



## **Vergleich von Infiltrationsmessungen unterschiedlicher Methodik**

### **Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades**

eingereicht von:  
Ing. Dipl.-Ing. Christian NEBOIS

Betreuer: Univ.Prof. DI Dr. Willibald Loiskandl  
Ass.Prof. DI Dr. Gerhard Kammerer  
Dipl.-Ing. MSc. Dr. Andrea Schnepf

Matrikelnummer H9940504

18.09.2014



---

## **Danksagung**

Für die Entstehung meiner Doktorarbeit möchte ich vielen Menschen einen herzlichen Dank aussprechen. Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuungsteam am Institut für Hydraulik bedanken, denn Sie brachten mir sehr viel Geduld entgegen und sorgten mit wertvollen Ratschlägen für das Gelingen der Arbeit.

Hr. Dr. Dipl.-Ing. Willibald Loiskandl und Hr. Dr. Dipl.-Ing. Gerhard Kammerer gaben mir mit Ihrem fundierten Fachwissen viele Anregungen und Lösungsvorschläge für meine wissenschaftliche Arbeit.

Weiters möchte ich bei meinen Eltern Heinrich und Eva, meiner Lebensgefährtin Barbara sowie meinem gesamten Freundeskreis, speziell Hr. Dr. Dieter Novotny, für Ihre Unterstützung bedanken.



**INHALTSVERZEICHNIS**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... I  
TABELLENVERZEICHNIS ..... V  
FORMELVERZEICHNIS ..... VI  
PHYSIKALISCHE GRÖßEN ..... VII  
VERWENDETE VARIABLEN ..... VIII  
VERWENDETE ABKÜRZUNGEN ..... IX  
BEGRIFFSBESTIMMUNGEN ..... X  
VORWORT ..... XI  
ABSTRACT ..... XIII

**1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG ..... 1**

**EINLEITUNG..... 1**  
**ZIELSETZUNG ..... 3**

**2. GRUNDLAGEN / STAND DER WISSENSCHAFT ..... 7**

2.1. ALLGEMEINES..... 7  
2.1.1. INFILTRATIONSPROZESS ..... 7  
2.1.2. VERLAUF DER WASSERSPANNUNGSKURVEN ..... 8  
2.1.3. HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER AUSWERTUNG AUS RINGINFILTROMETERN .....10  
2.2. INFILTRATIONSMESSUNG – UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEM EINFACH- UND DEM  
DOPPELRINGVERFAHREN.....12  
2.2.1. DOPPELRINGINFILTROMETER .....12  
2.2.2. EINFACHRINGINFILTROMETER .....12  
2.2.3. WEITERE INFITRATIONSMESSGERÄTE .....12  
2.2.3.1. HAUBENINFILTROMETER .....13  
2.2.3.2. DISKINFILTROMETER .....13  
2.2.3.3. REGENSIMULATONSVERSUCHE .....14  
2.2.3.4. TENSIONSINFILTROMETER.....14  
2.2.3.5. GUELPH-PERMEAMETER.....15  
2.2.4. AUSWERTUNG DER RINGINFILTROMETERVERSUCHE .....17  
2.2.4.1. INSTATIONÄRE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....17  
2.2.4.2. STATIONÄRE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....21  
2.3. BERECHNUNG ALS 3-PHASENSYSTEM: .....23  
2.3.1. SOFTWARE: .....26  
2.3.1.1. SOFTWARE HYDRUS 2D/3D: .....26

2.3.1.2.	SOFTWARE STOMP (SUBSURFACE TRANSPORT OVER MULTIPLE PHASES).....	27
2.3.1.3.	UNTERSCHIEDE ZWISCHEN HYDRUS UND STOMP: .....	36
2.4.	KOMBINATION DER INFILTRATIONSMESSUNG MIT BESTIMMUNG WEITERER BODENPARAMETER .....	37
2.5.	VERGLEICH ÄHNLICHER FELDVERSUCHE IN VERSCHIEDENEN NORMENWERKEN .....	39
2.5.1.	Ö-NORM EN ISO 22282-5 INFILTRMETERVERSUCHE:.....	39
2.5.2.	Ö-NORM L 1066 PHYSIKALISCHE BODENUNTERSUCHUNGEN - BESTIMMUNG DER VERSICKERUNGSINTENSITÄT MIT DEM DOPPELRING-INFILTRMETER (FELDMETHODE): .....	40
2.5.3.	Ö-NORM B4422-2 ERD- UND GRUNDBAU – UNTERSUCHUNG VON BÖDEN:.....	40
<b>3.</b>	<b><u>METHODIK</u></b> .....	<b>41</b>
3.1.	ANNAHMEN FÜR DIE SIMULATIONEN IN HYDRUS UND STOMP .....	41
3.1.1.	GEOMETRISCHES MODELL .....	41
3.1.2.	GEOMETRIE DER EINFACH- UND DOPPELRINGE .....	41
3.1.3.	VERLAUF DER SIMULATION.....	43
3.1.4.	WAHL DER BÖDEN FÜR DIE SIMULATIONEN .....	44
3.1.5.	ANFANGSBEDINGUNGEN DER BÖDEN IN DEN SIMULATIONEN.....	48
3.1.6.	SIMULATIONSVARIANTEN DOPPELRING / EINFACHRING .....	48
3.1.7.	ZIEL DER SIMULATIONEN .....	55
3.1.8.	ANNAHMEN ZU DEN SIMULATIONEN MIT HYDRUS 2D/3D UND STOMP.....	55
3.1.9.	MODELLIERUNGSGRUNDLAGEN – SIMULATION IN HYDRUS 2D/3D .....	55
3.1.9.1.	HYDRUS 2D/3D-GRUNDLAGEN .....	55
3.1.9.2.	PROZESSCHARAKTERISIERUNG IN HYDRUS 2D/3D.....	55
3.1.9.3.	VERLAUF DER SIMULATIONSANORDNUNG GEGENÜBER GÜLTIGEN Ö-NORMEN .....	58
3.1.10.	MODELLIERUNGSGRUNDLAGEN – SIMULATION IN STOMP .....	59
3.1.10.1.	SIMULATION / MODELLPARAMETER IN STOMP .....	59
3.2.	FELDVERSUCHE – KOMBINATION DES DOPPELRINGINFILTRMETERVERSUCHES MIT WEITEREN MESSUNGEN .....	63
3.2.1.	VERSUCHSSTANDORTE .....	64
3.2.2.	VERSUCHSANORDNUNG .....	66
3.2.2.1.	MESSUNG DER WASSERSPANNUNG.....	66
3.2.2.2.	MESSUNG DES WASSERGEHALTES DES BODENS.....	66
3.2.3.	INVERSE MODELLIERUNG DER FELDVERSUCHE IN HYDRUS .....	68
3.2.3.1.	VERWENDETE PARAMETER IN HYDRUS BEI DER INVERSEN SIMULATION DER FELDMESSUNGEN	69
3.3.	VERGLEICH DER SIMULATIONEN UND FELDVERSUCHE MIT GÄNGIGEN NORMENWERKEN .....	69
3.3.1.	Ö-NORM EN ISO 22282-5 INFILTRMETERVERSUCHE:.....	69

3.3.2. Ö-NORM L 1066 PHYSIKALISCHE BODENUNTERSUCHUNGEN — BESTIMMUNG DER VERSICKERUNGSINTENSITÄT MIT DEM DOPPELRING-INFILTROMETER (FELDMETHODE): .....	70
3.3.3. Ö-NORM B4422-2:.....	70

## **4. AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE.....73**

4.1. COMPUTERSIMULATIONEN DOPPELRING HYDRUS / STOMP.....	73
4.1.1. UNTERSUCHUNGEN DER EINDRINGTIEFE .....	77
4.1.2. UNTERSUCHUNGEN DER RINGGRÖÙE .....	79
4.1.3. UNTERSUCHUNGEN DER VORSÄTTIGUNG .....	81
4.2. COMPUTERSIMULATIONEN EINZELRING HYDRUS UND STOMP.....	82
4.2.1. UNTERSUCHUNGEN DER EINDRINGTIEFE .....	84
4.2.2. UNTERSUCHUNGEN DER RINGGRÖÙE .....	86
4.2.3. UNTERSUCHUNGEN DER VORSÄTTIGUNG .....	88
4.2.4. UNTERSCHIEDE ZWISCHEN EINFACHRING- UND DOPPELRINGSIMULATIONEN .....	88
4.3. COMPUTERSIMULATIONEN DREIPHASENSYSTEM STOMP .....	90
4.3.1. DR-VERSUCHE .....	90
4.3.1.1. VERGLEICH DR-VERSUCHE MIT/OHNE BODENLUFTDRUCK .....	94
4.3.2. ER-VERSUCHE.....	95
4.3.2.1. VERGLEICH ER-SIMULATIONEN MIT/OHNE BODENLUFTDRUCK.....	98
4.3.3. NUMERISCHE PROBLEME BEI DEN SIMULATIONEN / BERECHNUNGEN .....	99
4.3.3.1. SCHWANKUNGEN DER INFILTRATIONSRATE .....	99
4.3.3.2. WERTE #NV – BODENVARIANTE 0.....	100
4.4. KOMBINATION DER INFILTRATIONSMESSUNG MIT BESTIMMUNG WEITERER BODENPARAMETER ...	101
4.4.1. FELDVERSUCH GROÙ-ENZERSDORF.....	101
4.4.2. FELDVERSUCH UNTERTULLNERBACH.....	106

## **5. ZUSAMMENFASSUNG.....111**

5.1. UNTERSCHIEDE EINFACHRING – DOPPELRING.....	111
5.1.1. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG DER INFILTROMETERVERSUCHE:.....	111
5.1.2. EINFACHRING .....	112
5.1.3. DOPPELRING .....	112
5.1.4. FELDVERSUCHE .....	112
5.2. BERECHNUNG ALS 2-PHASENFLUSS .....	113
5.3. KOMBINATION DER INFILTRATIONSMESSUNG MIT BESTIMMUNG WEITERER BODENPARAMETER ...	113
5.4. VERGLEICH DER SIMULATIONEN UND FELDVERSUCHE MIT GÄNGIGEN NORMENWERKEN .....	113

<b>6. AUSBLICK .....</b>	<b>115</b>
<b>7. ANHANG .....</b>	<b>117</b>
7.1. COMPUTERSIMULATIONEN .....	117
7.1.1. DOPPELRINGVERSUCHE .....	117
7.1.2. BODENVARIANTE 0 – "SAND" – NACH US-TAXONOMY – $K_s = 8,25 \times 10^{-5}$ M/S.....	118
7.1.3. BODENVARIANTE 1 – "LOAMY SAND" – NACH US-TAXONOMY – $K_s = 4,0532 \times 10^{-5}$ M/S.....	126
7.1.4. BODENVARIANTE 2 – "LOAMY SAND" - NACH US-TAXONOMY - $K_s = 3,33 \times 10^{-7}$ M/S .....	134
7.1.5. BODENVARIANTE 0 – "SAND" – NACH US-TAXONOMY – $K_s = 8,25 \times 10^{-5}$ M/S – $K_{SH}$ 10FACH ÜBERHÖHT .....	142
7.1.6. BODENVARIANTE 1 – "LOAMY SAND" – NACH US-TAXONOMY – $K_s = 4,0532 \times 10^{-5}$ M/S – $K_{SH}$ 10FACH ÜBERHÖHT .....	150
7.1.7. BODENVARIANTE 2 – "LOAMY SAND" - NACH US-TAXONOMY - $K_s = 3,33 \times 10^{-7}$ M/S – $K_{SH}$ 10FACH ÜBERHÖHT .....	158
7.1.8. EINFACHRINGVERSUCHE .....	166
7.2. FELDVERSUCHE .....	190
7.2.1. AUSWERTUNG FELDVERSUCH GROß-ENZERSDORF .....	191
7.2.2. AUSWERTUNG FELDVERSUCH UNTERTULLNERBACH.....	194
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>197</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: wichtigste hydrologische Prozesse bei der Infiltration [Baumgartner und Liebscher 1996].....	7
Abb. 2: schematischer Verlauf der Infiltrationsrate bei trockenem und feuchtem Boden [Durner, 2005].....	8
Abb. 3: Retentionskurven diverser Böden nach unterschiedlichen Modellansätzen.....	9
Abb. 4: Haubeninfiltrimeter [UGT, 2010].....	13
Abb. 5: Darstellung Diskinfiltrimeter [User manual decagon devices, 2006].....	14
Abb. 6: Tensionsinfiltrimeter .....	15
Abb. 7: Hauptkomponenten Guelph-Permeameter [Soilmoisture, 2012] .....	16
Abb. 8: Guelph-Permeameter Einstellung mit konstanter Druckhöhe [Soilmoisture, 2012] .....	17
Abb. 9: Darstellung Graph Zeit $t$ – Absenkung $H$ für beide Messreihen [Amoozegar und Warrick, 1986] .	18
Abb. 10: Nomogramm A für die Bestimmung des $F$ -Faktors (untere Schicht undurchlässig) [Boersma, 1965] .....	19
Abb. 11: Nomogramm B für die Bestimmung des $F$ -Faktors (untere Schicht hoch durchlässig) [Boersma, 1965] .....	20
Abb. 12: Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter $\alpha^*$ [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a] .....	21
Abb. 13: Versuchsaufbau von Whang et al. [1998] .....	24
Abb. 14: Verlauf der Feuchtefront bei freier Gasbewegung [Whang et al., 1998] .....	25
Abb. 15: Verlauf der Feuchtefront bei luftbegrenzenden Bedingungen [Whang et al., 1998].....	25
Abb. 16: Funktionsprinzip TDR [Hillel, 1998] .....	37
Abb. 17: Funktionsprinzip Sentek Enviroscan [UMS-Katalog, 2002].....	38
Abb. 18: Granular-Matrix-Sensor Modell SIS Smart Irrigation Sensor [UMS, 2014].....	39
Abb. 19: Schema – DR-Versuch .....	42
Abb. 20: Schema – ER-Versuch.....	42
Abb. 21: zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelhöhe – DR-Versuch .....	43
Abb. 22: zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelhöhe – ER-Versuch .....	44
Abb. 23: Texturdreieck – ÖNORM L 1050 .....	45
Abb. 24: Texturdreieck US-Soil Taxonomy [Wikipedia, 2011] .....	46
Abb. 25: Beziehung Wasserspannung-Wassergehalt [Scheffer und Schachtschabel, 2002] .....	48
Abb. 26: Darstellung der Randbedingungen – DR-Versuch – Hydrus 2D/3D.....	56
Abb. 27: Darstellung der Randbedingungen – ER-Versuch – Hydrus 2D/3D .....	56
Abb. 28: geometrisches Modell – DR – Hydrus 2D/3D.....	57
Abb. 29: geometrisches Modell – ER – Hydrus 2D/3D .....	57
Abb. 30: Detail geometrisches Modell – Hydrus 2D/3D .....	58
Abb. 31: FE-Netz Doppelringinfiltrimeter – Hydrus 2D/3D.....	58
Abb. 32: FE-Netz Einzelringinfiltrimeter – Hydrus 2D/3D .....	58
Abb. 33: Skizze des geometrischen Modells – Stomp .....	59
Abb. 34: Skizze der Randbedingungen – Stomp .....	61
Abb. 35: Lage Groß-Enzersdorf [©BMLUF, 2006].....	64
Abb. 36: Lage Untertullnerbach [©BMLUF, 2006].....	65
Abb. 37: Bodenprofil Brentenmais [©BMLUF, 2006] .....	66
Abb. 38: Versuchsanordnung – Grundriss .....	67
Abb. 39: Versuchsanordnung – Schnitt.....	67
Abb. 40: DR-Versuch mit eingebautem Tensiometer .....	68
Abb. 41: DR-Versuch – Messung Wassergehalt .....	68
Abb. 42: Infiltrimeterversuch lt. Ö-Norm EN ISO 22282-5 [Hillel, 1998].....	69
Abb. 43: Ö-Norm L1066 – DR-Infiltrimeterversuch .....	70
Abb. 44: Infiltrimeterversuch lt. Ö-Norm B4422-2 (Prinzipskizze für den gleichartigen Versuch von Hillel, [1998]) .....	71
Abb. 45: kumulativer Verlauf von Hydrus – Stomp – BV 2 – R=40 cm .....	74
Abb. 46: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 0.....	78
Abb. 47: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 1.....	78

Abb. 48: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 2.....	79
Abb. 49: Verlauf der $f$ -Faktoren in Abhängigkeit des Innenringdurchmessers, $pF=3,0$ – DR – Hydrus.....	80
Abb. 50: Verlauf der $f$ -Faktoren – Stomp-Simulation.....	81
Abb. 51: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 0.....	85
Abb. 52: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 1.....	85
Abb. 53: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 2.....	86
Abb. 54: Verlauf der $f$ -Faktoren – Einzelring – $pF=3,0$ – Hydrus .....	87
Abb. 55: Verlauf der $f$ -Faktoren – Einzelring - Stomp-Simulation .....	88
Abb. 56: Darstellung der $f$ -Faktoren ER-DR.....	89
Abb. 57: Verlauf der $f$ -Faktoren bei Gegendruck der Bodenluft.....	90
Abb. 58: Vergleich $f$ -Faktoren – Doppelring – mit/ohne Bodenluftdruck .....	95
Abb. 59: Verlauf $f$ -Faktoren – Einzelring – mit Bodenluftdruck .....	96
Abb. 60: Verlauf $f$ -Faktoren - Einzelring – mit / ohne Bodenluftdruck.....	99
Abb. 61: Beziehung Wasserspannung-Wassergehalt – [Scheffer und Schachtschabel 2002] .....	100
Abb. 62: kumulative Infiltration – Versuch Groß-Enzersdorf .....	102
Abb. 63: Verlauf Infiltrationsraten – Versuch Groß-Enzersdorf.....	103
Abb. 64: Verlauf Wasserspannung – Versuch Groß-Enzersdorf – Tiefe 40 cm unter GOK .....	104
Abb. 65: Vergleich der kumulierten Infiltrationsmengen aus inverser Simulation und Feldmessung – Groß-Enzersdorf .....	105
Abb. 66: kumulative Infiltrationsmenge – Versuch Untertullnerbach .....	106
Abb. 67: Verlauf Infiltrationsraten – Versuch Untertullnerbach.....	107
Abb. 68: Verlauf Wasserspannung – Versuch Untertullnerbach – Tiefe ca. 40 cm unter GOK.....	108
Abb. 69: Vergleich der kumulierten Infiltrationsmengen aus inverser Simulation und Feldmessung – Untertullnerbach .....	109
Abb. 70: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 7,0 cm.....	118
Abb. 71: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 7,0 cm .....	118
Abb. 72: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 15,0 cm.....	119
Abb. 73: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 15,0 cm.....	119
Abb. 74: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 20,0 cm.....	120
Abb. 75: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 20,0 cm.....	120
Abb. 76: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 40,0 cm.....	121
Abb. 77: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 40,0 cm.....	121
Abb. 78: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 60,0 cm.....	122
Abb. 79: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 60,0 cm.....	122
Abb. 80: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 80,0 cm.....	123
Abb. 81: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 80,0 cm.....	123
Abb. 82: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 100,0 cm.....	124
Abb. 83: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 100,0 cm .....	124
Abb. 84: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 120,0 cm.....	125
Abb. 85: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 120,0 cm .....	125
Abb. 86: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 7,0 cm.....	126
Abb. 87: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 7,0 cm .....	126
Abb. 88: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 15,0 cm.....	127
Abb. 89: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 15,0 cm.....	127
Abb. 90: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 20,0 cm.....	128
Abb. 91: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 20,0 cm.....	128
Abb. 92: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 40,0 cm.....	129
Abb. 93: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 40,0 cm.....	129
Abb. 94: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 60,0 cm.....	130
Abb. 95: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 60,0 cm.....	130
Abb. 96: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 80,0 cm.....	131
Abb. 97: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 80,0 cm.....	131
Abb. 98: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 100,0 cm.....	132
Abb. 99: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 100,0 cm.....	132
Abb. 100: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 120,0 cm.....	133



Abb. 156: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 40,0 cm .....	161
Abb. 157: Infiltrationsrate DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 40,0 cm .....	161
Abb. 158: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 60,0 cm .....	162
Abb. 159: Infiltrationsrate DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 60,0 cm .....	162
Abb. 160: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 80,0 cm .....	163
Abb. 161: Infiltrationsrate DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 80,0 cm .....	163
Abb. 162: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 100,0 cm .....	164
Abb. 163: Infiltrationsrate DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 100,0 cm .....	164
Abb. 164: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 120,0 cm .....	165
Abb. 165: Infiltrationsrate DR – BV 2 – $k_{sh}$ 10fach überhöht – IR = 120,0 cm .....	165
Abb. 166: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 7,0 cm .....	166
Abb. 167: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 7,0 cm .....	166
Abb. 168: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 15,0 cm .....	167
Abb. 169: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 15,0 cm .....	167
Abb. 170: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 20,0 cm .....	168
Abb. 171: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 20,0 cm .....	168
Abb. 172: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 40,0 cm .....	169
Abb. 173: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 40,0 cm .....	169
Abb. 174: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 60,0 cm .....	170
Abb. 175: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 60,0 cm .....	170
Abb. 176: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 80,0 cm .....	171
Abb. 177: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 80,0 cm .....	171
Abb. 178: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 100,0 cm .....	172
Abb. 179: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 100,0 cm .....	172
Abb. 180: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 120,0 cm .....	173
Abb. 181: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 120,0 cm .....	173
Abb. 182: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 7,0 cm .....	174
Abb. 183: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 7,0 cm .....	174
Abb. 184: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 15,0 cm .....	175
Abb. 185: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 15,0 cm .....	175
Abb. 186: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 20,0 cm .....	176
Abb. 187: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 20,0 cm .....	176
Abb. 188: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 40,0 cm .....	177
Abb. 189: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 40,0 cm .....	177
Abb. 190: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 60,0 cm .....	178
Abb. 191: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 60,0 cm .....	178
Abb. 192: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 80,0 cm .....	179
Abb. 193: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 80,0 cm .....	179
Abb. 194: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 10,0 cm .....	180
Abb. 195: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 100,0 cm .....	180
Abb. 196: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 120,0 cm .....	181
Abb. 197: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 120,0 cm .....	181
Abb. 198: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 7,0 cm .....	182
Abb. 199: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 7,0 cm .....	182
Abb. 200: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 15,0 cm .....	183
Abb. 201: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 15,0 cm .....	183
Abb. 202: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 20,0 cm .....	184
Abb. 203: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 20,0 cm .....	184
Abb. 204: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 40,0 cm .....	185
Abb. 205: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 40,0 cm .....	185
Abb. 206: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 60,0 cm .....	186
Abb. 207: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 60,0 cm .....	186
Abb. 208: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 80,0 cm .....	187
Abb. 209: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 80,0 cm .....	187
Abb. 210: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 100,0 cm .....	188

Abb. 211: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 100,0 cm.....	188
Abb. 212: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 120,0 cm.....	189
Abb. 213: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 120,0 cm.....	189
Abb. 214: DR-Versuch mit eingebautem Tensiometer .....	190
Abb. 215: DR-Versuch – Tensiometer nach Versuchsende .....	190

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Unterschiede in den Kornklassendefinitionen.....	47
Tab. 2: Kornklassenbestimmung der Bodenvarianten nach Ö-Norm L1050 .....	47
Tab. 3: untersuchte Böden – Bodenparameter.....	47
Tab. 4: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – Doppelring .....	49
Tab. 5: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – Einzelring.....	49
Tab. 6: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – Doppelring .....	50
Tab. 7: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – Einfachring.....	50
Tab. 8: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – Doppelring .....	51
Tab. 9: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – Einzelring .....	51
Tab. 10: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – DR – $k_{fh}$ 10fach überhöht .....	52
Tab. 11: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – ER– $k_{fh}$ 10fach überhöht.....	52
Tab. 12: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – DR– $k_{fh}$ 10fach überhöht .....	53
Tab. 13: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – ER– $k_{fh}$ 10fach überhöht.....	53
Tab. 14: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – DR– $k_{fh}$ 10fach überhöht .....	54
Tab. 15: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – ER– $k_{fh}$ 10fach überhöht.....	54
Tab. 16: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 0 – Doppelring .....	75
Tab. 17: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp Bodenvariante 1 – Doppelring .....	76
Tab. 18: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 2 - Doppelring.....	77
Tab. 19: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp Bodenvariante 0 – Einzelring.....	83
Tab. 20: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 1 – Einfachring.....	83
Tab. 21: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 2 – Einfachring.....	84
Tab. 22: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring ,Bodenvariante 0 .....	92
Tab. 23: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring ,Bodenvariante 1 .....	93
Tab. 24: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring ,Bodenvariante 2 .....	94
Tab. 25: berechnete Infiltrationraten bei Gegendruck – Bodenvariante 0.....	97
Tab. 26: berechnete Infiltrationraten bei Gegendruck – Bodenvariante 1.....	97
Tab. 27: berechnete Infiltrationraten bei Gegendruck – Bodenvariante 2.....	98
Tab. 28: Feldversuch Groß-Enzersdorf – Gegenüberstellung $f$ -Faktoren – Simulation/Feld.....	105
Tab. 29: Feldversuch Untertullnerbach – Gegenüberstellung $f$ -Faktoren – Simulation/Feld.....	109
Tab. 30: Erklärung der Abkürzungen in den Abbildungen .....	117
Tab. 31: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 1 .....	191
Tab. 32: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 2 .....	192
Tab. 33: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 3 .....	193
Tab. 34: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 1 .....	194
Tab. 35: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 2 .....	194
Tab. 36: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 3 .....	195

## Formelverzeichnis

Gl. 1: van-Genuchten-Gleichung [1980] .....	9
Gl. 2: Berechnung $k_{fs}$ – instationär .....	18
Gl. 3: Berechnung $k_{fs}$ – stationär .....	21
Gl. 4: Richards-Gleichung .....	27
Gl. 5: $K$ -Wert .....	27
Gl. 6: Wassermassenerhaltungsgleichung .....	29
Gl. 7: Luftmassenerhaltungsgleichung .....	31
Gl. 8: Energieerhaltungsgleichung .....	32
Gl. 9: Wassermassenerhaltungsgleichung WAE-Modus .....	34
Gl. 10: Luftmassenerhaltungsgleichung WAE-Modus .....	35
Gl. 11: Energieerhaltungsgleichung WAE-Modus .....	36
Gl. 12: Berechnung Wasserdruck – initial condition – Stomp .....	60
Gl. 13: Berechnung Luftdruck – initial condition – Stomp .....	60
Gl. 14: Berechnung Wasserdruck – Stomp .....	61
Gl. 15: Berechnung Druck gasförmige Phase – Unterseite – ohne Gegendruck – Stomp .....	62
Gl. 16: Berechnung Druck flüssige Phase – Unterseite – ohne Gegendruck – Stomp .....	62
Gl. 17: Berechnung Druck gasförmige Phase – Unterseite – mit Gegendruck – Stomp .....	63
Gl. 18: Berechnung Druck flüssige Phase – mit Gegendruck – Stomp .....	63
Gl. 19: Umrechnung $i_f$ in $k_s$ [Wu, et. al., 1997] .....	73
Gl. 20: Umrechnung $i_f$ in $K_s$ [Wu, et. al., 1997] .....	73
Gl. 21: Berechnung vom Korrekturfaktor $f$ bei DR-Versuchen .....	80
Gl. 22: Berechnung vom Korrekturfaktor $f$ bei ER-Versuchen .....	82

## *Physikalische Größen*

Bezeichnungen der verwendeten Dimensionen

Formelzeichen	Dimension	SI-Einheit	Bezeichnung
$l$	L	m	Länge
$m$	M	kg	Masse
$t$	T	s	Zeit
$T$	$\Theta$	K	Temperatur

## Verwendete Variablen

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	$T$	s	Zeit
$\Delta t$	$T$	s	Zeitdifferenz
$\Theta$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Wassergehalt
$\Theta_r$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Restwassergehalt
$\Theta_s$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung
$\Theta_{WP}$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Wassergehalt bei dem Welkepunkt
$\Theta_{FK}$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Wassergehalt bei Feldkapazität
$\alpha$	$L^{-1}$	$cm^{-1}$	Koeffizient der Bodenwasser-Retentionsfunktion
$n$	1	1	Exponent der Bodenwasser-Retentionsfunktion
$m$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Parameter in der Bodenwasser-Retentionsfunktion
$h$	$L$	m	Druckhöhe
$h_a$	$L$	m	Luft Eintrittshöhe (air-entry value) in der Bodenwasser-Retentionsfunktion von Brooks and Corey
$\psi_m, \phi_m$	$L^2 T^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Matrix-Fluss-Potential bei gesättigten Feldbedingungen
$k_s$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	hydraulische Leitfähigkeit unter gesättigten Bedingungen
$\theta_s$	$L^3 L^{-3}$	%	Wassergehalt bei gesättigten Bedingungen
$\theta_r$	$L^3 L^{-3}$	%	Restwasserhalt
$k_{s,v}$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	hydraulische Leitfähigkeit unter gesättigten Bedingungen - vertikal
$k_{s,h}$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	hydraulische Leitfähigkeit unter gesättigten Bedingungen - horizontal
$f$	1	1	Korrekturfaktor
$H$	$L$	m	Überstauhöhe

*Verwendete Abkürzungen*

DR Doppelring

ER Einfachring

FDR Frequency-Domain-Resonance

NAPL Non-Aqueous Phase Liquids

TDR Time Domain Reflectometry

WSP Wasserspiegel

## *Begriffsbestimmungen*

Für die in dieser Dissertation häufig verwendeten Begriffe werden vorab einige Begriffsdefinitionen aufgeführt:

**Bodenparameter:** Ein Parameter ist in der mathematischen Betrachtung eine Variable, deren Wert für eine bestimmte Betrachtung konstant gehalten wird [Wiktionary, 2013].

Sinngemäß auf die Bodenphysik bezogen ist dies eine Bodeneigenschaft, die im betrachteten Prozess unabhängig vom Betrachtungszeitpunkt ist (konstant), z.B. die Trockendichte, der Porenanteil, etc.

**Bodenzustandsgrößen:** Eine Zustandsgröße ist eine makroskopische physikalische Größe, die gegebenenfalls zusammen mit anderen Zustandsgrößen den momentanen Zustand eines physikalischen Systems beschreibt, aber prinzipiell variabel ist [Wikipedia, 2013].

Sinngemäß auf die Bodenphysik bezogen sind dies physikalische Größen, deren Wert vom betrachteten Zeitpunkt und meist auch vom Ort abgehängt. Ein Beispiel für eine Bodenzustandsgröße ist z.B. die Temperatur, der Bodenwasseranteil, etc.

**Infiltration:** Als Infiltration bezeichnet man das Eindringen von Wasser in den Boden. Die Infiltration wird bei Beginn der Bodenbenetzung durch die Adhäsion und die Kapillarkräfte bestimmt, während nach Wassersättigung der Druckgradient (Darcy-Gesetz) maßgebend ist. Bei hydrophoben Flächen oder Streuschichten (wasserabstoßenden Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche, z.B. trockenen Tannennadeln) kann die Infiltration auch vorübergehend sehr stark behindert sein.

**Infiltrationskapazität:** Wasservolumendifferenz zwischen dem aktuellen Wassergehalt im Boden und dem Wassergehalt bei Wassersättigung; entspricht der Niederschlagsmenge, die pro Flächeneinheit in den Boden infiltrieren (Infiltration) kann, bis Oberflächenabfluss einsetzt [GeoDZ, 2013].

**pF-Wert:** Der pF-Wert ( $p$  von *Potenz*,  $F$  von *Freier Energie des Wassers*) ist der dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der Bodenwasserspannungshöhe für die Einheit cm. Er kennzeichnet das Matrixpotential  $\psi_m$  – die Energie, mit der das Wasser im Boden aufgrund der Matrixkräfte gehalten wird (ohne Schwerkraft) [nach Wikipedia, 2013].

## *Vorwort*

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation von Infiltrationsvorgängen mittels unterschiedlicher Methodik und deren Auswertung. Vor allem wird der Ringinfiltrometerversuch genauer betrachtet, da dieser vom Versuchsaufbau sehr einfach ist und mit geringen finanziellen Mitteln und wenig technischem Aufwand durchgeführt werden kann. Es werden 3 große Fragestellungen betrachtet.

- Bei der Versuchsdurchführung eines klassischen Doppelringinfiltrometerversuches werden 2 konzentrische Ringe verwendet, wobei der äußere Ring als Pufferring dient. Dieser Versuch wird in facheinschlägigen Normen (Ö-Norm L 1066 und Ö-Norm EN ISO 22282-5) beschrieben. Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung der Infiltrationsrate mittels Einzelringinfiltrometerversuchen, wobei sich die Ergebnisse grundsätzlich von den Doppelringinfiltrometerversuchen unterscheiden. In dieser Arbeit werden beide Versuchsdurchführungen betrachtet und die unterschiedlichen Ergebnisse interpretiert. Es werden auch die Einflüsse der Ringgeometrie genauer untersucht, deren Berücksichtigung in den vorher erwähnten Normen derzeit keinerlei Beachtung geschenkt wird.
- Weiters wird die Frage untersucht, ob die Betrachtung der Infiltration in den Boden als 2-Phasenfluss (Wasserphase und Gasphase) genauere bzw. plausiblere Werte liefert. Es besteht die Möglichkeit, dass der Gasdruck der Luft im Boden bei überstauten Bedingungen (Starkregen, Hochwasser) den atmosphärischen Luftdruck übersteigt und einen Einfluss auf die Infiltrationsrate hat. Dieser Effekt wird bei gebräuchlichen Auswertemethoden, z.B. Ö-Norm L 1066 „Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode)“ oder Ö-Norm EN ISO 22282-5 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 5: Infiltrometerversuche“ nicht beachtet.
- Es sollte geklärt werden, ob die zusätzliche Messung von einzelnen Bodenzustandsgrößen (Wassergehalt oder Wasserspannung) beim

Infiltrationsversuch zu einer verbesserten Auswertung mit vertretbarem Aufwand führt.

Wie sich in der Arbeit gezeigt hat, ist der Einfluss der Ringgeometrie für die Auswertung der Ringinfiltrationsversuche sehr wichtig. Weiters legt die Betrachtung als 2-Phasenfluss nahe, dass man die Luftbewegung bei der Untersuchung von Überflutungsgebieten mittels Ringinfiltrationsmeter nicht vernachlässigen darf. Die Messungen zusätzlicher Zustandsgrößen können zur Plausibilitätsprüfung und zur Interpretation der Ausbreitung der Feuchtigkeitsfront herangezogen werden.

## *Abstract*

This thesis deals with the simulation of infiltration processes under the use of different methodologies and evaluation of the results. Especially the ringinfiltrometer test is considered in detail, resulting from its simple experimental setup and minor financial effort in terms of implementation. The 3 major issues of this thesis are:

- In the experiment of a classic double-ring-infiltration-test two concentric rings are used. The outer ring acts as a buffer ring. This experiment is described in specific relevant standards (Ö-Norm L 1066 and Ö-Norm EN ISO 22282-5). One further possibility to determine the infiltration rate is to perform a single-ring-infiltration-test. However, the results from a single-infiltration-test differ from those of a double-ring-infiltration-test. In this thesis, both experimental procedures are considered and their different results are interpreted. Also analysed in detail are the influences of the ring geometry, which are currently not taken into account in the previously mentioned standards.
- Furthermore the question is examined if the analysis of infiltration into the soil provides more accurate and more plausible values if two-phase flow (water-phase and gaseous phase) is applied. It is possible that pressure in the gaseous phase exceeds atmospheric pressure at flooded conditions (heavy rain, floods) and influences the infiltration rate. This effect is ignored in common evaluation methods, such as Ö-Norm L 1066 "Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrimeter (Feldmethode)" or Ö-Norm EN ISO 22282-5 " Geotechnische Erkundung und Untersuchung –Geohydraulische Versuche – Teil 5: Infiltrimeterversuche".
- It should be clarified, if the additional measurement of single soil state variables (water content or water tension) provides a more precise evaluation.

As demonstrated in this work, the influence of the ring geometry for the evaluation of ringinfiltrometer tests is very important. Furthermore, the observation as two-phase flow shows, that the air movement should not be neglected in studies of inundation are-

as by using of ring infiltrometers. Measurements of additional state variables can be used to check the plausibility and the interpretation of the spread of the moisture front.

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

### **Einleitung**

Die Ringinfiltrometerversuche sind für die Messung der Infiltrationsrate und für die Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit ideale Messgeräte, da bei den Messungen in der Natur alle Aspekte, die die Infiltration beeinflussen, miterfasst werden. Dies sind Bewuchs (dieser wird möglicherweise zurückgeschnitten, bleibt aber vollständig erhalten), der Matrixpotentialfluss und der Makroporenfluss. Bei vielen anderen Messgeräten wird nur ein Teil der bestimmenden Aspekte gemessen (z.B. bei Hauben- und Diskinfiltrometer wird nur der Matrixfluss gemessen). Weiters ist zu erwähnen, dass die Ringinfiltrometerversuche mit einfachen Gerätschaften durchführbar sind und geringe finanzielle Mittel erfordern. Das Bedienpersonal benötigt auch keine komplizierte Einschulung.

Die Bestimmung der Infiltrationsrate ist für viele Anwendungsgebiete der (landeskulturellen) Wasserwirtschaft wichtig. Die Infiltrationsrate beschreibt das Eindringen von Wasser in den Boden, konkret, welches Wasservolumen ein Boden je Zeit und Fläche aufnimmt.

Es ist jedoch die aktuelle und die endgültige Infiltrationsrate zu unterscheiden. Die aktuelle Infiltrationsrate ist zeitlich und von den Bodenparametern abhängig und kann bei Beginn der Infiltration das 200fache der endgültigen Infiltrationsrate annehmen. Die endgültige Infiltrationsrate wird bei wassergesättigten Bedingungen des Bodens bestimmt und ist von den Bodenzustandsgrößen abhängig.

Ein wichtiger Anwendungsfall ist die Dimensionierung von Versickerungsbecken jeglicher Art. Diese Becken werden z. B. bei Autobahntwässerungen benötigt, da die derzeitige Rechtslage vorsieht, dass das anfallende Niederschlagwasser an Ort und Stelle wieder dem Wasserkreislauf zu geführt werden muss.

Auch für die Klassifikation und Dimensionierung von Hochwasserschutzflächen ist die Bestimmung der Infiltrationsrate eine notwendige Größe.

Weiters ist die Infiltrationsrate für die Interpretation bzw. Beschreibung von Niederschlag-Abfluss-Beziehungen von Bedeutung. Vereinfacht betrachtet: übersteigt die Niederschlagsrate die maximale Infiltrationsrate, so kommt es zum Oberflächenabfluss (Runoff).

Die Bestimmung der Infiltrationsrate ist für weitere Gegebenheiten bzw. Anwendungsgebiete notwendig: z. B. Entwässerung von befestigten Flächen (versiegelte Oberflächen

wie z. B. Dachflächen, Parkplätze) durch Versickerung in Mulden oder auch für die Bewässerung.

Die maximale Versickerungsrate ist speziell bei Einstauverfahren bei Feldern für die Bewässerung wichtig, da dadurch bestimmt werden kann, wie lange das Feld bewässert werden muss, um eine ausreichende Bewässerung sicherzustellen (in Europa untergeordnete Bedeutung).

## Zielsetzung

In dieser Dissertation sollen Feldverfahren zur Bestimmung des feldgesättigten Durchlässigkeitsbeiwerts, insbesondere in Hinblick auf das Infiltrationsverhalten des Bodens untersucht werden (feldgesättigt = d.h. es ist nur mehr Bodenrestluft vorhanden, die vernachlässigbar ist und somit ist die Betrachtung als 3-Phasen-System irrelevant). Es werden die Simulation und die Auswertung der Ringinfiltrationsexperimente genau betrachtet. Die Untersuchungen werden größtenteils numerisch mittels Computersimulationen (Hydrus 2D/3D und Stomp) durchgeführt. Labor- und Feldversuche dienen der Verifizierung der Simulationen und sind dementsprechend in geringerem Umfang geplant.

### **Folgende Hauptziele werden festgelegt:**

#### Simulation der Ringinfiltrationsversuche:

Es wird eine numerische Beschreibung der Ringinfiltrationsversuche (Doppelring und Einfachring) mittels Simulation mit der Unterstützung von Spezialsoftware durchgeführt. Die Ergebnisse werden dann ausgewertet und Unterschiede aufgezeigt.

Die Berechnung der Infiltrationsrate bzw. der gesättigten Leitfähigkeit eines Bodens mit Hilfe von Ringinfiltrationsversuchen (Doppelring- bzw. Einfachringinfiltrationsversuche) wurde bereits von vielen Wissenschaftlern untersucht. Die gängigsten Auswertemethoden werden in dieser Arbeit genauer erläutert. Die Literatur bezieht diesbezüglich viele geometrische und physikalische Größen (z.B. Ringdurchmesser, Eindringtiefe, Überstauhöhe, makroskopischer Kapillarlängenparameter, Abstand des Sohlplanums zur unteren Schicht, etc.) zur Auswertung der Ringinfiltrationsversuche mit ein. Die Problematik daran ist, dass viele dieser notwendigen Größen nur geschätzt bzw. nicht genau ermittelt werden können.

Nun ist klären, ob diese wirklich notwendig sind, bzw. einen so großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Eventuell ist eine Vereinfachung bei gleicher Genauigkeit möglich und es werden weniger Einflussgrößen benötigt.

### Betrachtung als 3-Phasensystem (Boden – Luft – Wasser):

Bei extremen Niederschlagsereignissen kann die Niederschlagsrate die Infiltrationsrate übersteigen. Bevor es jedoch zum Oberflächenabfluss kommt, wird das Wasser durch das Mikro- und Makrorelief der Bodenoberfläche zurückgehalten. Ebenso simuliert der Doppelringinfiltrometerversuch einen vollflächigen Überstau der untersuchten Fläche des Bodens, der ein Entweichen der Bodenluft nach oben erschwert. Allerdings ist die Querschnittsfläche der Infiltrometerringe üblicherweise relativ klein, sodass die unter der vordringenden Infiltrationsfront befindliche Bodenluft seitlich des äußeren Ringes entweichen kann und sich somit kein nennenswerter Gasdruck aufbauen kann. Im Gegensatz dazu ist ein Starkregenereignis horizontal viel stärker ausgedehnt, sodass die Bodenluft im Niederschlagsgebiet nicht mehr seitlich entweichen kann und der Gasdruck ansteigt, bis er groß genug ist, um die Wassermenisken in den größeren Poren des Bodens zu verdrängen. Auf diese Weise kann die Bodenluft nach oben entweichen. Es stellt sich die Frage, unter welchen klimatischen Bedingungen und Bodenverhältnissen und für welche Szenarien dieses Phänomen für die Infiltrationsrate relevant ist.

Dieses Phänomen ist zwar schon bekannt, jedoch in den gängigen Ö-Normen L 1066 „Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode)“ und Ö-Norm EN ISO 22282-5 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 5: Infiltrometerversuche“ nicht berücksichtigt.

Der vorher angeführte Anwendungsfall betrifft nur ungesättigte Bodenverhältnisse und es wird beobachtet, um wie viel sich  $k_{fs}$  verringert. Die Betrachtung ist für gesättigte Bodenverhältnisse irrelevant, da sich bei diesem Zustand keinerlei Bodenluft mehr im Boden vorhanden ist.

Es ist zu untersuchen, ob die Berechnung als 2-Phasensystem Luft-Wasser signifikant genauere Ergebnisse zur Folge hat. Zur genaueren Untersuchung werden numerische Untersuchungen (Computersimulationen) durchgeführt.

### Kombination der Infiltrometerversuche mit der Messung weiterer Bodenzustandsgrößen:

Wenn die Infiltrationsmessungen mit der Messung anderer Bodenzustandsgrößen kombiniert werden, können die hydraulischen Eigenschaften aus dem Versuch besser interpretiert und eventuell neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Dadurch sollte es möglich sein, die hydraulischen Eigenschaften mit einer solchen Genauigkeit zu be-

schreiben, die erforderlich ist, um signifikante Aussagen etwa des Einflusses der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung auf das Infiltrationsverhalten geben zu können. Denkbar ist die Kombination mit Wasserspannungsmessungen oder Wassergehaltsmessungen. Allerdings steigt auch der messtechnische Aufwand und die Anforderungen bei der Versuchsauswertung erhöhen sich. Es stellt sich daher die Frage, ob diese Kombination einen praktischen Mehrgewinn darstellt und sich die Versuche genauer auswerten lassen.

Eventuell kann durch die kombinierte Messung auch die Grundlage zur genaueren Untersuchung der Veränderung des Infiltrationsverhaltens des Bodens durch z.B. die landwirtschaftliche Bodenbearbeitung oder generell beim Monitoring der Bodenwasserbewegung geschaffen werden.

### **Des Weiteren werden folgende Nebenziele festgelegt:**

#### Unterschied Doppelring/Einfachring:

Das Doppelringinfiltrometerexperiment kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Die „klassische“ Methode ist eine instationäre Versuchsdurchführung, die aus zwei Versuchsreihen besteht. Für dieses Verfahren sind zwei Ringe notwendig, die zumeist konzentrisch angeordnet werden. Durch diese Anordnung fungiert der äußere Ring als „Puffering“. Dieser soll bewirken, dass das aus dem inneren Ring infiltrierte Wasser im Boden hauptsächlich vertikal und damit in besserer Übereinstimmung zur Hauptbewegungsrichtung des Bodenwassers in der ungesättigten Zone abströmt (die horizontale Abströmung soll weitestgehend verhindert werden).

Bei der stationären Versuchsdurchführung wird bei der Standardauswertung nur eine Versuchsreihe durchgeführt und nur ein Ring betrachtet (Innenring). Diese Vorgehensweise ist Standard bei den folgenden Ö-Normen: Ö-Norm L 1066 „Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode)“ und Ö-Norm EN ISO 22282-5 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 5: Infiltrometerversuche“.

Wie schon erwähnt, fungiert der äußere Ring des Doppelringinfiltrometers als „Puffering“, der sicherstellen soll, dass das Wasser des Innenringes nahezu vertikal im Boden

abströmt. Es ist zu klären, wie sich das Weglassen oder Hinzufügen des Pufferringes – insbesondere bei anisotropen Böden auf die Messergebnisse auswirkt bzw. wie die Messergebnisse zu interpretieren sind. Möglicherweise kann bei manchen auf den Pufferring verzichtet werden ohne schlechtere Ergebnisse in Kauf nehmen zu müssen und es könnten möglicherweise bessere Aussagen über das „Verhalten“ eines Bodens getroffen werden.

#### Forschungsfragen:

Auf Basis der vorher angeführten Ziele ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie wirkt sich die Berücksichtigung der Bodenluftkompression auf das Ergebnis der Infiltrationsversuche aus und bei welchen Anwendungen soll diese berücksichtigt werden?
- Warum ist in diversen aktuellen Normen, die sich mit Ringinfiltration beschäftigen, der Doppelringversuch Stand der Technik bzw. lässt sich das gleiche Ergebnis auch mit einem Einfachringinfiltrationsversuch erzielen?
- Warum ist in div. Normen die Betrachtung als 2-Phasen-Fluss nicht enthalten?
- Warum werden bei vielen gängigen Auswertemethoden viele Faktoren zur Berechnung herangezogen, die nur geschätzt werden können, ist dies sinnvoll, bzw. gibt es bessere Lösungsansätze?

#### Gliederung dieser Dissertation:

Die Grundlagen zu diesen Fragestellungen werden in Kapitel 2 erläutert. In Kapitel 3 wird die Methodik beschrieben. Im Anschluss daran folgen die Auswertung (Kapitel 4) und ein Ausblick (Kapitel 5) auf weitere Forschungsfragen. Im Anschluss daran befinden sich das Literaturverzeichnis und der Anhang.

## 2. Grundlagen / Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird zu den jeweiligen Fragestellungen, die in der Einleitung angeführt wurden, der aktuelle Stand der Wissenschaft angeführt.

### 2.1. Allgemeines

#### 2.1.1. Infiltrationsprozess

Die Infiltration von Wasser in den Boden setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die hauptsächlichsten Vorgänge der Versickerung dargestellt. Einen geringeren Einfluss auf die Infiltration haben Quellen und Schrumpfen des Bodens. Hauptsächlich wird die Infiltrationsrate bzw. die Infiltration von folgenden Bodenzustandsgrößen bzw. Bodenparametern und Randbedingungen beeinflusst.

Bodenzustandsgrößen: Bodentextur, Bodenstruktur, Porengrößenverteilung, Gesamtporenvolumen, Mächtigkeit der Humusaufgabe, Bodenschichtung, Verdichtungsintensität, Wasserspannungskurve, Hangneigung, Verschlammung, Bewuchs

Bodenparameter: Anfangswassergehalt, Niederschlagsintensität, Abfolge der Niederschläge.

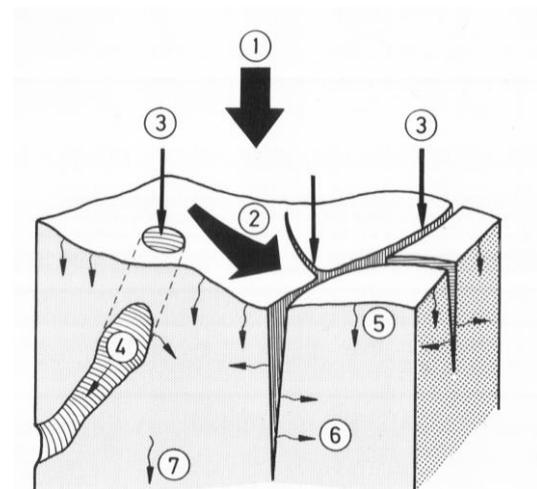


Abb. 1: wichtigste hydrologische Prozesse bei der Infiltration [Baumgartner und Liebscher 1996]

Erklärung der Abbildung:

1 – Niederschlag, 2 – Oberflächenabfluss, 3 und 4 – Versickerung in Makroporen, 5 – Versickerung in Mikroporen, 6 – Versickerung in Mikroporen aus den Makroporen

Der Einfluss der Makroporen nimmt mit steigender Niederschlagsintensität zu.

Der Infiltrationsprozess lässt sich in 2 Komponenten aufteilen. Diese sind der Matrix- und der Makroporenfluss. Die wichtigsten wirkenden Kräfte sind Kapillarkräfte, die am Anfang des Infiltrationsprozesses dominieren und die Gravitation.

Bei einem typischen Infiltrationsversuch in einem nahezu homogenen Boden nähert sich die anfangs sehr hohe Infiltrationsrate im Lauf der Zeit einem stationären Wert an (Abbildung 2). Dieser Übergang verläuft asymptotisch. Die zu Versuchsbeginn gemessene Infiltrationsrate kann je nach Art des Bodens und der vorhandenen Vorsättigung doppelt (feuchter Sand) bis 100-mal (Ton, sehr trocken) so groß sein wie die Endinfiltrationsrate.

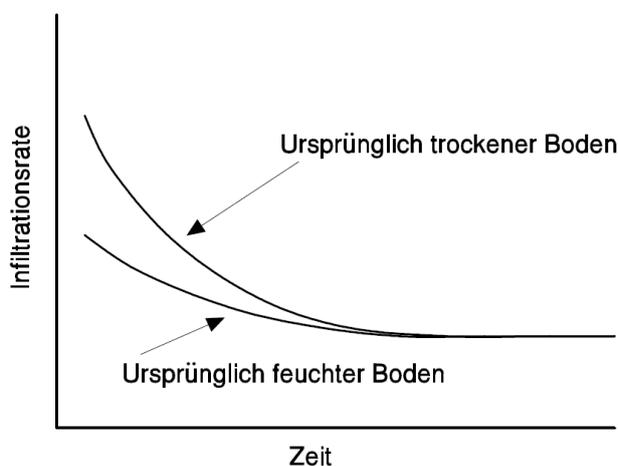


Abb. 2: schematischer Verlauf der Infiltrationsrate bei trockenem und feuchtem Boden [Durner, 2005]

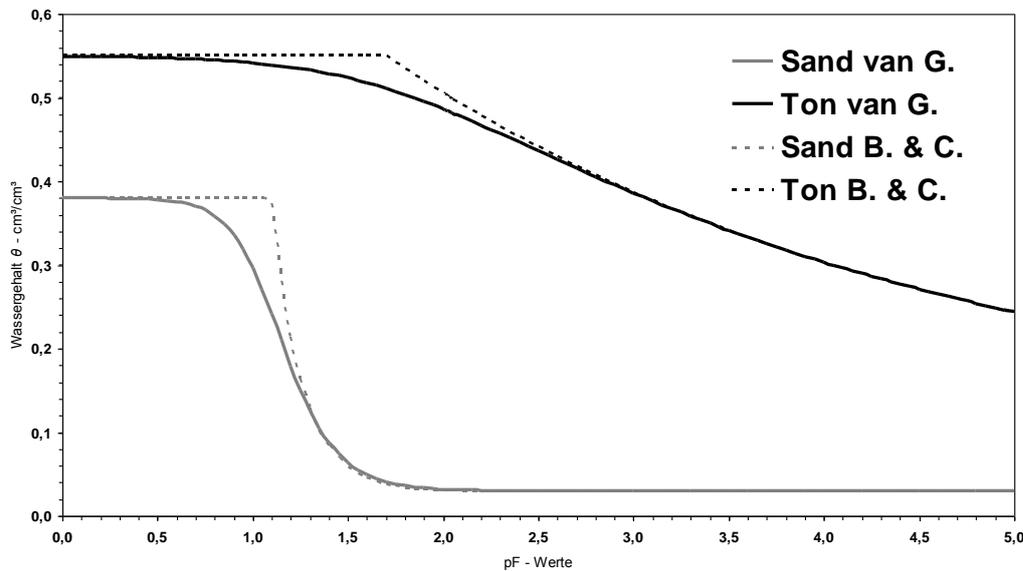
### 2.1.2. Verlauf der Wasserspannungskurven

Eines der größten Probleme ist, dass die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Untersuchungsgebiet meistens variiert. Die Messung dieser dauert sehr lange und ist mit großem materiellem und finanziellem Aufwand verbunden.

Aus diesem Grund wurden schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mathematische Modelle zur Berechnung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit entwickelt, die sehr schwierig anzuwenden waren.

Die ersten Wasserspannungskurven wurden für Sande und Kiese entwickelt. Diese wiesen einen Punkt auf, wo der Boden bei Desorption beginnt zu entwässern (Lufttrittspunkt). Aus diesem Grund wurden diese Kurven C-förmige Entwässerungskurven genannt. Diese Modelle (z.B. Brooks und Corey [1964]) bestanden aus kurzen Gleichungen.

Da die C-förmigen Entwässerungskurven für Böden mit höherem Feinkornanteil nicht bzw. nur bedingt entsprechen, wurden die S-förmigen Kurven entwickelt.



**Abb. 3: Retentionskurven diverser Böden nach unterschiedlichen Modellansätzen**

Viele Forscher beschäftigten sich mit den S-förmigen Wasserspannung-Wassergehaltskurven. Beispiele dafür sind Kosugi, van Genuchten [1980], Vogel und Cislérova [1988] und Durner [2005].

Van Genuchten hat die S-Form in seinem Modell berücksichtigt und dann mit der Gleichung von Mualem kombiniert (van Genuchten [1980]). So hat er einen verbesserten Ansatz zur Berechnung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotential geschaffen.

Zur Simulation der Infiltrationsversuche wurde dieses Modell gewählt. Die dazu notwendigen van-Genuchten-Formparameter können über Pedotransfer-Funktionen im Subprogramm Rosetta von Hydrus abgeschätzt werden.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

**Gl. 1: van-Genuchten-Gleichung [1980]**

$$\theta = \theta_s \text{ für } h \geq h_s$$

Aus numerischen Gründen wird oft angewendet:

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$\theta$	$L^3 L^{-3}$	%	volumetrischer Wassergehalt
$\theta_r$	$L^3 L^{-3}$	%	volumetrischer Restwassergehalt
$\theta_s$	$L^3 L^{-3}$	%	volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung
$\alpha$	$L^{-1}$	$\text{cm}^{-1}$	Koeffizient der Bodenwasser-Retentionsfunktion
$n$	1	1	Formparameter für Kurvenkrümmung
$m$	1	1	Formparameter
$h$	L	cm	Druckhöhe
$h_s$	L	cm	Luft Eintrittshöhe (air-entry value) in der Bodenwasser-Retentionsfunktion von Brooks and Corey

### 2.1.3. Historische Entwicklung der Auswertung aus Ringinfiltrometern

Bouwer beschäftigte sich ab 1960 mit Hilfe einer analogen Schaltung von elektrischen Widerständen und einer stückweise linearen Leitfähigkeitsfunktion mit der Thematik Infiltrationsrate. Er fand 1963 heraus, dass die Unterschiede der Wasserspiegelmessungen zwischen Innenring und Außenring „fehlerhafte“ Messungen der Infiltrationsrate im Innenring verursachen. Tricker beschäftigte sich 1978 mit den Einfachringinfiltrometern, die sehr oft zur Anwendung kommen. Bei den meisten Infiltrationsmessungen in der vadosen (ungesättigten) Bodenzone wurde die Infiltrationsrate eindimensional betrachtet (=definiert durch jene Wassermenge, die ohne Oberflächenabfluss aufgebracht werden kann).

Die vertikale Infiltration wurde dann erstmals in der Philip-Gleichung [Philip, 1969] durch 2 Parameter, der Sorptivität  $S$  und  $a$ , der minimalen Infiltration, beschrieben. Infiltration aus einem Ringinfiltrometer ist jedoch ein 2Dv-rotationssymmetrisches Problem [Philip, 1966], [Reynolds und Elrick, 1990].

Tricker [1978] unterteilte die „gesamte“ Infiltrationskapazität bei einem Ringinfiltrometerversuch in zwei Komponenten: „wahre“ (vertikale) Infiltrationskapazität und „übertriebene“ Infiltrationskapazität, die durch laterale (seitliche) Strömung verursacht wird.

Mit der hydraulischen Funktion von Gardner [1958] und der Verwendung von Formfaktoren und unterschiedlichen Eindringtiefen entwickelten Reynolds und Elrick 1990 eine Lösung für die stationäre Infiltrationsrate aus einem Einfachringinfiltrometer. Wu und Pan entwickelten 1997 eine allgemeine Infiltrationskurve, indem sie das Retentionsmodell von

van Genuchten [1980] in die Beziehungsfunktion von Reynolds und Elrick [1990] eingliederten.

2002 entwickelten Reynolds, Elrick und Youngs die Auswertung des Doppelringinfiltrations-Stationärversuches.

## 2.2. *Infiltrationsmessung – Unterschiede zwischen dem Einfach- und dem Doppelringverfahren*

In diesem Kapitel werden die klassischen Versuchsanordnungen und Auswertungen beschrieben. Je nach Versuchsdurchführung werden die Messergebnisse vom Matrix- und/oder Makroporenfluss beeinflusst. Die erfassten bzw. gemessenen Infiltrationsraten von Doppel- und Einfachringinfiltrrometer entstehen aus Matrix- und Makroporenfluss, bei Hauben- und Diskinfiltrrometer entstehen die Infiltrationsraten aus dem Matrixfluss allein.

Beim Einbau der Ringinfiltrrometer wird der vorhandene Boden innerhalb der Ringe nicht gestört und der vorhandene Bewuchs bleibt ungestört erhalten. Somit werden die Messungen durch die vorhandene Vegetation beeinflusst und diese beeinflusst somit die Ergebnisse.

### 2.2.1. *Doppelringinfiltrrometer*

Beim Doppelringinfiltrrometerversuch werden 2 konzentrische Ringe in den Boden gedrückt. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass sich keine Kurzschlussströmung entlang der inneren und äußeren Ringwand bilden kann. Danach werden die beiden Ringe (Innenring und Außenring) mit Wasser befüllt, sodass sich ein Überstau von ca. 5 bis 8 cm Wasserspiegelhöhe einstellt. Dieses Maß wird bei der ersten Versuchsreihe im Außenring konstant gehalten. Während des Versuches wird der Wasserspiegel im Innenring in konstanten Zeiteinheiten gemessen. Der Außenring dient zur Verringerung der lateralen Strömung.

### 2.2.2. *Einfachringinfiltrrometer*

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Infiltrationsrate und der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist der Einfachringinfiltrrometerversuch. Beim Einfachringversuch entstehen Randeffekte bei der Ausbreitung (lateraler Fluss). Für die Versuchsdurchführung wird im Gegensatz zum Doppelringinfiltrrometerversuch viel weniger Wasser benötigt. Somit kann dieser Versuch auch bei geringer Wasserverfügbarkeit durchgeführt werden.

### 2.2.3. *Weitere Infiltrationsmessgeräte*

Um einen guten Überblick zu geben, werden an dieser Stelle auch weitere Messgeräte angeführt. Diese werden kurz erklärt, jedoch dann in dieser Dissertation nicht weiter behandelt.

## 2.2.3.1. Haubeninfiltrrometer

Das Haubeninfiltrrometer (Abbildung 4) besteht aus einer auf dem Versuchsboden aufgesetzten Haube, die mit Wasser gefüllt ist. Mittels dieser Haube wird Wasser in den Boden infiltriert. Die durch die Haube eingeschlossene Fläche ist die Beobachtungsfläche für die Infiltrationsmessung. Durch eine Mariotte'sche Flasche wird die eingestellte hydraulische Druckhöhe konstant gehalten. Durch die während des Versuches ermittelten Fließraten wird die Infiltrationsrate berechnet.

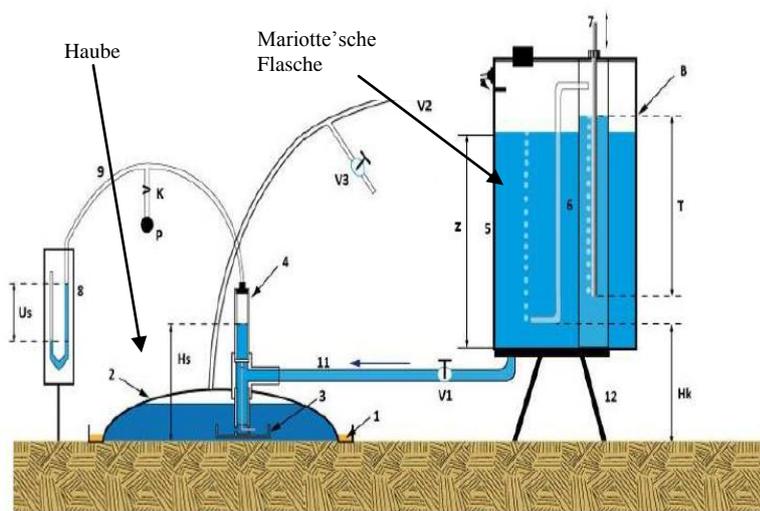


Abb. 4: Haubeninfiltrrometer [UGT, 2010]

## 2.2.3.2. Diskinfiltrrometer

Das Diskinfiltrrometer besteht aus einem Zylinder aus Glas oder Plexiglas mit einer keramischen Grundplatte, der an der Oberseite mit einem Gummistoppel verschlossen werden kann. Das Matrixpotential ist mit einer Wasserspannung von entweder 0,5 cm, 1,0 cm oder 2,0 cm durch ein horizontales, kapillares Lufteintrittsrohr fixiert, das in den Zylinder hineinreicht. Aus dem Röhrchenende kann nur dann Luft in den Vorratszylinder einperlen, wenn der Unterdruck in dieser Höhe des Zylinders die Oberflächenspannung im Luftbläschen am Rohrende überwindet bzw. die Kapillardruckhöhe der relativen Druckhöhe entspricht.

In der nachfolgenden Abbildung 5 ist ein Diskinfiltrrometer abgebildet.

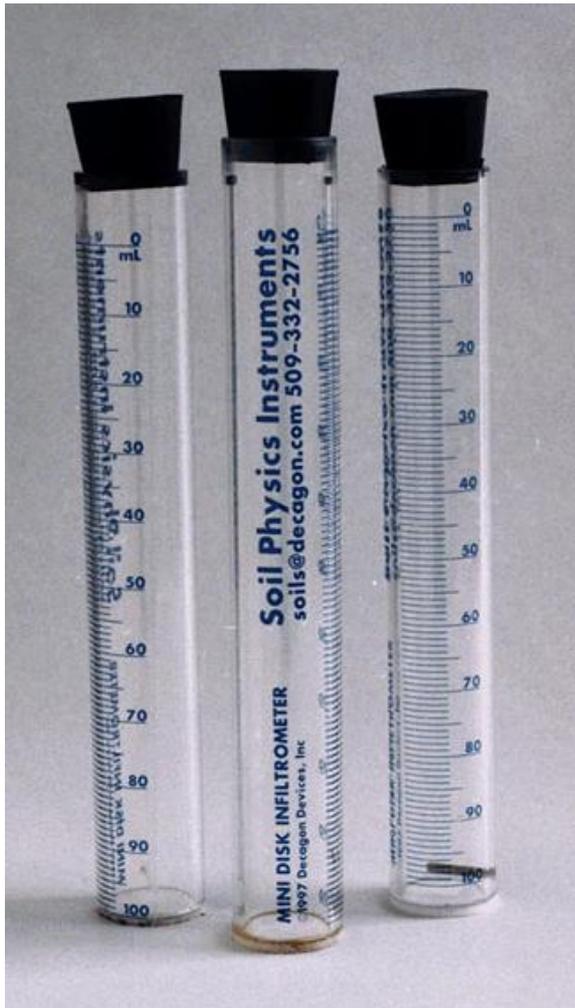


Abb. 5: Darstellung Diskinfiltrrometer [User manual decagon devices, 2006]

#### 2.2.3.3. Regensimulationsversuche

Erkenntnisse über das Infiltrationsverhalten des Bodens können auch durch Regensimulationsversuche gewonnen werden. Bei der Versuchsdurchführung wird eine bestimmte Fläche unter kontrollierten Bedingungen beregnet. Allerdings wird bei den künstlichen Beregnungen nur der Oberflächenabfluss erfasst, der sich wegen der Oberflächen-speicherung deutlich von der Differenz zwischen der Niederschlagsrate und der Infiltrationsrate unterscheiden kann. Es werden für die Versuchsdurchführung ein großes Fahrzeug und weiters mindestens 3 Personen zum Aufbau benötigt. Da das Ziel dieser Doktorarbeit ist, mittels einfach und kostengünstig durchzuführenden Messmethoden Aussagen über das Infiltrationsverhalten des Bodens zu treffen, werden Regensimulationsversuche in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

#### 2.2.3.4. Tensionsinfiltrrometer

Mit dem Tensioninfiltrrometer kann man durch Messung der zeitabhängigen Infiltrationsrate mit verschiedenen aufgebrachtten Unterdrücken die hydraulischen Eigenschaften des un-

gesättigten Bodens bestimmen. Es wird Wasser, das unter einem Unterdruck gehalten wird, über eine hochdurchlässige Membran in den Boden infiltriert. Durch Ermittlung der Versickerungsraten bei den einzeln eingestellten Wasserspannungen kann man die ungesättigte Leitfähigkeit des Bodens ermitteln.

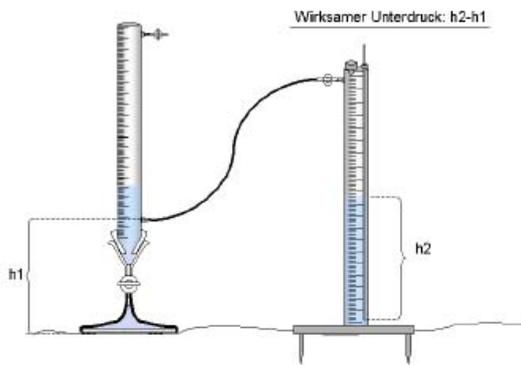


Abb. 6: Tensionsinfiltrometer

#### 2.2.3.5. Guelph-Permeameter

Zitat aus Skript Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis [G. Kammerer, 2014]:

„Das Guelph-Permeameter ist eine Apparatur, die zur Bestimmung der feldgesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bzw. des  $k_{fs}$ -Wertes, aber auch des Matrixflusspotenzials dient. Zu diesem Zweck wird im ungestörten Boden sorgfältig ein nicht allzu tiefes Bohrloch errichtet, die Apparatur aufgestellt, die Wasserzufuhr geöffnet und der Wasserspiegel konstant gehalten. Gemessen wird vom Beginn der Wasserzufuhr an das je Zeitintervall infiltrierende Wasservolumen. Für eine genauere Auswertung sind ähnlich wie beim Doppelring-Infiltrometer zwei Messreihen erforderlich. Die Messung dauert für gewöhnlich nicht länger als eine Stunde.“

Apparatur

Das Guelph-Permeameter besteht aus folgenden Teilen:

- Wasserreservoir-Einheit mit Reservoirhalterung
- Reservoirkopf und mittlerem Luftrohr
- Versorgungsrohr mit unterem Luftrohr
- oberes Luftrohr mit Wassertiefenanzeiger und Skalenrohr
- Dreibeinkopf mit Halterungsmanschette
- drei Fußrohre des Dreibeins
- Bohrgestänge
- Flügelbohrer
- Sohlbohrer
- Bohrlochbürste
- Kanister
- Handvakuumpumpe“.

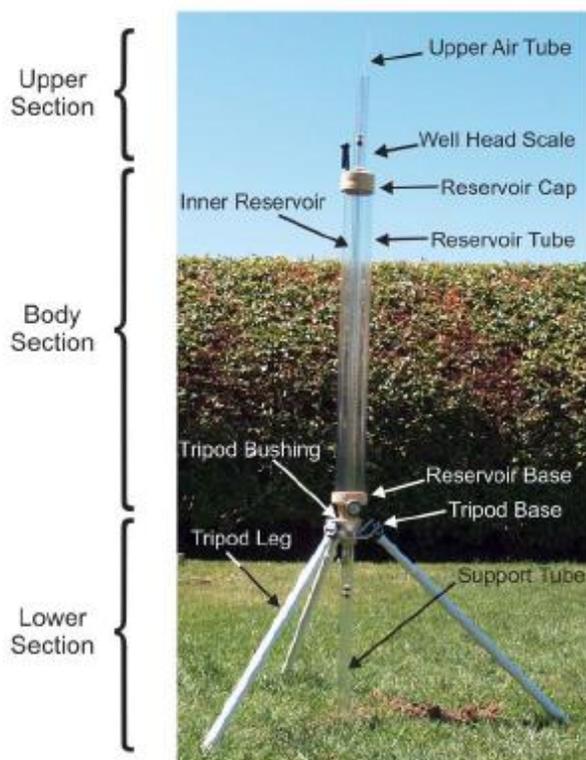


Abb. 7: Hauptkomponenten Guelph-Permeameter [Soilmoisture, 2012]

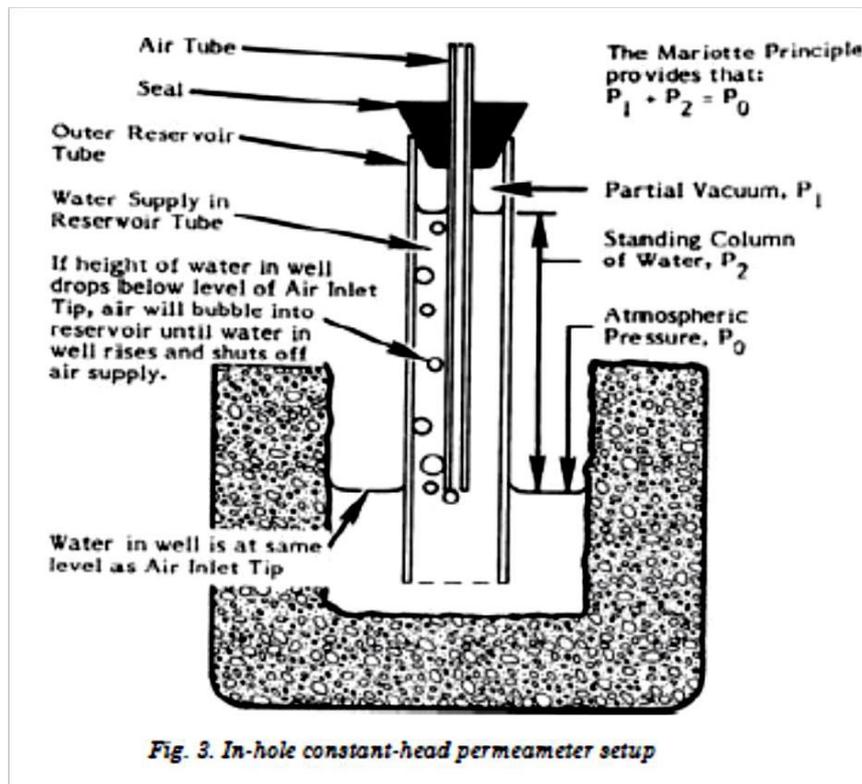


Abb. 8: Guelph-Permeameter Einstellung mit konstanter Druckhöhe [Soilmoisture, 2012]

#### 2.2.4. Auswertung der Ringinfiltrometerversuche

Bei der Auswertung der Ringinfiltrometerversuche ist zwischen der instationären und der stationären Durchführung zu unterscheiden.

##### 2.2.4.1. Instationäre Versuchsdurchführung

Die instationäre Versuchsdurchführung ist das klassische Verfahren für die Ringinfiltrometerversuche. Bei dieser Versuchsart werden 2 Messdurchgänge durchgeführt. Die Messgröße ist die zeitliche Absenkung des Wasserspiegels im Innenzylinder. Während des ersten Messdurchganges wird der Wasserspiegel im äußeren Zylinder auf dem Ausgangsniveau gehalten, während der Wasserspiegel im Innenzylinder abfällt. Anschließend wird der Innenwasserspiegel auf das Ursprungsniveau gebracht und stationäre Verhältnisse abgewartet. Beim 2. Durchgang lässt man die Wasserspiegel in beiden Zylindern absinkend, wobei darauf geachtet wird, dass mit Hilfe von Wasserzugabe der Außenwasserspiegel jeweils auf der Höhe des Innenwasserspiegels gehalten wird.

Versuchsdurchführung:

Als erster Schritt wird der Boden aufgesättigt. Nach der Aufsättigung kann mit der ersten Messreihe begonnen werden. Es wird die Absenkkurve erfasst bis der Wasserspiegel im Innenring nahe der Geländeoberkante abgesunken ist, während der Außenwasserspiegel konstant gehalten wird. Beim Absinken des Innenwasserspiegels wird jeweils die Zeit gemessen, bei der sich der Wasserspiegel um 0,5 cm absenkt. Anschließend wird der Wasserspiegel in beiden Zylindern auf die ursprüngliche Höhe erhöht und die 10fache Dauer des Absenkens der ersten Versuchsreihe abgewartet. Nochmalig wird die Zeit des Absenkens des Innenwasserspiegels gemessen. Es werden beide Messreihen wiederholt. Stimmen diese beiden nicht überein, so muss eine dritte Versuchsreihe durchgeführt werden.

Auswertung:

Es werden beide Messreihen in ein Diagramm eingetragen: Daraus ergibt sich folgender schematischer Verlauf, der in der nächsten Abbildung dargestellt ist. Auf der Ordinate ist das Absinken des Innenwasserspiegels und auf der Abszisse die Zeit aufgetragen.

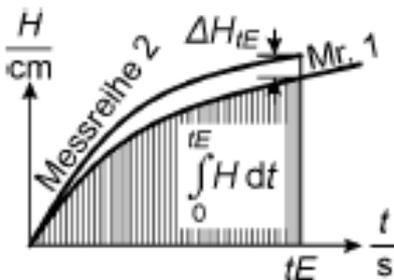


Abb. 9: Darstellung Graph Zeit  $t$  – Absenkung  $H$  für beide Messreihen [Amoozegar und Warrick, 1986]

Die feldgesättigte Leitfähigkeit kann aus folgender Gleichung errechnet werden:

$$k_{fs} = \frac{R_c}{F} \cdot \frac{\Delta H_{tE}}{\int_0^{tE} H dt}$$

Gl. 2: Berechnung  $k_{fs}$  – instationär

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$k_{fs}$	$L T^{-1}$	$cm \cdot min^{-1}$	k-Wert unter feldgesättigten Bedingungen
$R_c$	L	cm	Innenradius Innenzylinder
$F$	1	1	Geometriebeiwert; $F=f(D,R_c,d)$ ; ist aus den nachfolgenden Nomogrammen zu entnehmen, falls unterhalb der zu ermittelnden Schicht ein undurchlässige Schicht ansteht, so ist Nomogramm A zu verwenden, bei durchlässigen Schichten Nomogramm B
$D$	L	cm	Abstand vom Sohlplanum bis zur unteren Grenze der zu untersuchenden Schicht
$d$	L	cm	Gemessene Eindringtiefe des inneren Zylinders in den unzerstörten Boden
$\Delta H_{tE}$	L	cm	Differenz der Absenkung H der beiden Messreihen nach der Absenkdauer $t_E$
$t_E$	T	s	Absenkdauer des Innenwasserspiegels bis zum Erreichen der Endhöhe
$H(t)$	L	cm	Absenkung vom Ausgangsniveau nach einer Dauer von t Sekunden
$\int H dt$	L T	$cm \cdot min$	Fläche unter der Kurve H (t) von $t = 0$ bis $t = t_E$ der ersten Messreihe mit sinkendem Wasserspiegel im Innenrohr und konstant gehaltenem Wasserspiegel im Außenrohr

Die Verhältnisse von  $d/R_c$  und  $D/R_c$  werden ermittelt und mit diesen wird aus den Nomogrammen der Geometriebeiwert  $F$  bestimmt.

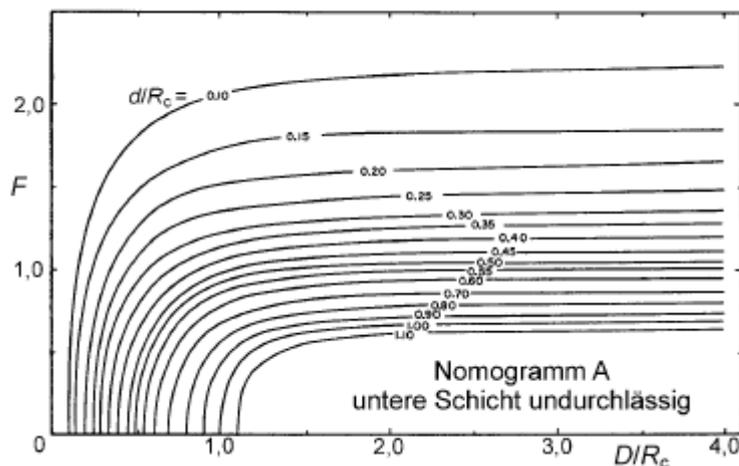


Abb. 10: Nomogramm A für die Bestimmung des  $F$ -Faktors (untere Schicht undurchlässig) [Boersma, 1965]

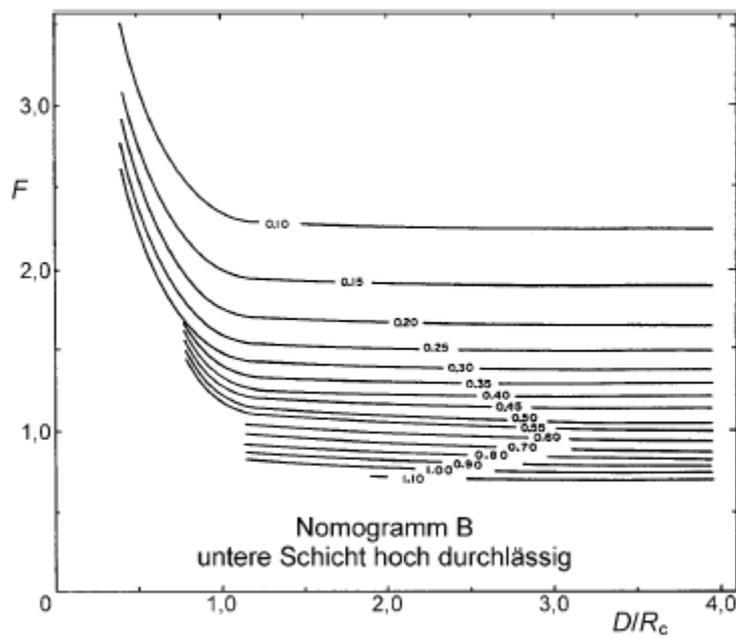


Abb. 11: Nomogramm B für die Bestimmung des  $F$ -Faktors (untere Schicht hoch durchlässig) [Boersma, 1965]

Anmerkung: Der hier angeführte Geometriebeiwert  $F$  steht in **keinem** Zusammenhang mit dem Korrekturbeiwert  $f$  in Kapitel 4.1 und den nachfolgenden Kapiteln!

## 2.2.4.2. Stationäre Versuchsdurchführung

Die neuere Variante geht von stationären Verhältnissen aus. Dies wird dadurch erreicht, dass der Innen- und Außenwasserspiegel auf einem konstanten Niveau gehalten wird und somit die Infiltrationsrate nahezu konstant wird. Die Infiltrationsrate wird aufgezeichnet [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002b].

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe folgender Formel:

$$k_{fs} = \frac{q_s}{\frac{H}{(C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + \frac{1}{\alpha^* \cdot (C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + 1}$$

Gl. 3: Berechnung  $k_{fs}$  – stationär

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$k_{fs}$	$L T^{-1}$	$cm \cdot min^{-1}$	k-Wert unter feldgesättigten Bedingungen
$q_{fs}$	$L T^{-1}$	$cm \cdot min^{-1}$	gemessene Infiltrationsrate unter Überstaubedingungen
$H$	L	cm	Überstauhöhe; Höhe des stationären Wasserspiegels sowohl im Innen- als auch im Außenzylinder über der Bodensohle
$C_1$	1	1	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für $d \geq 3$ cm und $H \geq 5$ cm beträgt $C_1 = 0,316 \cdot \pi$
$C_2$	1	1	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für $d \geq 3$ cm und $H \geq 5$ cm beträgt $C_2 = 0,184 \cdot \pi$
$d$	L	cm	Eindringtiefe des Innenzylinders in den Boden (der Außenzylinder sollte ein wenig tiefer eingedrückt sein)
$a$	L	cm	Innenradius des Innenzylinders
$\alpha^*$	$L^{-1}$	$cm^{-1}$	makroskopischer Kapillarlängenparameter. $\alpha^*$ drückt die relative Bedeutung der Schwerkraft bezogen auf die Kapillarkraft aus, wobei große Werte von $\alpha^*$ die Dominanz der Schwerkraft über die Kapillarkraft anzeigen. Das trifft insbesondere auf grob texturierte und/oder hochgradig strukturierte Böden zu (siehe nachfolgende Tabelle) [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a].

Bodentextur- und -struktur-Kategorie	$\alpha^* / cm^{-1}$
Verdichtete, strukturlose, tonige oder schluffige Substrate. Diese Kategorie trifft oftmals auf Deponieabdeck- oder -dichtungsschichten, limnische oder marine Sedimente zu	0,01
Böden, die sowohl fein texturiert (tonig oder schluffig) als auch unstrukturiert sind; können auch einen gewissen Feinsand-Anteil aufweisen	0,04
Die meisten strukturierten Böden von Tonen bis zu Lehmen, einschließlich unstrukturierten mittleren und feinen Sanden. Diese Kategorie trifft für die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden zu	0,12
Grobsande und kiesige Sande; einschließlich stark strukturierte oder aggregierte Böden als auch Böden mit großen und/oder zahlreichen Rissen oder Makroporen	0,36

Abb. 12: Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter  $\alpha^*$  [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a]

In dieser Gleichung sind die bestimmenden Hauptkomponenten enthalten, die den quasi-stationären Fluss verursachen: Fluss aufgrund des hydrostatischen Druckes (Überstauhöhe), ungesättigter Fluss unterhalb und seitlich der Zylinder als Folge der Matrixkräfte

---

(=Wasserspannung) und dem Schwerkraftfluss (Gradient 1). Die laterale Wasserbewegung wird von den geometrischen Verhältnissen der Zylinder bzw. durch das Verhältnis von hydrostatischem Druck zu Kapillardruck im Nenner des ersten Terms ausgedrückt.

### 2.3. Berechnung als 3-Phasensystem:

Bei dieser Betrachtungsweise wird das System als 3-Phasensystem (Wasser, Bodenluft, Bodenmatrix) gesehen. Durch das Überstauen des Bodens mit Wasser (Starkregen, Überschwemmungen) kann es zu einer Kompression der Bodenluft in der Bodenmatrix kommen. Aufgrund dieses Phänomens kann es zu Änderungen bzw. zu Verringerungen der Infiltrationsrate kommen. Es haben sich mehrere Forscher mit dieser Thematik beschäftigt, welche Auswirkungen die komprimierte Bodenluft auf die Infiltrationsrate hat.

Besonders zu erwähnen sind Wang et al. (1998), diese haben die Thematik sehr genau untersucht.

In dieser Arbeit wurden die Effekte von eingeschlossener Bodenluft auf die Wasserinfiltration in einen lehmigen Sandboden quantifiziert. Transparente 3D- und 2D-Säulen wurden für die Experimente verwendet, bei denen unter folgenden Infiltrationsbedingungen Versuche durchgeführt wurden:

- (1) Luft konnte sich frei vor der Feuchtigkeitsfront bewegen und durch den Boden der Säule das Rohr verlassen (freie Luftbewegung) und
- (2) Luft war vor Feuchtefront „eingeschlossen“ (Säulenboden verschlossen), folglich konnte die Luft nur durch die Bodenoberfläche das System verlassen (luftbegrenzend).

Weitere Komponenten im Versuchsaufbau: Tensionsinfiltrometer, Luftdurchflussmesser, Wassermanometer und Videobilderkameras.

Es wurden positive und negative Wasserdrücke auf der Bodenoberfläche angelegt. Gemessen wurde gleichzeitig: die Änderungen der Raten des Wassereinflusses und Luftflusses, Luftdruck vor der Feuchtigkeitsfront, dynamisches Verhalten des Fortschreitens der Feuchtigkeitsfront.

Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass der Gasdruck vor der Feuchtigkeitsfront bei Versuchen mit luftbegrenzenden Bedingungen (2.) mit fortschreitender Zeit einen konstanten Level erreicht, wie es bereits in anderen Studien von anderen Forschern festgestellt wurde. Der Gasdruck schwankte nur, wenn Luft nach oben durch die Oberfläche entwich (d.h. bei Fortschreiten der Infiltrationsfront nahm der Gasdruck vor der Feuchtefront bis zu einer Größe zu, bei der die Luft die Feuchtefront durchbrach. Es wurde festgestellt, dass die Infiltrationsrate gleich zu der Rate des Gasausflusses war. Die Infiltrationsrate variierte invers mit dem Gasdruck vor der Feuchtefront und ebenfalls mit der Überstauhöhe auf der

Bodenoberfläche. Bei Versuchen mit luftbegrenzenden Bedingungen (2.) erhöhte sich das Volumen des eingeschlossenen Gases um durchschnittlich 7 % und die Infiltrationsrate sank deutlich, verglichen mit Versuchen, bei denen sich die Bodenluft frei bewegen konnte (1.).

Der Fluss unter luftbegrenzenden Bedingungen (2.) wurde durch Fingering beeinflusst und war instabil. Dies stimmt mit den Annahmen bestehender Theorien überein (z.B. Wilson und Luthin [1963], Peek [1965], Adrian und Franzini [1966], Latifi et al. [1994], Feldversuche von Bodman [1937], Dixon und Linden [1972], Lalali-Farahani et al. [1993]). Wenn der Gasdruck ausreichend hoch war, entwich Gas von der Bodenoberfläche, wodurch eine starke Abnahme des Gasdrucks zu einer deutlichen Steigerung in der Infiltrationsrate des Wassers führte (McWhorter [1971], Vaehaud et al. [1974], Touma et al. [1984], Grismer et al. [1994]).

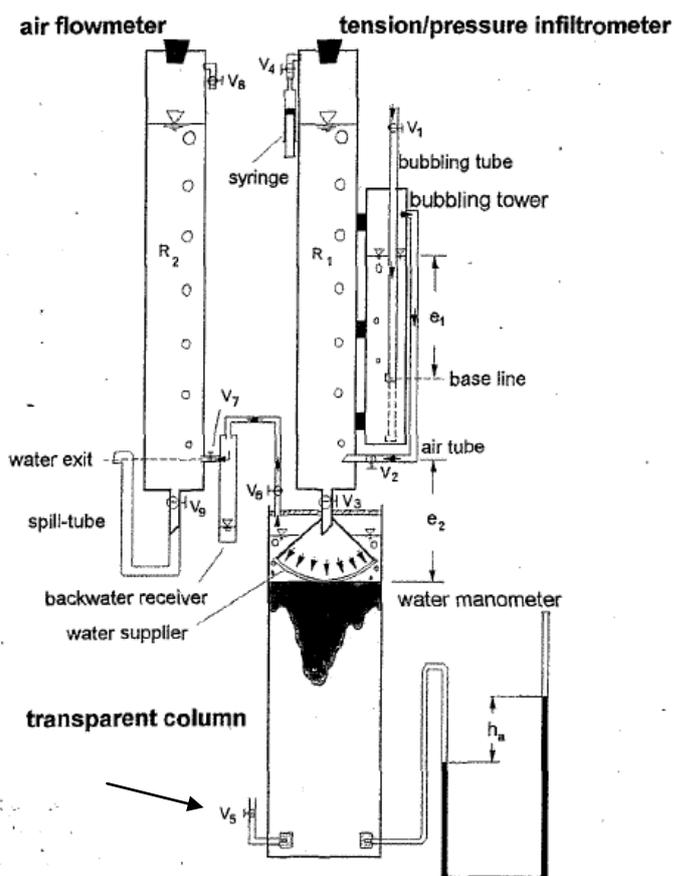


Abb. 13: Versuchsaufbau von Whang et al. [1998]

In Abbildung 13 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Durch das Öffnen und Schließen des Ventils mit der Kennzeichnung Nr. 5 wurden jeweils die erforderlichen Bedingungen (freie Luftbewegung (1.) oder luftbegrenzend (2.)) eingestellt. Die jeweiligen Wasserspannungen

wurden durch Rohrverstellung erzeugt ( $e_1 < e_2 \rightarrow$  positive Druckhöhe (Überstau), umgekehrt negative Druckhöhe an der Bodenoberfläche).

Als Ergebnis ergeben sich folgende Verläufe der Feuchtfrent unter den jeweiligen Bedingungen (Abbildung 14 - freie Luftbewegung, Abbildung 15 - luftbegrenzend)

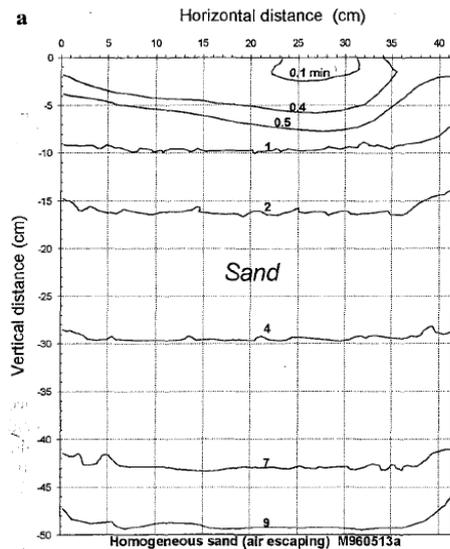


Abb. 14: Verlauf der Feuchtfrent bei freier Gasbewegung [Whang et al., 1998]

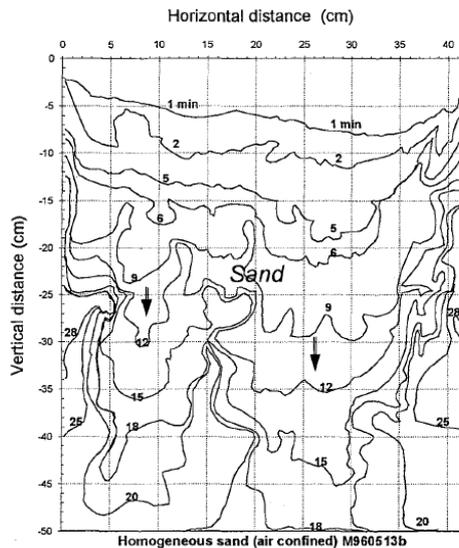


Abb. 15: Verlauf der Feuchtfrent bei luftbegrenzenden Bedingungen [Whang et al., 1998]

Somit können die Auswirkungen der Gaskompression vor der Feuchtfrent bei der Infiltration nicht vernachlässigt werden. In dieser Dissertation werden diese näher untersucht.

### 2.3.1. Software:

In dieser Dissertation werden zwei Softwarepakete verwendet. Zur Simulation der Ringinfiltrationsversuche ohne Gasdruck wird die Software Hydrus und zur Simulation des 3-Phasensystems wird der Stomp-Simulator verwendet. Die genaue Beschreibung ist den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

#### 2.3.1.1. Software Hydrus 2D/3D:

Die Software Hydrus 2D/3D dient zur Simulation von Strömungs-, Wärme- und Stofftransportprozessen in 2-dimensionalen bzw. 3-dimensionalen (auch 2D-rotationssymmetrischen), gesättigten oder ungesättigten, porösen Medien (Šimunek et al. 2006).

Zur Dateneingabe besitzt Hydrus 2D/3D eine graphische Benutzeroberfläche. Die Berechnungsergebnisse der Simulation werden graphisch aufbereitet. Es können beliebige Netze der Systeme erstellt werden, die aus Dreiecken bzw. Vierecken bestehen (Netzdiskretisierung).

Die Richards-Gleichung ist die Grundlage für die Beschreibung der gesättigten und ungesättigten Strömungsprozesse. Die Wärme- und Stofftransportprozesse werden mit der Konvektions-Dispersions-Gleichung berechnet. Die Lösung dieser Differentialgleichungen erfolgt mittels numerischer Verfahren. In den Simulationen mit Hydrus wurden nur Wassertransport betrachtet. Wärme- sowie Stofftransportprozesse sind vernachlässigt und die zugehörigen Gleichungen werden nicht näher ausgeführt.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( K \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + S$$

Gl. 4: Richards-Gleichung

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$\theta$	$L^3 L^{-3}$	1	volumetrischer Wassergehalt
$x$	L	m	Räumliche Koordinaten
$S$	$T^{-1}$	$s^{-1}$	Senkentherm zur Beschreibung der Wurzelaufnahme
$K$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Ungesättigte Leitfähigkeit
$\psi$	L	m	Hydraulisches Potential
$t$	T	s	Zeit
$K$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	hydraulische Leitfähigkeit

$$K(h, x, y, z) = K_s(x, y, z) \cdot K_r(h, x, y, z)$$

Gl. 5: K-Wert

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$K_s$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
$K_r$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Relative hydraulische Leitfähigkeit

### 2.3.1.2. Software Stomp (Subsurface Transport Over Multiple Phases)

Stomp ist ein Computermodell, das von der Pacific Northwest National Laboratory's Hydrology Group der Vereinigten Staaten von Amerika (PNNLH-Gruppe) entwickelt wurde, um ein Allzweck-Werkzeug zur Simulation von Strömungen und dem Transport von Stoffen im Boden zu schaffen. Der Simulator wurde speziell entwickelt, um Wissenschaftler und Ingenieure aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen mit einem Werkzeug mit multidimensionalen Analyse-Fähigkeiten zur Modellierung Grundwasserfluss und Stofftransport auszustatten.

Der Stomp-Simulator löst die partiellen Differentialgleichungen, die die Erhaltung der Masse- und der Energiemenge beschreiben, räumlich durch Finite-Differenzen-Diskretisierung und zeitlich durch inverse Euler-Diskretisierung. Die resultierenden Gleichungen sind nichtlineare, gekoppelte algebraische Gleichungen, die mittels Newton-Raphson-Iteration gelöst werden.

Der Simulator ist in einem Quellcode geschrieben, der dem Benutzer erlaubt, die gelösten Grundgleichungen (z. B. Wassermasse, Luftmasse, gelöste-Öl-Masse, Öl-Masse, Salzmasse, thermische Energie) frei wählen zu können. Der Quellcode ist durch den Benutzer auch veränderbar.

Abhängig von der gewählten Betriebsart werden die Transportgrundgleichungen von ein bis vier Phasen (z. B. wässrige Phase, Gasphase) benutzt. Stofftransport, radioaktiver Zerfall und chemische Reaktionen erster Ordnung werden über eine direkte Lösungstechnik (z. B. Patankar Macht-Gesetz Formulierung) über Berechnung der gekoppelten Gleichungen gelöst.

Die Eingabe erfolgt über semi-formatierte Text-Dateien und es werden die Berechnungsergebnisse über eine Vielzahl von anwendergesteuerten Formaten ausgegeben. Der Simulator erkennt eine Reihe von Randbedingungen und ermöglicht deren Spezifikation nach innen und außen auf das Berechnungsgebiet.

Geschrieben wurde der Simulator in Ansi Fortran 77, ist aber schon in Fortran 90 umgewandelt. Der Simulator wird auf einer Vielzahl von Plattformen in nationalen Labors, Behörden, privaten Unternehmen und Universitäten ausgeführt.

Die theoretischen und numerischen Ansätze, die im Simulator angewendet werden sind im Benutzerhandbuch angeführt. Die Firma Battelle hält die Urheberrechte an der Codierung und dem geistigen Eigentum an Stomp. (<http://stomp.pnnl.gov/index.stm>)

### Betriebsart

Die gewählte Betriebsart ist der WAE-Modus (Water-Air-Energy-Mode).

Bei dieser Betriebsart werden folgende Gleichungen gelöst:

- Wassermasse,
- Luftmasse und
- thermische Energie.

Die primären Annahmen sind:

- keine nichtwässrigen Flüssigkeiten
- kein gelöstes Öl, keine Sohle
- keine Tenside
- thermodynamische Gleichungen sind lokal

Wassermassenerhaltungsgleichung

Die Wassermassenerhaltungsgleichung beschreibt die zeitliche Änderung der Wassermasse in einem Kontrollvolumen. Zu- und Abfluss erfolgt durch die Oberfläche des betrachteten Bereichs. Im Stomp-Simulator existiert das Wasser im diffusen Porenraum als flüssiges Wasser und als Wasserdampf in der flüssigen Phase und der Gasphase.

Die Berechnung der Phasenaufteilung der Wassermasse erfolgt unter der Annahme von Gleichgewichtsbedingungen, was bedeutet, dass die Zeitskala in geologischen Medien für das thermodynamische Gleichgewicht für die Transportkomponente deutlich kürzer ist.

Der Wassertransport erfolgt durch Advektion der flüssigen Phase und der Gasphase und durch Diffusion-Dispersion in der Gasphase.

Der Transport der Phasenkomponenten wird aus einer modifizierten Form des Fick'schen Gesetzes berechnet, wo ein kombinierter Diffusions-Dispersionskoeffizient den klassischen Fickschen Diffusionskoeffizient ersetzt. Der Fluss der flüssigen Phasen wird auf Basis des Darcyschen Gesetzes berechnet.

Die Wassermassenerhaltungsgleichung enthält einen Term, der den Fluss der wässrigen Flüssigkeit durch osmotischen Druck gekoppelt mit Salztransport in den Simulationen berücksichtigt.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[ \sum_{\gamma=l,g,i} (n_D \omega_\gamma^w \rho_\gamma s_\gamma) \right] = - \sum_{\gamma=l,g} (\nabla F_\gamma^w + \nabla J_\gamma^w) - \nabla F_l^S + m^w$$

**Gl. 6: Wassermassenerhaltungsgleichung**

Die drei Flüsse  $F_\gamma^w$ ,  $J_\gamma^w$  und  $F_l^S$  ergeben sich aus:

$$F_\gamma^w = - \frac{\omega_\gamma^w \rho_\gamma k_{r\gamma}}{\mu_\gamma} k (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g) \text{ für } \gamma=l,g$$

$$J_\gamma^w = - \tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M^w}{M_\gamma} D_\gamma^w \nabla \chi_\gamma^w \text{ für } \gamma=l,g$$

$$F_l^S = D_l^S \nabla S_l$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	s	Zeit
$n_D$	1	1	Porenanteil bzw. diffuse Porosität
$\omega_\gamma^w$	M	kg	Massenfraktion von Komponente Wasser $w$ in Phase $\gamma$
$\rho_\gamma$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Phasendichte von Phase $\gamma$
$s_\gamma$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Sättigung von Phase $\gamma$
$F_\gamma^w$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	advektiver Fluss von Komponente Wasser $w$ in Phase $\gamma$
$J_\gamma^w$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Druck-Dispersionsfluss von Komponente Wasser in Phase $\gamma$
$F_l^S$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	osmotischer Fluss
$m^w$	M T <sup>-1</sup>	kg·s <sup>-1</sup>	Massenquellrate (Quellen/Senkentherm)
$k_{r\gamma}$	1	1	relative Permeabilität der Phase $\gamma$
$\mu_\gamma$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität von Phase $\gamma$
$k$	L <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup>	Durchlässigkeitstensor
$P_\gamma$	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Pa	Phasendruck
$g$	L T <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$
$M^w$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Komponente Wasser
$M_\gamma$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Phase $\gamma$
$D_\gamma^w$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Diffusion-Dispersion-Tensor von Komponente $w$ in Phase $\gamma$
$\chi_\gamma^w$	1	1	Molfraktion von Komponente $w$ in Phase $\gamma$
$D_\gamma^w$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Diffusionskoeffizient für Komponente $w$ in Phase
$S_l$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Salzkonzentration in Phase l
$l$	1	1	flüssige Komponente
$g$	1	1	gasförmige Komponente
$i$	1	1	eisförmige Komponente
$w$	1	1	Wasser
$a$	1	1	Luft
$o$	1	1	Öl
$n$	1	1	nichtwässrige Flüssigkeiten

### Luftmassenerhaltungsgleichung

Die Luftmassenerhaltungsgleichung besagt, dass die zeitliche Änderung der Luftmasse innerhalb eines Kontrollvolumens mit dem Fluss der Luftmasse über die Oberfläche des Kontrollvolumens übereinstimmt.

Im STOMP-Simulator existiert Luft im diffusen Porenraum als Bestandteil der Gasphase und gelöst in der wässrigen Phase. Die Lösung der Luft in der NAPL-Phase wird vernachlässigt.

Die Phasenaufteilung der Luftmasse wird unter der Annahme von Gleichgewichtsbedingungen berechnet. Diese Annahme impliziert, dass in porösen Medien die Zeitskala für das thermodynamische Gleichgewicht erheblich kürzer ist als die der Komponente Trans-

port. Lufttransport erfolgt durch Advektion und Diffusion-Dispersion in der Flüssig- bzw. Gasphase.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \left[ \sum_{\gamma=l,g} (n_D \omega_\gamma^a \rho_\gamma s_\gamma) \right] = - \sum_{\gamma=l,g} (\nabla F_\gamma^a + \nabla J_\gamma^a) + m^a$$

### Gl. 7: Luftmassenerhaltungsgleichung

Die beiden Flüsse  $F_\gamma^a$ ,  $J_\gamma^a$  betragen analog der Wasserbewegung:

$$F_\gamma^a = - \frac{\omega_\gamma^a \rho_\gamma k_{r\gamma}}{\mu_\gamma} (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g) \text{ für } \gamma=l,g$$

$$J_\gamma^a = - \tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M^a}{M_\gamma} D_\gamma^a \nabla \chi_\gamma^a \text{ für } \gamma=l,g$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	s	Zeit
$n_D$	1	1	Porenanteil bzw. diffuse Porosität
$\omega_\gamma^a$	M	kg	Massenfraction von Komponente a in Phase $\gamma$
$\rho_\gamma$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Phasendichte von Phase $\gamma$
$s_\gamma$	M L <sup>3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Sättigung von Phase $\gamma$
$F_\gamma^a$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	advektiver Fluss von Komponente a in Phase $\gamma$
$J_\gamma^a$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Druck-Dispensionsfluss von Komponente a in Phase $\gamma$
$m^a$	M T <sup>-1</sup>	kg·s <sup>-1</sup>	Massenquellrate (Quellen/Senkentherm)
$k_{r\gamma}$	1	1	relative Permeabilität der Phase $\gamma$
$\mu_\gamma$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität von Phase $\gamma$
$P_\gamma$	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Pa	Phasendruck
$g$	L T <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$
$M^a$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Komponente a
$M_\gamma$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Phase $\gamma$
$D_\gamma^a$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Diffusion-Dispersion-Tensor von Komponente a in Phase $\gamma$
$\chi_\gamma^a$	1	1	Molfraktion von Komponente a in Phase $\gamma$
$l$	1	1	flüssige Komponente
$g$	1	1	gasförmige Komponente
$i$	1	1	eisförmige Komponente
$w$	1	1	Wasser
$a$	1	1	Luft
$o$	1	1	Öl
$n$	1	1	nichtwässrige Flüssigkeiten

### Energieerhaltungsgleichung

Die Energieerhaltungsgleichung beruht auf dem Ansatz, dass die zeitliche Änderung der Energie in einem Kontrollvolumen gleich ist dem Fluss der Energie über die Oberfläche des Kontrollvolumens. Im Stomp-Simulator ist die thermische Energie je nach dem thermischen Gleichgewicht auf die flüssige und feste Phasen verteilt. Die thermische Kapazität des unverbundenen Porenraums, dargestellt als Differenz der gesamten und diffusiven Porosität, wird berechnet, sobald dieser mit flüssigem Wasser gefüllt ist. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Advektion der Phasenmasse, durch Diffusion der Feststoffphase und durch thermische Diffusion von flüssigen und festen Phasen. Wärmeübertragung durch hydraulische Dispersion in den durchströmten Phasen wird vernachlässigt.

Energien, verbunden mit Massequellen, sind als interne Wärmeerzeugungsquellen enthalten. Referenzzustände für Enthalpie und innere Energie sind bestandteilsabhängig. Latenter Wärmetransport wird durch den Transport von Wasserdampf durch die Gasphase und durch thermodynamischen Gleichungen berücksichtigt.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[ \sum_{\gamma=l,g,i} (n_d \rho_\gamma s_\gamma u_\gamma) + (1-n_T) \rho_s u_s + (n_T - n_D) \rho_l u_l \right] =$$

$$- \sum_{\gamma=l,g,n} \left( \nabla (\rho_\gamma h_\gamma V_\gamma) + \sum_{j=w,a,o} (\nabla h^j J_\gamma^j) \right) + \nabla (k_e \nabla T) + \sum_{j=w,a,o} (h^j m^j) + q$$

**Gl. 8: Energieerhaltungsgleichung**

wobei

$$V_\gamma = -\frac{k_{r\gamma} k}{\mu_\gamma} (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g) \text{ für } \gamma=l,g,n$$

$$J_\gamma^j = -\tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M^j}{M_\gamma} D_\gamma^j \nabla \chi_\gamma^j \text{ für } \gamma=l,g,n \text{ und } j=w,a,o$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	S	Zeit
$n_D$	1	1	diffuse Porosität
$\rho_\gamma$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Phasendichte für Phase $\gamma$
$s_\gamma$	$M L^{-3}$	$kg \cdot m^{-3}$	Sättigung von Phase $\gamma$
$u_\gamma$	$L^2 M T^{-2} M^{-1}$	$J kg^{-1}$	interne Energie der Phase $\gamma$
$n_T$	1	1	absoluter Porenanteil - absolute (gesamte) Porosität
$\rho_s$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Feststoffdichte
$u_s$	$L^2 M T^{-2} M^{-1}$	$J kg^{-1}$	interne Energie der festen Phase $s$
$\rho_l$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte der flüssigen Phase $l$
$u_l$	$L^2 M T^{-2} M^{-1}$	$J kg^{-1}$	interne Energie der flüssigen Phase $l$
$J_\gamma^j$	$M L^{-2} T^{-1}$	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Druck-Dispersionsfluss von Komponente $j$ in Phase $\gamma$
$V_\gamma$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Darcy'scher Geschwindigkeitsvektor
$k_{r\gamma}$	1	1	relative Permeabilität der Phase $\gamma$
$\mu_\gamma$	$L^2 T^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematische Viskosität von Phase $\gamma$
$k$	$L^{-2}$	$m^2$	Durchlässigkeitstensor
$P_\gamma$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Phasendruck
$g$	$L T^{-2}$	$m \cdot s^{-2}$	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$
$M^j$	$M N^{-1}$	$kg \cdot mol^{-1}$	Molekulargewicht von Komponente $j$
$M_\gamma$	$M N^{-1}$	$kg \cdot mol^{-1}$	Molekulargewicht von Phase $\gamma$
$D_\gamma^j$	$L^2 T^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Diffusion-Dispersion-Tensor von Komponente $j$ in Phase $\gamma$
$\chi_\gamma^j$	1	1	Molfraktion von Komponente $j$ in Phase $\gamma$
$h_\gamma$	$L^2 M T^{-2} M^{-1}$	$J kg^{-1}$	Enthalpie von Phase $\gamma$
$h^j$	$L^2 M T^{-2} M^{-1}$	$J kg^{-1}$	Enthalpie von Komponente $j$
$k_e$	$L^2 M T^{-3} L^{-1}$ $\Theta$	$W \cdot m^{-1} \cdot K$	equivalenter thermischer Leitfähigkeitstensor
$T$	$\Theta$	K	Temperatur
$m^j$	$M T^{-1}$	$kg \cdot s^{-1}$	Massequellrate von Komponente $j$
$q$	$L^2 M T^{-3}$	W	Thermische Energiequelle
$l$	1	1	flüssige Komponente
$g$	1	1	gasförmige Komponente
$i$	1	1	eisförmige Komponente
$w$	1	1	Wasser
$a$	1	1	Luft
$o$	1	1	Öl
$n$	1	1	nichtwässrige Flüssigkeiten

### Lösungen der Erhaltungsgleichungen im WAE-Mode von Stomp

Im WAE-Modus der Programmes Stomp werden die Erhaltungsgleichungen wie folgt im Kontrollvolumen angesetzt.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[ \sum (n_D \rho_l s_l) \right] = - \sum \nabla F_l^w$$

**Gl. 9: Wassermassenerhaltungsgleichung WAE-Modus**

Der Fluss  $F_l^w$  ergibt sich aus:

$$F_l^w = - \frac{\rho_l k_{rl} k}{\mu_l} (\nabla P_l + \rho_l g z_g)$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	s	Zeit
$n_D$	1	1	Porenanteil bzw. diffuse Porosität
$\rho_l$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Phasendichte von Phase l
$s_l$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Sättigung von Phase l
$F_l^w$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	advektiver Fluss von Komponente Wasser $w$ in Phase $l$
$k_{rl}$	1	1	relative Permeabilität der Phase l
$\mu_\gamma$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität von Phase l
$k$	L <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup>	Durchlässigkeitstensor
$P_l$	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Pa	Phasendruck
$g$	L T <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \left[ \sum (n_D \rho_g s_g) \right] = - \sum \nabla F_l^a$$

**Gl. 10: Luftmassenerhaltungsgleichung WAE-Modus**

Der Fluss  $F_l^a$  beträgt analog der Wasserbewegung:

$$F_l^a = - \frac{\omega_l^a \rho_l k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l + \rho_l g z_g)$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	s	Zeit
$\omega_l^a$	M	kg	Massenfraktion von Komponente a in Phase l
$\rho_l$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Phasendichte von Phase l
$s_l$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Sättigung von Phase l
$F_l^a$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	advektiver Fluss von Komponente l in Phase $\gamma$
$k_{rl}$	1	1	relative Permeabilität der Phase l
$\mu_l$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität von Phase l
$P_l$	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Pa	Phasendruck
$g$	L T <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -(\nabla \rho_l h_l V_l + \nabla \rho_g h_g V_g) + \nabla (k_e \nabla T) + h^w m^w + h^a m^a$$

Gl. 11: Energieerhaltungsgleichung WAE-Modus

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$t$	T	S	Zeit
$n_D$	1	1	diffuse Porosität
$\rho_\gamma$	M L <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	Phasendichte für Phase $\gamma$
$s_\gamma$	M L <sup>-3</sup>	kg·m <sup>-3</sup>	Sättigung von Phase $\gamma$
$u_\gamma$	L <sup>2</sup> M T <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	interne Energie der Phase $\gamma$
$n_T$	1	1	absoluter Porenanteil - absolute (gesamte) Porosität
$\rho_s$	M L <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	Feststoffdichte
$u_s$	L <sup>2</sup> M T <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	interne Energie der festen Phase $s$
$\rho_l$	M L <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	Dichte der flüssigen Phase $l$
$u_l$	L <sup>2</sup> M T <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup>	J kg <sup>-1</sup>	interne Energie der flüssigen Phase $l$
$J_\gamma^j$	M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>	kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Druck-Dispersionsfluss von Komponente $j$ in Phase $\gamma$
$V_\gamma$	L T <sup>-1</sup>	m·s <sup>-1</sup>	Darcy'scher Geschwindigkeitsvektor
$k_{r\gamma}$	1	1	relative Permeabilität der Phase $\gamma$
$\mu_\gamma$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	kinematische Viskosität von Phase $\gamma$
$k$	L <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup>	Durchlässigkeitstensor
$P_\gamma$	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	Pa	Phasendruck
$g$	L T <sup>-2</sup>	m·s <sup>-2</sup>	Erdbeschleunigung
$z_g$	1	1	einheitlicher Gravitationsrichtungsvektor
$\tau_\gamma$	1	1	Tortuosität von Phase $\gamma$
$M^j$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Komponente $j$
$M_\gamma$	M N <sup>-1</sup>	kg·mol <sup>-1</sup>	Molekulargewicht von Phase $\gamma$
$D_\gamma^j$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Diffusion-Dispersion-Tensor von Komponente $j$ in Phase $\gamma$
$\chi_\gamma^j$	1	1	Molfraktion von Komponente $j$ in Phase $\gamma$

### 2.3.1.3. Unterschiede zwischen Hydrus und Stomp:

Das Programm Hydrus hat eine graphische Oberfläche, was die Eingabe der Modelle und Parameter sehr erleichtert. Die Simulationsergebnisse können in Ausgabefiles und graphisch dargestellt werden. Die Simulation in Hydrus basiert auf der Richards-Gleichung unter der Annahme eines konstanten Drucks in der Gasphase. Unterschiedliche bzw. zeitlich variable Gasdrücke können daher nicht berücksichtigt werden.

Das Programm Stomp basiert auf dem modifizierten Fickschen Gesetz, somit können unterschiedliche Luftdrücke berücksichtigt werden.

Somit wird Hydrus zur Simulation der ER- und DR-Versuche verwendet. Stomp wird zur Simulation von Versuchen mit komprimierter Bodenluft eingesetzt.

#### 2.4. Kombination der Infiltrationsmessung mit Bestimmung weiterer Bodenparameter

Aufgrund der technischen Entwicklung gibt es die Möglichkeit mittels Sensoren zusätzlich Bodenzustandsgrößen zu erfassen. Für die genauere Beschreibung beziehungsweise der Beobachtung des Eindringens der Feuchtefront in den Boden bei einem Ringinfiltrationsversuch kommen zwei Bodenzustandsgrößen in Betracht, die beobachtet werden können. Sinnvoll ist die Beobachtung des Wasseranteils oder/und der Wasserspannung im Versuchsbereich.

##### Messung der Bodenfeuchtigkeit

Der Wassergehalt von Böden wird in-situ nach heutigem Stand der Technik in der Regel über die Messung der Dielektrizitätskonstanten bestimmt. Grundsätzlich gibt es 2 Systeme, die auf dieser Basis arbeiten: TDR-Sensoren (Time-Domain Reflectometry) und FDR-Sensoren (Frequency-Domain Resonance).

Beim TDR-Prinzip wird die Laufzeit eines hochfrequenten, elektromagnetischen Impulses durch den Boden gemessen (siehe Abbildung 16).

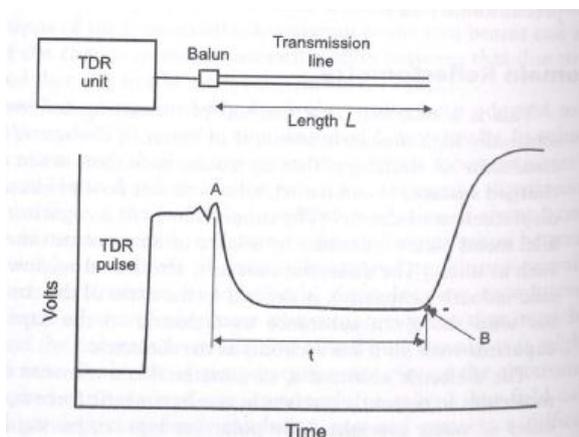


Abb. 16: Funktionsprinzip TDR [Hillel, 1998]

Über Möglichkeiten und Grenzen dieses Verfahrens existieren bereits zahlreiche Veröffentlichungen.

Bei der FDR-Messung wird der Wassergehalt wie bei der TDR-Messung indirekt über die Dielektrizitätskonstante bestimmt. Der Scheinwiderstand des Bodens ist hierbei die eigentliche Messgröße. Jedoch erfolgt die Messung nicht über einen Impuls, sondern über einen Schwingkreis. Das Ergebnis der Wassergehaltsbestimmung kann durch erhöhte Leitfähigkeit (Salze, etc.) verfälscht werden, da diese Erhöhung die Widerstandsmessung sowie die

Laufzeit der elektromagnetischen Wellen beeinflusst. Um diesen Einfluss so gut wie möglich auszuschließen, werden hochfrequente Wechselströme angewandt.

Je nach Anwendungsfall werden TDR- oder FDR-Sonden eingesetzt. Für eine punktuelle Messung ist die TDR-Sonde einzusetzen, für eine Wassergehaltsbestimmung über ein vertikales Profil kommt die FDR-Sonde zum Einsatz.

Ein Beispiel für eine FDR-Sonde ist die Profilsonde Enviroscan (Abbildung 17) des australischen Hersteller Sentek. Bei dieser Profilsonde werden mehrere Sensoren in unterschiedlichen Tiefen installiert. Die Auswertung erfolgt über die mitgelieferte Software.

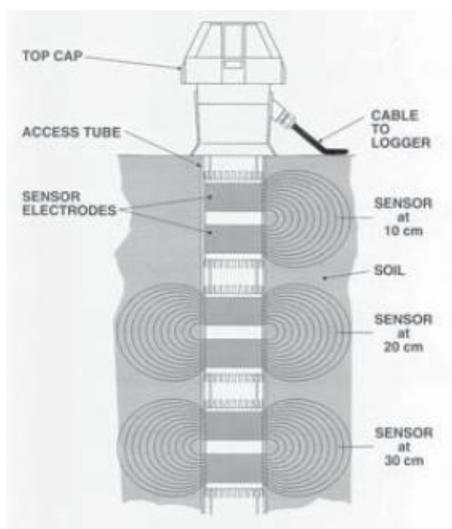


Abb. 17: Funktionsprinzip Sentek Enviroscan [UMS-Katalog, 2002]

### Messung der Wasserspannung

Zur Messung der Wasserspannung im Boden werden verschiedene Methoden verwendet. Übliche Methoden sind je nach zu erwartender Wasserspannung Tensiometer und Granular-Matrix-Sensoren, wie z.B. SIS Smart Irrigation Sensor der Firma UMS (Abbildung 18).



Abb. 18: Granular-Matrix-Sensor Modell SIS Smart Irrigation Sensor [UMS, 2014]

### 2.5. Vergleich ähnlicher Feldversuche in verschiedenen Normenwerken

In diesem Kapitel werden die gängigen Normenwerke erwähnt, die sich im näheren Sinn mit den Ringinfiltrationsversuchen beschäftigen. Die jeweiligen Anwendungsbereiche werden aus den Normen zitiert.

#### 2.5.1. Ö-Norm EN ISO 22282-5 Infiltrationsversuche:

Zitat aus dieser Norm: „Dieser Teil von ISO 22282 behandelt Anforderungen an Erkundungen des Baugrunds mit Hilfe von Infiltrationsversuchen als Teil von geotechnischen Erkundungsdiensten nach EN 1997-1 und EN 1997-2.

*Diese Norm gilt für die In-situ-Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in einer natürlichen geologischen Formation oder von behandelten oder verdichteten Materialien. Der Infiltrationsversuch wird angewendet, um das Versickerungsvermögen des Baugrunds an der Oberfläche oder in geringer Tiefe zu bestimmen. Es handelt sich um einen einfachen Versuch zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts. Das Verfahren kann sowohl unter stationären als auch transienten Zuständen und sowohl in gesättigten als auch ungesättigten Böden angewendet werden.*

*Das Prinzip des Versuchs beruht auf der Messung einer vertikalen Durchflussrate des Wassers an der Oberfläche, das unter dem Einfluss eines hydraulischen Überdrucks in den Boden einsickert. Geräte für die Oberflächenversickerung umfassen Einzelring- und Doppelring-Infiltrimeter in offener oder geschlossener Ausführung.*

*Die Messgeräte und Messverfahren sind auf unterschiedliche Durchlässigkeitsbereiche angepasst:*

- offene Systeme sind auf Bereiche von  $10^{-5}$  m/s bis  $10^{-8}$  m/s und
- geschlossene Systeme auf eine Durchlässigkeit unterhalb  $10^{-8}$  m/s.

*In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen und der Wasserdurchlässigkeit des Bodens ist eine Dauer von einigen Minuten bis einigen Tagen erforderlich, um den Versuch durchzuführen. Dieser Teil von ISO 22282 definiert die Terminologie und die Messparameter. Er legt die erforderlichen Merkmale der Ausrüstung fest, definiert die Versuchsverfahren in Bezug auf die verschiedenen Vorgehensweisen bei der Messung und legt die Versuchsergebnisse fest.*

*Es ist auf Folgendes anwendbar:*

- Projekte des Ingenieurbaus;
- hydrogeologische Untersuchungen; und
- Abfalllagerung.“

#### *2.5.2. Ö-Norm L 1066 Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode):*

*Zitat aus dieser Norm: „Diese ÖNORM legt ein In-situ-Verfahren zur Bestimmung der Versickerungsintensität in der ungesättigten Bodenzone fest. Diese Methode ist für Versickerungsintensitäten zwischen  $0,05 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  und  $50 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  anwendbar.“*

#### *2.5.3. Ö-Norm B4422-2 Erd- und Grundbau – Untersuchung von Böden:*

*Zitat aus dieser Norm: „Diese ÖNORM ist für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit „in situ“ für oberflächennahe Schichten, deren Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 1 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  beträgt, anzuwenden. Die daraus erhaltenen Kennwerte können für die Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit von natürlichen und künstlichen Erdkörpern im Erd- und Grundbau herangezogen werden. Zweck dieser ÖNORM ist es, Richtlinien für den grundsätzlichen Aufbau der Prüfgeräte, Versuchsanordnungen, Durchführung und Auswertung von Wasserdurchlässigkeitsprüfungen festzulegen. Dadurch sollen bei gleichen Versuchsabmessungen und Auswertungskriterien vergleichbare Prüfergebnisse erzielt werden. Bei unterschiedlichen Versuchen und/oder Versuchsbedingungen sind entsprechende Korrelationsfaktoren anzuwenden.“*

### 3. METHODIK

In diesem Kapitel wird die Methodik beschrieben, mit der die in Kapitel 1 angeführten Ziele untersucht wurden.

#### 3.1. *Annahmen für die Simulationen in Hydrus und Stomp*

Es werden 3 unterschiedliche Böden mit verschiedenen Ringradien mittels unterschiedlichen Computersimulationen (z. B. Hydrus 2D/3D und Stomp) numerisch untersucht und Optimierungspotentiale aufgezeigt. Ebenfalls werden Doppelring- und Einfachringversuche simuliert. Zur Verifizierung und als Plausibilitätsprüfung werden in geringem Umfang Feldversuche durchgeführt. Die Auswertung der Simulationen in dieser Arbeit wird ähnlich der Skalierungsmethode von Wu [1997] mit Hilfe von sogenannten  $f$ -Faktoren erfolgen.

In diesem Kapitel werden die generellen Eckpunkte für die Simulationen angeführt.

##### 3.1.1. *Geometrisches Modell*

Für die Simulationen wurden rotationssymmetrische quasi-3D-Modelle verwendet. Der Radius des untersuchten Bereiches betrug 200 cm, bei einer Tiefe von 30 cm. Auf diese Art und Weise können sämtliche Ringradien im selben geometrischen Modell simuliert werden.

##### 3.1.2. *Geometrie der Einfach- und Doppelringe*

###### Doppelringsimulationen:

Bei der Simulation der DR-Versuche wurde der Innendurchmesser des Innenringes von 7,0 bis 120,0 cm und der des Außenringes von 14,5 cm bis 160 cm variiert. Die Wandstärke betrug 0,5 cm. In Abbildung 19 ist die Simulationsgeometrie dargestellt.

Folgende Ringpaare wurden simuliert:

- 7,0 cm Innenring – 14,5 cm Außenring
- 15,0 cm Innenring – 40,0 cm Außenring
- 20,0 cm Innenring – 60,0 cm Außenring
- 40,0 cm Innenring – 80,0 cm Außenring
- 60,0 cm Innenring – 100,0 cm Außenring
- 80,0 cm Innenring – 120,0 cm Außenring
- 120,0 cm Innenring – 160,0 cm Außenring

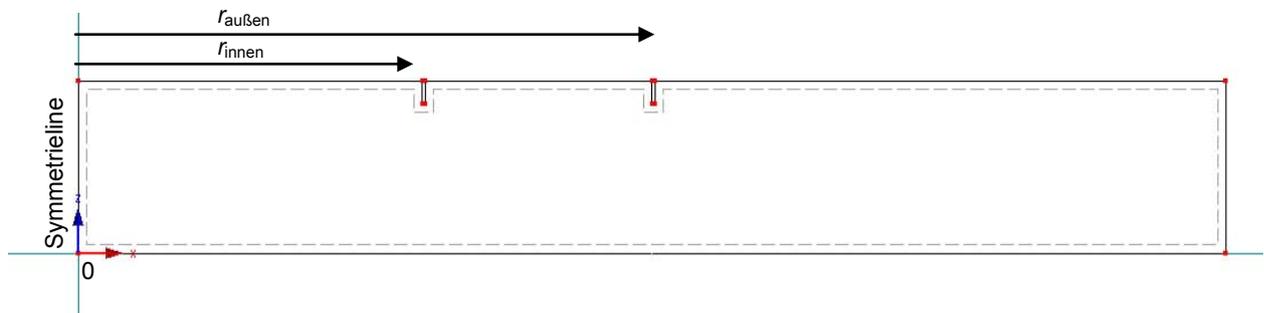


Abb. 19: Schema – DR-Versuch

#### Einfachringsimulationen:

Auch bei den Einfachringsimulationen wurden die Radien der Einzelringe analog zu den Doppelringsimulationen von 15 cm bis 120 cm Radius variiert. Die Wandstärke des Ringes betrug 0,5 cm. In Abbildung 20 ist die Einzelringsimulation schematisch dargestellt.



Abb. 20: Schema – ER-Versuch

Eindringtiefe:

Die Eindringtiefe betrug – wenn nicht anders beschrieben – 4,0 cm. Bei der praktischen Durchführung in Form von Feldversuchen sind Eindringtiefen von ca. 4 cm üblich.

*3.1.3. Verlauf der Simulation*

Die Simulation wurde in Anlehnung an die ÖNORM L 1066 als Versuch mit konstanter Druckhöhe durchgeführt.

Doppelringversuch:

Um eine ausreichende Vorsättigung sicherzustellen, wurde bei den DR-Versuchen der Wasserspiegel des Außenringes in den ersten 30 Minuten konstant 8 cm über Geländeoberkante gehalten. Während dieser Zeit wurde im Innenring kein Wasser dotiert. Danach wurde der Innenwasserspiegel auf 8 cm über Geländeoberkante aufgespiegelt und der Außenwasserspiegel konstant auf der Höhe bei Beginn gehalten. Wenn nicht anders angeführt, betragen die Wasserspiegel 8 cm über Geländeoberkante. Der Verlauf der Wasserspiegel ist in Abbildung 21 dargestellt.

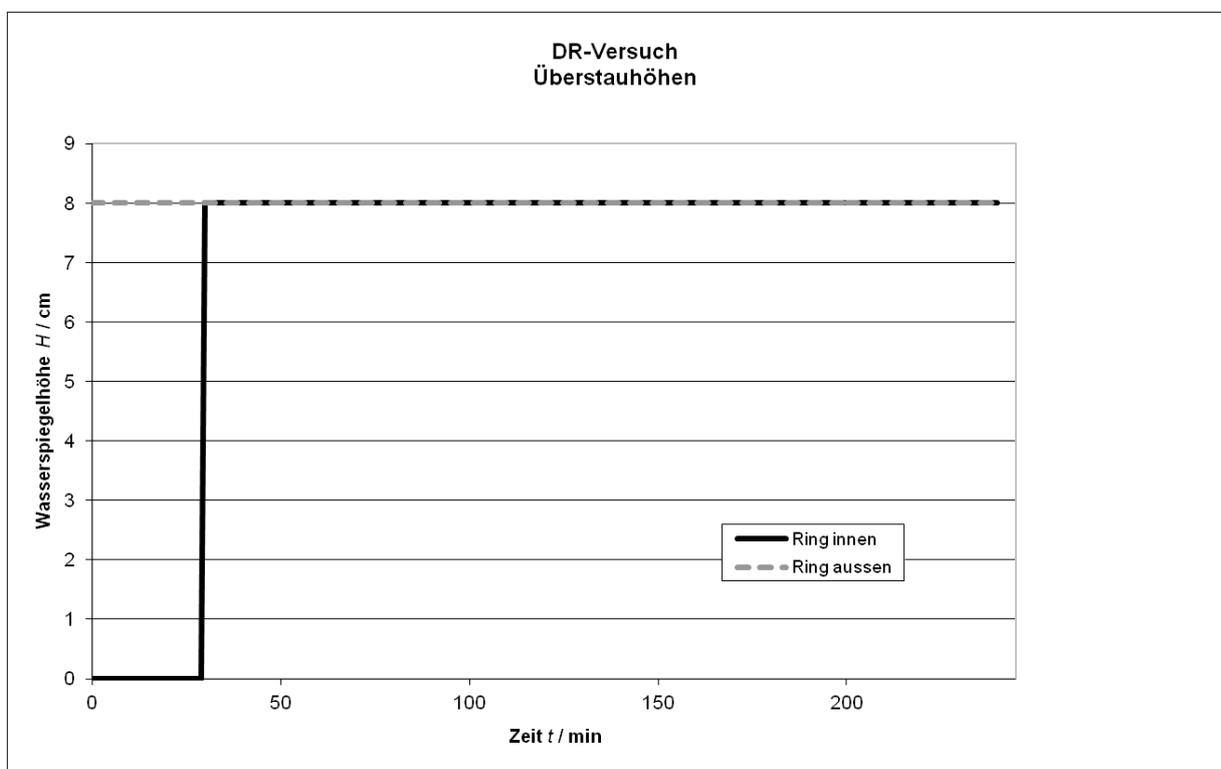


Abb. 21: zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelhöhe – DR-Versuch

### Einfachringversuch:

Beim Einfachringversuch wurde die Wasserspiegelhöhe auf konstanten 8 cm über Geländeoberkante gehalten. Der Verlauf ist in Abbildung 22 dargestellt.

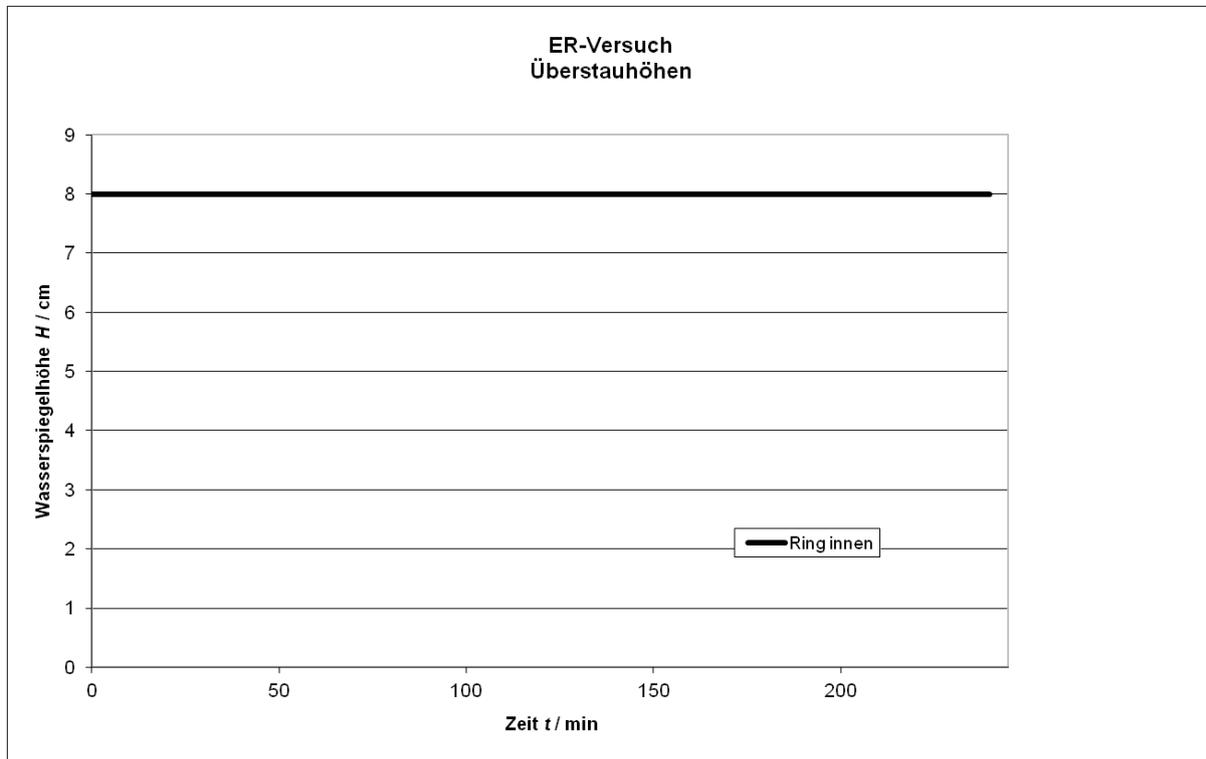


Abb. 22: zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelhöhe – ER-Versuch

#### 3.1.4. Wahl der Böden für die Simulationen

Um ein breites Spektrum an Böden abzudecken, wurden für die Simulationen mit Hydrus 2D/3D und Stomp drei signifikant unterschiedliche Böden ausgewählt, die sich vor allem in der hydraulischen Leitfähigkeit unterscheiden:

- Bodenvariante 0 – „sand“ – nach US-Soil-Taxonomy
- Bodenvariante 1 – „loamy sand“ – nach US-Soil-Taxonomy
- Bodenvariante 2 – „sandy clay loam“ – nach US-Soil-Taxonomy

Die hydraulischen Parameter sind in einem Bodenkatalog im Programm Hydrus enthalten. Diese stammen aus dem Skript von Carsel und Parrish [1988] für das gewählte van-Genuchten-Modell.

Die S-, U- und T-Anteile der gewählten Böden sind nach der US-Soil-Taxonomy beschrieben, damit diese direkt in Hydrus verwendbar sind. Um diese mit dem Texturdreieck gemäß Ö-Norm 1050 L zu vergleichen, werden beide Texturdreiecke im nachfolgenden angeführt (Abbildung 23 und 24).

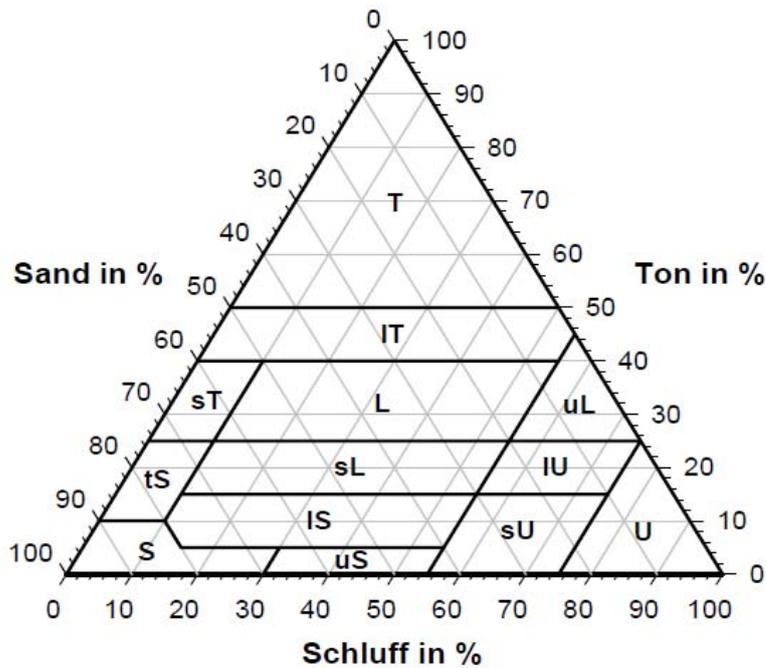
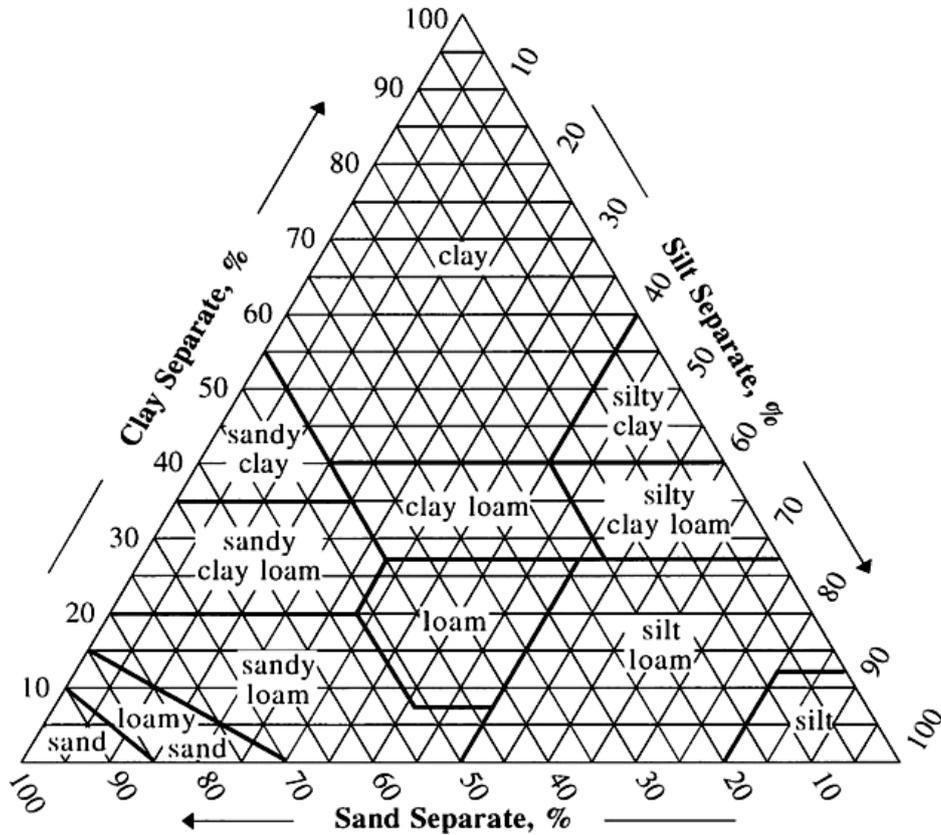


Abb. 23: Texturdreieck – ÖNORM L 1050



COMPARISON OF PARTICLE SIZE SCALES

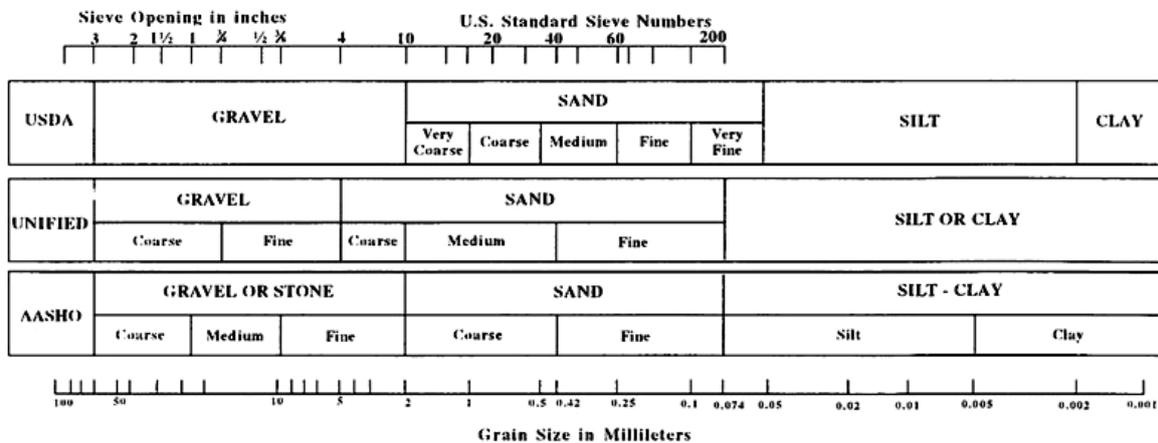


Abb. 24: Texturdreieck US-Soil Taxonomy [Wikipedia, 2011]

Anzumerken ist, dass es Unterschiede in den Bezeichnungen der Kornklassen und in den Kornklassengrenzen zwischen ÖNORM L 1050 und der US-Taxonomy gibt. Diese Unterschiede sind in einer Tabelle zusammengefasst (Tabelle 1)

Kornklassenbezeichnung	ÖNORM L 1050		US-Soil-Taxonomy	
	Korndurchmesser		Korndurchmesser	
	von	bis	von	bis
	mm	mm	mm	mm
Steine	63	-	75	-
Kies	2	63	2	75
Sand	0,063	2	0,05	2
Schluff	0,002	0,063	0,002	0,05
Ton	0	0,002	0	0,002

**Tab. 1: Unterschiede in den Kornklassendefinitionen**

Betrachtet man die Bodenvarianten nach Ö-Norm L 1050, so ergeben sich folgende Bezeichnungen in der Tabelle 2:

Kornklassenbezeichnung	Bodenbezeichnung	Bodenbezeichnung
Kornklassenbezeichnung	US-Soil-Taxonomy	ÖNORM L 1050
	Bodenbezeichnung	Bodenbezeichnung
Bodenvariante 0	sand	Sand
	%	%
Sand	95	94,8
Schluff	2,5	2,7
Ton	2,5	2,5
Bodenvariante 1	loamy sand	Sand
Sand	82,5	81,8
Schluff	10	10,7
Ton	7,5	7,5
Bodenvariante 2	sandy clay loam	lehmgiger Sand
Sand	60	58
Schluff	27,5	29,5
Ton	12,5	12,5

**Tab. 2: Kornklassenbestimmung der Bodenvarianten nach Ö-Norm L1050**

Die gewählten Bodenparameter der Simulationen können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Simulation	Soil/Boden	$Q_r$	$Q_s$	$Q_r/Q_s$	$\alpha$	$n$	$K_s$	$l$
Bodenvariante		1	1	1	m	1	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	1
0	sand	0,045	0,43	0,105	14,5	2,68	$8,25 \times 10^{-5}$	0,5
1	loamy sand	0,057	0,41	0,139	12,4	2,28	$4,05 \times 10^{-5}$	0,5
2	sandy clay loam	0,1	0,39	0,256	5,9	1,48	$3,64 \times 10^{-6}$	0,5

**Tab. 3: untersuchte Böden – Bodenparameter**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$\theta_s$	$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$	1	volumetrischer Sättigungswassergehalt
$\theta_r$	$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$	1	volumetrischer Restwassergehalt
$K_s$	$\text{L T}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
$l$	1	1	Tortuositätsfaktor
$\alpha$	1	1	Parameter $\alpha$ der Wasserrückhaltekurve
$n$	$\text{L T}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Parameter $n$ der Wasserrückhaltekurve

### 3.1.5. Anfangsbedingungen der Böden in den Simulationen

Die Vorsättigung der Böden wurde so gewählt, dass ein möglichst großes Spektrum der vorkommenden Anfangsbedingungen abgedeckt wird. Die Wasserspannung im Boden bewegt sich im Bereich des permanenten Welkepunktes und sehr feuchter Bedingungen (von pF-Wert 4,2 – entspricht einer Wasserspannung von ca. 15 bar und pF-Wert von 0,8 – entspricht einer Wasserspannung von 0,06 bar). Als Zwischenstufe wurde der pF-Wert von 3,0 gewählt. Dies entspricht einer Wasserspannung von 1,0 bar im Boden.

Die Abbildung 25 zeigt modellhaft die Verläufe der Rückhaltekurven für 3 verschiedenen Böden.

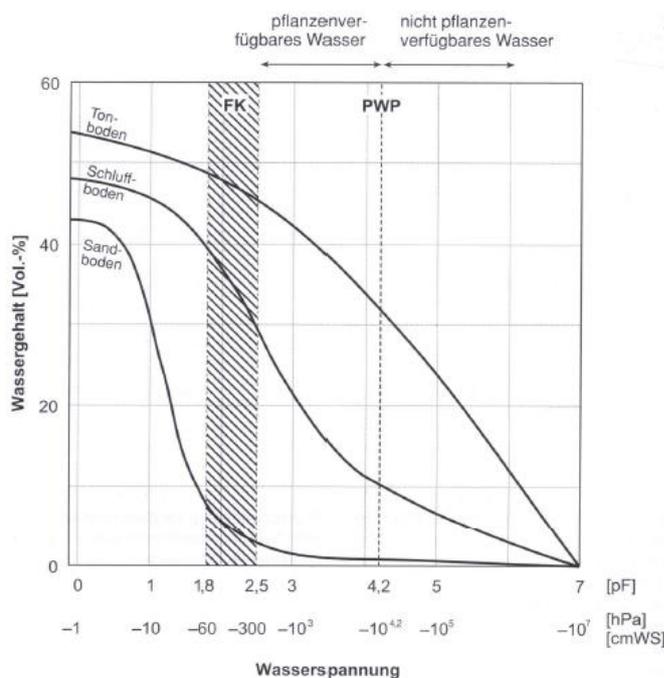


Abb. 25: Beziehung Wasserspannung-Wassergehalt [Scheffer und Schachtschabel, 2002]

### Anisotropie:

Da in der Natur die horizontale hydraulische Leitfähigkeit ( $K_{sh}$ ) meist größer ist als die vertikale hydraulische Leitfähigkeit ( $K_{sv}$ ), wurde diese auch bei einzelnen Versuchreihen um den Faktor 10 erhöht.

### 3.1.6. Simulationsvarianten Doppelring / Einfachring

Im Bezug auf die simulierten Böden, Einfachring-/Doppelringversuche und unterschiedliche Wasserspannungen ergeben sich folgende Simulationsanordnungen.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Simulationsannahmen für die Bodenvariante 0 – „sand“ – nach US-Taxonomy angeführt.

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - DR				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
0111	7	14,5	0,06	1,8
0211	7	14,5	1	3
0311	7	14,5	15	4,2
0111	15	40	0,06	1,8
0211	15	40	1	3
0311	15	40	15	4,2
0111	20	60	0,06	1,8
0211	20	60	1	3
0311	20	60	15	4,2
0111	40	80	0,06	1,8
0211	40	80	1	3
0311	40	80	15	4,2
0111	60	100	0,06	1,8
0211	60	100	1	3
0311	60	100	15	4,2
0111	80	120	0,06	1,8
0211	80	120	1	3
0311	80	120	15	4,2
0111	100	140	0,06	1,8
0211	100	140	1	3
0311	100	140	15	4,2
0111	120	160	0,06	1,8
0211	120	160	1	3
0311	120	160	15	4,2

**Tab. 4: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – Doppelring**

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - ER				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
0211	15	0	1	3
0211	20	0	1	3
0211	40	0	1	3
0211	60	0	1	3
0211	80	0	1	3
0211	100	0	1	3
0211	120	0	1	3

**Tab. 5: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – Einzelring**

Für die Bodenvariante 1 – „loamy sand“ – nach US-Taxonomy haben sich folgende Simulationsannahmen ergeben:

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - DR				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
1111	7	14,5	0,06	1,8
1211	7	14,5	1	3
1311	7	14,5	15	4,2
1111	15	40	0,06	1,8
1211	15	40	1	3
1311	15	40	15	4,2
1111	20	60	0,06	1,8
1211	20	60	1	3
1311	20	60	15	4,2
1111	40	80	0,06	1,8
1211	40	80	1	3
1311	40	80	15	4,2
1111	60	100	0,06	1,8
1211	60	100	1	3
1311	60	100	15	4,2
1111	80	120	0,06	1,8
1211	80	120	1	3
1311	80	120	15	4,2
1111	100	140	0,06	1,8
1211	100	140	1	3
1311	100	140	15	4,2
1111	120	160	0,06	1,8
1211	120	160	1	3
1311	120	160	15	4,2

**Tab. 6: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – Doppelring**

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - ER				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
1211	15	0	1	3
1211	20	0	1	3
1211	40	0	1	3
1211	60	0	1	3
1211	80	0	1	3
1211	100	0	1	3
1211	120	0	1	3

**Tab. 7: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – Einfachring**

Bei der Bodenvariante 2 – „sandy clay loam“ – nach US-Taxonomy wurden folgende Simulationen durchgeführt:

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - DR				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
2111	7	14,5	0,06	1,8
2211	7	14,5	1	3
2311	7	14,5	15	4,2
2111	15	40	0,06	1,8
2211	15	40	1	3
2311	15	40	15	4,2
2111	20	60	0,06	1,8
2211	20	60	1	3
2311	20	60	15	4,2
2111	40	80	0,06	1,8
2211	40	80	1	3
2311	40	80	15	4,2
2111	60	100	0,06	1,8
2211	60	100	1	3
2311	60	100	15	4,2
2111	80	120	0,06	1,8
2211	80	120	1	3
2311	80	120	15	4,2
2111	100	140	0,06	1,8
2211	100	140	1	3
2311	100	140	15	4,2
2111	120	160	0,06	1,8
2211	120	160	1	3
2311	120	160	15	4,2

**Tab. 8: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – Doppelring**

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - ER				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
2211	15	0	1	3
2211	20	0	1	3
2211	40	0	1	3
2211	60	0	1	3
2211	80	0	1	3
2211	100	0	1	3
2211	120	0	1	3

**Tab. 9: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – Einzelring**

Für die Simulation der Anisotropie ergaben sich folgende Simulationsanordnungen:

Bodenvariante 0 – „sand“ – nach US-Taxonomy:

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - DR - $k_{fn}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
0212	7	14,5	1	3
0212	15	40	1	3
0212	20	60	1	3
0212	40	80	1	3
0212	60	100	1	3
0212	80	120	1	3
0212	100	140	1	3
0212	120	160	1	3

**Tab. 10: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – DR –  $k_{fn}$  10fach überhöht**

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - ER - $k_{fn}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
0212	20	0	1	3
0212	40	0	1	3
0212	60	0	1	3
0212	80	0	1	3
0212	100	0	1	3
0212	120	0	1	3

**Tab. 11: Simulationsanordnungen Bodenvariante 0 – ER –  $k_{fn}$  10fach überhöht**

Nachfolgend befinden sich die Simulationsanordnungen für die Bodenvariante 1 – „loamy sand“ – nach US-Taxonomy:

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - DR - $k_{fh}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
1212	7	14,5	1	3
1212	15	40	1	3
1212	20	60	1	3
1212	40	80	1	3
1212	60	100	1	3
1212	80	120	1	3
1212	100	140	1	3
1212	120	160	1	3

**Tab. 12: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – DR–  $k_{fh}$  10fach überhöht**

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - ER - $k_{fh}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
1212	15	0	1	3
1212	20	0	1	3
1212	40	0	1	3
1212	60	0	1	3
1212	80	0	1	3
1212	100	0	1	3
1212	120	0	1	3

**Tab. 13: Simulationsanordnungen Bodenvariante 1 – ER–  $k_{fh}$  10fach überhöht**

Bodenvariante 2 – „sandy clay loam“ – nach US-Taxonomy:

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - DR - $k_{fh}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
2212	7	14,5	1	3
2212	15	40	1	3
2212	20	60	1	3
2212	40	80	1	3
2212	60	100	1	3
2212	80	120	1	3
2212	100	140	1	3
2212	120	160	1	3

Tab. 14: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – DR–  $k_{fh}$  10fach überhöht

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - ER - $k_{fh}$ 10fach überhöht				
Versuch	Radius	Radius	Anfangsbedingung	
Nummer	Innenring	Aussenring	Wasserspannung	pF-Wert
	cm	cm	bar	1
0212	15	0	1	3
0212	20	0	1	3
0212	40	0	1	3
0212	60	0	1	3
0212	80	0	1	3
0212	100	0	1	3
0212	120	0	1	3

Tab. 15: Simulationsanordnungen Bodenvariante 2 – ER–  $k_{fh}$  10fach überhöht

### 3.1.7. Ziel der Simulationen

Um die Unterschiede von ER- und DR-Versuchen aufzuzeigen, wurden beide Versuchsarten mit identen Modellparametern. Weiters wurde untersucht, ob die im Feld durchgeführten Infiltrometerversuche mittels einem bekanntem mathematischen Modell simuliert und mittels Gleichungen beschrieben werden können.

Insbesondere sollte ermittelt werden

- Der zeitliche Verlauf des Wasseranteils,
- Die räumliche Ausbreitung der Feuchtigkeitsfront und
- Die Berechnung der Infiltrationsrate.

### 3.1.8. Annahmen zu den Simulationen mit Hydrus 2D/3D und Stomp

Um die Berechnungsergebnisse vergleichen zu können, sind die Annahmen in Stomp und Hydrus grundsätzlich gleich. Da die Eingabe der Anfangs- und Randbedingungen für die jeweilige Simulationssoftware unterschiedlich ist, wird diese für die beiden Programme genauer beschrieben.

### 3.1.9. Modellierungsgrundlagen – Simulation in Hydrus 2D/3D

Das Programm Hydrus 2D/3D – Version 1.1 für Windows (ŠIMŮNEK et al., 2006) wurde zur Simulation verwendet.

#### 3.1.9.1. Hydrus 2D/3D-Grundlagen

Die verwendeten Böden der Simulationen und die Versuchsdurchführung bzw. Versuchsanordnung wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln erläutert. In der Natur sind Kenntnisse über die Bodeneigenschaften notwendig, um Parameter für physikalisch basierende Modelle in Hydrus 2D/3D zu erhalten. Wenn diese Zustandsgrößen im Feld gemessen wurden, können die Parameter auch durch inverse Modellierung bestimmt werden.

#### 3.1.9.2. Prozesscharakterisierung in Hydrus 2D/3D

##### Anfangsbedingungen

In Hydrus 2D/3D kann als Anfangsbedingung für den simulierten Bereich (Boden) entweder die Druckhöhe oder der Wasseranteil festgelegt werden. Bei der Simulation der Vergleiche (Einfachring – Doppelring) wurde die Anfangsbedingung für die Knoten der Berandung innerhalb der Infiltrationerringe mittels der Überstauhöhe definiert.

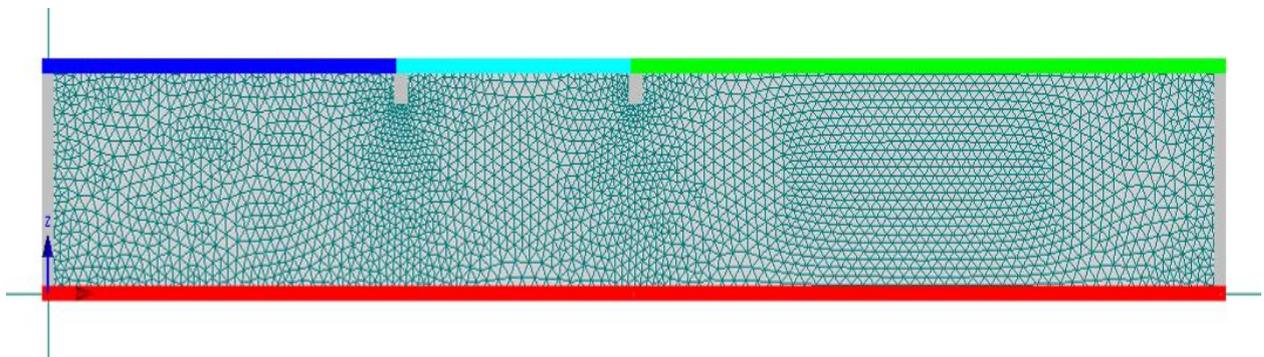
### Randbedingungen

Im Modell von Hydrus 2D/3D können konstante oder zeitabhängige Randbedingungen zur Beschreibung der Grenzen des Modells verwendet werden. Diese können auch mit frei dränbaren und atmosphärischen Bedingungen verknüpft werden.

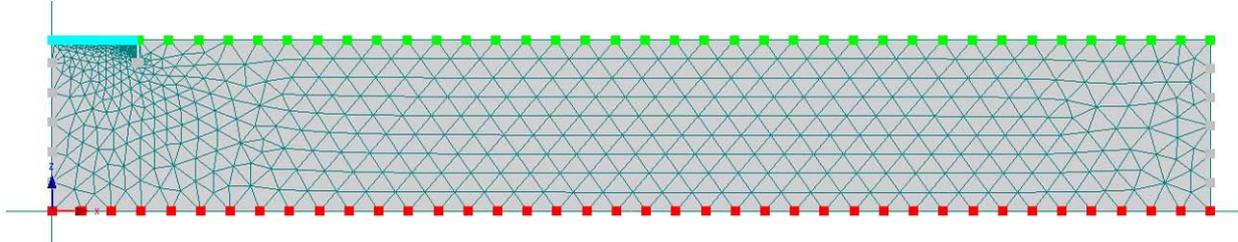
In den beiden Abbildungen unten (Abbildung 26 – Doppelring und Abbildung 27 - Einfachring) ist die Festlegung der Randbedingungen ersichtlich.

Hierbei gilt folgender Farbschlüssel:

- Hellgrau: beschreibt eine physikalische Barriere (No-Flux-Bedingung)
- Grün: atmosphärische Randbedingung
- Hellblau: Randbedingung mit konstanter Druckhöhe (8 cm)
- Dunkelblau: zeitlich veränderbare Druckhöhe – nach 30 Minuten Vorsättigung wird eine konstante Druckhöhe von 8 cm Überstau simuliert, während der Vorsättigung wird eine atmosphärische Randbedingung angenommen.
- Rot: Free-drainage-Bedingung, freier Fluss nach unten möglich



**Abb. 26: Darstellung der Randbedingungen – DR-Versuch – Hydrus 2D/3D**



**Abb. 27: Darstellung der Randbedingungen – ER-Versuch – Hydrus 2D/3D**

Beim ER-Versuch wird auf die Vorsättigung verzichtet, somit wird von Anfang an eine Überstauhöhe mit einem konstanten Wasserspiegel von 8 cm angenommen.

### Geometrisches Modell / räumliche Diskretisierung

Es wurde für die Simulation der Doppel- und Einfachringversuche ein rotationsymmetrisches 2D-Modell verwendet. Die Abstände der Netzknoten betragen ca. 2,0 cm.

Doppelringinfiltrationsimulationen:

Wie schon in Kapitel 3.1.2 erwähnt, wurden die Doppelringinfiltrationsimulationen mit unterschiedlichen Ringgrößen durchgeführt. Der kleinste Radius der Innenringe wurde mit 7 cm gewählt und wurde stufenweise bis zu einem Radius von 120 cm simuliert. Die Außenringe wurden von 14,5 cm bis 160 cm gewählt. Die Wandstärke der Ringe wurde mit 0,5 cm gewählt. Die betrachtete Versuchsfläche hatte einen Radius von 200 cm und 30 cm Tiefe. Die Eindringtiefe der Ringe betrug 4 cm (Abbildung 28).

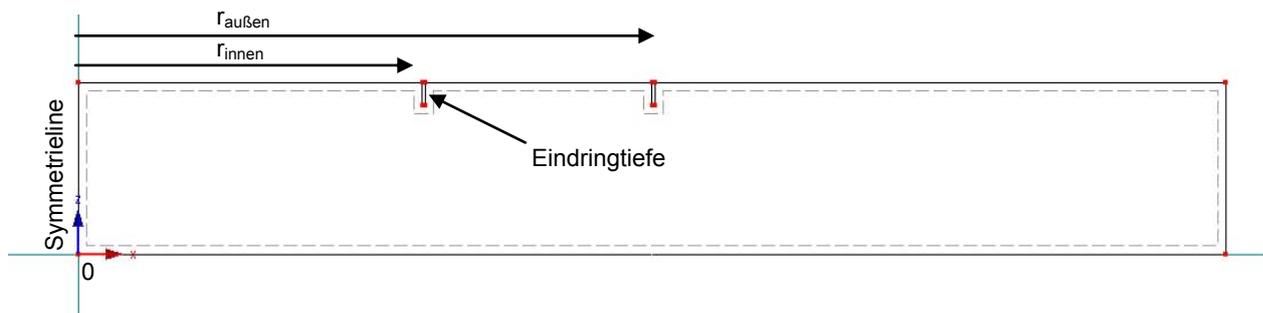


Abb. 28: geometrisches Modell – DR – Hydrus 2D/3D

Einfachringinfiltrationsimulationen:

Die Ringgrößen für diese Simulationen sind ebenfalls in Kapitel 3.1.2 angeführt. Die Wandstärke des Rings, die betrachtete Versuchsfläche und die Eindringtiefe werden gleich wie bei den Doppelring-Simulationen gewählt (Abbildung 29).



Abb. 29: geometrisches Modell – ER – Hydrus 2D/3D

Wie vorher bereits angeführt, wurden die Netzgenerierungspunkte im Abstand von ca. 2,0 cm angeordnet (siehe Abbildung 30). Das Netz wurde an den Rändern der Ringe zusätzlich verdichtet.

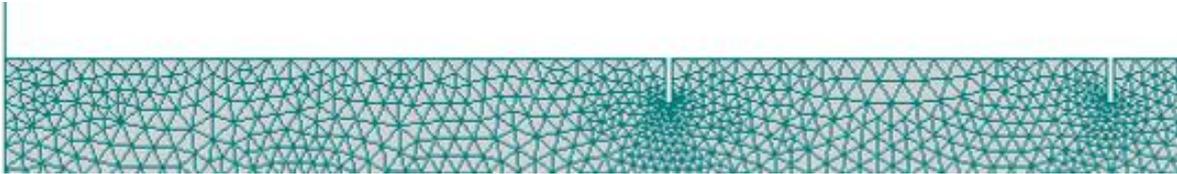


Abb. 30: Detail geometrisches Modell – Hydrus 2D/3D

Somit entstand folgendes FE-Netz (Abbildung 31, 32):

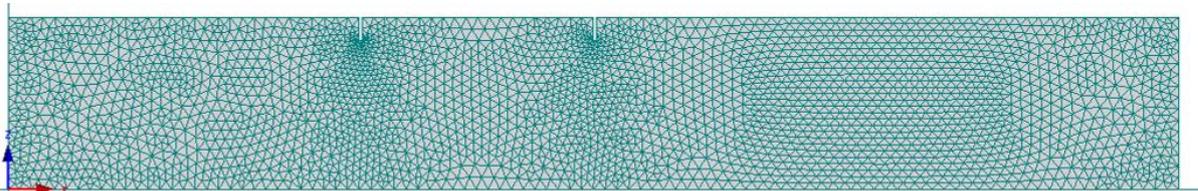


Abb. 31: FE-Netz Doppelringinfiltrimeter – Hydrus 2D/3D

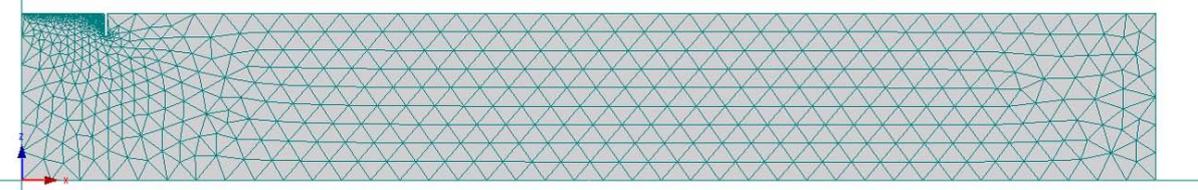


Abb. 32: FE-Netz Einzelringinfiltrimeter – Hydrus 2D/3D

### 3.1.9.3. Verlauf der Simulationsanordnung gegenüber gültigen Ö-Normen

#### Doppelringinfiltrationssimulationen:

Um exaktere Ergebnisse zu erhalten wurde die Simulation modifiziert. Der Wasserspiegel wurde im Außenring 30 Minuten konstant auf 8 cm gehalten und danach der WSP des Innenringes augenblicklich auf 8 cm WSP aufgefüllt. Diese Versuchsdurchführung gleicht einem Stationärversuch.

#### Einfachringinfiltrationssimulationen:

Bei diesen Versuchen wurde der WSP im Einzelring über die gesamte Versuchszeit auf konstant 8 cm Höhe gehalten, d.h. zum Zeitpunkt 0 der Simulation betrug der WSP bereits 8 cm.

### 3.1.10. Modellierungsgrundlagen – Simulation in Stomp

Das Programm Stomp wurde zur Simulation von ER- und DR-Infiltrationen verwendet. Da es in dem Programm Hydrus nicht möglich ist Simulationen mit dem Gegendruck der komprimierten Bodenluft durchzuführen (Bedingung der Richards-Gleichung), wurden diese Simulationen mit dem Programm Stomp durchgeführt.

Um die Ergebnisse zwischen Simulationen mit und ohne „Gegendruck“ der Bodenluft zu vergleichen, wurden dieselben Böden verwendet wie bei der Simulation mit Hydrus (Betrachtung als 2-Phasensystem – mit Gegendruck).

- Bodenvariante 0 – „sand“ – nach US-Taxonomy
- Bodenvariante 1 – „loamy sand“ – nach US-Taxonomy
- Bodenvariante 2 – „sandy clay loam“ – nach US-Taxonomy

#### 3.1.10.1. Simulation / Modellparameter in Stomp

##### Geometrisches Modell

Das geometrische Modell der Simulationen ist wie bei den Hydrus-Simulationen ein rotationssymmetrisches 2D-Modell. Um den Rechenaufwand und die Berechnungszeit zu verkürzen, wurde das rotationssymmetrische Modell mit einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  („Tortenstück“) verwendet (siehe Abbildung 33).

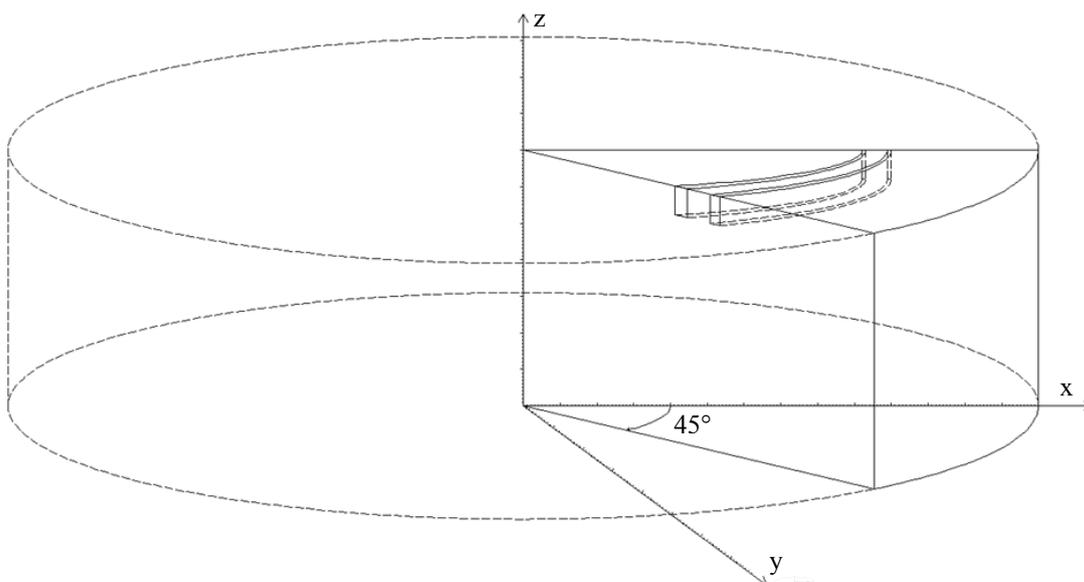


Abb. 33: Skizze des geometrischen Modells – Stomp

Die Infiltrationsringe wurden mittels inaktiver Knoten im Modell simuliert.

### Anfangsbedingungen

Der Bodenluftdruck wurde bei den Simulationen entsprechend dem umgebenden Standardluftdruck (101325 Pa) angenommen. Der Druck der flüssigen Phase variiert und ist vom Bodenzustand zu Simulationsbeginn (Anfangsbedingung – initial condition) abhängig.

$$P_{WA} = P_a - h_{vor} \cdot \rho_W \cdot g$$

#### **Gl. 12: Berechnung Wasserdruck – initial condition – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{WA}$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Druck der flüssigen Phase innerhalb des Modells
$P_a$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P
$h_{vor}$	L	m	Wasserspannung zu Simulationsbeginn in mWS
$\rho_W$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser bei 20°C
$g$	$M T^{-2}$	$m s^{-2}$	Erdbeschleunigung

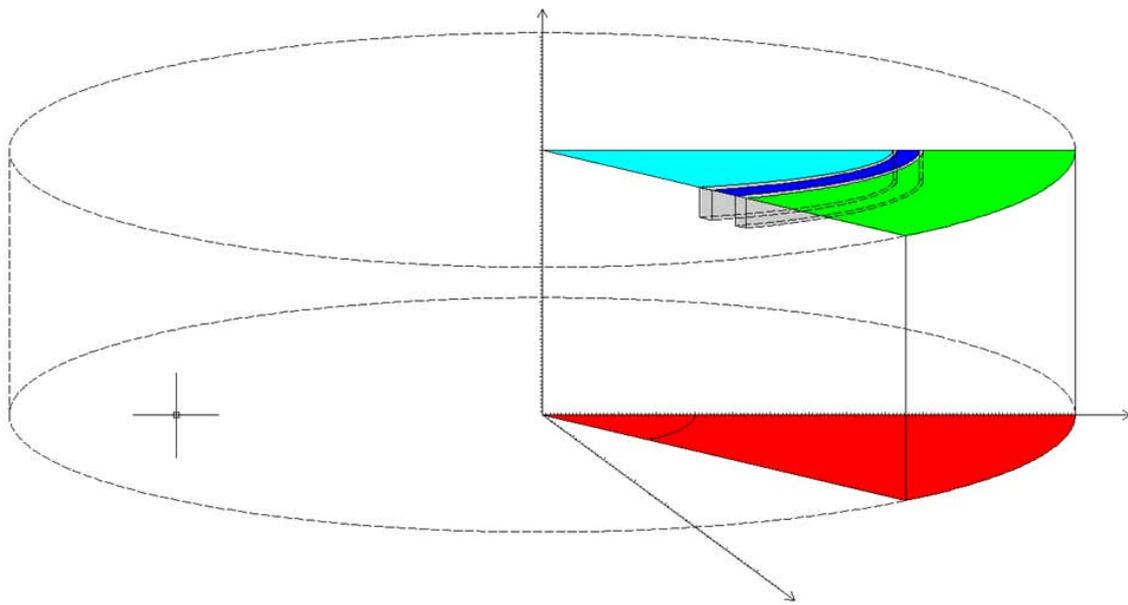
$$P_{LA} = P_a$$

#### **Gl. 13: Berechnung Luftdruck – initial condition – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{LA}$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Druck der gasförmigen Phase innerhalb des Modells
$P_a$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P

### Randbedingungen

In Abbildung 34 sind die jeweiligen Randbedingungen farblich dargestellt.



**Abb. 34: Skizze der Randbedingungen – Stomp**

Es wurden folgende Randbedingungen für die Simulation mit STOMP verwendet: No-Flux, atmosphärische Grenzen und je nach Lage im Modell die jeweiligen Randbedingungen der Grenzen, die mittels Wasserdruck und Gasdruck definiert waren.

No-Flux-Grenze (physikalische Barriere) – Farbe grau:

Mit dieser Grenzbedingung wurden die Infiltrometerringe simuliert. In STOMP erfolgt dies mittels der Definition inaktiver Knoten, die die Außenabmessungen der Ringe im geometrischen Modell wiedergeben.

Atmosphärische Grenze – Farbe grün:

Diese Grenzbedingung beschreibt jene Oberflächenbereiche, die außerhalb der Infiltrometerringe liegen. Der Gasdruck entspricht dem atmosphärischen Luftdruck und der Wasserdruck jenem Druck der jeweiligen Anfangsbedingung (initial condition).

Oberflächen innerhalb der Infiltrometerringe – Farbe cyan und blau:

Der Wasserdruck entspricht der simulierten Überstauhöhe im Bezug auf den atmosphärischen Luftdruck. Die Gasflussbedingung ist auf 0 reduziert.

$$P_{WR} = P_a + h_u \cdot \rho_W \cdot g$$

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{WR}$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Druck der flüssigen Phase an der Oberfläche der Infiltrationsringe
$P_a$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P
$h_{\bar{U}}$	L	m	Überstauhöhe innerhalb der Infiltrationsringe in mWS
$\rho_W$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser bei 20°C
$g$	$M T^{-2}$	$m s^{-2}$	Erdbeschleunigung

### Unterseite des Simulationsmodells – Farbe rot:

Als relativer Luftdruck wird im Weiteren der um den atmosphärischen Luftdruck reduzierte Absolutdruck verstanden. Wenn kein relativer Bodenluftdruck angesetzt (Varianten ohne Bodenluft/Gegen/Gegenluftdruck) ist, entspricht der Bodenluftdruck dem atmosphärischen Druck.

Diese Randbedingung ist ebenfalls durch Wasserdruck und Gasdruck definiert. Die Drücke sind von der Simulationsdurchführung (mit Gegenluftdruck – 3-Phasensystem) abhängig. Das bedeutet für Versuche ohne Bodenluftdruck, dass der Gasdruck dem atmosphärischen Luftdruck entspricht. Der Druck der flüssigen Phase entspricht dem gewählten Flüssigkeitsdruck entsprechend der Vorsättigung.

$$P_{LBOG} = P_a$$

#### **Gl. 15: Berechnung Druck gasförmige Phase – Unterseite – ohne Gegendruck – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{LBOG}$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Druck der gasförmigen Phase an der Unterseite des Simulationsmodells – ohne Gegendruck der Bodenluft
$P_a$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P

$$P_{WBOG} = P_a + h_{\bar{U}} \cdot \rho_W \cdot g$$

#### **Gl. 16: Berechnung Druck flüssige Phase – Unterseite – ohne Gegendruck – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{WBOG}$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	Druck der flüssigen Phase an der Unterseite des Simulationsmodells – ohne Gegendruck der Bodenluft
$P_a$	$M L^{-1} T^{-2}$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P
$h_{\bar{U}}$	L	m	Überstauhöhe innerhalb der Infiltrationsringe in mWS
$\rho_W$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser bei 20°C
$g$	$M T^{-2}$	$m s^{-2}$	Erdbeschleunigung

Bei jenen Versuchen, wo in der Simulation angenommen wird, dass sich ein Gegendruck durch Kompression der Bodenluft verursacht durch die Infiltrationsfront, aufbaut, wird der Druck der gasförmigen Phase und der flüssigen Phase wie folgt errechnet:

$$P_{LBMG} = P_a + h_{\dot{U}} \cdot \rho_W \cdot g$$

**Gl. 17: Berechnung Druck gasförmige Phase – Unterseite – mit Gegendruck – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{LBMG}$	$M L^{-1} T^2$	Pa	Druck der gasförmigen Phase an der Unterseite des Simulationsmodells – mit Gegendruck der Bodenluft
$P_a$	$M L^{-1} T^2$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P
$h_{\dot{U}}$	L	m	Vorsättigung des Bodens in mWS
$\rho_W$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser bei 20°C
$g$	$M T^{-2}$	$m s^{-2}$	Erdbeschleunigung

$$P_{WBMG} = P_a + h_{\dot{U}} \cdot \rho_W \cdot g - h_{vor} \cdot \rho_W \cdot g$$

**Gl. 18: Berechnung Druck flüssige Phase – mit Gegendruck – Stomp**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$P_{WB}$	$M L^{-1} T^2$	Pa	Druck der flüssigen Phase an der Unterseite des Simulationsmodells – mit Gegendruck der Bodenluft
$P_a$	$M L^{-1} T^2$	Pa	atmosphärischer Luftdruck bei 0 m Seehöhe = 101325 P
$h_{vor}$	L	m	Vorsättigung des Bodens in mWS
$\rho_W$	$M L^{-3}$	$kg m^{-3}$	Dichte von Wasser bei 20°C
$g$	$M T^{-2}$	$m s^{-2}$	Erdbeschleunigung

### 3.2. Feldversuche – Kombination des Doppelringinfiltrometerversuches mit weiteren Messungen

Um die Wassergehalts- und Tensiometermessungen gemeinsam mit den Infiltrometerversuchen im praktischen Einsatz zu definieren, wurden Feldversuche im kleinen Rahmen durchgeführt und die Messergebnisse mit den Simulationen verglichen. Die Feldversuche haben an 2 Orten im Großraum Wien stattgefunden.

Bei diesen Feldversuchen wurden jeweils 3 Doppelringversuche durchgeführt

Weiters wurde versucht die Ringinfiltrometermessungen, sei es Doppel- oder Einfachringversuch, mit Messungen von anderen Bodenzustandsgrößen zu kombinieren und daraus eventuell bessere die Durchlässigkeit genauer ermitteln zu können.

### 3.2.1. Versuchsstandorte

Die Messungen wurden in der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur/Wien Groß-Enzersdorf und in Untertullnerbach durchgeführt.

#### Groß-Enzersdorf

##### Lage

Die Versuchswirtschaft befindet sich ca. 2 km östlich von der Wiener Stadtgrenze in Groß-Enzersdorf im Marchfeld.

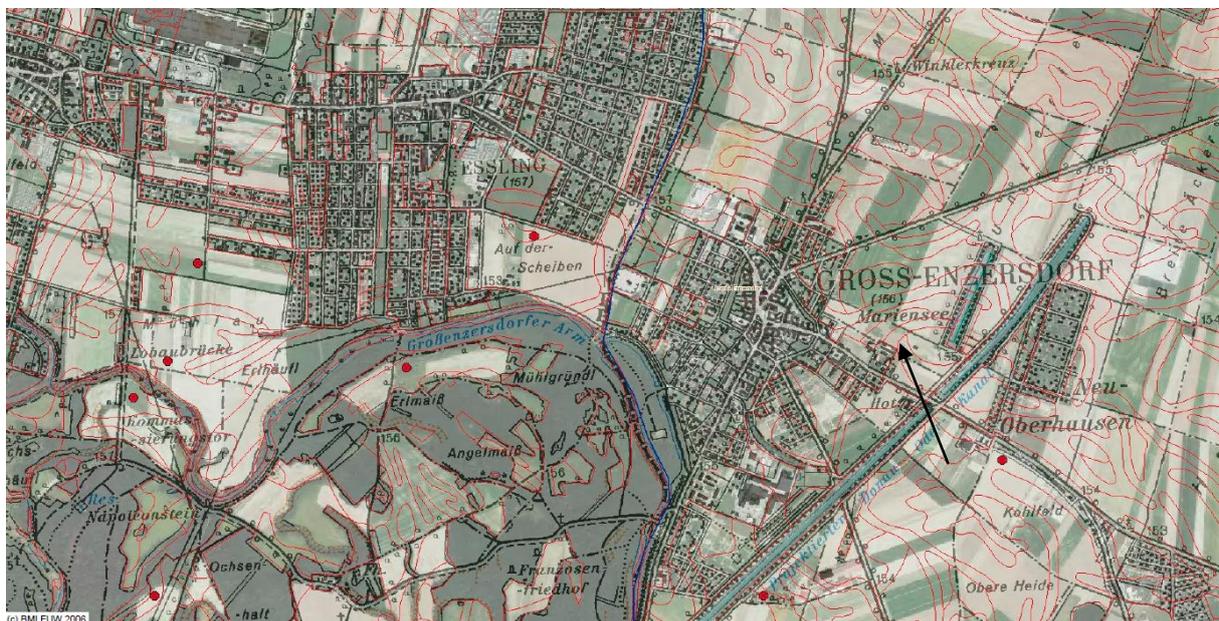


Abb. 35: Lage Groß-Enzersdorf [©BMLFUW, 2006]

##### Klima

Die Versuchswirtschaft liegt im pannonischen Klimagebiet bzw. im Kleinproduktionsgebiet Marchfeld. Die Felder liegen in offener, windiger Lage 156 m über dem Meeresniveau. Das Klima ist besonders im Sommer durch geringe Luftfeuchtigkeit und wenig Taubildung gekennzeichnet. Der Klimaraum ist durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 9,8 ° C, die mittlere Niederschlagssumme 546 mm und die durchschnittliche relative Luftfeuchte 75 %.

##### Bedingungen bei den Feldversuchen

Die Feldversuche in Groß-Enzersdorf wurden im Juli 2012 durchgeführt. Die Lufttemperatur betrug 34°C und es fiel kein Niederschlag in den Wochen vor den Feldversuchen. Zum Zeitpunkt des Feldversuches war es sonnig und trocken.

### Bodenbedingungen

Der Boden ist tiefgründig, mittelschwer und besteht aus schluffigem Lehm, wobei der Schluffgehalt im Unterboden stark zunimmt; er ist ein Tschernosem der Praterterrasse. Der Ap-Horizont reicht von 0 - 25 cm und hat eine graubraune Farbe. Der Oberboden ist humos und stark lehmig.

### Untertullnerbach

Die Marktgemeinde Tullnerbach besteht aus den Ortsteilen Lawies, Untertullnerbach und Irenental. Untertullnerbach befindet sich ca. 16 km westlich von Wien (Abbildung 36).

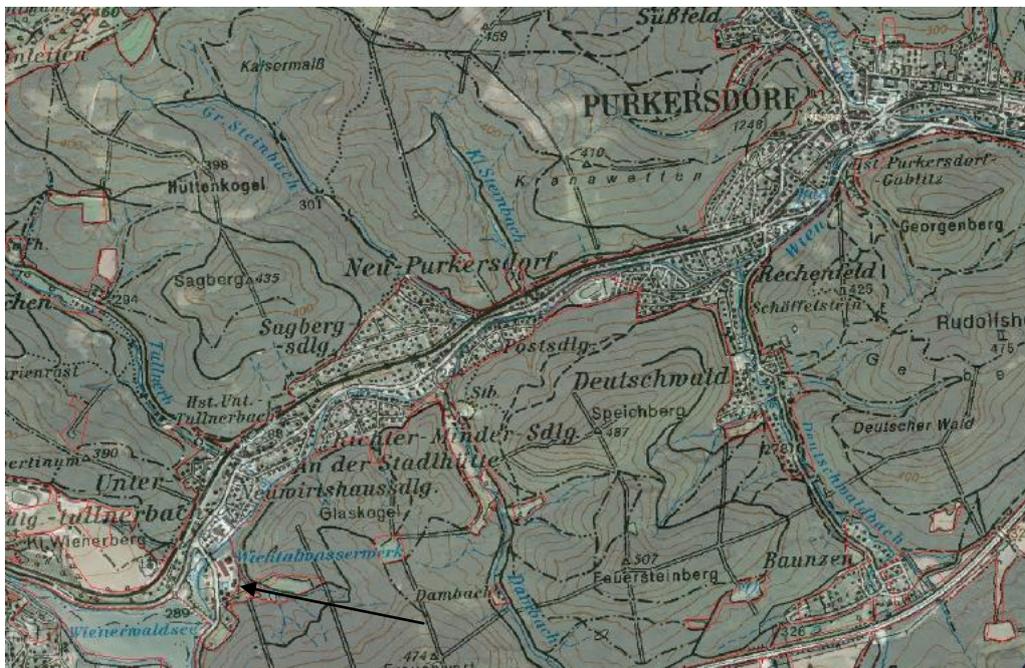


Abb. 36: Lage Untertullnerbach [©BMLUF, 2006]

### Klima

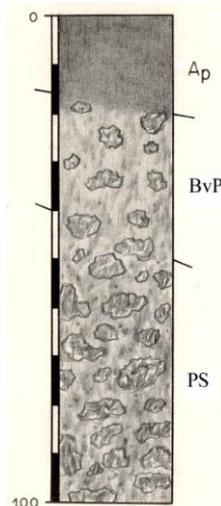
Das Klima in Untertullnerbach wird vom atlantisch beeinflussten Übergangsklima bestimmt.

### Bedingungen bei den Feldversuchen

Die Feldversuche wurden im Oktober 2012 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt der Feldversuchsdurchführung war es regnerisch, die Lufttemperatur betrug 12°C.

### Bodenbedingungen

Zur Bodenbeschreibung des Feldversuches in Untertullnerbach wurde die Profilstelle Brentenmais des BMLUF herangezogen, da diese im unmittelbaren Umfeld von Untertullnerbach liegt. In Abbildung 37 ist dieses Profil dargestellt.



**Abb. 37: Bodenprofil Brentenmais [©BMLUF, 2006]**

Der Ap-Horizont besteht aus einem Mineralboden, der relativ dunkel gefärbt ist. Der darunter liegende BvP-Horizont ist ein Horizont mit Verwitterung (Oxidation), zum Teil mit deutlicher Verlehmung. Unterhalb dieser Schicht befindet sich die Stauzone des Pseudogleyes, in bzw. über dieser Schicht staut sich das Wasser (Farbe grau bzw. rostfarben marmoriert).

### 3.2.2. Versuchsanordnung

Die DR-Versuche wurden örtlich in einem Abstand von ca. 1,5 Meter angeordnet, um den Verlauf der Versuche vergleichen zu können. Zur genaueren Untersuchung des Verlaufes der Feuchtefront wurde mittels Tensiometer die Wasserspannung vor, während und nach dem DR-Versuch beobachtet. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 38 als Grundriss und in Abbildung 39 als Schnitt dargestellt.

#### 3.2.2.1. Messung der Wasserspannung

Das Tensiometer wurde im Winkel von ca. 50° mit Hilfe eines Tensiometerbohrers eingebracht. Die erreichte Tiefe betrug ca. 20 cm bis 30 cm, gemessen von der Geländeoberkante.

#### 3.2.2.2. Messung des Wassergehaltes des Bodens

Weiters wurde mit einem Wassergehaltssensor die Bodenfeuchte im Bereich des DR-Versuches beobachtet.

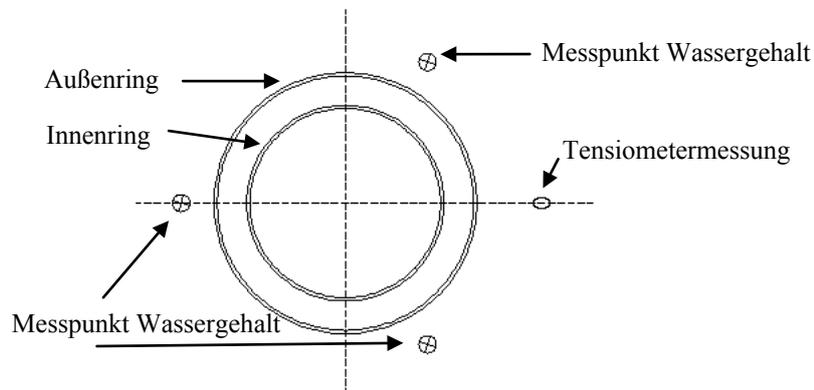


Abb. 38: Versuchsanordnung – Grundriss

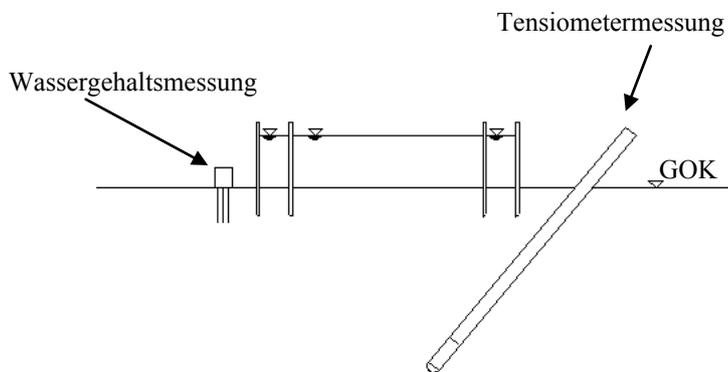


Abb. 39: Versuchsanordnung – Schnitt

Pro Versuchsstandort wurden 3 Doppelringinfiltrometerversuche durchgeführt. In Abbildung 40 ist die Ausführung mit eingebautem Tensiometer dargestellt.



**Abb. 40: DR-Versuch mit eingebautem Tensiometer**

In Abbildung 41 ist die Wassergehaltsmessung beim Feldversuch dargestellt.



**Abb. 41: DR-Versuch – Messung Wassergehalt**

### 3.2.3. inverse Modellierung der Feldversuche in Hydrus

Im Programm Hydrus 2D/3D gibt es die Möglichkeit, aus Messergebnissen aus der Natur Bodenparameter mittels inverser Simulation zu bestimmen. In diesem Fall

wurden die kumulierten Infiltrationsmengen des Innenringes herangezogen, um die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Böden zu berechnen.

### 3.2.3.1. Verwendete Parameter in Hydrus bei der inversen Simulation der Feldmessungen

Folgende Punkte müssen in Hydrus gegenüber den bereits vorher angeführten Standardsimulation geändert werden, um eine numerische Lösung aus dem Programm zu erhalten:

- Simulationsdauer muss der Versuchsdauer entsprechen.
- Folgende Bodenparameter wurden zur Iteration freigegeben:  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  und  $k_s$ .  $\alpha$  und  $n$  (Parameter der van-Genuchten-Gleichung) wurden nicht angepasst, da keine Hysterese berücksichtigt wurde.

## 3.3. Vergleich der Simulationen und Feldversuche mit gängigen Normenwerken

### 3.3.1. Ö-Norm EN ISO 22282-5 Infiltrometerversuche:

In der Ö-Norm EN ISO 22282-5 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche – Teil 5: Infiltrometerversuche“ werden die Ringinfiltrometerversuche analog den Simulationen in dieser Dissertation durchgeführt. Die notwendige und erwähnte Vorsättigung wird durch den 30minütigen Vorlauf im Außenring erreicht (Abbildung 42).

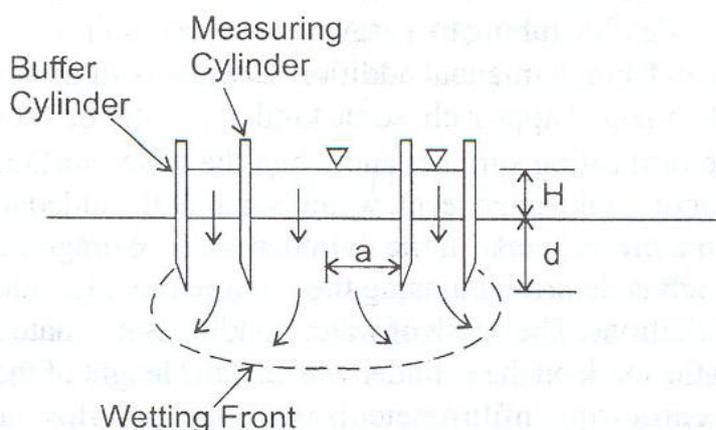
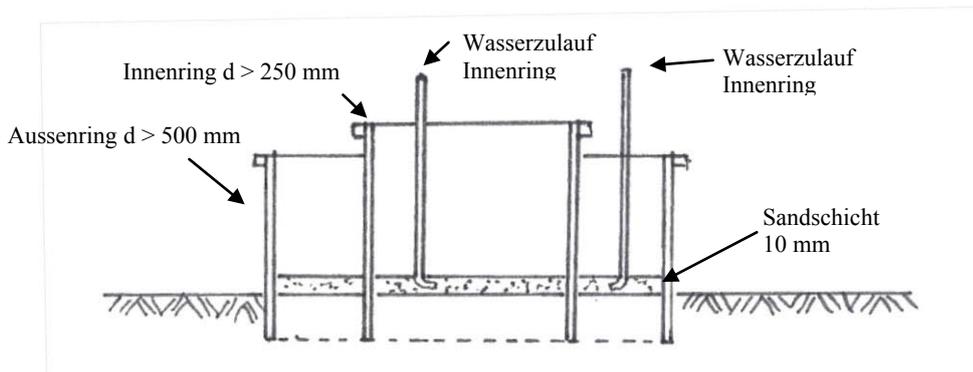


Abb. 42: Infiltrometerversuch lt. Ö-Norm EN ISO 22282-5 [Hillel, 1998]

### 3.3.2. Ö-Norm L 1066 Physikalische Bodenuntersuchungen — Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode):

In der Ö-Norm L 1066 „Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode)“ angeführte dienen als Vorbild für die Versuchsanordnung mit konstanter Druckhöhe in dieser Dissertation (Abbildung 43).



**Abb. 43: Ö-Norm L1066 – DR-Infiltrometersversuch**

### 3.3.3. Ö-Norm B4422-2:

In der Ö-NORM B 4422-2 „Erd- und Grundbau - Untersuchung von Böden - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit - Feldmethoden für oberflächennahe Schichten“ wird das Infiltrationsverhalten mit verschiedenen Methoden im Feld untersucht. Anwendung findet diese Norm bei Böden mit einer Durchlässigkeit von  $k_s < 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ . Die angeführten Standrohr- und Piezometersversuche können nicht direkt mit den Ringinfiltrometersversuchen verglichen werden, da der aufgebrachte Gradient auf die Bodenoberfläche wesentlich größer ist (ca. 1,0 – 2,5 Meter Druckhöhe). Jedoch entspricht der angeführte Infiltrometersversuch (Abbildung 44) den in dieser Dissertation angeführten ER-Infiltrometersversuchen.

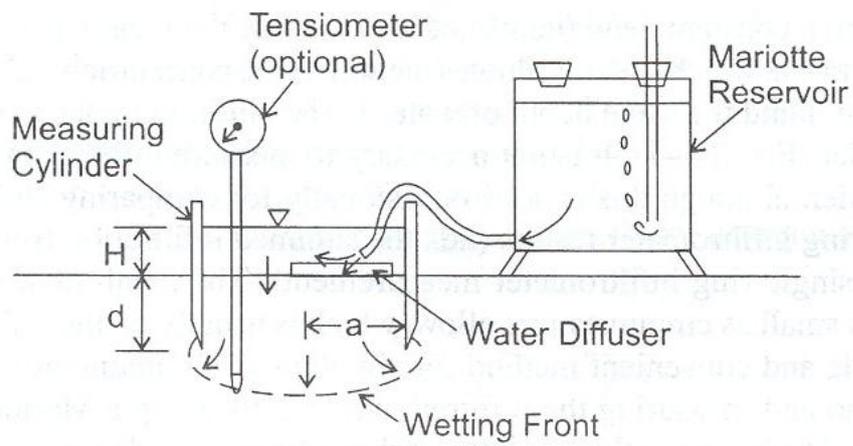


Abb. 44: Infiltrometersversuch lt. Ö-Norm B4422-2 (Prinzipskizze für den gleichartigen Versuch von Hillel, [1998])



## 4. AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Im Anschluss werden die verschiedenen Simulationsergebnisse und Feldversuche genauer erläutert.

### 4.1. Computersimulationen Doppelring Hydrus / Stomp

Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben, wurden 3 unterschiedliche Bodenvarianten mit unterschiedlichen Anfangswasserspannungen simuliert.

Um einen Vergleichswert zu schaffen, mit denen die Simulationsergebnisse verglichen werden können, wurde in Ablehnung an die Methode von Wu et al. [1997] der Korrekturfaktor  $f$  herangezogen.

$$k_s = \frac{i_f}{f}$$

Gl. 19: Umrechnung  $i_f$  in  $k_s$  [Wu, et. al., 1997]

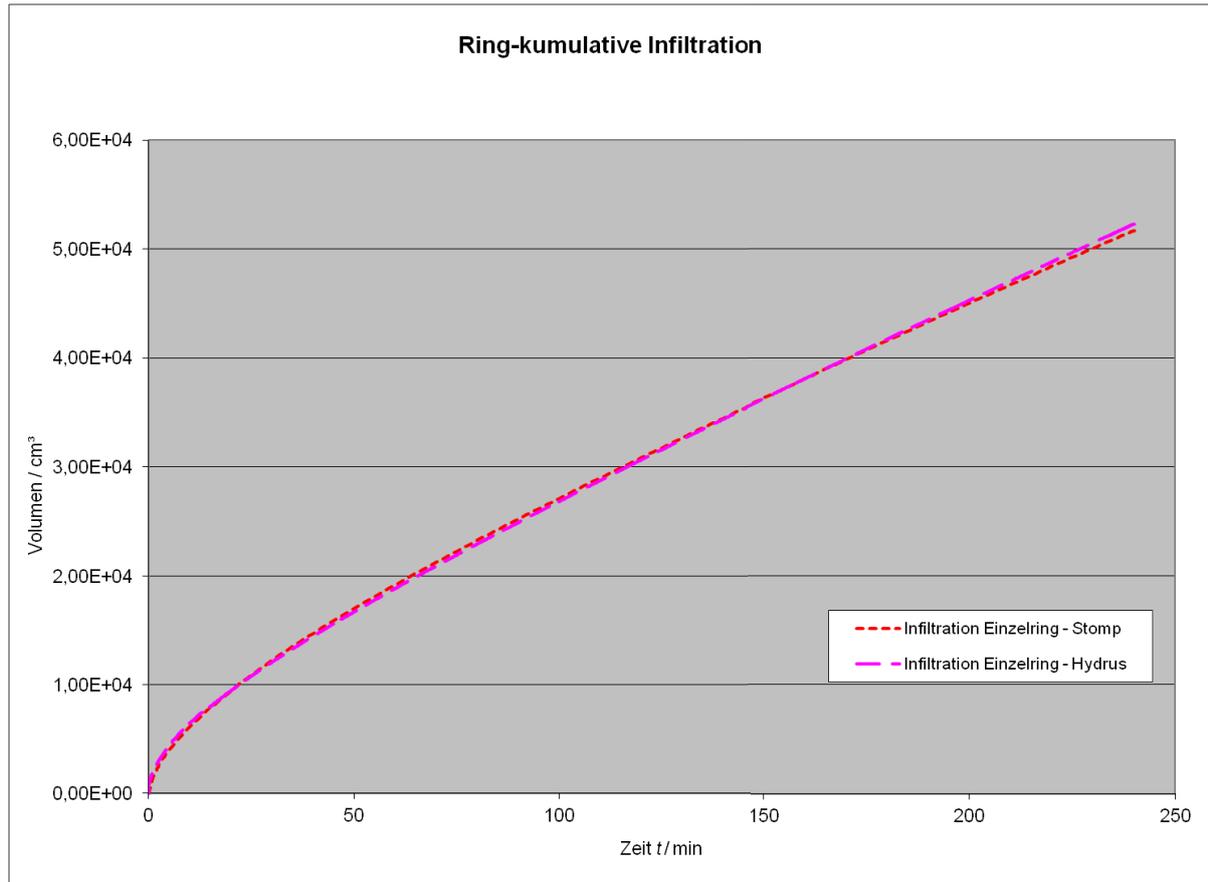
Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$i_f$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Endinfiltrationsrate
$f$	$L^3 L^{-3}$	1	Korrekturfaktor
$k_s$	$L T^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Um den Korrekturfaktor  $f$  bei den Simulationen dieser Dissertation berechnen zu können, wurde diese Formel umgeformt (siehe Gleichung 20).

$$f = \frac{i_f}{k_s}$$

Gl. 20: Umrechnung  $i_f$  in  $K_s$  [Wu, et. al., 1997]

Die Berechnungsergebnisse von Hydrus und der Simulationen von Stomp ohne Gasdruck wurden verglichen, wobei sich erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung zeigte. In der Abbildung 45 ist exemplarisch der kumulative Verlauf der Infiltration von HYDRUS und STOMP-Simulationen dargestellt.



**Abb. 45: kumulativer Verlauf von Hydrus – Stomp – BV 2 – R=40 cm**

In den nächsten Tabellen 16 bis 18 werden die Berechnungsergebnisse der Infiltrationsraten von den Hydrus- und Stomp-Simulationen dargestellt. Es werden jeweils die Ergebnisse für die Innenringe der DR-Simulationen dargestellt.

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp
	innen	ausen							
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
0111	7	14,5	0,006	-9,22E-01	-9,00E-01	-1,54E-04	-1,50E-04	-1,86	-1,82
0211	7	14,5	1	-9,22E-01	-9,00E-01	-1,54E-04	-1,50E-04	-1,86	-1,82
0311	7	14,5	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	15	40	0,006	-6,39E-01	-6,34E-01	-1,07E-04	-1,06E-04	-1,29	-1,28
0211	15	40	1	-6,39E-01	-6,31E-01	-1,07E-04	-1,05E-04	-1,29	-1,28
0311	15	40	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	20	60	0,006	-5,65E-01	-5,56E-01	-9,42E-05	-9,27E-05	-1,14	-1,12
0211	20	60	1	-5,57E-01	-5,56E-01	-9,28E-05	-9,27E-05	-1,13	-1,12
0311	20	60	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	40	80	0,006	-5,35E-01	-5,27E-01	-8,92E-05	-8,78E-05	-1,08	-1,06
0211	40	80	1	-5,34E-01	-5,28E-01	-8,90E-05	-8,80E-05	-1,08	-1,07
0311	40	80	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	60	100	0,006	-5,22E-01	-5,14E-01	-8,69E-05	-8,57E-05	-1,05	-1,04
0211	60	100	1	-5,22E-01	-5,15E-01	-8,69E-05	-8,59E-05	-1,05	-1,04
0311	60	100	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	80	120	0,006	-5,17E-01	-5,08E-01	-8,62E-05	-8,46E-05	-1,04	-1,03
0211	80	120	1	-5,15E-01	-5,09E-01	-8,58E-05	-8,48E-05	-1,04	-1,03
0311	80	120	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	100	140	0,006	-5,09E-01	-5,04E-01	-8,49E-05	-8,40E-05	-1,03	-1,02
0211	100	140	1	-5,11E-01	-5,05E-01	-8,51E-05	-8,42E-05	-1,03	-1,02
0311	100	140	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	120	160	0,006	-5,08E-01	-5,01E-01	-8,47E-05	-8,36E-05	-1,03	-1,01
0211	120	160	1	-5,07E-01	-5,01E-01	-8,46E-05	-8,36E-05	-1,02	-1,01
0311	120	160	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV

Tab. 16: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 0 – Doppelring

Jene Werte, die mit #NV gekennzeichnet sind, waren für diesen Simulationsbodentyp in den jeweiligen Simulationsprogrammen numerisch nicht lösbar. Eine Begründung dafür ist in Kapitel 4.3.3 nachzulesen.

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	innen	ausen		Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp
	Ring							<i>f</i>	
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
1111	7	14,5	0,006	-4,48E-01	-4,37E-01	-7,47E-05	-7,29E-05	-1,84	-1,80
1211	7	14,5	1	-4,48E-01	-4,37E-01	-7,47E-05	-7,29E-05	-1,84	-1,80
1311	7	14,5	15	-4,48E-01	-4,39E-01	-7,47E-05	-7,31E-05	-1,84	-1,80
1111	15	40	0,006	-3,13E-01	-3,08E-01	-5,21E-05	-5,13E-05	-1,29	-1,27
1211	15	40	1	-3,13E-01	-3,08E-01	-5,21E-05	-5,13E-05	-1,29	-1,27
1311	15	40	15	-3,13E-01	-3,09E-01	-5,21E-05	-5,15E-05	-1,29	-1,27
1111	20	60	0,006	-2,76E-01	-2,71E-01	-4,60E-05	-4,52E-05	-1,14	-1,12
1211	20	60	1	-2,76E-01	-2,71E-01	-4,60E-05	-4,52E-05	-1,14	-1,12
1311	20	60	15	-2,76E-01	-2,73E-01	-4,60E-05	-4,55E-05	-1,14	-1,12
1111	40	80	0,006	-2,63E-01	-2,59E-01	-4,38E-05	-4,32E-05	-1,08	-1,07
1211	40	80	1	-2,61E-01	-2,59E-01	-4,34E-05	-4,32E-05	-1,07	-1,07
1311	40	80	15	-2,63E-01	-2,59E-01	-4,38E-05	-4,32E-05	-1,08	-1,07
1111	60	100	0,006	-2,56E-01	-2,51E-01	-4,27E-05	-4,19E-05	-1,05	-1,03
1211	60	100	1	-2,56E-01	-2,51E-01	-4,26E-05	-4,19E-05	-1,05	-1,03
1311	60	100	15	-2,56E-01	-2,51E-01	-4,26E-05	-4,19E-05	-1,05	-1,03
1111	80	120	0,006	-2,54E-01	-2,48E-01	-4,23E-05	-4,14E-05	-1,04	-1,02
1211	80	120	1	-2,54E-01	-2,48E-01	-4,23E-05	-4,14E-05	-1,04	-1,02
1311	80	120	15	-2,54E-01	-2,48E-01	-4,23E-05	-4,14E-05	-1,04	-1,02
1111	100	140	0,006	-2,51E-01	-2,48E-01	-4,19E-05	-4,13E-05	-1,03	-1,02
1211	100	140	1	-2,51E-01	-2,48E-01	-4,19E-05	-4,13E-05	-1,03	-1,02
1311	100	140	15	-2,51E-01	-2,48E-01	-4,19E-05	-4,13E-05	-1,03	-1,02
1111	120	160	0,006	-2,50E-01	-2,46E-01	-4,16E-05	-4,11E-05	-1,03	-1,01
1211	120	160	1	-2,50E-01	-2,46E-01	-4,16E-05	-4,11E-05	-1,03	-1,01
1311	120	160	15	-2,50E-01	-2,46E-01	-4,16E-05	-4,11E-05	-1,03	-1,01

Tab. 17: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp Bodenvariante 1 – Doppelring

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp
	innen	ausen							
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
2111	7	14,5	0,006	-3,86E-02	-3,86E-02	-6,43E-06	-6,04E-06	-1,77	-1,66
2211	7	14,5	1	-3,96E-02	-3,84E-02	-6,60E-06	-6,40E-06	-1,81	-1,76
2311	7	14,5	15	-3,86E-02	-3,62E-02	-6,60E-06	-6,47E-06	-1,81	-1,78
2111	15	40	0,006	-2,67E-02	-2,62E-02	-4,46E-06	-4,37E-06	-1,23	-1,20
2211	15	40	1	-2,81E-02	-2,57E-02	-4,68E-06	-4,29E-06	-1,28	-1,18
2111	15	40	15	-2,90E-02	-2,70E-02	-4,83E-06	-4,50E-06	-1,33	-1,24
2111	20	60	0,006	-2,45E-02	-2,35E-02	-4,09E-06	-3,92E-06	-1,12	-1,08
2211	20	60	1	-2,49E-02	-2,38E-02	-4,15E-06	-3,97E-06	-1,14	-1,09
2311	20	60	15	-2,55E-02	-2,48E-02	-4,24E-06	-4,13E-06	-1,17	-1,13
2111	40	80	0,006	-2,35E-02	-2,26E-02	-3,91E-06	-3,76E-06	-1,08	-1,03
2211	40	80	1	-2,35E-02	-2,35E-02	-3,91E-06	-3,92E-06	-1,08	-1,08
2311	40	80	15	-2,39E-02	-2,34E-02	-3,98E-06	-3,89E-06	-1,09	-1,07
2111	60	100	0,006	-2,28E-02	-2,21E-02	-3,80E-06	-3,68E-06	-1,04	-1,01
2211	60	100	1	-2,31E-02	-2,27E-02	-3,85E-06	-3,78E-06	-1,06	-1,04
2311	60	100	15	-2,32E-02	-2,24E-02	-3,87E-06	-3,74E-06	-1,06	-1,03
2111	80	120	0,006	-2,26E-02	-2,18E-02	-3,77E-06	-3,63E-06	-1,04	-1,00
2211	80	120	1	-2,29E-02	-2,26E-02	-3,82E-06	-3,76E-06	-1,05	-1,03
2311	80	120	15	-2,31E-02	-2,19E-02	-3,85E-06	-3,65E-06	-1,06	-1,00
2111	100	140	0,006	-2,24E-02	-2,17E-02	-3,73E-06	-3,62E-06	-1,03	-0,99
2211	100	140	1	-2,25E-02	-2,21E-02	-3,76E-06	-3,68E-06	-1,03	-1,01
2311	100	140	15	-2,27E-02	-2,16E-02	-3,78E-06	-3,60E-06	-1,04	-0,99
2111	120	160	0,006	-2,23E-02	-2,16E-02	-3,72E-06	-3,60E-06	-1,02	-0,99
2211	120	160	1	-2,25E-02	-2,18E-02	-3,74E-06	-3,64E-06	-1,03	-1,00
2311	120	160	15	-2,26E-02	-2,18E-02	-3,76E-06	-3,64E-06	-1,03	-1,00

Tab. 18: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 2 - Doppelring

#### 4.1.1. Untersuchungen der Eindringtiefe

Weiters wurden die Auswirkungen der Eindringtiefe bei den DR-Versuchen untersucht. Bezüglich der Eindringtiefe wurde festgestellt, dass in den üblichen Einbautiefen (3 bis 5 cm) nur geringe Auswirkungen auf die berechneten Infiltrationsraten zu erwarten sind. Der Einfluss der Eindringtiefe nimmt mit abnehmender gesättigter Leit-

fähigkeit des Bodens ab. In den nachfolgenden Abbildungen 46 bis 48 sind die kumulierten Infiltrationsmengen mit einem Innenringdurchmesser von 7 cm bei den jeweiligen Bodenvarianten dargestellt. Die Bezeichnungen ED mit der nachfolgenden Zahl beschreiben die Eindringtiefe in cm.

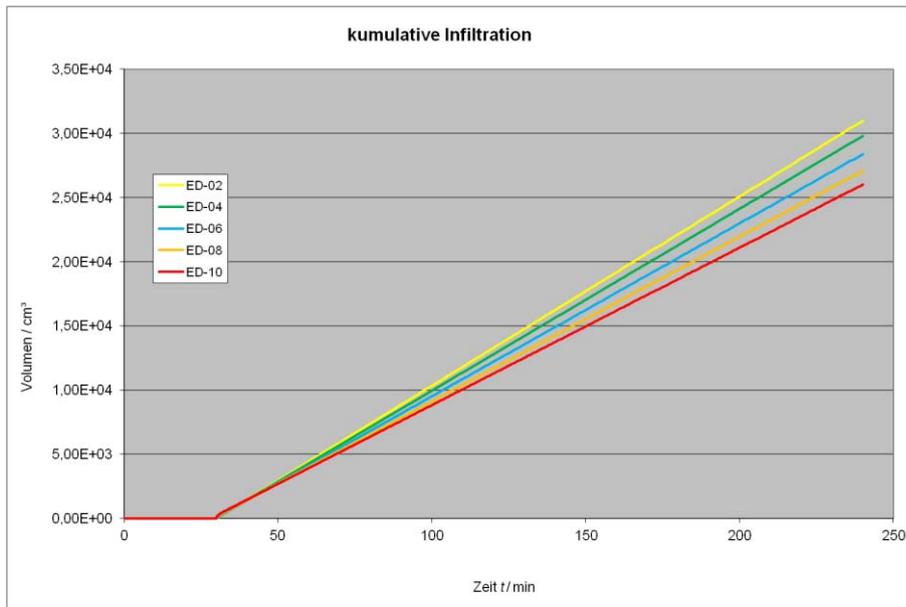


Abb. 46: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 0

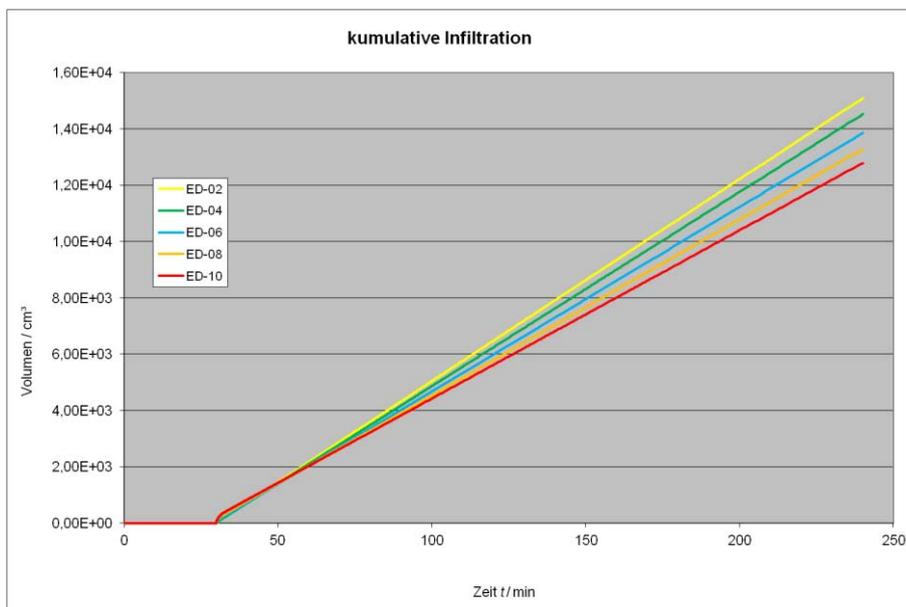


Abb. 47: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 1

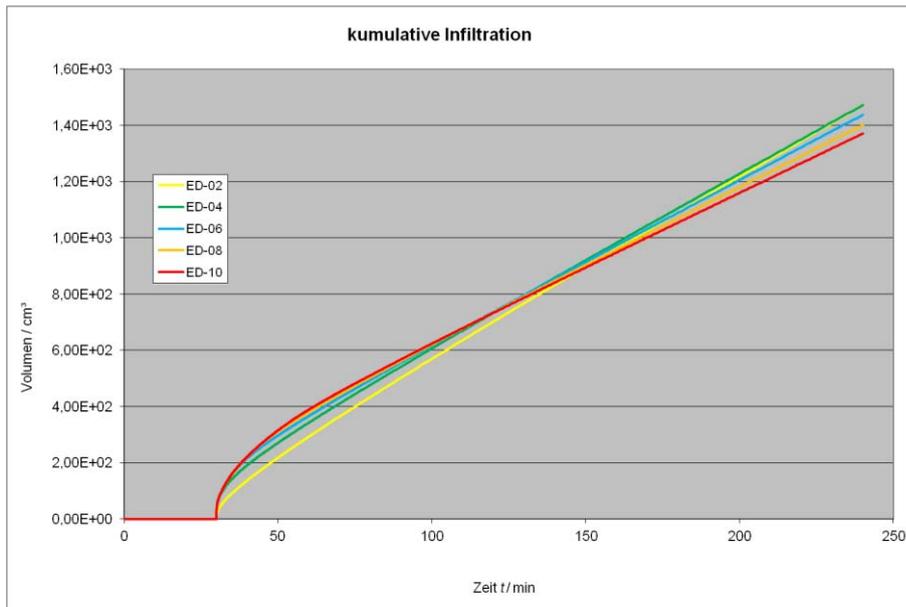
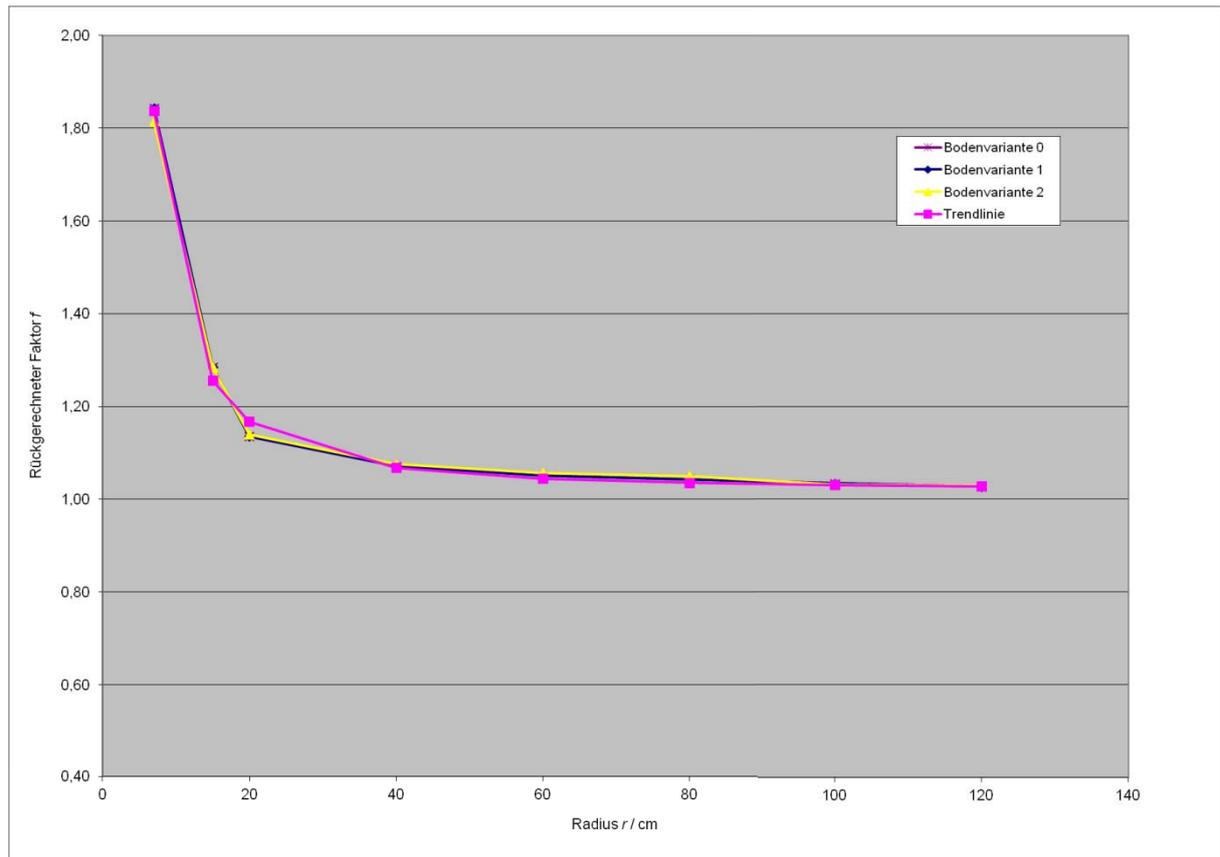


Abb. 48: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 2

#### 4.1.2. Untersuchungen der Ringgröße

Der Ringradius der Innenringe wurde stufenweise von 7 cm bis auf 120 cm erhöht. Der Innenradius zeigte eine starke Auswirkung auf den  $f$ -Faktor. Die berechneten  $f$ -Faktoren wurden in einem Diagramm zusammengefasst, wobei sich die Kurve in Abbildung 49 ergab. Festzustellen war, dass die rückgerechneten  $f$ -Faktoren unabhängig von den unterschiedlichen simulierten Bodenvarianten den gleichen Verlauf zeigten. Bei den der Abbildung 49 zu Grunde liegenden Simulationen entsprach die Vorsättigung einer Wasserspannung von 1,0 bar (bzw. einem pF-Wert von 3,0).



**Abb. 49:** Verlauf der  $f$ -Faktoren in Abhängigkeit des Innenringdurchmessers,  $pF=3,0$  – DR – Hydrus  
 Durch Mittelwertbildung der  $f$ -Faktoren und anschließender Annäherung durch Bildung einer Trendlinie wurde folgende Funktion dieser Trendlinie berechnet. Die Eindringtiefe beträgt 4 cm.

$$f = 1,02 + 19,5 \cdot r_i^{-1,63}$$

**Gl. 21:** Berechnung vom Korrekturfaktor  $f$  bei DR-Versuchen

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$f$	1	1	Korrekturfaktor
$r_i$	L	cm	Radius Innenring

Um einen vollständigen Überblick zu geben, wird das Diagramm mit den Stomp-Simulationen angeführt (Abbildung 50). Aus dem Vergleich von Abbildung 49 und 50 ist zu erkennen, dass der Kurvenverlauf der  $f$ -Faktoren sehr genau dem der Hydrus-Simulation gleicht.

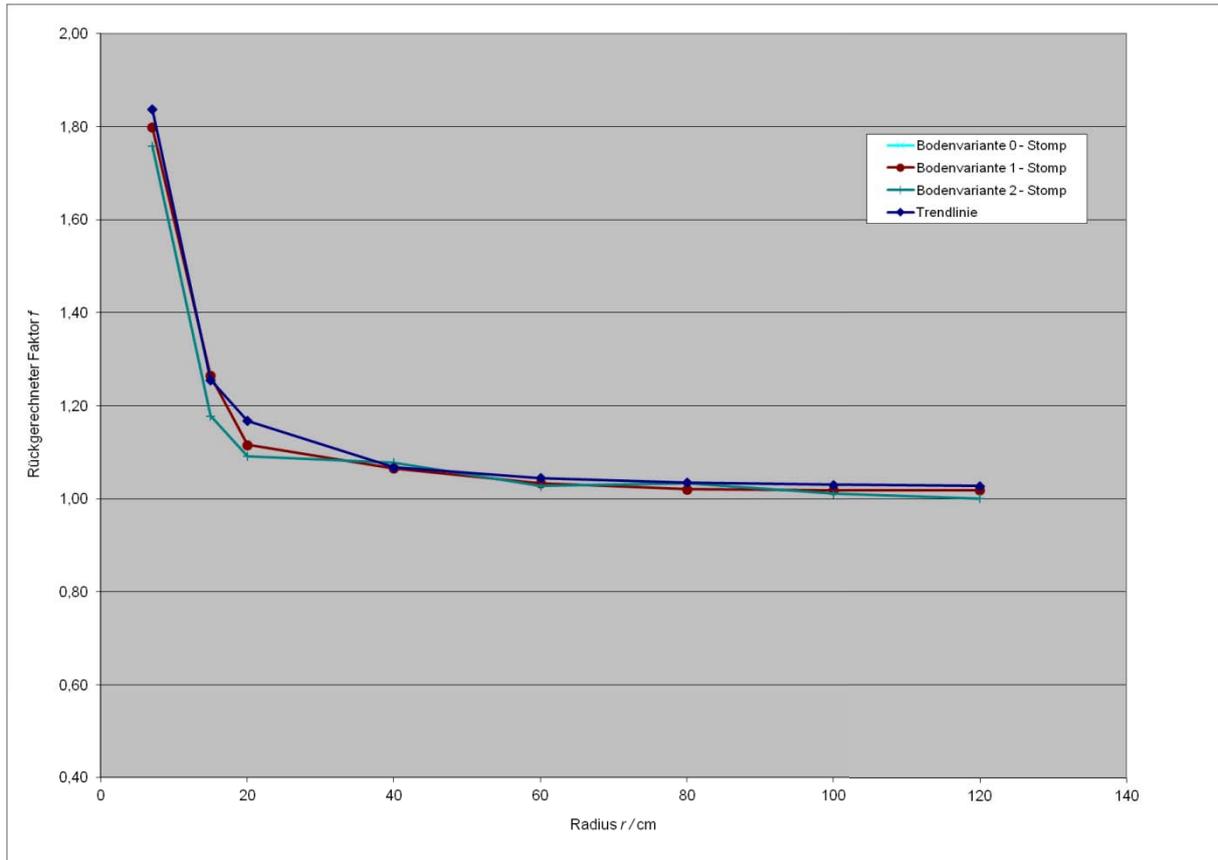


Abb. 50: Verlauf der  $f$ -Faktoren – Stomp-Simulation

#### 4.1.3. Untersuchungen der Vorsättigung

Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Vorsättigungen der Böden waren keine großen Unterschiede bei den Ergebnissen der Simulationen mit unterschiedlicher Vorsättigung im gleichen Simulationsboden feststellbar. Diese ist den Tabellen 16 bis 18 zu entnehmen.

#### 4.2. Computersimulationen Einzelring Hydrus und Stomp

Da die Simulationen der Doppelringinfiltrationen mit den jeweiligen Vorsättigungen keine relevanten Unterschiede (3 Vorsättigungen 0,006 bar, 1,0 bar und 15 bar) ergaben, wurden die Simulationen der Einzelringe im geringeren Umfang bei einer Vorsättigung von 1,0 bar mit Hydrus und Stomp durchgeführt. Die Rückrechnung der  $f$ -Faktoren erfolgte analog der in Kapitel 4.1 beschriebenen Weise (Eindringtiefe beträgt ebenfalls 4 cm).

Es wurde folgende Funktion der Trendlinie errechnet:

$$f = 1,01 + \frac{2,61}{2} \cdot (1 - F_{er} \left( \ln \frac{\frac{10,16}{r}}{\sqrt{2} \cdot -1,78} \right))$$

**Gl. 22: Berechnung vom Korrekturfaktor  $f$  bei ER-Versuchen**

Formelzeichen	Dimension	übliche Einheit	Bezeichnung
$f$	1 <sup>3</sup>	1	Korrekturfaktor
$r$	L	cm	Ringradius
$F_{er}$	1	1	Gauß'sche Fehlerfunktion

In den folgenden Tabellen 19 bis 21 sind die Berechnungsergebnisse der ER-Simulationen angefügt.

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	f	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
0211	7	0	1	-1,27E+00	-1,21E+00	-2,12E-04	-2,02E-04	-2,56	-2,43
0211	15	0	1	-1,05E+00	-1,01E+00	-1,74E-04	-1,68E-04	-2,08	-2,02
0211	20	0	1	-9,63E-01	-9,35E-01	-1,60E-04	-1,56E-04	-1,93	-1,87
0211	40	0	1	-7,90E-01	-7,72E-01	-1,32E-04	-1,29E-04	-1,59	-1,55
0211	60	0	1	-7,07E-01	-6,91E-01	-1,18E-04	-1,15E-04	-1,42	-1,39
0211	80	0	1	-6,57E-01	-6,41E-01	-1,09E-04	-1,07E-04	-1,33	-1,29
0211	100	0	1	-6,24E-01	-6,17E-01	-1,04E-04	-1,03E-04	-1,26	-1,24
0211	120	0	1	-6,10E-01	-5,96E-01	-1,02E-04	-9,93E-05	-1,22	-1,20

Tab. 19: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp Bodenvariante 0 – Einzelring

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	f	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
1211	7	0	1	-6,24E-01	-5,91E-01	-1,04E-04	-9,86E-05	-2,56	-2,43
1211	15	0	1	-5,06E-01	-4,92E-01	-8,44E-05	-8,19E-05	-2,08	-2,02
1211	20	0	1	-4,70E-01	-4,56E-01	-7,83E-05	-7,59E-05	-1,93	-1,87
1211	40	0	1	-3,86E-01	-3,77E-01	-6,43E-05	-6,28E-05	-1,59	-1,55
1211	60	0	1	-3,45E-01	-3,38E-01	-5,75E-05	-5,63E-05	-1,42	-1,39
1211	80	0	1	-3,23E-01	-3,15E-01	-5,39E-05	-5,24E-05	-1,33	-1,29
1211	100	0	1	-3,06E-01	-3,02E-01	-5,09E-05	-5,03E-05	-1,26	-1,24
1211	120	0	1	-2,96E-01	-2,92E-01	-4,94E-05	-4,86E-05	-1,22	-1,20

Tab. 20: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 1 – Einfachring

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	f	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
2211	7	0	1	-5,39E-02	-5,10E-02	-8,99E-06	-8,51E-06	-2,47	-2,34
2211	15	0	1	-4,44E-02	-4,28E-02	-7,40E-06	-7,13E-06	-2,03	-1,96
2211	20	0	1	-4,30E-02	-3,99E-02	-7,16E-06	-6,64E-06	-1,97	-1,83
2211	40	0	1	-3,44E-02	-3,28E-02	-5,73E-06	-5,46E-06	-1,58	-1,50
2211	60	0	1	-3,14E-02	-2,93E-02	-5,23E-06	-4,88E-06	-1,44	-1,34
2211	80	0	1	-2,98E-02	-2,78E-02	-4,97E-06	-4,63E-06	-1,37	-1,27
2211	100	0	1	-2,77E-02	-2,61E-02	-4,62E-06	-4,35E-06	-1,27	-1,20
2211	120	0	1	-2,79E-02	-2,52E-02	-4,64E-06	-4,20E-06	-1,28	-1,16

Tab. 21: Simulationsergebnisse Hydrus – Stomp, Bodenvariante 2 – Einfachring

#### 4.2.1. Untersuchungen der Eindringtiefe

Der Einfluss der Eindringtiefe ist bei den Einzelringsimulationen größer als bei den Doppelringsimulationen. Das Verhalten des Einflusses ist unterschiedlich zu den Doppelringsimulationen. Der Einfluss nimmt mit abnehmender gesättigter Leitfähigkeit des Bodens nicht ab. In den nachfolgenden Abbildungen 46 bis 48 sind die kumulierten Infiltrationsmengen mit einem Ringdurchmesser von 7 cm bei den jeweiligen Bodenvarianten dargestellt. Die Bezeichnungen ED mit der nachfolgenden Zahl beschreiben die Eindringtiefe in cm.

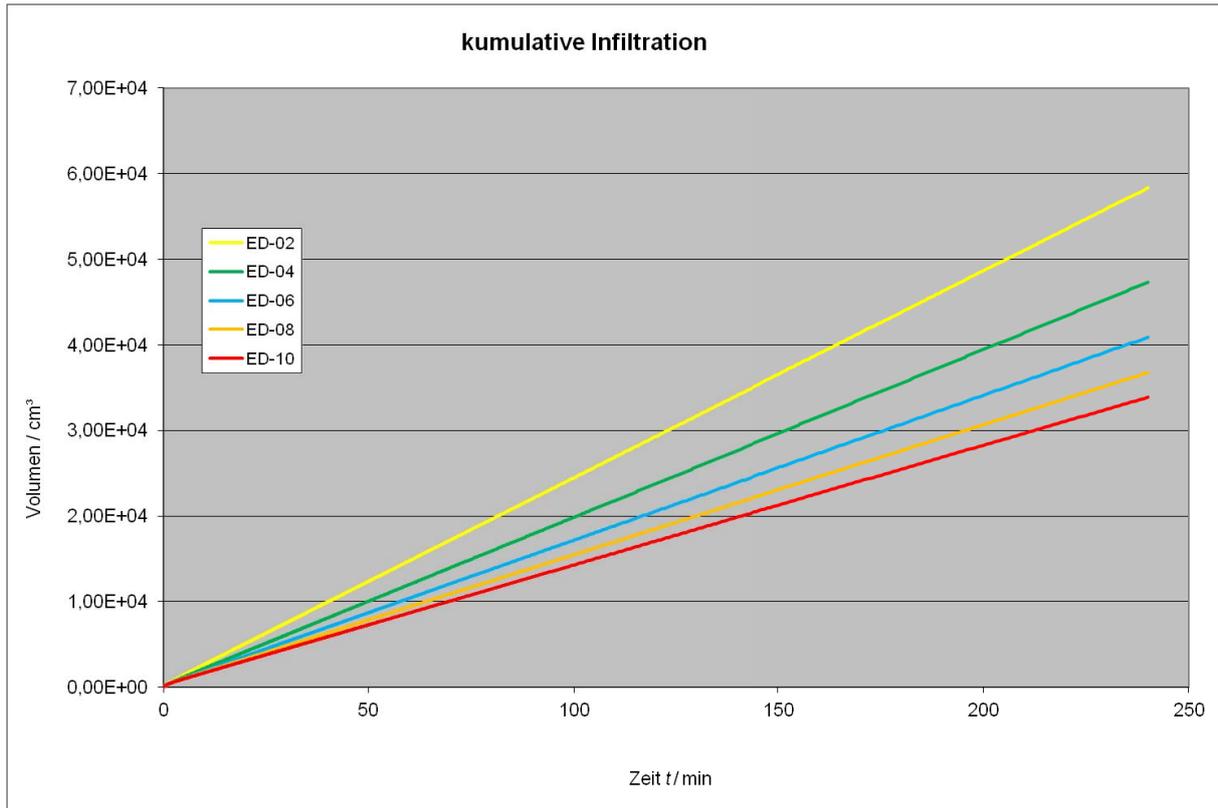


Abb. 51: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 0

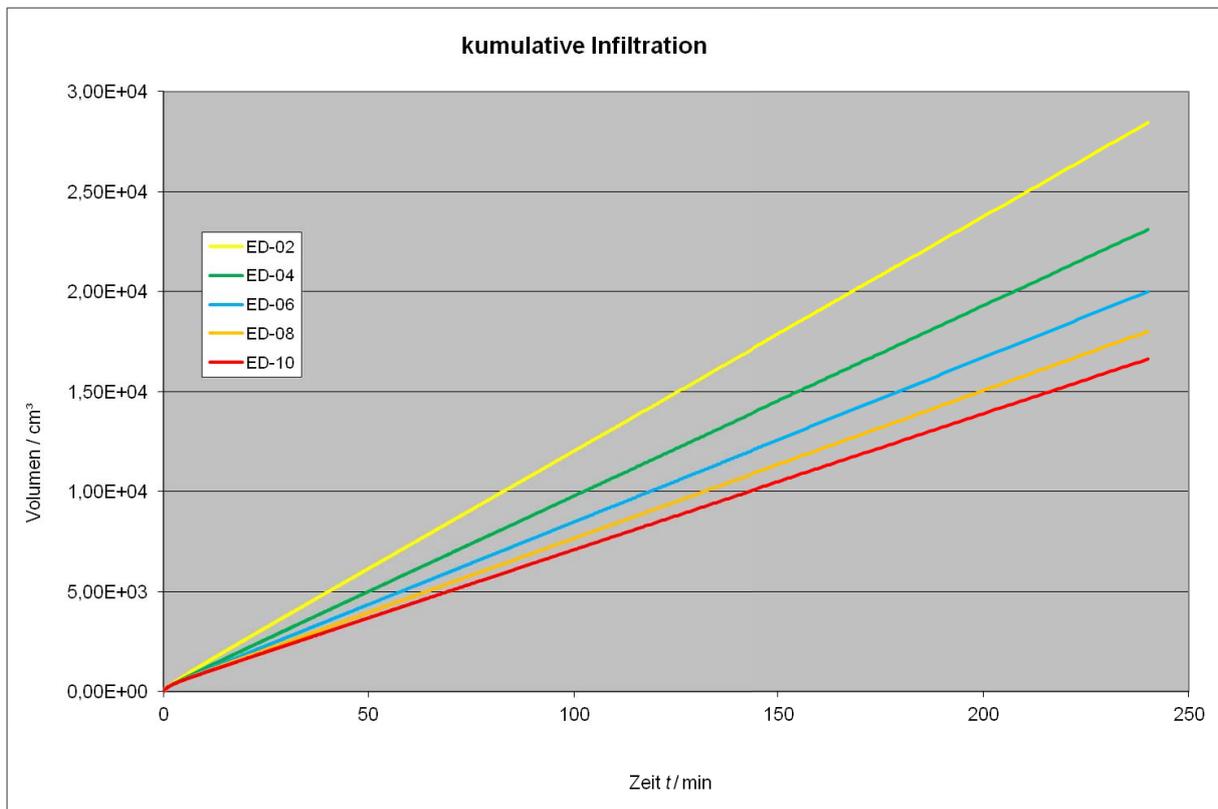


Abb. 52: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 1

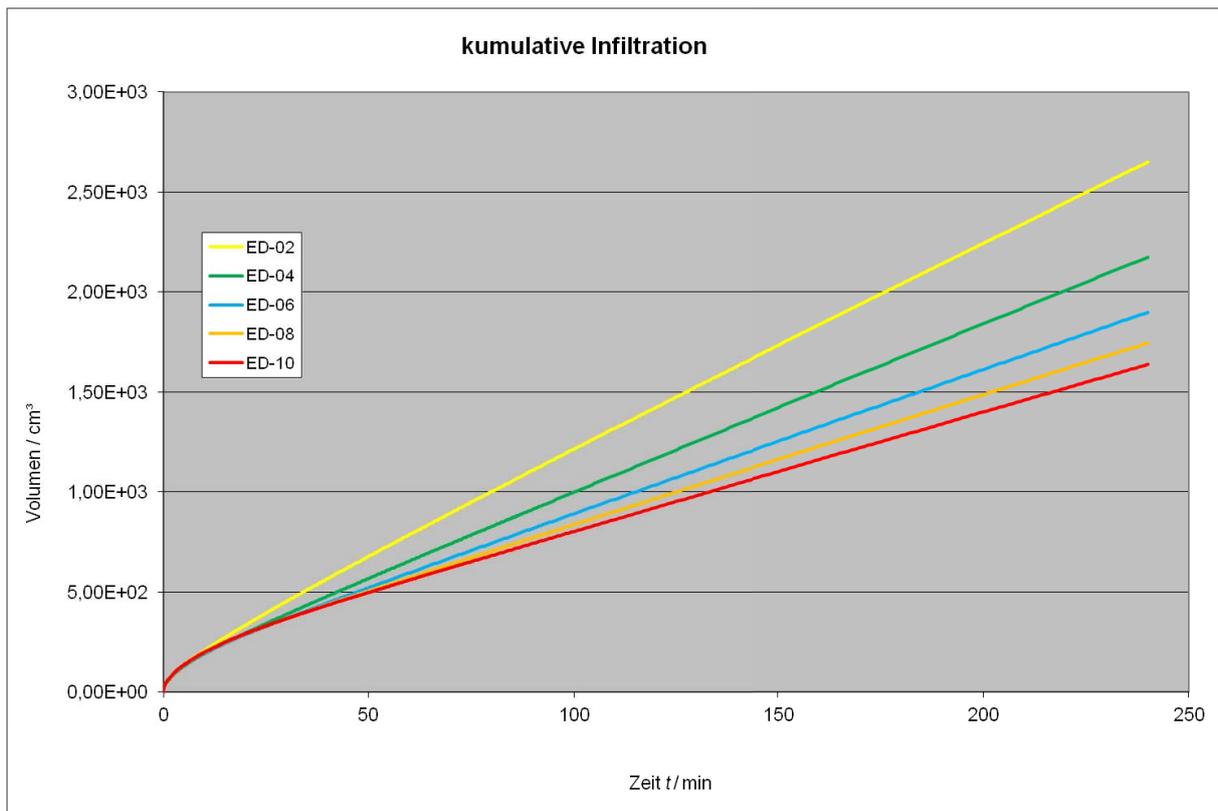


Abb. 53: kumulierte Infiltration mit unterschiedlichen Eindringtiefen – Bodenvariante 2

#### 4.2.2. Untersuchungen der Ringgröße

Die Variation der Ringgröße zeigte ähnliche Auswirkungen auf den  $f$ -Faktor wie bei den DR-Versuchen. Durch die Ermittlung der  $f$ -Faktoren im Bezug auf die bekannte gesättigte Leitfähigkeit wurde festgestellt, dass sich die  $f$ -Faktoren im Bereich von ca. 2,15 bei einem Ringradius von 15 cm bis 1,20 bei einem Ringradius von 120 cm bewegen (Abbildung 54).

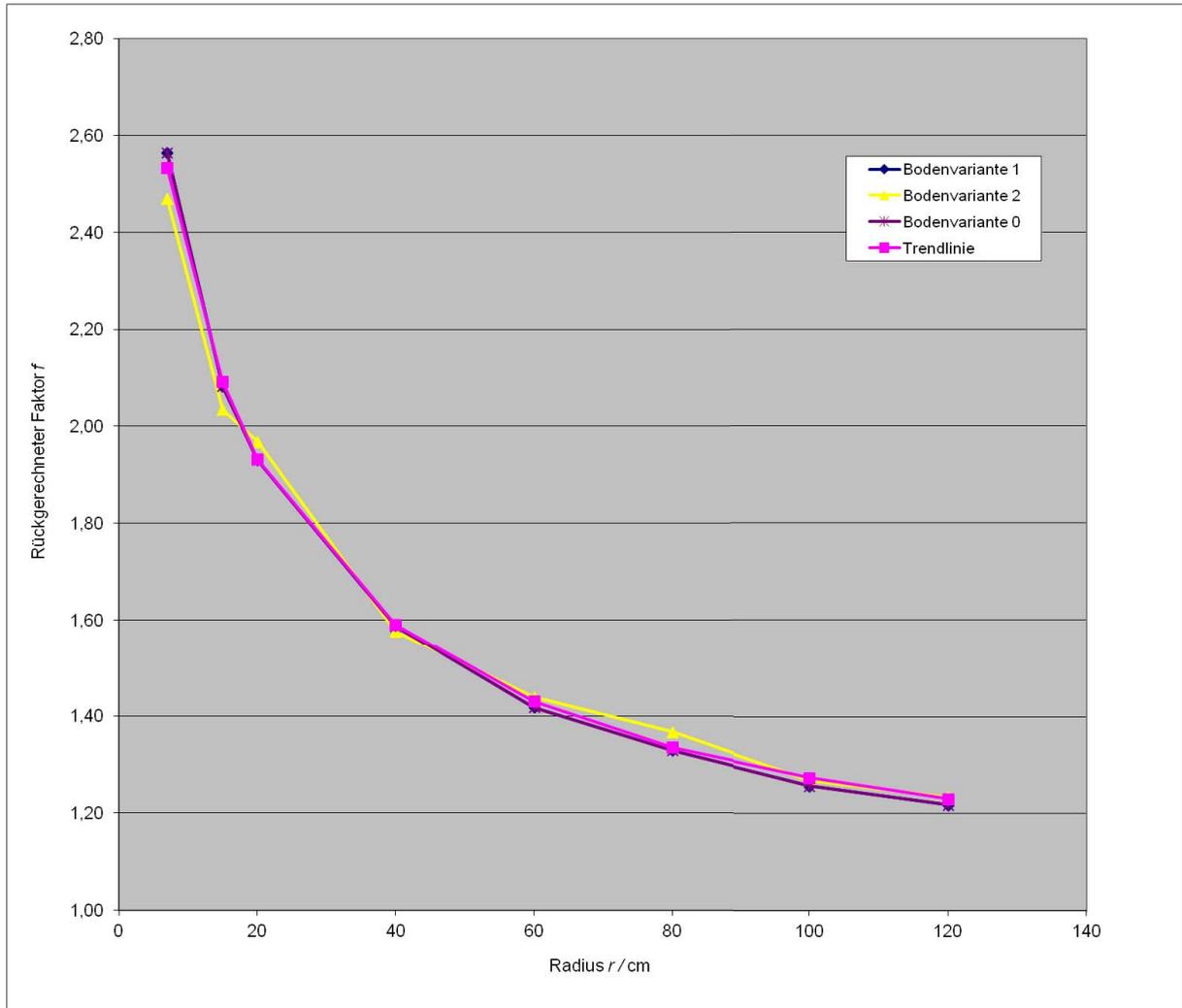


Abb. 54: Verlauf der  $f$ -Faktoren – Einzelring –  $pF=3,0$  – Hydrus

Die Auswertung von Stomp lieferte folgende Ergebnisse, einzusehen in Abbildung 55:

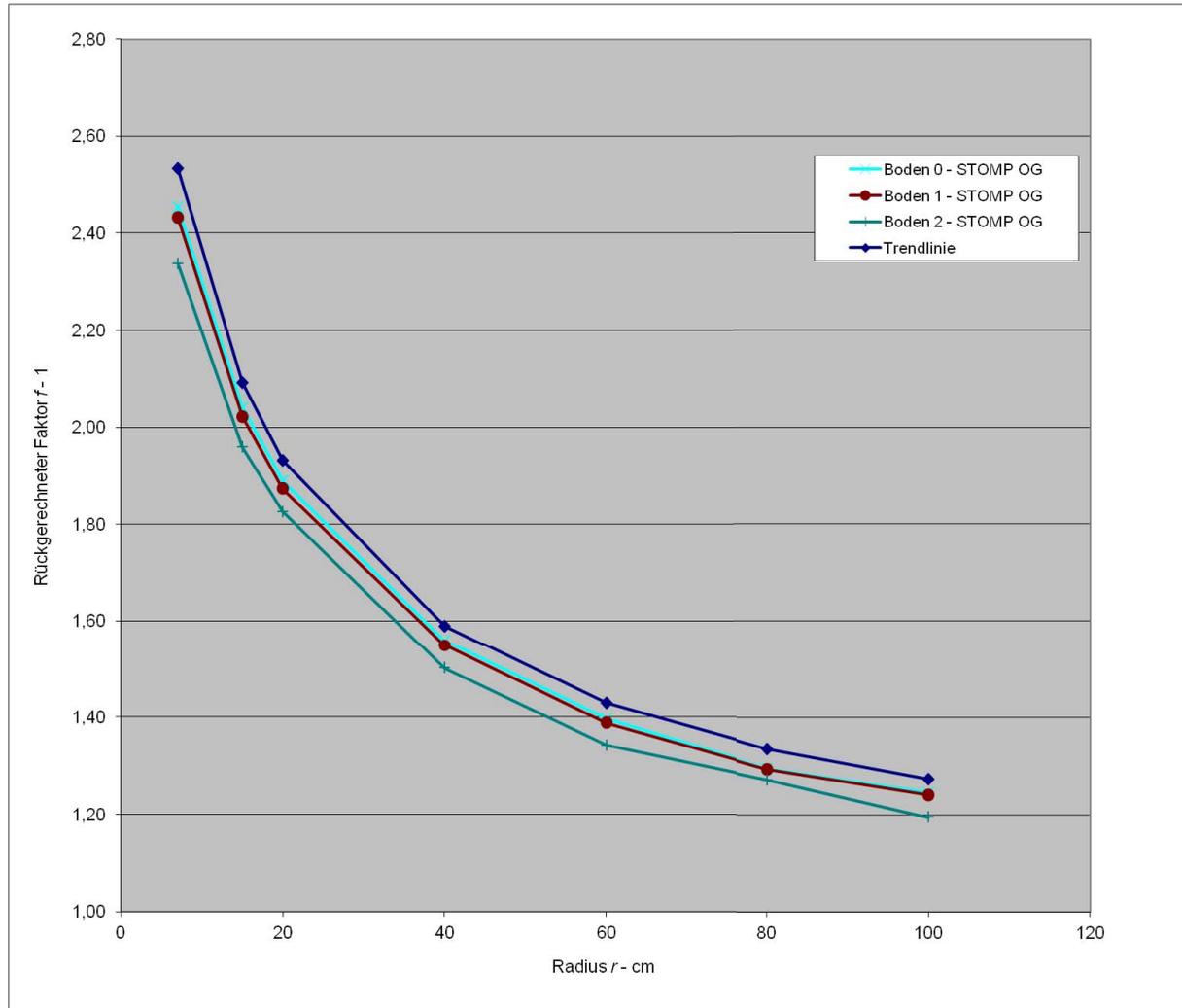


Abb. 55: Verlauf der  $f$ -Faktoren – Einzelring - Stomp-Simulation

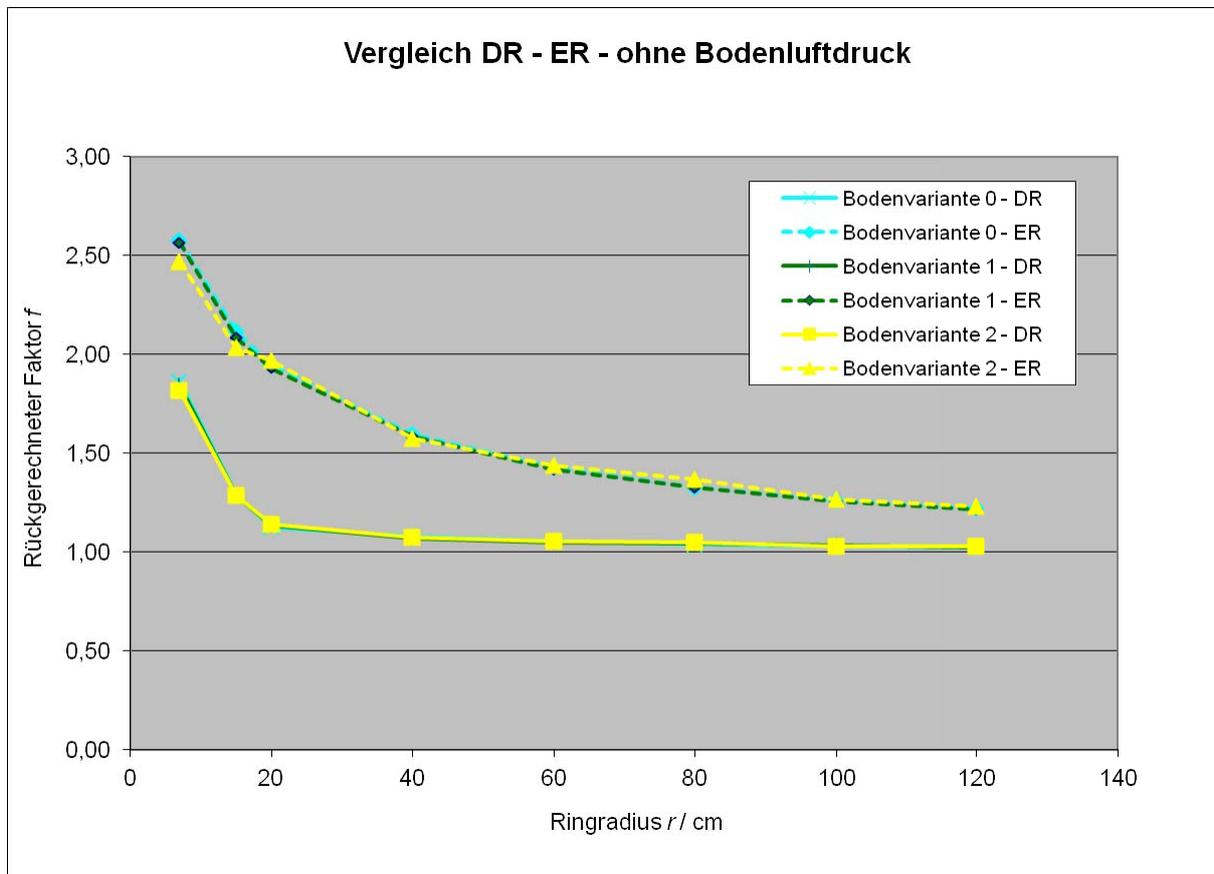
#### 4.2.3. Untersuchungen der Vorsättigung

Bei den Ergebnissen der Doppelringinfiltrationsmessungen waren keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Vorsättigungen der Simulationsböden zu erkennen, aus diesem Grund wurden die Einfachringmessungen nur bei einer Vorsättigung mit der Wasserspannung von 1,0 bar (bzw. einem pF-Wert von 3,0) durchgeführt.

#### 4.2.4. Unterschiede zwischen Einfachring- und Doppelringmessungen

Es wurden auch die Unterschiede der  $f$ -Faktoren von Doppelring- und Einfachringmessungen untersucht. Bei kleinem Ringradius sind die Unterschiede sehr groß. Bei Ringradien von 120 cm nähert sich die Differenz von DR und ER-Messungen dem Wert von 20% an. Dieser Wert ist auch stimmig mit gängiger Literatur [Al-Qinna M I,

Abu-Awwad M A, 1998]. In Abbildung 56 sind die  $f$ -Faktoren von Doppelring- und Einfachringsimulationen bei den jeweiligen Ringradien angeführt.



**Abb. 56: Darstellung der  $f$ -Faktoren ER-DR**

Bezüglich des Approximationsverhaltens der ER- und DR-Simulationen sind folgende Punkte zu erkennen:

Bei den DR-Simulationen nähert sich der  $f$ -Wert bei großen Ringradien nahezu 1 an. Dies ist dadurch begründbar, dass durch den Pufferring (Außenring) die Abströmung aus dem Innenring praktisch vertikal verläuft. Dadurch entspricht die berechnete Infiltrationsrate der Simulationen der gesättigten Leitfähigkeit der Bodenvarianten.

Bei den ER-Simulationen ist der  $f$ -Faktor bei kleinen Ringradien durch die horizontale Abströmung beeinflusst, somit ergeben sich deutlich höhere  $f$ -Werte als bei den DR-Simulationen.

### 4.3. Computersimulationen Dreiphasensystem Stomp

Die simulierten Infiltrationsversuche zeigen einem deutlichen Unterschied zwischen der Betrachtung mit dem Gegendruck der Bodenluft und unter Vernachlässigung derselben.

Durch den gewählten simulierten Gegendruck der Bodenluft hat sich erwartungsgemäß auch die Infiltrationsrate verringert. Zu beachten ist, dass sich die Verringerung der Infiltrationsrate je nach Bodenvariante unterschiedlich ausgewirkt hat.

#### 4.3.1. DR-Versuche

In dem nachfolgenden Diagramm (Abbildung 51) ist die Verringerung der Infiltrationsrate mittels der rückgerechneten Korrekturfaktoren dargestellt. Bei den der Abbildung 57 zu Grunde liegenden Simulationen entsprach die Vorsättigung einer Wasserspannung von 1,0 bar (bzw. einem pF-Wert von 3,0).

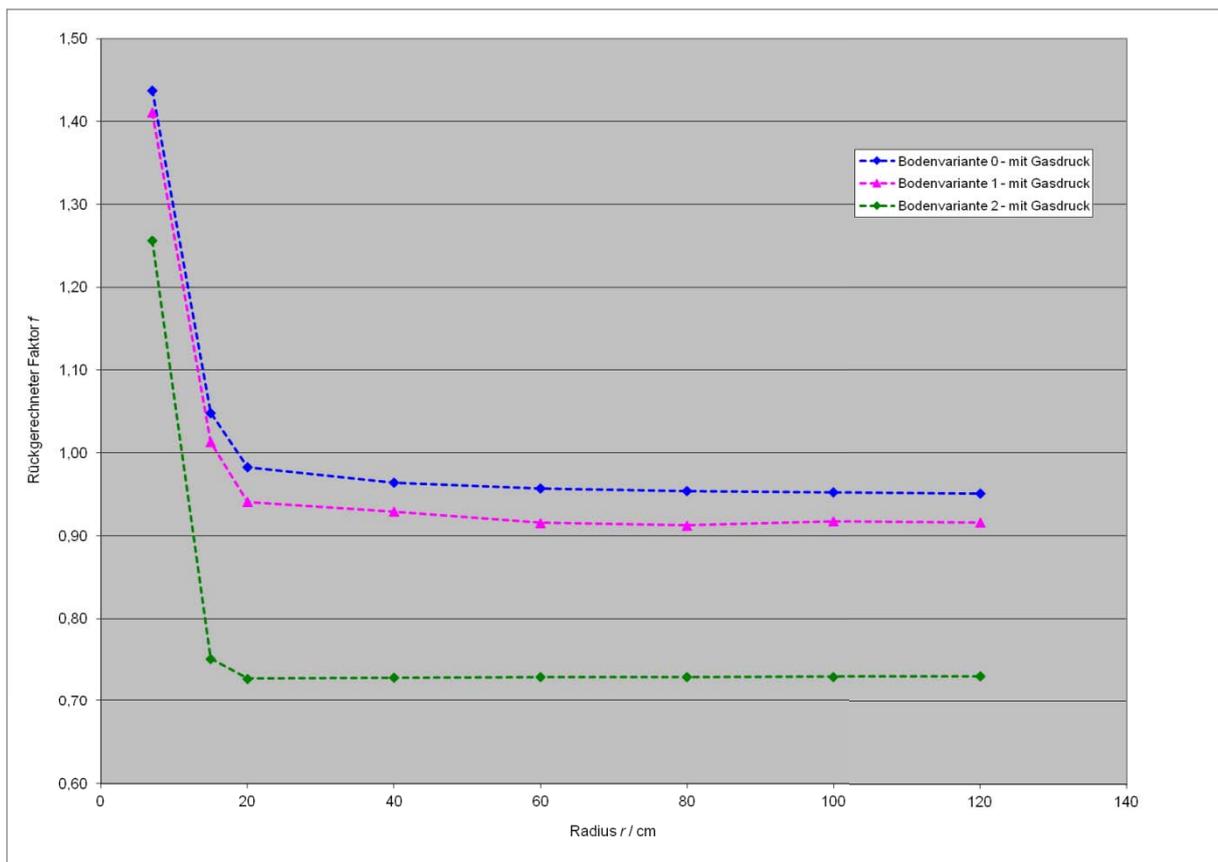


Abb. 57: Verlauf der  $f$ -Faktoren bei Gegendruck der Bodenluft

Bei den Bodenvarianten 0 "sand" und 1 „loamy sand“ ist der Einfluss des Bodenluftdruckes wesentlich geringer als bei Bodenvariante 2 „sandy clay loam“. Es ist festzustellen, dass der Einfluss des Bodenluftdruckes mit Verringerung der Durchlässigkeit zunimmt. Ab einem Ringradius von etwas 20 cm ist der  $f$ -Faktor generell kleiner 1. Auch in dem Bereiche, in dem sich der  $f$ -Faktor über 1 liegt, sind die Werte geringer als bei den ER-Simulationen ohne Bodenluftdruck.

In den nachfolgend abgebildeten Tabellen 22 bis 24 sind die berechneten Infiltrationsraten der Simulationen in Stomp mit Gegendruck dargestellt. Die Spalten mit der Bezeichnung „Hydrus“ sind die Ergebnisse der Simulationen ohne Bodenluftdruck und dienen lediglich dem Vergleich.

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp
	innen	ausen							
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
0111	7	14,5	0,006	-9,22E-01	-7,14E-01	-1,54E-04	-1,19E-04	-1,86	-1,44
0211	7	14,5	1	-9,22E-01	-7,12E-01	-1,54E-04	-1,19E-04	-1,86	-1,44
0311	7	14,5	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	15	40	0,006	-6,39E-01	-5,19E-01	-1,07E-04	-8,65E-05	-1,29	-1,05
0211	15	40	1	-6,39E-01	-5,19E-01	-1,07E-04	-8,65E-05	-1,29	-1,05
0311	15	40	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	20	60	0,006	-5,65E-01	-4,85E-01	-9,42E-05	-8,09E-05	-1,14	-0,98
0211	20	60	1	-5,57E-01	-4,87E-01	-9,28E-05	-8,11E-05	-1,13	-0,98
0311	20	60	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	40	80	0,006	-5,35E-01	-4,76E-01	-8,92E-05	-7,93E-05	-1,08	-0,96
0211	40	80	1	-5,34E-01	-4,77E-01	-8,90E-05	-7,96E-05	-1,08	-0,96
0311	40	80	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	60	100	0,006	-5,22E-01	-4,72E-01	-8,69E-05	-7,87E-05	-1,05	-0,95
0211	60	100	1	-5,22E-01	-4,74E-01	-8,69E-05	-7,90E-05	-1,05	-0,96
0311	60	100	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	80	120	0,006	-5,17E-01	-4,71E-01	-8,62E-05	-7,84E-05	-1,04	-0,95
0211	80	120	1	-5,15E-01	-4,72E-01	-8,58E-05	-7,87E-05	-1,04	-0,95
0311	80	120	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	100	140	0,006	-5,09E-01	-4,70E-01	-8,49E-05	-7,83E-05	-1,03	-0,95
0211	100	140	1	-5,11E-01	-4,71E-01	-8,51E-05	-7,86E-05	-1,03	-0,95
0311	100	140	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV
0111	120	160	0,006	-5,08E-01	-4,69E-01	-8,47E-05	-7,82E-05	-1,03	-0,95
0211	120	160	1	-5,07E-01	-4,71E-01	-8,46E-05	-7,85E-05	-1,02	-0,95
0311	120	160	15	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV

Tab. 22: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring ,Bodenvariante 0

Jene Werte, die mit #NV gekennzeichnet sind, waren für diesen Simulationsbodentyp in den jeweiligen Simulationsprogrammen numerisch nicht lösbar. Eine Begründung dafür ist in Kapitel 4.3.3 nachzulesen.

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp
	innen	ausen							
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
1111	7	14,5	0,006	-4,48E-01	-3,43E-01	-7,47E-05	-5,72E-05	-1,84	-1,41
1211	7	14,5	1	-4,48E-01	-3,43E-01	-7,47E-05	-5,72E-05	-1,84	-1,41
1311	7	14,5	15	-4,48E-01	-3,47E-01	-7,47E-05	-5,78E-05	-1,84	-1,43
1111	15	40	0,006	-3,13E-01	-2,46E-01	-5,21E-05	-4,11E-05	-1,29	-1,01
1211	15	40	1	-3,13E-01	-2,46E-01	-5,21E-05	-4,11E-05	-1,29	-1,01
1311	15	40	15	-3,13E-01	-2,48E-01	-5,21E-05	-4,13E-05	-1,29	-1,02
1111	20	60	0,006	-2,76E-01	-2,29E-01	-4,60E-05	-3,81E-05	-1,14	-0,94
1211	20	60	1	-2,76E-01	-2,29E-01	-4,60E-05	-3,81E-05	-1,14	-0,94
1311	20	60	15	-2,76E-01	-2,30E-01	-4,60E-05	-3,84E-05	-1,14	-0,95
1111	40	80	0,006	-2,63E-01	-2,26E-01	-4,38E-05	-3,77E-05	-1,08	-0,93
1211	40	80	1	-2,61E-01	-2,26E-01	-4,34E-05	-3,77E-05	-1,07	-0,93
1311	40	80	15	-2,63E-01	-2,26E-01	-4,38E-05	-3,77E-05	-1,08	-0,93
1111	60	100	0,006	-2,56E-01	-2,23E-01	-4,27E-05	-3,71E-05	-1,05	-0,92
1211	60	100	1	-2,56E-01	-2,23E-01	-4,26E-05	-3,71E-05	-1,05	-0,92
1311	60	100	15	-2,56E-01	-2,23E-01	-4,26E-05	-3,71E-05	-1,05	-0,92
1111	80	120	0,006	-2,54E-01	-2,22E-01	-4,23E-05	-3,70E-05	-1,04	-0,91
1211	80	120	1	-2,54E-01	-2,22E-01	-4,23E-05	-3,70E-05	-1,04	-0,91
1311	80	120	15	-2,54E-01	-2,22E-01	-4,23E-05	-3,70E-05	-1,04	-0,91
1111	100	140	0,006	-2,51E-01	-2,23E-01	-4,19E-05	-3,72E-05	-1,03	-0,92
1211	100	140	1	-2,51E-01	-2,23E-01	-4,19E-05	-3,72E-05	-1,03	-0,92
1311	100	140	15	-2,51E-01	-2,23E-01	-4,19E-05	-3,72E-05	-1,03	-0,92
1111	120	160	0,006	-2,50E-01	-2,23E-01	-4,16E-05	-3,71E-05	-1,03	-0,92
1211	120	160	1	-2,50E-01	-2,23E-01	-4,16E-05	-3,71E-05	-1,03	-0,92
1311	120	160	15	-2,50E-01	-2,23E-01	-4,16E-05	-3,71E-05	-1,03	-0,92

Tab. 23: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring, Bodenvariante 1

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - DR									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	<i>f</i>	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
2111	7	14,5	0,006	-3,86E-02	-3,62E-02	-6,43E-06	-4,62E-06	-1,77	-1,27
2211	7	14,5	1	-3,96E-02	-2,74E-02	-6,60E-06	-4,57E-06	-1,81	-1,26
2311	7	14,5	15	-3,86E-02	-2,77E-02	-6,60E-06	-4,63E-06	-1,81	-1,27
2111	15	40	0,006	-2,67E-02	-1,65E-02	-4,46E-06	-2,75E-06	-1,23	-0,75
2211	15	40	1	-2,81E-02	-1,64E-02	-4,68E-06	-2,73E-06	-1,28	-0,75
2111	15	40	15	-2,90E-02	-1,68E-02	-4,83E-06	-2,79E-06	-1,33	-0,77
2111	20	60	0,006	-2,45E-02	-1,38E-02	-4,09E-06	-2,30E-06	-1,12	-0,63
2211	20	60	1	-2,49E-02	-1,59E-02	-4,15E-06	-2,65E-06	-1,14	-0,73
2311	20	60	15	-2,55E-02	-1,62E-02	-4,24E-06	-2,70E-06	-1,17	-0,74
2111	40	80	0,006	-2,35E-02	-1,43E-02	-3,91E-06	-2,38E-06	-1,08	-0,65
2211	40	80	1	-2,35E-02	-1,59E-02	-3,91E-06	-2,65E-06	-1,08	-0,73
2311	40	80	15	-2,39E-02	-1,62E-02	-3,98E-06	-2,71E-06	-1,09	-0,74
2111	60	100	0,006	-2,28E-02	-1,41E-02	-3,80E-06	-2,35E-06	-1,04	-0,65
2211	60	100	1	-2,31E-02	-1,59E-02	-3,85E-06	-2,65E-06	-1,06	-0,73
2311	60	100	15	-2,32E-02	-1,63E-02	-3,87E-06	-2,71E-06	-1,06	-0,74
2111	80	120	0,006	-2,26E-02	-1,40E-02	-3,77E-06	-2,34E-06	-1,04	-0,64
2211	80	120	1	-2,29E-02	-1,59E-02	-3,82E-06	-2,65E-06	-1,05	-0,73
2311	80	120	15	-2,31E-02	-1,63E-02	-3,85E-06	-2,71E-06	-1,06	-0,74
2111	100	140	0,006	-2,24E-02	-1,40E-02	-3,73E-06	-2,33E-06	-1,03	-0,64
2211	100	140	1	-2,25E-02	-1,59E-02	-3,76E-06	-2,66E-06	-1,03	-0,73
2311	100	140	15	-2,27E-02	-1,63E-02	-3,78E-06	-2,71E-06	-1,04	-0,75
2111	120	160	0,006	-2,23E-02	-1,40E-02	-3,72E-06	-2,33E-06	-1,02	-0,64
2211	120	160	1	-2,25E-02	-1,59E-02	-3,74E-06	-2,66E-06	-1,03	-0,73
2311	120	160	15	-2,26E-02	-1,59E-02	-3,76E-06	-2,66E-06	-1,03	-0,73

Tab. 24: Simulationsergebnisse bei Gegendruck, Doppelring, Bodenvariante 2

## 4.3.1.1. Vergleich DR-Versuche mit/ohne Bodenluftdruck

In Abbildung 58 wurden rückgerechneten *f*-Faktoren der Simulationen von der Berücksichtigung des Bodenluftgedruckes und der Vernachlässigung dessen verglichen.

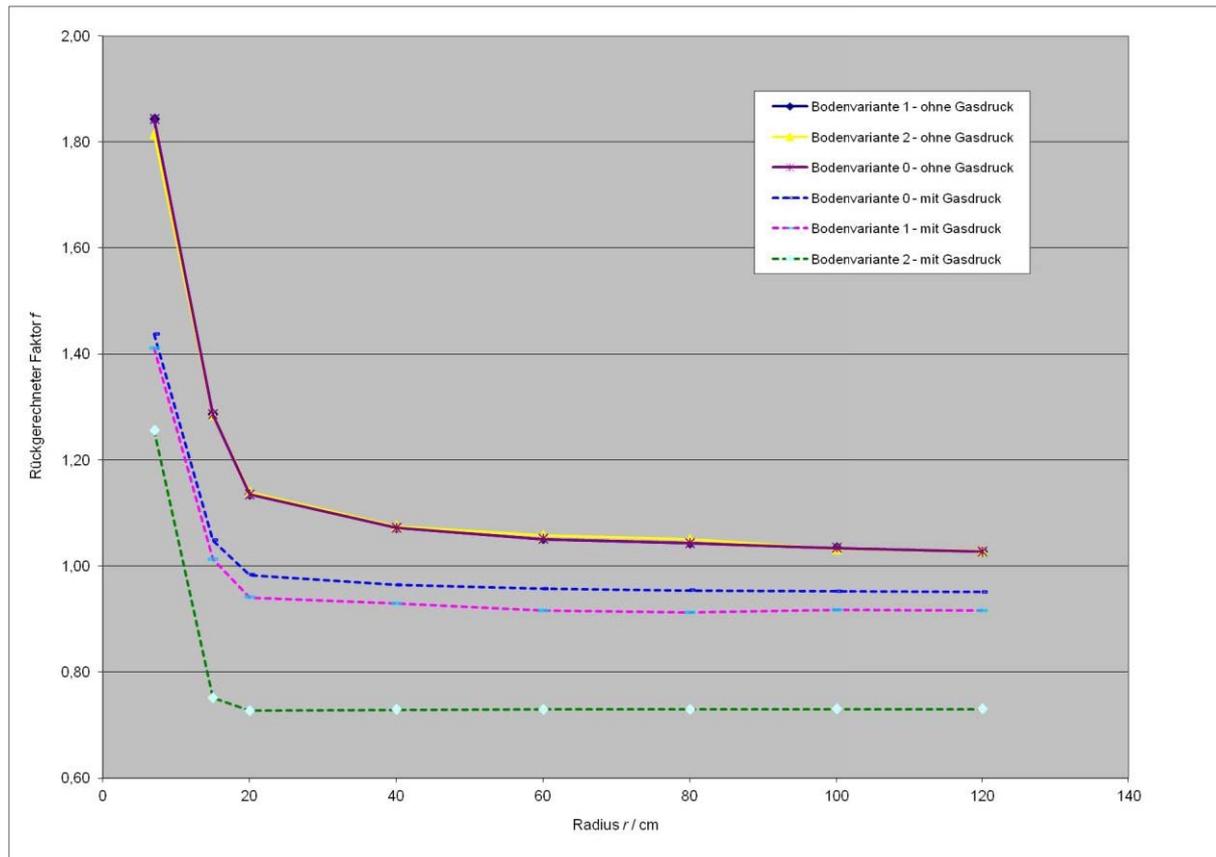


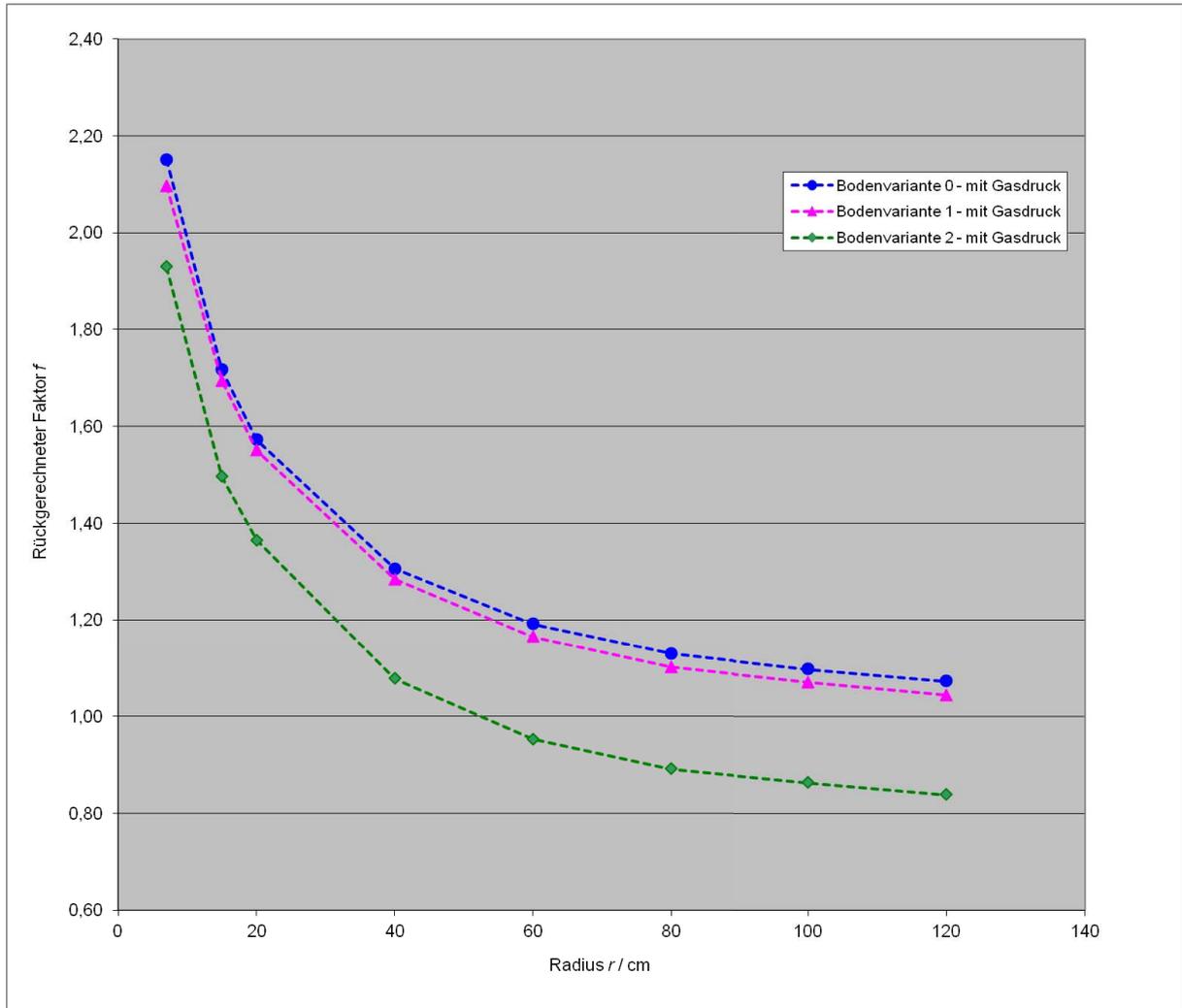
Abb. 58: Vergleich  $f$ -Faktoren – Doppelring – mit/ohne Bodenluftdruck

Bei den Simulationen ohne Bodenluftüberdruck ist der Verlauf der  $f$ -Faktoren der 3 Bodenvarianten ident und unabhängig von der Durchlässigkeit der Bodenvarianten. Bei den Simulationen mit Bodenluftüberdruck ist der  $f$ -Faktor jedenfalls kleiner als bei den Simulationen ohne Bodenluftüberdruck, jedoch ist auch eine Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der Bodenvariante erkennlich.

#### 4.3.2. ER-Versuche

Die Auswertung der  $f$ -Faktoren lieferte ein ähnliches Ergebnis wie die Simulationen der Doppelringinfiltrationen mit der komprimierten Bodenluft als Gegendruck (siehe Abbildung 59).

Bei den Simulationen mit Bodenluftdruck ist zwischen den Bodenvarianten 0 und 1 (sehr durchlässig bzw. durchlässig) der Unterschied im  $f$ -Faktor gering, die Variante 2 (wenig durchlässig) zeigt hingegen einen deutlich kleineren  $f$ -Faktor bzw. einen tieferliegenden Verlauf.



**Abb. 59: Verlauf  $f$ -Faktoren – Einzelring – mit Bodenluftdruck**

In den Tabellen 25 bis 27 sind die Auswertungen der Einzelringsimulationen mit den jeweiligen Bodentypen zu sehen. Die Spalten mit der Bezeichnung „Hydrus“ sind die Ergebnisse der Simulationen ohne Bodenluftdruck und dienen dem Vergleich und der Übersicht.

"sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 0 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	f	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
0211	7	0	1	-1,27E+00	-1,06E+00	-2,12E-04	-1,77E-04	-2,56	-2,15
0211	15	0	1	-1,05E+00	-8,50E-01	-1,74E-04	-1,42E-04	-2,08	-1,72
0211	20	0	1	-9,63E-01	-7,78E-01	-1,60E-04	-1,30E-04	-1,93	-1,57
0211	40	0	1	-7,90E-01	-6,46E-01	-1,32E-04	-1,08E-04	-1,59	-1,31
0211	60	0	1	-7,07E-01	-5,90E-01	-1,18E-04	-9,83E-05	-1,42	-1,19
0211	80	0	1	-6,57E-01	-5,59E-01	-1,09E-04	-9,32E-05	-1,33	-1,13
0211	100	0	1	-6,24E-01	-5,44E-01	-1,04E-04	-9,06E-05	-1,26	-1,10
0211	120	0	1	-6,10E-01	-5,31E-01	-1,02E-04	-8,85E-05	-1,22	-1,07

Tab. 25: berechnete Infiltrationsraten bei Gegendruck – Bodenvariante 0

"loamy sand" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 1 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	f	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
1211	7	0	1	-6,24E-01	-5,10E-01	-1,04E-04	-8,50E-05	-2,56	-2,10
1211	15	0	1	-5,06E-01	-4,12E-01	-8,44E-05	-6,87E-05	-2,08	-1,69
1211	20	0	1	-4,70E-01	-3,77E-01	-7,83E-05	-6,28E-05	-1,93	-1,55
1211	40	0	1	-3,86E-01	-3,12E-01	-6,43E-05	-5,20E-05	-1,59	-1,28
1211	60	0	1	-3,45E-01	-2,83E-01	-5,75E-05	-4,72E-05	-1,42	-1,17
1211	80	0	1	-3,23E-01	-2,68E-01	-5,39E-05	-4,47E-05	-1,33	-1,10
1211	100	0	1	-3,06E-01	-2,60E-01	-5,09E-05	-4,34E-05	-1,26	-1,07
1211	120	0	1	-2,96E-01	-2,54E-01	-4,94E-05	-4,23E-05	-1,22	-1,04

Tab. 26: berechnete Infiltrationsraten bei Gegendruck – Bodenvariante 1

"sandy clay loam" - nach US-Taxonomy - Bodenvariante 2 - ER									
Nr.	Radius		Wasserspannung	Infiltrationsrate				Faktor	
	Ring			Hydrus	Stomp	Hydrus	Stomp	<i>f</i>	
	innen	ausen						Hydrus	Stomp
1	cm	cm	bar	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	m h <sup>-1</sup>	1	1
2211	7	0	1	-0,0539178	-4,21E-02	-8,99E-06	-7,02E-06	-2,47	-1,93
2211	15	0	1	-0,04442191	-3,27E-02	-7,40E-06	-5,44E-06	-2,03	-1,50
2211	20	0	1	-0,04297613	-2,98E-02	-7,16E-06	-4,97E-06	-1,97	-1,36
2211	40	0	1	-0,0344085	-2,35E-02	-5,73E-06	-3,92E-06	-1,58	-1,08
2211	60	0	1	-0,03140244	-2,08E-02	-5,23E-06	-3,47E-06	-1,44	-0,95
2211	80	0	1	-0,02984454	-1,95E-02	-4,97E-06	-3,24E-06	-1,37	-0,89
2211	100	0	1	-0,02769573	-1,88E-02	-4,62E-06	-3,14E-06	-1,27	-0,86
2211	120	0	1	-0,0278549	-1,83E-02	-4,64E-06	-3,05E-06	-1,28	-0,84

Tab. 27: berechnete Infiltrationsraten bei Gegendruck – Bodenvariante 2

#### 4.3.2.1. Vergleich ER-Simulationen mit/ohne Bodenluftdruck

Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Bodenluft ist festzustellen, dass sich merkbare Unterschiede bei den diversen Simulationen zeigten. Die ist in Abbildung 60 dargestellt.

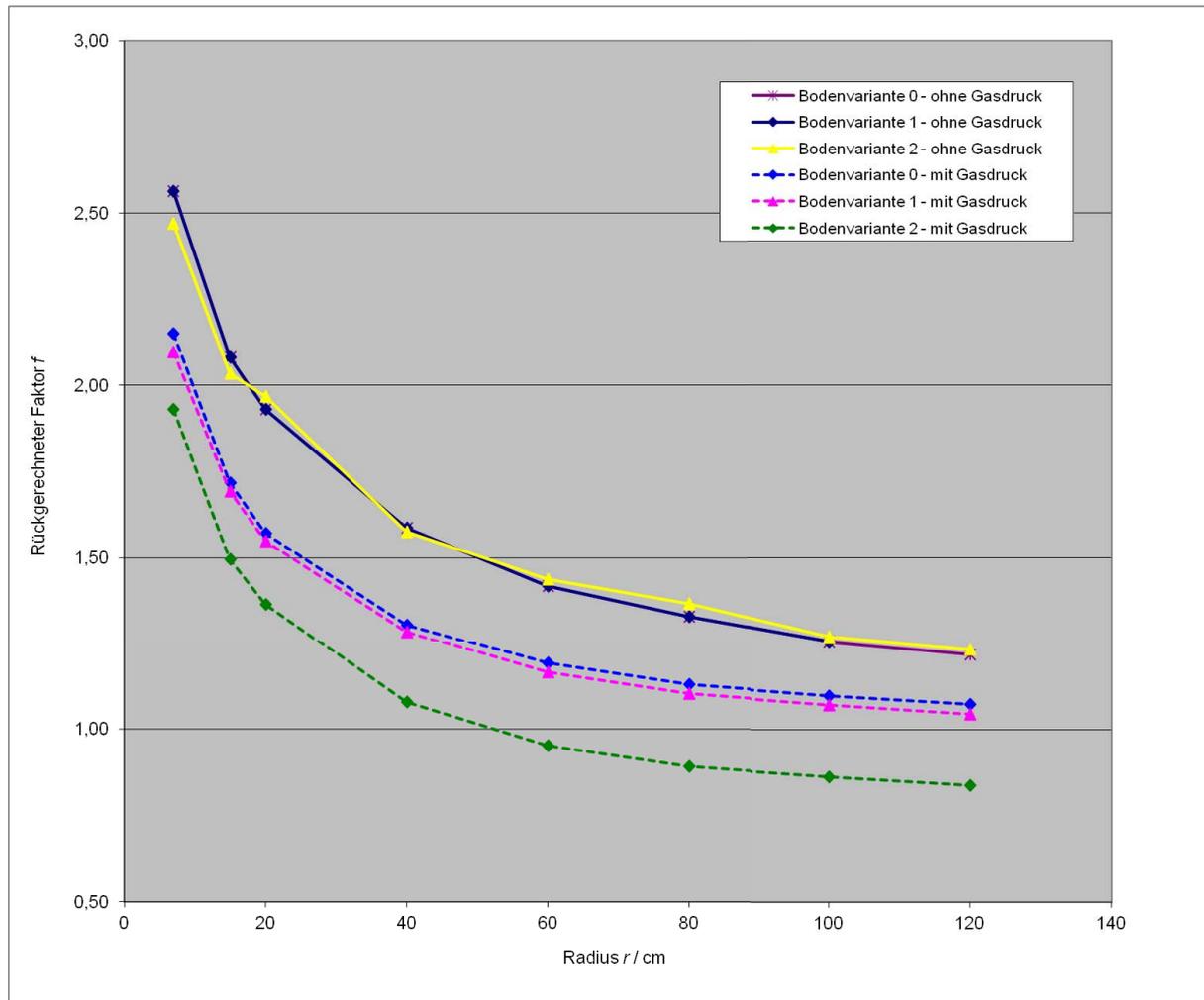


Abb. 60: Verlauf f-Faktoren - Einzelring – mit / ohne Bodenluftdruck

#### 4.3.3. Numerische Probleme bei den Simulationen / Berechnungen

In diesem Kapitel werden die „Auffälligkeiten“ bei der Interpretation der Simulationsergebnisse aufgezeigt.

##### 4.3.3.1. Schwankungen der Infiltrationsrate

Zu Beginn der Dotation im Innenring zum Zeitpunkt  $t = 30$  min ist festzustellen, dass die Infiltrationsrate von 0 cm/min sehr stark zunimmt und dann zu schwanken beginnt. Diese Schwankungen nehmen sukzessive nach einer kurzen Zeitspanne ab. Zu diesem Zeitpunkt ändert sich im Innenring die atmosphärische Randbedingung zu einer mit 8 cm überstauten Randbedingung, was natürlich Veränderungen im simulierten System verursacht. Kurze Zeit später (1 min nach diesem Zeitpunkt) verringern sich diese Auswirkungen.

Es kann auch im weiteren Fortschreiten der Zeit zu Schwankungen der Infiltrationsrate kommen, wobei auch hier die Schwankungen nach einer Zeitspanne von 10 min wieder aufhören. Diese Schwankungen sind physikalische und numerische Unstetigkeiten in der jeweiligen Bodenvariante und können vernachlässigt werden. Diese verringern sich dann mit der Zeit. Als Beispiel kann die Abbildung 191 auf Seite 178 eingesehen werden.

#### 4.3.3.2. Werte #NV – Bodenvariante 0

Jene Ergebnisse, die in den Tabellen mit #NV gekennzeichnet sind, waren für diese Bodenvariante in den jeweiligen Simulationsprogrammen numerisch nicht lösbar und betreffen jene Simulationen, die mit einer hohen Wasserspannung von 15 bar durchgeführt wurden (entspricht einen pF-Wert von 4,2). Anhand der nachfolgenden Abbildung 61 kann der Grund erklärt werden. Die Bodenvariante 0 – "sand" – nach US-Taxonomy ist ein sehr durchlässiger Boden und daher mit einem Sandboden nach Ö-Norm L 1050 vergleichbar. Folgt man nun der Wasserspannung-Wassergehaltskurve eines Sandbodens, so ist bei einer Wasserspannung von 15 bar kaum mehr Wasser im Sandboden vorhanden (verglichen dazu beträgt der Wasseranteil eines Schluffbodens 10% und eines Tonbodens über 30% bei der selben Wasserspannung). Somit ist der Unterschied bei der Bodenvariante 0 an den Grenzen der jeweiligen Randbedingung zu groß, um diese numerisch zu lösen.

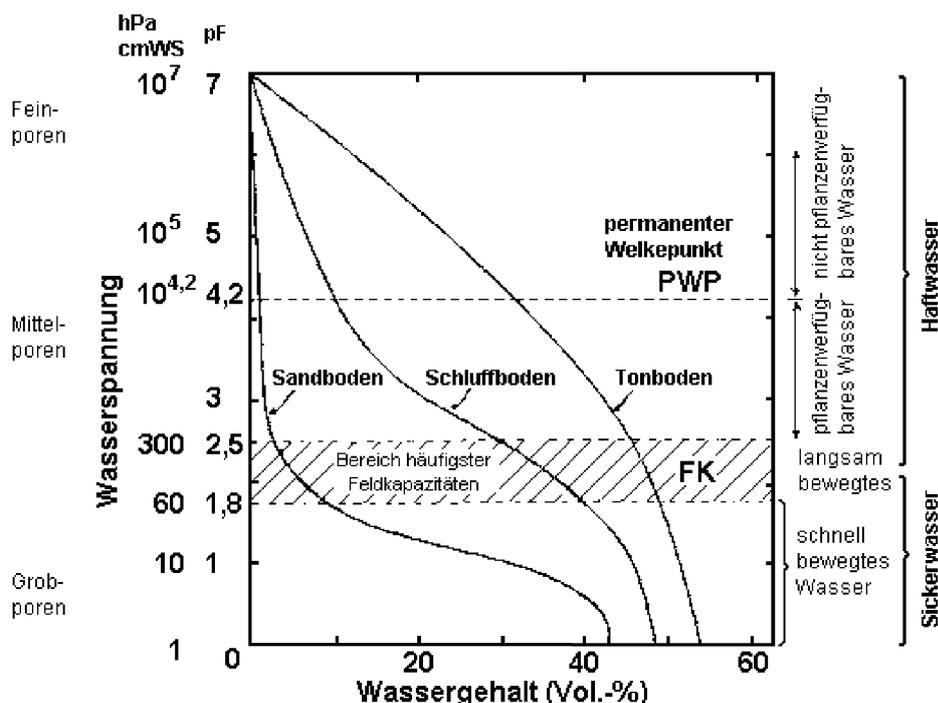


Abb. 61: Beziehung Wasserspannung-Wassergehalt – [Scheffer und Schachtschabel 2002]

#### 4.4. *Kombination der Infiltrationsmessung mit Bestimmung weiterer Bodenparameter*

Bei den durchgeführten Feldversuchen wurde neben der Beobachtung des Infiltrationsvorganges auch mittels Tensiometer die Veränderung der Wasserspannung während des Infiltrationsvorganges betrachtet. Weiters wurde der mittlere Wassergehalt von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 6 cm im Versuchsbereich gemessen. Dies erfolgte mittels des Messsystems Pogo.

##### 4.4.1. *Feldversuch Groß-Enzersdorf*

Beim Feldversuch Groß-Enzersdorf wurden 3 Doppelring-Versuche durchgeführt. Das Tensiometer wurde nur bei Nr. 1 und 3 eingebaut. Bei Versuch Nr. 2 wurde darauf verzichtet, um den Einfluss des Tensiometers auf die Infiltrationsrate auszuschließen.

##### Beobachtung der Infiltration:

Der Verlauf der Infiltration bei den 3 Versuchen verläuft unterschiedlich. Versuch Nr. 2 und 3 verlaufen nahezu ähnlich, lediglich bei Versuch 1 ist eine Abweichung zu beobachten. Es könnte sein, dass beim Einbringen des Tensiometers der Boden gestört wurde oder ein Fehler beim Einbau der Ringe gemacht wurde. Ein weiterer Grund könnte eine lokale Verdichtung im Boden gewesen sein. Versuch 1 ist somit nicht signifikant für die Bestimmung der Infiltrationsrate. Wenn man Versuch 2 und 3 betrachtet, beträgt die Infiltrationsrate circa 0,41 cm/min. Die graphische Darstellung ist in Abbildung 62 – kumulierte Infiltration und in Abbildung 63 – Infiltrationsrate zu erkennen.

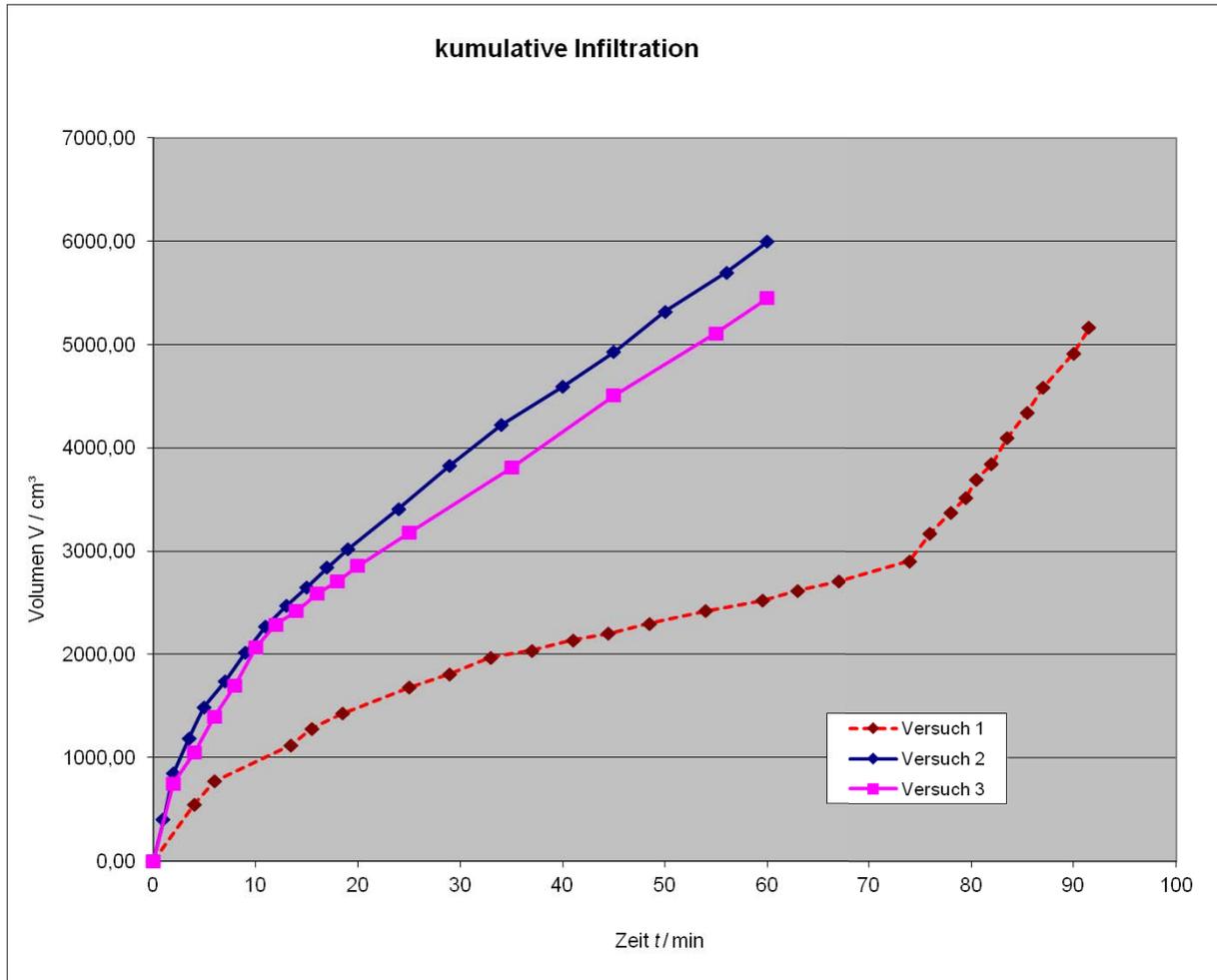
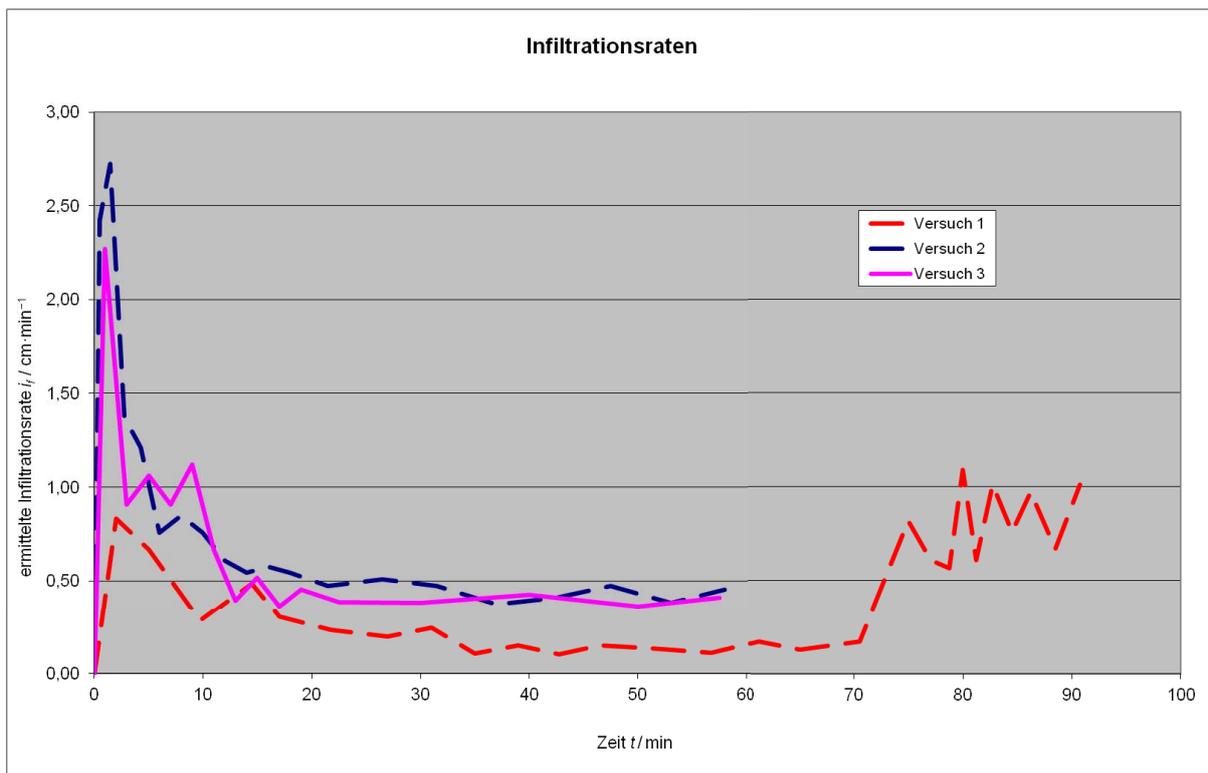


Abb. 62: kumulative Infiltration – Versuch Groß-Enzersdorf



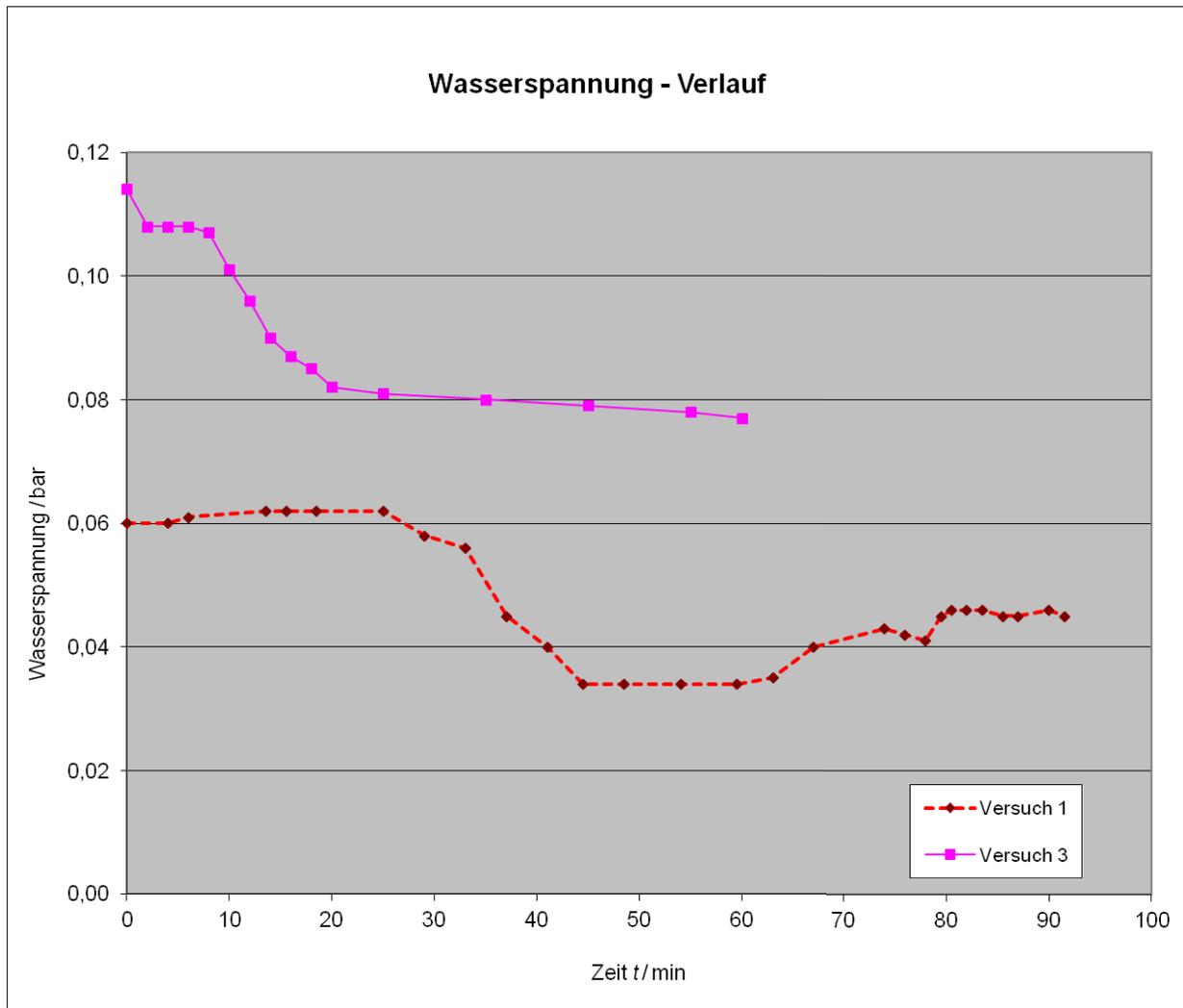
**Abb. 63: Verlauf Infiltrationsraten – Versuch Groß-Enzersdorf**

Die Schwankung der Infiltrationsraten in den ersten 10 Minuten der Feldversuche ergeben sich daraus, dass das Zeitintervall der Ablesung zu groß gewählt wurde.

Versuch 1 ist aus bereits vorher angeführten Gründen als nicht relevant zu betrachten.

**Beobachtung der Wasserspannung:**

Um den Einfluss durch Störung des Bodens durch den Einbau des Tensiometers auszuschließen, wurde beim Versuch 2 auf diesen verzichtet. Beim Versuch 3 wurde die Abnahme der Wasserspannung nach ca. 12 Minuten nach Versuchsbeginn beobachtet, zu diesem Zeitpunkt erreichte die Feuchtigkeitsfront eine Tiefe von 40 cm unter Geländeoberfläche. Der Verlauf der Wasserspannung ist in Abbildung 64 ersichtlich. Die genaue Anordnung des Tensiometers bei diesem Feldversuch ist in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben.



**Abb. 64: Verlauf Wasserspannung – Versuch Groß-Enzersdorf – Tiefe 40 cm unter GOK**

#### Beobachtung des Wassergehalts des Bodens:

Der Wassergehalt des Bodens wurde vor, während und nach den Versuchen beobachtet, es war keine signifikante Veränderung der Werte feststellbar. Der Wassergehalt des Bodens betrug im Schnitt ca. 25 %. Die Wasseranteilmessungen wurden von Versuchsbeginn an in einem Zeitintervall von 15 Minuten durchgeführt. Die Anordnung der Wasseranteilmessungen sind in Kapitel 3.2.2.2 genau erklärt.

#### Vergleich der Messungen mit inverser Hydrus-Simulation

Die kumulativen Infiltrationsmengen der Feldmessungen wurden für eine inverse Hydrus-Simulation herangezogen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung des jeweiligen berechneten  $f$ -Faktors aus der inversen Simulation mittels Formel 20 und

der  $f$ -Faktor-Berechnung aus dem Radius des Innenringes aus Formel Nr. 21, die zur Berechnung der Trendlinie bei DR-Versuchen erstellt wurde. Der Versuch Nr. 1 wurde nur zur Übersicht dargestellt und ist für einen  $f$ -Faktor-Vergleich nicht relevant.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 dargestellt.

Versuch - Nr.	Hydrus $k_{fs}$	gemessene $i_f$	$f$ -Faktor	$f$ -berechnet	Radius Innenring
(1)	( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	(1)	(1)	(cm)
1	0,1405	0,35	2,49	1,75	7,5
2	0,2729	0,42	1,54	1,75	7,5
3	0,2467	0,4	1,62	1,75	7,5

Tab. 28: Feldversuch Groß-Enzersdorf – Gegenüberstellung  $f$ -Faktoren – Simulation/Feld

In Abbildung 65 sind die kumulierten Infiltrationsmengen der inversen Hydrus-Simulation im Vergleich zu den Feldmessungen dargestellt.

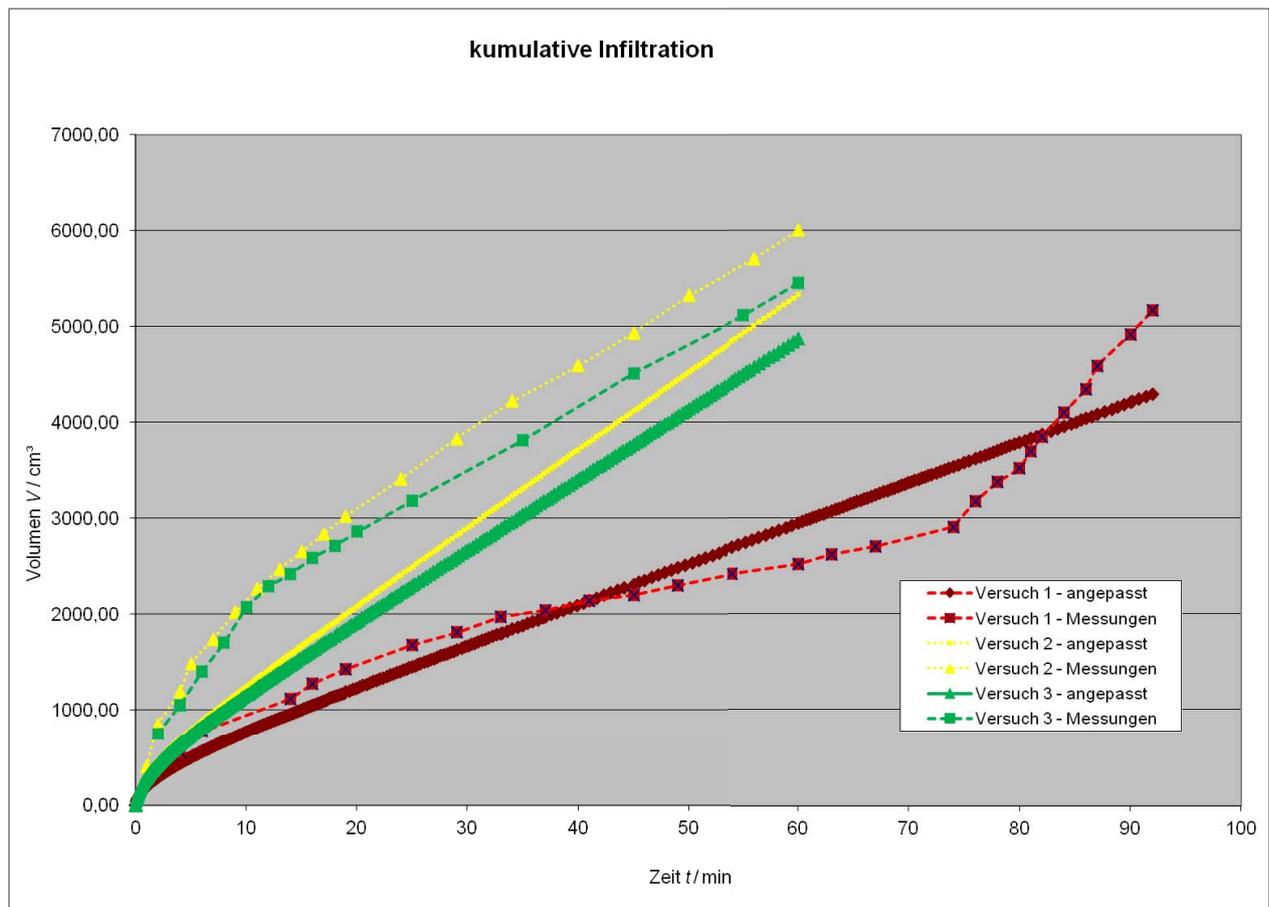


Abb. 65: Vergleich der kumulierten Infiltrationsmengen aus inverser Simulation und Feldmessung – Groß-Enzersdorf

#### 4.4.2. Feldversuch Untertullnerbach

Beim Feldversuch Untertullnerbach wurden 3 Doppelringinfiltrometerversuche durchgeführt.

##### Beobachtung der Infiltration:

Es wurde bei alle drei Versuchen die Infiltrationsmenge im Innenring der DR über einen Zeitraum von ca. 85 Minuten beobachtet. Diese wurde dann kumuliert aufgezeichnet und in Abbildung 66 dargestellt. Aus der kumulierten Infiltration wurde die Infiltrationsrate berechnet. Diese ist in Abbildung 67 eingetragen.

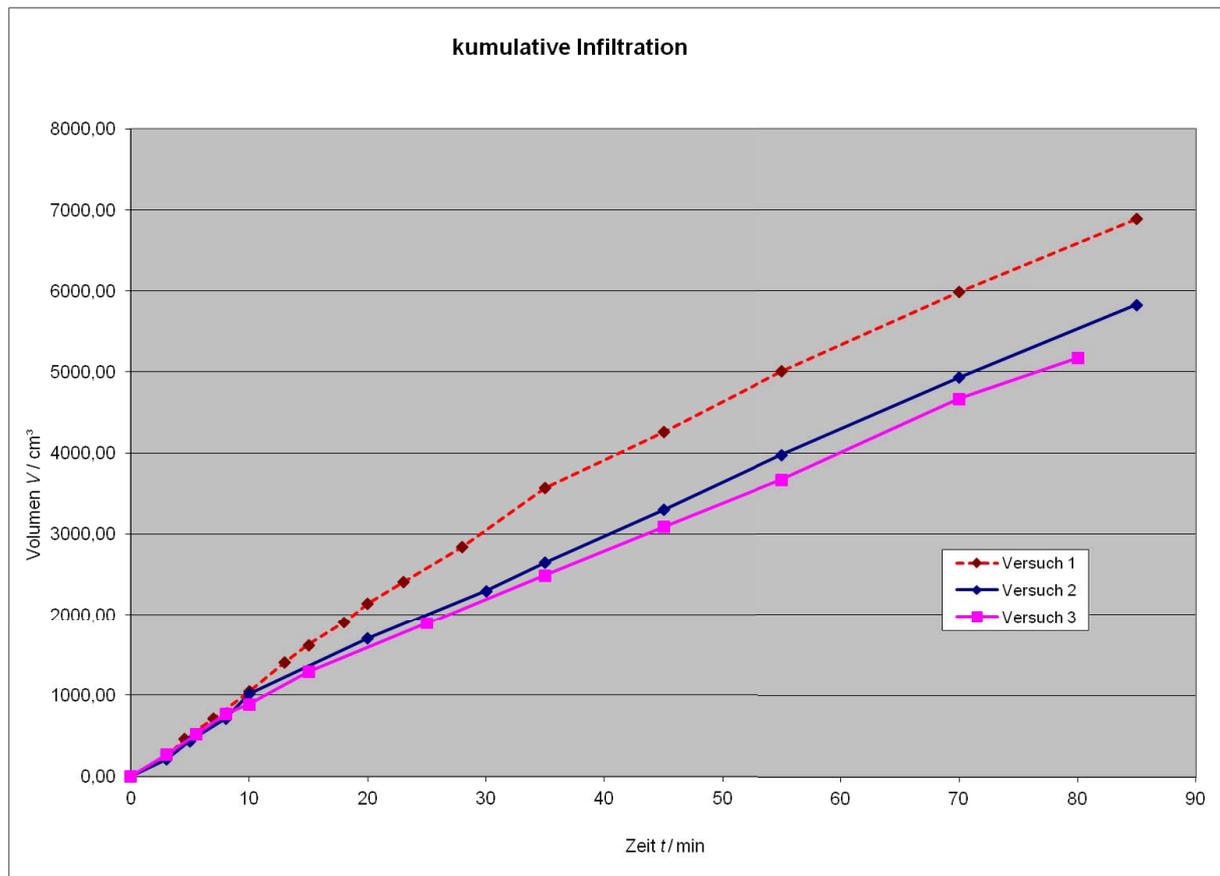


Abb. 66: kumulative Infiltrationsmenge – Versuch Untertullnerbach

Aus Abbildung 67 ist festzustellen, dass sich 2 Versuche genau derselben Infiltrationsrate annähern. Die Endinfiltrationsrate errechnete sich für Versuch 1 und 2 zu 0,38 cm/min; beim Versuch 3 keine annähernde Konstanz erreicht. Der Verlauf ist in Abbildung 67 dargestellt.

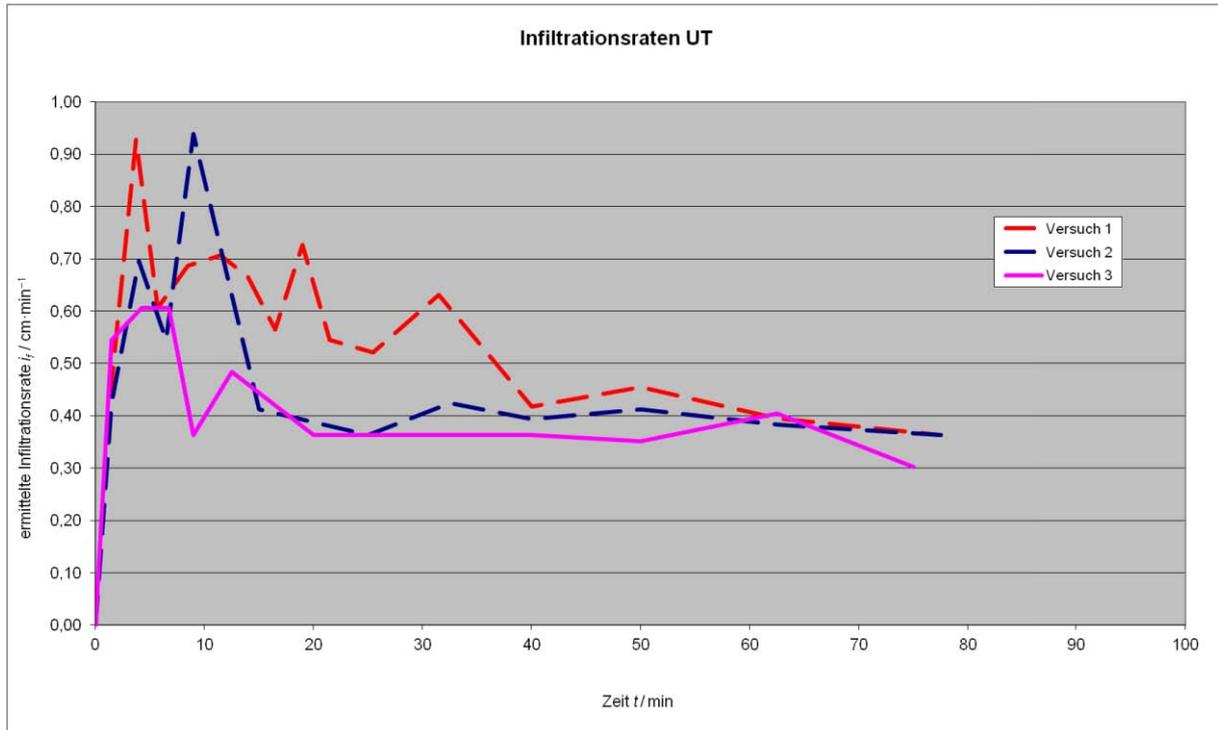


Abb. 67: Verlauf Infiltrationsraten – Versuch Untertullnerbach

Die Schwankungen der Infiltrationsraten in den ersten 10 Minuten der Feldversuche ergeben sich daraus, dass das Zeitintervall der Ablesung der Infiltrationsmenge zu groß gewählt wurde.

#### Beobachtung der Wasserspannung:

Bei dem installierten Tensiometer, das sich circa in einer Tiefe von 40 cm unterhalb der Geländeoberfläche befand, war eine sukzessive Abnahme der Wasserspannung zu verzeichnen. Die Wasserspannung war wesentlich geringer als beim Feldversuch Groß-Enzersdorf. Diese Messungen sind durchaus schlüssig, da durch den Niederschlag der Boden bereits vorgesättigt wurde. Die Abnahme erfolgte circa 10 Minuten nach dem Versuchsbeginn, es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Feuchtigkeitsfront die Tensiometertiefe von ca. 40 cm erreichte (siehe Abbildung 68). Die genaue Anordnung des Tensiometers bei diesem Feldversuch ist in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben.

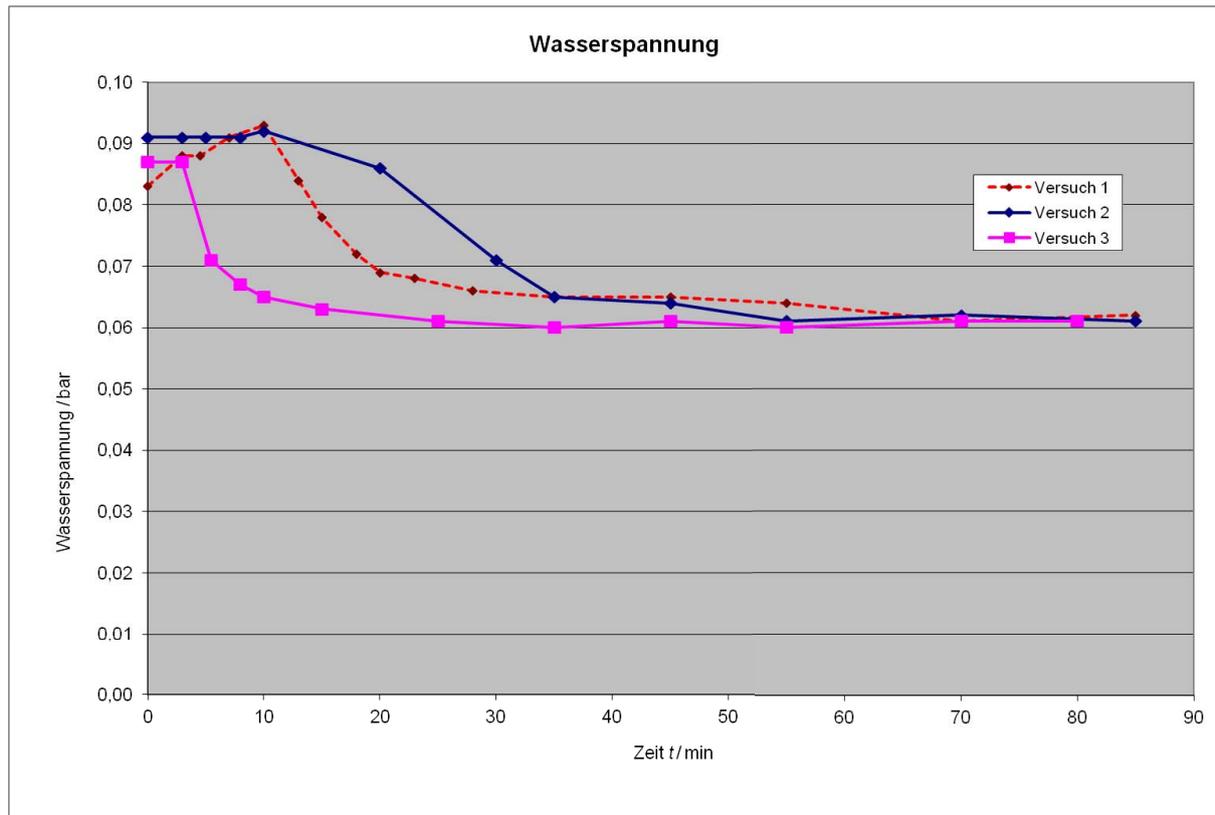


Abb. 68: Verlauf Wasserspannung – Versuch Untertullnerbach – Tiefe ca. 40 cm unter GOK

#### Beobachtung des Wassergehalts des Bodens:

An der Oberfläche und während des Versuches wurde der Wasseranteil mit Hilfe der Sonde Pogo gemessen. Der Wassergehalt des Bodens war bei allen 3 Versuchen annähernd gleich und änderte sich während und nach dem Versuch nicht. Die durchschnittliche Bodenfeuchte betrug ca. 35 %. Die Wasseranteilmessungen wurden von Versuchsbeginn an in einem Zeitintervall von 15 Minuten durchgeführt. Die Anordnung der Wasseranteilmessungen sind in Kapitel 3.2.2.2 genau erklärt.

#### Vergleich der Messungen mit inverser Hydrus-Simulation

Die kumulativen Infiltrationsmengen der Feldmessungen wurden für eine inverse Hydrus-Simulation herangezogen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung des jeweiligen berechneten  $f$ -Faktors aus der inversen Simulation mittels Formel 20 und der  $f$ -Faktor-Berechnung aus dem Radius des Innenringes aus Formel Nr. 21, die zur Berechnung der Trendlinie bei DR-Versuchen erstellt wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 dargestellt.

Versuch - Nr.	Hydrus $K_{fs}$ ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	gemessene $i_f$ ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$f$ -Faktor (1)	$f$ -berechnet (1)	Radius Innenring (cm)
1	0,2702	0,4	1,48	1,75	7,5
2	0,2256	0,39	1,73	1,75	7,5
3	0,2094	0,36	1,72	1,75	7,5

Tab. 29: Feldversuch Untertullnerbach – Gegenüberstellung  $f$ -Faktoren – Simulation/Feld

In Abbildung 69 sind die kumulierten Infiltrationsmengen der inversen Hydrus-Simulation im Vergleich zu den Feldmessungen dargestellt.

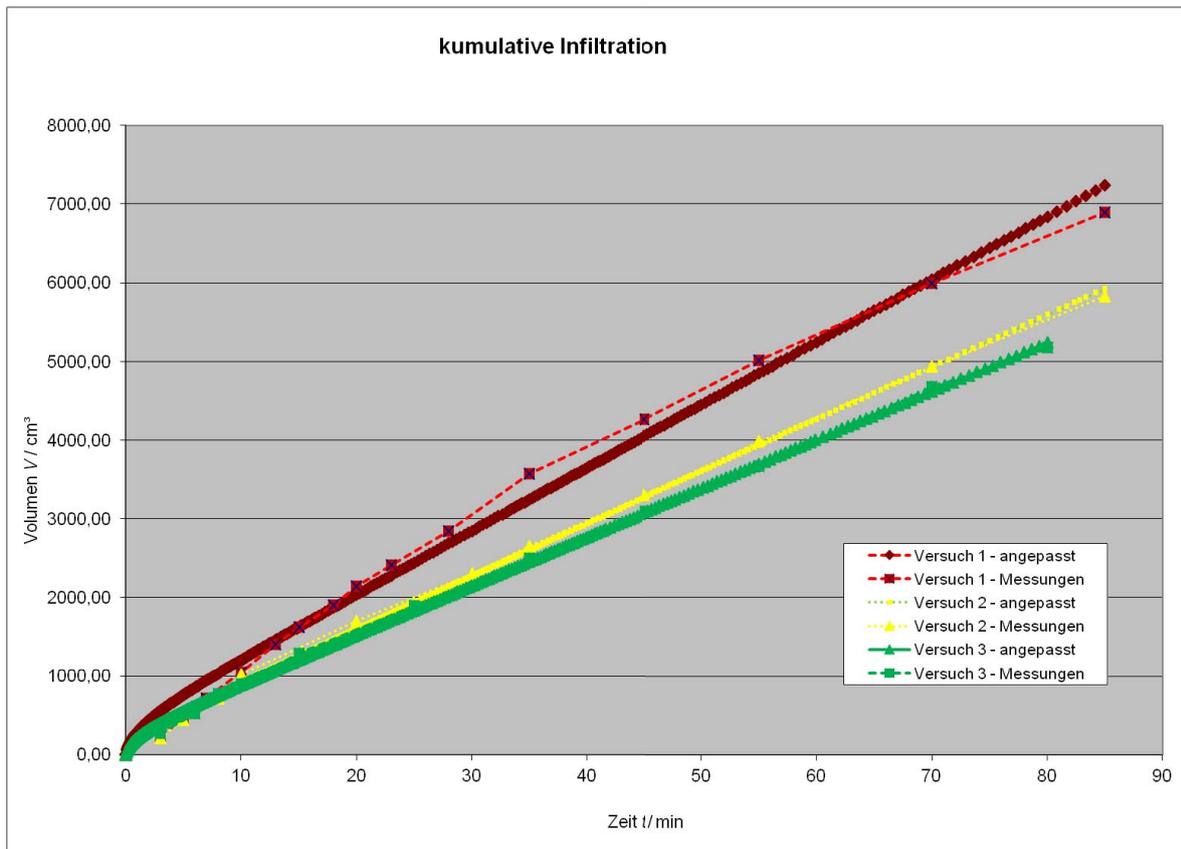


Abb. 69: Vergleich der kumulierten Infiltrationsmengen aus inverser Simulation und Feldmessung – Untertullnerbach



## 5. ZUSAMMENFASSUNG

### 5.1. Unterschiede Einfachring – Doppelring

#### 5.1.1. Versuchsdurchführung der Infiltrometerversuche:

Die instationäre Durchführung der Doppelringversuche hat den Vorteil, dass bei der 2. Versuchsreihe die Feuchtigkeitsfront bereits durch den ersten Infiltrationsversuch weiter in den Boden vorgedrungen ist. Somit wird automatisch eine größere Tiefe im Boden mit etwaigen Inhomogenitäten erreicht, die beim Stationärversuch leicht übersehen werden können. Problematisch ist jedoch die aufwendige Auswertung und Versuchsdurchführung.

Bei der stationären Versuchsdurchführung wird eine geringere Tiefe mit der Feuchtefront erreicht als beim Instationärversuch. Dieser „Nachteil“ wurde durch eine Veränderung der Versuchsdurchführung kompensiert. Durch die Einführung einer Vorsättigungszeit im Außenring wurde bereits der Boden vorgesättigt und die Simulationsdauer verlängert.

Bei den Einzelringversuchen wurde die Simulationsdauer ebenfalls verlängert, um eine möglichst große Tiefe in den jeweiligen Bodenvarianten zu erreichen.

Um die Verläufe der Infiltrationsraten bei unterschiedlichen Bodenvarianten und Werten vergleichen zu können, wurden  $f$ -Faktoren eingeführt, die sich aus der Division der konstanten Endinfiltrationsrate und der bekannten gesättigten Leitfähigkeit errechnen. Die numerische Analyse der  $f$ -Faktoren ergab, dass für Doppelring- und Einfachringssimulationen eine einfache analytische Funktion gefunden werden konnte. Generell ist festzustellen, dass bei jenen Simulationen, die mit kleineren Ringdurchmessern durchgeführt wurden, circa die doppelte Endinfiltrationsrate berechnet wurde, als der Boden tatsächlich besitzt (Vergleich Endinfiltrationsrate zu  $k_s$ ). Diese Untersuchungen wurden mit 3 Bodenvarianten durchgeführt.

Dies ist natürlich ein interessanter Aspekt, vor allem bei Anwendungen, bei denen Versickerungsanlagen mit Hilfe von Feldmessungen dimensioniert werden.

Bei Doppelringversuchen kann bei ab einem Innenringradius von ca. 40 cm auf eine Anwendung der Näherungsformel verzichtet werden (Annäherung des  $f$ -Faktor gegen 1, siehe Abbildung 49). Bei den Einzelringversuchen nähert sich der  $f$ -Faktor erst ab einem Ringradius von über 80 cm dem Wert von 1,2 an (siehe Abbildung 54).

Generell sollte je nach Gegebenheit, Anwendungsziel und erforderliche Genauigkeit der Ringradius so groß wie notwendig und so klein wie möglich gewählt werden (Wasserverbrauch, Einbaumöglichkeit).

### 5.1.2. Einfachring

Bei den Einfachring-Simulationen hat sich gezeigt, dass neben der Ringgeometrie und dem lateralen Fluss auch die Eindringtiefe einen Einfluss auf die Infiltrationsmessung hat. Somit ist auch die indirekt bestimmte gesättigte Leitfähigkeit  $k_s$  von diesen abhängig. Beim Versuchsaufbau ist auch sehr auf die Eindringtiefe zu achten, da bereits eine kleine Variation bei der Eindringtiefe das Ergebnis der Messung beeinflusst (siehe Kapitel 4.2.1 – Untersuchungen der Eindringtiefe). Anzumerken ist, dass die Gleichung 22 zur Berechnung des  $f$ -Faktors für eine Eindringtiefe von 4 cm herangezogen werden kann. Der laterale Fluss verursacht bei kleinen Ringgrößen einen höheren  $f$ -Faktor als bei Doppelring-Simulationen mit dem gleichen Innenringradius. Mit Zunahme der Ringradien wird der Einfluss des lateralen Flusses geringer und der  $f$ -Faktor pendelt sich bei einem Wert von 1,2 ein. Somit kann gesagt werden, dass bei großen Ringradien circa 20% der Infiltration durch lateralen Fluss verursacht wird.

### 5.1.3. Doppelring

Die Doppelring-Simulationen haben gezeigt, dass die Eindringtiefe eine kleinere Rolle spielt als bei den ER-Simulationen (siehe Kapitel 4.1.1 – Untersuchungen der Eindringtiefe). In üblichen Einbautiefen von 4 bis 6 cm kann sie vernachlässigt werden und somit kann Gleichung 21 für die Berechnung des Korrekturfaktors zur Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit im Feld für diese Einbautiefen herangezogen werden. Weiters ist anzumerken, dass der Pufferring die Werte der  $f$ -Faktoren auch bei kleinen Ringradien verringert.

### 5.1.4. Feldversuche

Es wurden einige Feldversuche mit eingebautem Tensiometer durchgeführt, um das Verhalten der Feuchtefront genauer zu untersuchen. Es ist ein Unterschied zwischen Theorie (Simulation) und Praxis im Feld zu bemerken, jedoch bestätigen die Feldmessungen die Simulationsergebnisse. Generell ist bei der Durchführung von Feldmessungen auf einen exakten Ringeinbau zu achten und der Boden sollte so wenig wie möglich gestört werden.

### 5.2. *Berechnung als 2-Phasenfluss*

Die Ergebnisse der Simulation zeigen einen deutlichen Unterschied gegenüber den Simulationen ohne Gasdruck.

Es ist davon auszugehen, dass je nach Untersuchungsziel und zukünftigem Anwendungsfall die jeweiligen Ergebnisse und Formeln herangezogen werden sollten.

Die Anwendung der DR- und ER-Versuche ohne Gasdruck können für Versickerungsanlagen von kleinerem Ausmaß herangezogen werden. Ein Beispiel dafür sind kleine Parkplatzversickerungsanlagen. Der Versickerungsort ist kleinräumig.

Für die Untersuchung von Überflutungsbereichen sollte eher die Anwendung der Ergebnisse der DR/ER – Versuche mit Gegendruck verwendet werden. In diesem Fall sind die Versickerungsflächen größer und werden in kurzer Zeit vollflächig überstaut, was das Infiltrationsvermögen verringert. Diese Tatsache ist besonders bei Böden zu beachten, die eine geringere Durchlässigkeit aufweisen.

### 5.3. *Kombination der Infiltrationsmessung mit Bestimmung weiterer Bodenparameter*

Die Kombination der Ringinfiltrationsmessung im Zusammenhang mit Tensiometer- und Bodenfeuchtemessungen ist durchaus durchführbar. Der Einbau von Tensiometer und Bodenfeuchtemesser ist sehr einfach und ohne großen Zeitaufwand machbar. Die Messergebnisse können zur Plausibilitätsprüfung und zur Interpretation der Ausbreitung der Feuchtigkeitsfront herangezogen werden. Durch den Tensiometereinbau wird der Boden jedoch lokal gestört, was das Messergebnis verfälschen kann.

### 5.4. *Vergleich der Simulationen und Feldversuche mit gängigen Normenwerken*

Die Simulationen und Feldversuche wurden in Anlehnung an die Ö-Norm EN ISO 22282-5 und die Ö-Norm L 1066 simuliert bzw. durchgeführt. Es ist anzumerken, dass bei der Auswertung nach der Ö-Norm der Einfluss der Geometrie der Ringe bzw. die Betrachtung als 3-Phasen-System keinerlei Beachtung geschenkt wird. Die Simulationen und Versuche haben gezeigt, dass diese Größen sehr wohl einen Einfluss auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens haben.



## 6. AUSBLICK

### Quellen/Schrumpfen bei tonigen Böden:

Es könnte sein, dass dieses Phänomen die Infiltration beeinflusst. Der Einfluss von Quellen beziehungsweise Schrumpfen bei tonigen Böden auf den Infiltrationsvorgang und dessen Einfluss sollte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist auch festzustellen ab welcher Kornabstufung diese Erscheinung Einfluss auf den Infiltrationsvorgang hat.

Die wichtigste Eigenschaft in diesem Zusammenhang ist das zeitliche Verhalten und ob das Quellen oder Schrumpfen ein reversibler Vorgang ist. In mineralischen Deponieabdichtungen ist dieses Verhalten sehr genau zu beobachten, da es zu Schrumpfrissen in der Deponieabdichtung kommen kann. Es sollte auch überlegt werden, ob es sinnvoll ist diese Abdichtungsschichten mit einem möglichst hohen Tonanteil zu verwenden (möglichst kleiner  $k_f$ -Wert), oder ob es besser ist einen Höchst- bzw. Mindestanteil der Tonfraktion vorzugeben.

### Fingering:

Fingering-Infiltration ist ein instabiler Fluss, der während der Infiltration in trockenen und homogenen, porösen Medien entsteht und zum beschleunigten Transport von Wasser und nichtwässrigen Flüssigkeiten zum Grundwasser führen kann. Es verursacht auch eine ungleiche Verteilung von Wasser und Dünger in der Wurzelzone und vergrößert das Auslaugen bzw. den Eintrag in den Grundwasserkörper. Daher ist die weitere Forschung über Fingering-Infiltration aufgrund der Luftkompression durch infiltrierendes Wasser oder anderer Ursachen, wichtig, um grundlegende Transportprozesse in der vadosen Zone zu verstehen.

Dieser Effekt ist in hydraulischen Modellen noch nicht bzw. nur teilweise berücksichtigt. Es ist zu untersuchen, wie stark dieser Effekt die Infiltration beeinflusst.

### Makroporenfluss:

Der Makroporenfluss ist in der Regel in den Simulationen nicht erfasst, könnte aber mit einem Spezialprogramm indirekt berücksichtigt werden. Bei den Feldversuchen geht der Makroporenfluss direkt in die Messergebnisse ein und hat einen Einfluss auf Betrachtun-

gen im größeren Ausmaß. Zu erwähnen ist an dieser Stelle die Berücksichtigung bei der Betrachtung von Überflutungsflächen.

#### Bodenschichtung:

Die Bodenschichtung ist je nach Ziel der Untersuchung ein wesentlicher Faktor und beeinflusst natürlich auch die Infiltration. Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen wird der  $k$ -Wert durch maschinelle Bodenbearbeitung (z.B. Pflügen) bei gleichem Bodenaufbau im Boden unterhalb der Pflugtiefe verschlechtert und damit die Infiltration von der Bodenoberfläche bei stärkeren Niederschlagsereignissen reduziert. Dies entsteht durch die Bodenschichtung durch die Maschinen selbst und durch das Bearbeiten des Bodens. Zur besseren Interpretation solcher Beeinträchtigungen sollten weitere Untersuchungen angestellt werden.

#### Lage der Messpunkte im Untersuchungsgebiet

In dieser Arbeit wurde die Infiltrationsmessung aus einem anderen Blickwinkel und mit einem anderen Zugang betrachtet, als es in der gängigen Literatur bisher der Fall war. Der  $k$ -Wert in der Natur ist von vielen Einflüssen (z.B. Grundwasserspiegel, Findlinge, etc.) abhängig. Daher ist es wichtig die Messpunkte im Untersuchungsgebiet sorgfältig auszuwählen und die natürlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

## 7. ANHANG

### 7.1. Computersimulationen

In den nachfolgenden Diagrammen werden sämtliche Ergebnisse bei einer Bodenwasserspannung von 1 bar ( $pF$ -Wert = 3,0) als Anfangsbedingung der jeweiligen Versuchsböden angeführt.

In der Tabelle 30 werden die verwendeten Abkürzungen in den nachfolgenden Abbildungen erläutert.

Erklärung der Abkürzungen in den Abbildungen	
Abkürzung	Bedeutung
ER	Einzelring
DR	Doppelring
BV	Bodenvariante
IR	Innenringradius bei Doppelringsimulationen bzw. Ringradius bei Einzelringsimulationen
HYDRUS	Simulation mit Hydrus
STOMP	Simulation mit Stomp
OG	Simulation ohne Berücksichtigung des Bodenluftdruckes
MG	Simulation mit Berücksichtigung des Bodenluftdruckes

**Tab. 30: Erklärung der Abkürzungen in den Abbildungen**

#### 7.1.1. Doppelringversuche

7.1.2. Bodenvariante 0 – "sand" – nach US-Taxonomy –  $k_s = 8,25 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

Bodenvariante 0 – Innenringradius 7,0 cm

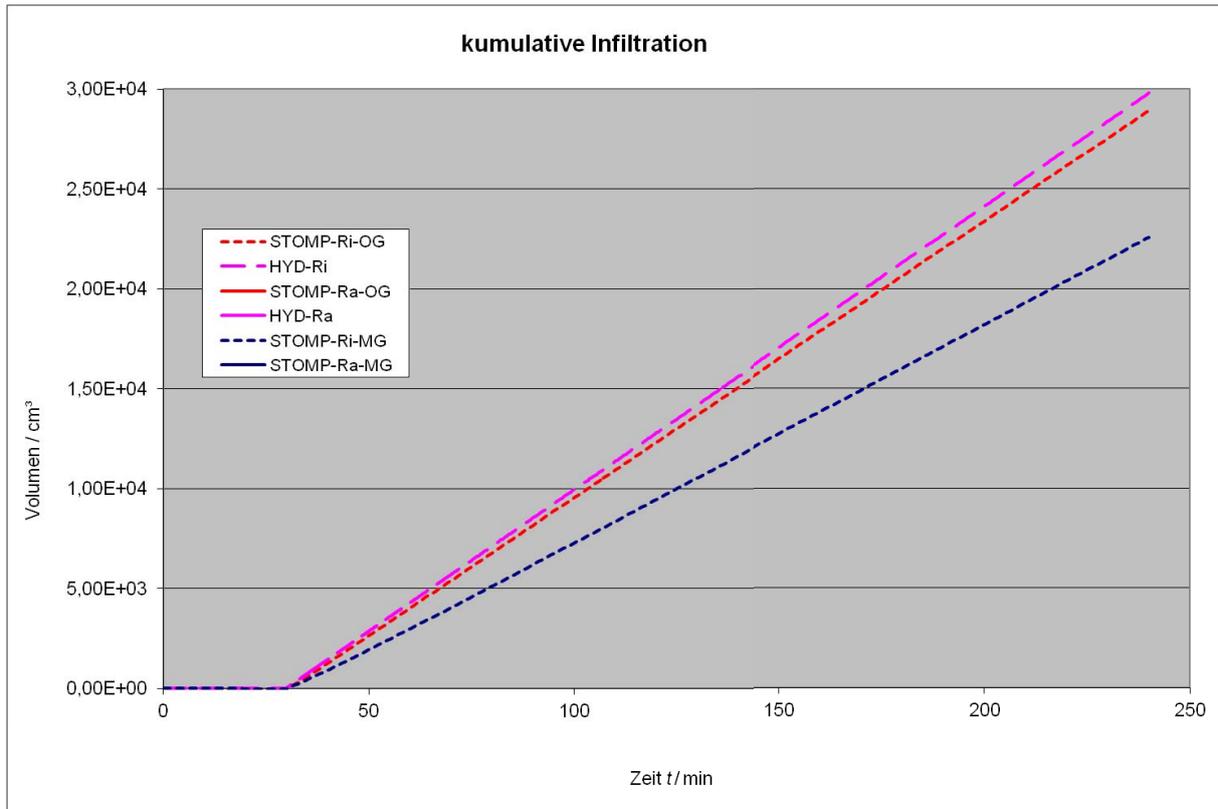


Abb. 70: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 7,0 cm

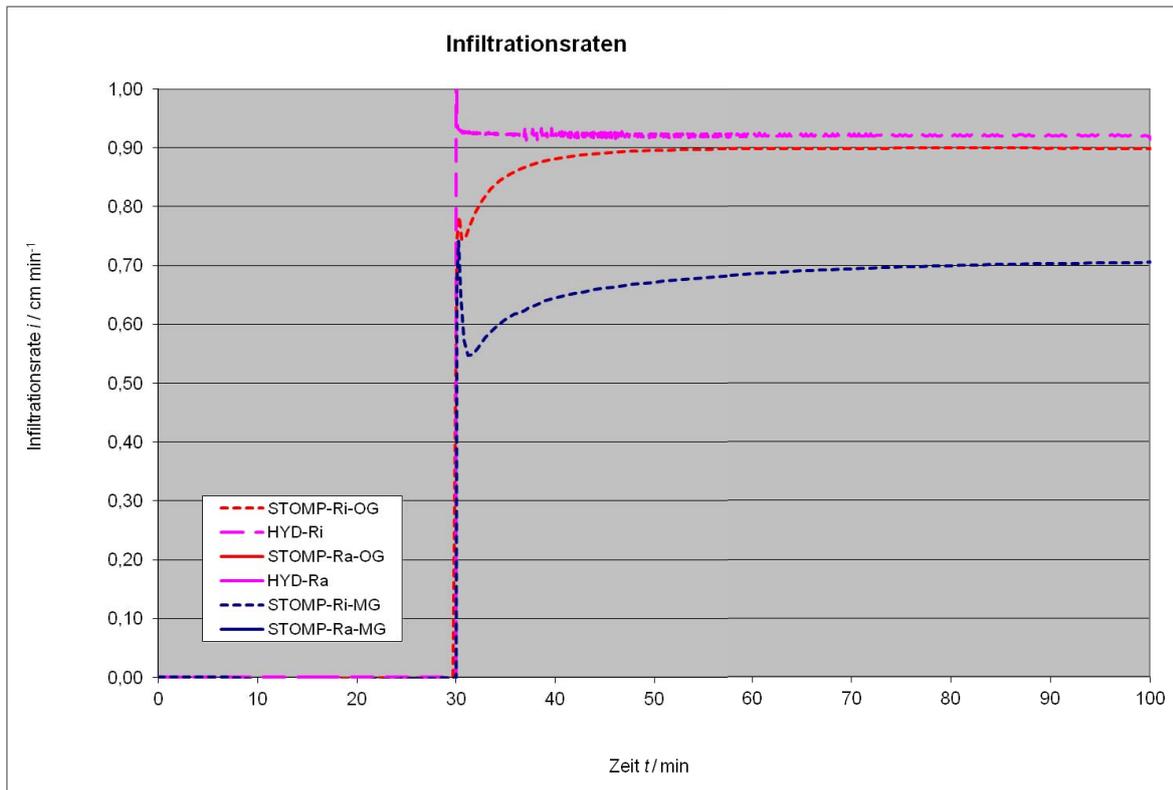


Abb. 71: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 0 – Innenringradius 15,0 cm

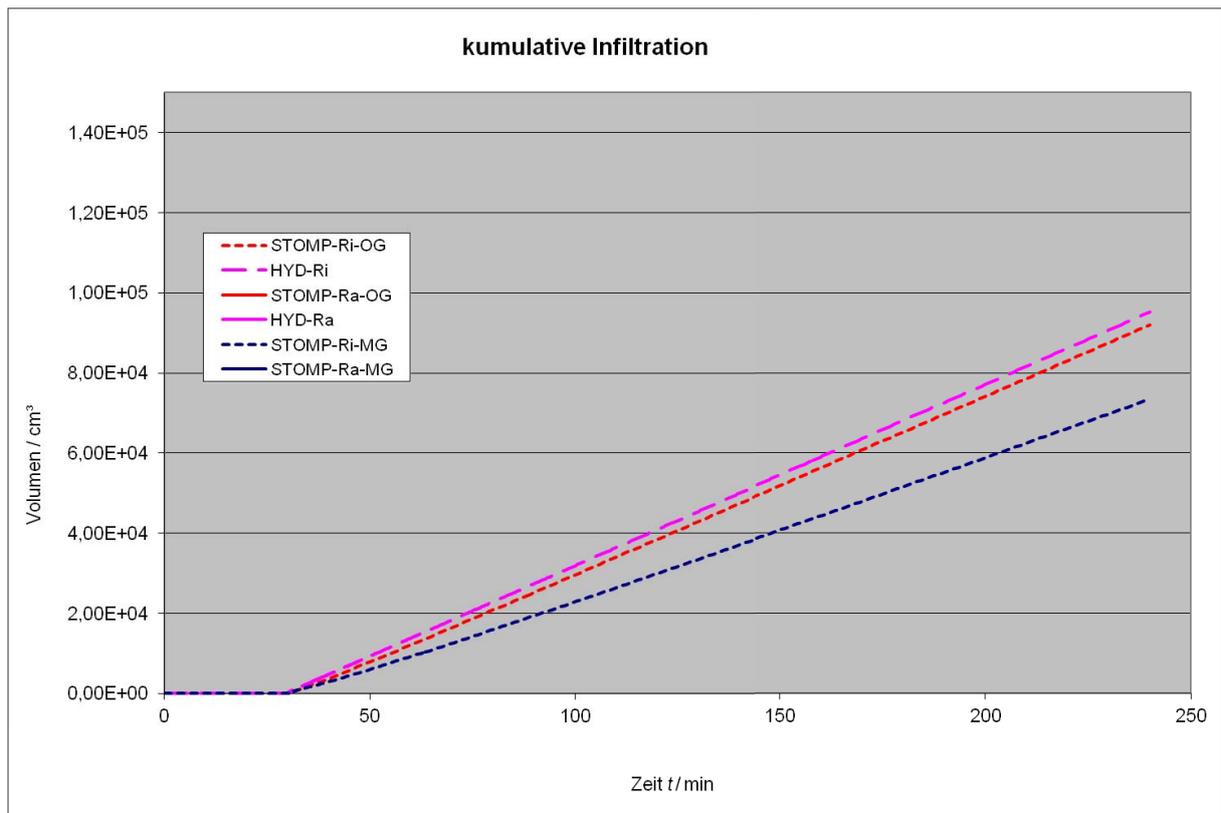


Abb. 72: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 15,0 cm

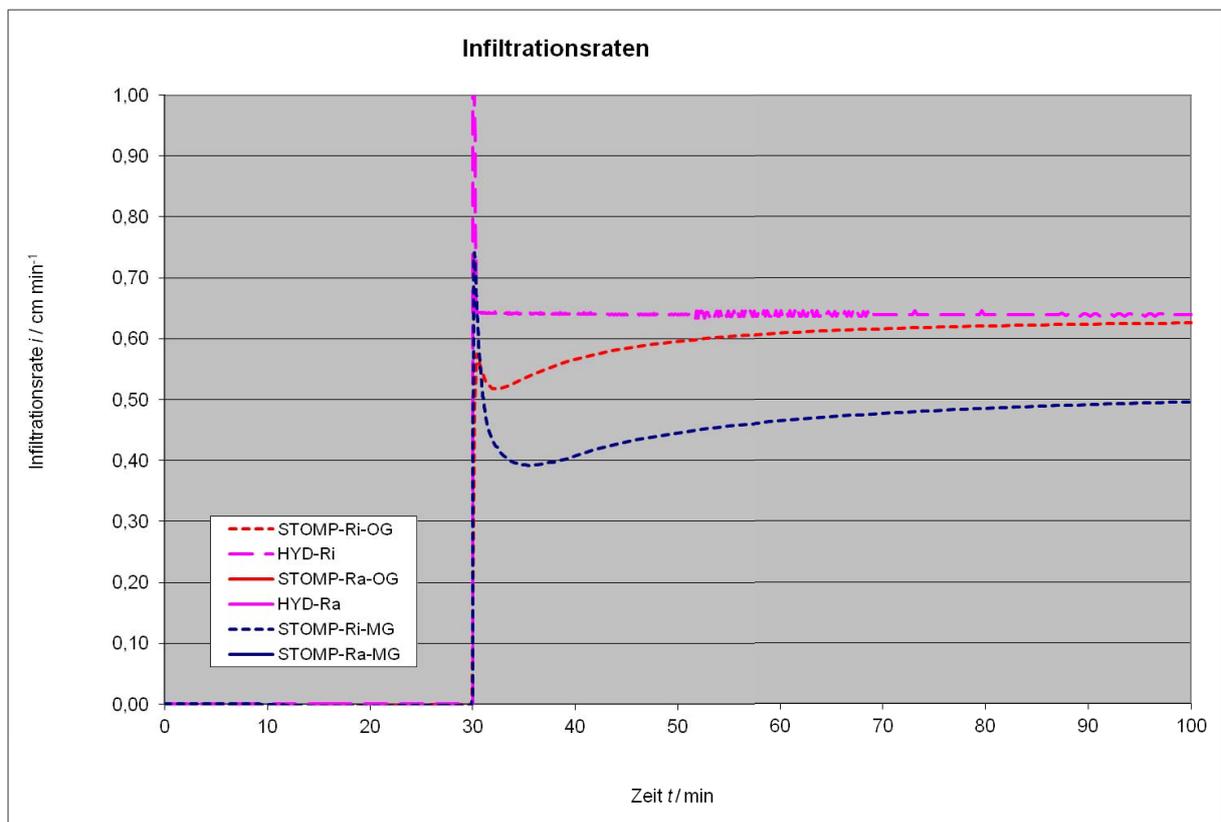


Abb. 73: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 15,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 20,0 cm

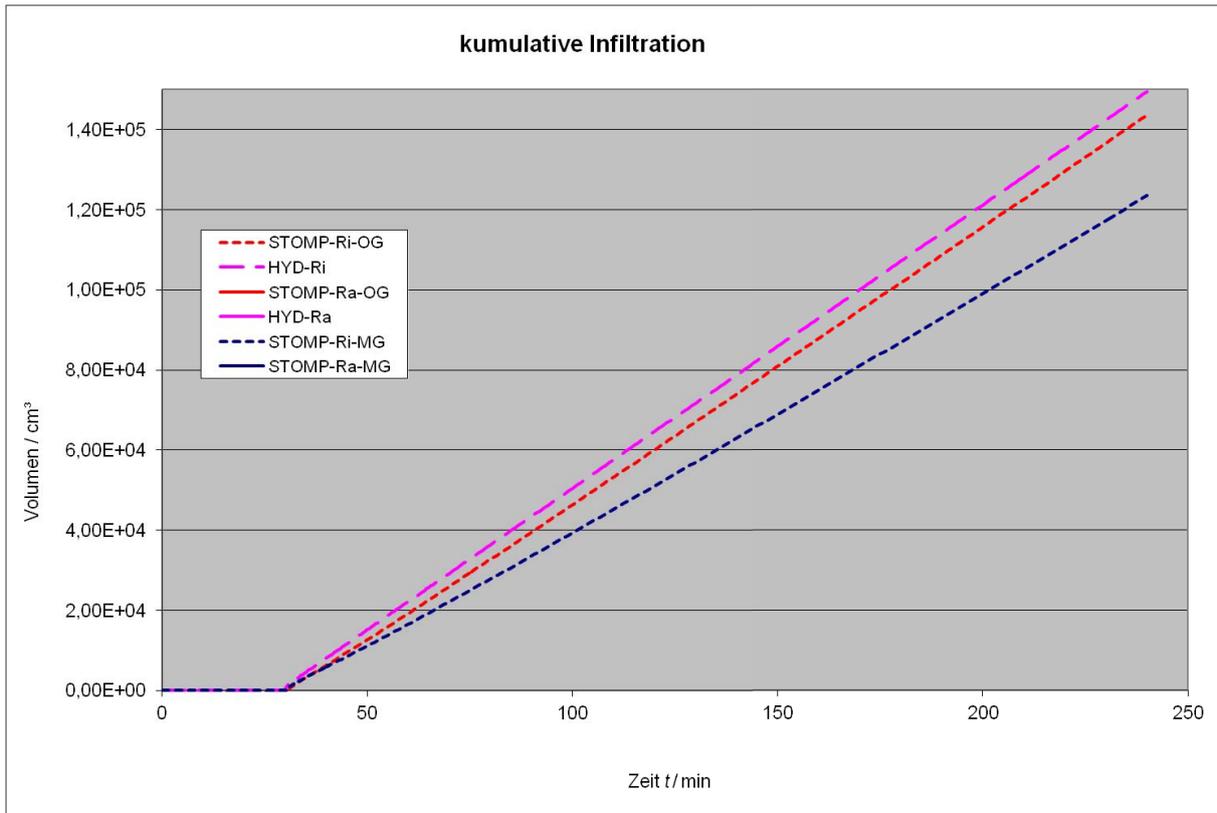


Abb. 74: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 20,0 cm

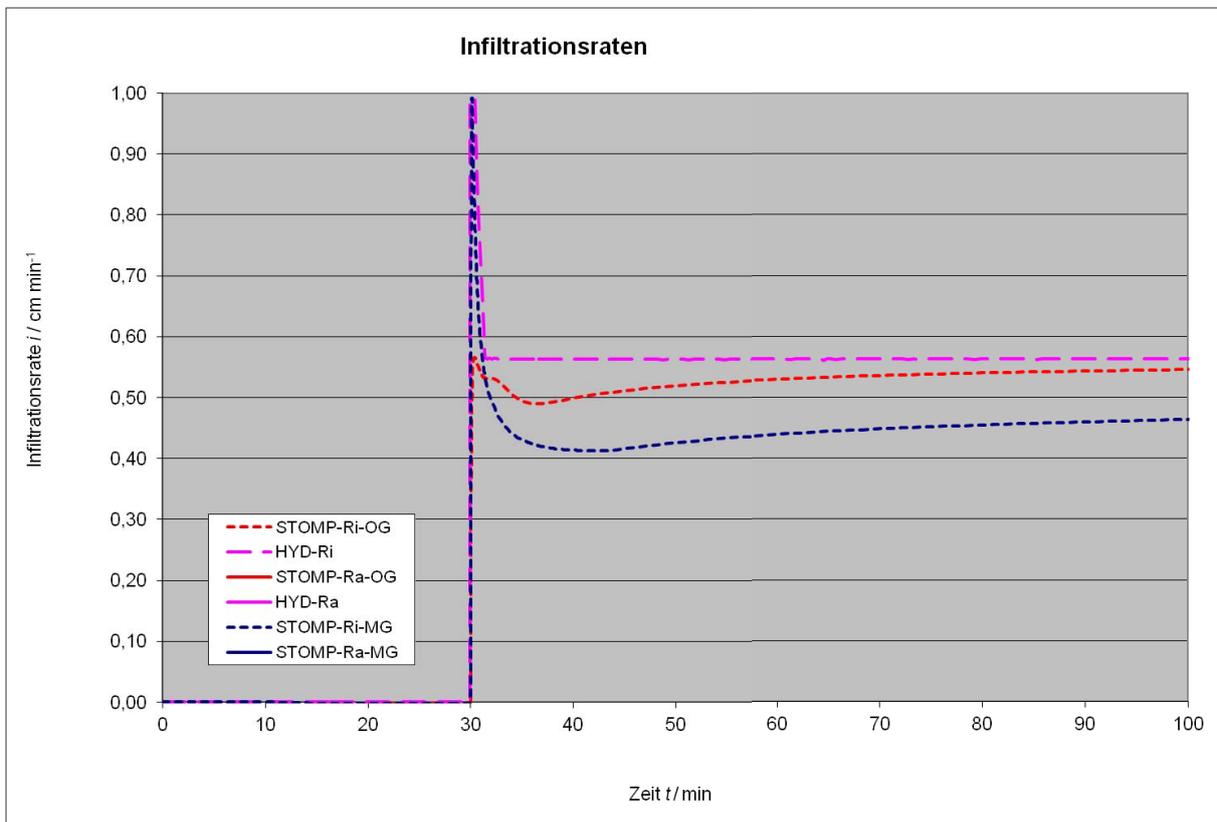


Abb. 75: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 0 – Innenringradius 40,0 cm

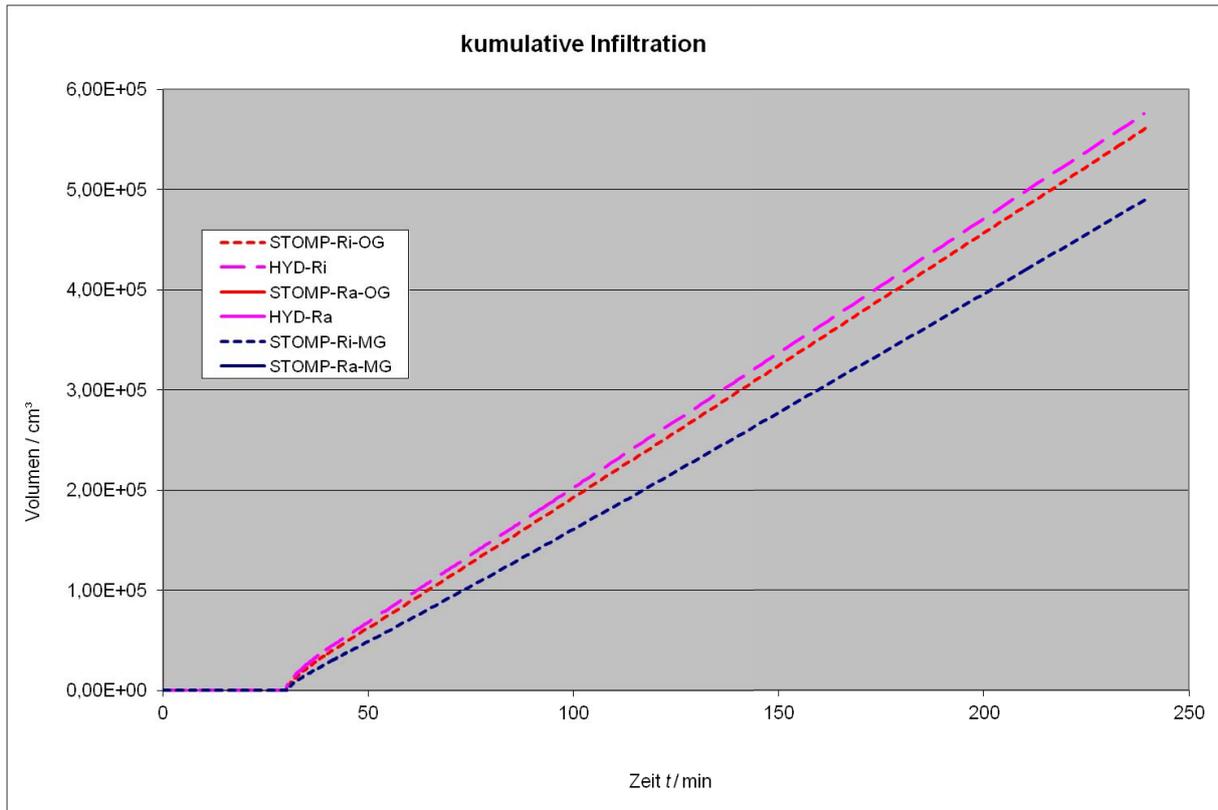


Abb. 76: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 40,0 cm

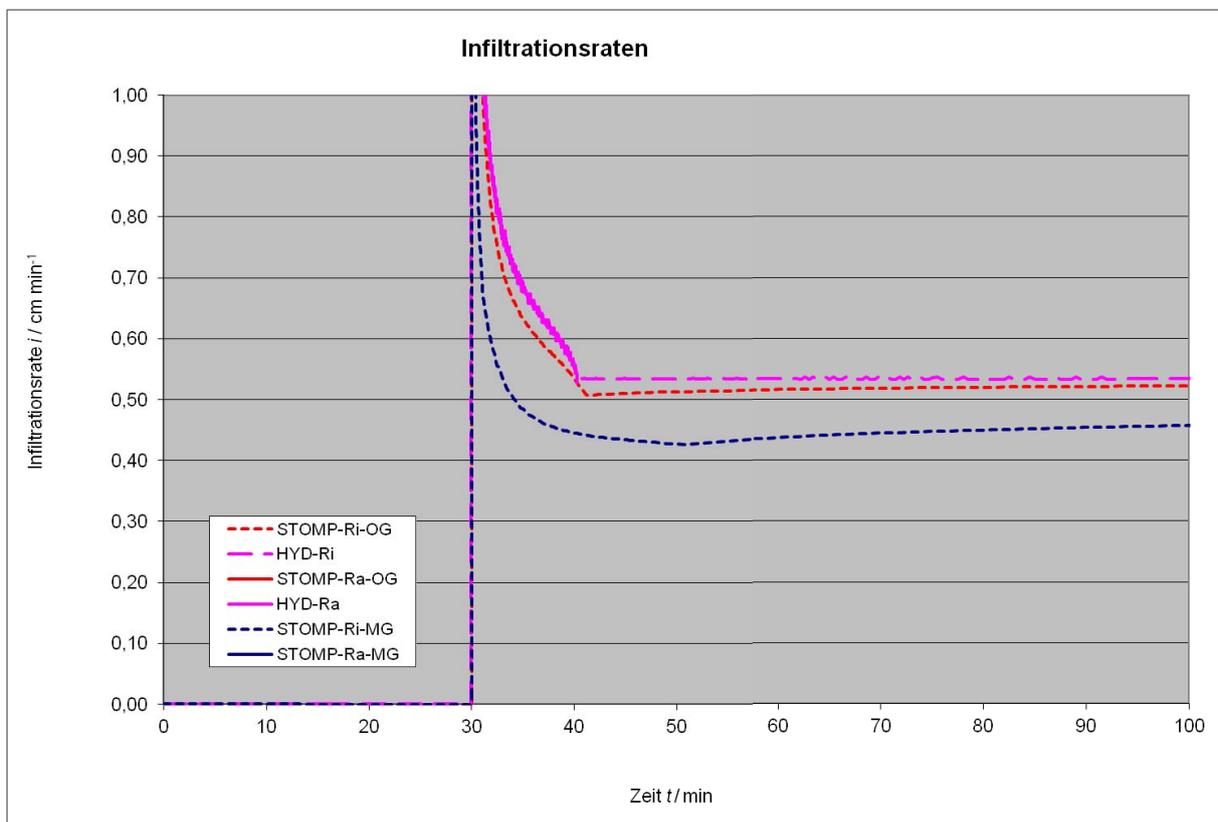


Abb. 77: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 40,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 60,0 cm

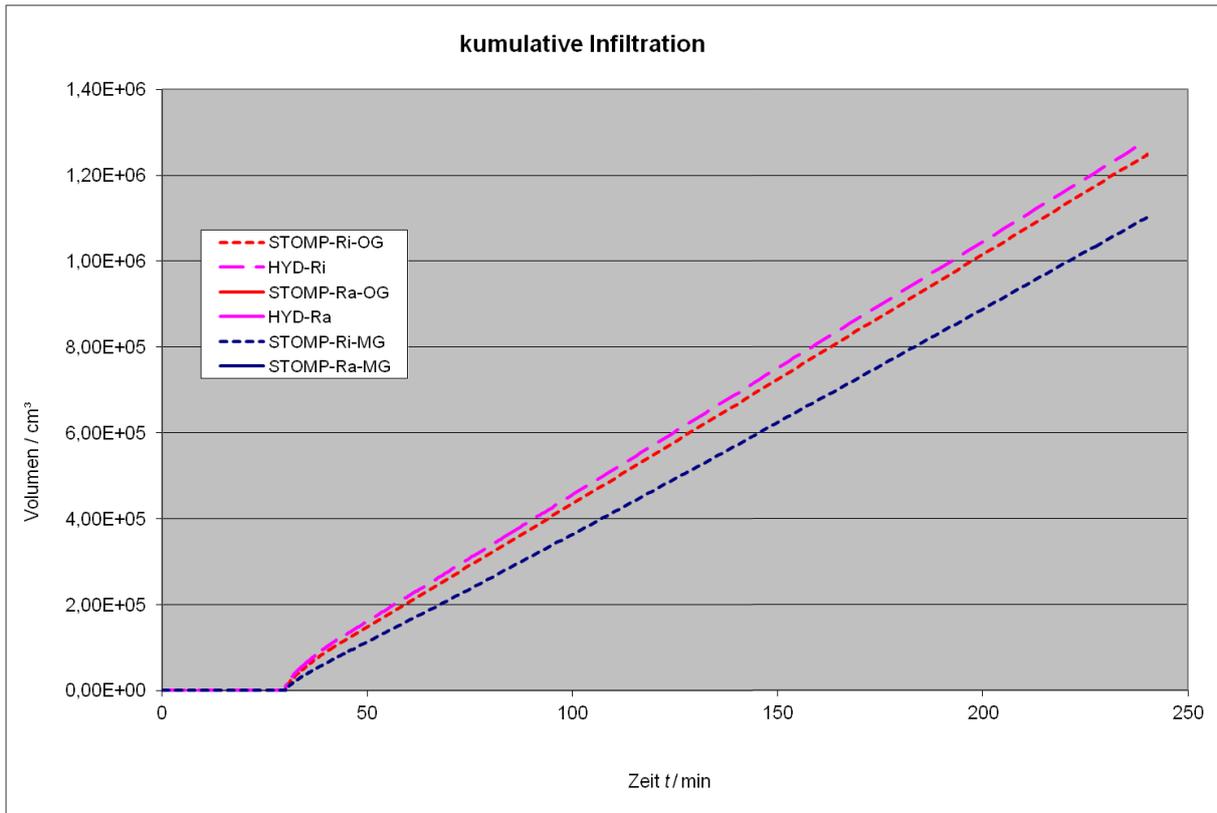


Abb. 78: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 60,0 cm

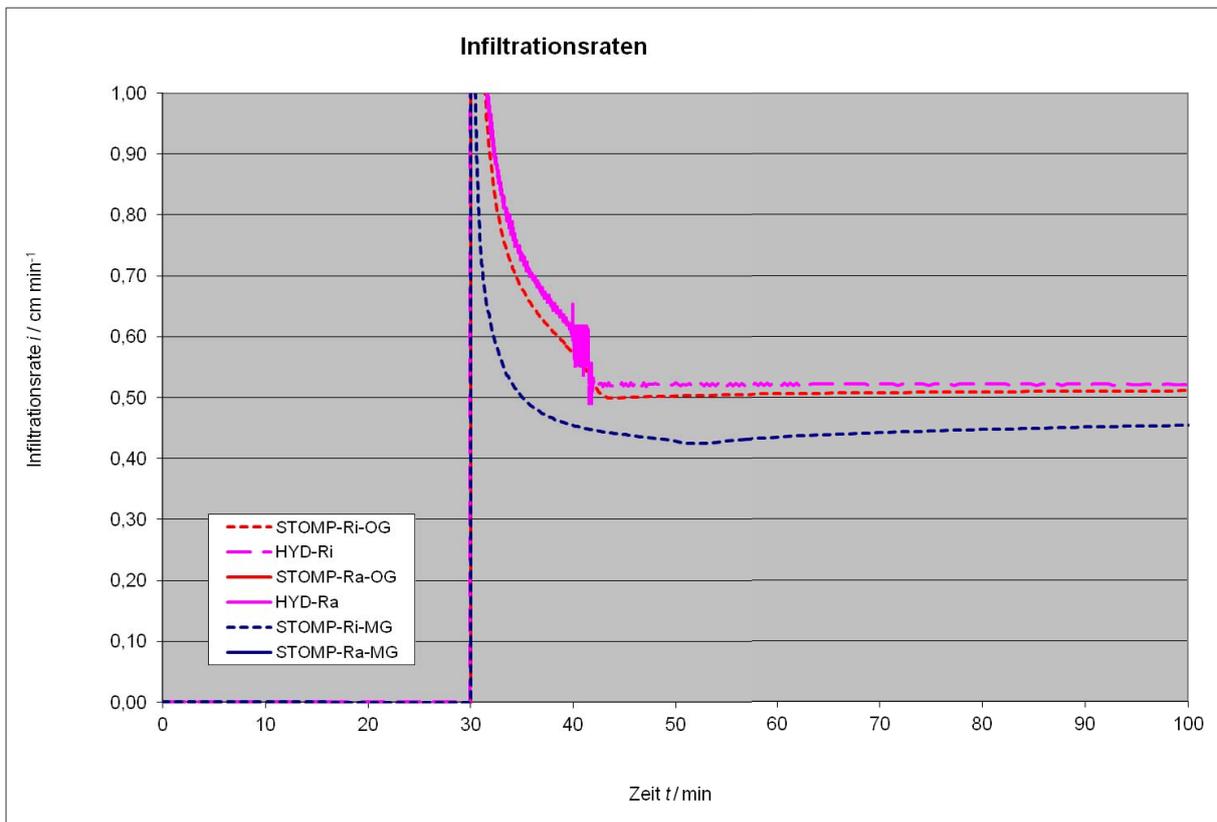


Abb. 79: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 0 – Innenringradius 80,0 cm

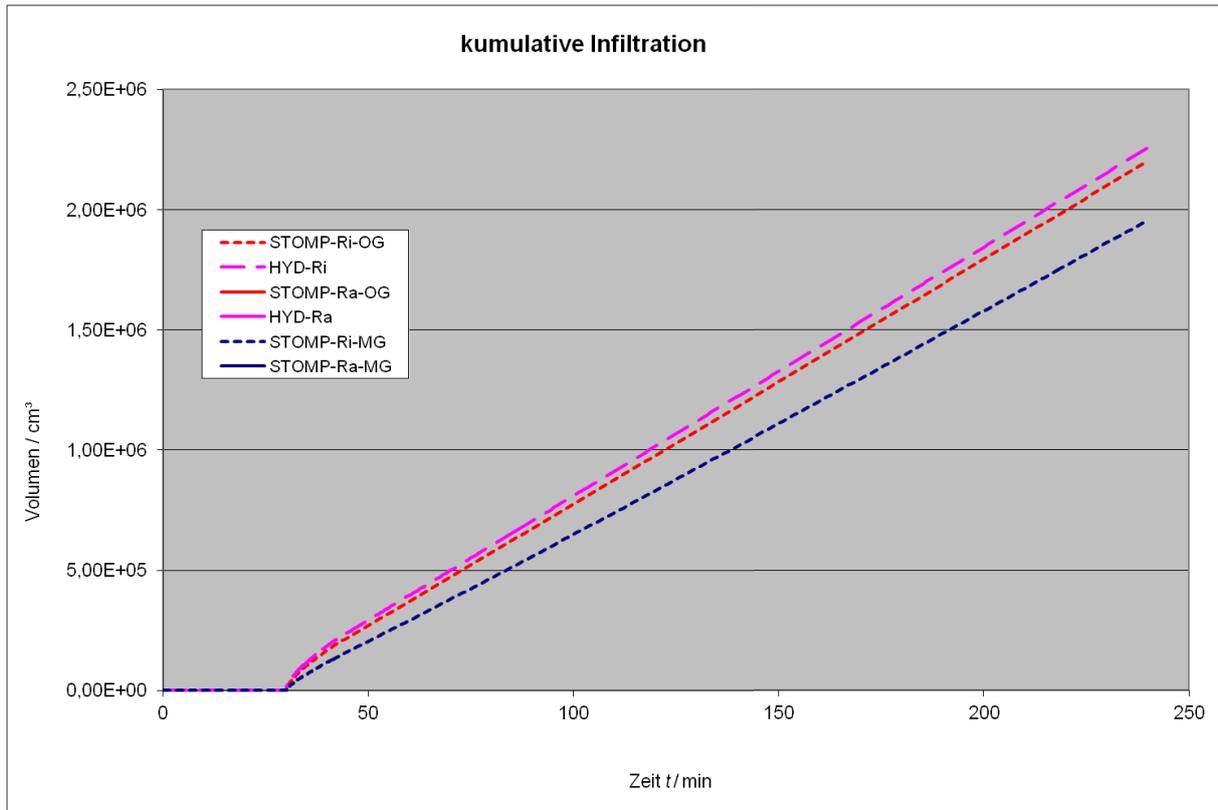


Abb. 80: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 80,0 cm

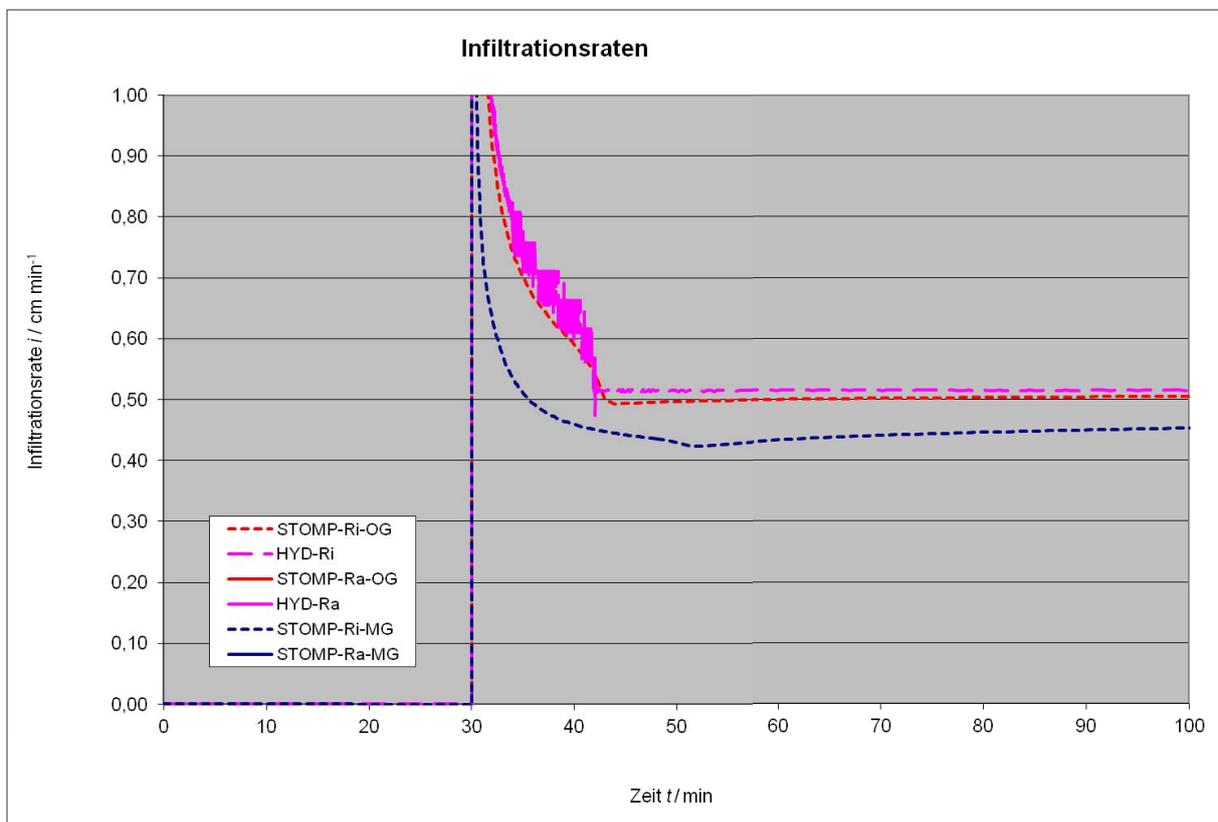


Abb. 81: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 100,0 cm

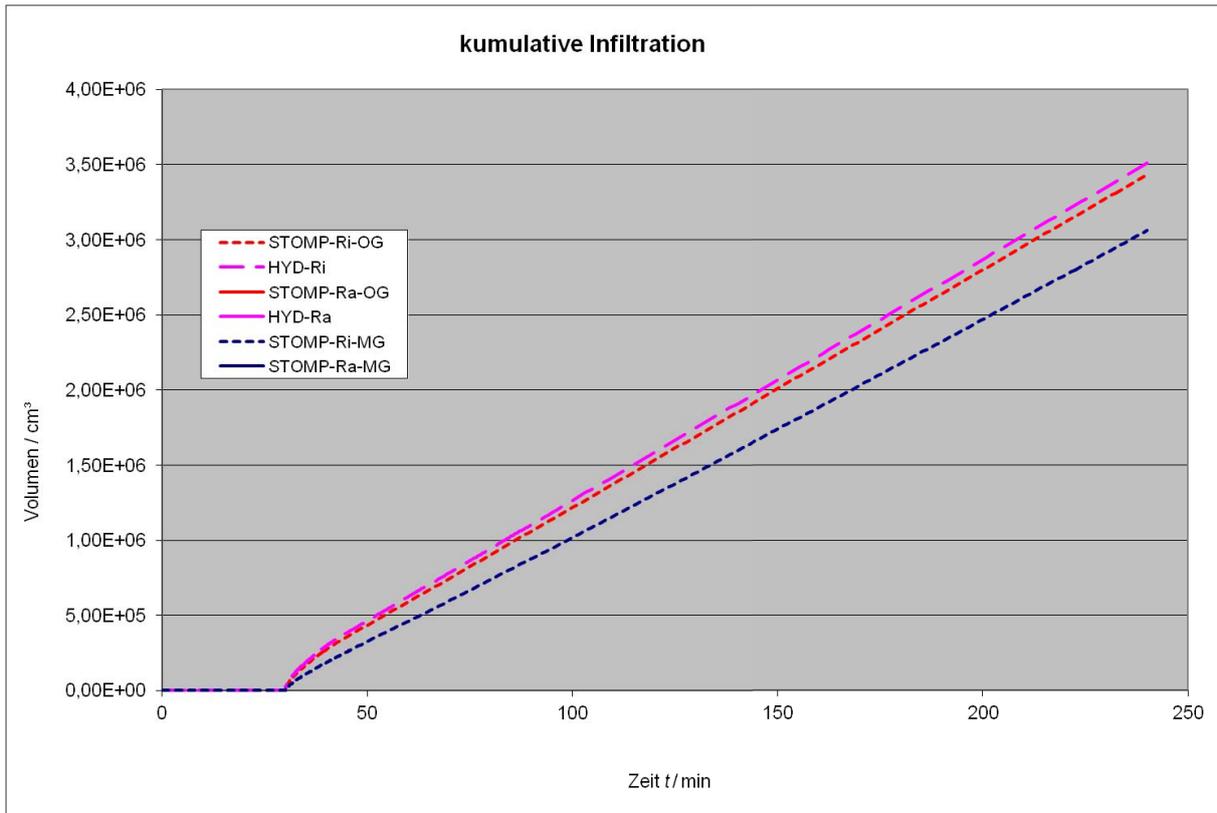


Abb. 82: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 100,0 cm

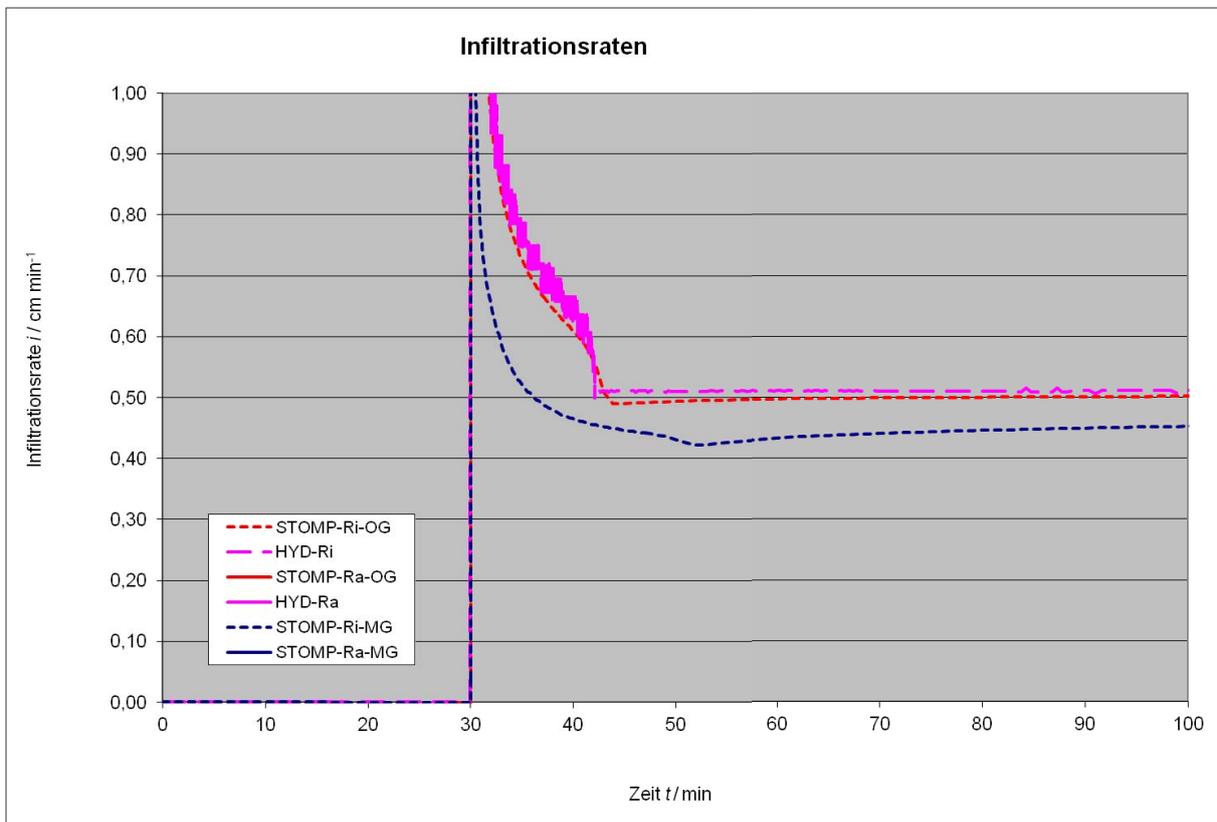


Abb. 83: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 0 – Innenringradius 120,0 cm

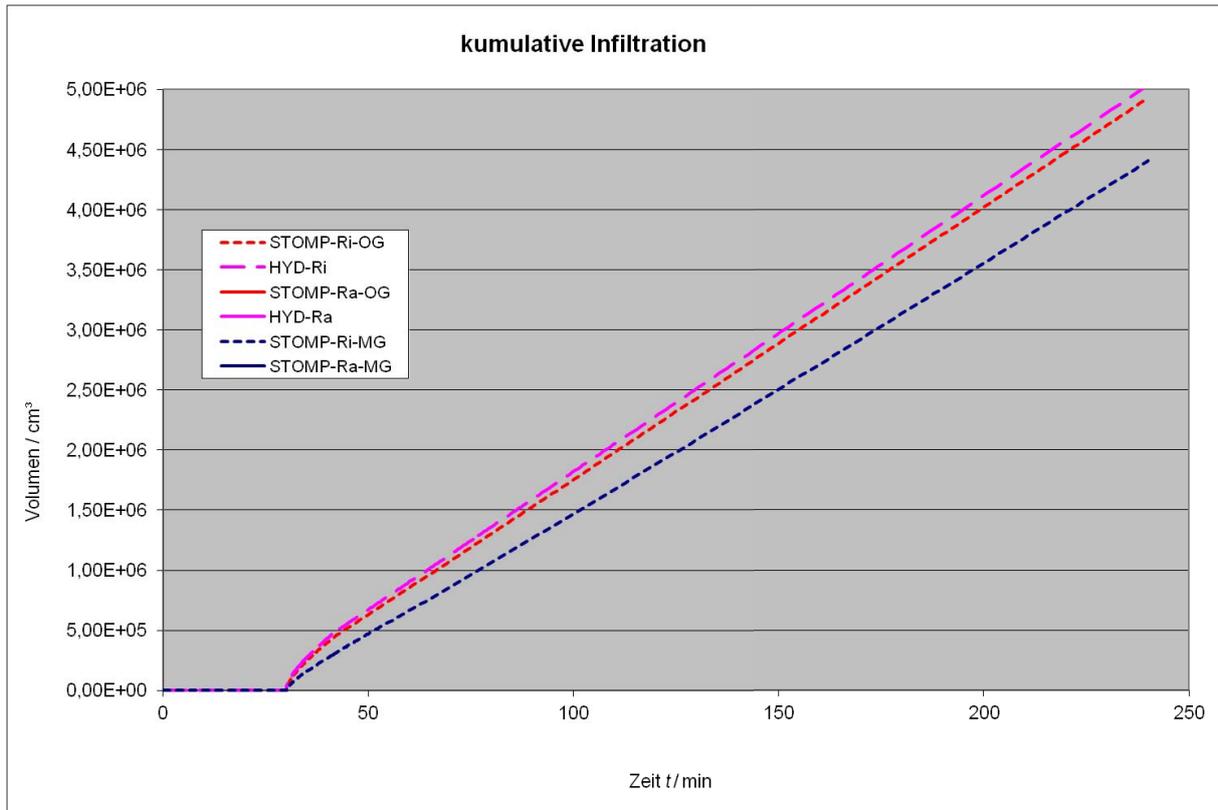


Abb. 84: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 – IR = 120,0 cm

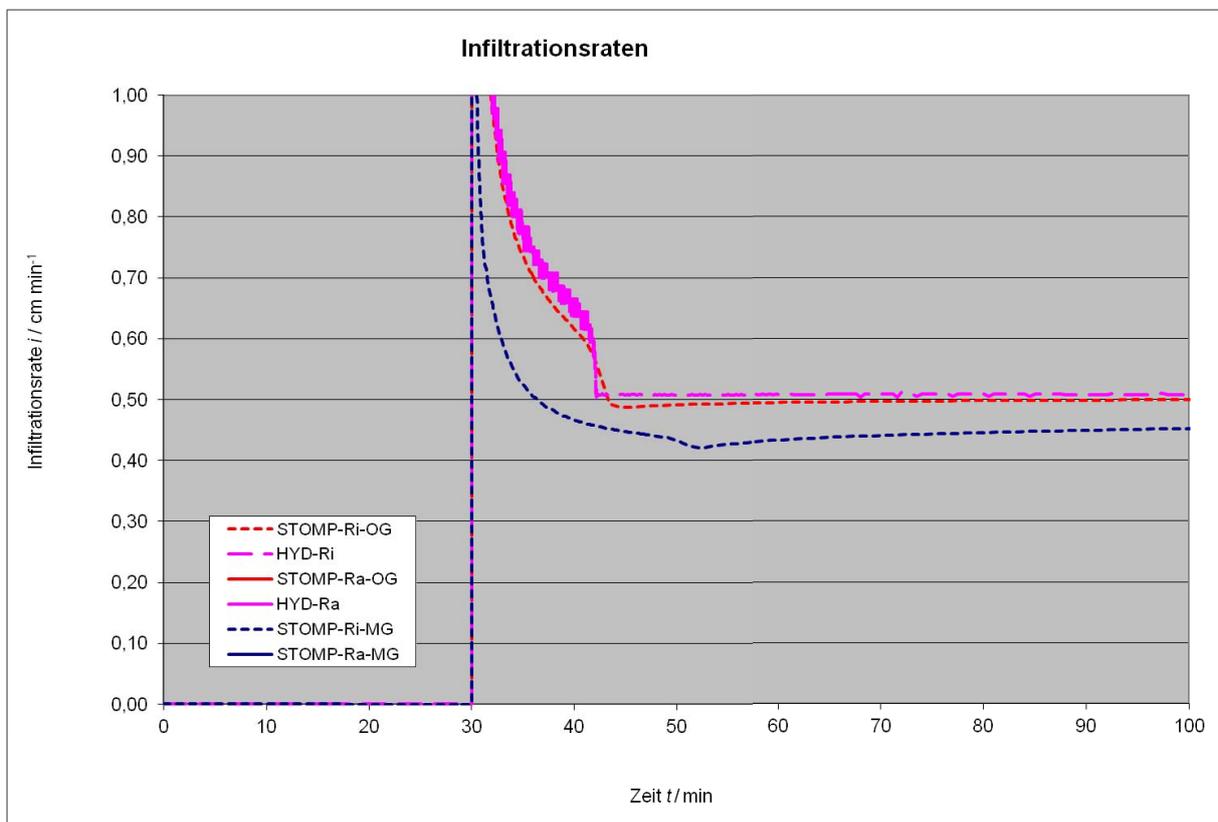


Abb. 85: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 120,0 cm

7.1.3. Bodenvariante 1 – "loamy sand" – nach US-Taxonomy –  $k_s = 4,0532 \times 10^{-5}$  m/s

## Bodenvariante 1 – Innenringradius 7,0 cm

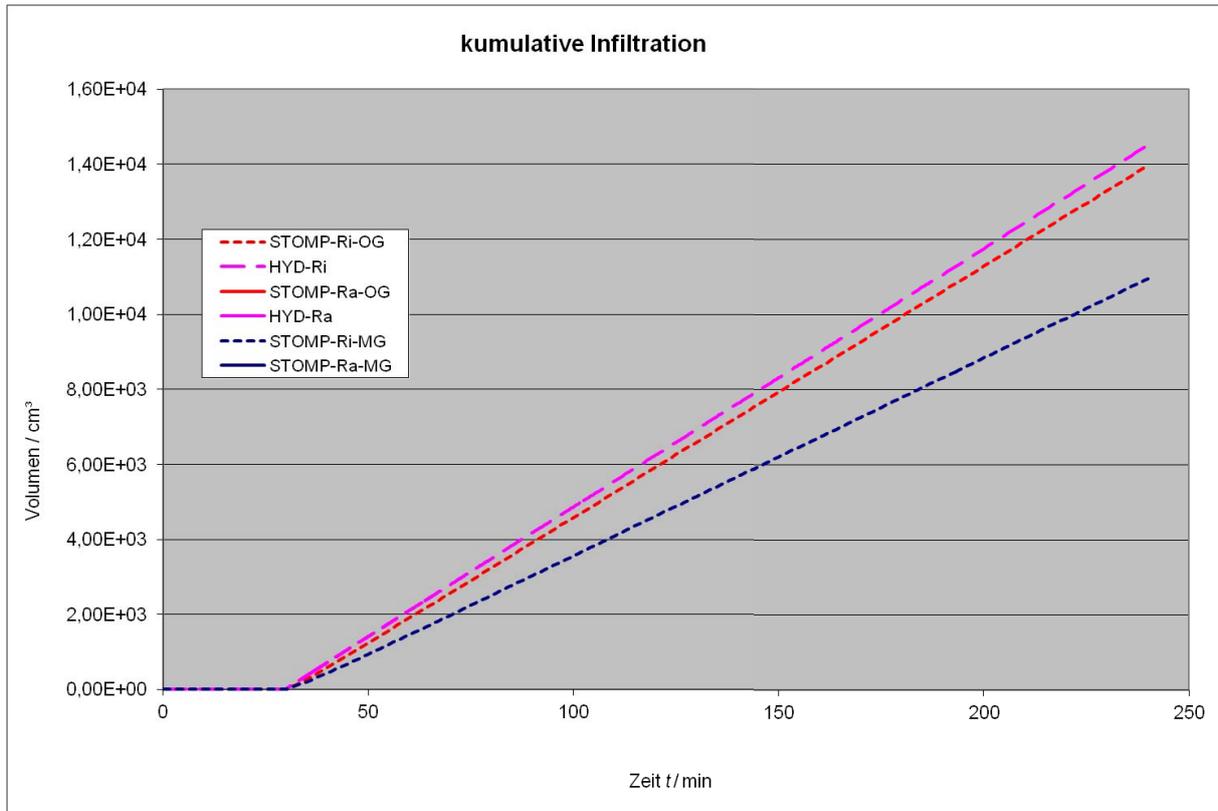


Abb. 86: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 7,0 cm

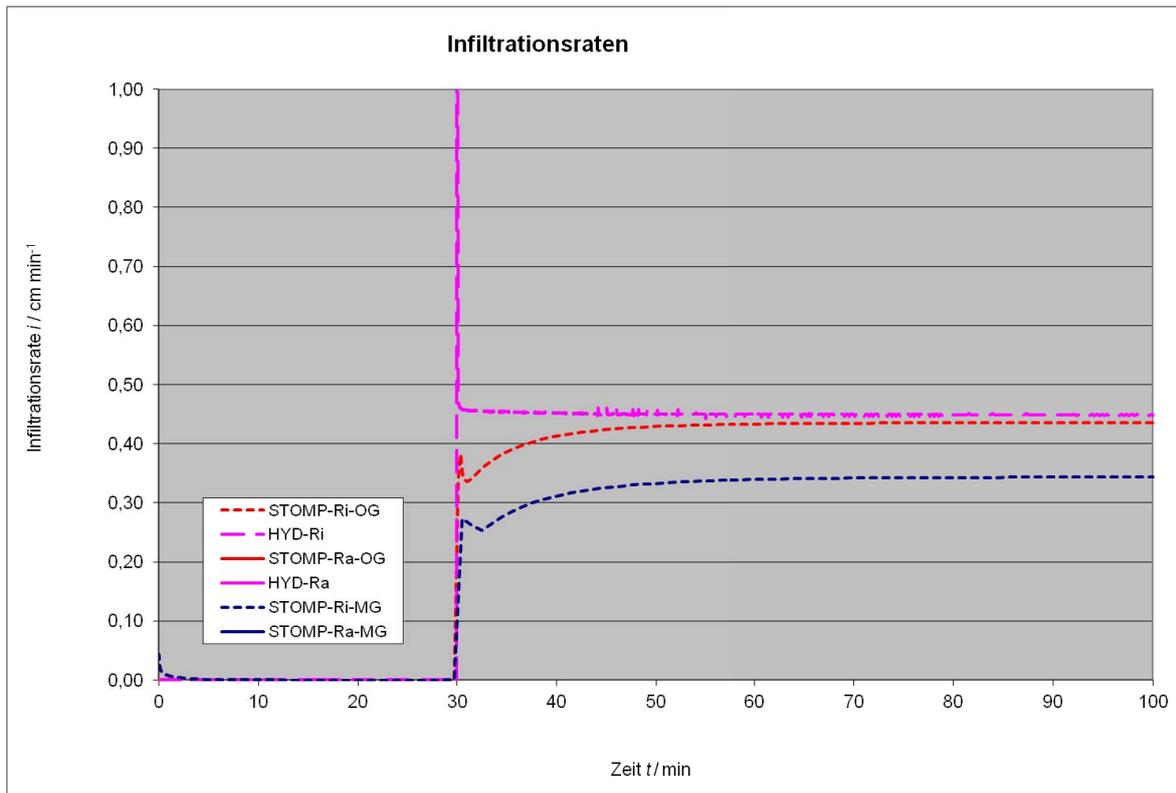


Abb. 87: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 15,0 cm

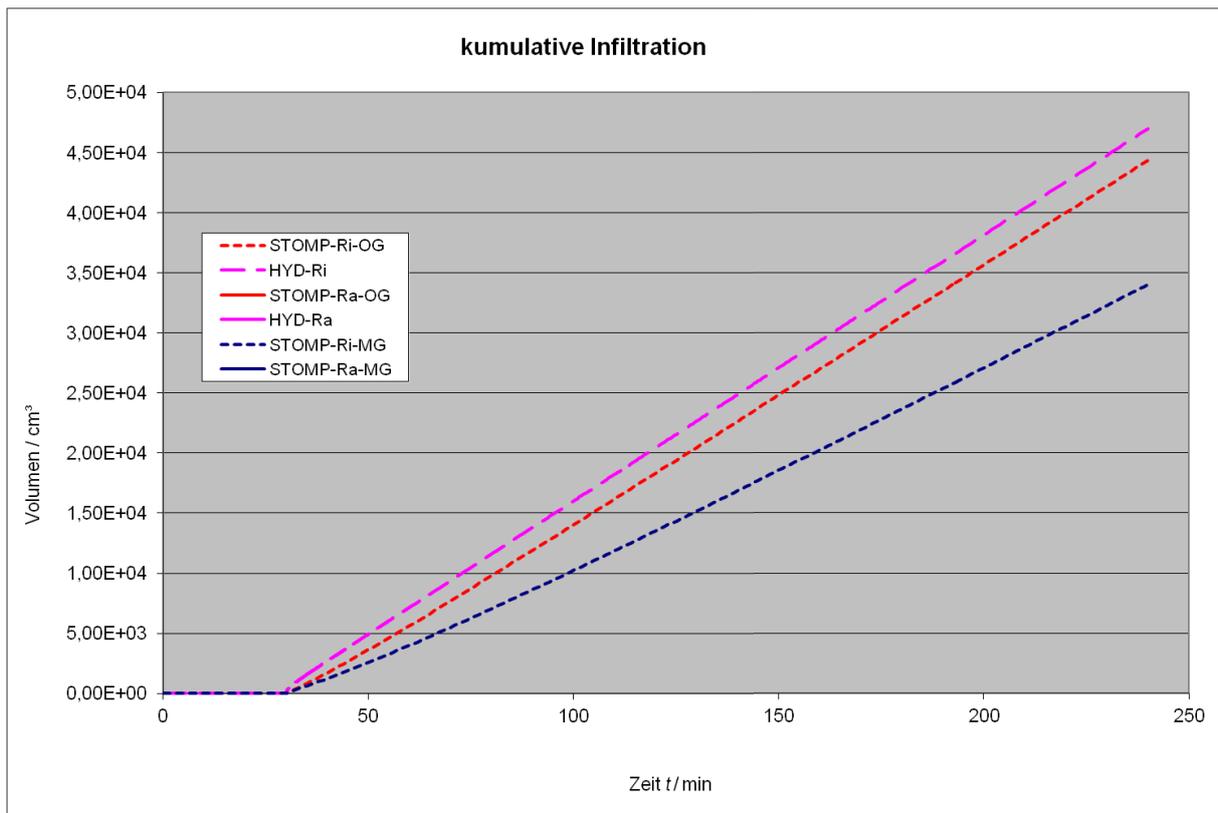


Abb. 88: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 15,0 cm

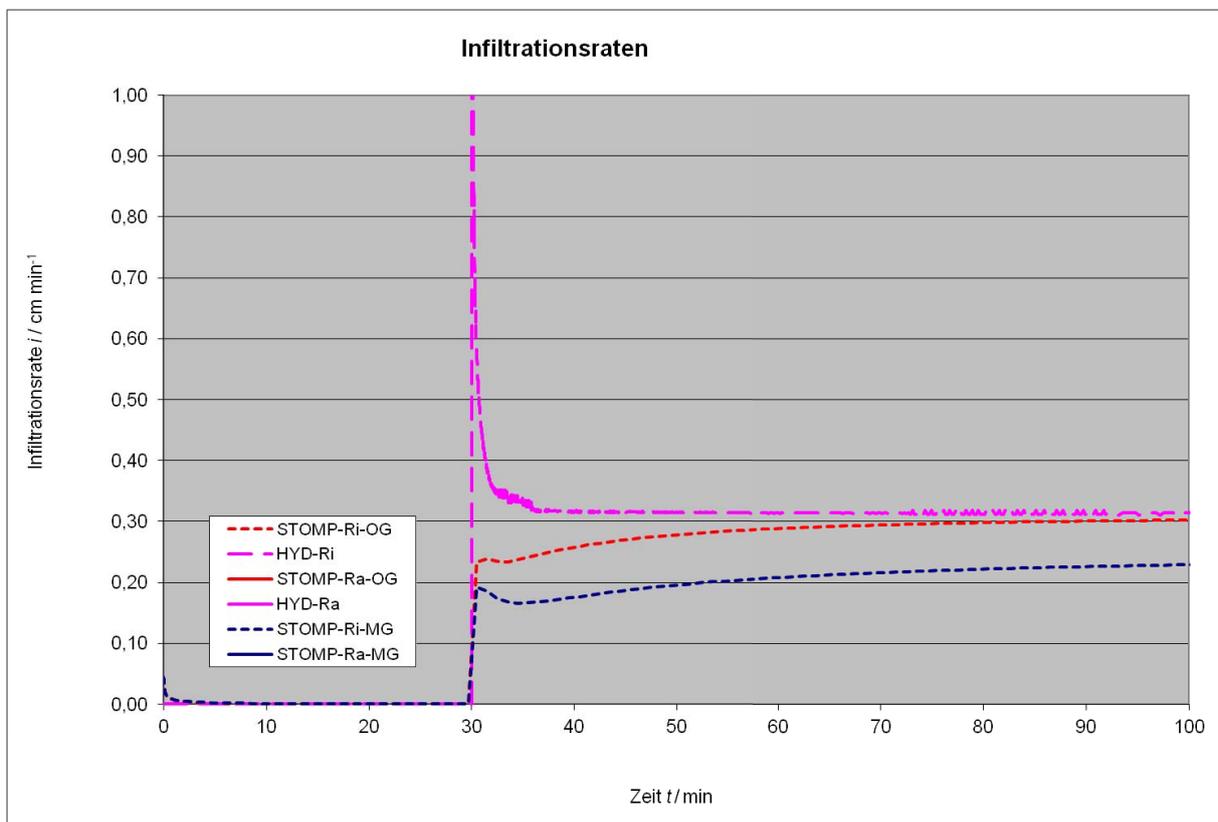


Abb. 89: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 15,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 20,0 cm

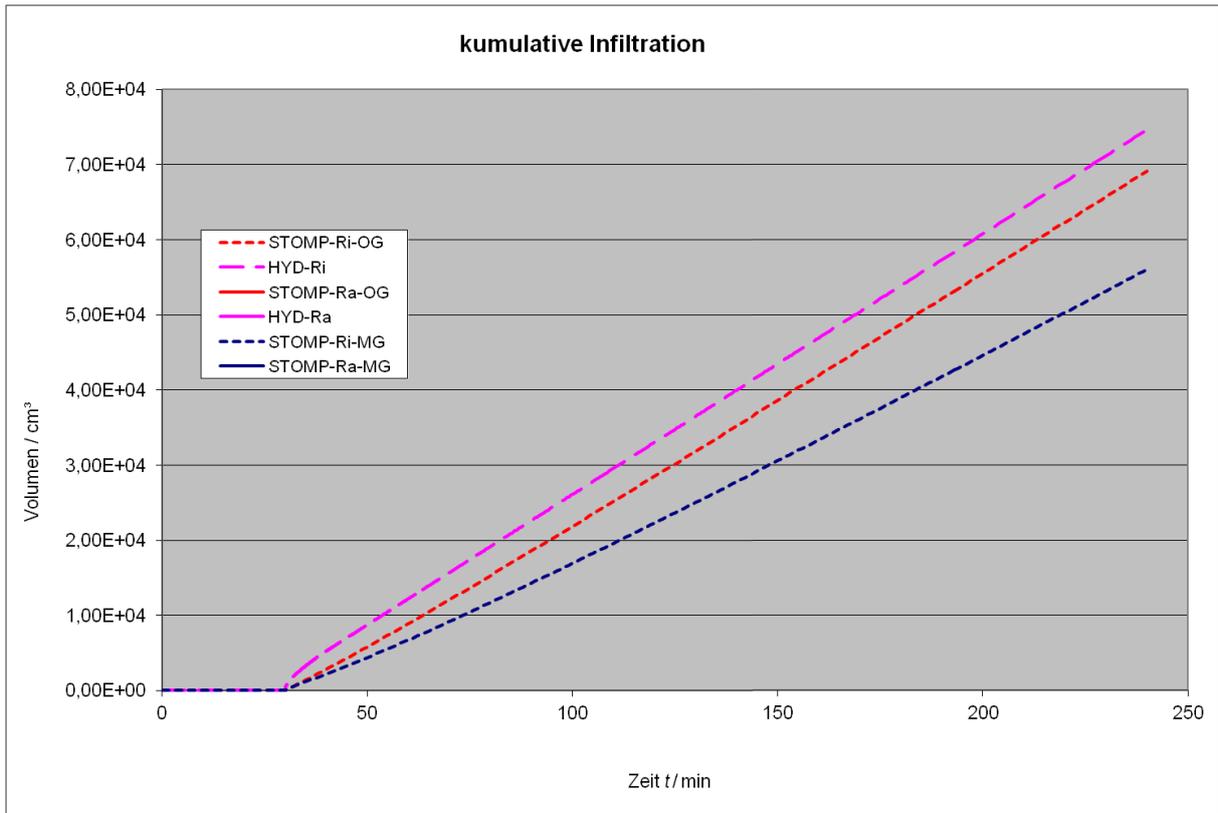


Abb. 90: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 20,0 cm

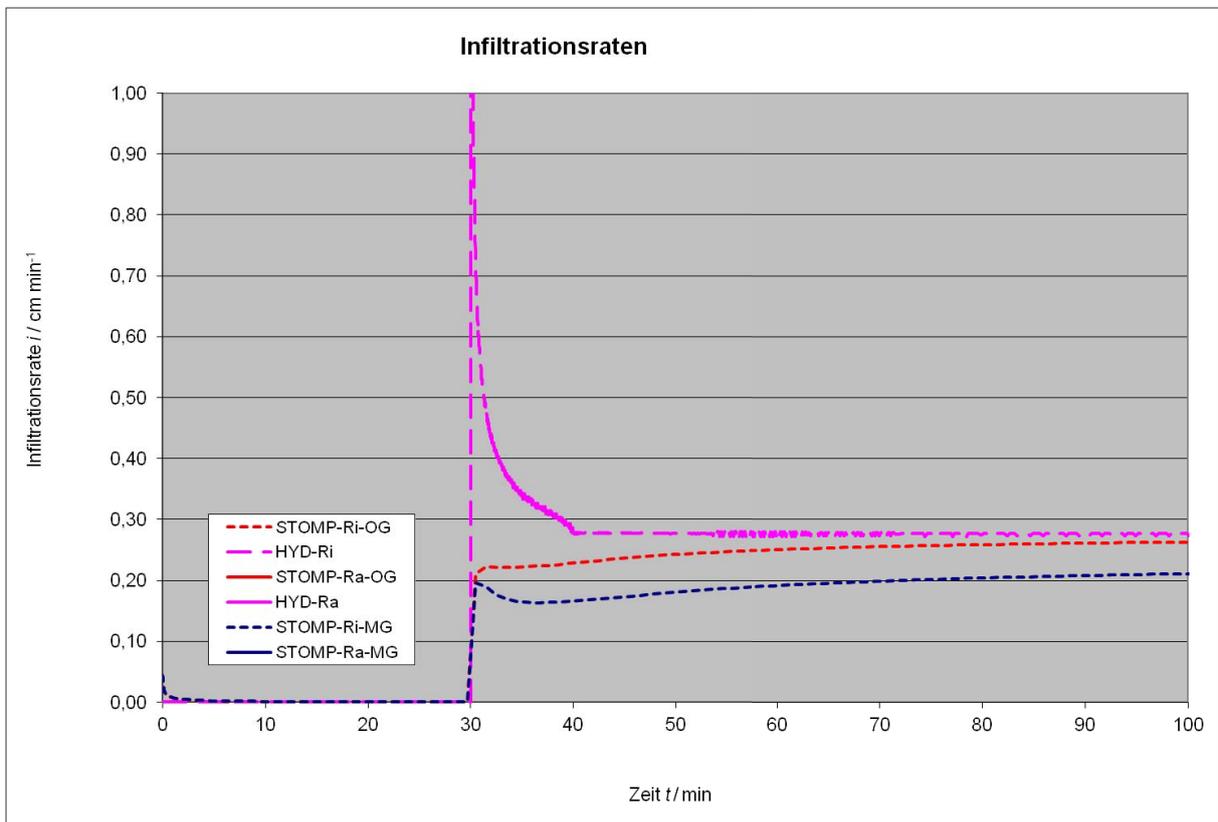


Abb. 91: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 40,0 cm

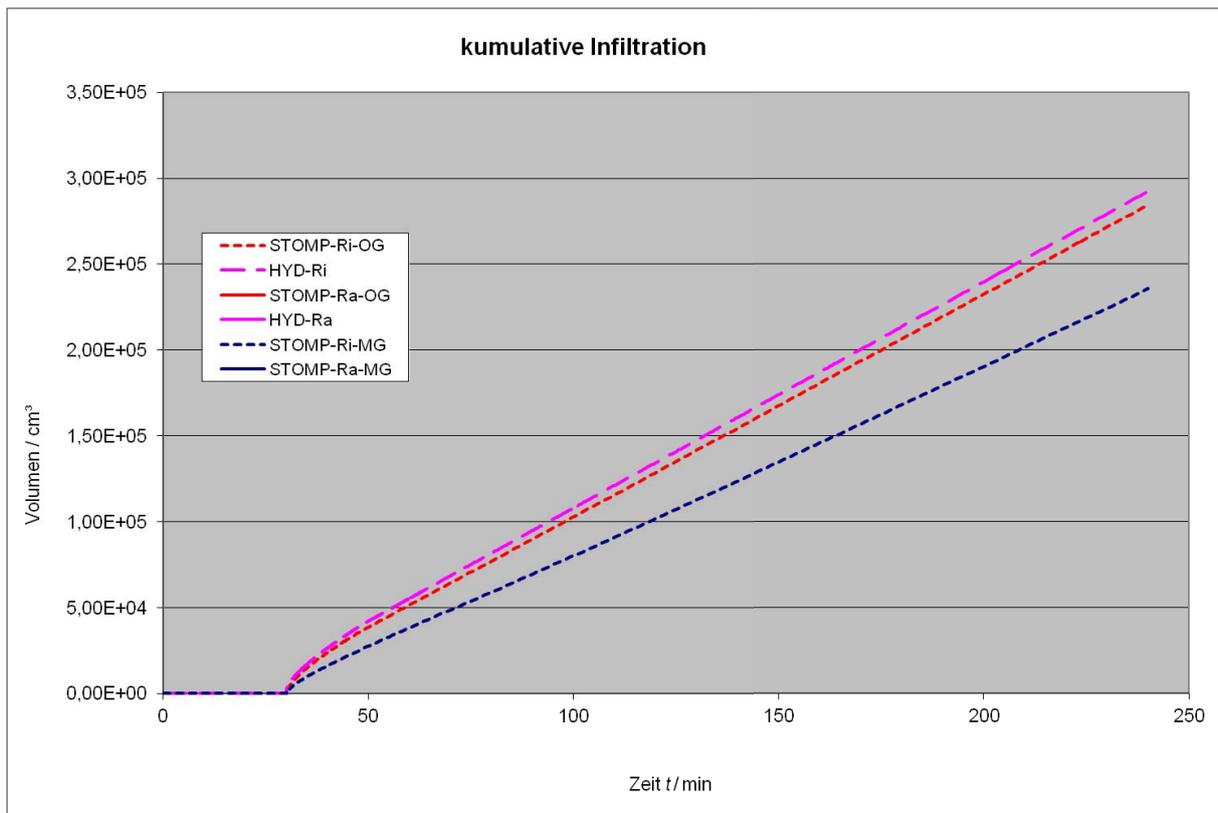


Abb. 92: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 40,0 cm

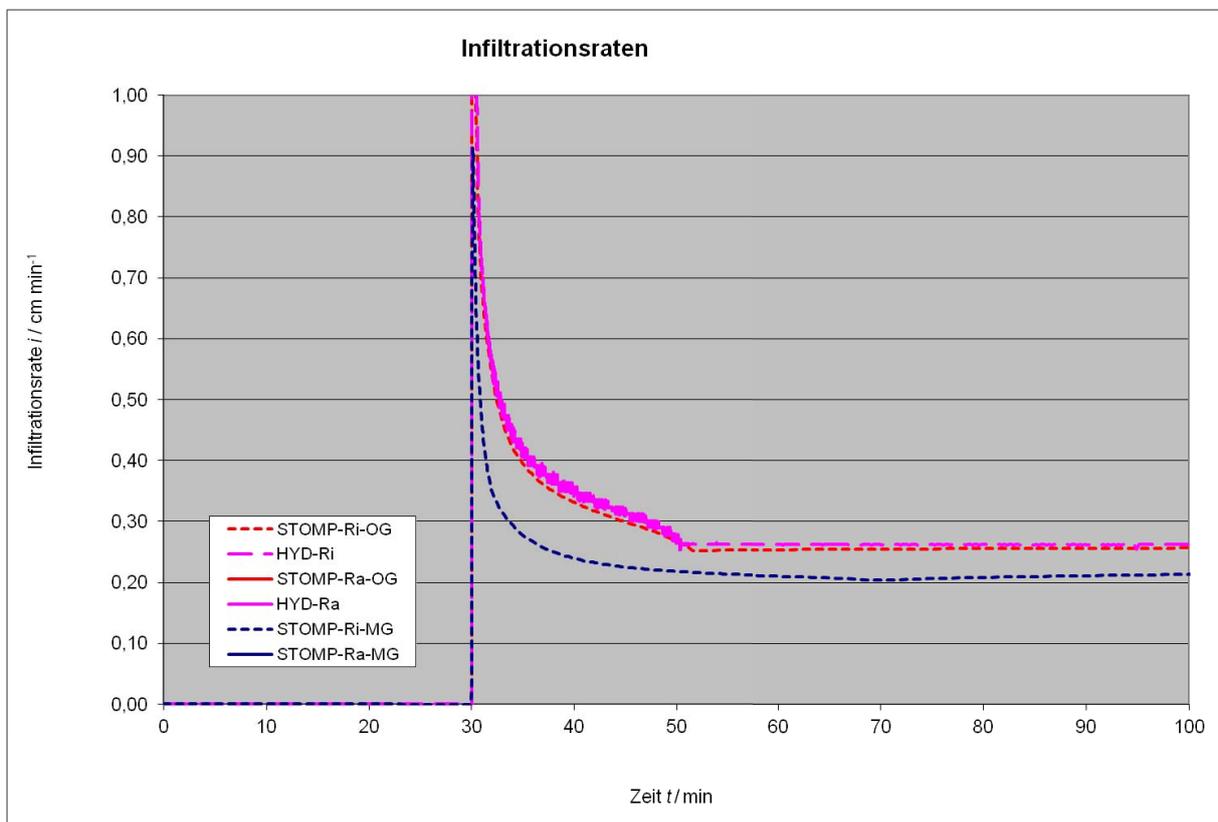


Abb. 93: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 40,0 cm

## Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 60,0 cm

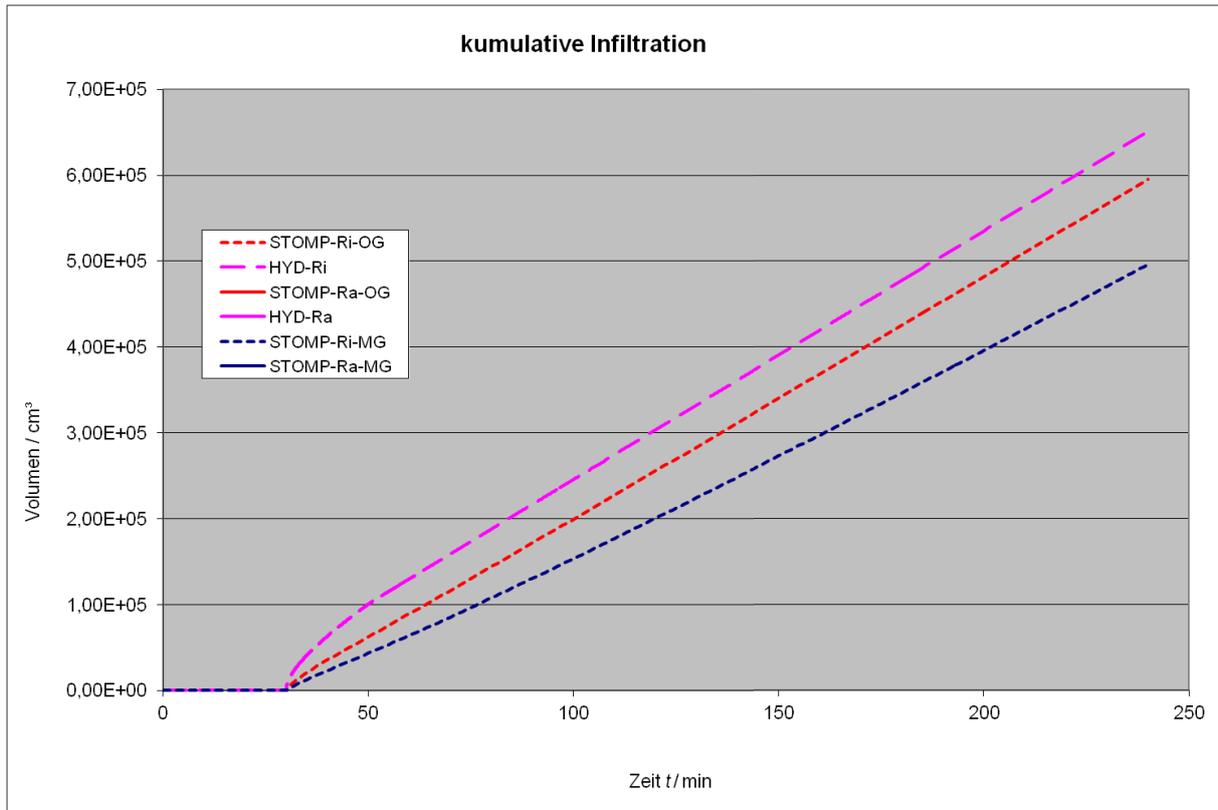


Abb. 94: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 60,0 cm

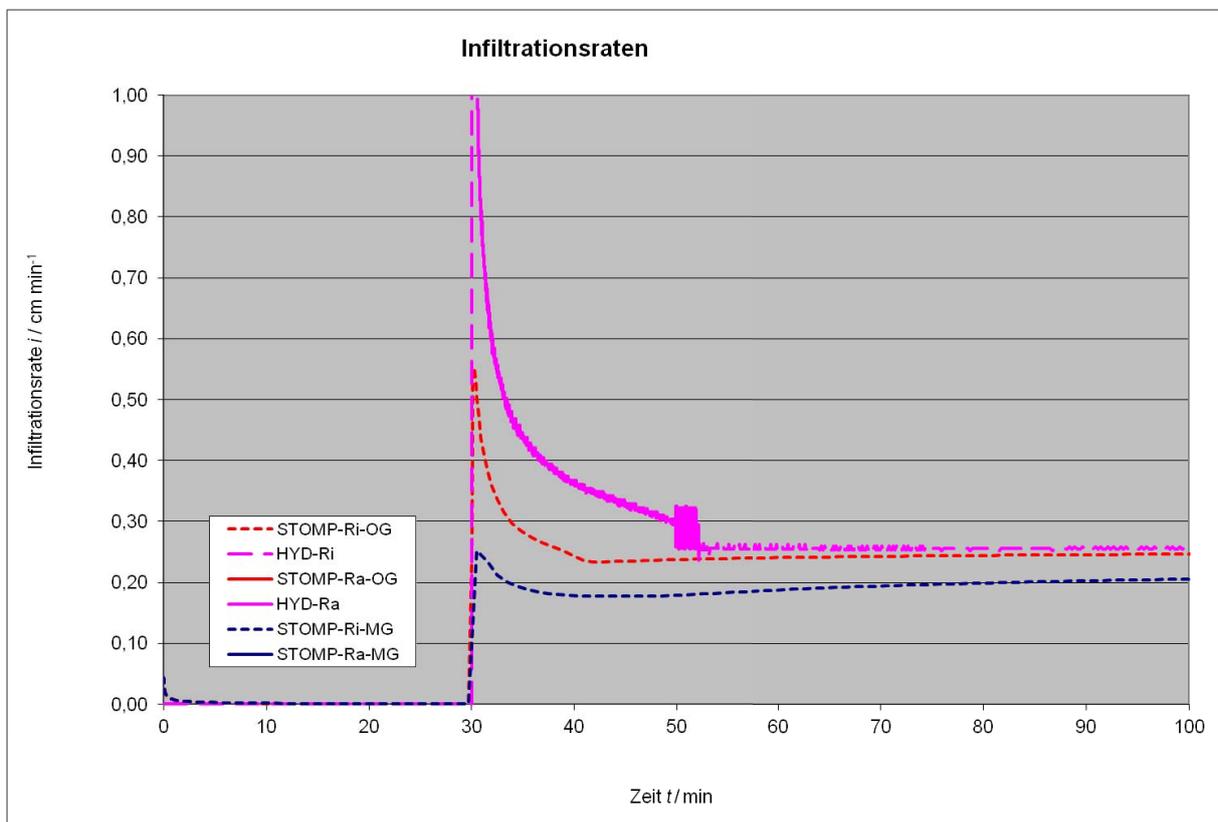


Abb. 95: Infiltrationsrate DR – BV 0 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 80,0 cm

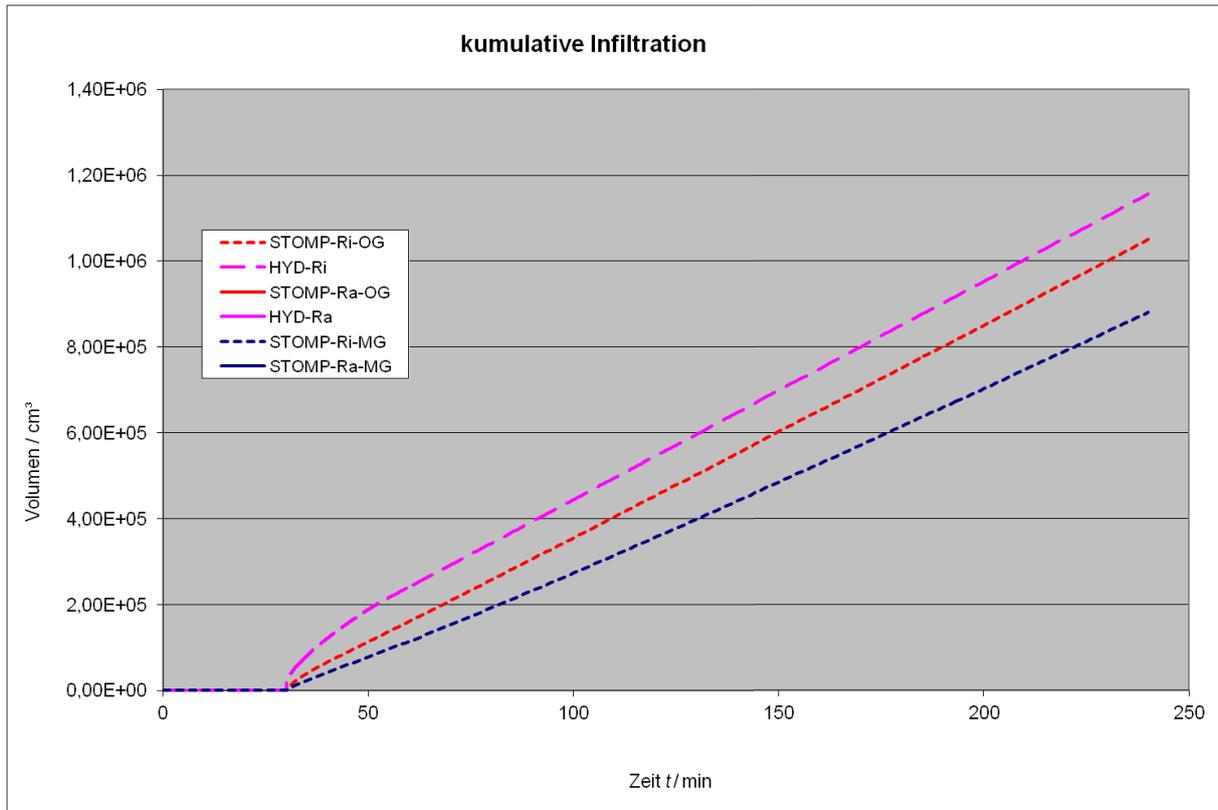


Abb. 96: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 80,0 cm

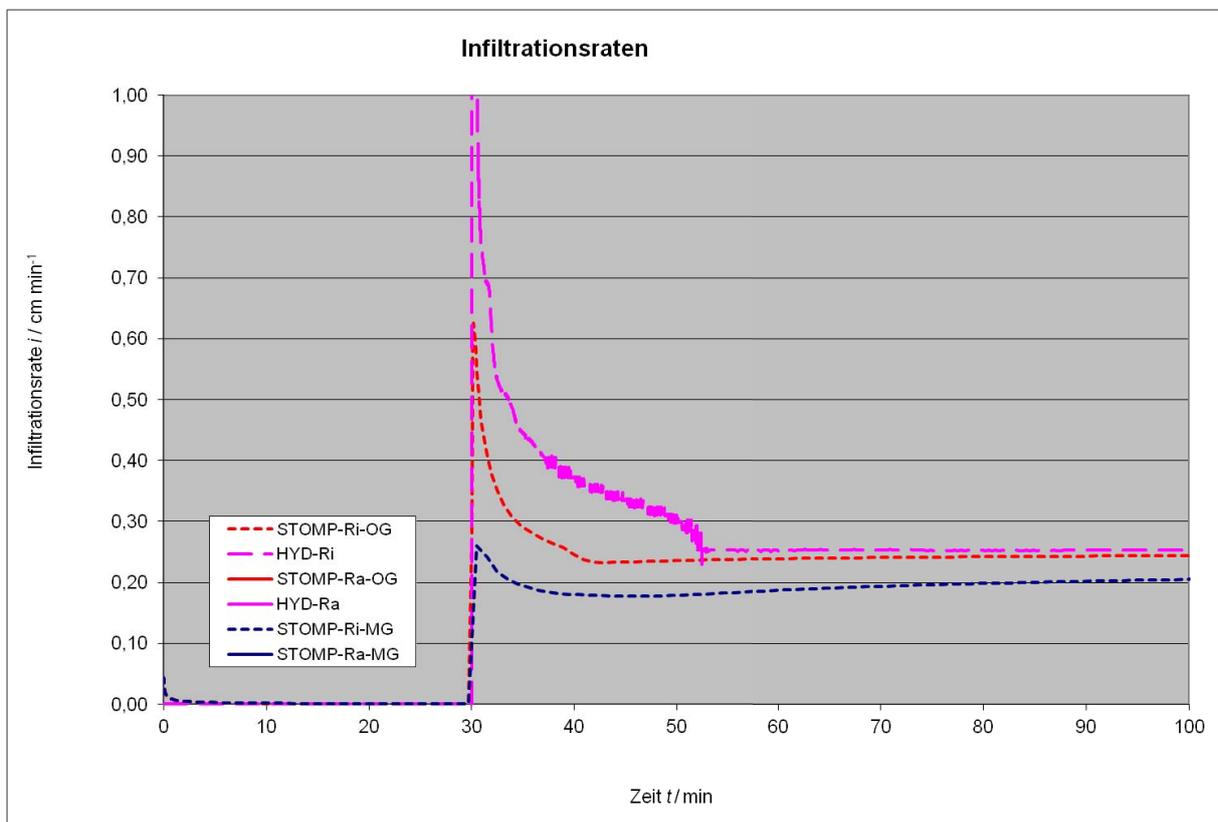


Abb. 97: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 100,0 cm

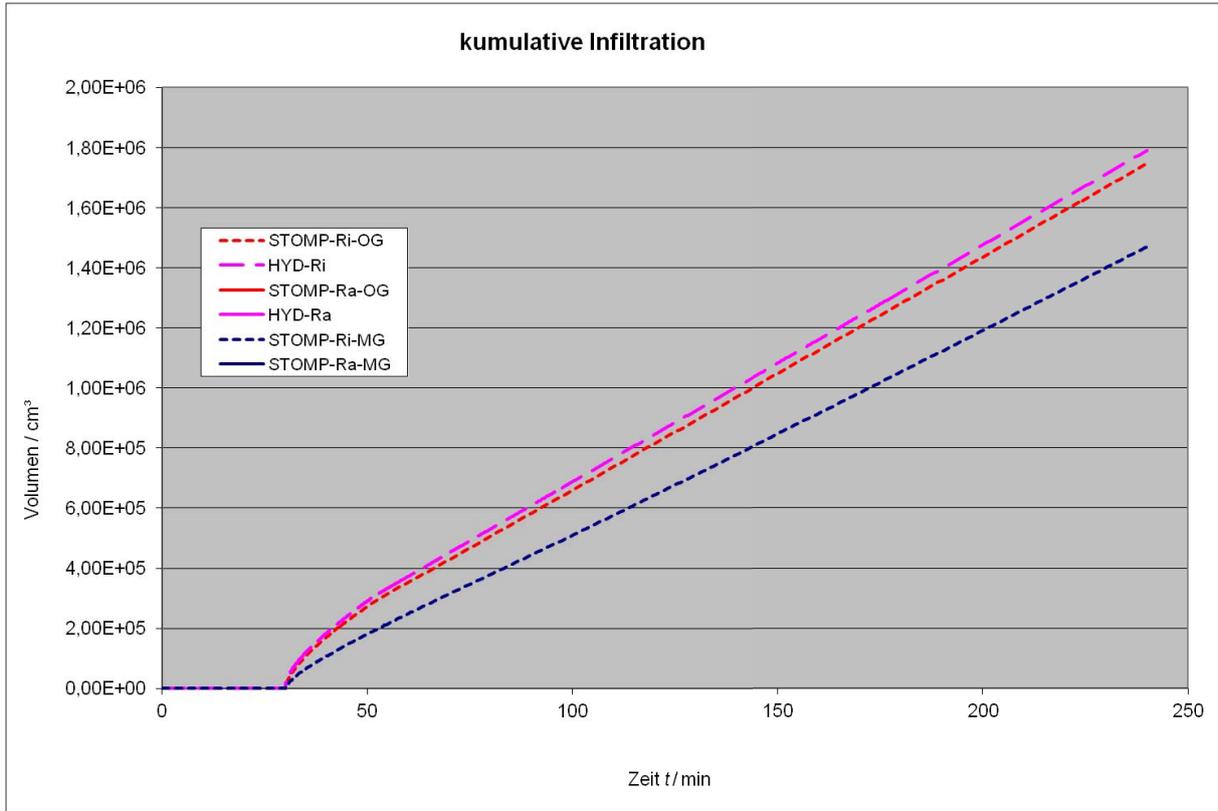


Abb. 98: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 100,0 cm

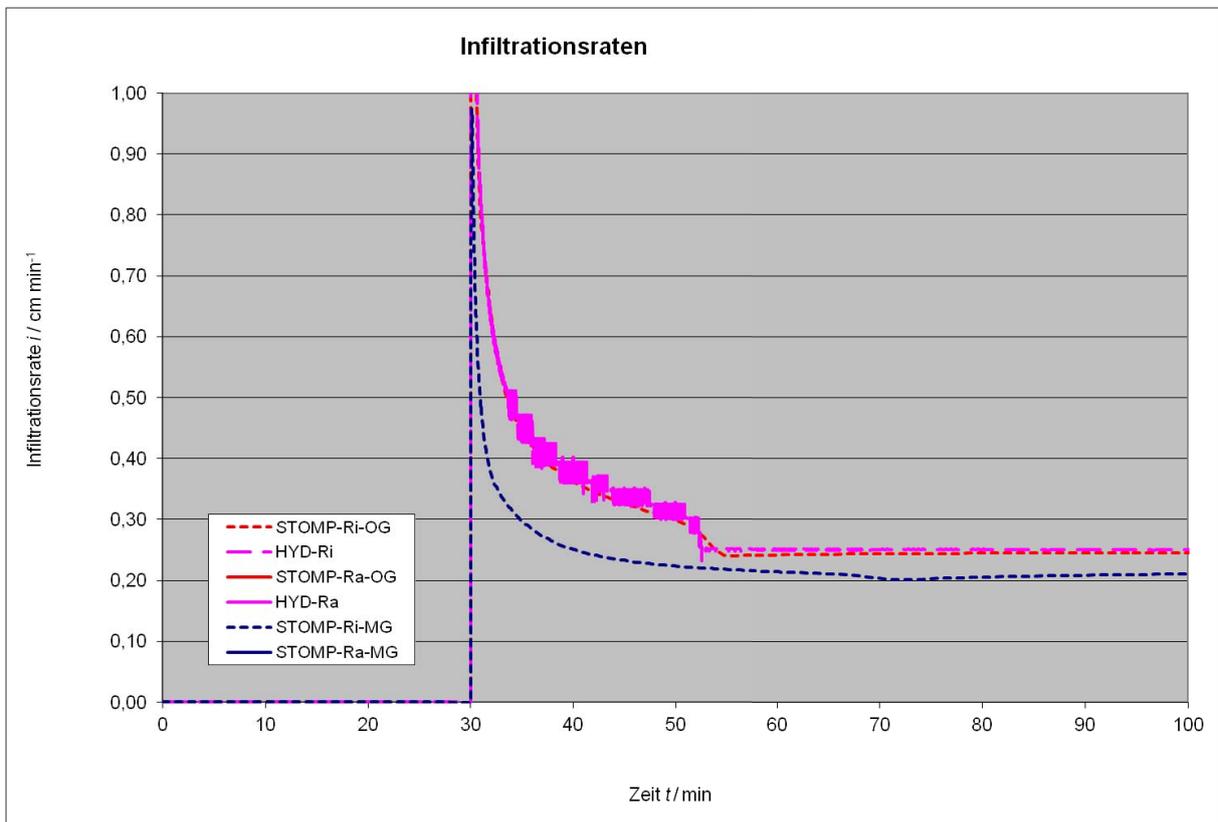


Abb. 99: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 1 – Innenringdurchmesser 120,0 cm

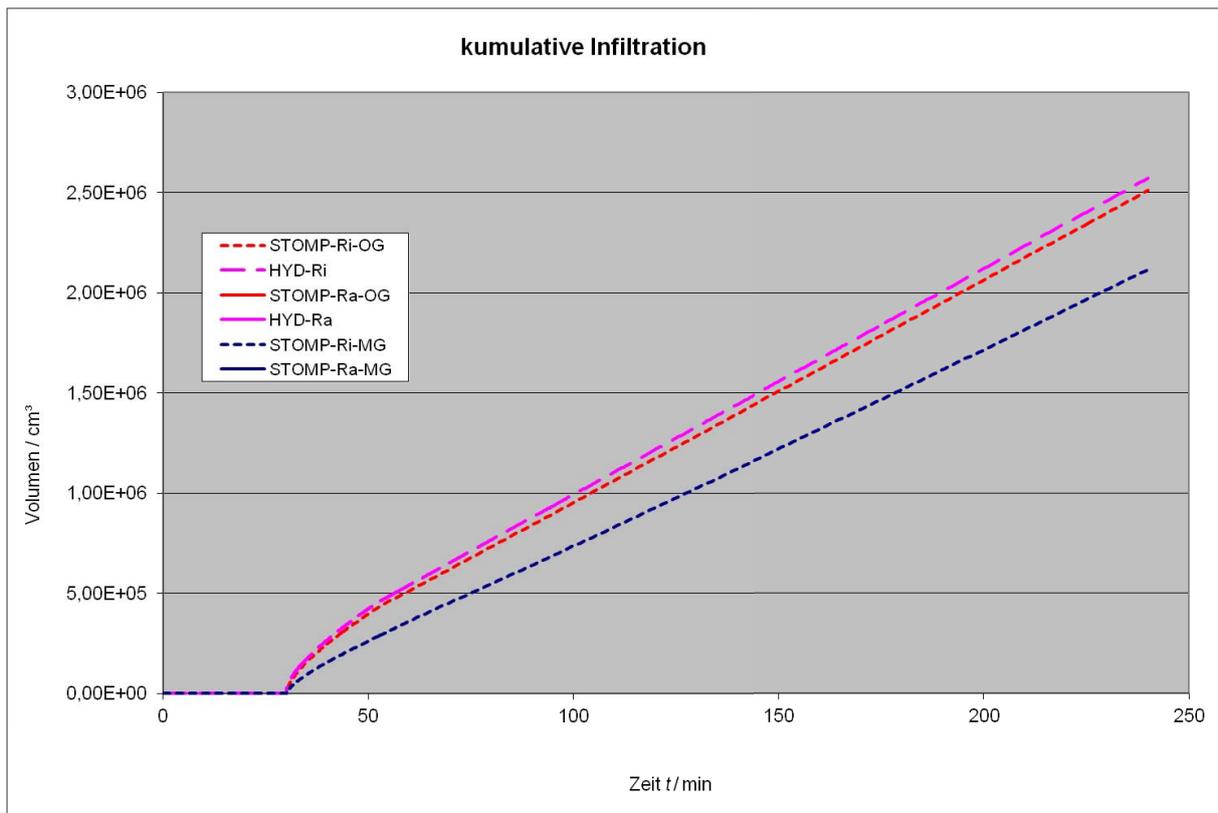


Abb. 100: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 – IR = 120,0 cm

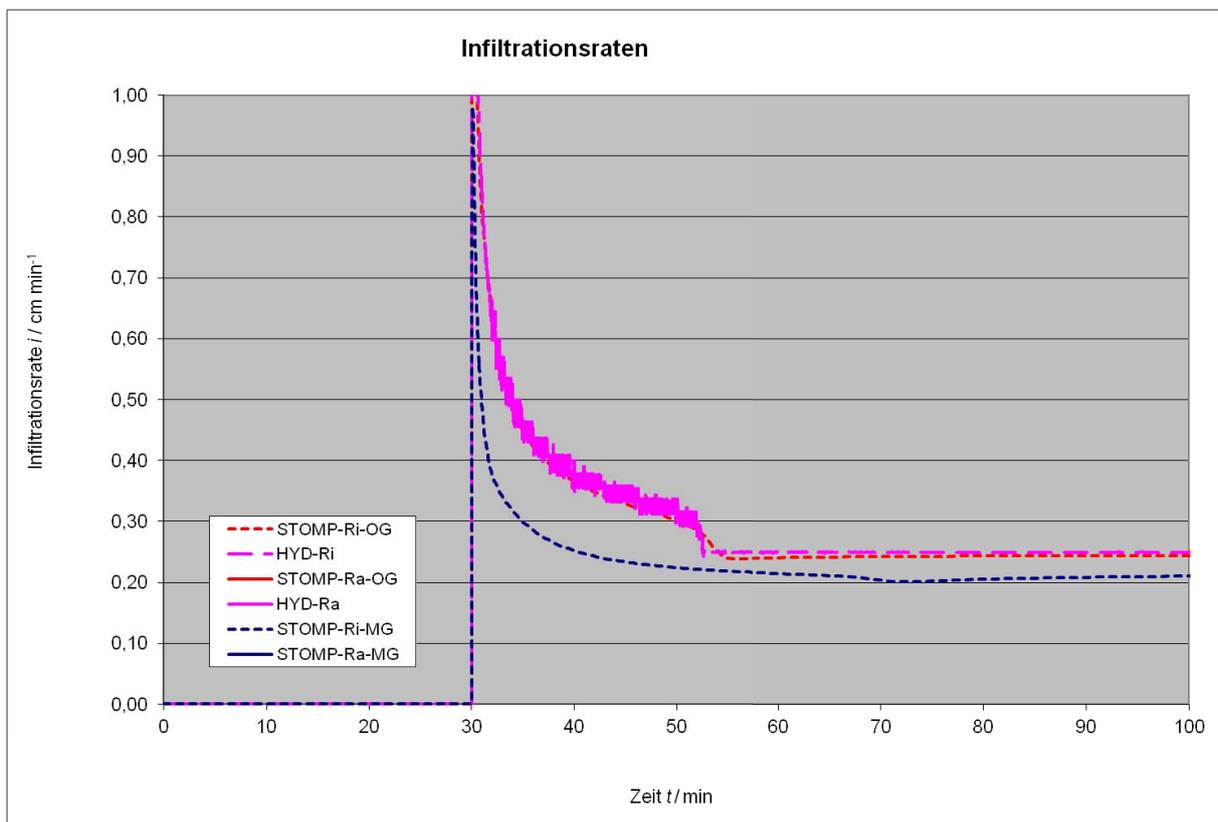


Abb. 101: Infiltrationsrate DR – BV 1 – IR = 120,0 cm

7.1.4. Bodenvariante 2 – "loamy sand" - nach US-Taxonomy -  $k_s = 3,33 \times 10^{-7}$  m/s

Bodenvariante 2 – Innenringradius 7,0 cm

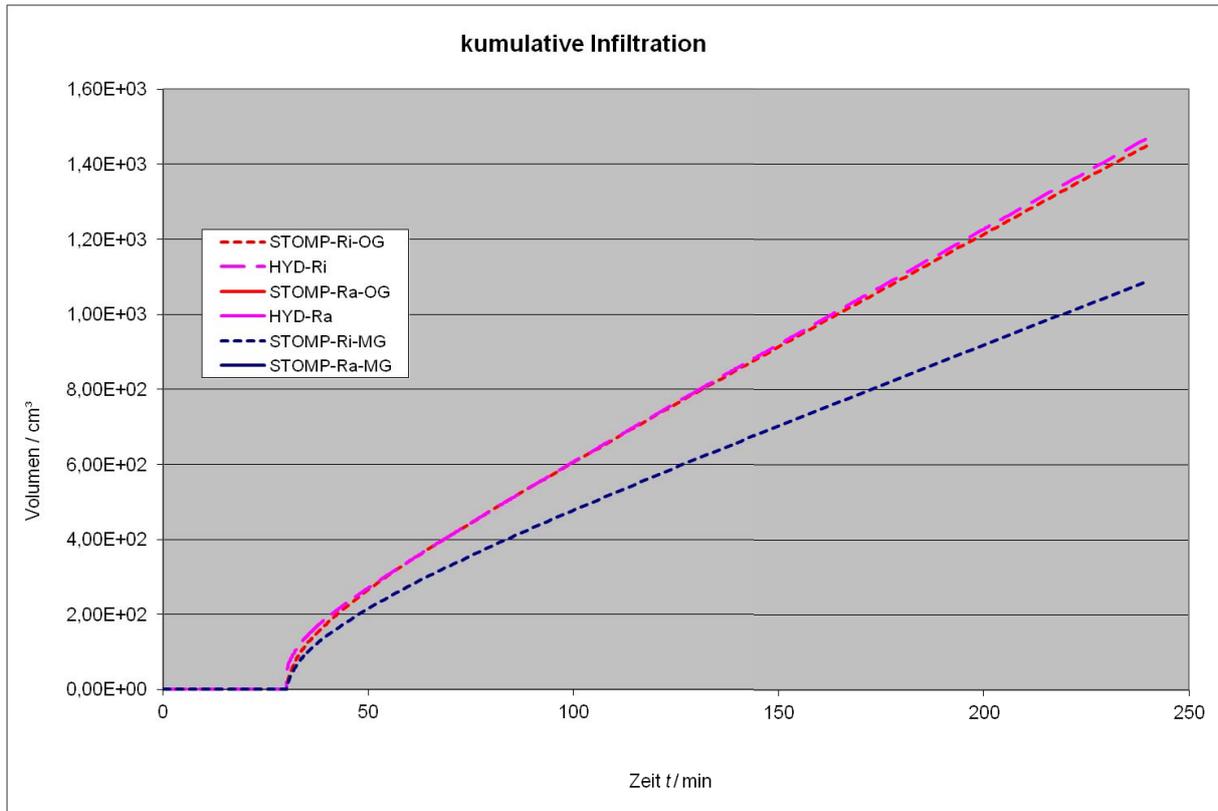


Abb. 102: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 7,0 cm

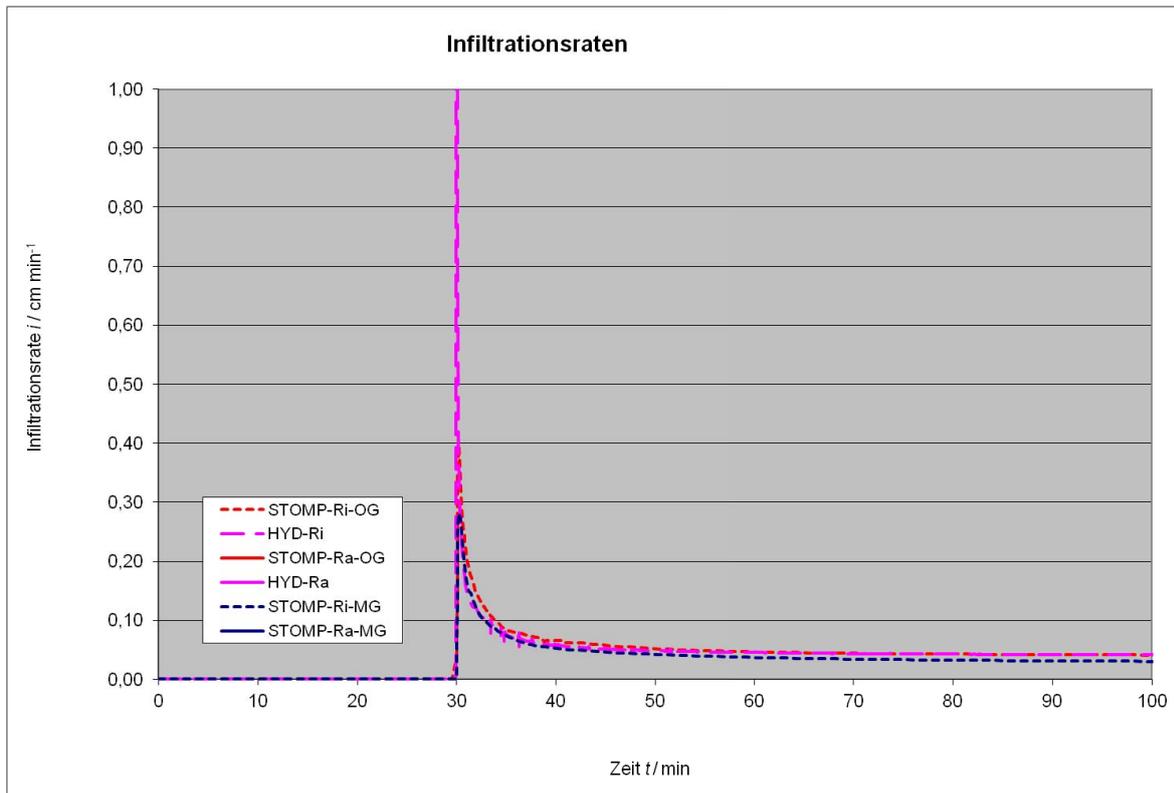


Abb. 103: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 15,0 cm

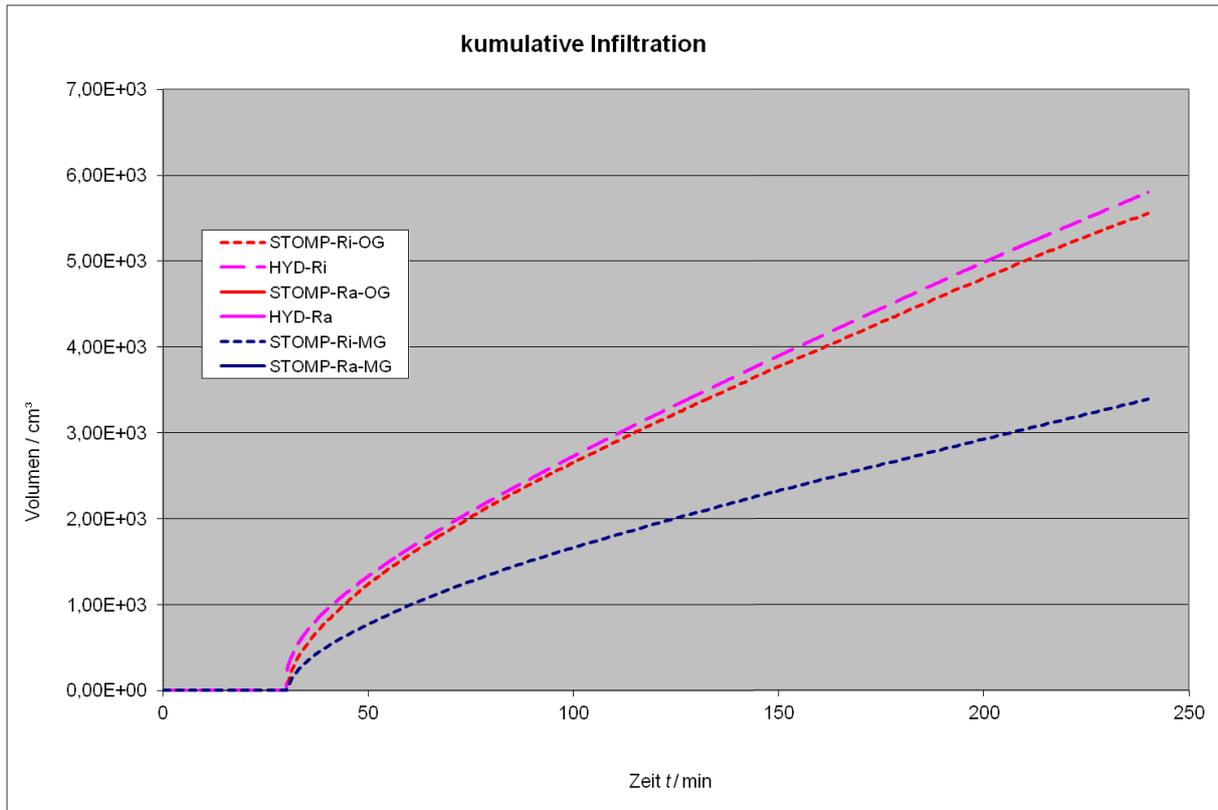


Abb. 104: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 15,0 cm

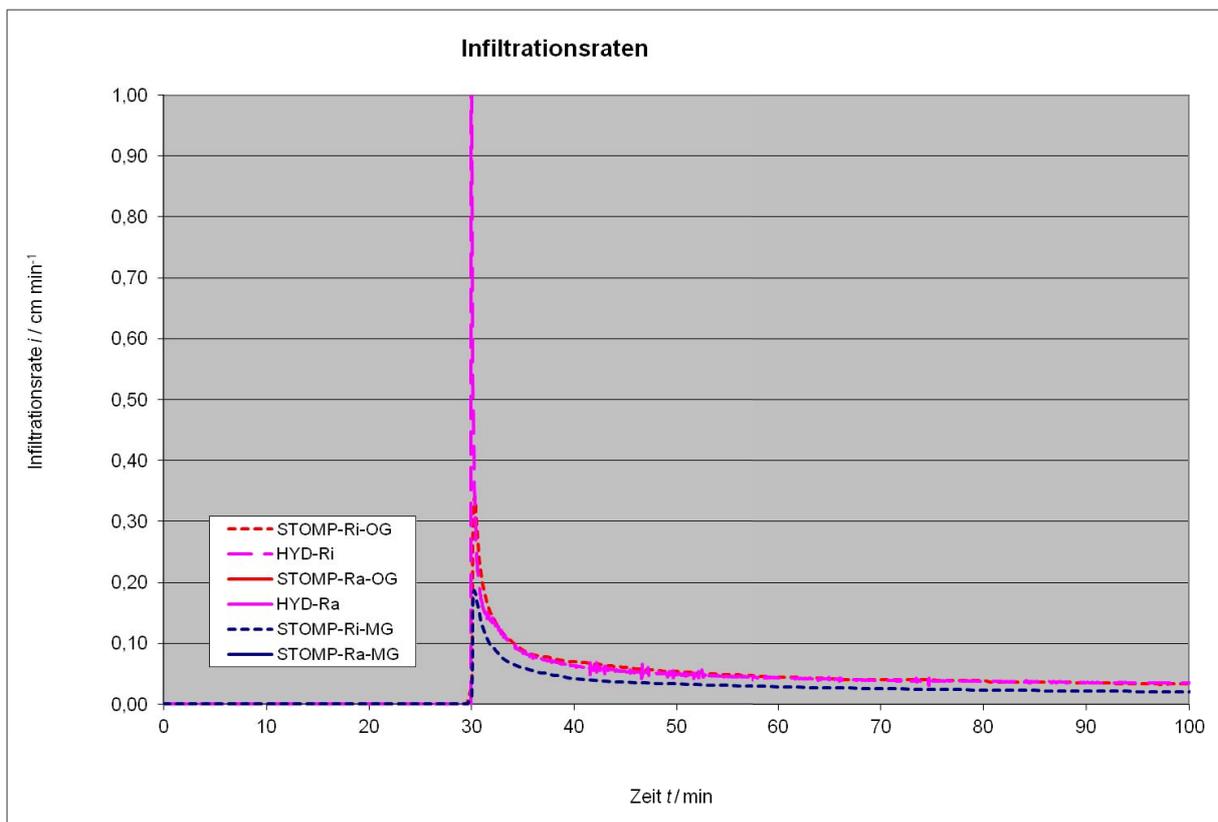


Abb. 105: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 15,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 20,0 cm

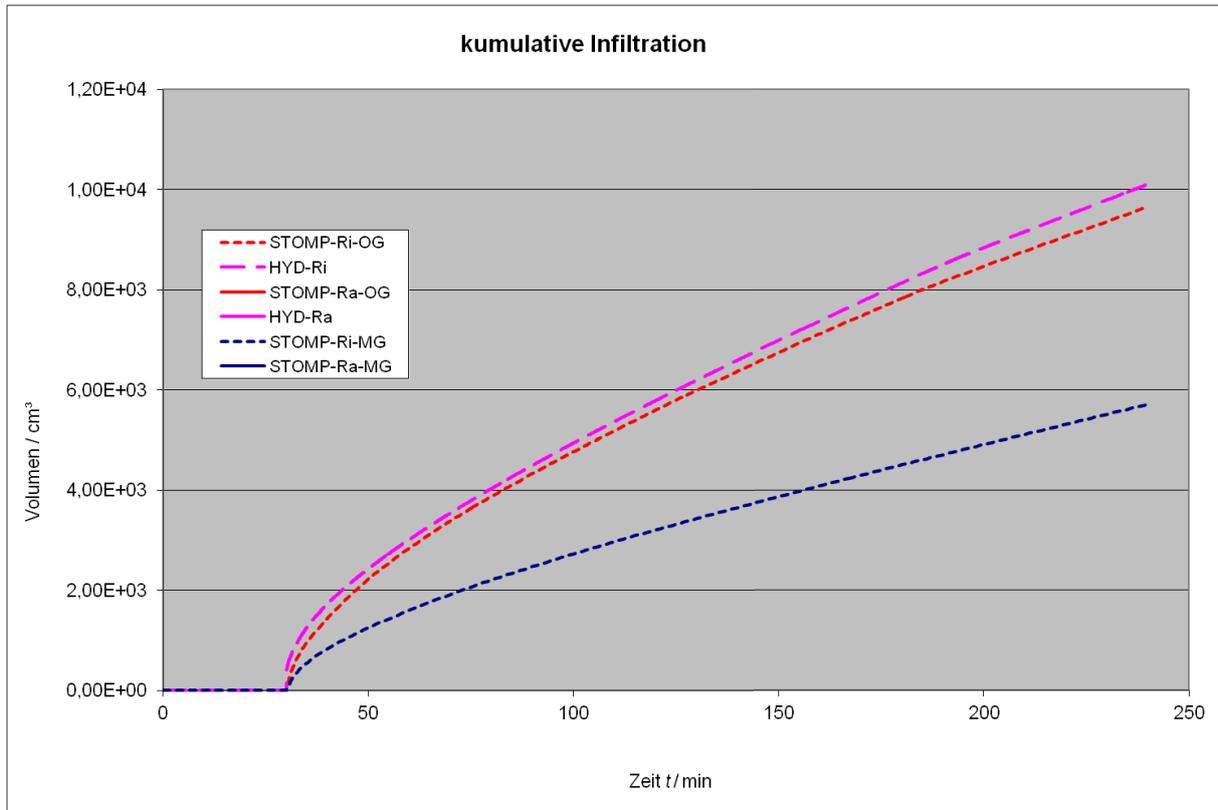


Abb. 106: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 20,0 cm

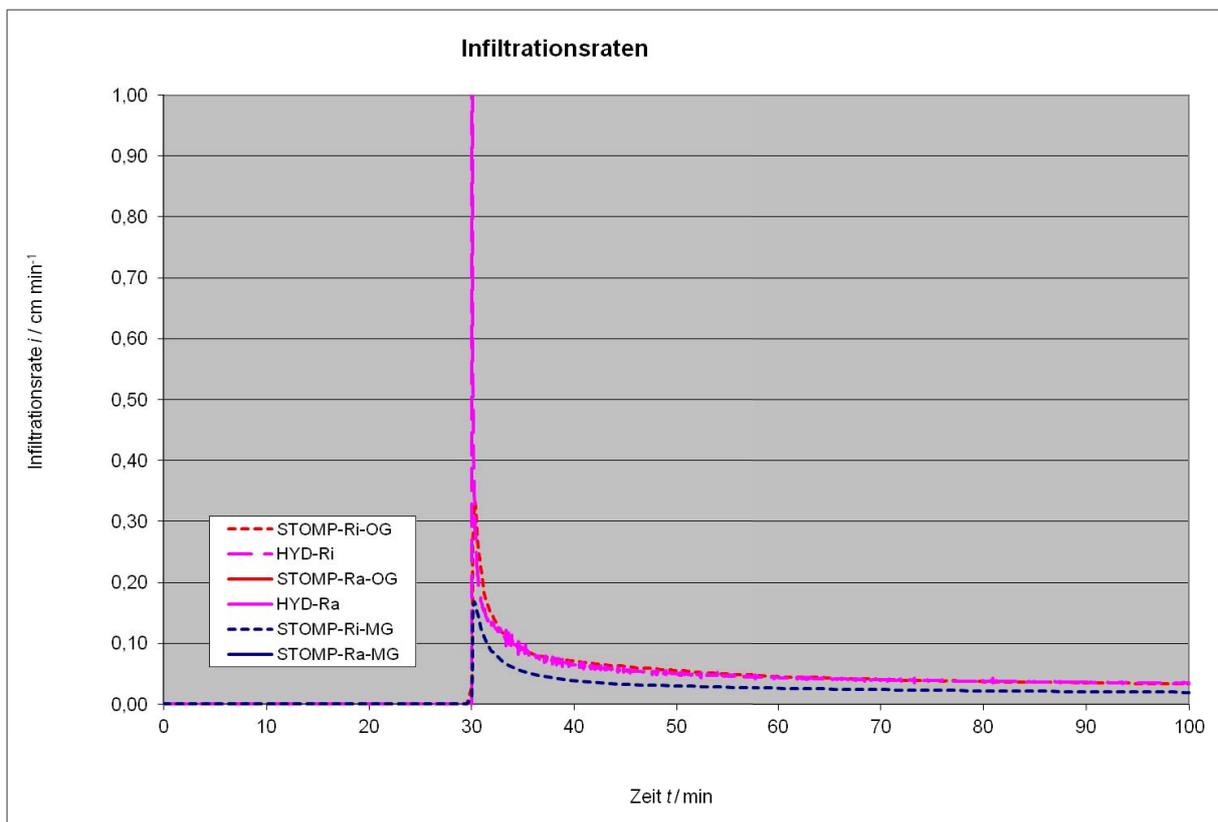


Abb. 107: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 40,0 cm

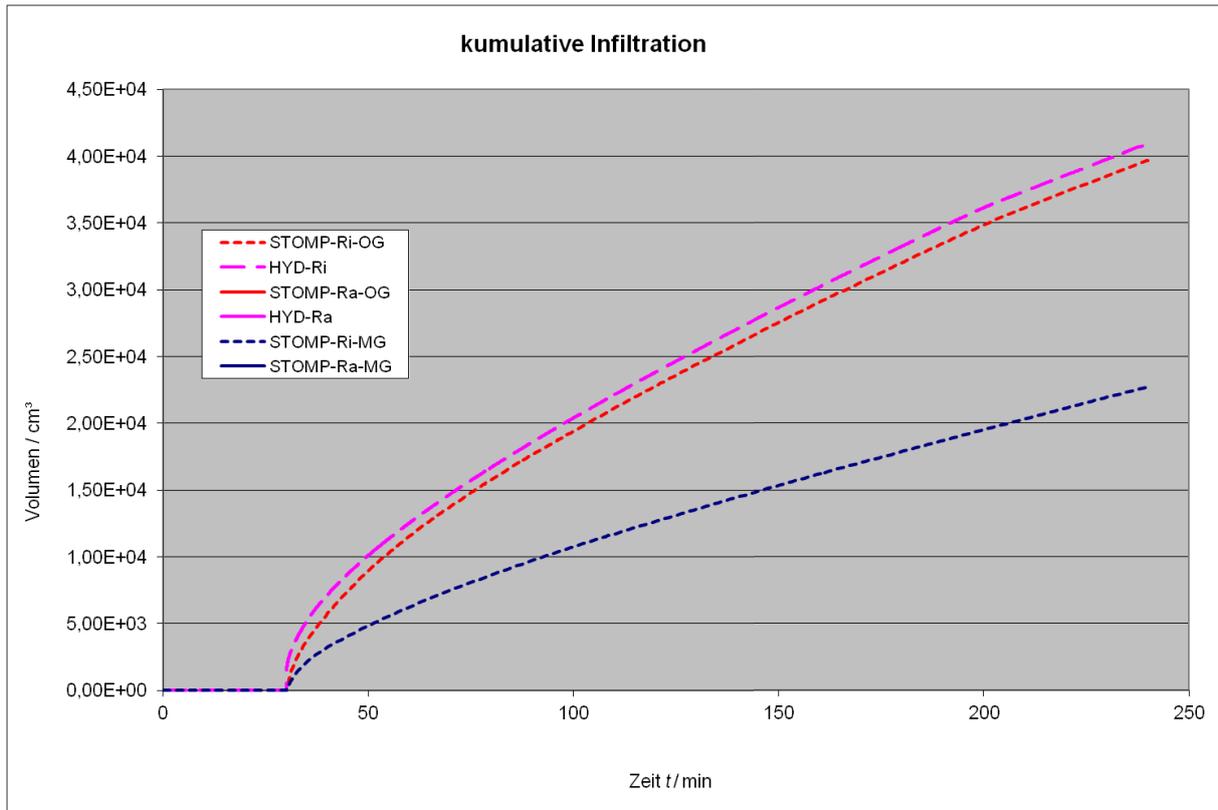


Abb. 108: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 40,0 cm

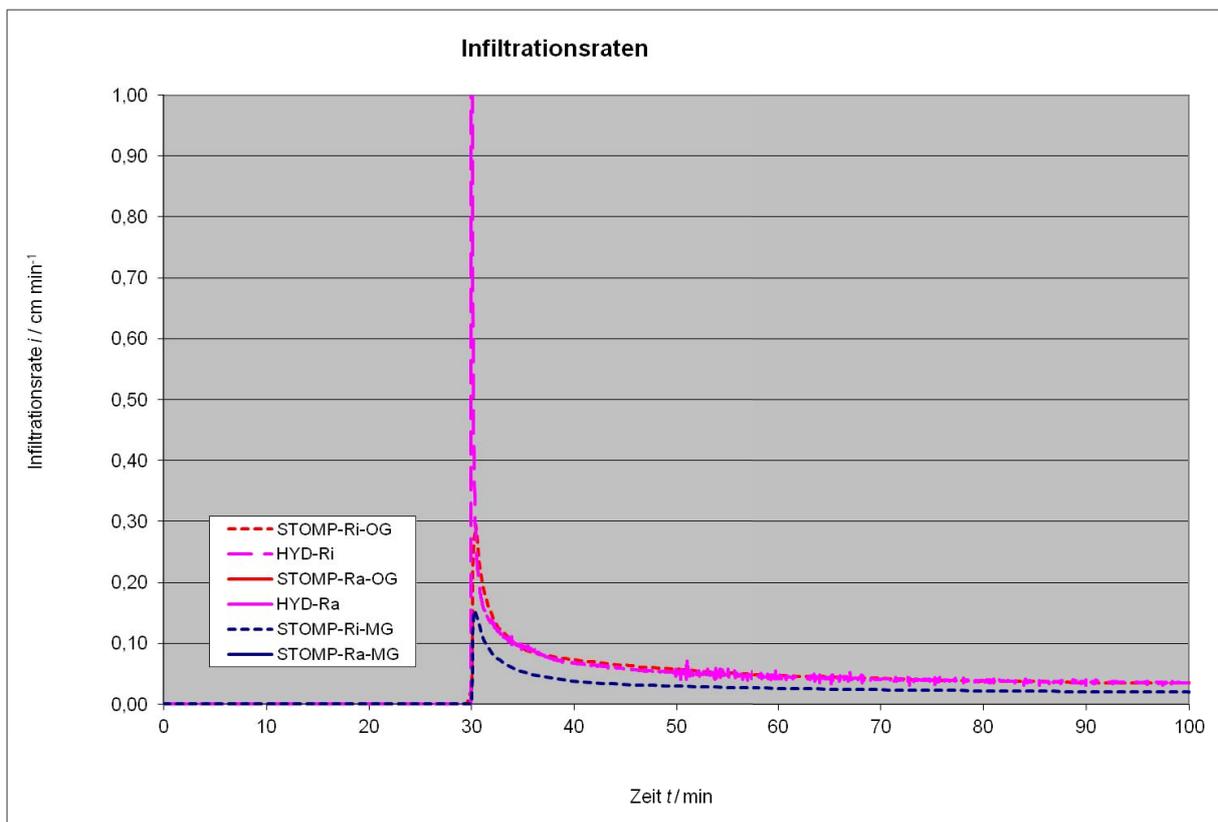


Abb. 109: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 40,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 60,0 cm

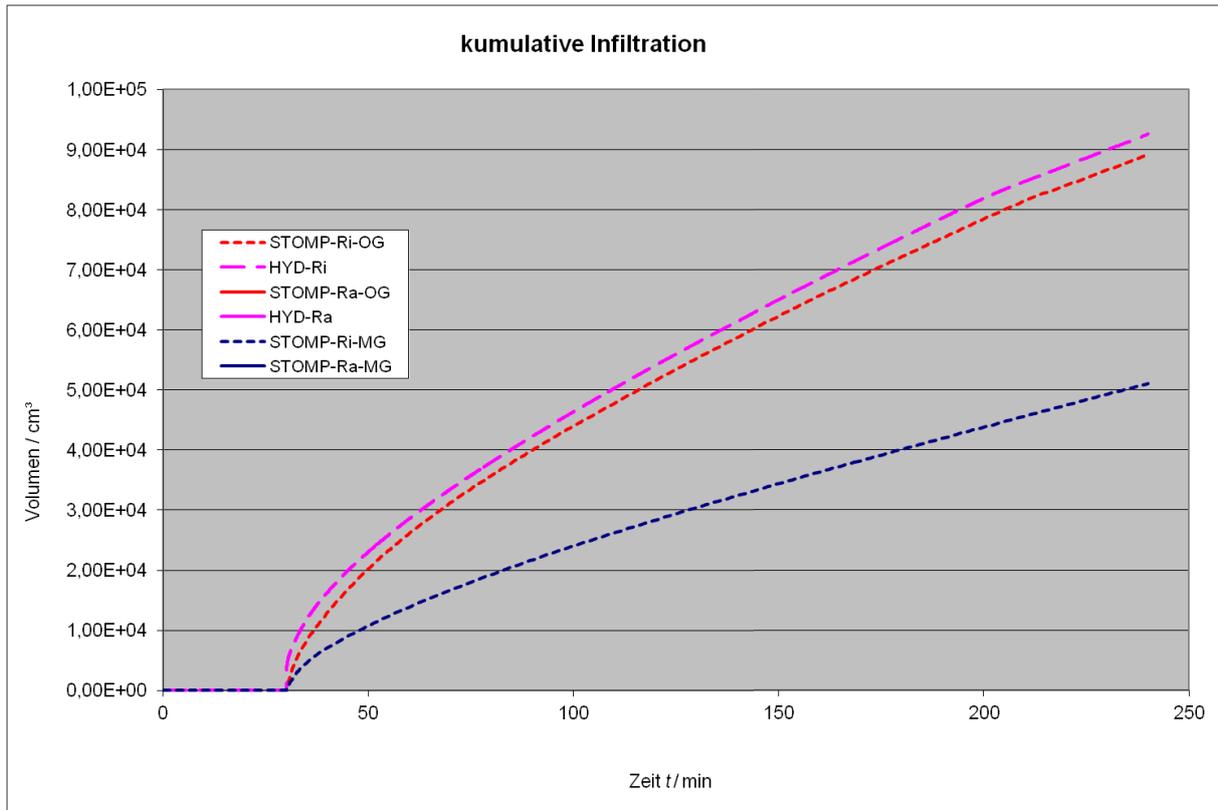


Abb. 110: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 60,0 cm

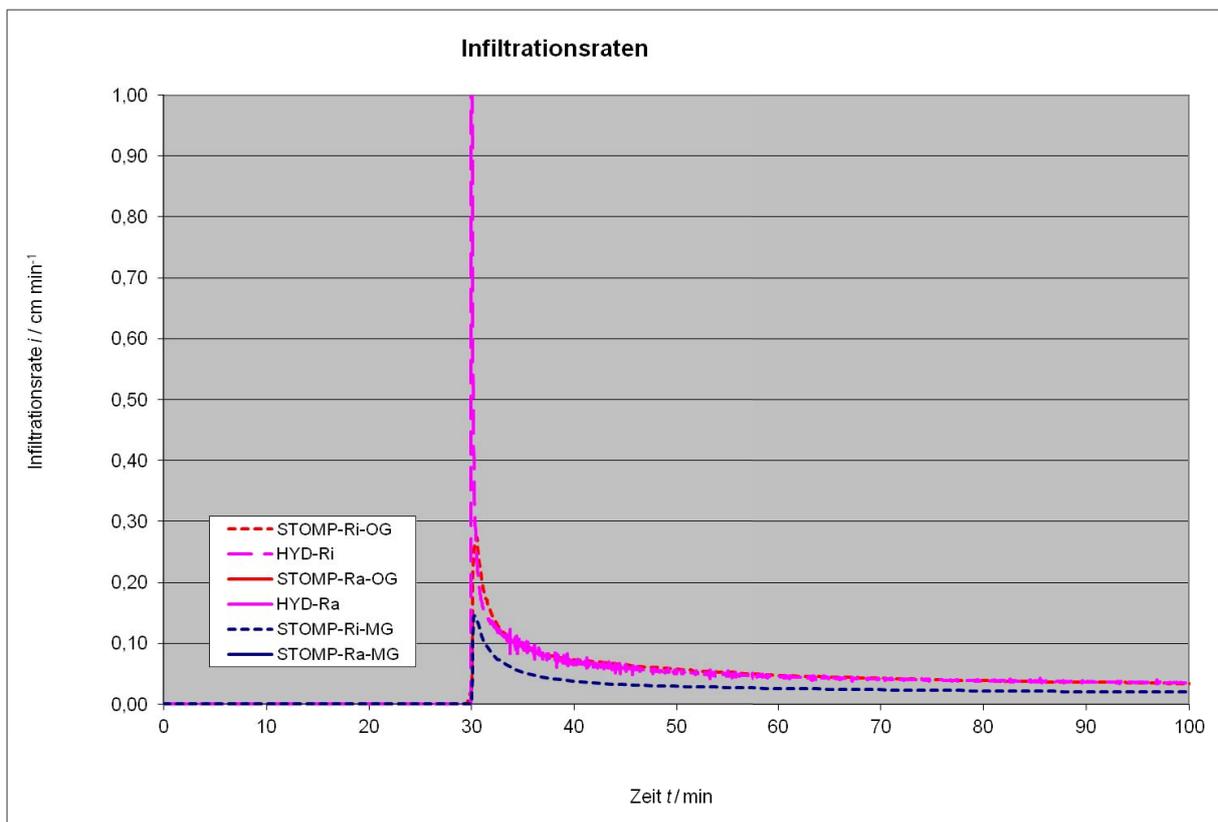


Abb. 111: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 80,0 cm

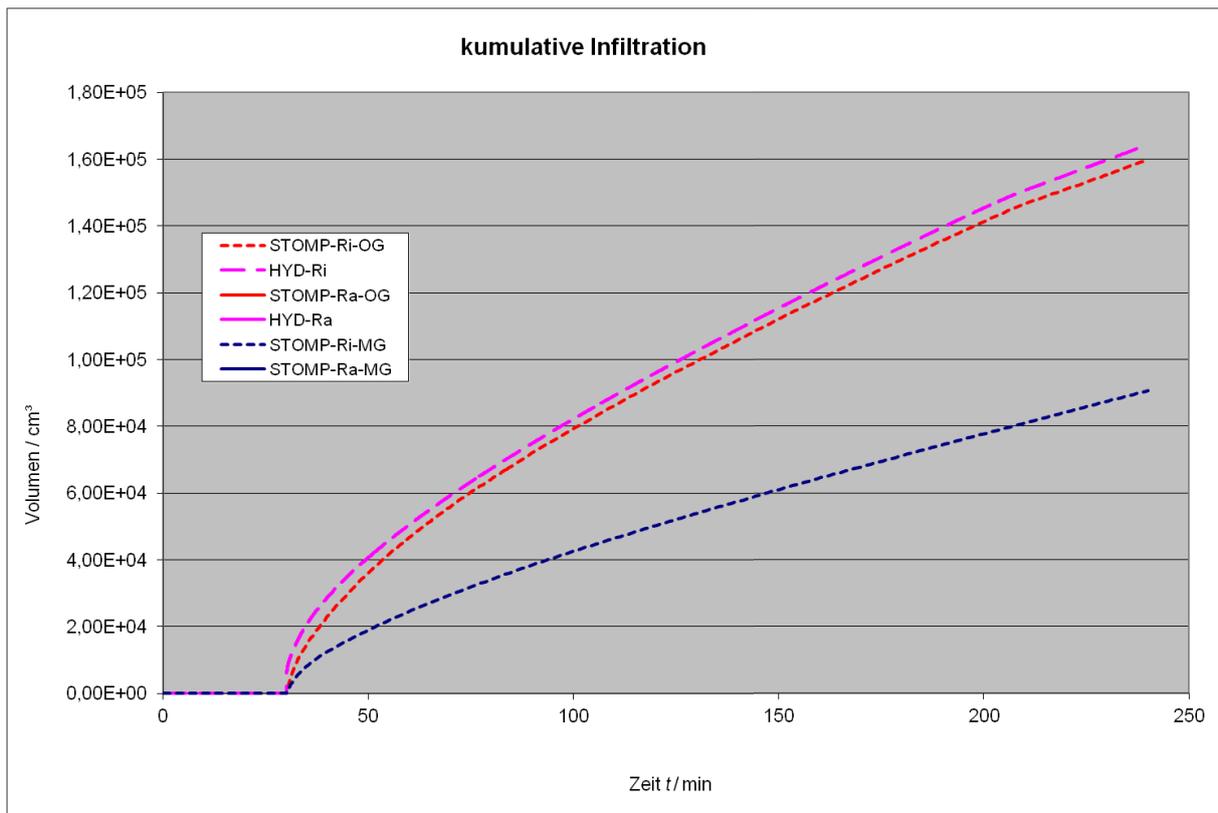


Abb. 112: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 80,0 cm

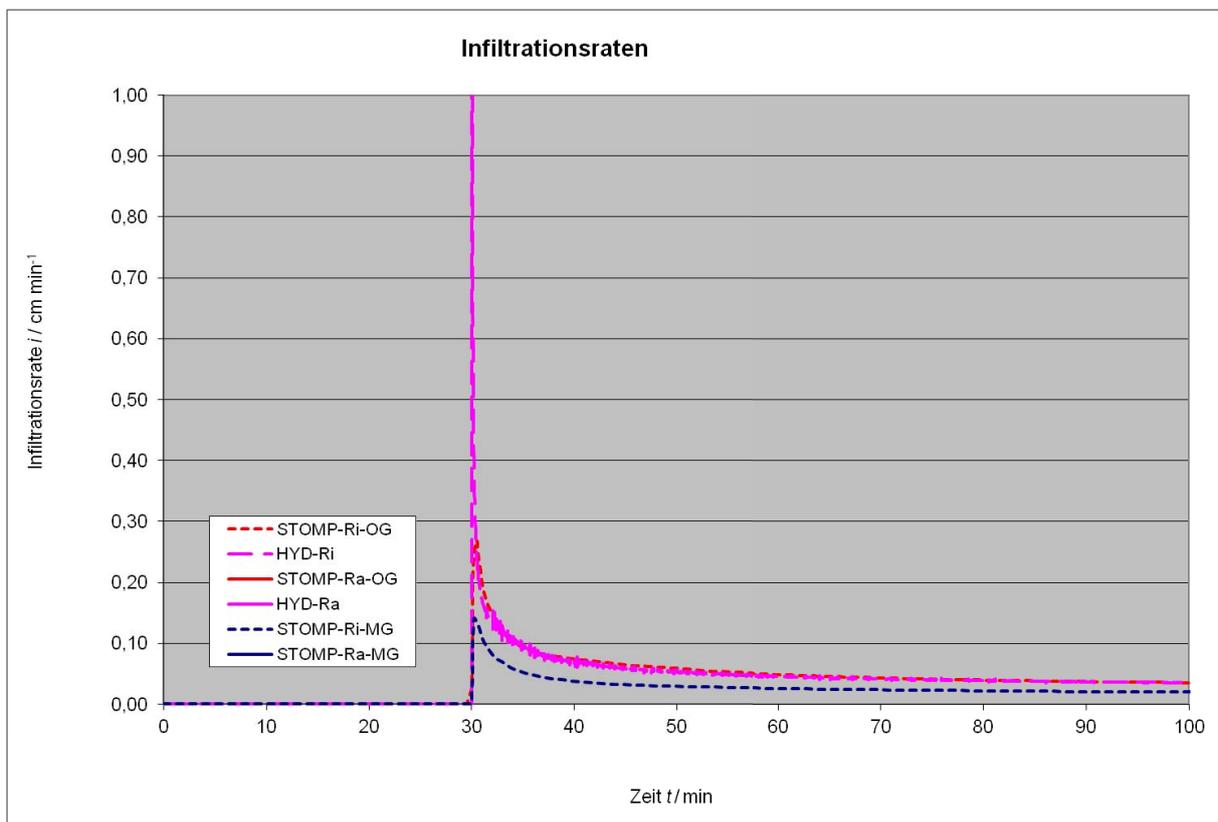


Abb. 113: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 100,0 cm

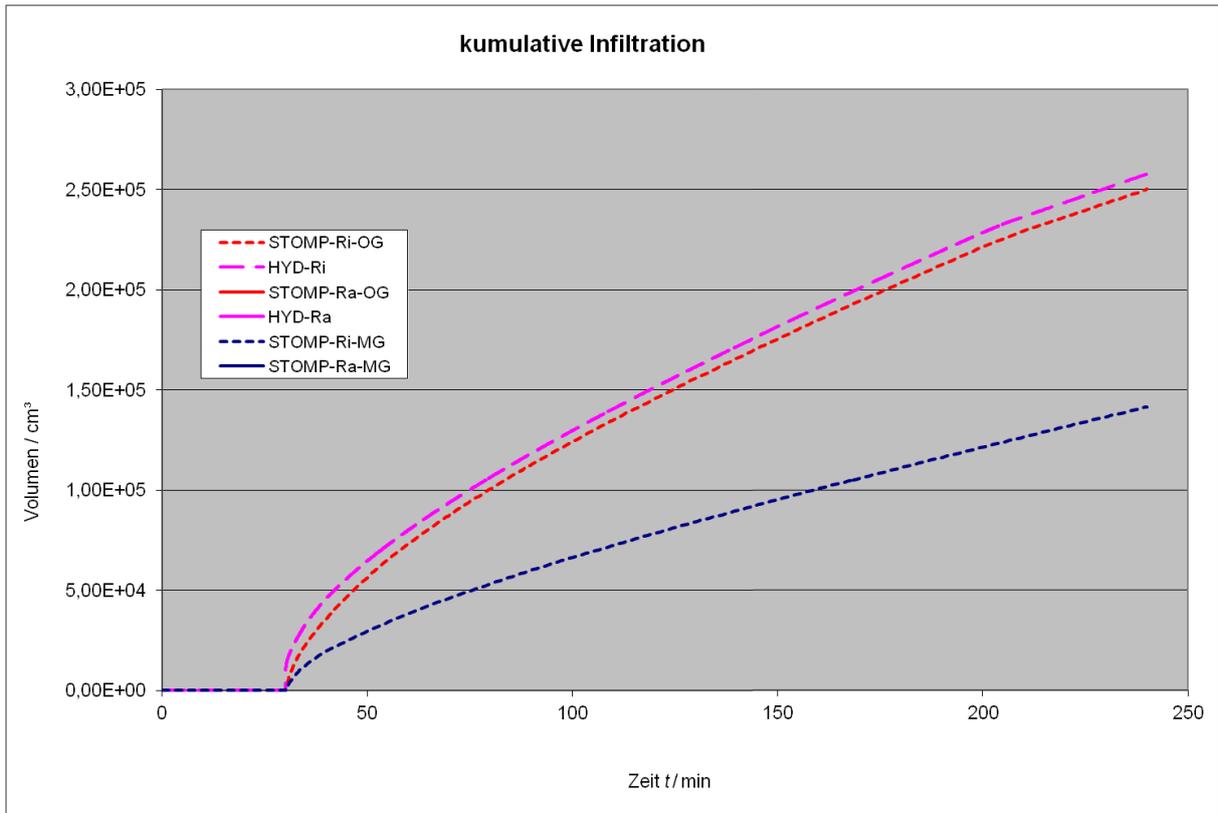


Abb. 114: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 100,0 cm

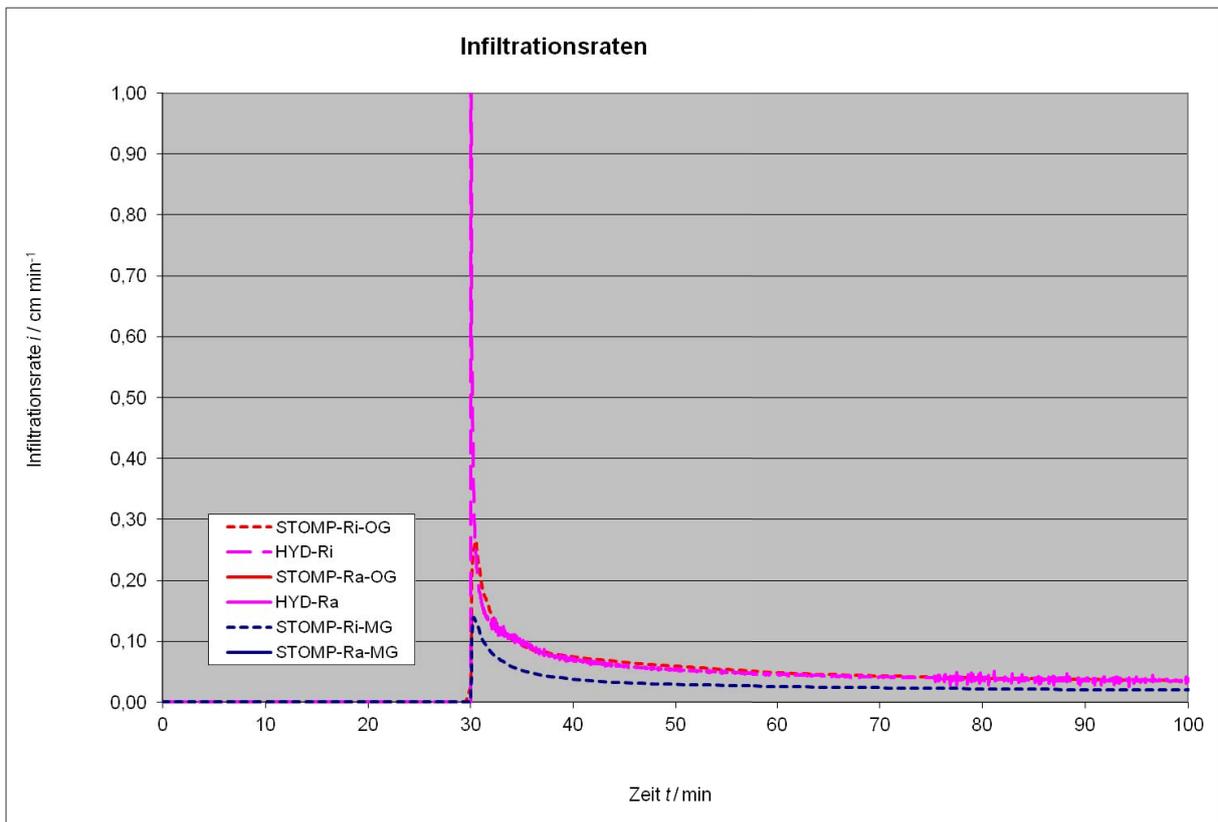


Abb. 115: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 2 – Innenringradius 120,0 cm

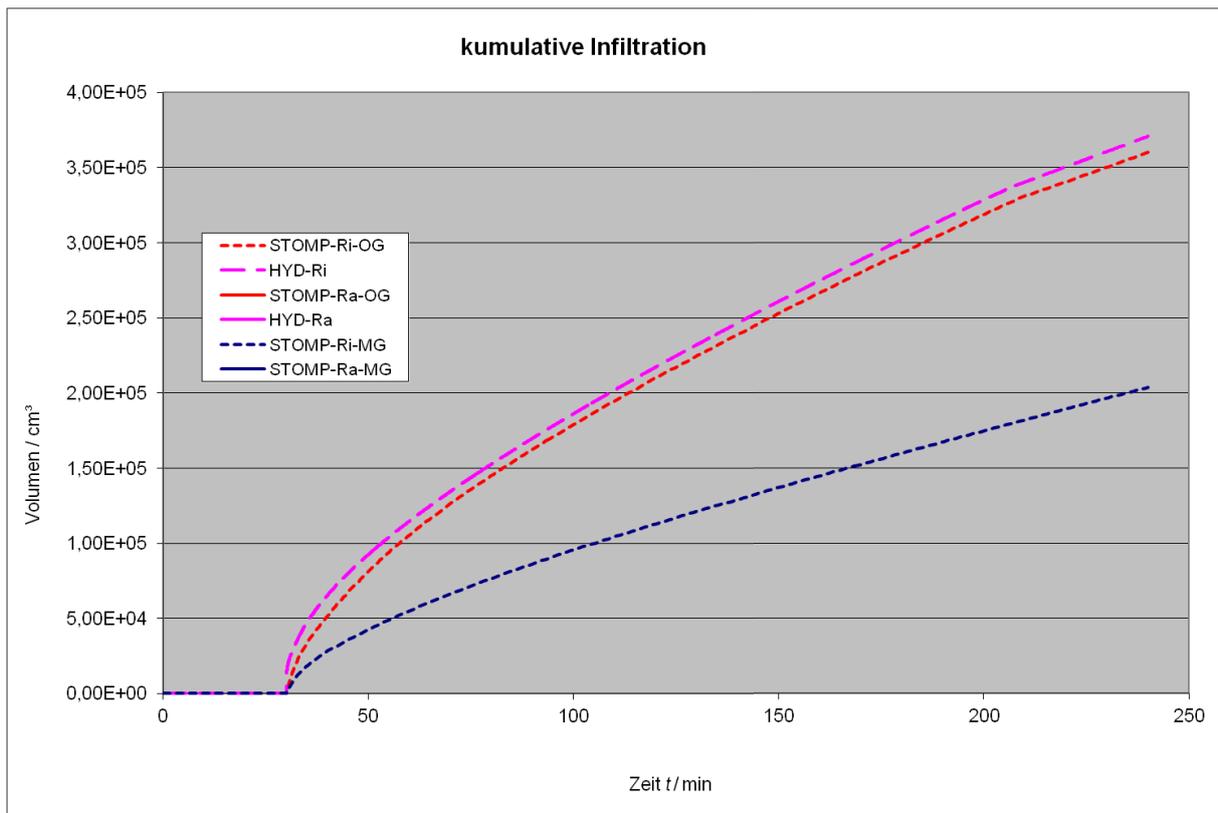


Abb. 116: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 – IR = 120,0 cm

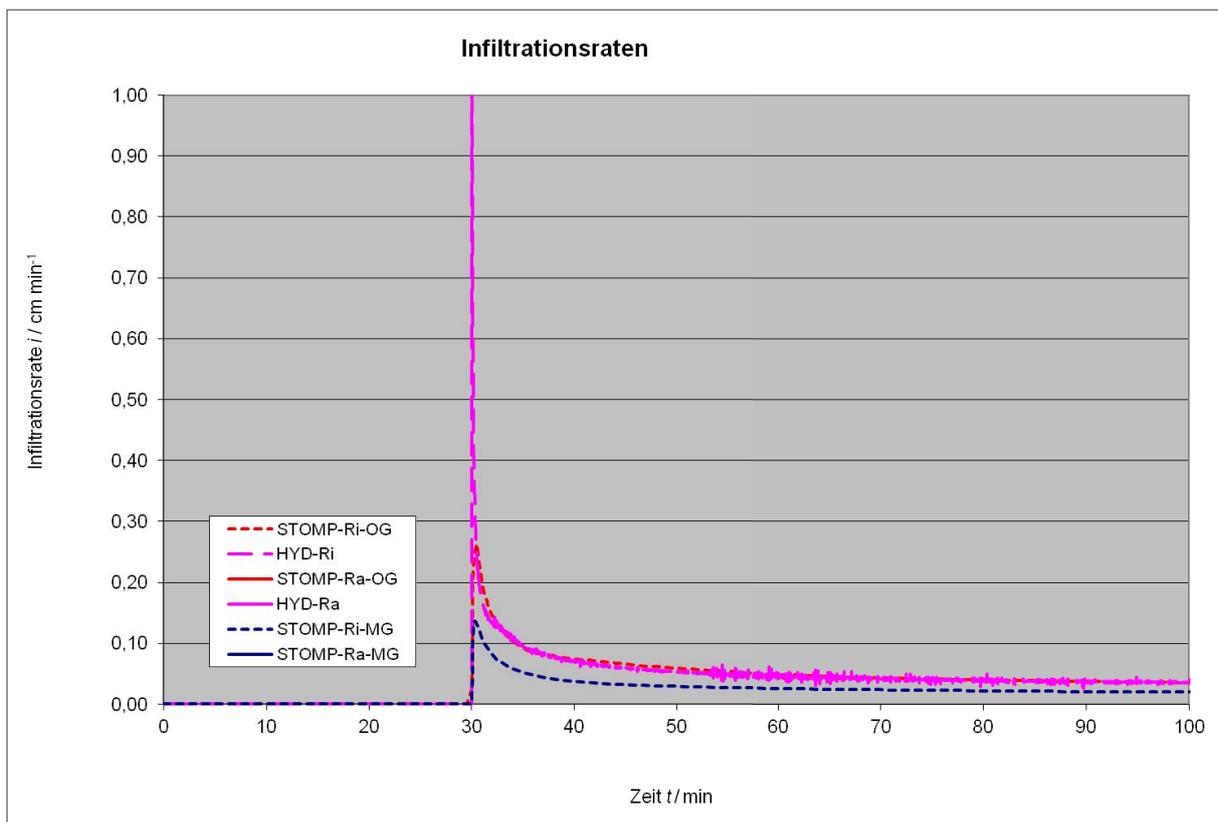


Abb. 117: Infiltrationsrate DR – BV 2 – IR = 120,0 cm

7.1.5. Bodenvariante 0 – "sand" – nach US-Taxonomy –  $k_s = 8,25 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  –  $k_{sh}$  10fach überhöht

Bodenvariante 0 – Innenringradius 7,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

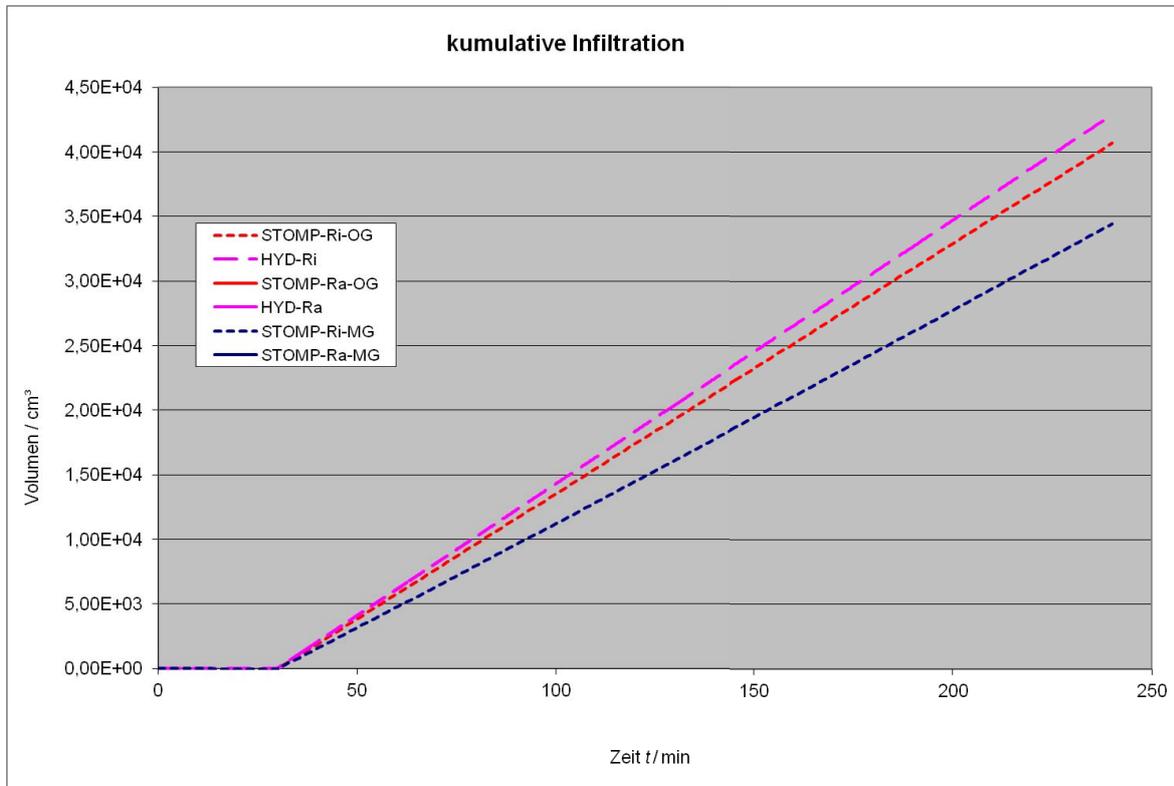


Abb. 118: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

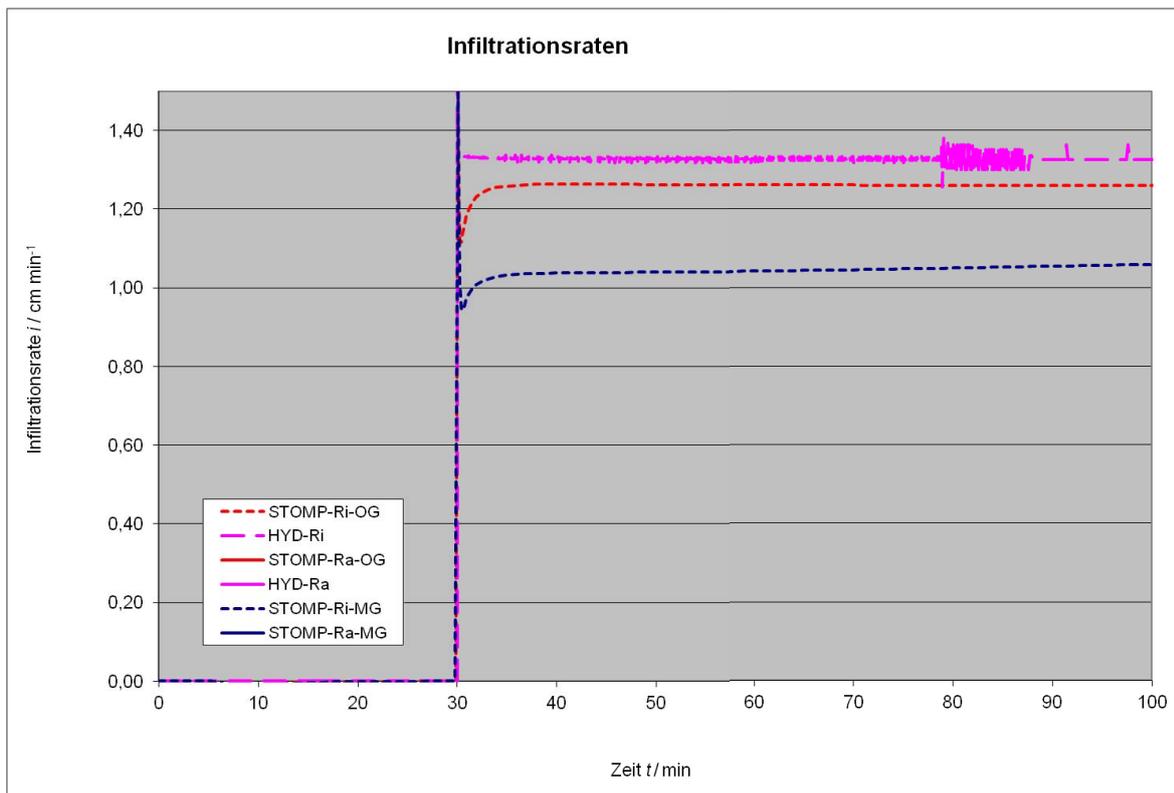


Abb. 119: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 15,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

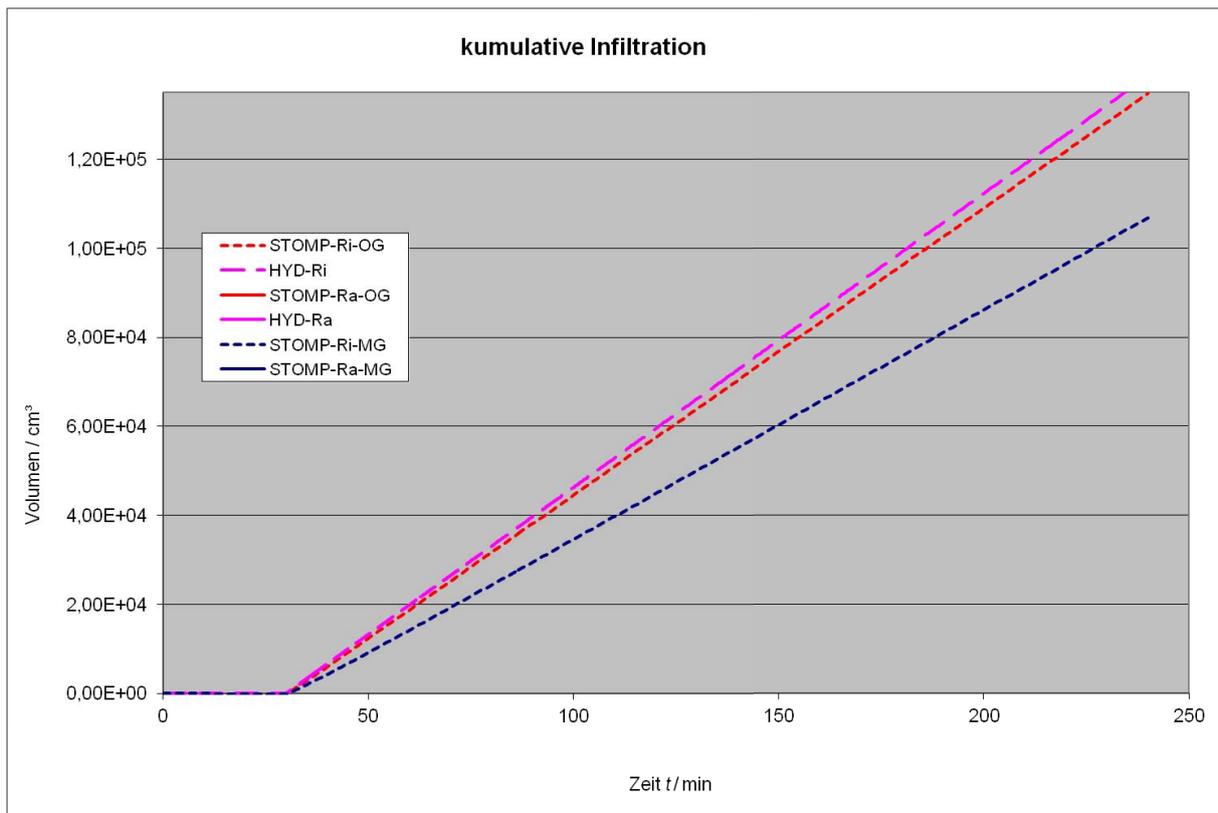


Abb. 120: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cm

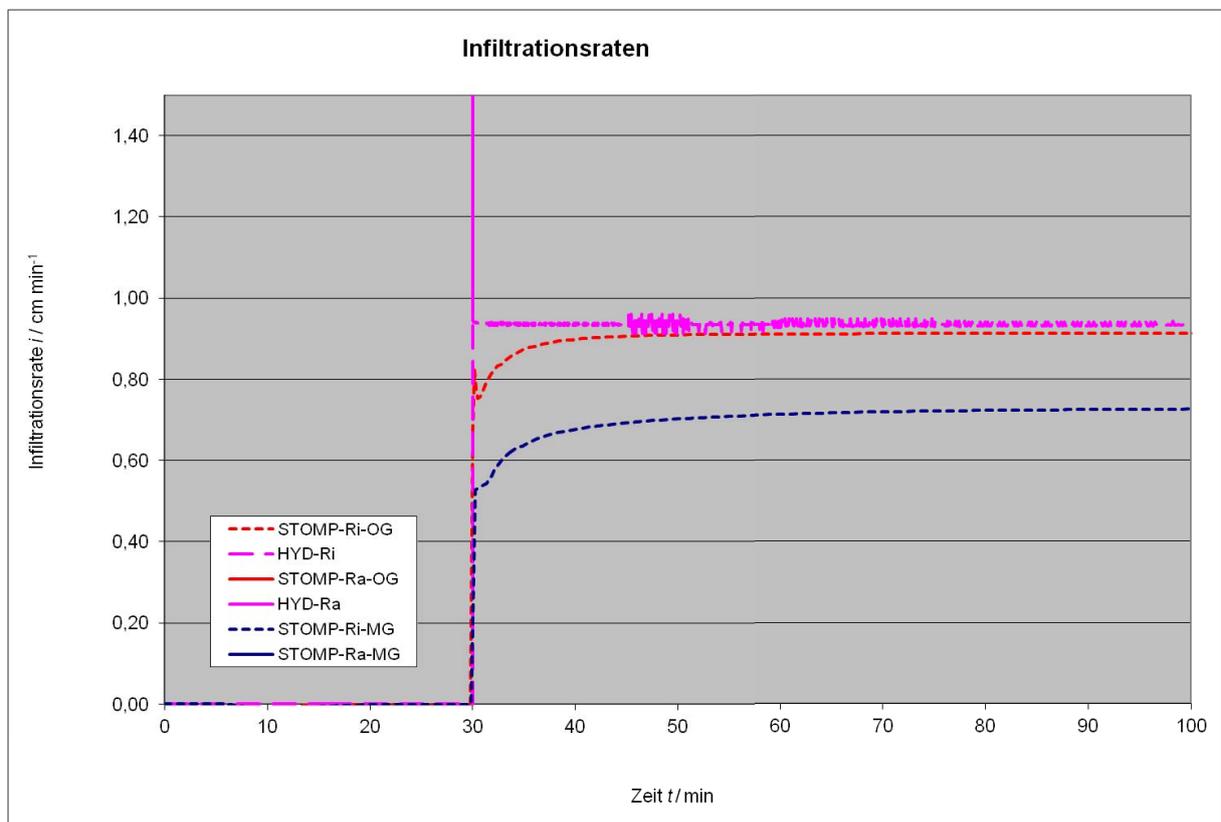
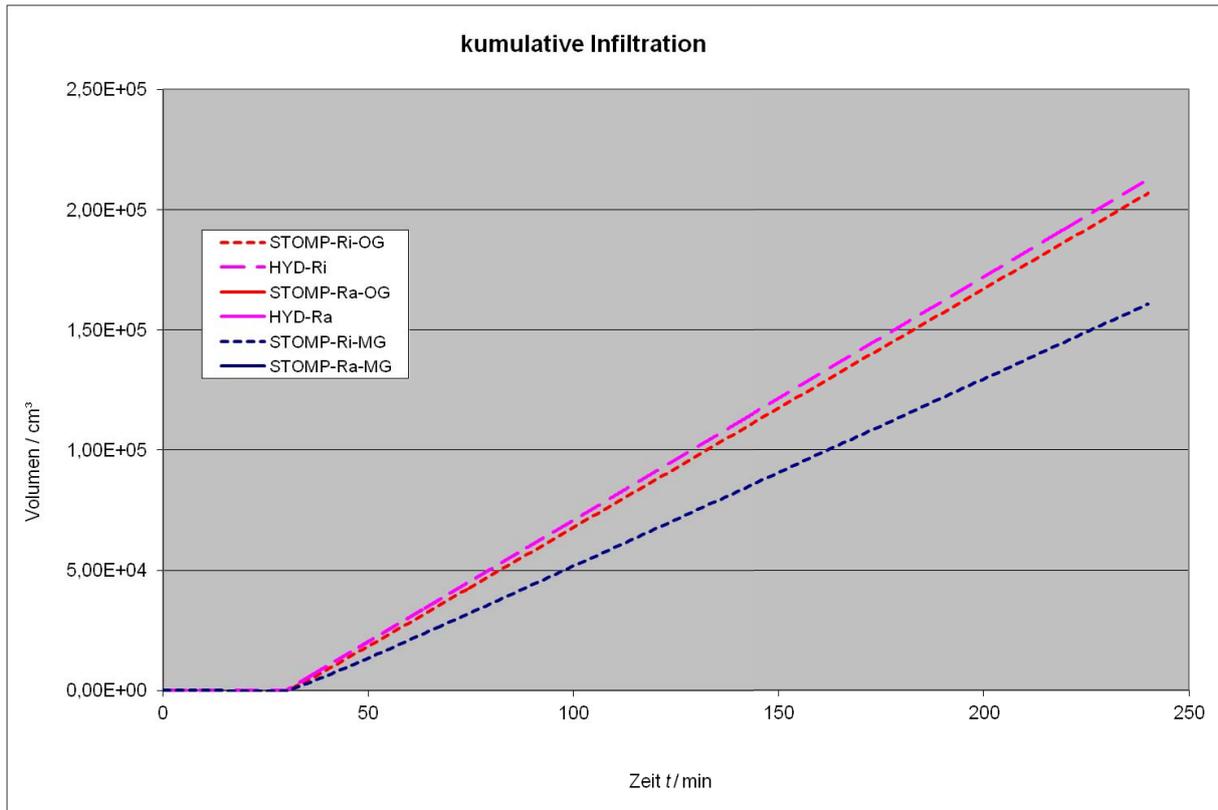
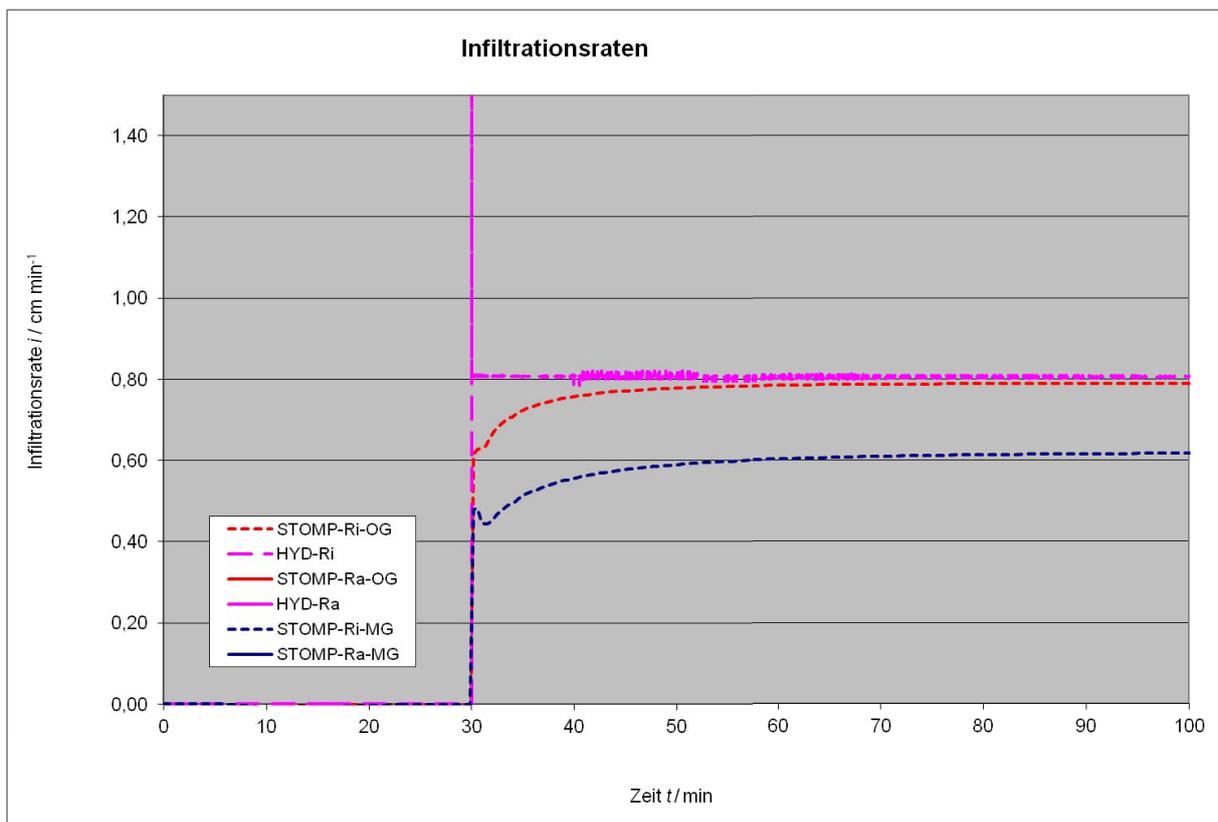


Abb. 121: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 20,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 122: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cmAbb. 123: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 40,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

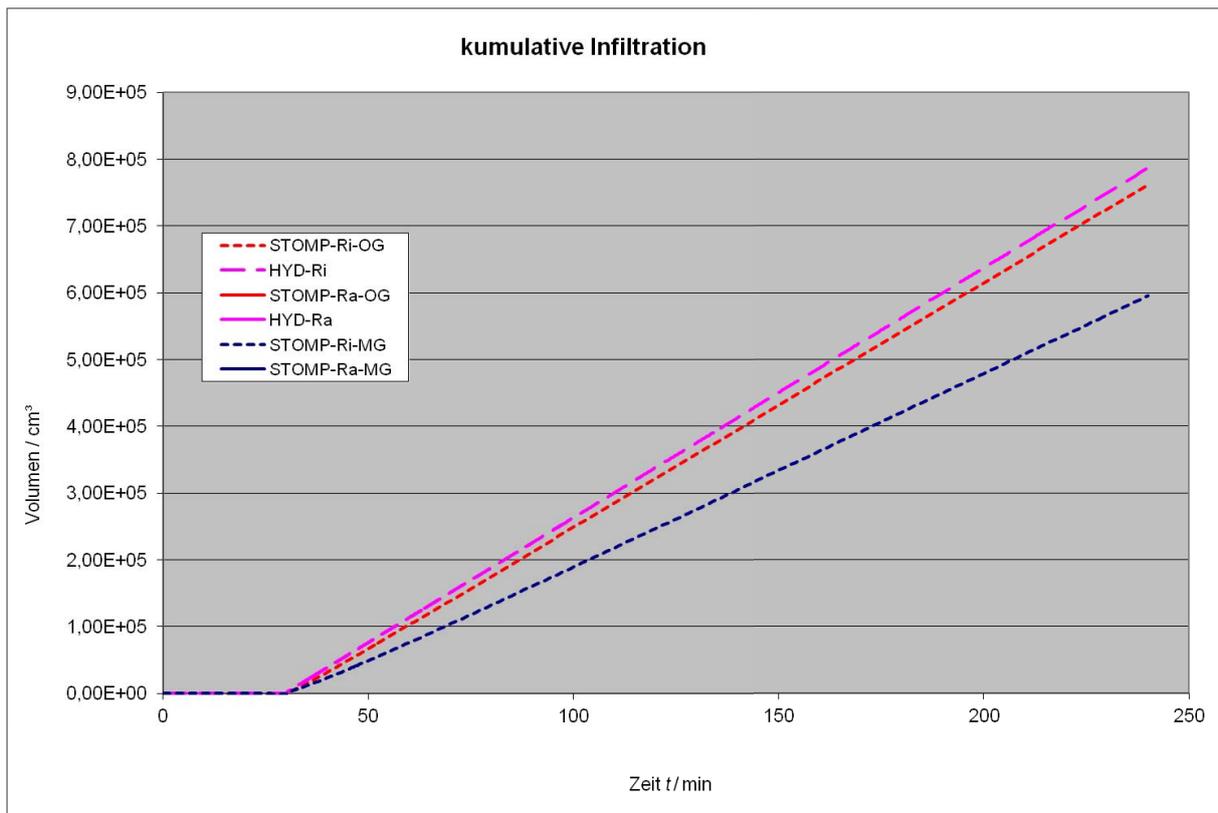


Abb. 124: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cm

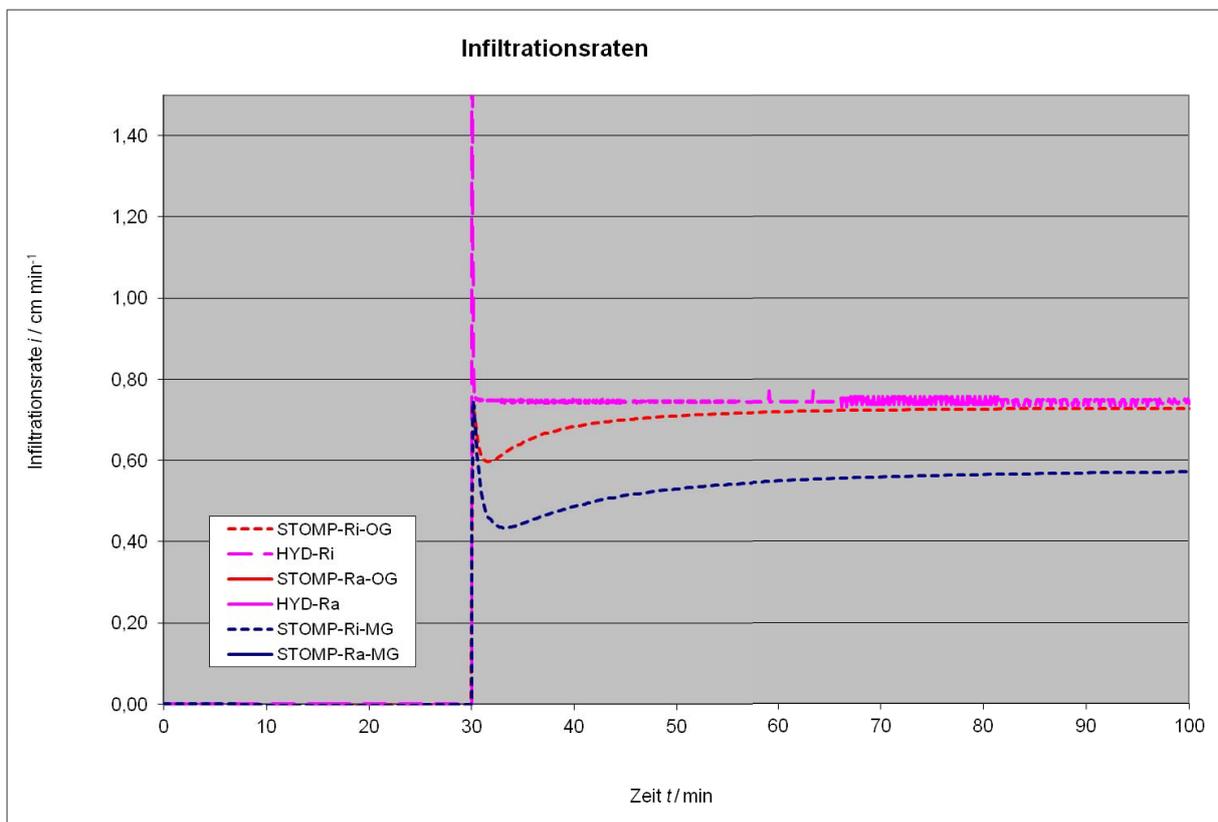
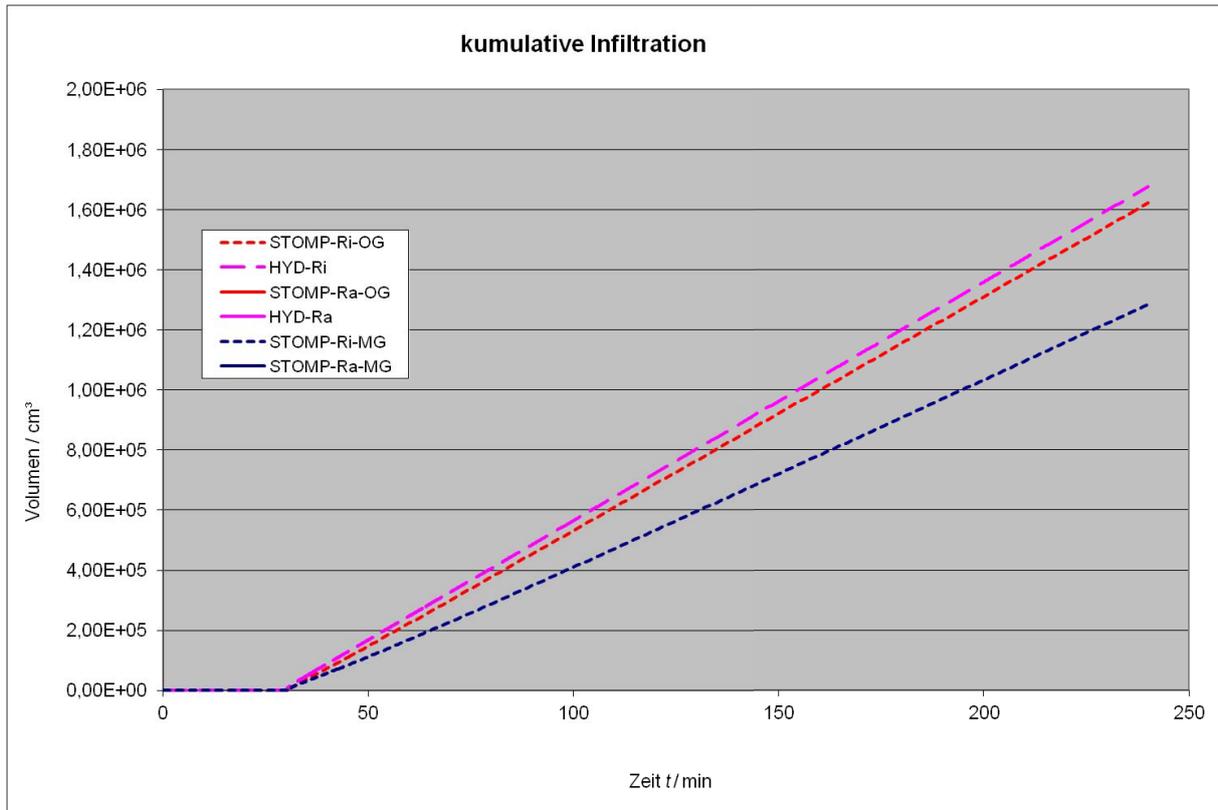
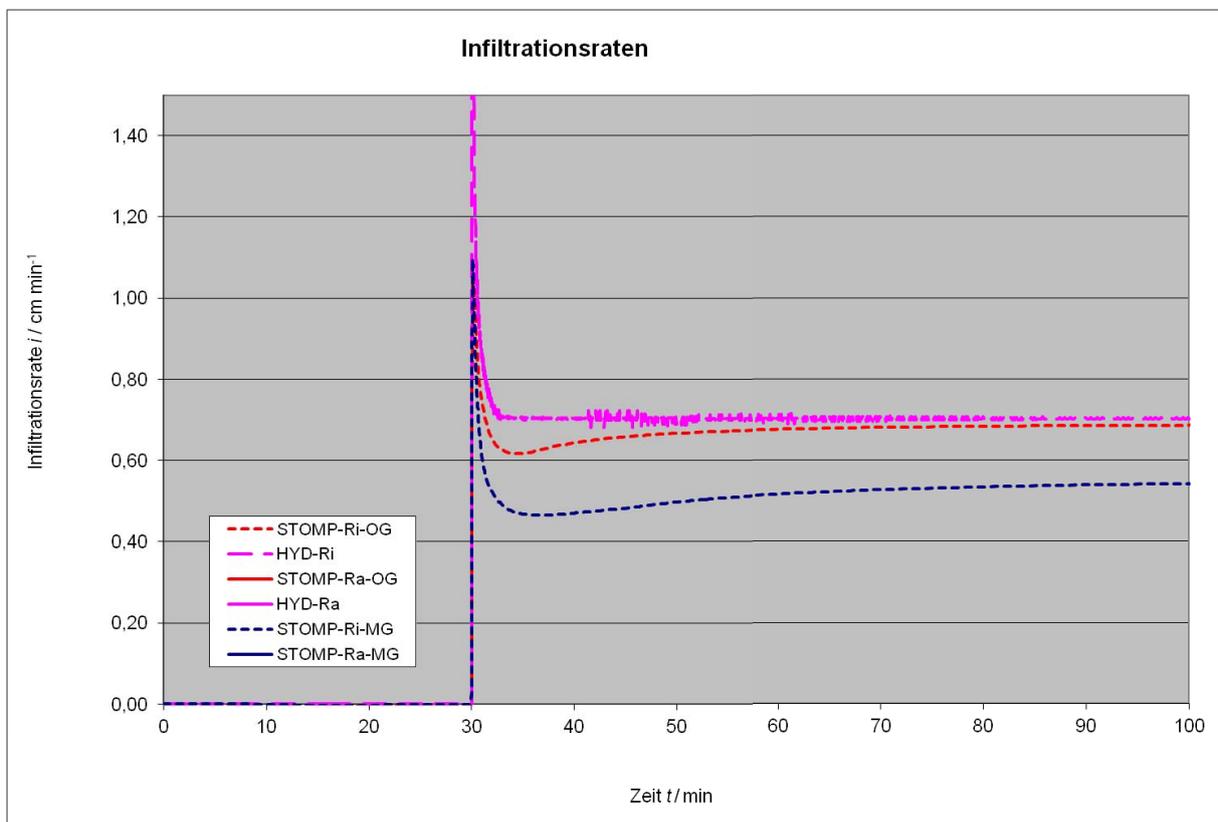


Abb. 125: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 60,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 126: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cmAbb. 127: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 80,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

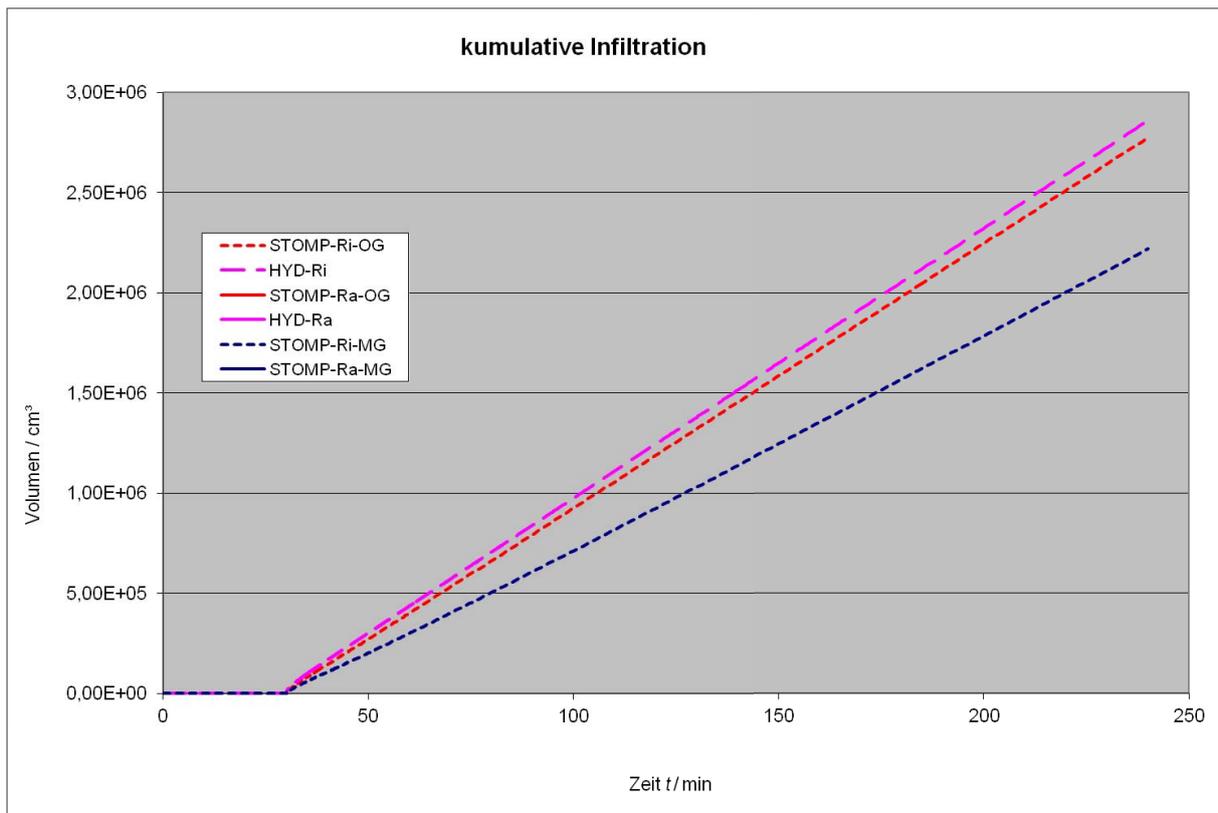


Abb. 128: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cm

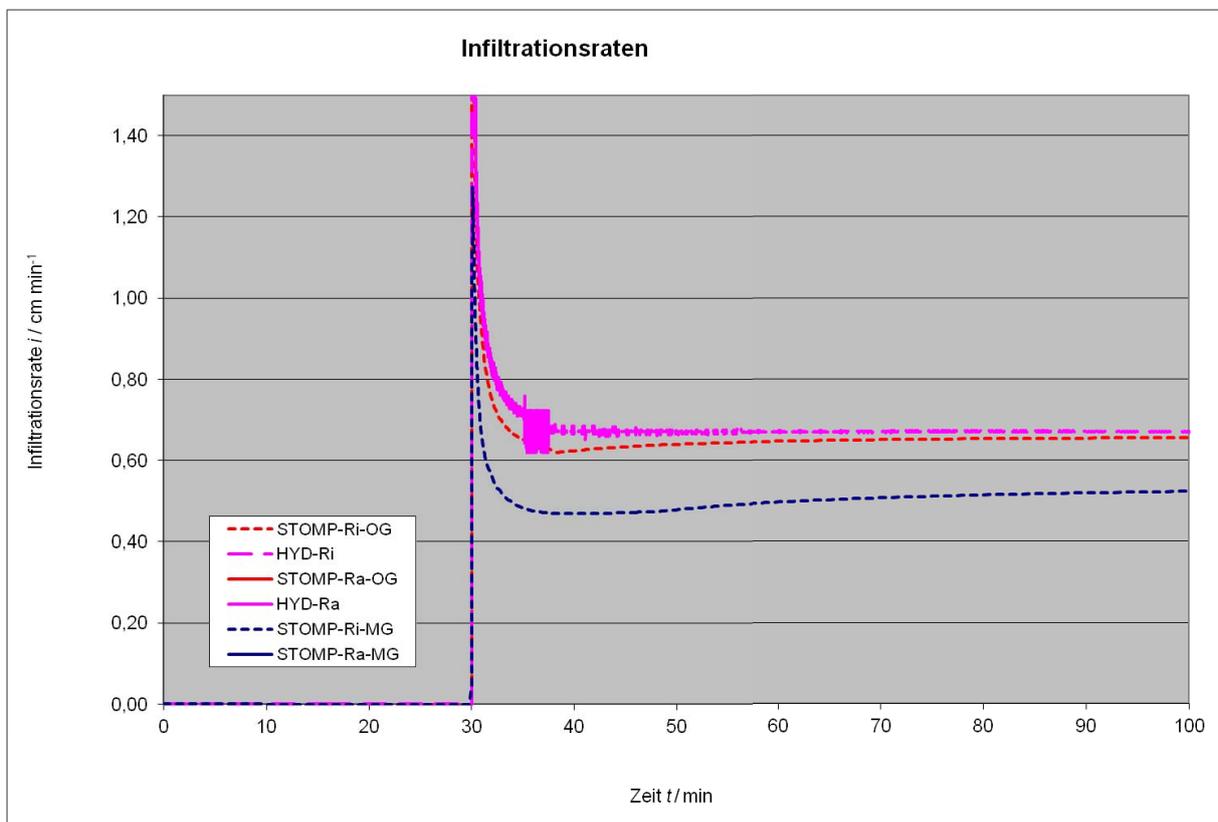


Abb. 129: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 100,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

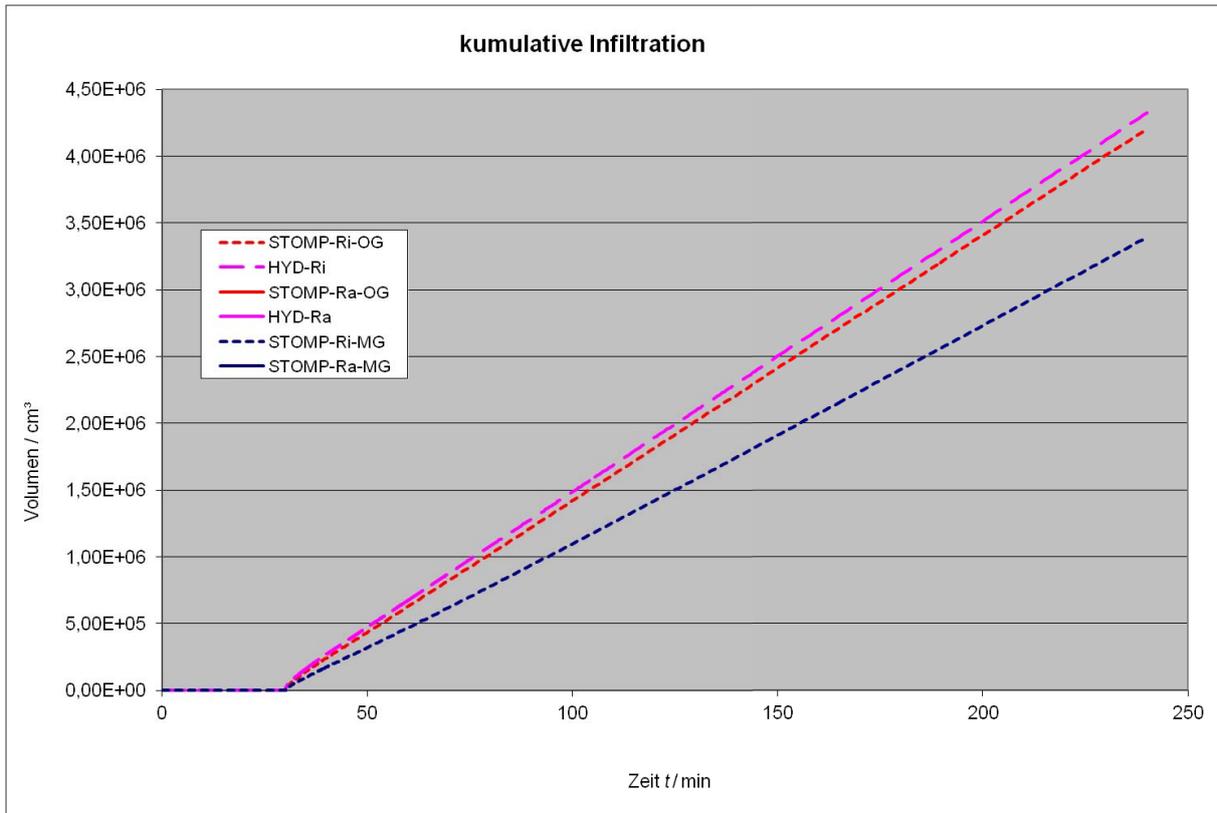


Abb. 130: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cm

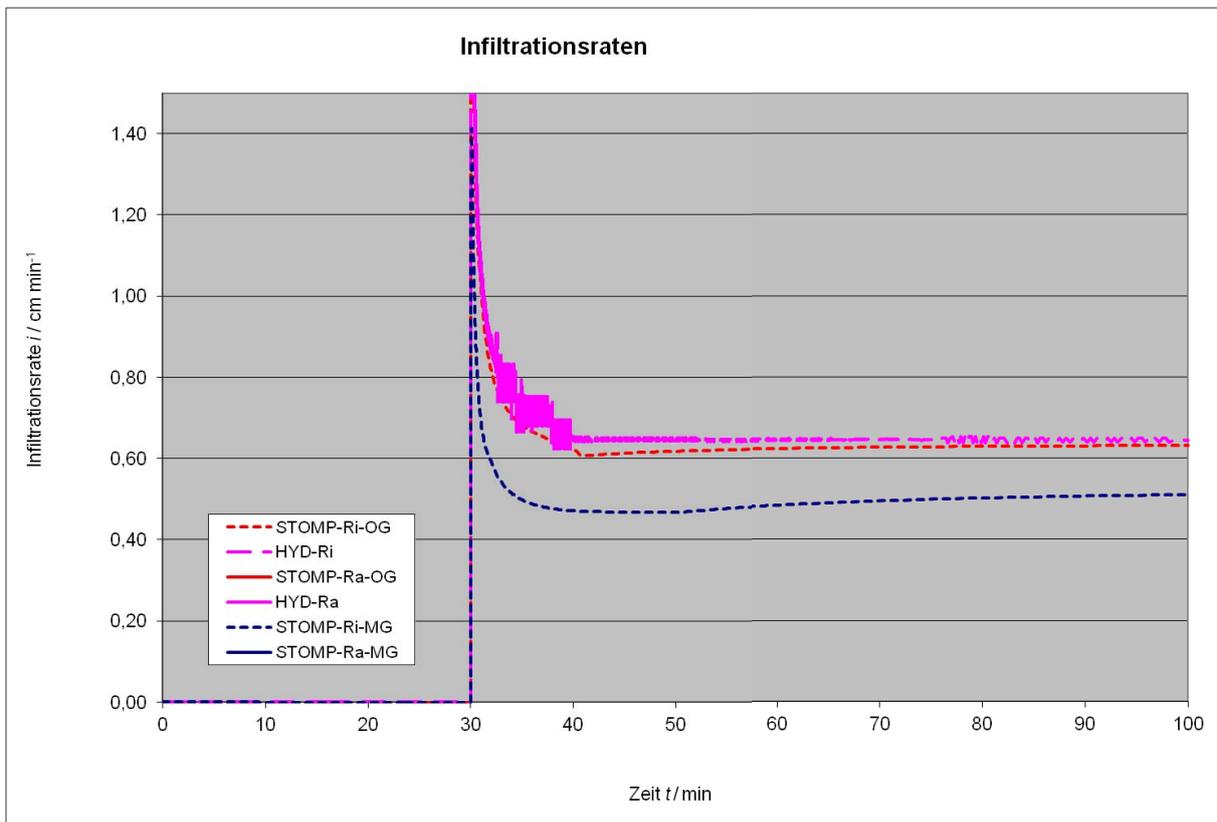


Abb. 131: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cm

Bodenvariante 0 – Innenringradius 120,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

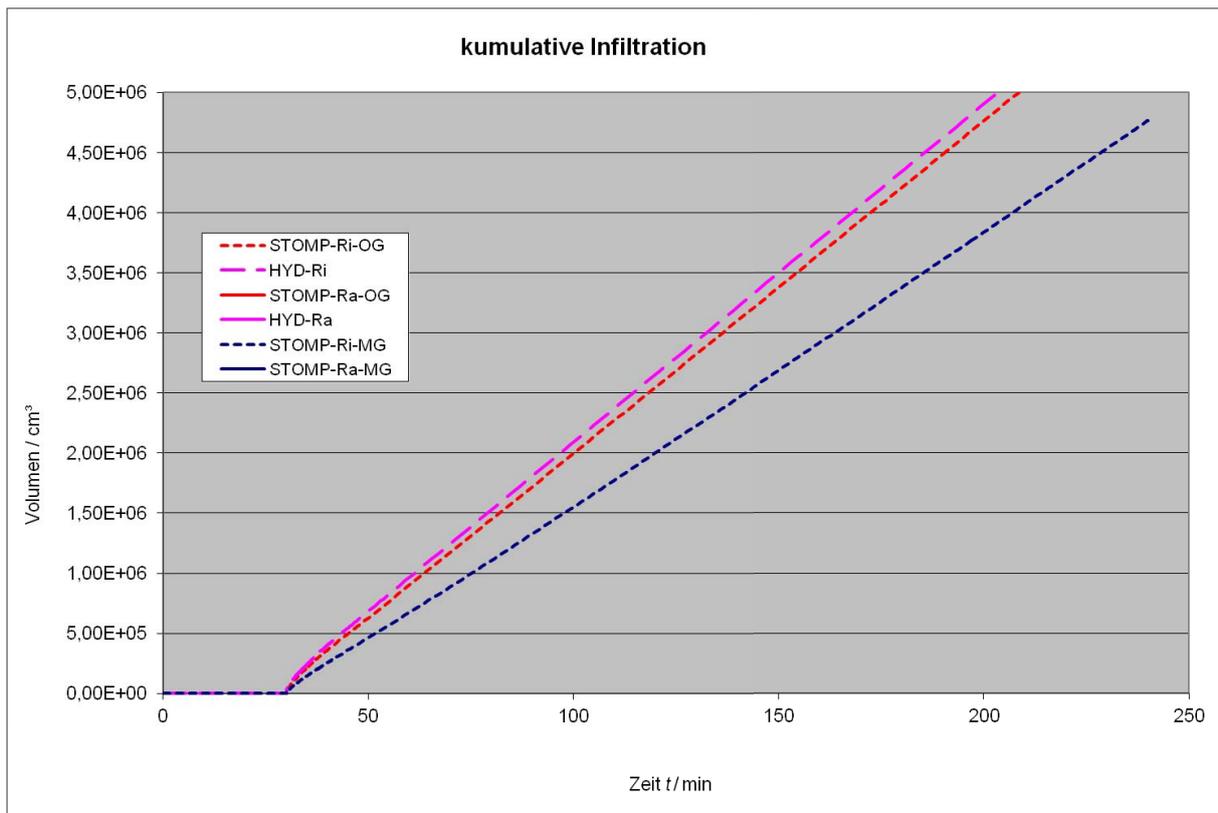


Abb. 132: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cm

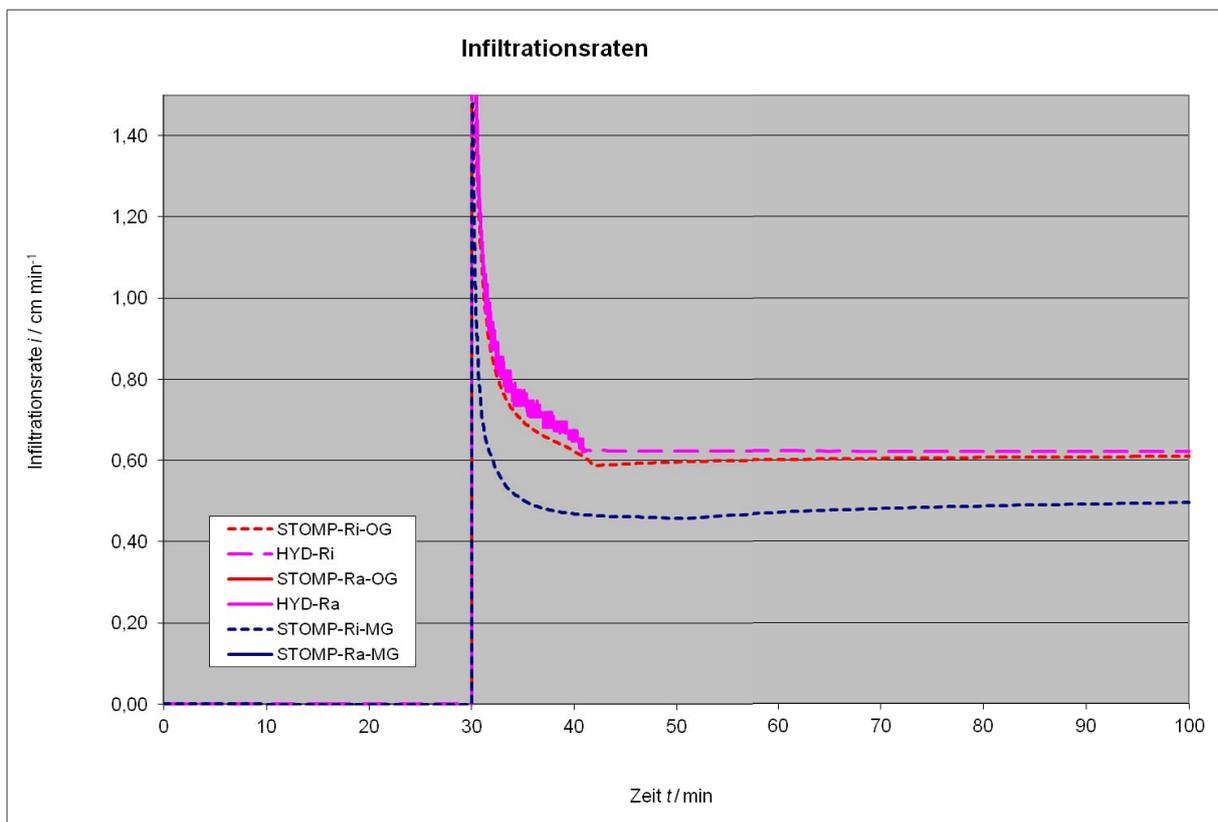


Abb. 133: Infiltrationsrate DR – BV 0 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cm

7.1.6. Bodenvariante 1 – "loamy sand" – nach US-Taxonomy –  $k_s = 4,0532 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  –  $k_{sh}$  10fach überhöht

Bodenvariante 1 – Innenringradius 7,0 cm –  $k_{sh}$  – 10fach überhöht

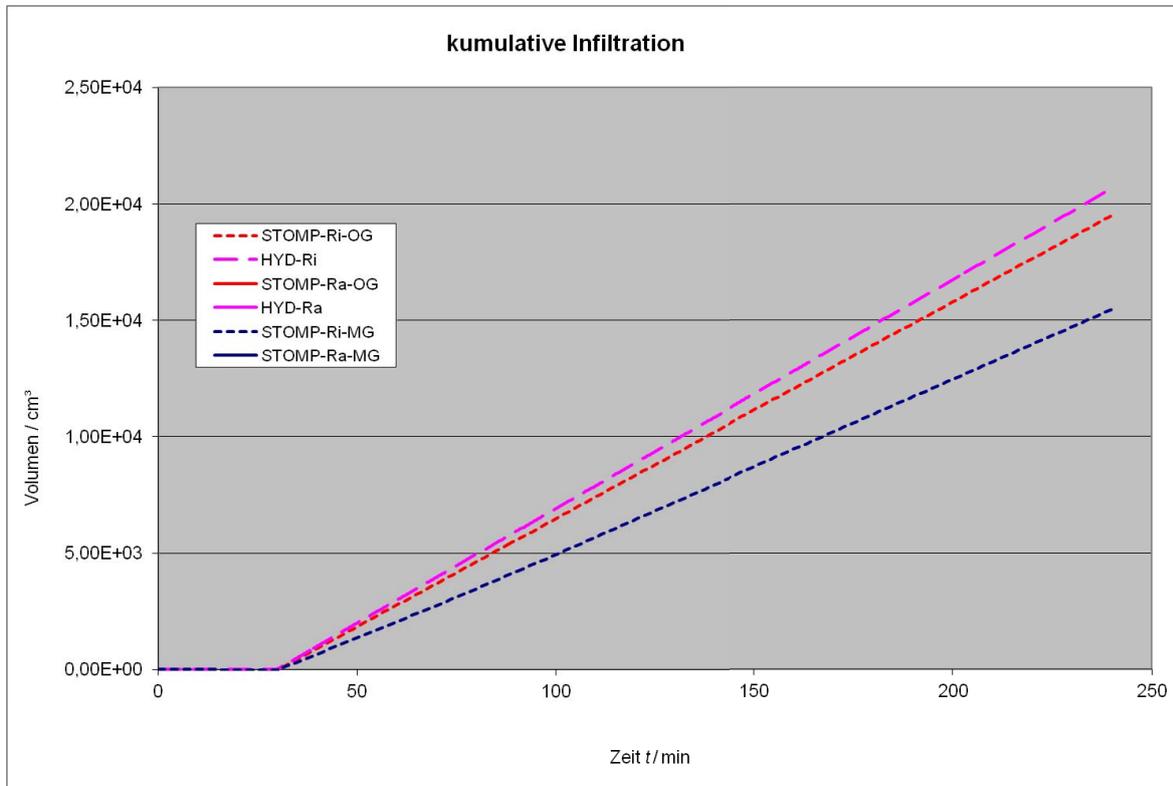


Abb. 134: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

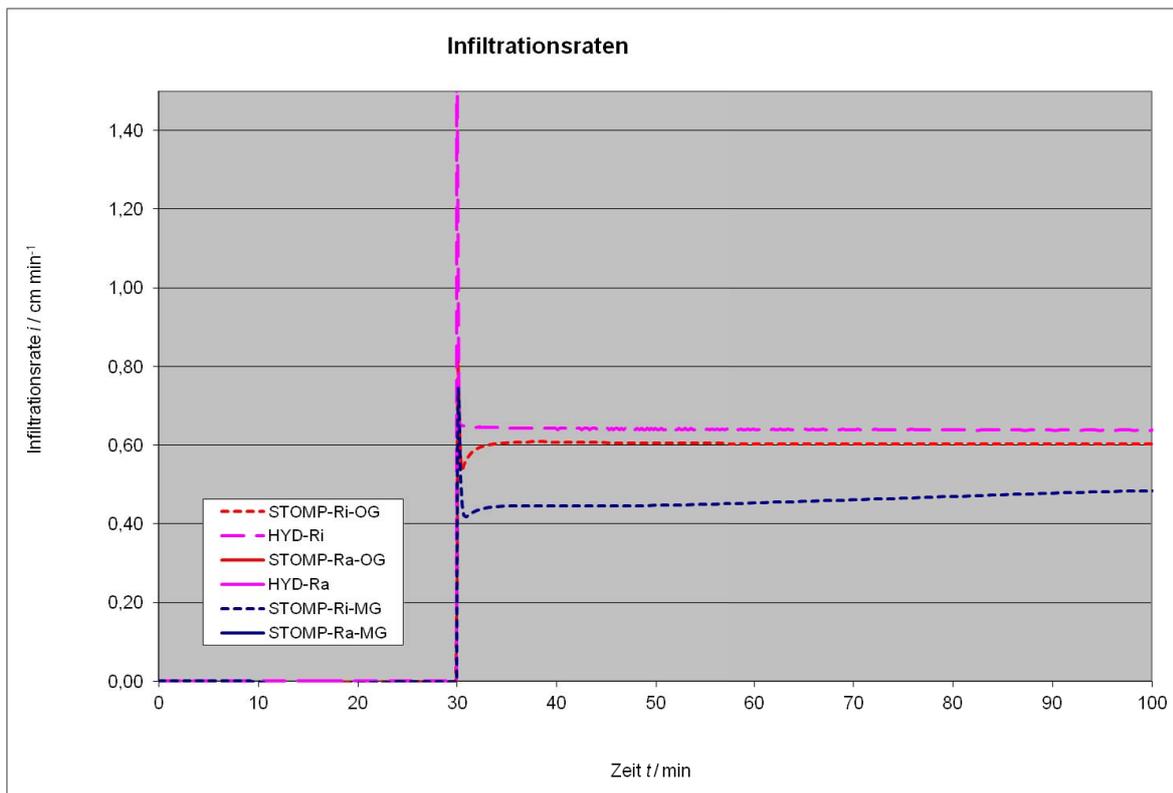
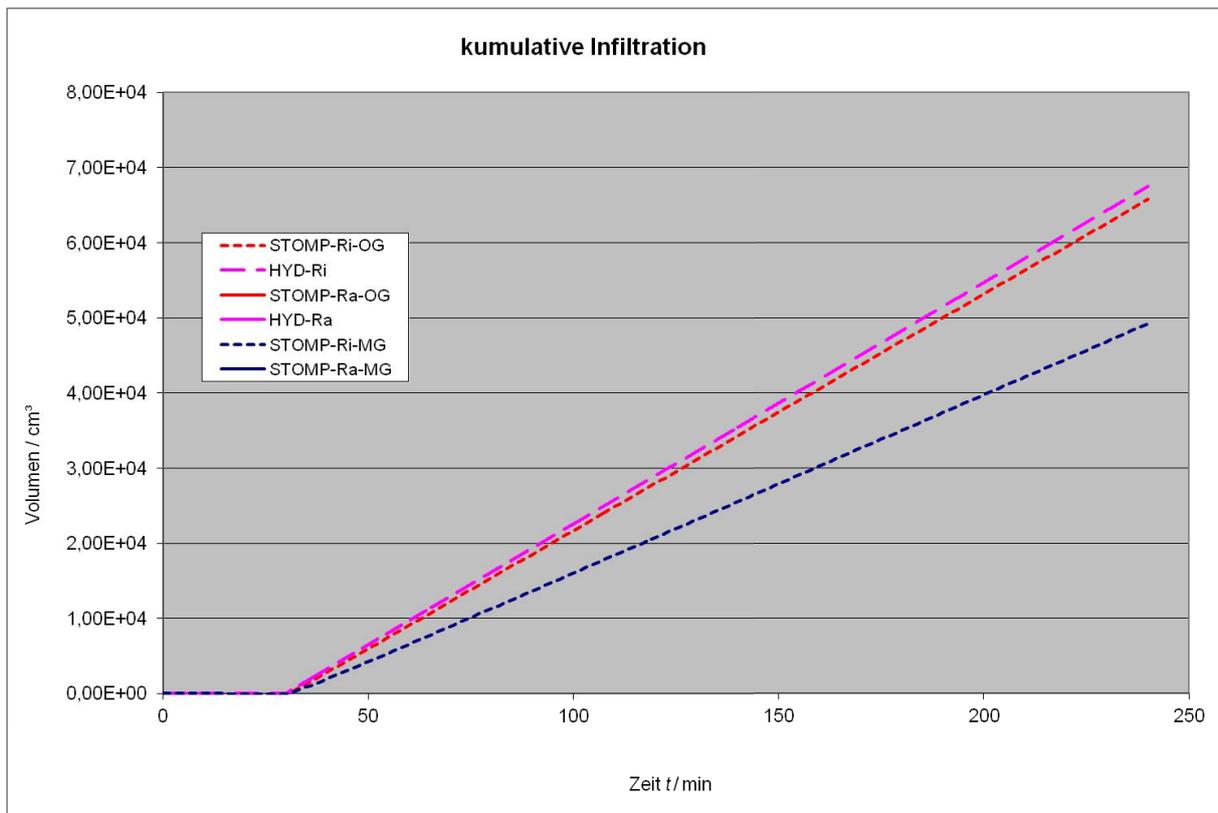
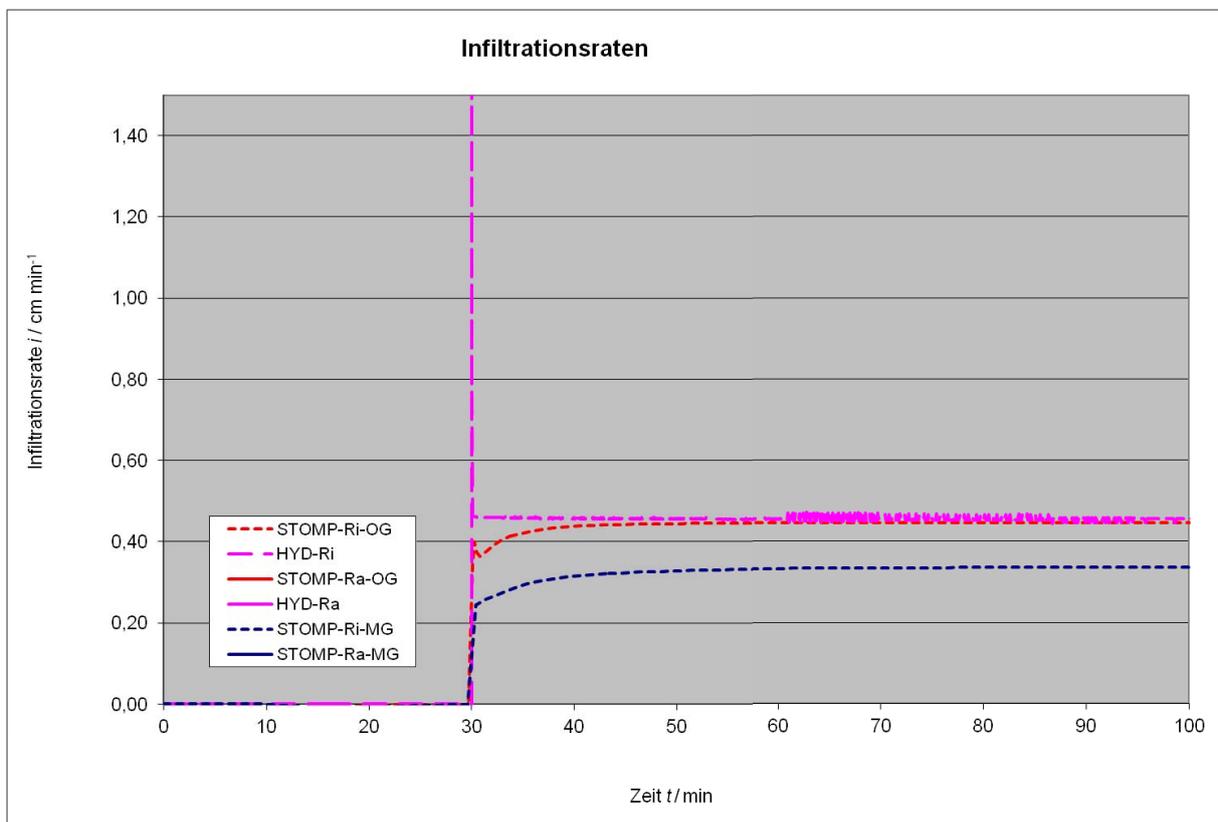
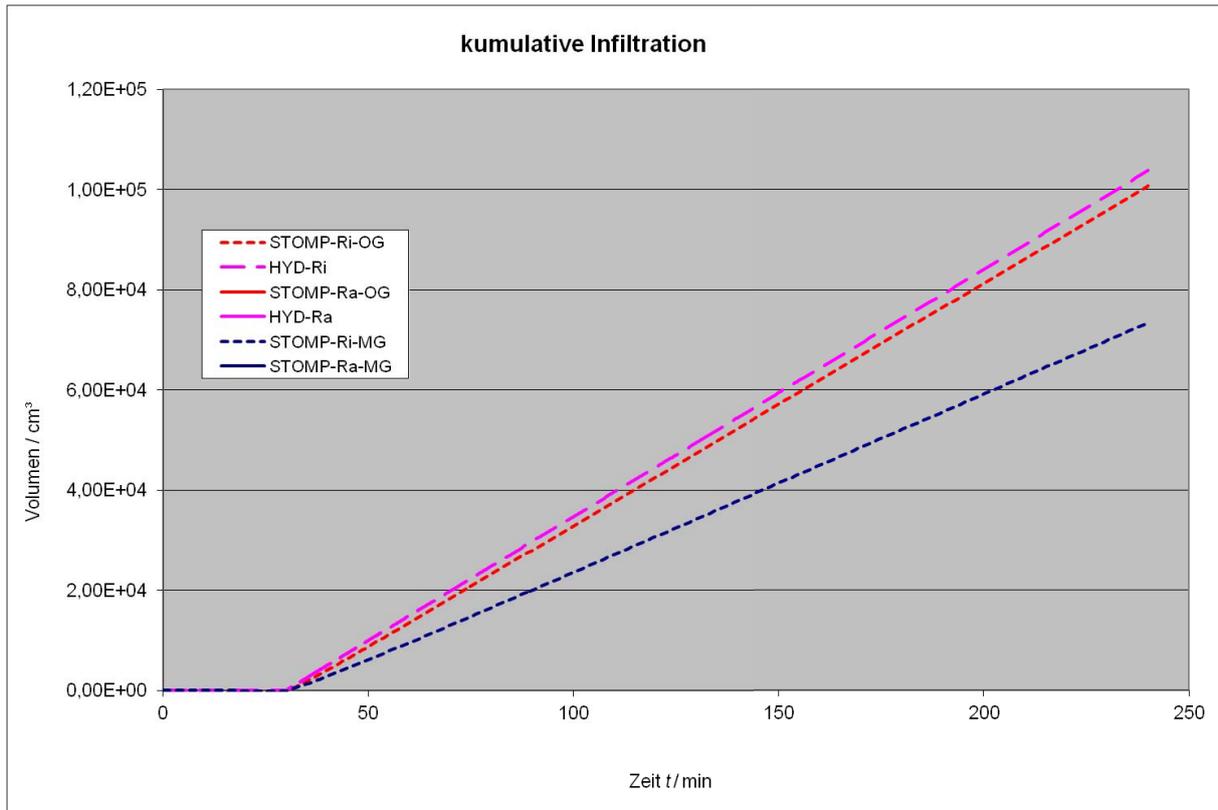
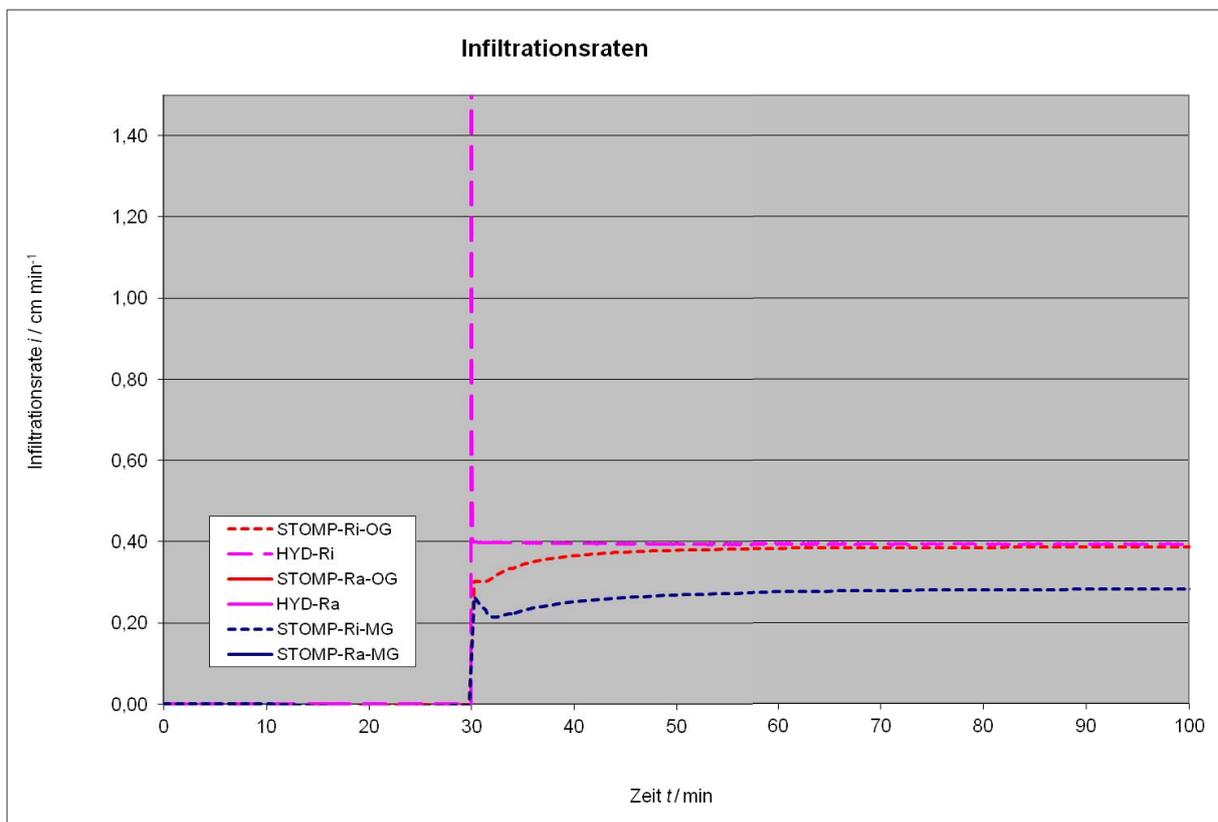


Abb. 135: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

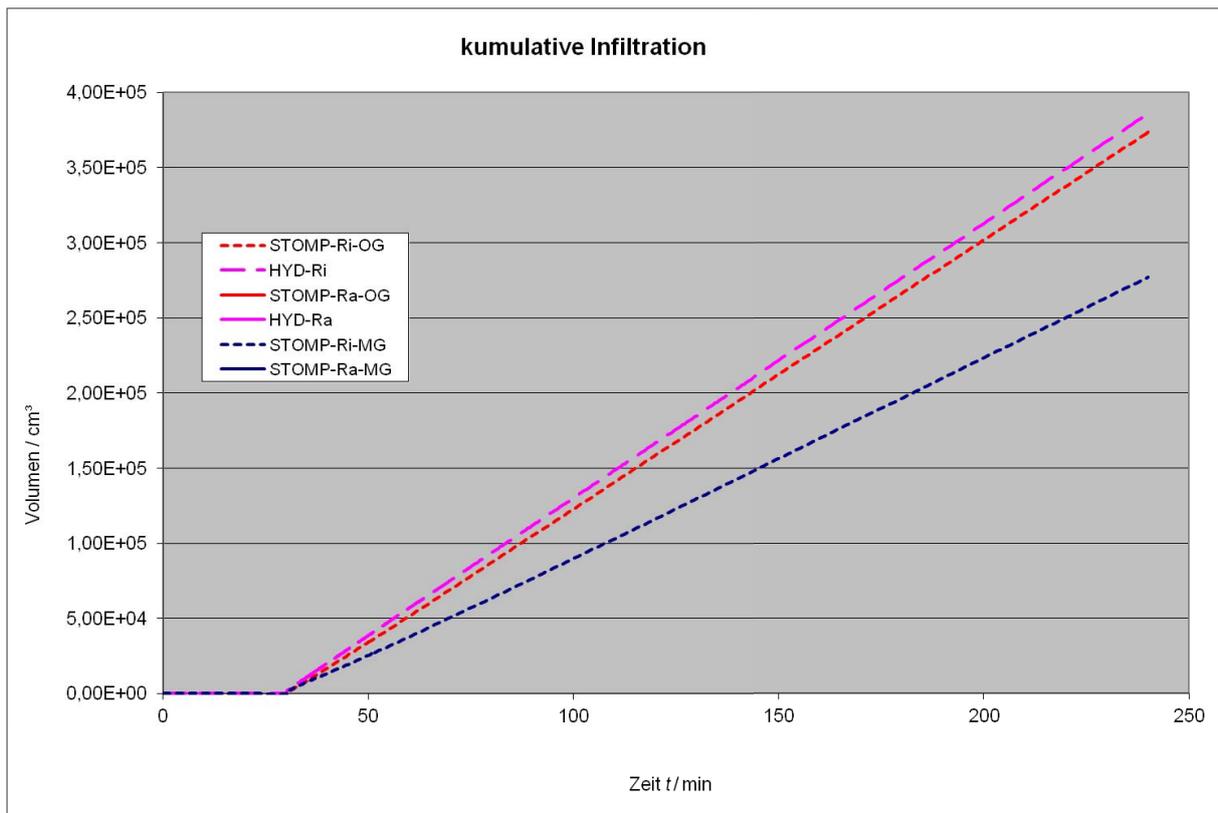
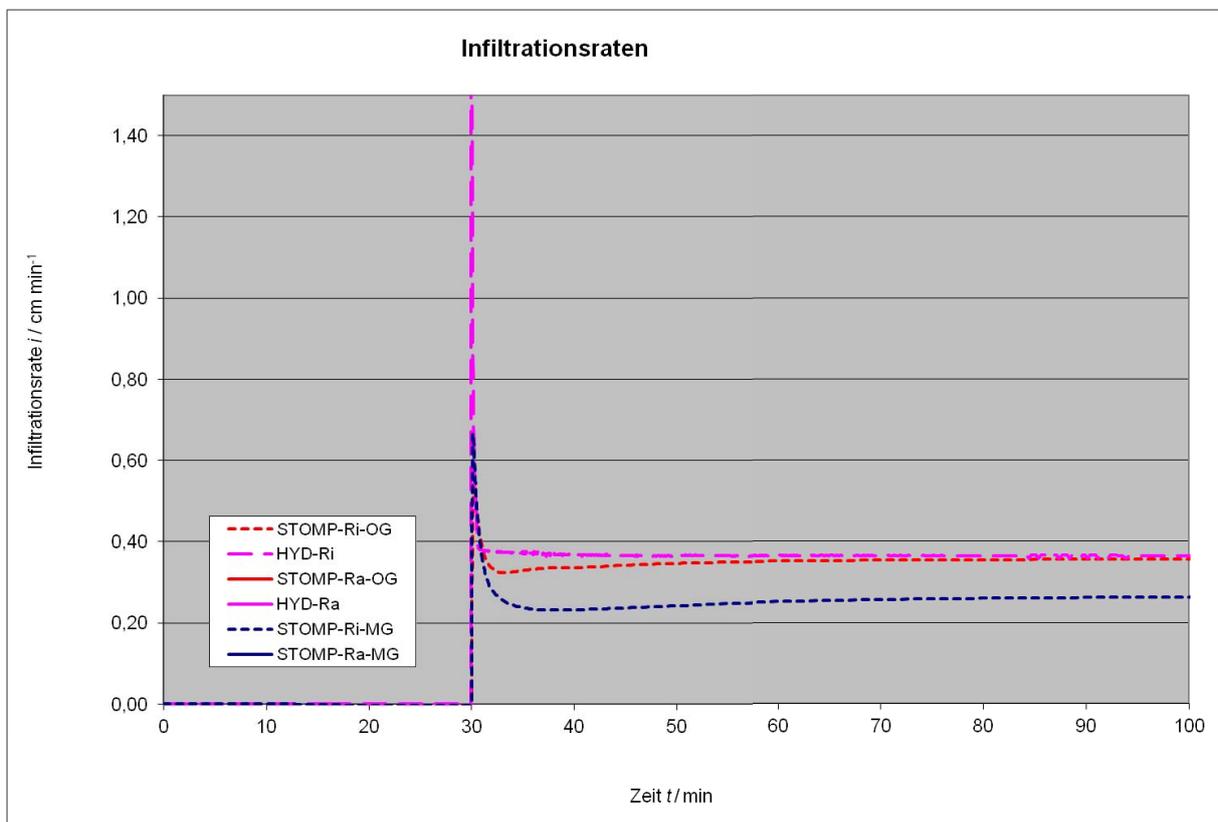
Bodenvariante 1 – Innenringradius 15,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 136: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cmAbb. 137: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cm

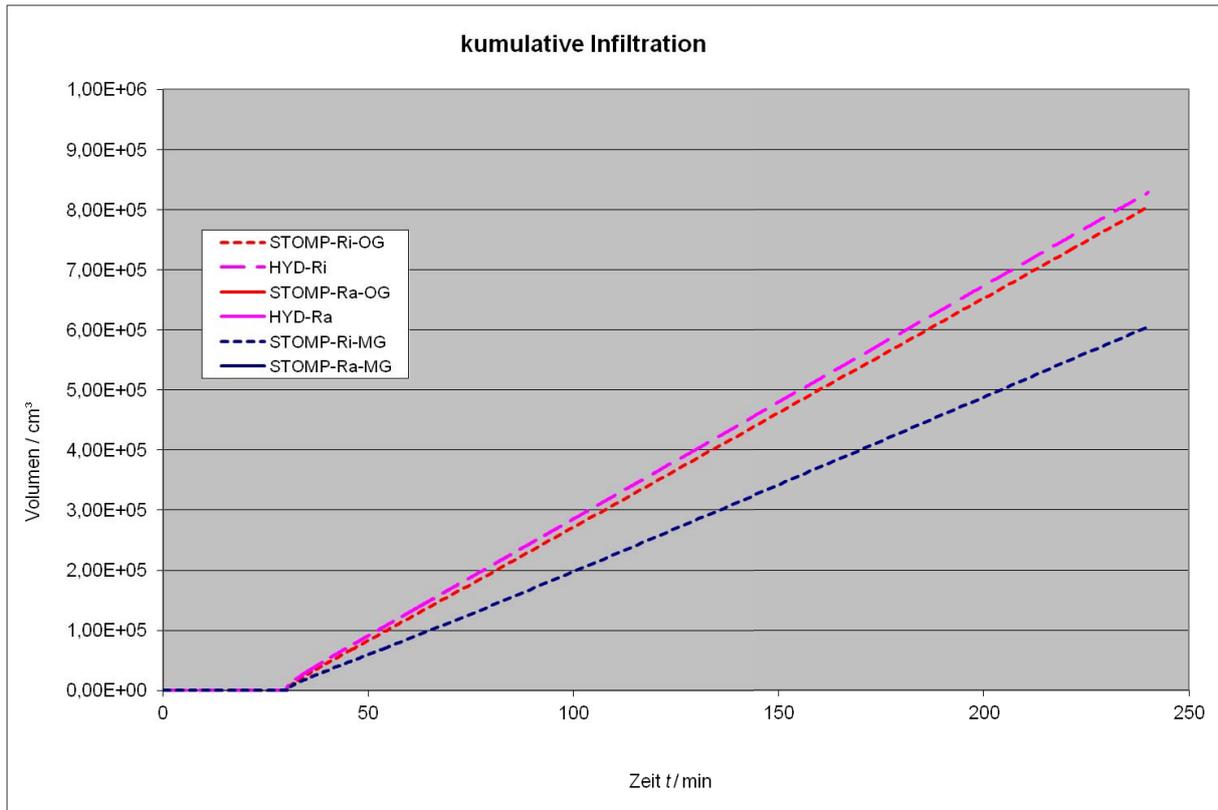
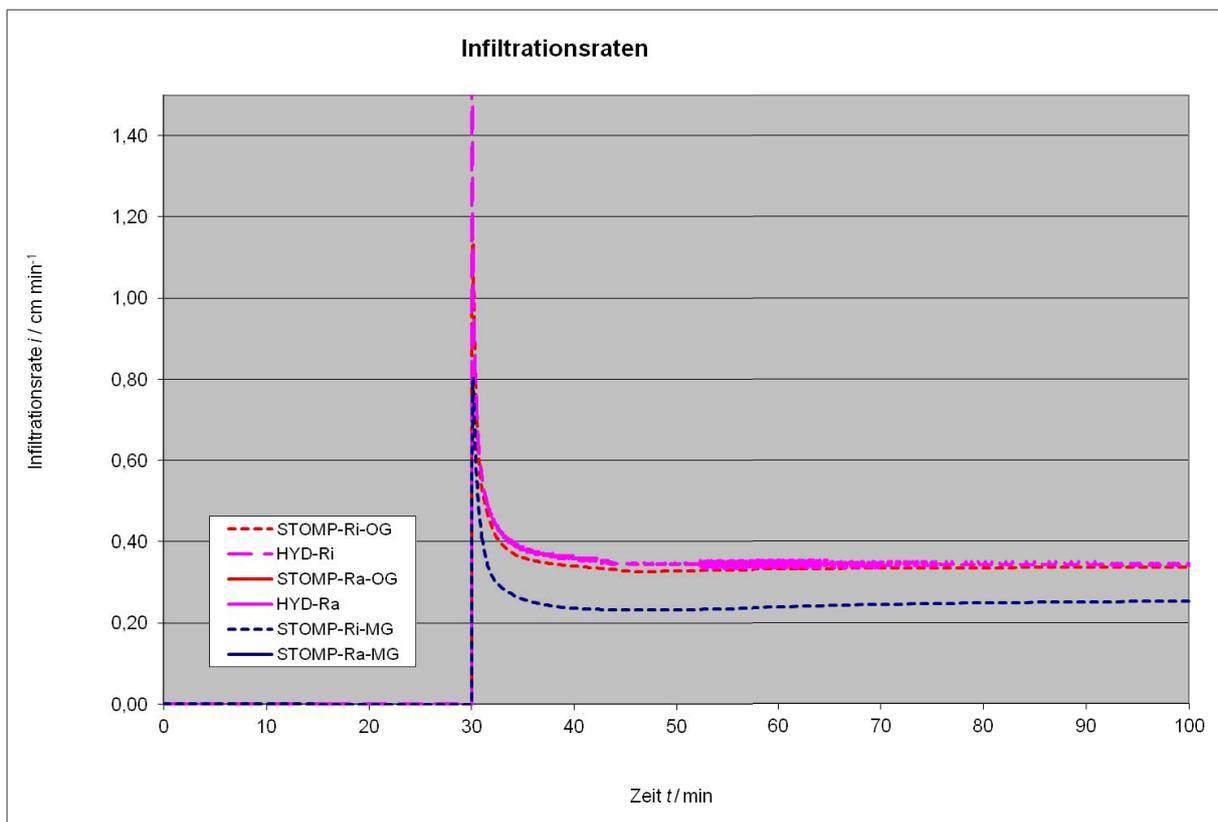
Bodenvariante 1 – Innenringradius 20,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

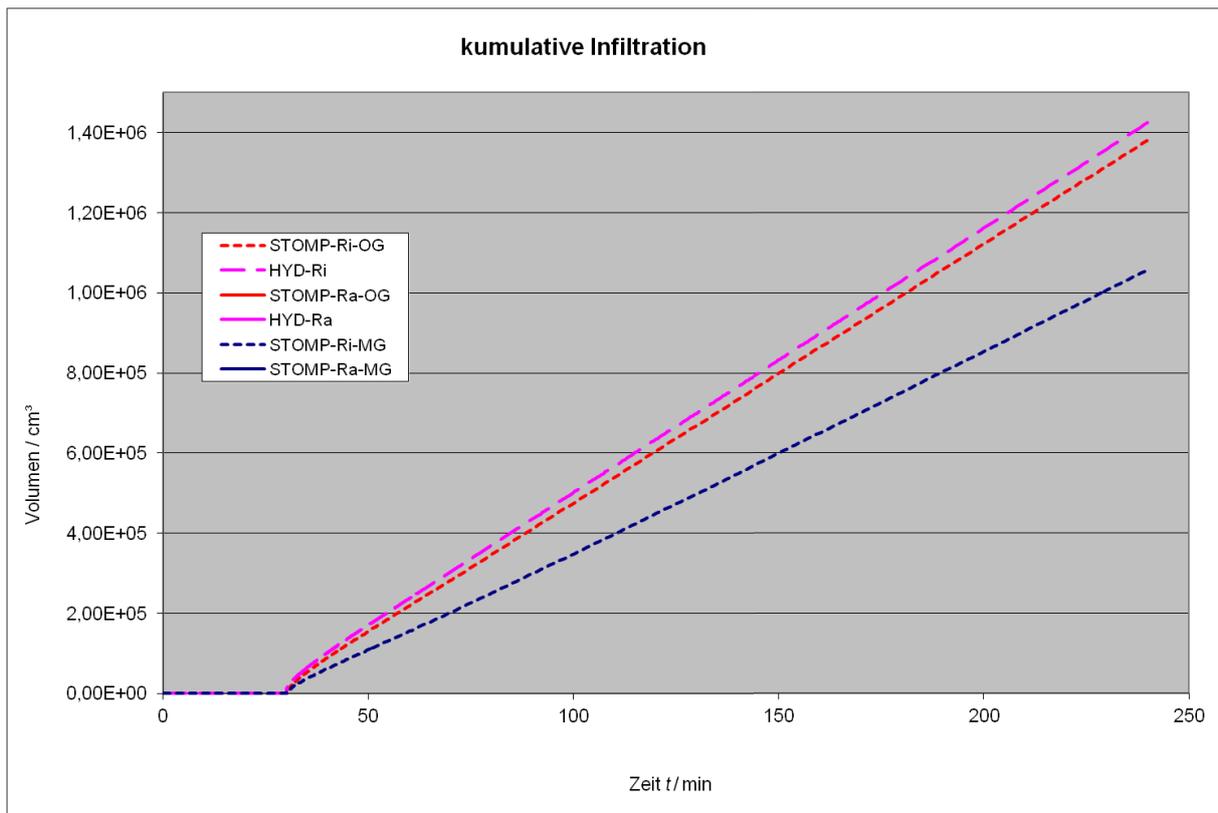
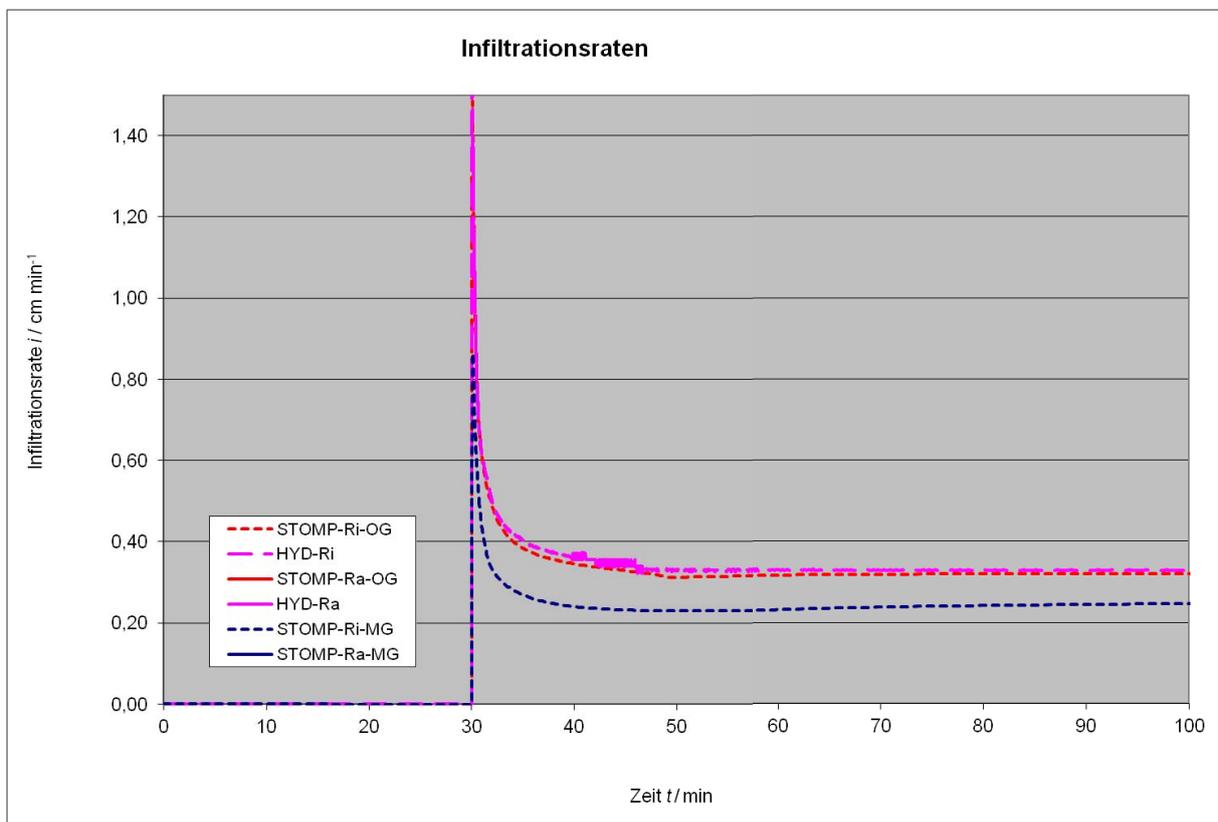
**Abb. 138: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cm**

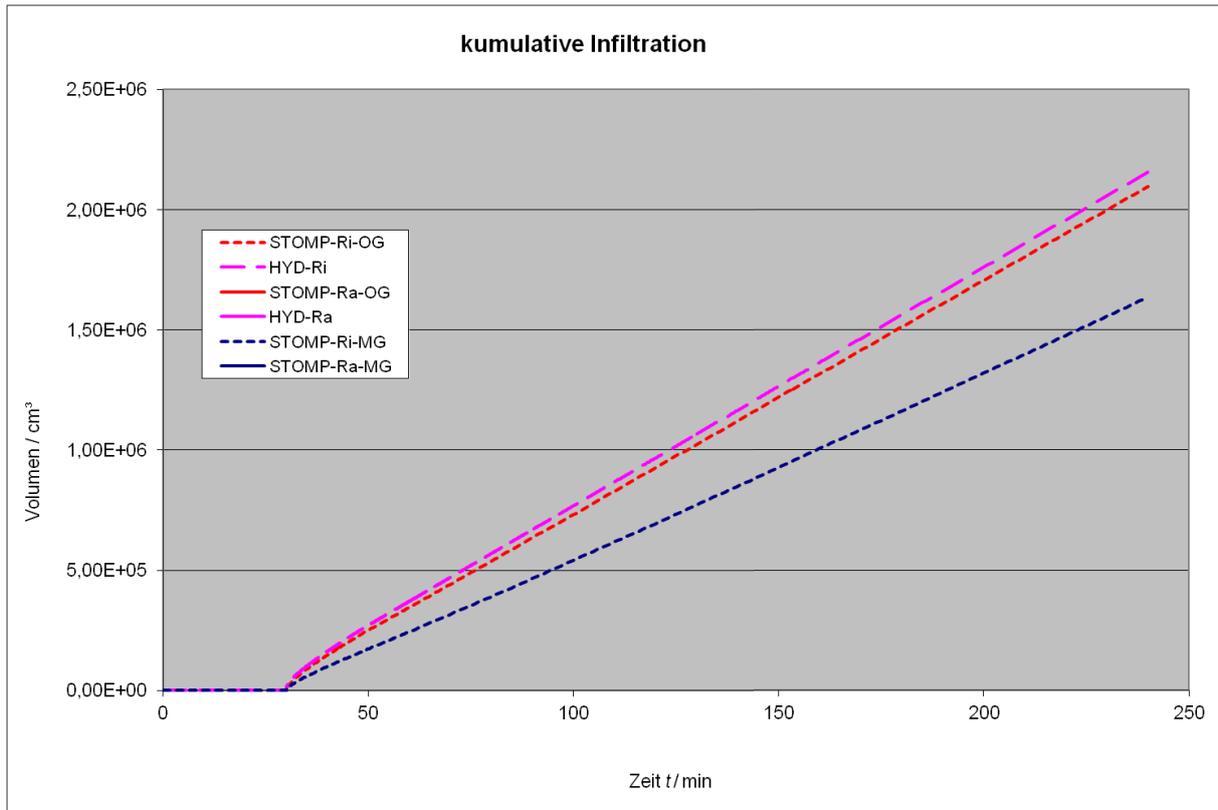
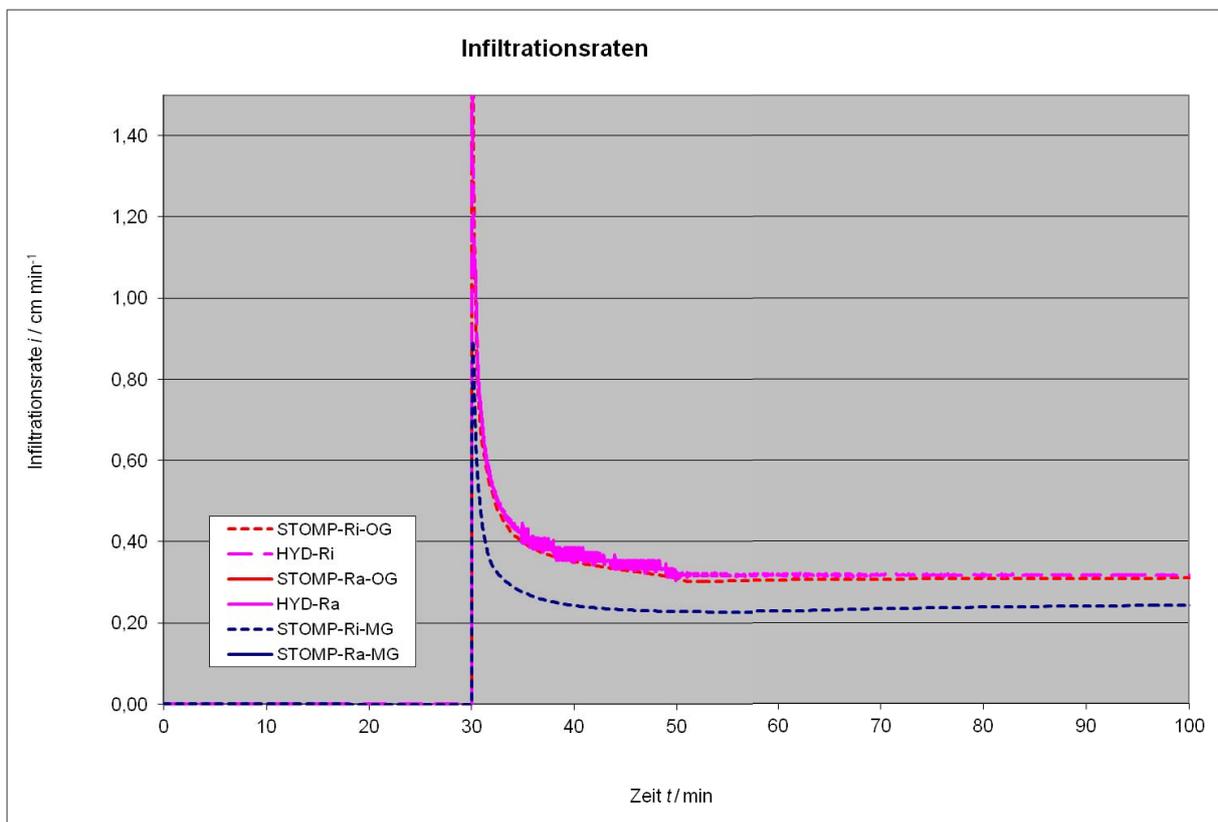


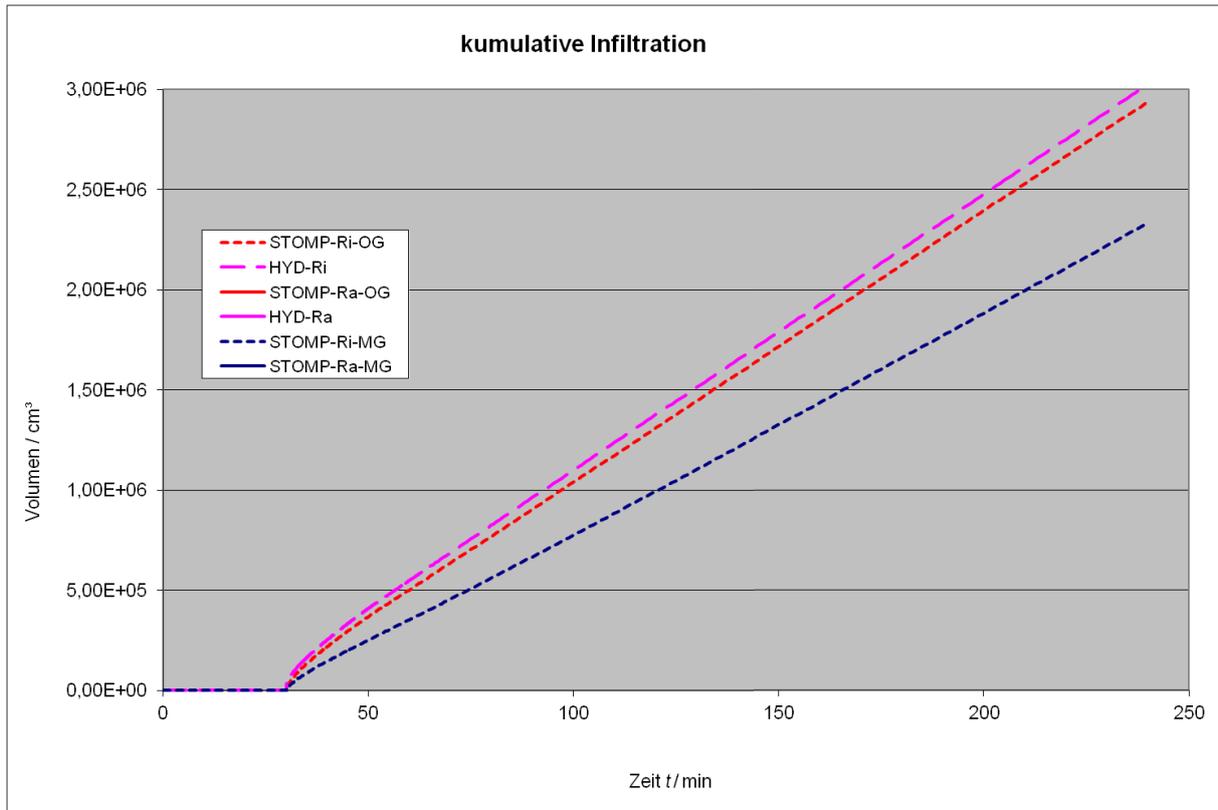
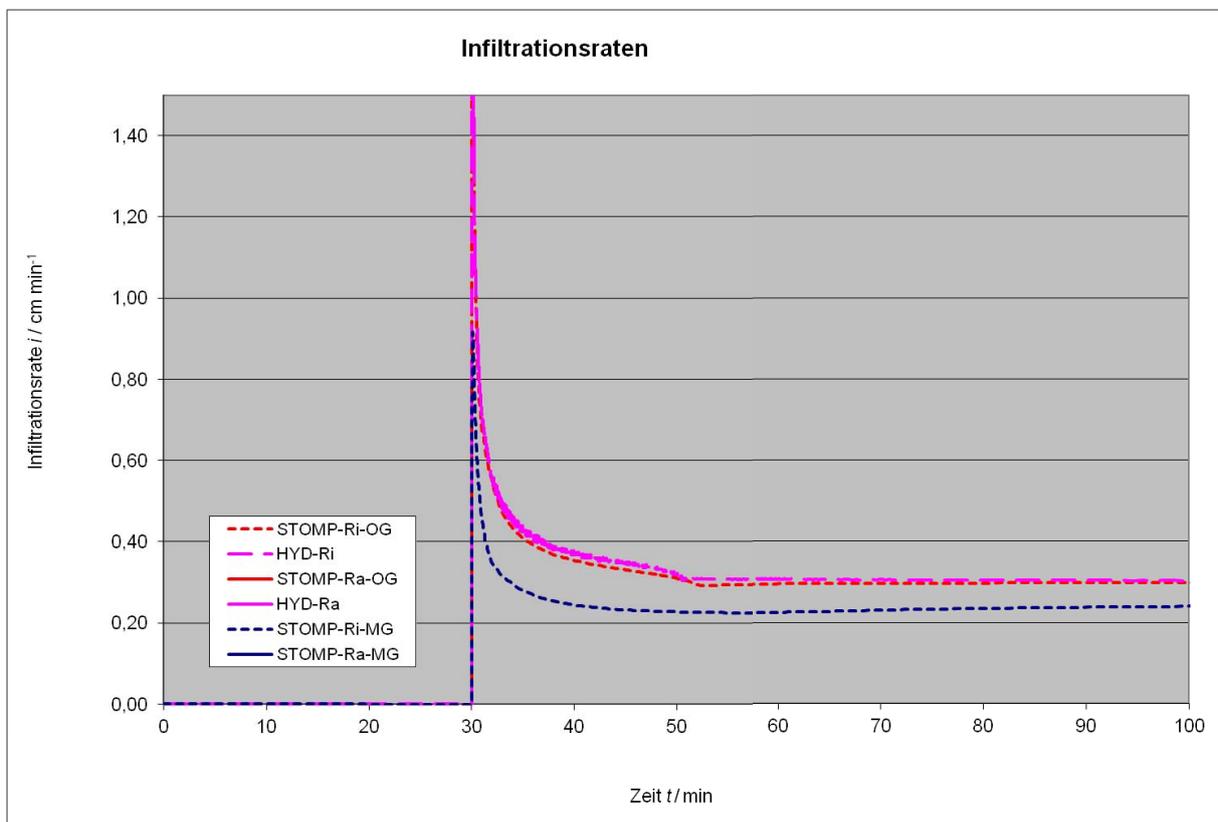
**Abb. 139: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cm**

Bodenvariante 1 – Innenringradius 40,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 140: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cmAbb. 141: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringradius 60,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 142: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cmAbb. 143: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringradius 80,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 144: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cmAbb. 145: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringradius 100,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 146: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cmAbb. 147: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cm

Bodenvariante 1 – Innenringradius 120,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 148: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cmAbb. 149: Infiltrationsrate DR – BV 1 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cm

7.1.7. Bodenvariante 2 – "loamy sand" - nach US-Taxonomy -  $k_s = 3,33 \times 10^{-7}$  m/s –  $k_{sh}$  10fach überhöht

Bodenvariante 2 – Innenringradius 7,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöht

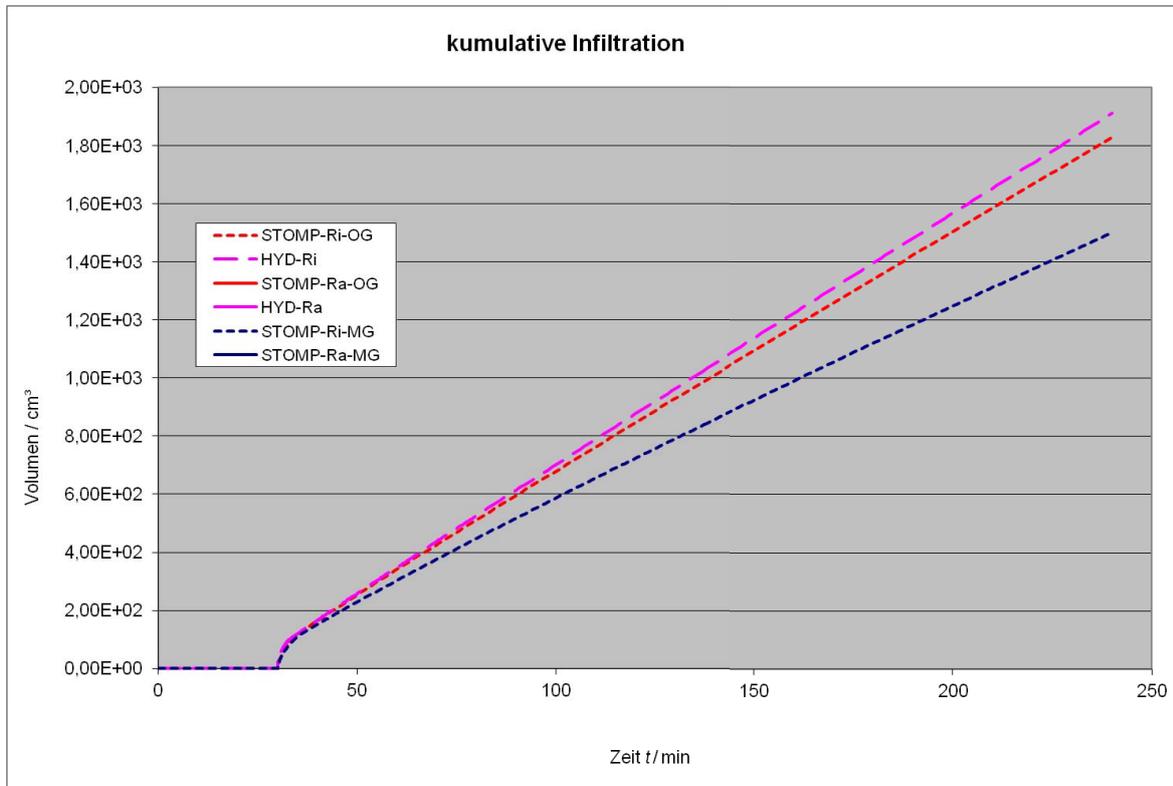


Abb. 150: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

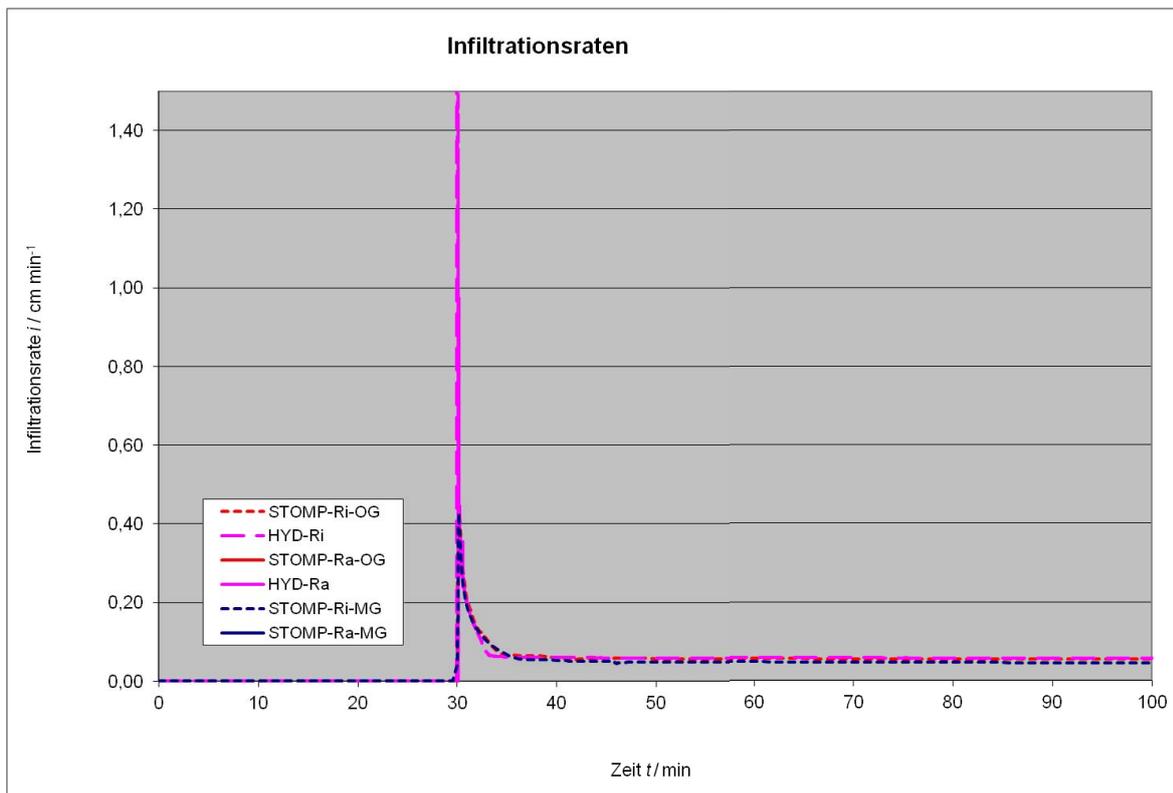
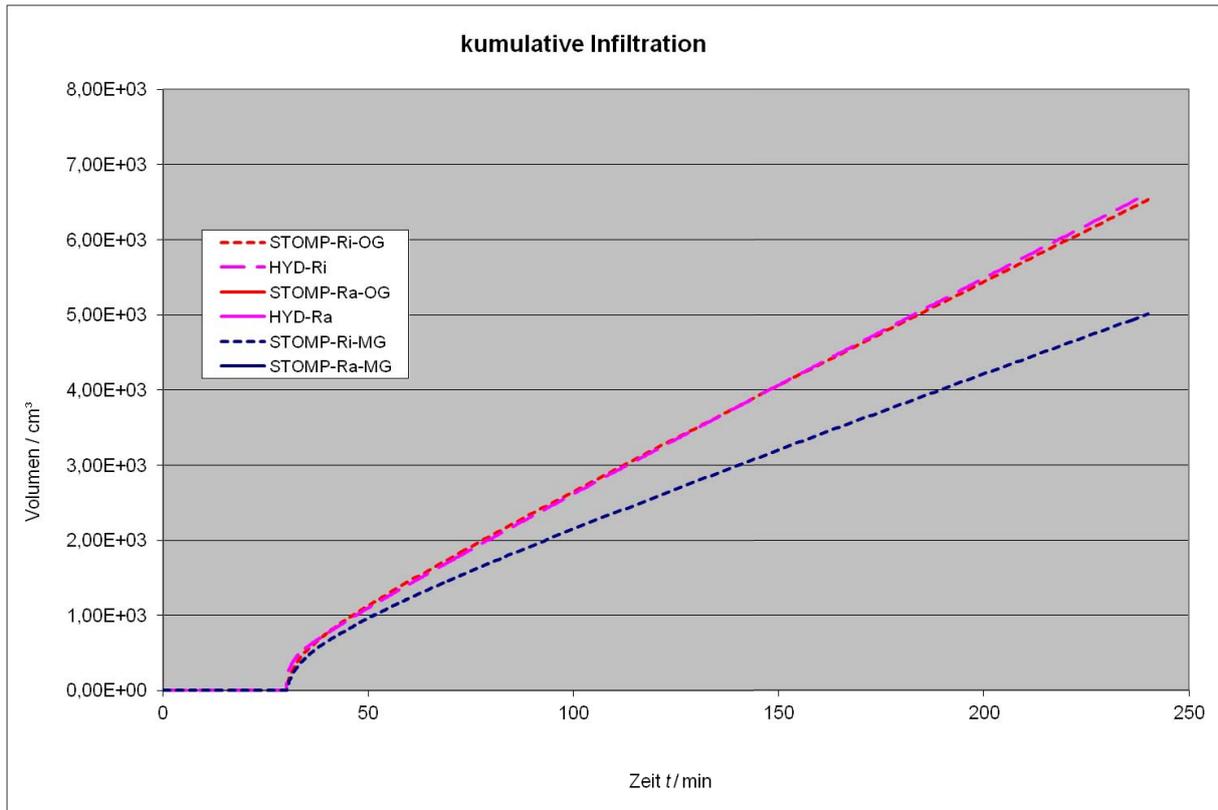
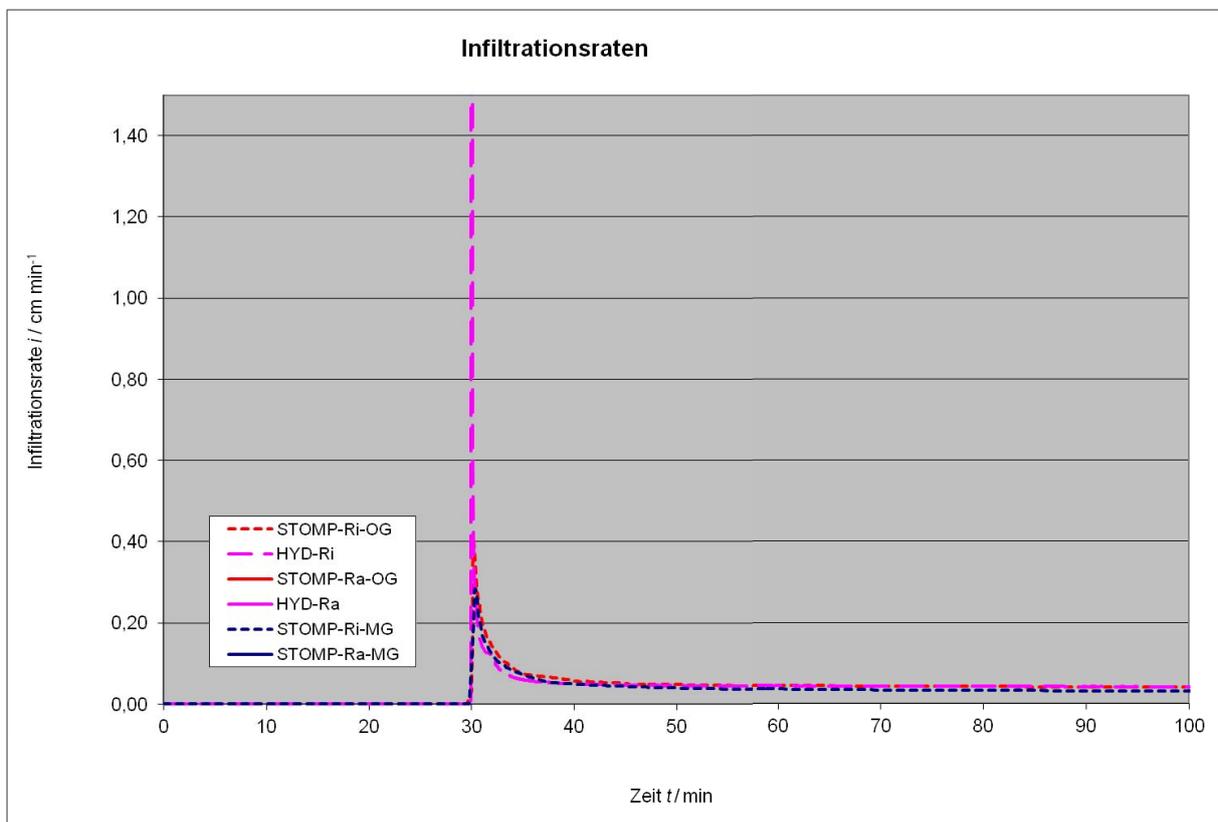
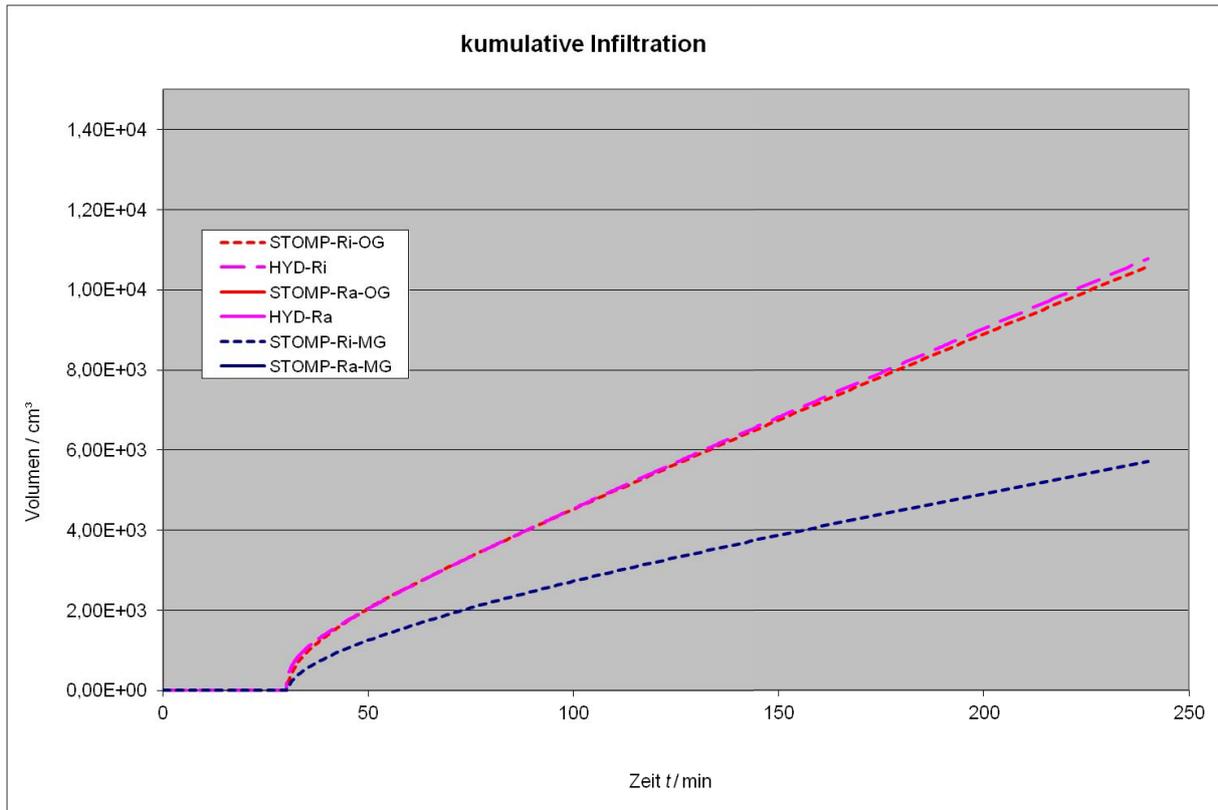
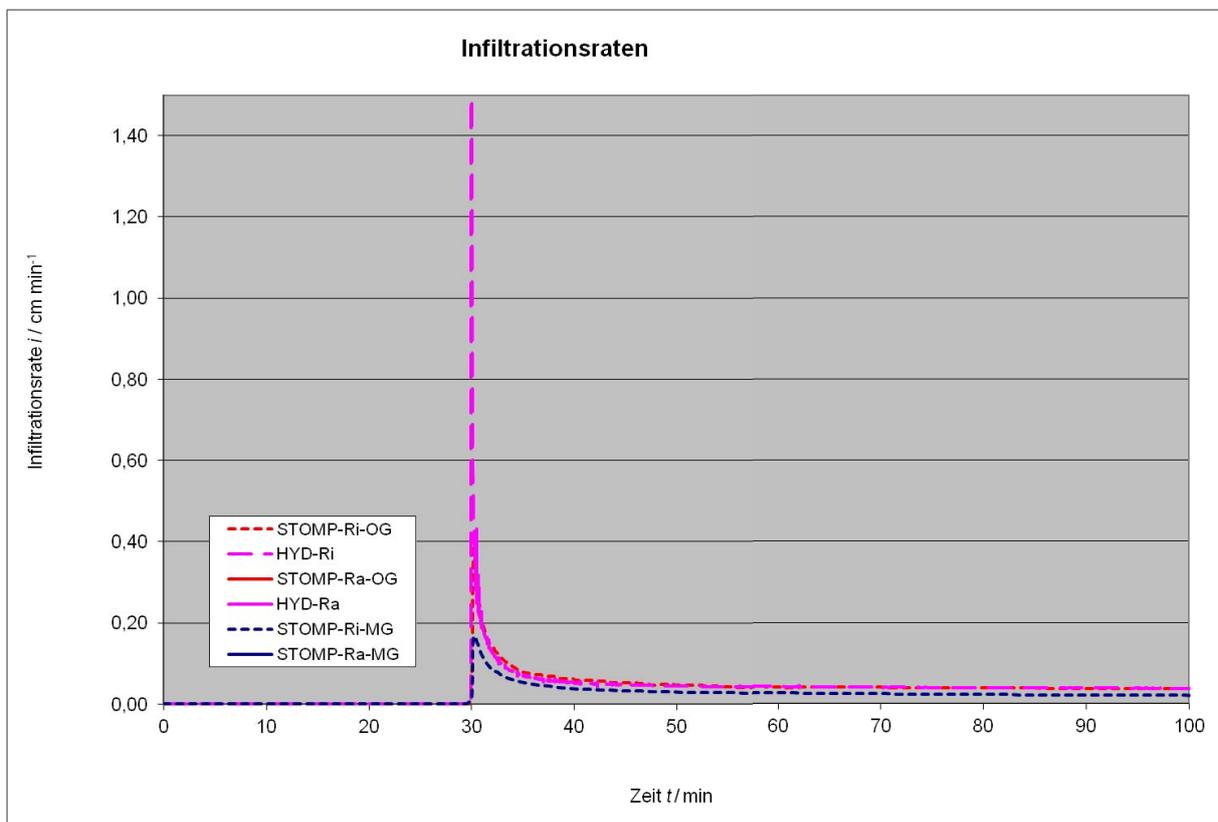
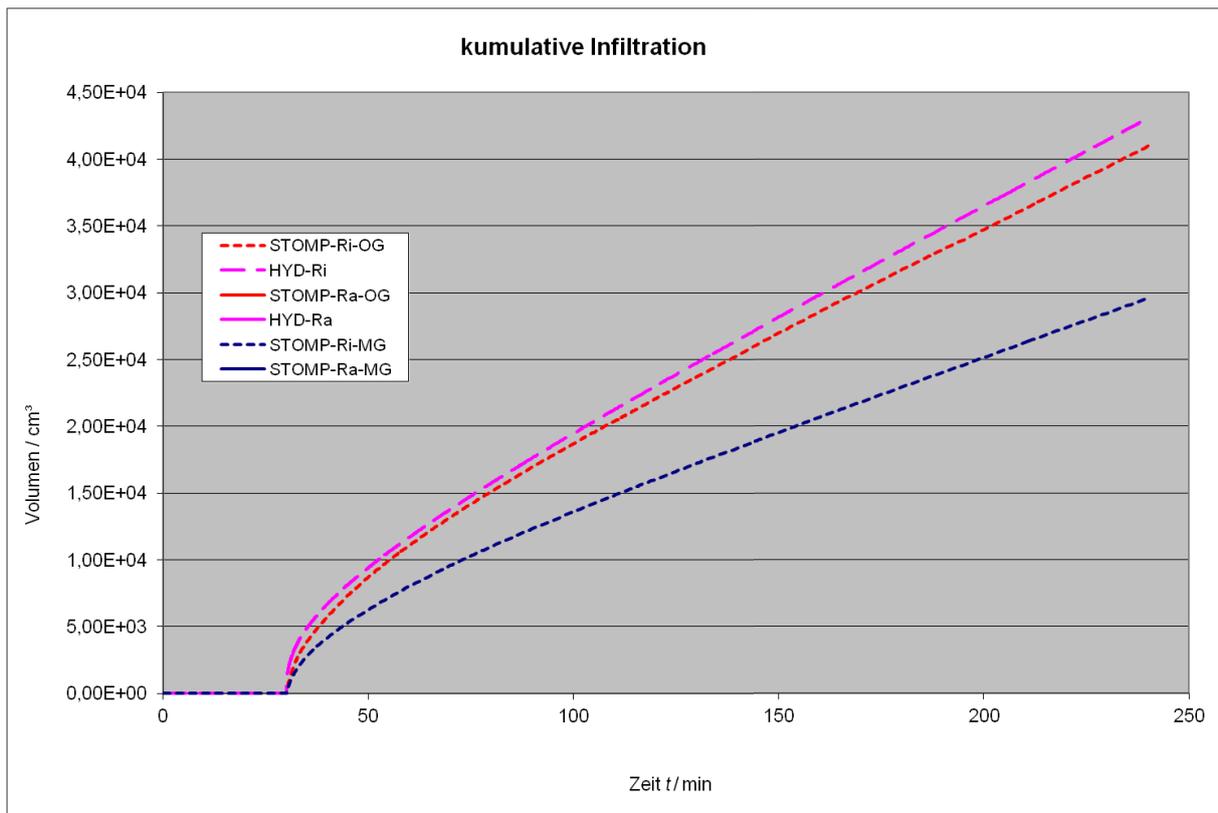
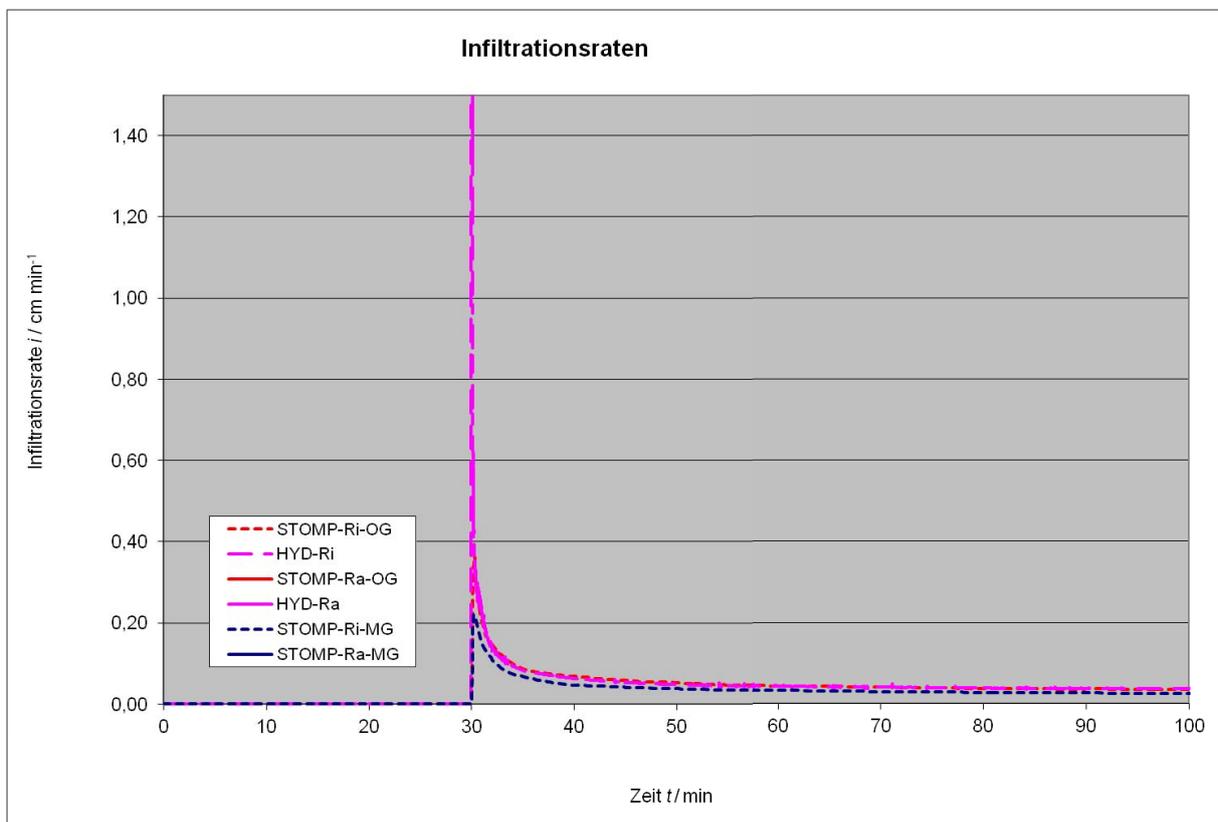
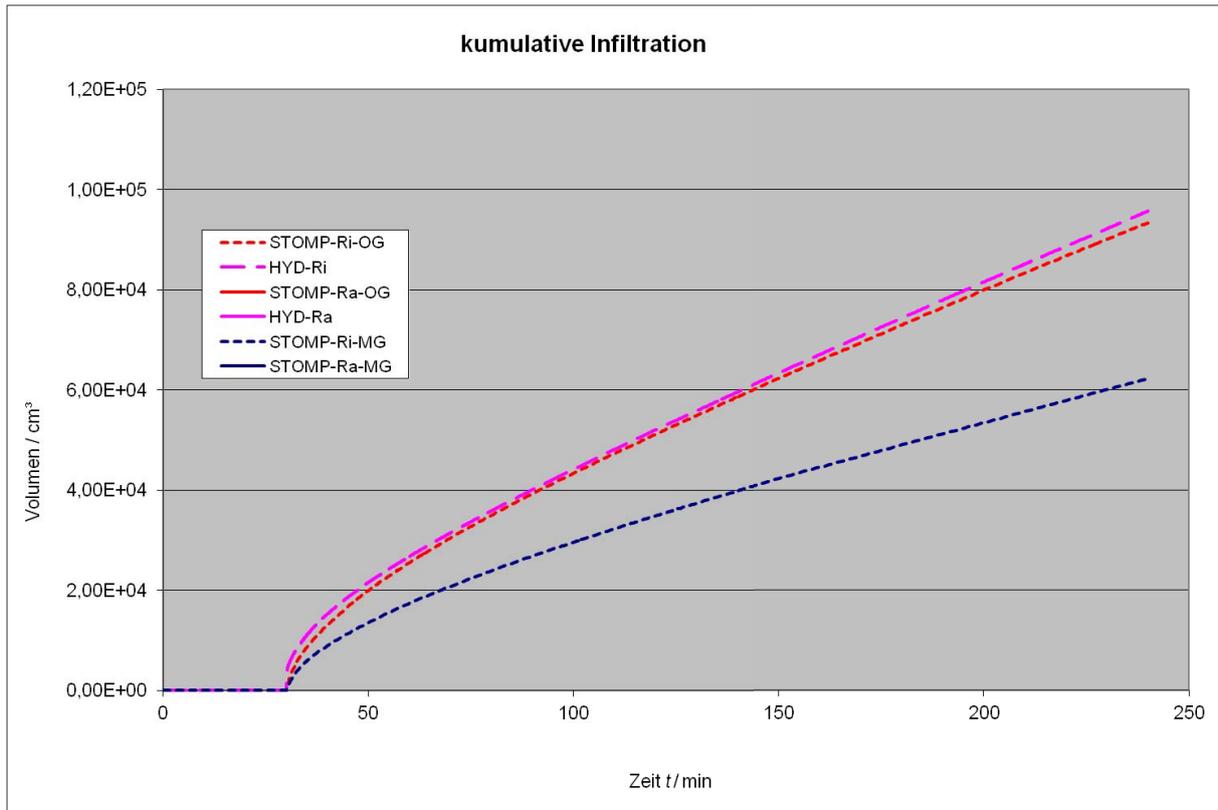
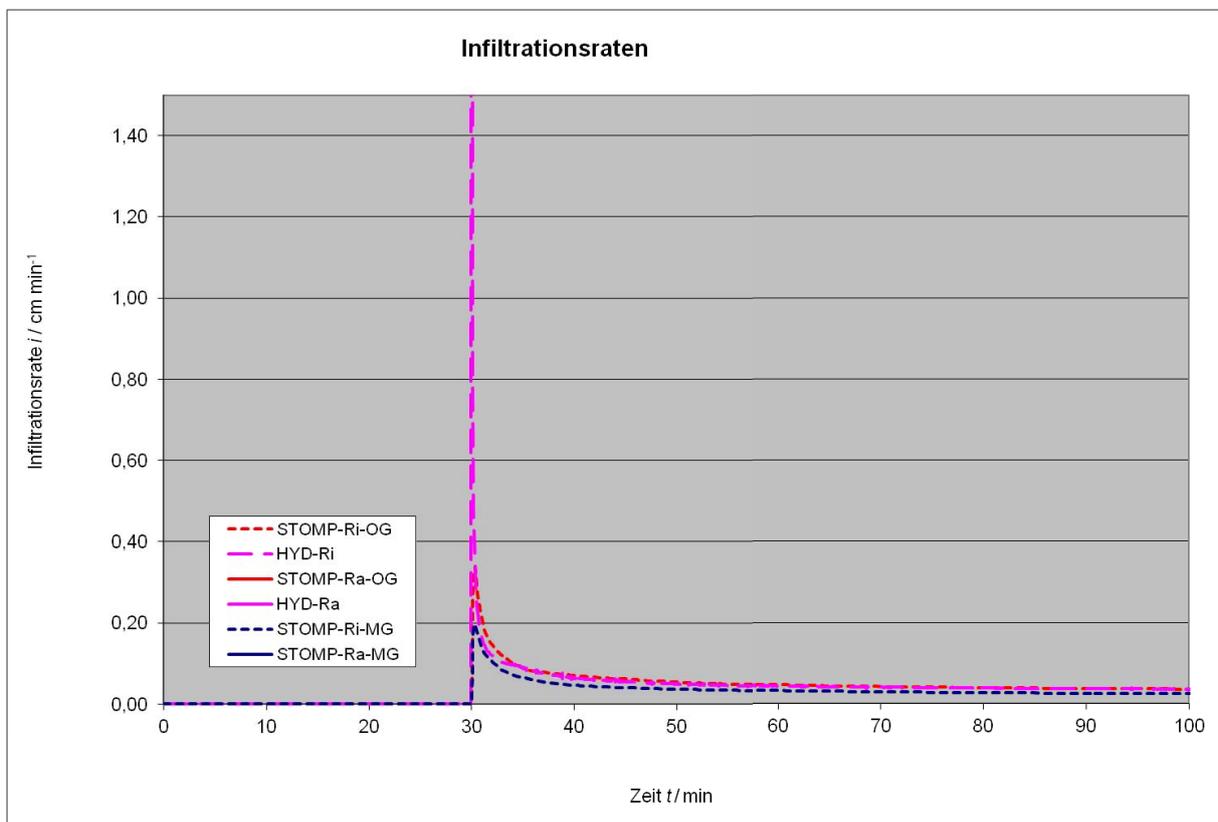


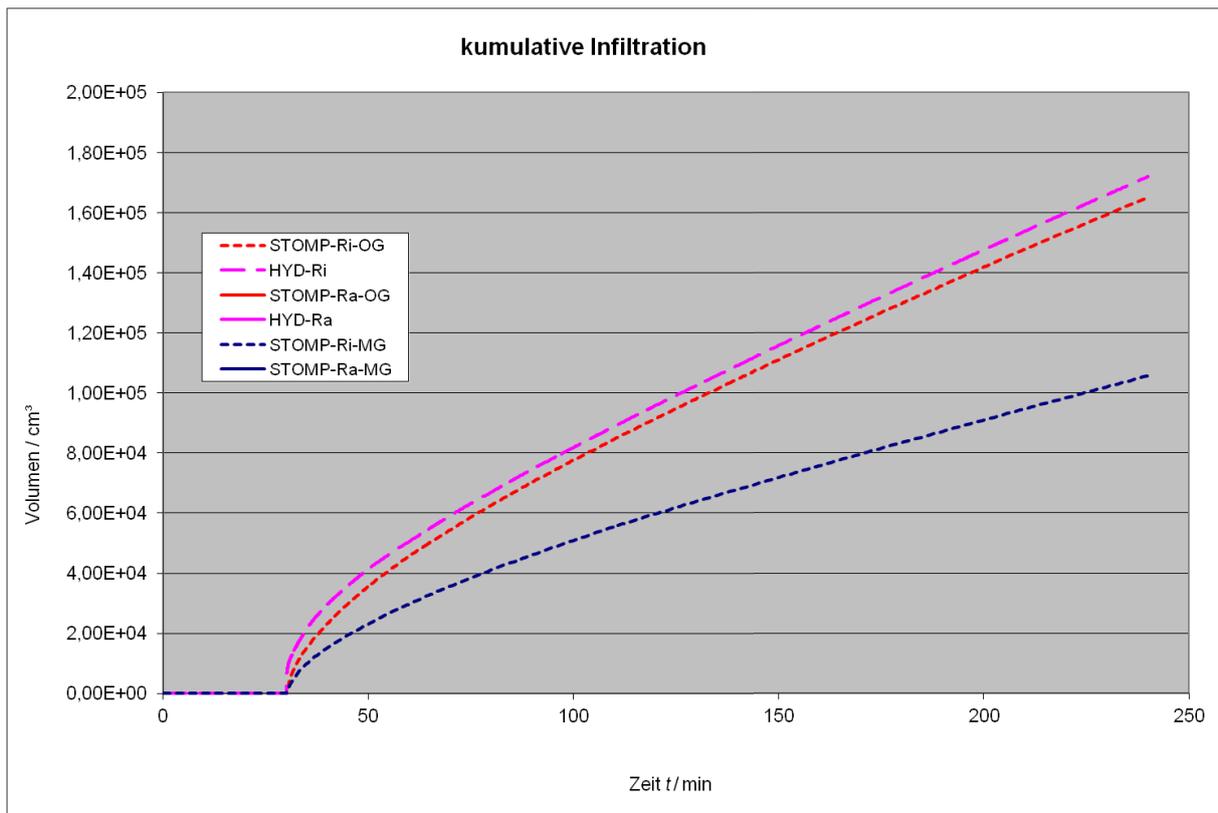
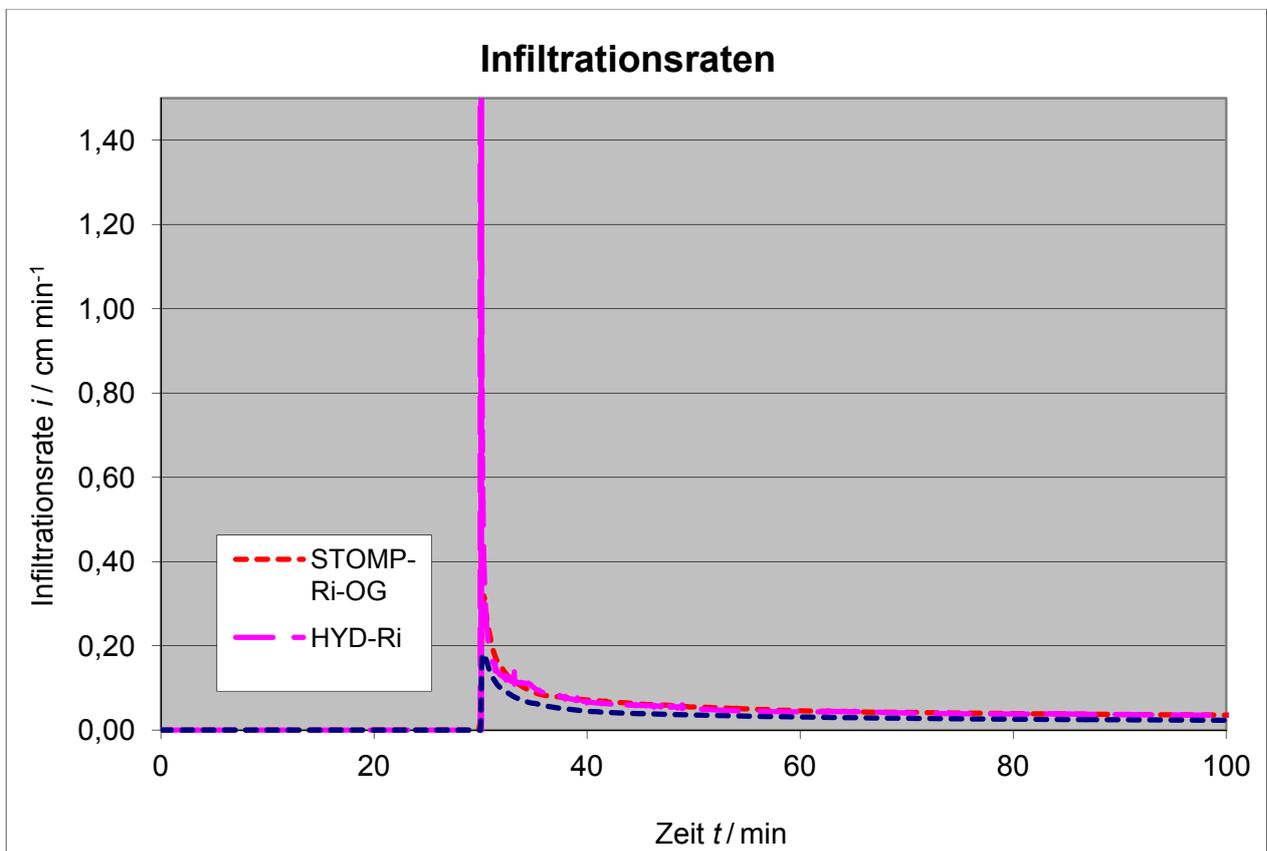
Abb. 151: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 7,0 cm

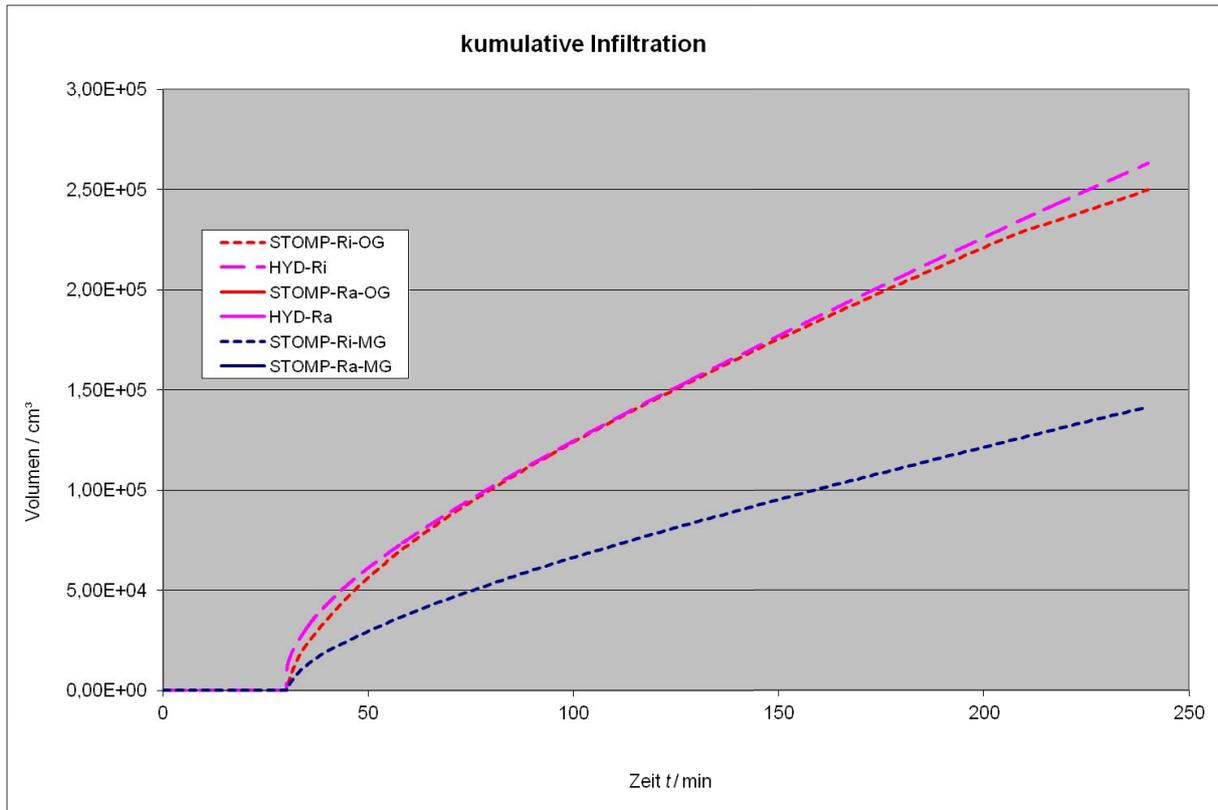
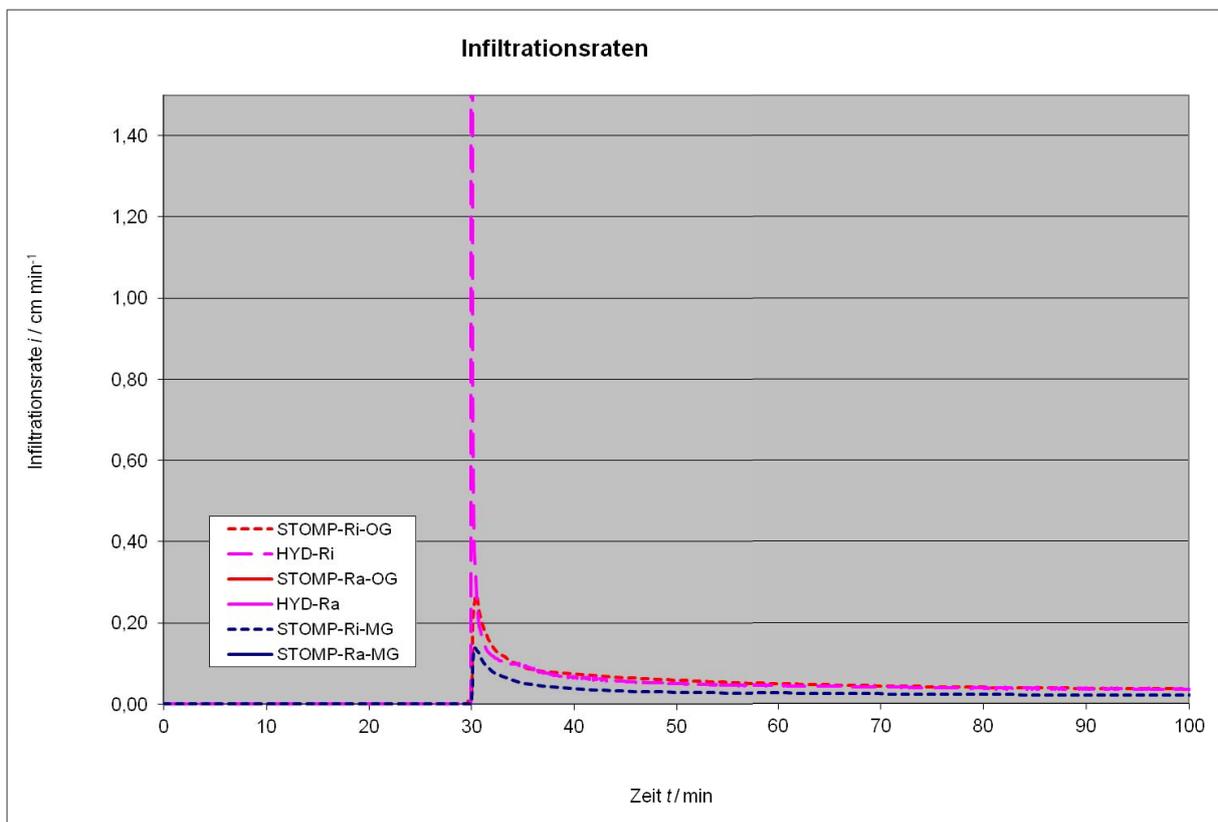
Bodenvariante 2 – Innenringradius 15,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 152: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cmAbb. 153: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 15,0 cm

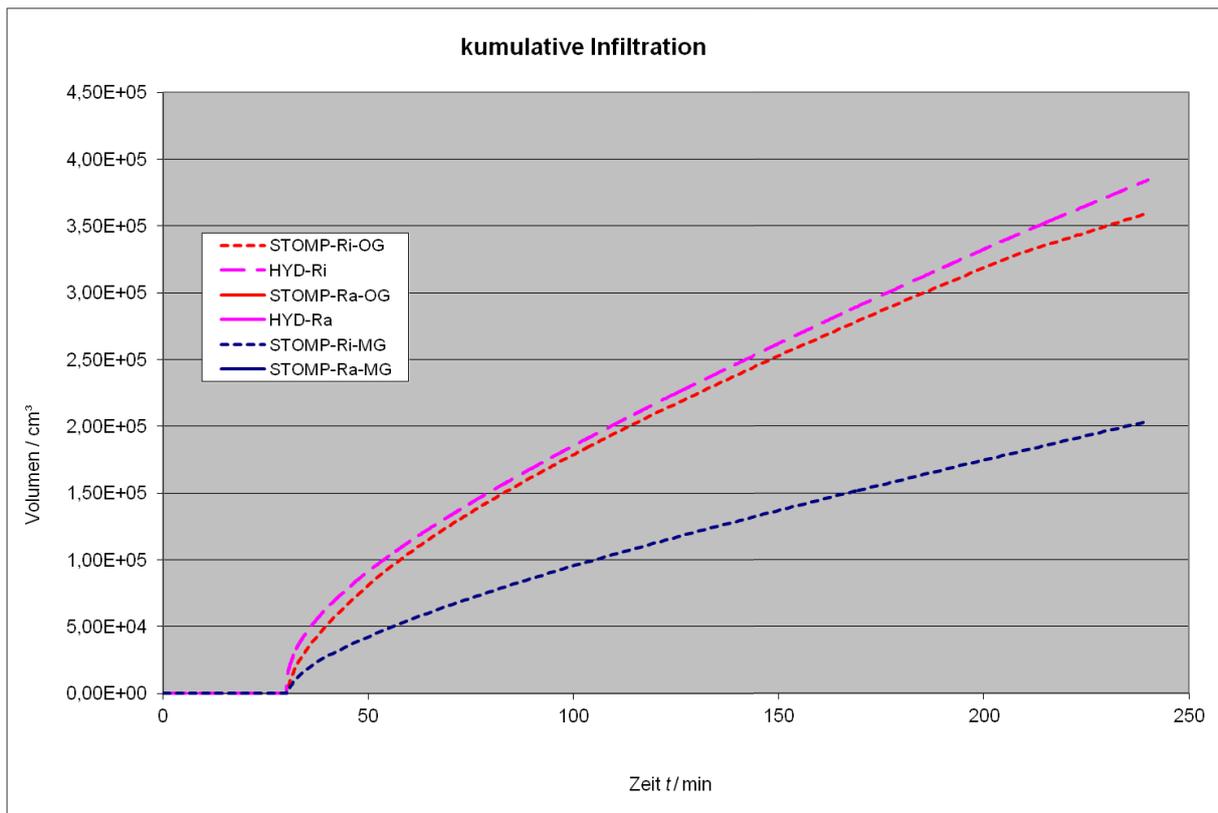
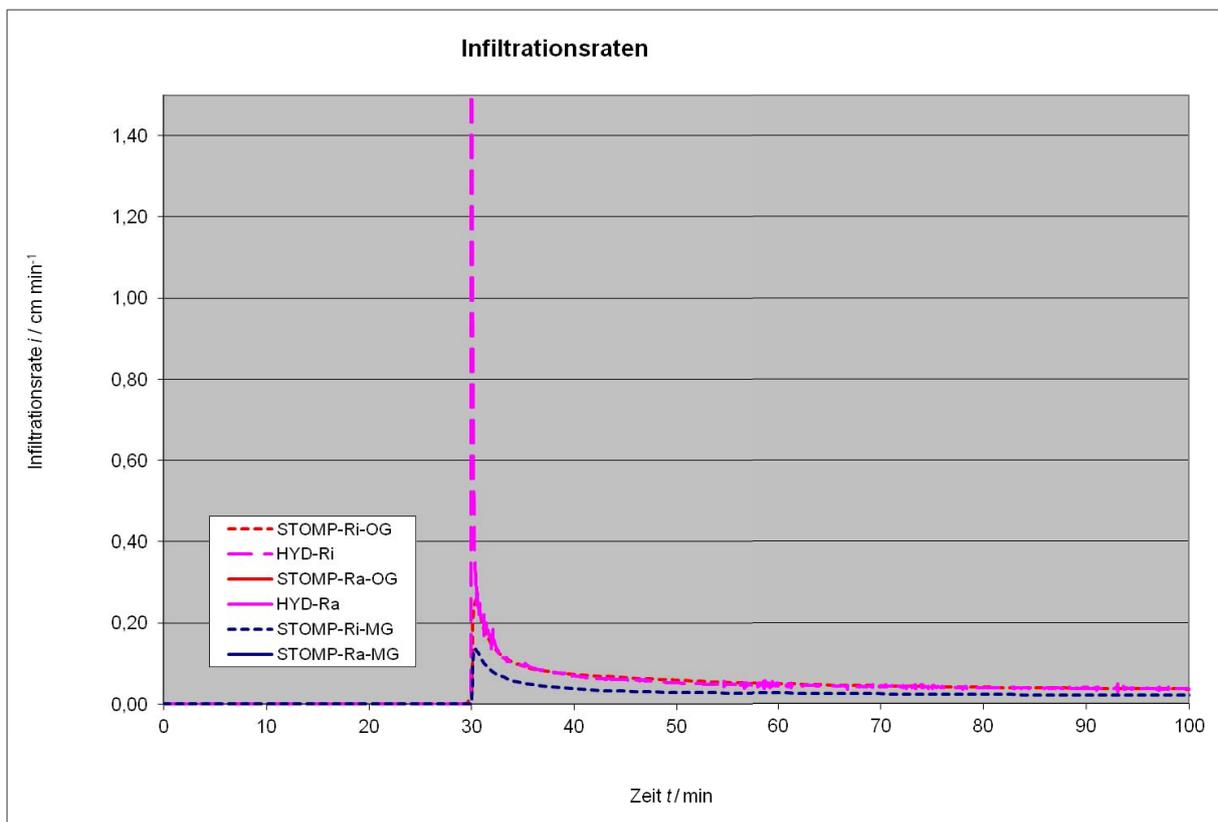
Bodenvariante 2 – Innenringradius 20,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 154: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cmAbb. 155: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 20,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 40,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 156: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cmAbb. 157: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 40,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 60,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 158: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cmAbb. 159: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 60,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 80,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 160: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cmAbb. 161: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 100,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 162: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cmAbb. 163: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 100,0 cm

Bodenvariante 2 – Innenringradius 120,0 cm –  $k_{sh}$  – 10 fach überhöhtAbb. 164: kumulative Infiltrationsmenge DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cmAbb. 165: Infiltrationsrate DR – BV 2 –  $k_{sh}$  10fach überhöht – IR = 120,0 cm

## 7.1.8. Einfachringversuche

Bodenvariante 0 – Ringradius 7,0 cm

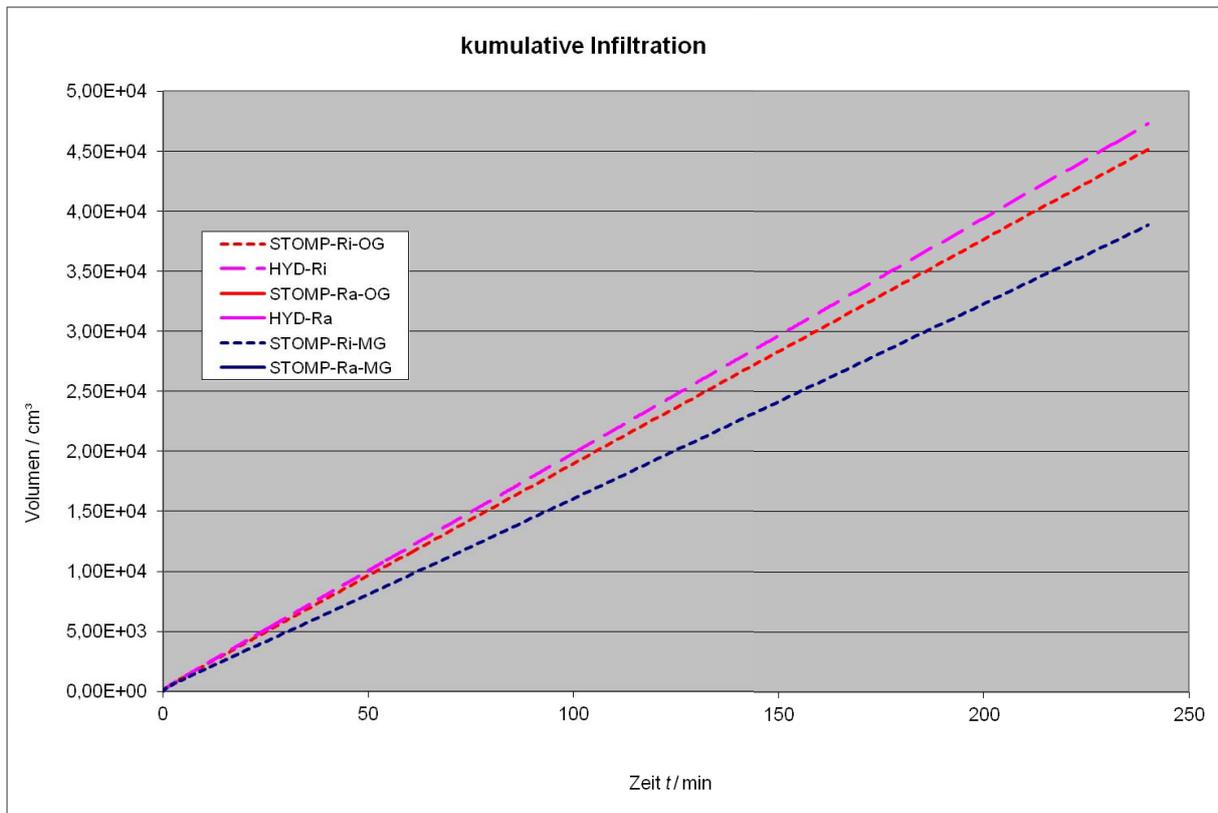


Abb. 166: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 7,0 cm

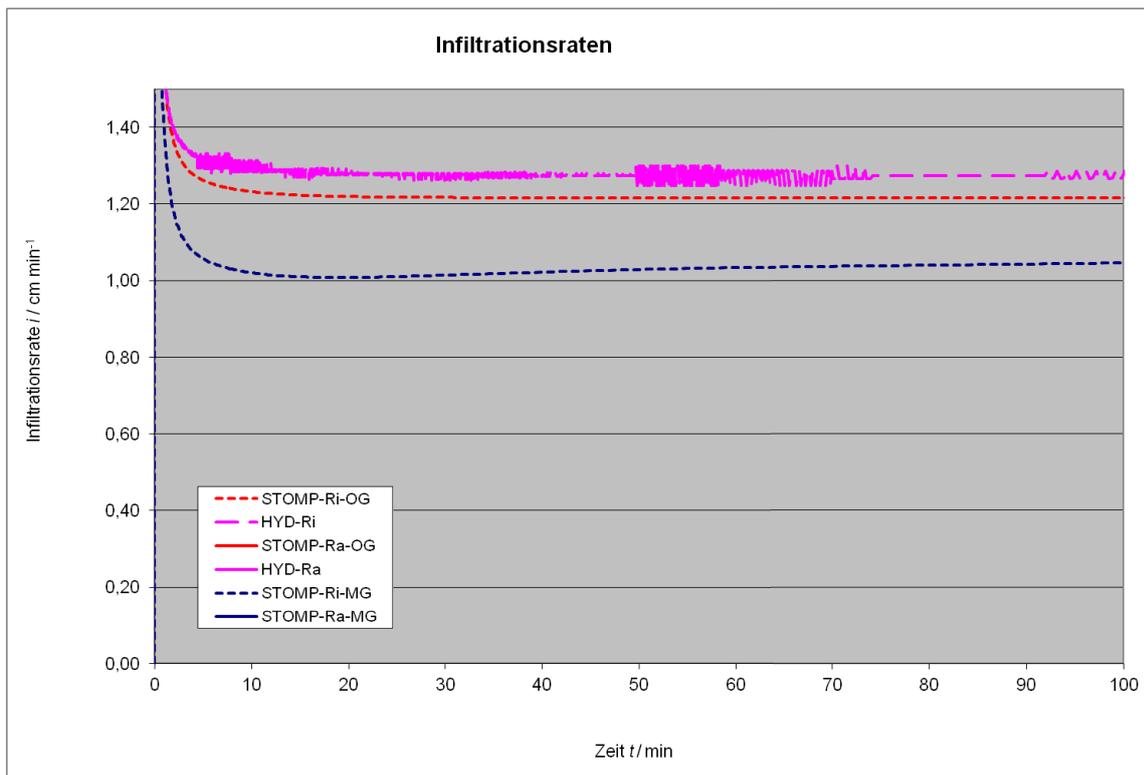


Abb. 167: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 15,0 cm

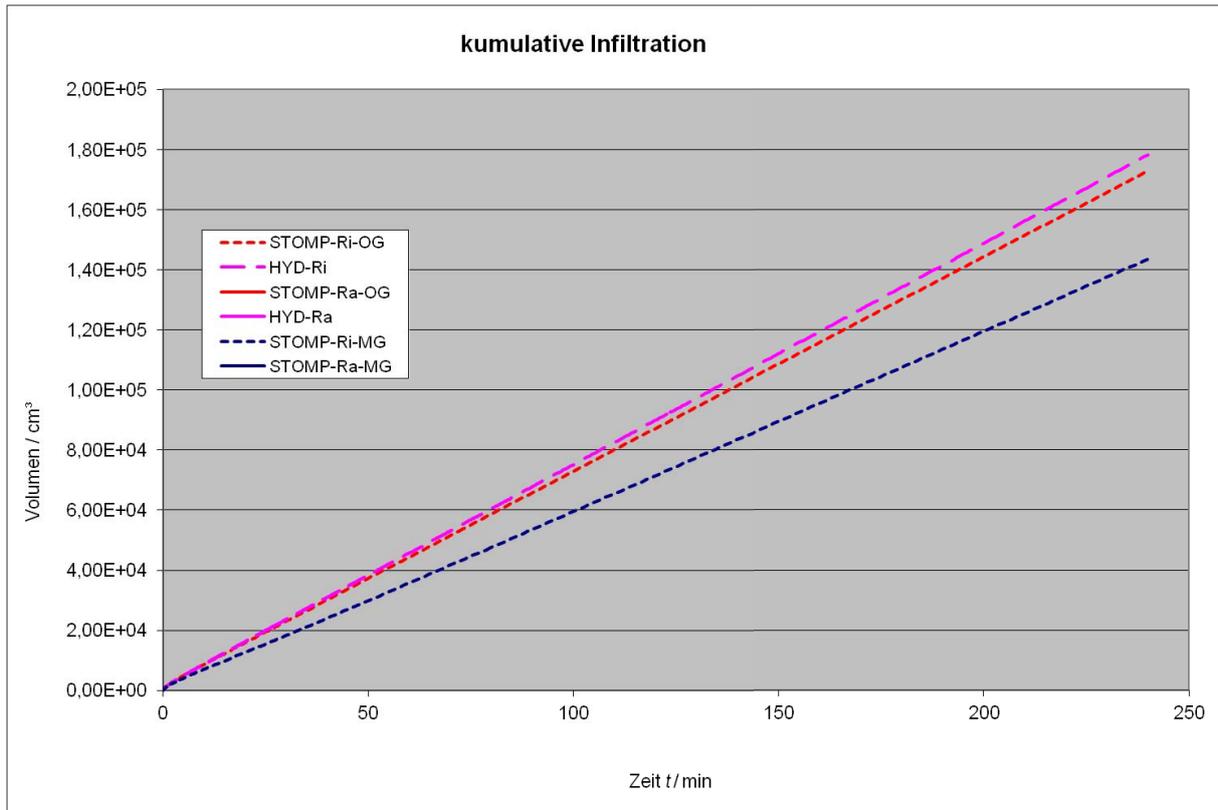


Abb. 168: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 15,0 cm

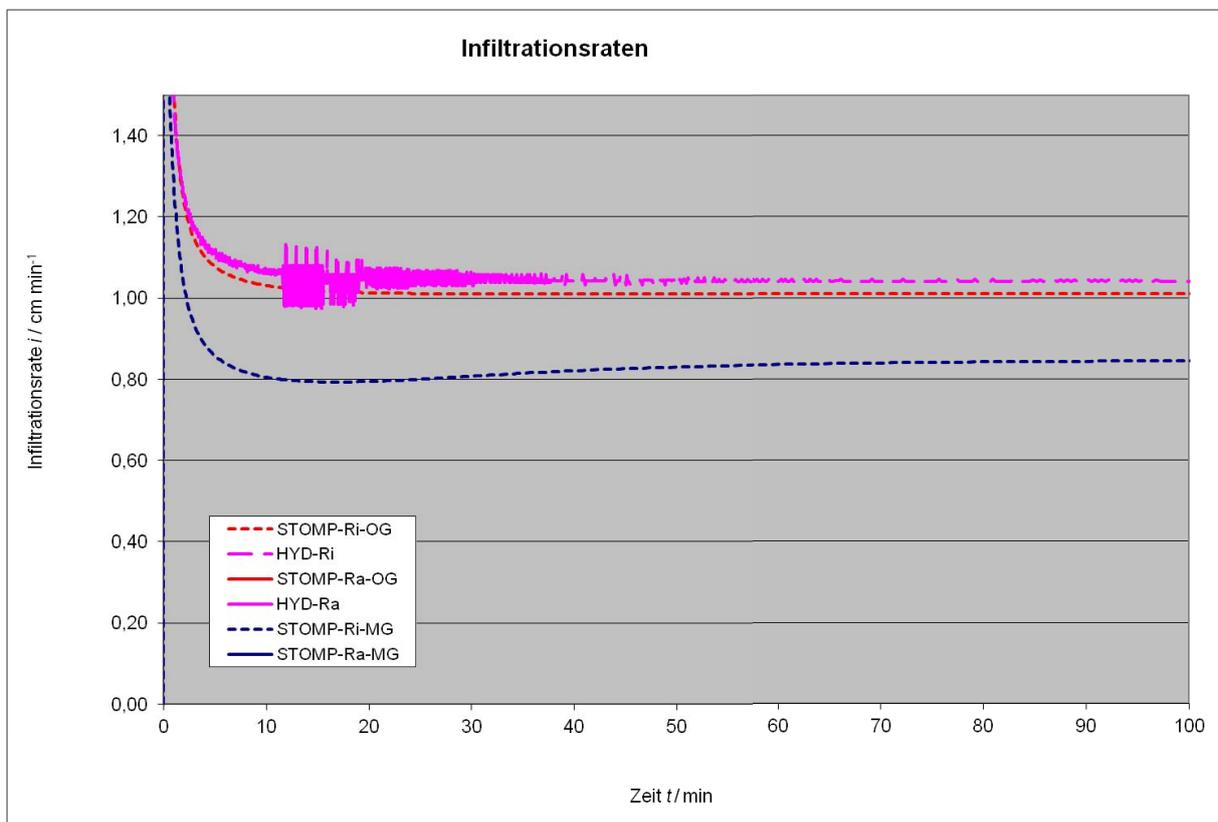


Abb. 169: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 15,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 20,0 cm

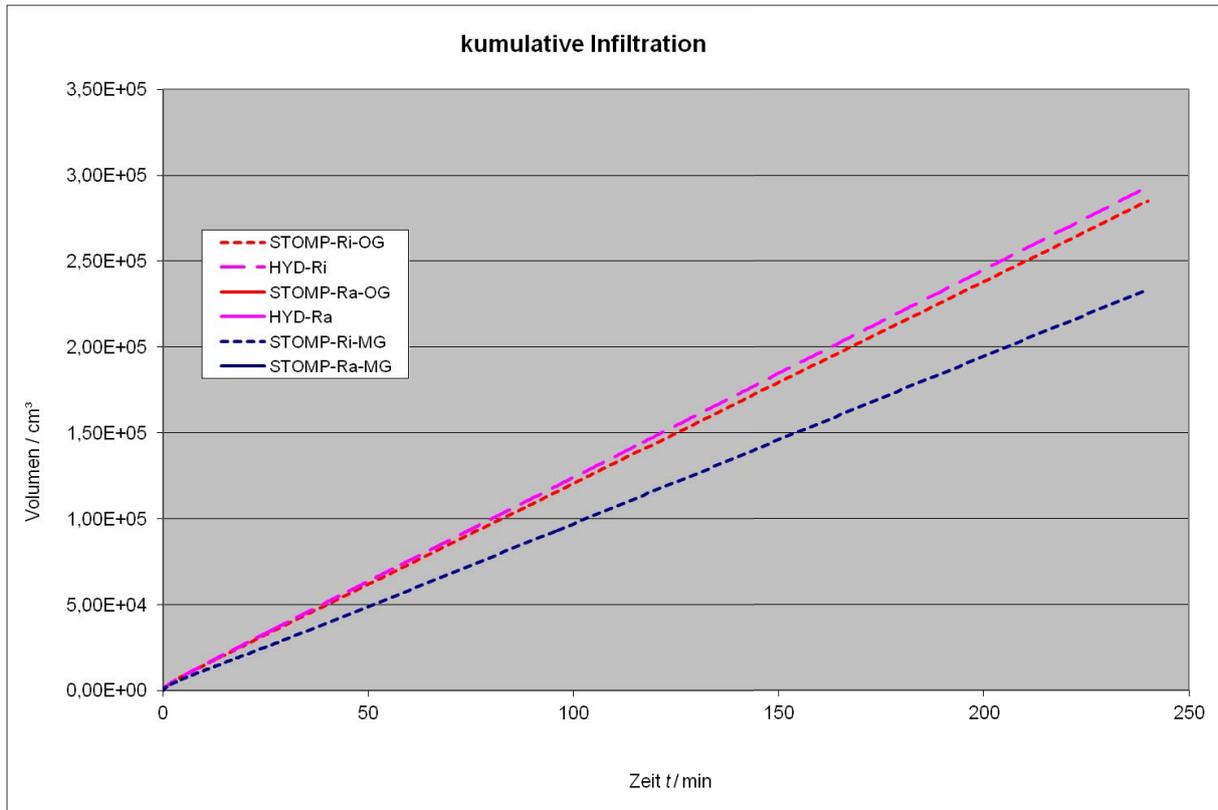


Abb. 170: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 20,0 cm

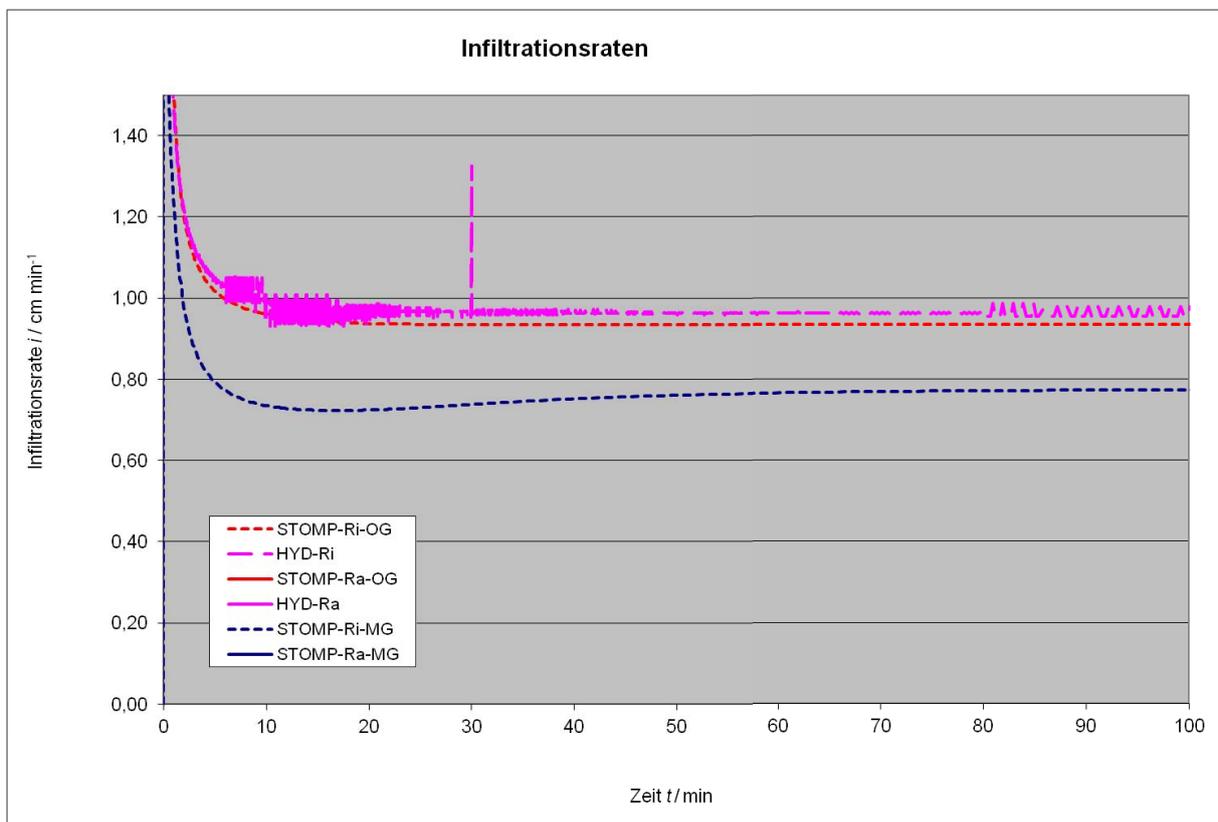


Abb. 171: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 40,0 cm

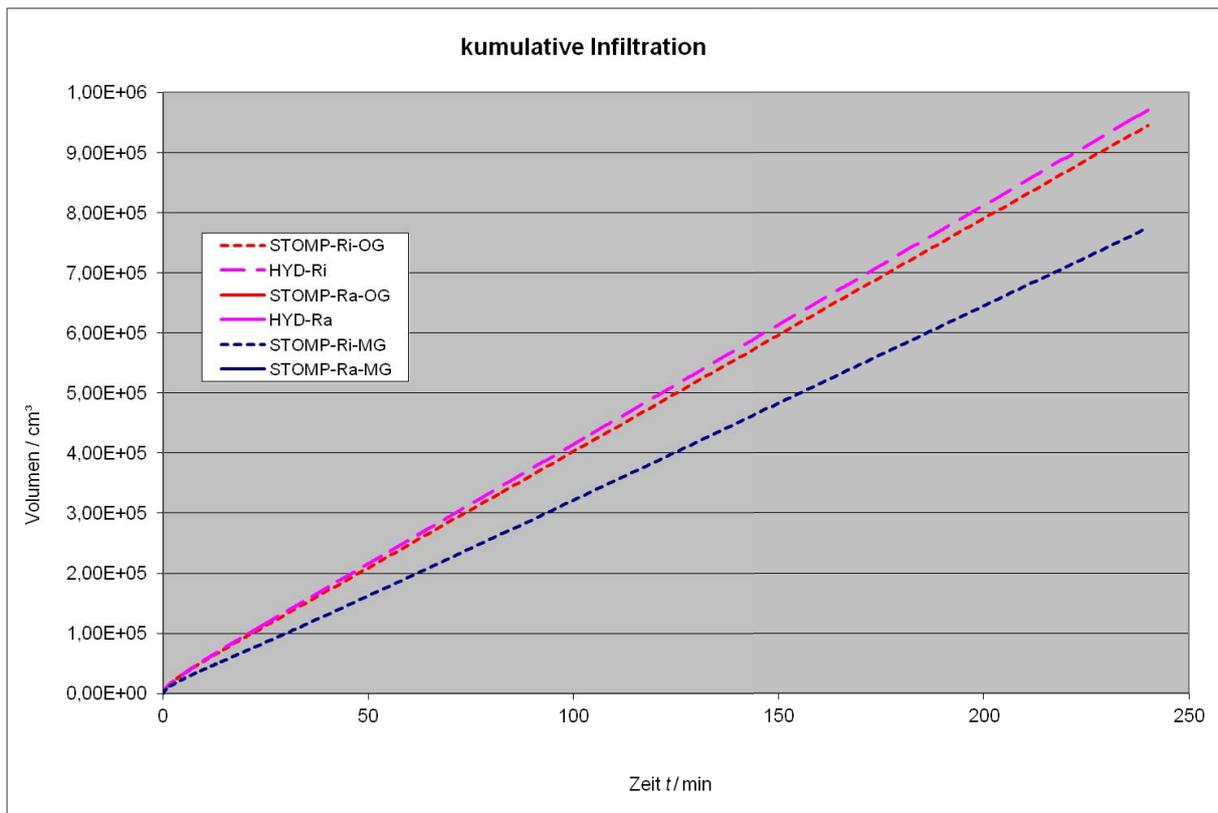


Abb. 172: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 40,0 cm

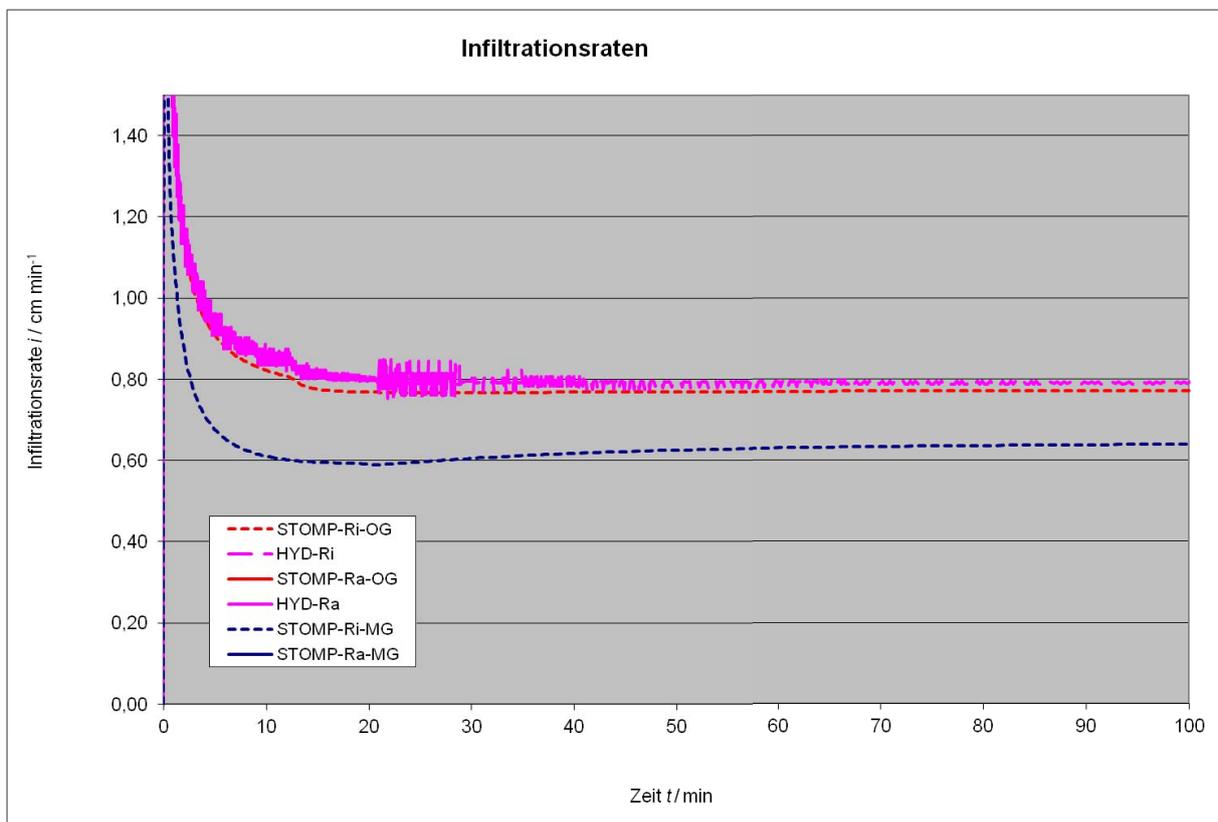


Abb. 173: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 40,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 60,0 cm

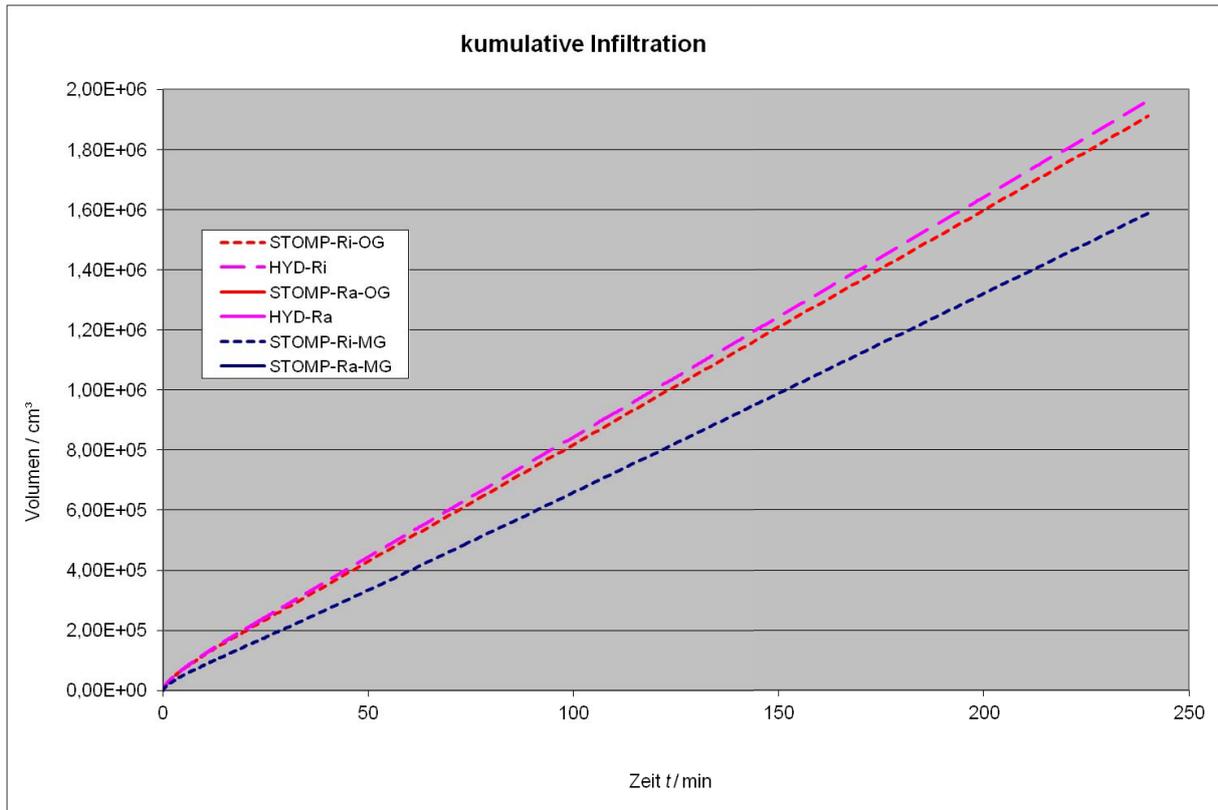


Abb. 174: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 60,0 cm

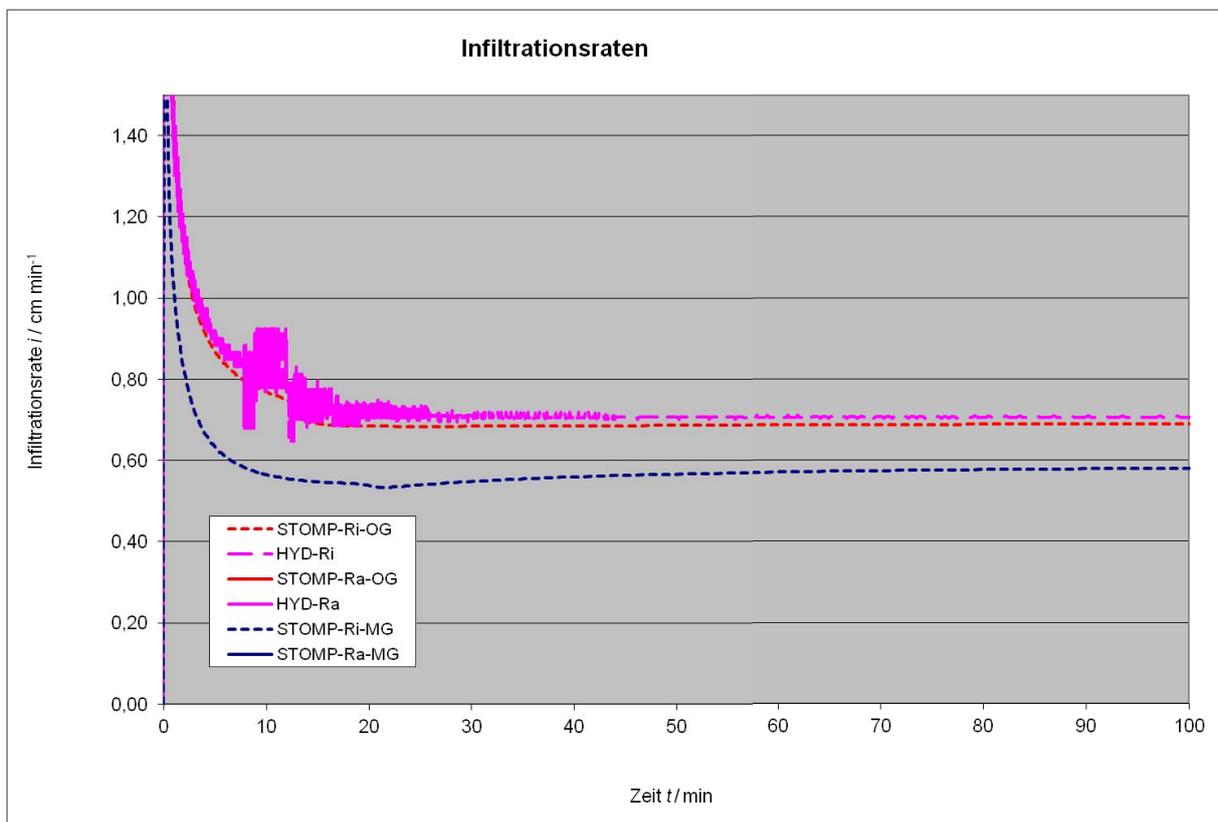


Abb. 175: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 80,0 cm

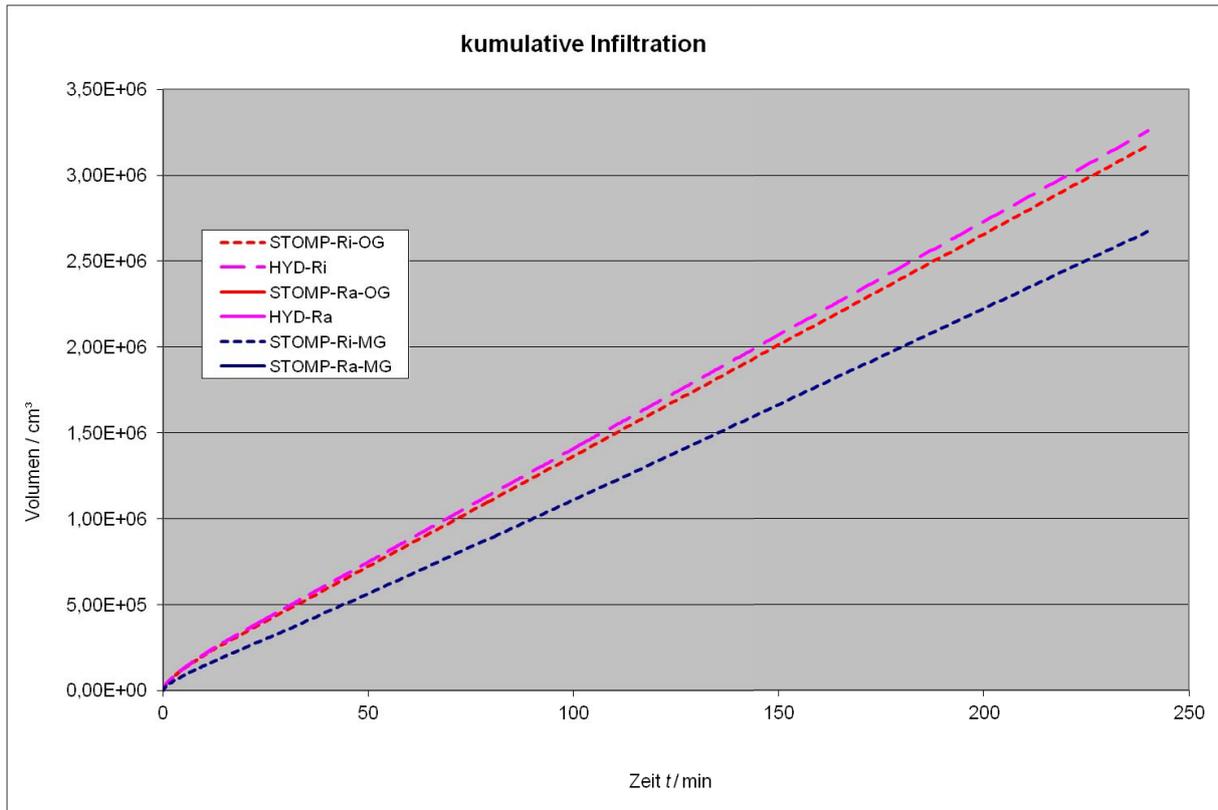


Abb. 176: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 80,0 cm

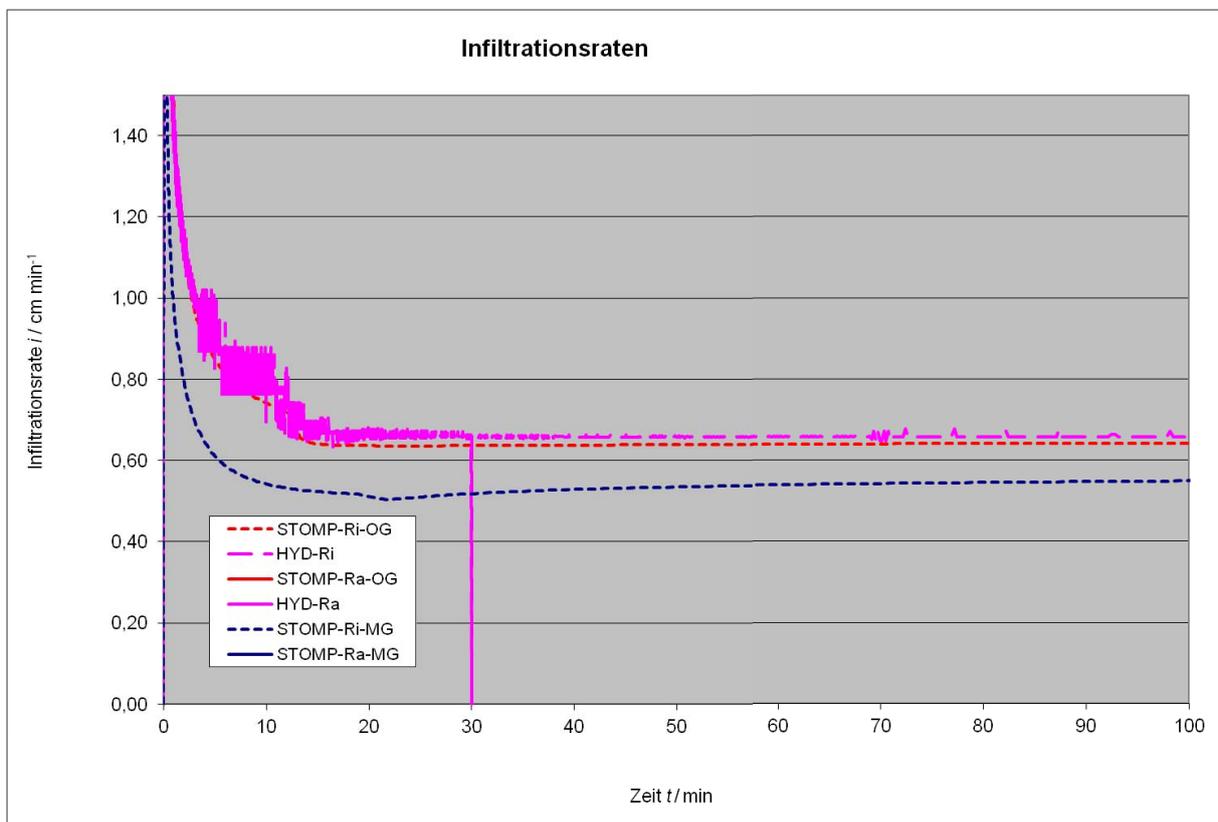


Abb. 177: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 80,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 100,0 cm

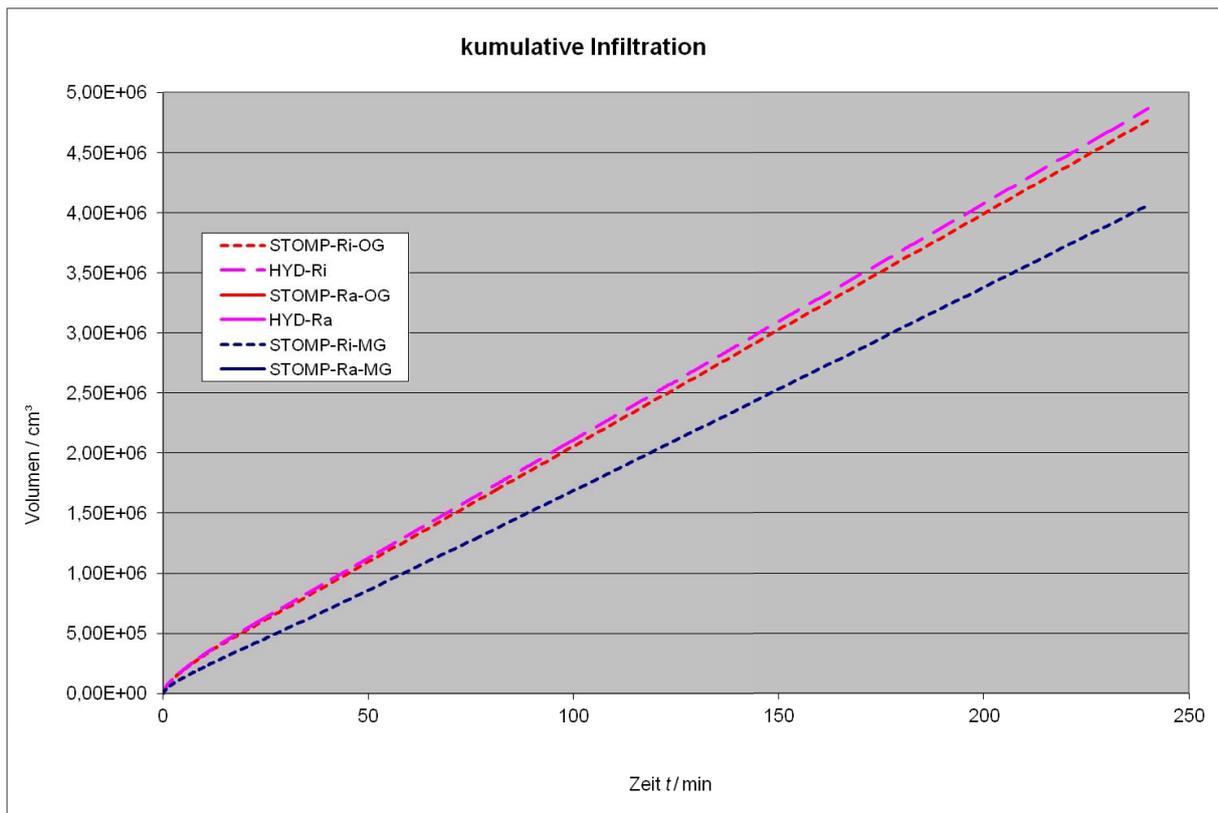


Abb. 178: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 100,0 cm

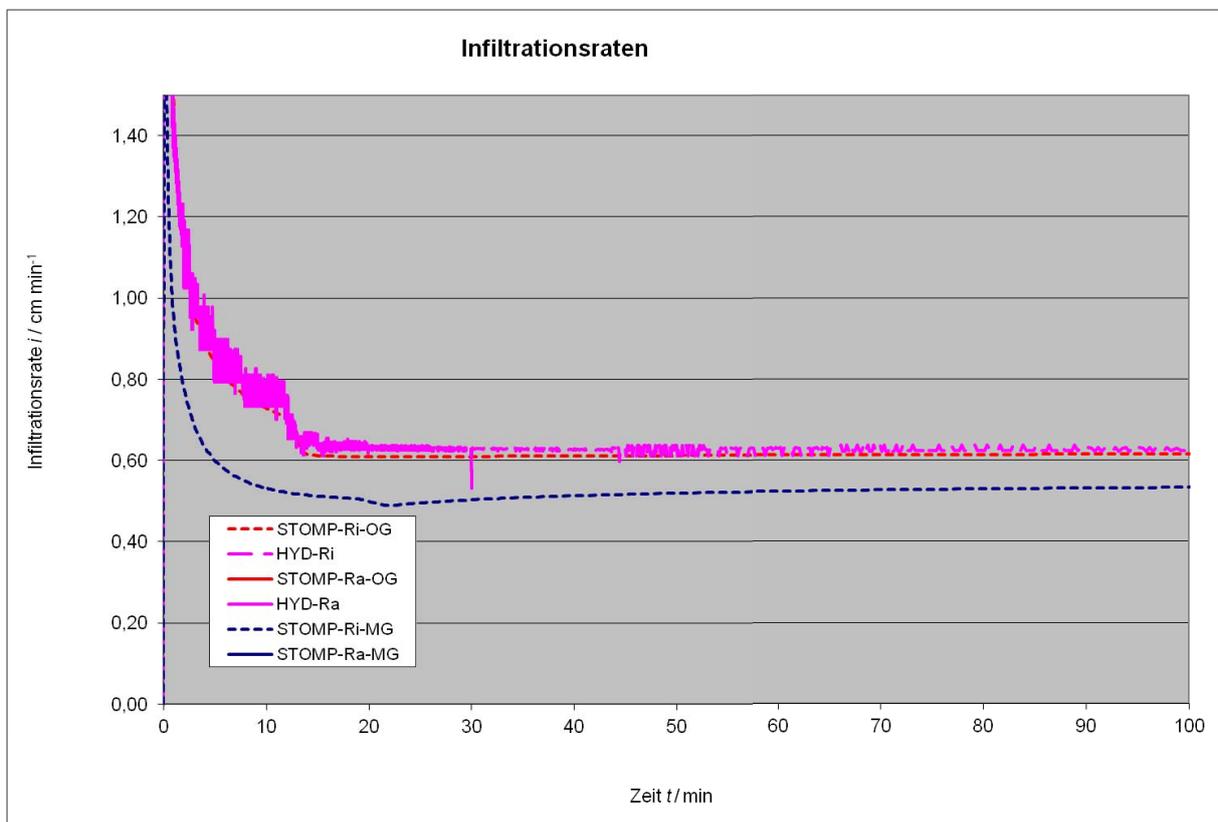


Abb. 179: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 0 – Ringradius 120,0 cm

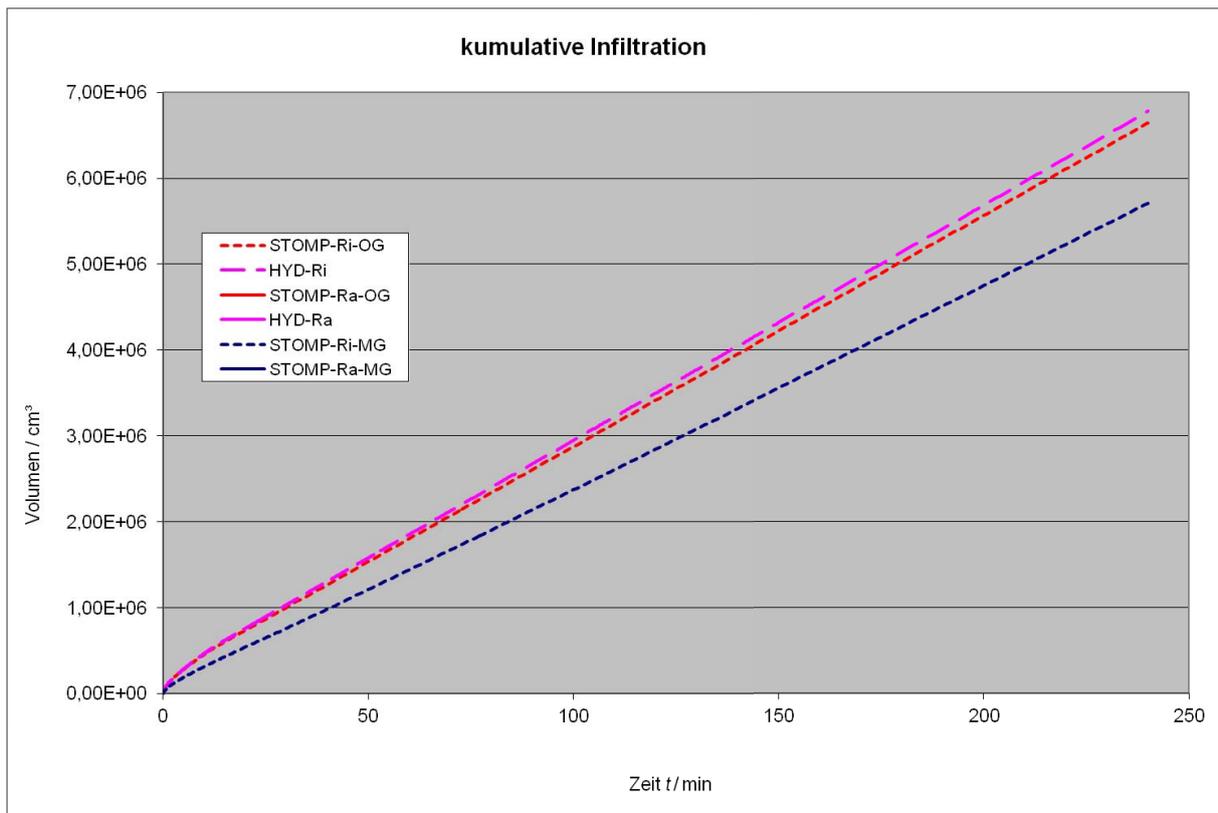


Abb. 180: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 0 – IR = 120,0 cm

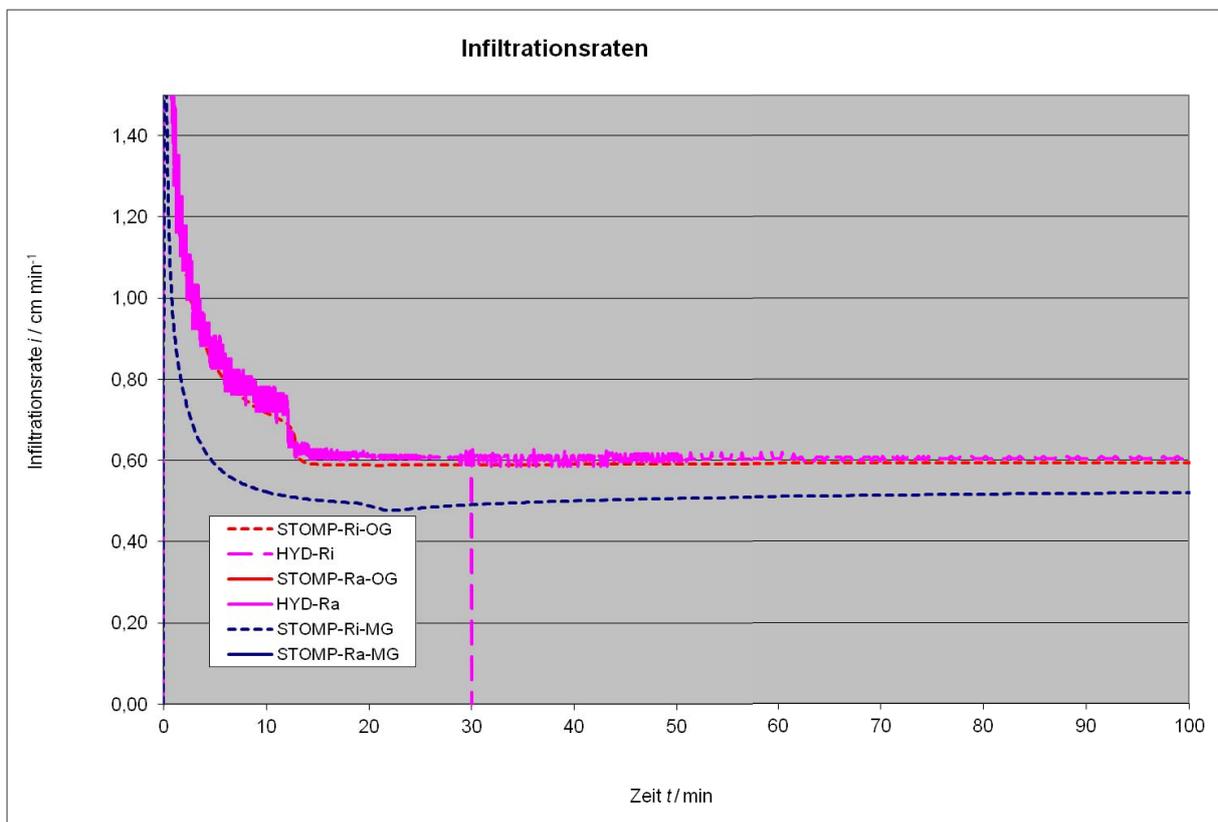


Abb. 181: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 120,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 7,0 cm

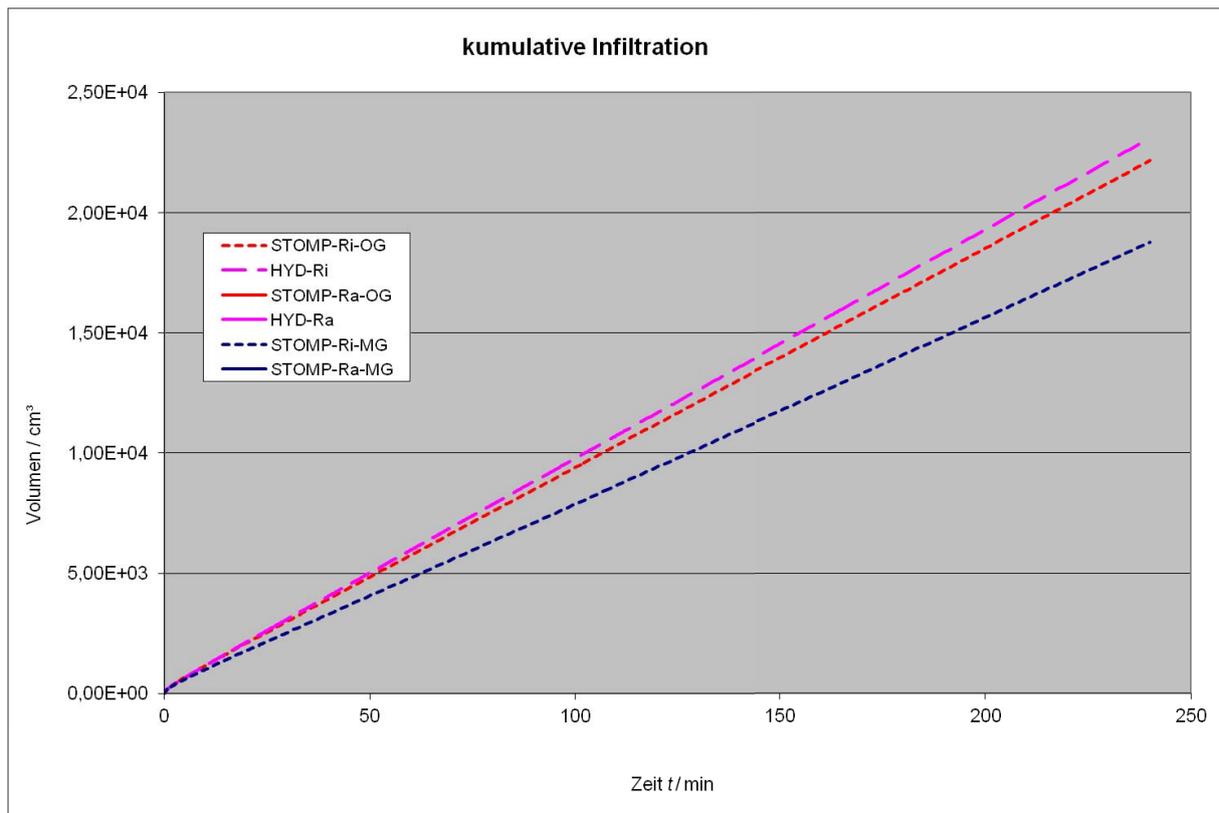


Abb. 182: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 7,0 cm

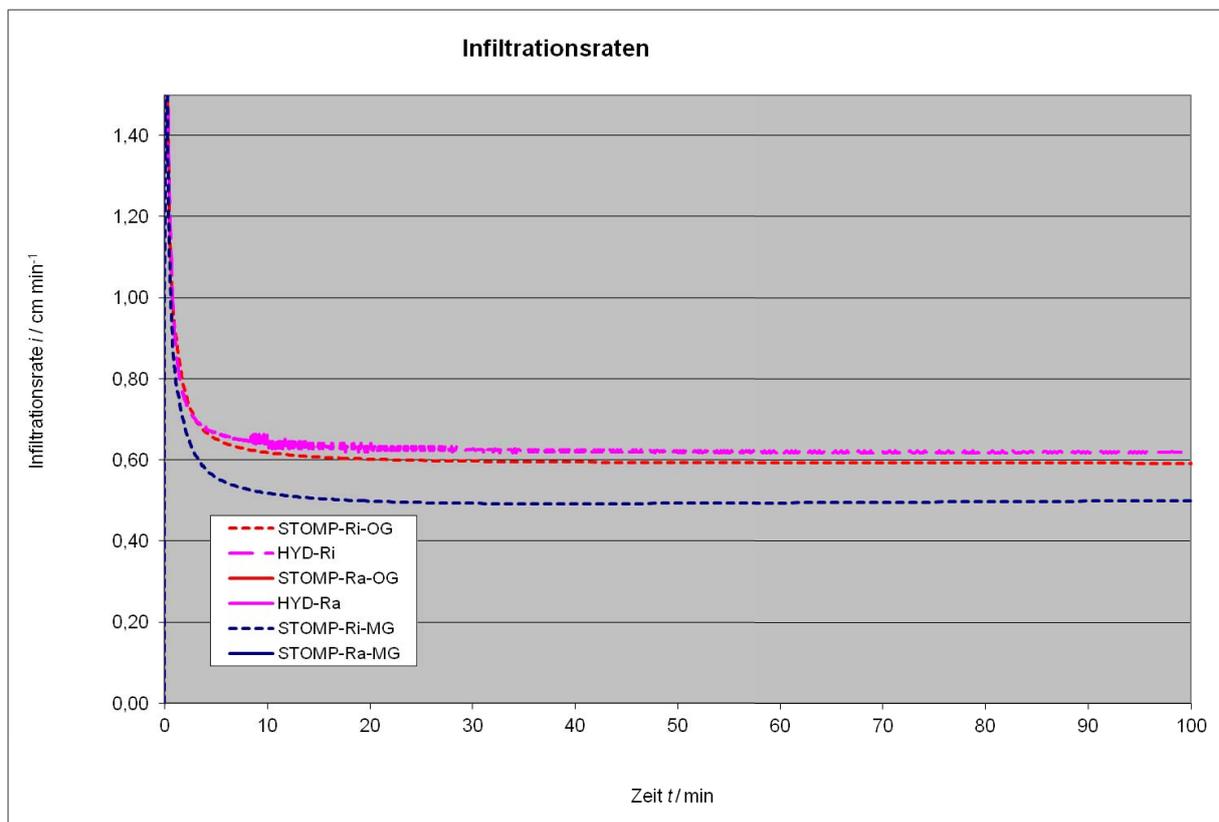


Abb. 183: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 15,0 cm

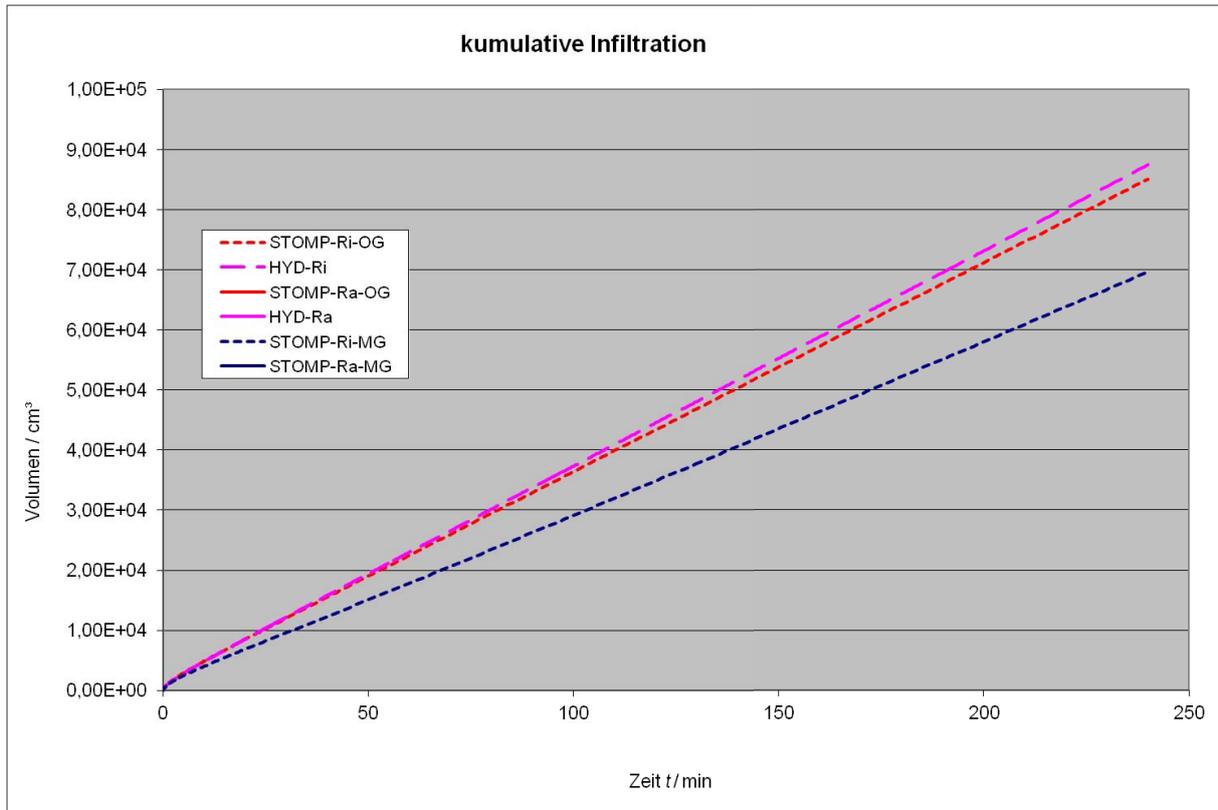


Abb. 184: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 15,0 cm

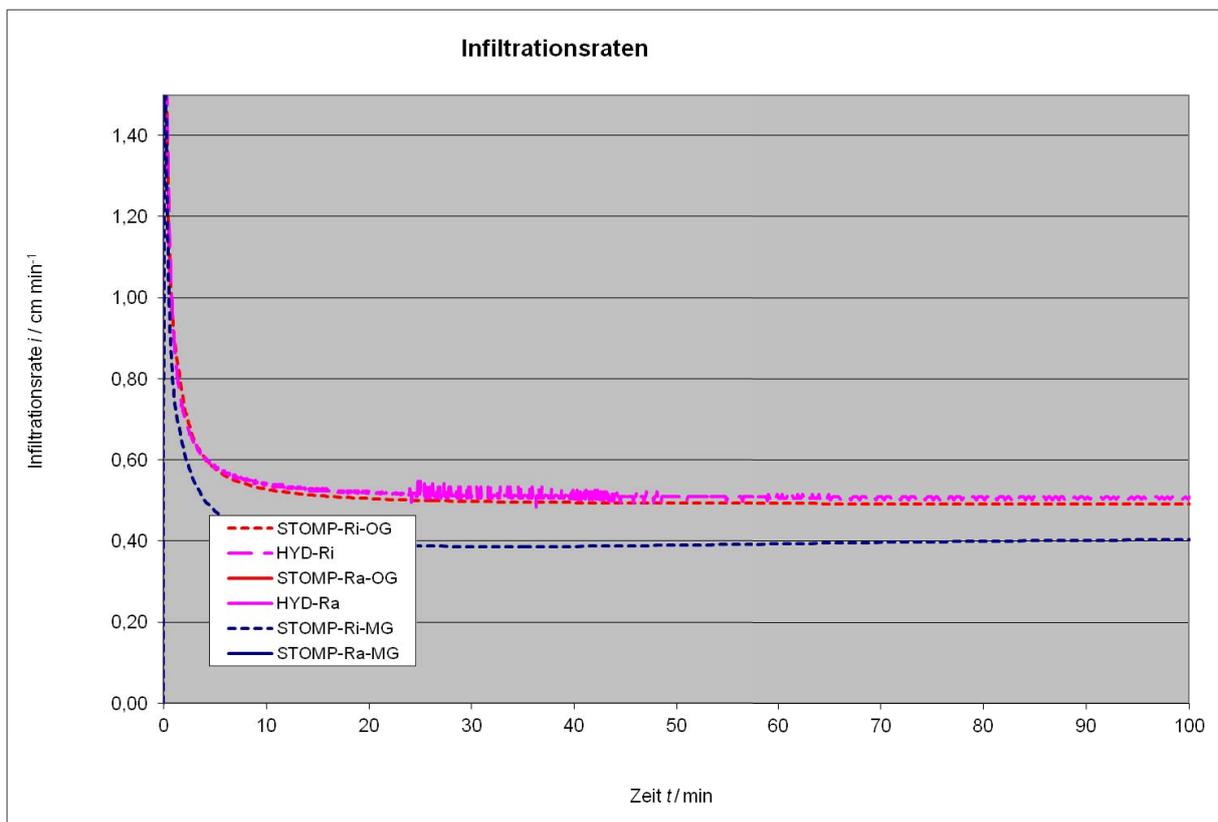


Abb. 185: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 15,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 20,0 cm

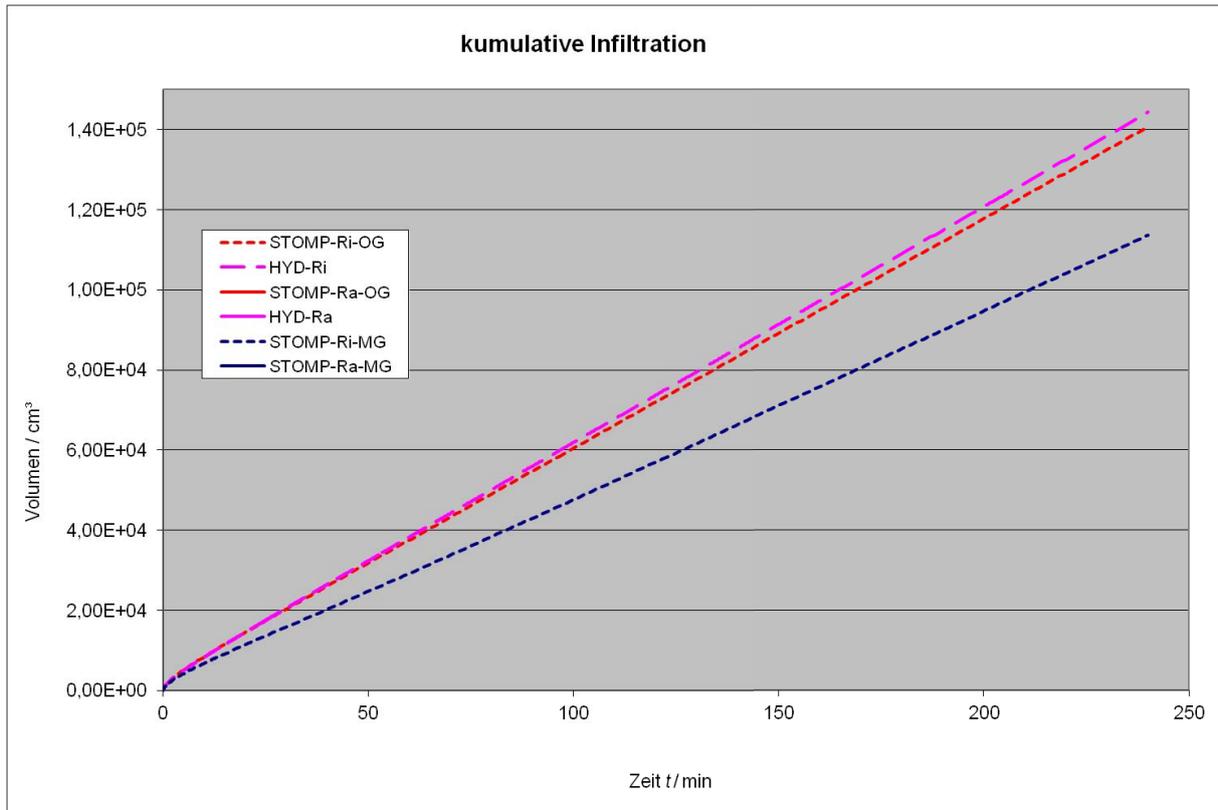


Abb. 186: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 20,0 cm

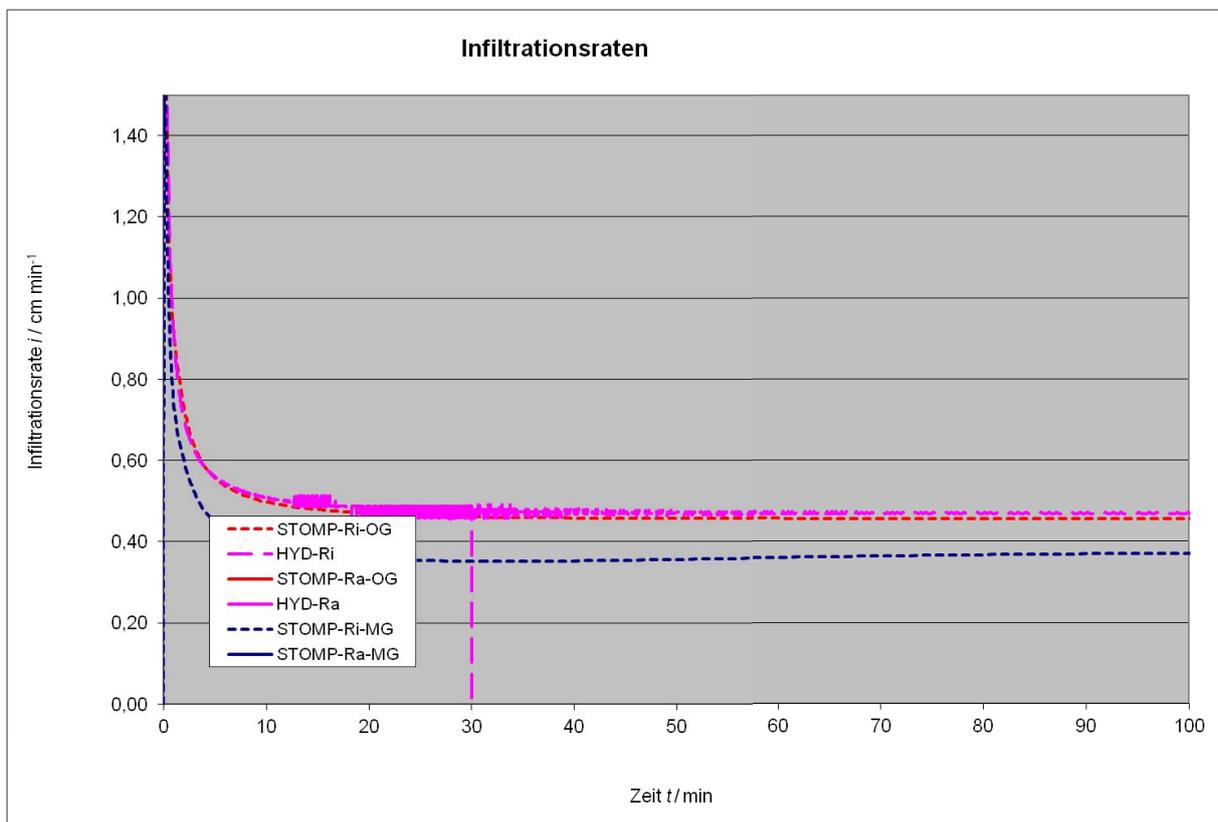


Abb. 187: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 40,0 cm

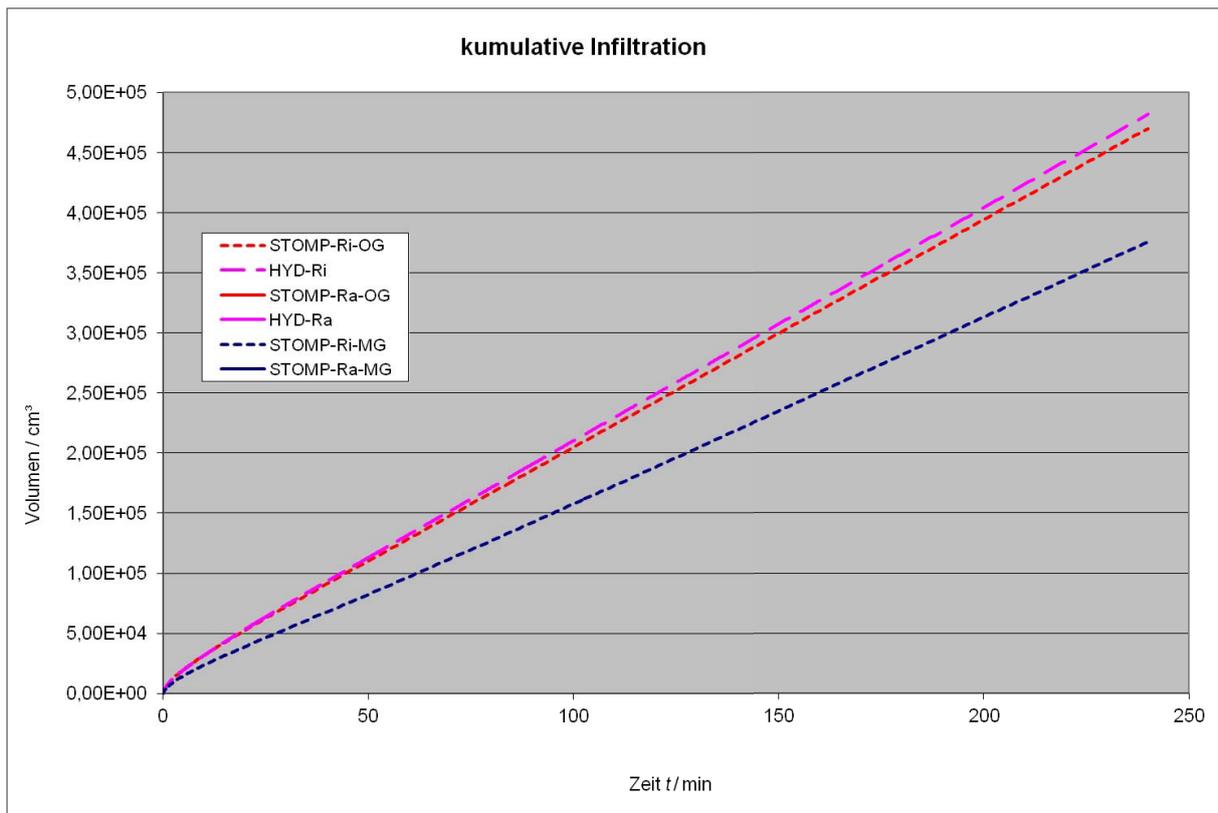


Abb. 188: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 40,0 cm

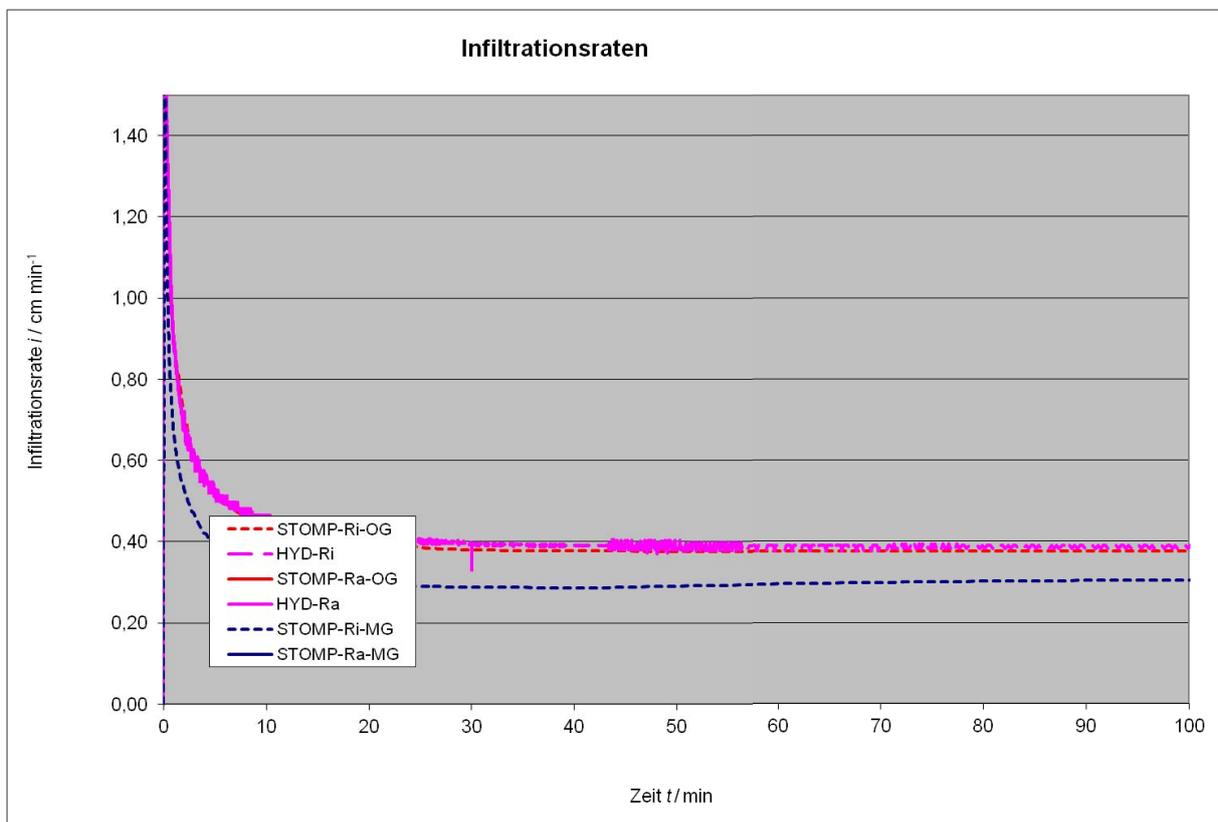


Abb. 189: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 40,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 60,0 cm

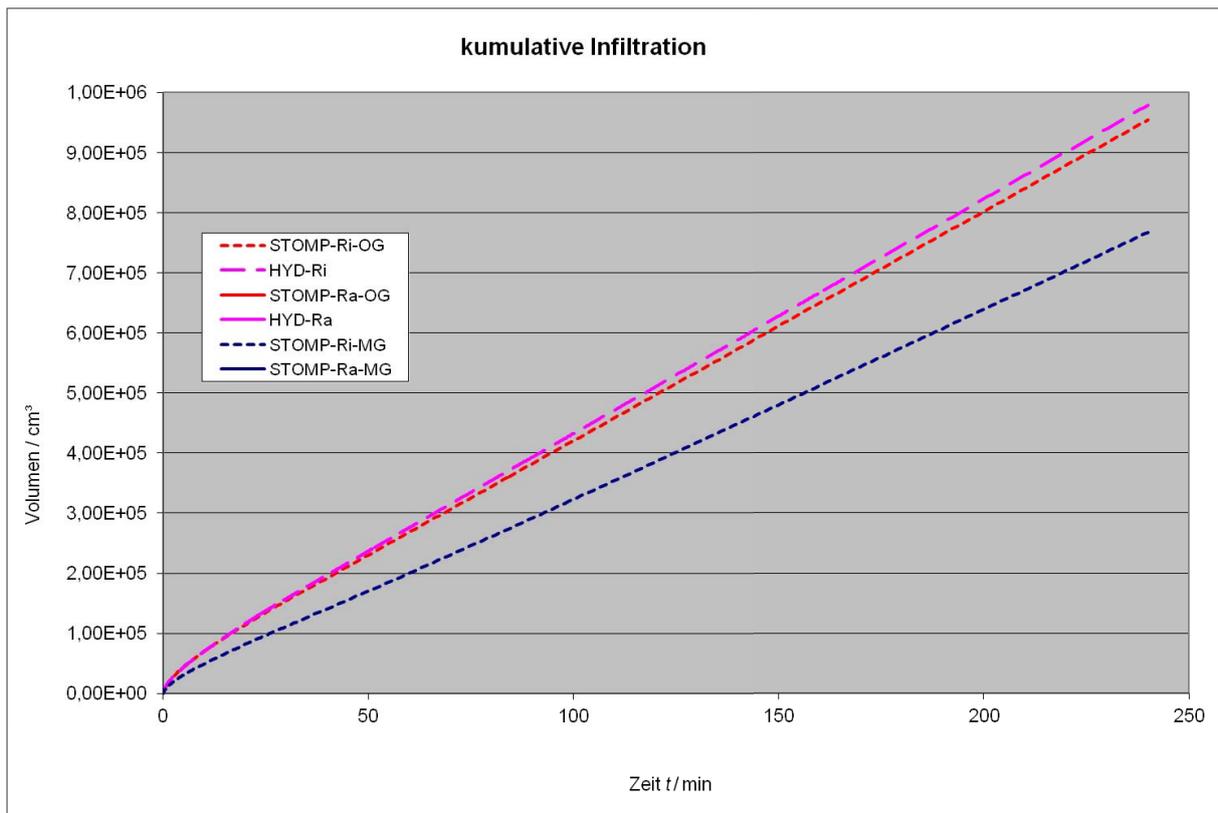


Abb. 190: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 60,0 cm

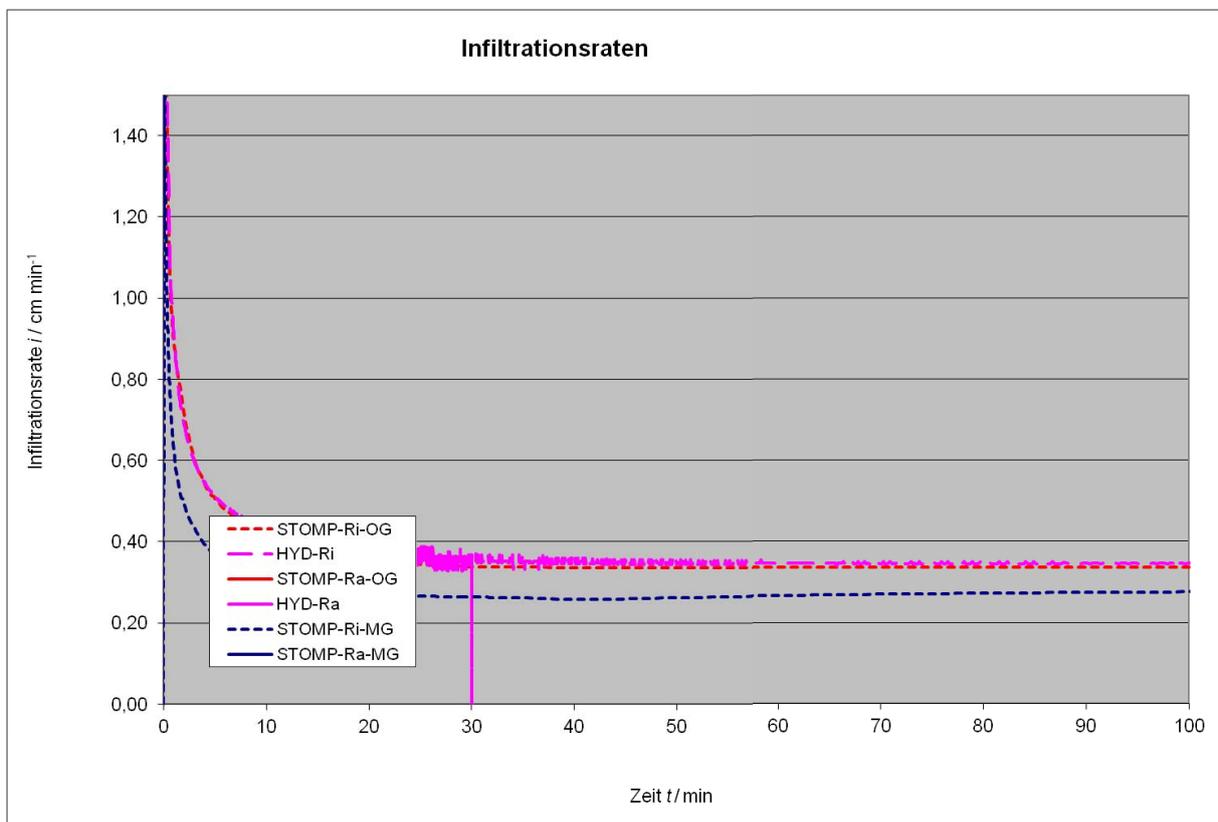


Abb. 191: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 80,0 cm

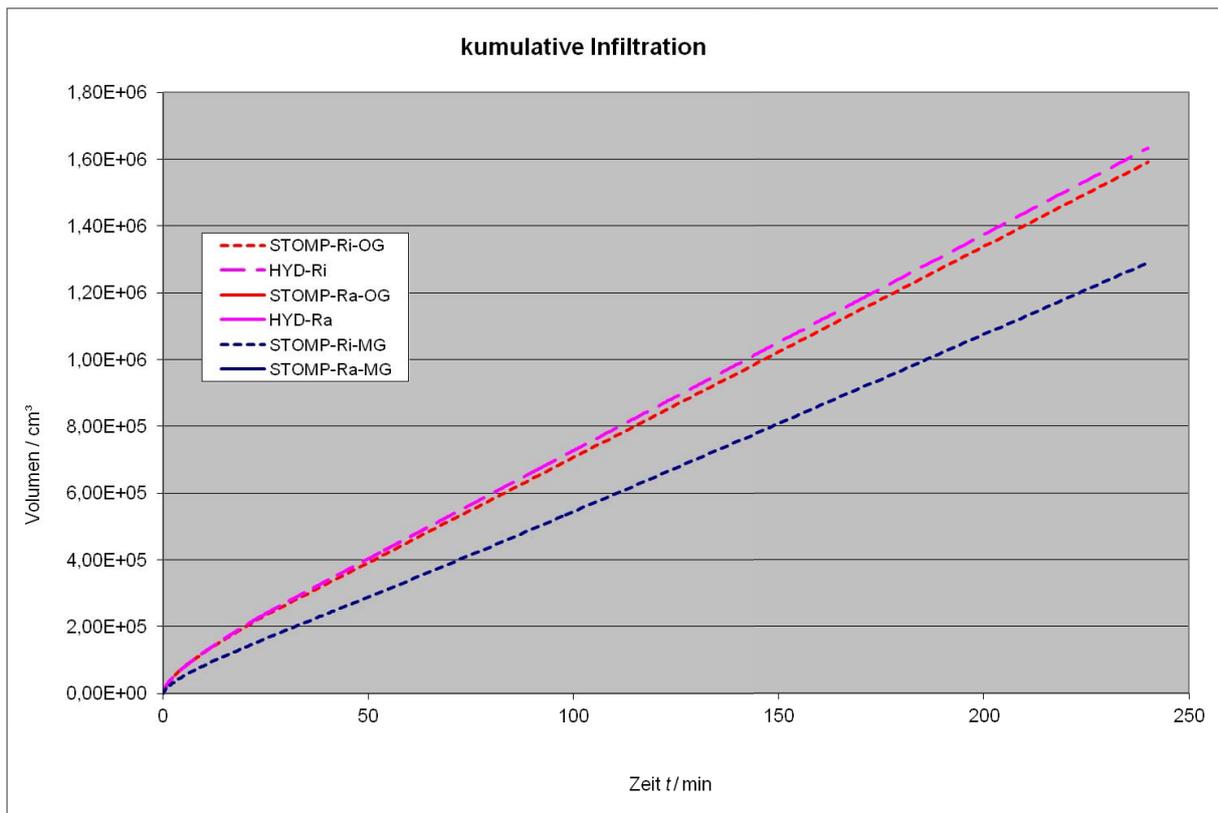


Abb. 192: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 80,0 cm

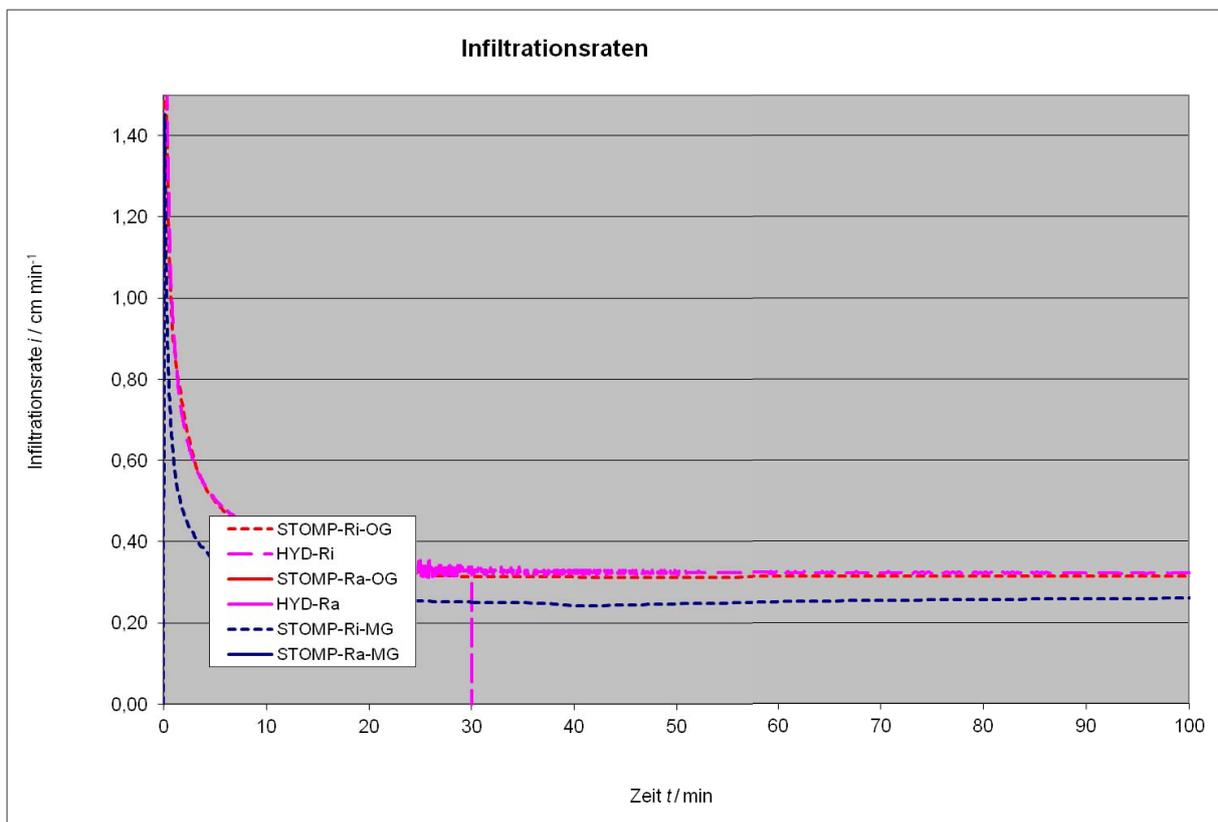


Abb. 193: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 80,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 100,0 cm

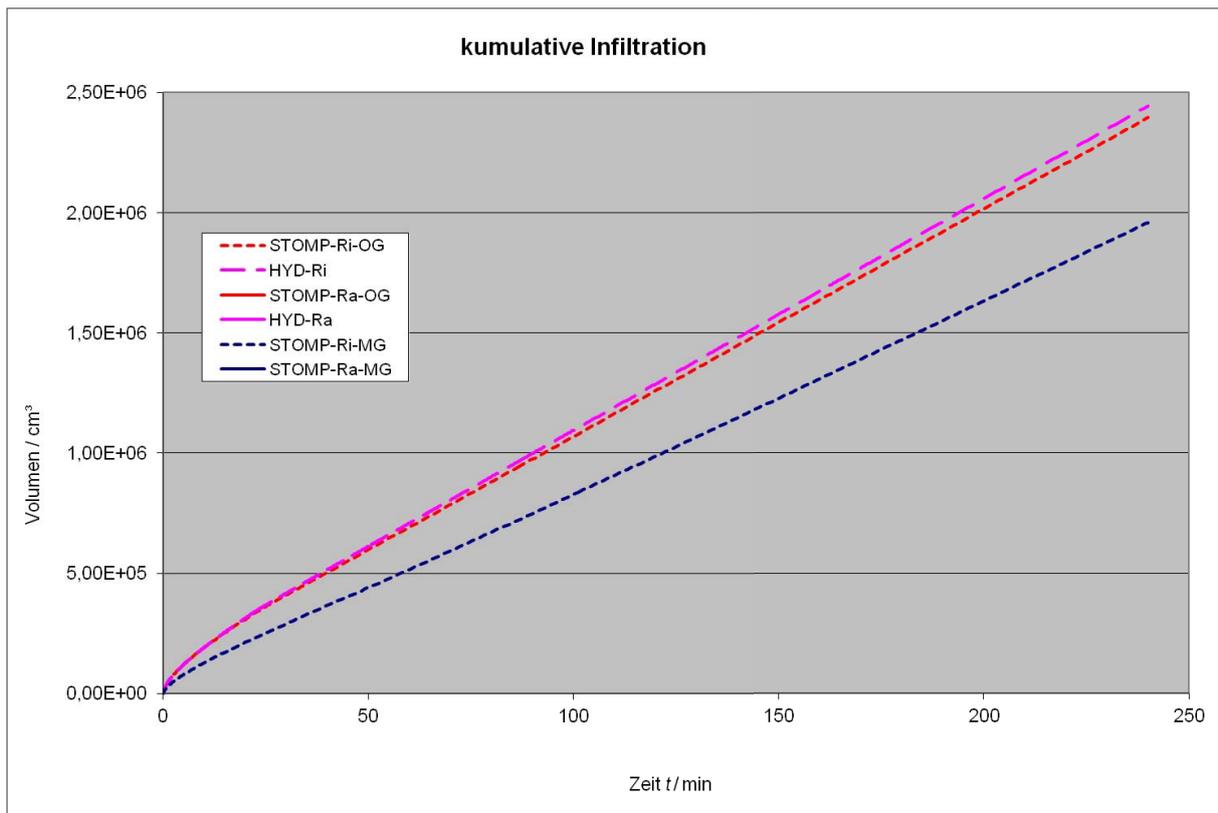


Abb. 194: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 10,0 cm

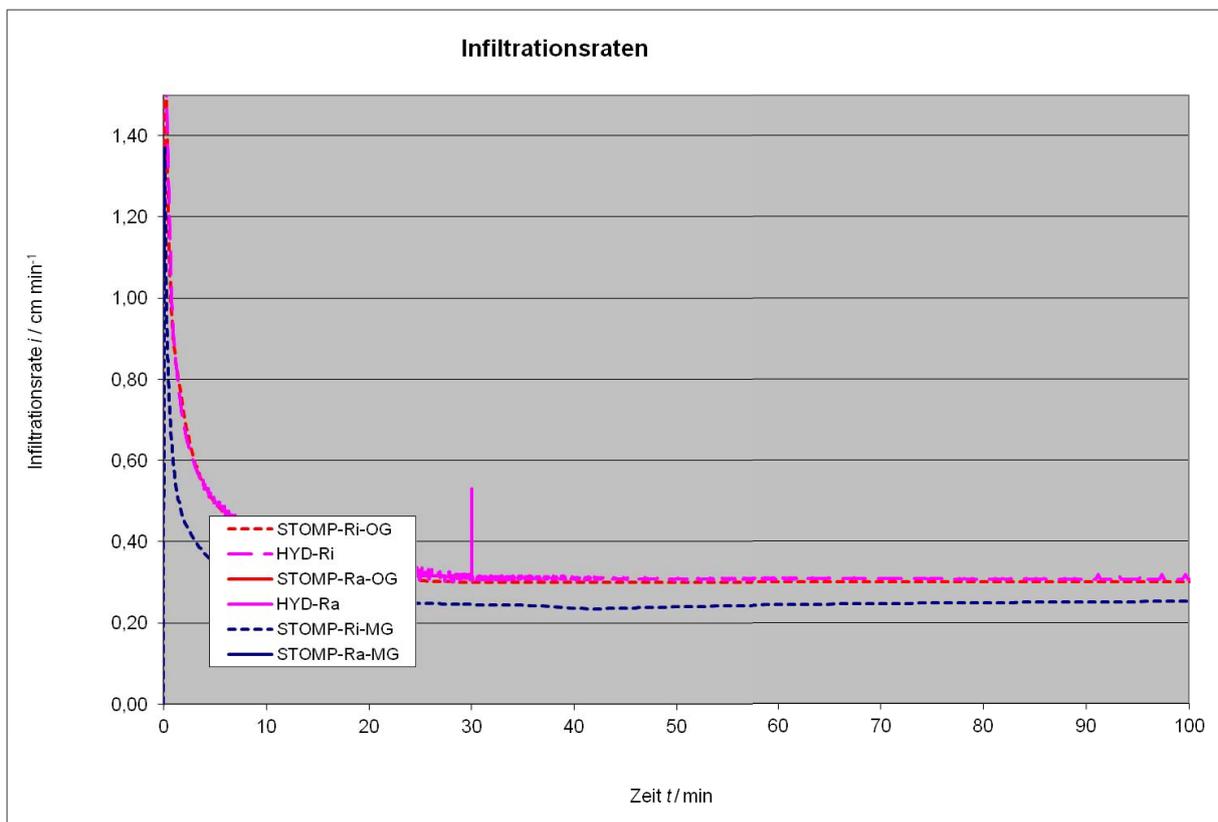


Abb. 195: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 1 – Ringradius 120,0 cm

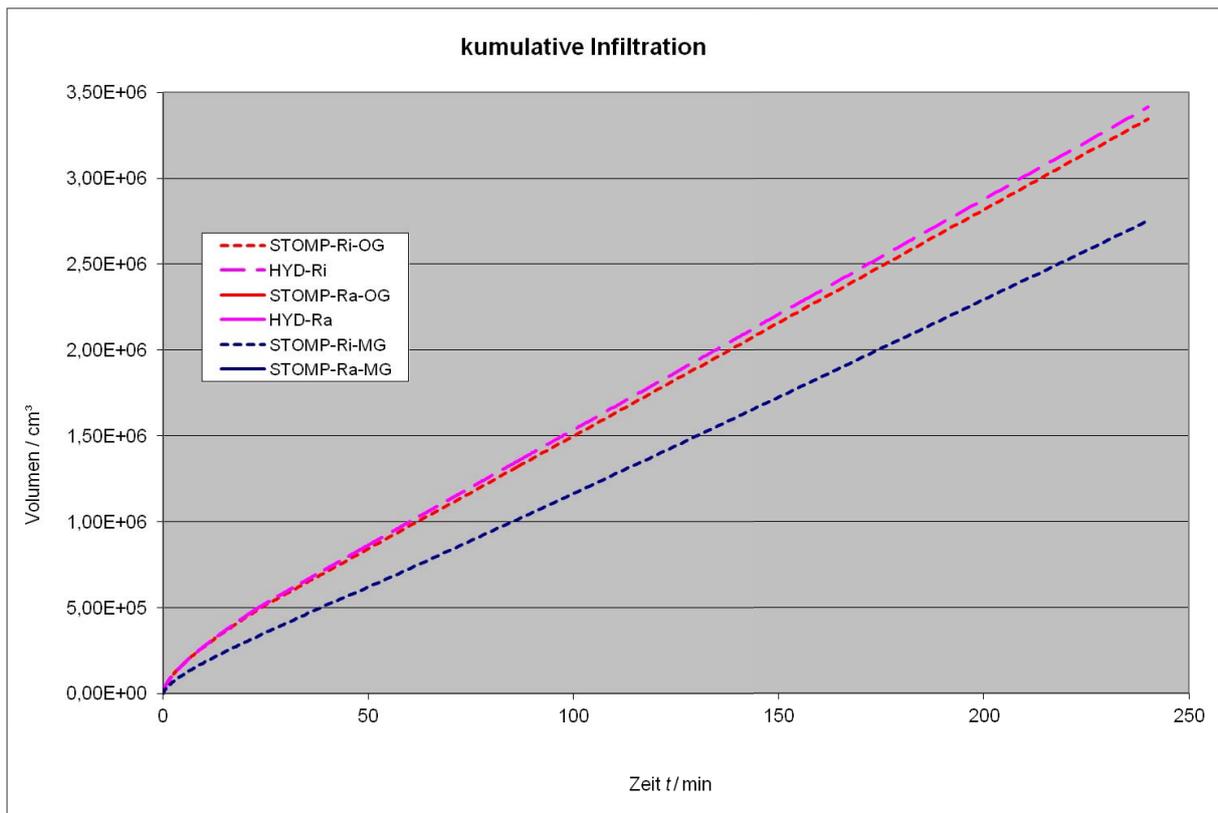


Abb. 196: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 1 – IR = 120,0 cm

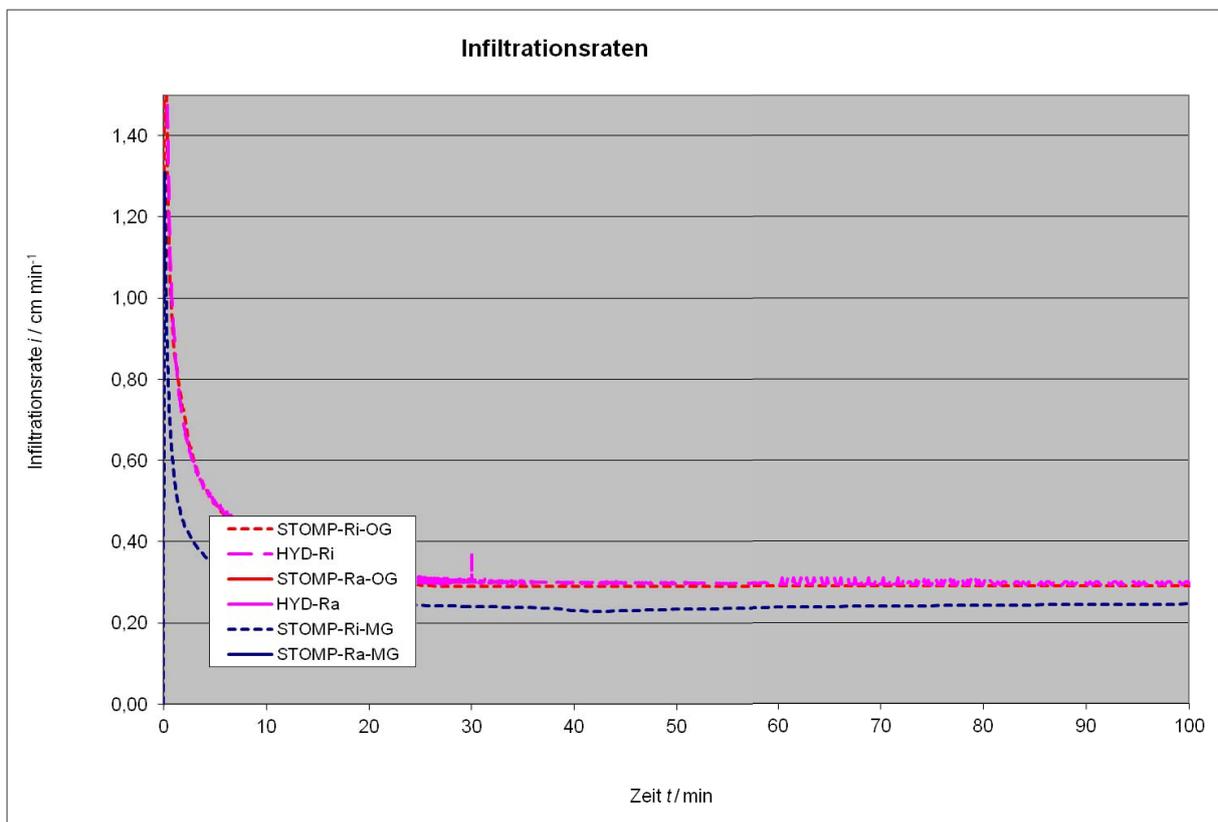


Abb. 197: Infiltrationsrate ER – BV 1 – IR = 120,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 7,0 cm

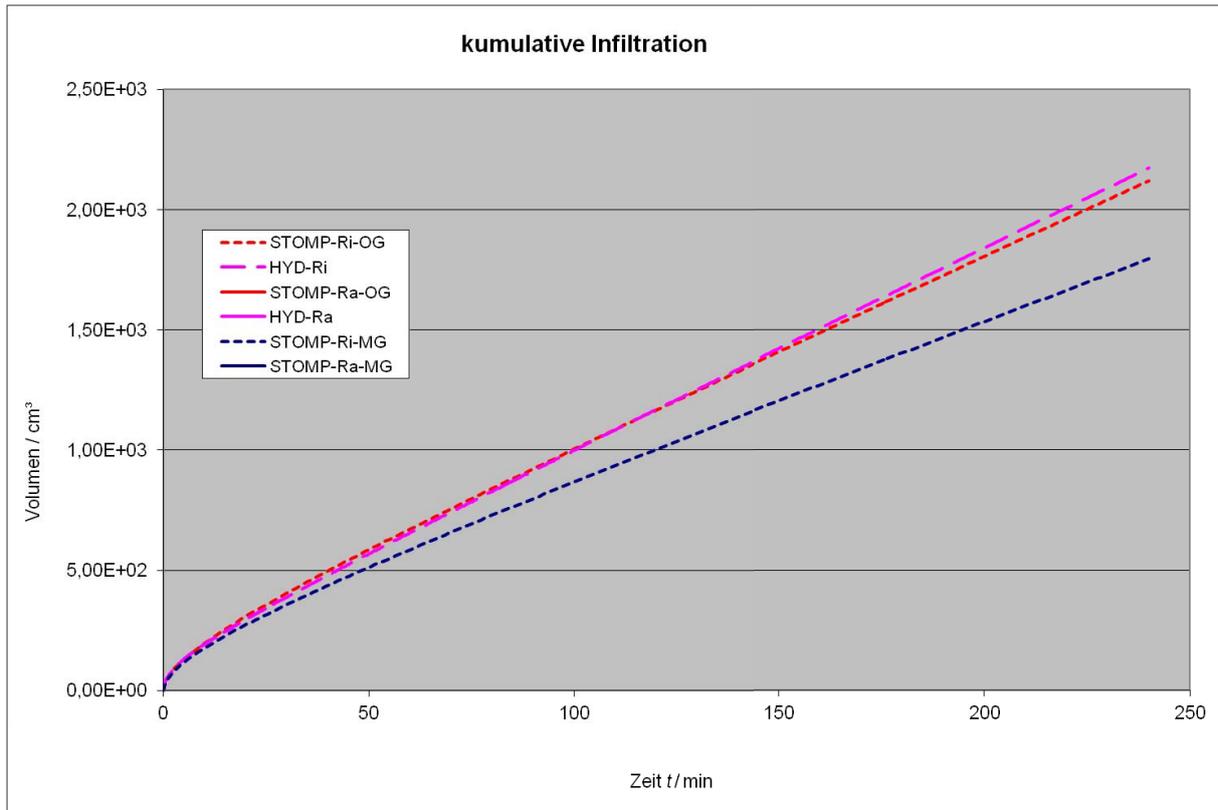


Abb. 198: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 7,0 cm

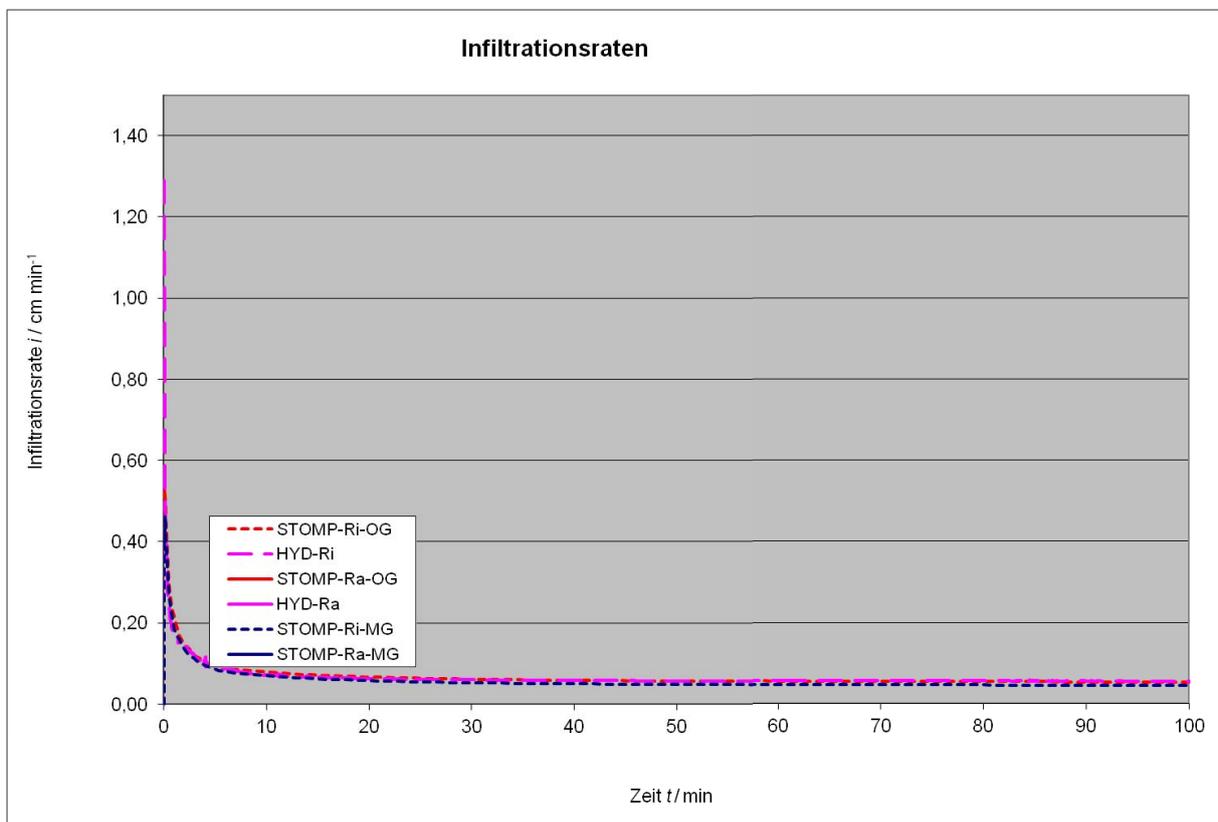


Abb. 199: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 7,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 15,0 cm

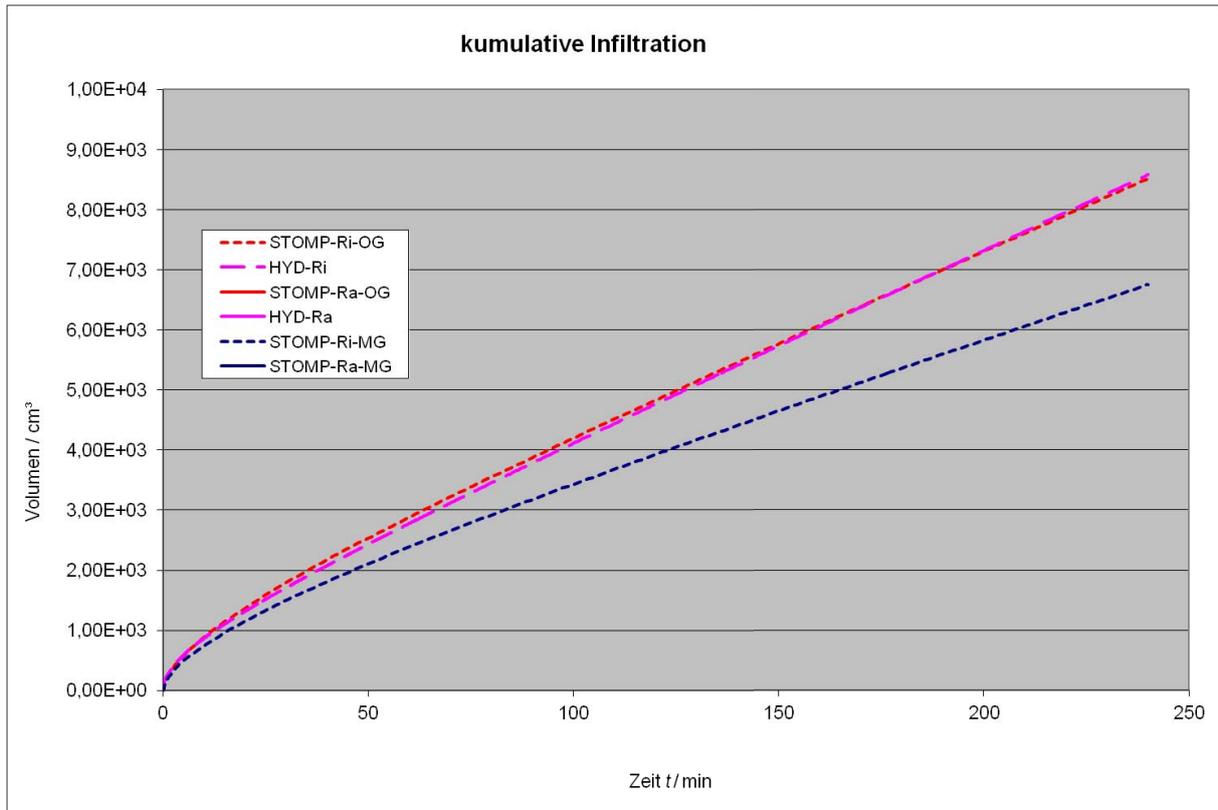


Abb. 200: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 15,0 cm

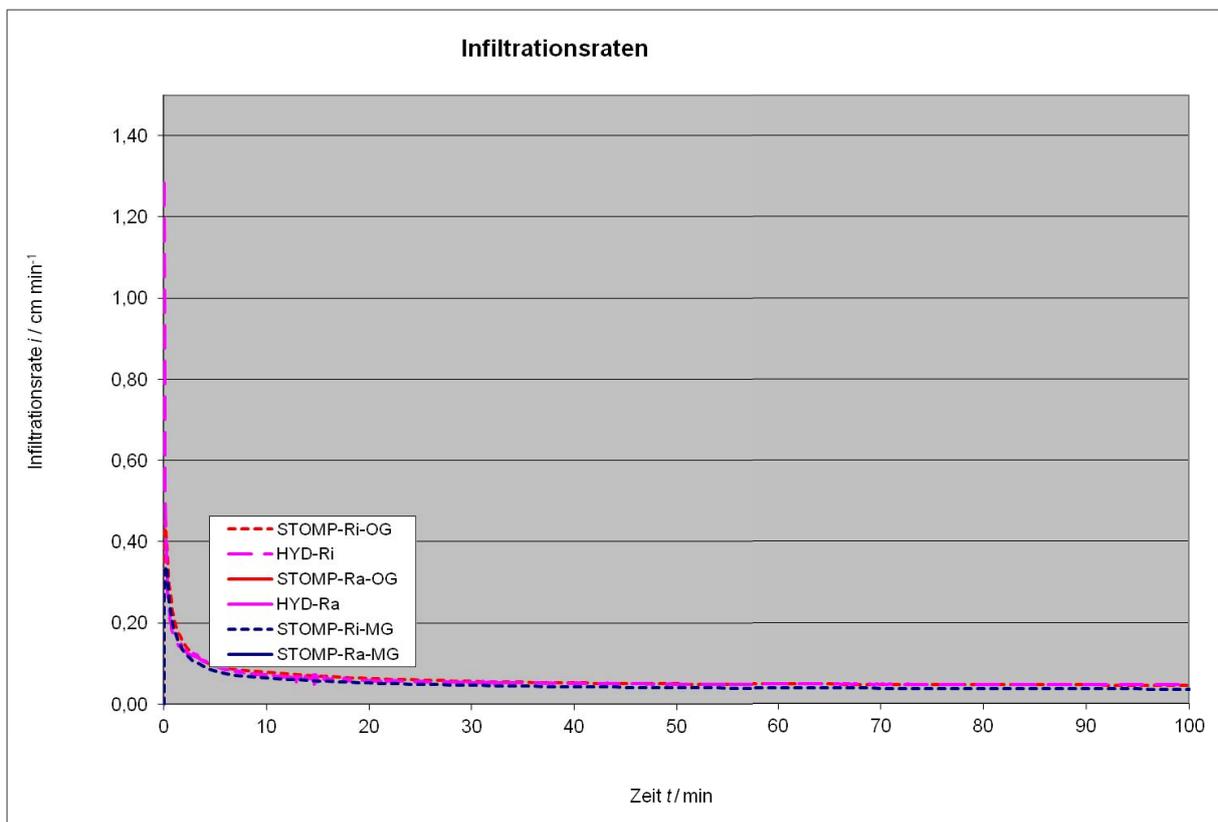


Abb. 201: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 15,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 20,0 cm

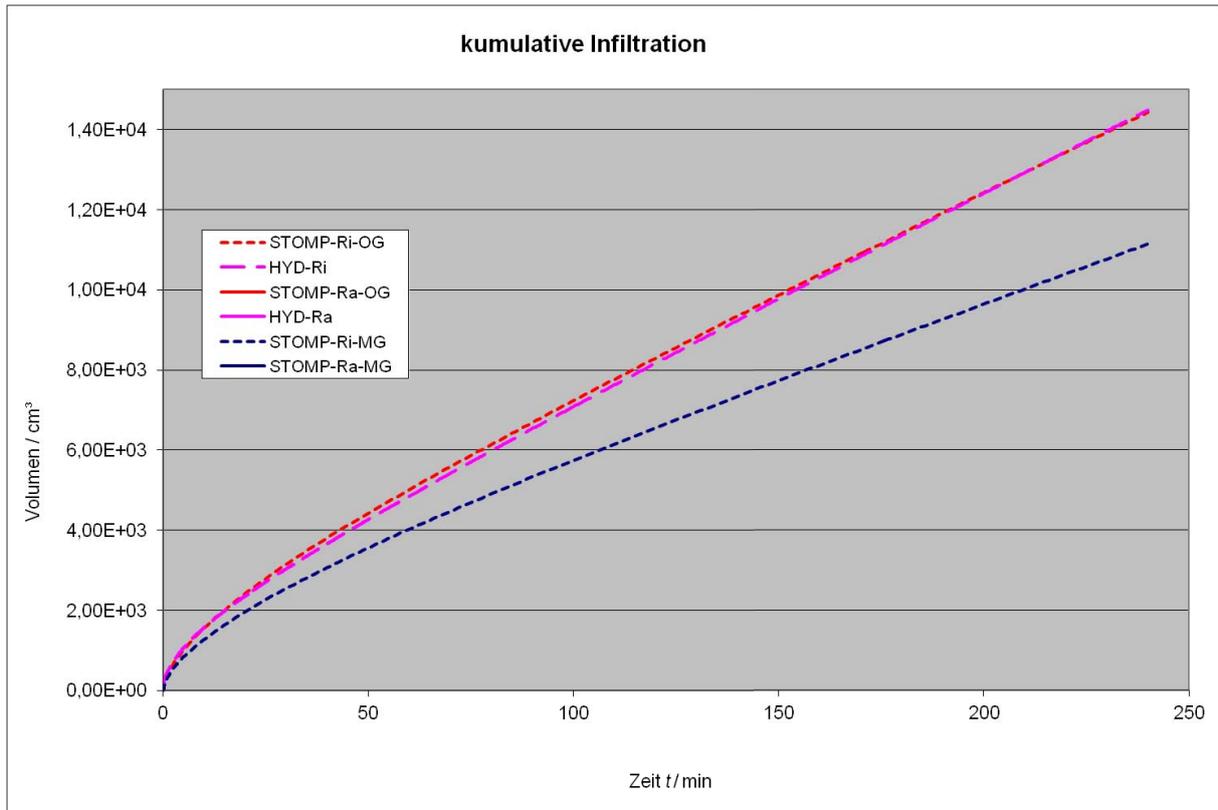


Abb. 202: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 20,0 cm

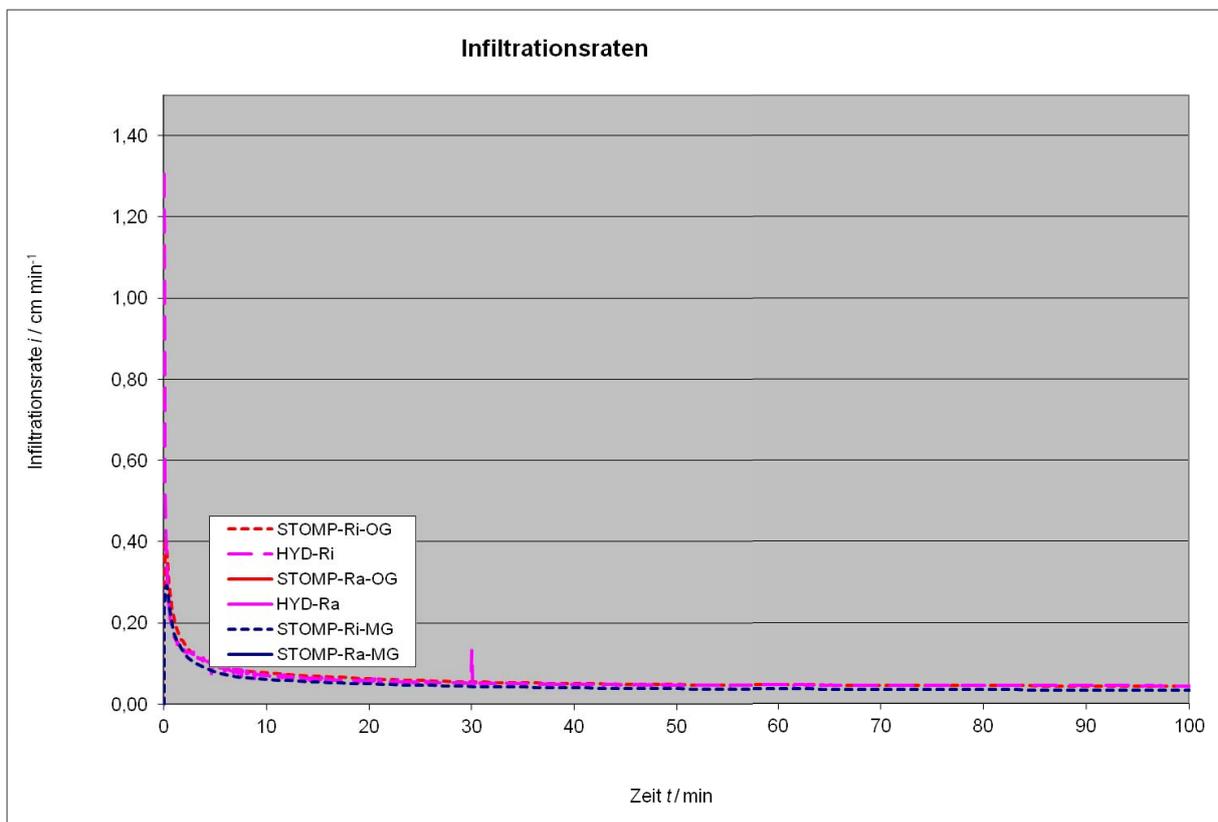


Abb. 203: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 20,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 40,0 cm

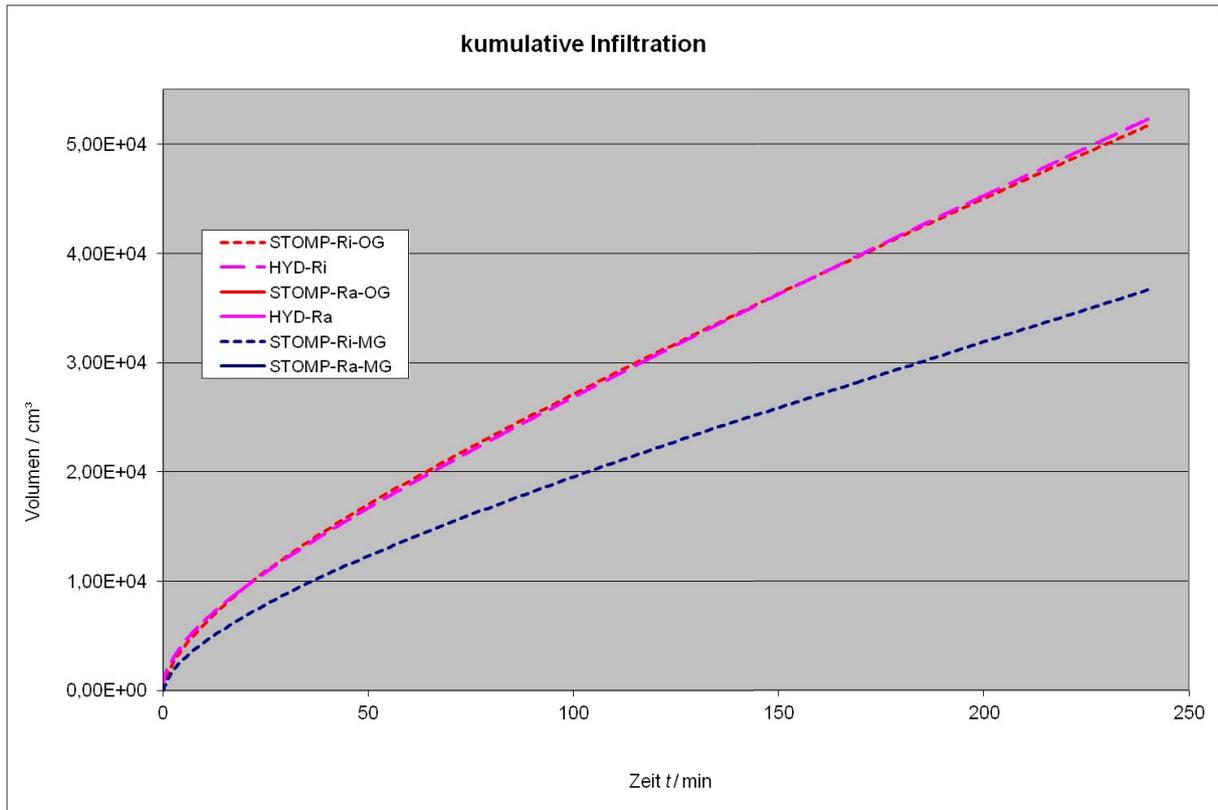


Abb. 204: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 40,0 cm

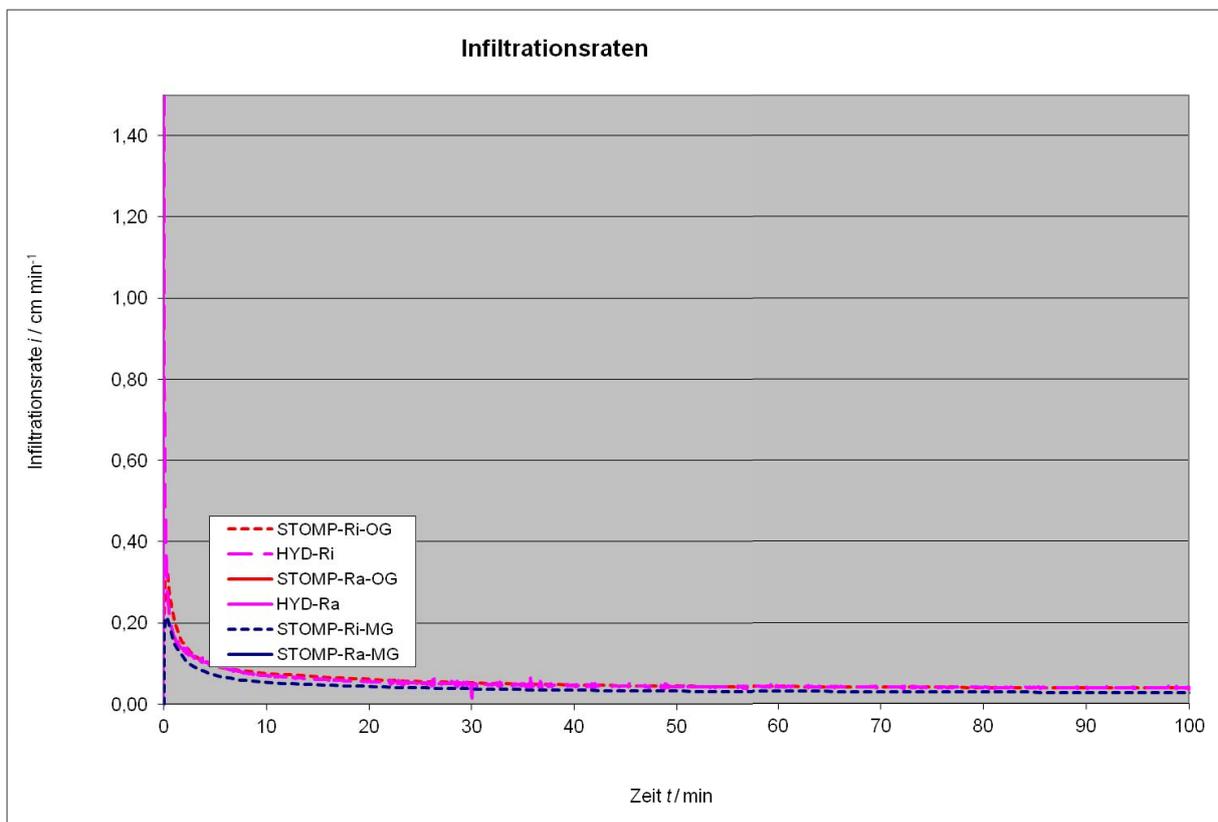


Abb. 205: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 40,0 cm

Bodenvariante 2 – Ringradius 60,0 cm

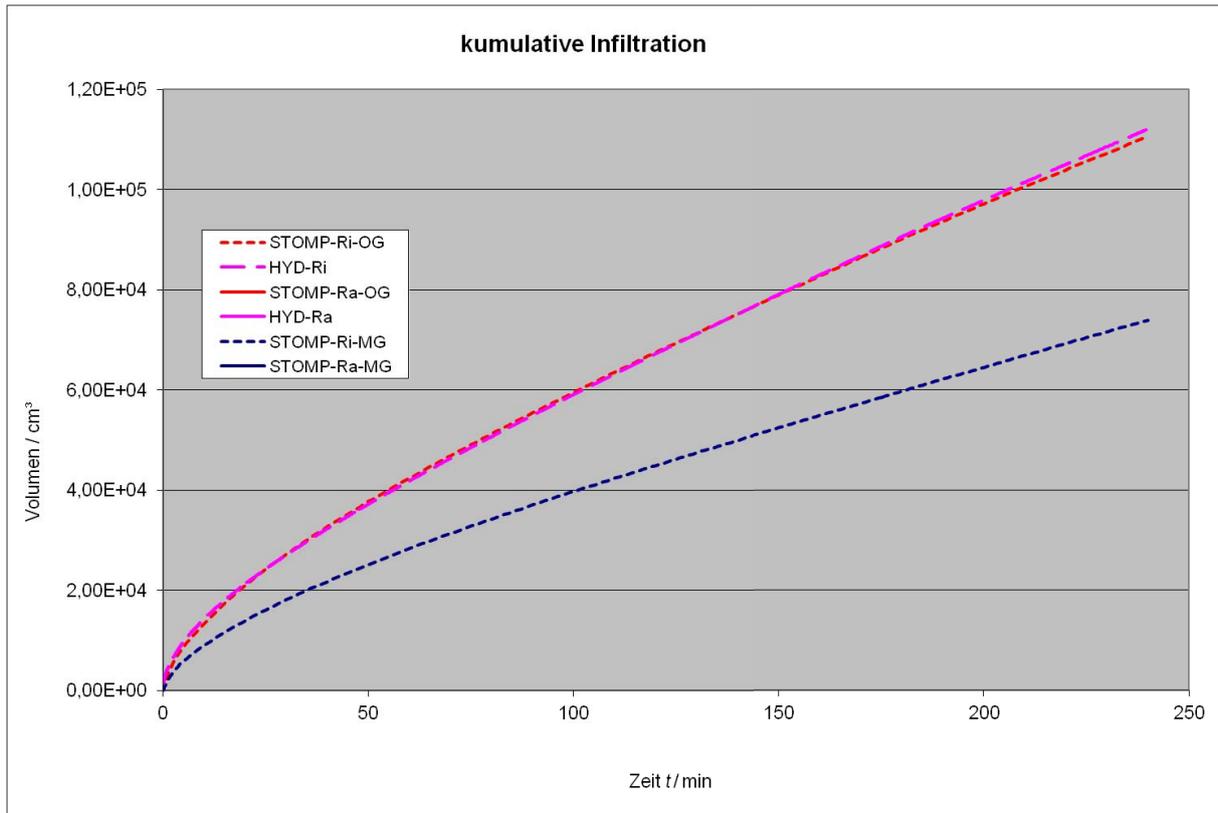


Abb. 206: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 60,0 cm

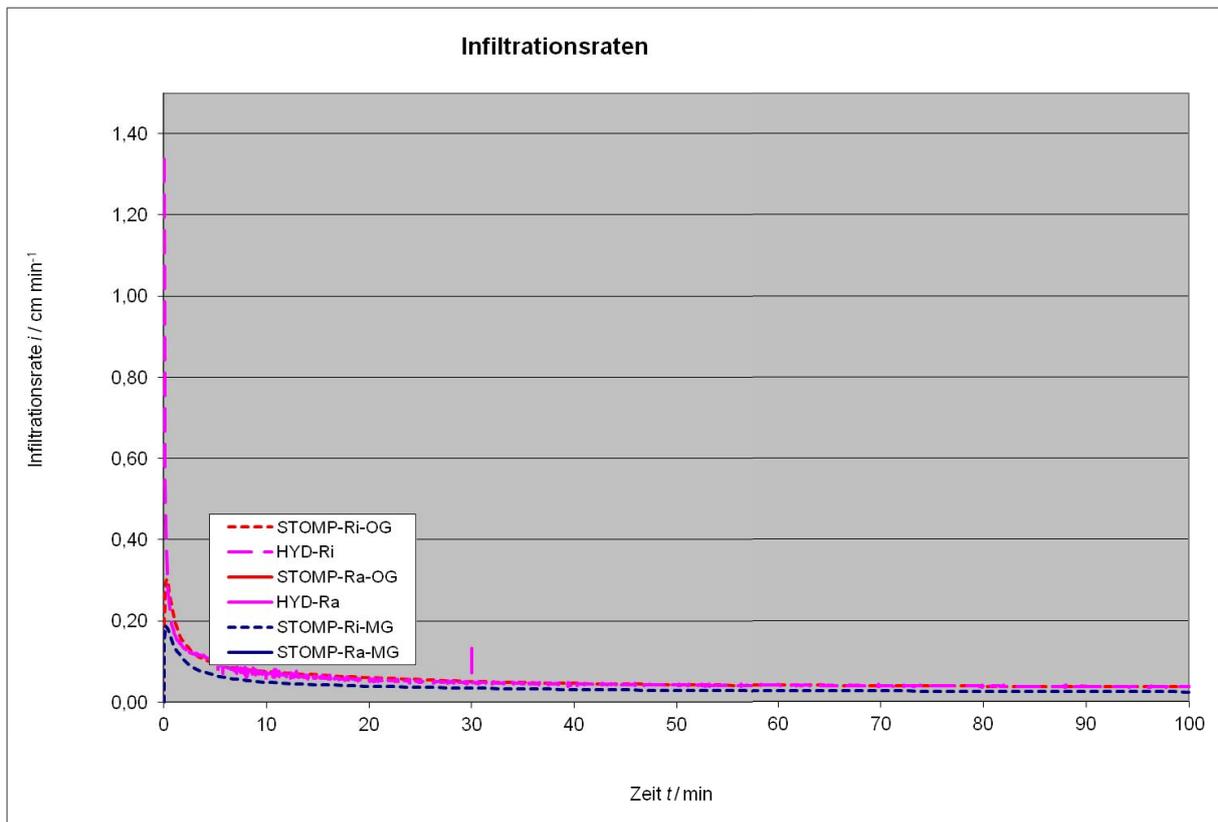


Abb. 207: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 60,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 80,0 cm

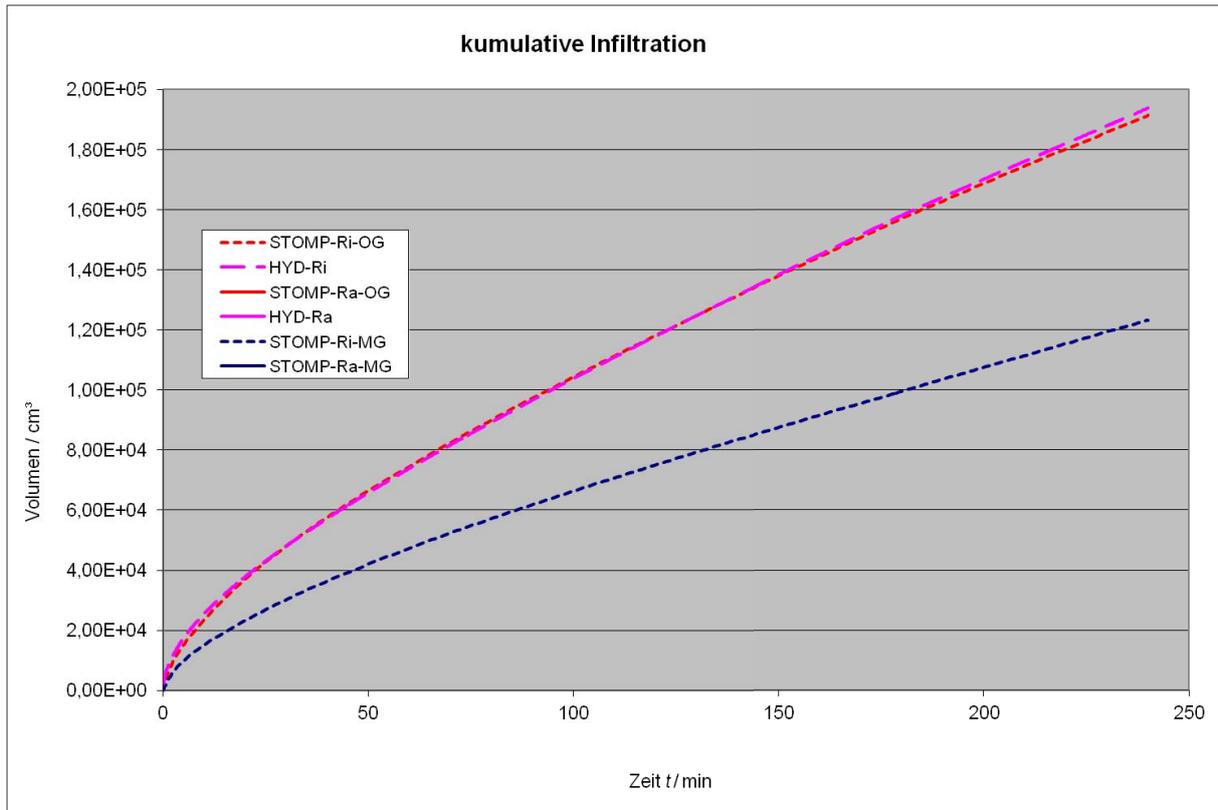


Abb. 208: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 80,0 cm

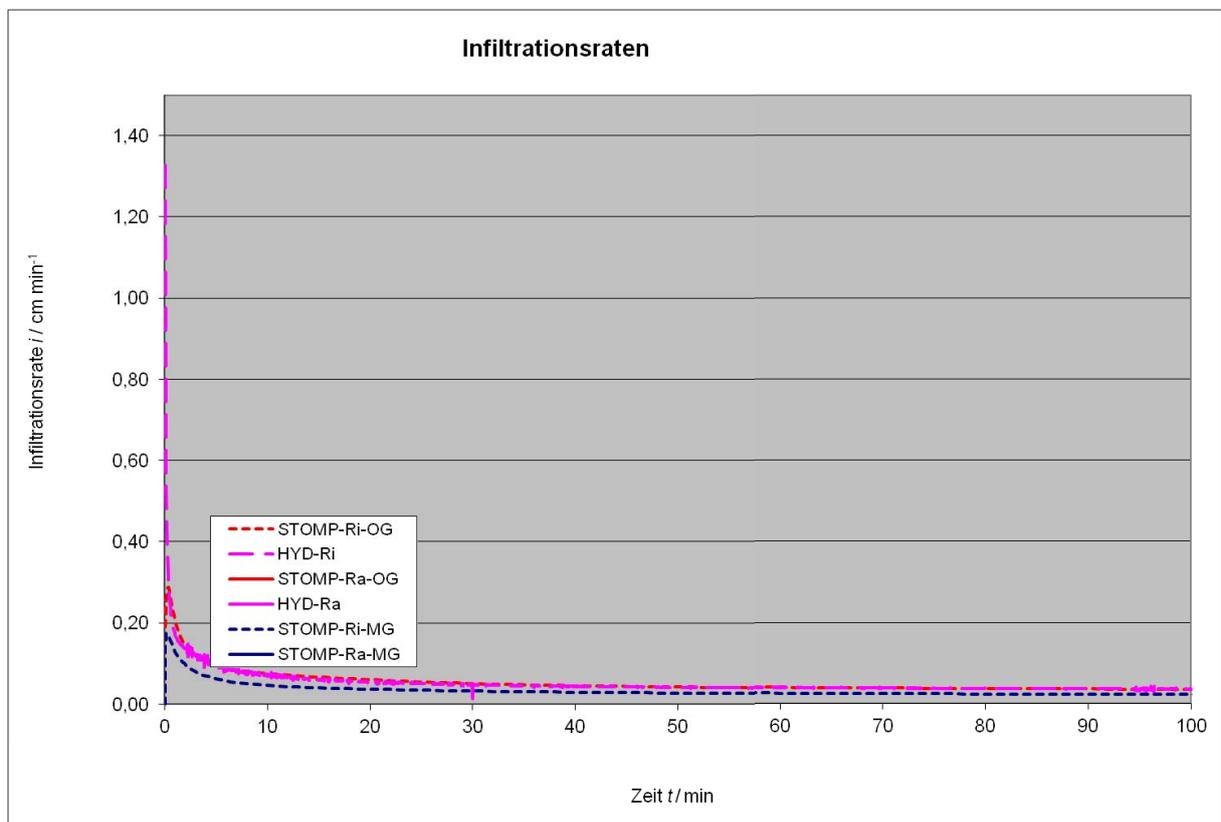


Abb. 209: Infiltrationsrate ER – BV 0 – IR = 80,0 cm

Bodenvariante 2 – Ringradius 100,0 cm

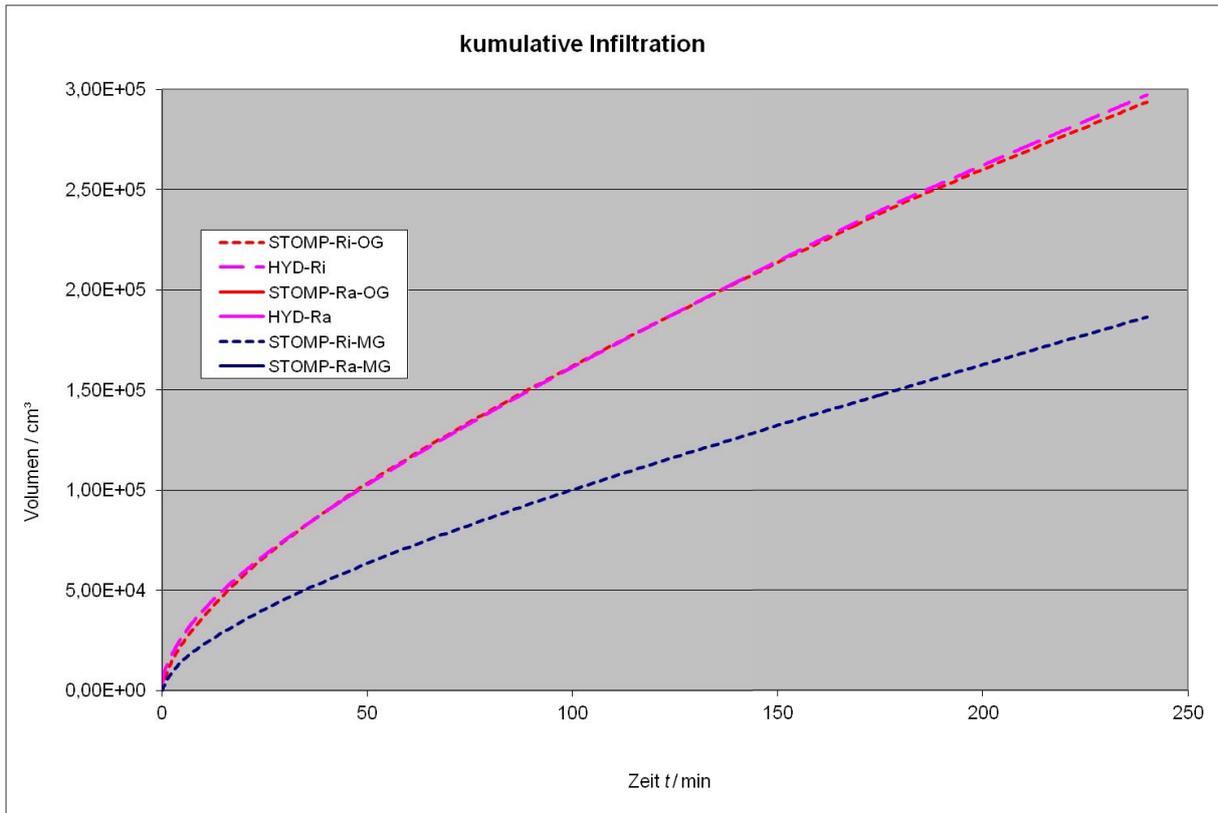


Abb. 210: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 100,0 cm

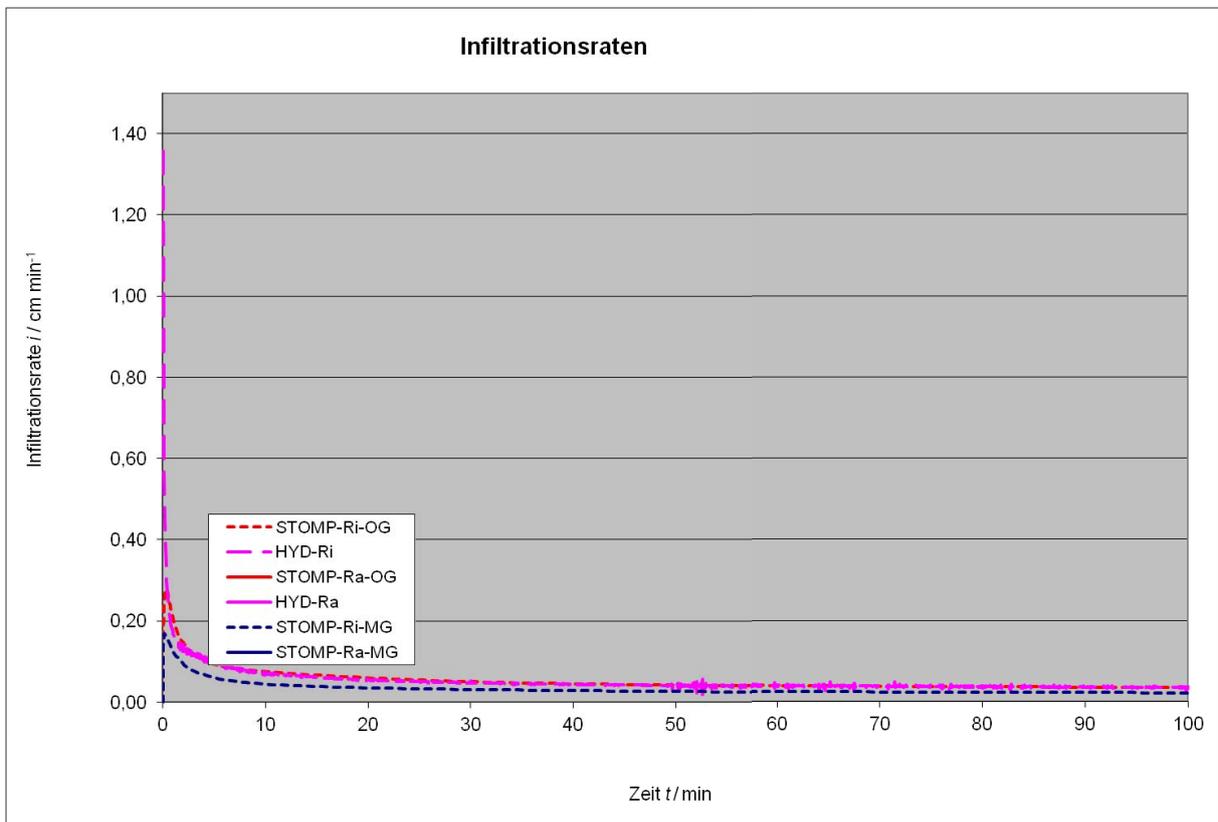


Abb. 211: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 100,0 cm

## Bodenvariante 2 – Ringradius 120,0 cm

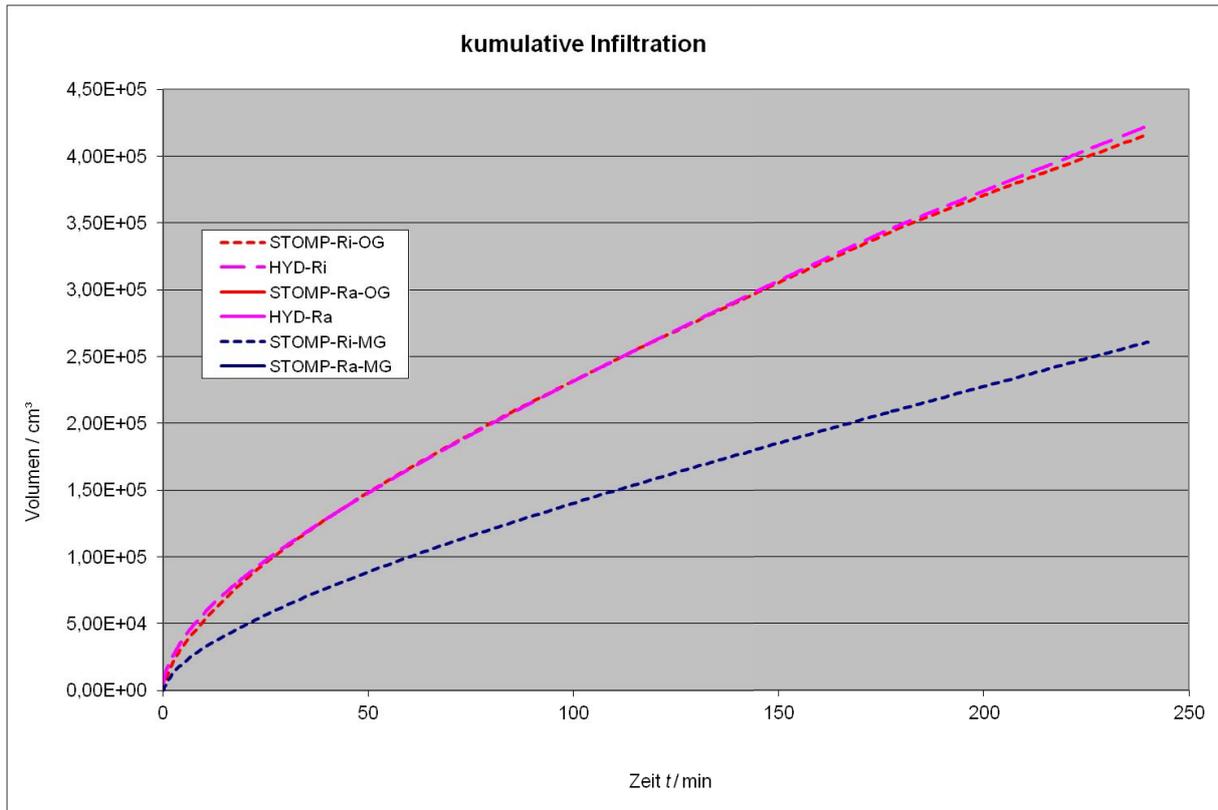


Abb. 212: kumulative Infiltrationsmenge ER – BV 2 – IR = 120,0 cm

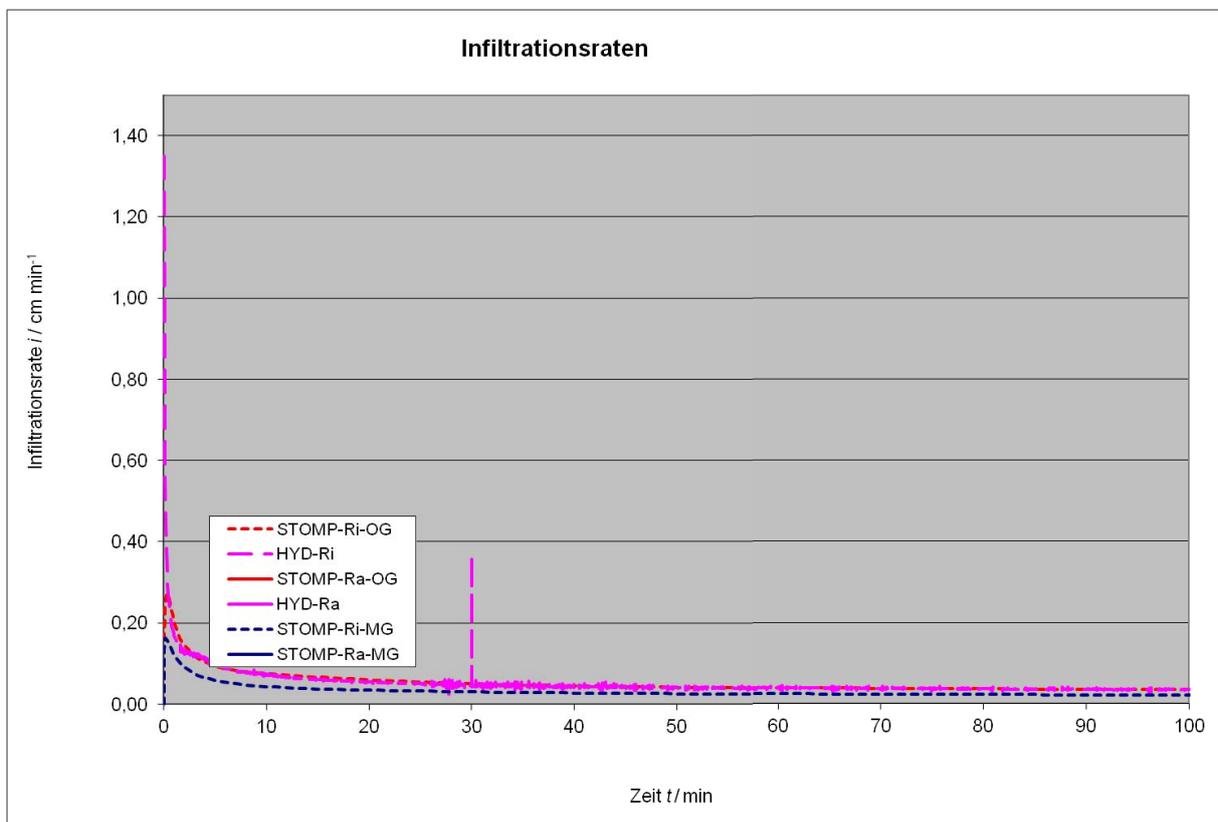


Abb. 213: Infiltrationsrate ER – BV 2 – IR = 120,0 cm

## 7.2. Feldversuche



Abb. 214: DR-Versuch mit eingebautem Tensiometer



Abb. 215: DR-Versuch – Tensiometer nach Versuchsende

## 7.2.1. Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf

Versuch 1							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe			Fläche	
Innenring	Außenring					Innenring	Außenring
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm			$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$
7,25	15	0,2	4			165	532
Zeit	Fluss	Wasserspannung $t=$	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$hPa$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	60	0	0	0	0,00	0,06
4	550	60	550	2	138	0,83	0,06
6	220	61	770	5	110	0,67	0,061
14	350	62	1120	10	47	0,28	0,062
16	160	62	1280	15	80	0,48	0,062
19	150	62	1430	17	50	0,30	0,062
25	250	62	1680	22	38	0,23	0,062
29	130	58	1810	27	33	0,20	0,058
33	160	56	1970	31	40	0,24	0,056
37	70	45	2040	35	18	0,11	0,045
41	100	40	2140	39	25	0,15	0,04
45	60	34	2200	43	17	0,10	0,034
49	100	34	2300	47	25	0,15	0,034
54	120	34	2420	51	22	0,13	0,034
60	100	34	2520	57	18	0,11	0,034
63	100	35	2620	61	29	0,17	0,035
67	85	40	2705	65	21	0,13	0,04
74	200	43	2905	71	29	0,17	0,043
76	270	42	3175	75	135	0,82	0,042
78	200	41	3375	77	100	0,61	0,041
80	140	45	3515	79	93	0,57	0,045
81	180	46	3695	80	180	1,09	0,046
82	150	46	3845	81	100	0,61	0,046
84	250	46	4095	83	167	1,01	0,046
86	250	45	4345	85	125	0,76	0,045
87	240	45	4585	86	160	0,97	0,045
90	330	46	4915	89	110	0,67	0,046
92	250	45	5165	91	167	1,01	0,045

Tab. 31: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 1

Versuch 2							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe			Fläche	
Innenring	Außenring					Innenring	Außenring
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm			$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$
7,25	15	0,2	4			165	532
Zeit	Fluss	Wasserspannung	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
		$t =$					
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$hPa$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	0	0	0	0	0,00	0
1	400	0	400	1	400	2,42	0
2	450	0	850	2	450	2,73	0
4	340	0	1190	3	227	1,37	0
5	300	0	1490	4	200	1,21	0
7	250	0	1740	6	125	0,76	0
9	280	0	2020	8	140	0,85	0
11	250	0	2270	10	125	0,76	0
13	200	0	2470	12	100	0,61	0
15	180	0	2650	14	90	0,55	0
17	190	0	2840	16	95	0,58	0
19	180	0	3020	18	90	0,55	0
24	390	0	3410	22	78	0,47	0
29	420	0	3830	27	84	0,51	0
34	390	0	4220	32	78	0,47	0
40	370	0	4590	37	62	0,37	0
45	340	0	4930	43	68	0,41	0
50	390	0	5320	48	78	0,47	0
56	380	0	5700	53	63	0,38	0
60	300	0	6000	58	75	0,45	0

Tab. 32: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 2

Versuch 3							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe			Fläche	
Innenring	Außenring					Innenring	Außenring
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm			$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$
7,25	15	0,2	4			165	532
Zeit	Fluss	Wasserspannung $t=$	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$hPa$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	114	0	0	0	0,00	0,114
2	750	108	750	1	375	2,27	0,108
4	300	108	1050	3	150	0,91	0,108
6	350	108	1400	5	175	1,06	0,108
8	300	107	1700	7	150	0,91	0,107
10	370	101	2070	9	185	1,12	0,101
12	220	96	2290	11	110	0,67	0,096
14	130	90	2420	13	65	0,39	0,09
16	170	87	2590	15	85	0,51	0,087
18	120	85	2710	17	60	0,36	0,085
20	150	82	2860	19	75	0,45	0,082
25	320	81	3180	23	64	0,39	0,081
35	630	80	3810	30	63	0,38	0,08
45	700	79	4510	40	70	0,42	0,079
55	600	78	5110	50	60	0,36	0,078
60	340	77	5450	58	68	0,41	0,077

Tab. 33: Auswertung Feldversuch Groß-Enzersdorf – Nr. 3

## 7.2.2. Auswertung Feldversuch Untertullnerbach

Versuch 1							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe	Fläche			
Innenring	Außenring				Innenring	Außenring	
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm		$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$	
7,25	15	0,2	4		165	532	
Zeit	Fluss	Wasserspannung $t=$	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$h\text{Pa}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	83	0	0,0	0	0,00	0,083
3	230	88	230	1,5	77	0,46	0,088
5	230	88	460	3,8	153	0,93	0,088
7	250	91	710	5,8	100	0,61	0,091
10	340	93	1050	8,5	113	0,69	0,093
13	350	84	1400	11,5	117	0,71	0,084
15	220	78	1620	14,0	110	0,67	0,078
18	280	72	1900	16,5	93	0,57	0,072
20	240	69	2140	19,0	120	0,73	0,069
23	270	68	2410	21,5	90	0,55	0,068
28	430	66	2840	25,5	86	0,52	0,066
35	730	65	3570	31,5	104	0,63	0,065
45	690	65	4260	40,0	69	0,42	0,065
55	750	64	5010	50,0	75	0,45	0,064
70	980	61	5990	62,5	65	0,40	0,061
85	900	62	6890	77,5	60	0,36	0,062

Tab. 34: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 1

Versuch 2							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe	Fläche			
Innenring	Außenring				Innenring	Außenring	
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm		$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$	
7,25	15	0,2			165	532	
Zeit	Fluss	Wasserspannung $t=$	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$h\text{Pa}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	91	0	0	0	0,00	0,091
3	210	91	210	2	70	0,42	0,091
5	230	91	440	4	115	0,70	0,091
8	270	91	710	7	90	0,55	0,091
10	310	92	1020	9	155	0,94	0,092
20	680	86	1700	15	68	0,41	0,086
30	600	71	2300	25	60	0,36	0,071
35	350	65	2650	33	70	0,42	0,065
45	650	64	3300	40	65	0,39	0,064
55	680	61	3980	50	68	0,41	0,061
70	950	62	4930	63	63	0,38	0,062
85	900	61	5830	78	60	0,36	0,061

Tab. 35: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 2

Versuch 3							
Radius		Ringdicke	Eindringtiefe	Fläche			
Innenring	Außenring					Innenring	Außenring
$r_1 / \text{cm}$	$r_3 / \text{cm}$	cm	cm			$A_1 / \text{cm}^2$	$A_3 / \text{cm}^2$
7,25	15	0,2				165	532
Zeit	Fluss	Wasserspannung	kumulierter Fluss	Zeit	Fluss	Infiltrationsrate	Wasserspannung
		t=					
	Innenring		Innenring		Innenring	Innenring	
$t / \text{min}$	$V_1 / \text{cm}^3$	$hPa$	$V_1 / \text{cm}^3$	$t / \text{min}$	$Q_1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{min})$	$q_1 / (\text{cm} \cdot \text{min})$	$p / \text{bar}$
0	0	87	0	0	0	0,00	0,087
3	270	87	270	2	90	0,55	0,087
6	250	71	520	4	100	0,61	0,071
8	250	67	770	7	100	0,61	0,067
10	120	65	890	9	60	0,36	0,065
15	400	63	1290	13	80	0,48	0,063
25	600	61	1890	20	60	0,36	0,061
35	600	60	2490	30	60	0,36	0,06
45	600	61	3090	40	60	0,36	0,061
55	580	60	3670	50	58	0,35	0,06
70	1000	61	4670	63	67	0,40	0,061
80	500	61	5170	75	50	0,30	0,061

Tab. 36: Auswertung Feldversuch Untertullnerbach – Nr. 3



## LITERATURVERZEICHNIS

Adrian D D and J B Franzini. 1966. Impedance to infiltration by pressure build-up ahead of the wetting front. *J Geophys Res*, 71. Seite 5857 – 5862

Al-Qinna M I and Abu-Awwad M A. 1998. Infiltration rate measurements in arid soils with surface crust. *Irrig Sci*. Seite 83 – 89

Baumgartner A und Liebscher H J. 1996. Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie. Borntraeger. 2te Auflage .694 Seiten. ISBN 3-443-3002-2

Bodman G B. 1937. The variability of the permeability "constant" at low hydraulic gradients during saturated water flow in soils. *Soil Sci Soc Am Proc* 2. Seite 45 – 53

Boersma L. 1965. Field Measurement of Hydraulic Conductivity above a Water Table (in: Black C A. 1965. *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods, Including Statistics of Measurement and Sampling (Agronomy No 9)*). Soil Science of America

Bouwer H. 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water Resour Res* 2. Seite 729 - 738

Carsel R F and Parrish R S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour Res* 24. Seite 755 - 769

Dane J and Topp G. 2002. *Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods*. SSSA Book Series No. 5. Seite 821 – 826. ISBN 0-89118-841-X

Decagon Devices. 2006. Mini disk infiltrometer user manual, V3. 22 Seiten

Dixon R M and Linden D R. 1972. Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. *Soil Sci Soc Am Proc* 36. Seite 948 – 953

Durner W. 2007. Skript Hydrologie I: Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie, TU Braunschweig. 42 Seiten

GeoDZ. 2013. Infiltrationskapazität. Verfügbar unter:

<http://www.geodz.com/deu/d/Infiltrationskapazit%C3%A4t> (überprüft am 13.10.2013)

Grismer M E, Orang M N, Clausnitzer V and Kinney K. 1994. Effects of air compression and counterflow on infiltration into soils. *J Irrig Drain Eng* 120. Seite 775 – 795

- Hillel D. 1998. Environmental Soil Physics. 771 Seiten. ISBN 10: 0-12-348525-8
- Kammerer G. 2011. Bodenphysik (Vertiefung), Skript, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien. 257 Seiten
- Kammerer G. 2011. Kulturtechnisches Feldpraktikum, Betreuungsteil, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien. 51 Seiten
- Kammerer G. 2014. Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien. 121 Seiten
- Latifi H, Prasad S N and Helweg O J. 1994. Air entrapment and water infiltration in two-layered soil column. J Irrig Drain Eng 120. Seite 871 – 891
- McWhorter D B. 1971. Infiltration affected by flow of air. Hydrological Paper 49, Colorado State University, Fort Collins
- ON - Österreichisches Normungsinstitut. 2004. Ö-NORM L 1050. Boden als Pflanzenstandort – Begriffe und Untersuchungsverfahren. 20 Seiten
- ON - Österreichisches Normungsinstitut. 2007. Ö-NORM L 1066. Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelring-Infiltrometer (Feldmethode). 8 Seiten
- ON - Österreichisches Normungsinstitut. 2002. Ö-NORM B 4422-2. Erd- und Grundbau - Untersuchung von Böden - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit - Feldmethoden für oberflächennahe Schichten. 21 Seiten
- ON - Österreichisches Normungsinstitut. 2012. Ö-NORM EN ISO 22282-5 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Geohydraulische Versuche - Teil 5: Infiltrometerversuche. 25 Seiten
- Philip J R. 1969. Theory of infiltration. Advances in Hydroscience, version 5. Seite 215 - 296
- Radcliffe D E and Šimunek J. 2010. Soil Physics with Hydrus. 373 Seiten. ISBN 978-1-4200-7380-5

Reynolds W D and Elrick D E. 1990. Pondered infiltration from a single ring. I. analysis of steady state flow, Soil Science Society America Journal 54. Seite 1233 - 1241

Reynolds W D, Elrick D.E. and Youngs E G. 2002. Single-ring and double- or concentric-ring infiltrometers. Dane J and Topp G. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA. Seite 821 - 826

Reynolds W D and Elrick D E. 1995. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph-Permeameter. Soil Science Vol 140, No 4. Seite 292 - 302

Reynolds W D, Elrick D E. 2002. Constant Head Well Permeameter (Vadose Zone) (in: Dane J and Topp G. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA

Reynolds W D, Elrick D E, Youngs E G. 2002a. Ring or Cylinder Infiltrimeters (Vadose Zone) (in: Dane J and Topp G. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA

Reynolds W D, Elrick D E and Youngs E G. 2002b. Single-Ring and Double- or Concentric Ring Infiltrimeters (in: Dane J and Topp G. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI, USA

Šimunek J, Sejna and van Genuchten. 1999: Technical manual, The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0. 251 Seiten

Šimunek J, Sejna M and van Genuchten. 2006. Technical manual, The HYDRUS software package for simulating two- and threedimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 1. 241 Seiten

Scheffer F und Schachtschabel P. 2002. Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, 15 Auflage. 593 Seiten. ISBN 3-827-41324-9

Tricker A S. 1978. The infiltration cylinder: Some comments on its use. Journal of Hydrology 36, Seite 383 - 391

Touma J, Vachaud G and Parlange J-Y. 1984. Air and water flow in a sealed, pondered vertical soil column: Experiment and model. Soil Sci, 137. Seite 181 - 187

UGT - Umwelt Geräte Technik. 2010. Haubeninfiltrimeter Bedienungsanleitung, Version 08/10. 24 Seiten

- UMS - Umweltgeräte Management Systeme. 2002. Beschreibung EnviroSCAN Sentec
- UMS - Umweltgeräte Management Systeme. 2014. SIS Smart Irrigation Sensor. Verfügbar unter: [http://www.ums-muc.de/produkte/matrix\\_sensoren/sis.html](http://www.ums-muc.de/produkte/matrix_sensoren/sis.html) (überprüft am 08.02.2014)
- Van Genuchten M Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J 44. Seite 892 - 898
- Wang Z, J Feyen and M Th van Genuchten, D R Nielsen. 1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. Water Resour Res 34(2). Seite 213 - 222
- Wilson L G and Luthin N J. 1963. Effects of air flow ahead of the wetting front an infiltration. Soil Sci, 91. Seite 137 - 143
- Wu L, Pan L, Robertson M J and Shouse P J. 1997. Numerical evaluation of ringinfiltrometers under various soil conditions, Soil Science 162 (11). Seite 771 - 777.
- Wu L and Pan L. 1997. A generalized solution to infiltration of single-ring infiltrimeters. Soil Science Society of America Journal 61. Seite 1318 - 1322
- Wikipedia. 2013. pF-Wert. Verfügbar unter:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/PF-Wert> (überprüft am 13.10.2013)
- Wikipedia. 2011. Soil classification. Verfügbar unter:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Soil\\_classification](http://en.wikipedia.org/wiki/Soil_classification) (überprüft am 29.05.2011)
- Wikipedia. 2013. Zustandsgröße. Verfügbar unter:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Zustandsgr%C3%B6%C3%9Fe> (überprüft am 13.10.2013)
- Wiktionary. 2013. Parameter. Verfügbar unter:  
<http://de.wiktionary.org/wiki/Parameter> (überprüft am 13.10.2013)
- Youngs E G and Peck A J. 1964. Moisture profile development and air compression during water uptake by air-confining porous bodies, Theoretical introduction. Soil Sci, 98. Seite 290 - 294