

יציבות חללים תת-קרקעיים
בעלי מפתח רחב במיוחד
בסלע משוכב וסדוק

מקרה חקר:

מערת צידקיהו, ירושלים

תודה!

לפרופ' יוסי חצור

לד"ר מיכאל צ'סרסקי

לד"ר קוסשווילי

לד"ר ויאצ'סלב פלצ'יק

לד"ר י. מימרן, הקרן לשיקום מחצבות

למר טמקין, חברת "תיק פרוייקטים"

לגב' מלכה, החברה לפיתוח מזרח ירושלים

מטרות המחקר

- ניתוח יציבות החלל התת-קרקעי במערת צידקיהו
- קביעת זמן העמידה והמפתח המרבי היציב בסלע ללא תימוך
- בדיקת אמינות שיטות הסיווג הקיימות

יעדי המחקר

- עבודת שדה
- הגדרת תכונות מכניות של הסלע
- ניתוח גיאו-הנדסי

רקע מדעי

- **שיטות סיווג אמפיריות**

Bieniawski 1973 –

Barton 1974 –

- **מודלים אנליטיים**

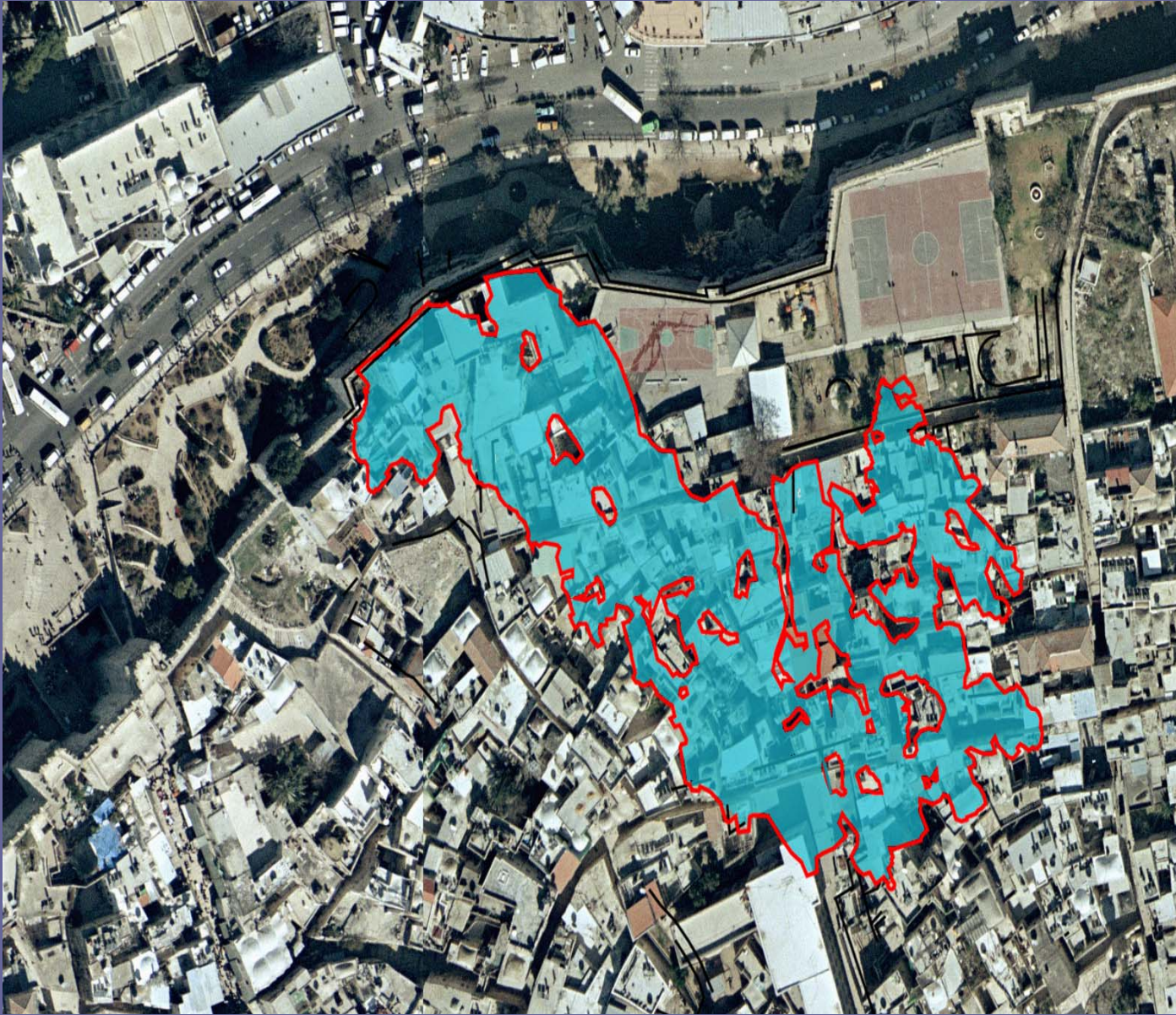
Obert&Duvall 1967 –

Evans 1941, Beer&Meek 1982 –

Goodman&Shi 1985 –

- **מודלים נומריים**

Shi 1993 –



מערכות אי-רציפות

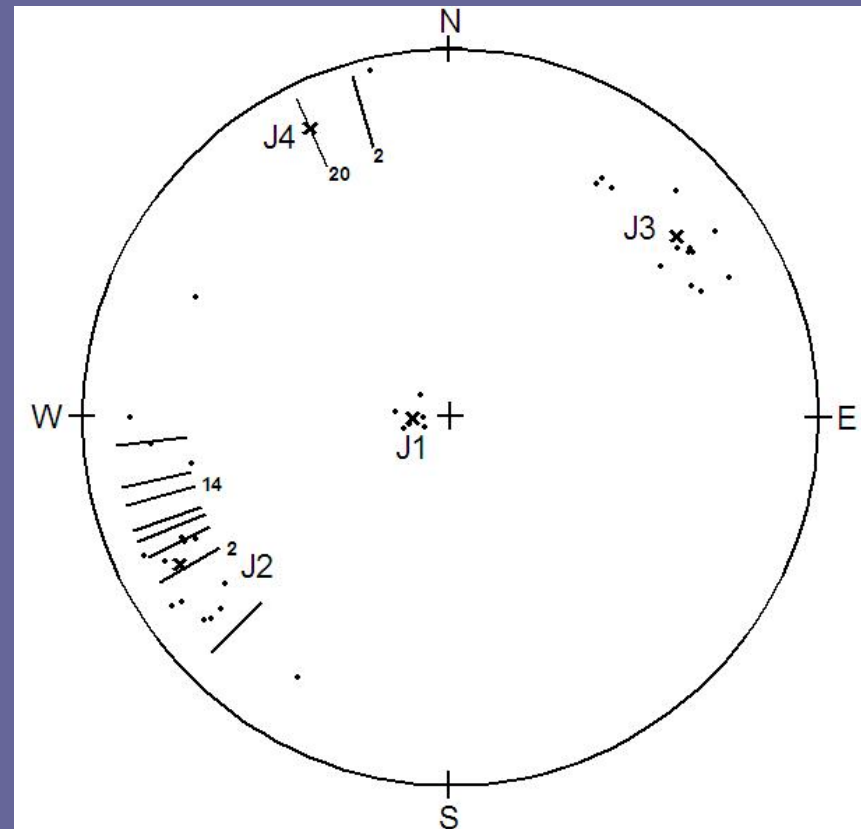
- J1 – שיכוב תת-אופקי

- J2 – מישורי גזירה
71/061

- J3 – מישורי גזירה
67/231

- J4 – מישורי סידוק
75/155

- מרווח ממוצע 1-1.5 מ'



בדיקות מכניות

- **חוזק הסלע in situ**

- פטיש שמיט

- **חוזק הסלע הרציף**

- Point load

- Brazilian

- לחיצה חד-צירית

- **חוזק גזירה של מישורי אי-הרציפות**

- **מקדמים אלסטיים**

- מודול יאנג

- יחס פואסון

- **חספוס**

- זווית חיכוך שיורית

- זווית חספוס

תוצאות הבדיקות המכניות

- צפיפות 1976 kg/m^3
- נקבוביות 27%
- חוזק פטיש שמיט 10 MPa
- חוזק עבור עומס נקודתי 1.33 MPa
- חוזק מתיחה משוער 2.8 MPa
- חוזק חד-צירי (I) 11.3 MPa , (II) 16.5 MPa
- חוזק גזירה $0.5\text{--}0.6 \text{ MPa}$
- מקדם האלסטיות 7.6 GPa , 8.4 GPa
- יחס פואסון 0.16, 0.14
- זווית חיכוך שיורית 33 מעלות
- זווית חספוס 3 מעלות

סיווג אמפירי של איכות מסת הסלע

Terzaghi 1946 •

Lauffer 1958 •

Deere 1967 (RQD) •

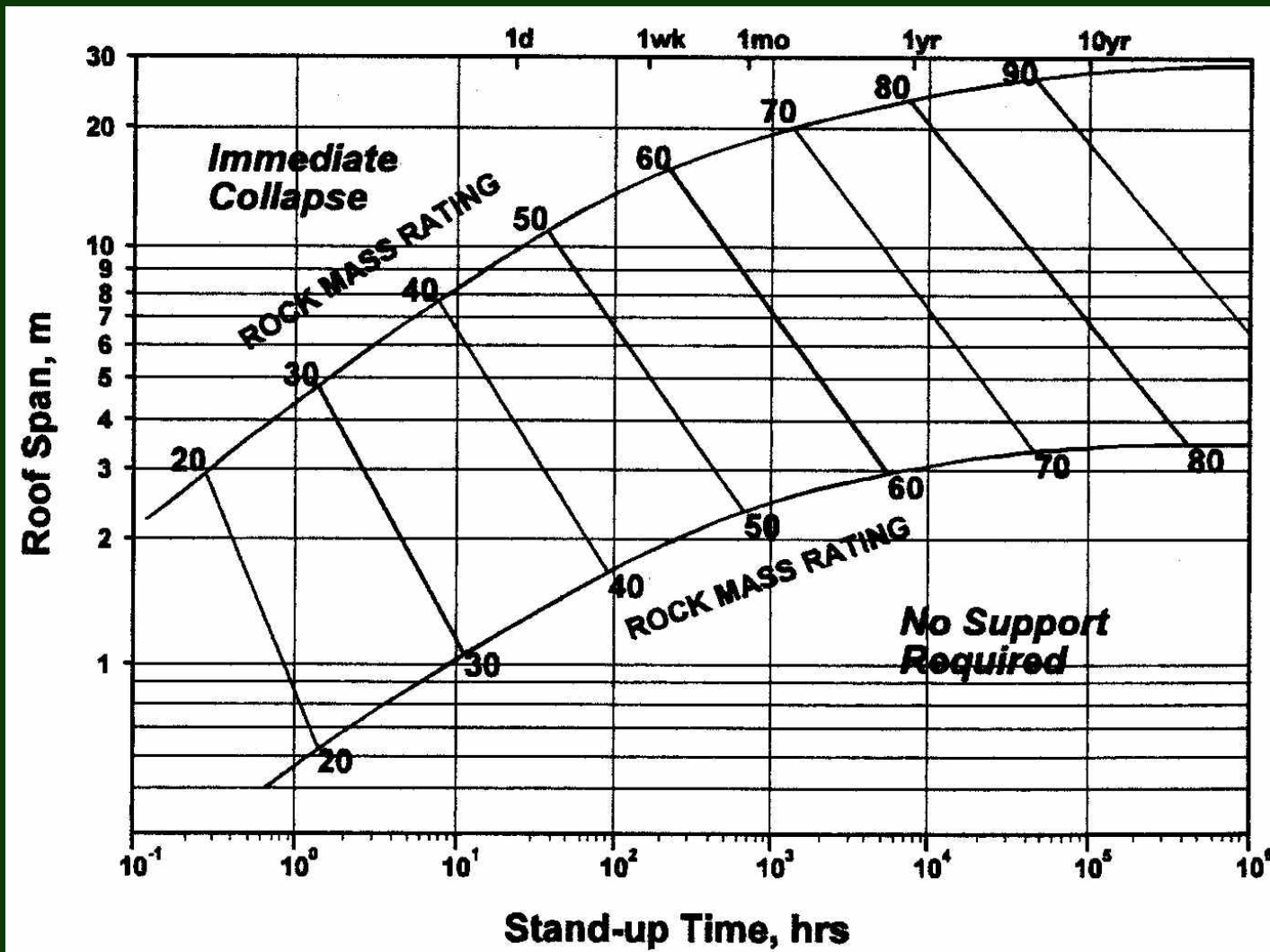
Wickham et al. (RSR) •

Bieniawski 1973,1989 (RMR) •

Barton 1974 (Q) •

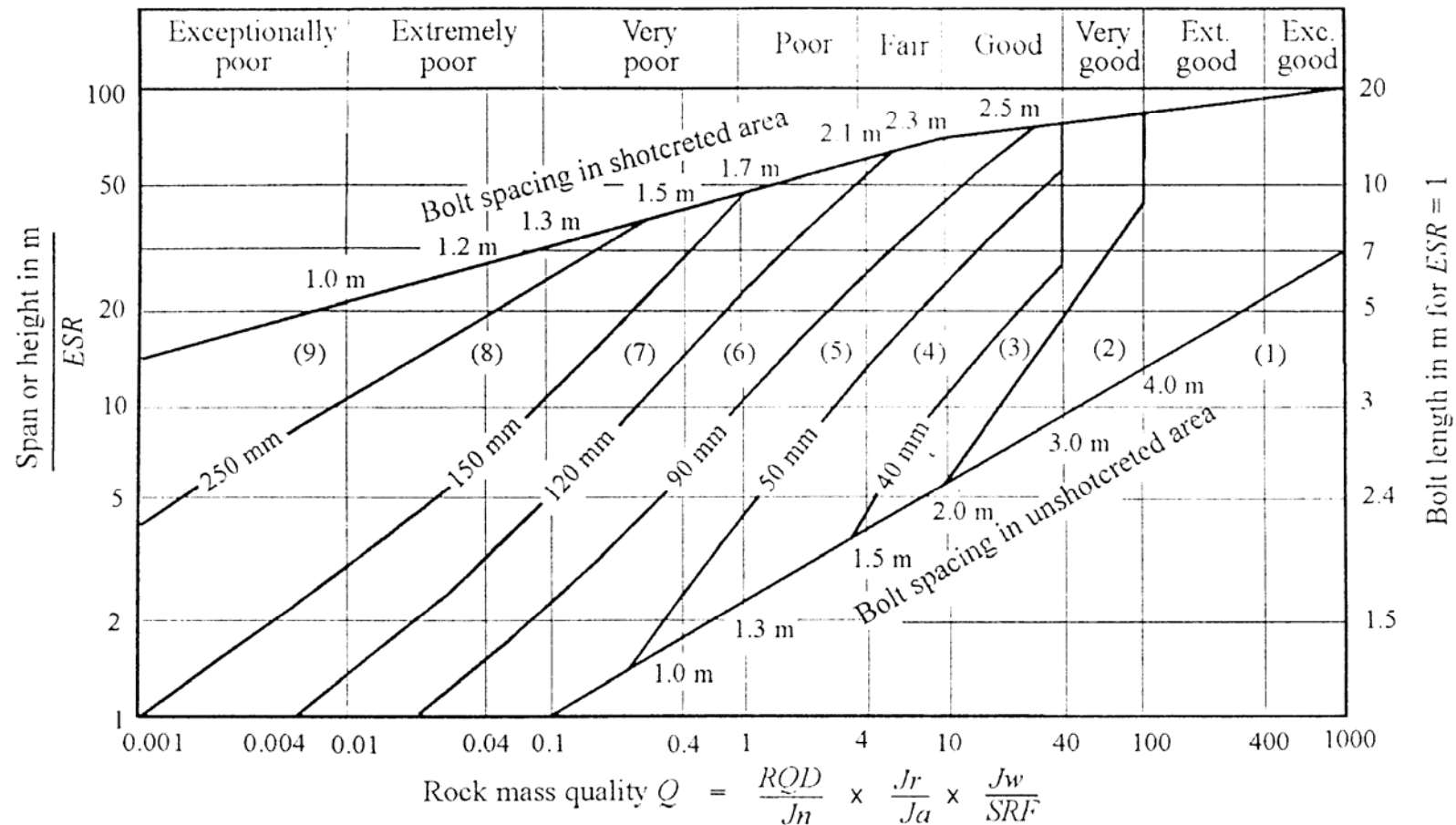
שיטת RMR

- חוזק לחיצה של הסלע הרציף
- אינדקס ה-RQD
- רמת הסידוק
- מצב מישורי אי-הרציפות
- מי תהום
- כיוון מישורי אי-הרציפות ביחס לציר המנהרה
- איכות הסלע, זמן עמידה, מפתח, תימוך



שיטת Q

- $Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$
- RQD
- J_n – מס' מערכות הסידוק
- J_r – מקדם חספוס של מישורי הסדק
- J_a – מקדם רמת הבליה של הסדק
- J_w – מקדם החלשה עקב נוכחות מים
- SRF – מקדם החלשה עקב אזורי חולשה, גזירה ומצב המאמצים
- איכות הסלע, תימוך



REINFORCEMENT CATEGORIES

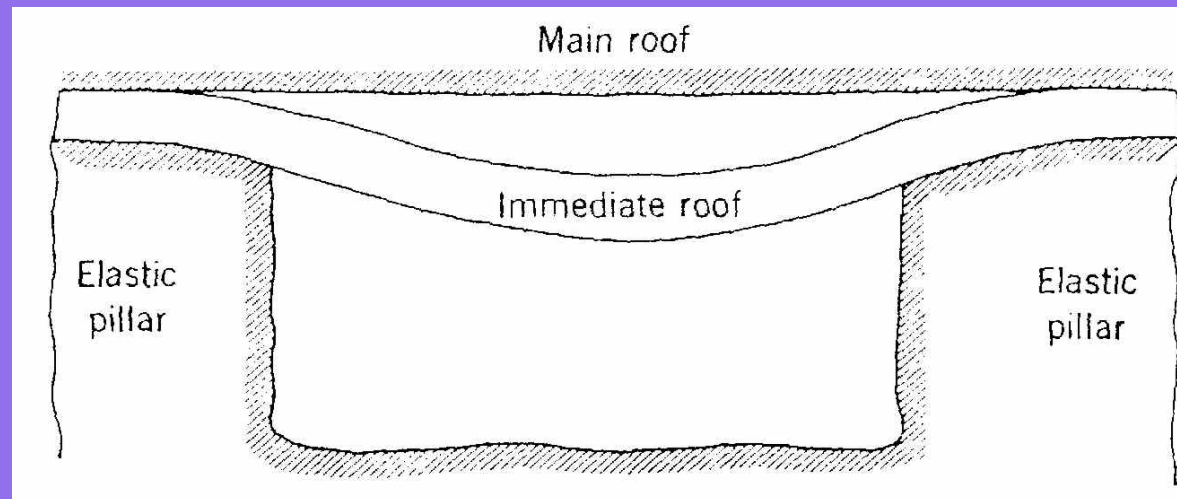
- | | |
|---|--|
| 1) Unsupported | 5) Fibre reinforced shotcrete, 50 - 90 mm, and bolting |
| 2) Spot bolting | 6) Fibre reinforced shotcrete, 90 - 120 mm, and bolting |
| 3) Systematic bolting | 7) Fibre reinforced shotcrete, 120 - 150 mm, and bolting |
| 4) Systematic bolting with 40-100 mm unreinforced shotcrete | 8) Fibre reinforced shotcrete, > 150 mm, with reinforced ribs of shotcrete and bolting |
| | 9) Cast concrete lining |

ניתוח יציבות

- ניתוח מאמץ בסלע רציף
- ניתוח מאמץ בסלע סדוק (Voussoir)
- תיאוריית בלוקים
- Discontinuous Deformation Analysis

ניתוח כפיפה בתקרה

- Obert & Duvall 1967
- מודל של קורה אלסטית פשוטה עם קצוות מקובעים
תחת עומס מפולג אחיד



תוצאות ניתוח כפיפה

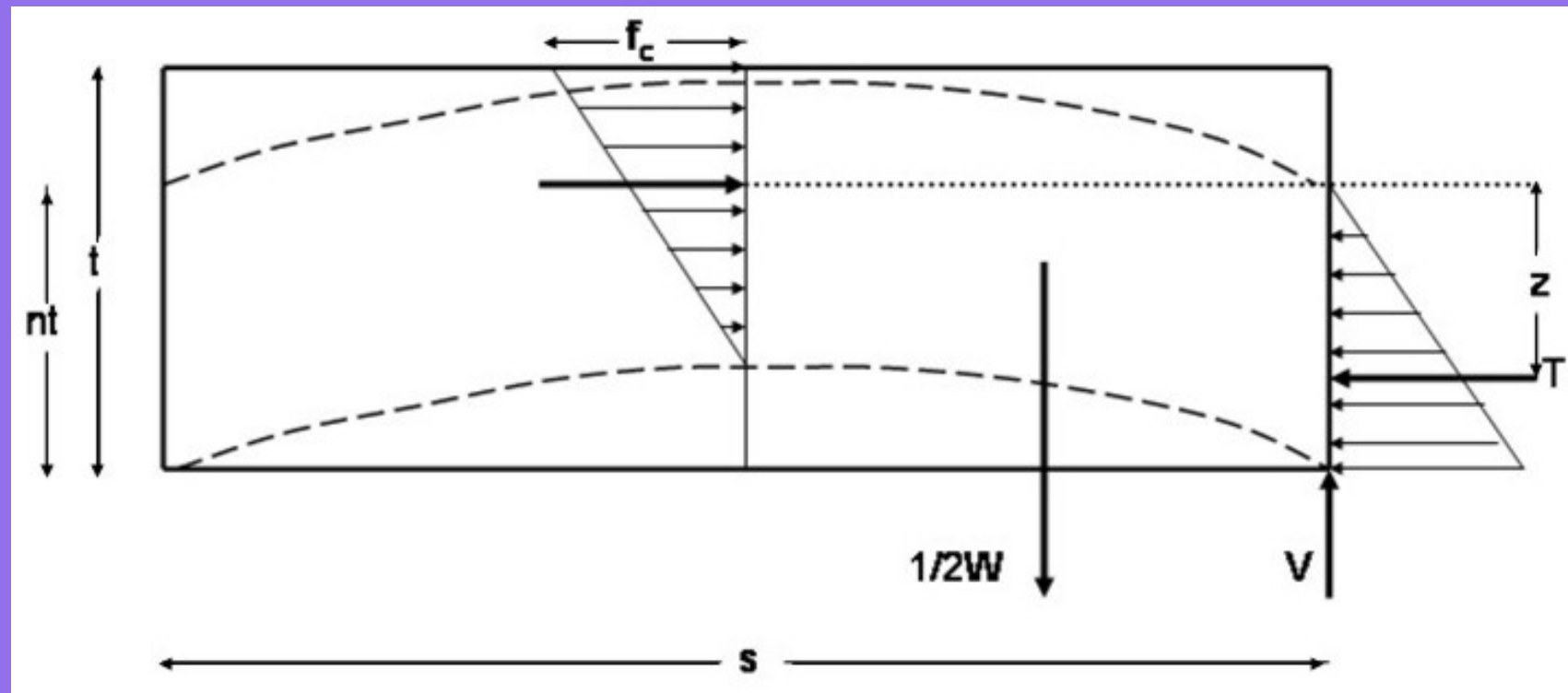
- מאמץ צירי מרבי בקורה 10.5 MPa
- מאמץ גזירה מרבי 445 KPa
- שקיעה מרבית 8.67 cm
- לעומת זאת חוזק הסלע למאמץ לחיצתי 11 MPa
חוזק הסלע למאמץ מתיחתי 2.8 MPa
וחוזק הגזירה של הסדקים 0.5 MPa

מודל Voussoir

• Evans 1941, Beer&Meek 1982

• התקרה בנויה מבלוקים בלתי-רציפים ומגיבה על ידי lateral thrust הנוצר על ידי כפיפה תחת משקל עצמי כנגד הלחץ המקיף של הדפנות.

• אפקט ההתקשות מייצב את המבנה.



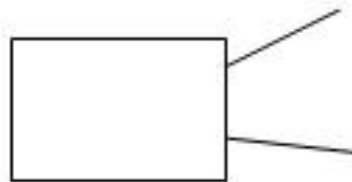
תוצאה (Voussoir)

- מאמץ צירי מרבי 3.5 MPa
- מקדם הבטחון עבור crushing = 4.7
- מקדם הבטחון עבור גזירה בדפנות = 3.1
- Buckling אינו צפוי
- התקרה יציבה עקב התקשטות (arching)

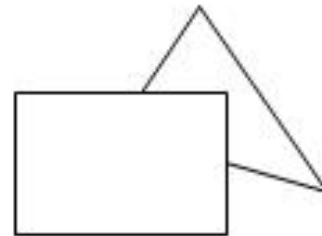
תיאוריית בלוקים

- Goodman&Shi 1985
- תיאורייה גיאומטרית תלת-מימדית
- קיים מספר סופי של מערכות אי-רציפות בעלי השתרעות אינסופית היוצרות בלוקים על ידי הצטלבותן.
- הגדרת בלוקים ברי תזוזה (keyblocks)

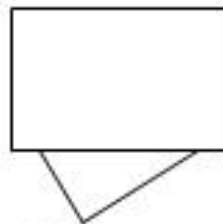
סוגי הבלוקים



a



b



c



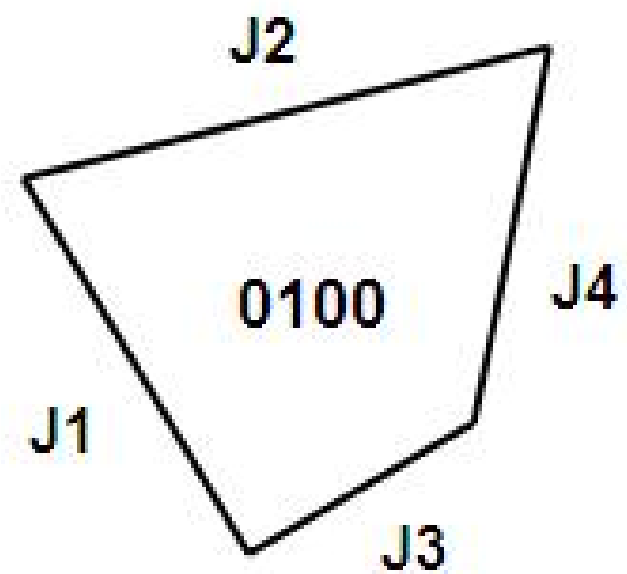
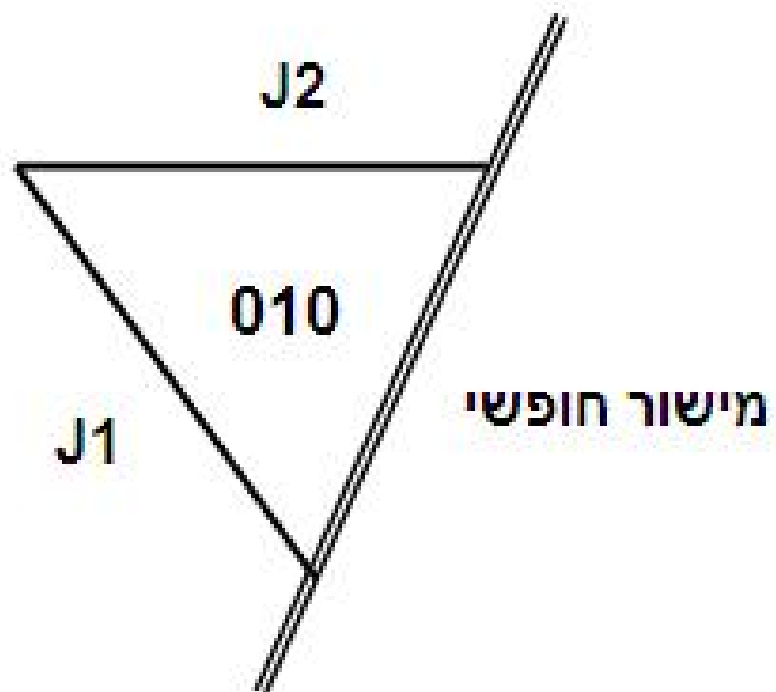
d

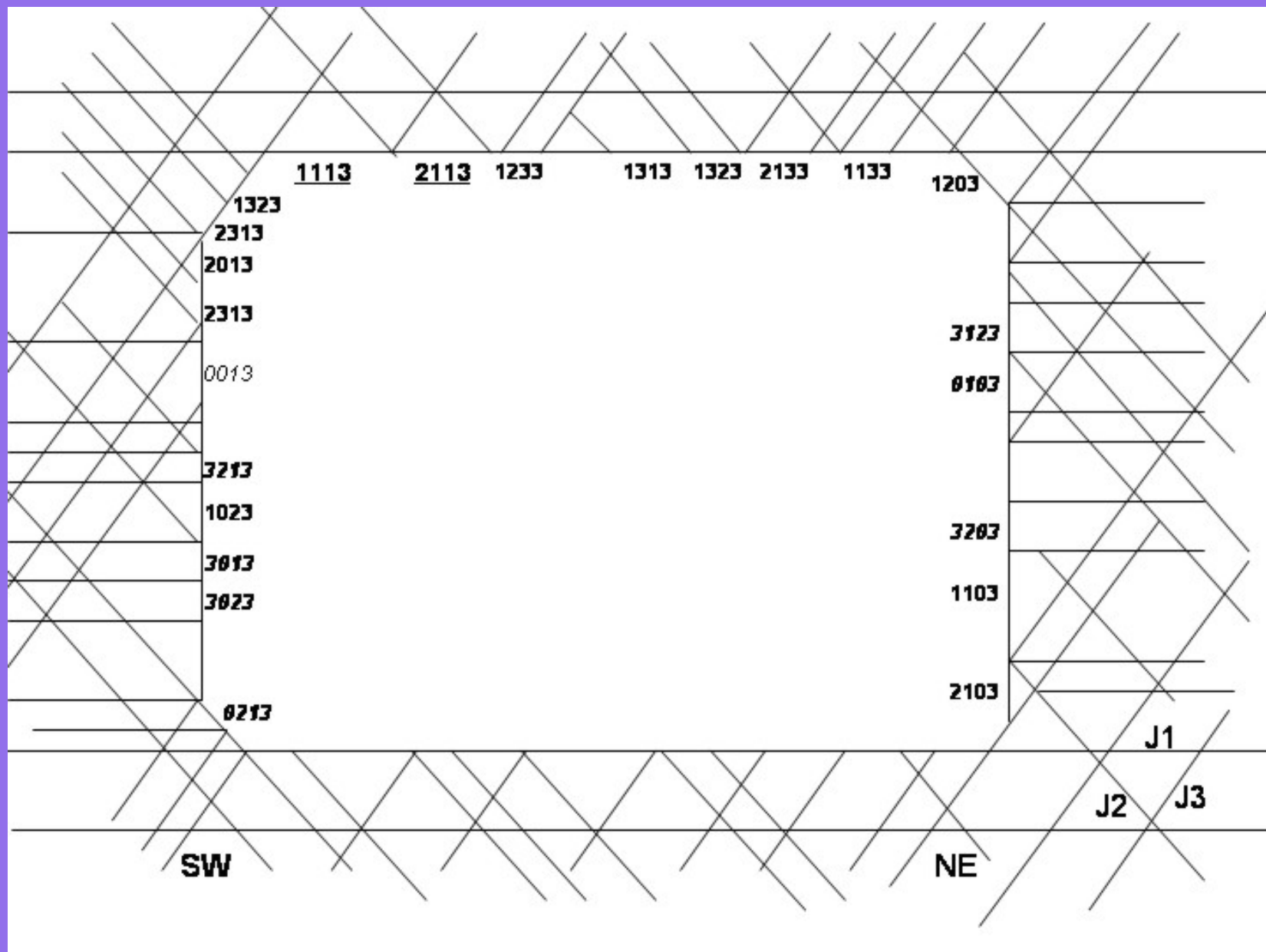


e



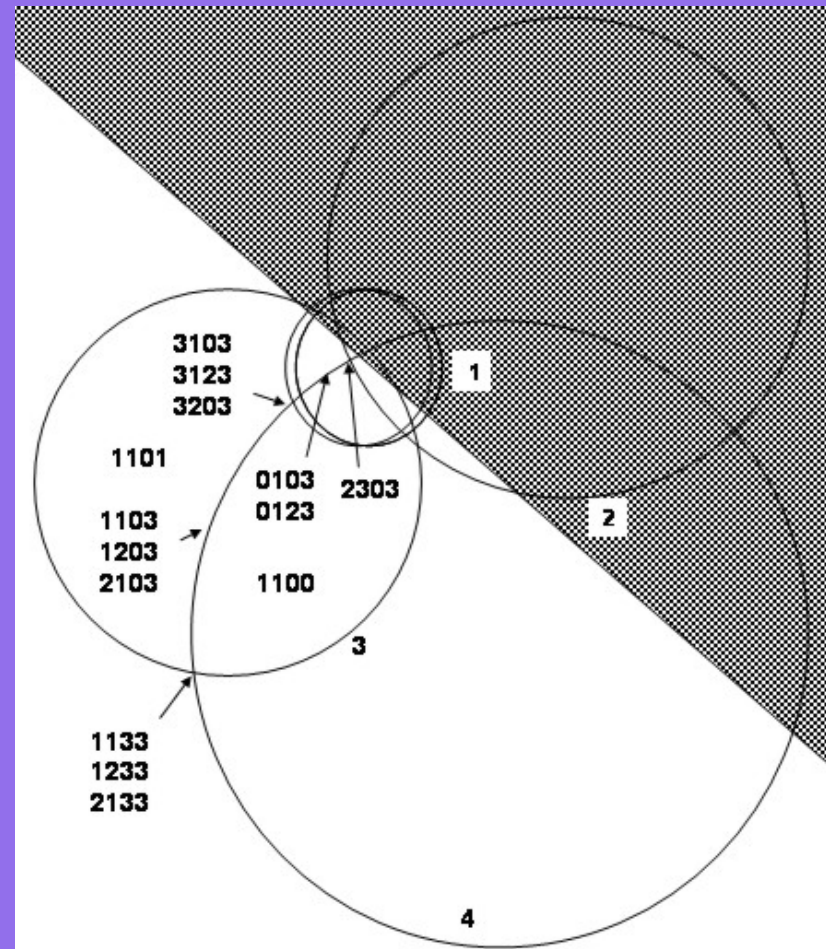
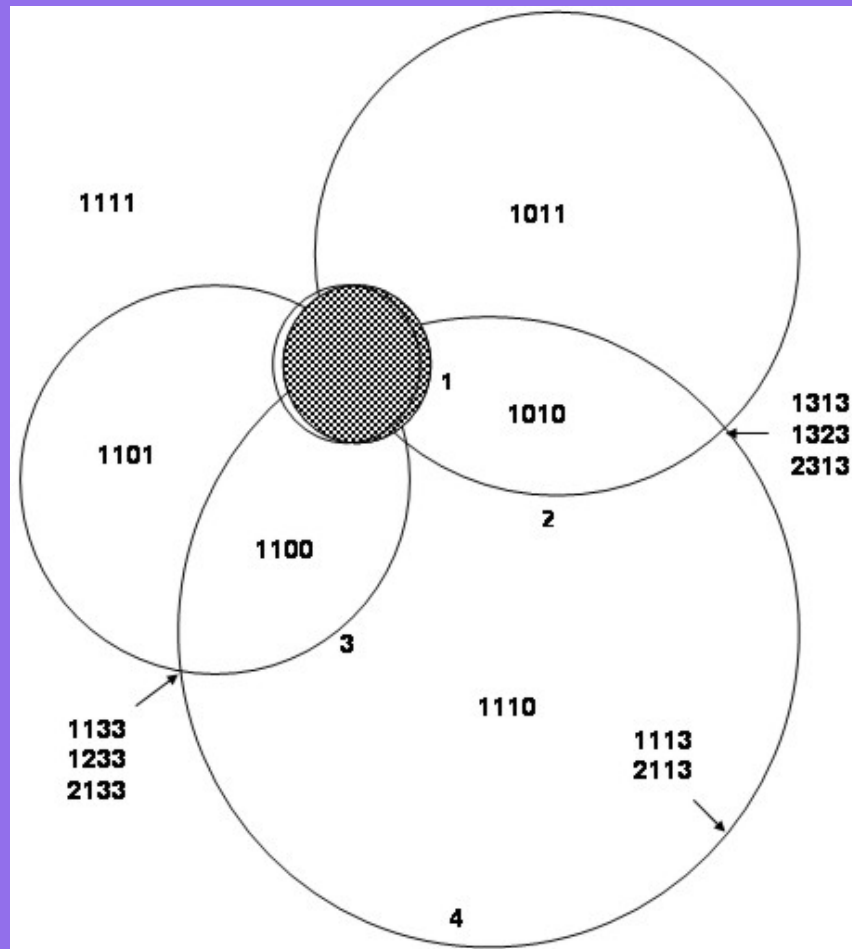
f





השלכה סטריאוגרפית

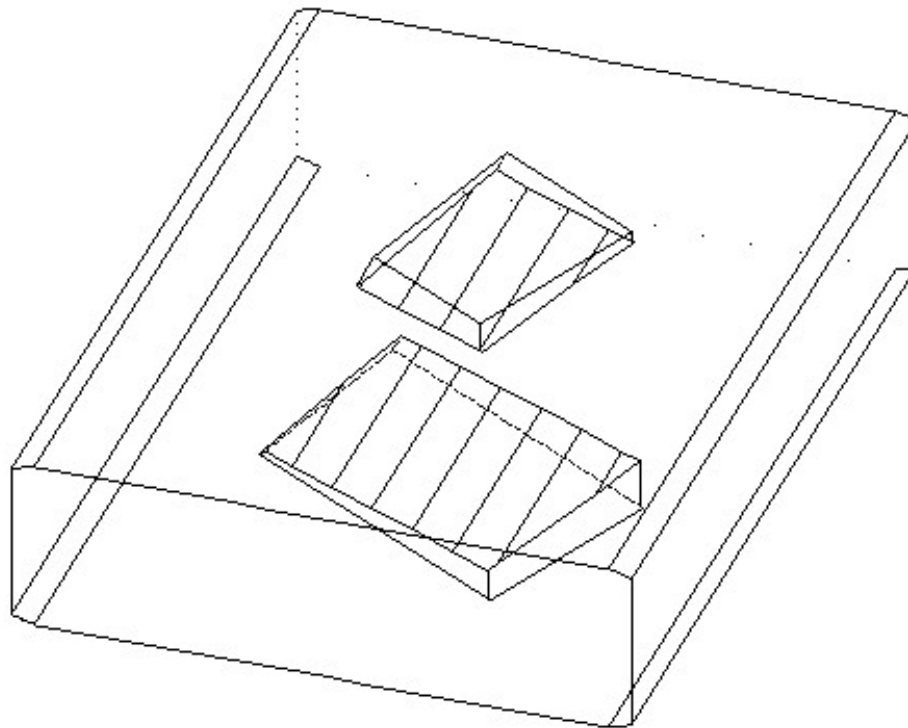
- השלכת מישורי אי-רציפות וקביעת JP code
- המישור החופשי מחלק את המרחב לחצי חלל של אוויר ולחצי חלל של סלע.
- לפי Shi כל בלוק הכלול כולו בחלל האוויר הנו בר תזוזה.



הבלוק הקריטי בתקרה

BP 1113 •

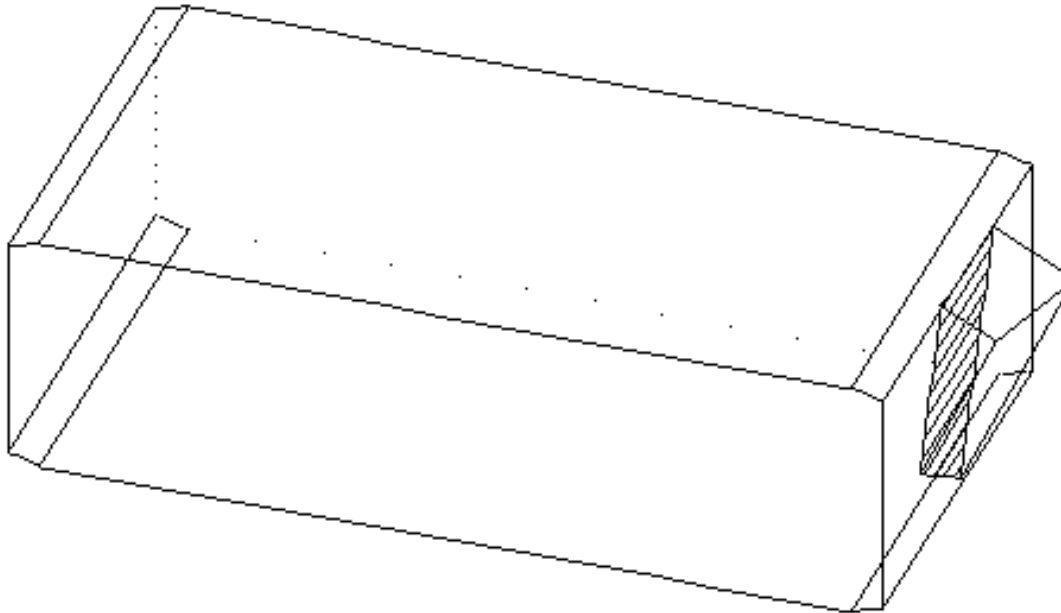
TUNNEL SHAPE
Q. 140+02 Q. 400+03 Q. 300+01
PROTECTIVE DIR.
Q. 100+01 Q. 200+03 Q. 300+01
TOP VERTIX DIR.
Q. 500+01
Q. 500+01
Q. 500+01
Q. 500+01
Q. 600+01
Q. 500+01
TOP DISTANCE
Q. 000+00
S113



הבלוק הקריטי בקיר הצפון-מזרחי

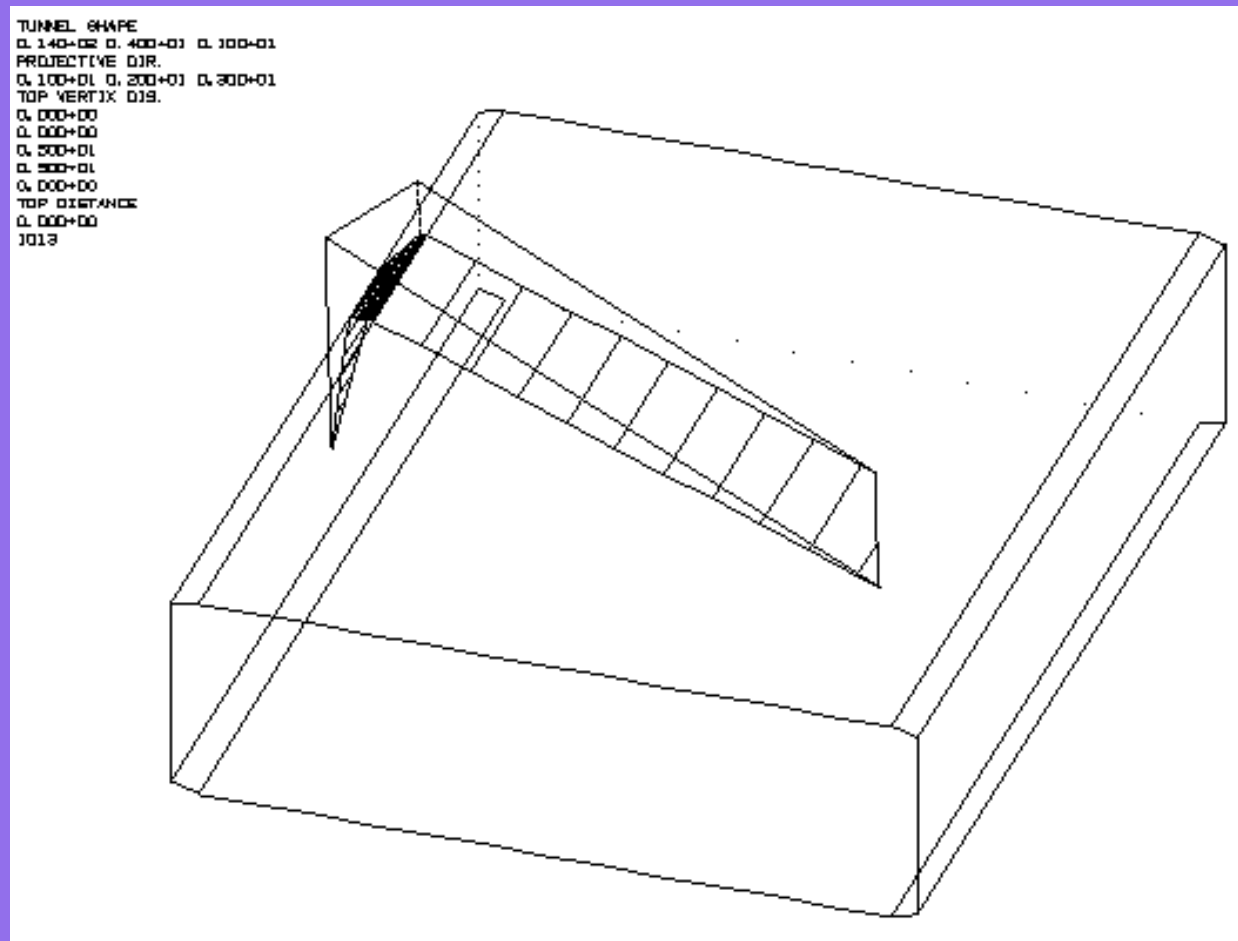
BP 1103 •

TUNNEL SHAPE
Q. 140+02 Q. 400+01 Q. 300+01
PROTECTIVE DTR.
Q. 100+01 Q. 200+01 Q. 300+01
TOP VERTIX DTR.
Q. 000+00
Q. 500+01
Q. 000+00
Q. 000+00
Q. 000+00
TOP DISTANCE
Q. 500+01
1103



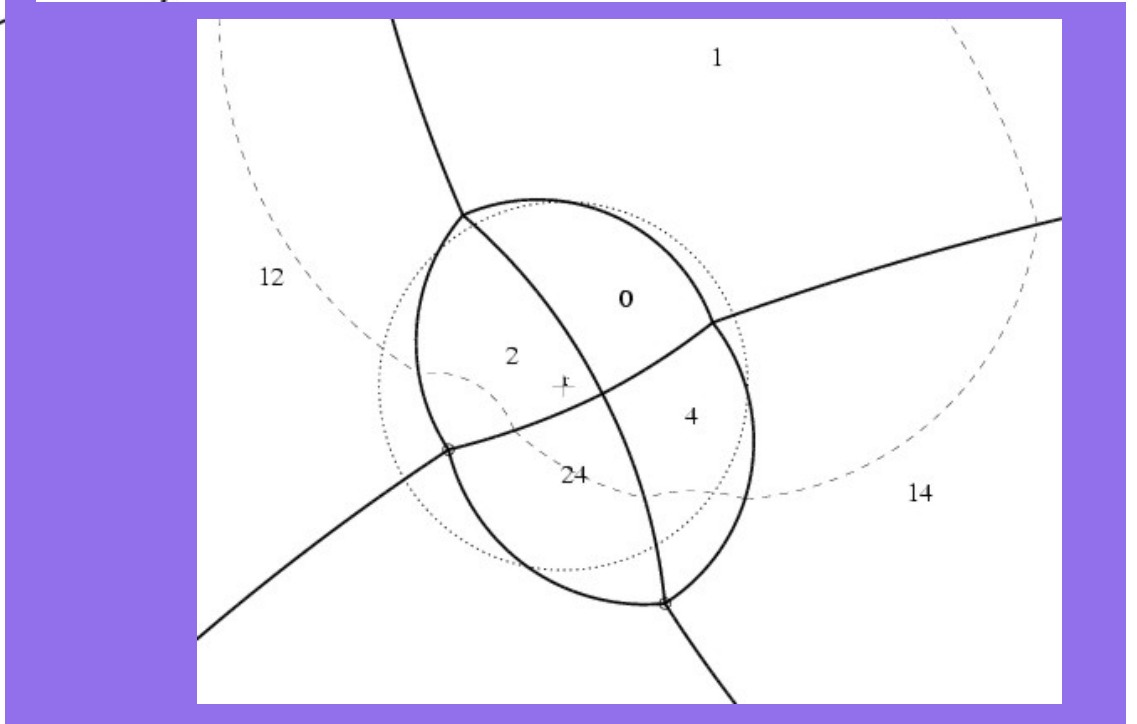
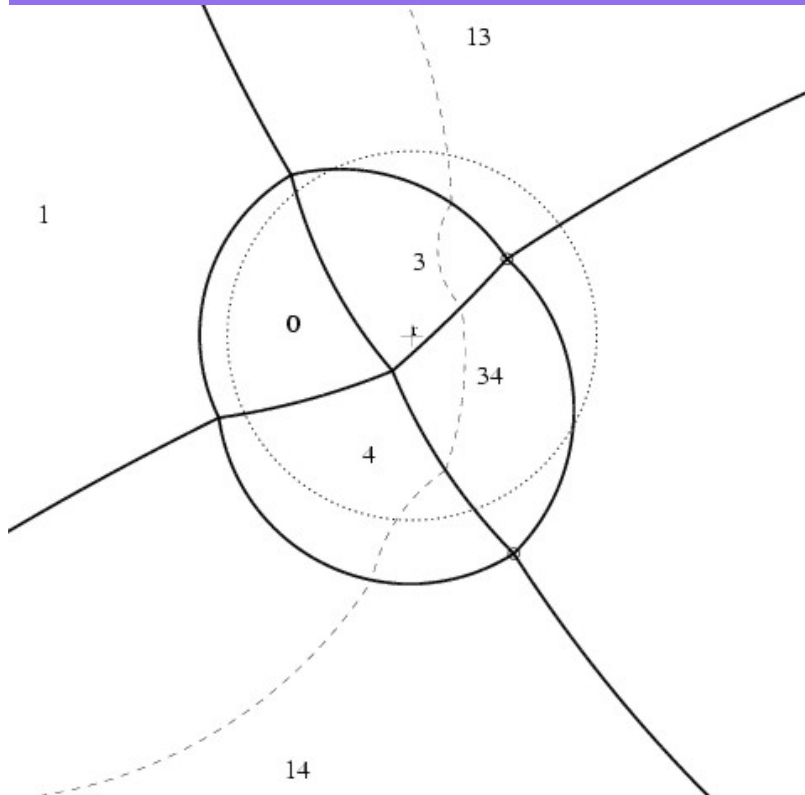
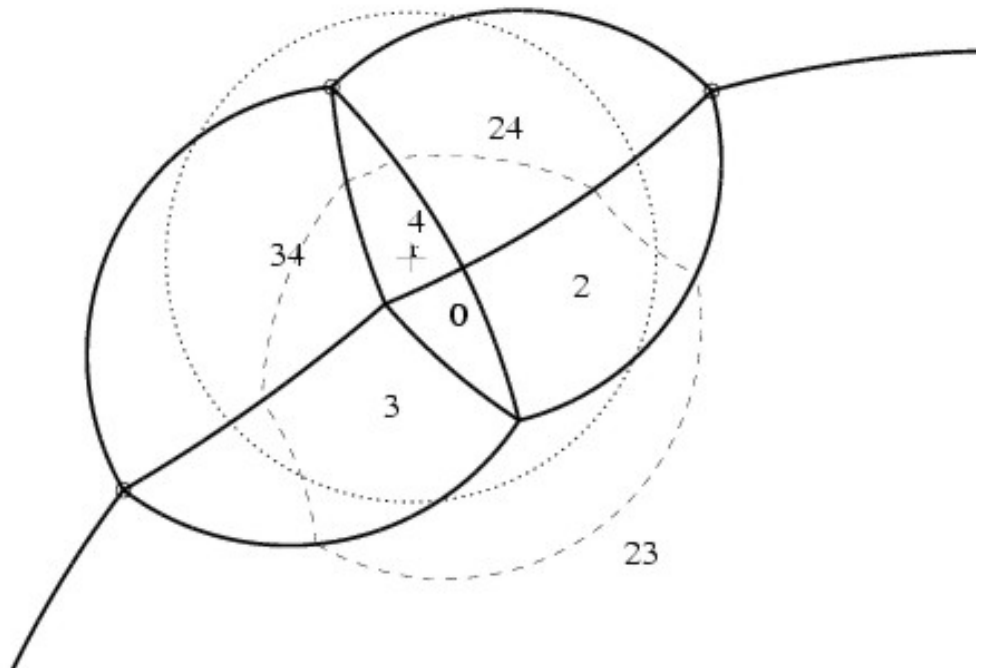
הבלוק הקריטי בקיר הדרום-מערבי

BP 1013 •



סגנונות כשל

- נפילה
- החלקה על גבי מישור אחד
- החלקה על גבי שני מישורים
- שליפה
- סגנון הכשל תלוי בנטיית מישור אי-הרציפות ביחס לשקול הכוחות ובזווית החיכוך של מישור אי-הרציפות.

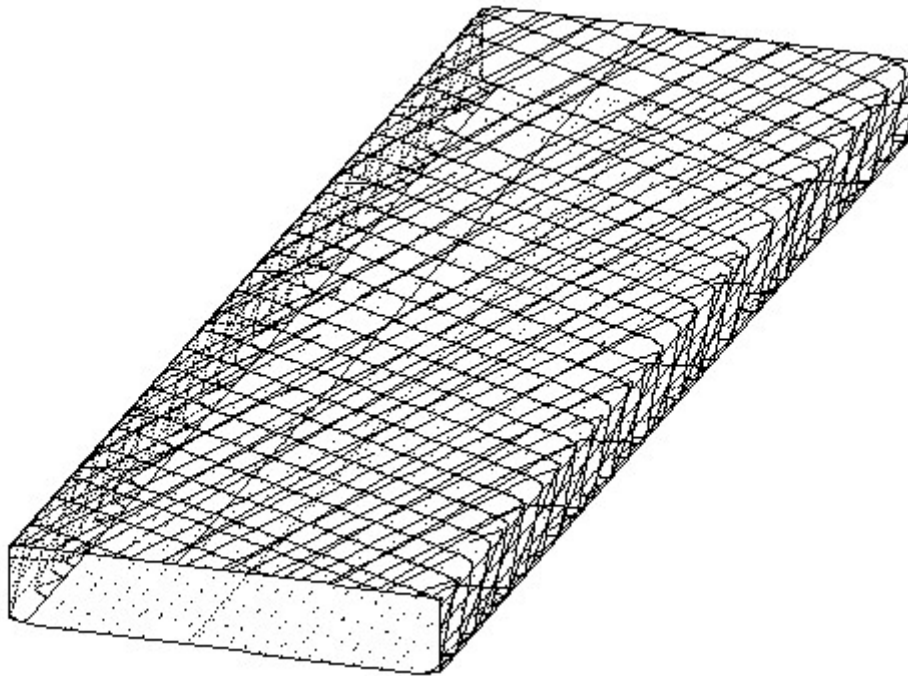
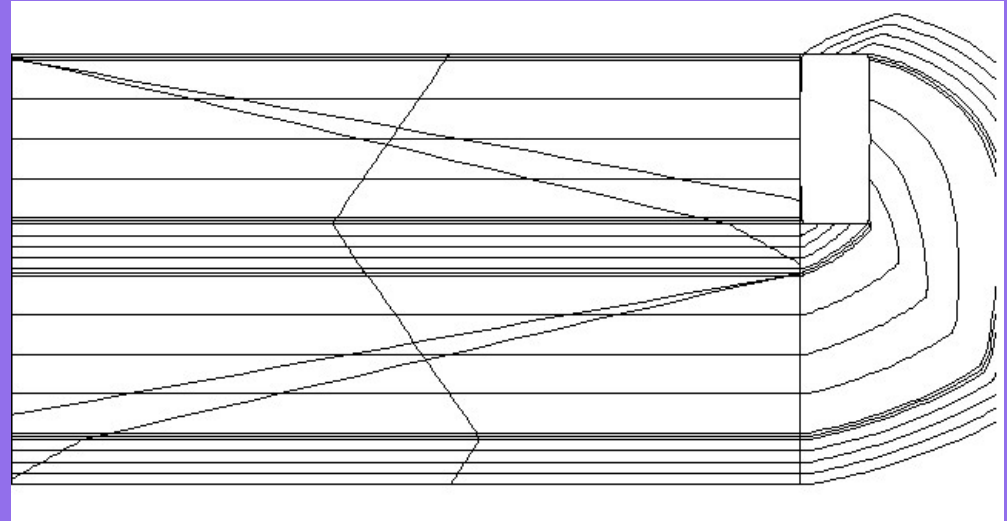


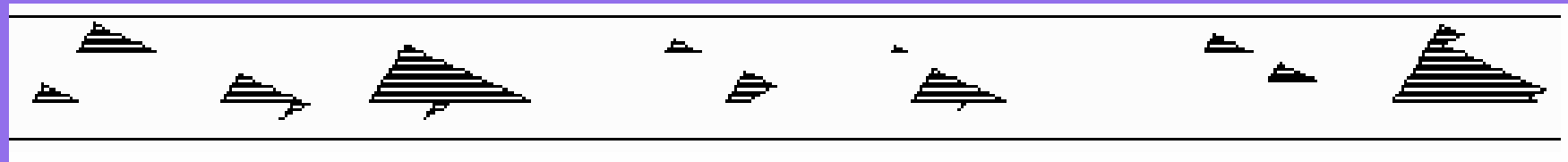
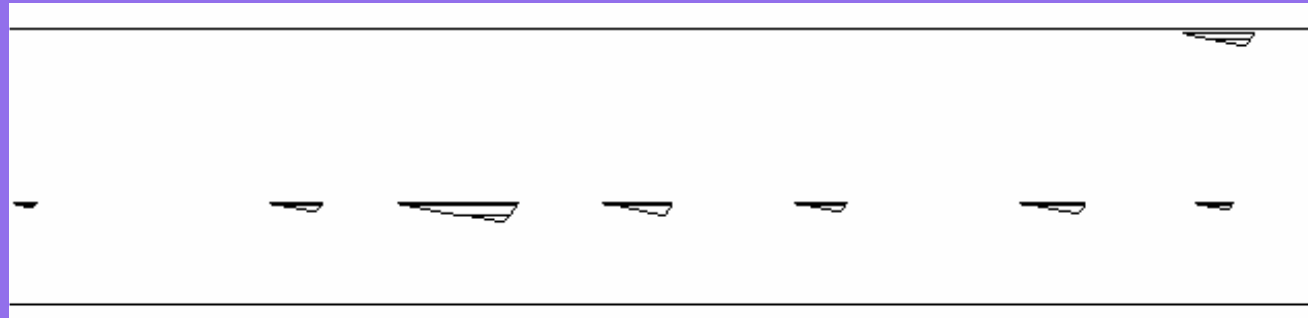
סבירות הכשל

- מבחינה גיאומטרית קיימים בלוקים רבים שהנם ברי תזוזה. אך ישנם גורמים פיסיקליים שמונעים כשל:
- זווית החיכוך גדולה מנטיית המישור שעליו הבלוק מחליק
- הגברת חיכוך על ידי מישורים מקבילים
- שקול הכוח מנוגד לכיוון התזוזה

פריסת מערכות הסידוק

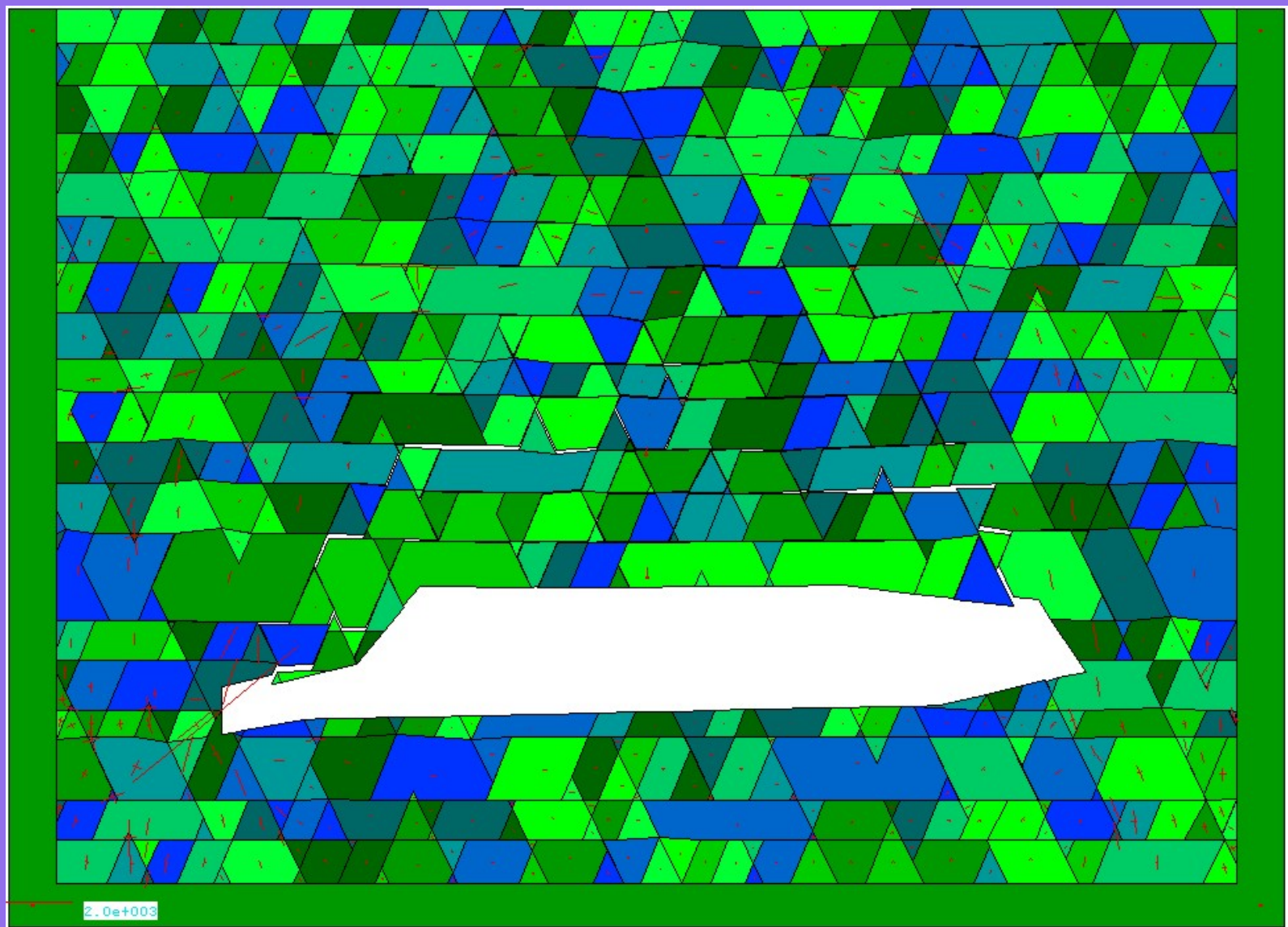
- Goodman&Shi 1989
- טרנספורמציית מערכות הסידוק אל מרחב המנהרה מאפשרת את הצגת קווי החיתוך של מישורי הסידוק עם דופן המנהרה
- חישוב שטח הכשל הפוטנציאלי בתקרה ובקירות

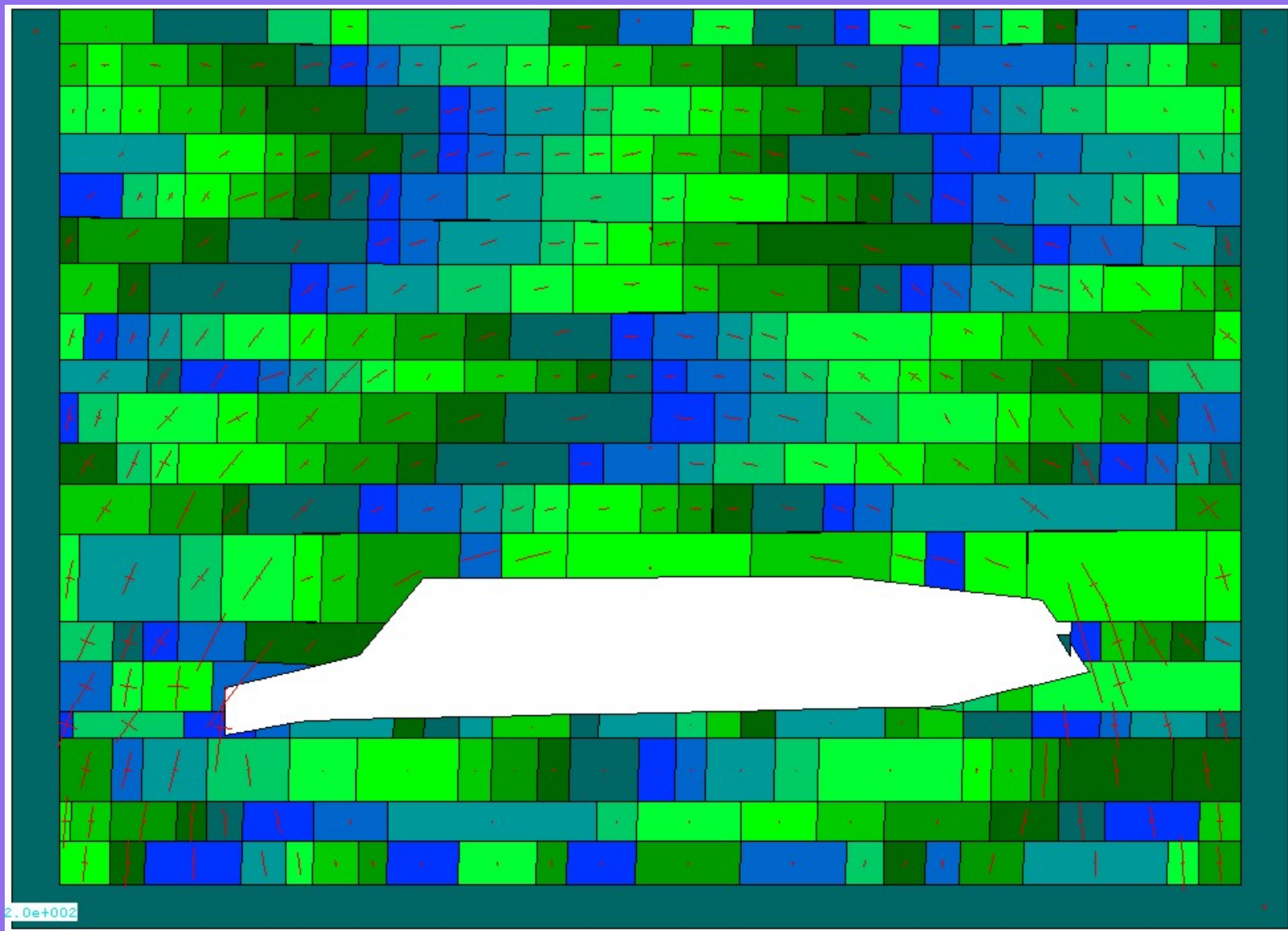




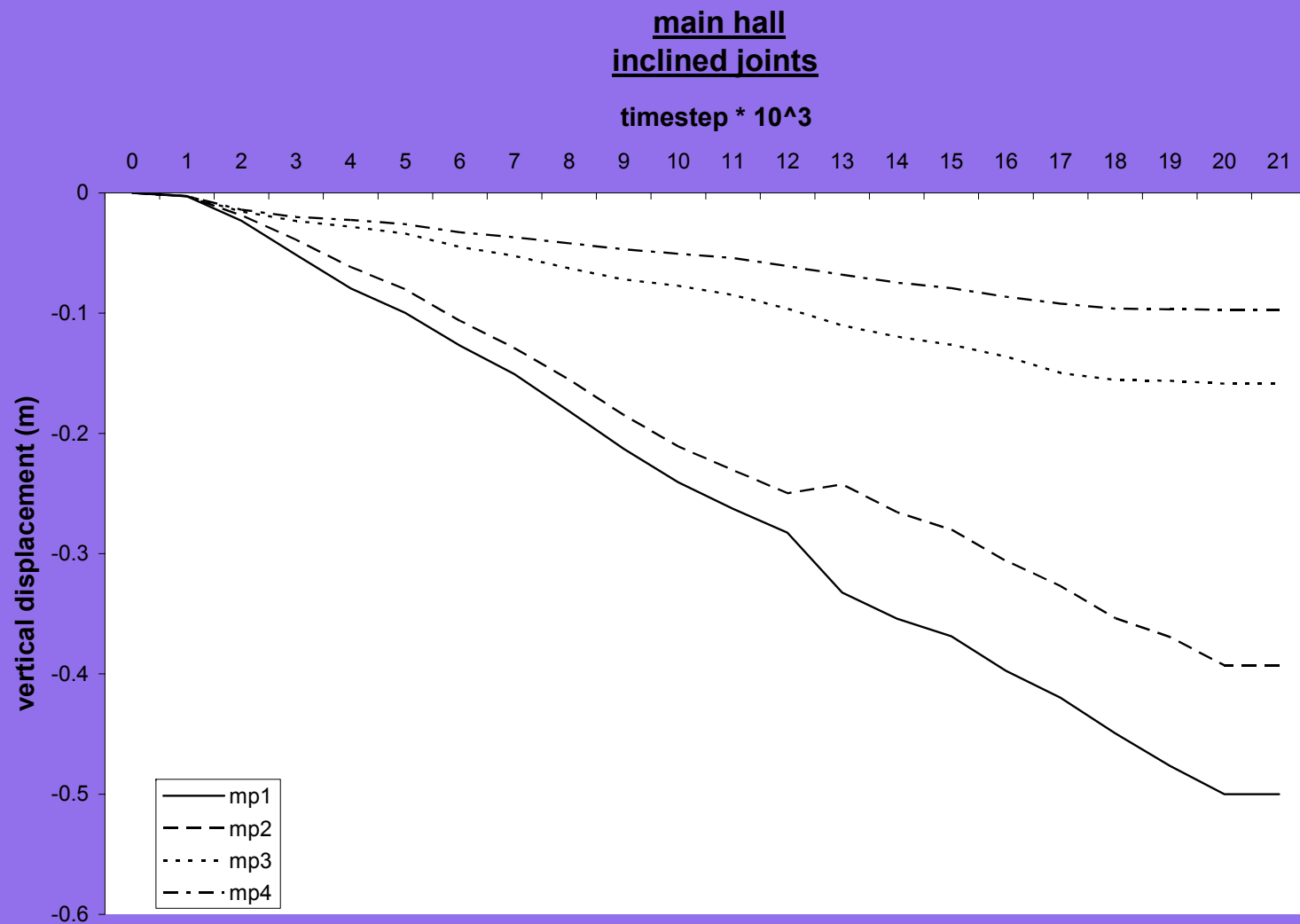
Discontinuous Deformation Analysis

- Gen-Hua Shi 1996
- שיטה נומרית לניתוח יחסי כוחות ומעוותים במערכת סופית של בלוקים בודדים המוגדרים על ידי מישורי אי-רציפות קיימים
- פתרון חוזר של משוואות שיווי משקל עבור מספר רב של מרווחי זמן עבור מצב סטטי או דינמי
- קפיצים קשיחים במגעים למניעת מתיחה וחדירה
- שיטה לינארית ואלסטית לחלוטין ללא איבוד אנרגיה פרט לאנרגיה הדרושה לכיווץ הקפיצים
- לעומת זאת נמצא כי ריסון של 2% נותן תמונה מציאותית יותר. כנראה ישנו איבוד אנרגיה עקב ריסוק הסלע במגעים.
- תכנון הנדסי על ידי הכנסת ברגי סלע או תימוך פסיבי

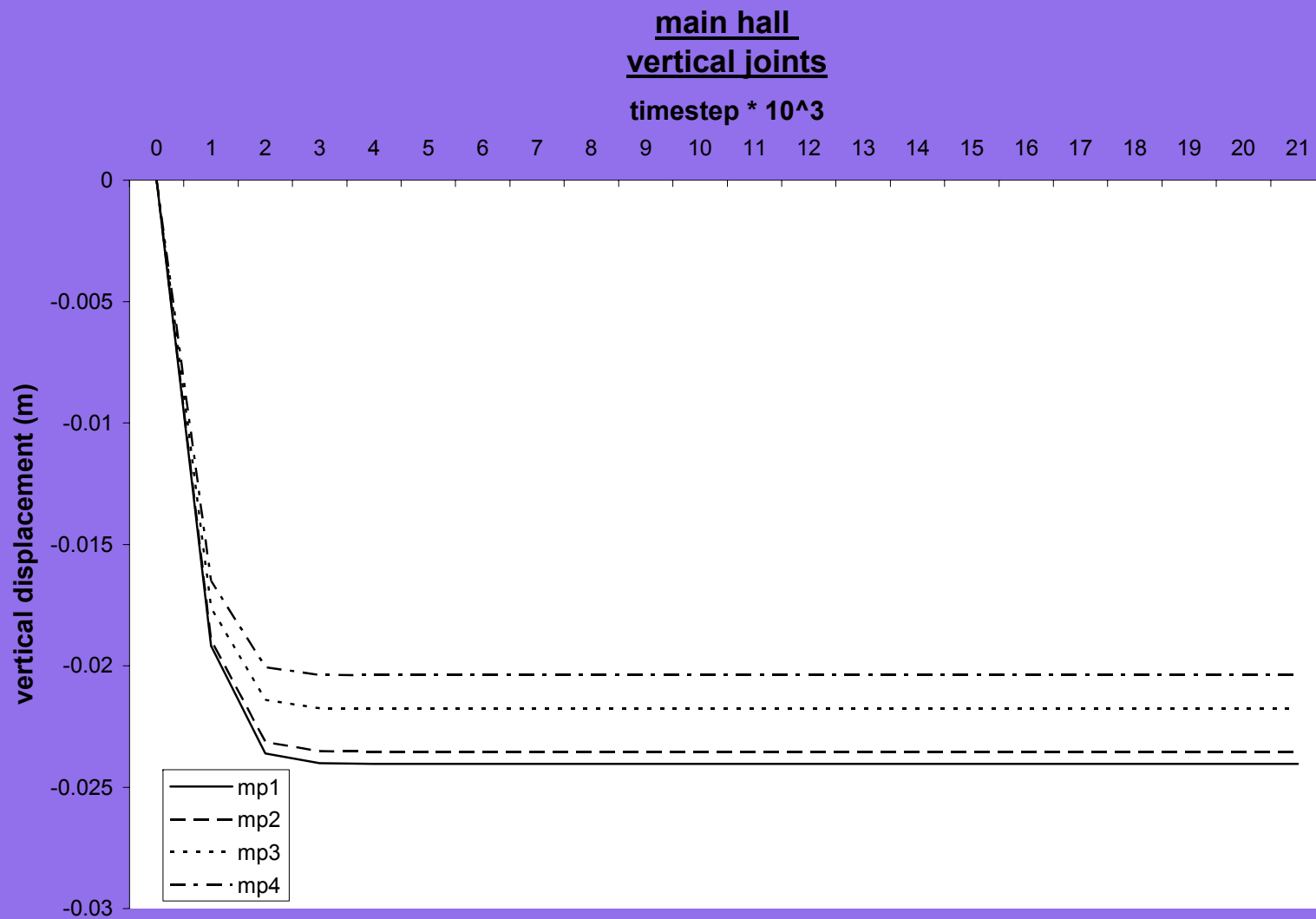




שקיעת התקרה עבור סידוק אלכסוני



שקיעת התקרה עבור סידוק אנכי

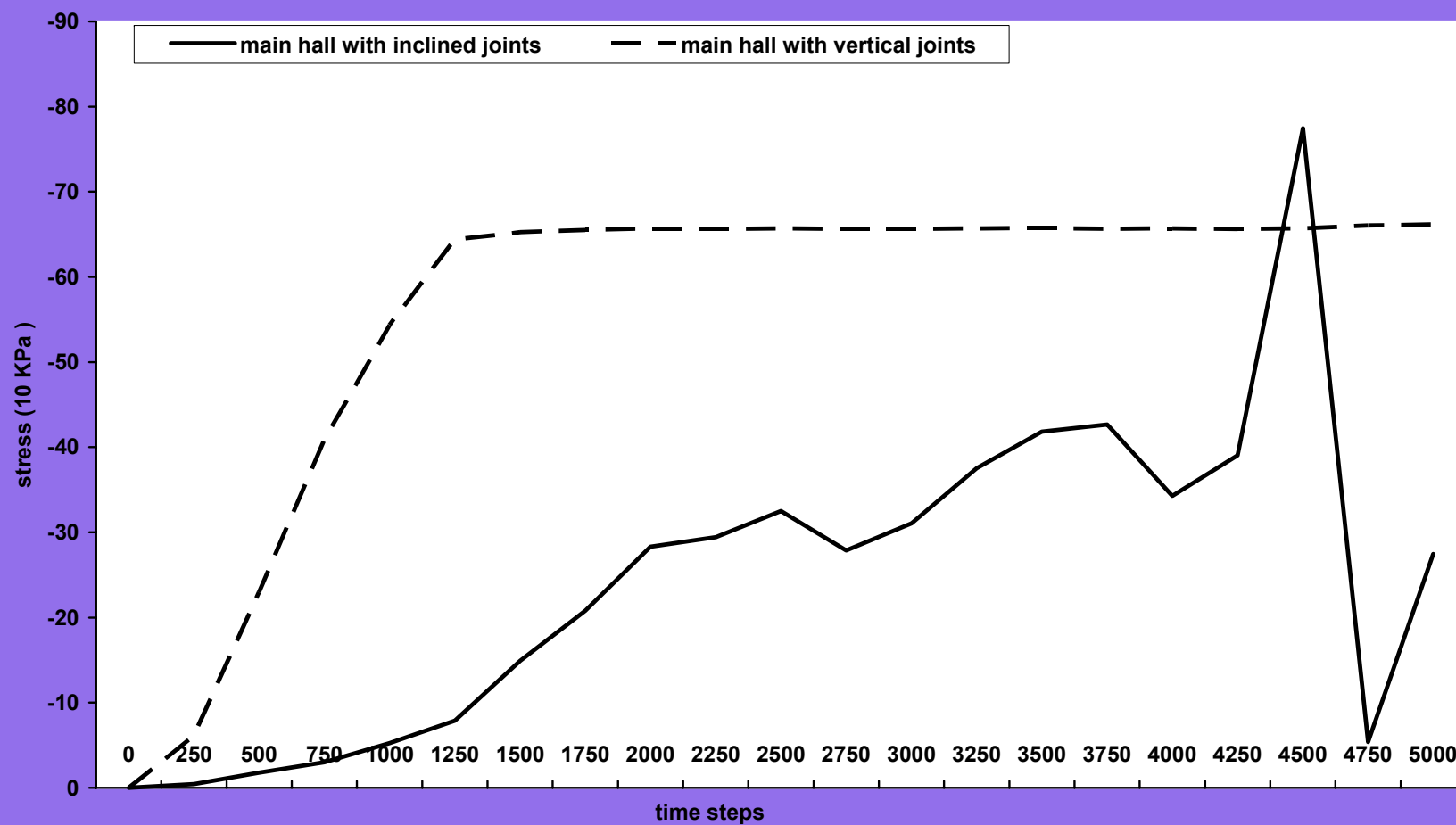


השוואה (שקיעת התקרה)



מאמצים אופקיים באזור ההתקשות

stresses in main hall



מסקנות

- בתקרה ובקירות נוצרים בלוקים קריטיים. סגנונות הכשל הנם: נפילת בלוקים והחלקה על מישורי אי-רציפות. חיכוך מוגבר מונע החלקה (J4).
- הסלע רך ובעל חוזק נמוך
- לפי השיטות Q ו-RMR מתקבל כשל מיידי עבור מפתח של 30 מ' ופחות. העובדה שהמערה נחצבה לפני אלפי שנים וטרם התמוטטה מצביעה על בעיה בשיטות הסיווג הקיימות בכל הנוגע לתיכנון הנדסי. אין התייחסות לתופעת ההתקשות. קיום מערכות סידוק מוריד את איכות מסת הסלע.
- הערכת זמן העמידה על פי שיטות אלו אינה מציאותית כלל. העובדות בשטח מדברות בעד עצמן.

- על פי המודל של קורה אלסטית רציפה התקרה צפויה להיכשל במתיחה. הסדקים מהווים גורם חיוני ליציבות התקרה.
- מודל Voussoir מתאר את אפקט ההתקשות המייצב את התקרה לאחר שקיעה מועטה בלבד.
- תופעה זו בולטת במיוחד עבור סידוק אנכי בהדמיות DDA. לא כך במצב של סידוק אלכסוני.
- בשטח ישנן עדויות לשני מצבי הסידוק שנבדקו.
- במסגרת עבודה זו לא נחקרה התנהגות התקרה בהשפעת עומס דינמי ולא נחקרו פתרונות תימוך.