

# TRAJNOST KONSTRUKCIJA II



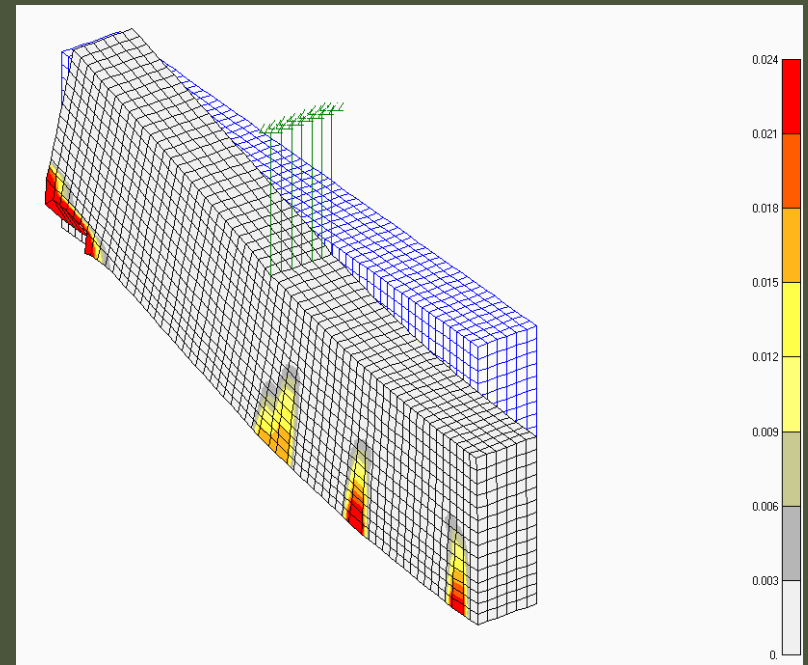
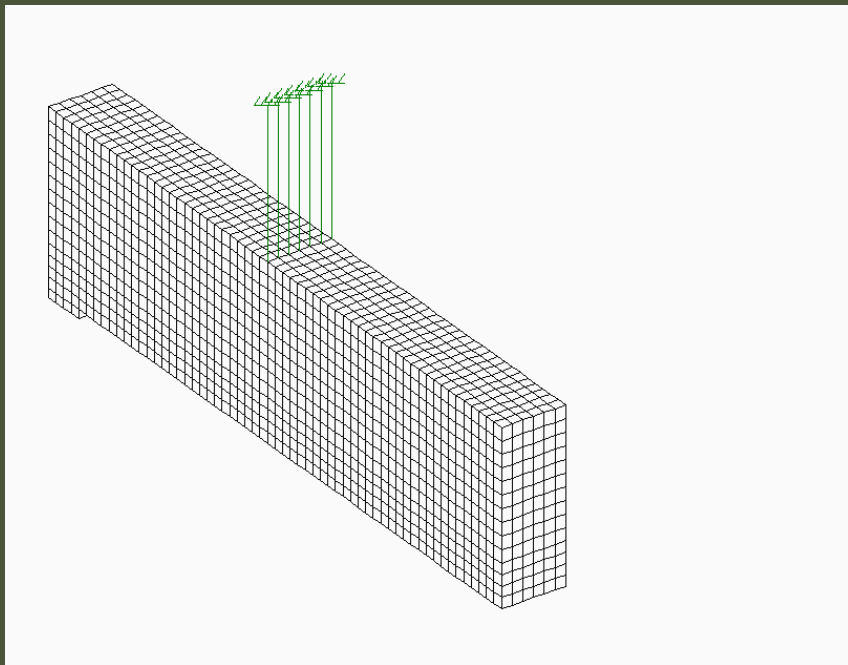
-8-

## MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA LINEARNA I NELINEARNA ANALIZA, OSNOVE MEHANIKE LOMA, MIKORAVNINSKI MODEL BETONA KOROZIJA ARMATURE U BETONU

# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA

## ▣ Statičko opterećenje – savijanje u 4 točke

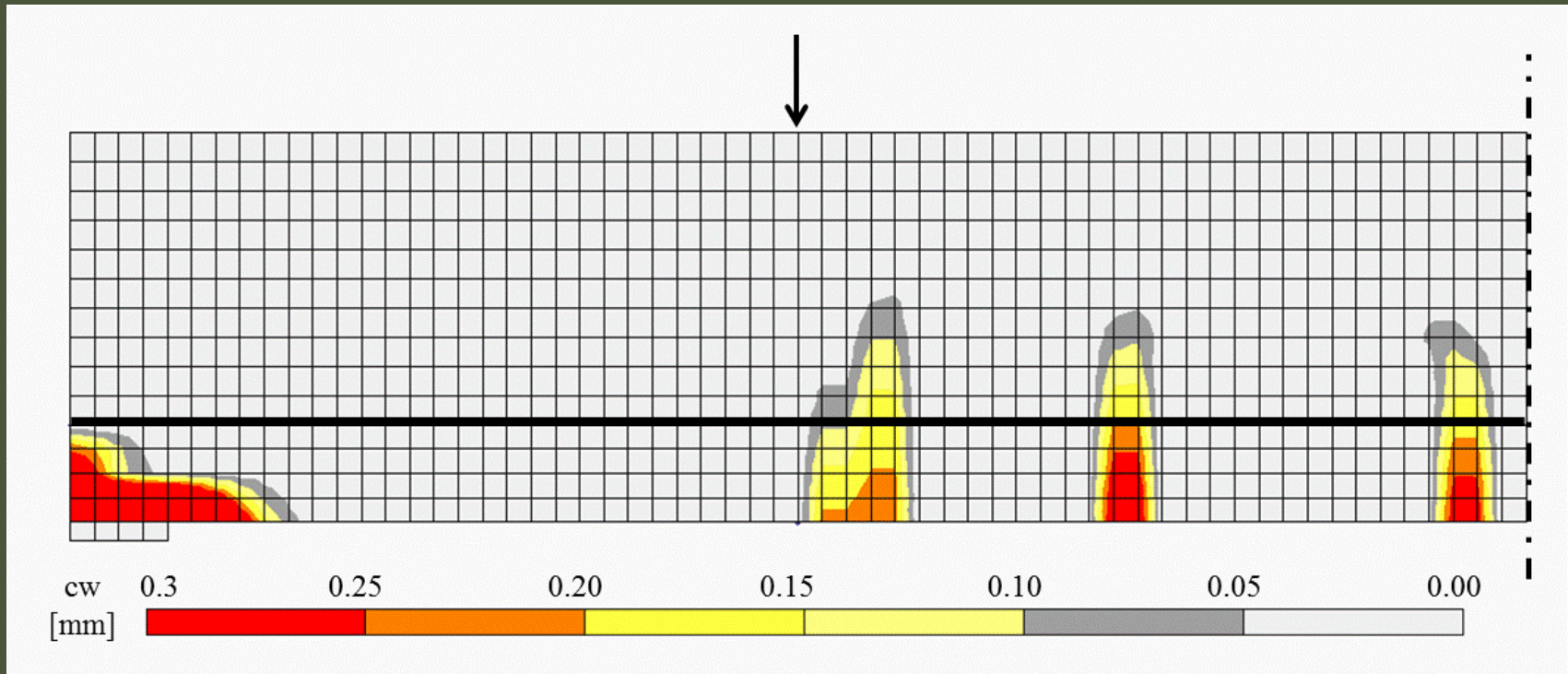
- Primijenjena simetrija modela



Kušter Marić et al. 2017

# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA

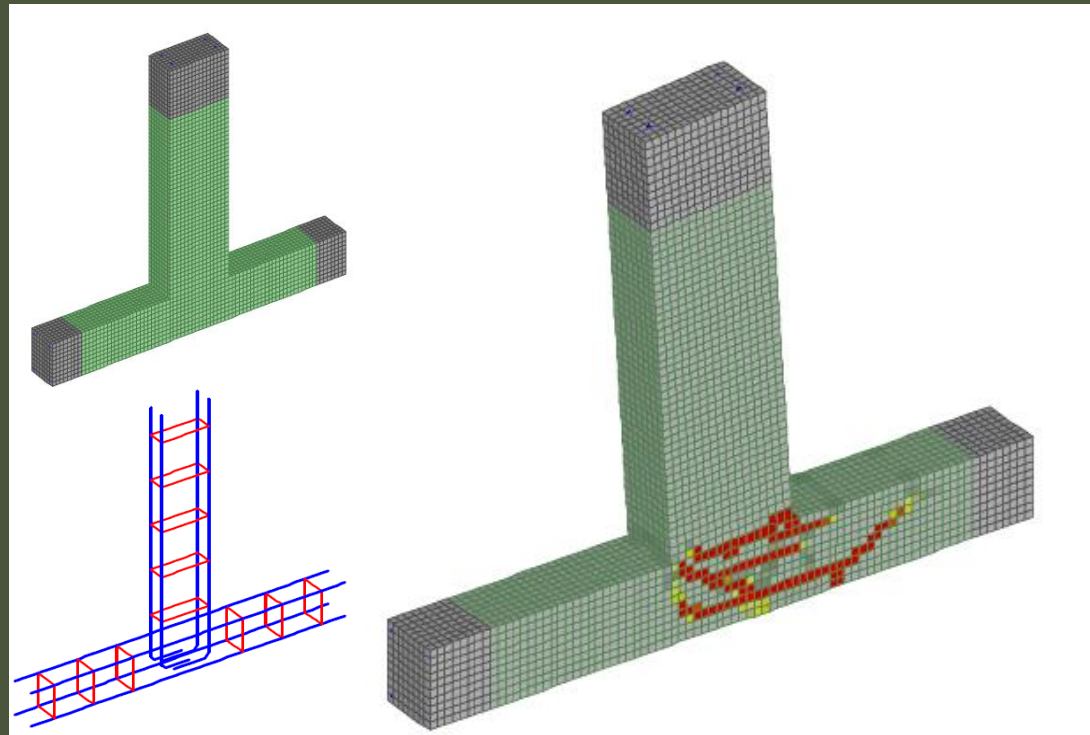
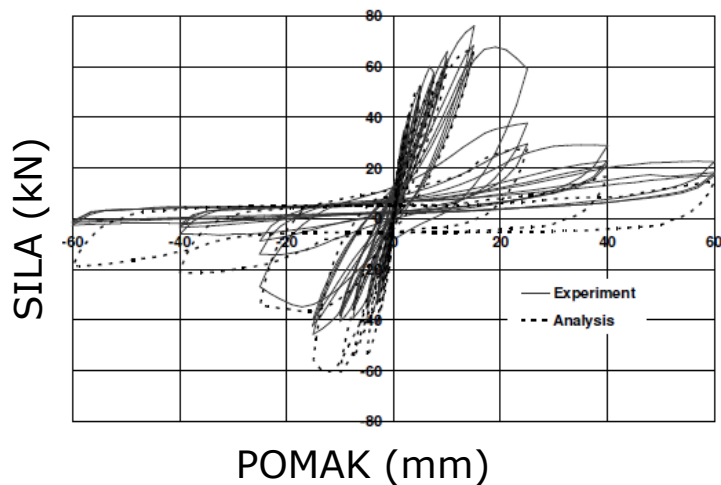
- ▣ **Statičko opterećenje – savijanje u 4 točke**
  - Primijenjena simetrija modela
- ▣ **Razvoj pukotina uslijed savijanja**



Kušter Marić et al. 2017

# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA

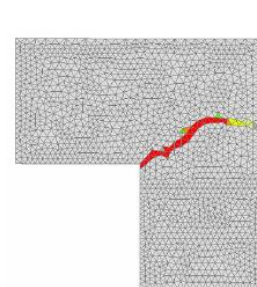
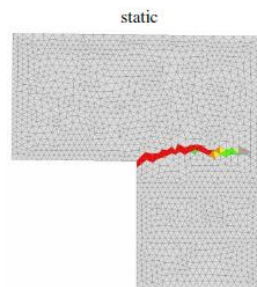
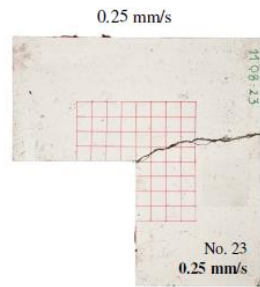
- Cikličko opterećenje – detalj spoja stupa i grede
- Razvoj pukotina
- Usporedba s eksperimentom



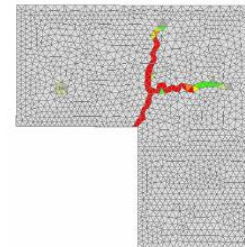
Ožbolt & Sharma, 2013

# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA

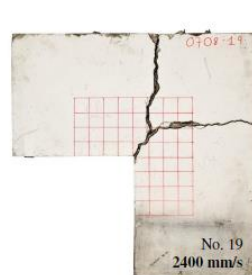
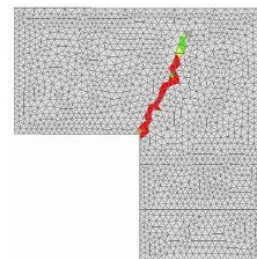
- ▣ Dinamičko opterećenje
- ▣ Razvoj pukotina
- ▣ Usporedba s eksperimentom



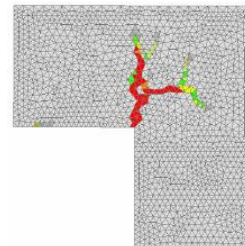
1000 mm/s



740 mm/s



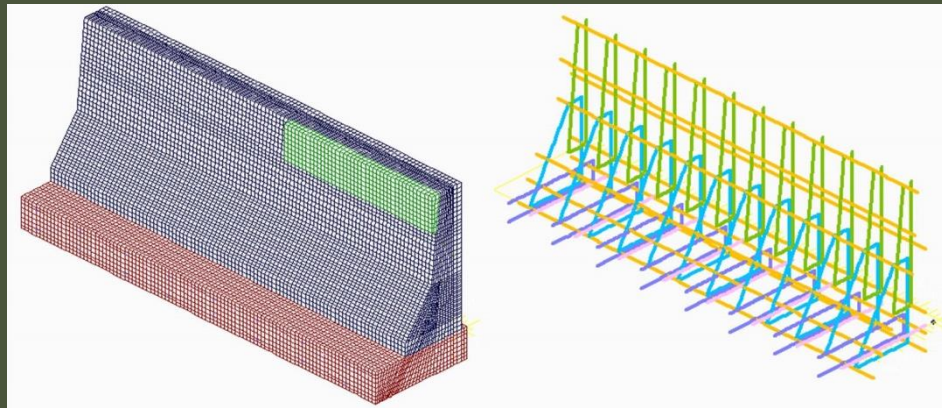
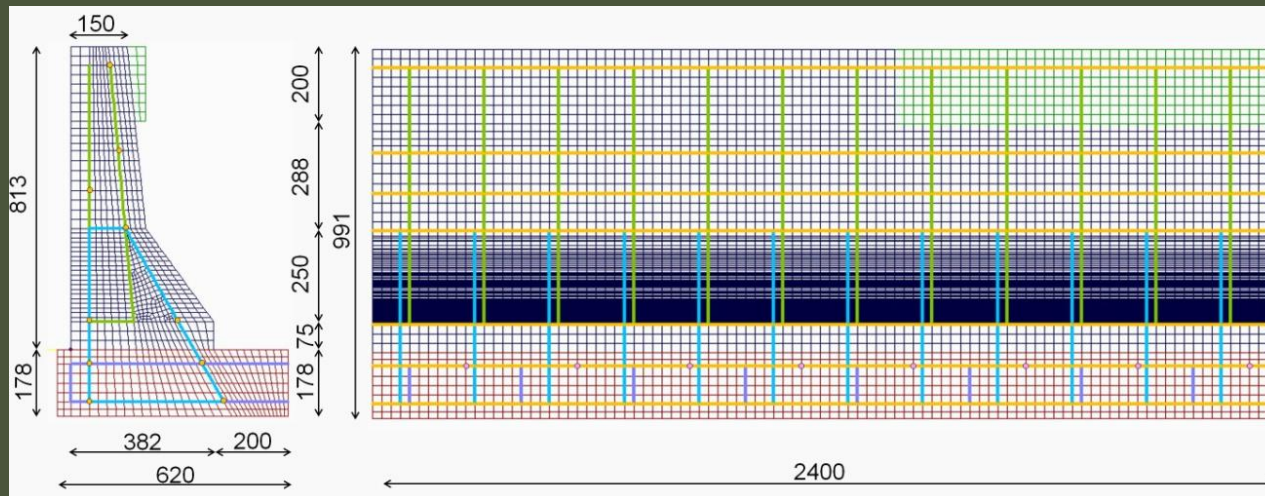
2400 mm/s



Bede, 2015



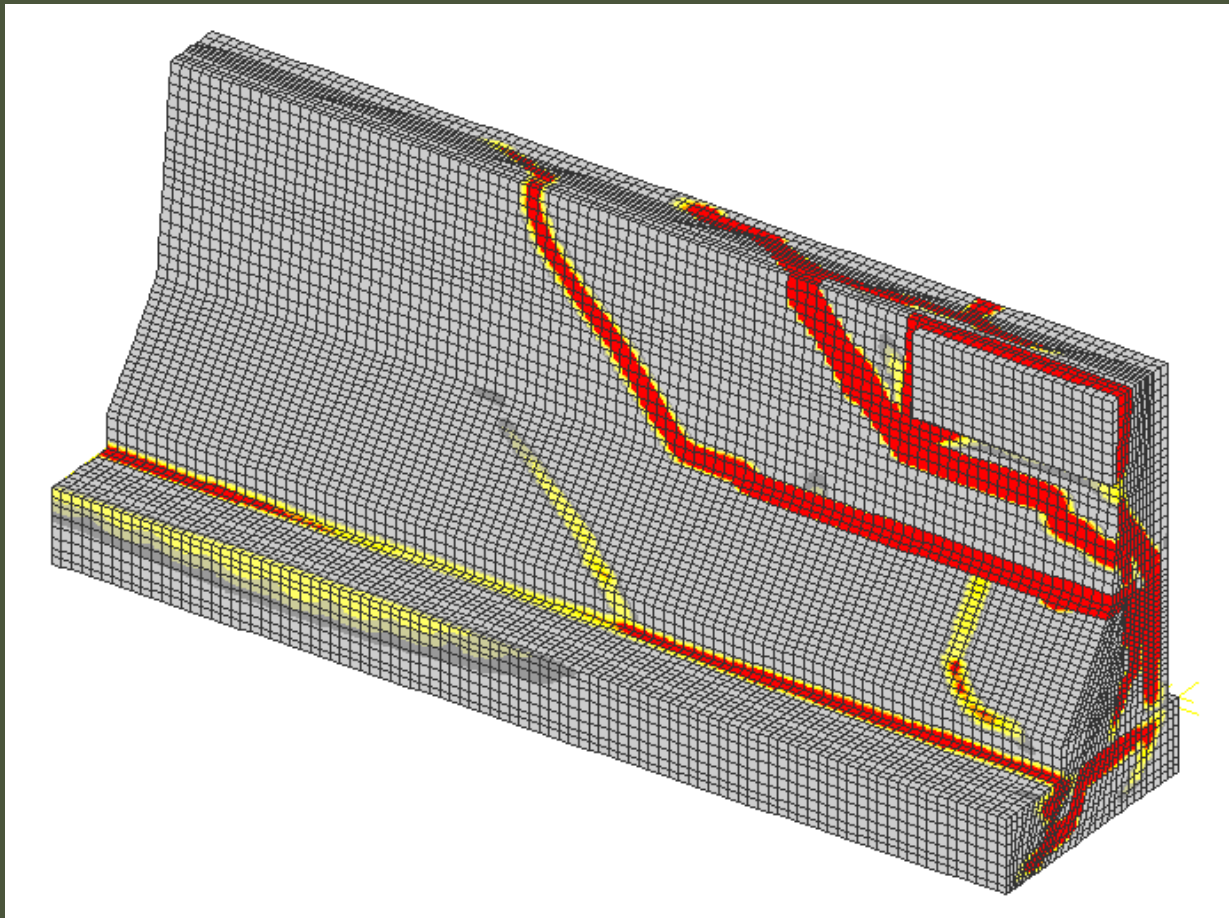
# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA



- **Betonska odbojna ograda „New Yersay”**

Kušter Marić, 2013

# PRIMJERI NUMERIČKIH MODELA AB KONSTRUKCIJA



- **Betonska odbojna ograda „New Yersay”**
- **Razvoj pukotina uslijed dinamičkog udara**

Kušter Marić, 2013

# UVOD

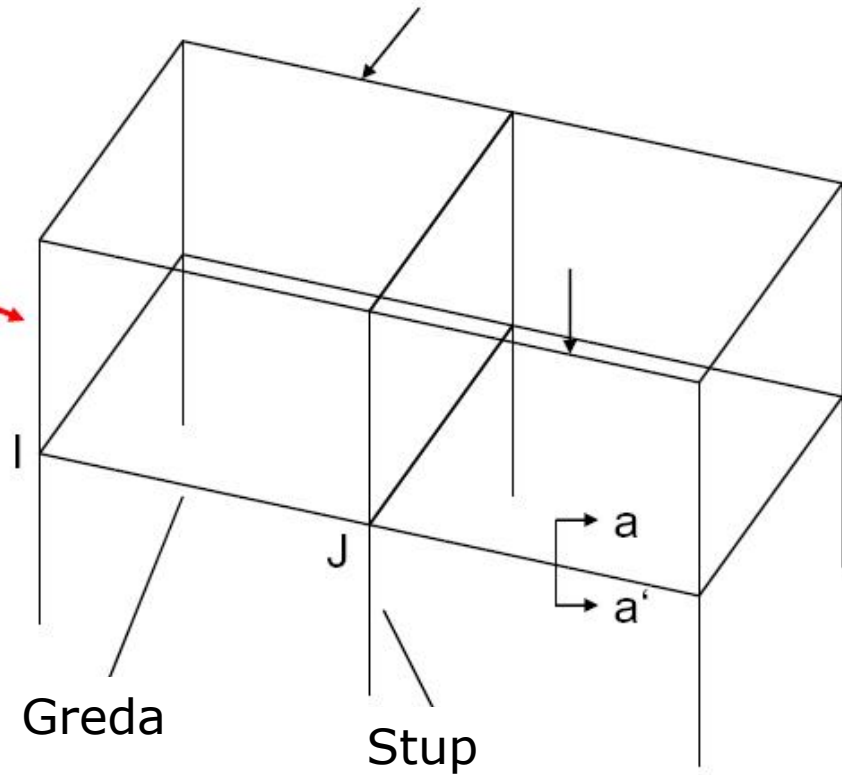
---

- **Proračun AB konstrukcije (elemenata) – što vjernije fizikalnoj stvarnosti**
  - Veća sigurnost
  - Veća racionalnost
  
- **Razvoj inženjerskih proračuna:**
  1. **Predkompjutorsko razdoblje**
    - Jednostavni modeli s homogenim, linearnim materijalom
  2. **Početak kompjutorskog razdoblja**
    - Složeniji modeli, ali još uvijek linearno promatranje materijala
  3. **Razdoblje graničnih stanja**
    - Vrlo složeni modeli, globalno ponašanje konstrukcije: linearno; kod dimenzioniranja: nelinearno ponašanje materijala
  4. **Suvremeni složeni proračuni**
    - Nelinearno ponašanje konstrukcije: geometrija i materijal

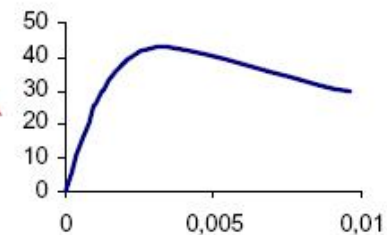
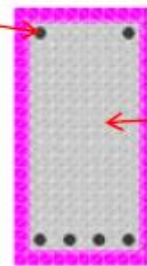
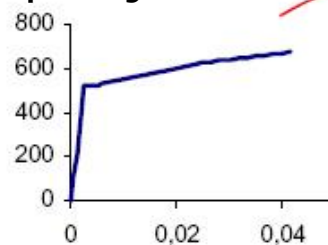


# MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

## Globalni model konstrukcije

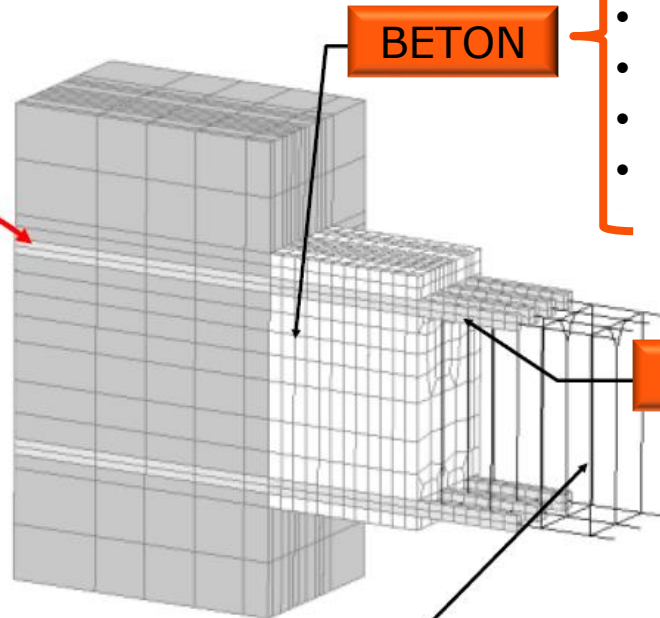


Model materijala na razini poprečnog  
presjeka



# MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

## Model detalja konstrukcije



BETON

- Konstitutivni zakon – 3D
- Mehanika loma
- Kontinuitet / diskontinuitet
- Cikličko opterećenje (potres)
- Ponašanje ovisno o vremenu
- Objektivnost analize
- ...

SPOJ

- Diskretan prijenos opterećenja
- "Razmazan"

ARMATURA

- 1D / 3D modeliranje
- Konstitutivni zakon
- Cikličko opterećenje
- ...

# MODELIRANJE KONSTRUKCIJA

---

## ▣ Zadatak inženjera – projektanta:

### ■ Izbor optimalnog proračunskog modela

- ▣ Što točnije opisati stvarno ponašanje konstrukcije pod propisanim opterećenjem
- ▣ Uz optimalnu složenost modela (mogućnosti proračuna + isplativost)

### ■ Potrebno:

- ▣ Poznavati različite metode proračuna
- ▣ Upoznati mogućnosti pojedinog softwareskog paketa
- ▣ Predvidjeti moguće probleme prilikom modeliranja - odrediti prioritete
- ▣ Kontrola rezultata !!!!

# PRORAČUN KONSTRUKCIJE PO TEORIJI 1. REDA – LINEARNI PRORAČUN

## PRETPOSTAVKE:

- 1. Pomaci konstrukcije dovoljno su mali**
  - Uvjeti ravnoteže definirani na nedeformiranoj konstrukciji
  - Izvedba bez početnih deformacija i naprezanja
- 2. Linearno-elastično ponašanje materijala**
  - Hookov zakon
  - Homogen, izotropan, linearno elastičan materijal
- 3. Poprečni presjeci elemenata ostaju u ravnini (okomito na deformiranu težišnu os) i nakon nanošenja opterećenja**
  - Štapni nosači:  $b, h \leq 0, 2L$

**VRIJEDI ZA VEĆINU KONSTRUKCIJA!!!**



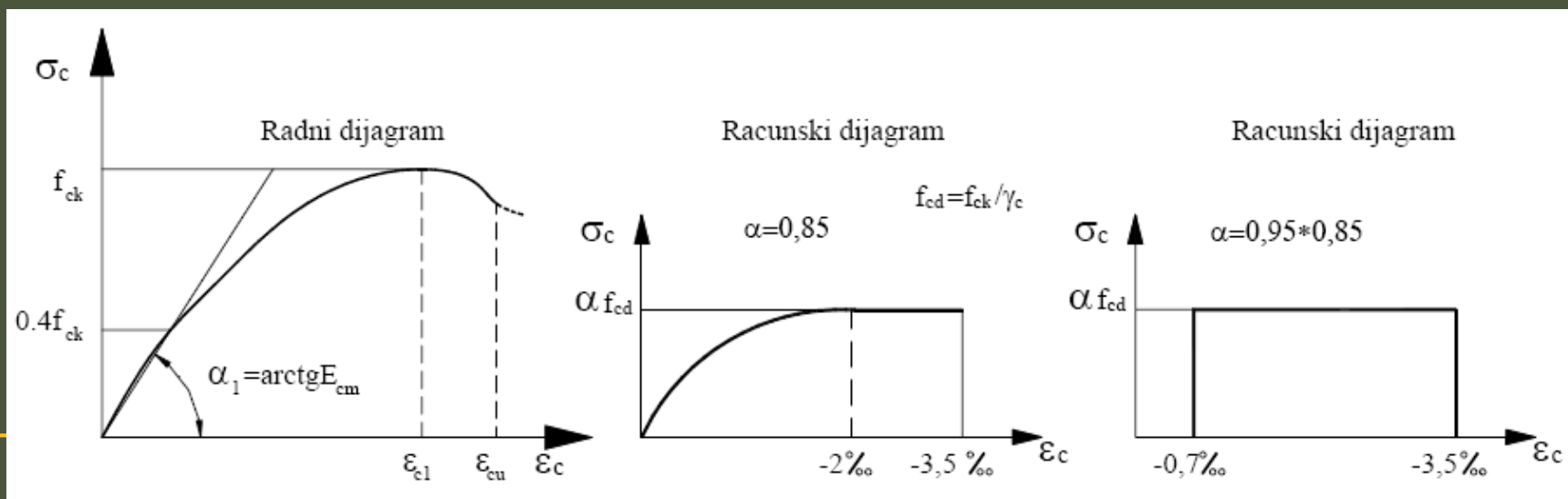
# PRORAČUN KONSTRUKCIJE PO TEORIJI 2. REDA – NELINEARNI PRORAČUN

## 1. Pomaci konstrukcije NISU mali – GEOMETRIJSKA NELINEARNOST

- Uvjeti ravnoteže na deformiranoj konstrukciji

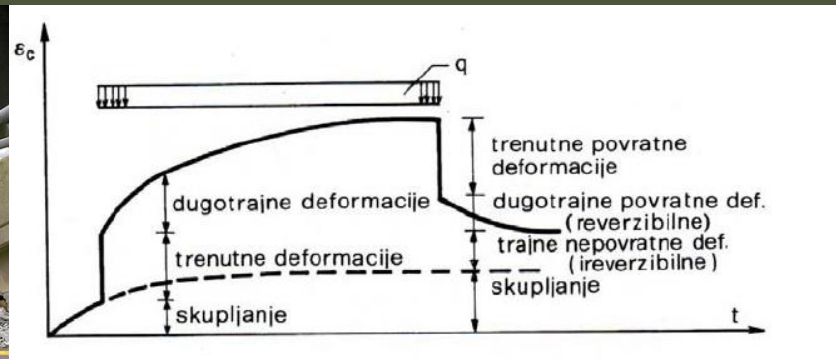
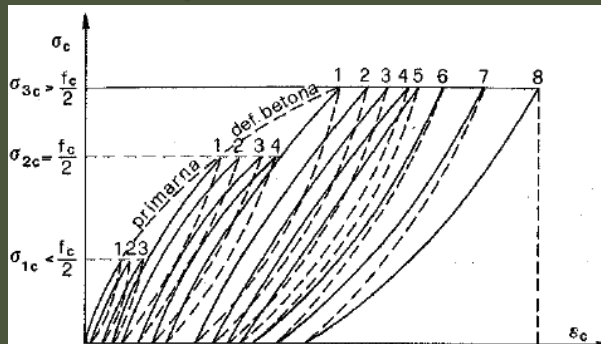
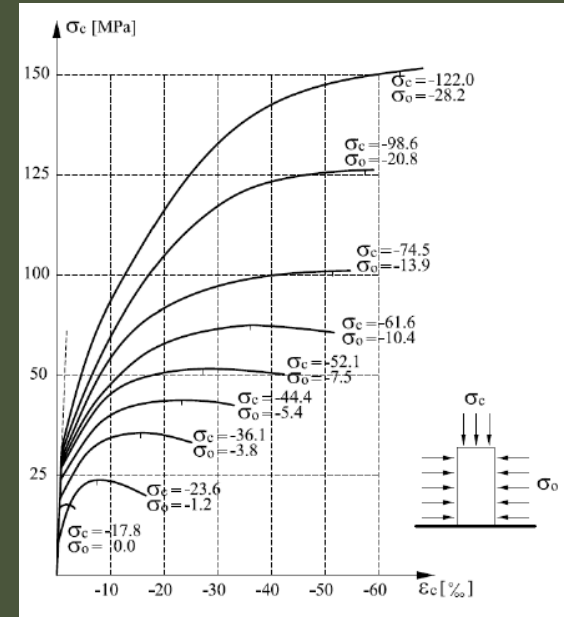
## 2. Ponašanje materijala NIJE linearno-elastično – NELINEARNO PONAŠANJE MATERIJALA

- Potrebno ustanoviti ponašanje materijala –  
eksperimentima - konstitutivni zakon



# STVARNO (NELINEARNO) PONAŠANJE BETONA

- Nelinearni višeosni odnos naprezanja–deformacija
  - Ovisno o statičkom/dinamičkom opterećenju
- Otvaranje pukotina pri vlačnom naprezanju
- Drobljenje betona pri visokom tlačnom naprezanju
- Plastično popuštanje armature
- Prionjivost betona i armature
- Puzanje i skupljanje betona – ovisno o temperaturi i vremenu



# KADA U PRORAČUNIMA AB KONSTRUKCIJA TEŽITI SIMULACIJI STVARNOG PONAŠANJA BETONA?

---

- ❑ Granično stanje nosivosti, duktilnost, preraspodjela sila, itd.
  - ❑ Bolje razumijevanje ponašanja konstrukcija i detalja
    - prilikom eksperimenta ne vidimo što se događa unutar presjeka
  - ❑ Pravila/preporuke u projektiranju - razjašnjena
  - ❑ Optimalizacija
    - Predgotovljeni elementi – masovna proizvodnja
  - ❑ Izvanredna opterećenja
  - ❑ Trajnost konstrukcije
  - ❑ Sanacije i ojačanja konstrukcija
  - ❑ Raspucavanje betona – stabilno ili nestabilno stanje
  - ❑ Utjecaj veličine (povećanjem geometrije – niža čvrstoća)
  - ❑ Podrška ili potpuna zamjena za eksperiment
-

# MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA

---

- ❑ Betonske konstrukcije – pune defekata, mikropukotina i oštećenja
  - I prije nanošenja opterećenja: posljedica temperaturnih djelovanja, skupljanja itd.
- ❑ Defekti u betonu mogu višestruko smanjiti čvrstoću
  - RAZLOG: Koncentracija naprezanja u okolini defekata –i s time povezano oslobađanje energije prilikom porasta oštećenja (širenju pukotina)
- ❑ Kad veličina pukotine prijeđe kritičnu vrijednost, za nosivost konstrukcije postane mjerodavna energija sloma materijala, a ne njegova čvrstoća
  - Ako materijal nije u stanju preuzeti energiju oslobođenu prilikom širenja pukotine – dolazi do KRTOG LOMA

# PONAŠANJE MATERIJALA

## ELASTO-PLASTIČNO

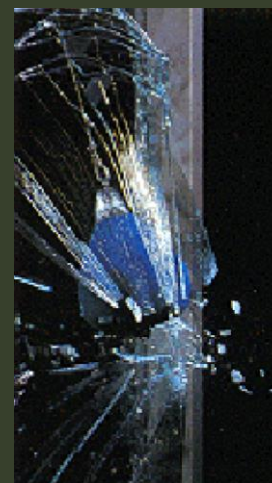
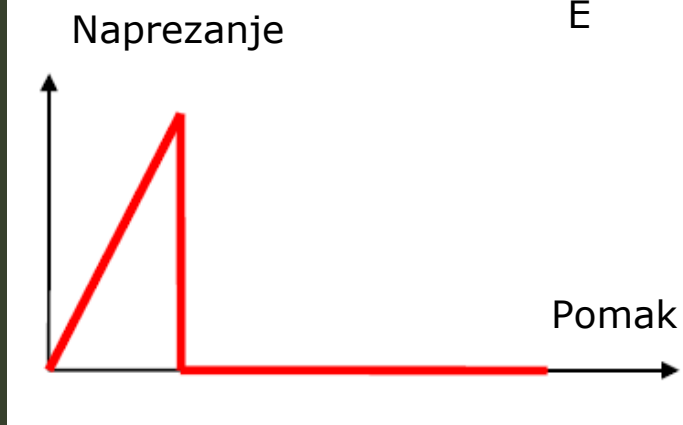
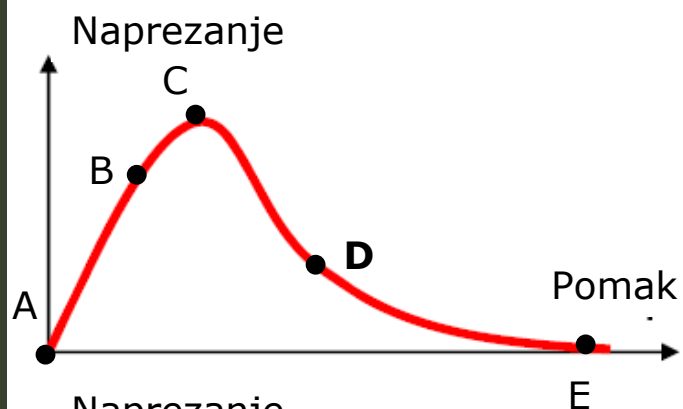
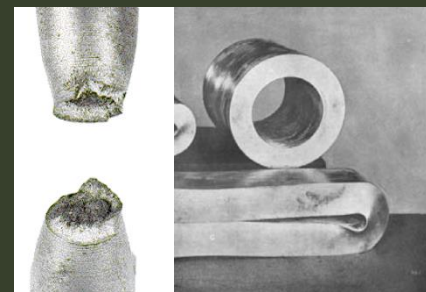
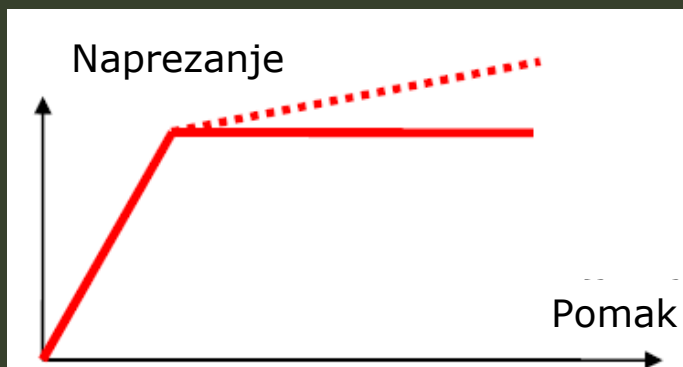
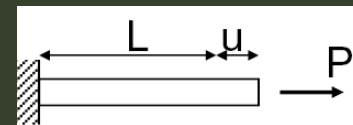
- Čelik, aluminij
- Velike deformacije prije sloma

## KVAZI KRTO

- **BETON**
- A-B= gotovo linearno ponašanje
- B-C= nelinearno ponašanje, pojava mikropukotina, **područje očvršćenja materijala**
- C-D-E= lokalizacija oštećenja, otvaranje pukotina, **područje omekšanja materijala**
- *Odgovor konstrukcije ovisi o veličini (male konstrukcije – elasto-plastično ponašanje)*

## KRTO

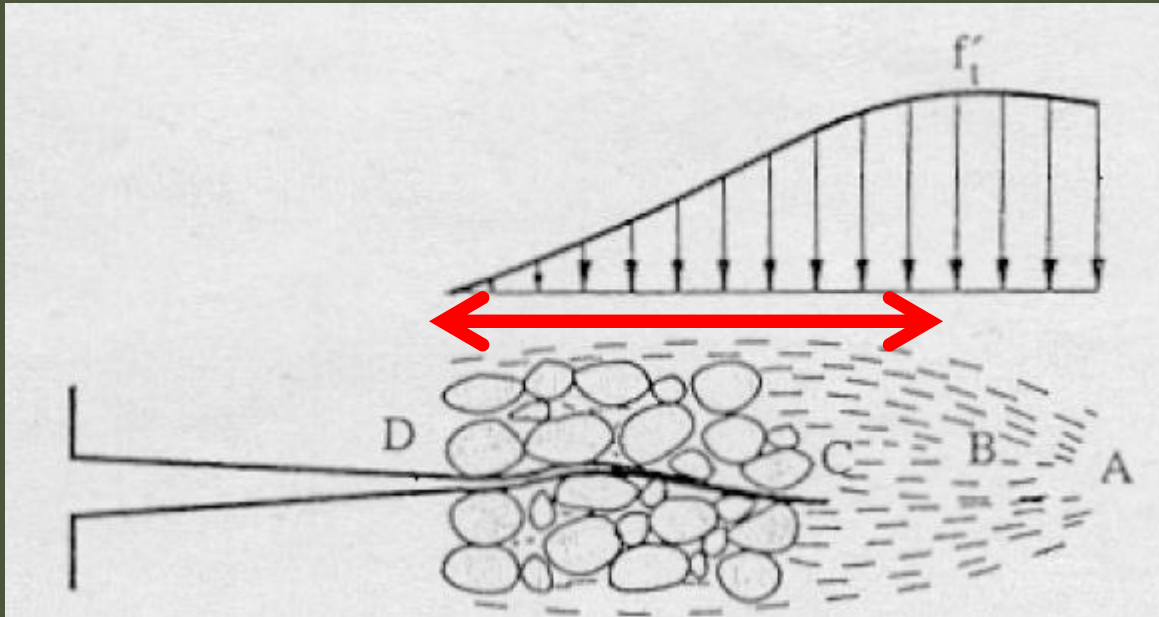
- Staklo, željezo
- Slom bez prethodnih deformacija





# Zona raspucavanja

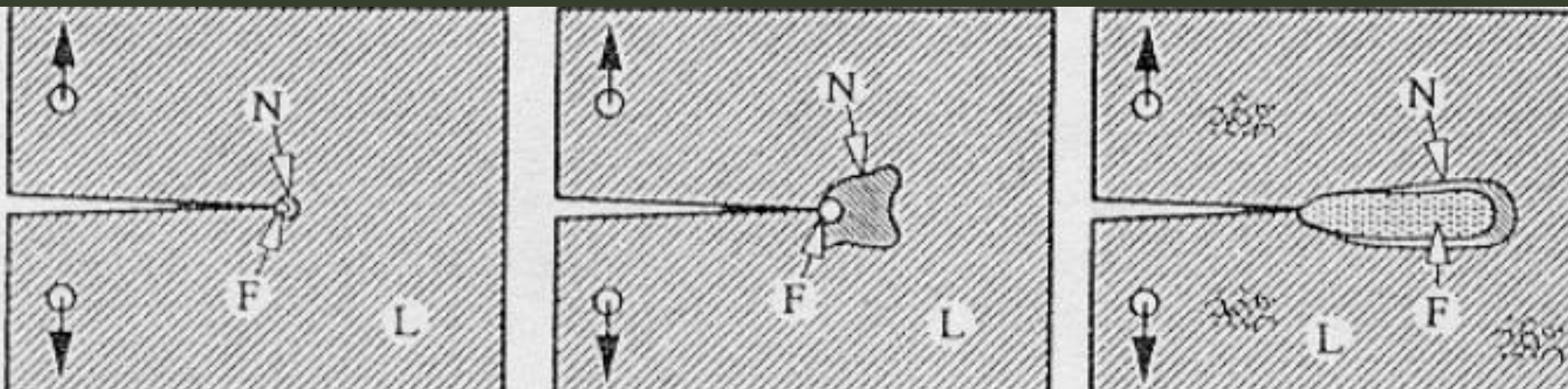
- Zona raspucavanja – područje u kojem se materijal odupire raspucavanju
  - Naprezanje u otvorenoj pukotini = 0
  - Naprezenje u mikropukotinama = max
  - Prijelazno područje = zona raspucavanja



# PONAŠANJE MATERIJALA

- Zona raspucavanja (Fracture progress zone)** = područje u kojem se troši deformacijska energija koje se oslobađa pri rastu pukotine

**F** = zona raspucavanja  
**L** = linearno područje  
**N** = nelinearno područje



## LINEARNO ELASTIČNO

- Zona raspucavanja beskonačno mala
- Staklo ( $10^{-6}$  mm)

## NELINEARNO PLASTIČNO

- Zona raspucavanja  $\ll$  nelinearno područje
- Čelik

## NELINEARNO KVAZI KRTO

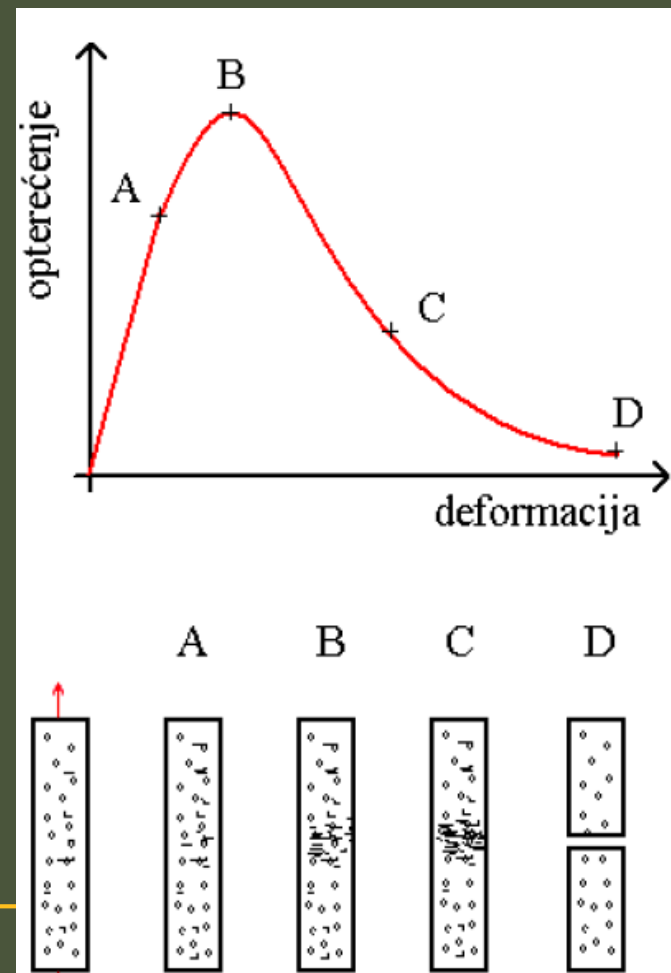
- Zona raspucavanja pokriva gotovo cijelo nelinearno područje
- Beton (200-500 mm)

# BETON

## - KVAZI KRTI MATERIJAL

- 0 – A: linearno elastično
  - 70-80% vlačne čvrstoće
- A – B: područje očvršćenja materijala - nelinearno
  - Razvoj mikro pukotina u području gdje je beton najslabiji
- B: dostizanje nosivosti
- B-C-D: područje omekšanja materijala
  - Formiranje otvorene pukotine

**TIPIČAN RADNI DIJAGRAM BETONA  
PRI VLAČNOM NAPREZANJU**



# BETON

## - KVAZI KRTI MATERIJAL

Za materijale koje karakterizira slijedeći slijed ponašanja:

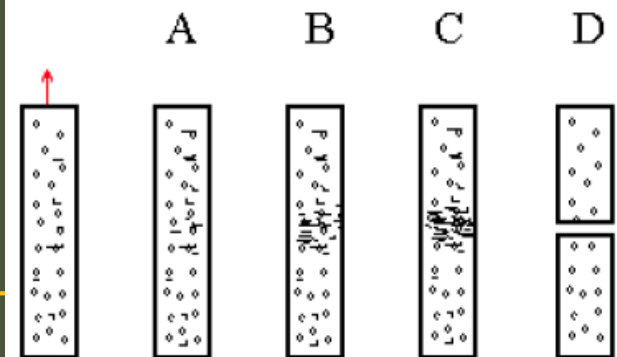
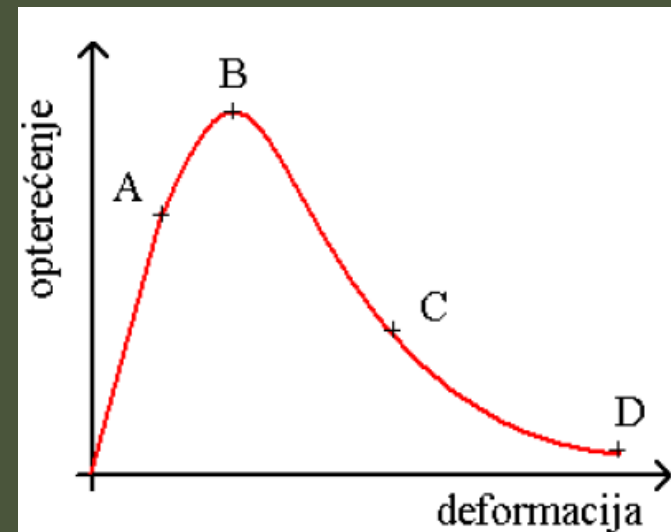
1. područje očvršćenja materijala
2. dostizanje nosivosti
3. područje omekšenja materijala



### KVAZI KRTI MATERIJAL

- Zona raspucavanja je konstatna za beton=200-500 mm

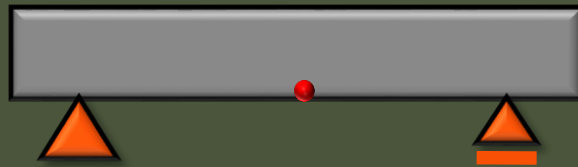
**TIPIČAN RADNI DIJAGRAM BETONA  
PRI VLAČNOM NAPREZANJU**



# BETON

## - KVAZI KRTI MATERIJAL

---



LEML NIJE  
primjenjiv



LEML primjenjiv

- ❑ Linearna elastična mehanika loma (LEML) je primjenjiva samo ako je veličina **zone raspucavanja** puno manja od karakterističnih dimenzija elastičnog tijela uključujući i duljinu pukotina
- ❑ Za kod betonskih konstrukcija samo za ekstremno velike dimenzije konstrukcije



# MEHANIKA LOMA KVAZIKRTIH MATERIJALA (MLKM)

---

- ❑ Linearna mehanika loma – 1920-ih, Griffith
- ❑ MLKM –počela se razvijati 1980-ih
- ❑ Mehaniku loma potrebno uključiti u norme i propise za projektiranje AB konstrukcija
  - Izjednačavanje sigurnosti konstrukcije - veća pouzdanost i ekonomičnost
    - ❑ Argument: Učinak veličine = utjecaj veličine konstrukcije na njenu nosivost i duktilnost

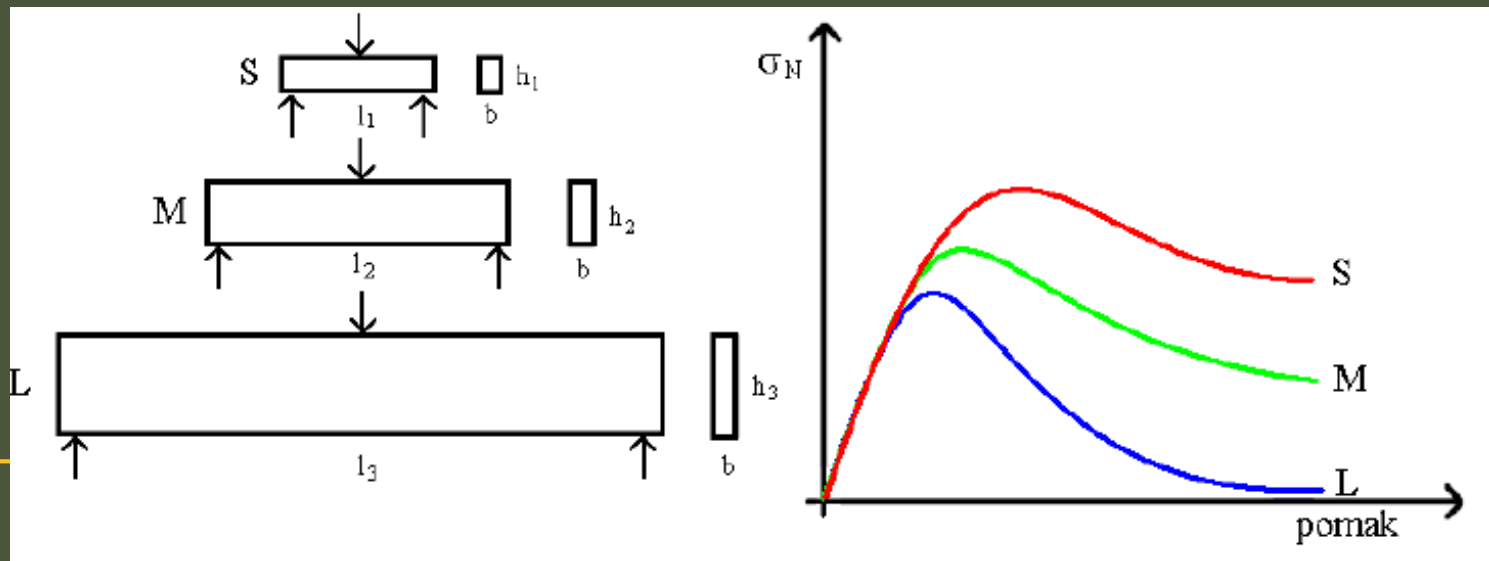
# UČINAK VELIČINE

- 3 grede konstatne širine ( $b$ ), različitih duljina  $l$  i visina  $h$ , ali konstatnog  $l/h$  omjera - opterećene na savijanje
  - Grede većeg raspona i visine imaju manju duktilnost i manju nominalnu nosivost:

$$\sigma = F_u / b * h$$

$F_u$  = sila sloma

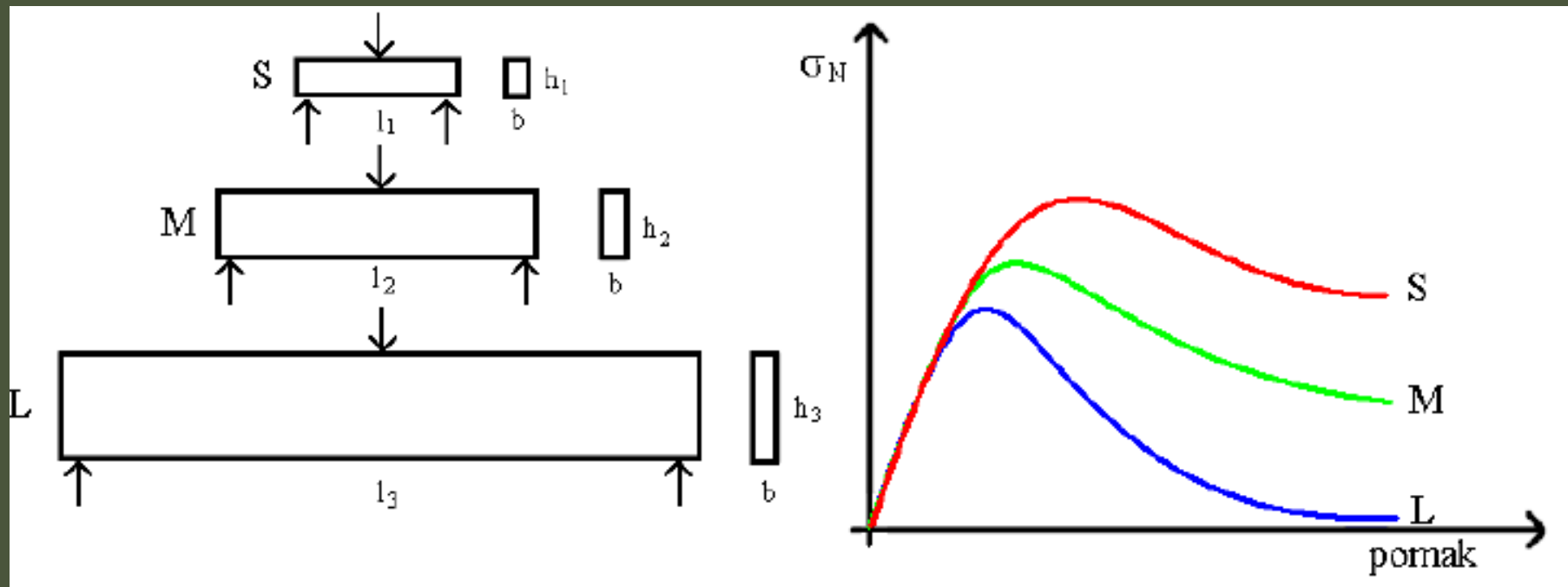
$b * h$  = površina poprečnog presjeka



# UČINAK VELIČINE

## ■ Pri razvoju pukotine

- Kod velike grede oslobađa se relativno velika deformacijska energija koju beton ne može preuzeti – nestabilan razvoj pukotine – KRTI LOM
- Kod male grede - beton može prihvatiti oslobođenu deformacijsku energiju – stabilan razvoj pukotine – DUKTILNI SLOM

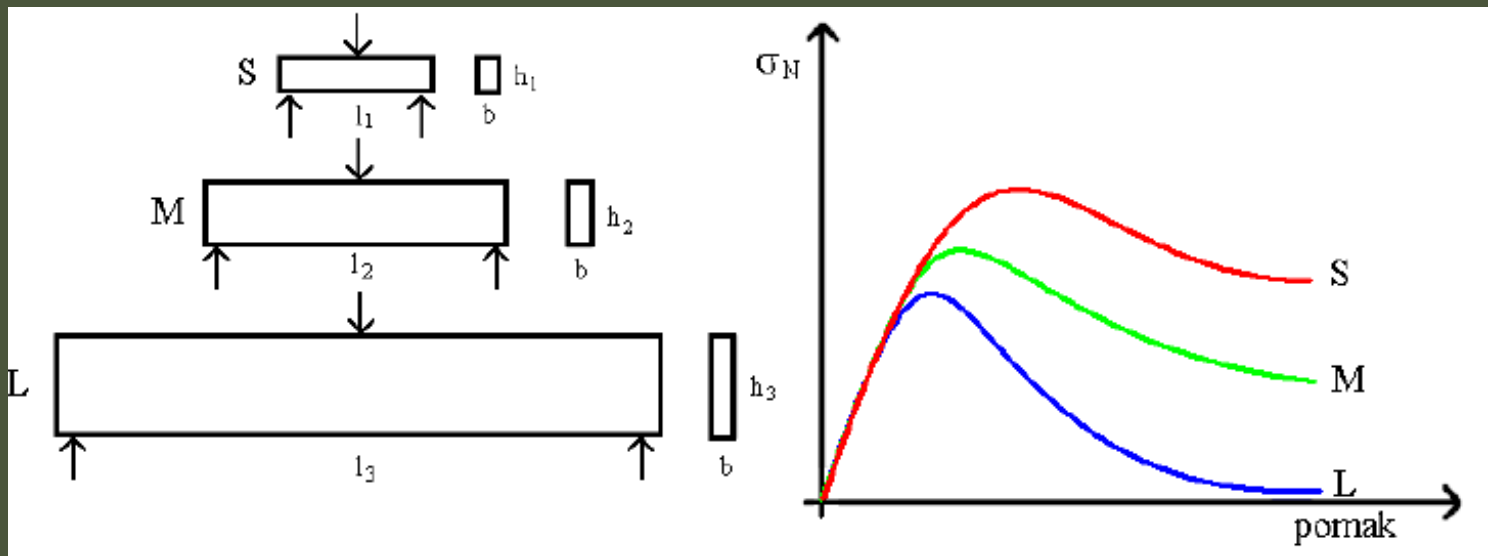


# UČINAK VELIČINE

## OBJAŠNJENJE

### 1. STATISTIČKI ASPEKT

- Kod veće konstrukcije je veća vjerojatnost za postojanje defekata
  - Veća konstrukcija ima manju nominalnu nosivost



# UČINAK VELIČINE

---

## ▣ OBJAŠNJENJE

### 1. DETERMINISTIČKI ASPEKT

- ▣ Nominalna nosivost ovisi o deformacijskoj energiji koja se oslobađa prilikom pojave pukotine

**a) STABILNA PUKOTINA:** prije dostizanja kritične duljine pukotine uz porast pukotine moguć porast opterećenja

- Učinak veličine je značajan
- Primjeri:
  - Proboj stupa i ploče
  - Slom na posmik kod vitkih greda
  - Čupanje sidra iz betonskog bloka



# UČINAK VELIČINE

---

## ▣ OBJAŠNJENJE

### 1. DETERMINISTIČKI ASPEKT

- ▣ Nominalna nosivost ovisi o deformacijskoj energiji koja se oslobađa prilikom pojave pukotine

**a) NESTABILNA PUKOTINA:** pojava pukotine pri maksimalnom opterećenju

- Učinak veličine zanemariv

## ▣ Betonske konstrukcije

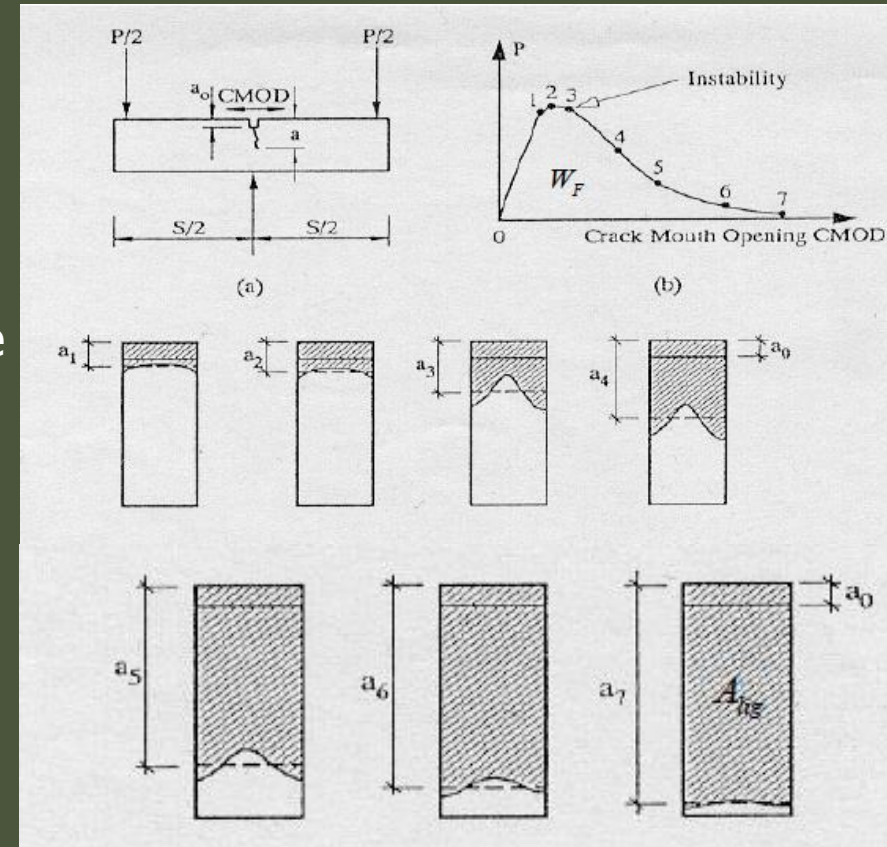
- Zona raspucavanja konstantna
- Mala brzina oslobađanja deformacijske energije



**STABILAN RAZVOJ PUKOTINE - NLML**

# Energija sloma

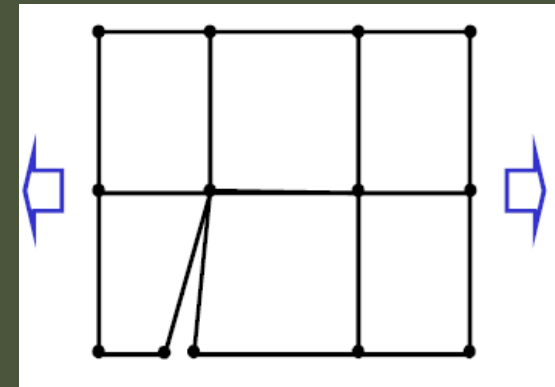
- $G_F = W_F / A_{lig}$
- Ukupan rad koji se utroši na širenju pukotine
  - $W_F$  - utrošeni rad
  - $A_{lig}$  - površina pukotine nastale pri radu  $W_F$
- Za beton  
 $G_F = 0.075 \text{ N/mm}^2$
- 10x veća od energije krtog sloma



# METODE MODELIRANJA PUKOTINA U AB KONSTRUKCIJAMA

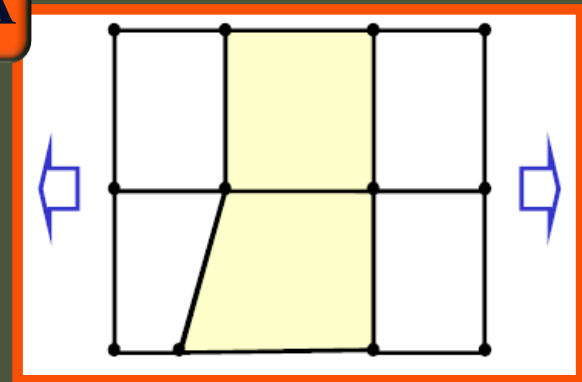
## KONCEPT DISKRETNIH PUKOTINA

- ❑ Strogi diskontinuitet
- ❑ Bolje aproksimira stvarno stanje
- ❑ Izuzetno zahtjevno i složeno modeliranje (pukotinom nastaju 2 nove slobodne površine na kojima je potrebno naknadno definirati rubne uvjete)



## KONCEPT “RAZMAZANIH” PUKOTINA

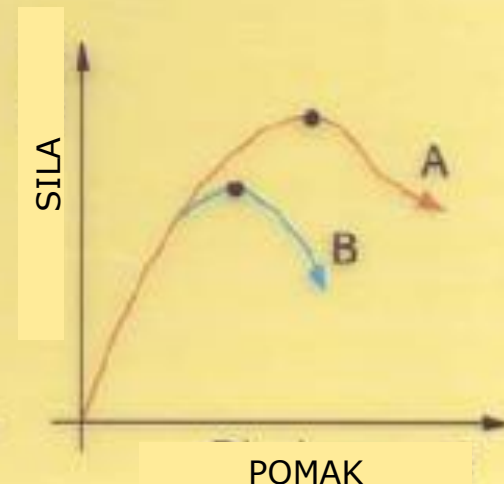
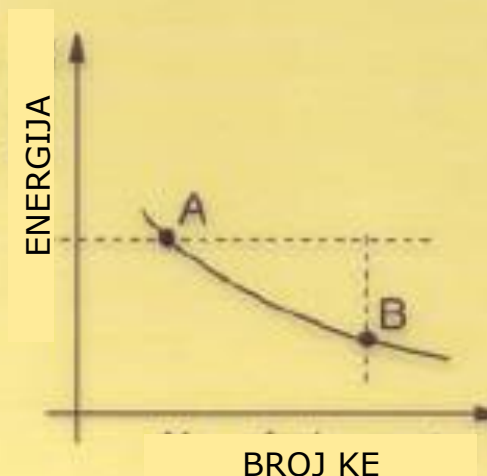
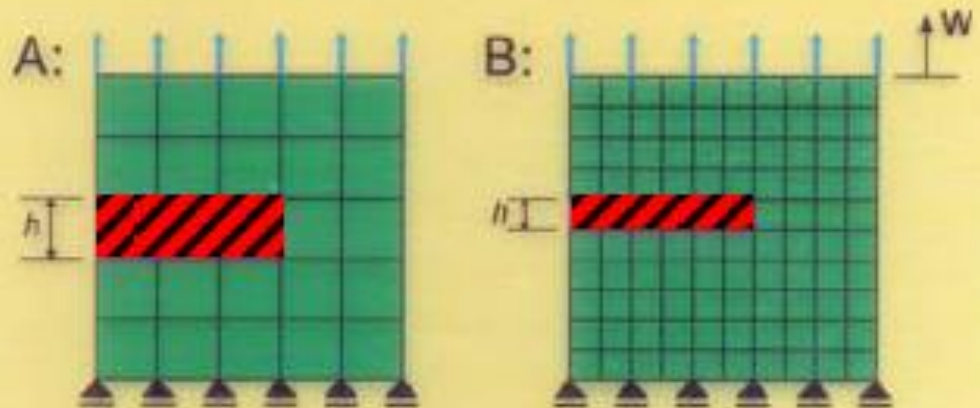
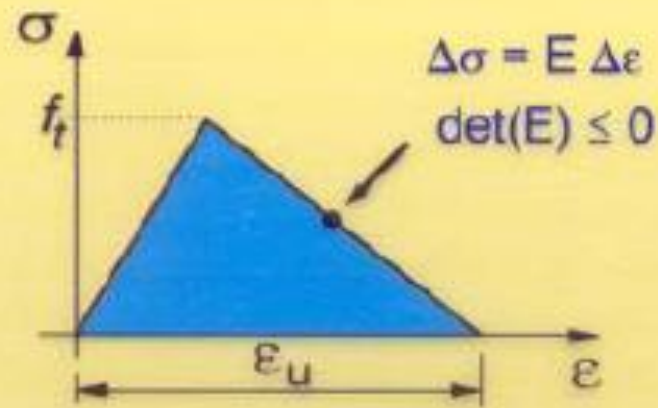
- ❑ Slabi diskontinuitet
- ❑ Oštećenja su distribuirana u jednoj “traci” konačnih elemenata
- ❑ Objektivnost rezultata proračuna ovisi o veličini konačnih elemenata



# CRACK BAND METODA

- Osigurava objektivnost rezultata kod korištenja koncepta razmazanih pukotina
- Pukotine lokalizirane u 1 traci konačnih elemenata prosječne širine  $H$
- U tom području se i oslobađa deformacijska energija konstrukcije
- Potrebno je osigurati konstatnu disipaciju energije – neovisna o veličini konačnog elementa
- Energija sloma = površina ispod radnog dijagrama  $A_f$  x prosječna širina konačnog elementa  $H$

$$G = A_f \cdot H = konst$$



# CRACK BAND METODA

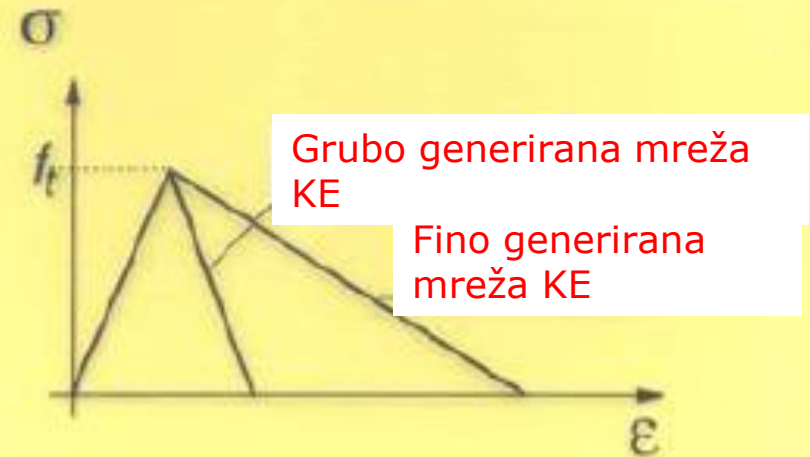
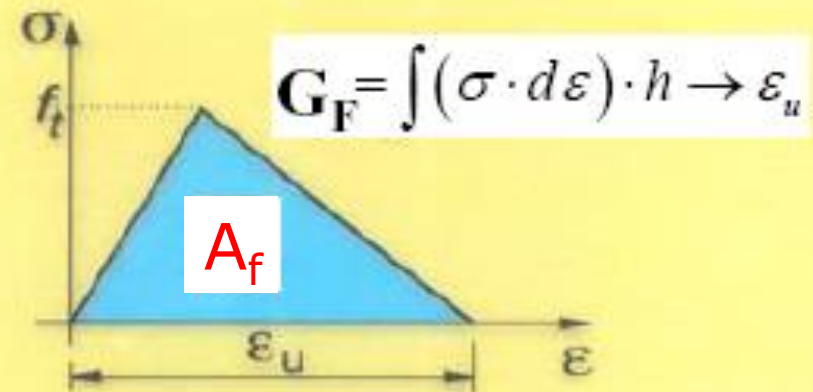
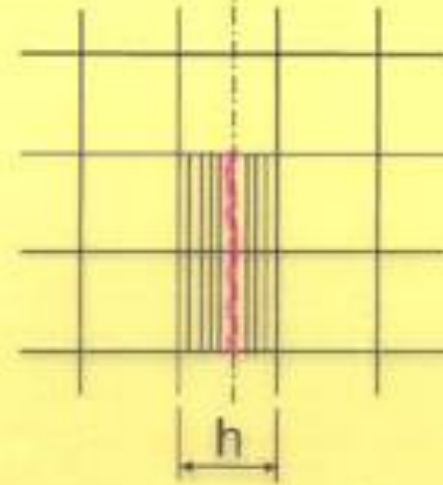
- Radni dijagram betona veže se za veličinu konačnog elementa
- Enerija sloma betona:

$$G_F = A_f \cdot H = konst.$$

- Tlačna energija sloma betona:

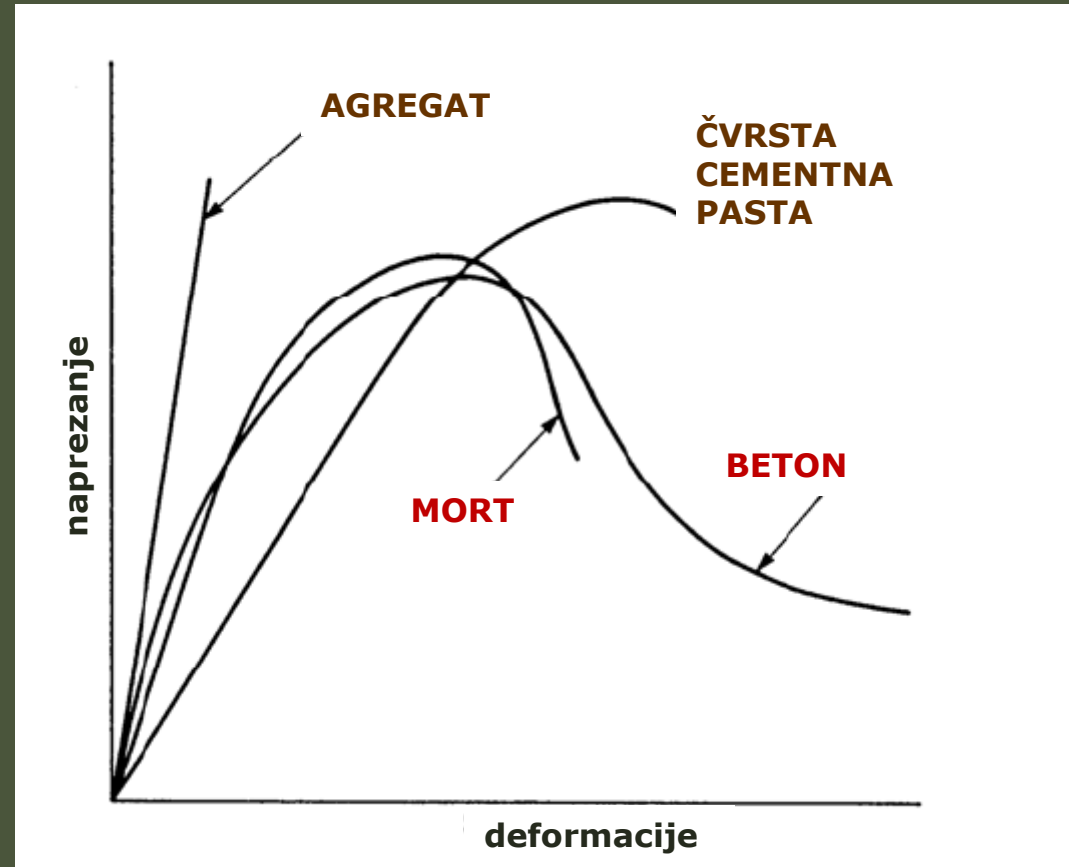
$$G_c = A_{fc} \cdot H = konst.$$

- Pretpostavka:  $G_c = 100 \times G_F$
- Samo grana omekšanja radnog dijagrama mora biti prilagođena (točke C-E)



# MODELI PONAŠANJA BETONA

- Beton – nije homogen, izotropan, linearno-elastičan
  - Agregat, čvrsta cementna pasta
  - Ponašanje pod tlakom
  - Ponašanje pod vlakom

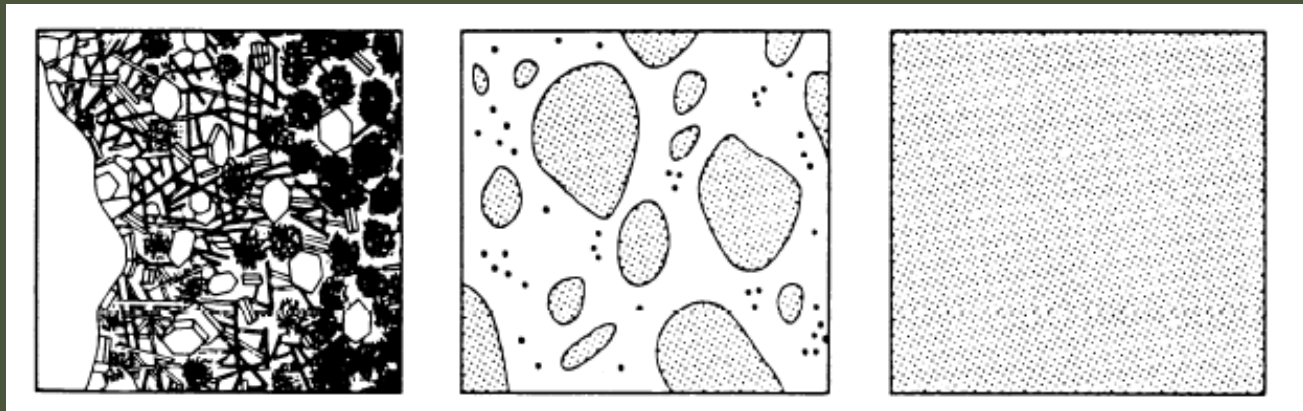




# MODELI PONAŠANJA BETONA

---

- 3 razine pristupa modeliranju i promatranju betona
  - Mikro razina
  - Mezo razina
  - Makro razina



- Reprezentativni volumen elemenata
  - Dovoljno mali da se izbjegnu greške kod velikih aproksimacije gradijenata
  - Dovoljno veliki da predstavlja reprezentativni uzorak materijala

# MODELI PONAŠANJA BETONA

## FENOMENOLOŠKI MODELI

Što bolje opisati makroskopsko ponašanje betona, a da ne bude previše matematički složen

- Dvoparametarski model (Chen, Kojić, Chateman)
- Troparametarski model (Reiman, Argyris)
- Četveroparametarski model (Ottosen)
- Peteroparametarski model (William)
- Hipoelastični model (Bangash)
- Model posmičnog modula (Philips i dr.)

## STRUKTURNI MODELI

Opisana temeljna svojstva materijala na razini čestica (mikroskopski)

Presloženi za praksu, koriste se u istraživačkim radovima

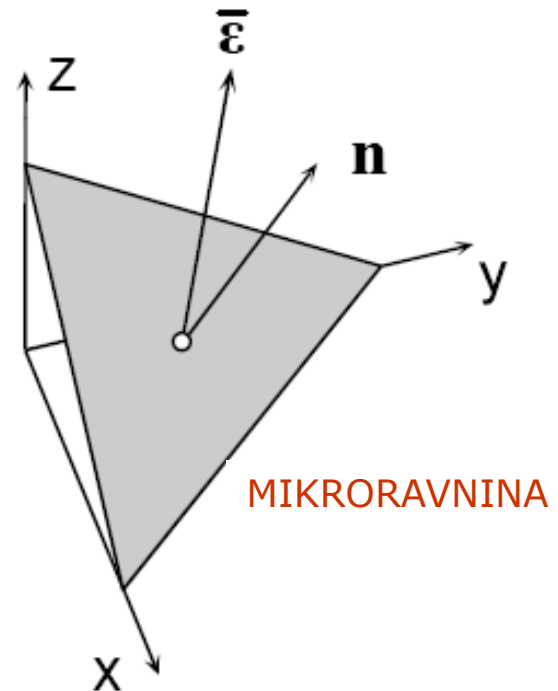
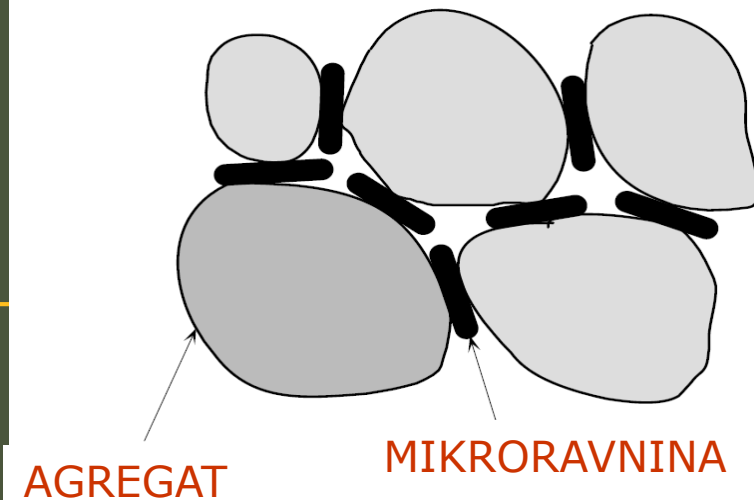
- **Mikroravninski modeli** (Bažant i dr.)
- Modeli temeljeni na diskretnim elementima

# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

## □ FIZIKALNO MOTRIŠTE:

□ **Mikroravnine** = smjerovi mogućih oštećenja ili osjetljiva mjesta u betonu (kontaktna ravnina između zrna agregata i cementne paste)

□ Svaka mikroravnina definirana je jediničnim vektorom normale na vanjsku plohu



# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

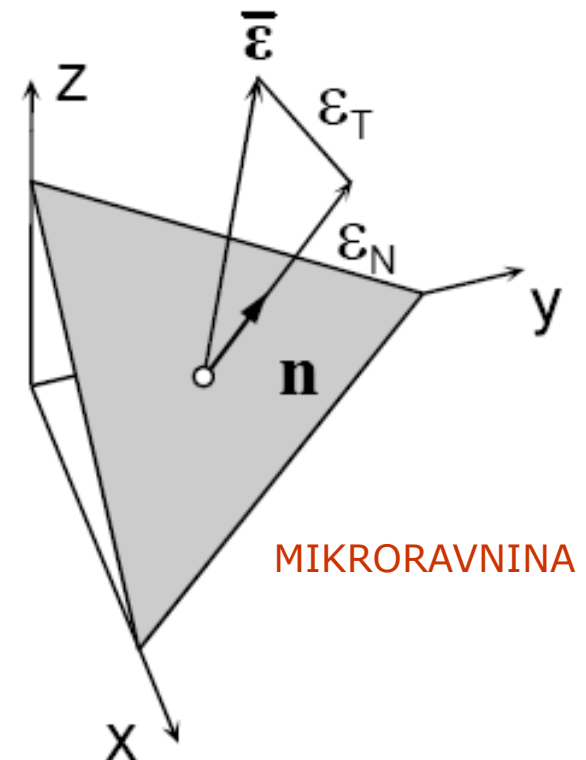
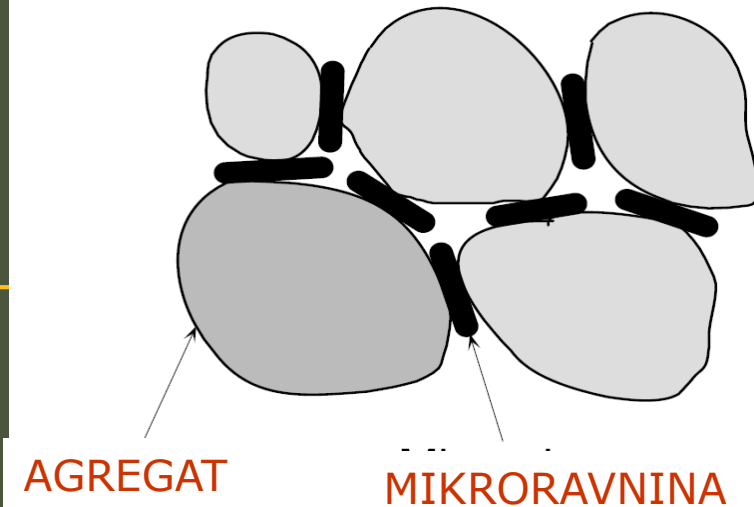
□ Mikroravninski vektor deformacije rastavlja se na komponente:

□ Normalna

- Volumenska
- Devijatorska

□ Posmična

- 2 međusobne okomite posmične komponente



# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

□ Mikroravninski vektor deformacije rastavlja se na komponente:

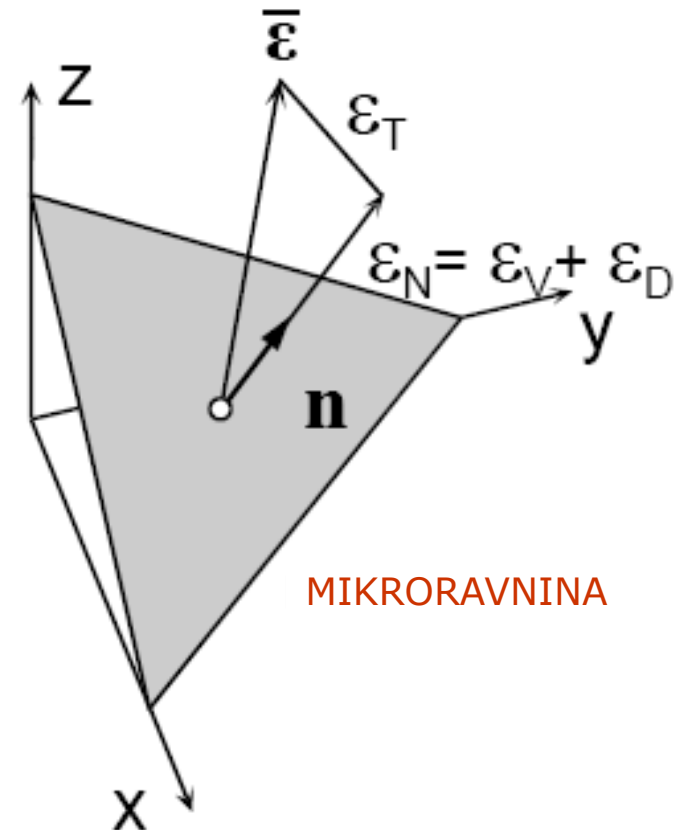
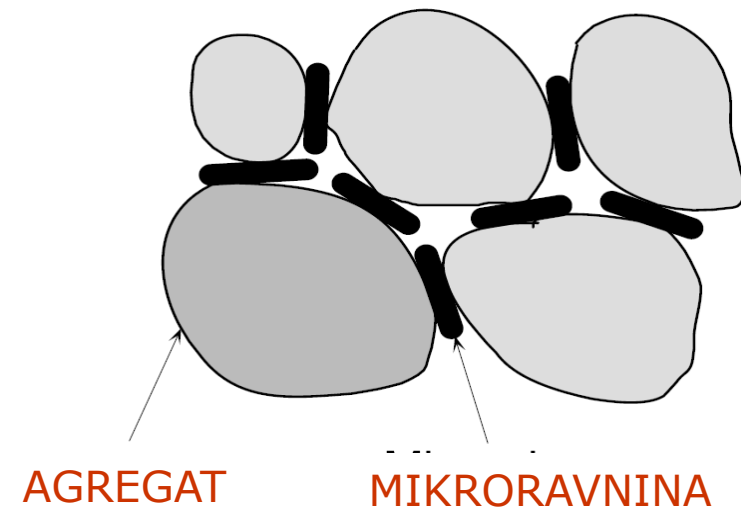
□ Normalna

□ Volumenska

□ Devijatorska

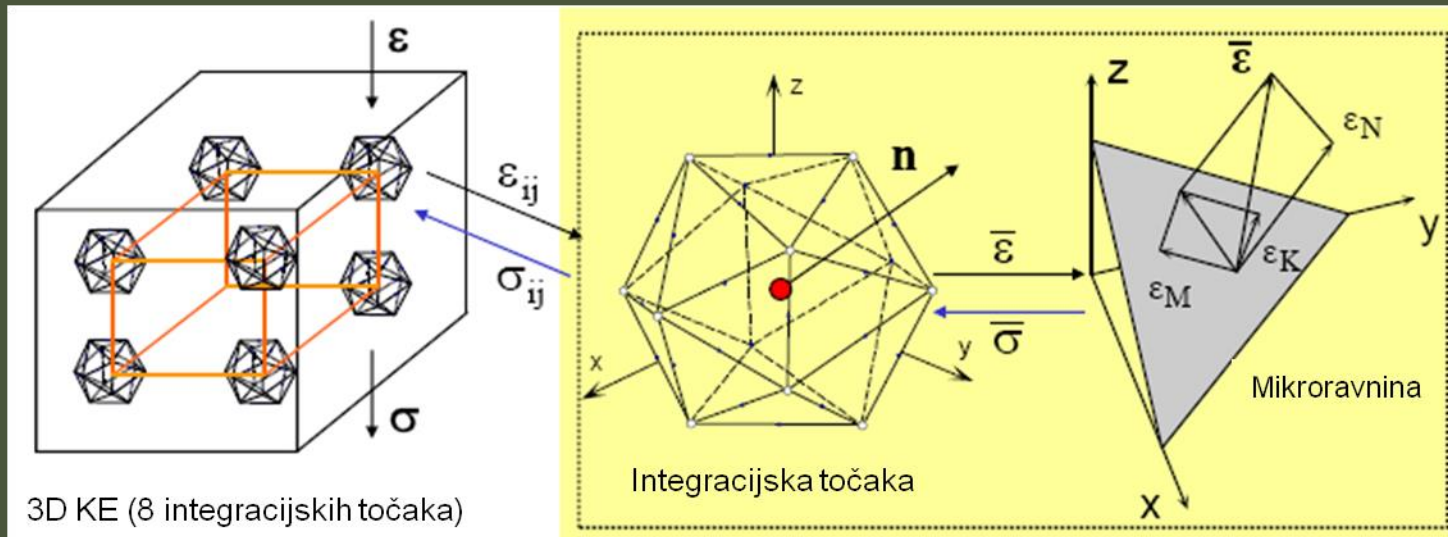
□ Posmična

□ 2 međusobne  
okomite  
posmične  
komponente



# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- 1 trodimenzionalni (3D) konačni element podijeljen je na  $n$  integracijskih točaka ( $n$  broj vrhova elementa)
  - Heksaedar - 8 integracijskih točaka; tetraedar - 4 integracijske točke
- Svaka integracijska točka ima nekoliko mikro-ravnina
  - Minimalno 10, optimalno 21 mikro-ravnina za 1 integracijsku točku

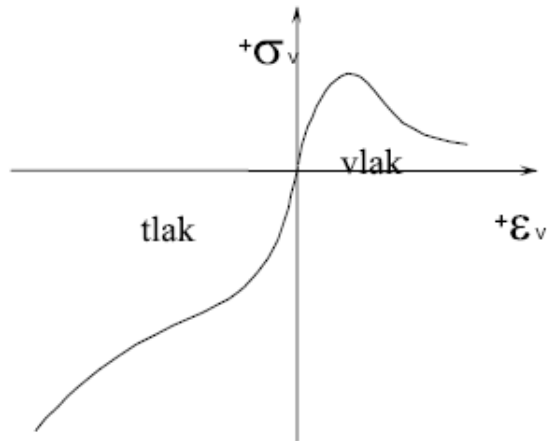


*Pretpostavka:  
male  
defomacije i  
mali pomaci*

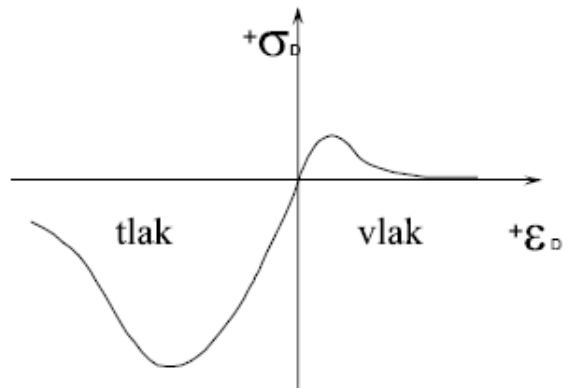


# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

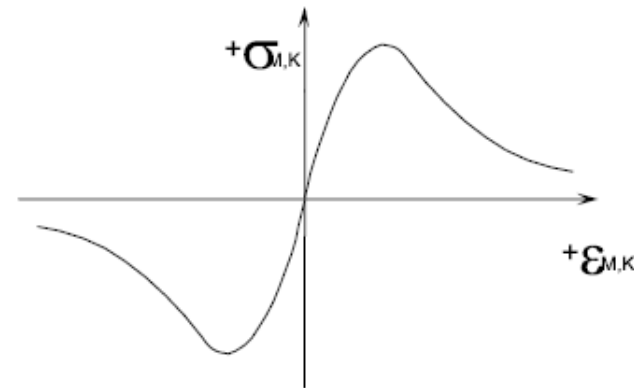
- Na svakoj mikroravnini je unaprijed definiran jednoosni zakon ponašanja materijala za sve 3 komponente mikroravninske deformacije
- Kinematički uvjeti (V+D+T)



**VOLUMENSKA**



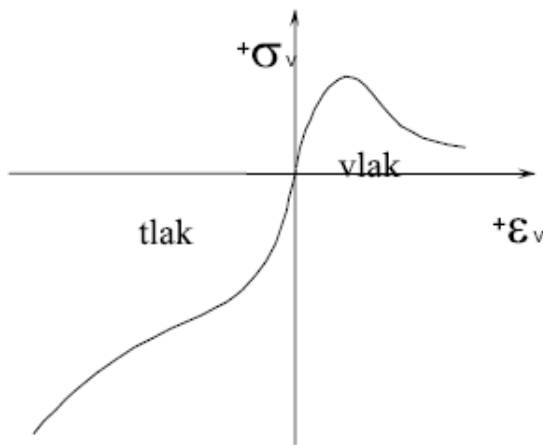
**DEVIJATORSKA  
KOMPONENTE**



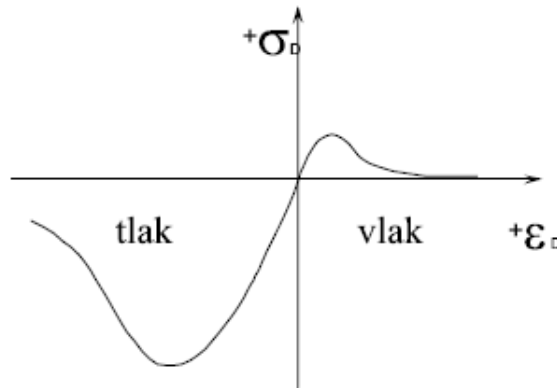
**2POSMIČNE**

# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

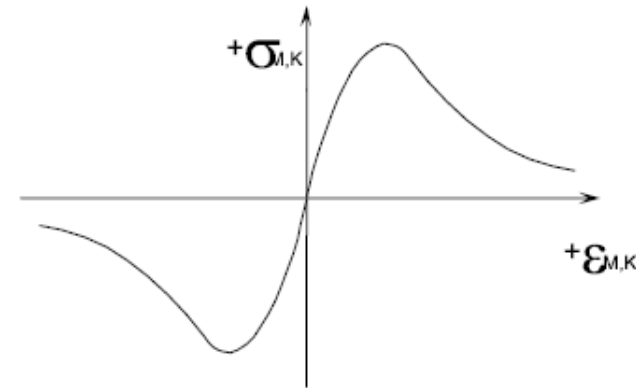
- Iz poznatih komponenti **deformacija\*** na mikroravnini moguće je izračunati komponente **naprezanja u mikroravnini**
  - \*Poznate komponente deformacija na mikroravnini dobivamo iz rubnih uvjeta



**VOLUMENSKA**



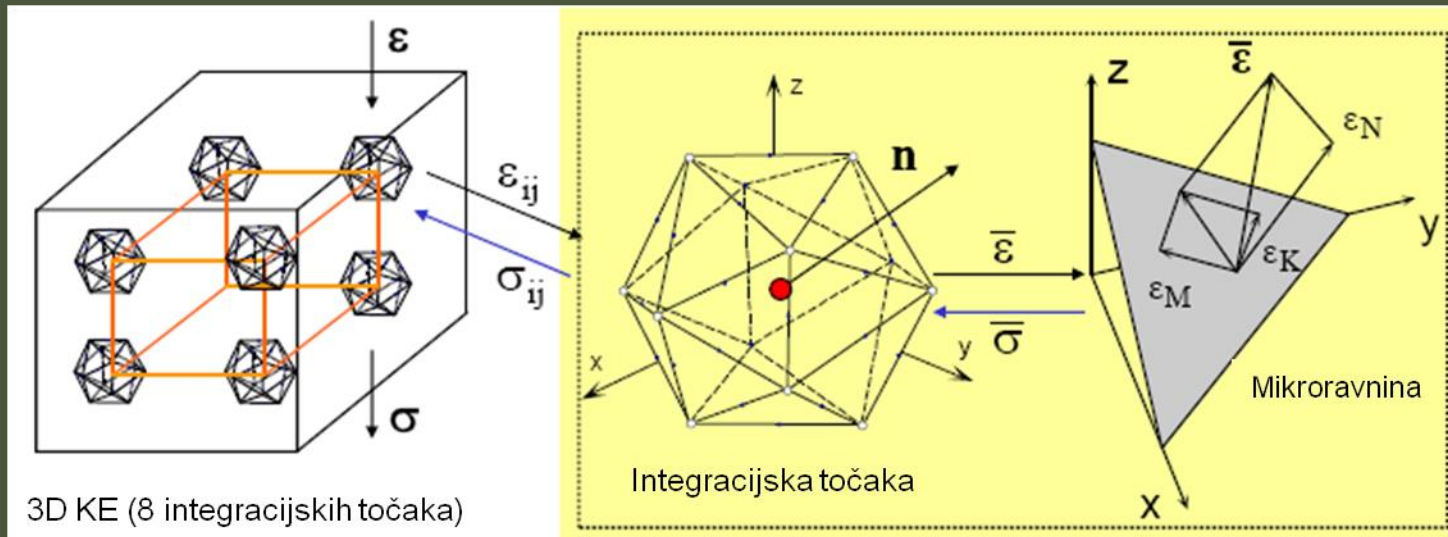
**DEVIJATORSKA  
KOMPONENTE**



**2POSMIČNE**

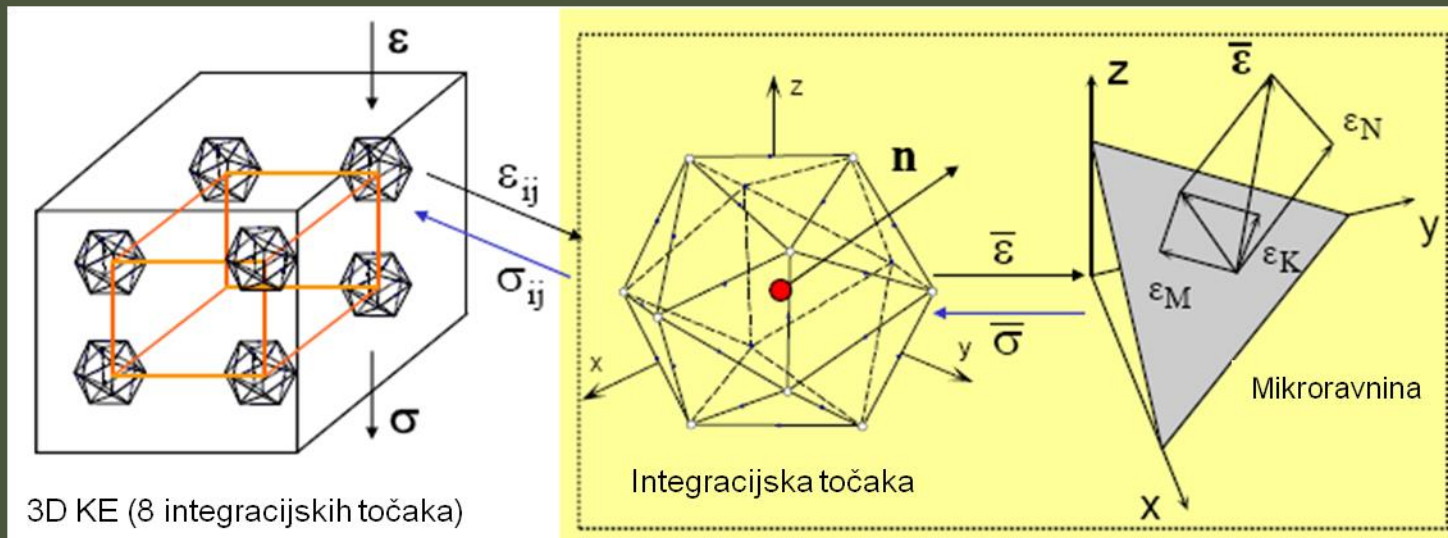
# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Kada su poznata naprezanja u mikro-ravnini – računa se **makroskopski tenzor naprezanja**
  - Izračuna se iz uvjeta **jednakosti virtualnog rada** unutar kugle jediničnog radijusa i virtualnog rada po površini te kugle



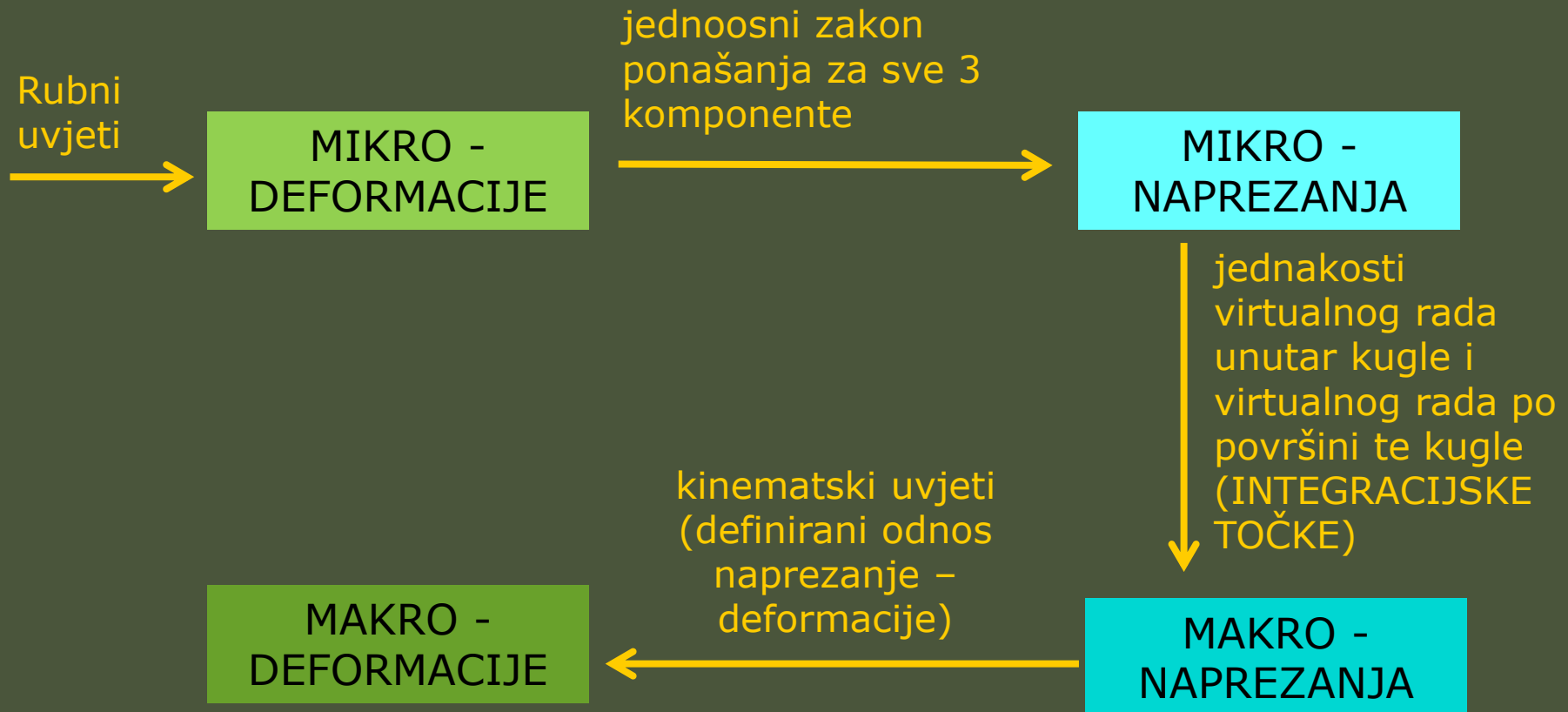
# MIKRORAVNINSKI MODEL BETONA

- Iz makroskopskog tenzora naprezanja
  - Izračuna se **makroskopski tenzor deformacija naprezanja** korištenjem kinematskih uvjeta (definirani odnos naprezanje – deformacije)



# MIKRO - RAVNINSKI MODEL ZA BETON

---



# MIKRORAVNINSKI MODEL ZA BETON

---

- Jednadžba je ravnoteže za kontinuirano tijelo u slučaju statičkog opterećenja

$$\nabla \left[ D_m(u, \theta_w, T) \nabla u \right] + \rho b = 0$$

- gdje je  $D_m$  = tenzor krutosti materijala, a  $\rho b$  = specifično volumno opterećenje
  - Pretpostavka je da krutost materijala ovisi o polju pomaka, sadržaju vode i temperaturi
-

# MIKRORAVNINSKI MODEL ZA BETON

---

- Ukupni tenzor deformacija  $\varepsilon_{ij}$  se može zapisati kao

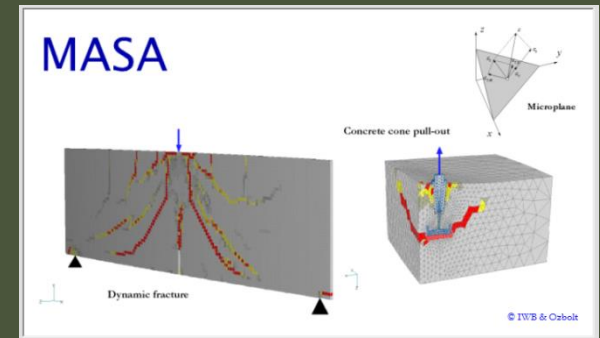
$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^w + \varepsilon_{ij}^{corr}$$

- m -mehanička deformacija
  - T-toplinska deformacija
  - w- „higro“ deformacija (deformacije izazvane bubrenjem i skupljanjem)
  - corr- deformacija nastala porastom produkata korozije, javlja se samo na kontaktu armature i betona nakon depasivacije čelika
  - Mehanička komponenta deformacija može se rastaviti na elastični dio, plastični dio i dio oštećenja
  - Izvor mehaničkih deformacija su vanjske sile, dok su toplinske i hygro, kao i korozijske deformacije izazvane naprezanjima nastalim zbog promjene volumena
-



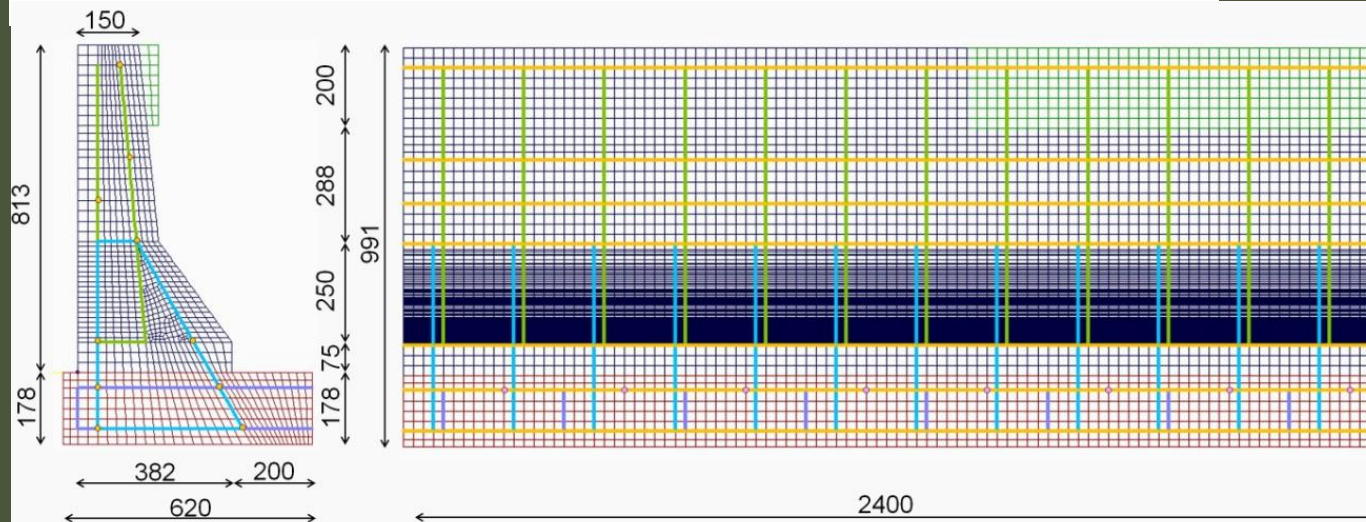
# IMPLEMENTACIJA MODELA

- ❑ MASA + (Microplane Analysis Program)
- ❑ 3D nelinearni proračun kvazikrhkih materijala (betonskih, AB, PB ...)
- ❑ Temelji se na metodi konačnih elemenata
- ❑ Upotrijebljeni klasični konačni elementi (solid, bar, ...) formirani u okviru mehanike lokalnog kontinuma
- ❑ Oštećenja (pukotine) tretirana u okviru koncepta "razmazanih pukotina" – pri čemu je objektivnost rezultata postignuta pomoću "crack band" metode
- ❑ Konstitutivni zakon ponašanja materijala: primjenjen mikroravninski model betona (microplane model)



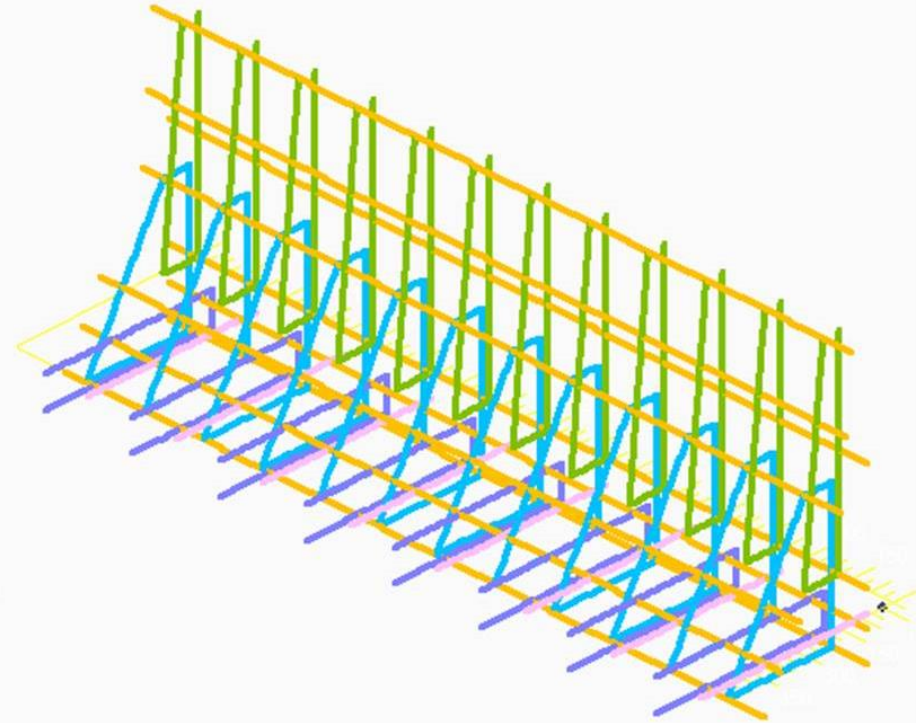
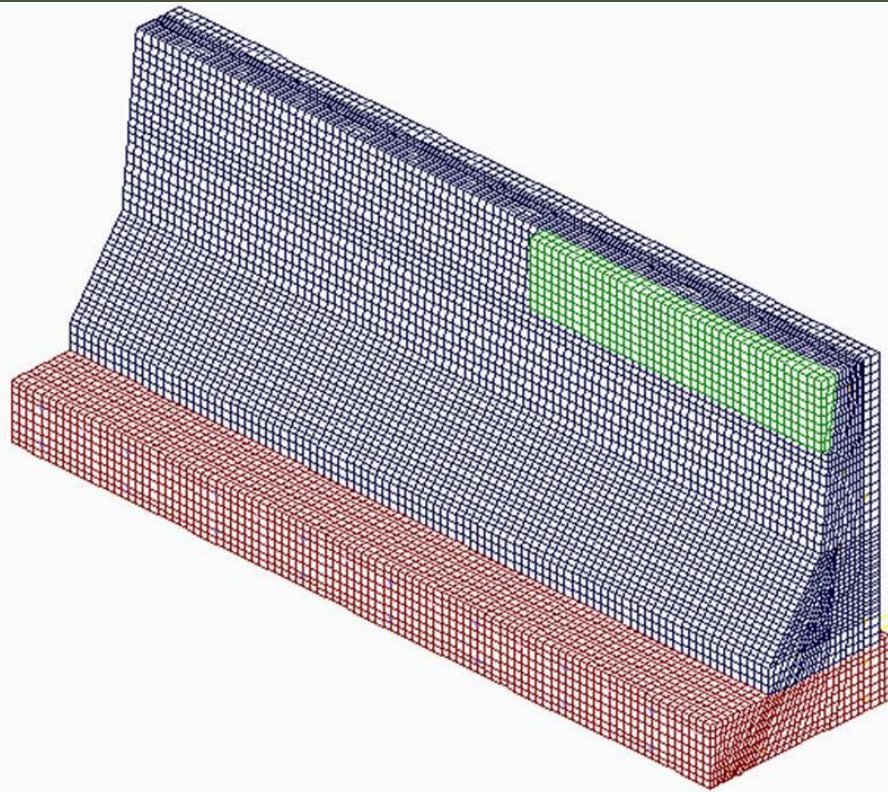
# Numerička simulacija statičkog opterećenja betonske odbojne ograde

| Svojstvo materijala                              | Ograda    | Ploča |
|--------------------------------------------------|-----------|-------|
| Modul elastičnosti betona, $E_c$ (MPa)           | 25000.00  |       |
| Modul elastičnosti čelika, $E_s$ (MPa)           | 200000.00 |       |
| Poissonov koeficijent betona, $\nu_c$            | 0.18      |       |
| Poissonov koeficijent čelika, $\nu_s$            | 0.33      |       |
| Vlačna čvrstoća betona, $f_t$ (MPa)              | 2.00      |       |
| Jednoosna tlačna čvrstoća betona, $f_c$ (MPa)    | 25.00     | 27.00 |
| Energija sloma betona, $G_F$ (J/m <sup>2</sup> ) | 90.00     |       |
| Granica popuštanja čelika, $f_y$ (MPa)           | 414.00    |       |
| Čvrstoća čelika, $f_u$ (MPa)                     | 580.00    |       |



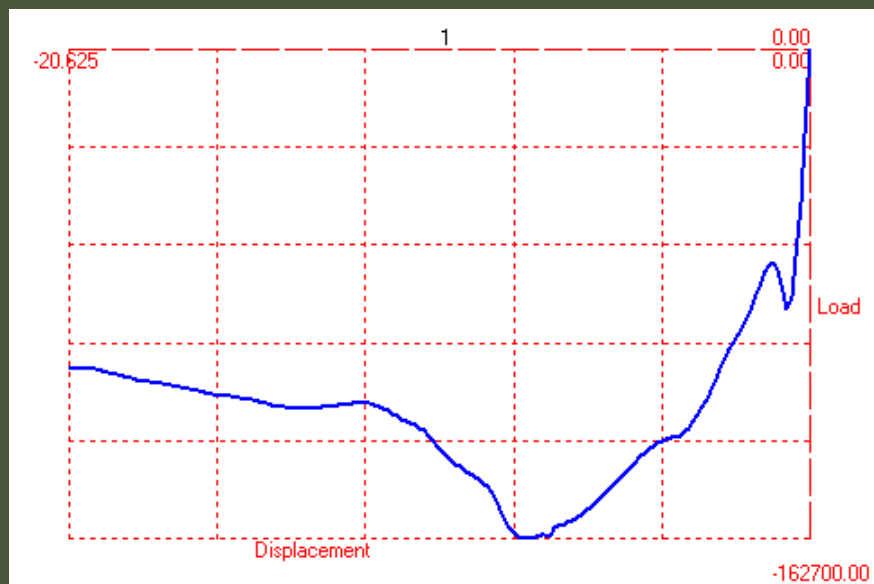
# Numerička simulacija statičkog opterećenja betonske odbojne ograde

---

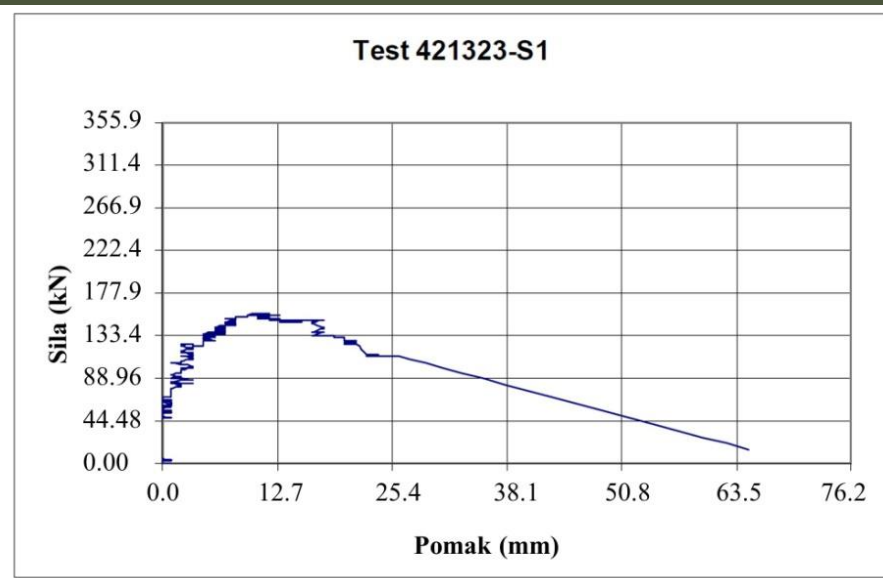


# Numerička simulacija statičkog opterećenja betonske odbojne ograde

## Dijagram sila – pomak



numerička analiza



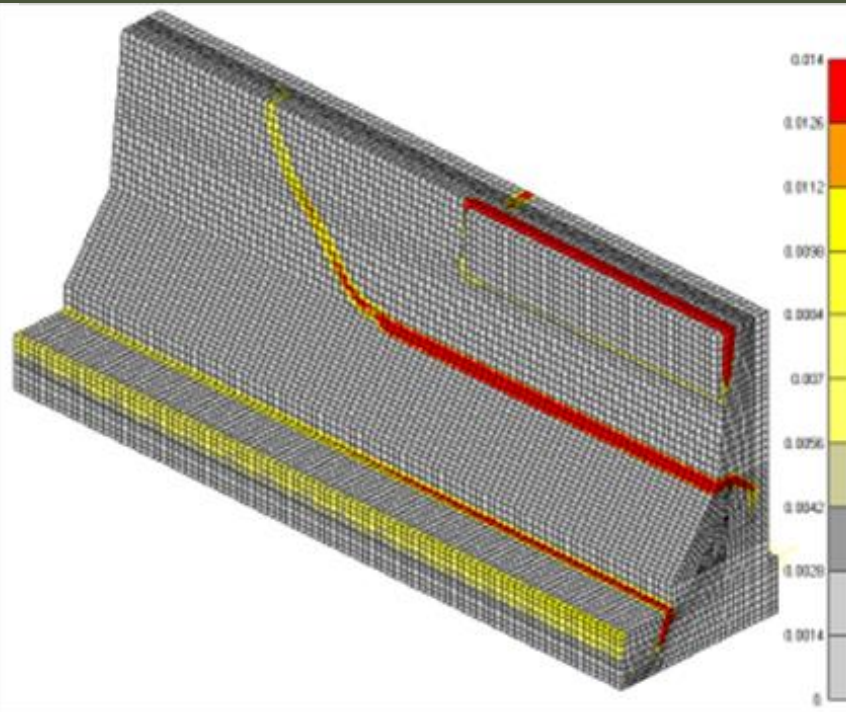
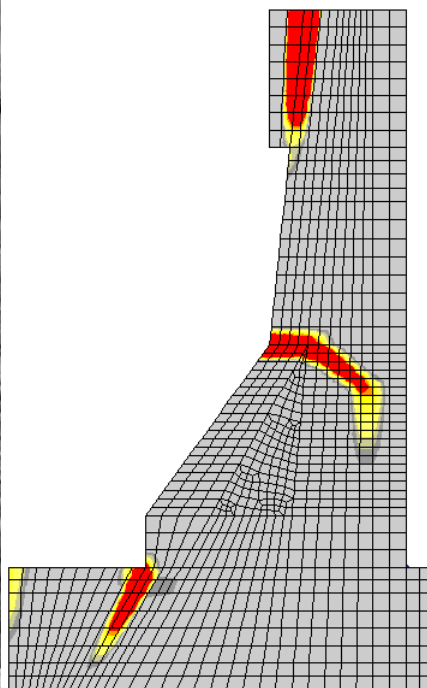
eksperimentalno ispitivanje  
(Alberson et al., 2004)

Max sila u numeričkoj analizi 4% veća od postignute sile u eksperimentu



# Numerička simulacija statičkog opterećenja betonske odbojne ograde

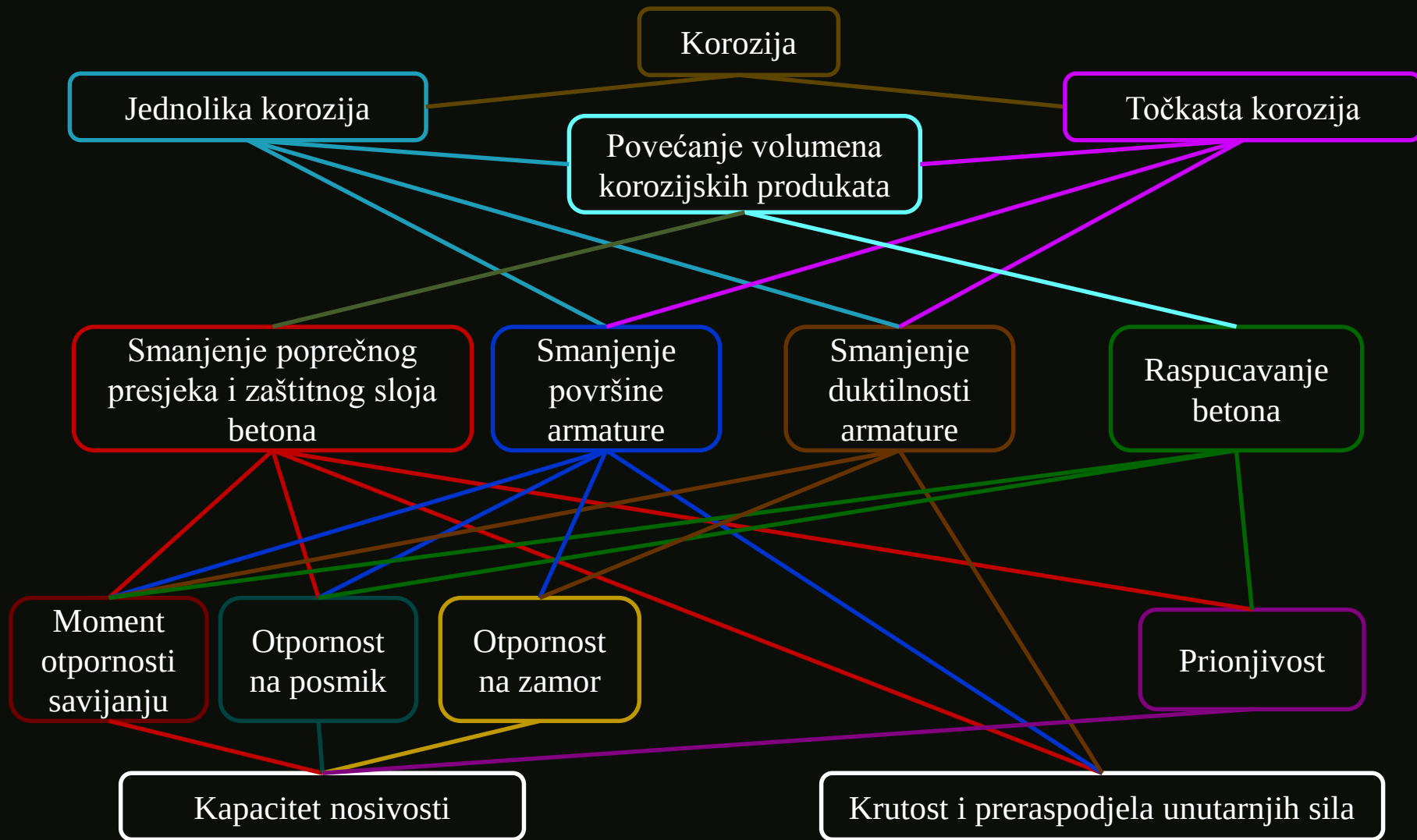
## Razvoj pukotina pri dostizanja maksimalne sile



Kušter Marić, 2013

Pri projektiranju mostova, uz detaljno oblikovanje detalja konstruktivnih elemenata, treba pažnju posvetiti izboru i načinu ugradnje opreme mosta kako bi se izbjegla moguća oštećenja konstrukcije uslijed otkazivanja opreme

# KONSTRUKCIJSKE POSLJEDICE KOROZIJE



# KONSTRUKCIJSKE POSLJEDICE KOROZIJE

---

- ❑ Korozijskim procesom željezo prelazi u hrđu, što za direktnu posljedicu ima: (i) smanjenje površine poprečnog presjeka i duktilnosti armature te (ii) porast volumena korozijskih produkata
  - ❑ Smanjenjem poprečnog presjeka armature smanjuje se njena otpornost na savijanje i posmik te dolazi do smanjenja krutosti konstrukcije
  - ❑ Promjena duktilnosti šipke utječe na krutost konstrukcije, na mogućnost preraspodjele unutarnjih sila te graničnu nosivost statički neodređenog sustava
  - ❑ Pri lokalnoj (točkastoj) koroziiji poprečni presjek armature se može znatno smanjiti što ugrožava nosivost i čvrstoću na zamor što pod posebnim okolnostima može dovesti do krkog loma kabela za prenapinjanje od čelika visoke čvrstoće
-



# KONSTRUKCIJSKE POSLJEDICE KOROZIJE

---

- ❑ Korozijskim procesom nastaju korozijski produkti čijim povećanjem volumena dolazi do raspucavanja i odlamanja betona oko šipke što dovodi do smanjenja poprečnog presjeka betona i debljine zaštitnog sloja
- ❑ Ukoliko dođe do odlamanja zaštitnog sloja betona na tlačnoj strani poprečnog presjeka, smanjuje se unutarnji krak sila koji dovodi do smanjenja momenta savijanja
- ❑ Uslijed povećanja volumena korozijskih produkata raspucavanje i odlamanje betona u blizini korodirane šipke armature dovodi do smanjenja prionjivosti između betona i armature
- ❑ U slučaju da su korodirane vilice s raspucanim okolnim betonom dolazi do smanjenja otpornosti na posmik.

# KONSTRUKCIJSKE POSLJEDICE KOROZIJE

---

- ❑ Pukotine nastaju ako je dosegnuta vlačna čvrstoća betona, stoga svako daljnje vlačno naprezanje uslijed mehaničkog opterećenja konstrukcije dovodi do otvaranja novih ili širenje postojećih pukotina
- ❑ Dugoročno gledano, raspucani beton smanjuje kapacitet nosivosti konstrukcije jer pruža manju zaštitu armaturi te omogućava brži prodor agresivnih tvari do armature
- ❑ Ovisno o smjeru, pukotine u betonu mogu utjecati na promjenu krutosti, a time i na moguću preraspodjelu sila u konstrukciji
- ❑ Raspucavanjem i odlamanjem zaštitnog sloja betona uslijed korozije armiranobetonskog stupa smanjuje se poprečni presjek, a povećava vitkost stupa te u određenim uvjetima može doći do izvijanja stupa

# POSTOJEĆI NUMERIČKI MODELI KOROZIJE



- Bažant, 1979.
- Tutti, 1982.
- Još uvijek u fazi intenzivnog istraživanja

# Modeli faze inicijacije

---

**Difuzija – 2. Fickov zakon**



**Difuzija + vezanje klorida za produkte cementne hidratacije**



**Difuzija + konvekcija**

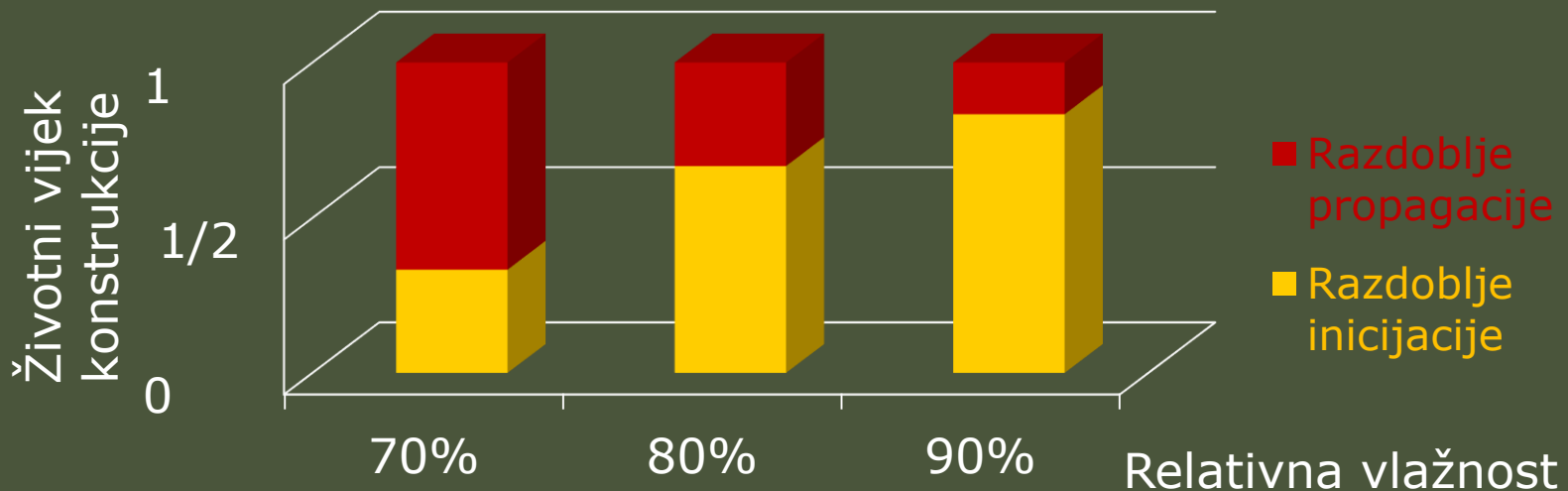


**Difuzija + konvekcija + utjecaj pukotina**

---

# Modeli faze propagacije

- Većina dostupnih modela – pretpostavka: **vrijeme propagacije zanemareno**
  - Projektirani životni vijek = trajanje faze inicijacije
  - Pretpostavka - zbog oskudnog znanja o procesu propagacije te njenoj složenosti
  - U nekim slučajevima ta pretpostavka previše konzervativna
    - Primjerice, za vrijednosti relativne vlažnosti od 70% razdoblje propagacije ne samo da nije zanemarivo, već je i dulje od razdoblja inicijacije



# Modeli faze propagacije

---

## Proračun gustoće korozijske struje

**Elektrokemijski  
principi korozijske  
čelika u betonu**

**Ograničena  
koncentracija  
kisika na razini  
armature  
(limiting current  
density)**

**Empirijski modeli**

---

# MODELIRANJE FAZE INICIJACIJE

## □ Transport kapilarne vode

- Volumni udio kapilarne vode ( $\text{m}^3/\text{m}^3$  betona)
- Richardova jednadžba

## □ Transport kisika

- Pretpostavka: kisik ne sudjeluje ni u jednoj kemijskoj reakciji prije depasivacije čelika

## □ Transport klorida

## □ Fizikalno i kemijsko vezanje klorida za cementnu pastu

## □ Distribuciju topline

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w(\theta_w) \nabla \theta_w]$$

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o$$

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{W_{gel}}{1000} \cdot \frac{\partial C_{cb}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial C_{cb}}{\partial t} = k_r (\alpha C_c^\beta - C_{cb})$$

$$\lambda \Delta T + W(T) - c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$



# MODELIRANJE FAZE PROPAGACIJE

## Depasivacija



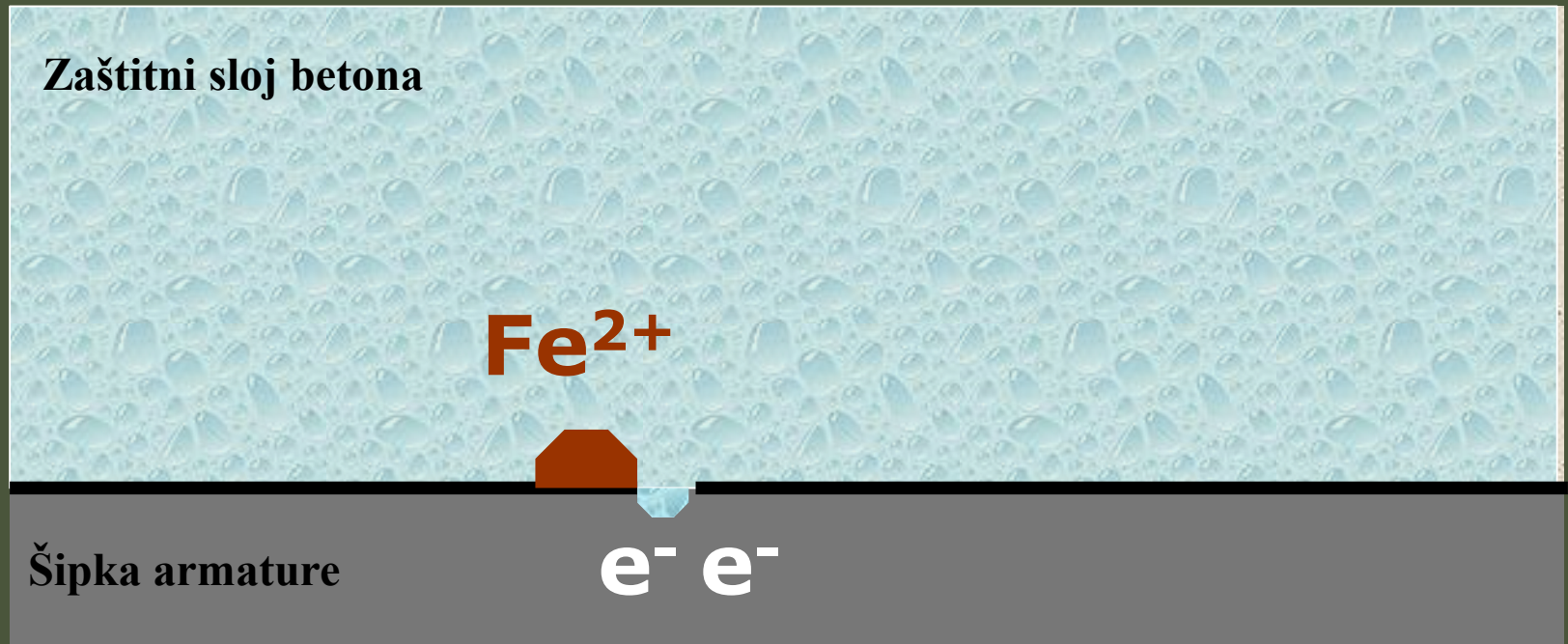
Zaštitni sloj betona

Pasivni film  $Fe_2O_3$

Šipka armature

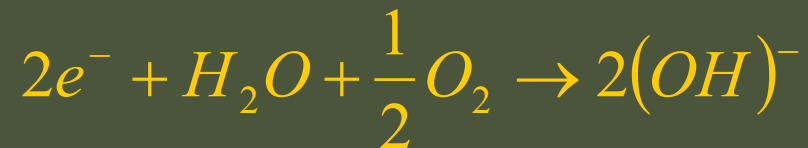
# MODELIRANJE FAZE PROPAGACIJE

ANODA: otapanje željeza



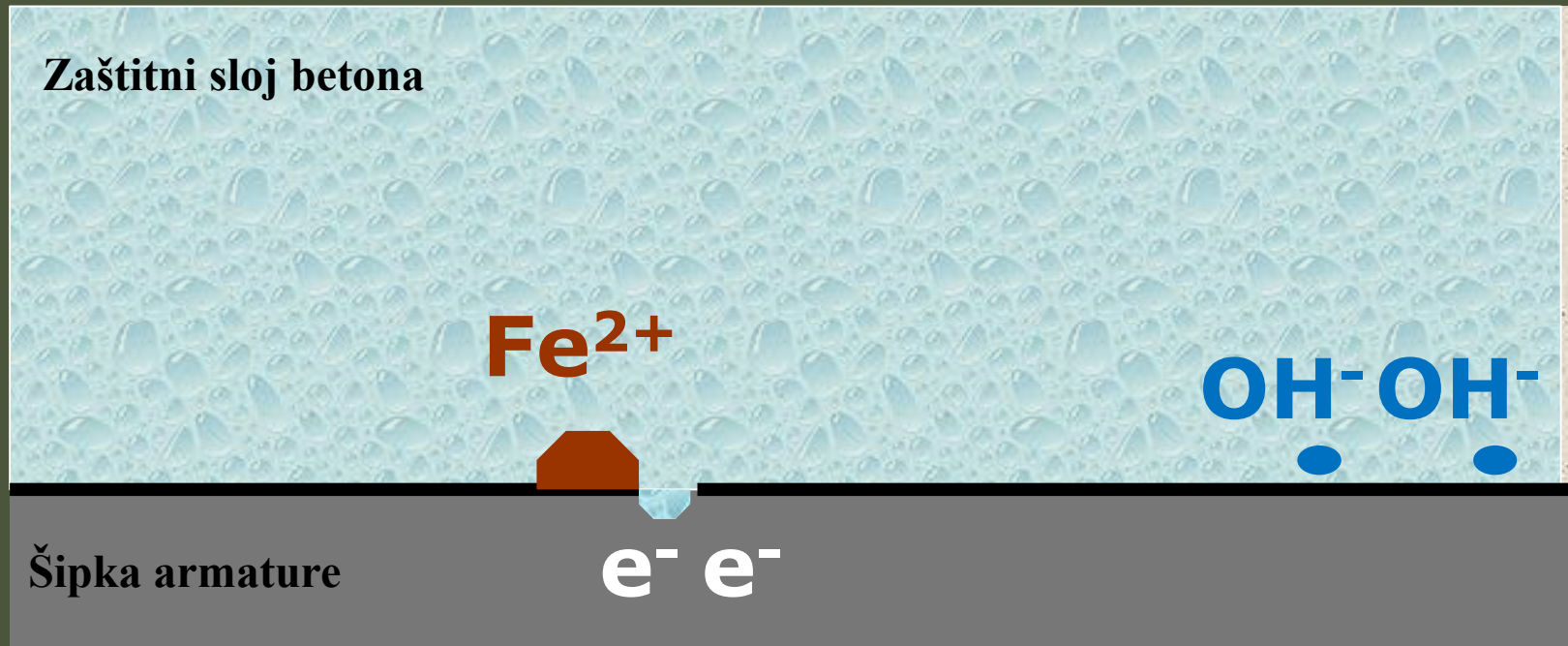
# MODELIRANJE FAZE PROPAGACIJE

KATODA: hidroksidni ioni



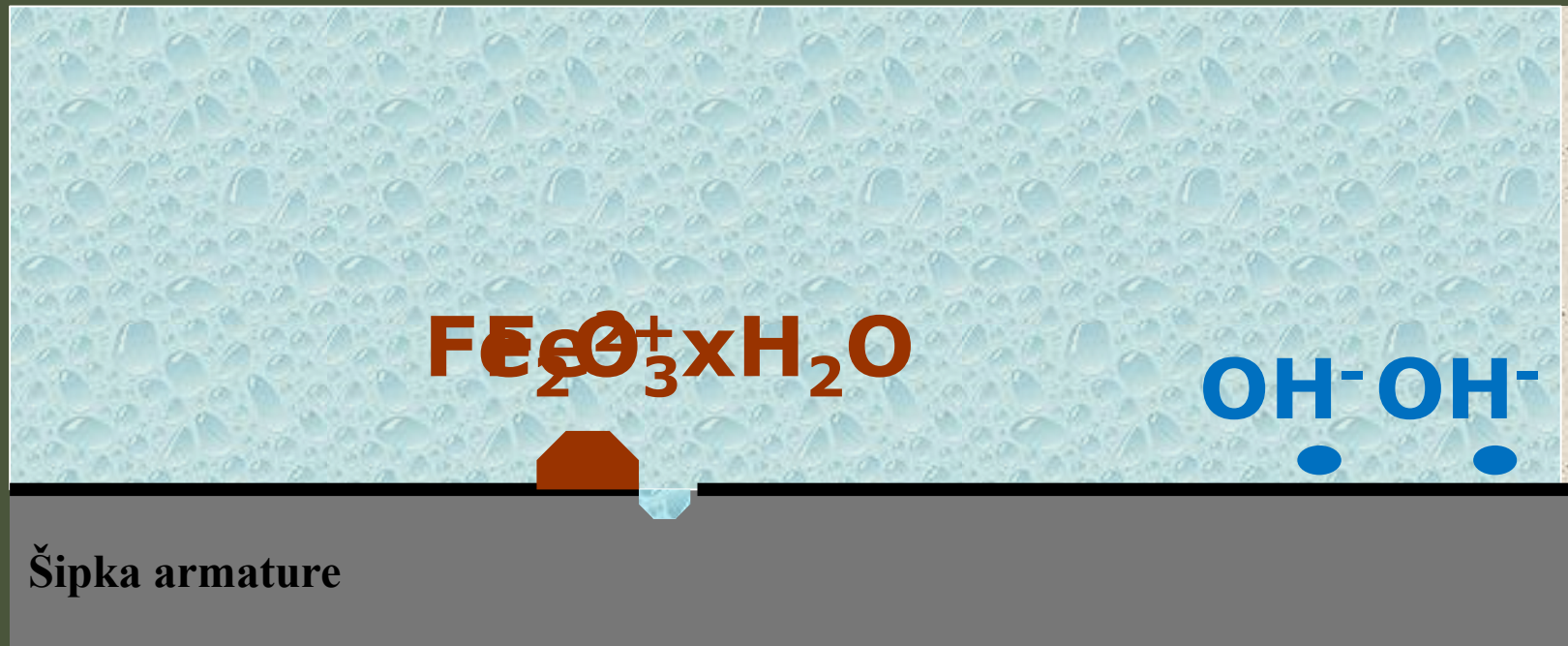
$O_2$

$H_2O$



# MODELIRANJE FAZE PROPAGACIJE

ANODA: korozijski produkti



# MODELIRANJE FAZE PROPAGACIJE

- Potrošnja kisika na katodi i anodi

$$D_o(S_w, p_{con}) \frac{\partial C_o}{\partial n} \Big|_{katoda} = -k_c i_c \quad k_c = 8.29 \times 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$
$$D_o(S_w, p_{con}) \frac{\partial C_o}{\partial n} \Big|_{anoda} = -k_a i_a \quad k_a = 4.14 \times 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

- Butler-Volmer jednadžbe
  - Kinetika elektrokemijskog procesa

$$i_c = i_{0c} \frac{C_o}{C_{ob}} e^{2.3(\Phi_{0c} - \Phi)/\beta_c} \quad i_a = i_{0a} e^{2.3(\Phi - \Phi_{0a})/\beta_a}$$

- Gustoća struje
  - Pretpostavka: električna neutralnost sustava i ravnomjerna raspodjela koncentracije iona

$$\mathbf{i} = -\sigma(S_w, p_{con}) \nabla \Phi$$

- Električni potencijal
  - Očuvanje električnog naboja

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

# Modeliranje oštećenja u betonu izazvanih porastom korozijskih produkata

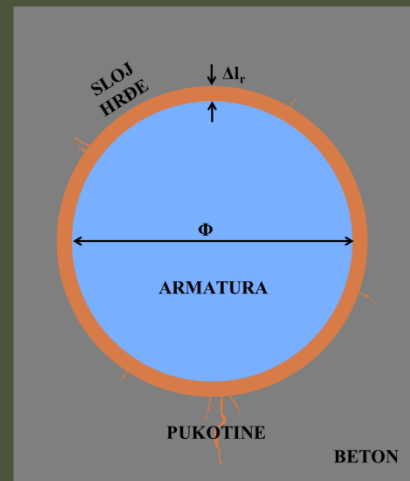
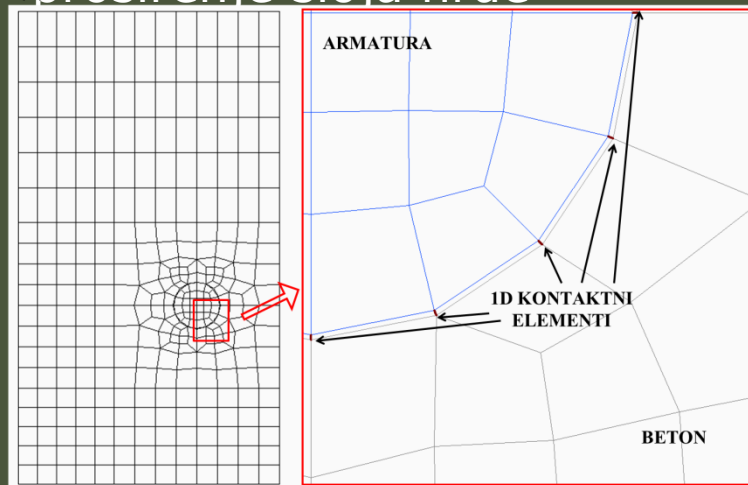
- Stupanj prirasta hrđe (kg/m<sup>2</sup>s)
- Masa crvene hrđe po jedinici duljine šipke  $m_r$  (kg/m)
- Raspodjela hrđe u porama i pukotinama betona
- Neelastično radijalno proširenje sloja hrđe

$$J_r = 5.536 \times 10^{-7} i_a$$

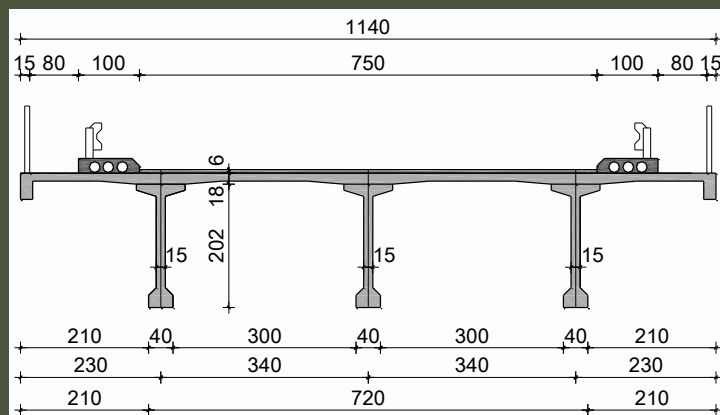
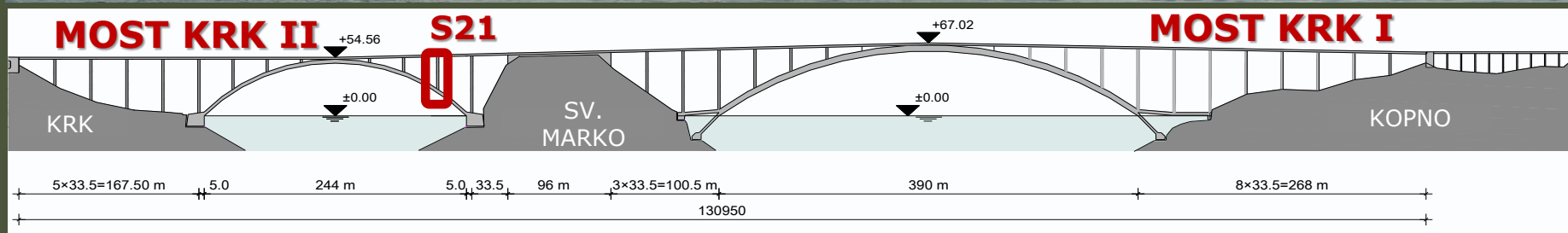
$$m_r = J_r \Delta t A_r$$

$$\theta_w \frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_r \nabla R] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla R$$

$$\Delta l_r = \frac{m_r}{A_r} \left( \frac{1}{\rho_r} - \frac{0.523}{\rho_s} \right)$$



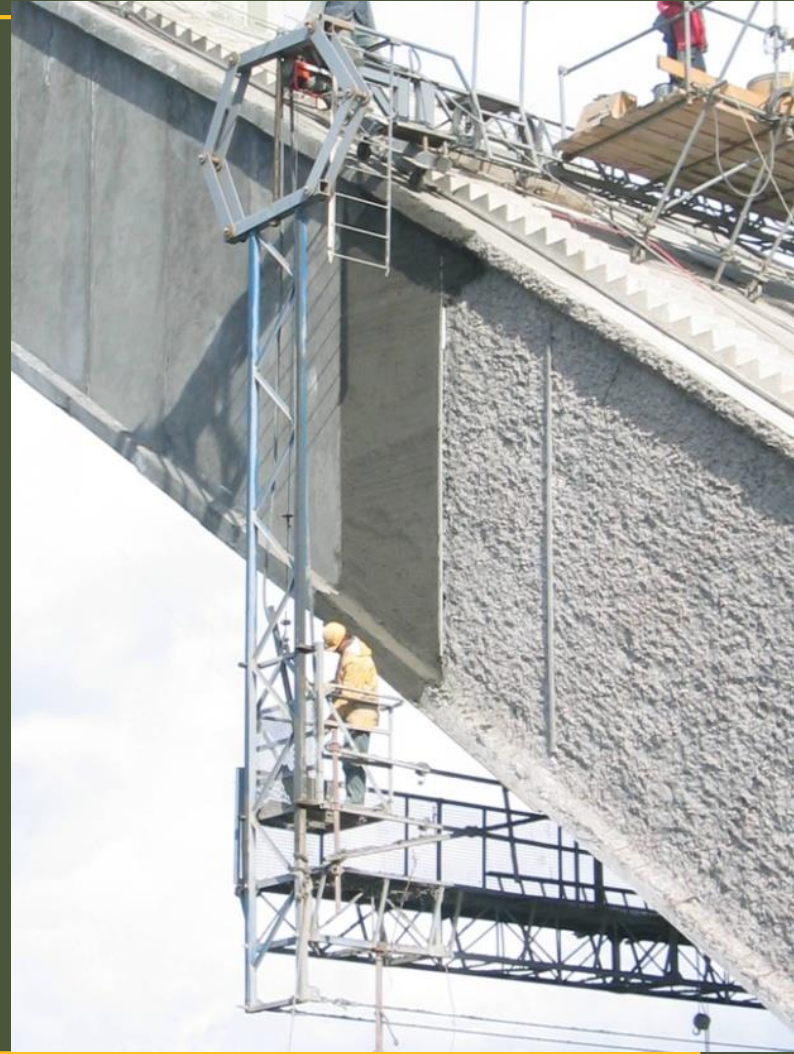
# ANALIZA PROPADANJA ARMIRANOBETONSKOG MOSTA U MORSKOJ OKOLINI USLIJED KOROZIJSKIH PROCESA



- ❑ Dva AB luka: raspona 244 m and 390 m
- ❑  $f/L = 1/6,5$  – veći luk;  $1/5,2$  – manji luk
- ❑ Najveći klasični AB luk na Svijetu
- ❑ Nadlučna konstrukcija: predgotovljeni PB nosači
- ❑ Građenje: 1976-1980.
- ❑ Sanacija: od 1986.



# ANALIZA PROPADANJA ARMIRANOBETONSKOG MOSTA U MORSKOJ OKOLINI USLIJED KOROZIJSKIH PROCESA



# ANALIZA PROPADANJA ARMIRANOBETONSKOG MOSTA U MORSKOJ OKOLINI USLIJED KOROZIJSKIH PROCESA

**Greške u projektiranju i izvođenju + agresivan okoliš = ubrzano propadanje Krčkog mosta**

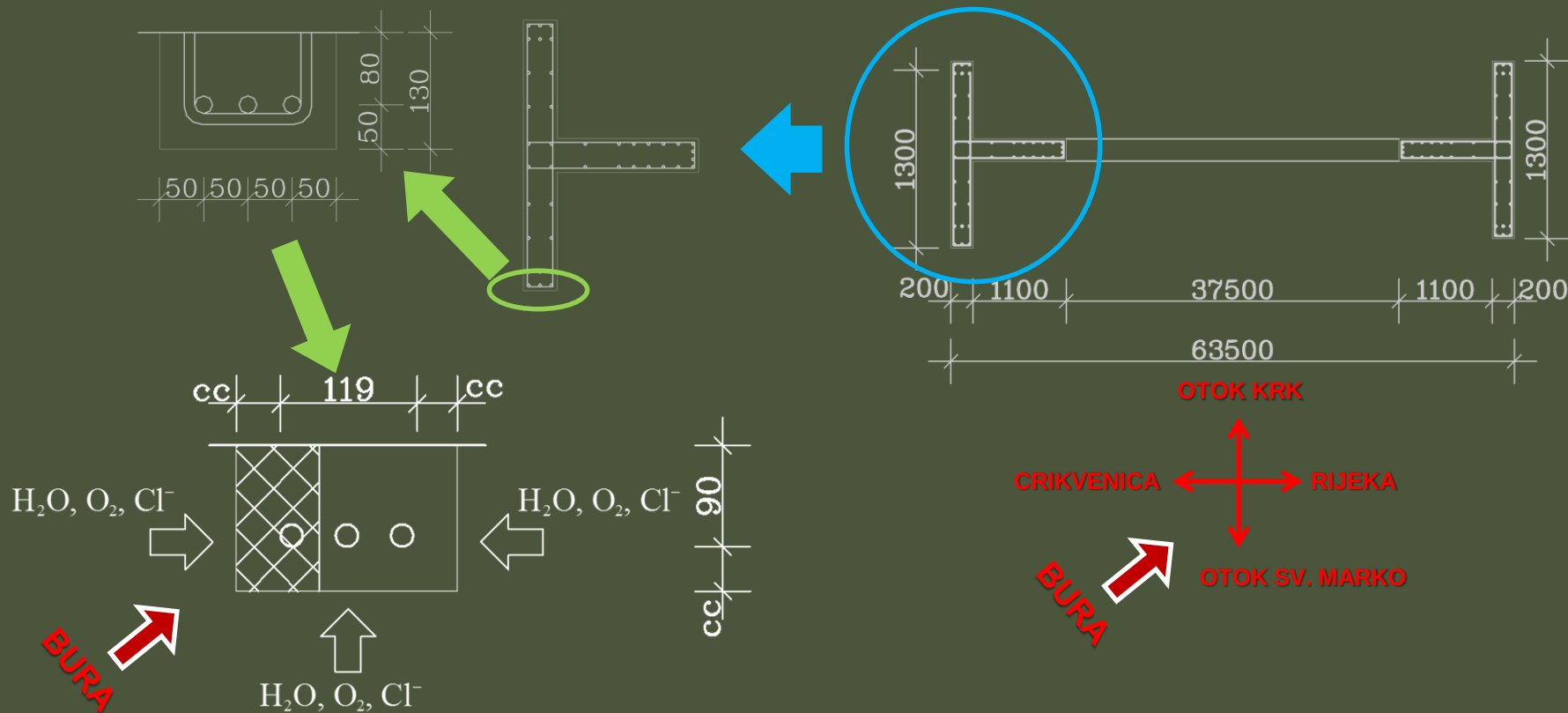
**Oblikovanju detalja konstrukcije potrebno je posvetiti posebnu pažnju kako bi ostvario statičkim proračunom definiran tijek sila bez neplaniranog raspucavanja betona.**

**Sustav odvodnje valja odgovarajuće riješiti kako bi se izbjeglo zadržavanje vode na bilo kojem konstruktivnom elementu mosta što je osnova za osiguranje trajnosti građevine.**

**Greške nastale prilikom građenja Krčkog mosta (Krk II) intenzivirala su djelovanja drugih mehanizama degradacije, posebice korozije armature u betonu, što je dovelo do ubrzanog propadanja konstrukcije.  
Prilikom građenja potrebno je osigurati kontrolu kvalitete kako bi se izvela projektom definirana debljina i kvaliteta zaštitnog sloja betona.**

**Ukoliko za projektirani most postoji visok rizik od korozije izazvane kloridima potrebno je razmotriti mogućnosti antikorozivne zaštite te primijeniti optimalnu zaštitu neposredno nakon završetka gradnje.**

# Numeričko modeliranje korozijskih procesa na elementu Krčkog mosta



## □ Zaštitni sloj

- Projektirano  $cc = 30 \text{ mm}$  (40 mm do glavne armature)
- Izvedeno  $cc = 15 \text{ mm} - 50 \text{ mm}$
- Modelirano  $cc_1 = 25 \text{ mm}; cc_2 = 40 \text{ mm}; cc_3 = 55 \text{ mm}$

# Transportni procesi do depasivacije armature

## RASPODJELA VODE

Raspodjela vode  
( $\text{m}^3$  vode /  $\text{m}^3$  betona)

nakon:

(a) 1 dana

(b) 1 mjeseca

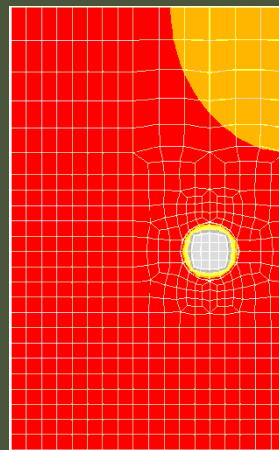
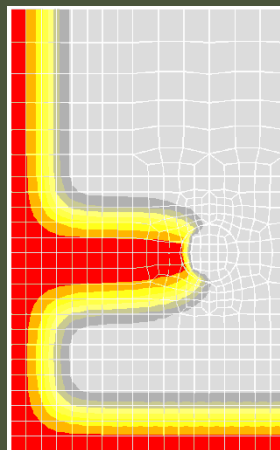
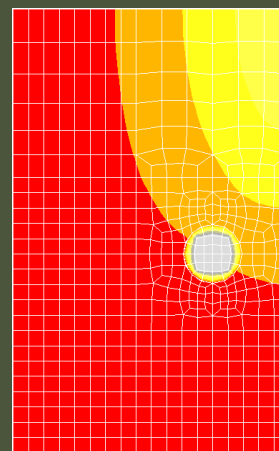
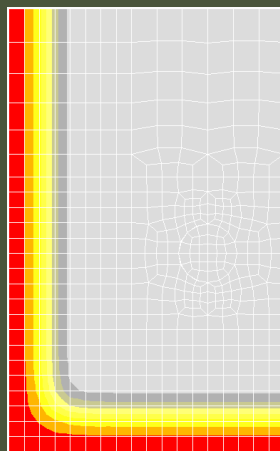
Odmah nakon raspucavanja  
betona, voda, kisik i kloridi  
prodiru u pukotinu  
U skladu s eksperimentalnim  
istraživanjima: Wittmann et al.  
(2009), Marsavina et al.  
(2008)

BEZ PUKOTINE

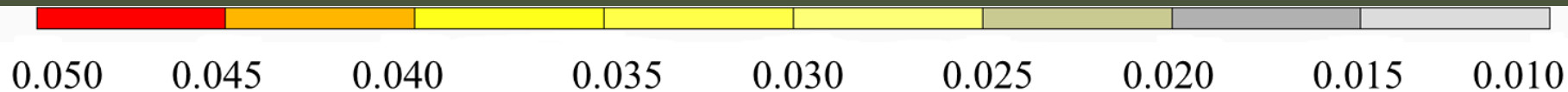
S PUKOTINOM  
( $c_w=0.2 \text{ mm}$ )

(a)

(b)



Kušter Marić, 2013



# Transportni procesi do depasivacije armature

## RASPODJELA KISIKA

Raspodjela kisika  
(kg /m<sup>3</sup> porne vode)  
nakon:

(a) 1 dana

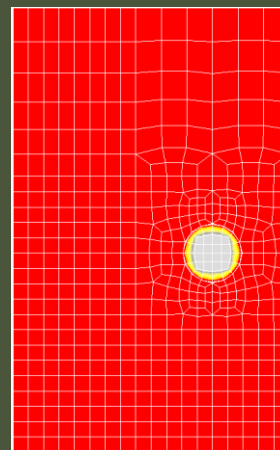
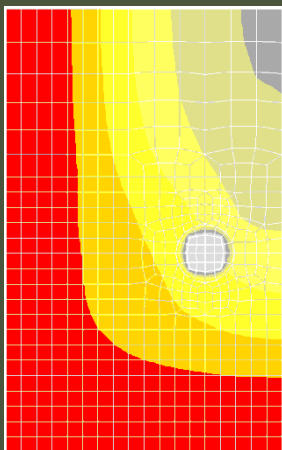
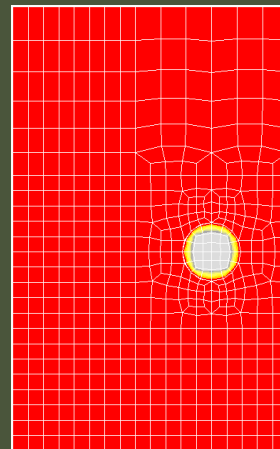
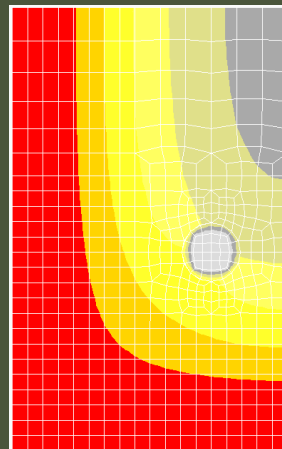
(b) 1 mjeseca

BEZ PUKOTINE

S PUKOTINOM  
(cw=0.2 mm)

(a)

(b)



Kušter Marić, 2013





# Transportni procesi do depasivacije armature

## RASPODJELA SLOBODNIH KLORIDA

Raspodjela  
slobodnih klorida  
(kg /m<sup>3</sup> porne  
vode) nakon:

(a) 1 dana

(b) 1 mjeseca

(c) 1 godine

(d) 10 godina

Odmah nakon raspucavanja  
betona, voda, kisik i kloridi  
prodiru u pukotinu  
U skladu s eksperimentalnim  
istraživanjima: Wittmann et al.  
(2009), Marsavina et al.  
(2008)

BEZ PUKOTINE

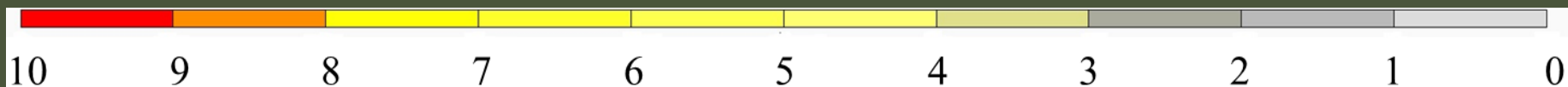
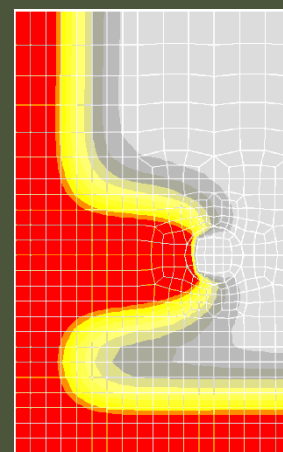
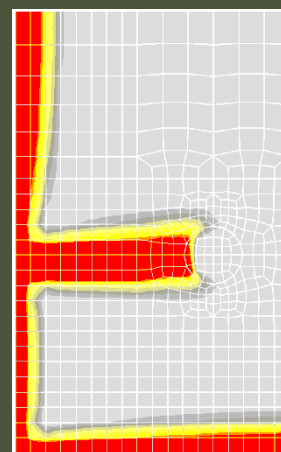
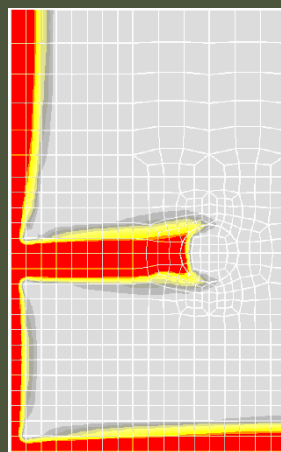
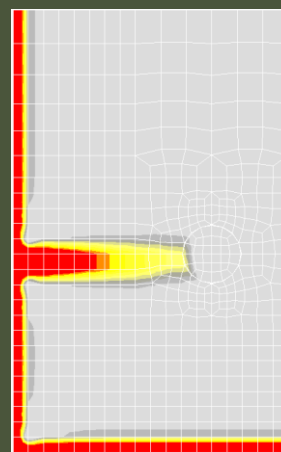
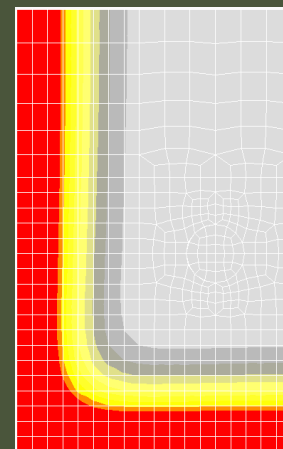
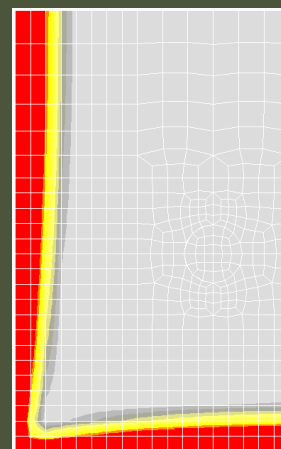
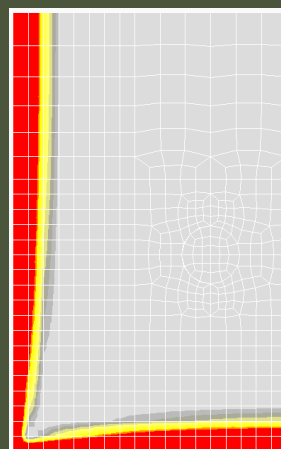
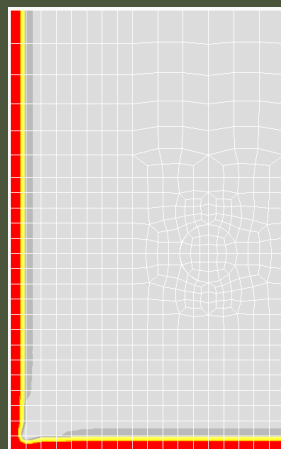
S PUKOTINOM  
(cw=0.2 mm)

(a)

(b)

(c)

(d)



# Transportni procesi do depasivacije armature

## RASPODJELA VEZANIH KLORIDA

Raspodjela  
vezanih  
klorida (g /kg  
cementnog  
gela) nakon:  
(a) 1 dana,  
(b) 1 mjeseca  
(c) 1 godine  
(d) 10 godina

BEZ PUKOTINE

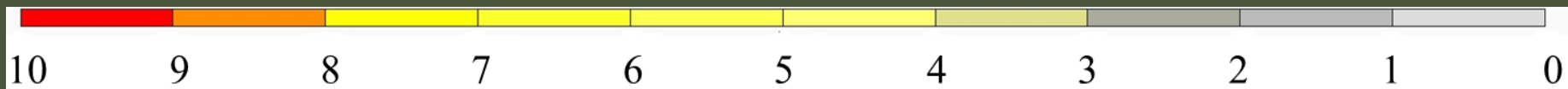
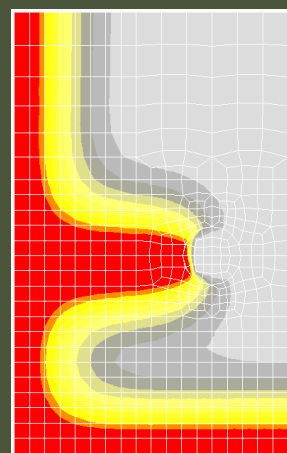
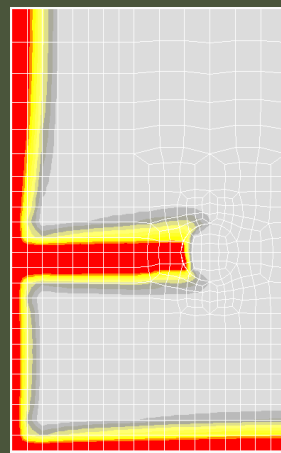
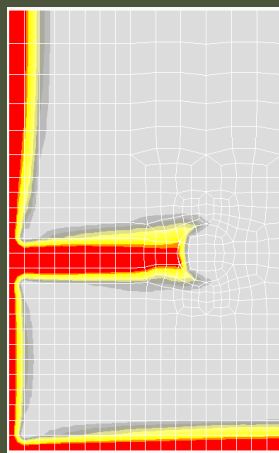
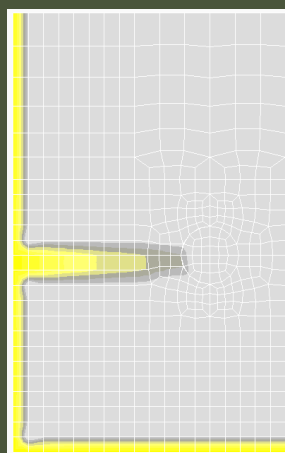
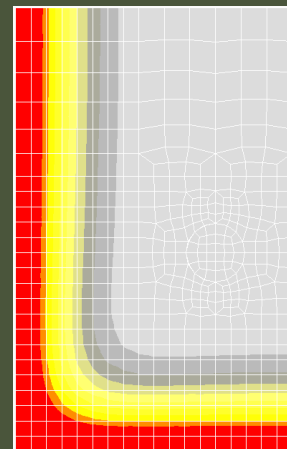
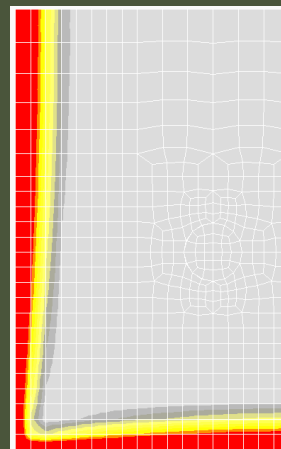
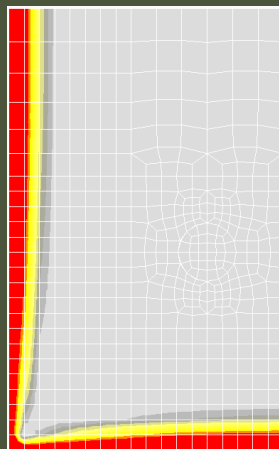
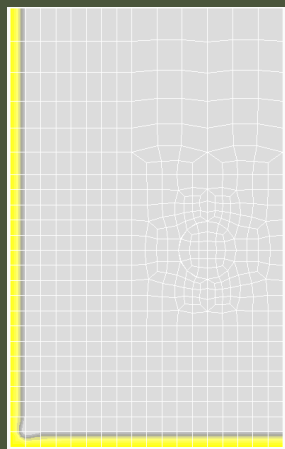
S PUKOTINOM  
(cw=0.2 mm)

(a)

(b)

(c)

(d)

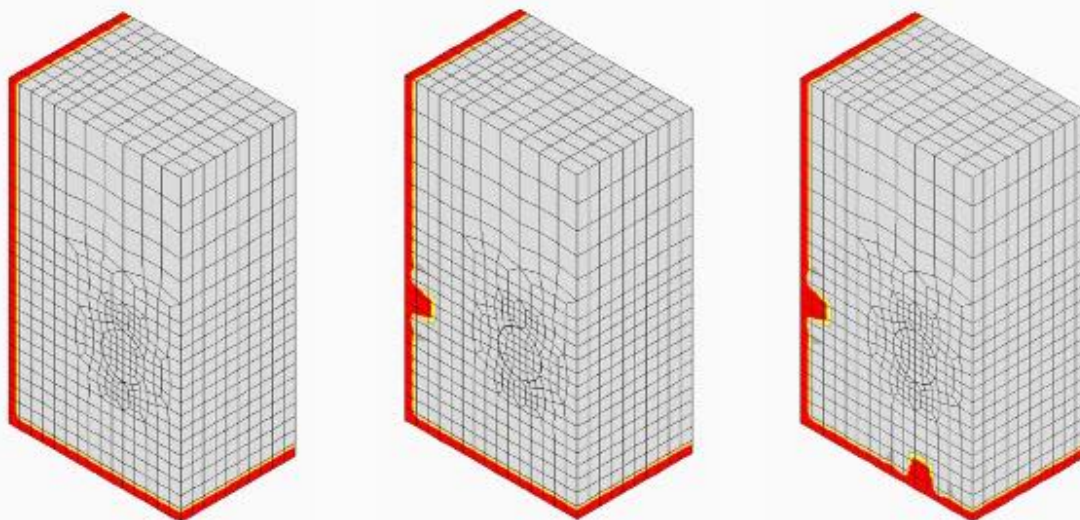




# Utjecaj debljine i oštećenja zaštitnog sloja betona

## Raspodjela klorida u betonu bez pukotine, s 1 i 2 pukotine

$t = 1 \text{ sat}$

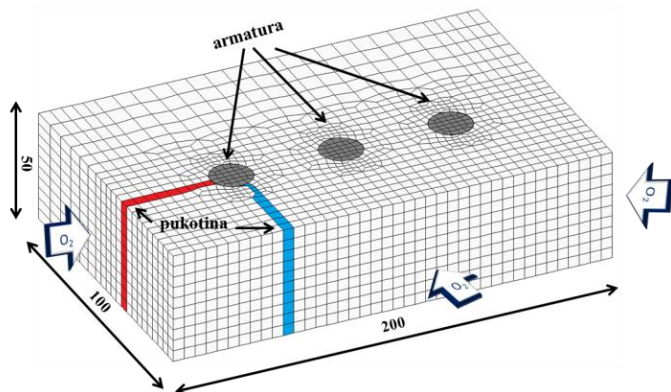
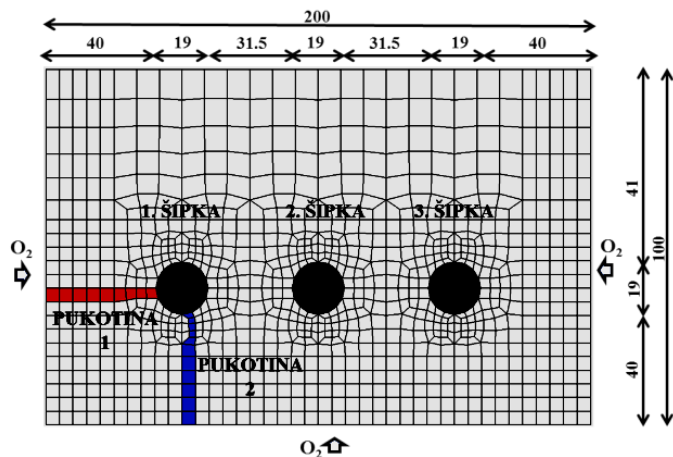


Transportni procesi samo kroz porozan materijal

Broj pukotina ne utječe na vrijeme depasivacije, ali utječe na depasiviranu površinu armature

# Modeliranje korozijskih procesa nakon depasivacije armature

## Uzdužna i poprečna raspodjela anode po površini armature

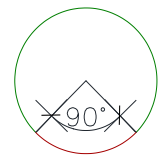
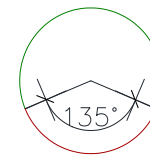
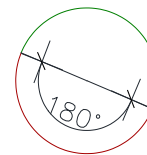


IV.C

1. ŠIPKA

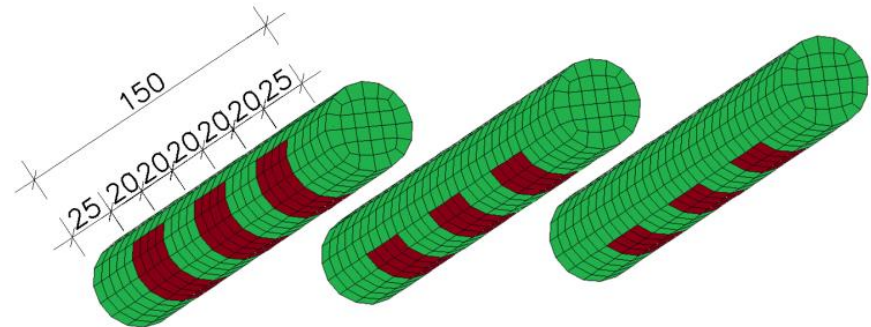
2. ŠIPKA

3. ŠIPKA

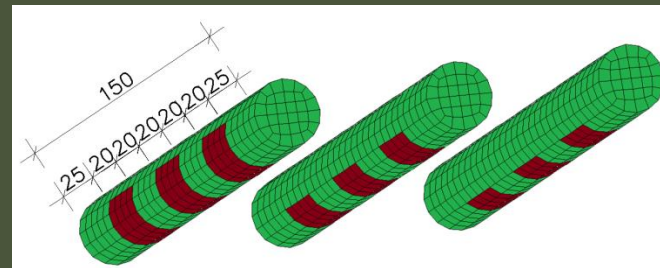


ANODA

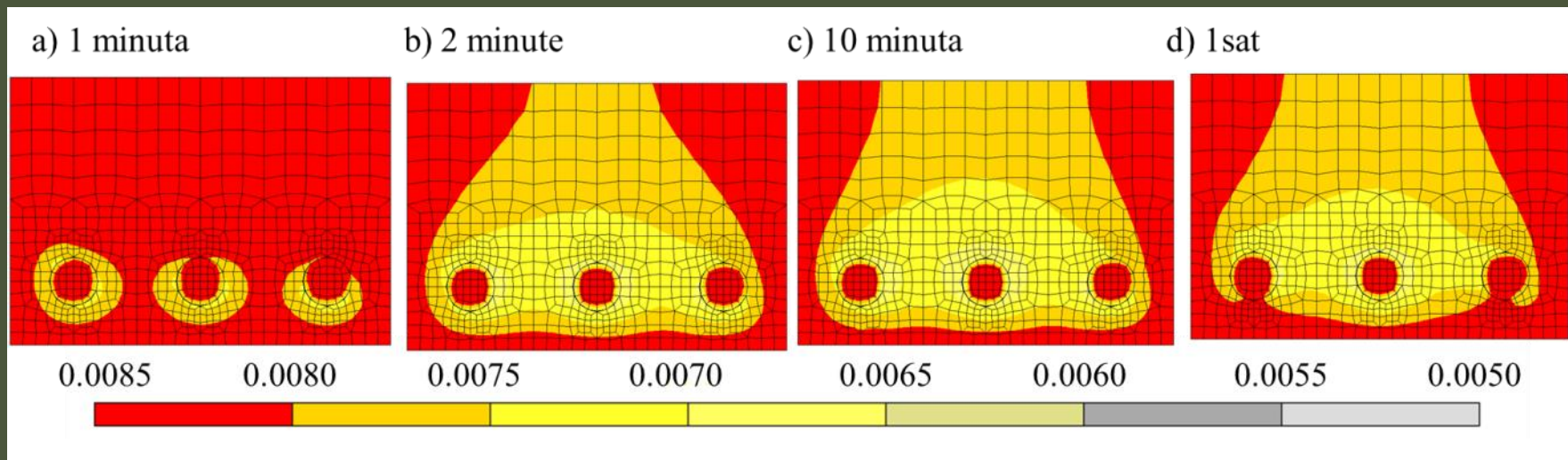
KATODA



# Raspodjela kisika, električnog potencijala i gustoće struje



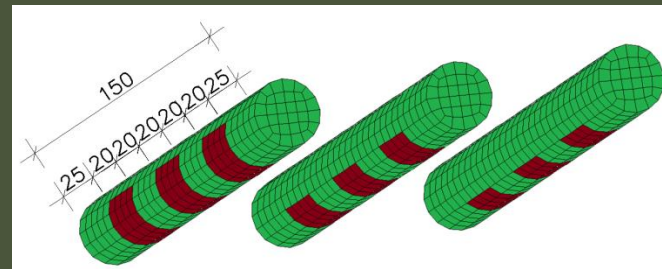
## Raspodjela kisika



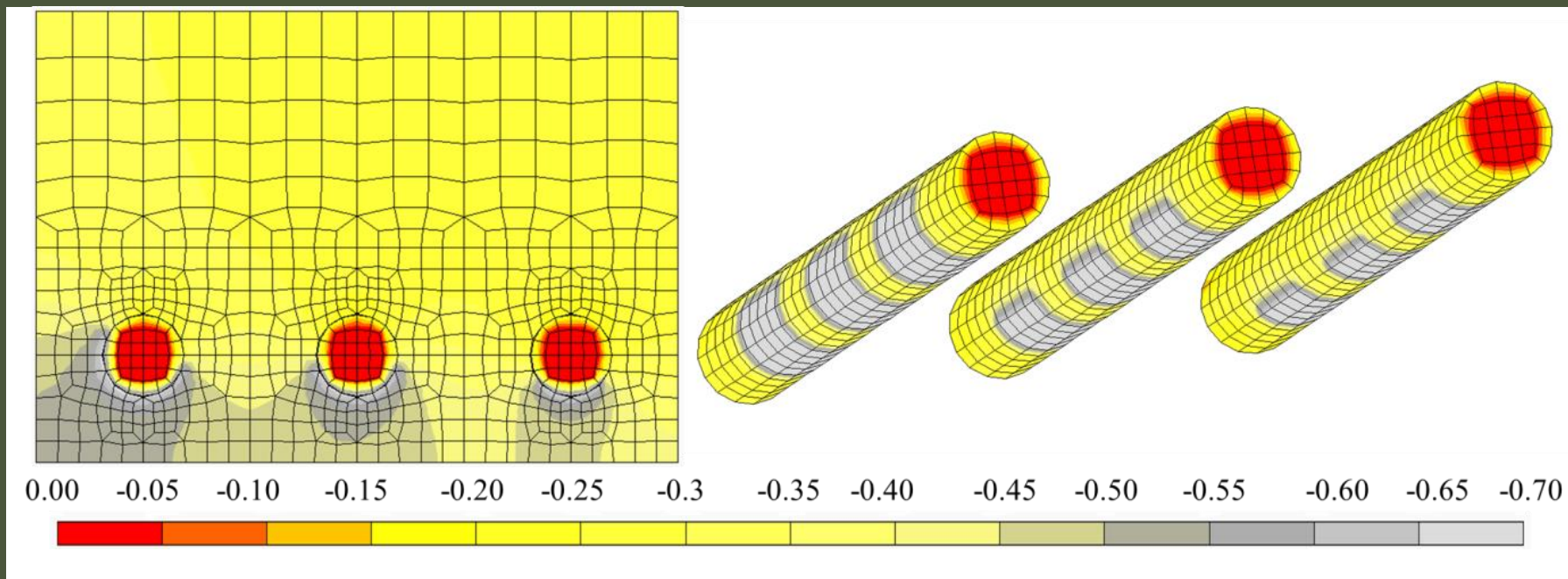
*Raspodjela kisika ( $\text{kg/m}^3$ ) za konfiguraciju anode (IV.C) modela detalja stupa Krčkog mosta u poprečnom presjeku na anodnom dijelu nakon: a) 1 minute, b) 2 minute, c) 10 minuta i d) 1 sata korozijskih procesa*



# Raspodjela kisika, električnog potencijala i gustoće struje

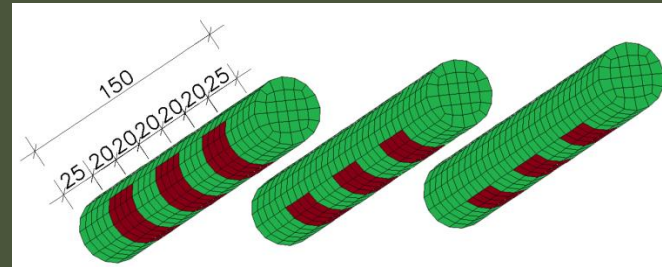


## Raspodjela električnog potencijala

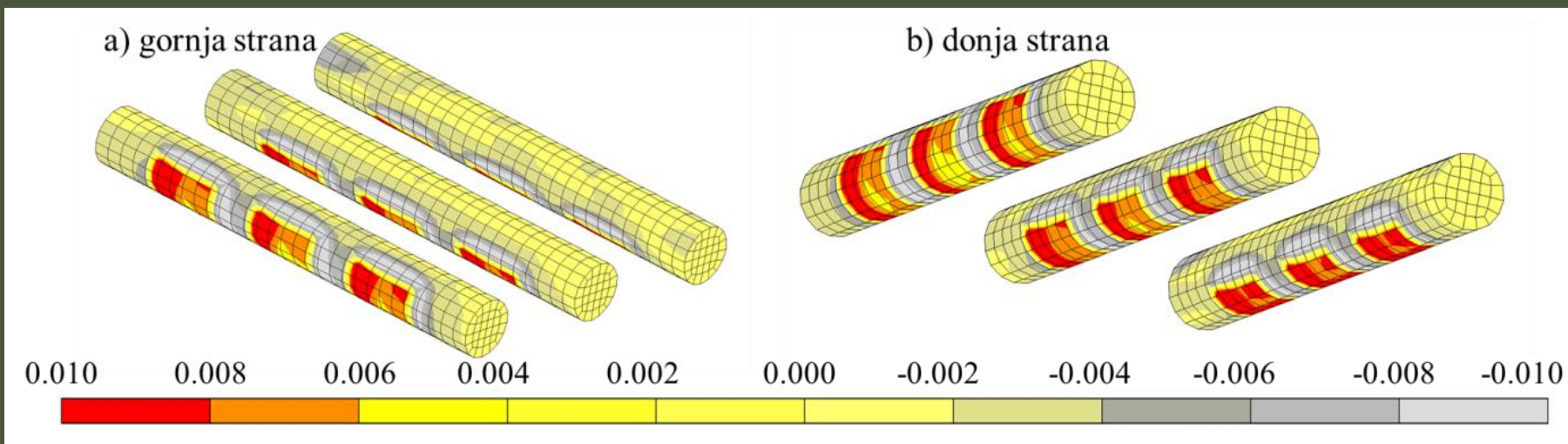


*Raspodjela električnog potencijala (V) detalja stupa Krčkog mosta na 3D prikazu čeličnih šipki armature nakon 10 minuta korozijskih procesa*

# Raspodjela kisika, električnog potencijala i gustoće struje

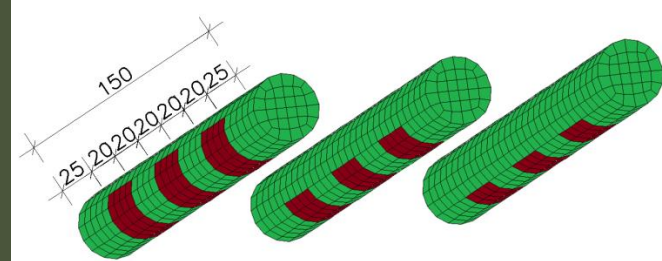


## Raspodjela gustoće struje



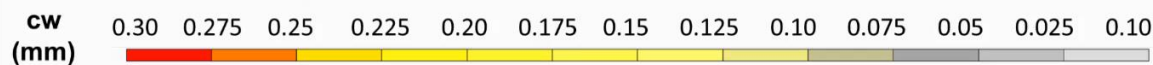
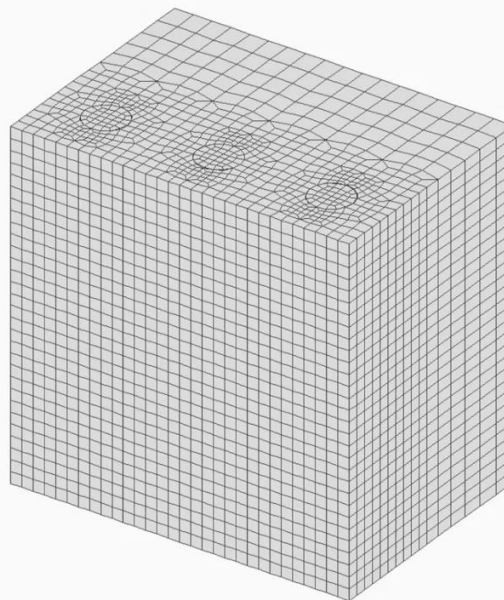
*Raspodjela gustoće struje ( $A/m^2$ ) detalja stupa Krčkog mosta na 3D prikazu čeličnih šipki armature nakon 10 minuta korozijskih procesa*

# Oštećenja betona uslijed korozije armature



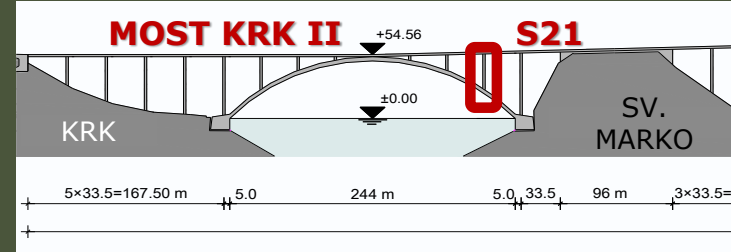
## Numerička simulacija raspucavanja betona uslijed korozije

**t = 1 godina**

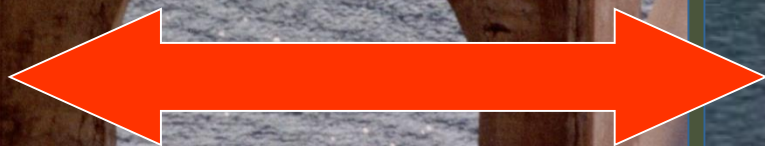
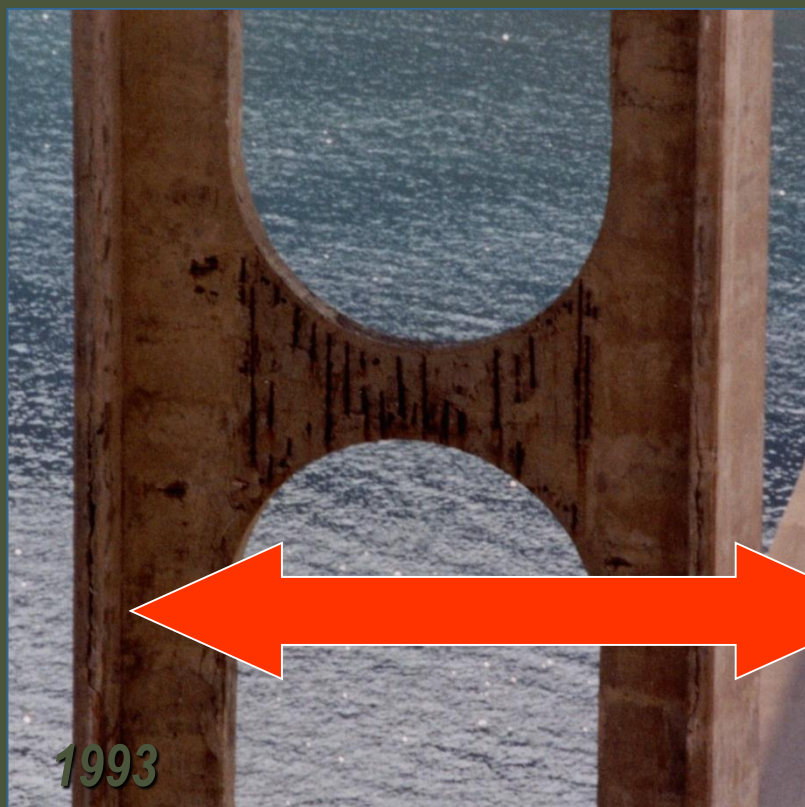




# Oštećenja betona uslijed korozije armature



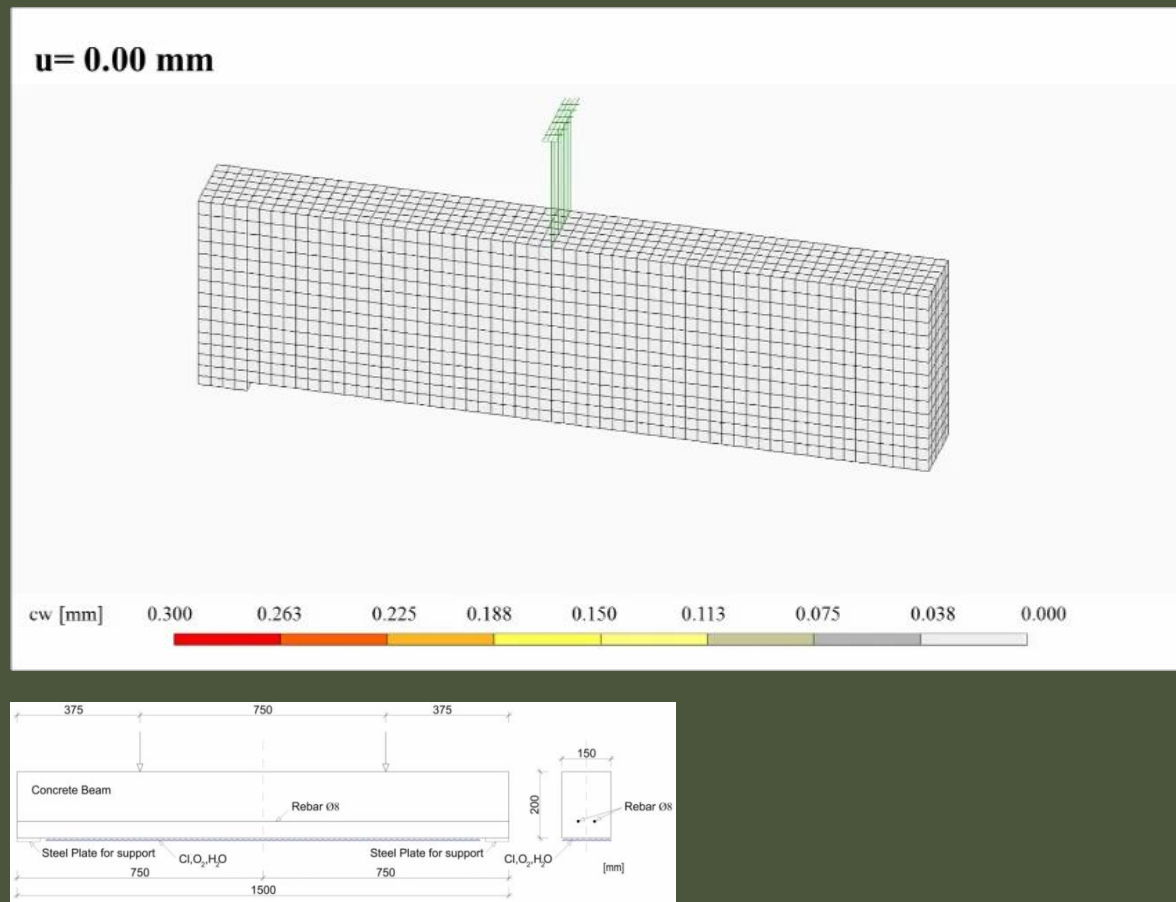
## Stup S-21 iznad manjeg luka Krčkog mosta





# Analiza utjecaja pukotina na prodor klorida

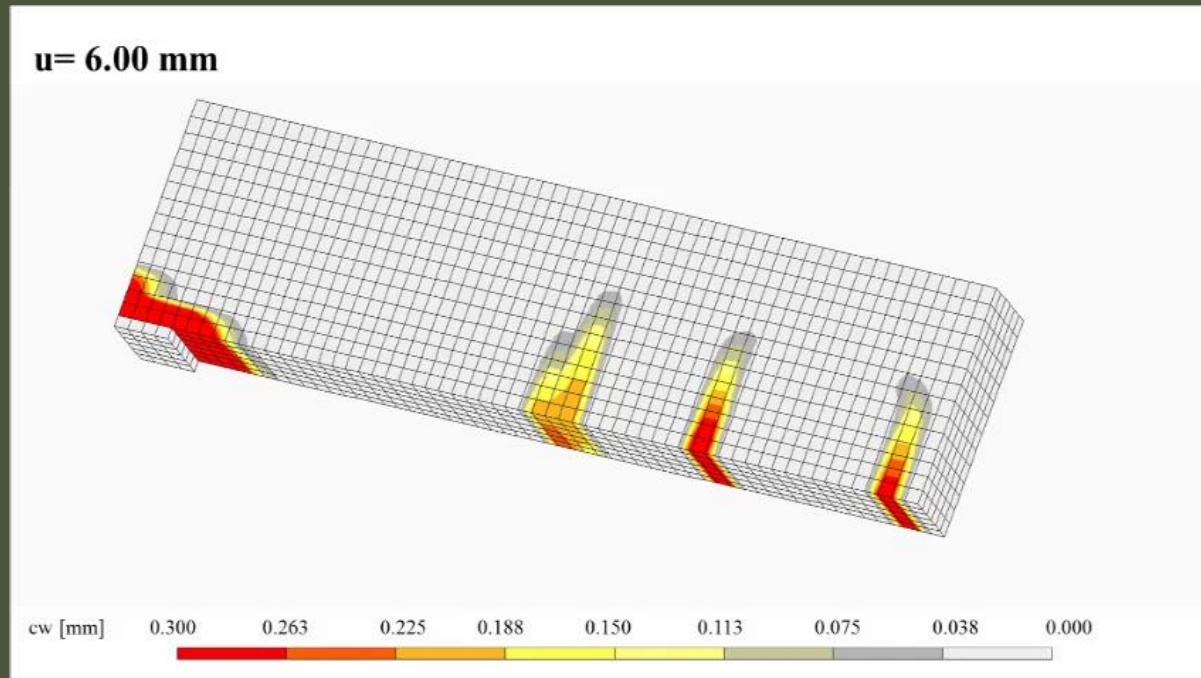
## Razvoj pukotina uslijed mehaničkog djelovanja



Kušter Marić, 2017

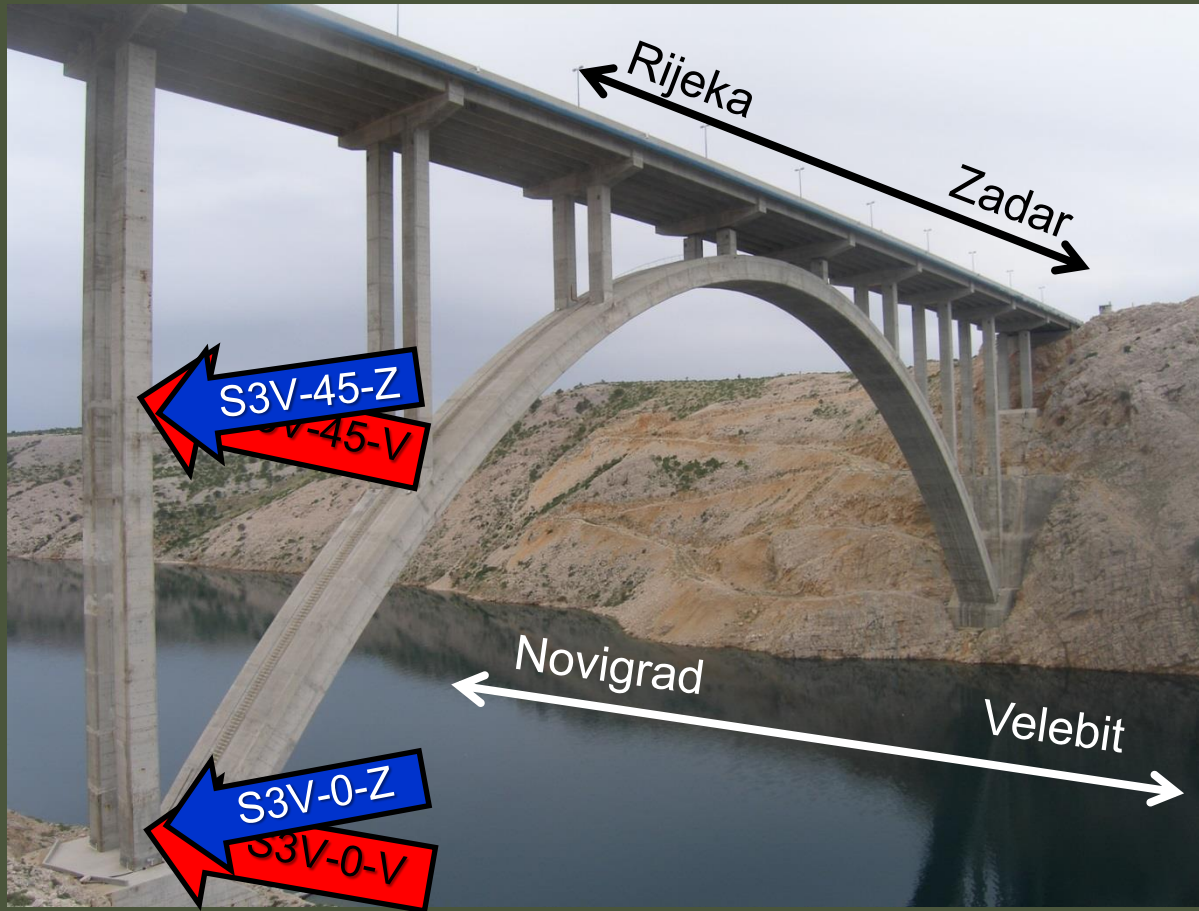
# Analiza utjecaja pukotina na prodor klorida

## Distribucija slobodnih klorida



# Analiza utjecaja pukotina na prodor klorida

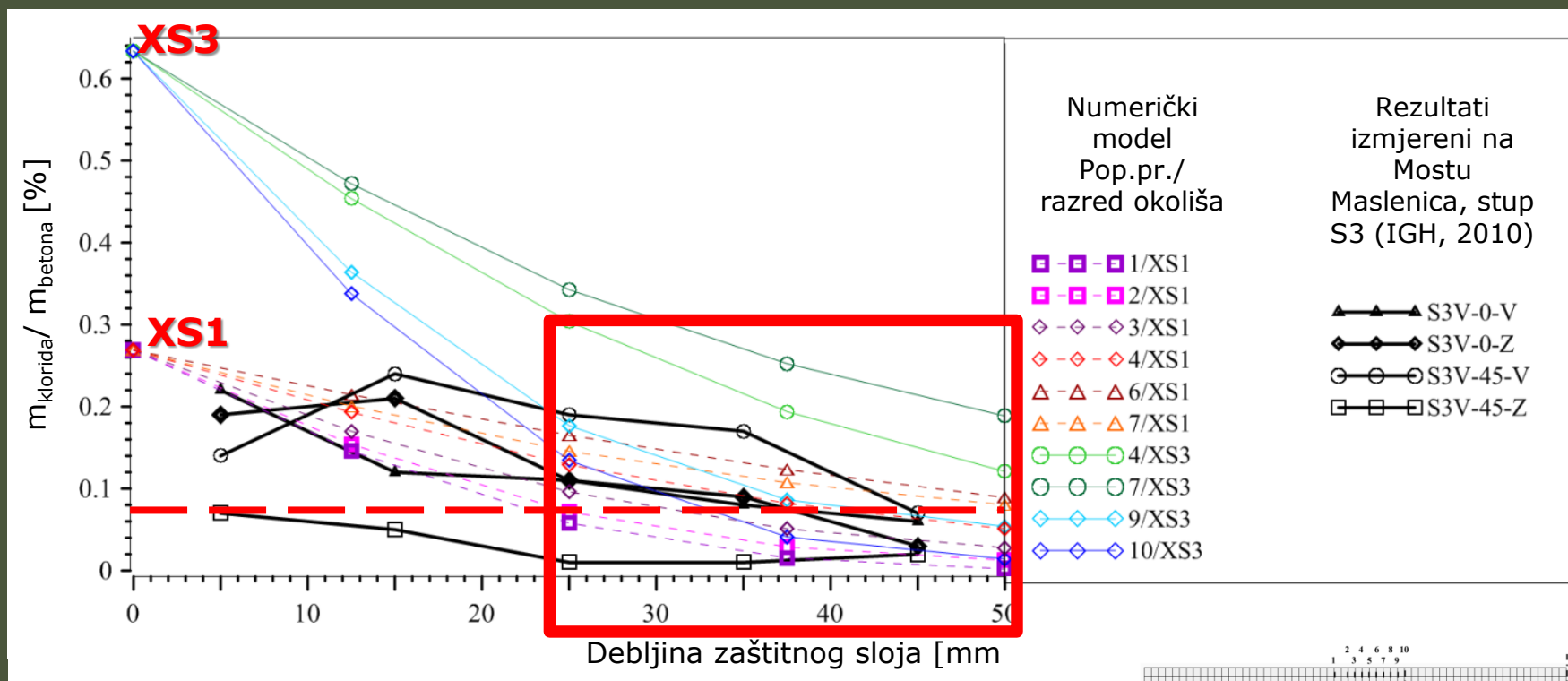
## Usporedba sa sadržajem klorida u betonu Mosta Maslenica



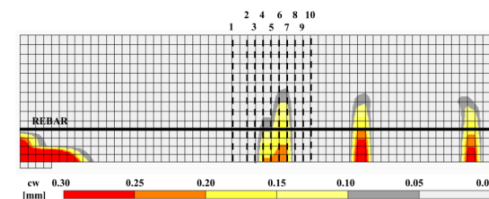
□ 4 lokacije – 20 uzoraka

# Analiza utjecaja pukotina na prodor klorida

## Usporedba sa sadržajem klorida u betonu Mosta Maslenica



- ❑ Rezultati izmjereni na mostu su unutar numeričkih vrijednosti na razini armature – dobro definirani rubni uvjeti
- ❑ Mali nagib u profilu klorida upućuje na pukotine u stupovima



# TRAJNOST KONSTRUKCIJA II



-8-

## MODELIRANJE AB KONSTRUKCIJA LINEARNA I NELINEARNA ANALIZA, OSNOVE MEHANIKE LOMA, MIKORAVNINSKI MODEL BETONA KOROZIJA ARMATURE U BETONU