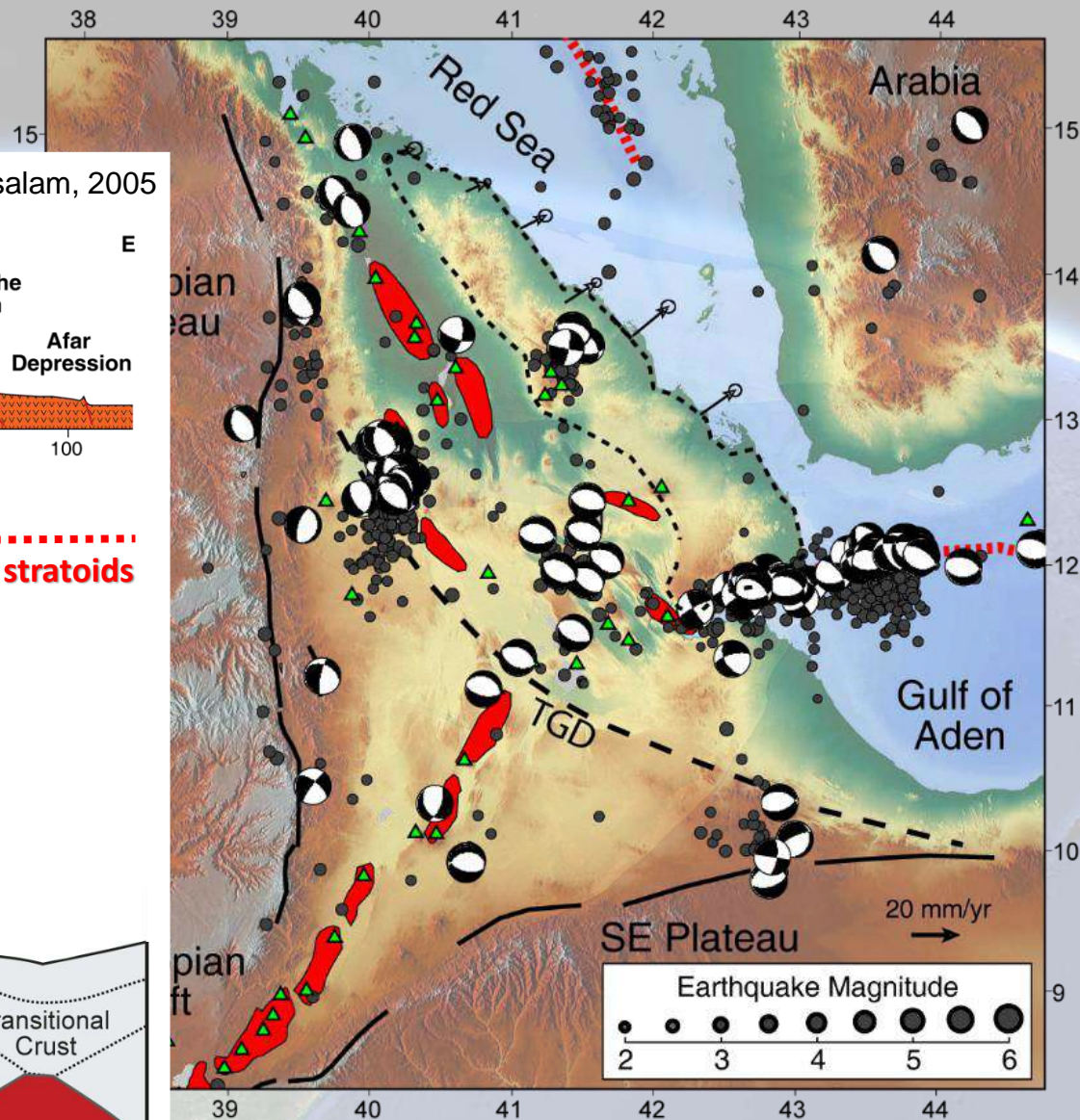
Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids



.....
Afar stratoids

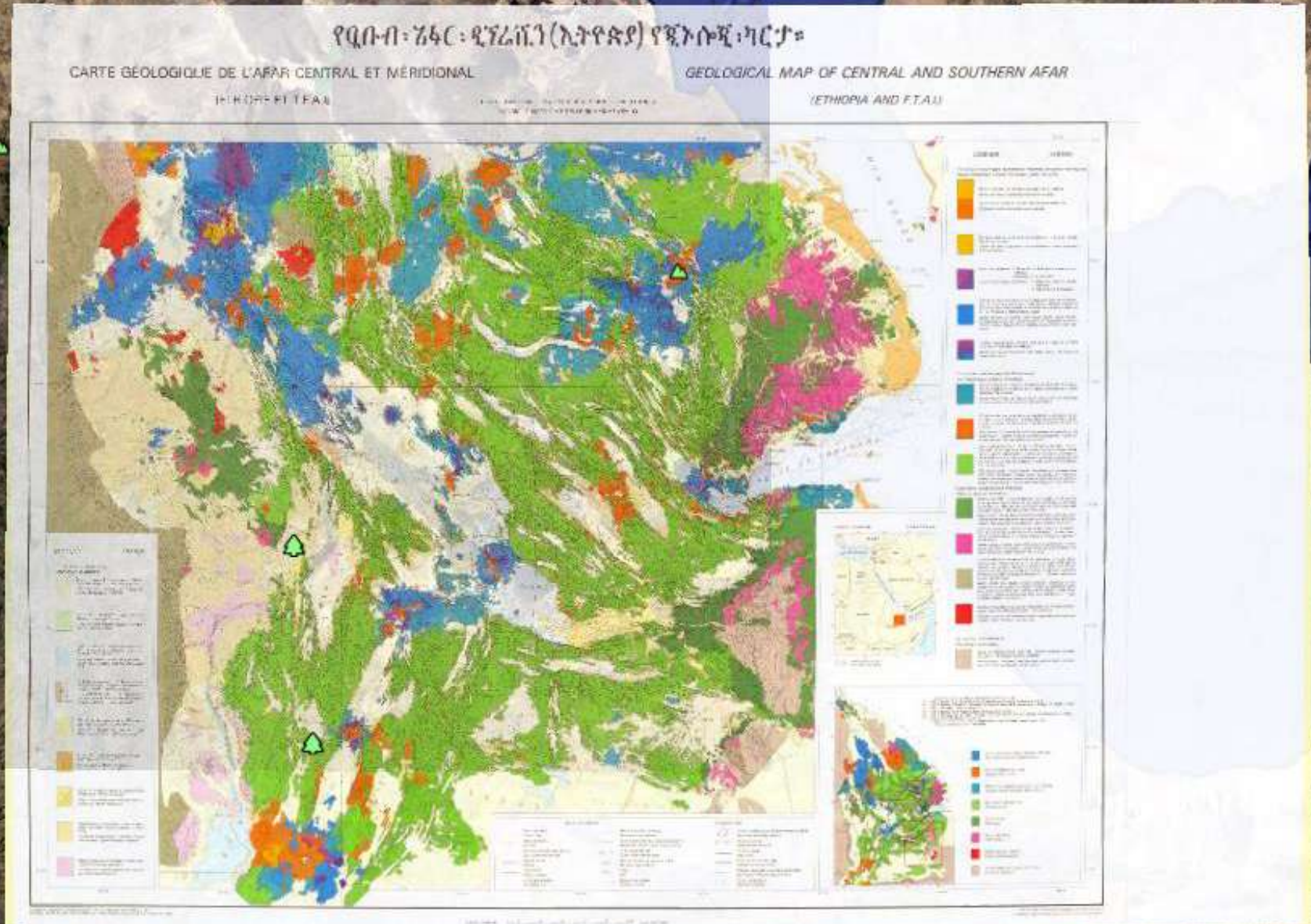


Wolfenden et al. (2005)



Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids

Serie degli stratoidi (4-0.5 Ma?): Large Igneous Province, prodotti principalmente basaltici (con subordinate rioliti); coprono un'area di >50,000 km², circa 2/3 dell'Afar



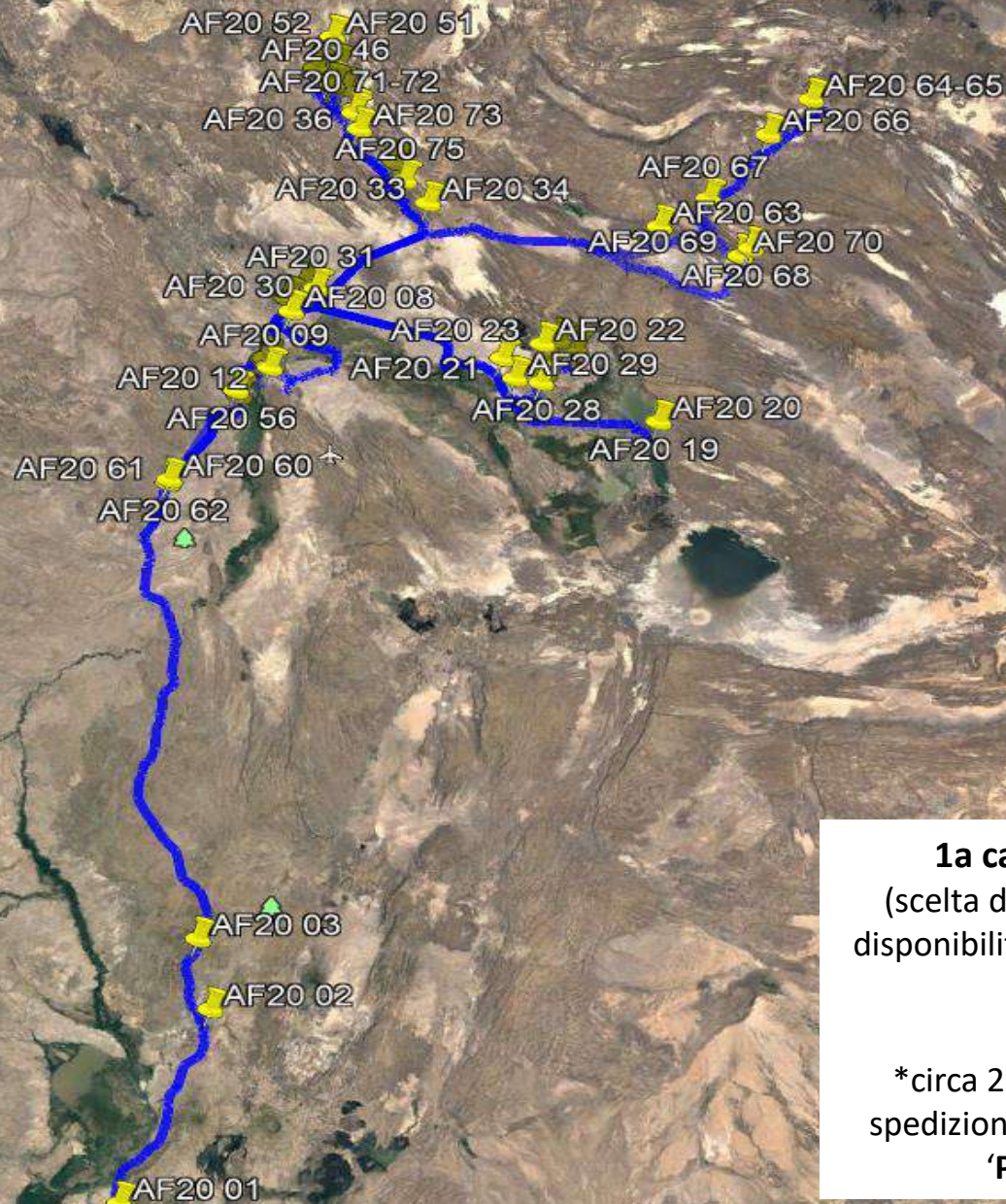
Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids



Serie degli stratoidi (4-0.5 Ma?): sono spessi fino a 1500 m e Acocella [2010] ha stimato un tasso di eruzione di 5000 km^3 per Ma, uno dei più alti per un margine di placca divergente.

Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids

Caratteristiche, timing, legame con il rifting....

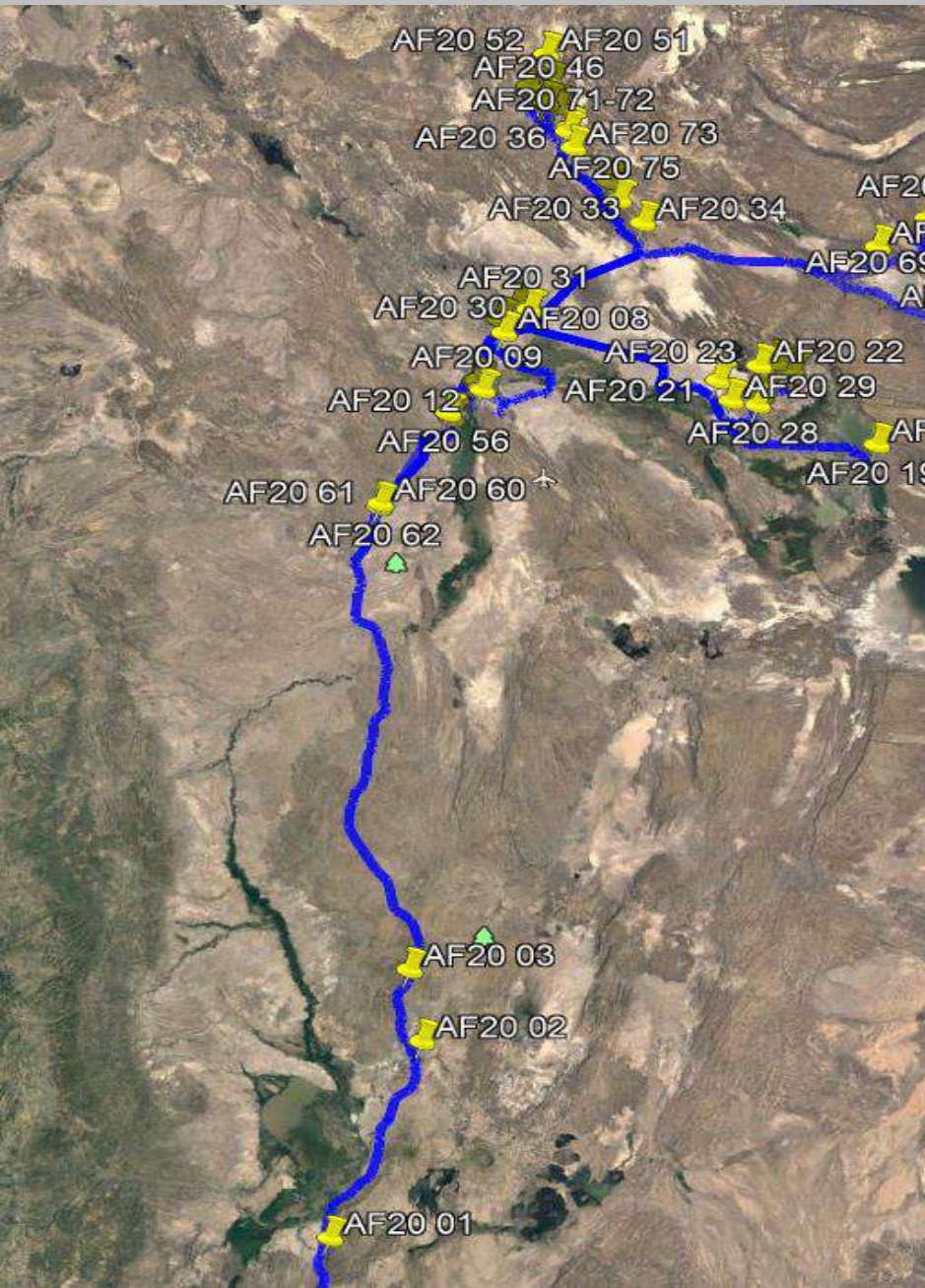


1a campagna Feb 2020 70 campioni
(scelta delle aree basata su: studi precedenti e disponibilità campioni*, età stimata degli stratoidi, accessibilità e **logistica**)

*circa 2000 campioni e 9500 sezioni sottili da spedizioni degli anni 60-70 sono disponibili nella 'Petroteca Dancala' al DST-Unipi

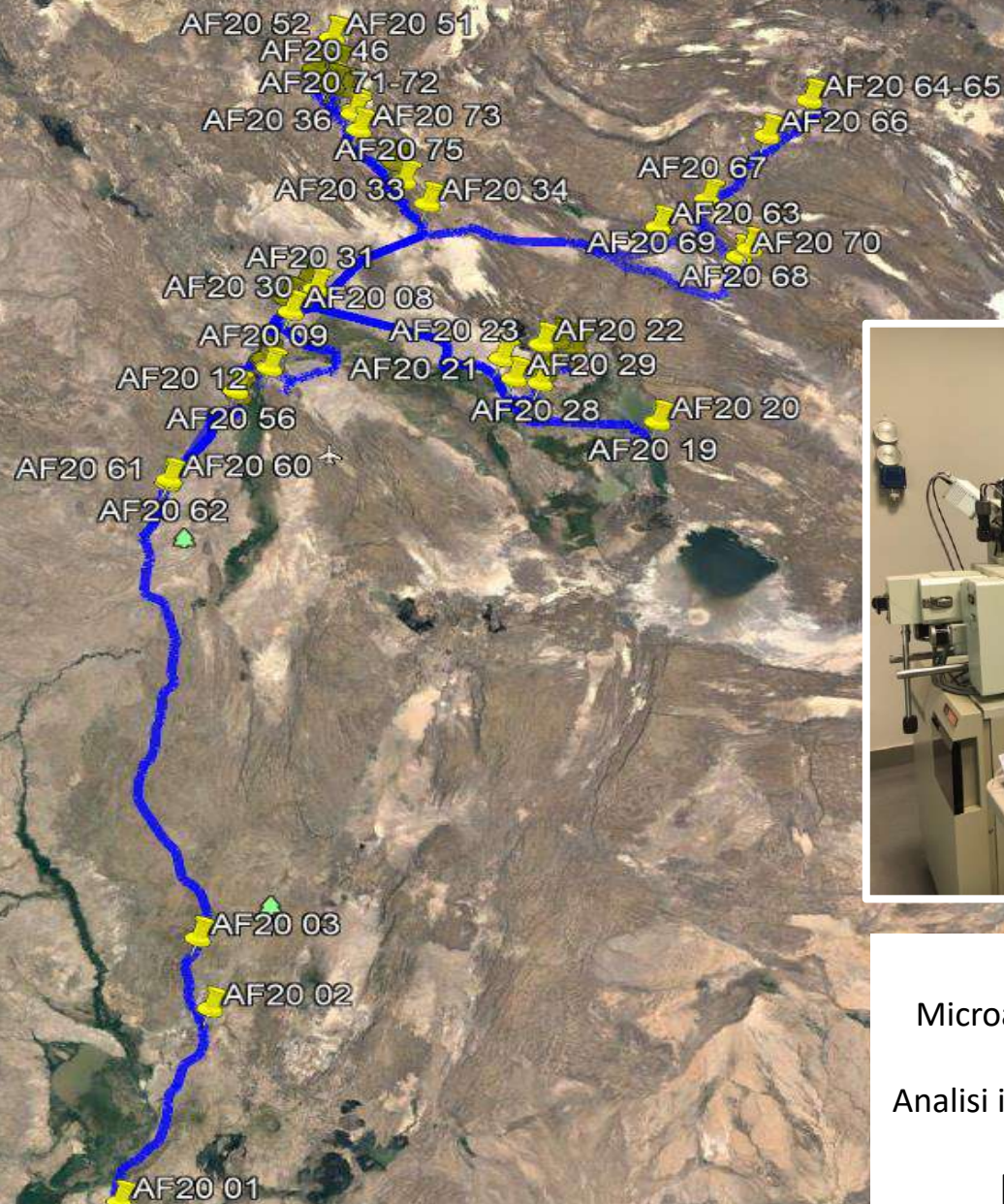
Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids

Caratteristiche, timing, legame con il rifting....



Questioni aperte – PRIN2017: Afar Stratoids

Caratteristiche, timing, legame con il rifting....



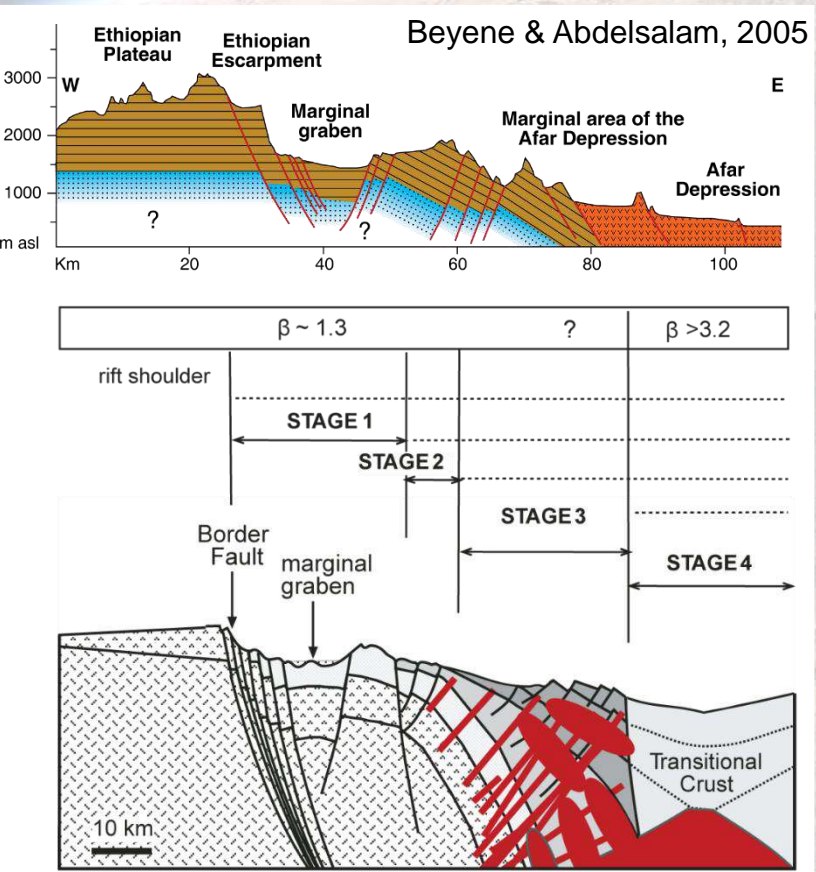
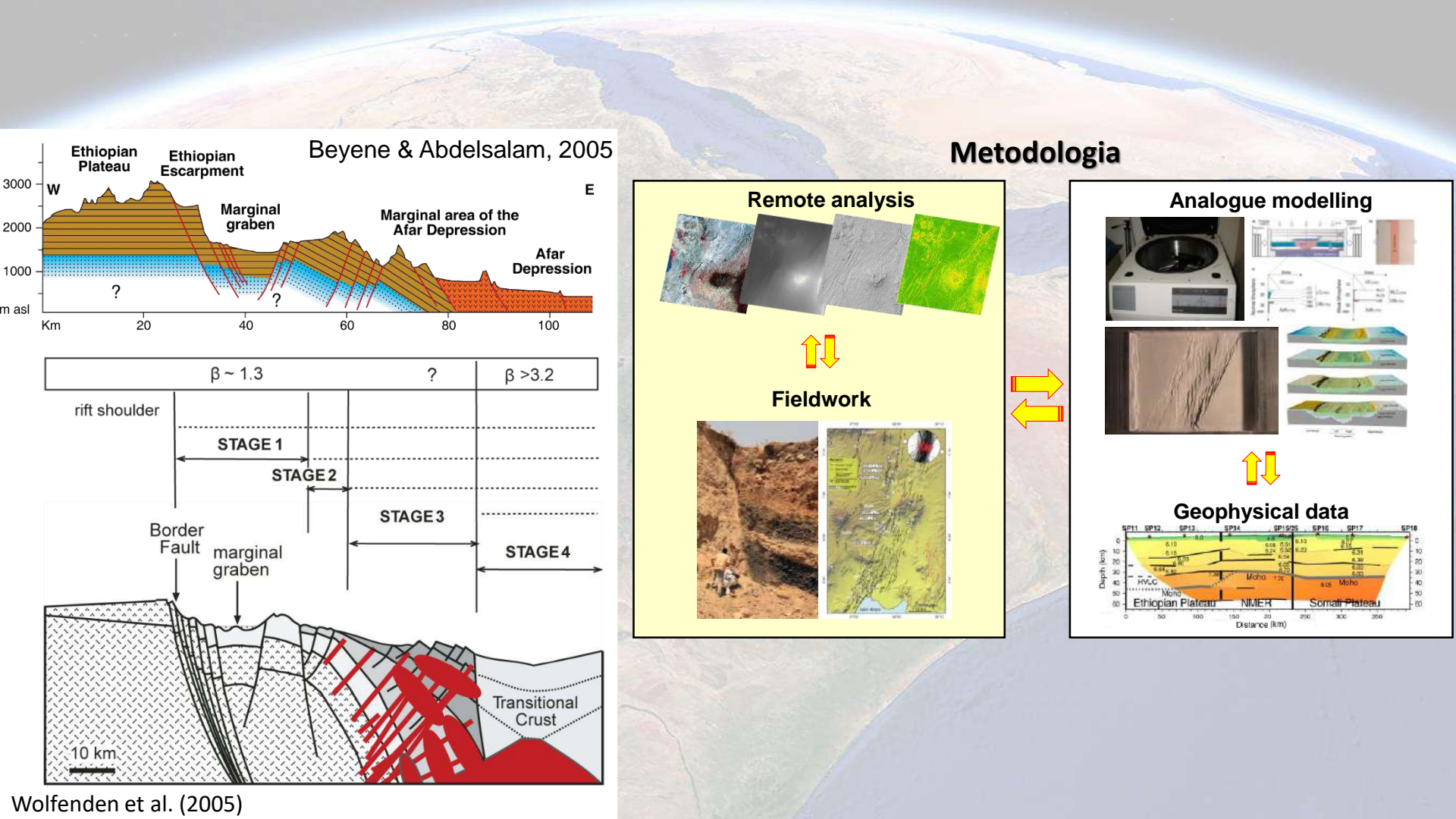
Lab Firenze

Microanalisi composizionale delle singole fasi mineralogiche e vetri (EMPA)
Analisi isotopica Sr-Nd-Pb su roccia totale (TIMS)

[in coordinamento con DST-Unipi]

Questioni aperte – PRIN2017: distribuzione e caratteristiche della deformazione

Deformazione nei margini vs. zona assiale - caratteristiche dei margini (es. flessura, graben marginali)



Metodologia

Remote analysis

Fieldwork

Yellow double-headed arrows indicate the interaction between Remote analysis and Fieldwork.

Analogue modelling

Geophysical data

Yellow double-headed arrows indicate the interaction between Analogue modelling and Geophysical data.

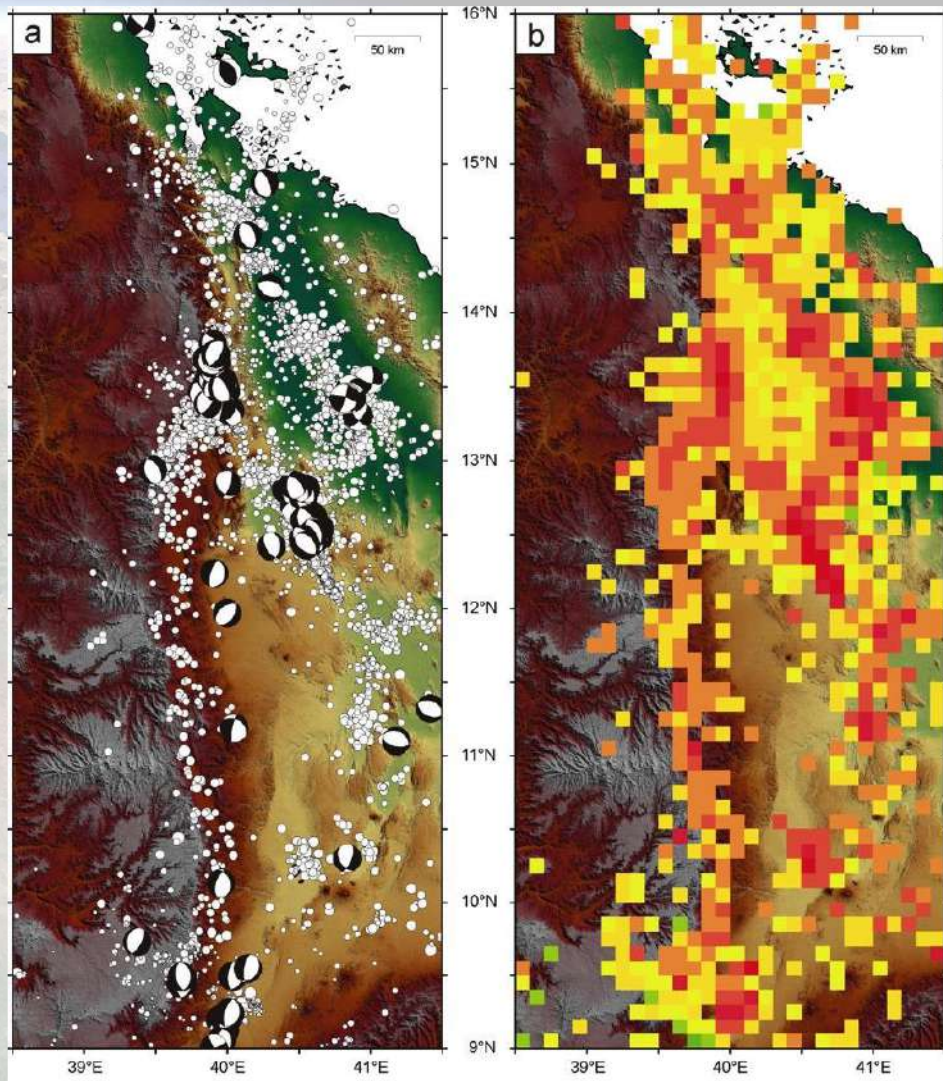
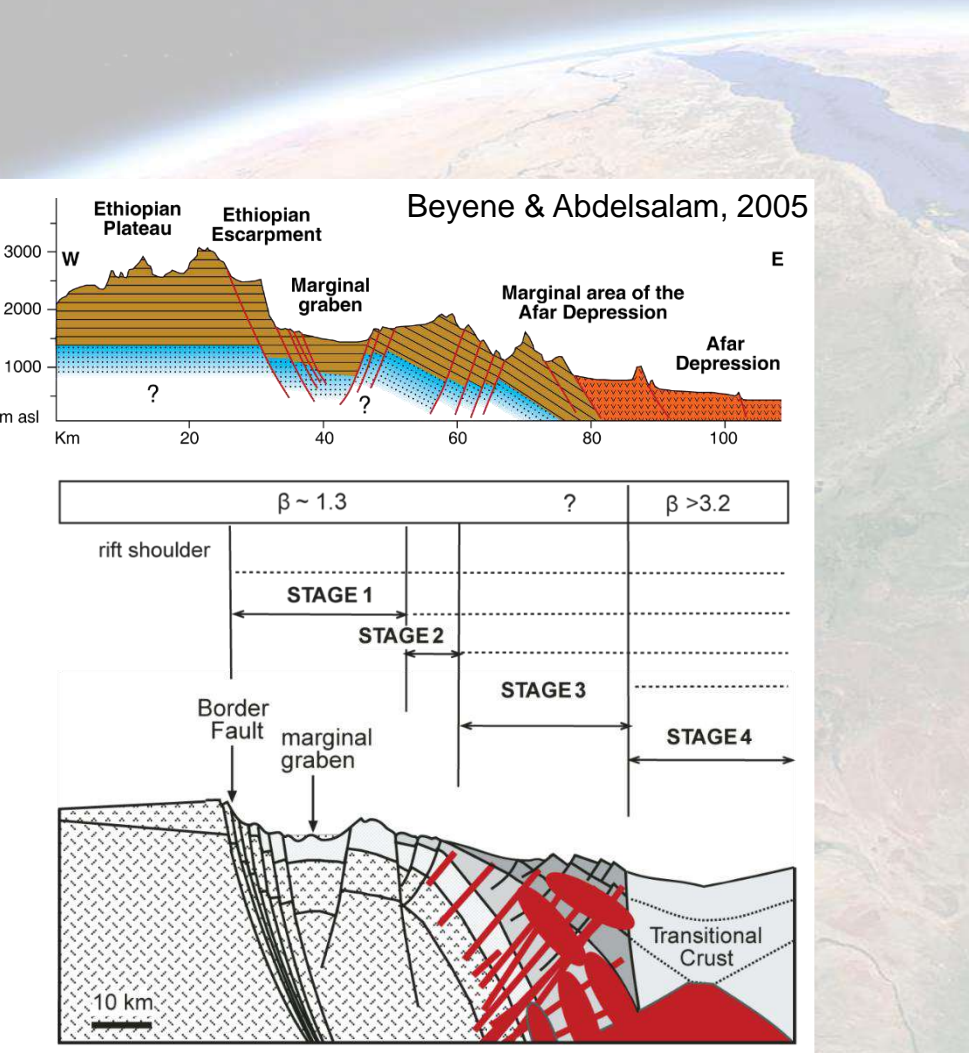
Wolfenden et al. (2005)

Deformazione nei margini vs. zona assiale - caratteristiche dei margini (es. flessura, graben marginali)

Tectonics

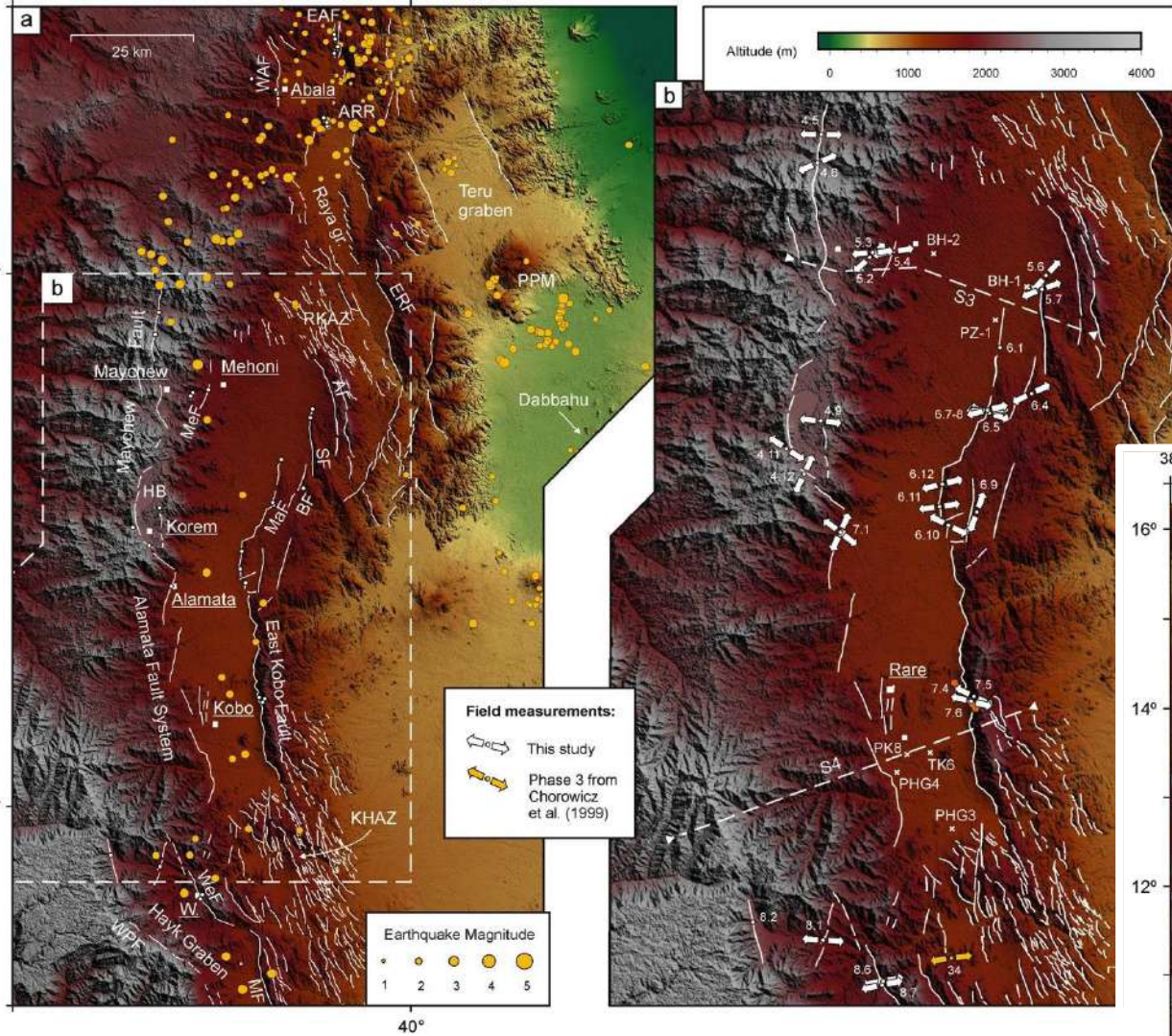
Structural analysis of the Western Afar Margin, East Africa: evidence for multiphase rotational rifting

F. Zwaan, G. Corti, F. Sani, D. Keir, A. Muluneh, F. Illsley-Kemp, M. Papini



Wolfdenden et al. (2005)

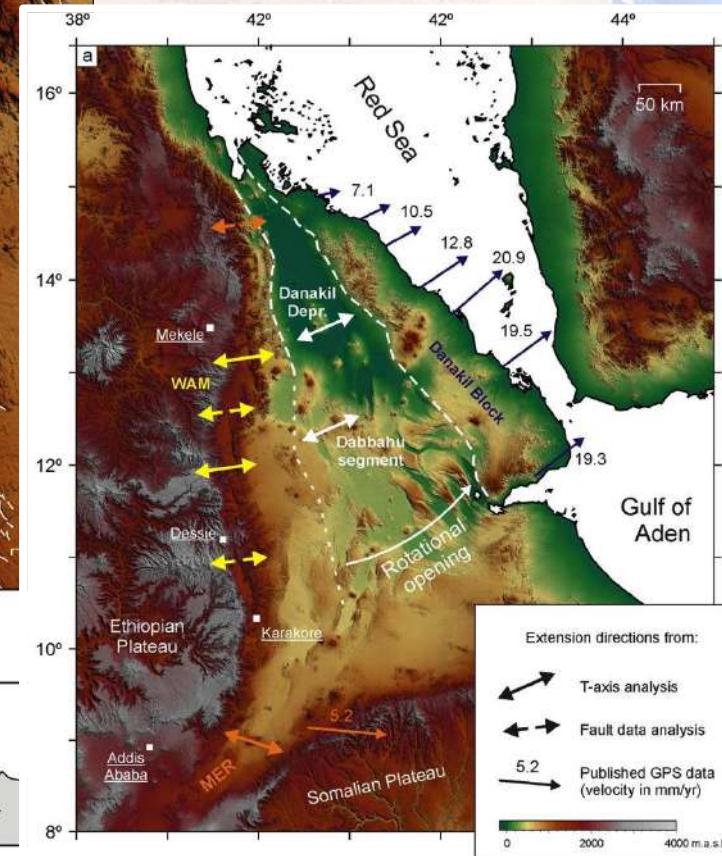
Questioni aperte – PRIN2017: distribuzione e caratteristiche della deformazione



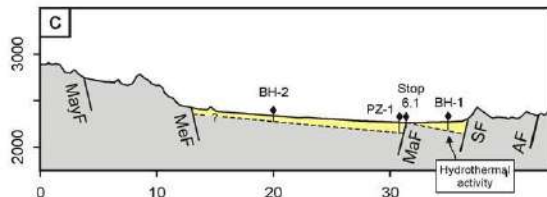
Tectonics

Structural analysis of the Western Afar Margin, East Africa: evidence for multiphase rotational rifting

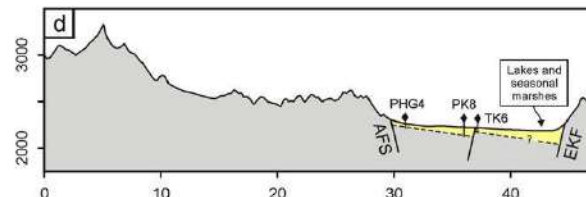
F. Zwaan, G. Corti, F. Sani, D. Keir, A. Muluneh, F. Illsley-Kemp, M. Papini



North Kobo section S3 (near Maychew-Mehoni)

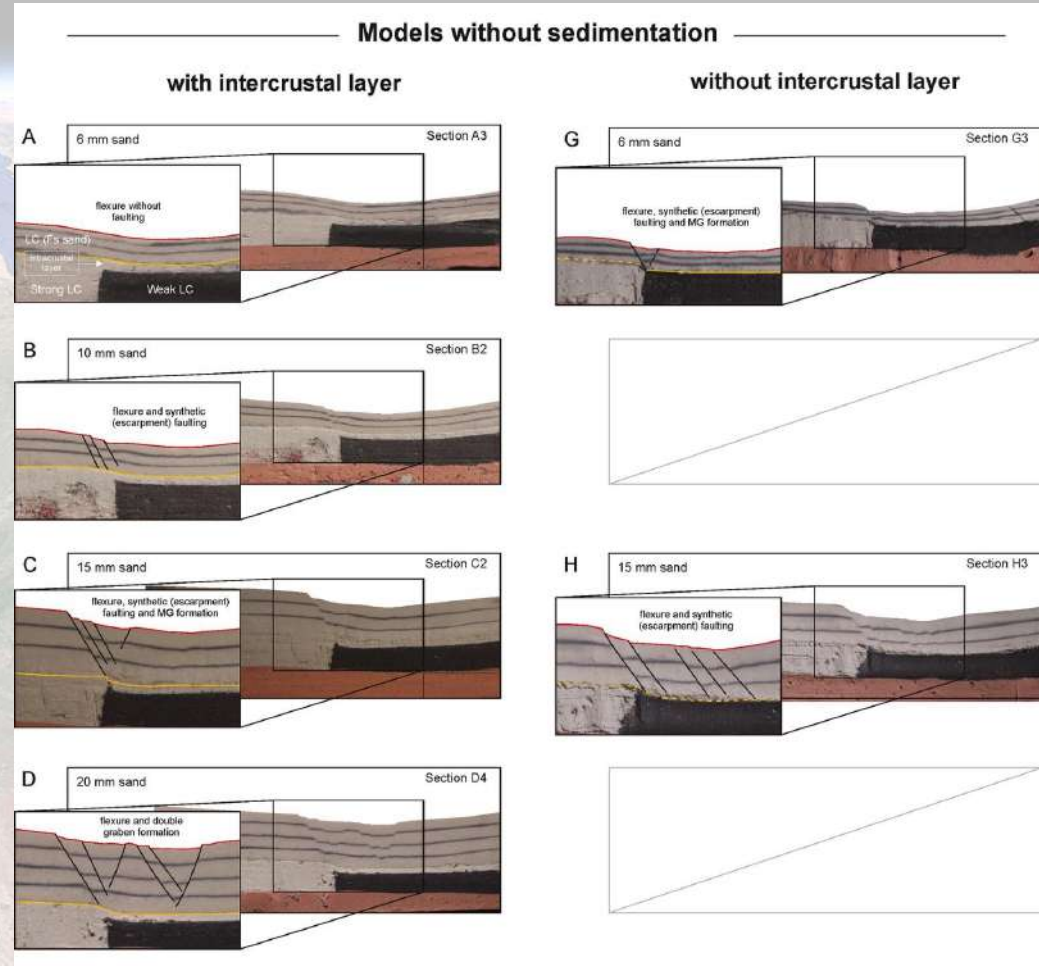
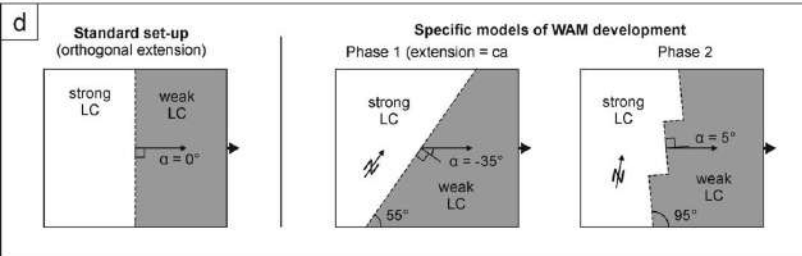
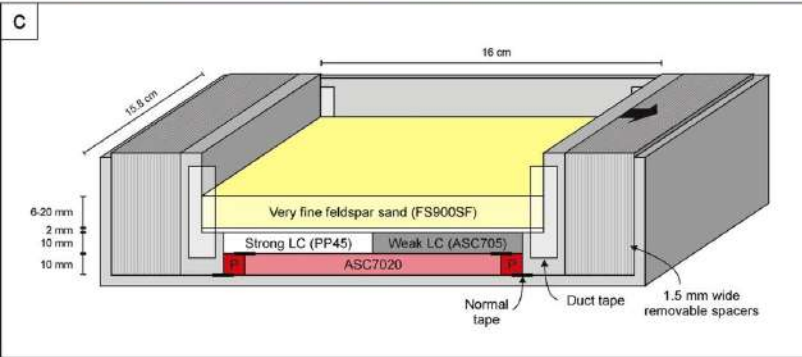
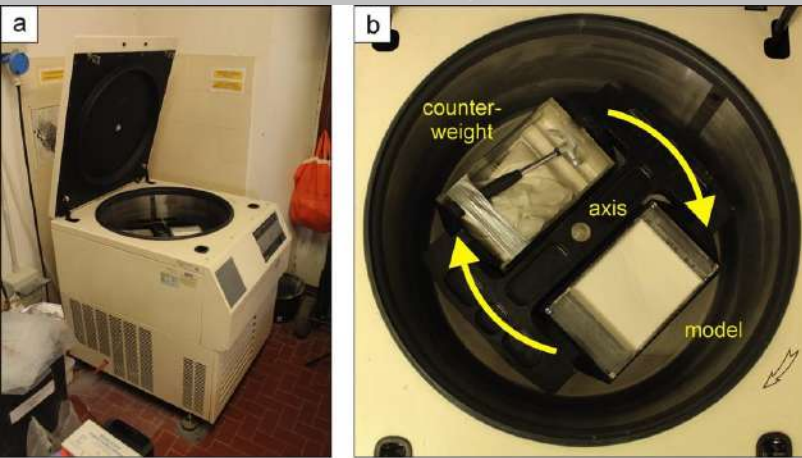


South Kobo section S4 (Near Kobo town)



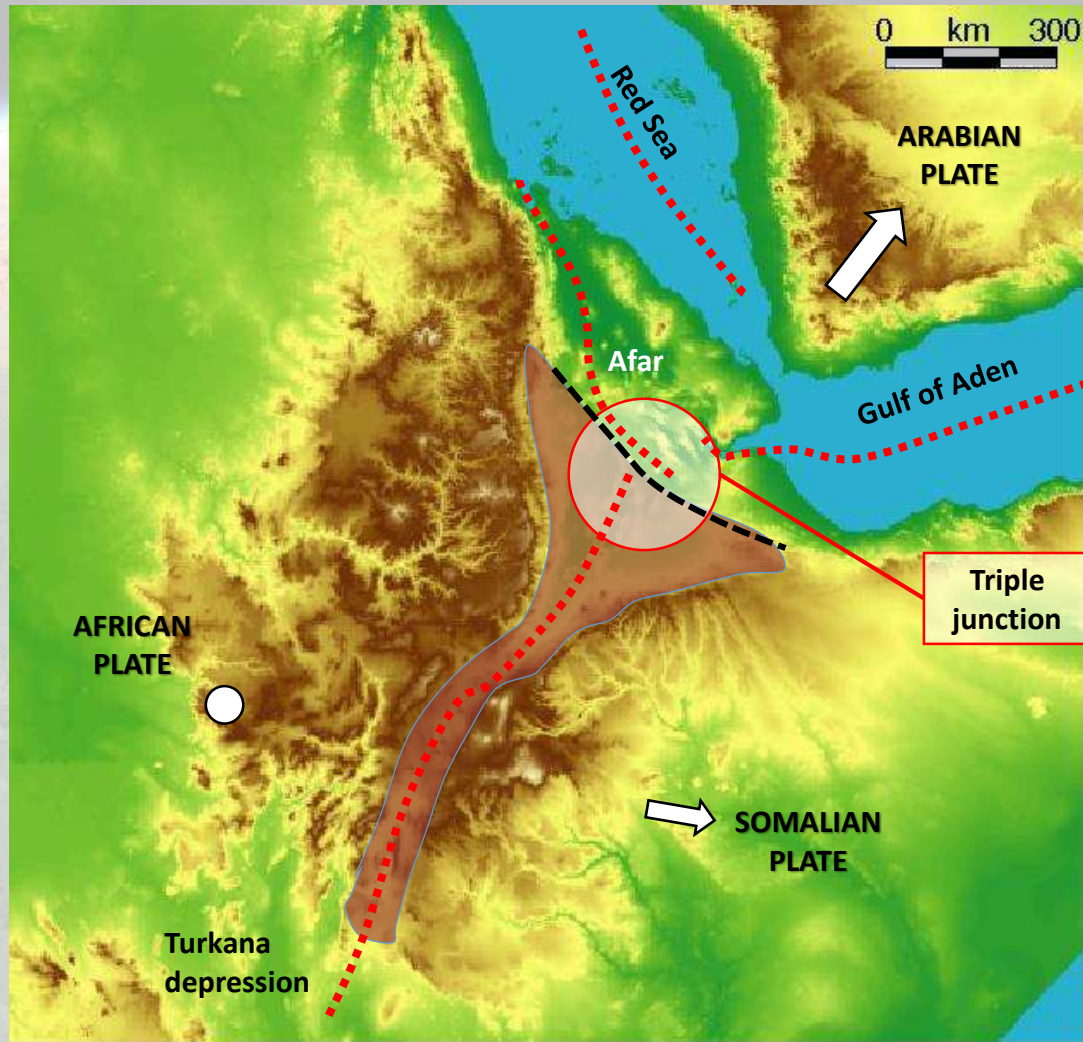
Questioni aperte – PRIN2017: distribuzione e caratteristiche della deformazione

Zwaan et al. submitted

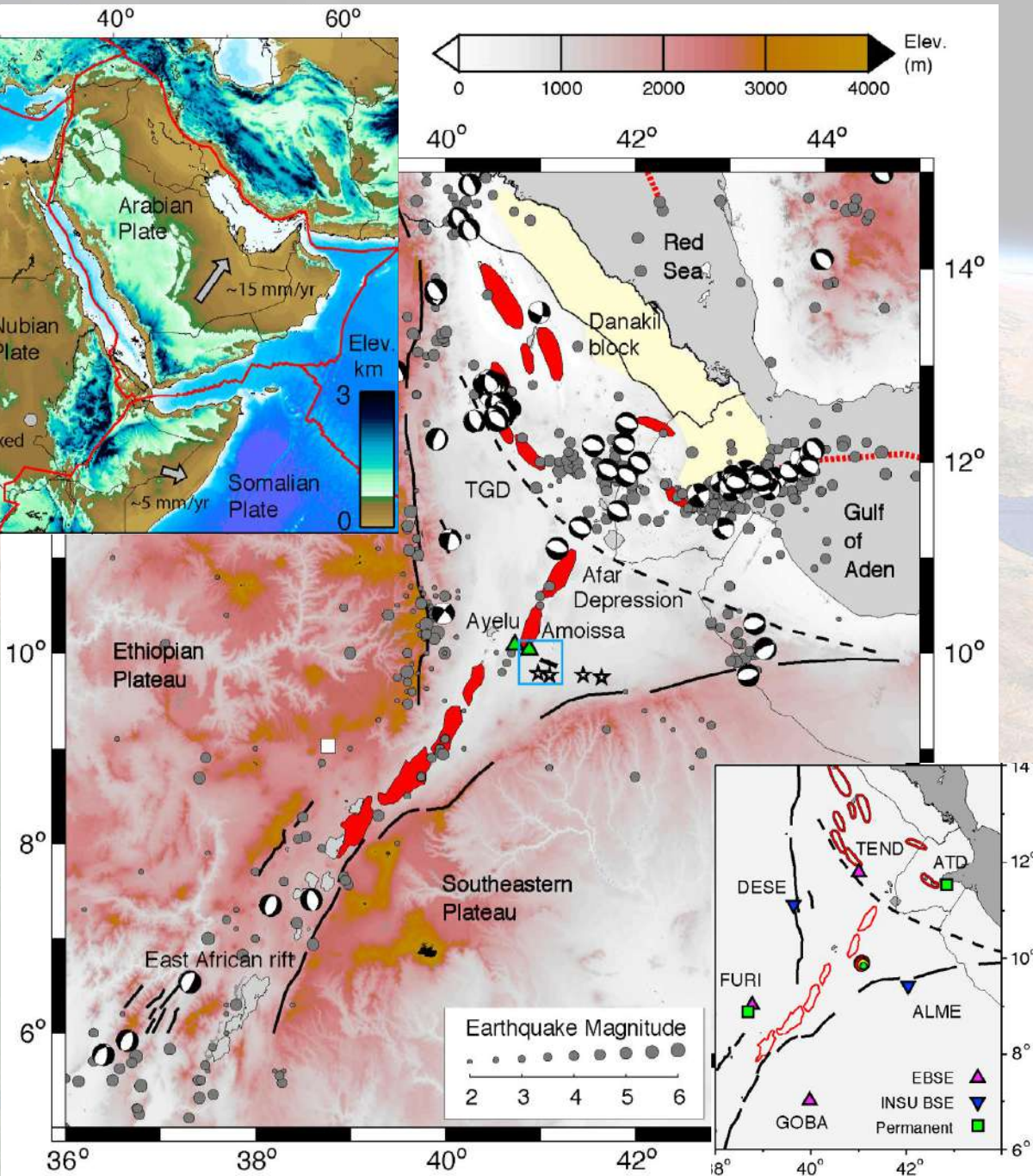


Questioni aperte – PRIN2017: tettonica della giunzione tripla

Campo di sforzi complesso (estensione radiale vs. polifasica)

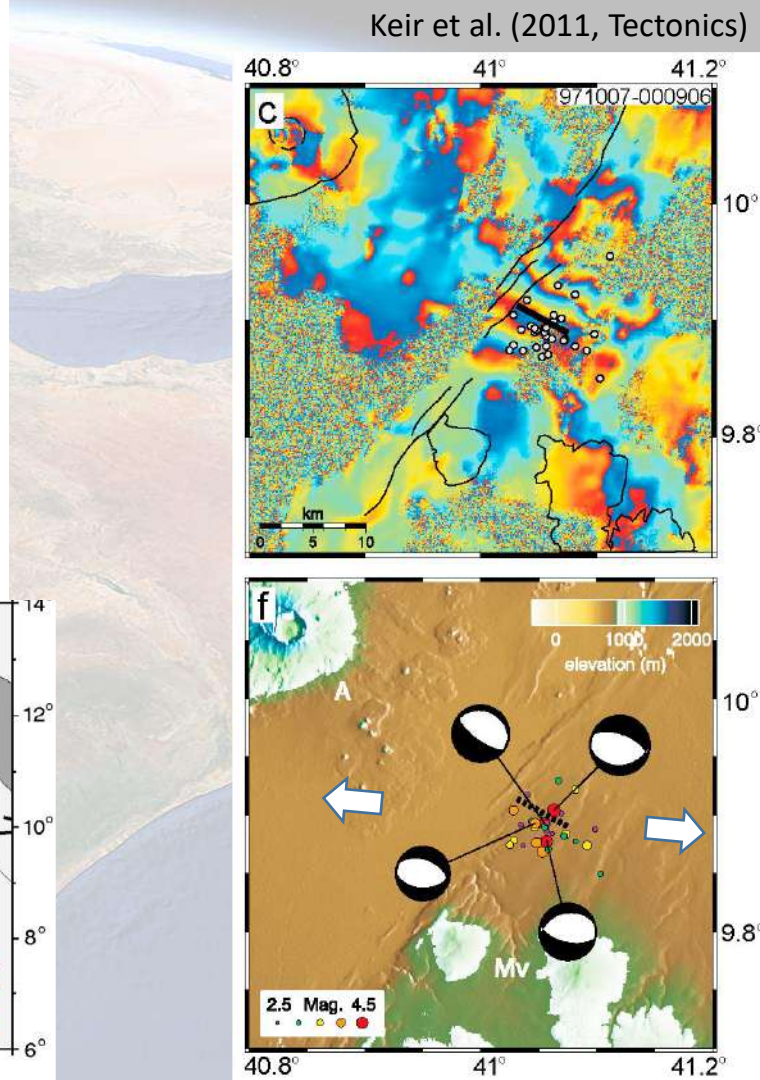


Questioni aperte – PRIN2017: tettonica della giunzione tripla

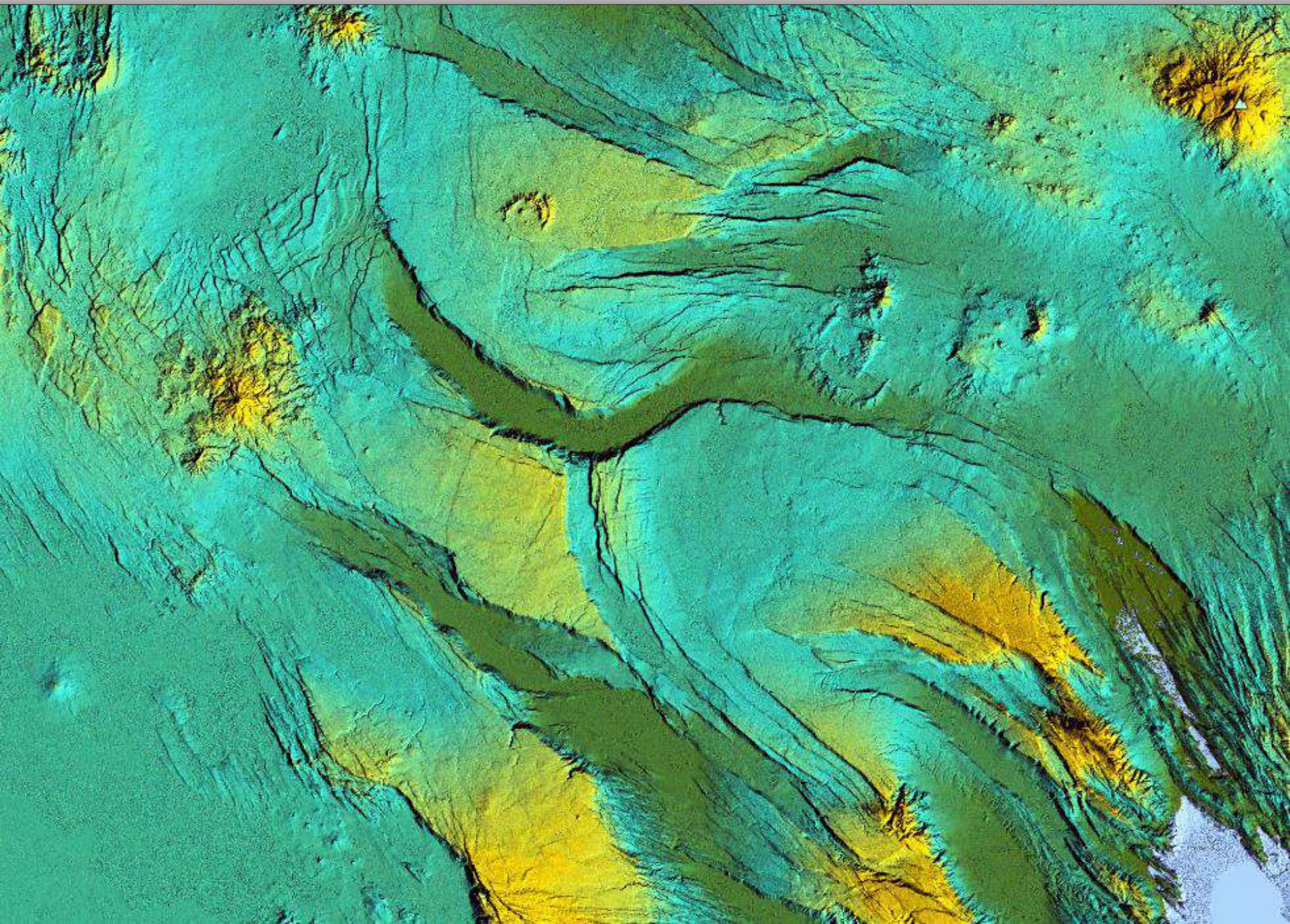


Intrusione di un dicco (lungo 6km, largh 1.5m; Maggio 2000) in prossimità della catena vulcanica di **Ayelu-Amoissa** con orientazione 'anomala' ESE-WNW (influenza moto Arabia)

Keir et al. (2011, Tectonics)



Questioni aperte – PRIN2017: tettonica della giunzione tripla



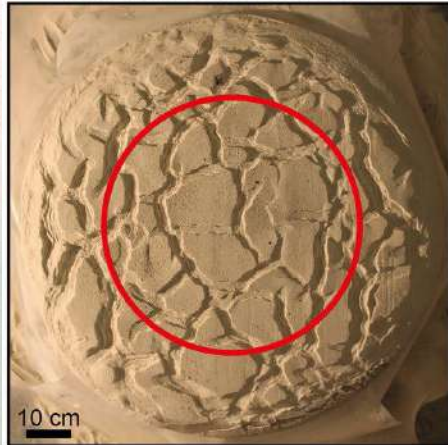
Questioni aperte – PRIN2017: tettonica della giunzione tripla

**SCIENTIFIC
REPORTS**
nature research

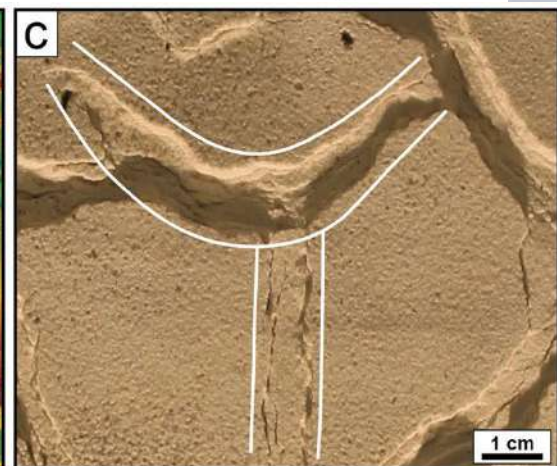
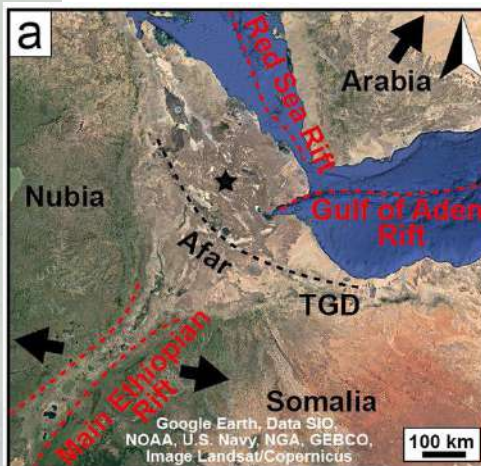
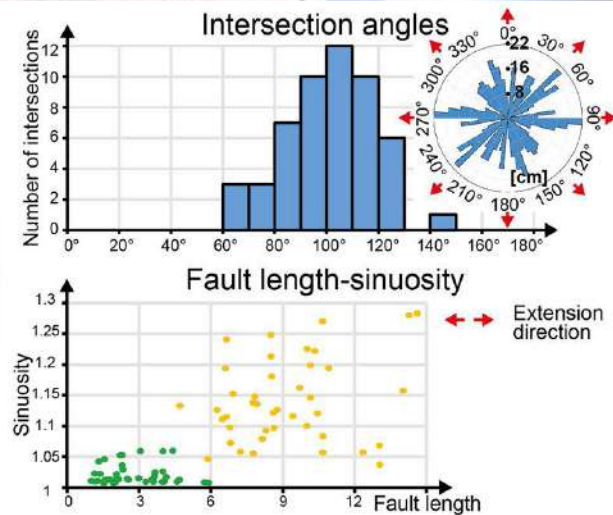
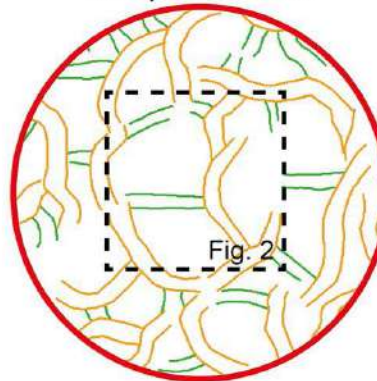
**3D Extension at Plate Boundaries
Accommodated by Interacting
Fault Systems**

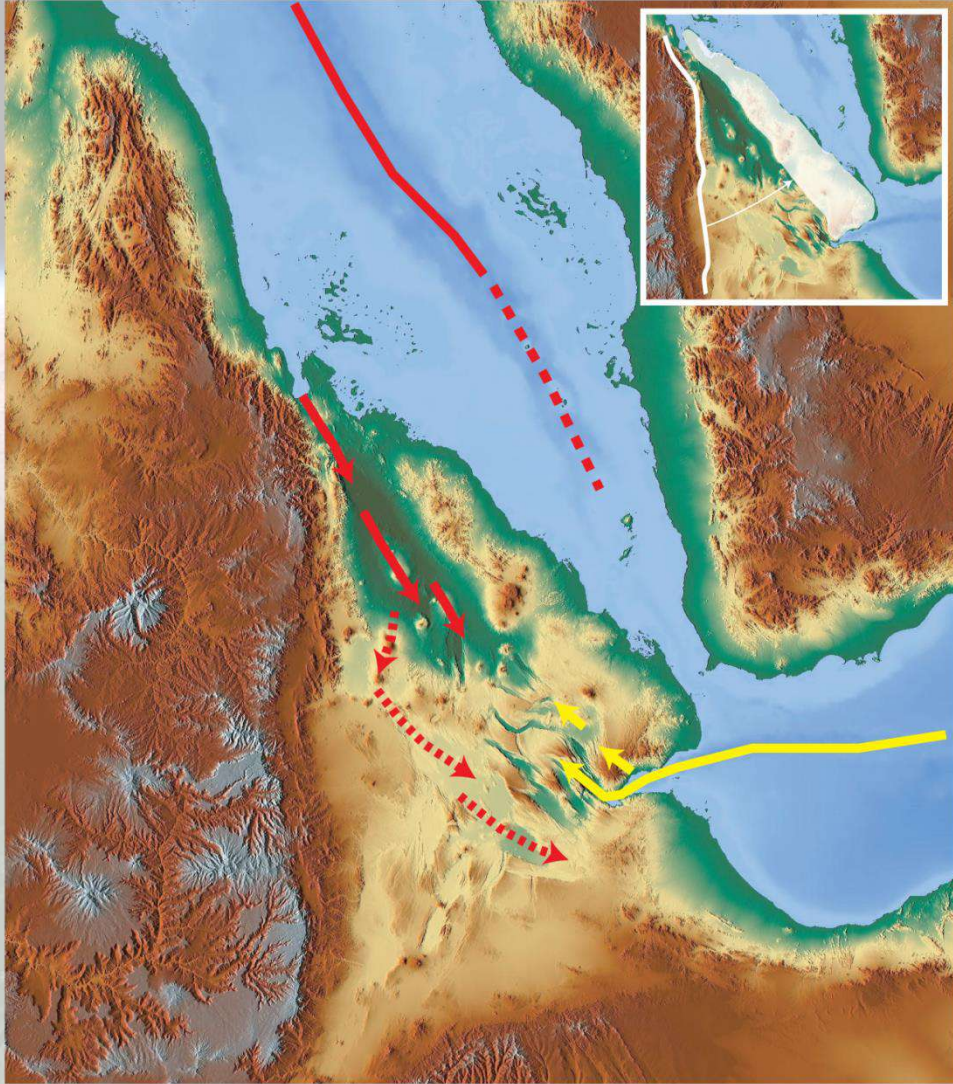
Luca Collanega¹, Giacomo Corti², Anna Breda³, Matteo Massironi¹ & Derek Keir^{3,4}

Isotropic radial extension



Interpreted faults

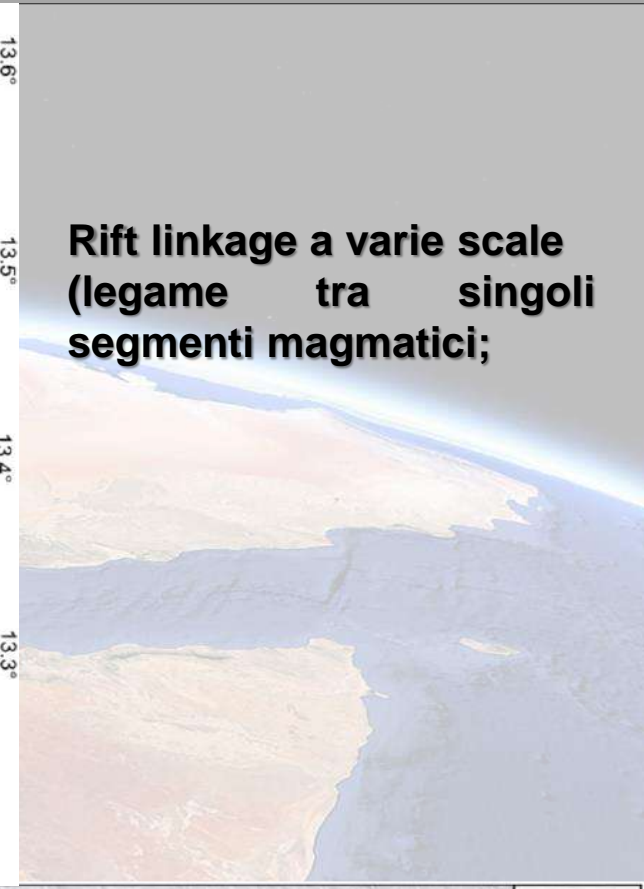
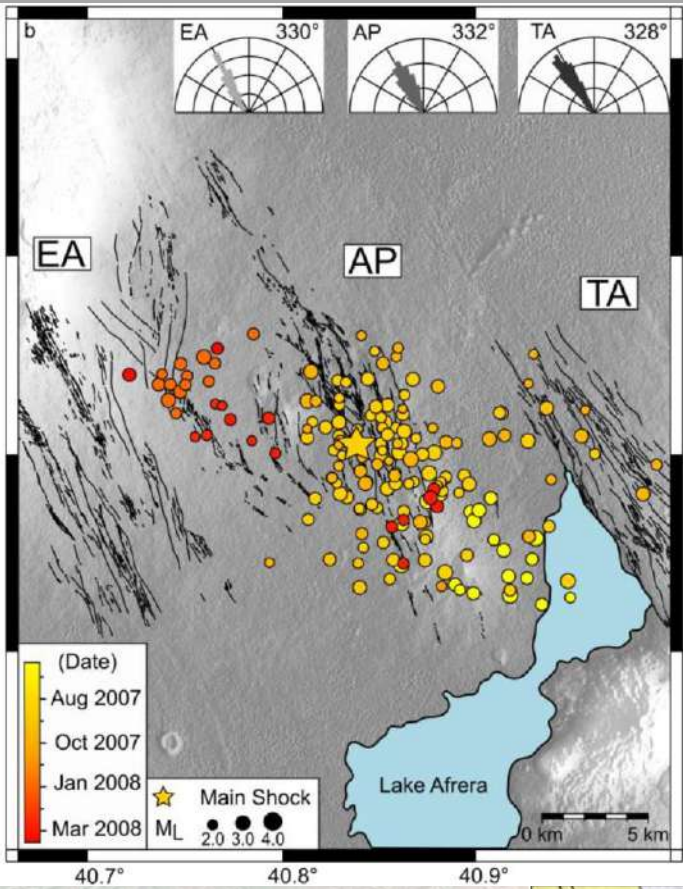
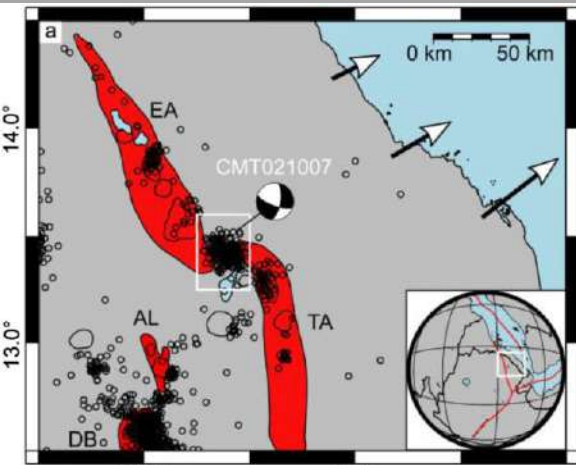




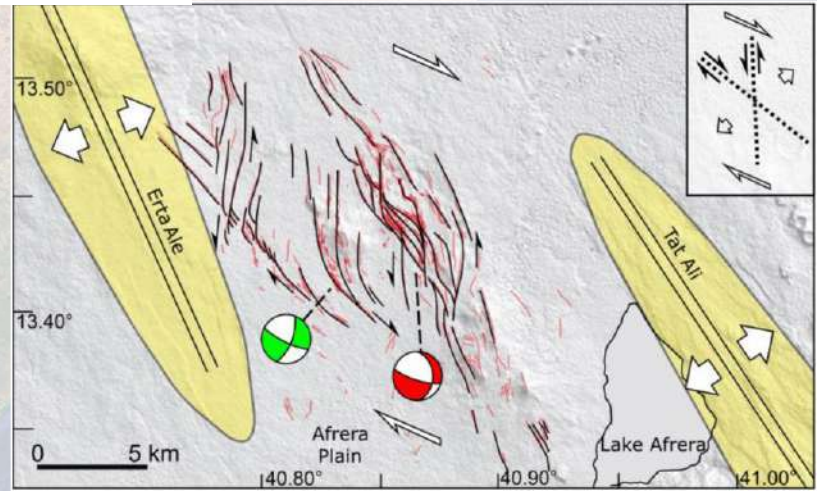
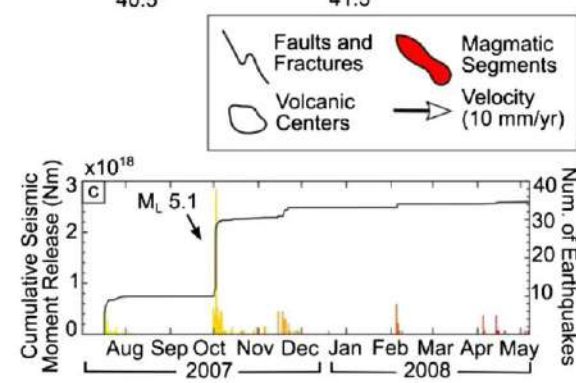
Rift linkage a varie scale



Questioni aperte – PRIN2017: rift linkage

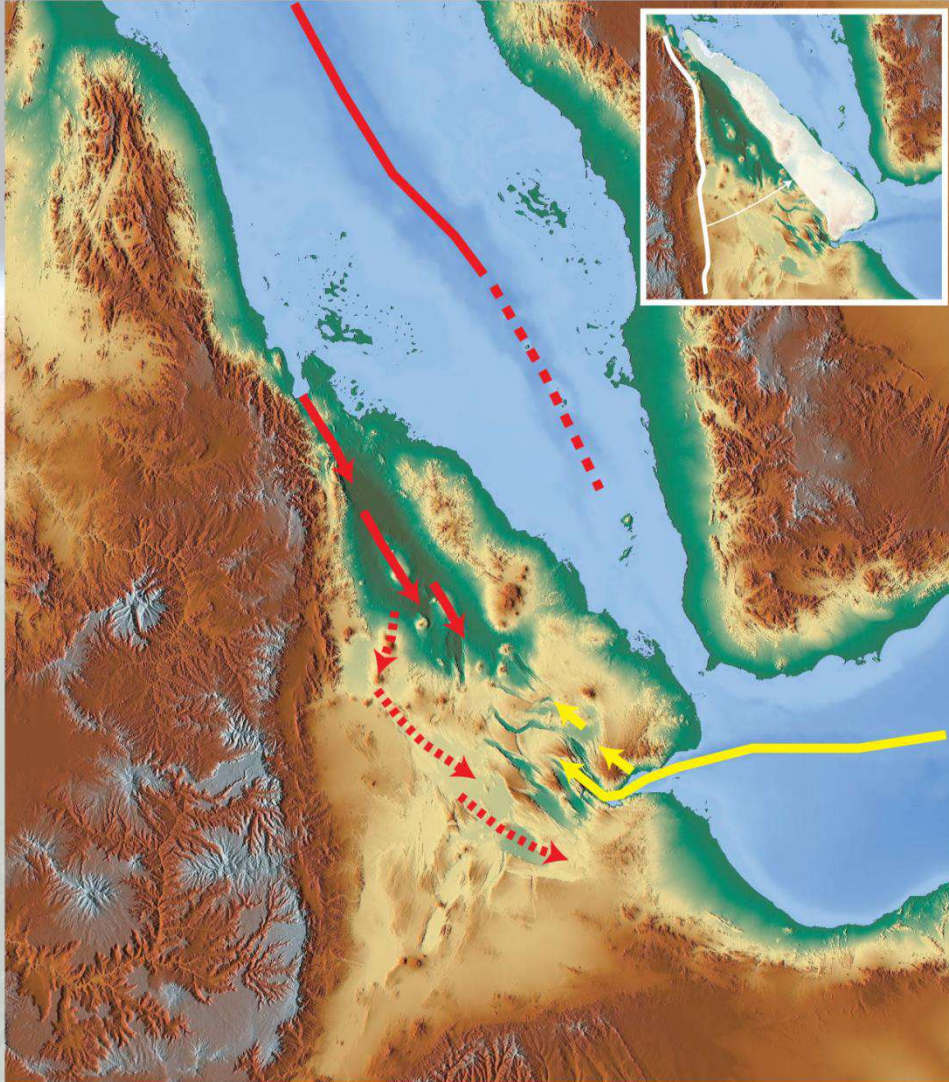


Rift linkage a varie scale (legame tra singoli segmenti magmatici;



Geophysical Research Letters
Observing Oblique Slip During Rift Linkage in Northern Afar
 Alessandro La Rosa^{1,2}, Carolina Pagli², Derek Keir^{1,3}, Federico Sani¹, Giacomo Corti⁴, Hua Wang⁵, and Daniel Posse⁶

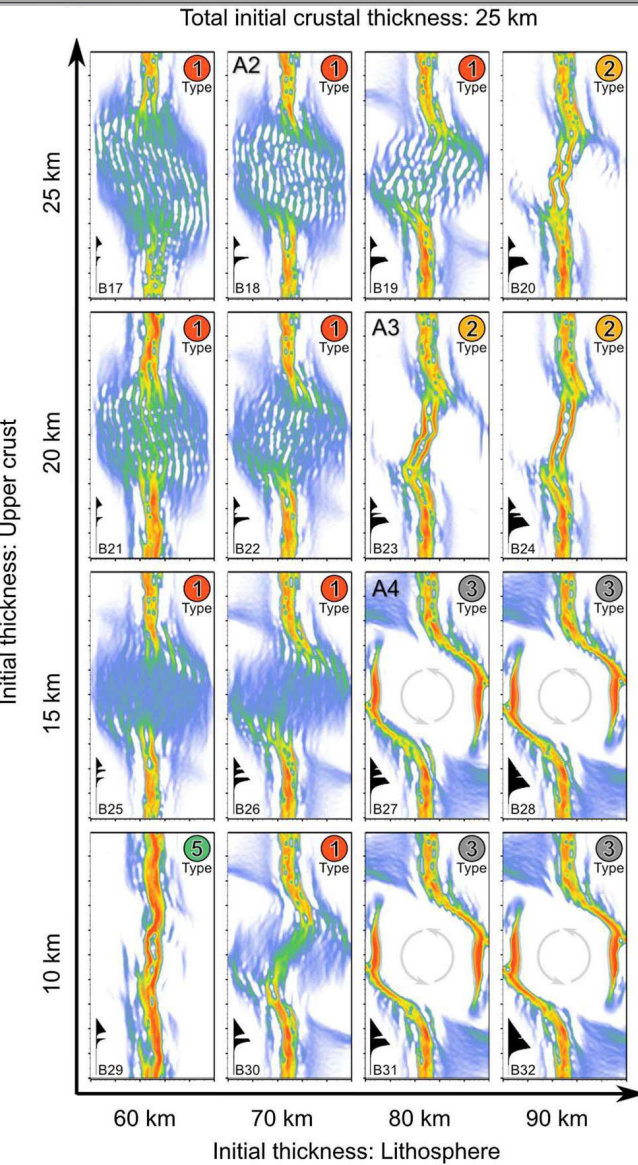
Questioni aperte – PRIN2017: rift linkage



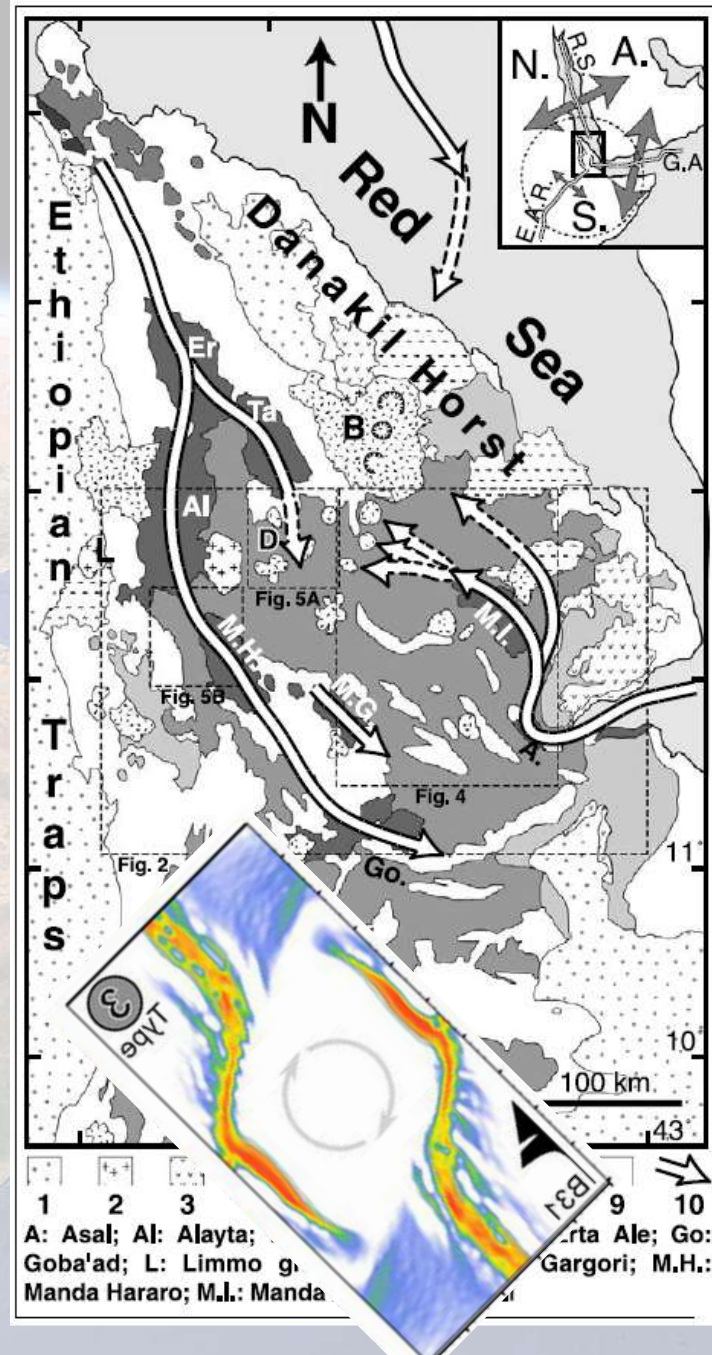
**Rift linkage a varie scale
(legame tra singoli
segmenti magmatici;
interazione tra Mar Rosso
e Golfo di Aden e ruolo
del blocco Dancalo)**

Modelli numerici (Sascha
Brune, GFZ; Ameha Muluneh,
AAUniv)

Questioni aperte – PRIN2017: rift linkage



Modelli già applicati all'interazione tra Rift Etiopico e del Kenya



Tectonics

Controls of inherited lithospheric heterogeneity on rift linkage: Numerical and analog models of interaction between the Kenyan and Ethiopian rifts across the Turkana depression

Sascha Brune^{1,2}, Giacomo Corti³, and Giorgio Ranalli⁴



Aborted propagation of the Ethiopian rift caused by linkage with the Kenyan rift

Giacomo Corti¹, Raffaello Clerici², Zaza Franceschini², Federico Sansò², Stéphane Scaillet¹, Paola Molin⁴, Ilaria Isola², Francesco Mazzarini², Sascha Brune^{1,2}, Derek Keir^{2,8}, Adfaw Erbelo⁷, Arneha Muluneh¹⁰, Pirilgan Hiley-Kemp^{1,11} & Arne Geleyn⁶

Dalla rift valley a un nuovo oceano

