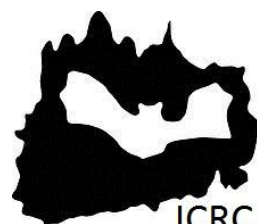


JERUSALEM'S UNDERWORLD: SILOAM TUNNEL

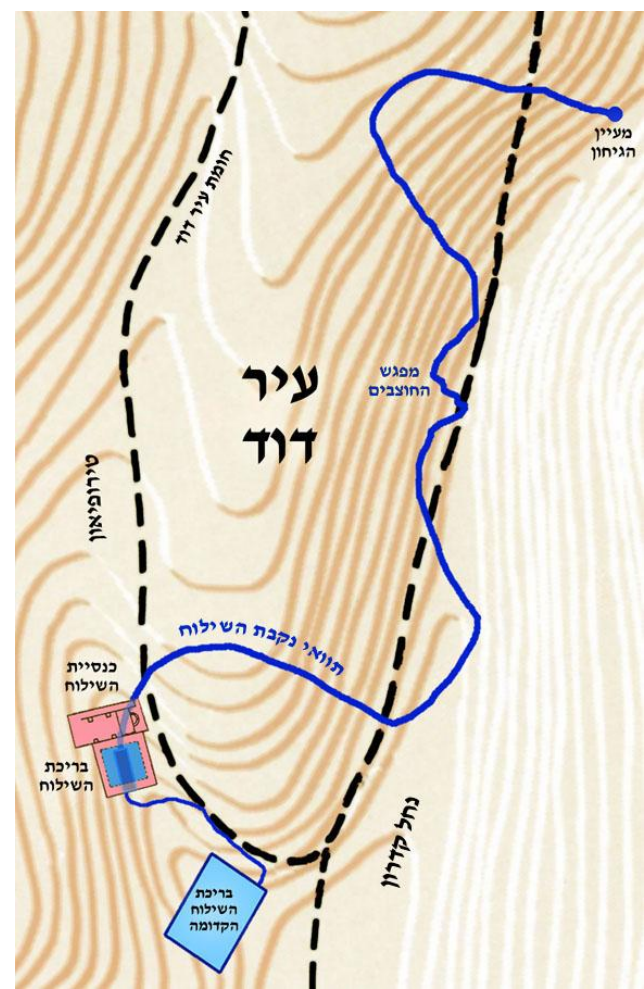


Amos Frumkin
The Hebrew University of
Jerusalem, Israel

Aryeh Shimron
Geological Survey
of Israel

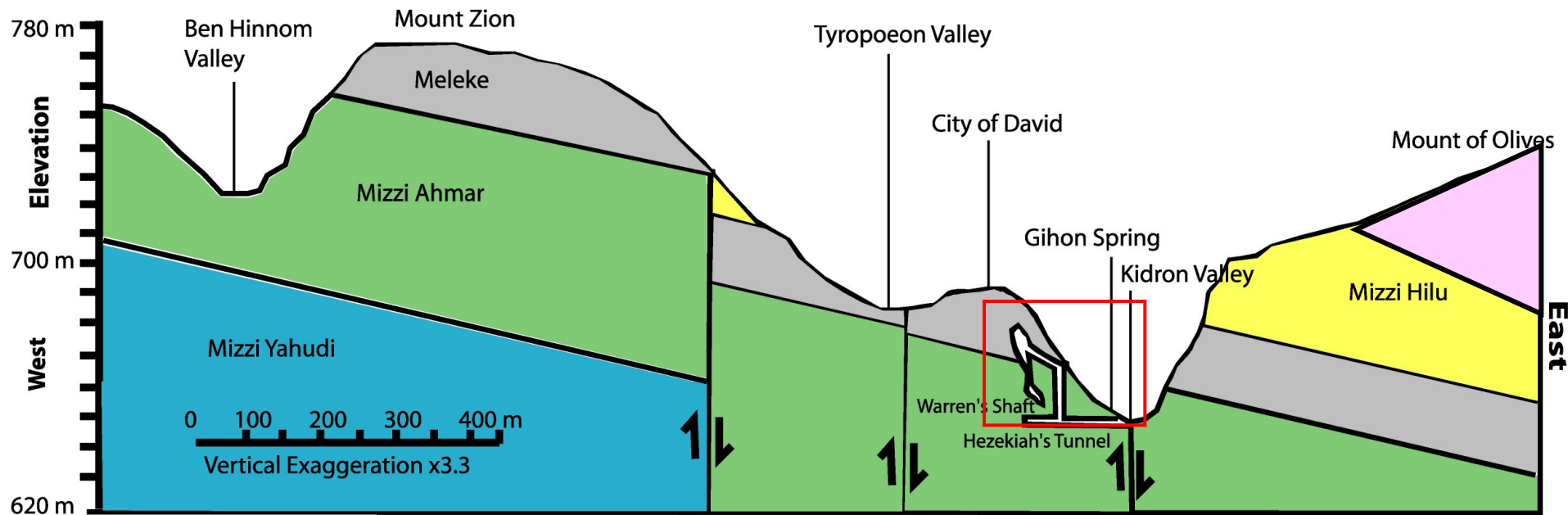


Israel Cave Research Center



Ancient Jerusalem

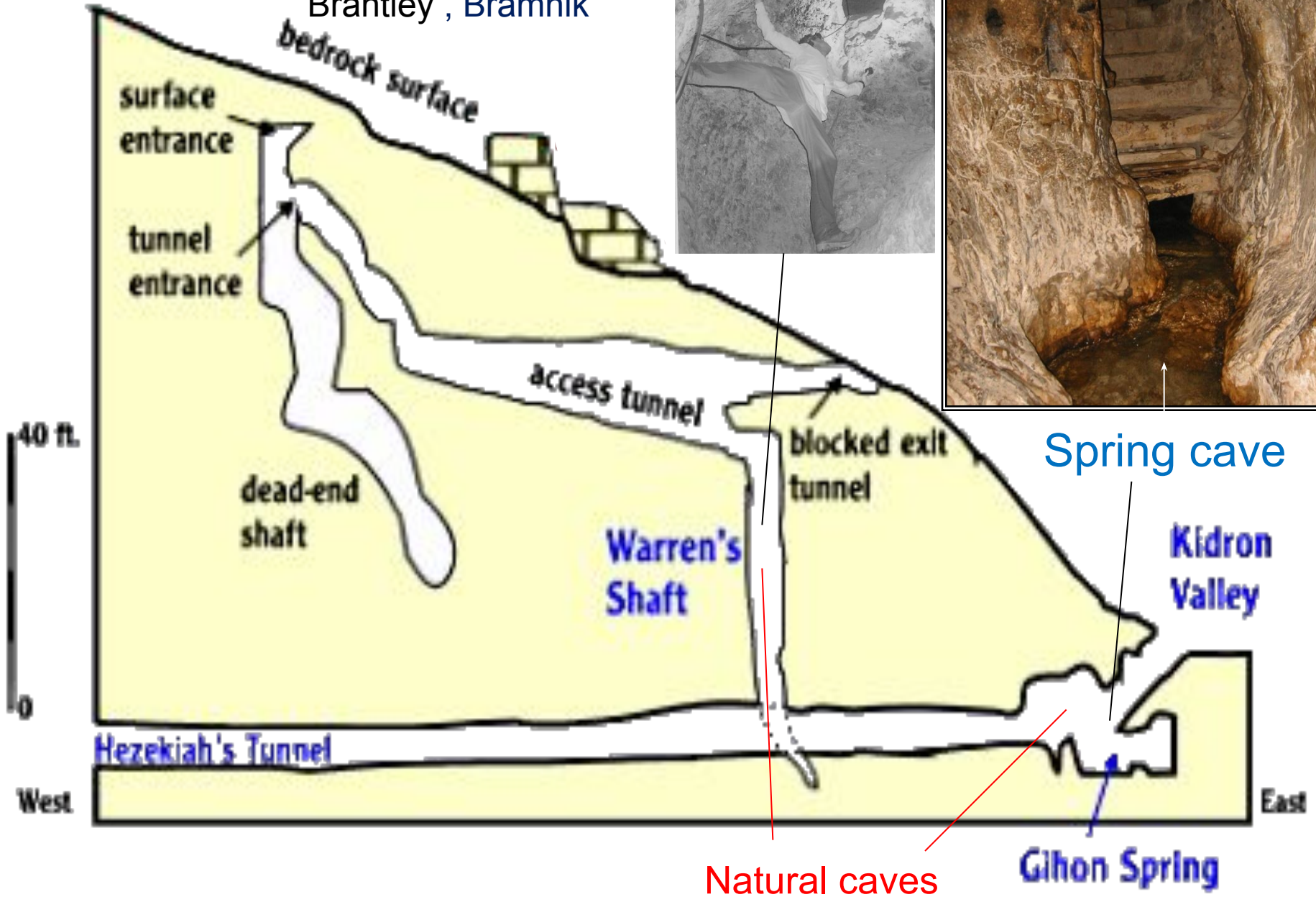
The 'City of David' site was built above the karstic Gihon Spring. Corresponding karst features were adapted for human use since ~3800 years ago



geological section

City of David

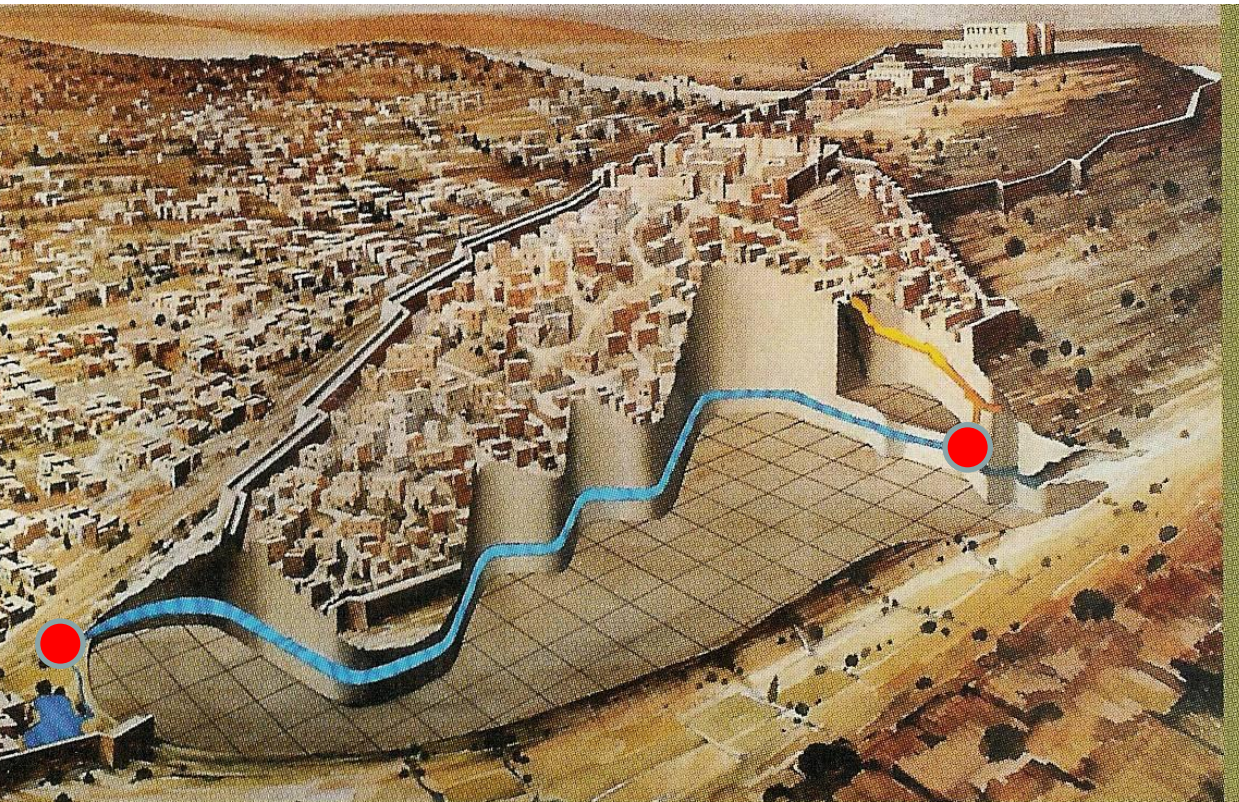
Modified after Frumkin et al. Nature 2003, Brantley, Bramnik



ראשי פרקים

- תיארוך נקבת השילוח ומפעלי המים הסמוכים – (שיטות רדיומטריות, ארכיאולוגיות ויחסיות)
- שיטת החציבה:
 - איך נפגשו החוצבים?

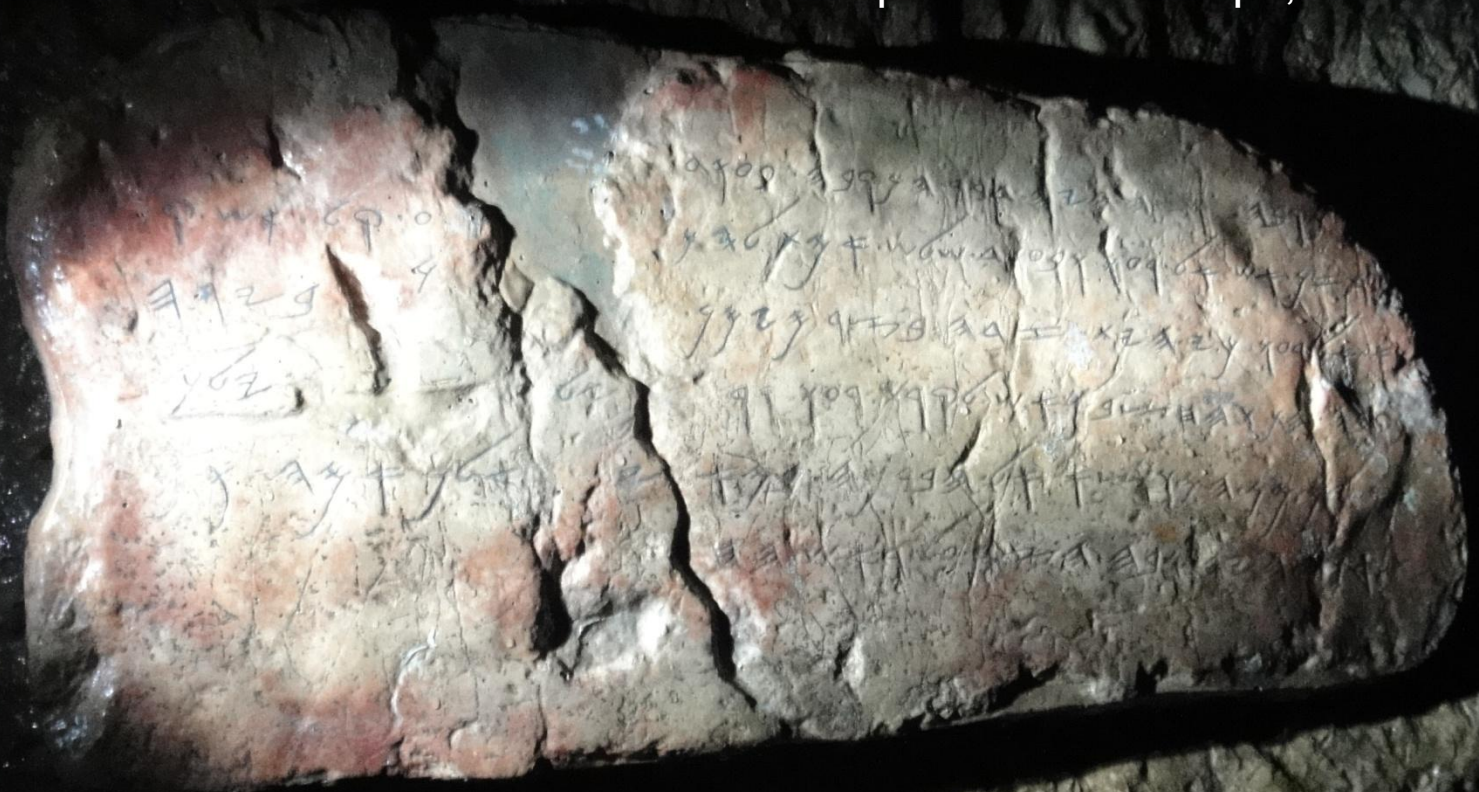
- סיבת הפיתולים
- (תצפית וניסויים)



ניתוח מצויין של הנושא עשה לאחרונה אשר גרוסברג (2011), כולל סקירת ספרות

התיארוך המקובל של נקבת השילוח לחזקיהו מסתמך על כתובת השילוח ופסוקים מהתנ"ך:

כתובת השילוח שנמצאה סמוך למוצא הנקבה אל בריכת השילוח:
אין בכתובת שם, אך היא מתאימה לתקופת הברזל 2



מלכים ב' כ':

מפעלי המים המתועדים ביותר בתנ"ך הם של חזקיהו

וְיִתֵּר דְּבָרֵי חֲזַקְיָהוּ²⁰

וְכַל־גְּבוּרָתוֹ וְאֲשֶׁר עָשָׂה אֶת־הַבְּרִכָּה וְאֶת־הַחֲתָעָלָה וַיָּבֵא אֶת־
הַמַּיִם הָעִירָה הֵלְאֵהֶם בְּתוֹכָם עַל־סֵפֶר דְּבָרֵי הַיָּמִים לְמַלְכֵי
יְהוּדָה:

אבל, האם ניתן לקשור פסוקים אלה בוודאות למפעל מים מסוים מתוך אלה שהתגלו בירושלים?

A tale of two cities

ירושלים

נינה

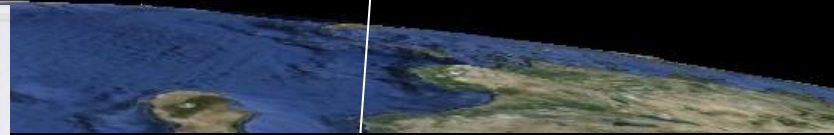


Image © 2010 DigitalGlobe
© 2010 Cnes/Spot Image

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

© 2005

החפירות בארמון סנחריב בנינוה: גילוי תבליט קרב לכיש



יהודים שנשבו
על ידי סנחריב
עוזבים את
ביתם בלכיש:
מתוך התבליט
בארמון סנחריב



56. Excavation of Sennacherib's palace. Layard's method was to dig tunnels along the walls of sculptured slabs in order to avoid the work and expense involved in digging the entire building from above.

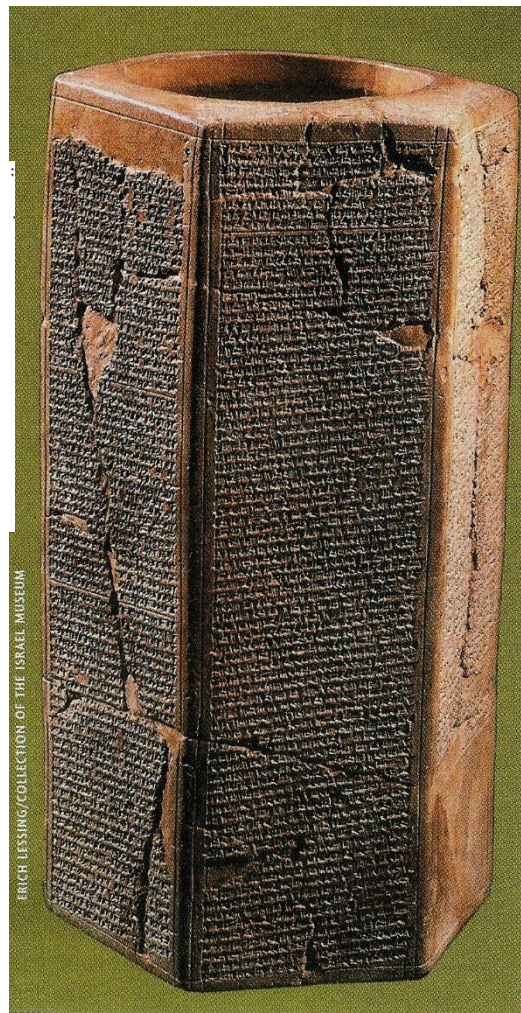
מה קרה בירושלים?

בַּלַּיְלָה הַהוּא וַיֵּצֵא מֶלֶךְ יְהוּדָה וַיֵּךְ בְּמַחֲנֵה אַשּׁוּר מֵאֵה
שְׁמוֹנִים וַחֲמִשָּׁה אֲלָף וַיִּשְׁכַּיְמוּ בַּבֶּקֶר וְהָנִה כָּל־פְּגָרִים מֵתִים:
וַיִּסַּע וַיֵּלֶךְ וַיֵּשֶׁב סְנַחְרִיב מֶלֶךְ-אַשּׁוּר וַיֵּשֶׁב בְּנִינוּה:

מלכים ב יט

מנסרת סנחריב

אשר לחזקיהו היהודי אשר לא נכנע לעולי, את ארבעים ושש עריו הבצורות המוקפות חומה, יחד עם הערים הקטנות שבסביבותיהן, אשר לא יימנו מרוב — בעזרת סוללות, כרים שקורבו [לחומות], בהסתערות חיל רגלים, בפרצים ובמחתרות הקפתי ולכדתי. 200,150 נפש, קטן וגדול, איש ואשה, סוסים, פרדים, חמורים, גמלים, בקר וצאן עד אין מספר לקחתי שלל. אותו עצמו סגרתי כציפור כלוב בתוך ירושלים עיר מלכותו. שפכתי סוללות [על עירון] ואת היציאה משער עירו עשיתי לתועבה[?].



It is no easy task, either, to try to assign a convenient date to the inscription. The assumption, which has been generally admitted without discussion, that it is contemporary with the execution of the tunnel, can by no means be correct, since a certain time must have necessarily elapsed before a report on the work was prepared and had become part and parcel of the royal annals. To be sure, the Recorder, *mazkīr*, who was in charge of writing down the annals, must have

Della Vida 1968

Was the Siloam Tunnel Built by Hezekiah?

By John Rogerson and Philip R. Davies

האם נקבת השילוח היא
תעלת חזקיהו?
עציון 1992



חוקרים שונים הטילו
ספק בקשר בין חזקיהו
לנקבת השילוח או
לכתובת השילוח

The Why, How, and When of the Siloam Tunnel Reevaluated

Sneh et al., 2010

המטרה: תיארוך רדיומטרי של נקבת השילוח

Radiometric dating of the Siloam Tunnel, Jerusalem

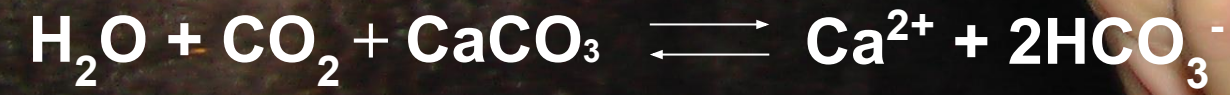
Amos Frumkin¹, Aryeh Shimron² & Jeff Rosenbaum³

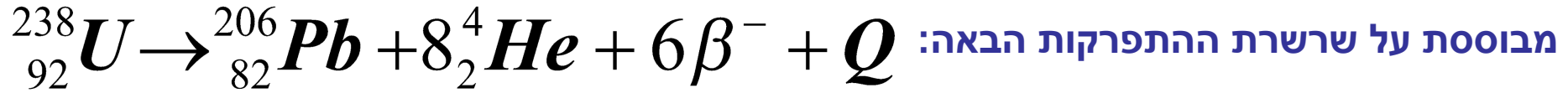
NATURE | VOL 425 | 11 SEPTEMBER 2003



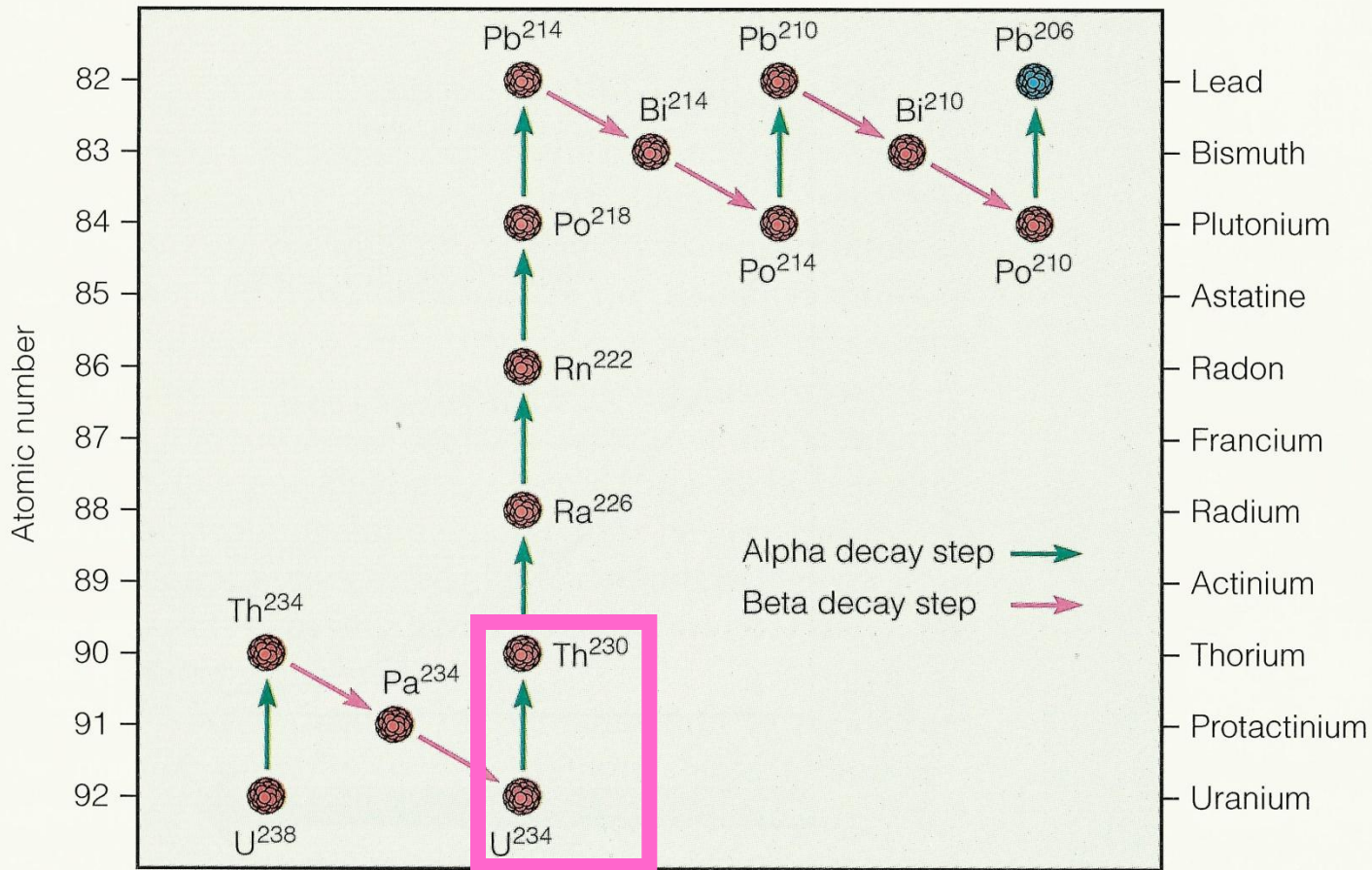
נטיף בנקבת השילוח: נוצר אחרי

חציבת הנקבה

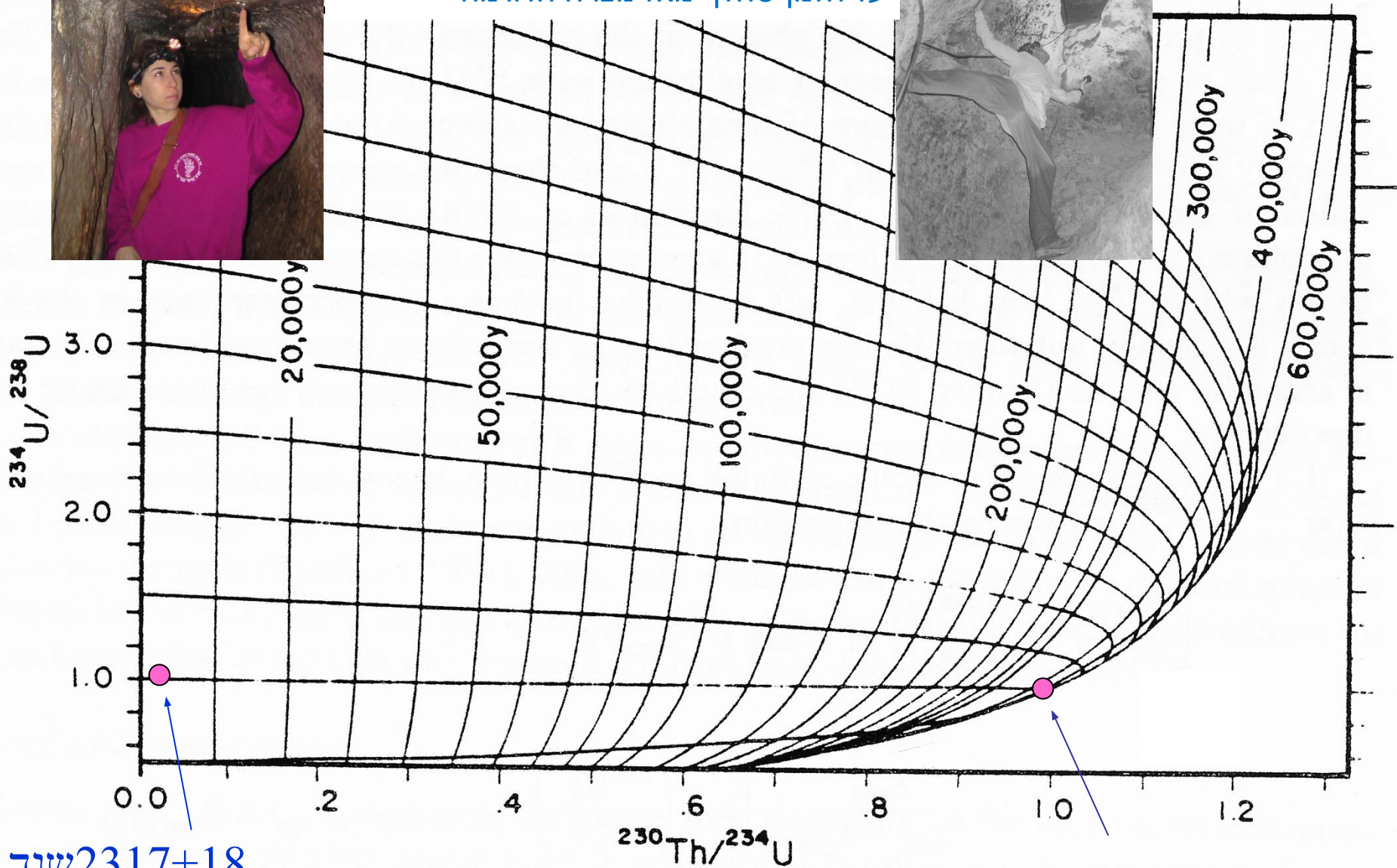
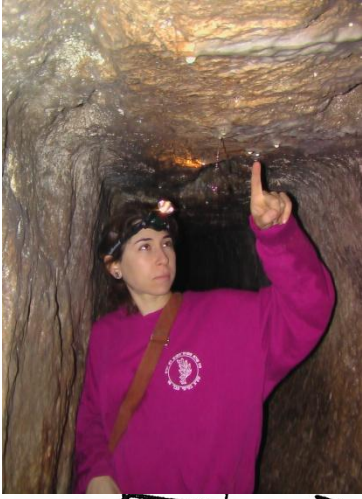




שבמהלכה נוצרים גרעיני בת רדיואקטיביים וביניהם ^{234}U ($\tau_{1/2} = 248\text{ky}$) ו- ^{230}Th ($\tau_{1/2} = 75\text{ky}$)



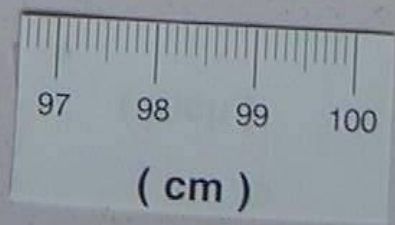
במשך הזמן אורניום 234 מתפרק לתוריום 230. היחס ביניהם גדל משמאל לימין ומעיד על הזמן שחלף מאז נוצרה הדגימה



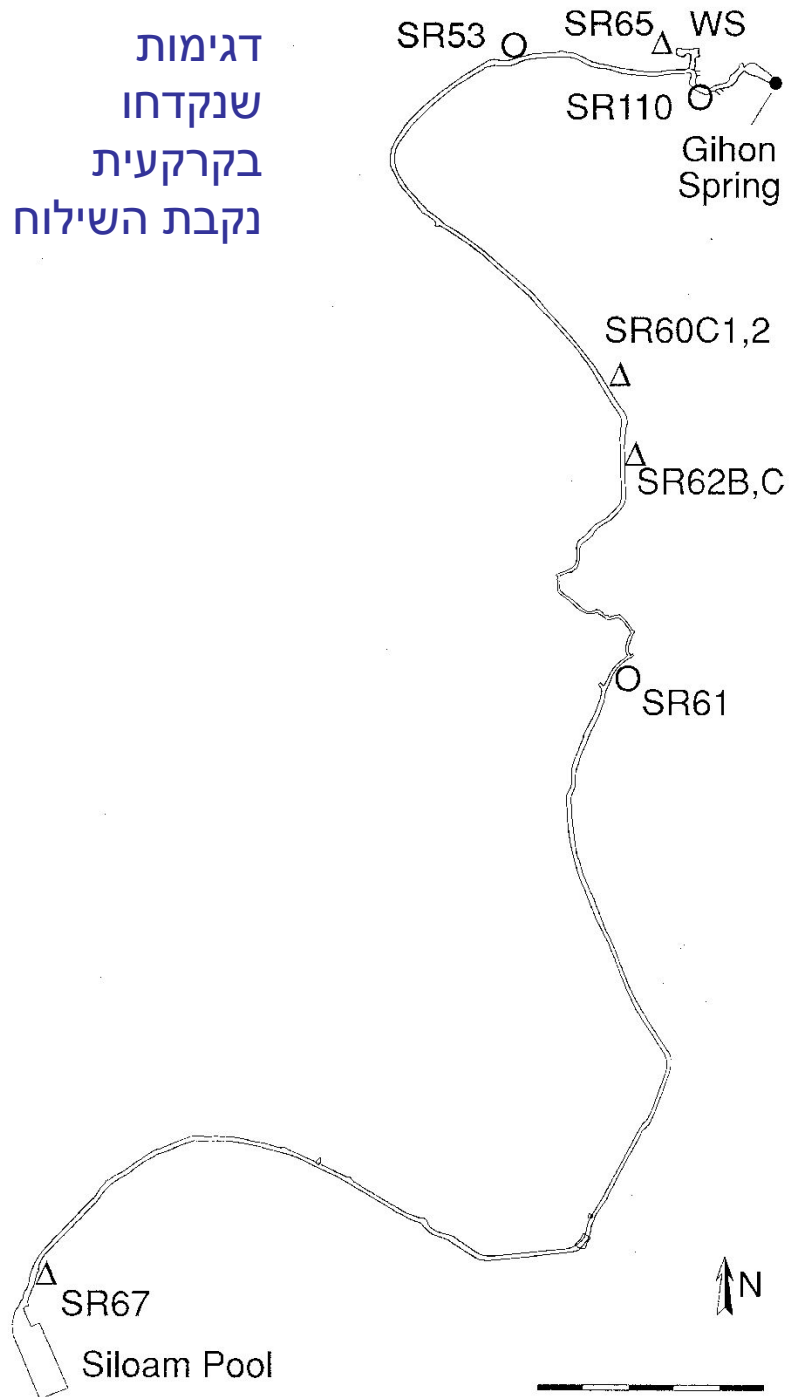
2317±18 שנה

נטיף בנקבת השילוח

קרומ קלציט בפיר וורן: קדום מאד, לפני פעילות האדם



דגימות
שנקדחו
בקרקעית
נקבת השילוח



silty tufa

modern black plaster

Mameluke coarse plaster

Byzantine limestone clast

0

5 cm

Iron Age plaster

piece of charcoal

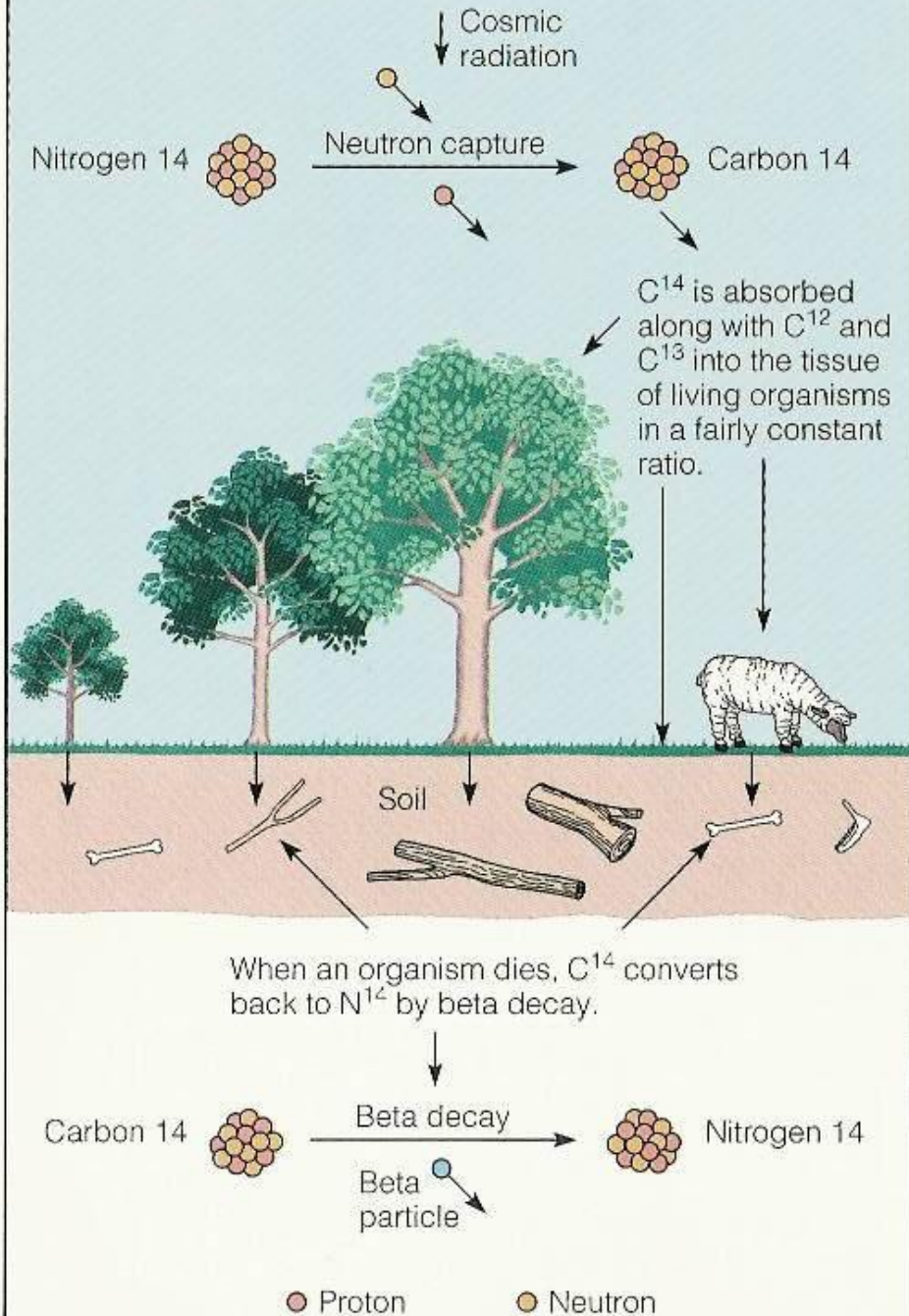
limestone bedrock

חומר אורגני בטיח תוארך בעזרת פחמן 14



COURTESY AMOS TRUMKIN

תיארוך חומר אורגני מהטיח בעזרת פחמן 14

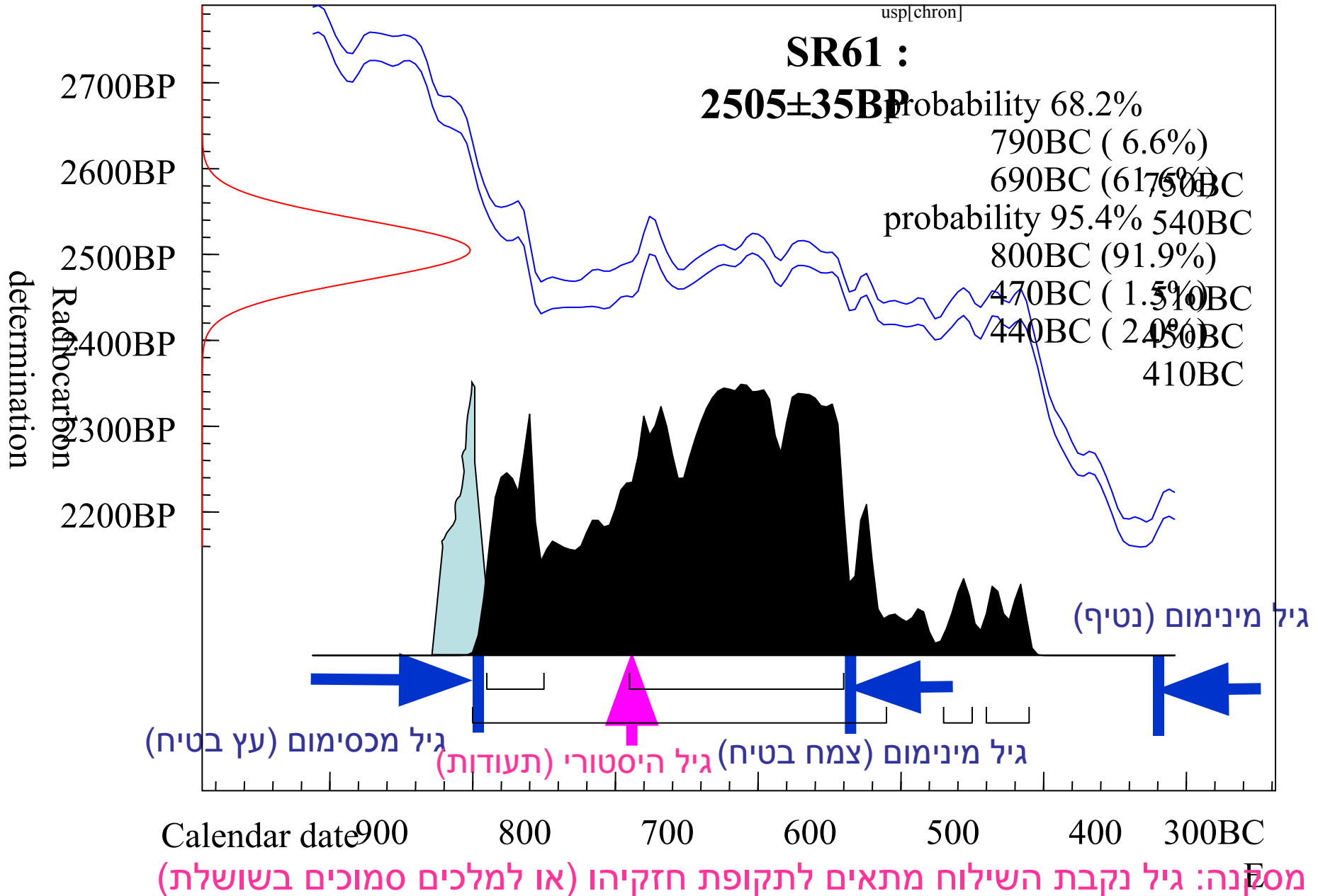


גילי פחמן 14 של חומר אורגאני מהטיח בנקבת השילוח

Field no.	Lab no.	Sample description	$\delta^{13}\text{C}$	^{14}C date (years BP)	Calibrated age 1 σ range
SR53*	OxA-8522	Piece of wood, ST	-26.0	2620 \pm 35	822-796 BCE
SR61*	OxA-8523	Short-lived plant, ST	-25.0	2505 \pm 35	790-760; 690-540 BCE
SR110*	OxA-8990	Piece of wood, ST	-27.5	605 \pm 65	1300-1405 CE

תיארוך צמח חד שנתי מהטיח הקדום בנקבת השילוח והשוואתו לגילים אחרים

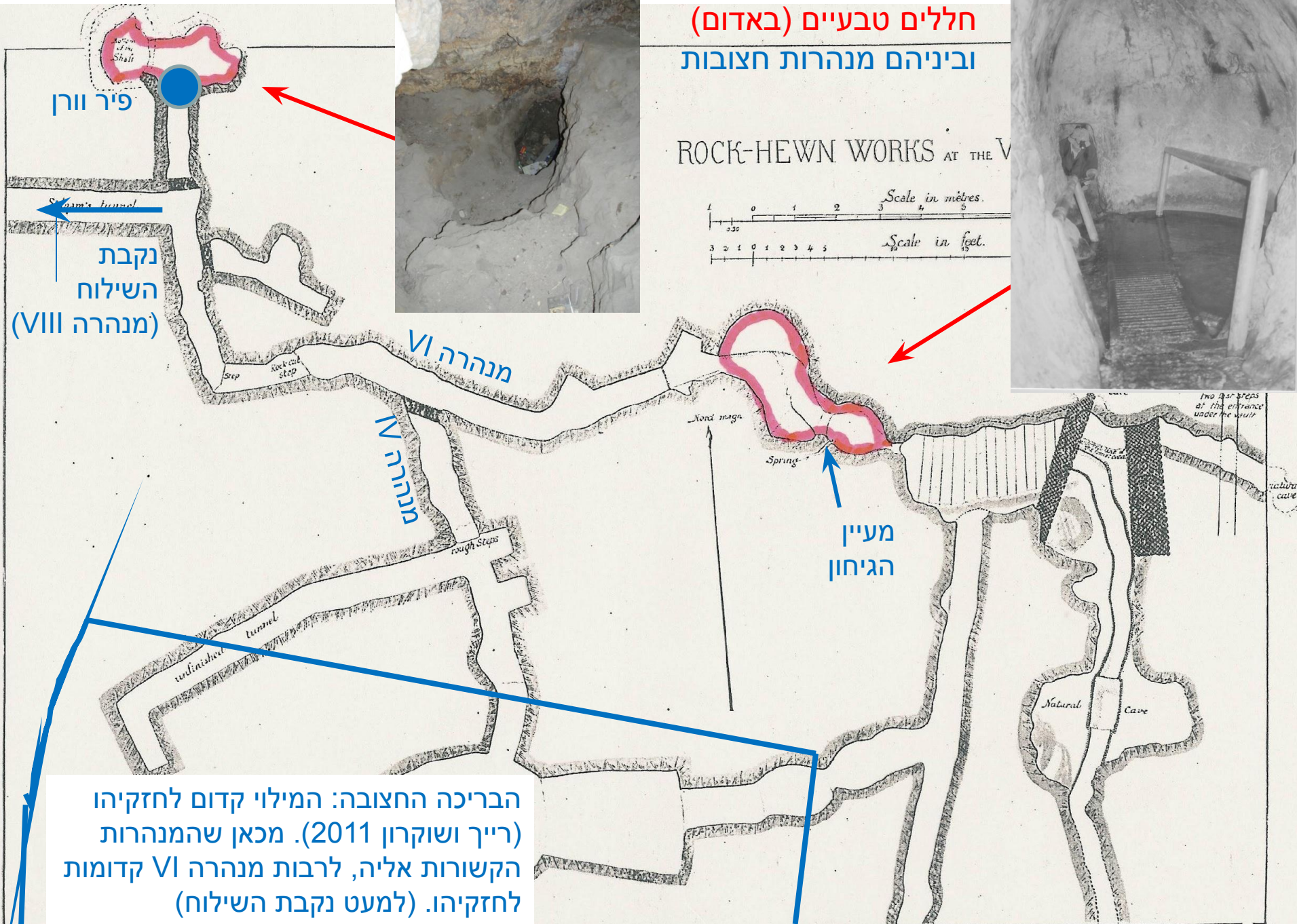
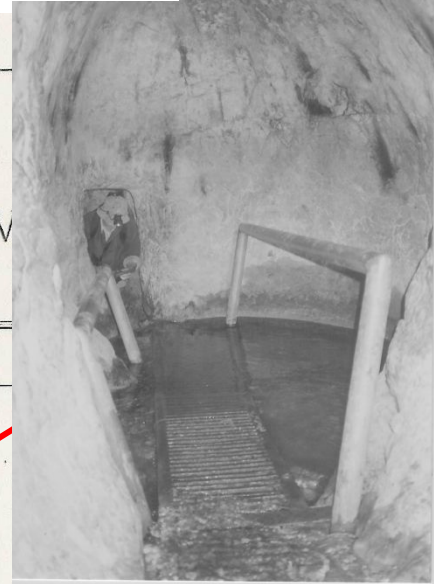
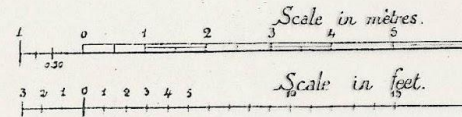
Atmospheric data from Stuiver et al. (1998); OxCal v3.5 Bronk Ramsey (2000); cub r:4 sd:12 prob



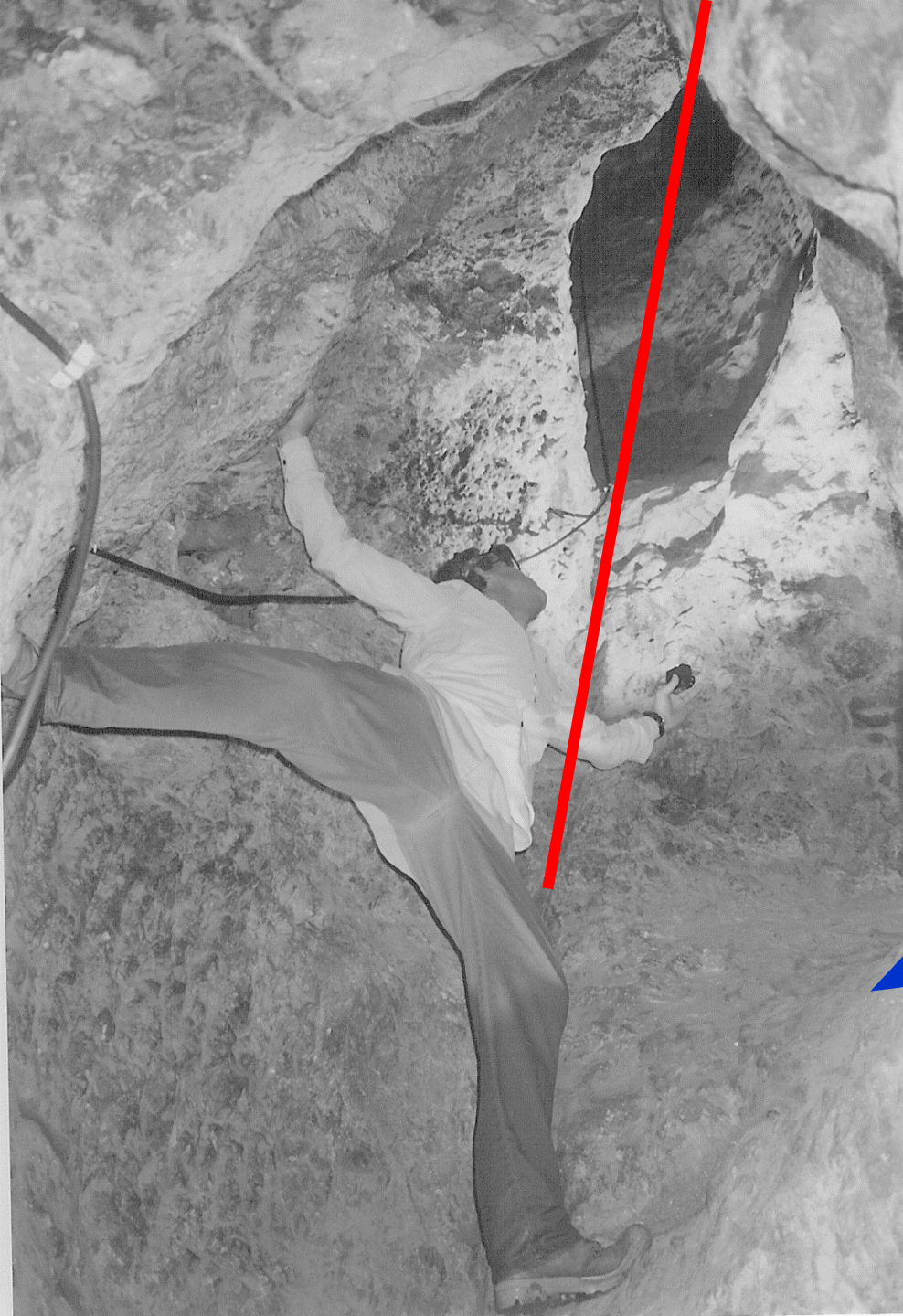
הגיל הנ"ל איננו מתייחס למערכת המנהרות הסמוכות למעיין הגיחון, שהינה קדומה יותר

חללים טבעיים (באדום)
ובניהם מנהרות חצובות

ROCK-HEWN WORKS AT THE V



הבריכה החצובה: המילוי קדום לחזקיהו (רייך ושוקרון 2011). מכאן שהמנהרות הקשורות אליה, לרבות מנהרה VI קדומות לחזקיהו. (למעט נקבת השילוח)



פיר וורן: קמין טבעי (פיר קארסטי)
שהתפתח לאורך סדק אנכי.
קרום על הקיר תוארך למאות אלפי
שנים

Crust > 400 kyr
(Th/U age)

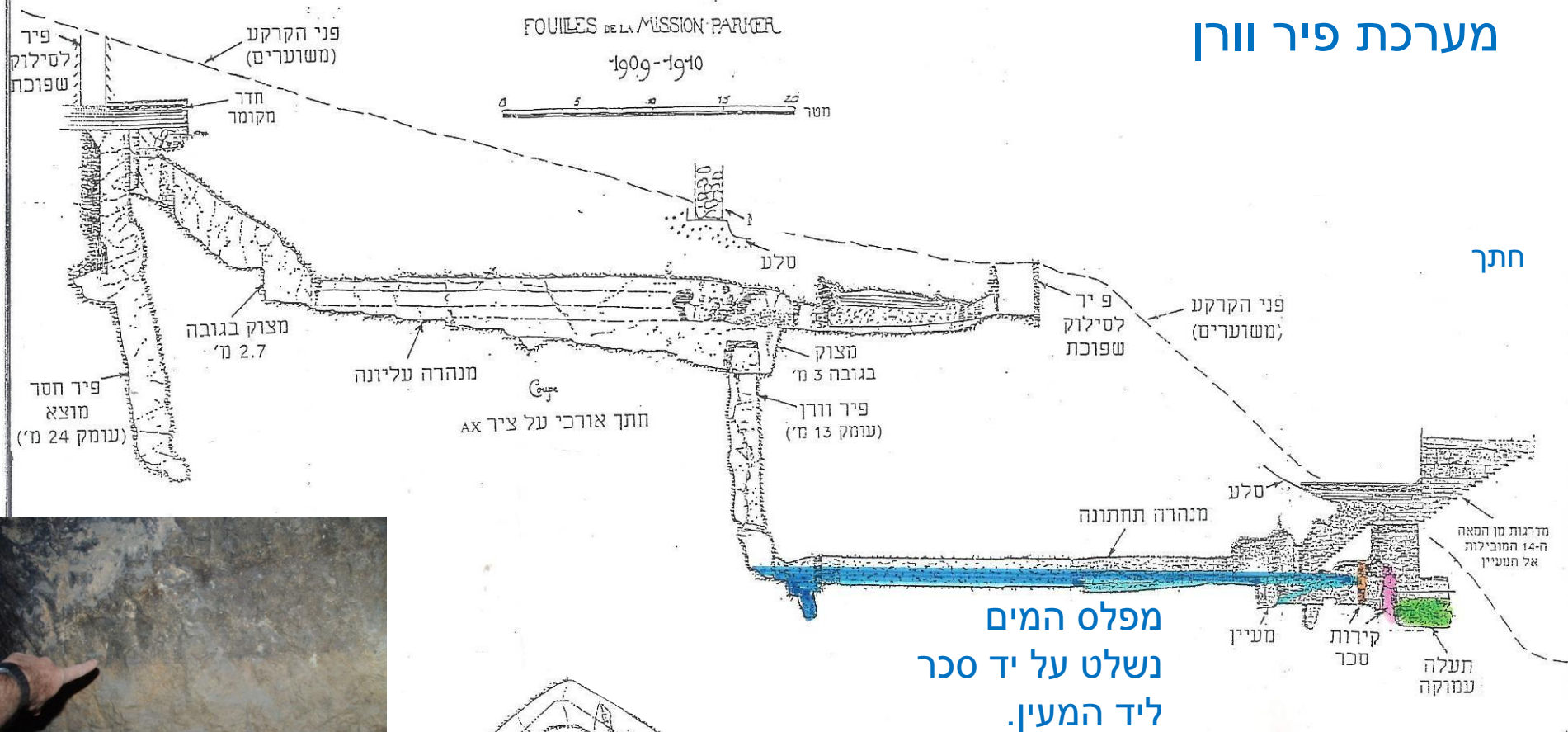
LE TUNNEL D'OPHEL

FOUILLES DE LA MISSION PARKER

1909-1910



מערכת פיר וורן



חתך

מפלו המים
נשלט על ידי סכר
ליד המעיין.



סימני מפלו
המים בתחתית
פיר וורן.



תוכנית

שילוב לוחות של וונסאן
(1912)XVI ו-LXII (1954)
(כולל שינויים מזעריים)

מנהרה VI הובילה את מימי מעין הגיחון
לתחתית פיר וורן

הגבהה מאוחרת של מנהרה VI

מפלס מים שאיפשר למים
להגיע לתחתית פיר וורן

חציבה מקורית של
מנהרה VI:
חתך רוחב מעוגל

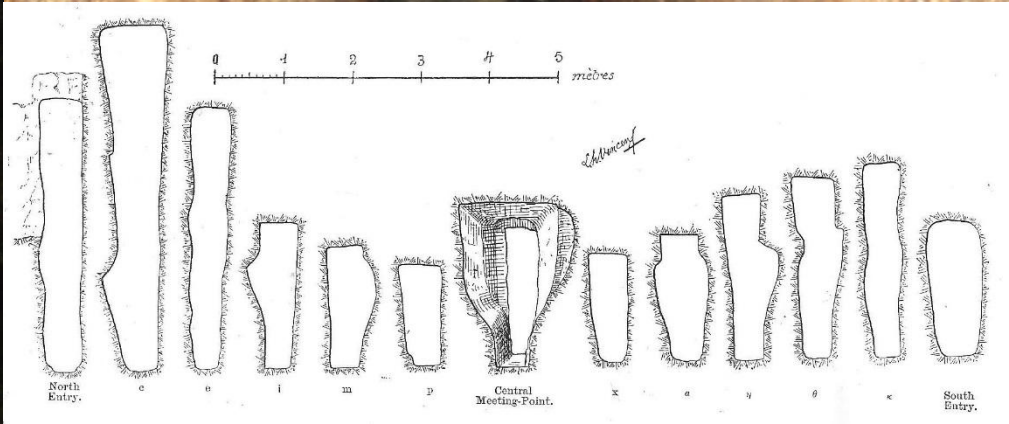


למנהרה VI חתך רוחב מעוגל

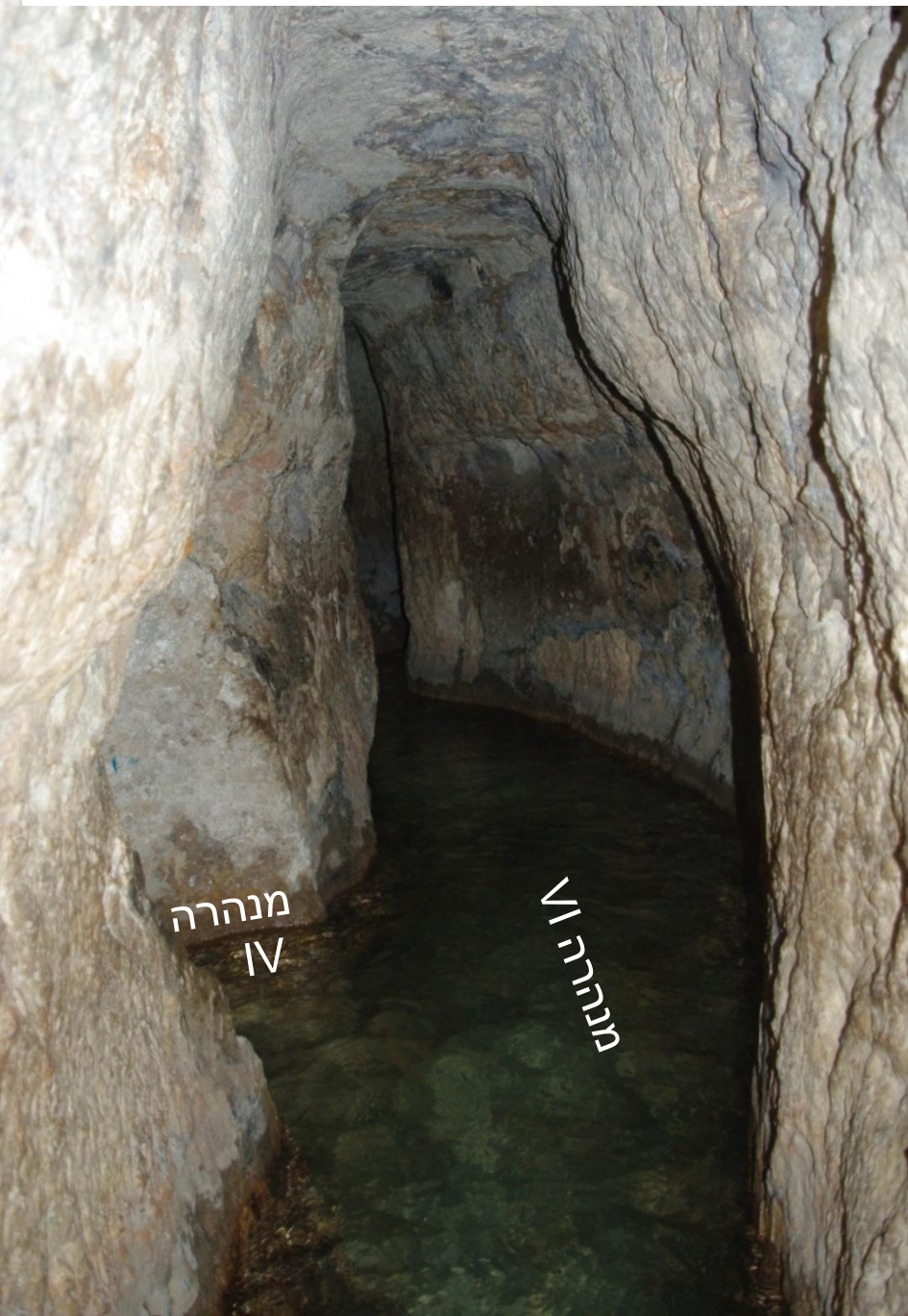


מדובר בשני מפעלים שונים מגיל שונה

לנקבת השילוח חתך רוחב מלבני



אין הבדל במאפייני מנהרה VI לפני ואחרי הצומת עם מנהרה IV. מכאן שמנהרה VI נחצבה בבת אחת



כפי שהוצע ע"י וורן ווינסאן, המטרה המסתברת
ביותר להקמת מערכת פיר וורן הינה מפעל מים
מוסתר ומוגן היטב.

• המים הוזרמו מהמעייין במנהרה חצובה (VI)
לתחתית הפיר הטבעי.

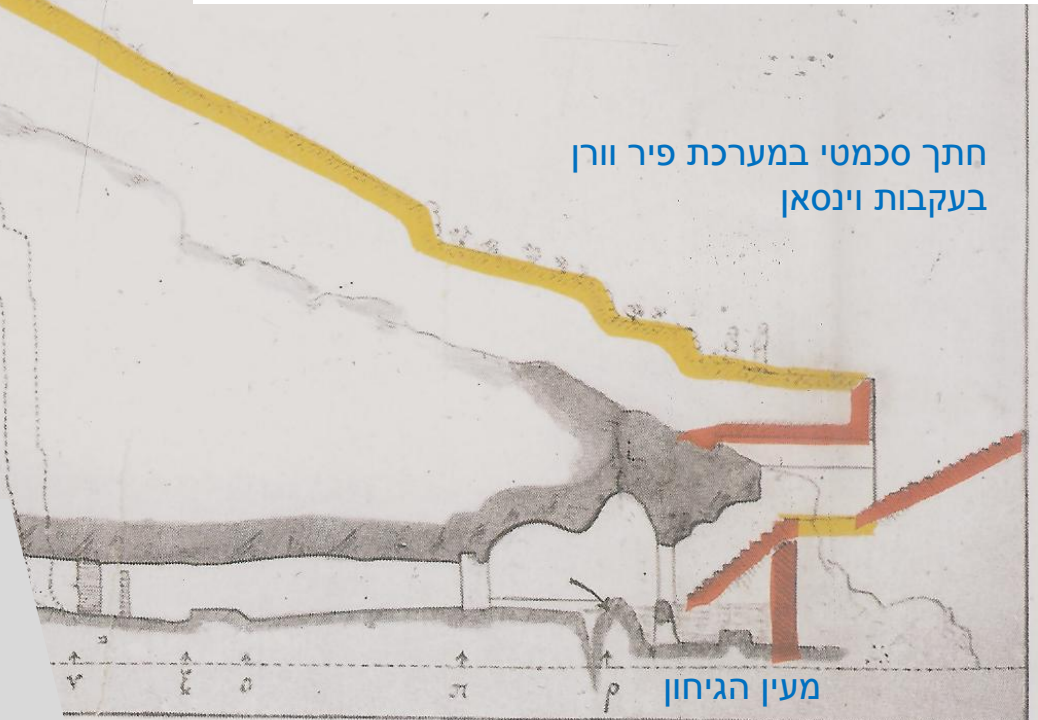
• ניסוי שאיבה שערכנו הראה כי אין כל בעיה לשאוב
מים דרך הפיר.

• המים נשאבו כנראה דרך הפיר, והובלו לעיר
במנהרה המשופעת.

• כל המערכת מוסתרת ומוגנת היטב.
• המפעל נחצב לפני תקופת חזקיהו



חתך סכמטי במערכת פיר וורן
בעקבות וינסאן



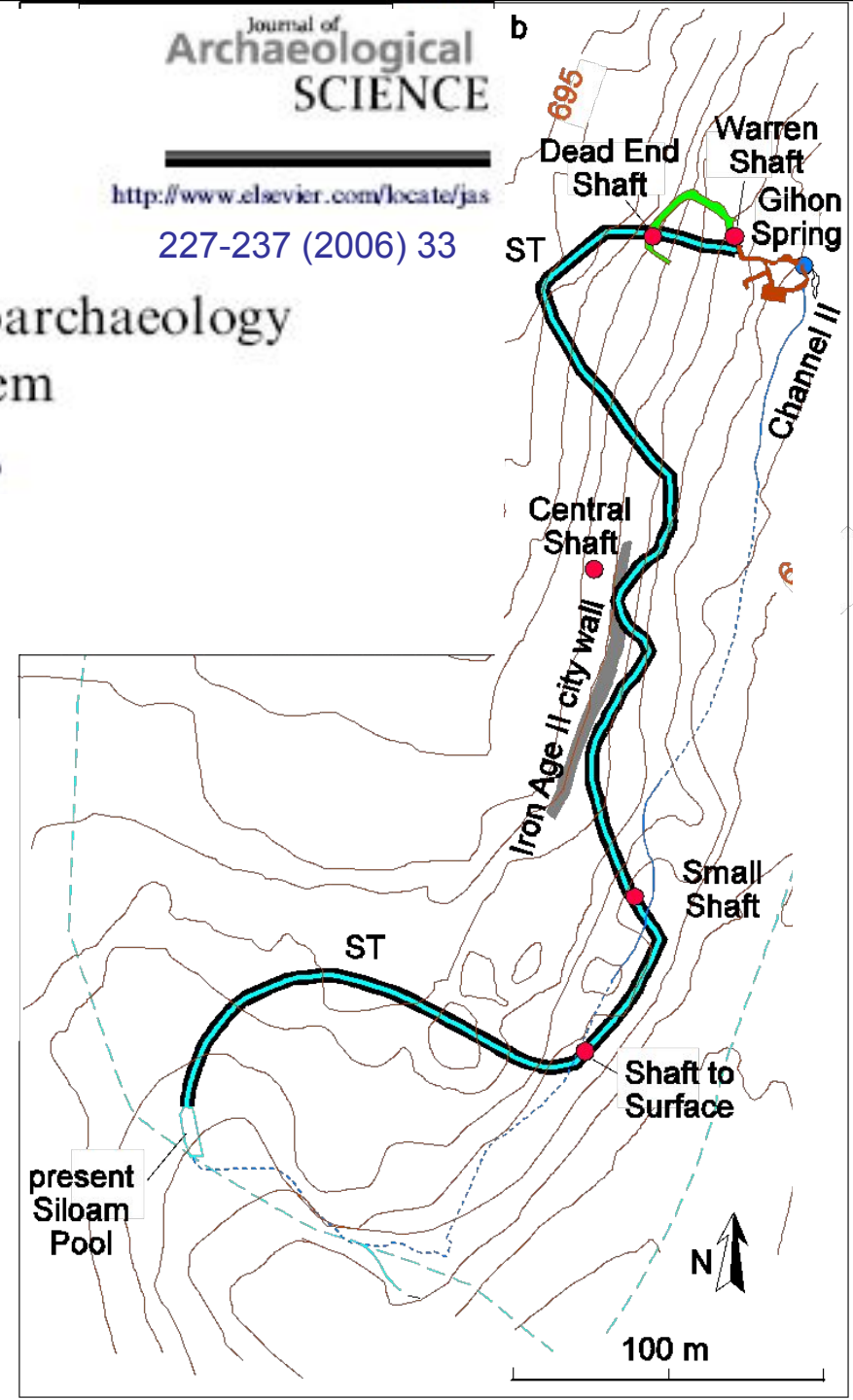
Tunnel engineering in the Iron Age: geoarchaeology of the Siloam Tunnel, Jerusalem

Amos Frumkin^{a,*}, Arveh Shimron^b

מדוע נקבת השילוח מפותלת:

מעל 500 מ' במקום כ-300 מ' בקו אוויר?

איך נפגשו שתי קבוצות החוצבים?



הסברים שהוצעו לנפתולי נקבת השילוח

טעויות בגלל חוסר מיומנות (Conder 1882)

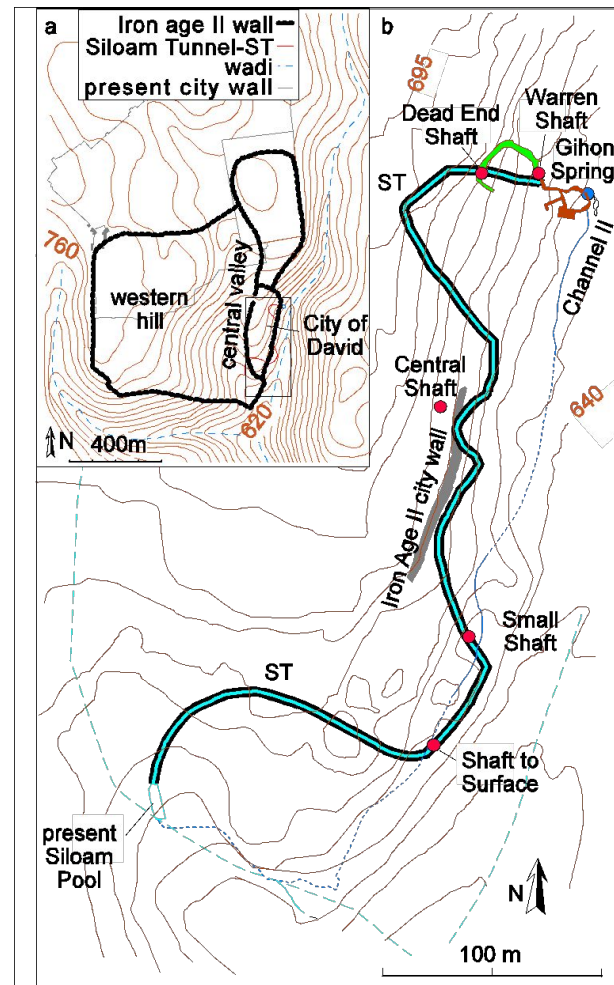
בצפון - התחלה לכיוון בורות; בדרום - עקיפת קברי המלכים
(Clermont-Ganneau 1897)

מעקב אחרי מחילה קרסטית לכל האורך (Sulley 1929,
[followed by others

התחלה לכיוון מרכז העיר משיקולי בטחון, ואז בריחה מסלע קשה
(הקר 1956)

שאיפה להגיע לנקודות חשובות לחציבת פירי שאיבה, וחזרה
לשולי הגבעה להכוונה קולית (Shaheen 1979)

מחילות קרסטיות בכיוון מזרח-מערב לאורך הקטע הצפוני
והדרומי, ואחר כך שגיאות במדידה (Rosenberg 1998)



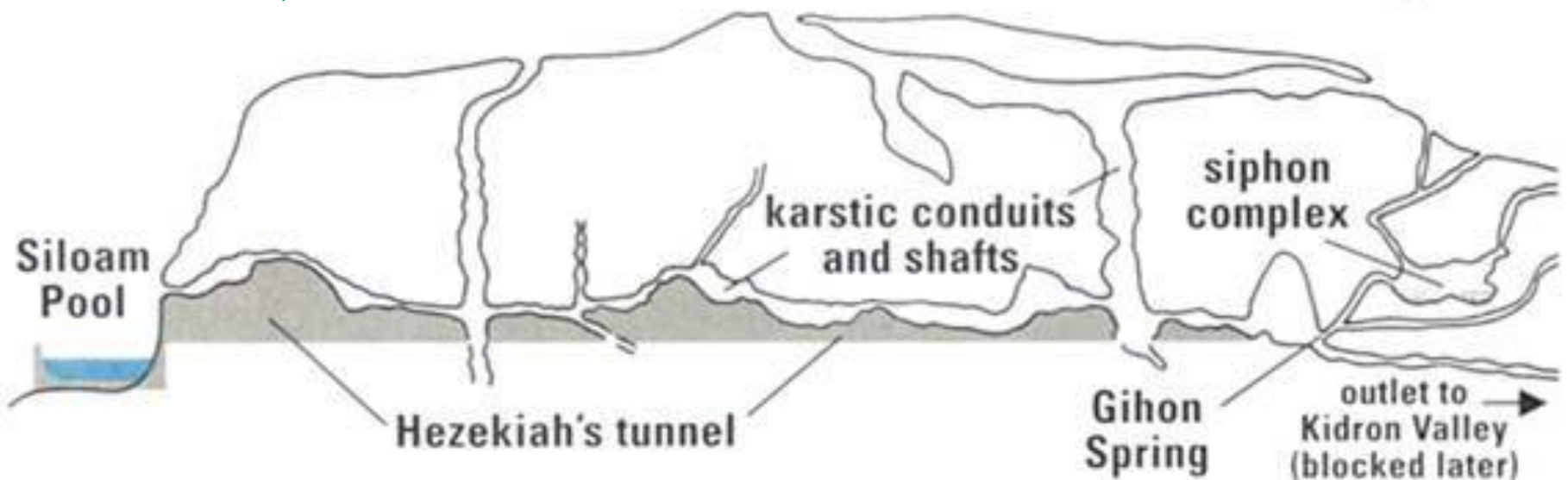
MR. HENRY SULLEY, architect, of 21, Arboretum Street, Nottingham, writes to the P.E.F. as follows :—

“ My attention has been called to the interesting articles which are appearing in *The Daily Telegraph* upon ‘ The Bible and the Spade.’

“ A very interesting question has been raised by Mr. Mortlock as to why Hezekiah’s Tunnel took such a circuitous course. I agree with him that neither of the two theories put forward by M. Clermont-Ganneau and Dr. Macalister are a satisfactory explanation. Since those who have inspected the tunnel mention a cleft in the rock at the point where the excavators met, (it seems to me that this cleft is the explanation of the course taken by the excavators in forming this tunnel.) Probably the cleft extended from the Virgin’s Fountain to the Pool of Siloam, and a small quantity of water would at times trickle through ; if so, Hezekiah’s workmen, commencing at each end, would enlarge this channel to its present dimensions for the purpose he had in view in cutting off the waters from the use of an enemy. Hence its erratic course.

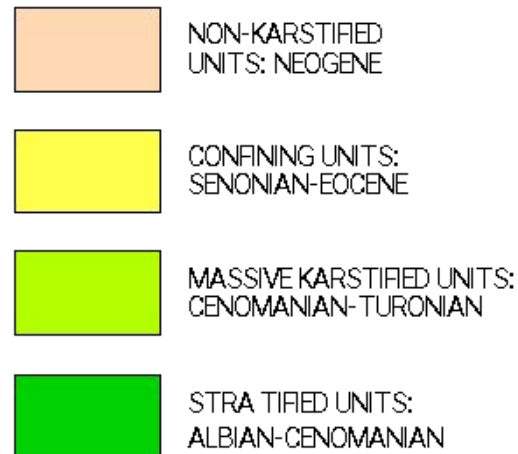
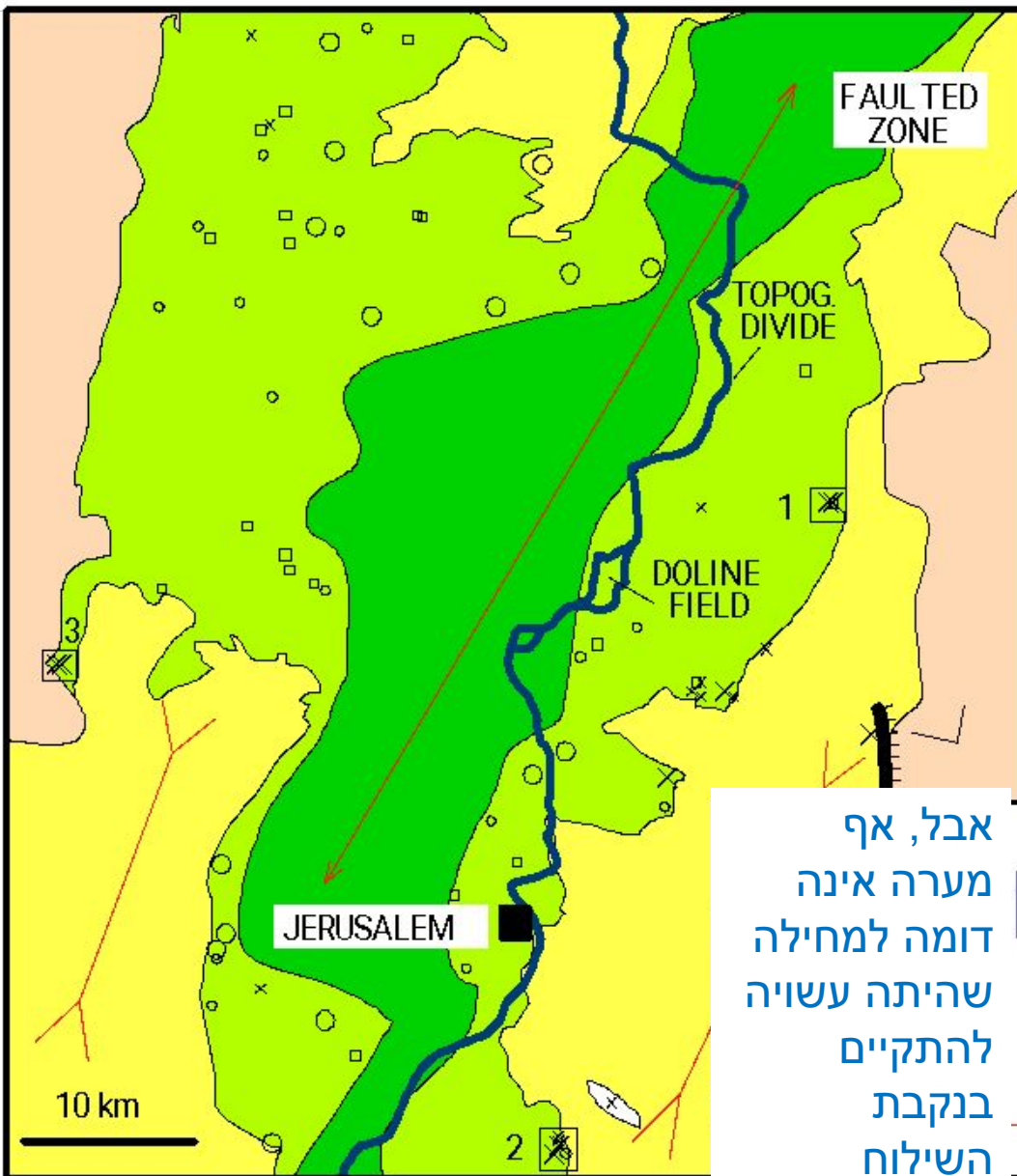
התאוריה הקארסטית קסמה לכותבים רבים שטענו כי נקבת השילוח היא הרחבה של מחילה טבעית קדומה

- Sulley 1929
- Amiran 1968
- Issar 1976
- Hoberman 1977
- Gill 1982,1991,1994,1996,2011
- Ahituv 1992
- Abells & Arbit 1996
- Sneh et al., 2010



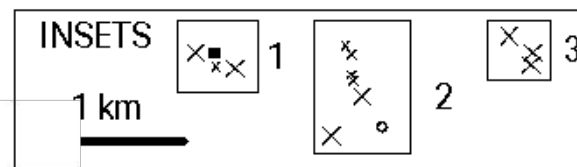
KARST FEATURES AND HYDROGEOLOGY GENERALISED MAP

185



CAVE TYPE	LENGTH/WIDTH
CHAMBER	○ L/W < 3
	◦ 3 < L/W < 5
	◻ 5 < L/W < 20
MAZE	× 20 < L/W < 100
	⊗ 100 < L/W

אבל, אף
מערה אינה
דומה למחילה
שהיתה עשויה
להתקיים
בנקבת
השילוח



115

140

מחילה קארסטית מתפתחת תמיד לאורך סדק או מישור שיכוב (מוליכי מים ראשוניים):
מחילות מים קארסטיות בישראל



נחל תת קרקעי אינו יכול 'להתחבא' בתוך חתך הרוחב של נקבת השילוח.
מישור השיכוב או הסדק המנחה אינם יכולים להעלים





מחילה קארסטית
בשפלה: חיצים מצביעים
על מישור שיכוב מנחה



נקבה שנחצבה לאורך קטע
מהמחילה הקארסטית
בשפלה. המחילה
ומישור השיכוב
נראים בברור בראש הנקבה

נקבת השילוח: חציבה מלבנית,
אין מחילה קארסטית,
ואף לא סדק או מישור שיכוב
שנמשכים לאורך הנקבה

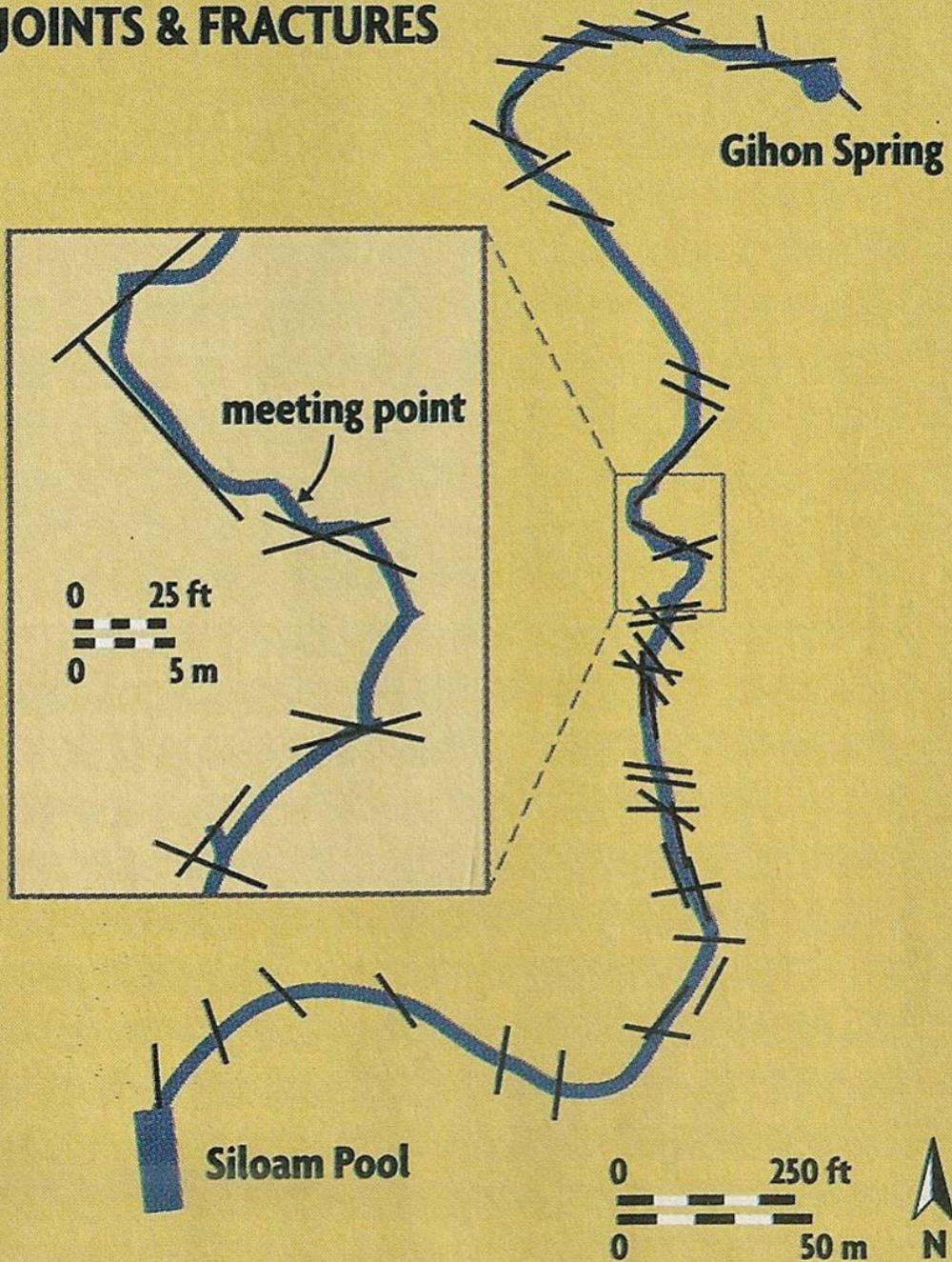




תקרת נקבת השילוח (מבט מלמטה): אין סידוק או מישור שיכוב, יש סימני חציבה



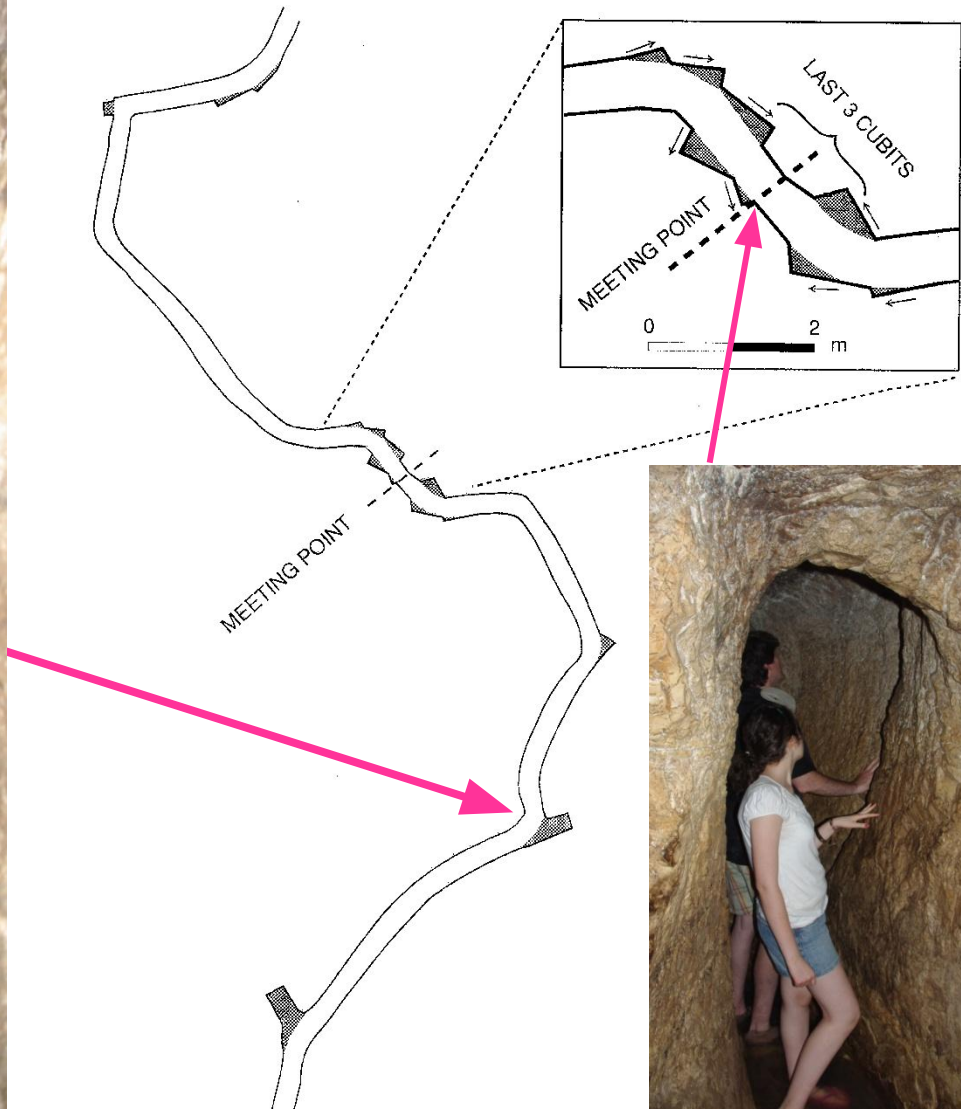
JOINTS & FRACTURES



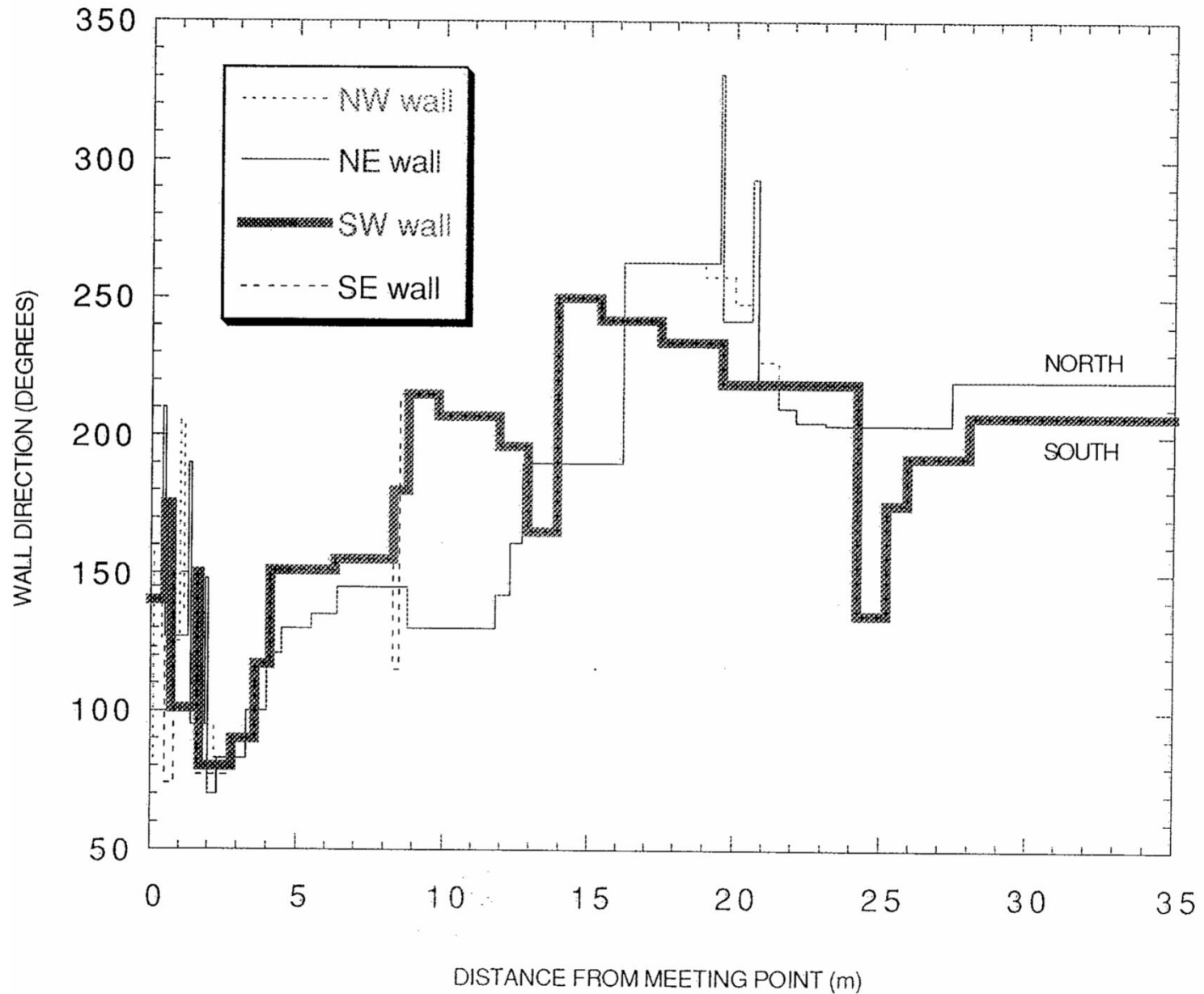
מיפוי סדקים בנקבת השילוח:

הנקבה חוצה סדקים
ולא מתקדמת מרחק ניכר לאורכם

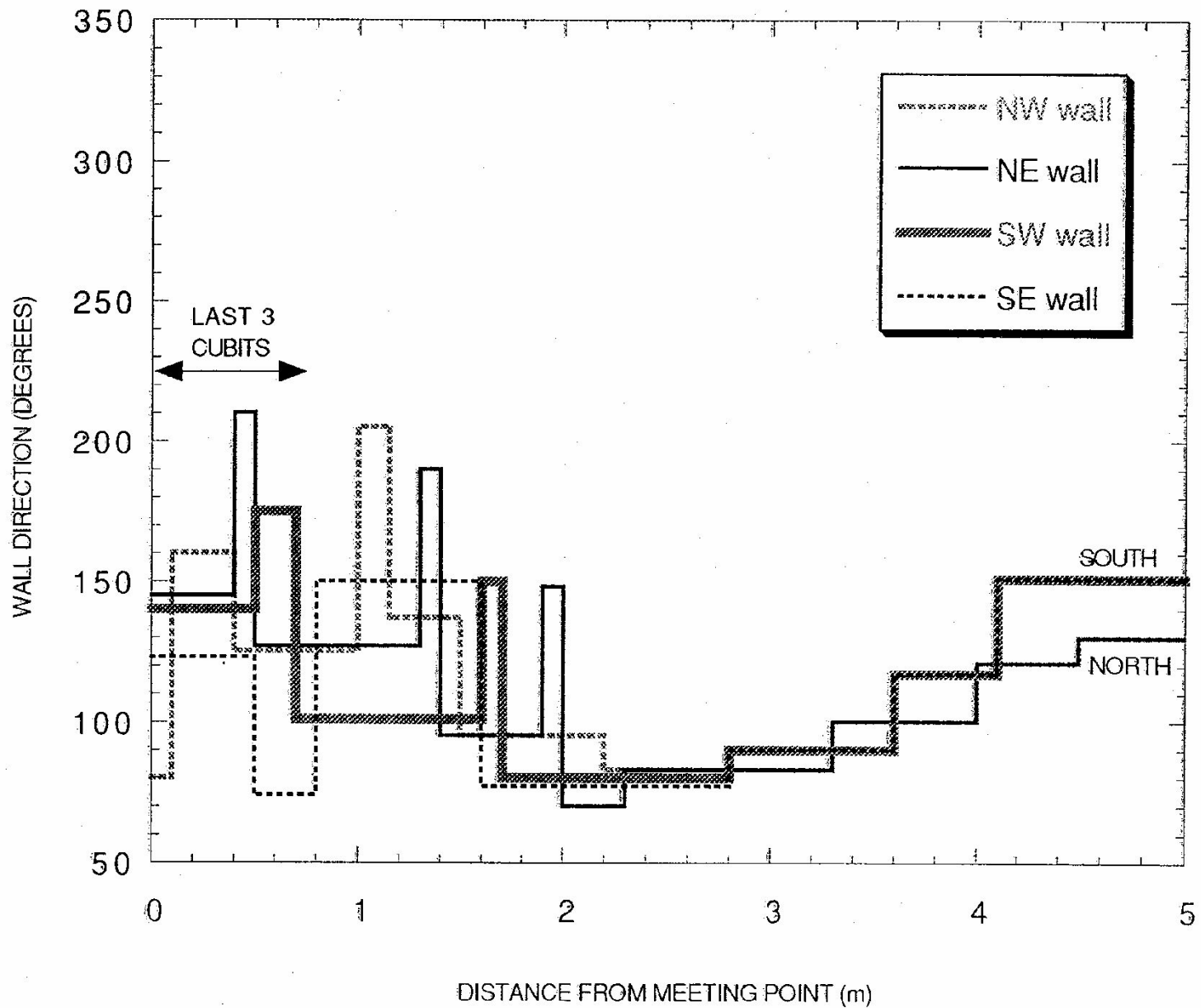
שגיאות ותיקוני כיוון שכיחים בנקבת השילוח, בעיקר סביב מפגש החוצבים.
אין כל סימן לסדק או מישור שיכוב מכון;
אילו היה כזה, האם היו שוגים?

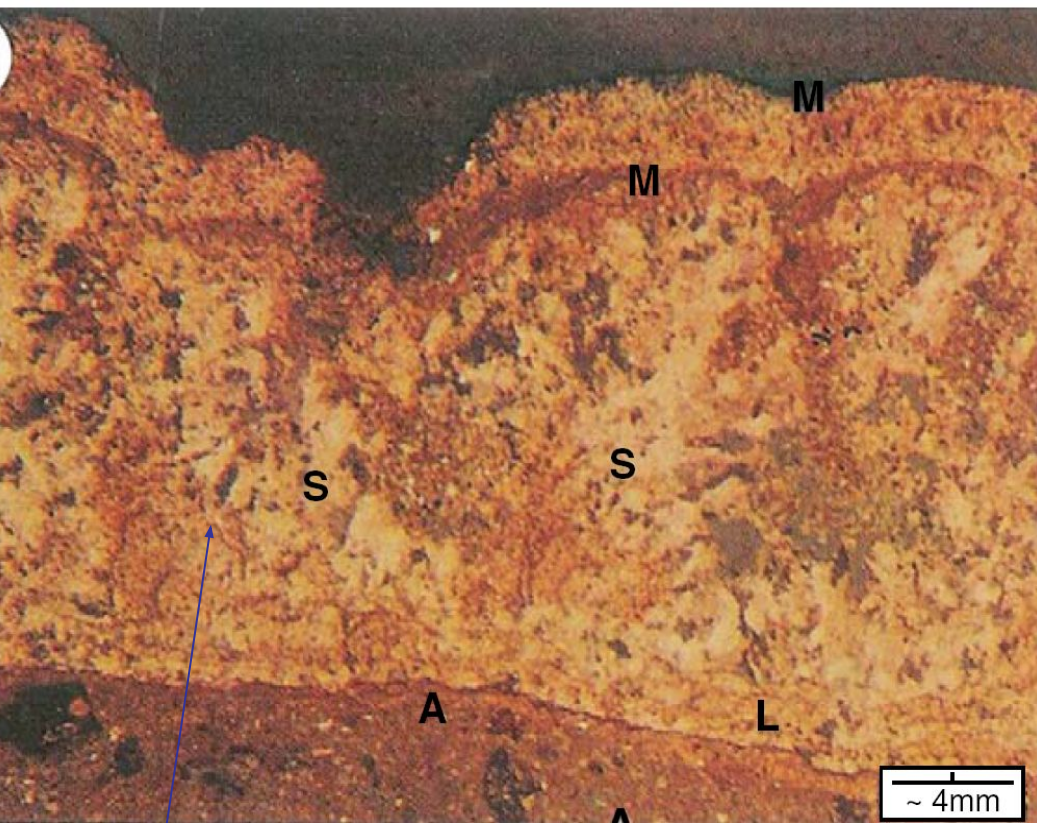


EXCAVATION DIRECTIONS 35 m FROM THE MEETING POINT



EXCAVATION DIRECTIONS 5 m FROM THE MEETING POINT





מעל הטיח הקדום קיים משקע טבעי של מי המעין



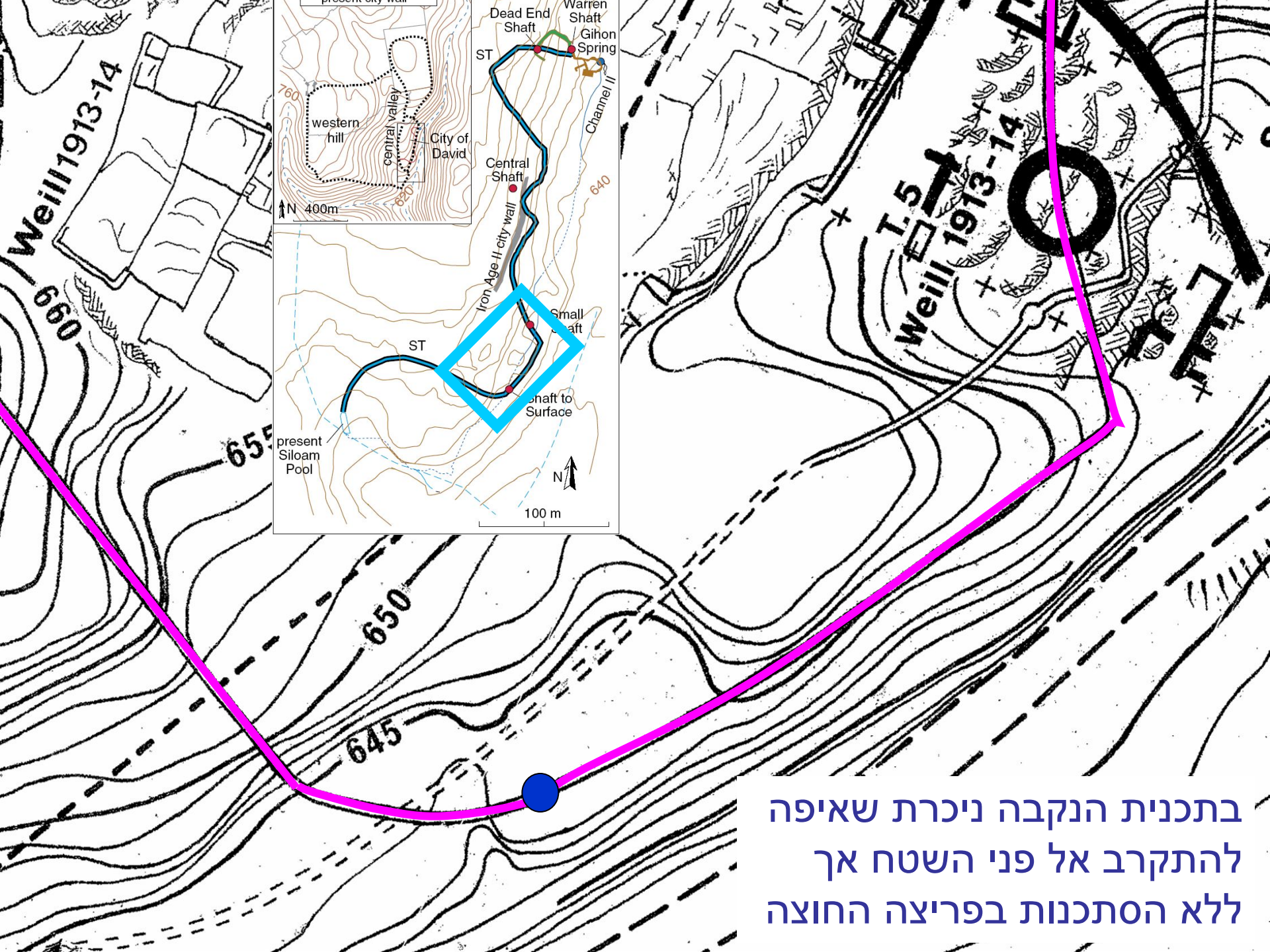
הטיח מונח ישירות על סלע,
 ללא שכבת ביניים של משקע טבעי של מי המעין
 (שהיה עשוי להצביע על זרימה שקדמה לטיח)

דְּבַר הַנִּקְבָּה. וְזֶה הָיָה דְבַר הַנִּקְבָּה. בְּעוֹד אֲמַנְפִּים הַחֲצֵבִים אֶת
הַגְּרִזִּין אֲשֶׁר רָעוּ וּבְעוֹד שְׁלֹשׁ אֲמַת לְהַנְקִיב, נִשְׁמַע קוֹל אֲשֶׁר קוֹ
רָא אֶל רָעוּ, כִּי הָיְתָה זָדָה בְּצִר מִיָּמִן וּמִשְׁמָאל. וּבָיִם הַ
נִקְבָּה הָכּוּ הַחֲצֵבִים אֲשֶׁר לְקֶרֶת רָעוּ, גְּרִזִּין עַל גְּרִזִּין, וַיִּלְכּוּ
הַמַּיִם מִן הַמוֹצָא אֶל הַבְּרִכָּה בְּמַאֲתִים וְאַלְפֵי אֲמָה, וּמִן אֲמָ
ת אֲמָה הָיָה גִבָּה הַצֵּר עַל רֹאשׁ הַחֲצֵבִים

עיקר הכתובת: ארוע המפגש.
האם זה כה חשוב
אילו היתה מחילה טבעית קודם?

כתובת השילוח





בתכנית הנקבה ניכרת שאיפה
להתקרב אל פני השטח אך
ללא הסתכנות בפריצה החוצה

חתך לאורך נקבת השילוח ופני השטח שמעליה

20 m

20 m



פני השטח והנקבה: מפה טופוגרפית

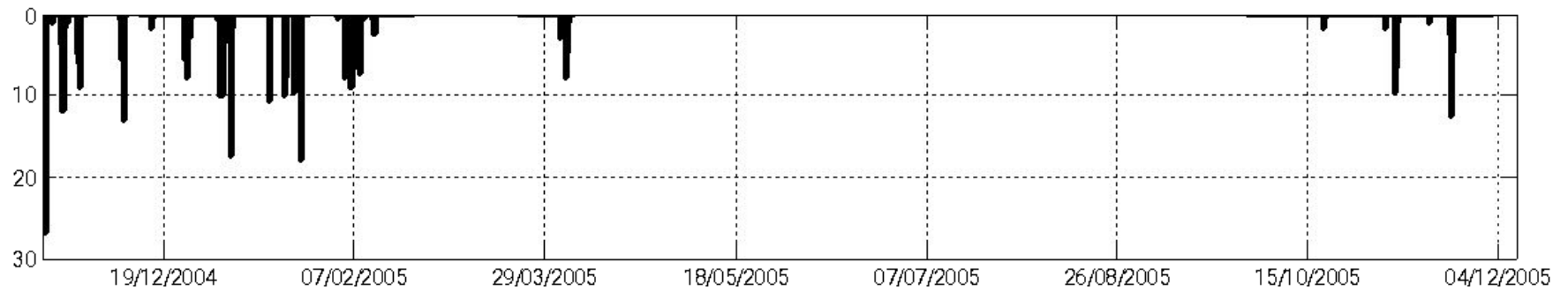
Siloam Pool

Gihon Spring

בתחילה התקדמו החוצבים לעבר מרכז הגבעה. משהבינו שתואי זה יקשה על המפגש, שינו את מסלולם לשולי הגבעה.

התוואי החדש איפשר יצירת קשר אקוסטי עם פני השטח (אותו אימתנו בניסוי), ששימש כנראה להכוונה

Gihon Spring responds within hours to rainfall and human pollution

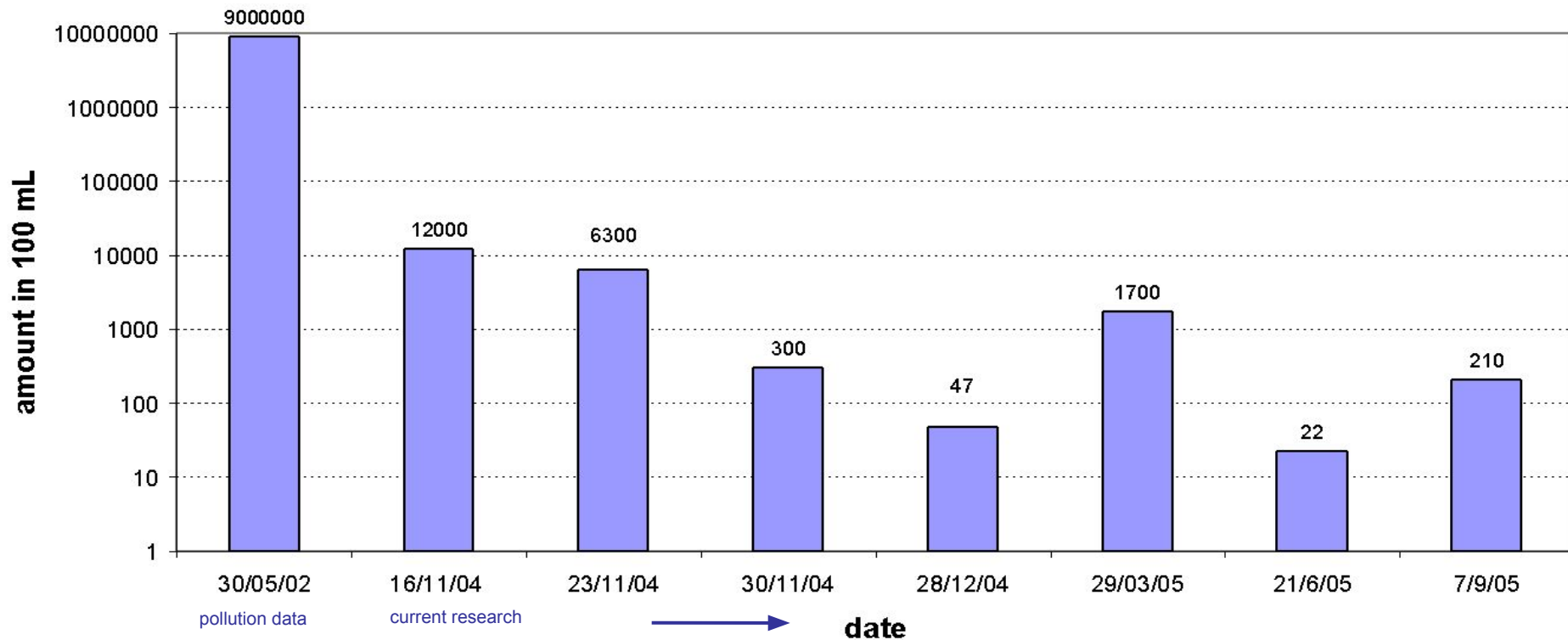


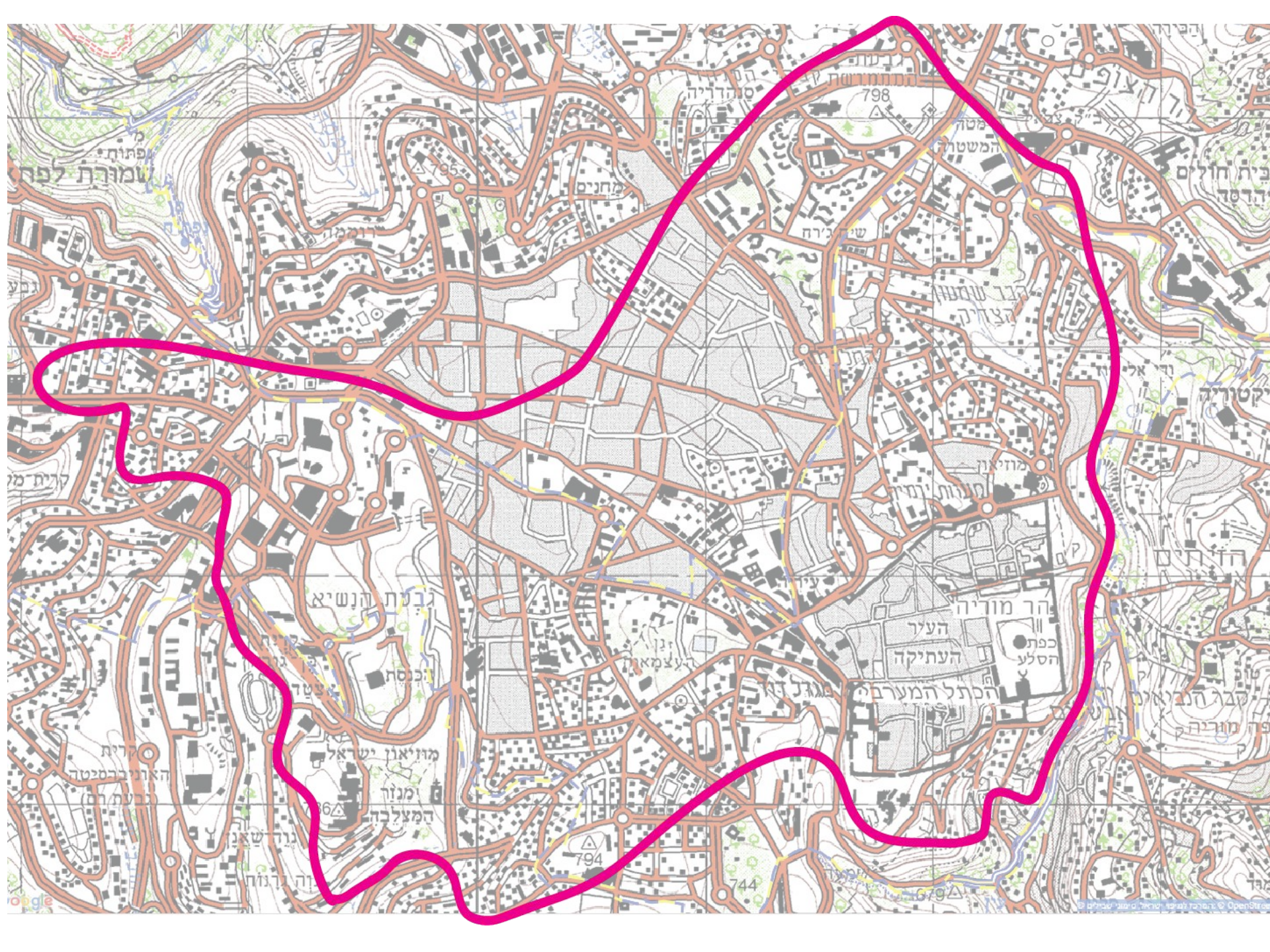
Major anthropogenic pollution event occurred in Gihon Spring on 2002

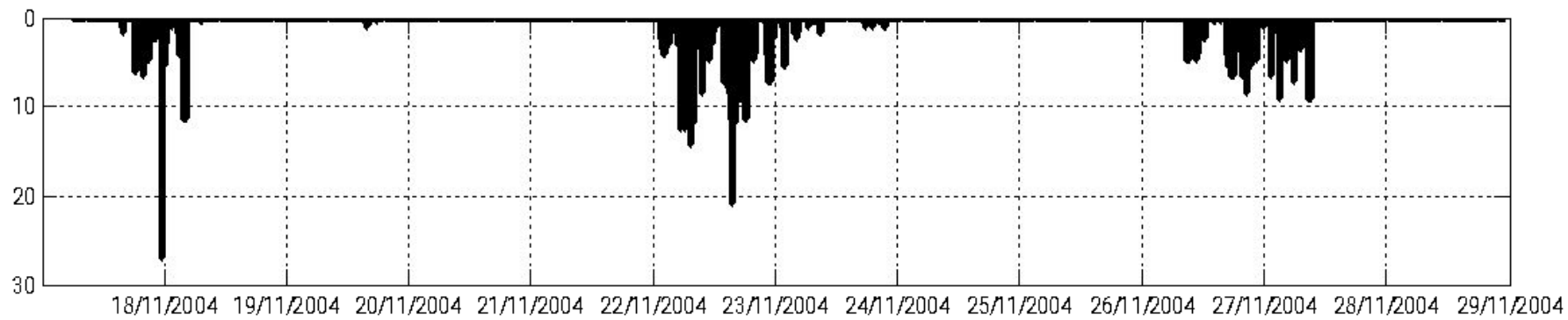
Sewage pipe breaks



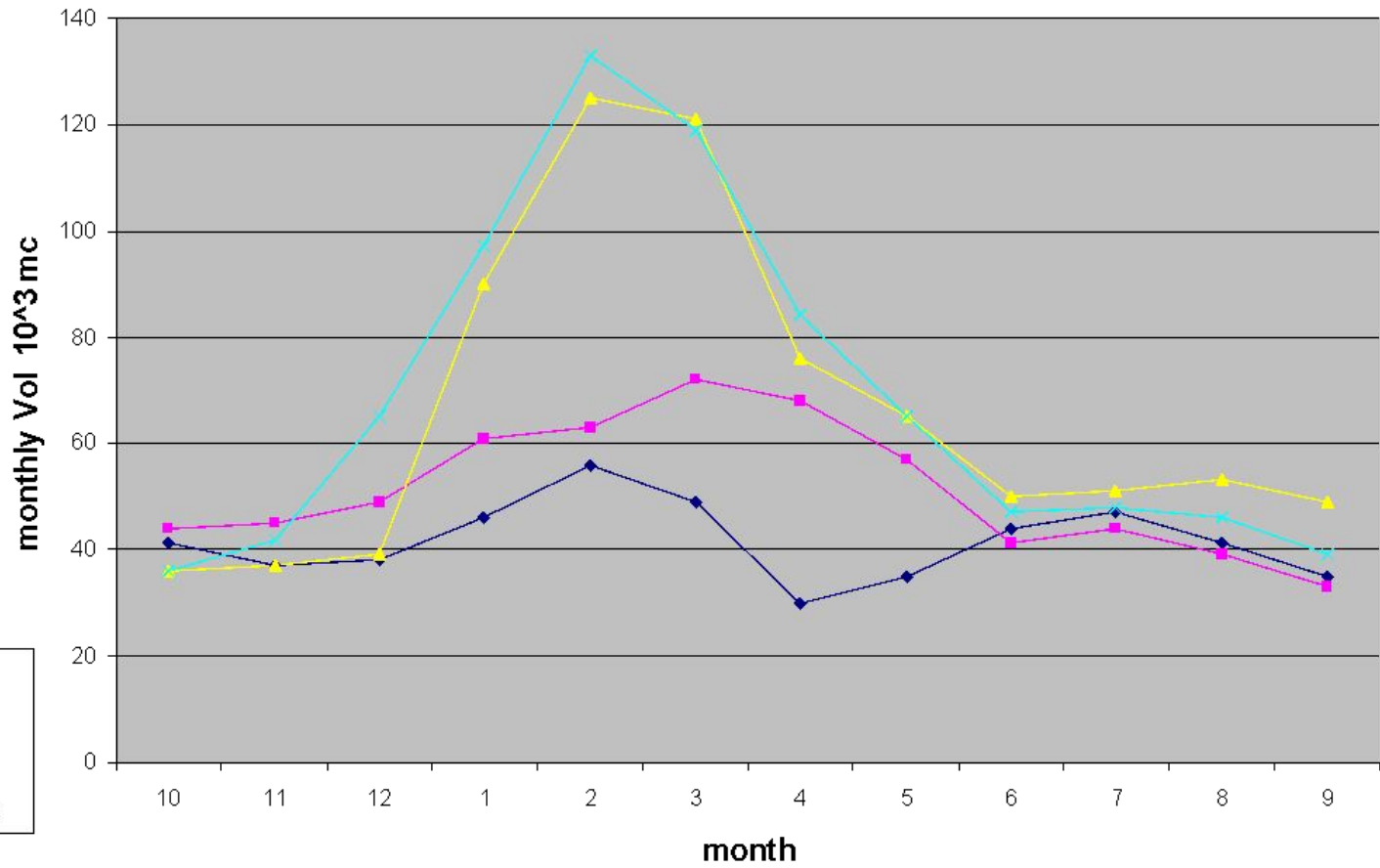
Fecal Coliform Bacteria (in 100 mL)







Precipitation Effect on Spring



מסקנות

- תיארוך רדיומטרי מאשר שנקבת השילוח נחצבה בתקופת הברזל 2ב, סביב ימי חזקיהו

- הנקבה לא נחצבה לאורך מחילה קרסטית טבעית

- להכוונת החוצבים לקראת המפגש נעזרו ככל הנראה בקשר אקוסטי עם פני השטח

- מערכת פיר וורן שימשה ככל הנראה לשאיבת מים באופן מוגן לפני חציבת נקבת השילוח

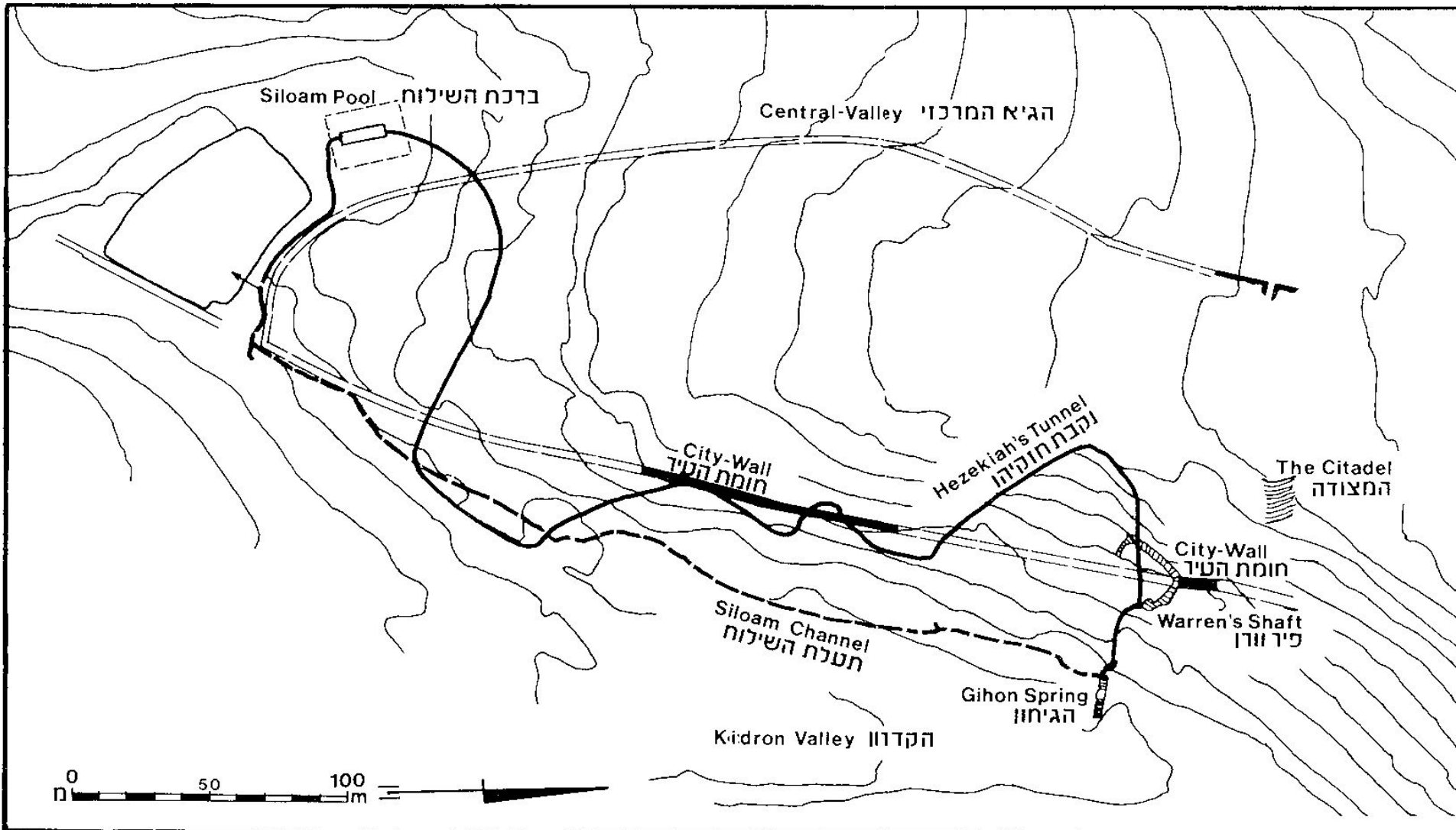
כל עוד יחס האקטיביות $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ הוא בין 0 ל-1 ניתן לחשב את גיל הדוגמא. כאשר היחס 1 קצב ההתפרקות שווה לקצב ההיווצרות ולא ניתן למדוד את הגיל. משיקולים אלה שיטת תיארוך זו היא עד לכ-500 אלף שנה.

קיימות שתי שיטות עיקריות למדידת יחסי $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ספקטרומטריה של חלקיקי α : מניית פליטת חלקיקי α הנפלטים תוך התפרקותם הרדיואקטיבית של U או Th לשיטה זו שגיאת מדידה של כ-10%

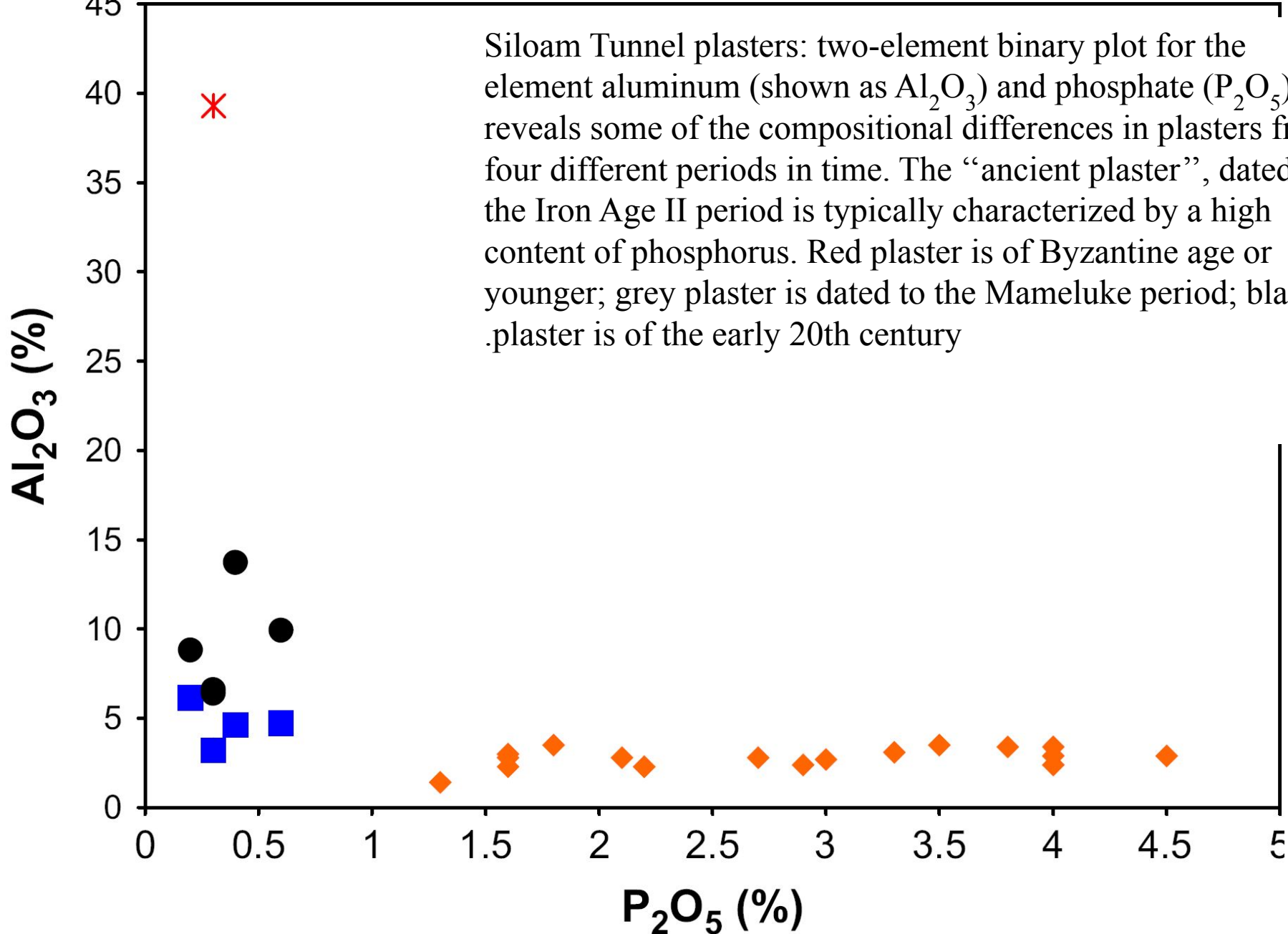
שיטות מס-ספקטרומטריות: מודדות את יחסי הריכוזים של ^{230}Th ו- ^{234}U . לשיטות אלה שגיאת מדידה של 1-5%.

Field no.	Sample description	U concn (ppm)	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ age (years)
SR67 **	Stalactite from ceiling, ST	0.617	0.02237 ± 0.00016	1.0403 ± 0.0031	27.15	2317 ± 18
SR65 **	Flowstone in natural void WS	0.386	0.9899 ± 0.0054	1.0918 ± 0.0052	920.5	>400,000
SR62B **	Flowstone on plaster, ST	0.911	0.01942 ± 0.00020	1.2253 ± 0.0053	2.446	<1000
SR62C **	Flowstone on plaster, ST	0.615	0.05892 ± 0.00056	1.2185 ± 0.0035	1.604	<500
SR60C1 **	Flowstone on plaster, ST	0.664	0.05082 ± 0.00083	1.3765 ± 0.0027	2.619	<2500
SR60C2 **	Flowstone on plaster, ST	0.625	0.03101 ± 0.00014	1.3956 ± 0.0048	2.067	<2000

מיקום טופוגרפי של נקבת השילוח



Siloam Tunnel plasters: two-element binary plot for the element aluminum (shown as Al_2O_3) and phosphate (P_2O_5) reveals some of the compositional differences in plasters from four different periods in time. The “ancient plaster”, dated to the Iron Age II period is typically characterized by a high content of phosphorus. Red plaster is of Byzantine age or younger; grey plaster is dated to the Mameluke period; black plaster is of the early 20th century



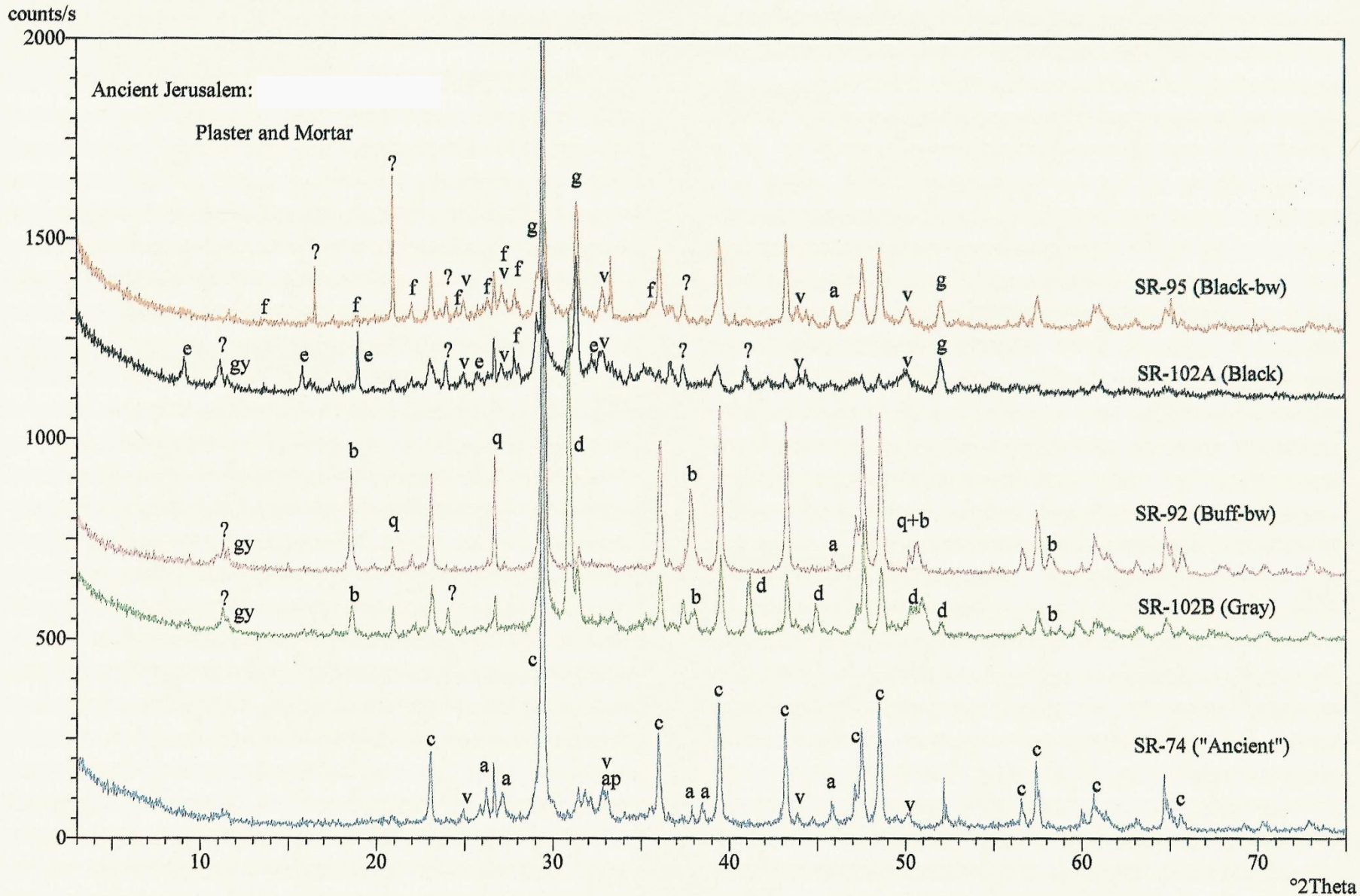
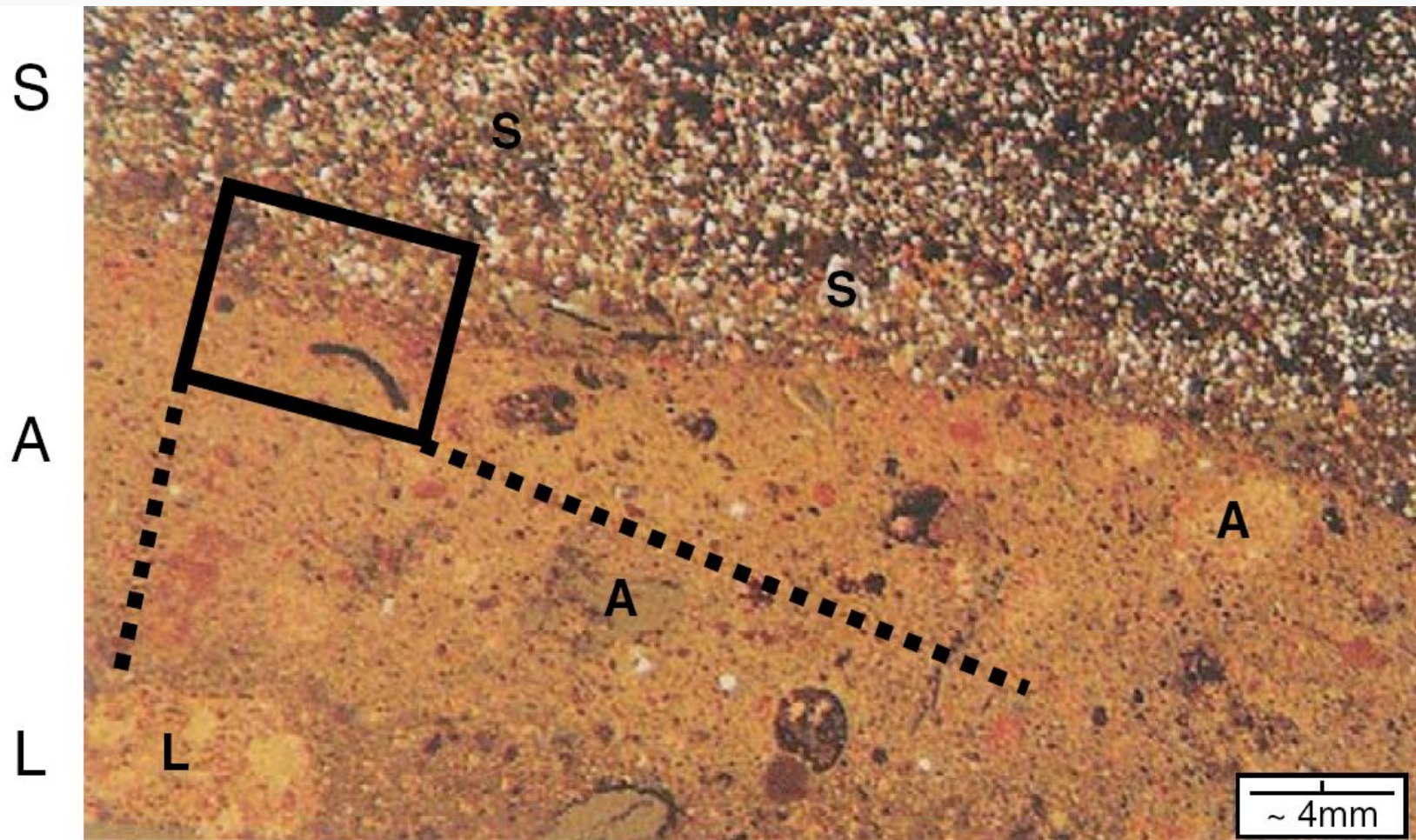


Figure 5. XRD of the different types of plaster and mortar. c, calcite; v, vaterite; a, aragonite; ap, apatite; q, quartz; gy, gypsum; b, brucite; d, dolomite; e, ettringite; f, anorthite; g, gehlenite; ?, undetermined.

Photomicrograph under partially crossed polarizers at the contact between the ancient plaster (A) and natural deposits found above it. Quartzose siltstone (S) detrital deposit of the Gihon waters, composed mostly of angular to subangular quartz and some feldspars (both colorless), iron oxides (opaque grains) and rare tourmaline and garnet (green and brown constituents). Underneath is the ancient plaster (A), consisting mostly of fine recarbonated, somewhat marly, lime binder (buff colored) mixed with small chalk fragments (L), clays, fine potsherds, burnt organic materials (black), chips of bone and foraminifera (seen under higher magnification). The enlarged segment of (A) is under plain light

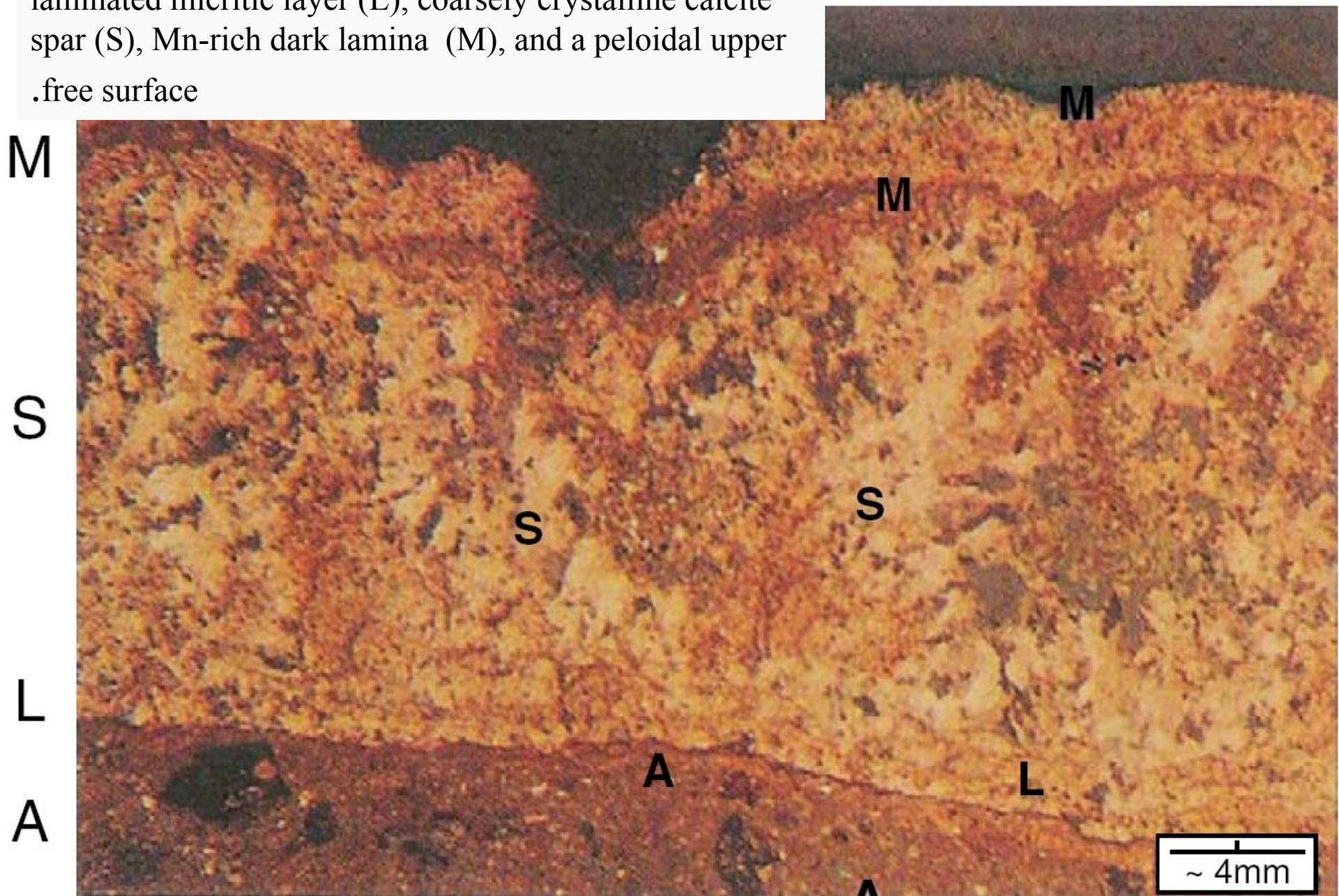


S

A



Ancient plaster (A) overlain by chemical deposits of the Gihon waters, consisting of calcite tufa with finely laminated micritic layer (L), coarsely crystalline calcite spar (S), Mn-rich dark lamina (M), and a peloidal upper free surface





תודה