

DEFORMÁCIE NADLOŽIA PRI VÝSTAVBE PODZEMNÝCH STAVIEB

Jana Chabroňová

**KEGA: „Integrácia nových trendov v hnedých zónach
urbanizovaného prostredia do podzemného
staviteľstva“**



■ 3. marca. 2009 výstavba metra v Kolíne



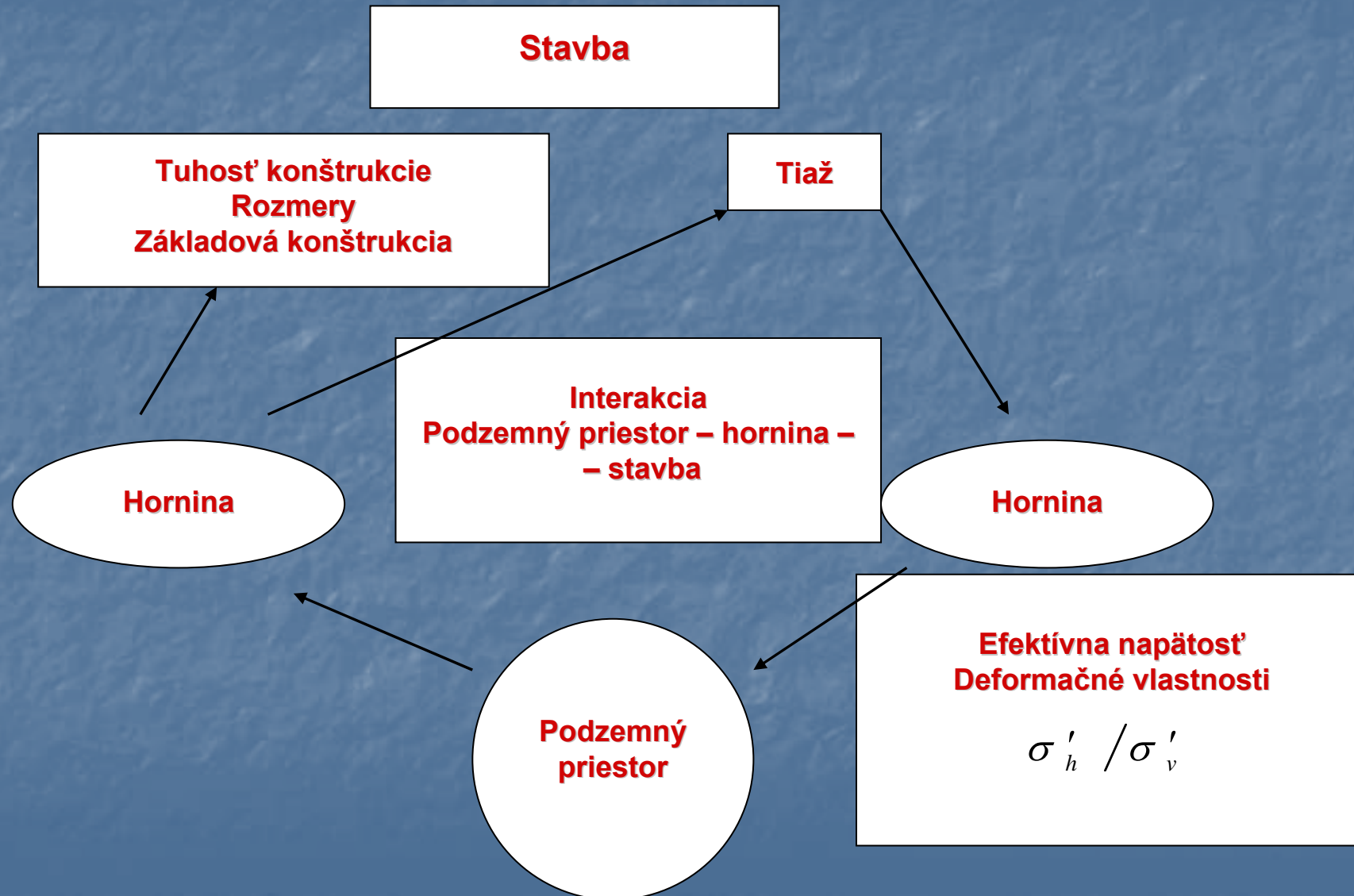
- 6. 7. 2010 Tunel Blanka v Prahe

Rok	Projekt	Vynaložené financie v miliónoch US \$
1994	Heathrow Express Link,GB	141
1994	Metro Taipei, Taiwan	12
1994	Munich Metro, Germany	4
1995	Metro Los Angeles, USA	9
1995	Metro Taipei, Taiwan	29
1999	Hull Yorkshire Tunnel, UK	55
1999	TAV Bologna – Florence, Italy	9
2000	Metro Taegu, Korea	24
2000	TAV Bologna - Florence, Italy	12
2002	Taiwan High Speed Railway	30
2003	Shanghai Metro, PRC	80
2004	Singapore Metro, S'pore	
2005	Barcelona Metro, Spain	
2005	Lausanne Metro, Switzerland	
2005	Lane Cove Tunnel, Sydney	
2005	Kaohsiung Metro, Taiwan	

Pre navrhovanie mestských tunelov
Prof. Eisenstein uvádza tri medzné
stavy, ktorým musia podzemné
stavby vyhovovať.

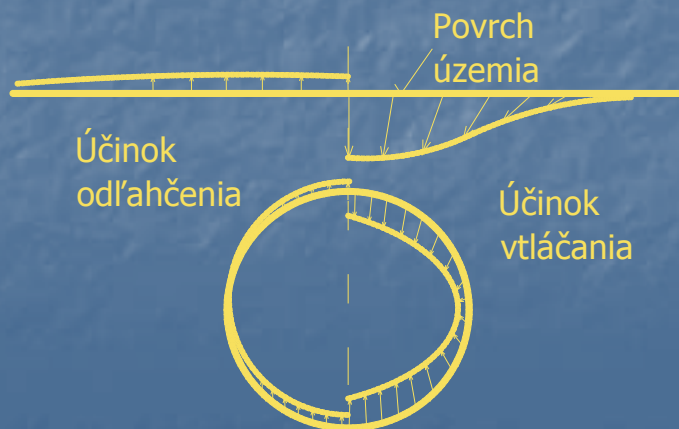
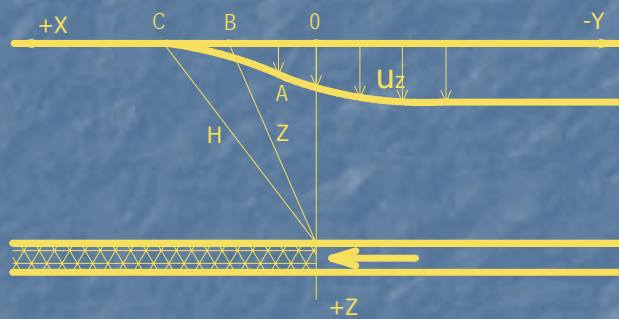
- Medzný stav únosnosti (napätosti)
- Medzný stav deformácie (použitelnosti)
- Medzný stav viditeľného poškodenia
konštrukcie nad tunelom.

Interakcia podzemný priestor – – hornina - stavba



Deformácie nadložia a povrchu územia:

- Nad banským porubom
- Nad razenou podzemnou stavbou



Nad banským porubom

- Porub dlhý
- Poklesy začínajú v bode C
- Bod A inflexný bod
- Po prekročení pevnosti HM – porušenie HM - vznik plôch klzu, povrchové trhliny

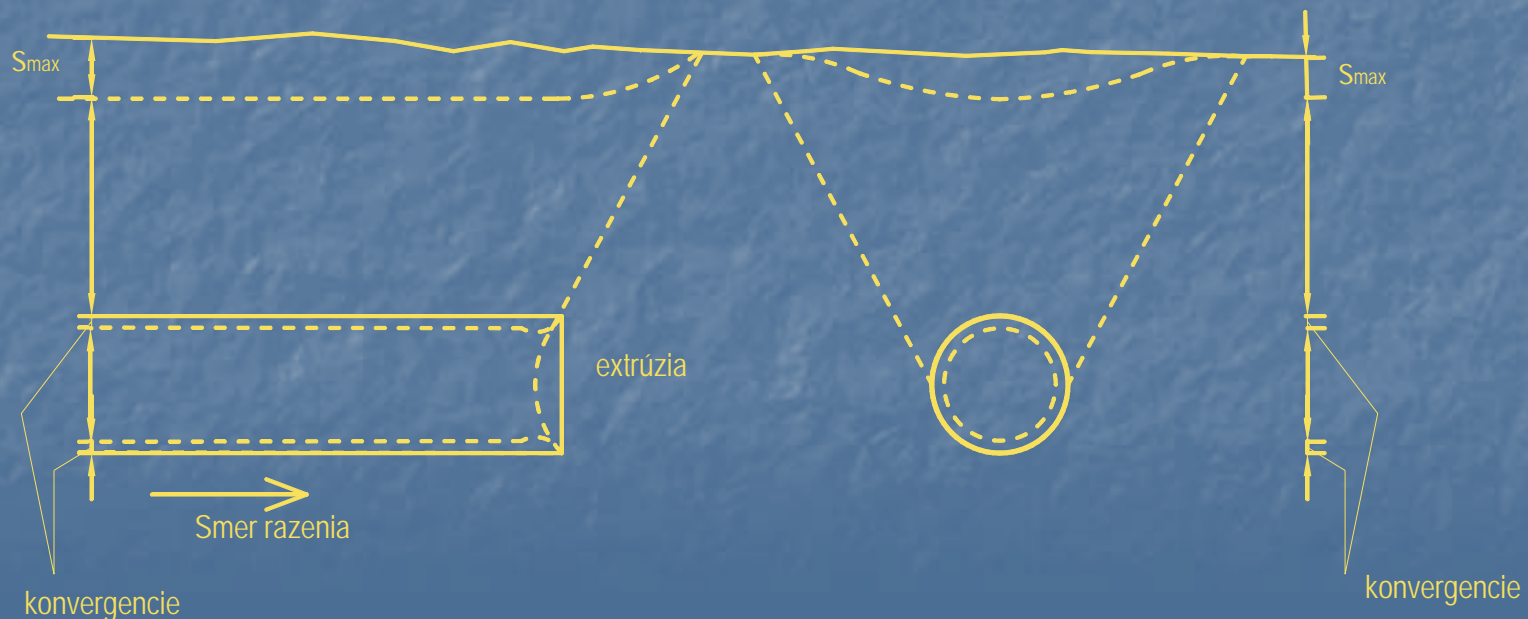
Deformácie nadložia a povrchu územia nad razenou podzemnou stavbou

Príčiny deformácií:

- Strata zeminy – deformácia horniny okolo výrubu
- Zníženie hladiny podzemnej vody – drenážny efekt podzemného diela

Strata zeminy

- Prejav deformácií:
 - Radiálne deformácie po obvode výrubu – konvergencie
 - Pozdĺžne deformácie čela – extrúzie
- Vyplýva z objemu horniny, ktorá prenikne do teoretického prierezu



Odvodnenie územia stavebným dielom

Zníženie hladiny podzemnej vody má za následok stratu vztlaku na zemné častice » zväčšenie efektívneho napätia v zemine

1. kategória

- sadnutie, ktoré vzniknú otvorením s výrubu – znížením hladiny podzemnej vody. Prvý dôsledok razenia je okamžité sadnutia vrstiev a šošoviek stlačiteľných zemín, ale aj niektorých porušených zón. Dopad zníženia sa mení v závislosti na hĺbke

2. kategória

- dlhodobé deformácie – konsolidácia zemín

Prítok vody do čela výrubu spôsobuje:

- Účinok hydraulického spádu:
 - mechanické rozrušovanie čela a stien výrubu
- Vyplavovanie častíc a vytváranie kaverien
- Zhoršenie mechanických vlastností nadložia (prepad (zborenie) opôr a strata zemných väzieb)

Faktory ovplyvňujúce vznik deformácií pri podtunelovaní

- Rozdelenie podľa metód ovplyvnenia horninového masívu a ochrany stavieb pred účinkami tunelovania:
 - Faktory neovplyvniteľné
 - Faktory zakomponované do projektového riešenia:
 - Metóda tunelovania s použiteľnými doplňujúcimi opatreniami
 - Lokálne zlepšenie horninového prostredia
 - Zaistenie základových konštrukcií dotknutých objektov
 - Faktory neočakávané (poruchy sietí, záplavy apod.)

Faktory, ktoré vplyvajú na vznik deformácií pri podtunelovaní

Dve hlavné skupiny:

- **Odvodnenie územia podzemným dielom - zmena režimu hladiny podzemnej vody**
 - Jedná sa o zníženie hladiny podzemnej vody pri výstavbe a zamýšľané alebo nezamýšľané odvodnenie masívu vyrazenou tunelovou rúrou. Účinok je plošný a siaha do väčšej vzdialenosti.
- **Deformácie horniny okolo výrubu pri výstavbe**
 - Steny výrubu pri tunelovaní vyrúbaním otvoru stratili podporu a hornina sa teda posúva do výrubu. V niektorých prípadoch sa masív dlho dotvaruje a inokedy môže nastať dodatočné sadanie, najmä účinkom otrasov vyvolaných povrchovou dopravou.

Faktory, ktoré ovplyvňujú veľkosť objemu stratenej zeminy – loss of ground

- Zmeny šmykovej pevnosti v deformujúcej sa zemine.
- Redistribúcia napätí okolo výrubu – zvýšenie napätí v niektorých častiach horninového masívu, čo má za následok zmenšenie objemu horniny nad výrubom.
- Posun opory prekonsolidovanej zeminy
- Vplyv technológie
- Dynamické zaťaženie od dopravy po skončení výstavby.

■ **Ekologické faktory**

- Strata vlhkosti (zmena hladiny podzemnej vody)
– 1%
- Vplyv zmien mechanických vlastností – zmena šmykovej pevnosti horniny
- Dilatancia prekonsolidovaných zemín
- Spevnenie zeminy okolo výrubu
- Zhutnenie sypkej zeminy
- Vyplavovanie jemných častíc (prúdením vody)

Faktory ovplyvňujúce vznik deformácií pri podtunelovaní

- Metóda tunelovania sú charakterizované 2 základnými spôsobmi:
 - Cyklický spôsob - pravidelne sa opakujúce operácie v cykloch
 - Kontinuálny spôsob - TBM

Zdroje deformácií pri konvenčnom razení

- Správanie sa čela výrubu - geologické prostredie
- Konštrukcia dočasného výstroja
- Pracovný postup
- Konštrukcia sekundárneho ostenia

Vel'kost' deformácií pri konvenčnom razení je ovplyvnená:

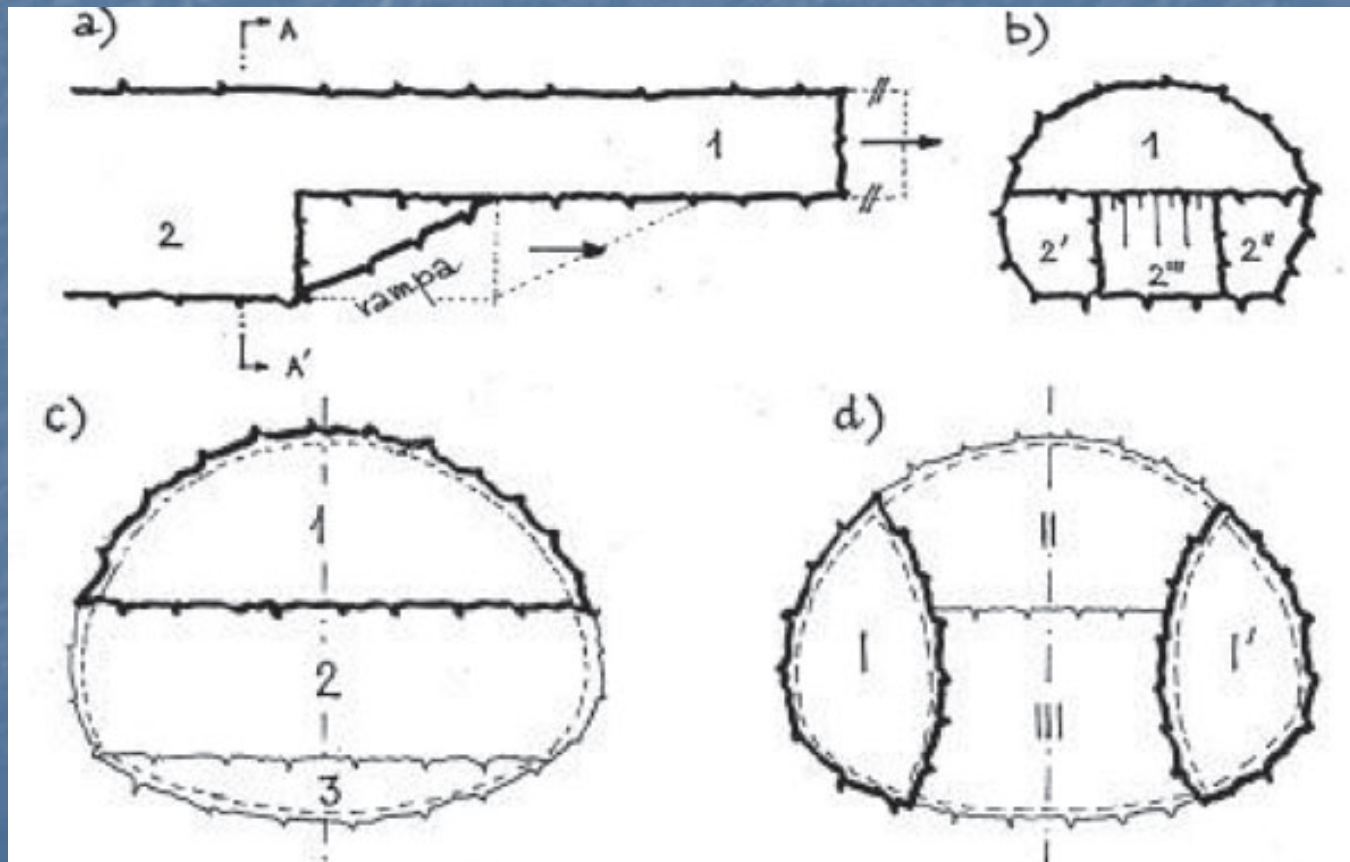
- Rýchlosťou zabudovania konštrukcie dočasného výstroja
- Tuhosťou konštrukcie dočasného výstroja
- Členením razeného profilu
- Opatreniami robenými v predstihu pred čelom výrubu

■ **Pre technológiu NRTM**

- je dôležitý kotevný systém to je účinný spôsob tzv. predpätie kotiev – 75% objemu.

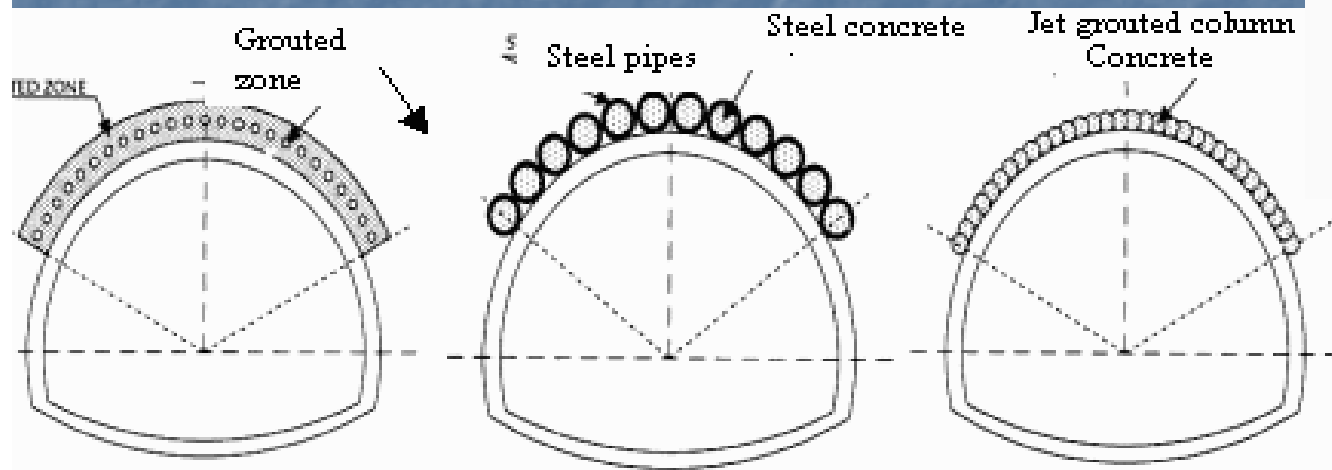
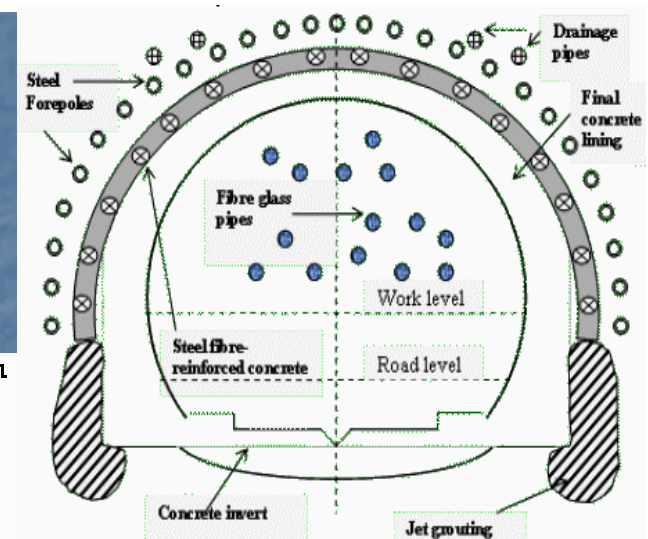
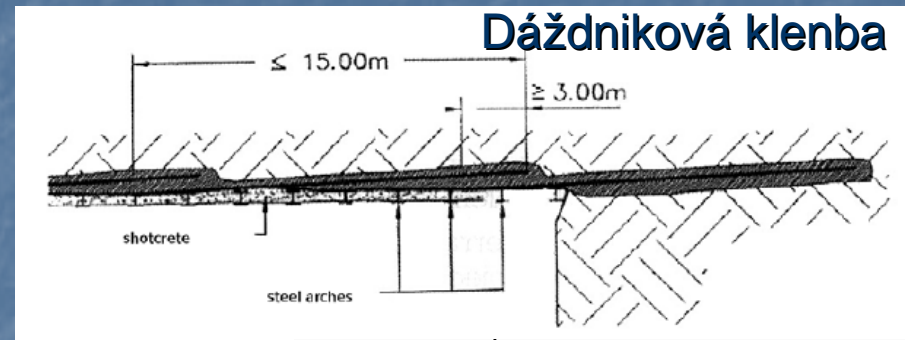
Členenie razeného profilu

- Horizontálne - $> 2\%$ (straty horniny)
- Vertikálne - $< 1\%$



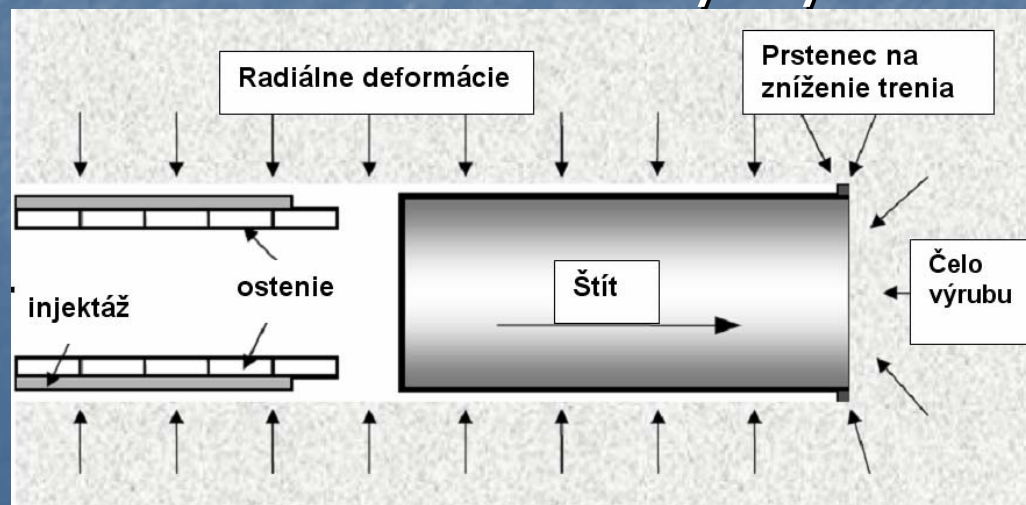
Zlepšovanie prostredia počas razenia

- Opatrenia pri cyklickom razení
 - Podoprenie čela
 - Podoprenie klenby
 - Predháňané paženie
 - Hnaná výstuž
 - Dáždniková klenba



Kontinuálne razenie

- Deformácie pri kontinuálnom razení (pomocou raziacich strojov a štítov) môžeme rozdeliť do 4 častí:
 - Deformácie pred a nad čelom výrubu,
 - Deformácie pozdĺž stroja,
 - Deformácie vyvolané za strojom – pri hýbajúcej výplni,
 - Deformácie vzhľadom na vychýlenie ostena.



■ **Obvodová injektáž pre TBM**

- pozdĺžna injektáž – ovplyvníme 80% objemu stratenej zeminy
- injektáž cez otvory v segmentoch – 70% objemu.

Pri plynulom spôsobe razenia - TBM ovplyvnenie vzniku deformácií

- Použitie plne mechanizovaných štítov – stabilizujú čelo a zabraňujú prenikaniu vody do pracovného priestoru:
 - Pneumatický štít (APB)
 - Bentonitový štít (SPB)
 - Zeminový štít (EPB)

Opatrenia na zníženie pretvorení

- Výber vhodných podmienok pre výstavbu
- Zlepšovanie fyzikálnych a mechanických vlastností horninového prostredia
- Štruktúrne zlepšovanie konštrukcií
- Zlepšovanie prostredia počas razenia

Vplyv pracovných podmienok

- Deformácie od vibrácií (vrtanie, doprava)
strata objemu
- Zlá kvalita výplňových vrstiev

Veľkosť objemu tzv. stratenej zeminy môžeme ovplyvniť pomocou technológií:

TECHNOLÓGIA	OBJEM stratenej zeminy
Injektáž, trysková injektáž	60%
Vystuženie čela	25%
Mechanické podoprenie čela napr. hydraulickými lisami	10%
Prídavná vystuž	5%
Prídavné kotvy pred čelo výrubu	70%
Rýchlosť tunelovania	80%
Pozdĺžna injektáž obvodu pri TBM	80%
Injektáž cez otvory v segmentoch	70%
Hydroštitý	90%
Pneumatické štitý	75%

Dôležité parametre pre hodnotenie stability tunela

- Geometria priečneho rezu
- Výška nadložia
- Dĺžka záberu
- Primárna napätosť
- Fyzikálne parametre zeminy
- Zaťaženie nadložia
- Hladina podzemnej vody

Metódy určenia deformácií nadložia pri tunelovaní

- Empirické
- Analytické
- Fyzikálne modelovanie
- Matematické modelovanie
- Meranie in situ

Určenie deformácií nadložia

- Určenie oblasti, do ktorej zasahujú deformácie vyvolané razením
- Výpočet poklesovej krivky, 2 skupiny metód:
 - Analytické metódy
 - Numerické metódy – metóda konečných prvkov MKP (FEM).

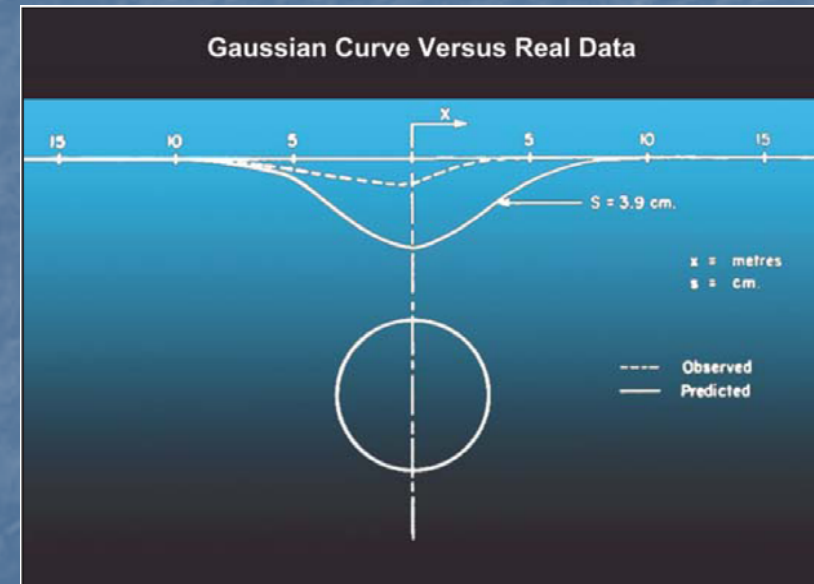
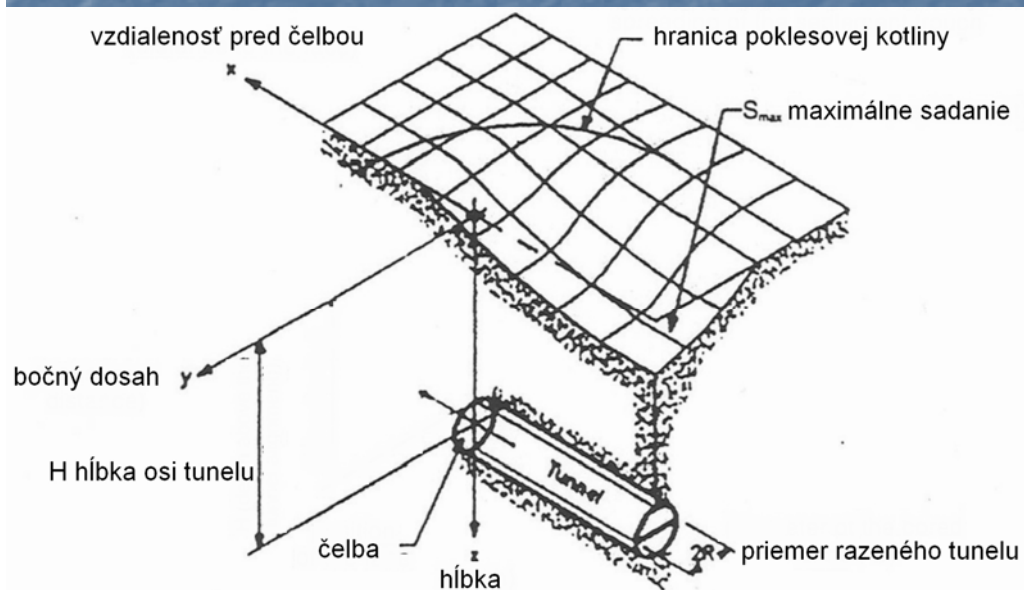
Priečny rez poklesového koryta

Výpočet poklesovej krivky podľa Schmidta – Pecka

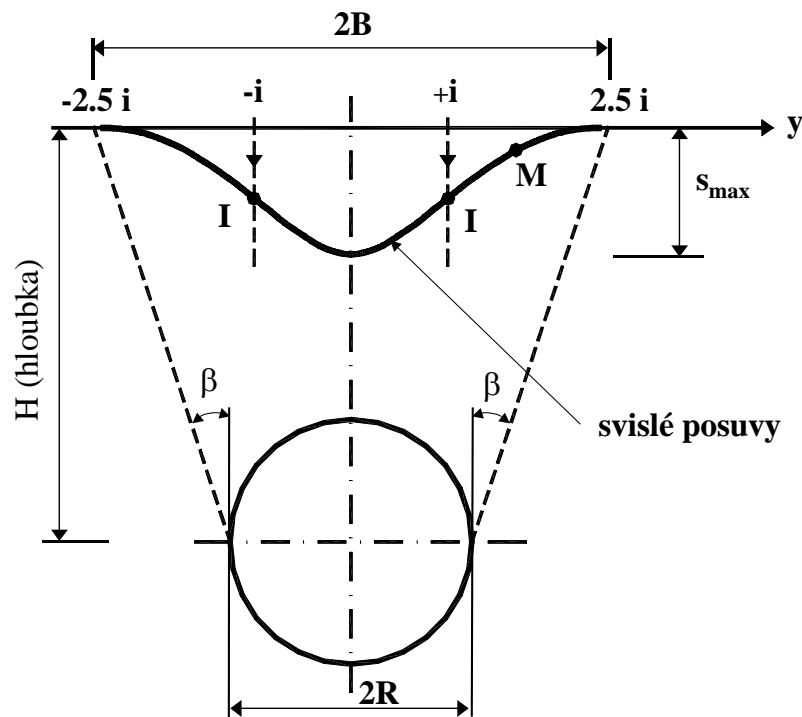
$$S_z(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

- S_{\max} – maximálna hodnota sadnutia povrchu
- x – vzdialenosť bodu od osi razenia
- i – inflexný bod poklesovej krivky

Oblasť, do ktorej zasahujú deformácie



Gaussova poklesová krivka a skutočnosť
Prof. Eisenstein, Tunely v metropoli



- plocha (objem) poklesovej kotliny

$$V_G = \sqrt{2\pi i s_{\max}} \approx 2,5 i s_{\max}$$

- maximálny pokles v osi výrubu

$$s_{\max} = \frac{V_G}{2,5 i}$$

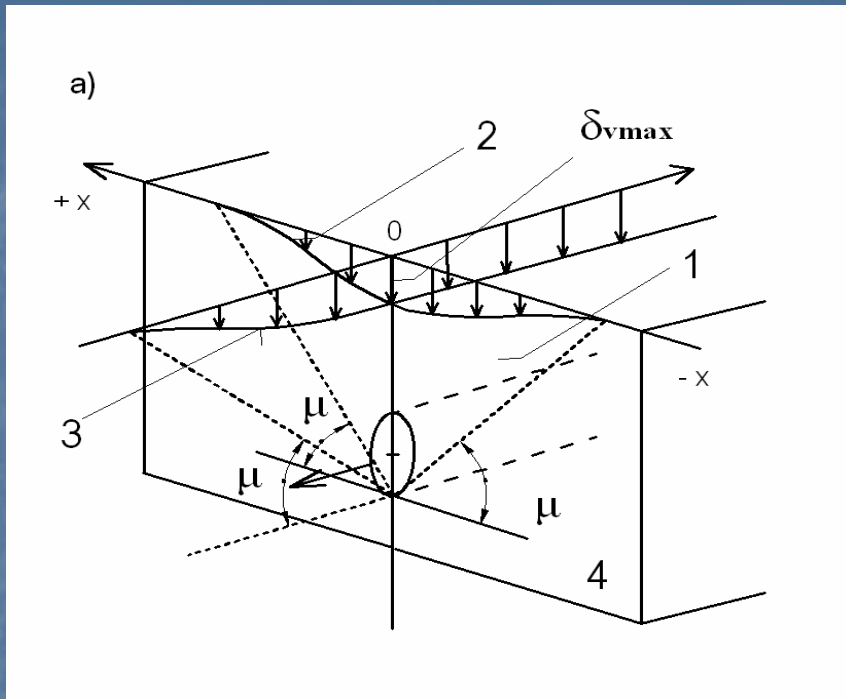
- inflexný bod i

$$i = 0,606 \cdot s_{\max}$$

- bod maximálnej krivosti M

$$M = 0,223 s_{\max}$$

(Peck, Schmidt, 1969)



Poklesová kotlina v dôsledku straty objemu zeminy v okolí výrubu extrúzií a konvergencií aproximovaná Gaussovou krivkou

Ukazovateľ kvality razenia q

$$q = \frac{V_z}{V_G} \cdot 100\%$$

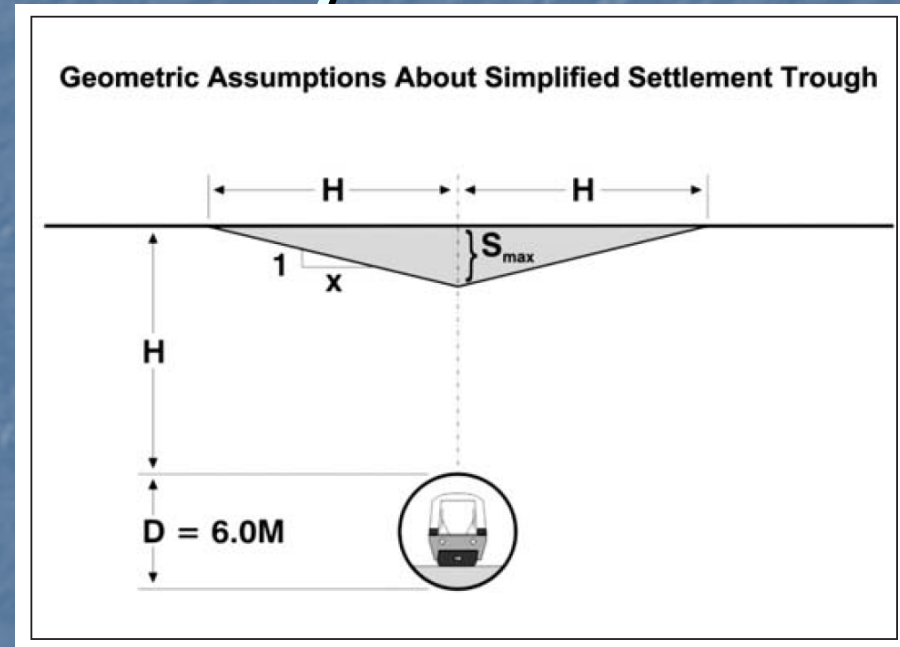
V_z – objem straty zeminy

V_G – objem poklesovej kotliny

Autor	i	Podklady pre empirické riešenie
Peck (1969)	$i/R = (z_0/2R)^n$ ($n=0.8 - 1.0$)	Poľné pozorovania
Attewell and Farmer (1974)	$i/R = (z_0/2R)^n$ ($a=1, n=1$)	Poľné pozorovania na tuneloch VB
Clough and Schmidt (1981)	$i/R = (z_0/2R)^n$ ($a=1, n=0.8$)	Poľné pozorovania na tuneloch VB
O'Reilly and New (1982)	$i = 0.43z_0 + 1.1\text{m}$ (cohesive soil ($3 \leq z_0 \leq 34\text{m}$)) $i = 0.43z_0 + 1.1\text{m}$ (cohesive soil ($3 \leq z_0 = 34\text{m}$)) $i = 0.28z_0 - 0.1\text{m}$ (granular soil ($6 \leq z_0 \leq 10\text{m}$))	Poľné pozorovania na tuneloch VB
Atkinson and Potts (1977)	$i = 0.25(z_0 + R)$ (loose sand) $i = 0.25(z_0 + R)$ (loose sand) $i = 0.25(1.5z_0 + 0.5R)$ (dense and OC clay)	Poľné pozorovania a skúšobné modelovanie
Leach (1985)	$i = (0.57 + 0.45z_0) \pm 1.01\text{m}$	Pre miesta kde sú výrazné vplyvy konsolidácie
Mair et al. (1983)	$i = 0.5z_0$	Poľné pozorovania a skúšky v centrifúge

Deformácia povrchu nad budovaným podzemným dielom

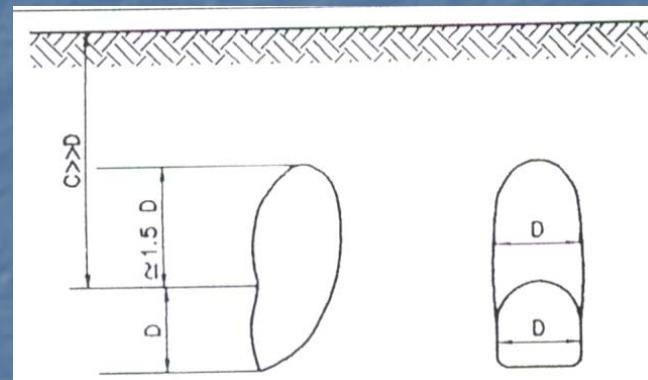
- Strata zeminy – integrál plochy vytvorenej posunom zeminy kolmo na obvod výrubu, vyjadrená percentom z plochy výrubu.
- Uhlové pretvorenie – sklon krivky poklesovej kotliny



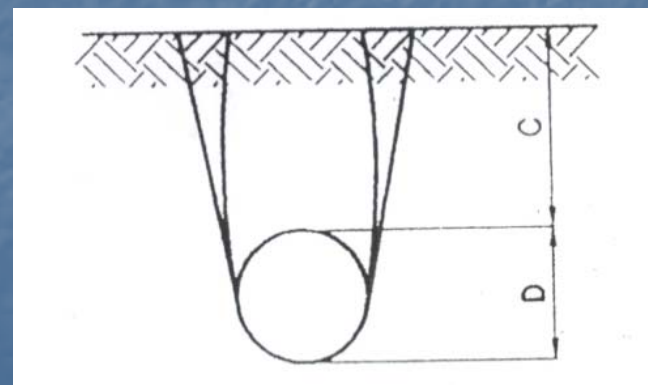
Geometrické predpoklady zjednodušenej poklesovej kotliny podľa Prof. Eisensteina, Tunely v metropoli

Modely deformácií nadložia

- Pre vysoké nadložie ($h > 2,5 D$)

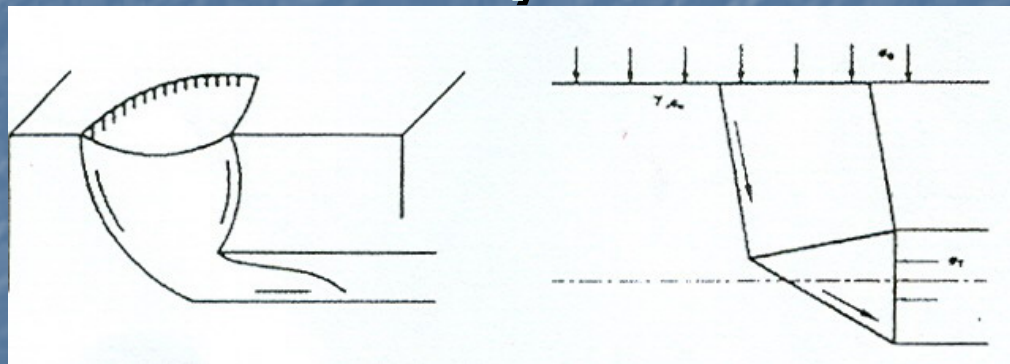


- Pre nízke nadložie ($h > 2,5 D$)

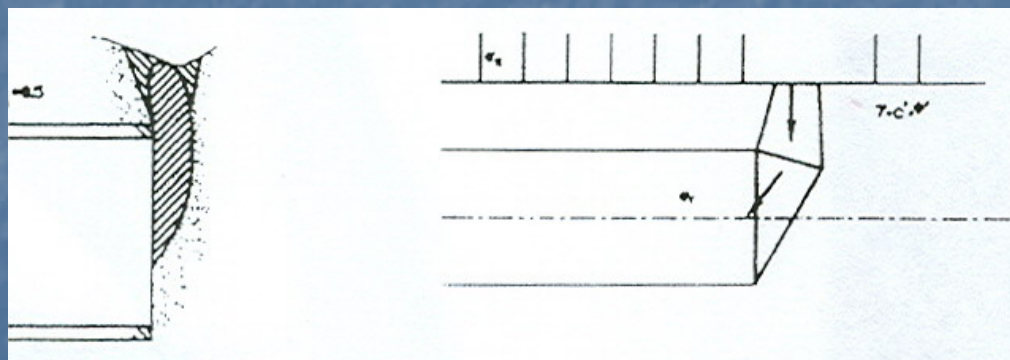


Typické modely porúch pre jednotlivé zeminy

Základný model pre jemnozrnnú zeminu



Základný model pre sypkú zeminu



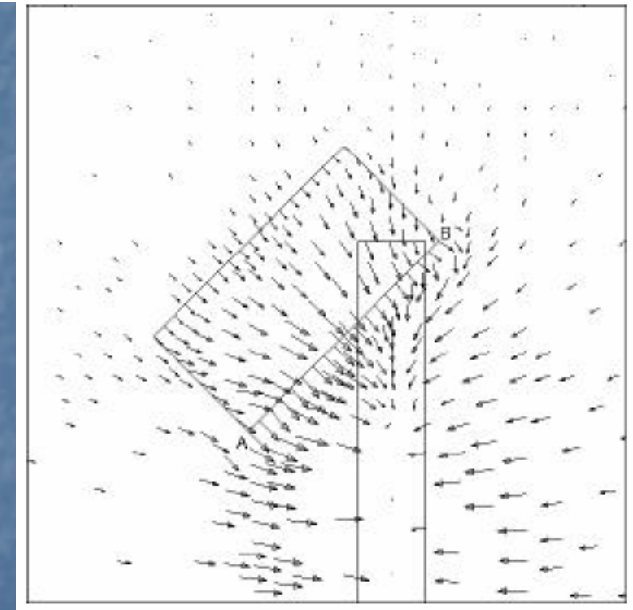
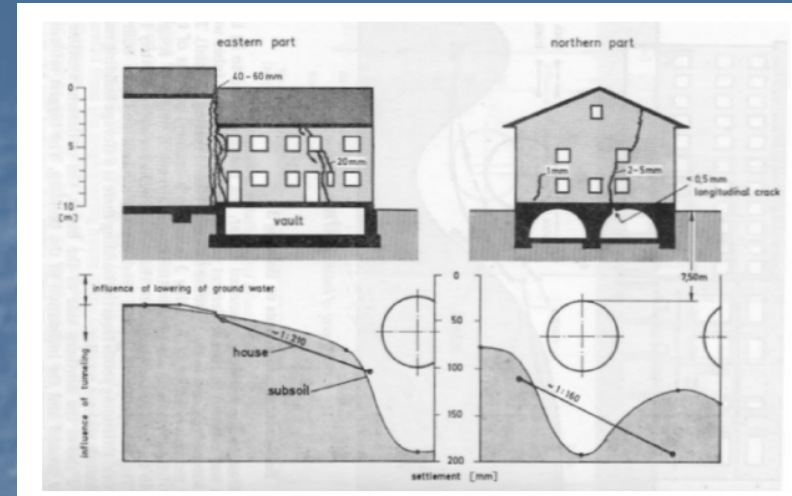
Maximálny sklon poklesovej kotliny podľa Wahlsa (1981) a STN 73 1001

Kategória možných porúch	Uhlové pretvorenie	STN 73 1001
Zariadenie citlivé na deformácie	1/750	1/333
Konštrukcie skeletové	1/600	1/400
Limitné hodnoty pre budovy, kde nie sú povolené trhliny	1/500	1/500
Vznik 1. trhlín pri panelových stavbách	1/300	1/667
Stropné žeriavové dráhy	1/300	1/667
Možnosť viditeľného naklonenia tuhých budov	1/250	1/200, 1/500
Vznik výrazných trhlín pri panelových a tehlových budovách	1/150	1/667
Vznik štruktúrnych porúch vo všeobecnosti pri budovách	1/150	1/667
Limitná hodnota pre pružné murované stavby	1/150	1/167

Vplyv deformácií povrchu na zástavbu

Rôzne druhy pohybov:

- Jednoduché sadnutie
- Nerovnomerné sadnutie základov
- Celkové alebo rozdielne pootočenie
- Čiastočné horizontálne deformácie
- Nerovnomerné horizontálne deformácie



Monitoring

- Vybavenie pre monitoring sa navrhuje v projekte. Je rozdelený na 3 časti:
 - Monitoring existujúcich budov
 - Monitoring povrchu základovej škáry
 - Merania v podzemných priestoroch
- Monitoring existujúcich budov sa zameriava na 3 druhy deformácií:
 - Absolútne sadnutie
 - Nerovnomerné sadnutie
 - Pootočenie

Geotechnický monitoring počas výstavby

- Monitoring zástavby v oblasti poklesovej kotliny, pasportizácia objektov pred začatím výstavby
- Monitoring povrchu a základovej pôdy v oblasti poklesovej kotliny
- Monitoring inžinierskych sietí v oblasti poklesovej kotliny
- Sledovanie deformácií podzemného diela, konvergencií

Klasifikácia porúch na súčasných konštrukciách

Typ poruchy	Stupeň poruchy	Popis poruchy	Šírka trhliny v [mm]*
0	Bezvýznamné poruchy	Mikrotrhliny	< 0,1
1	Veľmi malé poruchy	Estetické	< 1,0
2	Malé poruchy	Estetické – musia byť opravované	< 5,0
3	Stredné poruchy	Prevádzkové	5 – 15 niektoré trhliny > 3mm
4	Vážne poruchy	Štruktúrne	15 – 25**
5	Veľmi vážne poruchy	Štruktúrne	> 25**

*Šírka trhlín je len jeden aspekt porúch a nemôže byť určený priamym meraním

** Berie sa do úvahy aj počet trhlín

Táto klasifikácia je navrhnutá pre praktické účely a jej cieľom je na uľahčenie určenia rozsahu sanácie:

1. **Typ** – Vnútorne trhliny sú ľahko odstrániteľné pri bežnej oprave; ojedinelé vonkajšie trhliny sú zistiteľné len hĺbkovou kontrolou.
2. **Typ** – Vnútorne trhliny sú ľahko vyplniteľné; vonkajšie trhliny sú viditeľné a treba ich prešpárovať. Dvere a okná môžu ľahko zadrhať.
3. **Typ** – Vnútorne trhliny sa musia vyčistiť pred vyplnením; vonkajšie trhliny môžu byť škodlivé pre kvalitu a tepelnú izoláciu omietky.
4. **Typ** – Trhliny môžu ohrozovať bezpečnosť obyvateľov a štruktúrnu stabilitu. Opravy sú nevyhnutné. Môžu sa týkať aj deformácií častí stien, hlavne nad otvormi, dvere a okná sú čiastočne skrútené a podlaha nemusí byť vodorovná, oporné trámy môžu byť porušené a technické vybavenie budov je zlomené.
5. **Typ** – Konštrukcia sa stáva nestabilnou a treba ju celú rekonštruovať.

- Poznať veľkosť deformácie nadložia pri tunelovaní hlavne v zeminách je dôležité už pri návrhu tunelu.
- Vznikajú kombináciou jednotlivých pretvorení a zmien objemu zeminy v tuneli a jeho okolí.
- Pretvorenia od straty zeminy v čele výrubu, od konvergencií v tuneli a od nadvýlomu môžu ovplyvniť veľkosť a tvar poklesovej krivky na povrchu.

- Problematika deformácií horninového resp. zeminového prostredia je stále aktuálnou a veľmi závažnou.
- Pri vytváraní hustého plošného systému podzemných priestorov, ktoré sú blízko seba dochádza nielen k deformáciám jednotlivých diel, ale tieto plochy sadania sa môžu spojiť do celkovej deformácie územia nad podzemným dielom, čím sa môže dôjsť k poruchám.
- Pri výstavbe podzemných diel je teda dôležité poznať nielen maximálne deformácie nadložia, ale aj šírku deformačnej oblasti, aby sme mohli v dostatočnom predstihu navrhnuť správne a rýchle postupy sanácie možných porúch prípadne zamedziť týmito deformáciám.