

# Co ukrývá křivka

## Principy analýzy pulzové vlny

Dušan Merta, BPPV



XXII. dny intenzivní medicíny  
Kroměříž, červen 2018

## Srdeční výdej

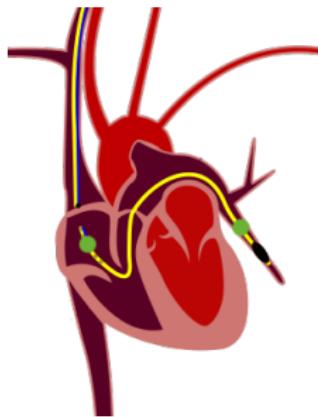
- Měření srdečního výdeje

# Srdeční výdej – *Cardiac output (CO)*



# Měření srdečního výdeje

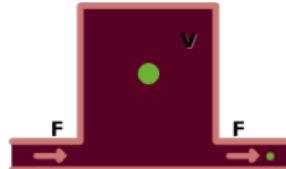
Swan-Ganzův plicnicový katetr



## Stewart–Hamiltonova rovnice

$$Q_{t_1, t_2} = \int_{t_1}^{t_2} F(t) C(t) dt$$

$Q$  ... množství indikátoru,  $F$  ... průtok,  $C$  ... koncentrace

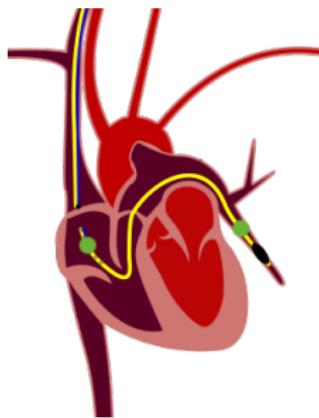


### ■ indikátory

- indocyaninová zeleň
- teplo(ta)
- Lithium

# Měření srdečního výdeje

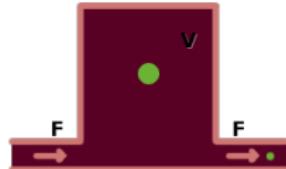
## Swan-Ganzův plicnicový katetr



### Stewart–Hamiltonova rovnice

$$Q = F \int_0^\infty C(t) dt$$

$Q$  ... množství indikátoru,  $F$  ... průtok,  $C$  ... koncentrace

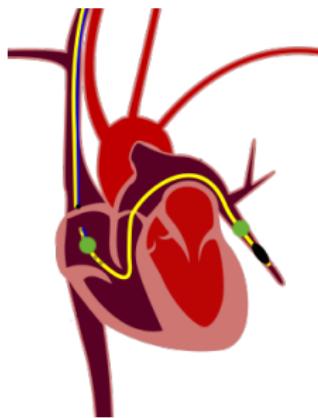


#### ■ indikátory

- indocyaninová zeleň
- teplo(ta)
- Lithium

# Měření srdečního výdeje

Swan-Ganzův plicníkový katetr

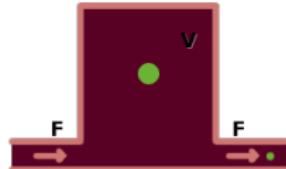


## Stewart–Hamiltonova rovnice

$$Q = F \int_0^\infty C(t) dt$$

$$F = \frac{Q}{\int_0^\infty C(t) dt}$$

$Q$  ... množství indikátoru,  $F$  ... průtok,  $C$  ... koncentrace



### ■ indikátory

- indocyaninová zeleň
- teplo(ta)
- Lithium

# Windkessel model

- Měření krevního tlaku
- Windkessel model
- Systola

# Měření krevního tlaku

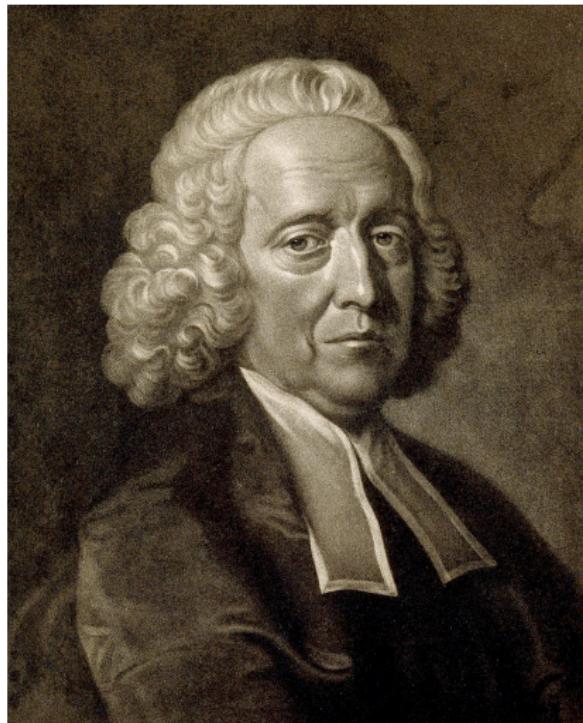
- botanik a fyziolog

1735 první měření krevního tlaku

- přímé měření  
(sloupec krve)

- TK není konstantní

- oscilace se srdečním rytmem
- vztah k elasticitě velkých cév



STEPHEN HALES 1677 – 1761

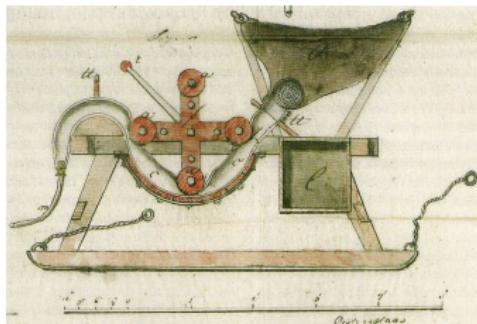
# Měření krevního tlaku



# Windkessel model

- 1899 – Otto Frank

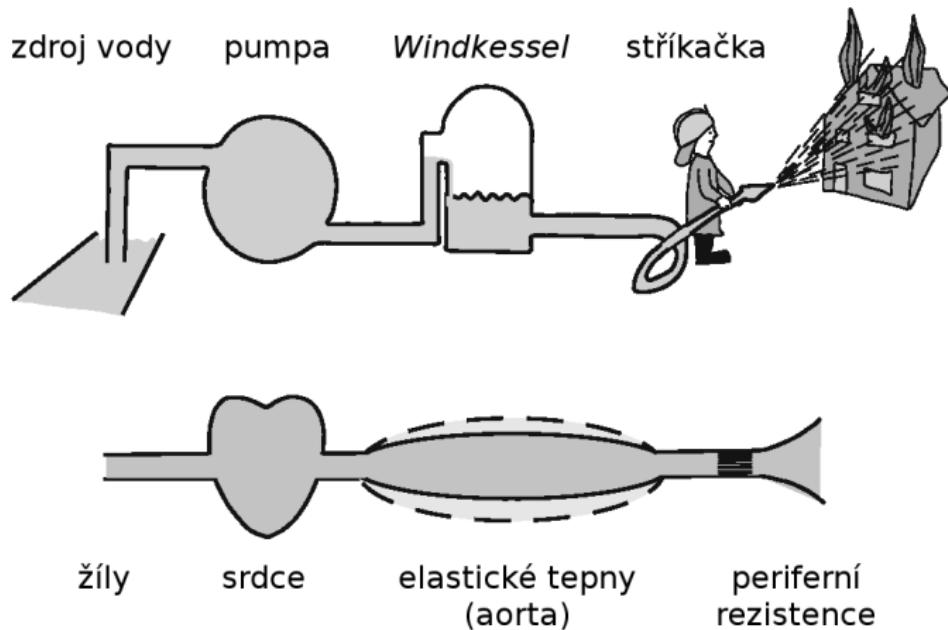
- tekutina je vstříknuta do uzavřené, vzduchem naplněné komory (*compliance*)
- dále odteče přes otvor ven (*resistance*)
- analogie s hasičskou stříkačkou



---

<sup>1</sup>Sagawa et al. 1990.

# Windkessel model



<sup>2</sup>Westerhof et al. 2009.

# Windkessel model

## Analýza diastolické části

### Předpoklady

- Compliance je konstantní:  $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova zákona*:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$

# Windkessel model

## Analýza diastolické části

### Předpoklady

- Compliance je konstantní:  $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova zákona*:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$

# Windkessel model

## Analýza diastolické části

### Předpoklady

- Compliance je konstantní:  $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova zákona*:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$

# Windkessel model

## Analýza diastolické části

### Předpoklady

- Compliance je konstantní:  $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova zákona*:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$

# Windkessel model

## Analýza diastolické části

### Předpoklady

- Compliance je konstantní:  $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova zákona*:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$

# Windkessel model

Analýza diastolické části – obecný případ

Compliance i tok jsou obecnou funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \frac{dV}{dt} = -\varphi(P)$$

$$dV = \frac{dP}{f(P)}$$

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

# Windkessel model

Analýza diastolické části – obecný případ

Compliance i tok jsou obecnou funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \frac{dV}{dt} = -\varphi(P)$$

$$dV = \frac{dP}{f(P)}$$

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

# Windkessel model

## Analýza systolické části

### Předpoklady

- Tok do systému za časový interval  $dt$ :  $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

# Windkessel model

## Analýza systolické části

### Předpoklady

- Tok do systému za časový interval  $dt$ :  $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

# Windkessel model

## Analýza systolické části

### Předpoklady

- Tok do systému za časový interval  $dt$ :  $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

# Windkessel model

## Analýza systolické části

$$dV = i \cdot dt \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)} \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

$$i \cdot dt = \frac{dP}{f(P)} + \varphi(P) \cdot dt$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

# Windkessel model

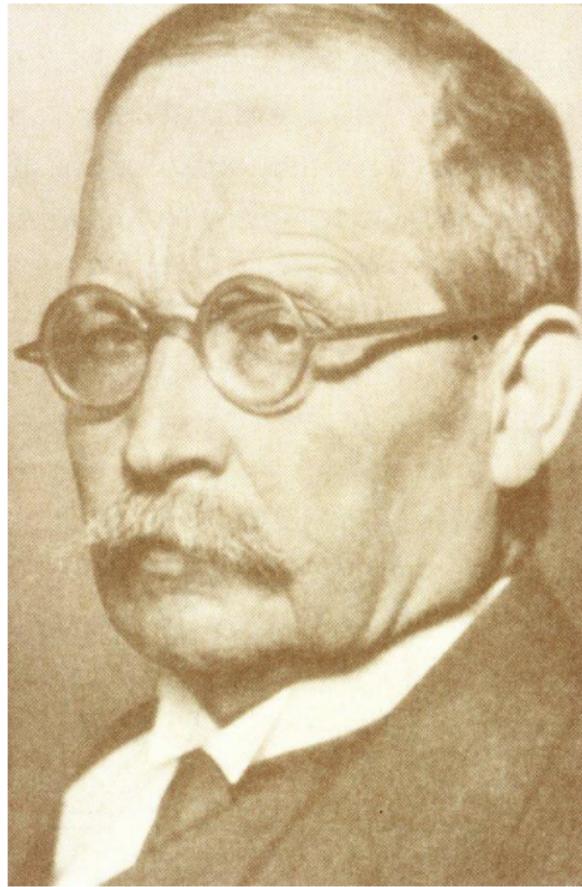
## Analýza systolické části

$$dV = i \cdot dt \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)} \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

$$i \cdot dt = \frac{dP}{f(P)} + \varphi(P) \cdot dt$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$



OTTO FRANK (1865 – 1944)

# Windkessel model

Systola

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

Diastola

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \left[ \left( \frac{dP}{dt} \right)_S - \left( \frac{dP}{dt} \right)_D \right]$$

$$SV \sim \int_{stroke} i \cdot dt$$

# Windkessel model

Systola

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

Diastola

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \left[ \left( \frac{dP}{dt} \right)_S - \left( \frac{dP}{dt} \right)_D \right]$$

$$SV \sim \int_{stroke} i \cdot dt$$

# Windkessel model

Systola

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

Diastola

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \left[ \left( \frac{dP}{dt} \right)_S - \left( \frac{dP}{dt} \right)_D \right]$$

$$SV \sim \int_{stroke} i \cdot dt$$

# Windkessel model

## Shrnutí

- dobře popisuje jen diastolickou část
- dikrotický zářez vůbec neřeší
- předpokládá pulz jako přechodný fenomén na systému, který je jinak v klidu
- i velké cévy mají rezistenci a i arterioly mají compliance → nelze zcela oddělit kompartmenty
- problém šíření pulzu na cévním systému

# Windkessel model

## Shrnutí

- dobře popisuje jen diastolickou část
- dikrotický zářez vůbec neřeší
- předpokládá pulz jako přechodný fenomén na systému, který je jinak v klidu
- i velké cévy mají rezistenci a i arterioly mají compliance → nelze zcela oddělit kompartmenty
- problém šíření pulzu na cévním systému

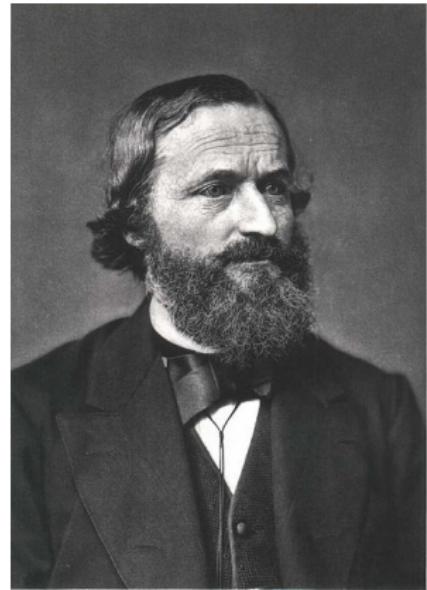
# Windkessel model

## Souvislost s RLC obvody

- formálně stejný popis, jako jednoduchý obvod s kondenzátorem a rezistorem

## Kirchhoffovy zákony (1847)

- 1 Součet proudů do uzlu vstupujících je roven součtu proudů vystupujících.
- 2 Součet úbytků napětí na rezistorech ve smyčce se rovná součtu napětí zdrojů.



G. R. KIRCHHOFF  
(1824 – 1887)

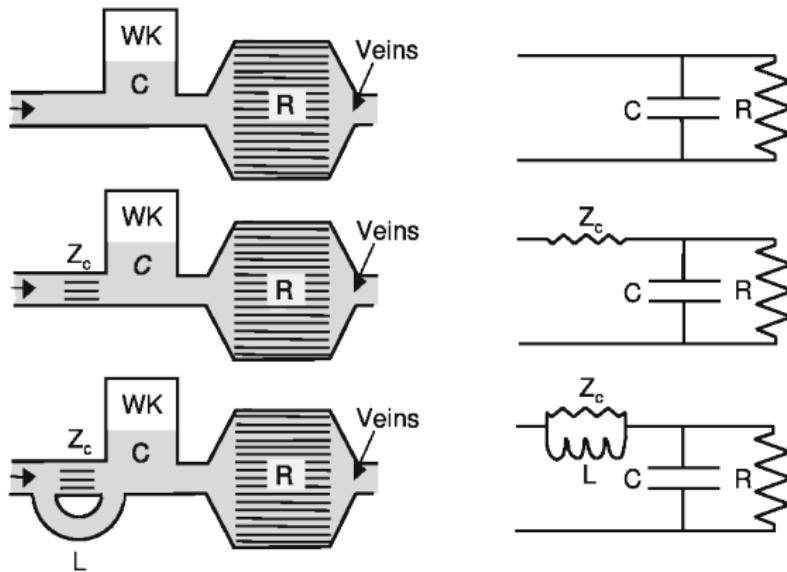
# Windkessel model

Souvislost s RLC obvody

$R$	odpor	<b>rezistence</b>	$I$	proud	<b>průtok krve</b>
$C$	kapacita	<b>poddajnost</b>	$U$	napětí	<b>tlak krve</b>
$L$	indukčnost	<b>setrvačnost</b>			

# Windkessel model

Souvislost s RLC obvody



<sup>3</sup>Westerhof et al. 2009.

# Závěr

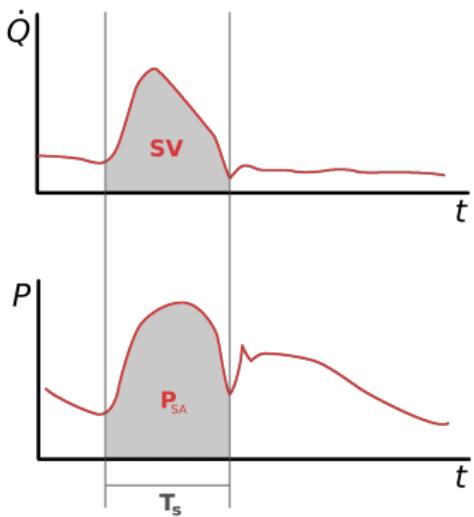
- Plocha pod křivkou a tepový objem
- Kalibrační konstanta

# Plocha pod křivkou a SV

$$SV = \int_{T_s} i \, dt$$

$$SV = K \cdot \int_{T_s} P \, dt$$

$$CO = TF \cdot SV$$



Kde vezmeme  $K$ ?

# Kalibrační konstanta

- $K$  integruje charakteristiky řečiště a proces šíření vlny po cévním systému
- tyto podmínky se v dané situaci a u daného pacienta příliš nemění
  - je *rozumně* konstantní
- populační charakteristiky
  - LiDCO rapid
- transpulmonální *Lithiová diluce*
  - LiDCO
- transpulmonální termodiluce
  - PiCCO

# Kalibrační konstanta

- $K$  integruje charakteristiky řečiště a proces šíření vlny po cévním systému
- tyto podmínky se v dané situaci a u daného pacienta příliš nemění
  - je *rozumně* konstantní
- populační charakteristiky
  - LiDCO rapid
- transpulmonální *Lithiová diluce*
  - LiDCO
- transpulmonální termodiluce
  - PiCCO

# K dalšímu čtení

-  Kouchoukos, N. T., L. C. Sheppard a D. A. McDonald (1970). "Estimation of stroke volume in the dog by a pulse contour method". In: *Circ. Res.* 26.5. [PubMed:4910134], s. 611–623.
-  Rhodes, A. a R. Sunderland (2005). "Arterial Pulse Power Analysis: The LiDCO plus System". In: M.R.Pinsky, D.Payen (Eds.) *Functional Hemodynamic Monitoring Update in Intensive Care and Emergency Medicine* 42. Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork, s. 183–192. ISBN: 3-540-22349-5. URL: <http://eknygos.lsmuni.lt/springer/167/183-192.pdf>.
-  Richard P. Feynman Robert B. Leighton, Matthew Sands (2000). *Feynmanovy přednášky z fyziky I, II*. Fragment. ISBN: 80-7200-405-0.
-  Sagawa, K., R. K. Lie, J. Schaefer a O. Frank (1990). "Translation of Otto Frank's paper "Die Grundform des Arteriellen Pulses" Zeitschrift für Biologie 37: 483-526 (1899)". In: *J. Mol. Cell. Cardiol.* 22.3. [PubMed:2192068], s. 253–254.
-  Wesseling, K. H., J. R. Jansen, J. J. Settels a J. J. Schreuder (1993). "Computation of aortic flow from pressure in humans using a nonlinear, three-element model". In: *J. Appl. Physiol.* 74.5. [DOI:10.1152/jappl.1993.74.5.2566] [PubMed:8335593], s. 2566–2573.
-  Westerhof, Nico, Jan-Willem Lankhaar a Berend E. Westerhof (2009). "The arterial Windkessel". In: *Medical & Biological Engineering & Computing* 47.2, s. 131–141. ISSN: 1741-0444. DOI: 10.1007/s11517-008-0359-2. URL: <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0359-2>.

# On-line

✉ dusan.merta@gmail.com

🐦 @dusanmerta

🏡 www.dusanmerta.eu



**www.dusanmerta.eu**