



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

סקר ספרותי על ההידרוגיאולוגיה של מלחת יטבתה

עינת מגל ויוסף יחיאלי

המכון הגיאולוגי
הספריה
GEOLOGICAL SURVEY OF ISRAEL
THE LIBRARY



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

סקר ספרותי על ההידרוגיאולוגיה של מלחת יטבתה

עינת מגל ויוסף יחיאלי

תקציר

מלחת יטבתה היא מערכה הידרולוגית האופיינית לאזורים יבשים בעולם בהם האידוי רב וכמות המשקעים מועטה. מי התהום במלחת יטבתה המצויים קרוב לפני השטח מתאדים ישירות מן הקרקע, או בטרנספירציה דרך צמחים. עקב כך עולה מליחות מי התהום עד ל- 150,000 mgCl/L במרכז המלחה. מזה מספר שנים מצויה הצמחייה השיחית במלחת יטבתה במצוקה. על מנת להעריך את הגורמים להתייבשות הצמחים הזמינה רשות הטבע והגנים את העבודה הנוכחית, המבוססת על נתונים שנאספו מן השירות ההידרולוגי, תה"ל, השירות המטאורולוגי ומחקרים שונים.

מלחת יטבתה נמצאת בשקע סטרוקטוראלי, שהתפתח כחלק ממערכת השבירה של טרנספורם ים המלח. השקע מכיל רצף של סדימנטים קלסטים המהווים את אקוויפר המילוי. במרכז המלחה מתחלק אקוויפר המילוי לשני תת אקוויפרים: האחד עמוק וכלוא והשני רדוד ופריאטי. מצפון וממערב למלחה מצויים האקוויפרים של חבורת כורנוב ויהודה, וממזרח מצויים סלעי התשתית הפרה-קמבריים ומניפות הסחף של הרי אדום.

מלחת יטבתה מהווה בסיס ניקוז למי תהום מן האקוויפרים בשוליה הצפוניים, המזרחיים והמערביים. תת האקוויפר העמוק מוזן ככל הנראה על ידי מים שמקורם באקוויפר חבורת כורנוב מצפון וממערב ובמניפות הסחף ממזרח. ההזנה של תת האקוויפר הרדוד היא במי תהום שמקורם באקוויפר חבורת יהודה מצפון וממערב ובמניפות הסחף ממזרח. בסיס הניקוז של מי התהום מצוי מערבית לבסיס הניקוז של המים העיליים כנראה בשל כמות המים הגדולה הנכנסת ממזרח. העומד ההידראולי של מי התהום בתת האקוויפר העמוק גבוה מזה של תת האקוויפר הרדוד, ולכן במידה והגבול בין תת האקוויפרים אינו אטום לחלוטין תתכן זרימת מים כלפי תת האקוויפר הרדוד.

השאיבות משנות הששים בקידוחי ההפקה של שדה השאיבה יטבתה, שמצפון למלחה, השפיעו על מפלסי מי התהום במלחה (ירידת מפלסים של עד כ- 10 מטר במקומות מסוימים). בקידוחי ההפקה של שדה השאיבה של יטבתה לוותה העלייה בנפח השאיבה בירידת מפלסים בקידוחים ועם ההתייצבות בנפח השאיבה, בשנות השמונים, התייצבו המפלסים ברוב הקידוחים. השפעת קידוחי ההפקה של שדה השאיבה של סמר מדרום למלחה על מפלס מי התהום במלחת יטבתה קטנה.

שני גורמים הידרולוגיים עשויים לגרום לפגיעה בצמחייה השיחית במלחה: הירידה במפלס מי התהום והמלחת מי התהום. מליחות מי התהום מושפעת מן היחס בין האידוי, התלוי בעומק מי התהום, לבין המיהול על ידי מים מן השוליים. ניתן להניח שהורדת המפלס הפרה את האיזון המקורי במלחה ובשל העדר נתונים לא ניתן לקבוע כעת האם עלתה מליחות מי התהום במלחה. במרכז המלחה ובמרבית הקידוחים סביבה מפלס מי התהום יציב למדי בשנים האחרונות. על כן נראה כי המערכת ההידרולוגית מצויה בשווי משקל. לעומת זאת לא ברור האם מליחות מי התהום משתנה. מוצעת בדו"ח תכנית עבודה לבדיקה מפורטת יותר של ההידרולוגיה של מלחת יטבתה שתספק את הנתונים החסרים כיום.

1. מבוא	1
1. רקע כללי על מלחת יטבתה	1
1. מבנה גיאולוגי	1
2. הידרוגיאולוגיה	2
2. משקעים ונגר עילי	2
3. תפרוסת של תצורות הצומח	3
3. היסטוריה של שאיבה והפקת מים באזור	3
2. שיטות עבודה	3
3. מקור הנתונים	4
4. תוצאות	4
4. חתכים הידרוגיאולוגיים	4
5. השינוי במפלסי מי התהום בקידוחים במלחה לאורך הזמן	5
5. השוואה של ההידרוגרפים לאורך החתכים ההידרוגיאולוגיים	5
6. ריכוז ה-Cl וה-NO ₃ בקידוחי המלחה	6
5. דיון	6
6. מודל הזרימה במלחה	6
7. השפעת השאיבה על מפלס מי התהום	7
7. מנגנון ההמלחה	7
8. האם קיימים גורמים אפשריים נוספים להתייבשות המלחה?	8
6. סיכום	9
7. המלצות	9
8. הבעת תודה	10
9. רשימת ספרות	11
10. טבלאות	13
11. איורים	15

רשימת טבלאות

- טבלה 1 : נתונים קבועים של קידוחי ההפקה והתצפית במלחת יטבתה
טבלה 2 : ריכוז ה-Cl במי הקידוחים במלחת יטבתה.

רשימת איורים

- איור 1 : מפה של מיקום הקידוחים במלחת יטבתה.
איור 2 : חתך משולי המלחה למרכזה במלחת יטבתה.
איור 3 : מפת ריכוז ה-Cl במי תת האקוויפר הרדוד במלחת יטבתה.
איור 4 : חתך הידרוגיאולוגי סכמתי במלחת יטבתה בכוון מזרח מערב.
איור 5 : חתך הידרוגיאולוגי סכמתי באזור גרופית-יטבתה.
איור 6 : עובי המשקעים השנתיים בתחנת מדידה יטבתה.
איור 7 : מפת המשקעים בישראל ובירדן.
איור 8 : נפח השאיבה השנתי בקידוחי הפקה מצפון למלחה.
איור 9 : נפח השאיבה השנתי בקידוחי הפקה בדרום המלחה.
איור 10 : מפת מיקום חתכי הרוחב במלחת יטבתה.
איור 11 : חתך הידרוגיאולוגי 'A-A צפון- צפון-מזרח לדרום-דרום-מערב במלחת יטבתה.
איור 12 : חתך הידרוגיאולוגי 'B-B מזרח-מערב במלחת יטבתה.
איור 13 : חתך הידרוגיאולוגי 'C-C מזרח-מערב במלחת יטבתה.
איור 14 : הידרוגרפים של קידוחים במלחת יטבתה.
איור 15 : מפלס של מי התהום וקצב השאיבה החודשי בקידוחים יטבתה 5 ו-11.
איור 16 : השוואה של הידרוגרפים של קידוחים בחתך 'B-B.
איור 17 : השתנות ריכוז Cl במי קידוחי הפקת מים במלחת יטבתה.
איור 18 : מודל משוער לזרימת המים במלחת יטבתה.

1. מבוא

מלחת יטבתה נמצאת בבקע ים-המלח כ-40 ק"מ צפונית לאילת (איור 1). המלחה מהווה בית גידול ייחודי לצמחים ובעלי החיים בדרום הערבה ועל כן הוכרזה כשמורת טבע. נאת המדבר עין רדיאן נמצאת במלחת יטבתה (בשטח החי-בר) ובה דקלים ובאר מים עתיקה. בשנות החמישים מתאר ברסלבסקי (1952) כי לעיתים בחורף היו מי הבאר עולים על גדותיהם וזורמים על פני השטח. בתקופה זו הייתה הקרקע "רוויה במי תהום עליונים הבוצצים ועולים בימות החורף על פני אדמתה" (ברסלבסקי, 1952).

בשנות החמישים החלה התיישבות באזור ובמקביל פעילות הפקה של מים מקידוחים בקרבת מלחת יטבתה. כיום מפלס מי התהום נמוך מבעבר ובבאר עין רדיאן (איור 1) נמצאים מי התהום בעומק 10 מ' מפני השטח. מזה כעשרים שנה מצויים השיחים במלחה במצוקה; חילף החולות כמעט ונכחד לחלוטין ורבים משיחי ההגה המצוי התייבשו ומתו.

ברשות הטבע והגנים התעוררה דאגה לנוכח ההתדרדרות של הצמחייה הייחודית למלחה והמשך פעילות ההפקה של מים בקרבתה. בעקבות זאת הוזמנה הרשות את העבודה הנוכחית במטרה לבחון את הסיבות להתייבשות המלחה. עבודה זו הינה שלב מקדים למחקר הידרולוגי עתידי שמטרתו היא לבחון את הסיבות לירידת מפלס מי התהום במלחה ולפגיעה בצמחי המלחה, וכן את הקשר בין שאיבת המים בקרבת המלחה לירידה של מפלסי המים. העבודה הנוכחית מבוססת אך ורק על נתונים מן הספרות.

רקע כללי על מלחת יטבתה

מחקרים רבים נערכו על מלחות או סבחות (Sabkha, Salina, Salar, Playa, Salt flat) באזורים מדבריים וחצי מדבריים בעולם (Yechieli and Wood; Rosen, 1994 בפרסום). מלחות נוצרות באגנים נמוכים טופוגרפית כאשר כמות האידוי עולה על כמות המשקעים (Langbein, 1961). מלחת יטבתה מהווה בסיס ניקוז לסביבתה. מפלס המים בה רדוד ומגיע לקרבת פני השטח (איור 2). החום והיובש גורמים להתאדות ישירה של מי תהום מן הקרקע. אובדן המים בהתאדות מעלה את ריכוז המלחים המומסים במי התהום בתת הקרקע (איור 3) ומביא להשקעה של מלחים מסיסים בקרקע. במרכז המלחה נוצרים תנאי מליחות קיצוניים שאינם מאפשרים התפתחות צמחיה, על כן מרכז המלחה חסר צמחים (איור 2). עם ההתרחקות ממרכז המלחה מעמיקים בהדרגה פני מי התהום. באזור בו עומק המים עולה על תחום העלייה הנימית של מים בקרקע, אין אידוי ישיר של מים מתת הקרקע ומליחות מי התהום נמוכה יותר (איור 3). הצמחים במלחה מסתדרים בחגורות סביב המרכז על פי מידת עמידותם למליחות מי התהום (איור 2). שורשי הצמחים יונקים מים מן התחום הקפילרי ומאבדים מים באבפוטרונספירציה.

מבנה גיאולוגי

מלחת יטבתה נמצאת בשקע סטרוקטוראלי שהתפתח כחלק ממערכת השבירה של טרנספורם ים המלח (גרפונקל, 1970). במהלך השנים צבר שקע זה רצף עבה של סדימנטים קלסטיים (אקוויפר המילוי). מערכת השבירה של שולי הבקע העמידה מצפון וממערב למלחת יטבתה את

סלעי חבורת יהודה וכורנוב מול אקוויפר מילוי הערבה (איור 4 ו-5) וממזרח את סלעי התשתית הפרה-קמבריים (איור 4).

הידרוגיאולוגיה

בחתך הגיאולוגי באזור המחקר ניתן להבחין בשלושה אקוויפרים עיקריים :

1. האקוויפר של חבורת כורנוב: מגיל קרטיקון תחתון, בנוי בעיקר מאבני חול בחילופין עם אופקי חוואר וחרסית. באזור יטבתה האקוויפר כולא ומכיל מים בעומד גבוה (נאור, 1979). שטחי המילוי החוזר המצומצמים ותנאי האקלים היבשים גורמים לכך שהאקוויפר מכיל בעיקר מים פוסיליים (נאור, 1979).
2. האקוויפר של חבורת יהודה: מגיל קנומן-טורון, בנוי בעיקר משכבות גיר ודולומיט בחילופין עם שכבות חוואר קרטון ופצלים. לפי נאור (1979) המילוי החוזר של האקוויפר מגיע בעיקר מחלחול מי שטפונות במניפות הסחף ממערב למלחה. כנראה שחלק מן המילוי החוזר הינו ממקור דומה לזה של אקוויפר כורנוב ובחלקו מים עתיקים ללא מילוי חוזר עכשווי.
3. אקוויפר המילוי בנוי מסדימנטים מגיל ניאוגן עד רצנט בעובי מאות מטרים (נאור, 1979). הרכב הסדימנטים של אקוויפר המילוי נעשה דק גרגר עם הקרבה למרכז המלחה (קרויטורו, 1978), כאשר השוליים המערביים (מיכאלי וגלאי, 1963) והמזרחיים (Abdulkader, 1998) בנויים מחלוקים וחול ומרכז המלחה בנוי מחרסיות וגבס. האקוויפר מופרד על ידי אופקים אקוויקלודיים מקומיים (חרסית וסילט), חלקם עמוקים וחלקם רדודים, המפרידים את החתך לתת אקוויפרים (קרויטורו, 1978). תת האקוויפר הרדוד של אקוויפר המילוי מכיל מי תהום פריאטיים בעומק 3-8 מ' מפני השטח (נאור, 1979). תת האקוויפר העמוק מכיל מי תהום כלואים בעלי עומד הגבוה במספר מטרים מן המפלס הפריאטי הרדוד (נאור, 1979). לפי קרויטורו (1978) מקורות המים של אקוויפר המילוי הם הזנה לטרלית מאקוויפר חבורת יהודה וכורנוב וממניפות הסחף האלוביאליות ממזרח למרגלות הרי אדום.

משקעים ונגר עילי

מעצם היותה אזור ארידי מתאפיינת הערבה הדרומית במיעוט משקעים ובתנודות גדולות בכמות הגשם ופיזורו בזמן ובמרחב. כמות הגשם משתנה באופן ניכר משנה לשנה (איור 6). לעיתים הגשם יורד בתא שטח אחד בעוד שבתא השטח הצמוד לו, לא יורד גשם. מי הנגר העילי משטפונות מהווים מרכיב קטן במאזן המים של המלחה בשל האקלים היבש (גלעד, 1968). גורם משמעותי יותר הוא המילוי החוזר שמקורו במשקעים היורדים בהרי הנגב ובהרי אדום המזינים את מי התהום. המילוי החוזר הטבעי ממזרח לבקע גבוה בהשוואה למערב מאחר שכמות המשקעים היורדת בהרי אדום גדולה יותר (איור 7). השוני האיזוטופי (^2H -ו- ^{18}O) בין מים מתחדשים, המגיעים כאמור בעיקר ממזרח, לבין מים עתיקים שמקורם באקוויפר חבורת כורנוב ויהודה, מאפשר קביעה של מקור מי התהום במלחה (Gat and Naor, 1979; ביין וח'י, 1995). מרבית המים המגיעים לצפון המלחה הם מים מתחדשים בעוד שמקור מי התהום בדרום המלחה הוא בעיקר מים עתיקים (Gat and Naor, 1979).

תפרוסת של תצורות הצומח

כנאמר לעיל מרכז המלחה חסר צמחיה וסביבו מסתדרים הצמחים בצורה של חגורות על פי מליחות מי התהום (איור 2). סדר חגורות הצומח מן המרכז לשוליים הוא: חגורת הימלוח הפגום והאשל, חגורת חילף החולות, הגה מצוי וימלוח פגום, וחגורת שיטת סוכך וימלוח פגום (סיני, 1998).

החל משנות השמונים נצפתה פגיעה בצמחים בחגורת חילף החולות וההגה המצוי. חילף החולות היה הראשון שנפגע עד שנכחד לחלוטין משטח החי-בר לפני כ-20 שנה (ב. שלמון בע"פ). משנת 1994 מצויים שיחי ההגה המצוי במצוקה. בסקר צומח שנערך ב-29 נקודות דיגום בחלק הצפוני של חי-בר יטבתה נמצאה ירידה מובהקת בצפיפות צמחי ההגה והימלוח בין השנים 1998 ל-2000 (בר, 2000). כמו כן, נצפתה ירידה במספר צמחי ההגה הצעירים (ב. שלמון בע"פ). לא נמצא שינוי בגודל השיח כפי שניתן היה לצפות אם הדילול באוכלוסיית ההגה היה נובע מרעית יתר. תמותת צמחי ההגה מתאפיינת בכתמיות, כאשר לצד אזורים בהם מתים צמחי ההגה נמצאים אזורים בהם לא נכרת מצוקה ואף חל גידול של צמחים צעירים (ב. שלמון, בע"פ).

היסטוריה של שאיבה והפקת מים באזור

מצפון ומדרום למלחה מצויים מספר שדות שאיבה של מי-תהום. בצפון המלחה מצוי שדה השאיבה של יטבתה ובו מספר קידוחי הפקה מאקוויפר חבורת כורנוב, חבורת יהודה ואקוויפר המילוי. צפונה יותר מצויים שדות השאיבה של גרופית קטורה ויעלון השואבים מים מאותם אקוויפרים. בדרום המלחה מצוי שדה השאיבה סמר ובו ארבעה קידוחים השואבים מים מאקוויפר המילוי.

מאז קדיחתם של קידוחי ההפקה הראשונים בשדה השאיבה יטבתה בשנות החמישים עלה בהדרגה נפח המים השנתי הנשאב משדה השאיבה והגיע בתחילת שנות השמונים לשיא של 8.6 מלמ"ש (איור 8). לקראת שנת 1984 ירד נפח המים הנשאבים והתייצב על 5.7 מלמ"ש בממוצע. ההפקה בשדות השאיבה הצפוניים הרחוקים יעלון, קטורה וגרופית החלה בסוף שנות השבעים. נפח המים המופקים עלה בהדרגה מתחילת שנות השבעים ועד לתחילת שנות השמונים, מאמצע שנות השמונים עלה נפח השאיבה בקצב איטי. כיום מופקים בממוצע 12.4 מלמ"ש מים מן הקידוחים בשדות השאיבה יעלון עד יטבתה, מהם כמחצית מופקים משדה השאיבה של יטבתה (נאור וגרניט, 1999). בשדה השאיבה של סמר, דרומית למלחה, נשאבים בממוצע כ-1.3 מלמ"ש מים החל משנת 1969 (איור 9). צפונית מזרחית למלחת יטבתה, בשטח הממלכה הירדנית באזור ואדי רחמה (בעבר נקרא דרבה) מצויים 5 קידוחים המפיקים כ-0.25 מלמ"ש (לפי נתוני Energoproject Co., 1990).

2. שיטות עבודה

הנתונים בהם נעשה שימוש בעבודה נאספו ממקורות שונים: ממאגר המידע של השירות ההידרולוגי ושל תה"ל, דו"חות שונים ונתונים שנאספו על ידי אנשי רשות הטבע והגנים (בני שלמון). העבודה כללה סיור בשטח המלחה והתייעצויות עם גורמים שונים.

3. מקור הנתונים

נתונים של מפלסי קידוחים, נפחי שאיבה וריכוזי Cl ו- NO_3 במי תהום התקבלו מן השירות ההידרולוגי. בשטח החי-בר באזור בו יש ריכוז של שיחי הגה מתים נקדח בשנת 1998 קידוח תצפית לעומק של כ-12 מ' (קידוח "הגה מת"). אנשי רשות הטבע והגנים מודדים את מפלס מי התהום בקידוחים יטבתה ת/2, "הגה מת" וכן בבאר בעין רדיאן מידי חודש. מפלס המים בקידוח "הגה מת" נותר קבוע מעל שנה ועובי המים מקרקעית הקידוח קטן מ-0.5 מ'. מאחר שהקידוח לא נקדח וצונר בצורה סטנדרטית יתכן שנתוני המפלס שלו אינם מהימנים. במאגר המידע של השירות ההידרולוגי רשומים הקידוחים יטבתה ת/2 ות/3 בשונה מהמופיע בשטח; על צינור הקידוח בחי-בר מסומן יטבתה ת/2, בשעה שקידוח זה רשום כיטבתה ת/3. כמו כן בעבודות שונות (לדוגמה דו"ח תה"ל קרויטורו, 1978) מופיעים הקידוחים הפוך מהרשום במאגר המידע של השירות ההידרולוגי. על כן בדו"ח הנוכחי מוקם קידוח יטבתה ת/2 ממערב לקידוח יטבתה ת/3. בהנחה שאיסוף הנתונים מן הקידוחים (מפלס מים, Cl ו- NO_3) נעשה על פי הרשום בשטח (על הקידוחים עצמם) שויכו הנתונים לקידוחים לפי מיקומם בשטח (איור 1). נתוני כמויות הגשם בתחנות המדידה בקרבת מלחת יטבתה התקבלו מן השרות המטאורולוגי. נתוני הקידוחים השונים מוצגים בטבלה 1.

4. תוצאות

חתכים הידרוגיאולוגיים

חתך A-A' חוצה את המלחה בכיוון צפון-צפון-מזרח דרום-דרום-מערב (איור 10 ו-11). הבלוקים השבורים של סלעי חבורת יהודה וכורנוב מצויים מול אקוויפר המילוי (איור 11). אקוויפר חבורת כורנוב הינו כלוא בבלוק השבור הקרוב לאקוויפר המילוי (יטבתה ת/9 באיור 11). במרכז המלחה מופרד אקוויפר המילוי לשני תת-אקוויפרים: האחד עמוק וכלוא והשני רדוד ופריאטי (יטבתה ת/2 באיור 11). מפלס מי התהום בתת האקוויפר הרדוד של אקוויפר המילוי נראה המשכי למפלס מי התהום בחבורת יהודה. כיום המפלס במלחה מצוי בעומק של 6.5 מ' (יטבתה ת/2), אולם כפי שכבר צוין, בעבר הגיעו מי התהום עד לפני השטח. אקוויפר המילוי בדרום המלחה מורכב מחלוקים בעובי ניכר (קידוח צמחי השממה) אשר אינם יוצרים כליאה והאקוויפר הנו פריאטי.

החתכים B-B' ו-C-C' (איורים 10, 12 ו-13) חוצים את מרכז המלחה ממערב למזרח. על פי חתך B-B' מצויים סלעי חבורת יהודה מול החלק העליון של אקוויפר המילוי וסלעי חבורת כורנוב מול החלק התחתון. מפלס מי התהום באקוויפר חבורת יהודה נמוך ממפלס מי התהום באקוויפר המילוי, בעוד שהעומד באקוויפר כורנוב גבוה מזה של אקוויפר המילוי (איור 12). חתך C-C' חוצה את אקוויפר המילוי במלחה. מפלס מי התהום הנמוך ביותר בתת האקוויפר הרדוד נמדד בקידוח יטבתה ת/2. מפלס מי התהום בקידוח יטבתה ת/3 קרוב מאוד לפני השטח (עומק המים 4 מ') ושכבות החרסית אותן הוא חודר מכילות גבס לאורך כל החתך הנחדר (איור 13).

השינוי במפלסי מי התהום בקידוחים במלחה לאורך הזמן

ההידרוגרפים של מפלסי הקידוחים מוצגים באיור 14.

קידוחי חבורת יהודה וכורנוב (איור 14, A-C ו-I): בכל הקידוחים חלה ירידת מפלס במהלך השנים. בקידוח יטבתה 5 ירד המפלס ב-10 מ' (איור 14, A) משנות ה-50 ועד היום. החל משנות השמונים מפלסי מי התהום במרבית הקידוחים יציבים או יורדים ירידה מתונה. קידוחי אקוויפר המילוי: בקידוחים הרדודים ממערב למלחה ירדו מפלסי המים ב-3-5 מ' מתחילת שנות השישים ועד תחילת שנות התשעים (איור 14, H, L, M). החל מאמצע שנות התשעים המפלסים התייצבו. בקידוחים במרכז המלחה החלו למדוד את מפלסי המים בקידוחים רק בסוף שנות השבעים. בקידוחים יטבתה ת/2 ו-ת/3 נשמר לאורך כל השנים הפרש בין מפלסי המים של שני תת האקוויפרים, העמוק והרדוד, של אקוויפר המילוי (איור 14, D, G). לעומת זאת בקידוחים יטבתה ת/1 ו-ת/29 לא קיים הפרש ברור בין המפלסים של שני תת האקוויפר (איור 14, F ו-J). בקידוחים הרדודים מפלס מי התהום היה יציב למדי וברובם נרשמה ירידה מתונה (איור 14, D, F, G ו-J). בקידוח יטבתה 13, המצוי צפונית למלחה וממנו מפיקים מים משנת 1980, מפלס מי התהום יציב יחסית בכל שנות פעילותו (איור 14, K). נתוני המפלסים הקיימים מקידוחים של שדה השאיבה של סמר נמדדו ככל הנראה תחת השפעה של שאיבה (איור 14, E). מן הנתונים הקיימים נראה כי משנות השבעים ירדו המפלסים בקידוחים אלה 3 מ' בלבד.

בחלק מן הקידוחים מפלס מי התהום הנמדד אינו במנוחה בשל השאיבה (איור 14, A-B). על מנת לבדוק את הקשר בין מפלס המים לנפח השאיבה צויר ההידרוגרף של קידוח יטבתה 5 יחד עם נפח השאיבה החודשי בקידוח ההפקה הסמוך יטבתה 11 (איור 15). שני העקומים באיור 15 יוצרים ברוב המקרים תמונת ראי ובדרך כלל תגובת מפלס המים מאוחרת במעט לשינוי בנפח השאיבה.

השוואה של ההידרוגרפים לאורך החתכים ההידרוגיאולוגיים

חתך צפון דרום: מן השוואה בין ההידרוגרפים של קידוחים לאורך חתך מצפון לדרום (איור

11, 14, A-E) ניתן לקבוע:

- גובה מפלסי מי התהום והשתנותם בקידוחים בצפון המלחה (יטבתה 5, 11, 2 ו-8) היה דומה רוב הזמן, למרות הרעש הרב של ההידרוגרפים. כל הקידוחים הנ"ל חודרים לחבורת יהודה, למעט קידוח יטבתה 8 החודר לאקוויפר חבורת כורנוב (איור 14).
- מפלס המים בקידוח התצפית יטבתה ת/9 (חבורת כורנוב) גבוה מזה של הקידוח יטבתה 9 הסמוך (חבורת יהודה), אולם מפלס מי התהום בשני הקידוחים השתנה עונתית בצורה מחזורית דומה (איור 14, C).

חתך מזרח-מערב (חתך B-B', איור 12): מפלס מי התהום בקידוחים בתת האקוויפר העמוק באקוויפר המילוי ובאקוויפר חבורת כורנוב משתנה באופן דומה (איור 16) בעוד שקשה למצוא דמיון בין ההידרוגרפים של הקידוחים בתת האקוויפר הרדוד ובאקוויפר חבורת יהודה (איור 16).

ריכוז ה-Cl וה-NO₃ בקידוחי המלחה

בטבלה 2 מוצגים ריכוזי Cl במי הקידוחים במלחת יטבתה. הערכים המופיעים בטבלה הם לרוב ערכים ממוצעים של הנתונים הקיימים עבור שתיים עד שלוש השנים האחרונות עבורם קיימים נתוני השירות ההידרולוגי. המליחות של מי התהום בקרבת מלחת יטבתה נעה בין זו של מי התהום המתוקים המגיעים ממזרח בהם ריכוז ה-Cl נמוך מ-200 mg/L (מי Bir Baida; Adar et al., 1992) למי התמלחת באזור חסר הצמחייה במלחה, שריכוז הכלוריד בהם מגיע ל-150,000 mgCl/L (נאור, 1979). בקידוחים הקיימים כיום, ואשר נערך בהם מעקב הידרולוגי, מליחות מי התהום אינה עולה על 2,560 mgCl/L (קידוח יטבתה ת/1 א'). ראוי לציין כי ריכוזי ה-Cl המופיעים בטבלה 2 לא נמדדו בו-זמנית ובמהלך השנים השתנה הרכב מי התהום (איור 17).

איור 17 מתאר את השינויים בריכוז ה-Cl וה-NO₃ במי התהום של ארבעה קידוחי הפקה במלחה. בקידוח יטבתה 11 חלה עליה עם השנים בריכוז ה-Cl במי הקידוח בשעה שריכוז ה-NO₃ לא השתנה (איור 17 א'). בקידוחים יטבתה 12 ויטבתה 2 חל שינוי מקביל בריכוז ה-Cl וה-NO₃ במי הקידוחים; עליה מקבילה בריכוז המומסים ואחר כך ירידה (איור 17 ב'-ג'). במי קידוח יטבתה 13 היו ריכוזי ה-Cl יציבים בקרוב (איור 17 ד').

5. דיון

קיום הצמחייה במלחת יטבתה מותנה בהמצאות מי תהום בעומק המאפשר את ניצולם וברמת מליחות סבירה. העומק והמליחות של מי התהום משתנים על פני שטח מצומצם במלחת יטבתה. המלחת מי התהום במלחה קשורה למנגנון הזרימה של מי התהום. על כן, לצורך בחינה של ההשפעה האפשרית של הגורמים ההידרולוגיים על תמותת הצמחים במלחה, נדון במודל הזרימה של מלחת יטבתה ובעקבותיו במנגנון ההמלחה.

מודל הזרימה במלחה

מלחת יטבתה מהווה בסיס ניקוז לזרימת מים עלילים מצפון, מהרי הנגב במערב ומהרי אדום במזרח. המלחה משמשת גם כבסיס ניקוז לזרימת מי תהום המתכנסת אל אקוויפר המילוי מהאקוויפרים של חבורת יהודה וחבורת כורנוב ממערב וצפון ומהאקוויפר של מניפות הסחף ממזרח ובמידה מסוימת גם מצפון ומערב. אקוויפר המילוי נחלק לשני תת אקוויפרים הנבדלים זה מזה במפלס ובמליחות מי התהום. למרות השוני בין שני תת האקוויפרים לא ברורה מידת ההפרדה ההידרולוגית ביניהם ועד כמה היא רציפה בעיקר בשולי המלחה. העומד ההידראולי הגבוה בתת האקוויפר העמוק, יחסית לזה של האקוויפר הרדוד, יוצר גרדיאנט הידראולי כלפי מעלה. במקומות שבהם הגבול בין שני תת האקוויפרים דולף (leaky) תתכן הזנה של מי תהום מתת האקוויפר העמוק לרדוד.

תת-האקוויפר העמוק ניזון ממניפות הסחף במזרח וגם לטרלית מאקוויפר חבורת כורנוב, כפי שנראה מהפרש המפלסים בין אלו באקוויפר חבורת כורנוב בצפון ובמערב ואלו שבתת האקוויפר העמוק של אקוויפר המילוי. הדמיון בהשתנות המפלסים במשך השנים בקידוחי אקוויפר חבורת כורנוב ובתת האקוויפר העמוק של המילוי רומז על הקשר ההידרולוגי

ביניהם. מאחר ששני האקוויפרים כלואים התנודות בעומדים של מי התהום מובחנות היטב על פני מרחקים גדולים.

תת האקוויפר הרדוד של אקוויפר המילוי ניזון לטרלית מאקוויפר חבורת יהודה מצפון וממערב למלחה וממניפות הסחף ממזרח וממערב לה. איור 13 רומז על האפשרות שבסיס הניקוז התת קרקעי, של מי התהום במלחה מצוי בקרבת קידוח יטבתה ת/2, ממערב לבסיס הניקוז העילי המצוי בקרבת קידוח יטבתה ת/3. בנוסף לכך נראה שמפלס מי התהום בתת האקוויפר הרדוד באקוויפר המילוי (קידוח יטבתה ת/1 באיור 12) גבוה מן המפלס בחבורת יהודה במערב (קידוח יטבתה 9). המיקום הא-סימטרי של בסיס הניקוז נגרם כנראה על ידי כניסות מים גדולות יותר ממזרח ובהתאם המפלסים גבוהים יותר מאלו שבמערב (איור 18).

היווצרותה של התמלחת קרוב לפני השטח, כתוצאה מאידוי, יוצרת מצב הידרולוגי בלתי יציב בו נמצאים מים מלוחים, בעלי צפיפות גבוהה, מעל מים מתוקים צפופים פחות. בעקבות זאת תהיה שקיעה של התמלחת כלפי מטה (density driven flow) וערבוב עם המים הצפופים פחות.

השפעת השאיבה על מפלס מי התהום

שאיבת מים בשולי המלחה הביאה להפחתה בנפח המים המתנקזים אליה ומכאן לירידה במפלס מי התהום. קיימות עדויות ברורות לירידת המפלס באזור המלחה כמו לדוגמא בעין רדיאן. הגברת השאיבות בצפון המלחה משנות השישים ועד לשנת 1984 לוותה בירידה של מפלס מי התהום בקידוחים השואבים. עם ההתייצבות בנפח השאיבה התמתנו ירידות מפלס מי התהום בקידוחים המפיקים, בחלקם עד התייצבות המפלס.

סביר להניח כי מפלס מי התהום בתת האקוויפר הרדוד של אקוויפר המילוי מושפע משאיבות מאקוויפר חבורת יהודה. עקב קשרי ההזנה בין אקוויפר חבורת כורנוב לתת אקוויפר המילוי העמוק ובין האחרון לתת האקוויפר הרדוד, עלולה שאיבה משני האקוויפרים העמוקים והכלואים הללו לגרום במישרין או בעקיפין לירידת מפלס באקוויפר המילוי הרדוד. בשדה השאיבה של יטבתה לא מפיקים מים מאקוויפר חבורת כורנוב אלא רק בשדות שאיבה רחוקים יותר מצפון למלחה. קשה לקבוע, על סמך הנתונים הקיימים, עד כמה משפיעים קידוחי ההפקה הרחוקים על מפלס מי התהום במלחה. הפקת מים מאקוויפר המילוי עצמו נעשית בעיקר מדרום למלחה במורד הזרימה. נפח המים הנשאבים באזור זה קטן יותר וככל הנראה המפלסים שם ירדו יחסית פחות. על כן השאיבה מדרום לא צפויה להשפיע באופן משמעותי על מפלס מי התהום במלחה. קידוח יטבתה 13 הוא הקידוח היחיד השואב מים מאקוויפר המילוי מצפון למלחה. בכל שנות פעולתו של הקידוח (משנת 1980) מפלס מי התהום לא ירד משמעותית.

מנגנון ההמלחה

הגורם העיקרי למליחות הגבוהה של מי התהום בתת האקוויפר הרדוד במלחה הוא כאמור אידוי מן הקרקע וטרנספירציה דרך צמחים. מליחות מי התהום במלחה מושפעת במידה מסוימת גם מן המליחות של המקורות השונים של המים המגיעים למלחה: מי התהום המליחים שמקורם באקוויפרים של חבורות כורנוב ויהודה ומי התהום המתוקים שמקורם במניפות הסחף ממזרח וממערב. מליחות מי התהום מושפעת מיחס הערבוב בין שני מרכיבי

הקצה. ככל שמתקרבים מזרחה עולה חלקו של המרכיב המתוק. מליחות מי התהום יכולה לעלות כאשר קטן חלקו של מרכיב הקצה המתוק, למשל על ידי שאיבה ממזרח, או כאשר עולה המליחות של מרכיב הקצה המלוח. אין בידינו נתונים מהימנים על היקף השאיבה ממזרח. לעומת זאת מליחות מרכיב הקצה המליח עלתה במהלך השנים בהן הופקו מי תהום מקידוחים בשדה השאיבה של יטבתה (איור 17). עליה בריכוז הכלורידים במי התהום יכולה להצביע על עליה במרכיב המליח וואו על זיהום אנתרופוגני. מי תהום לא מזוהמים מכילים NO_3 בריכוז נמוך (בד"כ נמוך מ-20 mg/L). עליה של ריכוז ה- NO_3 מעל לערכי רקע אלו מעידה על זיהום שמקורו בקולחים או בדשנים. ריכוז ה-Cl בקידוחים יטבתה 2 ו-12 עלה יחד עם ריכוז ה- NO_3 עובדה המעידה גם על זיהום שמקורו אנתרופוגני. קשה להעריך את הקף הזיהום של מי התהום ויתכן שמדובר בזיהום מקומי בלבד של שני הקידוחים. בקידוח יטבתה 11 עלה מעט ריכוז ה-Cl ללא שינוי דומה בריכוז ה- NO_3 כנראה בשל עליה קלה בחלק היחסי של המרכיב המליח במי התהום.

השינוי העיקרי שהתרחש במלחה הוא ככל הנראה הפחתה בנפח המים המליחים הנכנסים למלחה. הירידה בנפח המים הנכנסים למלחה מקטינה את המרכיב המוהל את התמלחת של המלחה וגורמת לעליה במליחות מי התהום. לעומת זאת, הירידה בנפח המים הנכנסים גורמת להעמקה של מפלס מי התהום ולכן מקטינה את ההתאדות בשל הקשר בין קצב ההתאדות לעומק מפלס מי התהום (Ripple et al., 1972). כתוצאה מכך יכולה לרדת מליחות מי התהום באזורים מסוימים. העדר נתונים על ההרכב הנוכחי של מי התהום, בעיקר באזורים בהם מצויים הצמחים במצוקה, אינו מאפשר לבחון איזה מבין התהליכים הוא הדומיננטי. הגורם לתמותת השיחים באזורים בהם צורת התמותה כתמית יכול להיות מקומי. יתכן שהתמותה נגרמת משילוב של ירידה כללית במפלס מי התהום ותנאים מקומיים כמו הרכב הקרקע וטופוגרפיה. גורם נוסף העשוי לפגוע בצמחי המלחה הוא שקיעת מלחים, כדוגמת גבס, בקרבת פני השטח או באזור בית השורשים של הצמחים. קיימים חתכים עבים של גבס במלחה המלמדים כי גבס שקע בעבר לאורך תקופות ארוכות. לכן, סביר להניח כי גם כיום באזורים מסוימים במלחה שוקע גבס. המחסור בנתונים לא אפשר בדיקת הנושא בשלב זה.

האם קיימים גורמים אפשריים נוספים להתייבשות המלחה?

1. שינויים אקלימיים: בשנים האחרונות לא נמדד שינוי משמעותי בכמות המשקעים באזור מלחת יטבתה ולא ניתן להבחין בשינוי אקלימי משמעותי.
2. תהליכי בינוי המפרים את זרימת הנגר העילי הטבעית: כביש הערבה נבנה כסוללה ובה מספר נקזים למי הנגר העילי. הנקזים מאפשרים למי הנגר לעבור את הכביש ממערב למזרח. מצבם הטוב של עצי השיטה ממזרח לכביש הערבה מעיד על כך שההפרעה שיוצר כביש הערבה כנראה אינה משמעותית (ב. שלמון בע"פ). מרכיב הנגר העילי הינו בכל מקרה זניח עקב מיעוט אירועי גשם גדולים.

6. סיכום

הצמחים במלחת יטבתה מתקיימים בתחום צר בו מי התהום אינם עמוקים מכדי שיוכלו לנצלם ואינם קרובים יתר המידה לפני השטח ועל כן בעלי מליחות גבוהה בשל האידוי. הפרה של המערכת ההידרולוגית במלחת יטבתה גרמה לירידה במפלס מי התהום ויתכן שאף הביאה לשינוי במליחותם.

מי תהום מצפון, ממזרח וממערב זורמים אל מלחת יטבתה. סביר להניח כי מפלס מי התהום בתת האקוויפר הרדוד ירד כתוצאה משאיבת מים מצפון. אכן, מפלסי מי תהום ירדו באופן משמעותי משנות הששים (ירידת מפלסים של עד כ-10 מטר במקומות מסוימים), בתקופה שבה החלה השאיבה העיקרית. לא נמצאו גורמים נוספים העשויים להביא להתייבשות. לא נמצאה ירידה בכמות המשקעים או שינוי אקלימי ונראה כי נפח מי הנגר העילי שהמלחה מאבדת כיום בשל ההפרעה שיוצר כביש הערבה קטן בהשוואה לנפח המים של המקורות האחרים של המלחה.

מליחות מי התהום במלחה נקבעת על ידי מידת האידוי במלחה ומידת המיהול על ידי זרימות מן השוליים. שני הגורמים מושפעים ישירות מן הכמות של מי התהום המגיעים למלחה הקובעת את מפלס מי התהום. מאחר ששני הגורמים משפיעים בצורה מנוגדת על מליחות מי התהום לא ניתן להעריך את ההשתנות בהרכב מי התהום ללא מדידה ישירה. כיום הקידוחים הרדודים אינם דוגמים את התמלחת של המלחה (במטרים העליונים של תת הקרקע). על כן לא ניתן לבדוק האם הצמחים במלחה נפגעו כתוצאה מעליה במליחות מי התהום. העובדה שצורת הפגיעה בשיחי המלחה היא כתמית רומזת כי הצמחים הושפעו מתהליכים מקומיים ועל כן ייתכן שמדובר בתהליכי המלחה המושפעים בעיקר מתנאים מקומיים. גורם נוסף שיכול להשפיע, ולא נבדק בגלל חוסר בנתונים, הוא שקיעת מלחים כדוגמת גבס בחלקים השונים של המלחה.

בשנים האחרונות התמתנו הירידות הגדולות של מפלס מי התהום בקידוחי ההפקה מצפון למלחת יטבתה. יתכן שהדבר מצביע על התייצבות של מפלסי מי התהום בשווי משקל חדש ועל כן במידה ומשטר השאיבה הנוכחי ישמר לא צפויה ירידה נוספת במפלס המים. לעומת זאת לא ברור האם מי התהום הגיעו לשווי משקל חדש גם מבחינת מליחותם.

7. המלצות

המשך ניטור:

- א. יש להמשיך במעקב אחר נפח המים הנשאב מקידוחי ההפקה מצפון למלחה.
- ב. יש להמשיך במעקב אחר מפלסי המים הן בקידוחי התצפית במלחה: יטבתה 19/21, 21/7, 19/25 וקידוחי התצפית הדו-קניים יטבתה 29/ת, 1/ת, 2/ת ו-3/ת והן בקידוחי ההפקה.
- ג. יש לבדוק באופן רצוף את ההרכב הכימי של מי התהום במלחה בעיקר בתת האקוויפר העליון.

מחקר להבנת ההידרולוגיה של המלחה:

לצורך הערכת הגורמים המשפיעים על התנאים ההידרולוגיים במלחה יש לבדוק את הנושאים

הבאים:

1. הרכב מי התהום בשני תת האקוויפרים במלחה.
2. אפיון גיאוכימי ואיזוטופי של מקורות המים של המלחה (מרכיבי הקצה ומי תת האקוויפר העמוק והרדוד).
3. השוואה של הרכב מי המלחה כיום ובעבר.
4. בחינה של ההבדלים בין אזורים בהם התייבשו צמחי ההגה המצוי לאזורים בהם הצמחים במצב טוב (מפלסים ומליחות מי תהום).
5. חשוב להשיג נתונים מהצד הירדני של מפלסי מי תהום, מליחותם וכמויות שאיבה. לצורך כך יש ליצור שיתוף פעולה עם הירדנים.
6. כסיכום מומלץ לבנות מודל הידרולוגי ממוחשב שינסה, עד כמה שניתן במצב הנתונים הקיימים, לערוך סימולציה למודל ההידרולוגי של המלחה לפני התחלת השאיבה ולשינויים שחלו כתוצאה ממנה. המודל ישמש גם לעריכת סימולציה לגבי תרחישים בעתיד.
7. מומלץ לבדוק אם ישנם פרמטרים אחרים, פיסולוגיים וביולוגיים, המשפיעים על הצמחייה.

לצורך כך יש לנקוט באמצעים הבאים:

1. הוספת קידוחי תצפית להשלמת הידע הקיים על מבנה תת הקרקע, חלוקה לתת אקוויפר, והכרת ההרכב המינרלוגי של הסדימנטים. הקידוחים ישמשו למעריך ניטור למפלס מי התהום והרכבם. על כן הקידוחים יהיו פתוחים לשני תת-האקוויפרים, חלק מן הקידוחים יהיו רדודים מאוד, וימוקמו קרוב למרכז המלחה, על מנת שניתן יהיה לדגום מהם מי תמלחת.
2. עריכת אנליזות כימיות ואיזוטופיות מלאות כולל אנליזות רדיואקטיביות (^{14}C וטריטיום) לקביעת הגיל של מי התהום והערכת קצב הזרימה באקוויפרים השונים. שלב מקדים לדגימה יהיה שאיבת ניקיון שתגרום להכנסת מי תהום מייצגים לצינור הקידוח.
3. דיגום מים וסדימנטים מן האזור הבלתי רווי מפני המים ועד לפני השטח, כולל אזור השורשים. המים ימוצו מן הסדימנטים בעומקים שונים על ידי צנטריפוגה.

8. הבעת תודה

אנו מודים לאורי כפרי מן המכון הגיאולוגי על הייעוץ והעזרה, לבני שלמון מרשות הטבע והגנים על העזרה הרבה בשדה והעמדת הנתונים. להרצל נאור מתה"ל על שיחות מועילות וליצחק גרינט על הנתונים ההידרולוגיים. לעדי טל ואולגה מלר מן השירות ההידרולוגי על הנתונים ההידרולוגיים, ולרונית בן-שרה מן השרות המטאורולוגי על העמדת נתוני המשקעים לרשותנו. תודה לד"ר משה גטקר מן התחנה לחקר הסחף על שיחה מועילה. העבודה מומנה על ידי רשות הטבע והגנים.

9. רשימת ספרות

- ביין, ע., יחיאלי, י. והליץ, ל., 1995, הגיאוכימיה של מי התהום בערבה הדרומית, דו"ח המכון הגיאולוגי מס' GSI/43/95, 28 עמ'.
- בר, א., 2000, סיכום סקר צומח בשטח הצפוני – חי בר יטבתה, מסמך פנימי רשות הטבע והגנים. ברסלבסקי, י., 1952, הידעת את הארץ. כרך ד' אל אילת ואל ים סוף, הוצאת הקיבוץ המאוחד, עמ' 73-74, 185.
- גלעד, ד., 1968, מחקר התאדות בשיטה הליזימטרית במלחת יטבתה. עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- גרפונקל, צ., 1970, הטקטוניקה של השוליים המערביים של מפרץ אילת (תרומה לדרך היוצרות בקעים). עבודת דוקטור, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- מיכאלי, א. וגלאי, ע., 1963, מחקר הידרולוגי באזור יטבתה. תה"ל פ"מ 359.
- נאור, ה., 1979, הידרוגיאולוגיה של האקוויפרים באזור גרופית יטבתה. עבודת גמר לתואר מוסמך, האוניברסיטה העברית, ירושלים.
- נאור, ה. וגרניט, י., 1999, ערבה דרומית, עדכון המצב ההידרולוגי והתפעולי של האקוויפרים והקידוחים ותחזיות לשנת 2003. תה"ל 6749-278.99.
- נאור, ה. וגרניט, י., 1992, מלחת יטבתה, סקר הידרוגיאולוגי ראשוני למיקום ברכות אידוי מי ים המלח. תה"ל 04/92/54.
- נאור, ה. ושהרבני, מ., 1989, אזור תמנע-יהל, בדיקת המצב ההידרולוגי והתפעולי של האקוויפרים ושל קידוחי ההפקה. תה"ל 01/89/40.
- סיני, י., 1998, פרוגרמת ממשק לחי-בר יטבתה בשמורת יטבתה, מסמך פנימי, רשות הטבע והגנים.
- קרויטורו, ל., 1978, קידוחי מחקר במליחת יטבתה, דו"ח תה"ל ת"א.
- Adar, E. M., Rosenthal, E., Issar, A. S. and Batelaan, O., 1992, Quantitative assessment of the flow pattern in the southern Arava Valley (Israel) by environmental tracers and a mixing cell model. J. Hydrol. 136, 333-352.
- Burdon, D. J., 1959. Handbook of the Geology of Jordan. Government of the Hashemite Kingdom of Jordan, 82pp.
- Abdulkader, M. A., 1998, Geology and mineral genesis of Taba inland sabkha, southern Dead Sea Transform, SW Jordan. Quaternary Deserts and Climatic Change.
- Energoproject Co., 1990, Wadi Arava development project/ Summary project, 1990, Belgrade.
- Gat, J. R. and Naor H., 1979, The relationship between salinity and the recharge/discharge mechanism in arid lowlands. IAHS publication no. 128, 307-312.
- Kafri, U., 1977, Disposal of waste effluents formed during the proposed production of titanium dioxide in Timna., Geological Survey of Israel, Hydro/2/77, 11 pp.

- Langbein, W. B., 1961, Salinity and hydrology of closed lakes: U.S. Geological Survey Professional Paper 412.
- Ripple, C. D., Rubin, J., Van Hylckama, T. E. A., 1972, Estimating steady-state evaporation rate from bare soils under condition of high water table. U. S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2019-A, p. A1-A39.
- Rosen, M. R., 1994, The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas, Geological Society of America, Special Paper 289, p 1-8.
- Yechieli, Y. and Wood, W. W., (In press), Hydrogeologic processes in saline systems: Playas, Sabkhas, and Saline Lakes. Earth Science Review.

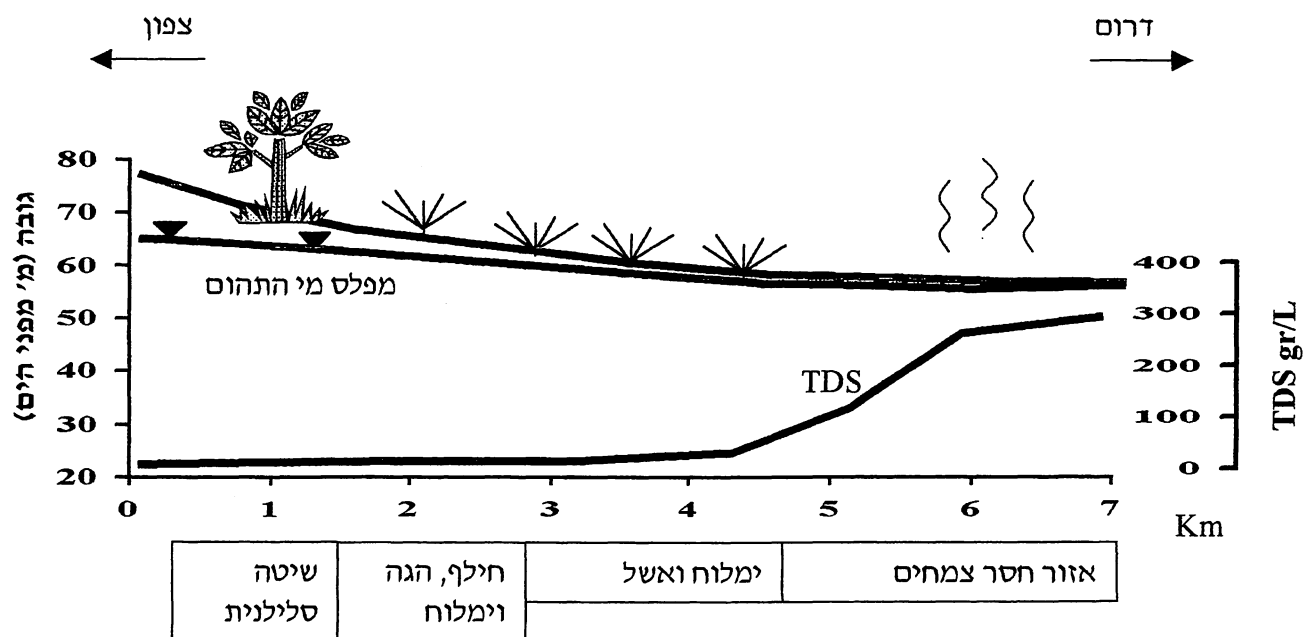
טבלה 1 : קידוחי ההפקה והתצפית במלחת יטבתה ובסביבתה.

שם	קוד הקידוח	קואורדינטות		שנת קדיחה	גובה מעל פני הים (מ')	עומק הקידוח (מ')	אקוויפר	סוג הקידוח	עומק פרפורציה (מ')
יטבתה 5	92415501	155.74	924.92	1950	79.9	73	חב' יהודה	תצפית	
יטבתה 11	92415601	156.06	924.9	1965	77.6	64.4	חב' יהודה	הפקה	
יטבתה ת/12	92415602	156.42	924.3	1960	80.1	18	חב' יהודה	תצפית	12.5-0
יטבתה 12	92415603	156.58	924.16	1974	80	81	חב' יהודה	הפקה	61.4-25.2
יטבתה 8	92215502	155.48	922.99	1953	80.29	122.5	חב' כורנוב	תצפית	117.5-68.8
יטבתה 2	92215503	155.5	922.88	1950	72.9	50	חב' יהודה	הפקה	38.8-15.2
יטבתה 9	92215501	155.08	922.24	1955	73.65	32	חב' יהודה	תצפית	26-10
תמרים צפון יטבתה	92215601	156.22	922.24	1962	73		מילוי	הפקה	
יטבתה ת/9	92215505	155.08	922.21	1967	72.89	130	חב' כורנוב	תצפית	124-100
יטבתה ת/1 עמוק	92215701	157.2	922	1978	64.06	149	מילוי	תצפית	149-90
יטבתה ת/1 אי שטוח	92215702	157.2	922	1978	63.97	62	מילוי	תצפית	65-14
יטבתה 13	92115602	156.06	921.23	1980	70	132.5	מילוי	הפקה	128-80
יטבתה ת/29 עמוק	92115504	155.8	921	1976	64.1	150	מילוי	תצפית	
יטבתה ת/29 שטוח	92115503	155.8	921	1976	36.83	150	מילוי	תצפית	
עין רדיאן		154.5	921.5				מילוי באר עתיקה		
מלחת יטבתה 19/25	91915201	152.97	919.99	1962	78.52	28.9	מילוי	תצפית	
מלחת יטבתה 19/21	91815201	152.78	918.99	1962	65.49	18	מילוי	תצפית	
יטבתה ת/2 אי עמוק	91815602	154	918.7	1978	58.51	149	מילוי	תצפית	143-71
יטבתה ת/2 בי שטוח	91815603	154	918.7	1978	58.51	53.4	מילוי	תצפית	53.4-10
יטבתה ת/3 אי עמוק	91815403	156.05	918.7	1978	59.39	148	מילוי	תצפית	148-78
יטבתה ת/3 בי שטוח	91815404	156.05	918.7	1978	58.95	53	מילוי	תצפית	53-17
הגה מת		153.3	918.2	1998		12.15	מילוי	תצפית	
מלחת יטבתה 21/7	91515201	152.2	915.52	1962	84.94	34.6	מילוי	תצפית	
תמוע צמחי שממה	91415202	152.79	914.07	1965	75.83	90.5	מילוי	הפקה	84.9-47
צמחי שממה 2 סמר	91415203	152.79	914.02	1976	76	103.2	מילוי	הפקה	102.7-53

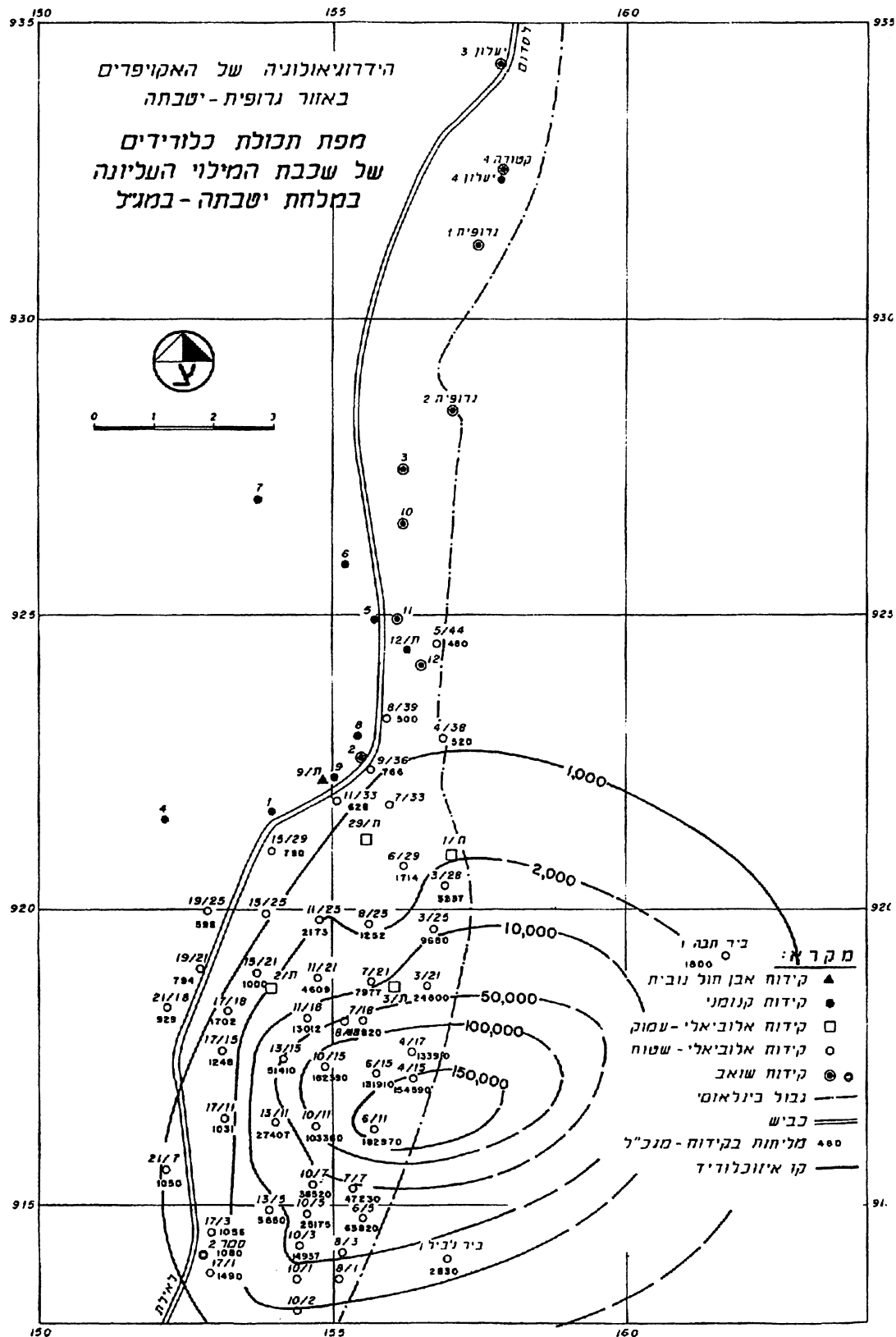
טבלה 2 : ריכוז ה-Cl במי תהום מקידוחים במלחת יטבתה.

הערכים בטבלה הם ברובם ערכים ממוצעים של שתיים-שלוש השנים האחרונות.

Cl (ppm)	שנה	
567	2000	יטבתה 11
502	1954	יטבתה 5
812	2000	יטבתה 12
595	1982	יטבתה 8
1169	2000	יטבתה 2
750	1980	יטבתה 9
728	1983	יטבתה ת/9
566	1984	יטבתה ת/1 עמוק
2559	1984	יטבתה ת/1 א' שטוח
505	2000	יטבתה 13
454	1984	יטבתה ת/29 עמוק
482	1984	יטבתה ת/29 שטוח
558	1984	יטבתה ת/2 א' עמוק
604	1984	יטבתה ת/2 ב' שטוח
564	1984	יטבתה ת/3 א' עמוק
639	1984	יטבתה ת/3 ב' שטוח
618	1962	מלחת יטבתה 19/25
798	1984	מלחת יטבתה 19/21
871	1968	מלחת יטבתה 21/7
1155	1979	תמנע צמחי שממה
1325	2000	צמחי שממה 2 סמר



- איור 2: התאדות מי תהום במלחת יטבתה.
 בציור מוצגים:
1. מפלס המים בציר השמאלי.
 2. תכולת המלחים המומסים (TDS) במי התהום בציר הימני.
 3. תיאור של וחגורות הצומח במלחה יטבתה.
 (מבוסס על גלעד, 1968)

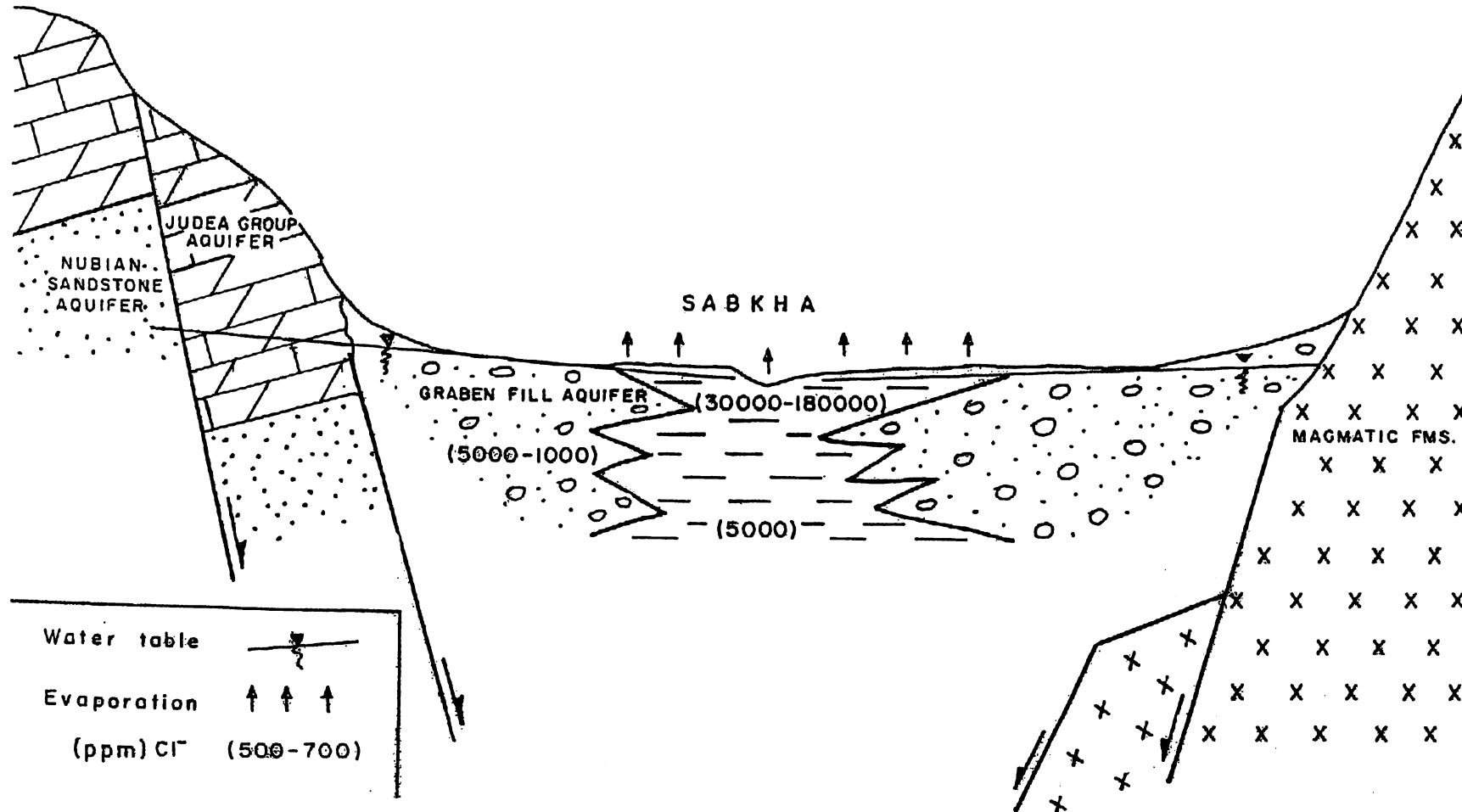


איור 3: מפת ריכוז ה-Cl במי התהום בתת האקוויפר העליון של אקוויפר המילוי במלחת יטבתה (נאור, 1979).

HYDROGEOLOGIC SCHEMATIC CROSS SECTION

WEST

EAST

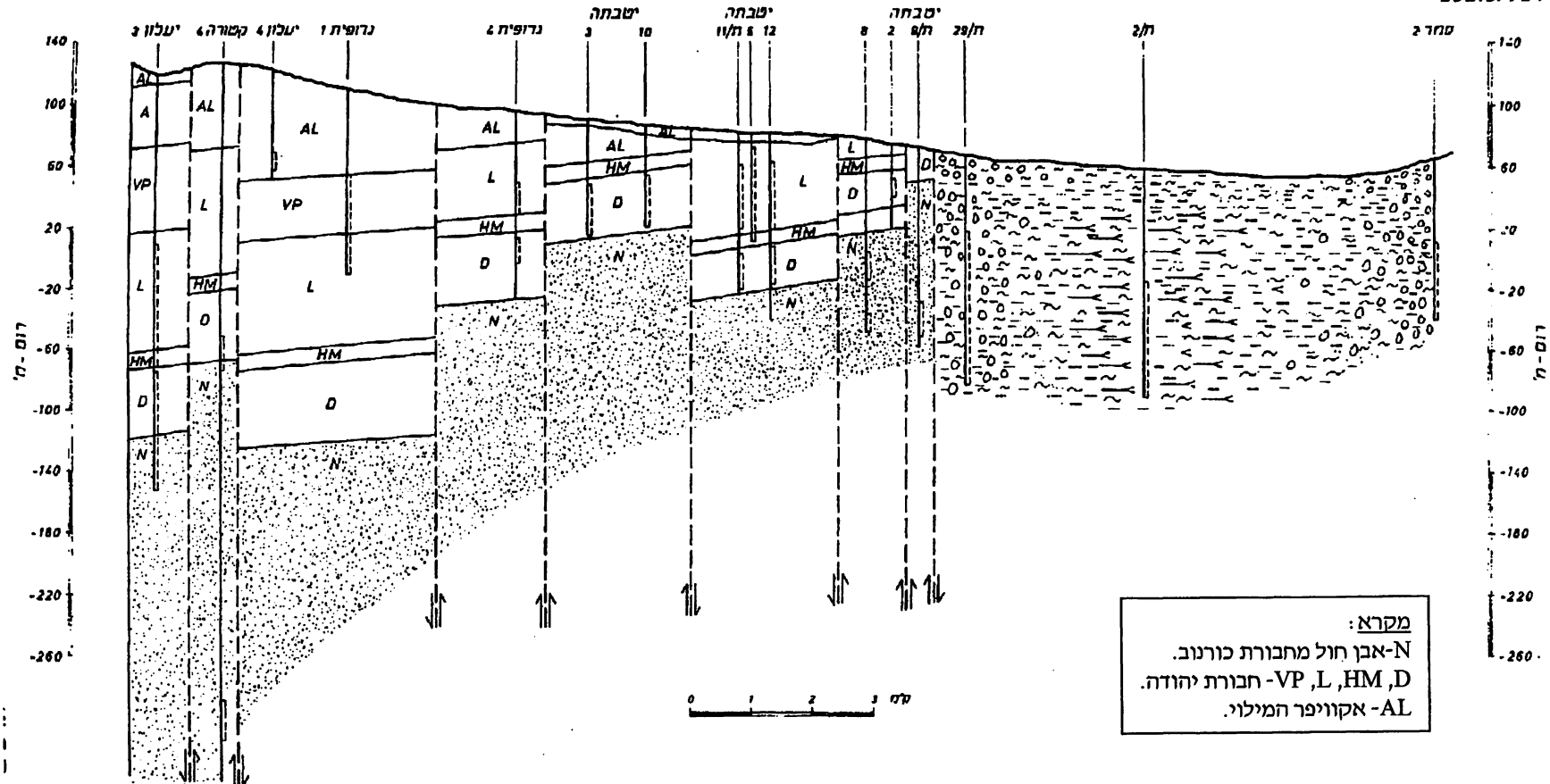


איור 4 : חתך הידרוגיאולוגי סכמתי בכיוון מזרח-מערב דרך מלחת יטבתה (Kafri, 1977).

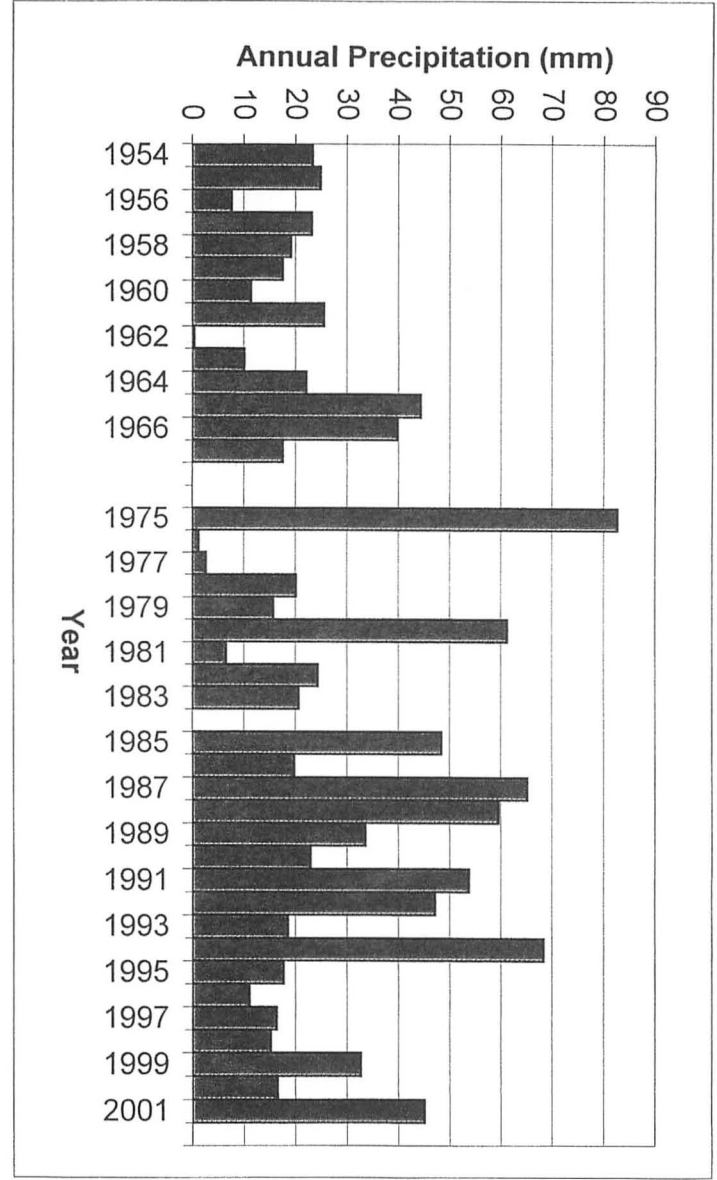
הידרוגיאולוגיה של האקויפרים באזור נרופית-יטבתה

צפון
158.2/934.5

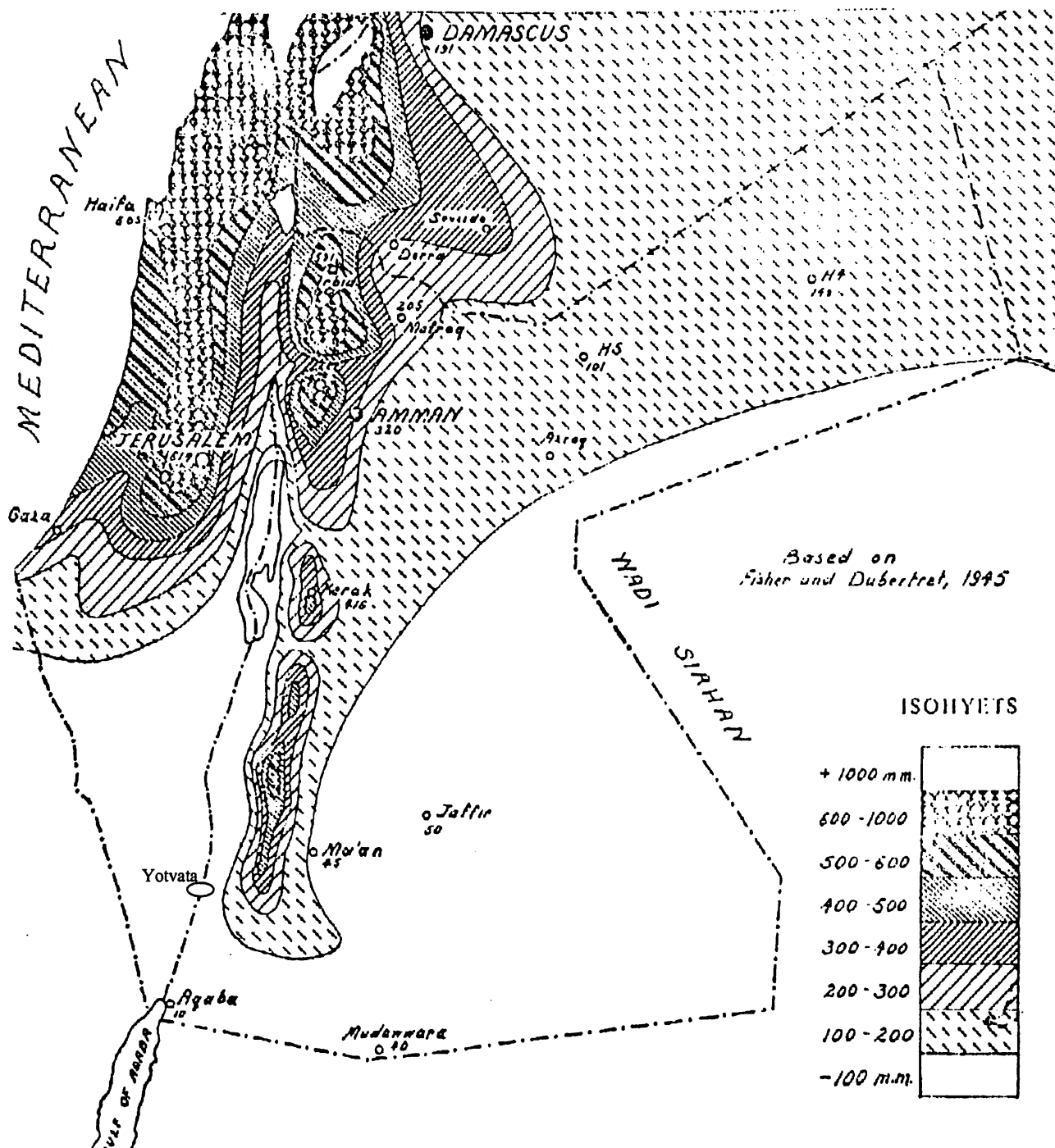
דרום
152.3/914



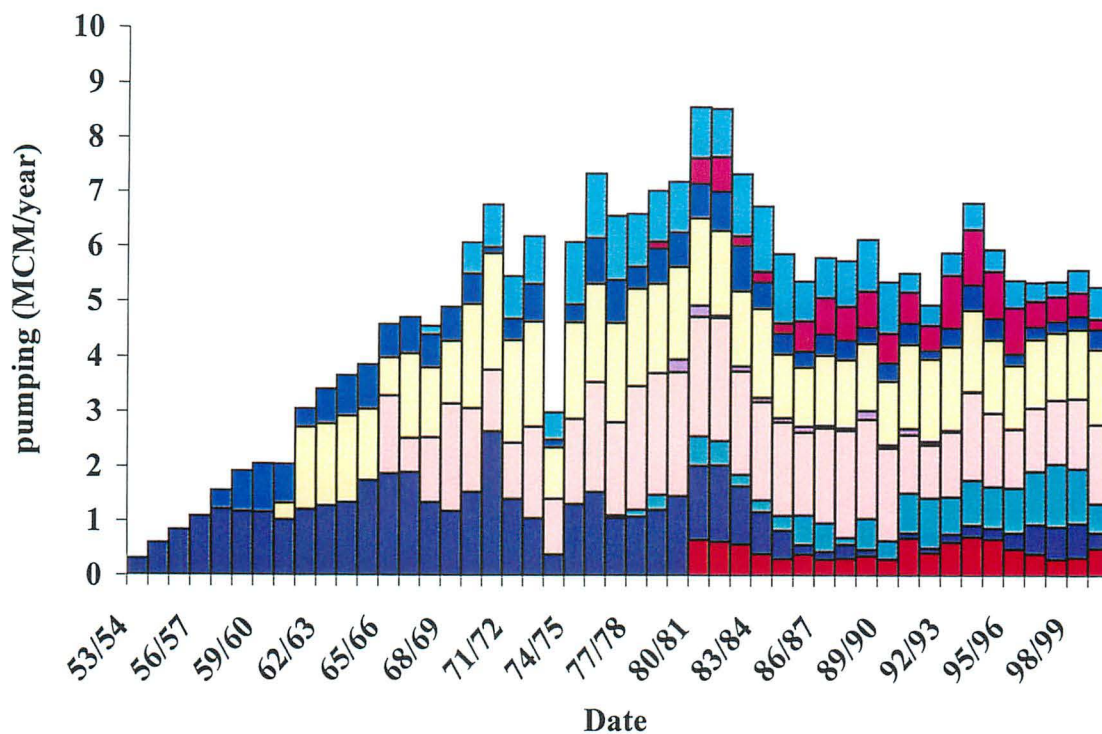
איור 5: חתך הידרוגיאולוגי סכמתי בכיוון צפון-דרום דרך מלחת יטבתה (נאור, 1979).



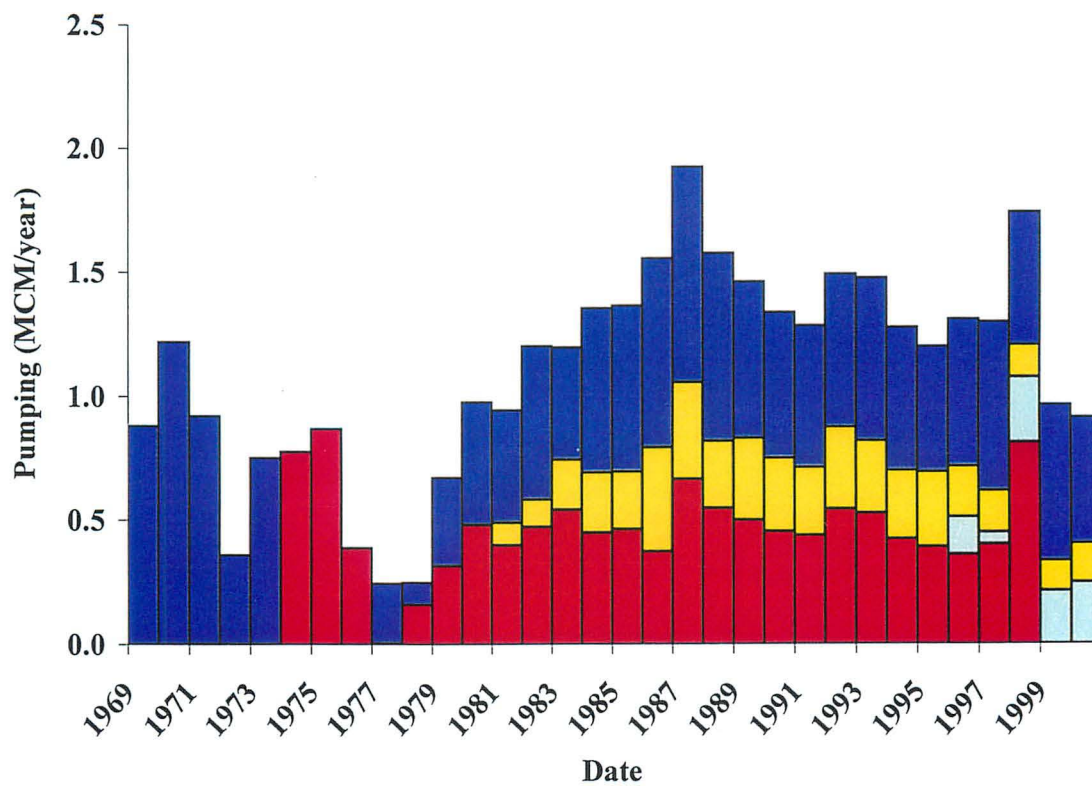
איור 6: כמות הגשם השנתית בתחנת יטבתה (נתוני השרות המטאורולוגי).



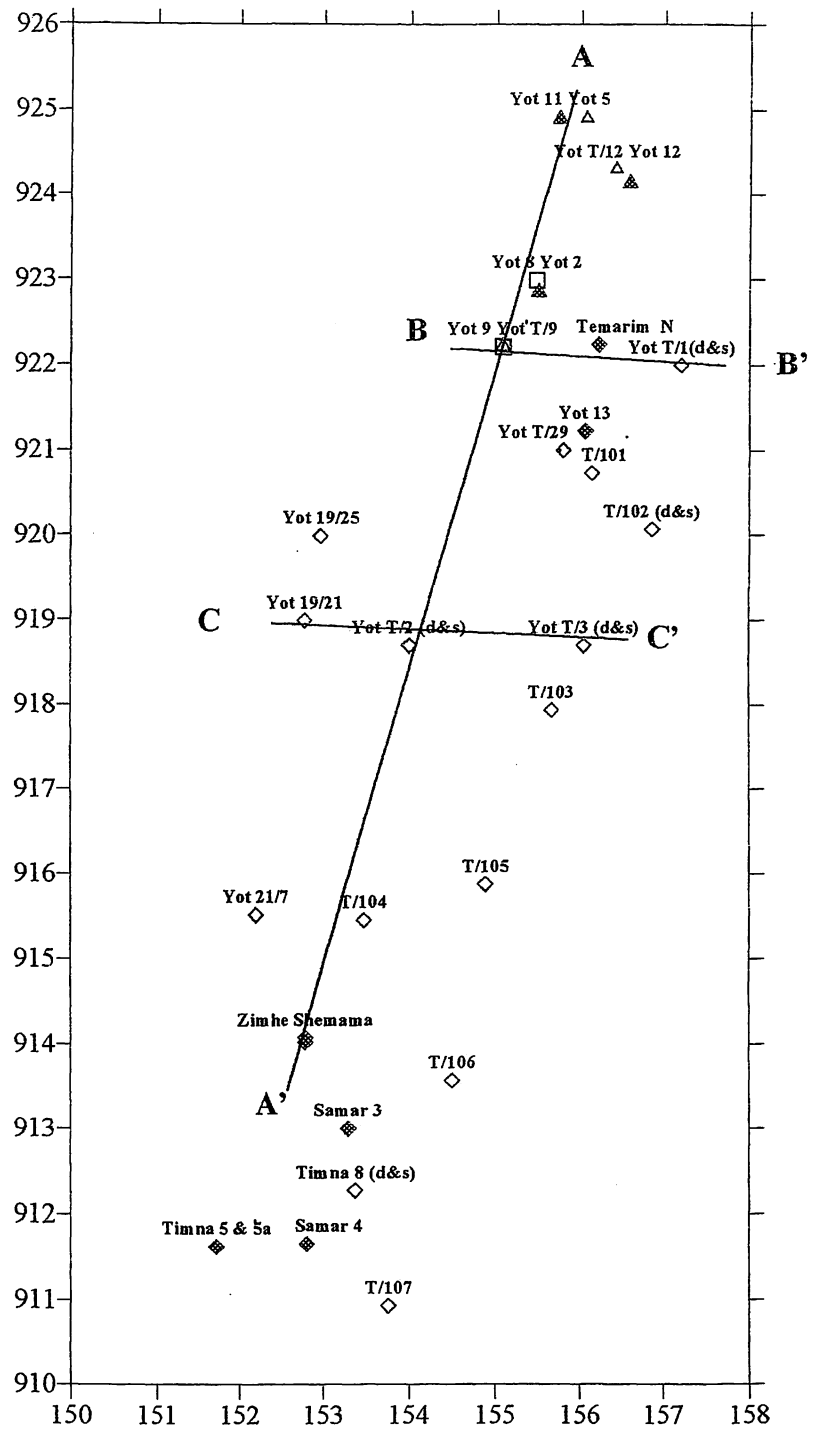
איור 7: מפת המשקעים בירדן וישראל (Burdon, 1959).



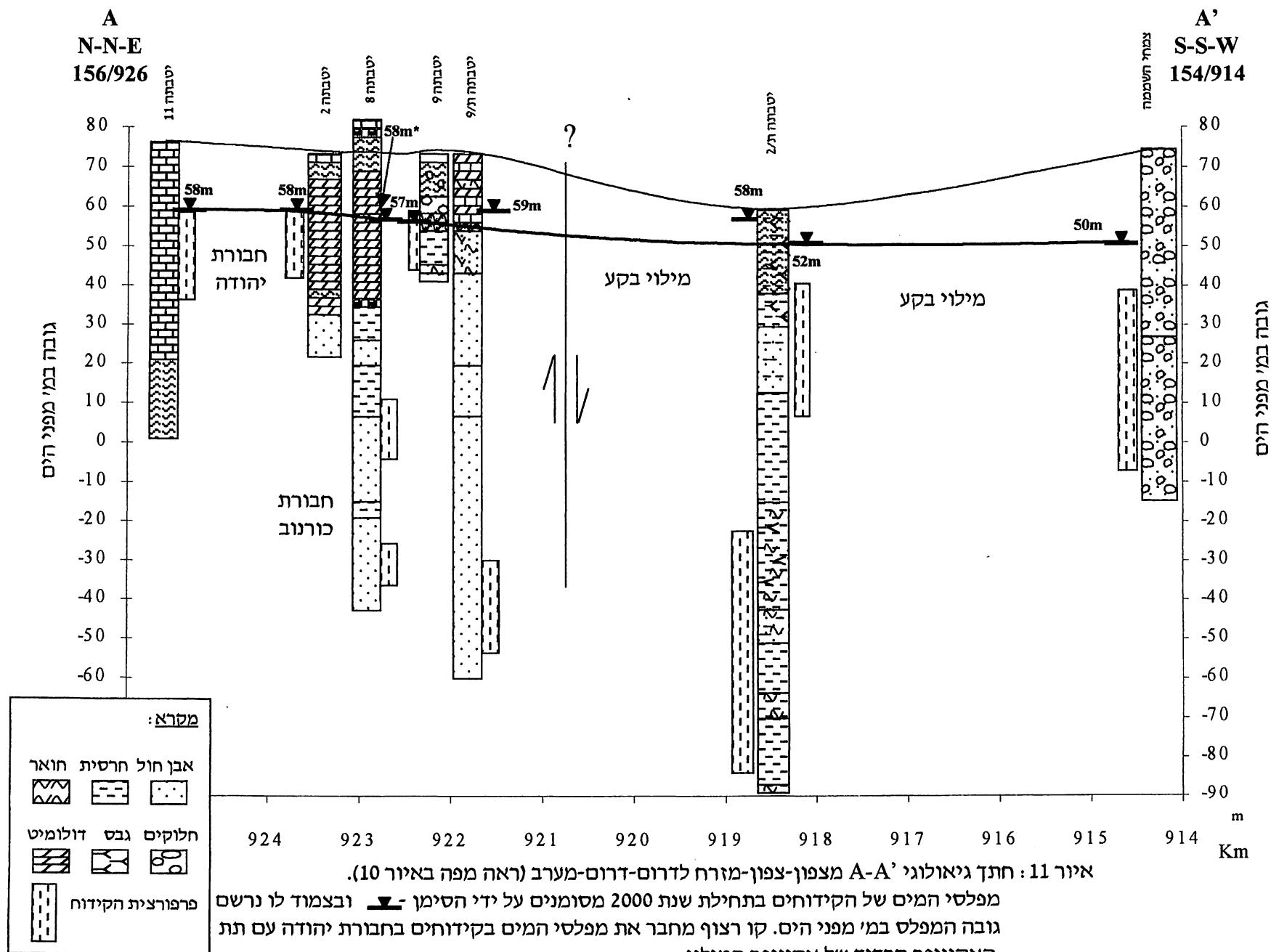
איור 8: נפח השאיבה השנתי בקידוחים השונים בצפון מלחת יטבתה.



איור 9: נפח השאיבה השנתי בקידוחים השונים בדרום מלחת יטבתה.

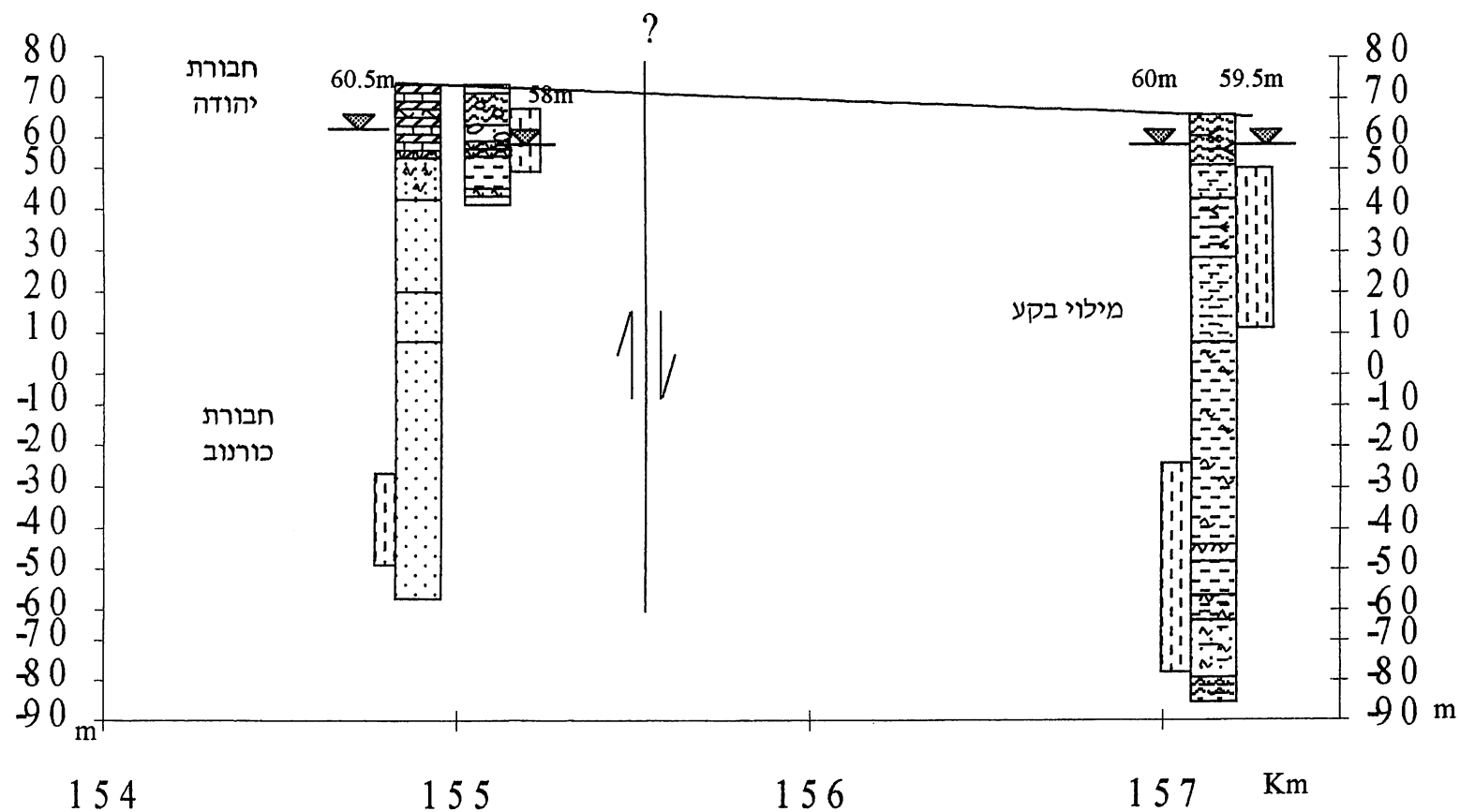


איור 10: מפת מיקום של חתכי רוחב במלחת יטבתה.
ראה מקרא באיור 1.



B
W
154/922

B'
E
158/922

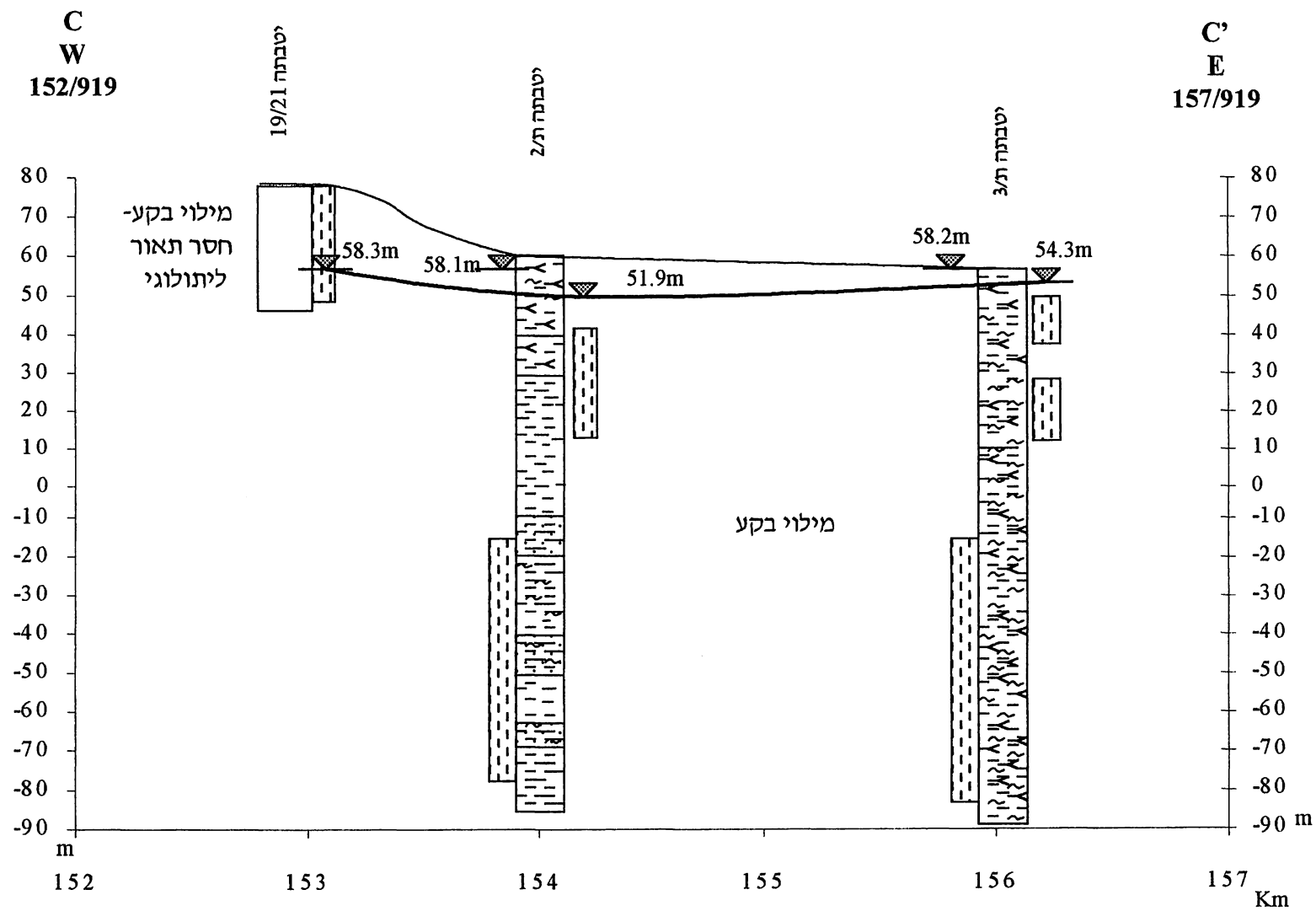


איור 12: חתך רוחב ממזרח למערב בצפון מלחת יטבתה.

מפלסי המים של הקידוחים בשנת 1990 מסומנים על ידי הסימן

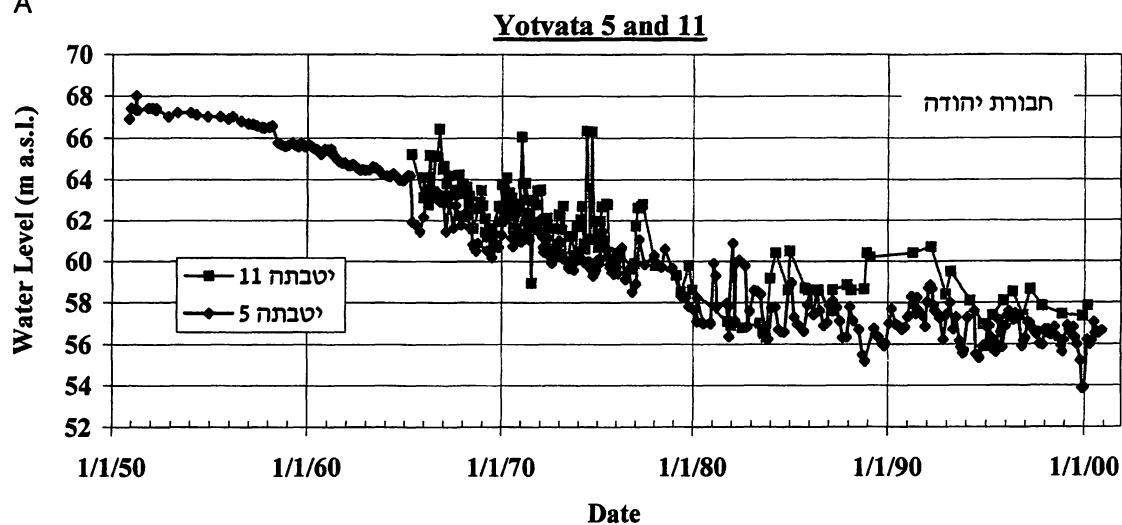
ובצמוד לו רשום גובה המפלס ב-מ' מפני הים.

מקרא באיור 11.

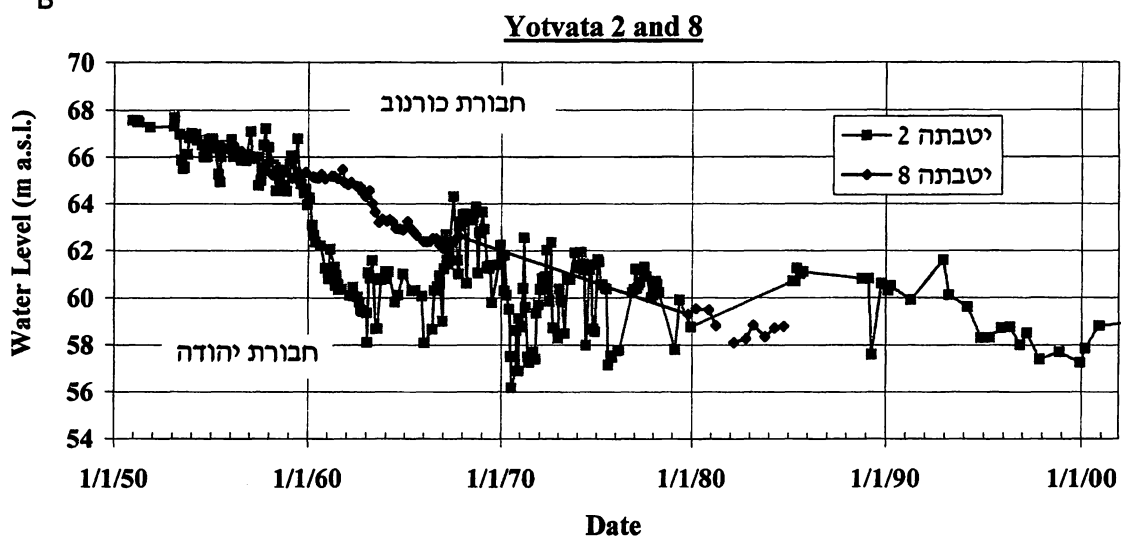


איור 13: חתך רוחב מזרח-מערב במלחת יטבתה, בציר מצוינים המפלסים בקידוחים בשנת 1992.
מקרא באיור 11.

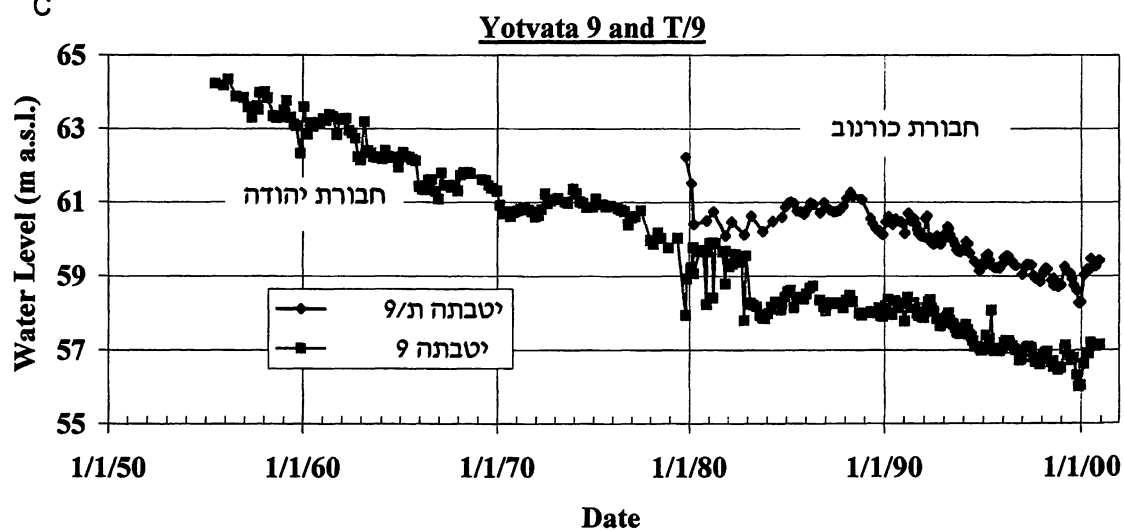
A



B

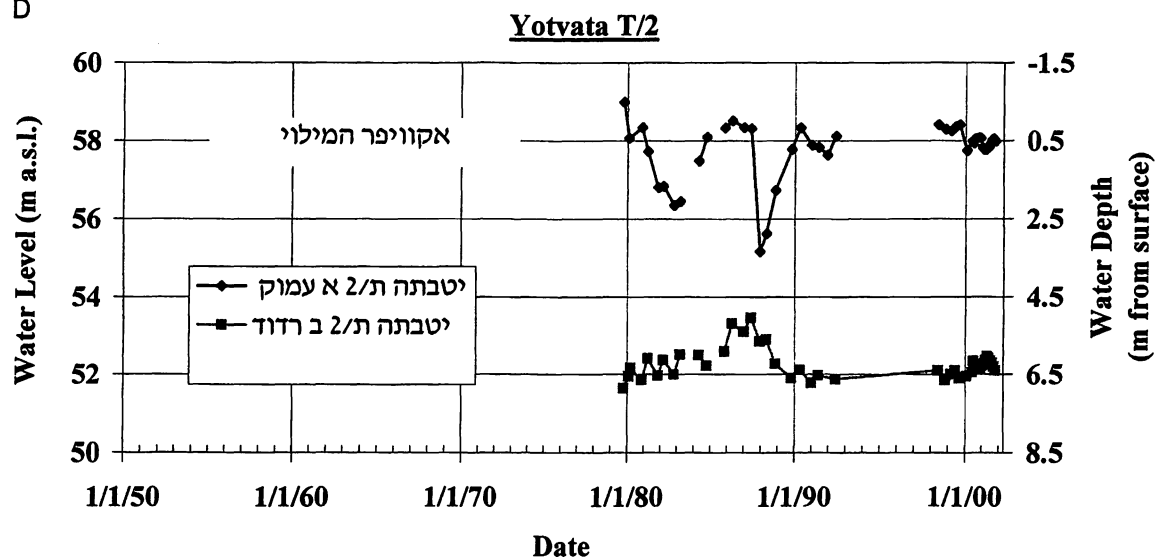


C

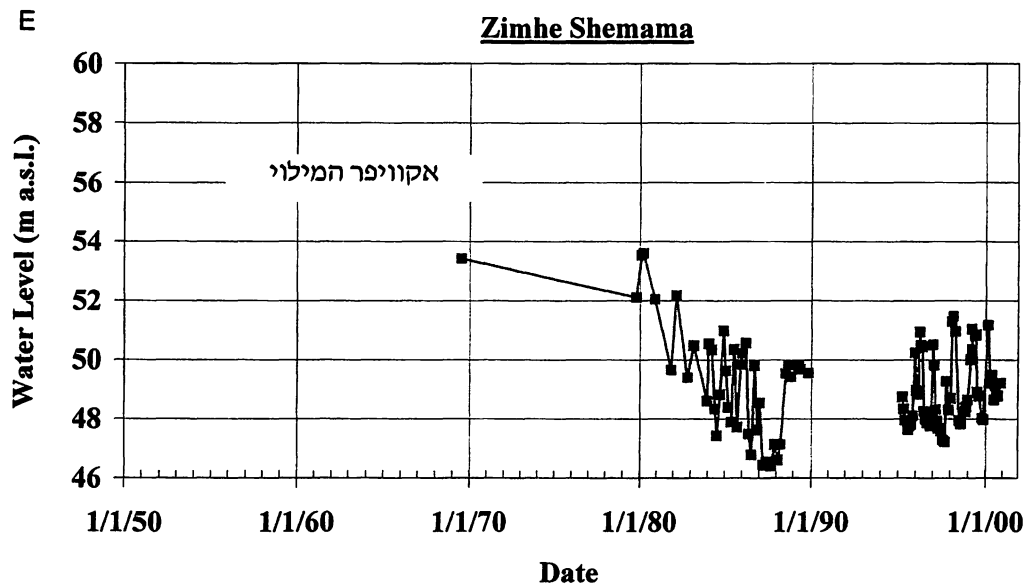


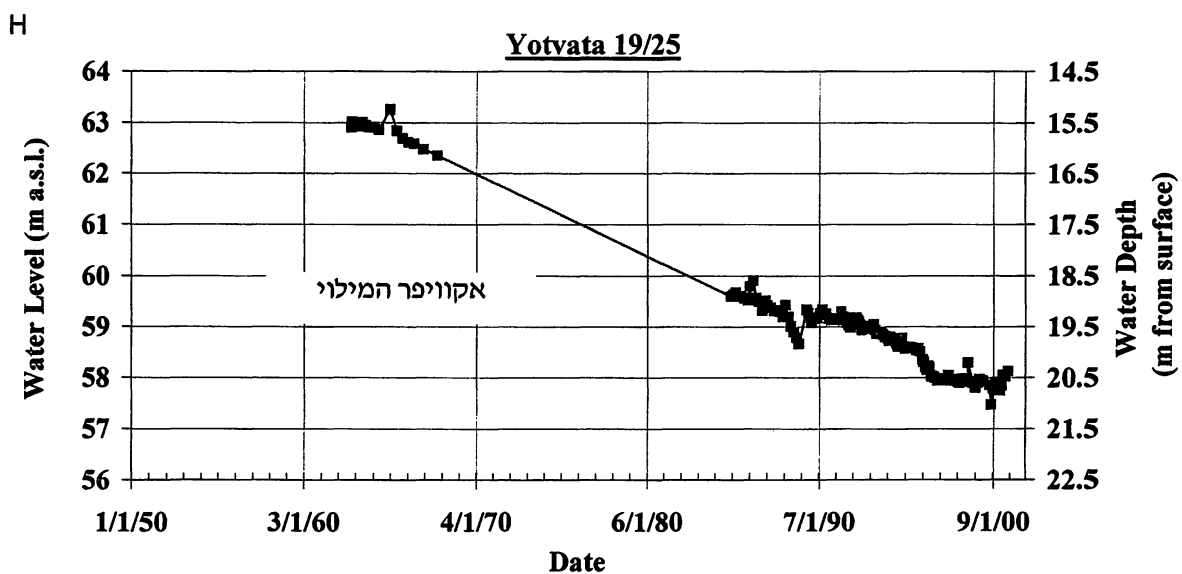
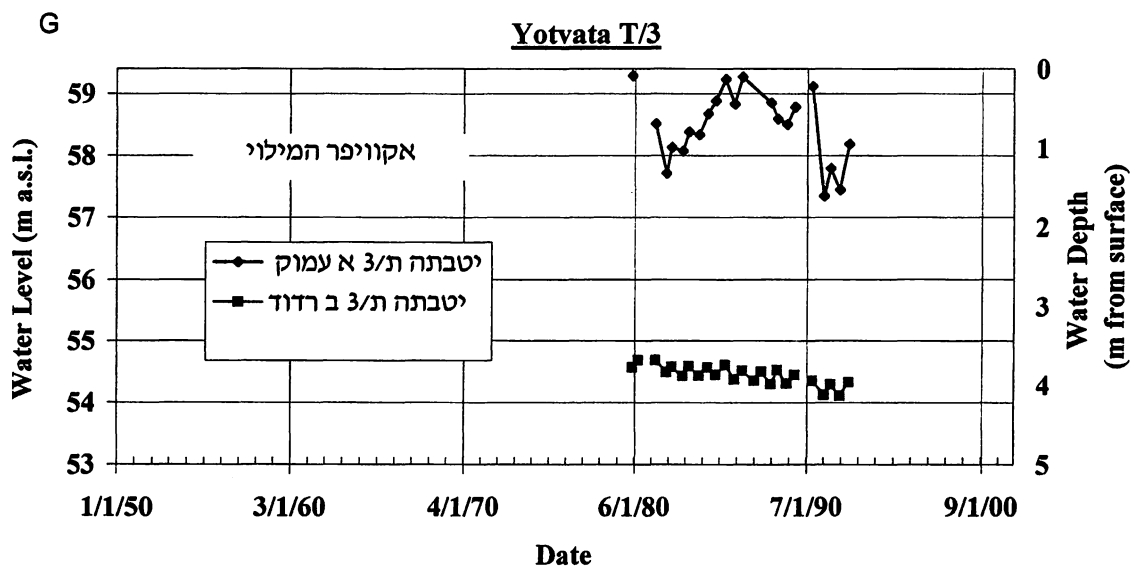
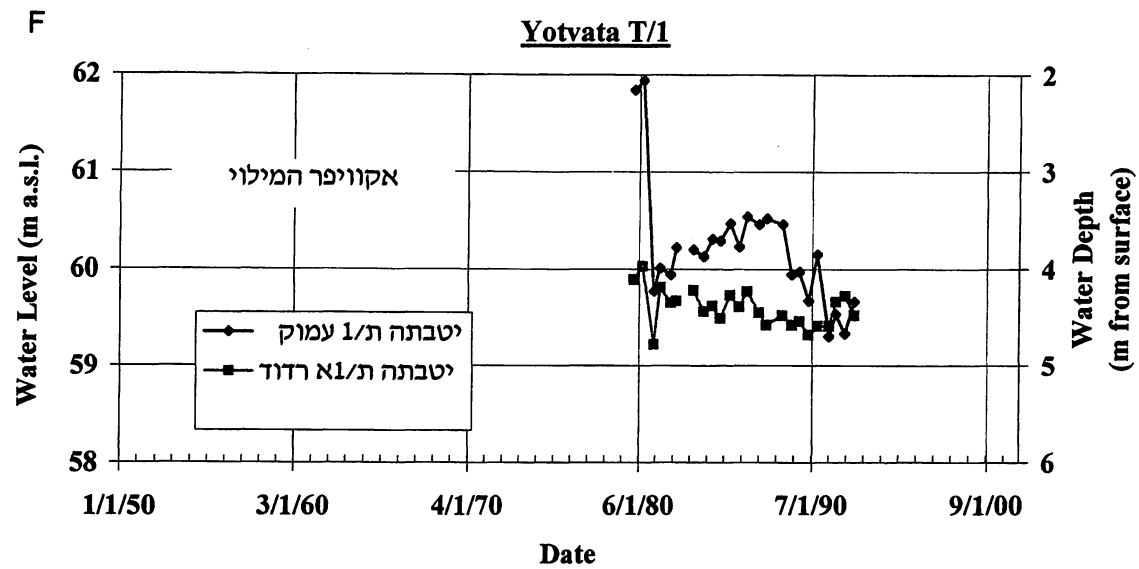
איור 14: הידרוגרפים של קידוחים במלחת יטבתה.

D

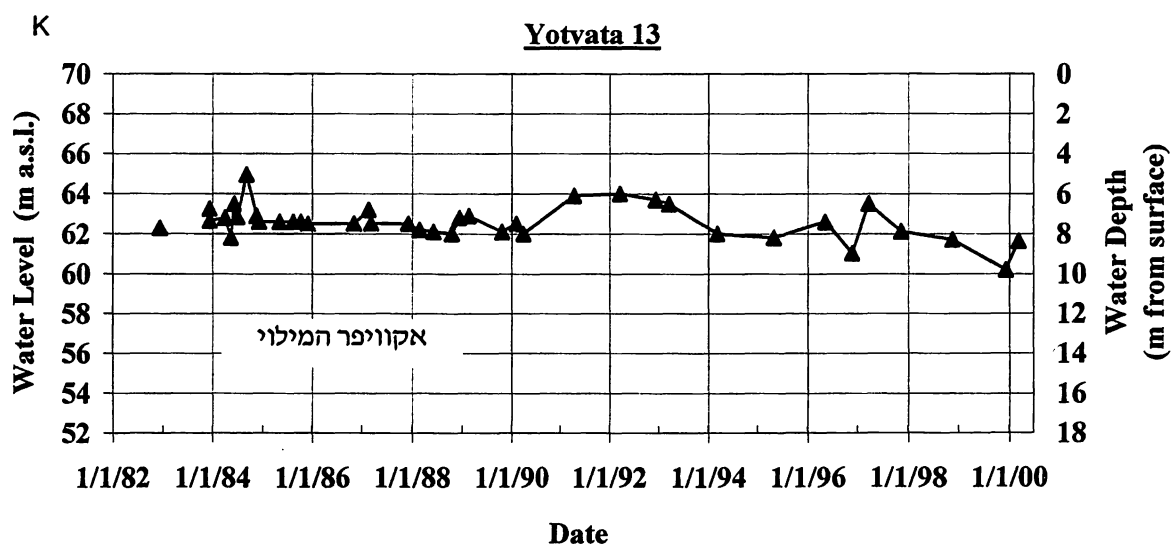
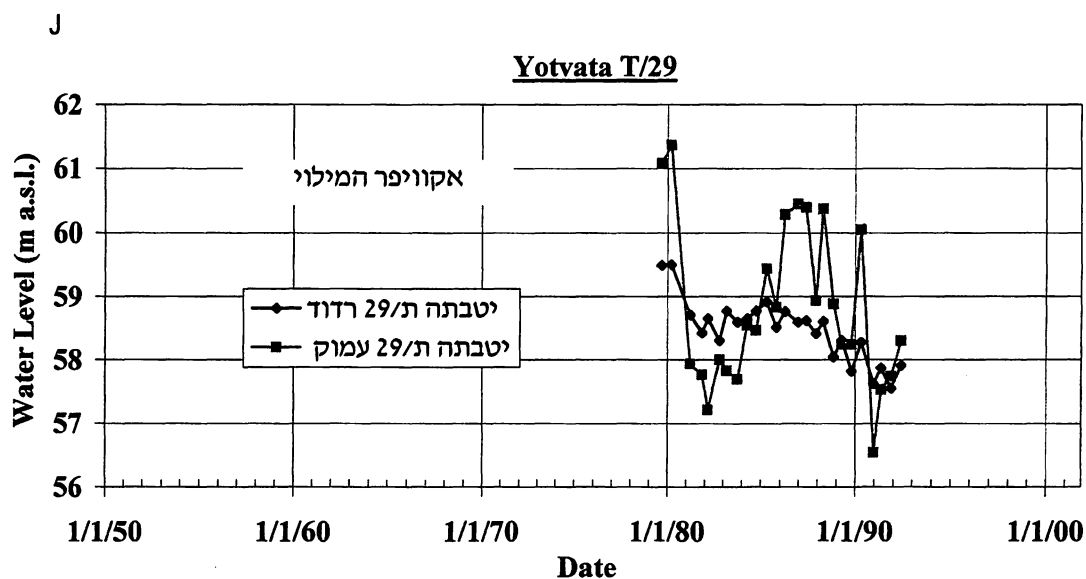
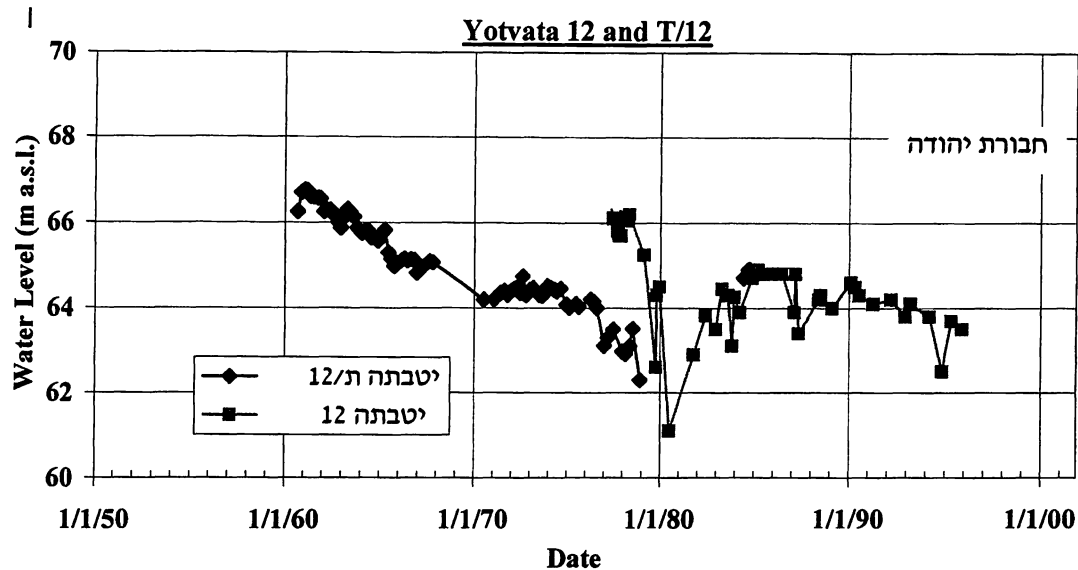


E



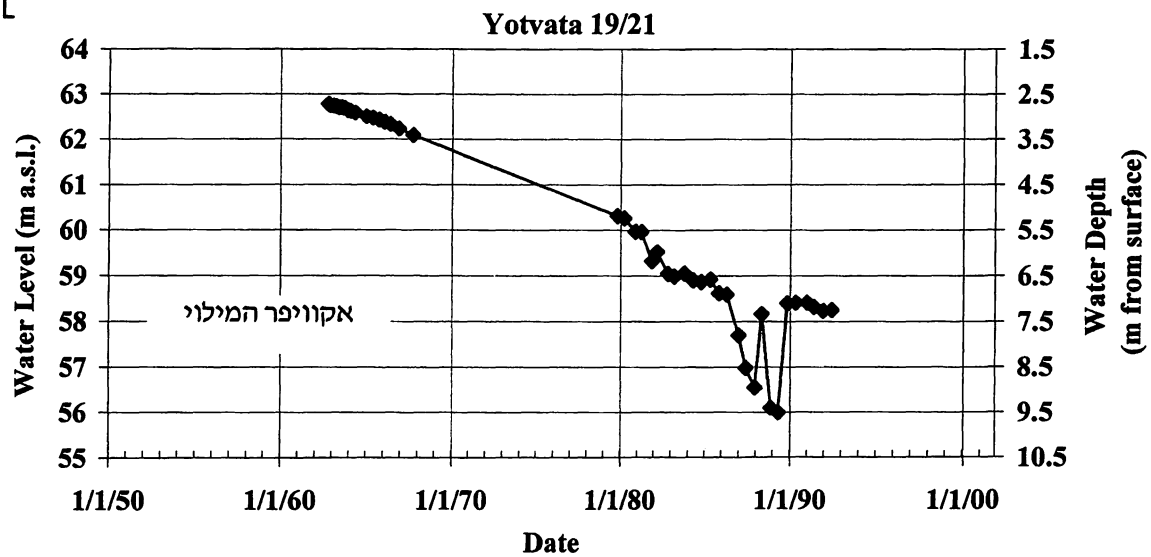


איור 14: הידרוגרפים של קידוחים במלחת יטבתה.

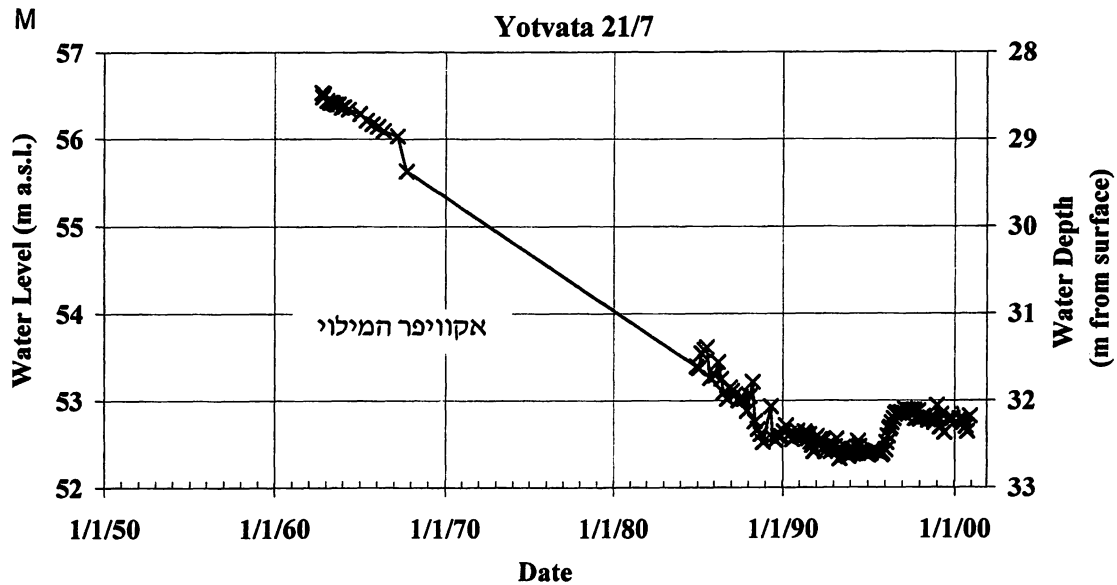


איור 14: הידרוגרפים של קידוחים במלחת יטבתה.

L

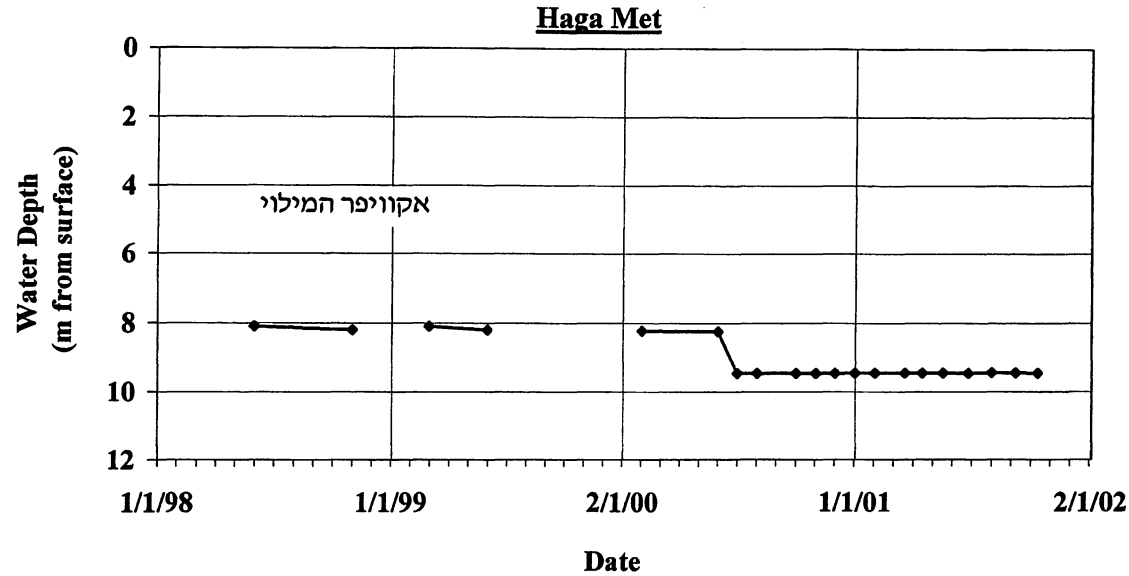


M

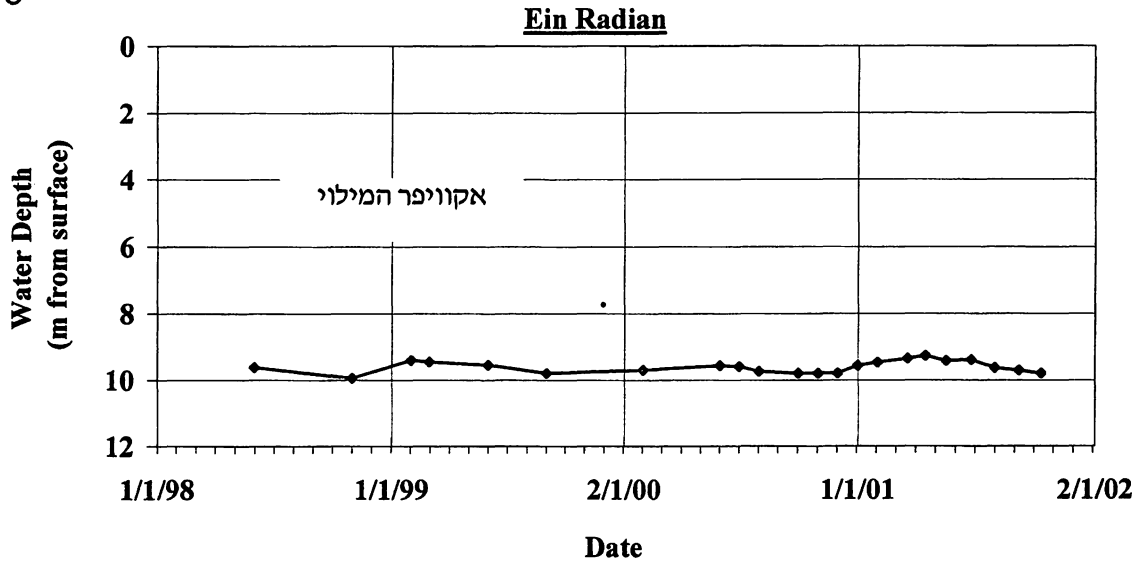


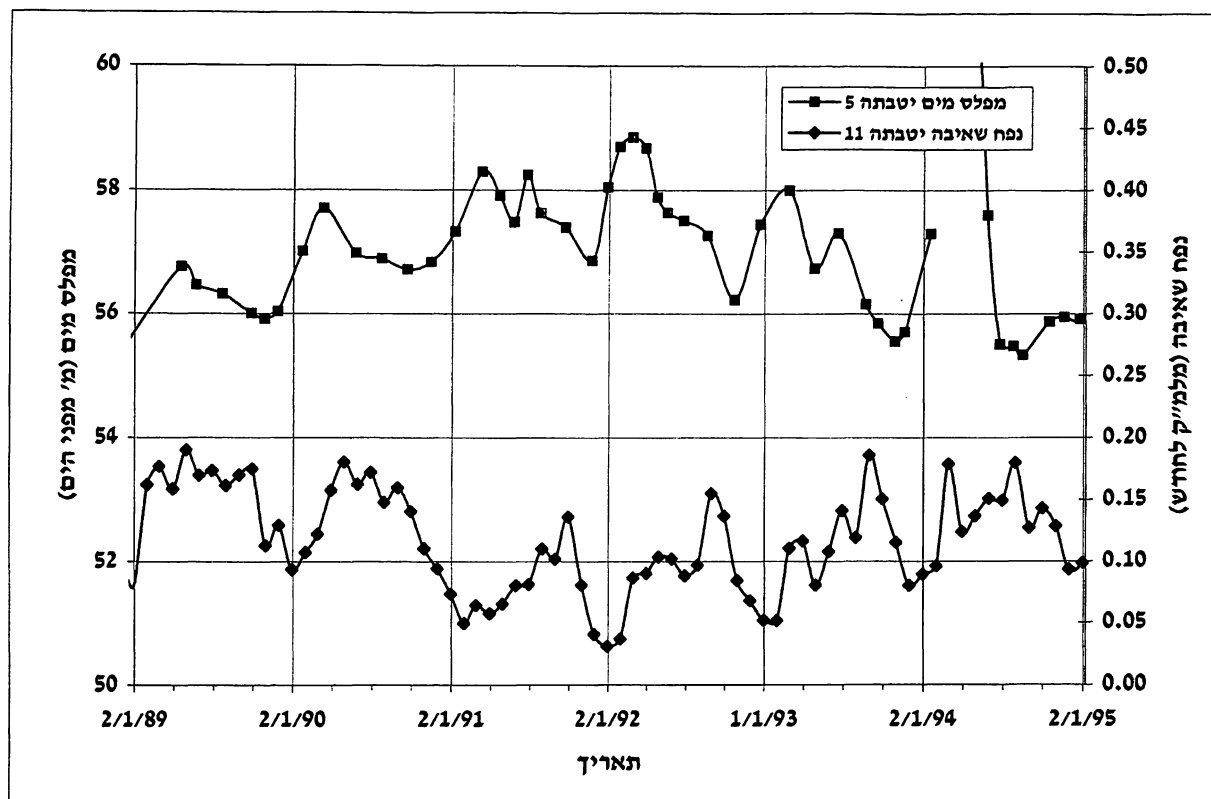
איור 14: הידרוגרפים של קידוחים במלחת יטבתה.

N



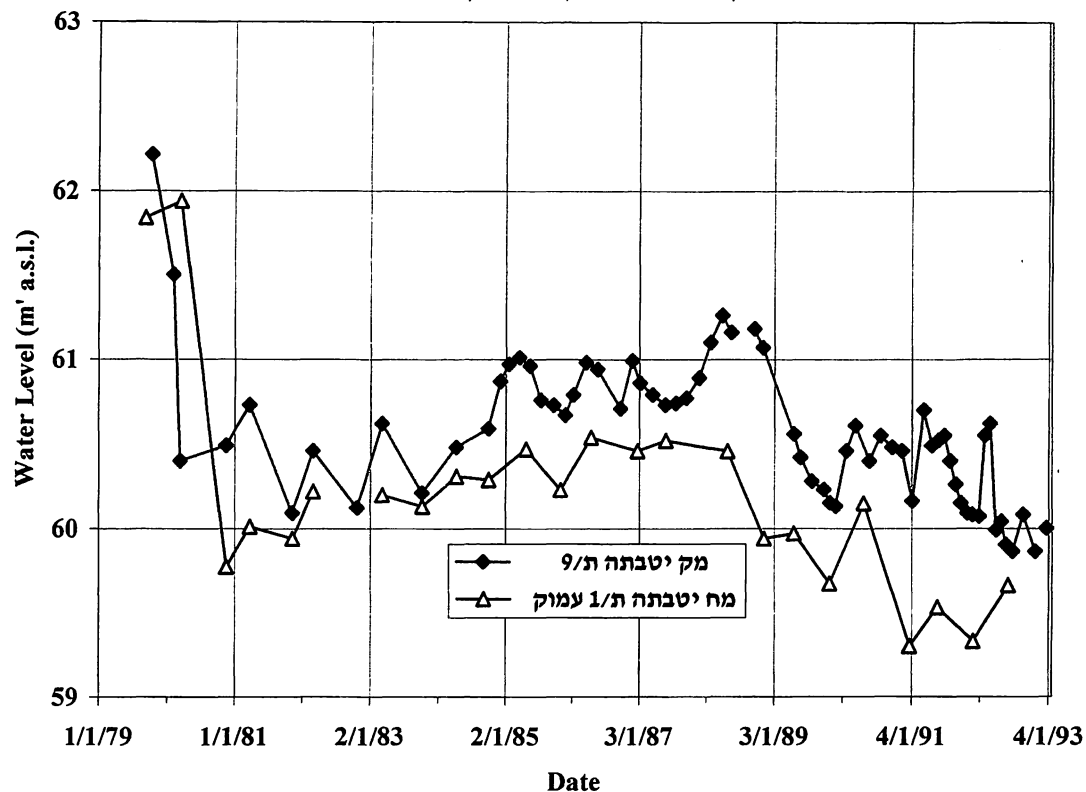
O



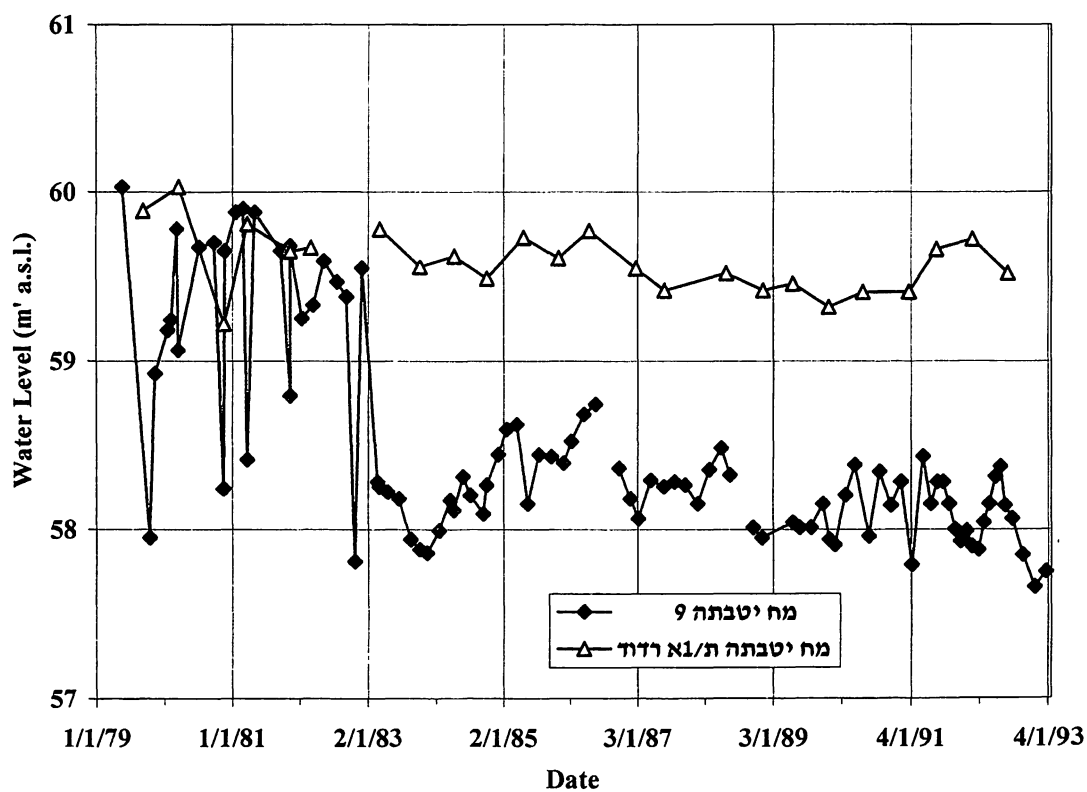


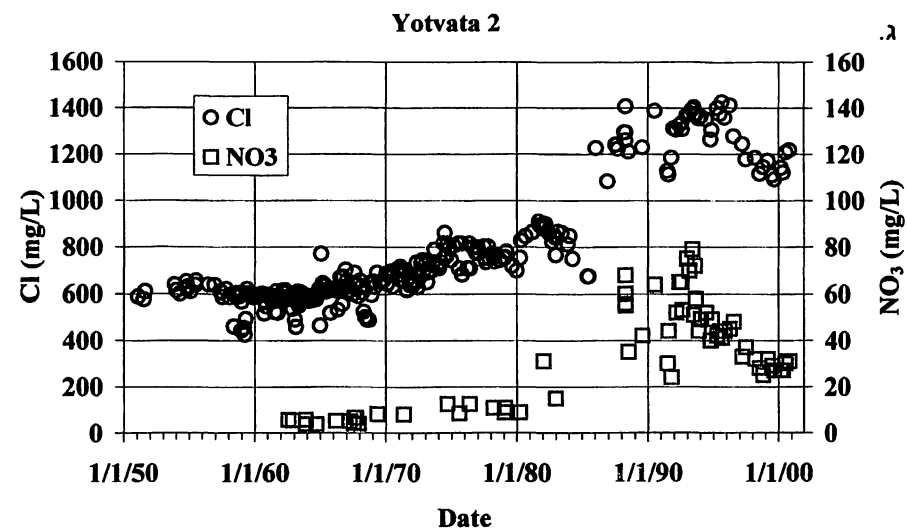
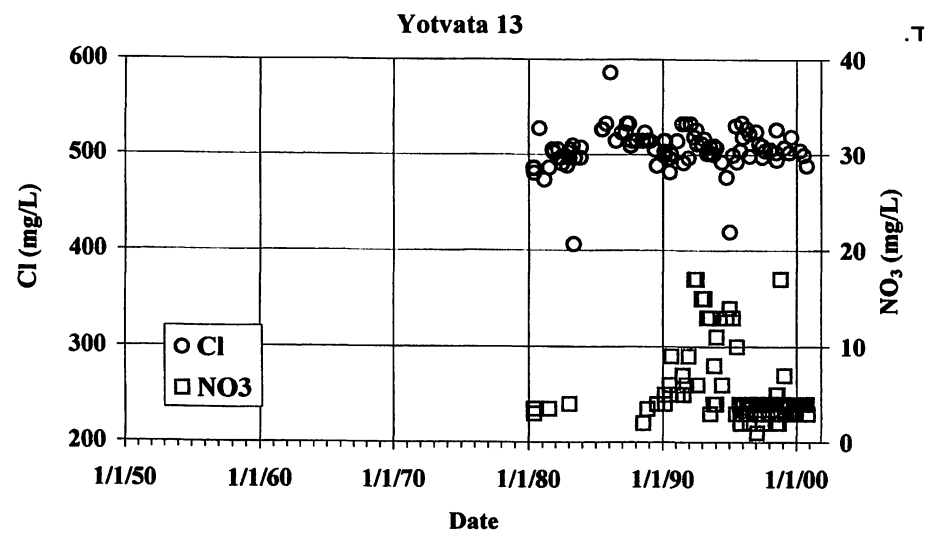
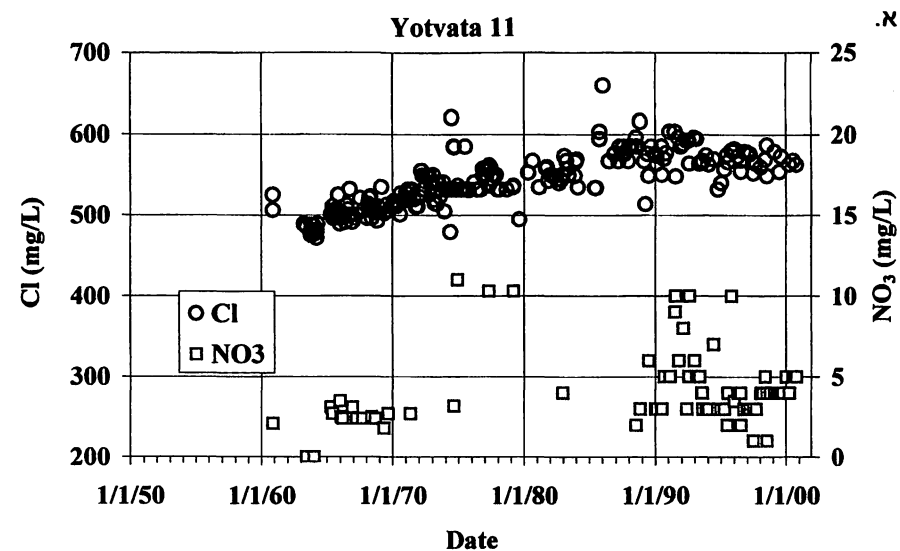
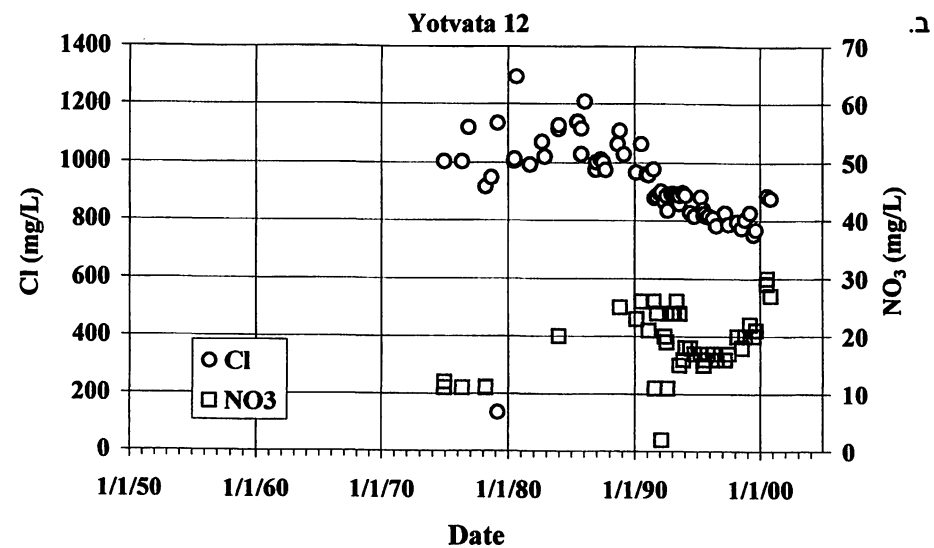
איור 15: השוואה בין נפח המים החודשי הנשאב בקידוח ההפקה יטבתה 11 למפלס המים בקידוח התצפית הסמוך יטבתה 5.

א. ההידרוגרפים של הקידוחים העמוקים בחתך מזרח-מערב B-B'.



ב. ההידרוגרפים של הקידוחים הרדודים בחתך מזרח-מערב B-B'.





איור 17: השתנות רכוז ה-Cl וה-NO₃ במי קידוחים שונים.



איור 18 : מודל הזרימה המשוער של מי התהום במלחת יטבתה בחתך מזרח-מערב.

1. מפלס מי התהום באקוויפר חבורת יהודה.
2. מפלס מי התהום של אקוויפר חבורת כורנוב, העומד הפיזומטרי גבוה מכיוון שהאקוויפר כלוא.
3. מפלס המים במניפות הסחף במזרח המלחה.
4. מפלס מי התהום בתת האקוויפר העליון באקוויפר המילוי.
5. מפלס מי התהום בתת האקוויפר התחתון באקוויפר המילוי, העומד הפיזומטרי גבוה מכיוון שהאקוויפר כלוא.

החצים השחורים מסמנים את כיוון הזרימה של מי התהום כתוצאה מהפרשי פוטנציאל.
החצים הצהובים מסמנים את השקיעה של התמלחת עקב צפיפותה (density driven flow).

