

## MODELAREA NUMERICA A STARII DE EFORTURI SI DEFORMATII IN AREALUL STATIEI PILOT SI ZONELE INVECINATE

Modelarea numerica a starii de eforturi si deformatii este o preocupare activa a numerosi cercetatori. Abordarea acestui domeniu a luat amploare odata cu dezvoltarea tehnicii de calcul superioare, care a permis rulara unor programe, bazate pe variatii de parametri si retele de discretizare din ce in ce mai fine, cu posibilitati de ajungere la rezultate cat mai corecte din punct de vedere stiintific.

In ceea ce priveste modelarea numerica a starii de eforturi si deformatii in jurul golurilor subterane rezultate in urma dizolvării sării în soluție, aceasta este o preocupare relativ noua, unde rezultatele in domeniu sunt aproape insignifiante raportate la necesitatea existenta. In general, acest domeniu a fost exploatat, fie ca o necesitate a cunoasterii conditiilor de exploatare a sării și preintampinare a unor fenomene nedorite, ulterioare (prabusiri, cu implicatii socio-economice majore), fie datorita unor stari de urgente, care impuneau pe moment necesitatea cunoasterii.

Tinand cont ca metodele de monitorizare actuale ale unor astfel de goluri subterane sunt destul de costisitoare economic, nepermitand realizarea unei monitorizari complexe in conditiile unei rentabilitati economice a exploatarii, rezultatele obtinute in domeniu sunt vizibil sarace din acest motiv.

Avand in vedere scopul acestui studiu si anume, modelarea numerica prin metoda elementelor finite a starii de eforturi si deformatii din jurul golului sondei 361 si a golurilor invecinate, s-a incercat pe cat posibil pastrarea unei coerente in utilizarea caracteristicilor de material. Astfel, in afara masuratorilor de laborator, in alegerea valorilor caracteristicilor s-au considerat si ordinele de marime rezultate in urma exploziilor test efectuate la punerea in functiune a statiei microseismice, cand s-au determinat vitezele undelor P si S pe zone de intere.

Parametrii geomecanici medii, rezultati in urma determinarilor efectuate pe carotele prelevate din zona Ocnița-Ocnele Mari au urmatoarele valori:

### pentru sare

- greutatea specifica ( $\gamma$ ):	21,193 kN/m <sup>3</sup>
- greutate volumica ( $\gamma$ ):	19,5 – 21,1 kN/m <sup>3</sup>
- umiditate (W):	17,86 – 26,5 %
- indicele de porozitate (e):	0,139
- modulul longitudinal Young (E):	21*10 <sup>5</sup> – 27*10 <sup>5</sup> kPa
- modulul dinamic de elasticitate (pe baza vitezelor P si S) ( $E_{din}$ ):	18*10 <sup>5</sup> – 22.5*10 <sup>5</sup> kPa
- modulul de elasticitate static ( $E_{st}$ ):	19,836*10 <sup>5</sup> kPa
- rezistenta la compresiune:	20,7 Mpa

- rezistenta la tractiune:	11,15 1,115 Mpa
- rezistenta de rupere la forfecare	
( $\sigma_f / \tau_f$ ):	5,754/5,465 Mpa
- unghiul de frezare interna:	62 grade
- coeziunea:	circa 2,5 Mpa = $25 \cdot 10^2$ kPa
- modulul de elasticitate la incarcare:	$8 \cdot 10^5$ kPa – $12 \cdot 10^5$ kPa
- modulul de deformatie secant:	$7.9 \cdot 10^5$ kPa – $9.8 \cdot 10^5$ kPa
- modulul de elasticitate la revenire:	$17 \cdot 10^5$ kPa – $21 \cdot 10^5$ kPa
- modulul de elasticitate reologic:	334,7 Mpa – 3347 daN/cm <sup>2</sup>

### pentru steril

Pentru rocile din acoperisul zacamantului s-au determinat urmatoarele caracteristici fizico-mecanice:

- greutate volumica:	20 kN/m <sup>3</sup>
- umiditate:	26,5 %
- modulul dinamic de elasticitate:	$7.5 \cdot 10^5$ kPa
- rezistenta la compresiune:	$40 \cdot 10^2$ kPa
- rezistenta la tractiune:	$6,6 \cdot 10^2$ kPa
- unghiul de frezare interna:	18 grade
- coeziunea:	9 – 11 $\cdot 10^2$ kPa
- modulul de elasticitate la incarcare:	$7.5 \cdot 10^5$ kPa
- modulul de deformatie secant:	$3.2 \cdot 10^5$ kPa <sup>2</sup>

Pentru toate incercarile sensul de solicitare a fost diagonal in raport cu stratificatia.

S-au realizat o serie de determinari de parametrii pentru cateva probe de sare prelevate din zacamantul de la Ocnele Mari. Determinarile au fost facute de catre laboratorul Institututului de Mine de la Petrosani, la cererea Societatii Nationale a Sarii, prin intermediul Exploatarii Ramnicu Valcea.

Parametrii determinati se regasesc in tabelul urmatoar, cu precizarea ca au fost preluati in mod identic din buletinele de analiza, insa au fost modificate unitatile de masura, astfel incat sa nu existe diferente din acest punct de vedere la nivelul tuturor determinarilor.





Analizand retrospectiv dezvoltarea metodei elementelor finite, se constata ca primele incercari de folosire a acestei metode au fost facute cu 50 de ani in urma (Olariu & Bratianu, 1986). Astfel Hrenikoff a propus in anul 1941 *metoda cadrelor* folosita in *elasticitate*, prin care se inlocuieste corpul analizat printr-un ansamblu de bare, oferindu-se astfel posibilitatea reprezentarii unui mediu elastic, continuu, cu o infinitate de grade de libertate, printr-un ansamblu de bare cu un numar finit de elemente si grade de libertate. In anul 1943, Courant a dezvoltat metoda, introducand pentru prima data functii de aproximare similare celor folosite in prezent la definirea elementelor finite triunghiulare.

Metoda elementelor finite prezinta, comparativ cu alte metode numerice anumite posibilitati de prelucrare si interpretare mai deosebite dintre care se mentioneaza:

- modelarea unor forme neregulate prin folosirea elementelor finite cu forme si dimensiuni diferite, adecvate configuratiei geometrice a corpului studiat.
- tratarea, fara dificultati deosebite a unor probleme in care proprietatile fizice corpului variaza.
- adaptarea dimensiunilor elementelor finite la caracteristicile principale ale problemei abordate, cum ar fi, de exemplu, marimea gradientului functiei studiate.
- considerarea oricaror conditii la limita caracteristice pentru problema studiata.

#### CARACTERISTICILE PROGRAMULUI PLAXIS

Pentru realizarea modelarii numeri am folosit si vom folosi in continuare programul PLAXIS 2D ale carui particularitati vor fi prezentate in randurile urmatoare, asa cum au fost ele detaliate in manualele de utilizare ale acestui program.

*Plaxis-ul este un program de modelare cu elemente finite pentru aplicatii geomecanice in care comportamentul materialelor este descris prin mai multe legi constitutive. Ca in orice model numeric, rezultatele pot fi afectate de erori numerice precum si de alegerea inadecvata a proprietatilor materialelor. Erorile numerice sunt limitate datorita alegerii unor functii de forma polinomiale de ordinul 6-15. Este-dupa cunostinta noastra - cea mai rafinata discretizare a unui model intalnita in cadrul unui program comercial.*

Programul este structurat in trei sectiuni: preprocesarea, in care se prezinta efectiv modelul de elemente finite; calculul starii de eforturi si deformatii; postprocesarea in care se prezinta rezultatele finale.

*Pentru a simula o problema prin metoda elementelor finite folosind Plaxis, utilizatorul trebuie sa creeze un model de elemente finite, sa specifice proprietatile materialului si conditiile de margine. Acesta operatie este realizata in modelul de intrare care precizeaza datele de intrare in functie de caracteristicile problemei respective. Pentru a genera un model de elemente finite, utilizatorul trebuie sa creeze un model 2D compus din puncte, linii si alte componente, in planul XY. Generarea unui camp potrivit de elemente finite si generarea conditiilor, proprietatilor si limitelor pe un nivel de element este facuta automat de generatorul de campuri Plaxis, bazat pe informatia modelului geometric.*

*Partea finala a introducerii datelor cuprinde generarea de presiune a apei si distributia initiala a eforturilor.*

*Constructia modelului urmareste ordinea fireasca a analizei unei sectiuni geologice: initial se deseneaza conturul geometric, apoi obiectele structurale, parametrii geomecanici ai elementelor structurale iar in final conditiile la limita si respectiv incarcările. Desigur, nu toate optiunile de input sunt necesare in general pentru analize speciale. De exemplu, unele elemente structurale sau tipuri de incarcări nu sunt necesare cand este luata in considerare doar incarcarea sterilului, generarea presiunii apei poate fi omisa daca modelul este complet uscat sau solicitarea initiala poate fi omisa daca planul de solicitare initial este calculat prin incarcarea gravitacionala. Plaxisul va avertiza deasemenea daca informatii necesare nu au fost introduse. Cand se efectueaza modificarea unui model existent este important ca modelul de elemente finite si, daca este cazul, conditiile initiale, sa fie regenerate pentru a fi agreate de modelul nou obtinut.*

*Aplicatiile geotehnice necesita modele constitutive avansate pentru simularea comportamentelor nelinere, dependente de timp precum si de anizotropia rocilor. In plus, avand in vedere ca rocile moi sunt materiale multifazice, proceduri speciale sunt necesare pentru introducerea presiunii apei din pori. Desi modelarea rocilor in sine este o problema importanta, multe proiecte de tip tunel includ modelarea structurilor si interactiunea intre structuri si sol. Plaxisul este echipat cu caracteristici ce trateaza aspectele variate ale structurilor geotehnice complexe.*

*Introducerea grafica a modelelor geometrice: introducerea zonelor cu caracteristici diferite, structuri, stadii de constructie, este bazata pe procedurile de desenare CAD, care permit modelarea detaliata a sectiunii geometrice. Din acest model geometric, un plan de elemente finite 2D este generat cu usurinta.*

*Generarea automata a retelei : Plaxisul permite generarea automata a retelelor de elemente finite 2D nestructurate cu optiuni pentru rafinare ulterioara globala si locala a modelului. Generatorul de plan 2D este o versiune speciala a generatorului de Triunghiuri, care a fost realizat de Sepra.*

*Elemente principale: elemente triunghiulare de ordinul patru cu 15 noduri si patrate cu sase noduri sunt disponibile pentru modelarea deformatiilor si solicitarilor in roca.*

*Placi: elemente speciale circulare sunt folosite pentru a modela suprafete curbe, captuseala tunelelor, invelisurilor si altor structuri subtiri. Comportamentul acestor elemente este definit folosind o rigiditate la incovoiere, o rigiditate normala si un moment de incovoiere.*

*Interfete: Elementele unite sunt disponibile pentru modelarea interactiunii material-structura. De exemplu, aceste elemente pot fi folosite pentru simularea zonei subtiri de forfecare intensa a materialului la contactul intre o captuseala de tunel si materialul inconjurator. Sunt deasemeni frecvent utilizate in modelarea suprafetelor de alunecare, zone in care proprietatile materialelor se modifica. Valorile interfetei unghiului de frecare si coeziune sunt de obicei diferite de cele ale sterilului inconjurator.*

*Ancore: Sunt modelate ca resorturi elastoplastice si sunt folosite pentru modelarea punctelor de contact. Comportamentul acestor elemente este definit folosind o rigiditate normala si o forta maxima de tractiune , dincolo de care ancora cedeaza.*

*Geomaterialele: sunt des folosite pentru modelarea rambleelor din pamant armat.in constructia structurilor ranforsate sau structurilor ce retin steril. Aceste elemente pot fi simulate in Plaxis folosind elementele speciale care preiau forle de tensiune. Este convenabila combinarea acestor elmente cu interfete pentru modelarea interactiunii cu sterilul inconjurator.*

## LEGI CONSTITUTIVE

Pentru caracterizarea comportarii materialelor utilizatorul poate alege diferite legi constitutive.

- a.** *Modelul Mohr-Coulomb: Acest model robust si non-linear este bazat pe parametrii de material care sunt bine cunoscuti in inginerie. Nu toate caracteristicile non-lineare ale comportamentului sterilului sunt incluse in acest model. Modelul Mohr-Coulomb poate fi folosit pentru calcularea presiunilor de baza reale pentru fetele tunelelor, incarcari finale ale picioarelor, etc. Poate de asemenea fi folosit pentru calcularea factorului de siguranta „phi-c reduction”.*

Criteriul Mohr-Coulomb prezinta avantajul ca poate fi exprimat atat in functie de eforturile normale si tangentiale pe planul de rupere, cat si in functie de eforturile principale. Al doilea avantaj este simplitatea , rezistenta fiind exprimata in functie de numai doi parametri de material:  $c$  si  $\varphi$ .

Rezistenta redusa (factorizat) la forfecare:  $t/F=c/F+\sigma \operatorname{tg} \varphi/F$

sau:  $t/F=c^*+\sigma \operatorname{tg} \varphi^*$  cu  $c^*=c/F$  si  $\varphi^*=\operatorname{arctg} \varphi /F$

Etapile succesive de determinare a factorului critic de stabilitate care duce un taluz initial stabil ( $F>1$ ) in pragul ruperii:

1. Constructia unui model MEF utilizand parametrii de deformabilitate si de rezistenta corespunzatori. Calculeaza si pastreaza deformatiile totale maxime.
2. Cresterea succesiva a factorului de stabilitate  $F$  si recalcularea parametrilor de rezistenta conform relatiilor de mai sus; Recalcularea eforturilor si a deformatiilor maxime pentru fiecare pas succesiv;
3. Repetarea pasului precedent, crescand sistematic factorul  $F$  pana cand modelul MEF nu converge ceea ce inseamna ca proprietatile materialului scad pana cand taluzul cedeaza. Factorul  $F$  reprezinta valoarea critica pentru care masivul cedeaza.

In cazul  $F<1$  procedeul este asemanator dar parametrii de rezistenta sunt crescuti succesiv.

- b.** *Modele cu ecrisare: In completarea modelului Mohr-Coulomb, care corespunde unei comportari ideal plastice, Plaxisul ofera un model elastoplastice cu ecrisare hiperbolica, (Hardening Soil model).*
- c.** *Modele vasco-elasto-plastice: permit simularea deformatiei in timp si a proceselor de consolidare.*

- d. Modele de roci definite de utilizator:** O caracteristica speciala in Plaxis este optiunea modelelor de material definite de utilizator. Aceasta optiune permite utilizatorilor sa includa modele programate de ei in calcule.

*Presiunea apei din pori in regim stationar: Distributia complexa a presiunii apei din pori poate fi generata ca urmare a simularii miscarii apei subterane, prin metoda elementului finit. Suprafata libela este modelata ca limita a regimurilor de curgere nesaturat-saturat.*

*Exces de presiune a apei din pori: Plaxisul distinge intre roca uscata si roca umeda pentru modelarea nisipurilor permeabile si chiar a rocilor aproape impermeabile. Presiunile in exces saturate sunt calculate in timpul proceselor plastice cand stratele de roca saturata sunt supuse incarcarii. Simulari ale incarcarii umede sunt de cele mai multe ori decisive pentru stabilitatea structurilor geotehnice.*

*Modelul de calcul permite determinarea starii de eforturi si deformatii pentru o comportare elasto-plastica. Acest proces este neliniar, dar PLAXIS-ul permite calculul automat al pasilor de incarcare.*

*Incarcarea automata: Plaxisul poate fi rulat intr-un mod automatizat. Aceasta evita nevoia utilizatorilor sa selecteze cresteri convenabile de incarcare care asigura stabilitatea si convergenta solutiei inverse pentru calculele plastice si garanteaza un proces de calcul eficient si robust.*

*Controlul lungimii arcelor: Aceasta optiune permite calcule exacte ale incarcarii de rupere si mecanismelor defecte. In calcule normale de incarcare controlata, procedura iterativa se strica cand incarcarea este marita peste nivelul de varf. Cu controlul lungimii arcelor, incarcarea aplicata este incetinita pentru a putea captura nivelul de varf al incarcarii si incarcarii reziduale.*

*Constructia pe etape: Aceasta optiune puternica a Plaxisului ingaduie simulari realiste ale constructiilor si proceselor de excavare prin activarea si dezactivarea grupurilor (cluster-elor) de elemente, aplicarii incarcarii, schimbarea nivelurilor apelor, etc. Aceasta procedura permite evaluarea realista a solicitarilor si dislocuirilor cauzate, de exemplu, de excavarea sterilului in timpul unui proiect de constructie subteran.*

*Analiza consolidarii: Evolutia in timp a excesului de presiune a apei din pori poate fi calculata folosind o analiza de consolidare. O analiza de consolidare are nevoie de date legate de coeficientii de permeabilitate ale stratelor roca. Procedurile automate fac aceasta optiune de analiza usor de folosit.*

*Factori de siguranta: In cea mai generala definitie factorul de siguranta reprezinta raportul dintre forta de forfecare disponibila si forta de forfecare minima necesara echilibrului sau mai simplu ca raport intre rezistenta la forfecare a materialului ( $t$ ) si rezistenta (efortul) de forfecare la rupere ( $t^*$ ). In determinarea factorului de siguranta al oricarei structuri, este utilizat un model nelinier de elemente finite, considerand un material elastic-perfect plastic, criteriu de cedare fiind Mohr-Coulomb.*

*Avantajele metodei sunt urmatoarele:*

- Eliminarea consideratiilor apriorice privind forma si pozitia suprafetei de rulare;
- Eliminarea ipotezelor si schematizarilor legate de inclinarea si localizarea fortelor dintre fasii;
- Posibilitatea modelarii ruperilor progresive;



- *Calculul deformatiilor (element masurabil) corespunzatoare eforturilor;*
- *Robusteta: abilitatea de a calcula stabilitatea pentru o gama larga de conditii.*

Conform definitiei factorul de stabilitate F este definit de relatia:

$$F = \tau_{\text{maximum disponibil}} / \tau_{\text{necesar echilibrului}}$$

unde am notat prin:

- $\tau_{\text{maximum disponibil}}$ , efortul de forfecare definit de parametrii c si  $\varphi$ , valorile de intrare ale parametrilor de rezistenta;
- $\tau_{\text{necesar echilibrului}}$  definit de parametrii redusti  $c_r$  si  $\varphi_r$ , adica valorile minime ale acestor parametri care mai mentin echilibrul

Atunci avem:

$$F = (c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi) / (c_r + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_r)$$

Metoda reducerii c-  $\phi$  (*phi-c reduction*) presupune reducerea succesiva si in aceiasi proportie a celor doi parametri:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{reduc}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{initial}} / F$$

$$c_{\text{reduc}} = c_{\text{initial}} / F$$

Etapele succesive de determinare a factorului critic de stabilitate care duce o structura initial stabila ( $F > 1$ ) in pragul ruperii sunt urmatoarele:

4. Constructia unui model de elemente finite utilizand parametrii de deformabilitate si de rezistenta corespunzatori. Sunt calculate si pastrate deplasariile totale maxime.
5. Cresterea succesiva a factorului de stabilitate F si recalcularea parametrilor de rezistenta conform relatiilor precedente; recalcularea eforturilor si a deformatiilor maxime pentru fiecare pas succesiv;
6. Repetarea pasului precedent, crescand sistematic factorul F pana cand modelul numeric nu converge ceea ce inseamna ca proprietatile materialului scad pana cand structura cedeaza. Factorul F reprezinta valoarea critica pentru care masivul cedeaza.

*Indicatorul de rupere* il constituie neconvergenta solutiei dupa un numar mai mare de pasi. Aceasta inseamna ca structura NU poate fi in echilibru in conditiile criteriului Mohr-Coulomb, pentru parametrii redusti. Neconvergenta si colapsul sunt simultane si sunt legate printr-o crestere a deplasarilor. Imediat dupa rupere deplasariile prezinta un mare salt

In cadrul programului PLAXIS parametrii de rezistenta ai rocii la un anumit stadiu al analizei se definesc cu ajutorul multiplicatorului total  $\sum Msf$ . Deci  $F = \sum Msf$ .

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{reduc}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{initial}} / \sum Msf$$

$$c_{\text{reduc}} = c_{\text{initial}} / \sum Msf$$

unde

*valorile reduse* ( $c$  si  $\phi$ ) : valorile parametrilor de material reduse in timpul analizei

*valorile initiale* ( $c$  si  $\phi$ ) : parametrii de material introdusi initial.

Initial se considera ca structura este in echilibru, deci  $\sum Msf = 1$ . Apoi  $\sum Msf$  creste sau scade cu 0.1, reducand parametrii de rezistenta ai materialului pana cand structura cedeaza. Factorul de stabilitate este definit ca valoarea  $\sum Msf$  la rupere cu conditia ca sa se obtina o valoare relativ constanta pentru incarcari succesive.

#### Multiplicatorii incarcarilor (load multipliers)

Pasii de calcul – treptele de incarcare – sunt controlati de multiplicatori. Incarcarea este controlata de produsul dintre valoarea data la intrare a respectivei incarcari, care este de altfel si valoarea finala, si multiplicatorii incarcarii.

Exista doua categorii de multiplicatori:

- *multiplicatori fractionari* (incremental), notati cu  $M$ , care caracterizeaza cresterea incarcarii intr-un anumit pas de incarcare, adica a treptelor de incarcare,  $f_1, f_2, \dots$ , obtinute ca produsul dintre valoarea data la intrare a respectivei incarcari si multiplicatorul corespunzator. Spre exemplu daca valoarea deplasarii data la intrare este de 0.1 m si  $M_{disp} = 0.1$ , prima treapta de incarcare este de 1 cm.

- *multiplicatori totali* ( $\sum M$ ) care caracterizeaza valoarea finala a incarcarii ca produs intre  $\sum M$  si valoarea data la intrare.

#### Multiplicatori standard:

-  $M_{disp}, \sum M_{disp}$

Acesti multiplicatori controleaza valorile deplasarilor impuse. Valoarea finala a deplasarilor este produsul dintre deplasarea initiala si  $\sum M_{disp}$ ;

-  $M_{load A}, \sum M_{load A}, M_{load B}, \sum M_{load B}$

Acesti multiplicatori controleaza valorile fortelor impuse, valoarea finala a fortelor este produsul dintre forta initiala si  $\sum M_{load}$ .

-  $\sum M_{weight}$  - specifica valoarea finala a incarcarii datorata greutatii

-  $M_{sf}, \sum Msf$  - Acesti multiplicatori controleaza modificarile parametrilor de rezistenta in cazul metodei "c-phi reduction"

$\sum Msf$  – raportul dintre valorile initiale si cele reduse ale rezistentei, initial  $\sum Msf = 1$ ;

$M_{sf}$  – specifica cresterea reducerii rezistentei; initial  $M_{sf} = 0.1$ , deci primul factor de siguranta este  $\sum Msf = 1.1$  sau  $\sum Msf = 0.9$ .

### Multiplcatori speciali:

- $\Sigma$  Mstage – acest multiplicator controleaza constructia in trepte – proportia din etapa respectiva care a fost realizata; initial  $\Sigma$  Mstage = 0, iar la finalul executiei  $\Sigma$  Mstage = 1;
- $\Sigma$  Marea – acest multiplicator controleaza constructia in trepte, specificand proportia din aria modelului care este activa; daca toate cluster-ele sunt active,  $\Sigma$  Marea = 1
- "Stiffness" (rigiditatea) – indica pierderea rigiditatii datorata atingerii limitei de plasticitate. Pentru comportarea elastica, "Stiffness" = 1, la cedare "Stiffness" = 0.

### Informatii obtinute in timpul calculului:

1. *Curba de incarcare – deplasare* – pe axa Ox – deplasarea in primul punct selectat; pe axa Oy – multiplicatorul incarcarii;
2. *"Plastic point stress" (puncte de deformatie plastica datorate eforturilor de forfecare – puncte in care efortul de forfecare determina deformatii plastice, ruperea-cedarea este datorata efortului de forfecare)* – numarul punctelor aflate in stadiul plastic.
3. *"Tension point" (puncte in care deformatia este datorata eforturilor de intindere)* – numarul punctelor in care roca a cedat prin intindere
4. *Efort deviator* – caracterizeaza modificarea formei elementului infinitezimal care conduce in final la cedarea – ruperea acestuia;
5. *Efort sferic* – caracterizeaza modificarea volumului elementar;
6. *Efortul relativ de forfecare "relative shear stress"* – indica proximitatea punctului de rupere. Efortul relativ de forfecare,  $\tau_{rel}$ , este definit ca:

7. 
$$\tau_{rel} = \frac{\tau}{\tau_{max}}$$

unde,  $\tau$  este valoarea maxima a efortului de forfecare (raza cercului de eforturi a lui Mohr), iar  $\tau_{rel}$  este valoarea maxima a efortului de forfecare in cazul in care cercul Mohr este extins pana cand este atinsa curba intrinseca, pastrand efortul intermediar principal constant.

- *Eroarea globala* – raportul dintre fortele nodale si incarcările active.

*Prezentarea rezultatelor: postprocesorul Plaxis are caracteristici grafice avansate pentru dispunerea rezultatelor calculelor. Valorile deplasarilor, solicitarilor, tensiunilor si fortelor pot fi obtinute din tabelul final. Scenarii si tabele pot fi trimise altor aparate sau Windowsului in vederea exportarii spre alte softuri.*

*Pasii solicitarilor: O optiune speciala este disponibila pentru desenarea curbelor de deformatie, a incarcarilor, solicitarilor, diagramelor solicitare-tensiune si curbelor de evolutie in timp. Vizualizarea acestor cai de solicitare furnizeaza date valoroase privind comportamentul rocilor si permite analiza detaliata a rezultatelor calculelor in Plaxis.*

Alegerea automata a pasilor de incarcare se poate face prin doua proceduri:

1. Load advancement ultimate level, respectiv
2. Load advancement number of steps;

In cadrul procedurii *Load advancement ultimate level* incarcarea corpului se face fie pana cind incarcările ating stagiul final sau pana cand corpul cedeaza. In aceasta varianta *Additional steps* - numarul pasilor de integrare - este 100, valoare care de obicei nu este atinsa, deoarece nivelul maxim de incarcare este atins dupa un numar mai mic de pasi, sau materialul cedeaza.

Procesul se opreste intr-una din urmatoarele situatii:

- Este atinsa incarcarea maxima;
- Este atins numarul maxim de iteratii;
- Materialul cedeaza

In cadrul procedurii Load advancement number of steps procesul este executat intr-un numar prestabilit de pasi de incarcare definit de optiunea Additional steps. Spre deosebire de varianta precedenta procesul nu se opreste daca are loc cedarea materialului. Daca se intampla ca materialul sa cedeze, programul livreaza deplasari sau eforturi exagerat de mari, fara semnificatie fizica. Procedura este recomandata cand se studiaza factorul de siguranta prin metoda reducerii c-phi (c-phi reduction). In acest caz utilizatorul specifica primul pas de incarcare, dupa care determinarea pasilor urmasi se face automat.

Pentru ca proiectul nostru se desfasoara in zona Ocnele Mari, o zona afectata de probleme majore de instabilitate geomecanica, partenerii implicati in proiect au incercat pe cat posibil sa determine evolutia sistemului in ansamblul sau. Noi am urmarit in permanenta evolutia din punct de vedere geomecanic al zonei in care s-a implementat statia pilot, dar si a zonelor invecinate, zone ce pot oricand influenta in mod negativ.

Analiza de stabilitate pe care noi o facem ia in calcul intregul ansamblu al Campurilor I, II si III Teica, asa cum este el evidentiat in harta pe care am afisat-o la activitatea ce a avut in vedere realizarea si interpretarea masuratorilor cavernometrice, cu specificatia ca s-au realizat 20 de sectiuni geologice reprezentative, insa, am ales sa prezentam doar doua in acest stadiu, pe cele mai importante pentru arealul statiei pilot.

Pe aceste doua sectiuni geologice, numite de noi Sectiunea 1 si Sectiunea 2, am realizat si un calcul numeric, initial si dupa executarea ultimei cavernometriei, pentru a determina modul in care evolueaza stabilitatea golului sondei 361 in timpul procesului de rambleiere.

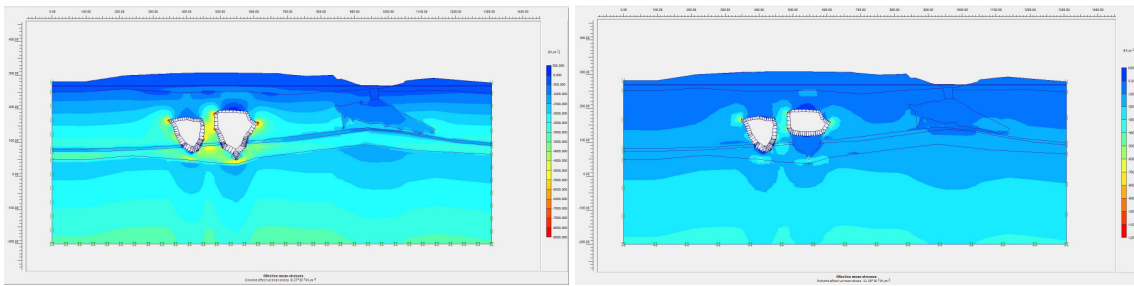
Pentru modelarea numerica s-a folosit , asa cum am amintit la inceput, programul Plaxis, un program de modelare cu elemente finite. Analiza s-a realizat atat pentru "problema plana" cat si pentru cea "asimetrica" sau radiala. Pentru sare s-au folosit urmasorii parametrii geomecanici: modulul de elasticitate =  $1,075 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>, coeficientul lui Poisson = 0,3, coeziunea = 2000 kN/m<sup>2</sup>, unghiul de frecare = 40 de grade. De asemenea, s-au considerat viteza undelor S de 1357 m/s, iar cea a undelor P = 2539 m/s. Aceste viteze se cunosc de la punerea in functiune a sistemului de monitorizare

microseismica, in baza unor determinari pe 3 foraje experimentale (in care au fost induse explozii). Pentru sterilul din partea inferioara a zacamantului s-au folosit urmatoorii parametrii geomecanici: greutatea volumetrica in stare saturata = 21 kN/m<sup>2</sup>, iar cea nesatura = 19 kN/m<sup>2</sup>, permeabilitatea in plan de 1 m/zi, modulul de elasticitate E=9,5x10<sup>4</sup> kN/m<sup>2</sup>, coeficientul lui Poisson = 0.25, coeziunea de 500 kN/m<sup>2</sup>, unghiul de frecare de 30 grade, viteza undelor P=140 m/s, iar cea a undelor S=242 m/s. Pentru sterilul din partea superioara a zacamantului de sare s-au folosit urmatoorii parametrii: aceeasi greutate volumetrica ca la cel din partea inferioara a zacamantului, modulul de elasticitate a fost considerat la 2,75x10<sup>4</sup> kN/m<sup>2</sup>, coeficientul lui Poisson = 0.25, coeziunea = 100, iar unghiul de frecare = 20 grade. Materialul de umplutura din caverna dezafectata, dar si din baza golului sondei 361 (materialul introdus de noi in procesul de rambleiere) s-a considerat a fi un steril cu proprietati asemanatoare cu cel din partea superioara a zacamantului de sare, exceptie facand coeziunea care s-a considerat a fi 0, iar unghiul de frecare 20 grade (asa cum a rezultat din analizele de laborator realizate in etapa anterioara).

Pentru problema plana (practic golurile sunt considerate a fi niste tuneluri cu lungime infinita), adica situatia cea mai nefavorabila, rezultatele au fost urmatoarele:

### SECTIUNEA 1

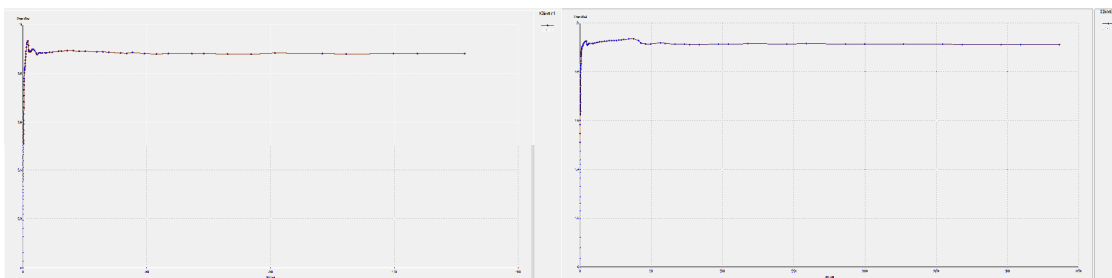
Efortul relativ de forfecare – se observa diminuarea zonelor cu risc crescut la forfecare



Initial

Dupa rambleierea partiala

Factorul de siguranta – se observa o crestere a factorului de siguranta de la 1,88 la 1,92

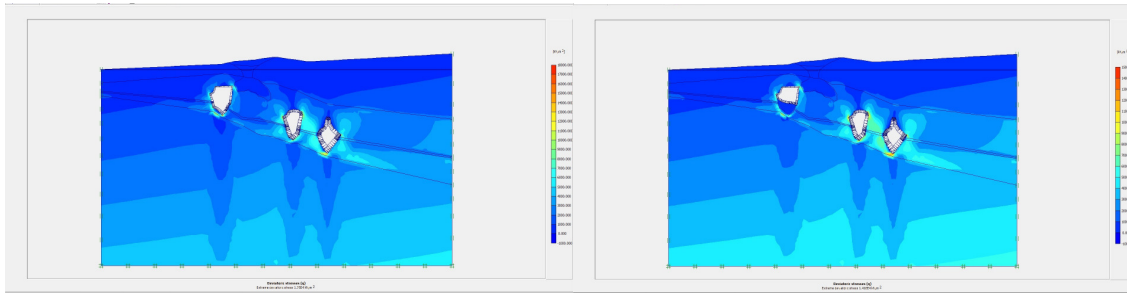


Initial, valoarea FS=1.88

Dupa rambleierea partiala, valoarea FS=1.92

## SECTIUNEA 2

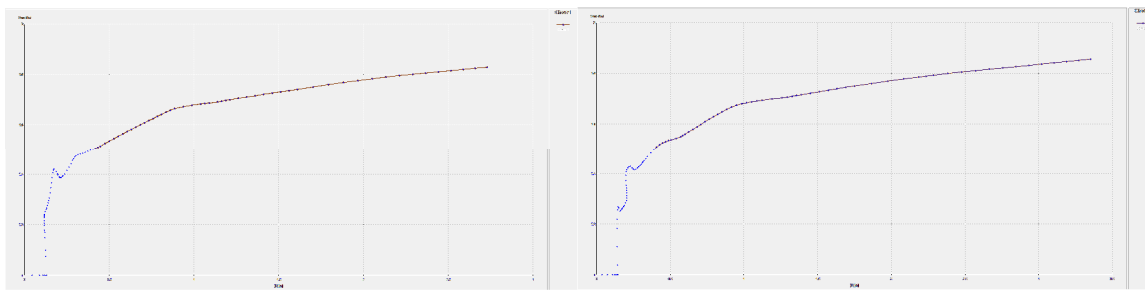
Efortul relativ de forfecare – se observa o usoara diminuare a zonelor cu risc crescut la forfecare



Initial

Dupa rambleierea partiala

Factorul de siguranta – se observa o crestere a factorului de siguranta de la 1,82 la 1,86



Initial, valoarea FS=1.82

Dupa rambleierea partiala, valoarea FS=1.86

Avand in vedere cele constatate anterior, s-a hotarat continuarea procesului de rambleiere, cu aceiasi parametrii, tinand cont ca, toate analizele au iesit favorabile, in special cele legate de stabilitate, care, sunt in definitiv, principala noastra tinta.

Trebuie sa spunem aici ca acesta este doar inceputul etapei de modelare numerica cu elemente finite, pentru ca acest studiu va fi continuat si in etapa viitoare, cand vom dispune de mai multe informatii, si cand, valorile de stabilitate vor fi reflectate mult mai clar. Practic, cu cat vom inainta cu procesul de rambleiere, factorul de siguranta va creste semnificativ. Aceste rezultate pe care le vom obtii ne vor permite sa imbunatam modelul numeric, aflat in prezent intr-o stare incipienta.