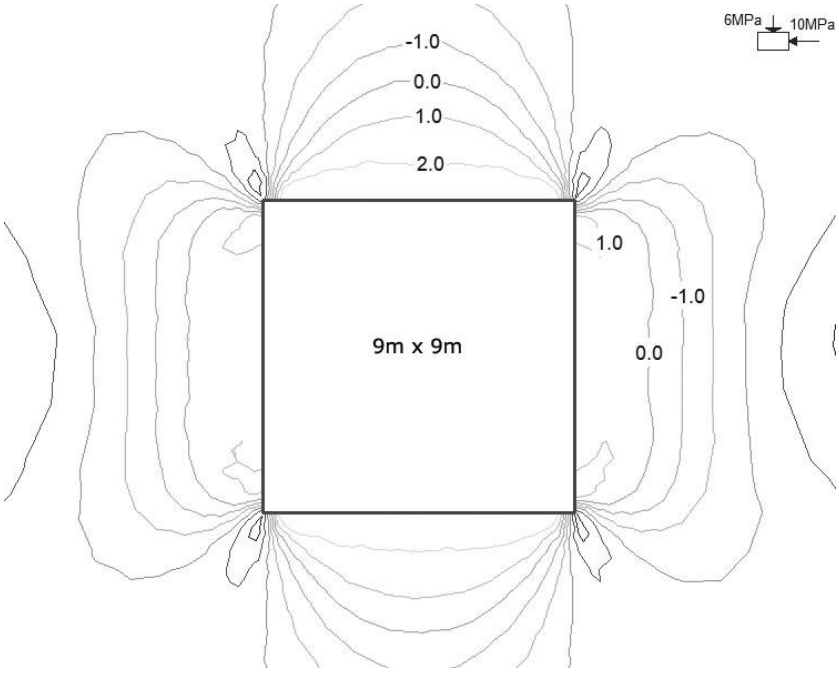
Димензионисање стубова у откопу

Уобичајени поступци прорачуна стубова у откопима пређутно полазе од претпоставке да су стубови израђени од стенског материјала, а да су потом оптерећени тежином стена до површине терена. На бази укупне површине откопа и површине стубова рачуна се припадајуће оптерећење сваког стуба. Код плочастих, хоризонталних лежишта на малој дубини резултат прорачуна кореспондира са стварном ситуацијом. При том је чврстоћа стуба једноаксијална притисна чврстоћа монолита умањена због испуцалости масива. Цео поступак прорачуна је заправо паковање података тако да резултат буде покриће за искуствено дизајнирану конструкцију.

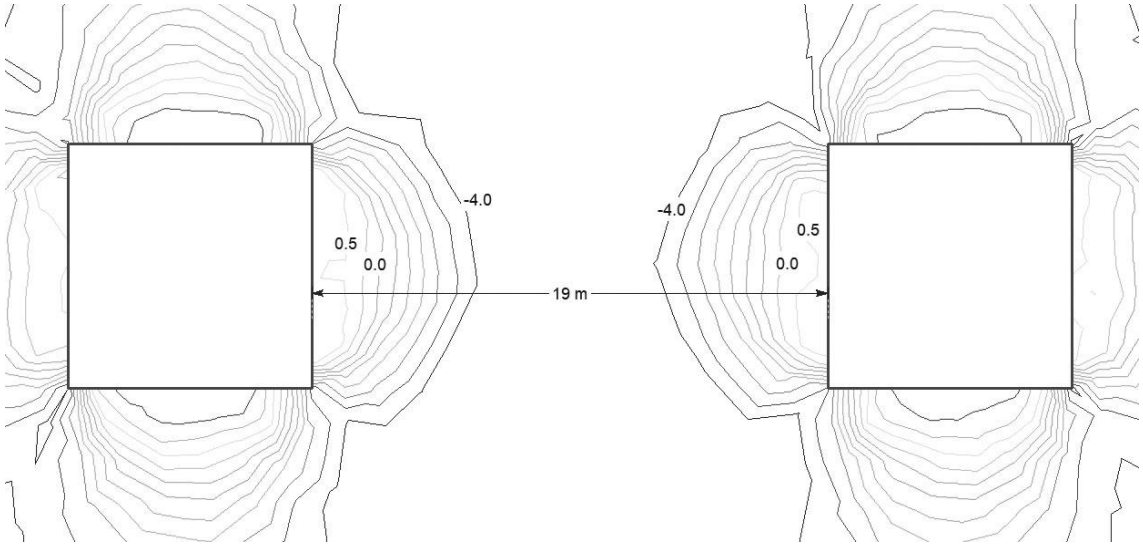
А заправо се у напрегнутом стенском масиву врши откопавање (дезинтеграција) дела стене (руде), а последица је настала подземна просторија (откоп). Ако метода откопавања подразумева да откоп буде стабилан онда облик и димензије подземне просторије треба ускладити са чврстоћом стене и њеном напрегнутошћу (напонским стањем).

Ако разматрамо хоризонтално плочасто лежиште, чија је ширина (дужина) вишеструко већа од стабилне ширине једног откопног ходника (откопа) онда у лежиште можемо сместити већи број паралелних откопних ходника. Неоткопани део стене (руде) између два ходника је сигурносни стуб. Део руде који остаје у сигурносном стубу је најчешће трајни губитак, па је разумна тежња да стуб буде што мањи. Поступак одређивања минималног сигурног растојања између два откопа се назива димензионисањем сигурносног стуба.

Ако су два откопна ходника која формирају сигурносни стуб стабилна и стуб ће бити стабилан. Дакле, целокупан откоп и сви откопни ходници у њему и сви стубови између њих биће стабилни ако се откопни ходници димензијама и геометријским обликом и евентуалном подградном конструкцијом учине стабилним.



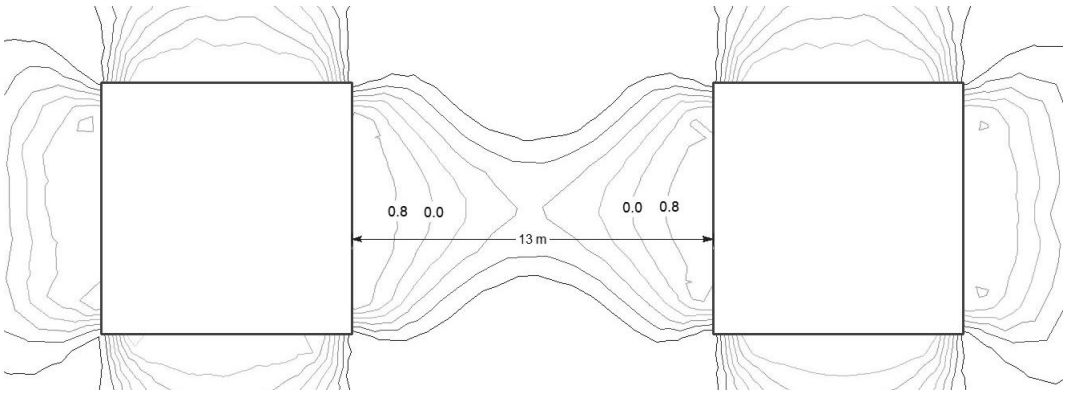
Слика 1. Зоне затезања код једног ходника



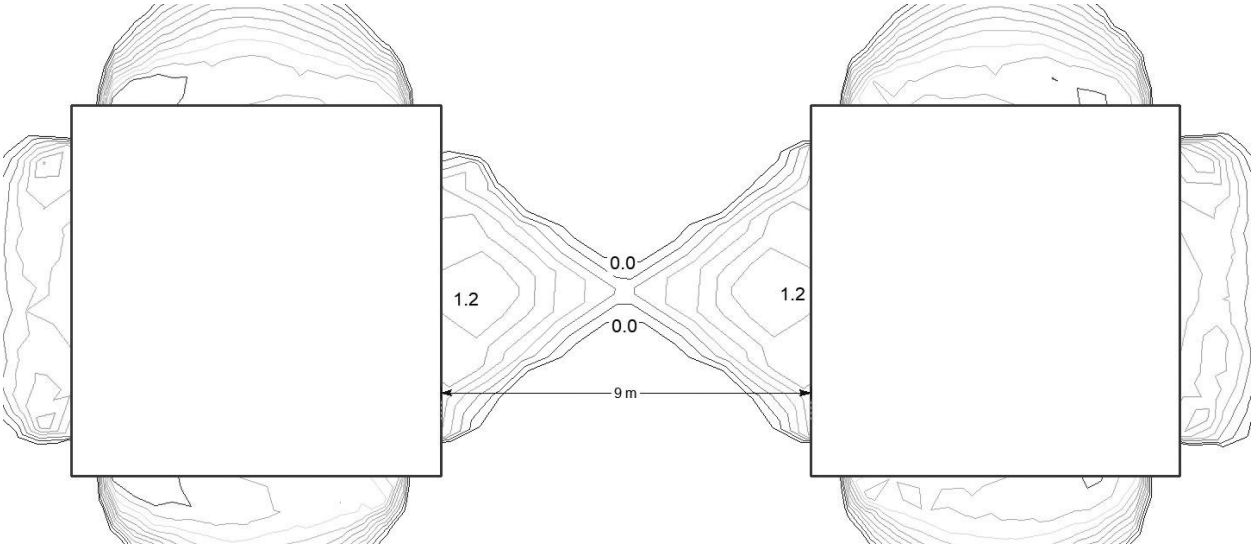
Слика 2. Зоне затезања код два паралелна ходника на растојању од 19m

Показивање исправности приступа

У стенском масиву са примарним напонским стањем дефинисаном са вертикалним напоном $\sigma_v = 6MPa$ и максималним хоризонталним напоном $\sigma_H = 10MPa$, урађен је ходник димензија 9mx9m. Урађена је напонско-деформацијска анализа методом коначних елемената и на слици 1 је приказана зона затезања у оквиру изолиније „0". Негативне вредности указују на притисно напрезање. На слици 1 није приказано, али је утврђена зона утицаја израђене просторије до 19тог метра од ивице просторије. Због тога је на хоризонталном растојању од 19m моделирана још једна просторија истих димензија. Резултат прорачуна је приказан на слици 2. Очигледно је да ове две просторије немају битан утицај једна на другу. Пажњу обраћамо само на простор између две просторије. Нема промене облика и величине зоне затезања. У наредном кораку растојање између откопних ходника је смањено на 13m, слика 3. Очигледна је интеракција ове две просторије. Дистрибуција напрезања, односно индукованих напона у боку са стране где постоји други откоп и са супротне стране је битно различита. У овом случају део стенског масива између два откопна ходника можемо означити као „стуб". Зона затезног напрезања је знатно већа, а максимано затезно напрезање у боку подземних просторија је такође повећано. Наредни корак у овом опиту је смањивање растојања на 9m, слика 4. У овом случају запажамо да је дошло до спајања зона затезања појединачних ходника у заједничку зону која захвата средиште стуба уз даље повећање максималног затезног напрезања у боковима просторија.



Слика 3. Зоне затезања код два паралелна ходника на растојању од 13m

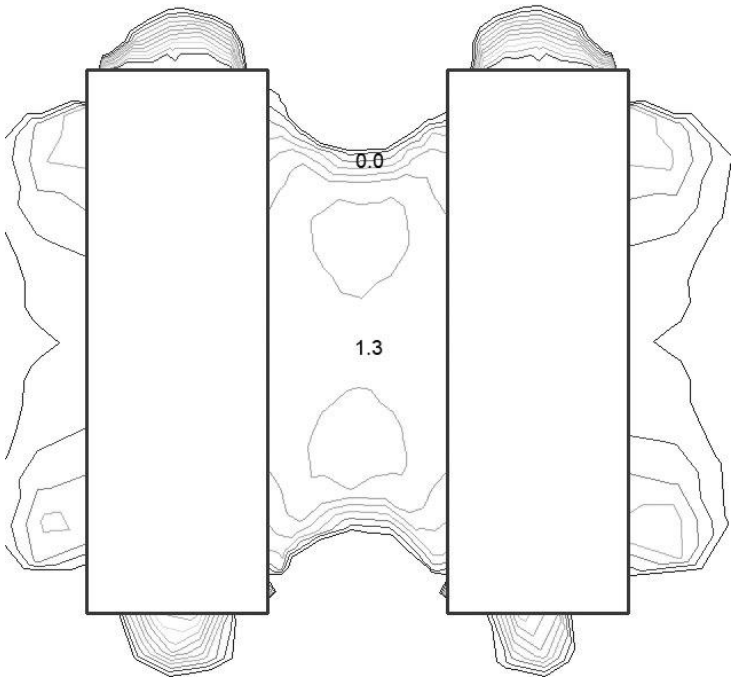


Слика 4. Зоне затезања код два паралелна ходника на растојању од 9m

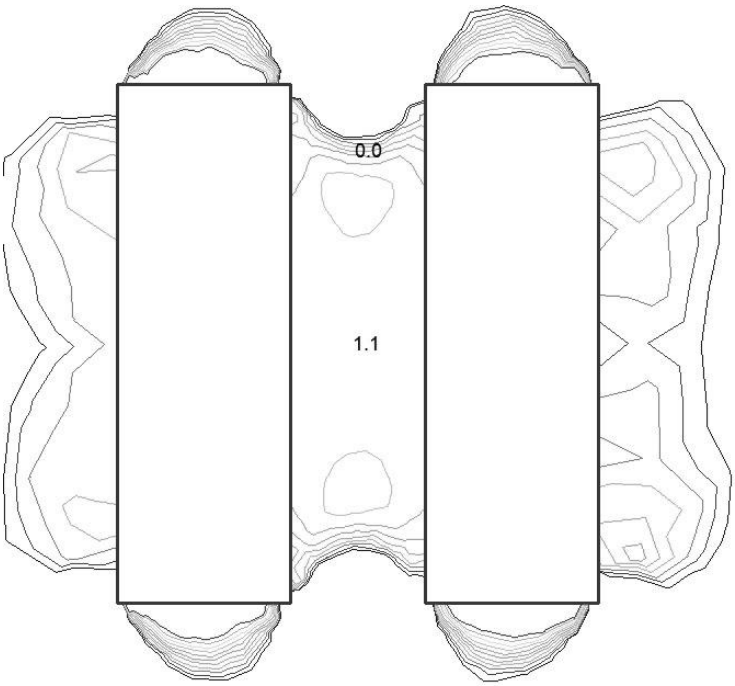
Следећи низ опита урађен је за две откопне коморе ширине 9m и висине 27m, а ширина стуба између комора је мењана. Први опит је био са стубом ширине 9m, слика 5. Као и до сада пратимо величину зоне и интензитет затезног напрезања у стубу између комора. Уочљиво је да је затезању изложен цео стуб и да је интензитет затезног напрезања 2.1MPa до 2.3MPa. Моделиране су ширине стуба и од 7m, 5m, 3m, са непромењеним осталим димензијама конструкције. Уочљиво је да се ради о истом нивоу затезног напрезања у заштитном стубу. Разлика у затезном напрезању стуба ширине 9m и стуба ширине 3m је само 0.2 MPa.

Јасно је да на затезно напрезање, које изазива лом, не утиче ширина стуба него ширина откопних комора које формирају стуб.

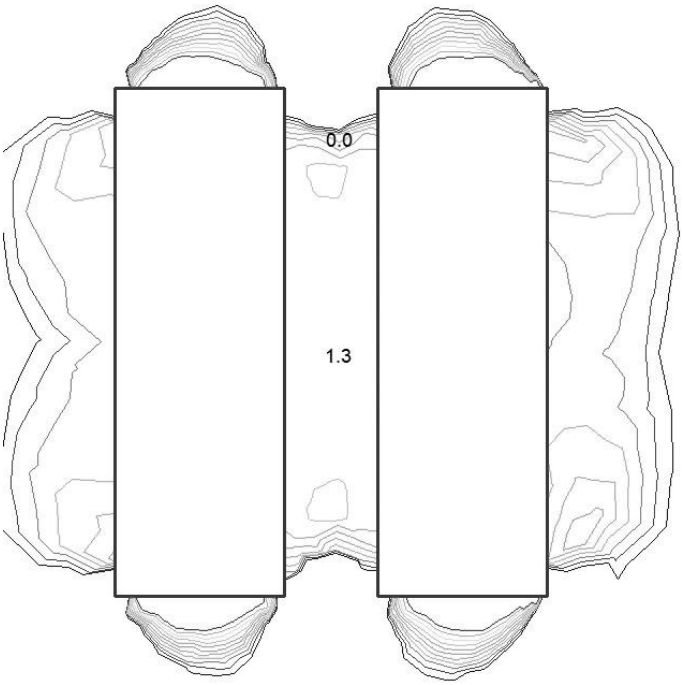
Наредни низ опита је рађен са завршним моделом претходне серије опита. Односно први модел ове серије опита има две коморе ширине 9m, са ширином стуба између њих од 3m. Висина комора, односно висина стуба је са 27m смањена на 22m, слика 9. Напон затезања у средишту стуба је порастао на 1.4MPa. Потом су урађени опити са висинама комора: 18m, слика 10; 9m, слика 11; 5m, слика 12. Смањење висине комора прати пораст затезног напрезања у средишту стуба. Па је тако за висину комора, односно стуба 5m, затезно напрезање у сигурносном стубу 3MPa. Очигледно је да на затезно напрезање утиче и висина откопних комора које формирају стуб.



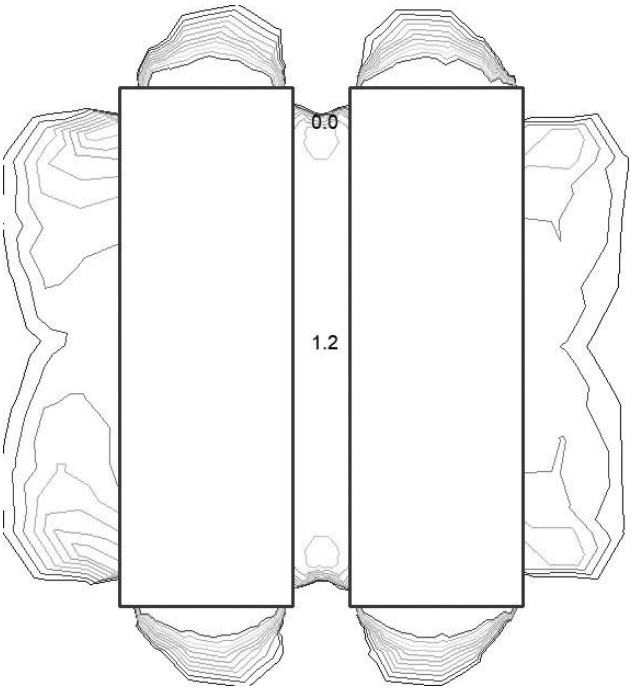
Слика 5. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 27m, а на растојању од 9m



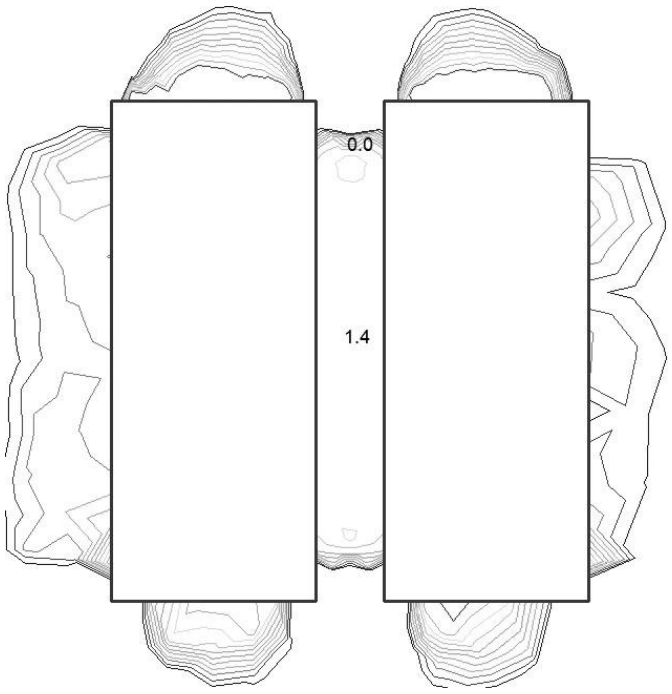
Слика 6. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 27m, а на растојању од 7m



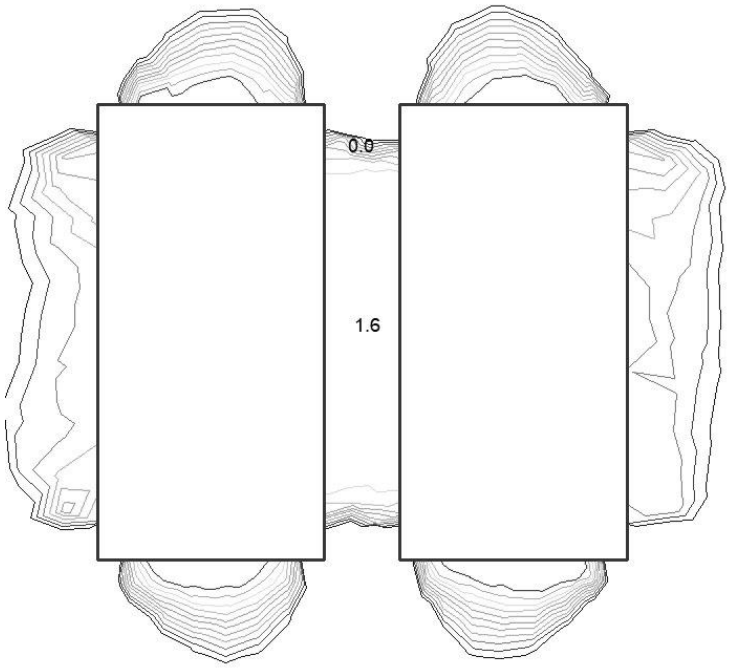
Слика 7. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 27m, а на растојању од 5m



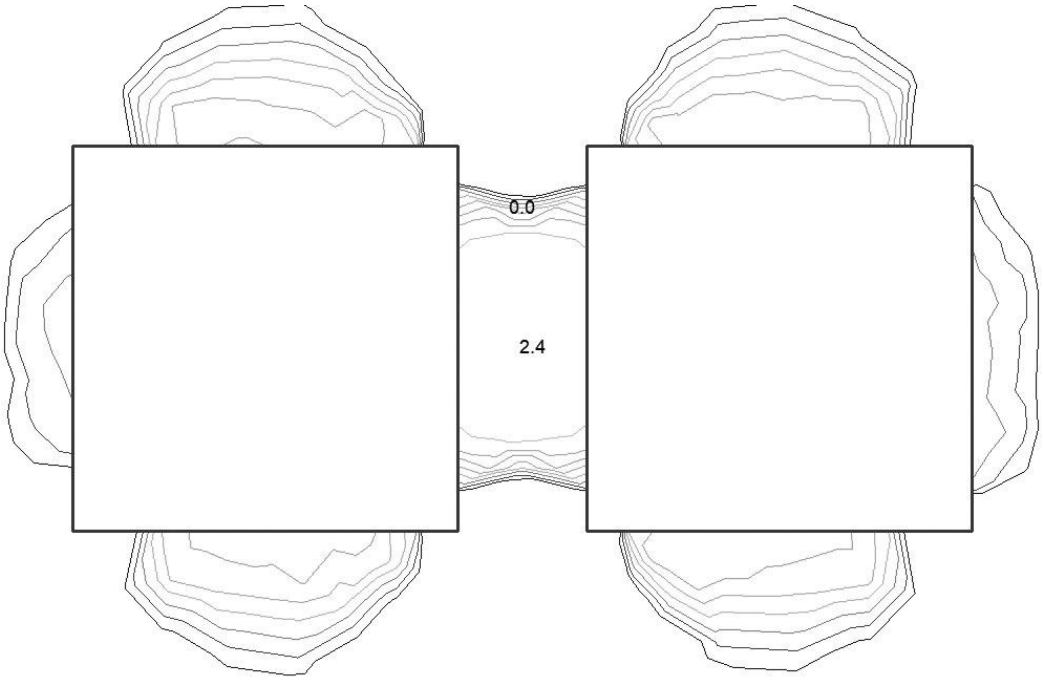
Слика 8. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 27m, а на растојању од 3m



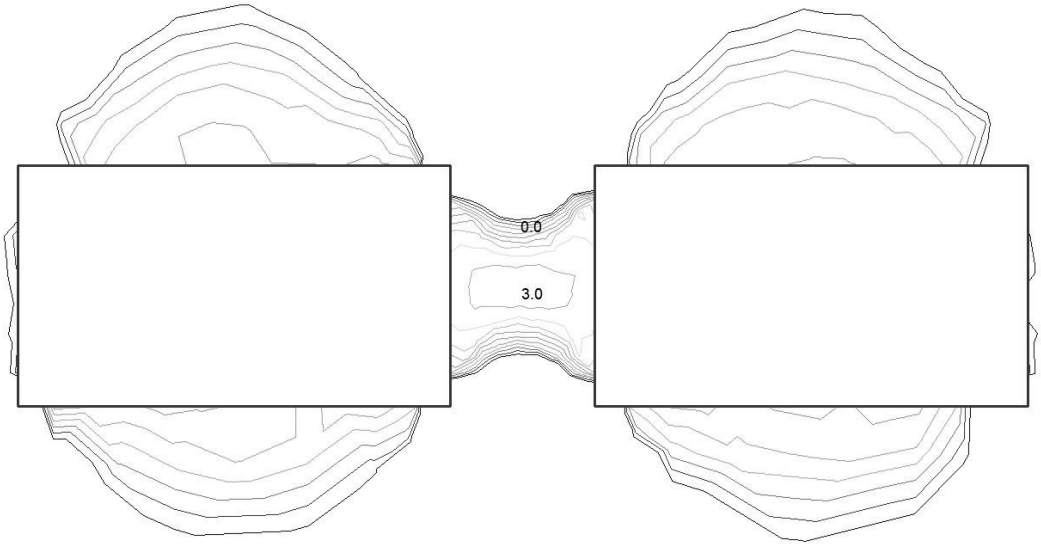
Слика 9. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 22m, а на растојању од 3m



Слика 10. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 18m, а на растојању од 3m



Слика 11. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 9m, а на растојању од 3m



Слика 12. Зоне затезања код два паралелна откопа ширине 9m, висине 5m, а на растојању од 3m

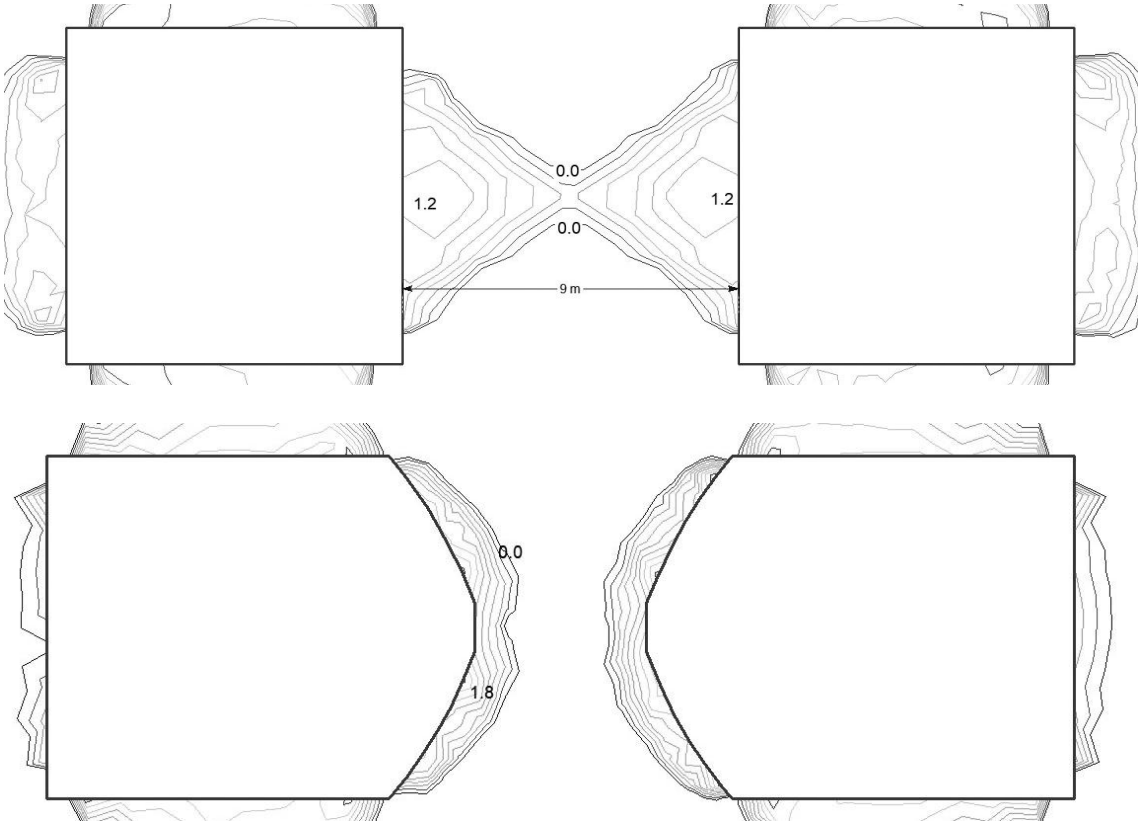
Ако се вратимо на модел на слици 4 на коме стуб 9m x 9m формирају две коморе истих димензија 9m x 9m, уочавамо зону затезања која се сужава од периферије ка центру стуба. Када бокове комора који

формирају стуб заоблимо, слика 13, стуб у пресеку добије облик пешчаног сата из језгра стуба нестане затезно напрезање. Зона напрезања је само уз бок откопне коморе и при том се интензитет напрезања смањује са удаљавањем од бока.

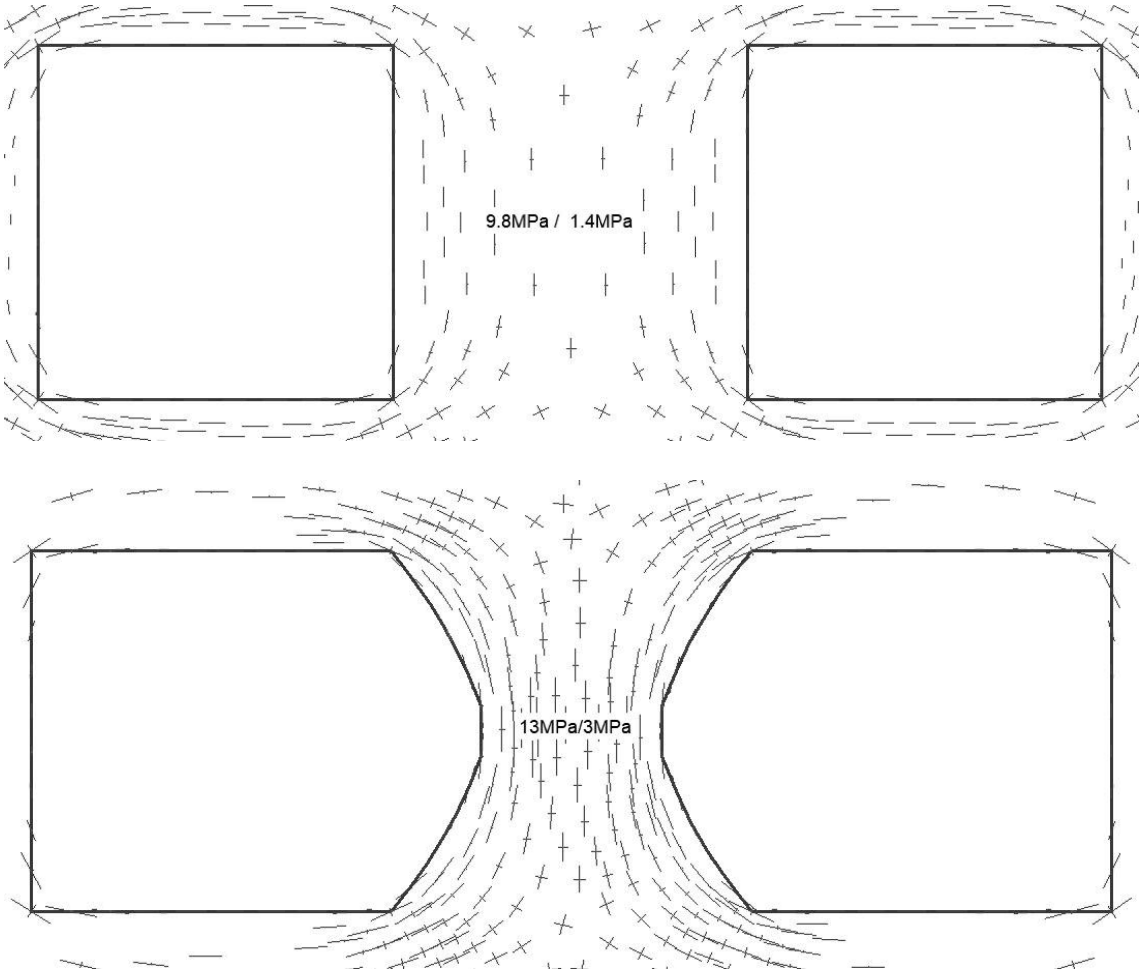
Ко није био у прилици да то види у јами у откопу, може пронаћи више фотографија тог феномена на интернету. При том ти стубови су примарно били са вертикалним боковима, а затечени облик је настао спонтано. Лом почиње на половини висине стуба када затезно напрезање пређе границу лома, односно дозвољену затезну чврстоћу. Лом се заустави када се систем уравнотежи то јест када се испуни услов да је:

$$\sigma_{td} + \sigma_3 = st \cdot \sigma_1$$

На слици 14 су приказани правци главних напона и њихови интензитети за обе конструкције откопних комора.



Слика 13. Утицај облика конструкције на облик и величину зоне затезања и интензитет затезног напрезања



Слика 14. Утицај облика конструкције на интензитет максималних и минималних главних напона

Као што је већ раније објашњено облик конструкције утиче на њену отпорност. Затезно напрезање у боковима подземне просторије је:

$$\sigma_t = st \cdot \sigma_1 - \sigma_3$$

У овом случају разматрани стуб је заједнички бок две суседне откопне просторије. Коефицијент затезања је:

$$st = \frac{\nu}{1 + tg\varphi} = \frac{0{,}3}{1 + tg35^{\circ}} = 0.176$$

Па је у првом случају са равним бочним зидом откопа (стуба) напон затезања у средишту стуба:

$$\sigma_t = 0{,}176 \cdot 9.8 - 1{,}4 = 0{,}325MPa$$

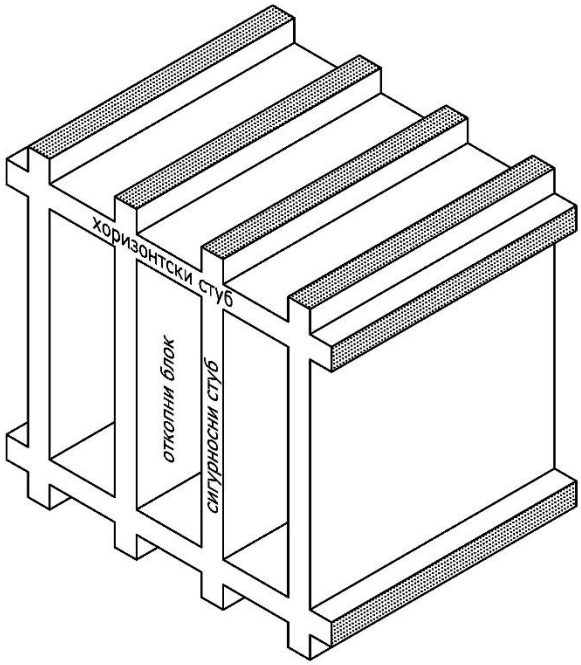
А када су бокови тог стуба прилагођени да приближно прате изолиније затезног напрезања напон затезања у средишту стуба је:

$$\sigma_t = 0{,}176 \cdot 13 - 3 = -0{,}73MPa$$

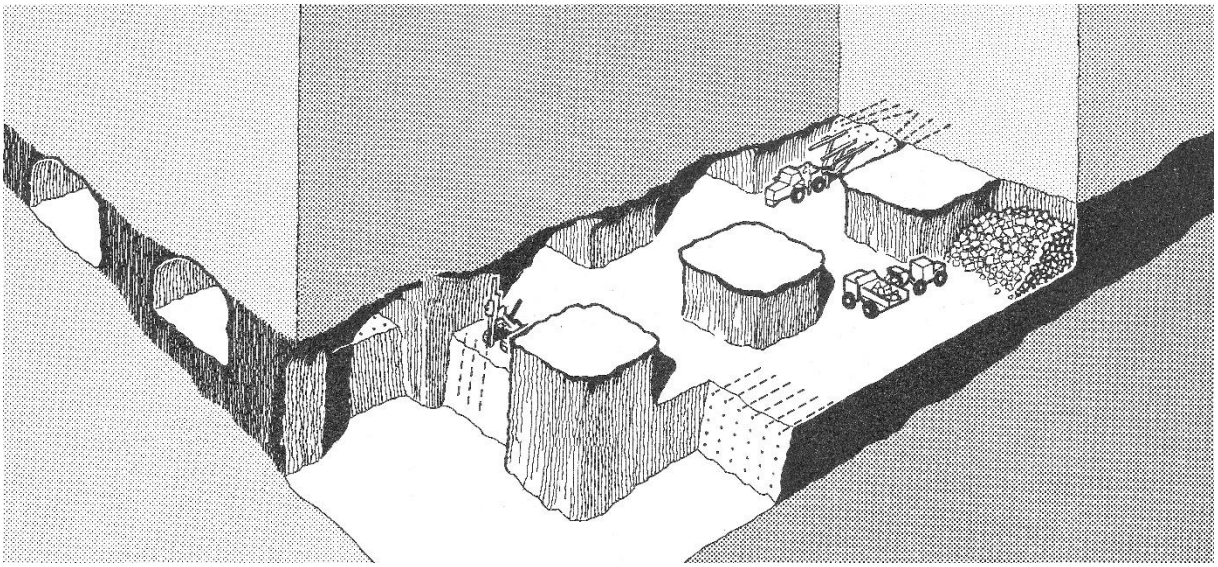
Негативна вредност указује да је средиште стуба није оптерећено на затезање него на притисак.

Тракасти и квадратни стубови

Сви претходни модели и анализе урађени су методом коначних елемената за услов равног стања деформација. На графичким приказима су попречни пресеци стубова, а дужина им је неодређена. Овакви стубови се називају тракастим, слика 15.



Слика 15. Пример тракастих стубова између откопних комора

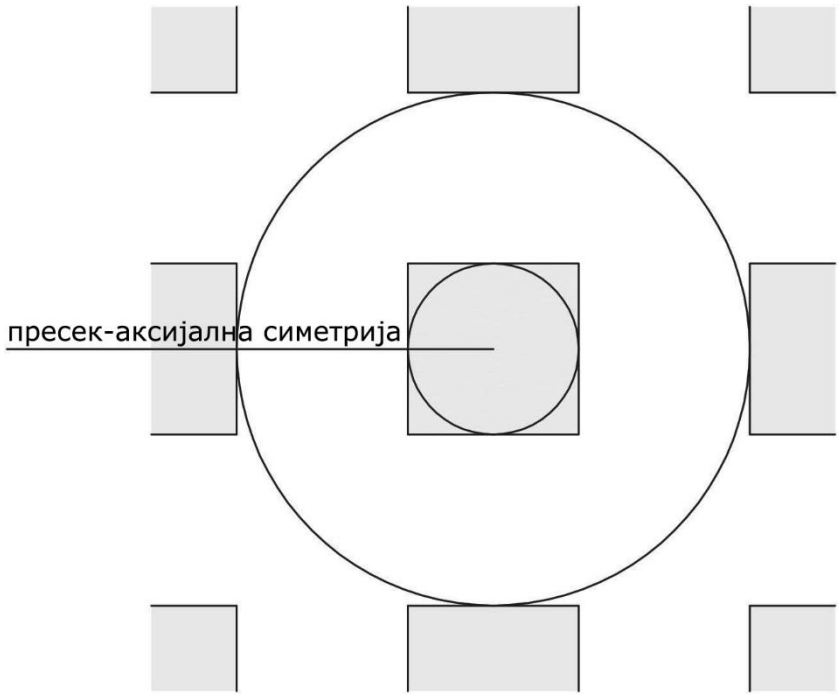


Слика 16. Пример квадратних стубова у откопу

Код низ других метода откопавања остављају се квадратни сигурносни стубови у откопу слика 16. Попречни пресек оваквог откопа не испуњава основни услов за равно стање деформација и то компликује ствар у општеприхваћеном приступу прорачуна стубова.

Међутим, како је већ показано, израђена подземна просторија је извор поремећаја постојеће равнотеже. Деформациони рад, односно кретање честица ка празном простору обавља се на уштрб потенцијалне енергије еластично деформисане стене која чини стуб. Потенцијална енергија и њој адекватан деформациони рад везан је за сваку честицу. И сходно томе честица се може померити адекватно енергији коју поседује и отпору кретању који је карактеристика материјала и положају честице у односу на друге честице са којима је у контакту, а што је карактеристика конструкције.

Облик и величина просторије условљавају редистрибуцију компоненти напонског стања стене. Ако анализирани тракасти стуб поделимо на низ призми са квадратном основом, можемо формирати квадратне стубове уклањањем призми између њих и претварајући тај простор у откопне коморе. То ће за последицу имати додатни деформациони рад на уштрб компоненте напона управне на новоформирану површину. Ако су обе компоненте хоризонталних напона стенског масива исте и ако су ширине откопних комора исте, онда ће и



Слика 17 Моделирани стуб и откопи са положајем пресека за аксијално симетрични модел

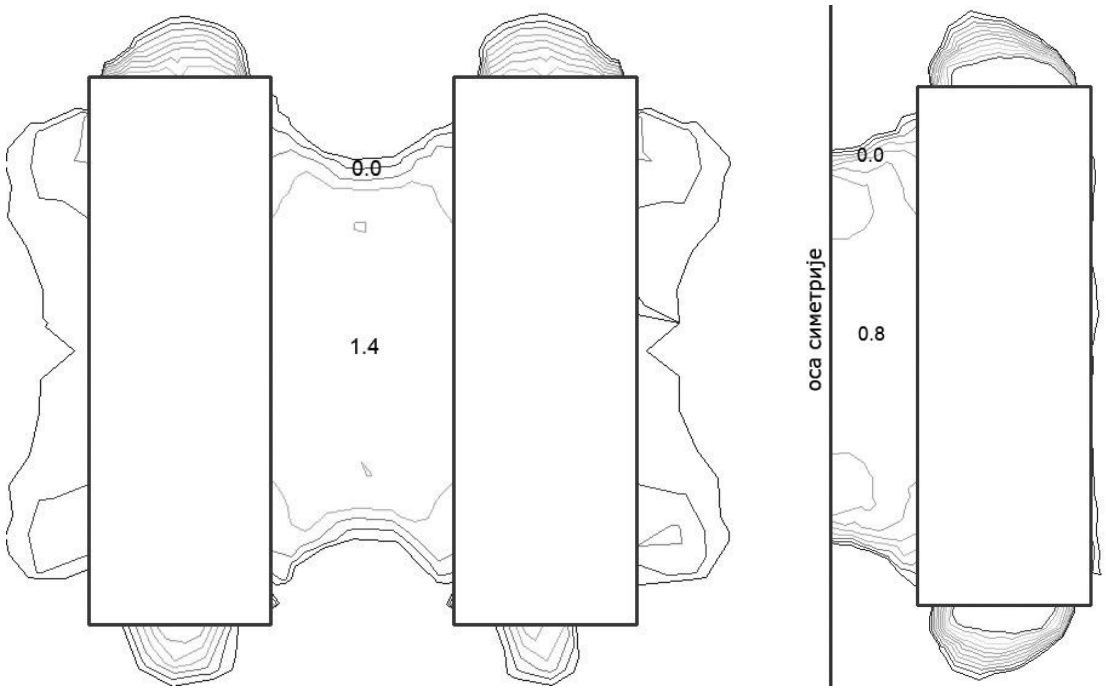
деформација у овом правцу бити иста као у правцу који је управан на њега.

То значи да је прорачун стабилности тракастог сигурносног стуба истовремено и прорачун стабилности квадратног сигурносног стуба за исте ширине откопних ходника (комора) које га формирају. Како компоненте хоризонталних напона нису исте као меродавне за прорачун користићемо максималне хоризонталне напоне.

Ову тврдњу ћемо поткрепити следећим доказом. На плану откопа са квадратним стубом и откопним ходницима (коморама) које га формирају и директно утичу на његову стабилност, лоцирали смо положај пресека за аксијално симетрични модел конструкције. У овом случају квадратни стуб је моделиран кружним, а празан простор (откоп) је прстенаста просторија са истим попречним пресеком. Графички приказ дистрибуције зоне затезног напрезања и интензитети напона за оба модела приказани су на слици 18. Величина и изглед зоне напрезања су истоветни код оба модела. Код аксијално симетричног модела нешто су ниже вредности затезних напрезања. Разлог за то је што спољни зид коморе на моделу

има кружни облик (уместо квадратног) и због тога је већи отпор конструкције, а што је раније објашњено.

За сад остаје отворено питање која је то минимална рационална димензија сигурносног стуба, будући да напон у стубу не зависи од димензија стуба већ од димензија и облика комора које формирају стуб.



Слика 18 Упоредни приказ стања затезног напрезања у стубу за равно стање деформација и стање аксијалне симетрије

Коефицијент сигурности

Поступак димензионисања конструкције подразумева подешавање њених димензија и облика како би напрезање које изазива лом било усклађено са чврстоћом материјала. Како лом изазива затезно напрезање, равнотежно стање је:

$$\sigma_{td} + \sigma_3 = st \cdot \sigma_1$$

Дозвољено затезно напрезање (σ_{td}) је измерена затезна чврстоћа (σ_{ti}) увећана за коефицијент сигурности (k_s).

$$\sigma_{td} = \frac{\sigma_{ti}}{k_s}$$

Коефицијенти сигурности се у инжењерској пракси крећу од неколико десетина до неколико стотина процената. То зависи од поузданости методе прорачуна и од поузданости података са којима се улази у прорачун.
У овом случају предлажем да се коефицијент сигурности одређује у функцији геолошког индекса чврстоће стренског масива(GSI):

$$k_s = 2 - \frac{GSI}{100}$$