

## R A Z P R A V E

UDC  
UDK 911.2:551.44:54:551.3.053(21) = 863

## POGLAVITNI DEJAVNIKI KEMIČNE EROZIJE NA KRASU PO SVETU\*

Ivan G a m s\*\*

Kvantitativno raziskovanje kemične erozije na krasu\*\*\* je po drugi svetovni vojni morda najbolj poživil spor o tem, ali je ta proces najbolj intenziven v toplem vlažnem podnebju (prof. H. Lehmann) ali v hladnih klimah (J. Corbel). Obe naziranji sta se sklicevali na temperaturo, ki naj bi v toplem podnebju povečala biološko aktivnost oziroma dovoljevala v hladnih podnebnih večje uravnovešene koncentracije CO<sub>2</sub> v vodi s CO<sub>2</sub> v zraku. Četrt stoletja po tej debati vloga temperature še vedno ni povsem razčiščena. Očitna je zveza pri vodnih temperaturah na krasu. Arktične vode imajo nedvomno manjšo mineralizacijo (Bleahu, 1974, 116-117). V zmernem pasu je dokazano, da imajo hladnejši izviri nižje celokupne trdote (za Severne Apneniške Alpe Maurin-Zötl, 1964.) za Slovenijo Gams 1967, na krasu od Mehike do Kanade Harmon et al., 1975). Pozitivni učinek temperature pojasnjujejo z večjo proizvodnjo CO<sub>2</sub> v prsti (Harmon et al., 1975, Sweeting, 1976) in to so dokazale tudi meritve talnih temperatur in koncentracije CO<sub>2</sub> v tleh v Nemčiji (Gerstenhauer, 1972). Voda, ki prenikne skozi sloj permafrosta, ima znatno večjo trdoto kot hladna nad njim (Michalszyk-Wojciechowski, v tisku, iz Mongolije). Eraso (1975) meni, da je korozija zaradi organskih kislin premočrtno odvisna od produkcije CO<sub>2</sub>. Pozitivno koleracijo so ugotavljali tudi na različnih ekspozicijah v vrtači (Barany, 1975). Podobno zvezo med vodno temperaturo na kraških izviri in njihovo celokupno trdoto so ugotovili tudi za venezuelski kras (Gascoyne, 1978). Toda tamkaj imajo najhladnejši izviri mnogo manjšo trdoto kot na primer enako topli

\* To je povzetek javnega predavanja novembra 1979 v Slovenski akademiji znanosti in umetnosti v Ljubljani.

\*\* Dr., redni prof. univ., PZE za geografijo, Filozofska fakulteta, Aškerčeva 12, 61000 Ljubljana, YU.

\*\*\* Za kemično erozijo rabijo po svetu več terminov. Slovenski (in nemški) termin korozija pomeni kemični proces in geomorfološki dejavnik (ne povsem ustrezno tudi: korozijska intenzivnost). Francoski izraz «érosion karstique» bi mogel po svojem smislu besede združevati vse destruktivne procese na krasu. Najbolj se je uveljavil angleški izraz karst denudation, ki pa vzbuja pomisleke iz naslednjih razlogov: ne gre za »ogolichenje« (denudare-izvor besede denudation) in ta vrsta morfološkega procesa ni omejena samo na kras. Pri mednarodni speleološki zvezi delujeta dve komisiji: za korozijo in za kraško denudacijo.

istrski. Zveza med vodno temperaturo in trdoto ima očitno le lokalno vrednost. Pri nas pa je ugotovljena še druga zveza med vodno trdoto: kraško ozemlje z več padavin, predvsem pa z večjim vodnim odtokom, ima nižje celokupne trdote (Gams, 1967). V alpskem in visokem dinarskem krasu so nizke celokupne trdote tudi (ali predvsem) iz tega razloga in ne le zaradi hladne vode. V svetovnem okviru vloga vodne temperature ni jasna: po Pulini (1974) je koleracija med njo in celokupno trdoto rahlo pozitivna (+ 0,127), po Priesnitzu (1974) pa rahlo negativna (- 0,179).

Zadnji čas postaja vedno bolj jasno, da je poglavitni dejavnik kemične erozije karbonatov (apnenca in dolomita, ne pa sadre in anhidrita) količina padavin oziroma vodni odtok. To so ugotovili vsi, ki so primerjali podatke o kemični eroziji in specifičnem vodnem odtoku po svetu (Gams, 1967, Habič, 1968, Douglas, 1968, Balacz, 1971, Jennings, 1972, Kotarba, 1972, Priesnitz, 1974, Pulina, 1974, Nicod, 1976, Kunaver, 1978, Julian et al. 1978 Lang, 1978). Korelacijski koeficient za padavine in kemično erozijo je po Pulini (1974) 0,709 in po Priesnitzu 0,458. Toda po slednjem znaša korelacija med vodnim odtokom in kemično erozijo 0,743. Boljša korelacija z odtokom je razumljiva spričo znatne evapotranspiracije v toplem podnebjju. Korelacija med vodnim odtokom in trdoto vode se med letom menja. V jeseni pomeni večji pretok kapnice na stropu jame ali na izviru praviloma višjo trdoto (Gams, 1967, 1972, 1976), spomladi in deloma poleti pa obratno. Reke, ki imajo večji delež porečja v površinskem odtokanju, ob višji vodi bolj zmanjšajo celokupno trdoto (gl. Kolbezen, 1977). Odvisnost kemične korozije od vodnega pretoka je očitna zlasti pri aridnem krasu, ki ima zelo malo površinskih depresijskih kraških oblik. Vloga vodnega odtoka za kemično erozijo je tako odločilna, da bi delež korozije, ki je tako pogojen, lahko imenovali normalno kemično erozijo, dejavnike, ki to odvisnost spreminjajo, pa modifikatorje (Gams, 1980, v tisku). Slednji izvirajo:

1) Razlike v koncentraciji  $\text{CO}_2$  v tleh. V polpretekli dobi so hoteli razlike v kemični eroziji na krasu raztolmačiti z meritvami parcialnega tlaka  $\text{CO}_2$  v talnem zraku (Gerstenhauer, 1972 in drugi). Zdaj vemo, da ima vsak talni tip svoj letni potek koncentracije  $\text{CO}_2$ . Slednji pa ni samo funkcija proizvodnje  $\text{CO}_2$  ampak tudi izmenjave s prostim ozračjem, kar je v veliki meri odvisno od talne teksture in vlažnosti talnih horizontov. Klima za to ni odločilna (Miotke, 1974 a, 1974 b).

Zadnja leta se javlja vedno več prizadevanj, da bi pojasnili kemično erozijo na krasu brez uravnavesja tlaka  $\text{CO}_2$  v vodi in zraku (gl. tudi Sweeting, 1972, s. 34-36). Kot možni izvor  $\text{CO}_2$  v vodi navajajo zemeljski plin v zvezi z naftnimi nahajališči (Bögli, 1978, p. 42), subdukcijo in metamorfozo sedimentov (Müller, 1971). Dodatek NaCl poveča topnost karbonatov (Cigna et al., 1963). Če ni skupnega jona, lahko raztopina ene snovi poveča topnost druge (Picknett, 1977). Korozija se vrši tudi pri oksidaciji piritov v apnencih v sulfatne kisline. Dodatna raztopina magnezijevega oksida do 0,05 mM poveča topnost kalcita (Picknett, 1977). Vemo za več vrst »korozije mešanice«: mešanje voda z različnimi trdotami in temperaturami (Bögli, 1978), voda z raztopljenim kal-

citom in taka z magnezijevim dodatkom (Picknett, 1977). Različne organske kisline povzročajo različne hitrosti in stopnje korozije (Muxart et al., 1978). Delež kalcija, raztopljenega ob učinku humatov, brez ekvilibrija  $\text{CO}_2$  v posameznih delih Ljubljaničinega porečja, presega 2% in v vodi iz močvirnega barja lahko preseže 50% (Miserez, 1975).

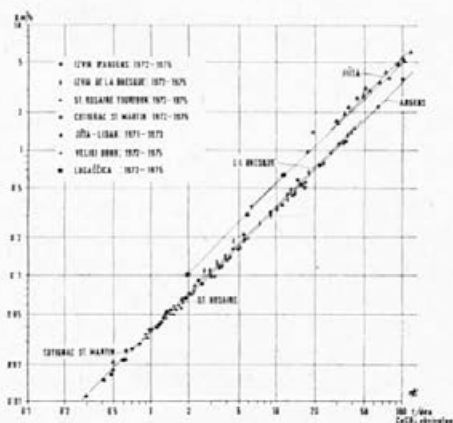
2) Tipi prsti. 18 mesecev pod različnimi talnimi tipi izpostavljene apneniške tablete so izkazale razlike v koroziji v razmerju 1 : 10 in več (Trudgill, 1977). Vode, ki so v laboratoriju prenikale skozi različne prsti, so imele trdoto med 3 in 33 ppm/l  $\text{CaCO}_3$  (Groom-Ede, 1972). Znatne razlike je ugotovil tudi Keller (1963).

3) Razlike v vegetaciji. Njihov delež v naravi ni točno izpričan, ker so navadno povezane z drugimi spremenljivkami, (primerjaj Sweeting, 1962, Gams, 1969, Groom-Ede, 1972).

4) Razlike v litologiji. Razlike v vodni trdoti zaradi učinka različnih vrst apnenca so po Sweetingovi (1973, 1976) v razponu 1 : 4, po Trudgillu (1976) na Aldabra stolu v Indijskem oceanu 1 : 5,6.

5) Hidrogeološke razlike. Različni načini prenikanja in pretoka vode (pretok v zaprtih sistemih, v odprtih kanalih, difuzni pretok, gl. Drake et al., 1975) prav tako vplivajo na mineralizacijo vode.

Pri laboratorijskih poizkusih so za vsako od teh spremenljivk ugotovili trdote v razponu do 1 : 4. Toda če na diagram vnašamo na eno ordinato vodni pretok in na drugo transport raztopljenih karbonatov v kraških izviri, dobimo največkrat dokaj premočrtno regresijsko linijo. To so ugotovili za 4 kraške izvire na Basse Provence in pri Jeiti v Libanonu (Julian et al., 1978) in za razne reke po svetu (Douglas, 1968). To se pravi, da je pri njih delež modifikatorjev bistveno manj pomemben kot t. im. normalna kemična erozija. Da na primer med krasom v južni Franciji, v Liba-



Slika 1. Zveza med vodostajem in transportom raztopljenih karbonatov za Jeito v Libanonu, štiri izvire v južni Franciji (po Julian et al., 1978) in dve notranjski kraški reki (Kolbezen, 1977)

nonu in na Notranjskem v tem pregledu ni bistvenih odstopanj, prikazuje slika 1. Prerisana je po Julian et al., 1978, dodani pa so podatki za Veliki Obrh pri Pudobu in Logaščico v Logatcu po Kolbezen, 1977. Naši dve soodvisnici sta bliže libanonskemu krasu kot pa krasu v južni Franciji.

Med izsledki laboratorijskih raziskav in opazovanji v naravi je tudi naslednja, vse pozornosti vredna razlika. Z laboratorijskimi poskusi raztapljanja apnencev z dovajanjem  $\text{CO}_2$  so dosegli po nekaj dneh le okoli sto  $\text{mg/l CaCO}_3$  ali manj (Keller, 1963, Groom-Ede, 1972, Muxart et al., 1978, Rock-Ek, 1973). Toda kapnice pod le deset ali nekaj več metrov debelim stropom, ki z nekaj urno ali največ enodneвно zamudo reagirajo na povečane padavine na površju (če je zemlja namočena), praviloma odlagajo sigo in so torej trše od okoli 130  $\text{mg/l CaCO}_3$ . Med merjenji v Postojnski jami l. 1963 se je v Zgornjem Tartaru pod okoli 100 m debelim stropom kapljanje sprevrglo v curek manj kot eno uro po nalivu, vodna trdota pa je bila tudi tedaj okoli 200  $\text{mg/l CaCO}_3$ . Podoben primer je bil tudi v Lipiški jami (Gams, 1967). Kako si lahko raztolmačimo te razlike? Najbolj smiselno z večjo količino negravitacijske, retencijske vode. Ta se zadržuje ne le v prsti, ki se v žepih zajeda globoko pod površje v skalne špranje, ampak tudi med skalnimi drobci in na skalnih površini. Sile, ki jo združuje od gravitacijskega teka, so adsorbcija, adhezija, kapilarne sile in druge, ki so znane v pedologiji, in ki so očitno prisotne tudi v skalni gmoti, kjer se kapljanje na nekaterih mestih pod debelim stropom v jami zadržuje še tedne in mesece po zadnjem nalivu. Količina te retencijske vode je lokalno različna, izražena v plasti pa verjetno presega nekaj metrov debeline. Nova padavinska voda s površja se pomeša s staro retencijsko vodo in iztisne le spodnji sloj. Zato trdota slednje ne zavisi od trenutnih padavin. Od količine retencijske vode in letnih padavin je odvisna njena starost, ki je verjetno precejšnja. To ugotavljajo meritve z izotopom  $^{14}\text{C}$ . Pri kopanju tunela pod Schneepalp v Avstriji so naleteli na obarvano vodo. Tam so izvedli sledenja površinskih voda 5,5 leta poprej. (Bauer, 1969). V bolj padavinskih klimah je ta voda mlajša, v aridnejših starejša. Če v severnem Izraelu vodni pretok na izviru reagira z zamudo dveh let na padavinski režim, mora biti retencijska voda še starejša (gl. Gerson, 1974). Vse kaže, da retencijska voda v zaprtih pretočnih sistemih v kraški gmoti počasi povečuje svojo mineralizacijo in z njo preseže parcijalni pritisk  $\text{CO}_2$  v prsti.

Žal smo pri vprašanju poprečne koncentracije  $\text{CO}_2$  v prsti na krasu (in izven njega) v širših območjih navezanih na ugibanja. Kraška literatura največkrat ostaja pri navedbah, da je tam koncentracija  $\text{CO}_2$  mnogokrat večja kot v prostem ozračju, pri meritvah se pa navadno zadovoljuje z izjemno visokimi vrednostmi. Po fizikalnih zakonitostih bi s srednjih celokupnih trdot kraških voda sklepali na tolikšne srednje regionalne koncentracije  $\text{CO}_2$  v prsti, kot jih dosedanje meritve navajajo kot izjemne v času in prostoru. Pri uravnovesenju pritiska  $\text{CO}_2$  v zraku in vodi odgovarja mineralizaciji 200  $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$  parcijalni pritisk 1,5%  $\text{CO}_2$ , trdoti 250  $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$  2,4% in trdoti 300  $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$  3,0%  $\text{CO}_2$ . V nižinskem krasu v zmerni klimi s padavinami okoli 1000 mm je trdota 250-300  $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$  običajna, toda meritve so ugotovile (Gerstenhauer, gl. Miótke, 1974, s. 20) ustrezno koncentracijo  $\text{CO}_2$  le redko poleti. Na notranjskem krasu so srednje trdote kraških voda okoli 200  $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$ , in tej bi ustrezala poprečna koncentracija 1,5%  $\text{CO}_2$ . Redke in nesigurne meritve

CO<sub>2</sub> so našle manjše vrednosti (Gams, 1976, s. 33). Miserez (1975) računa z 20%-no prezasičenostjo vode Ljubljaniče. Žal Mitotke ni objavil vseh svojih 500 meritev CO<sub>2</sub> v Severni Ameriki. Če pri njegovih objavljenih poprečnih vrednostih za predele od Nove Fundlandije do Puerto Rika upoštevamo sredo med navedenimi razponi in tako izračunamo popreček, uvidimo, da je nižji od 1% CO<sub>2</sub>. Velike krajevne razlike — koncentracije so praviloma večje v mokrih in v težjih prsteh — lahko pričakujemo zlasti na polgolom krasu.

Kaže torej, da prenikajoča voda povečuje trdoto še pod odejo prsti, tu, v zaprtih špranjah v vadozni coni pa so neznani procesi, ki bi mogli pospešiti korozijo. Dosedanje preučevanje endolitskih in epilitskih mikroorganizmov (Schneider, 1977, Perna, 1974, Trudgill, 1977) je žal, zajelo le kamenje na površju.

Različni gozdovi »porabijo« letno 1,4 do 8,9 ton CaO na km<sup>2</sup>. Kaj se dogaja z njimi po razpadu biomase?

V nakazani luči je celokupna trdota kraške vode tudi pokazatelj njene starosti, ker ta zavisi od stopnje mešanja z novimi padavinami. Vendar so razlike v kemični eroziji večje od razlik v starosti vode in njeni trdoti (po Priesnitzu, 1974, so celokupne trdote po svetu v razponu 1 : 5, odtoki pa 1 : 30). »Mlajše« vode so pretrde. To si lahko razložimo z ugotovljenim dejstvom, da je hitrost korozije funkcija koncentracije jonov. Mehkejša voda korodira hitreje kot trša (Markovisz - Lohinowicz, 1972). Odtod večja kemična korozija v bolj padavinskih predelih, kjer je kraška voda manj mineralizirana.

Odprto a za geomorfologijo pomembno je vprašanje globine pod kraškim površjem, kjer se odvija korozija. V nasprotju s kemično erozijo, ki so jo po porečjih kvantitativno opredelile številne raziskave, smo pri globini, razen redkih izjem (v karbonatni moreni gl. Radinja, 1976) omejeni na sklepanje. To pa kaže na največjo korozijsko aktivnost v prvih metrih kamenine pod odejo prsti, nakar navzdol ob poti prenikajoče vode postopoma jenjuje. Na to je soditi po:

a) dejstvu, da je hitrost korozije odvisna od stopnje zasičenosti, ki je najmanjša ob prvem dotiku padavinske vode s karbonati.

b) recentno rastočih kapnikih v jamah, kjer je jamski strop debel komaj deset ali malo več metrov (n. pr. Skednena jama),

c) primerjavi kemične erozije v prepustnih in neprepustnih karbonatnih kameninah. Korozija v pretežno neprepustnih karbonatnih fliših, laporjih, karbonatnih peščenjakih in karbonatnih skrilavcih v enakih ostalih pogojih ne zaostaja bistveno za apneniški predeli.

č) Sodeč po dvigu piezometrične vodne gladine je votlikavost vodno-prepustne apneniške cone pogosto okoli 0,3%. Ob sedanji srednji koroziji na notranjskem krasu (ok. 60 m<sup>3</sup> CaCO<sub>3</sub>/km<sup>2</sup>/leto) in pri sto metrov globoki coni podzemeljskega pretakanja bi padavinska voda ustrezno prevotlenost izdelala že v 500.000 letih.

Po Dubljanskem (povzetek po: Shutov, 1977) znaša v gorah Krima in v Zahodnem Kavkazu gradient razstapljanja v zgornji (vadozni) coni 167-18 mg/l 100 m, niže pa v razponu 3,5 — 0,5 do 0,1 — 17,4 mg/l

100 m (v slednjem primeru je odlaganje karbonatov možno seveda samo v votlih prostorih).

Vkljub pomislekom (Beckinsale, 1972) bi torej le smeli večjo kemično erozijo, izpričano z meritvami na izvirih, povezovati s hitrejšim zniževanjem kraškega površja. Še zlasti, ker se površje v bolj votlikavi notranjosti ustrezno hitreje korozijsko znižuje. Le v hladnih predelih brez pomembne odeje prsti prevladuje globinska korozija nad podtalno.

Po približno treh desetletjih intenzivnega kvantitativnega raziskovanja kemične erozije po svetu postaja vse bolj jasno, da je nedosegljiv cilj, zastavljen na začetku v petdesetih letih, da bi točno opredelili vpliv klime na korozijo. Samo če smatramo padavine za najpomembnejši klimatski dejavnik, smemo govoriti o odločilni klimatski pogojenosti kemične erozije, ki je daleč najšibkejša v aridnih predelih. V ostalih klimah so najvišje ugotovljene vrednosti oazne, tako kot so oazni najvišji odtoki, povezani z najvišjimi, orografskimi padavinami.

V luči zgornjih ugotovitev je izgubila veljavo še vedno prisotna trditve, da je bila na našem krasu večja kemična erozija v subtropski neogeni klimi. Ta trditve bi veljala le, če bi tedaj bili večji vodni odtoki. To pa je malo verjetno, ker je naš alpidski relief dosegel največje višine in z njimi najvišje orografske padavine v kvartarju, in ker je v topli klimi zaradi večje evapotranspiracije vodni odtok pri enakih padavinah, kot so danes, manjši.\*

Ker so korozijske kraške depresije (o tektoniki tukaj namerno ni govora) bolj posledica lokalno pospešene in ne toliko splošne korozije, so take razlage kraškega reliefa nezadovoljive.

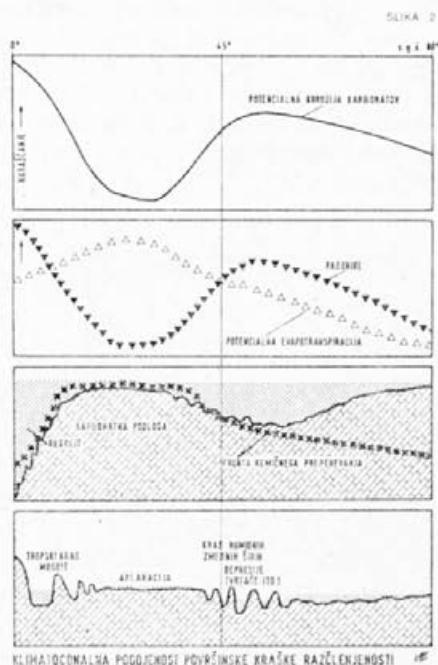
Najbolj izraziti kras v svetu (neoziraje se na jame, ki se pojavljajo v vseh klimah) je v predelih najvišjih padavin, in višjega krasa. Do lokalnih razlik v razvitosti kraških depresij pa prihaja zaradi drugih razlik (litoloških, genetskih itd), od katerih je stopnja pretežno litološko pogojene denudacije zelo pomembna. Denudacija namreč preprečuje nastajanje večjih strmin v nastopajočih depresijah, ki jih pogloblja lokalno pospešena korozija. Odtod manj vrtač na bolj strmem pobočju. V predelih s pretežno uravnovešenimi padavinami in evapotranspirajo se pridružuje še nastajanje horizonta kopičenja karbonatov v debelejši prsti, ki se nabere v dnu depresij in zavre nadaljnje poglobljanje skalnega dna (slika 2).

Iz teh razlogov je pri nas in v svetu delež krasa znatno manjši od deleža karbonatnih kamnin in kemične erozije. Delež krasa cenijo na 4% kopne površine, karbonatnih kamnin na okoli 27%. Ker so laže topljive, predstavljata  $\text{CaCO}_3$  in  $\text{MgCO}_3$  kar 59% vsega kemično raztopljenega rečnega transporta. Tega pa se v geografiji premalo zavedamo.

Pač pa je očitna navezanost najbolj izrazitega krasa na klimatske pogoje v smislu, kot je upodobljen na Sliki 2 (povzeti po Gams, 1976). Pri tem so izvzete kraške jame in nekatere oblike kontaktnega krasa, ki se

\* Vlagoljubna vegetacija, ki jo najdejo na primer v premogovnih kotanjah, te trditve ne more ovreči, ker so kotanje vlažne domala v vseh klimah.



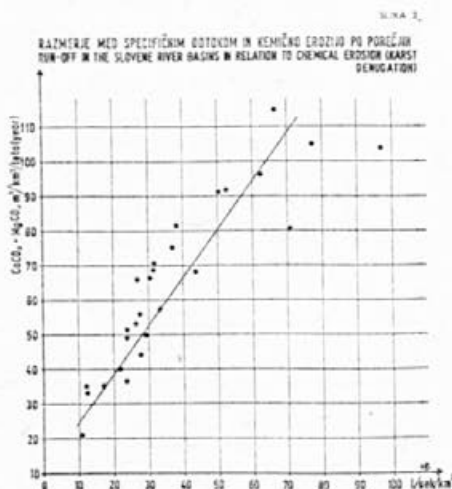


*de klima - padavine - prepušča*

javljajo v vseh klimatih. Kraško površje je najbolj razčlenjeno tam, kjer padavine najbolj presegajo evapotranspiracijo, to pa je v vlažni tropski in v vlažni zmerni klimi. Ker je korozijski preostanek v vlažnih tropih bolj glinast (o tem: Pfeffer, 1976, s. 16-17) in slabše prepušča prenikajočo vodo, prevelika debelina regolita prepreči nadaljnje poglobljanje depresije, in korozija se usmeri bočno na depresijo. Tako nastajajo mogote kot tipične oblike površinskega tropskega krasa. Drugi kraški optimum je v vlažni zmerni klimi, kjer je regolit manj vododržan. Dinarski kras spada med najbolj namočene dele tega pasu. Severneje od nas so padavine vedno bolj izenačene z evapotranspiracijo, in v takih pogojih se v debelejši prsti javlja horizont kopičenja kalcijevega karbonata, ki je tem bližje površju, čim bolj evapotranspiracija dosega padavine. Tak horizont preprečuje podtalno korozijo v dnu depresij in njihovo poglobljanje. V severnejših predelih z mehničnim preperevanjem in soliflukcijo spremlja poglobljanje depresije na njenem pobočju pospešena denudacija, ki zatrpava poglobljanje. Površinske depresije so odstotne v aridnem podnebnju, kjer pride horizont kopičenja karbonatov prav na površje.

Mnoge postavke iz tega članka potrjuje karta kemične erozije po poročjih v Sloveniji (slika 4). Zanj so bili uporabljeni specifični odtoki iz arhiva Skupnosti vodnega gospodarstva v Ljubljani, iz atlasa »Vodnogospodarske osnove Slovenije« (Ljubljana 1978) ter iz Bidovčeve razprave Die empirischen Formeln für die Berechnung des Durchflusses in Vergleich mit den tatsächlichen Wassermengen der Flüsse im Alpengebiet Sloweniens

(VI. Int. Tagung f. Alpine Meteorologie, Bled-Jugoslawien). Srednje trdote rečne vode so povzete iz omenjenega arhiva, iz lastnih zapiskov in iz literature v tem članku. Če je bilo le mogoče, so bile upoštevane predvsem meritve ob srednji poletni vodi, ki so najbliže srednji letni vrednosti. Tam, kjer je v porečju več silikatnih kamnin, so izračunane vrednosti premajhne za karbonatne predele. Na njihov račun je bilo zmanjšano samo porečje Meže in Dravinje.



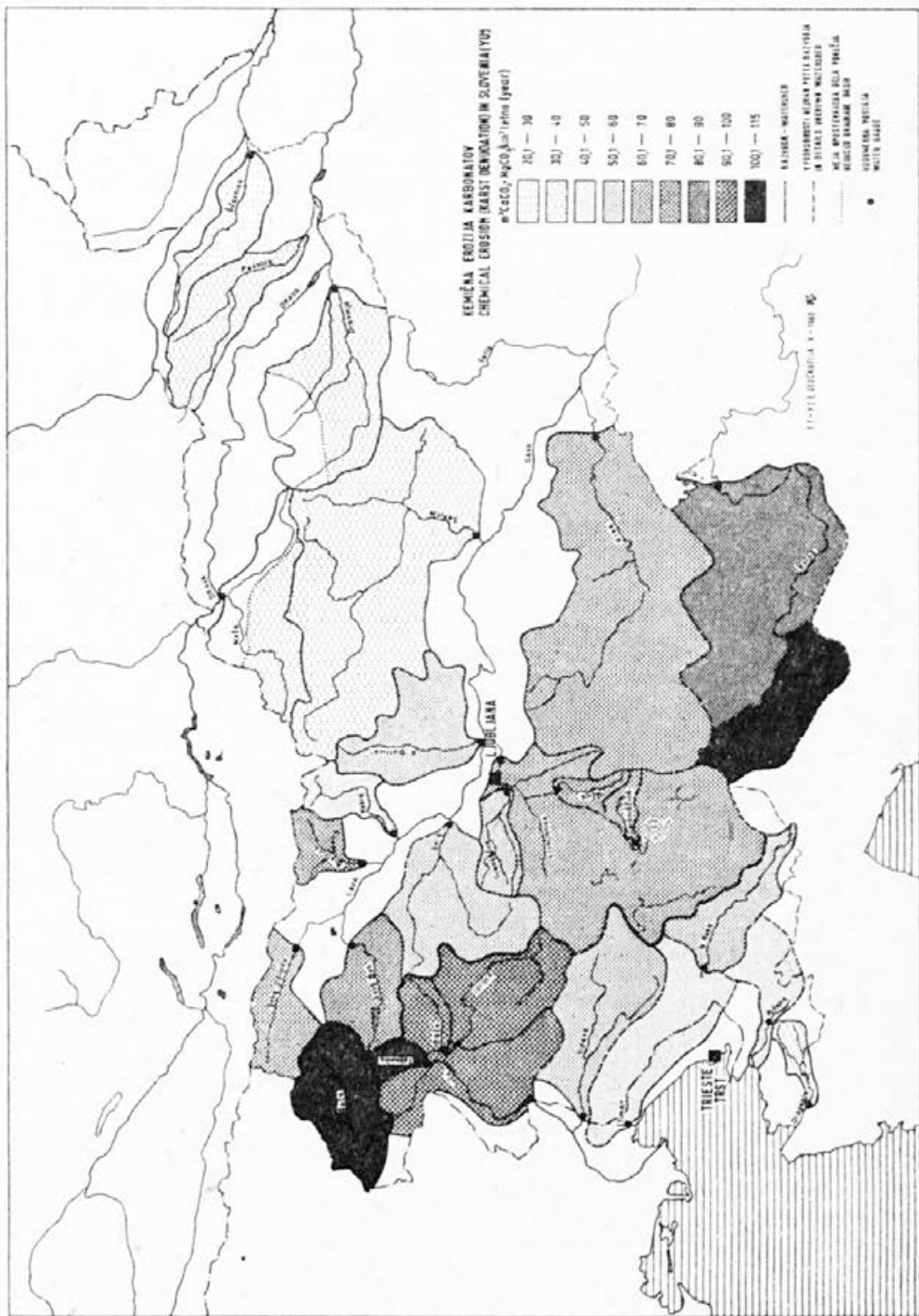
Po porečjih so skrajne vrednosti 10,7 (Ščavnica) in 97 l/sek/km<sup>2</sup> letno (Tolminka) ter okoli 100 mg CaCO<sub>3</sub>/l (Tolminka) ter dobrih 200 mg (Pesnica). Pri odtoku je torej razmerje 1 : 9 in pri trdoti 1 : 2,2. Netočnosti pri obsegu porečij in pri hidroloških meritvah vnašajo torej v končni izračun več nejasnosti kot netočne srednje trdote. Ker smo se morali nasloniti na večja porečja, ne pride prav do izraza pas najmočnejše kemične erozije karbonatov v območju najvišjih padavin med povirjema Kolpe in Soče. Od tod se vrednoti znižujejo proti Tržaškemu zalivu in subpanonski Sloveniji. V tej smeri rase tudi delež nekarbonatov v porečjih.

Če že ne drugod, pa v vododržnih karbonatnih kamninah (in porečjih) izračunane vrednosti v m<sup>3</sup> CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>/km<sup>2</sup> letno pomenijo najmanj tolikšno znižanje površja na račun korozije karbonatov in to v mikronih na leto, milimetrih na tisoč in metrih v milijon letih. Če se recimo porečje Pesnice korozijsko znižuje s hitrostjo 34 m v milijon letih (in z ostalimi degradacijskimi procesi vred še hitreje), je to še ena podpora mnenju o mladosti našega reliefa.

V karbonatnih kamninah se nenehno znižuje vse površje, tudi terase in nivoji, ki se jih kaj radi predstavljamo v višini prvotnega nastanka.

Trditev, da je poglavitni dejavnik kemične erozije specifični vodni odtok, potrjuje tudi naš diagram, v katerem so vnešena porečja glede na vodni odtok in kemično erozijo. (slika 3)





## Literatura

- Balac z, D., 1971, Intensity of the tropical karst development based on cases of Indonesia. Karst-és barlangkutató. Vol. VI, 1968—71, 33—67, Budapest.
- Barany, I., 1975, Role of soil temperature in control of denudative processes of different exposures in karstic regions. Acta geographica, T. XV, 35—44, Sceged.
- Bauer, F., 1969, Karsthydrologische Untersuchungen im Schneealpenstollen in den steirisch-niederösterreichischen Kalkalpen. Steirische Beiträge zur Hydrologie, Graz.
- Beckinsale, R., 1972, The limestone bugaboo: surface lowering or denudation or amount of solution. Transaction of the Cave Research Group of Great Britain. Vol. 14,2 55—59
- Bleahu, D. M., 1974, Morfologia carstica. 587 str., Bucuresti.
- Bögli, A., 1971, Karstdenudation-das Ausmass des korrosiven Kalkabtrags. Regio Basiliensis, XII/2, Basel.
- Bögli, A., 1978, Karsthydrographie und physische Speläologie. Springer, 291 str., Berlin.
- Cigna, A., A., Cigna L., Vido, L., 1963, Quelques considérations sur l'effet sel dans la solubilité des calcaires. Ann. Spéléol., 18, 85—191.
- Drake, J., Ford, D. C., 1976, Solutional erosion in the southern Canadian Rockies. Canadian Geographer, XX, 2, 158—170.
- Drake, J., J., Wigley, T. M., 1975, The effect on the chemistry of carbonate groundwater. Water resources research, vol. 11, No 6, 958—962
- Douglas, I., 1968, Some hydrologic factors in the denudation of limestone terrains. Z. f. Geomorphologie, N. H., Bd. 12, 3, 241—255
- Dr oppa, A., 1977, Die Lösungsintensität von Bächen, die aus dem Kristallin stammen, in Kalk-dolomitischen Komplexen. Proc. 7th Int. Speleological Congress, 156—158, Sheffield, England
- Eraso, A., 1975 The function on physical-chemical factors in the process of karstification. Intern. Symposium of physical chemistry in karst. Granada.
- Gams, I., 1967, Faktorji in dinamika korozije na karbonatnih kameninah slovenskega dinarskega in alpskega krasa. Geografski vestnik XXXVIII 1966, 11—68, Ljubljana
- Gams, I., 1969, Ergebnisse der neueren Forschungen der Korrosion in Slowenien (NW Jugoslavien). Studia geographica, ČSAV—Problems of the karst denudation, 9—20, Brno
- Gams, I., 1972, Effect of runoff on corrosion intensity in the North-western Dinaric Karst. The Transactions of the Cave Research Group of Great Britain. Vol. 14,2, p. 78—83
- Gams, I., 1974, Kras. Ljubljana, 360 p.
- Gams, I., 1976, Variations of total hardness of karst waters in relation to discharge (case studies in Slovenia, Yugoslavia). Karst processes and relevant landforms, 41—59, Ljubljana
- Gams, I., 1976, Chemical erosion as a landscapeforming climatizonal phenomenon. XXIII Int. Geogr. Congress-International geography '76, 1, 153—158, Moskva
- Gams, I., 1980 (v tisku): Retention water in karst: its role in influencing total water hardness and denudation rate. Proc. Symposium on karst denudation, Aix en Provence-Marseille-Nimes.
- Gascoyne, M., 1978, Hydrology and solution chemistry of North Venezuelan Karst. Bol. Soc. Venezolana Espel., 9(17)
- Gerson, R., 1974, Karst processes of the Eastern Upper Galilee, Northern Israel. Journal of hydrology, 21, 131—152
- Gerstenhauer, A., 1972, Der Einfluss des CO<sub>2</sub>—Gehaltes der Bodenluft auf die Kalklösung. Erdkunde, XXVI, 11—120

- Harmon, R., et al., 1975, Regional hydrochemistry of North American carbonate terrains. *Water Resources Research*, 11.
- Groom, G. E., Ede, D. P., 1972, Laboratory simulation of limestone solution. *Trans. Cave Research Group of Great Britain*. Vol. 14, 2, 89—95
- Habič, P., 1968, Kraški svet med Idrijco in Vipavo. 240 str., Ljubljana
- Jennings, J. N., 1972, Observations at the Blue waterholes, March 1965—April 1969, and limestone solution on Coleman Plain, 1—46, N.S.W. Helictite
- Julian, M., Martin, J., Nicod, J., 1968, Les Karst méditerranéen. *Méditerranée*, Nr. 1—2, 115—131
- Keller, R., 1963, Der Einfluss von Boden, Gestein und Klima auf den Chemismus des Grundwassers. *Intern. Ass. scientific hydrology*. *Prubi*. No. 64. 112—117, Berkely
- Kolbezen, M., 1977, Discharge and corrosion intensity in the drainage basin of the karst river Ljubljana. *Karst processes and relevant karstforms*. 107—112, Ljubljana
- Kotarba, A., 1972, Powierzchniowa denudacja chemiczna w wapienno-dolomitowych Tatrach zachodnich. *Prace geograficzne*, Nr. 96, Instytut geografii PAN, 118, Wrocław
- Kunaver, J., 1978, Intenzivnost zakrasevanja in njegovi učinki v Zahodnih Julijskih Alpah-Kaninsko pogorje. *Geografski vestnik*, L/1978, 33—50, Ljubljana
- Lang, S., 1977, Relationship between world-wide karst denudation (corrosion) and precipitation. *Proc. 7th Int. Speleological Congress*, 282—283, Sheffield, England
- Markowicz-Lohinowicz, 1972, Aktywność chemiczna wód krasowych. *Speleologia VII*, 1—2, 25—43, Warszawa
- Maurin, V., Zötl, J., 1964, Karsthydrologische Untersuchungen im Toten Gebirge. *Oesterreichische Wasserwirtschaft*, 16, 5/6.
- Michalczyk, Z., Soja, Z., Wojciechowski, K., Varunki hydrologiczne i denudacja chemiczna w dorzeczu Dumba Bajdafag-Gol (Chentej-Mogolia). In print in *Studia geomorphologica Carpatho-balcanica*.
- Miotke, F., D., 1974a, Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft in seiner Bedeutung für die aktuelle Kalklösung in verschiedenen Klimaten. *Abhand. Akad. Wiss. in Göttingen. Bericht über ein Symposium »Geomorphologische Prozesse und Prozess-kombinationen in der Gegenwart unter verschiedenen Klimabedingungen*, 51—67, Göttingen
- Miotke, F., D., 1974b, Carbon dioxide and the soil atmosphere. *Abh. Karst-und Höhlenkunde*, R. A., 9, 52, München
- Miserez, J. J., 1975, Complements to the water chemistry of the karstic system of the Ljubljana river. *Underground water tracing. Investigations Slovenia 1972—1975*, 82—92, Ljubljana
- Müller, P., 1971, A metamorf eredetű széndioxid karstorróziós hatása. *Karst és barlang*, II, 53—56
- Muxart, T., Andrieux-Demarle, 1978, Dissolution expérimentale de la calcite et d'une dolomie dans des solutions aqueuses d'acides organiques simple. *Bul. No 4-Ass. Française de karstologie. Travaux de la table ronde Franco-Suisse; Aix en Provence*, 31—37
- Nicod, J., 1976, Relations débit-teneurs et débit-érosion dans les karst méditerranéens. *Actes du 99<sup>e</sup> congrés nat. Soc. savantes. Sect. de Géographie. Études géographiques sur le montagne*, 115—124, Paris
- Panoš, V., 1972, A brief analysis of problems in karst erosion studies. *The Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*. Vol. 14, 2, 49—51
- Perna, G., 1974, Il fitocarsismo nella formazione delle Kamenitze (vaschette di corrosione). *Natura Alpina*, vol. XXV, 1, 25—35, Trento

- Pfeffer, K.-H., 1976, Probleme der Genese von Oberflächenformen auf Kalkgestein. *Z. Geomorph. N. S., Suppl. B*, 26, 6—34, Berlin-St.
- Picknett, P. G., 1977, Rejuvenation of aggressiveness in calcium carbonate solutions by means of magnesium carbonate. *Proc. 7th Int. Speleological Congress*, 346—348, Sheffield, England
- Picknett, R. G., 1977, Foreign substances and calcite solubility in carbonated water. *Proc. 7th Int. Speleological Congress*, 348—351, Sheffield, England
- Priesnitz, K., 1974, Lösungsraten und ihre geomorphologische Relevanz. *Abh. Akad. Wiss. in Göttingen. PH Kl. III, F. NR. Sonderabdruck: Geomorphologische Prozesse und Prozesskombinationen in der Gegenwart unter verschiedenen Klimabedingungen*, 68—85, Göttingen
- Pulina, M., 1974, Denudacja chemiczna na obszarach krasu weglanowego. *Prace geograficzne*, No 105, PAN-Institut geografii, 159 str., Wrocław
- Radinja, D., 1975, La corrosion dans les moraine carbonatic au pied des Alpes du sud-est. *International geography 76' — XXIII Int. Geographical congress, sec. 1-Geomorphology and Paleogeography*, 137—141, Moskva
- Roques, H., Ek, C., 1973, Étude expérimentale de la dissolution des calcaries par un eau chargée de CO<sub>2</sub>. *Ann. Spélol.*, 28 — 4, 549—563
- Schneider, J., 1977, Carbonate construction and decomposition by ephilitic and endolithic micro-organisms in salt- and freshwater. *Fossil algae*, 248—260, Berlin
- Shutov, Y., I., 1977, Hydrochemical zonality and the velocity of karst processes. *Proc. 7th Int. Speleological Congress*, 379—380, Sheffield
- Sweeting, M. M., 1972, *Karst landforms*. Macmillan, 362 str., London
- Sweeting, M. M., 1976, Present problems in karst geomorphology. *Z. f. Geomorphology. Supplementband 26: Karst processes*, 1—5, Berlin—Stuttgart
- Sweeting, M. M., 1973, Some Comments on the lithological basis of karst land forms variations. *Intern. Speleology*, I, subsection Aa: Geology of soluble rocks. Olomouc.
- Sweeting, M. M., 1976, Recent problems in the karst denudation research in the world. *Karst processes and relevant landforms*, 7—15, Ljubljana
- Trudgill, S., T., 1977, The role of soil cover in limestone weathering. *Cockpit Country, Jamaica. Proc. 7th Int. Speleological Congress Sheffield*, 401—404, Sheffield, England
- Trudgill, S., T., 1976, The marine erosion of limestone on Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Z. Geomorph., Suppl. Bd*, 26, 164—200.

## MAIN FACTORS OF KARST DENUDATION IN THE WORLD

Ivan Gams

(Summary)

Copious literature cited in this article confirms that the specific run-off is the decisive factor for the denudation rate. Denudation rate controlled by specific run-off only is called the normal karst denudation. All other factors are called modifiers, and their contribution is usually limited to some tenths of the total denudation.

Two problems are closely examined as open problems for further research. In laboratory research water that had been in contact with limestone for one or two days have attained mostly up to 100 mg ppm CaCO<sub>3</sub>/l

eq. But in the Postojna Cave less than an hour after a heavy rain water flow on the cave ceiling increased and showed a hardness of 180 ppm. General water hardness in the middle mountainous karst in Carniolia (Slovenia) is about 200 mm  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  what is equivalent to 1,5% of  $\text{CO}_2$  in the soil air. It seems in Slovenia and, according to literature, in the world karst areas that the regional yearly overage amount of  $\text{CO}_2$  partial pressure in the soil air is smaller than the amount calculated on the basis of water hardness.

These two facts are in favour of significant corrosion of percolated water downward soil cover by means of processes not yet fully explained. They are also in favour of a greater retention capacity of limestone mass of nongravitational water (in amount of some metres if expressed in an layer). The average age of the percolation water is therefore presumably greater than generally assumed and the total hardness is an indicator of the age of water.

In the enclosed diagram (No. 1) (correlation between the discharge of the river and the transport of soluted carbonates) are shown the rivers in Lebanon and S. France (acc. to Julian et al, 1978) and two of them in Slovenia (acc. to Kolbezen 1977). In the sketch nr. 2 is shown the distribution of the surface karst depressions to the precipitation and evapotranspiration in the world.

In the map No. 4 is show the chemical erosion («karst denudation») in the river basins in Slovenia. Methodology for it is described in the Slovene text. NE of the river Sava some basins are built of noncalcareous and nondolomitic rocks. As there the (mostly Tertiary and Quaternary) unpermeable sediments are partially carbonatic, the evidence of the run-off as the most important factor for the amount of chemical erosion (denudation) is not disturbed. The run-off is more important factor as the percentage of karst areas in the river basins and the chemical erosion is progressively diminishing with precipitation toward NE from the belt of maximal run-off (Triglav- upper basin of the Kolpa). This is evident also from the diagram No. 3.