



המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

הערכת קצב ההתחזרות העתידית של נחל ערוגות כתגובה לירידת מיפלים ים המלח

דו"ח מסכם

מוגש ל-מ.ע.צ.

דן באומן
טל סבוראי
יונתן לרון
שלמה דבורה

מרץ 2005

תוכן

עמוד	
3	א. מבוא
6	ב. שיטות
6	1. פרופילי הנחל
7	2. עיבוד תמונה
7	3. ניתוח מרחבי מבוסס DEM
9	4. גאוויות וקביעת מפלס רלוונטי של ים המלח
9	5. הבתימטריה של ים המלח
9	ג. ממצאים
9	1. פרופיל האורך וחתכי הרוחב
11	2. התחתרות אנכית
13	3. חתירה אופקית
16	4. גאוויות וקצב ירידת מפלס הים
18	5. בתימטריה
22	ד. סיכום והמלצות
22	1. סיכום
23	2. המלצות
25	ה. ביבליוגרפיה
26	ו. נספחים

תודות:

ליעל סטורץ' על העזרה בעיבוד הנתונים ועריכת הדוח. לרוני לבנון על העריכה הגראפית. השרות ההידרולוגי סיפק את נתוני הגאוויות.

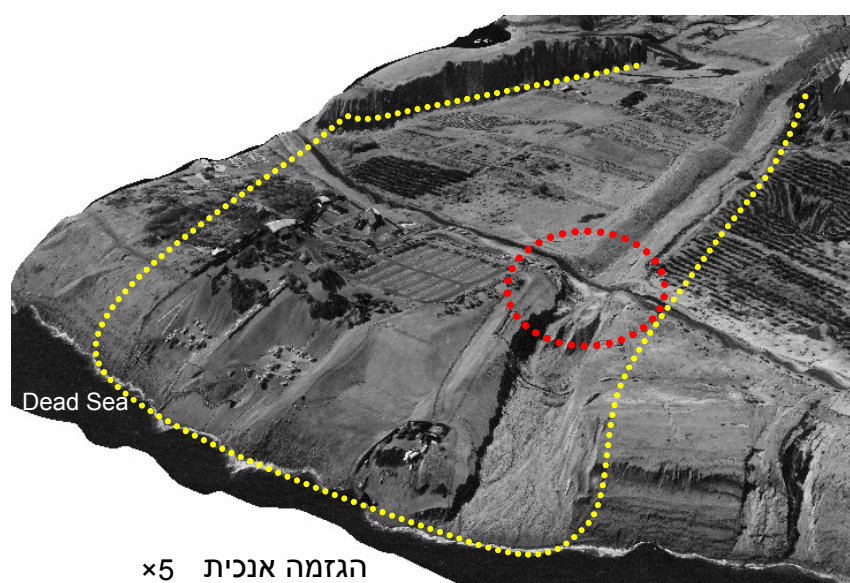
א. מבוא

שטח האגן הניקוז של נחל ערוגות הוא 232 קמ"ר (טבלה 1). המניפה הדלתאית של נחל ערוגות הושקעה אל תוך ים המלח במפלסיו הגבוהים וכיום היא חשופה ומבותרת על ידי הנחל במגמה להגיע לאיזון עם מפלס האגם היורד, מגמה שאיננה יכולה להשיג איזון כל עוד הירידה נמשכת. כיום נבנית מניפה שקודקודה באזור קו החוף, והמשכה אל מתחת למפלס האגם.

עד תחילת שנות ה-90 הייתה לערוץ המרכזי של מניפת נחל ערוגות אפשרות תנועה אופקית (sweep) בכל מרחב המניפה דבר שגרם לירידה באנרגיית הנחל ליחידת רוחב. בין השנים 1990 ו-1993 נכלא חלק מהערוץ בין סוללות הגדה (איור 1). בעקבות ריכוז הזרימה לערוץ מרכזי אחד גדל מאמץ הגזירה של הנחל לספיקת מים נתונה וכתוצאה מכך הוגבר באופן ניכר אפקט ההתחתרות של בסיס הסחיפה על ערוץ נחל ערוגות (איור 2).

טבלה 1. נחל ערוגות: נתונים בסיסיים.

שטח אגן הניקוז	מורפולוגיה	שיפוע משטח עליון של המניפה הדלתאית	גובה שבירה טופוגרפית	שיפוע חזית המניפה הדלתאית	מועד חציית האגם את ראש המדרון החופי - תחילת הביתור	תחום שיפועי הערוץ החתור	עומק ביתור מקסימלי - 2002
ק"מ ²		°	מ'	°		°	מ'
232	מניפה דלתאית	1.2	-395.6	11.8	1963/4	1.1-3.7	16

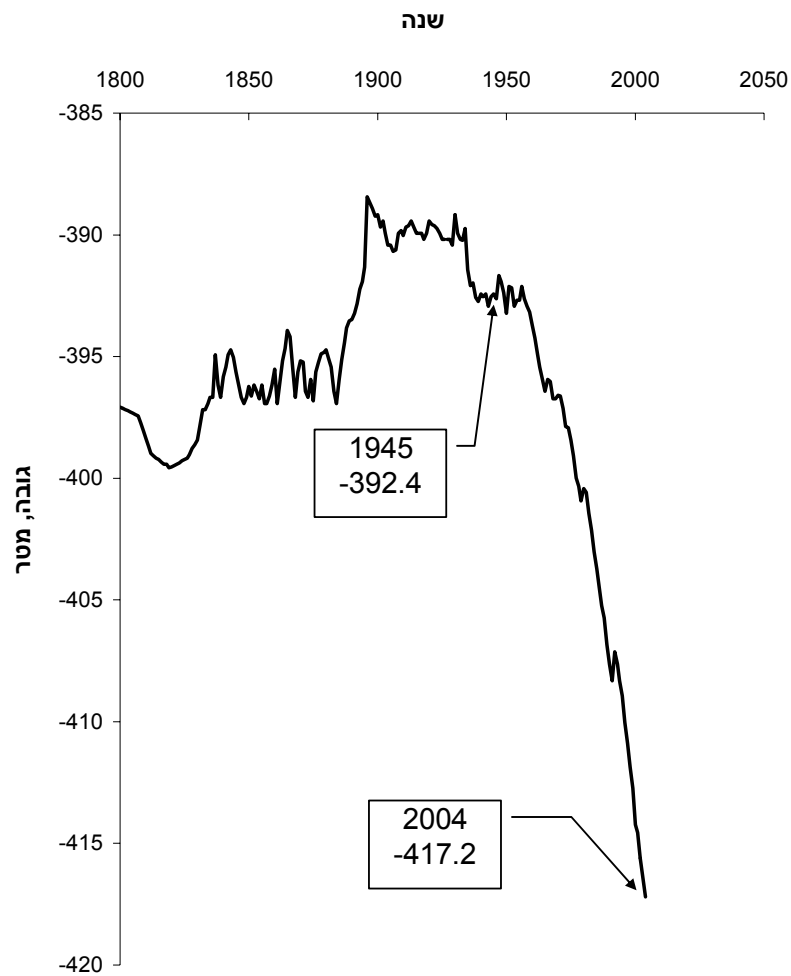


איור 1 - המניפה הדלתאית של נחל ערוגות 2002 (צהוב). איזור קריסת הגשר עם הביתור החזק לאחר (אדום) ממערב ממוקמת התעלה בין הסוללות. מרחב המניפה חסום לזרימה.

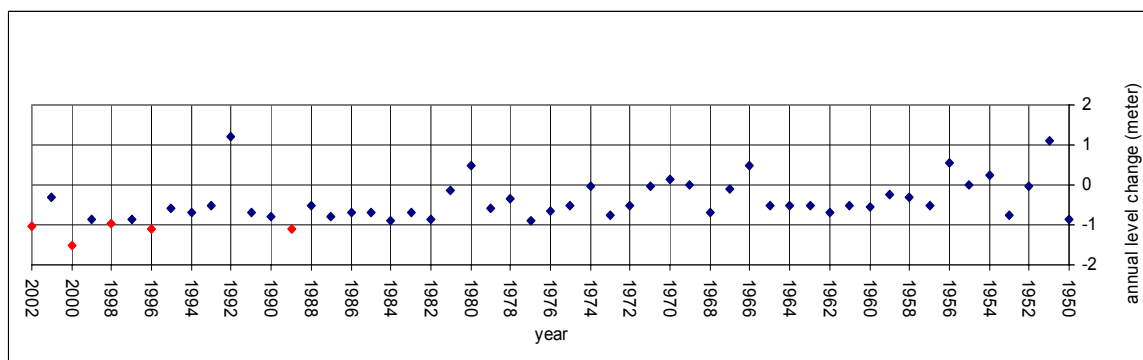


איור 2. משמאל - נחל ערוגות 2002 - הערוץ הבלתי מופרע מהווה את הקטע המערבי ביותר, הרחב עם גדות אנכיות. ממערב לכביש הערוץ נתון בין סוללות מלאכותיות. איזור הכביש הוא קטע בו הגיאומטריה ההידראולית עוברת שינוי חריף. הכביש הוא נקודת נקע ובסיס סחיפה מקומי.

מאז 1896 ועד 2004 ירד מפלס ים המלח מ-388.4 מ' ל-417.2 מ' ב 2004 (איור 3). הקצב השנתי הממוצע של ירידת מפלס ים המלח בתקופה 1988-1981 הגיע ל 0.8 מ' לשנה לעומת 0.4 מ' לשנה בתקופה 1977-1969 (Anati et al., 1987; Anati & Shasha, 1989). קצב הירידה גדל מתחילת שנות התשעים והגיע בשנים בודדות אף לקצב העולה על 1 מ' לשנה (איור 4). נפילות המפלס של ים המלח בעבר מעולם לא עלו על קצב הירידה בהווה (Bookman et al., 2004). קצב ירידת המפלס הממוצע ל-12 השנים, שבין 1990 ל 2002 הוא 0.696 מ' לשנה (על סמך נתוני מפעלי ים-המלח). יש להדגיש שקצב ירידת המפלס תוחם את קצב ההתחתרות האנכית המכסימלית.



איור 3. ירידת מיפלים ים המלח. הגובה מתייחס לאפס האיזון הארצי (הנתונים לפי: קליין, 1986; Masterman, 1913; אשבל, 1965; מפעלי ים המלח והשירות ההידרולוגי).



איור 4. הירידה השנתית של מיפלים ים המלח מאז 1950. (הנתונים לפי: קליין, 1986; Masterman, 1913; אשבל, 1965; מפעלי ים המלח והשירות ההידרולוגי).

ב. שיטות

1. פרופילי הנחל

בנחל ערוגות נותר רק קטע של כ-300 מטר אשר בו ניתן למצוא אזורים חופשיים מאילוצים מלאכותיים (איורים 1, 2, 5) ובו ניתן לחקור את תגובות הנחל לאירועי שיטפונות. נמדדו חתכי אורך בעזרת תאודוליט אלקטרוני (total station electronic theodolite) בערוצים לאורך ה-thalweg עד לחוף האגם. במקביל נמדד פרופיל לאורך פני השטח הראשוניים לפני הביתור. בנוסף נמדדו 5 חתכי רוחב על בסיס נתוני DEM רב שנתיים (איור 5). חתך 1 בסמוך לגשר שקרס עד חתך 5 ליד החוף. חתך 5 עבר בקו המים בשנת 1990.



איור 5. 2002: חתכי הרוחב בערוץ הערוגות ועל פני המניפה הדלתאית.

עיבוד נתוני חתכי האורך והרוחב נעשה בגיליון אלקטרוני. פרופיל האורך חולק לקטעים הומוגנים מבחינת השיפוע. קטע הומוגני הוגדר כקטע בעל סטית תקן שפועית מכסימלית של $0.5^\circ \leq$. פרופילי הרוחב מתארים את מידת ההתחתרות האנכית והחתירה האופקית של הערוץ. החישוב של קצב הביתור האנכי המכסימלי מתבסס על השוואה בין פרופיל האורך על פני הטופוגרפיה הראשונית של המניפה הדלתאית לפרופיל האורך בערוץ החתור. ההשוואה גם מבטאת את צורת הדעיכה של הביתור כלפי מעלה הערוץ. ירידת קו חוף האגם על פני טופוגרפיה ראשונית וחשיפתה מציינת את תחילת תהליך הביתור. ידיעת שנת החשיפה, על בסיס גרף ירידת

מפלס ים המלח, מגדירה את מועד תחילת הביתור ומאפשרת את תיחום מימד הזמן וחישוב קצב הביתור.

2. עיבוד תמונה

חישוב קצב ההתחזרות של נחל ערוגות בוצע על בסיס עיבוד תצלומי אוויר מהשנים 1990, 1995, 1999 ו-2002. תיקון גיאומטרי של התצ"אות בוצע באמצעות DGPS (Differential Global Positioning System) שאפשר ביצוע מדידות שדה בנקודות הניתנות לזיהוי ברור בתצ"א. אלה שימשו כנקודות בקרה קרקעיות GCP (Ground Control Point) שבעזרתן תוקן תצ"א 2002 לרשת ישראל החדשה. לאחר התיקון שימש התצ"א של 2002 כמקור יחוס לתיקון הגיאומטרי של שאר התצלומים. תיקון התצלומים התבצע בתוכנת ERDAS במודל Ortho base, המתבסס גם על נתוני כיול המצלמה. המוצר הסופי של התיקון הגיאומטרי הוא ארבעה תצא"ות מתוקנות לרשת ישראל החדשה ברמת דיוק כמתואר בטבלה 2.

לצורך מדידת ההתחזרות יוצרו שריגי גבהים דיגיטליים DEM (Digital Elevation Models) מעיבוד של זוגות תצלומים סטריאוסקופיים. יצירת השריגים מתבססת על רכיב ה-Ortho pro base של תוכנת ה-Erdas Imagine. יצירת ה-DEM מצריכה מספר רב של נתונים כגון נתוני כיול המצלמה, גובה טיסה, כיוון הטיסה ונתוני מיקום X.Y.Z שהתקבלו בעזרת DGPS. הדיוק האנכי נקבע בעזרת התאודוליט. התקבלו ערכי מיקום X.Y.Z יחסיים, שלצורך כיול הגובה שלהן נמדדה נקודה בגובה פני האגם ושאר הנקודות תוקנו ביחס אליה.

טבלה 2. נתוני תצלומי האוויר. (שים לב כי נתוני השגיאה בטבלה הם בפיקסל)

שנת תצלום	Pixel R.M.S.E (XY)	control points	גודל פיקסל (מטר)	מודל
2002	1.05	16	0.16	Ortho base
1999	1.20	10	0.16	Ortho base
1995	1.10	10	0.25	Ortho base
1990	1.10	6	0.20	Ortho base

3. ניתוח מרחבי מבוסס DEM

הניתוח המרחבי כלל תיחום גבולות הערוץ בכל אחת מהשנים. ההתחזרות בתקופה שבין התצלומים הוגדרה בעזרת האלגוריתם Change Detection, המחשב את הפרש התבליט בין זוגות DEM על בסיס הפרש הגובה בכל תא. האלגוריתם מאפשר לחשב את השינוי המורפולוגי בערוץ ובגדות ולהראות את כמות ומיקום החומר שהוסע או הושקע בערוץ. התוצר שמתקבל הינו מפת הפרשי גבהים דיגיטלית, המבטאת את השינויים כתוצאה מהתחזרות או מהשקעה במרחב הערוץ הנבדק.

טעות המדידה המקסימאלית במדידה בודדת במימד הגובה היא 0.81 מ' (טבלה 3) ובמימד האופקי 0.30 מ'. לצורך מעקב אחרי התפתחות הערוצים שוחזרו חתכי רוחב בנקודות קבועות לאורך השנים במניפה הדלתאית של נחל ערוגות. החתכים נמדדו מנתוני ה-DEM. שיחזור חתכי רוחב על בסיס מפות הגבהים הדיגיטאליות הוא אמצעי חשוב כדי לעקוב אחרי מגמות ההתחזרות האנכית והחזרה האופקית, במיוחד כדי לחלץ את הקצבים.

הדיוק האנכי של ה-DEM הוגדר באמצעות שגיאת שורש ריבועי הסטיות (RMSE) - מדד המקובל בשימושי DEM בהידרולוגיה (Wise et al., 2000). השגיאה חושבה כנגד מדידות DGPS וכן מדידות EDM שכוילו בנפרד לגובה פני הים. השגיאה הכוללת שהתקבלה לכל DEM בנפרד מתוארת בטבלאות 3 ו-4 ומשמעותה כי במוצע הגובה הנמדד באמצעות ה-EDM נמצא במרחק +/- 0.658 מ' מהחזוי ב-DEM (כמפורט בטבלה). על מנת לבטא את השגיאה בחיזוי תהליכי השקעה וסחיפה חושבו הפרשי הגובה בין ה-DEM לפי הנוסחה הבאה:

$$\Delta Z = \frac{ZE + RMSEE - ZL - RMSEL}{T}$$

כאשר ΔZ הוא ההפרש בין שני המועדים, ZE הוא הגובה ב-DEM במטרים במועד המוקדם יותר ו- ZL הוא הגובה במטרים ב-DEM במועד המאוחר יותר. RMSEE ו-RMSEL הם השגיאה במטרים שנמדדה במועדים המוקדם והמאוחר בהתאמה ו-T הוא הזמן שעבר בין המועדים ביחידת שנה הידרולוגית (שנה המתחילה בחודש ספטמבר).

טבלה 3. חישובי השגיאה האנכית (מטר) ל-DEM שיוצרו במסגרת עבודה זו.

שנה	השוואה ל	
	GPS	EDM
	RMSE	RMSE
2002	0.809	0.459
1999	0.774	0.648
1995	0.758	0.757
1990	0.782	0.768

כן בוצע חישוב ממוצע ריבועי הסטיות להפרש הגבהים בנקודות בעלות מפלס קבוע בהן לא צפוי שינוי בין השנים (טבלה 4).

טבלה 4. חישובי השגיאה (מטר) של חיסור DEM בין כל זוג שנים. החיסור בוצע ב-40 נקודות תצפית, שלא אמור להיות בהן שינוי גובה ולכן ההפרש הצפוי הוא 0 מ'.

הפרשי שנים	RMSE
1999-2002	0.633
1995-1999	0.688
1990-1995	0.870

4. גאוויות וקביעת מפלס רלוונטי של ים המלח

נבחנו הגודל (ספיקת שיא), המשך והנפח של גאוויות שהתרחשו בנחל ערוגות בתקופה הרלוונטית (מאירוע הזרימה מתאריך 24.02.1988 שהתרחש לפני ביצוע התצלום של 1990 ועד לאירוע הזרימה המקביל 2.05.2001 שהתרחש לפני ביצוע התצלום של 2002). נבדקו התאריכים בהם התרחשו השיטפונות לקביעת משך הזמן בו בוצעה עבודה נחלית (התחתרות אנכית וחתיירה אופקית): כלומר לא בין התאריכים של תצלומי האוויר, אלא בין התאריכים של הגאוויות הרלוונטיות. משכים אלה הם פרקי הזמן לקביעת קצב התחתרות אנכית וחתיירה אופקית. למשל, כדי לקבוע במדויק קצב על סמך התצלומים משנת 1990 ו-1995 היה צריך להתחשב באירוע הזרימה האחרון לפני 1990 (24.2.1988) ומיד לפני התצלום השני (02.11.1995) - ראה נספח 1. בסיס הנתונים המפורט של מפלס ים המלח (ראה נספח 2) נבדק כדי לקבוע האם השתנה קצב ירידת מפלס הים בין שתי התקופות עבורן נעשו חישובי הפעילות הנחלית.

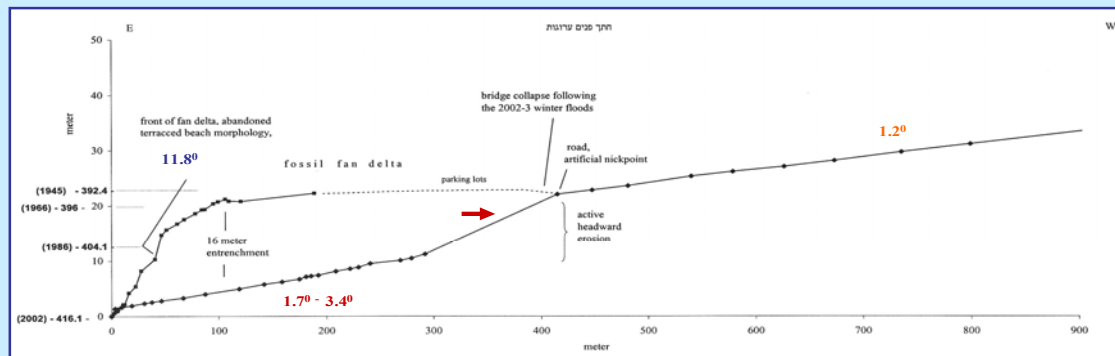
5. הבתימטריה של ים המלח

שיפועי הטופוגרפיה העתידה להיחשף תורמים לחיזוי של התגובה ההתחתרותית עם נסיגת האגם העתידית. התמקדנו בטופוגרפיה של קרקעית ים המלח עד ל-490 מ' בחזית מוצא נחל ערוגות. מפת התצלום והבתימטריה העדכנית מ-1997 בקנה"מ 1:5000 וברוח אנכי 1 מ' של חברת אופק (המתבססת על המיפוי הבתימטרי של חקר ימים ואגמים עד עומק מים של כ-80 מ') אינה מגיעה לחזית נחל ערוגות. הנתונים הבתימטריים מתבססים, לכן, על המפה של Hall (1974).

ג. ממצאים

1. פרופיל האורך וחתכי הרוחב

פרופיל האורך בנחל ערוגות ועל המניפה הדלתאית מוצג באיור 6. הפרופיל הקעור מבטא סחיפה חריפה לאחר שאחראית להרס הגשר (מאי, 2001). הביתור המכסימלי באזור נמדד בנחל ערוגות – עומקו 16 מ'.



איור 6. פרופיל האורך בערוץ הערוגות ועל פני המניפה הדלתאית

חתי הרוחב מרוכזים באיור 7. החתכים מראים כלהלן:

1. החתך של שנת 1990 מבטא מורפולוגיה בלתי חתורה ובלתי עמוקה של פני מניפה. ביתור מניפת 1990 ו-1999-2002 דועך מהחוף למעלה, ביטוי לדעיכה במעלה (headward) המופעלת ע"י בסיס סחיפה יורד.

2. התקופה 1990-95 מראה ביתור אנכי חזק.

3. ב-2002 החתך מגיע לראשונה ליצורה טרפזית קלאסית בעלת גדות מאוד תלולות ובלתי יציבות.

4. בתקופה 1990-2002 יש העמקה וחתיירה אופקית. חלק מהפאזות ההתחתרותיות מתבטאות בהצרת החתך ע"י מעבר לחתך דמוי V והרחבתו לאחר מכן. נראית מגמה ברורה מאוד (בחתיכים 1-2 וגם 5) של ביתור אופקי צפונה.

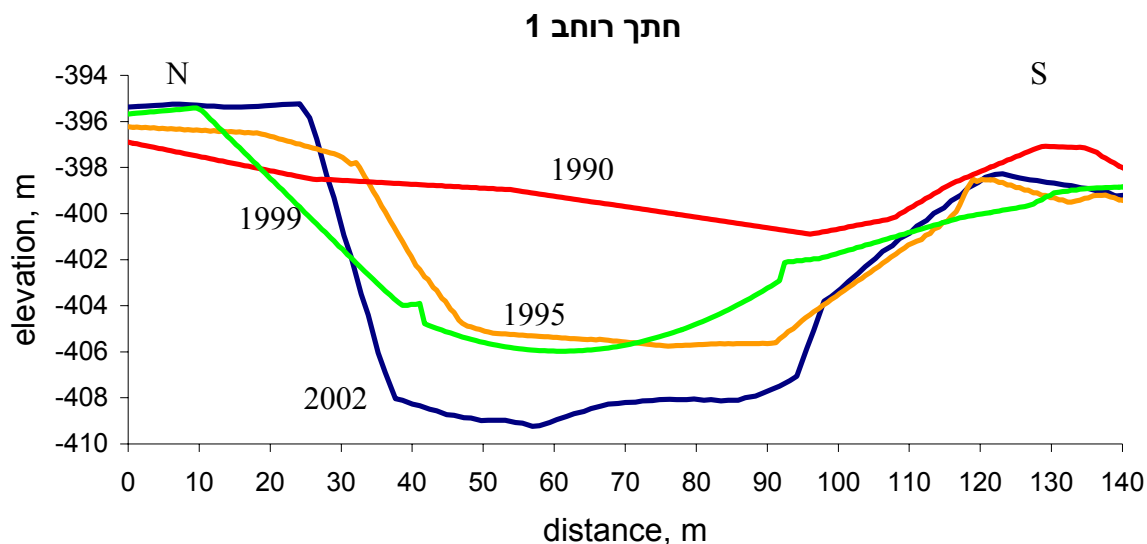
2. התחתרות אנכית

חישוב קצב ההתחתרות האנכי על בסיס החתכים המשוחזרים (איור 7) בתקופה 1990-2002 מראה שהערך הממוצע לכל התקופה הוא 0.62 מ' לשנה (טבלה 5). הערך המכסימלי להתחתרות אנכית שנתיית על בסיס חישוב כולל של הסחיפה לכל התקופה הוא 0.698 מ' לשנה. קצב זה כולל את השגיאה הממושבת על פי נוסחא 1. ניתן לעגל ערך זה ל-0.70 מ' לשנה.

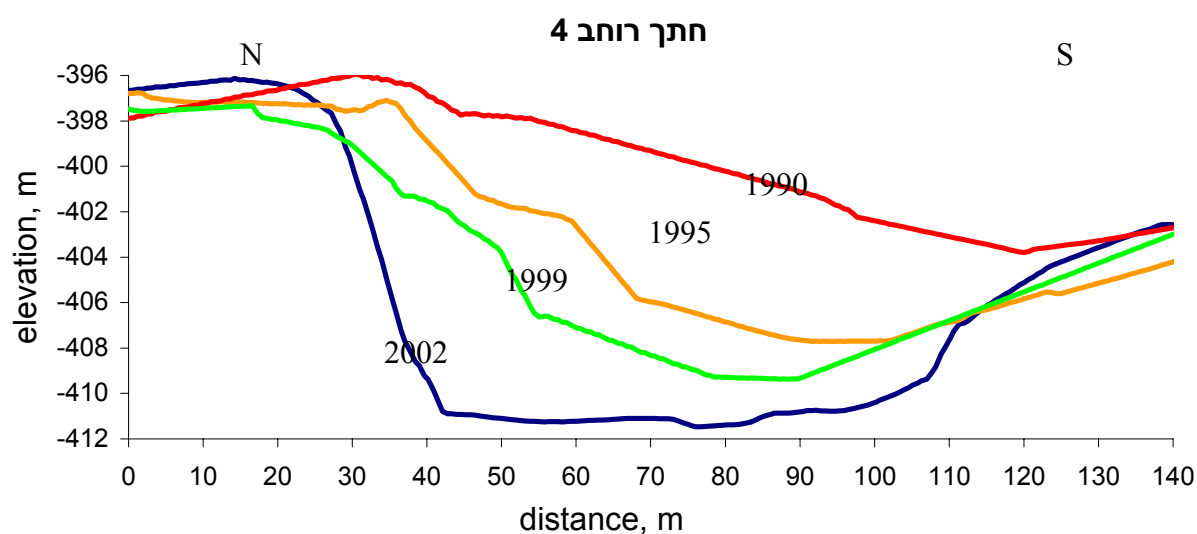
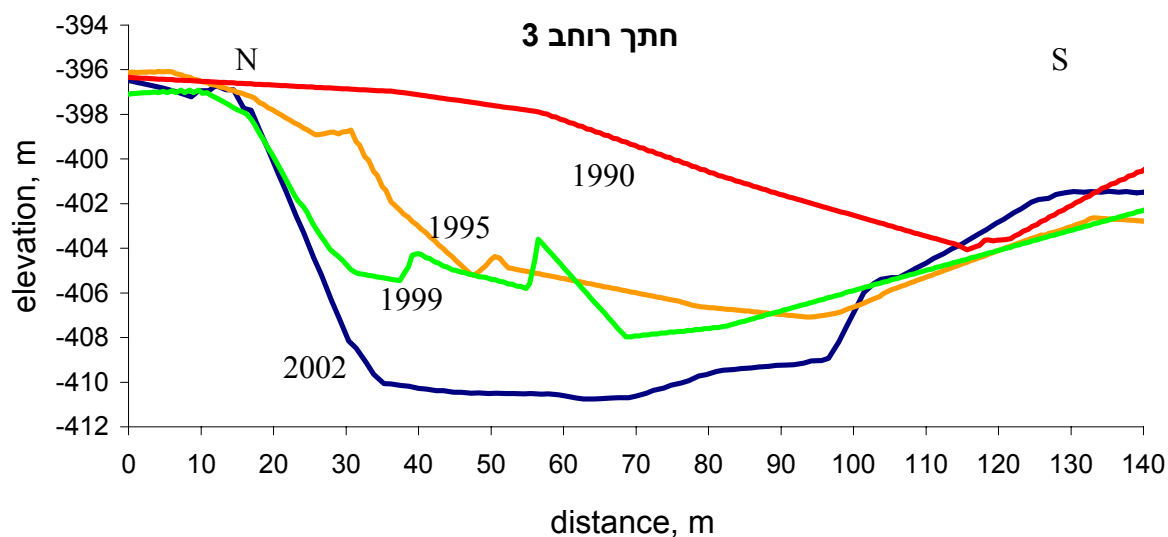
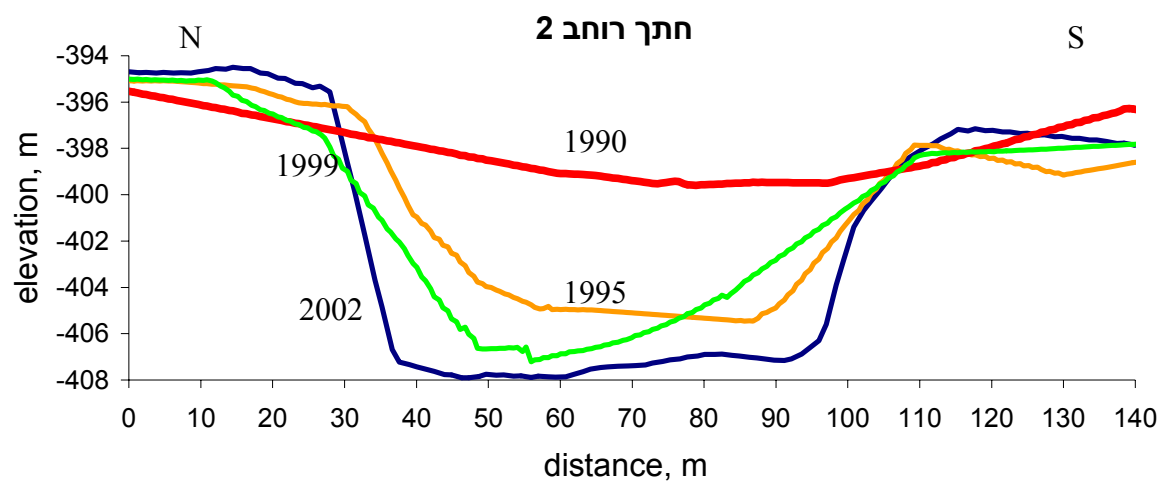
טבלה 5. סיכום נתוני ההתחתרות האנכית (מ' לשנה) על בסיס החתכים המשוחזרים. החישוב אינו כולל את שגיאות ה-RMS כיוון שפרקי הזמן קצרים מכדי לבטא אותה. להסבר ראה גוף הדו"ח.

קצב התחתרות אנכית, (מ' לשנה)						
חתך	1	2	3	4	5	ממוצע
1995-2002	0.46	0.67	0.64	0.69	0.77	0.65
1990-1995	0.76	0.64	0.45	0.52	ND	0.59
ממוצע כולל						0.62

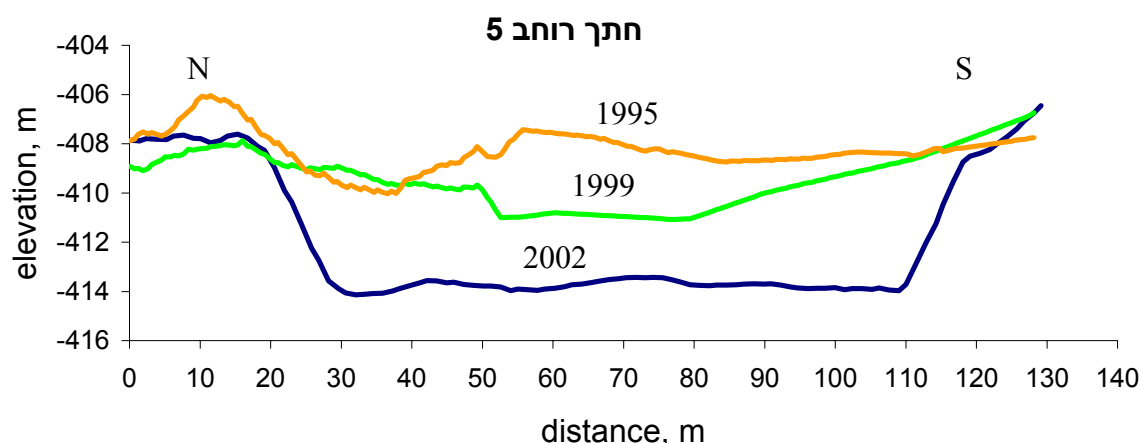
משרע קצב ההתחתרות האנכית בכל החתכים משתרע בתחום 0.45-0.77 מ' לשנה. הממוצע הוא 0.62 מ' לשנה.



איור 7. חתכי רוחב משוחזרים על בסיס D.E.M.



איור 7. המשך: חתכי רוחב משוחזרים על בסיס D.E.M.



איור 7. המשך: חתכי רוחב משוחזרים על בסיס D.E.M.

3. חתירה אופקית

רוחב החתכים נמדד בתצ"אות על בסיס ערכי ה-D.E.M. קיימת (בעיקר בתצ"א של 1999 אך גם באחרות) התערבות של האדם בהתפתחות הערוץ על ידי כרייה במרכז ובמיוחד בגדה הצפונית. על כן, נותחו קצבי חתירה אופקית רק על בסיס אותם חתכי רוחב בהם זוהו הגדות או אחת משתי הגדות כטבעיות. ליתר זהירות ובמטרה להקטין את השגיאה בקביעת מיקומה של גדה בחתך, זוהו הגדות באופן בלתי תלוי על גבי ההדמאות על ידי שניים ממחברי הדו"ח.

טבלה 6. סיכום נתוני החתירה האופקית על בסיס החתכים המשוחזרים

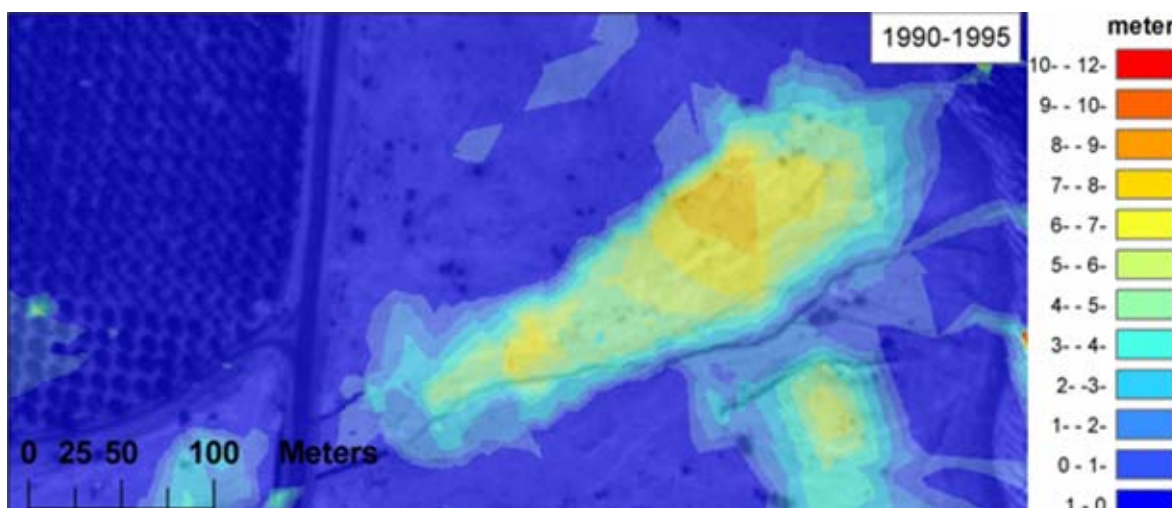
קצב חתירה אופקית בחתך, מ' לשנה						
חתך	1	2	3	4	5	ממוצע לתקופה
1995-2002	2.21	2.21	ND	2.50	ND	2.30
1990-1995	3.08	2.12	ND	ND	ND	2.60
ממוצע כולל						2.45

משרע קצב החתירה האופקית בכל החתכים משתרע בתחום 2.12 - 3.08 מ' לשנה. הממוצע הוא 2.45 מ' לשנה.

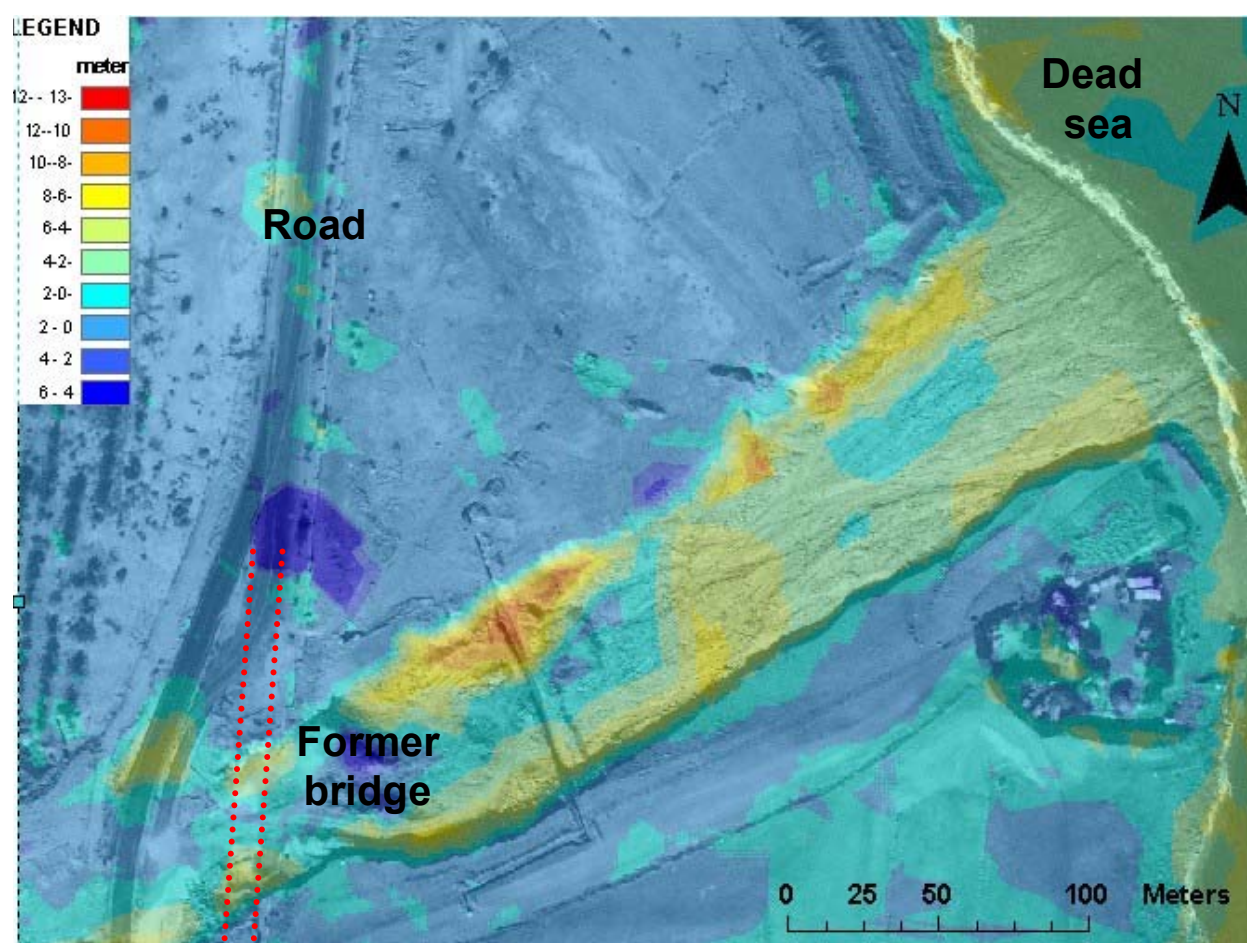
החתכים המשוחזרים (איור 7) מראים באופן ברור גם חתירה אופקית משמעותית. בחתך 1, המזרחי, משרעת הקצבים שנמדדו היא 2.21-3.08 מ' לשנה ובממוצע 2.65 מ' לשנה ובחתך 2 היא 2.12-2.21 מ' לשנה ובממוצע 2.17 מ' לשנה (טבלה 6). בחתך 4 ניתן היה למדוד רק בין השנים 1995 ו-2002 והחתירה האופקית בתקופה זו היא 2.5 מ' לשנה – ז.א., חתירה אופקית כמעט זהה

לזו המזרחית. בסמוך לגשר. מניתוח מפות Change Detection מתברר שבשנים 1990-95 רוב ההתחברות התרחשה במרכז הערוץ (איור 8), אך בין השנים 1999 ל- 2002 ניתן להבחין בחתירה אופקית מודגשת בגדה הצפונית (איור 9). החתירה האופקית איננה רציפה ומופיעה כמטליות. מסתבר שקריסת הגשר (איור 10) נגרמה בעיקר כתוצאה מהחתירה האופקית. אך החתירה האופקית הינה מוצר לוואי של ההתחברות האנכית.

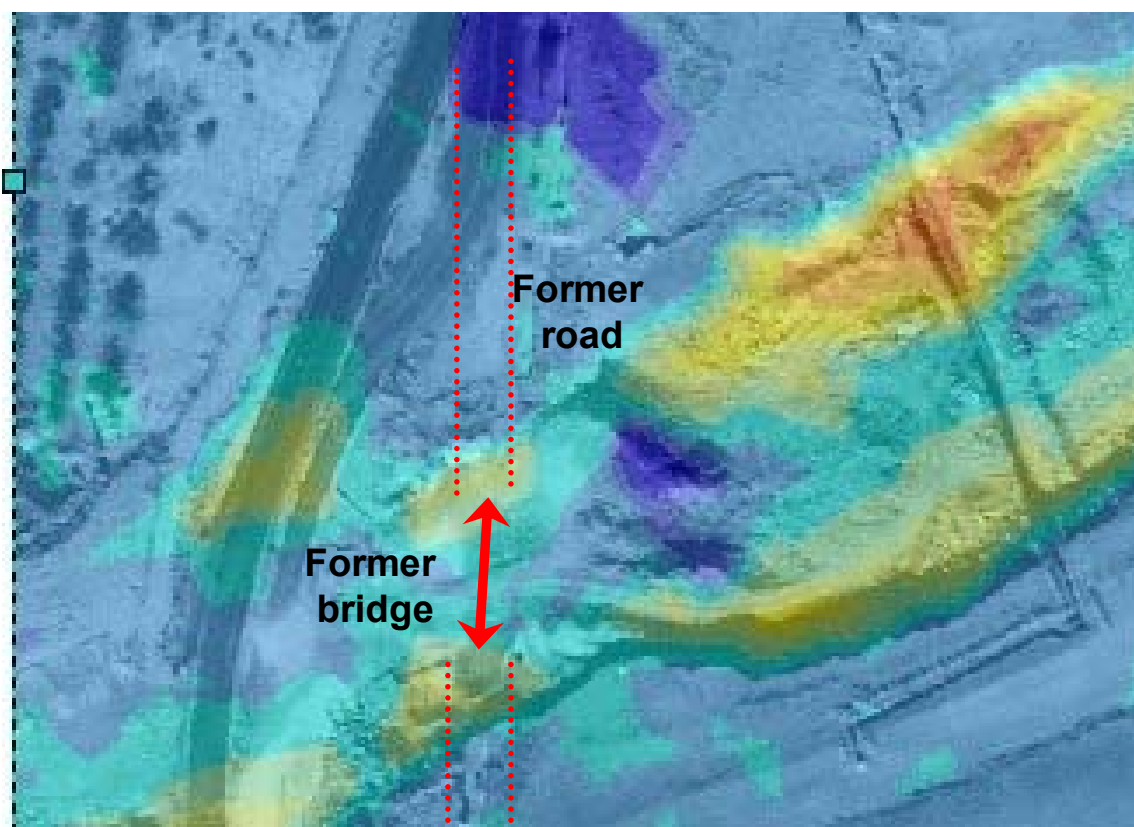
תחזית קצב החתירה האופקית אינו יכול להתבסס על תקופה כה קצרה וקטע נחל שחלקו הופרע מלאכותית מספר פעמים בתקופת הבדיקה. מצד אחד הקצב של התרחבות חייב לקטון עם הזמן, שכן האפקטיביות של שיטפון מלא מגדה לגדה קטנה ככל שרוחבו גדל עקב ירידה במאמץ גזירה ממוצע. אך, מאמצי הגזירה הפועלים בנחל רחב מאד בדגם פזרות אינם מתפלגים באופן הומוגני לרוחב הערוץ. להיפך, בערוץ רחב מאד מתקיימת זרימה חזקה והרסנית באפיקי מישנה (anabranches) שהם מסיעים את מרבית הסחף, גורמים לסחיפת גדות ובאזורים צחיחים כמו איזור ים המלח גורמים להתרחבות מהירה יותר מאשר באזור לח כגון בגליל.



איור 8. מפת 1990 change detection - 1995 המצביעה על תקופה ארוזיבית בעיקר במרכז הערוץ.



איור 9. השקעה והתחתרות בערוץ 1999-2002: סחיפה אופקית מודגשת במטליות על הגדה הצפונית. שנויי התבליט הארוזיביים כאן מגיעים ל-9 מ' ומביעים התמוטטות גדות והתרחבות הערוץ.



איור 10. השקעה והתחתרות 1999-2002 באיזור הגשר (הגדלה של איזור הגשר מאיור 9): ההתחתרות דועכת לכוון הגשר. על תוואי הגשר עיקר הסחיפה היא לתרלית ולא האינטנסיבית ביותר. השקעת החומר ממזרח לגשר (כחול-סגול) היא מלאכותית. ראה מקרא בשרטוט הקודם.

4. גאוויות וקצב ירידת מפלס הים

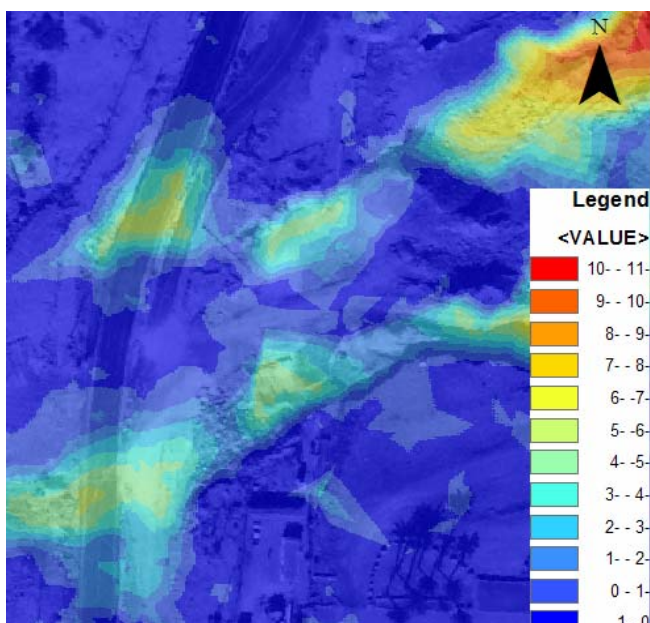
הגורמים להתחתרות אנכית ולחתירה אופקית הם, כמובן, הירידה של בסיס הסחיפה והגאוויות בנחל ערוגות. ללא ירידה בבסיס הסחיפה לא מתרחשת התחתרות בערוץ הנמצא בשווי משקל דינאמי, ז.א. יציב לאורך זמן. במקביל, אף אם ישנה ירידה מואצת של בסיס הסחיפה – הוא ים המלח, לא מתבצעת עבודה נחלית ללא גאוויות. בתקופה הנדונה עברה יש נתונים מתצלומי אוויר התרחשו שיטפונות שתועדו ע"י השרות ההידרולוגי (טבלה 1 בנספח). נתוני הגאוויות לנחל ערוגות הינן לתקופה פברואר 1985 עד היום, ובהתחשב כי תחנת המדידה של השרות ההידרולוגי ניזוקה בגאות מאי 2001 יש מדידות ל' 16 שנים בלבד. זו התקופה המתועדת הארוכה ביותר לנחלים המתנקזים ממדבר יהודה לים המלח. יש לזכור שקיימת שונות במימדי השיטפונות ולאירועים גדולים יש תקופת חזרה ארוכה יותר. להלן נתייחס לתקופה 1990-1995 כתקופה ראשונה ולתקופה 1995-2002 כתקופה שנייה.

כפי שמסוכם בטבלה 7, התרחשו סה"כ 13 אירועי זרימה בתקופה הראשונה ו-28 בשנייה. למרות הבדל כביכול גדול זה, קצב ההתחתרות האנכית היה רק 10% יותר גבוה בתקופה השנייה וקצב החתירה האופקית אף היה יותר קטן בשנייה. ספיקת השיא בתקופה השנייה הייתה פי 3

גבוהה מאשר בראשונה והיא זו שגרמה להתמוטטות הגשר. ההתחתרות האנכית והחתירה האופקית בכל ארוע זרימה נפרד תלויים ביכולת הנחל להסיע סחף. יכולת זו תלויה בספיקת המים ליחידת רוחב (למעשה במאמץ הגזירה). מאמץ הגזירה תלוי בעומק המים ובשיפוע האורכי. עומק המים אינו חייב להיות גבוה כדי להסיע סחף רב מפני שנחלי מדבר יהודה תלולים בכניסתם לים המלח. במחקר על תפוקת הסחף בנחל רחף ובנחל קנאים הסמוכים מסתבר שבעומק רדוד ביותר, אף מתחת ל-10 ס"מ, שטף הגרופת (הסחף הגס) גבוה מאד (Cohen and Laronne, 2005). כאשר גדלים עומק המים והספיקה כן גדל השטף בקצב המתאים לנוסחאות ידועות, כגון אלה של Meyer-Peter & Müller (1948); Parker (1990). מכאן ניתן להבין מדוע הקצב השנתי של ההתחתרות האנכית בשתי התקופות איננו שונה בהרבה על אף הגאות של מאי 2001: הסיבה לכך נעוצה במשך דומה בשתי התקופות ובנפח גאויות גדול יותר בתקופה הראשונה.

טבלה 7. סיכום נתוני גאויות בנחל ערוגות ל-3 התקופות שבין תצלומי האוויר. הערכים הרלוונטיים הינם רק לשתי התקופות לזוג ההדמאות 1990-1995 ולזוג 1995-2002.

תקופה	משך שנים	מס ארועים #	ספיקת שיא מ ³ /שנה	נפח גאויות מלמ"ק	משך שעות	התחתרות מ' לשנה	חתירה מ' לשנה	ירידת מפלס הים מ'
1990-95	7.7	13	160	12.2	700	0.59	2.6	3.9
1995-99	2.4	15	137	4.6	458			
1999-02	3.1	13	418	3.5	179			
1995-02	5.5	28	418	8.1	637	0.65	2.3	5.6



איור 11. החתירה האופקית החזקה בשתי הגדות של הערוץ, על בסיס סרט וידאו שתיעד את השיטפון של מאי 2001. (מקור: רשות ניקוז ים המלח; צולם ע"י חבר קיבוץ עין גדי).

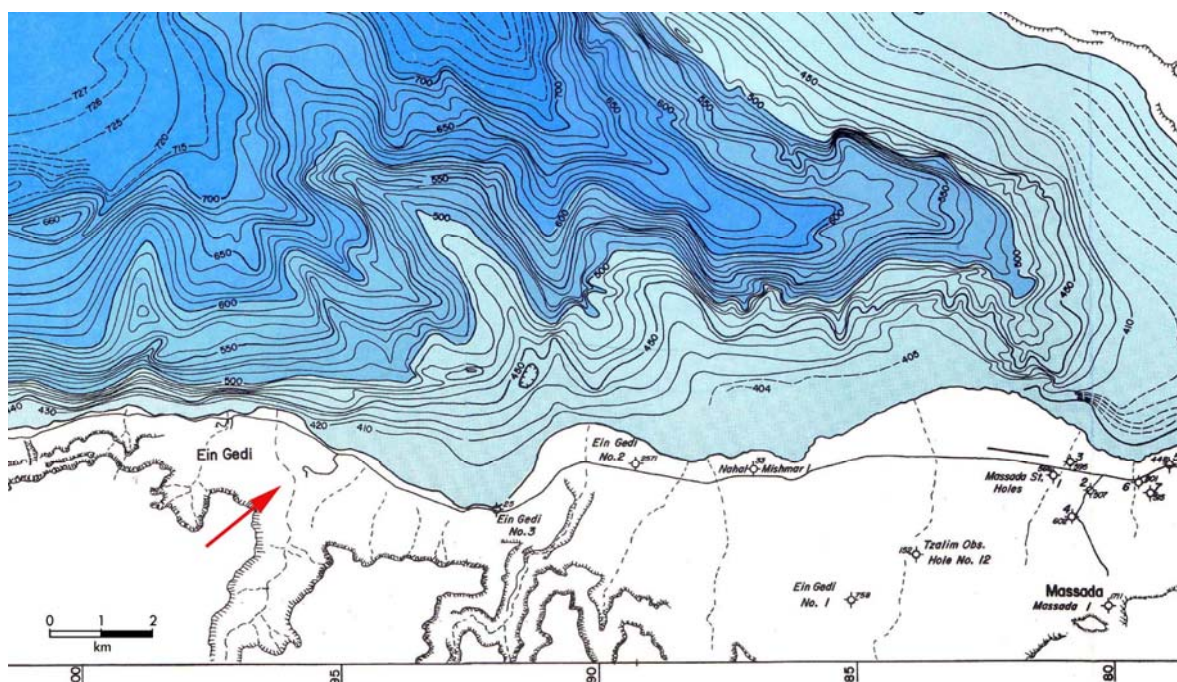


איור 11. המשך: החתירה האופקית החזקה בשתי הגדות של הערוץ, על בסיס סרט וידאו שתיעד את השיטפון של מאי 2001. (מקור: רשות ניקוז ים המלח, צולם ע"י חבר קיבוץ עין גדי).

5. בתימטריה

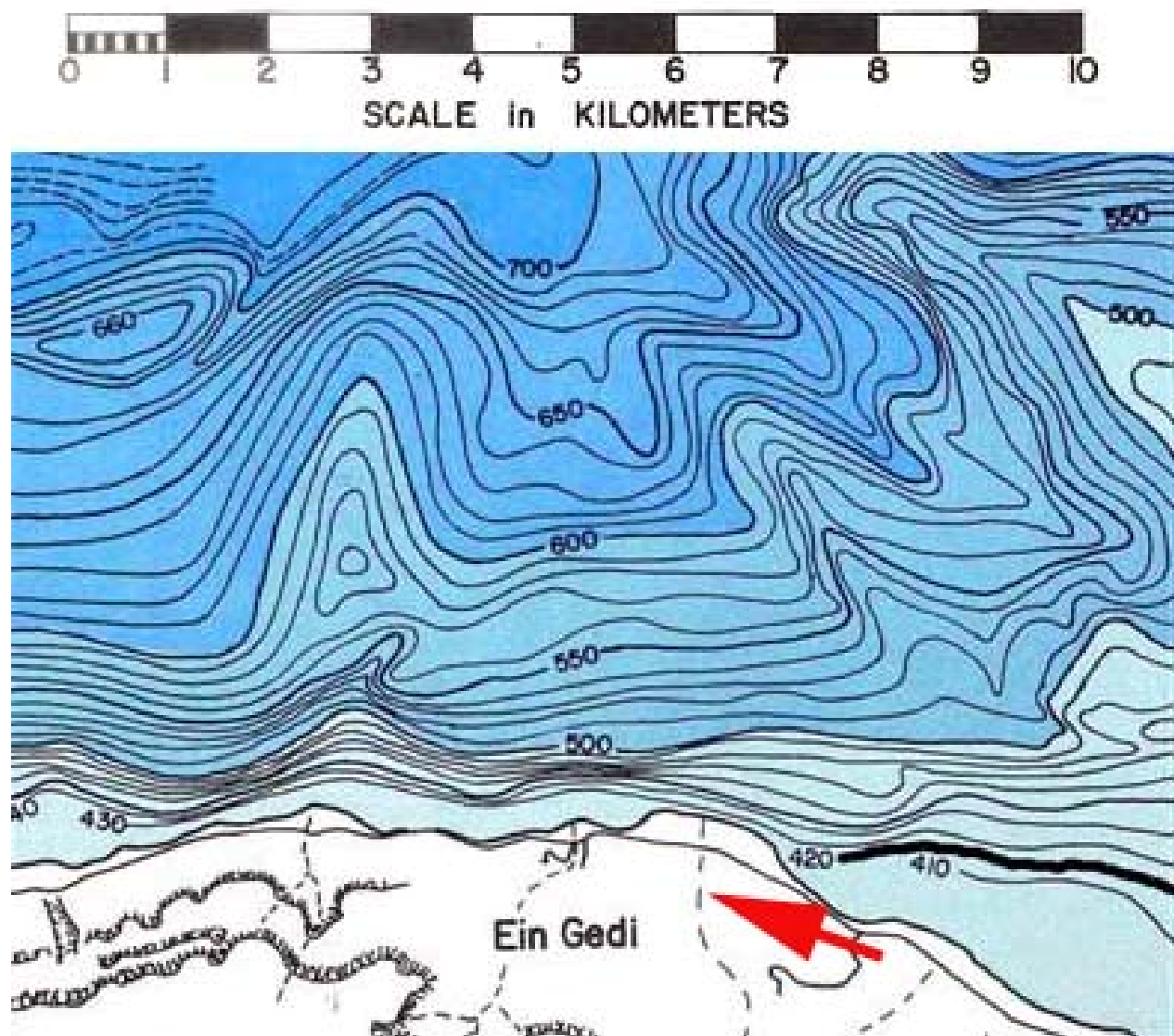
שיפוע הטופוגרפיה הראשונית בשולי אגמים הוכר בעבודות רבות כגורם דומיננטי ראשון במעלה הקובע אם תהיה התחתרות אנכית עמוקה, מעטה או שאין ביתור (Koss et al., 1994; Schumm, 1993). על בסיס המיפוי הבתימטרי של Hall (1974) נמדדו השיפועים הבתימטריים בחזית נחל ערוגות עד למפלס של 500- מ'. השיפוע הממוצע בתחום מפלסים 500- מ' עד 420- מ' הוא $5^{\circ} 12'$ (איורים 12, 13). סף השיפוע הקריטי לתגובה התחתרותית באזור ים המלח הוא $3^{\circ} \sim$ (באומן וחבריו, 2004). ירידת בסיס הסחיפה על פני המורפולוגיה התלולה שתיחשף, בעלת השיפועים העל-קריטיים, תגרום לתגובה התחתרותית. מסקנה זו מתבססת על בדיקות מצבים דומים בנחל דרגה, קדם וחצון.

הליתולוגיה, אשר תיחשף ותבותר בעשרות השנים הקרובות, כלומר תת-הקרקע לאורך חוף ים המלח עד עומק של כ 50 מ' מתחת לפני השטח, נלמדה מקידוחים (וקס ואחרים 2000 Yechieli, 2000 ; Arkin and Gilat, 1999) ומסקרים גיאופיזיים. נתגלו שכבות של חרסית, סילט וחרסית, חרסית חולית, שכבות מלח סדוקות כנראה עם חללים וכן חולות באצבוע עם חלוקים וחול. הסדימנטים אינם מלוכדים. במסגרת עבודה זו לא נאספו נתונים ספציפיים בנחל ערוגות והנחתנו היא שהמסקנות למעלה תקפות. בקצב התחתרות אנכית של 0.7 מ' לשנה עומק התחתרות הערוץ מתחת לפני המניפה יצטבר עד השנים 2045-2050 ל 50 מ'.

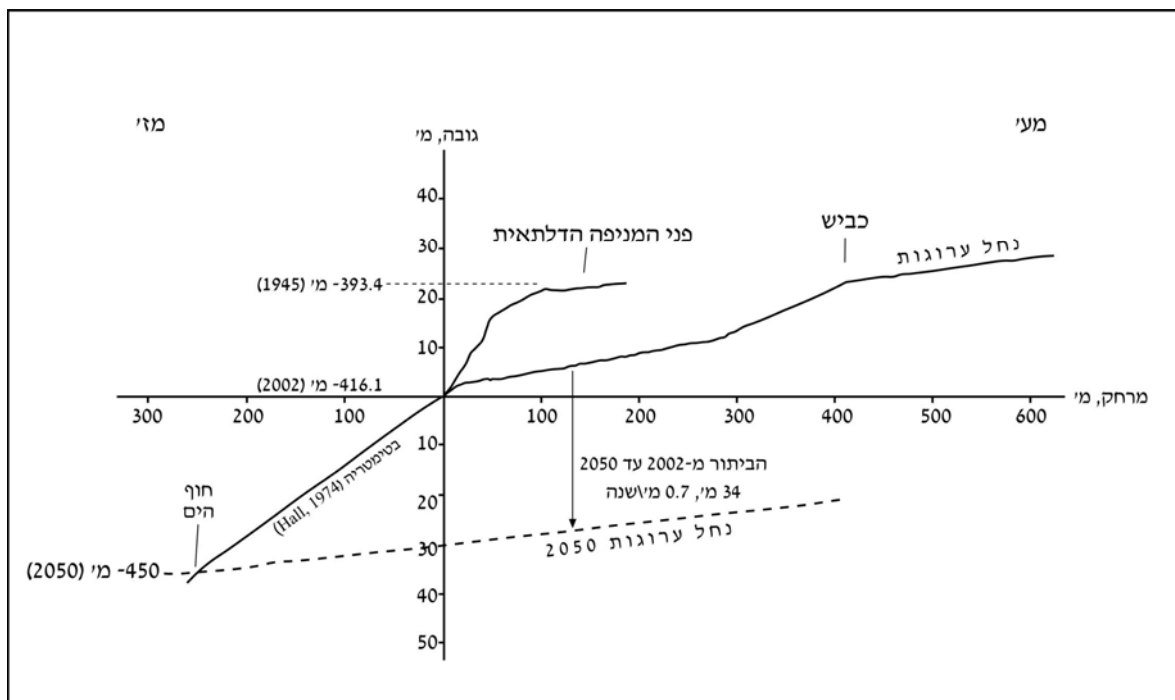


איור 12. המפוי הבתימטרי של Hall (1974). באזור נחל ערוגות (חץ) מתקרבת הבתימטריה התלולה לשולי האגם. קו החוף כיום קרוב לאיזובט 420- מ'.

בצענו חיזוי על בסיס הבתימטריה ובהנחת קצב ירידה ממוצע של מפלס האגם 0.7 מ' לשנה הממשיך את מגמת הקצב הקיים (איור 3-4) ותוך הנחת ביתור מכסימלי, כלומר היוצרות חתך אורך של $1.5^\circ - 1^\circ$, שהוא השיפוע של הנחלים הגדולים חבר וצאלים קרוב לחוף. לפי החיזוי (איור 14) בתקופה 2045-2050, כאשר מפלס האגם יגיע ל-450 מ', תושלם התחתרות אנכית לעומק 34 מ'.



איור 13. מיפוי לפי Hall (1974) – הסביבה הבתימטרית התלולה של נחל ערוגות (חץ) איזובט 420- מ' הוא בקירוב קו החוף. איזובט 550- מ', 32 מ' מתחת למפלס 2005, יהיה קו החוף בעוד כ- 45 שנה, במרחק של כ- 300 מ' מזרחה מהחוף הנוכחי.



איור 14. התחתרות של נחל ערוגות בחוף עתידי, במפלס 450 מ' בהנחת קצב ירידת מפלס מהירה של 0.7 מ' / שנה.

ד. סיכום והמלצות

חישובינו במודל האמפירי מתבססים על הנחה שהאגם ימשיך לרדת בקצב מהיר וקצוב (0.7 מ' לשנה) כפי שהייתה המגמה בשנות התשעים ושהערוץ ימשיך להתחתר בבתימטריה התלולה ששיפועה על-קריטי (כ-5 מעלות) שתיחשף בחזית נחל ערוגות, ושתמשיך להפעיל אפקט התחתרות.

1. סיכום

א. קצב הביתור האנכי המכסימלי בקטע בין הכביש לאגם, על בסיס מדידות שדה שמשקפות ביתור של כ-40 שנה (מחציית מפלס האגם את השפה הגבוהה של חזית המניפה הדלתאית – (איור 5) 1963/4 ועד ל-2004) הוא בממוצע 0.4 מ' לשנה (טבלה 1). על בסיס מדידת חתכים משוחזרים לפי ניתוח DEM מאז 1990 (וגאיות מ-1988) קצבי הביתור הממוצעים הם 0.62 מ' לשנה והתחתרות האנכית המכסימלית היא 0.70 מ' לשנה. זו האחרונה חושבה לכל התקופה 1990-2002 תוך התחשבות בטעות המדידה המכסימלית שמסבירה חלק מהפער בין הערכים. גם האצת קצב ירידת מפלס האגם בתקופה האחרונה תורמת כנראה לפער.

על סמך כל נתוני הביתור שהפקנו ממדידות השדה וממדידות על בסיס DEM אנו חוזים שקצב הביתור האנכי השנתי ימשיך להיות כ-0.6 מ' לשנה. ערכים אלה נכונים למרחק של מספר מאות מטרים מהחוף העתידי והם ידענו אחורה. עומק הקניון העתידי של הערוגות יהיה בעוד 10 שנים כ-7 מטר מתחת לפני קרקעית האפיק הנוכחי ובעוד כ-50 שנה העומק יגיע ל-31 מטר (איור 14).

ב. קצבי ההתחתרות שחושבו על ידינו כוללים לכל היותר אירועי שיטפונות מכסימליים בעלי זמן חזרה עד 16 שנה, אף כי ייתכן שמהסידרה החלקית של גאיות בנחל ערוגות ניתן היה להסיק כי ספיקת השיא בחודש מאי 2001 היא בעלת זמן חזרה ארוך הרבה יותר, ייתכן אף 1 ל-50 שנה (ראה פרק תוצאות לגבי משך זמן כזה). אירועים גדולים יותר בעלי זמן חזרה ארוכים יותר ייתכנו, כמובן, אך השפעתם לא נכללה בחישובינו. הם לא יכולים להעלות באופן ניכר את קצב ההתחתרות האנכית, שכן זה שחושב 0.62 מ' לשנה הינו 10% בלבד פחות מקצב שפילת ים המלח בתקופה הנדונה (0.70 מ' לשנה). יחד עם זאת, בתקופה לפני התרחשות גאות גדולה ואחרי משך ארוך בו יש יובש או פעילות נחלית מועטה מפלס הים יורד הרבה ואירוע חריג כזה הינו הרסני במיוחד.

ג. מרצף החתכים המשוחזרים (איור 7) ניתן להסיק שחתך הרוחב נעשה יותר דמוי טרפז. שינוי צורה זה משקף תקיפה אופקית. השוואת קצבי הביתור האנכי (טבלה 4) עם ההתרחבות האופקית (טבלה 5) מאשרת שקצב ההתרחבות עולה בסדר גודל על קצב הביתור האנכי. התשתית הבלתי קוהזיבית של הסדימנטים וקצב הביתור האנכי המהיר יעודדו אי יציבות של הגדות הגבוהות, חתירה אופקית בבסיס וגלישה של הגדות. חתכי הרוחב שמגיעים כיום לכ-70 מ' ימשיכו להתרחב בקצב ממוצע פחות מ-2.45 מ' לשנה ויגיעו תוך 45 שנה לרוחב העולה על 150 מ'.

אפשר לקחת בחשבון ולהצהיר: א. בנחל ערוגות כמו בנחלים רבים בקטעים הקרובים לחוף ולכל אורך הערוץ, הגדות הינן כמעט אנכיות. ב. יש עדויות שדה רבות לכשל גדות פעיל. ג. מבחינת מודל התפתחות של entrenched channel כל העדויות בערוגות ובנחלים אחרים מצביעות על כך שכיום ישנו שלב הביתור לעומק ולרוחב ועדיין אין סימנים לשלב הבא – מילוי. צפויה להמשיך בעתיד אותה פאזה. השלב הבא – מילוי – יבטא השקטת המגמות הקיימות של התחתרות אנכית וחתירה אופקית כאשר הרוחב יעבור סף קריטי.

ד. בנקודה בה הכביש חוצה את הערוץ ומחזק על ידי בטון נוצרה נקודת נקע מלאכותית בפרופיל האורכי במרחק 400 מ' מהחוף. הכביש מהווה בסיס סחיפה מקומי וחוסם את הביתור המופעל מהאגם. ללא מחסום זה אפיק הערוגות היה מתחתר אחורה לפחות 800-1000 מ' כפי שקורה בנחלים חבר וצאלים, שניהם דוגמאות לנחלים בלתי מופרעים בתנאים של בסיס סחיפה הממשיך לסגת אך בתבליט מניפתי יותר מתון. שיפוע הערוגות יקטן ל 1° - 2° בדומה למצב בחבר ובצאלים ולמעשה בדומה לשיפוע במעלה הכביש בנחלים השונים, ללא קשר למימדי אגניהם: 1.5° בערוגות, 1.3° בחצצון, 1.4° בדרגה. בחזית נחל ערוגות הטופוגרפיה והבתימטריה תלולים ביותר והנחל נתון בערוץ אחד בלבד. לכן, מראה הערוגות את התגובה ההתחתרותית החריפה ביותר באזור.

2. המלצות

ההמלצות הנובעות מהחישובים ומהניתוח הן כדלקמן:

א. מומלץ כי בכל תכנון הנדסי יילקח בחשבון קצב התחתרות אנכי ממוצע של 0.62 מ' לשנה ללא פקטור בטיחות. תוספת פקטור בטיחות של 1.13 יוצרת קצב התחתרות אנכית ממוצעת מקסימאלי של 0.7 מ' לשנה. יש לתכנן תשתיות שייקחו בחשבון שתוך 45 שנה יתפתח ערוץ קניוני בעומק של כ-31 מטר מתחת לפני המניפה הנוכחית של ערוץ הערוגות הנוכחי.

ב. יש להגן באופן יעיל ומוחלט מפני הסחיפה לאחור ממזרח לכל גשר שעתידי להבנות. את אמצעי ההגנה יש לתחזק ולהמשיך להעמיק באופן קבוע בהמשך לביתור. צורך דומה קיים בנחל דרגה, המראה כבר היום כי מבנה ההגנה נמצא בסכנה כיוון שאינו מוגן בעצמו מפני סחיפה בבסיס המגלש. בנוסף, יש להגן על הגדות הרכות בצידו הגשר למרחק של לפחות 100 מ', ויש לדאוג שההגנה תהיה מוחלטת ע"י תחזוקה מתמדת - להמשיך להעמיק את ההגנה בדפנות בהמשך לביתור הבלתי פוסק.

ג. התערבות ההנדסית יכולה לשקול עידוד של זרימת פזרות דיברגנטית. כלומר, לפתוח תעלת זרימה נוספת ולנקז את הערוגות בשיטפון בעל זרימה מעומק מסוים (כ-1.5 מ') דרך שתיים ויותר תעלות. כיום המרחק לים הינו קצר אך תוך 10-20 שנה יכולה פעולה ניקוזית כזו להקטין את קצב ההתחתרות.

ד. מאחר וקצבי ההתחתרות מהירים ביותר והשינוי המורפולוגי לו ניתן לצפות בערוגות הינו חריף יותר מאשר בכל ערוץ אחר באזור (!) יש לשקול מעבר כביש ללא גשר: גשר אירי תוך התאמה מתמדת לביתור, וסגירת הכביש למספר שעות לשנה בזמן השיטפונות. פתרון זה יהיה זול במידה נכרת. מה עוד, ממילא כביש עין-גדי-סדום סגור מספר שעות כמעט כל חורף עקב זרימתם של נחלים גדולים אחרים, כמו נחל צאליים ונחל חבר.

ביבליוגרפיה

- אשבל, ד. 1965. עלייתו וירידתו של מפלס פני ים המלח. מדע ט, 5, 255 – 260.
- באומן, ד., דבורה, ש., סבוראי, ט. 2004. השפעת מפלס ירידת ים המלח כבסיס סחיפה. דוח מחקר לרשות ניקוז דרומי ים-המלח. המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן גוריון בנגב.
- וקס, ד., יחיאלי, י., שטיבלמן, ו., איתמר, א., בר, ג., גולדמן, מ., רז, א., ריבקוף, מ., שטנר, א. 2000. היווצרות הבורות לאורך חופי ים המלח. המכון הגיאולוגי, דו"ח מס GSI / 41 / 2000, 49 עמ.
- קליין, צ. 1986. שינויי מפלס ים-המלח ותנודות אקלים בארץ ישראל בתקופה ההיסטורית, עבודת דוקטורט, האוניברסיטה העברית, 212 עמ'.
- Anati, D. A., Stiller, M., Shasha, S., Gat, J. R. 1987. Changes in the thermocline structure of the Dead Sea : 1979-1984. Earth Planet Sci. letters, 84 : 109-121.
- Anati, D. A. and Shasha, S. 1989. Dead Sea Surface-level changes. Isr. J. Ear. Sci. 38: 29-32.
- Arkin, Y. and Gilat, A. 1999. Dead Sea sinkholes – an ever-developing hazard. Environmental Geology, 39 (7) : 711 – 722.
- Bookman, R., Enzel, Y., Agnon, A., Stein, M. 2004. Late Holocene lake levels of the Dead Sea . Bulletin of the Geological Society of America 116: 557-571.
- Cohen, H. and Laronne, J.B. 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel. Hydrological Processes. DOI: 10/1002/hyp/563/
- Hall, J., Neev, D., 1977. The Dead Sea geophysical survey 19 July – 1 August 1974. Final Rept no. 1 : Methods, Navigation, Bathymetry and Magnetism, Geological Survey Report, MG/1/78, 28 pp.
- Koss, J.E., Ethridge, F.G., Schumm, S.A., 1994. An experimental study of the effects of base level change on fluvial, coastal and shelf systems. J. Sed. Pet. Vol. B64, 90-98.
- Masterman, E.W.G. 1913. Summary of observations on the rise and fall of the level of the Dead Sea 1900-1913. P.E.F. Quarterly Statement, 192-197.
- Meyer-Peter, R., and R. Müller, 1948. Formulas for bedload transport, in Proceedings II IAHR Congress, Stockholm, 39-64.
- Parker, G., 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, J. Hydr. Res. 28(4), 417-543.
- Schumm, S.A. 1993. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. J. Geol. 101, 279 – 294.
- Yechieli, Y. 2000. Fresh – saline water interface in the western Dead Sea area. Ground Water 38 : 615 – 623.
- Wise, S., 2000, Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. Hydrological Processes, 14, 1909-1929.

נספחים

נספח 1. נתוני גאוויות בנחל ערוגות ל-3 התקופות שבין תצלומי האויר. הגאוויות הנבחרות הן

אלה בין האחרונה שהתרחשה לפני התצלום הקודם והאחרונה שהתרחשה לפני

התצלום הבא. הספיקה המקסימלית בכל תקופה מדגשת. מקור: השרות

ההידרולוגי.

משך שעות	ספיקת שיא מ ³ /שנ	נפח גאוויות מלמ"ק
27.63	31.40	0.334
104.18	16.30	0.843
51.47	25.00	1.045
153.68	65.80	2.441
10.37	1.82	0.015
13.70	160.00	0.927
	1.54	
	3.86	
77.57	54.20	0.637
112.53	28.00	1.861
45.97	50.80	1.806
72.37	38.00	1.939
30.00	53.10	0.383
699.5		12.2
סה"כ		
31.00	6.75	0.246
30.00	7.00	0.158
10.00	2.16	0.020
35.00	12.50	0.398
41.00	21.50	0.197
25.00	24.30	0.404
12.00	11.50	0.079
29.00	12.00	0.232
33.00	10.50	0.253
69.00	11.00	0.528
36.60	137.00	1.573
34.18	6.25	0.286
45.55	5.00	0.121
19.30	4.40	0.089
7.40	1.00	0.009
458.033		4.593
סה"כ		
13.58	6.50	0.077
7.95	2.02	0.023
16.80	46.15	0.210
23.63	11.50	0.253
6.47	6.50	0.039
13.37	6.75	0.106
12.83	6.50	0.090
2.65	2.44	0.008
13.88	7.25	0.169
11.33	7.25	0.123
12.67	8.00	0.132
15.88	9.50	0.163
28.20	418.10	2.143
179.250		3.536
סה"כ		

נספח 2. נתוני מפלס ים המלח בתאריכים הרלוונטיים להדמאות ולגאוויות בנחל ערוגות

(מקור: השרות ההידרולוגי).

תאריך גאות	תאריך מדידה	גובה המפלס מ'
24/02/1988	14/01/1988	-405.23
	10/03/1988	-405.03
02/11/1995	29/10/1995	-408.94
	28/11/1995	-409.07
17/03/1998	22/02/1998	-410.91
	23/03/1998	-410.95
02/05/2001	24/04/2001	-414.57
	30/05/2001	-414.64