

# **Mechanika hornin**

## **Přednáška 6**

### **Reologické modely a popis diskontinuit**

prof. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.

# Reologie

Reologie je nauka o pohybu vazkých kapalin a přetváření hmot, jež nejsou dokonale pružné, ani zcela tvárné či vláčné, ale u kterých se vyskytují různé kombinace těchto vlastností.

Zkoumá zvláště **změny napětí a přetvoření v závislosti na čase a na rychlosti přetváření.**

Reologie se dělí na makroreologii, která zkoumá přetvárné vlastnosti hmoty z celkového pohledu a na mikroreologii, jež studuje přetvárné vlastnosti jednotlivých částí hmoty.

# Základní reologické prvky

- Tuhá látka (Euklidova hmota)
- Tekutá kapalina (Pascalova kapalina)
- Pružná látka (Hookova hmota)
- Vazká kapalina (Newtonova kapalina)
- Tvárná látka (St. Venantova látka)
- Vláčná látka

## **Tuhá látka (Euklidova hmota)**

Tuhá látka (označovaná TU) se nepřetváří ani při namáháním libovolně velkými silami, její modul přetvárnosti je nekonečně velký, zůstává stále dokonale tuhá, používá se hlavně při popisu ohybu hmotných těles.

## **Tekutá kapalina (Pascalova kapalina)**

Tekutá kapalina (označována TE) neklade žádný odpor pohybu při jakýchkoli rychlostech a nevznikají v ní žádná napětí a její vazkost je nulová. Používá se při popisu proudění a v úlohách hydrodynamiky.

# Pružná látka (Hookova hmota)

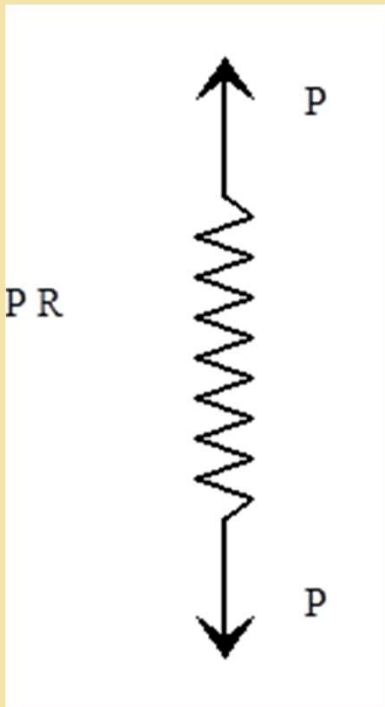
Pružná látka (označována PR) má při přetváření napětí vždy přímočavě úměrné přetvoření a chová se tedy podle Hookova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon ; \quad \tau = G \cdot \gamma$$

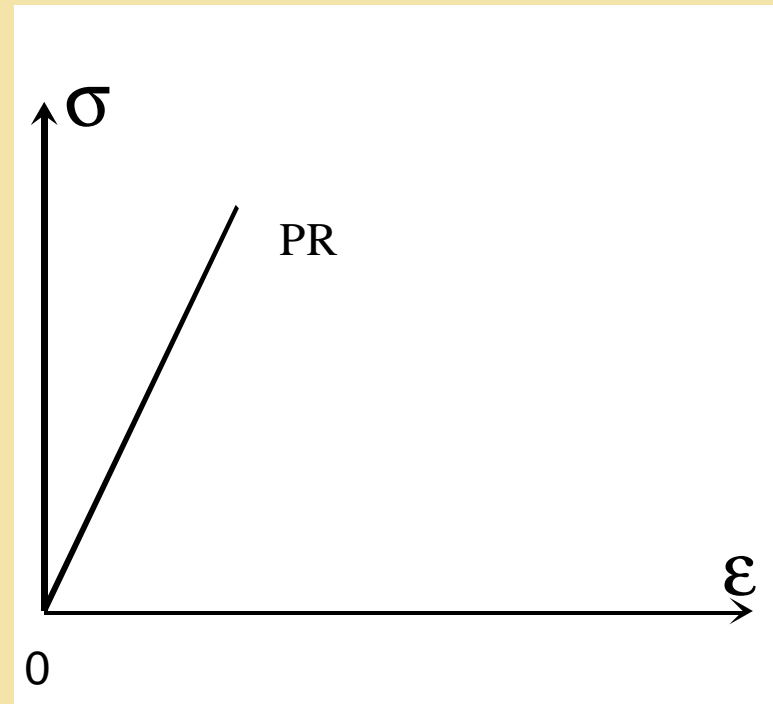
kde  $\sigma$  normálové napětí,  
 $E$  modul pružnosti v tahu,  
 $\varepsilon$  přetvoření,  
 $\tau$  tangenciální napětí,  
 $G$  modul pružnosti ve smyku,  
 $\gamma$  poměrné zkosení

Pružná hmota se po odlehčení vrací do svého původního stavu a její přetváření je nezávislé na předchozím namáhání.

# Pružná látka (Hookova hmota)



Reologický model  
pružné látky



Pracovní diagram  
pružné látky

# Vazká kapalina (Newtonova kapalina)

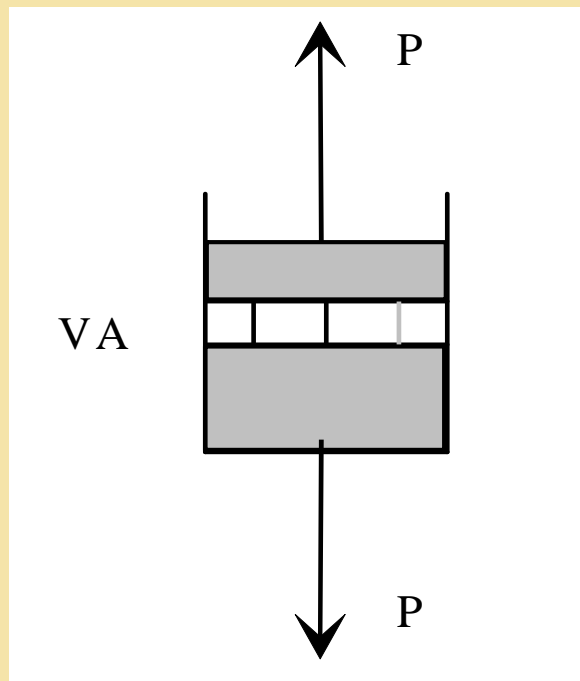
Tato kapalina (označována VA) má mezi napětím a rychlostí pohybu přímou úměrnost podle rovnice:

$$\sigma = \lambda \frac{d\varepsilon}{dt} \quad ; \quad \tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

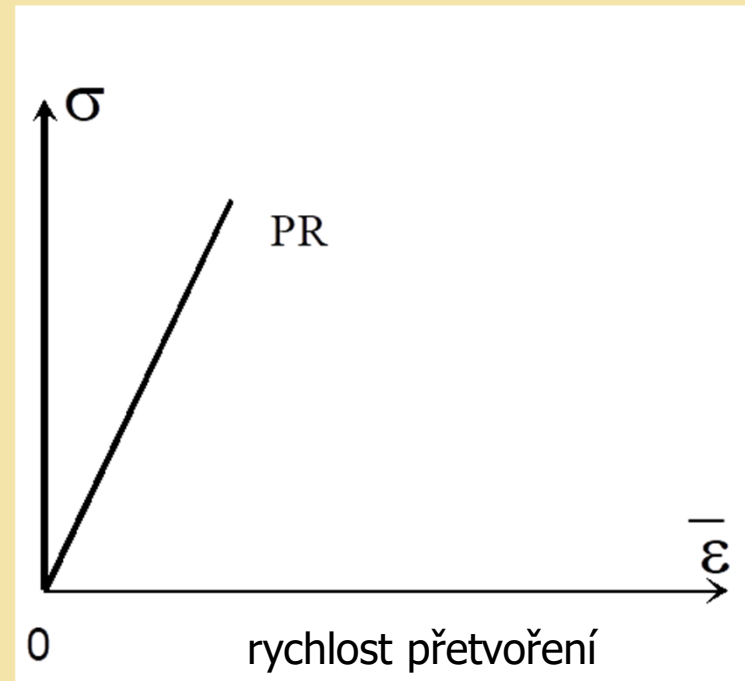
$\sigma$	normálové napětí,
$\lambda$	součinitel normální vazkosti,
$\varepsilon$	přetvoření,
$\tau$	tangenciální napětí,
$\eta$	součinitel tangenciální vazkosti,
$\gamma$	poměrné zkosení,
$t$	čas

# Vazká kapalina (Newtonova kapalina)

Reologickým modelem je hydraulický válec - píst s otvory, který se pohybuje ve válci s tekutinou se stálou vazkostí.



Reologický model  
vazké kapaliny



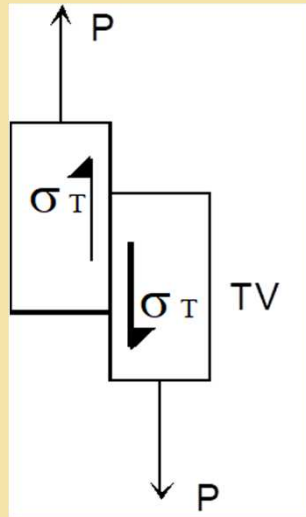
Pracovní diagram  
vazké kapaliny



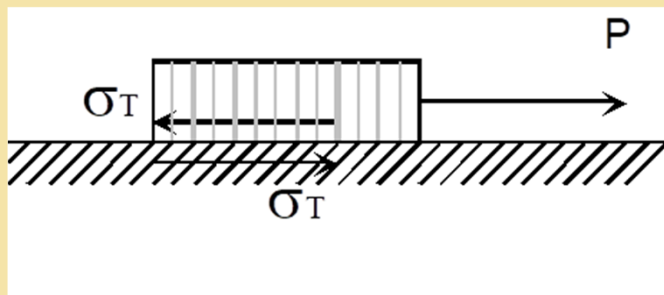
# Tvárná látka (St. Venantova látka)

- Tvárná látka (označována TV) se někdy nazývá plastickou.
- Je abstrakcí, ve skutečnosti nikdy neexistuje samostatně, ale jen ve spojení s jinými látkami (nejčastěji pružnou látkou PR).
- Tvárná látka se do meze plasticity chová jako látka tuhá (TU) a po překročení této meze jako látka tekutá (TE).
- Tření v klidu je větší než za pohybu (pokles napětí při uvedení do pohybu, pak je napětí již konstantní).

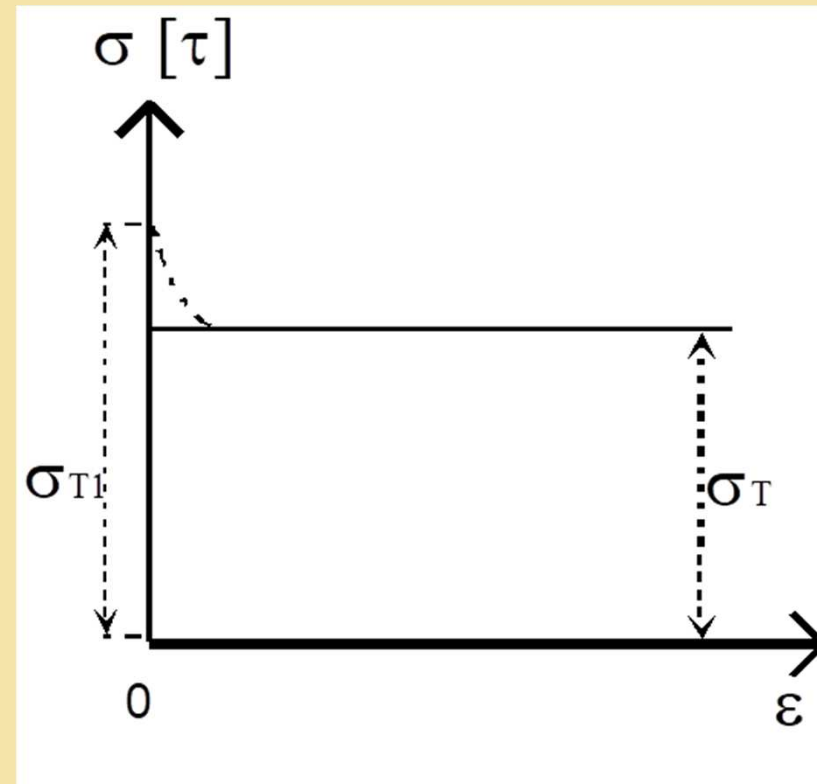
# Tvárná látka (St. Venantova látka)



1. model - dvě destičky s podélným třením



2. model - těleso ležící na podložce s třením



Pracovní diagram tvárné látky

# Vláčná látka

Když vláčná látka (označována VL) dosáhne meze vláčnosti, má závislost mezi napětím a rychlostí přetváření stejnou jako vazká kapalina (VA):

$$\sigma = \sigma_{vl} + \lambda \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\tau = \tau_{vl} + \eta \frac{d\tau}{dt}$$

$\sigma$	normálové napětí,
$\sigma_{vl}$	mezní normálové napětí tvárného prvku,
$\lambda$	součinitel normální vazkosti,
$\varepsilon$	přetvoření,
$\tau$	tangenciální napětí,
$\tau_{vl}$	mezní tangenciální napětí tvárného prvku,
$\eta$	součinitel tangenciální vazkosti,
$\gamma$	poměrné zkosení,
$t$	čas

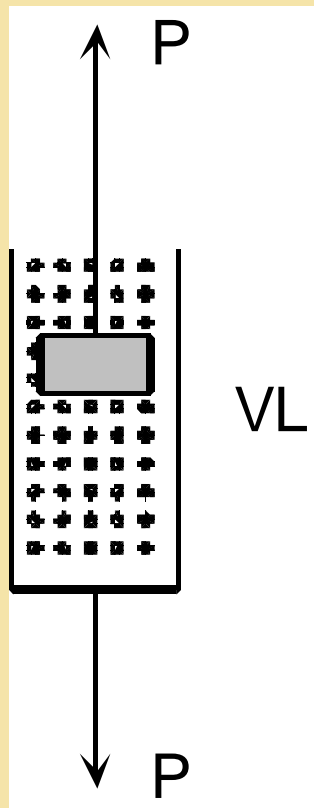
Vláčná látka má vystihnout projevy vláčnosti jako jsou dotváření (plouživost) a relaxace (ochabování). Reologické vlastnosti vláčné látky vyjadřuje vztah paralelního spojení tvárného a vazkého prvku :

$$VL = TV|VA$$

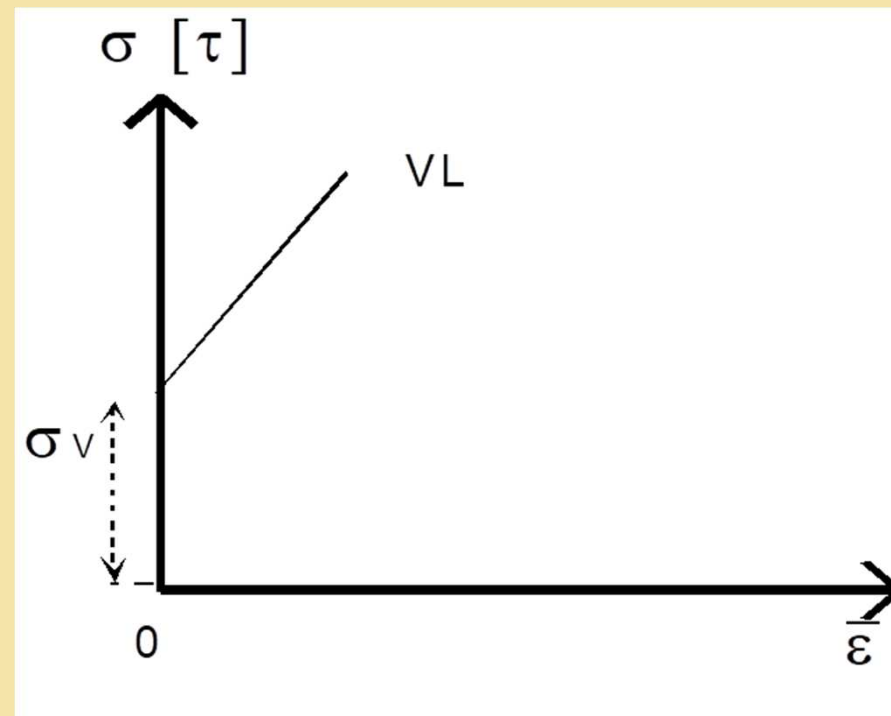
VL	vláčná látka,
TV	tvárná látka,
VA	vazká látka.

# Vláčná látka

Reologickým modelem vláčné hmoty je válec s pístem naplněným sypkou hmotou. Vláčná hmota se od vazké kapaliny liší tím, že je schopna při nulové rychlosti mít určité napětí (nejde o hydrostatický tlak).



Model



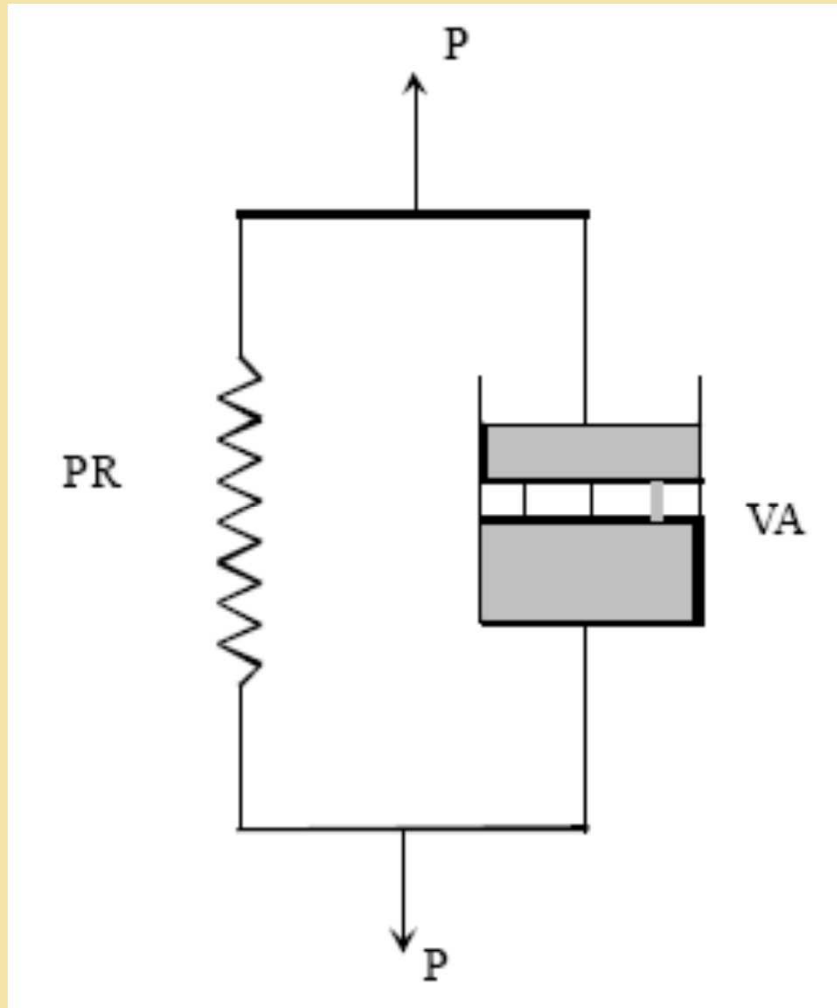
Pracovní diagram

# Složené reologické modely

- Kelvinův pružnovazký model (PR | VA)
- Maxwellův vazkopružný model (VA-PR)
- Pružnotvárná hmota bez zpevnění (PR-TV)
- Zobecněný Kelvinův model PR-(PR | VA)
- Pružnotvárná hmota s přímkovým zpevněním
- Burgersův model
- Binghamův model PR-TV-VA
- Thomsonův model

Ve značení složených reologických modelů značí svislá čára (|) paralelní zapojení a pomlčka (-) sériové zapojení základních reologických modelů.

## Kelvinův pružnovazkový model (PR | VA)



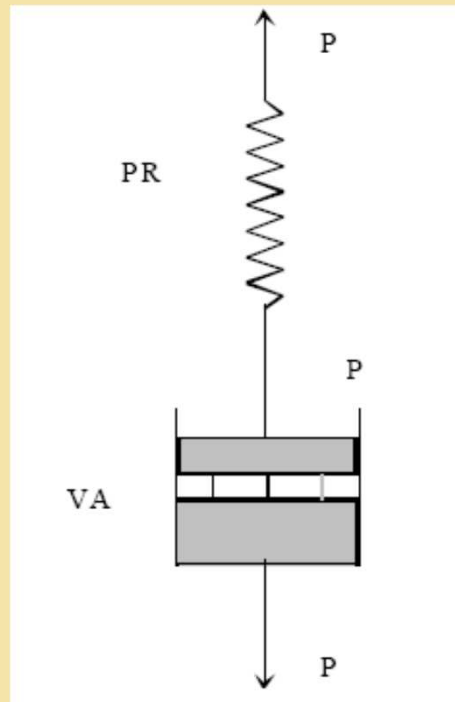
Kelvinův model znázorňuje pružnovazkou látku pomocí modelu, který vzniká spojením pružného a vazkého prvku vedle sebe. Tento model aproximuje základní projevy vláčnosti.

$$\sigma_s = \sigma_{pr} + \sigma_{va} = E\varepsilon + \lambda \frac{d\varepsilon}{dt}$$

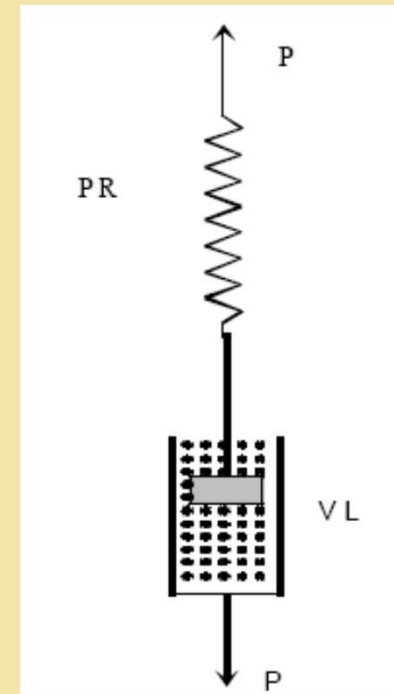
# Maxwellův vazkopružný model (VA-PR)

Popisuje vazkopružnou látku pomocí modelu, který je sestaven ze sériového spojení vazkého a pružného prvku (v oboru pevných hmot se místo Maxwellova modelu používá analogická pružnovláčná látka). V každém základním prvku je stejné napětí a různé přetvoření. Významnými vlastnostmi vazkopružné látky je plouživost (dotváření, creep) a nelineární relaxace (ochabnutí)

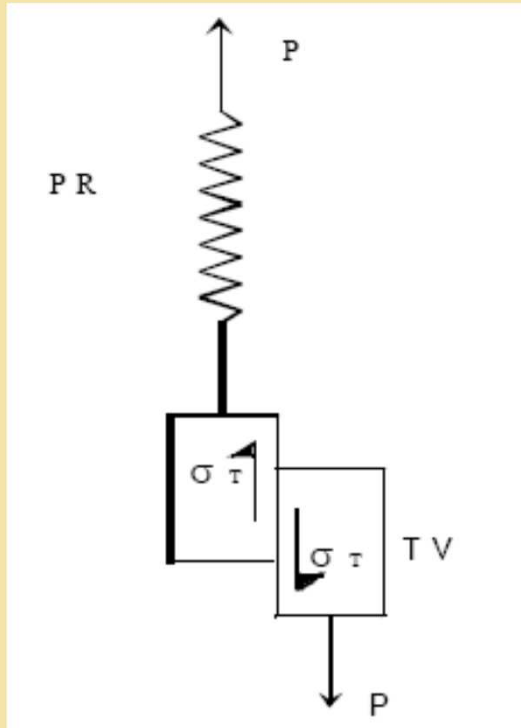
Maxwellův  
model



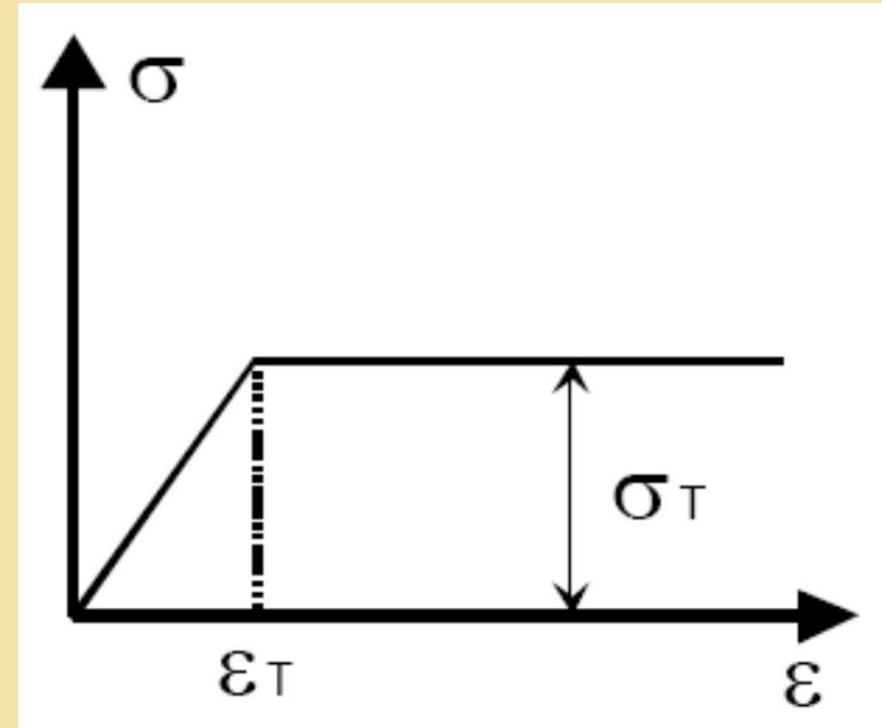
Pružnovláčná  
látka



# Pružnotvárná hmota bez zpevnění (PR-TV)



Model



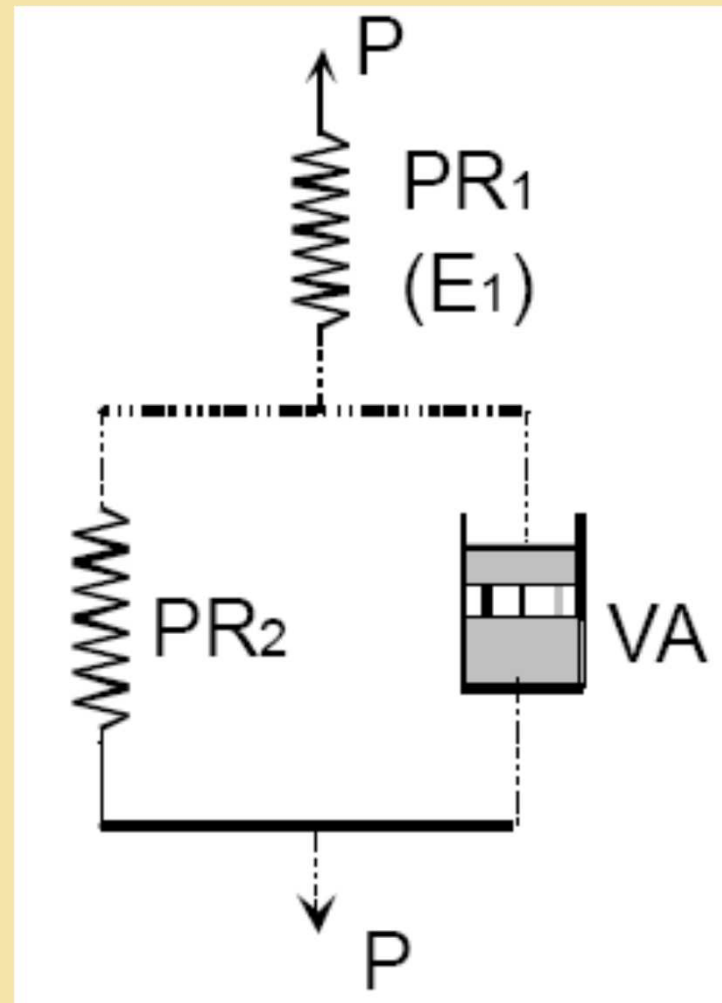
Pracovní diagram

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[ \sigma_T + E \left( \varepsilon - \left| \varepsilon_T - \varepsilon \right| \right) \right]$$

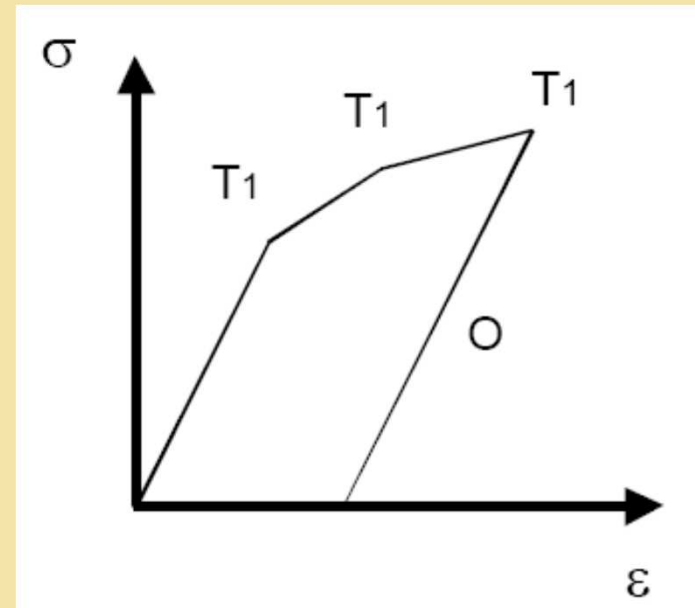
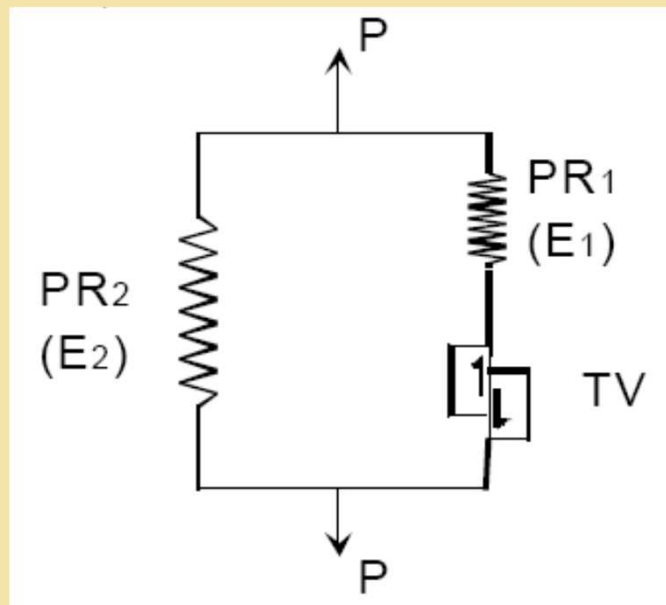
$\sigma_T$  napětí na mezi tvárnosti  
 $\varepsilon_T$  deformace na mezi tvárnosti



# Zobecněný Kelvinův model PR-(PR | VA)

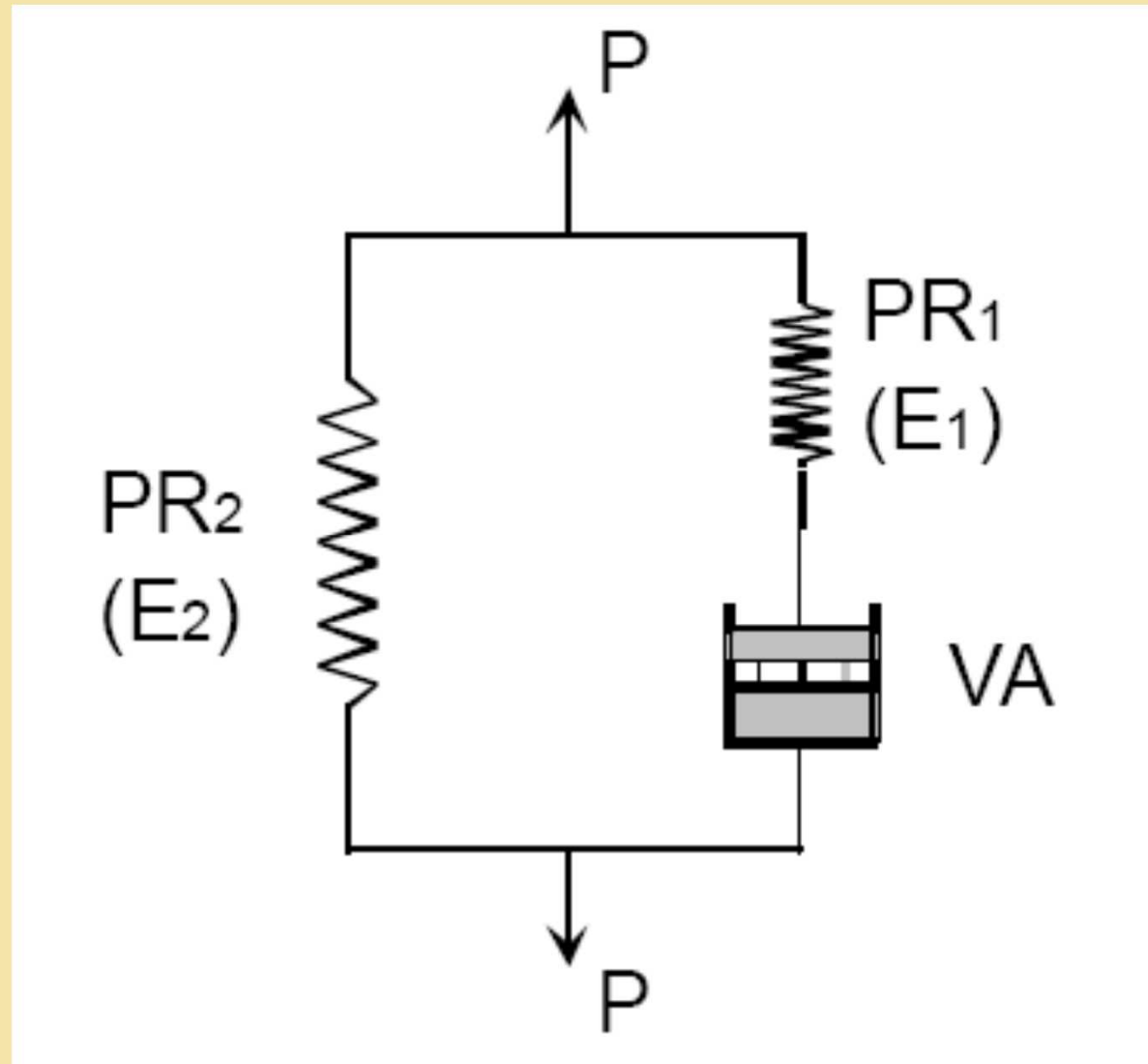


# Pružnotvárná hmota s přímkovým zpevněním

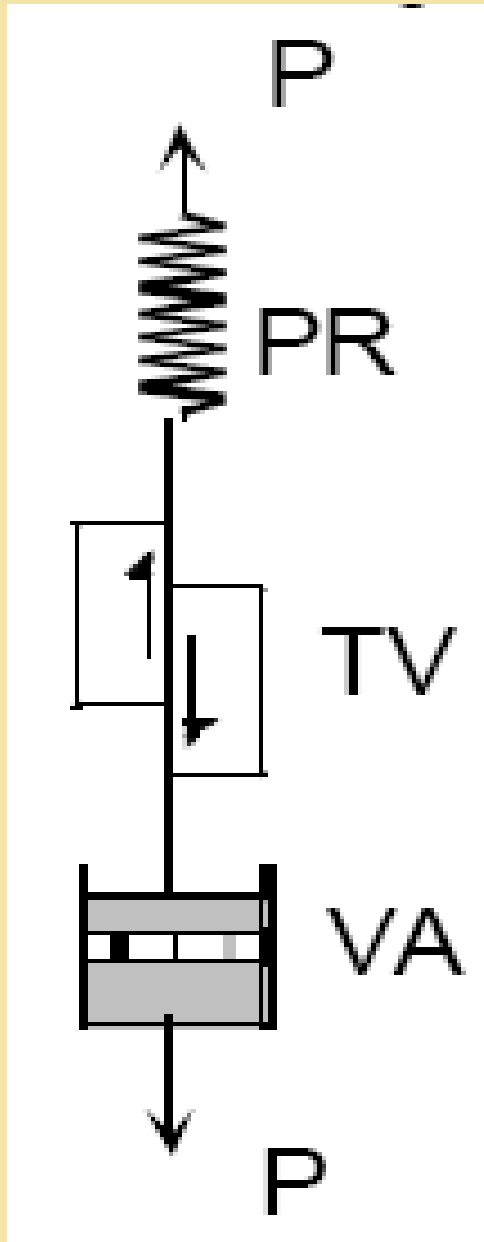


Vzniká zapojením více pružnětvárných modelů, další prvky mají menší hodnoty pružnosti (vyobrazen model s jedním pružnětvárným modelem). Napětí v tvárných prvcích  $TV$  dosahuje postupně meze plasticity, což je důsledkem toho, že závislost mezi napětím a přetvořením se za mezí nejslabšího prvku  $T_1$  plynule ohýbá.

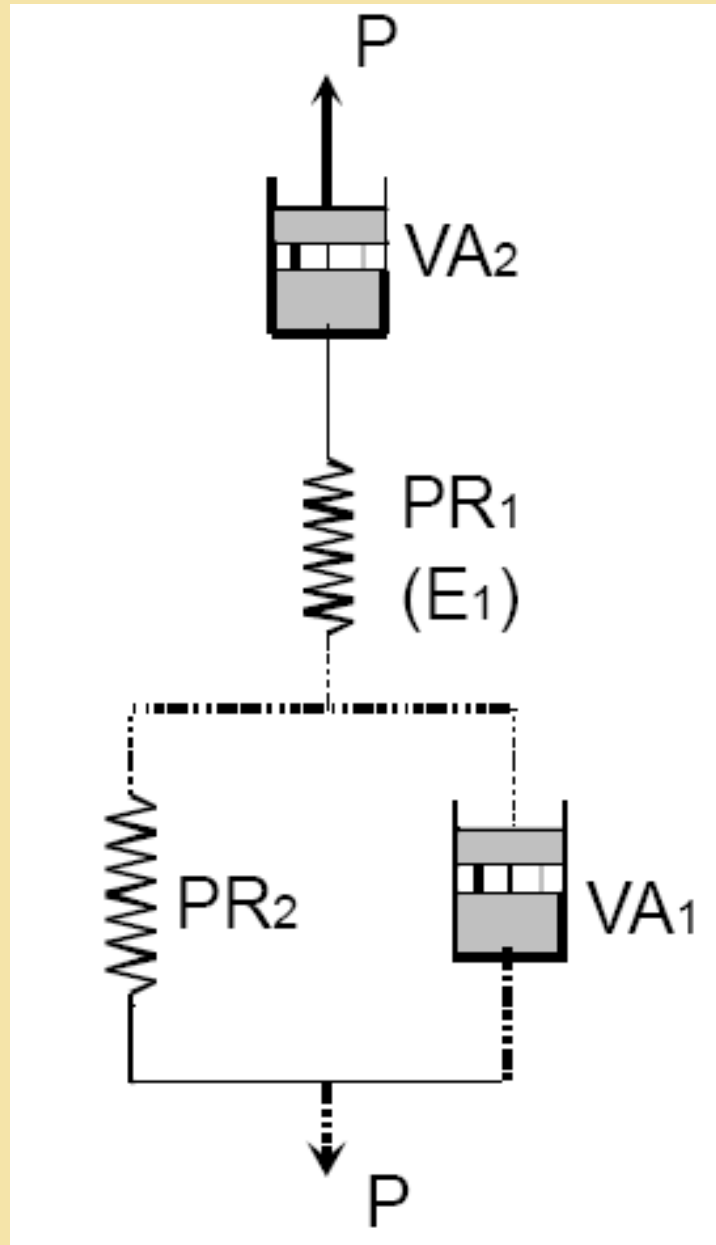
# Thomsonův model



## Binghamův model PR-TV-VA



Pokud je přetváření Binghamova modelu tak velké, že se zapojí všechny reologické prvky, dojde k plouživosti modelu.



## Burgersův model

# Diskontinuity

Diskontinuitou (plochou nespojitosti) rozumíme jakékoli rozdělení (nespojitosť) horninového masivu bez ohledu na způsob vzniku.

## **Patří sem:**

vrstevné plochy, honové plochy, pukliny, praskliny, zlomy, trhliny, břidličnatost zlomy, poruchy, atd.

# Původ diskontinuit

## a) Tektonického původu:

- zlomové plochy a různé systémy puklin vzniklé při horotvorných procesech

## b) Netektonického původu:

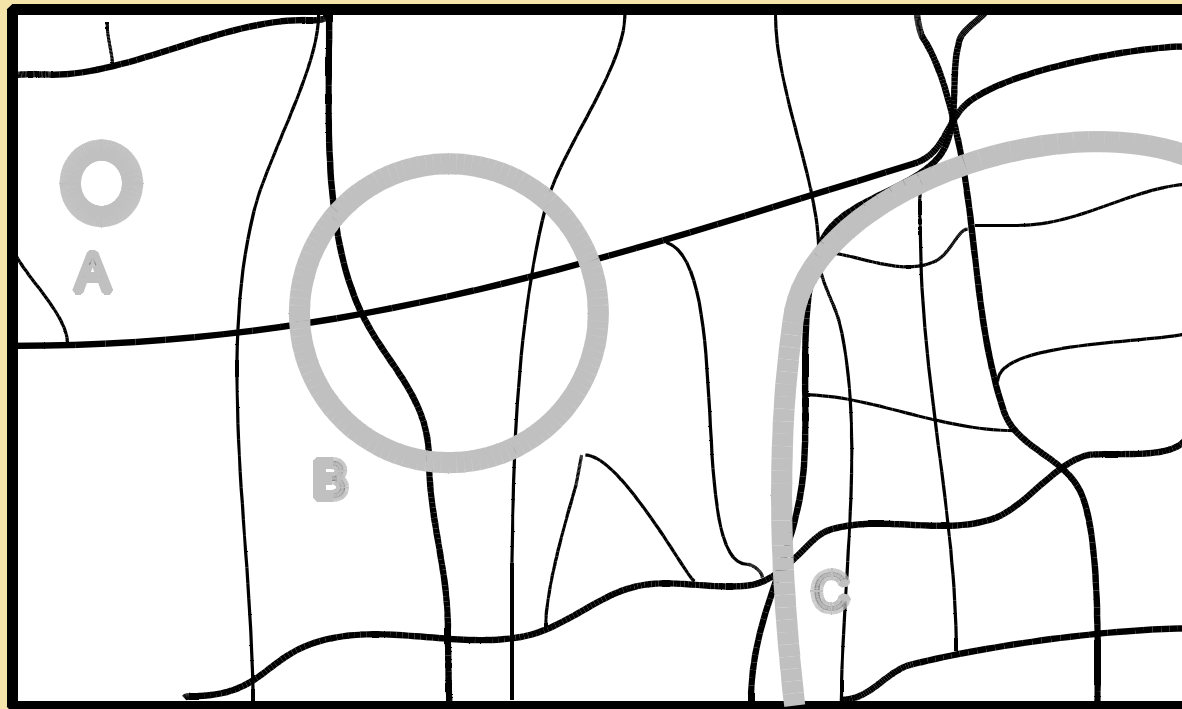
- plochy nespojitosti vzniklé ochlazováním popř. smršťováním magmatu (honové plochy v žule, plochy omezující čedičové sloupce apod.)
- systémy puklin zhruba rovnoběžných s povrchem terénu, vzniklé uvolňováním napětí po odlehčení tíhy nadloží
- systémy puklin a smykových ploch provázejících gravitační pohyby na svazích i vertikální poklesy v důsledku nerovnoměrné kontrakce podložních hornin
- vrstevní plochy a systémy puklin provázející procesy diagenetického zpevnění sedimentů.

## Dělení diskontinuit

- **I. řádu** - svislé zlomy oddělující kontinentální kry a diskontinuity oddělující jednotlivé vrstvy zeměkoule, většinou neovlivňují stabilitu podzemních děl.
- **II. řádu** - vzdálenost těchto ploch nespojitosti je řádově v kilometrech, výrazněji neovlivňují stabilitu podzemních děl.
- **III. řádu** - zasahují do podzemního díla a výrazně ovlivňují jeho stabilitu.
- **IV. řádu** - podružné systémy ploch nespojitosti, které nemají většinou velký vliv na stabilitu podzemních děl.



# Vztah diskontinuit k velikosti podzemního díla



**A vrt    B štola    C tunel**

Větší velikost podzemního díla znamená větší počet diskontinuit ovlivňujících stabilitu díla

# Zaměření diskontinuit

Geologický kompas

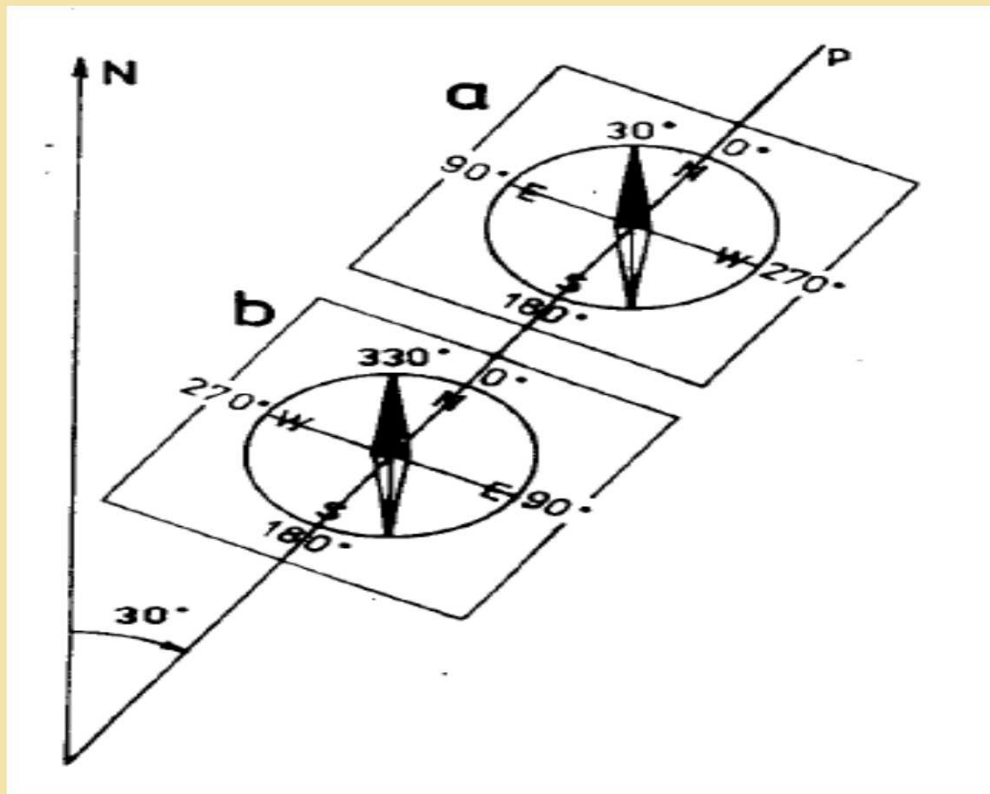


Elektronický geologický kompas



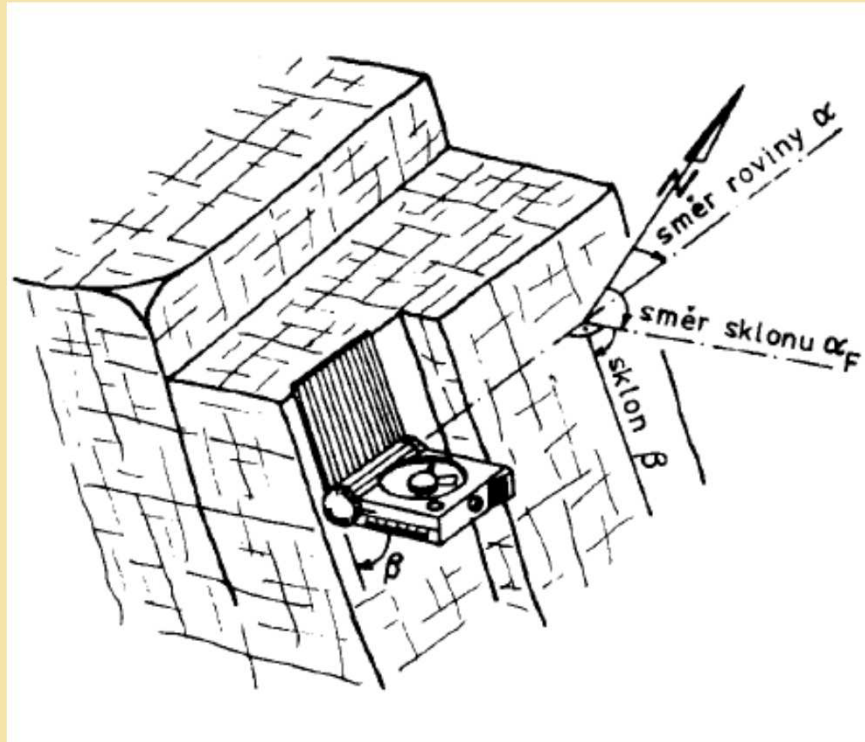
# Geologický kompas

Geologický kompas - dělení azimutální stupnice provedeno proti směru hodinových ručiček (oproti běžným kompasům je přehozen východ a západ).



- a) geologický kompas
- b) normální kompas

# Měření geologickým kompasem



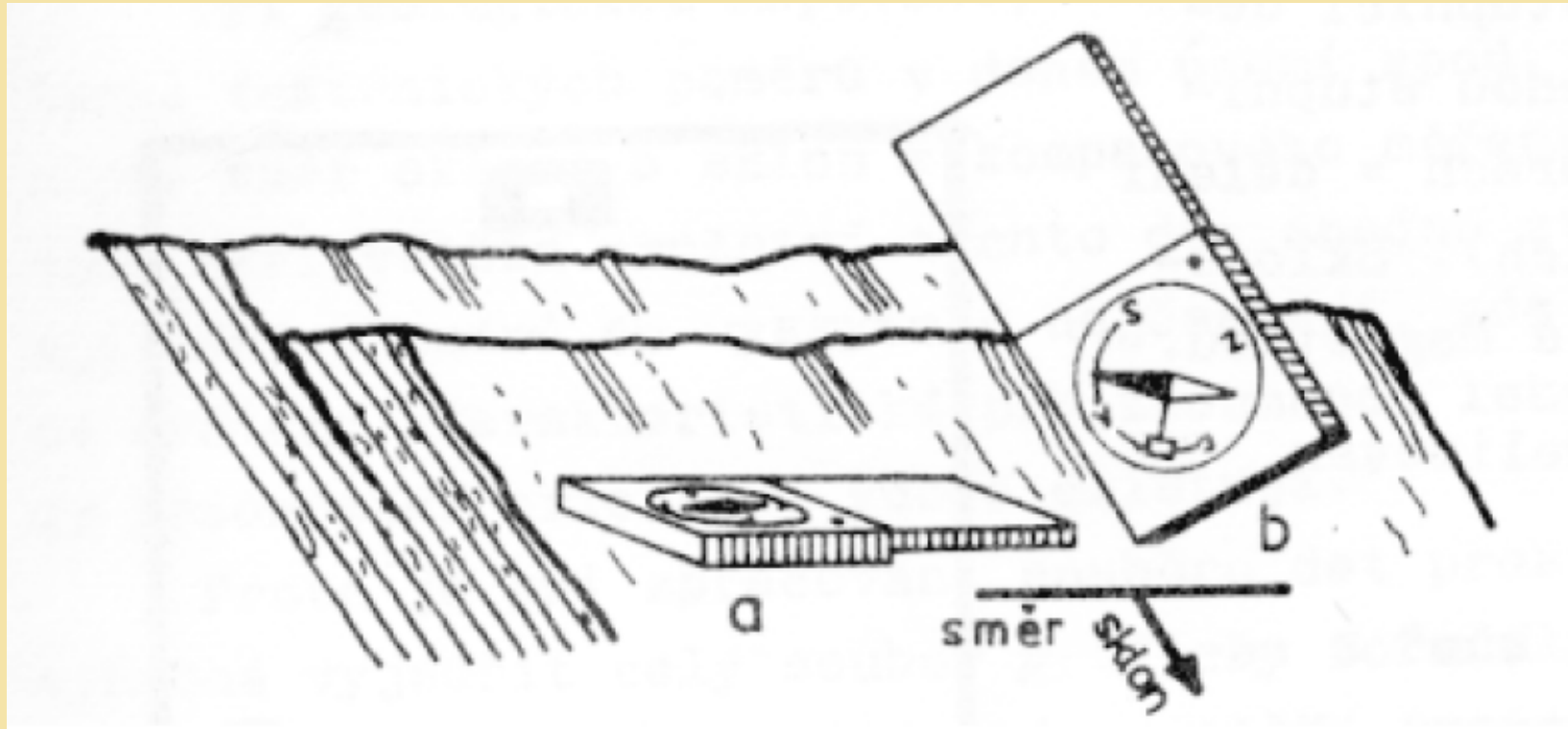
- $\alpha$  směr roviny
- $\alpha_F$  směr sklonu
- $\beta$  sklon roviny

**Směr roviny** je úhel, který svírá průsečnice s vodorovnou (hlavní přímkou roviny) se směrem magnetického severu (0 – 360°).

**Směr sklonu roviny** svírá ve směru klesání orientovaný půdorysný průmět spádové přímky dané roviny se směrem magnetického severu (0 – 360°).

**Sklon roviny** svírá spádová přímka dané roviny s rovinou horizontální (0 – 90°).

# Měření geologickým kompasem

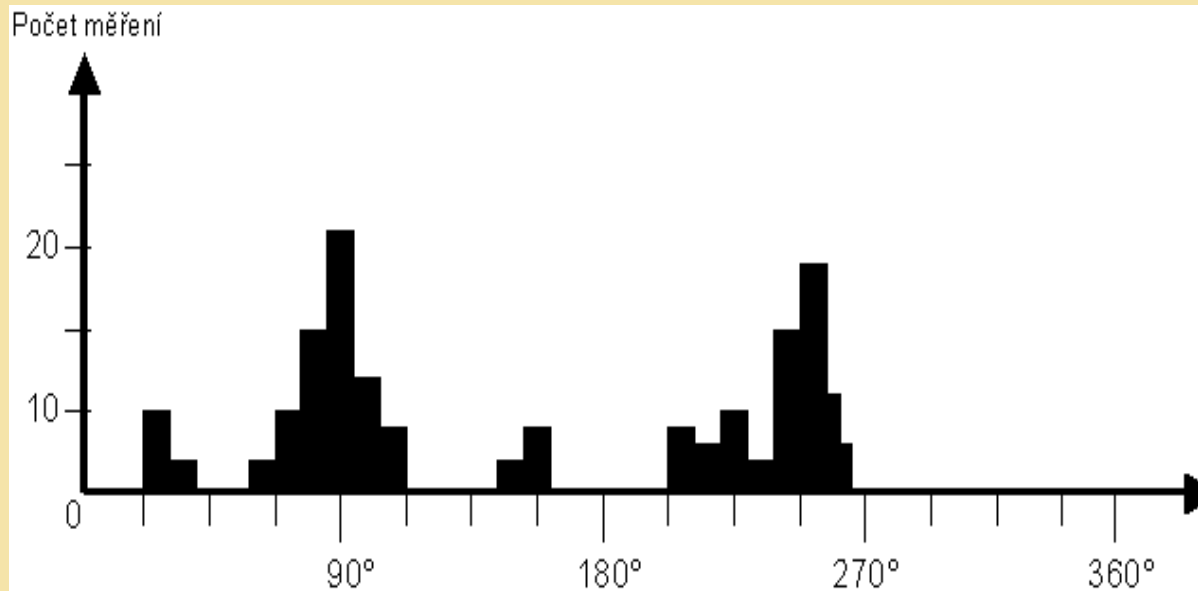


- a) směru roviny
- b) sklonu roviny

# Diagramy pro vyjádření diskontinuit (tektonogramy)

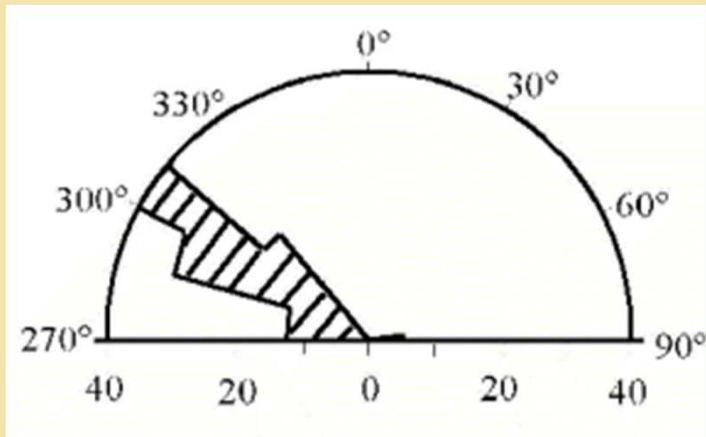
- Sloupcový
- Růžicový
- Průsečnicový
- Bodový
- Konturový

# Sloupcové diagramy

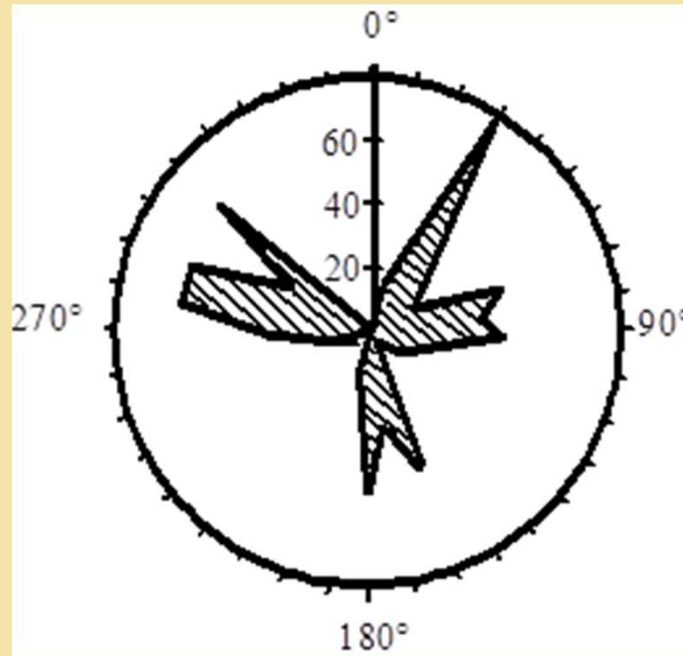


Sloupcové diagramy se zpracovávají v pravoúhlé souřadnicové síti, kdy se hodnoty znaku (směr sklonu roviny, směr roviny atd.) vynášejí intervalově na vodorovnou osu a četnosti znaků na osu svislou. Tento způsob zobrazení je pro svoji jednoduchost velice používán, jeho nevýhodou je však to, že zobrazuje jen jeden znak.

# Růžicové diagramy



Úhlový histogram



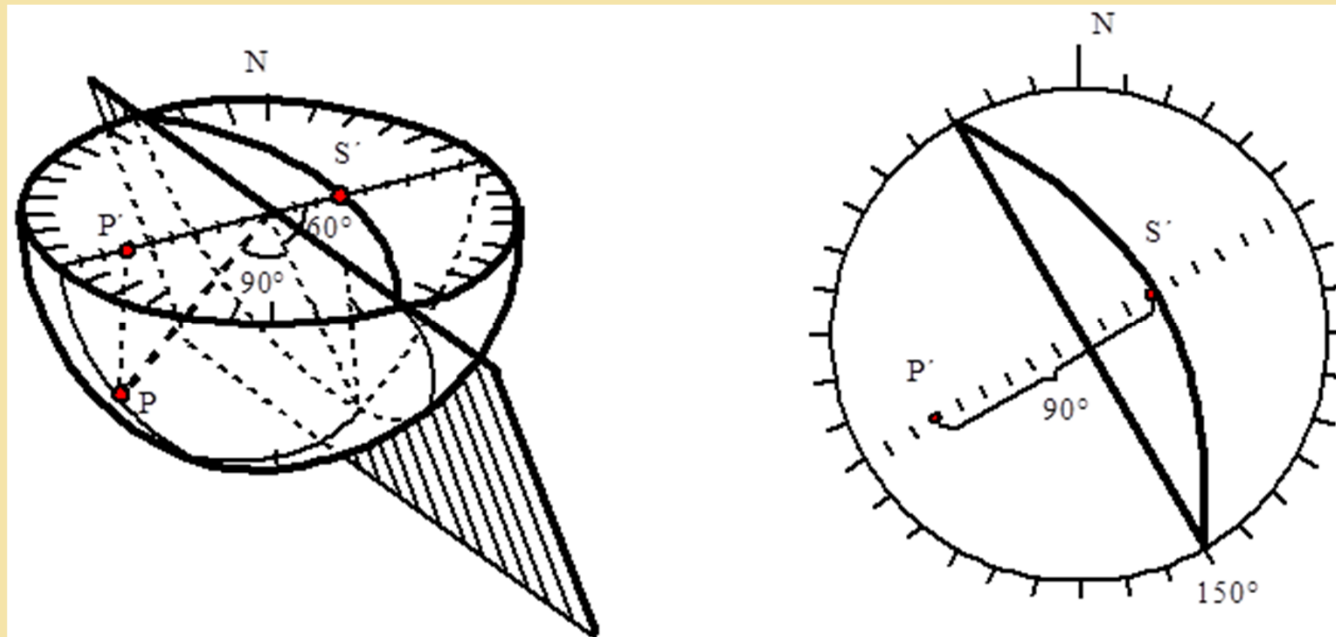
Úhlový polygon

Růžicové diagramy zobrazují statistické vyhodnocení směrového rozložení četnosti výskytu geologického prvku v polárních souřadnicích. Růžicové diagramy se zpracovávají buď ve formě úhlových histogramů či ve formě úhlových polygonů.

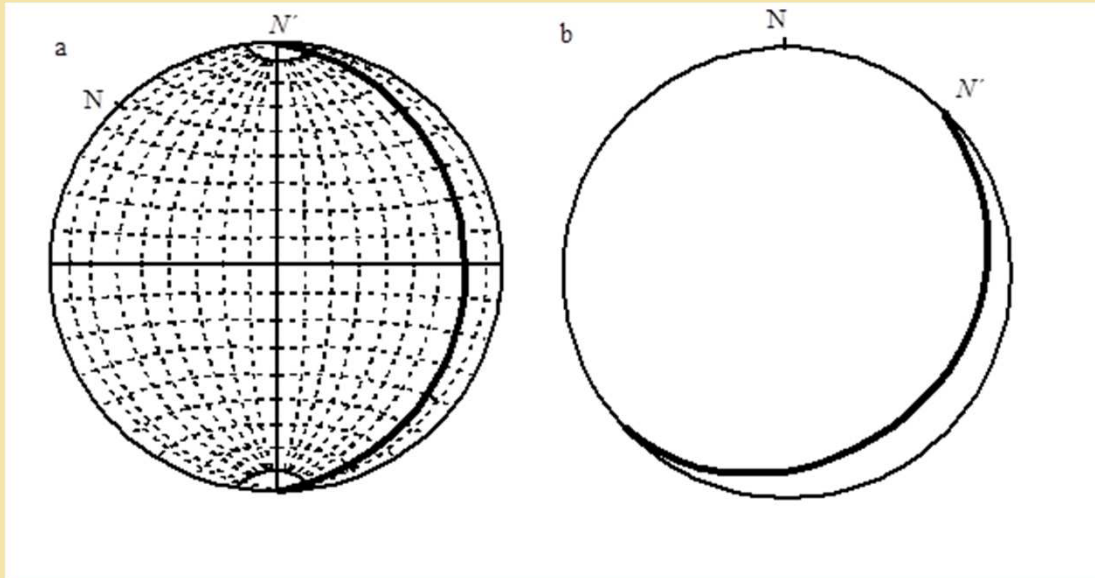


# Lambertova projekce

Vektor se zobrazí jako bod  
Plocha se zobrazí pomocí kružnice

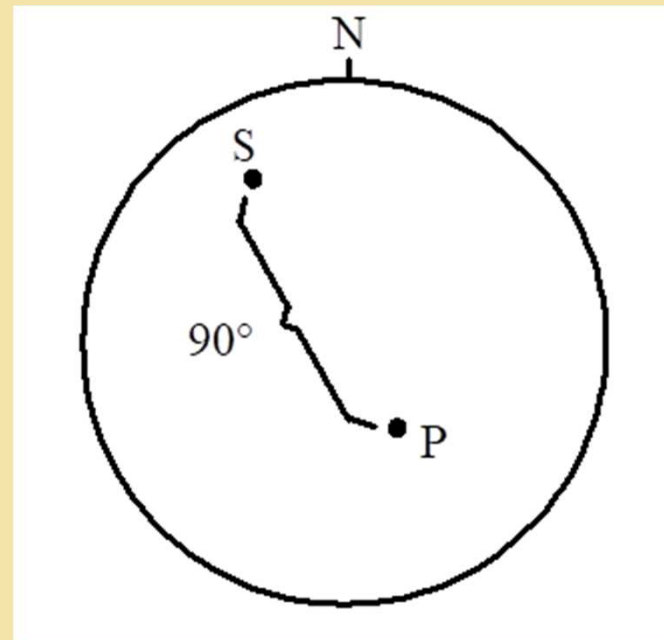


Rovinné plochy určené směrem a sklonem se zobrazují pomocí poledníkových oblouků sítě. Velký oblouk představuje průsečnici roviny s povrchem spodní polokoule

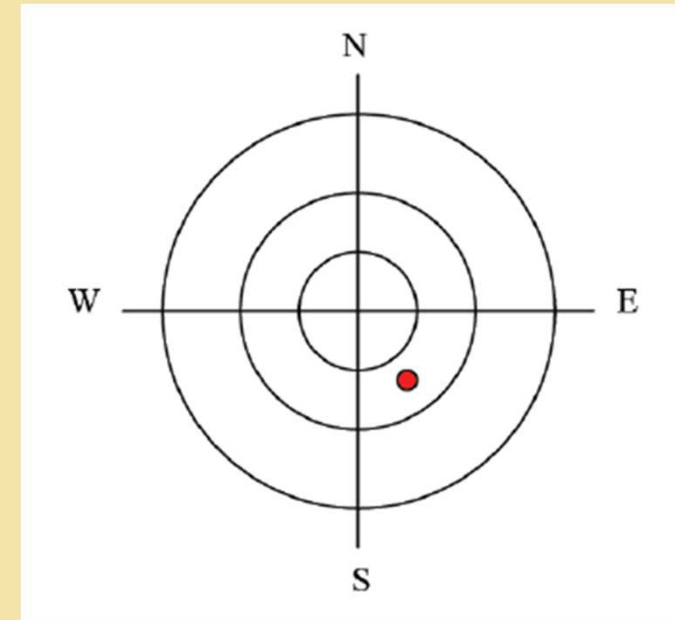
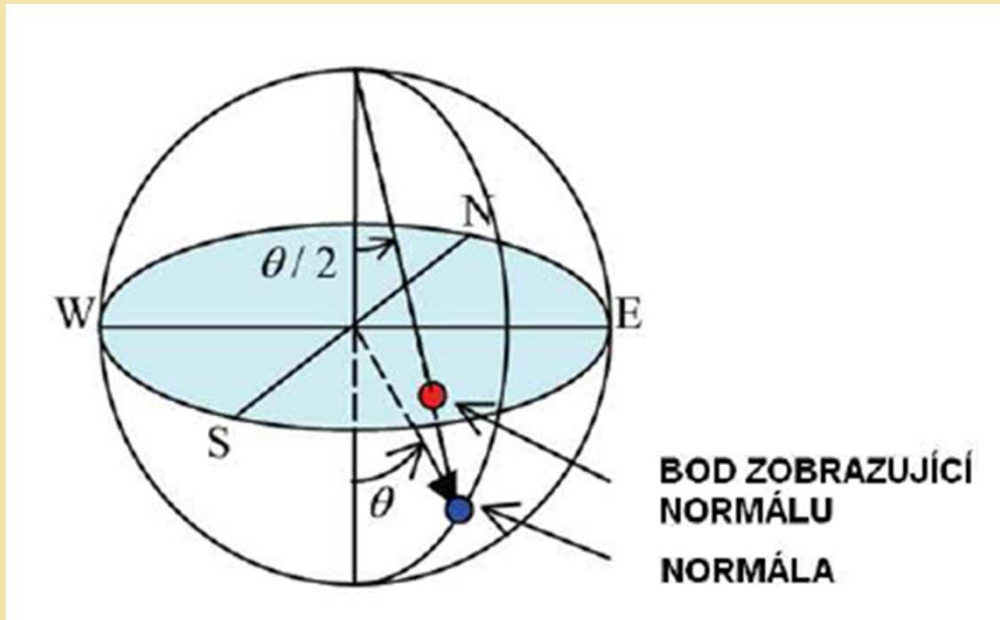


## Průsečnicové diagramy

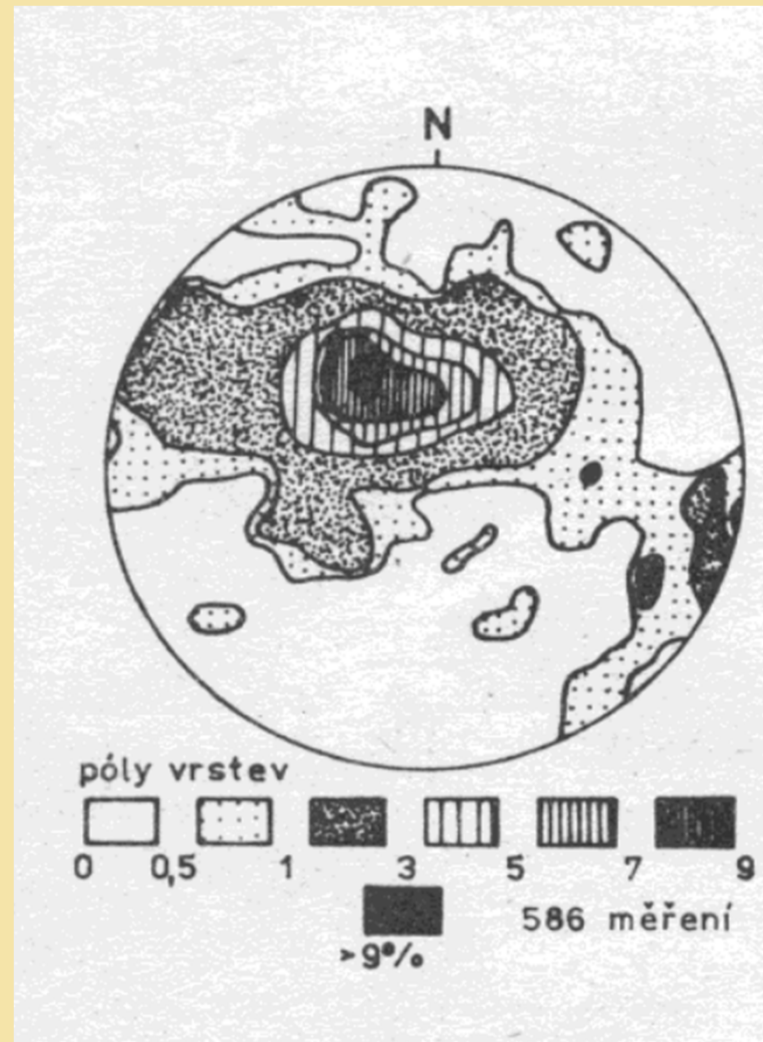
## Bodové diagramy



# Zobrazení pomocí bodu



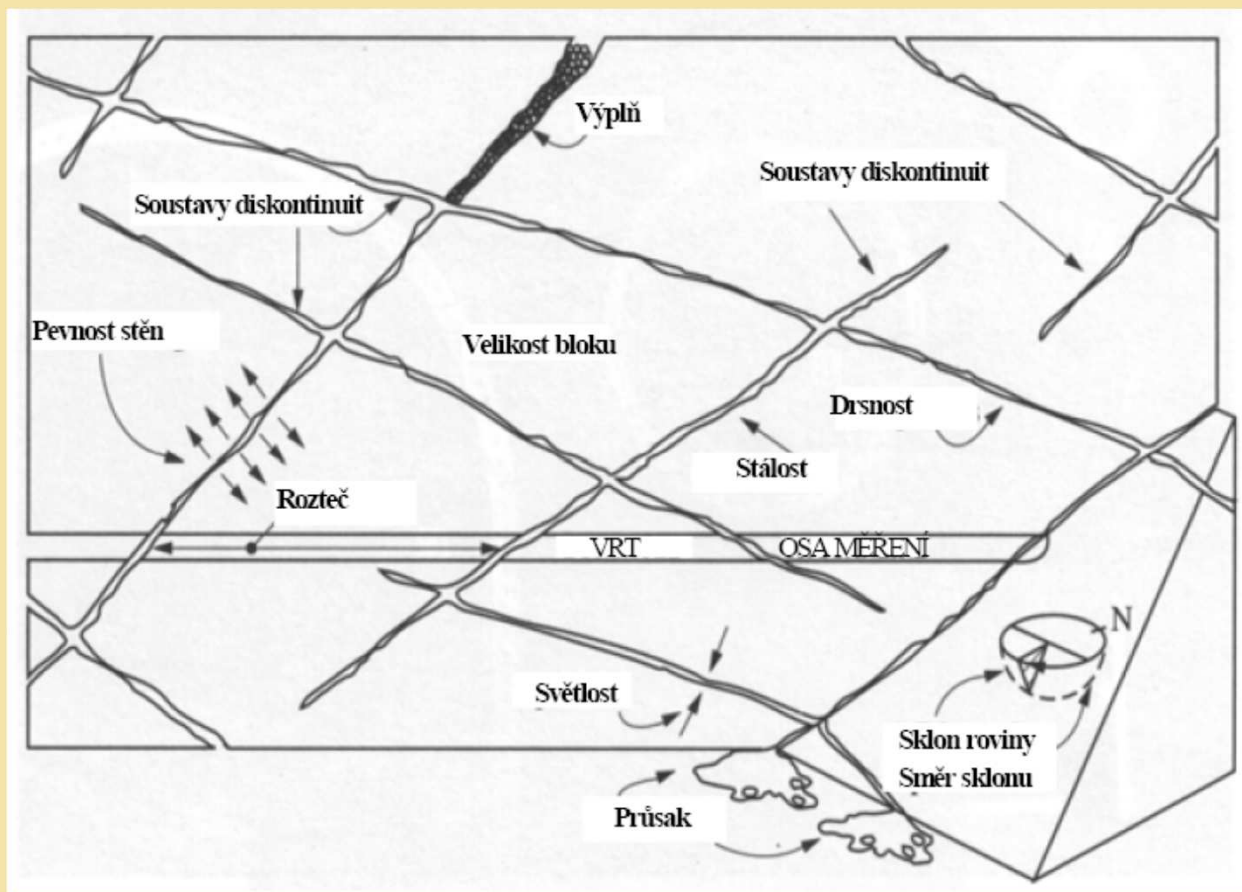
# Konturové diagramy



# Vlastnosti diskontinuit

- Rozteč ploch nespojitosti
- Hustota ploch nespojitosti
- Četnost
- Drsnost
- Volumetrický počet spar
- Velikost horninových bloků
- Průsak
- Světlost
- Stálost
- Výplň ploch nespojitosti
- Pevnost ploch

# Rozteč ploch nespojitosti



Je dána vzdáleností průniku plochy nespojitosti  
s osou měření

# Hustota ploch nespojitosti

$$\bar{x} = \frac{L}{N}$$

- $\bar{x}$  hustota ploch nespojitosti
- L uvažovaná délka v ose měření (vrtu)
- N počet průniků ploch nespojitosti

# Četnost ploch nespojitosti

$$\lambda = \frac{N}{L}$$

$\lambda$  četnost ploch nespojitosti

$L$  uvažovaná délka v ose měření (vrtu)

$N$  počet průniků ploch nespojitosti



# Vlastnosti diskontinuit

- **Drsnost** - povrch plochy diskontinuity nemusí být pokaždé hladký. Drsnost plochy se u diskontinuit určuje buď matematicky či pomocí diagramů.
- **Volumetrický počet spar** je veličina značená  $J_v$  a udává počet spar nacházejících se v  $m^3$  horniny.
- **Velikost horninových bloků a smyková pevnost na rozhraní bloků** určují hlavní mechanické vlastnosti horninového masivu. Z hlediska inženýrského (ražby a vystrojení podzemního díla) je nutné určit rozšíření bloků v masivu (obdoba určení zrnitosti zemin) a průměrnou velikost horninového bloku.
- **Průsak** - druh proudění podzemní vody puklinami horninovém masivu.

# Vlastnosti diskontinuit

- **Světlost** je kolmá vzdálenost přilehlých stěn diskontinuity. V případě rovnoběžných a rovinných povrchů se jedná o konstantní hodnotu. Pro nerovnoběžné, ale rovinné povrchy se bude světlost měnit lineárně a pro nerovné plochy bude zcela proměnou hodnotou.
- **Stálost** plochy nespojitosti udává její průběžnost (kontinuitu, nepřetržitost) v horninovém masivu. Vzhledem k tomu, že odkryté pukliny často zapadají do horninového masivu, je velice obtížné určit jejich další průběh (tj. jejich stálost)
- **Výplň ploch nespojitosti** - pukliny mohou být částečně či zcela vyplněny materiálem, jenž ovlivňuje nejen pevnost horninového masivu, ale i jeho propustnost.

# Popis diskontinuitního horninového masivu

Jelikož nelze vzhledem ke složitosti a množství různých parametrů provést komplexní popis diskontinuitního masivu, používá se popis podle význačné vlastnosti, jako např.:

- rozteče puklin
- rozteče ploch vrstevnatosti
- soustav ploch nespojitosti
- stálosti ploch nespojitosti,
- velikosti horninových bloků
- otevřenosti plochy
- nespojitosti
- drsnosti plochy nespojitosti
- průsaku

# Popis pomocí rozteče puklin a ploch vrstevnatosti

Vrstevnatost	Rozteč puklin	Limit rozteče
velmi silně zvrstvená	extrémně široká	přes 2 m
silně zvrstvená	velmi široká	0,6 - 2 m
středně zvrstvená	široká	0,2 - 0,6 m
slabě zvrstvená	poměrně široká	60 mm - 0,2 m
velmi slabě zvrstvená	poměrně malá	20 - 60 mm
tence vrstevnatá	malá	6 - 20 mm
velmi tence vrstevnatá	nepatrná	pod 6 mm

Získává se zkoumáním vrtného jádra či odkryté plochy.

# Popis pomocí soustav ploch nespojitosti

- pevný, masivní horninový masiv s náhodně se vyskytujícími spárami
- jedna soustava ploch nespojitosti
- jedna soustava ploch nespojitosti a náhodně se vyskytující plochy nespojitosti
- dvě soustavy ploch nespojitosti
- dvě soustavy ploch nespojitosti a náhodně se vyskytující plochy nespojitosti
- tři soustavy ploch nespojitosti
- tři soustavy ploch nespojitosti a náhodně se vyskytující plochy nespojitosti
- čtyři a více soustav ploch nespojitosti
- rozdrčená hornina, měkké až zemité horniny

# Popis pomocí stálosti diskontinuity

<b>Stálost diskontinuity</b>	<b>Limit formální délky stopy diskontinuity</b>
velmi malá stálost	menší než 1 m
malá stálost	1 - 3 m
střední stálost	3 - 10 m
velká stálost	10 - 20 m
velmi velká stálost	nad 20 m

Stálost plochy nespojitosti nám udává její průběžnost (kontinuitu, nepřetržitost).

# Popis podle otevřenosti plochy nespojitosti (Anon)

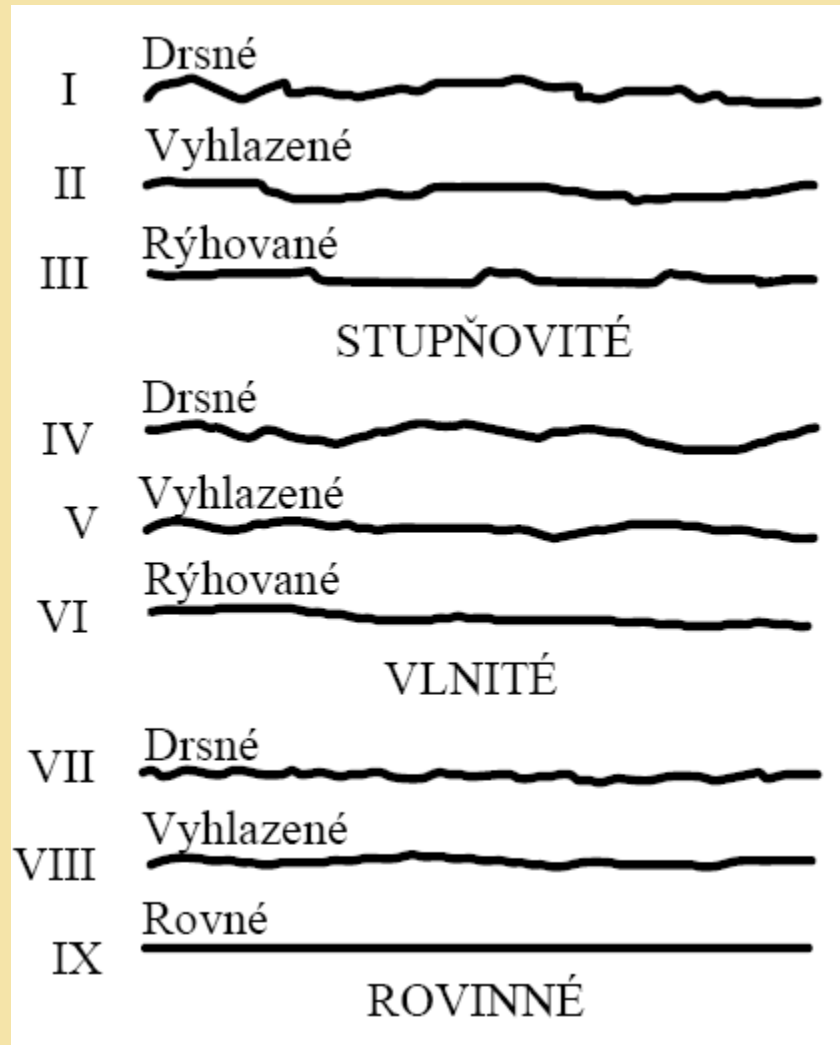
Označení	Šířka otevření
těsné	0
extrémně úzké (vlásečnicové)	pod 2 mm
velmi úzké	2 – 6 mm
úzké	6 – 20 mm
mírné	20 – 60 mm
mírně široké	60 – 200 mm
široké	přes 200 mm

# Popis podle otevřenosti plochy nespojitosti (Barton)

Označení	Popis	Šířka otevření
uzavřené	velmi těsné	pod 0,1 mm
	těsné	0,1 – 0,25 mm
	zčásti otevřené	0,25 – 0,5 mm
Rozevřené	otevřené	0,5 – 2,5 mm
	mírně široké	2,5 – 10 mm
	široké	přes 10 mm
Otevřené	velmi široké	10 – 100 mm
	extrémně široké	100 – 1000 mm
	dutinaté (kavernózní)	přes 1000 mm



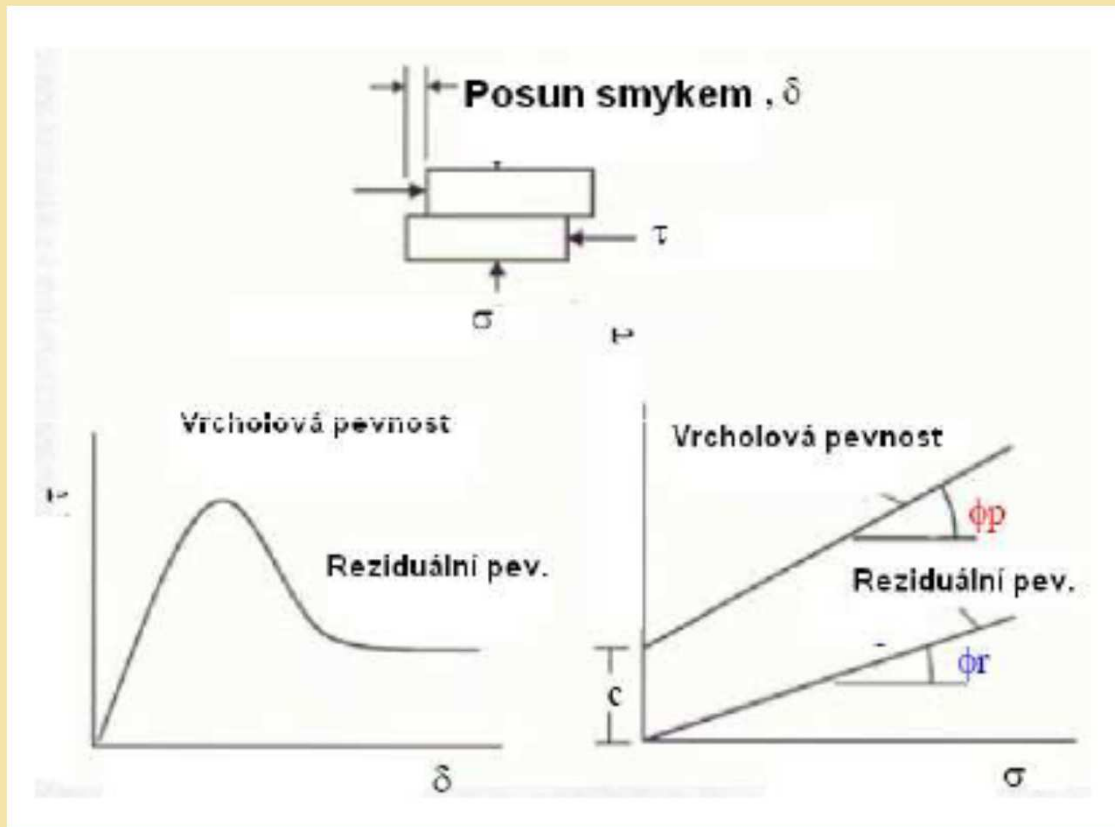
# Popis podle drsnosti plochy nespojitosti



# Popis podle průsaku

Průsak	Otevřené diskontinuity (bez výplňového materiálu)	Diskontinuity s výplňovým materiálem
1	Diskontinuita je velice těsná a suchá, neumožňuje proudění podzemní vody	Výplňový materiál je suchý a plně konsolidován, významné proudění je pro nízkou propustnost nepravděpodobné
2	Suchá diskontinuita, nejsou pozorovány příznaky proudění podzemní vody	Výplňové materiály jsou vlhké, bez přítomnosti volné vody
3	Suchá diskontinuita vykazující příznaky proudění podzemní vody (např. rezavé zbarvení)	Výplňové materiály jsou mokré, občas z nich odkapává voda
4	Diskontinuita je vlhká, proudění podzemní vody nenastává	Výplňový materiál vykazuje souvislé proudění vody (přítok v l/min), voda z něj vytéká
5	Diskontinuitou nepatrně sákně voda, příležitostně z diskontinuity odkapává voda	Výplňový materiál je místně vyplavován, místa vyplavování vykazují značné proudění vody
6	Diskontinuitou proudí voda, je nutné určit přítok v l/min a popsat tlakové poměry	Výplňový materiál je zcela vyplaven, je zjištěn velký tlak vody (hlavně při odkrytí materiálu), určuje se přítok v l/min a tlakové poměry

# Pevnost diskontinuit



Pukliny redukuje smykovou pevnost horninového masivu, a to při nejmenším ve směru rovnoběžném se sklonem pukliny. Pukliny vykazují velký odpor tlakovému namáhání, ale žádný při namáhání tahem.