	<b>תקופת המחקר:</b> 1998-2000	<b>קוד מחקר:</b> 838-0439-00	
<b>שם המחקר:</b> חקירת תהליכי זרימה והסעה דרך נתיבים מועדפים בקרקעות חרבות INVESTIGATINGH PREFERENTIAL FLOW IN STRUCTURAL CLAY SOILS			
<b>חוקר ראשי:</b> פרופ' ישראל רבינא <b>מוסד:</b> הפקולטה לחקלאות, רחובות			
<b>מאמרים:</b>	<b>חוקרים שותפים:</b> דר' רון וולך, דר' רמי קרן, מר גיל שליט, פרופ' רוני וולך		

### תקציר

לתנועת מים דרך נתיבים מועדפים בקרקעות חרסיתיות יש השלכות על זמינות המים והדשנים לצמחים ועל תהליכי זיהום הקרקע ומי תהום. בניסוי נותבים וצבע התקבלו ממצאים המצביעים על כך שקיימים נתיבי זרימה מועדפת בקרקע החרסיתית שבעל־זרעאל שבה מתרחשת זרימה והסעה משמעותיים. לאור התוצאות הנ"ל פותח מודל מתמטי לחיזוי ההידרוגרף הזרימה הזרימה ועקום הפריצה של נותב שיושם בפני הקרקע. המודל מתייחס באופן פרטני לתהליכי הזרימה וההסעה שמתרחשים במערכת קרקע לא רוויה שבה נתיבי זרימה מועדפת ומתחתיה קרקע רוויה שבה יש נקזים. חלק מהנחות המודל התבדדו על ניסויי הצבע והנותבים. המודל אומת ע"י השוואתו לתוצאות מדודות ולאחר מכן שימש לבחינת ההשפעה שיש לפרמטרים ההידרולוגיים והקרקעיים על ההידרוגרף הזרימה ועקומי הפריצה במוצא הנקזים. לאור תקלות בלתי צפויות שמנעו מאיתנו לבצע את המשך ניסויי השדה המתוכננים, הסטנו את המחקר לכיוון המודלים המתמטיים וטיפלנו באופן מפורט יותר בנושא הסדקים. המסקנות ממחקר זה הן שאכן קיימים נתיבי זרימה מועדפת בקרקע החרסיתית בעמק יזרעאל. נתיבי זרימה אלה משפיעים באופן מכריע על פירוס הרטיבות בפרופיל הקרקע הלא רוויה, והעשרה של מי התהום השעונים במים וכימיקלים וכן על הקשר בין השכבה הרדודה לשכבה הארטזית שמתחתיה.

חקירת תהליכי זרימה והסעה דרך נתיבים מועדפים בקרקעות חרסיתיות

מחקר מס' 838-0439-00

דו"ח מסכם

רוני וולך – הפקולטה למדעי החקלאות המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית (wallach@agri.huji.ac.il)

The Department of Soil and Water Sciences, The Faculty of Agricultural, Food, and Environmental Sci. Qual.

ישראלה רבינא – הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון (agdean@technion.ac.il)

The Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Haifa.

ויקטור צ'רטקוב – הפקולטה להנדסה חקלאית, הטכניון (agdean@technion.ac.il)

The Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Haifa.

רמי קרן – המכון לקרקע ומים וסביבה, המינהל המחקר החקלאי.

The Institute of Soil, Water and Environment, ARO.

רינה שבתאי-ויצמן – הפקולטה למדעי החקלאות המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית.

The Department of Soil and Water Sciences, The Faculty of Agricultural, Food, and Environmental Sci. Qual.

#### מבוא

המלחתם של אזורים חקלאיים נרחבים בעמק יזרעאל בעשורים האחרונים גרמה להפחתת יכולים ואף להפסקת העיבוד בחלק מהשדות. לתוספת כמויות גדולות של מי מוביל למי ההשקיה בעמק הייתה השפעה רבה על מאזן המלח של העמק. הצטברות הכלורידים בקרקע העמק עלתה מ- 3,000 טון לשנה לפני 1964 ל- 12,000 טון לשנה במוצע בכל שנה מאז 1964. בגלל שימוש חסכוני במים ואיסוף ואיגום מי נגר עילי וניקח, נשאר פינוי הכלורידים קבוע ברמה של כ- 4,000 טון לשנה. המאמצים לפתרון הבעיה התרכזו בשיפור הניקוח העמוק והרדוד בקרקעות העמק. בנוסף, בקיץ 1996 נפתח סכר אגם ברוך ומתאפשרת זרימה בחורף שצפויה להגדיל את הסעת המלחים השנתית מחוץ לעמק באפיק הקישון. תחזיות מראות עם זאת שקצב פינוי המלחים מעמק יזרעאל ימשיך להיות נמוך במידה משמעותית מהכמות המיובאת לתוכו, במיוחד לאור המשך העלייה הצפויה בשימוש במים מושבים בחקלאות. התבוננות מפורטת יותר על אופי הזרימה בקרקע החרסיתית של העמק ובמיוחד קיומם של נתיבי זרימה מועדפת המקצרים את זמן התנועה בין פני הקרקע ופני מי התהום מעלות את הצורך להמשיך ולחקור את תהליכי ההמלחה הנ"ל מנקודת ראייה שונה.

נתיבי זרימה מועדפת אנכיים בקרקע (preferential flow Pathways) נמצאו באזורים רבים בעולם ובסוגי קרקעות כבדות ובקרקעות חוליות. נתיבי זרימה אלה מהווים גורם משמעותי באיכות מי התהום הרדודים ומי הניקוח התת קרקעי היות והם עשויים לקצר מאוד את זמן ההגעה של מלחים ומוזהמים שונים אל מי התהום. בקרקעות כבדות, מהווים הסדקים יחד עם שרידי שורשים ומחילות של תולעי אדמה כנתיבי זרימה מועדפת. במדידות שבוצעו בקרקעות בהן קיימים נתיבי זרימה מועדפת נמצא כי חלק גדול של הזרימה כלפי מטה עשוי לעבור דרך חלק קטן יחסית של נפח הפרופיל בעוד ששאר הפרופיל נשאר יבש. אולם מדידת נפחי המים והמומסים הנעים בנתיבי זרימה אלה אינה פשוטה עקב השונות המרחבית הגדולה של התופעה ובגלל שמיקומם המרחבי של נתיבי הזרימה המועדפת ופירוס גודלם ואורכם אינם ניתנים להגדרה דטרמיניסטית ויש להתחייס לתופעה באופן כוללני יותר. אולם אם מוותרים על הרצון להתמקד במדידת הזרימה וההסעה בנתיבי זרימה ספיציפיים ניתן להשתמש בנקזים תת קרקעיים כדי למדוד זרימות אלה

משטה מסויים אותו מנקז הנקז. אולם היות ומדידת ספינת המים ועקום הפריצה במוצא הנקזים מייצגים את החלקה כולה על מכלול תהליכי הזרימה וההסעה המתקיימים בפרופיל הלא רווי והרווי של פרופיל הקרקע, ההיקש המידי בין המדידות במוצא הנקזים ותהליכי הזרימה וההסעה בפרופיל אינו מידי ופשוט. הנחה נפוצה המקלה על ניתוח התוצאות המדודות היא שניתן לקשור בין שיאי הזרימה במוצא הנקז לבין זרימות בנתיבי זרימה אלה היות והמוליכות ההידראולית של מערכת נתיבי הזרימה המועדפת גבוהה בהרבה מזאת של מטרצת הקרקע.

המחקר התבצע בשדה השייך לקיבוץ שריד בעמק יזרעאל בו מותקנת מערכת ניקוז בעומק של 1.2 מ' מאז 1991 ובתצפיות שנערכו בעבר נמצאו עדויות עקיפות לכך שקיימים נתיבי זרימה מועדפת בקרקע. בניסוי ההשקיה שבוצע ב-1996 הומטרו מים מושבים (ריכוז כלור: 256 ppm) על פני הקרקע בשעור של כ-10 מ"מ לשעה. הזרימות בנקזים התחילו 7-10 שעות לאחר תחילת השקיה ועקום הפריצה של הכלור במוצא הנקזים הצביע על כך שריכוזו היה נמוך בתחילת אירוע הניקוז ובסיומו היה גבוה מאוד (כ-3000 ח"מ). תבנית זו מתאימה לתסריט בו כלור נמצא לפני תחילת אירוע ההמטרה בתמיסת הקרקע סביב הנקז ריכוזים נמוכים יחסית והוא זה הנמדד בתחילה. הזרימה בזמן שיא הספיקה מקורה בפני השטח והיא מגיעה לנקז דרך נתיבי הזרימה המועדפת ואוספת בדרכה כלור הנמצא בתמיסת הקרקע הנייחת. ואכן, בבדיקות קרקע לפני ואחרי אירוע ההשקיה נמצא שריכוז הכלור מגיע לשיא בעומק של 1.2-1 מ', וערכו בעומק זה הוא 3500-4000 ח"מ ומהווה את מקור הכלור שעבר לתמיסה הנעה בנתיבי הזרימה המועדפת. תוצאות דומות נמצאו בארבעה אירועי השקיה שנערכו בשנים 1995-1996 והם מצביעות על קיום מרכיב משמעותי של זרימה מועדפת באתר הניסוי, לפחות בתקופת הסתיו בה נערכו הניסויים.

המערכת הגיאולוגית-הידרולוגית בעמק יזרעאל מסובכת ולה תרומה על פירוס המלחים סמוך לפני הקרקע ובעומק. מקצת מבעיות ההמלחה בעמק יזרעאל נקשרו ע"י חוקרים שונים לקיום לחצים ארטזיים רדודים. לחצים אלה מתפתחים באופירים כלואים למחצה הנמצאים במניפות סחף אלוויליות או באפיקי נחלים קבורים. מעל לאקוויפרים אלה מצאו חוקרים רבים שכבות חרסיות עם מוליכויות הדראוליות נמוכות שבין  $10^{-4}$  ל-  $10^{-9}$  ס"מ לשנייה. הלחצים הארטזיים מתפתחים בעקבות זרימות לטראליות משולי העמק לתוך מניפות הסחף או אפיקי הנחלים הקבורים או כתוצאה מדליפות ממאגרי אפיק. הלחצים בשכבה הארטזית יוצרים גרדיאנט לחץ בשכבה שמעליה המונע שטיפת מלחים לעומק הקרקע. מנגנון נוסף שהוצע הוא שהגרדיאנט הארטזי גורם לחלחול מים כלפי מעלה לתוך שכבת בית השורשים. המים בשכבה זו חשופים לעלייה נימית, לדיות ולהתאידות, הגורמים להצטברות מלחים סמוך לפני הקרקע. הביקורת העיקרית נגד מנגנונים אלה היתה שהשכבה בעלת המוליכות הנמוכה מעל לאקוויפר הארטזי (השכבה הכוללת) תמנע כל קשר עם בית השורשים ולכן אין חשיבות ללחצים הארטזיים בחקירת מנגנוני ההמלחה. את הסתירה בין קיום לחצים ארטזיים מתחת לשכבה עם מוליכות הדראולית נמוכה, לבין הסענה שתיתכן שטיפת מלחים דרך שכבה זו, צריך אמנם ליישב. במחקר הנוכחי מוצע לבדוק את ההשערה הבאה: שטיפת מלחים דרך השכבה האטומה יחסית תתכן דרך נתיבי זרימה והסעה מועדפים, בעונות בהן מתפתחים נתיבי זרימה מועדפת בפרופיל הלא רווי של הקרקע. מטרת המחקר להלן היא לאמת את קיום נתיבי הזרימה המועדפת וללמוד על אופן השפעתם על הידרוגרף המים ועקום הפריצה של כימיקלים במוצא הנקזים.

### פירוט הניסויים ותוצאותיהם

המחקר בוצע בשדה השייך לקיבוץ שריד בו מותקנת מערכת ניקוז תת קרקעית בעומק של 1 מ' (איור 1). שיפוע החלקה 1%. כדי לבחון באופן ישיר את קיומם של נתיבי זרימה מועדפת שמהווה את ההיפותזה בבסיס המחקר ואת הפירוס המרחב של נתיבי זרימה אלה פוזרו על פני הקרקע במהלך השנה הראשונה למחקר נותב ומיד לאחר מכן הושקתה הקרקע כדי לדחוק את הנותב כלפי מטה. שלוש חלקות בגודל  $1.5 \times 1.5$  מ' נבחרו לניסוי הנותב. הניסוי נערך כשבועיים לאחר קטיף הכותנה ולפני עקירתה. החלקות נבחרו כך שלא יהיו בהן שיחי כותנה. כל חלקה הוקפה בלוחות מתכת שנעצו לעומק של כ-15 ס"מ, למניעת נגר עילי. חלקה אחת שמשה כחלקת ביקורת וקבלה השקיה של מים בלבד ושתי חלקות טופלו בברומיד ובצבע כמתואר להלן. ההשקיה החלה בשעה 7 בבוקר, נמשכה עד חצות, וחודשה למחרת בין 6 ל-12 בצהריים. בכל שעה עגולה הומטרו על כל חלקה 20 ליטר בעזרת משפך גינה עם ראש מתורר. בשתי ההשקיות הראשונות קיבלו שתי חלקות הטיפול 6 גרם KBr כל אחת בכל השקיה שהם 202 ח"מ. בכל ההשקיות כבלו שתי חלקות הטיפול 25 גרם צבע מאכל כחול מספר 1. בתום ההשקיה (16 לאוקטובר) כל שלושת החלקות כוסו

ביריעות פלסטיק כדי למנוע התאדות. שוחות נחפרו בעזרת מחפרון כדי לעקוב אחרי פירוס הצבע בפרופיל הקרקע. בכל אחת מחלקות הטיפול נחפרה שוחה עד לעומק של כ- 3 מ' בצד החלקה, כ- 20 ס"מ בתוכה והחתך האנכי צולם (איורים 2 ו- 3). לאחר מכן הוסרו שכבות עפר מכל שטח החלקה ונלקחו צילומים עיליים (איור 4). מאיורים 2 ו- 3 רואים אומנם שרוב הצבע נשאר סמוך לפני הקרקע אולם יש חלק לא מבוטל שהיגיע לעומקים של עד 70 ס"מ. במבט מקרוב יותר מצאנו שבעומק הצבע נע בתעלות שנוצרו ע"י שורשים שהתנוונו.

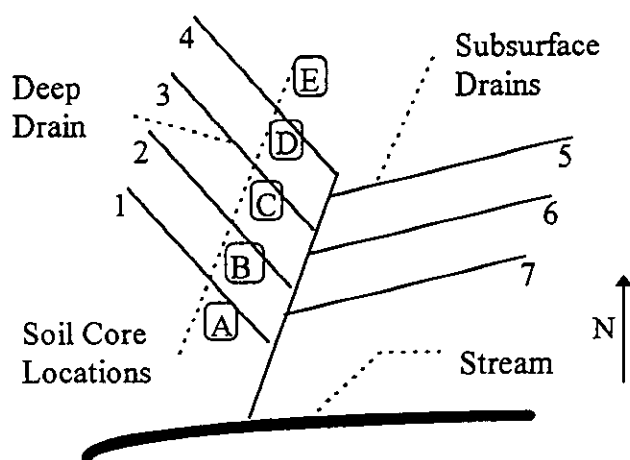
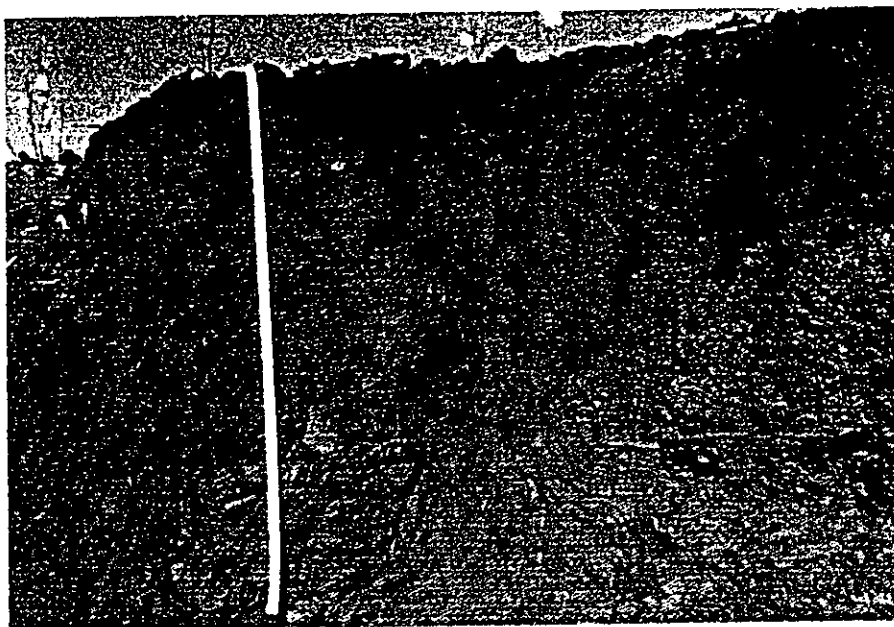


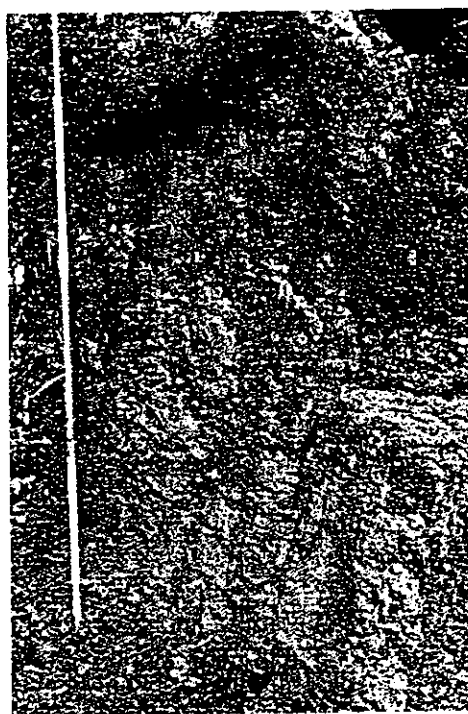
Figure 1: Schematic view of study field



איור 2: מבט על חתך הקרקע בו רואים את פירוס הצבע בפרופיל הקרקע



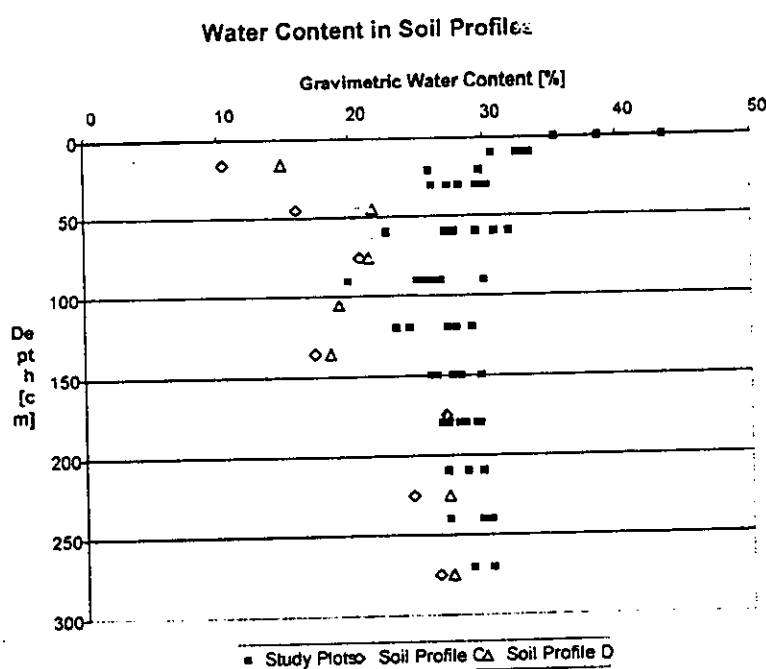
איור 3: מבט על חתך הקרקע בו רואים שהצבע היגיע על לעומק של 65 ס"מ מפני הקרקע



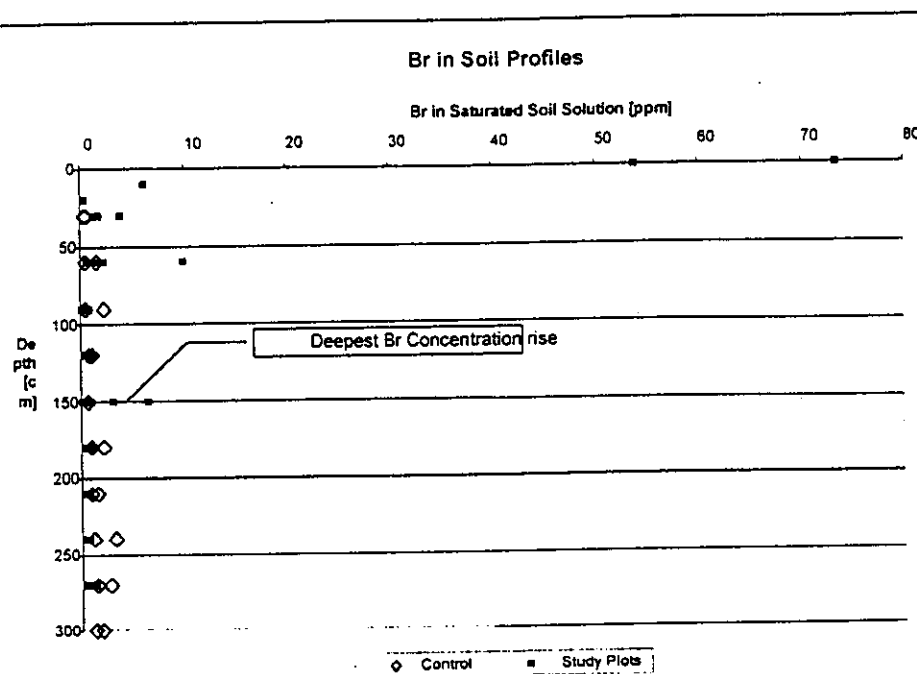
איור 4: מבט על פני הקרקע לאחר הסרה של 5 ס"מ עליונים.

מאירים 2, 3 ו-4 ניתן להסיק בבירור שבקרקע החרסיתית שבעמק יזרעאל מתקיימת זרימה והסעה בנתיבים מועדפים ואי התחשבות קיומם של נתיבים אלה עלולה לגרום לשגיאה משמעותית בהערכת זרימת המים והסעת המומסים בקרקעות מסוג זה על כל המשמעות הנגזרות מכך.

בחינה כמותית על היקף התופעה של נתיבי הזרימה המועדפת התקבלה ממדידת פרוס תכולת הרטיבות בפרופילי הקרקע בחלקות ניסוי הצבע ובנקודות סמוכות (C ו-D באיור 1). פרוסים אלה מוצגים באיור 5. פרופיל הרטיבות שבאיור 5 מחזקים את ההוכחה היוזאלית שהתקבלה בניסוי הצבע (איורים 2 ו-3) מהאיור עולה שיש עלייה בתכולת הרטיבות עד לעומק של 150 ס"מ בחלקות ניסוי הצבע במיוחד לאור ההשוואה עם פרוסי הרטיבות בנקודות C ו-D. תכולת הרטיבות בעומק 0-150 ס"מ בחלקות הניסוי מאד וריאבילית ומעידה על קיום נתיבי זרימה מועדפת בהם נעים המים במהירויות שונות. פרוסים של ריכח הברומיד בפרופיל הקרקע בחלקת הביקורת ובחלקות ניסוי הצבע מוצגות באיור 6. איור זה בו ניתן לראות שהברומיד הגיע עד לעומק של 150 ס"מ, מאשש את התוצאות שהתקבלו ממדידות תכולת הרטיבות (איור 5). נציין שהצבע הגיע בניסוי "רק" עד לעומק של כ-70 ס"מ בהשוואה לעומקים בהם נמצאו מי ההשקיה וריכוזי הברומיד וזאת עקב ספיחה של החומר לחלקיקי הקרקע.



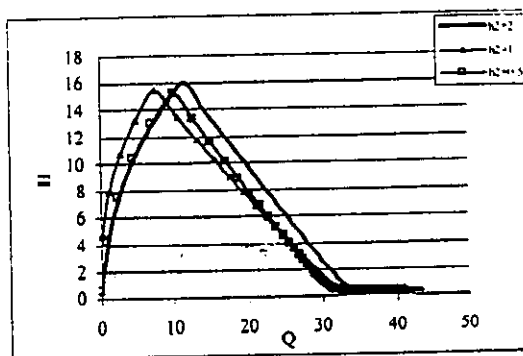
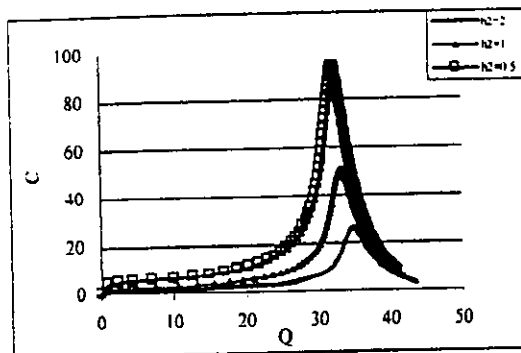
איור 5: פרוס תכולת הרטיבות בחלקות הצבע לאחר ההשקיה בהשוואה לחלקות ביקורת סמוכות לפני תחילת ההשקיה.



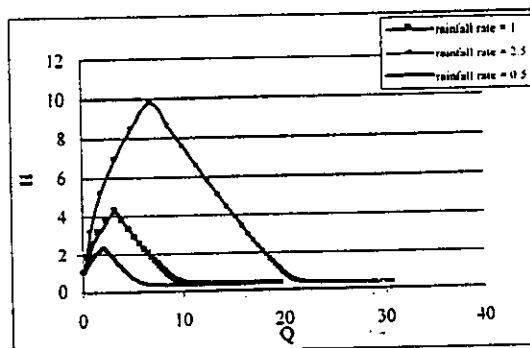
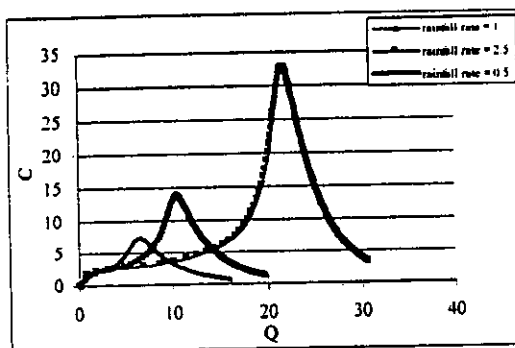
איור 6: פרוס הנוטב (Br) בחלקות הצבע לאחר ההשקיה בהשוואה לחלקות ביקורת סמוכות לפני תחילת ההשקיה.

בהמשך לניסויים הנ"ל היינו אמורים לבצע ניסויים מקיפים במהלך חודשי הקיץ תוך שימוש במערכת הפיזומטרים ואמצעי המדידה שהותקנו במוצא הנקזים, כפי שנכתב בתוכנית המחקר. לצערנו, המשק לא היה מוכן להקציב לנו מים לניסויים לאור הקיצוץ החד שהושט עליו במכסות המים. לפיכך לא יכולנו להשתמש במודל המתמטי לתיאור הספיקות ועקומי הפריצה מהנקזים שפותח במסגרת המחקר ובמקום זה הרחבנו את המודל כך שיוכל לצאר גם תנועה של חומרים נספחים ולא רק נוזלים אינרטיים כגון מלח וברומידים והמשכנו בפיתוח מודל מתמטי נוסף לתיאור תכונות הידראוליות בקרקעות חרסית סדוקות ששילבו עם המודל הראשון יספק תיאור מלא יותר של תנועת המים והכימיקלים במדיום סדוק. להלן סקירה של המודל לתיאור תכונות הידראוליות בקרקעות סדוקות.

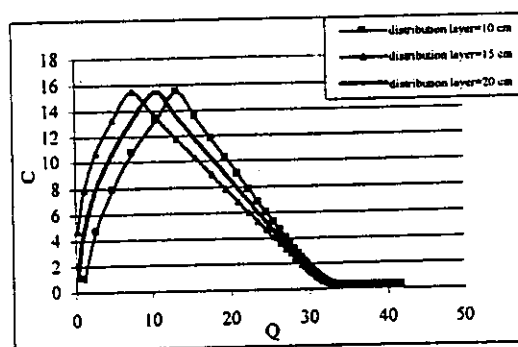
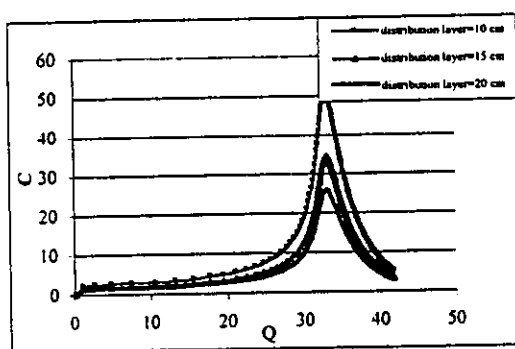
במהלך המחקר פותח מודל מתמטי המופיע באופן מפורט בדו"ח של השנה השנייה ואינו מפורט בדו"ח המסכם כדי לשמור על מגבלות היקף הדו"ח. מודל זה חוזה את ההידרוגרף הזרימה ועקום פריצה של נוטב במוצא הנקזים כאשר הנוטב נמצא בתחילה בשכבת פני הקרקע. המודל מתחשב במכלול תהליכי הזרימה וההסעה שמתרחשים בקרקע החרסיתית הכוללת נתיבי זרימה מועדפים, זרימה באיזור הרור מעל הנקזים וההתכנסות אל הנקזים. על אף מורכבות המודל הוא נפתר באופן אנליטי והשווה בהצלחה לתוצאות מדודות שנלקחו מהספרות עבור פרופיל קרקע הכולל נתיבי זרימה וזרימה מועדפת הדומים לתנאים בעמק יזרעאל. לאחר האימות המודל ביצענו ניתוח רגישות לפרמטרים השונים ע"י הרצות בהן שינינו ערכים של המשתנים ההידרולוגיים והקרקעיים ובחנו את השפעתם על ההידרוגרף הזרימה ועקום הפריצה במוצא הנקזים. התוצאות המחושבות מוצגות באיורים 7-9. מאיור 8 עולה שלעוצמת הגשם השפעה רבה על ההידרוגרף ועקום הפריצה במוצא הנקזים. ככל שעוצמת הגשם עולה, עולה גם הספיקה וגם הריכוז במוצא הנקזים. לעובי שכבת הערבוב לעומת זאת השפעה מועטה על ספיקת המים אך השפעה רבה על ריכוז הנוטב במוצא הנקזים.



זיור 7: השתנות הריכוז במוצא הנקזים וגובה מי התהום כפונקציה של הספיקה במוצא הנקז כתלות בגובה המים התחילי מעל הנקזים.



זיור 8: השתנות הריכוז במוצא הנקזים וגובה מי התהום כפונקציה של הספיקה במוצא הנקז כתלות בעוצמת הגשם.



זיור 9: השתנות הריכוז במוצא הנקזים וגובה מי התהום כפונקציה של הספיקה במוצא הנקז כתלות בעובי שכבת הערבוב.

לאור התקלות שתוארו לעיל שלא איפשרו לנו לבצע את ניסויי השדה המתוכננים, הסטנו את המחקר לכיוון המודלים המתמטיים וטיפלנו באופן מפורט יותר בנושא הסדקים. אחת התופעות המשמעותיות ביותר בקביעת התכונות ההידראוליות של קרקעות חרסיות הינה התפיחה – התכווצות, כולל היסדקות, בעקבות השתנות תכולת הרכיבות בקרקע. נוכחות הסדקים בקרקעות אלו מאפשרת לנו להתייחס לקרקע חרסית כאל מערכת פיסיקלית – מכנית המורכבת משתי תת מערכות, קרי "מערכת הסדקים" (crack network) ו"מטריצת הקרקע" (soil matrix). המודל מניח שבין שתי התת-מערכות קיימת פעילות גומלין חזקה ושדקים המחוברים זה לזה יוצרים מערכת סדקים רציפה ומסלולים מועדפים למעבר מים (preferential flow). מעבר המים דרך מערכת הסדקים מסתבך בגלל ספיגת מים מתוך הסדקים על ידי מטריצת הקרקע (החרסית) ואיבוד מים בהתאדות מקירות המטריצה לסדקים. לפיכך, המוליכות ההידראולית של קרקע חרסית עם סדקים כוללת תרומות משתי תת המערכות. חזיון התכונות ההידראוליות של קרקע חרסית מהווה מוקד מחקר כבר שנים ארוכות (גם כאשר לכאורה אין סדקים אלא תפיחה והתכווצות בלבד). ידיעת התכונות ההידראוליות חשובה לפיתוח פעולות ועיבודי קרקע מתאימים לשם שמירה על תאחיזת-מים, ייעול ההשקיה והדישון והגנה על גופי מי התהום ומים עיליים בפני זיהום.

הגישה הכוללנית ללימוד מעבר מים בנתיבי זרימה מועדפת (סדקים) בקרקעות חרסית מוצגת באופן סכמטי באיור 1 בנספח. פרופיל רכיבות הקרקע ברגע נתון מאפיין הן את מערכת הסדקים והן את מבנה הנקבוביות במטריצת הקרקע ברגע נתון והיא קובעת את התכונות ההידראוליות הרגעיות של המכלול. ללא קשר באלו משוואות זרימה ייחודיות משתמשים לצורך פתרון הבעיה הן תמיד תכלולנה את התכונות ההידראוליות של המטריצה ושל הסדקים. לבסוף, הפתרון של משוואות הזרימה, בהתחשב בתנאי ההתחלה והגבול, ייתן את פרופיל הרכיבות הרגעי של נקודת הזמן הבאה (התלויה בגודל צעד הזמן הנבחר) וכך הלאה.

התיאור המדויק (המודל) של כל תהליך מעבר בין שתי המערכות הנ"ל אינו טריוויאלי והבעיה הכוללת היא לא-לינארית בדרגה גבוהה בגלל החפיפה בין אי הלינאריות של הבעיות ההידראוליות והחלחול ואי הלינאריות הקשורה להתכווצות הקרקע והסידוק. ראוי לציין שקושי נוסף טמון בכך שהבעיה הכוללת אינה נקודתית, בעיקר משום שהאפיון הגיאומטרי של הסדקים בעומק מסוים הוא פונקציה של פרופיל הרכיבות השלם ולא דווקא תכולת הרכיבות באותהנקודה. את הבעיות שטופלו עד כה, במסגרת הגישה המתוארת בסקירת הספרות בנספח, ניתן לחלק לתת הבעיות שלהלן: הגיאומטריה של מערכת הסדקים; התכונות ההידראוליות של מערכת הסדקים; מבנה הנקבוביות במטריצת החרסית; תכונות ההתכווצות והתכונות ההידראוליות של מטריצת החרסית.

המודל לחיזוי המאפיינים הגיאומטריים של מערכת סדקים (פירוסי רוחב, שטח חתך ונפח) המתפתחת בקרקע חרסית בתהליך התכווצות-התייבשות (אשר מבוסס על מודל מוקדם של סדקים בסלע כתוצאה מפיצוץ) והמגדיר את הפרמטרים הבסיסיים של מערכת סדקים – רמת חיבור בין סדקים (connectedness) ורמת ההתחלקות (fragmentation) בהתייחסות לקרקע, פותח ונבדק בעזרת נתונים מהספרות המקצועית על סדקים בקרקעות חרסיות. הפרמטרים של המודל – עובי שכבת הקרקע העליונה בעלת ההיסדקות האינסופית והעומק המכסימלי של הסדקים קשורים, למרווח הממוצע בין הסדקים על פני הקרקע ומימד הסדק המינימלי האופייני (התלוי באלסטיות, החוזק, הדיפוזיביות, ואופי ההתכווצות) המאפשר המשך התפתחות הסדק.

בעזרת התוצאות הראשוניות שהתקבלו ניתנה תשומת לב פרטנית לתיאור הגיאומטרי של סדקי התכווצות אופקיים על בסיס פרמטר שכונה "שקיעה" (subsidence) יחסית פוטנציאלית המבוסס על הנחה של הבדל בין שקיעה בתוך מטריצת הקרקע להנחה ולאורך הקירות האנכיים של הסדקים המתייבשים. הפתלתלות של מערכת מחוברים הוערכה עבור מקרה איזותרמי של ואורניטציה של הסדקים במרחב ועבור חפיפה של סדקים אופקיים ואנכיים בהתייחס לפירוסי רוחב הסדקים. המודלים שעסקו בגיאומטריה של מערכת הסדקים הנוצרת במהלך התכווצות הקרקע, שימשו בסיס למודלים של המוליכות ההידראולית האנכית של סדקי התכווצות קפילריים אנכיים תוך שימוש ב"חוק החזקה השלישית" (cubic law) לזרימת מים בסדק מלבני (slit) מלא מים. העבודה המתייחסת למודל של המוליכות ההידראולית המשולבת של הסדקים הקפילריים הבין תלכדיים (interaggregate) והבין גושיים (interblock) שנעשתה בחלקה במסגרת המחקר המדווח כאן ואשר הוגשה לפרסום כמאמר בעיתון המקצועי (Water Resources Research) מצורפת כנספח לדו"ח.

ההכללה של המוליכות ההידראולית האנכית מתבססת על התוצאות של הגיאומטריה והתכונות ההידראוליות של מערכת הסדקים הקפילריים. התרומה של הסדקים הקפילריים הבין גושיים למוליכות ההידראולית של הקרקע בעומד לחץ נתון משתנה עם העומק אפילו למבנה מטריצה נתון וזאת בניגוד לתרומות של הסדקים הקפילריים הבין אגרגטיים ושל המטריצה. בחינת המודל נעשתה בעזרת נתונים מהספרות על שינוי תכולת רטיבות עם העומק, התאודות שקיעה ונפח הסדקים בתקופת ההתייבשות כפי שנמדדו בניסיון מעבדתי עם לייזמטרים. הערכים הנומריים שהתקבלו מעידים על החשיבות המרכזית שיש לתרומה של הסדקים הקפילריים משני הסוגים למוליכות ההידראולית בטווח עומדי לחץ קטנים לעומת השפעתם הזניחה על תאחיזת המים בקרקעות חרסית. אישור המודל מתבסס על השוואה של שתי הערכות בלתי תלויות של סכום המוליכות ההידראולית של מטריצת הקרקע ושל הסדקים הקפילריים הבין אגרגטיים. אחת מהערכות האלו מחושבת כהפרש בין המוליכות ההידראולית הכוללת של הקרקע זו של מערכת הסדקים הקפילריים הבין גושיים. תוצאות ההשוואה מאשרות את ההתכונות של המודל בכך שהתחזיות שלו אינן סותרות את הנתונים המדודים בניסוי הליזמטרים.

## סיכום עם שאלות מונחות

### 1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח מתוך התייחסות לתכנית העבודה.

מטרת המחקר הייתה ללמוד את ההשפעה שיש לזרימה והסעה בנתיבי זרימה מועדפת בקרקע החרסיתית של עמק זרעאל על פירוס הרטיבות והמלחים בפרופיל הקרקע ובמי התהום השעונים. ראשית היינו צריכים להוכיח את קיומם של נתיבי זרימה אלה בפרופיל הקרקע ולאחר מכן לבחון את השפעתם. הדרך אותה הצענו כדי לאפיין את התהליכים המתרחשים במערכת קרקע - מי תהום שעונים הייתה באמצעות מדידות של ספיקת המים (הידרוגרף) ועקום פריצה של נותבים במוצא נקזים תת-קרקעיים במשטרי הרטבה שונים. לימוד זה היה אמור להתבצע הן באופן ניסויי וכמותי באמצעות מודל מתמטי במקביל.

### 2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח

ביצענו ניסויי צבע ומעקב אחר נותב בפרופיל הקרקע הלא רוויה. דחיקת הצבע והנותב לפרופיל הקרקע בוצע באמצעות השקיייה. התוצאות הצביעו בבירור על קיומם של נתיבי זרימה מועדפת בקרקע החרסיתית שבעמק זרעאל. בעוד שחזית ההרטבה היגיעה לעומק של מספר עשרות ס"מ, המים בנתיבי הזרימה המועדפת היגיעו לעומק של 3 מ' ויותר. במקביל פותח מודל מתמטי לחיזוי ההידרוגרף הזרימה ועקום פריצה של הנותב במוצא הנקזים עבור קרקע שבה יש שילוב של נתיבי זרימה מועדפת ומי תהום שעונים. המודל הושווה בהצלחה עם תוצאות ניסיוניות מהספרות ושמודלים אחרים נכשלו בחיזויים. כמו כן שימש המודל לבחינת הרגישות של ההידרוגרפים ועקומי הפריצה לשינוי בערכים של הפרמטרים ההידרולוגיים והקרקעיים. תקלות בלתי צפויות מראש שלא היו תלויות בנו לא אפשרו לנו לבצע את הניסויים כמתוכנן, למרות הצידוד הרב שהותקן בחלקה לצורך כך. לכן העברנו את מרכז הכובד לפן הכמותי של התופעה. הרחבנו את המודל ה"ל והשלמנו בנייה של מודל משלים המתמקד באפיון ההידרולי של מערכת קרקע-סדקים.

### 3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו

המסקנות ממחקר זה הן שאכן קיימים נתיבי זרימה מועדפת בקרקע החרסיתית בעמק זרעאל. נתיבי זרימה אלה משפיעים באופן מכריע על פירוס הרטיבות בפרופיל הקרקע הלא רוויה, והעשרה של מי התהום השעונים במים וכימיקלים וכן על הקשר בין השכבה הרדודה לשכבה הארסית שמתחתיה.

### 4. הבעיות שצוּתרו לפתרון

השלמה של הידע החסר באמצעות הניסויים שתוכננו ושלצערנו לא בוצעו והשוואה של תוצאות הניסויים למודלים שפותחו במסגרת המחקר הנוכחי.

### 5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שרכש בתקופת הדו"ח.

הידע במלואו לא הופץ עדיין. חלקים מהמודל המתמטינשלו במאמר שנשלח לאחרונה לפירסום מדעי (מצורף כנספח).

THE COMBINED EFFECT  
OF INTERBLOCK AND INTERAGGREGATE CAPILLARY CRACKS  
ON THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SWELLING CLAY SOILS

V.Y. Chertkov and I. Ravina

Faculty of Agricultural Engineering, Technion, Haifa 32000, Israel

**Abstract**

The cracks in swelling clay soils at sufficiently high water content can be presented as the superposition of interblock- and interaggregate-capillary-crack networks. The objective of this work is the generalization of an earlier proposed model describing the hydraulic conductivity of a soil matrix with only interaggregate capillary cracks. The generalized model describes the hydraulic conductivity of a soil with capillary cracks of both types. For the case of the vertical hydraulic conductivity the generalization is based on the available results relative to the geometrical and hydraulic properties of capillary crack networks. The contribution of interblock capillary cracks to the hydraulic conductivity of a soil at a given pressure head changes with depth even for a given matrix structure, contrary to the contributions of interaggregate capillary cracks and soil matrix. For numerical estimates and validation of the model we use literature data on variation of water content in different soil layers, evaporation, subsidence, and crack volume during a drying period in the course of a laboratory lysimeter experiment. The numerical estimates indicate the essential and even prevailing contribution of capillary cracks of both types to hydraulic conductivity at sufficiently small pressure heads and their negligible contribution to water retention of clay soil. The validation is based on a comparison between two independent estimates of the summary hydraulic conductivity of soil matrix and interaggregate capillary cracks. One of these estimates is found as a difference between the total hydraulic conductivity of the soil and hydraulic conductivity of the interblock-capillary-crack network. Results of the comparison validate the feasibility of the model showing that it does not contradict the available data of the lysimeter experiment.

**1. Introduction**

The reliable prediction of the hydraulic properties of deformable (swelling) soils is important for the development of actions connected to environment protection and water management and is a difficult problem even if cracks are absent [Garnier *et al.*, 1997a, b, 1998; Askar and Jin, 2000]. However, actually, the hydraulic conductivity of swelling clay soils contains contributions of both cracks and soil matrix. In the previous work [Chertkov and Ravina, 2001] we assumed that the cracks can be presented as a superposition of seasonal (interblock) and interaggregate crack networks. At sufficiently large water content all the cracks are capillary. In the above work [Chertkov and Ravina, 2001] we proposed and validated a model for prediction of hydraulic conductivity of capillary shrinkage cracks in swelling soils as applied to the particular case of a soil matrix with interaggregate cracks only. This case is realized in small soil cores and characterized by a number of specific features in comparison with the case of interblock capillary cracks [Chertkov and Ravina, 2001]. The network of interaggregate capillary cracks changes with depth very slightly if at all [Velde *et al.*, 1996]. Interaggregate capillary cracks contract with shrinkage of soil matrix and are water filled [Chertkov and

*Ravina*, 2001]. These specific features determine characteristic functions (specific length of traces of connected cracks of width  $< R$  at a horizontal cross-section and the maximum width of water filled capillary cracks) entering the expression for the vertical hydraulic conductivity of a capillary crack network [*Chertkov and Ravina*, 2001].

Drying in field conditions always leads to the more general state of coexistence and superposition of interblock- and interaggregate-capillary-crack networks. The objective of the work is to generalize and validate *Chertkov and Ravina's* [2001] model as applied to this real case. In the generalization we account for contributions of the interblock capillary cracks, interaggregate capillary cracks, and a soil matrix to the vertical hydraulic conductivity of a swelling soil as well as an effect of soil depth, length of drying period, and soil water content (or pressure head). In the validation we analyze the available data of *Bronswijk's* [1991] lysimeter experiment, based on the concepts of *Chertkov and Ravina's* [2001] model and its development in this work. In this presentation similar to our previous work [*Chertkov and Ravina*, 2001] for estimating the contribution of a clay matrix to the hydraulic conductivity, we use the known approach of *van Genuchten* [1980] and *Mualem* [1976] which predicts the relative conductivity function of a soil matrix based on its water retention curve.

## 2. Theory

Based on the small specific volume of interaggregate capillary cracks *Chertkov and Ravina* [2001] assumed that these cracks in a saturated clay matrix are filled with water according to capillary hypothesis only. The specific volume of interblock capillary cracks is also small compared to the specific pore volume of the soil matrix (this will be shown in Section 4.5). Hence, we can assume that in a saturated clay matrix the interblock capillary cracks are also filled with water according to capillary hypothesis only. Then the contents of *Chertkov and Ravina's* [2001] Sections 1-5 are also related to the interblock capillary cracks. In particular, the expression itself for the contribution of a capillary crack network ( $K_{cr}$ ) to the hydraulic conductivity of a swelling soil (*Chertkov and Ravina's* [2001] Eq.(3)) is related to the capillary cracks of any origin (both interblock and interaggregate)

$$K_{cr}(\bar{n}, R_w) = \frac{g}{12\nu T(\bar{n}, R_w)} \int_0^R R^3 dL(\bar{n}, R) \quad (1)$$

where  $g$  is the acceleration of gravity;  $\nu$  is the kinematic viscosity of water;  $R$  is a slit width;  $R_w$  is the maximum width of water filled capillary cracks;  $L(\bar{n}, R)$  is the specific length of connected-crack traces of width  $< R$  at a soil cross-section normal to the unit vector  $\bar{n}$  (per unit area of the cross-section);  $T(\bar{n}, R_w)$  is a spatial tortuosity of the water filled part of crack network along the direction  $\bar{n}$ . The functions  $L(\bar{n}, R)$ ,  $T(\bar{n}, R_w)$ , and  $R_w(\theta)$  (here  $\theta$  is a volumetric water content) are specific for different conditions and related to the total crack network. The total crack network includes both interblock and interaggregate cracks. Hence, in (1)

$$L(\bar{n}, R) = L_a(\bar{n}, R) + L_b(\bar{n}, R) \quad (2)$$

and

$$R_w(z, \theta) = \max(R_{wa}(\theta), R_{wb}(z, \theta)) \quad (3)$$

where  $L_a(\bar{n}, R)$  and  $L_b(\bar{n}, R)$  are contributions of interaggregate and interblock cracks, respectively, to the specific length  $L(\bar{n}, R)$  (see Section 2.1);  $R_{wa}(\theta)$  and  $R_{wb}(z, \theta)$  are the maximum width of water filled interaggregate and interblock cracks, respectively, at a given water content  $\theta$  and soil depth  $z$  (see Section 2.2).

In a general case the tortuosity  $T(\bar{n}, R_w)$  of the water filled part of the total crack network cannot be simply expressed through the similar tortuosities of interblock and interaggregate crack networks (we have only some simplification in the case of an isotropic crack network [Chertkov and Ravina, 1999]). Thus, in a general case, for an arbitrary direction  $\bar{n}$  and unisotropic distribution of crack orientations, the hydraulic conductivity of the total crack network from (1) is not the sum or a simple function of hydraulic conductivities of interblock and interaggregate crack networks. However, hereinafter we will address the important case of the vertical hydraulic conductivity of a crack network (unit vector  $\bar{n}$  is vertical). Interblock cracks are vertical or subvertical [Chertkov and Ravina, 1998]. For interaggregate cracks we will take advantage of Chertkov and Ravina's [2001] approximation of the negligible contribution of subhorizontal cracks, compared to subvertical ones, to crack network hydraulic conductivity. Then, calculation of the vertical tortuosity of the total crack network is essentially simplified. As in the case of subvertical interaggregate cracks [Chertkov and Ravina, 2001] the spatial tortuosity of the total subvertical (nonparallel) crack network in vertical direction is

$$T(R) = 1 \quad (4)$$

and does not depend on the maximum width  $R$  of participating cracks. Thus, according to (1) the vertical hydraulic conductivity of the network turns out a sum of contributions of interaggregate and interblock capillary cracks. Let us consider other specific functions entering (1) besides  $T(R)$  in the case under study.

## 2.1. Specific Length of Crack Traces at a Horizontal Soil Cross-Section

The value,  $L(R)$  according to (2), contains (at a given  $z$ ) contributions of interaggregate cracks,  $L_a(R)$  and interblock ones,  $L_b(R, z)$ . The expression for  $L_a(R)$  [Chertkov and Ravina, 2001, Eqs.(14) and (15)] is

$$L_a(R) = \frac{2.1721}{l} \left( 1 - \exp(-4.6R/R_{ma}) \right), \quad 0 \leq R \leq R_{ma} \quad (5)$$

where  $l$  is the characteristic (mean) dimension of soil aggregates, and  $R_{ma}$  is the maximum width of the vertical interaggregate cracks. As Chertkov and Ravina [2001], we consider that  $R_{ma}$  does not depend on soil depth.  $R_{ma}$  value will be regarded in Section 2.2.

The expression for  $L_b(R, z)$  is based on Chertkov and Ravina's [1998] model, according to which the characteristics of an interblock-vertical-crack network are determined by: (i) the water content profile together with the soil shrinkage curve, and (ii) the average spacing between the cracks,  $d$  as a function of soil depth  $z$ . This function  $d(z)$  is found by two specific parameters, the maximum crack depth,  $z_m$  and the thickness of an upper intensive-cracking layer,  $z_o$  such that

$$d(z) = z_o(z/z_o)^\omega \quad (6)$$

where the exponent  $\omega$  is

$$\omega = 1 - 2\ln 2 / \ln(0.8 z_m / z_o) \quad (0 < \omega < 1) \quad (7)$$

At the quasi-steady state the ratio  $z_o / z_m$  is in the range

$$0.1 \leq z_o / z_m < 0.2 \quad (8)$$

Known values of  $z_o$  and  $z_m$  and the variation with depth of the relative decrease of horizontal surface area (surface shrinkage of soil matrix),  $\delta(z)$  (from the water content profile and the shrinkage curve of the soil matrix) enable the estimation of two characteristics of interblock vertical cracks [Chertkov and Ravina, 1998]. The mean specific length of crack traces (of all possible widths) at a horizontal cross-section at depth  $z$  (i.e. per unit area of the cross-section),  $\bar{L}(z)$  is found by

$$\bar{L}(z) = \left[ 1 - \left( 1 + z_m / d(z) \right) \exp \left( -z_m / d(z) \right) \right] / d(z) \quad (9)$$

(in the work of Chertkov and Ravina [1998] this value was denoted through  $L(z)$ ). The width of the interblock vertical cracks at a depth  $z$ ,  $R(z, Z)$  (Fig.1) is [Chertkov and Ravina, 1998]

$$R(z, Z) = \int_Z^z \bar{L}(\zeta)^{-1} d\delta(\zeta), \quad z < Z \quad (10)$$

where  $Z$  is the crack tip depth and  $\zeta$  is a variable of integration (soil depth is positive downward).

Based on (6), (7), (9), and (10) one can write

$$L_b(R, z) = \bar{L}(z) - \bar{L}(Z(R, z)), \quad 0 \leq R \leq R_{mb}(z) \quad (11)$$

where  $Z(R, z)$  is a solution (with respect to  $Z$ ) of the equation  $R(z, Z) = R$  with the function  $R(z, Z)$  from the right part of (10).  $R_{mb}(z)$  will be considered in the following section.

## 2.2. The Maximum Width of Cracks and of Water Filled Cracks

The maximum width of interaggregate cracks,  $R_{ma}$  and of water filled interaggregate cracks,  $R_{wa}$  depend on the local volumetric water content,  $\theta$  and are found by [Chertkov and Ravina, 2001, Eq.(26)]

$$R_{ma}(\theta) \equiv R_{wa}(\theta) = R_{ma,o} \left( \frac{1 - \theta_s}{1 - \theta} \right)^b \quad \theta_r \leq \theta \leq \theta_s \quad (12)$$

where  $\theta_r$  and  $\theta_s$  are residual and saturated values of water content, respectively;  $R_{ma,o} \equiv R_{ma}(\theta_s)$ ; and the power index  $b$  can be calculated through the value of  $R_{ma,o}$  [Chertkov and Ravina, 2001, Eq.(30)] at known values of  $\theta_s$ , surface tension of water,  $\gamma$ , the mean pore dimension of a clay matrix,  $D_p$ , and parameters  $a$ ,  $n$ ,  $m$  determining van Gemuchten's [1980] approximation of the water retention curve of a soil matrix.  $R_{ma,o}$  is a calibrating parameter of Chertkov and Ravina's [2001] model, estimated using one value of the relative hydraulic conductivity of the soil matrix with interaggregate cracks.

The maximum width of interblock cracks at depth  $z$ ,  $R_{mb}$  is estimated by (10) at  $Z = z_m$  (see Fig.1)

$$R_{mb}(z) \equiv R(z, z_m) = \int_{z_m}^z \bar{L}(\zeta)^{-1} d\delta(\zeta), \quad 0 < z < z_m \quad (13)$$

According to (13) and (9)  $R_{mb}(z)$  is a functional of water content profile  $\theta(\zeta)$  (through  $\delta(\zeta)$  in the range  $z < \zeta < z_m$ ) at given  $z_0$  and  $z_m$  values. In general, the water content changes with time,  $t$ . Then  $\theta(z) \rightarrow \theta(z, t)$ ,  $\delta(z) \rightarrow \delta(z, t)$ , and  $R_{mb}(z) \rightarrow R_{mb}(z, t)$ .

The maximum width of water filled interblock capillary cracks at depth  $z$ ,  $R_{wb}$  is found by [Chertkov and Ravina, 2001, Eq.(4) and Fig.1i]

$$R_{wb}(z, t) = \begin{cases} R_{mb}(z, t), & R_{mb}(z, t) \leq 2\gamma \cos \alpha / h(z, t) \\ 2\gamma \cos \alpha / h(z, t), & R_{mb}(z, t) > 2\gamma \cos \alpha / h(z, t) \end{cases} \quad (14)$$

where  $h(z, t)$  is a pressure head of soil matrix,  $\gamma$  is a surface tension of water, and  $\alpha$  is a contact angle at the boundary soil-water. Then the value of  $R_w(z, \theta)$  entered in (1) is determined by (3), (12), and (14).

### 2.3. Specific Crack Volume

Specific interaggregate crack volume,  $V_{cr,a}(R)$  is found by [Chertkov and Ravina, 2001, Eq.(16)]

$$V_{cr,a}(R) = \int_0^R r dL_a(r), \quad 0 \leq R \leq R_{ma} \quad (15)$$

Specific interblock crack volume,  $V_{cr,b}(R, z)$  is found using (9), (11), and (13)

$$V_{cr,b}(R, z) = \int_0^R r \frac{\partial L_b(r, z)}{\partial r} dr, \quad 0 \leq R \leq R_{mb} \quad (16)$$

In (15) and (16)  $r$  is a variable of integration.

### 2.4. Hydraulic Conductivity of Capillary Crack Network

In the case under study (vertical cracks) the hydraulic conductivity of interaggregate capillary cracks (per unit surface area of a horizontal soil cross-section) [Chertkov and Ravina, 2001, Eq.(18)] is

$$K_{cr,a}(R_{wa}) = \frac{g}{12\nu} \int_0^{R_{wa}} R^3 dL_a(R), \quad (17)$$

The hydraulic conductivity of interblock capillary cracks (per unit surface area of a horizontal soil cross-section) is found using (1) and (9)-(11)

$$K_{cr,b}(R_{wb}, z) = \frac{g}{12\nu} \int_0^{R_{wb}} R^3 \frac{\partial L_b(R, z)}{\partial R} dR \quad (18)$$

### 2.5. Additional Remarks

- According to the abovementioned the geometrical and hydraulic properties of an interblock-capillary-crack network are determined by the function  $\delta(z)$  and those of an interaggregate-capillary-crack network by the function  $R_{ma}(\theta)$  (see (12)).
- Thus, water content profile, shrinkage curve, geometry factor,  $r_s$  [Rijniersce, 1983; Bronswijk, 1990], and overburden pressure [Philip, 1969; Bronswijk, 1990] influence the geometrical and hydraulic properties of interblock- and interaggregate-capillary-crack networks through the functions  $\delta(z)$  and  $R_{ma}(\theta)$ , respectively.

- In the following for model validation we use data from upper soil layers of *Bronswijk's* [1991] lysimeter experiment (see Section 3.1.). For this reason a possible effect of overburden potential on the hydraulic conductivity of capillary-shrinkage-crack networks is beyond the scope of this work.

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Experimental Data to Be Used in This Work

We have taken advantage of data from *Bronswijk's* [1991] lysimeter experiment. This laboratory experiment allows one to observe the development of interblock capillary cracks during evaporation from the surface and at the same time, unlike the field situation, permits a sufficiently accurate determination of the water balance in controlled conditions. *Bronswijk* [1991] investigated a heavy clay soil from the central part of the Netherlands. The height of the undisturbed soil core was 60 cm and the diameter 27.4 cm (Fig.2). Initially the core was water saturated. Then for 82 days the ground water level was kept constant at 55 cm below the soil surface (Fig.2), and water evaporated from the bare soil surface only. We used the following data from this experiment:

- shrinkage characteristic of soil aggregates;
- water retention curve;
- isotropy of shrinkage in the soil;
- actual evaporation from the surface during the experiment;
- pressure head and gravimetric water content vs. drying duration for two upper layers (Fig.2);
- water content profiles at various times during drying;
- the maximum volume of soil aggregates.

We discuss shrinkage cracking in the two upper layers (Fig.2) only because deeper layers practically stay water saturated during the experiment.

#### 3.2. Scheme of the Data Analysis

The data analysis included a number of steps.

*Step 1.* First, we estimated the maximum width and specific volume of interblock capillary cracks as well as the maximum width, length of traces, and specific volume of water filled ones, at the bottom of the first and second layers (Fig.2) and for seven values of the pressure head (see Sections 3.4 and 4.1). The range of pressure head values is determined by the available data. For the bottom of the first layer chosen pressure heads correspond to the following day numbers of drying:  $2.5 \leq T_1 \leq 8.5$  days (see Section 3.4).

For the bottom of the second layer the day numbers of drying were  $15 \leq T_2 \leq 75$  days (Section 3.4).

*Step 2.* Second, we estimated the total hydraulic conductivity,  $K$  of the soil matrix, interblock and interaggregate capillary cracks at the bottoms of the two layers for the 7 values of the pressure head (see Sections 3.5 and 4.2). To estimate  $K$  we considered the water balance for the two layers, accounting for vertical and lateral shrinkage as well as the total and a water filled crack volumes (see Sections 3.5 and 4.2).

*Step 3.* Then, based on the model (see Section 2), we estimated the hydraulic conductivity of interblock capillary cracks,  $K_{cr,b}$  also at the bottom of the two layers and for the 7 pressure head values (see Sections 3.6 and 4.2). Checking the  $K_{cr,b}$  estimate is one of the major objectives of this work (see steps 4 and 5, and further ).

Step 4. The difference between the total hydraulic conductivity,  $K$  and the hydraulic conductivity of interblock capillary cracks,  $K_{cr,b}$  gives the summary contribution of the soil clay matrix and interaggregate cracks to the total hydraulic conductivity,  $K_m + K_{cr,a}$ . From the two sets (for the seven pressure head values) of the summary contributions relating to the bottom of the first and second layers we can find the 7 averages and standard deviations (see Sections 3.7 and 4.2).

Step 5. On the other hand, the summary contribution of the soil matrix and interaggregate cracks,  $K_m + K_{cr,a}$  can be predicted independently by Chertkov and Ravina's [2001] approach for a soil clay matrix with interaggregate cracks only (see sections 3.8 and 4.3). To estimate the hydraulic conductivity of the interaggregate cracks we need the maximum interaggregate crack width at the maximum water content,  $R_{ma,0}$  (see Section 2.2). The hydraulic conductivity of the soil matrix is estimated by its saturated value,  $K_{ms}$  and van Genuchten [1980] – Mualem's [1976] approach. These two parameters ( $R_{ma,0}$  and  $K_{ms}$ ) are found if we know two values of the summary hydraulic conductivity,  $K_m + K_{cr,a}$  at different pressure heads [Chertkov and Ravina, 2001]. In the case under consideration we took these two values of the summary hydraulic conductivity from the 7 estimated at step 4.

Eventually we can compare the 5 initial estimates of the summary hydraulic conductivity obtained at step 4 with the summary hydraulic conductivity function of soil matrix and interaggregate cracks, predicted by step 5 (see Section 4.3).

### 3.3. Accounting for a Small Subsidence of Shrinking Soil in the Data Analysis

Geometrical and hydraulic properties of the capillary-crack network were considered in Section 2 keeping in mind that the point of reference on the axis  $z$  is the initial position of the soil surface. However, water content profile and shrinkage curve, together with geometry factor,  $r_s$  [Bronswijk, 1990], cause and determine not only cracking (through  $\delta(z)$ ), but also the subsidence of the soil surface and all the horizontal (material) surfaces at different (initial) depths. That is the (Eulerian)  $z$  coordinate of material points changes in the shrinkage process

$$z \rightarrow z' = z + \delta z(t) \quad (19)$$

causing a corresponding change in any function  $f(z, t)$  of  $z$  and  $t$  connected to the geometrical and hydraulic properties of a crack network and soil matrix

$$f(z, t) \rightarrow f(z'(t), t) = f(z + \delta z(t), t) \quad (20)$$

We are interested in the case of sufficiently large  $z$  values and small  $t$  values when condition

$$\delta z(t) \ll z \quad (21)$$

is fulfilled. Then, neglecting by small terms proportional to  $\delta z$  and its higher powers, we can write

$$f(z, t) \rightarrow f(z'(t), t) \cong f(z, t) \quad (22)$$

$$\frac{\partial f(z, t)}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial f(z'(t), t)}{\partial z'} \cong \frac{\partial f(z, t)}{\partial z} \quad (23)$$

$$\frac{\partial f(z, t)}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial f(z'(t), t)}{\partial t} \cong \frac{\partial f(z, t)}{\partial z} \frac{d\delta z(t)}{dt} + \frac{\partial f(z, t)}{\partial t} \quad (24)$$

Two terms in the right part of (24) can be comparable by the order of magnitude. Thus, if condition (21) is fulfilled we can neglect the soil subsidence for the geometrical and hydraulic properties not connected to derivatives with respect to time (see Sections 2, 3.4

and 3.6). In the opposite case we should account for changes of soil layer thickness (see Section 3.5).

### 3.4. Estimation of the Volume and Maximum Width of the Interblock Capillary Cracks and Water Filled Ones, and the Length of Traces of the Water Filled Cracks at a Horizontal Cross-Section

Using *Bronswijk's* [1991] Fig.4A we approximated pressure heads,  $h_1$  and  $h_2$  at the first- and second-layer bottoms ( $z_1 = 7.5\text{cm}$  and  $z_2 = 17\text{cm}$ , Fig.2) as functions of drying duration  $T$ . Table 1 shows estimates of  $T_1$  and  $T_2$  values for the bottoms of the two layers, respectively, corresponding to seven selected  $h$  values. Initial  $T$  values,  $T_1 = 2.5$  days and  $T_2 = 15$  days were selected so as to exclude in *Bronswijk's* [1991] Fig.4A initial sections of  $h(T)$  curves where the pressure head increases quickly. The final value  $T_1 = 8.5$  days was stipulated by the absence in *Bronswijk's* [1991] Fig.4A of  $(h, T)$  data for the upper layer at  $T_1 \geq 8.5$  days. The final value  $T_2 = 75$  days corresponds approximately with the same  $h$  value (at the bottom of the second layer) as  $T_1 = 8.5$  days (at the bottom of the first layer).

For every drying duration from the ranges  $2.5 \leq T_1 \leq 8.5$  days and  $15 \leq T_2 \leq 75$  days based on *Bronswijk's* [1991] Fig.4B one can estimate the volumetric water content of soil matrix,  $\theta$  for 5 depths,  $z=3, 12, 22, 32$ , and  $42$  cm ( $\theta$  values of depths 22, 32, and 42 cm can coincide at sufficiently small  $T_1$  and  $T_2$  values). Using the 5  $\theta$  values for the 5 soil depths we found approximations for soil water content profiles at drying durations of  $2.5 \leq T_1 \leq 8.5$  days and  $15 \leq T_2 \leq 75$  days (similar to the water content profiles in *Bronswijk's* [1991] Fig.5 for  $T=0, 33, 39$ , and 82 days).

Accounting for the soil water content profiles, the shrinkage curve of soil aggregates (*Bronswijk's* [1991] Fig.2A) and isotropic shrinkage of the soil [*Bronswijk*, 1990], we approximated  $\delta(z)$  dependencies (see Section 2.1) and found the vertical shrinkage in the middle sections of the two upper layers,  $\varepsilon_1(T_1)$  and  $\varepsilon_2(T_2)$  for drying times  $T_1$  and  $T_2$  from Table 1. The decrease in thickness of the two layers  $\Delta_1(T_1) = \varepsilon_1(T_1)z_1$  and  $\Delta_2(T_2) = \varepsilon_2(T_2)(z_2 - z_1)$  is also given in Table 1. One can see that  $\Delta_1(T_1) \ll z_1 = 75$  mm and  $\Delta_2(T_2) \ll (z_2 - z_1) = 95$  mm. Thus, condition (21) is fulfilled in the case under study, and we can use the results indicated at the end of Section 3.3.

The  $\delta(z)$  dependencies were further used for estimation of the maximum widths of interblock capillary cracks,  $R_{mb}(h)$  and water filled ones,  $R_{wb}(h)$  from (13) and (14), respectively, at 7.5 cm depth (for the first-layer bottom) and  $T=2.5, \dots, 8.5$  days and at 17 cm depth (for the second-layer bottom) and  $T=15, \dots, 75$  days (for corresponding  $h$  values see Table 1). These estimates are considered in Section 4.1.

The  $\delta(z)$  dependencies (for the above drying time values) together with the found values of  $R = R_{wb}(h)$  (for 7.5 cm and 17 cm depths) allowed us to estimate from (11) the lengths of traces of water filled interblock capillary cracks,  $L_b(h)$  at the bottoms of the two layers for  $h$  values from Table 1. The estimates are considered in Section 4.1.

The estimates of  $R_{wb}(h)$  and  $L_b(h)$  turned out to be  $\ll 1$  (cm and  $\text{cm}^{-1}$ , respectively) for both depths (see Section 4.1). Therefore, estimation from (16) of the specific volume of water filled interblock capillary cracks,  $V_{cr,b}(R_{wb}(h), z)$  at  $z = 7.5$  and  $17$  cm was simplified. We can write (at both depths) in the linear approximation

$$L_b(R) \cong \frac{L_b(R_{wb})}{R_{wb}} R, \quad 0 < R \leq R_{wb} \ll 1 \quad (25)$$

and (16) gives (at  $z = 7.5$  or  $17$  cm)

$$V_{cr,b}(R_{wb}) \cong \frac{L_b(h)R_{wb}(h)}{2} \quad (26)$$

At  $R = R_{mb}(h)$  (11) is reduced to  $L_b(R_{mb}, z) = \bar{L}(z)$ , and the total specific volume of interblock capillary cracks,  $V_{cr,b}(R_{mb}, z)$  is determined according to (16) by Chertkov and Ravina's [1998] Eq. (33) for the total specific crack volume at depth  $z$ . The estimates of  $V_{cr,b}(R_{wb})$  and  $V_{cr,b}(R_{mb})$  at  $z = 7.5$  and  $17$  cm are considered in Section 4.1.

### 3.5. Estimation of the Total Hydraulic Conductivity Function at the Bottom of the First and Second Layers

We assume that the total vertical hydraulic conductivity  $K(z, T)$  (of the soil matrix, interblock and interaggregate capillary cracks) at depth  $z$  and time  $T$  is

$$K(z, T) = -q(z, T) / \frac{\partial h(z, T)}{\partial z} \quad (27)$$

where  $q$  is a vertical water flux at depth  $z$  and time  $T$  (averaged on the surface of the lysimeter including the matrix and cracks). We are interested in (absolute) values of hydraulic conductivity,  $K_1(h) \equiv K(z_1, T_1)$  and  $K_2(h) \equiv K(z_2, T_2)$  at  $z_1 = 7.5$  cm and  $z_2 = 17$  cm (Fig. 2) and at drying durations  $T_1$  and  $T_2$ , or pressure heads,  $h$  from Table 1.

To estimate (absolute) values of derivatives,  $\frac{\partial h}{\partial z}$  at  $z = z_1$  and  $z_2$  we used approximations based on Bronswijk's [1991] Fig. 4A

$$\left. \frac{\partial h(z, T_1)}{\partial z} \right|_{z=z_1=0.075\text{m}} \cong \frac{h(z=0.03\text{m}, T_1) - h(z=0.12\text{m}, T_1)}{0.09\text{m}} \quad (28)$$

$$\left. \frac{\partial h(z, T_2)}{\partial z} \right|_{z=z_2=0.17\text{m}} \cong \frac{h(z=0.12\text{m}, T_2) - h(z=0.22\text{m}, T_2)}{0.1\text{m}} \quad (29)$$

where  $z=0.03, 0.12$ , and  $0.22$  m correspond with the middle of the first, second, and third layers, respectively [Bronswijk, 1991].

To estimate (absolute) values of fluxes,  $q(z_1, T_1)$  and  $q(z_2, T_2)$  (at  $T_1, T_2$ , and corresponding  $h$  values from Table 1) we used the water balance equations for the two layers

$$q(z_i, T_i) = \left. \frac{dQ_i(t)}{dt} \right|_{t=T_i}, \quad i=1,2 \quad (30)$$

with

$$Q_i(t) = Q_{i-1}(t) - \theta_s(t)(z_i - z_{i-1}) + \theta_i(t)(z_i - z_{i-1}) - \theta_i(t)\Delta V_i(t) + V_{cr.bi}(R_{wb}(h(t)))(z_i - z_{i-1} - \Delta_i(t)), \quad i=1, 2 \quad (31)$$

where  $z_{i-1} \parallel i=1 = 0$ ,  $z_1 = 0.075$  m, and  $z_2 = 0.17$  m are the initial depths (at saturation) of the soil surface and bottoms of the first and second layers, respectively;  $Q_0(t) \equiv Q_{ev}(t)$  is the cumulative evaporation to time  $t$  per unit upper-surface area of the lysimeter (i.e., averaged on the surface including soil and cracks);

$$\Delta V_i(t) \equiv \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta_i(t)}{z_i - z_{i-1}} \right)^3 \right] (z_i - z_{i-1}), \quad i=1, 2 \quad (32)$$

is the decrease in the volume of soil matrix in the  $i$  th layer per unit surface area of a horizontal cross-section of the lysimeter (in the case of isotropic shrinkage [Bronswijk, 1990]);  $\Delta_i(t)$  is the decrease in the thickness  $(z_i - z_{i-1})$  of the  $i$  th layer as a result of shrinkage.  $\theta_s$  is the initial (saturated) volumetric water content. Volumetric water content,  $\theta_i(t)$  and specific volume of water filled interblock capillary cracks in the  $i$  th layer,  $V_{cr.bi}(R_{wb}(h(t)))$  (see Sections 3.4 and 4.1) are related to its middle depth. Both parts of (31) are related to the unit surface area of a horizontal cross-section of the lysimeter. The left part of (31) gives the cumulative water volume passing through the bottom surface of the  $i$  th layer for time  $t$ . The five terms in the right part have the following physical meaning. The first term gives the cumulative water volume passing through the top surface of the  $i$  th layer for time  $t$ . The second one (not depending on time) gives an initial water volume in the  $i$  th layer of the initial thickness  $(z_i - z_{i-1})$ . The third one gives a water volume that would be at the time  $t$  in the  $i$  th layer of the initial thickness,  $(z_i - z_{i-1})$ . The fourth one gives the decrease in water volume of the  $i$  th layer at moment  $t$  at the expense of a decrease of its volume (see (32)) as a result of shrinkage (the decrease in volume of soil matrix in the  $i$  th layer,  $\Delta V_i(t)$  includes the contributions of cracks and the decrease  $\Delta_i(t)$  in initial thickness of the  $i$  th layer). The fifth term gives a water volume at moment  $t$  in the interblock capillary cracks of the  $i$  th layer. The five terms in the right part of (31) account for the influence on  $q$  and  $K$  of both vertical and lateral shrinkage. For a particular soil Chertkov and Ravina [2001] showed that the contribution of interaggregate capillary cracks to soil water retention is negligible. Estimates in Section 4.5 confirm the same for the soil under study. For this reason we neglected in the right part of (31) the term similar to the fifth one, but for interaggregate capillary cracks.

We estimated  $\theta_i(t)$  values for a number of  $t$  values from Bronswijk's [1991] Fig.4B. Estimating the decrease in layer thickness,  $\Delta_i(t)$  for a number of  $t$  values (Table 1) was based on the  $\theta_i(t)$  estimates, Bronswijk's [1991] Fig.2A, and isotropic shrinkage of the soil [Bronswijk, 1990]. Cumulative evaporation at the surface,  $Q_{ev}(t)$ , at different times, was calculated from Bronswijk's [1991] Fig.3A. To calculate  $q(z_i, T_i)$  ( $i=1, 2$ ) (at  $T_1$  and  $T_2$  values from Table 1) according to (30) we used approximation

$$q(z_i, T_i) \cong \frac{Q_i(T_i - \Delta T_i) - Q_i(T_i + \Delta T_i)}{2\Delta T_i} \quad (33)$$

where

$$2\Delta T_i = \begin{cases} 1 \text{ day,} & i = 1 \\ 10 \text{ days,} & i = 2 \end{cases}$$

Then,  $K_1(h) \equiv K(z_1, T_1)$  and  $K_2(h) \equiv K(z_2, T_2)$  are calculated from (27)-(29) and (31)-(33). The estimates of  $K_1(h)$  and  $K_2(h)$  are considered in Section 4.2.

### 3.6. Estimation of the Hydraulic Conductivity Function of the Interblock Capillary Cracks at the Bottom of the First and Second Layers

Accounting for small values of  $R_{wb}$  and  $L_b$  at  $0.49 \leq h \leq 0.99$  m for both depths, 7.5 cm and 17 cm (see Section 3.4), we estimated the hydraulic conductivity of the interblock capillary cracks,  $K_{cr,b}(R_{wb}, z)$  from (18) based on approximation (25). At  $z = 7.5$  cm or 17 cm

$$K_{cr,b}(R_{wb}) \equiv \frac{g}{12\nu} \frac{L_b(h) \cdot R_{wb}^3(h)}{4} \quad (34)$$

The estimates of  $K_{cr,b}(R_{wb})$  are given in Section 4.2.

### 3.7. Estimation of the Summary Hydraulic Conductivity Function of the Soil Matrix and Interaggregate Cracks

The difference

$$A_i = K_i(h) - K_{cr,bi}(R_{wb}(h)), \quad i = 1, 2 \quad (35)$$

gives for a number of  $h$  values from Table 1 the summary contribution of a soil clay matrix,  $K_{mi}$  and interaggregate-capillary-crack network,  $K_{cr,ai}$  to the total hydraulic conductivity at the bottom of the first ( $i=1$ ) and second ( $i=2$ ) layers. However, this summary hydraulic conductivity,  $K_{mi} + K_{cr,ai}$  is one per unit surface area of the soil including the matrix, interaggregate, and interblock capillary cracks. For comparison between this estimate of  $K_{mi} + K_{cr,ai}$  according to (35) and a prediction by another way (Sections 3.8 and 4.3) we will need the summary hydraulic conductivity (at the bottom of two the layers) per unit surface area of the system itself (without interblock capillary cracks)

$$B_i(h) = A_i(h) / (1 - V_{cr,bi}(R_{mbi}(h))), \quad i=1,2 \quad (36)$$

Here we accounted for that interblock capillary cracks being vertical. We assume that both the soil matrix and interaggregate-capillary-crack network are the same for different soil depths (see Section 1). Hence, sets  $B_1(h)$  and  $B_2(h)$  (for the seven  $h$  values from Table 1) relating to the different depths should coincide within the limits of statistical error. Therefore, from the two sets we can find the 7 averages

$$\bar{B}(h) = (B_1(h) + B_2(h)) / 2 \quad (37)$$

and standard deviations

$$\delta \bar{B}(h) = \sqrt{B_1^2(h) + B_2^2(h)} / \sqrt{2} \quad (38)$$

### 3.8. An Alternative Way of Predicting the Summary Hydraulic Conductivity Function of the Soil Matrix with Interaggregate Cracks

An alternative way of predicting the hydraulic conductivity of a soil clay matrix with interaggregate capillary cracks only was considered by *Chertkov and Ravina* [2001]. In this way we should preliminarily estimate:

- the relative hydraulic conductivity function of the soil clay matrix by *van Genuchten* [1980]-*Mualem's* [1976] approach; and
- the characteristic (mean) dimension of soil aggregates,  $l$  (see (5)).

The *van Genuchten's* [1980] approximation of the water soil retention curve is

$$\Theta = [1 + (ah)^n]^{-m}, \quad m = 1 + 1/n, \quad h > 0. \quad (39)$$

where  $a$  ( $L^{-1}$ ) and  $n$  are fitting parameters, and  $\Theta$  is the normalized volumetric water content of soil matrix

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (40)$$

with  $\theta_r$  and  $\theta_s$  denoting residual and saturated volumetric water content ( $L^3/L^3$ ), respectively. We estimated *van Genuchten's* [1980] parameters of the soil matrix based on the water retention curve given in *Bronswijk's* [1991] Fig.2B. From *Bronswijk's* [1991] data we have the value of  $\theta_s = 0.538 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Parameters  $\theta_r$ ,  $a$ , and  $n$  meet the conditions [*van Genuchten*, 1980; *Hillel*, 1998]

$$\theta_r \geq 0, \quad a \geq 0.1 \text{ m}^{-1}, \quad n \geq 1.2 \quad (41)$$

We searched the values of  $\theta_r$ ,  $a$ , and  $n$  in the area (41) by the least-square criterion providing the minimum of the sum of squares,  $S$  of the differences between  $\theta$  values predicted by (39) and (40) and  $\theta$  values from *Bronswijk's* [1991] Fig.2B in the range  $0.48 < \theta < 0.52 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (the gravimetric water content from *Bronswijk's* [1991] Fig.2B was preliminarily converted to the volumetric one). It turned out that the water retention curve can be approximated in the form (39)-(40) using a number of sets of parameters  $\theta_r$ ,  $a$ , and  $n$  with  $\theta_r \geq 0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $a \geq 0.25 \text{ m}^{-1}$ , and  $n \geq 1.2$  giving the same  $S_{\min}$ .

For instance, sets:  $\theta_{r\min} = 0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $a_{\min} = 0.25 \text{ m}^{-1}$ ,  $n_{\min} = 1.2$ ;

$\theta_r = 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $a = 0.27 \text{ m}^{-1}$ ,  $n = 1.24$ ; and  $\theta_r = 0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $a = 0.35 \text{ m}^{-1}$ ,

$n = 1.40$ . This ambiguity is connected with limited ranges of  $\theta$  and  $h$  values in

*Bronswijk's* [1991] Fig.2B. However, it is natural to assume from physical considerations

that actually realized are the parameters corresponding with the indicated minimum

possible  $\theta_r$  value. Thus, in estimating the relative hydraulic conductivity of the soil clay

matrix under study by *van Genuchten* [1980]-*Mualem's* [1976] approach we used

$$\theta_r = 0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3, \quad \theta_s = 0.538 \text{ m}^3/\text{m}^3, \quad a = 0.25 \text{ m}^{-1}, \quad n = 1.2 \quad (42)$$

We estimated the characteristic (mean) dimension of the soil aggregates,  $l$  based on

the maximum volume of natural aggregates,  $V_{ag} \cong 25 \text{ cm}^3$  [*Bronswijk*, 1991].

Accounting for a spacing distribution between interaggregate cracks [*Chertkov and Ravina*, 2001] we have

$$l \cong V_{ag}^{1/3} / 4.6 \cong 6.4 \text{ mm} \quad (43)$$

Accounting for parameters (42) and (43) and assuming that two values of the summary hydraulic conductivity  $K_m + K_{cra}$  at different pressure heads are known, we

can find, based on *Chertkov and Ravina's* [2001] approach, the maximum interaggregate

crack width at the maximum water content,  $R_{ma,0}$  (see Section 2.2) and the saturated hydraulic conductivity of the soil matrix,  $K_{ms}$ . For the two known values of the summary hydraulic conductivity we used two from the seven estimated based on Section 3.7 (see Section 4.2). Finally, following *Chertkov and Ravina* [2001] we estimated from (42), (43), and  $R_{ma,0}$  and  $K_{ms}$  values the relative summary hydraulic conductivity function and separate contributions to it of soil matrix and interaggregate cracks (see Section 4.3) as well as the width and volume of the cracks (see Section 4.5).

## 4. Results and Discussion

### 4.1. Estimates of the Volume and Maximum Width of the Interblock Capillary Cracks and Water Filled Ones, and the Length of Traces of Water Filled Cracks at a Horizontal Cross-Section

Table 2 shows the estimates of the maximum width of interblock capillary cracks,  $R_{mb1}(h)$  and  $R_{mb2}(h)$  as functions of the pressure head  $0.49 \leq h \leq 0.99\text{m}$  at the bottom of the first (7.5 cm) and second (17 cm) layers, respectively. Because at  $0.49 \leq h \leq 0.99\text{m}$  (and water-soil contact angle  $\alpha = 0$ )  $2\gamma/h < R_{mb1}(h)$  and  $2\gamma/h < R_{mb2}(h)$  ( $\gamma = 0.073\text{N/m}$  at  $-20^\circ\text{C}$ ), according to (14)

$$R_{wb1}(h) \equiv R_{wb2}(h) = 2\gamma/h, \quad 0.49 \leq h \leq 0.99\text{m} \quad (4.4)$$

Estimates of  $R_{wb}(h) \equiv R_{wb1}(h) \equiv R_{wb2}(h)$  are also given in Table 2. The estimates  $R_{mb1}(h)$ ,  $R_{mb2}(h)$ , and  $R_{wb}(h)$  (Table 2) show that:

- $R_{mb1}$ ,  $R_{mb2}$  increase, and  $R_{wb}$  decreases with  $h$ ;
- $R_{mb1}(h) \gg R_{wb}(h)$  and  $R_{mb2}(h) \gg R_{wb}(h)$ ;
- $R_{mb1}(h)$  and  $R_{mb2}(h)$  keep capillary dimensions.

Table 2 also shows the estimates of the lengths  $L_{b1}(R_{wb}(h))$  and  $L_{b2}(R_{wb}(h))$  of traces of water filled interblock capillary cracks as functions of pressure head,  $0.49 \leq h \leq 0.99\text{m}$  at the bottom of the first (7.5cm) and second (17cm) layers, respectively. Small values of  $R_{wb}$  (cm) and  $L_{b1}$ ,  $L_{b2}$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) justify approximations (25), (26), and (34).

Specific volumes  $V_{cr.b1}(R_{wb}(h))$  and  $V_{cr.b2}(R_{wb}(h))$  of water filled interblock capillary cracks, estimated according to (26) as functions of pressure head  $0.49 \leq h \leq 0.99\text{m}$  at the bottoms of the first (7.5 cm) and second (17 cm) layers, respectively, are also given in Table 2. Finally, Table 2 shows estimates of the total specific volume of interblock capillary cracks at two depths, as found from *Chertkov and Ravina's* [1998] Eq.(33). The estimates of  $V_{cr.b1}(R_{wb}(h))$ ,  $V_{cr.b2}(R_{wb}(h))$ , and  $V_{cr.b1}(R_{mb1}(h))$ ,  $V_{cr.b2}(R_{mb2}(h))$  will be used in Section 4.5 to compare between the interblock crack volume (total and water filled) and interaggregate crack volume.

### 4.2. Estimates of the Total Hydraulic Conductivity, Hydraulic Conductivity of Interblock Cracks, and Summary Hydraulic Conductivity of Soil Matrix and Interaggregate Cracks

Table 3 shows the total hydraulic conductivity functions  $K_1(h)$  and  $K_2(h)$  at depths 7.5 cm and 17 cm, respectively, estimated according to Section 3.5. In estimating we

accounted for the negligible values of  $V_{cr.b1}(R_{wb}(h))$  and  $V_{cr.b2}(R_{wb}(h))$  (see Table 2).

Table 3 also shows the hydraulic conductivity functions  $K_{cr.b1}(R_{wb}(h))$  and  $K_{cr.b2}(R_{wb}(h))$  of the interblock capillary cracks at depths 7.5 cm and 17 cm, respectively, calculated from (34) based on dependencies  $R_{wb}(h)$ ,  $L_{b1}(h)$ , and  $L_{b2}(h)$  (Table 2) ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  at  $\sim 20^\circ\text{C}$ ).

Finally, Table 3 shows the values of the mean summary hydraulic conductivity of soil matrix and interaggregate cracks,  $\bar{B}$  and standard deviations,  $\delta\bar{B}$  as functions of the pressure head, estimated from (35)-(38) based on  $K_i$  and  $K_{cr.bi}(R_{wb}(h))$  values ( $i=1, 2$ ) (Table 3) and  $V_{cr.bi}(R_{mbi}(h))$  values ( $i=1, 2$ ) from Table 2.

#### 4.3. Alternative Prediction of the Summary Hydraulic Conductivity Function of the Soil Matrix and Interaggregate Cracks, and Comparison with Estimates of Table 3

Following Section 3.8, Fig.3 shows the prediction of the relative summary hydraulic conductivity of the soil matrix and interaggregate cracks (per unit surface area of the soil without interblock cracks) as well as separate contributions of soil matrix and interaggregate cracks in the wide range  $10^{-2} < h < 10^2 \text{ m}$ . Fig.4 shows a field within the limits of the square frame in Fig.3 after its magnification. Square points and vertical bars in Figs.3 and 4 indicate the seven values of the relative summary hydraulic conductivity and their standard deviations estimated independently (Table 3,  $\bar{B}$  and  $\delta\bar{B}$  values) after normalization by the saturated value of the summary hydraulic conductivity. In Fig.4 in the range of estimated square-points on the pressure head axis, predicted curve 1 goes within the limits of the standard deviations. That is, the model estimates do not contradict the data from Bronswijk's [1991] lysimeter experiment.

#### 4.4. Absolute Contributions of Three Types to the Total Hydraulic Conductivity

Using absolute values of the summary hydraulic conductivity (Table 3,  $\bar{B}$  values) in the available range of pressure head and relative contributions of the soil matrix and interaggregate cracks (Figs.3 and 4) we can find two corresponding absolute contributions. Fig.5 shows the absolute values of all the three contributions to the total hydraulic conductivity in the available range of pressure head for bottoms of the first (7.5cm) and second (17cm) layers: contributions of soil matrix, interaggregate cracks, and interblock cracks. It is worth noting that for the first layer the contribution of interblock cracks (Fig.5, curve 3) is, as a rule, larger by two-three times than for the second one (Fig.5, curve 4). This result is intuitively expected. At the same time a ratio between the summary contributions of the soil matrix and interaggregate cracks, for the first and second soil layers is  $\sim 0.99$ . The latter is connected with the difference between  $V_{cr.b1}(R_{mb1})$  and  $V_{cr.b2}(R_{mb2})$  (see Table 2). Therefore, curves 1 and 2 in Fig.5 are actually related to both the soil layers.

Fig.5 also shows relative values and variations with the pressure head of the three contributions to the total hydraulic conductivity of the soil for two of the layers.

#### 4.5. Crack Widths and Volumes

Estimating the variation of the maximum width of interaggregate capillary cracks,  $R_{ma}$  (see (12)) shows that with increase of  $h$  in the range  $10^{-2} \text{ m} < h < 2 \text{ m}$ ,  $R_{ma}$  decreases from  $\sim 20 \mu\text{m}$  to 0, and in the pressure head range from Table 1  $4 \mu\text{m} \geq R_{ma} \geq 2 \mu\text{m}$ . Comparison between these  $R_{ma}$  values and  $R_{mb1}$ ,  $R_{mb2}$ , and  $R_{wb}$  values from Table 2 shows that in the pressure head range from Table 1

$$R_{ma} \equiv R_{wa} \ll R_{wb} \ll R_{mb2} < R_{mb1} \quad (45)$$

Estimating the variation of the specific interaggregate-crack volume,  $V_{cr,a}$  (see (5), (12), and (15)) with pressure head shows that with an increase in  $h$  in the range  $10^{-2} \text{ m} < h < 2 \text{ m}$ ,  $V_{cr,a}$  decreases from  $\sim 1.5 \cdot 10^{-3}$  to 0, and in the pressure head range from Tables 1 and 2,  $3 \cdot 10^{-4} \geq V_{cr,a} \geq 5 \cdot 10^{-5}$ . Comparing between  $V_{cr,a}$  values and values of  $V_{cr,b1}(R_{wb})$ ,  $V_{cr,b2}(R_{wb})$ ,  $V_{cr,b1}(R_{mb1})$ , and  $V_{cr,b2}(R_{mb2})$  from Table 2 one can see that in the pressure head range from Table 1

$$V_{cr,b2}(R_{wb}) < V_{cr,b1}(R_{wb}) \ll V_{cr,a} \ll V_{cr,b2}(R_{mb2}) < V_{cr,b1}(R_{mb1}) \quad (46)$$

Interaggregate cracks are water filled up to closing in the drying process [Chertkov and Ravina, 2001]. Therefore, according to (46) the specific water volume in the interaggregate capillary cracks is appreciably more than in the interblock ones (at both depths, 7.5 and 17cm), although the maximum width (see (45)) and the total specific volume (see (46)) of interblock capillary cracks are considerably more (the reason is that interaggregate capillary cracks are located significantly denser than interblock ones). Thus, according to the above estimates of  $V_{cr,a}$  and Table 2 (see  $V_{cr,b1}(R_{wb})$  and  $V_{cr,b2}(R_{wb})$ ) the total contribution of interaggregate and interblock capillary cracks to water retention of the soil stays negligible compared to the contribution of the soil matrix porosity (by order of magnitude the fraction of water volume in capillary cracks is  $\sim 10^{-3}$ ) as in the case of a soil matrix with interaggregate capillary cracks only [Chertkov and Ravina, 2001]. At the same time Figs.3-5 show that at sufficiently small pressure heads the contribution of capillary cracks (both the interaggregate and interblock) to hydraulic conductivity of the clay soil can prevail and even be overwhelming.

## 5. Summary and Conclusion

The cracks in swelling clay soils at sufficiently high water content can be presented as a superposition of interblock- and interaggregate-capillary-crack networks. Chertkov and Ravina [2001] proposed a model describing the hydraulic conductivity of soil matrix with interaggregate capillary cracks only. The objective of this work is a generalization of the model including interblock capillary cracks.

For the case of the vertical hydraulic conductivity of the total capillary crack network and based on the results of Chertkov and Ravina [1998, 2001] we consider expressions for the specific length of crack traces at a horizontal soil cross-section, the maximum width of cracks and the maximum width of water filled cracks, the specific crack volume, and the hydraulic conductivity of the capillary crack network. Physical factors (such as a water content profile, shrinkage curve, geometry factor,  $r_s$  [Rijniersce, 1983; Bronswijk, 1990], and overburden potential [Philip, 1969; Bronswijk, 1990]) influence the geometrical and hydraulic properties of interblock- and interaggregate-capillary-crack networks through the vertical profile of surface shrinkage of soil matrix ( $\delta(z)$ ) and the

maximum width of the water filled interaggregate capillary cracks in the saturated state ( $R_{ma.o}$ ).

For numerical estimation and validation of the model we used the data from Bronswijk's [1991] lysimeter experiment. The total hydraulic conductivity is considered based on the water balance in the two upper soil layers of the lysimeter (of 7.5cm and 17cm thickness) accounting for vertical and lateral shrinkage as well as the total and water filled crack volumes. Hydraulic conductivity of interblock capillary cracks is estimated based on the model. The difference between the total hydraulic conductivity and hydraulic conductivity of interblock capillary cracks gives summary contribution of soil matrix and interaggregate cracks. As an alternative way of estimating the summary contribution we used Chertkov and Ravina's [2001] approach for the hydraulic conductivity of a soil matrix with interaggregate capillary cracks only. The model validation is based on the comparison between the two independent estimates of the summary hydraulic conductivity of soil matrix and interaggregate cracks.

The numerical estimates show that:

- the contribution of the interblock cracks to the total hydraulic conductivity of the first soil layer is larger by two-three times than of the second one;
- the width of water filled interaggregate capillary cracks is considerably smaller than that of water filled interblock capillary cracks;
- at the same time, the volume of water filled interaggregate capillary cracks is significantly more than that of water filled interblock capillary cracks;
- the total contribution of interaggregate and interblock capillary cracks to water retention of the soil stays negligible (as in the case of soil matrix with interaggregate capillary cracks only [Chertkov and Ravina, 2001]);
- at sufficiently small pressure heads the contribution of capillary cracks of both types to hydraulic conductivity of the clay soil can prevail.

Results of the comparison between the two different estimates of the summary hydraulic conductivity of the soil matrix and interaggregate capillary cracks validate the feasibility of the model showing that the latter does not contradict the data of Bronswijk's [1991] lysimeter experiment.

**Acknowledgments.** The research was supported in part by the German-Israeli Foundation for Scientific Research and Development and the Chief Scientist Foundation of the Israel Ministry of Agriculture and Rural Development.

Corresponding author – V. Y. Chertkov, e-mail: [agvictor@tx.technion.ac.il](mailto:agvictor@tx.technion.ac.il)

# References

- Askar, A., and Y.-C. Jin, Macroporous drainage of unsaturated swelling soil, *Water Resour. Res.*, 36, 1189-1197, 2000.
- Bronswijk, J. J. B., Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1500-1502, 1990.
- Bronswijk, J. J. B., Drying, cracking, and subsidence of a clay soil in a lysimeter, *Soil Sci.*, 152 (2), 92-99, 1991.
- Chertkov, V. Y., and I. Ravina, Modeling the crack network of swelling clay soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 1162-1171, 1998.
- Chertkov, V. Y., and I. Ravina, Tortuosity of crack networks in swelling clay soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1523-1530, 1999.
- Chertkov, V. Y., and I. Ravina, The effect of interaggregate capillary cracks on the hydraulic conductivity of swelling clay soils, *Water Resour. Res.*, 2001 (in press).
- Garnier, P., M. Rieu, P. Boivin, M. Vauclin, and P. Baveye, Determining the hydraulic properties of a swelling soil from a transient evaporation experiment, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1555-1563, 1997a.
- Garnier, P., E. Perrier, R. Angulo-Jaramillo, and P. Baveye, Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and 1-dimensional water flow in swelling soils, *Soil Sci.*, 162, 410-420, 1997b.
- Garnier, P., R. Angulo-Jaramillo, D. A. DiCarlo, T. W. J. Bauters, C. J. G. Darnault, T. S. Steenhuis, J.-Y. Parlange, and P. Baveye, Dual-energy synchrotron X ray measurements of rapid soil density and water content changes in swelling soils during infiltration, *Water Resour. Res.*, 34, 2837-2842, 1998.
- Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12, 513-522, 1976.
- Philip, J. R., Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soils, *Water Resour. Res.*, 5, 1070-1077, 1969.
- Rijniersce, K., A simulation model for physical soil ripening in the Ijsselmeerpolders. Rijksdienst voor de Ijsselmeerpolders Ielystad, the Netherlands, 1983.
- van Genuchten, M. Th., A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898, 1980.
- Velde, B., E. Moreau, and F. Terribile, Pore networks in an Italian Vertisol: quantitative characterisation by two dimensional image analysis, *Geoderma*, 72, 271-285, 1996.

# Figure captions

Fig. 1. Sketch of interblock cracks in a soil layer.

Fig. 2. Sketch of the soil core in *Bronswijk's* (1991) lysimeter experiment.

Fig. 3. The relative summary hydraulic conductivity of the soil matrix and interaggregate capillary cracks, estimated by the model (square points) and predicted independently (solid curve 1), for the soil of *Bronswijk's* (1991) lysimeter experiment: 1 – the predicted relative summary conductivity; 2 – the predicted contribution of the soil matrix; 3 – the predicted contribution of the interaggregate cracks.

Fig. 4. The magnified part of Fig. 3 inside of the square frame.

Fig. 5. Absolute values of the contributions to the total hydraulic conductivity function at the bottom of the first (7.5 cm) and second (17 cm) soil layer of *Bronswijk's* (1991) lysimeter experiment (in the available range of the seven pressure head values): 1 – the contribution of the intraaggregate soil matrix (not actually depending on the soil depth); 2 – the contribution of the interaggregate capillary cracks (not actually depending on the soil depth); 3 – the contribution of the interblock capillary cracks at 7.5 cm depth (figures indicate the drying duration, days); 4 – the contribution of the interblock capillary cracks at 17 cm depth (figures indicate the drying duration, days).

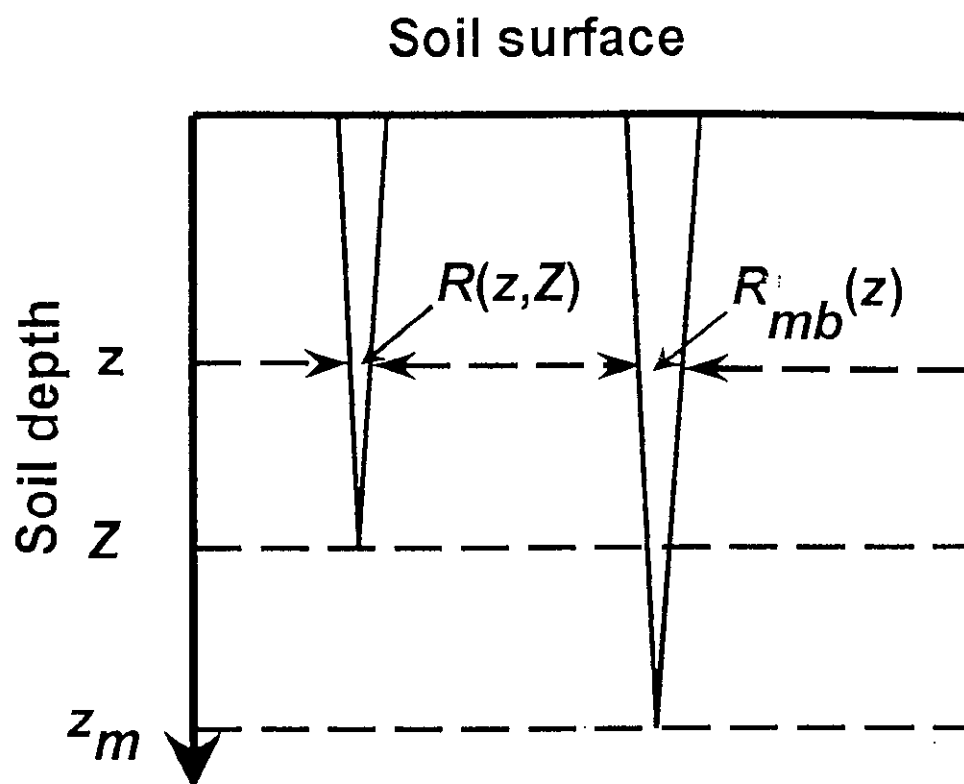


Figure 1

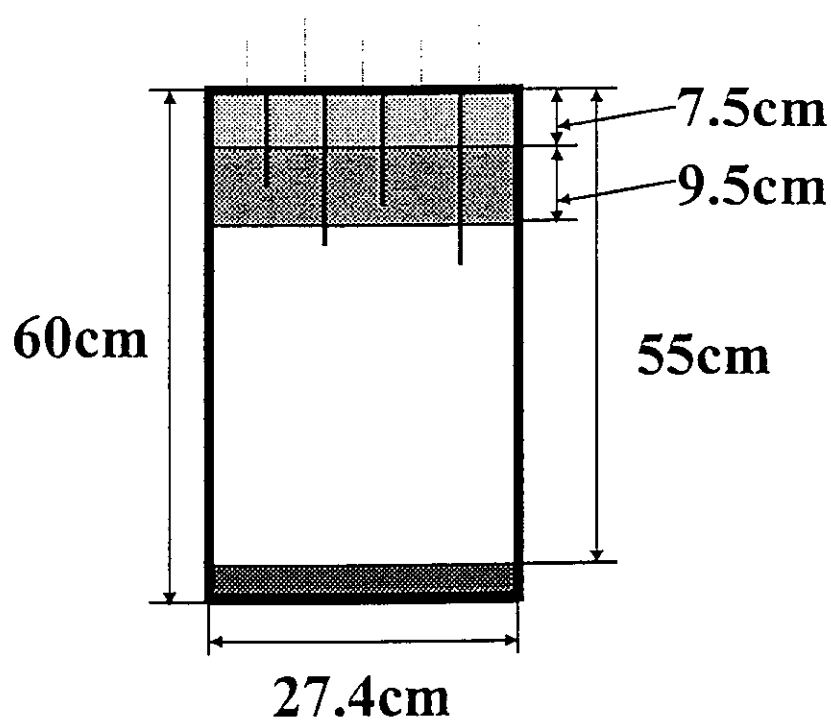


Figure 2

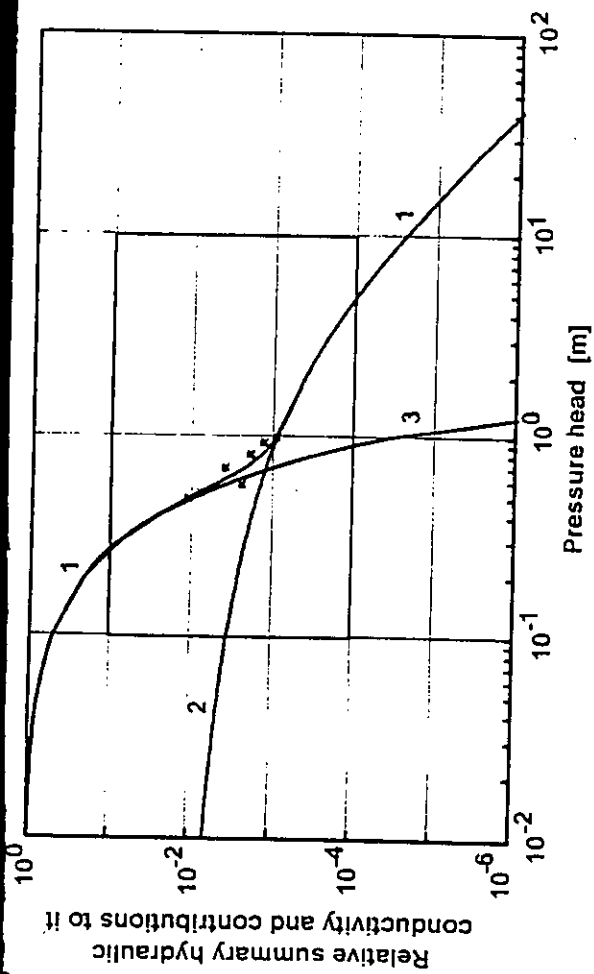
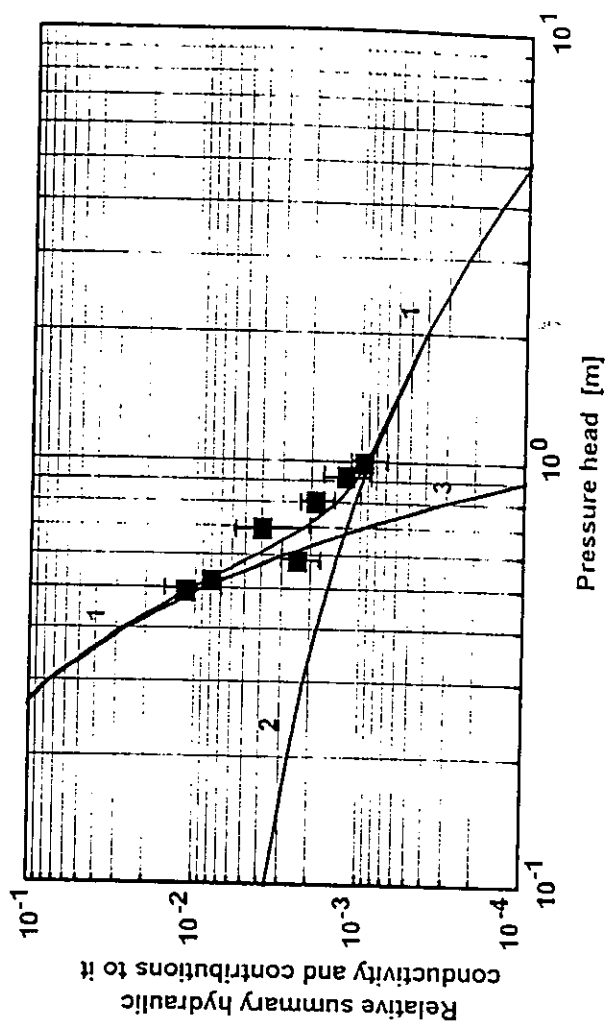


Figure 3

Figure 4



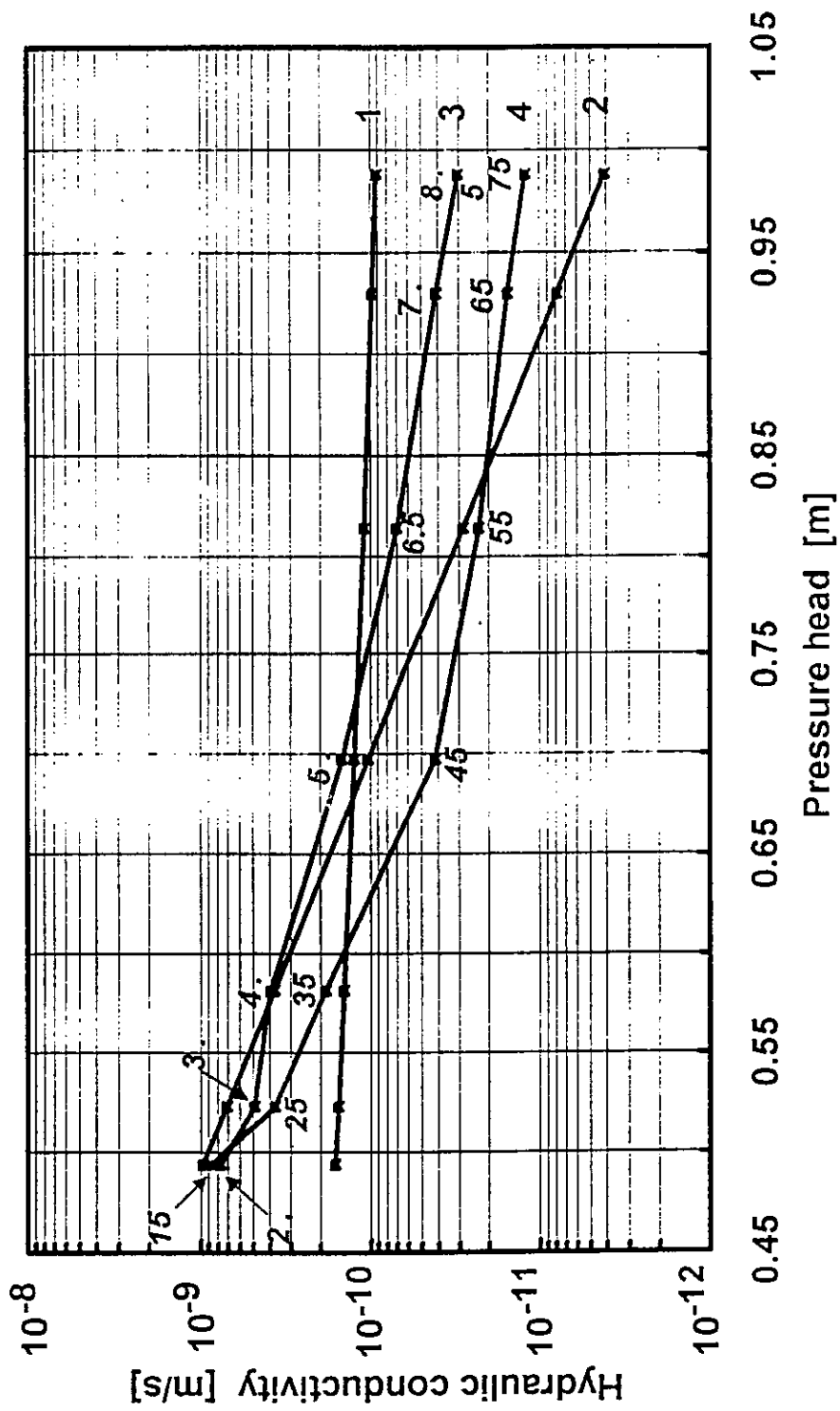


Figure 5

Table 1. Drying duration at the bottom of the first and second layer for the seven pressure head values and decrease in thickness of the layers

Pressure head, $h$ , m	Drying duration		Decrease in the thickness	
	at $z = 7.5$ cm,	at $z = 17$ cm,	of the first	of the second
	$T_1$ , days	$T_2$ , days	layer,	layer,
			$\Delta_1$ , mm	$\Delta_2$ , mm
0.49	2.5	15	1.3	0.9
0.52	3.5	25	1.4	1.2
0.58	4.5	35	1.5	1.4
0.70	5.5	45	1.6	1.7
0.81	6.5	55	1.8	2.0
0.93	7.5	65	2.0	2.3
0.99	8.5	75	2.1	2.6

Table 2. Estimates of the volume and maximum width of the interblock capillary cracks and water filled ones, and the length of traces of the water filled cracks at the bottom of two soil layers as functions of pressure head

Pressure head, $h$ , m	The maximum width of		The maximum width of interblock capillary cracks	The maximum width of interblock capillary cracks	Specific length of traces of		Specific volume of water		The total specific volume of	
	interblock				water filled interblock capillary cracks	filled interblock capillary cracks	interblock capillary cracks	interblock capillary cracks		
	at 7.5 cm depth, $R_{mb1}$ , cm	at 17 cm depth, $R_{mb2}$ , cm								

**Table 3.** The estimates of the total hydraulic conductivity functions,  $K_1(h)$  and  $K_2(h)$ , hydraulic conductivity functions of interblock capillary cracks,  $K_{cr.b1}(R_{wb})$  and  $K_{cr.b2}(R_{wb})$ , and the mean summary hydraulic conductivity function of the soil matrix and interaggregate capillary cracks,  $\bar{B}$  (per unit surface area of the soil without interblock capillary cracks) and its standard deviations,  $\delta\bar{B}$ .

Pressure head, $h$ , m	$K_1$ , m/s	$K_2$ , m/s	$K_{cr.b1}$ , m/s	$K_{cr.b2}$ , m/s	$\bar{B}$ , m/s	$\delta\bar{B}$ , m/s
0.49	$2.03 \cdot 10^{-9}$	$1.59 \cdot 10^{-9}$	$7.7 \cdot 10^{-10}$	$8.8 \cdot 10^{-10}$	$1.14 \cdot 10^{-9}$	$0.43 \cdot 10^{-9}$
0.52	$1.39 \cdot 10^{-9}$	$1.08 \cdot 10^{-9}$	$4.9 \cdot 10^{-10}$	$3.7 \cdot 10^{-10}$	$8.0 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$
0.58	$5.8 \cdot 10^{-10}$	$4.9 \cdot 10^{-10}$	$4.0 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$	$2.4 \cdot 10^{-10}$	$0.6 \cdot 10^{-10}$
0.70	$7.3 \cdot 10^{-10}$	$2.5 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$4.0 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$
0.81	$3.0 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$	$0.4 \cdot 10^{-10}$
0.93	$2.1 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$0.4 \cdot 10^{-10}$
0.99	$1.4 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$1.2 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$