

תודות

תודה לפקחי ועובדי רשות הטבע והגנים, ובראשם יוסי הראל, על דיגום המים במעיין והעברת הדוגמאות למכון הגיאולוגי,

תודה לדר' בני רופא מהשרות ההידרולוגי על העברת נתוני המעיין,

תודה לצוות המעבדה הגיאוכימית - דינה שטיבר, אולגה יופה, אירנה סגל וגלית שרעבי על האנליזות הכימיות,

יבואו כולם על הברכה

תקציר

הדו"ח הנוכחי מסכם ניטור כימי, רב שנים, שנערך בעין בוקק ע"י המכון הגיאולוגי (אנליזות כימיות), בעזרת רשות הטבע והגנים (דיגום בשטח והעברת הדוגמאות למכון הגיאולוגי). הדו"ח מתאר את הפרמטרים הכימיים המעידים על זיהום אנתרופוגני-תעשייתי במעיין ובאקוויפר חבורת יהודה המזין אותו, החל משנת 1994, ומצביע על התגברות הקף הזיהום עם הזמן. עין בוקק הוא כיום מקור המים היחידי בו ניתן לאסוף נתונים רציפים על התפתחות זיהום האקוויפר במרחב של דרום מדבר יהודה.

הפרמטר העיקרי המצביע על התגברות הקף הזיהום הוא ריכוז הכלוריד במי המעיין; הריכוז עלה מערך רקע טבעי של כ-550 מגכ"ל, באמצע שנות ה-90, עד מעל 3,100 מגכ"ל, בתחילת שנת 2011, כאשר קצב ההמלחה הולך וגובר עם הזמן. במקביל עלו גם ריכוזי מומסים נוספים, בעיקר הנתרן, הקלציום, המגנזיום והברום, שמקורם העיקרי הוא, גם כן, מהזיהום התעשייתי. ההשתנות במי המעיין של יחסים כימיים שונים, כגון: Ca/HCO_3 , Mg/Ca , Cl/Br , SO_4/Cl , Na/Cl ו- $Ca/(HCO_3+SO_4)$ מצביעה אף היא על כניסת הזיהום התעשייתי למי המעיין והתגברותו עם הזמן.

מאחר ולא מתוכנן בעתיד הקרוב כל מהלך להוצאת המים המזוהמים מתוך האקוויפר, יש לצפות להתגברות הזיהום במעיין. ריכוז הכלורידים במי השפכים התעשייתיים שהוחדרו לקרקע ומזינים את האקוויפר ואת המעיין מוערך בלא פחות מ-40,000 מגכ"ל. מליחות המעיין עשויה, לפיכך, לעלות לערכים גבוהים בהרבה מאלה הנמדדים כיום, ואין לדעת מתי יואט קצב ההמלחה. עם זאת, סביר שהמליחות לא תגיע לערכים שבמי השפכים מאחר והזיהום נמהל בדרכו במי האקוויפר. זיהום המעיין צריך לעורר חשש לזיהום אפשרי גם של קידוחי הפקה המצויים במורד הזרימה ממקור הזיהום וכן של נפחים ניכרים של אקוויפר חבורת יהודה בשוליים המערביים של ים המלח.

אין כיום סימנים לזיהום מי המעיין ע"י מרכיבים משניים, יסודות קורט ומתכות כבדות (ורעילות), פרט אולי לעליה מסוימת בריכוז הבורון. הסיכוי שמרכיבים אלה יופיעו בריכוזים גבוהים במי המעיין, במקביל להתגברות הזיהום, הוא קטן, מאחר והם שוקעים ברובם כמוצקים כבר בתחילת מסלול הזרימה, סמוך למקור הזיהום. מי המעיין מכילים ריכוזי סלניום וקדמיום גבוהים יחסית שמקורם איננו ידוע, אולם הם אינם קשורים לזיהום התעשייתי.

נדרשת בדיקה מחודשת של איכות המים בקידוח אפעה 13, כפי שקבע בית הדין למים בשנת 2007. הממצאים צפויים להיות גרועים מאלה שנתגלו בקידוח בשנת 1999, ולכן יש צורך לפעול באופן נמרץ לניקוי, חלקי לפחות, של האקוויפר המזוהם. התעלמות מהמצב הקיים רק תחריף את הזיהום ההולך ומתפשט ברחבי אקוויפר חבורת יהודה בשוליים המערביים של ים המלח.

תוכן העניינים

עמוד

1	פרק 1. מבוא
2	פרק 2. שיטות העבודה
3	פרק 3. הזיהום בקידוח אפעה 13
3	פרק 4. השתנות ההרכב הכימי בעין בוקק עם הזמן
7	פרק 5. סיכום ומסקנות
7	רשימת ספרות

טבלאות (בסוף הדו"ח)

1. אנליזות כימיות של מים מעין בוקק, מקידוח אפעה 13 ומקידוח אפעה 3 (שאיבת ביניים).
2. ריכוזי יסודות קורט ומרכיבים משניים במים מעין בוקק, מקידוח אפעה 13 ומקידוח אפעה 3 (שאיבת ביניים).

תרשימים (בסוף הדו"ח)

1. מפת מיקום, דרום מדבר יהודה. המפה מציגה את מקורות הזיהום התעשייתי, את הקידוחים באזור, את עין בוקק ואת כיוון זרימת הזיהום באקוויפר חבורת יהודה (מתוך בורג ונאור, 2000).
2. ההרכב הכימי של המים בקידוח אפעה 13 בשתי שאיבות הניסיון (6-1995, 1999), בהשוואה להרכב הכימי של אקוויפר חבורת יהודה לפני שזוהם.
3. השתנות ריכוז הכלוריד בעין בוקק עם הזמן.
4. השתנות תכולת המלחים הכללית בעין בוקק עם הזמן.
5. השתנות ריכוזי המומסים בעין בוקק עם הזמן.
6. ההשתנות בזמן של היחס Na/Cl ביחס לריכוז הכלוריד במי עין בוקק.
7. ההשתנות בזמן של היחס SO_4/Cl ביחס לריכוז הסולפאט במי עין בוקק.
8. ההשתנות בזמן של היחס Mg/Ca ביחס לריכוז הקלציום במי עין בוקק.
9. ההשתנות בזמן של היחסים Ca/HCO_3 , $Ca/(HCO_3+SO_4)$ ביחס לריכוז הקלציום במי עין בוקק.

מבוא 1.

בשנים 4-1983 נקדח מצפון למישור רותם, סמוך לפתח נחל חימר (תרשים 1), קידוח אפעה 3 במטרה לנצל את מי אקוויפר חבורת כורנוב. המים שנמצאו בשאיבת הניסיון היו באיכות של כ-1,400 מיליגרם כלוריד בליטר (מגכ"ל). במהלך הקדיחה נערכה שאיבת ביניים בתצורת צפית, השייכת לאקוויפר חבורת יהודה; המליחות שנמדדה היתה 560-580 מגכ"ל.

לאור תוצאות אלה ודרישת הצרכנים (מפעלי התעשייה של מישור רותם) למים באיכות של 600-800 מגכ"ל, הוחלט לקדוח בסמוך לקידוח אפעה 3 קידוח נוסף לאקוויפר חבורת יהודה. ערבוב המים משני קידוחים אלה היה אמור לתת את האיכות הדרושה למפעלי התעשייה.

עד אמצע שנות ה-90 היה ידוע לכל שאיכות המים באקוויפר חבורת יהודה באזור אפעה היא בתחום 600-550 מגכ"ל. קביעה זו התבססה על תוצאות שאיבת הביניים בקידוח אפעה 3, על איכות המים בקידוחי הסקר של "תעלת הימים" (קידוחי ערד), שנקדחו מצפון ומצפון מערב לאזור אפעה, ועל איכות המים בעין בוקק, הנובע מבסיס תצורת צפית ומצוי במורד הזרימה הטבעית מאזור סינקלינת אפעה.

בשנים 5-1994 נקדח, כמתוכנן, קידוח אפעה 13 לאקוויפר חבורת יהודה, בסמוך לקידוח אפעה 3 (תרשים 1). במקום 600-550 מגכ"ל שהיו אמורים להתקבל במי האקוויפר, נשאבו, להפתעת הכל, מים באיכות של כ-5,500 מגכ"ל, כלומר פי 10 מהצפוי (נאור, 1996) (טבלה 1). גם שאר המומסים (פרט לסולפאט ולביקרונאט) נמצאו בריכוז גבוה יחסית למים שהתקבלו בשאיבת הניסיון בקידוח אפעה 3 (טבלה 1). בנוסף לכך, נמדד בקידוח ריכוז חמצן מומס נמוך וריכוז דטרגנטים גבוה יחסית. הקידוח ננטש. בתחילת שנת 1996 נערכה שאיבת ניסיון נוספת בקידוח, ערכי המליחות שהתקבלו היו דומים לאלו שנמדדו שלושה חודשים לפני כן (טבלה 1).

ב-1994 החלה עלייה במליחות המים הנובעים בעין בוקק, המצוי 14 ק"מ במורד הזרימה מקידוח אפעה 13. העלייה במליחות גברה לקראת סוף העשור. בעקבות עלייה מטרידה זו, בד בבד עם הרצון לפתח שדה שאיבה חדש מצפון לנחל חימר, הוחלט לבדוק שוב את איכות המים בקידוח אפעה 13. שאיבת הדיגום נערכה בסוף שנת 1999 ונמשכה כשבועיים. בסופה, התקבלו מים באיכות של מעל 8,200 מגכ"ל, כלומר גרועה מזו שנמצאה בשנת 1995.

בעקבות הממצאים הללו נערכה עבודת מחקר (בורג ונאור, 2000), אשר סיכמה את מקורות ההמלחה, והמליצה על דרך הפעולה הראויה בכדי להקטין את היקפי הזיהום באקוויפר. בעבודה זו נטען שמקור הזיהום הסביר ביותר, וקרוב לוודאי גם הבלעדי, הוא מי השפכים של מפעלי התעשייה של מישור רותם, המצויים כ-9 ק"מ דרומית לקידוח אפעה 13 (תרשים 1). בעקבות דו"ח זה פנתה אגודת אדם טבע ודין (אט"ד) בשנת 2002 לבית המשפט למים בבקשה להטלת צו לתיקון מעוות. בית המשפט נתן את דברו ביולי 2007 ועיגן הסכם פשרה שנחתם בין רשות המים, מפעלי רותם אמפרט ופריקלס ואט"ד, לפיו מפעלי ים המלח ירכשו מחברת מקורות את המים בקידוח אפעה 13. מאז, בשל קשיים סטטוטוריים שונים, ובניגוד לקביעת בית המשפט, הקידוח לא נפתח לשאיבת בדיקה נוספת. כלומר, אין כיום בידנו נתונים נוספים על איכות המים בקידוח ועל היקף הזיהום בו.

בנסיבות הקיימות נותר עין בוקק מקור המים היחידי במורד הזרימה ממקורות הזיהום, המספק מידע רציף על התפשטות והתפתחות הזיהום באקוויפר. השינויים הכימיים הנמדדים במעיין רומזים, ללא ספק, גם על התנאים הגיאוכימיים המתפתחים במעלה הזרימה באקוויפר.

הדו"ח הנוכחי מציג את השינויים בהרכב המים בעין בוקק עם הזמן, ואת המגמות הגיאוכימיות הנצפות בו. הדו"ח איננו מציג את מגוון הטיעונים להוכחת מקור הזיהום של אקוויפר חבורת יהודה באגן אפעה בכלל, ובעין בוקק בפרט, והמעוניין לקרוא על כך מופנה לדו"ח של בורג ונאור (2000).

שיטות העבודה .2

המכון הגיאולוגי, יחד עם רשות הטבע והגנים (רשות שמורות הטבע עד שנת 1998), מנטרים את איכות המים בעין בוקק מאז שנת 2004. הדיגום בשטח נעשה ע"י פקחי רשות הטבע והגנים, אשר דואגים גם להעביר את הדגימות למכון הגיאולוגי לאנליזות. הדיגום נעשה מספר פעמים בשנה, כאשר פעם בשנה בממוצע נערכת אנליזה מלאה של המים, ובשאר הדיגומים - רק בדיקה של ריכוז הכלוריד. במספר דוגמאות נערכה גם אנליזה של יסודות קורט. תוצאות האנליזות נתונות בטבלאות 1 ו-2.

בנוסף לנתונים הכימיים שנאספו במהלך הניטור, קובצו בטבלאות 1 ו-2 נתונים נוספים מעין בוקק. אלה כוללים אנליזות שנערכו ע"י חברת מקורות והשרות ההידרולוגי, וכן אנליזות שנאספו מדו"חות ומאמרים, כגון: יחיאלי וארד (1996), גבריאלי וחבריו (1996), Arad et al. (1984), Halicz et al. (1991) ו-Gavrieli et al. (1998). יש לציין שבמאגר השרות ההידרולוגי מופיעות אנליזות נוספות על שתי אלה שנתונות בטבלה 1, אולם אחוז השגיאה במאזן החשמלי היה גבוה בהן מסף קביל של 2% ולכן הן לא הוכנסו. בנוסף, שולבו בטבלאות 1 ו-2 אנליזות מקידוח אפעה 13 (נתוני חברת מקורות והמכון הגיאולוגי), ומשאיבת הביניים שנערכה בתצורת צפית בקידוח אפעה 3 (נתוני חברת מקורות), וזאת לצורך השוואות ומעקבים אחר ההתפתחות הזיהום במרחב ובזמן.

האנליזות שנערכו במעבדות המכון הגיאולוגי נעשו על פי ההליך השגרתי הבא: אנליזה של היסודות העיקריים והמשניים (פרט לביקרבונט HCO_3^-) נעשתה באמצעות מכשירי ICP-AES ויון כרומטוגרף. שגיאת המדידה - $\pm 2\%$. ריכוז הביקרבונט נמדד ע"י טיטרציה של נפח מים ידוע עם חומצת 0.02N HCl עד ל-pH=4.4, המזוהה בשיטה קלורומטרית וע"י מד pH. שגיאת האנליזה היא 1 מיליגרם לליטר (מג"ל, mg/l) ביקרבונט. הריכוזים של היסודות העיקריים נתונים בטבלה 1 בערכי מג"ל, אולם לשם חישוב יחסים כימיים (פרט ליחס Cl/Br) הם הוסבו לערכים של מיליאקוויוולנטיים לליטר (ריכוז מחולק במשקל האטומי ומוכפל בערכיות). כבקרה לאיכות האנליזות חושב, עבור כל אנליזה, אחוז השגיאה במאזן החשמלי של התמיסה (R.E-reaction error), עם סף שגיאה קביל של $\pm 2\%$ (טבלה 1). אנליזה של יסודות קורט וכמה יסודות משניים נעשתה במכשיר ICP-MS. השגיאה היא בדרך כלל 3-5%, אולם היא עולה מאוד כאשר הריכוזים יורדים עד קרוב לסף הגילוי. פרט ל- PO_4 , ריכוזי יסודות הקורט מדווחים בטבלה 2 בערכי מיקרוגרם לליטר ($\mu\text{g/l}$ או ppb).

3. הזיהום בקידוח אפעה 13

מי השפכים התעשייתיים שהוחדרו לתת הקרקע, ועל פי הניתוח ההידרוגיאולוגי, זרמו צפונה לכיוון קידוח אפעה 13 ועין בוקק (נאור, 1996, בורג ונאור, 2000), היו בעלי טווח ריכוזים רחב מאוד (סדרי גודל), הנובע ממקורות תעשייתיים שונים (ארד והליץ, 1992, בורג ונאור, 2000). למרות טווח הריכוזים הרחב, ארד והליץ (1992) הניחו שהמאזן השנתי הממוצע של המלחים שנתרמו ע"י מי השפכים התעשייתיים כמעט ולא השתנה בזמן, זאת בשל הייצור החוזר ונשנה של אותם מוצרים תעשייתיים.

מי השפכים המרוכזים שהוחדרו היו בהרכב כללי של תמלחות נתרן וקלציום כלורידיות, עם ריכוזי כלוריד של מעל 100,000 מג"ל, בליווי ריכוזים גבוהים של נתרן, קלציום, ברום ומגנזיום וריכוז נמוך של סולפאט. מי השפכים התאפיינו ביחסי Na/Cl , SO_4/Cl , Cl/Br נמוכים. בקידוח רותם ת/1 שנקדח סמוך לברכות של מפעלי רותם אמפרט (תרשים 1), וחדר חתך טבול דק, נמדדו בתחילת שנות ה-90, ריכוזי כלוריד של 90,000-110,000 מג"ל, ריכוזי נתרן של 2,700-3,300 מג"ל, ריכוזי קלציום של 32,000-48,000 מג"ל, ריכוז ברום של 2,500 מג"ל וריכוזי מגנזיום של 3,000-5,400 מג"ל (בורג ונאור, 2000). בורג ונאור (2000) העריכו שריכוז הכלוריד הממוצע במי השפכים שהוחדרו לתת הקרקע, במשך עשרות שנים, היה כ-40,000 מג"ל, וכן שמים אלה עשירים מאוד יחסית למים הטבעיים שבחבורת יהודה בכל המרכיבים העיקריים, פרט לניטראט, לסולפאט ולסיליקה, בהם הפער מצומצם יותר.

ההרכב הכימי של המים בקידוח אפעה 13, בשני מועדי הדיגום (6-1995, 1999, טבלה 1), הצביע על מגמת המלחה באותם מרכיבים בהם מי השפכים עשירים. המים שנשאבו בשאיבת הביניים בקידוח אפעה 3, בעת שזה היה פתוח בתצורת צפית, מייצגים את ההרכב הטבעי, הלא מזוהם, של המים באקוויפר חבורת יהודה, ומשמשים כבסיס לבדיקת עוצמת תהליכי הזיהום בקידוח (תרשים 2). מאחר והמומס העיקרי בשפכים התעשייתיים שחדרו לקרקע הוא הכלוריד, אזי זיהום מי התהום בקידוח בא לידי ביטוי קודם כל בשינוי חד בריכוז הכלוריד. עם זאת, נצפתה בקידוח עלייה משמעותית גם בריכוזי שאר המרכיבים העיקריים, וזאת פרט לסולפאט ולניטראט שעליית ריכוזם הייתה מתונה יחסית, ולביקרבונט ולסיליקה שריכוזיהם לא השתנו (תרשים 2).

מאז השאיבה בשנת 1999 לא נדגמו מים בקידוח אפעה 13 ולא ידוע עד לאיזה דרגת חומרה הגיע הזיהום באקוויפר. את תהליך הזיהום ניתן, כאמור, לראות ולנטר כיום רק בעין בוקק.

4. השתנות ההרכב הכימי בעין בוקק עם הזמן

מעין עין בוקק נובע מעל ערוץ נחל בוקק ומזין מספר ברכות לאורכו. המעין נובע בבסיס תצורת צפית ומנקז יחידה אקוויפרית זו, השעונה על גבי החווארים של תצורת עין ירקעם. ספיקת המעין בשנים 2007-2010 (נתוני השרות ההידרולוגי) הייתה בתחום 39-58 מק"ש, ובממוצע כ-49 מק"ש, שהם שווי ערך ל-0.43 מלמ"ק בשנה. במשך שנים רבות חברת מקורות ניצלה כ-30 מק"ש ממי המעין לאספקה עבור המתחם התיירותי הסמוך, ורק השארית נותרה לזרום בנחל. עד שנת 1994 המליחות במעין (במג"ל) הייתה יציבה סביב 500-530 מג"ל (תרשים 3), כלומר זהה למליחות המים באקוויפר באזור קידוחי אפעה, טרום הזיהום. ההרכב האיזוטופי של מי המעין באותה תקופה היה $\delta^{18}O = -5.7\%$ ו- $\delta D = -31\%$, נכון לנובמבר 1963, וכן $\delta^{18}O = -5.5\%$, נכון לאוקטובר

1967 (Gat et al., 1969). ההרכב האיזוטופי של הגופרית בסולפאט ($\delta^{34}\text{S}$) במי המעיין היה באותה תקופה (אפריל 1996) 19% (גבריאל וחובריו, 1996). בשנת 1994 החלה המליחות במעיין לעלות ברציפות (תרשים 3). נכון לתאריך כתיבת דו"ח זה, קרי תחילת שנת 2011, המליחות במעיין היא 3,120 מגכ"ל, כלומר פי 6 מהמליחות הטבעית. קצב העלייה במליחות הלך וגבר במהלך השנים; בין תחילת 1995 לתחילת 1999 ההמלחה הייתה בקצב של כ-5 מגכ"ל בחודש, בין תחילת 1999 לתחילת 2003 בקצב של כ-11 מגכ"ל בחודש, בין תחילת 2003 לתחילת 2007 בקצב של כ-17 מגכ"ל בחודש, ובין תחילת 2007 לתחילת 2010 בקצב של כ-23 מגכ"ל בחודש. הגברת קצב ההמלחה משמעותה שנפח המים המזוהם העיקרי, המרוכז עדיין במעלה הזרימה מהמעיין, הולך וקרוב אליו. במדידות שנערכו ביוני ובאוקטובר 2010 חלה התמתנות בקצב ההמלחה (תרשים 3), והוא ירד לכ-5 מגכ"ל בחודש. יתכן ואירוע הגשם החריג שהתרחש בנגב ובערבה בתאריכים 17-18/1/2010 גרם למיהול של המים במעלה הזרימה מהמעיין ולירידה זמנית בקצב ההמלחה. עם זאת, העובדה שספיקת המעיין לא עלתה באותה תקופה ולאחריה באופן חריג וכן, שדווקא הדיגום שנערך חודש לאחר אירוע הגשם, בתאריך 25.2.2010, לא הצביע על התמתנות בקצה ההמלחה, מעוררים שאלה על נכונות טענה זו. המדידה שנערכה בתחילת ינואר 2011 הצביעה על חזרה לקצה המלחה מהיר מאוד (47 מגכ"ל בחודש).

בנוסף לעלייה החדה בריכוז הכלוריד קיימים פרמטרים כימיים נוספים המצביעים על החרפת הזיהום של מי המעיין. ראשית, תכולת המומסים הכללית במעיין עולה בעקביות עם הזמן (תרשים 4), אם כי היא עדיין רחוקה מזו שנמדדה בקידוח אפעה 13. המרכיבים המראים עלייה עם הזמן נתונים בתרשים 5א, ב'; באופן דומה לקידוח אפעה 13, העלייה במי המעיין עם הזמן היא בעיקר בריכוז הכלוריד, וכן בריכוז הנתרן, הברום, הקלציום והמגנזיום. עלית ריכוז האשלגן והסטרונציום במעיין מתונה יותר, ואילו ריכוזי הסולפאט, הניטראט והביקרבונט לא מראים מגמת עלייה בזמן.

השינוי בהרכב מי המעיין, התואם לכניסת הזיהום התעשייתי, בא לידי ביטוי גם במספר יחסי יונים. היחס Na/Cl במי האקוויפר, לפני שזוהם, גבוה בהרבה מהיחס במים התעשייתיים שהוחדרו לתת הקרקע (0.9-0.8 לעומת 0.15, יחס אקוויולנטי, בהתאמה). פער גדול זה מאפשר שימוש ביחס ככלי להמחשת התפתחות תהליך הזיהום. תרשים 6 מציג את התפתחות היחס במעיין עם הזמן, כאשר מרכיבי הקצה לצורך החישוב הם, מצד אחד, המים שנדגמו במעיין בשנת 1983 ($\text{Cl}=515\text{mg/l}$, $\text{Na}=290\text{mg/l}$, טבלה 1) ומייצגים מצב לפני הזיהום, ומי השפכים הממוצעים, מצד שני, כפי שנקבעו ע"י בורג ונאור (2000) ($\text{Na}=4,000\text{mg/l}$, $\text{Cl}=40,000\text{mg/l}$). מי קידוח אפעה 13, כפי שנדגמו בשנות ה-90, נמצאים במורד עקום הערבוב, ומי המעיין מתקרבים אליהם עם הזמן לאורך עקום זה. העובדה שמרכיב הקצה המזוהם הוא בעל יחס Na/Cl של 0.15 מחזקת את הטענה שמקור ההמלחה בקידוח ובמעין הוא אנתרופוגני, שכן אין תמלחות טבעיות בתת הקרקע בעלות יחס כה נמוך. יחס של 0.15 מאפיין את התמלחות בברכות האידוי של ים המלח ואת השפכים שהוחדרו ע"י מפעלי התעשייה במישור רותם.

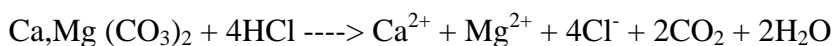
תמונת ערבוב דומה נראית בהתפתחות היחס SO_4/Cl במעיין עם הזמן (תרשים 7). מי השפכים התעשייתיים דלים יחסית בסולפאט, ומאחר והם עשירים מאוד בכלוריד, היחס SO_4/Cl בהם נמוך מאוד. לעומת זאת, היחס במים הטבעיים של אקוויפר חבורת יהודה גבוה בהרבה. כמרכיב הקצה המייצג את המצב לפני הזיהום נלקח שוב ההרכב של המים במעיין בשנת 1983 ($\text{Cl}=515\text{mg/l}$).

עבור ריכוז הכלוריד במרכיב הקצה המייצג את מי השפכים נבחר, $SO_4=342mg/l$, טבלה 1). עברו ריכוז הסולפאט במרכיב קצה זה נבחר ערך של 1,170 מג"ל, ואילו עבור הסולפאט במרכיב קצה זה נבחר ערך של 40,000 מג"ל, ואילו עבור הסולפאט במרכיב קצה זה נבחר ערך של 1,170 מג"ל, שהוא הממוצע של ריכוז הסולפאט במקורות הזיהום השונים, כפי שמרוכזים אצל בורג ונאור (2000) (כולל: ברכות השפכים, מי הרפש שהוחדרו לבלוע וכן נתונים מקידוח רותם ת/1). את פיזור הנקודות הרחב לאורך עקום הערבוב, ובעיקר הסטייה של רוב הדגימות מהמעין לריכוזי סולפאט גבוהים יחסית, ניתן להסביר בתוספת מסוימת של סולפאט בשל המסת גבס טבעי מהסלע.

מאחר ומי השפכים כוללים תמלחות, היחס Cl/Br (משקלי) בהם נמוך מאוד. יחס נמוך, המצביע על הזיהום, אכן נמדד בקידוח אפעה 13 (סביב 50) ובמי המעיין (98-56, טבלה 1). אין בידינו את ערך היחס במי האקוויפר לפני זיהומו, אם כי סביר שהוא קרוב ל-300 (יחס ימי השכיח גם באקוויפרים ברחבי ישראל), ולכן לא ניתן לשרטט עקום ערבוב מתאים.

גם היחס Mg/Ca במי השפכים המזוהמים נמוך מאוד (בורג ונאור, 2000). לעומת זאת, היחס במים הטבעיים של אקוויפר חבורת יהודה הוא בתחום 0.7-0.9 (יחס אקוויולנטי) (טבלה 1), ומתאים לאקוויפר קרבונאטי דולומיטי. שורטט עקום ערבוב בין מי השפכים לבין מי האקוויפר לפני זיהומו, כאשר מרכיבי הקצה הם, מצד אחד, הריכוזים משאיבת הביניים בקידוח אפעה 3 ($Mg=83mg/l$, $Ca=158mg/l$) ומצד שני, הריכוזים בקידוח המזוהם רותם ת/1 ($Ca=48,000mg/l$, $Mg=5,000mg/l$) (תרשים 8, עקום ערבוב 1). מסתבר שהמים מקידוח אפעה 13 ומעין בוקק לא מסתדרים לאורך עקום זה, אלא סוטים ליחסי Mg/Ca גבוהים בהרבה. הסטייה ביחס היא כה גדולה שלא ניתן ליחס אותה לטעות מסוימת בהצבת מרכיב הקצה המציין את השפכים התעשייתיים. הגורם לסטייה נעוץ, קרוב לוודאי, בתהליכי המסה ושקיעה באקוויפר, כמו גם לבעיה בדיגום, שתפורט בהמשך. השפכים התעשייתיים והחומציים, עשירי הקלציום והמגנזיום, ממיסים בעת חדירתם לקרקע את סלע הסביבה הקרבונאטי-דולומיטי. סתירת החומציות ומיהול המים המזוהמים באקוויפר גורמים לעל רוויה לקלציט ($CaCO_3$) ולשקיעה שלו תוך כדי זרימה. בשל כך, עולה מאוד היחס Mg/Ca. לפיכך, הוצב בתרשים 8 עקום ערבוב נוסף (עקום מספר 2), והפעם בין מי האקוויפר בשאיבת הביניים בקידוח אפעה 3 לבין המים שנדגמו בשנת 1999 בקידוח אפעה 13 ($Mg=930mg/l$, $Ca=2,800mg/l$). מי עין בוקק מראים אמנם ירידה עקבית ביחס עם עליית ריכוז הקלציום (כלומר עם הזמן), אולם סוטים גם במקרה זה מעקום הערבוב. הגורמים לכך הם שוב - תהליכי שקיעה באקוויפר, אולם יתכן גם השפעה של צורת הדיגום והובלת המים למעבדה; המים לאחר הדיגום בשטח לא נשמרו בקירור והזמן עד העברתם למעבדות המכון הגיאולוגי עשוי היה להמשך מספר ימים. בזמן זה שקע כנראה קלציט בבקבוק הדגימה, דבר שהסיט את היחס Mg/Ca לערכים גבוהים מהאמיתיים.

תרשים 9 מציג יחסי ערבוב במערכת הקרבונאט. אין בידינו נתונים על ריכוזי הביקרבונט במי השפכים, אולם, ללא ספק, הם נמוכים מאוד בשל חומציות השפכים. גם המסת סלע הסביבה הקרבונאטי ע"י מי השפכים החומציים לא תורמת ביקרבונאט למערכת, שכן המסה זו משחררת לתמיסה יוני קלציום ומגנזיום, תוך כדי יצירת CO_2 , וזאת על פי הנוסחה הבאה:



לפיכך, יחסים בין ריכוזי מומסים שונים לבין ריכוז הביקרבונט במי השפכים צפויים להיות גבוהים מאוד. לעומת זאת, אותם יחסים באקוויפר צפויים להיות נמוכים בהרבה, מאחר והמים הטבעיים, בעלי החומציות הניטרלית, ממיסים סלע קרבונאטי עד רוויה, כך שעל כל אקוויולנט קלציום (יחד עם מגנזיום) נתנם לתמיסה אקוויולנט ביקרבונט. היחסים Ca/HCO_3 ו- $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ בקידוח אפעה 13 המזוהם הם, כצפוי, גבוהים מאוד יחסית למי האקוויפר לפני שזוהם (טבלה 1), ולא די בכך - הם גם גבוהים יותר בדיגום ב-1999 יחסית לדיגום ב-1995-6, אז עוצמת הזיהום הייתה קטנה יותר (תרשים 9). היחסים הגבוהים שהתקבלו בקידוח מראים שהאניון העיקרי המאזן את הקלציום הוא הכלוריד ולא הביקרבונט או הסולפאט, כמקובל באקוויפרים קרבונאטיים טבעיים. מקור עיקר הקלציום והכלוריד במי הקידוח הוא, כאמור, בשפכים התעשייתיים, קלציום נתנם גם בזמן המסת סלע הסביבה הקרבונטי ע"י השפכים החומציים.

עלייה בשני היחסים הכימיים Ca/HCO_3 ו- $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ עם הזמן ועם התגברות ההמלחה והזיהום, נראית גם בעין בוקק (תרשים 9). עבור שני היחסים נבנו עקומי ערבוב; מאחר והיחסים במי השפכים אינם ידועים, נבנו עקומי הערבוב בין המים משאיבת הביניים בקידוח אפעה 3 לבין המים המזוהמים בקידוח אפעה 13 משנת 1999. המים שנדגמו במעיין לאורך השנים לא יושבים על עקום הערבוב הראשון, כלומר סוטים לערכי Ca/HCO_3 גבוהים יותר, אולם כן מסתדרים על עקום הערבוב השני (תרשים 9). תהליכי שקיעת קלציט באקוויפר ויתכן גם בבקבוקי הדגימה, הם האחראיים לסטיית היחס Ca/HCO_3 במי המעיין מעקום הערבוב. סטייה זו לא קיימת בעקום הערבוב של היחס $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$, מאחר וריכוז הסולפאט גבוה יותר מריכוז הביקרבונט והוא זה ששולט ביחס.

מי השפכים התעשייתיים הכילו ריכוזים גבוהים מאוד של יסודות משניים, מתכות כבדות ויסודות קורט, חלקם רעילים, כגון: פוספאט, בור, בריום, ברזל, נחושת, מנגן, כרום, אבץ, עופרת, קדמיום, ניקל, מוליבדן, אלומיניום וארסן (ראה אנליזות אצל בורג ונאור, 2000). הריכוז הגבוה התאפשר בשל מצבם החומצי של מי השפכים שבעטיו עולה מסיסותם של מרכיבים אלה. חומציות זו נסתרת בעת המגע של מי השפכים עם הסלעים הקרבונאטיים של חבורת יהודה, ואז חלק ניכר מהמרכיבים המשניים, יסודות הקורט והמתכות שוקעים ומתקבעים, בין השאר בתוך משקע לא מסיס של ברזל הידרוקסיד (ארד והליץ, 1992). המים הנעים בתת הקרקע במורד הזרימה שומרים לפיכך על ריכוז גבוה של המומסים העיקריים, כפי שפורט לעיל, אולם הם אינם רעילים. אם מרכיבי הקורט מסולקים ברובם המכריע כבר בתחילת הזרימה בתת הקרקע, אין לצפות להופעתם בריכוזים גבוהים הרחק במורד הזרימה, קרי בקידוח אפעה 13 ובדאי בעין בוקק. ואכן בקידוח לא זהו מרכיבים אלה בריכוזים חריגים (פרט לבורון שיתואר בהמשך), אם כי נצפתה עלייה מסוימת בריכוזי הקדמיום, המנגן, הניקל, האבץ והברזל, יחסית למי האקוויפר לפני הזיהום (כפי שנראה בעין בוקק). יש לשים לב שריכוזי הניקל, האבץ והברזל יכולים להיות מושפעים גם מצנרת הקידוח. בעין בוקק נערכו במסגרת הסקר הנוכחי שתי אנליזות של מרכיבים משניים ויסודות קורט (בשנת 2003 ובשנת 2006, טבלה 2), אולם לא נראו בהן מגמות העשרה וזיהום. גבריאל וחבריו (1996) בדקו את תכולת מרכיבי הקורט במי עין בוקק ומצאו ערכים חריגים של סלניום, קדמיום ואף אבץ. מאחר והדיגום נעשה לפני הגעת הזיהום התעשייתי למעיין, ברור שערכים אלה אינם קשורים לזיהום ומקורם לא ידוע (יתכן שהאבץ נתנם ע"י מערכת הצינורות שבמעיין). הערכים שמדדו

גבריאלי וחובריו (1996) ונוספים (טבלה 2) יוכלו לשמש בעתיד כבסיס לבדיקה האם מי המעיין מתחילים להראות עליה בריכוזי יסודות קורט אם לאו.

מרכיב משני יחידי שהראה עלייה ברורה בקידוח אפעה 13 לאחר שזוהם היה הבורון (טבלה 2). מרקע טבעי של כ-0.4 מג"ל חלה עלייה בקידוח לרמה של 1.3-1.8 מג"ל. אין בכך כדי להפתיע שכן בורון מצוי בריכוזים גבוהים במי השפכים התעשייתיים, אולם זמן ספיחתו ממושך יחסית (ארד והליץ, 1992). יתכן והריכוז שנמדד בעין בוקק בשנת 2006 (0.7 מג"ל, טבלה 1), מצביע על התחלת עלייה בריכוז מרכיב זה גם בעין בוקק.

5. סיכום והמלצות

מעיין עין בוקק, שחשיבותו האקולוגית והתיירותית רבה, הולך ומזדהם במהירות. הזיהום מתבטא, בשלב הנוכחי, בעלייה חדה בריכוזי הכלוריד, הנתרן, הקלציום, המגנזיום והברום. מאחר ולא מתוכנן בעתיד הקרוב כל מהלך להוצאת המים המזוהמים מתוך האקוויפר, יש לצפות להתגברות הזיהום של המעיין, כפי שנצפה גם בקידוח אפעה 13 עד שנת 1999 (הדיגום האחרון בקידוח). יש לזכור שריכוז הכלורידים במי השפכים שהוחדרו לקרקע, ומזינים את האקוויפר ובהמשך את המעיין, מוערך בלא פחות מ-40,000 מג"ל. מליחות המעיין עשויה, לפיכך, לעלות לערכים גבוהים בהרבה מאלה הנמדדים כיום, ואין לדעת מתי יואט קצב ההמלחה. עם זאת, סביר שהמליחות לא תגיע לערכים שבמי השפכים מאחר והזיהום נמהל בדרכו במי האקוויפר. זיהום המעיין צריך לעורר את החשש גם לזיהום אפשרי של קידוחי הפקה המצויים במורד הזרימה מאזור קידוח אפעה 13 (קידוחים של מפעלי ים המלח), וכן של נפחים ניכרים של אקוויפר חבורת יהודה בשוליים המערביים של ים המלח.

אין כיום סימנים לזיהום מי המעיין ע"י יסודות קורט ומתכות כבדות (ורעילות). הסיכוי שאלו יגיעו למעיין הוא קטן מאחר והם שוקעים ברובם כמוצקים כבר בתחילת מסלול הזרימה. עם זאת, לא ברור האם תתרחש, בכל זאת, עלייה מוגבלת בריכוזי יסודות משניים ויסודות קורט מסוימים (בורון ואחרים) עם התגברות ההמלחה. כאמור לעיל, מי המעיין מתאפיינים בריכוזי סלניום וקדמיום גבוהים יחסית שמקורם איננו ידוע, אולם הם אינם קשורים לזיהום התעשייתי.

המכון הגיאולוגי, יחד עם רשות הטבע והגנים, ימשיכו לנטר את מי המעיין ולעקוב אחרי התפתחות המליחות. הניטור יכלול מעקב תדיר אחר ריכוז הכלוריד, אנליזה כימית מלאה של היסודות העיקריים (פעם בשנה או שנתיים) ואנליזת מרכיבים משניים, יסודות קורט ומתכות כבדות (פעם בכמה שנים). בנפרד, נדרשת פתיחת קידוח אפעה 13, כפי שקבע בית הדין למים בשנת 2007, וזאת במטרה לבדוק את מידת הזיהום שבו, ולאור הממצאים (הצפויים להיות גרועים מאלה שנתגלו בשנת 1999) לפעול באופן נמרץ לניקוי, חלקי לפחות, של האקוויפר המזוהם. התעלמות מהמצב הקיים רק תחריף את הזיהום ההולך ומתפשט ברחבי האקוויפר בשוליים המערביים של ים המלח.

ספרות

ארד, א., הליץ, ל., 1992. שפכים תעשייתיים של מפעלי כימיקלים לישראל במישור רותם. המכון הגיאולוגי, משרד האנרגיה והתשתית, דו"ח GSI/16/92, 30 עמ'.

בורג, א., נאור, ה., 2000. קידוח אפעה 13, ממצאים המצביעים על זיהום אקוויפר חבורת יהודה במישור רותם והמלצות לשיקומו. דו"ח תה"ל, 164.063-ד00.164, 28 עמ' + נספחים.
גבריאלי, א., יחיאלי, י., הליץ, ל., עפרון, ד., שפירו, ב., 1996. סקר מים מינרליים בחוף ים המלח, דו"ח סיכום שנת מחקר ראשונה - הוגש למשרד המדע. המכון הגיאולוגי, דו"ח GSI/32/96, 8 עמ' + תרשימים וטבלאות.
יחיאלי, י., ארד, א., 1996. סקר ספרות בנושא מים מינרליים בחוף ים המלח. המכון הגיאולוגי, נוסח ראשוני, 34 עמ'.
נאור, ה., 1996. קידוח אפעה 13 הקנומני, סיכום ממצאים המתיחסים לזיהום מי האקוויפר. דו"ח תה"ל, 17.4701-ד96.063, 17 עמ'.

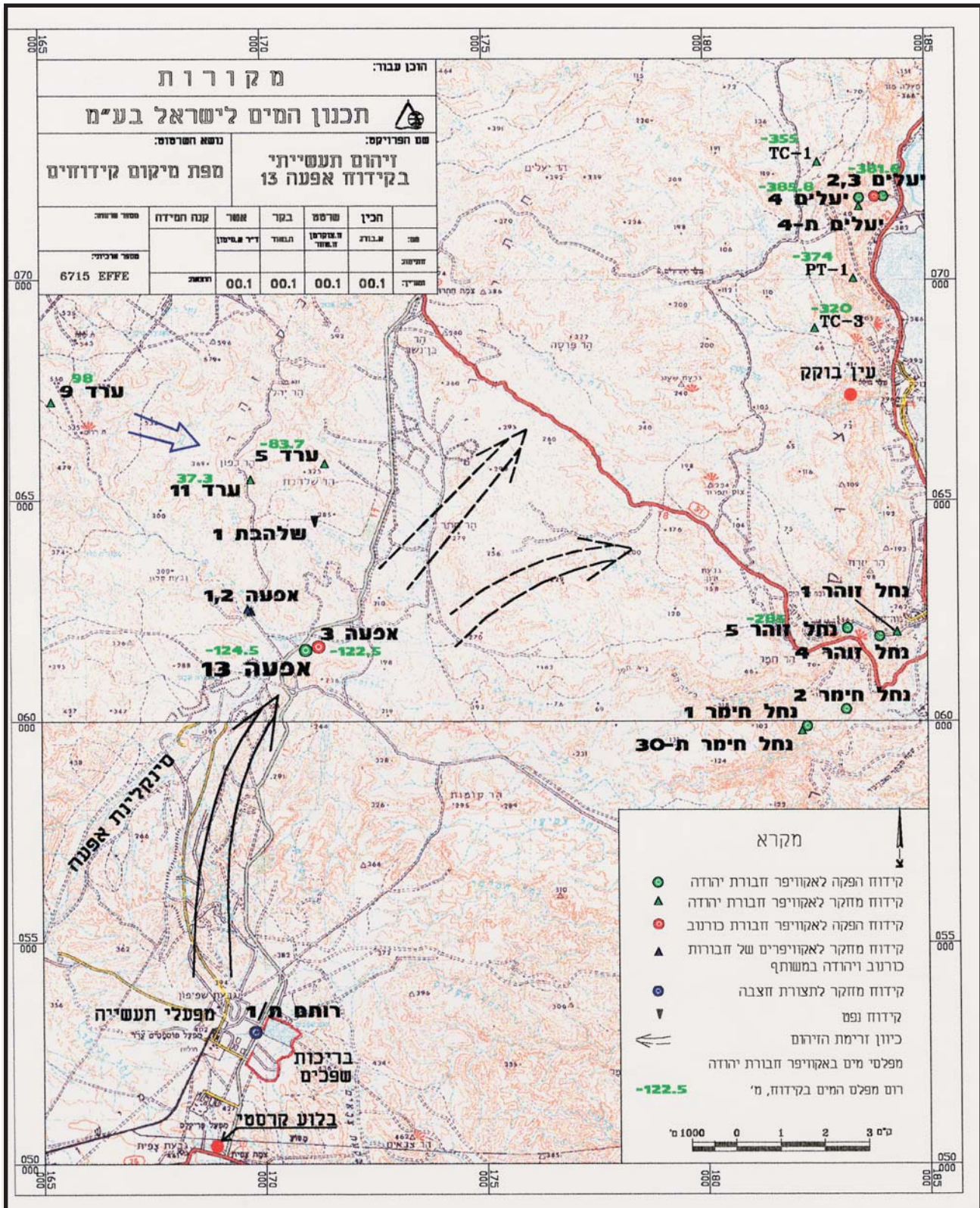
Arad, A., Kafri, U., Halicz, L., Brenner, I., 1984. Chemical composition of some trace and minor elements in natural groundwater in Israel. Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/29/84, 52 p + appendices.

Gat, J.R., Mazor, E. Tzur, Y., 1969. The stable isotope composition of mineral waters in the Jordan Rift Valley, Israel. J. Hydrology, V. 7 (3): 334-352.

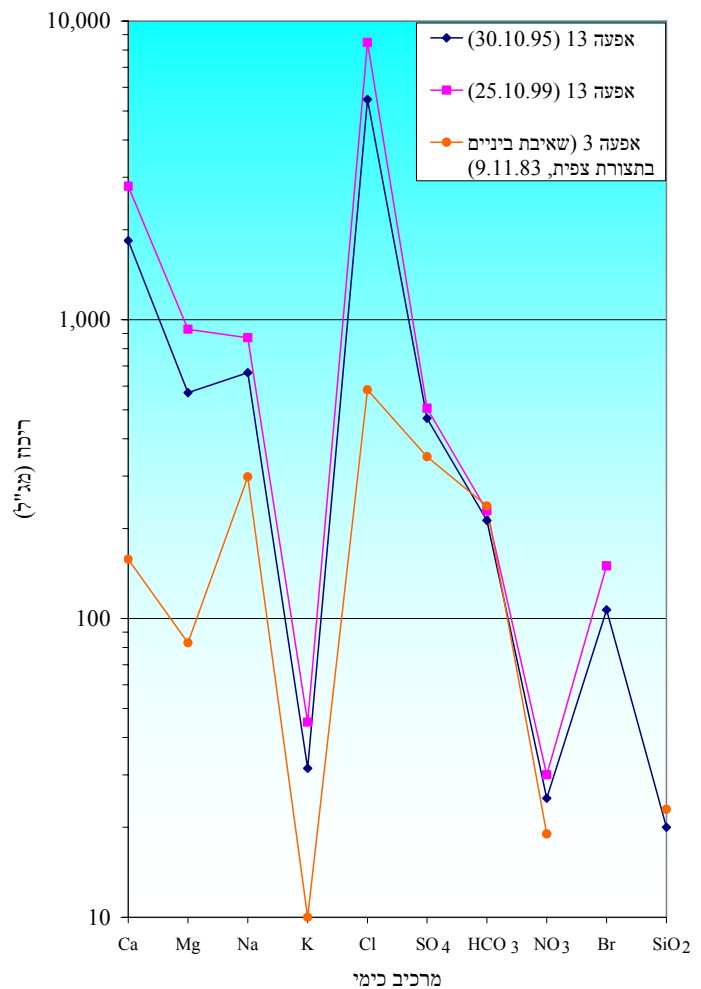
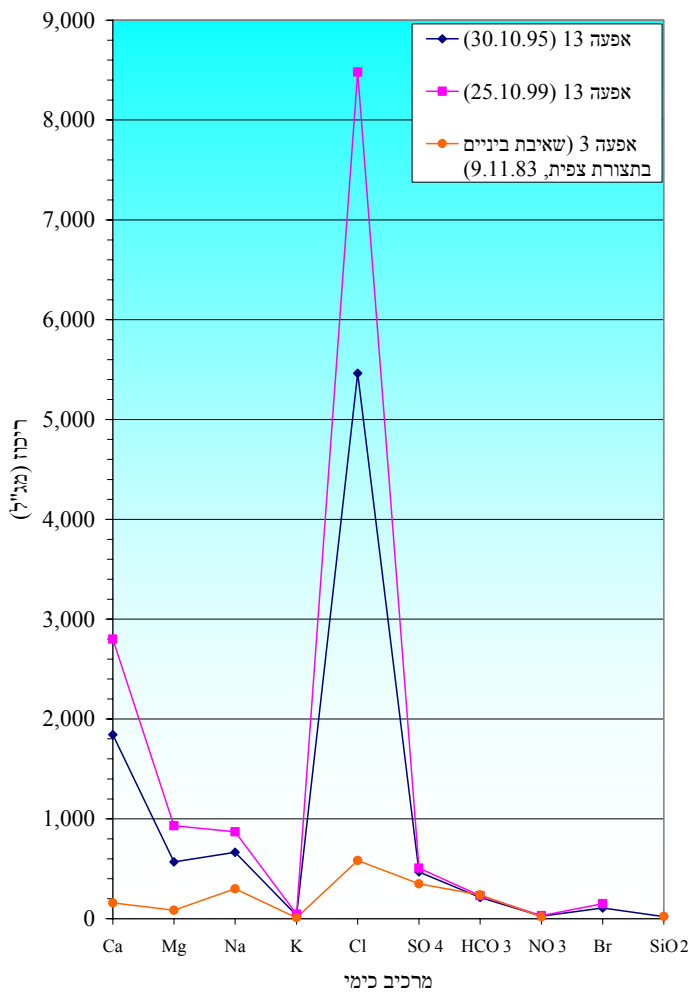
Gavrieli, I., Yechieli, Y., Halicz, L., Efron, D., 1998. Survey of mineral waters along the Dead Sea coast. GSI, Current Research, V. 11: 71-75.

Halicz, L., Kafri, U., Bein, A., 1991. Trends in chemical composition (major and trace elements) of groundwaters in Israel, summer 1990. Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/16/91, 43 p.

טבלאות ותדשימים

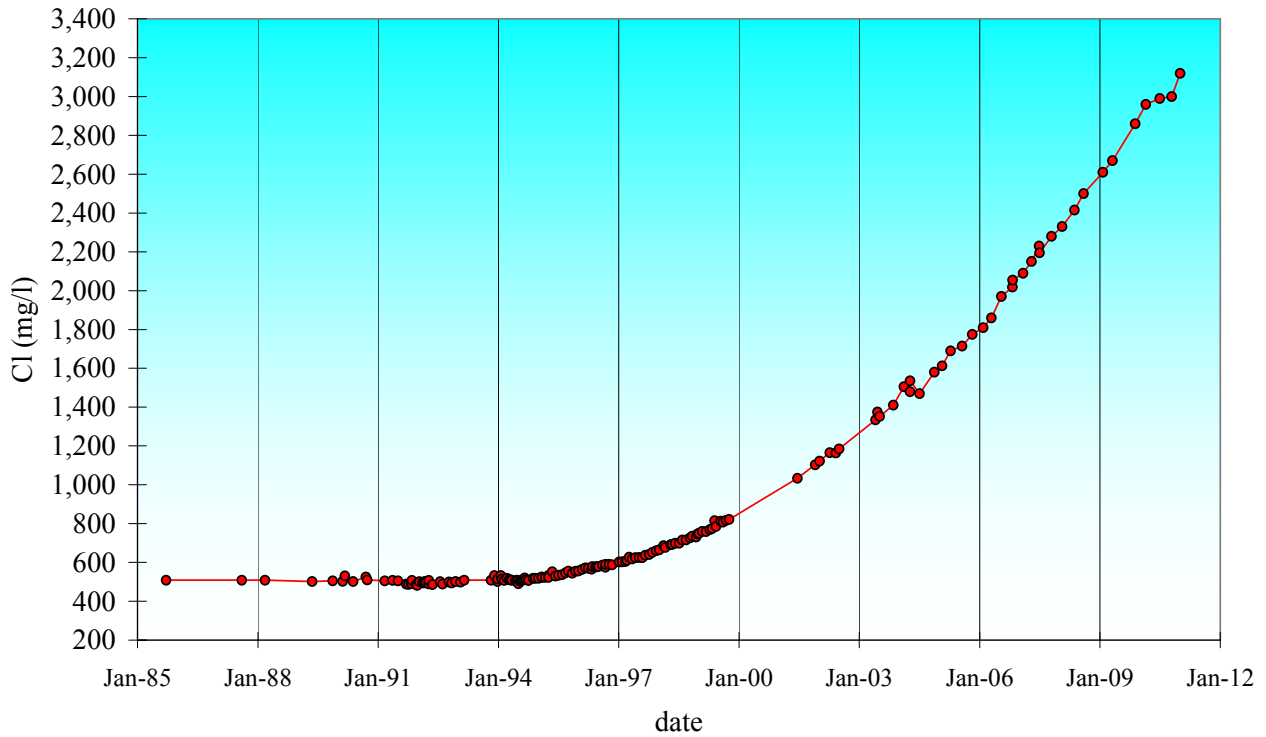


תרשים 1: מפת מיקום המציגה את מקור הזיהום התעשייתי (ברכות השפכים של מפעלי מישור רותם והבלוע הקרסטי ליד מפעל פריקלס), הקידוחים באזור, המעיין ההולך ומזדהם של עין בוקק וכיוון זרימת הזיהום באקוויפר חבורת יהודה (מתוך בורג ונאור, 2000).

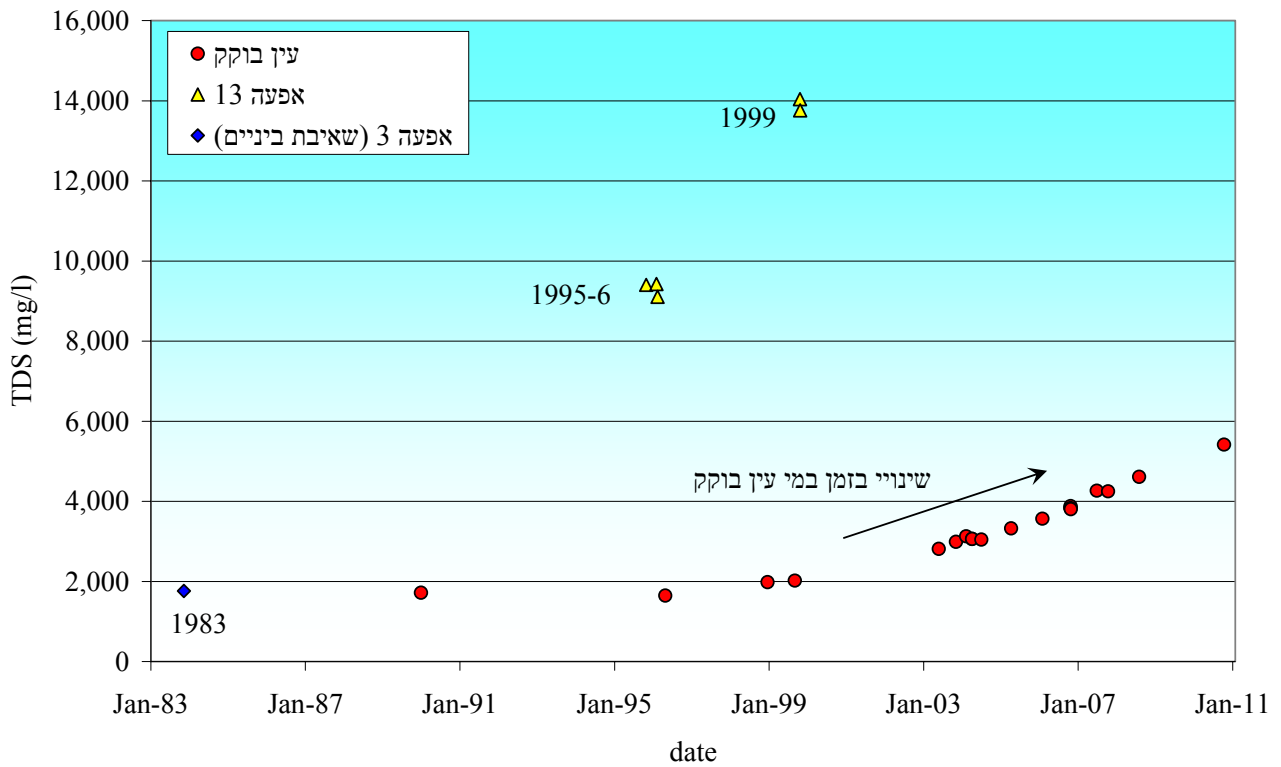


תרשים 2: ההרכב הכימי של המים בקידוח אפעה 13 בשתי שאיבות הניסיון (1995-6, 1999), בהשוואה להרכב הכימי של אקוויפר חבורת יהודה לפני שזוהם (שאיבת ביניים בתצורת צפית בקידוח אפעה 3, 1983).

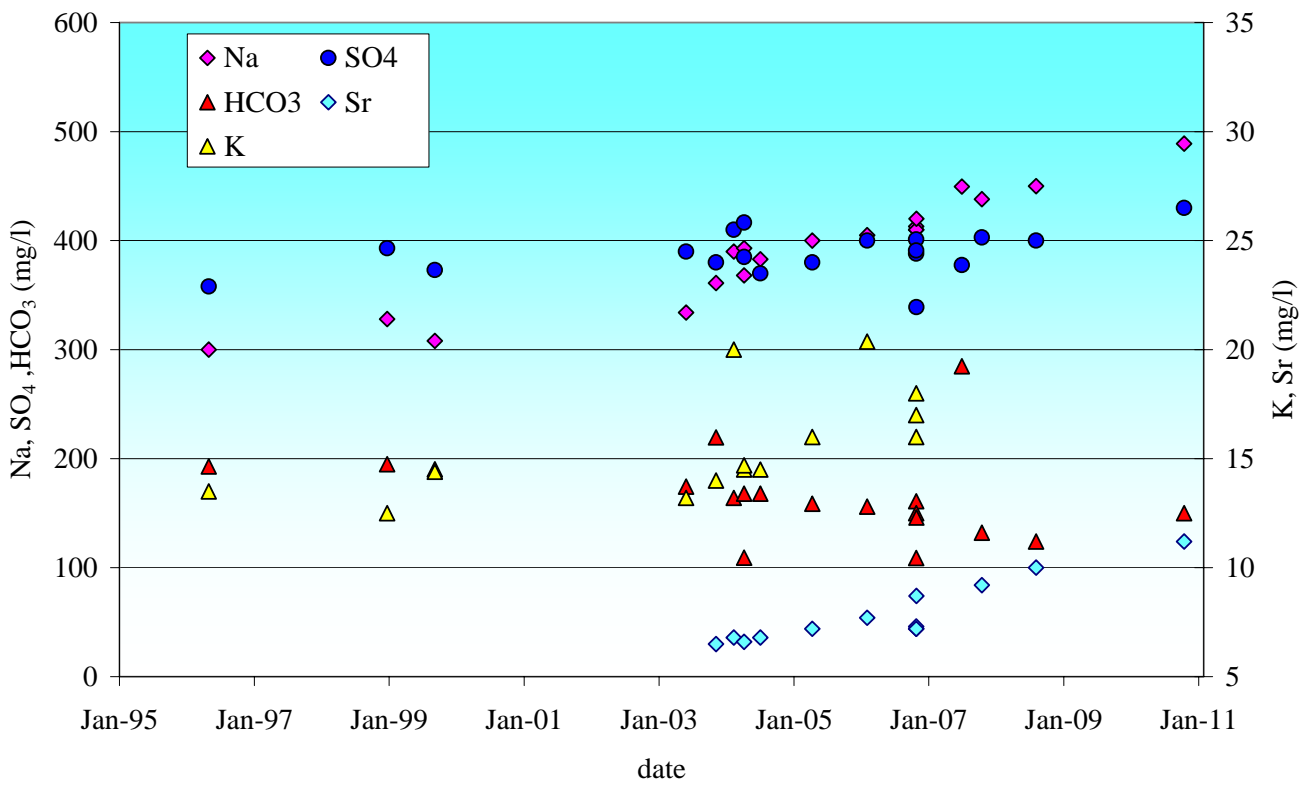
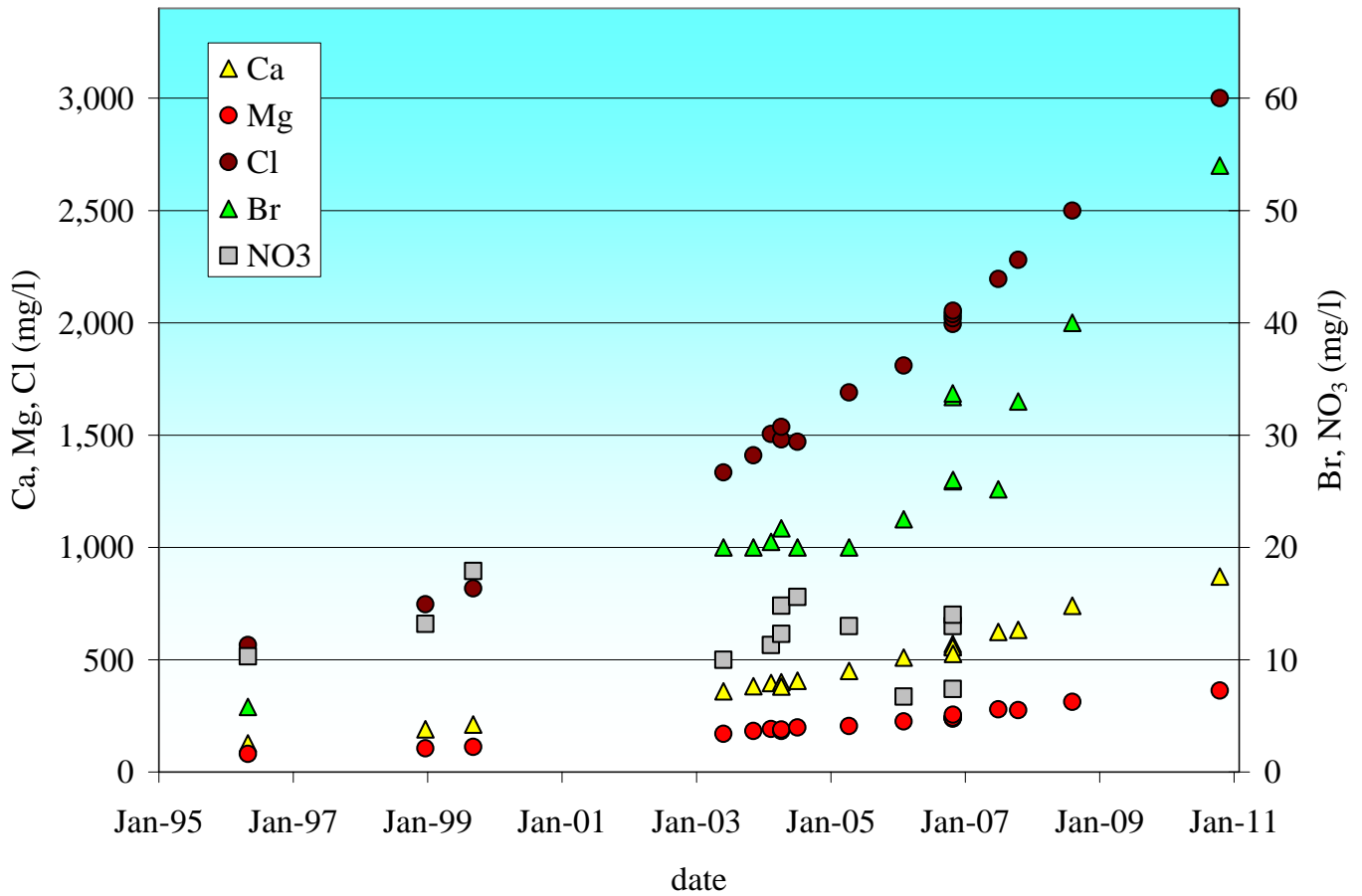
שני התרשימים מציגים את אותם נתונים, אולם בפורמטים שונים וזאת כדי להראות בבהירות הן את ההבדלים במומסים בעלי הריכוזים הגבוהים והן את המומסים בעלי הריכוזים הנמוכים.



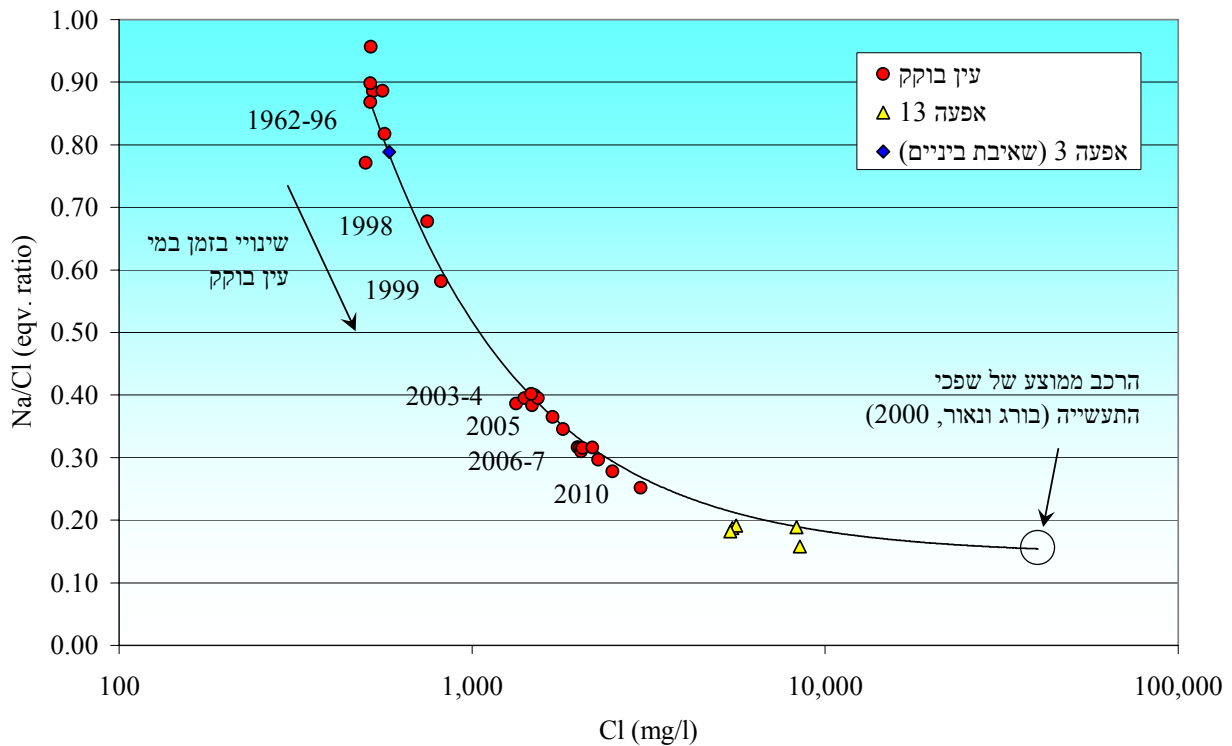
תרשים 3 : השתנות ריכוז הכלוריד בזמן בעין בוקק.



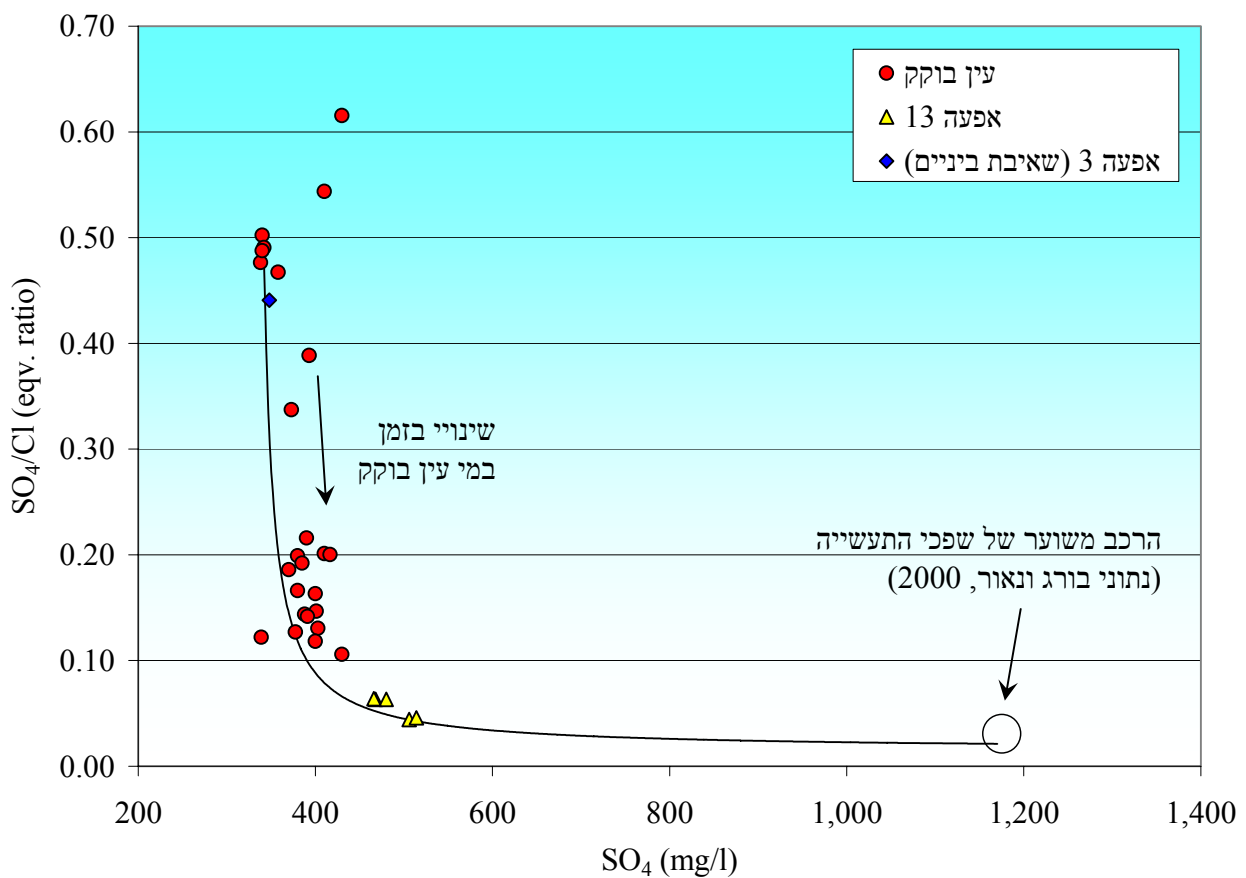
תרשים 4 : השתנות תכולת המלחים הכללית בעין בוקק עם הזמן.



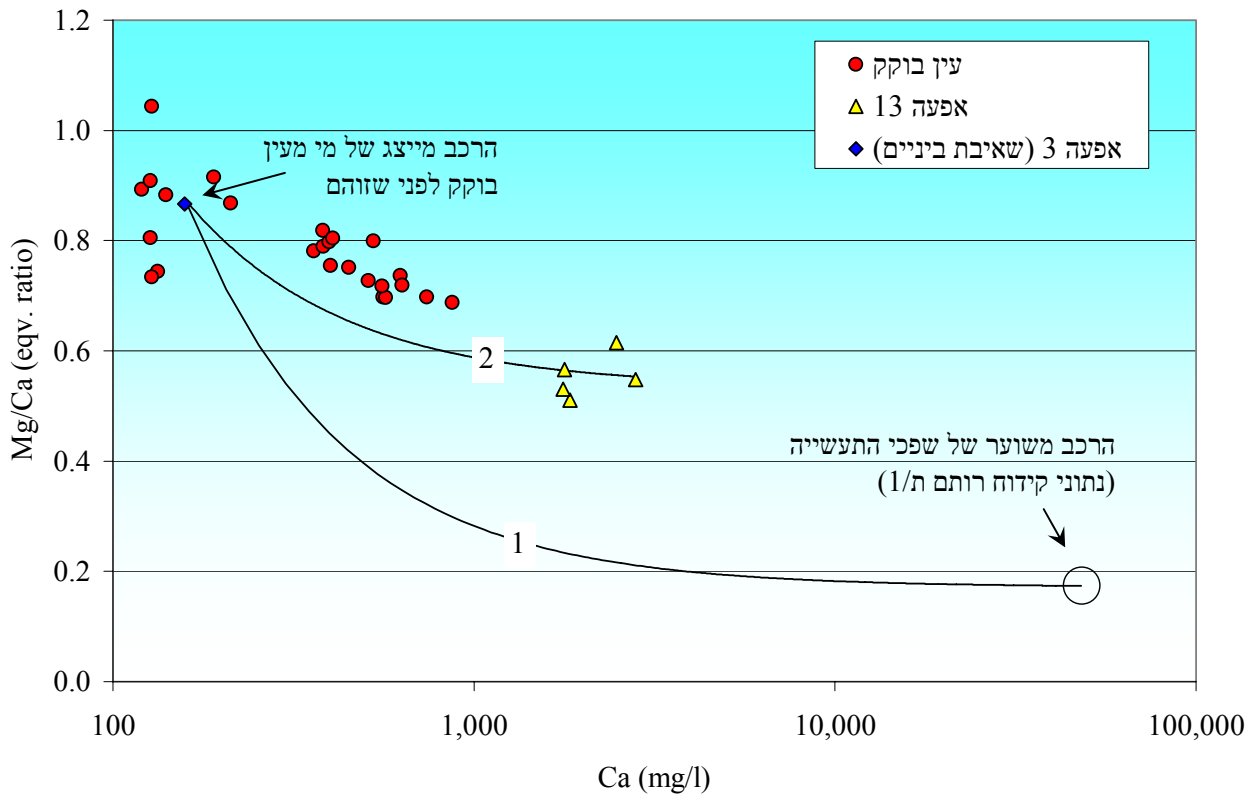
תרשים 5 : השתנות ריכוזי המומסים בעין בוקק עם הזמן.



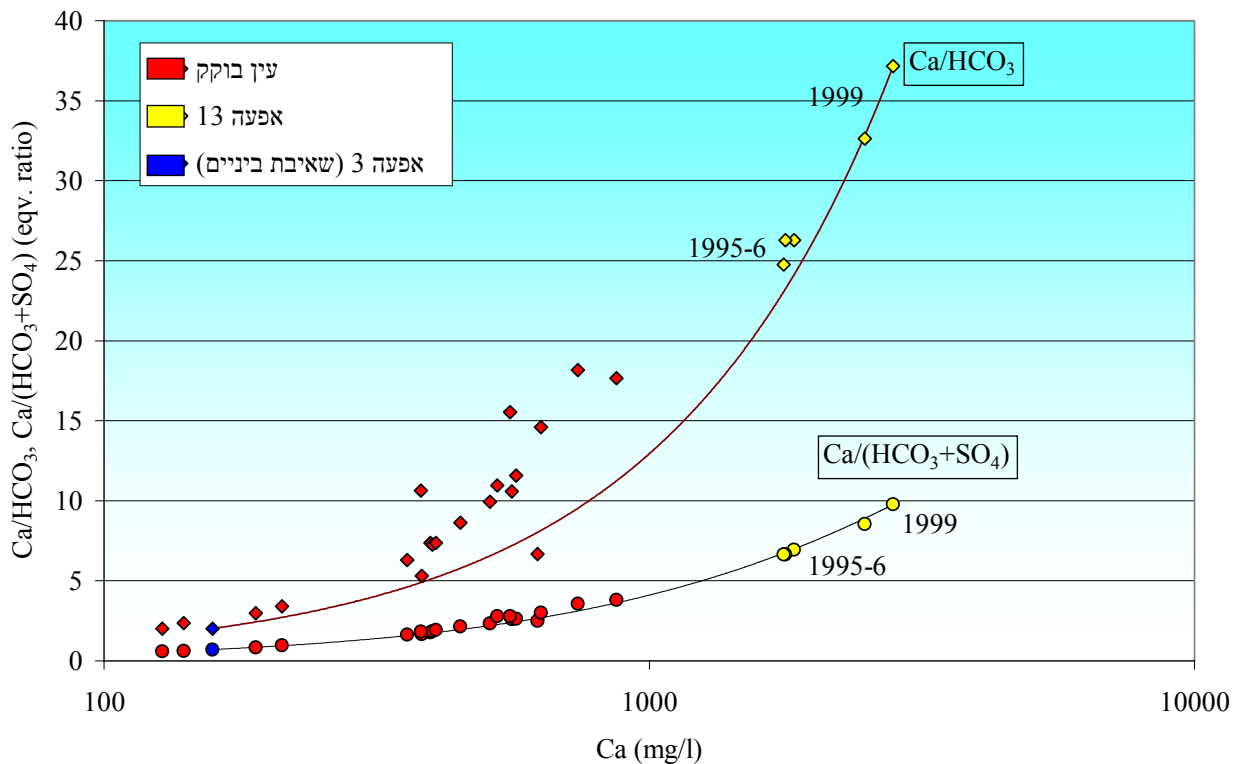
תרשים 6: ההשתנות בזמן של היחס Na/Cl ביחס לריכוז הכלוריד במי עין בוקק. תאור מרכיבי הקצה עבורם נבנה עקום הערבוב נתון בטקסט.



תרשים 7: ההשתנות בזמן של היחס SO₄/Cl ביחס לריכוז הסולפאט במי עין בוקק. תאור מרכיבי הקצה עבורם נבנה עקום הערבוב נתון בטקסט.



תרשים 8: ההשתנות בזמן של היחס Mg/Ca ביחס לריכוז הקלציום במי עין בוקק. תאור מרכיבי הקצה עבורם נבנה עקום הערבוב נתון בטקסט.



תרשים 9: ההשתנות בזמן של היחסים Ca/HCO_3 , $Ca/(HCO_3+SO_4)$ ביחס לריכוז הקלציום במי עין בוקק. תאור מרכיבי הקצה עבורם נבנו עקומי הערבוב נתון בטקסט. העיגולים מציינים שינוי ביחס $Ca/(HCO_3+SO_4)$, המעוינים - שינוי ביחס Ca/HCO_3 .