

Baumwurzeln und Infiltration

Benjamin Lange^{1,2,3,4}, Peter Lüscher², Peter Germann³ und Axel Bronstert⁴

¹ Bundesamt für Umwelt BAFU, CH-3003 Bern, b.lange@gmx.ch

² WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, peter.luescher@wsl.ch

³ Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, pf.germann@bluewin.ch

⁴ Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24-25, D-14476 Potsdam, axelbron@uni-potsdam.de

Die Erforschung der Hochwasserschutzwirkung von Wäldern hat in der Schweiz eine lange Tradition die bis Anfang des 20. Jahrhundert zurück reicht. Lange Zeit galt die Prämisse, dass Wald a priori hochwasserschutzwirksam sei bis dieses Paradigma in den 1980er vermehrt angezweifelt wurde und sich ein differenzierteres, waldstandortsspezifisches Bild der Waldwirkung auf den Hochwasserschutz durchsetzte. Hier stellen wir die Resultate verschiedener Forschungsprojekte über den Einfluss von Wurzeln auf den Wasserrückhalt vor, die in den letzten Jahren in Hochwasserschutzwäldern im Gantrischgebiet (Kanton Bern) durchgeführt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass Wurzeln in gewissen Waldstandortstypen das Wasserspeichervermögen massgeblich beeinflussen und waldbauliche Massnahmen die Hochwasserschutzwirkung verbessern können.

1 Einleitung

In der Schweiz häuften sich im Zeitraum vom 1825 bis 1875 Hochwasserereignisse mit katastrophalen Auswirkungen (RÖTHLISBERGER 1991). Trotz fehlenden wissenschaftlichen Untersuchungen ging man bereits damals davon aus, dass grossflächige Rodungen und die starke Übernutzung der Wälder zur hohen Hochwasserfrequenz beigetragen hatten. Als Folge davon wurde 1876 das erste eidgenössische Forstpolizeigesetz erlassen, welches unter anderem ein Rodungsverbot beinhaltete. Zudem wurden grosse Flächen aufgeforstet um den Wasserrückhalt in den Einzugsgebieten grosser Flüsse zu erhöhen. Zu Beginn des 20. Jahrhundert initiierte die Zentralanstalt für forstliches Versuchswesen (heute die Eidg. Forschungsanstalt WSL) unter der Leitung von Prof. A. Engler eine Studie zur Untersuchung der Waldwirkung auf das Abflussgeschehen. Die Forscher verglichen dabei Abflussdaten des bewaldeten Einzugsgebietes «Sperbelgraben» (Emmental) mit denjenigen des in unmittelbarer Nachbarschaft liegenden, schwach bewaldeten «Rappengraben». ENGLER (1919) konnte zeigen, dass der Spitzenabfluss bei kurzzeitigen Starknie-

derschlägen im stärker bewaldeten Einzugsgebiet um 30 bis 50 Prozent geringer war. Diese Untersuchung erhärtete das forsthydrologische Paradigma in der Schweiz das besagte, dass Wald *a priori* eine abflusshemmende Wirkung aufweist. Diese Meinung blieb lange Zeit unangetastet, erst ab den 1980er Jahren wurde die Untersuchung der Hochwasserschutzwirkung von Wäldern wieder intensiviert und führte zum Teil zu kontroversen Ergebnissen. Auch wenn ein breiter Konsens darüber herrscht, dass Wälder im Vergleich zu offener Vegetation den durchschnittlichen Jahresabfluss von Gewässern aufgrund der höheren Transpirations- und Interzeptionsraten vermindern, ist die Wirkung auf Spitzenabflüsse weniger eindeutig. GERBER (1989) zeigte, dass eine Erhöhung der Waldfläche um 20 Prozent im Einzugsgebiet der Emme zwischen 1860 und 1980 keinen signifikanten Einfluss auf Abflussvolumina hatte und BURCH *et al.* (1996) wiesen nach, dass es keinen statistisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen dem prozentualen Waldanteil von kleinen Einzugsgebieten (1 bis 5 km² im voralpinen Fylschgebieten mit Wald, eher extensiv bewirtschafteter Streuwiesen und Weiden) und dem flächenbezogenen

Abfluss eines mittleren jährlichen Hochwassers gab. Die einfache Formel «Wald = Hochwasserschutz» greift damit zu wenig weit. Unter anderem ist die Waldwirkung auf Spitzenabflüsse abhängig von der Intensität des Niederschlagsereignisses (BESCHTA *et al.* 2000), der alternativen Landnutzungsform, und der Waldbewirtschaftung. So zeigte MOESCHKE (1998), dass eine Entwaldung um 40 Prozent bei Femelschlag den Spitzenabfluss um 30 Prozent erhöhte während die einzelbaumweise Entnahme von 40 Prozent der Bäume zu keiner Änderung des Abflussgeschehens führte. Nach heutigem Kenntnisstand muss die Hochwasserschutzwirkung standortsspezifisch beurteilt werden indem sowohl der Baumbestand (Arten-, Alters- und räumliche Struktur) wie auch Bodeneigenschaften und Niederschlagscharakteristiken integrativ beurteilt werden. Generell geht man davon aus, dass die positive Wirkung des Waldes auf die Wasserretention auf gehemmt durchlässigen, mittel- bis tiefgründigen Böden maximal ist während Wälder auf sehr durchlässigen oder stark vernässten Böden den Wasserrückhalt kaum beeinflussen (LÜSCHER und ZÜRCHER 2003). 2005 wurde die Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NAIS, FREHNER *et al.* 2005) publiziert. Die Autoren definierten für alle relevanten Waldstandortstypen einen die Schutzwirkung maximierenden Idealzustand bezüglich der Baumartenmischung, des Waldgefüges und der Verjüngung. Diese Bestandesparameter wirken sich vor allem auf die Durchwurzelungssituation und damit auf die durch Wurzeln gebildeten Poren aus, die ein massgeblicher Faktor bei Infiltrationsvorgängen sein können (LI und GHODRATI 1994; LANGE *et al.* 2009). Hier präsentieren wir

die Ergebnisse und Schlussfolgerungen langjähriger Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen der Durchwurzelung und Wasserhaushaltsgrößen bei kurzen Starkniederschlägen in voralpinen Schutzwäldern auf gehemmt durchlässigen, mittel bis tiefgründigen Böden im Flyschgürtel wo eine grosse Wirkung des Waldes auf das Abflussgeschehen erwartet werden kann.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet und Experimente

Die Untersuchungen wurden in voralpinen Hochwasserschutzwäldern im Gantrischgebiet (Kt. Bern) in Höhenlagen zwischen rund 880 und 1000 m ü.M. in Waldstandortstypen (WST) 46 (Typischer Heidelbeer-Tannen-Fichtenwald), 49 (Schachtelhalm-Tannen-Fichtenwald) und 19f (Waldsimen-Tannen-Buchenwald auf Pseudogley) durchgeführt. Die Böden wurden als Pseudogleye, Gleye beziehungsweise vergleyte und pseudovergleyte Braunerden klassiert (vgl. ZIMMERMAN *et al.* 2006). Zur Erfassung der bodenhydrologischen Parameter wurden intensive (70 mm h^{-1}), kurzzeitige (1 Std.), kleinflächige Berechnungen (1 m^2) durchgeführt. Oberflächenabfluss konnte nicht beobachtet werden. Eine dreimalige Wiederholung der Berechnung pro Standort diente dazu, unterschiedliche Ausgangswassergehalte im Boden zu simulieren. Der Abstand zwischen den Berechnungen betrug rund 23 Stunden. Während den Berechnungsexperimenten wurden mittels TDR- beziehungsweise FDR-Sonden die volumetrischen Wassergehalte in einer zeitlichen Auflösung von 60 s aufgezeichnet. Pro Standort wurden fünf Sonden in unterschiedlichen Tiefen eingesetzt. Nach diesen Experimenten wurden an denselben Positionen, an welchen die Wassergehaltssonden platziert waren, Bohrproben entnommen (0,1 m Durchmesser) aus welchen die Wurzeln separiert und anschliessend mittels der Software «whinRHIZO» digital vermessen wurden. In den Waldstandortstypen 46 und 49 wurden insgesamt 16 Standorte beregnet, im Waldstandortstyp 19f deren zehn. Die Abstände zur

Stammbasis der Bäume betrug ungefähr 1 m mit Ausnahme von drei Plots im WST 46 und 49 wo der Abstand maximal 3,5 m war.

Die Bodeneigenschaften der Untersuchungsflächen waren relativ homogen, es konnten keine signifikanten Unterschiede in der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem pH-Wert festgestellt werden: Der Sandanteil der Horizonte lag zwischen 17,5 und 73,1 Prozent, der Schluffanteil 16,4 bis 48,6 Prozent und der Tonanteil betrug 8,6 bis 34,6 Prozent. Die Lagerungsdichten im Oberboden waren zwischen $0,65$ und $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, im Unterboden zwischen $0,79$ und $1,6 \text{ g cm}^{-3}$. Details zu den Bodeneigenschaften sind in LANGE *et al.* (2013) zu finden. Ein Vergleich zwischen den WST ist damit zulässig.

2.2 Theorie

Die Zeitreihen der volumetrischen Wassergehalte wurden nach einem Ansatz von GERMANN *et al.* (2007) ausgewertet. Es wird davon ausgegangen, dass Wasser in Form von Wasserfilmen laminar entlang von Porenwänden fliesst. Dabei muss die Pore nicht in ihrem ganzen Durchmesser Wasser führen. In diesem Stokes-Fluss Ansatz beschleunigt die Gravitation den Wasserfluss, während die Viskosität des Wassers den gravitativen Kräften entgegenwirkt. Damit ist die Interpretation der Ergebnisse auf einen bestimmten Bodenwassergehalt limitiert, bei dem kleinere Poren bereits gesättigt sind und grössere Poren als Fliesswege dienen. Diese Verhältnisse sind typisch für Wasserfluss in präferenziellen Fliesspfaden wie zum Beispiel in Makroporen. Ein Wasserfilm ist definiert durch seine Mächtigkeit (Filmdicke F) sowie seine Kontaktlänge L mit den festen Bodenbestandteilen in der horizontalen Ebene. Dabei ist L ein Mass für die Porosität, welche am Wasserfluss beteiligt ist. Die Kontaktlänge kann mit der Wurzeldichte verglichen werden, um zu untersuchen inwieweit Wurzeln den hydrologisch aktiven Porenraum bilden. Ausgangspunkt der Analysen sind aufgezeichnete Wassergehaltsmessungen. Aus dem Zeitpunkt des ersten Anstieges des Wassergehaltes bei der Berechnung (Ankunftszeit der Feuchtefront) lässt sich die Filmdicke F berechnen. Unter Einbezug des volumetrischen Wassergehaltes kann die Kontaktlänge L bestimmt werden. Ein detaillierter Beschrieb der theoretischen Hintergründe ist in GERMANN *et al.* (2007) zu finden.

cke F berechnen. Unter Einbezug des volumetrischen Wassergehaltes kann die Kontaktlänge L bestimmt werden. Ein detaillierter Beschrieb der theoretischen Hintergründe ist in GERMANN *et al.* (2007) zu finden.

3 Resultate

3.1 Vergleich der Wurzeldichten

Die WST 46 und 49 waren im Untersuchungsgebiet räumlich eng verzahnt, weshalb diese Waldstandortstypen hier, trotz unterschiedlichem Mikrorelief, zusammenfassend als Tannen-Fichtenwälder dem WST 19f mit höherem Buchenanteil gegenüber gestellt werden. Als vergleichbares Mass für die Wurzeldichte diente die Wurzellänge pro Bodenvolumen RL in cm cm^{-3} . Rund 90 Prozent der Gesamtwurzellänge wurden durch Feinwurzeln mit einem Durchmesser von unter 2 mm gebildet. Erwartungsgemäss nahm die Wurzeldichte mit zunehmender Bodentiefe infolge der Zunahme der Vernässungsgrade der Horizonte ab. Im Tannen-Buchenwald (WST 19f) war die Durchwurzelung generell ausgeprägter als in Tannen-Fichtenwäldern (WST 46, 49), auch wenn sich die durchschnittlichen Durchwurzelungsdichten zwischen den Standorten infolge einiger sehr hohen Wurzeldichten im Oberboden der WST 46, 49 nur geringfügig unterschieden. Insbesondere im Tiefenbereich von 0,2 bis 0,8 m, d.h. in nicht und schwach vernässten Unterbodenhorizonten war der WST 19f intensiver durchwurzelt, was mit dem höheren Deckungsgrad der Buchen erklärt werden kann die über Herzwurzelsysteme verfügen die mittlere Bodentiefen intensiver durchwurzelt (Abb. 1).

Werden nicht die Tiefenbereiche zum Vergleich der Wurzeldichten herangezogen sondern morphologische Bodenhorizonten, ergibt sich ein leicht anderes Bild. Bei dieser Betrachtungsweise waren nicht hydromorphe Oberbodenhorizonte in den WST 46, 49 intensiver durchwurzelt als der WST 19f, was mit der stärkeren Verbreitung der bekanntermassen flachwurzelnden Fichte zusammenhängen dürfte.

3.2 Infiltration

Der Unterschied zwischen dem Wassergehalt unmittelbar vor der Beregnung und dem maximalen Wassergehalt während der Beregnung, die Amplitude der Infiltration ω_i , ist ein Mass für das Infiltrationsvermögen. Die hier präsentierten Ergebnisse stammen ausschliesslich von der dritten Beregnung. Der Grund liegt darin, dass während der dritten Beregnung ein vergleichbares Porengrössenspektrum hydrologisch aktiv war. Während den ersten zwei Beregnungen wurden kleinere Poren kapillar gesättigt und das Wasser darin immobilisiert. Der Wasserfluss der dritten Beregnung fand primär in grösseren Poren statt in denen Gravitation als massgebende Kraft angenommen werden kann und der angewandte theoretische Ansatz gültig ist. Die Amplitude der Infiltration war bis in 0,2 m Tiefe in den WST 46, 49 höher als im WST 19f. Zwischen 0,2 und 0,8 m verfügte dagegen der WST 19f über eine deutlich höhere ω_i die sich erst zwischen 0,8 und 1,0 m wieder anglich (Abb. 2). Das bedeutet, dass die Wasseraufnahme in den WST 46, 49 bei einem kurzzeitigen Starkniederschlagsereignis vor allem auf die obersten Bodenhorizonte, in der Regel der Ah-Horizont, beschränkt war und kaum Tiefensickerung stattfand während im WST 19f auch der Unterboden als Speicherraum zur Verfügung stand.

Der erwähnte Stokes-Fluss Ansatz erlaubte nun eine genauere Analyse der Geometrie des Wasserflusses: Eine Veränderung der Amplitude der Infiltration kann entweder durch Veränderungen der Wasserfilmdicke F oder durch eine Variation der wasserführenden Porosität (Kontaktlänge L) erfolgen. Zur Berechnung von L und F ist eine Zunahme des Wassergehaltes infolge der Beregnung nötig. Aufgrund des geringen Umfanges der Stichproben welche diese Bedingung in Bodentiefen unterhalb von 0,8 m erfüllten, wurde in diesem Tiefenbereich auf die Berechnung der Wasserflussgeometrie verzichtet. Wie Abbildung 3 zeigt, war die Filmdicke bei vertikaler Infiltration im WST 46, 49 über die ganze Bodentiefe relativ konstant. Das bedeutet aufgrund der Theorie, dass auch die Geschwindigkeit der sich vertikal nach unten bewegenden Feuchte-

Abb. 1. Durchschnittliche Wurzel-dichten der WST 46, 49 im Vergleich zum WST 19f in unterschiedlichen Bodentiefen. Die Fehlerbalken zeigen \pm ein Standardfehler.

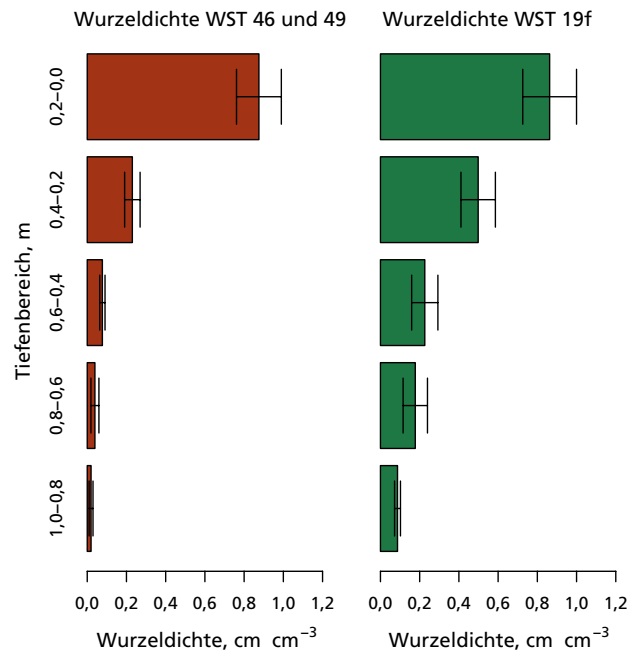
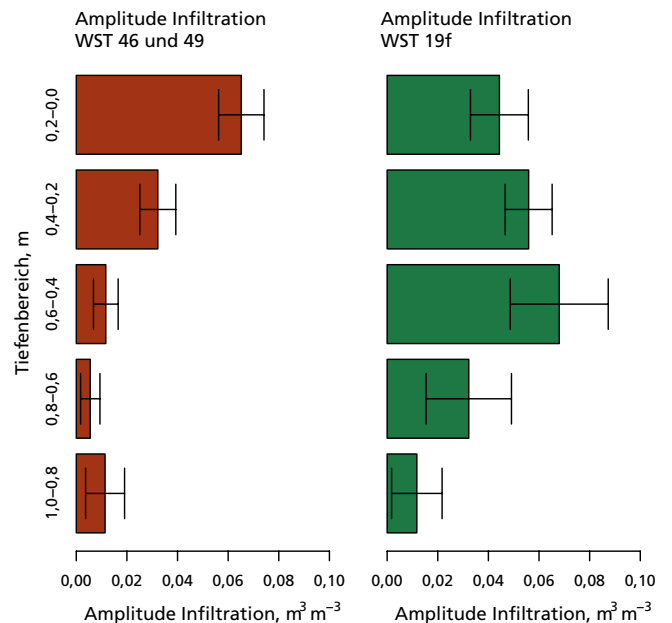


Abb. 2. Durchschnittliche Amplituden der Infiltration ω_i der WST 46, 49 und des WST 19f in unterschiedlichen Bodentiefen. Die Fehlerbalken zeigen \pm ein Standardfehler.



front relativ stabil war und Änderungen der Amplitude der Infiltration primär durch verändertes wasserführendes Porenvolumen bedingt waren. Demgegenüber nahm die Filmdicke im WST 19f mit zunehmender Bodentiefe zu. Eine mögliche Erklärung dazu sind zusammenfliessende Wasserfilme aufgrund einer mit der Tiefe abnehmenden (Makro-)Porosität analog eines Trichters. Die Kontaktlänge nahm in den WST 46, 49 mit zunehmender Bodentiefe deutlich ab. Dieser

Trend war auch im WST 19f ersichtlich, allerdings weniger deutlich ausgeprägt (Abb. 4). Veränderungen in der Infiltrationskapazität über die Bodentiefe waren damit in den WST 46, 49 in einer Abnahme der wasserführenden Porosität begründet während im WST 19f sowohl die Kontaktlänge L wie auch die Filmdicke F variierten und damit zu einem weniger einheitlichen Bild führten.

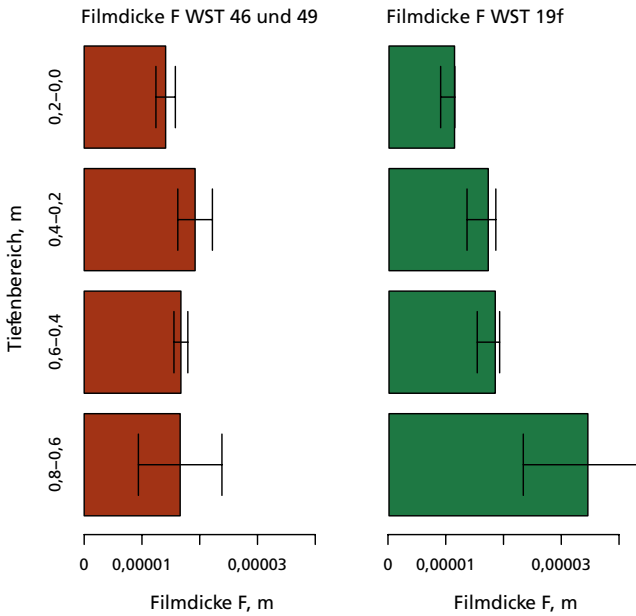


Abb. 3. Durchschnittliche Filmdicken F der WST 46, 49 und 19f verschiedener Tiefenbereiche. Die Fehlerbalken zeigen ± ein Standardfehler.

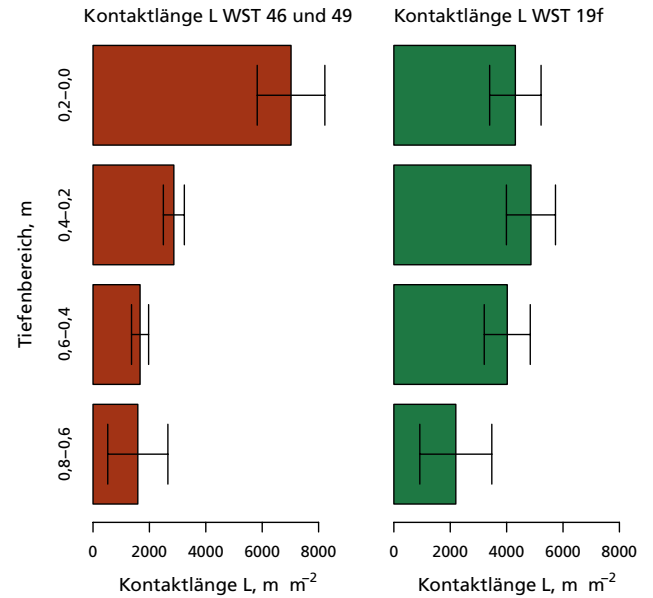


Abb. 4. Durchschnittliche Kontaktlängen L der WST 46, 49 und 19f verschiedener Tiefenbereiche. Die Fehlerbalken zeigen ± ein Standardfehler.

3.3 Wurzeln und vertikale Infiltration

Um den Einfluss der Wurzeln auf die Infiltration zu eruieren, wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Als Inputvariablen dienten die Lagerungsdichten, die Wurzel-dichten und die Bodenart (prozentuale Anteile von Sand, Schluff und Ton). Im WST 19f konnte damit die Amplitude der Infiltration nicht zufriedenstellend erklärt werden. Es scheint, als ob an diesem Standort weitere, nicht erfasste Faktoren den Wasserfluss im Boden beeinflussten. Mögliche makroporenbildende Prozesse sind zum Beispiel Gefrier- und Tauzyklen, Quellen und Schrumpfen tonhaltiger Bodenbestandteilen (ROMKENS und PRASAD 2006) oder die Wühltätigkeit von Bodentieren (LAMANDE *et al.* 2003). Dagegen zeigte sich im WST 46, 49 klar, dass die Amplitude der Infiltration bei hohem Bodenwassergehalt primär durch Wurzeln bestimmt wurde (R^2 zwischen RL und ω_1 0,43). Der Einbezug der weiteren Variablen verbesserte das Modell nur marginal. Da die Fimdicke F in diesem WST über die Bodentiefe relativ konstant war, beeinflussten die Wurzeln vor allem die Kontaktlänge L und damit den an der Infiltration beteiligte Porenraum (Abb. 5).

Damit konnte nachgewiesen werden, dass in gewissen Hochwasserschutzwäldern mit vernässten Horizonten ein Zusammenhang zwischen der Wurzel-dichte und der wasserführende Porosität besteht. Die Ergebnisse von zahlreichen anderen Studien lassen den Schluss zu, dass Wurzeln die Infiltration tatsächlich massgeblich erhöhen kann und nicht nur eine Folge der örtlich höheren Porosität sind. So wiesen

zum Beispiel MEEK *et al.* (1989) nach, dass sich die Infiltrationsrate eines gepflügten und mit Luzerne bewachsenen Standortes aufgrund des durch Wurzeln gebildeten Porenraumes innerhalb von vier Jahren etwa verdoppelte. Detaillierte Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen der Infiltration und der Durchwurzelung in Waldböden sind in LANGE *et al.* (2010) zu finden.

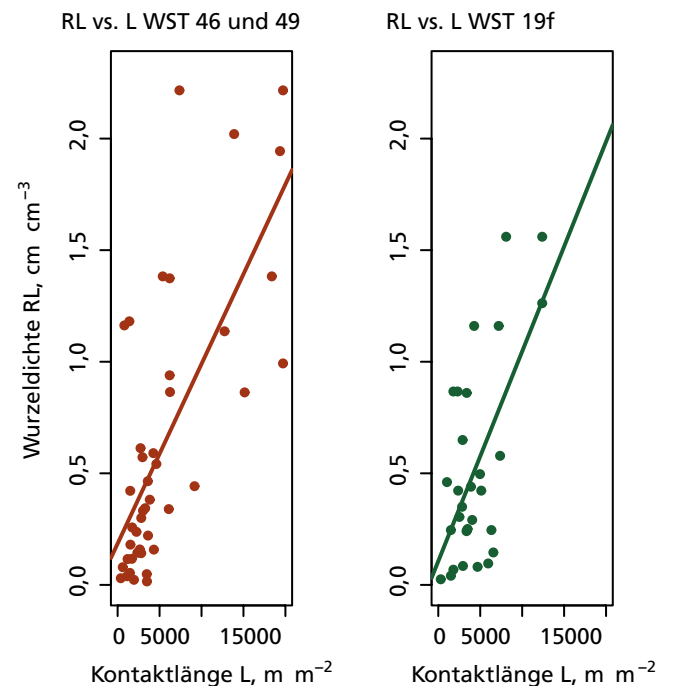


Abb. 5. Horizontspezifische Wurzel-dichte vs. Kontaktlänge der WST 46, 49 und des WST 19f. R^2 WST 46, 49: 0,43; R^2 WST 19f: 0,26.

3.4 Wurzeln und lateraler Fluss

Lateraler Fluss im Boden ist ein wichtiger abflussbildender Prozess in Einzugsgebieten mit geringer Bodenmächtigkeit oder dichten Bodenhorizonten oberhalb derer Wasser lateral hangabwärts fließen kann. Wurzeln können lateralen Abfluss im Boden begünstigen indem sie durch die hangparallele Ausbildung von Poren ein laterales präferenzielles Fließnetz generieren können (z.B. NOGUCHI *et al.* 1999). Dadurch können Wurzeln auch dazu beitragen, dass die Volumenflussdichte des lateralen Abflusses bei konstanter Niederschlagsintensität zunimmt. Dieser Prozess kann die Hochwasserschutzfunktion von Wäldern zumindest teilweise mindern. Als Beispiel sei hier das Ergebnis eines hydrologischen Modells gezeigt, das den vertikalen Stokes-Fluss Ansatz von GERMANN *et al.* (2007) um lateralen Fluss erweitert. In diesem Ansatz wird gravitativer Fluss angenommen, kapillare Kräfte und Oberflächenabfluss werden nicht berücksichtigt. Die Aussagekraft beschränkt sich damit auf einen Wassergehalt zwischen Sättigung und der Feldkapazität. Ziel der Untersuchung war es, den Ausfluss am unteren Ende eines Hanges für verschiedene laterale Porositäten, und damit unterschiedliche laterale Wurzeldichten, zu modellieren. Als Modell diente ein virtueller Hang mit einer Neigung von 30°, beliebiger Breite der während 1 h mit 70 mm h⁻¹ beregnet wird. Zudem wurde in 0,5 m Tiefe eine Stauschicht oder anstehender Fels angenommen. Entlang diesem Infiltrationshindernis floss das Wasser lateral hangabwärts. Es wurde weiter davon ausgegangen, dass die Wurzeldichte nur die wasserführende Porosität (Kontaktlänge L) beeinflusste während die Filmdicke F konstant blieb da HINCAPIÉ und GERMANN (2009b) nachwiesen, dass F primär von der Niederschlagsintensität abhängt und kaum von lokalen Bodeneigenschaften beeinflusst ist. Im Modell wurde daher der Mittelwert der Filmdicken aller WST in einer Bodentiefe von 0,4 bis 0,6 m verwendet (F = 1,755 × 10⁻⁵ m) während die Kontaktlängen WST-spezifisch über dieselbe Bodentiefen gemittelt wurden. Daraus resultierte L = 1669 m m⁻² im WST 46, 49 und L = 4022 m m⁻² im WST 19f. Damit

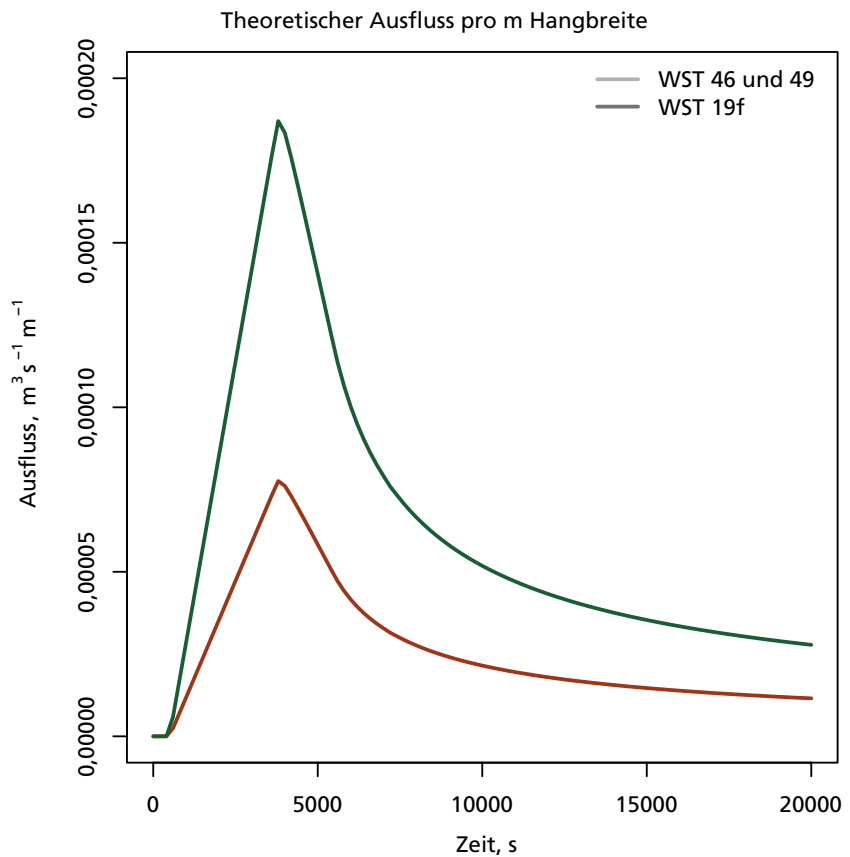


Abb. 6. Modellierter Ausfluss aus einem Hang bei einer Niederschlagsdauer von 3600 s und einer Intensität von 70 mm h⁻¹. Tiefe der Stauschicht: 0,5 m; Hangneigung: 30°; Filmdicke F: 1,755 × 10⁻⁵ m; Kontaktlänge L: 1669 m m⁻² (WST 46, 49) bzw. 4022 m m⁻² (WST 19f). Kein Oberflächenabfluss, rein gravitativer Fluss in grösseren Poren.

wurde angenommen, dass die durch Wurzeln gebildete vertikale Porosität auch der lateralen Porosität entspricht. Abbildung 6 zeigt den erwarteten Ausfluss pro m Hangbreite. Eine höhere Wurzeldichte führte zu höherem Ausfluss am Hangende. Im hier gezeigten Beispiel resultierte eine Erhöhung der Wurzeldichte um einen Faktor von 2,4 zu einer Erhöhung des Spitzenausflusses um denselben Faktor. Unter der Annahme, dass die Filmdicke konstant war, war der Spitzenausfluss aus dem Hangsegment also linear abhängig von der lateralen Porosität die auch durch Wurzeln erhöht werden kann. Die Begründung liegt darin, dass die Volumenflussdichte gemäss Theorie eine Funktion von F in der dritten Potenz und L (linear) ist. Da F nur von der Niederschlagsintensität abhängt, hängt die Volumenflussdichte bei gleichbleibender Intensität des Niederschlages linear von L ab. Damit kann davon ausgegangen werden, dass lateral verlaufende Wurzeln den hangparallelen Fluss erhöhen und

damit die Schutzwirkung der Wälder vermindern können. Diese Schlussfolgerung muss allerdings relativiert werden wenn die Fließdistanz des Wassers zwischen dem Beginn des Niederschlags und dem Spitzenabfluss berücksichtigt wird. Wenn angenommen wurde, dass das Wasser vertikal bis zur Stauschicht floss und sich anschliessend lateral daran entlang bewegte, resultierte eine laterale Fließdistanz bis zum Zeitpunkt des Spitzenabflusses (3828 s nach Niederschlagsbeginn) von gerade einmal 2,7 m bei einem Niederschlagsereignis von 1 Stunden Dauer und einer Intensität von 70 mm h⁻¹. Die abflussbeitragende Fläche beim Spitzenabfluss erstreckte sich damit maximal 2,7 m seitlich vom Gewässer hangaufwärts. Weiter entfernte Flächen wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt abflusswirksam wenn die Volumenflussdichte der gerinnenahe Flächen bereits wieder abnimmt und sich damit der Ausfluss aus dem Hang verringert. Damit kann auch die Wirkung von durch Wurzeln gebildeten lateralen Poren auf den Spitzenabfluss

relativiert werden, da unsere Modellierung zeigte, dass diese nur sehr geringe oder bei sehr lang anhaltenden Niederschlägen von hydrologischer Bedeutung waren. Wurde dagegen ein längerer Zeitrahmen betrachtet, erhöhte sich die Grösse der abflussbeitragenden Fläche. So war nach 10 Stunden eine Distanz von etwa 11,3 m hangaufwärts am Ausfluss beteiligt wobei dann der Ausfluss nur noch etwa 28 Prozent des Spitzenabflusses betrug. Hinzu kommt, dass in realen Böden Wasser von präferenziellen Fliesspfaden in kleinere Poren abstrahiert wird und kurz bis mittelfristig durch Kapillarkräfte gebunden werden kann (HINCAPIE und GERMANN 2009a) was den lateralen Abfluss weiter vermindern wird.

Auch wenn eine hohe Wurzelichte den lateralen Fluss im Boden erhöhen kann, sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Verminderung oder Verhinderung des Oberflächenabflusses ein zentrales Ziel der Hochwasserschutzfunktion des Waldes sein sollte. Damit kann einerseits eine schnelle Abflussantwort der Gewässer verzögert, andererseits der Boden als potentieller Zwischenspeicher erst zur Verfügung gestellt werden. Oberflächenabfluss erreicht Geschwindigkeiten von bis zu 10 cm s^{-1} (WOHLRAB *et al.* 1992), während sich Fliessgeschwindigkeiten in präferenziellen Fliesspfaden im Boden meist zwischen $0,01$ bis $0,5 \text{ cm s}^{-1}$ (GERMANN und HÄNSEL 2006) bewegen. Dies führt bereits zu einer deutlichen Verzögerung des Abflusses. Eine durch Wurzeln erwirkte höhere Infiltration vergrössert auch den Speicherraum im Boden, die Wasseraufnahmekapazität kann gesteigert werden. Die positiven Auswirkungen erhöhter Durchwurzelungsdichten auf die vertikale Infiltration überwiegen damit bei weitem und überkompensieren die negativen Effekte bezüglich des Hochwasserschutzes aufgrund potentiell höherer lateraler Fliessgeschwindigkeiten.

3.5 Klimaänderung und Schutzwirkung

Die globale Erwärmung wird die Baumartenzusammensetzung in gewissen Höhenstufen verändern. Frostempfindliche Arten können höhere Lagen bestocken und aufgrund ihrer Konkur-

renzkraft heute verbreitete Arten teilweise verdrängen. Damit geht auch eine Veränderung der Durchwurzelungssituation und der Schutzwirkung einher. Um die daraus resultierenden Konsequenzen abzuschätzen wurde ein Szenario verwendet, bei dem Buchen infolge der Klimaänderung vermehrt in heutige Hochwasserschutzwälder des WST 46 einwandern und vor allem Fichten verdrängen werden (BRZEZIECKI *et al.* 1995). Es wurde angenommen, dass sich die Wurzelichte im heutigen WST 46 mit dem Einwachsen der Buche zukünftig zu derjenigen verändern wird, wie sie heute im WST 19f typisch ist. Aufgrund der Korrelation zwischen der Wurzelichte und der Amplitude der Infiltration liess sich anschliessend abschätzen, wie sich die Wasserspeicherkapazität mit einem höheren Anteil der Buchen voraussichtlich ändern würde. Details der Berechnungsgrundlage sind in LANGE *et al.* (2013) zu finden. Aufgrund der tendenziell höheren Wurzelichte im WST 19f kann von einer höheren Wasserspeicherkapazität ausgegangen werden. In den obersten 10 cm des Bodens ist eine leichte Abnahme des Wasserspeichervermögens zu erwarten, da hier die Wurzelichte in den WST 46, 49 durchschnittliche höher war als

im WST 19f. Dagegen wird in mittleren Bodentiefen zwischen rund $0,1$ und $0,8 \text{ m}$ eine Zunahme der Wasseraufnahmekapazität erwartet (Abb. 7).

Der zusätzliche Wasserspeicherraum summiert sich über eine Bodentiefe von einem Meter auf rund 9 mm , was im Untersuchungsgebiet rund 15 Prozent eines einstündigen Extremniederschlagsereignisses mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren entspricht. Auch wenn dieses Ergebnis zeigt, dass der Wasserspeicherraum im heutigen WST 46 mit einem höheren Buchenanteil vergrössert wird, kann trotzdem nicht von einer generellen Verbesserung der Hochwasserschutzfunktion ausgegangen werden, da die Klimaerwärmung auch intensivere Niederschlagsereignisse mit sich bringen könnte (OCC/ProClim 2007). Zudem wurde nur ein WST untersucht und die Folgen potentieller, klimatisch bedingter Artenwechsell auf das Wasserspeichervermögen von Böden anderer WST sind weitgehend unbekannt. Die Ergebnisse sind repräsentativ für kurzzeitige Starkniederschlagsereignisse bei hoher Bodenfeuchte im nordalpinen Flyschgürtel mit Tannen-Fichtenwäldern und in Höhenlagen wo die Buche die Fichte voraussichtlich stark konkurrieren wird.

Zusätzlicher Wasserspeicher WST 19f

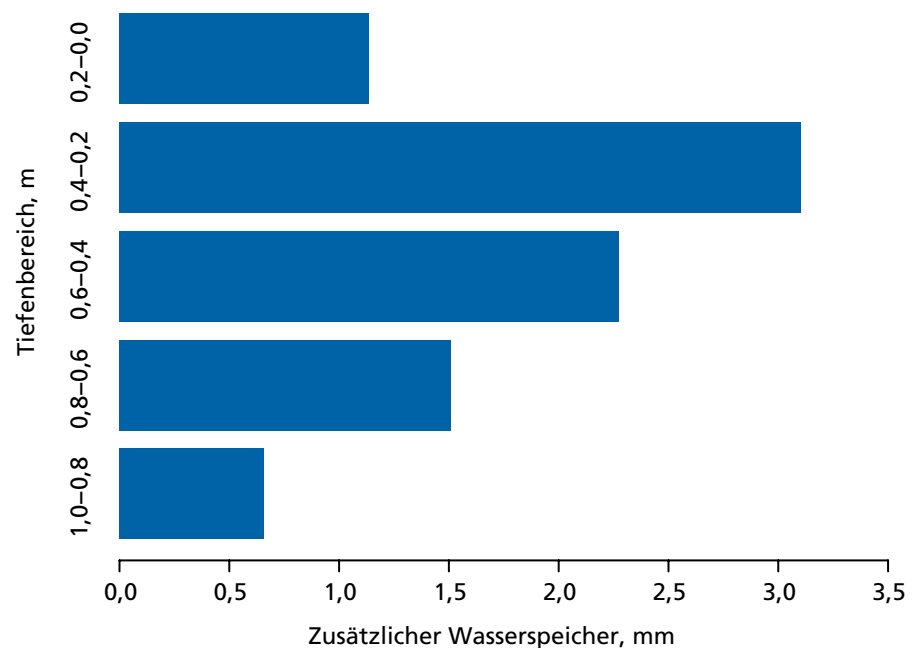


Abb. 7. Zusätzlicher Wasserspeicher (Amplitude der Infiltration) in mm wenn die Buche im WST 46 infolge der Klimaerwärmung dominanter wird.

4 Der ideale Hochwasserschutzwald

Hochwasserschutzwälder stocken vielerorts auf vernässten Böden die bei stärkeren Niederschlagsereignissen und höheren Bodenwassergehalten zur Bildung von Oberflächenabfluss neigen. Ein wichtiges Schutzziel dieser Wälder ist die Erhöhung der Infiltrationskapazität und des Wasserspeichervermögens des Bodens. Unsere Studien weisen klar daraufhin, dass Wurzeln das Infiltrationsvermögen und die Wasserspeicherkapazität von Böden massgeblich verbessern können. Das Ziel im Hochwasserschutzwald sollte deshalb eine in allen Dimensionen möglichst hohe Wurzelichte sein, die auch vernässte Horizonte einbezieht und grössere Lücken in der Durchwurzelung des Bodens ausschliesst. Damit kann auch eine vorhandene Stauschicht erschlossen werden und potentielle laterale Fliesspfade entlang der Stauschicht können unterbrochen werden. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass bei einzelbaumweiser Baumartemischung, bei gleichzeitigem Vorhandensein unterschiedlicher Altersstufen und bei einer Mischung von eher flach- und tiefwurzelnder Arten eine maximale Durchwurzelungsintensität über den gesamten potentiellen Wurzelraum erreicht wird (FÖLSTER *et al.* 1991; SCHMID und KAZDA 2002). Daraus können folgende Anforderungen an Hochwasserschutzwäldern auf vernässten Böden abgeleitet werden:

1. Der Bestand soll über eine einzelbaumweise Artenmischung verfügen.
2. Die Baumarten sollen über unterschiedliche Wurzelsysteme verfügen (Flach-, Herz- und Pfahlwurzeln) um den gesamten potentiellen Wurzelraum optimal zu erschliessen.
3. Mindestens eine Baumart, idealerweise die am tiefsten wurzelnde, sollte auch in teilweise anaeroben Bodenhorizonten wurzeln können.
4. Unterschiedliche Altersstufen sollten gleichzeitig vorhanden sein. Nebst einer Erhöhung der Wurzelichte kann damit auch eine ausreichende Verjüngung und die nötige Bestandesstabilität sichergestellt werden.

Diese Erkenntnisse decken sich mit denen von FREHNER *et al.* (2005), die in der Wegleitung «Nachhaltigkeit

und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS) Zielgrössen bezüglich der Artenmischung, Bestandesstruktur und Verjüngung für schutzrelevante Waldstandortstypen definiert haben. Die Autoren fordern generell eine naturnahe, stufige Bestockung mit hohem Deckungsgrad um den Wurzelraum optimal zu erschliessen und damit die Schutzwirkung zu optimieren. FREHNER *et al.* (2005) stellen zudem Unterlagen zur Verfügung, um den aktuellen Zustand der Schutzwälder zu erfassen und daraus waldbauliche Massnahmen zur Optimierung der Schutzfunktion abzuleiten.

Die Wirkung der Hochwasserschutzwälder beruht einerseits auf der Porosität des Bodens welche massgeblich durch Wurzeln gebildet wird, andererseits aber auch auf erhöhten Interzeptions- und Transpirationraten von Wäldern gegenüber offener Vegetation. Das führt dazu, dass der Boden vor einem Niederschlagsereignis trockener sein kann und damit ein höheres Speichervermögen aufweist. Die hier präsentierten Studien befassten sich vor allem mit der Wirkung von Wurzeln auf die Infiltration. Um die Waldwirkung auf den Hochwasserschutz umfassend zu untersuchen, müssten auch die Interzeption und Transpiration berücksichtigt werden. Bei der Transpiration von Bäumen wird, je nach Durchwurzelungstiefe, Wasser aus unterschiedlichen Bodentiefen entnommen. Auch bei diesem Prozess sind damit Wurzeln von zentraler Bedeutung und eine Abschätzung der Auswirkungen der Transpiration auf den Bodenwassergehalt und potentiellen Wasserspeicher bedingt Kenntnisse über die standortstypische Durchwurzelungssituation. Generell existieren bislang nur wenige Daten zur vertikalen und lateralen Durchwurzelung verschiedener WST. Dies ist primär darin begründet, dass die Erfassung der Durchwurzelungssituation zeitraubend ist und die Ergebnisse aufgrund der Inhomogenität der Böden und Bestände nur unter Vorbehalten auf andere Standorte übertragen werden können. Möglicherweise bieten sich hier Wurzelmodellierungen an, wie sie zum Beispiel von SCHWARZ *et al.* (2010) durchgeführt wurden. Ein besserer Kenntnisstand über Dichten und räumliche Verteilungen von Wurzeln liesse eine Verbesserung hydro-

logischer Modelle zu und würde auch in anderen Gebieten, wie zum Beispiel der Modellierung von Trockenstressrisiken aufgrund der Klimaerwärmung, entscheidend zur Verbesserung von Vorhersagemodellen beitragen.

Einige offenen Fragen, in welcher Weise und unter welchen Umständen der Wald einen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten kann, wurden in den letzten Jahren beantwortet. Allerdings bereitet es nach wie vor Schwierigkeiten, daraus allgemeine Zusammenhänge abzuleiten da sowohl die Vorfeuchte des Bodens, die Bodeneigenschaften, Niederschlagscharakteristiken und Bestandesparameter hochvariabel sind. Für die Praxis hat die Wegleitung von FREHNER *et al.* (2005) auch nach neuesten Erkenntnissen ihre Gültigkeit und bietet einen dem Stand des Wissens angepassten Rahmen, um die Hochwasserschutzwirkung von Wäldern abzuschätzen, zu erhalten und gegebenenfalls mittels forstlicher Massnahmen zu verbessern.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Roger Köchli und Marco Walser von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL (Schweiz) und bei Andreas Bauer, Thomas Gräff und Irene Hahn von der Universität Potsdam (Deutschland) für die Hilfe bei der Feldarbeit. Philipp Mösch von der Waldabteilung 5 (Kt. Bern) hat uns bei der Suche nach Untersuchungsgebieten unterstützt und uns erlaubt, die Feldarbeiten durchzuführen. Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden durch die COST-Aktion E38 (Woody Root Processes), das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL und des Bundesamtes für Umwelt BAFU sowie durch den Schweizerischen Nationalfonds finanziell unterstützt und ermöglicht.

6 Literatur

- BESCHTA, R.L.; PYLES, M.R.; SKAUGSET, A.E.; SURFLEET, C.G., 2000: Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA. *J. Hydrol.* 233: 102–120.
- BRZEZIECKI, B.; KIENAST, F.; WILDI, O., 1995: Modeling potential impacts of climate-change on the spatial-distribution of zonal forest communities in Switzerland. *J. Veg. Sci.* 6, 2: 257–268.
- BURCH, H.; FORSTER, F.; SCHLEPPI, P., 1996: Zum Einfluss des Waldes auf die Hydrologie der Fylsch-Einzugsgebiete des Alptals. *Schweiz. Z. Forstwes.* 147, 12: 925–937.
- ENGLER, A., 1919: Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitt. Schweiz. Zent.anst. forstl. Vers.wes.* XII Band.
- FÖLSTER, H.; DEGENHARDT, M.; FLOR, T.; LUX, M., 1991: Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerden-Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängigkeit von Baumart und Bestandesstrukturparametern. *Mitt. Forstl. Vers.anst. Rheinland-Pfalz.* 19: 91–106.
- FREHNER, M.; B. WASSER, B.; SCHWITZER, R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Bern, BUWAL.
- GERBER, B., 1989: Waldflächenveränderungen und Hochwasserbedrohung im Einzugsgebiet der Emme. *Geogr. Bern.* G33.
- GERMANN, P.F.; HENSEL, D., 2006: Poiseuille flow geometry inferred from velocities of wetting fronts in soils. *Vadose Zone J.* 5: 867–876.
- GERMANN, P.; HELBLING, A.; VADILONGA, T., 2007: Rivulet approach to rates of preferential infiltration. *Vadose Zone J.* 6: 207–220.
- HINCAPIÉ, I.; GERMANN, P., 2009a: Length scale of abstraction from water content waves during gravity-driven viscous infiltration. *Vadose Zone J.* 8: 996–1003.
- HINCAPIÉ, I.; GERMANN, P., 2009b: Impact of initial and boundary conditions on preferential flow. *J. Contam. Hydrol.* 104: 63–73.
- LAMANDE, M.; HALLAIRE, V.; CURMI, P.; PERES, G.; CLUZEAU, D., 2003: Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena.* 54, 3: 637–649.
- LANGE, B.; GERMANN, P.; LÜSCHER, P., 2009: Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 1809–1821.
- LANGE, B.; GERMANN, P.F.; LÜSCHER, P., 2010: Einfluss der Wurzeln auf das Wasserspeichervermögen hydromorpher Waldböden. *Schweiz. Z. Forstwes.* 161: 510–516.
- LANGE, B.; GERMANN, P.F.; LÜSCHER, P., 2013: Greater abundance of *Fagus sylvatica* in coniferous flood protection forests due to climate change: impact of modified root densities on infiltration. *Eur. J. For. Res.* 132: 151–163.
- LI, Y. M.; GHODRATI, M., 1994: Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 653–659.
- LÜSCHER, P.; ZÜRCHER, K., 2003: Waldwirkung und Hochwasserschutz: Eine differenzierte Betrachtungsweise ist angebracht. *Ber. Bayer. Landesanst. Wald Forstwirtschaft.* 40: 30–33.
- MEEK, B.D.; RECHEL, E.A.; CARTER, L.M.; DETAR, W.R., 1989: Changes in infiltration under Alfalfa as influenced by time and wheel traffic. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 238–241.
- MÖSCHKE, H., 1998: Abflussgeschehen im Bergwald – Untersuchungen in drei bewaldeten Kleineinzugsgebieten im Fylsch der Tegernseer Berge. *Forstl. Forsch.ber. Münch.* 169.
- NOGUCHI, S.; TSUBOYAMA, Y.; SIDLE R.C.; HOSODA, I., 1999: Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1413–1423.
- OcCC/ProClim (Hrsg.) 2007: Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern.
- ROMKENS, M.J.M.; PRASAD, S.N., 2006: Rain Infiltration into swelling/shrinking/cracking soils. *Agric. Water Manage.* 86, 1–2: 196–205.
- RÖTHLISBERGER, G., 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. *Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 330 S.
- SCHMID, I.; KAZDA, M., 2001: Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Can. J. For. Res. – Rev. Can. Rech. For.* 31: 539–548.
- SCHWARZ, M.; LEHMANN, P.; OR, D., 2010: Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surf. Process. Landf.* 35: 354–367.
- WOHLRAB, B.; ERNSTBERGER, H.; MEUSER, A.; SOKOLLEL, V., 1992: Landschaftswasserhaushalt: Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum; Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Hamburg/Berlin, Paul Parey. 335 S.
- ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; BLASER, P.; WALTHER, L.; LÜSCHER, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Region Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep Verlag, 768 S.

Abstract

Tree roots and infiltration

Since the 19th century, it has been widely assumed that forests mitigate runoff because forest soils are thought to be more porous than soils outside the forest. Not until the 1980s, however, did the scientific community begin to discuss this forest hydrological paradigm seriously. Today it is no longer assumed that the mere existence of a forest is sufficient to mitigate runoff. A forest's capacity for water retention depends on the characteristics of both its soil and forest stands. Several studies have shown that tree roots are relevant pore-generators in forest soils. Here we present the results of three research projects on the influence of roots on vertical and lateral water flow in forest soils of pre-alpine forests in Switzerland. The presence of tree roots in the soil was found to increase the soil's infiltration and water storage capacity in the forest communities we investigated. Thus, water retention can be optimized through silvicultural interventions. A comparison of the root densities and water storage capacities in different forest stands indicated that the tree species shift from spruce- to beech-dominated mixed forests expected under climate change will probably increase slightly the water storage capacity in the soils of stands where this shift takes place.

Keywords: infiltration, soil water flow, flood protection forests, tree roots, lateral subsurface flow, climate change