

MECHANIKA HORNIN **A ZEMIN**

podklady k přednáškám

doc. Ing. Kořínek Robert, CSc.

Místnost: C 314

Telefon: 597 321 942

E-mail: robert.korinek@vsb.cz

Internetové stránky: fast10.vsb.cz/korinek

Mezní stavy základové půdy

Každá geotechnická návrhová situace musí být posouzena podle mezních stavů, při jejichž překročení přestává konstrukce spolehlivě plnit své funkce. Z hlediska působení zatížení a vnesených deformací posuzujeme konstrukce podle mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti.

I. mezní stav - _____

Překročení mezního stavu únosnosti se projeví jako ztráta stability základové půdy, kdy se poruší rovnováha na smykových plochách vytvořených v podloží nebo na styku mezi základovou půdou a konstrukcí. Posunutím po těchto smykových plochách dojde ke zhroucení konstrukce, nepřipustnému zaboření, posunutí, naklonění atd. Porušení podzákladí může také vzniknout vlivem velkého zatížení povrchu, kdy základová půda ve velkém rozsahu přechází do plastického stavu, který má opět za následek velké deformace podloží.

II. mezní stav - _____

Při návrhu konstrukcí podle mezního stavu použitelnosti je třeba prokázat, že deformace podzákladí nepřekročí s určitou pravděpodobností mezní hodnoty, které zaručí normální užívání objektu a nesnižují jeho životnost.

Geotechnické kategorie

Dle ČSN EN 1997-1 jsou konstrukce podle náročnosti, složitosti základových poměrů a rizika rozděleny do tří geotechnických kategorií.

1. GK

- Zahrnuje pouze malé a relativně jednoduché konstrukce se zanedbatelným rizikem.
- Návrh lze provést na základě zkušeností a kvalitativního geotechnického průzkumu, který proběhne nejpozději během provádění stavby.
- Např. jednoduché jedno a dvoupodlažní domy založené na běžných typech plošných nebo pilotových základů, opěrné zdi a pažení výkopů nad HPV do 2m a další malé výkopy.

2. GK

- Zahrnuje obvyklé typy konstrukcí a základů s běžným rizikem nebo jednoduchými základovými poměry či zatěžovacími podmínkami.
- Pro návrh je třeba získat kvantitativní geotechnické údaje a statickým výpočtem prokázat splnění základních požadavků. Geotechnické údaje se získají z předběžného a podrobného průzkumu.
- Např. obvyklé typy plošných a pilotových základů, stěny a ostatní konstrukce zadržující nebo podporující zeminu nebo vodu, výkopy, mostní pilíře a opěry, násypy a zemní hráze, kotevní systémy, tunely v tvrdých a neporušených horninách nevyžadující zvláštní opatření na vodotěsnost a nemající jiné požadavky apod.

3. GK

- Zahrnuje konstrukce nebo jejich části, které nespadají do 1. a 2. GK, tzn. velmi velké nebo neobvyklé konstrukce s abnormálním rizikem nebo vyskytují-li se výjimečně obtížné základové poměry nebo zatěžovací podmínky.
- Patří sem i konstrukce seizmicky zatížené, konstrukce v oblastech pravděpodobné nestability staveniště nebo trvalých pohybů základové půdy apod. Tyto stavby vyžadují další _____ specializované povahy.

Dle zrušené ČSN 731001

1. GK

- Nenáročná konstrukce z hlediska zakládání, jednoduché základové poměry.
- Únosnost se posuzuje pomocí tabulkové výpočtové únosnosti a porovnává se s provozním výpočtovým kontaktním napětím v základové spáře

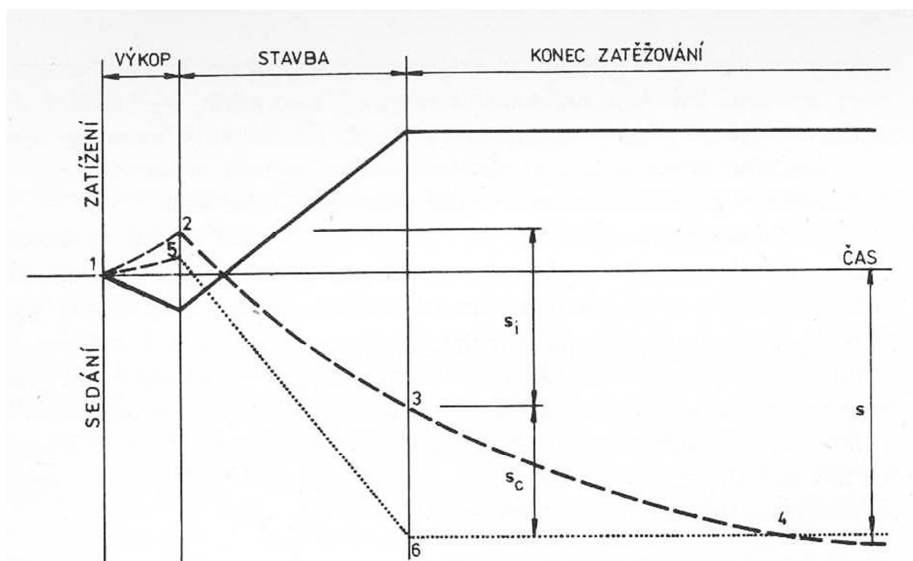
2. GK

- Nenáročná konstrukce z hlediska zakládání, složité základové poměry / náročná konstrukce z hlediska zakládání, jednoduché základové poměry
- Únosnost i sedání se prokazuje výpočtem; pro výpočet lze použít směrné normové charakteristiky

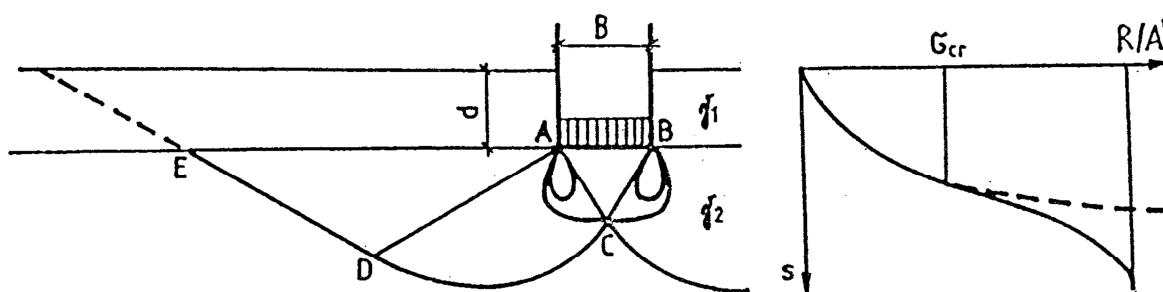
3. GK

- Náročná konstrukce z hlediska zakládání, složité základové poměry
- Pro výpočet únosnosti i sedání nutno použít hodnoty z laboratorních / polních zkoušek.

Mezní stav únosnosti



Obr. Vývoj napětí v základové spáře a sedání v závislosti na čase během výstavby (neodvodněné podmínky – čárkovaná čára, odvodněné podmínky – tečkovaná čára, průběh sedání – plná čára) [Šimek]



Obr. Porušení podzákladí [Lamboj]

Při dosažení zatížení $\sigma_m = R/A'$ () dojde k prolomení podzákladí, v zemině se vytvoří spojitě smykové plochy, po kterých je zemina vytlačována a základ se zaboří nebo nakloní.

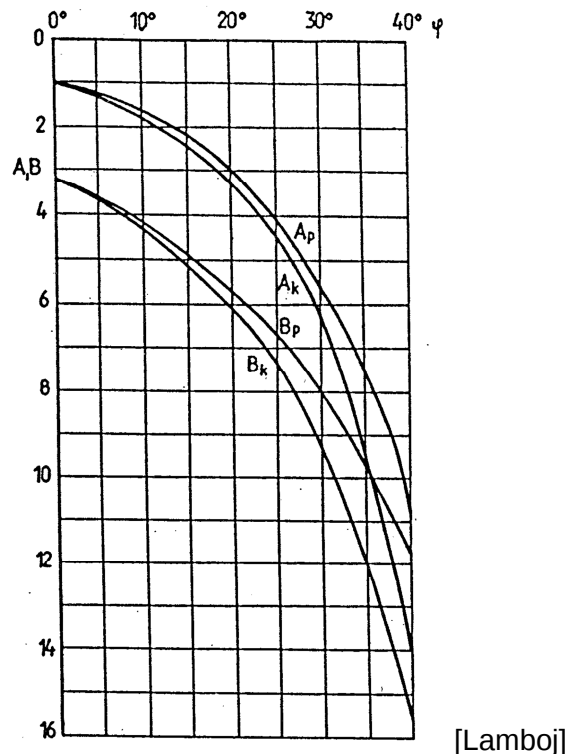
Za σ_{cr} je považováno rovnoměrné zatížení, při němž pod hranami základu vzniká plastický stav (končí linearita mezi sedáním a zatížením, vznikají první lokální porušení). Jeho hodnota závisí na smykových parametrech zeminy a na hloubce zatížení.

Cílem návrhu základu je dostat zatížení v základové spáře do takových oblastí, kde jsou rozsahy plastických zón velmi malé.

Stanovení kritického zatížení – výpočet dle Jegorova

- Pás
- Patka

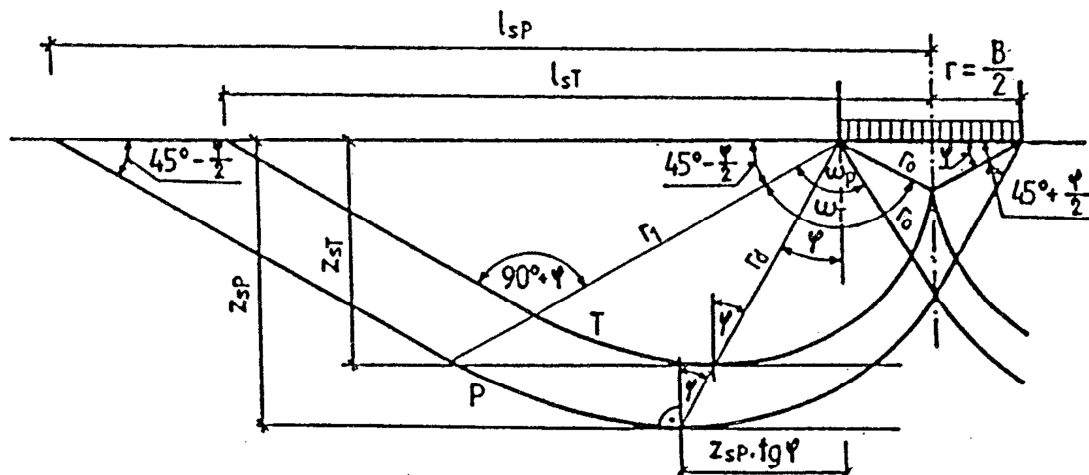
A, B součinitele kritického zatížení, stanovení z následujícího grafu



Pro stanovení mezního zatížení (únosnosti) je třeba zjistit mechanismus porušení, tj. vyhledat smykové plochy, podél kterých je dosaženo rovnováhy a vyšetřit síly na nich působící. Obecně nebyla úloha vyřešena, známá řešení, které lze rozdělit do třech hlavních směrů, vycházejí vždy z nějakých zjednodušujících předpokladů.

- _____ - zjišťuje se rovnováha sil na předem zjištěných nebo zvolených smykových plochách a únosnost vyjde z podmínky minima pro kinematicky možnou smykovou plochu. *Terzaghi, Meyerhof* aj.
- Řešení vycházející _____ . *Prandtl, Sokolovskij, Sobotka* aj.
- Kombinace dvou předcházejících směrů – aplikuje podmínky rovnováhy prostředí v plastickém stavu, okrajové podmínky určuje semiempiricky (tvar smykové plochy, hloubku a tvar plastické zóny atd.). *Berezancev*, _____ (ENV i ČSN 73 1001)

Prandtlovo a Terzaghiho řešení



Obr. Průběh smykové plochy podle Prandtla (P) a Terzaghiho (T); [Lamboj]

r_1 – , r_0 – počáteční průvodič, ω – sklon úhlu mezi r a r_0 .

Podle podmínek Prandtla je poloprostor bez tíže, pružná posunutí jsou zanedbatelná, základová spára bez tření. Prandtl uvažuje pod základovou spárou ostřejší Rankinův aktivní klín (roviny klínu pod základem svírají se základovou spárou úhel $45 + \frac{\varphi}{2}$).

Terzaghi uvažuje drsný základ a předpokládá, že tření v základové spáře zamezuje boční rozšíření (roviny klínu pod základem svírají se základovou spárou úhel φ). Zemina v aktivní zóně utvoří tuhý klín, jednotlivé částice se budou pohybovat dolů, a proto tečna k plasticke oblasti bude svislá.

Přechodovou logaritmickou plochu a pasivní Rankinův klín uvažuje Prandtl a Terzaghi obdobně. Předpokládaná logaritmická spirála je dána vztahem $r_1 = r_0 e^{\arctan \omega \tan \varphi}$

Mezní únosnost dle Prandtla:

Mezní únosnost dle Terzaghiho:

$$R_m = \gamma_1 d \cdot N_d + \frac{1}{2} \gamma_2 b \cdot N_b + c \cdot N_c$$

$$N_d = \frac{1}{2} \sec\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot e^{(1,5\pi - \varphi) \tan \varphi}$$

$$N_b = (N_d - 1) \frac{1}{2 \cos \varphi} \cdot e^{(45 - \varphi) \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_d - 1) \cdot \cot \varphi$$

Hloubka smykové plochy

$$z_{sT} = r \cdot e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi}$$

$$z_{sP} = r \frac{\cos \varphi}{\cos \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)} \cdot e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\arccos \varphi}{2} \right) \tan \varphi}$$

Dosah smykové plochy

$$l_{sT} = r \left[1 + \frac{2}{\cos \varphi} \cos \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) e^{\left(\frac{3}{4} \pi - \frac{\arccos \varphi}{2} \right) \tan \varphi} \right]$$

$$l_{sP} = r \left[1 + 2 \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} \right]$$

φ	Terzaghi		Prandtl	
	z_{sT}/B	l_{sT}/B	z_{sP}/B	l_{sP}/B
0°	0,50	1,21	0,71	1,50
10°	0,66	1,60	0,89	2,07
15°	0,76	1,99	1,01	2,49
20°	0,89	2,43	1,16	3,03
25°	1,04	3,02	1,35	3,77
30°	1,24	3,85	1,59	4,79
35°	1,50	5,05	1,90	6,27
40°	1,87	6,87	2,35	8,51

Tab. Dosah smykových ploch [Lamboj]

Brinch Hansenovo řešení

Teorie převzata pro výpočet v ENV i ČSN 73 1001. Dále výpočet podle ENV.

$$R_m = q \cdot N_q s_q d_q i_q + c \cdot N_c s_c d_c i_c$$

Bezrozměrné součinitele pro:

- únosnost

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi'$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi'$$

- sklon základové spáry

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \cdot \tan \varphi')^2$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \varphi'}$$

- tvar základu

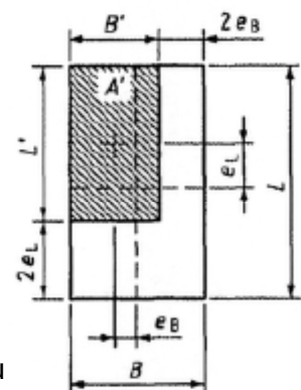
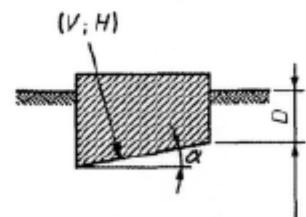
$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \sin \varphi' \text{ pro obdélníkový tvar}$$

$$s_q = 1 + \sin \varphi' \text{ pro čtvercový nebo kruhový tvar}$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 \frac{B'}{L'} \text{ pro obdélníkový tvar}$$

$$s_q = 0,7 \text{ pro čtvercový nebo kruhový tvar}$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \text{ pro obdélníkový, čtvercový nebo kruhový tvar základu}$$



- šikmost zatížení způsobená vodorovným zatížením

$$i_q = \left[1 - \frac{H}{V + A'c' \cot g \varphi'} \right]^m$$

$$i_\gamma = \left[1 - \frac{H}{V + A'c' \cot g \varphi'} \right]^{m+1}$$

$$i_c = i_q - \frac{1-i_q}{N_c \tan g \varphi'}$$

kde

$$m = m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} \text{ pokud } H \text{ působí ve směru } B'$$

$$m = m_L = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}} \text{ pokud } H \text{ působí ve směru } L'$$

V případě, kdy složka vodorovného zatížení působí ve směru svírající úhel θ se směrem L' , se může m vypočítat z:

$$m = m_\theta = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta$$

Vypočteme-li R_m , získáme únosnost, při které dojde k prolomení základové půdy. Při návrhu stavby však nelze připustit napětí v základové spáře rovné únosnosti R_m , ale je třeba počítat s určitou bezpečností. Zavádějí se proto dílčí součinitelé γ , kterými se zatížení i pevnost materiálu upravují tak, aby návrhové hodnoty zatížení nebo účinků zatížení dosáhly současně únosnosti materiálu s určitou velmi malou pravděpodobností.

Návrhová hodnota zatížení F_d se vypočte z charakteristické hodnoty F_k ze vztahu

Návrhové hodnoty vlastností základové půdy X_d se vypočítají z charakteristických hodnot X_k ze vztahu

Tab. Dílčí součinitele pro zatížení γ_F , pro vlastnosti základové půdy γ_m a pro odolnost základové půdy γ_R pro mezní stav únosnosti plošných základů

Přístup	Součinitel γ_F			Součinitel γ_m					Součinitel γ_R	
	stálé		proměnné	tg φ	c'	c _u	q _u	γ	zaboření	usmyknutí
	nepříznivé	příznivé								
^a 1-GEO	1,00	1,00	1,30	1,25	1,25	1,40 (1,60)	1,40	1,00	1,00	1,00
^b 1-STR	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,40	1,10
3	1,00 (1,35)	1,00 (1,00)	1,30 (1,50)	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00	1,00	1,00

Zemní tlaky

Zemním tlakem nazýváme síly, kterými na sebe navzájem působí zemina a stavební konstrukce.

Tlak zemin na svislou část stavební konstrukce závisí na konstrukčním uspořádání stavební konstrukce, vlastnostech zemin za rubem konstrukce, velikosti a charakteru deformace zatížené části svislé konstrukce.

Podle posunu konstrukce vzhledem k zemině rozeznáváme tři druhy zemních tlaků:

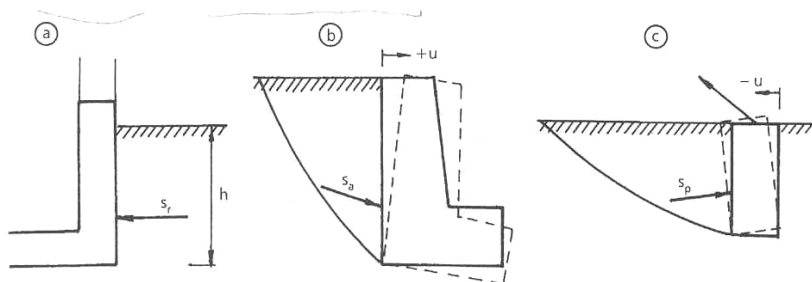
- _____, tj. tlak zeminy na konstrukci, která je natolik pevná a tuhá, že nedojde k její deformaci, posunu či pootočení. (např. tlak zeminy na suterénní zdivo)

- _____, který se mobilizuje, pokud se konstrukce posunuje nebo pootáčí ve směru tlaku zeminy (posun v hodnotách 0,0001 - 0,001 výšky konstrukce). Jeho velikost je menší než velikost zemního tlaku v klidu.

Zemina za stěnou se dostává do plastického stavu, postupně se aktivuje smyková pevnost a počáteční velikost zatížení klesá na hodnotu aktivního zemního tlaku. Aktivní zemní tlak klesne na minimální hodnotu, když se plně mobilizuje smyková pevnost. Tzn., že klín zeminy ohraničený rubem konstrukce, povrchem terénu a smykovou plochou se dostane do stavu mezní rovnováhy. (např. opěrné a pažící konstrukce)

- _____ vzniká, pokud je konstrukce zatlačována do zeminy vnější silou (konstrukce se posunuje proti zemině, posun v hodnotách 0,001 – 0,01 výšky konstrukce).

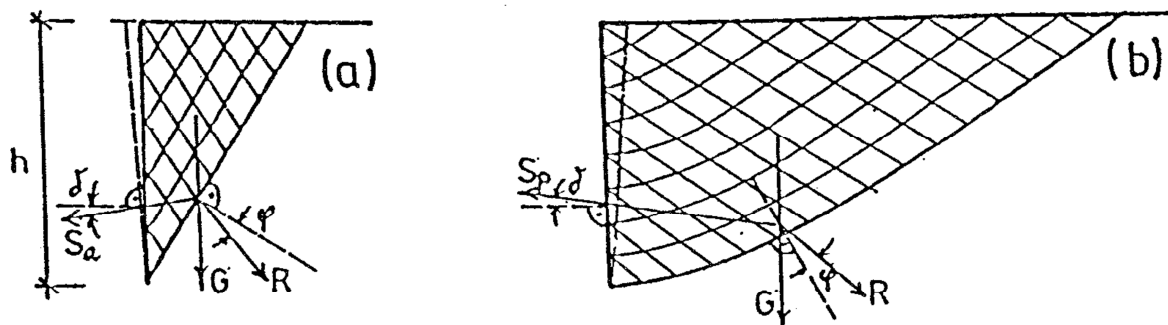
Pasivní zemní odpor je větší než zemní tlak v klidu. Maximální hodnoty pasivního odporu dostaneme za předpokladu plné mobilizace smykové pevnosti na vznikající smykové ploše v zemním masivu. (např. kotvení stožárů, opěry mostů, kotvicí systémy)



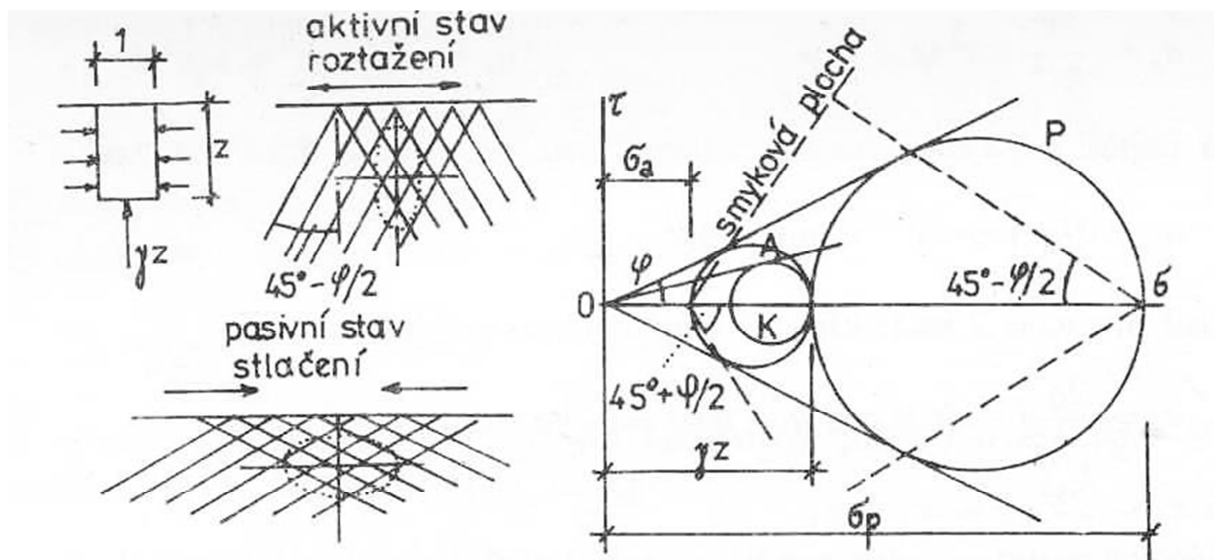
Obr. 7.1. Druhy zemních tlaků

a – tlak zeminy v pokoji, b – aktivní zemní tlak, c – pasivní zemní odpor, d – závislost velikosti tlaku na posunu [Hula]

Pokud se nedosáhne plné mobilizace smykové pevnosti v zemině, jde podle směru přemístění a přetvoření o _____ **aktivní zemní tlak** $\sigma_{a,zv}$ nebo o _____ **pasivní zemní tlak** $\sigma_{p,sn}$.



Obr. Smykové plochy v zemině při dosažení plné mobilizace smykové pevnosti [Lamboj]

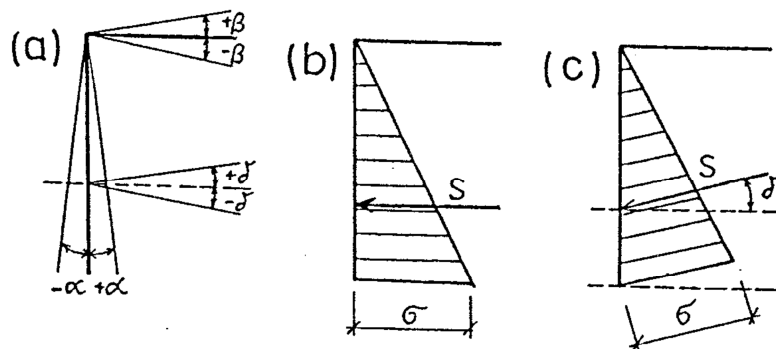


Obr. Mohrovo zobrazení zemních tlaků [Šimek]

Při stanovení zemních tlaků se vychází z teorie mezních stavů. Za tím účelem norma ČSN 73 0037 – Zemní tlak na stavební konstrukce (1990) uvádí součinitel spolehlivosti zeminy a zatížení.

Při natočení konstrukce kolem paty se předpokládá rozdělení zemního tlaku podle trojúhelníka a jeho velikost je dána obecně vztahem:

kde σ_z geostatické napětí v hloubce z
 K _____, $K = f(\varphi, \delta, \alpha, \beta; \nu)$



Obr. Orientace úhlů, rozdělení zemního tlaku podél konstrukce

Při výpočtu zemních tlaků se vychází z efektivních smykových parametrů, když tlak vody v pórech je nulový. V opačném případě se počítá s totálními parametry.

Zemní tlak v klidu

Poměrné vodorovné přetvoření konstrukce nulové

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_z + \sigma_y)] = 0, \text{ předpoklad rovnosti vodorovných napětí } \sigma_x = \sigma_y$$

$$\rightarrow \sigma_r = \sigma_z \frac{\nu}{1 - \nu} = \sigma_z \cdot K_r$$

K_r součinitel _____

$$K_r = \nu / (1 - \nu)$$

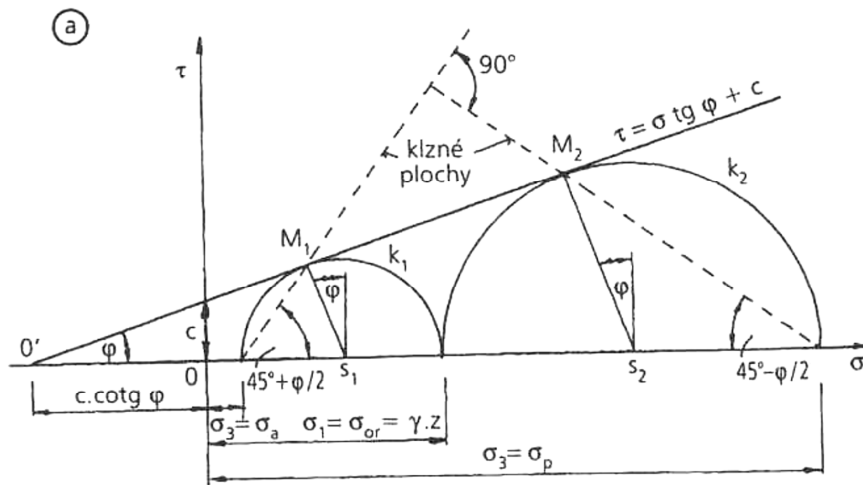
$$K_r = 1 - \sin \varphi \quad \text{Jákyho vztah (_____)}$$

$$K_r = 0,95 - \sin \varphi \quad \text{Fedův vztah pro _____}$$

Je-li terén nakloněn o úhel β , směr zemního tlaku v klidu je rovnoběžný s povrchem terénu a je roven:

$$\sigma_r = \sigma_z K_r \frac{\sin \varphi \cos \beta}{\sin \varphi - \sin^2 \beta}$$

Aktivní zemní tlak, pasivní zemní odpor



Obr. Rankinův stav mezní rovnováhy v soudržných zeminách

$$\sin \varphi = \frac{\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}}{\frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} + c \cdot \cot \varphi} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min} + 2c \cdot \cot \varphi}$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2c \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} = \dots = \sigma_{max} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \dots = \sigma_{max} \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}$$

Zavedením transformační rovnice $\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$ resp. $\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)$

Dostaneme rovnice ve tvaru:

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45 - \varphi/2) \quad \dots$$

$$\text{kde } K_a = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) - 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2) \quad \dots$$

$$\text{kde } K_p = \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)$$

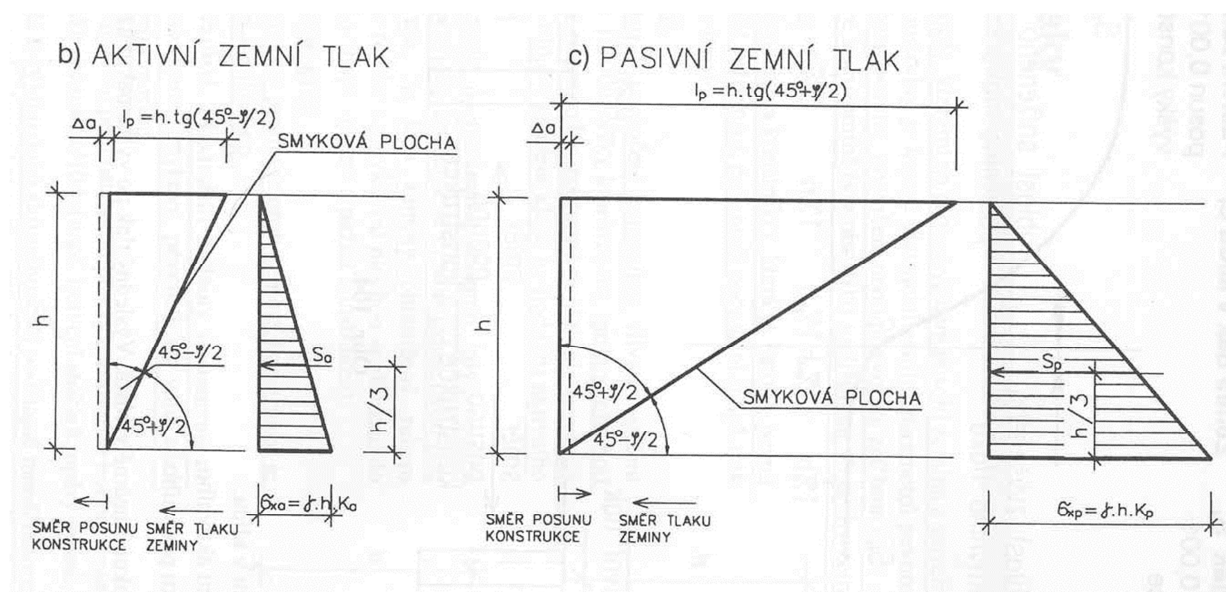
K_a součinitel _____

K_p součinitel _____

σ_a aktivní zemní tlak

σ_p pasivní zemní odpor

Aktivní zemní tlak a pasivní zemní odpor v nesoudržných zeminách



[Weiglová]

Napětí od aktivního tlaku

$$\sigma_a = \sigma_{or} \cdot K_a$$

Napětí od pasivního odporu

$$\sigma_p = \sigma_{or} \cdot K_p$$

Výsledná horizontální síla (S_a , S_p) bude rovna ploše napěťového obrazce a působí v jeho těžišti:

Aktivní tlak

Pasivní odpor

Součinitelé zemních tlaků

$$K_{a,p} = \frac{\cos^2(\varphi \mp \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varphi \pm \delta) \cdot \sin(\varphi \mp \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2}$$

Pokud _____ a zanedbá-li se tření mezi stěnou a konstrukcí ($\delta=0$), pak:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

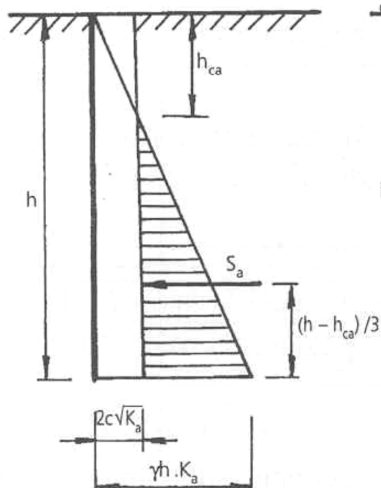
$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Aktivní zemní tlak a pasivní zemní odpor v soudržných zeminách

Rankinovo řešení předpokládá pro svůj výpočet rovinné smykové plochy (viz výše). U soudržných zemin vlivem jejich soudržnosti vznikají zakřivené smykové plochy. Pro tyto zeminy je tedy vhodné použít jiné výpočetní metody.

Avšak pro _____ aktivního a pasivního zemního tlaku soudržných zemin můžeme zemní tlak nahradit tlakem nesoudržné zeminy, který však působí pouze na zmenšené výšce v případě tlaku aktivního a na zvětšené výšce v případě pasivního odporu zeminy.

Aktivní tlak



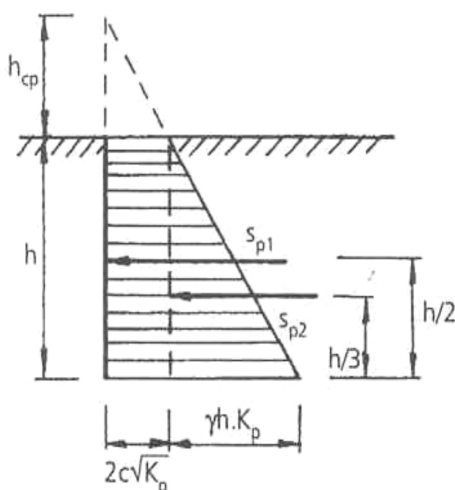
Vlivem soudržnosti zeminy se hodnota napětí od aktivního tlaku zmenší o tahové napětí $2c\sqrt{K_a}$ (napětí nebude působit na délce rovné tzv. **udržovací výšce h_{ca}**).

Napětí od aktivního tlaku $\sigma_a = \sigma_{or}K_a - 2c\sqrt{K_a}$

Udržovací výška

Výsledná síla od akt. tlaku $S_a = \frac{1}{2}\sigma_a(h - h_{ca})$

Pasivní odpor



Vlivem soudržnosti zeminy se hodnota napětí od pasivního odporu zvýší o odpor zeminy rovný hodnotě $2c\sqrt{K_p}$, který je stejně velký, jako účinek myšlené vrstvy zeminy výšky h_{cp} .

Napětí od pasivního odporu $\sigma_p = \sigma_{or}K_p + 2c\sqrt{K_p}$

Udržovací výška

Pasivní odpor $S_p = S_{p1} + S_{p2}$

Tlak zeminy nasycené vodou

Tlak zemin _____, nasycených vodou, se vypočte jako součet tlaku zeminy o objemové tíže zeminy pod vodou γ_{su} a tlaku vody v pórech. Při stanovení zemního tlaku se vychází z efektivních smykových parametrů zeminy. Tlak vody se uvažuje buď jako hydrostatický, když je zamezeno proudění vody pod konstrukcí, nebo jako hydrodynamický, když se uvažují ztráty tlaku způsobené prouděním.

Zemní tlak _____ se počítá s použitím totálních smykových parametrů zeminy, kdy se zpravidla uvažuje $\varphi_u = 0^\circ$, $c_u \neq 0$ a objemová tíha nasycené zeminy γ_{sat} . Samostatný tlak vody na konstrukci se v tom případě neuvažuje, pokud je spolehlivě prokázáno, že se za rubem konstrukce nemůže vytvořit souvislá vrstva vody.

Literatura:

Mechanika zemin, Šimek

Mechanika zemin a zakládání staveb, Lamboj, Štěpánek

Mechanika zemin, Weiglová

ENV 1997-1