



Hrvatsko asfaltno društvo

Croatian asphalt association

# Metode ispitivanja trajnosti bitumenskih mješavina

## *Test methods for durability of bituminous mixtures*

***Branimir Palković***

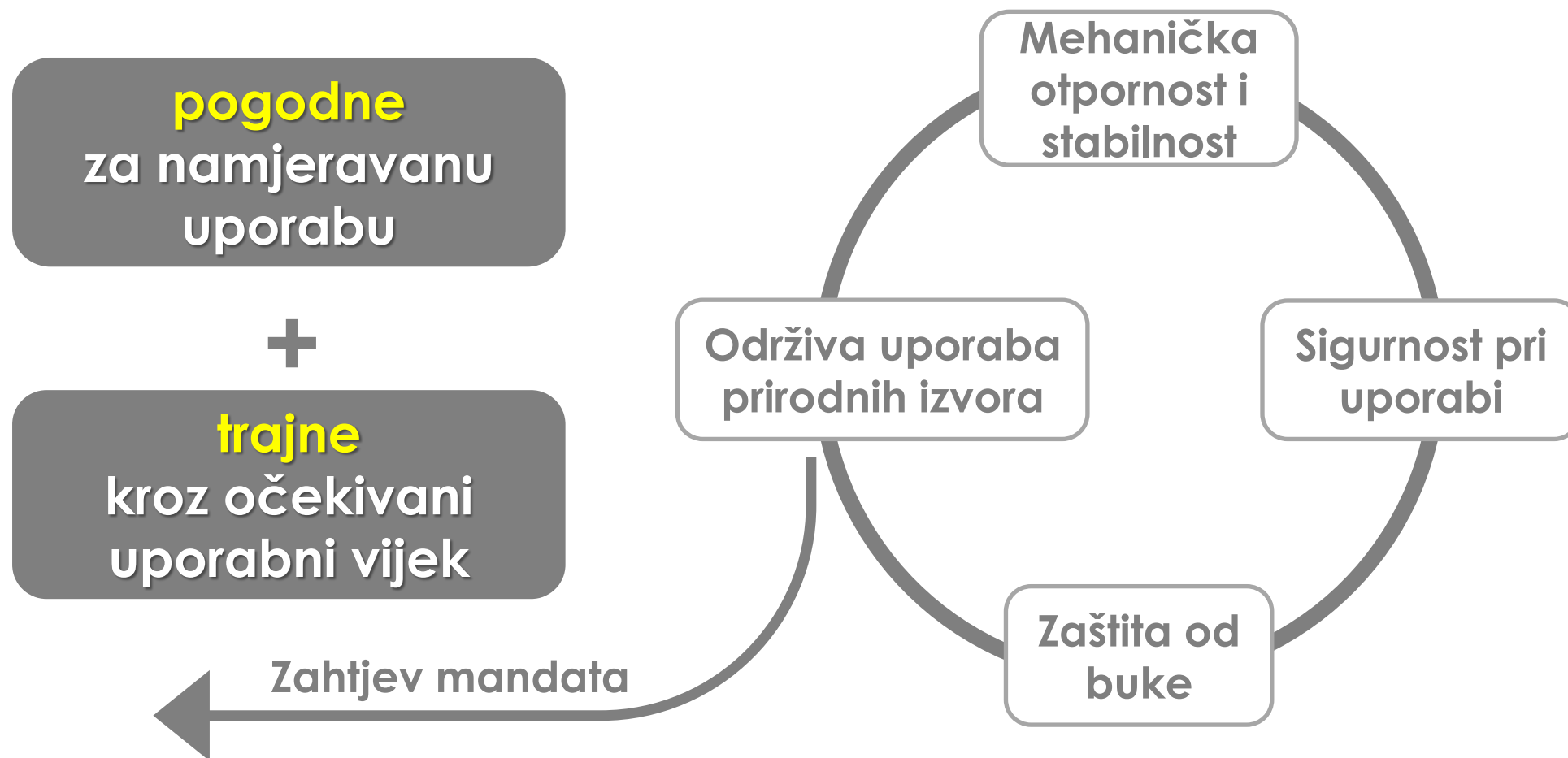
Međunarodni seminar ASFALTNI KOLNICI 2019  
International seminar ASPHALT PAVEMENTS 2019

Opatija, 04.–05. 04. 2019.

# Sadržaj

1. Osvrt na ispitne metode trajnosti bitumenskih mješavina
2. Detaljnije o načinu određivanja parametara loma
3. Sastavne komponente bitumenskih mješavina i lomna žilavost
4. Kritički osvrt na primjenu lomne žilavosti

# Bitumenske mješavine moraju biti ...



Trajnost građevine → Trajnost proizvoda izražena kao otpornost na:

- starenje,
- atmosferilije,
- oksidaciju,
- trošenje,
- kemikalije,
- odvajanje bitumenskog filma

# Razlikovanje pojma trajnosti

## *Asphalt durability*

„Maintenance of the structural integrity of compacted material over its expected service-life when exposed to the effects of the environment (water, oxygen, sunlight) and traffic loading”.

## *Pavement durability*

„Retention of a satisfactory level of performance over the structure’s expected service-life without major maintenance for all properties that are required for the particular road situation in addition to asphalt durability”.

J. C. Nicholls, M. J. McHale and R. D. Griffiths, **Best practice guide for durability of asphalt pavements**, Road Note RN42, Transport Research Laboratory, 2008

# Norme specifikacija serije EN 13108 (**2006.**)

## - Metode ispitivanja trajnosti bitumenskih mješavina

Oznaka i naziv norme	AC	BBTM	SMA	MA	PA
<b>HRN EN 12697-41</b> Otpornost na tekućine za odleđivanje	+	+	+	+	+
<b>HRN EN 12697-43</b> Otpornost na gorivo	+	+	+	+	+

# Norme specifikacija serije EN 13108 (2016.)

## - Metode ispitivanja trajnosti bitumenskih mješavina

Oznaka i naziv norme	AC	BBTM	SMA	MA	PA	AUTL
<b>HRN EN 12697-41</b> Otpornost na tekućine za odleđivanje	+	+	+	+	+	+
<b>HRN EN 12697-43</b> Otpornost na gorivo	+	+	+	+	+	+
<b>HRN EN 12697-44</b> Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje	+		+			
<b>HRN EN 12697-45</b> Ispitivanje starenja zasićenim asfaltnim uzorcima	+					
<b>HRN EN 12697-46</b> Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima	+	+	+	+	+	+

# HRN EN 12697-41:2014

- Otpornost na tekućine za odleđivanje

HRN EN 12697-41:2005



HRN EN 12697-41:2014

## Princip:

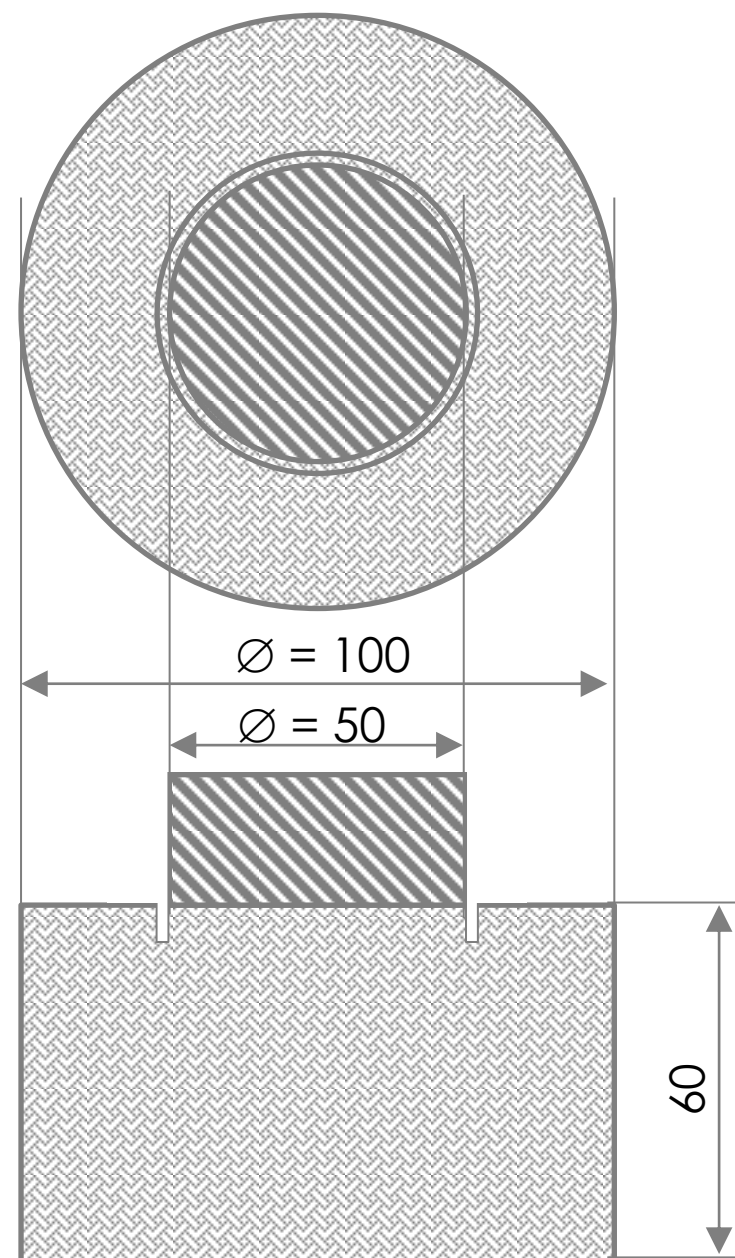
- Određivanje vlačne čvrstoće „pull-off” testom uzorka asfalta tretiranog otopinom acetata ili formijata
- Omjer maksimalnog vlačnog naprezanja tretiranog i netretiranog uzorka predstavlja mjeru otpornosti na djelovanje tekućine za odleđivanje

# HRN EN 12697-41:2014

## - Otpornost na tekućine za odleđivanje

### Priprava uzoraka:

- Najmanje osam cilindričnih uzoraka,  $\varnothing$  100 mm,
  - udarni zbijač ili
  - kružni zbijač ili
  - valjkasti zbijač ili
  - vibracijski zbijač ili
  - iz kolnika
- Kondicioniranje uzoraka (**16 ± 4**) h,
- Određivanje gustoće uzoraka,
- Svrstavanje uzoraka u „suhu” i „mokru” grupu,
- Urezivanje cilindričnog utora dubine 5 mm i  $\varnothing$  50 mm,
- Lijepljenje cilindrične čelilčne ploče  $\varnothing$  50 mm,
- Uranjanje uzorka u tekućinu za odleđivanje i čuvanje u trajanju od **70 dana**





# HRN EN 12697-41:2014

- Otpornost na tekućine za odleđivanje

Parametar otpornosti:

- zadržana vlačna čvrstoća,  $\beta$

$$\beta = \frac{\sigma_{\text{wet}}}{\sigma_{\text{dry}}} \times 100 \text{ [%]}$$

Kategorije otpornosti na tekućine za odleđivanje u normama specifikacija (2016.)

AC, BBTM, SMA, MA, PA, AUTL

Kategorija $\beta_{\text{min}}$
$\beta_{\text{min}100}$
$\beta_{\text{min}85}$
$\beta_{\text{min}70}$
$\beta_{\text{min}55}$
$\beta_{\text{min}NR}$

# HRN EN 12697-43:2014

- Otpornost na gorivo

HRN EN 12697-43:2005



HRN EN 12697-43:2014

## Princip:

- Određivanje gubitka mase nakon kemijskog djelovanja goriva
- Abrazija gorivu izloženog dijela uzorka
- Određivanje gubitka mase nakon mehaničkog djelovanja
- Određivanje ukupnog gubitka mase nakon kemijskog i mehaničkog djelovanja

# HRN EN 12697-43:2014

## - Otpornost na gorivo

### Priprava uzoraka:

- Pet cilindričnih uzoraka,  $\varnothing$  100 mm i visine 60 mm
  - udarni zbijač ili
  - kružni zbijač ili
  - valjkasti zbijač ili
  - iz kolnika
- Određivanje gustoće uzoraka,
- Sušenje uzoraka u trajanju između **14 i 42 dana**
- Uzorci djelomično uronjeni u gorivo **24 h ili 72 h**

### Parametar otpornosti: **gubitak mase [%]**

- *Parametar A* (kemijsko djelovanje)
- *Parametar B* (mehaničko djelovanje)
- *Parametar C* (kemijsko + mehaničko djelovanje)

# HRN EN 12697-43:2014

## - Otpornost na gorivo

### Ocjena otpornosti:

$C < 6\%$ : dobra otpornost

$6\% \leq C \leq 10\%$ : srednja otpornost

$C > 10\%$ : slaba otpornost

### Kategorije otpornosti na gorivo u normama specifikacija (2016.)

AC, BBTM, SMA

MA, PA, AUTL

Kategorija $C_{i_{\max}}$
$C_{i_{\max} 6}$
$C_{i_{\max} 7}$
$C_{i_{\max} 8}$
$C_{i_{\max} 9}$
$C_{i_{\max} 10}$
$C_{i_{\max} 11}$
$C_{i_{\max} 12}$
$C_{i_{\max} 13}$
$C_{i_{\max} 14}$
$C_{i_{\max} 15}$
$C_{i_{\max} NR}$

Kategorija $C_{i_{\max}}$
$C_{i_{\max} 1}$
$C_{i_{\max} 2}$
$C_{i_{\max} 3}$
$C_{i_{\max} 4}$
$C_{i_{\max} 5}$
$C_{i_{\max} 6}$
$C_{i_{\max} 7}$
$C_{i_{\max} 8}$
$C_{i_{\max} NR}$

# HRN EN 12697-45:2012

## - Ispitivanje starenja zasićenim asfaltnim uzorcima

### Svrha:

- Ocjena trajnosti međusobne adhezije konstituenata bitumenske mješavine za vezne i nosive slojeve od asfaltbetona

### Princip:

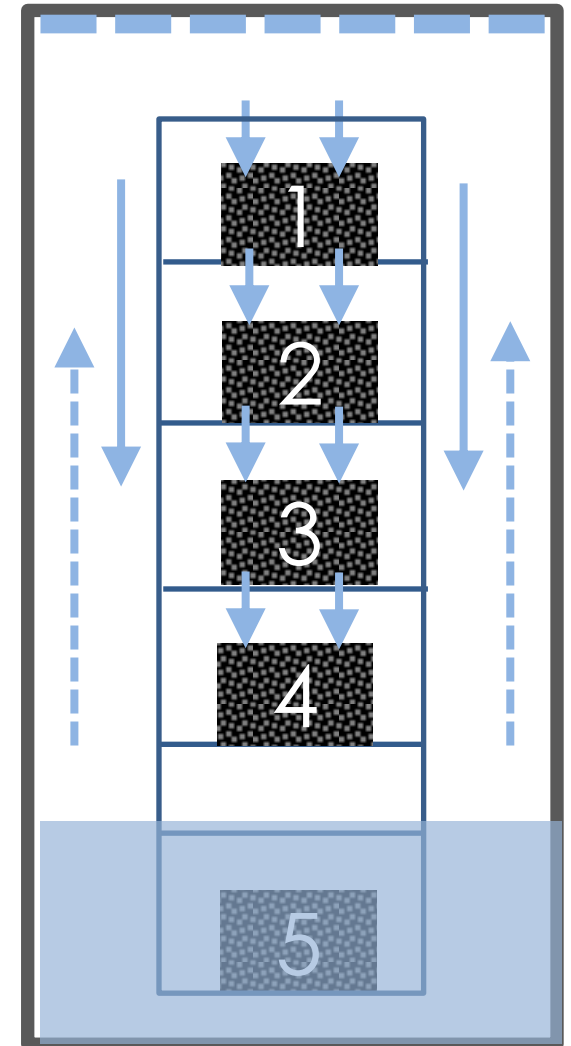
- Modul krutosti indirektnim vlačnim testom na cilindričnim uzorcima kondicioniranim u uvjetima vlage, tlaka i temperature,
- Omjer modula krutosti kondicioniranih i nekondicioniranih uzoraka  
→ **ocjena trajnosti na starenje i vlagu**

# HRN EN 12697-45:2012

## - Ispitivanje starenja zasićenim asfaltnim uzorcima

### Priprava uzoraka:

- Pet cilindričnih uzoraka,  $\varnothing$  100 mm i visine 60 mm
  - udarni zbijač ili
  - kružni zbijač ili
  - valjkasti zbijač ili
  - iz kolnika
- Određivanje gustoće uzoraka,
- Uzorci selektivno saturirani vlagom i kondicionirani **65** sati pri temperaturi od **85 °C** i tlaku od **2,1 MPa**



# HRN EN 12697-45:2012

- Ispitivanje starenja zasićenim asfaltnim uzorcima

Parametar trajnosti:

- omjer modula krutosti,  $CTR_R$  [%]

$$CTR_R = (100 \times CTR_C / CTR_U)$$



**(Mixture SATS Durability Index)**

Kategorije trajnosti u normi  
HRN EN 13108-1:2016

AC

Kategorija $MDI_{min}$
$MDI_{min}$ 100
$MDI_{min}$ 90
$MDI_{min}$ 80
$MDI_{min}$ 70
$MDI_{min}$ 60
$MDI_{min}$ NR

# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima

## Svrha:

- Karakterizacija otpornosti bitumenskih mješavina prema nastanku pukotina uslijed niskih temperatura

## Princip:

- Određivanje temperature loma pri termičkom naprezanju  
(*Thermal Stress Restrained Specimen Test – **TSRST***)
- Određivanje vlačne čvrstoće  
(*Uniaxial Tension Stress Test - **UTST***)
- Određivanje maksimalne rezerve vlačne čvrstoće



# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima

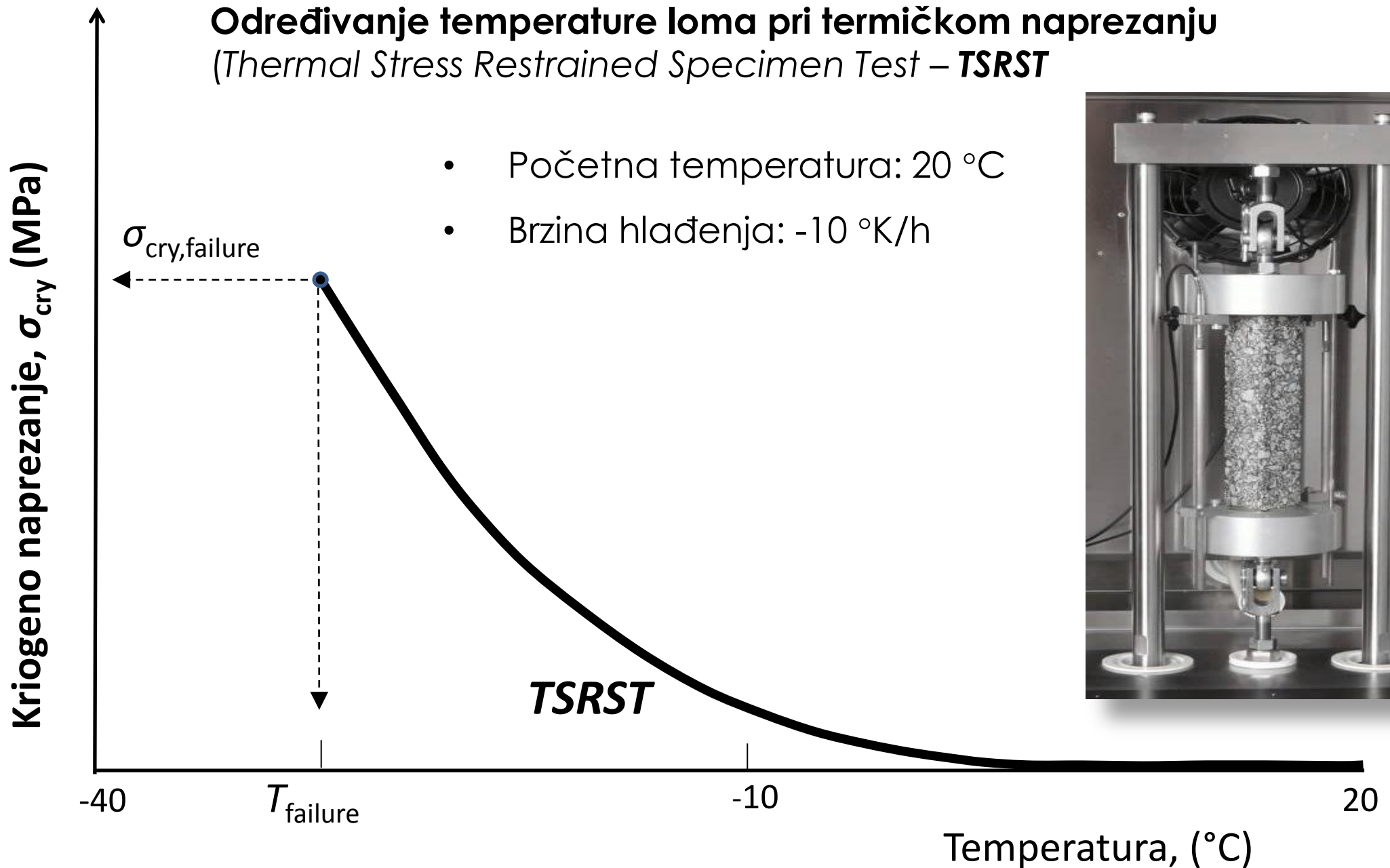
## Priprava uzoraka:

- Kvadratni prizmatični ili kružni cilindrični uzorci duljine 160 mm, a širine/visine ili promjera zavisno od maksimalnog zrna bitumenske mješavine:
  - valjkasti zbijač ili
  - iz kolnika
- Određivanje gustoće uzoraka
- Kondicioniranje uzoraka na odabranu temperaturu ispitivanja
- Temperatura uzorka :  $\pm 1$  °C od temperature ispitivanja kroz ne manje od 10 min

# HRN EN 12697-46:2012

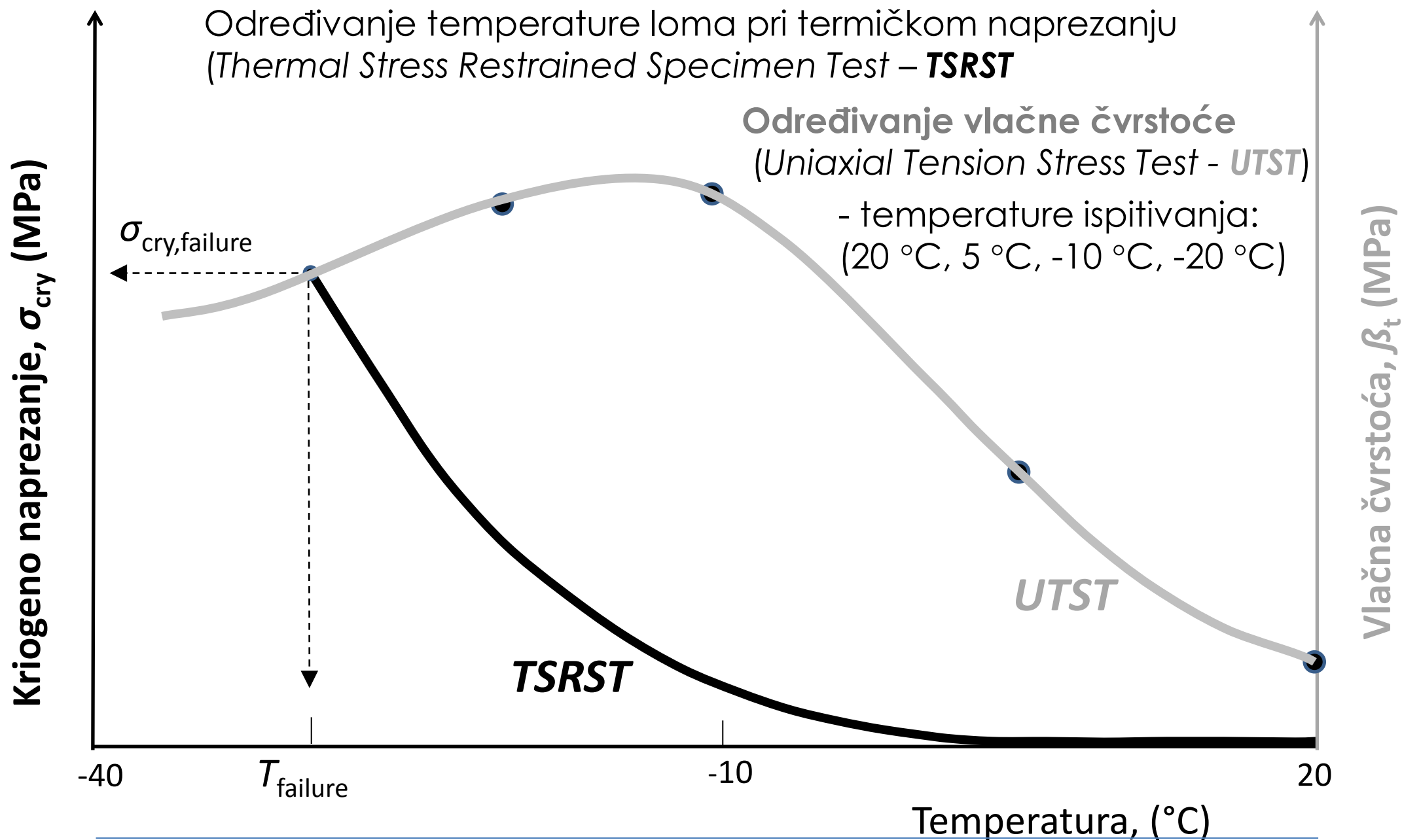
- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima

## Određivanje temperature loma pri termičkom naprezanju (*Thermal Stress Restrained Specimen Test – TSRST*)



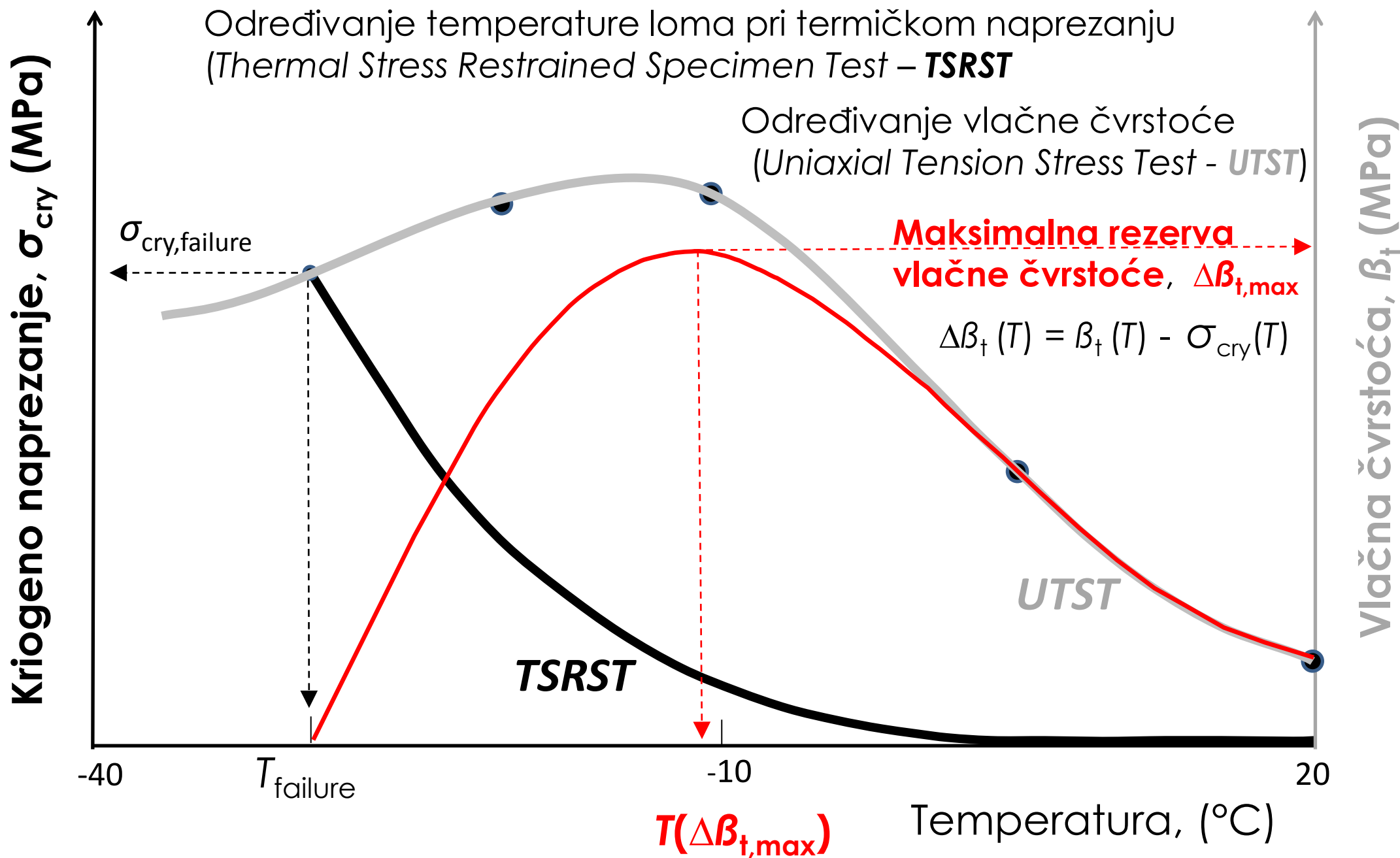
# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima



# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima



# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima

## Parametri otpornosti na niskim temperaturama:

- Temperatura loma,  $T_{\text{failure}}$  [°C]
- Maksimalna rezerva vlačne čvrstoće,  $\Delta\beta_{t,\text{max}}$  [MPa]
- Temperatura pri maksimalnoj rezervi vlačne čvrstoće,  $T(\Delta\beta_{t,\text{max}})$  [°C]

## Zahtjev u tehničkom propisu za asfaltne kolnike (u izradi):

- $T_{\text{failure}}$ : max. -28 °C
- $\Delta\beta_{t,\text{max}}$ : min. 4,0 MPa
- $T(\Delta\beta_{t,\text{max}})$ : max. -10 °C

# HRN EN 12697-46:2012

- Niskotemperaturne pukotine i svojstva pri jednoosnim vlačnim ispitivanjima

Kategorije temperature loma na niskim temperaturama u normama specifikacija (2016.)

$$T_{\text{failure}} \equiv \text{TSRST}_{\text{max}}$$

AC, BBTM, SMA, PA, AUTL

MA

Kategorija $\text{TSRST}_{\text{max}}$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -15$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -17,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -20$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -22,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -25$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -27,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -30$
$\text{TSRST}_{\text{max}} \text{NR}$

Kategorija $\text{TSRST}_{\text{max}}$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -12,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -15$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -17,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -20$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -22,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -25$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -27,5$
$\text{TSRST}_{\text{max}} -30$
$\text{TSRST}_{\text{max}} \text{NR}$

# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

## Svrha:

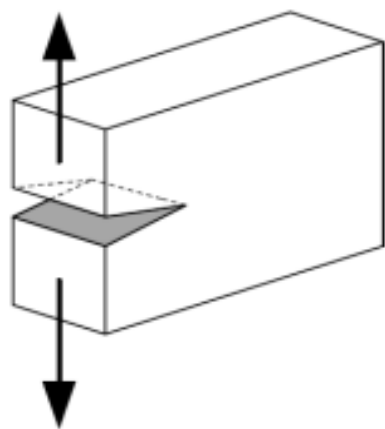
- Ocjena potencijala otpornosti bitumenske mješavine prema razvoju pukotina.

## Princip:

- Ispitivanje se temelji na konceptu mehanike loma,
- Polucilindrični uzorak savija se u tri točke, uz konstantnu brzinu deformacije,
- Središnji dio baze uzorka sa zarezom izložen je vlačnom naprezanju,
- Funkcija „opterećenje-deformacija” → izvor značajki mehanike loma,
- Maksimalna vrijednost opterećenja ( $F_{\max}$ ) izravno je povezana s lomnom žilavošću.

# Neke općenite značajke mehanike loma

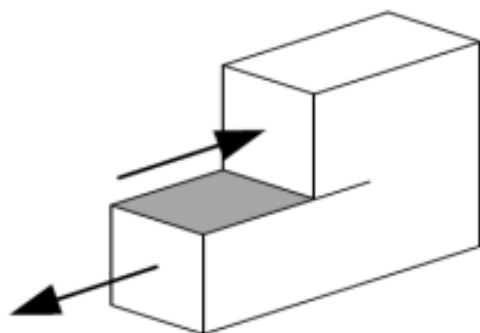
Tipovi otvaranja pukotine i pripadni faktori intenziteta naprezanja



**Tip I**  
vlačno



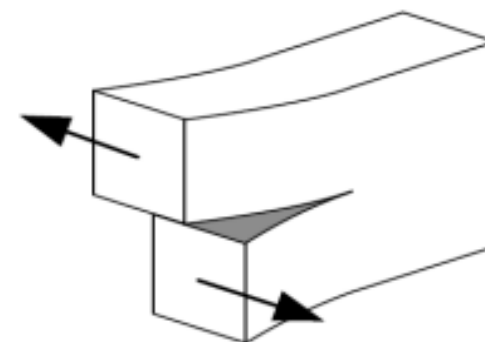
**$K_I$**



**Tip II**  
uzdužno smično



**$K_{II}$**



**Tip III**  
poprečno smično

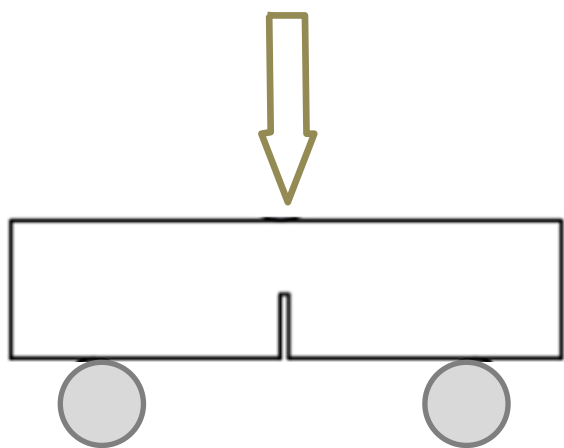


**$K_{III}$**



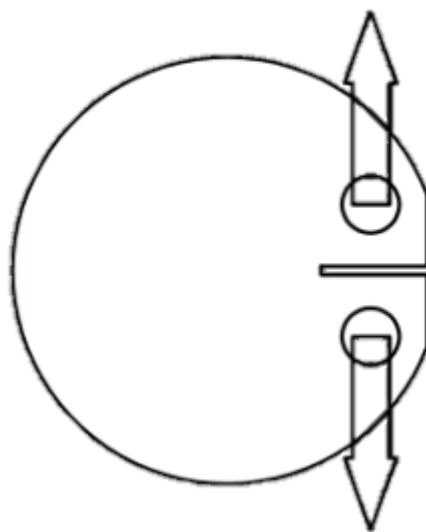
# Neke općenite značajke mehanike loma

## Metode ispitivanja loma bitumenskih mješavina



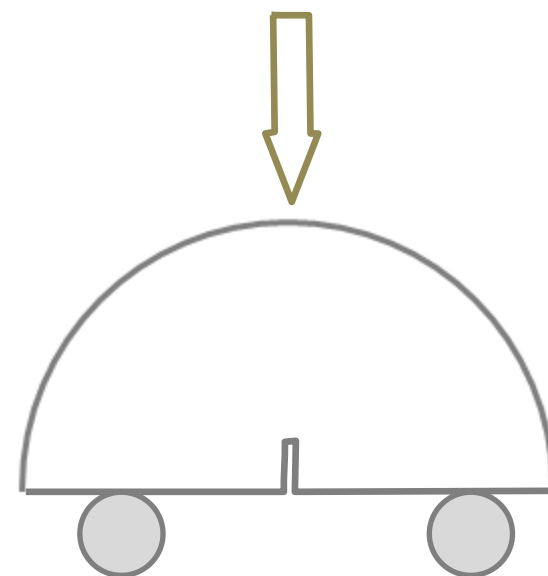
### **Greda**

*Single-edge notched beam (**SEB**)*



### **Disk**

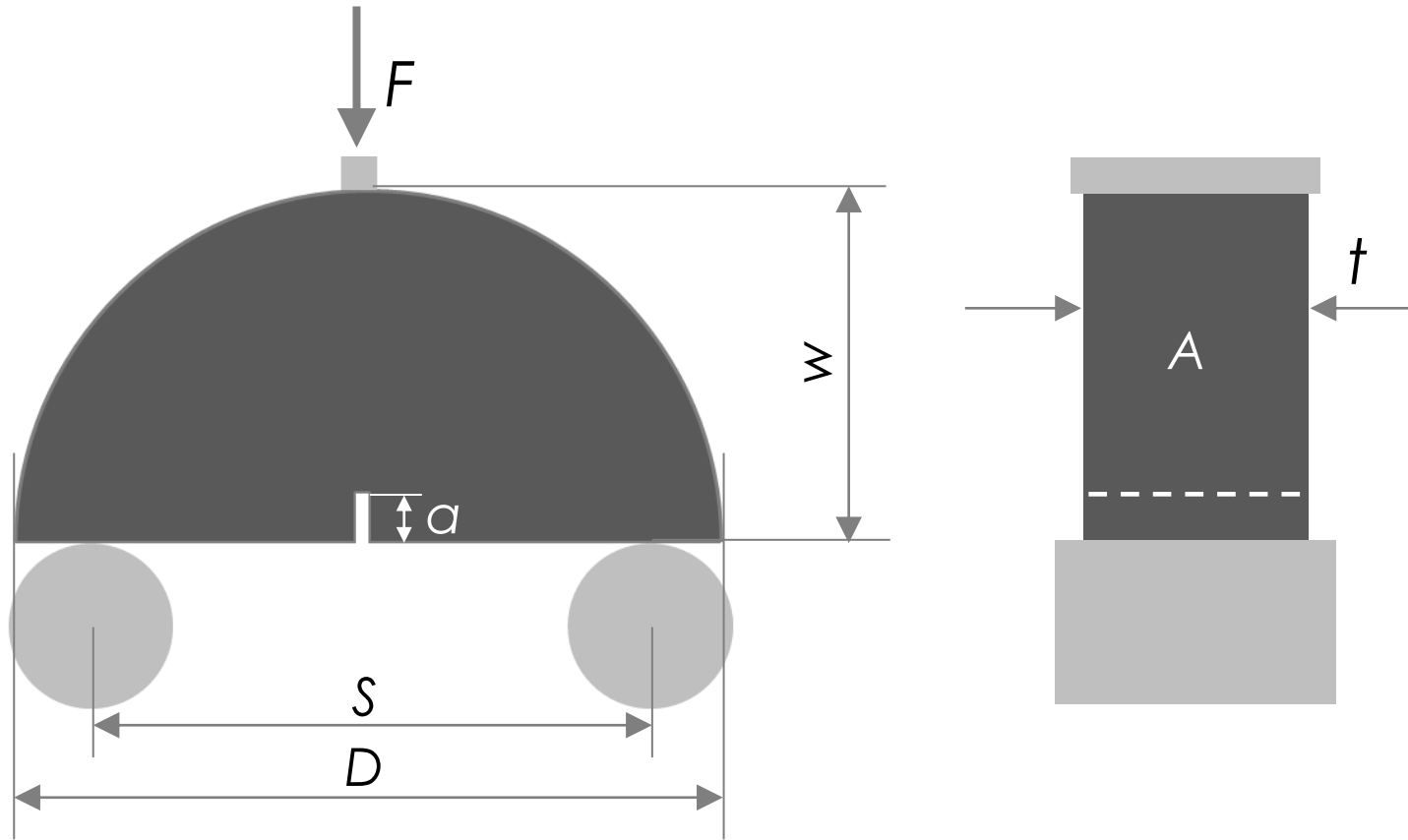
*Disk-shaped compact tension (**DCT**)*



### **Polucilindar**

*Semicircular bending (**SCB**)*

# Značajke uzorka za SCB test



**D** - promjer uzorka [mm]

**S** - razmak između oslonaca baze uzorka [mm]

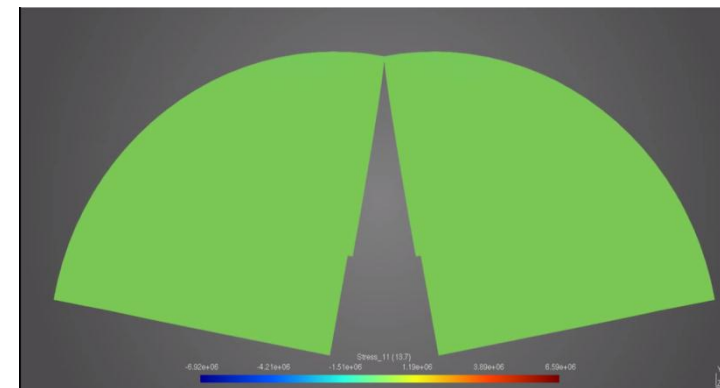
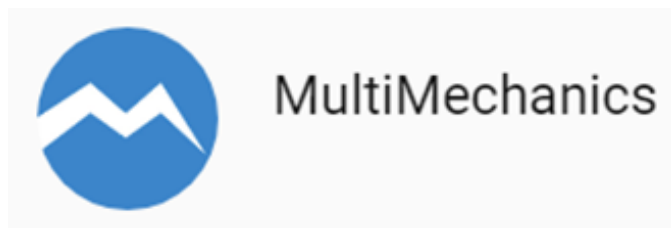
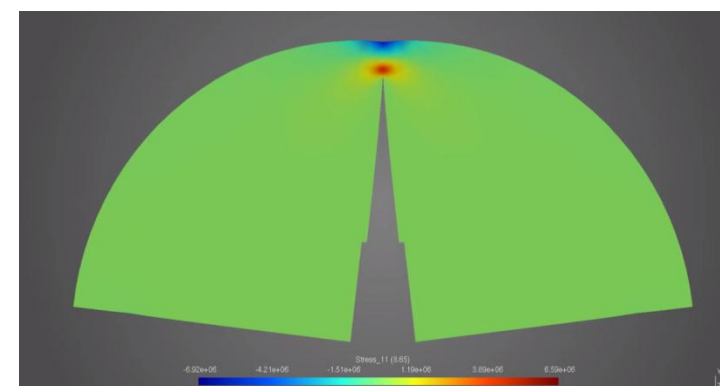
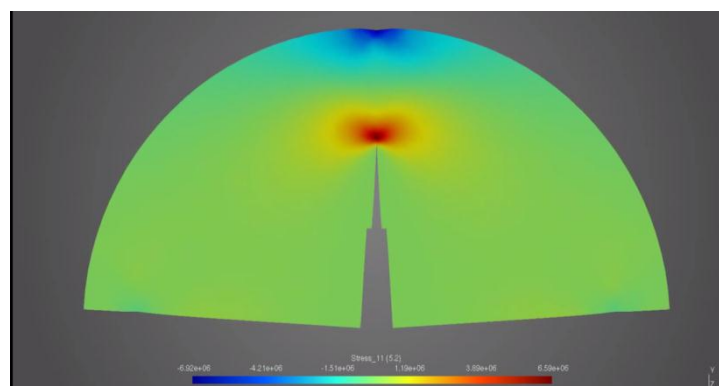
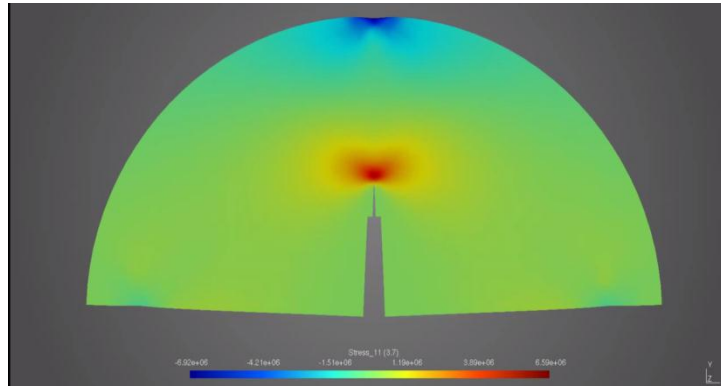
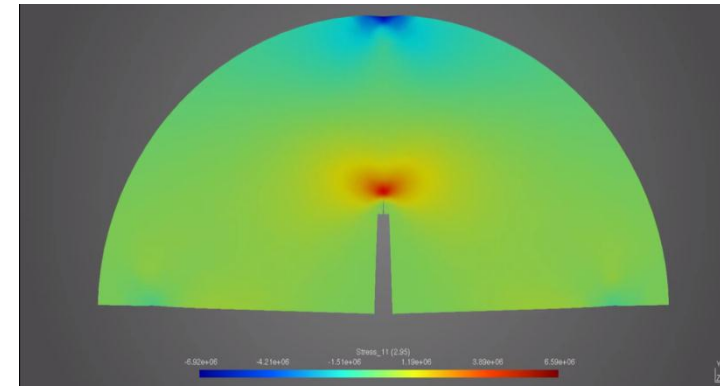
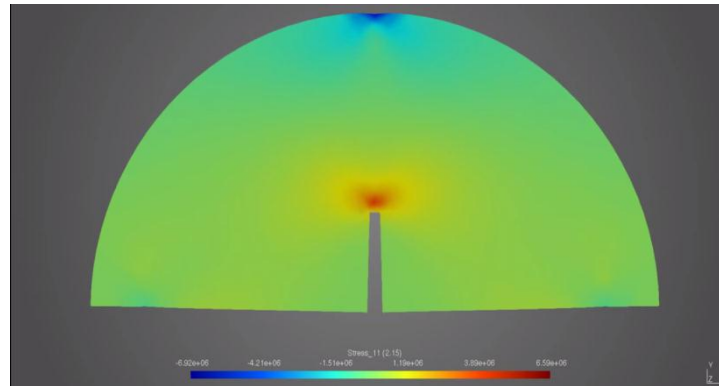
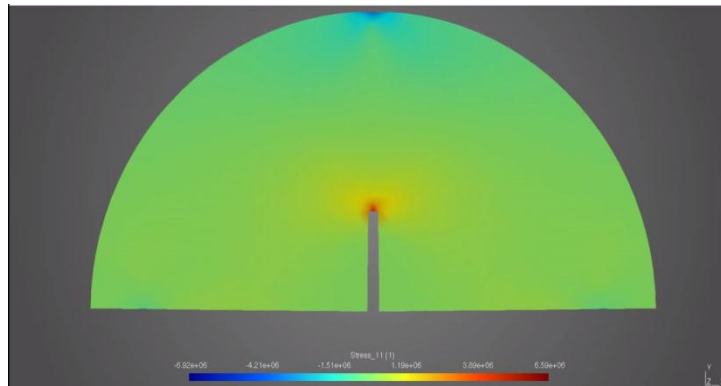
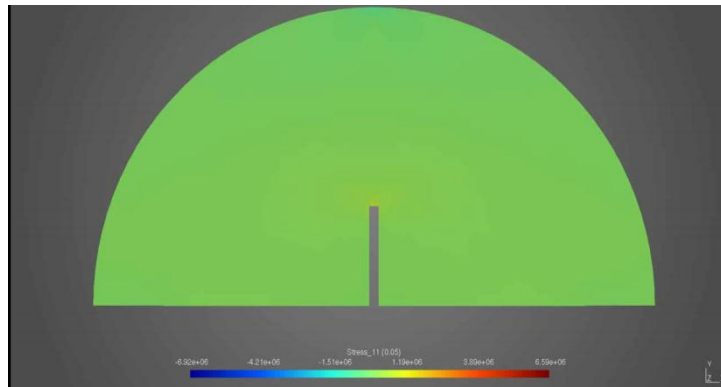
**a** - veličina zareza [mm]

**t** - debljina uzorka [mm]

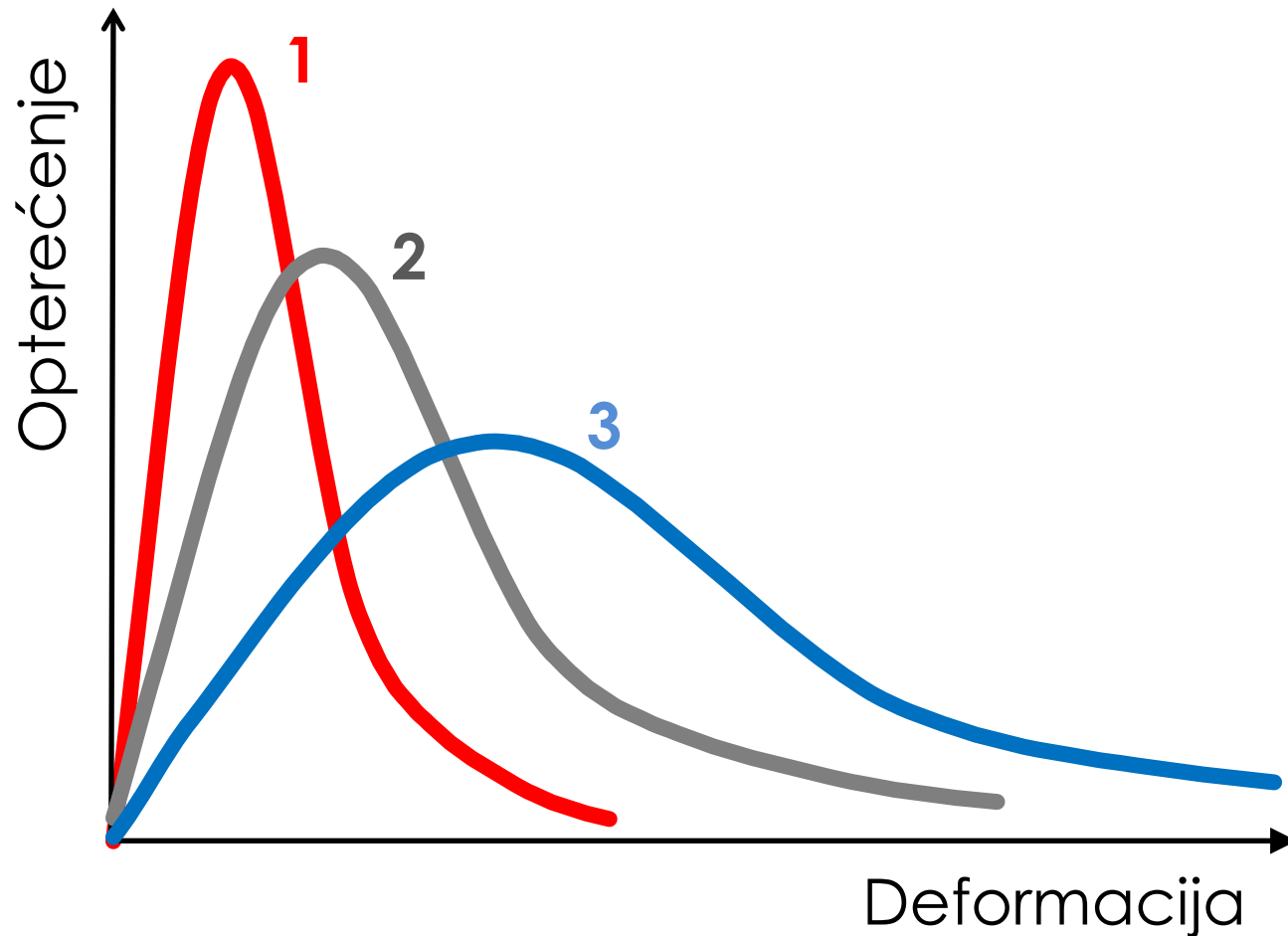
**w** - visina uzorka [mm]

**A** - površina loma,  $A = (w - a) \cdot t$  [mm<sup>2</sup>]

# Virtualni SCB test



# Ovisnost funkcije „opterećenje – deformacija”



Debljina uzorka:

$$t_1 > t_2 > t_3$$

Duljina zareza:

$$a_1 < a_2 < a_3$$

Brzina deformacije:

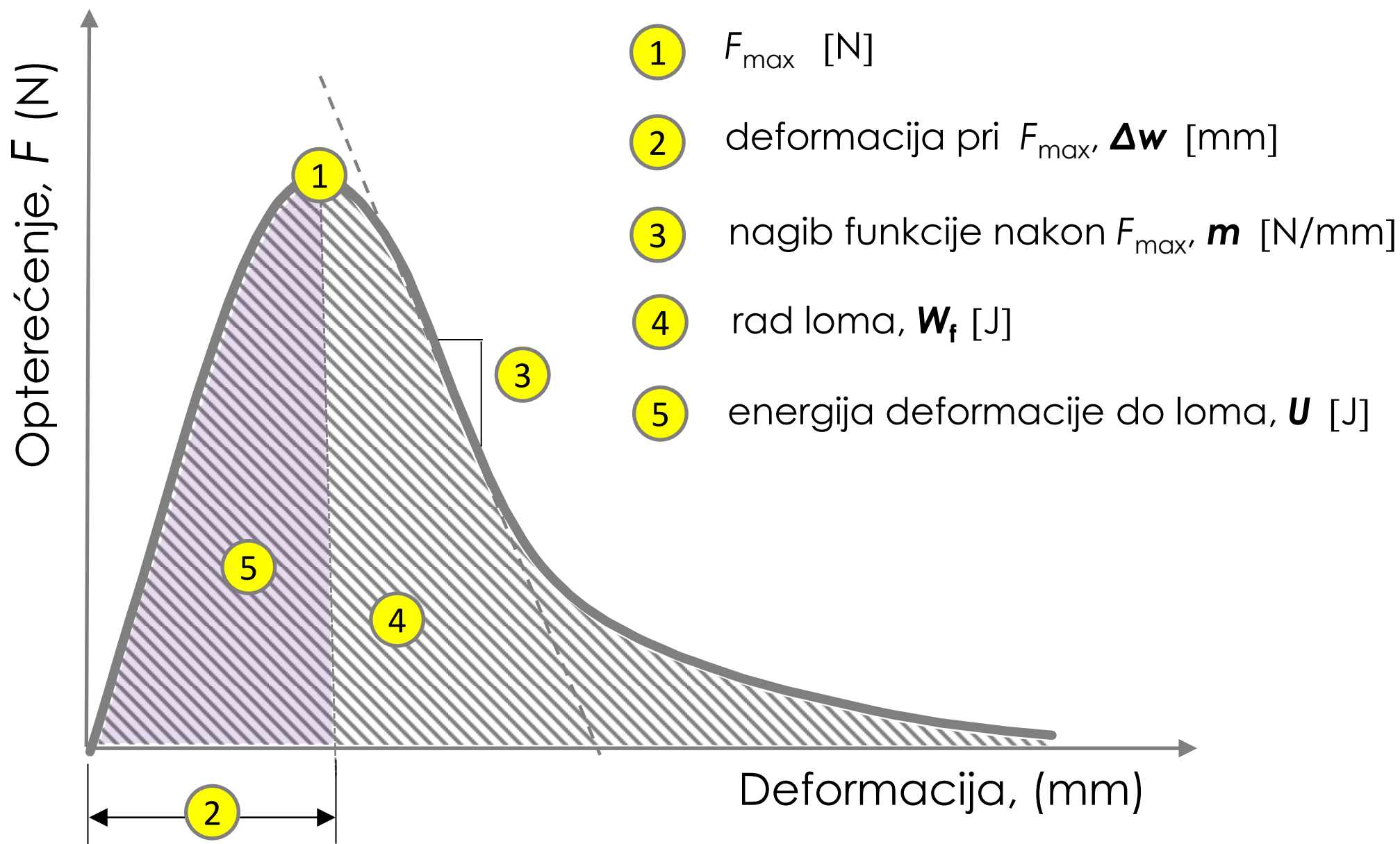
$$v_1 > v_2 > v_3$$

Temperatura ispitivanja:

$$T_1 < T_2 < T_3$$

# Eksperimentalne značajke SCB testa

## Funkcija „opterećenje – deformacija”



# Parametri loma SCB testa

**$J_c$**  - kritična vrijednost otpora loma  
(mjera intenziteta deformacije pri vrhu pukotine)

$$J_c = - (1/t) \cdot ((dU/da)) \quad (\text{J/m}^2)$$

**$G_f$**  - energija loma  
(energija potrebna za stvaranje jedinične lomne površine)

$$G_f = W_f / A \quad (\text{J/m}^2)$$

**$FI$**  - indeks fleksibilnosti  
(vrednuje oblik funkcije nakon vršnog opterećenja,  $F_{\max}$ )

$$FI = A_1 \cdot G_f / abs(m)$$



faktor skaliranja (0,01)

**$K_{Ic}$**  - lomna žilavost  
(kritična vrijednost faktora intenziteta naprezanja)

$$K_{Ic} = \sigma_{\max} \cdot Y \cdot (\pi \cdot a)^{1/2} \quad (\text{N/mm}^{3/2}) \text{ ili } (\text{MPa} \times \text{m}^{1/2})$$

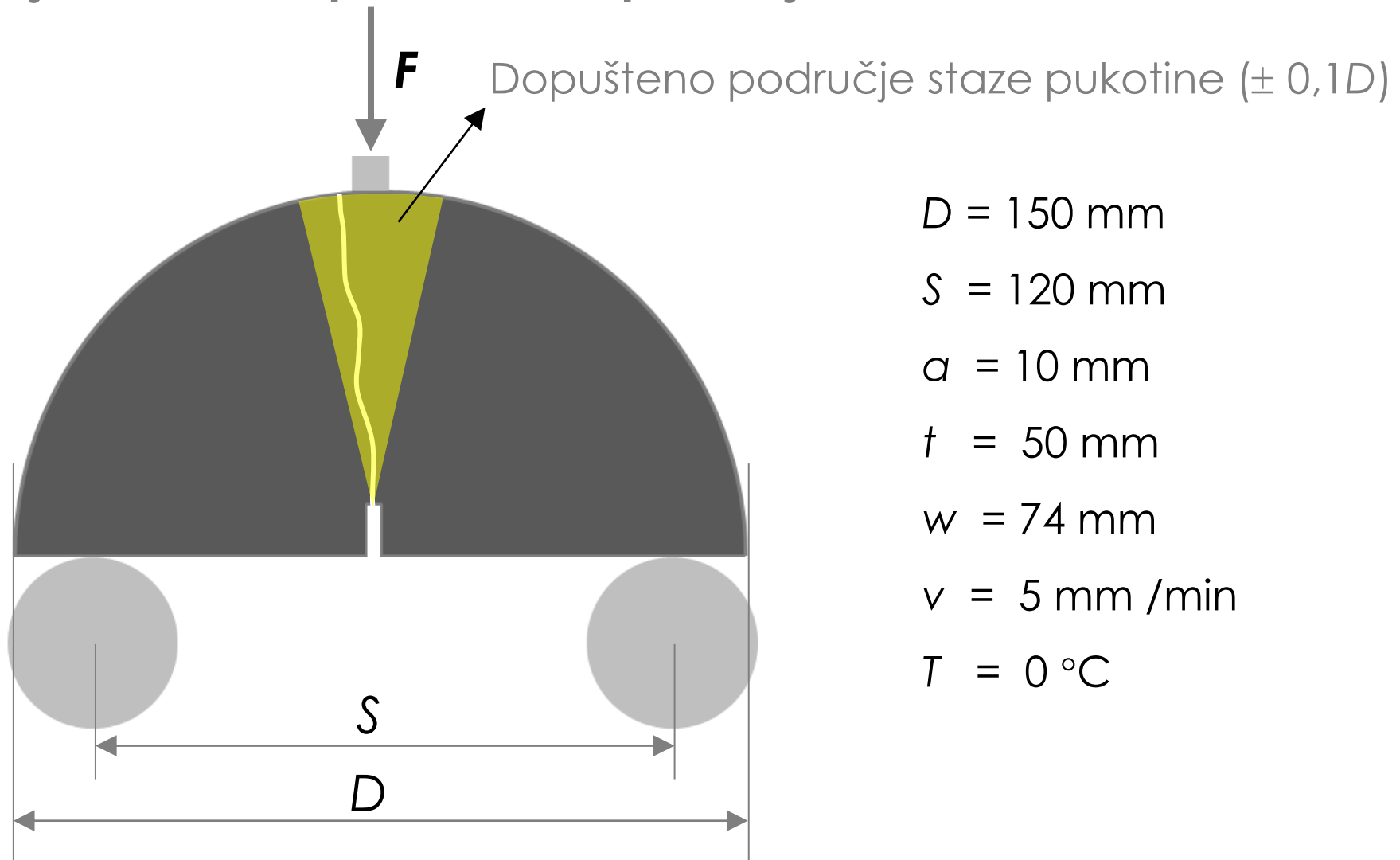


faktor oblika

# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

## Značajke uzorka i provedbe ispitivanja



# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

Kategorije lomne žilavosti  
u normi HRN EN13108-1:2016  
i HRN EN 13108-5:2016

## Izveštaj o ispitivanju:

- Relativna deformacija,  $\epsilon_{\max}$ , %
- Naprezanje,  $\sigma_{\max}$ , N/mm<sup>2</sup>
- Lomna žilavost,  $K_{Ic}$ , N/mm<sup>1,5</sup> ili MPa×m<sup>0.5</sup>

AC, SMA

Kategorija $K_{Ic \min}$
$K_{Ic \min 10}$
$K_{Ic \min 15}$
$K_{Ic \min 20}$
$K_{Ic \min 25}$
$K_{Ic \min 30}$
$K_{Ic \min 35}$
$K_{Ic \min 40}$
$K_{Ic \min 45}$
$K_{Ic \min 50}$
$K_{Ic \min 55}$
$K_{Ic \min NR}$



# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

Utjecaj sastava i svojstva bitumenske mješavine na lomnu žilavost pri niskim temperaturama:

## Povoljno

- veći udio bitumena,
- elastomerom modificirani bitumen,
- vapnenački agregat,
- sitnozrne bitumenske mješavine,
- manji udio šupljina

## Nepovoljno

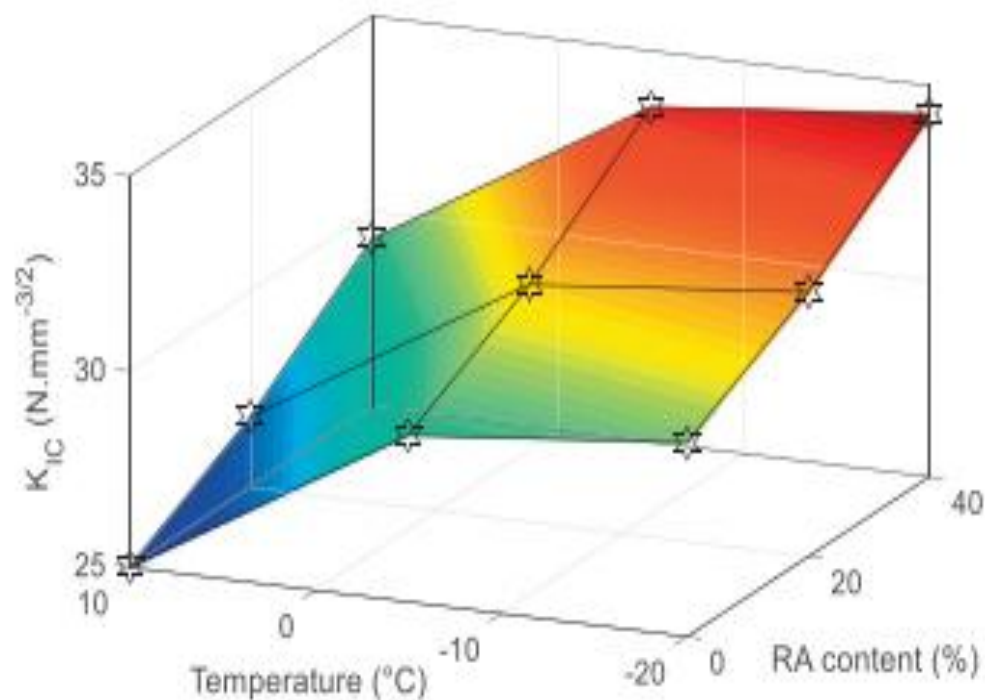
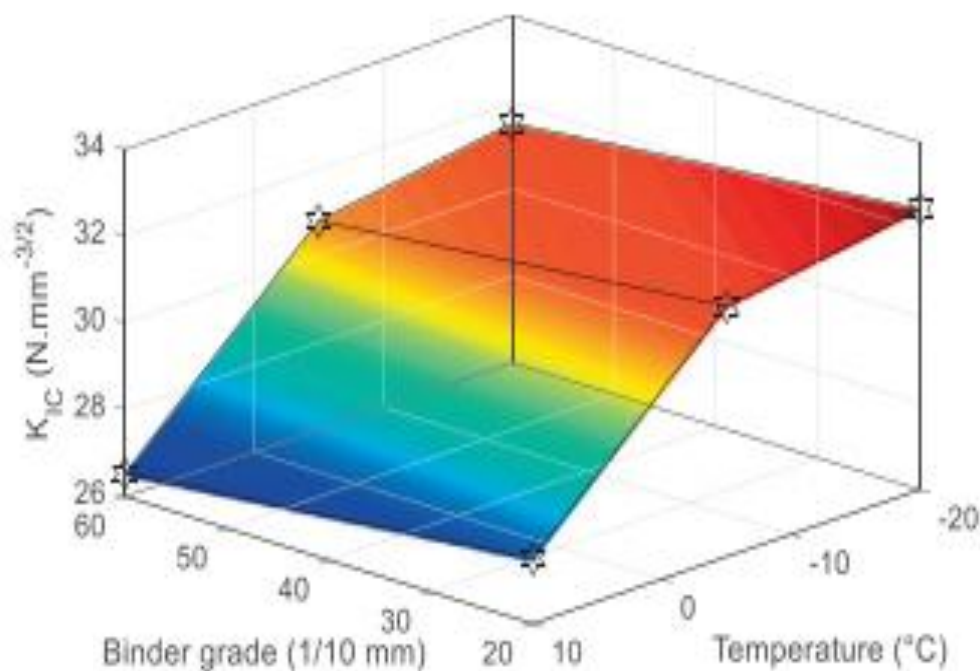
- RA u bitumenskoj mješavini

(postoje i oprečna mišljenja – mogući uzrok u omjeru: bitumen iz RA/ ukupni bitumen) ??

# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

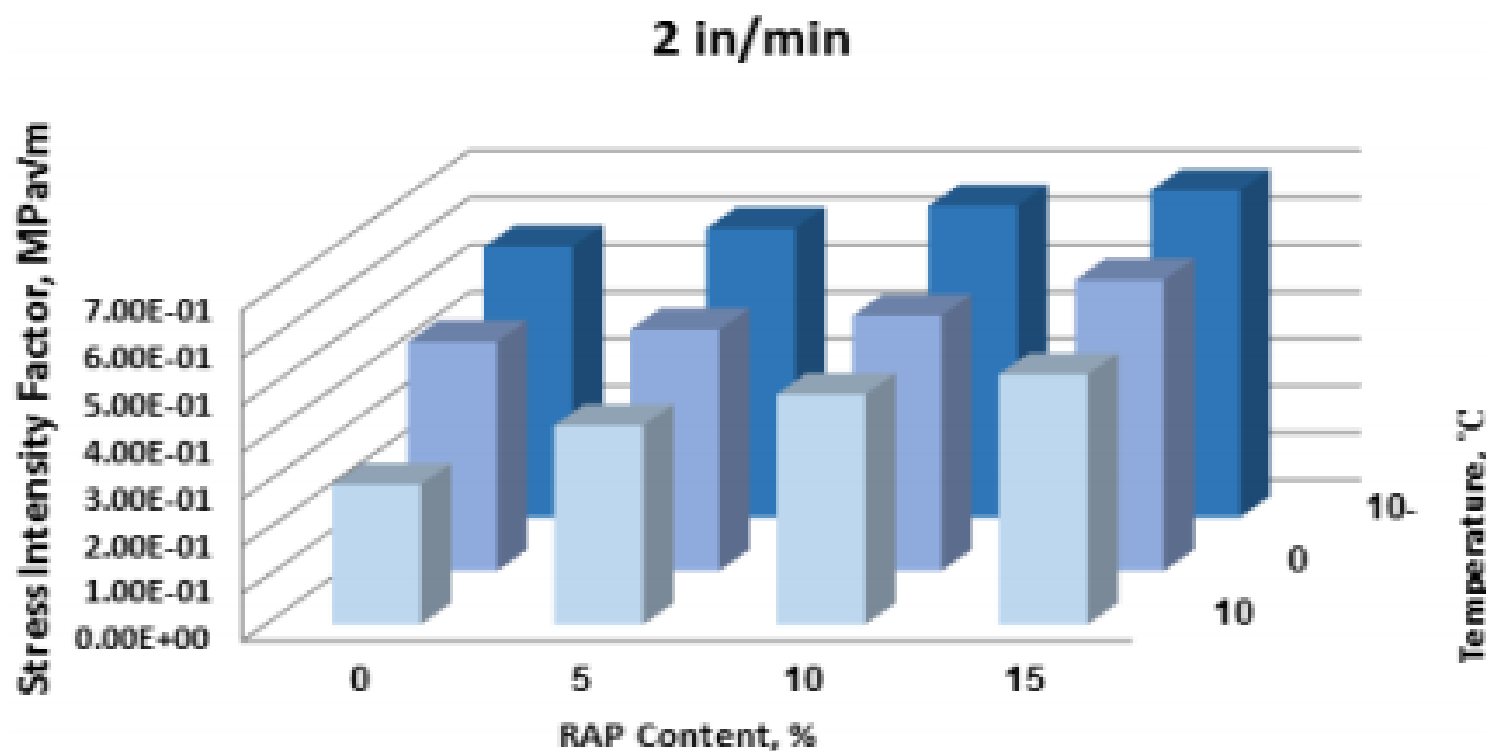
Utjecaj konzistencije bitumena i udjela RA u bitumenskoj mješavini na lomnu žilavost pri niskim temperaturama:



# HRN EN 12697-44:2011

- Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

Utjecaj udjela RA u bitumenskoj mješavini na lomnu žilavost:



# HRN EN 12697-44:2011

## - Razvoj pukotine ispitivanjem polucilindričnog uzorka na savijanje

### Kritički osvrt:

- Lomna žilavost ( $K_{Ic}$ ) primjeren je parametar loma za materijale koji se ponašaju po zakonitostima linearno-elastične mehanike loma (LEFM), a temelji se na faktoru intenziteta naprezanja
  - asfalt na izrazito niskim temperaturama?
- Asfalt se ponaša po zakonitostima elasto-plastične mehanike loma (EPFM)
  - primjereniji parametri loma bili bi: kritična vrijednost otpora loma  $J_c$ , energija loma  $G_f$ , indeks fleksibilnosti  $FI$ , koji se temelje na energetsom konceptu (posebno značajno pri višim temperaturama ispitivanja)
- SCB test proveden na niskim temperaturama mogao bi se uspoređivati s ispitivanjem niskotemperaturnih svojstava asfalta prema HRN EN 12697-46
- SCB test proveden na višim temperaturama mogao bi biti prikladan za ocjenu otpornosti na pojavu „*top-down*” pukotina
- Odluku o prihvaćanju lomne žilavosti, kao parametra trajnosti bitumenske mješavine u normama HRN EN 12697-1:2016 i HRN EN 12697-5:2016, potrebno je donijeti temeljem detaljnije analize