

Zum Informationsgehalt zeitlich begrenzter Infiltrationsmessungen

1. Einleitung

Infiltration, das Eindringen von Wasser durch die Geländeoberfläche in den Boden, fungiert als Schaltstelle zwischen ober- und unterirdischen Abflusskomponenten und ist aus diesem Grund für eine größere Anzahl verschiedener Fachleute, wie Hydrologen, Wasserbauer, Kulturtechniker, Agraringenieure, Pedologen, Geochemiker, und auch Gerichtssachverständige von Interesse. Für Letztere können Informationen zur Infiltration bei einer großen Bandbreite von Fragestellungen nützlich sein, zB bei Fragen zu Überflutungsereignissen („War Oberflächenabfluss oder doch Grundwasser die Ursache für den Wasserschaden?“), zur konzentrierten Zuleitung von Wasser an den Nachbarn („Fließt überhaupt etwas an der Oberfläche, das durch die beanstandeten Maßnahmen allenfalls zugeleitet werden könnte?“), zu Kontaminationen („Wie viel von dem Schadstoff an der Geländeoberfläche ist in den Boden eingedrungen?“) und in vielen anderen Zusammenhängen.

Häufig kann daher eine Infiltrationsmessung einen sinnvollen oder sogar notwendigen Teil der Befundaufnahme an Ort und Stelle bilden. Neben der Frage nach der Anzahl und Auswahl der Messstellen (die nicht den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildet) muss auch beurteilt werden, wie lange die einzelne Messung durchzuführen ist, um ein aussagekräftiges Datenkollektiv zu erhalten. Die letztere Frage wird umso wesentlicher, wenn mehrere Messungen (an verschiedenen Stellen) vorzusehen sind und der Zeitbedarf für die gesamte Infiltrationsmessung proportional ansteigt. Auch sind Befundaufnahmen mit Sachverständigen und Parteienvertretern ein durchaus nennenswerter Kostenfaktor für die Parteien, sodass die dafür beanspruchte Zeit möglichst gut genutzt werden sollte.

Im vorliegenden Beitrag wird über die Ergebnisse einer vom Verfasser durchgeführten bzw geleiteten Forschungsarbeit berichtet, die Anhaltspunkte für die sachgerechte Wahl der Dauer von Infiltrationsmessungen erarbeiten sollte.¹ Nach einer Schilderung der Untersuchungsmethodik folgt eine Beschreibung und Diskussion der erhaltenen Ergebnisse. Den Abschluss der Arbeit bilden Schlussfolgerungen und – auf einer naturgemäß noch eingeschränkten Datenbasis – erste Empfehlungen für die Praxis.

2. Untersuchungsmethodik

Die Datenbasis für die nachfolgende Analyse bildeten Ergebnisse von 5 Messungen mit einem Doppelringinfiltrometer von 1 bis 3 Stunden Dauer. Die erste Gruppe von drei Messungen wurde über die längeren Versuchsdauern (3 bzw 2,5 Stunden) geführt, ergänzt um zwei kürzere Messungen von rund je 1 Stunde (60 bzw 70 Minuten). Die Wahl des Messgeräts fiel auf das Doppelringinfiltrometer, weil sowohl Transport als auch Handhabung im Feld mit wesentlich geringerem Aufwand verbunden sind als beispielsweise Beregnungsversuche, was bei Befundaufnahmen einen deutlichen praktischen Vorteil darstellt. Gegenüber dem Ringinfiltrometer stellt die Verwendung zweier konzentrischer Blechringe andererseits keinen erheblichen Mehraufwand dar, vermindert bzw verhindert aber jenen systematischen Messfehler, der durch die seitliche Ausbreitung des Wassers unterhalb eines einzelnen Ringes entsteht. Beim Doppelringinfiltrometer (Foto siehe Abbildung 1) erfolgt die Messung nur im inneren Ring, das Wasser im Zwischenraum zwischen den Ringen deckt aber den Einfluss der seitlichen Ausbreitung unterhalb der Messfläche weitgehend ab, sodass dadurch keine oder nur wenig Verfälschung der Messung mit der Folge einer scheinbaren Vergrößerung der Infiltrationsrate entsteht. Die eigentliche Ermittlung der zeitabhängigen Infiltrationsrate erfolgt dadurch, dass entweder das Absinken des Wasserspiegels im inneren Ring erfasst oder (zB mit ei-

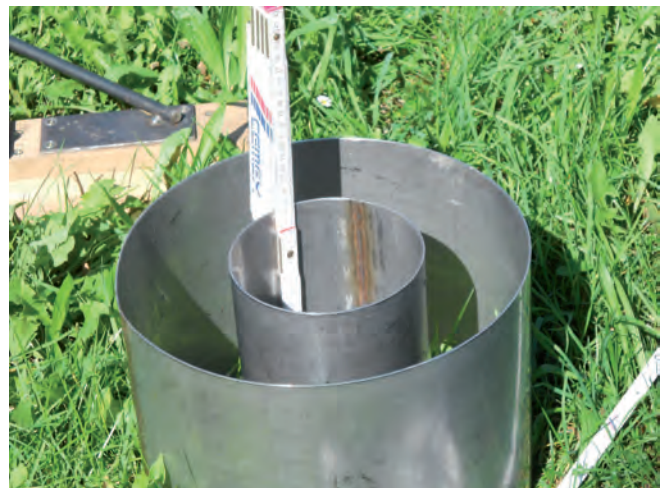


Abbildung 1: Doppelringinfiltrometer

ner dafür geeigneten Wasseruhr) gemessen wird, welcher (zeitabhängige) Zufluss nötig ist, um den Wasserstand konstant zu halten.

Die im Zuge der Infiltrationsmessung ermittelte Ganglinie der Infiltrationsrate kann nun anhand eines prozessorientierten Infiltrationsmodells nachvollzogen bzw zur Kalibrierung des Modells verwendet werden. Zur Berücksichtigung des bei der Infiltrationsmessung herrschenden Einstaues an der Bodenoberfläche eignet sich das „klassische“, physikalisch begründete und rechentechnisch einfach umsetzbare Modell nach *Green/Amp*² sehr gut, das für bestimmte Böden auch eine Lösung der die vertikale Bodenwasserbewegung beschreibenden *Richards*-Gleichung darstellt. Dessen Voraussetzung einer nach unten laufenden Feuchtefront mit nur geringer Änderung ihrer eigenen Form entspricht häufig in guter Näherung den Bedingungen unterhalb des (inneren) Infiltrationsringes, während die durch das Modell nur schlecht reproduzierbare Feuchteumverteilung im Zuge der Infiltrationsmessung planmäßig nicht auftritt.

Das *Green/Amp*-Modell geht von der Gültigkeit des *Darcy*'schen Gesetzes im Bereich zwischen der Bodenoberfläche und der Feuchte- bzw Sättigungsfront aus. Für das hydraulische Gesamtpotenzial ϕ an der Oberfläche wird die Höhe des Überstaues angesetzt (Wassertiefe H_0), für jenes an der Sättigungsfront die Summe aus der Höhendifferenz ($-z_s$ als die z-Koordinate der Feuchtefront, gemessen von der Bodenoberfläche nach unten) und der (über die Feuchtefront) gemittelten Saugspannung des Absolutbetrags ψ_m . Das Potenzialgefälle ergibt sich damit zu (Abbildung 2):

$$\Delta\phi = \frac{H_0 - (-z_s - \psi_m)}{z_s} = \frac{H_0 + z_s + \psi_m}{z_s} = 1 + \frac{H_0 + \psi_m}{z_s} \quad (1)$$

und die Filtergeschwindigkeit in diesem Bereich und somit auch die Infiltrationsrate f_r zu:

$$f_r = K_{sv} \cdot \left(1 + \frac{H_0 + \psi_m}{z_s} \right) \quad (2)$$

mit K_{sv} der vertikalen Durchlässigkeit bei Sättigung.

Gleichung (2) enthält mit $f_r(t)$ und $z_s(t)$ zwei Unbekannte und muss daher durch eine weitere Gleichung, die Kontinuitätsgleichung (3), ergänzt werden:

$$\frac{dz_s}{dt} = \frac{f_r}{(\theta_s - \theta_i)} \quad (3)$$

θ_s bezeichnet dabei den (volumetrischen) Wassergehalt bei Sättigung, θ_i den (ebenfalls volumetrischen) Anfangswassergehalt, die Differenz $\theta_s - \theta_i$ gibt daher den zur Aufnahme des infiltrierenden Wassers verfügbaren Raum(anteil) wieder.

Integration von Gleichung (3) ergibt:

$$z_s(t) = z_s(t=0) + \int_0^t \frac{f_r}{(\theta_s - \theta_i)} d\tau = \frac{1}{(\theta_s - \theta_i)} \cdot F(t) \quad (4)$$

mit $F(t)$ der kumulativen Infiltration vom Beginn des Einstaues bis zur betrachteten Zeit t . Da die Feuchtefront von der Bodenoberfläche wegzulaufen beginnt, ist $z_s(t=0) = 0$ (die vertikale Ortskoordinate wird ja von der Bodenoberfläche weggezählt, positiv nach unten). Setzt man nun für z_s in Gleichung (1) den Ausdruck aus Gleichung (4), rechts, ein und berücksichtigt, dass die Infiltrationsrate $f_r(t)$ die zeitliche Ableitung der kumulativen Infiltration $F(t)$ ist, dann erhält man folgende beschreibende Differentialgleichung (5):

$$\frac{dF(t)}{dt} = K_{sv} \cdot \left[1 + \frac{(H_0 + \psi_m) \cdot (\theta_s - \theta_i)}{F(t)} \right] \quad (5)$$

Gleichung (5) hat eine analytische Lösung für die Variable $F(t)$, diese ist allerdings implizit und lautet wie folgt:³

$$F(t) - (H_0 + \psi_m) \cdot (\theta_s - \theta_i) \cdot \ln \left[1 + \frac{F(t)}{(H_0 + \psi_m) \cdot (\theta_s - \theta_i)} \right] = K_{sv} \cdot t \quad (6)$$

Nach (im Allgemeinen numerischer) Lösung der Gleichung (6) kann anschließend die zugehörige Infiltrationsrate aus Gleichung (5) bestimmt werden, da ja gilt:

$$f_r = \frac{dF(t)}{dt} \quad (7)$$

Aus den obigen Gleichungen (5) und (6) ist erkennbar, dass sie und damit auch die Infiltrationsrate (dem *Green/Amp*-Modell folgend) nur von zwei Parametern abhängen, nämlich der Durchlässigkeit K_{sv} und dem Produkt $\chi := (H_0 + \psi_m) \cdot (\theta_s - \theta_i)$. Verfügt man daher über eine Lösung der Gleichung (5) bzw Gleichung (6) und über Messwerte der Infiltrationsrate f_r bzw kumulativen Infiltration F für eine Anzahl von Zeitpunkten t , dann kann durch „opti-

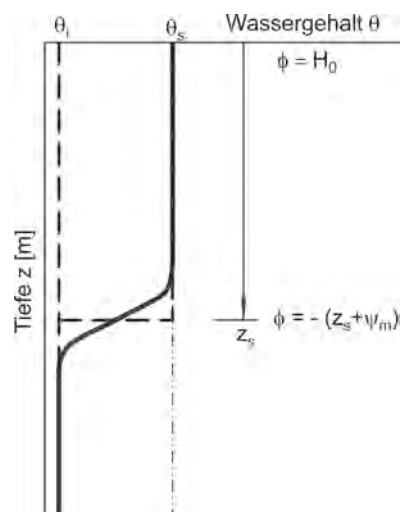


Abbildung 2: Erläuterungsskizze zum *Green/Amp*-Modell

male“ Wahl der beiden Parameter K_{sv} und χ das Kollektiv der Messwerte bestmöglich reproduziert werden (zB nach einem Kriterium der kleinsten Fehlerquadrate), und dieser Vorgang kann umgekehrt zur Schätzung von K_{sv} und Δ dienen. Man wird dabei intuitiv eine umso zuverlässigere Parameterschätzung erwarten, je mehr Messwerte einbezogen werden können bzw je länger die Messung (bei gleichem Messintervall Δt) durchgeführt wurde. Andererseits ist es durchaus naheliegend, dass eine beliebig (theoretisch unendlich) lange Fortsetzung der Messung mit keinen beliebig anwachsenden Informationsgehalten verbunden sein wird. Es ist daher durchaus davon auszugehen, dass eine bestimmte Dauer der Infiltrationsmessung zur Charakterisierung der Infiltrationseigenschaften an dem betrachteten Ort ausreichen wird. In weiterer Folge erhebt sich fast zwangsläufig die Frage, welchen Informationsgehalt man einer etwa im Rahmen einer Befundaufnahme stattfindenden, zeitlich eng begrenzten Infiltrationsmessung entnehmen kann. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden im Zuge des hier gegenständlichen Forschungsvorhabens mehrere lang andauernde Infiltrationsmessungen mittels Doppelringinfiltrimeters durchgeführt und die Messergebnisse zur Parameterschätzung auf der Grundlage wiederholter Lösungen der Gleichungen (5) bzw (6) mit Minimierung eines Fehlermaßes verwendet. Die Parameterschätzung wurde dabei zunächst auf die Daten der vollen Messdauer (zwischen einer und drei Stunden) gestützt und danach die Datenreihen durch Abschneiden laufend weiter verkürzt (Beginn zB mit dem Datensatz für 3 Stunden = 180 Minuten, gefolgt von Parameterschätzungen für die verkürzten Dauern von 150, 120, 90, 60, 45, 30, 15, 10 und 5 Minuten, in einigen Anwendungen auch noch 3 Minuten). Die Parametersätze, bestehend aus der Durchlässigkeit K_{sv} und dem Produkt $\chi := (H_0 + \psi_m) \cdot (\theta_s - \theta_i)$, wurden danach einerseits dazu verwendet, die Infiltrationsraten für die volle Messdauer (zB 3 Stunden) zu simulieren und mit den Messwerten zu vergleichen, andererseits wurden die jeweils geschätzten Werte der Durchlässigkeit über die Länge des zur Schätzung verwendeten Datensatzes aufgetragen, um solcherart ihre Entwicklung charakterisieren zu können. Die Vorstellung der dabei erhaltenen Ergebnisse und ihre Interpretation folgen in dem nun anschließenden Abschnitt.

3. Ergebnisse und Erörterung

Sämtliche Messungen mit dem Doppelringinfiltrimeter wurden an der Geländeoberfläche ohne Abheben des humosen Auflagehorizonts durchgeführt, somit in einer Weise, wie sie für gutachtliche Aussagen über die Entstehung von Oberflächenabfluss zweckmäßig ist.

Ein Schurfaufschluss an Messstelle 1 zeigte unterhalb von 25 cm humosem Auflagehorizont bis zirka 50 cm (Unterkante Schurf) sandigen Kies. Abbildung 3 gibt die Messdaten zusammen mit dem Resultat der Parameterschätzung für das *Green/Ampt*-Modell auf Basis der gesamten Daten wieder. Zusätzlich dargestellt ist die Simulation, die mit den aus nur 15 Minuten Messung rückgerechneten Werten von

K_{sv} und χ berechnet wurde. Erwartungsgemäß zeigen sich Abweichungen zwischen diesen beiden Linien, diese sind aber durchaus gering, sodass man die Linien in Abbildung 3 über einen größeren Bereich optisch nur schwer unterscheiden kann. Im Fall von Messung 1 hätte sich die Infiltrationsrate auf der Basis der Messdaten der ersten 15 Minuten daher gut charakterisieren lassen.

An der Stelle der Messung 2 steht unterhalb von 18 cm Humus mit Grasnarbe ebenfalls sandiger Kies an. Auch im Fall dieser Messung weichen die Ergebnisse der Rückrechnung auf der Grundlage der Messdaten der ersten 15 Minuten von jenen auf Basis des gesamten verfügbaren Datenkollektivs (hier: Dauer 2,5 Stunden) nur geringfügig ab (Abbildung 4).

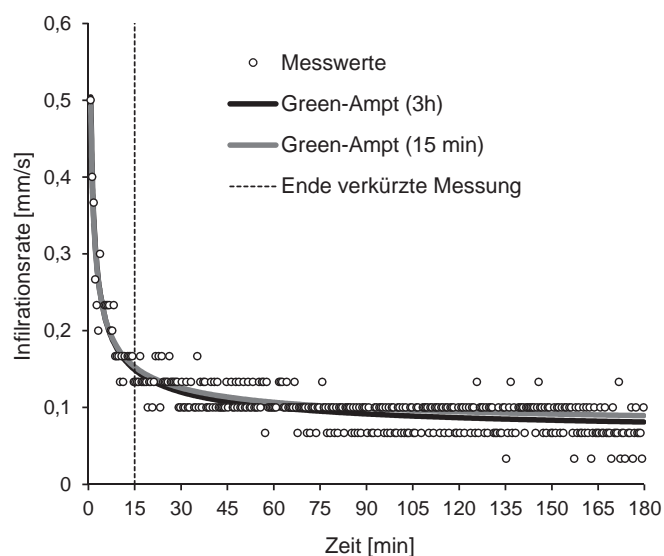


Abbildung 3: Messdaten und Berechnungsergebnisse für Messung 1

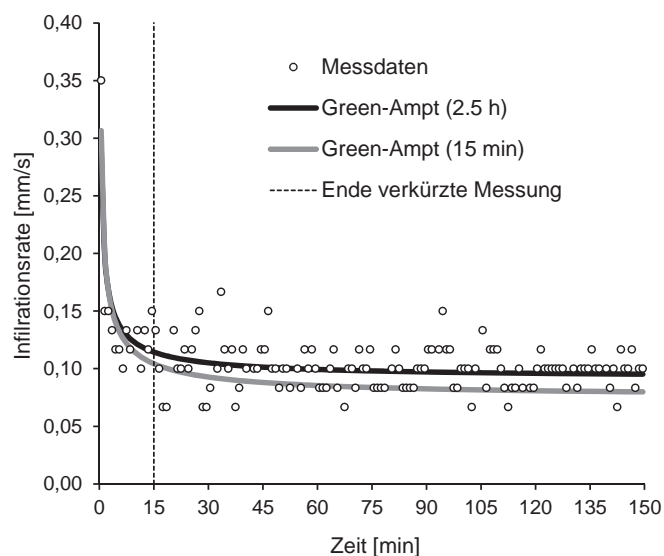


Abbildung 4: Messdaten und Berechnungsergebnisse für Messung 2

Ähnliches kann über die Ergebnisse der dritten „langen“ Messung (an einem Standort mit feinkörnigerem Boden und geringerer Durchlässigkeit) gesagt werden. Hier stimmen die den Abbildungen 3 und 4 entsprechenden Linien sogar so gut überein, dass sie praktisch deckungsgleich verlaufen und nicht getrennt wahrnehmbar sind (weshalb hier auf eine den vorangegangenen Abbildungen analoge Darstellung verzichtet wird). Auch die aus den Daten der ersten Viertelstunde rückgerechnete Durchlässigkeit K_{sv} ($3,09 \times 10^{-5}$ m/s) stimmt mit der Schätzung auf Basis des gesamten Datenkollektivs ($3,16 \times 10^{-5}$ m/s) sehr gut überein. Der Verlauf der rückgerechneten Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Dauer der Infiltrationsmessung ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Grafik zeigt die Verläufe für alle drei „langen“ Messungen (3 bzw 2,5 Stunden Dauer), im Fall der Messung 3 aber in zwei unterschiedlichen Varianten. Während sich die obigen Ausführungen zu Mes-

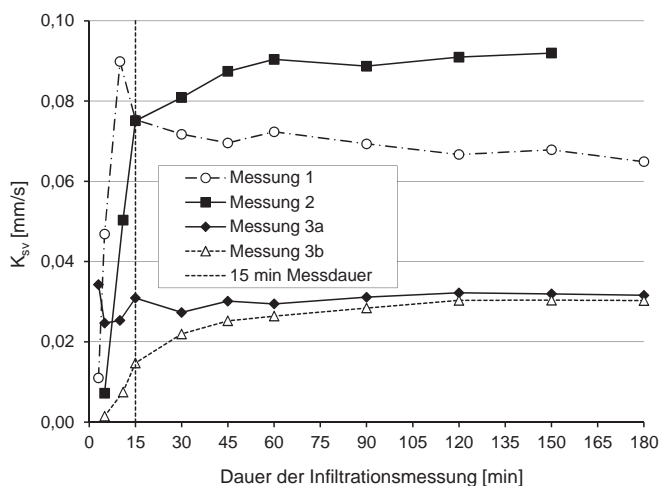


Abbildung 5: Mit dem *Green/Ampt*-Modell rückgerechnete Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der zugrunde liegenden Messdauer

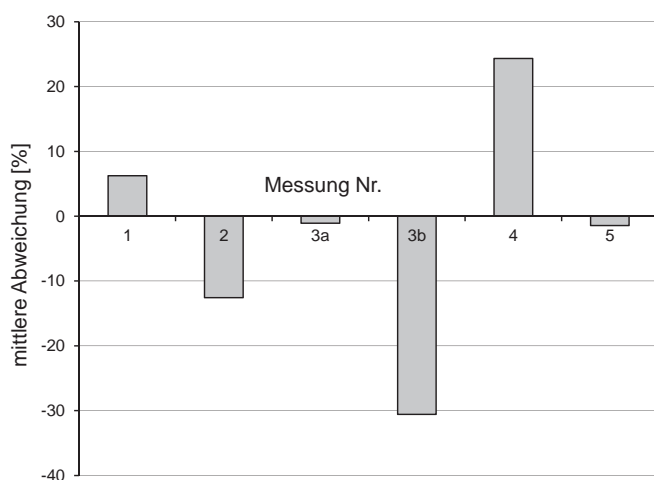


Abbildung 6: Mittlere Abweichung der auf Grundlage der Daten der ersten 15 Minuten für die gesamte Messdauer (von 1 bis 3 Stunden) simulierten Infiltrationsraten

sung 3 auf ein Messintervall von 30 Sekunden beziehen (im Weiteren als Messung 3a bezeichnet), wurde auch untersucht, welchen Einfluss eine geringere Dichte der Einzelmessungen gehabt hätte. Dazu wurde das Messintervall durch Weglassen von Zwischenwerten von 30 Sekunden auf 2 Minuten erhöht (Messung 3b). Infolgedessen war die Zahl der einbezogenen Messwerte innerhalb der ersten Viertelstunde erheblich kleiner als zuvor und der Erfolg der Parameterrückrechnung auf Basis von 15 Minuten Messdauer merklich schlechter, wie auch aus Abbildung 5 für Variante 3b zu erkennen ist. Die Durchlässigkeit nähert sich bei großer Messdauer zwar etwa demselben Wert an wie im Fall 3a, dies erfolgt aber sehr langsam und weist bei einer Parameterschätzung auf Basis von 15 Minuten Messdauer noch eine durchaus erhebliche Abweichung auf (die geschätzte Durchlässigkeit K_{sv} beträgt hier nur knapp die Hälfte ihres Wertes bei Schätzung aus den Daten von 3 Stunden), ganz im Gegensatz zum analogen Fall 3a mit 30 Sekunden Messintervall.

Die Auswertungen der beiden weiteren Messungen (Nr 4 und 5) mit 60 Minuten bzw 70 Minuten Dauer zeigen unterschiedliche Ergebnisse: Die Rückrechnung der Durchlässigkeit auf der Basis von 15 Minuten Messdauer wäre im Fall der Messung 4 mit zirka $1,8 \times 10^{-4}$ m/s deutlich größer ausgefallen als unter Berücksichtigung aller 30-Sekunden-Messwerte der 60 Minuten Gesamtdauer (zirka $1,1 \times 10^{-4}$ m/s). Im Gegensatz dazu sind die beiden Ganglinien der Infiltrationsraten der Messung 5 auf Basis von 70 Minuten bzw 15 Minuten Messdauer praktisch deckungsgleich, die zugehörigen rückgerechneten Werte der Durchlässigkeit weichen um weniger als 3 % voneinander ab.

Betrachtet man schließlich noch den mittleren Fehler der auf Basis von 15 Minuten Messdauer berechneten Infiltrationsraten (jeweils bis zum Ende der Messung nach 1 bis 3 Stunden), dann ergibt sich das in Abbildung 6 wiedergegebene Bild. Die Simulation der Infiltrationsraten über 3 Stunden Dauer auf der Basis der in den Daten der ersten 15 Minuten enthaltenen Information hätte bei Messung 1 (gegenüber den tatsächlichen Messwerten) zu einem mittleren Fehler von +6,25 % geführt, was sicherlich akzeptabel erscheint. Etwa doppelt so groß, aber negativ, ist die mittlere Abweichung für Messung 2, was sich ebenfalls noch in einem tolerablen Rahmen hält. Eine Messdauer von 15 Minuten hätte auch für die Messungen 3a und 5 völlig ausgereicht, was durch die sehr geringen mittleren Abweichungen von -1,07 % bzw -1,43 % bestätigt wird. Knapp unter der 25-%-Marke bleibt die Abweichung im Fall der Messung 4, was vom praktischen Gesichtspunkt meist auch noch als ausreichend beurteilt werden kann. Die „Verdünnung“ der zeitlichen Messdichte durch Anhebung des Messintervalls auf 2 Minuten hatte dagegen für Messung 3b einen mittleren Fehler von -30,6 % zur Folge, was gegenüber dem Messintervall von 30 Sekunden unter sonst gleichen Bedingungen eine signifikante Verschlechterung bedeutet.

4. Schlussfolgerung

Bei Infiltrationsmessungen – nicht nur, aber auch im Zuge hydrologischer Befundaufnahmen – stellt sich häufig die Frage nach deren angemessener Dauer. Diese hängt zwangsläufig von der Aufgabenstellung ab: Soll beispielsweise die Entstehung von Oberflächenabfluss im Gefolge eines 10-minütigen Starkregens untersucht werden, dann erscheint eine über dieses Intervall hinausgehende Messdauer von vornherein entbehrlich. Kann aber für den zu untersuchenden Abflussvorgang auch ein mehrstündiges Niederschlagsereignis relevant sein, dann wäre es von (im Hinblick auf die Verfahrenskosten durchaus auch finanziell) Interesse, zu wissen, wie lange Infiltration gemessen werden muss, um das Geschehen zuverlässig charakterisieren zu können. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde anhand mehrerer längerer Infiltrationsmessungen untersucht, welcher Informationsgehalt insbesondere in den ersten 15 Minuten an Messdaten enthalten ist. Die auf der Grundlage einer natürlich noch sehr eingeschränkten Datenbasis erhaltenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass Messdauern von 15 bis 30 Minuten bei Messintervallen von 30 Sekunden ausreichen können, um das Infiltrationsgeschehen (sowie damit zusammenhängende Vorgänge wie Oberflächenabfluss) auch über ein- bis mehrstündige Zeitspannen gültig zu charakterisieren.

5. Danksagung

Der Verfasser dankt Herrn *David Linhardt* und Herrn *Christof Renner* für ihre Beiträge zu den Messungen 1 bis 3.

Anmerkungen:

- ¹ Siehe dazu auch *Linhardt/Renner*, Interpretation von Infiltrationsmessungen (Diplomarbeit an der HTBLuVA Mödling, 2013).
- ² *Green/Ampt*, Studies on Soil Physics: 1. The flow of air and water through soils, J. Agric. Sci. 1911, 1; siehe dazu zB auch *Assouline*, Infiltration into Soils: Conceptual Approaches and Solutions, Water Resources Research 2013, 1, doi:10.1002/wrcr.20155.
- ³ Siehe dazu unter anderem auch *Jury/Gardner/Gardner*, Soil Physics⁵ (1991); *Swamee/Rathie/Ozelim*, Explicit Equations for Infiltration, J. of Hydrology 2012, doi: 10.1016/j.hydro.2012.01.020.

Korrespondenz:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard H. Schmid
Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger
Vegagasse 16, 1190 Wien
Tel. und Fax: 01 / 3688623
E-Mail: schmid@hydro.tuwien.ac.at

Wichtig für alle im Jahr 2004 auf weitere 10 Jahre eingetragenen Sachverständigen und für alle im Jahr 2009 erstmalig allgemein beeideten und gerichtlich zertifizierten Sachverständigen!

Wir machen darauf aufmerksam, dass alle Sachverständigen, die während des Jahres 2004 auf weitere 10 Jahre eingetragen wurden, sowie all jene, die im Jahr 2009 erstmalig allgemein beeideten und gerichtlich zertifiziert wurden, bis längstens Ende September 2014 den Antrag auf Verlängerung der Eintragung an die Präsidentin oder den Präsidenten des Landesgerichts, bei dem sie seinerzeit den Antrag auf Eintragung gestellt haben, zu richten haben.

Im Antrag sind die gerichtlichen Verfahren, in denen Sie seit Ihrer Eintragung, bei häufiger Heranziehung in einem maßgeblichen Zeitraum unmittelbar vor der Antragstellung, also etwa im letzten Jahr vor der Antragsstellung, tätig geworden sind, mit Aktenzeichen und Gericht anzuführen. Der Rezertifizierungsantrag hat auch einen Hinweis auf die absolvierten Fortbildungsaktivitäten zu enthalten. Legen Sie daher auch – soweit vorhanden – dem Antrag einen Ausdruck des Bildungs-Passes bei.

Die Präsidentin oder der Präsident kann weitere Ermittlungen anstellen und ein Gutachten der Kommission nach § 4a SDG oder eine Äußerung eines qualifizierten Mitglieds dieser Kommission einholen.

Es wird empfohlen, den Antrag auf Rezertifizierung nicht erst gegen Ende der dafür offenstehenden Frist, sondern möglichst bald zu stellen, um eine gleichmäßige Auslastung der mit der Rezertifizierung befassten Stellen zu erreichen.