

# NERAZORNE METODE UDARA I ODJEKA

1

## OŠTEĆENJA KOJA SE MOGU LOCIRATI METODAMA UDARA I ODJEKA

- Dimenzije pločastog konstruktivnog elementa
- Šupljine, segregacije, pukotine unutar konstruktivnog elementa
- Injektiranost prednapetih kabela
- Odlamanja (kontakt betona i asfalta, kontakt betona i armature, sanacijski materijali)
- Dubina površinskih pukotina

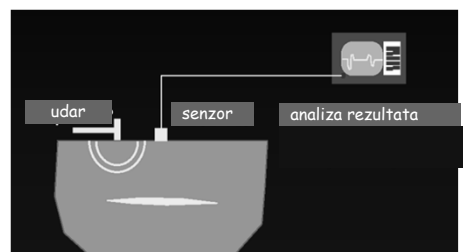
2

## PRINCIP ISPITIVANJA POMOĆU METODA UDARA I ODJEKA

- Udarom ili sličnom pobudom na površini ispitivanog konstruktivnog elementa proizvode se valovi koji se šire kroz materijal, reflektirani valovi se prikupljaju na površini te se njihovom analizom dobiva zaključak o postojanju diskontinuiteta ili nepravilnosti unutar elementa

3

## PRINCIP ISPITIVANJA POMOĆU METODA UDARA I ODJEKA



4

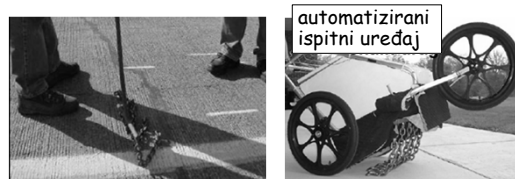
## METODE UDARA I ODJEKA

- Impakt eho
- Impuls response
- Ultrazvučni eho

5

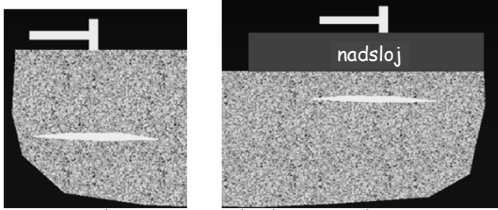
## METODA POVLAČENJA LANCA

- Najjednostavnija metoda udara i odjeka
- Služi za vizuelne preglede konstrukcija



6

## NEDOSTACI METODE POVLAČENJA LANCA



- Ne može registrirati oštećenja na većoj udaljenosti od površine konstruktivnog elementa
- Ne može registrirati oštećenje ispod nadsloja (npr. u betonu ispod asfalta)

7

## NEDOSTACI METODE POVLAČENJA LANCA

- Rezultati ispitivanja previše ovise o procjeni ispitivača
- Buka od prometa otežava provedbu ovog ispitivanja

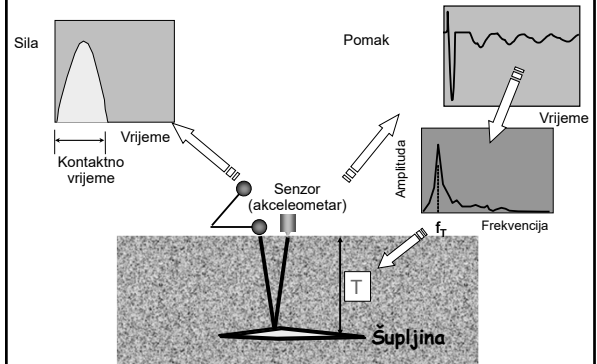


8

## Metoda impakt eho

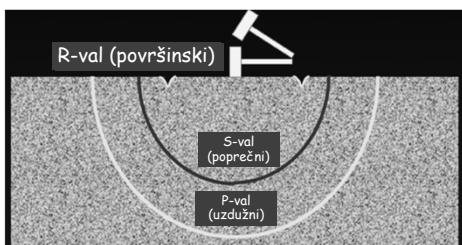
9

## Metoda impakt eho



10

## Vrste valova koji se javljaju pri ispitivanju metodom impakt eho



Metoda impakt eho zasniva se na širenju P-vala

11

## Vrste valova

- gibanje čestica      brzina vala
- P-val  $V_p = \sqrt{\frac{E(1+\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$
- S-val  $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$
- R-val  $V_R = V_s \frac{0.87 + 1.2\nu}{1 + \nu}$
- smjer širenja vala →

12

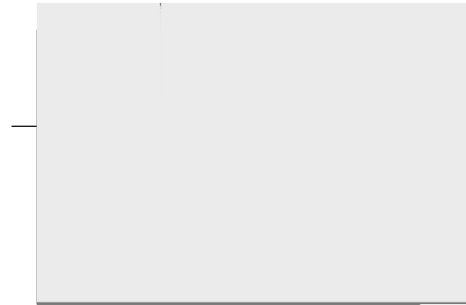
## Relativni omjeri brzina valova

- Odnos brzina P, R i S vala ovisi prvenstveno o Poissonovom koeficijentu
- Za  $\nu = 0.2$  vrijedi:

P-val	$C_p = 1$
S-val	$C_s = 0.62 C_p$
R-val	$C_R = 0.56 C_p$

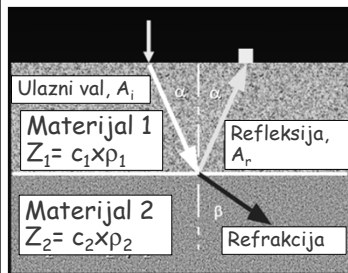
13

## Refleksija i refrakcija na kontaktu dva materijala



14

## Refleksija i refrakcija na kontaktu dva materijala



- $Z = c \times \rho$
- $Z =$  akustična impedancija
- $R =$  koeficijent refleksije
- za  $\alpha = 0^\circ$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

15

## Brzina P-vala i akustična impedancija za karakteristične materijale

Materijal	Brzina P-vala (m/s)	Akustična impedancija (kgm <sup>2</sup> /s)
ZRAK	343	0,40
VODA	1480	1 500 000
BETON	4000	9 000 000
ČELIK	5900	47 000 000

16

## Koeficijent refleksije na kontaktu dva materijala

- Za  $\alpha = 0^\circ$

kontaktna površina	R
beton – zrak	- 1
beton – voda	- 0.71
beton – čelik	0.68

Negativna vrijednost koeficijenta refleksije podrazumijeva da val na kontaktu dva materijala mijenja predznak (tlačni val se reflektira kao vlačni).

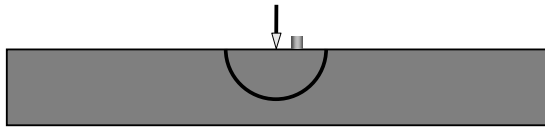
17

## Refleksija i refrakcija na kontaktu dva materijala

- $Z_2 < Z_1 \rightarrow$  negativni R
- Najčešći slučaj pri ispitivanj impakt ehom, pojavljuje se na kontaktu betona sa zrakom ili vodom tj. pukotina, šupljina
- $Z_2 > Z_1 \rightarrow$  pozitivni R
- Slučaj nailaska P-vala u betonu na običnu ili prednapetu armaturu.

18

### Višestruka refleksija P-vala u ploči



— Tlačni val  
- - - Vlačni val

19

### Višestruka refleksija P-vala u ploči

Refleksija od donjeg ruba ploče



— Tlačni val  
- - - Vlačni val

20

### Višestruka refleksija P-vala u ploči

Prvi dolazak P-vala na površinu (gornji rub ploče)



— Tlačni val  
- - - Vlačni val

21

### Višestruka refleksija P-vala u ploči

Refleksija od gornjeg ruba ploče



— Tlačni val  
- - - Vlačni val

22

### Višestruka refleksija P-vala u ploči

Druga refleksija od donjeg ruba ploče



— Tlačni val  
- - - Vlačni val

23

### Višestruka refleksija P-vala u ploči

Druga refleksija od gornjeg ruba ploče

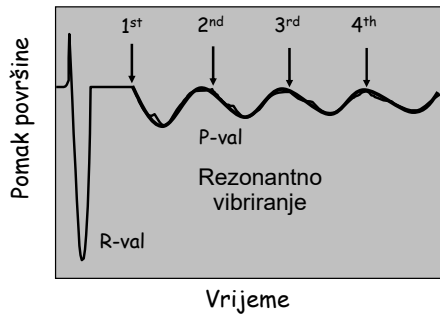


Reflektirani valovi dolaze na površinu (gornji rub) ploče periodički

— Tlačni val  
- - - Vlačni val

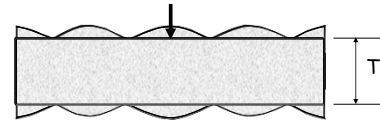
24

## Pomaci površine uslijed dolaska P-vala



25

## Određivanje dimenzije ploče



$\beta$  je funkcija Poissonovog omjera:

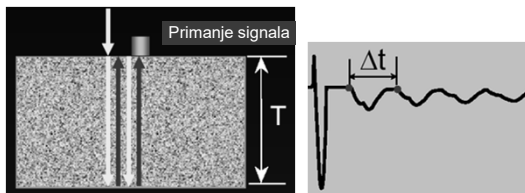
$$f_T = \frac{\beta C_P}{2T}$$

$\nu$	$\beta$
0.18	0.955
0.20	0.953
0.22	0.950

Gibson and Popovics, 2005

26

## Analiza dobivenih rezultata



$$\Delta t = \frac{2T}{C_p} \quad f = \frac{1}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{C_p}{2f}$$

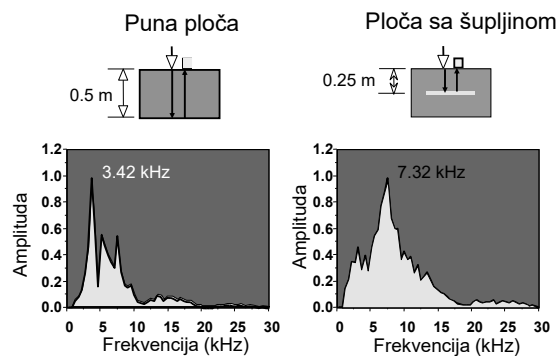
27

## Analiza dobivenih rezultata

- Valni zapis se iz vremenske domene pretvara u frekventnu domenu obradom signala
- Frekvencije s najvećim amplitudama predstavljaju dominantne frekvencije

28

## Primjer ispitivanja ploče



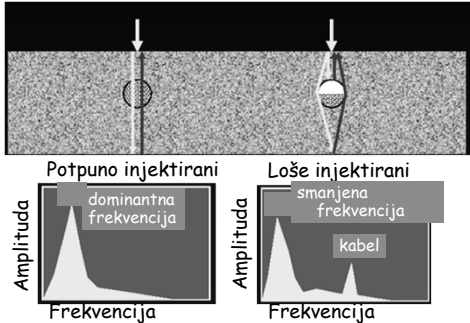
29

## Primjer ispitivanja injektiranosti kabela



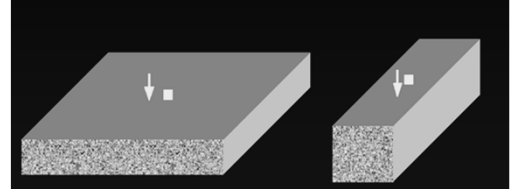
30

## Primjer ispitivanja injektiranosti kabela



31

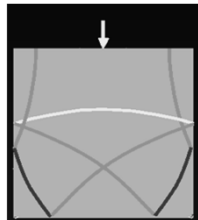
## Razlike u ispitivanju pločastog i štapnog elementa



- Kod štapnog elementa nije slobodno širenje valova te zbog toga oblik elementa utječe na refleksiju valova

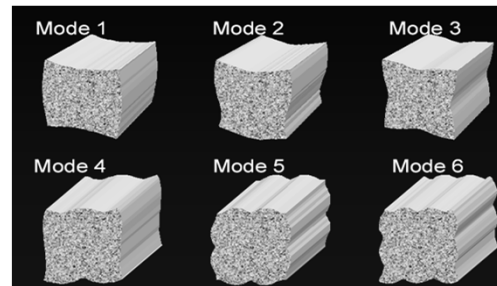
32

## Refleksija valova unutar poprečnog presjeka štapnog elementa



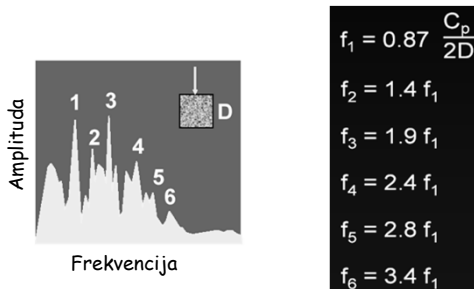
33

## Vibriranje štapnog elementa



34

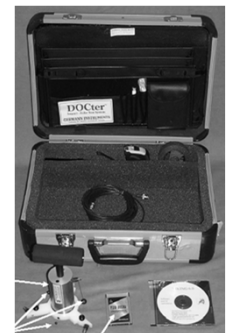
## Analiza rezultata ispitivanja štapnog elementa



35

## Oprema za ispitivanje

- Udaraljke (čelične kuglice)-kontaktno vrijeme < 100 μs
- Senzor (akcelerometar) – mjeri pomak površine uslijed dolaska vala
- Oprema za prikupljanje i obradu podataka



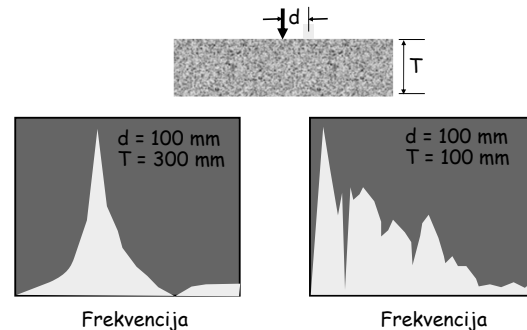
36

## Utjecaj razmaka udaraljki i senzora pri mjerenju dimenzije ploče

- Mjerenje dimenzije ploče debljine 300 mm provodi se sa međusobnim razmakom čelične kuglice (udaraljka) i senzora (akcelerometar) od 100 mm
- Mjerenje dimenzija izbušenih valjaka na ploči debljine 300 mm pokazuje dobru korelaciju s rezultatima nerazornih ispitivanja
- Novi zadatak: mjerenje dimenzije ploče debljine 100 mm sa istim međusobnim razmakom udaraljki i senzora
- Rezultati ispitivanja su složeni za interpretaciju; navode na podatak o postojanju diskontinuiteta (šupljina) u ploči

37

## Usporedbe rezultata ispitivanja



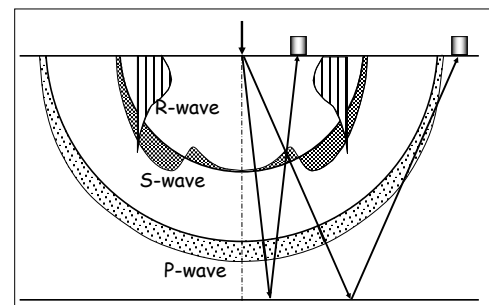
38

## Problematika koja se javila pri ovom ispitivanju dimenzija ploče

- Metoda impakt eha se bazira na refleksiji P-vala
- Da bi se umanjio efekt S-vala, međusobni razmak udaraljke i senzora treba biti manji od 40 % debljine ploče (0.4T)
- Zbog toga za debljinu ploče od 100 mm, međusobni razmak udaraljki i senzora treba biti manji od 40 mm

39

## Distribucija amplituda P-vala i S-vala



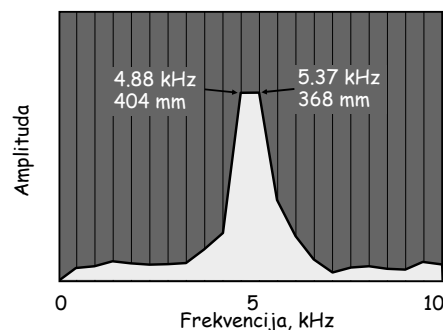
40

## Utjecaj učestalosti uzorkovanja na rezultate ispitivanja dimenzije ploče

- Potrebno je impakt eho metodom izmjeriti ploču nominalne debljine 400 mm sa ciljem da se utvrdi da li je zadovoljena minimalna potrebna dimenzija od 380 mm
- Mjerenje brzine P-vala na površini pokazuje da je brzina P-vala 4100 m/s
- Ispitivanje metodom impakt eha provedeno je frekvencijom prikupljanja signala od 500 kHz (2  $\mu$ s) i sa brojem snimljenih podataka od 1024 točke

41

## Rezultati ispitivanja



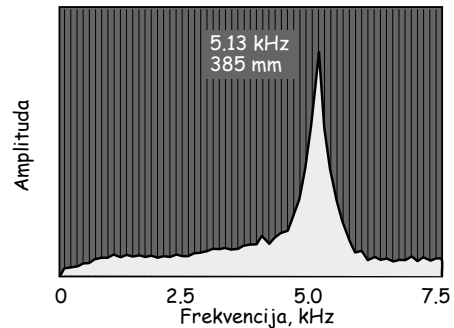
42

## Odnos učestalosti uzorkovanja i dimenzije ploče

- Dimenzija ploče  $T$  ovisi obrnuto proporcionalno o dobivenoj frekvenciji tj.  $T$  varira sa  $1/f$ , zbog toga se povećanjem dimenzije ploče treba smanjiti učestalost uzorkovanja podataka
- Osnovni parametar točnosti mjerenja dimenzije ploče je odabir duljine snimanja tj.  $N\Delta t$ , pa se dobivaju frekvencije u rasponu  $\Delta f = 1/(N\Delta t)$
- Za  $N = 1024$  točke ispitivanja i frekvencija prikupljanja signala and  $\Delta t = 2 \mu s$  (500 kHz), tada je  $\Delta f = 488$  Hz
- Ako se poveća broj točaka ispitivanja na  $N = 4096$ , tada je  $\Delta f = 122$  Hz

43

## Novi rezultati ispitivanja



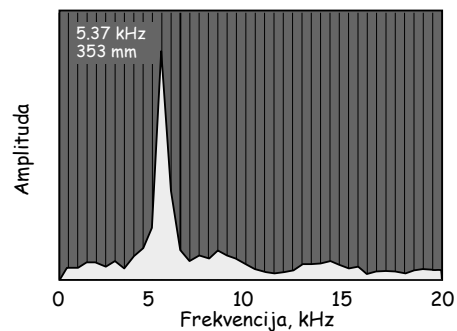
44

## Utjecaj učestalosti uzorkovanja na rezultate ispitivanja dimenzije ploče

- Sumnja se da je tijekom betoniranja potpornog zida debljine 300 mm došlo do pojave segregacije betona
- Impakt eho metodom će se provjeriti postojanje segregacije betona u potpornom zidu
- Izmjerena brzina P-vala iznosi 3800 m/s
- Broj snimljenih podataka je  $N = 2048$  točke, učestalost prikupljanja podataka  $\Delta t = 2 \mu s$
- Odabrana je udaraljka za ispitivanje čelična kuglica promjera 20 mm
- Očekuje se dominantna frekvencija od  $f = c_p / 2 \times T = 3800 / (2 \times 300) = 6.3$  kHz

45

## Rezultat ispitivanja



46

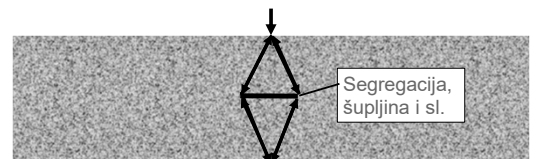
## Analiza rezultata ispitivanja

- Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da nema nikavih segregacija u potpornom zidu, ali je dobivena debljina zida veća od projektirane debljine od 300 mm
- Vađenje valjaka iz potpornog zida potvrdilo je postojanje segregacije betona na dubini od 130 mm od površine, te je utvrđena debljina zida od 300 mm
- Na temelju ovakvih rezultata proizlazi da je impakt eho nemjerodavna metoda!

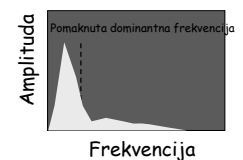
• ZAŠTO???

47

## Difrakcija od malih diskontinuiteta



Dulji put P-vala utječe na smanjenje dominantne frekvencije



48



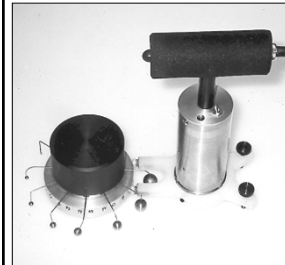
## Kontaktno vrijeme

- Izbor kontaktnog vremena je vrlo bitan parametar za cilj ispitivanja kojeg provodimo impakt eho metodom
- Kontaktno vrijeme utječe na veličinu maksimalne frekvencije koju možemo postići
- Manji promjer čelične kugle omogućava postizanje većih frekvencija
- Za brzinu P-vala od  $C_{plate} = 3800$  m/s pogrešan je odabir čelične kuglice promjera 20 mm, jer se ne mogu mjeriti dimenzije manje od 160 mm

49

## Kontaktno vrijeme

- Kod čeličnih kuglica kontaktno vrijeme ( $t_c$ ) zavisi od promjera čelične kuglice



$$t_c \text{ (in } \mu\text{s)} \approx 4.3 D \text{ (in mm)}$$

$$\text{Maksimalna frekvencija } f_{\max} \approx 1/t_c$$

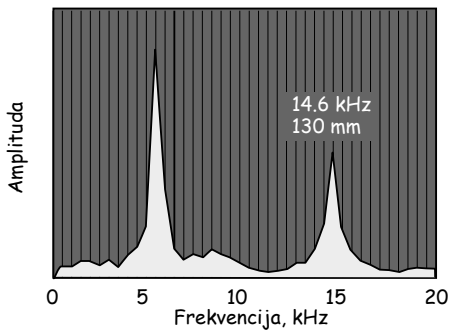
$$f_{\max} \text{ (in kHz)} \approx 230/D \text{ (in mm)}$$

Za promjer čelične kuglice od  $D = 20$  mm

$$f_{\max} \approx 12 \text{ kHz}$$

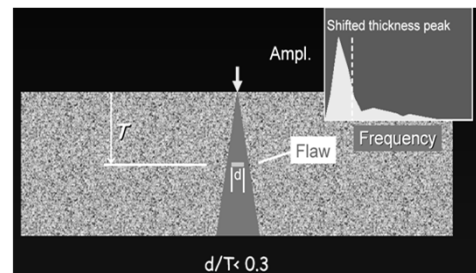
50

## Novi rezultat ispitivanja sa udaraljkom promjera 10 mm



51

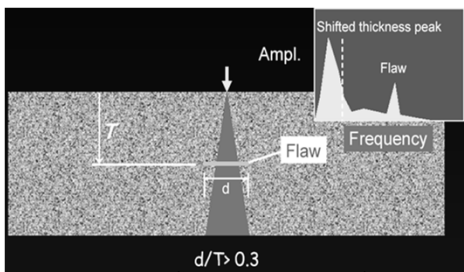
## Ograničenja prilikom ispitivanja diskontinuiteta



Diskontinuitet može biti registriran, ali se ne može odrediti njegova pozicija unutar konstruktivnog elementa.

52

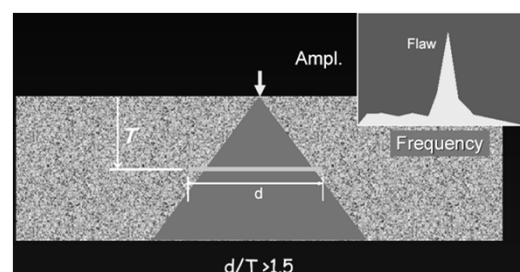
## Ograničenja prilikom ispitivanja diskontinuiteta



Diskontinuitet može biti registriran, ali i njegova pozicija unutar konstruktivnog elementa.

53

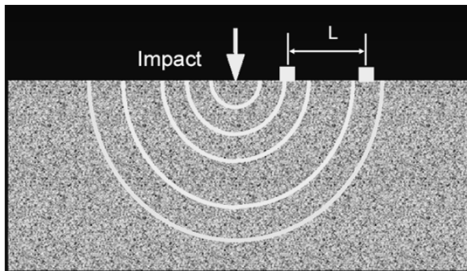
## Ograničenja prilikom ispitivanja diskontinuiteta



- Dobiva se odgovor kao da se ispituje pločasti element debljine T.

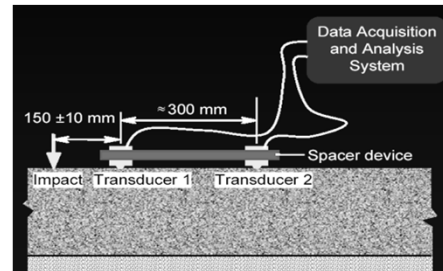
54

## Određivanje brzine P-vala



55

## Određivanje brzine P-vala



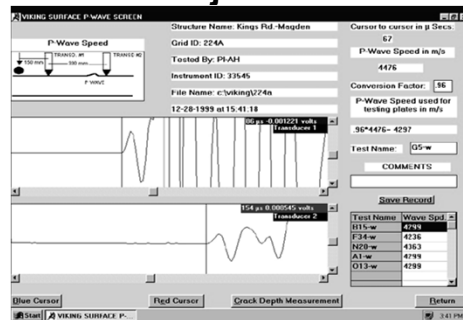
56

## Određivanje brzine P-vala



57

## Primjer rezultata ispitivanja pri određivanju brzine P-vala



58

## Zaključci

- Impakt eho je na temelju dosadašnjih teoretskih podloga i praktičnih primjena pokazao se kao pouzdana metoda za ispitivanje betonskih konstrukcija
- Ispitivanje je moguće provesti u slučajevima kada su u kontaktu dva materijala kod kojih vrijedi  $[R] > 0.25$
- Veličina diskontinuiteta treba biti veća od  $1/3$  njegove udaljenosti od površine

59

## Zaključci

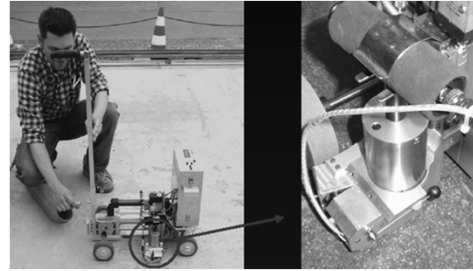
- Ne može se utvrditi postojanje diskontinuiteta ispod drugog diskontinuiteta
- Provedba ispitivanja je složenija za štapne nego za pločaste elementa
- Rezultat ispitivanja se odnosi samo za datu točku ispitivanja
- Izuzetno je bitno da ispitivač posjeduje dostatno iskustvo i znanje u rukaovanju s impakt ehom

60

## Impakt eho skener

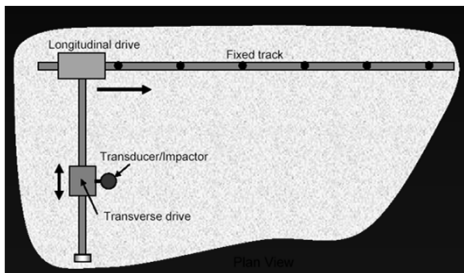
61

## Impakt eho skener



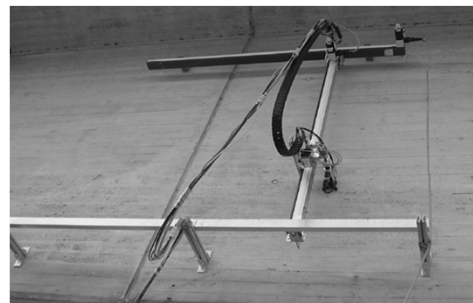
62

## Impakt eho skener



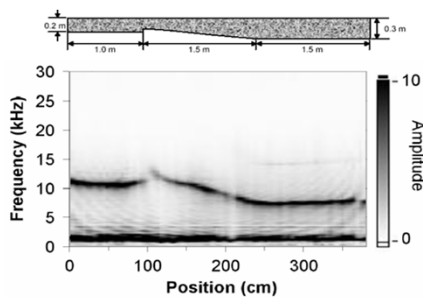
63

## Impakt eho skener



64

## Impakt eho skener



65

## Nedostaci impakt eho metode

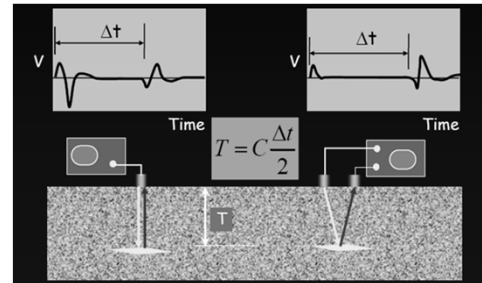
- Složen postupak ispitivanja i analize
- Dobiveni rezultat vrijedi samo za ispitnu točku
- Dugotrajno ispitivanje za veću ispitnu površinu
- U POSLJEDNJE VRIJEME RAZVIJEN JE ULTRAČUČNI EHO SA CILJEM POBOLJŠANJA NEKIH OD OVIH NEDOSTATAKA

66

## Metoda ultrazvučni eho

67

## Princip ispitivanja



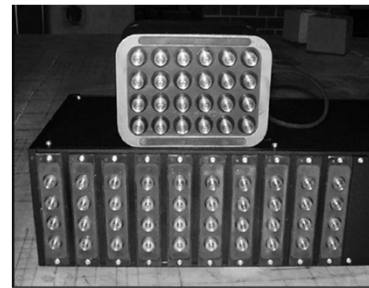
68

## Metoda ultrazvučni eho

- Bez većih primjena prije 90-ih godina prošlog stoljeća
- Nakon toga slijedi razvoj:
  - niskofrekventni senzori (50 do 100 kHz) koji se postavljaju na površinu bez kontaktnog sredstva
  - ispitivanja na bazi širenja i uzdužnih i porečnih valova
  - razvoj računala i programa omogućuje bolju obradu signala i vizualizaciju rezultata

69

## Izgled mjerne opreme



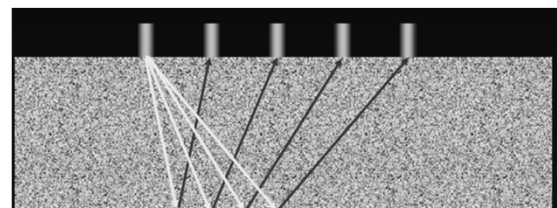
70

## Izgled mjerne opreme



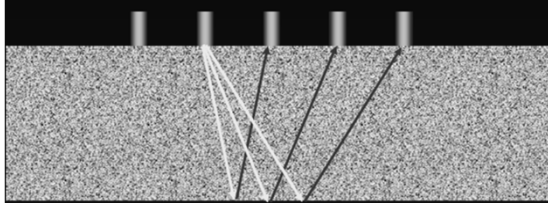
71

## Princip ispitivanja



72

### Princip ispitivanja

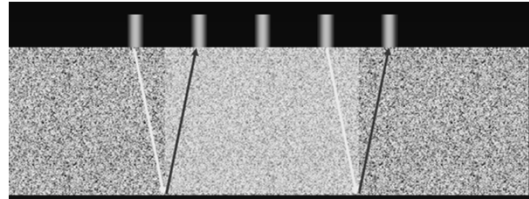


Svaki senzor i odašilje i prima signal.

73

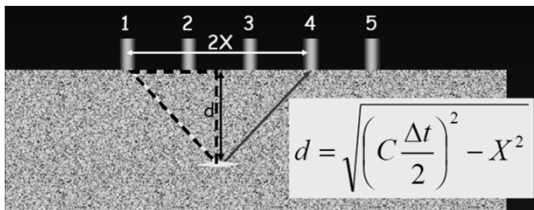
### Princip ispitivanja

Područje ispitivanja



74

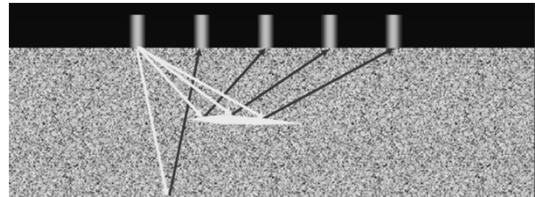
### Princip ispitivanja



$c$  = brzina poprečnog vala  
 $\Delta t$  = ukupno vrijeme

75

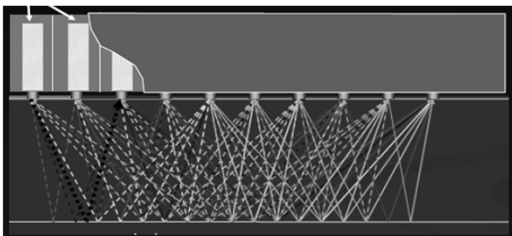
### Princip ispitivanja



Prisustvo defekata uspješno se locira pomoću više senzora

76

### Princip ispitivanja



40 senzora u 10 redova  
180 signala poslanih i primljenih  
vrijeme skeniranja = 0.35 s

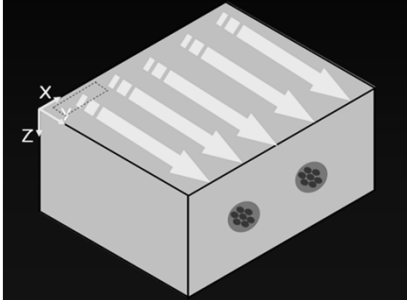
77

### Primjer ispitivanja



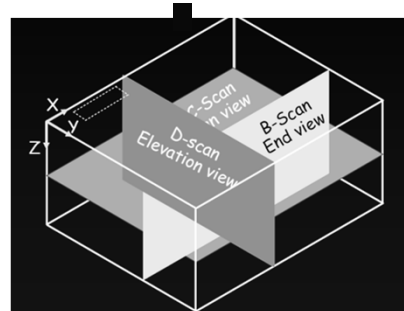
78

## Ispitivanje u 2-D



79

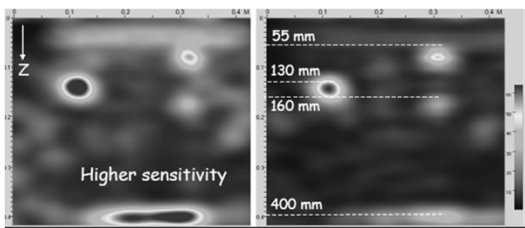
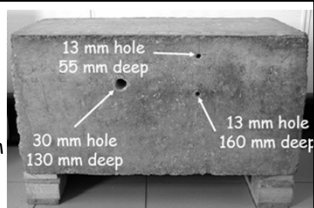
## Vizualizacija u 3-D



80

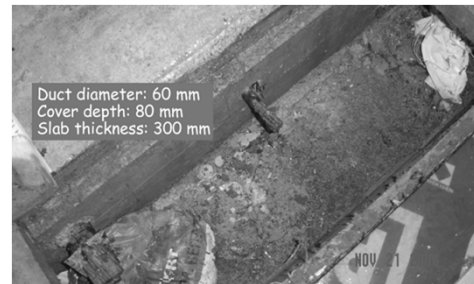
## PRIMJER ISPITIVANJA

Konstruktivni element  
dimenzija 0.8 x 0.4 x 0.4 m  
 $C_s = 2385$  m/s  
Prikazan je D-scan



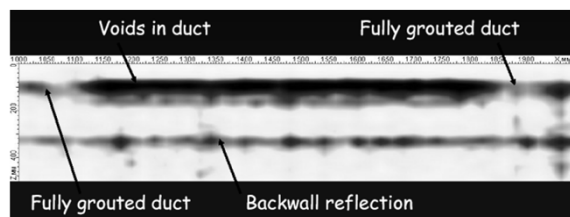
81

## Primjer ispitivanja injektiranog kabela



82

## Rezultat ispitivanja

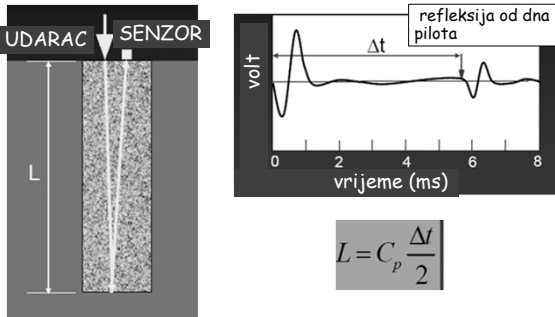


83

## Metoda impuls response

84

## ISPITIVANJE CJELOVITOSTI PILOTA



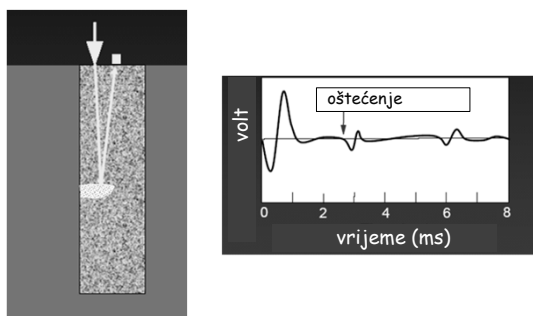
85

## ISPITIVANJE CJELOVITOSTI PILOTA

- Unošenje uzdužnog vala udarom čekićem s gumenim vrhom uzrokuje stvaranje i širenje vala duž cijele duljine pilota L
- Omjer duljine i promjera pilota (L/D) treba biti manji od 30 da bi se pri analizi rezultata jasno mogla utvrditi duljina pilota
- Uzdužni valovi koji se stavraju ovdje su iste prirode kao kod impakt eha, ali *znatno manje frekvencije*

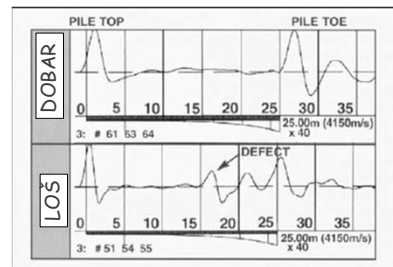
86

## ISPITIVANJE CJELOVITOSTI PILOTA NA OŠTEĆENOM PILOTU



87

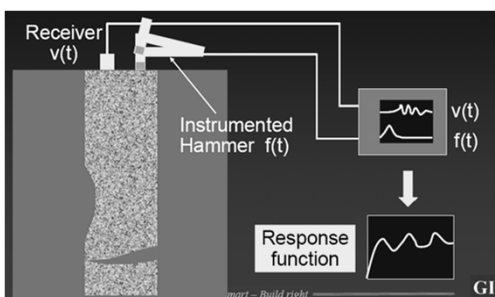
## PRIMJER REZULTATA ISPITIVANJA CJELOVITOG I OŠTEĆENOG PILOTA



88

## Metoda impuls response

Razvijena iz metode ispitivanja cjelovitosti piota



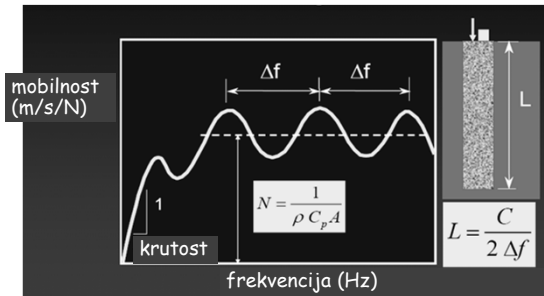
89

## OPREMA ZA ISPITIVANJE IMPULS RESPONSE (ODGOVOR NA UDAR)



90

## DIJAGRAM MOBILNOSTI DOBIVEN ISPITIVANJEM PILOTA



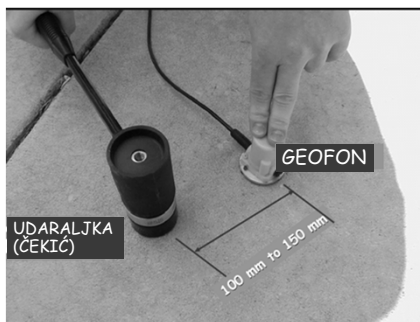
91

## PRIMJENA METODA ODGOVORA NA UDAR KOD PLOČASTIH ELEMENATA

- Metoda ispitivanja odgovora na udar je početno razvijena za ispitivanje cjelovitosti betonskih pilota
- Rezultati ispitivanja i teoretska istraživanja potvrdili su da se metoda ispitivanja odgovora na udar može učinkovito koristiti kod pločastih elemenata za određivanje različitih defekata unutar konstruktivnih elemenata

92

## POLOŽAJ UDARALJKE (ČEKIĆ) I GEOFONA TIJEKOM ISPITIVANJA



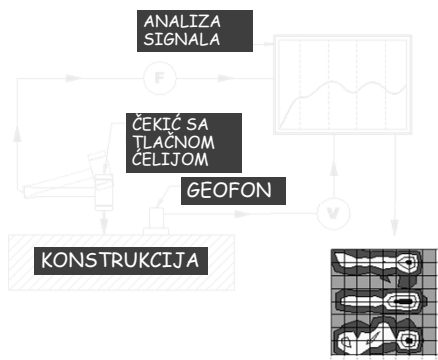
93

## PRIMJENA METODE ODGOVORA NA UDAR

- Ispitivanje cjelovitosti pilota
- Određivanje postojanja šupljina, segregacija, odlamanja unutar konstruktivnih elemenata
- Utvrđivanje postojanja šupljina (nekvalitetna podloga) ispod ploča na podlozi
- Ispitivanje prionljivosti konstruktivnih elemenata npr. betonskih panela ovješnih o konstrukciju

94

## IMPULS RESPONSE METODA



95

## PRIMJER ISPITIVANJA METODOM ODGOVORA NA UDAR



96

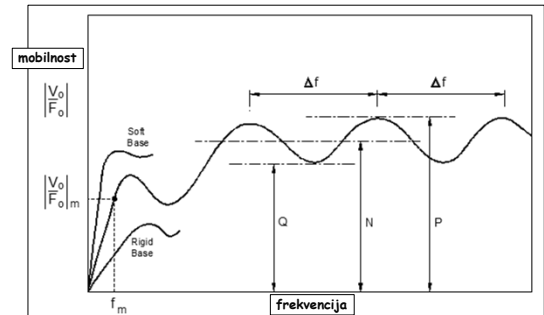


## PRINCIPI ISPITIVANJA

- Udarac čekićem sa gumenim vrhom po vrhu pilota generira uzdužni val (P-val, kao kod impakt eha, ali manje frekvencije (0-800 Hz) i bitno jača sila udara) koji prolazi duž pilota
- Pomoću tlačne ćelije ugrađene u čekić mjeri se sila kojom se generira uzdužni val
- Odgovor na pobudu (udar čekićem) registrira se na vrhu pilota pomoću geofona (u vremenskoj domeni)
- Fourierovom transformacijom rezultati ispitivanja se iz vremenske domene pretvaraju u dijagram odnosa mobilnosti (brzina/sila) i frekvencija

97

## IDEALIZIRANI DIJAGRAM ISPITIVANJA



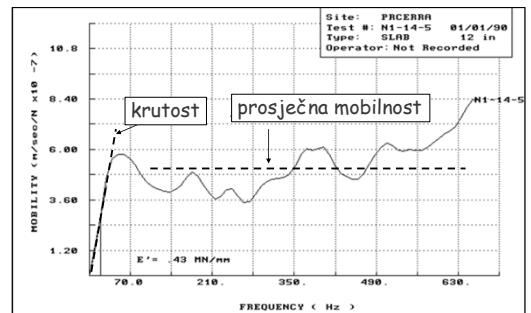
98

## PARAMETRI ISPITIVANJA METODOM ODGOVORA NA UDAR

- Dinamička krutost u MN/mm određuje se iz nagiba krivulje mobilnosti na rasponu frekvencija 0-50 Hz
- Prosječna mobilnost na rasponu frekvencija od 100 do 800 Hz (ovisi o debljini konstruktivnog elementa, uvjetima podloge, kvaliteti betona, prisustvu defekata unutar elementa)
- Nagib pravca prosječne mobilnosti (ovisi o kvaliteti betona i promjeni dimenzija i oblika konstrukcije)
- Odnos vršne i prosječne mobilnosti (ovisi o kvaliteti podloge, postojanju šupljina)

99

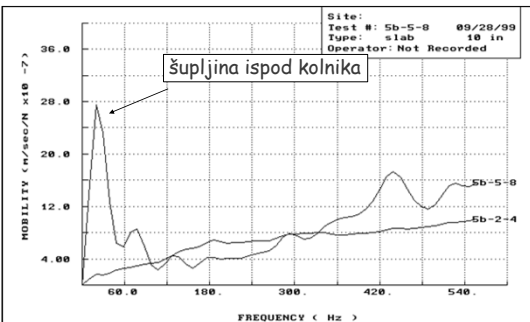
## PRIMJER ISPITIVANJA PLOČE



CTL

100

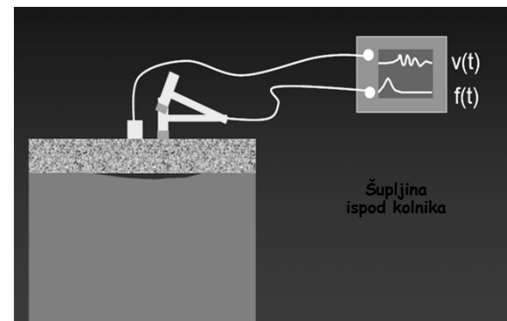
## REZULTAT ISPITIVANJA BETONSKOG KOLNIKA



CTL

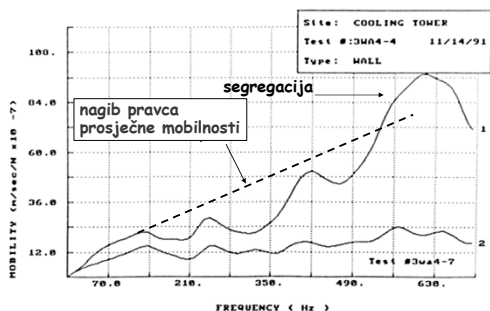
101

## REZULTAT ISPITIVANJA BETONSKOG KOLNIKA



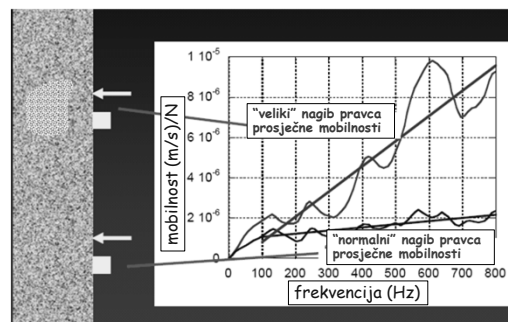
102

## REZULTAT ISPITIVANJA BETONSKOG REZERVOARA



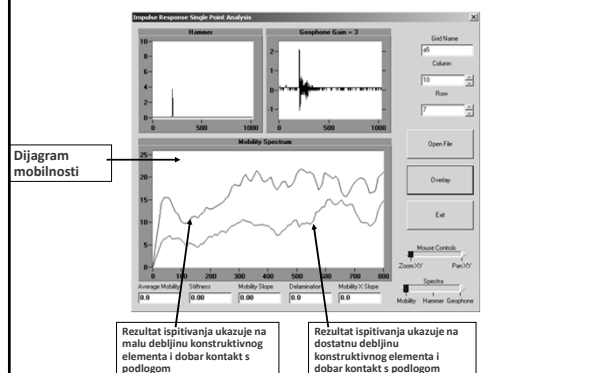
103

## ISPITIVANJE ELEMENATA SA SEGREGACIJAMA



104

## PRIMJER REZULTATA ISPITIVANJA



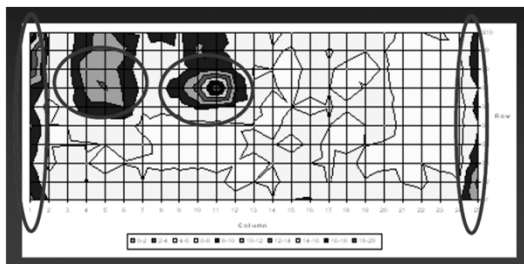
105

## PROVEDBA ISPITIVANJA

- Ispitivanja na konstrukciji se provode na unaprijed definiranom rasteru
- Odabir rastera ispitnih mjesta ovisi o vrsti konstruktivnog elementa i tipu oštećenja
- Metoda je brza za provedbu
- Na mjestima gdje je uočeno postojanje oštećenja mogu se napraviti detaljnija ispitivanja npr. sa impakt ehom ili nekom drugom metodom

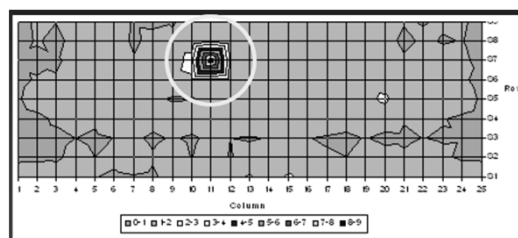
106

## Primjer rezultata ispitivanja -prosječna mobilnost-



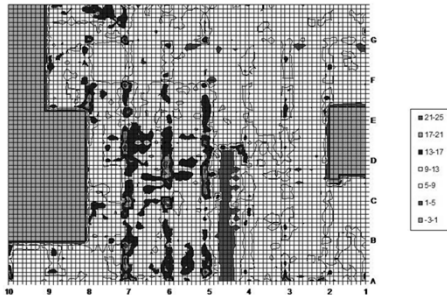
107

## Primjer rezultata ispitivanja -nagib pravca prosječne mobilnosti-



108

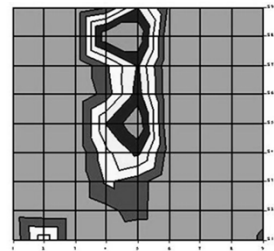
### REZULTATI ISPITIVANJA PODNE PLOČE 160 m x 120 m



Dijagram prosječne mobilnosti

109

### REZULTATI ISPITIVANJA INDUSTRIJSKOG PODA (40 m x 40 m)



Dijagram odnosa vršne i prosječne mobilnosti

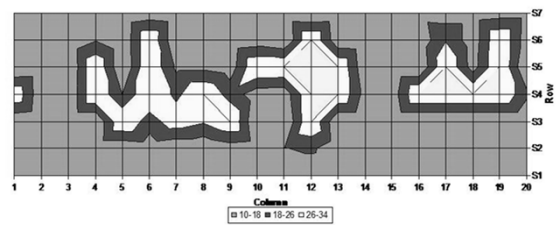
110

### RASLOJAVANJE IZMEĐU NADSLOJA I KOLNIČKE PLOČE MOSTA



111

### REZULTATI ISPITIVANJA PLOČE MOSTA



Dijagram prosječne mobilnosti

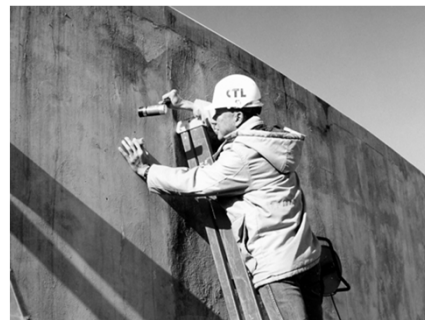
112

### ISPITIVANJE PLOČE MOSTA



113

### ISPITIVANJE BETONSKOG SPREMNIKA



114

**ODREĐIVANJE POLOŽAJA  
ŠUPLJINA IZA SEKUNDARNE  
TUNELSKJE OBLOGE**



115

**ISPITIVANJE SILOSA IZVEDENOG  
KLIZNOM OPLATOM NA  
POSTOJANJE SEGREGACIJA**



116

**ODREĐIVANJE POLOŽAJA  
ODLOMLJENOG BETONA NA  
SLAPIŠTU HIDROELEKTRANE**



117

**PRONALAŽENJE SEGREGACIJA  
I ODLOMLJAVANJA NA  
STUPIŠTU MOSTA**



118

**ISPITIVANJE KVALITETE  
PRIONLJIVOSTI PANELA NA  
NEBODERIMA**



119

**ODREĐIVANJE MJESTA GUBITKA  
PRIONLJIVOSTI I RASPUCAVANJA  
NA KONTAKTU PANELA I  
PODKONSTRUKCIJE**



120

## ISPITIVANJE KVALITETE PRIONLJIVOSTI PANELA

