OSNOVE GEOLOGIJE KRASA

Semester 2011/2012

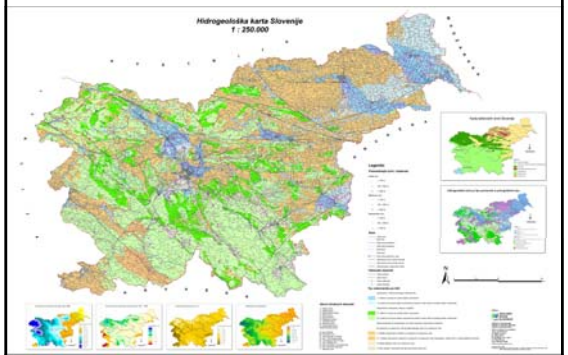
Sklop 1

Osnove

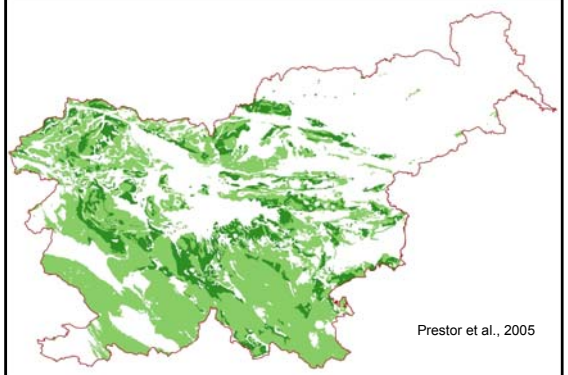
- Zakaj geologija krasa?
- Kaj je kras?
  - definicije
- Model čistega krasa
- Kraške kamnine
- Minerali

ZAKAJ GEOLOGIJA KRASA?

- “Nacionalna veda”
- Kras pokriva skoraj ½ ozemlja Republike Slovenije
- Zanimiv naravni pojav katerega “realizacije” v zelo različnih pojavnih oblikah lahko spremljamo na ozemlju Slovenije
- Začetki modernih raziskav krasa segajo na območje Slovenije



Prestor et al., 2005



Prestor et al., 2005

KRAS KOT POJAV

- Definicije, ki izhajajo iz različnega razumevanja in dojemanja pojava.
- V slovenščini
  - Kras
  - kras
    - Do srede 19. stoletja le toponim
- Izvor besede je predindoevropski in izhaja iz osnove “karra” kar pomeni gola skala.
  - Tudi golo površje

KRAS KOT POJAV

- **Kras** je pokrajina med med Tržaškim zalivom, Goriškim poljem, Vipavsko dolino in Brkini

KRAS KOT POJAV

KRAS KOT POJAV

- “matični” kras
  - pokrajina
- “klasični” kras
  - Trikotnik Ljubljana-Trst-Reka
    - Intenzivne raziskave na območju Notranjske
  - Vezano na začetne raziskave krasa kot naravnega pojava
    - Prvotno več središč v katerih se je kras raziskoval
    - Danes IZRK v Postojni

KRAS KOT POJAV

- Predmet zanimanja v preteklosti, ker pokrajina leži na območju pomembnih transportnih poti v zaledju Jadrana in Trsta
  - V 19. stoletju popolnoma gola pokrajina
    - Ovčjereja
    - Kozjereja
  - Razmeroma neugodne vremenske razmere
    - Burja
  - Značilni naravni pojavi
  - Sčasoma so opazili podobne pojave tudi drugod
    - Dinarski kras (od današnje Italije do Albanije)

KRAS KOT POJAV - definicije

- Definicije krasa
  - Zelo raznolike
  - Odvisno od namena
    - Geološka
    - Geografska
    - Geomorfološka
    - Sedimentološka
    - Hidrogeološka
    - ...

KRAS KOT POJAV - definicije

- Slovenska kraška terminologija (1973):

"Ozemlje, kjer vlada zaradi poklinske prepustnosti kamnine podzemeljsko (kraško) pretakanje vode, učinkovito kemično raztapljanje kamnin in kjer so lahko razvite tudi značilne površinske in podzemeljske oblike"

KRAS KOT POJAV - definicije

- Geološki terminološki slovar (Pavšič et al., 2007):

"*Površje in podzemlje z značilnimi oblikami, nastalimi zaradi kemičnega in mehanskega delovanja vode v apnencu, redkeje v drugih kamninah*"

KRAS KOT POJAV - definicije

- Geografski terminološki slovar (Kladnik et al., 2005):

"*Ozemlje s kraškim vodnim odtokom in korozijo lahkotopnih karbonatnih kamnin, za katero so značilni kraški procesi, pojavi in oblike*"

KRAS KOT POJAV - definicije

- Splošni tehniški slovar (2. izdaja 1978):

"Kras – ozemlje s kraškimi pojavi; valovit, razdrapan, razoran, skalovit, apnenčast svet z lijakom podobnim dolinam."

KRAS KOT POJAV - definicije

- Geološka delitev krasa
  - Strukturno definirano
  - Glede na debelino kraških kamnin
- Visoki kras
  - Visoke kraške planote
- Nizki kras
  - "Nizke" kraške planote - luske

KRAS KOT POJAV - definicije

- Geološka delitev krasa v Sloveniji
  - Dinarski kras
    - Dinarska karbonatna platforma
      - Debelina karbonatov mezozoika tudi do 7 km
  - Visoki (Alpski) kras
    - Julijska karbonatna platforma
  - Osameli kras
    - Slovenski jarek
    - Mlajši sedimenti
      - Litotamnijski apnenci - Miocen

KRAS KOT POJAV - definicije

- Hidrogeološka definicija
  - Kanalska poroznost
  - Transport v raztopini
    - Podrejeno suspenzija in trdni delci
- Sedimentološka definicija
  - Razvojni cikel sedimentov
    - Paleokras
    - Razvoj

KRAS KOT POJAV - definicije

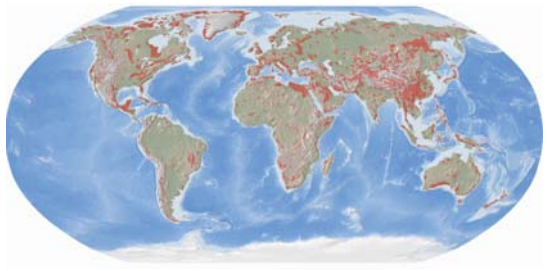
- Geomorfološka definicija krasa
  - Ena od pojavnih oblik preoblikovanja skorje
  - Del Zemljinega površja
  - Močno izražena korozija zaradi delovanja vode
    - Vertikalni odtok -> površinski odtok je zanemarljiv
  - Razvoj značilnih kraških oblik
    - Jame, brezna, izviri, ponikalnice
    - Kraška polja, suhe doline
    - Škraplje, žlebiči, vrtače
    - Itd.

KRAS KOT POJAV - definicije

- Fizikalno gledano:
  - Transportni procesi s katerimi prihaja do odnašanja mase
    - Transportno omejeni (nekongruentno)
    - Transportno neomejeni (kongruentno)
      - Praviloma transport v raztopini
  - Prostorska porazdelitev posledic transportnih procesov je posledica izrazite
    - Anizotropije zloga kraških kamnin

GLOBALNA PORAZDELITEV

- Kopno površino pokriva 12% karbonatnih kamnin
- Ob upoštevanju tudi drugih kamnin, ki jih lahko obravnavamo kot kraške, pa je površina kopnega v 20% pokrita s krasom
  - Ni natančne evidence
- Alpe, Himalaja, Arabski polotok, JV Azija, Kitajska, etc.



PORAZDELITEV KRASA V ČASU

- Delež dolomita proti apnencu se s časom zmanjšuje
  - V mlajših obdobjih je dolomita manj
- Paleokras
  - zapis ohranjen v sedimentu
  - “reaktivacija” paleokrasa
- Kraška morfologija
  - Geološko gledano zelo mlada

KAJ JE KRAS?

- Tipi krasa (pojavne oblike):
  - Pokriti (površje je poraslo)
  - Goli (površje je močno kamninto in neporaslo)
  - Stožčasti (tropi)
  - Fosilni
  - Plitvi (tla so plitva)
  - Globoki (debela tla)
  - Osameli
  - Zajezeni
  - Visoki
  - Nizki

KRAS KOT SISTEM

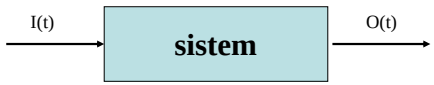
- Sistem – množica delov, ki so med seboj povezani
- Hidrološki sistem – struktura ali volumen, ki je obkrožen z mejami, ki vodo sprejemajo, prevajajo; v sistemu pa se voda lahko tudi uskladišči
- Kras kot posebna oblika hidrološkega sistema v katerem prevladujejo nekateri procesi (npr. transport v raztopini)

KRAS KOT SISTEM

- Vhodne spremenljivke I(t)
- Izhodne spremenljivke O(t)
- Uskladiščenje S(t)
- Model črne skrinjice (model sive skrinjice)

- Odprti sistemi
- Zaprti sistemi

KRAS KOT SISTEM



KRAS KOT SISTEM

$$I(t) \pm S(t) = O(t)$$

$$I(t)\Omega = O(t)$$

$$\Omega = \frac{O(t)}{I(t)}$$

$$Q(t) = \alpha V(t)$$

MODEL ČISTEGA KRASA

- Šušteršič, 1986 in 1996:
  - Model čistega krasa in nasledki v interpretaciji povšja. Acta Carsologica 14/15, 59-70
  - Pure karst model. Cave and Karst Studies
- Modelni pristop
  - Predpostavka, da imamo opraviti s čistimi kraškimi kamninami, v katerih ni motenj nekraških kamnin, sedimentov in procesov

MODEL ČISTEGA KRASA

- Sistem osmih aksiomov (po Šušteršiču)
  1. Obstajati mora kamninska masa z začetno potencialno energijo
  2. Matična kamnina mora biti dovolj samonosna, da omogoča nastajanje geomorfnih oblik
  3. Lateralne spremembe kamnine morajo biti dovolj daleč, da so v obsegu opazovanj nezaznavne

MODEL ČISTEGA KRASA

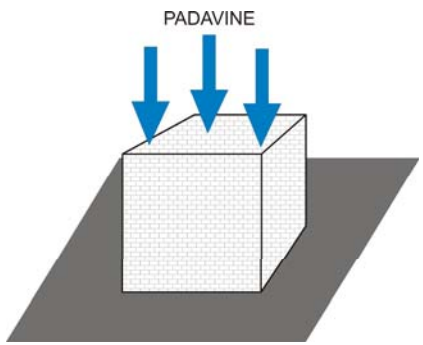
4. Matična kamnina mora biti enakomerno topna do take mere, da so vse ostale oblike prehajanja kamnine v trasportabilno obliko – razen raztapljanja – zanemarljive
5. Prvotna votlikavost kamnine mora biti enakomerna in zvezna

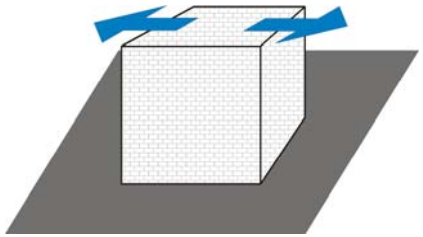
MODEL ČISTEGA KRASA

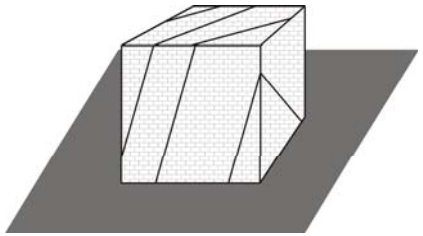
6. Delovanje sistema ne more zavreti pomanjkanje vode
7. Kamninski sistem mora biti z boka dovolj odprt, da lahko nastane navpičen sistem odvodnjavanja
8. Naklon površja mora biti prvotno dovolj majhen, da je površinsko odvodnjavanje omejeno na celico začetne votlikavosti

MODEL ČISTEGA KRASA

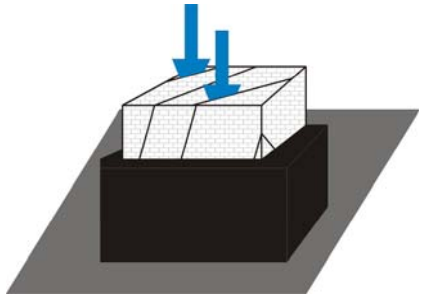
- Cvijićeve definicije krasa:
  - Holokras – globok v celoti razvit kras
  - Merokras – na pol razvit kras
- Hierarhični razvoj krasa



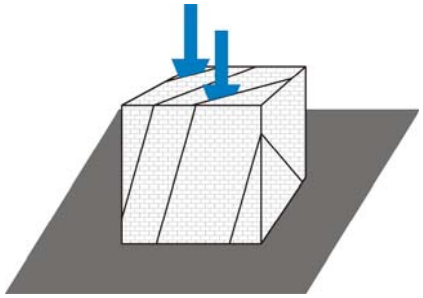




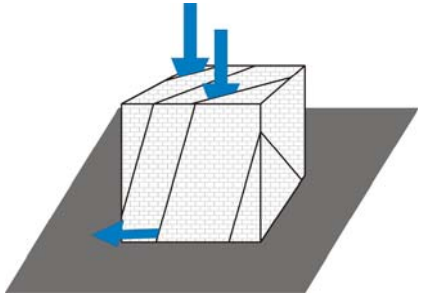
M. Brenčič Geologija krasa



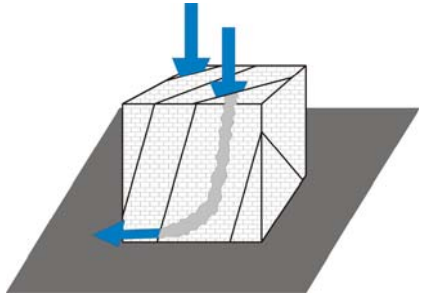
M. Brenčič Geologija krasa



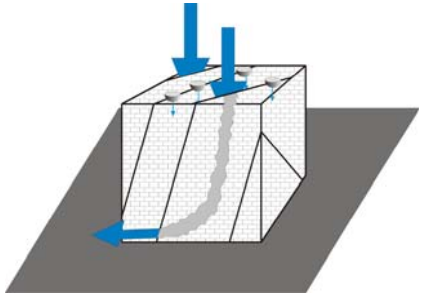
M. Brenčič Geologija krasa



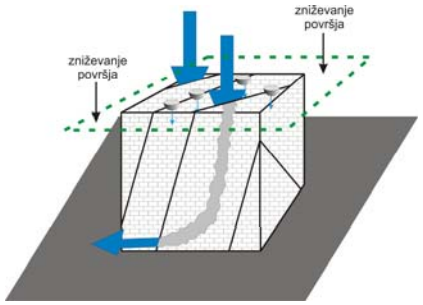
M. Brenčič Geologija krasa



M. Brenčič Geologija krasa



M. Brenčič Geologija krasa

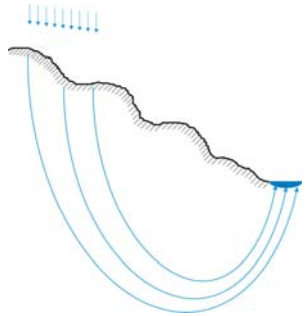


MODEL ČISTEGA KRASA

1. Obstajati mora kamninska masa z začetno potencialno energijo

- Vzpostavitev gradienta potenciala
  - Nujen za vzpostavitev toka podzemne vode
    - Vzpostavitev konvekcijskih celic

MODEL ČISTEGA KRASA



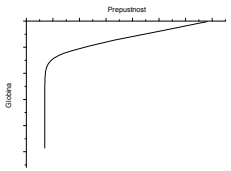
MODEL ČISTEGA KRASA

2. Matična kamnina mora biti dovolj samonosna, da omogoča nastajanje geomorfnih oblik

- Mehanske lastnosti kamnin (sedimenta), ki omogočajo ohranjanje struktur (praznin), ki so značilne za kras (npr. kanali – jame)
  - Kras je razvit le do neke določene globine
    - Funkcija prepustnosti kamninske mase

MODEL ČISTEGA KRASA

- Funkcija potenciala razlike – konvekcijskih celic, ki se razvijejo znotraj kraške kamnine
  - Različna globina zakrasevanja



MODEL ČISTEGA KRASA

3. Lateralne spremembe kamnine morajo biti dovolj daleč, da so v obsegu opazovanj nezaznavne

Predpostavka, ki opredeljuje, da je prisotna le kraška kamnina, nekraške kamnine so “dovolj daleč stran”, da ne vplivajo na razvoj krasa

MODEL ČISTEGA KRASA

4. Matična kamnina mora biti enakomerno topna do take mere, da so vse ostale oblike prehajanja kamnine v trasportabilno obliko – razen raztapljanja – zanemarljive

Prevladujejo reakcije hidrolize v sistemu voda mineral, ki prevladuje v kraški kamnin

MODEL ČISTEGA KRASA

5. Prvotna votlikavost kamnine mora biti enakomerna in zvezna

Votlikavost = poroznost

Predpostavka o enakomernem toku in s tem povezanim enakomernim raztapljanjem

MODEL ČISTEGA KRASA

6. Delovanja sistema ne more zavreti pomanjkanje vode (Delovanje sistema ne sme biti zavrto zaradi aridnosti)

Razvoj sistema je odvisen od prisotnosti vode – v izrazito aridnem območju je razvoj krasa zanemarljivo počasen

MODEL ČISTEGA KRASA

7. Kamninski sistem mora biti z boka dovolj odprt, da lahko nastane navpičen sistem odvodnjavanja

To je predpostavka iz katere izhaja, da je v krasu vedno razvita nezasičena in zasičena cona – ob poznavanju zakonov hidrodinamike toka podzemne vode to izhaja a priori, v nasprotnem primeru bi gladina podzemne vode izdanjala in imeli bi opravka s površinskim tokom

MODEL ČISTEGA KRASA

8. Naklon površja mora biti prvotno dovolj majhen, da je površinsko odvodnjavanje omejeno na celico začetne votlikavosti

Predpostavka, da je površina kraške kamnine ob t=0 izpostavljena trenutno

Dejansko gre za dinamičen odnos med vektorjem premika bloka kamnine zaradi tektonike in vektorjem denudacije, ki je v primeru krasa vezan predvsem na transportne procese v raztopini

MODEL ČISTEGA KRASA

- Hierarhična realizacija pogojev

  (za nastanek višje hierarhične oblike morajo biti izpolnjeni prdhodni pogoji)

  – Od 1 do 4 nastanek katerih kolih geomorfnih oblik
  – Od 5 do 6 nastanek podzemnih kanalov
  – Od 7 do 8 nastanek površinskih kraških oblik

MODEL ČISTEGA KRASA

- "Kritika" modela čistega krasa
  - Implicira poznavanje definicije krasa –> podaja razlago tega kdaj se čisti kras razvije
    - Če to obravnavamo s stališča modeliranja je to pomankljiv pogoj, ker ne definira konvergenčnega kriterija (e.g. numerično modeliranje)
- Težnja po aksomatski gradnji sistema (povzeto iz matematike)

MODEL ČISTEGA KRASA

- Opredeliti je potrebno bistvene fenomenološke karakteristike krasa in nato s povratnim modeliranjem rekonstruirati procese, ki do takšne oblike privedejo
- Fizikalno kemijsko (numerično) modeliranje razvoja krasa
  - Razvoj kanalske poroznosti
  - Razvoj denudacije

KRAŠKE KAMNINE

- Kraške kamnine so tiste v katerih se razvije kras
- Kraške kamnine so tiste v katerih je denudacija vezana predvsem na transport v raztopini

KRAŠKE KAMNINE

- **Zogovićev efekt** (opažen na/v dolomitnih kamninah)
  - Kamnina je topna brez ostanka ali pa so delci, ki nastanejo pri tem dovolj majhni, da ne blokirajo toka vode
  - Vezano tudi na tektoniko (na obdobja relativnega mirovanja med katerimi se kras lahko razvije)

KRAŠKE KAMNINE

- Magmatske kamnine
  - Karbonatiti
  - Kisle žilnine
- Sedimentne kamnine
  - Karbonati (10% kopnega; 20% vseh kamnin)
  - Sulfati
  - Soli (halit, silvin)
  - Kremenovi peščenjaki
- Metamorfne kamnine
  - Marmorji
  - Kvarciti
  - Gnajsi

MINERALI V KRAŠKIH KAMNINAH

- Različna topnost mineralov
- Bistveni (glavni) minerali
  - So tisti minerali po katerih se določi kamnino
  - Kalcit
  - Dolomit
- Značilni minerali
  - Tisti minerali po katerih se določi ime kamnine (npr. biotitov gnajs)
  - V karbonatnih kaminah jih praviloma ne definiramo

MINERALI V KRAŠKIH KAMNINAH

- Akcesorni minerali
  - Minerali, ki jih kamnina vsebuje do 1% in s petrološkega vidika ne spremenijo bistveno njenih lastnosti
  - Fe in Al hidroksidi
  - Sljude
  - Glineni minerali
  - Sulfidi (pirit)

MINERALI V KRAŠKIH KAMNINAH

- Minerali/sedimenti
  - Definirani glede na jamsko okolje
- Avtohtoni
  - Minerali, ki se oborijo v jami
    - Aragonit -> kalcit (vezano na razmerje Mg/Sr)
    - Sadra
    - Opal
    - Epsomit
- Paravtohtoni
  - Presedimentirani minerali/sedimenti
    - Kalcit
    - Halit
    - Ankerit
- Alohtoni
  - Prinešeni iz nekrasa (izven kraškega sistema)

RAZTAPLJANJE KRAŠKIH KAMNIN

Sklop 2

Letni semester 2011/2012

Pregled vsebine

- Nekatera teoretična izhodišča
- Hidroliza
- Zakrasevanje
  - Raztapljanje kalcita

Izhodišča

- Osnovni fizikalno kemijski proces, ki regulira raztapljanje kraških kamnin
- Pri disocijaciji vode nastanejo hidroksidni ioni in oksonijevi ioni

$$H_3O^+ + OH^- \Leftrightarrow 2H_2O$$

Izhodišča

- V okviru naših izvajanj bomo enačbo disociacije vode zapisali nekoliko poenostavljeno

$$H^+ + OH^- \Leftrightarrow H_2O$$

Hidroliza

- Na podlagi tega kemijskega ravnotežja lahko zapišemo naslednjo ravnotežno konstanto

$$K_w = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = [H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

- kjer produkt K_w imenujemo ionski produkt, vrednost pa velja pri 25°C

Izhodišča

- Pri disocijaciji molekule vode velja obnoviti tudi naslednjo definicijo

$$pH = -\log[H^+]$$

- pH<7
- pH>7

- Ioni nekaterih raztopljenih snovi reagirajo z ioni vode. Takšno ionsko reakcijo imenujemo hidroliza.
- Hidrolitske reakcije so v naravi izredno pomembne takrat, kadar poteka transport mase v raztopinah.
- **Tako in predvsem tudi v krasu**.

Izhodišča

- Pri obravnavi preperevanja (zakrasevanja) kraških kamnin velja ponoviti še izražanje kemijskih konstant, ki izhajajo iz ravnotežnih reakcij.
- Tako lahko zapišemo splošno reakcijo

$$aA + bB \Leftrightarrow cC + dD$$

Izhodišča

- Iz česar sledi zapis ravnotežne konstante *K*

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

- To zvezo imenujemo zakon o vplivu koncentracije ali Guldberg Waagejev zakon.

Izhodišča

- Kemijsko ravnotežje je odvisno od temperature.
- Tako v praksi pogosto konstanto ravnotežja podamo kot funkcijo temperature raztopine *T*, ta odnos pa je praviloma določen eksperimentalno s pomočjo empiričnih koeficientov *A*, *B*, *C*, *D*, *E*.
- Enačba je praviloma podana kot polinom.

$$\log K_i = A + BT + C/T - D\log T + E/T^2$$

Izhodišča

- Ponovimo tudi pojme ionske moči in aktivnosti.
- Aktivnosti (*i*) in koncentracije [*i*] so med seboj povezane z izrazom

$$(i) = \gamma_i [i]$$

- *γi* – koeficient aktivnosti posameznega iona

Izhodišča

- Ionska moč *I* raztopine je podana kot

$$I = \frac{1}{2}\sum_i Z_i^2 c_i$$

- Z_i - naboj posamene zvrsti
- c_i – koncentracija posamezne zvrsti

Izhodišča

- Koficient aktivnosti posamezenega iona *γi* izračunavamo s pomočjo Debye-Hücklove enačbe

$$\log \gamma_i = -AZ_i^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + Ba_i\sqrt{I}}$$

- a_i – ionski radij
- *A*,*B* – parametra odvisna od temperature

Izhodišča

- Iz zgornjega izraza izhaja, da $\gamma_i \rightarrow 1$ če $I \rightarrow 0$.
- V podzemnih vodah na katere naletimo na krasu je praviloma I<<0,1.

Hidroliza mineralov

- Voda je najbolj univerzalno topilo, ki ga zasledimo na Zemlji.
- Tako raztaplja številne minerale, pri čemer prihaja do hidrolize.
- Opraviti imamo s kongruentnimi in nekongruentnimi reakcijami.

Hidroliza mineralov

- Kongruentna reakcija – takrat kadar so produkti reakcije topni v celoti, do raztapljanja prihaja brez ostanka.
- Nekongruentna reakcija – takrat kadar so produkti reakcije le deloma topni ali netopni v celoti.

Hidroliza mineralov

- Albit v kaolinit

$$2NaAlSi_3O_8 + 2H^+ + 9H_2O \Rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 4H_4SiO_4$$

- K glinenci v kaolinit

$$2KAlSi_3O_8 + 2H^+ + 9H_2O \Rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 4H_4SiO_4$$

- Anortit v kaolinit

$$CaAl_2Si_2O_8 + 2H^+ + H_2O \Rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+}$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Predno si ogledamo raztapljanje minerala kalcita $CaCO_3$ osnovnega gradnika karbonatnih kamnin si oglejmo najprej čist sistem H_2O – CO_2.

$$CO_2^{\,g} + H_2O \Leftrightarrow CO_2^{\,aq} + H_2O$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Ta reakcija opisuje prehod plinskega CO_2^g v vodno raztopino CO_2^{aq}.
- Tako je ravnotežje med obema zvrstema določeno z ravnotežno konstanto

$$K_D = \frac{(CO_2^{aq})}{(CO_2^{g})}$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Ta odnos lahko opredelimo tudi s Henryevim zakonom

$$(CO_2^{aq}) = K_H\, p_{CO_2}$$

- ki opredeljuje odnos med parcialnim tlakom pCO_2 v ozračju in aktivnostjo raztopljenega CO_2.

SISTEM H_2O – CO_2

- Iz plinske enačbe izhaja, da sta konstanti K_d in K_H med seboj povezani z izrazom

$$K_D = K_H RT$$

- R – plinska konstanta (8,314 [J/mol])
- T – absolutna temperatura [K]

SISTEM H_2O – CO_2

- CO_2 reagira z vodo in nastane ogljikova kislina

$$CO_2 + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3$$

- Tako kot v prejšnjem primeru sledi zapis

$$K_0 = \frac{(CO_2^{aq})}{(H_2CO_3)}$$

SISTEM H_2O – CO_2

- V nekaterih primerih definiramo tudi izraz

$$[H_2CO_3{*}] = [CO_2^{aq}] + [H_2CO_3]$$

- Iz aritmetične operacije izhaja

$$K_D = \frac{(CO_2^{aq})}{(H_2CO_3{*})} = \left(1 + \frac{1}{K_0}\right)^{-1}$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Ogljikova kislina disociira na

$$H_2CO_3 \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$

- Od tod sledi zapis ravnotežne konstante

$$K_{H_2CO_3} = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(H_2CO_3)}$$

- Če izhajamo iz zapisa za $[H_2CO_3{*}]$ potem sledi

$$K_{H_2CO_3} = K_1(1 + K_0) = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(H_2CO_3{*})}$$

SISTEM H_2O – CO_2

- velja tudi

$$K_1 = \frac{(HCO_3^-)(H^+)}{(H_2CO_3^*)}$$

- Naslednji korak pri disocijaciji je

$$HCO_3^- \Leftrightarrow CO_3^{2-} + H^+$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Konstanta reakcije je definirana kot

$$K_2 = \frac{(CO_3^{2-})(H^+)}{(HCO_3^-)}$$

- Pri nadaljnjih izvajanjih bomo potrebovali tudi ionski produkt K_w, ki pa smo ga predhodno že uvedli.

SISTEM H_2O – CO_2

- Ionsko moč raztopine v sistemu H_2O – CO_2 definiramo kot

$$I = \frac{1}{2}\left([H^+] + [OH^-] + [HCO_3^-] + 4[CO_3^{2-}]\right)$$

- Ta izraz je pomemben pri nadaljnjih izračunih aktivnosti γ_i posameznih zvrsti v sistemu H_2O – CO_2. V kraških vodah lahko za nenabite zvrsti, kot sta CO_2 in H_2CO_3 ugotovimo da je $\gamma \approx 1$.

SISTEM H_2O – CO_2

- Glavna spremenljivka, ki vpliva na koncentracije CO_3^{2-}, HCO_3^-, H_2CO_3 je pH.
- Oglejmo si izvajanja, na podlagi katerih lahko podamo delež posameznih zvrsti v sistemu H_2O – CO_2.

SISTEM H_2O – CO_2

- Celotna množina (koncentracija) anorganskega ogljika C_T je določena kot

$$C_T = [CO_2^{aq}] + [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = [H_2CO_3^*] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Na podlagi zgoraj podanih odnosov lahko definiramo molske deleže α_i

$$\alpha_0 = \frac{[H_2CO_3^*]}{C_T}; \qquad \alpha_1 = \frac{[HCO_3^-]}{C_T}; \qquad \alpha_2 = \frac{[CO_3^{2-}]}{C_T};$$

SISTEM H_2O – CO_2

- Z nekaj aritmetike, tako da enačbo za C_T vstavimo v enega od izrazov za α_i, sledi

$$\frac{1}{\alpha_0} = 1 + \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} + \frac{[CO_3^{2-}]}{[H_2CO_3^*]}$$

$$\frac{1}{\alpha_1} = 1 + \frac{[H_2CO_3^*]}{[HCO_3^-]} + \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}$$

$$\frac{1}{\alpha_2} = 1 + \frac{[HCO_3^-]}{[CO_3^{2-}]} + \frac{[H_2CO_3^*]}{[CO_3^{2-}]}$$

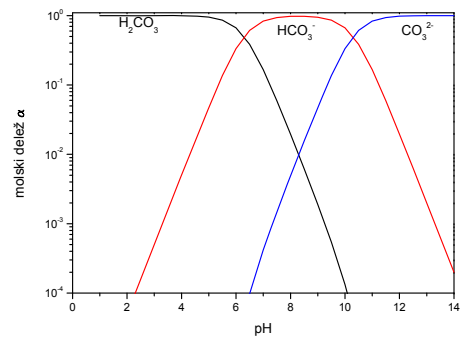
SISTEM H_2O – CO_2

- Na podlagi zgornjih treh izrazov ob upoštevanju zakona o vplivu koncentracij in izrazov za izračun aktivnosti dobimo

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{K_1}{\gamma_{HCO_3^-}\gamma_{H^+}[H^+]} + \frac{K_1K_2}{\gamma_{CO_3^{2-}}\gamma^2_{H^+}[H^+]^2}\right)^{-1}$$

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{\gamma_{HCO_3^-}\gamma_{H^+}[H^+]}{K_1} + \frac{\gamma_{HCO_3^-}K_2}{\gamma_{CO_3^{2-}}\gamma^2_{H^+}[H^+]}\right)^{-1}$$

$$\alpha_2 = \left(1 + \frac{\gamma_{CO_3^{2-}}\gamma^2_{H^+}[H^+]^2}{K_1K_2} + \frac{\gamma_{CO_3^{2-}}\gamma_{H^+}[H^+]}{K_2\gamma_{HCO_3^-}}\right)^{-1}$$



SISTEM H_2O – CO_2

- Na območju kjer je pH<4 je prisotna le zvrst H_2CO_3* med tem ko je koncentracija HCO_3^- in CO_3^{2-} praktično zanemarljiva.
- Z naraščanje pH pride do disociacije H_2CO_3 in v raztopini prične prevladovati HCO_3^-, tako pod pH=8,3 v raztopini skorajda ni CO_3^{2-}.
- Nad pH=8.3 pa se prične disociacija HCO_3^- in pri pH=12 nastopa le še CO_3^{2-}.

SISTEM H_2O – CO_2

- Odnos, ki je prikazan na zgornjem diagramu, je le v manjši meri odvisen od temperature in aktivnosti, zlasti v podzemnih vodah, ki nastopajo na krasu, saj so aktivnosti relativno nizke.

SISTEM H_2O – CO_2

- Diagram nam pokaže tudi dejstvo, da je CO_3^{2-} v kraških vodah zelo redko prisoten, prav tako pa tudi H_2CO^3, saj zaradi puferske sposobnosti karbonatnih kamnin v krasu le redko zasledimo vode z nizkim pH.

TOPNOST $CaCO_3$

- Če bi raztopili majhen košček kalcita $CaCO_3$ v destilirani vodi in preprečili dostop zračnemu CO_2 ter počakali nekaj tednov bi lahko opazovali naslednjo disocijacijsko enačbo

$$CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

TOPNOST $CaCO_3$

- Če zapišemo zakon o vplivu koncentracij, brez upoštevanja aktivnosti, sledi

$$K_{CaCO_3} = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{[CaCO_3]} = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$$

TOPNOST $CaCO_3$

- ker iz steheometričnega razmerja izhaja

$$[Ca^{2+}] = [CO_3^{2-}]$$

- sledi izraz za topnostni produkt kalcita K_{CaCO3}

$$K_{CaCO_3} = [Ca^{2+}]^2$$

TOPNOST $CaCO_3$

- Pri laboratorijskih pogojih je topnostni produkt kalcita $K_{CaCO3}=10^{-8,3}$ kar ustreza koncentraciji $[Ca^{2+}]=10^{-4,15}$=0,06 mmol/l.
- Podatki o koncentracijah Ca^{2+} v naravnih vodah pa kažejo, da se koncentracije gibljejo na intervalu od 1 do 5 mmol/, kar je skoraj stokrat več, kot to izhaja iz topnostnega produkta.

TOPNOST $CaCO_3$

- Višje koncentracije Ca^{2+} so posledica delovanja ogljikove kisline H_2CO_3 iz predhodne diskusije pa je razvidno, da je koncentracija slednje v veliki meri odvisna od pH kot glavne spremenljivke.
- <u>Zaradi tega so natančne meritve pH v kraških vodah izredno pomembne, čeprav so nihanja relativno majhna</u>.

TOPNOST $CaCO_3$

- Na tem mestu velja uvesti pojem indeksa nasičenja SI.
- Če izhajamo iz topnostnega produkta kalcita K_{CaCO3} zapisanega z aktivnostmi v ravnotežju –*eq*

$$K_{CaCO_3} = (Ca^{2+})_{eq}(CO_3^{2-})_{eq}$$

TOPNOST $CaCO_3$

- potem je nasičenje Ω definirano kot kvocient ionskega produkta *IAP* in topnostnega produkta K_{sol}

$$\Omega = \frac{IAP}{K_{sol}} = \frac{(Ca^{2+})\,(CO_3^{2-})}{K_{CaCO_3}}$$

- pri čemer so aktivnosti (Ca^{2+}) in (CO_3^{2-}) definirane glede na dejansko stanje raztopine, ki je lahko prenasičena ali podnasičena glede na kalcit

TOPNOST $CaCO_3$

- V praksi indeks nasičenja definiramo kot

$$SI = \log \Omega$$

- Če je SI=0 imamo opraviti z ravnotežjem; če je SI<0 imamo opraviti s podnasičenjem in če imamo opraviti z SI>0 imamo prenasičeno raztopino.

TOPNOST $CaCO_3$

- Včasih o raztopinah, ki so podnasičene na določen mineral govorimo tudi o »agresivnih« raztopinah, ker se mineral v takšni raztopini še lahko raztaplja.
- Pri nasičenih raztopinah pa praviloma prihaja do obarjanja mineralov.

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Preperevanje apnenca v katerem v celoti prevladuje mineral kalcit lahko zapišemo z naslednjo kemijsko reakcijo:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- To je reakcija, ki jo imenujemo zbirna reakcija ali globalna reakcija.
- V realnem sistemu imamo pri preperevanju kalcita opraviti s številnimi ravnotežnimi reakcijami, kjer voda H_2O in ogljikov dioksid CO_2 na različne načine »napadata« površino apnenca.

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

$$CaCO_3 + H^+ \Leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

$$CaCO_3 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} + H_2O$$

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- V določenih sistemih se lahko pojavijo tudi naslednja ravnotežja

$$CaCO_3^0 \Leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

- Kjer $CaCO_3^0$ označuje molekularno obliko kalcita v raztopini.

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Od tod sledi, da imamo lahko opraviti tudi z ravnotežno reakcijo

$$CaHCO_3^+ \Leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Obe zgornji reakciji se pojavljata predvsem v raztopinah, kjer imamo opraviti z visokimi koncentracijami organskih spojin (npr. huminske in fulvinske kisline), kar pa je v kraških sistemih redkost, zato obe reakciji in zvrsti, ki izhajajo iz njiju zlahka zanemarimo.

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Iz predhodne diskusije lahko razberemo, da imamo v sistemu $CaCO_3$ – H_2O – CO_2 opraviti z naslednjimi zvrstmi:

Ca^{2+}, CO_3^{2-}, HCO_3^-, H_2CO_3, H^+, in H_2O

- Hkrati pa je iz tega razvidno, da imamo navkljub relativno majhnemu številu zvrsti, opraviti s kompleksnim sistemom.

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Pri obravnavi katere koli raztopine v naravi izhajamo iz dejstva, da je raztopina nevtralna. Iz tega sledi, da je vsota negativnih nabojev enaka vsoti pozitivnih nabojev.
- Tako lahko v sistemu *CO_2-H_2O- $CaCO_3$* zapišemo naslednjo vsoto:

$$2\left[Ca^{2+}\right] + \left[H^+\right] = \left[HCO_3^-\right] + 2\left[CO_3^{2-}\right] + \left[OH^-\right]$$

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- Na območju 4 < pH < 8,4 lahko z 2% natančnostjo zapišemo odnos

$$2\left[Ca^{2+}\right] = \left[HCO_3^-\right]$$

- Dovolimo pa si lahko še nekaj poenostavitev. V sistemu, kjer imamo od mineralov opraviti le z kalcitom $CaCO_3$ velja naslednji približek za ionsko moč *I*

$$I = 3\left[Ca^{2+}\right]$$

SISTEM CO_2-H_2O- $CaCO_3$

- V primeru prisotnosti Mg kalcitov pa velja približek

$$I = 3\left(\left[Ca^{2+}\right] + \left[Mg^{2+}\right]\right)$$

OPREDELITEV SISTEMA

- V naravi raztapljanje kalcita $CaCO_3$ pod vplivom ogljikovega dioksida CO_2 poteka pod zelo različnimi pogoji. Tako v grobem opredelimo tri skupine pogojev, ki jih lahko obravnavamo kot termodinamske sisteme geokemijskega sistema CO_2-H_2O- $CaCO_3$.

OPREDELITEV SISTEMA

- Zaprt sistem.
  - O tem sistemu govorimo takrat, kadar v raztopini ni zunanjega vira ogljikovega dioksida CO_2, tako se ta med raztapljanjem ves čas porablja, njegova koncentracija pa se s časom do vzpostavitve kemijskega ravnotežja zmanjšuje.
  - Lep primer takšnega sistema so globlji predeli kraškega vodonosnika, ki niso v stiku z atmosfero, zato se porabljeni CO_2 ne more nadomeščati.

OPREDELITEV SISTEMA

- Odprt sistem.
- V tem sistemu se zračni CO_2 neprestano obnavlja, raztopina je z njim neprestano v ravnotežju.
- Tako se ves CO_2, ki se porabi z raztapljanjem kalcita $CaCO_3$ nadomesti s CO_2 iz zraka.
- Lep primer takšnih sistemov so tekoče vode, na primer tok reke preko struge razvite v apnencih (npr. Blejski vintgar).

OPREDELITEV SISTEMA

- Prehodno območje.
  - To je sistem v katerem podzemna voda v krasu preide iz začetnega odprtega sistema v končni zaprt sistem.
  - Tak sistem nastopi predvsem takrat, kadar imamo na razpolago omejeno množino CO_2, prav tako pa tudi omejen volumen vode, ki raztaplja kalcit.
  - Takšne razmere se pojavljajo predvsem v nezasičenem območju kraškega vodonosnika.

PREHODNO OBMOČJE

- Raztapljanje v prehodnem območju lahko obravnavamo kot prehodna stanja v območju fizikalno kemijskih pogojev, ki definirajo bodisi odprt ali zaprt sistem.
- Takšne sisteme najpogosteje zasledimo v nezasičenem ali vadoznem območju kraškega vodonosnika.
- V relativno enostavnih geoloških razmerah ravnotežje v sistemu H_2O- $CaCO_3$-CO_2 ravnotežje kontrolirajo koncentracije Ca^{2+} in parcialnega tlaka CO_2.

PREHODNO OBMOČJE

- Pri nadaljnjih fizikalno kemijskih izvajanjih izhajamo iz predpostavke, da raztapljanje $CaCO_3$ poteka dovolj počasi, tako, da so zvrsti v katerih nastopa ogljik med seboj v ravnotežju.
- Poleg tega predpostavljamo, da je v vodi raztopljen CO_2 v ravnotežju z zračnim CO_2.

PREHODNO OBMOČJE

- Volumen raztopine, ki jo obravnavamo je definiran kot V_l, ta raztopina pa je v stiku z omejenim volumnom plina v zraku V_g.
- Podobno kot že predhodno, celotno množino ogljika definiramo kot

$$C_T = \left(\left[Ca^{2+}\right] + \left[HCO_3^-\right]_i + \left[H_2CO_3^*\right]_i + \left[CO_3^{2-}\right]_i\right)V_l + \left[CO_2^g\right]_i V_g =$$
$$= \left(\left[HCO_3^-\right] + \left[H_2CO_3^*\right] + \left[CO_3^{2-}\right]\right)V_l + \left[CO_2^g\right]V_g$$

PREHODNO OBMOČJE

- pri tem pa gre seveda za ogljik, ki je tudi posledica raztapljanja kalcita.
- En mol Ca^{2+} ustreza enemu molu CO_3^{2-}.
- Tako v zgornji enačbi $[Ca^{2+}]$ podaja koncentracijo $[CO_3^{2-}]$, ki izhaja iz raztapljanja kalcita koncentracije $[\ ]_i$ pa se navezujejo na zvrsti, ki so posledica raztapljanja zračnega CO_2 v vodi.
- Koncentracije, ki so podane na desni strani enačbe pa podajajo celotno koncentracijo posamezne zvrsti.

PREHODNO OBMOČJE

- Iz Henryevega zakona izhaja

$$\left[CO_2^g\right] = \frac{\left[H_2CO_3^*\right]}{K_H RT}\left(1 + \frac{1}{K_0}\right)^{-1}$$

- Če si ogledamo vrednosti pred začetkom raztapljanja, takrat ko je $[Ca^{2+}]=0$ zapišemo:

PREHODNO OBMOČJE

$$\left[H_2CO_3^*\right]_i = K_H\, p_{CO_2}^i\left(1 + \frac{1}{K_0}\right)$$

$$\left[HCO_3^-\right]_i = \sqrt{\left[H_2CO_3^*\right]_i \frac{K_1}{\gamma_{H^+}^i \gamma_{HCO_3^-}^i}}$$

$$\left[CO_3^{2-}\right]_i \approx 0$$

PREHODNO OBMOČJE

- Iz dejstva, da je raztopina kot celota nevtralna, sledi

$$2\left[Ca^{2+}\right] + \left[H^+\right] = \left[HCO_3^-\right] + 2\left[CO_3^{2-}\right] + \left[OH^-\right]$$

PREHODNO OBMOČJE

- Za potrebe nadaljnjega izvajanja uvedemo nekatere spremenljivke

$$\chi = \frac{V_g}{V_l} \qquad K'_w = \frac{K_w}{\gamma_{H^+}\gamma_{OH^-}}$$

$$K'_2 = K_2 \frac{\gamma_{HCO_3^-}}{\gamma_{H^+}\gamma_{CO_3^{2-}}} \qquad f = 1 + \frac{\chi}{\left(1+\frac{1}{K_0}\right)K_H RT}$$

$$v = f\left[H_2CO_3^*\right]_i + \left[HCO_3^-\right]_i \qquad w = f\frac{\gamma_{H^+}\gamma_{CO_3^{2-}}}{K_1}$$

PREHODNO OBMOČJE

- Če povsem algebraično med seboj odštejemo enačbo za masno ravnotežje C_T od enačbe za elektronevtralnost raztopine in to enačbo preuredimo tako, da pri tem upoštevamo še zakone o vplivu koncentracij dobimo enačbi

PREHODNO OBMOČJE

$$\left[Ca^{2+}\right] + \left[H^+\right] - v - \frac{K'_w}{\left[H^+\right]} + \left(w\left[H^+\right] - \frac{K'_2}{\left[H^+\right]}\right)\left[HCO_3^-\right] = 0$$

$$2v - \left[H^+\right] + \frac{K'_w}{\left[H^+\right]} = \left[HCO_3^-\right]\left(1 + 2w\left[H^+\right]\right)$$

PREHODNO OBMOČJE

- Če združimo še ti dve enačbi sledi

$$\left[Ca^{2+}\right] + \left[H^+\right] - v - \frac{K'_w}{\left[H^+\right]} + \left(w\left[H^+\right] - \frac{K'_2}{\left[H^+\right]}\right)\left(2v - \left[H^+\right] + \frac{K'_w}{\left[H^+\right]}\right)\left(1 + 2w\left[H^+\right]\right)^{-1} = 0$$

PREHODNO OBMOČJE

- Opraviti imamo z zapletenim polinomom četrte stopnje, ki ga lahko rešimo le numerično.
- Iz zapisa tega polinoma je razvidno, da podaja odvisnost med koncentracijami protonov, to je pH, in koncenteracij Ca^{2+}.

PREHODNO OBMOČJE

- Pri izračunavanju izhajamo iz poenastavitve, ki smo jo že vpeljali

$$I = 3\left[Ca^{2+}\right]$$

PREHODNO OBMOČJE

- Tako nam ni potrebno izračunavati koeficientov aktivnosti γ_i z iteracijo.
- Ko izračunamo $[Ca^{2+}]$ ali pa $[H^+]$ zlahka sledi še izračun koncentracij preostalih zvrsti $[CO_3^{2-}]$, $[HCO_3^-]$, $[H_2CO_3]$, $[H_2CO_3^*]$ in $[CO_2^{aq}]$.

PREHODNO OBMOČJE

- Ker je v večini naravnih kraških sistemov pH<8 je zaradi koncentracija $[OH^-]$ zelo nizka.

PREHODNO OBMOČJE

- Tako se zgornji polinom poenostavi v enačbo, ki jo lažje ovrednotimo

$$[H^+]^2 + [H^+]\left(2[Ca^{2+}] + \frac{1}{w}\right) + \frac{1}{w}\left([Ca^{2+}] - v\right) = 0$$

PREHODNO OBMOČJE

- Če to enačbo preuredimo sledi

$$[H^+] = -\frac{1}{2}\left(2[Ca^{2+}] + \frac{1}{w}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{4[Ca^{2+}] + \frac{4v}{w} + \frac{1}{w^2}}$$

- Na podlagi česar lahko ponovno izračunamo vse ostale zvrsti v raztopini.

PREHODNO OBMOČJE

- Za boljše razumevanje celotne izpeljave si oglejmo še enkrat konstante in spremenljivke, ki smo jih vpeljali zgoraj.
- Spremenljivka χ podaja razmerje med volumnom tekočine V_l in volumnom plina V_g.
  - To razmerje pa ni zgolj numerična vrednost temveč podaja stopnjo odprtosti ali zaprtosti sistema.
  - Višja kot je vrednost spremenljivke χ bolj je sistem odprt, velja pa tudi obratno.
  - Če je vrednost χ = 0 imamo opraviti z zaprtim sistemom.

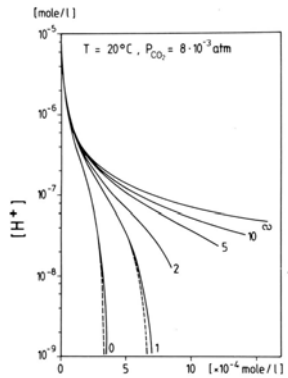


Fig. 2.9

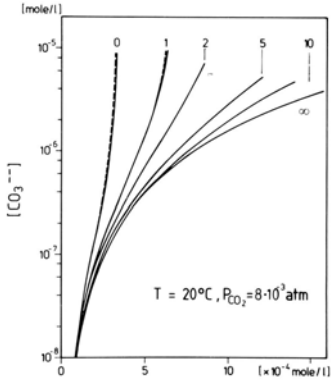


Fig. 2.10

ODPRT SISTEM

- Če ponovno zapišemo enačbo, ki smo jo že spoznali

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

- in zapišemo zakon o vplivu koncentracij

$$K_{CaCO_3} = \frac{[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2}{[CO_2^{aq}]}$$

ODPRT SISTEM

- ter preko zveze (CO_2^{aq})=$K_H pCO_2$, ki smo jo že vpeljali v predhodnih izvajanjih, zapišemo

$$K_{open} = K_H K_{CaCO_3} = \frac{[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2}{p_{CO_2}}$$

ODPRT SISTEM

- ker iz steheometrije izhaja

$$2[Ca^{2+}] = [HCO_3^-]$$

- sledi iz preureditve enačbe zakona o vplivu koncentracij

$$[Ca^{2+}] = \sqrt[3]{K_{open} p_{CO_2} / 4}$$

ODPRT SISTEM

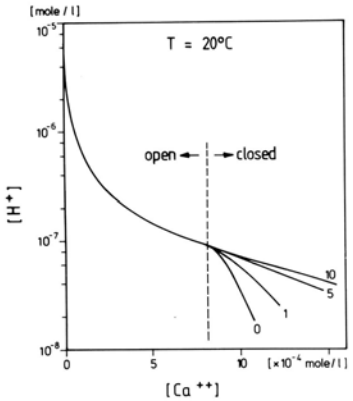
- Izraz, ki smo ga izpeljali ima velik praktičen pomen.
- Če iz naše interpretacije in kemijskih analiz vode izhaja, da imamo opraviti z apnenci v katerih nastopa le kalcit in da lahko naš sistem interpretiramo kot odprt,
  - potem lahko ob poznavanju koncentracije Ca^{2+} s pomočjo zgornje enačbe izračunamo parcialni tlak CO_2, kar je izredno pomemben podatek pri interpretaciji pogojev v kraškem vodonosniku in njegovem razvoju.
- Hkrati pa lahko ta izračun izkoristimo tudi za izračun ostalih zvrsti v sistemu.

ZAPRT SISTEM

- Pri zaprtem sistemu imamo praviloma opraviti s podzemno vodo, ki na začetku svoje poti raztopi določeno množino CO_2 nato pa je pri svoji nadaljni poti skozi vodonosnik izolirana od dodatnih virov CO_2.

ZAPRT SISTEM

- Tak sistem praviloma obravnavamo tako, da opazujemo obnašanje sistema do neke koncentracije Ca^{2+} kot odprt sistem, nato pa od te točke dalje kot zaprt sistem, pri katerem pa predpostavimo stopnjo zaprtosti sistema.
- Izračune izvedemo na podoben način, kot smo to podali za sistem prehoda, pri čemer moramo definirati le stopnjo zaprtosti sistema χ.



RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Izračune, ki smo jih izvedli za kalcit zlahka razširimo tudi na dolomit ali katerikoli drug karbonat.
- Matematično gledano pri dolomitu v sistem dodamo še eno spremenljivko.

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Disociacijo dolomita lahko zapišemo kot

$$CaMg(CO_3)_2 \Leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$$

- Zapišemo enačbo, ki podaja nevtralnost raztopine. Sledi

$$2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}] = [HCO_3^-]$$

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- ker iz steheometrije izhaja

$$[Ca^{2+}] = [Mg^{2+}]$$

- sledi

$$4[Ca^{2+}] = [HCO_3^-]$$

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Če v enačbo za disociacijo dolomita vključimo še sistem H_2O – CO_2 sledi kemijska enačba

$$2CO_2^g + 2H_2O + CaMg(CO_3)_2 \Leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$$

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Iz disociacijske enačbe izhaja, da je topnostni produkt dolomita definiran kot

$$K_{dol} = \frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}]^2}{[CaMg(CO_3)_2]} = [Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}]^2$$

- ki pri 10°C znaša $10^{-16,9}$ mol^4/l^4

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Če pri nadaljnih izvajanjih upoštevamo že uvedene konstante K_1, K_2, K^H in pa parcialni tlak pCO_2 sledi izraz

$$[Ca^{2+}][Mg^{2+}][HCO_3^-]^4 = K_{dol}\left(p_{CO_2} K_H \frac{K_1}{K_2}\right)^2$$

RAZTAPLJANJE DOLOMITA

- Preko zgornjih izrazov enakosti koncentracij zaradi steheometrije pa sledi še izraz

$$[Ca^{2+}] = \sqrt[6]{\frac{1}{256} K_{dol}\left(p_{CO_2} K_H \frac{K_1}{K_2}\right)^2}$$

Raztapljanje sadre (1)

- Obsežne jamske sisteme najdemo tudi v sadri, katere raztapljanje v vodi pa ima enostavnejšo termodinamiko kot kalcit ali celo dolomit.
- Če si ogledamo disociacijo sadre sledi ravnotežna enačba:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$$

Raztapljanje sadre (2)

- Topnostni produkt sadre

$$K_g = \frac{[Ca^{2+}][SO_4^{2-}]}{[CaSO_4 \cdot 2H_2O]} = [Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$$

- Iz zgornjih enačb izhaja, da na raztapljanje sadre vplivajo predvsem drugi ioni, ki lahko vplivajo na ionsko moč raztopine ali pa minerali, ki prav tako disocirajo bodisi Ca^{2+} ali SO_4^{2-}.

Raztapljanje kremenice (1)

- Če želimo imeti kolikor toliko jasno sliko o procesih raztapljanje mineralov, ki tvorijo kamnine v katerih lahko nastanejo jame si moramo ogledati še raztapljanje kremenice SiO_2.

Raztapljanje kremenice (2)

- Kremenica ima zelo slabo topnost, vendar pa lahko hidrolizira, kar lahko zapišemo s kemijsko reakcijo

$$SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4$$

- Hidrolizirano obliko kremenice imenujemo tudi kremenova kislina, ki jo sestavljajo štiri OH^- skupine vezane na centralni atom silicija.
- V drugačni obliki formulo zapišemo tudi kot $Si(OH)_4$.

Raztapljanje kremenice (3)

- Pri standardnih temperaturah znaša njena topnost med 6 in 10 mg/l, njena topnost pa zelo naraste pri višjih temperaturah.
  - Tako pri 100°C topnost narasten na okoli 60 mg/l.
  - Prav zaradi tega lahko v nekaterih geotermalnih vrtinah ali ob gejzirjih opazujemo sigi podobne tvorbe.

Raztapljanje kremenice (4)

- Pri dokaj visokih alkalnih pogojih, ko je pH > 9, silicijeva kislina disociira

$$H_4SiO_4 \rightarrow H_3SiO_4^- + H^+$$

$$H_3SiO_4^- \rightarrow H_2SiO_4^{2-} + H^+$$

- Ti pogoji so le redko doseženi. Pojavijo se lahko v kvarcitih in kremenovih peščenjakih, kjer so vode rahlo alkalne.

Mešanje raztopin (1)

- Opazovanja različnih morfoloških oblik na stiku rovov
- Opazovanja razvoja jam v območjih
- Te oblike glede na svojo lego v prostoru napeljujejo na to, da so nastale na območju, kjer je prišlo do mešanja raztopin z različnim kemijskim stanjem
- Böglijev efekt

Mešanje raztopin (3)

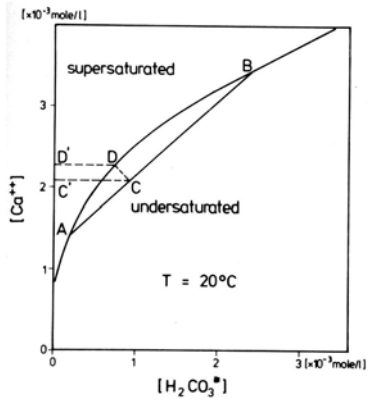
- Mešalno razmerje

$$[H_2CO_3*]_m = \frac{V_1}{V}[H_2CO_3*]_1 + \frac{V_2}{V}[H_2CO_3*]_2$$

- Böglijev efekt
  - Omejitve zaradi različne hitrosti raztapljanja mineralov odvisne od koncentracij (aktivnosti)

Mešanje raztopin (4)

- Mešanje sladke in slane vode
  - Morska voda je prenasičena na kalcit
    - Spremenjeni fizikalno kemijski pogoji zaradi povečevanja topnosti
  - Intenzivna območja zakrasevanja na stikih



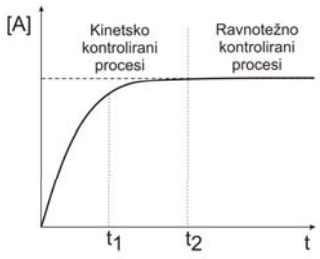
Kinetika (2)

- Kinetika raztapljanja kraških kamnin
  - Zakonitosti, ki podajajo hitrost raztapljanja mineralov
- Pomemben vpliv na razvoj krasa in večine morfoloških oblik značilnih za kras

Kinetika (3)

- Raztapljanje mineralov, ki tvorijo kraški vodonosnik, je odvisna od
  - vzpostavitev kemijskega ravnotežja,
  - če pa to ni vzpostavljeno, pa od hitrosti raztapljanja in od hitrosti toka vode skozi vodonosnik in s tem od dolžine zadrževalnih časov.

Kinetika (4)



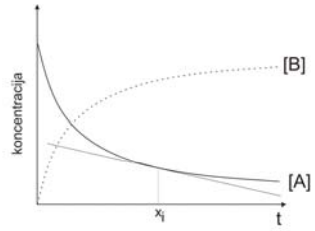
Kinetika (5)

- Oglejmo si preprosto enačbo

$$A \rightarrow B$$

- v kateri lahko koncentracijo [A] zasledujemo v odvisnosti od časa

Kinetika (6)



Kinetika (7)

- Tako lahko na zgornjem diagramu hitrost reakcije *v* ob poljubnem času x_1 določimo kot tangento v tej točki, za poljubno točko na celotni krivulji pa lahko zapišemo:

$$v = -\frac{d[A]}{dt}$$

Kinetika (8)

- Ker koncentracija reaktanta A upada s časom je ta hitrost negativna. Istočasno pa hitrost reaktanta B narašča, zato je njegova hitrost pozitivna, kar lahko zapišemo kot

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{dt}$$

Kinetika (9)

- Za nekoliko bolj zapleteno reakcijo

$$A + 2B \rightarrow 3C$$

$$v = \frac{d[C]}{dt} = -3\frac{d[A]}{dt} = -\frac{3}{2}\frac{d[B]}{dt}$$

Kinetika (10)

- Iz zgornjega zapisa izhaja, da je zelo pomembno zapisati hitrost reakcije eksplicitno.
- Način po katerem se spreminja hitrost reakcije imenujemo **red reakcije**.

Kinetika (11)

- Tako lahko navedemo primer, ko je bilo z eksperimentom ugotovljeno, da je hitrost reakcije proporcionalna potenci α reaktanta A in potenci β reaktanta B sledi izraz

$$v = k[A]^{\alpha}[B]^{\beta}$$

Kinetika (12)

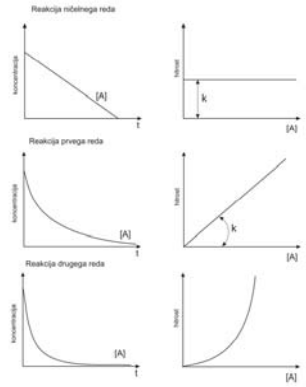
- Za takšno reakcijo pravimo, da je reda α glede na reaktant A in reda β glede na reaktant B. Celotni red reakcije pa je definiran kot

$$n = \alpha + \beta + \ldots$$

Kinetika (13)

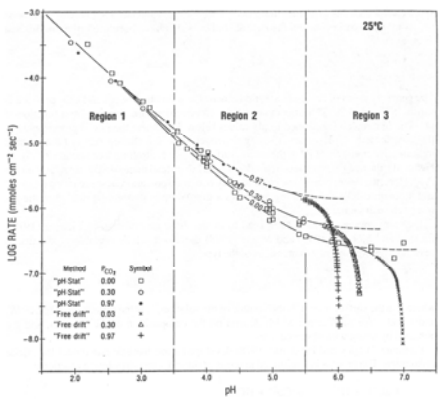
- Konstanto *k* imenujemo **konstanta reakcijske hitrosti**.
- Red reakcije α pa lahko definiramo s splošno enačbo

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^{\alpha}$$



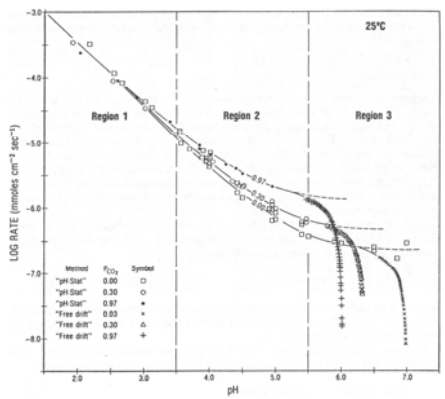
Kinetika (15)

- Čeprav je raztapljanje kalcita kot najpomebnejšega minerala v apnencih pa kinetika raztapljanja ni enostavna.
- Iz številnih eksperimentov izhaja, da se hitrost raztapljanja spreminja v odvisnosti od koncentracije posameznih zvrsti v sistemu $CaCO_3$-H_2O- CO_2, prevsem od parcialnega tlaka CO_2 in od pH.



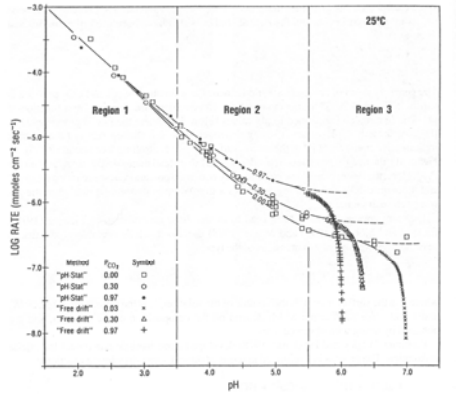
Kinetika (17)

- Že hiter pogled na ta območja pokaže, da se hitrosti raztapljanja razlikujejo v odvisnosti od pH.
- V območju, kjer je pH nižji od 3,5 je raztapljanje v veliki meri odvisno od premešanosti raztopine,
  - to pa pomeni, da je v tem območju reakcija raztapljanja odvisna predvsem od procesov na površini mineralov.



Kinetika (18)

- Pri višjih pH vrednostih raztapljanje ni več toliko odvisno od koncentracij protonov temveč od parcialnega tlaka CO_2,
- iz česar izhaja, da je raztapljanje odvisno tako od procesov na površini kot tudi od hitrosti transporta,
  - to je kroženja raztopine.
- V tretjem območju pa opazimo zelo hiter padec hitrosti raztapljanja.



Kinetika (19)

- V literaturi zasledimo več pristopov obravnave hitrosti raztapljanja kalcita.
- Tako v morski vodi obravnavamo raztapljanje kalcita z enačbo

$$R = k\frac{A}{V}(1-\Omega)^n$$

Kinetika (20)

- Zgornja enačba je empirična
- Procesno obravnavanje kinetike
  - Izhajamo iz reakcij s katerimi smo obravnavali karbonatno ravnotežje

Kinetika (21)

$$CaCO_3 + H^+ \Leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

$$CaCO_3 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^-$$

Kinetika (22)

- Prva reakcija opredeljuje raztapljanje v območju do pH<3,5, druga reakcija pa podaja vpliv H_2CO_3* pri višjih pH.
- Iz laboratorijskih opazovanj izhaja, da je v okoli pH=7 hitrost raztapljanja neodvisna od pH in parcialnega tlaka pCO_2,
- V tem območju je pomembna tretja reakcija, ki podaja hidrolizo kalcita.

Kinetika (23)

- Vse tri reakcije lahko združimo z bilančno enačbo raztapljanja

$$R = R_{fw} + R_b$$

- Katere pomen je sledeč;
  - celotno raztapljanje kalcita *R* je vsota raztapljanja *Rfw* (premika ravnotežja v desno) in obarjanja *Rb* (premika ravnotežja v desno).

Kinetika (24)

$$R_{fw} = k_1\left[H^+\right] + k_2\left[H_2CO_3*\right] + k_3\left[H_2O\right]$$

$$R_b = k_4\left[Ca_{2+}\right]\left[HCO_3^-\right]$$

- Če obe zgornji enačbi združimo sledi

$$R = R_{fw} + R_b = k_1\left[H^+\right] + k_2\left[H_2CO_3*\right] + k_3\left[H_2O\right] - k_4\left[Ca_{2+}\right]\left[HCO_3^-\right]$$

Kinetika (25)

- Iz empiričnih podatkov izhaja, da pri pH>6 vpliv pH na hitrost raztapljanja upada, tako je odvisna predvsem od parcialnega tlaka pCO_2.
- Če izhajamo iz zgornje nekoliko preoblikovane enačbe in ob upoštevanju aktivnosti sledi

$$R = \frac{d\left(Ca^{2+}\right)}{dt} = R_{fw} - k_4\left(Ca^{2+}\right)^2$$

Kinetika (26)

- Enačba izhaja iz premisleka po katerem iz steheometrije hidrolize kalcita sledi $[Ca^{2+}] = [HCO_3^-]$. Opraviti imamo z diferencialno enačbo z ločljivimi spremenljivkami

$$\frac{d\left(Ca^{2+}\right)}{\left(R_{fw} - k_4\left(Ca^{2+}\right)^2\right)} = dt$$

Kinetika (27)

- ter s pomočjo integracije

$$\int_0^{\left(Ca^{2+}\right)_t} \frac{d\left(Ca^{2+}\right)}{\left(R_{fw} - k_4\left(Ca^{2+}\right)^2\right)} = \int_0^t dt$$

Kinetika (28)

- Rešitev integrala

$$\frac{1}{2\sqrt{R_{fw}k_4}} \ln\left[\frac{\left(\sqrt{R_{fw}} + \sqrt{k_4}\left(Ca^{2+}\right)_t\right)}{\left(\sqrt{R_{fw}} - \sqrt{k_4}\left(Ca^{2+}\right)_t\right)}\right] = t$$

- Rešitev poiščemo z numerično iteracijo

Kinetika (29)

- Zastavi se seveda vprašanje kako ocenimo vrednost *Rfw*.
- Pri obravnavi hitrosti raztapljanja izhajamo iz predpostavke o mikroskopski reverzibilnosti raztapljanja kalcita, po kateri je na površini minerala tanka plast raztopine, ki je nasičena s kalcitom, od tod sledi $Rfw=[Ca^{2+}]_s^2$.

Kinetika (30)

- Kot ilustracijo si oglejmo rezultat, ki ga dobimo s pomočjo zgornjih izvajanj.
- Pri parcialnem tlaku $pCO_2=10^{-1,5}$ bara je 95% nasičenje doseženo v 38000 sekundah, kar ustreza 10,7 uram.
- S podobnim pristopom bi lahko izpeljali tudi enačbe za obarjanje kalcita.

Inhibicija

- Vplivi na raztapljanje kalcita:
  - Prisotnost raztopin z višjo ionsko močjo povečuje topnost
  - Vpliv Mg^{2+}
  - Vpliv Sr^{2+}
  - Vpliv elementov v sledovih

SPELEOGENETSKI PROSTOR

Semester 2011/2012

Sklop 3

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Speleogenetski prostor je
  - tisti del sistema kraške kamnine v katerem se vzpostavi tok vode, tako da voda v sistem doteka in iz sistema izteka,
  - pri tem pa se kot posledica raztapljanja in masnega transporta v raztopni v kamnini razvijejo nove pore.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- S hidrogeološkega stališča lahko ugotavljamo:
  - spreminjanje geometrije por, ki iz prvotne medzrnske ali razpoklinske poroznosti ali njihove kombinacije (t.i. dvojna ali kombinirana poroznost) tekom speleogenetskega procesa preidejo v kanalsko poroznost.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Speleogenetski proces opredelimo kot kateri koli proces, ki privede do spremembe primarne poroznosti kamnine v sekundarno kanalsko poroznost.
- O speleogenetskih procesih govorimo tudi, ko prihaja do sprememb že vzpostavljene kanalske poroznosti.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Pri speleogenezi govorimo o nastanku
  - razvoju kraških votlin,
  - kraških kanalov
  - kraških votlin
  - kraških jam.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- O <u>kraških kanalih</u> govorimo predvsem takrat, kadar je izražena in poudarjena ena prostorska komponenta.
- O <u>kraških votlinah</u> pa govorimo, kadar imamo v mislih kateri koli prazen prostor znotraj kraške kamnine, ne glede na njegovo obliko.
- O <u>kraških jamah</u> govorimo predvsem takrat, kadar kraške votline obravnavamo s stališča raziskovanja, tako da so dovolj velike za človekov prehod.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Pri razvoju kraških votlin in s tem kanalske poroznosti ločimo:
  - primarno fazo in
  - sekundarne faze.
- Kot primarno fazo razumemo obdobje znotraj sistema kraške kamnine, ko se začne razvijati kanalska poroznost.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Kot primarno fazo bi lahko opredelili tisto obdobje v katerem so robni pogoji sistema, ki so privedli do začetka tvorbe kanalov, ostali nespremenjeni.
- Ko se ti primarni robni pogoji spremenijo, se spremenijo tudi pogoji razvoja kanalov in s tem sistem kraške kamnine preide v eno od sekundarnih faz.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- V sekundarnih fazah, ki sledijo primarni fazi v različnih časovnih obdobjih, pa lahko pride tudi do sprememb kanalske poroznosti, ki je nastala v primarni fazi.
- Mejo med primarno in sekundarno fazo je težko postaviti natančno.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Nastanek kanalske poroznosti v kamnini je odvisen od:
  - litoloških in
  - strukturnih lastnosti kamnine.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Strukturne lastnosti kamnine, ki opredeljujejo nastanek kraškega kanala so:
  - lezike in druge sedimentne teksture,
  - prelomi,
  - narivi,
  - razpoke,
  - poškodbe nastale ob medplastovnih zdrsih.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- V to skupino lahko prištejemo že obstoječe speleogenetske strukture, ki so nastale v predhodnih fazah zakrasevanja ter deformacijske strukture, ki so posledica porušitev kamnin, ki so nastale z več zaporednimi fazami zakrasevanja.

SPELEOGENETSKI PROSTOR

- Litološke lastnosti kamnine, ki opredeljujejo razvoj kraškega kanala so:
  - mineraloške lastnosti kamnine,
  - zrnavost,
  - struktura in tekstura,
  - primarna poroznost in
  - mehanska trdnost.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Lezike so strukturni element, ki ima zelo pomembno vlogo pri nastanku kanalske poroznosti ali kraških votlin.
- Lezika je ploskev v kamnini, katere nastanek je vezan na proces sedimentacije in je lahko posledica začasne prekinitve sedimentacije ali pa posledica spremembe v procesu sedimentacije.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Lezike na razvoj kanalske poroznosti vplivajo tako v začetni fazi razvoja kanala ali ob začetju (tudi t.i. incepcija), kot tudi pri nadaljnjem razvoju.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Lezike so tista območja, ki so potencialno zelo primerna za začetje. To so območja v kamnini, kjer so zaradi sprememb ob sedimentaciji prisotne tudi geokemijske spremembe.
- Razlaga nastanka lezik:
  - Ena od hipotez pravi
    - to so območja, kjer je pri sedimentaciji na meji sediment voda prišlo do sprememb v Eh in pH pogojih, do te mere, da je postalo okolje sedimentacije bolj redukcijsko.
    - Zaradi tega se v območju lezike nahajajo povečane koncentracije pirita FeS_2, ki ob pojavu toka vode oksidira in nastane H_2SO_4, kar pospešuje raztapljanje kraške kamnine.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Poleg geokemijskih pogojev, ki nastopajo na območju lezik te na nastanek kanalov vplivajo tudi z nekaterimi drugimi svojimi lastnostmi.
- Pomembna je:
  - razprostranjenost lezike,
  - njena odprtost,
  - oblikovanost in
  - odprtost.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Na razvoj kanalov vpliva tudi prisotnost morebitnih polnil, kot so glineni minerali.
- Pomemben vpliv na nastanek kanalov ima tudi gostota lezik.
  - Tam, kjer je vertikalna gostota lezik velika, se kanali praviloma ne razvijejo.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Opazovanja kažejo, da lezike pomembno vplivajo na nastanek nekaterih kraških votlin, kljub vsemu pa je njihov celotni delež pri razvoju votlin relativno majhen.
  - Na Dinarskem krasu so votline nastale ob manj kot 10% lezik v stratigrafskem stolpcu.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Prelomi in narivi so nezveznosti, ki so vezane na premike v skorji.
- O obeh strukturah govorimo praviloma takrat, ko imajo ti strukturni elementi zgradbo.
- Na območju preloma tako govorimo:
  - o zunanjem območju in
  - O notranjem območju.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Ti dve območji sta lahko ločeni s tektonskim zrcalom.
- Glede na lego v zgradbi preloma se kras lahko razvije ali pa ne.
- Znotraj zunanjega območja ločimo:
  - razpoklinsko območje,
  - porušeno območje in
  - zdrobljeno območje. S stališča razvoja kanalske poroznosti je razpoklinsko območje zelo ugodno, med tem ko je porušeno območje manj ugodno. V zdrobljenem območju se kanali pojavijo le izjemoma. Notranje območje preloma je za nastanek kanalov zelo neugodno. Tako znotraj tega območja ločimo zdrobljeno območje, milonitno cono in pa območje kataklastita, ki predstavlja tektonsko kamnino.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- S stališča razvoja kanalske poroznosti je razpoklinsko območje zelo ugodno, med tem ko je porušeno območje manj ugodno.
- V zdrobljenem območju se kanali pojavijo le izjemoma.
- Notranje območje preloma je za nastanek kanalov zelo neugodno.
- Znotraj tega območja ločimo zdrobljeno območje, milonitno cono in pa območje kataklastita, ki predstavlja tektonsko kamnino.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Znotraj notranjega območja ločimo:
  - zdrobljeno območje,
  - milonitno cono in
  - območje kataklastita
    - predstavlja tektonsko kamnino.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Narivne strukture so bolj asimetrične kot prelomne strukture in usmerjene položno.
  - Njihova struktura je definirana vertikalno pravokotno na smer narivanja.
  - Praviloma narivi predstavljajo bariero za tok podzemne vode.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Razpoko lahko opredelimo kot območje, kjer je natezna trdnost kamnine enaka nič.
- Glede na genezo poznamo naslednje vrste razpok:
  - strižne,
    - natezne,
    - relaksacijske in
    - deformacijske
      - (pri deformacijah na prehodu iz elastoplastičnega v elastično območje).

STRUKTURNE LASTNOSTI

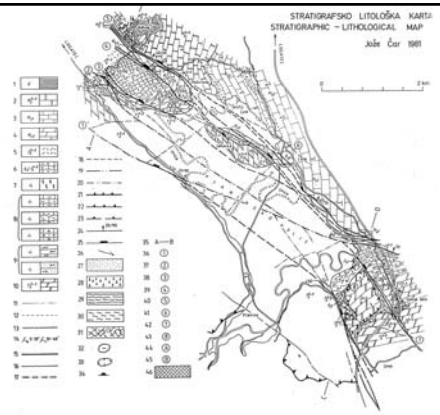
- S stališča toka podzemne vode in nastanka krasa so pomembne tiste razpoke, ki so dovolj odprte in ki so med seboj povezane
  - (t.i. povezanost ali konektivnost).

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Ob premikanju kamninskih mas lahko pride tudi do zdrsov po ploskvah lezik.
  - Takšne premike imenujemo <u>medplastovni zdrsi</u>.

STRUKTURNE LASTNOSTI

- Zaradi nepravilne oblike lezik se zaradi medplastovnih zdrsov pojavijo območja, ki se nekoliko bolj odprejo, hkrati pa je s tem omogočen lažji tok vode in s tem se ustvarijo razmere za nastanek kanalov.
- Hkrati z medplastovnimi zdrsi se vzporedno s temi premiki pojavijo poškodbe v kamnini, ki lahko prav tako predstavljajo območje potencialno za zakrasevanje.



LITOLOŠKE LASTNOSTI mineralogija

- Mineraloške lastnosti kamnine pomembno vplivajo na razvoj krasa.
- Večino kraških kamnin znotraj katerih se razvije kras lahko obravnavamo kot monomineralne kamnine.

LITOLOŠKE LASTNOSTI mineralogija

Apnenec iz Lipice

Mineral	Utežni delež
$CaCO_3$	97,9 – 98,7 %
SiO_2	0,007 %
Fe_2O_3	0,05 %
Al_2O_3	0,05 %
S	0,05 %

LITOLOŠKE LASTNOSTI mineralogija

- Najpogostejše nečistoče, ki jih zasledimo v kraških kamninah so:
  - minerali glin in kremen.
  - Iz terenskih raziskav izhaja, da se v apnencih, ki vsebujejo 20 do 30% nečistoč kras praviloma ne razvije.
  - To je povezano s tem, da nečistoče blokirajo raztapljanje, prav tako pa pogosto povzročajo, da se znotraj kamnin tvorijo skupki.
  - Vpliv nečistoč je lahko zelo raznolik.
    - Vpliv drobnih glinenih delcev bo povsem drugačen od vpliva debelih zrn peska.

LITOLOŠKE LASTNOSTI mineralogija

- Večina raziskav kaže, da je topnost apnencev v tesni povezavi z vsebnostjo CaO.
  - Ta odnos ni povsem premosorazmeren.
- Laboratorijske meritve so pokazale, da na topnost apnencev v veliki meri vpliva prisotnost Mg^{2+}.
  - Med tem, ko je dolomit mnogo slabše topen, kot apnenec, pa vsebnost Mg v rešetki kalcita, zaradi česar prihaja do napak v strukturi kristalov, povečuje njegovo topnost.

LITOLOŠKE LASTNOSTI mineralogija

- Pri topnosti karbonatnih mineralov velja praviloma naslednji vrstni red topnosti:
  - od najbolj topnega do najmanj topnega:
  - Mg-kalcit z visoko vsebnostjo – aragonit – Mg-kalcit z nizko vsebnostjo – kalcit – dolomit.

LITOLOŠKE LASTNOSTI velikost zrn

- Na raztapljanje kraških kamnin v veliki meri vpliva velikost zrn.
- V splošnem velja pravilo, da se z manjšanjem velikosti zrn povečuje topnost kamnine.

LITOLOŠKE LASTNOSTI velikost zrn

- Vzrok za vpliv velikosti zrn na topnost kamnine leži v dejstvu, da se z manjšanjem velikosti zrn povečuje specifična površina:
  - to je razmerje med celotno površino zrn v kamnini in njihovo maso.
  - Veliko študij je pokazalo, da so mikriti ali biomikriti bolje topni in da topnost znatno upade pri sparitih, zlasti tam, kjer sparitna zrna predstavljajo 40 do 50% volumna kamnine.

LITOLOŠKE LASTNOSTI velikost zrn

- Kljub temu pa topnost kamnin ni enoznačno povezana z velikostjo zrn.
- Pri zelo drobnih in enakomerno pakiranih zrnih lahko pride do tega, da je pakiranje zrn zelo učinkovito, zaradi česar so posamezna zrna manj izpostavljena, površina, ki je izpostavljena je tako bolj gladka.
  - Takšna površina je značilna za tako imenovano afanitsko ali porcelansko strukturo kamnin.
    - (Takšno opredelitev praviloma uporabljamo za magmatske kamnine v katerih zrn ne moremo ločiti niti pod mikroskopom.)

LITOLOŠKE LASTNOSTI velikost zrn

- Poleg velikosti zrn na raztapljanje v veliki meri vpliva tudi sortiranost zrn.
- V primeru, ko imamo opraviti z bolj nesortiranimi zrni je površina, ki je izpostavljena bolj hrapava in s tem je večja tudi specifična površina izpostavljenih zrn.
  - Kot primer lahko navedemo biomikrite, ki so bolj topni kot čisti mikriti, ker drobni fragmenti fosilov poudarjajo hrapavost.

LITOLOŠKE LASTNOSTI velikost zrn

- Poleg vpliva velikosti zrn na raztapljanje kamnine velikost zrna v kamnini v veliki meri vpliva tudi na razvoj površinskih oblik.
  - Tako se fasete v z vodo zalitih kanalih razvijejo predvsem v drobnozrnatih kamninah.
  - Prav tako pa tudi žlebiči na površini.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- **Poroznost**
- Že pri obravnavi čistega modela krasa smo ugotovili, da je za razvoj krasa, predvsem kraških kanalov in votlin potrebna učinkovita poroznost kamnine, brez katere se tok skozi kraški vodonosnik ne vzpostavi.
- Deloma pa smo se poroznosti lotili že ko smo razpravljali o primarni in sekundarnih fazah razvoja krasa.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- Čeprav je začetna poroznost sistema kraške kamnine ključna pa bomo v literaturi o razvoju krasa pri obravnavi poroznosti naleteli na vrsto nedoslednosti.
- Prav tako pa v širši geološki in hidrološki literaturi ne bomo naleteli na enotno klasifikacijo poroznosti.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- Če si ogledamo sedimentološke opredelitve poroznost ugotovimo, da večina klasifikacij poroznost deli na:
  - primarno in
  - sekundano poroznost.
- Čeprav je tudi za preučevanje razvoja krasa razdelitev poroznosti na dve skupini vabljiva, pa podroben študij literature pokaže, da za potrebe geologije krasa sedimentološka delitev ne ustreza.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- Sedimentološke opredelitve:
  - *Primarna poroznost* sedimentnih kamnin je opredeljena kot tista, ki je nastala med njegovim odlaganjem.
  - *Sekundarna poroznost* je poroznost, ki je nastala med diagenezo kamnine.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- S stališča obravnave razvoja krasa pa sta tako primarna kot sekundarna poroznost primarni.
- Tudi razpoke, ki tvorijo razpoklinsko poroznost, z vidika krasa opredelimo kot primarno poroznost,
  - Razpoke so ključne za nastanek kanalske poroznosti, ki nas v krasu zanima.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- Razširjena klasifikacijo poroznosti.
  - Kot *primarna poroznost* je opredeljena poroznost, ki je nastala v obdobju do zaključka diageneze.
    - Primarna poroznost le redko vpliva na nastanek kanalske poroznosti
  - Kot *sekundarna poroznost*, ki jo z geometrijskega vidika opredelimo kot razpoklinsko poroznost.
  - Kot *terciarno poroznost* kanalsko poroznost, ki se je razvila iz razpoklinske in morda tudi primarne poroznosti.

LITOLOŠKE LASTNOSTI poroznost

- Klasifikacija poroznosti s stališča razvoja krasa:
  - Predkraška poroznost
    - ki je v sistemu kraške kamnine nastala pred začetkom transporta mase iz sistema kraške kamnine v raztopini.
  - Kraška poroznost

Kamnina	Poroznost
Apnenci – mikriti	< 2%
Apnenci – spariti	5 – 10%
Kreda	8 – 37%
Primarni dolomiti	0,5 – 12,5 %
Marmorji	< 1%
Peščenjaki	5 – 30 %
Kvarciti	0,8 %
Graniti	6 – 8 %

Kamnolom Lipica 1,9 %

LITOLOŠKE LASTNOSTI
trdnost

- Ustrezna trdnost kamnine je ključna za nastanek kanalske poroznosti,
  - če je trdnost kamnine presežena se bodo kanali zaprli, ali pa se takšna poroznost ne bo razvila.
- Trdnost kamnine s stališča razvoja krasa moramo obravnavati z vidika merila.

LITOLOŠKE LASTNOSTI
trdnost

- Pri manjših merilih,
  - na nivoju nekaj deset kubičnih decimetrov velikega vzorca
  - trdnost odvisna od odnosa med zrni v kamnini,
    - predvsem od trdnosti posameznih zrn in njihovega pakiranja.

LITOLOŠKE LASTNOSTI
trdnost

- V večjih merilih,
  - ko obravnavamo razvoj večjih kanalov, oziroma kraških sistemov
  - upoštevamo trdnost, ki je rezultat strukturnih odnosov na nekem območju,
    - predvsem gostote in števila posameznih tektonskih elementov.

Vrsta kamnine	Enoosna tlačna trdnost [Mpa]
Apnenci	3,4 – 34,5
Dolomiti	6,2 – 36,0
Marmorji	4,6 – 34,0
Anhidrit	2,2 – 8,0
Glinavci	3,0 – 23,0
Peščenjaki	1,2 – 24,0
Bazalti	8,0 – 36,0
Graniti	16,0 – 30,0
Kvarziti	15,0 – 63,0

Kamnolom Lipica 2,34 MPa

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Vzpostavitev toka skozi sistem kraške kamnine
  - Nujen pogoj je, da ob nekem času $t = t_o = 0$ pride do preboja in s tem do vzpostavitve toka podzemne vode
- Režim toka vode skoz razpoke
  - Laminarni režim
  - Turbulentni režim

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Reynoldsovo število

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v R}{\mu}$$

  - R hidravlični polmer (pri krožnih kanalih R=r/2, pri razpokah R=w/2)
  - ρ gostota vode
  - v hitrost vode
  - μ dinamična viskoznost vode

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Prehod iz laminarnega v turbolentni tokovni režim pri Re=500
- Pomembno prehajanje iz enega tokovnega režima v drugega
  - Prehod v turbulentni tokovni režim pri
    - w=1 do 20 mm (odvisno od gradienta)

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Enačbe, ki obravnavajo tok vode pri laminarnem tokovnem režimu in turbulentnem tokovnem režimu
- Hagen – Poiseuille enačba (laminaren režim)

$$Q = \frac{R^2 \gamma i A}{c\mu}$$

- c – konstanta za okroglo cev 2, za pravokotno cev 3
- i – gradient
- γ – specifična teža vode

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Darcy Weissbachova enačba

$$Q = A\frac{8Rgi}{f}$$

- *f* – faktor trenja (določa se s posebnimi obrazci)

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Raztapljanje kalcita v morski vodi

$$R = k\frac{A}{V}(1-\Omega)^n$$

- Podobni prisotopi uveljavljeni tudi pri študiju raztapljanja kamnine

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Procesi, ki vplivajo na razvoj kanalov
  - Difuzija na mejni plasti med kamnino in raztopino
  - Prvi Fickov zakon

$$F = -D\frac{dC}{dx}$$

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Plummer Wigleyeva enačba

$$\frac{dC}{dt} = k\frac{A}{V}(C_s - C)$$

- Modificirana Plummer Wigleyeva enačba

$$\frac{dC}{dt} = k'\frac{A}{V}\left(1-\frac{C}{C_s}\right)^n$$

- Potenca *n* se spreminja s stopnjo nasičenja, kar izhaja iz kinetike raztapljanja v sistemu $CaCO_3$-CO_2-H_2O.

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Iz teoretičnih izvajanj ter laboratorijskih meritev izhajajo naslednja opažanja o širjenju kanalov:
  - Hitrost širjenja rova je odvisna od pretoka (hitrosti)
  - Po neki določeni točki (ta je določena s fizikalno kemijskimi pogoji) hitrost v kanalu ne vpliva več na širjenje
  - Hitrost širjenja 0,1 do 1 mm/a

RAZVOJ KANALOV
fizikalne osnove

- Pojav piraterije in prevlade enega kanala nad drugimi
  - Kanal “prevzame” tok vode
- Penetracijska razdalja
  - Vezano na nasičenje
  - V zaprtem sistemu, ko upada potencial raztapljanja
  - Od te razdalje je odvisen razvoj kanalov
- Preboj
  - Prehod iz laminarnega v turbolentni režim

HIDROGEOLOGIJA KRASA

izr. prof. dr. Mihael Brenčič
Šolsko leto 2011/2012

Pregled vsebine

- Uvod
- Vodonosnik
- Kontrolni volumen
- Kraški razpoklinski medij
- Razvoj jam glede na hidrogeološki profil

Uvod

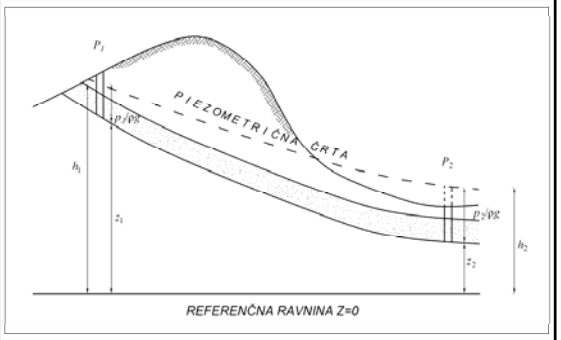
- Iz dosedanjih izvajanj izhaja, da je za nastanek in razvoj krasa ključna vzpostavitev toka vode skozi kraški sistem
  - V celotni vodni bilanci je izrazita in prevladujoča komponenta podzemnega toka
  - Površinski odtok je zelo majhen
    - V krasu površinski odtok pogosto zanemarimo
      - Le nekaj odstotkov

Vodonosnik

- Klasična hidrogeološka definicija vodonosnika
  - Sediment ali kamnina iz katerega je možno z ekonomskimi učinki zajemati (izkoriščati) podzemno vodo
  - Pojmi: akviklud, akvifob in aquitard
  - Za potrebe analize razvoja krasa in pojavljanja vode v krasu
    - Kot vodonosnik obravnavamo vse plasti (ali geološki medij), ki prevajajo vodo pod vplivom gradienta potencala, ki ga zasledimo v naravi

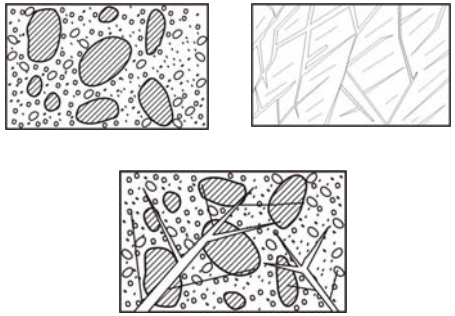
Kontrolni volumen

- Kontrolni (reprezentativni) volumen – REV
  - Litostratigrafske lastnosti
  - Poroznost
  - Mehanske lastnosti
  - Robni pogoji
  - Hidrodinamski pogoji – porazdelitev potenciala
  - Kemijsko stanje podzemne vode



Kraško razpoklinski porozni medij

- Klasifikacija poroznega medija
  - Ponovimo
    - Glede na geometrijo por opredelimo
      - Medzrnske pore
      - Razpoke
      - Kanale
    - Glede na kombinacijo
      - Medij z enojno poroznostjo
      - Medij z dvojno poroznostjo – kombinirana poroznost
      - Medij s trojno poroznostjo – kombinirana poroznost



Kraško razpoklinski porozni medij

- Kakšne vrste vodonosnikov glede na poroznost poznamo
  - Razpoklinski vodonosnik
  - Kraški vodonosnik
  - Kraško razpoklinski vodonosnik
    - Kdaj govorimo o kraško razpoklinskem vodonosniku?

Kraško razpoklinski porozni medij

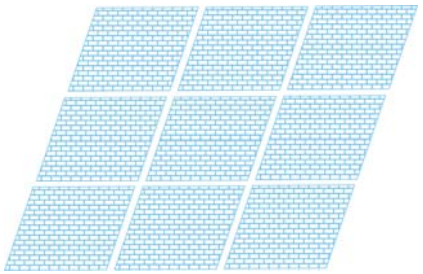
- Vpliv stopnje razpokanosti na razvoj krasa
  - Kakšna mora biti gostota razpok potrebnih za razvoj kraških kanalov?
  - Pristop ekvivalentnega poroznega medija
  - Lastnosti poroznega medija se med razvojem krasa neprestano spreminjajo
    - Kakšne so te spremembe?

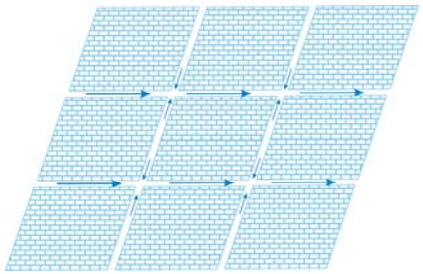
Kraško razpoklinski porozni medij

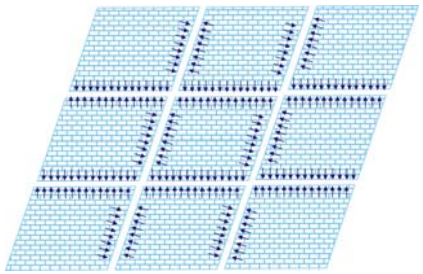
- Kraški sistem in vodonosnik, ki se iz njega razvije je izrazito:
  - Nehomogen
  - Anizotropen
- Ali se stopnja homogenosti s časom spreminja?
  - Hierarhični razvoj
    - V časovnem merilu
    - V prostorskem merilu

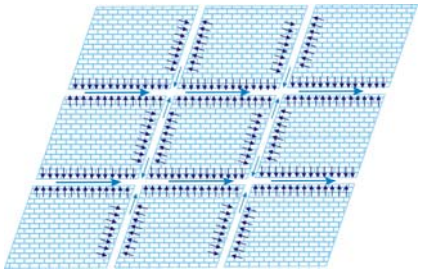
Kraško razpoklinski porozni medij

- Opazovanja kažejo, da je tok skozi razpoke ključen pri razumevanju toka
  - Pri genezi krasa
  - Pri razumevanju toka v že vzpostavljenem kraško razpoklinskem vodonosniku
- Pri natančni obravnavi toka vode v razpoklinskem mediju ugotovimo:
  - Tok v razpokah
  - Tok v blokih (matriksu) med razpokami









Kraško razpoklinski porozni medij

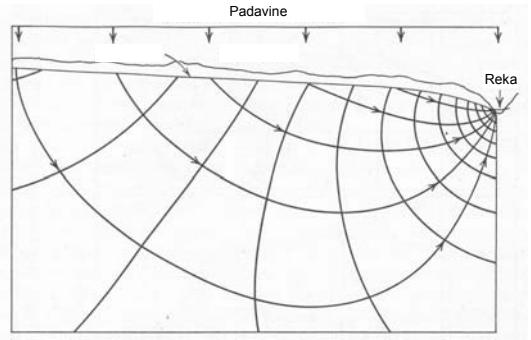
- Princip kontinuma (zveznosti)
  - Reakacija pretokov z zamikom
  - Stopnja uskladiščenosti
    - Razpoke hiter pretok, slabo uskladiščenje
    - Matriks počasen odtok, dobro uskladiščenje
      - Kemijsko stanja vode se odraža v času stika kamnine in vode
        - » V matriksu
        - » V razpokah

Kraško razpoklinski porozni medij

- Pri razvitem krasu
  - Tok v kanalih
  - Tok v razpokah
  - Tok v matriksu

Porazdelitev podzemne vode

- Porazdelitev vode znotraj kraškega sistema pomebno vpliva na razvoj kraških kanalov (jam)
- Od porazdelitve vode v kraškem sistemu je odvisna smer toka vode
  - Pretežno vertikalna
  - Pretežno “horizontalna”



Porazdelitev podzemne vode

- Vpliv tal – pedološki horizont praviloma slabše prepusten
  - Porazedlitev vode praviloma vezana na zakonitosti toka v medzrnskem poroznem mediju
  - Raztapljanje talnega CO_2 – mnogo višji parcialni tlaki kot v zraku
    - Ravnotežje vodonosnika s talnim CO_2

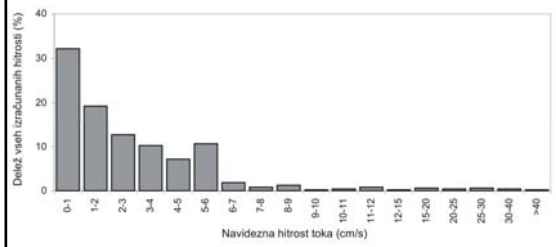
Porazdelitev podzemne vode

- Epifreatično območje
  - V kraški hidrogeologiji in pri razvoju krasa v nezasičenem območju se ji pripisuje zelo velik pomen
- Epikraško območje
  - Viseča gladina podzemne vode
  - Tudi subkutano območje

Porazdelitev podzemne vode

- Razvit kraški vodonosnik je nehomogen
  - Posledično je zelo nehomogeno hitrostno polje
    - Območja s turbulentnim tokom
    - Območja z laminarnim tokom
      - Odnos med tokom v kanalih, razpokah in matriksu
- Hitrosti toka so zelo raznolike
  - Razpon je nekaj dekad
    - Od 10^{-9} m/s do 2 m/s

Rezultati sledilnih poizkusov na območju Slovenije
navidezne hitrosti



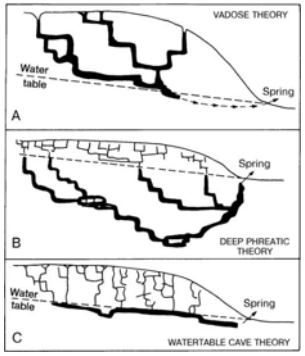
Petrič, 2009

Razvoj kraške poroznosti

- Pojavljanje jam v speleogenetskem prostoru
  - Speleogen
  - speleotem
- Jame nastopajo v svežnjih
- Jamski kanali
  - Segmenti
  - Strukturni segmenti

Razvoj kraške poroznosti

- Osnovni pogledi na razvoj jam
- Zonacija glede na območja v hidrogeološkem profilu
  - Razvoj v nezasičenem območju
  - Razvoj v freatičnem območju
  - Razvoj v območju gladine podzemne vode

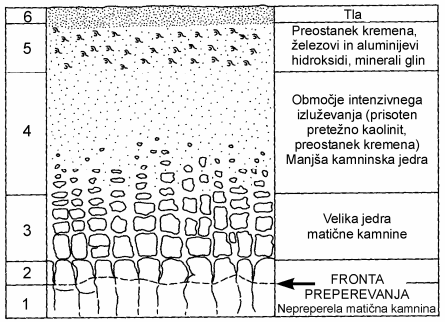


Razvoj poroznosti v nezasičenem območju

- Razvoj kanalske poroznosti v vertikalni smeri je odvisen od fizikalno kemijskih pogojev v vertikalni smeri
  - Od “potenciala raztapljanja”
  - Od vertikalne porazdelitve predkraške poroznosti
- Razvoj v območju
  - Tal
  - Epifreatičnega območja
  - Preostalege vadoznega območja

Razvoj poroznosti v nezasičenem območju

- Oblike, ki nastanejo v območju tal ("pod pedološkim horizontom)
  - Izluževanje izstopanje posameznih nehomogenosti v kamninah – strukture
  - Žepi
  - Vpliv korenin – koreninske luknje
  - Preoblikovane speleogenetske strukture



Razvoj poroznosti v nezasičenem območju

- Pojav epikraškega območja je veza na spremembe v vertikalni prepustnosti
  - Kontrasti v prepustnosti
  - Občasen pojav dokler ne pride do "pretočitve v razpoke"
  - Koncept izhaja iz opazovanja različnih uskladiščenj vode v nezasičenem območju
    - Vprašanje o vplivu na nastanek kanalov
      - Območja, ki so po prečnih oblikah rovov podobna razvoju v zasičenem območju

Razvoj poroznosti v nezasičenem območju

- Podrobnejši način pogled na gibanje vode v nezasičenem območju
  - Polzenje – učinki kapilarnih sil
    - Prenikanje brez reda
      - Podobno difuzijskemu toku
      - Neizoblikovani kanali
    - Prenikanje v koncentriranih tokovih
      - Strmi kanali
      - Žlebiči v odprtih lezikah
      - Hrapave stene
  - Prosti pad

Razvoj poroznosti v nezasičenem območju

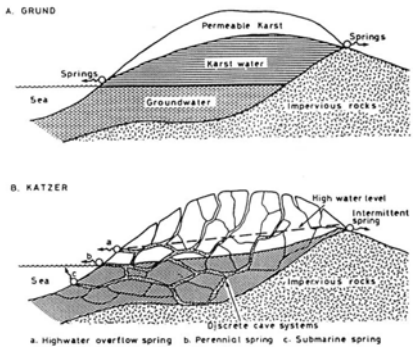
- Prosti pad:
  - V že odprtem prostoru
  - Prostopadajoči curki
    - Velika brezna
  - Kaskadni tokovi
    - Nepravilno oblikovani rovi
    - Manjša brezna
    - Tok ob geoloških strukturah

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Veliko nerazumevanja dinamike toka podzemne vode
  - Prenašanje rečnih razlag v kras
    - Konceptualno s stališča razumevanja porazdelitve vode v prostoru to ni napačno
    - Pri prenašanju rečnih shem v kras se je pozabljalo ali pa se ni razumelo, da je poleg "vidne" vode v vodotokih prisotna tudi "nevidna" voda
      - Tudi v rečnem sistemu je tok vode 3 dimenzionalen in ne zgolj 2 dimenzionalen kot se to tolmači pogosto

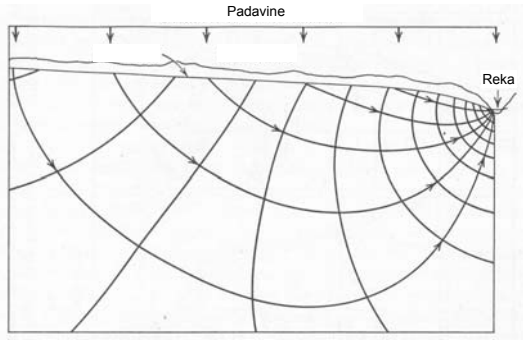
Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- V začetku 20 stoletja se razvijeta dve teoriji toka podzemne vode kraškem vodonosniku
  - Katzer (1909) – jama je rečna struga; v bokih tega kanala ni vode
  - Grund (1914) – dve vrsti podzemne vode
  - Z današnjimi očmi sta to razlagi, ki osvetljujeta isti pojav z drugega zornega kota
    - Vsaka od teorij enako površno z enako stopnjo nerazumevanja



Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Nerazumevanje krasa in porazdelitve podzemne vode je vezano tudi na nerazumevanje porazdelitve tokovnega (Hubertovega) potenciala v prostoru
  - V medzrnskem poroznom mediju je realizacija tokovnic in ploskev enakega potenciala enakomerna, ker je porozni prostor praviloma izotropen
    - Stopnja anizotropije je manjša kot v krasu



Razvoj poroznosti v zasičenem območju

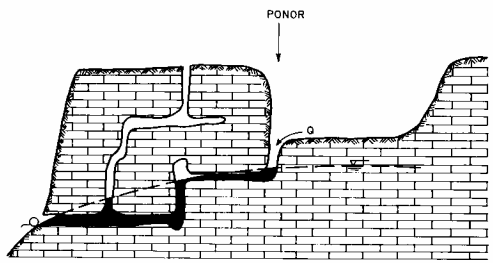
– V razpoklinskem poroznem mediju je realizacija tokovnic in ploskev enakega potenciala neenakomerna
  - Vzrok leži v anizotropiji in velikih kontrastih v prepustnosti tako razpok (nezveznosti) kot tudi matriksa (njegova prepustnost je mnogo nižja kot razpok)

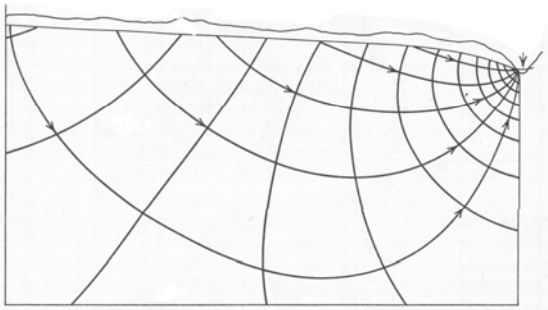
Razvoj poroznosti v zasičenem območju

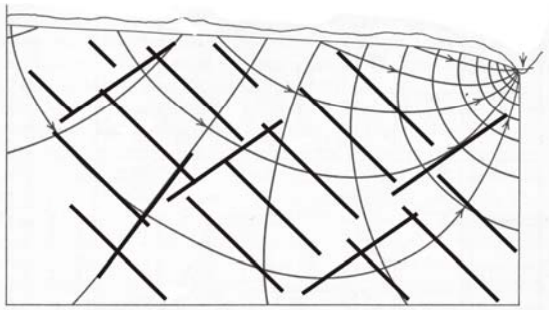
- V nekraških geomorfnih sistemih se podzemna voda napaja preko
  – Infiltracije
  – Preko površinskih vodnih teles
    - Rek in potokov
    - Jezer
- S stališča porazdelitve hidravličnega potenciala so razmere na krasu podobne
  – "razlikuje" se le realizacija
  – V nekrasu se voda infiltrira v krasu je vtok direkten

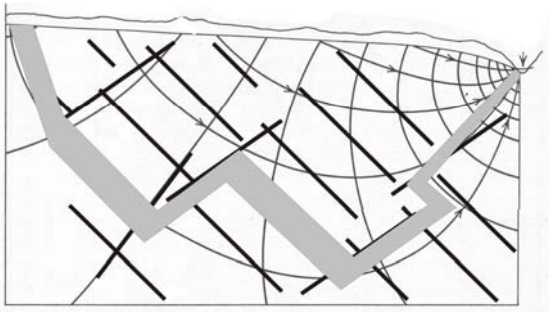
Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- V krasu napajanje kraškega vodonosnika delimo v dve skupini:
  – Avtigeno napajanje
    - Napajanje skozi nezasičeno območje
  – Alogeno napajanje
    - Napajanje v zasičeno območje





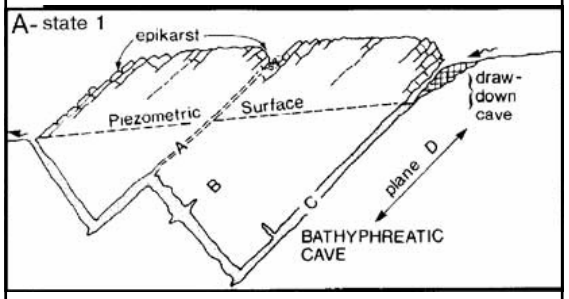




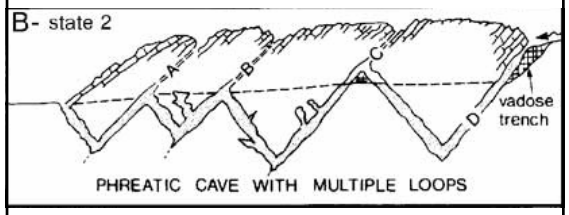
Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Ford & Ewersova teorija razvoja freatičnih zank
- Modifikacije in prilagoditve po Worthingtonu
- Novejše simulacijske študije
  - Dreybrodt,
  - Gabrovšek, Romanov, Kaufman

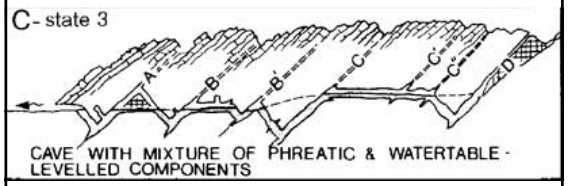
Batifreatični kanal



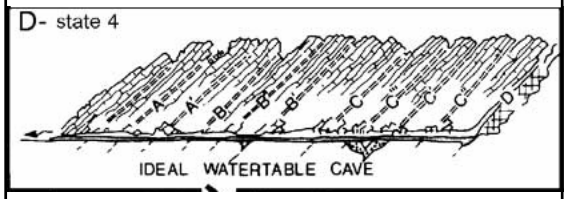
Freatični kanal z mnogo zankami

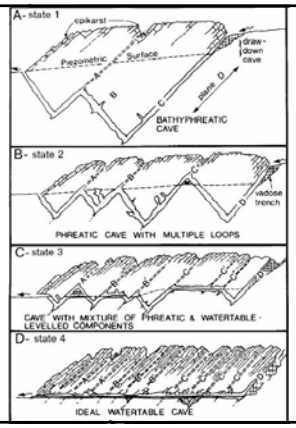


Prehod iz freatične jame v jamo v območju gladine podzemne vode



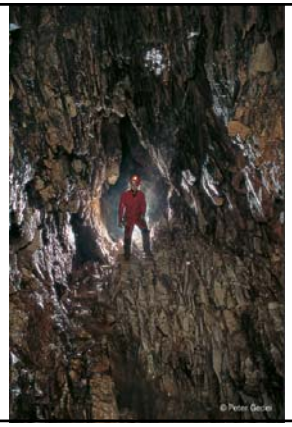
Jama gladine podzemne vode





Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Izvor freatičnih kanalov
  - Razširjne lezike
    - Praviloma elipsaste in lečaste oblike
  - Razširjene prelomne strukture
  - Freatična “brezna” in “kamini”
  - Večstopenjski nastanek
    - Kombinacija zgornjih procesov



Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Freatični kanali po nastanku
  - Singenetski
    - Osnovni razvoj v zasičenem območju
  - Paragenetski
    - Rast vzporednih kanalov zaradi zaprtja osnovnih singenetskih rovov
  - Preoblikovani
    - Vpliv podora
    - Vpliv sedimenta (Gamsov efekt)

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Palmerjeva analiza pojavljanja kanalov glede na različne strukturne elemente
  - Na podlagi analize 500 jam daljših od 3 km
  - Pregled:
    - Po lezikah 57%
    - Po razpokah 42%
    - Medzrnska poroznost 1%

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Palmerjeva razdelitev jam
  - Navzkrižna klasifikacija
  - Glede na napajanje
    - Preko površinskih depresij
    - Difuzno napajanje
    - Hipogeno napajanje
  - Glede na poroznost
    - Lezike
    - Razpoke
    - Medzrnska poroznost

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Napajanje preko površinskih depresij
  - Koncentrirano napajanje
    - Preko vrtač
      - Avtigeno napajanje
    - Preko ponorov
      - Alogeno napajanje
  - Ta vrsta jam močno prevladuje
    - Po skupni dolžini 90% vseh jam

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

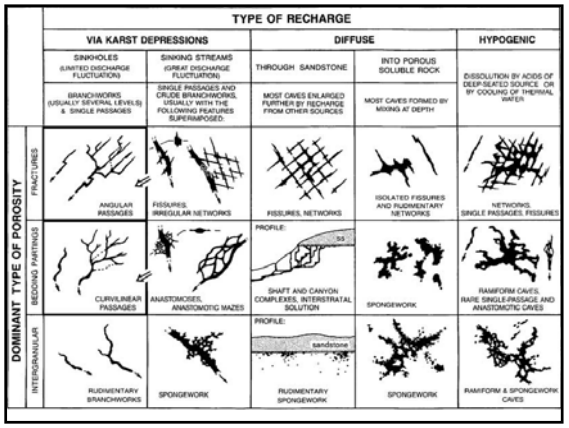
- Jame z difuznim napajanje
  - Dotok vode ni koncentriran
    - Razpršen
    - Preko medzrnskega poroznega medija (npr. peščenjakov)
    - Tok vode v dobro topno kamnino

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Jame s hipogenim napajanjem
  - Transportne tekočine s potencialom raztapljanja prihajajo “od spodaj” iz globine
    - Vezano na različne vulkanske procese
    - Termalne vode
    - Kisline različnega izvora (npr H_2S)

Razvoj poroznosti v zasičenem območju

- Morfološki opis sistema po Palmerju
  - Razvejane jame
  - Mrežne jame
  - Anastomozne
  - Gobaste
  - Razcepljene
  - Posamezni rovi



Razvoj poroznosti v območju nihanja gladine podzemne vode

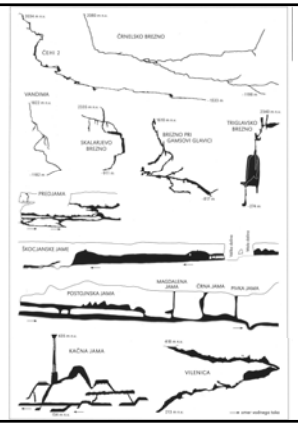
- V krasu gladina podzemne vode lahko zelo niha
  - Tudi nekaj 10 m
  - To ima lahko znaten vpliv na oblikovanje rovov
  - Poleg same dinamike nihanja gladine podzemne vode tudi vpliv alogenega sedimenta in plavlja
    - Delovanje abrazije

Razvoj poroznosti v območju nihanja gladine podzemne vode

- Praviloma za preoblikovanje jam iz freatičnega območja
- Tipične jame, ki nastajajo v tem območju
  - Ponori in požiralniki
    - Kontaktni kras
    - Fluvioglacialni vplivi
  - Večina dostopnih jam
    - sifoni

Dostopnost jam

- Definicija jame po JZS
- Delitev jam glede na njihovo dostopnost
  - Suhe
  - Vodne jame
  - Občasno zalite jame



Oblikovanost jamskih sten

- Pri preučevanju razvoja kraških kanalov izhajamo poleg tlorisa in stranskih risov tudi iz oblikovanosti jamskih sten
  - Preučujemo tako spremembe
    - V prečni smeri
    - V vzdolžni smeri
- Jamsko steno lahko obravnavamo kot nekakšen arhiv v katerem so zapisani dogodki, ki so privedli do njenega nastanka

Oblikovanost jamskih sten

- Pri interpretaciji oblikovanosti jamskih sten se moramo zavedati, da je ohranjen le del informacije
  - Zlasti tam, kjer imamo že opraviti z zelo spremenjenimi stenami
- Pri preučevanju oblikovanosti jamskih sten izhajamo iz podobnih genetskih opredelitev kot pri obravnavi celotnega jamskega svežnja

Oblikovanost jamskih sten

- Tako oblikovanost jamskih sten opazujemo s stališča nastanka jam v hidrogeološkem profilu
  - Zasičeno območje
  - Nezasičeno območje
  - Območje nihanja gladine podzemne vode
  - Stik kraškega in nekraškega hidrogeološkega sistema

Oblikovanost jamskih sten

- Ne glede na to v katerem delu hidrogeološkega profila nastopa jamska stena pa moramo izhajati iz dejstva, da gre lahko stena skozi več razvojnih faz
  - Faze, ki sledijo, lahko znatno preoblikujejo predhodne faze
    - Do te mere, da lahko na posamezno predhodno fazo sklepamo le še iz celotnega (včasih) predpostavljenega razvojnega niza
    - Tudi hkratnost procesov (nezasičeno območje)

Oblikovanost jamskih sten

- Ne glede na to kje se je stena razvijala ločimo naslednje razvojne faze stene
  - Prvotna stena
  - Koreografiranje prvotnih sten – sekundarni procesi
  - Mehanske spremembe sten – terciarni procesi
  - Prekrivanje sten

Oblikovanost jamskih sten

- Predhodno definirane razvojne faze stene so značilne za posamezna razvojna območja znotraj hidrogeološkega profila
  - Podroben pregled pa pokaže, da so si posamezni procesi, ne glede na mesto v hidrogeološkem profilu dokaj podobni

Oblikovanost jamskih sten

- Prvotna stena
  - V zasičenem območju:
    - Širjenje sten kanala pod vplivom:
      - Hidrostatičnega tlaka in hidravličnega gradienta
      - Kemijskega stanja vode
      - Profili krožne in polkrožne oblike
      - Sprememba hidravličnega polja in kemijskega stanja vode povzroči spremembe v prečnem profilu
      - Prehod iz enega območja v drugega
        - » Ključasti profili
        - » Premik rova v vertikalni ali horizontalni smeri

Oblikovanost jamskih sten

- V nezasičenem območju
  - Ob geoloških strukturah
    - Vezano na prelomna območja
      - » Razpoke
  - Po razširitvi območja
    - Curki
    - Polzenje

Oblikovanost jamskih sten

- Oglejmo si nastajanje in preoblikovanje sten, ki so značilne splošno, ne glede na to v katerem delu hidrogeološkega profila nastopajo

Oblikovanost jamskih sten

- Koreografiranje prvotnih sten – sekundarni procesi
  - Prvotna stena se preoblikuje s sekundarnimi procesi, ki so vezani na
    - Dotok vode z drugačnim kemizmom
    - Spremembo hidrodinamskih pogojev (prehod iz laminarnega v turbulentni tok)
      - Fasetiranje – velikost faset je obratno sorazmerna velikosti
    - Vpliv kondenzne vode

Oblikovanost jamskih sten

- Koreografiranje sten je težko ločiti od procesov, ki so pred tem privedli do nastanka primarnih sten
  - Zelo lep primer je nastajanje kanalov v nezasičenem območju
    - Tu že primarni procesi oblikujejo stene tako, da so nepravilnih oblik
    - Hkrati se z odprtjem prostora (z nastankom kanala) pričnejo tudi drugi procesi, ki so po svoji naravi sekundarni a že potekajo v fazi, ko primarni procesi še tečejo

Oblikovanost jamskih sten

- Mehansko preoblikovanje sten
  - Odlom:
    - Zaradi prekoračitve trdnostnih karakteristik kamnine se prvotna stena odlomi
      - Posamezen ali enkratni dogodek
    - Praviloma še lahko sledimo primarni obliki kanala
  - Zaporedno rušenje
    - Sprožijo se rušni procesi
      - Niz dogodkov med katerimi se oblikujejo podori
        - » Podorni bloki ali celo oblikovanje melišč v območju delovanja zunanje klime
      - Rov se lahko v znatni meri preoblikuje
        - » Tudi do te mere, da se prvotna oblika povsem zabriše

Oblikovanost jamskih sten

- Izsutje
  - Do tega procesa prihaja tam, kjer rov preide v porušeno ali zdrobljeno območje preloma (v zunanji ali notranji prelomni coni)
  - Kamnina, ki je poškodoovana zaradi tektonike se izsuje ali pa je erodirana z delovanjem vode
    - Voda jo odnaša
    - V odsotnosti dovolj velikega hidravličnega potenciala se lahko rov z izsutjem zapre
      - » Vzrok je v tem, da ima izsut material manjšo gostoto
    - Strogo gledano ne gre za kraški proces

Oblikovanost jamskih sten

- Prekrivanje
  - Prekrivanje z avtohtonimi sedimenti
    - Stik med sedimentom (mineraloško zelo raznoliki) in stenami v kamnini
      - Zaobljanje
      - Abrazija če je sediment grobozrnat in prihaja do pogostega masnega transporta
  - Prekrivanje z alohtonimi sedimenti
    - Siga
      - Porozna in nasičena
      - Na kontaktih različni procesi
    - Samo zasiganje predstavlja znatno preoblikovanje jamskih sten

Dokumentiranje in analiza kraških jam

- Lokacija
  - Pri dokumentiranju je potrebno čim bolj natančno podati lokacijo vhoda
  - Na krasu, kjer je orientacija otežena (zlasti v gosto poraščenem gozdu) je dobro in natančno določena lega ključna
  - Podati opis dostopa – pri opisovanju se je potrebno izogibati objektom ki niso trajni
  - Pri obravnavi posameznih pojavov vezanih na jamo je potrebno upoštevati željeno natančnost meritve

Dokumentiranje in analiza kraških jam

- Identifikacija
  - S kakšno jamo imamo opraviti
    - Npr. vodna jama, brezno ipd.
      - Pomembno predvsem pri tehniki raziskovanja
- Opredelitev zahtevnosti objekta
  - Pri raziskavah je potrebno opredeliti tehniko za "osvajanje" prostora
  - Pomebna je osnovna ideja o velikosti sistema in njegovem prostorskem raztezanju
- Izdelava topografskega načrta
  - Vpetje v topografski načrt in v druge specialne karte
  - Vnos elementov pomembnih za razumevanje nastanka kraške votline v prostor

Dokumentiranje in analiza kraških jam

- Ocena speleogenetske enote in geneze nastajanja
  - Ob risanju skic že ocenjujemo razvoj jame
    - Zasičeno, nezasičeno območje
    - Pogosto je analiza možna le na licu mesta
- Identifikacija nosilnih struktur
  - Strukturna analiza
  - Analiza inicialnih struktur
- Merjenje nosilnih struktur
  - Ekstrapolacija nosilnih struktur v prostor
    - Potrebno za identifikacijo procesov v širšem prostoru

Dokumentiranje in analiza kraških jam

- Analiza sedimentov
  - Alohtoni in avtohtoni sedimenti
  - Sedimenti pogosto odkrivajo dogodke
    - Sedimentne teksture
    - Razvoj avtohtonih sedimentov
      - Njihova oblikovanost
    - Določeni sedimenti se pojavljajo le v določenem okolju
      - Različne (časovne) faze razvoja
- Ekstrapolacija v speleogenetski prostor
  - sinteza

Dokumentiranje in analiza kraških jam

- Prikaz in ilustracija zapisnikov Jamarske zveze Slovenije
- Arhiv (kataster jam) Inštituta za raziskovanje krasa IZRK v Postojni
  - Različne vrste
  - Različen nivo informacije
  - Zelo različna kvaliteta obstoječih zapisnikov
  - Za znastveno raziskovalne namene lahko to dokumentacijo razširimo
    - Obrazci so oblikovani na podlagi dolgoletnih izkušenj številnih jamarjev

Dokumentiranje in analiza kraških votlin

- Prikaz vrste zapisnikov

POVRŠINSKE OBLIKE

Letni semester 2011/2012

Površinska oblikovanost

- Površinsika oblikovanost krasa je zelo značilna in predstavlja osnovno komponento pokrajinskega zaznavanja tega naravnega pojava
  - Poleg prisotnosti kraških jam in brezen
- Tako kot v primeru, zakrasevanja kraške kamnine, je tudi v primeru zakrasevanja površja glavni dejavnik korozija (transport mase v raztopini)

Površinska oblikovanost

- Kljub temu pa poleg raztapljanja na površinsko oblikovanost vplivajo tudi drugi procesi
  - Mehansko premeščanje materiala
  - Akumulacija materiala
- Tudi rezultat součinkovanja z drugimi “nekraškimi” procesi

Površinska oblikovanost

- Površinska oblikovanost je odvisna od:
  - Litologije in strukture
  - Padavin
  - Temperaturnih razmer
  - Mehanskih lastnosti kamnin
  - Drugih (bioloških) dejavnikov
    - Narava tal
    - Vegetacija – vrsta in obseg

Površinska oblikovanost

- Za površino so značilne globeli in vzpetine
  - Centrično oblikovane morfologije
    - Krožne in elpisaste kotanje - tloris
    - Krožne in elipsaste vzpetine - tloris
- Takšna oblikovanost je posledica prevladujočega vertikalnega odtoka

Površinska oblikovanost

- Prvotne teorije razlage oblikovanosti kraškega temeljijo na Davisovem cikličnem modelu
- Ena morfološka oblika postopno prehaja v drugo morfološko obliko
- Globeli po Cvijiću
  - Vrtača
  - Uvala
  - Kraško polje

Površinska oblikovanost

- Razlage razvoja kraškega površja temelječe na
  - Klimatski geomorfologiji
  - Tektonski geomorfologiji
- Dejansko je potrebno uporabljati razlago s pomočjo kompleksnih mehanizmov
  - Ob upoštevanju vseh kompleksnih razmerij v prostoru v katerem je pojav nastal

Hitrost korozije – zniževanje površja

- Dinamika zniževanja kraškega površja se razlikuje od dinamike zniževanja površja v nekraških geomorfnih območjih
  - Raztapljanje kamnin je prevladujoče
- Na dinamiko zniževanja površja vpliva
  - “agresivnost” vode
    - Večji del potenciala raztapljanja se porabi na površini in v globini do 10 m

Hitrost korozije – zniževanje površja

- Vpliv parcialnega tlaka CO_2
  - V tleh se parcialni tlak CO_2 zelo razlikuje od območja do območja in od klimatskega pasu do klimatskega pasu
    - Tropski klimatski pas $p(CO_2)=10^{-1,5}$ *bar*
    - Zmerno topli klimatski pas $p(CO_2)=10^{-2,5}$ *bar*
    - Polarni pas $p(CO_2)=10^{-3,5}$ *bar*

Hitrost korozije – zniževanje površja

- Opredelitev hitrosti zniževanja površja [L/t] ali [V/(tA)]
  - mm/leto
  - m/Ma
  - (enota 1 bubnoff mm/leto)
- Zelo različne izpeljanke enot, ki izhajajo iz tega odnosa

Hitrost korozije – zniževanje površja

- Meritve hitrosti zniževanja kraškega površja
  - Neposredne meritve
  - Posredne meritve
- Neposredne meritve
  - Erodimeter – mikrometrski števec
  - Standardne tablete
    - Izpostavljanje natančno opredeljenih vzorcev

Hitrost korozije – zniževanje površja

- Posredne meritve
  - Opazovanje kemijskega stanja vode v jamah in na izvirih
    - Bilanca mase, ki temelji na opazovanju kemizma in pretoka
      - Ob upoštevanju gostote
  - Morfološke analize
    - Opazovanje morfologije preko značilnih oblik ali erozijskih ostankov
      - Kraške mize

Hitrost korozije – zniževanje površja

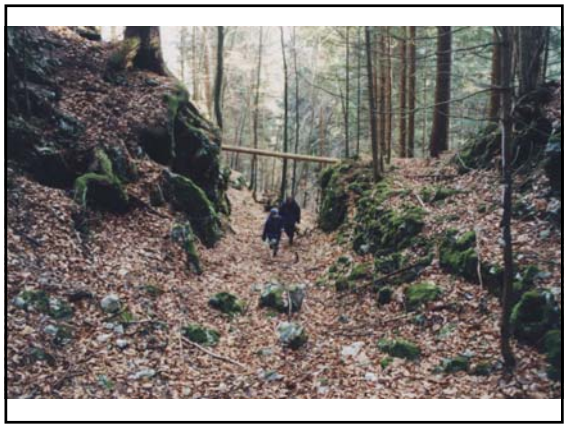
Slovenija kot celota	20 – 100 m/Ma
Porečje Ljubljanice	60 – 65 m/Ma
Matični kras	20 – 30 m/Ma
Papua Nova Gvineja	270 – 760 m/Ma
Sudeti	20 – 33 m/Ma
Zahodne Tatre	40 – 49 m/Ma

Osnovne oblike površinskih kraških oblik

- Preoblikovane geološke strukture
- Kraške uravnave
- Kraška polja
- Zaprte globeli podzemnega izvora
- Mikro oblike
- Podedovane oblike

Preoblikovane geološke strukture

- Gre za geološke oblike, ki so na površini načete z geomorfnimi procesi
  - Kraški procesi
- Vrste:
  - Škraplje
  - Tori – babe in dedci
  - Bogazi (tudi kraške ulice)
  - Vrtačasti jarki
  - Kitajski zidovi
  - Učinki menjajoče se litologije
  - Podolja
  - Mosor
  - Tektonske uvale
  - Kanjoni



Kraške uravnave

- Tudi kraški ravnik ali zaravan
  - Lahko obsežna območja velikih površin
  - Po genezi podobno nekaterim kraškim poljem
    - blizu gladine podzemne vode
      - Severnodalmatinska uravnava
- Za te morfološke oblike je značilen zelo majhen naklon
- Te oblike so praviloma izpostavljene tako, da so odprte z boka

Kraške uravnave

- Uravnave v višini podzemne vode (nem. “Vorfluter”)
- Uravnave na robovih
- Podedovane ali preslikane uravnave
  - Po geoloških strukturah
    - Najpogosteje po narivnicah
  - Pod sedimentom

Kraška polja

- Roglić: Kraška polja so oaze rečnega reliefa znotraj kraškega geomorfnega okolja
- Značilnosti:
  - Uravnano skalno ali naplavljeno dno
  - Globel, ki je zaprta z vsaj ene strani s strmimi bregovi
  - Kraški dotok in/ali kraški odtok
  - Vsaj občasne polave

Kraška polja

- Del literature opredeljuje kraško polje kot tisto kotanjo, katere prečna dolžina je daljša od 500 m – nenatančno.
- Kraška polja je predvsem potrebno obravnavati skozi oči Roglićevega opisa in skozi dejstvo, da gre praviloma za tektonsko pogojene oblike.

Kraška polja

- Klasifikacije kraških polj glede na:
  - Geološke značilnosti
  - Morfološke genetske značilnosti
  - Hidrološke značilnosti

Kraška polja

- Geološka opredelitev polj
  - Razporne kotanje (bazeni)
    - Notranjska kraška polja ob Idrijskem prelomu
  - Kontaktna polja
    - Posledica stika kraških in nekraških kamnin
    - Pogreznjene leče nekraških kamnin

Kraška polja

- Glede na hidrološke značilnosti:
  - Pritočno ponorniška
  - Prelivna
  - Izvirno ponorniška zajezenega krasa
  - Raztočno ponorniška
  - Suha polja

Kraška polja

- Morfološko genetska klasifikacija:
  - Robna
  - Periferna
  - Pretočna
  - Polja v višini gladine podzemne vode

Zaprte globeli

- Nekaj kar je “samoumevno” obravnavano kot kraško
- Odražajo procese v notranjosti kraškega masiva
  - Procesi v notranjosti se lahko navpično preslikajo tudi navzgor na območje nekrasa

Zaprte globeli

- Vrtače dinarskega tipa (ang. doline)
- Vrtače amariškega tipa (ang. sinkhole)
- Grezi
- Udornice
- Stropni udori ali okna
- Pogreznitve brez značilnih oblik
- “Aluvialne vrtače”

Vrtače

- Ovalnih (centričnih) oblik
- Različnih dimenzij
  - Natančno njihove dimenzije ni mogoče omejiti – meja napram ostalim oblikam je odprta
- Delitev po obliki
  - Skledaste
  - Lijakaste
  - Kotlaste
  - Vodnjakaste

Vrtače

- Po nastanku:
  - Korozijske
  - Udorne
  - Sufuzijske
  - Posedne

Uvale

- Pojem, ki izhaja iz Cvijićeve razlage nastanka krasa
  - Danes uvale v kraški geomorfologiji niso enoznačno razpoznane
- Opis
  - Kraška kotanja večja od vrtače, v daljši osi dolga tudi nekaj 100 m; na dnu več vrtač ali pa je dno nepravilne oblike
  - Kotanja, ki je ni mogoče uvrstiti ne med vrtače in ne med kraška polja, in katere dno je neravno

Udornice

- Nastanejo zaradi porušitve stropa votline
  - Ko se površje približa rušnemu svodu ali pa se oblika rušnega svoda spremeni zaradi spremembe oblike prečnega profila rova
- Robovi so praviloma stenaste oblike
- Nastanek
  - Trenutne porušitve
  - Postopno rušenje

Pozitivne oblike

- Kopasti vrhovi
  - Prav tako značilni za kras
  - Klima pomembno vpliva na njihov razvoj
  - Indikator sorazmerno stabilnega zakrasevanja
  - “problem samoumevnega povezovanja s tropskim krasom”

Drobne površinske oblike

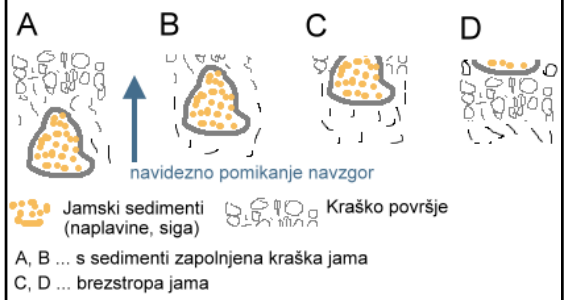
- Posledica vpliva nenasičene padavinske vode na kamnino
- Posledica vpliva huminskih kislin
  - Vpliv korenin dreves
- Tam, kjer se pojavijo drobne kraške površinske oblike mora biti kamnina odporna na druge procese preperevanja
  - Mehansko preperevanje

Drobne površinske oblike

- Žlebiči
- Škavnice ali kamenice
- Tropske oblike - gnamma

Kontaktni kras

- Prehod iz nekraške okolice v kras ali obratno
- Glede na položaj kontakta:
  - Vzvodni
  - Nizvodni
  - Bočni
  - Glede na vertikalno porazdelitev kamnin
    - Spodnji
    - Zgornji
  - Inducirani
  - Klimatski - permafrost

Podedovane oblike

- Brezstrope jame
  - Značilne negativne oblike – jarki
  - Pojavi sige na površju
  - Značilna vegetacija
  - Pojavi klasičnih jamskih sedimentov v primarni legi