



Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Modelování v geotechnice – Programový systém Plaxis v.8
(prezentace pro výuku předmětu Modelování v geotechnice)

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Inovace studijního oboru Geotechnika CZ.1.07/2.2.00/28.0009.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

Tvorba modelu
(kroky) ✓

PLAXIS INPUT
(položky)

Rozměry
modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové
podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS
CALCULATION
(obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady

Tvorba modelu (základní kroky)

- Dimenze modelu – (*tlačítko General Settings*)
- Typ modelu – rovinná deformace resp. osově symetr. model (*tlačítko General Settings*)
- geometrie (zeminové resp. horninové vrstvy, geometrie tunelu, konstrukční části (výztuž, opěrné stěny, kotvy, apod.), rozhraní výstavbových fází (*tlačítko Geometry*)
- Výběr konstitutivního modelu, nastavení materiálových charakteristik (*tlačítko Materials*)
- Výběr materiálu typu undrained nebo drained (*tlačítko Materials*)

Tvorba modelu
(kroky)

PLAXIS INPUT
(položky)

Rozměry
modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové
podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS
CALCULATION
(obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady

- Zadání geometrických okrajových podmínek (*Loads*)
 - Mělké tunely a hloubené jámy– horizontální posuny jsou nulové na vnějších svislých hranicích, na spodní hranici jsou nulová jak horizontální, tak i vertikální posuny, horní hranice nemá omezení (tuhá vana)
 - Hluboké tunely – k podmínce pro mělké tunely přistupuje podmínka nulových posunů na horní hranici modelu
- Zadání silových okrajových podmínek – přetížení hranice, ... (*tlačítka Loads*)- v případě hlubokých tunelů lze takto modelovat část přetížení od nadloží
- Automatický generátor sítě (modifikace:hustota sítě, pět úrovní hustoty sítě (velmi řídká, ..., velmi hustá), lokální zjemnění v oblastech, kde jsou očekávány velké změny napětí nebo deformací) (*tlačítka Mesh*)

Tvorba modelu
(kroky)

PLAXIS INPUT
(položky)

Rozměry
modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové
podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS
CALCULATION
(obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady

- Počáteční podmínky (*tlačítko Initial conditions*)

- **Hydrostatické podmínky** – úroveň hladiny podzemní vody, ..., generace počátečního pórového tlaku

- **Geostatické podmínky** – generace vertikálních a horizontálních počátečních efektivních napětí v napěťových bodech

γ_i – objemová tíha zemin

h_i – tloušťka vrstev

p_w – počáteční pórový tlak

K_0 – koeficient bočního tlaku

implicitní Jákyho vztah: $K_0 = 1 - \sin \varphi$

n-počet vrstev

$$\sigma_v^0 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i$$

$$\sigma_h^0 = K_0 \sigma_v^0$$

Pokud nejsou splněny podmínky pro generaci počáteční geostatické napjatosti pomocí koeficientu bočního tlaku (např. ukloněný terén, ...), je nutno provést iniciační gravitační výpočet v modulu Calculations.

Základní vstupní okno PLAXIS INPUT

Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS CALCULATION (obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady

Obecné nastavení: rozměry

- Tvorba modelu (kroky)
- PLAXIS INPUT (položky)
- Rozměry modelu
- Modelář tunelu
- Plate elementy
- Klouby
- Interface
- Kotvy
- Okrajové podmínky
- Poč.podmínky
- PLAXIS CALCULATION (obecně)
- Výpočetní fáze
- β - metoda
- Odvodnění
- Příklady

Point number and coordinates:
Pixels : 120 x 36 Units : -0,879 x 31,316 m

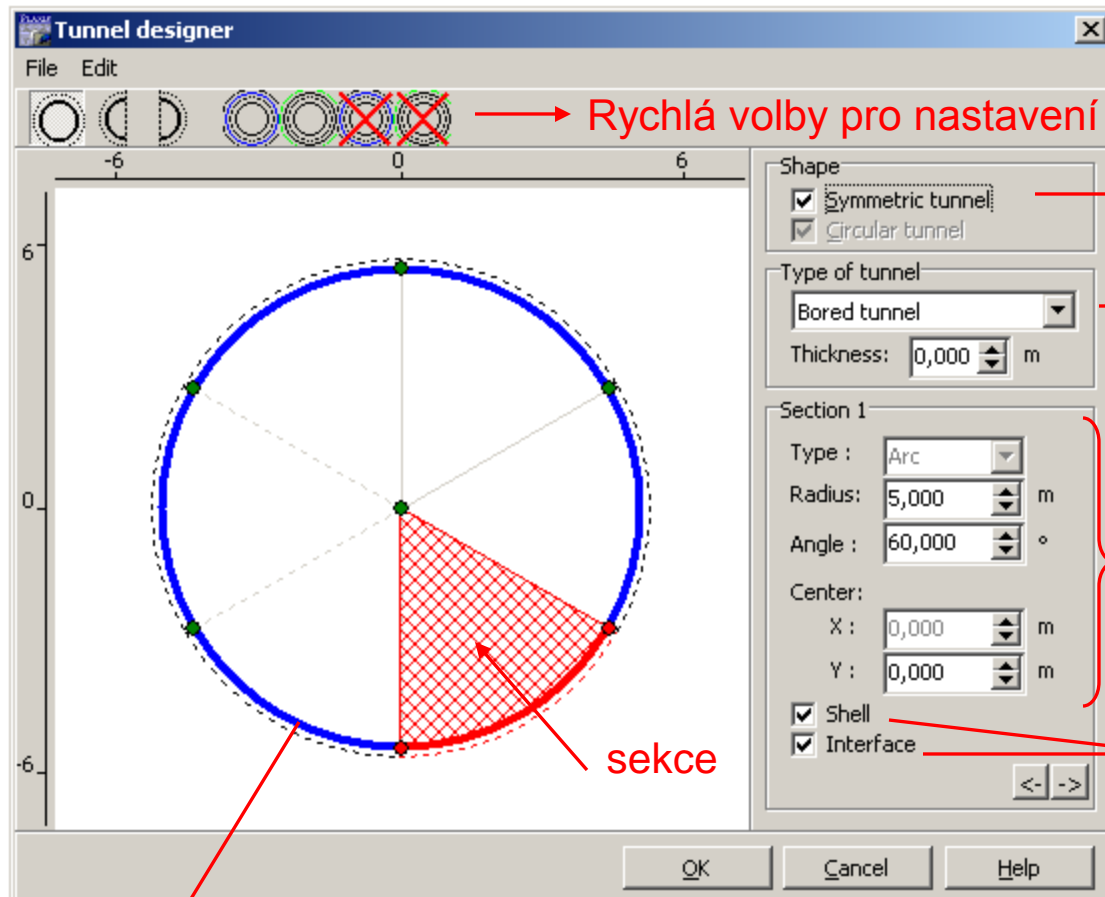
Start geotaco Microsoft PowerPoint - [I... Plaxis Input facility - Seznam Slovník ... 9:50

Rozměry modelu musí odpovídat požadavkům na eliminaci vlivu okrajových podmínek

Modelování v geotechnice – Programový systém Plaxis (MKP)

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Modelář tunelu (základní volby)



→ Rychlá volby pro nastavení atributů tunelu kruhový, nekruhový tune

→ Ražba TBM (bored tunnel) nebo NATM

} Sekce geometrických charakteristik

→ Volitelné položky shell – ostění tunelu interface- např. izolace

→ výztuž (plate)- složena z nosíkových prvků (liniových prvků) typu 2D

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Tunely ražené TBM

- Kruhový tvar
- homogenní výztuž, interface
- kontrakce tunelu může být simulovat ztrátu objemu zeminy v důsledku ražby

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Modelování tunelu raženého NATM

- Variabilní tvar příčného průřezu tunelu (sekce jsou definovány pomocí oblouků a úseček)
- Možnost simulace kombinace vnější (primární) výztuže (např. stříkaný beton) pomocí liniových prvků typu plate a vnitřní výztuže (sekundární) pomocí plošných prvků
- Možno zohlednit interface elementy (např. pro vrstvy izolace)
- Není možno modelovat smrštění, prodlevu mezi vyražením a vyztužením díla je ale možno modelovat pomocí tzv. β -metody

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elements
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β- metoda
Odvodnění
Příklady

Základní vstupní data pro prvky typu „Plate“

- Normálová tuhost $E.A$ (na jeden metr délky ve směru out-of-plane) - E -modul pružnosti, A - plocha příčného průřezu
- Ohybová tuhost $E.I$ (I - moment setrvačnosti průřezu)

Ekvivalentní tloušťka deskového prvku – d je počítána automaticky:

$$d = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$$

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

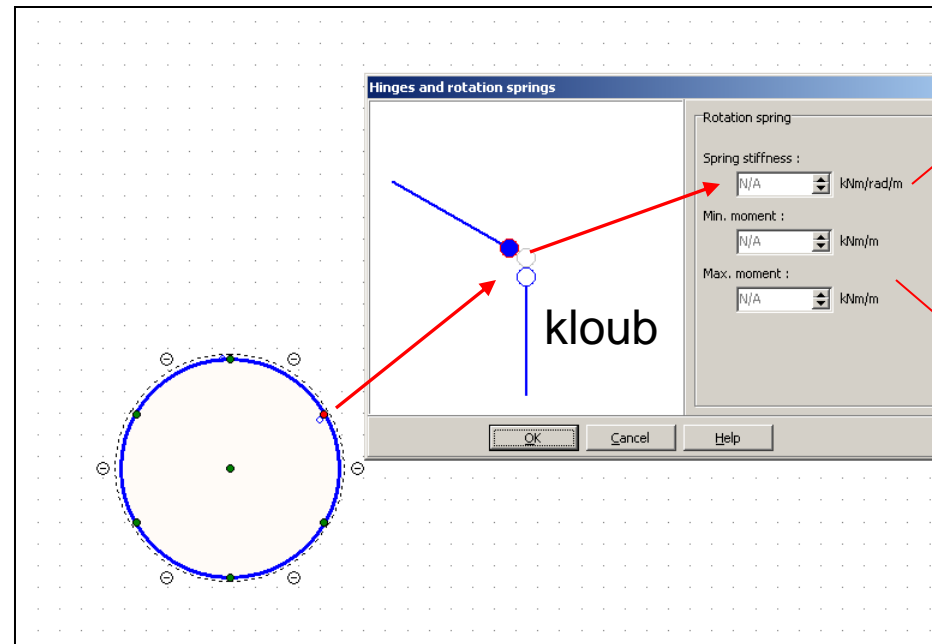
Základní vstupní data pro prvky typu „Plate“

- Poissonovo číslo
- Tíha – síla na jednotkovou plochu, stanovení: objemová tíha materiálu daného deskového prvku x tloušťka desky
- Charakteristiky pružně-plastického chování prvku: maximální ohybový moment M_p , maximální normálová síla N_p

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvození
Příklady

Klouby (hinges) a rotační pružinové prvky

- Přednastavené spojení deskových prvků (default): tuhé (rigid)
- Kloub (hinge): přidáný rotační stupeň volnosti (umožňuje nezávislou rotaci (discontinuous rotation))
- Zadání rotačních pružinových prvků mezi deskami



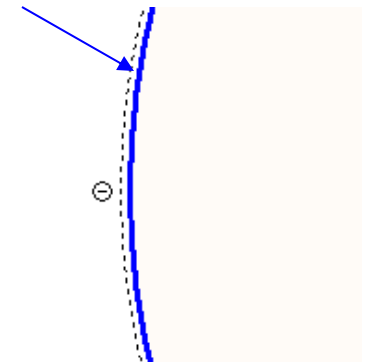
Definování tuhosti rotační pružiny

Definování momentu rotační pružiny

Interface

- Umožňuje modelovat úplnou interakci mezi strukturními objekty (stěny, výztuže, geomříže, piloty, ...) a okolní horninou
- Pevnostní parametry kontaktního prvku jsou funkcí pevnosti okolní zeminy a redukčního faktoru R (úhel vnitřního tření a soudržnost okolní zeminy je redukována)
- Interface je nepropustný, umožňuje zabránit proudění vody přes deskový prvek (impermeable screen)

Čerchovaná čára - interface



Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Kotvy (anchors)

- *node-to- node anchor*: dvoubodový pružinový element s konstantní tuhostí pružiny (normálová tuhost $E.A$), používaný pro modelování zeminových kotev (svorníků), může být předepínán

Vstupní data

- *Modul pružnosti materiálu kotvy E*
 - *Plocha příčného průřezu A kotvy*
 - *Rozteč kotev v out-of-plane L_s*
 - *V případě pružně-plastického chování se dále zadává maximální tahová síla $F_{max,tens}$, maximální tlaková síla $F_{max,comp}$*
 - *síla předepnutí (volitelný parametr)*
- } Normálová tuhost $E.A$

Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS CALCULATION (obecně)

Výpočetní fáze
β– metoda
Odvodnění
Příklady

- ***fixed-end anchor (kotvy s fixovaným koncovým bodem)***: pružinový element, který modeluje kotvu (svorník), jehož jeden bod je pevně ukotven v horninovém prostředí, lze jím modelovat rovněž i rozpěry (např. v případě stavebních jam), může být předepnut

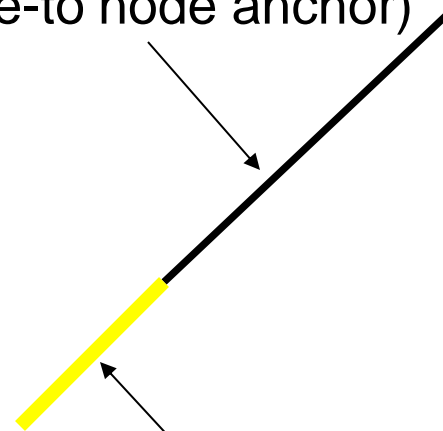
Vstupní data

- *Modul pružnosti E materiálu kotvy*
- *Plocha příčného průřezu A kotvy*
- *Rozteč kotev v out-of-plane L_s*
- *Ekvivalentní délka kotevního prvku*
- *Úklon kotvy od horizontální roviny*
- *V případě pružně-plastického chování se dále zadává maximální tahová síla $F_{max,tens}$, maximální tlaková síla $F_{max,comp}$*
- *Předepínací síla (volitelný parametr)*

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

- *Injektovaná kotva* – tento typ kotvy může být modelován kombinací kotev typu node-to-node a prvku geogrid, geogrid – simuluje injektovaný materiál, node-to-node anchor – simuluje kotevní tyč

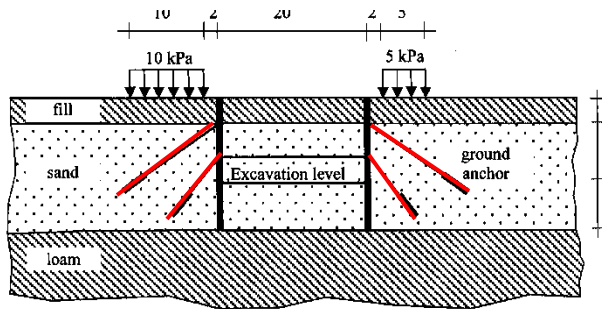
Kotevní tyč (node-to node anchor)



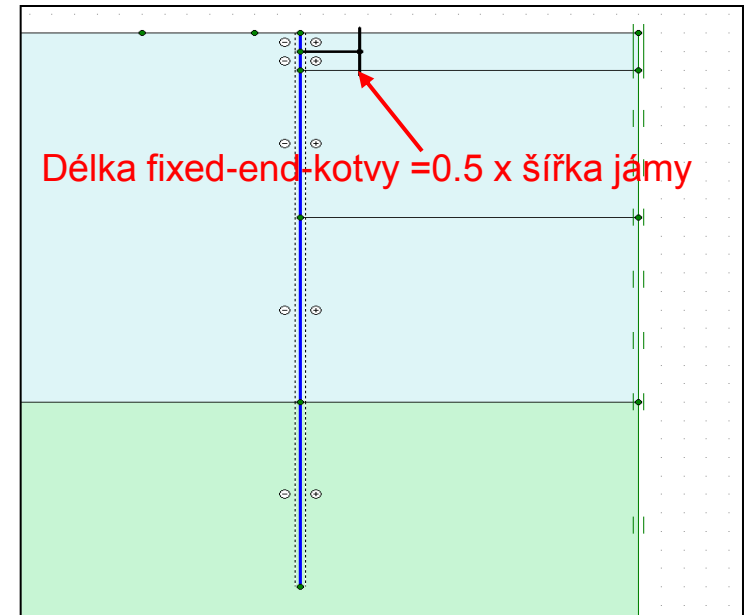
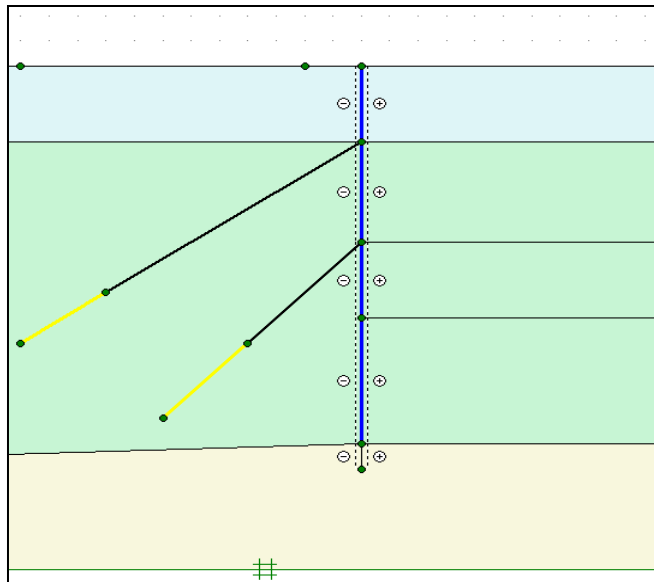
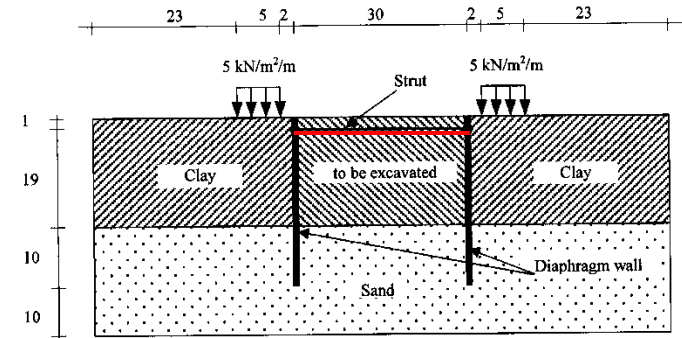
Injektáž (geogrid)

Kotvy – příklady použití

node-to-node kotva
(kotva s injektovaným kořenem)



fixed-end-kotva (rozpěra)



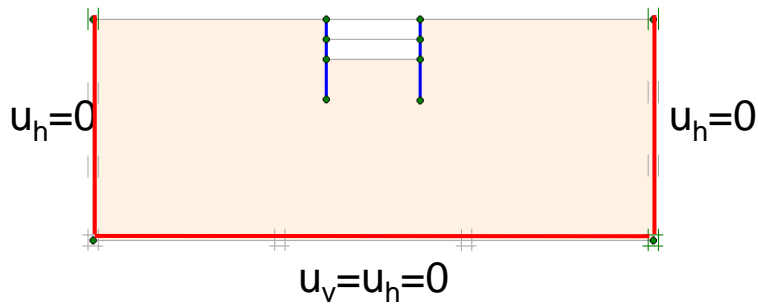
Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β- metoda
Odvodnění
Příklady

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Základní geometrické okrajové podmínky

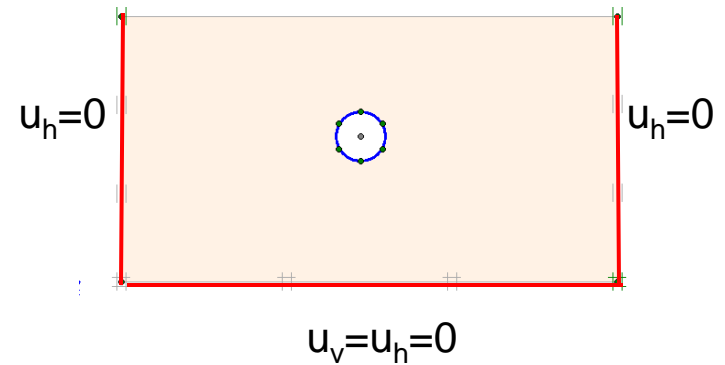
Hlubená jáma

Volná hranice

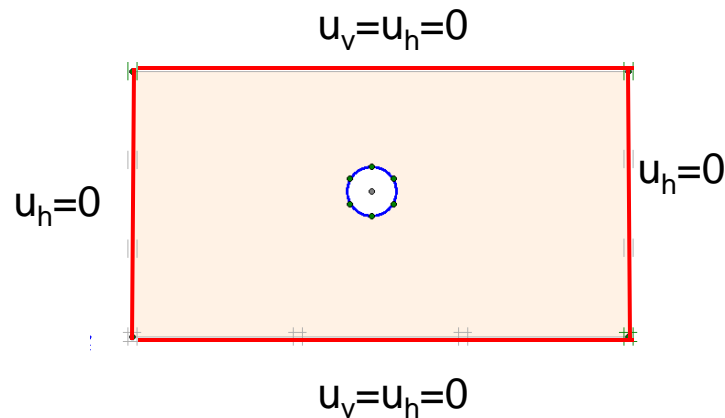


Mělký tunel

Volná hranice



Hluboký tunel



Nastavení počátečních podmínek

Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč. podmínky

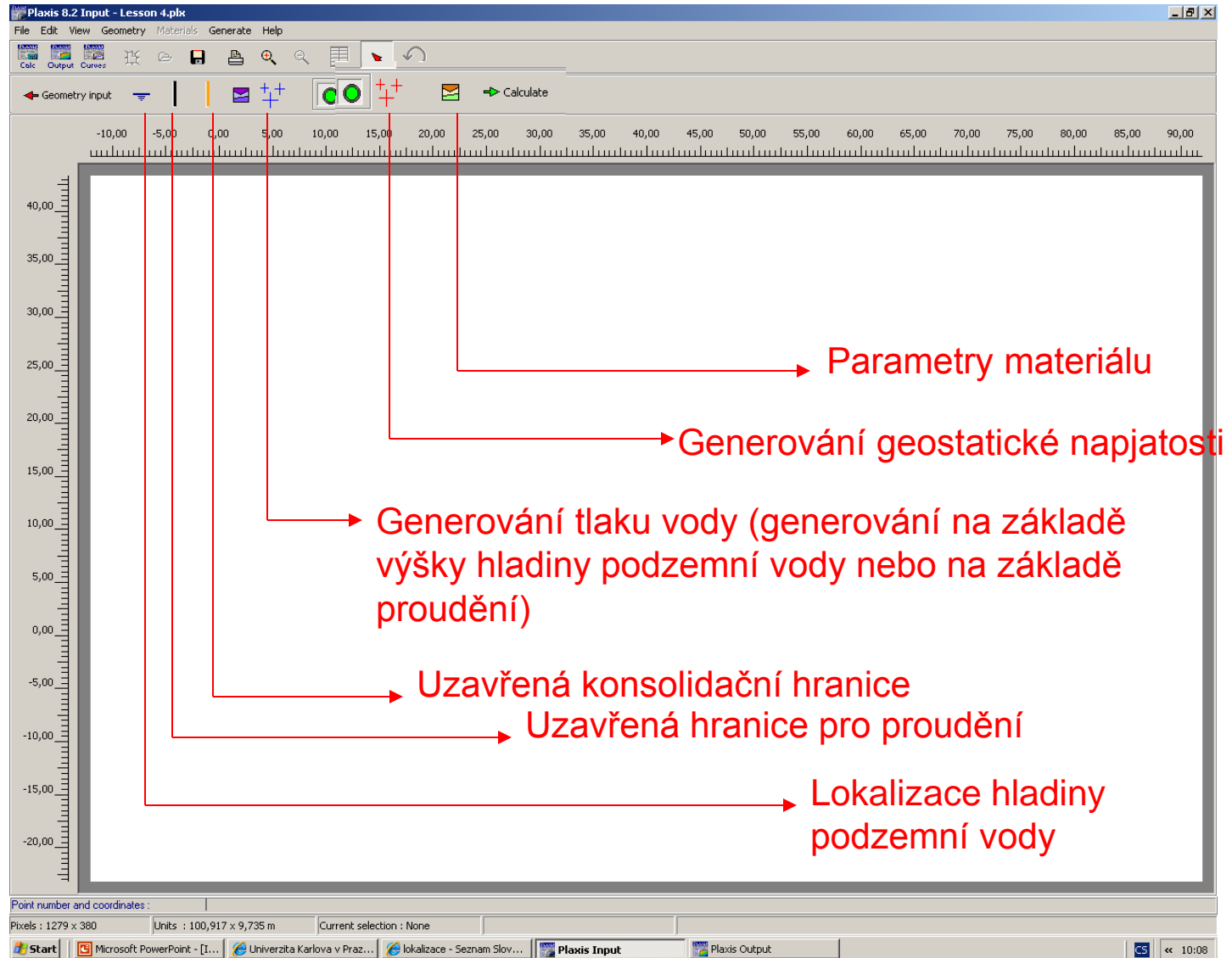
PLAXIS CALCULATION (obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady



Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Nastavení počátečních podmínek

Počáteční podmínky: nastavení počáteční geostatické a hydrostatické napjatosti

Geostatická napjatost lze v případě horizontální vnější hranice, horizontálních rozhraní vrstev a horizontální hladiny podzemní vody stanovit ve svislém směru jako tíhu nadloží, horizontální složka primární napjatosti je pak přímo úměrná složce vertikální, kde koeficientem úměrnosti je koeficient bočního tlaku (*Ko-procedura*).

V případě nesplnění těchto podmínek je třeba nejprve v první fázi výpočtu provést vyhodnocení těchto počátečních podmínek (výpočet *Gravity loading*)

Příklady geometrií nesplňujících podmínky pro Ko-proceduru



- Tvorba modelu (kroky)
- PLAXIS INPUT (položky)
- Rozměry modelu
- Modelář tunelu
- Plate elementy
- Klouby
- Interface
- Kotvy
- Okrajové podmínky
- Poč.podmínky
- PLAXIS CALCULATION (obecně)**
- Výpočetní fáze
- β - metoda
- Odvodnění
- Příklady

Výpočetní okno programu PLAXIS (obecné vstupy)

Jméno aktuální výpočetní dáze

Typ výpočtu (plastický, konsolidační, ...)

Výchozí fáze

Výpočetní parametry (definice fází, ...)

Aktuální fáze

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	Fir
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
→ walls instalation	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 ...	1	
→ first construction ...	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 ...	2	
→ second constructi...	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 ...	3	
→ safety analysis	4	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	3	

Výpočetní okno programu PLAXIS (parametry)

Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS CALCULATION (obecně)

Výpočetní fáze

β - metoda

Odvodnění

Příklady

General **Parameters** Multipliers Preview

Control parameters
 Additional Steps: 250
 Reset displacements to zero
 Ignore undrained behaviour
 Delete intermediate steps

Iterative procedure
 Standard setting
 Manual setting

Loading input
 Staged construction
 Total multipliers
 Incremental multipliers
 Time interval : 0,0000 day
 Estimated end time : 0,0000 day

Advanced...
 Define...
 GW Flow...

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	Fir
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
→ walls instalation	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 ...	1	
→ first construction ...	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 ...	2	
→ second constructi...	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 ...	3	
→ safety analysis	4	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	3	

Nulování posunů na začátku aktuální výpočetní fáze

load advancement ultimate level

Definice fáze

Parametry iteračního výpočtu (přesnost, počet iterací ...)

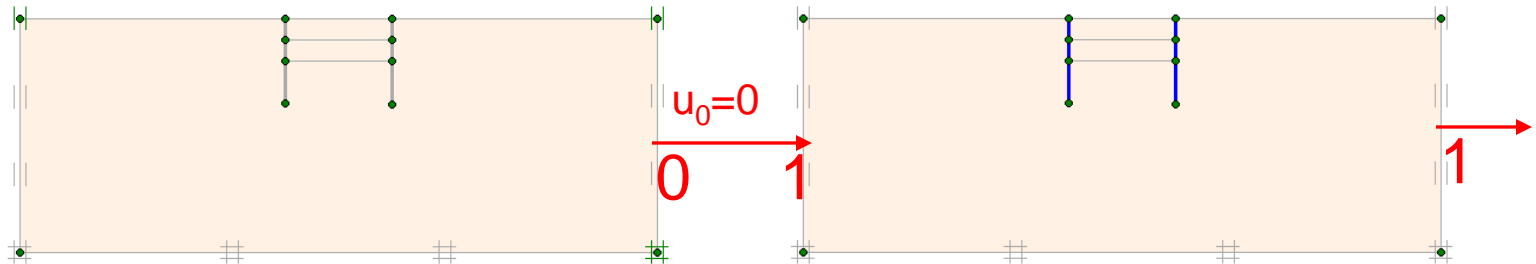
Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elements
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Základní výpočetní fáze (Stages)

Typické výpočetní fáze – stavební jáma stabilizovaná pažící stěnou

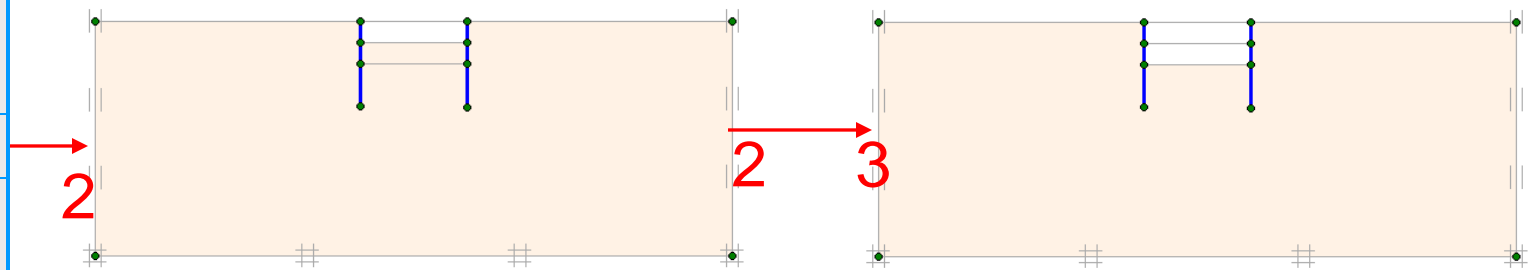
Počáteční fáze – počáteční napěťový stav (nastavený v části Input)

První výpočetní fáze = instalace pažící stěny



Druhá výpočetní fáze = první fáze hloubení jámy

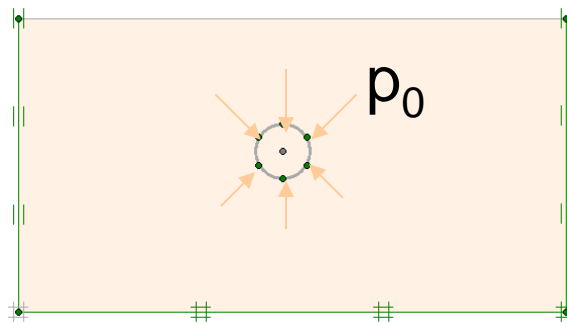
Třetí výpočetní fáze = druhá fáze hloubení jámy



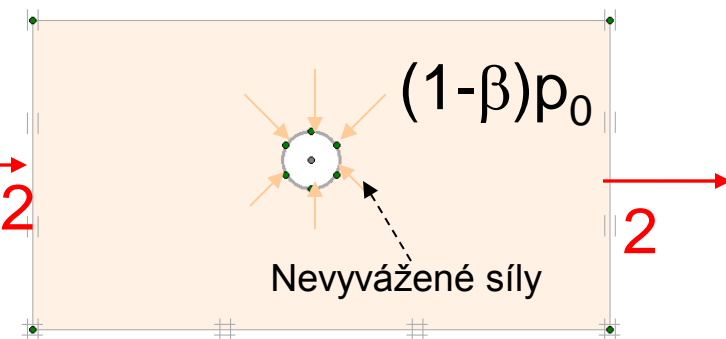
Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Typické výpočetní fáze – vyztužený tunel (β -metoda)

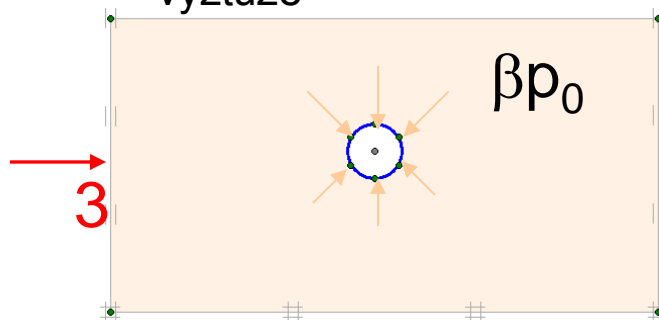
Počáteční fáze – počáteční napěťový stav (zadaný v části Input)



První výpočetní fáze = vyražení díla (deaktivace oblasti tunelu bez aktivace tunelové výztuže)



Druhá výpočetní fáze = aktivace tunelové výztuže



Simulace konstrukčního procesu (ražení, vyztužování) – aplikace tzv. β -metody

Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

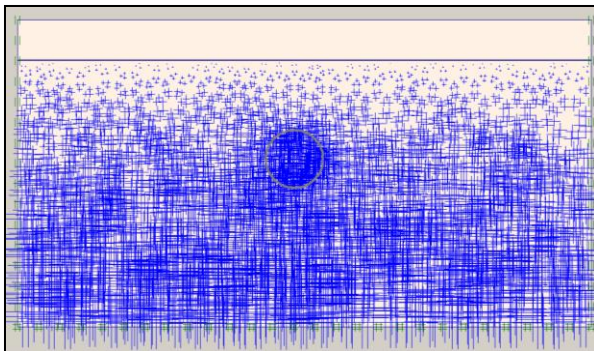
Princip β -metody

- Počáteční napětí p_0 působící v místě lokalizace budoucího tunelu je rozděleno do dvou částí $(1-\beta)p_0$ a βp_0
- $(1-\beta)p_0$ je aplikováno na nevyztužený tunel (dochází k vývoji části deformací před instalací výztuže)
- βp_0 je aplikováno na vyztužený tunel
- β -faktor je obvykle definován na základě zkušeností

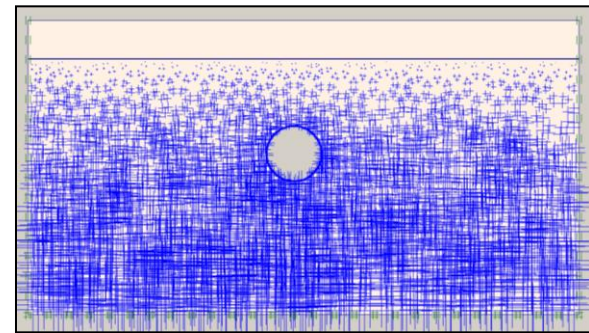
Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

Modelování odvodnění tunelu

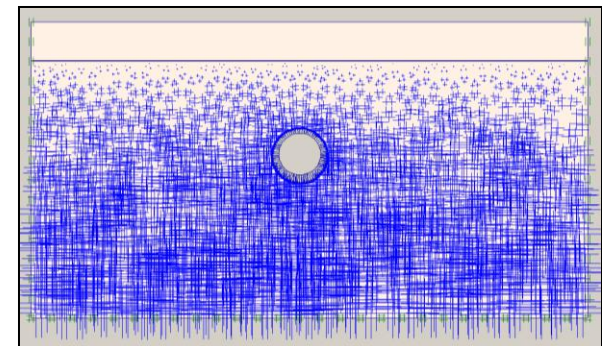
Počáteční pórový tlak
Tunel situován pod hladinou
podzemní vody



definice výpočetní fáze
(ražení+vyztužování+odvodnění)
odvodnění: oblast uvnitř tunelu je definována
jako suchá (dry)



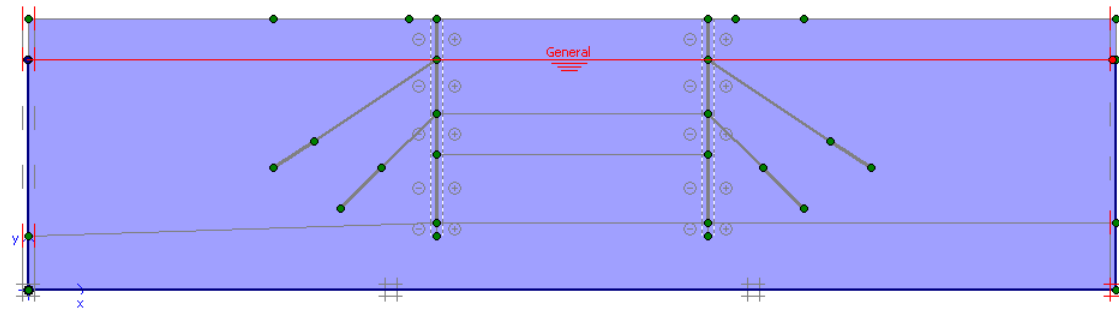
definice výpočetní fáze
(ražení+vyztužování)
Uvnitř tunelu zůstává tlak vody, který působí
na tunelovou výztuž (např. tlak vody v
potrubí)



Tvorba modelu (kroky)
PLAXIS INPUT (položky)
Rozměry modelu
Modelář tunelu
Plate elementy
Klouby
Interface
Kotvy
Okrajové podmínky
Poč.podmínky
PLAXIS CALCULATION (obecně)
Výpočetní fáze
β - metoda
Odvodnění
Příklady

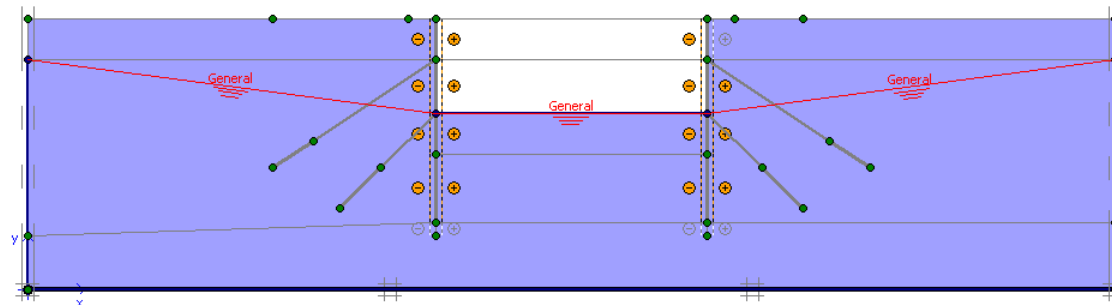
Odvodnění stavební jámy

Počáteční hladiny vody



Definice výpočetní fáze

(instalace pažící stěny+aktivace interface+hloubení+odvodnění)
odvodnění: modifikace hladiny podzemní vody (depresní kužel)



Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS CALCULATION (obecně)

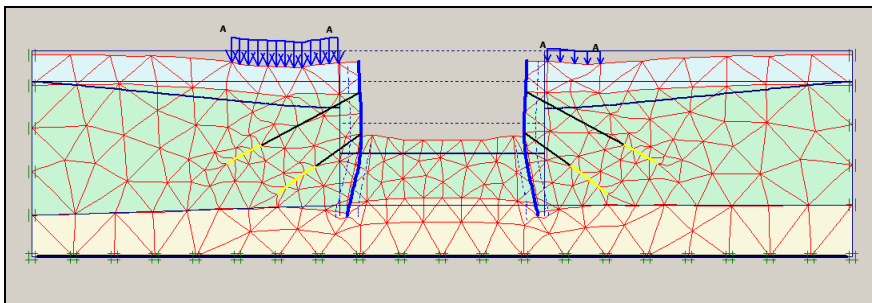
Výpočetní fáze

β- metoda

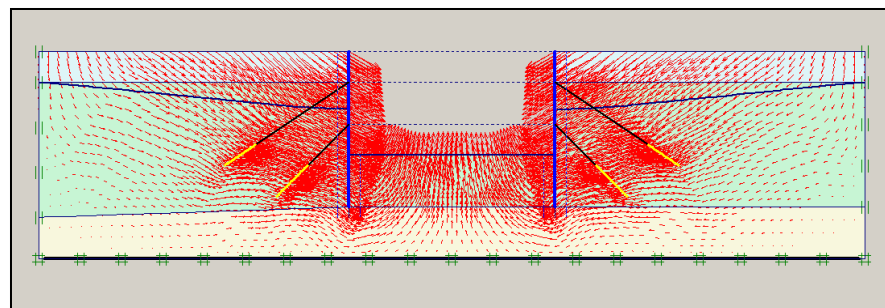
Odvodnění

Hloubená stavební jáma stabilizovaná betonovou stěnou

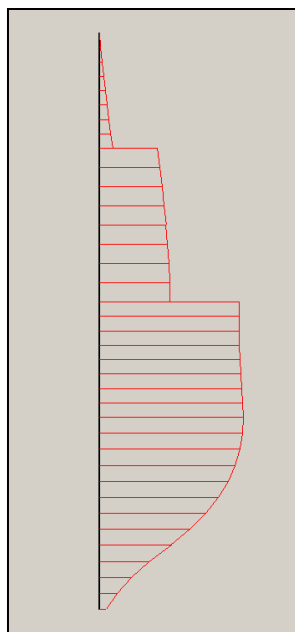
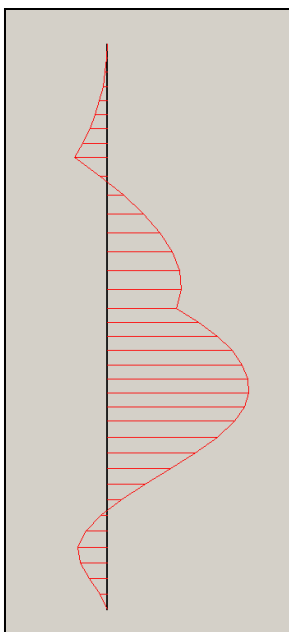
Deformovaná síť



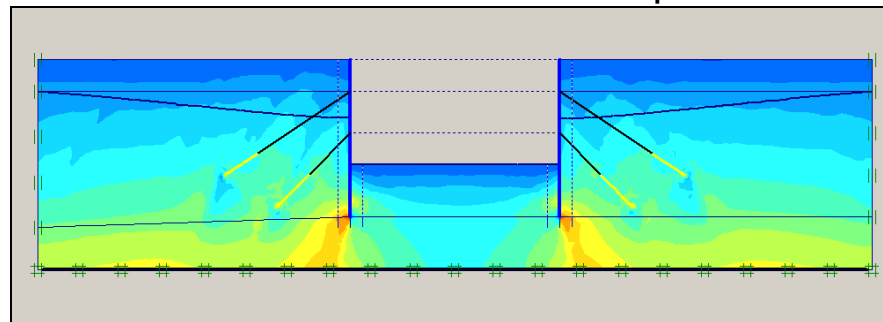
Celkové (totální) posuny



Vnitřní síly v konstrukci
ohybový moment normálové síly



Efektivní střední napětí



Sedání nad tunelem a vnitřní síly v ostění

Tvorba modelu (kroky)

PLAXIS INPUT (položky)

Rozměry modelu

Modelář tunelu

Plate elementy

Klouby

Interface

Kotvy

Okrajové podmínky

Poč.podmínky

PLAXIS CALCULATION (obecně)

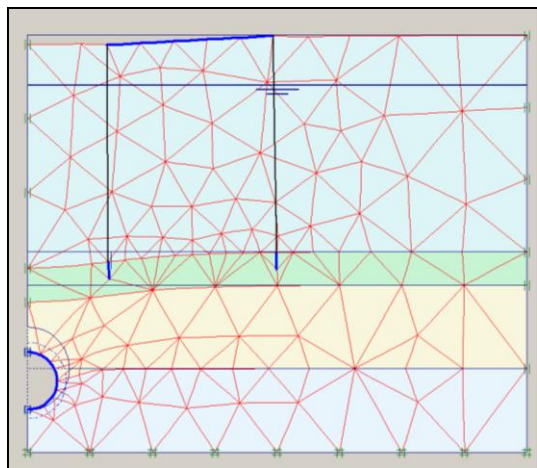
Výpočetní fáze

β- metoda

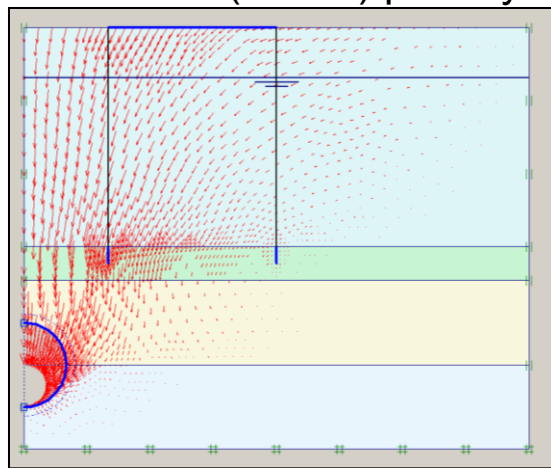
Odvodnění

Příklady

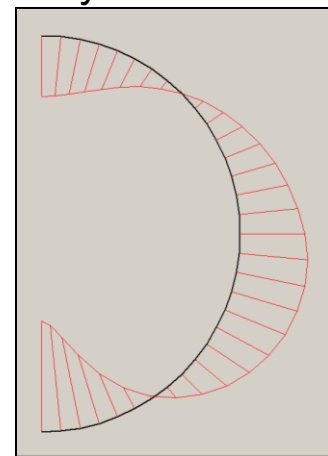
Deformovaná síť



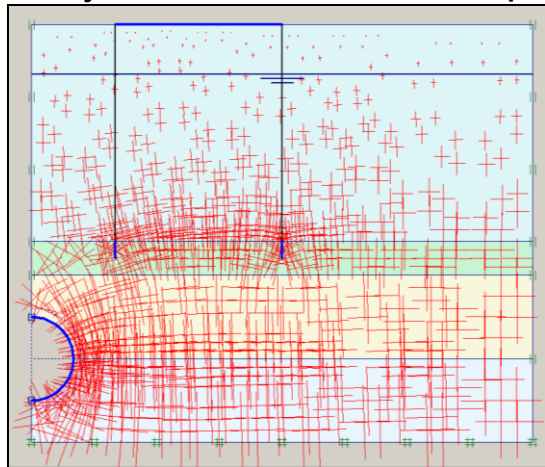
Celkové (totální) posuny



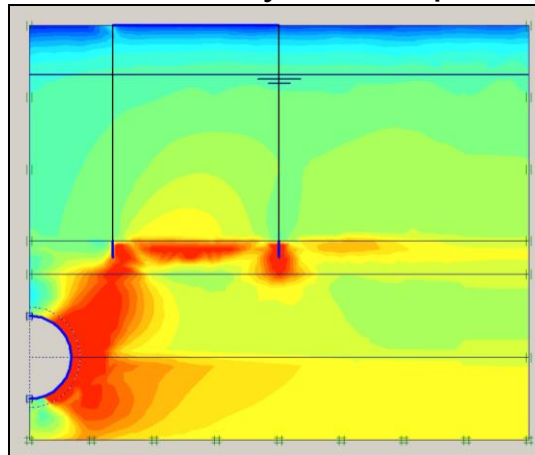
Ohybové momenty



Směry hlavních totálních napětí



Relativní smykové napětí



Normálové síly

