



Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO
GEOLOŠKO
NAFTNI FAKULTET



STRUKTURNA GEOMORFOLOGIJA

**Bruno Tomljenović
& Bojan Matoš**

**Geomorfološki
indikatori aktivne
tektonike**

GEOMORFOMETRIJA -

kvantitativna analiza reljefa Zemljine površine koja omogućava objektivnu usporedbu između oblika i sastavnih elemenata u reljefu (npr. usporedbu između kutova nagiba padina, parametara koji opisuju morfološke značajke slivova i dr.).

Pomoću geomorfometrijskih parametara moguće je i procijeniti odgovarajući stupanj razvoja reljefa, a koriste se i za prepoznavanje tektonski aktivnih područja, odnosno područja gdje se tektonski pomaci odražavaju u reljefu Zemljine površine.



Najčešće korišteni geomorfometrijski parametri koji se koriste za moguće prepoznavanje tektonski aktivnih područja, poznati i kao **geomorfološki indikatori aktivne tektonike**, su:

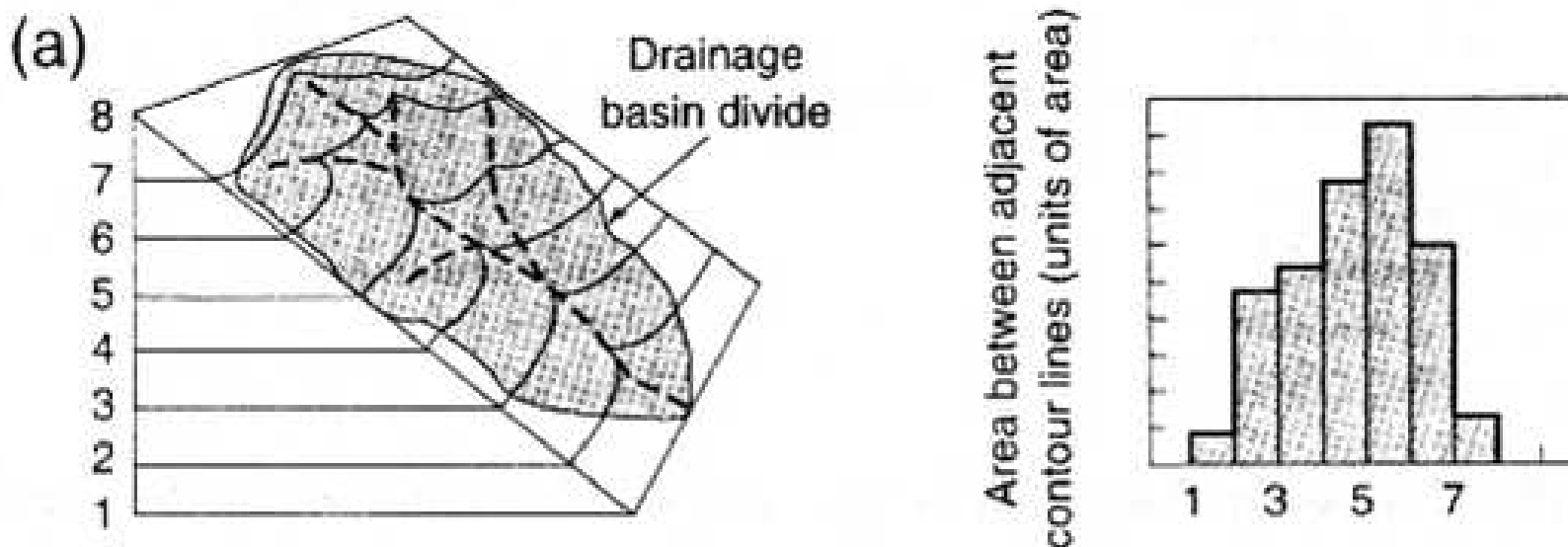
- ❖ hipsometrijska krivulja sliva
- ❖ hipsometrijski integral sliva
- ❖ parametar asimetrije sliva
- ❖ indeks duljine i nagiba glavnog toka
- ❖ normalizirani uzdužni profil toka
- ❖ indeks sinusoidalnosti gorskog čela
- ❖ omjer širine i visine dolina

Navedeni parametri dobivaju se proračunom iz podataka na topografskim kartama, orto-foto snimkama, a u današnje vrijeme gotovo isključivo iz digitalnih modela reljefa (DEM).



HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA

Ova krivulja, koju je definirao Strahler (1952), opisuje razdiobu površina u analiziranom slivu ili drenažnom bazenu (engl. drainage basin, catchment) u odnosu na razdiobu visina u slivu, odnosno opisuje relativan odnos između površina iznad ili ispod neke referentne točke na određenoj nadmorskoj visini u slivu.



Razdioba površina u slivu s obzirom na visinu (iz Keller & Pinter, 2002).



HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA

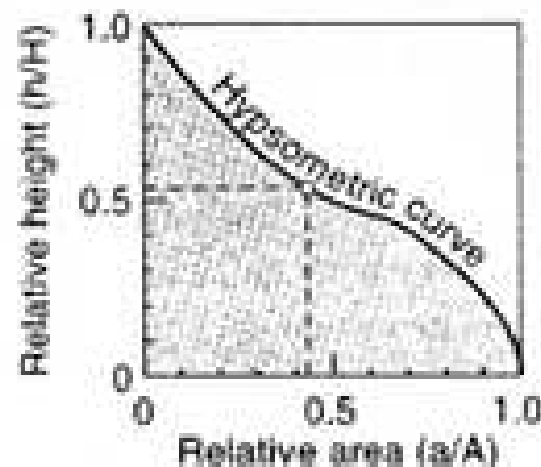
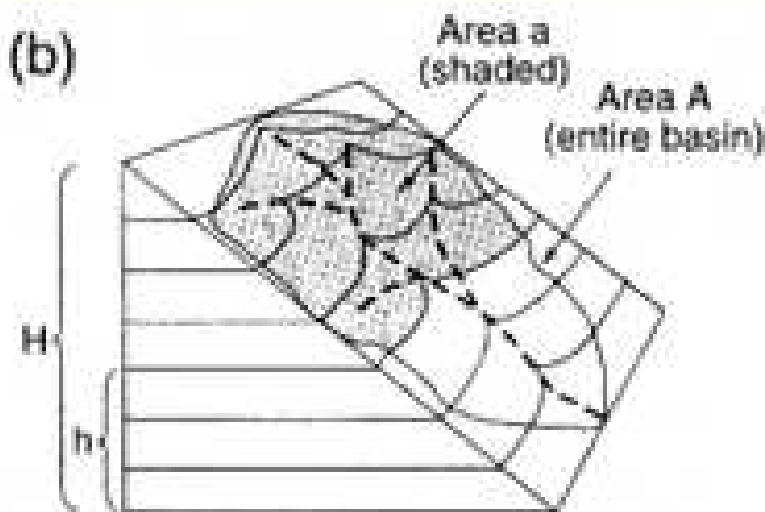
Krivulja se konstruira na način da se za svaku promatranu točku unutar sliva (od izvorišta prema ušću ili obratno) izračuna relativna visina (h/H) i relativna površina sliva (a/A), pri čemu je:

h - nadmorska visina sliva u promatranoj točki;

H - ukupna visina sliva (razlika između max. i min. n. visine u slivu);

a - površina sliva iznad promatrane točke na visini "h", i

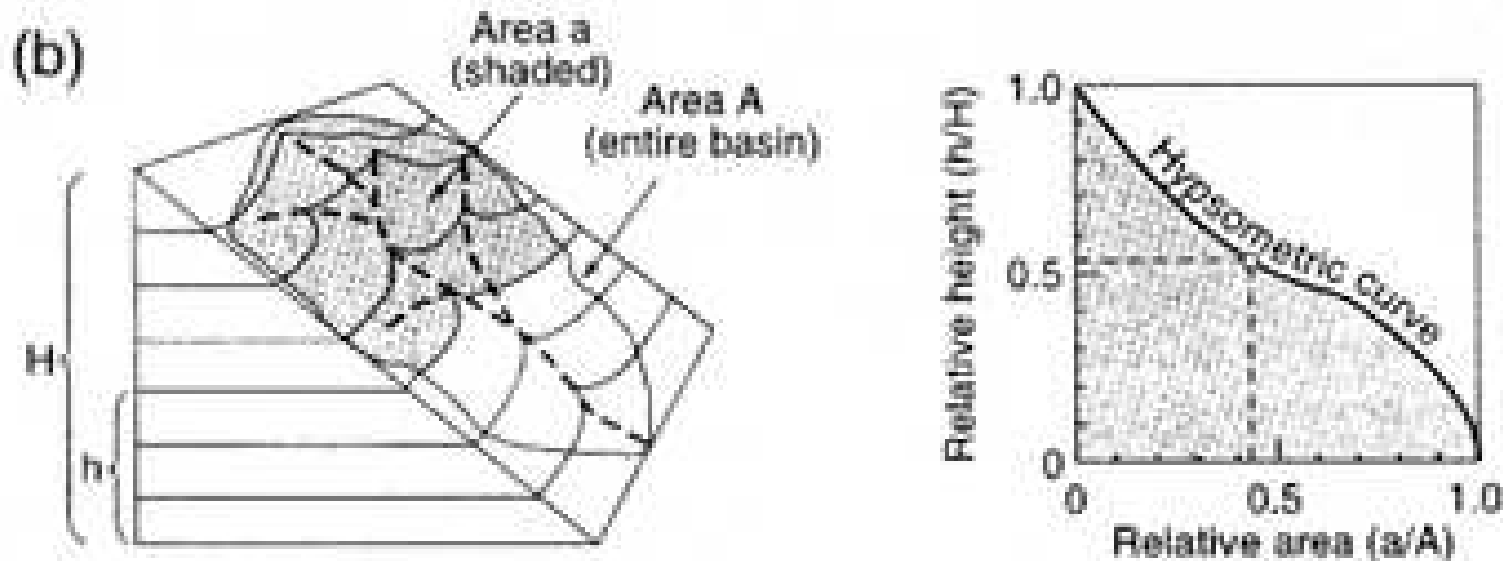
A - ukupna površina sliva.



Prikaz glavnih parametara za konstrukciju hipsometrijske krivulje sliva (iz Keller & Pinter, 2002, prema Strahler, 1952 i Mayer, 1990).

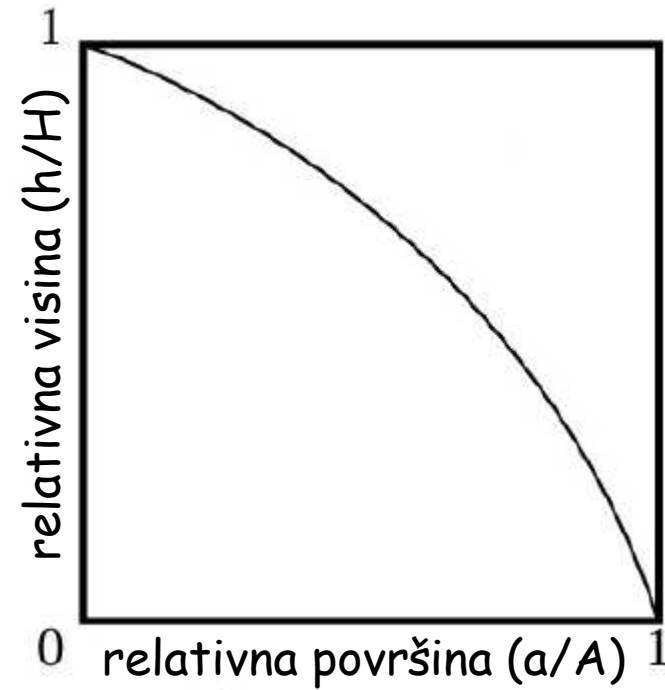
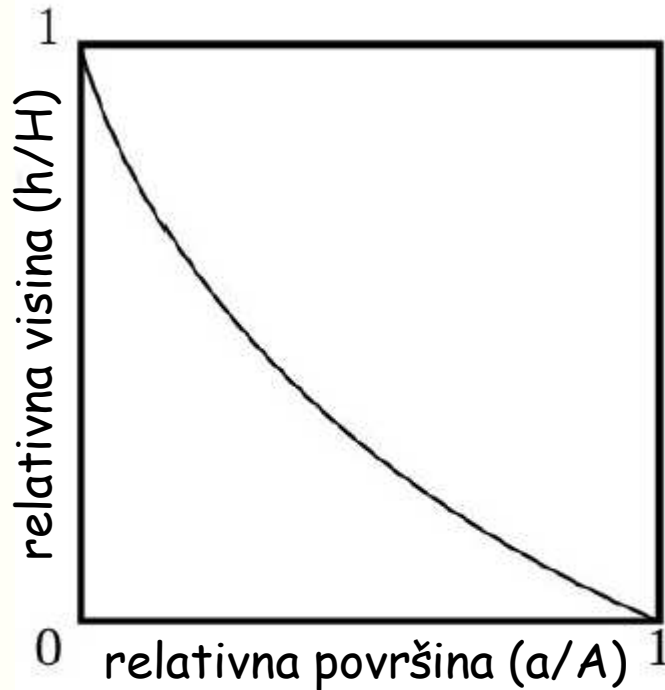


HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA



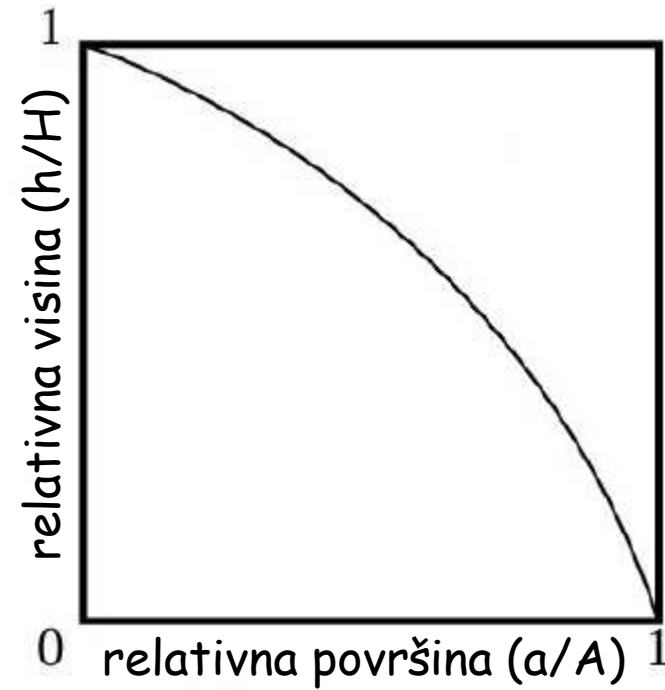
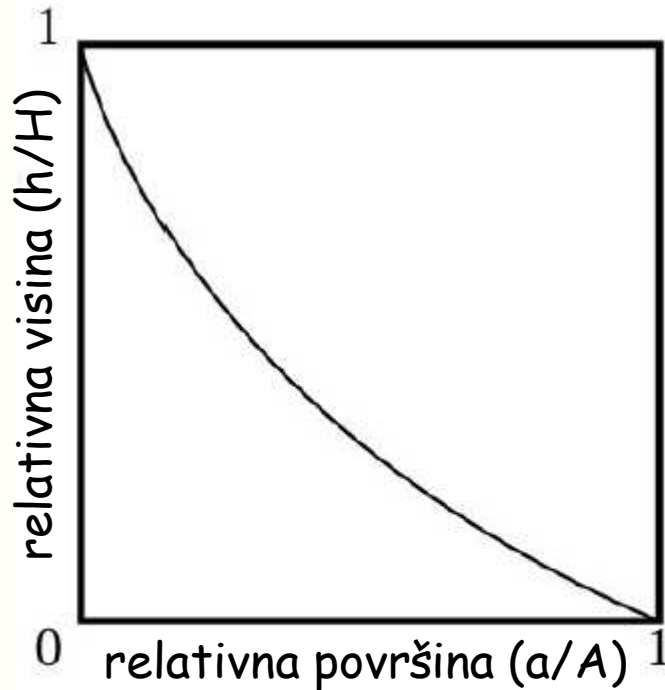
Vrijednosti relativne površine (a/A) uvijek su u rasponu od 1,0 (na najnižoj točki sliva gdje je relativna visina $h/H = 0$) do 0,0 (na najvišoj točki sliva gdje je $h/H = 1.0$). S obzirom na način izrade, hipsometrijske krivulje moguće je izravno koristiti za usporedbu između slivova bez obzira na njihovu veličinu.

HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA



Primjer dviju hipsometrijskih krivulja. Lijevo - krivulja konkavnog oblika koja pokazuje da površinom najveći dio sliva leži na manjoj nadmorskoj visini; Desno - krivulja konveksnog oblika koja pokazuje da površinom najveći dio sliva leži na višoj nadmorskoj visini.

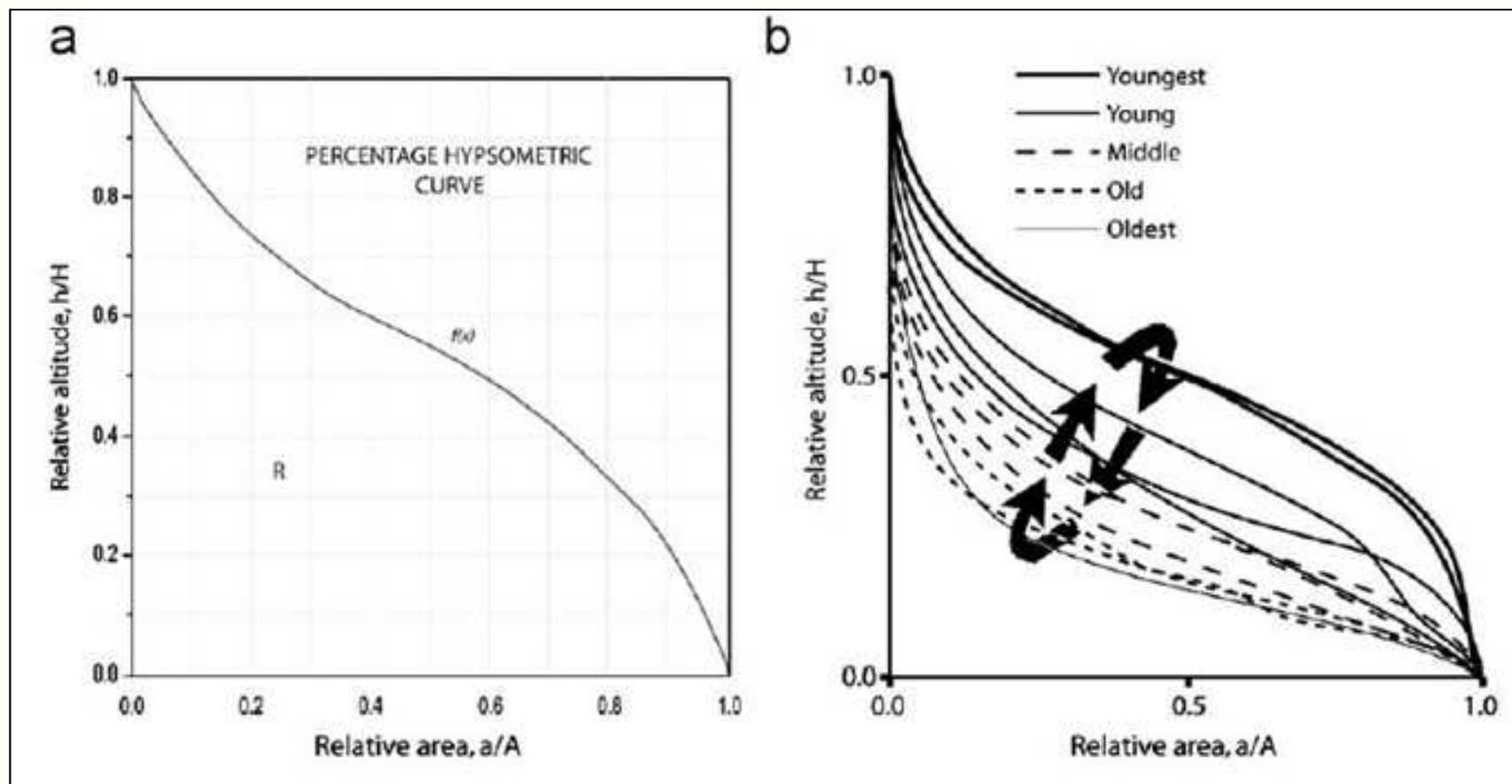
HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA



Na taj način, **krivulje konkavnog oblika** karakteristične su za **slivove u zrelom i kasnom stadiju razvoja reljefa**, dok su **krivulje konveksnog oblika** karakteristične za **slivove u mlađem stadiju razvoja reljefa**, s duboko usječenim i pravocrtnim tokovima na višoj nadmorskoj visini.



HIPSOMETRIJSKA KRIVULJA SLIVA



A) Hipsometrijska krivulja po Strahleru (1952). Površina ispod krivulje R odgovara hipsometrijskom integralu H_i . B) Niz hipsometrijskih krivulja različitog oblika: od izrazito konkavnih karakterističnih za zreli stadij, do kokveksnih karakterističnih za početni stadij u razvoju reljefa (iz Perez-Pena et al., 2009).



HIPSOMETRIJSKI INTEGRAL SLIVA

predstavlja jednostavan način da se kvantitativno izrazi oblik hipsometrijske krivulje sliva, jer predstavlja površinu ispod hipsometrijske krivulje. Jedan od načina na koji se može izračunati ovaj integral je prema sljedećoj jednadžbi:

$$H_i = \frac{\text{srednja vrijednost visine sliva} - \text{najniža vrijednost visine sliva}}{\text{najviša vrijednost visine sliva} - \text{najniža vrijednost visine sliva}}$$

pri čemu se srednja vrijednost visine sliva određuje **na temelju visine izmjerene na barem 50 točaka unutar sliva**, što se u današnje vrijeme relativno brzo postiže analizom digitalnog modela reljefa (DEM).

Vrijednosti H_i su u rasponu od 0,0 - 1,0.

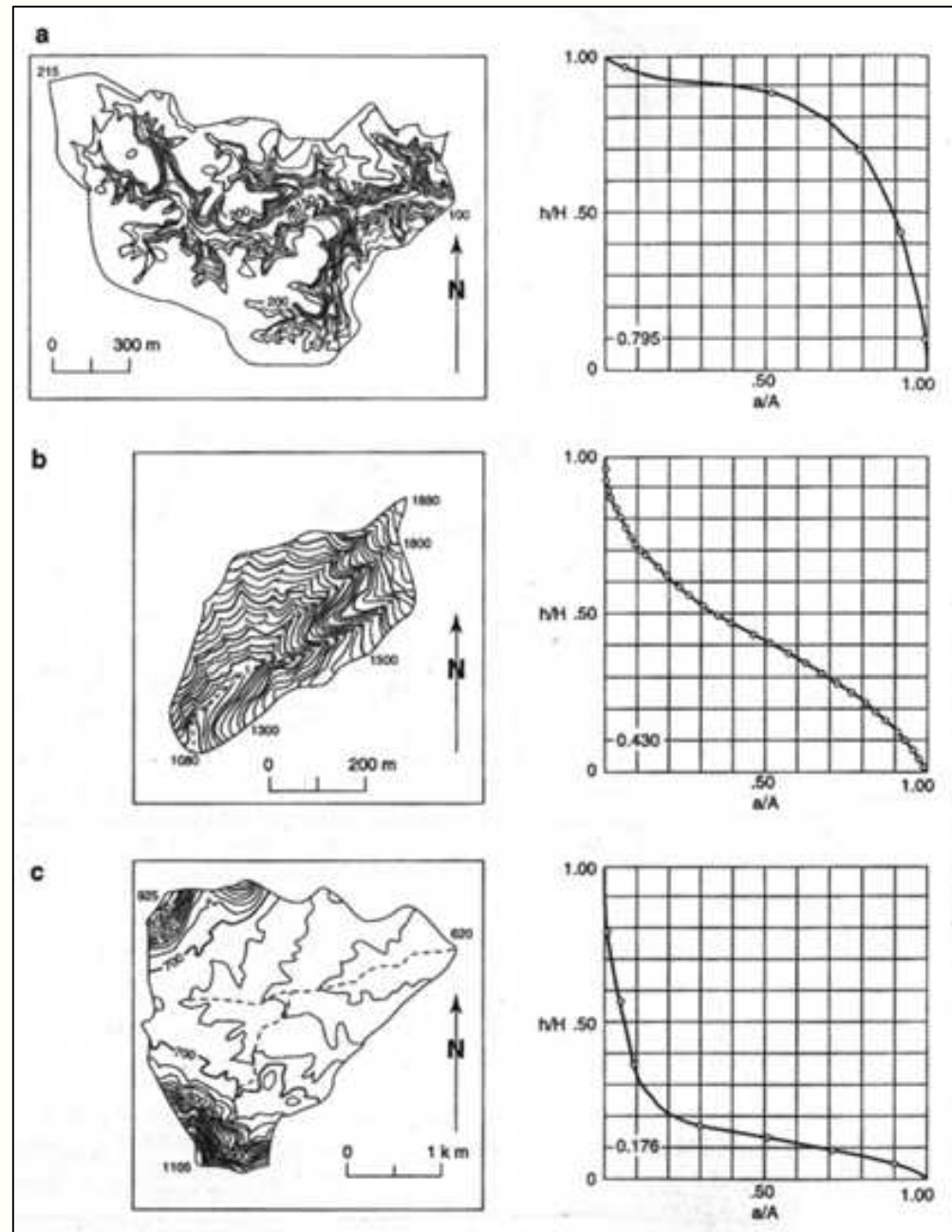
Kao i kod hipsometrijskih krivulja, vrijednost hipsometrijskog integrala uzima se kao pokazatelj stadija u razvoju reljefa prema Davisom modelu.



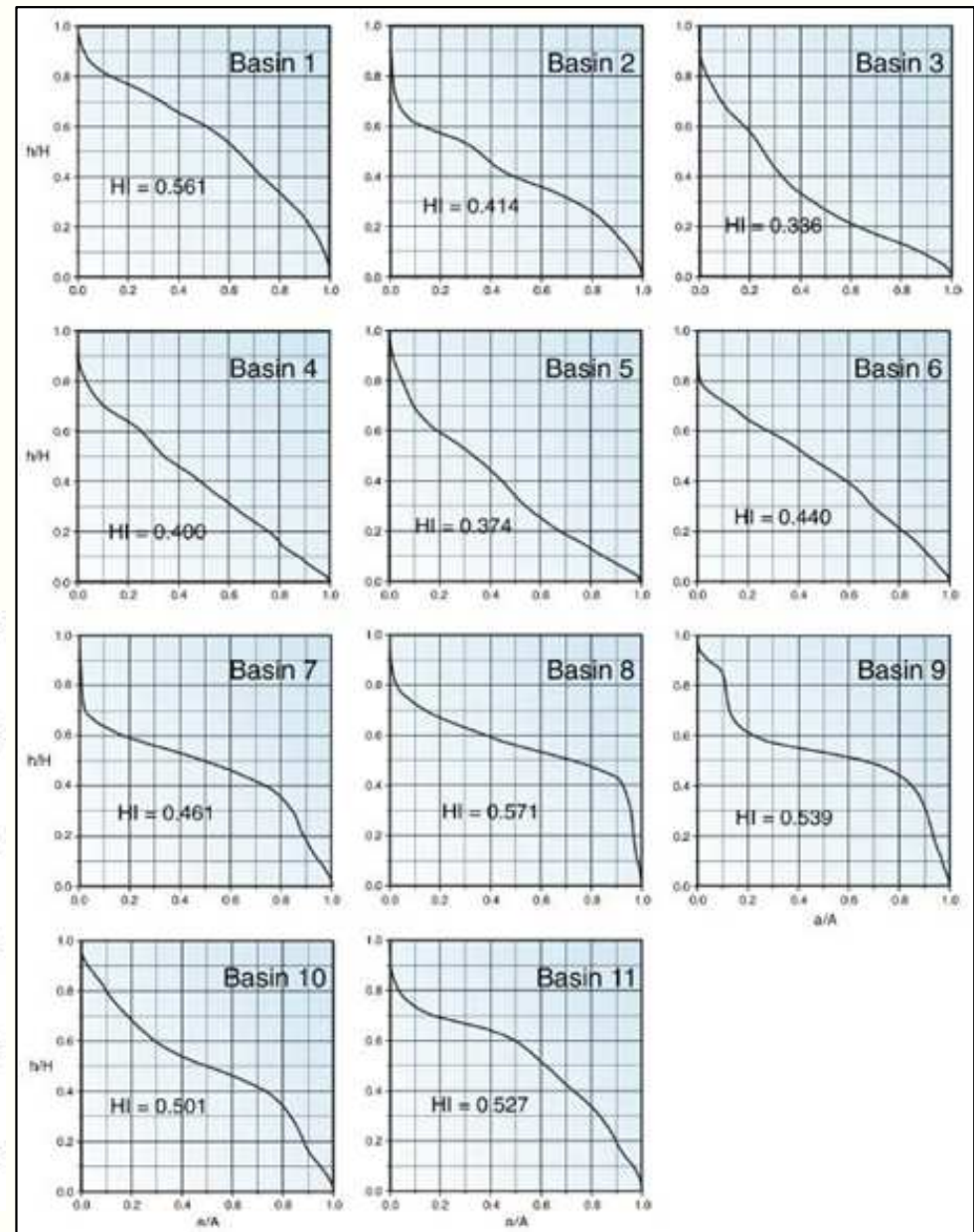
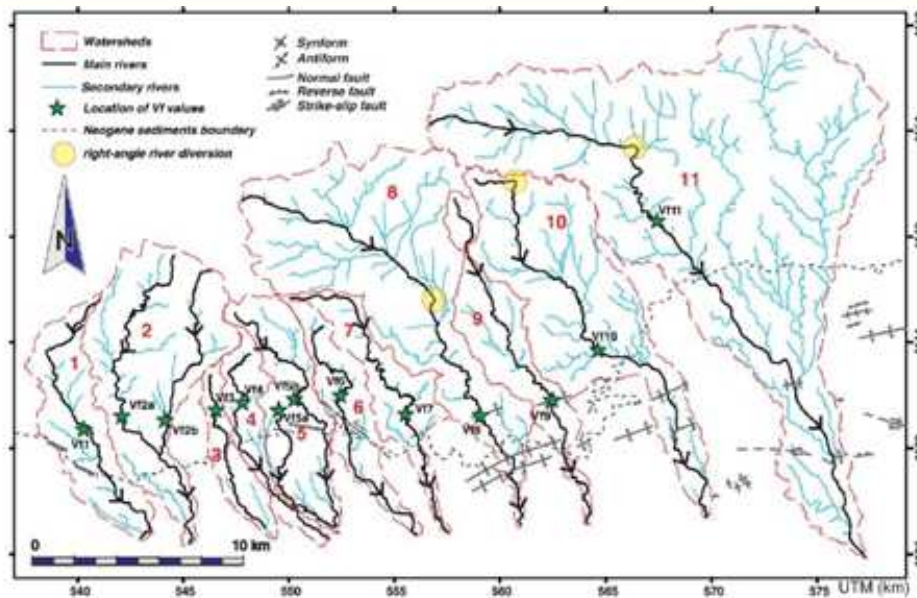
POČETNI STADIJ razvoja reljefa
visoke vrijednosti H_i
(sliv u brdovitom terenu s duboko
usječenim tokovima)

ZRELI STADIJ razvoja reljefa
srednje i niže vrijednosti H_i
(dobro razvijena drenažna mreža u
terenu s manjim visinskim razlikama)

KASNI, ZAVRŠNI STADIJ razvoja
reljefa
niske vrijednosti H_i
(drenažna mreža u terenu s vrlo malim
visinskim razlikama)



Primjer morfometrijske analize u 11 slivova na području Betijskih kordijera u Španjolskoj pomoću hipsometrijskih krivulja i hipsometrijskog integrala (iz Pedrera et al., 2009).

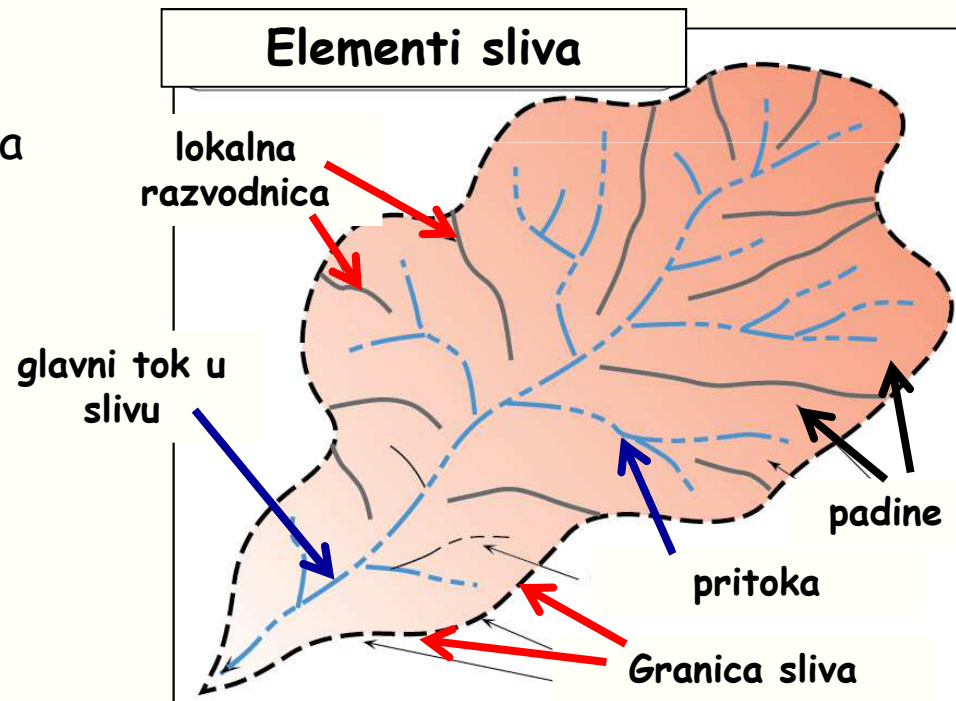


PARAMETAR ASIMETRIJE SLIVA

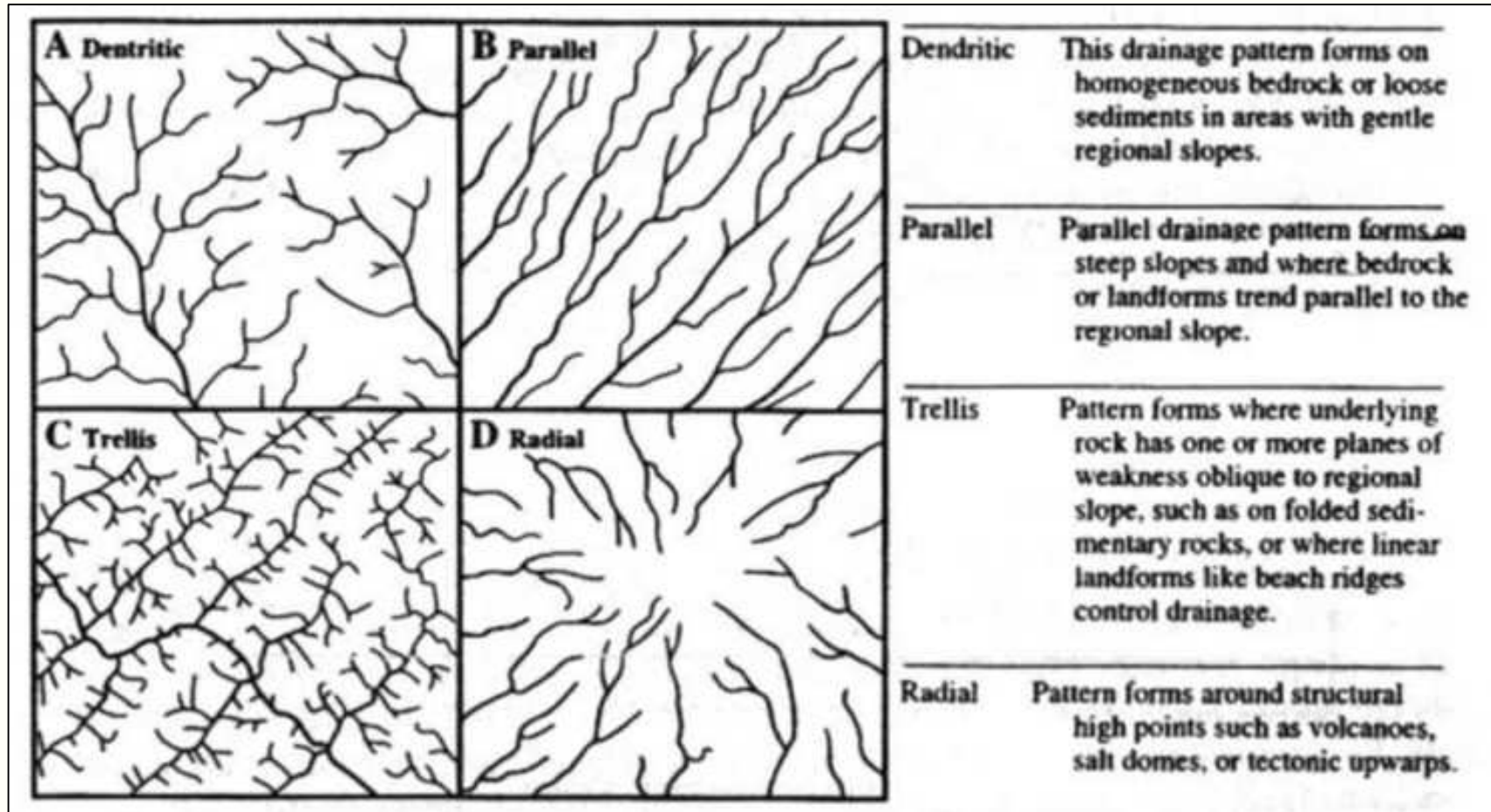
Svaki sliv obilježava njegova drenažna mreža koju čine glavni tok sliva i svi njegovi pritoci. S obzirom na prostorni raspored svih tokova, njihovu orijentaciju i duljinu, drenažna mreža može biti geometrijski vrlo raznolika, ovisno o veličini i nagibu sliva, vrsti stijena na površini, promijeni nivoa vodnog lica, tektonskim pomacima i dr.

Najčešći tipovi drenažnih mreža prema Howardu (1967) su:

- dendritični tip
- paralelni tip
- rešetkasti tip te
- radijalni tip drenažne mreže.



PARAMETAR ASIMETRIJE SLIVA



Najčešći tipovi drenažnih mreža prema Howardu (1967): A- dendritični, B- paralelni, C- rešetkasti i D- radijalni.



PARAMETAR ASIMETRIJE SLIVA

U slučaju kad je sliv pod utjecajem tektonskih pokreta koji dovode do izraženijeg nagiba sliva okomito na uzdužnu os (ili okomito na glavni tok), drenažna mreža sliva iz simetrične prelazi u asimetričnu. Parametar kojim se kvantificira simetričnost ili asimetričnost sliva naziva se **faktor asimetrije sliva** (engl. asymmetry factor), a dobiva se prema izrazu:

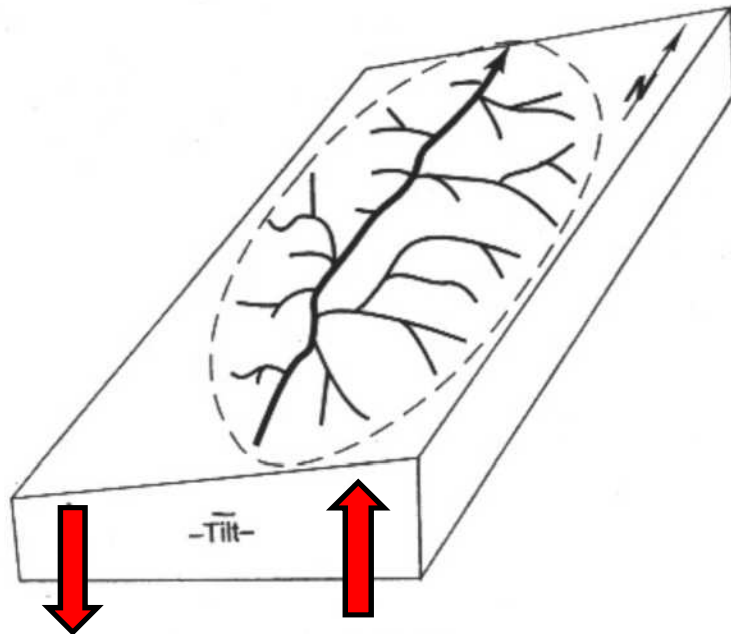
$$AF = 100 \left(\frac{A_r}{A_t} \right)$$

pri čemu je A_r - površina sliva s desne strane od glavnog toka (gledajući nizvodno po glavnom toku), a A_t - je ukupna površina sliva.

Za vrijednost $AF = 50$ sliv je **simetričan** i nije pod utjecajem tektonskih pokreta koji bi prouzročili asimetriju drenažne mreže.



PARAMETAR ASIMETRIJE SLIVA



$$AF = 100 \left(\frac{A_r}{A_t} \right)$$
$$= 100 \left(\frac{3.2 \text{ km}^2}{4.9 \text{ km}^2} \right) = 65$$

AF > 50 implies tilt down to the left of basin (looking downstream)

Za vrijednosti $AF > 50$ sliv je **asimetričan**, moguće kao posljedica tektonskih pomaka koji dovode do nagiba sliva na lijevu stranu u odnosu na glavni tok kad ga gledamo nizvodno.

Obrnuto, za vrijednosti $AF < 50$ sliv je **asimetričan**, moguće kao posljedica tektonskih pomaka koji dovode do nagiba sliva na desnu stranu u odnosu na glavni tok kad ga gledamo nizvodno.

Međutim, potrebno je naglasiti da pojava asimetrične drenažne mreže u slivu nije nužno posljedica tektonskih pomaka, jer može nastati i zbog drugih čimbenika koji utječu za razvoj drenažne mreže (npr. zbog nagiba granica među litološki različitim stijenama i dr.).



INDEKS DULJINE I NAGIBA GLAVNOG TOKA

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L$$

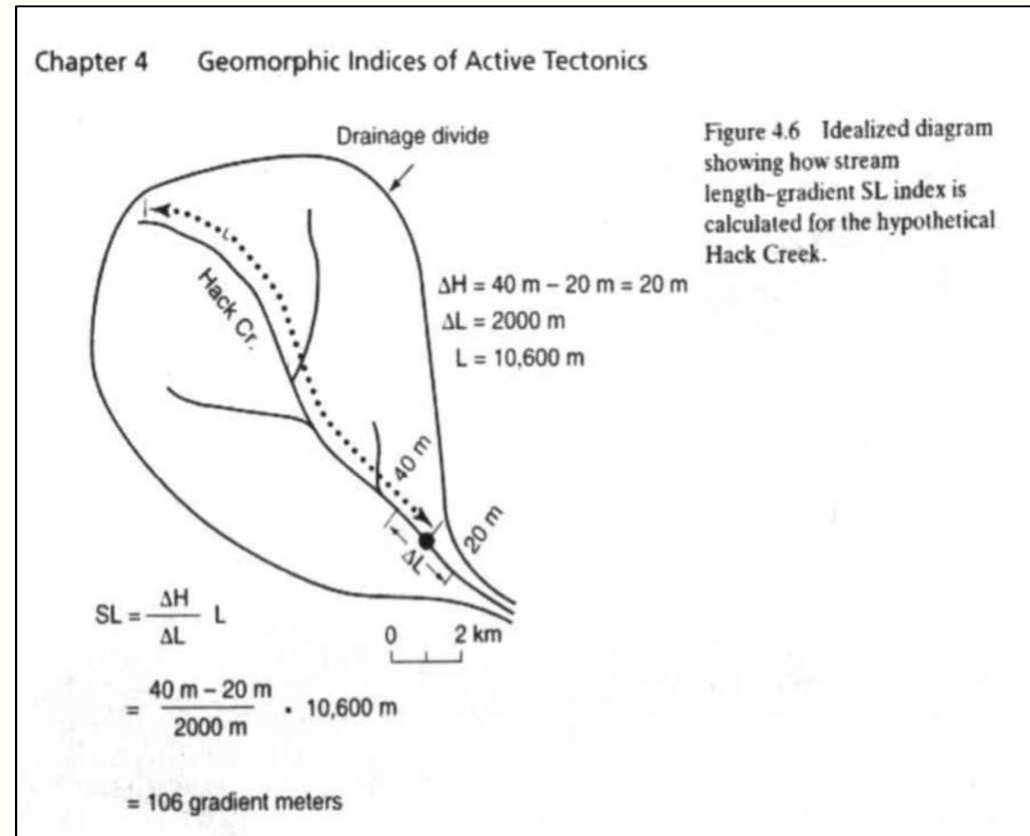
SL - (engl. stream length-gradient index)

$\Delta H / \Delta L$ - gradijent promjene nagiba između dva zavoja toka,

ΔH - promjena nadmorske visine između dva zavoja toka,

ΔL - duljina toka na dionici između dva zavoja toka

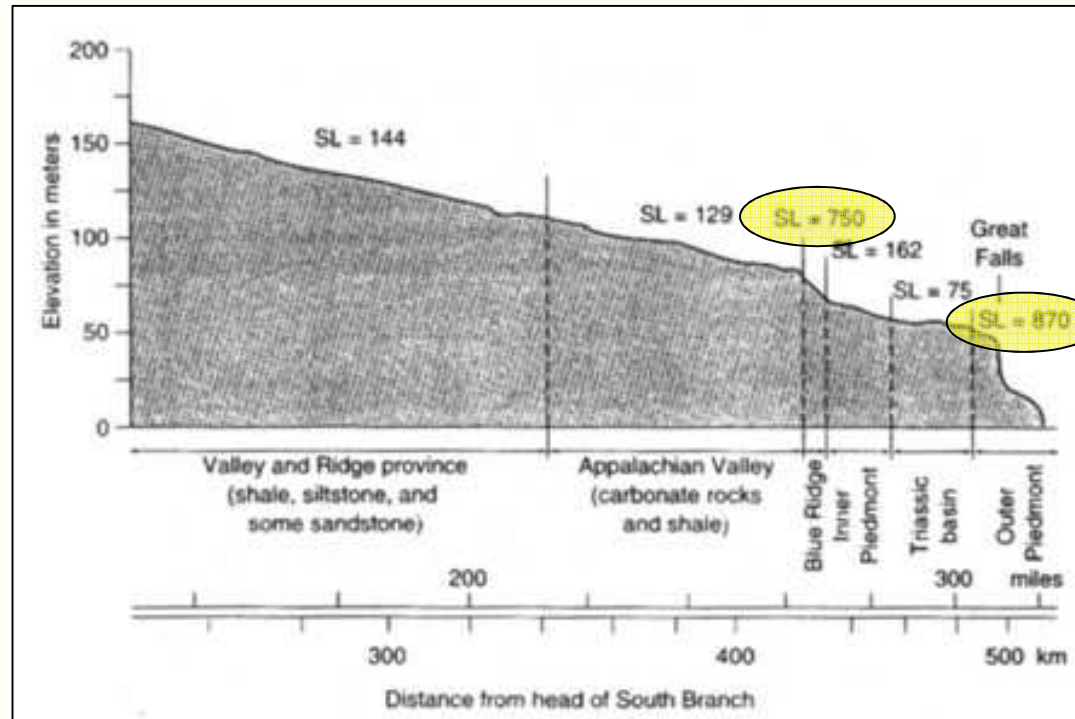
L - ukupna duljina toka od središnje točke (midpoint) između dva zavoja do najviše točke kanala



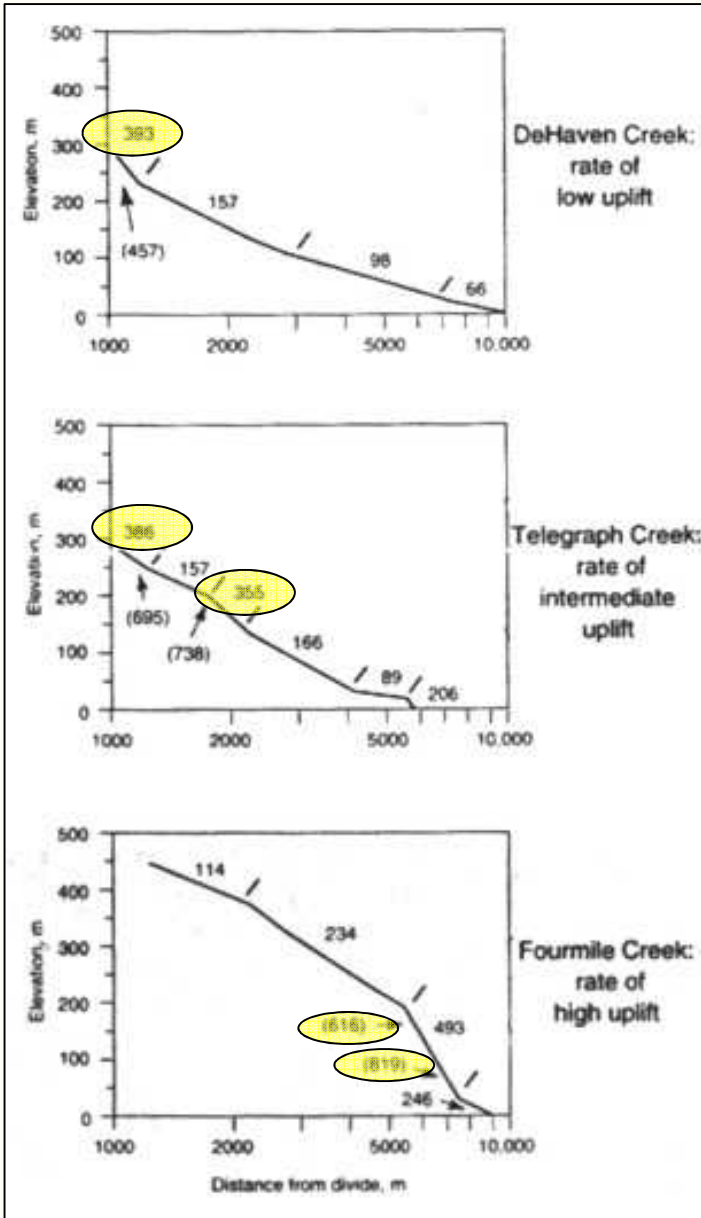
SL indeks ovisi o promjeni nagiba kanala glavnog toka. Na taj način ovaj indeks omogućuje prepoznavanje moguće tektonske aktivnosti u području sliva, ali može biti i posljedica trošenja stijena te različitih reljefnih oblika koji time nastaju.



INDEKS DULJINE I NAGIBA GLAVNOG TOKA

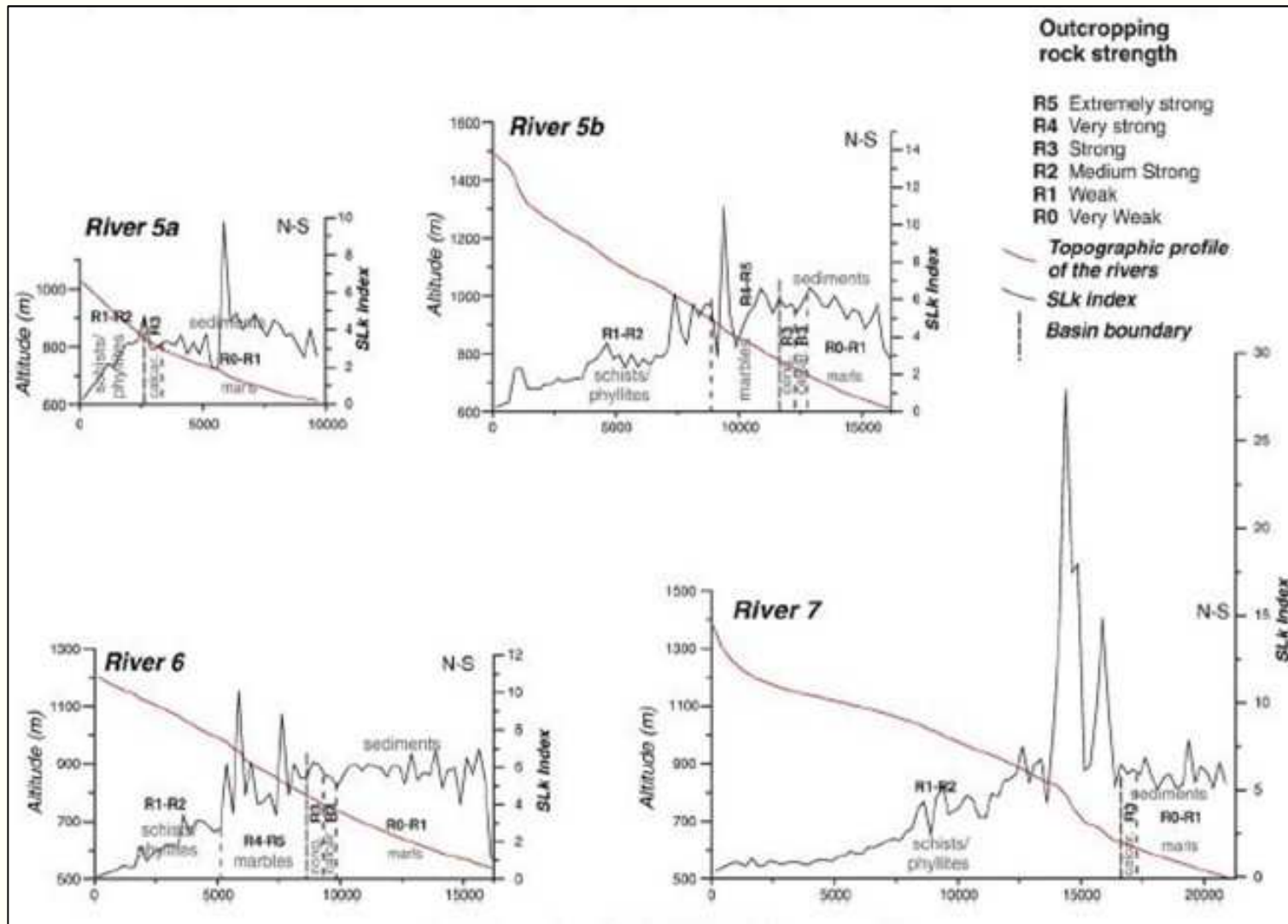


Primjer: Raspon vrijednosti SL indeksa na rijeci Potomac (SAD) (prema Hack, 1973). SL indeks se povećava gdje rijeka prelazi preko otpornijih stijena, dok je značajno niži u dolinama gdje je podloga izgrađena od "mekših" stijena (šejlova, lapora, slabo vezanih klastita i sl.). Prema tome izrazite promijene vrijednosti SL indeksa duž glavnog toka u slivu mogu biti posljedica promjene u litološkom sastavu podloge, ali isto tako mogu biti i posljedica **tektonske aktivnosti**.



Primjer: Vrijednosti SL indeksa u području pod utjecajem različitih vrijednosti tektonskog izdizanja (prema Merritts & Vincent, 1989).

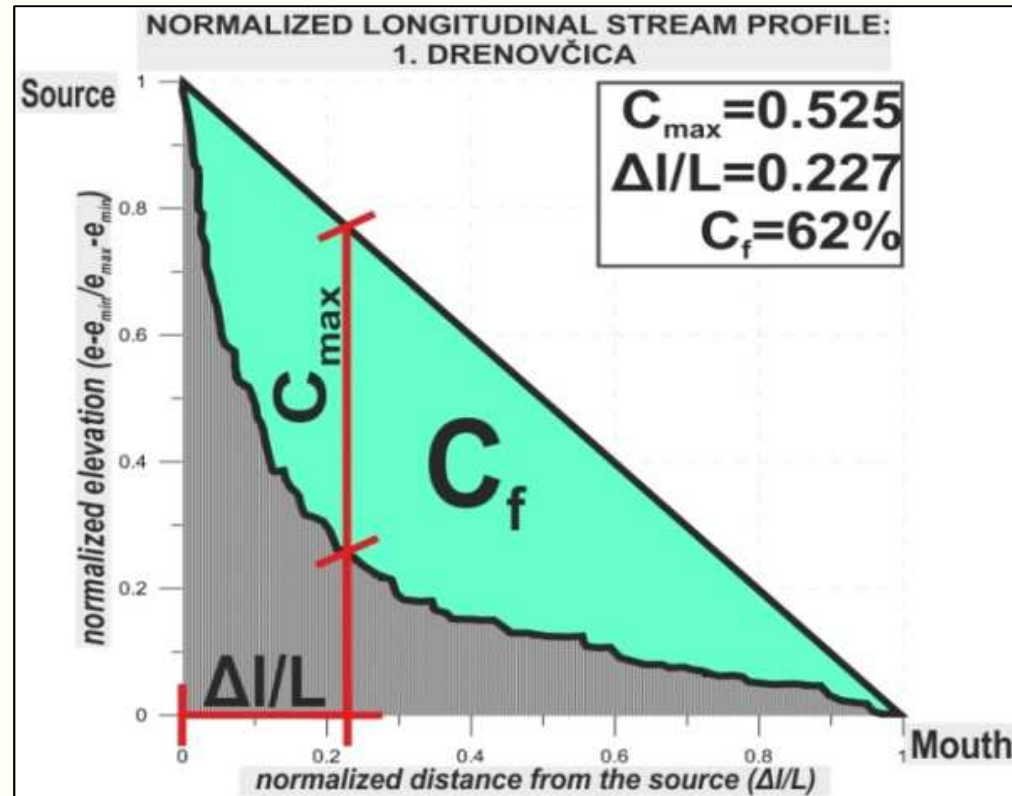




Primjer: Vrijednosti SL indeksa projicirane na topografski profil glavnih tokova i litološke granice (iz Pedrera et al., 2009).



NORMALIZIRANI UZDUŽNI PROFIL TOKA



H i Gr - apsolutni i relativni gradijent toka; C_{\max} - maksimalna konkavnost;
 $\Delta l / L$ - veličina udaljenosti koeficijenta konkavnosti od izvorišta;
(C_f) (%) - indeks konkavnosti



SINUSOIDALNOST GORSKOG ČELA

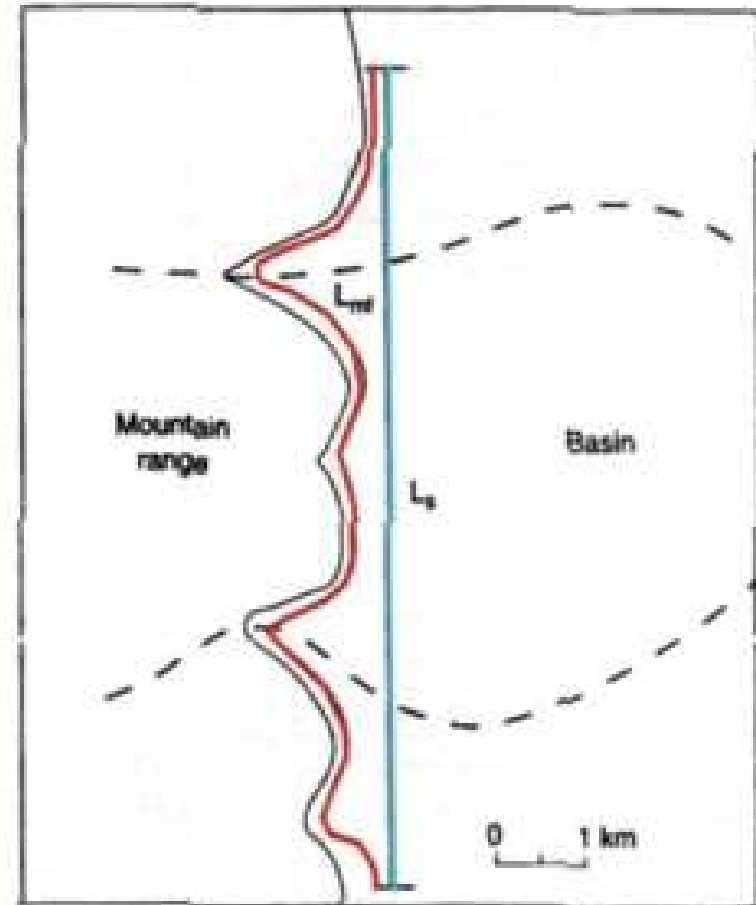
Ovaj morfometrijski parametar temelji se na pretpostavci da će mlada gorska čela, koja su još uvijek pod utjecajem aktivnih tektonskih pomaka, biti pravocrtne geometrije, za razliku od starih i tektonski neaktivnih čela koja će pod utjecajem erozije postati sve više zakrivljena. Parametar se dobiva prema izrazu:

$$S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s}$$

pri čemu je **S_{mf}** - sinusoidalnost gorskog čela,

L_{mf} - duljina gorskog čela mjerena po izohipsi u podnožju gorskog čela između dvije referentne točke ,

L_s - duljina gorskog čela mjerena duž pravca između referentnih točaka.



Mountain front sinuosity

$$= S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s} = \frac{10.5 \text{ km}}{8.5 \text{ km}} = 1.2$$



SINUSOIDALNOST GORSKOG ČELA

S obzirom na raspon vrijednosti S_{mf} parametra najčešće vrijedi da:

- mlada gorska čela koja su moguće još uvijek pod utjecajem aktivne tektonike u pravilu pokazuju niske vrijednosti S_{mf} u rasponu (1.0-1.6),
- stara gorska čela koja više nisu pod utjecajem aktivne tektonike u pravilu imaju vrijednosti S_{mf} u rasponu 1.8-5.0

Front	Segment	S_{mf}	Mean S_{mf}
West	Wa	1.39	1.16
	Wb	1.01	
	Wc	1.01	
	Wd	1.03	
	We	1.28	
	Wf	1.29	
South	Sa	1.09	1.24
	Sb	1.12	
	Sc	1.15	
	Sd	1.21	
	Se	1.35	
	Sf	1.43	
	Sg	1.34	
	Na	2.46	
North	Nb	3.49	
	Nc	1.31	
	Nd	1.23	

Vrijednosti S_{mf} parametra za pojedine segmente gorskog čela u području Sierra Nevada u Betijskim koridlijerama u Španjolskoj (iz Perez-Pena et al., 2010). Segmenti gorskog čela s prosječnim vrijednostima S_{mf} parametra između 1.16 - 1.24 interpretirani su kao tektonski aktivni.



OMJER ŠIRINE I VISINE DOLINA

Ovaj morfometrijski parametar omogućava kvantitativnu procjenu u izdvajanju širokih i plitkih riječnih dolina (koje se općenito smatraju karakterističnim za zreli i kasni stadij u razvoju reljefa) u odnosu na uske i duboke riječne doline koje su moguće pod utjecajem aktivne tektonike i izdizanja. Parametar se dobiva prema izrazu:

$$V_f = \frac{2V_{fw}}{[(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]}$$

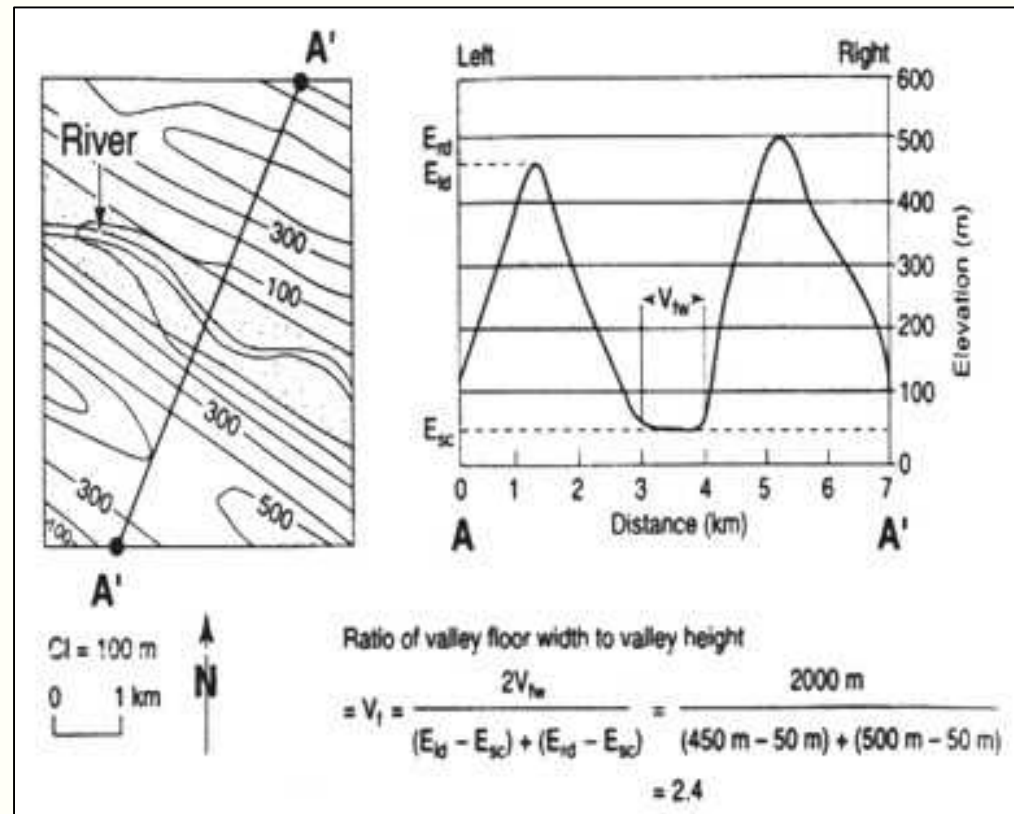
pri čemu je

V_f - omjer širine i visine doline toka,

V_{fw} - širina doline toka,

E_{ld} i E_{rd} - nadmorska visina razvodnice na lijevoj i desnoj strani doline te

E_{sc} - nadmorska visina doline toka.



UTJECAJ TEKONSKIH POMAKA NA PROMJENE U DRENAŽNOJ MREŽI I POVRŠINSKIM TOKOVIMA

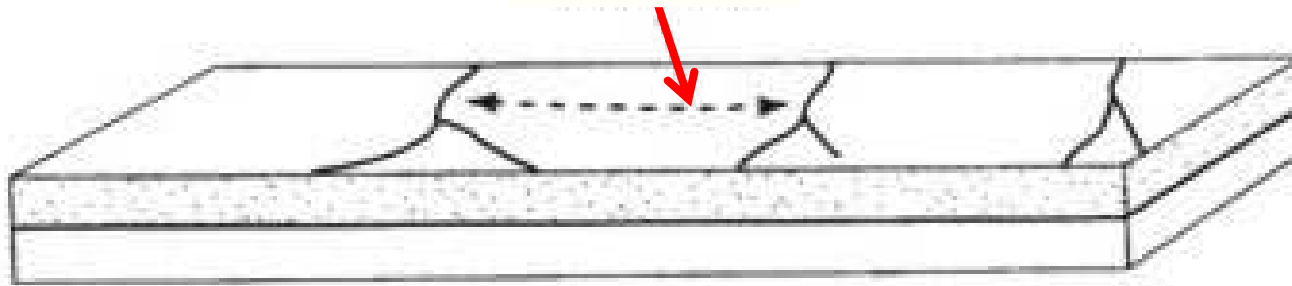
Tektonski pokreti često se odražavaju na površini u vidu izrazitih i naglih promjena u geometriji drenažne mreže ili njenih pojedinih tokova (OSNOVNE TIPOVE DRENAŽNE MREŽE VIDI NA SLAJDU 14). U slučaju kad je površinski tok pod izravnim utjecajem tektonskih pomaka možemo očekivati sljedeće:

- A) Tok će i dalje otjecati u istom smjeru, no lokalno će biti povijen zbog lokalne deformacije na površini;
- B) Tok će imati dovoljno energije da svlada tektonsko izdizanje putem usijecanja u podlogu i neće nimalo promijeniti tok; Takvi tokovi nazivaju se **antecedentni tokovi**.
- C) Tok neće imati dovoljno energije da svlada tektonsko izdizanje pa će promijeniti smjer, napustit će staro i izgradit će novo korito.

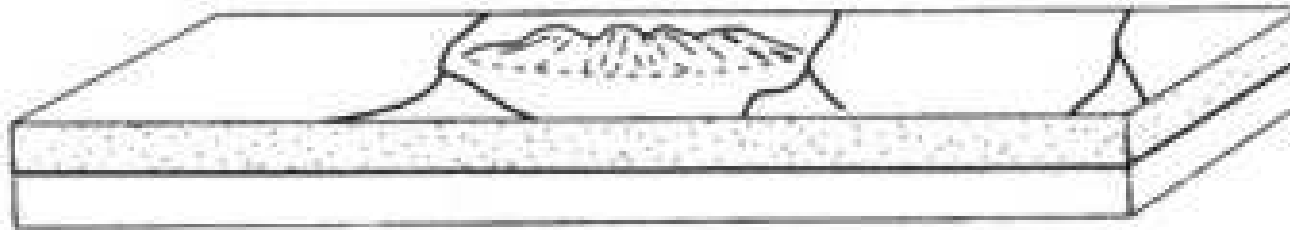


Model razvoja reljefa i drenažne mreže u području aktivnog tektonskog izdizanja (prema Burbank et al., 1999).

trag osne
plohe buduće
antiklinale

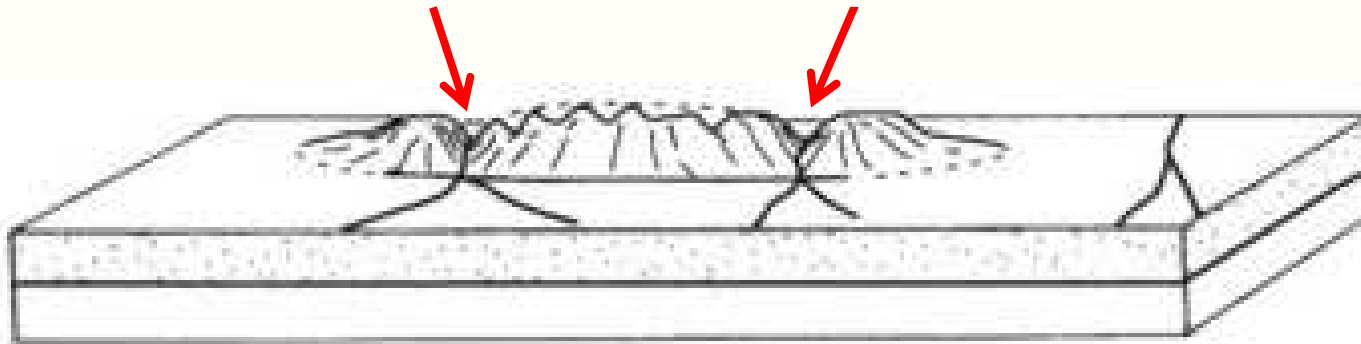


odraz antiklinale
na površini



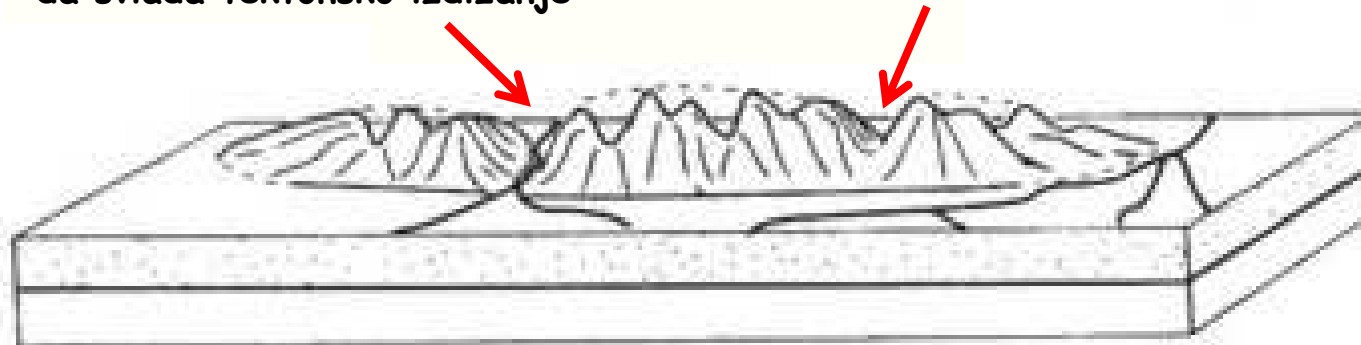
riječni tok s dovoljno energije
da svlada tektonsko izdizanje

riječni tok s dovoljno energije
da svlada tektonsko izdizanje

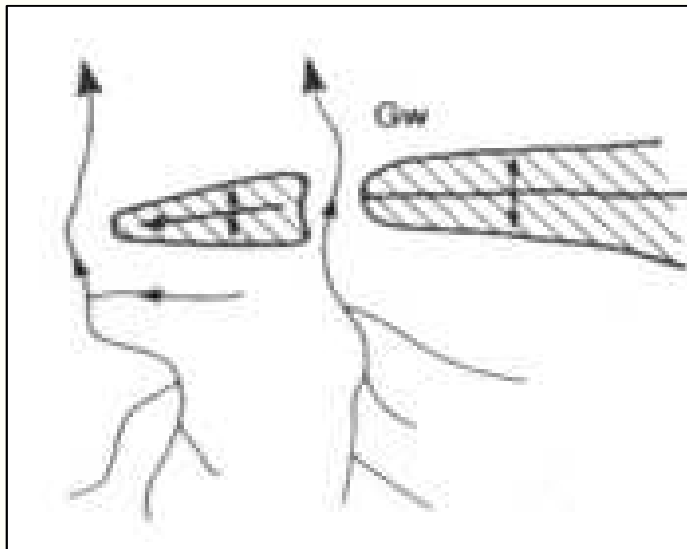


riječni tok s dovoljno energije
da svlada tektonsko izdizanje

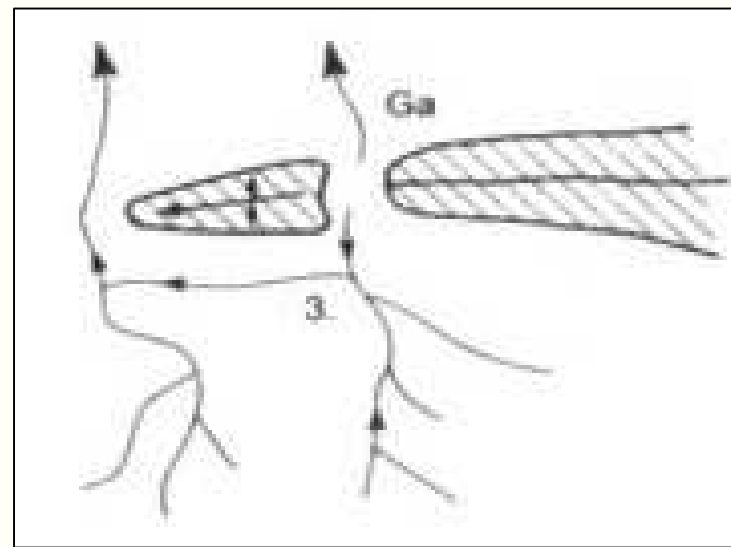
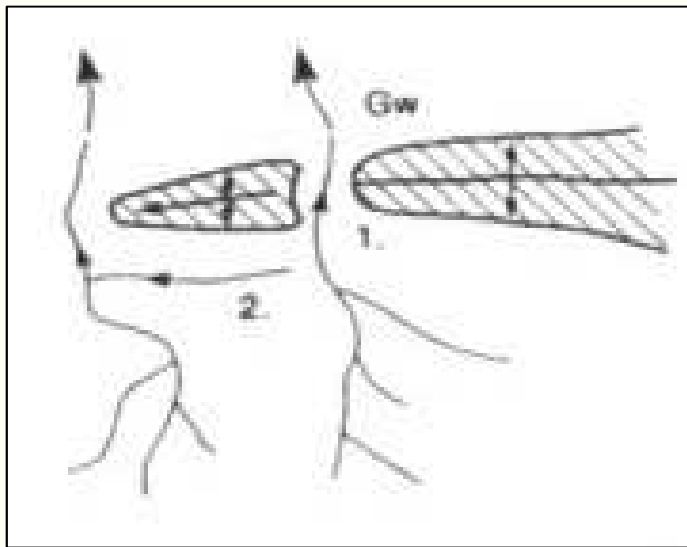
napušteno riječno korito



Model razvoja reljefa i drenažne mreže u području aktivnog tektonskog izdizanja (prema Keller & Pinter, 2002).



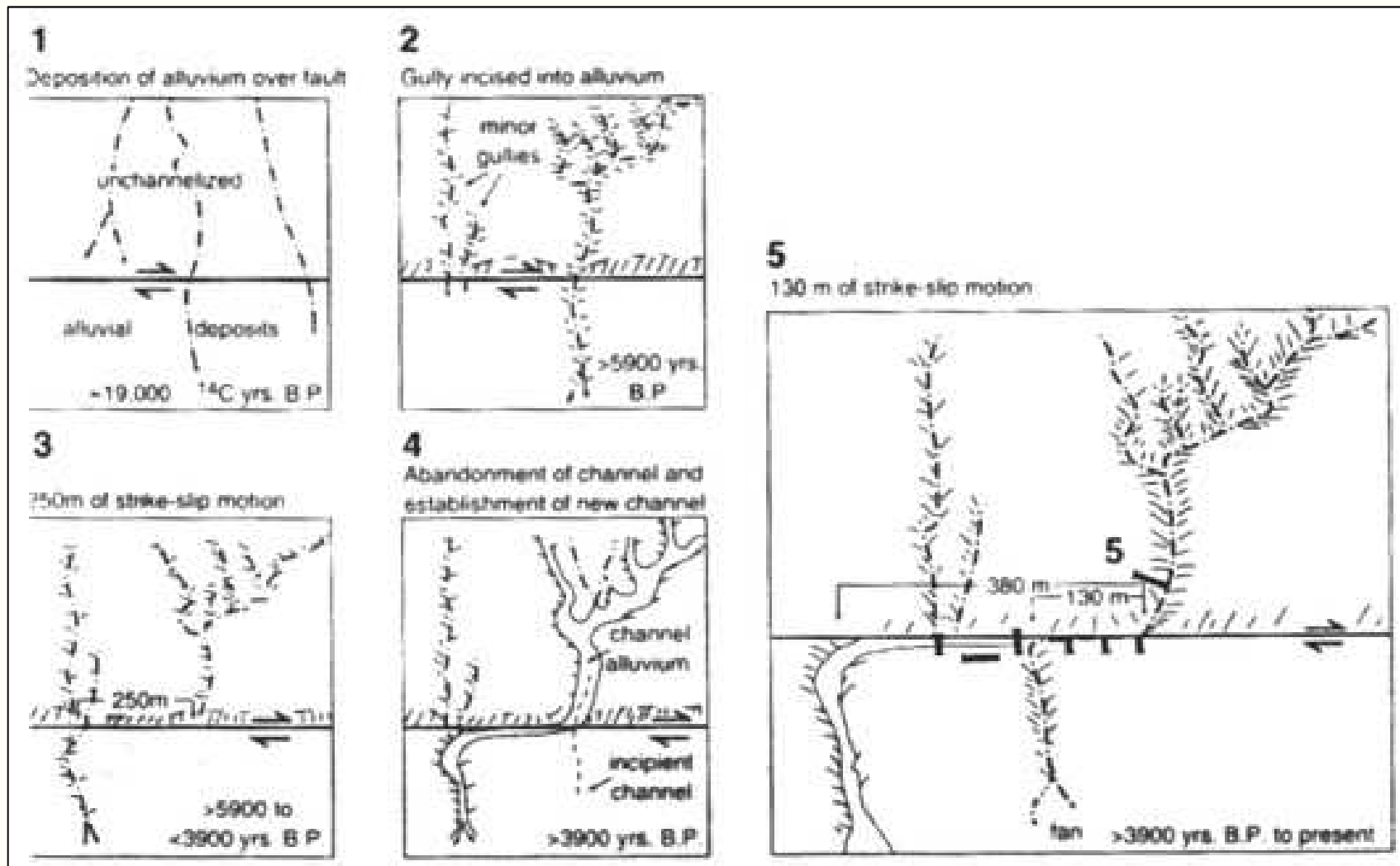
antiklinala u izdizanju



Pomak toka potoka Wallace uz San Andreas rasjed (iz Wallace, 1990)

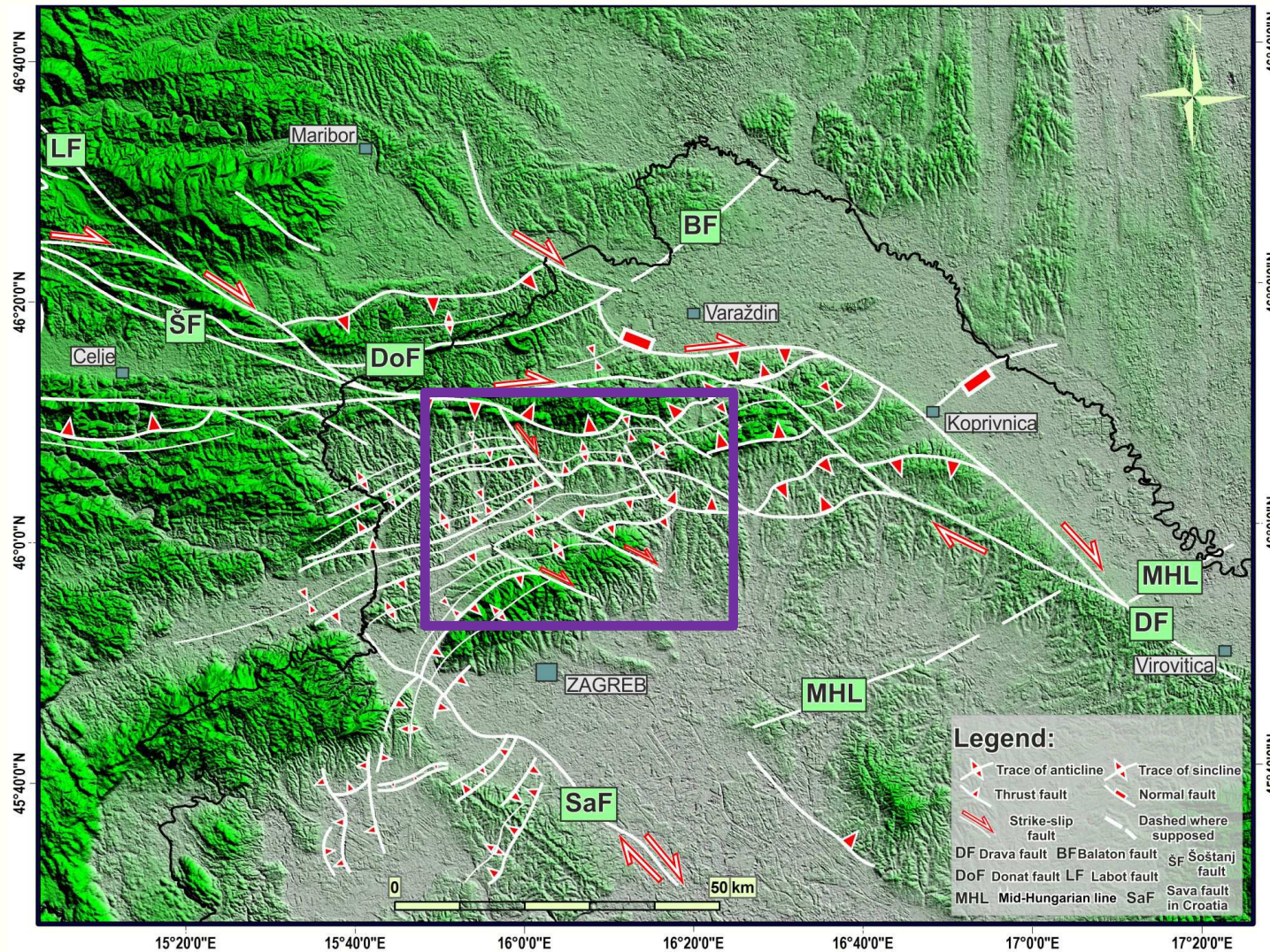


Razvoj reljefa, drenažne mreže i pomaka toka potoka Wallace uz San Andreas rasjed (prema Sieh, 1981)

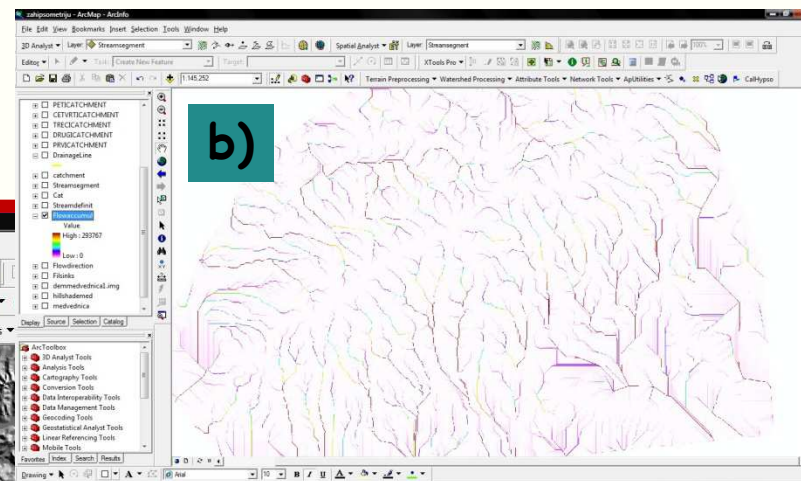
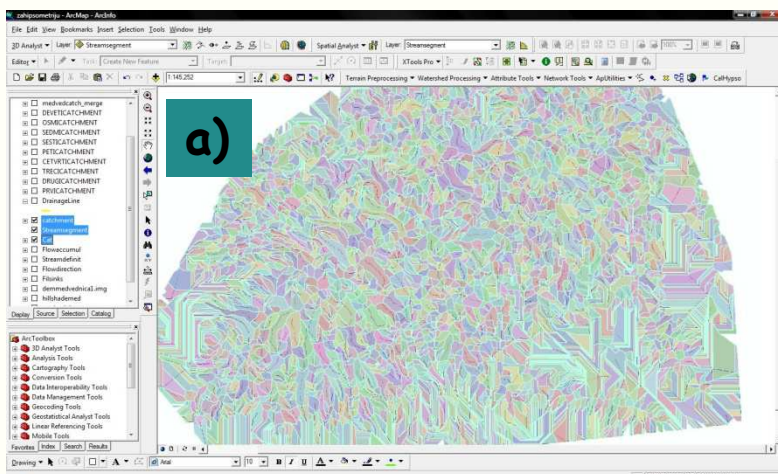


Primjer geomorfološke analize Medvednice

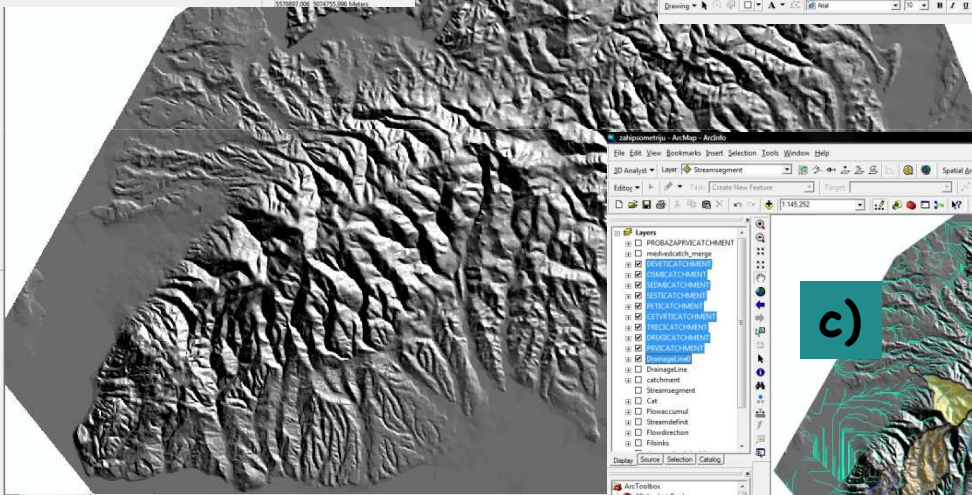
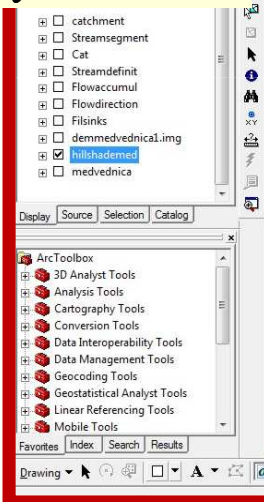
Regionalni digitalni model reljefa s naznačenim glavnim rasjedima i područjem istraživanja



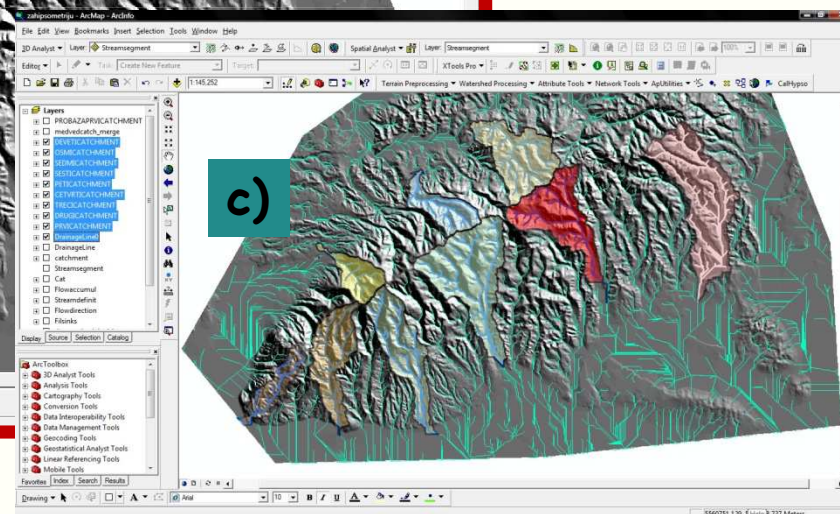
Primjer geomorfološke analize Medvednice



Svi izdvojeni mikroslivovi



Generirana drenažna mreža

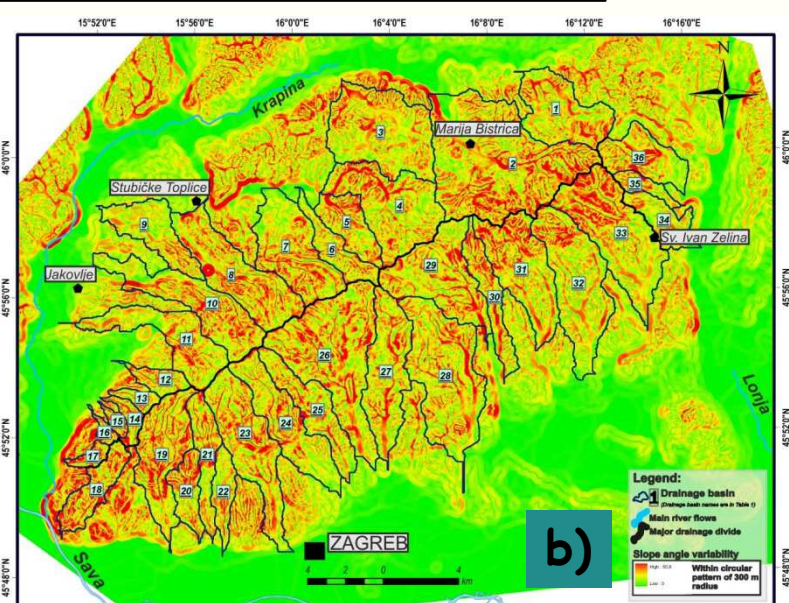
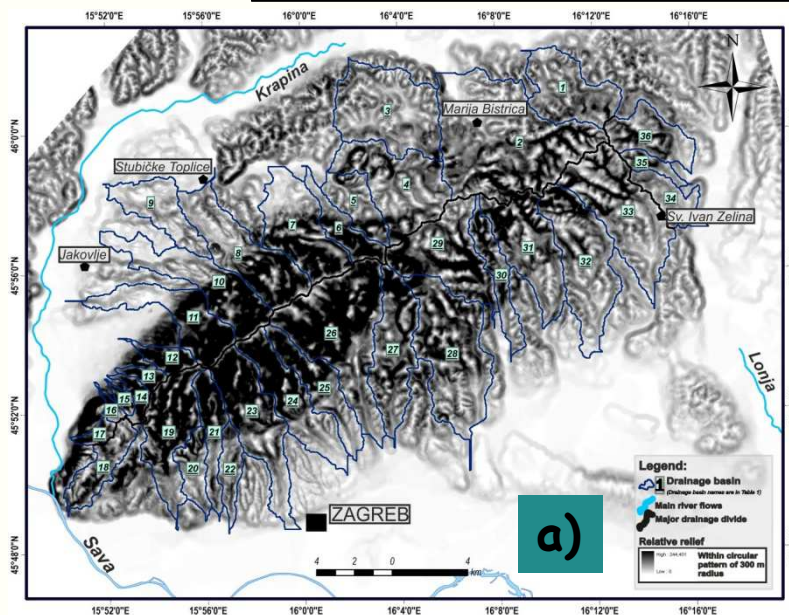


Digitalni model reljefa Medvednice s uključenom "hillshade" opcijom

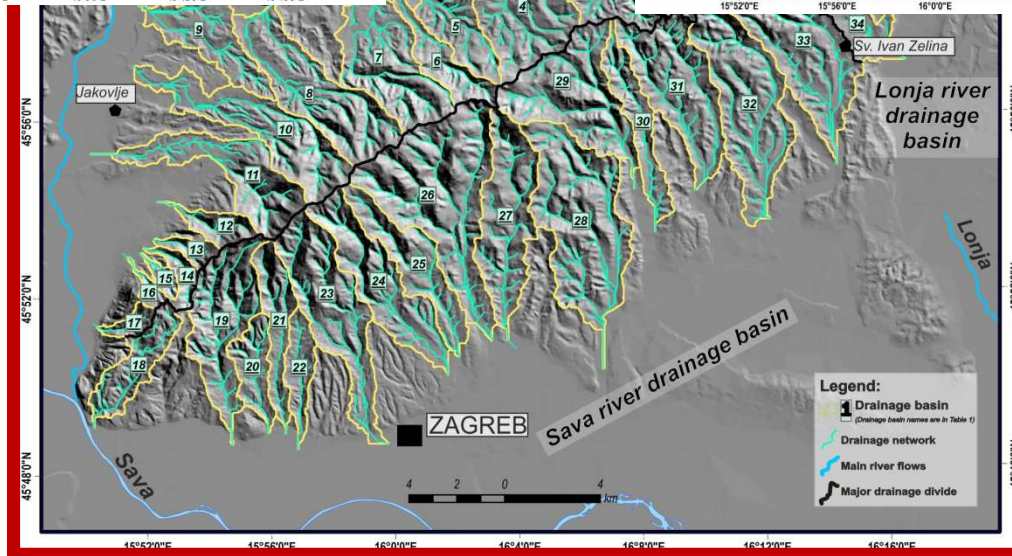
Na temelju topografske karte; izdvojeni analizirani slivovi na području Medvednice



Primjer geomorfološke analize Medvednice



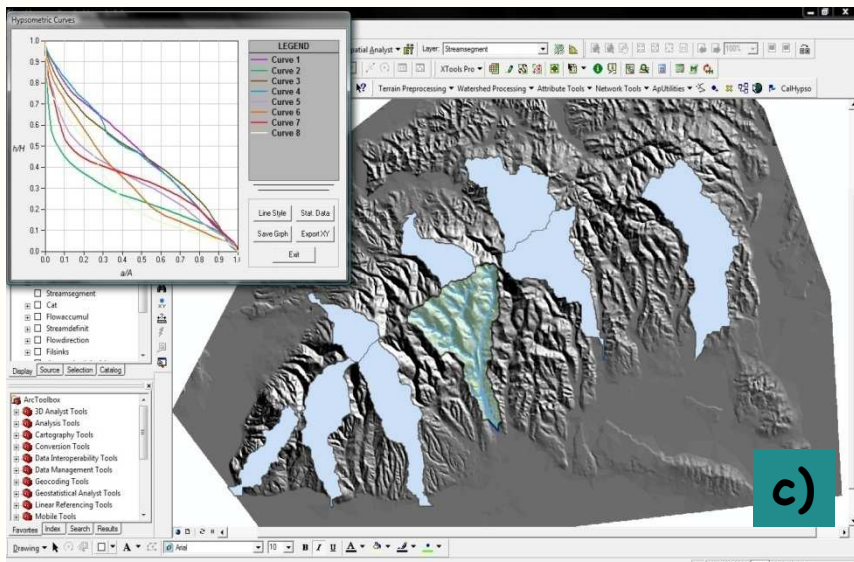
Relativni reljef Medvednice



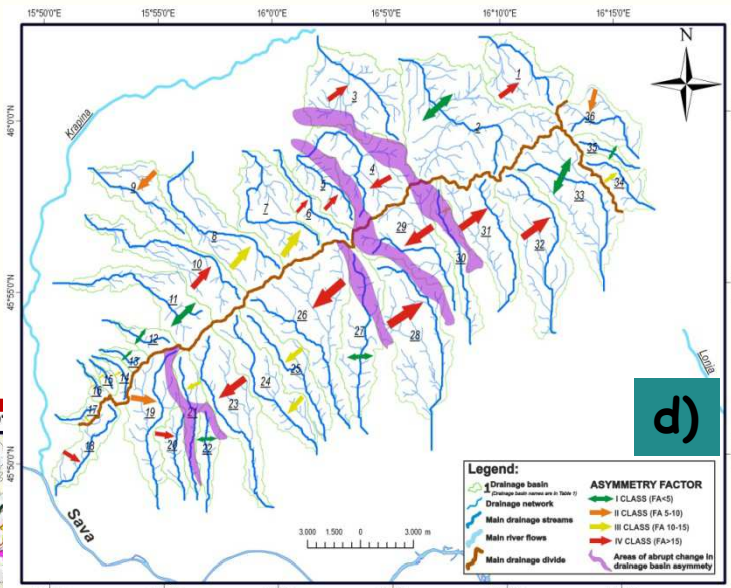
Varijabilnost nagiba padina Medvednice

Izdvojeni slivovi i pripadajuća drenažna mreža

Primjer geomorfološke analize Medvednice



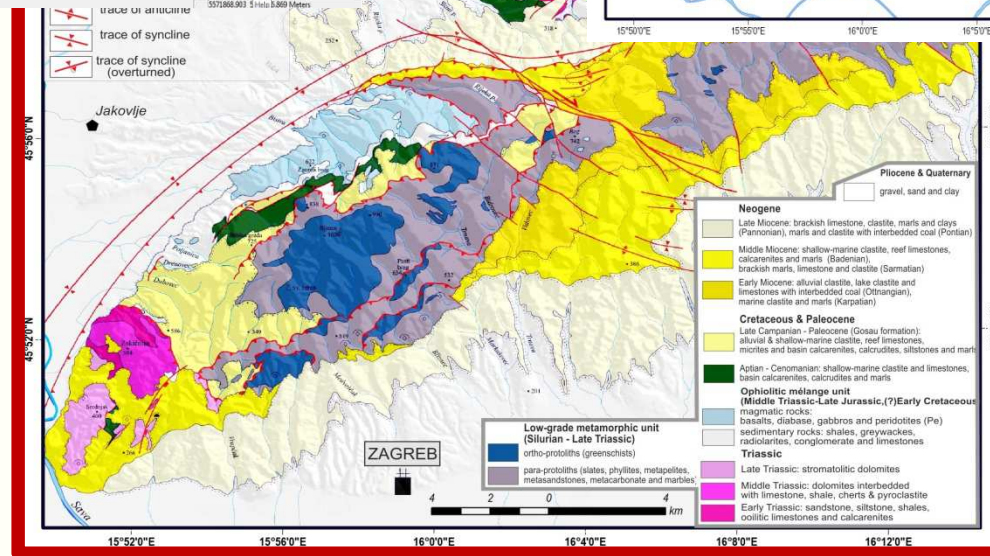
c)



d)

Hipsometrijske krivulje i hipsometrijski integral

Faktor asimetrije



Geološka građa Medvednice (Tomljenović, 2002)



Sveučilište u Zagrebu
**RUDARSKO
 GEOLOŠKO
 NAFTNI FAKULTET**

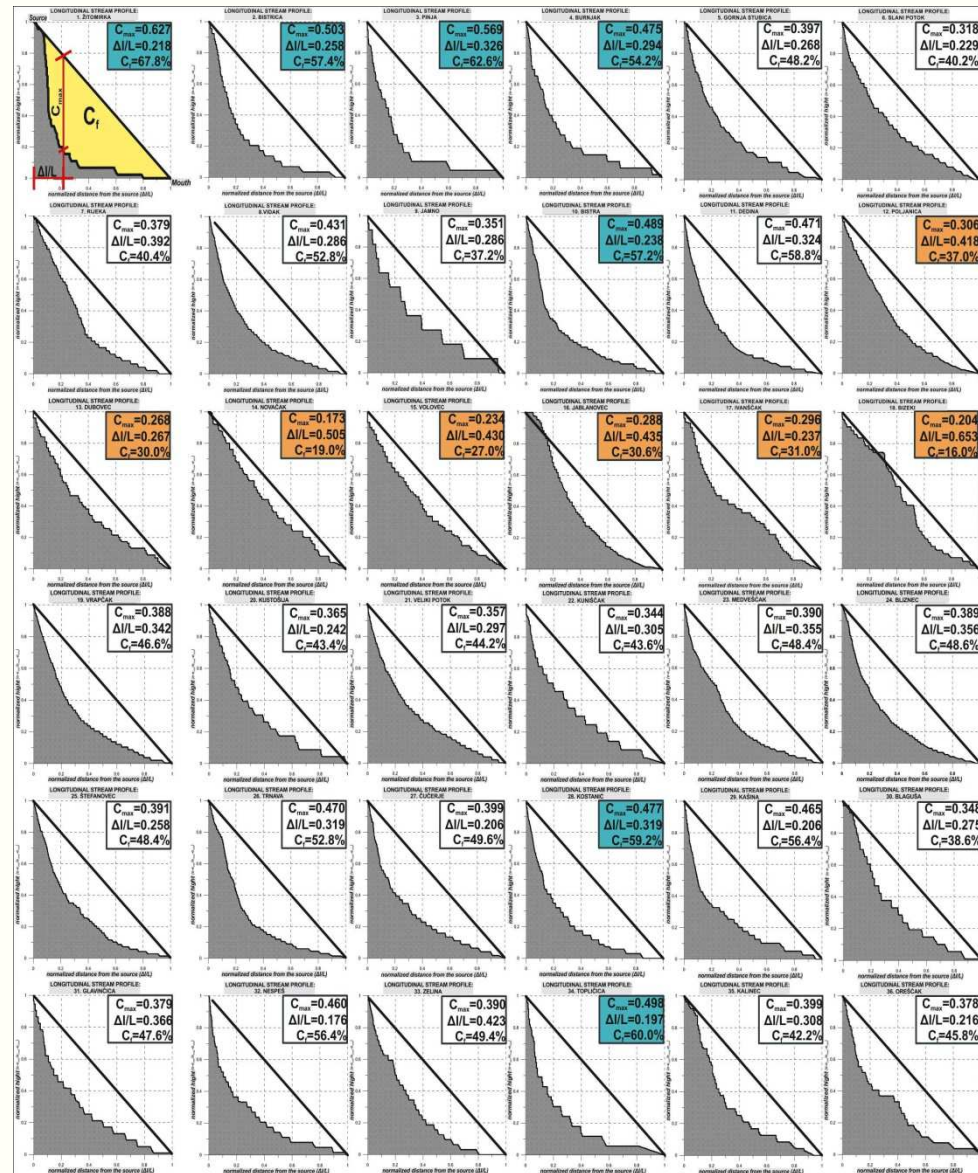
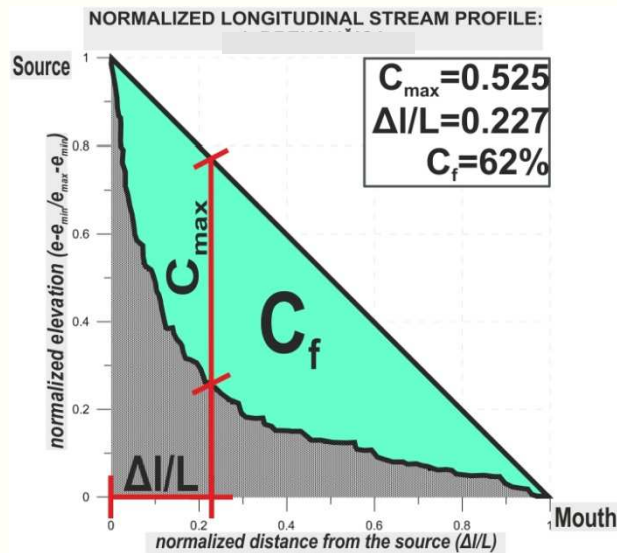
Bruno Tomljenović & Bojan Matoš

Strukturna geomorfologija

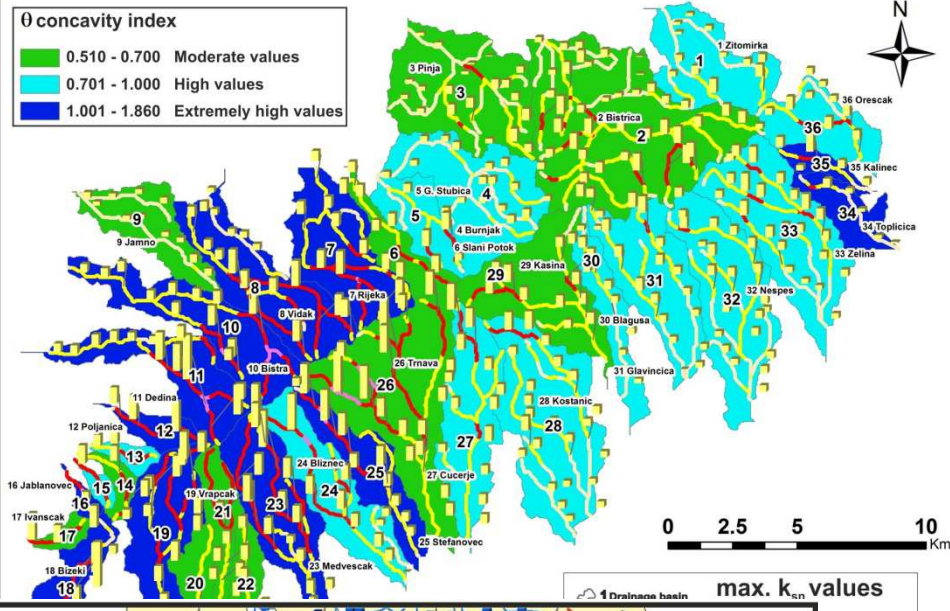
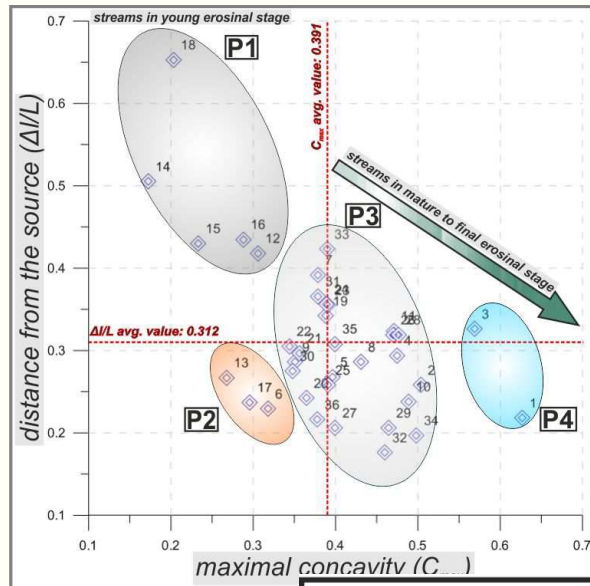
Primjer geomorfološke analize Medvednice

Analiza longitudinalnih profila glavnih tokova izdvojenih slivova:

• H , Gr , C_{max} , $\Delta l/L$, C_f



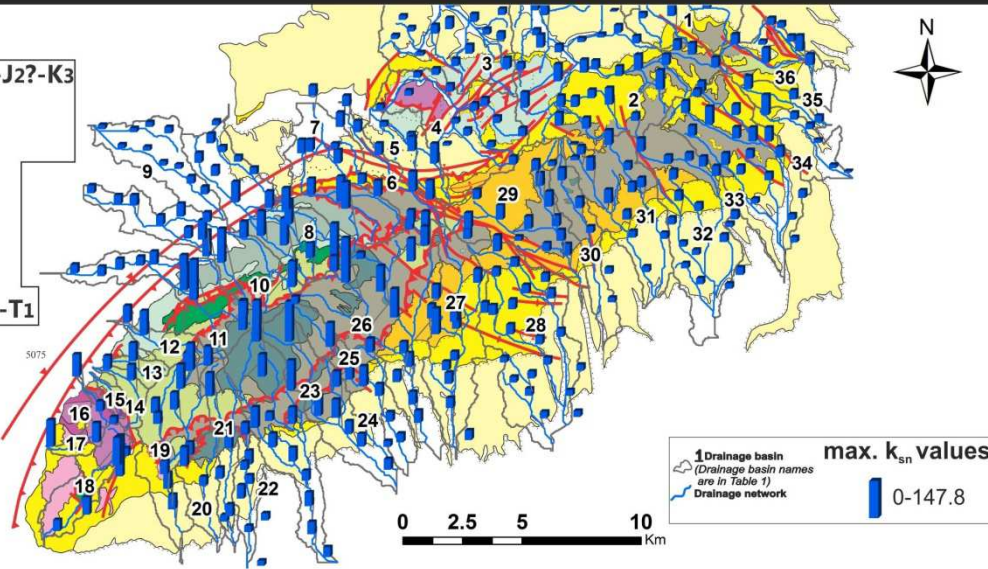
Primjer geomorfološke analize Medvednice



Prikaz maksimalne konkavnosti (Δ/L) normaliziranog glavnog toka te vrijednost parametra konkavnosti (Z_{max})

Legend:

PI, Q	OC, T3-J2?-K3
Ng	m
M3	s
M2	T
M1	T3
K, Pc	T2
Cp3-Pc	T1
Ap-Ce	LMC, S-T1
NB	o
TB	p
SSF	RVF
RF	NF
LF	A
	S
	OS



Indikator konkavnosti

Indeks strmine



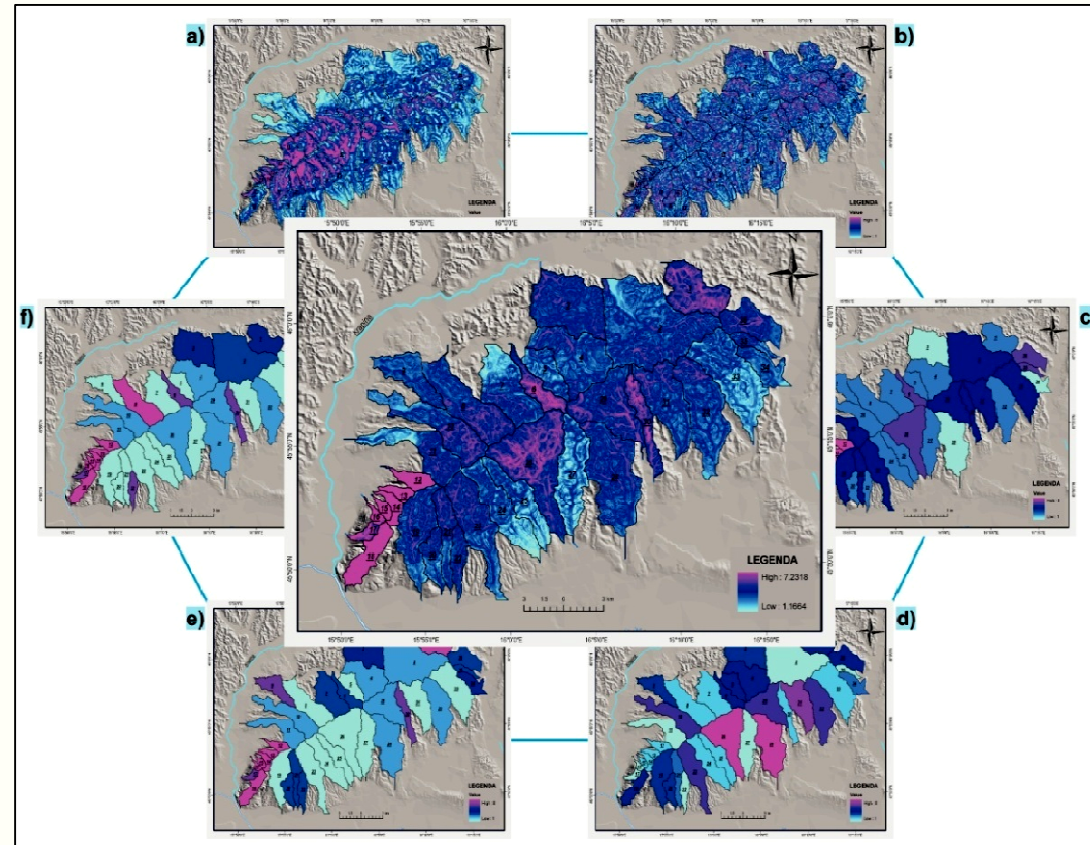
Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO
GEOLOŠKO
NAFTNI FAKULTET

Bruno Tomljenović & Bojan Matoš

Strukturalna geomorfologija

Primjer geomorfološke analize Medvednice

Spatial Analyst Tools ➡ "Weighted overlay" ili težinsko preklapanje



Zbir korištenih rastera [a) raster distribucije relativnog reljefa, b) raster distribucije varijabilnog nagiba terena, c) raster distribucije HI izdvojenih slivova, d) raster distribucije faktora asimetrije izdvojenih slivova, e) raster distribucije indeksa konkavnosti izdvojenih slivova, f) raster distribucije veličine maksimalne konkavnosti izdvojenih slivova. U središtu se nalazi težinskim preklapanjem dobiveni sumarni raster „moguće tektonske aktivnosti“ na medvedničkom području. Crvena područja su tektonski aktivnija dok su plava područja tektonski manje aktivna.



IZVORI SLIKA, TABLICA, CRTEŽA i LITERATURNI NAVODI:

- Keller, A. E. & Pinter, N. (2002): *Active Tectonics; Earthquakes, Uplift and Landscape; Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 362 str.*
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2001): Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology, May, p. 414 - 418 str.*
- Pedrera A., Pérez-Peña J.V., Galindo - Zaldívar J., Azañón J.M., Azor A. (2009): *Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain), Geomorphology 105 (2009), 218-231.*
- Pérez-Peña J.V., Azañón J.M., Azor A. (2009): *CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain, Computers & Geosciences 35 (2009), 1214 - 1223.*
- Pérez-Peña J.V., Azañón J.M., Azor A. (2010): *Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis.- Geomorphology, 119, 74-87.*
- Ruszkiczay-Rüdiger Z., Fodor L., Horváth E., Telbisz T. (2009): *Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary, Geomorphology 104 (2009), 203 - 217.*

