

טרוורטינים בערבה הצפונית והמרכזית:
סטרטיגרפיה, פטרוגרפיה וגיאוכימיה

ליאור אנמר



©

הוצאה לאור ע"י המכון הגיאולוגי,
רח' מלכי ישראל 30, ירושלים 95501

עיצוב עטיפה: בת-שבע כהן

שער קדמי: משטחי אצות וחללי צומח בטרורטין מפלס הביניים (מואה).

שער אחורי:

עליון: עין תמיד, ריכוז צמחיה (אשל, ימלוח, חילף, סמר) בנוף צחיח של שיטים,
ברקע גבעות שבראשן מפלס הטרורטין העליון - תצורת ערבה.

אמצע: חלל של גזע עץ שצופה בטרורטין (עין גדי).

תחתון: עין יהב שופע במספר פלגים הזורמים ממצוק הטרורטין לכיוון מזרח (נובמבר, 1995).

הפקה: סופרגרף בע"מ טל. 02-5388858



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

טרורטינים בערבה הצפונית והמרכזית: סטרטיגרפיה, פטרוגרפיה וגיאוכימיה

ליאור אנמר

עבודה זו הוגשה כחיבור לקבלת תואר "מוסמך במדעי הטבע"
המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

העבודה נעשתה בהדרכתם של:
ד"ר אריאל היימן, המכון הגיאולוגי, ירושלים,
פרופ' אמתי כץ ופרופ' אברהם סטרינסקי, המכון למדעי כדור הארץ, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

דברי תודה

תודתי נתונה בראש למדריכי פרופ' אמתי כץ, פרופ' אברהם סטרינסקי וד"ר אריאל היימן שדלתותיהם היו פתוחות בפני במשך כל זמן העבודה, שעזרו בבדיקות הכימיות והאיזוטופיות וכן בשיחות, דיונים והתלבטויות בשדה, במשרד ובמעבדה.

תודה לד"ר מוטי שטיין וד"ר פיונה דרבישייר על חלקם באנליזות האיזוטופיות, לד"ר חגי רון על האנליזות הפלאומגנטיות ולפרופ' איתן שש שהתעניין והזין עיניו במיקרוסקופ ולד"ר עמיר אידלמן על השיחות המעניינות. לחוקרי המכון הגיאולוגי ד"ר זאב לוי, ד"ר עזרא זילברמן, ד"ר רבקה אמית, ד"ר בנימין בוכבינדר, ד"ר יוסף יחיאל, ד"ר אהובה אלמוגי-לבין, ד"ר יורם עשת וד"ר עמיחי סנה על עזרתם בשיחות, הערות מאירות ויציאות לשדה.

לחברי ועמיתי בראשם לרני קלבו, צבי קרץ, יוני שקד, עפרי שמש ודפנה גור. לאנשי המכון הגיאולוגי תודה על הנכונות התמידית לעצה והדרכה. תודה לדוד סידי ויעקב רפאל שליווני ביציאות לשדה, לרוברט כנפו שתמיד היה לעזרה, לשלמה אשכנזי, לבת-שבע כהן ונחמה שרגאי על העזרה בעיצוב האוירים, לאברהם ברזילי שהכין את השקפים, לתמרה בר שהכינה דוגמאות מיקרופליאונטולוגיות, למיכאל דבורצ'ק אשר על ה-S.E.M., לורדה ארד שהיתה לי לעזר בספריה, וכן לרימונה סימן-טוב, אירה פאר ויעקב לקטוש.

לאנשי המכון למדעי כדור הארץ שהיה להם חלק נכבד בעבודה. תודה לצוות המזכירות מלי שישה-הלוי, מגי פרקין, בתיה משה וכרמלה לב, ליהודה בן ישראל אשר על השקפים, לעינת כשר, אהובה אגרנט, ורבקה ניסן על העזרה באנליזות הכימיות והאיזוטופיות, זלדה קולודנר, דבי מגן ומרי הנדל שניתבו את דרכי בספריה. שלמה מאירי ואלוירה הליץ תמיד האירו פנים לבקשותי.

לאנשי בייס שדה חצבה על האירוח והעזרה.

למכון הגיאולוגי ולמשרד התשתיות הלאומיות על מימון עבודה זו.

ולבסוף כמו בהתחלה לרעייתי קיקה שאיפשרה לעבודה לקרום עור וגידים.



תקציר

בערבה הצפונית והמרכזית חשופים טרוורטינים שנוצרו מאז הנאוגן ועד להולוקן, הנכללים ברובם בתצורת סייף. חלק אחר שלהם שאינו נכלל בתצורה מתאצבע עם תצורת חצבה, תצורת הלשון וקונגלומרטים צעירים. חלק מן הטרורטינים מלווה מעיינות רצטיים.

עבודה זו דנה בגיאולוגיה של הטרורטינים בערבה הצפונית והמרכזית, ומתחקה אחר הפלאוגיאוגרפיה וסביבות ההשקעה של מעיינות קדומים בערבה. במסגרת העבודה נבדקו הליתולוגיה, הסטרטיגרפיה והרכב הכימי והאיזוטופי ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) של הטרורטינים.

אזור העבודה מצוי ממערב לשולי הבקע, אזור בו משתפלים סלעי הר הנגב לכיוון מזרח אל הערבה. אקלים הערבה כיום הוא מדברי צחיח ונביעת המעיינות בו מועטה ועונתית. לעומת זאת מעידים סלעי הטרורטין על שפיעה ניכרת בעבר. רוב המעיינות נובעים מאקויפר תצורת מישאש והן ממוקמות בסמיכות לכיפות סטרוקטורליות. שפיעת המעיינות החלה רק כאשר נחשף אקויפר תצורת מישאש בראש הכיפות, מתחת לתצורות ערב וטקיה שהן בעלות מוליכות הידראולית נמוכה. עם פריצת המעיינות החלו לשקוע טרוורטינים סביב לכיפות על טרסות הנחלים שהתקיימו בכל זמן וזמן.

הטרורטינים מחולקים לשני טיפוסים עיקריים: טרוורטינים אוטוכתוניים ואלוכתוניים. הטרורטינים האוטוכתוניים הורבדו בקרבה המיידית של המעיינות. הם מצפים משטחים רציפים, מפלים או מדרונות תלולים או מופיעים כעדשות בתוך טרוורטין אלוכתוני. הם בנויים בעיקר משטחי אצות מאובנים המלווים בחללים של צמחיה עילאית. הטרורטינים האלוכתוניים מופיעים בדרך כלל במרחק מה מן הנביעות וברציפות אופקית או בשילוב עם משקעים פלוביאליים ואלוביאליים הכוללים קונגלומרטים, פלאוסולים או משקעים דקי גרגר. הם בנויים מאחוז ניכר של דטריטוס טרוורטיני, גרגרים מצופים (אונקואידים, פיזוליטים) ומליתוקלאסטים שמקורם בסלעי הסביבה.

הטרורטינים בנויים קלציט ומכילים גם גבס, חרסית, קוורץ וצלסטיט. הם מושקעים מן המים באופן פיסיו-כימי על ידי פיעפוע CO_2 מהמים לאויר וגם באופן ביוגני על ידי צריכת CO_2 מן המים על ידי אורגניזמים פוטוסינתטיים. הטרורטינים האוטוכתוניים בנויים בעיקר מקלציט המצפה פילמנטים של ציאנובקטריות ואצות. חללי הצמחיה העילאית מזדקרים מתוך משטחי האצות ומהווים נפח קטן מכלל הסלע. המבנה הפילמנטי הצפוף, האופי המיקריטי, יחד עם אופי הזרימה השקט והלמינרי מעידים על קיומו של מנגנון ביוגני בהשקעת הטרורטין. בתקופות בהן קטנה שפיעת מעיינות הערבה, פעיל יותר מנגנון שקיעה כימי - אבפוריטי הכולל גיבוש גבס, צלסטיט וכנראה Mg-סולפטים בנוסף לקלציט.

הטרורטין הקדום ביותר באזור העבודה מופיע בתצורת חצבה, והוא מכסה ומלכד קונגלומרטים של פרט צפע. חתך טרוורטין חצבה מכיל אונקואידים, טרוורטין אוטוכתוני וטרורטין אלוכתוני מעידים על מגוון סביבות השקעה של מערכת פלוביאלית נרחבת הכוללת ערוצים בעלי אנרגיה זרימה גבוהה, בריכות, סכרי טרוורטין ומפלי טרוורטין. שינויי עובי בטרורטין חצבה מעידים על קימוט סינקלינת שביה תוך כדי הרבדתו.

פעילות טקטונית וארוזיבית נמשכה בפליוקן תוך כדי הרבדת תצורת ערבה המורכבת מקונגלומרטים פולימיקטיים, ומונחת באי התאמה על גבי היחידות העתיקות ממנה מסביב לכיפת רחל-ערגה, כיפת תמיד, צפון קמר מחמל, כיפת שביה ובלוק נחל עמר. גידוע שעברה תצורת ערבה בחלק מכיפות אלו חשף את תצורת מישאש ואיפשר את הנביעה הארטזית של מעיינות מתוך אקויפר תצורת מישאש. התרוממות כיפות רחל וערגה איפשר למי הנביעות לזרום על המורדות ולכסות במספר מקומות את תצורת ערבה בטרורטינים פלייסטוקניים. מיקומם הסטרטיגרפי של הטרורטינים מעל הפרט המאוחר של תצורת ערבה והופעתם באסוציאציה עם פלאוסולים קלציים ומשקעי

אגמים מקומיים מעלה את האפשרות שטרורטינים אלה הם קורלטיביים לתצורת צחיחה שמופיעה בנגב הדרומי, המרכזי וברמת ברק וגם היא מונחת מעל תצורת ערבה ומכילה משקעים אגמיים, טרוורטינים ופלאוסולים. על מדרגות נמוכות מזו של תצורת ערבה מופיעות שתי קבוצות טרוורטין צעירות יותר. המדרגות נוצרו כאשר התחתרות עמקים רחבים בסלעי הקירטון והחואר הסחיפים של תצורת ערב וטקיה הותירה מדרגות נחל בשולי הערוצים. מדרגות נחל פלייסטוקניות-הולוקניות אלו (Q_1-Q_4) מייצגות את קרקעית העמקים בשלבי ההתחתרות השונים. בחתך האלוביאל של מפלס Q_2 מופיעים משקעי מעיינות במואה, כיפת שביה, כיפת ערגה ועין תמיד. גיל טרוורטין זה הוא פלייסטוקן עליון.

על מפלס Q_4 בקרקעית הערוצים בני זמננו מופיעים טרוורטינים הולוקניים, הצעירים ביותר בערבה. כיום לא שוקעים טרוורטינים במעיינות הערבה ששפיעתם נמוכה ביותר. מפלס תצורת ערבה/צחיחה Q_1 הוא המפלס העליון ביותר באזור העבודה, הטרורטין במפלס Q_2 הוא מפלס ביניים, מפלס Q_4 הוא מפלס הטרורטין הנמוך. קיימת התאמה בין היחסים המורפוסטרטיגרפיים של יחידות הטרורטין וגילי הטרורטינים כפי שנמדדו ע"י Kronfeld and Livnat (1987). הגילים הצעירים יותר מתאימים לטרורטינים של מפלס Q_2 (0.1-0.2 מיליון שנה) ואילו הגילים העתיקים יותר מתאימים לטרורטינים של המפלס העליון (0.2-0.3 מיליון שנה). מדידה פלאומגנטית של טרוורטין המפלס העליון מצביעה אף על גיל עתיק מ-0.78 מיליון שנה. גיל טרוורטין המפלס הנמוך נקבע בעבודה כהולוקן (8000 שנה)

אנליזות כימיות מצביעות על כך שהטרורטינים של תצורת חצבה שקעו ממים בעלי מאפיינים שונים מאלה של המים מהם שקעו הטרורטינים הכלולים בתצורת סייף. נראה שהסיבה נעוצה בכך שהמערך הפלאוהידרולוגי היה שונה בזמן הרבדתם, האקלים היה שונה וכמויות המים היו שונות.

הבדלים בהרכב הכימי בין הטרורטינים של שלושת המפלסים הפלייסטוקניים (Q_1-Q_4) ושינויים בנפח המוערך שלהם מעידים על שינויים בספיקת המעיינות. השינויים מעידים על מעבר ממעיינות בעלי שפיעה גבוהה בהם התגבש קלציט במערכת פתוחה למעיינות בעלי שפיעה מזערית בהם התגבשו קלציט, גבס, צלסטיט וכנראה Mg-סולפטים במערכת סגורה או סגורה למחצה.

יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בטרורטינים הפלייסטוקניים נשמרו לאורך הזמן. מכאן שלמרות שחלק מן המעיינות שינה את מיקומו עם הזמן הרכב מי המעיינות מהם שקעו הטרורטינים של תצורת סייף נשאר קבוע. דבר זה מעיד על קביעות המערכת ההידרולוגית בערבה במשך הפלייסטוקן. יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מי המעיינות, מי קידוחים, גירים אגמיים וטרורטינים מכלל אזור הערבה מראים מגמה של ירידה מצפון לדרום. ההרכב האיזוטופי של Sr - בטרורטינים ומי המעיינות שבאזור הצפוני (עין תמיד-נחל משק) גבוה מזה של האזור הדרומי (עין ערגה-מואה). יתכן וגורמים לכך יחסי עירבוב שונים או נוכחות מחדרים של בזלת בתת קרקע באזור הזרימה של האקויפר המשפיעים על הרכב המים.

רוב מחשופי הטרורטין בערבה תת אופקיים ולא נמצאו בהם סימנים לשבירה או הטיה שלאחר השקעתם. מכאן שבאזור המעיינות בו שקעו הטרורטינים לא התרחשה פעילות טקטונית מאוחרת לגיל המפלס העליון. העדויות היחידות שמצביעות על פעילות מצויות בעין ערגה ובצופר. בצופר, טרוורטין חצבה נטוי וקיימים שינויי עובי בטרורטין חצבה המצביעים על פעילות קימוט בזמן הרבדת טרוורטין חצבה ולאחריה. בעין ערגה טרוורטין המפלס העליון נטוי ומשטח הגידוע עליו הוא מונח מקומט. כך שכיפת ערגה עברה פאזת קימוט מאוחרת לאחר תחילת הרבדת טרוורטין המפלס העליון שגילו קדום ל-0.3 מיליון שנה (מנתונים פלאומגנטים אף קדום ל-0.78 מיליון שנה), הקימוט נפסק לפני השקעת טרוורטין מפלס הביניים שגילו 0.1-0.2 מיליון שנה.

תוכן העניינים

1	1. מבוא
1	רקע גיאוגרפי
4	רקע גיאולוגי
7	עבודות קודמות
11	מטרות העבודה
11	שיטות העבודה
13	2. המורפולוגיה של הטרורטין בערבה
14	3. פטרוגרפיה ומינרלוגיה
14	כללי
14	מרכיבים פטרוגרפיים
18	דיון
21	סיכום
22	4. טיפוס הטרורטין וסביבות ההשקעה שלהם
22	כללי
22	טרורטין אוטוכתוני
24	טרורטין אלוכתוני
26	פאצייאס ההשקעה של הטרורטין בערבה
29	5. הסטרטיגרפיה של סלעי הטרורטין בערבה
29	מפלסי מחשופים של יחידות אלוביאליות באזור הערבה
30	המפלסים של מחשופי הטרורטין
30	אזור עין תמיד-נחל משק
38	אזור מואה-צופר
43	אזור עין יהב-עין ערגה
51	הבדלים בנפחי הטרורטין
53	יחסי השדה והפלאוגיאוגרפיה-סיכום
55	6. ההרכב הכימי של סלעי הטרורטין
55	הקדמה
55	ההרכב הכימי של הטרורטין
66	מסקנות
67	סיכום
68	7. פלאוהידרולוגיה של המעיינות בשולי הערבה
68	מיקום המעיינות והטרורטינים
70	איזוטופים של Sr-הקדמה
71	ההרכב האיזוטופי של ה-Sr בטרורטינים ובמים בערבה
79	דיון פלאוהידרולוגי
81	8. גילי הטרורטין ומשמעותם
81	גילים בעבודות קודמות
82	גילים חדשים ופלאומגנטיזם
82	דיון במשמעות הגילים

10. סיכום ומסקנות

טיפוסי הטרוורטין

סטרטיגרפיה

כימיה

פלאוהידרולוגיה

טקטוניקה

היסטוריה גיאולוגית

ביבליוגרפיה

לוחות תמונות ונספח

רשימת האיורים

2	1.1	מפת מיקום
3	1.2	אגני הניקוז באזור המחקר
5	1.3	חתך עמודי מוכלל ומקרא כללי
6	1.4	אלמנטים סטרוקטורליים באזור העבודה
9	1.5	מיקום מחשופי הטרוורטין באזור העבודה
13	2.1	צורות השקעה אופייניות בטרוורטין
19	3.1	שלבים ביצירת הטרוורטין
27	4.1	יחסי שדה בטרוורטין האלוכתוני במואה (מפלס הביניים)
28	4.2	מפת הטיפוסים הליתולוגיים במואה (מפלס הביניים)
31	5.1	יחסי שדה בין יחידות הטרוורטין בשטח העבודה
32	5.2	מפת המחשופים של אזור עין תמיד-נחל משק
33	5.3	חתך סכימתי בנחל חצבה
33	5.4	חתך סכימתי בשולי סינקלינת עין תמיד
34	5.5	חתך סכימתי בנחל משק
35	5.6	חתך סכימתי באזור עין זך-עין תמיד
37	5.7	יחסי שדה בין יחידות הטרוורטין באזור עין תמיד-נחל משק
38	5.8	חתך סכימתי באזור צופר
39	5.9	מפת המחשופים של אזור מואה-צופר
40	5.10	חתך סכימתי נחל עומר
42	5.11	יחסי שדה בין יחידות הטרוורטין באזור מואה-צופר
44	5.12	מפת המחשופים של אזור עין ערגה-עין יהב
45	5.13	חתך סכימתי בכיפת ערגה
46	5.14	כיפת ערגה מבט תלת מימדי
47	5.15	חתך סכימתי בעין רחל
48	5.16	יחסי שדה בין יחידות הטרוורטין באזור עין ערגה-עין יהב
50	5.17	שיחזור פלאוגיאוגרפי: כיפת ערגה

52	5.18 עובי ממוצע של הטרוורטין מול ההשתרעות המוערכת המינימלית
59	6.1 Mg מול SO_4 בטרוורטין שבאזורים השונים
59	6.2 Sr מול SO_4 בטרוורטין שבאזורים השונים
60	6.3 Na מול SO_4 בטרוורטין שבאזורים השונים
61	6.4 השוואת יחסי Sr/Ca, Na/Ca, Mg/Ca באזורי התפוצה השונים
62	6.5 הקשר בין SO_4 ו-Sr, Mg, Na באזור עין תמיד-נחל משק
63	6.6 Sr מול SO_4 בסלעי הטרוורטין
65	6.7 ערכי Sr/Ca מחושבים במים שהשקיעו טרוורטין וגיר אגמי
68	7.1 מודל של מעין ארטזי בערבה המרכזית
69	7.2 כיווני הזרימה באקויפר מישאש
70	7.3 נדידת המעיינות באזור עין תמיד-נחל משק
71	7.4 במים מן הערבה וסביבתה $^{87}Sr/^{86}Sr$
74	7.5 $^{87}Sr/^{86}Sr$ מול $1/[Sr]$ של מים בערבה
75	7.6 $^{87}Sr/^{86}Sr$ בטרוורטינים ומי מעיינות בערבה
76	7.7 התפלגות יחסי $^{87}Sr/^{86}Sr$ בין מפלסי הטרוורטין
77	7.8 $^{87}Sr/^{86}Sr$ מול Sr/Ca בטרוורטינים אותיגניים
78	7.9 $^{87}Sr/^{86}Sr$ בטרוורטינים וגירים של מים מתוקים בערבה ובנגב
82	8.1 התאמת הגילים למפלסים

רשימת הטבלאות

51	5.1 עובי ושטח השתרעות של יחידות הטרוורטין
56	6.1 ההרכב הכימי של סלעי הטרוורטין
58	6.2 ההרכב הכימי של מי מעיינות ושטפונות
72	7.1 יחסי $^{87}Sr/^{86}Sr$ בטרוורטין וגיר אגמי בערבה
73	7.2 יחסי $^{87}Sr/^{86}Sr$ במי מעיינות, שטפונות וקידוחים בערבה
81	8.1 התאמת הגילים הרדיומטרים של הטרוורטינים למפלסים
82	8.2 גילי U-Th חדשים

1. מבוא

רקע גיאוגרפי

אזור העבודה ממוקם בשוליים המערביים של הערבה הצפונית והמרכזית, בין נחל צין בצפון לרכס מנוחה בדרום (איור 1.1). במערב אזור זה מצוי שטח גבעי עד הררי של שולי רכס מחמל והר גבים. בצד המזרחי של שטח העבודה הטופוגרפיה מתונה ומשתפלת אל מרכז הערבה. המחקר התמקד בשטח המצוי במעבר מרגלי האזור ההררי אל המשטחים המתונים של הערבה.

גובה האזור ההררי שבשולי שטח המחקר הוא כ-300 מ' מעל פני הים ואילו מרכז הערבה משתפל מאזור רכס מנוחה (שם הגובה הוא כ-100 מ' מעל פני הים) לכיוון צפון עד לגובה טופוגרפי של 250 מ' מתחת לפני הים. האזור ההררי מוסיף בחלקו לקמר מחמל ובחלקו לחבל הכיפות. כיוון ששטח המחקר מצוי באזור של השתפלות סטרוקטורלית מזרחה, הרי במערבו חשופה בעיקר תצורת מישאש בעוד שבשוליים המזרחיים שלו חשופות תצורות עירב, טקיה, חבורת עבדת ותצורת חצבה. בדרום השטח, מקום בו חשופה חבורת עבדת, הנוף צוקי, ואילו באזורים שמצפון לנחל נקרות הנוף מתון ושטוח יותר. אזור מרגלות ההרים הינו מישורי ומאופיין בנחלים רחבים ושטוחים החתורים בינות לגבעות מישאר שטוחות ורחבות המכוסות קונגלומרטים וקרקע רג (Reg) צורנית.

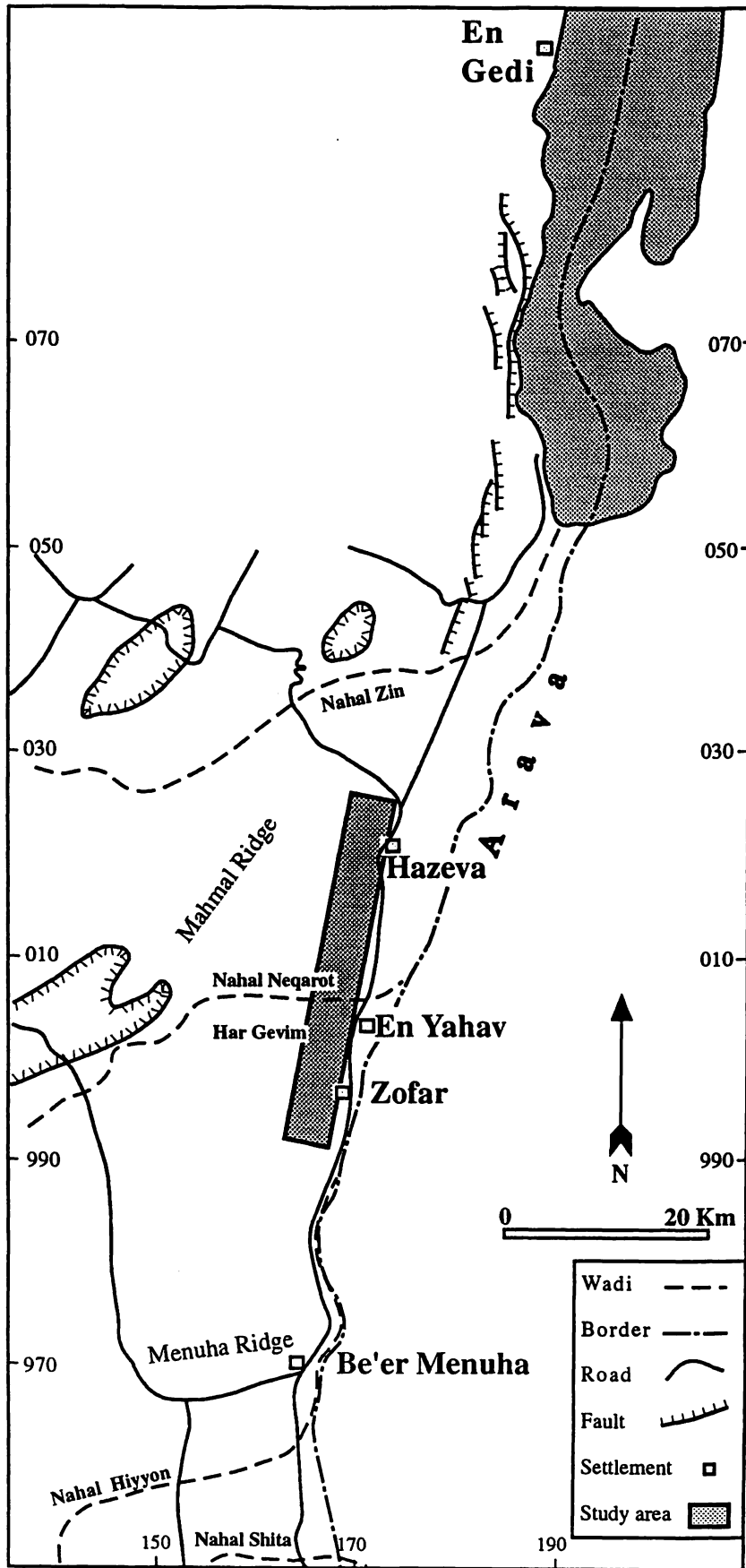
הידרוגיאוגרפיה: אזור המחקר מנוקז על ידי נחל ערבה ונחל אמציה הזורמים צפונה לים המלח. נחל ערבה זורם מדרום לצפון והוא מוזן על ידי נחלים המגיעים אליו ממערב וחוצים את אזור העבודה. הגדולים שבנחלים הם נחל פארן ונחל נקרות ואליהם מצטרפים מספר רב של נחלים קצרים יחסית היורדים מהאזור ההררי אל מרכז הערבה (איור 1.2).

הנחלים הם נחלי אכזב והזרימה בהם היא שטפונית, לא יותר מפעם עד פעמיים בשנה. מספר מעיינות קטנים מצויים באזור העבודה (איור 1.2) ושמותיהם, מצפון לדרום הם: עין ימלות, עין זך, עין תמיד, עין משק, עין שחק, עין ערגה, עין רחל, עין יהב, עין שביה (שם מוצע- במפות, המעין מופיע ללא שם) ומויאת עוואד (מואה). שפיעת המעיינות עונתית ונמוכה, בחורף חלקם מזינים פלג בן עשרות מטרים ספורים ובקיץ חלקם יבשים לחלוטין, וחלקם מזינים שקע קטן בקרקע או בור חפור. לעיתים מיקומם מזוהה על ידי סבך צומח בלבד, המסמן מפלס מי תהום גבוהים.

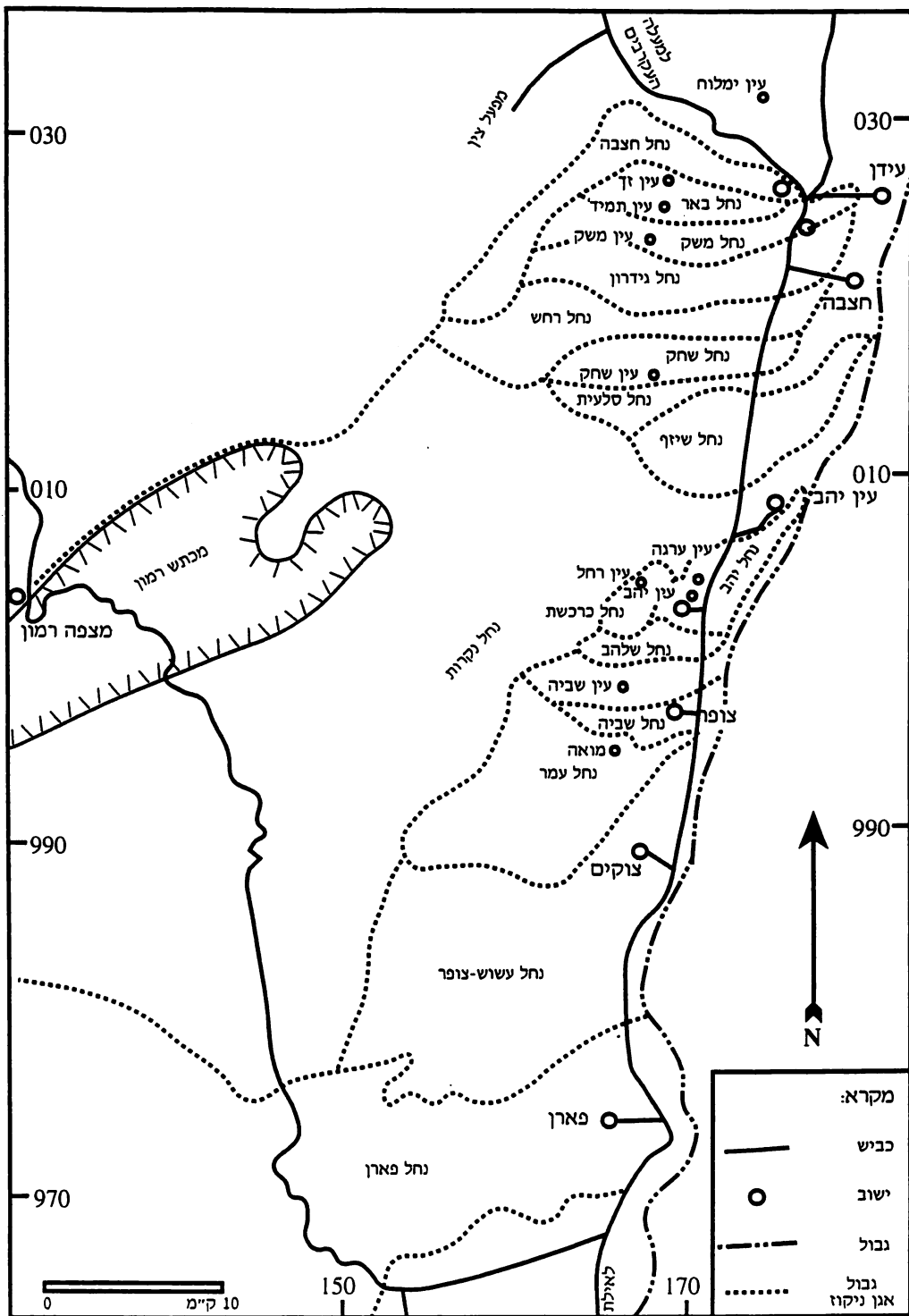
אקלים וצמחיה: האקלים באזור שחון, עם ממוצע משקעים רב שנתי של כ-50 מ"מ וחמישה ימי גשם בממוצע בשנה. קיימות תנודות גדולות בכמות המשקעים השנתית וקיימים הבדלים ניכרים בכמות הגשם בין שטחים סמוכים. הטמפרטורה השנתית הממוצעת היא 25°C ואילו בחודש החם ביותר בשנה, אוגוסט, היא מגיעה ל- 34°C . הלחות היחסית נמוכה ומגיעה לממוצע רב שנתי של 35% דבר הגורם להתאידות גבוהה. הצמחיה מוגבלת לערוצים בלבד ובשטחים שבין הערוצים כמעט ואין צמחיה. צומח הערוצים מאופיין על ידי עצי שיטה סלילנית וסוכך, שיחי אטד, יפרוק, סילון וריסן. באזורי המעיינות מצוי צומח הלופילי והידרופילי כמו סמר ימי, משין גלילי, הגה מצוי, ימלוח פגום, קנה מצוי ועצי אשל ותמר המעידים על מפלס גבוה של מי תהום.

דרכים וישובים: הכביש הראשי החוצה את אזור העבודה הוא כביש הערבה. הכביש היחיד המסתעף מכביש הערבה לכיוון מערב הוא כביש עיר אובות-מפעל צין. ממערב לכביש הערבה, לאורך מרגלות ההרים, עוברת מצפון לדרום דרך עפר ("ציר המעיינות"), בינונית בטיבה המאפשרת גישה לרוב המחשופים. דרכי עפר רבות נוספות באיכות נמוכה חוצות את האזור ממזרח למערב.

ישובי הערבה המצויים ממזרח לכביש הערבה מרוחקים ממחשופי הטרורוטיין. הישובים הקרובים ביותר למחשופי טרוורטיין הם מרכז ספיר וצופר המצויים ממערב לכביש. ישובים נוספים המצויים באזור הינם עידן, חצבה, בייס שדה חצבה, עין-יהב, מרכז ספיר, צופר ופארן (איור 1.2).



איור 1.1: מפת מיקום



איור 1.2: אגני הניקוז באזור המחקר

רקע גיאולוגי

סטריטיגרפיה: באזור המחקר חשופים סלעים מגיל טורון עד פלייסטוקן. מידת החשיפה של סלעי חבורת יהודה מועטה ביחס לזו של סלעי חבורות הר הצופים, עבדת וים המלח. היחידות החשופות באזור העבודה תוארו ומופו על ידי אידלמן (1979) ויחיאלי (1987). ברטוב (1994) סקר באופן כללי את הסטריטיגרפיה של הערבה תוך התייחסות לעבודות הרבות שנעשו בערבה עצמה ובשוליה (איור 1.3).

סלעי הגיר והדולומיט של תצורת נצר חשופים בעיקר ממזרח לאזור העבודה בנחל חצבה ובהר גבים, גילם טורון והם היחידה העתיקה ביותר הנחשפת באזור העבודה. סלעי חבורת הר הצופים, המונחים מעל תצורת גרופית, חשופים לאורך שולי רכס מחמל, חבל הכיפות, שולי מבנה גבים ובאזור נחל עמר. תצורת מנוחה הקירטונית אינה חשופה בשטח העבודה פרט לנחל משק ונחל חצבה. תצורת מישאש המורכבת סלעי צור עם שכבות ביניים קירטוניות ופוספוריטיות חשופה בחלק ניכר מהשטח. מעליה מופיעות תצורת עירב הקירטונית ותצורת טקיה המאופינת בחואר אפור. סלעי חבורת עבדת האאוקנית חשופים לאורך שולי רכס מחמל ובעיקר בשלוחת עמר ובאזור שבין עין יהב למואה. סלעי החבורה מתוארים בעבודתו של אידלמן (1979) וכוללים בבסיס את תצורת מור הבנויה קירטון עם רבדים של תרכיזי צור, ואת תצורת פארן הבנויה רבדים מתחלפים של קירטון וקירטון קשה, ומעליה תצורת מטרד הבנויה דרגשים גיריים ויחידות קירטוניות. תצורת קציעות החווארית-גירית מגיל אאוקן עליון שייכת לחבורת עבדת ומופיעה רק באזור מצומצם בסביבת עין יהב.

מאז המיוקן שקעו באזור משקעים נחליים ואגמיים. החתך הטיפוסי של תצורת חצבה תואר על ידי Sneh (1982) וחולק לפרט שחק (קונגלומרט הבסיס), פרט משק הבנוי בעיקר חוואר וגיר אגמי, ופרט גידרון הבנוי חול וחרסית אדומים. שלושת הפרטים האלו בנויים את חלקה התחתון של תצורת חצבה ונגדעים על ידי הפרטים רותם וצפע הנמנים על החלק העליון של תצורת חצבה. סלעי החתך העליון של תצורת חצבה מופיעים באי התאמה זותית וארוזיבית מעל החתך התחתון של תצורת חצבה או מעל סלעי חבורת עבדת (ברטוב וחבריו, 1997). פרט צפע מכיל חתך של סלעים קרבונטיים, חרסיות, אבני חול וקונגלומרט, ופרט רותם בנוי אבני חול אדומות גסות, חרסיות אדומות ושכבות חלוקים (צור יבוא, סלעים מגמטיים, גיר ועוד) (קלבו וחבריו, 1997).

מעל תצורת חצבה וסלעי התצורות העתיקות יותר מונחים, באי התאמה זותית, סלעי תצורת ערבה (בעבר, קונגלומרט הערבה) שגילה כנראה פליו-פלייסטוקן (Ginat and Avni, 1994). התצורה מתחלקת לקונגלומרט בסיס, יחידת משקעים דקים (בעיקר חול, סילט וחרסית), וקונגלומרט גג. מעל תצורת ערבה או באיבוע איתה מופיעים מחשופים מועטים של תצורת מזר. תצורת מזר הקירטונית-קלאסטית תוארה על ידי יחיאלי (1987) ואייל (1984), אך לאור השוני בליתולוגיה ובגבהים הטופוגרפים שבהם מופיעה היחידה יש קושי בזיהויה ובקורלציה בין המחשופים השונים.

תצורות סמרה והלשון תוארו על ידי יחיאלי (1987) מזרחית לשטח העבודה. תצורת סמרה מורכבת גיר, סילט וחרסית ותצורת הלשון בנויה באזור זה בעיקר חול, סילט, חרסיות ורבדים ארגוניטים. שתי התצורות שקעו באגמים שמילאו את החלק המרכזי הנמוך של הערבה.

מעל כל היחידות שתוארו לעיל מונחים קונגלומרטים צעירים ומשקעי המעינות של תצורת סייף אותה הגדיר לראשונה Sneh (1972). משקעי המעינות מורכבים טרוורטינים ומשקעים אגמיים שגילם פלייסטוקן. תיאור מורפו-סטריטיגרפי של טרסות הקונגלומרט באגני הניקוז של הנגב הדרומי והמרכזי נעשה על ידי גינת (1997) ועל ידי אבני (1997). הטרסות או המפלסים מכונים Q_1 עד Q_4 בהתאמה לגובהם מעל הערוצים הרצנטיים. Q_1 הוא העתיק והגבוה יותר ו- Q_4 הוא הצעיר והנמוך.

מבנה: אזור המחקר ממוקם בין שוליו המערביים של בקע ים המלח והאגף המזרחי של קמר מחמל (איור 1.4). באזור העבודה קיים מעבר הדרגתי בין הבקע לאזור שממערבו. שלושה טיפוסי מבנה עיקריים שולטים בשטח והם כיפות, קמטים והעתקים.

האנטיקלינות של חצרה ומחמל הן המבנים העיקריים בחלקו הצפוני של אזור המחקר (איור 1.4). חבל הכיפות, המצוי בחלק המרכזי של האזור, הוגדר על ידי בן-תור ופרומן (1957) וכולל מצפון לדרום את כיפות ביתרון, עין תמיד, גידרון, רחש, שיזף, נמיה, ערגה ורחל (איור 1.4). כיפת גבים מהווה מבנה אנטיקלינלי המצוי על קו עריף-בתור כמו גם כיפת רחל וכיפת ערגה שמופיעות בהמשך קו זה לכיוון צפון-מזרח (אידלמן, 1979; 1988).

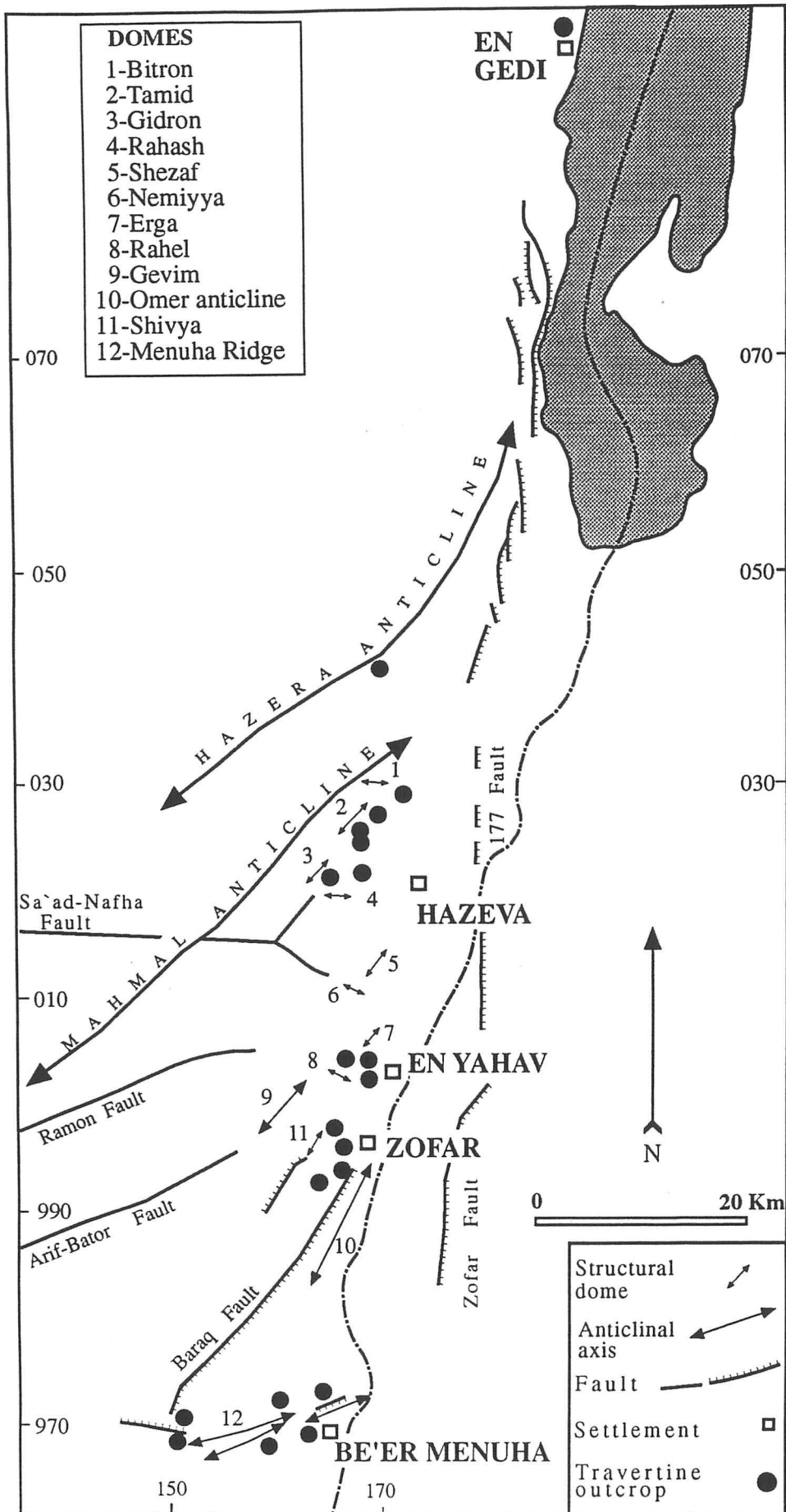
STRATIGRAPHY סטרטיגרפיה

SYSTEM תקופה	SERIES - STAGE סדרה / דרגה	SYMBOL סימן	THICK. m עובי מ'	LITHOLOGY מסלע	LITHOSTRATIGRAPHY ליתוסטרטיגרפיה			
					MAPPING UNITS יחידות מיפוי	GROUP חבורה		
TERTIARY טרצ'יין	QUATERNARY קוורטר	PLEISTOCENE - HOLOCENE פלייסטוקן - הולוקן			Lisan Formation תצורת הלשון Samra Formation תצורת סמרה	DEAD SEA ים המלח		
	NEOGENE ניאוגן	PLIOCENE פליוקן	Nm	5 - 8		Mazar Formation תצורת מזר Arava Conglomerate קונגלומרט ערבה	TIBERIAS טבריה	
		MIOCENE מיוקן	Nhg Nh Nhsm	80 + 5 - 30		Gidron Member פרט גדרון Shahaq & Mashaq mbrs. תצ. חצבה פרט שחק ופרט משק		
	PALEOGENE פליאוגן	EOCENE איאוקן	Ep Em	18 + 14		Paran Formation תצורת פארן Mor Formation תצורת מור	AVEDAT עבדת	
		PALEOCENE פלאוקן	Tit	0 - 28		Taqiye Formation תצורת טקיה Ghareb Formation תצורת ערב	MOUNT SCOPUS הר הצופים	
	CRETACEOUS קרטיקון	MAASTRICHTIAN מאסטריכט	Kug	0 - 23		Mishash Formation תצורת מישאש		JUDEA יהודה
		CAMPANIAN קמפן	Kumi	23 - 70		Menuha Formation תצורת מנוחה		
		SANTONIAN סנטון	Kum	0 - 40		Nezer Formation תצורת נצר Shivta Formation תצורת שבטה Derorim Formation תצורת דרורים Tamar Formation תצורת תמר		
		UPPER עליון	TURONIAN טורון	Kun	22 - 53		Avnon Formation תצורת אבנון	KURNUB כורנוב
				Kush Kud	14 - 21 10 - 30		Uza unit יחידת עוזה Hatira Formation תצורת חתירה Deragot unit יחידת דרגות	
CENOMANIAN קנומן			Kut	44		Zohar Formation תצורת זוהר		
			Kuav Kuz Kuey	105 47 51		En Yorqeam Fm. תצורת עין ירקעם		
LOWER תחתון		ALBIAN אלביאן	Klhh	112		Hevyon Formation תצורת חביון		
			Kihu Kih Kihd	320				
			APTIAN ברמיאן					
JURASSIC יורא	CALLOVIAN קלוביאן	Jmz	32		Zohar Formation תצורת זוהר	ARAD ערד		

Limestone גיר	Dolomite דולומיט	Chalk קירטון	Marl חואר	Chert צור	Conglomerate קונגלומרט	Clay חרסית	Sand חול	Gravel חלוקים	Travertine טרברטין	Fossiliferous מאובנים	Phosphorite פוספוריט

* Qd - lacustrine deposits - משקעים אגמיים
Qsf - (Sayif) travertine - טרברטין (סיף)
Qc - terrace conglomerate - קונגלומרט טרסות

איור 1.3: חתך עמודי מוכלל ומקרא כללי (ע"פ Yechieli et al., 1994)



איור 1.4: אלמנטים סטרוקטורליים באזור העבודה (ע"פ יחיאלי, 1987)

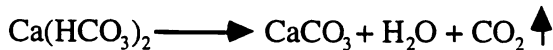
אנטיקלינת עמר וכיפת שביה הם מבנים סמוכים להעתק ברק. לפחות בחלק מן הכיפות, החל הקימוט לאחר הרבדת תצורת מישאש ולפני הרבדת תצורת חצבה. חלק ניכר מהקימוט נמשך לאחר הרבדת הפרטים שחק ומשק וכנראה גם פרט גידרון (אידלמן, 1979; יחיאלי, 1987). המפלס האופקי של תצורת ערבה מצביע על כך שהקימוט הסתיים לפני הרבדתה.

באזור העבודה מופיעות שלוש מערכות העתקה עיקריות:

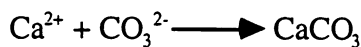
- (1) **העתקי הערבה:** מערכת זו כוללת את בקע הערבה וההעתקים הנורמליים הגובלים אותו ממערב. בנחל צין נחשף אחד מהעתקי השוליים הבונה את קצהו הדרומי של מצוק ההעתקים. מדרום לנחל צין, נמשך העתק בתת קרקע לאורך קו האורך 177. במרכז השטח, ממזרח לישובים מרכז ספיר וצופר מגביל את הבקע העתק צופר שהוא כנראה ההמשך הדרומי של "העתק 177" ואומדן הזריקה עליו הוא כ-2000 מ' (ברטוב, 1994).
- (2) **העתקי רצועת הגזירה:** קצותיהם המזרחיים של קוי סעד-נפחא, העתק רמון, והעתק עריף-בתור השייכים לרצועת הגזירה של הנגב וסיני, חוצים את אזור המחקר. יתכן שהם באים לידי ביטוי באזור המחקר בצורת הכיפות הסטרוקטורליות של ערגה ורחל (אידלמן, 1988).
- (3) **מערכת העתקה צפון-צפון-מזרחית:** מערכת זו באה לידי ביטוי בחלקו הדרומי של שטח העבודה בהעתק ברק, שפעל לאחר הרבדת תצורת ערבה (Avni et al., 1994).

עבודות קודמות

הטרורטין: טרוורטין הוא שם כללי למגוון משקעים קרבונטיים של מים מתוקים זורמים. משקע זה מורכב בעיקר מקלציט דל מגנזיום אם כי קיימים מקומות בהם הוא בנוי גם מארגוניט, קלציט מגנזי, או סידריט וכן סיליקה. שם מקביל לטרורטין הוא טופה שמקובל להשתמש בו כדי לאפיין טרוורטין נקבובי במיוחד המכיל שרידים מרובים של צמחים וחסרי חוליות, בעבודה זו יעשה שימוש בשם טרוורטין כיוון שרוב הסלעים הנדונים בה מסיביים, מגובשים היטב ואינם עשירים בשרידי צומח וחסרי חוליות. יש המפרידים בין טרוורטין לטופה גם על סמך טמפרטורת המים, טופה מורבדת במים קרים ואילו טרוורטין במים חמים (Ford and Pedley, 1990). טרוורטין שוקע מתמיסה המכילה CaCO_3 מומס, כתוצאה מירידת הלחץ החלקי של ה- CO_2 במים. הירידה בלחץ החלקי גורמת לעליה ב-pH, ובדרגת הרויה של התמיסה ביחס לקלציט ולכן מתרחשת שקיעה של CaCO_3 . הנוסחא הכימית המתארת את התהליך היא:



הריאקציה בנויה מספר שלבים:



בריחת ה- CO_2 היא ספונטנית ומתאפשרת בגלל ריכוזו הגבוה במים ביחס לאטמוספירה. הבריחה נעשית על ידי נידוף. שחרור ה- CO_2 מזורז על ידי חימום, אידוי, עירבול המים או על ידי צריכת CO_2 בתהליך פוטוסינתזה. המנגנון שבעזרתו משתחרר ה- CO_2 מהתמיסה הינו נושא שנוי במחלוקת בין חוקרים המצדדים במנגנונים פיסיקליים (Hoffer-French and Herman, 1988) לאלו המצדדים בחשיבותם של אלמנטים ביולוגיים בהשקעת הטרורטין על ידי צריכת CO_2 מהמים (Emeis et al., 1987). כיום מקובל שהשקעתו של הטרורטין היא כימית וביוגנית (Ford and Pedley, 1996).

קלאסיפיקציות שונות של טרוורטין מבוססת על קריטריונים גיאוכימיים, טקסטורליים ומורפולוגיים (Penacost, 1992):

(1) הקלאסיפיקציה הגיאוכימית מבוססת על מקור ה- CO_2 בתמיסה שיכול להיות אטמוספרי או סלעי. CO_2 יכול להתמוסס במי גשם תוך כדי חילחול בקרקע. מקורו בפירוק חומר אורגני ונשימת צמחים ובע"ח. ריכוזו בקרקע יכול לעלות פי 100 על זה שבאוויר (Lorah and Herman, 1988). מקור נוסף ל- CO_2 שמופיע בעיקר באזורים של שפיעת חום גבוהה הוא דקרבוניזציה של גירים, הידרוליזה וחימצון של פחמן מחוזר או CO_2 שמקורו במעטפת העליונה.

(2) הקלאסיפיקציה הטקסטוראלית מתבססת על המיגוון האדיר של הטקסטורות שבטרורטין. המבנה, הצפיפות,

הנקבוביות, גודל החלקיקים והאלמנטים הבונים עליהם מושקע משתנים ממקום למקום. הטקסטורה נקבעת על ידי קצב ההשקעה, המינרלוגיה ועוצמת הדיאגנוזה אך יותר מכל מושפעת הטקסטורה מסוג וצורת ההופעה של הצומח שעליו שקע הצפוי. ולכן, רבים המאמרים המחלקים את הטרוורטין על סמך סוגי הצומח השונים המעניקים לו את הטקסטורה (Irion and Muller 1968; Schafer and Staf 1978; Pentecost 1987).
 (3) הצעות לקלאסיפיקציה מורפולוגית מופיעות במאמרים רבים. Chafetz and Folk (1984) זיהו חמישה טיפוסים מורפולוגיים: מפלים, מילוי אגמים, מדרונות מדורגים, מדרונות ונביעות סדק. Pedlley (1990) חילק את הטרוורטינים לכאלה המייצגים מעיינות, מפלים, פלוביאליים, אגמיים וביצתיים.
 במרבית החלוקות המודרניות מופיעה חלוקה נוספת לשתי תת קבוצות: טרוורטין אוטוכתוני וטרוורטין אלוכתוני (קלאסטי). הטרוורטין האוטוכתוני הוא טרוורטין שהורבד כציפוי של חלקי צומח או דומם (מפל, חלוק, גדת ערוץ, חפץ אנטרופוגני). הטרוורטין האלוכתוני מורכב משברי טרוורטין או גופים שצופו בטרוורטין תוך כדי הסעה וגרגרי טרוורטין לא מלוכדים בקלציט.
 מגוון תופעות פטרוגרפיות המופיעות בטרוורטין תוארו במספר מחקרים, ביניהם Irion and Muller (1968) שתיארו תופעות פטרוגרפיות בטופות מגרמניה. Love and Chafetz (1988) שדנו באופן התפתחותם של הציפויים הלמינריים בטרוורטינים. Chafetz and Folk (1984) שתיארו מגוון תופעות בטרוורטינים של אגמים ומדרונות מאיטליה ואוששו את רעיון המנגנון הביוגני על ידי עדיות פטרוגרפיות. Schafer and Staf (1978) תיארו בפרוטרוט אונקואידים בטרוורטין.

טרוורטינים בישראל סלעי טרוורטין בארץ ידועים מרמת הבאניאס, עמק בית שאן, הנחלים געתון, עמוד ופרוד, לאורך מצוק ההעתקים במדבר יהודה, לאורך שולי הערבה ובמעיינות צוק הצינים, חלקם נחקר בעבודותיהם של Issar and Kafri (1972), היימן (1985) ו- Heimann and Sass (1989).

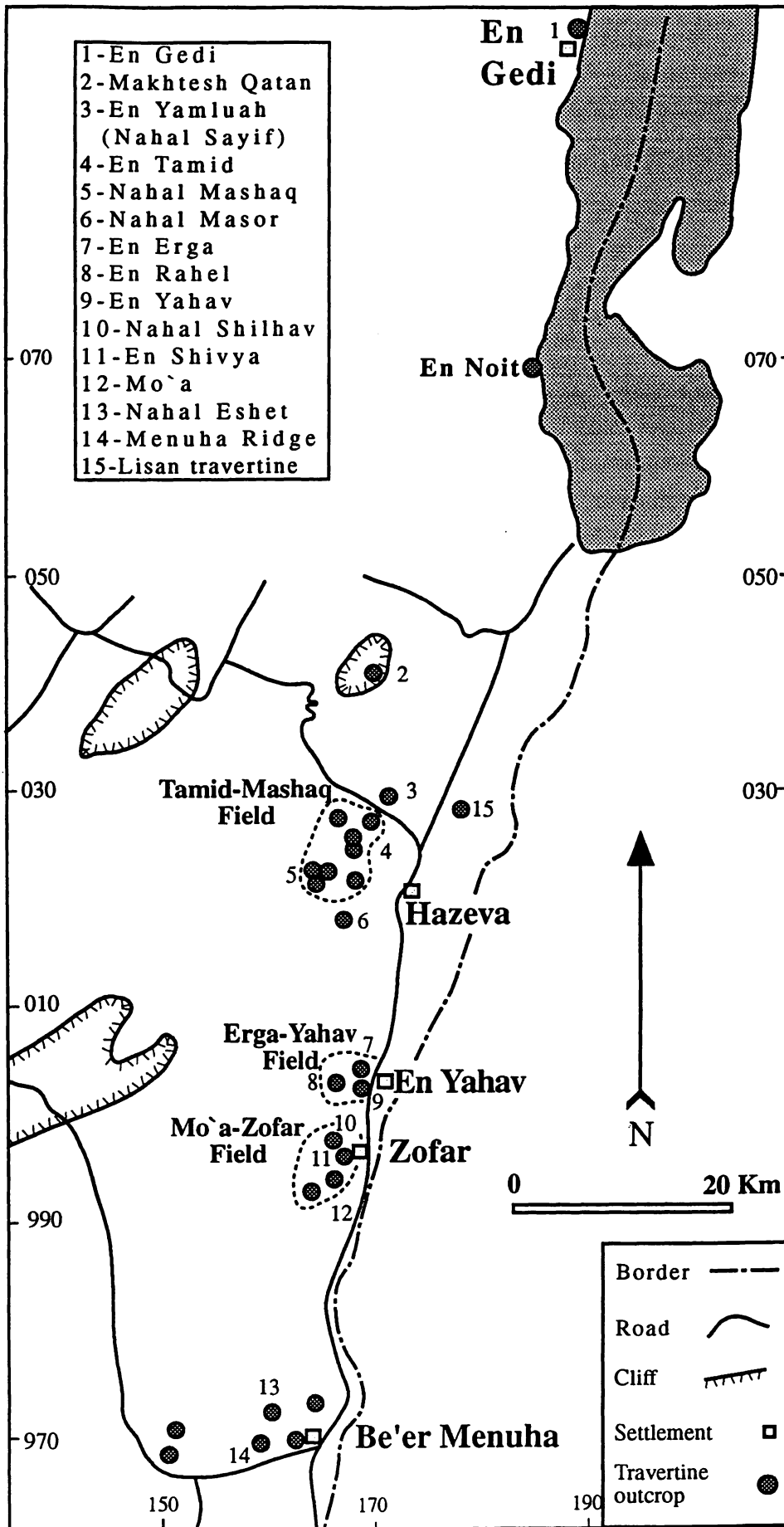
פטרוגרפיה ופטרוולוגיה: Issar and Kafri (1972) תארו טרוורטין פלייסטוקני מנחל געתון בקרבת נהריה. Buchbinder et al. (1974) תארו משקעי טופה פלייסטוקנים הקשורים לחופי של אגם הלשון. היימן (1985) חקר את הפטרוגרפיה, הכימיה והמינרלוגיה של סלעי הטרוורטין בצפון עמק החולה. סלעי הטרוורטין בעמק החולה מראים קווי אופי כימיים ואיזוטופיים המאפשרים להבדיל בין מקורות המים מהם שקעו. Livnat and Kronfeld (1987) תיארו באופן מפורט את הפטרוגרפיה של הטרוורטינים בערבה.

תיארוך: Schwartz (1979) תיארו טרוורטינים מנחל צין ורמת עבדת בשיטת סדרת האורניום וקיבל שלוש קבוצות גילים: סביב 45,000 שנה, 75,000 שנה ו-220,000 שנה. Kronfeld et al. (1988) תיארו טרוורטינים בבקעת בית שאן וקבעו עבורם גיל דומה למשקעי אגם הלשון. Livnat and Kronfeld (1985) ו- Kronfeld and Livnat (1987) תיארו טרוורטינים בערבה, מהמכתש הקטן בצפון ועד נחל חיון בדרום (להלן). גילי ^{14}C של טרוורטינים ברמת הבניאס הם 25-30 אלף שנה (היימן, 1985).

הטרוורטינים באזור העבודה (איור 1.5): אזור הערבה הצפונית עורר עניין רב בתחומי מחקר רבים עקב היותו באזור של טרנספורם ים המלח. אף על פי כן ההתייחסות לטרוורטינים שבשולי הערבה היתה מועטה עקב אופי תפוצתם הנקודתי וגילם הצעיר. מיפוי ותיאור הטרוורטינים בערבה נעשה באופן חלקי במספר עבודות: בן-תור ופרומן (1954, 1957) היו הראשונים לתאר את מחשופי הטרוורטין במכתש הקטן, עין תמיד, עין יהב ועין רחל. Gill (1965) מיפה את מחשופי הטרוורטין של המכתש הקטן. Sneh (1972; 1982) נתן ליחידת הטרוורטינים את השם תצורת סייף וקשר בינם לבין גופי המים הגדולים שהיו בבקע. סקל (1967) מיפה את הטרוורטינים של רכס מנוחה ותיאר את הליתולוגיה שלהם ושל היחידות האגמיות המלוות אותם וייחס להם גיל פלייסטוקן עד הולוקן.

אידלמן (1979) מיפה את מחשופי הטרוורטין באזור עין יהב וצופר וחילקם לשלש קבוצות על פי גובהם הטופוגרפי יחסית לנביעות הרצנטיות כדלקמן:

- טרוורטין רצנטי המורכב מחומר קרבונטי רך ועשיר בחומר אורגני.
 - טרוורטין סוברצנטי, נקבובי ועשיר בדפוזי צמחים וגסטרופודים המופיע סמוך לנביעות, בגובה קטן מעליהן.
 - טרוורטינים קדומים הנחשפים במפלס גבוה בעשרות מטרים מעל למפלס הנוכחי (לדוגמא גיר מאסיבי בעין ערגה וטרוורטין גס גביש בקונגלומרט הבסיס באזור צופר).
- הוא הציע שהטרוורטינים הקדומים (בעין ערגה, נחל שביה, אזור צופר וסינקלינת עמר) נוצרו מנביעות שניזונו



איור 1.5: מיקום מחשופי הטרבורטין באזור העבודה

מאקויפר קונגלומרט הבסיס של תצורת חצבה, לעומת מי המעינות הרצנטים והסוברצנטים שנובעים מעל תצורות עירב וטקיה, ומגיעים דרך העתקים מאקויפר עמוק יותר.

יחיאלי (1987) מיפה את השתרעות הטרוורטינים באזור חצבה ותיאר את הליתולוגיה והפטרוגרפיה שלהם. יחיאלי תיאר את סביבת ההשקעה של הטרוורטינים כאזור מעיינות עשיר צמחיה שהשתרע על שטח גדול, בנוף של נחלים רחבים בעלי שיפוע פלוביאלי נמוך (עד 1°).

גילים שנקבעו לדוגמאות טרוורטין מרוב אתרי הטרוורטין בערבה בשיטת סדרת האורניום על ידי Livnat and Kronfeld (1985) ו-Kronfeld and Livnat (1987) נעים בין 16,000 שנה לבין יותר מ-300,000. תוארכו 45 דוגמאות טרוורטין וגיר אגמי מנחל חיון בדרום דרך נחל עמר, מואה, עין יהב, עין רחל, עין ערגה, נחל משק, עין זך ונחל אמציה בצפון.

הגילים מופיעים בתחומי זמן מוגדרים שביניהם פערי זמן. פערים אלה פורשו על ידם כתקופות יבשות בהן לא שקע טרוורטין. רוב הגילים מתרכזים בתחום הדרגות האיזוטופיות של חמצן חמש ושבע שהינן תקופות בין-קרחוניות, ולא בדרגה איזוטופית שש שהיא תקופה קרחונית. מתצפית זו הסיקו המחקרים ששקיעת הטרוורטינים נשלטה על ידי האקלים, קרי-הטרוורטינים שקעו בתקופות בין קרחוניות שהיו תקופות לחות. פיזור גילי הטרוורטינים שהתקבל בעבודות אלה נקשר על ידי החוקרים למערכות מונסוניות מרובות גשמים שגרמו לשפיעת מעיינות גדולה בתקופות הבין-קרחוניות. אקלים יבש ששלט בנגב בתקופות הקרחוניות גרם לירידה בשפיעה. על סמך הגילים שקיבלו, הם מציעים לקשור חלק ממחשופי טרוורטין סייף לפאזה הלחה שאפשרה את קיום אגם סמרה.

Horowitz (1987) התנגד למודל האקלימי והציע שמנגנון הנביעה קשור בארועי העתקה מגיל Riss (פלייסטוקן תיכון, תקופה בה נכללת דרגה איזוטופית 7).

Weinstein-Evron (1987) בדקה את ה-Pollen בדוגמאות הטרוורטינים שנאספו על ידי Livnat and Kronfeld (1985) ומצאה תימוכין למודל האקלימי שלהם. מתוך השינויים ביחסי ה-Pollen העצי ל-Pollen האחר (שיחי ועשבוני) היא הסיקה על קיומו של אקלים לח יותר בתקופת השקעת הטרוורטינים. Livnat and Kronfeld (1990) דנו במשקעים האגמים של תצורת סייף מנחל אמציה, נחל משק, עין יהב, עין רחל ומואה. הם חילקו את המשקעים לגירים חסרי מרכיב דטריטי ו'קירטון' חוארי עשיר בדטריטוס וקשרו את ההבדל הליתולוגי לגודל אגן הניקוז של האגמים. לטענתם התקיימה פאזה אגמית באתרים האלו בתחילת הדרגה האיזוטופית 7 שהסתיימה לפני כ-200,000 שנה.

מעיינות הערבה: הרקע ההידרולוגי של אזור הערבה הצפונית נסקר על ידי Galay (1983). הוא תיאר חמישה אקויפרים עיקריים: כורנוב, יהודה, הר הצופים, עבדת וחצבה. יחיאלי (1987), יחיאלי וחבריו (1996) ו-Yechieli et al. (1992) חקרו את הרכב המים של עין תמיד, עין זך, עין רחל ועין שחק, הנובעים מאקויפר חבורת הר הצופים. הם התקשו להבדיל על פי ההרכב הכימי והאיזוטופי של המים בין האקויפרים שונים. יחיאלי הראה על פי ערכי $\delta^{18}\text{O}$ ו- δD שלפחות חלק ממי המעינות מגיע מן האקויפר התחתון (אקויפר חבורת כורנוב) והציע שהמים עולים לתצורת מישאש דרך סדקים והעתקים כתוצאה מהלחץ הארטזי והעומד הפיאזומטרי הגבוה בו נמצאים מי אקויפר זה בקידוחי האזור. גם Galay (1983) מזכיר את אקויפר המישאש כאקויפר קטן הניזון ממי נגר עילי וממים שעולים מאקויפרים עמוקים יותר דרך מערכת סדקים.

Gat and Galay (1982) בדקו ערכי $\delta^{18}\text{O}$ ו- δD של מים מקידוחים בערבה ומצאו שבערבה הצפונית והמרכזית קיים עירוב בין מי אקויפרים רדודים ומי שטפונות לבין מים של אקויפרים עמוקים יותר.

מטרות העבודה

מטרת העבודה היא לימוד הסטרטיגרפיה, הפטרוגרפיה והגיאוכימיה של הטרורטינים בערבה וניתוח ההשלכות שלהן על הפליאוגיאוגרפיה של שולי הערבה, הפליאווהידרולוגיה של מעיינות המצויים שם וההיסטוריה הגאולוגית של האזור.

המחקר התמקד בנושאים הבאים:

1. לימוד תפוצת סלעי הטרורטין, מיפוי וקביעת יחסי השדה בתוכם ובין שאר יחידות הסלע.
2. בדיקת הקשר בין התכונות הפטרוגרפיות, המינרלוגיות והכימיות של הטרורטין לבין תנאי ההשקעה במעיינות.
3. הבנת התגובה ההידרולוגית לשינויים בנוף הערבה.
4. תיאור הטקטוניקה הצעירה בשולי הערבה על סמך עדויות בסלעי הטרורטין.

שיטות עבודה

המחקר התבצע במכון למדעי כדור הארץ באוניברסיטה העברית ובמכון הגיאולוגי, משרד התשתיות הלאומיות, ירושלים.

עבודת השדה: מחשופי הטרורטין מופו בקני"מ 1:5000 על תצלומי אוויר ועל מפה בקני"מ 1:20,000. המיפוי נעשה תוך הסתייעות בעבודות קודמות, המפות הגיאולוגיות של סקל (1967), אידלמן (1979), (Sneh 1982), Yechieli et al. (1994) ותצלומי אוויר.

נאספו כ-140 דוגמאות סלע טרורטין להכנת שקפים פטרוגרפים, בדיקות כימיות ובדיקות מינרלוגיות. דוגמאות הטרורטין נלקחו מכל המחשופים ובאופן מיוחד מאזור נחל סייף-נחל אמציה, אזור עין תמיד-נחל משק, אזור עין ערגה-עין יהב ואזור מואה-צופר. מחוץ לאזור העבודה נאספו דוגמאות גם בעין גדי, במכתש קטן וברכס מנוחה. דוגמאות מים נלקחו ממי נביעות, קידוחים ושטפונות. הדגימה נעשתה בבקבוקי פלסטיק של 330 סמ"ק או 500 סמ"ק שנשטפו במי הדגימה, מולאו לגמרי ונאטמו. הבקבוקים הוחזקו בקירור מרגע הגעתם לירושלים ועד למועד הבדיקה הכימית.

פטרוגרפיה ופטרולוגיה: 94 שקפים הוכנו מן הדוגמאות שנאספו בשדה לצורך הגדרה פטרוגרפית. חלק מהדוגמאות שימש להכנת שקף פטרוגרפי אחד או שניים באוריינטציות שונות. דוגמאות הסלע הפריכות (בעיקר הטרורטין הדטרטי) עברו הקשיה לפני ניסור פרוסת הסלע. השקפים נבדקו במיקרוסקופ מקטב. חלק מן הדוגמאות נוסר ולוטש ידנית או בעזרת מכונת ליטוש על מנת לבחון טקסטורות גדולות מימדים. נוכחות גבס, קלציט מגנזי, דולומיט וקוורץ נבדקה בכל הדוגמאות שיועדו לאנליזה כימית על ידי דיפרקציה של קרני-X. הדיפרקציה נעשתה ע"י מכשיר מסוג PHILIPS-PW1710 בעל קרינת Cu-K α במעבדת המכון הגיאולוגי. דוגמאות האבקה הורצו בתחום 2 θ של 5 $^{\circ}$ עד 40 $^{\circ}$ במתח עבודה של 40 kV ועוצמת זרם 40 mA. מספר דוגמאות נבדקו במיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) של המכון הגיאולוגי. המכשיר מסוג JEOL-840 מצויד במערכת קרני-X (EDS) מסוג LINK-860 וגלאי SE המאפשר אפיון מורפולוגי של הדוגמא. העבודה נעשתה בעיקר על שברי סלע טריים שעברו ציפוי מבוקר בפחמן. מספר דוגמאות נשלחו להגדרה מיקרופלאונטולוגית במעבדות המכון הגיאולוגי.

כימיה של סלעי הטרורטין: אנליזה כימית של דוגמאות סלע ומים נעשתה במעבדות המחלקה לגיאולוגיה באוניברסיטה העברית. דוגמאות הסלע נגרסו ונוקו בעזרת מכשיר אולטרא סאונד ולאחר מכן יובשו בתנור יבוש בטמפרטורה של 35 $^{\circ}$ C. הדוגמאות נטחנו לאבקה בכלי אגאט או ברזל ולאחר מכן נשטף 1 גרם מהאבקה של כל דוגמא ארבע פעמים במים מזוקקים (2) על ידי צנטריפוגה. מי השטיפה סוננו דרך נייר סינון (Whatman #40). ההרכב הכימי של הסלע נבדק בשיטה המתוארת להלן. הקרבונט שבדוגמאות השטופות הומס בחומצה HCl תוך כדי חימום על פלטה. התמיסות עברו דילול לנפח של 100 ml כדי להגיע לטווח הריכוז האנליטי ולאחר מכן נבדקו בהן ריכוזי המומסים הבאים: Ca, Mg, Sr, Na, K, SO $_4$, Li, B. הבדיקות האנליטיות בוצעו באמצעות מכשיר Perkin Elmer, ICP מודל Optima 3000. סטנדרדים שהוצבו בין הדגימות שימשו לתיקוני סטייה של האנליזות בעזרת תוכנית מחשב שכתב פרופ' א. כץ מהמחלקה לגיאולוגיה.

דוגמאות המים אוכסנו במקרר מיד עם החזרה מהשדה. המים סוננו בעזרת ניר סינון (Whatman #40) ולאחר מכן נקבעו בהם ריכוזי המומסים כפי שתואר למעלה ובנוסף גם ריכוזי Si ו-Br. ריכוזי HCO_3^- במים נקבעו בטיטרציה עם חומצה, וריכוזי NO_3^- ו-Cl נקבעו במכשיר Flow Injection Analyzer מודל QE FIA המצויד בגלאי אופטי המודד את שני היונים אחרי יצירת קומפלקס של ה-Cl עם כספית-טיאווציאן ושל ה- NO_3^- עם סולפאנילמיד אחרי חיזור לניטריט על גבי קולונת Cd/Cu.

שגיאות המדידה של המומסים שנמדדו במכשיר ה-ICP חושבו ל-0.5% והשגיאות עבור אלו שנמדדו ב-FIA חושבו ל-1.5%.

אנליזות איזוטופיות של $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: חלק מבדיקות ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ נעשו בספקרומטר מסות מסוג Finnigan MAT 262 המצויד במולטיקולקטור במעבדות N.E.R.C., המכון הגיאולוגי הבריטי, נוטינגהם, אנגליה. התוצאות תוקנו כלפי היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בסטנדרד NBS 987 השווה ל- $(n=21)$ 0.710184 ± 0.000022 .

חלק מהבדיקות נעשו על ידי די"ר מ. שטיין במעבדות מכון מקס פלאנק, מיינץ, גרמניה. המדידה נעשתה בספקטרומטר מסות מסוג Finnigan MAT 261 המצויד במולטי-קולקטור. התוצאות תוקנו כלפי היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בסטנדרד NBS 987 השווה ל- $(n=43)$ 0.710263 ± 0.000016 . כל הדוגמאות שנמדדו במכון מקס פלאנק נורמלו ליחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של 0.710184 .

הכנת הדוגמאות לבדיקה הספקטרומטרית נעשתה במעבדה ה"נקיה" של המחלקה לגיאולוגיה באוניברסיטה העברית. ההפרדה הכימית של Sr דרך קולונות נעשתה בדרך המקובלת שתוארה על ידי Starinsky et al. (1983).

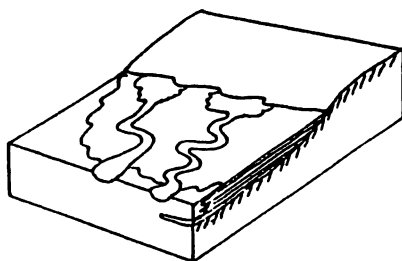
תיארוך U-Th: ארבעה דוגמאות טרוורטין תוארכו בשיטת U-Th במעבדות מכון מקס פלאנק, מיינץ, גרמניה, על ידי די"ר מ. שטיין. האנליזה נעשתה בספקטרומטר מסות מסוג Finnigan MAT 261 המצויד במולטי-קולקטור.

פלאומגנטיות: 11 דוגמאות טרוורטין וגיר אגמי נאספו מאזור כיפת ערגה למדידות פלאומגנטיות. הדוגמאות נקדחו ע"י מקדחה יעודית, מתוך מחשוף אנכי וכיוון הדוגמאות נמדד בשדה בעזרת ברנטון. נאספו זוגות של דגימות סלע צמודות במרווחים של 0.5-0.8 מ'.

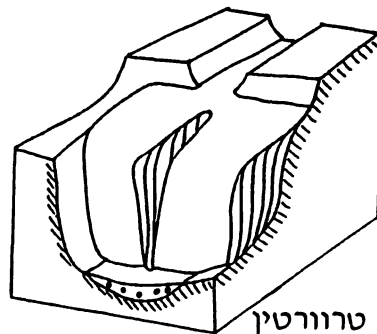
הדוגמאות נוסרו לעובי של אינטש ונמדדו במגנטומטר קריוגני הנשלט על ידי מחשב מסוג 2G-ENTREPRISE בעל רגישות מסדר גודל של 10^{-6} A/m במעבדת המכון הגיאופיזי בחולון. בתחילת המדידה נמדד המינגוט הטבעי (NRM) ואחריו השדה השאריתי בעזרת דה-מגנטיזציה בשדה מתחלף בצעדים של 2.5 עד 5 mT.

2. המורפולוגיה של הטרורטין בערבה

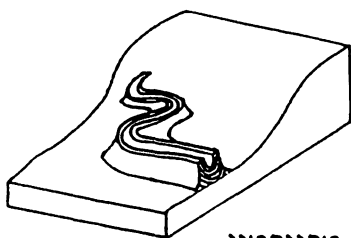
- את הופעות הטרורטין במרחב אזור המחקר ניתן לסווג לארבע קבוצות מורפולוגיות (איור 2.1):
- (1) משטחים - משטחי טרורטין המצפים שטחים נרחבים ותת אופקיים (תמונה G-3). מתאפיינים בעיקר על ידי משטחי אצות ושיכוב אופקי.
 - (2) מפלים - ציפוי טרורטין במפלים ומדרונות תלולים. משקעים אלה מאופיינים בעיקר על ידי שכבות של מאובני טחבים, שיכוב תלול עד אנכי וסטרוקטורות של טיפטוף (תמונות E-1, D-1).
 - (3) רכסים של נביעות סדק - נביעה לאורך סדק שגורמת להשקעת טרורטין בשוליו, להגבהת שוליו וליצירת תפיחה מאורכת מעליו.
 - (4) אמות טרורטין (self built canal) - אמות אלו (תמונה F-8) הינן קירות טבעיים של טרורטין שבראשם תעלה, וגובהן מגיע עד 1.5 מ'. חתך בניצב לקיר מראה רצף שכבות קעורות שיצרו תעלה בראש קיר האמה. קרקעית התעלה מוגבהת על ידי הטרורטין עם הזמן, גם קירותיה מוגבהים וצורת התעלה נשמרת עם התגבהותה.
- המורפולוגיה הנפוצה של טרורטינים בערבה מיוצגת על ידי משטחי הטרורטין (תמונה G-3). הם מצויים בכל המחשופים באזור זה ללא יוצא מן הכלל ובמקומות בודדים מופיעות מורפולוגיות נוספות (אמות- מואה, עין נואית ועין גדך מפלים ומדרונות- נחל חצבת, צופר, נחל עשת; רכסי סדק- נחל שברים). משטח כזה מחייב את קיומה של חזית נביעות רחבה ומדרון מתון שכן במדרון תלול תיווצרנה תעלות. זרימת המים למינרית ואיטית דבר שמאפשר התפתחות צמחיה צפופה, וזו ממתנת עוד יותר את מהירות זרימת המים ומונעת התחתרות. הצטברותו של הטרורטין מקטינה את השיפוע המקורי של המידרון ומפלסת משטח עליון. היות שבאזור משופע שוקע יותר טרורטין, קטן השיפוע עם הזמן ורובד הטרורטין השטוח מתרחב. דוגמאות רצנטיות לכך ניתן לראות בזרקא מעין (שבירדן) שם מצוי רובד טרורטין אופקי שטוח באורך של כ-80 מ' שעליו ערוצי זרימה עד למפל שגובהו כ-20 מ'. רבדות שטוחות ומוגבהות בעלות מפלים בקצותיהן מוכרות גם באיטליה, לדוגמא Rocchetta a Voltorno. בצפון ישראל מופיעים משטחי טרורטין בנחל חרוד וברמת הבניאס.



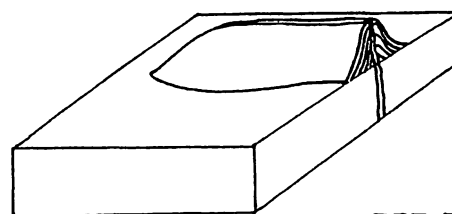
משטח טרורטין



מפל טרורטין



אמת טרורטין



נביעת סדק

3. פטרוגרפיה ומינרלוגיה

כללי

רוב משקעי המעיינות הקרבונטיים בעולם מורכבים קלציט דל מגנזיום (Ford and Pedley, 1996). לעיתים מופיעים גם ארגוניט, סידריט (Amundson and Kelly, 1987) או פרוטודולמיט (Smoot, 1978). המינרלים המלווים הינם קוורץ, חרסיות ותחמוצות ברזל. הטרורטין בערבה בנוי מקלציט דל מגנזיום כאשר בחלק מן הדוגמאות מופיעים גבס, חרסיות, קוורץ ותחמוצות ברזל בכמויות נמוכות. לא נמצאו עדויות לארגוניט או קלציט מגנזי. גבישי הקלציט מופיעים בשלוש צורות:

א. **מיקריט (micrite)** - גבישים קריפטוקריסטלינים עד מיקרוקריסטלינים, אפורים ואטומים לאור, המרכיבים פלואידים או מטריקס.

ב. **מיקרוספאר (micro-spar)** - גבישים שווי מימדים, אאוהידרליים שגודלם נע בין 10 ל-50 מיקרון הבונים את הצמנט, קרומי הקלציט הלמינריים, ואת מילוי החללים.

ג. **ספאר (spar)** - גבישים שאורכם מגיע עד לסנטימטר, המופיעים כגבישים מאורכים וצרים, לעיתים בהופעה גסת גביש ולעיתים בהופעה סיבית או דמוית מניפה. כיוון ההחשכה של הגבישים הינו בכיוון ציר האורך שלהם ולכן מתקבלת החשכה גלית שמתקדמת ברציפות מצידה האחד של מניפת הגבישים לצידה האחר או יוצרת צורת צלב כאשר הגבישים מסודרים קונצנטרית.

הנקבוביות של הסלעים גבוהה אך משתנה בהתאם לטיפוס הטרורטין ולהיסטוריה הדיאגנטית שלו. הנקבוביות מורכבת בעיקרה חללים מקוריים של מרכיבים צמחיים שהתפרקו, חללים בין משטחי אצות וחללים בין המרכיבים הצמחיים התומכים את הסלע.

מרכיבים פטרוגרפיים

פלואידים (peloids)

המונח פלואידים מגדיר מגוון גופים מיקריטיים מעוגלים עד אי רגולריים, אטומים עד חצי אטומים. הם בנויים גוש מיקריט יחיד או תלכיד של גופי מיקריט קטנים ואז הם בעלי מראה מנומר.

הופעה כללית: הפלואידים המיקריטיים מופיעים בטווח גדלים מ-20 מיקרון עד 250 מיקרון, כבודדים או כתלכידים של מספר פלואידים. לעיתים הם דחוסים לגופי מיקריט גדולים ואחידים שרק בקושי ניתן להבחין במבנה הפלואידי שלהם. צורת ההופעה הנפוצה היא של קבוצות של עשרות פלואידים שיוצרים "ענני" פלואידים בתוך מטריקס ספארי. צורתם מעוגלת, אובלית או אי רגולרית. פלואידים מאורכים דמויי נקניקה אינם נדירים, אורכם כ-100 מיקרון ויותר ורוחבם כ-10 מיקרון (תמונות A-1, A-4).

מבנה פנימי: חלקם הגדול בנוי מספר גושי מיקריט בגודל 3-5 מיקרון. גבולם החיצוני בדרך כלל דיפוזיבי ורק לעיתים רחוקות קיים סביבם ציפוי מיקריטי אטום, אך בלטים הם בעלי הופעה אוררית, מסועפת, דמוית נוצת פוך. הם בנויים סבך צפוף של פילמנטים דקיקים ומפותלים בעובי של מיקרון ומטה. השוליים הדיפוזיביים נובעים מפילמנטים הבולטים מעט משולי הפלואיד (תמונה A-1).

הופעה בסלע: הפלואידים בנויים אזורים רצופים של פלמיקריט (pelmicrite). הם מופיעים בהופעה גיאופטלית בחללים מקוריים של צמחים או חללים מקוריים בין צמחים. חלקם צף בתוך צמנט מיקרוספארי ללא מגע בפלואידים אחרים (תמונה A-4). בטרורטין האינטראקלאסטי, שם הם דחוסים לגופי מיקריט, נמצאים חלק מהפלואידים במגע הדוק עד כדי יצירת מגעים משולשים. בצידם מופיעים חלקיקים קלאסטים, חתיכות פחם שברי מיקרו פאונה ושברי קרומים ספאריים שמקורם בטרורטין.

קיים קשר בין הפלואידים לבין ציפויים מיקריטיים על סטרוקטורות אורגניות. הפלואידים מחוברים לציפויי המיקריט ולעיתים הציפויים בנויים על טהרת גופים פלואידלים קטנים (תמונה A-2). בלטים מופיע הציפוי המיקריטי בהופעה אוררית עם מבנה מסועף של פילמנטים דומה לזה של הפלואידים (תמונה A-3).

הפלואידים מהווים, לעיתים, גלעין גיבוש למעטפות מיקרוספאריות (תמונה A-4). זוהי מעטפת קונצנטרית ברוחב 9-10 מיקרון ויותר של קלציט מיקרוספארי עכור בעל צביעה חומה, שגבישיו מסודרים באופן רדיאלי סביב הפלואיד. בפלואידים הסמוכים לקרומי קלציט מעטפת זו יכולה להגיע לרוחב גדול פי שניים מקוטר הפלואיד. הציפוי במיקרה כזה הוא בדרך כלל א-סימטרי (תמונה A-2, A-6). הצבע החום הולך ונעלם בהדרגה עם המרחק

מהפלואיד שבמרכזו אל שולי הטבעת הספארית, כך שנוצרת כעין הילה חומה דיפוזיבית סביבו. הילה זו מופיעה גם בקרומי הספאר המצפים קרומים מיקריטיים (תמונה A-2), ומקורה כנראה בפילמנטים בולטים משולי הפלואידים והקרומים המיקריטיים. במעטפת הספארית ניכרים לעיתים שרידי למינציה קונצנטריים שמקורם כנראה במשטח פילמנטים מיקריטי משוכב שעטף את הפלואיד ועבר ספאריטיזציה (תמונה A-5).

הקשר בין הפלואידים למשטחי אצות: בחינת המבנה המרחבי של המטריקס הפלואידית בעזרת בינוקולר מגלה שמדובר במבנה תלת מימדי סבוך של פילמנטים ופלואידים היוצרים מבנה "שיחי" סבוך ועם זאת נקבובי ביותר. לעיתים יושבים פלואידים ישירות על הפילמנטים או בקצוות שלהם (תמונה A-3).

בטרוורטין שבמראה מצויות לחילופין שכבות של "שיחים" פלואידליים ושכבות פילמנטים למינריות המכסות את השיחים הפלואידיים.

משטחי אצות (Algal mats)

משטחי האצות בנויים שכבות דקות וגליות המופרעות לעיתים על ידי סטרוקטורות פנימיות. עובי כל משטח אצות קטן מ-1 מ"מ אך הם מצטברים לרצף שעוביו יכול להגיע לעשרות סנטימטרים (תמונה D-2). השכבות בנויות חלק עליון דק ועכור וחלק תחתון עבה יחסית וצלול בשקף פטרוגרפי. את העכירות מקנה סבך סטרוקטורות פילמנטיות דקיקות שמזכיר במראהו תפטיר קורי פטריה. סבך הפילמנטים משורג בתוך מוזאיקה של קלציט מיקרוספארי. בתוך הסבך משובצים גופי מיקריט בגודל ממוצע של 2-5 מיקרון שיוצרים מראה מנומר (תמונה A-3). הפילמנטים מצופים במיקריט, עוביים כ-0.5-1, מיקרון ואורכם למעלה ממאה מיקרון (תמונות A-3, A-7, A-8). הפילמנטים מאוד מסועפים וצורתם מפותלת כשל ענפים. בשונה מחללי הצמחים, הם בנויים מחלל שבמרכזו כעין סיב קלציט ולא מחלל מאורך מצופה קלציט, הם מופיעים פעמים רבות כזוג סיבים מקבילים, ויתכן שהם מתפצלים במקביל לציר האורך שלהם.

השיכוב של משטחי האצות והלמינציה הפנימית שבתוכם נוצרים על ידי סידור מחזורי מקביל למצע של פילמנטים וגופים צפופים זעירים. אחראים לכך בעיקר שינויים מחזוריים בצפיפות ובאורינטציה של הפילמנטים. בשכבות העכורות צפיפות הפילמנטים גדולה והם שרועים במקביל למצע. בין השכבות העכורות והדקות מופיעים אזורים עבים ובהירים בעובי של עשרות עד מאות מיקרונים בהם צפיפות הפילמנטים נמוכה וכיוונם ניצב למצע.

רוב משטחי האצות נחדרו על ידי חללים משניים (תמונה B-1) שמקורם כנראה בנבירה, התיבשות וסידוק או המסה (תמונות D-6). פגיעה זו מחקה במקומות סטרוקטורות מקוריות כמו למינציה ופילמנטים דקיקים, אך מאידך הבליטה את הגופים הפלואידים המיקריטיים הגדולים על רקע הספאר הצלול. בקלציט הספארי שממלא חללים אלו צפים מעט קרעי פילמנטים, דטריטוס, פלואידים וגופים מאורכים (עד 120 מיקרון ורוחב כ-20 מיקרון) הבנויים מפילמנטים צפופים. לחללים מספר מאפיינים:

- (א) החללים מסודרים במקביל למשטחי האצות.
- (ב) משטחי האצות נחתכים על ידי החללים אך מגיבים אליהם. משטחי האצות מקומרים כלפי החללים ומצפים את קירותיהם החיצוניים של העמודים (תמונה D-6).
- (ג) המגע בין החלל למשטחי האצות חד.

משטחי האצות שנשארו בין החללים הם הבסיס לבלוטות המעוגלות שבג משטחי האצות. בליטות אלה מזדקרות לגובה של כ-1 סנטימטר, הן בעלות למינציה פנימית וראשיהן מגיע לעיתים למשטח שמעליהם. יתכן והפלואידים שממלאים את החללים מקורם בפעילות בע"ח הנוברים שמפזרים ומפוררים את הפילמנטים אך לא את הפלואידים הצפופים.

אופי המשטחים, צורת הפילמנטים ועובים הדק מזכירים ציאנובקטריות רצנטיות מהסוג *Scytonema* או *Schizothrix* (Schafer and Stapf, 1978). במספר דוגמאות מטרוורטין בתצורת חצבה משתרגים הפילמנטים הללו ב"שיחים" של פילמנטים עבים המזכירים ציאנובקטריות רצנטיות מן הסוג *Phormidium* או *Calothrix* ו/או *Dichothrix* (תמונה B-2). הפילמנטים נראים כענפים המגיעים לגובה של 2 מ"מ לפחות, ומופיעים בין גבישי הקלציט המאורכים כשרידים של שיחים גדולים יותר. עובי הפילמנטים כ-40 מיקרון והם מסתעפים זה מזה תוך כדי יצירת מבנה שיח בעל בסיס צר כלפי פנים ושיא רחב כלפי חוץ. השכבות הכהות שבציפויים מכילות פילמנטים של *Scytonema* או *Schizothrix* בלבד, ואילו השכבות הבהירות מכילות לעיתים גם "שיחי"

Dichothrix ו-*Calothrix-Phormidium*. בין ענפי השיחונים מפוזר סבך פילמנטים דקיקים בעובי 0.5 מיקרון. הפילמנטים מופיעים ללא סדר, ומראים חתכי רוחב ואורך שמציגים חתכים חלולים, מעוגלים או צינוריים.

צמנט וציפויים ספאריים

ציפויי קלציט ספארי מופיעים סביב חללי צמחים, פלואידים, חלקיקים קלאסטיים וסביב ציפויי מיקריט. ציפויי מיקרוספאר: ציפויי המיקרוספאר מופיעים כמעטפת קונצנטרית (תמונה A-6) או שטוחה בעלת מבנה שכבתי וגלי במקצת על פלואידים, אלמנטים צמחיים וציפויים מיקריטיים (תמונה A-2). באזורים הקמורים מתעבים הציפויים ויוצרים בליטות, בדומה למשטחי אצות (תמונה B-8). הציפויים בנויים משכבת גבישי ספאר יחידה בעובי 0.5-2 מ"מ או שכבות מיקרוספאר המתחלפות עם רבדי מיקריט. הגבישים ניצבים למצע ומקבילים זה לזה או יוצרים מבנה מניפתי ואז הם תת-ניצבים למצע (תמונה B-4). המצע הוא בדרך כלל רובד מיקריטי שעוטף שריד של אלמנט צמחי.

בחלק מן הציפויים מופיעים שרידים של למינציה צפופה המקבילה לתבליט המצע (רוחב כל למינה כ-7 מיקרון ומספרן עולה על 20-30). הלמינציה דומה לזו המופיעה במשטחי האצות. לעיתים הלמינציה מלווה בגושים פלואידיים (תמונה A-5) שיכולים להצטרף זה לזה וליצור שכבת מיקריט אי-הומוגנית בעוביה או עדשת מיקריט בין שכבות הציפוי הספארי. הפלואידים גורמים לחלק החיצוני של הציפויים להתקמר ולעטוף אותם. יש ופלואידים מונחים במגרעות שמופיעות בחלקם העליון של הציפויים הספאריים (תמונות A-2) כך שנוצר מגע של פשרה בין ציפוי הפלואיד לבין הציפוי עליו הוא מונח.

צבעו של ציפוי המיקרוספאר הוא חום עכור יחסית לזה של הצמנט הספארי השקוף, והגבול שלו דיפוזיבי, בדומה לפלואידים. הצביעה מופיעה בקרבת המרכז או השוליים המיקריטיים ודועכת עם ההתרחקות מהם. ברוב המקומות לא נשמרו הלמינציה והצביעה בגלל ספאריטיזציה של ציפוי המיקריט הבנוי פילמנטים (תמונה A-5). פילמנטים דקים בצפיפות גדולה מופיעים בציפויי המיקרוספאר. הם נראים רק בהגדלה מירבית ובלטשים. פילמנטים אלה דומים מאוד לאלו הבונים את משטחי האצות והם שרדו בעיקר באזורים שבהם השתמרה גם הלמינציה.

מציאות הפילמנטים, גושי מיקריט, השכבתיות הגלית והלמינציה העדינה, מעידים שמקור הציפויים הספאריים במשטחי אצות שעברו ספאריטיזציה.

צמנט ספארי: צמנט מיקרוספארי עד ספארי מלכד את רוב מרכיבי הטרורטין, פלואידים (תמונה B-6), פילמנטים אצתיים, אינטרא-קלאסטיים ומרכיבים קלאסטיים (תמונה B-3). בניגוד לציפויי הספאר של משטחי האצות הצמנט הוא בלוקי צלול וגבישיו שווי גודל. לעיתים גבישי הספאר כולאים בתוכם חלקיקי מיקריט קטנטנים ואז הם עכורים במקצת אך פילמנטים כמעט לא מופיעים בהם. משטחי פילמנטים שלמים שנשמרו בתוך הספאר בדוגמאות מצופר מעידים על כך שהספאר גדל בשלב דיאגנטי מוקדם, במקומות אחרים הפילמנטים אינם שמורים.

מילוי חללים: חללי ההמסה של שלדי הגסטרופודים וחללי הפרוק של החומר האורגני הצמחי התמלאו לגמרי או בחלקם על ידי קלציט ספארי צלול בגיבוש דרוזי או על ידי גבס.

המשותף והשונה בין הטרורטינים האותיגניים השונים בערבה

בשולי הערבה מצויים טרוורטינים בני גיל שונה (פרק 5) והם מחולקים לארבע קבוצות עיקריות:

(א) טרוורטין חצבה

(ב) טרוורטין המפלס העליון- טרוורטין הערבה

(ג) טרוורטין מפלס הביניים- טרוורטין מואה

(ד) טרוורטין המפלס התחתון- טרוורטין האפיק

לקבוצות השונות מאפיינים ליתולוגיים ופטרוגרפיים

ציפויים ספאריים: טרוורטין חצבה האותיגני מכיל ציפויים עבים וגסי גביש במיוחד (תמונה C-5). אורך הגבישים מגיע ל-1 ס"מ ורוחבם ל-1-2 מ"מ (תמונה B-4). הגבישים גדלים מפני השטח של סטרוקטורות צמחיות כך שנוצר מבנה גבישי ראדיאלי של גבישים מאורכים ותת-מקבילים.

הגבישים הרדיאליים חוצים שיכוב קונצנטרי, למינרי וצפוף. הלמינציה גלית ומקבילה למצע, כנראה שמקורה

במשטחי אצות.

בתוך שכבות הגבישים הגסים מופיעים לעיתים רפאים (ghosts) מעוגלים של חללי צמחים או פלואידים ופילמנטים של ציאנובקטריה. גבישי הקלציט המאורכים גדלים כלפי חוץ על אזורי מיקרוספאר עשירים בענפי "שיחים" של ציאנובקטריות (תמונה B-2).

לעומת טרוורטין חצבה בטרורטין הערבה ובטרורטין מואה הציפויים דקים שווי עובי, למינריים ובנויים גבישי ספאר קטנים או מיקרוספאר. בטרורטין האפיק כמעט ולא מובחנים ציפויים ורוב נפח הסלע בנוי צמנט מיקרוספארי.

איכול: בטרורטין חצבה גבישי הספאר הגסים התפתחו על חשבון סטרוקטורות ביוגניות וסדימנטריות מקוריות (תמונות B-2, B-5), ה"שיחים" נותרים רק באזורים לא פגועים. הפלואידים מועטים ביחס ליחידות האחרות, טרוורטין ערבה, מואה והאפיק מכילים הרבה יותר פלואידים והמיקרוספאר בהם כמעט ואינו תוקף סטרוקטורות מקוריות ואם כן, אזי האיכול מתבצע כגידול גבישי מיקרוספאר עדינים על חשבון שולי פלואיד אך לא מחיקתו. לא מופיעים בהם שיחים ציאנובקטריאליים אלא רק פילמנטים.

coated grains: טרוורטין חצבה מכיל גרגרים מצופים (coated grains) במגוון גדול, מבנים סטרומטוליטים גדולי מימדים, אונקואידים בקוטר של כ-20 ס"מ (תמונה E-7), פיזוליטים בקוטר של כ-6 מ"מ (תמונות B-5, C-4) ועד אואוליטים בקוטר של עד מאות מיקרונים.

הפיזוליטים מופיעים במבנה תמוך מטריקס מיקריטי או ספארי שבתוכו צפים פלואידים. במרכזם מופיע מאובן צמחי כמו ענף (תמונה C-3) או שבר טרוורטין ולעיתים גרגר קוורץ, חצץ, שבר שבלול או מיקרופאונה (אוסטרקוד או פורמיניפר מגולגל). ציפויי הגרגרים למיניהם בנויים למינות בהירות בחילופין עם למינות כהות. הלמינות הבהירות אחידות במראהן ובנויות מיקריט או מיקרוספאר דק מאוד ומכילות פילמנטים מפוזרים ללא סדר. הלמינות הכהות עבות מן הבהירות והן בנויות ספאר שמכיל גם כן פילמנטים ציאנובקטריאליים מפוזרים ללא סדר. ההבדל בין הלמינות הכהות והבהירות הוא בצפיפות ענפי השיחונים וכיונם, המשתנים כנראה בסוג הציאנובקטריה שאיכלסה את הלמינה. האונקואידים הגלילים מורכבים מחללי צמחים מאורכים שנתמלאו בחומר קלאסטי, חללי הצמחים מצופים מעטפה לא-סימטרית משוכבת של קלציט. המעטפה הפנימית חסרת שיכוב, נקבובית ומשורגת בסבך פילמנטים של אצות חוטיות היוצרים מבנים מאורכים. כיונם של האחרונים מצביע כנראה על כיוון זרם המים (תמונה C-3). חללים קטנים (0.2 מ"מ) של נרתיקי תולעים מקנים את הפורוזיות לשכבה אסימטרית זו. יתכן והצורה האסימטרית נוצרה עקב פוטוסקסיס של מושבות אצות בחלק הפונה לאור בליתוקלאסט.

טרוורטין חצבה חסר שיכוב אופקי והוא בנוי בעיקר מציפויי צמחים עבים וחלוקים. טרוורטין הערבה, מואה והאפיק בנויים בעיקר שכבות אופקיות של משטחי אצות.

גבס: טרוורטין חצבה אינו מכיל גבס, עובדה זו קשורה כנראה להרכב המים שהשקיעו את הטרורטין. גבס יכול היה להופיע גם לאחר שקיעת הטרורטין אלא שאז גדול היה הסיכוי למצוא אותו גם בטרורטין חצבה.

הפטרוגנזה של הטרוורטינים האותיגניים בערבה

ארבעה שלבים פטרוגנטיים אובחנו בסלעי הטרוורטין בערבה על סמך המאפיינים הבאים (איור 3.1):

(1) אַלמנטים מיקרטיים - המיקריט מופיע כציפוי הבסיסי בכל הסטרוקטורות האורגניות והאי-אורגניות ועל כן נחשב כאלמנט הראשון ששקע. מקורו כנראה בהשפעה או השקעה של מקור של מקור ביוגני, כיוון שהוא בונה את הסטרוקטורות של הפילמנטים הציאנובקטריאליים והפלואידיים.

(2) ציפויי מיקרוספאר - צפוי מיקרוספארי משני מופיע על חשבון מיקריט ופלואידיים. מקורו של המיקרוספאר שבציפויים הוא כנראה ברקריסטליזציה (דיסמיקריטיזציה) של המיקריט, דבר העולה מהמעברים ההדרגתיים ביניהם, מהלמינציה המאפיינת את שכבות המיקריט ושרידיה מופיעים בציפויי המיקרוספאר, ומהסטרוקטורות המיקריטיות שנמחקות על ידי המיקרוספאר. הרקריסטליזציה התרחשה בסמיכות רבה להשקעת המיקריט. מסקנה זו נובעת מן השיקולים הבאים:

א) המיקריט שעוטר את חללי הצמחים אינו די קשיח למנוע את קריסתם ללא המיקרוספאר, כך שהמיקרוספאר צריך לשקוע עוד לפני פירוק הצמחים כדי לחזק את דפנות ציפוי הצמחים (Heimann and Sass, 1989).

ב) חילופים מהירים של ציפויי מיקריט ומיקרוספאר כמו גם פלואידיים מיקריטיים במיקרוספאר מרמזים על שקיעתו של המיקריט בד בבד עם המשך הדיסמיקריטיזציה.

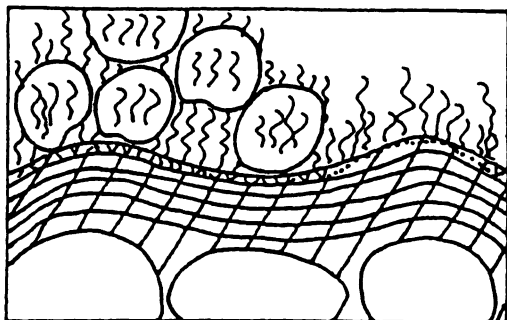
הרקריסטליזציה פוגעת בעיקר בפילמנטים המיקריטיים הבונים את הפלואידיים ואת משטחי האצות. תהליך הרקריסטליזציה אינו שלם כיוון שנשארים אזורים בנויי מיקריט והמעבר בין מיקריט למיקרוספאר המשני הינו הדרגתי כפי שנראה בצביעה הדיפוזיבית המאפיינת את המיקרוספאר, ובעובדה שאת רוב הפלואידיים מקיפה הילת מיקרוספאר (Kronfeld and Livnat, 1987). Love and Chafetz (1988) מסבירים תצפיות אלו כגיבוש מחדש של קלציט גס גביש על חשבון "שיחיים" ציאנובקטריות. שכבות הציאנובקטריות מותרות רפאים של שיכוב בתוך גבישי הספאר הגסים. תהליך הספאריטיזציה משתלם אנרגטית כיוון שהמיקריט הוא דק גביש ושטח הפנים הגדול הסגולי שלו גדול ביחס לספאר גס הגביש.

כמותו של המרכיב הספארי גדלה והולכת מטרוורטין האפיק דרך טרוורטין מואה וטרוורטין הערבה לטרוורטין חצבה. בטרוורטין חצבה הספאריטיזציה אינטנסיבית ומאופיינת בגיבוש ספאר גס המוחק סטרוקטורות ביוגניות וסדימנטריות מקוריות (כמו "שיחיים" ביוגניים, פיזוליטים ולמינציה). תוך כדי התהליך נוצרו גבישי ספאר דומים לגבישי הציפויים המיקרוספאריים בטרוורטינים הצעירים יותר, אך נבדלים בהיותם גסי גביש. הספאריטיזציה מוקדמת וגילה כגיל טרוורטין חצבה כיוון שכבר בגיר הדטריטי שבאותה יחידה מצויים שברים של ציפויי ספאר גס.

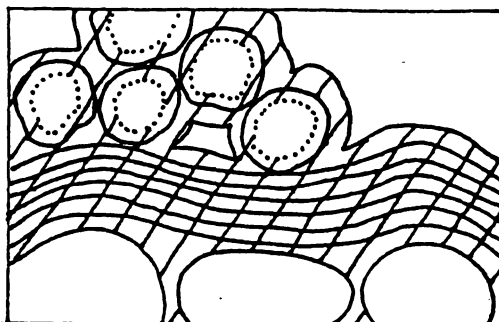
הילות מיקרוספאר שהתגבשו בשולי הפלואידיים שימרו את הפלואידיים ממעיכה וליכדו אותם זה לזה במבנה תמוך גרר. כנראה שמקורו של חלק ממיקרוספאר זה הוא ברקריסטליזציה של ציפויי מיקריט של פילמנטים בפלואידיים.

(3) דטריטוס מיקריטי וסילט קרבונטי - דטריטוס מיקריטי וסילט קרבונטי ממלאים חללים ומכסים את ציפויי המיקרוספאר, כך שהם מאוחרים לו. ההופעה של המיקריט והסילט הקרבונטי בדרך כלל גיאופטאלית ויתכן שהם שקעו במשטר השקעה ואדווי אף על פי שאין לכך עדויות נוספות. בכמה מקומות מופיע קלציט דרוזי צלול בין הציפוי המיקרוספארי לדטריטוס מיקריטי וסילט קרבונטי, כך יתכנו שלבי ביניים של השקעת מעט צמנט קלציטי ממי החללים. יתכן ומקורו של חלק מהקלציט בשלדי גסטרופודה המומסים שמהם נותרו רק הדפסים.

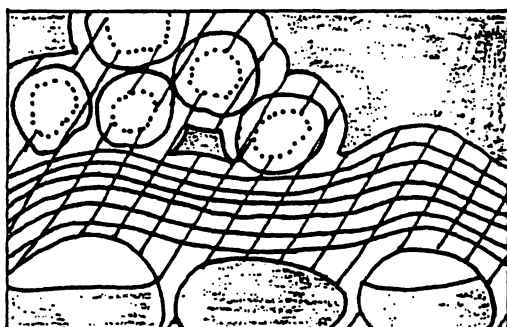
(4) מילוני החללים - חלק מן החללים מלאים בקלציט דרוזי או בלוקי ובגבס. מילוי החללים מאוחר להשקעת כל האלמנטים בוני הסלע כיוון שהוא מלכד אותם וממלא אף חללים בתוך הסילט הקרבונטי. מקור החללים הוא ראשוני (חללי צמחים ומולוסקה, חללים בין אלמנטים, בועות גז) ובחלקו משני (נבירות חללי המסה ופרוק של חומר צמחי ושלדי מולוסקה).



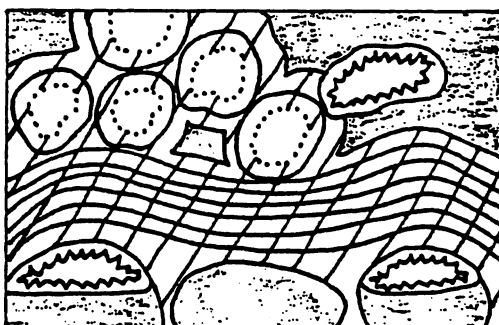
(א)



(ב)



(ג)



(ד)

איור 3.1: שלבים ביצירת הטרוורטין

- (א) משטח אצות שחלקו הפנימי עבר ספאריטיזציה מכוסה פילמנטים ופלואידיים
 (ב) משטח הפילמנטים והפלואידיים מכוסים בספאר שמקורו במקריט של ציפוי פילמנטים
 (ג) החללים והנפח שבין הפלואידיים מתמלא סילט קרבונטי
 (ד) היווצרות חללים משניים ולאחר מכן מתמלאים בקלציט דרוזי.

מקור המיקרוספאר

בטרוורטינים האוטוכתוניים ניתן להבדיל בשני מרכיבים מקוריים עיקריים: קלציט ספארי בהופעה למינרית ומיקריט בהופעה פלואידיית או מסיבית. הטרוורטין הלמינרי מכיל בעיקר קלציט ספארי ואילו טרוורטין הצמחים מכיל בעיקר את המרכיב הפלואידי.

הטרוורטינים הקלאסטיים בנויים בעיקר מחומר קלאסטי ומיקריט. הקלציט הספארי הוא משני ומופיע בהם כמילוי חללים או כחלקיקים קלאסטיים.

נראה שמקור המיקריט הוא ביוגני כיוון שהופעותיו הנפוצות כוללות: ציפוי סטרוקטורות צמחיות, פלואידיים או פילמנטים של ציאנובקטריות. המיקריט עוטר חללים שמורים של צמחים דבר המעיד על התגבשותו לפני פירוק הריקמה האורגנית (Heimann and Sass, 1989).

עולה השאלה האם המיקרוספאר הוא נאומורפי (neomorphic) על חשבון המיקריט או רק מצפה את המיקריט? Heimann and Sass (1989) הדגישו בטרוורטינים מרמת הבניאס כי המיקרוספאר מייצג טקסטורה אי-אורגנית מקורית אך בטרוורטינים שנבדקו בעבודה הנוכחית, נמצאו במיקרוספאר שרידי למינציה הדומים לאלה שבציפוי המיקריט. נראה שהמיקרוספאר מוחק את הלמינציה המקורית של המיקריט תוך כדי תהליך הנאומורפיזם ואם כך מקורו כנראה ביוגני.

Kronfeld and Livnat (1987) מציגים את הילות הספאר של הפלואידיים כעדות לקלציפיקציה של גבישי המיקריט. גבישי המיקריט הביוגנים משמשים גלעיני גיבוש לספאר אי אורגני השוקע מן המים. הסבר זה היה מתישב עם מבנה פלואידי תמוך או עם מצב בו הפלואידיים היו רוכשים את ההילה לפני שקיעתם אך לא עם

מצב בו הפלואידים צפים בספאר. אם מקובל שהפלואידים גדלים במקומם בתוך מושבת ציאנובקטריות אזי הם יצרו מבנה מקורי תמוך גרגר שיתפתח למבנה פלואידים צפים בספאר, כאשר הילות הספאר יגדלו על חשבון הפילמנטים המיקרטיים שבשולי הפלואידים (תמונה 4-A).

עדויות נוספות לנאומורפיזם קלציטי הם גבישי הספאר הגס שמאכל סטרוקטורות מיקריות של "שיחי" ציאנובקטריות בטרורטין הלמיני או באונקואידים ובמעטפות מיקריות של פיזולטים. (Love and Chafetz 1988) מראים תופעות דומות של גידול גבישי ספאר גסים על חשבון "שיחי" ציאנובקטריות בתהליכי נאומורפיזם. הם נותנים הסבר לעובדה שבגבישי הספאר הגס חוצים את מישורי הלמיניציה. (Schafer and Stapf 1978) מזכירים גם הם תופעה דומה של ספאריטיזציה הקשורה באופן לא ברור למושבות ציאנובקטריות באונקואידים.

חימצון החומר האורגני של הציאנובקטריות או של הצמחיה העטופה על ידיהם מאפשר רקיסטליזציה בחלק העמוק של הציפוי בד בבד עם המשך השקעת קלציט בחלקו החיצוני. (Kazmierczak and Kempe 1990) תיארו מצב כזה בציפוי מיקרטי-ספאריט בסטרומטוליטים רצנטיים. הם מסבירים זאת על ידי מינרליזציה in-vivo של החלק החיצוני במושבה על ידי קלציט דל מגנוזיום. מינרליזציה זו יוצרת ציפוי מיקרטי כהה שכולאת את שאר המושבה שלא עברה קלציפיקציה. באזורים הפנימיים, המצופים, מפורק החומר האורגני על ידי בקטריות בתהליכים אנארוביים של חיזור סולפט דבר שמעלה את האלקליניות וגורם לקלציפיקציה מיקרוספארית שלהם.

הצמנט המיקרוספאר הצלול מלכד את הפלואידים או ממלא חללים, ויצירתו היא אי-אורגנית כיוון שלא מופיעים בו פילמנטים וקיים מעבר הדרגתי בינו לבין קלציט דרוזי שממלא חללים. לעומתו ציפוי המיקרוספאר החום גדל סביב פלואידים או יוצר משטחים, ומופיעים בו שרידי למיניציה גלית כך שמקורו כנראה קשור בנאומורפיזם של משטחי אצות.

פילמנטים

קיימים שני מנגנונים מקבילים בהשקעת טרוורטין, מנגנון פיסי-כימי ומנגנון ביוגני, תרומתם של שני המנגנונים שרויה במחלוקת כיוון שהערכת כמות הקלציום קרבונט ששוקע בתהליכים ביולוגיים במערכות טבעיות הוא בעיתי. בטרורטינים של הערבה מופיעות עדויות המסייעות לעמוד על חשיבות האלמנטים האורגניים בהשקעת טרוורטין.

קשה לאפיין מיקרטי ממוצא מיקרוביאלי ולכן הערכת כמותו וחשיבותו היא בעיתית. פילמנטים ברורים של ציאנובקטריות או בקטריות נשמרים בדרך כלל רק בטרורטינים רצנטיים ואילו בטרורטינים הולוקניים ופלייסטוקנים נותרות בעיקר סטרוקטורות פלואידיות כמעט ללא פילמנטים (Guo and Riding, 1992; 1994), דבר זה מקשה על הערכת חשיבותו של מנגנון שקיעה ביוגני בעבר. פילמנטים בקוטר 0.5 מיקרון ובאורך 20 מיקרון תוארו על ידי Chafetz and Folk (1984) בטרורטינים פלייסטוקניים מאיטליה ומאידהו, ארה"ב, וזוהו על ידם כבקטריות בשל קוטרן הדקיק והמבנה הפשוט שלהן. הם טענו שרוב מרכיבי הטרורטין ובעיקר הפלואידים (המכונים אצלם clumps) בנויים על ידי הבקטריות.

המיקרטי בטרורטינים הוא צפוף, לא מלוכד, מנומר, פלואידלי או משוכב ובדרך כלל מכיל רק רפאים בלתי ברורים של פילמנטים אשר בגלל גודלם הקטן, עדינותם והמבנה המרחבי המסובך שלהם נהרסו ואינם ניתנים להבחנה. כדי להבחין בפילמנטים בבירור בדקתי בעבודה זו לטשים בעזרת בינוקולר בהארה ממוקדת. שיטה זו מאפשרת להבחין בברור בפילמנטים במקומות שאלו לא נראים במיקרוסקופ מקטב. בשיטה זו זוהו בדוגמאות טרוורטין פלייסטוקניות מבנה פילמנטים שמורים היטב וכן המבנה המרחבי המסובך שאותו הם מרכיבים. האורינטציה של הפילמנטים במרחב מצביעה על פוטוטקסיס (phototaxis-משיכה לכיוון האור) המעיד על היותן ציאנובקטריות המבצעות פוטוסינתזה. סבך הפילמנטים מופיע בתוך צמנט ספארי צלול דבר המאפשר להבחין בפילמנטים הבודדים. הפילמנטים בנויים מיקרטי ומצופים מיקרטי ובמיקרוסקופ מקטב הם נראים כמשטח מיקרטי מנומר אך באור הממוקד שחודר לתוך הספאר השקוף וב-S.E.M. הם נראים כסבך צפוף מאוד של פילמנטים. ממצאים אלה מביאים למספר מסקנות:

א) הפילמנטים בנויים קלציט, הם אינם מתפרקים ויוצרים חללים בלבד כפי שקורה בצמחים עילאיים. כך שיתכן והציאנובקטריות אחראיות לגיבוש הקלציט.

(ב) הקושי למצוא אזורים עם פילמנטים שמורים תומך ברגישותם לספאריטיזציה. דבר זה נובע כנראה מעוביים הקטן ושטח פניהם הגדול.

במספר מחקרים הוכח שציאנובקטריות מסוגלות להשקיע קלציום קרבונט ויש תמיכה למקור הביוגני של המיקרובי. Krumbein (1979) הראה שמינים רבים של ציאנובקטריות משקיעים קלציום קרבונט באזורים חופיים (סלעי חוף). Thompson and Ferris (1990) הראו שציאנובקטריות ממשפחת ה-*Synechococcus* משקיעות קלצייט (במים מתוקים) על דפנותיהן כתוצאה מפעילות פוטוסינתטית. מנגנון ביוגני בטרורטינים שבערבה נתמך גם על ידי הזרימה האיטית והרדודה שבמשטחים ובהעדר גרגרים קלאסטים. בזרימה שקטה כזו בריחת CO_2 זניחה לעומת צריכת ה- CO_2 על ידי תהליכים פוטוסינתטיים.

פלואידיים

מנגנון היווצרותם של פלואידיים מהווה סוגיה בעיתית בפטרוגרפיה של סלעים קרבונטיים. מקור ציאנובקטרילי הוצע על ידי Chafetz and Folk (1984) האסוציאציה של פלואידיים למושבות מיקרופיטים הועלתה גם במחקרים מאזור העבודה (Buchbinder et al., 1974; Kronfeld and Livnat, 1987).

בדוגמאות ממזרח נמצאו עדויות לקשר גנטי בין פלואידיים לפילמנטים, למשל המבנה ה"שיחי" המרווח של סבך הפילמנטים המכיל פלואידיים בתוכו. דוגמאות מצופר מצביעות גם כן על קשר כזה כיוון שהפלואידיים בנויים סבך של פילמנטים עדינים והם מופיעים על גבי פילמנטים או בקצות פילמנטים בראש משטחי האצות.

טיפוס פלואידיים נוסף הוא גלילי ומאורך, בנוי מפילמנטים אצתיים ומופיע במקומות שבהם נהרסו משטחי האצות על ידי נבירה, יבוש או חדירת שורשים. צורתם ומקום הופעתם של הפלואידיים מעלים שתי אפשרויות:

(א) יתכן והם סטרוקטורה ביוגנית, אצתית מקורית הנותרת לאחר התרוחחות הפילמנטים שסביבם.

(ב) יתכן והם נוצרים כתוצאה מפעולות עיבוד או הריסה של הפילמנטים על ידי אורגניזמים נזירים.

הצורה המאורכת של חלק מהגופים האלה תומכת באפשרות שהפלואידי הוא תוצר איכול או עיבוד של משטחי אצות. תמיכה נוספת לכך מסופקת על ידי קרעי הפילמנטים הפזורים סביב הפלואידיים. היחס בין משטחי האצות לחללים שבהם מופיעים הפלואידיים מראה המשך גידול והתחדשות משטחי האצות לאחר הפגיעה בהם. הדבר מעיד על היותם חיים, רכים ואפשריים לנבירה בזמן יצירת החללים. הלמינציה האופקית על פני שטחים נרחבים, השיכוב האופייני שלעיתים נשמר, ונוכחות הפלואידיים מעידים על כך שרוב משטחי הטרורטינים מייצגים משטחי אצות שמתוכם הגיחו צמחי מים עילאיים זקופים. משטחי אצות מופיעים גם כיום בארועי שפיעה. הם יוצרים משטחים רכים בעובי של כחצי סנטימטר, שחלקם העליון חלק ודביק במקצת וחלקם התחתון מכיל חול ודטריטוס רב.

Krumbein (1979) דיווח גם כן על גופים פלואידיים במשטחי אצות ובשרידיים של אצות. Kronfeld (1987) and Livnat ראו בפלואידיים מושבות קוקואידיים על סמך הדימיון שלהם לגופים פלואידיים מיקרוביים מוקפים מחטי ארוגניט שתוארו על ידי Buchbinder (1974) מטופות של אגם הלשון. לפי Braithwaite (1979) הפלואידיים אינם fecal (גללים) כיוון שקיים אצלם טווח גדלים גדול.

הילת המיקרוספאר שמקיפה את הפלואידיים (תמונה A-4) נוצרת בשלבים הראשונים של ההשקעה. הראיה לכך היא בהבדל שבין הפלואידיים בטרורטין הדטריטי לאלו שבאוטוכונוני. בטרורטין הדטריטי הפלואידיים דחוסים זה לזה ויוצרים לעיתים גוש מיקרובי אחיד בו נעלמים המגעים בין הפלואידיים. בטרורטין האוטוכונוני הפלואידיים נפרדים זה מזה ובדרך כלל הם בעלי הילה קשיחה של מיקרוספאר. הילה זו כנראה שומרת על הפלואידיים מדחיסה וגורמת ליצירת מבנה שאינו תמוך גרגר. הפלואידיים הנוצרים בסביבה שבה מתרחשת שקיעת קלצייט אוטוכונוני, כנראה נעטפים בציפוי מיקרוספארי במהירות ואילו הפלואידיים שמורבדים באזורים של קצב שקיעת קלצייט איטי לא מספיקים לרכוש מעטפת קשיחה ונדחסים.

סיכום

ניתוח פטרורגרי של סטרוקטורות הפילמנטיות, הפלואידיים והמיקרוספאר מעלה אפשרות שחלק ניכר מהטרורטין במשטחי הטרורטין שבערבה שקע בהשפעת ציאנובקטריות. חלק גדול מן הפילמנטים לא נראים ברור כיום כיוון שרובם בנויים פלואידיים צפופים ולא סבך מרווח של פילמנטים.

הפלואידיים שמהוים מרכיב עיקרי בטרורטין בנויים ככל הנראה מפילמנטים דחוסים. לא ברור אם הם סטרוקטורה ציאנובקטרילית מקורית אך נראה שלפחות חלקם הם תוצרי הריסה על ידי אורגניזמים נזירים.

מקור המיקרוספאר הוא ברקריסטליזציה של המיקרובי שבונה את מעטפות הפילמנטים. מיקרובי זה הופך למיקרוספאר תוך כדי טשטוש הסטרוקטורות מקוריות של למינציה והצבע החום שמאפיין את משטחי האצות.

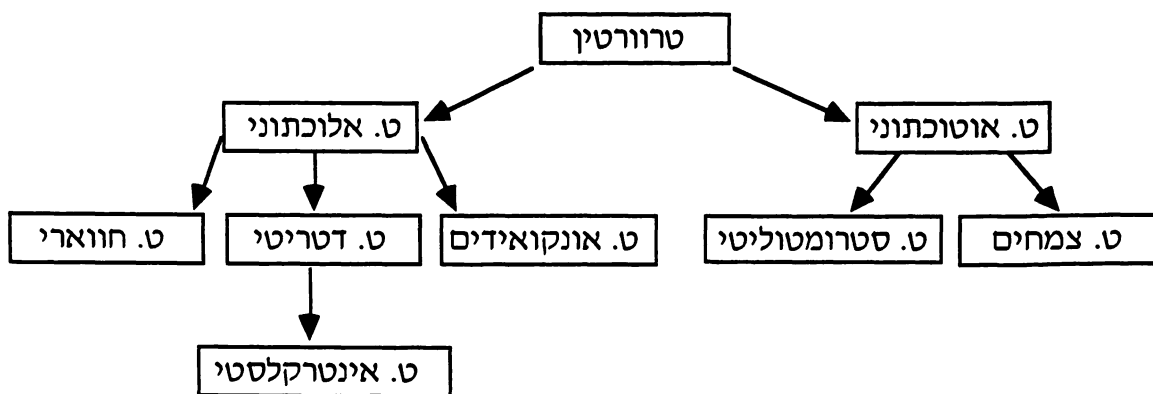
4. טיפוסים הטרורטין וסביבות ההשקעה שלהם

כללי

סביבות השקעה יבשתיות הן הטרורטיות מעצם טבען והסלעים אשר נוצרים בהן מראים שינויי פאצייס ועובי גדולים על פני מרחקים קצרים. השיכוב המקורי אינו בהכרח אופקי, והנטיה משתנה על פני טווחים קצרים. סביבת ההשקעה של מעיינות היא אולי המגוונת ביותר, היא משתנה גם במרחב (בין המעיינות) וגם בזמן (שינויים עונתיים ושנתיים) בעצמת השפיעה, תבליט ושיפועי המדרון, פיזור וסוג הצמחיה, הכימיה של המים ושינויים בטמפרטורת המים. יתר על כן, בכל מעין מופיעות תת סביבות רבות: אפיקי זרימה, מפלים, סכרים, בריכות, משטחי זרימה מכוסי צומח, אחר לח ושטחי הרטבה ויבוש. הטיפוסים הפאציליים השונים של הטרורטונים מתפתחים בהתאם למיקומם בסביבה הזו.

כיוון שסביבת המעיינות מאוד עשירה בצומח, נוצרים בה לעיתים, מבנים ביוגניים גדולי מימדים הבנויים מצמחים וחלקי צמחים עטופים על ידי קרבונט שמצפה את חלקיהם החיצוניים וממלא את החללים שביניהם ובתוכם. מבנים כאלו מכונים פיטוהרם (phytoherm על ידי Buccino et al., 1978). הפיטוהרם מהווה חומר גלם לדטריטוס טרורטוני (phytoclasts) המושקע בחללים שבתוכו או במורד המדרון שלפניו.

מיון ליתופאציאלי על בסיס פטרולוגי של טרורטונים מופיע בספרות במספר שיטות מיון שונות. חשיבותו העיקרית היא ככלי עזר לשחזור סביבות השקעה, למרות הבעיה הכרוכה בהופעת ליתופאצייסים שונים בכל סביבה. Buccino et al. (1978) ו-Ferreri (1985) חילקו את משקעי המעיינות לטרורטין אוטוכתוני ולטרורטין אלוכתוני. להלן התיאור המפורט של סוגי הטרורטין העיקריים כפי שהוגדרו בעבודה הנוכחית על פי התיאור הפטרולוגי שלהם.



טרורטין אוטוכתוני

טרורטין אוטוכתוני מצפה אורגניזמים בנתונים וגרגרים לכדי מבנה קשיח המהווה את שלד הסלע. תהליך הציפוי נעשה *in situ*, ובדרך כלל מופיע בשתי הופעות עיקריות הטקסטורה הנוצרת תלויה בסוג הצמחיה המצופה ובעיקר בגודל האורגניזמים, ולכן הטרורטונים האוטוכתוניים מחולקים לסוגים הבאים:

(א) טרורטין צמחים המכיל צמחים עילאיים וטחבים.

(ב) טרורטין סטרומטוליטי המכיל בעיקר שרידים של אצות וסטרוקטורות של ציאנובקטריות או בקטריות. קימים מעברים בין שני הטיפוסים והם יכולים להיות מעורבים.

טרורטין צמחים (phytoherm travertine)

טרורטין צמחים מופיע בערבה כטרורטין קשה המכיל חללים ודפוסים של טחבים, גבעולים, ענפים ועלים (תמונה E-5) ויוצר דרגש מסיבי (תמונה F-2) בו מופיעות לעיתים שכבות דקות לא רציפות של משטחי אצות. שיכוב קיים רק במקרים בהם נשמרו משטחי האצות וצמחים שרועים (תמונה D-2). חללי הצמחים אופקיים או הנטויים מעידים על צמחים שהיו בעת הציפוי במצב רכון או שוכב כאשר ביניהם בולטים צמחים זקופים (תמונה F-7). תמונה זו מודגמת גם על ידי הצמחיה העכשווית של מעיינות הערבה שבהם שטפונות החורף מרכינים את

צומח האפיק. הצומח החדש מזדקר זקוף מבעד לסבך המורכן. רוב חללי הצומח הם חללי עשבונים וחלקם קנים, מן השלד האורגני של הצמחים לא נותר דבר. הסלע במשטחי הטרוורטין בנוי בעיקר ממשטחי אצות, במפלים וקירות מטפטפים (נחל חצבה, עין גדי, נחל עשת) הוא בנוי בעיקר גבעולי טחבים רכונים כלפי מטה המסודרים במקביל זה לזה ויוצרים שכבות אנכיות (ברוחב 5-20 ס"מ) (תמונה D-1).

חללי הצומח עטופים במעטה קלציט דק בעובי של כ-0.5 מ"מ. החומר הממלא את הנפח שבין מעטפות הקלציט מאפיין שתי צורות טרוורטין עיקריות:

(א) טרוורטין צמחים הומוגני: הצמנט הוא קלציט ספארי חום אוטוכתוני, בהופעה זהה למעטפות הצמחים. במקרה זה ניתן להבחין בצמחים רק בזכות החללים שהותירו. לרוב ניתן להבחין בחזית הגלית של הצמנט על פי צבעו הכהה יותר של הספאר.

(ב) טרוורטין צמחים הטרוגני: המטריקס הוא גיר מיקריטי לבן ואילו מעטפות הצמחים הן מעטפות קלציט ספארי למינרי בצבע חום כהה, המתבלטות על רקע המטריקס הבהיר.

הפאונה המפוזרת בחללים עיקרה גסטרופודים מהסוגים *Melania* ו-*Melanopsis*. טרוורטין זה מופיע במשטחים כמעט אופקיים (נחל משק, עין רחל, מואה), במדרונות תלולים (נחל חצבה) ובמפלים (עין גדי, נחל עשת). בטרוורטינים האופקיים המופיעים במשטחים גדל מרכיב משטחי האצות ביחס לצמחים והפורוזיות קטנה יחסית לטרוורטין הצמחים והטחבים שבמפלים. עיקרו של הסלע בנוי מקרומים ספאריים משוכבים של מושבות פילמנטים ואזורים לא משוכבים של פלמיקריט.

סביבת השקעה: טרוורטין הצמחים מופיע בערבה בעיקר כמשטחים תת-אופקיים. תנוחת הצמחים ומציאות שברי טרוורטין צמחים בטרוורטין הדטריטי (תמונה C-7) הן עדויות להרבתו בסובב של מים זורמים ולא של מים עומדים. מצד שני עצם הופעת הצמחים, החוסר הבולט בגרגרים קלאסטיים בתוך טרוורטין הצמחים, והפילמנטים העדינים שהצטברו בין הצמחים מעידים שהזרימה היתה בעלת אנרגיה נמוכה. חסרונם הבולט של הגרגרים הקלאסטיים כנראה קשור לקיבוע הקרקעית על ידי משטחי אצות ולכושר הסינון של סבך הצמחיה. השתרעותם הרצופה של מחשופי טרוורטין הצמחים על משטחים נרחבים מציינת זרימה למינרית על פני שטחים גדולים ובשיפועים קטנים, שאם לא כן ככל שהשיפוע גדול יותר מתקבלת זרימה מתועלת. הנביעות הנוכחיות מפוזרות על שטח גדול ומופיעות לאורך חזית מוגדרת שמאפשרת יצירת שטח לח נרחב (תמונה H-4) מכוסה צמחיה עם זרימה למינרית רדודה בין הצמחים.

לסוג הצומח חשיבות בקביעת הטקסטורה של הטרוורטין. במשטחים התת-אופקיים מופיעים במקום הטחבים, משטחי אצות משוכבים ובתוכם צמחיה עילאית הכוללת בעיקר שיחים וקנים עם ציפוי דק ושווה עובי (תמונה F-7). במפלים וקירות מטפטפים בנוסף לצמחיה העילאית מצטבר טרוורטין טחבים ומתקבלות מעטפות קלציט עבות וגליות המזכירות משקעי מערות (תמונה D-1).

טרוורטין סטרומטוליטי (boundstone travertine)

הטרוורטין הסטרומטוליטי מופיע בטרוורטין חצבה שבצופר ובנחל חצבה. הוא אינו מופיע במשטחי הטרוורטין אלא בעיקר בסכרים, מדרונות ומפלים או בציפוי של חלוקים, אונקואידים וקבוצות צמחים. הופעתו מזכירה הופעה של סטרומטוליטים בכך שהוא למינרי, יוצר מבנים כיפתיים ומכיל אונקואידים (תמונה E-8). טרוורטין זה הוא בדרך כלל גס גביש ובעל נקבוביות מועטה, צבעו כהה והוא מורכב מרצף שכבות כהות ובהירות (תמונה D-5), בשיכוב מחזורי עדין וברוחב 1-3 מ"מ. השכבות בנויות אף הן למינות עדינות שעובין כ-20 מיקרון ומספרן מגיע לאלפים. הלמינות יוצרות משטחים גליים למינרים במראם. הציפויים סימטריים ומעידים על גידול סביב צמחים זקופים טבולים במים או תחת טיפטוף (תמונה C-5). עובי הקרומים מגיע לעשרות סנטימטרים. חלקם החיצוני מדורג (דמוי flowstone) ומקנה לגבעולי הצמחים צורת נטיפים. במקומות אחדים מופיעים חללים גדולים בטרוורטין הלמינרי ובהם סטרוקטורות טפטוף חרוטיות דמויות נטיפים (תמונה E-1), של משקעי מערות.

סביבת השקעה: טרוורטין סטרומטוליטי מופיע בעיקר במקומות בהם אנרגיית המים גבוהה. לדוגמא, במפלים או בתעלות זרימה על מדרונות, בסכרי טרוורטין או באסוציאציה עם קונגלומרט. הטרוורטין הלמינרי מצפה, גודע או מצופה על ידי טרוורטין הצמחים או מצוי לצידו בשולי מגלש (תמונה D-3). מציאותם של חללים עם נטיפים מעידה על זרימה וטיפטוף מגג מפלים קטנים דבר שיוצר גאות ומערות. הדרוג המופיע על הציפויים מאפיין זרימה על מדרון (Braithwaite, 1979). כמו כן מעיד הכיוון האחד של שובלי אצות על זרימת מים.

טרורטין אלכותוני

טרורטין אלכותוני הוא סלע קלאסטי המורכב בעיקר שברי טרורטין, גופים מצופים או שברי צמחים מצופים (phytoclats) שעברו הסעה. הגרגרים מצויים בתוך או ליד ה-phytoherm או במרחק מה בכיוון מורד הזרימה. ניתן לחלקם על פי גודל הגרגר ואופיו הליתולוגי (אונקואיד, פיזוליט, פיטוקלאסט, פלואיד). Pedley (1990) חילק את משקעי הטרורטין הקלאסטיים למספר טיפוסים:

(1) phytoclast tufa - טרורטינים הבנויים שברים של ציפויי קלציט.

(2) oncoidal tufa - טרורטינים הבנויים אונקואידים.

(3) intraclast tufa - טרורטינים הבנויים חלקיקי טרורטין בגודל חול עד סילט במבנה תמוך גרגר.

(4) microdetrital tufa - טרורטינים הבנויים ממשקעים דקים של מיקריט חסר סטרוקטורה או פלואידים (spring chalk או travertine-marl)

חלוקה זו מתאימה למדי לממצאי העבודה הנוכחית ולכן נעשה בה שימוש להלן.

טרורטין אונקואידים (cyanolith "oncoidal" travertine)

טרורטין זה מאופיין על ידי מעטפות קלציט בעובי 4-200 מ"מ, בעלות התך מעוגל ולרוב צילינדר, לעיתים חסר סימטריה כדורית (תמונה E-3). חוסר הסימטריה מעיד על גיבוש מעטפת סביב פיטוקלאסטים תוך כדי גילגול לא רציף או תחת זרם. טיפוס טרורטין זה יוצר עדשות של חלקי צומח מצופים ומאורכים שרובם בתנוחה אופקית (תמונה D-4). בחתך האונקואיד מופיעות מספר שכבות קונצנטריות של קלציט העוטפות את הפיטוקלאסטים. האונקואידים יוצרים לעיתים מבנה תמוך גרגר המשובץ בטרורטין דטריטי או אינטראקלסטי (תמונות E-7 ו-E-8). בטרורטין חצבה מופיעים משטחי אונקואידים ממוינים היטב ומסודרים בעין ריצוף של קרקעית בריכה (תמונה E-2). מצד שני הם מופיעים בתוך הטרורטין בצורה אקראית ובמיון גרוע (תמונה E-8).

סביבת השקעה: מצבורי פיזוליטים ואואואידים בקרקעית בריכות ומאחורי מחסומים מופיעים בצורה מסודרת שמצביעה על גידולם במקום ולא דוקא על סחיפתם למקום. חלקם, לפחות לא עבר הסעה אלא גדל במקום. האונקואידים והפיזוליטים מפוזרים בחתך לכאורה באופן אקראי, אך הם מופיעים בכיסים שקרקעיתם מצופה בקרומים למינריים. כיסים עם קירות נמוכים המצופים קרומים למינריים והם מייצגים ברכות קטנות שניקוו מאחורי סכרים קטנים (Rimstone pools) וצברו פיזוליטים (תמונה C-4) שגדלו בהם תוך כדי עירבול בזרמי הברכות. ללא יכולת לצאת. לעיתים מכסים האונקואידים בצפיפות משטחים שכנראה היוו קרקעית ברכות (תמונה E-2). במייקרים מסוימים טרורטין האונקואידים בנוי במקומות מסבך ענפים שנלכדו זה בזה ולכדו לסכר על ידי ציפוי אונקואידי.

מנגנון היצירה של אונקואידים קשור במושבות של ציאנובקטריות, בעיקר במישקעים אגמיים, אך הם מצויים גם במשקעים פלוביאליים (Nickel, 1983; Folk and Chafetz, 1983; Zamarrero et al., 1997; Ordonez et al., 1983). הסימטריה הכדורית/גלילית של חלק מהאונקואידים מעידה על כך שלפחות הסימטריים שביניהם עברו גלגול תוך גידולם או שגדלו על ענף שהזדקר אל גוף המים ולא נח על הקרקעית. ענפים כאלה יכולים לבלוט מצמח האם או להזדקר מסכר של ענפי צומח.

טרורטין דטריטי (detrital travertine)

טרורטין דטריטי בנוי שברי טרורטין וליתוקלאסטים בגודל גרגר בתחום סילט ועד 10 ס"מ ויותר. הוא אינו מלוכד כמו הטרורטין האינטראקלסטי או טרורטין הצמחים, לכן שברי טרורטין צמחים וטרורטין אונקואידים בולטים מקירות מחשופיו (תמונה C-7). חלק מריסוק הפיטוהרם מתבצע במקום (תמונה C-8) כנראה כתוצאה מפגיעה פיסית, כמו דריכה על קרום טרורטין אוטוכתוני קשה המונח על תשתית רכה ובוצית או כתוצאה מסידוק של הרטבה ויבוש. הופעת טיפוס זה מגוונת מאוד, בדרך כלל צבעו אפור-ובולטים בו חלוקים וחצץ של סלעי סביבה (תמונה F-2). רבדים של קרומים דקים (פחות מ-1 מ"מ) היוצרים טקסטורות צמחיות מופיעים בקירות מחשופיו ומעידים על מוצאו הטרורטיני. הטרורטין הדטריטי מתאצבע עם קונגלומרט ומצויות בו תעלות רדודות מלאות בקונגלומרט מלוכד היטב בגיר. מצד שני קיים מעבר דיפוזיבי בין הטרורטין הדטריטי לטרורטין האינטראקלסטי. גבס רב מפוזר בסלע ויוצר קרומים קשים ומעוגלים במצוקים. טרורטין זה רך

יחסית ולכן נשמר בעיקר מתחת לדרגשי טרוורטין קשים.

הטרוורטין הדטריטי מכיל שלושה מרכיבים שתורמים לו דטריטוס: מרכיב קלאסטי, טרוורטין וגיר.

סביבת השקעה: הטרוורטין הדטריטי מכסה מדרונות מתונים וממלא שקעים ותעלות המצויים נמוך ממפלס הנביעות ומן האיזור בו נוצר הטרוורטין האוטוכתוני. הוא בנוי בעיקר מתוצרי בליה של פיטוהרם ולכן הוא מכיל גם קלאסטים גדולים ומזוותים של טרוורטין שהוסעו או התגלגלו לאורך מרחק קצר. חלק מן הקלאסטים מצופים בציפוי למינרי. סטרוקטורות צמחיות מראות שגם באזור זה היתה צמחיה והיו מים אך כמות הקלציט שהושקעה בו היתה כנראה יותר נמוכה בגלל סילוקו באזור הפיטוהרם הקרוב לנביעה.

אספקת דטריטוס טרוורטיני על ידי פיטוהרם דומה לאספקת דטריטוס מביוהרם שוניתי ל-fore-reef. היות שהטרוורטין בנוי קרומי קלציט דקיקים ושברים הרי כל אירוע קל כמו תנועת בעלי חיים בסביבת המעין, יבוש והרטבה של התשתית, זרימה חזקה או כל פגיעה מכנית יגרמו ליצור דטריטוס. (Smoot (1978) (המצטט את Slack, 1967) מתאר טרוורטינים שהורבדו על מניפת סחף ונהרסו כליל כל 3-4 שנים בסערות. הטרוורטין שביר עד כדי כך שלמרגלות מניפת הסחף נותרו מן הקלאסטים המקוריים רק גרגרים בגודל חול או סילט. היות והטרוורטין סלע נקבובי קל להסעה, לא דרושה אנרגיה מים גבוהה כדי להובילו למרחק גדול יחסית. נראה עם זאת כי חלק מהטרוורטין הדטריטי בערבה, כלל לא הובל, כיוון שהוא מכיל שברי קרומים עדינים ושברי טרוורטין מזוותים מאוד. במקומות רבים השברים התואמים מרוחקים רק במעט זה מזה ומעידים על ריסוק במקום ולא על הסעה, כך שפרט לטרוורטין דטריטי אלוכתוני, קיים במעיינות הערבה טרוורטין "דטריטי" אוטוכתוני שאינו פלוביאלי אלא שקע בקידמת מידרון הנביעות, באזור היבוש וההרטבה - אזור המלחה.

טרוורטין אינטראקלאסטי (intraclast travertine)

טיפוס טרוורטין מסיבי, דק גביש, לא משוכב, מלוכד היטב, צבעו אפור בהיר, בעל בליה מעוגלת אופינית ומראהו הכללי מזכיר גיר דק גביש (תמונות D-7, D-8). מופיעים בו קרומים ואינטראקלאסטים קלציטיים חומים הבולטים לעומת המטריקס הבהיר ודק הגביש, הם מופיעים כגופים מעוגלים ולעיתים כשברים (תמונה C-6). הטרוורטין האינטראקלאסטי מאופיין ב-Charophytea וקשוות אוסטרקודים שנמצאו בו בלבד ולא בשאר טיפוסים הטרוורטין (תמונה C-2). כמו כן מפוזרים בו באופן אקראי ליתוקלאסטים מזוותים של סלעי הסביבה ומאובני גסטרופודים. חללים מעוגלים אי רגולרים המופיעים במטריקס הבהיר הם כנראה חללי שורשים. חללי צמחים נדירים ואם מופיעים הם מלאים בסילט קרבונטי ומיקריט וחסרים ציפוי קלציט חיצוני. הצמחים כולם מגולגלים. במקומות, סדקי התיבשות עמוקים (40-50 ס"מ) חוצים את הסלע והם מלאים על פי רוב בחומר גס גרגר, חולי או חצצי.

הטרוורטין האינטראקלאסטי בנוי מסילט קרבונטי ומיקריט או קאלקארניט מלוכד על ידי מיקרוספאר או מיקריט. גרגריו הם שברים מזוותים של טרוורטין צמחים, טרוורטין סטרומטוליטי או טרוורטין פלוביאלי עטופים במיקריט חום צהבהב (תמונות B-3, B-8). מעטפת המיקריט מקנה לגרגרים הופעה מעוגלת והיא מכילה לפעמים קוורץ אאולי.

טרוורטין חווארי (microdetrital travertine, travertine-marl)

טרוורטין חווארי עשוי סדימנט דק גרגר בצבע אפור ירקרק. גודל הגרגר הוא חרסיתי עד סילטי והוא חסר סטרוקטורות סדימנטריות אופייניות לטרוורטין פרט לחללים דקיקים ומאורכים של שורשים. תכולת החומר הבלתי מסיס בחומצה מגיעה ל 45%. קיים מעבר רציף בין טרוורטין זה לטרוורטין הדטריטי. מופיעות בו סטרוקטורות פדוגניות כמו תצבירי קרבונט (תמונות F-1, F-4), צביעה אפורה ירקרקה לא אחידה ומבנה סידוק פריזמטי. הסלע מלוכד ומוקשה על ידי גבס ולעיתים הוא מקבל אופי של gypserite. הוא מופיע בשדה כגבעות ומשטחי חוואר פריך (דמוי "פודרה") או בצנירים כאשר הוא נשמר מתחת לדרגשי טרוורטין קשים (תמונה G-3). אופיו הפריך מקשה את הניתוח הפטרוגרפי.

סביבות השקעה: המעברים הלטרלים הדיפוזיביים בין כל טיפוסים הטרוורטין האלוכתוני מעידים על קירבתן של סביבות ההשקעה זו לזו. שרידי ה-Charophytea והאוסטרקודים מצביעים על גוף מים רדוד ושקט. (Souli'e-Marsche, 1993) יתכן ומדובר בגוף מים עומדים שהתקים סמוך למעיינות או בצד ערוץ הזרימה והיה לעיתים חשוף למשטר של יבוש והרטבה. ממצאים נוספים התומכים בכך הם:

משטחי אצות, עדשות טרורטין צמחים קטנות בתנוחת גידול המשובצות בטרורטין האינטראקלאסטי, סדקי יבוש וקרומי הגבס. גוף מים זה קלט לתוכו גרגרים קלאסטיים של טרורטין ושל סלעי סביבה. חלקיקים אלו לוכדו במהלך הצטברותם בגוף המים לעדשה גירית. עדשות טרורטין הצמחים בדרך כלל מרוסקות במקום (in situ) דבר המעיד על אופיו הבוצי של הסדימנט מתחת לטרורטין הצמחים הקשיח (תמונה C-8). עדשות טרורטין צמחים בתוך הטרורטין הדטריטי או האינטראקלאסטי מעידות על תעלות זרימה או נביעות מתוך הטרורטין הקלאסטי.

הטרורטין החוארי שקע בסביבה ביצתית הדומה לסביבת המעיינות כיום. תכולת החרסיות שבו, הצבע האפור-ירקרק המעיד על תהליכי חיזור של סדימנט בתנאי מים עומדים ומצד שני המבנה הפריזומטי שלו אופייני לקרקעות שהיו במשטר של יבוש והרטבה, הגבס הרב המפוזר בחתך, סימני השורשים ותצבירי הקרבונט המופיעים במקומות מעידים על תהליכי חשיפה התיבשות והרטבה מחזוריים כפי שקורה היום סביב למעיינות. גינת (1997) מתאר משקעים דומים לטרורטין החוארי המופיעים כפאצייס שוליים סביב משקעי האגס של נחל ציחור. ההבדל בין הטרורטין הדטריטי והחוארי לבין הטרורטין האינטראקלאסטי (המלוכד היטב) נקבע על פי כמות הצמנט האותינגני. הטרורטין החוארי של מואה ועין רחל מצוי בסמוך למצוק תצורות עירב וטקיה שהיו יכולות לתרום חומר חרסיתי וקרטוני ובמרחק מהנביעה. הטרורטין האינטראקלאסטי קרוב תמיד יותר אל הנביעות המספקות את הקלציט האותינגני.

פאצייאס ההשקעה של הטרורטין בערבה

פאצייאס ההשקעה השלם ביותר נמצא בעמק של מואה ולכן מואה יכולה לשמש כאב טיפוס לשיחזור סביבות ההשקעה. פיזור טיפוס הטרורטין שם (ואדי טובייק, יובל של נחל עמר) מוצג באיור 4.2. ערוצי הנחל חתורים בעמק ויוצרים מגוון של חתכים בטרורטין המאפשרים את שיחזור סביבות ההשקעה. בין הערוצים מצויות גבעות משאר מצוקיות הבנויות בבסיסן קירטון של תצורת עירב, ומעליה טרורטין אלוכטוני המכוסה על ידי דרגש של טרורטין צמחים קשה הבנוי משטחי אצות (תמונה G-3).

מן החתך והמפה (איורים 4.1 ו-4.2) עולות מספר נקודות לגבי יחידת הטרורטין האלוכטוני:

(א) הטרורטין מונח בחלק המערבי של העמק על תצ' מישאש ולכן הנביעות היו תמיד במערב העמק במקום בו חשופה תצורת מישאש המהווה את אקוויפר המקור למים במואה (יחיאלי וחבריו, 1997). גם עובי הטרורטין האלוכטוני הגדל לכיוון מזרח תומך בכך.

(ב) בקירבת הנביעות קיימת רצועה של טרורטין דטריטי ובו משולבות עדשות לא רציפות אך רחבות של טרורטין אינטראקלאסטי כך שברכות התקיימו בצד הנביעות.

(ג) הטרורטין הדטריטי מתאצבע עם קונגלומרט הטרסה שבין נחל עומר לעמק של מואה. שירטון קונגלומרט נוסף נמשך במרכז העמק של מואה מפתח אחד הערוצים שממערב אל תוך הטרורטין הדטריטי ואף אל החוארי. הקונגלומרט ממלא תעלה, מתאצבע עם הטרורטין הדטריטי (תמונה F-2) ומלוכד היטב על ידי גיר (תמונה F-1). מכאן שהטרורטין לא יצר משטח רציף אחד בכל העמק של מואה.

(ד) הטרורטין הדטריטי משתנה לכיוון מרכז העמק לטרורטין חוארי. בשל המרחק מהנביעות יורד גודל הגרגר ומתווסף חומר חוארי ממדרונות העמק.

(ה) לא נמצאו שרידים לפיטוהרם אחד גדול שתרים את רוב הדטריטוס. יתכן שהמקור היה בהרבה גופים טרורטיניים קטנים ולא רציפים המשובצים במשקעי המעיינות האלוכטוניים (תמונה F-5).

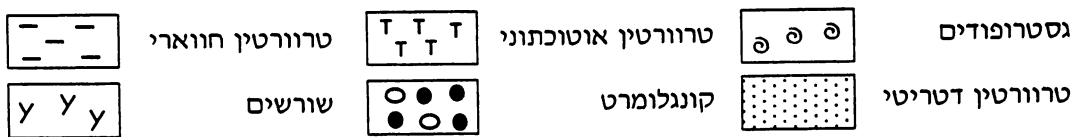
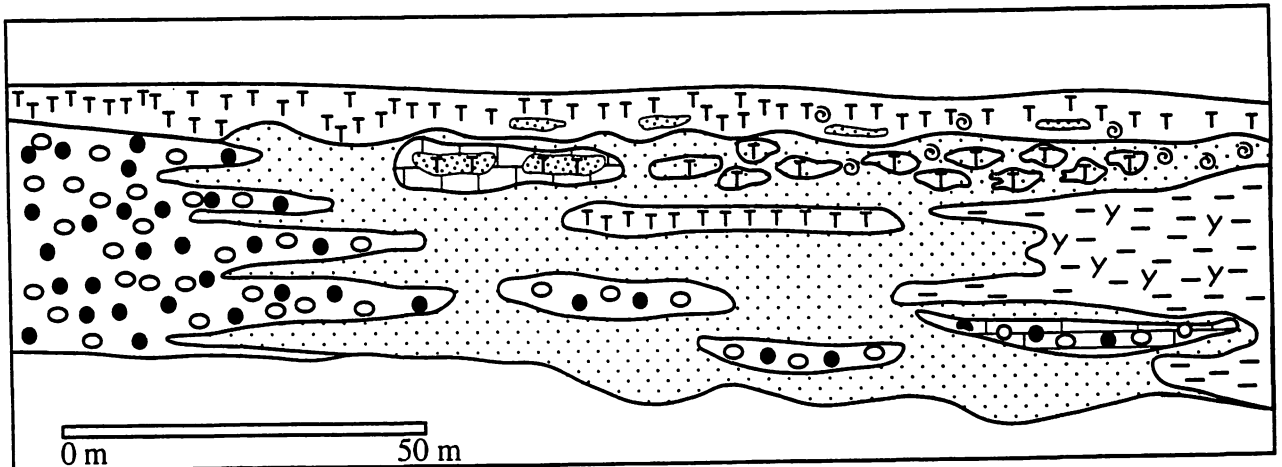
התמונה העולה מהמפה היא שקיים סידור בפאצייאס ההשקעה במידרון הנביעות. קו הנביעות התקיים במערב העמק באזור בו חשופה תצורת מישאש. מי הנביעות זרמו מזרחה והשקיעו טרורטין ממזרח לנביעות. באזור הקרוב לנביעות הורבדו משטחי אצות וטרורטין צמחים שהיוו מקור לדטריטוס של הטרורטין הדטריטי. ממזרח לחגורת הטרורטין הדטריטי הורבד חומר דק גרגר כטרורטין חוארי באזור מלחה מתון שצבר דטריטוס דק שנסחף מאזור הנביעות וחומר קלאסטי דק מסלעי הסביבה. טרורטין אינטראקלאסטי שקע בבריכות שהתקיימו באזור חגורת הטרורטין הדטריטי. הטרורטין הדטריטי הורבד מתחת לקו הנביעות ובין ערוצי הזרימה הפלוביאליית שם הורבד לעיתים גם קונגלומרט. חתך 4.1 הינו חתך סכמטי של יחסים המתוארים במפה.

רוב המעיינות בערבה מופיעים בדגם דומה למתואר במואה, טרורטין צמחים המונח מעל מספר טיפוסים של טרורטין אלוכטוני היוצרים דגם פיזור אופייני סביב המעיינות. לשם נוחות נכנה את טרורטין הצמחים המכסה

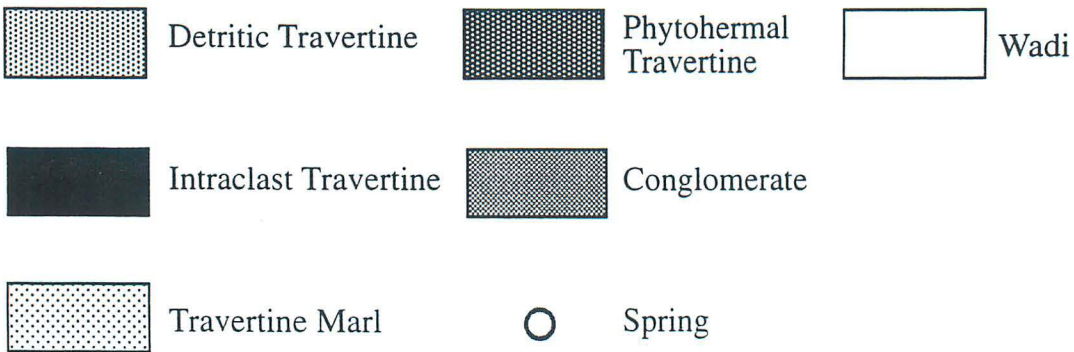
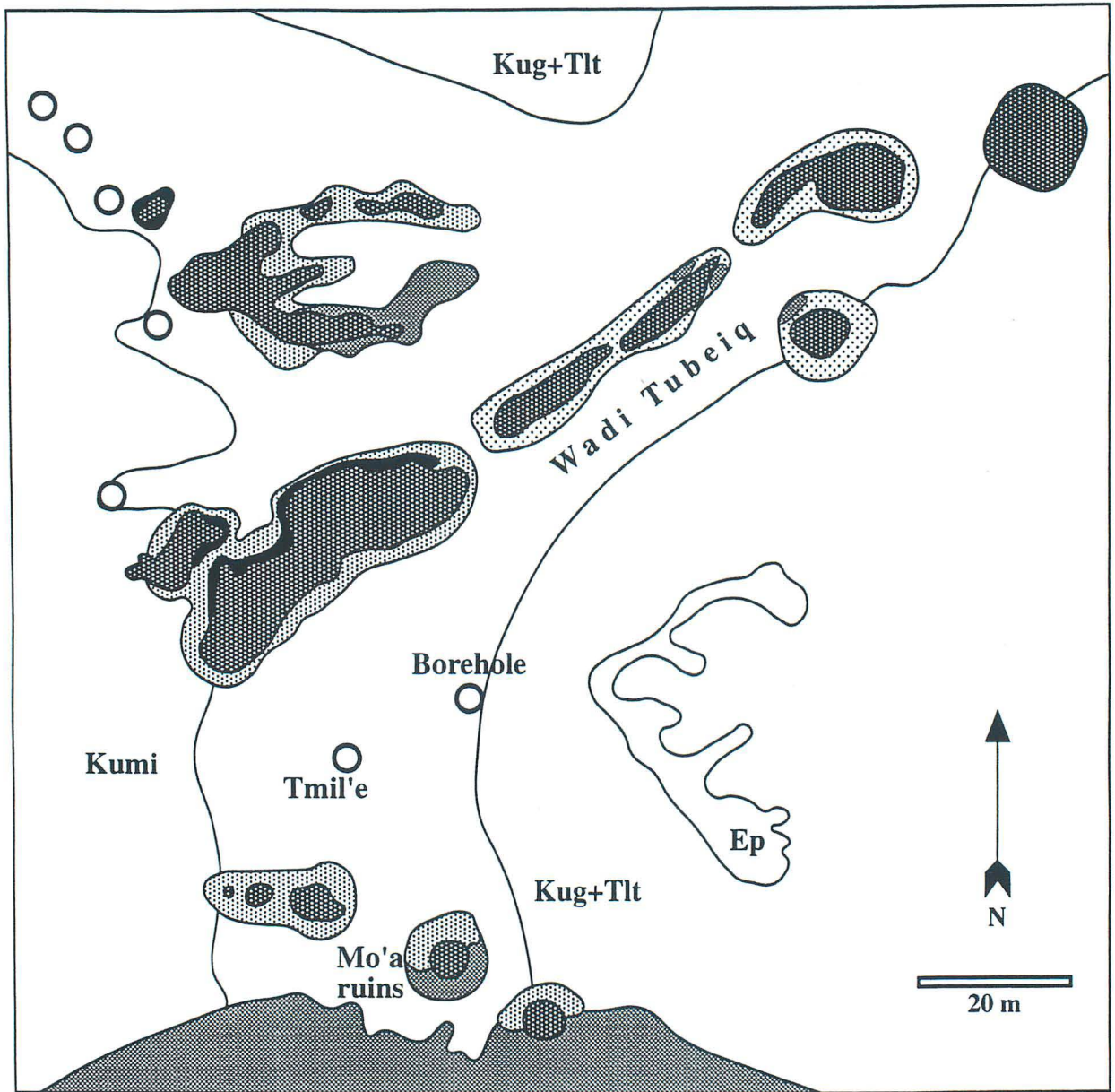
ממעל חלק עליון ואת הטרורטינים האלוכתוניים היוצרים דגם של חיגור חלק תחתון (תמונה F-2). החלק העליון בנוי טרורטין של משטחי אצות. טרורטין זה די אחיד במרחב ומעיד על הומוגניות של סובב המעיינות ועל זרימה למינרית שקטה במשטחים נרחבים ומתונים בנטיהם. בחלק התחתון מופיעים טרורטין דטריטי (תמונה F-3) בליווי קונגלומרט (תמונות F-2, G-2), עדשות טרורטין צמחים (תמונה F-5), טרורטין אינטראקלאסטי (תמונה F-8) וטרורטין חווארי.

שינוי הסביבה המתבטא במעבר בין שני חלקי החתך מופיע ברוב המחשופים והוא יכול להגרם על ידי: (א) מילוי ומיתון התבליט שהתקיים בזמן הרבדת החלק התחתון. מילוי התבליט בטרורטין אלוכתוני היה מביא ליצירת משטחים תת אופקיים רציפים. על משטחים כאלו יכולה להתקיים זרימה למינרית שקטה שתשקיע שכבה הומוגנית אופקית של משטחי אצות.

(ב) שינוי בשפיעת המעיינות. כל זמן שהשפיעה נמוכה, סובב המעיינות מופיע כמלחה (בוצית ומלוחה) שאותה חוצים ערוצים בעלי תשתית חלוקים. באזורי הנביעות שוקע טרורטין בדגם תפוצה מפוזר של עדשות. עדשות הטרורטין מפוזרות בטרורטין הדטריטי שנוצר סביבן שחלקו חולי וחלקו חרסיתי. באזורים ניקווים המים לבריכות רדודות. כאשר עולה השפיעה, מתרבות הנביעות, שטח גדול יותר מתכסה במים זורמים ומצופה טרורטין רציף הבונה משטח נרחב של טרורטין אוטוכתוני המונח מעל מגוון טרורטינים אוטוכתוניים.



איור 4.1: יחסי שדה בטרורטין האלוכתוני במואה (מפלס הביניים)



5. הסטרטיגורפיה של סלעי הטרורטין בערבה

סלעי הטרורטין אינם יוצרים יחידת סלע רציפה במרחב אלא מהווים חלק קטן מיחידות אלוביאליות שהשתרעו על פני כל המרחב. כדי לעמוד על הסטרטיגורפיה של הטרורטונים יש צורך לתאר ראשית את היחידות האלוביאליות המוכרות במרחב בהם מופיעים סלעי הטרורטין.

מפלסי מחשופים של יחידות אלוביאליות באזור הערבה

תצורת ערבה

התצורה הוגדרה על ידי אבני (1997) באגן נחל פארן-נקרות-ערבה כיחידה המורפוסטרטיגרפית הראשונה ששקעה לאורך מערכת הניקוז שהתפתחה בנגב ובערבה בעקבות הדפורמציה הטקטונית הפוסט-מיוקנית. מערכת ניקוז זו איננה פעילה בהווה בשל ארוזיה ששינתה את מערך הניקוז שלה ויצרה מערך ניקוז חדש. מחשופי תצורת הערבה בשוליים המערביים של הערבה מצויים בגבהים של 30-40 מ' מעל הערוצים הקיימים והשתרעותם אינה מוגבלת על ידי עמקי הנחלי הקיימים. עובי התצורה מגיע באזור העבודה ל 15 מ', הסלע מלוכד היטב והליכוד עשוי גיר חום אפור ולעיתים מכיל חול. קיימים שני מפלסי מחשופים:

(א) מפלס גבעות שיזף (Sneh, 1982) או פרט שגיא (אבני, 1997).

(ב) מפלס גבעות חצבה (Sneh, 1982) או פרט כונתילה (אבני, 1997).

משקעים קלאסטיים דקי גרגר ומשקעים כימיים אגמיים מצויים בחתך התצורה במוצא נחל נקרות אל הערבה.

תצורת צחיחה

התצורה הוגדרה על ידי Ginat et al. (1996) באזור נחל ציחור כתצורה המונחת מעל תצורת ערבה וכוללת משקעים אגמיים סינטקטוניים העוברים לטרלית לחתכים פלוביאליים עשירים בפלאוסולים קלציים אדומים. אבני (1997) מציע להרחיב את ההגדרה ולכלול בה את המשקעים הסינטקטוניים המאוחרים לתצורת ערבה גם בשאר הנגב הדרומי והמרכזי. בקרבת הערבה בנויה תצורת צחיחה חתך דק גרגר המכסה על החתך הקונגלומרטי של תצורת ערבה.

תצורת צחיחה מונחת על תצורת ערבה באי התאמה זוויתית. משקעים אגמיים וביצתיים מופיעים בתצורה במספר מקומות. הם מוגבלים לאגנים מקומיים ומיוחסים לדפורמציה הטקטונית שיצרה את אי ההתאמה הזוויתית והארוזיבית בין תצורת צחיחה לתצורת ערבה.

בערבה הצפונית קיים קושי להבחין בין תצורת ערבה לצחיחה באזורים שאין ביניהם אי התאמה זוויתית ושתי התצורות בנויות ממשקעים קלאסטיים. לכן יעשה להלן שימוש במונח ערבה/צחיחה למשקעים קלאסטיים המצויים במפלס המורפוסטרטיגרפי הגבוה ביותר.

מפלסים צעירים

מפלס מורפולוגי הוא ביטוי של פני שטח עתיקים הקשורים גנטית ומייצג פרק מוגדר בהתפתחות הנוף בזמן ובמרחב (King, 1953, גינת, 1997). כל אחד מהמפלסים יכול להיות בנוי ממשאר או קבוצת משארים של פני שטח קדומים גדועים או מכוסים בסדימנטים אלוביאלים. המפלסים הצעירים מתצורת ערבה וצחיחה תוארו על ידי גינת (1997) בנחל ציחור ובנחל חיון. הם תוארו על ידי אבני (1997) בנחלים פארן ונקרות עד מוצא הנחלים אל הערבה (הסקירה המפורטת של המפלסים מצויה שם).

מפלס Q_1 : מפלס מחשופי Q_1 גבוה ב-20 עד 25 מ' מן הערוצים הקיימים. מפלס זה כמו גם הצעירים ממנו מוגבלים בהשתרעותם לעמקי הנחלים הנוכחיים. מפלס מחשופי Q_1 התפתח לאורך שולי הערבה בעקבות ארוע ההתחזרות שבא לאחר השקעת תצורת צחיחה. מחשופי מפלס זה בנויים חלוקים ממוצא מקומי, בעיקר צור מישאש, בעלי מיון בינוני עד גרוע וליכוד חלוקים רופף. עובי החתך קטן מ-3 מ'. בגג המחשופים מופיעה קרקע רג מפותחת הכוללת אופק עבה של הצטברות אבק וסולית גבס פדוגני.

מפלס Q_2 : מחשופי מפלס Q_2 יוצרים טרסות בצידי ערוצי נחלים בגובה 5-10 מ' מעל אפיקי הזרימה הפעילים. הטרסות בנויות חלוקים, חול וסילט או טרוורטין. מחשופי מפלס זה חלקים ומכוסים ריצוף צורני מכוסה פטינה שחורה. הם כוללים קרקע רג מפותחת בעלת אופק צבירת אבק עבה, חלוקים סדוקים ותצבירי גבס.

מפלס Q_3 : מפלס זה בנוי חלוקים ושכבות קלאסטיים דקים של חרסית וגריט היוצרים טרסות נמוכות ושרטונות בצידי ובתוך הערוצים הקיימים, בגובה 1-3 מ' מעל לערוצים הפעילים. ליכוד החלוקים פריך. גג הטרסות אינו

חלק אלא בולטים ממנו בולדרים ומובחנים בו שקעים של ערוצי זרימה. לגג טרסות אלה צבע כהה יותר מצבעם של ערוצי הזרימה הפעילים.
מפלס הזרימה הנוכחי Q_4 : מפלס זה כולל את האפיקים הפעילים של נחלי הערבה, השרטונות הנמוכים שבתוכם ושטחי ההצפה הפעילים שבגדותיהם.

המפלסים של מחשופי הטרורטין

שלושה אזורים עיקריים של סלעי הטרורטין הוגדרו בשטח העבודה (איור 1.5):

- אזור תמיד-משק;
- אזור מואה-צופר;
- אזור יהב-ערגה.

מחשופי הטרורטינים יוצרים שלושה מפלסים טופוגרפיים-מורפולוגיים שונים בשטח העבודה. כל אחד מהמפלסים מתייחס לנוף ולמערכת הניקוז הפעילה באופן שונה. איור 5.1 מראה את היחסים הסטרטיגרפיים והמפלסים שבהם מופיעים הטרורטינים.

טרורטין חצבה - מופיע בתוך חתך סלעי תצורת חצבה באזור צופר ואינו מופיע במקומות נוספים בערבה. טרורטין זה אינו שייך למסכת המפלסים המורפולוגיים כי אינו יוצר מפלס מורפולוגי, אלא מהווה חלק מתצורת חצבה.

טרורטין ערבה - הטרורטין העליון מצוי בדרך כלל בגובה של כ-30 מ' מעל למפלס הערוצים הפעיל. הוא מופיע במשטח המורפולוגי העליון בשולי הערבה הבנוי ממשארים מבודדים של קונגלומרט שהוגדר כקונגלומרט ערבה¹ (מפלס גבעות חצבה אצל (Sneh (1982 או קונגלומרט ערבה ב-(Yeichieli et al. (1994). הטרורטין העליון בונה גבעות משאר שגובהן כגובה המשטח העליון או שהם מכסים את הקונגלומרט שלו. מחשופי טרורטין זה אינם מראים קשר עם מערכת הניקוז הנוכחית.

טרורטין מואה - טרורטין משטח הביניים מופיע כ-5 עד 10 מ' מעל לקרקעית הערוצים. משטח הביניים הינו מפלס של טרסות נחל שמופיעות בעמקים שחתורים במשטח העליון. לעומת הטרורטין העליון קשור טרורטין זה למערכת הניקוז הנוכחית ומוצע לשייך אותו למפלס Q_2 .

טרורטין האפיק - הטרורטין המפלס הנמוך מתלכד עם אפיקי הזרימה הפעילים (Q_4) החתורים במפלסים הקודמים.

טרורטין הלשון - מופיע בתצורת הלשון כרבדים דקים של טרורטין.

כל אחד מהטרורטינים המוזכרים מייצג פאזה שונה של פעילות מעיינות. ההנחה שהטרורטין שבמפלס הנמוך צעיר מזה שבגובה מבוססת על יחסי ההתחזרות שבין המפלסים.

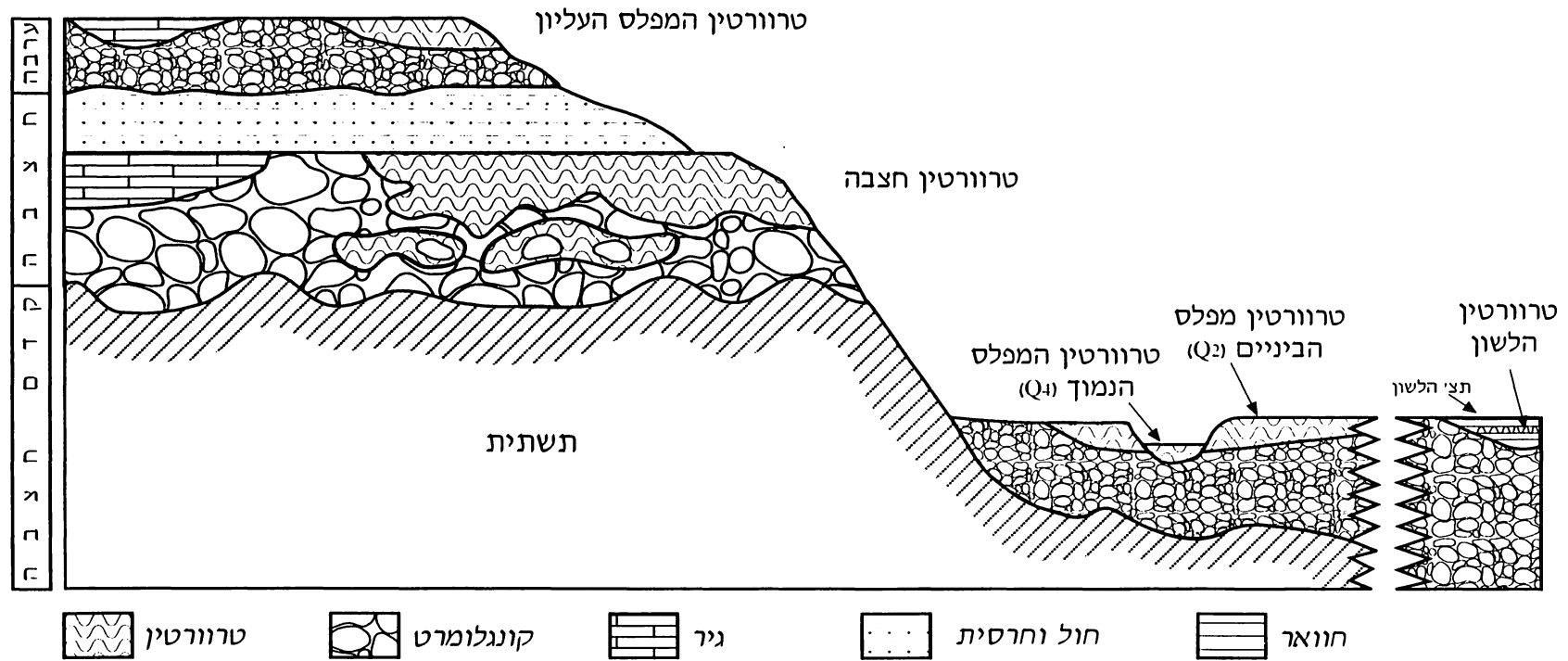
מפלסי הטרורטין בשלושת האזורים:

אזור עין תמיד-נחל משק (איור 5.2)

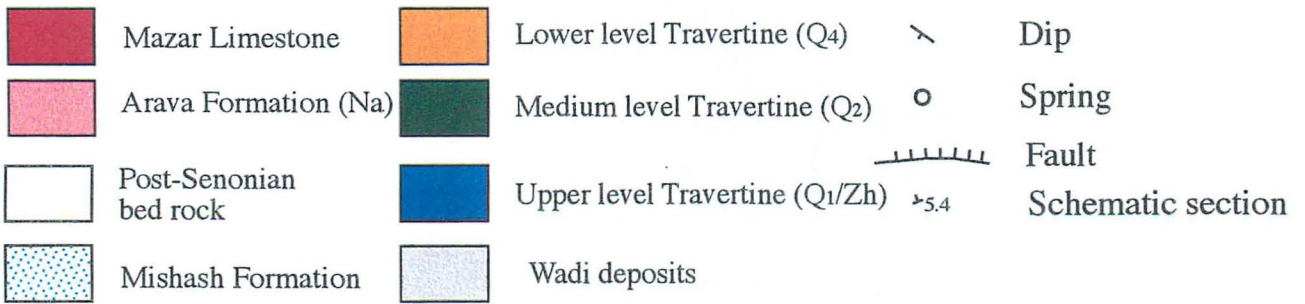
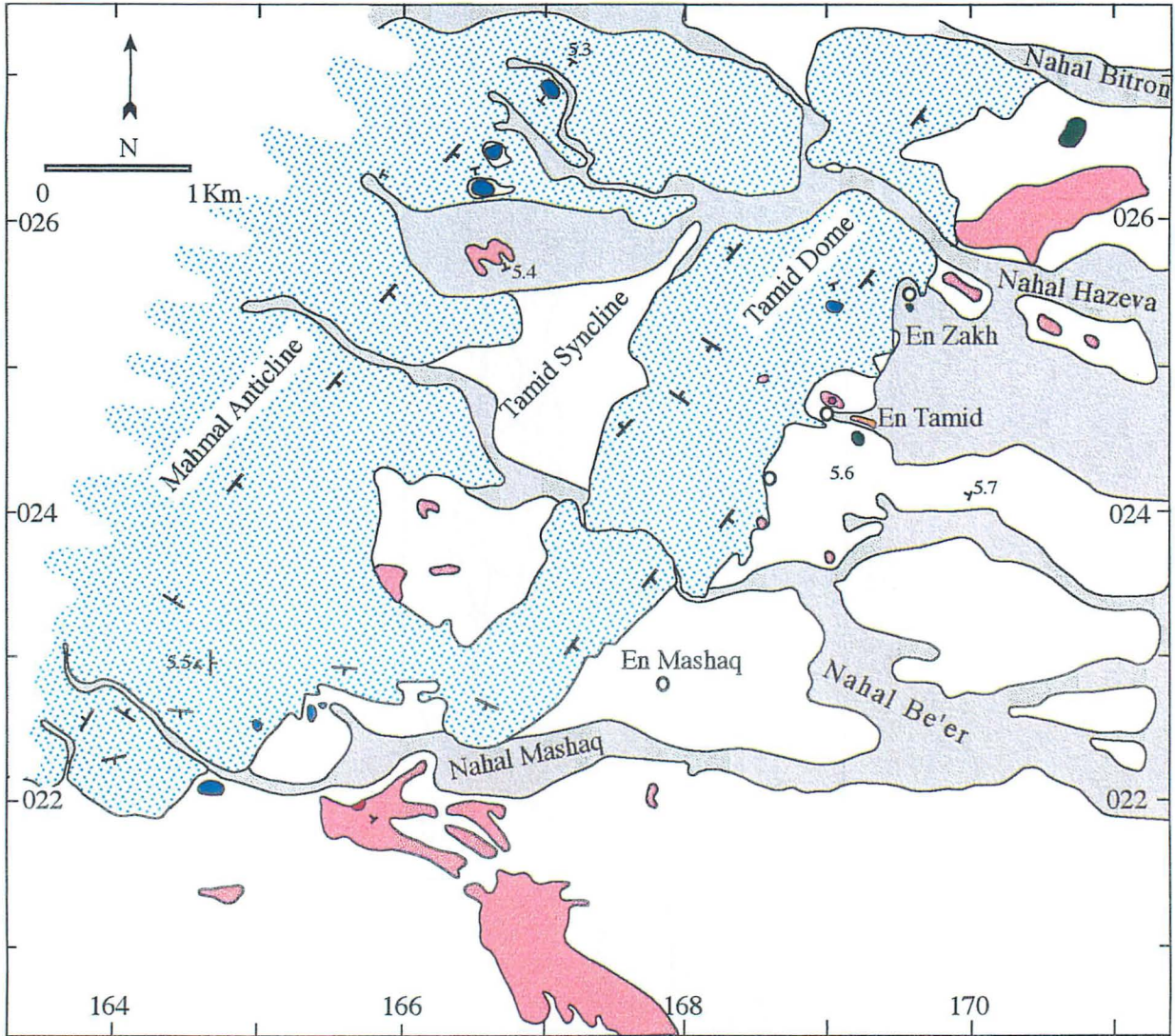
אזור עין תמיד-נחל משק הינו האזור הצפוני מבין שלושת האזורים המתוארים (איור 1.5). באזור זה מצויים מחשופי טרורטין בסביבות עין תמיד ועין זך שממזרח לכיפת תמיד ואילו ממערב לכיפה מצויים טרורטינים בשוליים המערביים של סינקלינת עין תמיד, על אגפו המזרחי של קמר מחמל בנחלים חצבה ומשק. באזור תוארו שלוש קבוצות טרורטין:

- 1) הטרורטין העליון המופיע במפלס תצורת ערבה בנחל חצבה, נחל משק ומעל עין זך.
- 2) טרורטין משטח הביניים המצוי כ-10 מ' מעל הערוצים של עין תמיד, נחל ביתרון וליד עין זך.
- 3) טרורטין המפלס הנמוך מצוי בקרקעית הערוצים שבין עין זך לעין תמיד.

¹ בעבודה מתייחס המונח קונגלומרט ערבה למינוח המופיע במפה של Yeichieli et al. (1994) שהפרידו את קונגלומרט ערבה (הטרסה הגבוהה ביותר) מקונגלומרט טרסות (טרסות נמוכות).



ציור 5.1: יחסי שדה בין יחידות הטרורטין בשטח העבודה

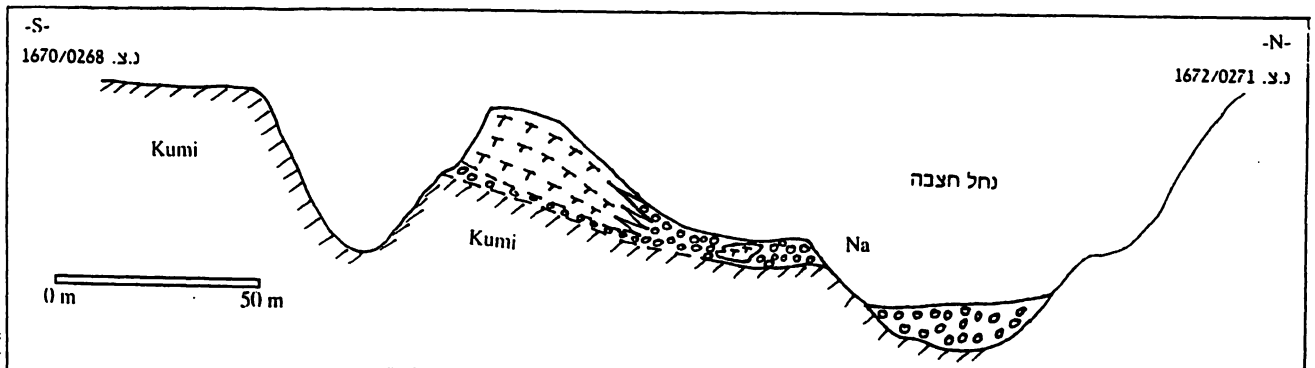


איור 5.2: מפת המחשופים של אזור עין תמיד-נחל משק

טרורטין המפלס העליון

נחל חצבה (איור 5.3)

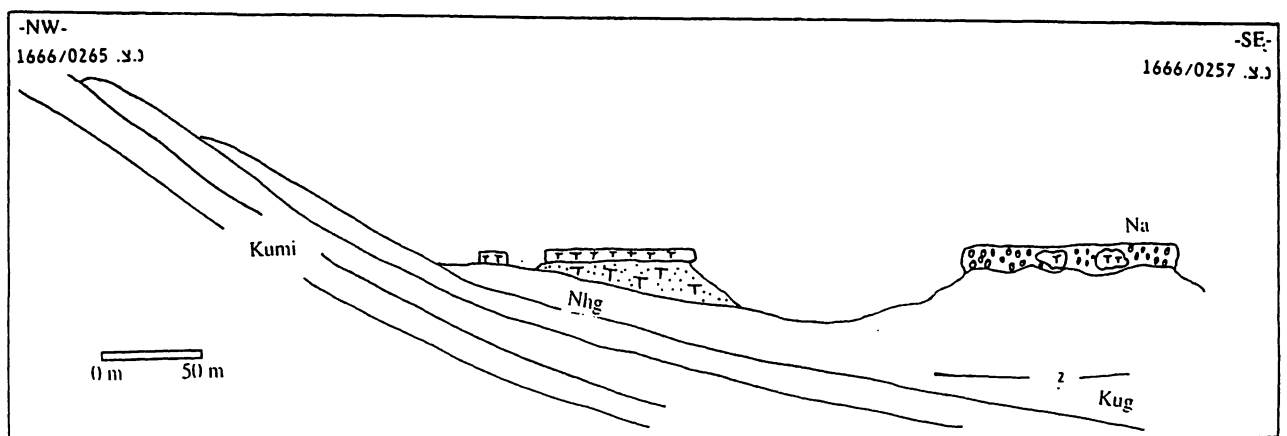
בנחל חצבה (נ.צ. 1671/0269) מצפה טרורטין צמחים את מידרון הנחל עד למפלס תצורת ערבה. גג קונגלומרט הערבה שבסינקלינת עין תמיד מכיל חלוקים גדולים של טרורטין, ובתחתית מדרון הטרורטין הקונגלומרט מלוכד ע"י קלציט ספארי וטרורטין. עובי החתך כ-10 מ' והוא הושקע על מדרון הפונה צפונה ומזרחה לתוך נחל חצבה. שכבות הטרורטין נטויות נטיה סדימנטרית ראשונית בזוית של כ-60°. ארבעה הגילים שנקבעו לסלעים ממחשוף זה נעים בין 228,000 ל-307,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) והם מתאימים לטווח הגילים שנתקבלו מסלעי מפלס זה.



איור 5.3: חתך סכמתי בנחל חצבה (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

סינקלינת עין תמיד (איור 5.4)

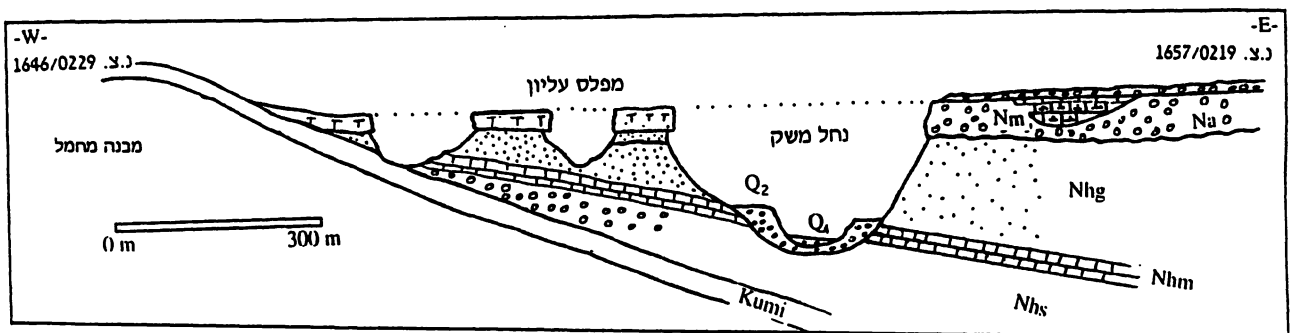
לאורך השוליים המערביים של סינקלינת עין תמיד, על אגפו המזרחי של מבנה מחמל מצויים שני מחשוף טרורטין במפלס דומה לזה שבנחל חצבה (תמונה G-2). הטרורטינים מונחים על גבעות משאר של תצורת חצבה שהמפלס שלהם זהה לזה של תצורת ערבה בסינקלינת עין תמיד. המחשוף הדרומי מבין המחשופים שבשולי סינקלינת עין תמיד (נ.צ. 1666/0262) מראה שיכוב תת אופקי ועובי הולך וגדל לכיוון מורד המדרון ואז הוא מונח על טרורטין דרטיטי וקונגלומרט המכיל חלוקי צור מישאש ואבן חול מתצורת חצבה. המחשוף הצפוני (נ.צ. 1667/0265) בנוי טאלוס של בלוקים גדולים (עד 5 מ'), הבלוקים כמעט ולא הובלו ולפיכך הם מעידים על קיומם של משקעי טרורטין אוטוכתוניים אינטנסיבים נוספים שכיסו בעבר חלקים גדולים של המדרון לעבר סינקלינת עין תמיד.



איור 5.4: חתך סכמתי בשולי סינקלינת עין תמיד-מחשוף דרומי (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

נחל משק (איור 5.5)

בנחל משק (נ.צ.1647/0221), מדרום לסינקלינת עין תמיד ועל אגפו המזרחי של מבנה מחמל, השתמרו ארבעה משארי טרוורטין. משארים אלו הם שרידי של משטח טרוורטין נרחב שכיסה מדרון מתון של תצורות מישאש וחצבה והוא מבוותר כיום ע"י ערוצי נחל משק. שרידי משטח הטרוורטין גבוהים ב-40 מ' ממערכת הניקוז הנוכחית ומקבילים בגובהם לגובה משטחי קונגלומרט תצורת ערבה/צחיחה המקיפים אותם. בתצורת ערבה/צחיחה מופיעה תעלה המלאה בגיר קרטוני לבן שהוגדר כתצורת מזר (יחיאלי, 1987). המרחק בין מחשוף הגיר למחשוף הטרוורטין הוא כ-700 מ', עובי הגיר נע בין 1 מ' לפחות מעשרה ס"מ ומצויים בו מאובני צמחים חלולים. הקונגלומרט ותעלת הגיר שבתוכו מכוסים על ידי קונגלומרט בעובי כ-0.3 מ' המכיל חלוקי טרוורטין. העובי המירבי של חתך הטרוורטין באזור נחל משק מגיע ל-5.5 מ' והוא נטוי מזרחה בשיעור של כ-3°. חלקו המערבי של המחשוף מונח על תצורת מישאש ואילו חלקו המזרחי מונח על תצורת חצבה (פרטים משק וגידרון). עובי החתך גדל בכיוון מזרח, כיוון המדרון, מ-1 מ' ועד 5.5 מ'.
שבעה גילים שנקבעו לסלעים ממחשוף זה נעים בין 240,000 ל-300,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) מתוכם חמישה גילים גבוהים מ-300,000 שנה. הגילים תואמים לטווח הגילים שנתקבל מסלעי מפלס זה.



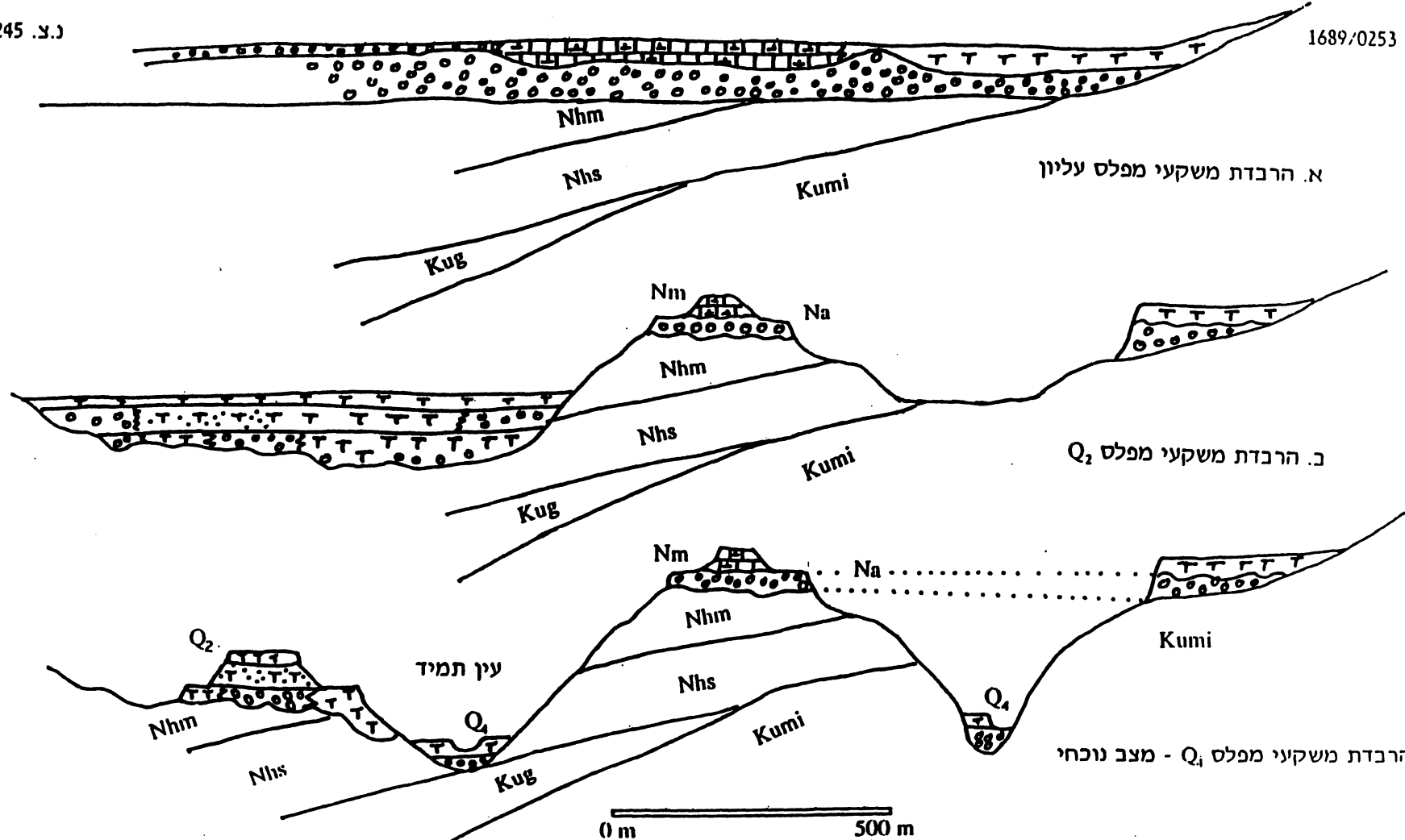
איור 5.5: חתך סכמתי בנחל משק (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

עין זד-עין תמיד (איור 5.6)

על השוליים המזרחיים של כיפת תמיד מעל עין תמיד, קיימים מספר משארים של קונגלומרט תצורת ערבה/צחיחה. על אחד מאלו הסמוכים לעין זד (נ.צ.1690/0253), בגובה 35 מ' מתחת לפני הים, מצוי טרוורטין אינטראקלאסטי מלוכד היטב המכיל עדשות גדולות של טרוורטין צמחים בעובי של עד 0.8 מ'. הטרוורטין מכסה על המגע בין קונגלומרט הערבה לתצורת מישאש החשופה באגף המזרחי של כיפת עין תמיד (מחשוף ימני באיור 5.6). חלקו העליון של הקונגלומרט מלוכד ע"י הטרוורטין והמעבר ביניהם הדרגתי (תמונה G-7). במרחק 500 מ' מהמחשוף בכיוון דרום מזרח (נ.צ.1691/0247) מונח מעל קונגלומרט הערבה גיר "קרטוני", שהוגדר כתצורת מזר ע"י יחיאלי (1987). שני המחשופים מצויים בגובה טופוגרפי זהה. יחיאלי (1987) מונה עוד שני מקומות בהם מופיע טרוורטין מעל או בתוך קונגלומרט ערבה במפלס העליון. בגבעת חצבה (נ.צ.1724/0246) מצויה שכבת טרוורטין מעל תצורת ערבה, המופיעה לסירוגין עם שכבות חלוקים קטנים בשיכוב צולב, ובנחל באר (נ.צ.1683/0235) מלוכד קונגלומרט הערבה ע"י טרוורטין.

-S-
1689/0245 .נ.צ.

-N-
1689/0253 .נ.צ.



35

ציור 5.6: חתך סכמתי ושלבי התפתחות מפלסי הטורורטין באזור עין זך-עין תמיד (למקרא ראה ציור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

טרוורטין משטח הביניים

שרידי טרוורטין משטח הביניים (Q) מצויים בקרבת עין תמיד (נ.צ.0244/1693) ובנחל ביתרון (נ.צ.0266/1707). הם נמוכים ב-35 מ' לערך ביחס למשטח העליון, גבוהים מקרקעית הערוצים הנוכחיים ב-10 מ' לערך וממוקמים בקרבת מקורות הנביעות הנוכחיים.

עין תמיד

על גדתו הדרומית של ערוץ עין תמיד בנ.צ. 1792/0246 (בסמוך לקבר בדואי) מצוי כתם של טרוורטין מפלס הביניים. השתרעותו ועוביו קטנים והוא בנוי עדשות טרוורטין או שברים הצפים בחומר דטריטי. החתך משוכב, תת אופקי ועוביו גדל בכיוון המדרון. חלקו התחתון מונח על הפרטים שחק ומשק של תצורת חצבה. בסיס החתך ממלא תבליט ארוזיבי, תעלה בעומק של 2 מ' מלאה חומר קלאסטי לא ממוין לחילופין עם טרוורטין צמחים. טרוורטין הצמחים מתחלף מחוץ לתעלה לטרוורטין אינטראקלאסטי מסיבי וקשה ולדרגש של קונגלומרט קשה מלוכד בגיר (איור 5.6ב). מעל לדרגש הקשה הנ"ל מופיע טרוורטין דטריטי קשה ובו צפים שברי טרוורטין צמחים. הוא מופיע כמדרון פריך או כצנר. כלפי גג החתך הולכות ומתרבות עדשות טרוורטין צמחים חום הצפות בתוך טרוורטין דטריטי רך. מעל הטרורטין החום מצוי טרוורטין צמחים שחור ומרוסק המכיל חומר אורגני המדיף ריח חריף כששברים אותו. הטרורטין שבג החתך לא מפותח לכדי דרגש רציף. מחשופים נוספים של טרוורטין מפלס הביניים מופיעים בעין זך (מחשוף קטן של טרוורטין צמחים מסיבי) ובנחל ביתרון שם מופיע חתך טרוורטין נרחב מעל תצורת חצבה (פרט משק). עוביו המירבי 1.5 מ' והוא בנוי מרבדי עדשות טרוורטין המתחלפים ברבדי טרוורטין דטריטי. כתמים של טרוורטין שחור המכיל חומר אורגני פזורים פה ושם.

במחקר הנוכחי נקבע גיל טרוורטין מפלס הביניים שבעין תמיד ל-180,000 שנה. הגיל עומד בהתאמה לטווח הגילים שנמדדו בטרורטינים במפלס זה. הגיל שנקבע לסלעי מחשוף עין זך הוא 258,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987). גיל זה עומד באי התאמה ליחסי השדה, לפיהם טרוורטין זה מייצג את מפלס הביניים וגילו צריך להיות לכן בין 100,000 ל-200,000 שנה. ניתן להסביר גיל זה בגלישה מהמפלס העליון כפי שתואר מסינקלינת עין תמיד.

טרוורטין המפלס הנמוך

עין תמיד

קרקעית הסלע של ערוץ עין תמיד מצופה ע"י טרוורטין צמחים חום (איור 5.6) המכיל משטחי אצות ומאובני צמחים, עוביו כ-10 ס"מ. טרוורטין זה בלוי, והוא ועובר תהליך הסרה וקילוף מערוץ הנחל הנוכחי. קרומי טרוורטין צמחים דקים נוספים מופיעים במשקע האלוביאלי הממלא את ערוץ הנחל הנוכחי בגובה של מספר סנטימטרים מעל לקרקעית הערוץ. מצויים בו מאובני החילזון Melania שמורים היטב בשלדס המקורי. במחקר הנוכחי נקבע גיל טרוורטין זה ל-5000 שנה (ראה פרק 8).

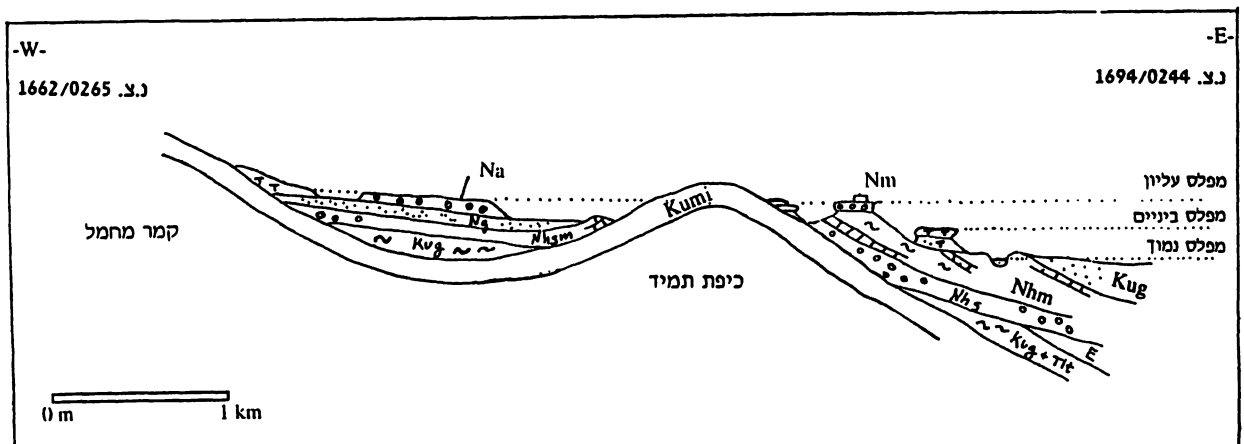
יחסי השדה בין מפלסי הטרורטין באזור עין תמיד-נחל משק (איורים 5.6, 5.7)

הטרורטין העליון מצוי בגובה כ-30 מ' מעל למערכת הניקוז הקיימת, גם ממזרח לכיפת תמיד וגם ממערב לה. כ-2 עד 3 ק"מ ממערב לכיפת תמיד ולמעיינות הנוכחיים (עין זך, עין תמיד ועין משק) ממוקמים שרידי המפלס העליון על האגף המזרחי של קמר מחמל (איור 5.7). חלקם הגבוה (המערבי) של משארי הטרורטין בנחל חצבה, נחל משק וסינקלינת עין תמיד מונחים על תצורת מישאש במפלס גבוה מזה של תצורת ערבה שבסינקלינת עין תמיד. חלקם הנמוך (המזרחי) מקביל במפלסו לתצורת ערבה וכנראה מאוצבע עימו ומעידים על כך חלוקי טרוורטין המופיעים בתצורת ערבה.

משארים אלו מעידים על רצועת מעיינות שליוותה את המגע בין האגף המזרחי של קמר מחמל עם מפלס תצורת ערבה/צחיחה בזמן הרבדת תצורת צחיחה. המעיינות היו ממוקמים אז בשוליים המערביים הגבוהים של הסינקלינה (איור 5.2), וזרמו אל הסינקלינה תוך כדי השקעת טרוורטין על תצורת מישאש החשופה באגף הסינקלינה ובתוך תצורת ערבה/צחיחה שמילאה את הסינקלינה (איורים 5.3, 5.4, 5.5).

טרוורטין המפלס העליון מונח גם על האגף המזרחי של כיפת תמיד (איור 5.7) והוא מעיד כנראה על קו מעיינות שנבעו לאורך המגע של האגף המזרחי של כיפת עין תמיד עם המפלס הגבוה של קרקעית הערבה. משקעי

המעיינות מצפים את הקונגלומרטים של תצורת ערבה ומלכדים את חלקם העליון. מחשופי הגיר האגמי, שמופיעים מעל או בתוך תצורת ערבה/צחיחה בעין תמיד ובנחל משק, תואמים במפלסם המורפולוגי והטופוגרפי למשקעי המעיינות של המפלס העליון. מחשופי גיר אלו שויכו לתצורת מזר ונתרו מהם באזור זה כתמים קטנים ומועטים שמקשים על הקורלציה: בנחל משק הגיר ממלא תעלה צרה ובעין תמיד הופעתו מצומצמת. גופים דומים באופיים הליתולוגי מצויים בעין יהב, עין ערגה ונחל אמציה. מרחקם של כתמי הגיר האגמי ממשקעי המעיינות אינו עולה על מאות מטרים ונראה שתפוצתם מוגבלת לאזורים הקרובים לטרורטינים. ככל הנראה מייצגים מחשופי גיר אלו גופי מים קטנים ומקומיים שהוזנו ע"י המים שהשקיעו את משקעי המעיינות של נחל משק ועין תמיד. טרוורטין משטח הביניים נמוך ב-30 מ' לערך מטרורטין המשטח העליון וקשור לנוף נמוך יותר ולמערכת ניקוז דומה למערכת הניקוז הנוכחית. גם טרוורטין זה מונח לאורך המגע של האגף המזרחי של כיפת תמיד עם מפלס קרקעית הערבה. מפלס זה נמוך וקרוב יותר למפלס הערבה הנוכחי. המשטר ההידרולוגי נשאר דומה לזה שקדם להתחברות, אך הגרדינט הטופוגרפי שבין קרקעית סינקלינת עין תמיד וקרקעית הערבה ממזרח לעין תמיד גדל. בגרדינט טופוגרפי כזה ינבעו המים במקום הנמוך ביותר, ממזרח לכיפת עין תמיד, ולא בסינקלינה. משקעי המעיינות הללו מהווים חלק מהחתך שבונה את טרסת Q_2 . טרוורטין המפלס הנמוך מכסה את קרקעית הערוצים החתורים לתוך טרוורטין משטח הביניים. בערוצים אלה מופיע קו הנביעות הנוכחי. בניגוד למשקעי המעיינות העתיקים המשתרעים על משטחים מרפד טרוורטין זה רק את קרקעית הערוצים Q_4 .



איור 5.7: יחסי שדה בין יחידות הטרורטין באזור עין תמיד-נחל משק (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

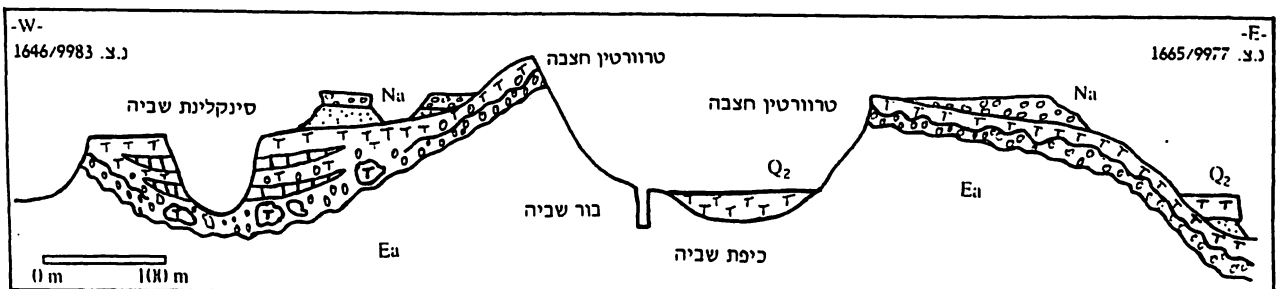
אזור מואה-צופר (איור 5.9)

- אזור זה מאכלס את מחשופי הטרוורטין השמורים והנרחבים ביותר בערבה. בין נחל שלהב בצפון לנחל עמר בדרום נמצאו ארבע קבוצות טרוורטין ולהלן תאורן:
- 1) הטרוורטין הקדום, מופיע בתוך תצורת חצבה באזור שמצפון מערב לצופר, בין נחל שלהב לכיפת שביה ומכסה את ראשי הגבעות בשטח של כשלושה קמ"ר.
 - 2) הטרוורטין העליון שמופיע במפלס תצורת ערבה בנחל שביה ונחל עמר.
 - 3) טרוורטין משטח הביניים שמצוי כ-10 מ' מעל הערוץ של ואדי טובייק (מואה) והעמק של נחל שביה ממערב לשוב צופר.
 - 4) טרוורטין המפלס הנמוך המצוי בקרקעית הערוצים שבמואה.

טרוורטין חצבה

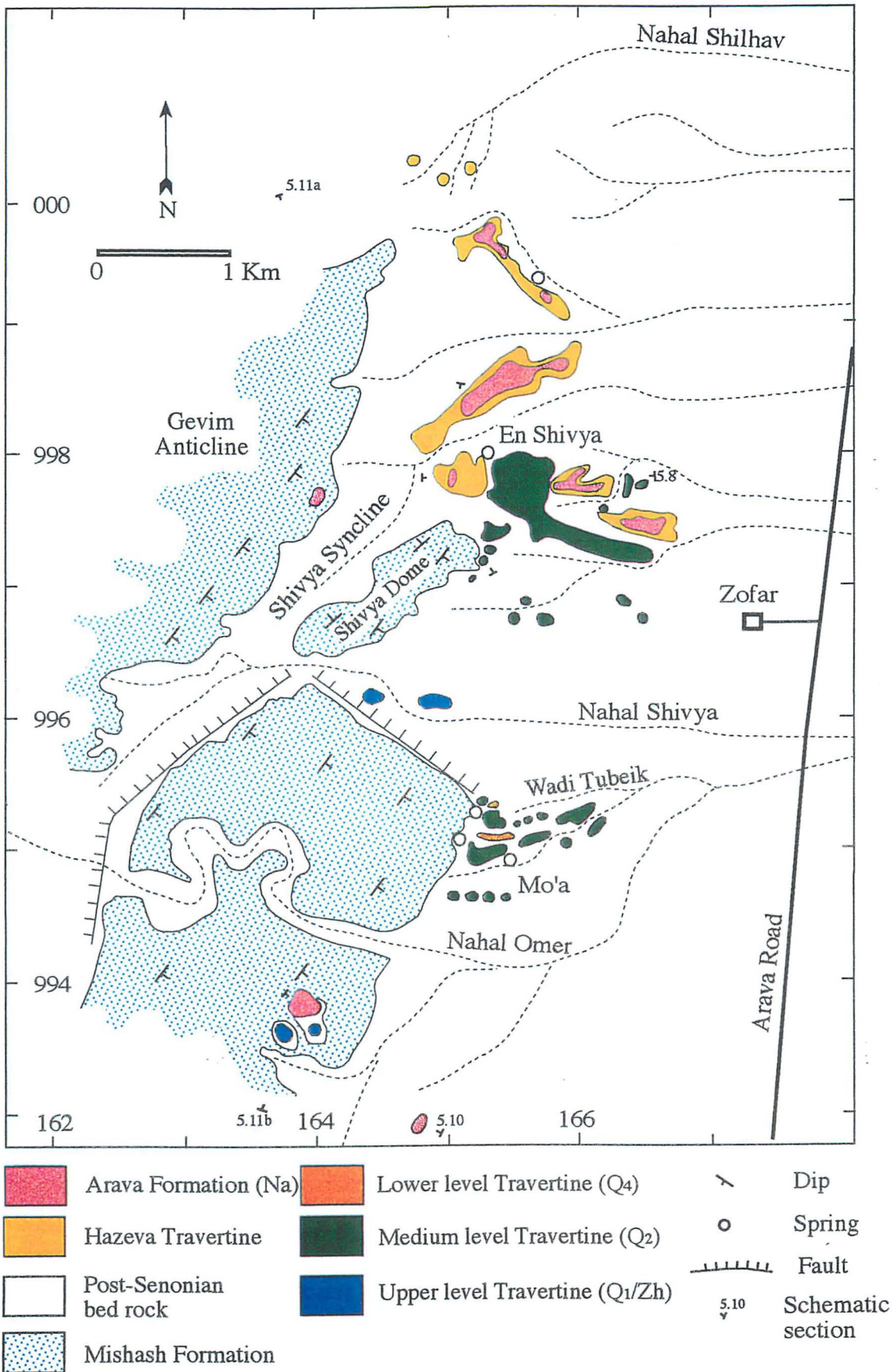
בין נחל שלהב לכיפת שביה (איור 5.9), בשטח שאורכו כ-2.5 ק"מ ורוחבו 1-2 ק"מ (נ.צ.מ. 1654/9985), מכוסות השלוחות המשתפלות לעבר הערבה בטרוורטין חום כהה ובהקונגלומרט המשולבים זה בזה. הקונגלומרט בעל חלוקים גסים ומכיל בעיקר חלוקים מחבורת עבדת ומתצורת מישאש המלוכדים היטב ע"י גיר או טרוורטין (תמונה F-6). הטרוורטין מופיע כמשטח רחב ובולט בצבעו הכהה שמערכת הניקוז הפעילה חתרה בו והותירה ממנו מספר גבעות משאר המתנשאות לגובה כ-40 מ' מעל סביבתם. היחידה מופתה כפרט שחך של תצורת חצבה ע"י אידלמן (1979).

היחידה מקומטת בקצה הצפון מזרחי של כיפת שביה. עובי היחידה ויחס הטרוורטין לקונגלומרט משתנה במרחב (איור 5.8). בסינקלינת שביה (נ.צ. 1649/9979) נמדד עובי חתך מכסימלי של 15 מ' בציר הסינקלינה לעומת עובי של 3 מ' באגפים המורמים של הסינקלינה. בצירי הסינקלינות של נחל שביה ונחל שלהב נשמר חתך אבן חול חרסיתית אדומה של תצורת חצבה מעל לטרוורטין ומעליה מונחת אופקית ובאי התאמה תצורת ערבה (תמונה H-2). לכיוון צפון הטרוורטין מתייחד בתוך תצורת חצבה עד שבקצהו הצפוני מערבי, בקרבת נחל שלהב, מופיעים רק כתמי טרוורטין קטנים בתוך הקונגלומרט.



איור 5.8: חתך סכמתי באזור צופר (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

החתך מורכב מחילופין של חלוקים, טרוורטין סטרומטוליטי ודטריטי. בסיס היחידה מונח על תבליט ארוזיבי החתור לתוך סלעי חבורת עבדת. הבסיס מורכב מקונגלומרט שמכיל חלוקים אאוקנים גדולים ומעוגלים, חלוקי טרוורטין ואחוז קטן (ומשתנה במרחב) של חלוקי צור מישאש גדולים בליכוד טרוורטיני. שכבות הטרוורטין מכילות שברים מזוותים של טרוורטין למינרי בגודל חול ועד בולדרים בקוטר מטר (תמונה E-6). הטרוורטין שמלכד את הקונגלומרט ומכסה אותו חסר שיכוב ברור, ובמקומות מספר הוא גלוש (נ.צ. 1662/9978) או ממלא תעלות עמוקות (כ-5 מ') המלאות בטרוורטין (נ.צ. 1654/9996). ציפויים סטרומטוליטיים בחלקו התחתון של הטרוורטין מלכדים את הקונגלומרט וחודרים אליו עד לעומק של כ-2 מ' (תמונה F-6). עדשות גיר פיזולטיים ועדשות גיר דטריטי המכיל שברי טרוורטין מופיעות בצורה אקראית בחלקו העליון של החתך. טרוורטין הצמחים מכיל חללי צמחים עשבוניים, קנים, עצים ודפוסים עלים של דקלים ועצים מסוגים שונים (תמונות E-3, E-4). רדיוס מעטפות הסטרומטוליטים מגיע ל-10 ס"מ. המבנים הסטרומטוליטיים יוצרים כיפות או כדורים. שכבות של אונקואידים בגודל קטן עד בינוני (3-6 ס"מ) מופיעות מדי פעם בחתך. אונקואידים שרדיוס מעטפת הקלציט שלהם מגיע ל-15 ס"מ מפוזרים אקראית (תמונה E-7). האונקואידים הגדולים רובם



איור 5.9: מפת המחשופים של אזור מואה-צופר

בעלי צורה צילינדרית כיוון שנוצרו על גבי ענפים. במספר מקומות מופיע טרוורטין במופע סטלגטיטי המעיד על קיום מפלים (תמונה E-1).

טרוורטין המפלס העליון

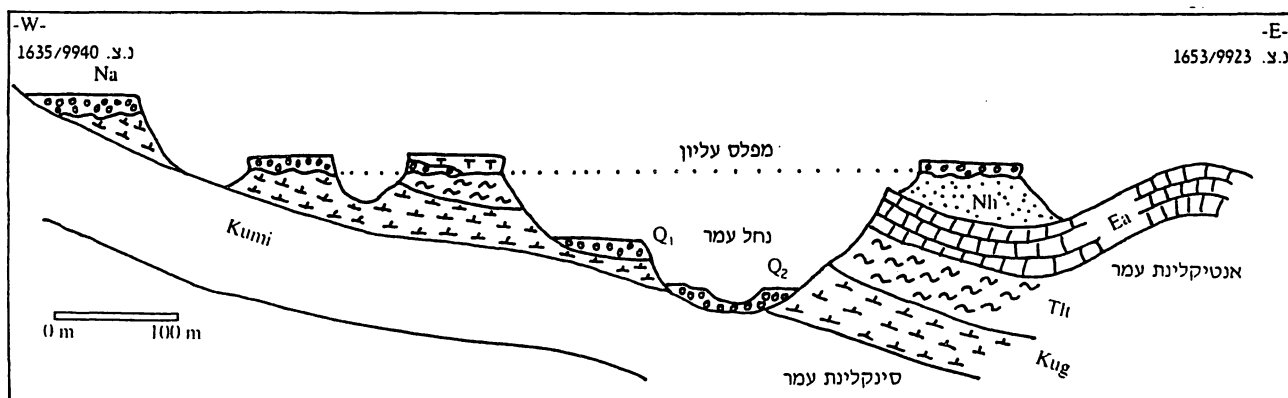
נחל עמר

מדרום לנחל עמר (נ.צ. 1640/9936) על השוליים המערביים של סינקלינת עמר מופיעים שני מחשופי טרוורטין צמחים הממוקמים בראשי גבעות משאר המתנשאות לכ-40 מ' מעל הערוצים הפעילים ובנויות מתצורות עירב וטקיה (איור 5.10).

עובי חתך הטרורטין הוא 2.6 מ' לפחות ומתחתיו מופיע קונגלומרט המורכב בעיקר מחלוקי תצורת מישאש וגריט צורני. הקונגלומרט זהה במפלסו הטופוגרפי ובהרכבו הליתולוגי לקונגלומרט של תצורת ערבה/צחיחה המופיעים במרחק עשרות מטרים ממנו מערבה או מונחים על תצורת חצבה באגף המזרחי של הסינקלינה במרחק 700 מ' ממנו לכיוון מזרח. במחשוף המזרחי תואר טרוורטין מעל קונגלומרט הערבה ע"י אידלמן (1979). שני הגילים שנקבעו לסלעים ממחשוף זה הם 224,000 ו-293,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) והם מתאימים לטווח הגילים שנתקבלו מסלעי מפלס זה.

נחל שביה

שני מחשופים נוספים של הטרורטין העליון מצויים בראשי גבעות מבודדות בנחל שביה (נ.צ.מ. 1650/9961), גובהן 30-40 מ' מעל סביבתן והם מנותקים ממערכת הניקוז הנוכחית (תמונה G-1). חתך הטרורטין מגיע לעובי מירבי של 10 מ' ומונה ישירות על סלעי חבורת עבדת.



איור 5.10: חתך סכמתי בנחל עומר (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

טרוורטין משטח הביניים

מצפון לערוץ נחל עמר ומצפון לערוץ נחל שביה מצויים מחשופי טרוורטין שמורים במפלס 3-10 מ' מעל מערכת הערוצים הנוכחית שחותרת בהם.

מואה (איור 4.2)

בואדי טובייק, יובל של נחל עמר, מצוי מחשוף טרוורטין נרחב (תמונה G-3) עליו ממוקם האתר הארכאולוגי של מואה. הטרורטין מקיף ממזרח ומצפון את האגף הנטוי מזרחה של בלוק נחל עמר ומכסה את חלקה העליון של תצורת מישאש ואת תצורת עירב. העובי המירבי של החתך (4 מ') נמדד במרכז העמק ובצידו המזרחי, בצידו המערבי של העמק מצטמצם החתך עד לאפס. משטח הטרורטין משתפל קלות לכיוון מזרח ובאזור מפגש נחל עמר וואדי טובייק הוא מגיע עד גובה הערוץ הנוכחי. דגם התפוצה של הטרורטינים (איור 4.2) איננו רציף ויוצר רצועות המשתפלות בכיוון כללי מזרחה. בין רצועת הטרורטין הצפונית למרכזית מצויה רצועת קונגלומרט מאורכת שמעידה על השקעה קלאסטית בו זמנית להשקעת הטרורטין או על שירטון בין פלגים משקיעי טרוורטין. הבדל גבהים ונטיות בין רצועת המחשופים הדרומית (עליה ממוקמים האתרים הארכאולוגיים) לשאר

המחשופים תומך בקיום פלגים שונים בגובהם וכיוונם.
 הגילים שנקבעו לגג הטרורטין ממואה נעים בין 107,000 בחלק הצפוני ל-196,000 שנה בחלק הדרומי (Kronfeld and Livnat, 1987). במחקר הנוכחי נקבע גיל גג הטרורטין בחלק הצפוני ל-130,000 שנה (ראה פרק 8). במהלך העבודה נמצאה בתוך הטרורטין החווארי שבחלק התחתון אבן יד אשלית (ע. סרגוסטי דברים בעל פה, 1997).

מתוך הגילים, הבדל בכיווני זרימה והבדל בגובה הטרורטין ניתן להבדיל במפלס הביניים של מואה בין שני שלבי שקיעה שונים. המחשוף שתוארך ל-196,000 שנה שייך לקו המחשופים הדרומי של מואה שמצביע על זרימה לדרום מזרח (איור 4.2). קו מחשופים זה (עליו ממוקמים האתרים הארכאולוגיים) גבוה בכ-2 מ' מעל שאר משטחי הטרורטין שמצפון לו ושבהם תוארכו דוגמאות ל-107,000 ו-130,000 שנה. כמו כן קו המחשופים הדרומי מצביע על זרימה לכיוון דרום מזרח לעומת שאר המשטחים שמעידים על זרימה לכיוון צפון מזרח. כך שעולה התאמה בין כל הגילים ליחסי השדה.

כיפת שביה

בתא השטח שמצפון לנחל שביה וממערב לשוב צופר מצוי משטח טרוורטין נרחב, בדרגת שימור וחשיפה פחותה מבמואה. מחשוף הטרורטין של צופר מונח על האגף המזרחי של אנטיקלינת שביה והוא מכסה משטח ארוזיבי החתור בסלעי התצורות עירב, טקיה וחבורת עבדת. גם כאן הטרורטין משתפל לכיוון מזרח. החתך כולל יחידת בסיס דטריטית ויחידת גג עשויה טרוורטין כהה. הטרורטין נשמר בעיקר בקו פרשת המים שבין נחל שביה והערוץ שמנקז את סינקלינת שביה. יחידת הבסיס הדטריטית ממלאת תעלות החתורות לתוך סלע האם ויחידת טרוורטין הגג מכסה לעיתים על סלע האם ולעיתים על יחידת הבסיס.

שני הגילים שנקבעו לסלעים ממחשוף זה הם 121,000 ו-182,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) והם מתאימים לטווח הגילים שנתקבלו מסלעי מפלס זה.

טרורטין המפלס הנמוך

מואה

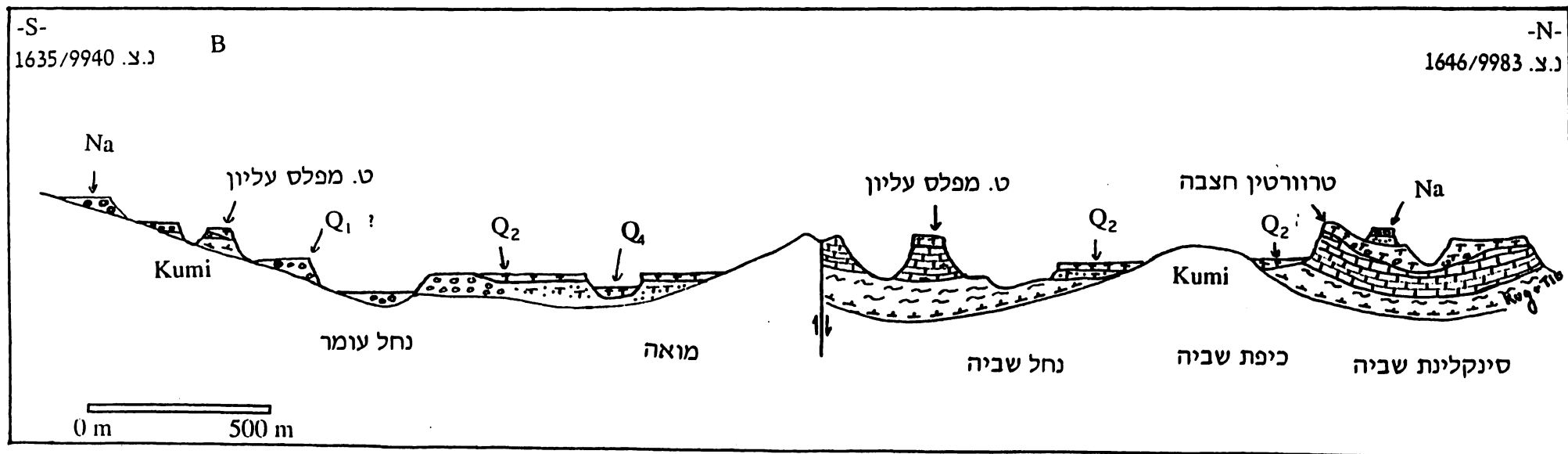
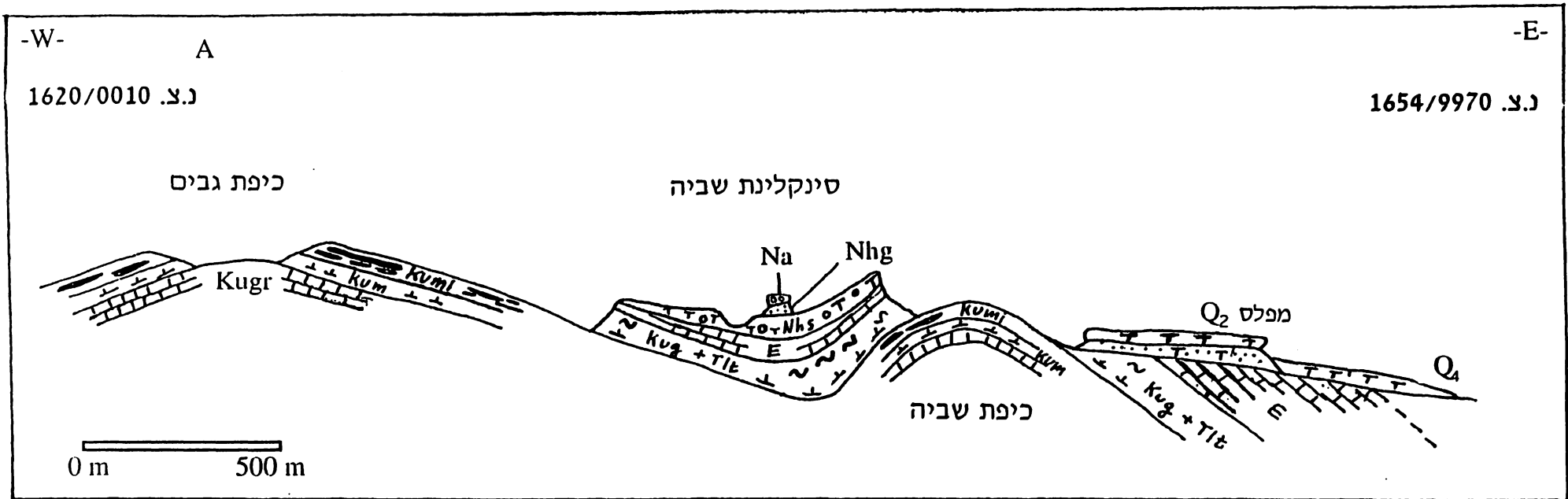
טרורטין המפלס הנמוך מופיע כציפוי הקרקעית של מספר ערוצים, הערוצים חתורים לעומק של כ-6-8 מ' בטרורטין משטח הביניים (תמונה G-5). הטרורטין אינו פרי השקעה רצנטית הוא מכסה סחף לא מלוכד ואינו נמצא בקרבת נביעה פעילה.

מחשופי הטרורטין הללו בנויים מטרורטין צמחים בעובי שאינו עולה על 30 ס"מ. טרוורטין זה בנוי משטחי אצות ומכיל חללי עשבוניים, קנים, מאובני שורשים ושלדי חלזונות שמורים היטב. בנצ. 16560/66705 המצויה אמת טרוורטין (self built canal) בגובה כ-1.2 מ' (תמונה F-8), יתכן שמקורה אנטרופוגני כיון שתעלת המקור זורמת במקביל למדרון ומקיפה גבעה תוך כדי זרימה מפולסת פחות או יותר. בצד אמת הטרורטין מצוי מדרון תלול בגובה כ-5 מ' המצופה טרוורטין מגובה טרוורטין הגג ועד לקרקעית ערוץ סוברצנטי המעיד על זרימת מים ממשטח הביניים למשטח התחתון.

יחסי השדה בין מפלסי הטרורטין באזור מואה-צופר (איור 5.11)

טרורטין חצבה מכוסה על ידי חלקה העליון של תצורת חצבה והוא חלק מן התצורה. הוא מצוי ממערב למעיינות הנוכחיים, למרגלותיה הצפוניים של כיפת שביה ומרגלותיה המזרחיים של כיפת גבים, יתכן ויש קשר למבנים הסטרוקטוראליים אלו ולמיקומו של הטרורטין חצבה. הוא מקומט על ידי חלקה הצפוני של כיפת שביה ובאגף הצפון מזרחי שלה הוא מכוסה על ידי תצורת ערבה וטרורטין משטח הביניים באי התאמה זוויתית (נצ. 1663/9977, איור 5.8 בקצה הימני של האיור).

תצורת חצבה בשולי הערבה, מעין עופרים בצפון ועד עין ערגה בדרום, כוללת שלושה פרטים: פרט שחק שבנוי קונגלומרט מקומי בליכוד קרבונטי, פרט משק שכולל משקעי גיר וחואר אגמיים ופרט גידרון שבנוי חרסית ואבן חול אדומים. מנחל שלהב ודרומה חסר פרט משק ופרט גידרון יושב ישירות על פרט שחק (אינדלמן, 1979). יתכן וטרורטין חצבה שמופיע באזור צופר בין פרט שחק לגידרון הינה היחידה הקורלטיבית לפרט משק האגמי כיוון שמיקומה הסטרוטיגרפי דומה לזה של פרט משק.



ציור 5.11: יחסי שדה בין יחידות הטרורטין באזור מואה-צופר (למקרא ראה ציור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

ההשתרעות הגדולה של הטרורטין מעידה על קיום נפח מים גדול שיתכן והיווה את אחד ממקורות המים של אגמי פרט משק. בטרורטין חצבה כמו גם בבסיס פרט משק שבעין עופרים, נחל באר ונחל אשבורן מופיעים גיר אצות, אונקואידים וסטרומוטוליטים (דברים בע"פ, ר. קלבו 1996). לפי חלוקה מפורטת יותר של תצורת חצבה (קלבו וחבריו, 1997) מוצע שהקונגלומרט והטרורטיני נמנים על פרט צפע המשתייך לחצבה עליונה. שני פרטים אלה מכסים בשולי הערבה באי התאמה ארוזיבית וזויתית על חלקה התחתון של תצורת חצבה ועל חבורת עבדת ומכילים גם כן משקעים של גירים אגמיים.

מחשוף הטרורטין והקונגלומרטים של המשטח העליון מקיפים את מואה מצפון בנחל שביה ומדרום בנחל עמר (איור 5.11b). טרורטין המשטח העליון הורבד על פני נוף גבוהים ובמשטר ניקוז שונה מהנוכחי, נוף תצורת ערבה/צחיחה. בנחל עמר מצויים שרידי הטרורטין במפלס גבוה מאוד בנוף ובגובה מקביל למדרגת נחל עתיקה שכנראה שייכת לתצורת ערבה או צחיחה.

משטחי טרורטין הביניים של מואה נמוכים בכ-30 מ' מהמפלס העליון ושייכים לפני נוף נמוכים יותר המנוקזים למערכת הניקוז הנוכחית (איור 5.11). הטרורטינים של מואה אינם מצפים טרסות נחל אלא בונים חלק מחתך המילוי של ואדי טובייק שיוצר את משטח Q_2 . רציפות משטחי הטרורטין מעידה על קו נביעות רציף שהקיף את הקצוות הצפון מזרחיים של כיפת שביה ובלוק נחל עומר. המעיינות נבעו מתצורת מישאש וזרמו מזרחה תוך כדי הרבדת טרורטין על היחידות הצעירות מתצורת מישאש.

טרורטין המפלס הנמוך מצפה את קרקעית הערוצים שחתורים לתוך משטח הביניים. הוא הקרוב ביותר למשטר הניקוז הנוכחי ולכן הוא גם הצעיר שבין יחידות הטרורטין המוזכרות.

אזור עין יהב-עין ערגה (איור 5.12)

מחשוף טרורטין מקיפים את מבני הכיפות הסטרוקטורליות של רחל וערגה. כיפת רחל מוקפת מדרום על ידי הטרורטינים של נחל יהב, ממזרח על ידי הטרורטינים של עין יהב ומצפון על ידי הטרורטינים של עין רחל ואילו ממערב לכיפה לא קיימים טרורטינים. כיפת ערגה מוקפת מצפון, ממזרח ומדרום מזרח. באזור תוארו שלוש קבוצות טרורטין:

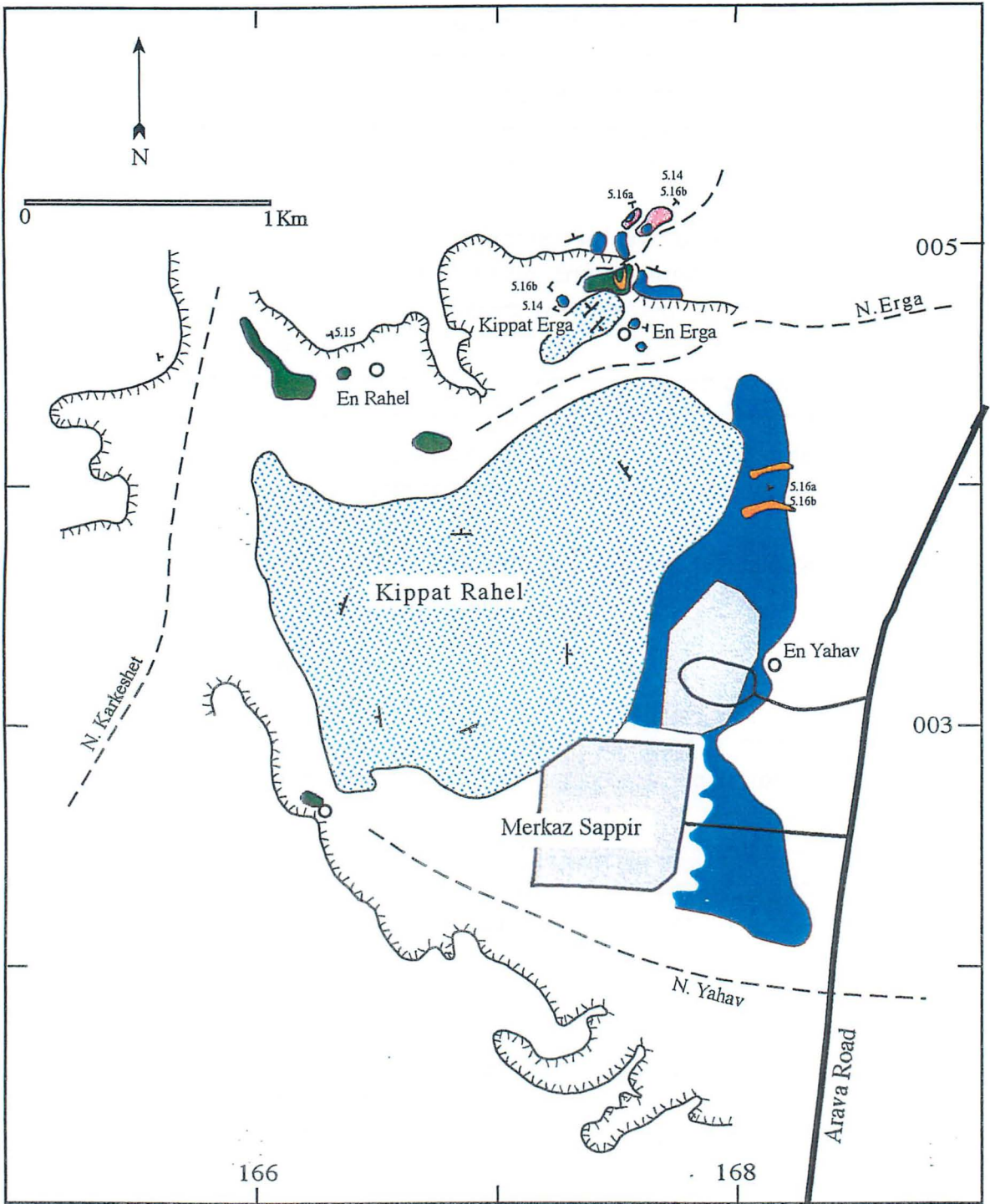
- 1) הטרורטין העליון שמופיע במפלס תצורת ערבה סביב כיפת ערגה ועין יהב.
- 2) טרורטין משטח הביניים שמצוי מטרים ספורים מעל הערוצים הסובבים את כיפת ערגה.
- 3) טרורטין המפלס הנמוך מצוי בקרקעית הערוצים שבין עין יהב וכיפת ערגה.

טרורטין המפלס העליון


עין יהב

מחשוף הטרורטין של עין יהב משתרע לאורך כקילומטר מצפון ודרום למעין עין יהב. הטרורטין יוצר מבנה כיפתי המתבטא בנטיות מתונות לצפון-מזרח ודרום-מזרח (איור 5.16 משמאל), יתכן ומבנה זה קשור למציאות הטרורטין על אגפה המזרחי של כיפת רחל. העובי המירבי של חתך הטרורטין נמדד בקרבת המעין שם הוא בונה מצוק בגובה 5 עד 8 מ' ואילו לכיוון צפון ודרום הוא הולך ונעשה דק תוך כדי התדקקות שכבות הטרורטין המסיביות והופעת טרורטין חוארי. במדרגה המצוקית מופיעות ארבע יחידות: בבסיס יחידה קלאסטית של אבן חול אדמדמה וקונגלומרט, מעל יחידת גיר לבן דק גביש, מעליה יחידת טרורטין אינטראקלאסטי חום ובגג החתך מופיע ציפוי דק של טרורטין צמחים. בסיס החתך איננו חשוף.

חמישה גילים שנקבעו לסלעים ממחשוף זה בעבודות קודמות נעים בין 209,000 ל-243,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) והם מתאימים לטווח הגילים שנתקבלו מסלעי המפלס העליון. הטרורטין שבגג המחשוף תוארך ל-105,000 שנה (ראה פרק 8). יתכן שהטרורטין העליון הוא בן גיל משטח הביניים ומונח כאן על גבי טרורטין המשטח העליון בהתאמה וללא יכולת להבחין במגע שביניהם בשדה.



- | | | |
|--|--|--|
|  Arava Formation (Na) |  Lower level Travertine (Q4) |  Dip |
|  Post-Senonian bed rock |  Medium level Travertine (Q2) |  Spring |
|  Mishash Formation |  Upper level Travertine (Q1/Zh) |  Fault |
| | |  Cliff |

 Schematic section

איור 5.12: מפת המחשופים של אזור עין ערגה- עין יהב

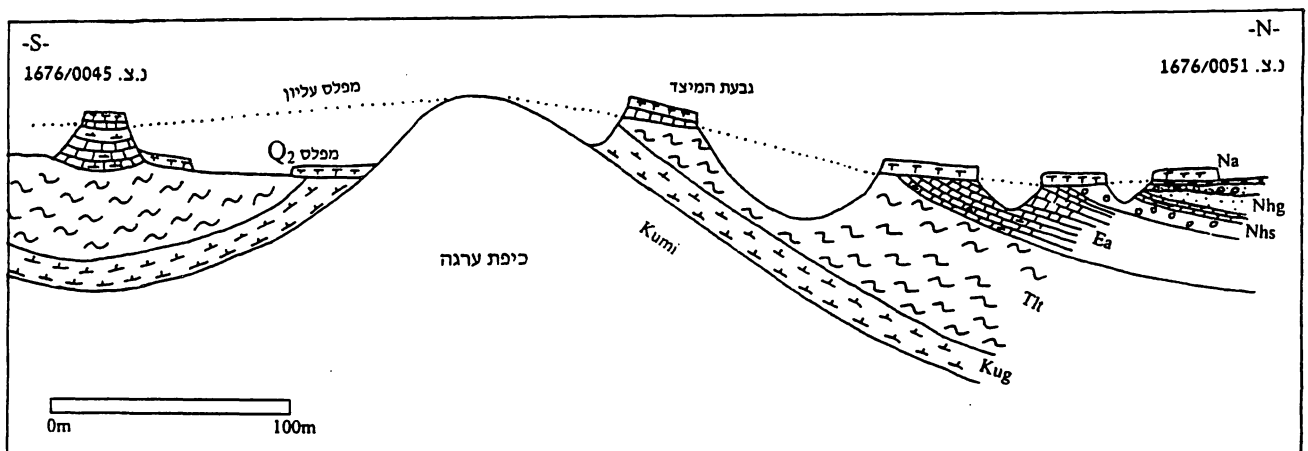
עין ערבה (איורים 5.13, 5.14)

מחשופי הטרורטין של עין ערבה מצויים סביב כיפת ערבה (איור 5.14) על גבעות מבודדות בגובה 20-30 מ' מעל סביבתם (תמונה H-3). הטרורטין מונח באי התאמה זויתית על סלעים בני גיל שונה (איור 5.14 משמאל, 5.13). בקרבת שיא הכיפה הוא מונח על תצורת טקיה (תמונה F-9) ואילו במרחק משיא הכיפה הוא מונח על חבורת עבדת ותצורת חצבה (תמונות G-9, H-5). הטרורטין שמצפון מזרח לכיפה נטוי 15° משיא המבנה צפונה (תמונות H-3, H-6) ושני משארים מדרום מצביעים על נטיה כלפי דרום. בשולי הכיפה מונח הטרורטין אופקית על תצורת ערבה (תמונה G-8). עובי החתך המירבי מגיע בגבעת המיצד ובמחשוף הראשי שבקרבת שיא הכיפה לכ-3 מ', החתך מדקק לכיוון צפון עם ההתרחקות מהכיפה לעובי של כ-0.5 מ'.

בחלק הצפוני מזרחי של כיפת ערבה נחשף קונגלומרט חולי אדמדם של תצורת ערבה (איור 5.16a מימין). הקונגלומרט מכוסה על ידי הטרורטין ומונח באי התאמה על גבי סלעי חבורת עבדת באמצע האגף הצפוני של כיפת ערבה. למרגלות הכיפה הוא מונח מעל פרט גידרון ועדיין מכוסה בטרורטין (איור 5.14 משמאל). לפי יחסי השדה בשפך נחל נקרות ניתן לשייך קונגלומרט זה לפרט כונתילה של תצורת ערבה. אפשר והטרורטין שמצוי מעל לקונגלומרט קורלטיבי לתצורת צחיחה.

בשיא גובהו של המחשוף הראשי של כיפת ערבה מופיע חתך דומה לחתך של הצוק בעין יהב. בולטות בו שתי שכבות (תמונה F-9), גיר אגמי דק גביש לבן ומעליו טרוורטין אינטראקלאסטי חום בעל משטחי אצות ועדשות טרוורטין צמחים גדולות ובלטות בצבען הכהה. הטרורטין האינטראקלאסטי החום משתנה לטרלית, כך שב"גבעת המיצד" (איור 5.13) הוא מופיע מעל לגיר הלבן כטרורטין צמחים צפוף עשיר בדפוסים חלזונות וחללי צמחים (בקוטר של עד 10 ס"מ). הגיר האגמי מופיע מצפון, מדרום וממזרח לכיפת ערבה בין הטרורטין למשטח אי התאמה הזויתית שגודע את חתך סלעי חבורת הר הצופים. הגיר עבה בקרבת הכיפה ומדקק עד אפס עם המרחק מהכיפה.

שלושה גילים שנקבעו לסלעי המפלס העליון מעין ערבה בעבודות קודמות נעים בין 218,000 ל-300,000 > שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) והם מתאימים לטווח הגילים שנתקבלו מסלעי המפלס העליון.



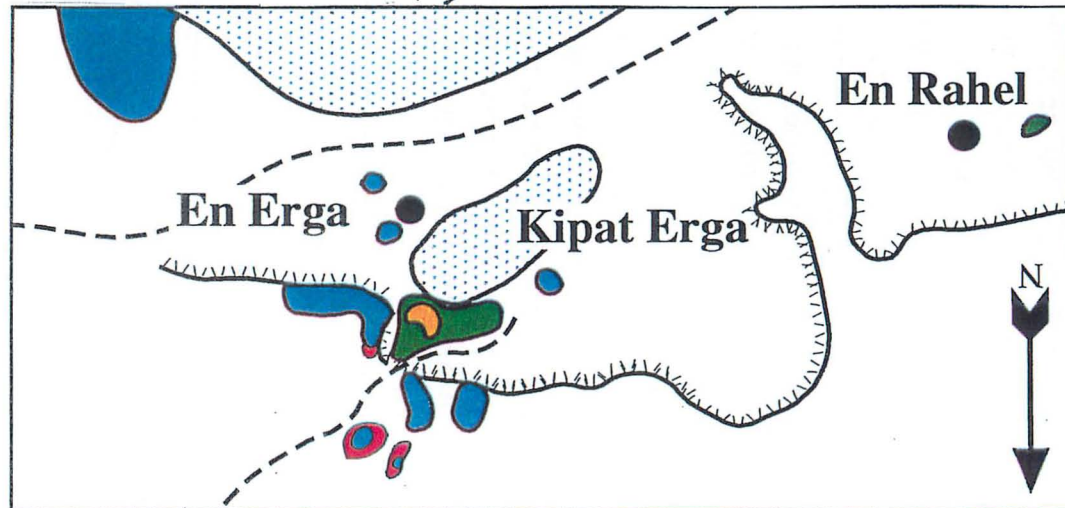
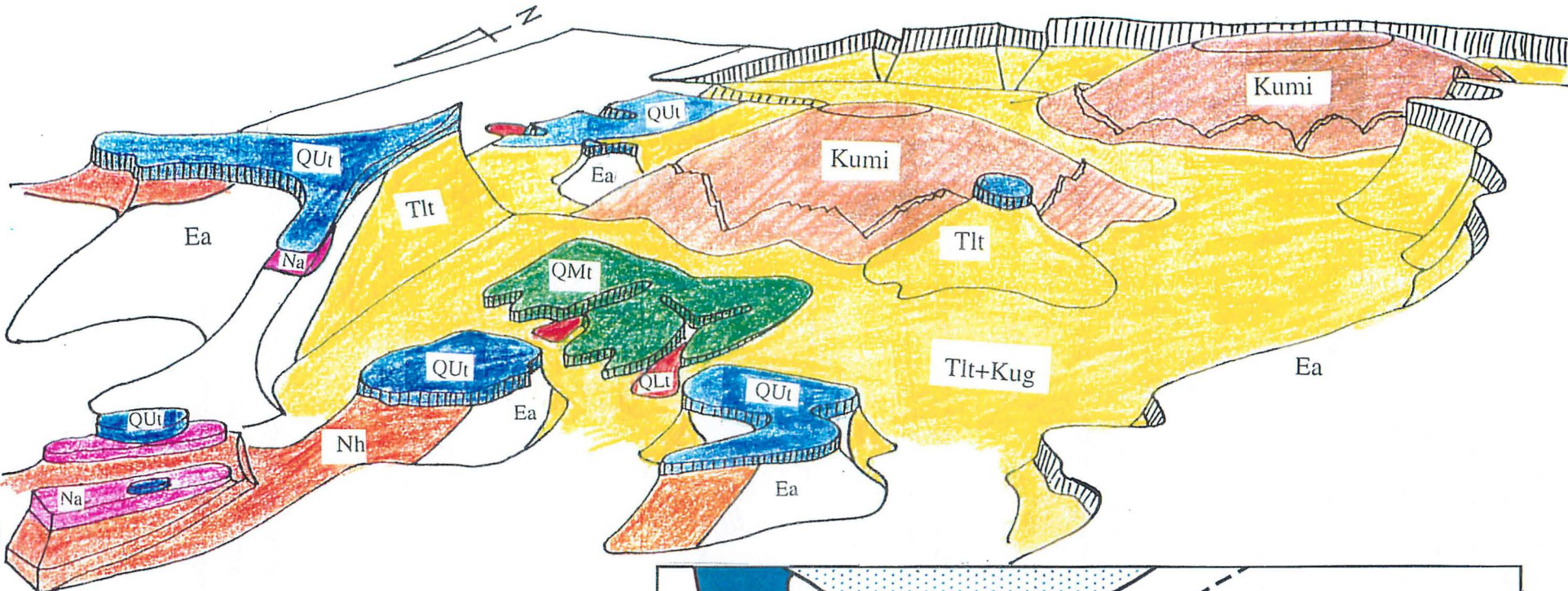
איור 5.13: חתך סכמתי בכיפת ערבה (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

טרורטין משטח הביניים

כיפת ערבה

מסביב לכיפת ערבה בגובה נמוך מהמשטח העליון בכ-10 עד 30 מ' מצוי חתך של טרוורטין אינטראקלאסטי בעובי 0.5-1.7 מ' (איור 5.14). משטח הטרורטין מכסה את קרקעיתו של העמק שהתפתח על התצורות הרכות עירב וטקיה סביב כיפת ערבה. בשוליה הדרומיים של הכיפה טרוורטין משטח הביניים בנוי טרוורטין דטריטי בלבד ומעליו שכבת גיבסריט.

הטרורטין האינטראקלאסטי הינו אפור בהיר ובתוכו מופיעים רבדים של טרוורטין צמחים חום. רוב רבדי טרוורטין הצמחים שבו מרוסקים לשברים.



QLt - טרוורטין המפלס הנמוך-
 QMt - טרוורטין מפלס הביניים
 QUt - טרוורטין המפלס העליון-

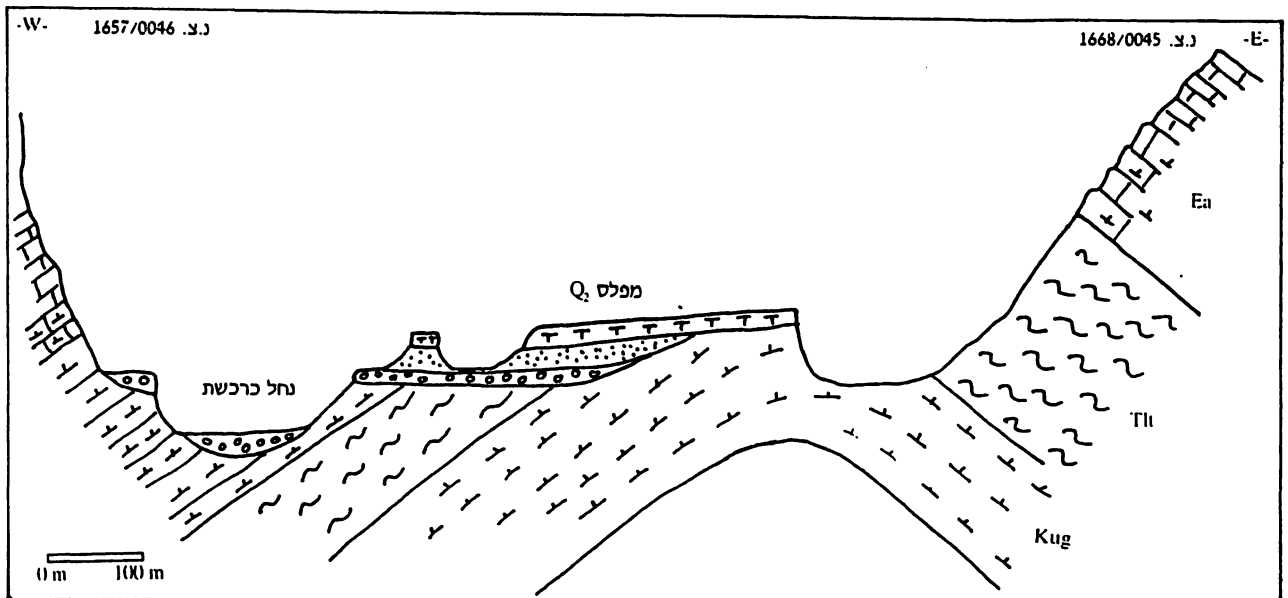
ציור 5.14: כיפת ערגה-מבט תלת מימדי מצפון מערב (למקרא ראה ציור 1.3)

הגיל היחיד שנקבע לסלעים ממחשוף זה הוא 111,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1987) גיל זה מתאים לטווח גילי מפלס הביניים.

עין רחל

מחשוף טרוורטין נוספים השייכים למפלס שממלא את הנוף הסחוף של תצורות עירב וטקיה מצויים מסביב לכיפת רחל בנחל יהב ובנחל כרכשת. כל המחשופים הללו ממוקמים בקרבת קרקעית העמקים הפעילים ובניתוק מנוף המפלס העליון שהתקיים בגובה גבעות משאר האאוקניות הסמוכות. במחשוף עין רחל שנמצא ליד נחל כרכשת קיימים שני מחשופי טרוורטין, האחד הוא משאר קטן הנמצא כ-50 מ' ממערב לעין רחל (עין רחל מזרח). המחשוף המערבי (עין רחל מערב) (איור 5.15) מרוחק מעין רחל כ-150 מ' ובנוי מדרגש טרוורטין עבה וקשה שמחפה על קומפלקס של טרוורטין דטריטי, חול וחוארים ויוצר גבעת משאר המורמת מעל נחל כרכשת ב-10 מ' לערך. הקומפלקס האלוכטוני, שבבסיס חתך הטרורטין, מונח מעל קונגלומרט שהורבד באפיקו הקדום של נחל כרכשת שזרם אז לעבר נחל נקרות תוך כדי ניקוז חלקו המערבי של עמק הסחיפה המקיף את כיפת רחל. הטרורטין נטוי מערבה לכיוון נחל כרכשת ומכסה מדרון מתון שנוקז לעבר נחל כרכשת.

חמשה הגילים שנקבעו בעבודות קודמות לסלעים ממחשוף עין רחל הסמוך למעין נעים בין 63,000 ל-174,000 שנה. שני הגילים שנקבעו לסלעים מהמחשוף המערבי והמרוחק מהמעין הם 221,000 ל-235,000 שנה (Kronfeld and Livnat, 1985). הגיל שנקבע בעבודה זו לחלקו העליון של המחשוף הסמוך למעין הוא 90,000 (ראה פרק 8) והוא בהסכמה מלאה עם הגיל שנקבע לאותה שכבה בעבודות הקודמות הנייל (86,000). קיימת אי התאמה בין גילי עין רחל מערב ויחסי השדה, לפי יחסי השדה טרוורטין זה אמור להמנות על מפלס הביניים שממלאים את העמק הסחוף אך הגילים מצויים בטווח הגילים שהתקבלו מסלעי המפלס העליון שמופיעים במפלס ראשי הגבעות שסביב העמק.



איור 5.15: חתך סכמתי בעין רחל (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

טרורטין המפלס הנמוך

כיפת ערגה

בחלק הצפון מזרחי של העמק המפותח סביב כיפת ערגה מופיעים שרידים של טרוורטין צמחים חום משוכב ועשיר בדפוסי צמחים ועלים רחבים (צפצפת פרת). עוביו כמה עשרות סנטימטרים והוא מונח באי התאמה ארוזיבית על הטרורטין האינטראקלאסטי של מפלס הביניים כך שהוא מכסה אותו ומצפה מפלים בערוצים החתורים לתוכו (איור 5.14 במרכז). בסביבתו הקרובה אין כיום סימן לנביעה פעילה.

עין יהב

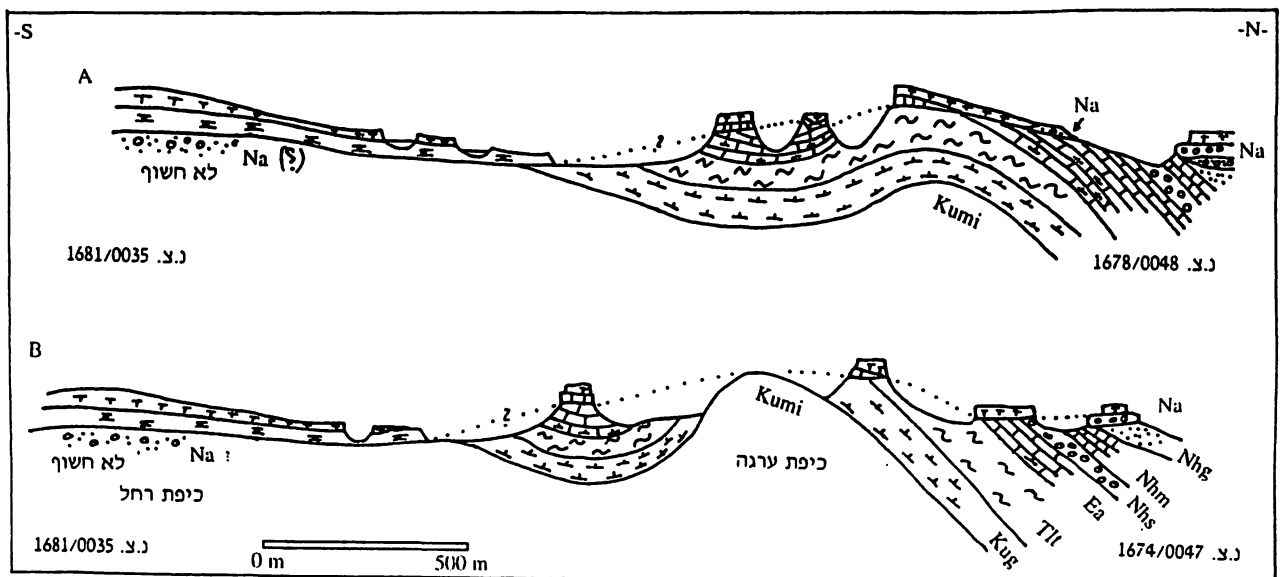
הטרורטין והגיר של המפלס העליון בעין יהב חרוצים בערוצים רדודים שקרקעיתם הנוכחית מצופה בטרורטין צמחים (תמונה G-6). טרורטין זו מצפה מפלים קטנים. הטרורטין נמצא בתהליכי בליה והסרה, לא נראים בו תהליכי שקיעה עכשוויים ואין בקרבתו נביעה פעילה.

יחסי שדה בין מפלסי הטרורטין באזור עין ערגה-עין יהב (איור 5.16)

יחסי השדה בין שלושת מפלסי הטרורטין באזור כיפת ערגה פשוטים אך עם המעבר לעין רחל ועין יהב הופכת הקורלציה בעיתית. בשני אתרים אלה קיים רק מפלס מורפולוגי אחד המכיל טרורטין. טרורטין המפלס העליון מכסה את ראשי הגבעות הגבוהות שסביב כיפת ערגה. הוא מכסה גבעות משאר שנותרו בעמק שמסביב לכיפה, על קירותיו המצוקיים ומחוצה לו. מכאן שהעמק עתיק ממפלס הביניים וצעיר מהמפלס העליון כיוון שהוא חתור בתוכו ומבתר אותו למספר משאים. טרורטין מפלס הביניים מוגבל לקרקעית העמק ולכן הוא מאוחר למפלס העליון. יתכן וחלק משברי הטרורטין "שצפים" בו הגיעו במקור מבליתי הטרורטין העליון. כתמי הטרורטין של המפלס הנמוך מופיעים בערוצים הפעילים. ערוצים אלה חתורים לתוך כל משטחי הטרורטין הקודמים.

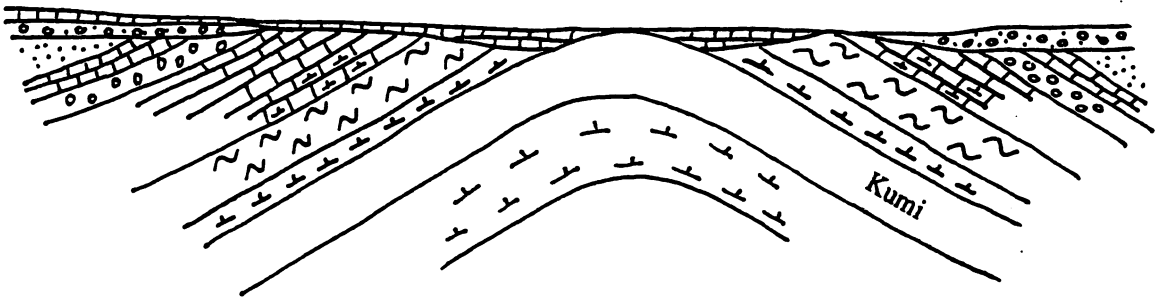
מחשופי עין רחל מצויים מצפון לכיפת רחל, בין מצוקי חבורת עבדת הסוגרים על עמק הסחיפה מצפון לבין גלעין העמק הסנוני (איורים 5.12, 5.15). משטח הטרורטין של עין רחל משתפל במתינות לעבר נחל כרכשת, תוך כדי כיסוי המדרון המתון וקונגלומרט שהיווה את קרקעיתו של נחל כרכשת. כיוון שטרורטין זה מונח בתוך העמק הסחוף הוא לכאורה משתייך לטרורטין מפלס הביניים.

לעומת שלשת המפלסים הברורים באזור עין ערגה, המצב באזור עין יהב מסובך יותר. כיוון שקיימים רק שני מפלסים. התחתון מתאים למפלס הנמוך והשאלה שעולה היא היכן שני המפלסים העליונים? באזור עין יהב אין חלוקה מורפולוגית למפלסים ויתכן שהטרורטינים השונים יוצרים חתך רצוף. מצוקי חבורת עבדת שתוחמים את העמק כנראה קבורים באזור עין יהב כך שקשה להעזר בקשר המורפולוגי שבינם לבין הטרורטינים. בשיא מדרגת הטרורטין של עין יהב מעל לטרורטין האינטראקלאסטי מופיע טרורטין צמחים שמיקומו הסטרטיגרפי אינו ברור, על פי גילו הוא שייך לטרורטין מפלס הביניים ויתכן שהוא מתלכד עם הטרורטין העליון ללא יכולת הבחנה מורפוסטרטיגרפית ביניהם.

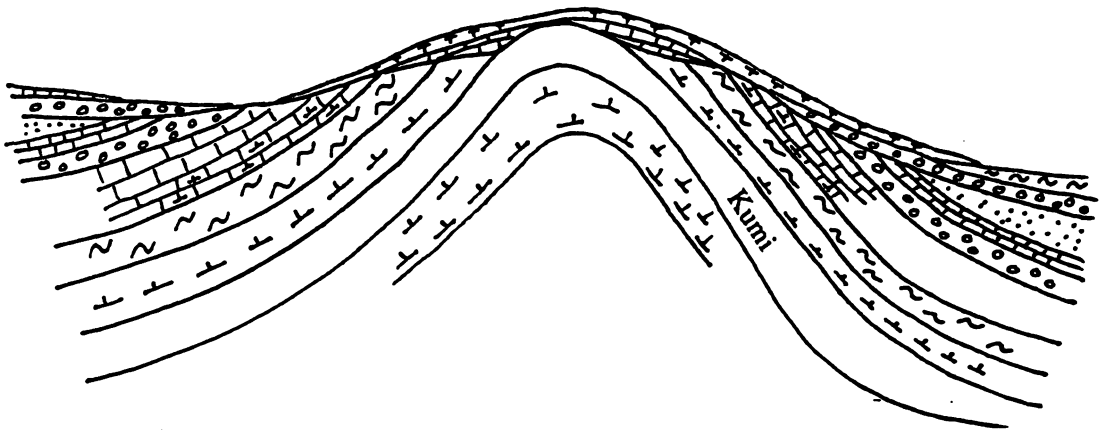


איור 5.16: יחסי שדה בין יחידות הטרורטין באזור עין ערגה-עין יהב (למקרא ראה איור 1.3, קיימת הגזמה אנכית)

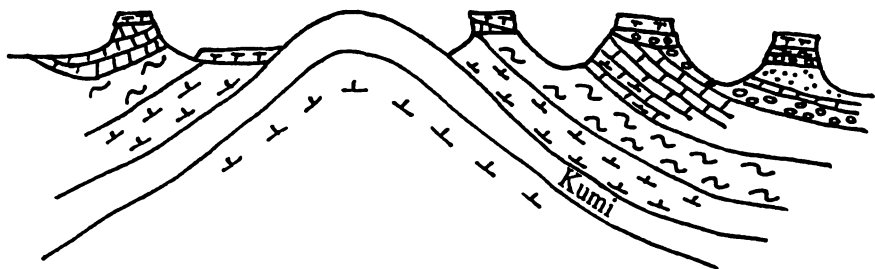
- נראה כי טרוררטיין המפלס העליון של עין יהב מתאים לטרוררטיין העליון בכיפת ערגה על אף שהם אינם מחוברים וזאת על בסיס השיקולים הבאים:
- (א) הסמיכות שבין המחשופים (300 מ') (איור 5.12).
- (ב) הדימיון הליתולוגי.
- (ג) ההשתפלות של המפלס העליון מכיפת ערגה אל עבר עין יהב (איור 5.16).
- משקעי המעינות שבאזור ערגה-יהב הושקעו מקו מעיינות ארטזיים שנבעו מהמגע בין תצורת מישאש שנחשפה בשיא כיפת ערגה וכיפת רחל (שהינה גבוהה סטרקטורלית יותר מכיפת ערגה) לבין משטח הנוף שהתקיים באותו זמן. מעיינות אלה השקיעו טרוררטינים בקרבתם ויצרו גופי מים שבהם שקע גיר באזור שממזרח לכיפת ערגה וממזרח לכיפת רחל (איור 5.17). חתך הגיר והטרוררטיין האינטראקלאסטי מונח באי התאמה זייתית על הסלעים הרכים של תצורת טקיה. יחסי שדה אלו מחייבים יצירת משטח גידוע שגדע את חתך תצורת ערבה, תצורת חצבה, חבורת עבדת, וחבורת הר הצופים עד לתצורת מישאש בכיפת רחל וערגה לפני השקעת הטרוררטיין העליון. הגיר האגמי מתעבה לכיוון שיא הכיפה ומדקק לאפס במרחק ממנה דבר שמראה על הקשר שלו למעינות שהתפתחו בגג אקויפר תצורת מישאש. המעבר ההדרגתי מגיר אגמי לטרוררטיין אינטראקלאסטי עם עדשות טרוררטיין מעיד על השתנות סביבת ההשקעה מגוף מים קבוע בו מורבד גיר לאזור מעיינות המתייבש לעיתים או זורם ומאפשר גידול צמחים. יתכן ששינוי זה קשור להתרוממות אזור הנביעות.
- הרמה מאוחרת הגביהה את משקעי המעינות ואת משארי תצורת ערבה בכיפת ערגה מעל למפלס הכללי של תצורת ערבה. הרמה זו לוותה בהתחתרות סביב כיפת ערגה דבר שיצר עמק סובסקוונטי סביב גלעין הכיפה שעשוי תצורת מישאש לבין שכבות חבורת עבדת. עמק זה התפתח על גבי הסלעים הרכים של תצורת עירב וטקיה שנחשפו בכיפת רחל, ערגה ונחל כרכשת. יתכן ומשקעי עין יהב שהינם רחוקים מהשיא הסטרקטורלי של כיפת רחל כמעט ולא הורמו אלא רק השתפלו לכיוון מזרח עם הקיר המזרחי של עמק הסחיפה שיכול היה להיווצר סביב כיפת רחל.
- לאחר התחתרות העמק התיצב קו הנביעות של כיפת ערגה במגע שבין תצורת מישאש לבין קרקעית הביקעה. במקביל החלה הרבדת משטח טרוררטיין הביניים בתוך העמק בעיקר בחלקו הצפון מזרחי. משטח זה כיסה את קרקעית הביקעה והוא בנוי טרוררטיין אינטראקלאסטי עם עדשות טרוררטיין צמחים. הטרוררטיין האינטראקלאסטי מצביע על קיום גוף מים עומד שכנראה נחסם בתוך העמק על ידי המצוקים שמסביב.
- שלב התחתרות נוסף גרם להיווצרות מצוק ותעלות זרימה במפלס הביניים שבביקעה. טרוררטיין המפלס הנמוך הורבד בערוצים החתורים ולכן לא יצר משטחים.
- לסיכום, בהתפתחות הנוף של בקעת ערגה-רחל ניכרים מספר שלבים (איור 5.17):
- (א) תצורת ערבה מורבדת באזור כיפת ערגה ומכסה אותה או את שולי המבנה (איור 5.17 א).
- (ב) גידוע ארוזיבי חושף בשיא מבני רחל וערגה את תצורת מישאש וגודע בשולי המבנה את תצורת ערבה.
- (ג) בשיא כיפת ערגה מתחילים לנבוע מעיינות ארטזיים שיוצרים גוף מים המשקיע חתך גיר אגמי על מישור הגידוע הארוזיבי (מפלס עליון). יתכן ומהלך ארועים דומה חל גם בכיפת רחל הקרובה.
- (ד) ארוע קימוט גרם להתרוממות כיפת ערגה וכנראה גם רחל, דבר שהביא לקימוט הגיר האגמי ולניקוז סופי של גופי המים. טרוררטיין המשיך להוצר סביב המבנה מעל לגיר האגמי ולשכבות החשופות מחבורת הר הצופים, עבדת, תצורת חצבה ותצורת ערבה (איור 5.17 ב).
- (ה) הרמת כיפת ערגה (ואולי גם שקיעת גרובן נקרות) הביאה להתחתרות ערוצים בסלעים הרכים של תצורת טקיה מסביב לגלעין המישאש והווצרות ביקעת ערגה (איור 5.17 ב).
- (ו) עם היווצרות העמק נדדו הנביעות לתוכו בעקבות קו המגע שבין תצורת מישאש ותצורת עירב. מי המעינות יצרו בתוך הביקעה גופי מים קטנים בהם שקע טרוררטיין אינטראקלאסטי ובצידם טרוררטיין צמחים (מפלס ביניים).
- (ז) ארוע התחתרות נוסף הביא לשיפור הניקוז של עמק ערגה, יבוש גופי המים ולחיתרת ערוצים בטרוררטיין מפלס הביניים.
- (ח) מי הנביעות שסביב הכיפה המשיכו לזרום בערוצים שנחתרו ולהשקיע בהם את טרוררטיין המפלס התחתון.



א. משטח גידוע והשקעת גיר אגמי



ב. קימוט והשקעת טרוורטין מפלס עליון



ג. התחרות ויצירת בקעת ערגה, שקיעת טרוורטין מפלס הביניים

0 m 100 m

הבדלים בנפחי הטרורטין

קיים יחס ישר בין ספיקת מעין משקיע טרורטין לנפח הטרורטין השוקע בו ולכן יש חשיבות לנסות ולהשוות את נפחי הטרורטין ששקעו בכל מפלס באזורים השונים. השוואה כזו יכולה לתת אינדיקציה לשינויים בספיקת המעינות. השוואת נפחי הטרורטינים היא בעיתית. מחשופי הטרורטין הם משארים המייצגים כתמי טרורטין לא רציפים עם הבדלי עובי גדולים ביניהם ובתוך כל אחד מהם. למרות זאת, מהשוואת העובי בלבד ניתן לראות כי קיימים הבדלים בין קבוצות מפלסי הטרורטין השונות. מתוך המפות שבאיורים 5.2, 5.9 ו-5.12 אפשר להבחין בהבדלים שבין שטחי ההשתרעות של יחידות הטרורטין השונות.

טבלא 5.1: השוואת עובי ושטח כיסוי של יחידות הטרורטין

אזור עין תמיד-נחל משק

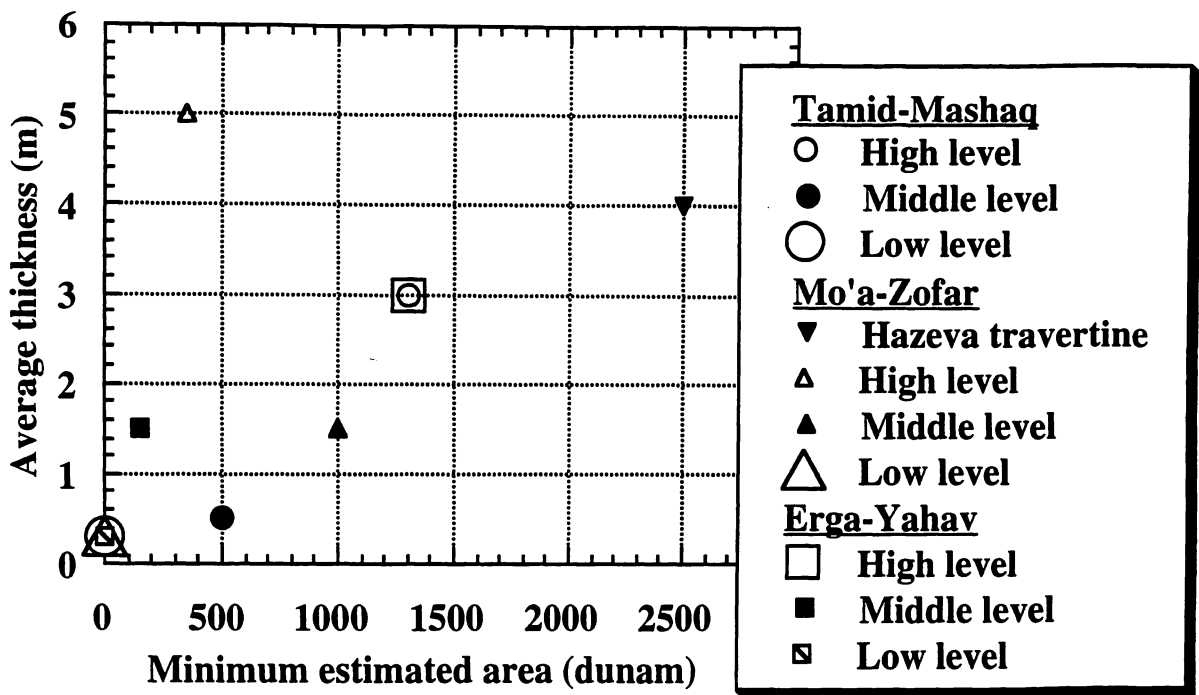
מפלס הטרורטין	שטח משוער (דונם)	עובי ממוצע (מ')	תחום עוביים (מ')
טרורטין עליון	1,300	3	8-1
טרורטין מפלס ביניים	500	0.5	0.5
טרורטין המפלס הנמוך	0.15	0.3	0.3-0.1

אזור מואה-צופר

מפלס הטרורטין	שטח משוער	עובי ממוצע	תחום עוביים
טרורטין חצבה	2,500	5	15-2
טרורטין עליון	350	4	10-2
טרורטין מפלס ביניים	1,000	1	1.5-0.5
טרורטין המפלס הנמוך	0.1	0.3	0.4-0.1

אזור עין ערגה-עין יהב

מפלס הטרורטין	שטח משוער	עובי ממוצע	תחום עוביים
טרורטין עליון	1,300	2	3-1
טרורטין מפלס ביניים	150	1	1.5-1
טרורטין המפלס הנמוך	0.1	0.3	0.4-0.1



איור 5.18: עובי ממוצע של הטרורטין מול ההשתרעות המוערכת המינימלית

הקשר בין העובי הממוצע לשטח השתרעותן של יחידות הטרורטין השונות בשלושת האזורים מוצג באיור 5.18. ההשתרעות המוערכת המינימלית נאמדה על פי חיבור משארי טרורטין קרובים הנמנים על אותה יחידה מתוך המפות. מתוך הגרף עולה שקיימת התאמה בין העובי והשטח המצופה בטרורטין. אלו משתנים בלתי תלויים כך שניתן לשער שגם נפחי הטרורטין מתנהגים בהתאם, ושנפח הטרורטין של המפלס העליון גדול מזה של מפלס הביניים ונפח המפלס התחתון הוא הקטן ביותר. נפח יחידת הטרורטין שמופיעה בתצורת חצבה גדול מאוד, לפחות פי חמש מנפחי היחידות האחרות.

גם כאשר מוחלפת האורדינטה בערכי עובי המכסימלי מתקבלת אותה תמונה. הטרורטין היחיד שחורג מהמגמה הכללית הוא טרורטין המפלס העליון שבאזור מואה-צופר, יתכן והסבר לכך נעוץ בהיותו כיסוי לסלעים הרכים של תצורות עירב וטקיה דבר שגרם לסחיפתו המהירה ולירידה בשטח השתרעותו כיום. לעומת אזור מואה-צופר טרורטין המפלס העליון באזור תמיד-משק מונח על תצורת מישאש או פרט משק של תצורת חצבה ובאזור ערגה-יהב הוא מונח בעיקר על חבורת עבדת, כך ששימורם יותר טוב.

מטבלא 5.1 ואיור 5.18 עולה שקיימת התאמה בין הגיל היחסי של הטרורטינים לבין העובי ומימדי ההשתרעות שלהם או לבין הנפח המוערך שלהם. טרורטין המפלס העליון מוערך כבעל הנפח הגדול ביותר בעיקר באזור תמיד-משק ובאזור ערגה-יהב. באזור מואה-צופר שטח משארי הקבוצה הגבוהה קטן עקב סחיפתם אך עובים (10 מ') מעיד על נפח גדול. נפחם הכולל של משקעי מפלס הביניים מוערך כנפח נמוך מנפחם של משקעי המפלס העליון. משקעי המפלס הנמוך מוגבלים לערוצים צרים ועובים קטן כך שהנפח שלהם קטן עוד יותר.

עובי או נפח הטרורטין תלויים ב:

(א) כמות המים שהשקיעה אותם;

(ב) ריכוז ה- HCO_3^- במים ויעילות ההשקעה.

בהנחה שהרכב המים ויעילות השקיעה לא השתנו הרי שכמות הטרורטין יכולה לבטא כמות מים. כמות גדולה של מים יכולה לבטא שפיעה רבה של מעיינות או זמן ארוך של השקעה. בהעדר למיניציה עונתית בשלוש הקבוצות קשה להשוות את קצב ההשקעה, אך מימדי ההשתרעות המרחבית של מחשופי שלוש הקבוצות מעידים שמדובר בשפיעה רבה של המעינות ולא דוקא במשך זמן ארוך של השקעה. על פי התנהגותם הדומה של שני הגורמים הבלתי תלויים, העובי וההשתרעות (שתלויה במספר הנביעות) אפשר לקבוע שמדובר בשפיעה רבה. באפשרות השפיעה הגבוהה בזמן הרבדת המפלס העליון תומכות גם התצפיות הבאות: משקעים אגמיים במפלס

העליון, חסרונם של מאובני עצים בטרורטין מפלס הביניים לעומת מציאותם בטרורטין חצבה וטרורטין המשטח העליון בנחל משק, כיפת ערגה, נחל עומר ונחל שביה. יש לראות את הירידה בשפיעה כשינוי כמות המים הזמינים באקויפר מישאש. זהו אקויפר קטן שמושפע עונתית ולכן כנראה שהשינוי בשפיעה קשור בשינויי אקלים שיכולים להשפיע על כמות המים החודרים לאקויפר ועל ריכוז הביקרבונט במים. נפחם הקטן של הטרורטינים ההולוקניים והנביעות המזעריות של המעיינות הרצנטיים קשורים כנראה לאקלים היבש שקיים באזור במשך ההולוקן.

יחסי השדה והפלאוגיאוגרפיה-סיכום

הטרורטינים בערבה הצפונית והמרכזית מתחלקים לשתי קבוצות, האחת מצויה בתוך תצורת חצבה והשנייה כוללת סלעים צעירים יותר.

מיקומו של טרוורטין חצבה מתאים מבחינת זמן הווצרותו לפרט משק או לפרט צפע האגמיים. יתכן והמעיינות שהשקיעו אותו סיפקו בין השאר מים לאחד משני האגמים.

את הטרורטינים הצעירים ניתן לחלק על סמך ניתוח המפלסים לשלוש קבוצות:

-קבוצת משקעי המעיינות הגבוהה, שהמפלס שלה מתאים למפלס המכונה מפלס תצורת ערבה/צחיחה.

-קבוצת הביניים של משקעי המעיינות, שהמפלס שלה מתאים למפלס המכונה מפלס Q_2 .

-קבוצת משקעי המעיינות הנמוכה, שהמפלס שלה מתאים למפלס הערוצים הפעיל, מפלס Q_4 .

אם נתיחס לחלוקת תצורת ערבה של גינת (1997) בנחלים חיון וציחור ואבני (1997) בנחלים פארן ונקרות ולמחשופי תצורת צחיחה ברמת ברק (קרץ, 1997) הרי ניתן להחיל חלוקה זו גם בנחל עמר ובכיפת ערגה וכנראה שגם באזור תמיד-משק. מציאות פלאוסולים קלציים בטרורטין העליון בנחל משק, משקעים אגמיים בכיפת ערגה ועין יהב ואזור תמיד-משק, מיקומם המורפוסטרטיגרפי של טרוורטין נחל עמר וכיפת ערגה תומכים בעקיפין בהשתייכות טרוורטין ערבה לתצורת צחיחה ולא לטרסה Q_1 בה לא מוכרים פלאוסולים, טרוורטינים או משקעים אגמיים.

פלאוגיאוגרפיה

במקומות אחדים (מואה, עין יהב, עין ערגה) מופיעים טרוורטינים שונים יחד. בין השאר הם נבדלים בעוביים ובשטח השתרעותם, כאשר טרוורטין מפלס הביניים מכסה שטחים רחבים בעובי יחסית גדול וטרורטין המפלס התחתון מכסה קרקעית ערוצים צרים יחסית ועוביו קטן. הבדלים אלה נובעים כנראה משפיעה גבוהה של המעיינות שמספרם גדול ולא ממשך זמן השקעה. נראה שהסיבה להבדלי השפיעות נובעת משינויי אקלים בין תקופות שקיעת הטרורטינים, כאשר טרוורטין המפלס התחתון (Q_4) מבטא את האקלים היבש של היום.

סביבות ההשקעה של היחידות השונות

טרורטין תצורת חצבה שקע במערכת פלוביאלית בסינקלינית שביה בשלב האחרון בהרבות יחידת הקונגלומרט שחלקו העליון מלוכד ע"י הטרורטין. זהו טרוורטין סטרומטוליטי המשמש חומר ליכוד הממלא חללים בין חלוקים ומצפה אותם. גודל החלוקים עולה על 30 ס"מ. בין החלוקים פרגמנטים אנגולריים של הטרורטין המצפה. על סמך אלה נראה שהטרורטין שקע תוך כדי השקעת חלוקי הקונגלומרט בסביבה של אנרגיה גבוהה. במקומות נמצאו בטרורטין סטרוקטורות "סטלקטיטיות" המעידות על קיום מפלים על פני השטח, שובלי אצות ואונקואידים המעידים גם הם על פאצייס פלוביאתילי.

ההשתרעות הנרחבת של טרוורטין חצבה ומציאות מאובנים רבים של עלי עצים ודקלים רבים מעידים על זרימה באפיק רחב מכוסה צמחיה גבוהה. השתרעותו של הטרורטין מקומית ומכסה שטחים מסוימים מתוך מניפת הסחף של הנחל. ליכוד טרוורטיני בקונגלומרט של פרט צפע מופיע גם בנחל פארן (קרץ 1977).

טרורטין המפלס העליון שקע לאורך המורדות הצפוניים של רכס מחמל, כיפת תמיד, כיפת ערגה כיפת רחל, ובלוק נחל עומר. הוא מכסה קונגלומרטים של תצורת ערבה/צחיחה או מצוי במפלס טופוגרפי דומה. טרוורטין זה נמצא בשולי אגן ההצטברות של תצורת ערבה/צחיחה. המעיינות שהשקיעו אותו נבעו מתוך אקויפר מישאש שהיה חשוף בשולי הערבה והוא הורבד בגופי מים עומדים או זורמים שנמצאו על המשטחים הפלוביאליים

שאפיינו את הנוף באותו פרק זמן על גבי תצורת ערבה/צחיחה או המשטחים הארוזיביים של סלעי התצורות עירב, טקיה, מור, פארן וחצבה.

ניתן לאפיין שתי סביבות השקעה בהן שקע טרוורטין המפלס העליון:

1. מדרונות - בנחל חצבה ובסינקלינת עין תמיד מופיע חתך טרוורטין דמוי יתד (איור 5.3) שחלקו העבה היה סמוך לנביעה שבחלקו העליון של המדרון בדומה לתיאור של Violante et al. (1994).
 2. מדרון מתון או ביצתי - משטחי טרוורטין תת אופקיים עם חילופים של טרוורטין צמחים עם טרוורטין דטריטי וחול קרבונטי. הסביבה היא ביצה-מלחה בעלת אופי של אחו לח הדומה לאזורי המעינות של היום בזמן שפיעת שיא. הופעת עדשות חלוקים, סדקי התיבשות וגיר קרוע בחתך עין יחב מצביעה על סביבה הנתונה ליבוש והרטבה.
- כפי שצוין נמצאו במפלס העליון בקרבת המעינות גם כתמי גיר ששקע ככל הנראה בסביבה של ברכות/אגמים/ביצות - הגיר נמצא בחילופין עם טרוורטין אינטראקלאסטי המכיל אוסטרקודה ו-Charophyta המצינים את מציאותם של גופי מים עומדים.

טרוורטין מפלס הביניים (Q_2) שקע ממעינות שמיקומם מקביל למיקום המעינות הנוכחיים. טרוורטין זה מהווה חלק מהחתך הבונה את מפלס Q_2 . העמקים בהם נוצר טרוורטין מפלס הביניים התחתרו לתוך המפלסים הגבוהים (ערבה/צחיחה ו- Q_1) ולתוך התצורות הרכות של חצבה עירב וטקיה ובהשארין את מצוקי הגיר הקשים (לרוב של תצורת פארן) סביב. עמקים אלה נוצרו סביב כיפת רחל, ערגה, סביב אנטיקלינות עומר ושביה וסביב כיפת תמיד. בעמקי סחיפה אלו החלו מעיינות נובעים סביב גלעין תצורת מישאש שנותר במרכז העמק ומרפדים את קרקעית העמקים בטרוורטין דטריטי בעל מרכיב חרסיתי גבוה. בשולי העמקים, על גבי המצוקים נותרו שרידי טרוורטין המפלס העליון.

טרוורטין מפלס הביניים בנוי בחלקו התחתון מטרוורטין אלוכתוני המכיל עדשות קטנות של טרוורטין צמחים וטרוורטין אינטראקלאסטי בתוך טרוורטין דטריטי או חול טרוורטיני. לעיתים מופיע טרוורטין חווארי נרחב, עדשות קונגלומרט ועדשות גיר. צירוף כזה מעיד על סביבה ביצתית בעלת ניקוז לא סדיר עם גופי מים עומדים (Pedely, 1991; Violante et al., 1994; Pentecost et al., 1994). יחסי האצבוע הקיימים במואה בין המשקעים הדקים הללו והקונגלומרט מצביעים על קיום סביבה פלוביאלית בסמיכות גדולה לגופי מים של אזור ביצתי או למלחה בה מורבדים משקעים קרבונטיים דקי גרגר. כמות הגבס הגדולה שבטרוורטין הדטריטי, סימני השורשים והמבנה העמודי של הטרוורטין החווארי מעידים על גוף מים לא קבוע וסדימנט חשוף להרטבה ויבוש.

בחלק העליון של אתרי טרוורטין מפלס הביניים מופיע טרוורטין צמחים קשה מעל לטרוורטין האלוכתוני הדטריטי והחווארי המכיל עדשות טרוורטין צמחים. אופי חתך זה מוסבר על ידי כך שבמקור קרקעית העמק אליה נסחף חומר דטריטי היתה מבוותרת והטרוורטין הראשון הנוצר על הקרקעית נהרס אף הוא והצטרף כטרוורטין אלוכתוני לשאר החומר שממלא את התבליט המקומי. עם התישורת הקרקעית נפסקה הריסת מבני הטרוורטין והוא החל מצטבר.

טרוורטין המפלס הנמוך שמרפד את קרקעית הערוצים הנוכחיים שקע לאחר שלב התחתרות הולוקני לתוך המשטחים הקודמים. כיום נביעת המעינות עונתית דלה ומקוטעת ולא נצפית שקיעת טרוורטין.

משקעי הטרוורטין בערבה אינם מראים עדויות לרציפות בשפיעה. כיום השפיעה מקוטעת ויתכן שכך היה גם בעבר. לא נמצאו שרידים לטרוורטינים המקשרים בין מפלסים, טרוורטינים כאלו היו יכולים להראות רציפות בשפיעת המעינות גם בתקופות ההתחתרות. כדי לבדוק האם קיימת רציפות בשפיעה בעזרת רציפות בגילים רדיומטריים יש למדוד גילים רבים באתר אחד ולהרבות במדידות על כל מפלס כיוון שפלג המשקיע טרוורטין משנה את נתיבו במשך הזמן על המשטח ויוצר משטח טרוורטין דיאכרוני בדומה למשטח השקעה פלוביאיטילי.

6. ההרכב הכימי של סלעי הטרוורטין

הקדמה

בעזרת אנליזה כימית ניתן לנסות ולהבחין האם קיימים הבדלים בהרכב הכימי של הטרוורטין. ואם קיימים הבדלים, האם הם קשורים בהבדלי פאזיס, בהבדלים בהרכב המים של המעיינות, במפלס או במשתנים כמו נפח ומידת ההשתרעות של הטרוורטין.

בתוך סלעי טרוורטין מצויים מרכיבים אותיגניים וקלאסטיים. אנליזה כימית אינה יכולה להבחין בין מרכיבים אותיגניים למרכיבים קלאסטיים שאינם נבדלים מבחינה מינרלוגית, גם אם הרכבם הפטרוגרפי שונה. לדוגמה, קלציט אותיגני לעומת גרגרי טרוורטין או גיר קדום. אנליזה כימית איננה יכולה להבחין בין מקורות מינרלוגיים שונים של יסוד כימי מסוים, לדוגמה לא תמיד ניתן לקבוע אם מקור ה-Mg הוא בדלומיט או בקלציט מגנזי, לעומת זאת ניתן לקבוע אם מקור ה-Ca הוא בגבס או בקלציט על פי ריכוז ה-SO₄.

ההרכב הכימי של הטרוורטין

תוצאות אנליזות הטרוורטין מוצגות בטבלא 6.1 אנליזות המים שנדגמו ממעיינות שבקרבת מחשופי הטרוורטין מוצגות בטבלא 6.2. יסודות הקורט שנמדדו באנליזות הכימיות של סלעי הטרוורטין כללו Li, K, Na, Sr, Mg, Ba. במי המעיינות נמדדו SO₄, Cl, HCO₃, Si, NO₃, Br, B, Ba, Li, K, Na, Sr, Mg, Ca. בדיעבד התברר כי רק ה-Sr, Mg וה-Na קשר בין הרכב המים לסלעים, ולכן התרכזו הדיון באלה בלבד.

מרבית דוגמאות הסלע מכילות 37%-40% Ca, ולכן הן מיצגות סלעים שעיקרם קלציט. אלו שמכילות פחות Ca מכילות מלחים מסיסים. הריכוזים חושבו יחסית למשקל המקורי של הסלע שנלקח לאנליזה. ריכוזי ה-Ca בטרוורטין החווארי (דוגמאות L-117, L-106, L-11H) נמוך מ-30% בגלל אחוז גבוה של חומר בלתי מסיס בחומצה (לדוגמה, 44% ב-L-106, או 30% ב-L-117). הטרוורטינים האותיגניים, טרוורטינים האלוכתוניים והמשקעים האגמיים אינם נבדלים בהרכבם הכימי.

לא נמצא קשר בין הרכב הטרוורטין לפאזיס או לאזורי התפוצה. באיורים 6.1, 6.2 ו-6.3 מוצגים הרכבי הטרוורטין בכל האזורים וניתן לראות את הדימיון בהרכבים שלהם. לעומת זאת קיימת תלות של ההרכב הכימי במפלסי הטרוורטין. באיור 6.4 מופיע פיזור הערכים של יחסי Sr/Ca, Mg/Ca ו-Na/Ca בכל אזורי התפוצה. מהאיור עולה שהערכים הנמוכים ביותר מופיעים בטרוורטין המפלס העליון והגבוהים ביותר בטרוורטין המפלס התחתון. טרוורטין חצבה הוא בעל הריכוזים הנמוכים ביותר של SO₄ ויסודות הקורט האחרים, הוא בנוי קלציט כמעט נקי.

השאלות שעולות מתוך התלות הזו הן: מהו הקשר בין ה-Sr, Mg וה-Na? מהו הקשר בין ההרכב הכימי למפלסים?

מהות הקשר בין ה-SO₄ ל-Mg, Sr וה-Na

הקשר בין ה-SO₄ ל-Mg, Sr וה-Na יכול לנבוע מאחת האפשרויות הבאות:
(א) ה-SO₄ מייצג כמויות שונות של גבס המלווה את הקלציט בטרוורטין. ככל שיש יותר גבס עשיר הקלציט ביסודות הקורט Sr, Mg ו-Na.

(ב) ה-SO₄ מייצג סולפטים של Sr וסולפטים של Mg שמלווים את הקלציט בטרוורטין. ככל שיש יותר סולפט גדל גם ריכוז ה-Sr וה-Mg.

(ג) אינקלוזיות נוזליות בקלציט, המכילות SO₄, Sr, Mg ו-Na בריכוזים שונים. כדי לבדוק איזו מהאפשרויות נכונה יש לבחון האם ריכוזי ה-Mg וה-Sr בטרוורטינים הצעירים יכולים להתאים לקלציט, או שריכוזם גבוה מדי ואז הם מוכרחים להמצא בפאזות אחרות שהוזכרו באפשרויות ב' וג'. הטרוורטין הצעיר מכיל Mg ו-Sr בריכוזים של עד 10,000 ppm ו-3000 ppm בהתאמה (טבלא 6.1). ריכוזים אלה גבוהים מדי עבור קלציט כיוון שהקלציט הנקי שבטרוורטינים מכיל ריכוז Mg של כ-2000 ppm, ריכוז Sr של כ-400 ppm וריכוז Na של כ-50-100 ppm (הריכוזים נמדדו על פי איורים 6.1, 6.2 ו-6.3 בחיתוך קו הרגרסיה עם האורדינטה שם ה-SO₄ מתקרב לאפס והטרוורטין מכיל רק קלציט).

קיימות מספר אפשרויות להסביר את המיתאם של ריכוז ה-SO₄ לריכוז שלושת היסודות הנזכרים:

(א) יסודות הקורט מחליפים Ca בתוך הגבס.

(ב) יסודות הקורט מרוכזים בקלציט בתוך אינקלוזיות שההרכב הכימי שלהן דומה לזה שבתמיסה הסובבת את הגביש בזמן התגבשותו.

(ג) יסודות הקורט מצויים באינקלוזיות מינרליות בתוך הגבס.

Sample LE no.	Location	Level	facies	Ca %	SO4 %	Na ppm	Mg ppm	Sr ppm	K ppm	Ba ppm	Li ppb	B ppm	Sr/Ca (mol)	Mg/Ca (mol)	Na/Ca (mol)
124	En Gedi	h	t	40.26	0.07	162	8371	553	24		137		6.27E-4	3.57E-2	7.02E-4
128	En Gedi	l	t	40.08	0.11	265	6082	740	52	102	543		8.43E-4	2.60E-2	1.15E-3
93	Kippat Erga	h	t	41.11	0.68	224	3270	1474	37	19	354		1.64E-3	1.37E-2	9.46E-4
94	Kippat Erga	l	t	38.47	0.72	321	6246	2037	185	36	1042		2.42E-3	2.79E-2	1.45E-3
95	Kippat Erga	m	tl	39.74	0.96	402	5220	2208	128	19	875		2.54E-3	2.25E-2	1.76E-3
96	Kippat Erga	m	tl	28.68	0.10	215	6326	797	639	165	2552		1.27E-3	3.79E-2	1.31E-3
98	Kippat Erga	h	ll	22.69	0.66	448	6240	1168	173	15	965		2.35E-3	4.72E-2	3.44E-3
99	Kippat Erga	h	tl	40.99	0.40	171	3316	1213	32	19	407		1.35E-3	1.39E-2	7.26E-4
13a	Kippat Erga	m	tl	38.59	0.40	183	4408	1130	126	51	1087	1934	1.34E-3	1.96E-2	8.25E-4
13b	Kippat Erga	m	tl	37.14	0.34	180	4315	989	209	26	1372	2478	1.22E-3	1.99E-2	8.44E-4
194LR	En Rahel	m	t	28.95	0.59	291	6402	1426	123	9	1057		2.25E-3	3.80E-2	1.75E-3
2	En Yahav	h	ll	35.73	0.14	208	6103	1388	693	134	4101		1.77E-3	2.93E-2	1.01E-3
3	En Yahav	h	tl	38.29	0.29	149	4807	1445	118	34	1161		1.72E-3	2.16E-2	6.76E-4
3 #	En Yahav	h	tl	36.65	0.31	139	4984	1149	121	38	1208	2344	1.43E-3	2.33E-2	6.59E-4
207	En Yahav	l	t	33.49	1.15	759	10864	2999	190	37	3268		4.09E-3	5.57E-2	3.94E-3
101	Shilhv hills	a	ll	41.85	0.13	31	968	71	4	44	219		7.72E-5	3.97E-3	1.30E-4
206	Shilhv hills	a	tl	40.11	0.05	20	556	87	1	50	69		9.94E-5	2.38E-3	8.61E-5
19a	Shilhv hills	a	ct	40.30	0.09	30	889	103	29	69	174	1069	1.17E-4	3.79E-3	1.28E-4
19b	Shilhv hills	a	ct	40.99	0.08	28	617	98	20	75	133	1802	1.10E-4	2.58E-3	1.19E-4
19c	Shilhv hills	a	ct	34.03	0.04	24	749	80	16	45	116	1498	1.08E-4	3.78E-3	1.21E-4
19d	Shilhv hills	a	ct	39.80	0.06	51	1090	79	40	85	217		9.10E-5	4.70E-3	2.21E-4
19d #	Shilhv hills	a	ct	41.80	0.06	37	1040	94	21	88	173	1199	1.03E-4	4.27E-3	1.56E-4
103	Mo'a	m	t	39.11	1.49	464	4039	2105	49	15	317		2.46E-3	1.77E-2	2.06E-3
104	Mo'a	m	lt	38.05	0.09	86	2610	526	312	186	1467		6.31E-4	1.18E-2	3.92E-4
107	Mo'a	m	dt	39.37	0.33	152	2485	2543	212	37	820		2.95E-3	1.08E-2	6.70E-4
108	Mo'a	m	dt	34.68	0.72	265	5209	1989	184	28	1052		2.62E-3	2.58E-2	1.33E-3
109	Mo'a	l	t	39.53	1.18	441	6980	3234	76	38	747		3.74E-3	3.03E-2	1.94E-3
202	Omer Wadi	h	t	39.09	0.88	281	4026	1464	55	49	593		1.71E-3	1.77E-2	1.25E-3
201	Shivya Wadi	h	t	39.04	1.10	305	3455	1682	40	68	554		1.97E-3	1.52E-2	1.36E-3
302	Zofar	m	t	36.97	1.38	448	5215	1754	34	43	390		2.17E-3	2.42E-2	2.11E-3

Level: h- upper level; m- intermediat level; l- lower level
Facies: t- trv.; dt- detritic trv.; tl- intraclast trv.; mh- cavity filling; ll- limnic lst.

Sample LE no.	Location	Level	facies	Ca %	SO4 %	Na ppm	Mg ppm	Sr ppm	K ppm	Ba ppm	Li ppb	B ppm	Sr/Ca (mol)	Mg/Ca (mol)	Na/Ca (mol)	residual per.
83	En Tamid	l	t	38.23	1.28	767	7145	1983	103	28	1012		2.37E-3	3.21E-2	3.49E-3	
86	En Zach	h	tl	40.38	0.34	215	3999	976	76	126	522		1.10E-3	1.70E-2	9.28E-4	
87	En Zach	m	t	27.62	0.61	406	6638	1187	239	73	1556		1.96E-3		2.56E-3	
88	En Tamid	m	t	39.22	0.55	307	6179	1309	135	70	1034		1.52E-3	2.70E-2	1.36E-3	
89	En Tamid	m	t	34.31	0.50	293	6003	1206	98	48	959		1.60E-3	3.00E-2	1.49E-3	
11c	En Tamid	l	t	28.69	1.28	819	6364	1573	116	32	939		2.50E-3	3.81E-2	4.97E-3	
11h	En Tamid	l	mh	24.53				800					1.49E-3			
7	Bitron Wadi	m	t	38.58	0.74	430	5841	1280	79	89	757		1.52E-3	2.60E-2	1.94E-3	
54	Hazeva Wadi	h	t	38.18	0.25	184	3499	841	65	136	411		1.01E-3	1.57E-2	8.39E-4	
84a	Hazeva Wadi	h	t	39.09	0.33	248	3941	1092	40	80	483		1.27E-3	1.73E-2	1.11E-3	
58	Mashaq Wadi	h	dt	25.22	0.02	90	2204	248	152	63	621		4.49E-4	1.50E-2	6.22E-4	
64	Mashaq Wadi	h	t	39.47	0.47	277	4873	1136	100	156	661		1.31E-3	2.12E-2	1.22E-3	
50	Masor Wadi	h	tl	36.88	0.39	231	4774	822	66	131	599	2779	1.02E-3	2.22E-2	1.09E-3	
203	Mashaq Wadi	h	ll	36.35	0.02	95	3458	457	149	253	870		5.73E-4	1.63E-2	4.54E-4	
204	Tamid Wadi	h	ll	25.03	0.01	88	3548	326	118	239	723		5.96E-4	2.43E-2	6.12E-4	
117	En Yahav	?	p	18.33	5.00	282	17580	2538	784	86	8920		6.32E-3	1.65E-1	2.68E-3	30.2
106	Mo'a	m	p	23.67	0.00	423	7259	624	1368	215	5070		1.20E-3	5.27E-2	3.11E-3	44.5

Level: h- upper leve; m- intermediet level; l- lower level

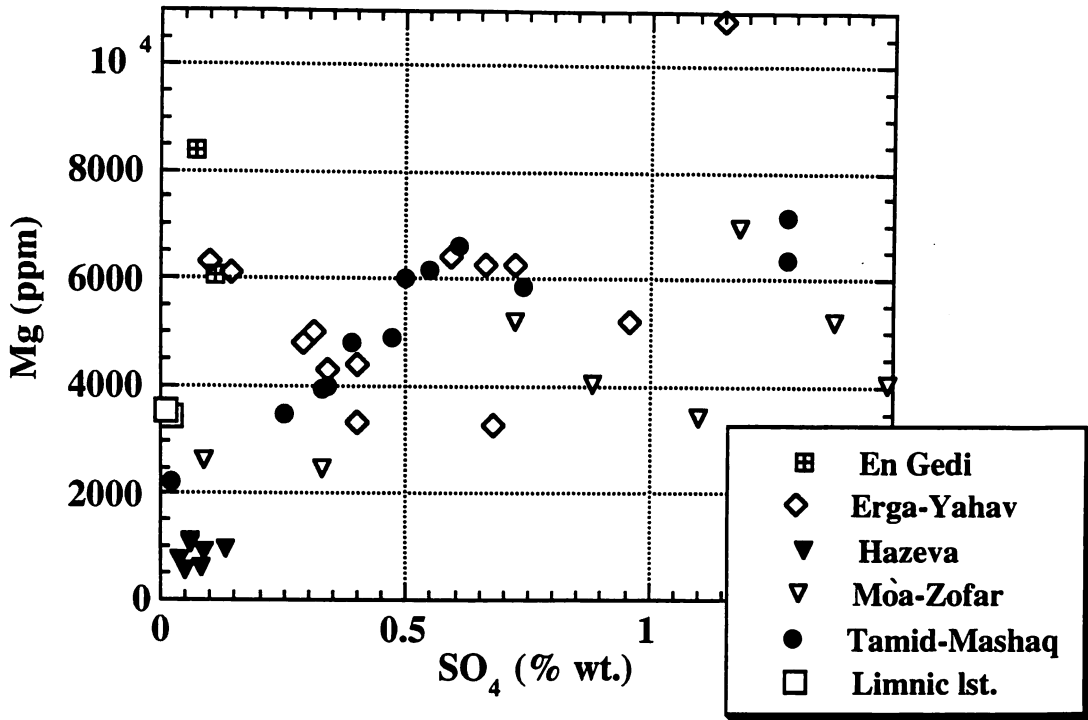
Facies: t- trv.; dt- detritic trv.; tl- intraclast trv.; mh- cavity filling; ll- limnic lst.

טבלא 6.1: ההרכב הכימי של סלעי הטרוורטין (המשך)

Sample LE no. ; G no.	Site	Type	Sampling Date	Na mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Sr mg/L	Ca mg/L	SO4 mg/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	NO3 mg/L	Br mg/L	Si mg/L	B ug/L	Ba ug/L	Li ug/L	T.D.S. mg/L
3748	En Erga	SP	16/2/96	461	42	192	10	357	1801	283	392			14	698	17	65	3550
3337	En Rahel	SP	6/6/95		3	20	2	39	99					2	64	16		
4221	En Rahel	SP	8/12/96	140	9	76	5	166	456	339	193		0.14	7	271	17	23	1393
4045	En Shivya	SP	2/10/96	360	59	275	15	653	2584	100	573		0.25	25	1031	17	101	4644
3851	En Shivya	CA	13/5/96	1853	157	549	18	672	3558		2854	13		16	1682		131	9869
3750	En Tamid	SP	17/2/96	567	14	145	7	321	690	366	1116		2.14	7	733	30	57	3235
3749	En Tamid	CA		1339	37	336	15	634	2050	342	2445		5.40	7	1719	23	136	7210
4237	En Tamid	SP	25/12/96	551	15	146	6	281	611	338	1076		2.11	8	723	26	42	3033
3853	En Yamluakt	SP	13/5/96	710	16	146	8	290	631	330	1359			9	715		26	
3720	Mo'a	BH	23/9/96	161	14	90	7	181	512	356	245			10	366	14	31	1577
4222	Mo'a	BH	8/12/96	160	14	95	7	184	527	368	244		0.11	10	318	18	28	1610
3410	Mo'a	BH	12/8/95	167	15	90	7	139	470					10	314	15	32	
4224	Mo'a	CA	8/12/96	154	13	97	7	198	576	346	236		0.22	14	295	24	29	1642
3721	Mo'a	PO	23/9/96	180	19	118	8	231	707	386	271			18	500	36	42	1937
4220	Mo'a	PO	8/12/96	149	13	91	7	195	518	337	238			11	322	23	27	1558
4238	Mo'a	PO	25/12/96	152	13	96	7	196	552	344	236			11	304	22	31	1607
3341	Mo'a	PO	9/5/95	153	14	87	7	137	492	244	256				331	16	30	1390
3746	Mo'a	SP	16/2/96	263	44	133	12	331	1119	342	346		0.48	17	575	38	48	2606
4046	Mo'a	SP	2/10/96	669	30	218	13	348	1945	249	694		0.53	19	727	14	69	4186
4223	Mo'a North	SP	8/12/96	222	21	131	12	227	819	310	335		0.23	16	411	51	48	2094
3747	N. Yahav	SP	16/2/96	869	74	369	19	612	2437	273				21	1084	9	140	6219
3852	N. Yahav	SP	13/5/96	2127	192	399	22	498	2434	123	3396	16		17	1131		172	9224
4265	N. Arava	FL	17/1/97	17	6	14	1	79	71					6	91	88	4	
4266	N. Zin	FL	23/1/97	101	7	18	2	124	220					3	121	64	4	
4267	N. Shahaq	FL	22/1/97	18	8	5	1	47	46					2	72	48	2	

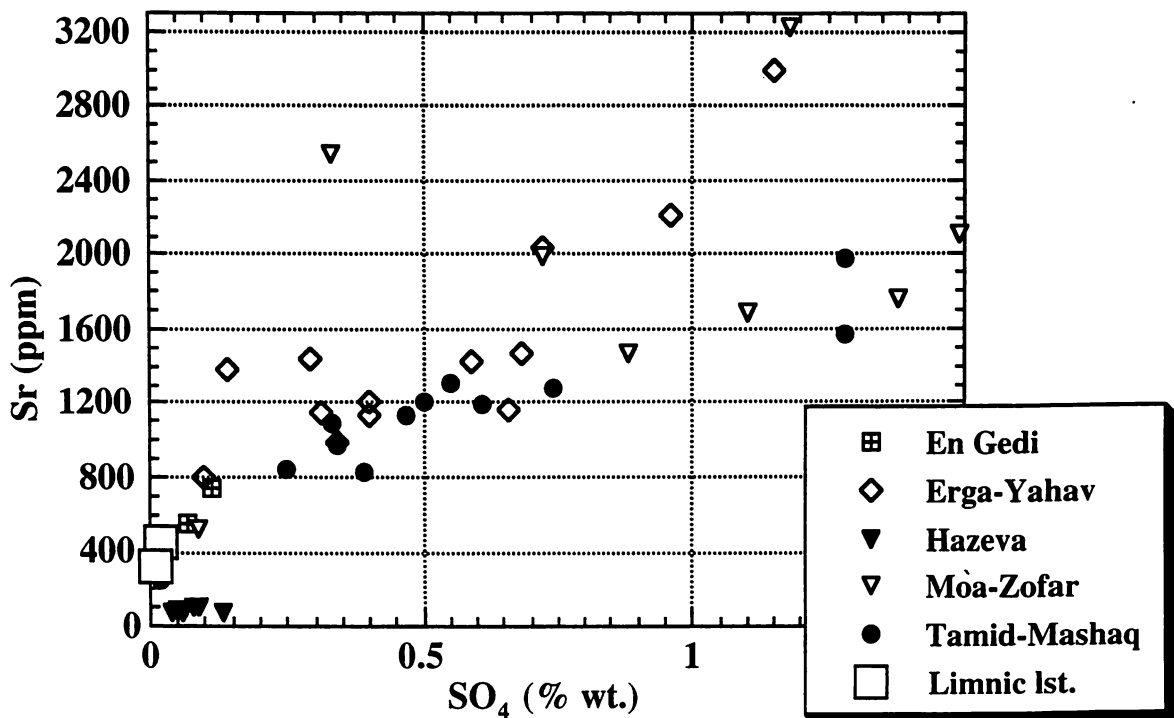
Type: SP- spring; BH- borehole; CA- channel; PO- pond; FL- flood

טבלא 6.2: ההרכב הכימי של מי מעיינות ושטפונות

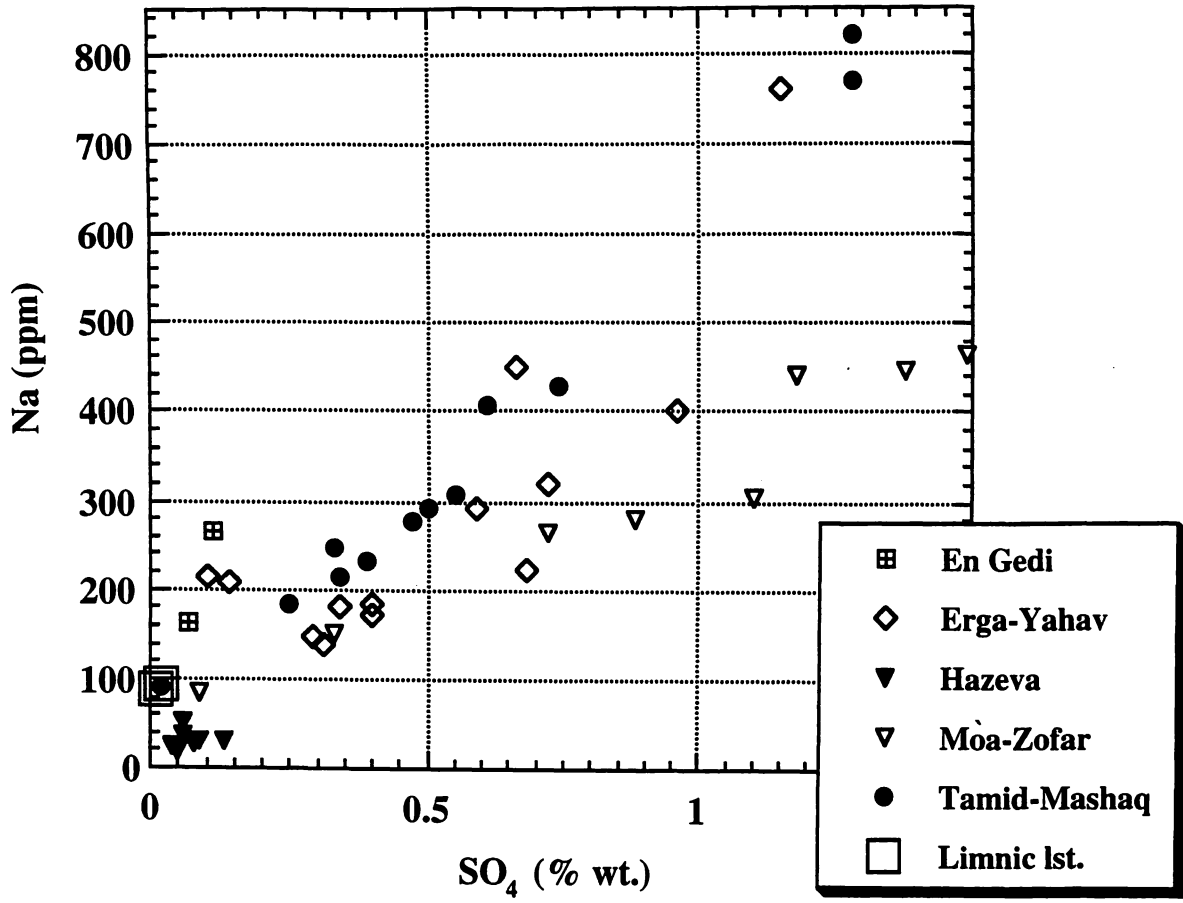


איור 6.1: Mg מול SO_4 בטרורטין שבאזורים השונים (ללא הפרדה למפלסים)

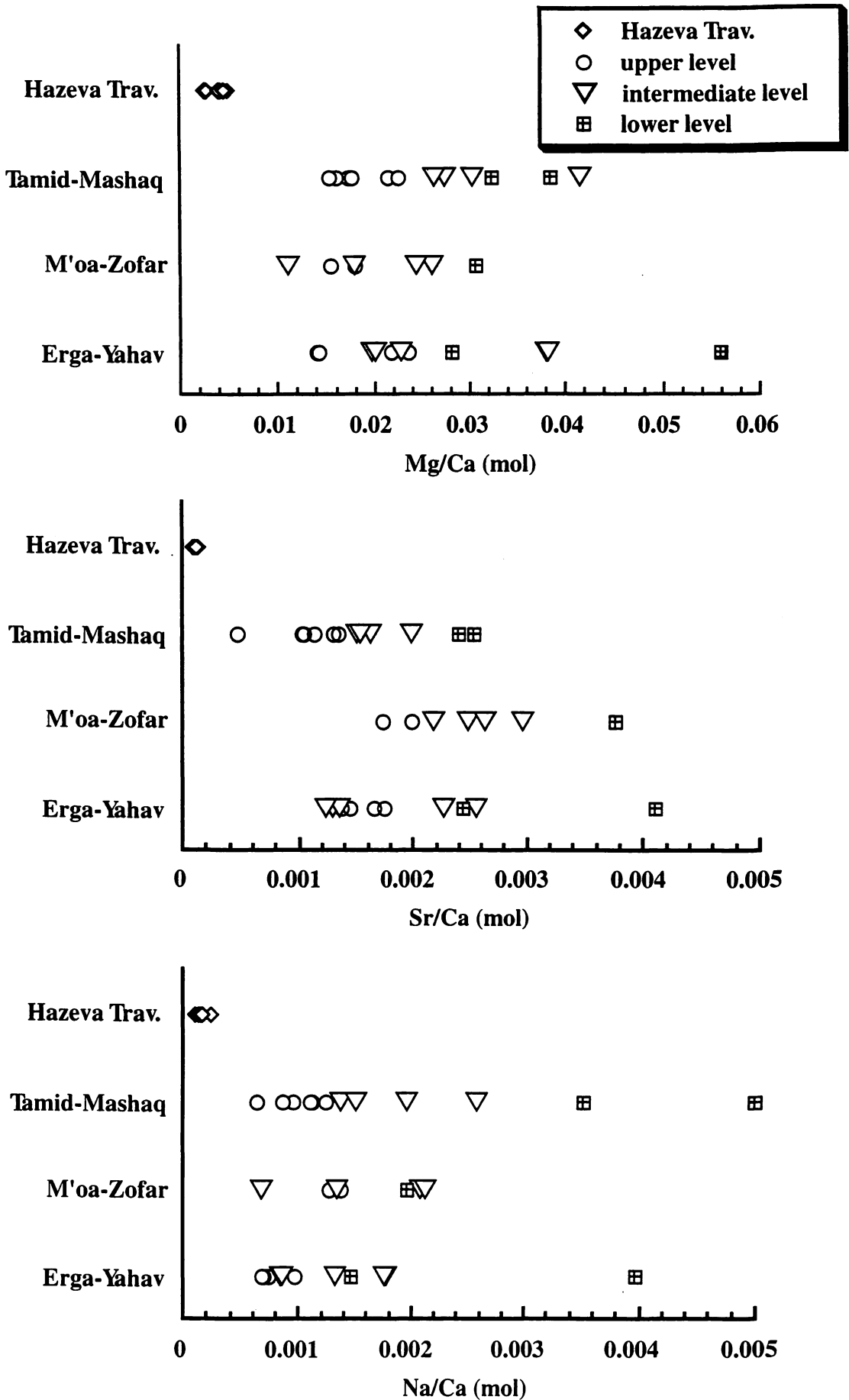
(גיר אגמי- גיר המפלס העליון שבאזור עין תמיד-נחל משק)



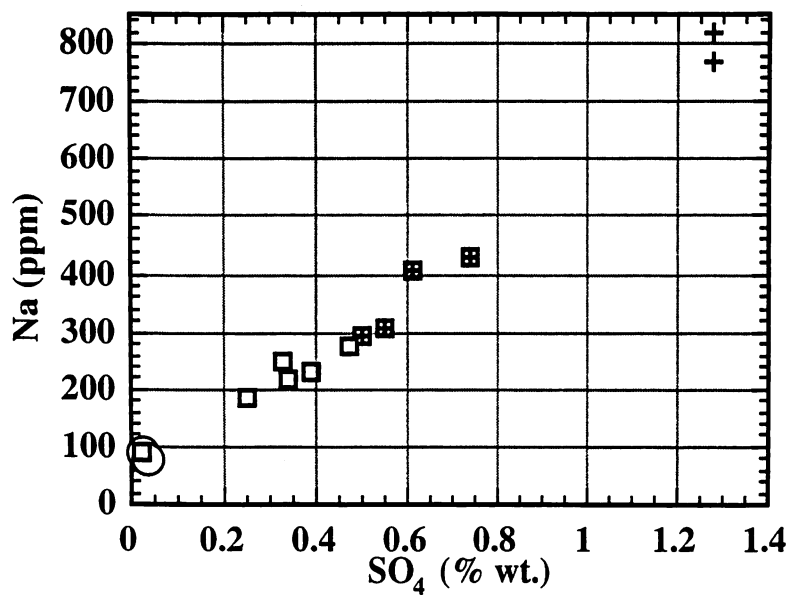
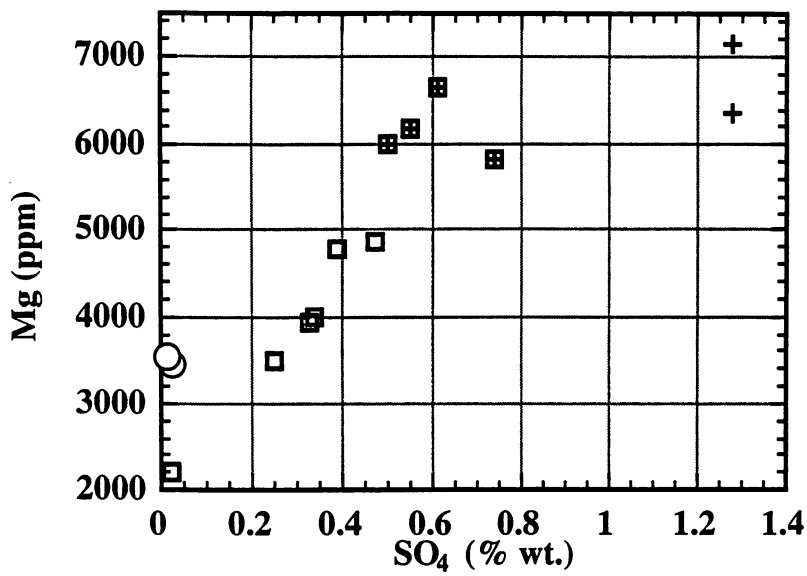
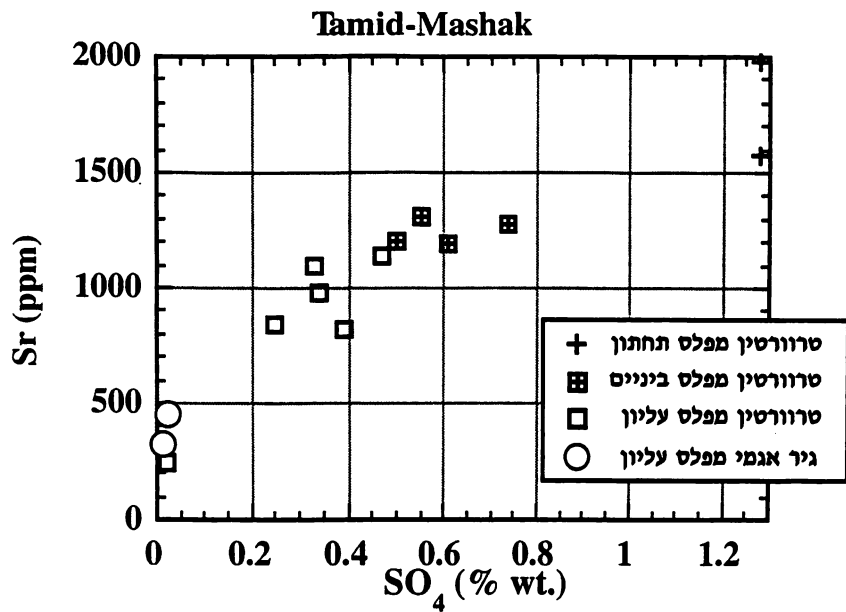
איור 6.2: Sr מול SO_4 בטרורטין שבאזורים השונים (ללא הפרדה למפלסים)



איור 6.3: Na מול SO₄ בטרורטין שבאזורים השונים (ללא הפרדה למפלסים)



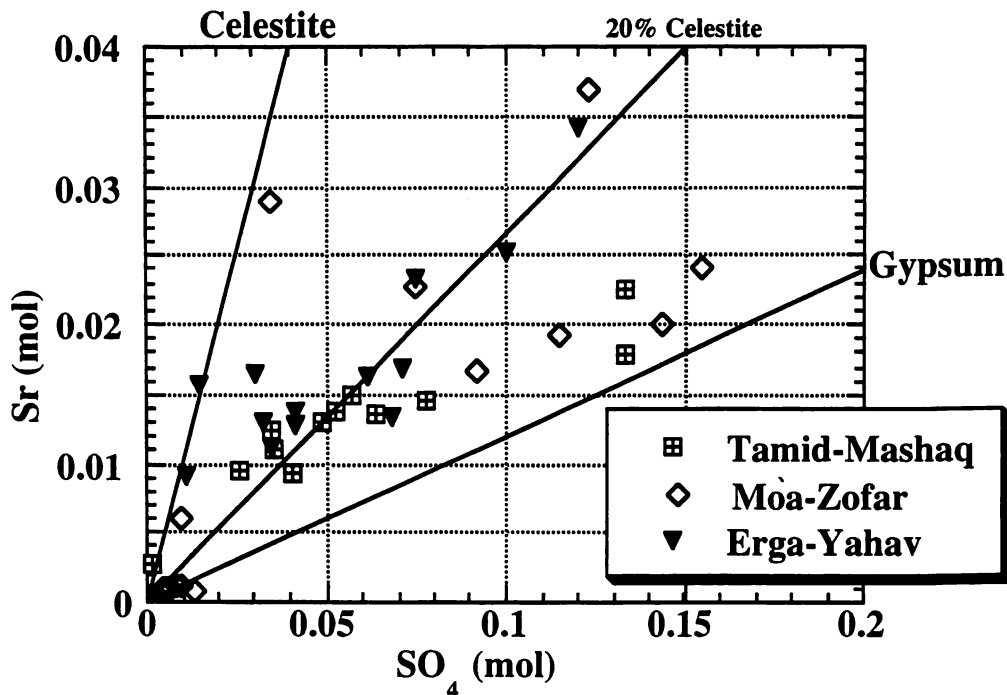
איור 6.4: השוואת יחסי Mg/Ca , Sr/Ca ו- Na/Ca באזורי התפוצה השונים



איור 6.5: הקשר בין SO_4 ו- Na , Mg , Sr באזור עין תמיד-נחל משק

א) החלפת Ca בגבס - לאור מקדמי החלוקה האמפיריים הנמוכים של Sr ו-Mg בגבס (ראב, 1998) שוללים היחסים הגבוהים Mg/SO_4 ו- Sr/SO_4 (עד 3.8 ו-0.24 בהתאמה, טבלא 6.1) את האפשרות שיסודות אלה יושבים בשריג הגבס.

ריכוז ה-Sr גבוה מכדי להיות מוכל כולו בגבס, ולמרות שנמצא צלסטיט בטרורטין (תמונה C-3), מראה שיפועו של איור 6.8 שהיחס Sr/SO_4 נמוך מכדי שה-Sr כולו יהיה מוכל בצלסטיט (שמחייב יחס 1:1 בין Sr ל- SO_4). היחס Sr/SO_4 מצוי בתחום הרחב שבין צלסטיט לגבס והתנהגות כזו ניתנת להסבר על ידי מציאות ה-Sr גם בגבס וגם בצלסטיט.



איור 6.6: Sr מול SO_4 בסלעי הטרורטין

(קו הגבס סומן על פי מקדם החלוקה המכסימלי של Sr בגבס, Usdowski, 1973, בראב, 1998)

ב) יסודות הקורט באינקלוזיות (בהרכב התמיסה המקורית) -

אינקלוזיות נוזליות מייצגות את ההרכב הכימי של המים מהם נוצרו. יחסי Sr/Na או Mg/Na בסלע מראים הבדלים גדולים לעומת מי המעינות. היחסים האקוילונטיים שנמדדים בסלע (לאחר הפחתת הריכוזים שבקלציט נאמדים ב $Sr/Na=0.4-1$, $Mg/Na=1-10$) אינם דומים לאלה הנמדדים במים שעברו אידוי או התגבשו מהם מינרלים (א. כץ דברים בעל פה, 1996). לכן, האפשרות שעודף יסודות הקורט נמצא בקלציט, בצורת אינקלוזיות, שמקורן בתמיסות מרוכזות, נדחית גם היא.

ג) יסודות הקורט באינקלוזיות מינרליות בגבס - מי התהום בערבה מאופיינים בריכוזי Mg ו- SO_4 גבוהים יחסית למים מתוקים במקומות אחרים בארץ (Yechieli et al., 1992). חישובי הרכב המינרלים המומסים במים מראים שתמיד מתקבל $MgSO_4$.

מינרלים Mg-סולפטיים (Epsomite, Kieserite, Celestite ו-Hexahydrite) הם מסיסים מאוד ולא ידועים מאזור העבודה וסביבתו (Yechieli et al., 1992). מינרלים אלה יכולים לשקוע מן המים המגנזיום-סולפטיים של מעיינות הערבה ולהמציא בטרורטין רק כאינקלוזיות שנוצרו בתנאים של אידוי פרקציה ניכרת. כך שיתכן שבתנאים האבפורטיים של מעיינות הערבה שוקע גבס שמלווה בצלסטיט ומינרלים Mg-סולפטיים. מינרלים אלה כנראה מצויים כאינקלוזיות במינרלים הראשיים, הקלציט והגבס.

הקשר בין ההרכב הכימי של הטרורטין למפלסים

הקשר שבין ההרכב הכימי של הטרורטין למפלס הטרורטין (איור 6.5) מתבטא בכך שריכוזיהם של Mg, Sr, ו-Na גבוהים בטרורטין המפלס התחתון יחסית לאילו שבטרורטינים האחרים. באיור 6.1 ניתן לראות שפיזור ריכוזיהם ביחס ל-Ca מראה שבטרורטין המפלס התחתון קיימים הריכוזים הגבוהים ביותר. באיור 6.5 ניתן לראות שבאזור עין תמיד-נחל משק קיימת עליה בריכוז הסולפט ובכמות המינרלים הסולפטיים עם הזמן, מטרורטין המפלס העליון דרך מפלס הביניים ועד טרורטין המפלס התחתון.

לטרורטין המפלס העליון העובי הגדול ביותר, לטרורטין המפלס התחתון עובי קטן מאוד ולטרורטין מפלס הביניים עובי ביניים (טבלא 5.1 ואיור 5.18). הקשר בין עובי הטרורטין והרכבו הכימי-מינרלוגי הוא כנראה תוצאה של שינויי שפיעה. שינויי שפיעה אמנם לא מקטינים את קצב האידוי אך ביכלתם להקטין את גודל החלק היחסי שמתאדה ממי המעיין, דבר אשר משפיע על ריכוז המומסים במים ויכולתם להשקיע מינרלים אבפוריטיים.

יסודות קורט ומקדמי חלוקה

במהלך ההתגבשות נכנסים לתוך המינרלים יסודות קורט מן התמיסה. יסודות אלו מחליפים יסודות ראשיים מתאימים בשריג ביחס מוגדר לריכוזיהם בתמיסה. אנליזה של יסודות כאלה מאפשרת ללמוד על הרכב המים שמתוכם התגבש המינרל ועל טיב סביבת ההתגבשות.

היחס בין ריכוז יסוד הקורט בגביש לבין ריכוזו בתמיסה, מנורמל לריכוזו של היסוד הראשי שאותו הוא מחליף בגביש, מוגדר כמקדם החלוקה (הסקירה על פי McIntire, 1963). כאשר ריכוז יסוד הקורט אחיד בכל נפח הגביש, החלוקה היא הומוגנית ומקדם החלוקה מוגדר כ-

$$K = (T/M)_S / (T/M)_L$$

כאשר: K- מקדם החלוקה M- ריכוז יסוד ראשי T- ריכוז יסוד קורט
L- פאזה נוזלית S- פאזה מוצקה

מקדמי החלוקה נקבעים באורח נסיוני במעבדה כך שניתן לבודד תנאי סביבה שונים ולקבל את תלות מקדם החלוקה בטמפרטורה, בלחץ וכדומה. מקדם חלוקה הנמדד בטבע מייצג תנאים ספציפיים, אופייניים למקום הדגימה, המשלבים השפעות שונות ומגוונות שאינן ניתנות להפרדה בדרך כלל.

מקדמי החלוקה ומשמעותם

מקדמי החלוקה מאפשרים לברר את מידת ההתאמה הכימית בין יחידות הטרורטין השונות לבין מי המעינות הנובעים היום (או האם כל הטרורטינים בערבה שקעו ממים דומים). הדבר נעשה על ידי השוואת יחסי Sr/Ca בקלציט שבטרורטין לבין יחסים אלה במי המעינות הרצנטיים. מבחן בלתי תלוי של שאלה זו מתאפשר על ידי השוואת יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בדוגמאות הטרורטין ודוגמאות המים הרצנטיים. ההרכב האיזוטופי של Sr מראה התאמה בין כל קבוצת טרורטינים למי המעינות הסמוכים אליה לאורך הזמן (איור 7.5, 7.6).

מקדם החלוקה האמפירי של Sr בין תמיסה מימית לקלציט הינו 0.054 ב-15°C-25°C (Katz et al., 1972). היימן (1985) חישב מהרכבו של טרורטין רצנטי ומאנליזה של המים שמהם הושקע את מקדם החלוקה של Sr וקיבל ערכים בתחום 0.12-0.1 Holland (1966) ו-Kinsman (1969) הציעו ערך של 0.14 עבור מקדם החלוקה של Sr בקלציט.

על פי יחסי Sr-SO₄ בדוגמאות דלות ה-SO₄ (הדוגמאות המצויות סמוך לאורדינטה על פי איורים 6.1, 6.2 ו-6.3 בהם נמדד ריכוז ה-Sr בקלציט כאשר ריכוז ה-SO₄ מתקרב לאפס). נמצא שריכוז ה-Sr בקלציט הטרורטיני הוא כדלקמן:

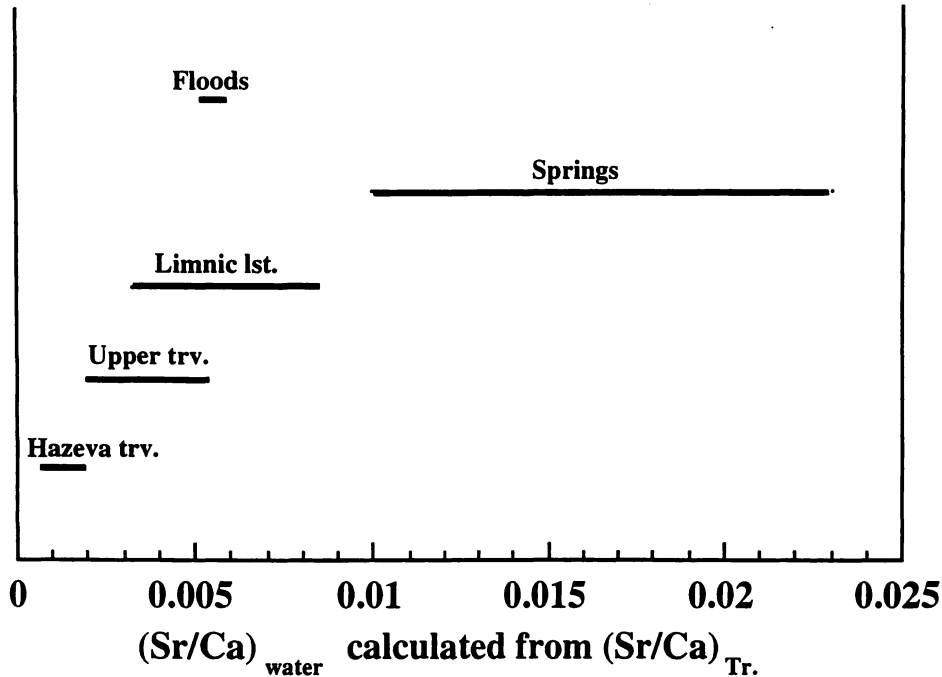
טרורטין חצבה	90 ppm
טרורטין המפלס העליון	250 ppm
גיר אגמי (מפלס עליון)	400 ppm

היחס המולרי (Sr/Ca)_L במים שבהם נוצרו סלעים אלה חושב בנפרד, על פי שני מקדמי חלוקה:

(1) 0.054 - מקדם שנמדד במעבדה ומייצג התגבשות בתנאים קרובים לשווי משקל.

(2) 0.14 - מקדם שחושב מתוך דוגמאות מים וטרורטין שמקורן בשדה.

$(Sr/Ca)_L$ לפי מקדם חלוקה 0.054	$(Sr/Ca)_L$ לפי מקדם החלוקה 0.14	
0.0091	0.0035	טרורטין חצבה
0.0253	0.0096	טרורטין המפלס העליון
0.0405	0.0161	גיר אגמי (מפלס עליון)



איור 6.7: ערכי Sr/Ca מחושבים במים שהשקיעו טרורטין וגיר אגמי (התחום נקבע על פי מקדמי חלוקה של 0.054 ו-0.14)

היחס המולרי (Sr/Ca) במי המעיינות נע בתחום 0.01 ל-0.017 ואילו בקידוח מואה, או בברכות של מים עומדים היחס מגיע ל-0.023. היחס במי השטפונות של הערבה הוא 0.0052-0.0059.

היחס $(Sr/Ca)_L$ במי המעיינות הרצנטיים גבוה בסדר גודל מהיחס בתמיסות המחושבות עבור טרורטין חצבה וטרורטין המפלס העליון (איור 6.7). ה- $(Sr/Ca)_L$ במי המעיינות הרצנטיים עולה ככל שהמים משקיעים יותר גבס (בסביבת המעיינות מופיעים כל העת קרומי גבס רבים על הקרקע) כיוון שמקדם החלוקה עבור Sr בגבס קטן מאחד. ה- $(Sr/Ca)_L$ הגבוה הוא תוצאה של אידוי פרקציה גדולה של המים באזור הנביעה בתנאים של שפיעה נמוכה ואידוי גבוה.

ה- $(Sr/Ca)_L$ המחושב עבור מי המעיינות שמהם שקעו הטרורטינים הקדומים של חצבה והמפלס העליון נמוך מזה של מי המעיינות הרצנטיים כיוון שכנראה אותם מים לא איבדו פרקציה גדולה של מים באידוי עקב שפיעה גבוהה ותנאי התאדות נמוכה. הטווח הנמוך של הריכוזים ובעיקר התחום הצר שלהם (טבלא 6.1), מעידים על שקיעה במערכת פתוחה השומרת על יחס Sr/Ca די קבוע. מסקנה זו מחוזקת על ידי העובי הגדול של טרורטינים הקדומים והופעת השדה שלהם.

התמונה שבה ה- $(Sr/Ca)_L$ של מי המעיינות הנוכחיים גבוה ביחס לזה המחושב עבור מי המעיינות העתיקים מקבילה לתמונה שהתקבלה עבור ה- Sr/Ca בטרורטינים הצעירים ביחס לעתיקים.

היחס $(Sr/Ca)_L$ המתקבל בטרורטין חצבה הוא נמוך במיוחד אפילו ממי השטפונות. שני הסברים אפשריים ליחס נמוך זה:

(א) יתכן וטרורטין חצבה שקע ממים בעלי יחסי Sr/Ca נמוכים יותר מאלה הקיימים במעיינות כיום. הטווח

הנמוך של הערכים ובעיקר התחום הצר שלהם, מעידים על שקיעה ממערכת פתוחה. מסקנה זו מחוזקת על ידי העובי הגדול של טרוורטינים אלו והופעת השדה שלהם. סלעים אלה מכילים חלוקים ומפלים מאובנים המעידים אנרגיה זרימה גבוהה יחסית.

(ב) יתכן וערכי $(Sr/Ca)_L$ נמוכים הם תוצר של רקריסטליזציה במערכת פתוחה, דבר שתועד פטרוגרפית כאיכול סטרקטורות סדימנטריות מקוריות על ידי ספאר גס (תמונות B-2, B-5).

מסקנות

הריכוזים הגבוהים של Na -ו- Mg , Sr שנמדדו בטרורטינים אינם יכולים להיות מוסברים על ידי מציאותם של יסודות אלו בשריגי קלציט, גבס, וגם לא באינקלוזיות נוזליות בגבישים אלה. ההסבר נעוץ בשילוב של גבס עם מינרלים אבפוריטיים נוספים בעלי ריכוזי Na -ו- Mg , Sr מתאימים. הגבס תורם את הסולפט שנמדד והמינרלים האבפוריטיים תורמים במקביל Na -ו- Mg , Sr . לדוגמה, המצאות אינקלוזיות של צלסטיט בתוך גבס, תופעה המוכרת גם בגבס טריאסי מתצורת מוחילה וגבס ליסאני (א. כץ דברים בעל פה, 1995), מאפשרת לקבל ריכוז Sr גבוה יחסית לזה הצפוי בגבס ומצד שני יחס Sr/SO_4 נמוך מזה של צלסטיט (1:1). אפשרות זו היא הסבירה ביותר להסבר התצפיות האנליטיות ולמצאי ה-S.E.M., שבו אובחן צלסטיט אותיגני ביחד עם גבס (תמונה C-1). ריכוזי ה- Mg ה- Sr וה- Na קשורים למפלסי הטרורטין (איור 6.5) באמצעות פאזה סולפטית המופיעה כאינקלוזיות בטרורטין. פאזה כזו יכולה היתה להיווצר רק עם התפתחות תנאים אבפוריטיים. אבפורציה מחייבת קיום מערכת הידרולוגית סגורה למדי בבריכות ומשטחי זרימה רדודים וחשופים לקרינה. בסביבה שבה האיוד נמוך יחסית לשפיעה (מערכת יותר פתוחה) תהיה נפיצותן של תת סביבות אבפורטיות קטנה יחסית ואיתן גם הסיכוי להכללת אינקלוזיות עשירות סולפט בטרורטין. במצב ההפוך תגדל נפיצותן של סביבות כאלה והסיכוי ליצירת אינקלוזיות של מינרלים אבפוריטיים בגבס יגדל.

צורת ההופעה של יחידת הטרורטין הנמוך מעידה על שפיעה מועטה ורדודה מאוד. בתנאי זרימה כאלו, בשילוב תנאי אקלים מדבריים קיצוניים בהם האידיוי גבוה מאוד תתכן שקיעה של טרוורטין בתנאים אבפוריטיים. הטרורטין יכיל קלציט, גבס ורצף של מינרלים אבפוריטיים, בכמות זעירה, שכולל גם צלסטיט ($SrSO_4$), הליט וכנראה גם מינרלים של $MgSO_4$. נוכחות מינרלים אלה יכולה לגרום לריכוזים הגבוהים של Na , Mg , Sr ו- SO_4 שנמדדו. יתכן שבתנאים אבפוריטיים כאלה מתעשר גם הקלציט ביסודות אלה יחסית ל- Ca בגלל ההעשרה בזמן האידיוי. יחיאלי (1987) הראה כי דרגת הרויה לגבי גבס של מי המעיינות היא בין 0.1 ל-0.8, ולא צריך אידיוי רב כדי להשקיע גבס. גם כיום סביבת המעיינות מכוסה קרומי גבס והקרע מכילה גבס רב. Livnat and Kronfeld (1987) ראו בסולפטים ובהלידים מרכיב אפיגנטי מאוחר. המסת הדוגמאות במים לפני האנליזה והדמיון בין הרכב המלחים במי השטיפה לבין הרכב המלחים בסלע מצביע על כך שחלק עיקרי שלהם מצוי בסלע כאינקלוזיות פרימיות ולא רק כמילוי חללים.

Yechieli et al. (1992) הציעו שמקור ה- Mg וה- SO_4 במי התהום של הערבה הוא במי גשם המתאדים ומשקיעים קרומים של קלציט, גבס ומלח על ובתוך הקרקע. שארית המים, המועשרת ב- Mg , SO_4 ו- K , מחלחלת למי התהום ומתערבבת בנפח גדול של מים מתוקים. כאשר שטף המים באקוויפר קטן מליחותו עולה כך, שבתקופות יבשות בהן המעיינות דלי שפיעה, ינבעו מים מלוחים יותר. מים אלה מסוגלים להשקיע סולפטים של Mg ו- Sr כתוצאה מאידיוי תוך כדי יצירת הטרורטין.

טיב המיתאם בין Na -ו- Mg , Sr לסולפט אינו אחיד בכל שלושת האזורים. באזור תמיד-משק קיימת ההתאמה הטובה ביותר ואילו באזור ערגה-יהב ההתאמה פחות טובה (איור 6.6). ניתן להסביר התנהגות זו על ידי השוואה פאציאלית של הדוגמאות השונות. באזור תמיד-משק כמעט כל הדוגמאות הן טרוורטין אוטוכתוני. לעומת זאת באזור מואה-צופר נמדדו גם דוגמאות טרוורטין דטריטי והן שונות מדוגמאות הטרורטין האוטוכתוני בכך שהיחס Mg/SO_4 שבהן גבוה יותר.

ההרכב הכימי הדומה של הטרורטינים האוטוכתוניים והאלוכתוניים (טבלא 6.1) וכן Livnat and Kronfeld (1990) מצביעים על כך שהמרכיב האלוכתוני הראשי הוא מוצר רדפוזיציה של טרוורטין מהסביבה הקרובה ומגיל דומה.

ההרכב המינרלוגי של הטרורטינים בערבה מחייב זהירות בחישוב מקדמי חלוקה. שלא כמו טרוורטינים המצויים בצפון ישראל שבהם הקלציט מהוה מינרל יחיד ורק לעיתים מלווים אותו קוורץ וחרסית, הטרורטינים בערבה

מכילים גבס, צלסטיט וכנראה סולפטים של Mg בגלל שקיעתם בתנאים אבפוריטיים.

אפקטים ביוגניים

השפעה ביוגנית על ההרכב הכימי של הטרורטינים היא דבר שצריך להביאו בחשבון. ציאנובקטריות יכולות להשקיע קלציט וגבס במים בעלי ריכוזים גבוהים של Ca -ו Mg , SO_4 (Thompson and Ferris, 1990) הראו בניסוי שציאנובקטריות שבודדו מ-bioherm טבעי מ-Green Lake ניו יורק, השקיעו על דופן גופן גבס, קלציט וכנראה גם מגנוזיט. ההשקעה מתקיימת באתר חוץ תאי ונובעת מקיבוע ביקרבונט בתהליך פוטוסינתטי. ציאנובקטריות אלו בונות bioherms ואחראיות כנראה לחלק ניכר מן המיקריט שבאגם. ידוע גם שציאנובקטריות מרכזות Ca -ו Mg על דופן התא שלהן ויוצרות אתר נוח לנוקליאציה.

Emeis et al. (1987) טענו שעקה סביבתית כמו עליה בריכוז ה- Ca מעודדת ציאנובקטריות להפריש פוליסכרידים בכמות גבוהה. זוהי הפרשה רירית היוצרת תשתית לנוקליאציה של קלציט. אם כך, בתנאי זרימה איטיים ורדודים תהיה השפעת הציאנובקטריות גדולה יותר והקלציט שישקע בקרבתם יכיל יותר אינקלוזיות עשירות Mg וסולפט, ואילו בתנאים של זרימה מהירה ושפיעה גדולה ההשפעה היחסית של הציאנובקטריות תקטן והקלציט שיתגבש יכיל פחות אינקלוזיות עשירות Mg וסולפט.

סיכום

ניתוח הנתונים הכימיים מראה שקיים הבדל בהרכב הכימי בין קבוצות הטרורטין הצעיר והעתיק יותר. היחס Na/Ca , Sr/Ca , Mg/Ca ו- Na/Ca גבוה יחסית בצעירים. כמו כן, קיים מיתאם בין ריכוזי ה- Mg , Sr ו- Na לבין ריכוז הסולפט. הטרורטין הצעיר מכיל פאזות מינרליות של Mg , Sr ו- Na . מינרלים מסיסים כאלה הם כנראה חלק מסדרה של מינרלים אבפוריטיים הנכלאים בקלציט ובגבס של הטרורטין.

מי המעיינות עשירים ב- Mg , Sr ו- Na ביחס למים מתוקים ולכן בתנאים שבהם חלק ניכר מן השפיעה מתאדה, המים משקיעים מלחים סולפטיים וכלורידיים בנוסף לקלציט. כמות המלחים היא קטנה והם נכלאים כאינקלוזיות במינרלים העיקריים - הקלציט והגבס.

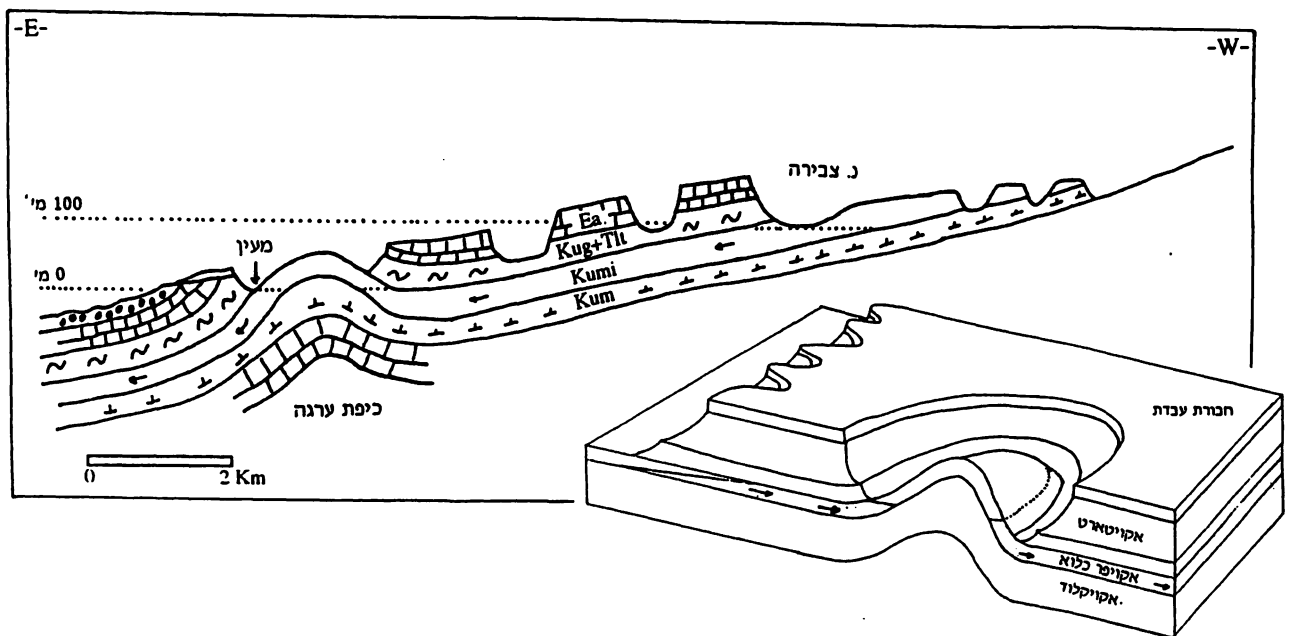
7. פלאוהידרולוגיה של המעינות בשולי הערבה

מיקום המעינות והטרורטינים

מעיינות שולי הערבה יבשים כיום במשך רוב השנה ואם קיימים בהם מים אזי הם מים עומדים, ללא זרימה. בסוף נובמבר, 1995, כשבועיים לפני תחילת עונת הגשמים בנגב, פרצו מעיינות רבים חלקם "חדשים" וחלקם קיימים, בשפיעה גבוהה במיוחד. תופעה זו מיוחסת לרעידת האדמה שארעה באזור ב-22 לנובמבר 1995. זרימות אלו אפשרו לאשר מספר תצפיות הנוגעות לקביעת מיקום הטרורטינים והמעיינות.

הגורמים המשפיעים על מיקום המעינות שבאזור ידונו להלן בעיקר על סמך המבנה של כיפת ערגה. בזמן ספיקות השיא שהוזכרו הופיעו סביב הכיפה הסטרוקטורלית של ערגה נביעות רבות שיצרו דגם זרימה רדיאלי (תמונה H-2). המים במעינות ערגה נובעים מבסיס תצורת ערב במרחק של כ-1.5 עד 10 מ' מהמגע עם תצורת מישאש. הנביעות אינן ממוקדות אלא יוצרות קו של נביעות קטנות שמזין פלגים רבים, איטיים ורדודים (עומק 1-5 ס"מ) עד שסביב הכיפה נוצר אזור לח נרחב. מואה, עין תמיד, עין יהב, עין רחל ועין שביה מצויים כולם בקרבה לשיפולים המזרחיים או הצפון מזרחיים של הכיפות הסטרוקטורליות של תמיד, רחל ושביה, שבחן תצורת מישאש מורמת. במואה ובעין תמיד נובעים המים ישירות מהיחידה הפוספוריטית שבג תצורת מישאש.

את סביבת המעינות הלחה והמלוחה מאפיינת צמחיה הלופילית הנעדרת מן האזורים המרוחקים מהם. אופן פיזור צמחיה זו מסביב לכיפות והגיאומטריה הקונצנטרית של הנביעות מצביעים על עלית מים מסביב לכיפה מתוך אקוויפר תצורת מישאש. תצורה זו מהווה, באזור המחקר, אקוויפר כלוא בחלקו (יחיאלי וחבריו, 1996). הכיפות הסטרוקטורליות שבשיאן נחשף גג האקוויפר מאפשרות נביעה שניתן להגדירה כארטזית לאורך המגע שבין האקוויפר לבין האקוויטארד של תצורת ערב הקרטונית-חווארית שמעליו (איור 7.1). בדרך זו מתקבל משטח לח



ציור 7.1: מודל מעין ארטזי בערבה המרכזית

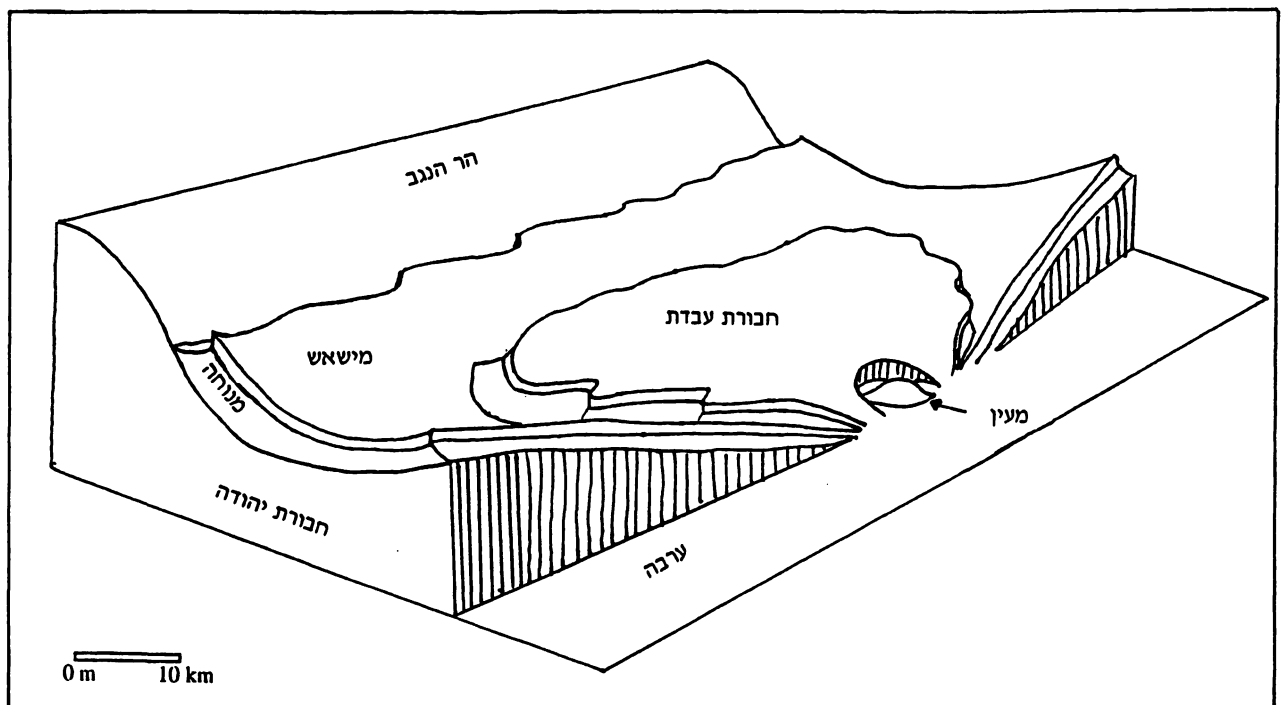
נרחב המקיף כיפה סטרוקטורלית כמו זו שבעין ערגה. בכיפות גדולות יותר כמו כיפת רחל, תמיד או שביה יש הפרש טופוגרפי בין מגע התצורות מישאש-ערב מעבר המזרחי של הכיפה לעבר המערבי, לכן ינבעו המים במקום הנמוך מבין השניים, כלומר במזרח.

מפת מחשופי הטרורטיין (איור 1.4) מראה כי רוב הטרורטינים קשורים גיאוגרפית לכיפות. כך זה בכיפות תמיד, שביה, ערגה, רחל, נחל משק ונחל ביתרון. רק מחשופי טרוורטיין מועטים אינם קרובים לכיפות.

מיקום משקעי המעינות באזורים שבהם תצורת מישאש גבוהה סטרוקטורלית, אם באגפי מבנים גדולים או

בכיפות סטרוקטורליות, מרמז על קשר גנטי ביניהם. רוב משקעי המעינות מעידים על כך שמקור הנביעות היה באקוויפר תצורת מישאש גם אם אין בקרבם מעיינות כיום. אופיים השטוח והנרחב מתאים לכך שהן נובעות לאורך קו נביעות נרחב. תמונה זו אופיינית לנביעות ארטזיות בכיפות סטרוקטורליות שבהן אין מיקוד של הנביעה אלא היא נמשכת לאורך המגע בין האקוויפר לפני השטח.

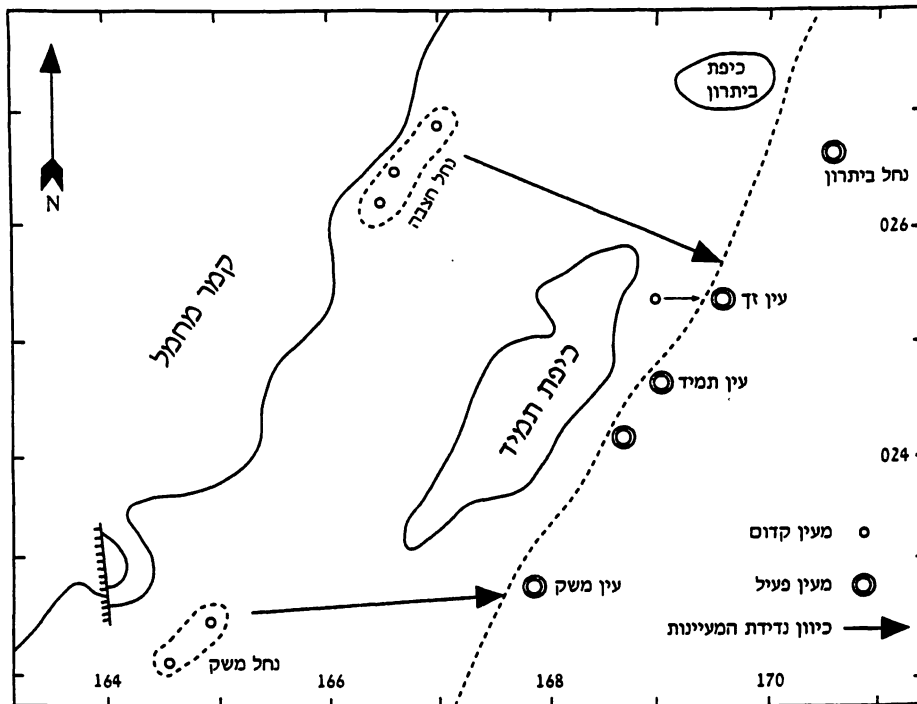
תצורת מישאש מופיעה בחלק נרחב של אגן הניקוז המזרחי של הנגב והיא משתפלת לכיוון מזרח (בהתאם למגמה הרגינולית). טרוורטינים קיימים גם לאורך מצוק ההעתקים של ים המלח, צוק הצינים שבנחל צין, בפאציס השוליים הרדוד של תצורת הלשון ובמכתש קטן. טרוורטינים אלה נבדלים מן הטרורטינים של שולי הערבה באקוויפר של המעינות אשר השקיעו אותם ובסוג הנביעות. בשולי הערבה מצויים טרוורטינים רק בקטע שבין נחל חיון בדרום ונחל צין בצפון (איור 7.1). בחלק הדרומי של הערבה, (מדרום לנחל שיטה) ובחלק הצפוני של הערבה, מצפון לנחל צין מתרומם מצוק העתקים שלאורכו נחשפת חבורת יהודה תוך כדי שהיא נטויה לכיוון מערב. בערבה הצפונית והמרכזית לא קיים מצוק העתקים, שם חבורת יהודה קבורה בעומק וחבורת הר הצופים וחבורת עבדת חשופות ומשתפלות ללא הפרעה אל הערבה. מצב כזה, של משפך סטרוקטורלי (איור 7.2), מביא את המים הזורמים באקוויפר תצורת מישאש לזרום מזרחה רק באזור שבין נחל שיטה בדרום לנחל צין בצפון.



ציור 7.2: כיווני הזרימה באקוויפר מישאש

במפה שבאיור 5.2 ניתן לראות כי הטרורטינים של המפלס העליון מצויים באגף המערבי של סינקלינת עין תמיד ואילו המעינות הרצנטיים והטרורטינים הצעירים יותר מצויים באגף המזרחי של כיפת עין תמיד. מצב דומה של הפרדה גיאוגרפית בין מחשופי טרוורטין בני גיל שונה קיים גם באזור מואה. מכאן, שחלה נדידה של הנביעות מזרחה לאחר הרבדת טרוורטין המפלס העליון (איור 7.3). נדידה זו היתה יכולה להגרם מהתחזרות בלבד מכיוון שבמעיינות ארטזיים כאלה מספיק לחשוף את האקוויפר במקום נמוך כדי שהנביעות ינדדו אליו.

קשה להראות קורלציה בין הטרורטינים שמצויים בתצורת הלשון לאחת מהקבוצות המוזכרות למעלה. אין כלל קשר הידרולוגי בין נביעות שוליים של אגם הלשון ובין הנביעות של מעיינות שולי הערבה. הטרורטינים של שולי הערבה שקעו ממי אקוויפר מישאש, ממעינות ארטזים והורבדו סביב לכיפות ואילו טרוורטין הלשון קשור לחופי אגם הלשון ולמערכת נביעות השעונה ככל הנראה על פן ביני ומקבלת את מימיה מאקוויפר חלוקים. לכן אין לכרוך אותם זה בזה. גם גילי טרוורטין הלשון מאוחרים מדי לגבי טרוורטין מפלס הביניים ועתיקים לגבי טרוורטין המפלס הנמוך, כך שאין בסיס לקבץ את שתי התופעות לכפיפה אחת.



ציור 7.3: נדידת המעינות בשדה תמיד-משק

איזוטופים של Sr-הקדמה

לסטרונוציום ארבעה איזוטופים: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr . האיזוטופ ^{87}Sr הוא רדיוגני ונוצר בדעיכת ^{87}Rb . ניתן להשתמש ביחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ לצורך זיהוי מקורות המים שהשקיעו את הטרורטין (הסקירה על פי Faure, 1982).

שיחזור היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במים שהשקיעו את הטרורטין הקדום מתאפשר על סמך התצפיות הבאות:

(א) היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ באוקינוסים משתנה עם הזמן ולכן מאופיינים סלעים קרבונטים ימיים בערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שונים בהתאם לגילם. מים הנודדים דרך סלעים כאלה יוחתמו על ידי היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שאופייני לסלעים בהתאם לגילם.

(ב) ההרכב האיזוטופי של מי הנביעות נקבע בין השאר על ידי הטיפוסים הליתולוגיים השונים באגן הניקוז והאקוויפר. ההרכב האיזוטופי יכול להשתנות עם הזמן עקב שינוי בחשיפת הסלעים באגן ניקוז.

(ג) תכולת ה-Rb במינרלים קרבונטיים זניחה לעומת ריכוז ה-Sr שבהם. לכן היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ אינו מושפע בהם מדעיכת ^{87}Rb , במיוחד בסלעים צעירים.

(ד) בתהליך התגבשות המינרלים הקרבונטיים לא מתרחשת פרקציונציה איזוטופית מדידה בין איזוטופי ה-Sr והיחס האיזוטופי במינרל מייצג את היחס שהיה במים שמתוכם התגבש המינרל (בהנחה שלא עבר שינוי דיאגנטי).

מי תהום ומים עיליים יכולים לייצג עירוב בין מי אקוויפרים שונים או אגני ניקוז שונים. לכן היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בהם הוא ערך של עירוב והוא יכול להשתנות במרחב עם זרימת וקליטת מים ממקורות נוספים (Benson and

Peterman, 1996). יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במים מקידוחי הערבה לא מראים הבדלים משמעותיים בין מי האקוויפרים השונים, כאשר דיוק המדידה הוא ± 0.0002 (Yecheili et al., 1992).

היות שהיחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בטרורטינים הוא זה שהיה קיים במים בזמן ההשקעה, הוא מבטא את התרומה היחסית של מי האקוויפרים השונים. זו תלויה מצידה בתהליכים טקטונים ובאקלים ששרר באזור באותו זמן. כדוגמא,

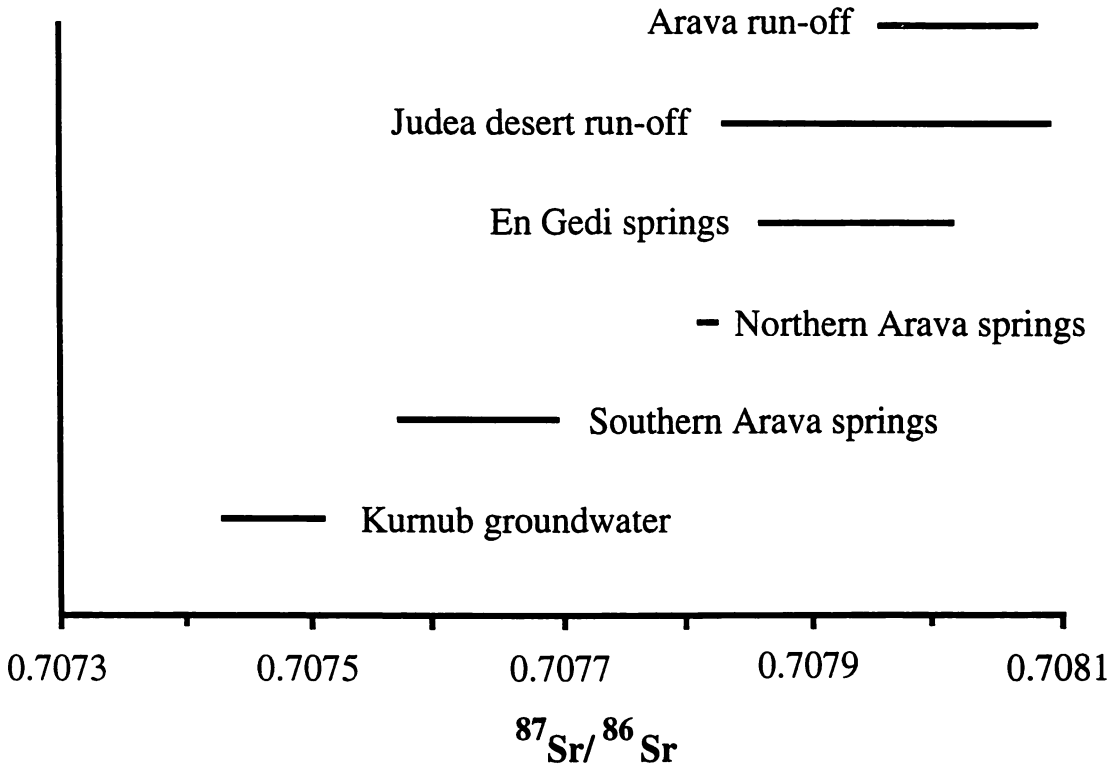
אפשר להביא מעין הניזון מאקוויפר פוסילי (כמו אקוויפר כורנוב) ואקוויפר פעיל. במעין כזה יגדל המרכיב של המילוי החוזר בתקופה של אקלים לח בגלל העליה בעומד האקוויפר. דבר זה עשוי להביא לשינוי ביחס האיזוטופי

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שבמים, ובעקבות זאת, בטרורטין הנוצר בהם.

ההרכב האיזוטופי של ה- Sr בטרורטינים ובמים בערבה

ההרכב האיזוטופי של Sr נמדד במדגמי סלע שנאספו מיחידות הטרורטין השונות בשלושת אזורי הדגימה, ובמים ממעינות סמוכים, משטפונות וממי קידוחים. ערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מוצגים בטבלאות 7.1 ו-7.2 ובסדרה של איורים (7.4, 7.6, 7.9).

טווח היחסים $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במדגמי הטרורטין נע בין 0.707564 ל-0.708034. זהו טווח רחב המאפשר להבדיל בין קבוצות שונות. הטווח המיוצג על ידי כלל דוגמאות מים גם הוא רחב ונע בין 0.707427 ל-0.708082.



איור 7.4: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במים מן הערבה וסביבתה

יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במים מן הערבה וסביבתה מוצגים באיור 7.4. ערכי הקצה הם יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מי אקוויפר כורנוב בקידוח פארן 20 ובקידוח יעלון 1 (0.707440-0.707516) ומי שטפונות הערבה (0.708013-0.707951). מי מעינות הערבה מציגים ערכי ביניים (0.707816-0.707569). לשם השוואה מוצגים גם ערכי יחסים שנמדדו במי אקוויפר חבורת יהודה מעין גדי (0.70802-0.70787) ומי שטפונות ממדבר יהודה (0.70783-0.70809) שנתקבלו בעבודתו של עפרי שמש (בהכנה). היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במי שטפונות הערבה דומה ליחס במי השטפונות במדבר יהודה. סך הכל, הערכים של מי השטפונות קרובים לאלה של מי הגשם בדרום הארץ (חרות, 1992). ערך מי השטפונות לא משתנה כמעט תוך כדי זרימה עקב הזמן הקצר בו נמצאים המים במגע עם הסלע והעדות לכך היא החפיפה בין תחום הערכים של השטפונות ומי המעיינות במדבר יהודה.

Sample LE no.	Sample J no.	Location	Lithology	Level	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sr/Ca mol	Sr ppm
	R-202	En Yahav	tr		0.707608		
94	2414	En Erga	tr	l	0.707663	2.4E-3	2.0E+03
95	2415	En Erga	dt	m	0.707645	2.5E-3	2.2E+03
	R-218	En Erga	tr		0.707646		
98	2416	En Erga	ll	u	0.70766	2.4E-3	1.2E+03
	R-219	En Erga	tr		0.707671		
99	2417	En Erga	dt	u	0.707722	1.4E-3	1.2E+03
	R-211	En Rahel	tr		0.707564		
	R-206	En Rahel	tr		0.707625		
	R-210	En Rahel	tr		0.707632		
	R-205	En Rahel	tr		0.707866		
88	2411	En Tamid	tr	m	0.707788	1.5E-3	1.3E+03
11C	2401	En Tamid	tr	l	0.707804	2.5E-3	1.6E+03
86	2410	En Zach	tr	u	0.707828	1.1E-3	9.8E+02
11H	2402	En Tamid	p	l	0.707836		
64	2408	N. Mashaq	tr	u	0.707836	1.3E-3	1.1E+03
83	2409	En Tamid	tr	l	0.707861	2.4E-3	2.0E+03
108		Mo'a	dt	m	0.707596	2.6E-3	2.0E+03
107		Mo'a	dt	m	0.707632	2.9E-3	2.5E+03
103		Mo'a	tr	m	0.707672	2.5E-3	2.1E+03
	R-222	Mo'a	tr	m	0.707677		
103	2418	Mo'a	tr	m	0.707684	2.5E-3	2.1E+03
106	2419	Mo'a	p	m	0.707762	1.2E-3	6.2E+02
107	2420	Mo'a	dt	m	0.707691	2.9E-3	2.5E+03
201	2725	Shilhav	tr	h	0.707768	2.0E-3	1.7E+03
202	2726	N. Shivya	tr	u	0.707699	1.7E-3	1.5E+03
206	2729	N. Omer	tr	u	0.707859	9.9E-5	8.7E+01
109	2423	Mo'a	tr	l	0.707646	3.7E-3	3.2E+03
124	2431	En Gedi	tr		0.707802	6.3E-4	5.5E+02
128	2432	En Gedi	tr		0.70796	8.4E-4	7.4E+02
209	2730	Lisan tr.	tr		0.708034	3.8E-3	3.1E+03
109a	2424	Be'er Menuha	tr	?	0.707575	3.7E-3	3.0E+03
53	2405	Maktesh Qatan	tr	?	0.707953	4.2E-4	3.5E+02
204	2728	En Tamid	ll	u	0.707824	1.7E-3	3.3E+02
203	2727	N. Mashaq	ll	u	0.707879	5.7E-4	4.6E+02
	R-216	En Erga	ll	h	0.707901		
rc 85	2731	N. Mashaq	ll	h	0.708169		

tr- Authogenic travertine

dt- Detritic travertine

p- Travertine-marl

ll- Limnic lst.

h- Hazeva Fm. trv.

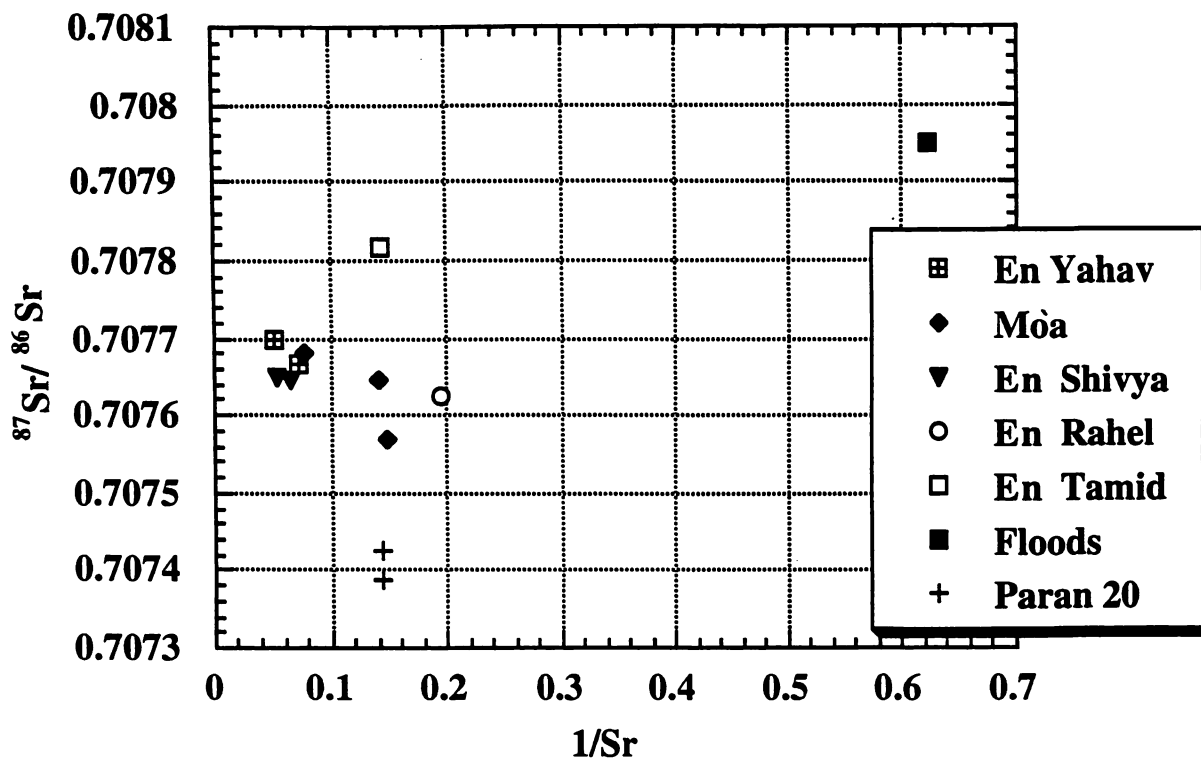
u- Upper level

m- Intermediet level

l- Lower level

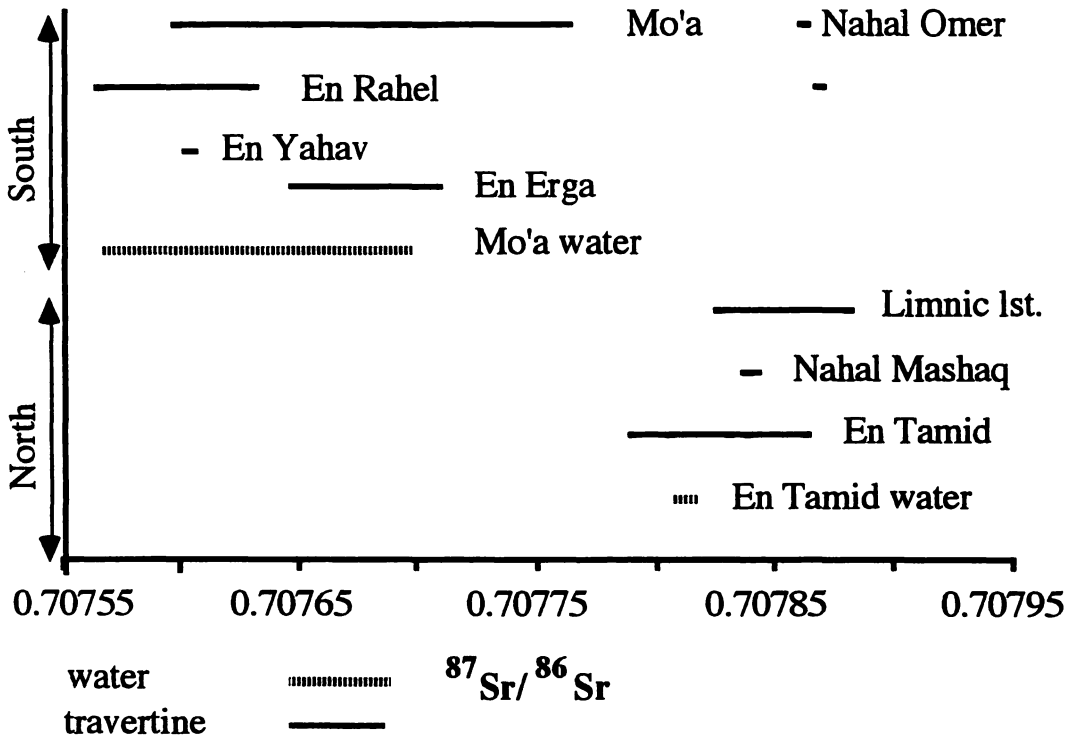
Source	Sample G no.	Sample J no.	place	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Ca mg/l	Sr mg/l	Sr/Ca mol
Springs	G-3337	D-3310	En Rahel	0.707626	39	1.5	1.7E-02
		2442	En Yahav	0.707698			
	G-3790	2738	En Yahav	0.707666	137	7	1.1E-02
		2444	Mo'a	0.707681			
	G-3338	D-3311	Mo'a	0.707646			
	G-3341	D-3312	Mo'a	0.707569			
		2445	En Shivya	0.707647	672	18	1.2E-02
	G-3851	2740	En Shivya	0.707651			
	2446	En Tamid	0.707816				
Floods	G-4265	2767	N. Arava	0.708013	79	1	5.3E-03
	G-4266	2768	N. Zin	0.707951	124	2	5.9E-03
	G-4267	2769	N. Shahaq	0.708082	47	1	5.2E-03
Kurnub aquifer (borehole)	G-4234	2742	Paran 20	0.707440	262	7	1.2E-02
	G-4233	2745	Yaalon 1	0.707516			
	G-4232	2746	Yaalon 7	0.707722			
	G-4231	2750	Paran 20	0.707427			

טבלא 7.2: יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במי מעיינות, שטפונות וקידוחים בערבה



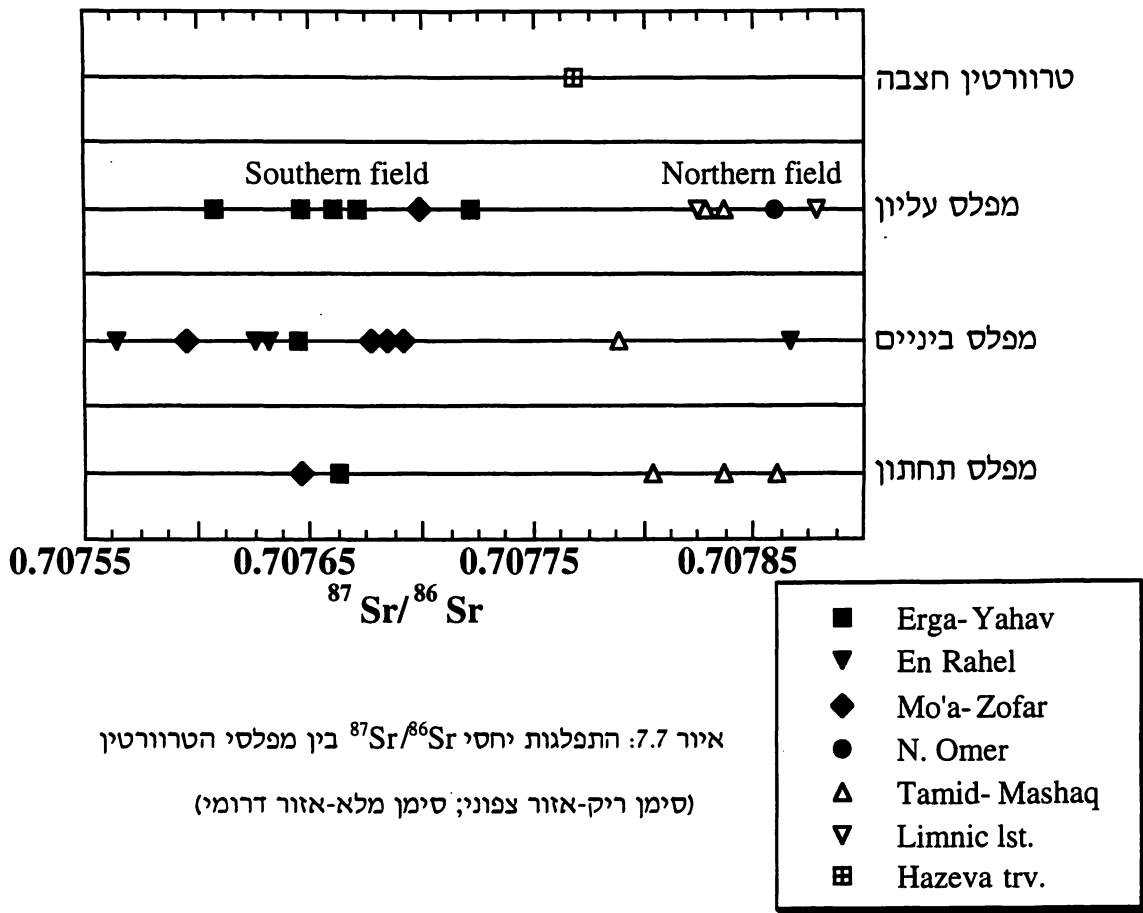
איור 7.5: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מול $1/[\text{Sr}]$ של מים בערבה

מרחב של $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מול $1/[\text{Sr}]$ משמש לבדוק האם קיים עירבוב בין קבוצות מים בעלות הרכב איזוטופי שונה של Sr. במצב של עירבוב בין שני מרכיבים קצה שונים צריכים ערכי המדגמים ליפול על קו ישר המחבר בין שני המרכיבים. איור 7.5 מציג קבוצות מים שונות מהערבה ומראה שההרכב האיזוטופי של מי מעיינות הערבה אינו יכול להיות תוצאה של עירבוב פשוט בין מי אקוויפר כורנוב למי שטפונות.



איור 7.6: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בטרורטינים ומי מעיינות בערבה

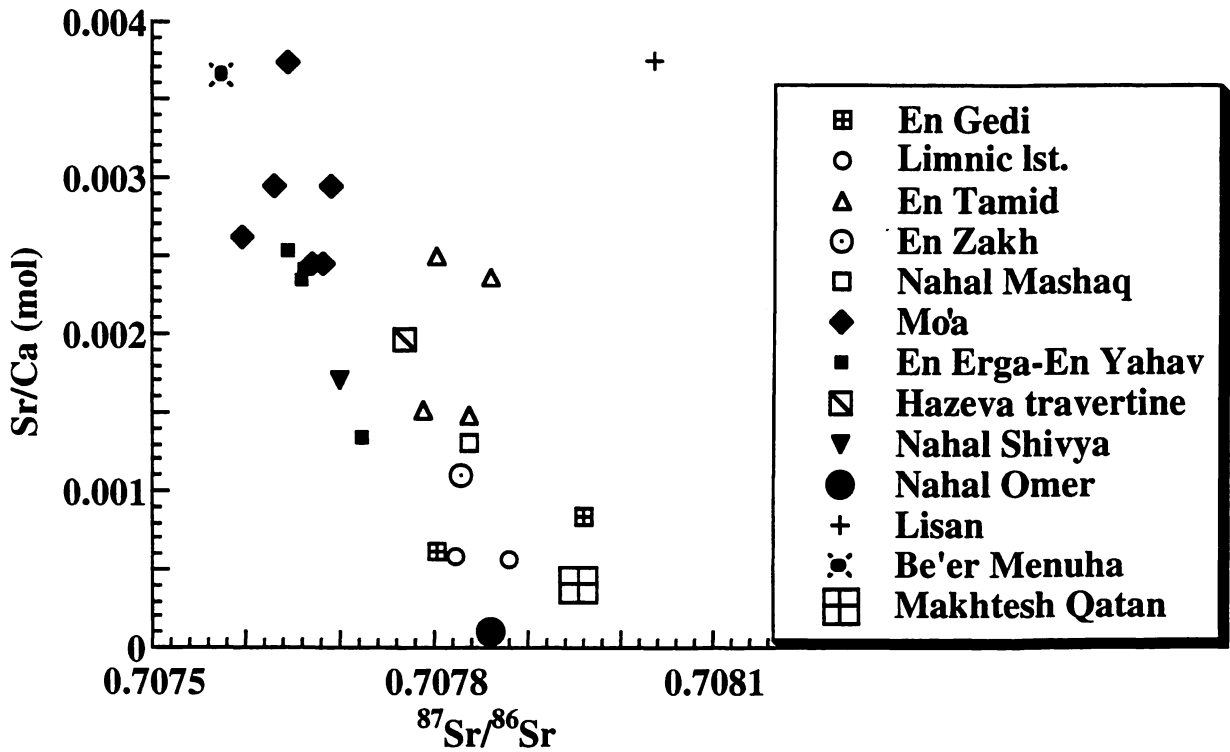
קיים הבדל ביחסי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בין מי המעיינות הדרומיים- עין ערגה, עין יהב, עין רחל, עין שביה ומואה (0.70757-0.70768) לבין מי המעיינות הצפוניים- עין תמיד ועין גדי (0.70787-0.70802) (איור 7.4). באיור 7.6 רואים שהבדל זה קיים לא רק במים כי אם גם בטרורטיין. ערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מי המעיינות מוצגים באיור יחד עם ערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שנמדדו בסלעי טרורטיין המופיעים באזור הקרוב להם. קיימת התאמה בין ערכי המים של המעיינות הדרומיים לסלעי הטרורטיין הדרומיים לסלעי הטרורטיין הצפוניים. גם ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מחשופי הגיר האגמי מעין תמיד ונחל משק מתאימים לאזור הצפוני. דוגמא אחת מנחל עומר (LE-206) ודוגמא אחת מעין רחל (LE-205) חורגות מתחום ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ המאפיין את האזור הדרומי. מהגרף עולה שהטרורטינים מקבלים את החותמת האיזוטופית של המים וניתן לראות בהם מיצגים של מי המעיינות שהשקיעו אותם.



איור 7.7: התפלגות יחסי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בין מפלסי הטרורטין

(סימן ריק-אזור צפוני; סימן מלא-אזור דרומי)

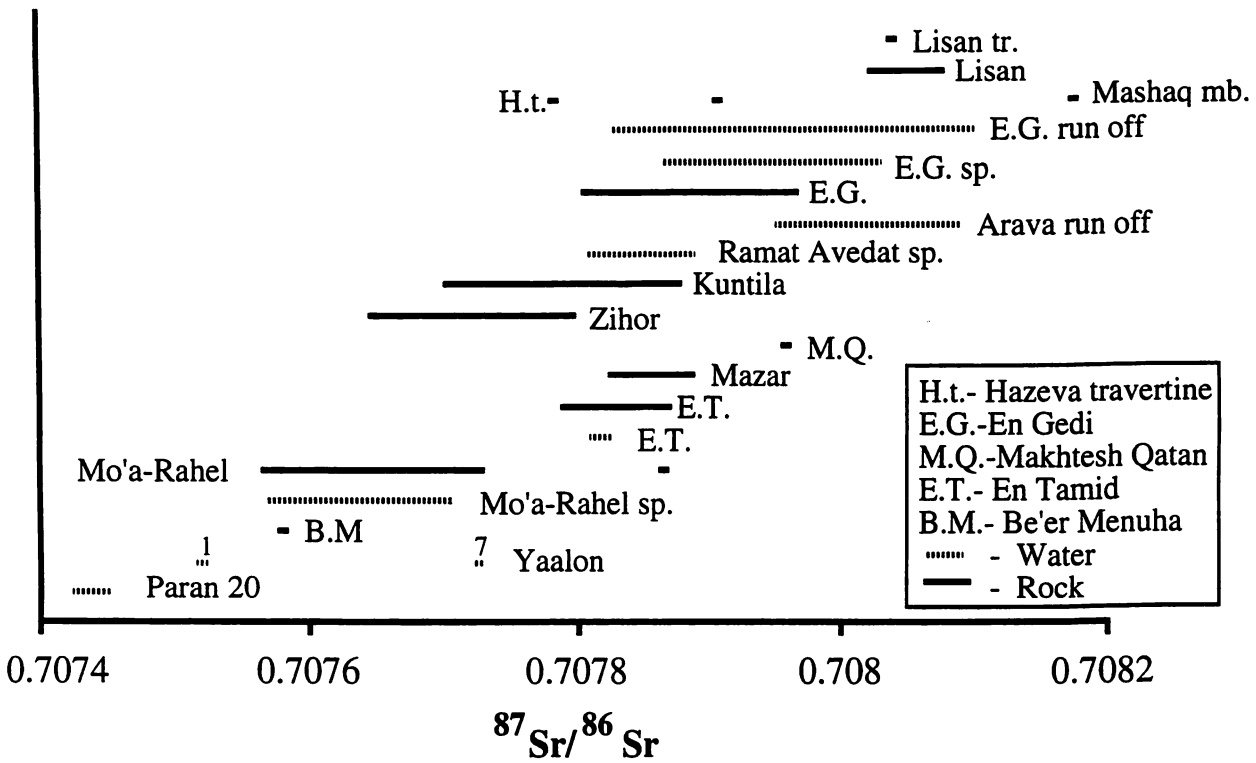
באיור 7.7 מופיעים נתוני ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ לפי התפלגותם במפלסי הטרורטינים. ההבדל בין ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של משקעי המעיינות הדרומיים לבין ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של משקעי המעיינות הצפוניים שעלה מאיור 7.6 ניכר גם באיור זה. באיור 7.7 ניתן לראות שתחום הערכים של שלושת הטרורטינים מהמשטחים השונים ששקעו בזמנים שונים וממעיינות שונים באזור הצפוני גבוה מתחום הערכים של שלושת הטרורטינים במשטחים השונים באזור הדרומי. מכאן ניתן להסיק שההבדל בין האזור הצפוני והדרומי מתקיים לפחות לכל אורכה של תקופת השקעת הטרורטין.



איור 7.8: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מול Sr/Ca בטרורטינים אותיגניים

(סימן ריק-אזור צפוני; סימן מלא-אזור דרומי)

ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מול ערכי Sr/Ca של משקעי המעינות מוצגים באיור 7.8. ערכי ה-Sr/Ca של הסלעים מהאזור הצפוני נמוכים מאלו של האזור הדרומי. מנגד ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של האזור הדרומי גבוהים מאלו של האזור הצפוני. טרורטין הלשון נמצא מחוץ לשדה של טרורטין שולי הערבה.



איור 7.9: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ בטרורטינים וגירים של מים מתוקים בערבה ובנגב

התוצאות מסודרות מדרום (למטה) לצפון (למעלה)

באיור 7.9 מוצגים ערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של משקעי המעינות, משקעים אגמיים ומים מהנגב והערבה, (גם מחוץ לשטח המחקר). ניתן לראות שגם במשקעי מים מתוקים נוספים כמו טרוורטין באר מנוחה, טרוורטין מכתש קטן ומעינות רמת עבדת, משתנה היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ מדרום לצפון. הערכים עולים מערך של 0.7075 בטרורטין ובמים של מואה ובמים מקידוח פארן 20 לערך של 0.7081 בטרורטין הלשון. גם בפרט משק של תצורת חצבה ניתן לראות את המגמה הנייל. הדוגמא מנחל משק היא בעלת ערך גבוה מאשר הדוגמא מכיפת ערגה ושתייה שונות מטרורטין חצבה שמצוי דרומית להם ליד צופר. יתכן וטרורטין חצבה כה שונה כיוון שהוא שייך לפרט צפע כפי שהוזכר בפרק 5 (טרורטין חצבה).

דיון פלאוהידרולוגי

- מתוך ערכי Sr בסלעי הטרוורטין ובמים בערבה ניתן להסיק מספר מסקנות:
- (1) היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מי מעיינות הערבה נמוך מזה של מי השטפונות באזור וממי מעיינות הנובעים מאקוויפר חבורת יהודה או חבורת עבדת. לעומת זאת הוא גבוה ממי אקוויפר כורנוב.
 - (2) קיים הבדל בין ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מעיינות האזורים הדרומיים (עין ערגה עד מואה) לבין האזור הצפוני (עין תמיד ונחל משק). ליחסי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של דוגמאות המים מתוספים נתוני הטרוורטין שהיחס בהם מייצג את המים מהם שקעו וזאת מכיוון שלא קימת פרקציונציה איזוטופית בין המים לטרוורטין. ערכי כל מדגמי הסלע והמים של האזור הצפוני מופיעים בתחום של 0.70786-0.70788 ואילו ערכי מדגמי האזור הדרומי והמרכזי מופיעים בתחום נמוך יותר של 0.70776-0.70756.
 - (3) ההבדל בין האזורים הוא הבדל קבוע המשתקף בכל מפלסי הטרוורטין כך שהוא קיים כבר זמן רב, לפחות מאז תחילת השקעת הטרוורטין.
 - (4) היחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ במי אקוויפר כורנוב הוא הנמוך ביותר שנמצא והוא נמוך מאלה שבאקוויפרים גבוהים יותר בחתך (חבורת יהודה והר הצופים). הערכים הגבוהים ביותר התקבלו במי הנגר העילי הזורמים על סלעים מגיל קרטיקון עליון. הבדלים אלו מאפשרים לבחון האם מי מעיינות הערבה הם תוצרי עירוב בין מי אקוויפר כורנוב ושני האקוויפרים האחרים והאם עולים מים ארטיזתי מאקוויפר כורנוב אל האקוויפרים הגבוהים יותר בחתך. יחיאלי וחבריו (1992) ניסו להבחין בין האקוויפרים על ידי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ אך דיוק של 0.0002 במדידה לא היה מספיק. ניתן לחשוש שמקור המלחים של מי המעיינות בערבה הוא בעירוב בין מים מתוקים ממי אקוויפרים רדודים לבין מים מליחים מאקוויפרים עמוקים יותר. איור 7.4 מראה שההרכב האיזוטופי של ה-Sr במי המעיינות הוא הרכב ביניים בין הרכב אקוויפר כורנוב לבין הרכבם של המים המתוק מאקוויפר יהודה שטפונות. יחסי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של טרוורטינים מבאר מנוחה ומהמכתש הקטן הם הקיצוניים ביותר. הטרוורטין במכתש קטן מונח על סלעי חבורת נגב מגיל יורא וה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ שלו גבוה. כנראה שמקור המים שהשקיעו אותו אינו באקוויפר כורנוב על אף מיקומו בתוך המכתש. לעומת זאת ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של טרוורטין מבאר מנוחה נמוך ביותר והוא הקרוב ביותר לטווח ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של מי אקוויפר כורנוב, דבר זה נובע כנראה מקרבתו של טרוורטין זה אל שבר עשת שחושף את חבורת כורנוב על פני השטח (בנחל שברים, מצפון לבאר מנוחה).
הסיבה לשוני בין שני האזורים יכולה להיות קשורה ב:
 - (א) יחסי עירוב שונים בין מי כורנוב למים מאקוויפר יהודה- באזור האזור הצפוני אקוויפר כורנוב עמוק יותר מבאזור הדרומי ואקוויפר יהודה עבה יותר. נוסף על כך האזור הדרומי שבור יותר: מואה סמוכה לשבר ברק כמו גם עין שביה ואילו אזור ערגה-יהב מצוי בקרבת הקצוות המזרחיים של שבר הרמון ושבר עריף בתור (איור 1.4). באזור הצפוני אקוויפר כורנוב עמוק יותר ואין מערכות שבירה (הנראות על פני השטח) שדרכם יכולים מים לעלות.
 - (ב) גופים מגמתיים - מציאותם של גופים בזלתיים החדורים לאקוויפר המישאש באזור הדרומי יכולה להשפיע על הרכב ה-Sr של מי האקוויפר הבאים עימם במגע. בתחומי אזור עין יהב-עין ערגה חשופים דייק וטופים, מדרום למואה קיים "פקק" בזלתי שנחל עשוי וממערב לבאר מנוחה חשופים טופים (גינת ח. דברים בעל פה, 1997). יתכן ובתת הקרקע מצוי נפח גדול יותר של גופים בזלתיים.
- מקור ה-Sr אינו יכול להיות בגופי בזלת התורמים עשירות mg/L למים מתוקים (סנדלר, 1981), לעומת $6-8 \text{ mg/L}$ במים הנידונים. לעומת זאת, אם נניח שהמים כולם היו בעלי ערך של 0.7081 (המתאים לצפון) הרי שינוי קל של 0.0002 כתוצאה מאינטראקציה בעומק עם גופים מגמתיים בסיסיים היתה יכולה לשנות את היחס המקורי לערך קרוב ל-0.7079. ריאקציה כזו מודגשת יותר באקוויפר מישאש עקב שני גורמים:
- (א) הוא חדר על ידי גופים מגמתיים.
 - (ב) שטף המים בו נמוך כך שיחס המים-סלע (בזלת) קטן.
- כיוון שהגופים המגמתיים חשופים רק באזור הדרומי וכיווני הזרימה באקוויפר כפי שתוארו בסעיף 7.1 הם מצפון מערב לאזור הצפוני ומדרום מערב לכיוון האזורים הדרומיים הרי שהמים הזורמים אל עבר האזורים הדרומיים באים למגע עם הגופים המגמתיים ואילו המים הזורמים אל עבר האזור הצפוני לא באים למגע.
- ההבדל בהרכב האיזוטופי של ה-Sr בין שני האזורים נמצא בטרוורטינים מכל הגילים. ההבדל קבוע בזמן לפחות מאז הרבדתו של טרוורטין המשטח העליון. במיוחד חשוב לציין שזאת למרות שהמעיינות באזור הצפוני שינו את

מקומם מזרחה ב-3 ק"מ כפי שתואר בסעיף 7.1. תזווה דומה, אבל קטנה יותר (עד כחצי ק"מ) מוכרת גם מן האזור הדרומי (מואה).

ההרכב האיזוטופי של ה-Sr בגיר האגמי שמעל עין תמיד ובנחל משק דומה לזה של הטרורטין הסמוך לו. אם גיר זה היה שוקע מגוף מים גדול שהשתרע על שטח נרחב מהערבה סביר היה להניח שערכי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ היו גבוהים יותר כיוון שרוב המים המנוקזים לערבה הם בעלי ערכי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ גבוהים יחסית (ערך מי השטפון של נחל ערבה הוא 0.70801). לפיכך מוצע שמחשופי גיר קטנים אלו שקעו בגופי מים קטנים או מנותקים מאגם מרכזי (אם היה כזה בזמן קיומם). גופי מים אלה הוזנו כנראה בעיקר על ידי מי המעינות הקרובים להם שבהם שקעו טרורטינים.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של הטרורטין שמופיע בתצורת חצבה באזור צופר גבוה מטווח היחסים שמאפיינים את הטרורטינים הצעירים ממנו באותו אזור. אמנם מדובר בדוגמא אחת בלבד אך נראה שהמסטר ההידרולוגי בזמן תצורת חצבה היה שונה מזה שהתקיים בזמן השקעת הטרורטינים הצעירים יותר.

ערכי ה-Sr של הטרורטינים והגירים המופיעים בעין תמיד ובנחל משק (איור 7.9) דומים לערכים שהתקבלו מהגיר האגמי של תצורת צחיחה המופיע בנחל ציחור (גינת, 1997). אגם ציחור הוא אגם נרחב ורדוד באזור מדברי צחיח והשאלה ההידרולוגית הראשית שהוא מעורר נוגעת למקור המים. כדי לקיים גופי מים קבועים (נמצאו בהם מאובני דגים), כה נרחבים ורדודים באזור הצחיח של הנגב הדרומי יש צורך במסטר הידרולוגי שונה מזה שקיים היום.

האם מקור מי אגם ציחור היה בנגר עילי או במי תהום? יתכן והוא הוזן בחלקו על ידי אקוויפר מישאש החשוף בסביבתו, כיוון שיחסי ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של האקוויפר שנמדדו בעבודה מתאימים לאלו של משקעי אגם ציחור. יתכן וחלק מההזנה של האגם היתה ממי נגר עילי אך מי השטפונות שנמדדו במדבר יהודה ובערבה היו בעלי $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ גבוה יותר ממה שנמצא במשקעי אגם ציחור ואינם יכולים להשקיע משקעים עם יחס כה נמוך (0.708 <). המקור התת קרקעי של מי האגם נתמך על ידי מציאות טרורטין סמוך למשקעי אגם ציחור (גינת, 1997). בדיקת ה- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ של הטרורטין בנחל ציחור והשוואתו לזה של הגיר האגמי תוכל לבסס את ההשערה.

8. גילי הטרורטין

גילים בעבודות קודמות

נתוני הגילים של Kronfeld and Livnat (1985) ו-Livnat and Kronfeld (1987) מוצגים בטבלא 8.1. בצד הגילים מופיעה עמודה בה הותאם לכל דוגמא המפלס שלה לפי המחקר הנוכחי. ניתן לראות כי קיימת התאמה כללית בין הגילים למפלסים. הדוגמאות שנדגמו ממפלס הטרורטין העליון הן בעלות גיל שמעל ל-209,000 שנה. הדוגמאות שנדגמו ממפלס טרורטין הביניים הן בעלות גיל בתחום שבין 196,000 ל-63,000 שנה. במפלס הנמוך לא נמדדה אף דוגמא.

מיקום	נ.צ.	מס' דוגמא	גיל מתוקן ל-1.5 Th	מפלס	הערות	
ע. יהב	1683/0037	18	105000	עליון	זיהוי המפלס בעייתי	
נ. חצבה	1666/0264	12/86top	257000	עליון		
נ. חצבה	"	12/86bottom	244000	עליון		
נ. חצבה	"	13/86	228000	עליון		
נ. חצבה	"	14/86	307000	עליון		
נ. משק	1651/0224	24/86	240000	עליון		
נ. משק	"	26/86	247000	עליון		
נ. משק	1654/0225	17-23/86	>300000	עליון		חמש דוגמאות בגיל >300,000 שנה
נ. עומר	1640/9937	58/86	293000	עליון		
נ. עומר	"	60/86	224000	עליון		
ע. ערגה	1677/0048	4/86	228000	עליון		
ע. ערגה	1676/0046	1	218000	עליון		
ע. ערגה	1676/0047	2/86	>300000	עליון		
ע. יהב	1683/0037	13	243000	עליון		
ע. יהב	"	28	234000	עליון		
ע. יהב	"	14	209000	עליון		
ע. יהב	"	15	211000	עליון		
מואה	1654/9944	72/86	196000	ביניים		
מואה	1653/9949	74/86	107000	ביניים		
נ. שביה	1658/9970	75/86	121000	ביניים		
נ. שביה	1661/9968	76/86	182000	ביניים		
ע. ערגה	1675/0046	2	111000	ביניים		
ע. רחל מזרח	1664/0044	9	174000	ביניים		
ע. רחל מזרח	"	10	125000	ביניים		
ע. רחל מזרח	"	11	86000	ביניים		
ע. רחל מזרח	"	12	63000	ביניים		
ע. רחל מערב	1662/0044	5	221000	ביניים	זיהוי המפלס בעייתי	
ע. רחל מערב	"	6	235000	ביניים	זיהוי המפלס בעייתי	
ע. זך	1696/0255	7/86	258000	ביניים	זיהוי המפלס בעייתי	

טבלא 8.1: התאמת הגילים הרדיומטריים של הטרורטיניים למפלסים

(הגילים על פי Kronfeld and Livnat (1985) ו-Livnat and Kronfeld (1987))

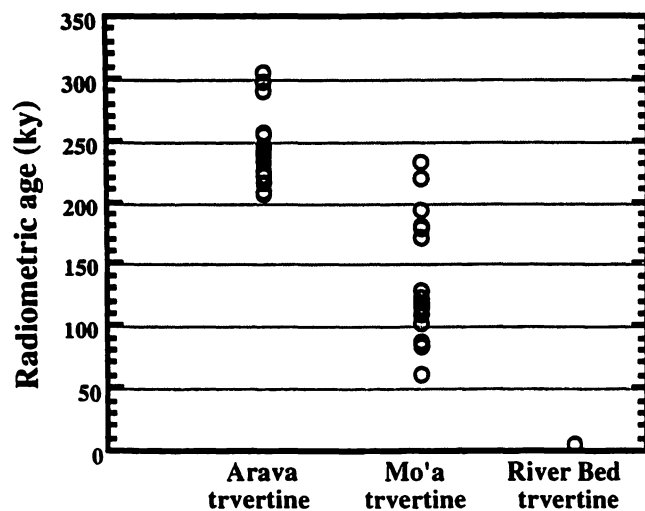
גילים חדשים ופלאומגנטיום

גילים חדשים שנמדדו תוך כדי עבודה זו על ידי די"ר מ. שטיין (המחלקה לגיאולוגיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים) מופיעים בטבלא 8.2. הגילים שבטבלא 8.1 נמדדו על ידי Kronfeld and Livnat (1985) ו-Livnat and Kronfeld (1987) בשיטת α -counting. הגילים המופיעים להלן נמדדו בשיטת TIMS הגילים שנתקבלו עבור טרוורטינים ממפלס הביניים מצויים בטווח הגילים שמופיע עבור מפלס זה גם בטבלא 8.1. מיקום הדוגמאות מופיע בספח 1.

חתך דגימה לפלאומגנטיום נערך במחשוף טרוורטין והגיר האגמי שבמפלס העליון ממזרח לכיפת ערגה (תמונה F-9). בחלקו העליון של המחשוף, בגובה 3.8 מ' מעל בסיס חתך הטרורטין והגיר האגמי, נמצאו שתי דוגמאות (שכל אחת מהן חולקה לשניים ונמדדה עצמאית, כך שבסך הכל מדובר בארבע מדידות) בהן קיים וקטור מגנטי הפוך. כדי לבסס את קיום הוקטור ההפוך יש לבצע דה-מגנטיזציה תרמלית למספר דוגמאות גדול יותר מאופק זה כיוון שהוא ממוסך ע"י וקטור נורמלי שככל הנראה מצוי בהמטיט מאוחר. משמעות קיום הוקטור המגנטי ההפוך (אם אכן יאושש קיומו על ידי דוגמאות נוספות) הוא שגילו של רוב חתך טרוורטין המפלס העליון בכיפת ערגה עתיק לפחות מ-780,000 שנה (היפוך מאטויאמה-ברונס, Bradley and Malcolm, 1996), כיוון שזהו גילו של ההיפוך הצעיר ביותר הידוע. מחשוף זה תוארך ע"י Kronfeld and Livnat (1985) הדוגמא העליונה בחתך הצביעה על גיל של 228,000 שנים ואילו דוגמאות מתחתית החתך (ממחשוף סמוך) הראו גיל עתיק מ-300,000 שנים. כך שמשני התיארוכים הבלתי תלויים מתקבל שחלקו התחתון של חתך טרוורטין המפלס העליון בכיפת ערגה עתיק מ-300,000 שנים ועל פי המדידה הפלאומגנטית אף עתיק מ-780,000 שנה.

מיקום	נ.צ.	מס' דוגמא	גיל	מפלס
ע. תמיד	16935/02460	LE-83	8,000	נמוך
מואה	16545/99525	LE-103	130,000	ביניים
ע. תמיד	16935/02465	LE-88	181,000	ביניים
ע. רחל	1664/0044	LR-194	90,000	ביניים

טבלא 8.2: גילי U-Th חדשים



איור 8.1: התאמת הגילים למפלסים

דיון במשמעות הגילים

תוצאות הגיל הידועות כיום מצביעות על התאמה ביניהן לבין הנתונים הסטטיסטיים הבלתי תלויים (איור 8.1). טווח גילי מפלס הטרורטין העליון הוא מעל ל-207,000 שנה וטווח גילי מפלס טרוורטין הביניים הוא בין 196,000 ל-63,000 שנה. אולם, קיימות מספר דוגמאות שהגילים שנמדדו להם חורגים מטווח הגילים המתאימים למפלס שלהם (אלו סומנו כזיהוי מפלס בעייתי). הדיון בבעיות של דוגמאות אלה מופיע להלן: (א) דוגמא 7/86 מעין זך היא בעלת גיל המתאים לטווח גילי המפלס העליון אך

מצויה בגובה מפלס הביניים. בדיקה בשטח מצביעה כי יתכן וגוף הסלע אליו דוגמא זו שייכת היא גלישה כיוון שבקרבת מקום, מעליה מצוי מחשוף של טרוורטין המפלס העליון והיא עצמה מופיעה כגוש קטן המונח ללא קשר ברור לסביבה. לפיכך נראה כי דוגמא זו שייכת למפלס העליון כפי שגם הגיל שלה מורה. (ב) לדוגמא 18 מעין יהב נמדד גיל המתאים לטווח מפלס הביניים אך היא מצויה מעל חתך טרוורטין עבה המשויד למפלס העליון. בינה לבין חתך טרוורטין המפלס העליון אין קו מגע או גבול ברור. טרוורטין המפלס העליון מצוי באזור זה בעמדה נמוכה ביחס לסביבה עקב השתפלות טקטונית של האגף המזרחי של

כיפת רחל (ראה פרק 9). עמדה נמוכה זו מתאימה בגובהה למפלס הביניים, כך שיתכן וטרוורטין מפלס הביניים שקע ישירות (ואולי אף באופן רציף) על גבי טרוורטין המפלס העליון.

ג) בעין רחל קיימים שני מחשופים המצויים שניהם בתוך בקעת הסחיפה כך שלכאורה על פי מיקומם הם אמורים להשתייך למפלס הביניים. במחשוף עין רחל מזרח התקבלו ארבעה גילים בתחום שמ-63,000 עד 174,000 שנה המתאימים לטווח הגילים של סלעי מפלס הביניים. במחשוף עין רחל מערב התקבלו שני גילים של 221,000 ו-235,000 שנה המתאימים לטווח המפלס העליון. הגילים מעוררים בעיתיות כפולה:
א. בחלקו העליון של משטח הטרוורטין מופיעים גילים שונים מאוד 235,000 שנה לעומת 63,000 שנה.
ב. הגילים לא עולים בקנה אחד עם יחסי השדה של אזור עין ערגה עין רחל. גילי עין רחל מערב גבוהים עבור מחשוף שמיקומו מתאים למפלס הביניים.

ניתן להסביר זאת רק אם ההתחברות והסחיפה במפלס העליון החלה באזור עין רחל לפני שהדבר קרה בעין ערגה. במקרה זה הורבד טרוורטין המפלס העליון בעין ערגה (228,000 שנה) על משטח הגידוע בו זמנית לטרוורטין עין רחל שהורבד בעמק שנחתר לתוך משטח הגידוע. כדי לקבל הפרשים כאלו במורפולוגיה השטח דרוש שטח בעל יכולת שינוי מהירה, החרסיות של תצורת טקיה מתאימות לכך. על מנת לברר נקודה זו יש צורך למדוד את גיל הסלעים הללו פעם נוספת.

ד) במראה התקבלו בתוך מפלס הביניים שני גילים שונים מאוד זה מזה. הדבר נובע כנראה מהעובדה שמפלס הביניים בנוי משני תת-מפלסים שונים העליון שביניהם תוארך ל-196,000 שנה והנמוך ל-107,000 שנה. תמונת גילים זו תואמת גם את יחסי השדה, שוני בגובה תת המפלסים וכיווני זרימה שונים (ראה פרק 5).

תיארוך טרוורטין המפלס העליון נותן מושג על גיל המפלס העליון שמכיל את הטרוורטין והשתרעותו גדולה הרבה יותר. בעבודותיהם של Livnat and Kronfeld (1985) ו-Kronfeld and Livnat (1987) תוארכו תשע דוגמאות טרוורטין מנחל משק, מתוכן חמש דוגמאות נתנו ערך גבוה שדווח כגבוה מ-300,000 שנה. גם דוגמאות מעין ערגה ונחל חצבה תוארכו כבעלות גיל גבוה מ-300,000 שנה. שאר דוגמאות המפלס העליון תוארכו ל-200,000 שנה ומעלה ותחום שגיאת המדידה של רובם אף הוא בקרבת 300,000 שנה. גילים אלו מצביעים שהמפלס עתיק מ-300,000 שנה והתקיים עד לפני כ-200,000 שנה. מהנתונים הפלאומגנטיים שתוארו למעלה מקבלים שהמפלס אכן עתיק מ-300,000 שנה והתקיים גם לפני 0.78 מיליון שנה. כלים פרהיסטוריים מוסטריים שנמצאו על ידי Sneh (1982) בנחל משק ועל ידי Livnat and Kronfeld (1985) בעין יהב הם עדות לא תלויה לגיל חלקו הצעיר יותר של חתך המפלס העליון.

מפלסים קורלטיבים החשודים בהתאמה מורפוסטריגרפית למפלס העליון בנגב המרכזי הם מפלס תצורת ערבה, מפלס תצורת צחיחה או מפלס Q_1 . ההבחנה ביניהם קשה ולא תמיד ניתן להבחין בקווי המגע ביניהם ולהבדיל אותם זה מזה. גילה של תצורת ערבה כפי שתוארך בנגב המרכזי (נחל פארן) הינו פליוקן (אבני, 1997) כך שיתכן והמפלס העליון בשולי הערבה שיוחס לתצורת הערבה הינו צעיר יותר ומשתייך לתצורת צחיחה או לטרסה Q_1 . גיל תצורת צחיחה וטרסה Q_1 מוערך כפלייסטוקן עליון.

לסיכום: על סמך התאמה כללית בין המפלסים לגילים והנתונים החדשים מהמחקר הנוכחי מתקבלות המסקנות הבאות:

(1) המפלס העליון התקיים לאורך פרק זמן ארוך יחסית, בין יותר מ-0.78 מיליון שנה ל-0.2 מיליון שנה. הדבר עומד בהתאמה להפרשי הגובה הטופוגרפי הקטנים שנמצאו בין תצורת ערבה לטרוורטין המפלס העליון (תצורת צחיחה או Q_1).

(2) בערך לפני כ-0.2 מיליון שנה חלה ירידה בבסיס הניקוז של אזור הערבה הצפונית והמרכזית והתרחשה התחברות בתוך המפלס שהיה קיים. ההתחברות באזור נחל עמר-מואה מוערכת ב-40 מ', בנחל שביה ב-40 מ', בעין תמיד ב-35 מ' ובעין ערגה ב-20 מ'. בעין תמיד מתקבל קצב התחברות של 0.045 ס"מ בשנה, בעין ערגה מתקבל קצב של 0.021 ס"מ לשנה ובנחל עמר-מואה נאמד הקצב ב-0.11 ס"מ בשנה.

(3) בפרק הזמן שבין 0.2 מיליון שנים ל-60,000 שנים נשמר מפלס קבוע (Q_2) בו נוצר טרוורטין משטח הביניים.
(4) התחברות נוספת בתוך המפלסים הקודמים התרחשה מאוחר יותר. אין מדידת גיל ישירה לארוע זה, ניתן אולי לקשר אותו לירידת מפלס אגם הלשון. על סמך הנתונים הקיימים היא התרחשה בין 60,000 ל-8000 שנה.

(5) מאז לפני 8000 שנה לא ארעה התחברות נוספת, וטרוורטין הורבד על המפלס הנמוך.

9. טקטוניקה צעירה בסלעי הטרורטין

הערבה הינה מחוז פעיל טקטונית ולכן יש חשיבות למידע על קיום או אי קיום מעוותים טקטוניים בסלעי הטרורטין שגילם צעיר יחסית. המבנה הגיאולוגי של הכיפות בשולי הערבה נחקר בעבר על ידי אידלמן (1989), איל (1984) ויחיאלי (1987). מחקרים אלה העלו כי לא התקיימה פעילות טקטונית לאחר הרבדת קונגלומרט ערבה בכיפות.

הפעילות הטקטונית תידון הן לגבי קימוט והן לגבי העתקה בטרורטינים בלבד.

ק.ג.מוט: (א) סביב כיפת שביה המצויה בהמשכו של העתק עמר (סעיף של העתק ברק) קיימים הבדלי עובי ונטיות בטרורטין חצבה. הטרורטין, המכיל חלוקים, מרפד את מרכז החלק הצפוני של סינקלינת שביה אך באגף המערבי של כיפת שביה מצוי הטרורטין בגובה כ-30 מ' מעל זה שבמרכז הסינקלינה. הטרורטין מגיע לעובי של לפחות 15 מ' במרכז הסינקלינה ועוביו קטן לעבר שוליה עד 3-4 מ' (איור 5.9). מכאן שהטרורטין הורבד תוך כדי קימוט. הקימוט המשיך לאחר תום ההרבדה ואגפיו הורמו בעוד כ-30 מ' מאוחר להשקעתו. פעילות מוקדמת אף יותר על העתק ברק מצא קרץ (1997) ברמת ברק.

(ב) באזור כיפת ערגה ניתן להבחין בשתי פאזות קימוט שביניהן ארע גידוע ארוזיבי. הפאזה הראשונה החלה בסנון ונמשכה עד למיוקן, לפחות עד לאחרי הרבדת פרט משק. בשלב זה התרחש תהליך גידוע שחתך את הכיפות עד לחשיפת תצורת מישאש. עדויות לפאזות קימוט נוספת אפשר למצוא בטרורטין המראה נטיות רדיאליות ממרכז הכיפה לשוליה ובמשטח הגידוע המקומט אף הוא (איורים 5.13, 5.17).

טרורטין המפלס העליון בעין ערגה משמר כיום את שרידיו של משטח גידוע שגדע את המבנה של כיפת ערגה וכיפת רחל עד לתצורת מישאש (איור 5.13). הטרורטין מכסה באי התאמה זויתית את סלעי תצורות עירב טקיה, חברת עבדת, ואת תצורת חצבה (תמונות F-9, H-1, H-5). כתם הטרורטין הצפוני ביותר מונח על חתך קלאסטי דק גרגר של תצורת הערבה (תמונה G-8).

הנביעה בעין ערגה ארטזית (ראה פרק 7), יתכן וגידוע הכיפה וחשיפת אקויפר תצורת מישאש הם שהביאו לתחילת השקעת הטרורטין על המפלס העליון. לפיכך ניתן להגביל את גיל הגידוע על ידי גיל הטרורטין שבמפלס העליון. Livnat and Kronfeld (1985) קבעו את גיל הגיר האגמי בעין ערגה ל-300,000 שנים. כלומר גיל ארוע הגדיעה האחרון גדול מ-300 000 שנים ועל פי המדידות הפלאומגנטיות אף גדול מ-730,000 שנה אך צעיר מתצורת ערבה שאותה הוא גודע.

משטח הגידוע והטרורטין העליון יוצרים כפיפה סביב כיפת ערגה לכיוון צפון, מזרח ודרום. נטית מישור הגידוע לצפון היא 15°. עובדה זו מחיבת הרמה וקימוט לאחר או תוך כדי הרבדת משקעי המעיינות שמכסים עליו. אמנם טרורטין יכול היה לשקוע על מדרונות הכיפה בנטיה מקורית וליצור מצב שרק מדמה קימוט אך משקעי המעיינות שסמוכים לשיא הכיפה כוללים משקעי גיר ששקעו מגוף מים עומד שמרכזו היה ככל הנראה מעל שיא הכיפה (לשם הוא מתעבה, איור 5.13). גוף מים כזה לא היה יכול להתקיים בשיפוע של 15° ולכן מחויב קימוט מאוחר לטרורטין העליון או תוך כדי השקעתו. מחשוף עין יהב שמצוי על אגפה המזרחי של כיפת רחל, גם הוא מקומט, כאשר הגיר האגמי והטרורטין שבונים את מצוק עין יהב עבים במרכז ומדקקים בשוליים. אולם, האזור העבה ביותר גבוה סטרוקטורלית מהשוליים הדקים. עולה מכך שגם כיפת רחל עברה שלב של קימוט לאחר השקעת המפלס העליון. העובדה שהטרורטין העליון מכסה על מישור גידוע של התצורות עירב וטקיה לא מאפשר את קימוט משטח הגידוע לפני השקעתו כיוון שאם היה מקומט לפני השקעתו היו בודאי התצורות הרכות נסחפות.

משטחי טרורטין הביניים המצויים על קרקעית העמק הסחוף מיצגים טרורטינים המאוחרים לקימוט, לסחיפה ויצירת העמק. טרורטינים כאלה מופיעים בעמק סביב עין רחל וסביב כיפת ערגה. הטרורטינים של עין רחל נטויים מערבה אך הנטיה היא נטיה מקורית על סמך הקונגלומרט האופקי עליו הם מונחים (איור 5.15). גם טרורטין הביניים של עין ערגה הינו תת אופקי, כך שניתן לקבל מיגבלות על גיל הקימוט. גבול עליון על סמך מדידות רדיומטריות ופליאומגנטיות של הטרורטין העליון ואילו גבול תחתון על סמך גילים רדיומטריים של טרורטין הביניים. טרורטין הביניים תוארך ע"י קרונפלד וליבנת ל-111,000 שנה, ומכאן שהקימוט ארע בין 780,000 שנה ל-111,000.

העתקה:

משטחי הטרורטין מצומצמים מאד בשטחם ולכן קשה למצוא בהם עדויות להעתקה. גם במואה שם עובר העתק נחל שביה על פני השטח לא נמצאו עדויות להעתקה משני צידי ההעתק. הסברה לפיה מעיינות שולי הערבה הינם מעיינות העתק (Horowitz, 1987) אינה נתמכת ע"י תצפיות השדה ברוב המקרים. יתכן ויש תפקיד להעתקים ביצירת אפשרות לדליפות ארטזיות אל אקויפר המישאש אך הם לא משפיעים על מיקום הנביעה עצמה. רק במקום אחד בלבד מופיעות נביעות על קו העתק: בחלקה הצפוני של מואה מופיע קו צמחיה רציף המלווה לעיתים בנביעות בהמשכו של העתק נחל שביה שכיוונו מזרח מערב. ראוי לציין שהעתק זה לא פגע בטרורטין.

לסיכום: התמונה הטקטונית שמתקבלת מהטרורטינים במרחב עקב השטחים הקטנים והמרוחקים בהם הם מופיעים. אולם סמיכות מחשופי הטרורטין לכיפות מאפשרת לגלות שפעילות טקטונית ארעה (לפחות בחלק מהכיפות) לאחר הרבדת תצורת ערבה. יתכן ופעילות טקטונית זו היא חלק מהדפורמציה הטקטונית המאוחרת לתצורת ערבה שמתוארת על ידי גינת (1997) ואבני (1997). דפורמציה זו מתוארת מרצועה ברוחב של כ-80 ק"מ לאורך שולי הערבה והיא כוללת העתקים בכיוון צפון וצפון-צפון מזרח, כמו גם העתקי אשבורן ועמר. בקצהו הצפוני של העתק אשבורן מצויות כיפות ערגה ורחל ובקצהו הצפוני של העתק עמר מצויה כיפת שביה. לפיכך, יתכן שהדפורמציה הנצפית כיום בכיפת ערגה, רחל וכנראה גם שביה, היא תוצאה של פעילות על העתקים אלו וזאת מאוחר להרבדת תצורת ערבה, קרי בפליסטוקן העליון. לאור זאת ניתן לומר שפעילות טקטונית צעירה ביותר מתרחשת בערבה ובשוליה וברמזים לה ניתן לצפות גם בסלעי הטרורטין.

10. סיכום ומסקנות

טיפוסי הטרורטין

הטרורטין של מעיינות הערבה מופיע במספר פאצייסים, חלקם אוטוכתוניים וחלקם אלוכתוניים. הטיפוסיים השונים מפוזרים לאורך רצועות פאצייס המשתנות עם המרחק מהנביעות. הטרורטינים האוטוכתוניים סמוכים לאזורי הנביעות הקדומים והם כוללים טרורטין צמחים וטרורטין סטרומטולטי. טיפוסי הטרורטין האלוכתוניים כוללים טרורטין דטריטי, טרורטין אינטראקלאסטי וטרורטין חווארי והם מצויים במרחק מה מאזורי הנביעות. **טרורטין הצמחים** הינו עשיר בחללי צמחים עילאיים ומלוכד היטב. הוא בנוי ציפויי קלציט ספארי ופלמיקריט ומאפיין בעיקר אזורים מכוסים במים זורמים. לרוב מופיע בו שיכוב שמקורו במשטחי אצות.

טרורטין סטרומטולטי הינו בעל אופי למינרי המצפה בעיקר אזורים שמאופינים על ידי זרימה כמו מפלים, מדרונות או ערוצי זרימה. הוא בנוי ציפויי קלציט למינריים עבים וסטרומטוליטיים ואינו מאופיין בשיכוב.

טרורטין דטריטי הוא טרורטין שבנוי דטריטוס טרורטיני לא ממוין וחומר קלאסטי. בתוכו מופיעות בדרך כלל עדשות של טרורטין צמחים ושל קונגלומרט. הוא מופיע במורד מדרון המעין או כמילוי של קרקעית עמקים.

טרורטין אינטראקלאסטי הוא טרורטין בהיר ומלוכד היטב הבנוי בעיקר פלמיקריט ומאובני הצמחים שבו הם רק קרעי משטחי אצות או חתיכות צומח מגולגל. הוא מייצג כנראה גופי מים עומדים הסמוכים למעין.

טרורטין חווארי הוא טרורטין דק גרגר עם מעט סימני צמחיה (בעיקר שורשים) או סימני צומח שלא צופו על ידי קלציט. טרורטין זה מופיע באזורים הרחוקים והנמוכים מהנביעות. הוא מייצג כנראה גוף מים עומדים לא קבוע בגודלו, או אזורי הרטבה ואחו לח שבשולי גוף כזה.

ברוב הפאצייסים מופיעים שרידי אצות, ציאנובקטריות וטחבים. יחד עימם מופיעים גם צמחים עילאיים בעדשות או כמרכיב עיקרי. עיקר הטרורטין הוא מיקריט ומקורו בציפויים מיקריטיים של פילמנטים ציאנובקטריאליים הבונים משטחי אצות בין הצמחים העילאיים. משטחי אצות אלה מקנים לטרורטין את השיכוב. קלציט מיקרוספארי מופיע לרוב כתוצר ספאריטיזציה דיאגנטית, כצמנט או כמילוי חללים. במקומות בהם שמורים משטחי האצות ניתן לקבוע כי מנגנון שקיעתו הינו ביוגני בעיקרו. הקשר בין פלואידיים לבין פילמנטים ומשטחי אצות מעיד כי גם במקומות בהם משטחי האצות אינם שמורים, אך קיימים פלואידיים המנגנון ביוגני בעיקרו.

סטרטיגרפיה

בערבה הצפונית והמרכזית מתחלק הטרורטין לחמש יחידות עיקריות, בעלות גיל שונה.

טרורטין חצבה- הטרורטין העתיק ביותר בערבה, משתייך לתצורת חצבה.

טרורטין הערבה (מפלס עליון)- מכסה את מפלס הטרסות הגבוה שבשולי הערבה. על פי גובהו הטופוגרפי ויחסי השדה בנחל עמר, בנחל משק ובעין זך מוצע לשייכו לתצורת צחיחה.

טרורטין מואה (מפלס ביניים)- משתייך לאחת ממדרגות הסחף הפלייסטוקניות המתאימה לטרסה Q_2 (גינת, 1997 ואבני, 1997).

טרורטין האפיק (מפלס תחתון)- משתייך למילוי הערוצים ההולוקני, מפלס Q_4 (גינת, 1997 ואבני, 1997).

טרורטין הלשון- מצוי בתצורת הלשון שבערוצי נחל אמציה וסיף.

עובי חתך הטרורטין והשטח המכוסה על ידו שונים בכל אחת מחמש היחידות הנ"ל. הטרורטין העתיק ביותר הוא בעל החתך העבה ביותר ושטח הכיסוי הגדול ביותר ואילו הטרורטינים הצעירים יותר, הם בעלי עובי ומידת השתרעות הקטנים והולכים עד טרורטין האפיק שהוא הצעיר ביותר ובעל החתך והשטח הקטנים ביותר.

החלוקה לחמש היחידות מתבססת על המורפוסטרטיגרפיה של משטחי הקונגלומרטים ועל יחסי השדה שבין הטרורטינים ליחידות הבונות את חתך תצורת חצבה וחבורת ים המלח. שולי הערבה הינם אזור המצוי בהתחברות הדרגתית לפחות מאז תום השקעת תצורת ערבה. התחברות הדרגתית זו באה לידי ביטוי בטרסות נחל נטושות המתקבצות למספר מפלסים. ההתחברות הולכת ומעמיקה אל מתחת למפלס העמק הראשוני כך שככל שמשטח הטרסה נמוך כך גילו צעיר יותר. היוצרות מפלסים נמוכים זה מזה יכולה להיגרם על ידי מספר גורמים ובהם השתפלות, הרמה טקטונית, או שינוי אקלימי.

טרורטין המפלס התחתון (Q_4) הינו הולוקני (כ-8000 שנה), טרורטין משטח הביניים (Q_2) תוארך ל-100,000 עד

180,000 שנה ואילו טרוורטין המפלס העליון התקיים על סמך קורלציה עם מחקרים קודמים עד לפני 200,000 (ואף מעבר לגבול השיטה). ממצאים ראשוניים של מדידות פליאומגנטיות בחתך של טרוורטין כיפת ערגה מצביעים על גיל מינימום של 780,000 שנה לחלק התחתון של חתך המפלס העליון (היפוך מאטויאמה-ברונס). למרות שהדוגמאות שנבדקו רדיומטרית אינן אלה שנבדקו לפלאומגנטיות נראה שקיימת התאמה כללית. על סמך כל הנאמר מוצע שהמפלס העליון קורלטיבי לתצורת צחיחה שתוארה על ידי גינת (1997) בנחל ציחור כ-50 ק"מ מדרום לאזור המחקר. תצורת צחיחה כמו טרוורטין המפלס העליון מונחת אף היא על תצורת ערבה ומקבצת משקעים אגמיים, פלוביאטילים ופלאוסולים קלציים. משקעים אלו מייצגים אקלים לח יותר מזה הקיים היום. ביחד עם טרוורטין המפלס העליון הם מעידים על תקופה בה התקיים אקלים גשום יחסית באזור נרחב בנגב. אקלים זה הלך ונעשה יבש עם הזמן (Q_4, Q_2) לפחות באזור המחקר עד לאקלים הנוכחי.

כימיה

במהלך המחקר נבדקו התכונות הפטרוגרפיות, המינרלוגיות, הכימיות והאיזוטופיות ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) של סלעי הטרורטין ומי המעיינות. הטרורטינים בנויים בעיקר מקלציט דל מגנזיום וחלקם מכיל גם גבס וסולפטים של Sr ו-Mg. תהליך שקיעת הטרורטין ממי מעיינות הינו תוצאה של ירידת הלחץ החלקי של CO_2 במים, עם שחרור לאטמוספירה כאשר המים פורצים ממבוע המעין. שיחורו ה- CO_2 מהמים גורם לעלית ה-pH ועלית דרגת הרוויה ביחס ל- CaCO_3 .

תהליכים כמו חימום, עירבול, פוטוסינתזה ואידוי מעודדים גם הם את איבוד ה- CO_2 ואת עלית דרגת הרוויה. מציאות גבס, צלסטין וריכוזים גבוהים של Sr, Mg ו-Na שלא יכולים להיות מוסברים רק על ידי היותם יסודות קורט בקלציט מצביעים על קיומם של מינרלים אבפוריטים. דבר זה מעיד על מקומו של מגנזיום אבפוריטי בהשקעת הטרורטין בערבה.

קיים קשר בין ריכוזי Sr, Mg ו-Na לבין יחידות הטרורטין השונות, הריכוזים הגבוהים ביותר נמצאו בטרורטין האפיק (Q_4) והנמוכים ביותר בטרורטין הערבה (המפלס העליון) וטרורטין חצבה. מגמה זו יכולה להיות מוסברת על ידי שינוי בהרכב המים עם הזמן או לחילופין בהתגברות המנגנון האבפוריטי ועליה בקצב האידוי. האפשרות שהשינוי בהרכב הכימי של הטרורטינים קשור בשינוי הרכב מים נסתרת כיוון שהיחס $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ זהה בטרורטינים העתיקים, הצעירים ובמי המעיינות הנוכחיים.

לעומת זאת ההבדלים בריכוזים מוסברים בהרכב המינרלוגי השונה של הטרורטין בין היחידות השונות. מתוך האנליזות הכימיות והשקפים של הטרורטינים הצעירים יחסית (Q_2 ו- Q_4) עולה שהם מכילים יותר של גבס, צלסטין וכנראה סולפטים של Mg.

ההבדל בהופעת השדה בין הטרורטין הצעיר לטרורטינים העתיקים מצביע על כך שהמערכת הצעירה היתה יותר סגורה מן העתיקה כנראה בגלל שפיעה מוגבלת ומועטה. הטרורטין הצעיר מופיע בתוך ערוצים צרים ובעובי דק מאוד כציפוי של קרקעית הערוץ, מפלים קטנים וצמחיה עשבונית נמוכה. הופעה זו טיפוסית לזרימת מים רדודה ואיטית המאפשרת אידוי חלק ניכר מן המים תוך כדי הזרימה ולכן מערכת זו סגורה יותר. לעומת זאת הטרורטינים העתיקים מעידים על שפיעה גבוהה יותר המתבטאת בעובי ניכר של הטרורטין, נוכחות מאובני עצים, השתרעות על שטחים נרחבים בהרבה וכמו כן הם מכילים צמחים גבוהים המוקפים "שרוולים" מאורכים של קלציט קונצנטרי. אלה היו חיבים לגדול בגופי מים עמוקים יותר וברי קימא, שיחס הכניסה/יציאה של המים לתוכם היה יותר גבוה. במילים אחרות הטרורטינים העתיקים מציינים מערכת עשירה יותר במים ולכן יותר פתוחה.

הירידה בשפיעה משתקפת גם מהרכב הכימי של הטרורטין כפי שהוא מתבטא בריכוזי Sr, Mg ו-Na. ירידה בשפיעה תגרום לירידה בשטף המים ולעליה בכמות המים המתאדה באופן יחסי לכמות המים במעין. ואכן בטרורטינים הצעירים עולה ריכוז ה- SO_4 ועימו ריכוזי Sr, Mg ו-Na שמעידים על שקיעה של מינרלים אבפוריטיים כמו גבס, צלסטין וכנראה גם מגנזיום-סולפטים. מינרלוגיה מיוחדת זאת אפשרית הודות להרכב המים המגנזיום סולפטיים, לאקלים היבש ולשפיעה הנמוכה.

בהסתמך על מקדמי חלוקה של Sr בקלציט (0.054-0.12) חושבו יחסי Sr/Ca במים שמהם שקעו הטרורטינים והגיר האגמי. היחס Sr/Ca במי המעיינות הנוכחיים גבוה מזה המחושב במים מהם שקעו הטרורטין של המפלס העליון והגיר האגמי (המקביל לו במפלס). דבר זה נגרם כיום כתוצאה מאידוי ושקיעת גבס מן המים בגלל שפיעה

נמוכה. בעבר כאשר השפיעה היתה גבוהה יותר, סולקו באידוי מספיק מים כדי להביא לשקיעת גבס ולעלית ה-Sr/Ca. לסיכום, השינויים במינרלוגיה, בעובי ובשטח הטרורוטין מצביעים על ירידה בשפיעת מעיינות הערבה עם הזמן.

פלאוהידרולוגיה

כפי שנאמר, חתך הטרורוטינים המתואר אינו רציף בזמן. אי רציפות זו עשויה להיות תוצאה של מספר גורמים העלולים להשפיע על נביעת המעיינות והשקעת הטרורוטין. בין גורמים אלה עומדים שינויים אקלימיים ופעילות טקטונית.

הטרורוטין של שולי הערבה שונה מטרורוטינים אחרים במרחב בהיותו קשור לאקויפר המישאש. לעומת הטרורוטין של מצוק ההעתקים קשור לאקויפר חבורת יהודה וזה של מצוק הצינים לאקויפר חבורת עבדת. אקויפר מישאש נוחת מזרחה אל מתחת לקרקעית הערבה והופך לאקויפר כלוא בין תצורת מנוחה הקרטונית לתצורות עירב וטקיה הקירטונית-חוואריות. באזור בו אקויפר המישאש כלוא ניתן לקבל מעיינות רק במקומות שם הוא נחשף לפני השטח, כלומר כיפות סטרוקטורליות. מיקום הכיפות קובע את מיקום הנביעות והטרורוטינים. הטרורוטינים והמעיינות הפעילים מופיעים בצד מחשופים של תצורת מישאש. ההתפרשות הנרחבת של הנביעות והטרורוטין סביב כיפות בהם חשופה תצורת מישאש מעידה על כך שחלק מהמעיינות ובעיקר עין ערגה הינם מעיינות ארטזיים הנובעים מאקויפר מישאש. גם הלחצים שנמדדו בקידוחים מעידים על היותם ארטזיים. המבנה הסטרוקטורלי של תצורת מישאש בנגב המזרחי קובע את כיווני הזרימה באקויפר ואלו מתנקזים לעבר הערבה הצפונית-מרכזית כיוון שרק שם נוצר מרזב סטרוקטורלי המשמש לניקוז מי האקויפר אל הערבה. לכן בשולי הערבה שם קיימות כיפות מצד אחד ואקויפר מישאש הופך כלוא מצד שני נוצר לחץ ארטזי ומתאפשרת עלית מים בכיפות ופריצת מעיינות.

מוצע שמעיינות הערבה החלו לפעול לאחר ארוע ארוזיבי שהסיר מעל ראשי הכיפות את היחידות האטומות הכולאות את האקויפר, תצורות עירב וטקיה. עם ההתחזרות וירידת פני הנוף בערבה נדדו המעיינות לאגפי הכיפות או לכיפות נמוכות יותר שהתגלו.

טקטוניה

התמונה הטקטונית שמתקבלת מהטרורוטינים מוגבלת ביותר במרחב עקב השטחים הקטנים והמרוחקים בהם הם מופיעים. אך הקשר ההדוק שלהם והסמיכות שלהם לכיפות מאפשרת לגלות שפעילות טקטונית ארעה לפחות בחלק מהכיפות לאחר הרבדת תצורת ערבה. בכיפת ערגה מקומט טרוורוטין המפלס העליון יחד עם מישור הגידוע שאותו הוא מכסה ואילו טרוורוטין מפלס הביניים כנראה לא מקומט כלל. קימוט זה חייב היה לפעול לאחר הרבדת תצורת ערבה כיוון שמישור הגידוע הנזכר גודע גם את תצורת ערבה. מצד שני ההעדר תופעות העתקה בטרורוטין מעיד יחד עם היציבות בהרכב מי המעיינות על יציבות טקטונית של שולי הערבה.

היסטוריה גיאולוגית

השלב העיקריים בהיסטוריה של הטרורוטין והמעיינות בערבה:

- (1) הטרורוטין הקדום ביותר באזור הוא טרוורוטין חצבה ששקע באזור צופר בתקופת המיוקן. הוא שקע בסביבה פלוביאלית עשירה בפלגי מים ועצים תוך כדי השתפלות סינקלינת שביה.
- (2) שלב ארוזיבי עתיק מ-0.78 מיליון שנה חשף בשולי הערבה את תצורת מישאש בשיאי כיפות סטרוקטורליות. חשיפה זו אפשרה את פריצת המעיינות מאקויפר מישאש בראשי ובאגפי הכיפות וכיסוי תצורות עירב וטקיה ותצורות צעירות יותר בגופי מים בהם הורבד גיר אגמי או בטרורוטין. טרוורוטין הערבה ומשקעים אגמיים שקעו בנחל עמר, נחל שביה, עין יהב, כיפת ערגה, נחל משק וסינקלינת תמיד. הטרורוטין שקע בסביבה מדברית עשירה בצומח הלופילי הכולל דקלים ובמקומות בתנאי מלחה.
- (3) שלב של קימוט בכיפת ערגה הביא כנראה את גוף המים שהשקיע גיר אגמי בקרבת שיא המבנה לקיצו. המעיינות שהמשיכו לנבוע השקיעו טרוורוטין וכיסו את הגיר ואת אגפי הקמר. טרוורוטין זה שקע עד לפני כ-0.2 מיליון שנה.
- (4) שלב ארוזיבי שגילו ככל הנראה 0.2 מיליון שנה גרם להתחזרות שיצרה עמקים בעיקר בסלעים הרכים של

תצורות עירב וטקיה. משטחי הטרורטין נשאר כמשארים מוגבהים מעל הסלעים הרכים.

(5) על המפלס הנמוך יותר שנוצר בעמקים ובבקעות סביב לגלעיני הכיפות הורבד טרוורטין מואה (מפלס הביניים). טרוורטין זה הורבד בין 0.2 מיליון ל-0.06 מיליון שנים. המעיינות נבעו בסביבה מדברית ויצרו סביבם תנאי מלחה בם שקע טרוורטין אלוכתומי בעיקרו. עליה בשפיעה כנראה גרמה לשינוי באופי ההשקעה ולהרבדת משטחי טרוורטין אוטוכתומי.

(6) התחתרות למפלס נמוך עוד יותר, לעיתים לתוך הטרורטינים העתיקים יותר, התרחשה לפני יותר מ-8000 שנה.

(7) טרוורטין האפיק (משטח תחתון) הורבד בקרקעית האפיקים הסוב רצנטיים וגילו הולוקן. המעיינות נבעו בספיקה נמוכה בסביבה מדברית ויצרו סביבם תנאי מלחה קיצוניים.

(8) כיום המעיינות אינם נובעים בצורה סדירה ואינם משקיעים כמעט טרוורטין.

ביבליוגרפיה

- אבני, י., 1997. ההתפתחות הגיאולוגית של הנגב המרכזי והדרומי כעדות להתפתחות שולי טרנספורם ים המלח בסוף הנאוגן וברביעון. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 171 עמ'.
- אמית, ר., 1990. הגיאומורפולוגיה של הערבה הדרומית. החברה הגיאולוגית הישראלית. הכנס השנתי. עמ' 22.
- אידלמן, ע., ברטוב, י., 1988. הר גבים ומזרח שבר הרמון. החברה הגיאולוגית הישראלית. הכנס השנתי. עמ' 47.
- אידלמן, ע., 1979. הגיאולוגיה של שולי הערבה באזור עין יהב ורמת צופר. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 92 עמ'.
- אייל, ע., 1984. הגיאולוגיה של הערבה ושוליה המערביים באזור עין יהב-חצבה. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 61 עמ'.
- גינת, ח., 1997. הפלאוגיאוגרפיה ושלבי התפתחות הנוף באגני הנחלים חיון וציחור. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 206 עמ'.
- בונה, י., 1975. כיצד משפיעים הגשמים על שפיעת המעינות בארצנו. טבע וארץ. י"ז עמ' 165-170.
- בן-תור, י., ופרומן, ע., 1954. המפה הגיאולוגית של ישראל, 1:100,000. גיליון 21: הר עמר. המכון הגיאולוגי של ישראל.
- בן-תור, י., ופרומן, ע., 1957. המפה הגיאולוגית של ישראל, 1:100,000. גיליון 19: ערבה. המכון הגיאולוגי של ישראל.
- ברטוב, י., 1994. הגיאולוגיה של הערבה, דברי הסבר למפה הגיאולוגית. המכון הגיאולוגי דו"ח GSI/4/94.
- ברטוב, י., גרפונקל, צ., אבני, י., קלבו, ר., ורוטשטיין, י., 1997. גרבן כרכום - תצפיות חדשות. החברה הגיאולוגית הישראלית. הכנס השנתי. עמ' 14.
- היימן, א., 1985. הגיאולוגיה של רמת הבניאס וצפון עמק החולה תוך דגש למשקעי טרוורטין. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 155 עמ'.
- חרות, ב., 1992. ההרכב הכימי ומקורות המלחים המומסים במי הגשם בישראל. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 144 עמ'.
- יחיאלי, י., 1987. הגיאולוגיה של צפון בקע הערבה ואנטיקלינת מחמל, אזור חצבה. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 94 עמ'.
- יחיאלי, י., ביין, ע. והליץ, ל., 1996. הגיאוכימיה של מי התהום בערבה המרכזית. המכון הגיאולוגי הישראלי, דו"ח GSI/30/96. 30 עמ'.
- מור, א., 1987. הגיאולוגיה של מדבר יהודה, אזור נחל דרגה. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 112 עמ'.
- סנדלר, ע., 1981. גיאוכימיה של מי תהום מאקויפרים בזלתיים בגליל התחתון ובגולן. המכון הגיאולוגי הישראלי, ירושלים. דו"ח הידרו/81/2. 91 עמ'.
- סקל, ע., 1967. הגיאולוגיה של רכס מנוחה. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 96 עמ'.
- קלבו, ר., פריזלנדר, א. וברטוב, י., 1997. חלוקה סטריטיגרפית חדשה לתצורת חצבה בנגב ובערבה. כנס החברה הגיאולוגית הישראלית. עמ' 78.
- קרונפלד, י., ליבנת, א., שפירו, ב., ווינשטיין-עברון, מ., 1996. הטרורטינים בערבה ואקלים הפלייסטוקן. כנס החברה הגיאולוגית הישראלית. עמ' 81.
- קרץ, צ., 1997. הגיאולוגיה של אזור צפון פארן. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 98 עמ'.
- ראב, מ., 1998. מקור האבפוריטים בבקעת הירדן-ים המלח לאור התפתחות תמלחות ואבפוריטים באיוד מי ים. עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 114 עמ'.
- רוזנטל, י., 1995. גיאואידרולוגיה ואקולוגיה של מעיינות הערבה. הוצאת רשות שמורות הטבע. ירושלים.
- רז, א., 1983. הגיאולוגיה של מדבר יהודה, אזור עין גדי. עבודת מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים. 104 עמ'.

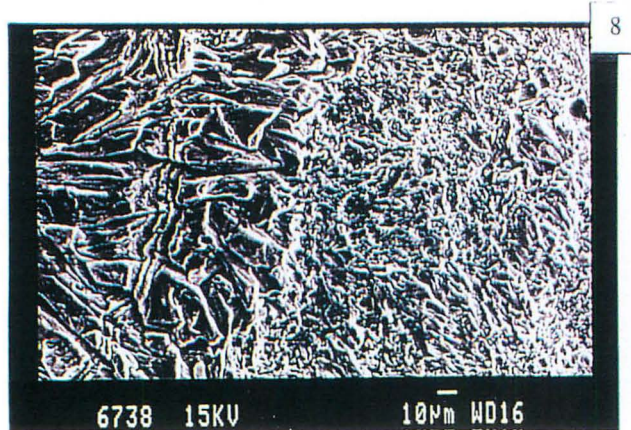
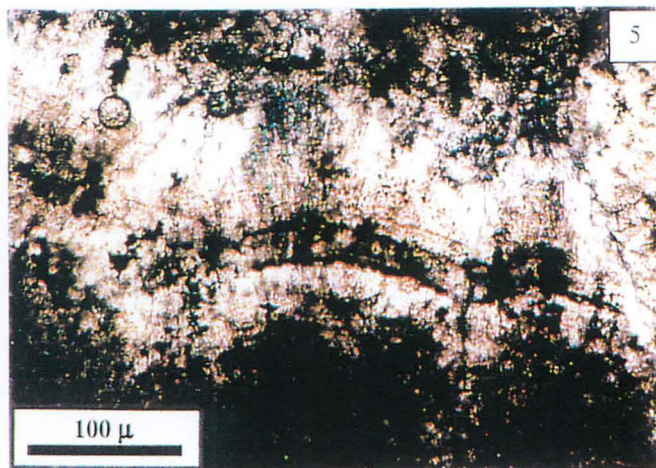
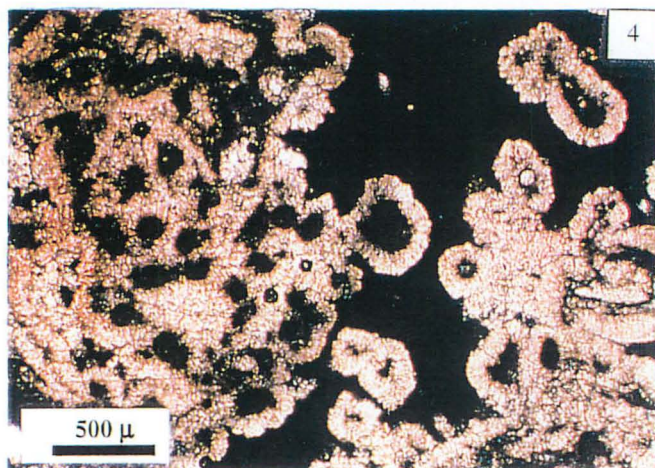
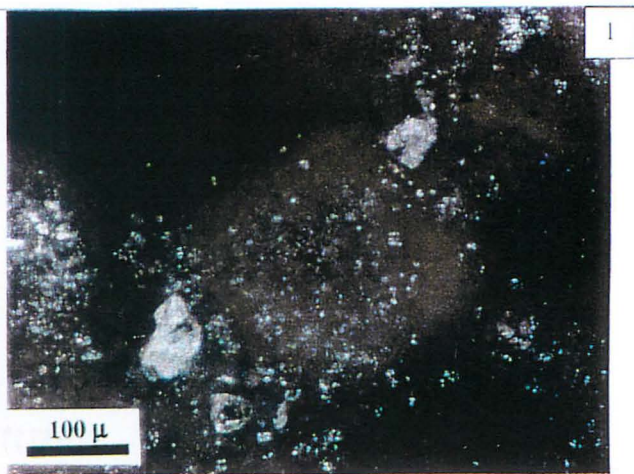
- Amundson, R., and Kelly, E., 1991. The chemistry and mineralogy of a CO₂ rich travertine depositing spring in the California Coast Range. *Sedimentology*, 38 (1): 107-126.
- Avni, Y., Garfunkel, Z., Bartov, Y. and Ginat, H., 1994. Pleistocene fault system in the central and southern Negev and its implications for the tectonic and geomorphological history of the Arava rift margin. *Geol. Surv. Isr., Current Research*, 9: 51-58.
- Benson, L. and Peterman, Z., 1996. Carbonate deposition, Pyramid Lake subbasin, Nevada, The use of Sr to values in carbonate deposits (tufas) to determine the hydrologic state of paleolake systems. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 119 (3-4): 201-213.
- Bradley, S. S. and Malcolm, S. P., 1996. Age and duration of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal from ⁴⁰Ar/³⁹Ar incremental heating analyses of lava. *E. P. S. L.*, 139: 47-61.
- Braithwaite, C. J. R., 1979. Crystal textures of recent fluvial pisolites and laminated crystalline crusts in Dyfed, South Wales. *J. Sed. Pet.*, 49: 181-194.
- Buccino, G., D'Argenio, B., Ferreri, V., Brancaccio, L., Ferreri, M., Panichi, C. and Stanzione, D., 1978. The travertines in the lower Tanagro Valley Campania-geomorphological, sedimentological and geochemical study. *Soc. Geol. Ital. Bull.*, 97: 617-646.
- Buchbinder, B. and Begin, Z. B., 1974. Pleistocene algal tufa of lake Lisan, Dead Sea area, Israel, *Isr. J. Earth Sci.*, 23: 131-138.
- Chafetz, H., and Folk, R., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *J. Sed. Pet.*, 54: 289-316.
- Chafetz, H., Rushand, P. and Utech, N., 1991. Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates; and example from an active travertine system. *Sedimentology*, 38: 107-126.
- Emeis, K. C., Richnow, H. H. and Kempe, S., 1987. Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology*, 34: 595-609.
- Faure G., 1982. The Marine-Strontium Geochronometer, In: G.S., Odin, ed., *Numerical Dating in Stratigraph.*, 1: 73-79.
- Ford, T. D. and Pedley, H. M., 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, 41: 117-175.
- Galay, A., 1983. *Geology and hydrology of the Arava Valley*, Tahal Consulting Engineers LTD, Tel Aviv.
- Gat, I. R. and Galay, A., 1982. Groundwater of the 'Arava Valley': An isotopic study of their origin and interrelationships. *J. Hydrology*, 31: 25-38.
- Gill, D., 1965. Petrographic study of some carbonate rocks from Jurassic outcrops in Makhtesh

- Qatan, southern Israel. *Isr. J. Earth Sci.*, 14: 122-138.
- Ginat, H. and Avni, Y., 1994. The Arava Conglomerate: A Pliocene valley deposit crossing the Dead Sea Rift. *Geol. Surv. Isr., Current Research*, 9: 59-62.
- Ginat, H., Zilberman, E. and Rosenfeld, A., 1996. New Finding of early Pleistocene lake deposits in Nahal Zihor, Southern Negev. *Geol. Surv. Isr., Current Research*, 10: 55-61.
- Guo, L. and Riding, R., 1992. Microbial micritic carbonates in uppermost Permian reefs, Sichuan basin, southern China: some similarities with Recent travertines. *Sedimentology*, 39: 37-53.
- Guo, L. and Riding, R., 1994. Origin and diagenesis of Quaternary travertine shrub fabrics, Rapolano Terme, central Italy. *Sedimentology*, 41: 499-520.
- Heimann, A. and Sass, E., 1989. Travertines in the northern Hula Valley, Israel. *Sedimentology*, 36: 95-108.
- Hoffer-French, K. J. and Herman, J. S., 1988. Evaluation of Hydrological and biological influences on CO₂ fluxes from a karst stream. *J. Hydrology*, 108: 189-212.
- Horowitz, A., 1987. Travertines of arid regions, oxygen isotope stages, and the late Quaternary climates of Israel. *Quaternary Res.*, 27: 103-105.
- Irion, G. and Muller, G., 1968. Mineralogy, petrology and chemical composition of some calcareous tufa from the Schwabische Alb, Germany. In: G. Muller and G.M. Friedmann (Editors), *Recent Developments of Carbonate Sedimentology in Central Europe*. Springer, Berlin, pp. 157-171.
- Issar, A., and Kafri, U., 1972. Neogene and pleistocene geology of western Galilee, coastal plain. *Geol. Surv. Isr. Bull.*, 53.
- Katz, A., Sass, E., Starinsky, A., and Holland, H. D., 1972. Strontium behavior in the aragonite-calcite transformation: an experimental study at 40-98°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36: 481-496.
- Kazmierczak, J. and Kempe, S., 1990. Modern cyanobacterial analogs of Paleozoic stromatoporoids. *Science*, 250: 1244-1248.
- Kinsman, D. J. J., 1969. Interpretation of Sr⁺² concentration in carbonate minerals and rocks. *J. Sed. Pet.*, 39: 486-508.
- Kronfeld, J. and Livnat, A., 1987. U-series dating of rift valley travertines and lacustrine deposits. Tel Aviv Univ., Ministry of Energy and Infrastructure, pp. 84.
- Kronfeld, J., Vogel, J. C., Rosenthal, E. and Weinstein-Evron, M., 1988. Age and paleoclimatic implication of the Bet Shean Travertines. *Quaternary Res.*, 30: 298-303.
- Kronfeld, J., Livnat, A., Spiro, B. and Weinstein-Evron, M., 1996. Arava Valley travertines and

- pleistocene paleoclimates. Israel Geological Society- annual meeting. pp. 54.
- Krumbein, W. E., 1979. Photolithographic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiology-Journal*, 1: 139-203.
- Livnat, A. and Kronfeld, J., 1985. Paleoclimatic implication of U-series dates for lake sediments and travertins in the Arava rift valley, Israel. *Quaternary Res.*, 24: 164-172.
- Livnat, A. and Kronfeld, J., 1987. Reply to comment on. Travertines of arid regions, oxygen isotope stages, and late Quaternary climates of Israel by A. Horowitz. *Quaternary Res.*, 27: 106-107.
- Livnat, A. and Kronfeld, J., 1990. Pleistocene lakes in the Arava rift of Israel (Sayif formation): facies and paleoenvironmental setting. *J. of African Earth Sci.*, 10 (3): 409-420.
- Lorah, M., and Herman, J., 1988. The chemical evolution of a travertine-depositing stream; geochemical processes and mass transfer reactions. *Water Resources Research*, 24 (9): 1541-1552.
- Love, K., and Chafetz, H., 1988. Diagenesis of laminated travertine crusts, Arbuckle Mountains, Oklahoma. *J. Sed. Pet.*, 58: 441-445.
- McIntire, W, L., 1963. Trace element partition coefficients-a review of theory and application to geology. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27; 1209-1264
- Nickel, E., 1983. Environmental significance of freshwater oncoids, Eocene Guarga formation Southern Pyrenees, Spain. In: Peryt Tadeusz M. (Editor), *Coated grains*. Springer-Verlag, Berlin, 308-329
- Ordonez, S. and Garcia Del Cura, M. A., 1983. Recent and Tertiary fluvial carbonates in central Spain. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment.*, 6: 485-497.
- Pedley, H. M., 1990. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sediment. Geol.*, 68:143-154.
- Pentecost, A., 1994. Formation of laminate Travertine at Bagno Vignone, Italy. *Geomicrobiology-Journal*, 12: 239-251.
- Pentecost, A. and Viles, H., 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Geogr. Phys. Quatenaire*, 48: 305-314.
- Schafer, A. and Stapf, K. R. G., 1978. Permian Saar-Nahe basin and recent lake constance (Germany): two environments of lacustrine algal carbonates. *Spec. Publs. Int. Ass. Sediment*, 2: 83-107.
- Schwarcz, H. P., Blackwell, B., Goldberg, P. and Marks, A. E., 1979. Uranium series dating of

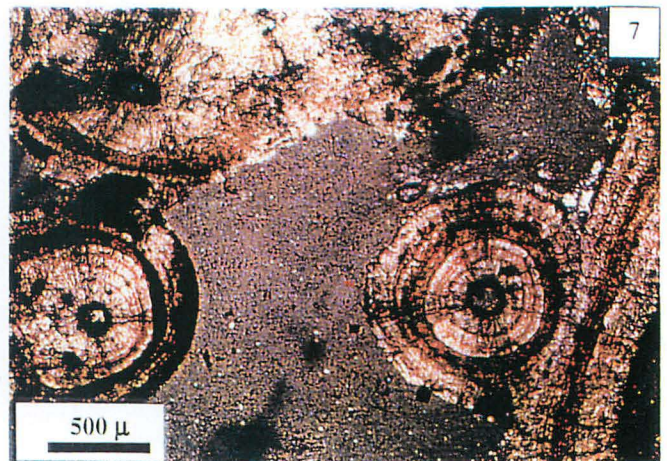
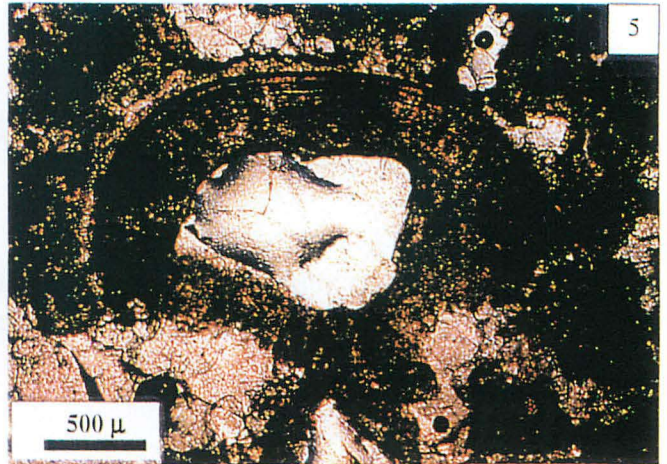
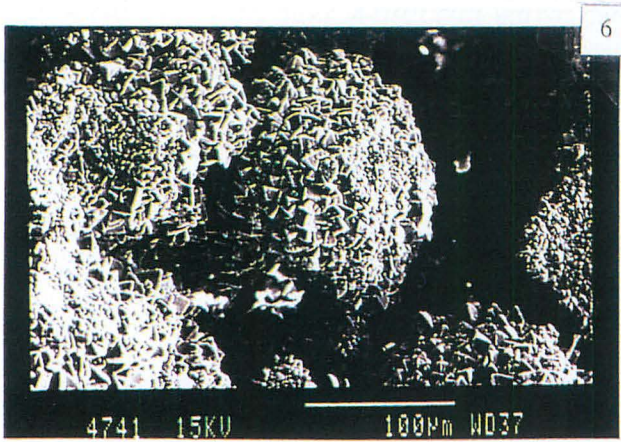
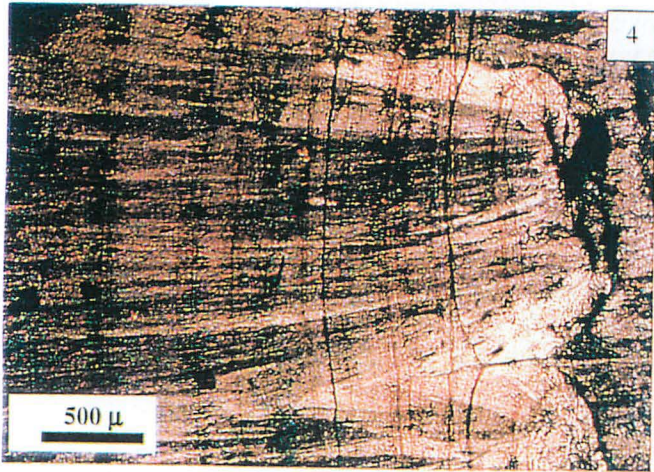
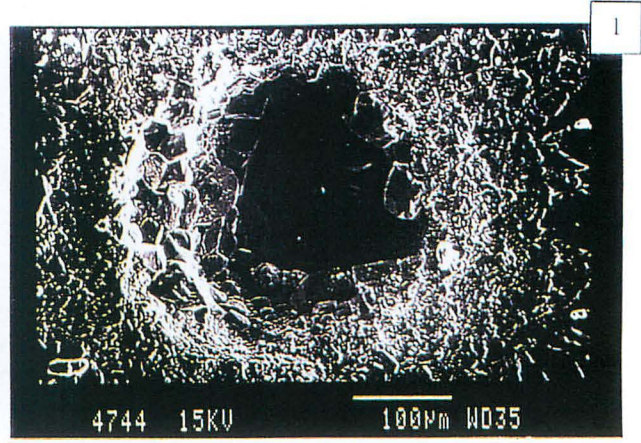
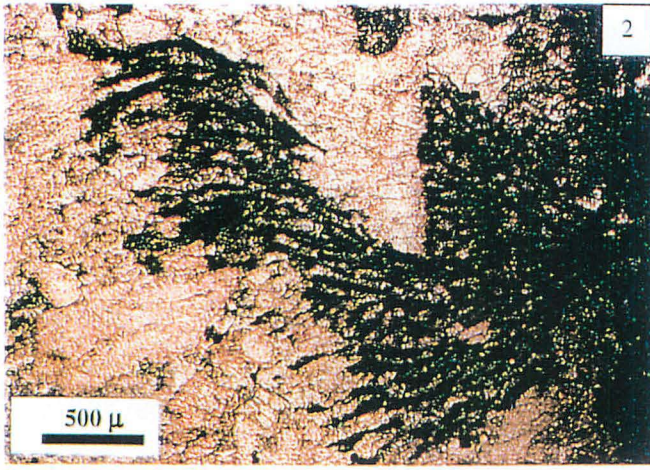
- travertine from archaeological sites, Nahal Zin, Israel. *Nature*, 277: 558-560.
- Smoot, J. P., 1978. Origin of the carbonate sediments in the Wilkins Peak member of the lacustrine Green River formation (Eocene), Wyoming, U.S.A.. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment*, 2: 109-127.
- Sneh, A., 1972. The geology of the Hazeva basin. *Geol. Surv. Isr. Rep. OD/4/67*.
- Sneh, A., 1981. The Hazeva Formation in the northern Arava, Israel. *Isr. J. Earth Sci*, 30: 81-92.
- Sneh, A., 1982. Quaternary of the northwestern Arava, Israel. *Isr. J. Earth Sci*, 31: 9-16.
- Souli'e-Marsche, I., 1993. Diversity of Quarternary aquatic environments in NE Africa shown by fossil Charophytes. "Geoscientific Res. in North Eastern Africa". ed: Thorweihe and Schandelmeier. Balkema, Riotterdam.
- Starinsky, A., Bielsky, M., Ecker, A. and Steinitz, G., 1983. Tracing the origin of salts in groundwater by Sr isotopic composition. *Isotop Geoscience*, 1: 257-267.
- Thompson, J., and Ferris, F., 1990. Cyanobacterial precipitation of Gypsum, Calcite, and Magnesite from natural alkaline lake water. *Geology*, 18: 995-998.
- Violante, C., Ferreri, V., D'Argenio, B. and Golubic, S., 1994. Quaternary travertines at Rocchetta a Volturno (Isernia, Central Italy): Facies analysis and sedimentary model of an organogenic system. In *Field Trip A1 Guidebook for the 15th International Association of Sedimentology Regional Meeting, Ischia, Italy*, pp. 3-23.
- Weinstein-Evron, M., 1987. Palynology of Pleistocene travertines from the Arava Valley, Israel. *Quaternary Res.*, 27: 82-88.
- Yechieli, Y., Starinsky, A. and Rosenthal, E., 1992. Evolution of brackish groundwater in a typical arid region: northern Arava Rift Valley, southern Israel. *Applied Geochemistry*, 7: 361-374.
- Yechieli, Y., Elron, E., Sneh, A., 1994. The geological map of the Israel, 1:50,000. Sheet 19-IV: Neot Hakikar, *Geol. Surv. Isr.*.
- Zamarreno, I., Anadon, P. and Utrilla, R., 1997. Sedimentology and isotopic composition of Upper Paleocene to Eocene non -marine stromatolites, eastern Ebro Basin, NE Spain. *Sedimentology*, 44: 159-176.

לוחות, תמונות ונספח



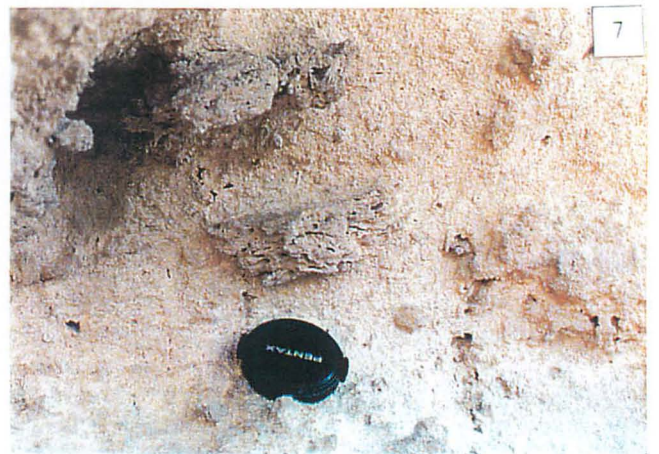
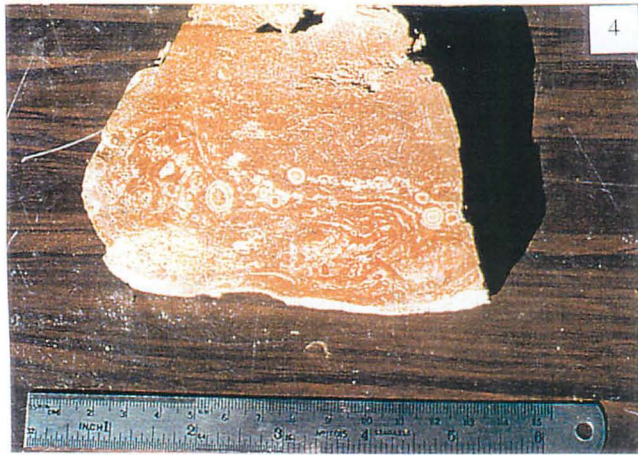
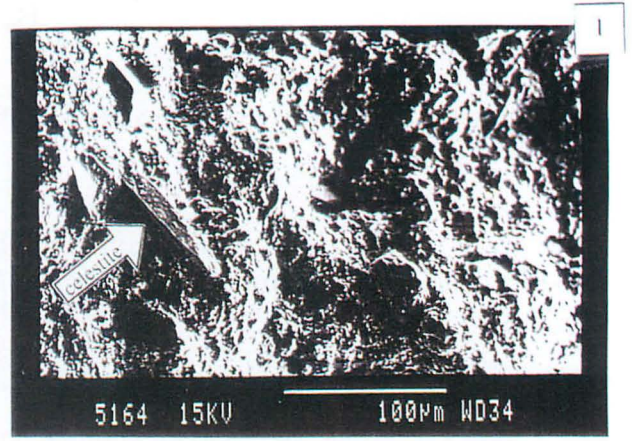
לוח A

- 1) צופר, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. פלואיד שמרכזו בנוי פילמנטים מיקריטיים בתוך ספאר שקוף, מופעו אורירי, הפילמנטים בולטים מפניו ולכן הגבול בינו לספאר דיפוזיבי. (לטש LE-302a)
- 2) נחל חצבה, מפלס עליון, טרוורטין צמחים. ציפויי ספאר ובהם פלואידים מוקפים הילת מיקרוספאר עכור, הציפויים המיקריטיים בנויים פלואידים קטנים, בחלק העליון ציפויים למינריים גליים של משטחי אצות. בחלק התחתון ניתן לראות הילות מיקרוספאר א-סימטריות המעידות על יחסי גידול בו זמניים של הילת פלואיד וציפוי מיקרוספארי. (שקף LE-52A)
- 3) צופר, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. פילמנטים מצופים מיקריט צפים בספאר. בחלק התחתון הפילמנטים צופים ויוצרים אזור מיקריטי, במעבר לספאר הם יוצרים אזור מעבר עכור. בחלק העליון השמאלי מופיעים פלואידים כעננים עכורים. הפלואידים מופיעים בקצוות הפילמנטים. (לטש LE-302)
- 4) מואה, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. פלואידים בעלי הילות מיקרוספאר המתלכדות למסה מיקרוספארית, לצידם חלל מלא בסילט קרבונטי הומוגני. (שקף LE-79)
- 5) נחל עמר, מפלס עליון, טרוורטין צמחים. ציפוי מיקרוספארי מצפה פלמיקריט. בתוכו מופיעים שרידי למינציה הבנויים שכבות של פלואידים קטנים. בחלק השמאלי הלמינציה נפגעה על ידי ספאריטיזציה. (שקף LE-71)
- 6) נחל חצבה, מפלס עליון, טרוורטין צמחים. חילופים של מיקריט וציפויים ספאריים סוגרים על חלל. פלואידים בעלי הילות ספאר א-סימטריות צמודים לציפויים (שקף LE-52B)
- 7) צופר, משטח ביניים, טרוורטין צמחים. פילמנטים במשטח אצות, ניתן להבחין שמרכז הפילמנטים עשוי קלציט, חלל מצוי בין מרכז הפילמנט לציפוי הפילמנט בחלק מהפילמנטים מופיע נקב מרכזי לאורך מרכז הפילמנט. (לטש LE-302a)
- 8) צופר, משטח ביניים, טרוורטין צמחים. מגע בין אזור שמור של פילמנטים (מימין) לאזור ספארי (משמאל). הספאר מכיל גם הוא פילמנטים וחזית הגידול שלו פונה אל עבר הפילמנטים. (דוגמא LE-302)



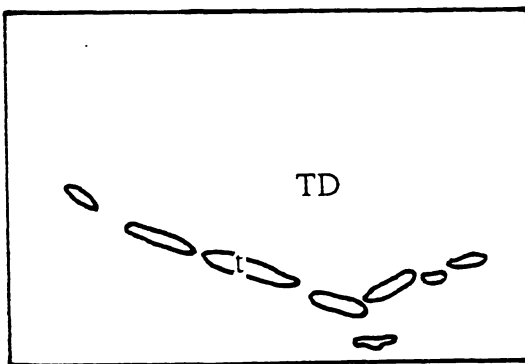
לוח B

- 1) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין סטרומטוליטי. נבירה המיוחסת לתולעים בתוך משטחי אצות. את שולי הנבירה מצפה קלציט ספארי. (דוגמא LE-A)
- 2) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין סטרומטוליטי. "שיח" של ציאנובקטריות (*Phormidium-Calothrix/Dichothrix*?) מופיע בתוך סבך של פילמנטים דקים של *Schizothrix* (?) (לא נראים בהגדלה זו) השיח מעוכל בחלק העליון ע"י גבישי ספאר גסים. בתוך השיח מופיעים גבישי בצר אדיומורפיים. (שקף LE-33B)
- 3) עין יהב, מפלס עליון, טרוורטין אינטראקלאסטי. אינטרקלאסט של טרוורטין בנוי ספאר, עטוף מיקריט צהבהב עם גרגרי קוורץ מזוותים. (שקף LE-3A)
- 4) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין סטרומטוליטי. למינציה מתעקלת סביב גוף מיקריטי. גבישי ספאר גסים חוצים את הלמינציה. הלמינציה עשויה מצביעה עכורה ומאינקלוזיות. (שקף LE-54A) מקטבים צלובים.
- 5) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין אונקואידים. פיזוליט בעל מרכז של גרגר קוורץ קלאסטי. הלמינציה מופרעת ע"י מיקרוספאר ובחלק התחתון גבישי קלציט ספארי מעכלים את מעטפת המיקריט. (שקף LE-41)
- 6) עין זך, מפלס עליון טרוורטין צמחים. פלואידים מצופים קלציט ספארי. במקומות בהם שבור הציפוי מתגלה מיקריט. (דוגמא LE-8)
- 7) עין רחל, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. ציפויי מיקרוספאר עכור למינריים מקיפים ציפוי מיקריטי סביב חלל של צמח. (שקף LR-194) מקטבים צלובים.
- 8) עין יהב, מפלס עליון, טרוורטין אינטראקלאסטי. אינטרקלאסט מיקריטי מצופה ציפוי מיקרוספאר גלי ולמינרי. באזורים הבולטים הציפוי עבה יותר, כנראה עקב המקור האצתי לציפוי. (שקף LR-193)



לוח C

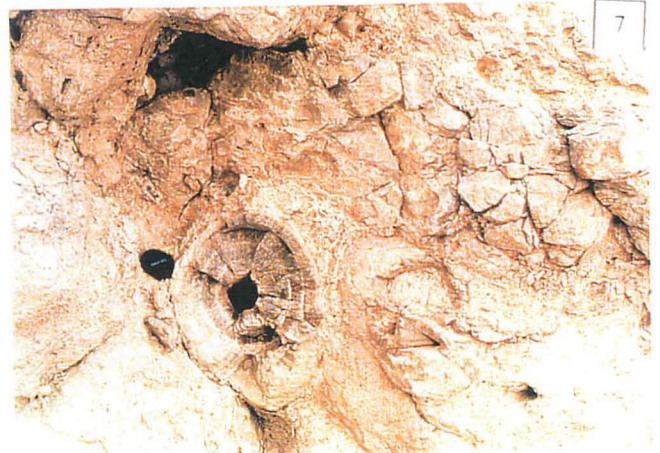
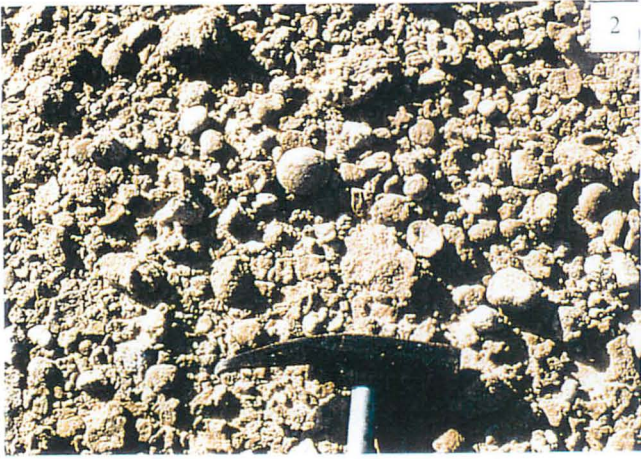
- (1) מואה, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. גבס ועליו גבישי צלסטיט אדיומורפים מאורכים. (דוגמא LE-22)
- (2) נחל משק, מפלס עליון, טרוורטין אינטראקלאסטי. חתך בגבעול Charophyte שבור. (שקף LE-127)
- (3) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין אונקואידים. אונקואיד מלוטש, במרכזו חלל מעוגל של צמח המלא בחול קוורץ, בציפוי נראים שובלי פילמנטים.
- (4) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין אונקואידים. פיזוליטים ממלאים בריכה חלקם מלוכדים אל שכבות ציפוי הקרקעית. את קרקעית הברכה ואת קיר הסכר הקטן המפורש כ-Rim stone pool ניתן לראות בחלק התחתון והשמאלי של הלטש.
- (5) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין צמחים. ציפויים ספאריים עבים סביב גבעולי צמחים דקים, החלק הכהה בנוי ספאר גס במיוחד, החלקים הבהירים בנויים מיקרוספאר ומשמרים שרידים של שיחי ציאנובקטריות.
- (6) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין דטריטי. פיטוקלסט של טרוורטין גס גביש בתוך טרוורטין דטריטי מלוכד היטב בבסיס טרוורטין חצבה.
- (7) נחל משק, טרוורטין עליון, טרוורטין דטריטי. פיטוקלאסטים מזוותים של טרוורטין צמחים בטרוורטין דטריטי.
- (8) עין ערגה, טרוורטין מפלס הביניים. ריסוק in-situ בשכבה דקה של טרוורטין צמחים (t) המופיעה בתוך טרוורטין דטריטי (TD).





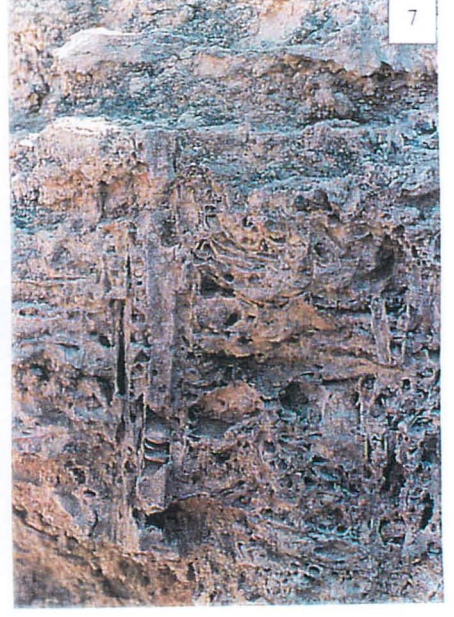
לוח D

- 1) עין גדי, טרוורטין צמחים במפל יבש. שכבות אנכיות של טרוורטין טחבים. גבעולי הטחבים נטויים מטה.
- 2) מואה, מפלס הביניים. טרוורטין צמחים בנוי משטחי אצות. צמחים זקורים חודרים בעד משטחי האצות. בין משטחי האצות מופיע טרוורטין דטריטי רך וחומר קלאסטי דק.
- 3) נחל דוד. בחלק התחתון טרוורטין דטריטי המכיל חלוקי דלומיט. במרכז טרוורטין צמחים בעל חללי צמחים, מצופה ע"י טרוורטין סטרומטולטי כהה ללא חללי צמחים. הטרורטין הסטרומטולטי עצמו מכוסה בטרורטין צמחים בהיר ונקבובי.
- 4) נחל משק, טרוורטין עליון. עדשה של טרוורטין אונקואידים בתוך טרוורטין דטריטי. האונקואידים מלוכדים זה לזה ובונים מלכודת סדימנט. האונקואידים מאורכים ומקורים בענף צומח.
- 5) נחל חצבה, מפלס עליון, טרוורטין סטרומטולטי. ציפוי קלציט למינרי עבה על גבעולי צמחים בטרורטין של ציפוי מדרונות.
- 6) צופר, מפלס ביניים, טרוורטין צמחים. מיקרו עמודים במשטחי אצות, העמודים נוצרו כתוצאה מפגיעה מכאנית או המסה של משטחי האצות, באזורים הפגיעים מופיע קלציט ספארי ופלאידים. (שקף LE-302)
- 7) מואה, מפלס ביניים. טרוורטין אינטראקלאסטי אפור בהיר בחלקו התחתון חצץ צורני מזוות, בחלקו העליון עדשות טרוורטין.
- 8) מואה, מפלס ביניים. בחלק העליון של המחשוף טרוורטין צמחים חום, בחלקו התחתון טרוורטין אינטראקלאסטי אפור בהיר המונח מעל תצורת עירב הקירטוניית שיוצרת צנר תחת לטרורטין. (הגדלה של הדרגש שמופיע בתמונה 7)

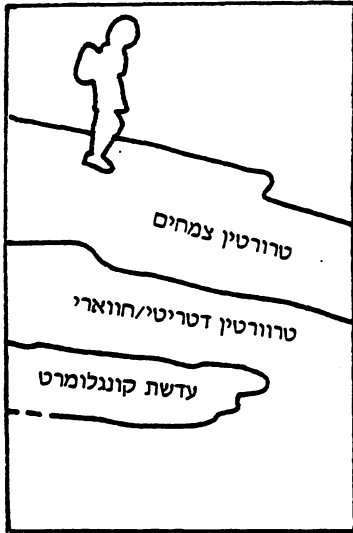


לוח E

- 1) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין צמחים. נטיפי טרוורטין בחלל בתוך הטרורטין. הרכסים הקטנים שעל הנטיפים מעידים על זרימת מים כלפי מטה על גבי הנטיפי.
- 2) צופר, טרוורטין חצבה. משטחי אונקואידים אובליים ממוינים היטב מרצפים כנראה קרקעית של ברכה.
- 3) צופר, טרוורטין חצבה. אונקואידים גליליים שמרכזם גבעולי צמחים או עלה דקל.
- 4) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין צמחים. דפוס עלה בתוך סבך ציפויי קלציט של שורשים מפותלים.
- 5) נחל משק, מפלס עליון, טרוורטין אינטראקלאסטי. חלל של בסיס עלה תמר, נפוץ במפלס העליון. מימין לחלל עיפרון לקנה מידה, עומק חללים אלה מגיע ל-0.5 מ' ויותר.
- 6) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין דטריטי. קו מגע של בולדר טרוורטין צמחים גס גביש המונח בתוך טרוורטין דטריטי מלוכד היטב.
- 7) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין אונקואידים. אונקואיד גלילי בעל מעטפות ספאריות עבות.
- 8) צופר, טרוורטין חצבה, טרוורטין אונקואידים. אונקואידים מלוכדים על ידי גיר וציפויים סטרומטוליטיים, מיון גרוע. האונקואידים הצטברו מאחורי סכר מצופה ציפוי סטרומטוליטי (מימין).



לוח F



1) מואה, מפלס ביניים. קונגלומרט ממלא תעלה, מלוכד בגיר. הקונגלומרט בולט מתוך הטרורטין הדטריטי/חווארי שבו סטרוקטורות עמודיות של רגבים. מעל טרורטין הצמחים של הקומפלקס העליון.

2) מואה, מפלס ביניים. בחלק העליון דרגש רציף של טרורטין צמחים, מתחת עדשות טרורטין צמחים מפוזרות בטרורטין הדטריטי. בחלק התחתון טרורטין דטריטי וקלקארניט עם שברים של סלעי סביבה.



3) מואה, מפלס ביניים. מגע ארוזיבי של הקומפלקס התחתון במואה המורכב טרורטין דטריטי עם תצורת עירב (Kug). מעל מופיע טרורטין צמחים חום במגע שלעיתים הוא חד ולעיתים דיפוזיבי. בחלק העליון של הטרורטין הדטריטי ניתן להבחין באזורים מעט חומים של עדשות טרורטין צמחים דקות, בחלק השמאלי של התמונה מופיעות עדשות טרורטין דטריטי בהירות בתוך טרורטין הצמחים.

4) נחל משק, מפלס עליון. תצבירי קרבונט בפלאוסול המצוי בבסיס הטרורטין האינטראקלאסטי.

5) מואה, מפלס ביניים. טרורטין דטריטי עם עדשות טרורטין צמחים לא רציפות בתוכו, בחלק העליון מופיע דרגש טרורטין צמחים.

6) צופר, טרורטין חצבה. בחלק התחתון מופיע קונגלומרט גס ובחלק העליון טרורטין חום. הטרורטין מלכד ומצפה את חלקו העליון של הקונגלומרט (צפע, שחק?). הגבול ביניהם לא מוגדר וחלוקים צפים גם בתוך הטרורטין.

7) מואה, מפלס ביניים. מאובני קנים מזדקרים מתוך משטחי אצות וצמחים שרועים. בתוך חלל הקנה מופיעים משטחי קלציט קעורים ודקיקים המעידים על השקעה באזור ואדוזי.

8) מואה, מפלס תחתון. אמת טרורטין בעלת תעלת זרימה רדודה. חתך הקיר בנוי כולו שכבות טרורטין קעורות. גובה האמה כ-1 מ'.

9) כיפת ערגה, הטרורטין העליון. בתחתית התמונה מדרון מתון של תצורת טקיה ועליה מונח גיר אגמי בהיר ומעליו טרורטין דטריטי חום שבו בולטת שכבת טרורטין צמחים כהה. הגיר האגמי מונח על מישור גידוע הגודע את סלעי תצורת טקיה.

2



1



4



3



6



5



8

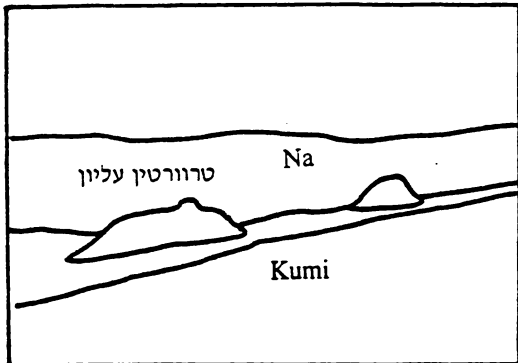


7



לוח G

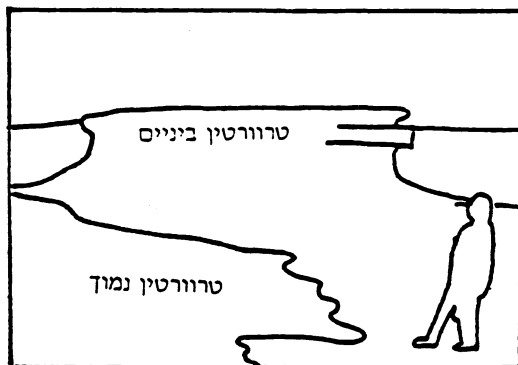
1) נחל שביה, מפלס עליון. שתי גבעות בגובה של כ-30 מ' מעל קרקעית הערוץ מכוסות בטרורטין המפלס העליון. מאחוריהן נראית כיפת שביה ומאחוריה הר גבים.



2) סינקלינת עין תמיד, מפלס עליון. שני משארים של טרורטין מכסים באי התאמה את תצורת מישאש ותצורת חצבה באגף המערבי של הסינקלינה.

3) מואה מפלס הביניים. בתחתית התמונה משטח טרורטין צמחים כהה, נרחב, תת אופקי, מכסה על חתך של טרורטין חווארי, בהיר ורך. מעבר לעצי השיטים קיר העמק המגביל את הטרורטין ובנוי מתצורות עירב, טקיה ומור, מעבר לקיר נחל שביה.

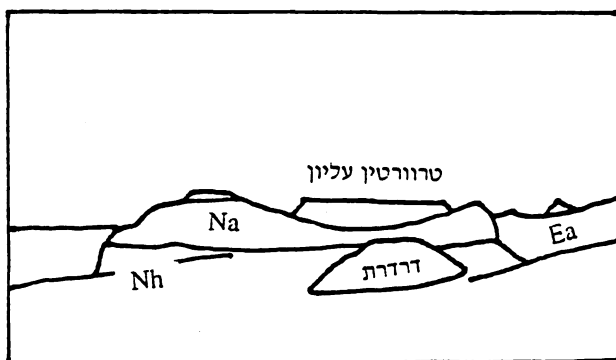
4) מואה, מפלס הביניים. טרורטין הצמחים שבחלקו העליון של החתך מכסה על קונגלומרט צורני, מזוות, בינוני חלוק. הקונגלומרט מתאצבע, במרחק כ-10 מ' משם, עם הטרורטין הדטריטי של החלק התחתון.



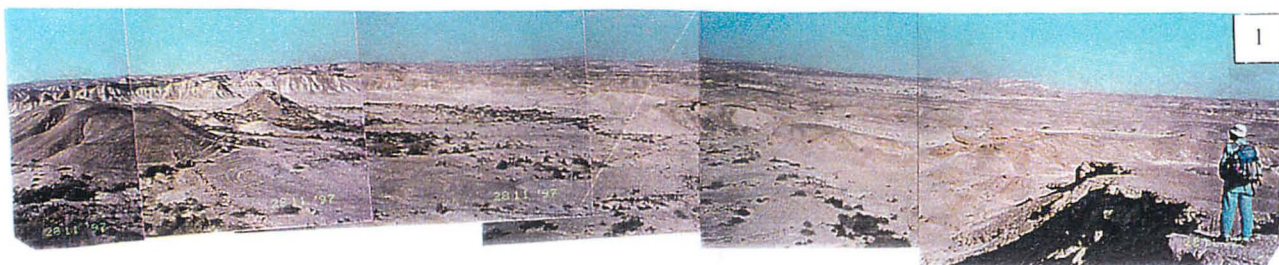
5) מואה. טרורטין המפלס התחתון מצפה קרקעית ערוץ החתור מתחת למפלס טרורטין משטח הביניים לתוך תצורת עירב.

6) עין ירב. טרורטין המפלס התחתון מרפד קרקעית ערוץ החתור לתוך טרורטין המשטח העליון.

7) עין זך, מפלס עליון. טרורטין המפלס העליון מצפה ומלכד את חלקו העליון של קונגלומרט המפלס העליון (ערבה/צחיחה).

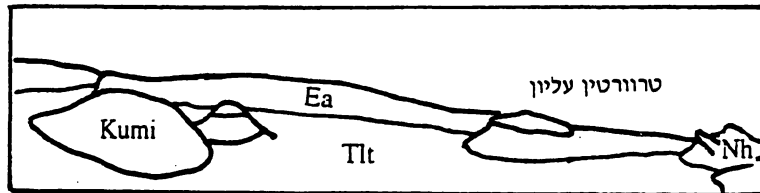


8) כיפת ערגה (אגף הצפוני), מפלס עליון. טרורטין (במרכז, העליון ביותר) מכסה על תצורת ערבה, זו מונחת באי התאמה על חתך נטוי צפונה של תצורת חצבה.

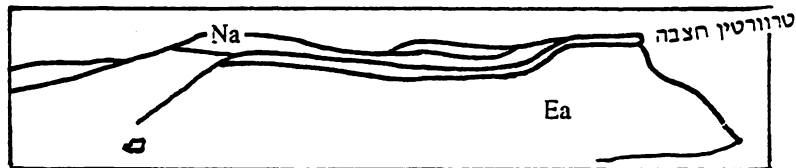


לוח H

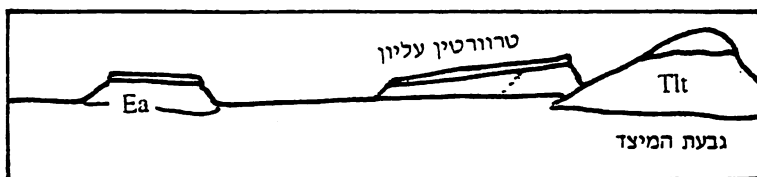
1) כיפת ערגה. בחלקה השמאלי של התמונה מופיע הגלעין הסנוני של כיפת ערגה והוא בנוי תצורת מישאש, לרגליו כתם הצמחיה של עין ערגה. מעל כיפת ערגה ניתן לראות את כיפת רחל ואת מצוק חבורת עבדת החוצץ ביניהם. מצוק זה מקיף את כיפת ערגה וסוגר על בקעת ערגה מימין. בראש המצוק מופיעים כתמים של טרוורטין עליון כמו גם על גבעת משאר מימין לגלעין הסנוני (גבעת המיצד). מצפון לבקעה מופיע כתם אדום של פרט גידרון ומעליו דרגש קונגלומרט קשה ואדמדם של תצורת ערבה. מעל מופיעים משקעים אגמיים בהירים וחומים של תצורת ערבה ומכסה עליהם הטרורטין העליון. הכתם החום שבתוך הבקעה שייך לטרורטין מפלס הביניים. הצילום צולם מדרגש הטרורטין העליון שממזרח לכיפת ערגה.



2) כיפת שביה, אגף מערבי, מבט צפונה. טרוורטין חצבה מכסה על סלעי חבורת עבדת. חלקו הימני מורם, בחלקו השמאלי הוא מכוסה על ידי חתך גבוה יותר של תצורת חצבה ועל ידי תצורת ערבה.



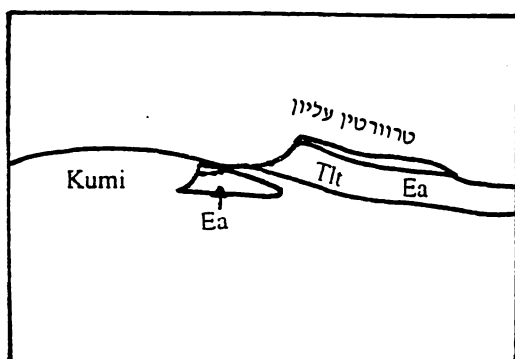
3) כיפת ערגה, אגף צפוני, מבט מזרחה מתוך הבקעה. שלושה דרגשים של טרוורטין המפלס העליון מכסים על סלעי חבורת עבדת ותצורת טקיה מצפון לכיפת ערגה. שלושה דרגשים אלה מצביעים על משטח טרוורטין נרחב שעבר קימוט.



4) כיפת ערגה, אגף צפוני, מבט מערבה מגבעת המיצד. הצמחיה חוגרת את כיפת ערגה ומצביעה על מי תהום גבוהים סביב לכיפה.



5) כיפת ערגה, אגף צפוני. מישור הגידוע, טרוורטין המפלס העליון מונח תת אופקי מעל סלעי חבורת עבדת הנטויים צפונה.



6) כיפת ערגה, מבט צפונה מעין יהב. משמאל מופיע הגלעין הסנוני של הכיפה מתחתיו ומימין גבעות משאר בהירות של תצורת טקיה וחבורת עבדת המכוסות בטרורטין המפלס העליון.

נספח

חתך עמודי בטרורטין המפלס העליון
 כיפת ערגה-מזרח נ.צ. 1673/0047

גיל	תצורה	ליתולוגיה	עובי (מ')	דוגמא	הערות
פלייסטוקן	סייף		4	*	גיר טרוורטיני חום, בתוכו עדשות טרוורטין חום כהה גדולות. הגיר עצמו בנוי חלקיקי טרוורטין בגודל חצץ עד חול. בבסיס מופיע חול קוורץ.
			2	*	גיר לבן, דק גביש. שבירה קונכיתית, חללים מאורכים קטנים, עורקים דקיקים מלאים בקלציט ספארי.
פלאוקן	טקיה		0		

* - מדידה פלאומגנטית

in the different incision stages during the Pleistocene. In the alluvial section of the Q₂ (upper Pleistocene) terrace there are travertines in Mo'a and in the Shivya, Erga and En Tamid domes.

The Q₁ level (the recent wadi floor) is coated by the youngest travertine in the Arava (Holocene). Today there is no deposition of travertine from the Arava springs, which have very low discharge.

The morphostratigraphic relations of the travertine terraces are in agreement with radiometric dates that were measured by Livnat and Kronfeld (1985) and Kronfeld and Livnat (1987). The younger dates best fit the Q₂ level (0.1-0.2 Ma) and the older dates fit the travertines of the upper level (0.2->0.3 Ma). Paleomagnetic measurements of the upper-level travertine show that it may be older than 0.78 Ma. The lower travertine dated in this work to Holocene (8000 years).

The geochemistry of the Hazeva travertine shows that it was deposited from water different from that which Sayif travertines were deposited from, implying that the paleohydrology, climate and water discharge were different.

Geochemistry differences between the three Pleistocene travertine levels are apparently connected to variations in discharge because there is good correlation between their thickness, estimated volume and geochemistry. The geochemistry variation indicates hydrologic change from high discharge springs, which deposited calcite in an open system, to low discharge springs, which deposited calcite, gypsum, celestite and perhaps Mg-sulfate in a system of limited conditions.

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of water from springs, boreholes, limnic deposits and travertines from the southern and central Arava increases from south to north and hence the travertine from the southern fields differ from those of the northern field in their ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. This might have been caused by different ratios of mixing between different water sources or basalt bodies which are intruded into the aquifer and influence the water ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. However, in each field the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr is stable in the travertine throughout the Pleistocene. Even though some springs changed location, their water composition was constant.

Most of the travertine outcrops in the Arava are subhorizontal and there are no signs of faults or tilt events that occurred since the upper level travertine was deposited. The only evidence that can account for tectonic activity is in Zofar and En Erga. In Zofar, the Hazeva travertine is folded and there are thickness changes that indicate a syndeposition sink of the Shivya syncline. In En Erga the upper level travertine overlies a truncation plane and both are folded. This fold phase is younger than the upper level travertine but older than the Q₂ travertine deposition.

Abstract

Neogene to Holocene travertines are exposed in the northern and central Arava. Most of them are found in the Sayif Formation, the rest are part of the Hazeva Formation, Lisan Formation and young conglomerates. Some travertines are exposed near recent springs and some are not.

This work presents the paleogeography of the Arava springs and the lithology, stratigraphy, chemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of the travertines found in their area.

The recent Arava climate is arid and the discharge of the springs is low and irregular. The travertines indicate that the Arava springs were bigger in area and had a higher discharge in the past. Most of the springs emerge from the Senonian Mishash Formation in the nearby structural domes. The springs only started to discharge when the domes were truncated and the Mishash Formation was exposed below the low hydraulic conductivity rock units (Ghareb and Taqiye formations). Subsequently, travertines were deposited on the wadi terraces which surround those dome slopes.

The travertines are divided to autochthonous and allochthonous facies. The allochthonous travertines were deposited somewhat far from the springs and the autochthonous travertines close to the springs. The autochthonous travertines are built mainly of algal mats with a lot of flora casts. They cover flat areas, waterfalls and slopes, or form lenses in the allochthonous travertine. The allochthonous travertines interfinger with fluvial and alluvial deposits which include conglomerates, paleosols or marl. They are built of travertine detritus, coated grains and lithoclasts from the surrounding area.

The allochthonous travertines are built of cyanobacterial filaments. The dense micritic filament net and the slow, laminar flow, which is indicated by the flat horizontal platforms, show that biogenic deposition was involved. In periods of low discharge and high evaporation, evaporitic deposition also occurred, and gypsum, celestite and probably Mg-sulfate were deposited in addition to calcite.

The most ancient travertine is contained in the Miocene Hazeva Formation where it coats and cements pebbles. It was deposited in a wide fluvial system with large flow energy: waterfalls, pools and dams. The travertine section includes both Zehiha and autochthonous travertines that were deposited in a variety of environments. Thickness changes in the Hazeva travertine seem to be the result of syndeposition tectonic activity.

Tectonic activity and incision continued during the Arava Formation deposition and after it. The Arava Formation overlies older formations in angular unconformity around the domes of Rahel-Erga, Tamid, Shivya and the Omer block. Truncation of part of the domes exposed the Mishash Formation and enabled the springs to discharge from the Mishash aquifer. Later uplift of the Erga and Rahel domes enabled those spring waters to flow over the slopes and to deposit Pleistocene travertine over the Arava Formation. The stratigraphic location of the travertine above the Arava upper member, the paleosols and the local liminic deposits indicate that the upper travertine is correlative to the Zehiha Formation described from the southern and central Negev and Ramat Baraq.

Incision of wide river valleys in the chalk and marl of the Ghareb and Taqiye formations left wide terraces above the valley floor. These terraces (Q_1 - Q_4) represent the valley floor





**THE MINISTRY OF NATIONAL
INFRASTRUCTURES
GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL**

The Travertines in the Northern and Central Arava: Stratigraphy, Petrography and Geochemistry

Lior Enmar

**This work submitted as a M.Sc. Thesis in the Institute of Earth Sciences,
The Hebrew University, Jerusalem.**

The study was carried out under the supervision of:

Dr. Ariel Heimann, Geological Survey of Israel, Jerusalem,

**Prof. Amitai Katz and Prof. Avraham Starinsky, Institute of Earth Sciences,
the Hebrew University, Jerusalem.**

GSI /1/ 99

Jerusalem, February 1999

