שימוש ברדאר לשיקוף מבני בטון

כנס עמידות מבנים ושיקום בטון 2012 – מכון התקנים

12.9.2012 סיטי טאואר ר"ג

ד"ר אורי בסון

גיאוסנס בע"מ - גיאופיסיקה סביבתית והנדסית
ת"ד 912 אבן יהודה. טל: 054-4899123

www.geo-sense.com

כל הזכויות שמורות – גיאוסנס בע"מ 2012 ©

פתרונות של חברת גיאוסנס להנדסה ולסביבה

באמצעות שיטות אלקטרומגנטיות בדגש על רדאר

GPR - Ground Penetrating Radar

הנדסת מבנים

שיקוף ומיפוי מבנים בדגש על מחקר בטון, קירות, תקרות ועמודים, תקרות פל-קל, גשרים, מיפוי מערך זיון ברזל (rebar) בבטון, מערכות סידוק

גיאולוגיה הנדסית

מיפוי תשתיות לבניה ולכבישים
איתור חללים, שברים וסדקים בסלע ובמבנים
איתור צנרת ואלמנטים שונים של תשתית

הידרולוגיה

איתור מי-תהום ושכבות בעלות פוטנציאל אגירת מים, מדידת תכולת רטיבות, זיהוי גופי מים מליחים (בתוך מים מתוקים)

סטרטיגרפיה

הגדרה ומיפוי שכבות קרקע וסלע

סביבה

איתור מזהמים ומיפוי אזורים בהם קיים זיהום, דליפה ממאגרים, המלחת קרקעות

ארכיאולוגיה

איתור ומיפוי קירות ושרידי מבנים, קברים, חללים, מערות, מחילות ומפלסי חיים

מכ"ם (רדאר) חודר קרקע

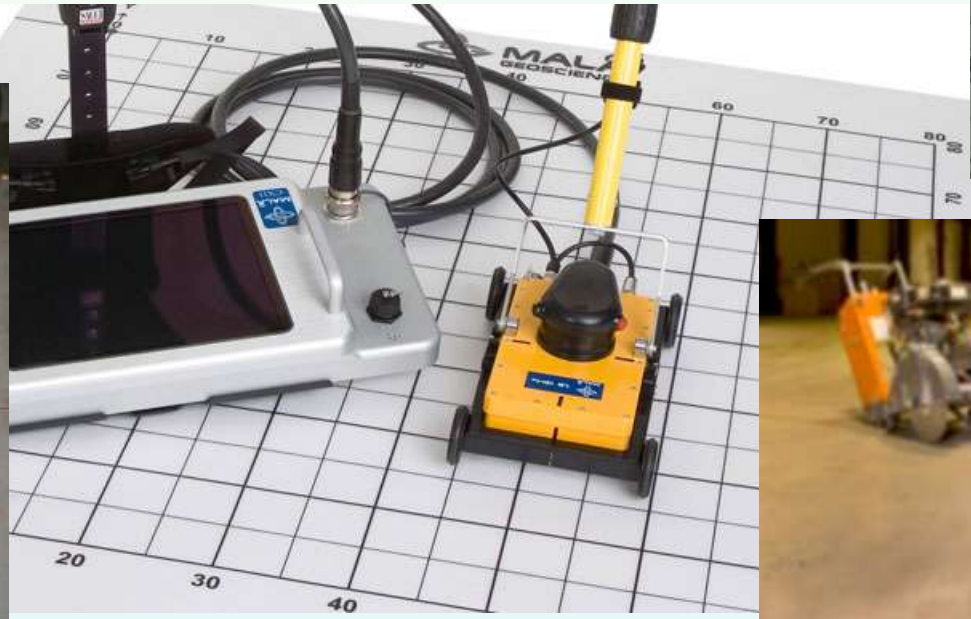
Ground-Penetrating Radar, GPR

שיטת NDT (אל-הרס) לשיקוף תת קרקע ומבנים
ברזולוציה גבוהה לעומק של עשרות מטרים

(בדומה למיפוי סיסמי)

לגבי בטון

הדמית המכ"ם מופקת מהחזרי גלים אלקטרומגנטיים (רדאר)
מאזורים פנימיים בהם קיימים שינויים בתכונות הבטון המשוקף, כגון:
שכבות ומעברים בין בטון בצפיפויות שונות, סגרגציה, חללים,
סדקים, שברים, מוטות זיון, גדילי דריכה...



שיקוף למדידת עובי כיסוי בטון – צינור דחיקה

שיקוף למדידת עובי כיסוי בטון – צינור דחיקה

שיקוף למדידת עובי כיסוי בטון – צינור דחיקה

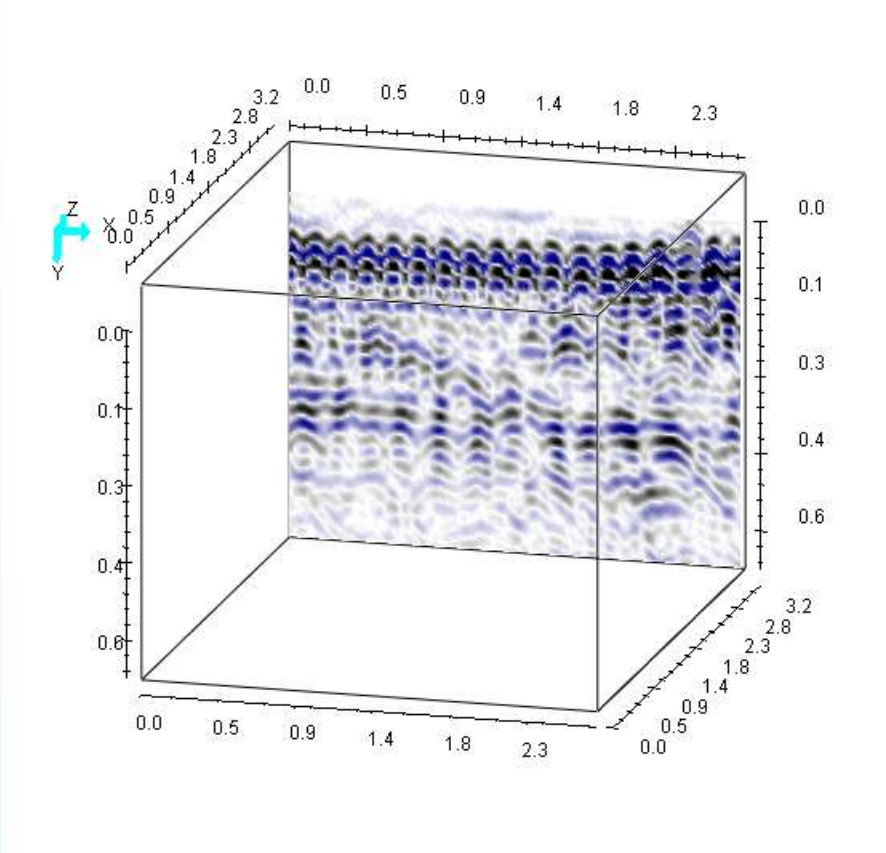
שיקוף למדידת חללים בציפוי בטון פנימי – צינור ביוב

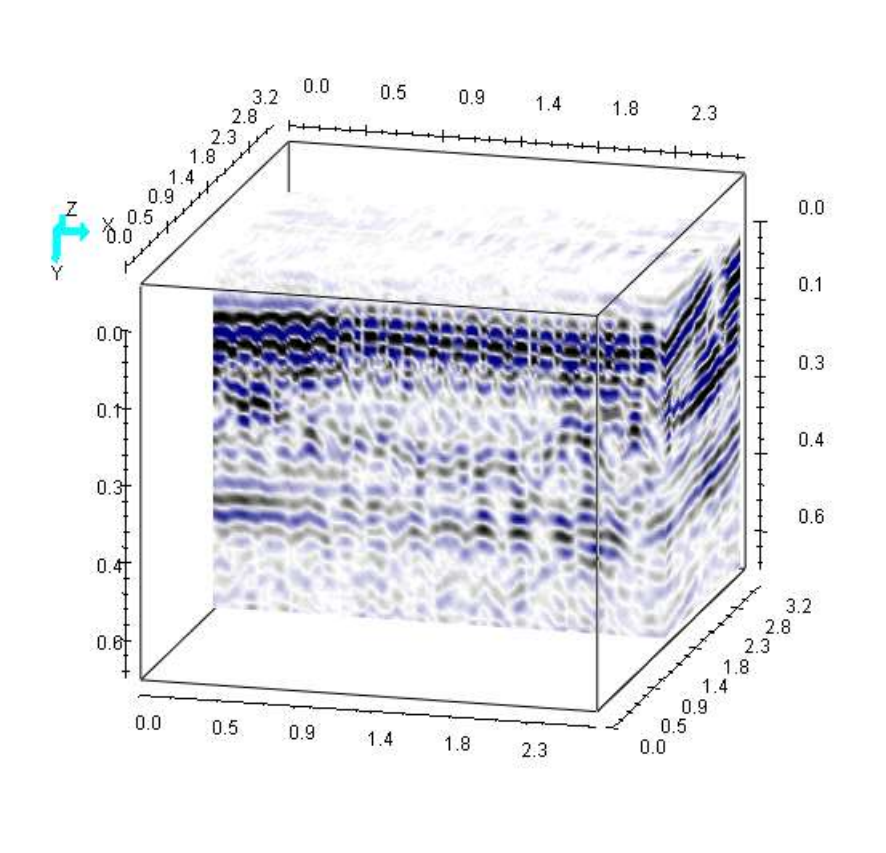
שיקוף למדידת בוטן – תקרות פל קל

שיקוף למדידת בטון – איתור מוטות זיון עיקרי ורשתות

שיקוף למדידת בטון – איתור מוטות זיון עיקרי ורשתות

שיקוף למדידת בטון – מדידות בתלת מימד

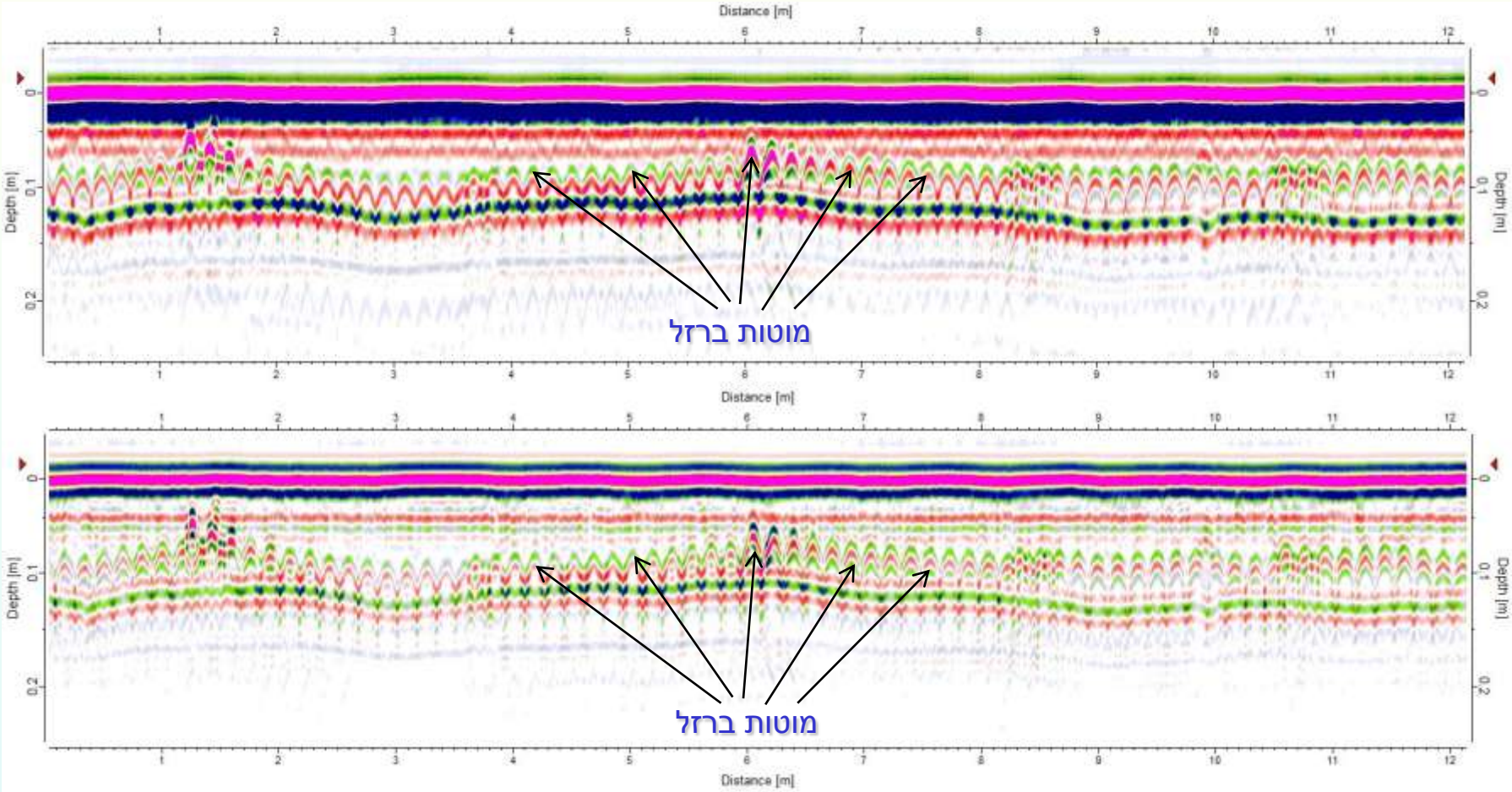




מאפיינים אלקטרומגנטיים של חומרים נפוצים

Material	Dielectric constant	Conductivity (mS/m)	Velocity (m/ns)	Attenuation (dB/m)
Air	1	0	0.3	0
Fresh water	80	0.5 - 30	0.033	0.1 - 20
Sea water	70-80	3,000	0.033	1,000
Dry sand	3 - 5	0.01	0.17 - 0.13	0.01
Saturated sand	20 - 30	0.1 - 1	0.06 - 0.05	0.03-0.3
Sandstone	2 - 3		0.21 - 0.17	
Sandy soil	4 - 6		0.15 - 0.12	
Limestone	4 - 8	0.5-2	0.15 - 0.11	0.4-1
Silt	5 - 30	1-100	0.05 - 0.13	1-100
Clay	4 -40	2-1,000	0.05 - 0.14	1-300
Average "soil"	16		0.075	
Gravels	4 - 8		0.15 - 0.10	
Granite	4 - 6	0.01-1	0.12 - 0.15	0.01-1
Concrete (dry-wet)	4 - 12	0.5-5	0.08 - 0.15	0.1 - 10
Average "rock"	5		0.13	
Asfalt	3 - 5		0.17 - 0.13	

שיקוף בטון ברזולוציה גבוהה - 2.3 GHz



GPR - מונחים וקשרים יסודיים מקורבים

α – דעיכה

σ – מוליכות חשמלית

k – קבוע דיאלקטרי

c – מהירות האור בריק

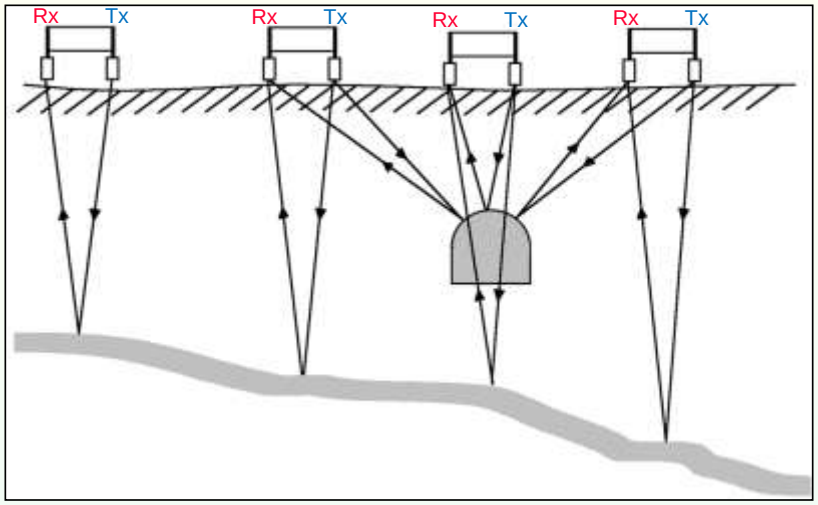
מהירות הסיגנל בתווך $v_s = \frac{c}{\sqrt{k}}$

מקדם ההחזרה $r = \frac{\sqrt{k1}-\sqrt{k2}}{\sqrt{k1}+\sqrt{k2}}$

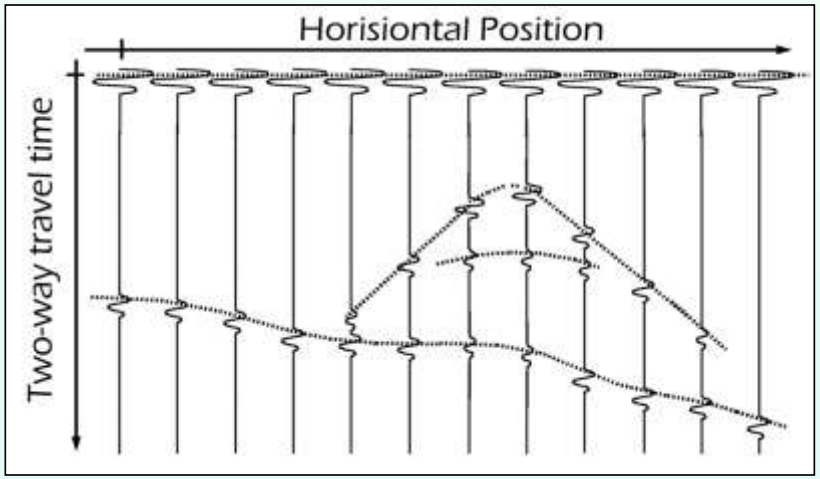
דעיכת הסיגנל בתווך $\alpha = 1.69\frac{\sigma}{\sqrt{k}}$

העומק להחזרה $d = \frac{1}{2}v_s t$ (t הזמן הלוך-חזור)

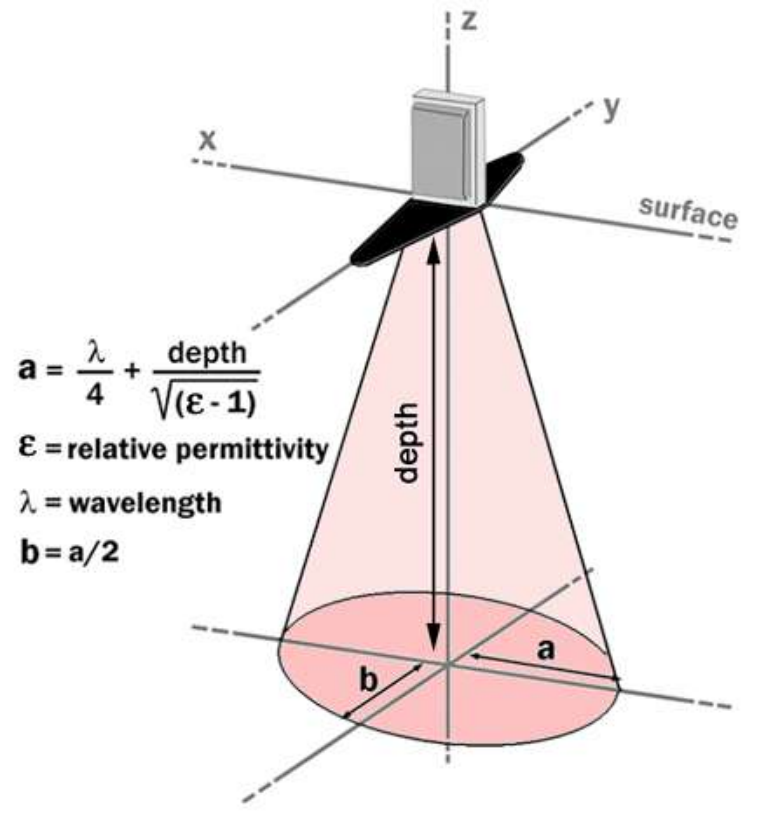
Receiver
Rx



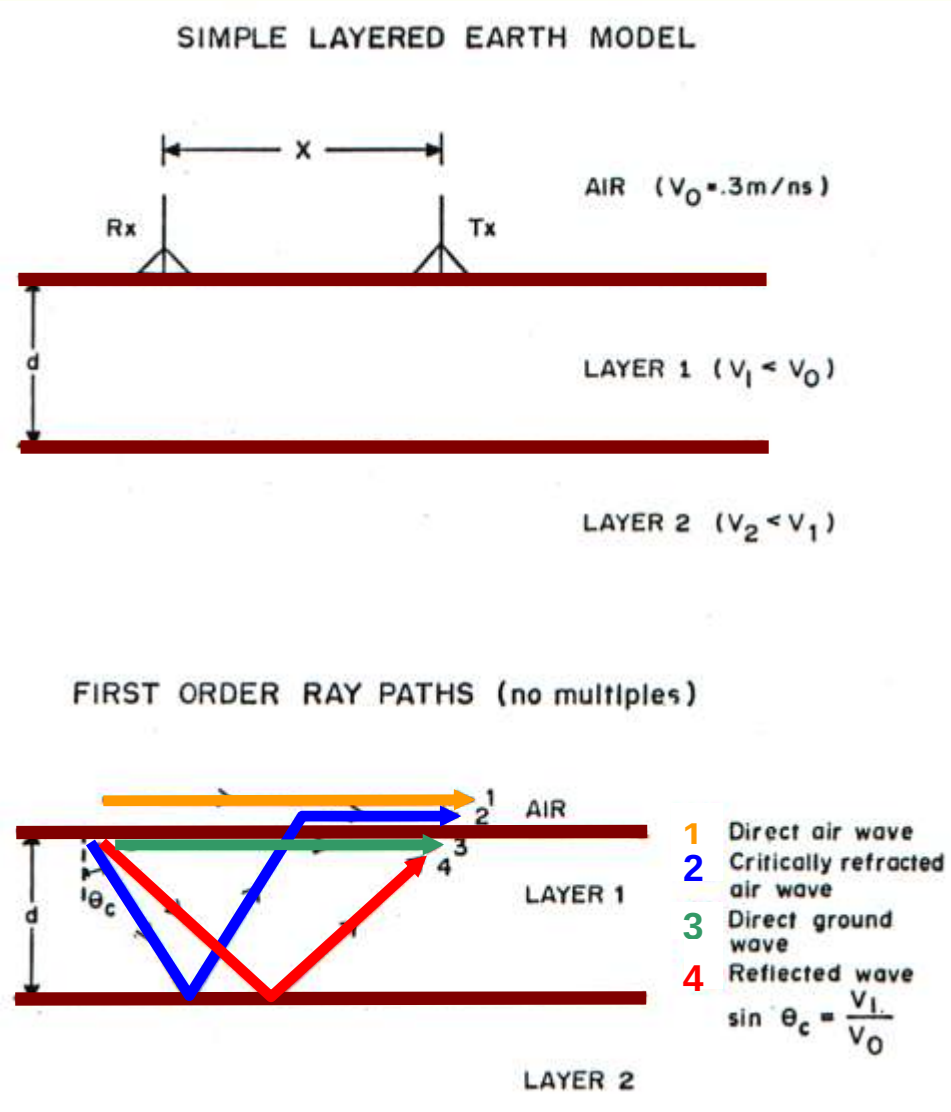
Transmitter
Tx



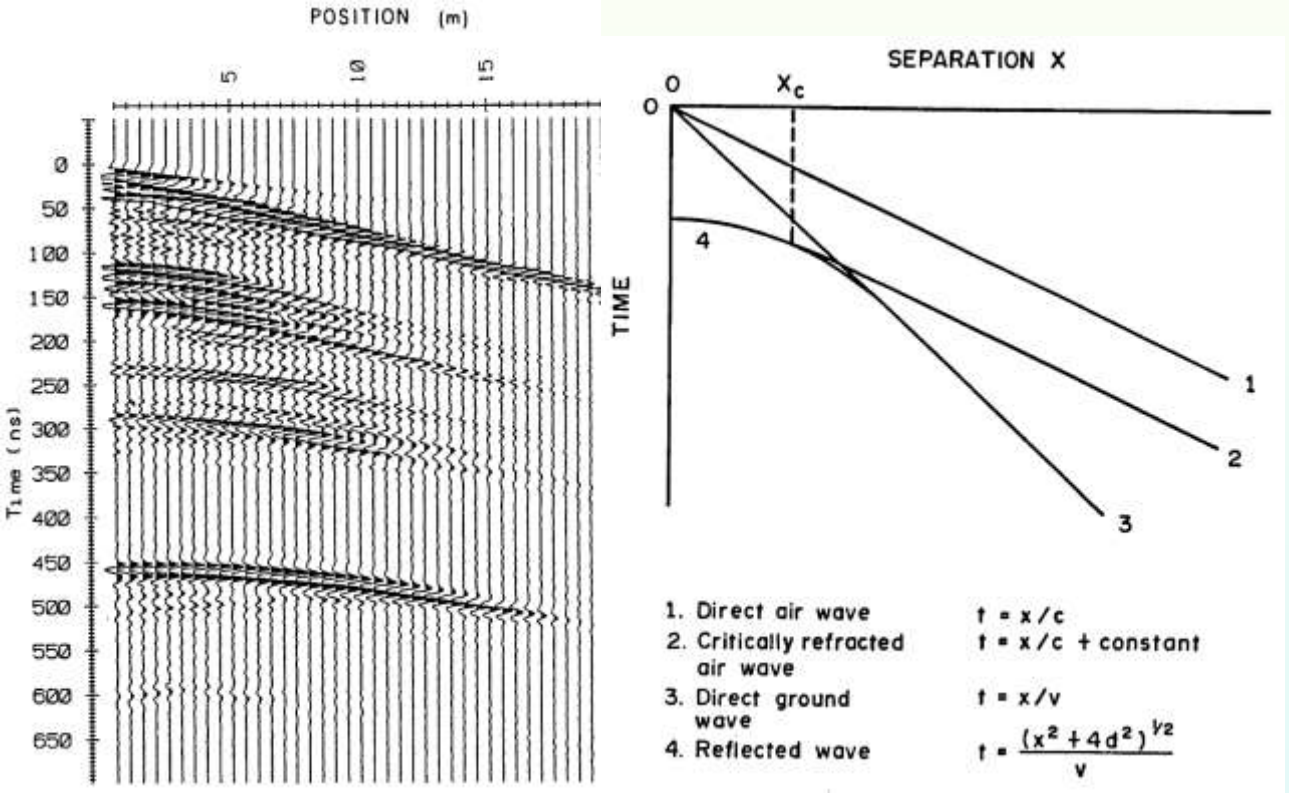
אלומת גלי המכ"ם



סוגי גלי המכ"ם

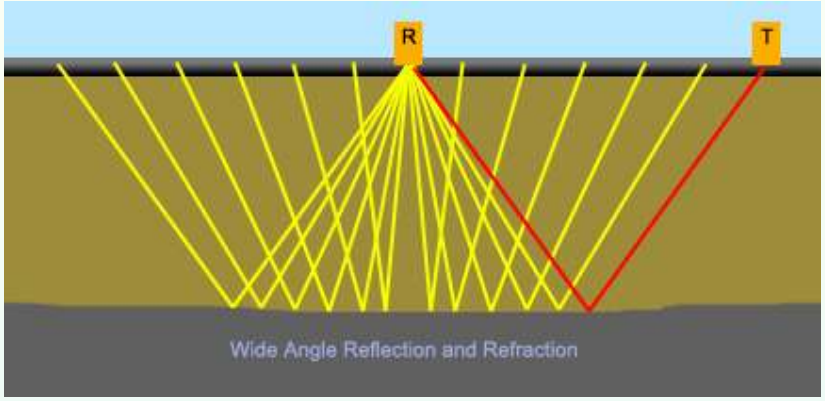


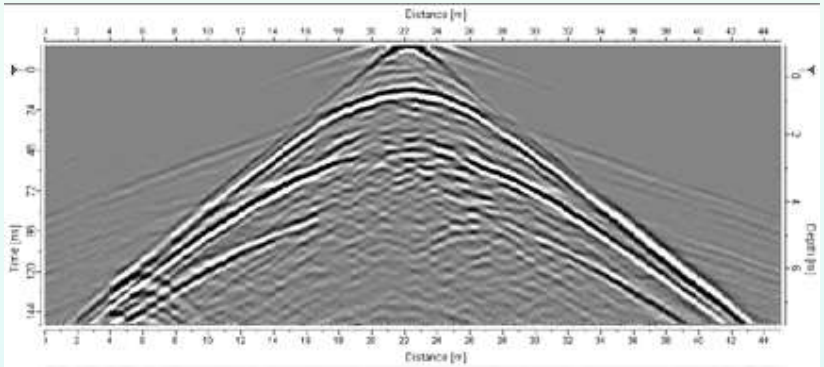
חישובי פרמטרים באמצעות CMP



GPR methods - Velocity Sounding (WARR)

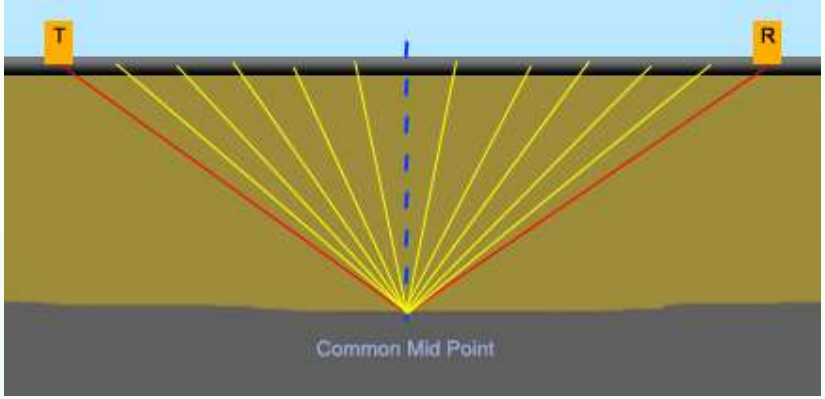
- Velocity sounding is a way to estimate the velocity of the signal in the subsurface
- Wide Angle Reflection Refraction (WARR) and Common Mid-Point (CMP) gathers are the two most common methods for velocity sounding. Both methods require separable transmitter and receiver.
- WARR requires a flat horizontal reflector but is quicker and easier to perform
- CMP gathers are more cumbersome to do but requires only a point reflector

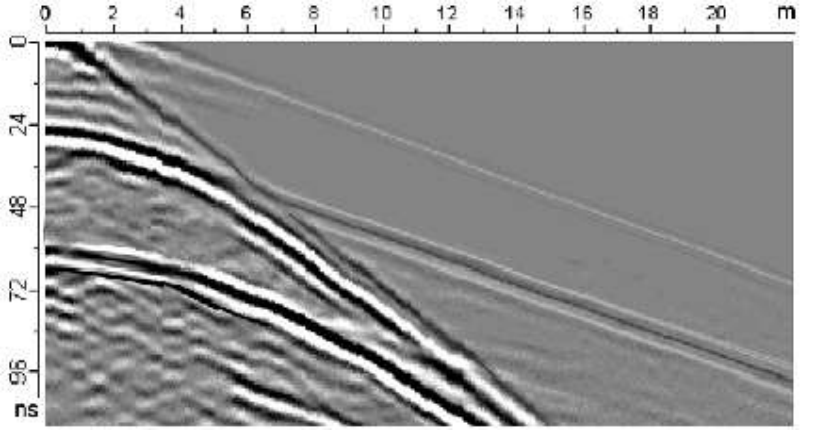




GPR methods - Velocity Sounding (CMP)

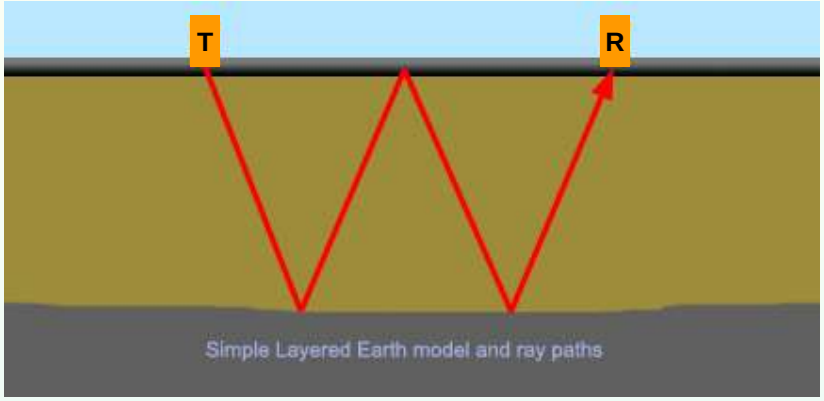
- Velocity sounding is a way to estimate the velocity of the signal in the subsurface
- Wide Angle Reflection Refraction (WARR) and Common Mid-Point (CMP) gathers are the two most common methods for velocity sounding. Both methods require separable transmitter and receiver.
- WARR requires a flat horizontal reflector but is quicker and easier to perform
- CMP gathers are more cumbersome to do but requires only a point reflector

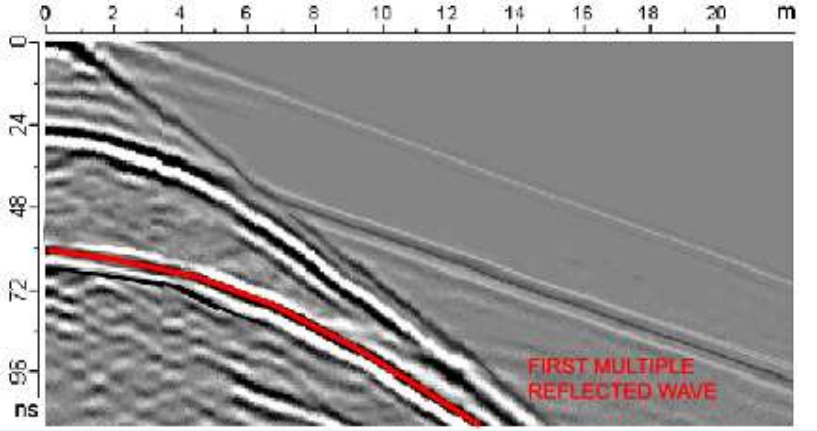




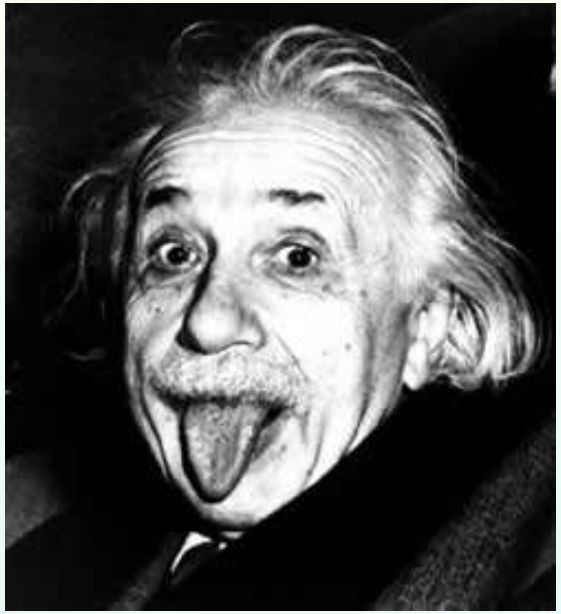
GPR methods - Velocity Sounding

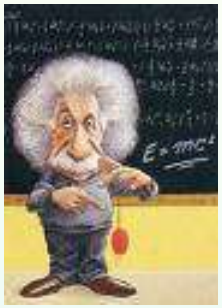
- Velocity sounding is a way to estimate the velocity of the signal in the subsurface
- Wide Angle Reflection Refraction (WARR) and Common Mid-Point (CMP) gathers are the two most common methods for velocity sounding. Both methods require separable transmitter and receiver.
- WARR requires a flat horizontal reflector but is quicker and easier to perform
- CMP gathers are more cumbersome to do but requires only a point reflector

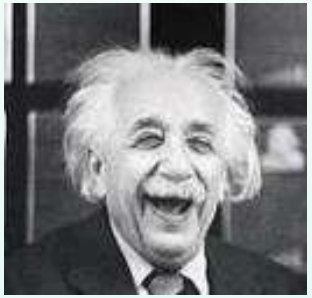




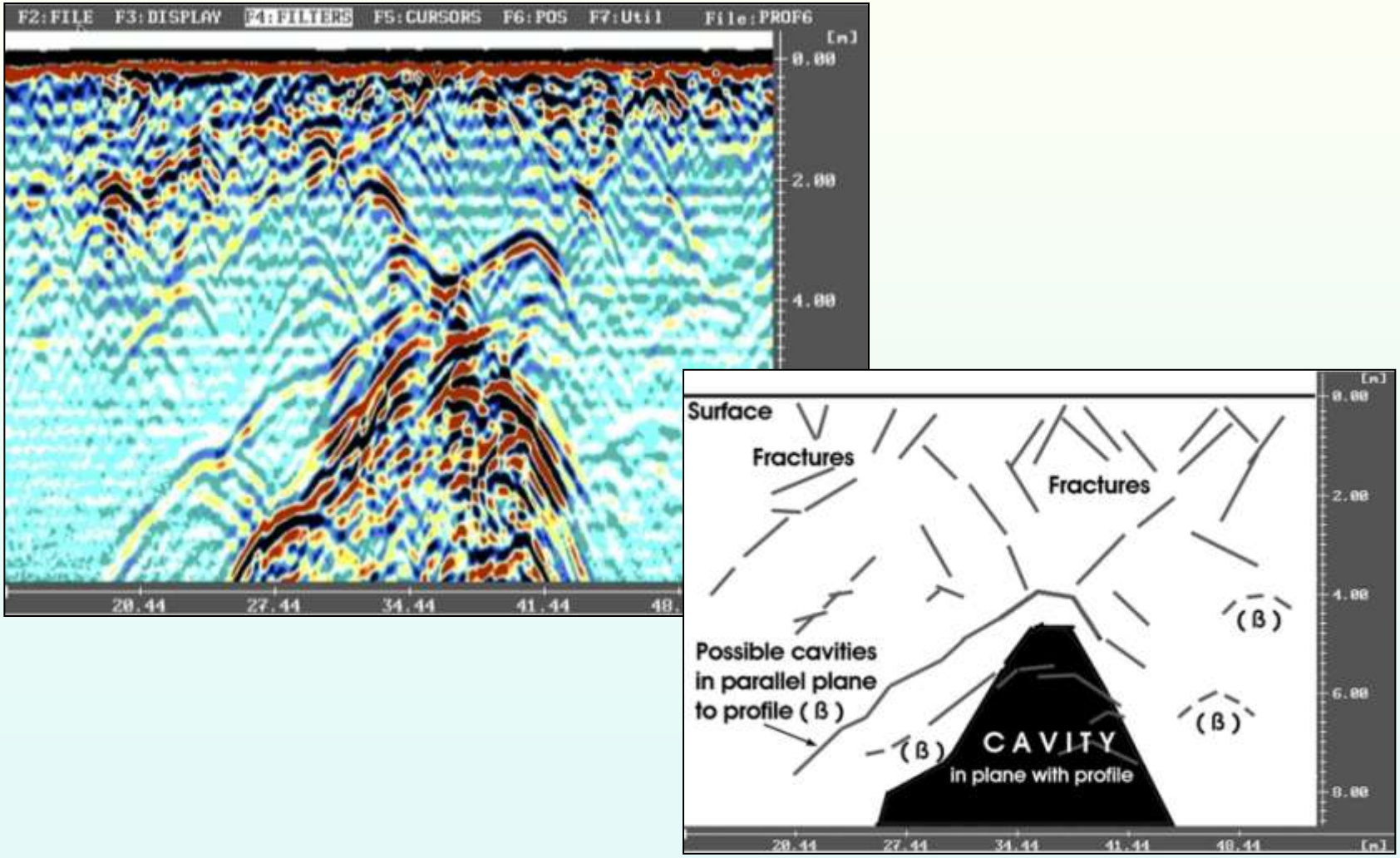
דוגמאות



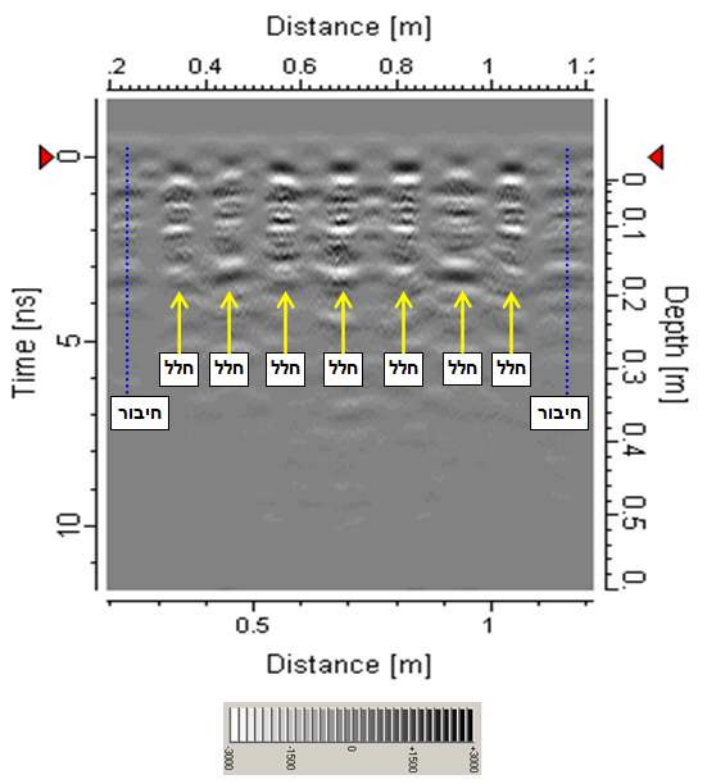


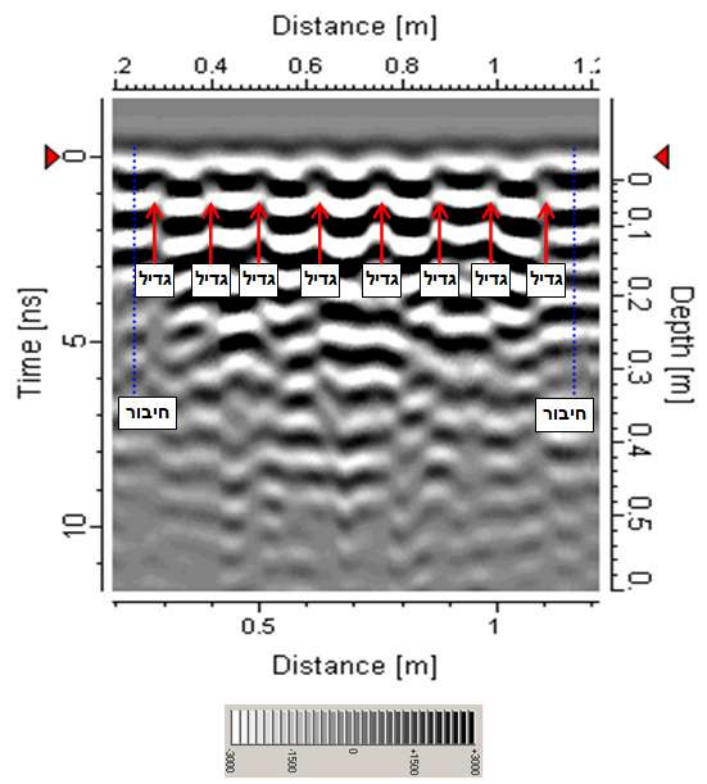


שיקוף GPR - חלל בסלע גיר (200 MHz antenna)



שיקוף תקרת לוח"דים - ספנקריט





שיקוף קירות תמך

Electromagnetic (EM) Velocity Calibration

GPR direct Measurements of a known wall

EM $Velocity_{wall}$ = $Thickness_{wall}$ / EM $Time_{wall}$

$Thickness_{wall}$ = 0.75 ± 0.03 m

$Time_{wall}$ (average) = 7 ± 0.5 ns

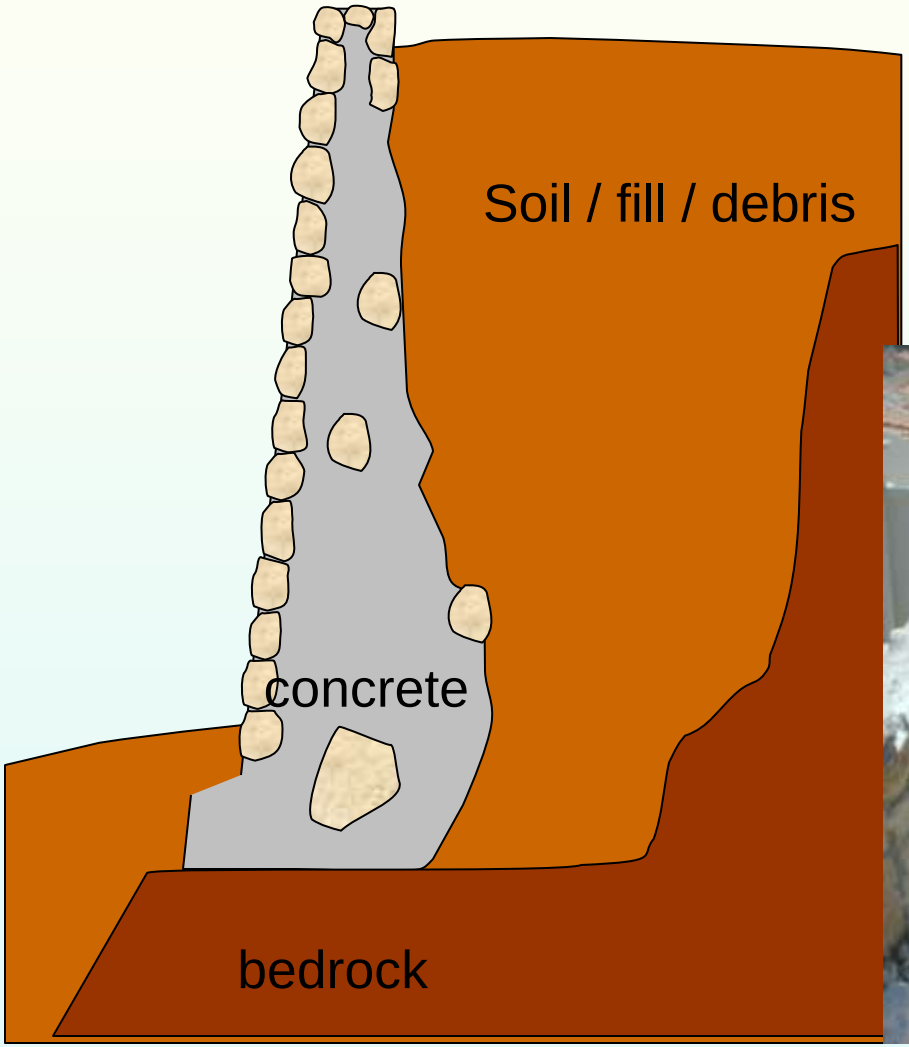
EM $Velocity_{wall}$ ~ 0.107 ± 5% m/ns

Calibration Wall

Thickness = 0.75 ± 0.03 m

המוטיבציה לשיקוף – קירות שכאלה

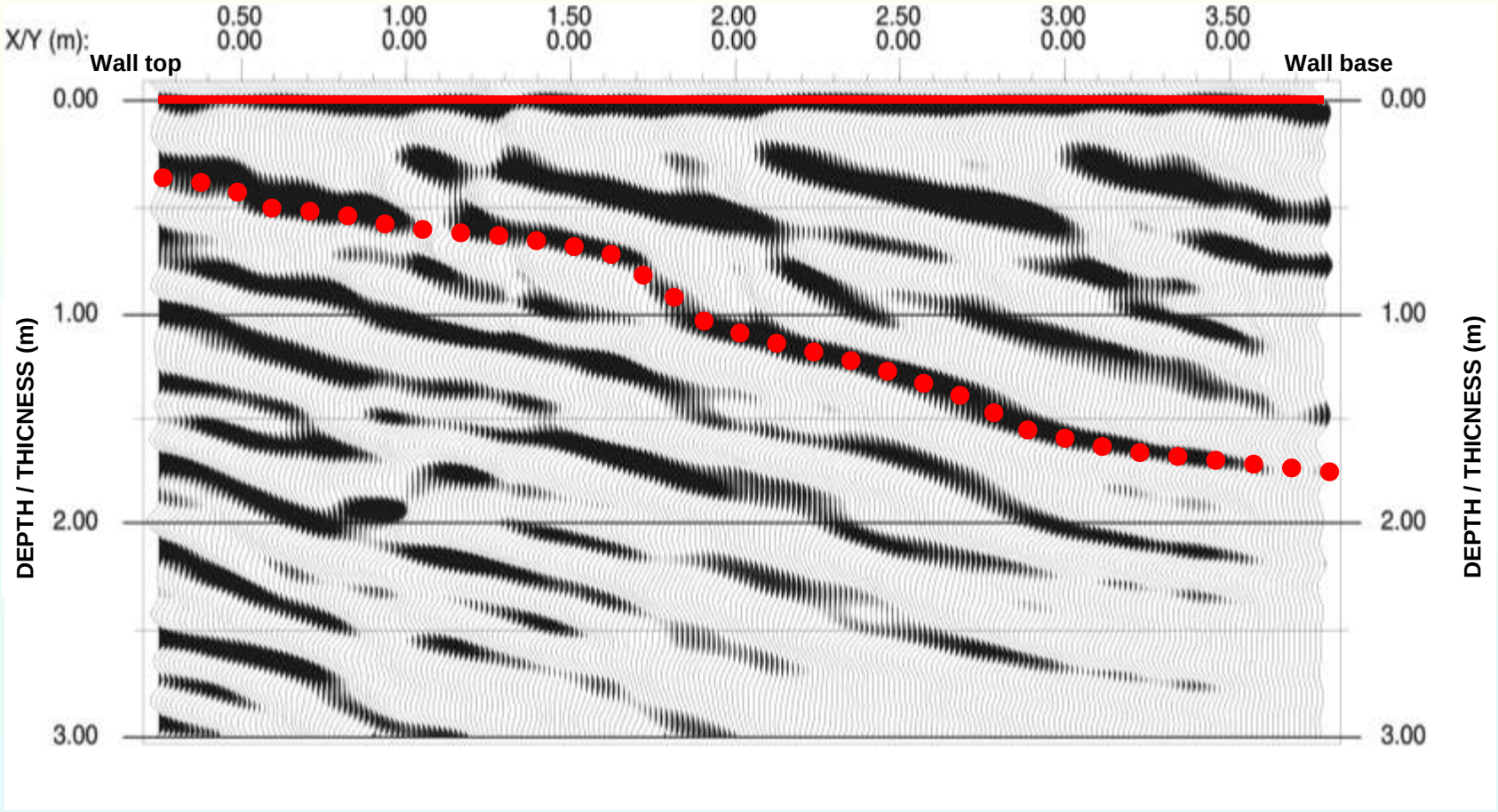
איתור קיר בטון לא תקין



שיקוף וורטיקאלי של קירות

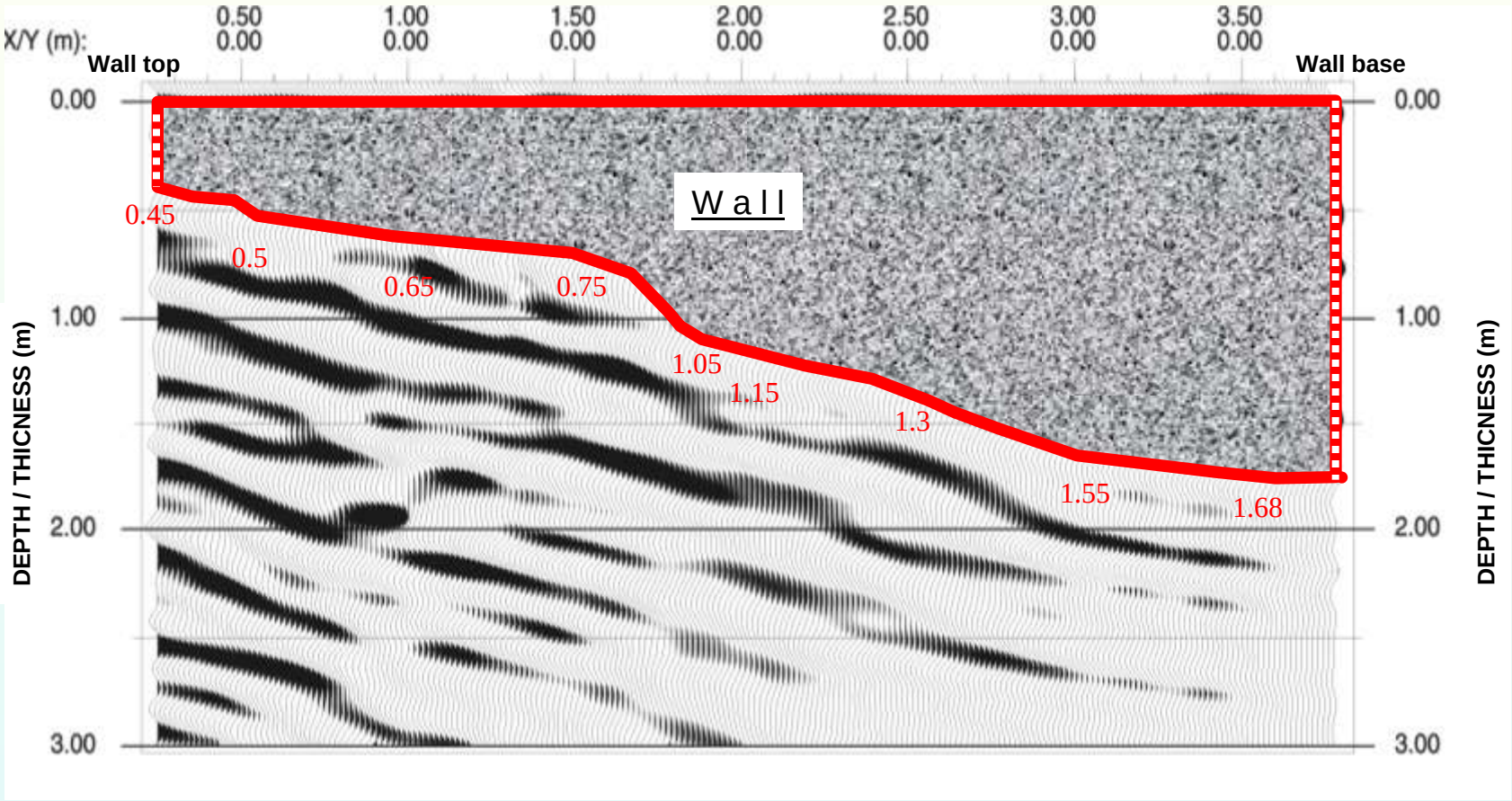
GPR Profile

POSITION (m) from the head of the WALL

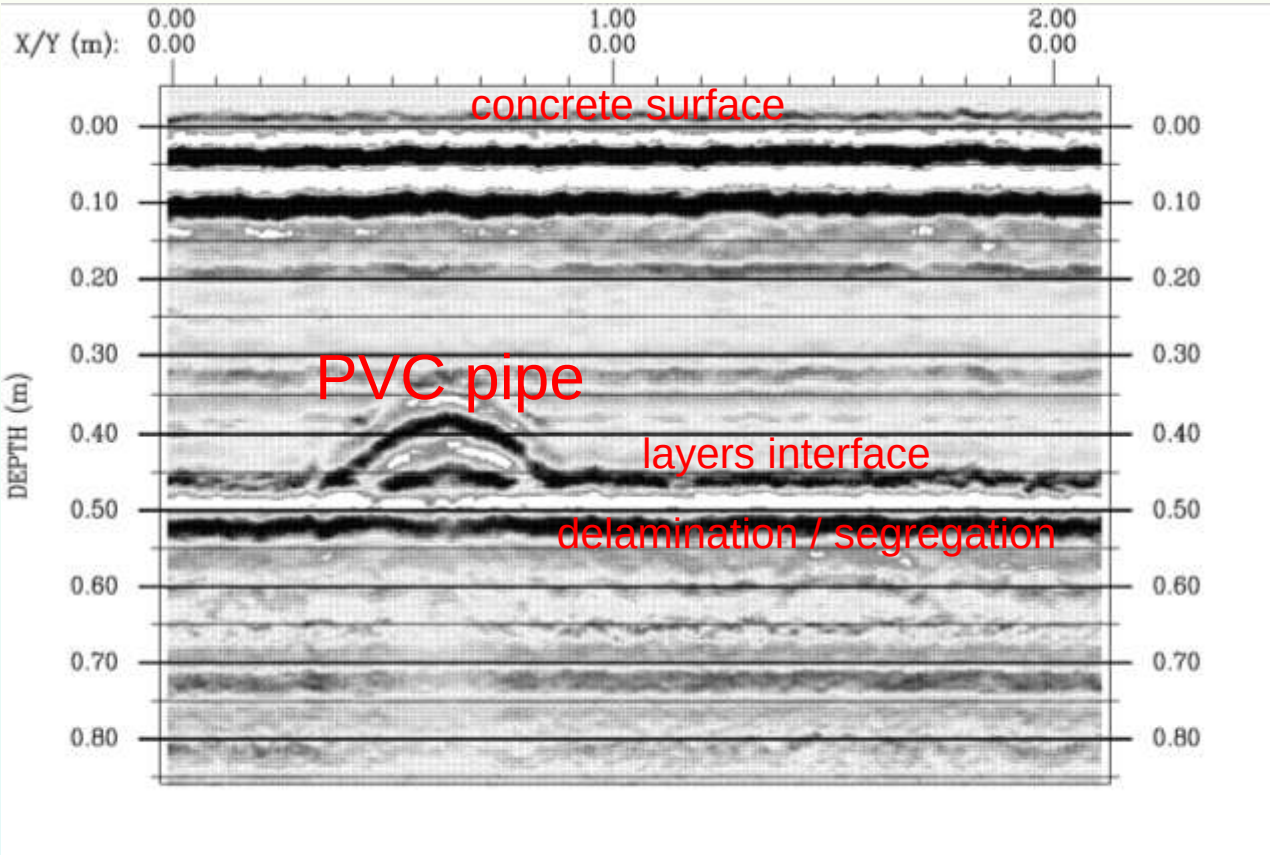


GPR Profile

POSITION (m) from the head of the WALL

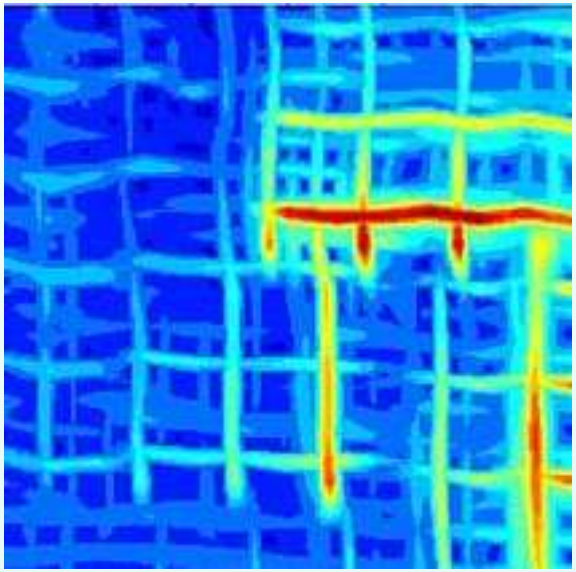


מחקר של גופי בטון



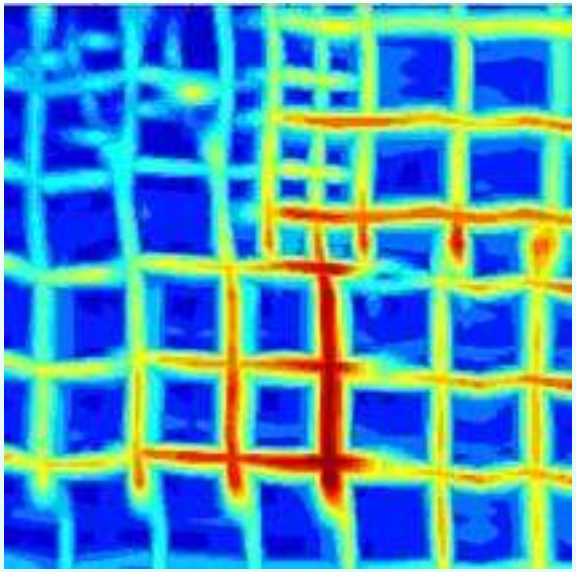
1.2 x 1.2 m concrete slab

Imaging depth range 6 x 9 cm



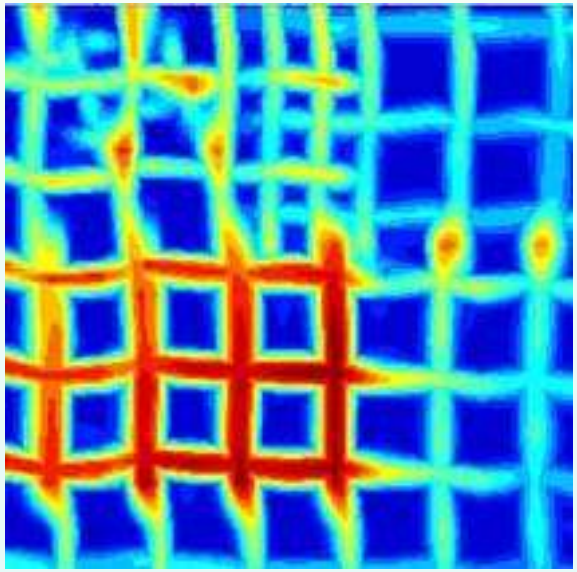
1.2 x 1.2 m concrete slab

Imaging depth range 9 x 12 cm



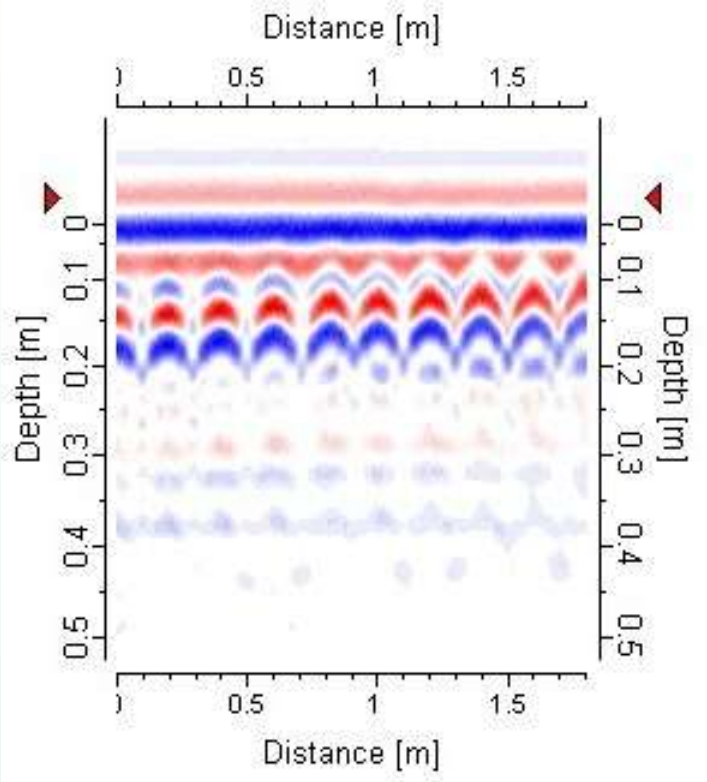
1.2 x 1.2 m concrete slab

Imaging depth range 12 x 15 cm



מיקום קידוחים ברצפת אולם יצור

מיקום קידוחים ברצפת אולם יצור

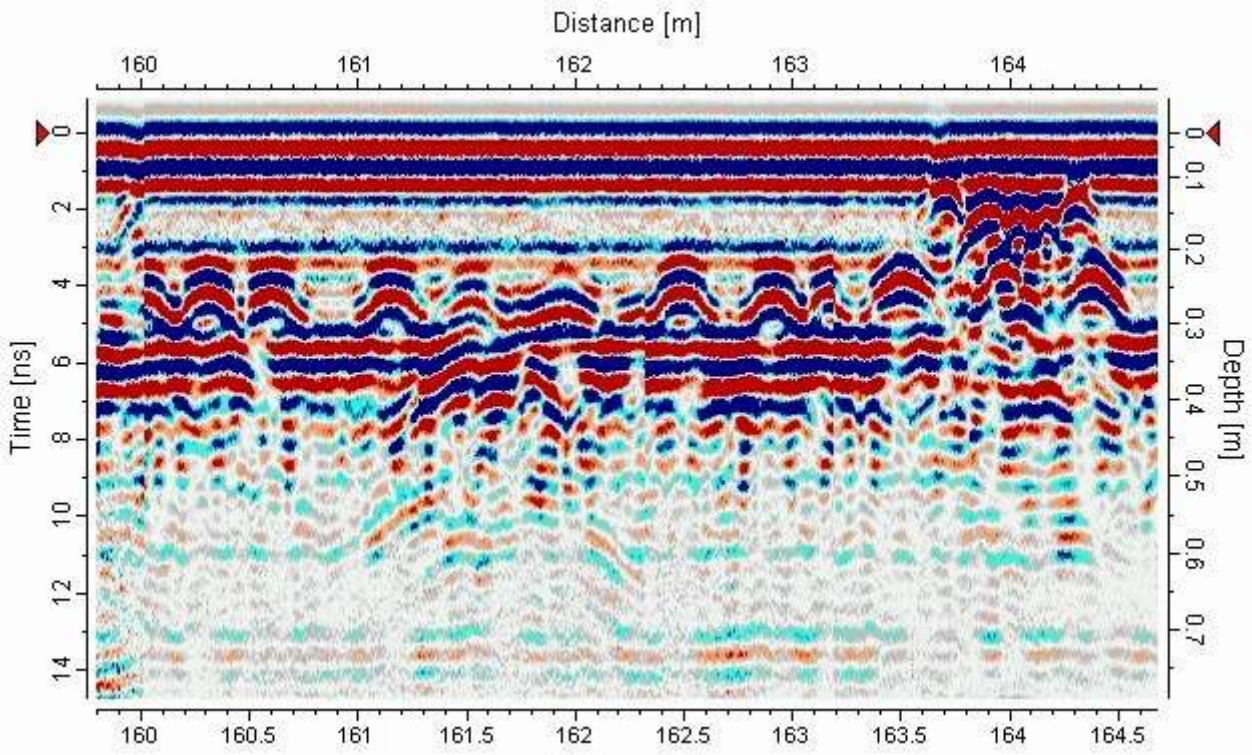


מיקום קידוחים ברצפת אולם יצור

שיקוף תקרות דרוכות

מגדל משה אביב – שער העיר רמת-גן

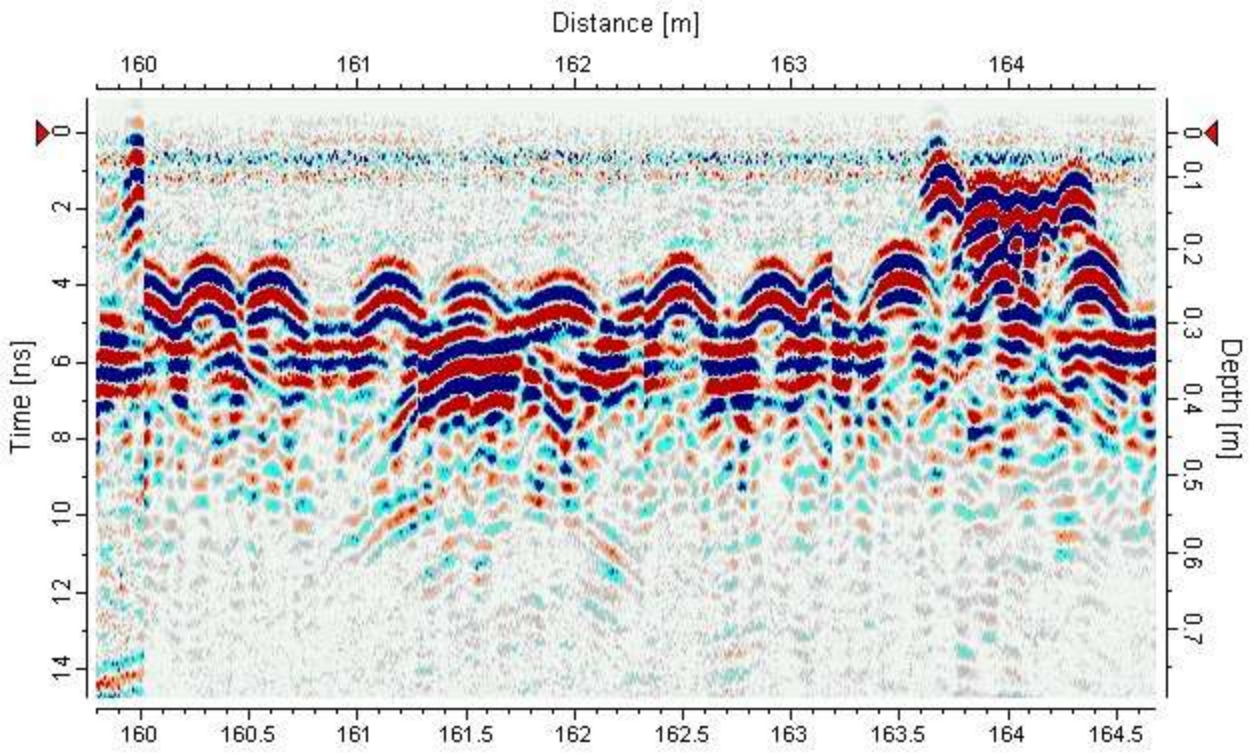
שיקוף GPR של גדילי מתיחה בתקרת בטון דרוכה



מגדל משה אביב – שער העיר רמת-גן

עובי התקרה: 30 ס"מ
עומק הכבלים: כ-20 עד 24ס"מ

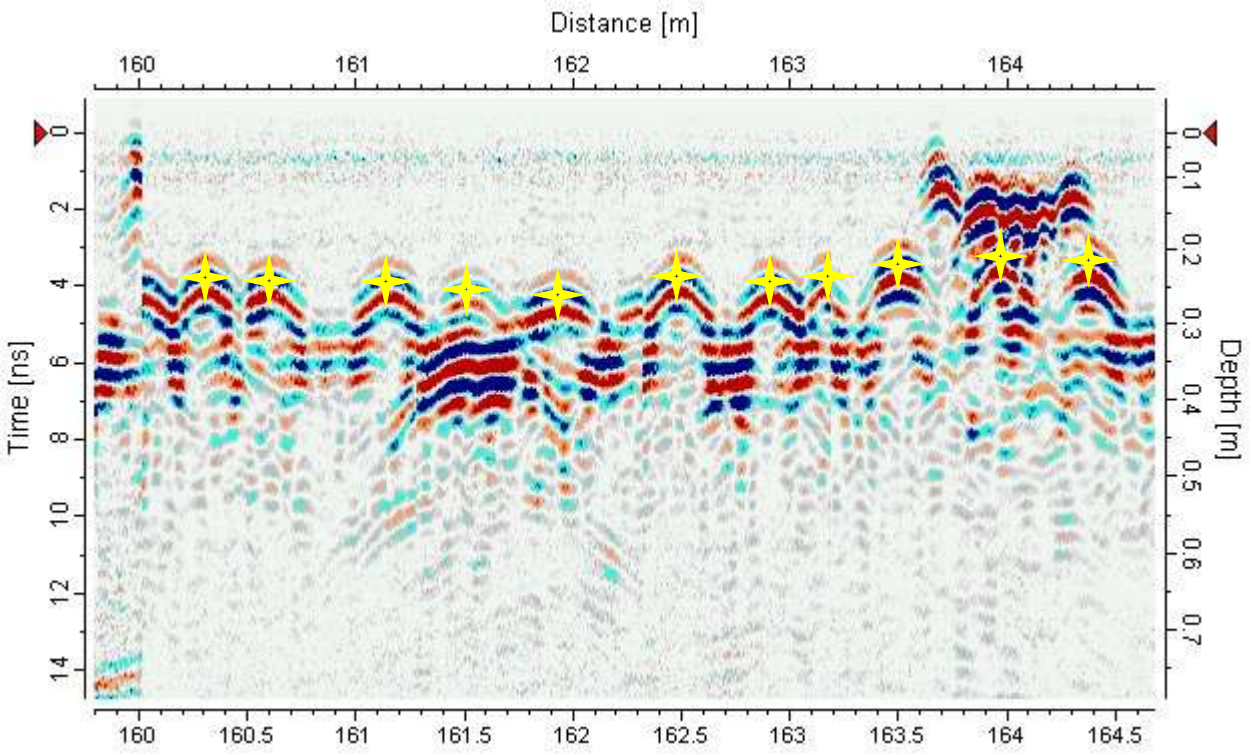
שיקוף GPR של גדילי מתיחה בתקרת בטון דרוכה



מגדל משה אביב – שער העיר רמת-גן

עובי התקרה: 30 ס"מ
עומק הכבלים: כ-20 עד 24ס"מ

שיקוף GPR של גדילי מתיחה בתקרת בטון דרוכה

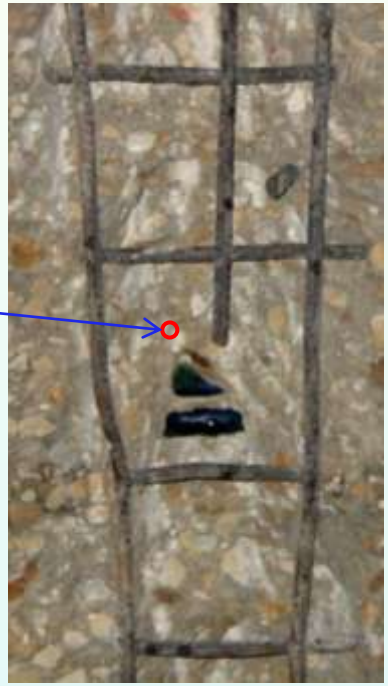


מגדל משה אביב – שער העיר רמת-גן

עובי התקרה: 30 ס"מ
עומק הכבלים: כ-20 עד 24ס"מ

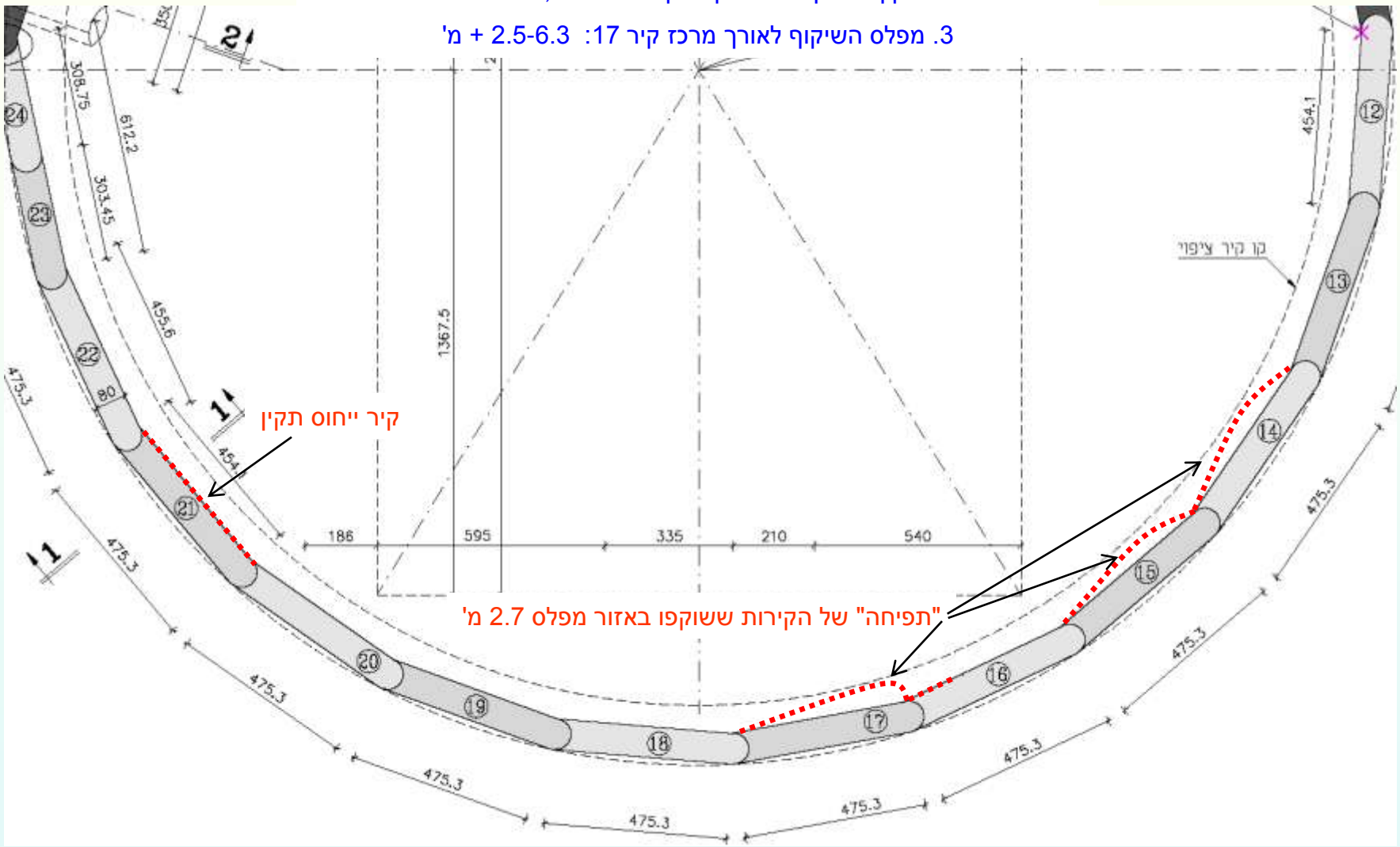
שיקוף GPR של גדילי מתיחה בתקרת בטון דרוכה – איתור וסימון

שיקוף GPR של גדילי מתיחה בתקרת בטון דרוכה



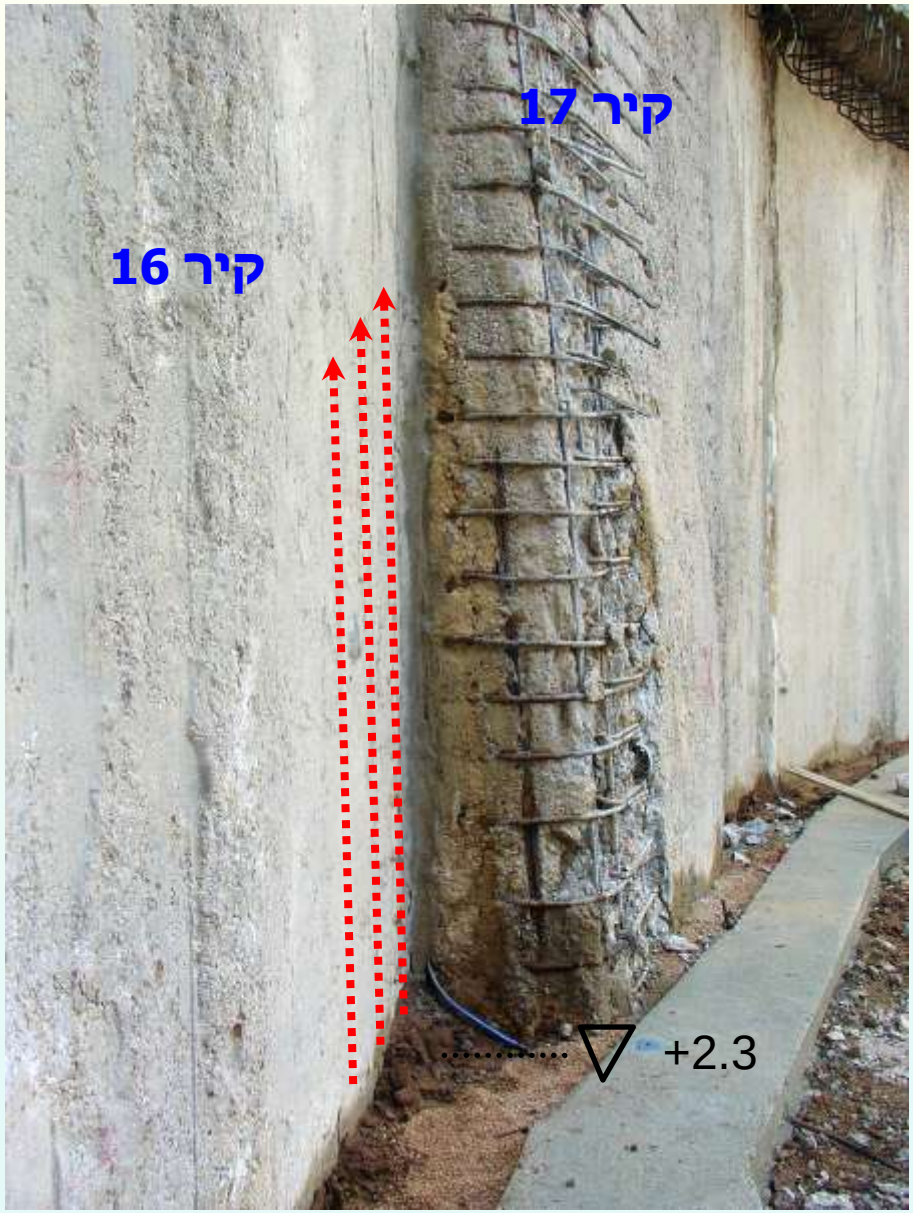
שיקוף קיר סלארי

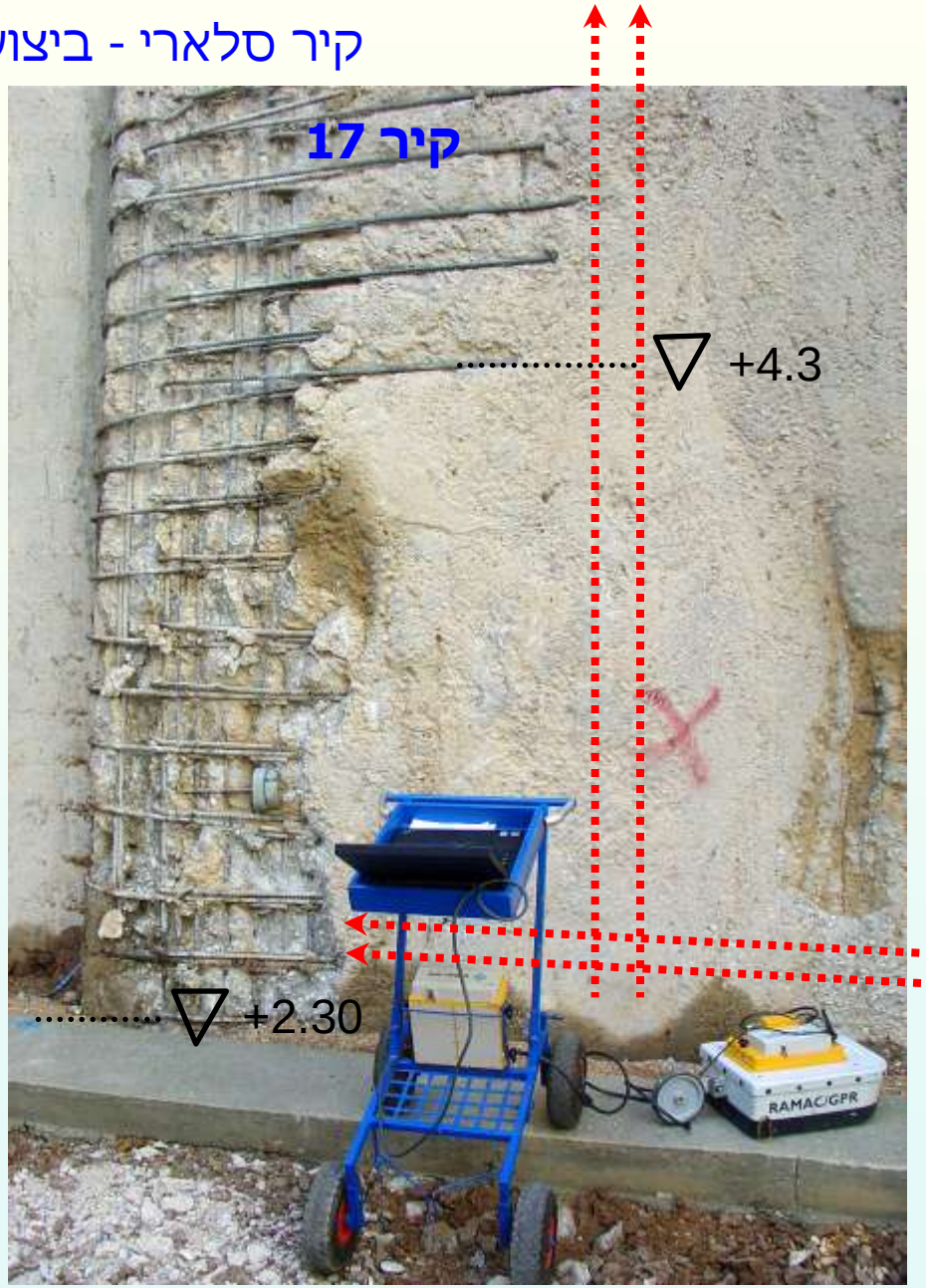
1. מפלס השיקוף לרוחב קירות 14-17, 21: 2.7-2.9 + מ'
2. מפלס השיקוף לאורך מרכז / קצה קירות 14-16, 21: 2.6-4.5 + מ'
3. מפלס השיקוף לאורך מרכז קיר 17: 2.5-6.3 + מ'



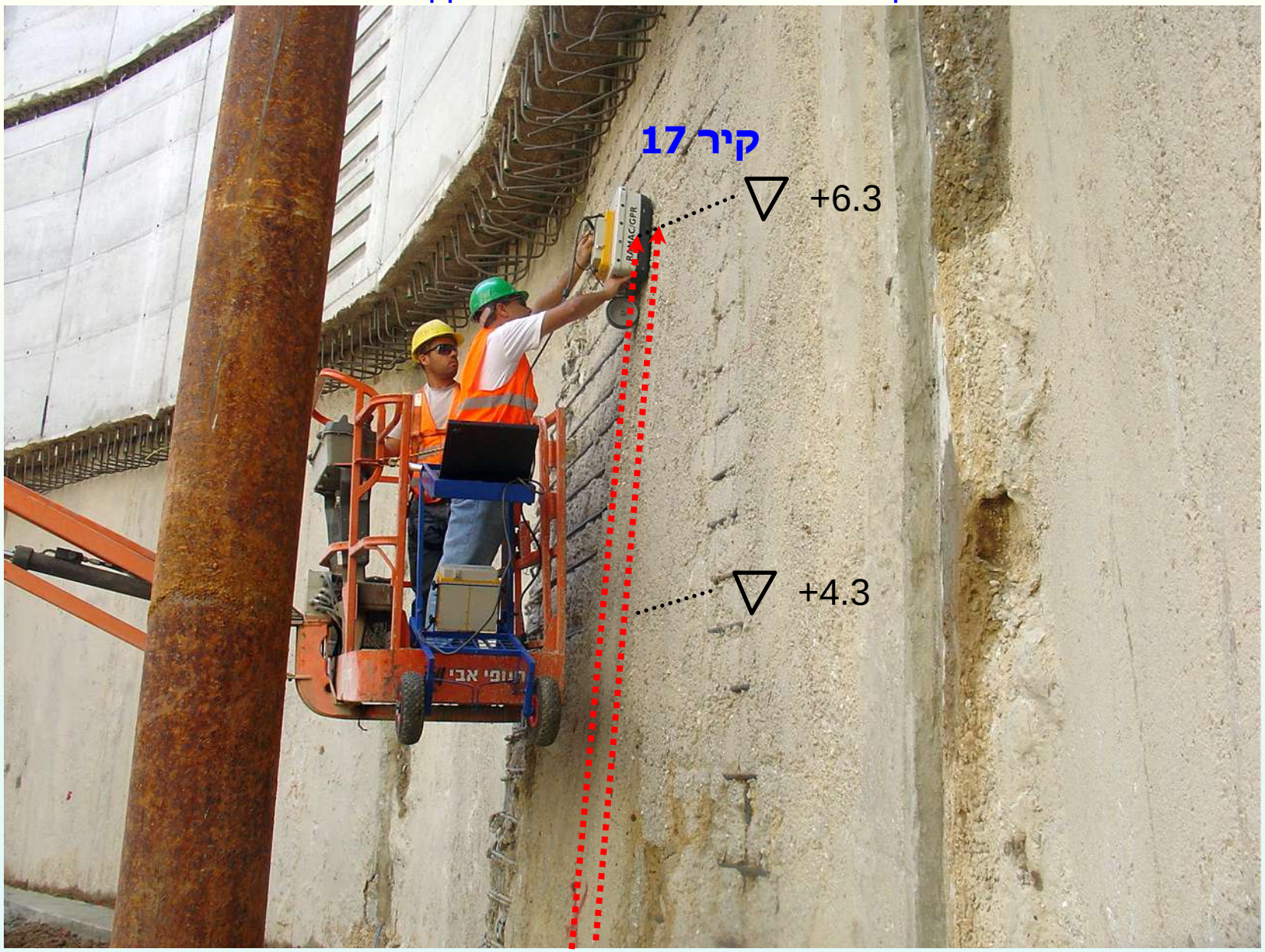
שיקוף קיר סלארי

קיר סלארי - ביצוע חתכי שיקוף GPR





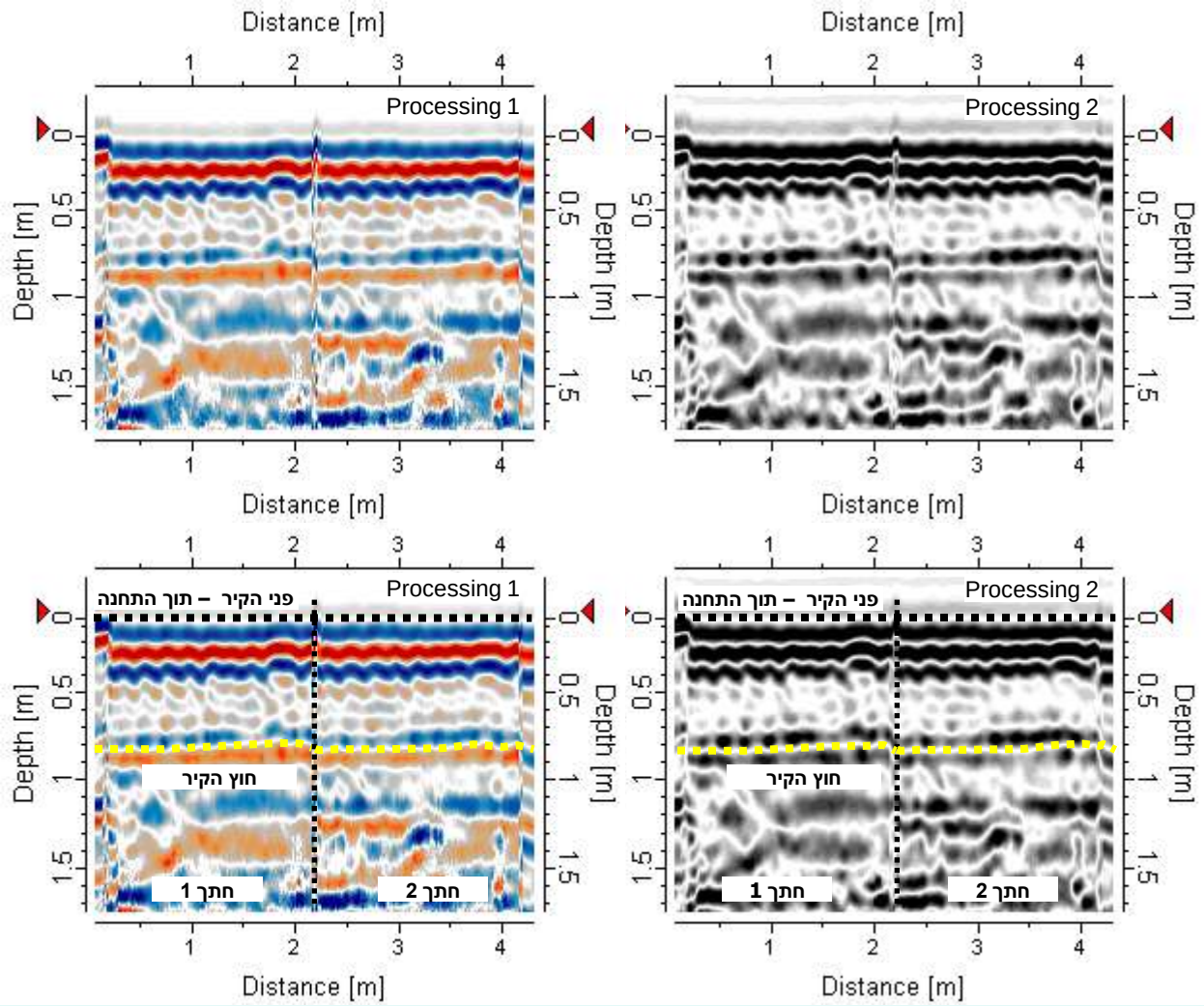
קיר סלארי - ביצוע חתכי שיקוף GPR



קיר סלארי - שיקוף קיר ייחוס 21 לרוחב

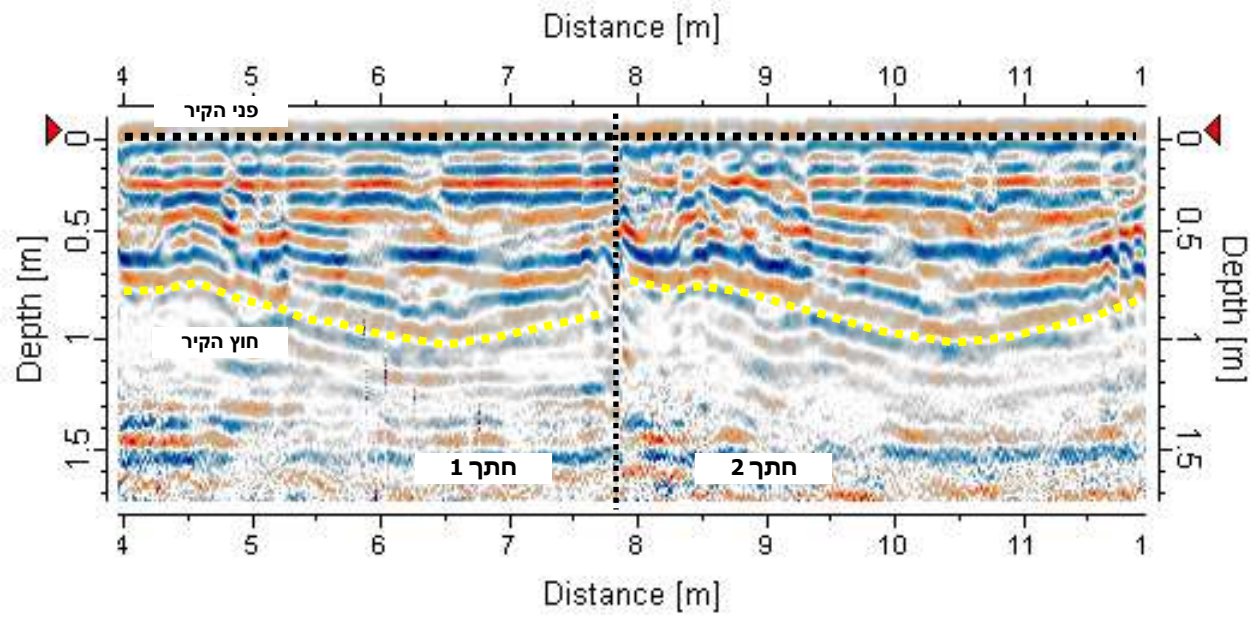
שני חתכים באורך של כ-2.2 מ' ביחס לציר מרכז הקיר

במפלס +2.7 מ' ובמפלס +2.9 מ'



שיקוף קיר סלארי 15

שני חתכים לרוחב, באורך של כ-4.2 מ' ביחס לציר מרכז הקיר
במפלס 2.7+ מ' ובמפלס 2.9+ מ'



שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

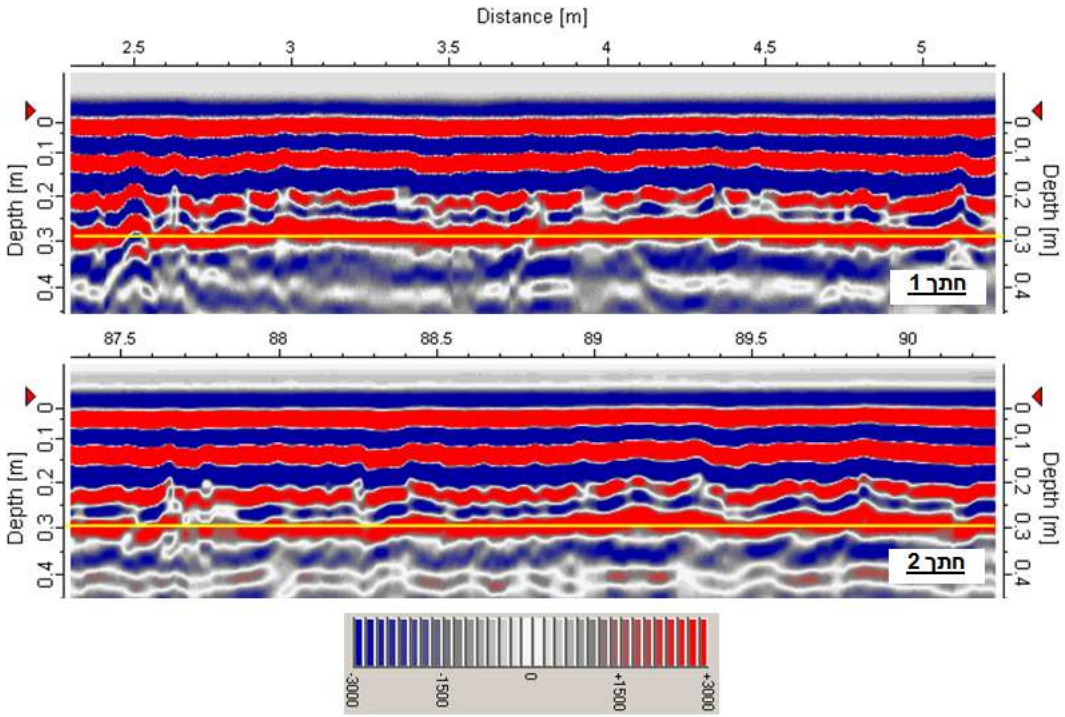
איתור גבולות הקריסה

שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

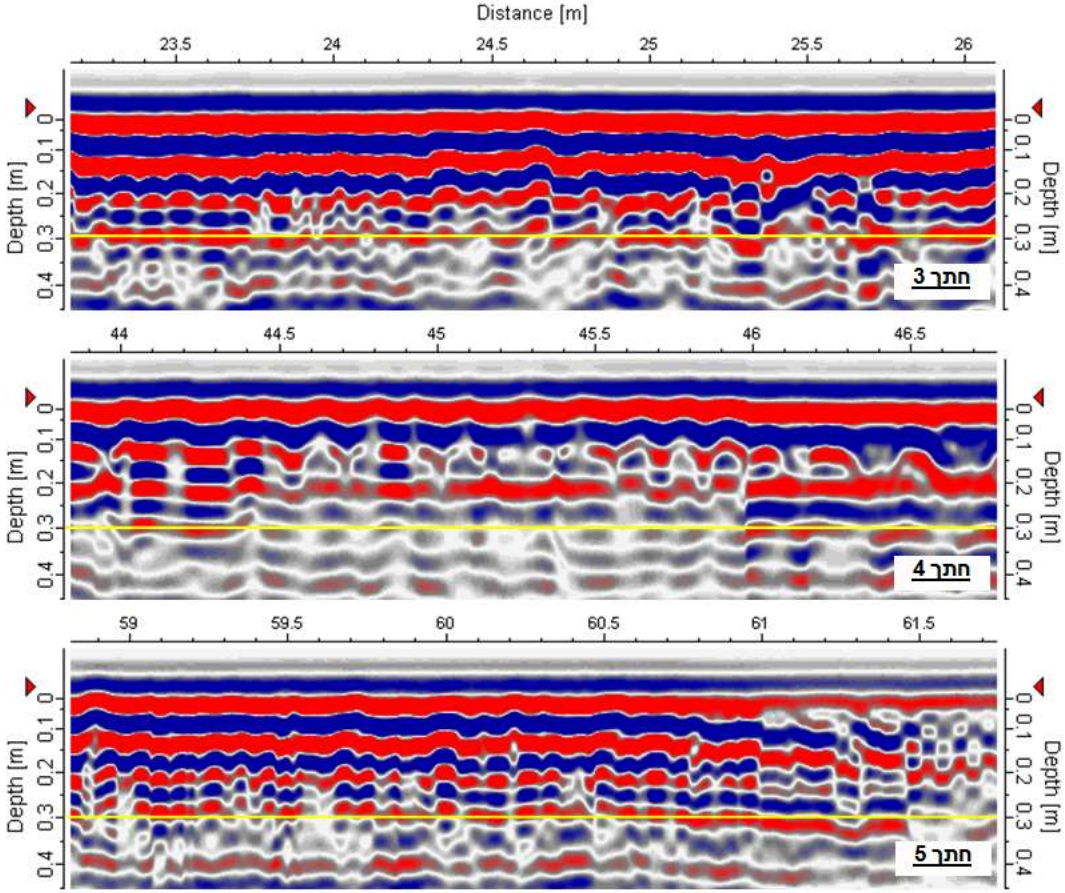
איתור גבולות הקריסה



חתכי מכ"ם 1-2: בחתכי המכ"ם הנ"ל נראים קטעי תקרה באורך של כ- 3 מ'. הרפלקטור בעומק 0.3 מ' הינו המעבר בין הבטון לקרקע מעליו (מסומן בקו צהוב). רפלקטור זה נראה שלם יחסית וללא הפרעות משמעותיות. לא נראים שברים או סדקים בבטון. ב**חתך 1** נראה האזור בקרבת מוצא המובל. ב**חתך 2** נראה המקטע באזור המרוחק מהקריסה. הסקאלות האופקיות מציינות את מיקום המדידות [m] לאורך החתך, הסקאלות האנכיות מציינות העומק [m] של החזרים מתחת לפני השטח (בתוך התקרה). סקאלת הצבעים מציינת את האמפליטודה והפאזה של הגלים המוחזרים.

שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

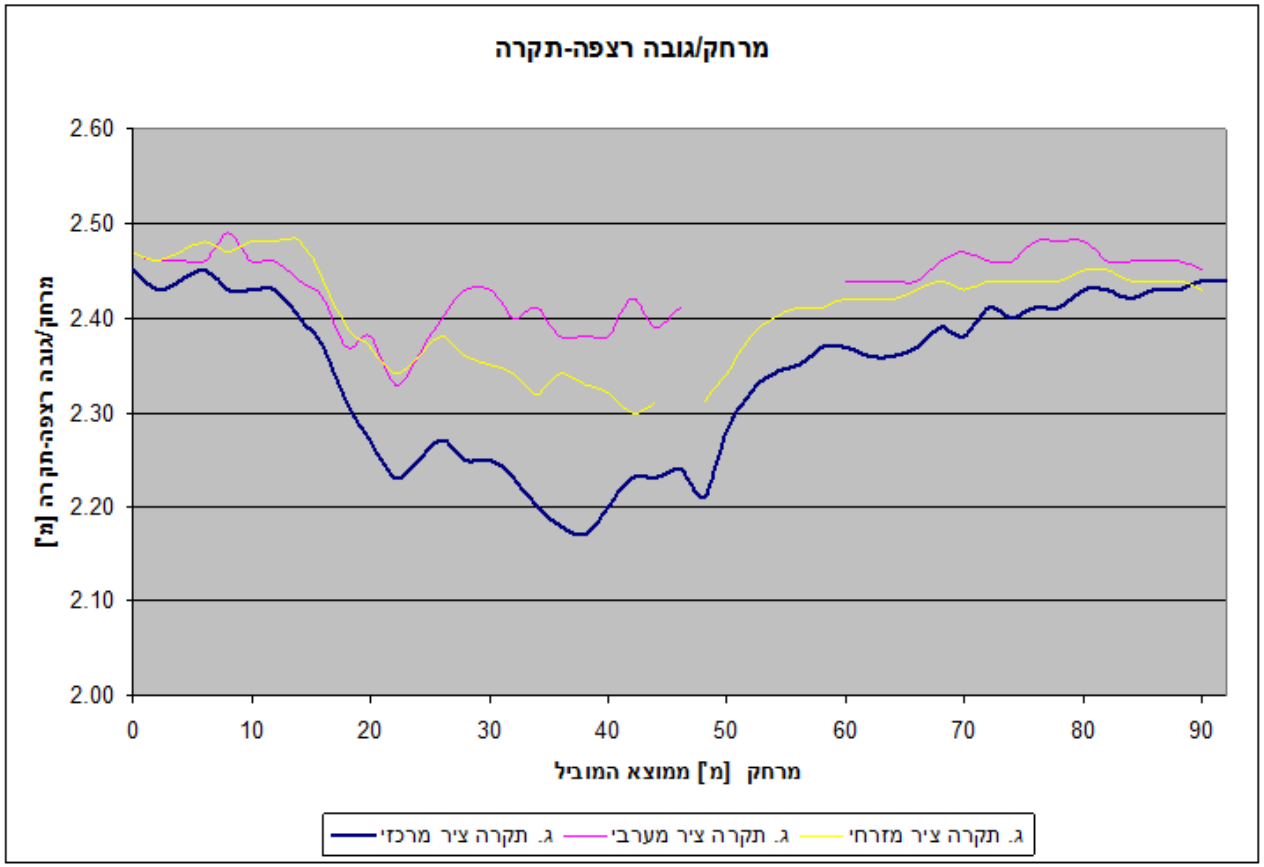
איתור גבולות הקריסה



חתכי מכ"ם 3-5: בחתכי המכ"ם הנ"ל נראים קטעי תקרה באורך של כ- 3 מ' במקומות שונים לאורך המובל. הרפלקטור בעומק 0.3 מ' הינו המעבר בין הבטון לקרקע שעליו נראה מקוטע ומופר באופן משמעותי. הדבר נובע מפיזור אנרגית הגלים כתוצאה מסידוק רב בבטון.

שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי

איתור גבולות הקריסה



גרף 1: מרחק / גובה בין גג המובל לרצפה. המדידות נערכו במרווחים של 2 מ' החל ממוצא המובל. מדידה אחת נערכה לאורך ציר המובל, ושתי מדידות בצידיו כ-50 ס"מ מהקירות. בגרף מוצגות המדידות כולן.

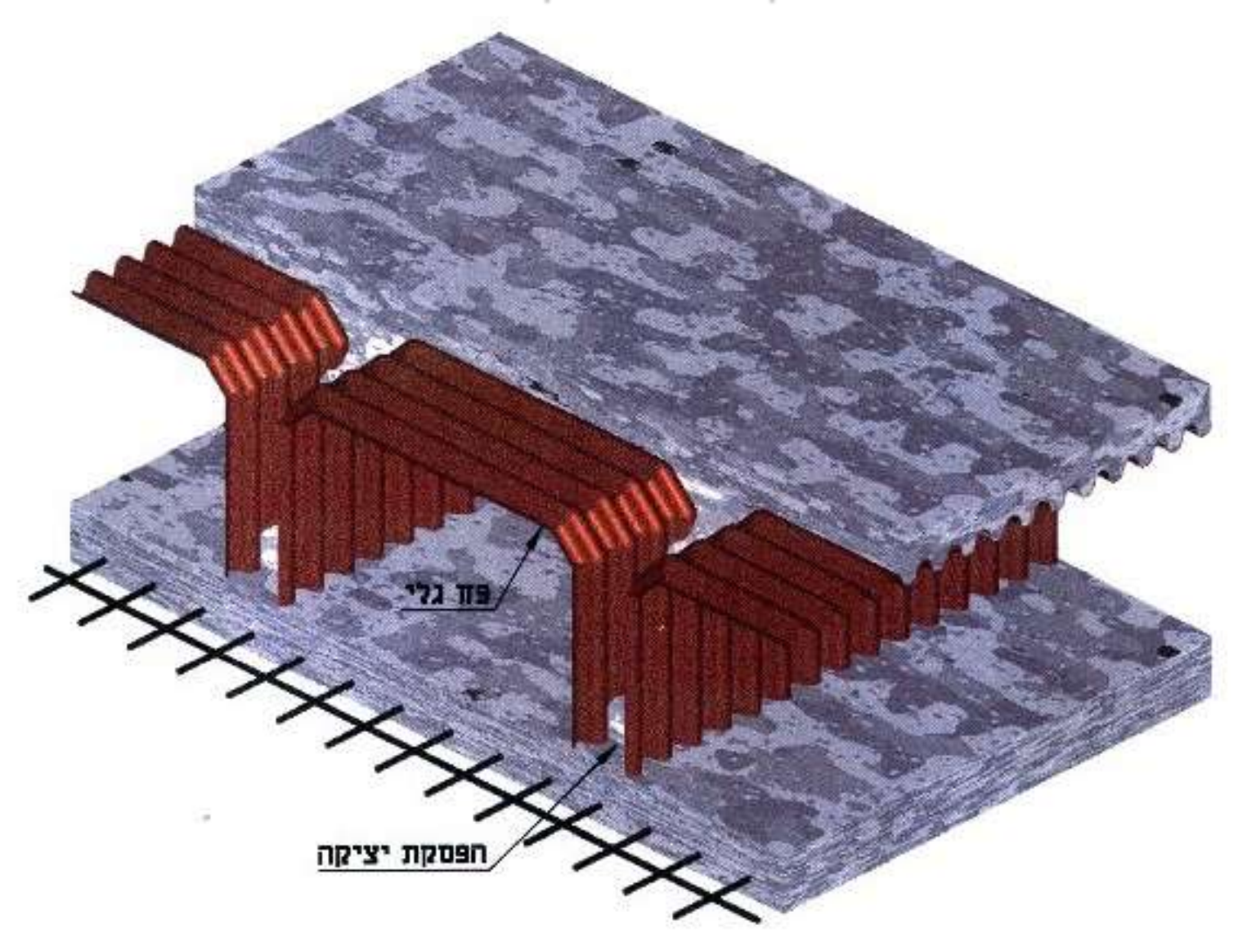
שיקוף GPR מובל מים תת-קרקעי
גבולות התיקון

מפה 2: האזור המומלץ לתיקון / החלפה (באדום). תחילת האזור: כ-11 מ' מפתח המובל. סוף האזור כ-79 מ' מפתח המובל.

שיקוף תקרות פל-קל
באמצעות GPR

ד"ר אורי בסון

מבנה טיפוסי של תקרת "פל-קל"



אסון ורסאי

גזירת הצלעות בקרבת הפלטה

קריסת התקרה

אסון ורסאי

צלעות לקויות ביותר

התנתקות הפלטה התחתונה וקריסתה

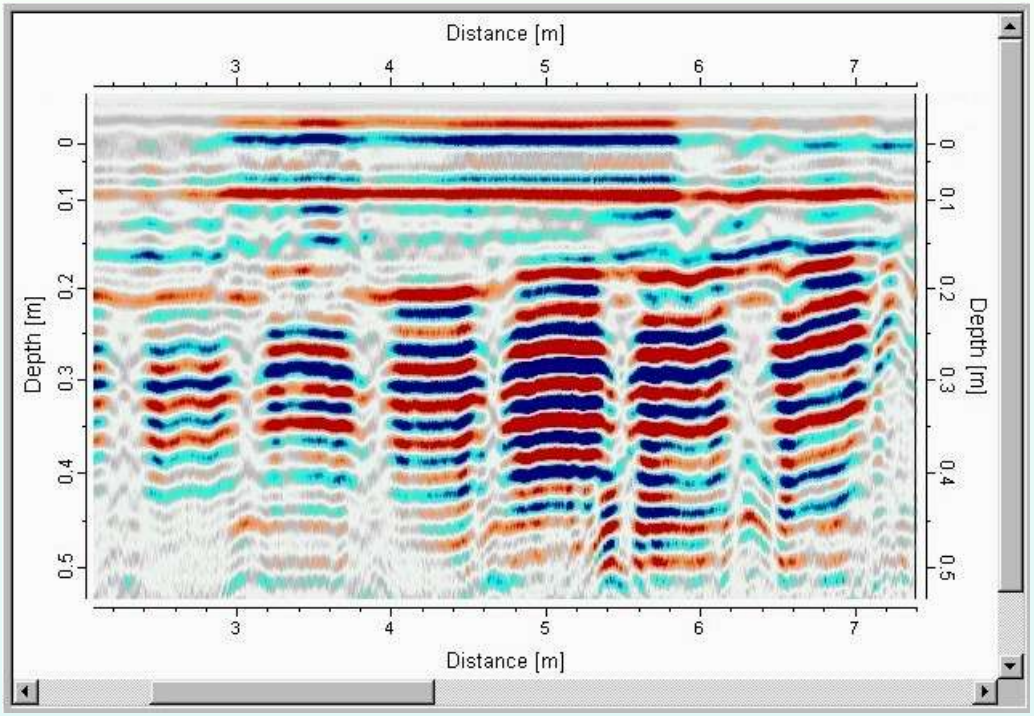
מבנה בחולון

שיקוף פל-קל בזמן אמיתי

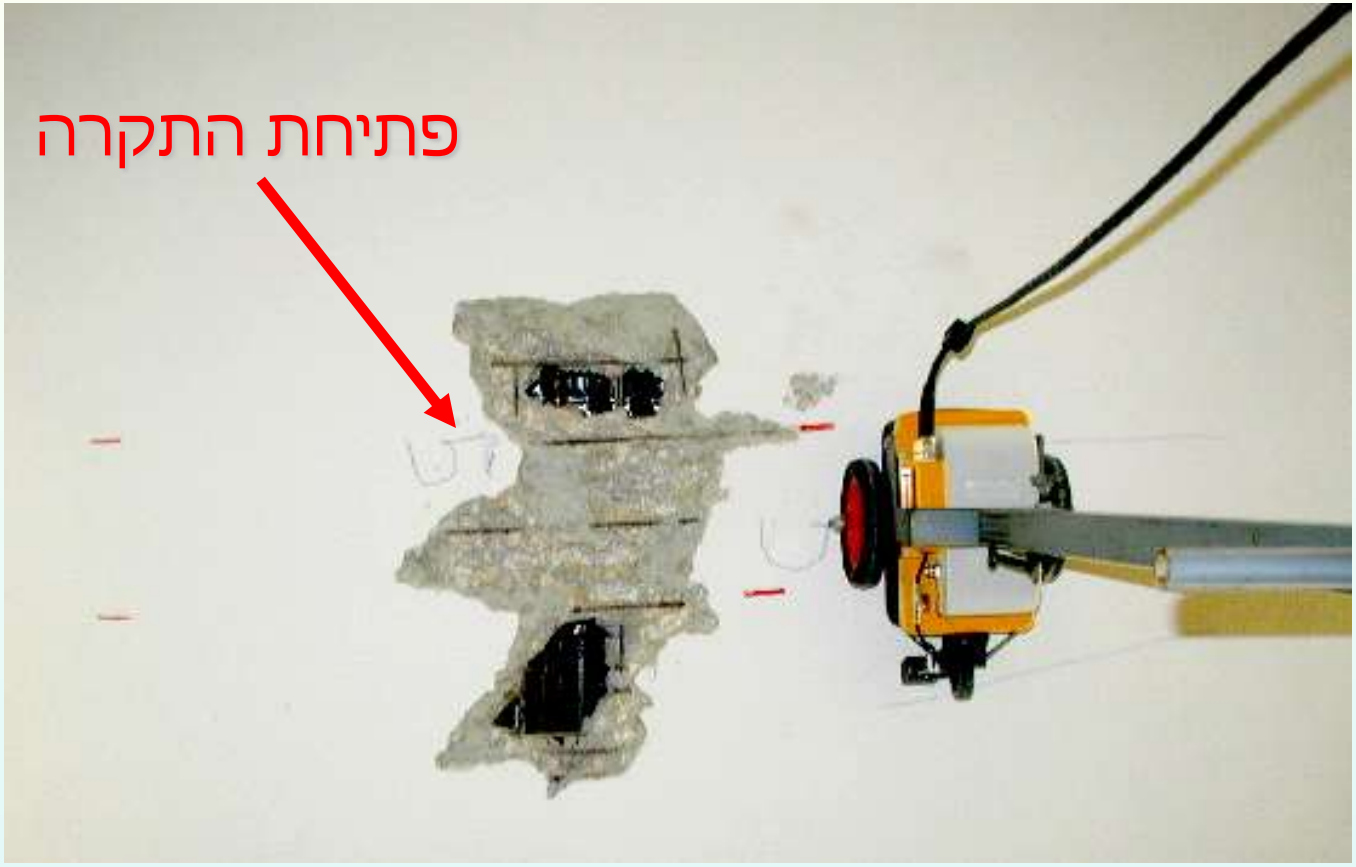
מערכת המכ"ם המתקדמת שנרכשה על-ידי גיאוסנס והותאמה לתקרות פל-קל מאפשרת שיקוף והדמיה תלת-ממדיים של תוך התקרה / הרצפה לכל עובייה, ברזולוציה של סנטימטרים בודדים. השיקוף מבוצע ישירות על הרצפה הקיימת, ללא צורך בהכנה מוקדמת.

השיקוף מוצג על צג המחשב במהלך הבדיקה ב-real-time, כאשר עיבוד פרטני וכמותי נעשה לאחר מכן במעבדת המחשבים של גיאוסנס.

REAL-TIME
IMAGING

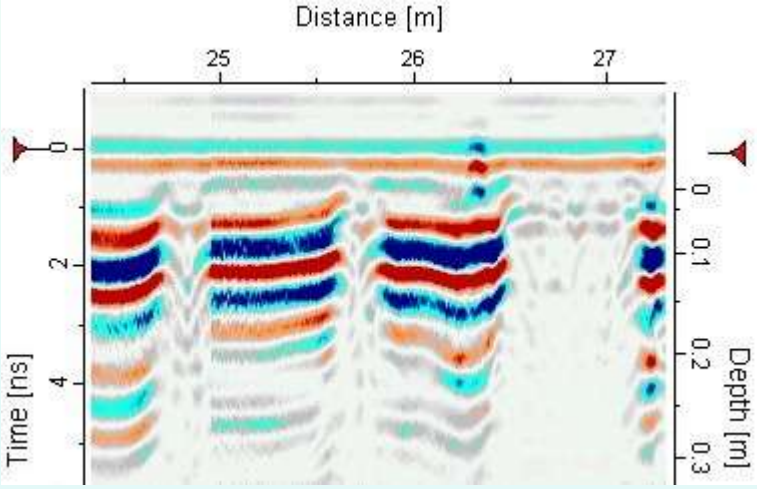


אלטרנטיבה לא אלגנטית



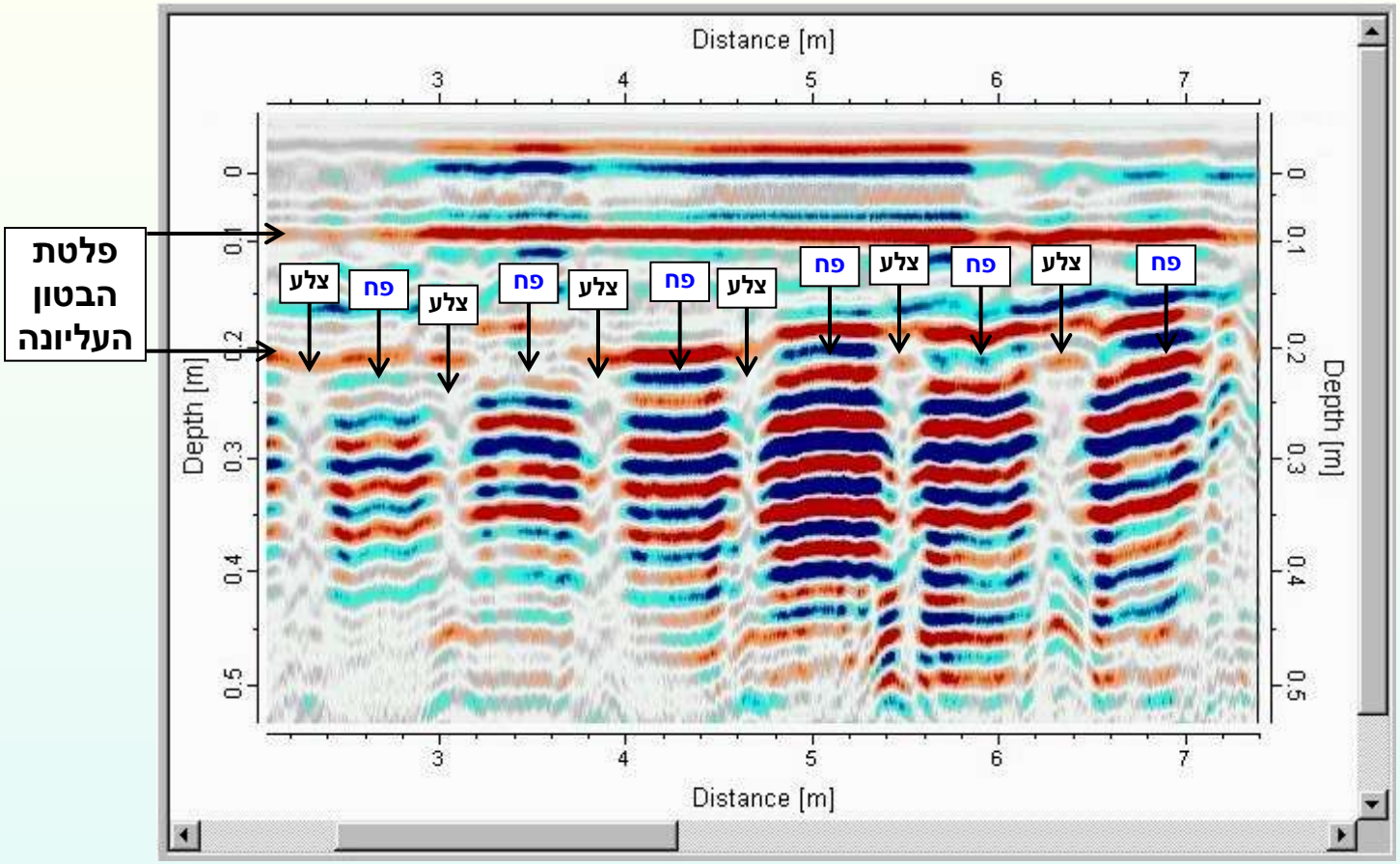
סוגי שיקוף בפל-קל

- שיקוף ומדידת חתך צלעות הבטון
- איתור הפחים המפרידים בין הצלעות
- שיקוף ומדידה של עובי יחידת הבטון העליונה והתחתונה
- שיקוף ואיתור רשתות ברזל הזיון (rebar)
- איתור רטיבות בתקרה
- איתור אזורי אי-רציפות בולטים כגון סגרגציה או הפסקות יציקה בין משטח הבטון התחתון והצלעות



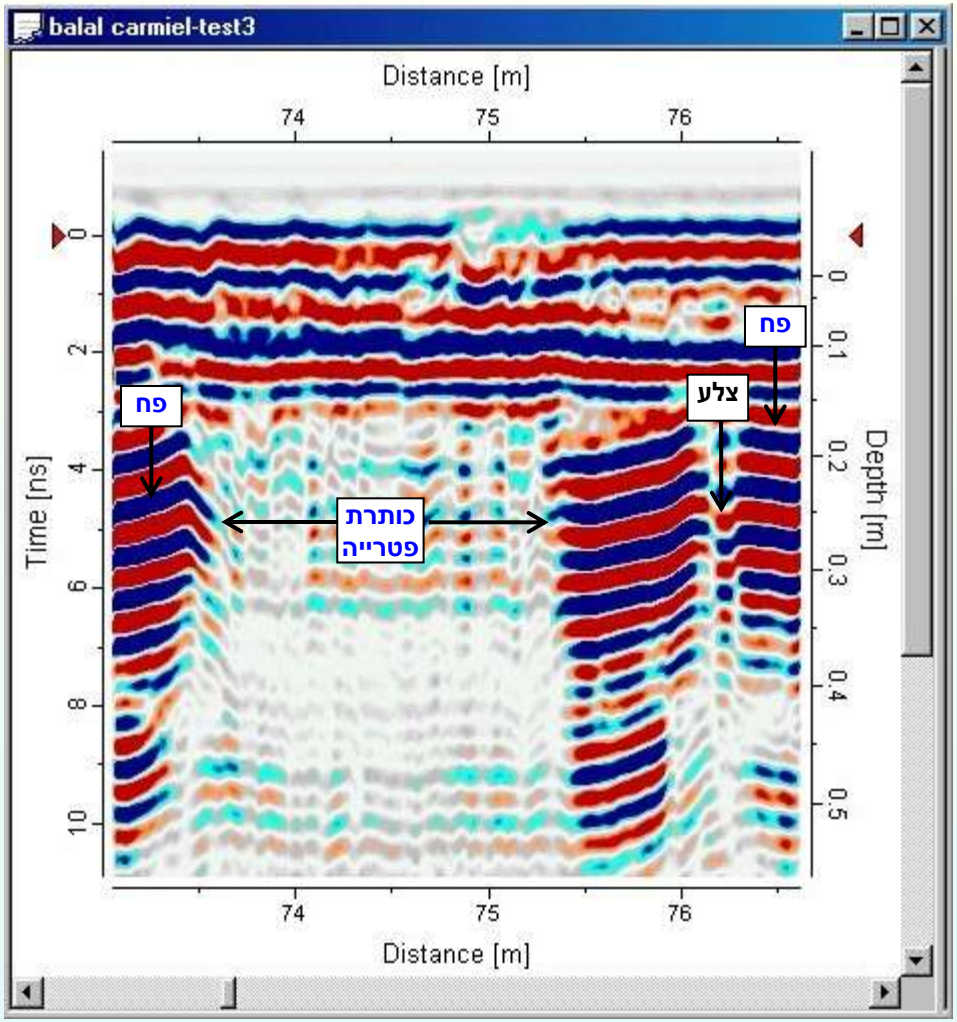
<u>השיקוף לסוגיו נעשה בתאום עם הקונסטרוקטור האחראי על בדיקת המבנה ותיקונו</u>

גג מבנה ספרייה



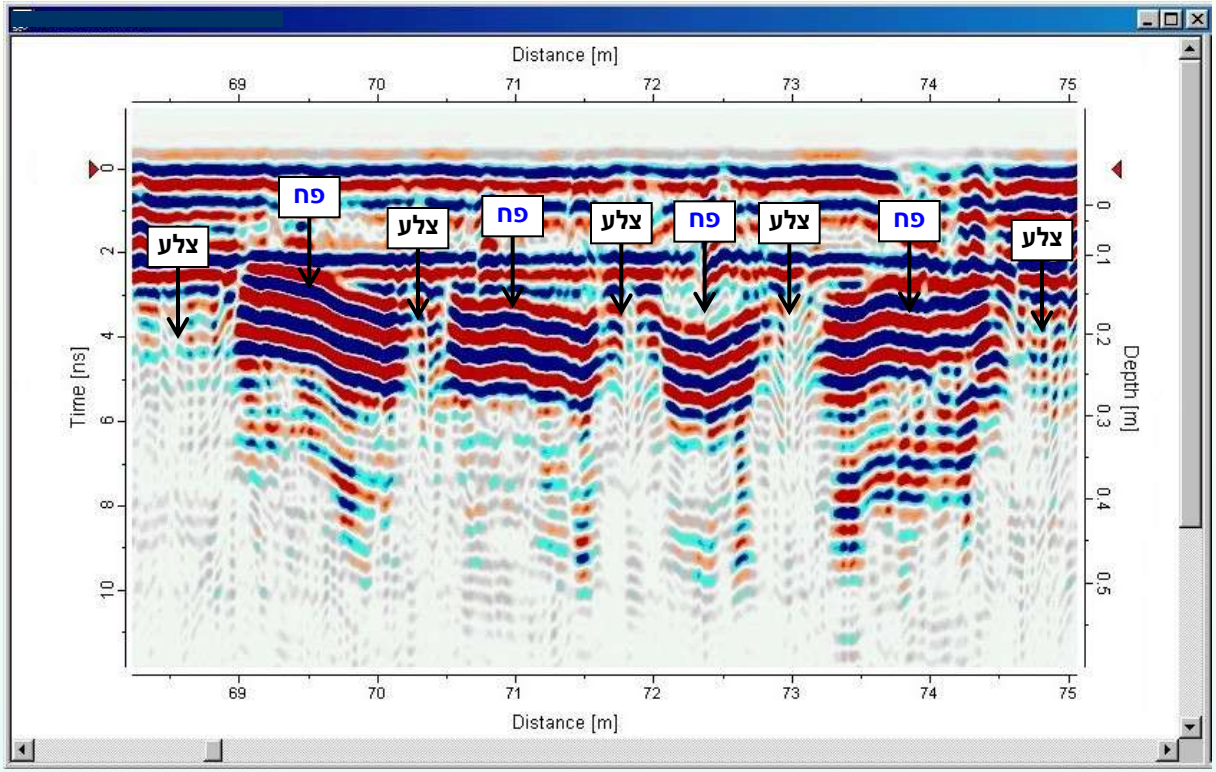
שיקוף תקרת פל-קל בבהירות גבוהה בו נראה מבנה של צלעות ופחים בגג הספרייה. הסקאלות האופקיות מציינות את מיקום המדידות [m] לאורך החתך, הסקאלות האנכיות מציינות את את עומק ההחזרים [m] בבטון מתחת לפני השטח. גג שכבת הבטון בעומק של כ-10 ס"מ. גג הפחים בין עומק של כ-15 ס"מ לכ-20 ס"מ (עובי פלטת הבטון העליונה איננו אחיד). ההחזרים החזקים נובעים מהפחים (גוונים אדומים וכחולים), ההחזרים החלשים מצלעות הבטון (גווני אפור).

סניף בנק



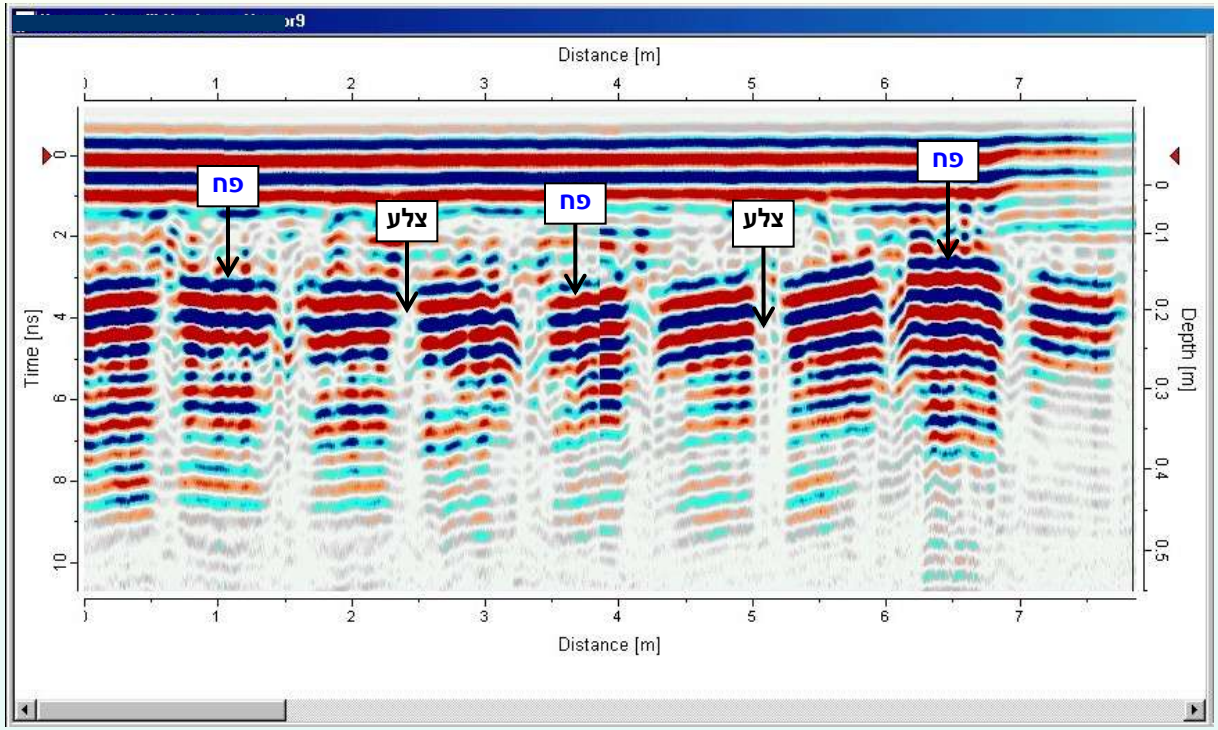
שיקוף של מבנה תקרת "פל-קל" בבהירות גבוהה בו נראה מבנה של פטרייה, צלע ופחים. המעבר אל גג פלטת הבטון העליונה נראה בעומק של כ-10 ס"מ. המעבר אל גג הפחים נראה בין עומק של כ-16 ס"מ בחלקו הימני של החתך לכ-20 ס"מ בחלקו השמאלי.

סניף בנק



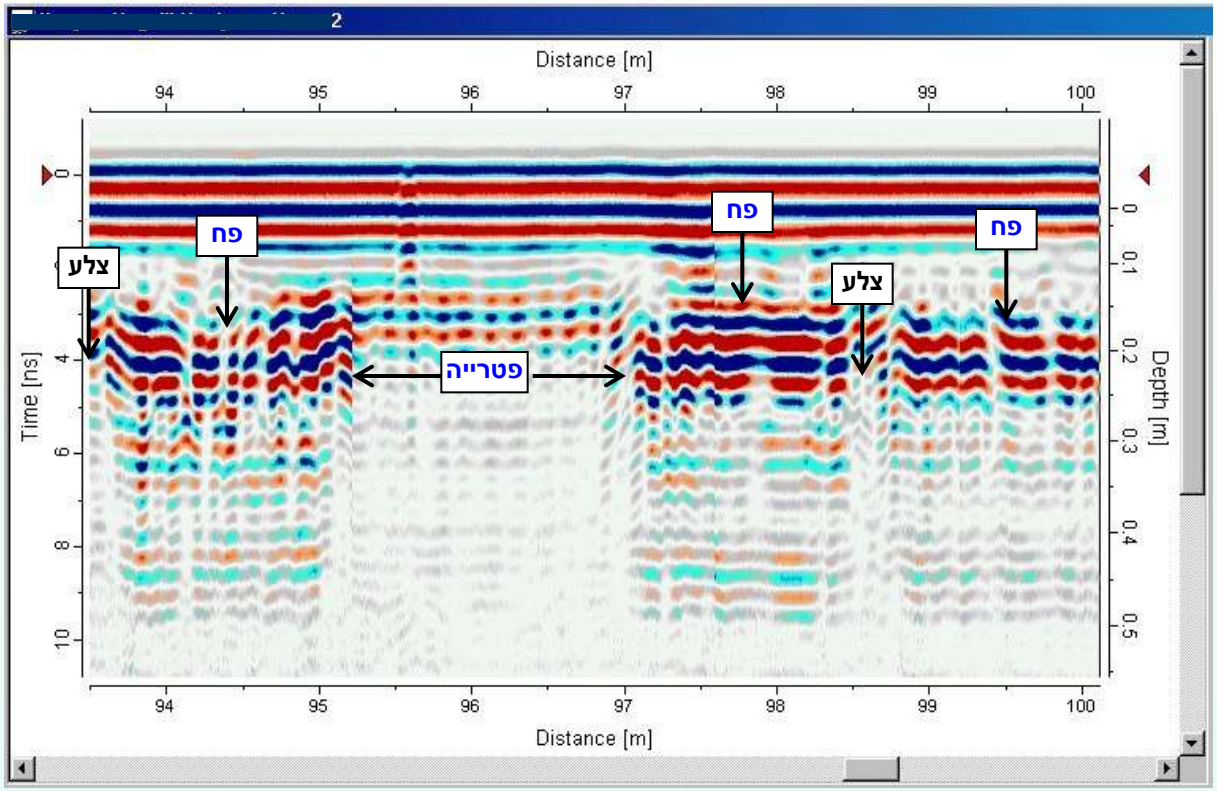
שיקוף של מבנה "פל-קל", צלעות ופחים בבהירות גבוהה. מעניין לראות כי בחתך הנ"ל מאותרים שלושה פחים הנחצים לאורכם ופח אחד הנחצה לרוחבו (השני מימין). גם רוחב הצלעות משתנה משמעותית.

גג קניון



שיקוף של מבנה תקרת "פל-קל" בבהירות גבוהה בו נראה מבנה של צלעות ופחים. המעבר אל גג הפחים נראה בין עומק של כ-14 ס"מ לכ- 18 ס"מ. החתך הנ"ל בוצע על גג קניון.

גג קניון

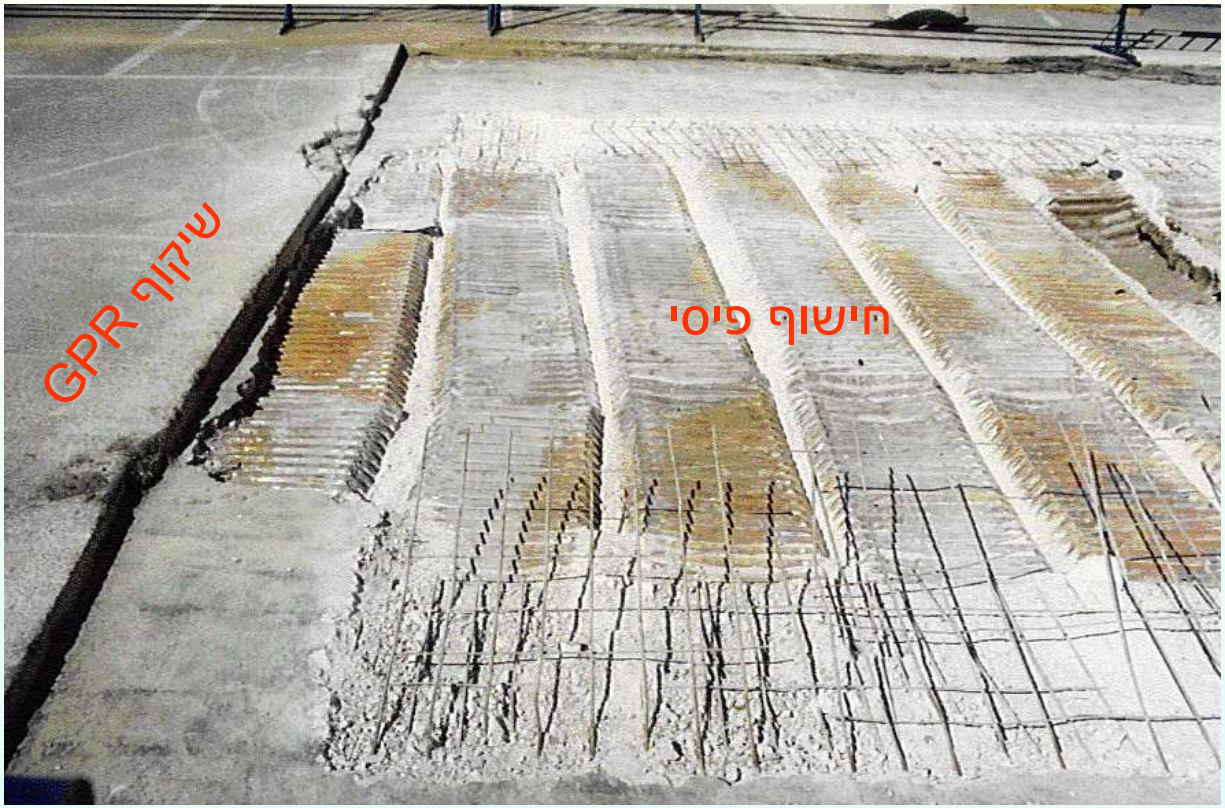


שיקוף של מבנה "פל-קל" ופטרייה בבהירות בינונית.
החתך הנ"ל בוצע על גג קניון.

תקרת פל-קל - חניון

אזור בחניון בו נפער חור כתוצאה משקיעת גלגלי מכונית. בחניון נעשה חישוף "לימודי" בשיתוף עם אינג' ישראל דוד

חישוף "לימודי" של תקרת פל-קל – חניון
(שיתוף פעולה עם אינג' ישראל דוד)



החישוף בוצע מדרום (מימין) לשטח בו בוצע שיקוף המכ"ם
המוצג בהמשך. בחישוף נראות צלעות מפותלות ובעלות רוחב משתנה. חלק מהפחים מפוררים מקורוזיה.
בהמשך בוצע שיקוף בקטע סמוך על-ידי גיאוסנס.

שיקוף פל-קל High-Resolution

חניון - חתכים מקבילים בניצב לצלעות ולפחים

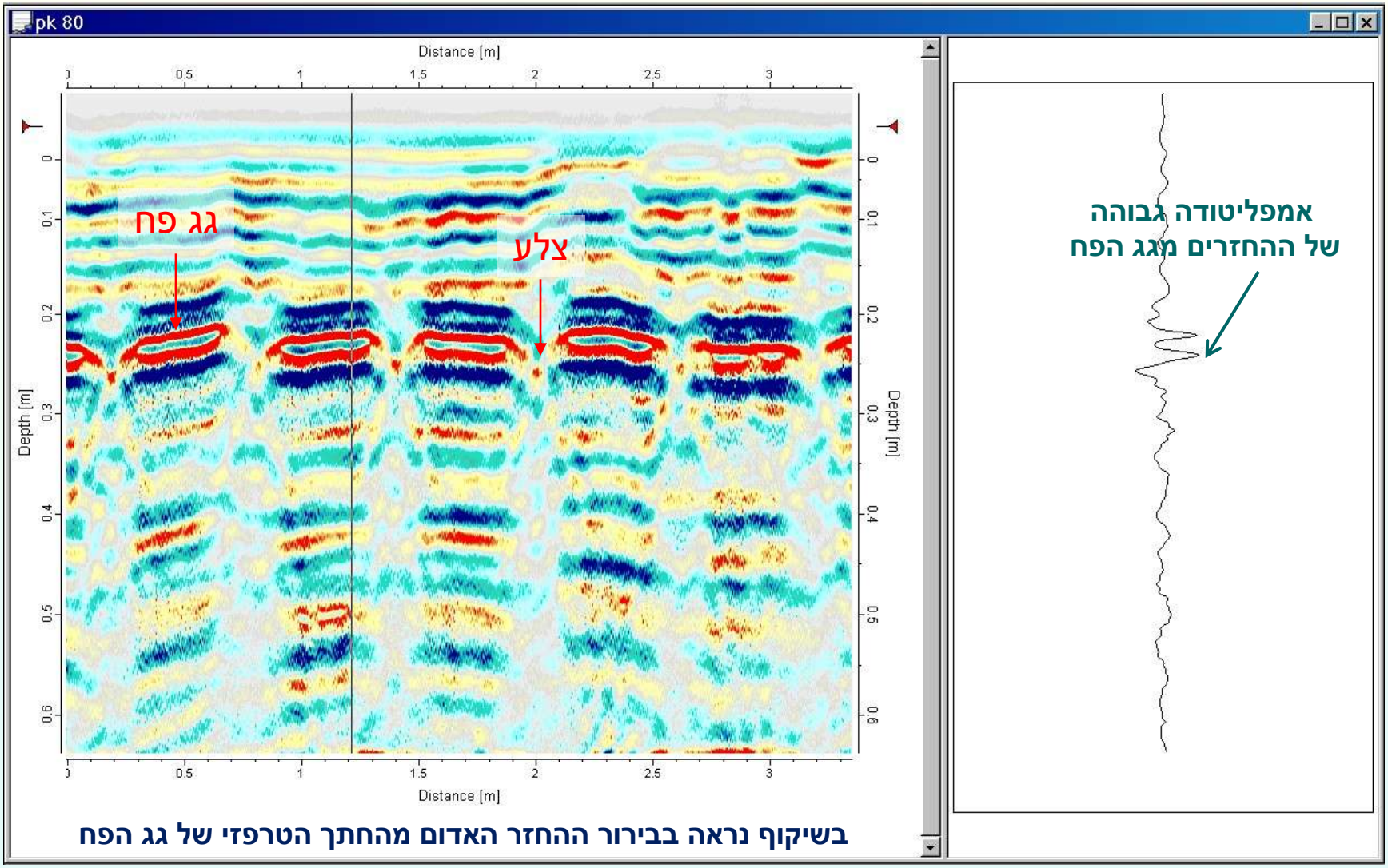
תדירות מרכזית: 1 GHz
דגימת זמן-עומק: 30 GHz
צפיפות מדידה: 0.5 ס"מ
מרווחי חתכים: 0.2 מ'
גודל משטח : 1.6 X 1.6 מ'

נתוני בדיקה אלה מאפשרים ביצוע שיקוף ברזולוציה גבוהה ביותר: צלע סטנדרטית ברוחב של 12 ס"מ מאותרת על-ידי 24 מדידות רציפות לפחות.

החתכים עובדו באמצעות תוכניות מחשב לעיבוד נתונים הלקוחות מתחום הרדאר, הסיסמיקה ועיבוד התמונה.

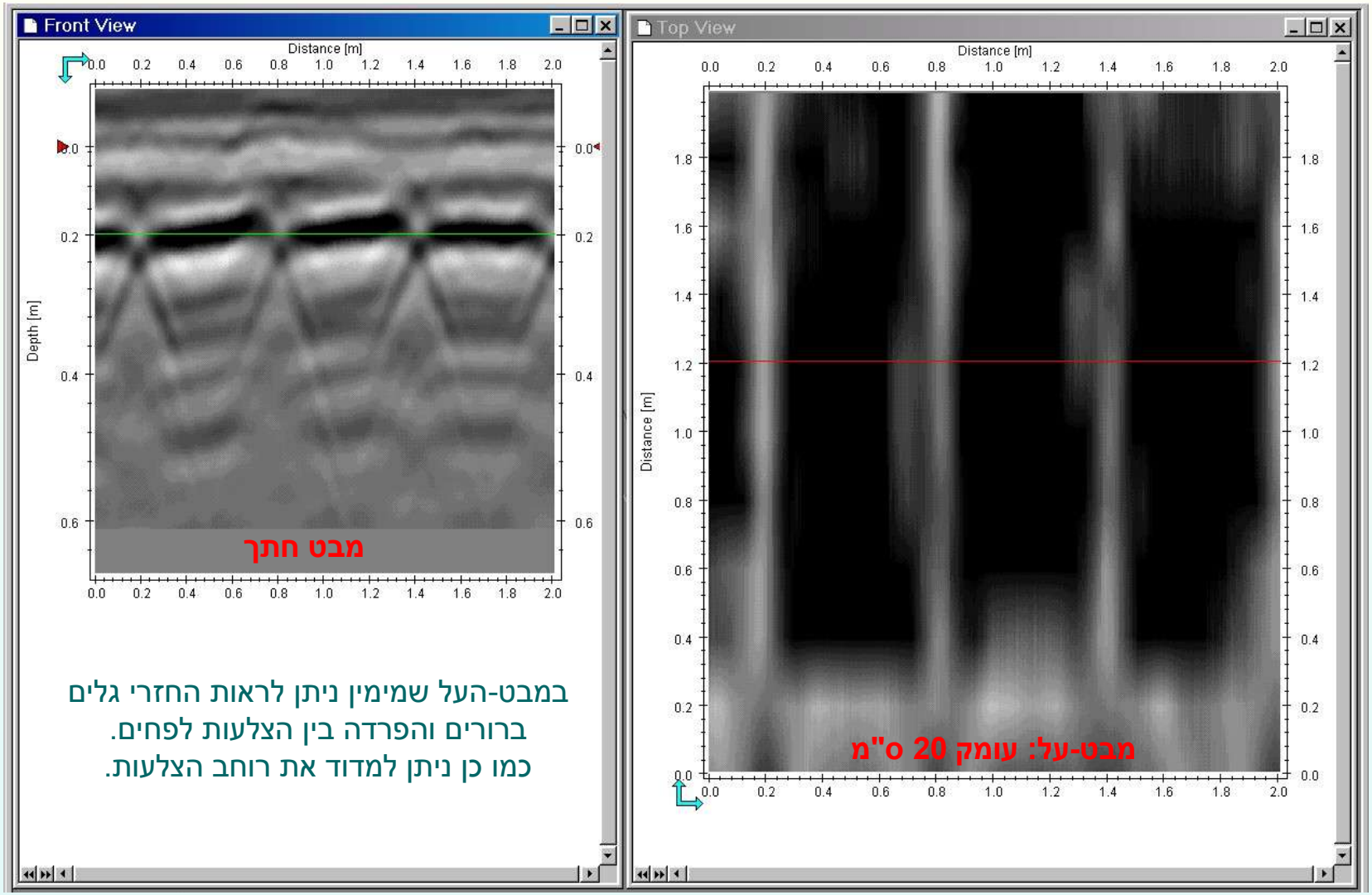
פל-קל: אנליזת High-Resolution

דוגמה לחתך מלמעלה, בדגימה גבוהה בניצב לצלעות ולפחים



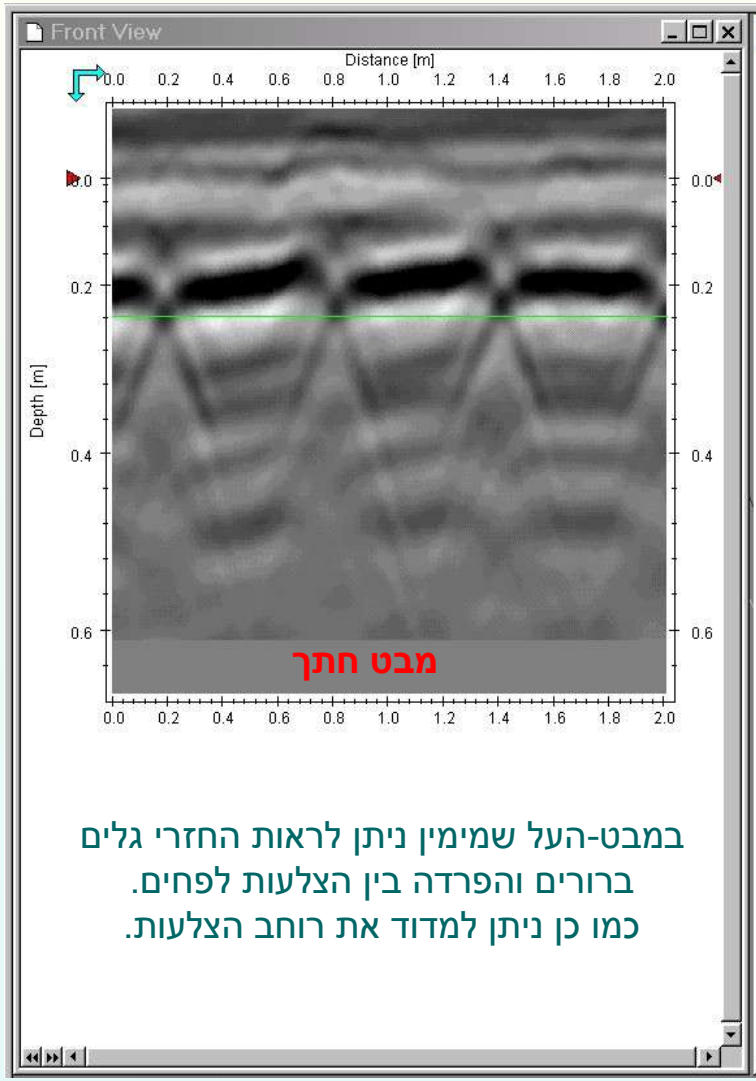
בשיקוף נראה בבירור ההחזר האדום מהחתך הטרפזי של גג הפח

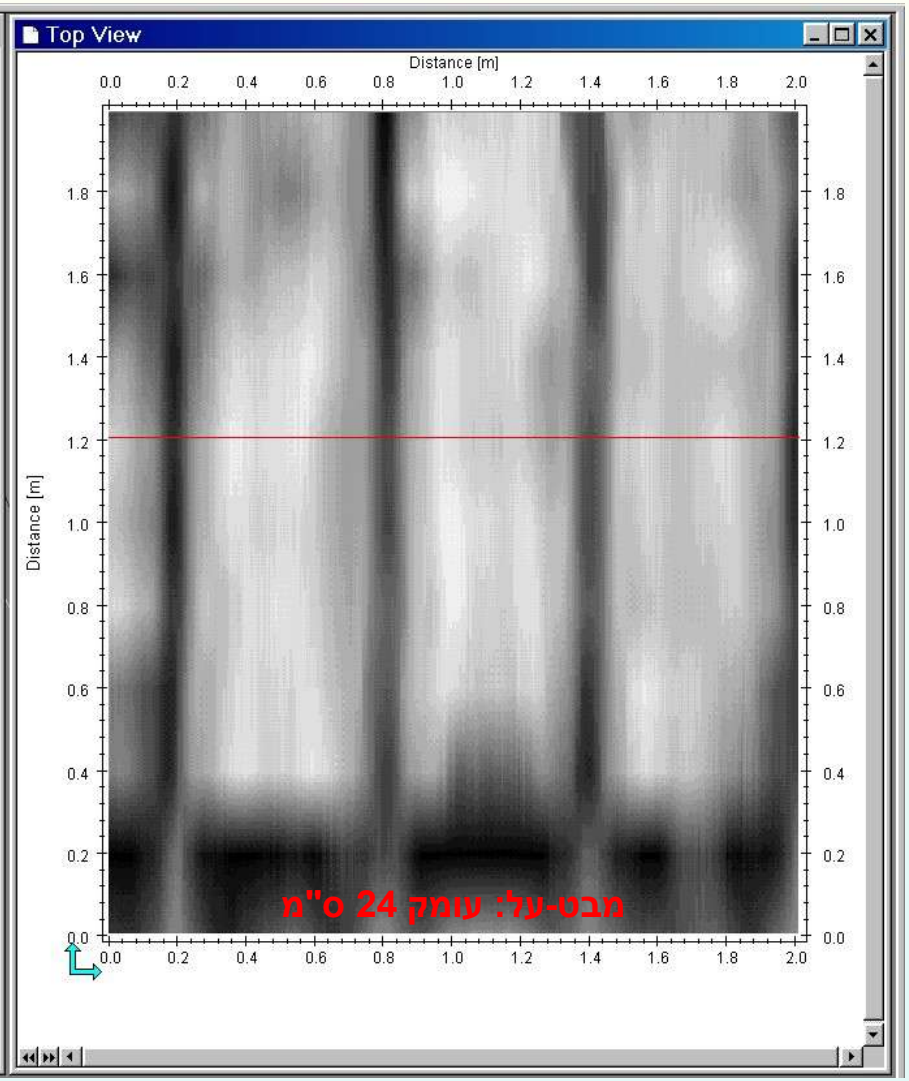
פל-קל: שיקוף תלת-ממדי High-Resolution



במבט-העל שמימין ניתן לראות החזרי גלים
ברורים והפרדה בין הצלעות לפחים.
כמו כן ניתן למדוד את רוחב הצלעות.

פל-קל: שיקוף תלת-ממדי High-Resolution





במבט-העל שמימין ניתן לראות החזרי גלים ברורים והפרדה בין הצלעות לפחים.
כמו כן ניתן למדוד את רוחב הצלעות.

שיקוף תקרות פל-קל מלמטה

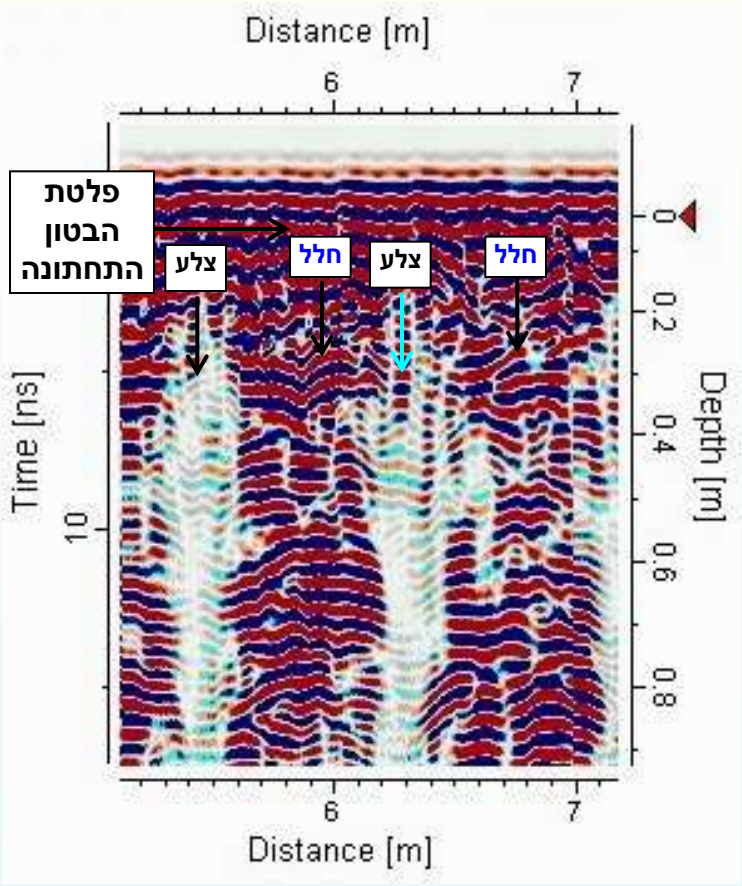
עד כה הובאו דוגמאות של שיקוף תקרות פל-קל שבוצעו מכיוון מעלה לכיוון מטה – כלומר כאשר סנסור השיקוף מונח על הרצפה.

במידת הצורך ניתן לבצע את השיקוף מלמטה למעלה, באמצעות מתקנים מיוחדים שהותאמו להצמדת הטרנסדיוסר (משדר, מקלט ואנטנה) אל התקרה.

מד טווח הלייזר המחובר לזרוע המרכזית מעל למחשב הנייד משמש למדידת מרחקי הצלעות מקירות המבנה.

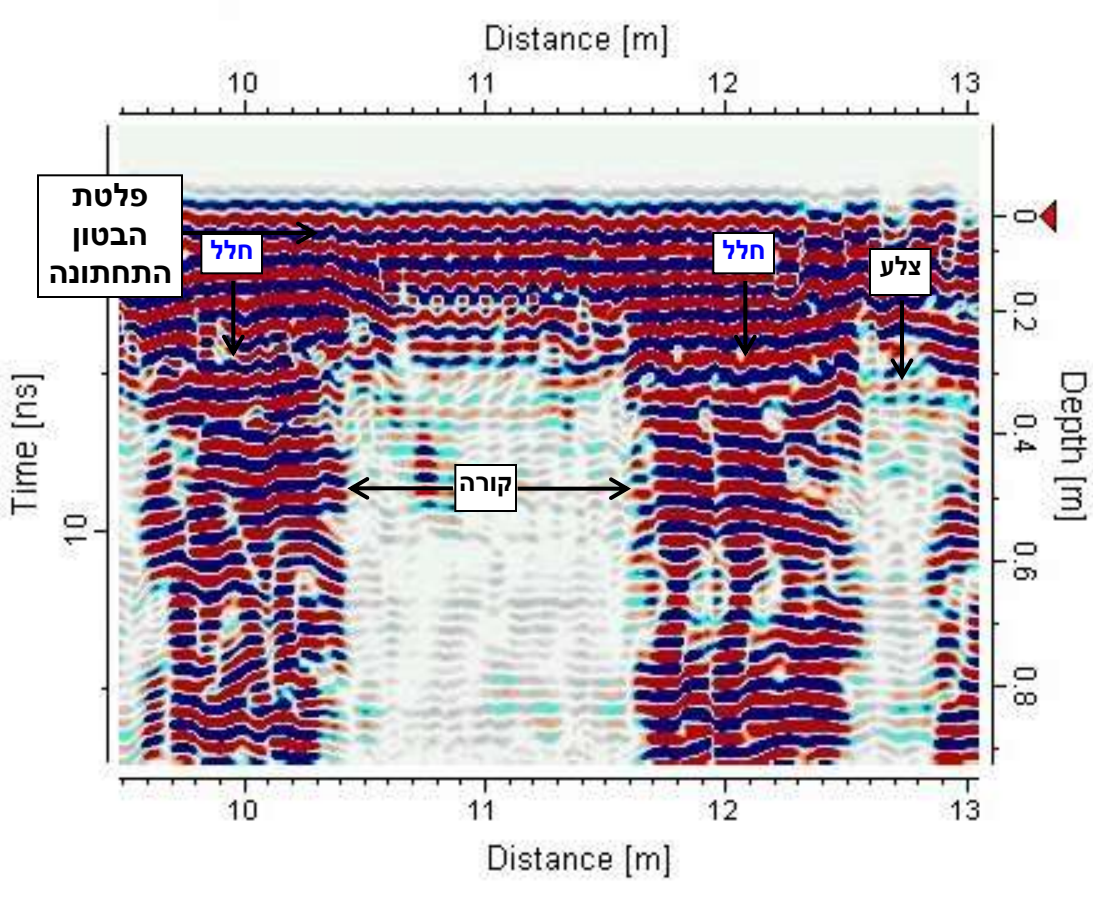
גם בצורה זו - השיקוף מתבצע בזמן אמיתי.

שיקוף תקרות פל-קל מלמטה



בתצלום מימין נראה חתך GPR שבוצע בתקרת חניון מלמטה, בסמוך לצלע שנחשפה באופן פיסי. הצלע המופיעה ב-6.3 מ' (החץ בגוון תכלת) הינה זו מתחתיה עומד הטרנסדיוסר שבתצלום משמאל.

שיקוף תקרות פל-קל מלמטה



בתצלום נראה חתך GPR שבוצע בתקרת חניון מלמטה, בקטע בו ישנם שני חללים של פחי הפל-קל שביניהם קורה ברוחב של כ-120 ס"מ. בהמשך מאותרת צלע ברוחב מינימאלי של כ-20 ס"מ. הגליות בסדרת הרפלקטורים הראשונים נובעת מרשת הברזל של הפלטה התחתונה (מוטות במרווחים של כ-10 ס"מ בכיוון בו נעשה השיקוף).

פנים תקרת פל-קל

פנים תקרת פל-קל

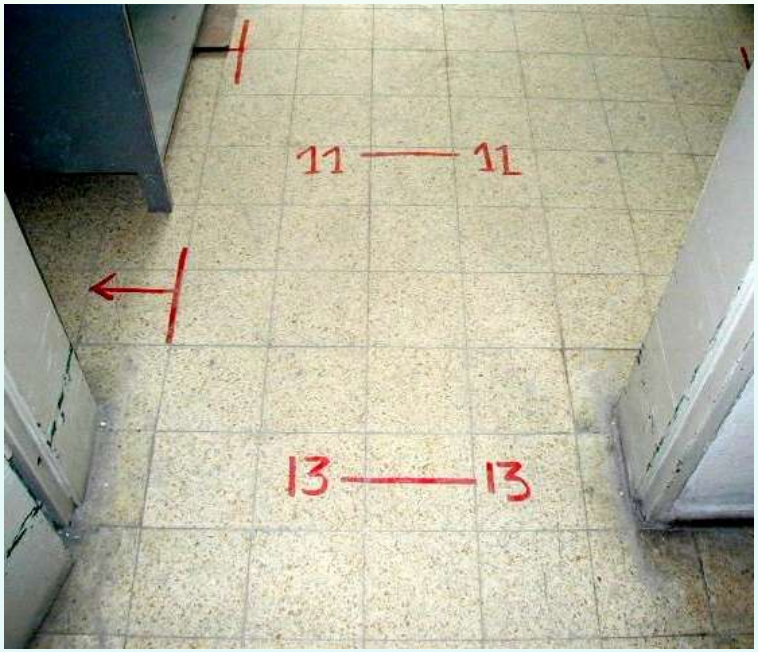
פנים תקרת פל-קל

שיקוף גן ילדים ב- real time

שיקוף גן ילדים ב- real time

שיקוף לתיקון תקרת פל-קל

התיקון בתכנון אינג' ישראל דוד



שיקוף לתיקון תקרת פל-קל

התיקון בתכנון אינג' ישראל דוד

שיקוף לתיקון תקרת פל-קל

התיקון בתכנון אינג' ישראל דוד

תיקון תקרת פל-קל

שיקוף GPR לחקר בטון

איתור סדקים באמצעות
מכ"ם חודר קרקע ברזולוציה גבוהה

ניסוי

גיאוסנס בע"מ

המכון לחקר הבנייה, הטכניון

שיקוף פלטת בטון סדוקה ברזולוציה גבוהה

שיקוף פלטת בטון סדוקה ברזולוציה גבוהה

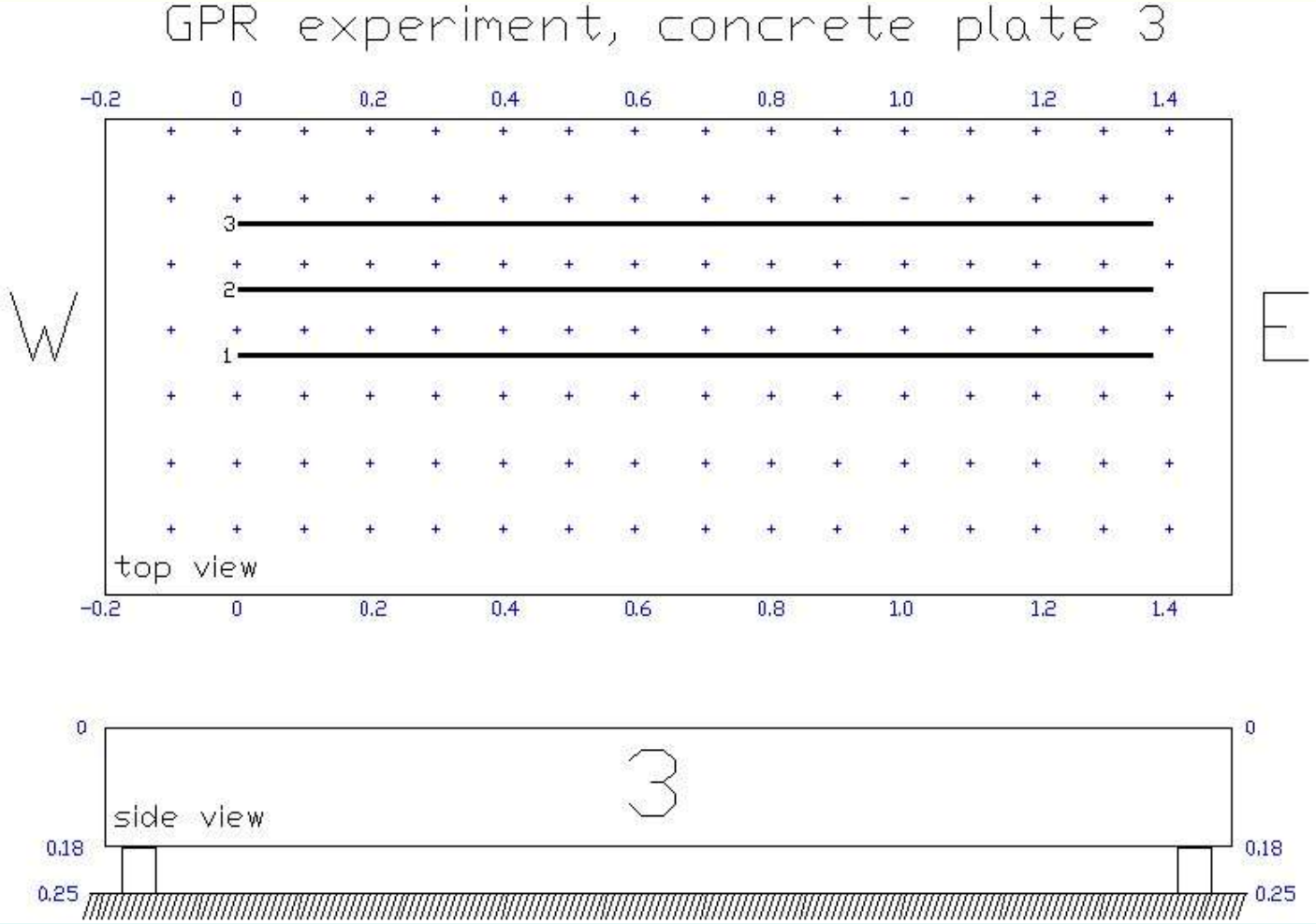


Plate 3

Profile 1 (d=0)

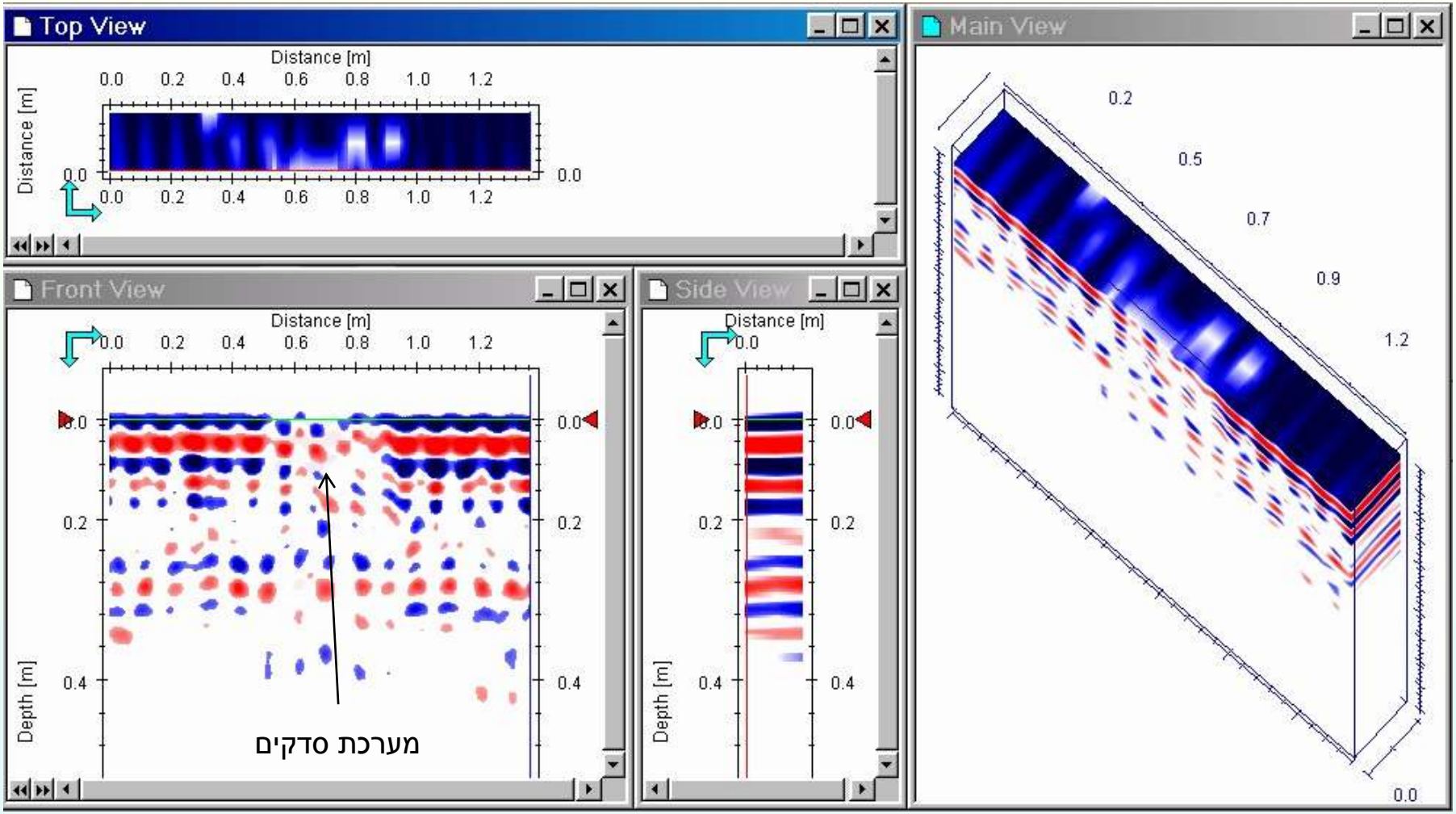


Plate 3

Profile 1-2 (d=0)

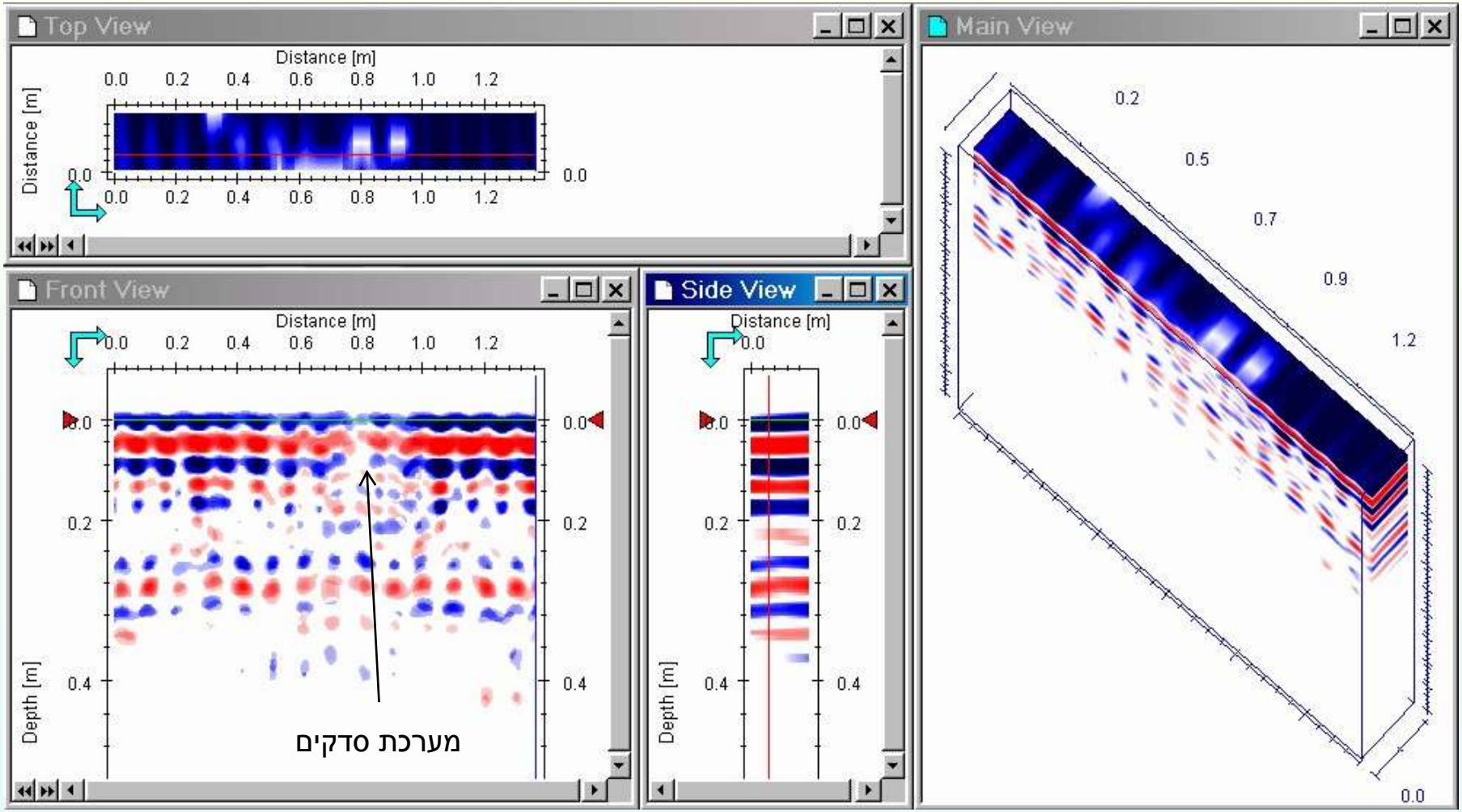


Plate 3

Profile 2 (d=0)

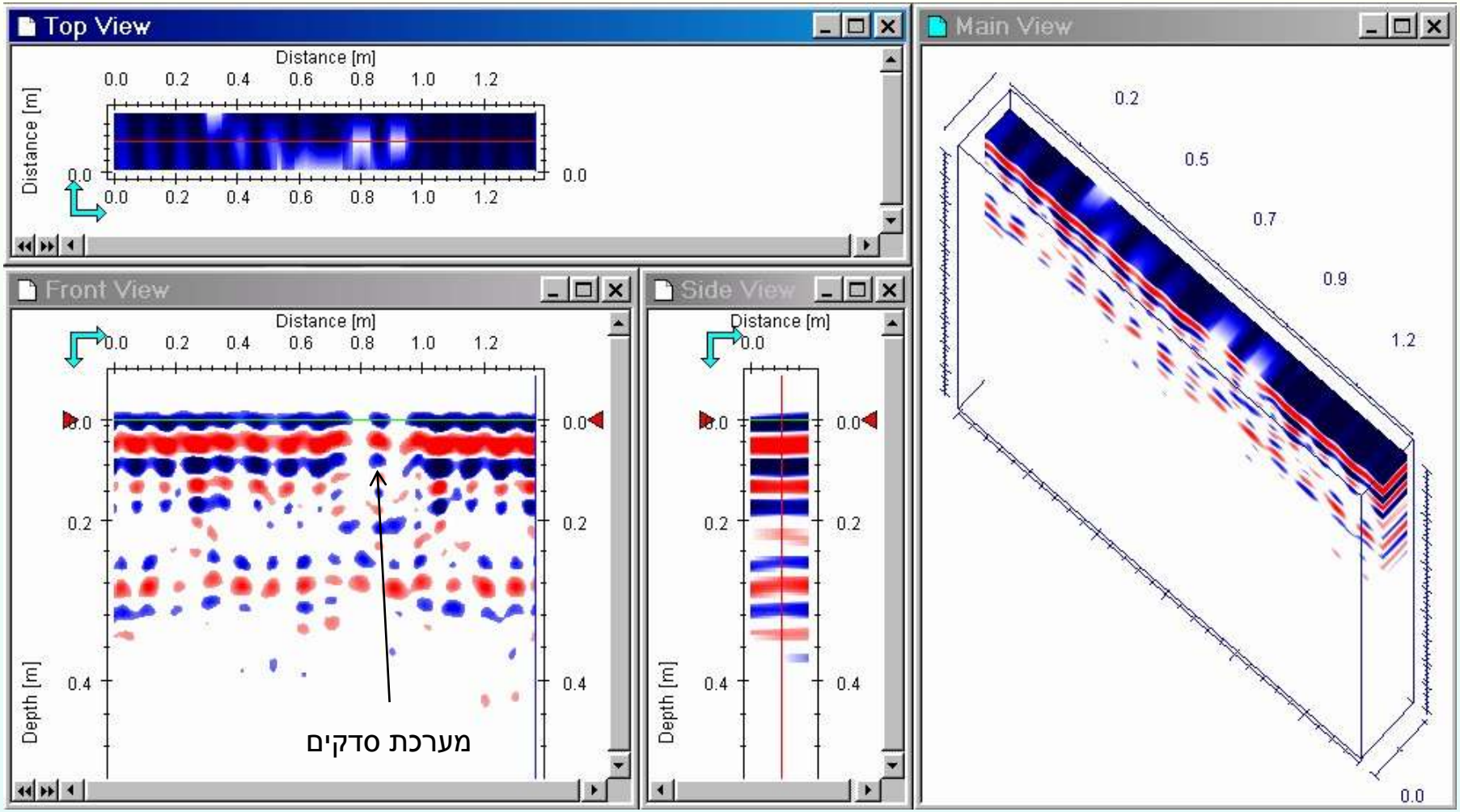


Plate 3

Profile 2-3 (d=0)

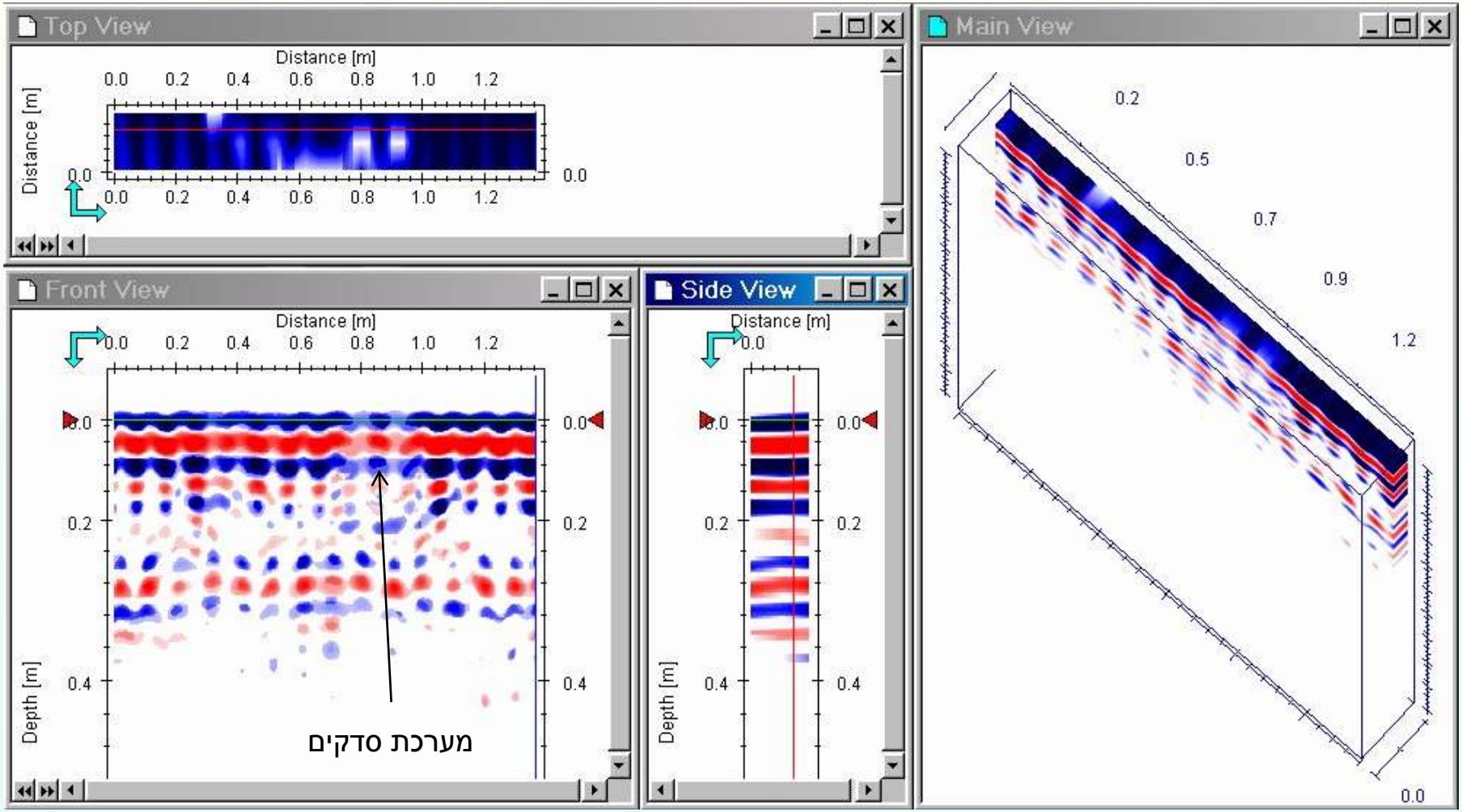


Plate 3

Profile 3 (d=0)

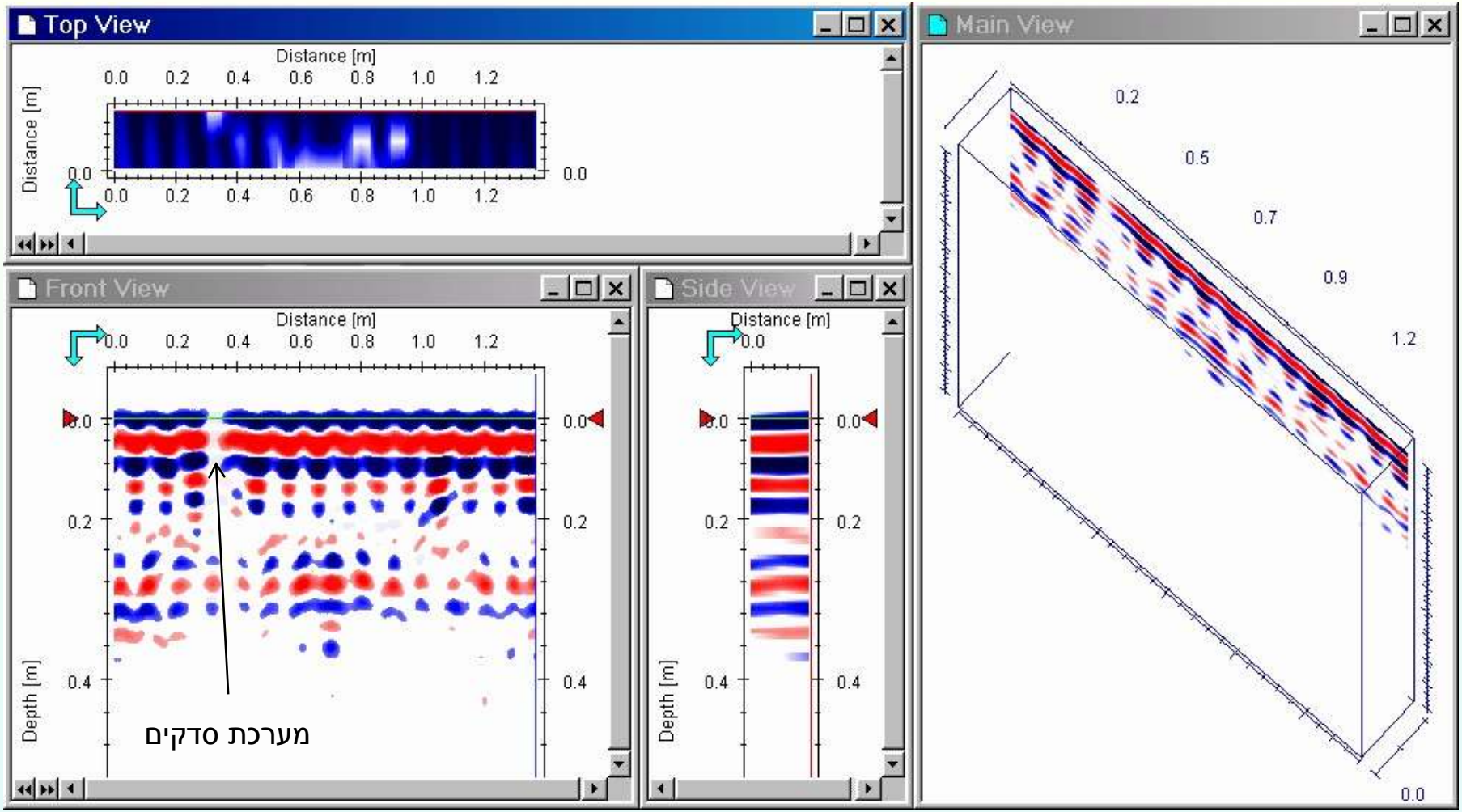


Plate 3

Profile 1 (d=4 cm)

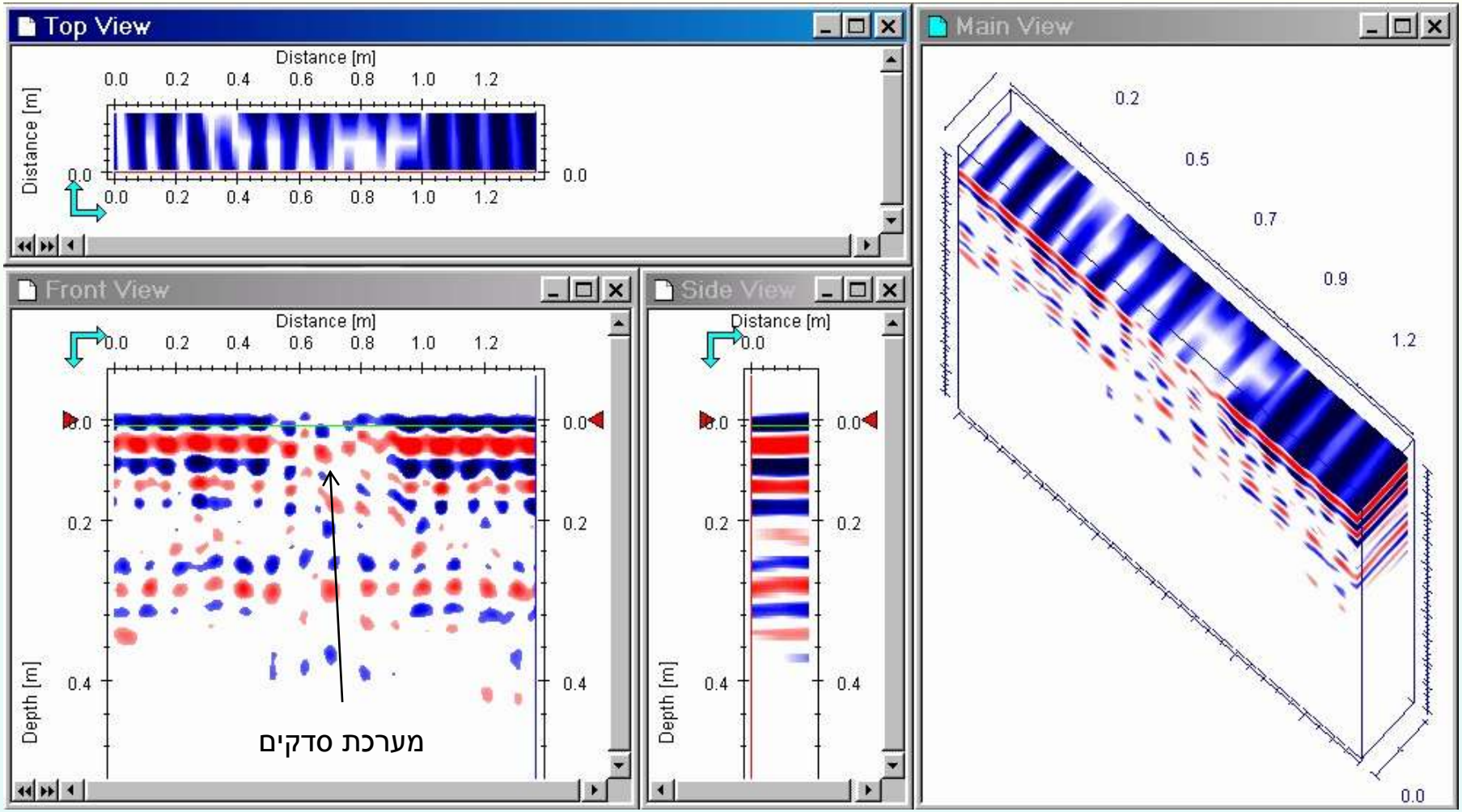


Plate 3

Profile 1 (d=8 cm)

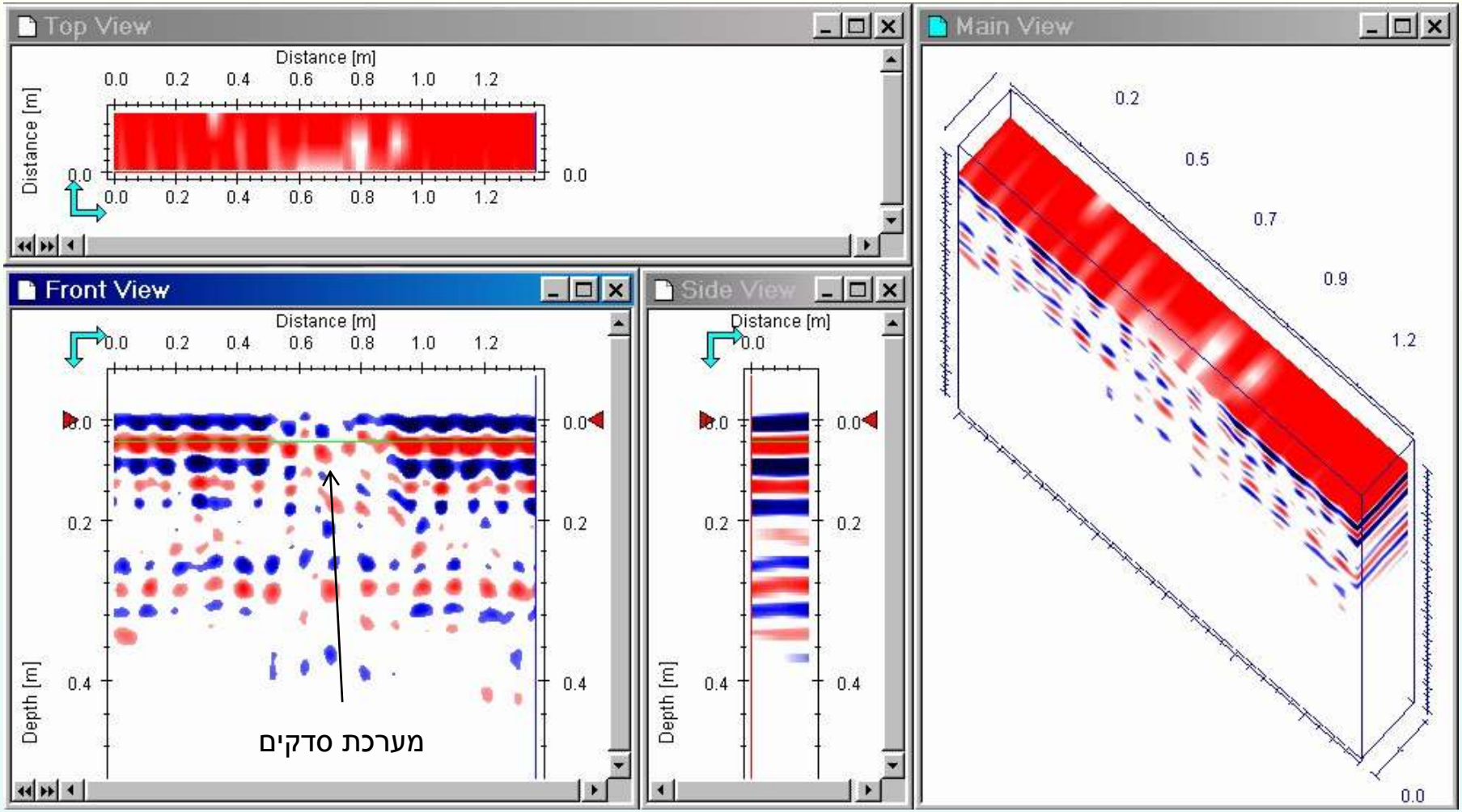


Plate 3

Profile 1 (d=12 cm)

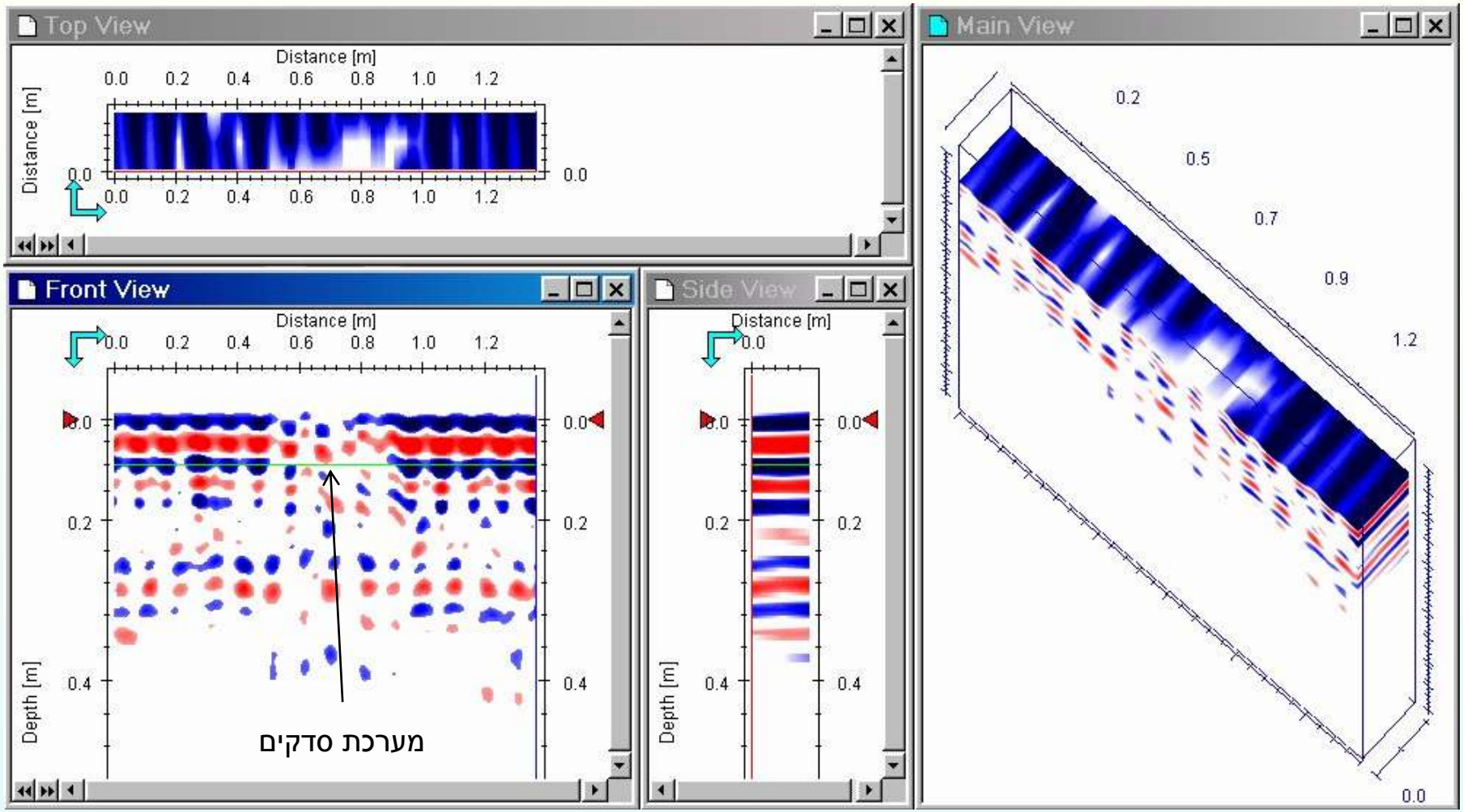


Plate 3

Profile 1 (d=15 cm)

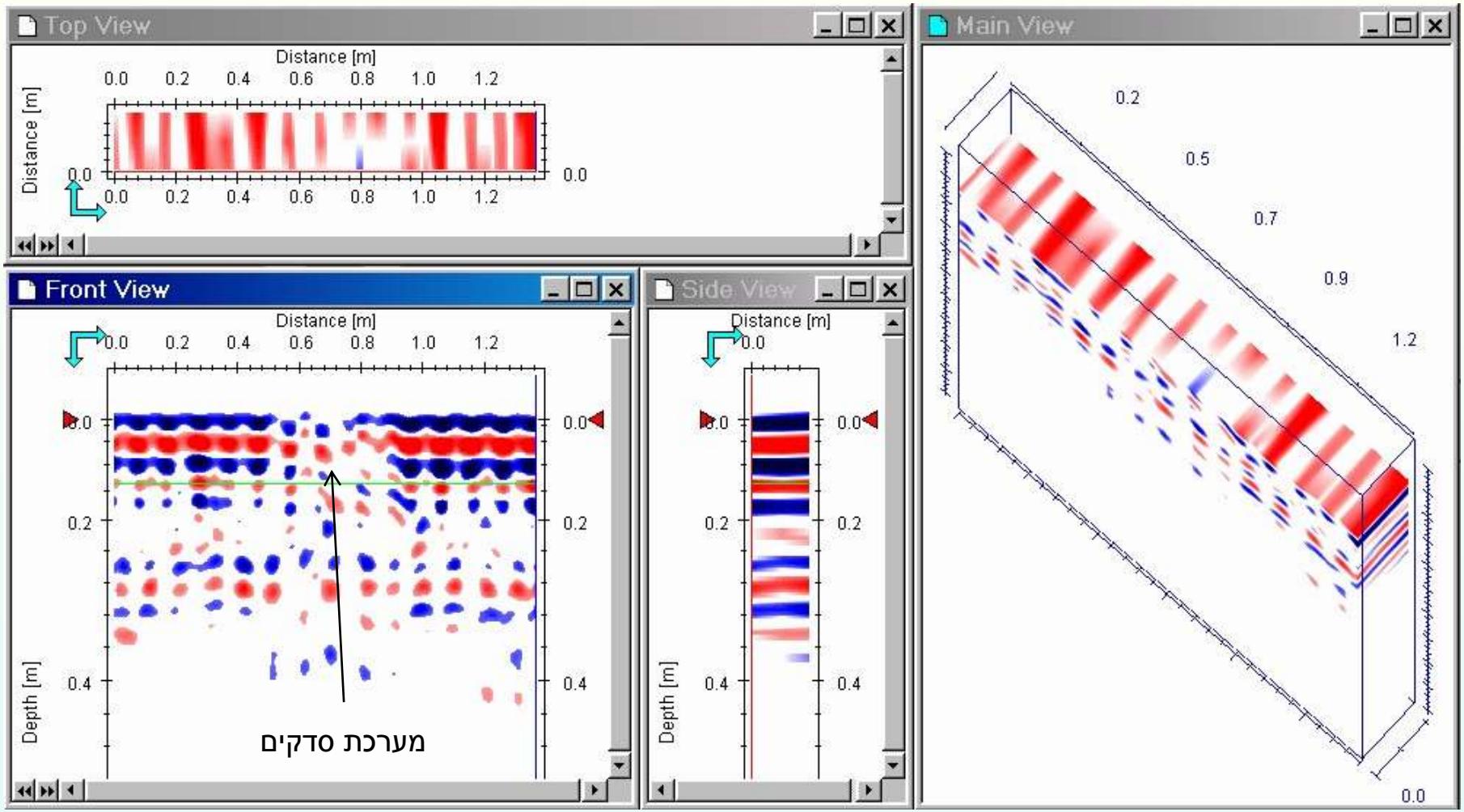
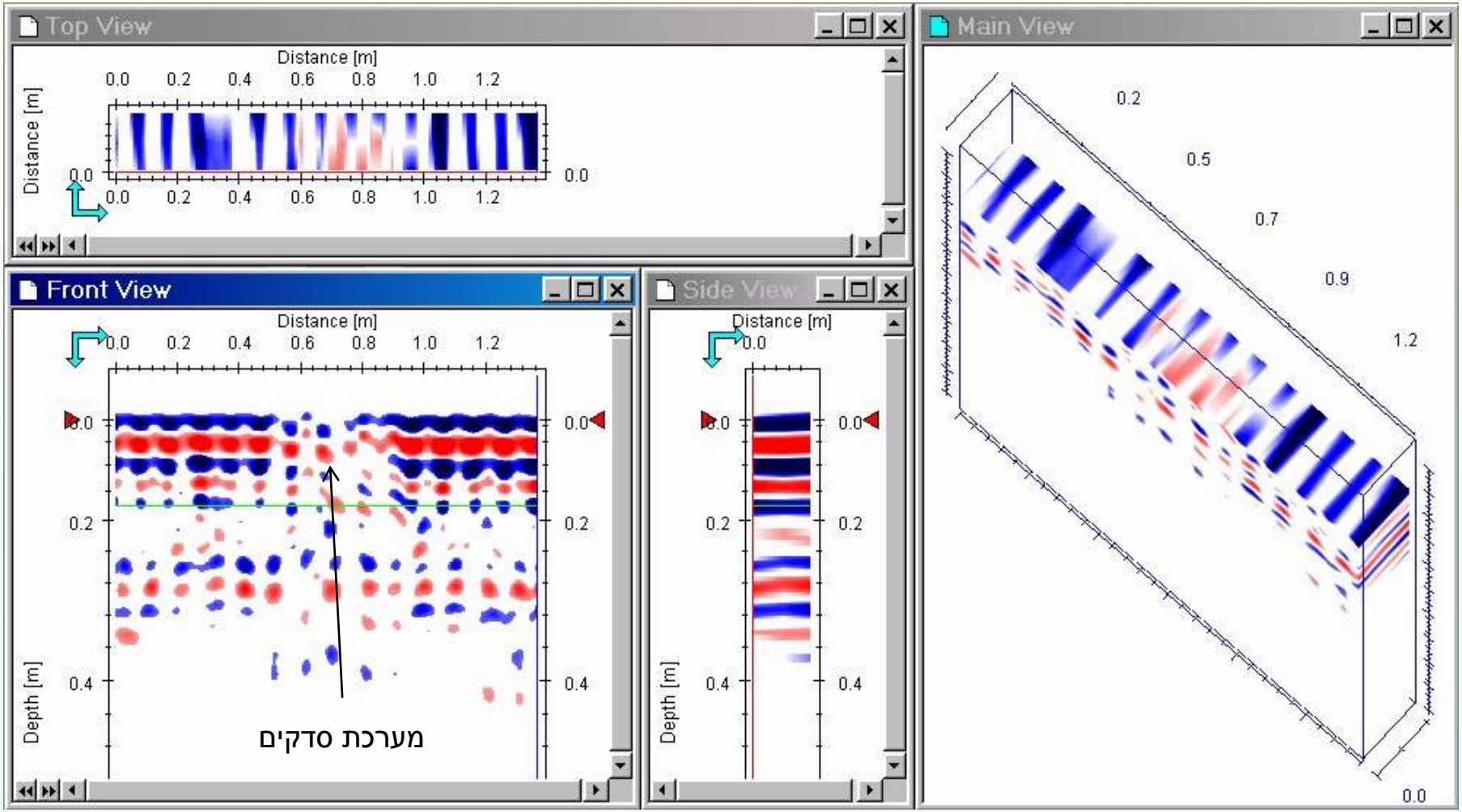


Plate 3

Profile 1 (d=18 cm)



thank you