

## Skalní svah – stabilita horninového klínu

Program: Skalní svah

Soubor: Demo\_manual\_28.gsk

Cílem tohoto inženýrského manuálu je popsat určení stability stěny ve vybraném místě zářezu, které se nachází v prostředí tektonicky porušených skalních a poloskalních hornin. V posuzovaném místě předurčují geometrie stěny a plochy diskontinuit vytvoření prostorových horninových klínů.

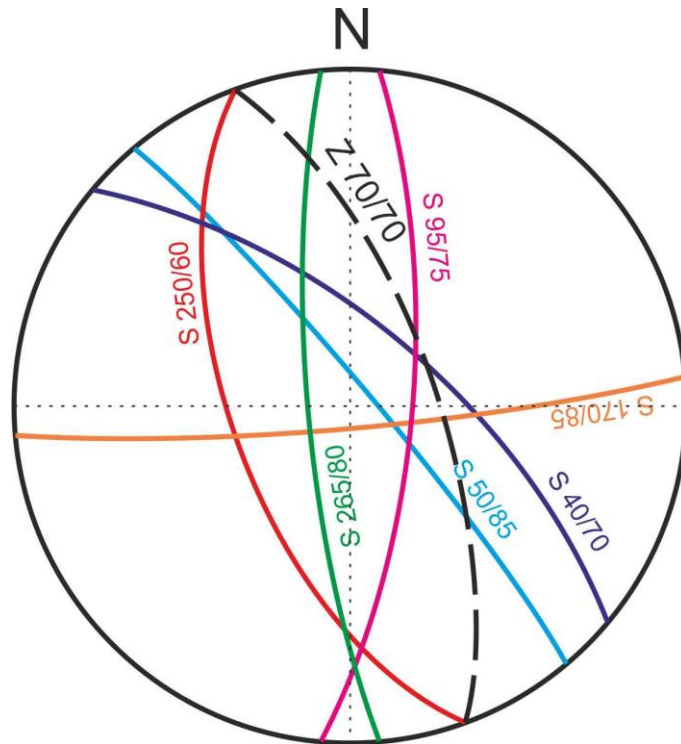
### Popis úlohy

Hloubený dvoukolejný tunel Votický se nachází v paleozoických vyvřelinách (hlubinných a žilných), z hornin převažují drobnozrnné žilné granity a aplity, místy amfibol-biotitické žuly. Posuzované místo se vyznačuje nepříznivou orientací diskontinuit, která negativně ovlivňuje stabilitu skalní stěny a vytváří prostorové horninové klíny – obr. 1.



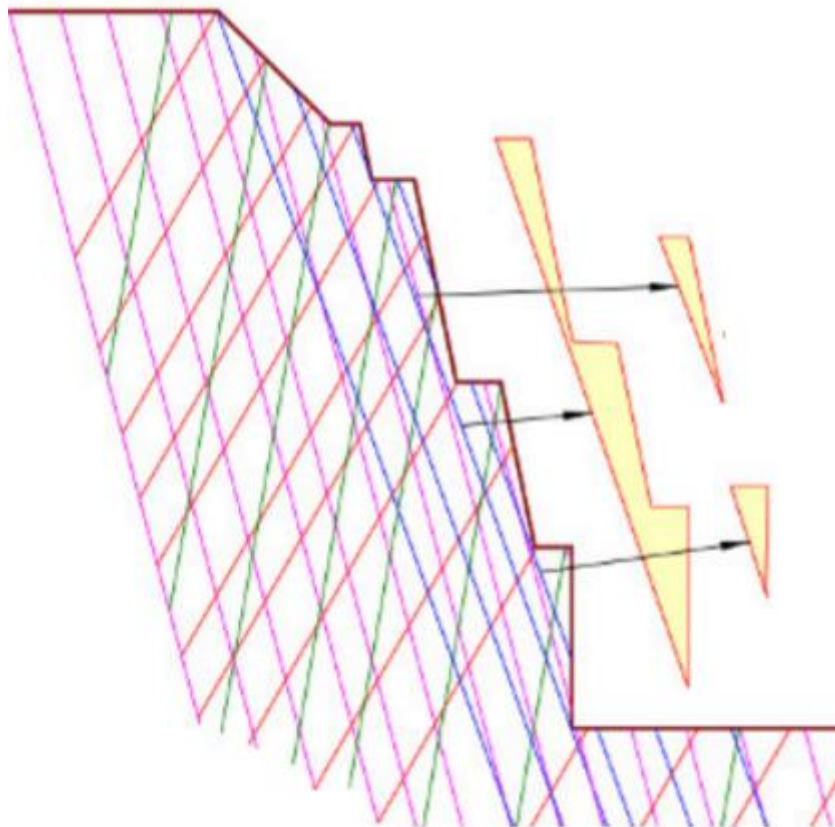
*Obr. 1 Západní svah stavební jámy – foto L. Mařík*

Geologickým průzkumem bylo zjištěno, že zářez ovlivňují zastoupené 3–4 systémy ploch nespojitosti a fragmentace horniny se pohybuje v závislosti na směru diskontinuit od malých bloků až po bloky v řádu metrů. Velikost sklonu spádnice nejčtenějších ploch svírají se spádnicí svahu stavební jámy úhel  $< 45^\circ$  a sklon se pohybuje v rozmezí  $65\text{--}80^\circ$  - obr. 2.



Obr. 2 Obloukový diagram nejčtenějších orientací ploch, Z 70/70 je orientace svahu stavební jámy

Tato nepříznivá (a před hloubením zářezu nepředpokládaná) orientace dominantních ploch nespojitosti způsobuje v průběhu hloubení zářezu vznik nestabilních širokých a plochých horninových klínů, které mají výraznou predispozici pro vyjetí do prostoru stavební jámy – viz obr. 3.



*Obr. 3 Projekce hlavních ploch nespojitosti do stavební jámy*

Na tuto novou situaci je nutné provést návrh způsobu zabezpečení stavební jámy - určit zabezpečení horninových klínů. V rámci tohoto inženýrského manuálu bude popsáno řešení pro horninový klín ve vybraném příčném řezu.

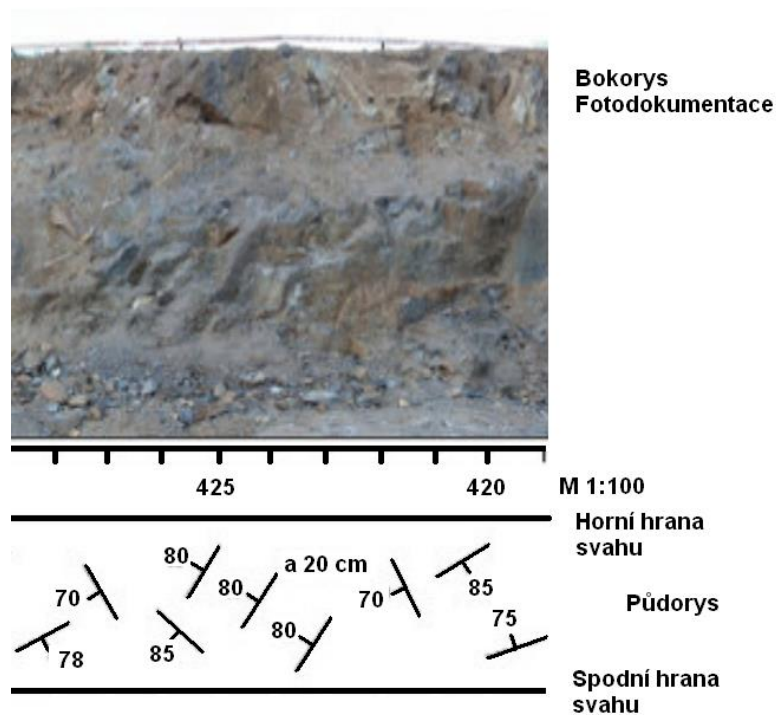
*Poznámka: Horninový masiv v přirozeném stavu prakticky vždy obsahuje alespoň dva hlavní systémy ploch nespojitosti, které předurčují charakter porušení skalního svahu. I v případě, že je skalní masiv postižen několika různě orientovanými systémy ploch nespojitosti, je klíčová povaha mechanismu porušení a vyvolání nestability rozhodující pro hodnocení stavu skalního svahu.*

### Zadání

Postup určení vhodného způsobu zabezpečení stability prostorového horninového klínu bude popsán na vybraném řezu stěny stavební jámy v portálovém úseku, kdy se jedná o trvalé zabezpečení, a proto požadovaný stupeň bezpečnosti je 1,5. Na základě geologického průzkumu byly na vzorcích horniny (granity a aplity, zatříděné jako R2 a R3) zjištěny následující parametry: pevnost v prostém tlaku stanovená zkouškou na nepravidelných vzorcích horniny  $\sigma_c = 15 - 60$  MPa, objemová tíha horniny  $\gamma = 27$  kN/m<sup>3</sup>, efektivní úhel vnitřního tření  $\varphi' = 32 - 42$  °, efektivní soudržnost zeminy  $c' = 100 - 150$  kPa, Poissonovo číslo 0,20 a modul deformace 100 – 200 MPa. Lze konstatovat, že

pevnostní a přetvárné charakteristiky zjišťované na vzorcích jsou vysoké, nicméně útvárová pevnost masivu jako celku je nízká díky disjunktivní nespojitosti masivu a místně může konvergovat k nule.

Hydrogeologické poměry jsou velmi jednoduché, na skalní stěně nebyla pozorována žádná zvodnělá puklina, občasné prameny souvisí pouze se zvýšenou srážkovou činností či s jarním táním. V celém skalní defilé v zájmové oblasti se nenachází vodoteč. Geolog projektanta provedl na obnažených plochách stavební jámy orientační měření sklonu a orientace ploch nespojitosti horninového masivu. V posuzovaném příčném řezu bylo určeno: svah stavební jámy má orientaci 257/78 (směr sklonu/sklon), sklon svahu 180/15, plochy nespojitosti 20/80 a 225/70. Na obou smykových plochách byly zjištěny následující parametry: efektivní úhel vnitřního tření  $\varphi' = 15^\circ$ , efektivní soudržnost  $c' = 5 \text{ kPa}$ ,



*Pohled na řešenou skalní stěnu – fotodokumentace (L. Mařík)*

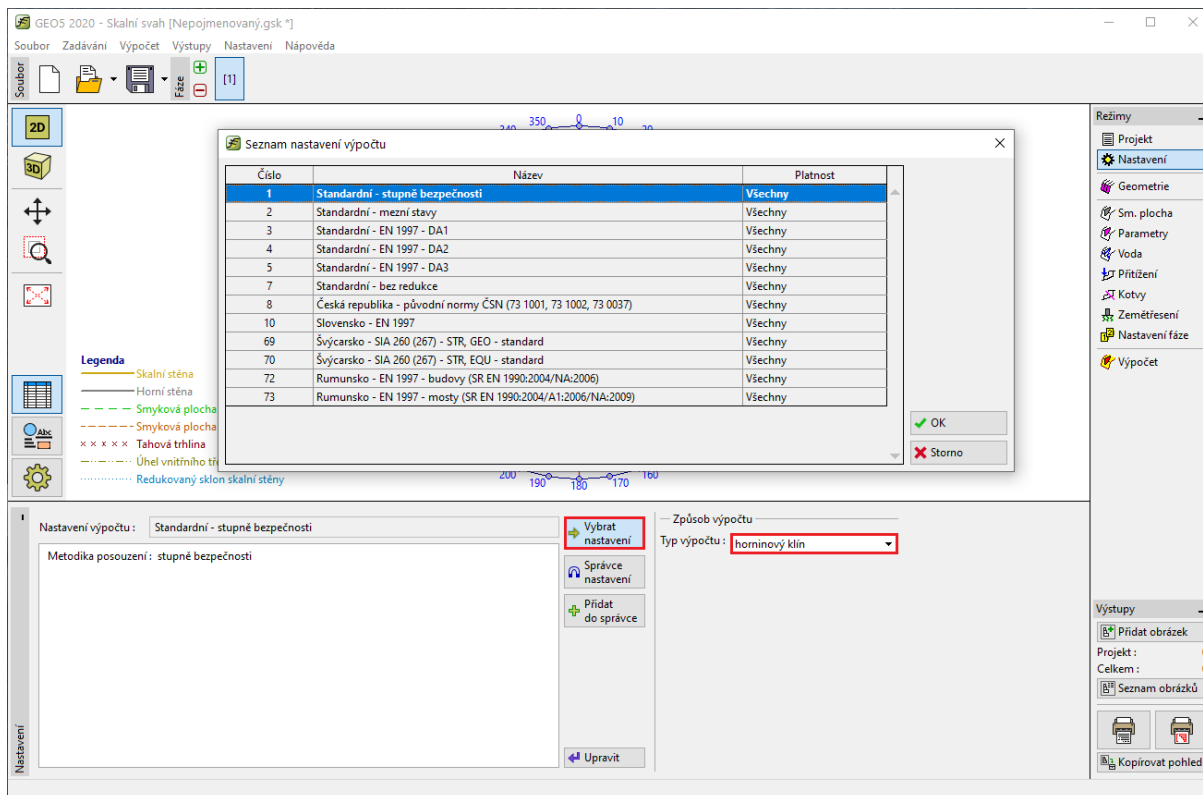
## Řešení

Výpočet stability horninového klínu v daném řezu a jeho zabezpečení provedeme podle stupňů bezpečnosti (z důvodu možnosti kontroly výsledků ručním výpočtem). Jednotlivé kroky zadání úlohy, vlastní výpočet a závěr k získanému řešení budou popsány v následujícím textu po jednotlivých krocích.

## Zadání úlohy

### 1) Nastavení požadovaného výpočtu podle stupně bezpečnosti a volba typu porušení skalní stěny.

V rámu „Nastavení“ klikneme na tlačítko „Vybrat nastavení“ a poté v Seznamu nastavení výpočtu zvolíme „Standardní – stupně bezpečnosti“ a potvrdíme tlačítkem OK.



Dialogové okno „Seznam nastavení výpočtu“

Dále v tomto rámu nastavíme typ výpočtu: horninový klín.

*Poznámka: Program Skalní svah umožňuje posoudit porušení skalní stěny smykem (skalní sesuvy) po rovinné a polygonální smykové ploše a stabilitu horninového klínu.*

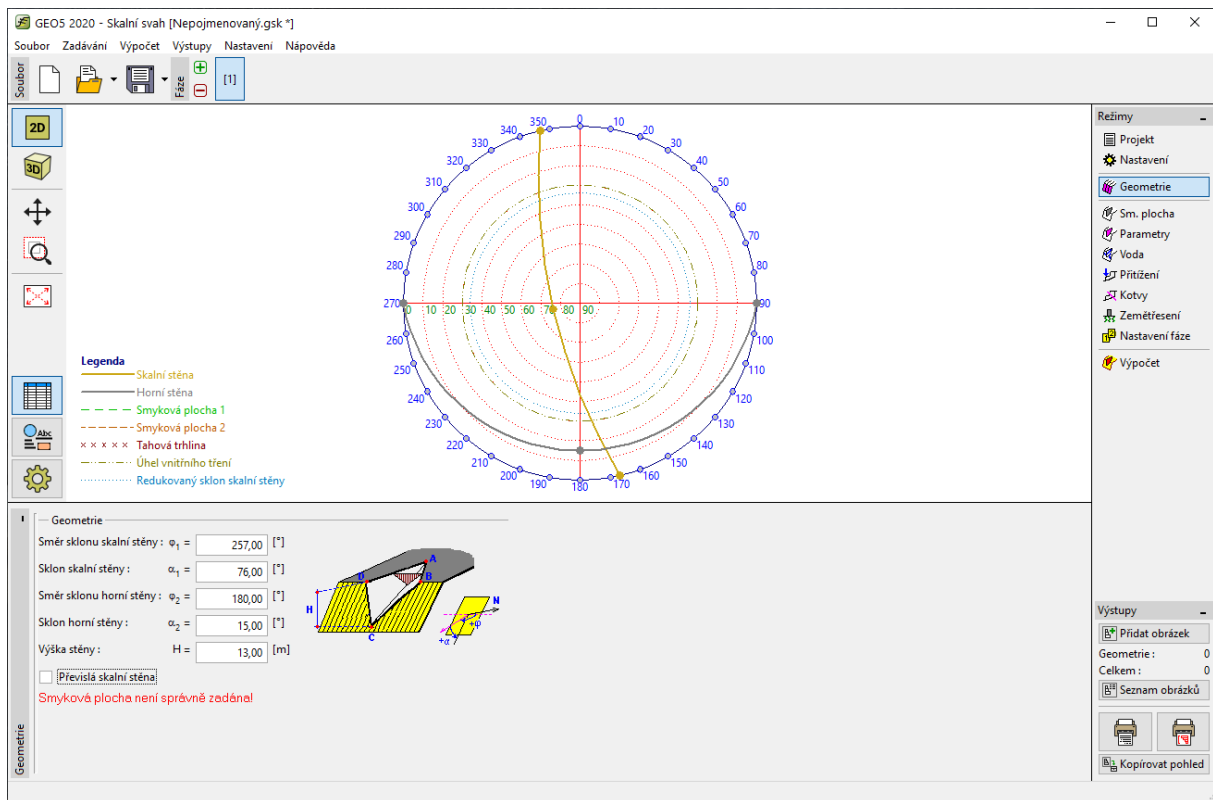
### 2) Zadání geometrie terénu a skalní stěny

Prostorovou orientaci (geometrii) posuzovaného svahu (terénu) a stěny jámy (skalní stěny) zadáme v rámu „Terén“. Zadávání orientace (geometrie) skalní stěny a terénu je pomocí směru sklonu a sklonu, které byly získány v geologickém průřezu - zadávané hodnoty jsou uvedené v tabulce. Výška skalní stěny je 13 m. Zadávané plochy se v grafickém okně zobrazují pomocí velkých (poledníkových) oblouků v Lambertově ortogonální projekci do spodní polokoule, kde oblouk představuje průsečnici roviny plochy nespojitosti s povrchem jmenované spodní polokoule.

*Poznámka: Pokud není k dispozici geologický průřez (popř. geofyzikální), můžeme prostorovou orientaci spádnice svahu určit z geodetického zaměření paty a horní hrany skalního svahu či pomocí laserového dálkoměru, svinovacího metru či fotogrammetricky. V obtížných podmínkách lze přibližně sklon svahu určit poměrově k výšce pozorovatele.*

Hodnoty pro zadání geometrie terénu a skalní stěny

	Směr sklonu [°]	Sklon [°]
Skalní stěna	257	76
Terén (horní stěna)	180	15



*Okno pro zadávání orientace skalní stěny a terénu s průsečnicovým diagramem zadaných ploch*

### 3) Zadání orientace smykových ploch

Prostorovou orientaci (geometrii) smykových ploch zadáme v rámu „Sm. plocha“. Zadávání orientace smykových ploch je pomocí směru sklonu a sklonu, které byly určeny strukturně-geologickým průřezem - zadávané hodnoty jsou uvedené v tabulce. Zadávané plochy se v grafickém okně zobrazují pomocí oblouků do Lambertovy projekce, kde oblouk představuje průsečnici roviny s povrchem spodní polokoule (průsečnicové diagramy).

## Hodnoty pro zadání geometrie terénu a skalní stěny

	Směr sklonu [°]	Sklon [°]
Smyková plocha 1	20	80
Smyková plocha 2	225	70

Po zadání orientace smykových ploch je možné zvolením tlačítka „3D Pohled“ vyvolat okno „Zobrazení 3D“, ve kterém je možné natáčet 3D zobrazení zadaných ploch.

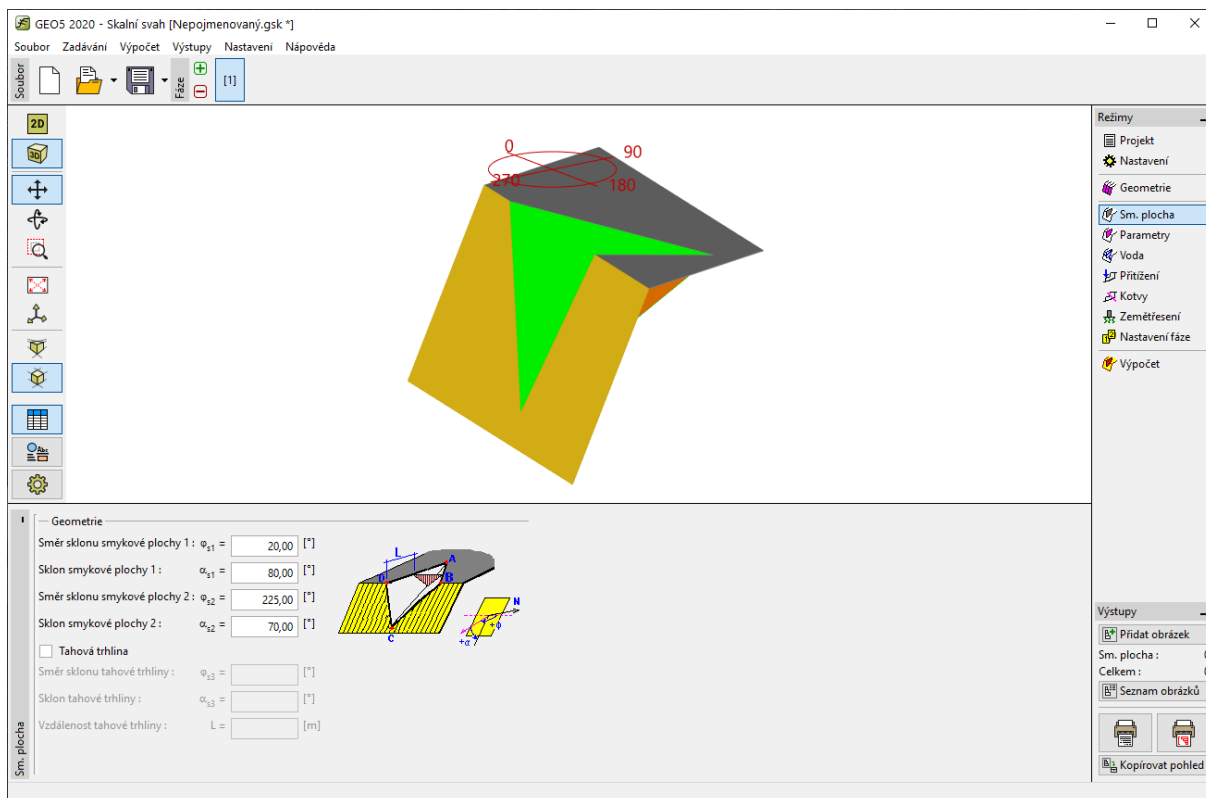
The screenshot displays the GEO5 2020 software interface for slope stability analysis. The main window shows a circular chart (Wulff diagram) with concentric circles representing safety factors and radial lines representing failure angles. Two failure surfaces are plotted: a solid line for the first failure surface and a dashed line for the second. The chart is labeled with angles from 0 to 350 degrees. A legend on the left identifies the elements: Skalní stěna (Rock wall), Horní stěna (Top wall), Smyková plocha 1 (Sliding surface 1), Smyková plocha 2 (Sliding surface 2), Úhel vnitřního tření (Internal friction angle), and Redukovaný sklon skalní stěny (Reduced slope of rock wall).

Below the chart, the 'Geometrie' (Geometry) section contains the following parameters:

- Směr sklonu smykové plochy 1:  $\phi_{s1} = 20,00$  [°]
- Sklon smykové plochy 1:  $\alpha_{s1} = 80,00$  [°]
- Směr sklonu smykové plochy 2:  $\phi_{s2} = 225,00$  [°]
- Sklon smykové plochy 2:  $\alpha_{s2} = 70,00$  [°]
- Tahová trhлина (Tensile crack)
- Směr sklonu tahové trhliny:  $\phi_{t3} =$  [°]
- Sklon tahové trhliny:  $\alpha_{t3} =$  [°]
- Vzdálenost tahové trhliny: L = [m]

A 3D diagram to the right of the parameters shows a cross-section of a slope with a failure surface, a rock wall, and a tensile crack. The diagram is labeled with 'C' and 'H'.

The right sidebar shows the 'Režimy' (Modes) menu with options: Projekt, Nastavení, Geometrie, Sm. plocha (selected), Parametry, Voda, Přetížení, Kotvy, Zemětřesení, Nastavení fáze, and Výpočet. The 'Výstupy' (Outputs) section shows 'Přidat obrázek' (Add image) and 'Seznam obrázků' (Image list) buttons, with 'Sm. plocha' and 'Celkem' both set to 0. A 'Kopírovat pohled' (Copy view) button is also present.



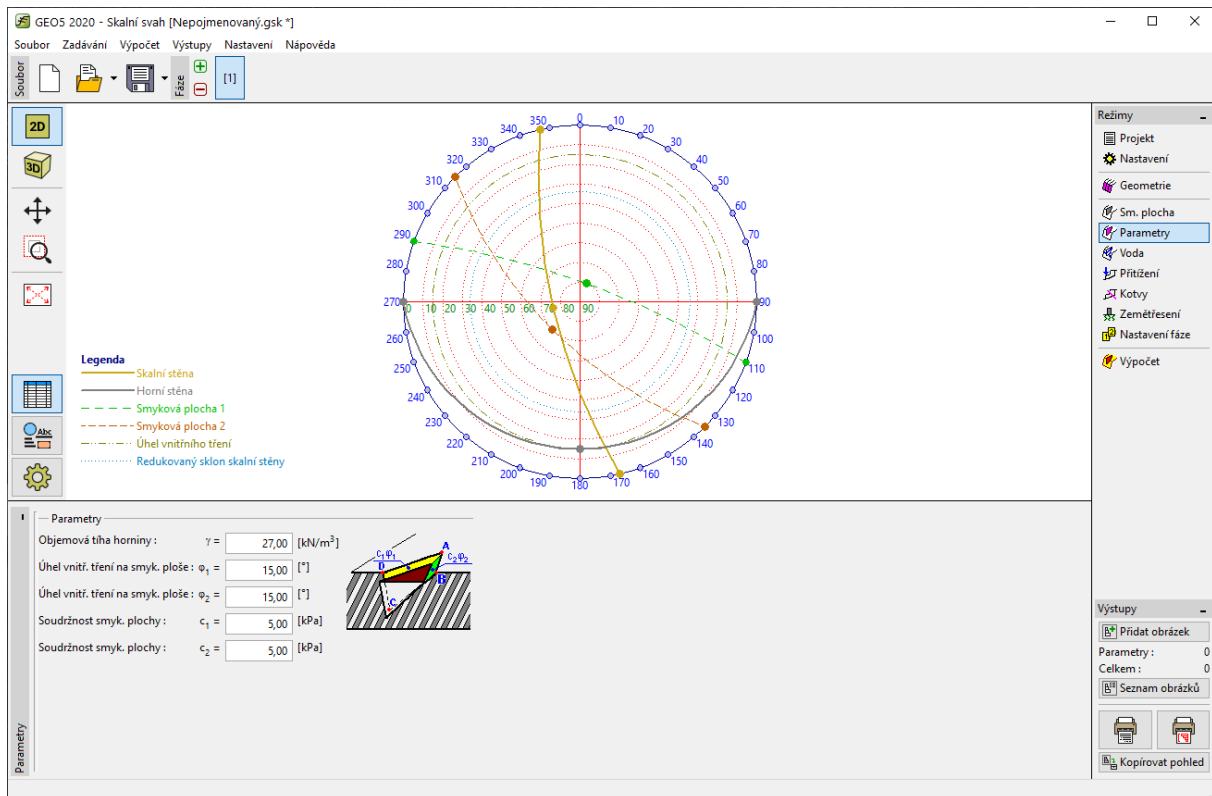
*Prostorové zobrazení horninového klínu v okně „Zobrazení 3D“*

*Poznámka: Prostorová orientace smykových ploch (ploch nespojitosti) se vztahuje ke geografickým souřadnicím – tzn. orientuje se vůči severu v horizontální rovině a k zemské tíži jako vertikální ose. Určuje se nejčastěji měřením v terénu geologickým kompasem. Hlavní dislokace v horninovém masivu lze určit i pomocí geofyzikálních měření.*



## 4) Zadání parametrů horniny a smykových ploch

V rámci „Hornina“ zadáváme objemovou tíhu horniny tvořící posuzovaný masiv a smykové parametry na smykových plochách (smykové parametry dle Mohr – Coulombova modelu). Žula má objemovou tíhu  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ , smykové parametry byly určeny průzkumem a jsou pro obě smykové plochy stejné: efektivní úhel vnitřního tření  $\varphi' = 15^\circ$ , efektivní soudržnost smykové plochy  $c' = 5 \text{ kPa}$ .



*Poznámka. Nejjednodušší určení smykové pevnosti po plochách nespojitosti spočívá v posouvání po sobě dvou horninových bloků vyjmutých z horninového masivu (původně od sebe oddělených vyšetřovanou plochou nespojitosti). Toto měření je vhodné pouze pro plochy nespojitosti bez výstupků a prohlubní (dilatačních prvků). Pokud tomu tak není, musí se parametry získat přepočtem ze zkoušky v rámu popř. složitě instrumentovanou zkouškou v terénu.*

## 5) Podzemní vody

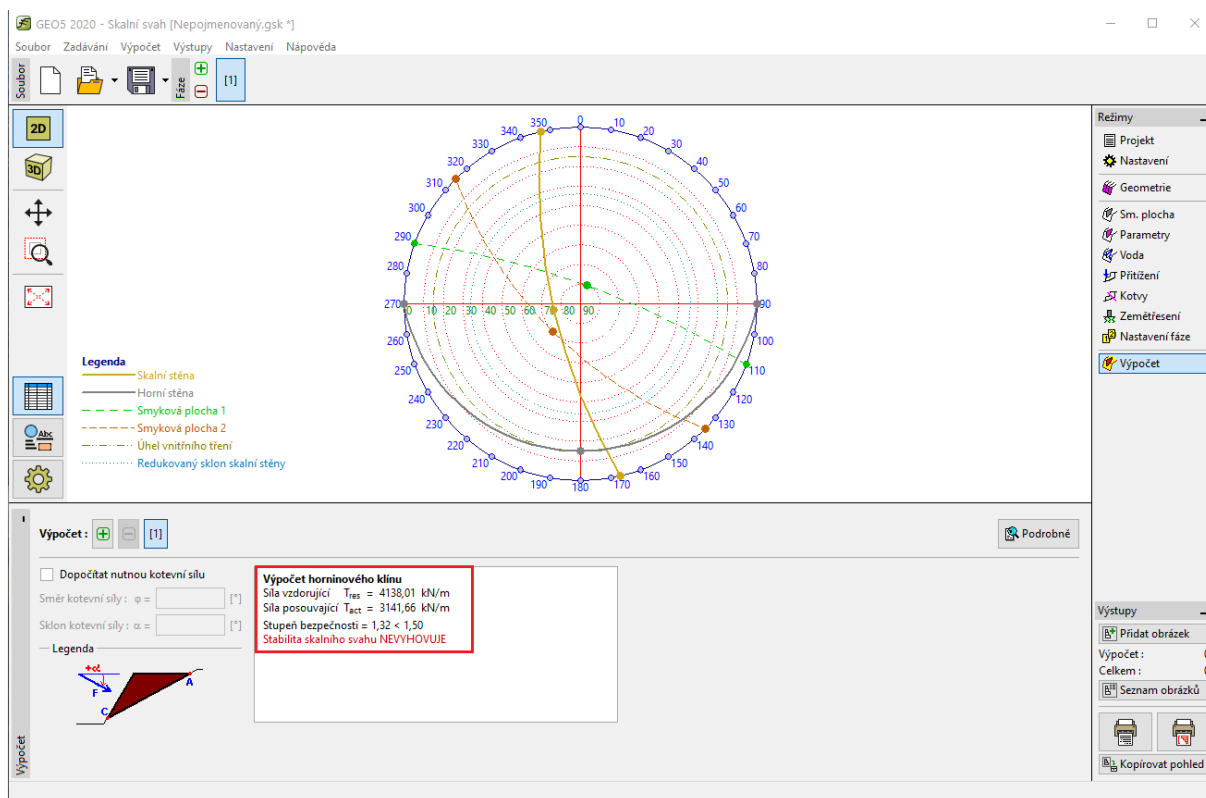
V rámci „Voda“ se zadává výška hladiny podzemní vody. V našem případě se na základě hydrogeologického průzkumu vliv podzemní vody nemusí uvažovat.

## 6) Nastavení návrhové situace

V rámci „Nastavení fáze“ volíme návrhovou situaci pro daný výpočet. V našem případě posuzujeme stabilitu skalní stěny v portálovém úseku tunelu se zabezpečením s dlouhou životností, tedy volíme trvalou návrhovou situaci.

## Výpočet úlohy

Výpočet zadané úlohy se spustí pomocí tlačítka „Výpočet“. Základní výsledky a další možné volby se objeví **v rámu „Výpočet“**. Podrobnější výsledky je možné získat stlačením tlačítka „Podrobně“ popř. ve výpisu programu. Pro naši zadanou úlohu vychází stupeň stability  $F = 1,32 < 1,5$ . Horninový klín tedy nevyhovuje požadavku na bezpečnost, z dlouhodobého hlediska může dojít k vyjždění klínových bloků a k šíření lokálních povrchových nestabilit hlouběji do masivu. Proto je nutné dále navrhnout technické opatření, které zvýší stabilitu horninového klínu na požadovanou hodnotu.



Výsledky výpočtu fáze 1

## Návrh technického opatření pro zvýšení stability

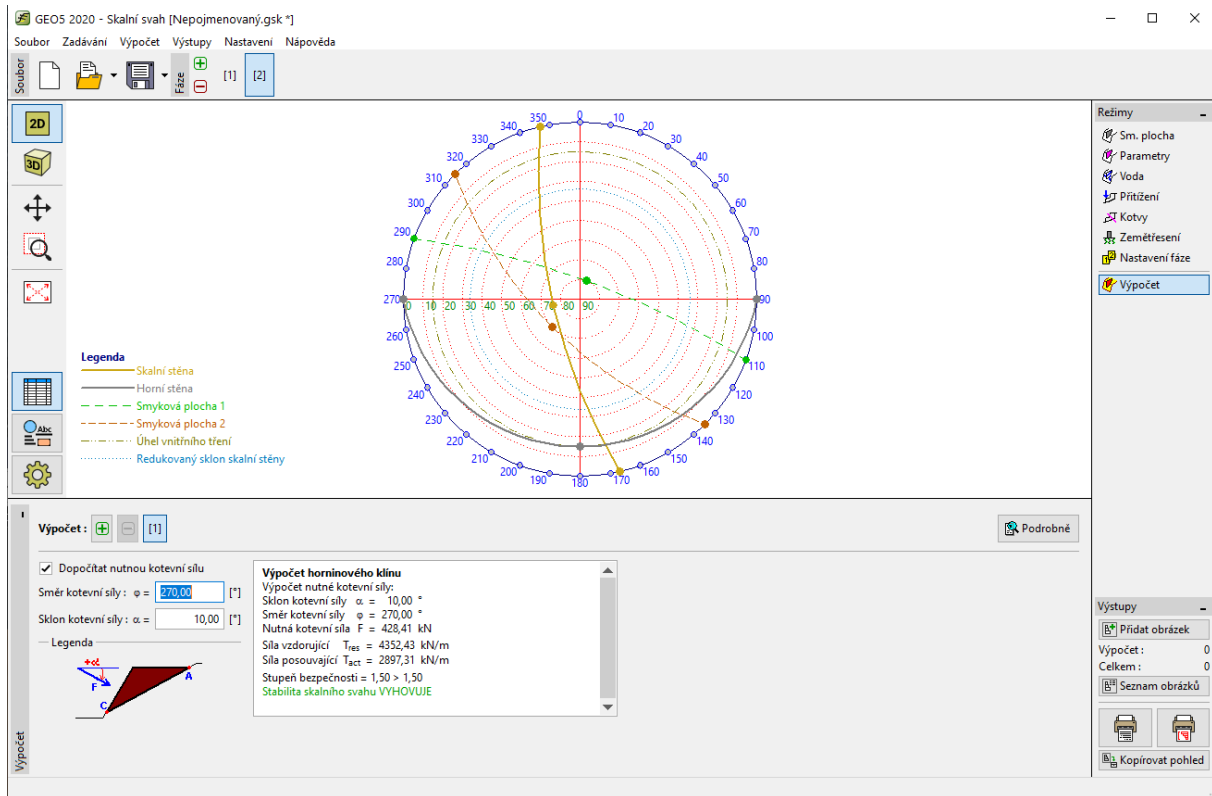
Zvýšení stability horninového klínu je možné buď návrhem přesvahování svahu na mírnější sklon, popřípadě i vybudování laviček ve svahu. Tato možnost vede však k velkému objemu zemních prací i záboru větší plochy a tudíž je finančně velmi náročná. Druhá možnost je ponechání původního tvaru skalní stěny a zabezpečení horninového klínu pomocí svorníků či kotev. Tato druhá varianta zabezpečení bude popsána v následujícím textu.

Návrh kotev bude proveden v druhé fázi posouzení - kliknutím na tlačítko plus u nabídky Fáze přidáme druhou fázi budování do výpočtu – je označena číslem 2.



Přidání fáze budování

V rámu „Výpočet“ zatrhneme nabídku „Dopočítat nutnou kotevní sílu“ a zadáme směr a sklon kotevní síly: směr kotevní síly vůči orientaci svahu  $\varphi = 270$ , sklon kotevní síly  $\alpha = 10^\circ$ . Po zadání hodnot se provede výpočet a zobrazí se spočtené výsledky. Pro navržený směr kotevní síly jsme dosáhli požadované stability 1,5, nutná kotevní síla působící na horninový blok vychází 428 kN.



### Podrobný výpis výsledků v okně „Výpočet“

Geometrie skalního svahu umožňuje mít u kotev jednotný sklon a směr, takže dalším krokem návrhu je výběr vhodného typu kotev s určitou deklarovanou únosností, určení jejich potřebného počtu a rozmístění ve skalním svahu (rastr rozmístění). V našem případě uvažujeme z důvodu rychlé aktivace kotev celozávitové tyče (samozavrtávací kotvy), které slouží během vrtání jako vrtné tyče (jsou při vrtání zároveň injektovány). Tyto kotvy umožňují ihned po jejich zavrtání vnesení kotevní síly 50 kN a po 24 hodinách zajišťují únosnost min. 150 kN. Z výše uvedeného vyplývá, že je pro zabezpečení horninového klínu potřeba 5 kotev, navržený je ortogonální rastr umístění 2,5 x 2,5 m. Vzhledem k fragmentaci horniny je vhodné kotvy doplnit ocelovou sítí.

*Poznámka: U hornin s výraznými směry a sklony ploch odlučnosti je nutné směr kotvení upravit tak, aby úhel svorníku vůči plochám diskontinuity byl co nejstrmější (nejlépe  $90^\circ$ , minimálně  $45^\circ$ ).*

### Závěr

Pro naši zadanou úlohu vyšel pro nezabezpečený horninový klín stupeň stability  $F = 1,32 < 1,5$ . Tento výsledek vedl k nutnosti provést návrh technického opatření pro zvýšení stability skalní stěny. Ze dvou variant byla na základě ekonomické úvahy vybrána varianta kotvení horninového klínu.

V druhé fázi výpočtu byla určena nutná kotevní síla a její směr i sklon. Pro možnost jednotného směru a sklonu kotev po celém skalním svahu byl vybrán vhodný typ kotvy pro dané geologické podmínky a proveden odhad rastru rozmístění kotev.