

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse  
**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein  
**Band:** 170 (2019)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen : ein Überblick  
**Autor:** Schwarz, Massimiliano  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097358>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 01.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick

Massimiliano Schwarz | Abteilung Waldwissenschaften, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)\*

## Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick

Durchwurzelte Böden sind vergleichbar mit Kompositwerkstoffen, die sehr heterogene mechanische Eigenschaften haben. Die Analyse und Quantifizierung dieser Eigenschaften und von deren Änderung im Lauf der Zeit ist sehr aufwendig und komplex, jedoch zentral für viele praxisrelevante Aspekte der Ingenieurbiologie und der Schutzwaldpflege. Im Artikel werden neuere Kenntnisse und Ansätze für die Quantifizierung der sogenannten Wurzelverstärkung – der Armierung des Bodens durch Wurzeln – und ihre Implementierung in Hangstabilitätsmodelle zusammengefasst. Die Wurzelverstärkung umfasst vier Mechanismen: die basale Wurzelverstärkung, die laterale Wurzelverstärkung unter Zug, die laterale Wurzelverstärkung unter Druck sowie die Versteifung des Rutschkörpers. In jüngster Zeit wurden die Modelle SlideforNET/SlideforMAP und SOSlope für die Praxis entwickelt. SlideforNET ist ein Online-Tool, mit dem im Feld oder Büro innert weniger Minuten die Wahrscheinlichkeit von flachgründigen Rutschungen sowie die Schutzwirkung eines Waldbestandes beurteilt werden können. SlideforMAP basiert auf dem gleichen Ansatz wie SlideforNET, ist aber räumlich aufgelöst und berücksichtigt die Waldstruktur in einem Einzugsgebiet oder einer Region im Detail. SOSlope unterstützt insbesondere die Quantifizierung der Schutzwirkbarkeit von Waldbeständen sowie die Planung der Schutzwaldpflege und von ingenieurbioologischen Massnahmen. Erste Pilotprojekte zeigen, dass die Modelle den Übergang von einer «qualitativen» zu einer «quantitativen» Ingenieurbiologie ermöglichen.

**Keywords:** root reinforcement, shallow landslides, slope stability models, SOSlope, SlideforMAP, SlideforNET, quantitative soil bioengineering

**doi:** 10.3188/szf.2019.0292

\* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail [massimiliano.schwarz@bfh.ch](mailto:massimiliano.schwarz@bfh.ch)

Die Armierung des Bodens durch Wurzeln – die sogenannte Wurzelverstärkung – ist ein Vegetationseffekt (Schwarz et al 2017), der die Stabilität von Hängen oder Ufern erhöhen kann. Ihre Bedeutung ist schon lange bekannt und wird vom Menschen genutzt, um die Gefahr von flachgründigen Rutschungen (<2 m mächtig) mithilfe von ingenieurbioologischen Massnahmen oder der Schutzwaldpflege zu reduzieren (Stokes et al 2014). Die Bedeutung der Wurzelverstärkung für die Hangstabilität ist auch oft im Feld erkennbar (Abbildung 1). Da die Vegetation gleichzeitig mechanisch, hydrologisch und chemisch auf die Hangstabilität wirkt, ist es schwierig, einzig den mechanischen Einfluss der Wurzeln empirisch zu analysieren (Rickli et al 2019, dieses Heft). Physikalisch basierte Ansätze bieten, komplementär zu empirischen Ansätzen, eine interessante Möglichkeit, um die Wirkung der Wurzelverstärkung einzuordnen. Die Vorteile von physikalischen Ansätzen bestehen vor allem darin, die

mögliche Wurzelverstärkung ausgehend von verschiedenen Faktorenkombinationen zu berechnen und die Variabilität bzw. die Unsicherheiten dieser Berechnungen zu charakterisieren.

Seit mehr als 40 Jahren setzen sich weltweit verschiedene Forschungsgruppen mit der Quantifizierung der Wurzelverstärkung auseinander (Wu et al 1979, Waldron & Dakessian 1981, Pollen & Simon 2005, Docker & Hubble 2008, Schwarz et al 2013) und versuchen, die Wurzelverstärkung in Hang- oder Uferstabilitätsmodelle zu implementieren (Greenway 1987, Casadei et al 2003, Greenwood 2006, Bankhead et al 2013). Dennoch bleibt die Berechnung der Wurzelverstärkung eine Herausforderung. Die zentralen Fragen dabei sind:

- Wie viel Kraft können einzelne Wurzeln je nach Belastung aufnehmen?
- Wie ist das Verformungsverhalten von einzelnen Wurzeln und von Wurzelbündeln bei Krafteinwirkung?



Abb 1 Laterale Wurzelverstärkung in flachgründigen Rutschungen. Beispiele aus Rüdlingen (SH; links) und Cusio (TI; rechts).

- Wie verändert sich die Wurzelverstärkung räumlich und zeitlich?
- Welchen Einfluss hat die Wurzelverstärkung bei unterschiedlichen Belastungen (Zug, Druck oder Scherung) auf die Hangstabilität?
- Wie kann die Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsmodelle implementiert werden?

Das Ziel dieses Übersichtsartikels ist es, die wesentlichen Erkenntnisse und Ansätze als Antwort auf die oben aufgelisteten Fragen zusammenzufassen und neue numerische Modelle, die für den Einsatz in der Praxis entwickelt worden sind, vorzustellen. Weiterführende Informationen zur Entwicklung des Forschungsbereiches finden sich in Giadrossich et al (2017) und Vergani et al (2017).

## Mechanismen der Wurzelverstärkung

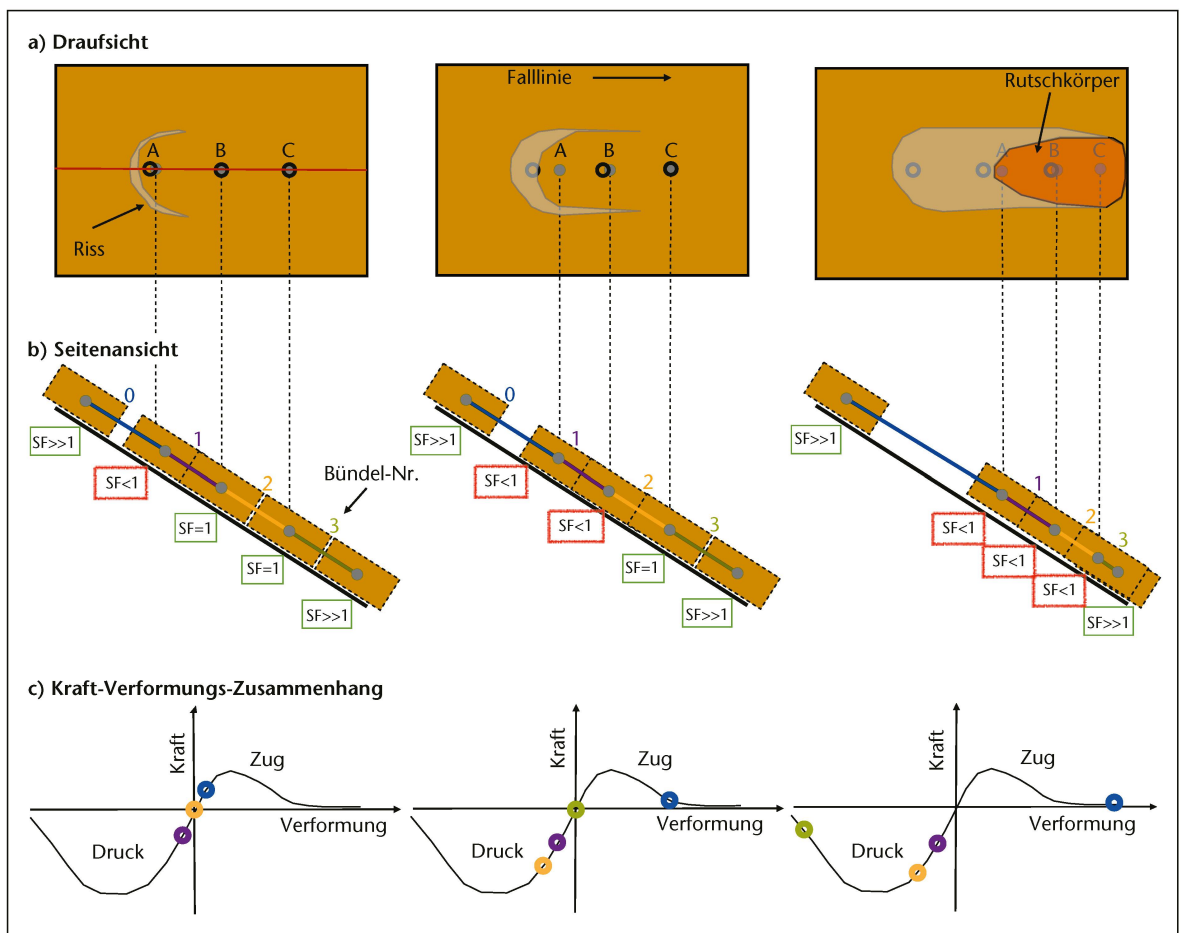
### Entstehungsdynamik einer flachgründigen Rutschung

Die künstliche Auslösung einer flachgründigen Rutschung im Zuge des TRAMM-Projektes (Triggering of Rapid Mass Movements; Askarinejad et al 2012) im Jahr 2009 war eine einzigartige Gelegenheit, um die Entstehungsdynamik einer flachgründigen Rutschung zu analysieren und die Mechanismen der Wurzelverstärkung zu erforschen. Im Rahmen des Experiments konnten beim Anreissen der Rutschung drei verschiedene Phasen beobachtet werden (Abbildung 2). In der ersten Phase wurde der Hang in einer kleinen, klar umrissenen Zone, die sich im oberen Teil der Rutschung befand, instabil. In dieser Zone (Punkt A in Abbildung 2) konnte lokal eine Zunahme des Porenwasserdruckes gemessen werden. Die Erhöhung des Porenwasserdruckes führte dazu, dass sich die Scherfestigkeit des Bodens so stark verringerte, dass sie den destabilisierenden Kräften nicht mehr genügend entgegen-

wirken konnte und sich der Boden in dieser Zone verformte. In der anschliessenden zweiten Phase verteilten sich die destabilisierenden Kräfte lateral hangaufwärts. Die laterale Wurzelverstärkung versagte unter diesen Zugkräften, der Boden verschob sich talwärts, und oberhalb der Schwachstelle entstand ein Riss. In der dritten Phase verteilten sich die destabilisierenden Kräfte als Druckkraft talabwärts bis zu dem Punkt, an dem sie grösser als die passive Erddruckkraft waren. Ab diesem Punkt (C in Abbildung 2) begann die Rutschmasse an der Oberfläche zu gleiten. Das Experiment zeigte, dass der Widerstand des Bodens und der Wurzeln zu unterschiedlichen Zeitpunkten aktiviert ist und innerhalb der Rutschmasse je nach Position unterschiedliche Kräfte wirken.

### Einordnung der vier Mechanismen der Wurzelverstärkung

Je nach Rutschphase werden in den Wurzeln unterschiedliche Widerstandskräfte aktiviert (Abbildung 3). In der ersten Phase ist es hauptsächlich der Scherwiderstand der Wurzeln entlang der lokalen Scherfläche (sogenannte basale Wurzelverstärkung; Mechanismus 1 in Abbildung 3). In der zweiten Phase werden im oberen Anriss der Rutschung zusätzlich auch laterale Zugwiderstände mobilisiert (laterale Wurzelverstärkung auf Zug; Mechanismus 2). In der dritten Phase – sobald der Grossteil des lateralen Zugwiderstands verloren gegangen ist – wirken hauptsächlich Druckkräfte hangabwärts. Während dieser Phase kann die Versteifung des Rutschkörpers durch die Wurzeln eine wichtige Rolle spielen (Mechanismus 3). Zudem reagieren die Wurzeln mit Druckwiderstand – der lateralen Wurzelverstärkung auf Druck – auf diese Belastung und tragen so zum maximalen passiven Erddruck bei (Mechanismus 4; für Details siehe Cohen & Schwarz 2017).



**Abb 2** Konzeptionelle Darstellung der Entstehungsdynamik einer flachgründigen Rutschung. a) Draufsicht auf den Hang bzw. den Rutschkörper, b) Seitenansicht entlang der Schnittlinie, c) Kraft-Verformungs-Zusammenhang bei den verschiedenen durchwurzelten Bodenkörpern, die konzeptionell als Bündel unter lateraler Kräfteinwirkung dargestellt sind (Bündel-Nr. 0 bis 3). SF: Sicherheitsfaktor = Quotient zwischen stabilisierenden und destabilisierenden Kräften.

#### Basale Wurzelverstärkung

Die basale Wurzelverstärkung ist der erste Mechanismus, der in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben worden ist (Wu et al 1979, Waldron & Dakessian 1981). Sie spielt eine sehr wichtige Rolle, wenn die Scherfläche einer potenziellen Rutschung innerhalb des Wurzelraums liegt. Typisch für flachgründige Rutschungen sind Scherflächen in einer Tiefe von 0.5 bis 2 m. Bei der Scherung werden die Wurzeln innerhalb eines «Scherbandes» unter Biegung, Zug oder einer Kombination von beidem belastet (Fan & Tsai 2016). Bereits wenige Hektopascal basaler Wurzelverstärkung können die Hangstabilität markant erhöhen. Wie Untersuchungen im Alpenraum gezeigt haben, ist die Wirkung dieses Mechanismus bei den meisten Baumarten aber auf den ersten Meter Bodentiefe limitiert (Bischetti et al 2009, Vergani et al 2016, Dazio et al 2018).

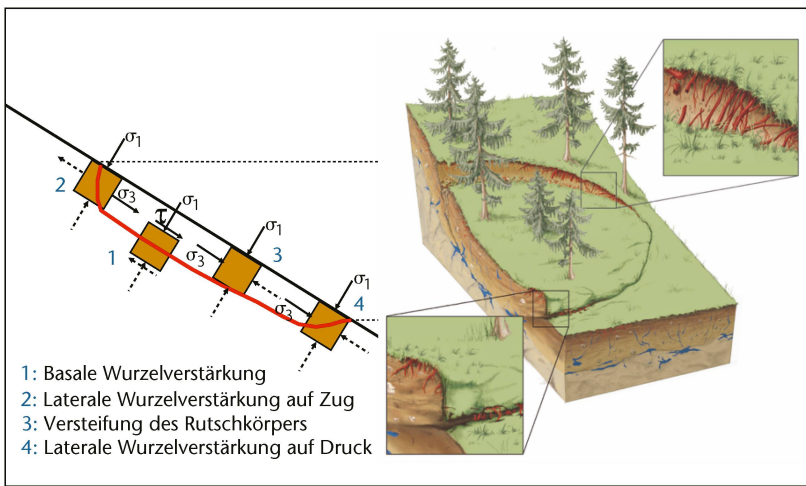
#### Laterale Wurzelverstärkung auf Zug

Im oberen Teil von Rutschungen werden die Wurzeln lateral auf Zug belastet. Dabei wird der Widerstand der Wurzeln progressiv entlang der Anrisskante mobilisiert. Diese laterale Wurzelverstärkung auf Zug wirkt vor allem in den obersten 0.5 m des

Bodens und wird hauptsächlich von den groben Wurzeln übernommen (Giadrossich et al 2019). Die Bedeutung dieses Mechanismus ist auf Rutschungen mit einem Volumen bis 2000 m<sup>3</sup> begrenzt (Schwarz et al 2010a). Weil die laterale Wurzelverstärkung auf Zug erst einsetzt, wenn ein Riss im Boden entstanden ist, dürfen bei statischen Hangstabilitätsberechnungen die Kohäsion des Bodens und die laterale Wurzelverstärkung auf Zug nicht addiert werden, wie das einige Autoren annehmen (Casadei et al 2003, Milledge et al 2014).

#### Versteifung des Bodens

Wurzeln können den Boden wie ein Hangrost versteifen. Dabei sind die destabilisierenden Scher-, Zug- und Druckkräfte gleichmäßiger auf den Hang verteilt als in einem Boden ohne Wurzeln. Damit der Mechanismus der Bodenversteifung einen bedeutenden Einfluss auf die Hangstabilität haben kann, ist ein gut vernetztes System von Grobwurzeln nötig. Wenn die Wurzeln untereinander nicht genügend gut verbunden sind, «schwimmen» sie isoliert in der Rutschmasse und können die Kräfte kaum lateral weiterleiten (für weitere Details siehe Cohen & Schwarz 2017).



**Abb 3** Die vier Mechanismen der Wurzelverstärkung (modifiziert nach Schwarz et al 2015). Das Symbol « $\sigma$ » bezeichnet die unterschiedlichen Spannungen, unter denen das Bodenelement steht.

#### Laterale Wurzelverstärkung auf Druck

Die laterale Wurzelverstärkung auf Druck hat normalerweise eine deutlich kleinere Bedeutung als die basale Wurzelverstärkung und die laterale Wurzelverstärkung auf Zug (ca. zehnmals kleiner; Schwarz et al 2015). Dennoch kann sie vor allem bei kurzen Hängen (10–20 m Länge) eine deutlich stabilisierende Wirkung haben (Cohen & Schwarz 2017).

### Aufskalierung der Wurzelverstärkung

Die Wurzelverstärkung kann für verschiedene Raum- und Zeitskalen quantifiziert werden. Dabei gibt es auf jeder Skala Faktoren von besonderer Relevanz. Auf der Ebene von einzelnen Wurzeln beispielsweise haben sich der Wurzeldurchmesser und die Baumart als entscheidend erwiesen, auf der Hangskala dagegen die Position und die Dimension der Bäume.

#### Mechanisches Verhalten von einzelnen Wurzeln

In den ersten Studien zur Wurzelverstärkung wurde ein Zusammenhang zwischen der maximalen Zugfestigkeit der Wurzeln und deren Durchmesser (Wu et al 1979) aufgezeigt, wobei deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten nachgewiesen werden konnten (Bischetti et al 2009). Waldron & Dakessian (1981) diskutierten erstmals den Einfluss, den das Versagen von Wurzeln (Brechen der Wurzeln oder Herausrutschen der Wurzeln aus dem Boden) auf die Wurzelverstärkung haben kann. Pollen & Simon (2005) konnten zeigen, dass das Herausrutschen eine Ausnahme ist und meist nur bei feinen Wurzeln vorkommt. In den meisten Fällen versagen die Wurzeln aufgrund eines Bruches. Viele dieser Studien wurden aber im Labor durchgeführt. Solche Versuche können die Realität nur be-

schränkt abbilden, weil jeweils nur ein kleines Wurzelstück getestet wird.

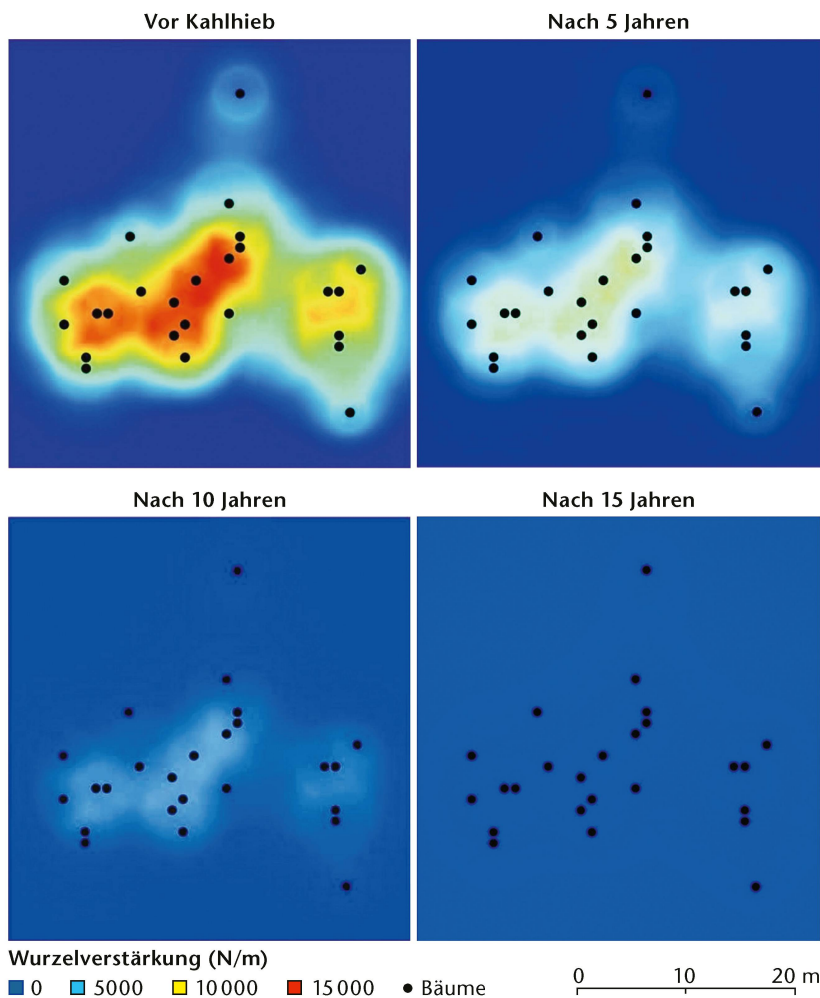
Giadrossich et al (2019) konnten zeigen, dass eine der praktikabelsten und repräsentativsten Methoden, um die Zugfestigkeit von Wurzeln zu messen, in einem Feldversuch besteht. Dieser erlaubt es auch, die Dehnung der Wurzeln zu messen, was sehr wichtig für die Berechnung des progressiven Versagens von Wurzeln unterschiedlichen Durchmessers in einem Wurzelbündel ist. Mit dem Verfahren können auch dicke Wurzeln getestet werden, was die Aufskalierung der Wurzelverstärkung erlaubt.

Bis jetzt wurden keine signifikanten Unterschiede in der Zugfestigkeit von Wurzeln einer Baumart aufgrund des Standorts oder der Bewirtschaftung festgestellt (Mattli 2014, Hildebrand 2015, Dazio et al 2018).

#### Mechanisches Verhalten von Wurzelbündeln

In den letzten 30 Jahren wurden drei verschiedene Methoden zur Quantifizierung der Wurzelverstärkung systematisch eingesetzt. Der Ansatz von Wu et al (1979) wurde wegen seiner Einfachheit – er erfordert nur minimale Informationen über die kritische Zugfestigkeit der Wurzeln und deren Querschnittsfläche – oft verwendet. Pollen & Simon (2005) und Schwarz et al (2011) zeigten jedoch, dass die Hypothese von Wu et al (1979), die besagt, dass alle Wurzeln gleichzeitig brechen, zu einem grossen Fehler in der Abschätzung der Wurzelverstärkung führt. Pollen & Simon (2005) entwickelten daher ein Faserbündel-Modell, das auf einem «Stress Step»-Ansatz beruht. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Wurzeln durchmesserabhängig zu unterschiedlichen Zeitpunkten brechen. Dieser Ansatz erlaubt jedoch keine Berechnung der Verformung. Um dieses Problem zu überwinden, haben Schwarz et al (2010a, 2010b, 2010c) den «Strain Step»-Ansatz in das Faserbündel-Modell implementiert. Die Hauptvorteile des so geschaffenen Wurzelbündel-Modells (Root Bundle Model; RBM) sind 1) die Berechnung der vollständigen Kraft-Verformungs-Kurve eines Wurzelbündels und 2) die Umverteilung der Kräfte auf jede einzelne Wurzel aufgrund ihrer geometrischen und mechanischen Eigenschaften. Das RBM wurde schliesslich erweitert und als RBMw bezeichnet («w» steht für «Weibull»), um den Effekt der mechanischen Variabilität der einzelnen Wurzeln miteinzubeziehen (Schwarz et al 2013). Es berücksichtigt, dass in einem Bündel, in dem alle Wurzeln den gleichen Durchmesser haben, nicht alle gleichzeitig brechen, sondern sie gemäss ihrer mechanischen Variabilität progressiv versagen.

In allen Modellen wird für die Berechnung der Wurzelverstärkung angenommen, dass keine seitlichen Interaktionen der Wurzeln in einem Bündel entstehen. Giadrossich et al (2013) stellten fest, dass diese seitlichen Interaktionen in dichten Bündeln



**Abb 4** Berechnete räumliche und zeitliche Änderung der Wurzelverstärkung in einem Fichtenwald nach Kahlhieb (modifiziert nach Vergani et al 2016). Die schwarzen Punkte zeigen die Position der Bäume und die Farben die Verteilung der lateralen Wurzelverstärkung.

aus Feinwurzeln einen grossen Einfluss auf das Verhalten eines Wurzelbündels haben können. Allerdings entsteht dieser Effekt nur bei einem durchschnittlichen Abstand von wenigen Millimetern zwischen den Wurzeln. In der Realität ist dies selten der Fall bei Baumwurzeln, vor allem im Zwischenkronenbereich. Somit können die Annahmen der Modelle für die meisten Fälle als plausibel angenommen werden.

Durch die Anwendung des RBMw konnte festgestellt werden, dass die Wirkung einer groben Wurzel oft ein ganzes Bündel dominiert. Für Kastanienbäume wurde zum Beispiel gezeigt, dass die Wirkung von 500 Wurzeln mit je 1 mm Durchmesser mit der Wirkung einer einzelnen Wurzel von 50 mm vergleichbar ist (Vergani et al 2017).

#### Wurzelverstärkung auf der Bestandesskala

Die räumliche und zeitliche Verteilung der Wurzelverstärkung auf der Bestandesskala wird hauptsächlich durch die Morphologie der einzelnen Wurzelsysteme sowie die Struktur des Waldbestandes beeinflusst. Die Wurzelverstärkung auf dieser

räumlichen Skala wurde bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Docker & Hubble 2008, Schwarz et al 2012a) bislang nicht untersucht. Um die Wurzelverstärkung auf Bestandesebene baumartenspezifisch charakterisieren zu können, wurde in den letzten Jahren eine Systematik entwickelt, die in Dazio et al (2018) beschrieben ist. Untersuchungen im Alpenraum zeigten, dass die Wurzelverstärkung auf Bestandesskala in angegebener Reihenfolge zunimmt: Fichte (Schwarz et al 2012b, Vergani et al 2016, Mattli 2014) < Kastanie (Dazio et al 2018) < Tanne (Schwarz et al 2012b) < Buche (Schwarz et al 2012b, Gehring et al 2019). Dieser Befund ist erklärbar durch die unterschiedliche Verteilung und die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Wurzeln je nach Baumart. Weitere Arbeiten sind für die Ergänzung und Validierung dieser Kenntnisse noch nötig.

Die zeitliche Entwicklung der Wurzelverstärkung hängt von zwei sich überlappenden Prozessen ab: 1) der Abnahme der Wurzelverstärkung nach einer Störung und 2) der Zunahme der Wurzelverstärkung im Zuge des Bestandeswachstums. Vergani et al (2016) untersuchten, wie sich die Wurzelverstärkung nach einem Kahlhieb in einem Fichtenbestand veränderte. Als Folge der Zersetzung der Wurzeln war die Wurzelverstärkung nach 5 Jahren stark reduziert, nach 15 Jahren war sie nicht mehr vorhanden (Abbildung 4). In weiteren Studien sollte auch untersucht werden, wie sich die Wurzelverstärkung nach einer Störung wieder erholt.

### Hangstabilitätsmodelle für flachgründige Rutschungen und Wurzelverstärkung

In der Literatur werden viele Ansätze für die Modellierung von flachgründigen Rutschungen präsentiert. Diese können in drei Kategorien eingeteilt werden: statistisch-empirische Ansätze (z.B. von Ruetter et al 2011), konzeptionelle Ansätze (z.B. «Cell Automata»; Piegari et al 2006) und physikalisch basierte Ansätze (z.B. Casadei et al 2003). Die statistisch-empirischen Modelle basieren auf der statistischen Auswertung von Messdaten und setzen für die Berechnungen auf mathematische Formulierungen, in denen die Koeffizienten keine physikalische Bedeutung haben. Bei den konzeptionellen Modellen werden die Prozesse mit vereinfachten physikalischen Formulierungen wiedergegeben und quantifiziert. Die Koeffizienten haben eine physikalische Bedeutung, sie haben aber keinen unmittelbaren Bezug zur Realität (sie können nicht im Feld kalibriert werden). Bei den physikalisch basierten Modellen werden, so gut wie möglich, alle physikalischen Prozesse berücksichtigt und mathematisch formuliert, und die Koeffizienten der Formeln werden im Feld oder im Labor kalibriert. Die sogenannten probabi-

listischen Modelle sind eine Erweiterung der physikalisch basierten und berücksichtigen die Variabilität der Parameter in der Berechnung (Zahner 2018). Hybridmodelle kombinieren unterschiedliche Ansätze (z.B. konzeptionelle und physikalisch basierte) je nach Prozess oder Raumskala (z.B. Lehmann & Or 2012). Parallel zum technischen Fortschritt (Rechnerkapazität, Datengewinnung) werden vermehrt auch Machine-Learning-Ansätze verwendet (Chen et al 2019).

Die Wirkung der Wurzelverstärkung wurde vor allem in physikalisch basierte Modelle implementiert. Diese lassen sich einteilen nach

- dem Ansatz für die Berechnung der Hangstabilität (Grenzgleichgewichtsberechnung, Finite-Elemente-Methode [FEM], Diskrete-Elemente-Methode [DEM]),
- den berücksichtigten Dimensionen des Systems (1-D, 2-D oder 3-D),
- dem Ansatz für die Berechnung der hydrologischen Prozesse (z.B. verschiedene Abflusstypen, kontinuierliche oder diskrete Modellierung),
- der Art der Implementierung der Wurzelverstärkung (basal/lateral, statisch oder verformungsabhängig, heterogen oder homogen).

Der in der Literatur am meisten verbreitete Ansatz ist der 1-D-Grenzgleichgewichtsansatz (unendliche Böschung), der nur die basale Wurzelverstärkung berücksichtigt und annimmt, dass diese homogen verteilt sei. Die vielen Modelle dieser Kategorie unterscheiden sich vor allem in der Berechnung der hydrologischen Prozesse. Es handelt sich um relativ einfache Modelle, die auf regionaler Skala verwendet werden (z.B. Salvatici et al 2018).

Die Erweiterung der 1-D-Grenzgleichgewichtsansätze zu 2-D- und 3-D-Ansätzen erlaubte die Berücksichtigung von lateralen Kräften (Casadei et al 2003, Dietrich et al 2007, Milledge et al 2014), wobei viele Ansätze die unrealistische Annahme machen, dass alle Widerstände gleichzeitig maximal seien. Aufgrund von Experimenten (Askarinejad et al 2012) und Feldbeobachtungen ist es plausibler, anzunehmen, dass die lateralen Zugwiderstände im oberen Teil der Rutschung vor den passiven Erd-druckkräften im untersten Teil der Rutschung mobilisiert werden. In den 2-D- und 3-D-Grenzgleichgewichtsmodellen sind die laterale und die basale Wurzelverstärkung als zusätzliche, in der Regel im Hang homogen verteilte Kohäsionsparameter implementiert.

FEM-Ansätze wurden vor allem eingesetzt, um 2-D- (Ji et al 2012, Genet et al 2008) oder 3-D-Stabilitätsberechnungen (Kokutse et al 2006, Lin et al 2010, Mao et al 2014) auf der Hangskala unter Berücksichtigung der Vegetation durchzuführen. Hydrologische Prozesse sind in diesen Modellen allerdings schwierig zu implementieren. Oft wird als Annäherung die sogenannte Kohäsion-Reibungs-

winkel-Reduktionsmethode (c-phi-Reduktionsmethode) verwendet, um die destabilisierende Wirkung der Niederschläge zu simulieren. Auch die Implementierung der Wurzelverstärkung ist schwierig. In der Regel wird sie wie bei den 2-D- und 3-D-Grenzgleichgewichtsansätzen als homogen verteilter Kohäsionsparameter ins Modell eingebunden. Nicht berücksichtigt ist dabei der Effekt der Bodenversteifung durch die Wurzeln. Abgesehen davon, dass die zugrunde gelegten Annahmen die Anwendung der FEM-Modelle limitieren, sind diese sehr aufwendig, weshalb sie bis heute nur auf der Hangskala und für die Forschung angewendet worden sind.

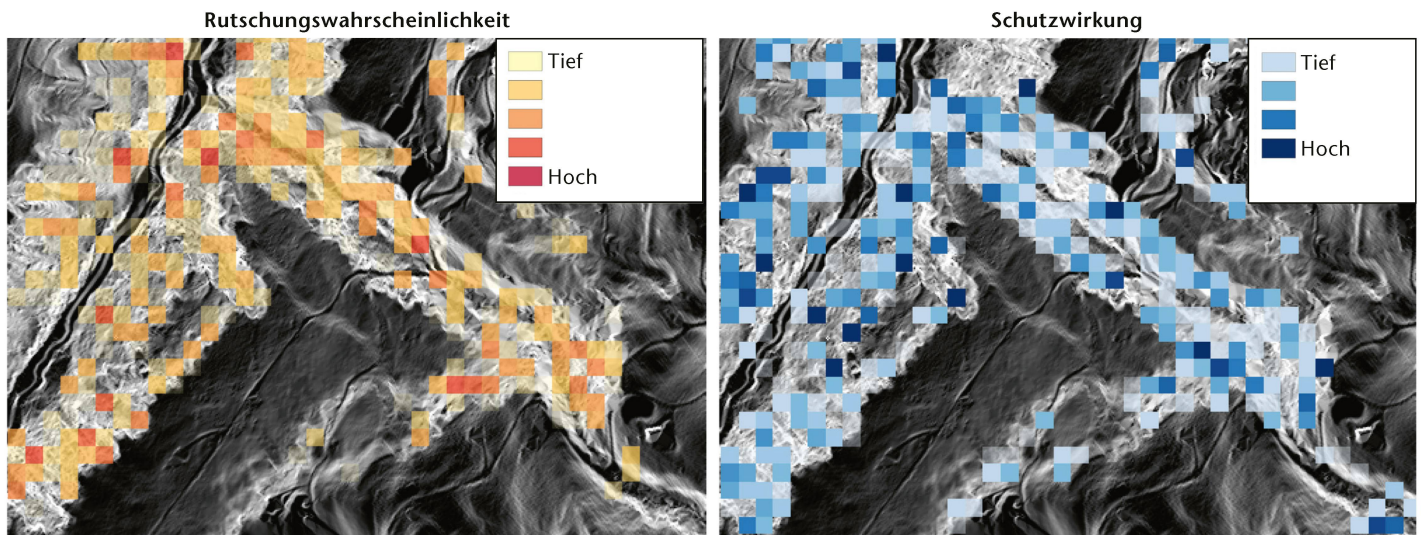
In den DEM-Ansätzen wird der Hang als eine Ansammlung von verschiedenen, zusammenwirkenden Partikeln betrachtet (z.B. Failletaz et al 2010), die sich mit der Zeit bewegen. Die dynamische Gleichgewichtsgleichung wird für jeden Partikel gelöst, bis die Randbedingungen und Gesetze des Kontakts und der Bewegung erfüllt sind. DEM-Ansätze eignen sich gut für die Implementierung der räumlich heterogenen Verteilung der Wurzelverstärkung.

Je nach Anwendung in der Praxis kann der eine oder der andere Ansatz die optimale Lösung sein. Im Folgenden werden drei Hangstabilitätsmodelle vorgestellt, die die Wurzelverstärkung berücksichtigen, einen guten Kompromiss zwischen dem Aufwand für die Datenbereitstellung und der Genauigkeit der Resultate darstellen und sich für unterschiedliche Anwendungen eignen:

- SlideforNET ist ein Online-Tool, mit dem im Feld oder Büro innert weniger Minuten die Schutzwirkung eines Waldbestandes beurteilt werden kann.
- SlideforMAP basiert auf dem gleichen Ansatz wie SlideforNET, ist aber räumlich aufgelöst und berücksichtigt die Waldstruktur in einem Einzugsgebiet oder einer Region im Detail. Für seine Anwendung müssen Grundlagen zusammengetragen werden, wofür mehrere Tage Arbeit nötig sein können. Am besten eignet sich SlideforMAP für das Schutzwaldmanagement auf regionaler Ebene.
- SOSlope ist ein Modell, das die Wurzelverstärkung in einem Bestand räumlich und zeitlich detailliert quantifiziert. Das aufwendige Modell wird meistens verwendet, um für einzelne Hänge ingenieurbioologische Massnahmen zu planen oder die Schutzwirkung des Waldes zu quantifizieren.

#### SlideforNET/SlideforMAP

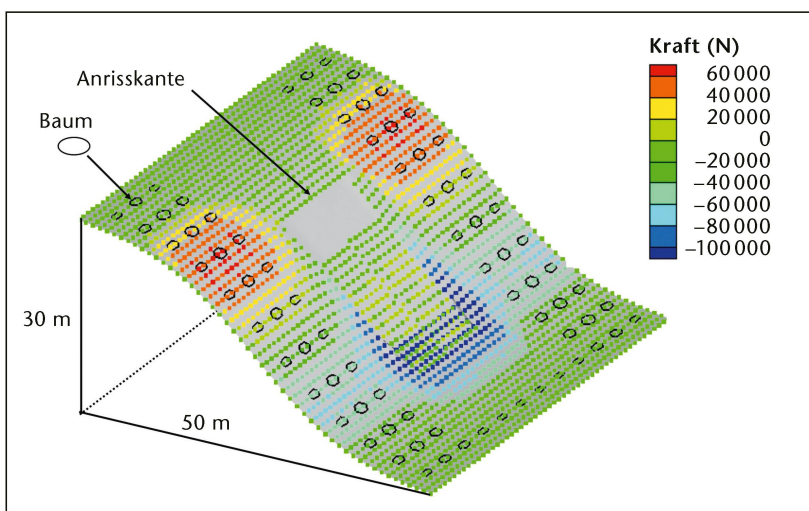
Das probabilistische Hangstabilitätsmodell SlideforNET/SlideforMAP basiert auf einer 3-D-Grenzgleichgewichtsberechnung, die in Schwarz et al (2010c, 2014) im Detail erläutert ist. Die wichtigste Eigenschaft dieses Modells ist die realistische Aufsummierung der stabilisierenden Kräfte unter Berücksichtigung von zwei Zeitpunkten bei der Entstehung einer Rutschung: Zum ersten Zeitpunkt



**Abb 5** Beispiel der Resultate des Modells SlideforMAP. Wahrscheinlichkeit von flachgründigen Rutschungen (100-jährliches Ereignis, mit Wald; links), Schutzwirkung des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen (rechts). Der Waldzustand wurde mithilfe von Fernerkundungsdaten ermittelt. Räumliche Auflösung: 25 m. Quelle: Gasser et al 2018, modifiziert

werden die basale Wurzelverstärkung, die residuale Scherkraft des Bodens und die laterale Wurzelverstärkung auf Zug bei der Anrisskante summiert (siehe Diskussion in Cohen & Schwarz 2017, Kapitel 2.1 und Abbildung 2). Zum zweiten Zeitpunkt werden die residuale Scherkraft des Bodens, die passive Erdruckkraft des Bodens und die laterale Wurzelverstärkung auf Druck summiert. Solange der Sicherheitsfaktor zu einem der beiden Zeitpunkte grösser als 1 ist (also die stabilisierenden Kräfte grösser als die destabilisierenden sind), ist der Hang stabil. Sobald aber der Sicherheitsfaktor zu beiden Zeitpunkten unter 1 fällt, kann eine Rutschung abgehen. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird die laterale Wirkung der Bodenkohäsion nicht dann zur Wurzelverstärkung addiert, wenn diese maximal ist. Dies, weil die Wurzelverstärkung erst nach Verlust der Bodenkohäsion entlang der Anrisszone mobil-

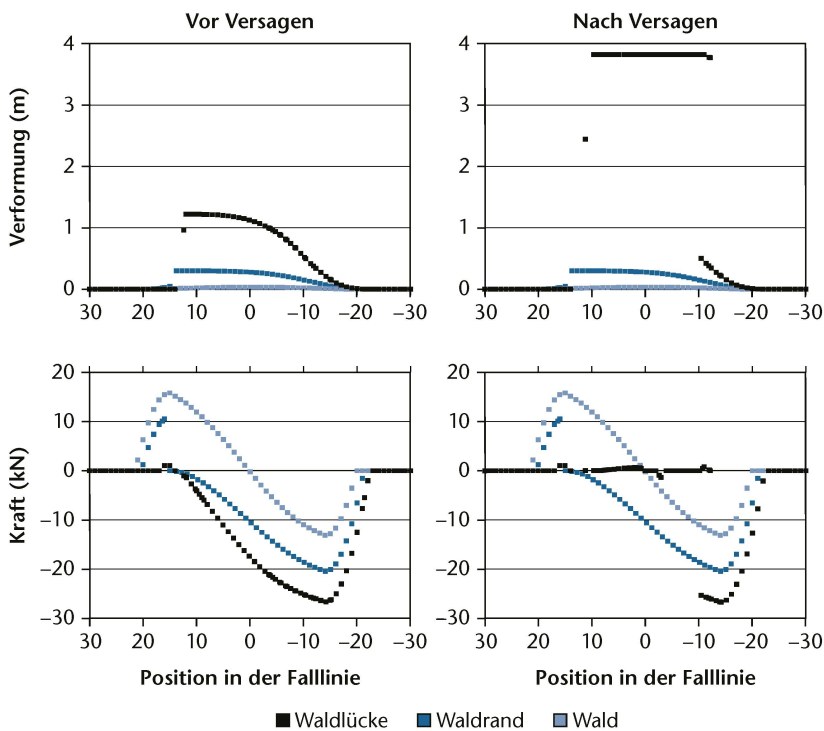
siert wird (siehe Diskussion in Cohen & Schwarz 2017). Weiter nimmt dieses Modell eine elliptische Geometrie der Rutschung an, wie sie in Ereignisanalysen oft dokumentiert ist. Die Inputparameter wie Bodenmächtigkeit, Bodenkohäsion und Reibungswinkel werden unter der Annahme einer Normalverteilung probabilistisch definiert. Die Dimension der Rutschungen wird aufgrund vorhandener Statistiken zu Frequenz und Magnitude der Rutschereignisse einer Region per Zufallsverfahren festgelegt. Die räumlich aufgelöste Version des Modells, SlideforMAP, berücksichtigt die morphologischen und hydrologischen Eigenschaften einer Region. Eine detaillierte Beschreibung dieser Aspekte ist in Zahner (2018) zu finden. Die Wurzelverstärkung wird in SlideforNET/SlideforMAP aufgrund der Waldstruktur und der Baumartenzusammensetzung (z.B. Schwarz et al 2012a, Gasser et al 2018) implementiert. Die Resultate zeigen die Rutschwahrscheinlichkeit je nach Waldszenario und Dimension der Rutschungen (für ganze Hänge: SlideforNET, pro Zelle in einem Raster-Dataset: SlideforMAP; Abbildung 5). Aus dem Unterschied zwischen den Resultaten der Simulationen mit und denen ohne Wald kann eine Karte der Wirkung des Schutzwaldes erzeugt werden (Abbildung 5). SlideforNET steht bereits für die Praxis zur Verfügung und kann bei Feldbegehungen die Beurteilung der Schutzwirkung des Waldes unterstützen. SlideforMAP wird voraussichtlich im Jahr 2020 für die Anwendung in der Praxis bereit sein.



**Abb 6** Zug- und Druckverteilung in einer Bestandeslücke nach erfolgter Rutschung sowie im umgebenden Waldbestand, berechnet mit SOSlope. Rot: Zugkräfte, blau: Druckkräfte, schwarze Kreise: Bäume. Räumliche Auflösung: 1 m.

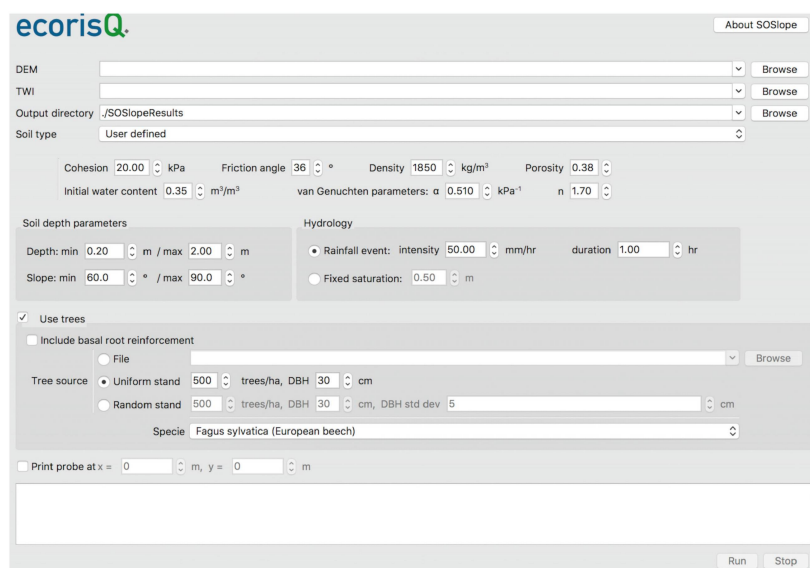
### SOSlope

SOSlope (Self Organised Slope) ist ein hydro-mechanisches Modell, das auf dem sogenannten Feder-Block-Ansatz basiert. Damit kann es als DEM betrachtet werden. In SOSlope wird das Untersuchungsgebiet in Blöcke unterteilt, wobei jeder einzelne Block durch «Federn» mit der Gleitfläche und



**Abb 7** Verformung (oben) und Kräfteverteilung (unten) entlang eines Hanges im Wald, am Waldrand und in der Waldlücke vor (links) und nach (rechts) Versagen der passiven Erddruckkraft in der Waldlücke. Der Waldrand ist definiert als Streifen im Anschluss an die letzte Baumreihe mit der Breite des halben Abstands zwischen den Bäumen im Bestand.

Quelle: Cohen & Schwarz 2017, modifiziert



**Abb 8** Anwendungsoberfläche von SOSlope.

mit den Nachbarblöcken verbunden ist. Simuliert werden die Kräfteverteilung im und die Verformung des Rutschgebiets unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie Topografie, Bodeneigenschaften, Waldzustand sowie hydrologischer Szenarien (vgl. Cohen & Schwarz 2017). Die Wurzelverstärkung unter Zug- und Druckbelastungen wird mit dem RBMw berechnet (Schwarz et al 2013, Schwarz et al 2015). Dieses beschreibt die Wurzelverstärkung in Abhängigkeit der Distanz zum jeweiligen Baum unter Berücksichtigung von dessen Art und dessen Brusthö-

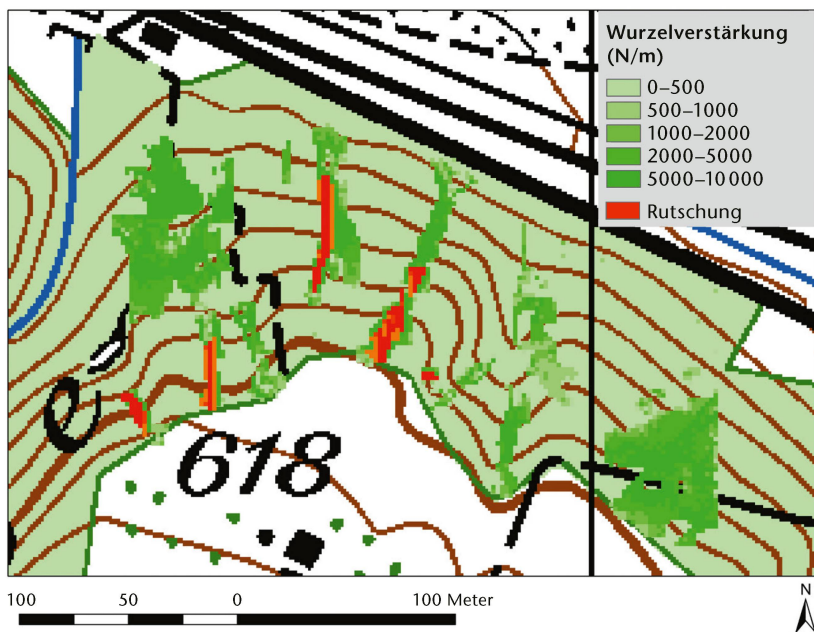
hendurchmesser (BHD; Schwarz et al 2012a, Cohen & Schwarz 2017). SOSlope kann berechnen, wie sich die Kräfte in einem Bestand, einer Bestandeslücke sowie am Bestandesrand verteilen. Im in den Abbildungen 6 und 7 gezeigten Beispiel war im Moment, als die passive Erddruckkraft in der Bestandeslücke versagte, bereits ein Riss von mehr als 1 m Länge in der Hangfalllinie vorhanden. In der bewaldeten Zone des Hanges wurden die Kräfte unter Zug und Druck so verteilt, dass der Hang stabil blieb.

SOSlope hat eine Anwendungsoberfläche (Abbildung 8), in die die Daten für die Modellierung eingegeben werden. Diese bestehen aus einem digitalen Terrainmodell, der Karte des Topographic Wetness Index, dem Bodentyp, der Niederschlagsdauer und -intensität sowie den Baumparametern. Am Anfang sind die Kräfte zwischen den Blöcken auf null gesetzt. Unter Berücksichtigung der Änderung der Kohäsion und des Porenwasserdruckes wird für jeden Block unter Verwendung einer Kraftbilanz der Sicherheitsfaktor (Verhältnis zwischen stabilisierenden und destabilisierenden Kräften) berechnet. Der gesamte Hang ähnelt während der Simulation einem sogenannten selbst organisierten kritischen System (SOC). Dieses Modell ist rechnerisch aufwendig und kann heute erst für einzelne Hänge verwendet werden (ca. 1000 × 1000 Zellen mit einer Auflösung von 1–2 m).

SOSlope liefert eine Reihe von Resultaten in Form von ASCII-Files, die für die Analyse von Rutschprozessen wichtig sind, zum Beispiel die Verteilung des Porenwasserdruckes und der Wurzelverstärkung. Die Anrissgebiete können aufgrund der resultierenden Verschiebung (>1.5 m hangparallel) festgelegt werden. Die Wirkung der Wurzelverstärkung kann visualisiert werden. Die Visualisierung zeigt die Flächen, in denen die basale oder die laterale Wurzelverstärkung aktiviert wurde (Abbildung 6).

## Ausblick

Die Bedeutung der Wurzelverstärkung für die Hang- und Uferstabilität kann je nach Situation sehr unterschiedlich sein. Weil bislang ein interdisziplinär anerkannter Ansatz fehlte, um die Wurzelverstärkung zu quantifizieren, wurden unter Fachspezialisten und Fachspezialistinnen zum Teil kontroverse Diskussionen über ihr Potenzial und ihre Grenzen geführt. Die explizit für den Praxiseinsatz entwickelten Modelle SlideforNET/SlideforMAP und SOSlope sollten nun Analysen und Diskussionen auf objektiver und nachvollziehbarer Grundlage ermöglichen. In den bisherigen Praxiseinsätzen haben sich die beiden Modelle bewährt. Gewünscht wird, dass neben Fichte, Buche, Waldföhre und Edelkastanie noch weitere Baumarten einbezogen werden und dass die Algorithmen optimiert werden, um eine raschere Berechnung zu ermöglichen. Einsatzgebiete der Modelle



**Abb 9** Mit SOSlope berechnete Rutschflächen (rote Flächen) und aktivierte laterale Wurzelverstärkung (grüne Flächen) für ein 100-jährliches Niederschlagszenario im Langnauerwald (LU).

sind beispielsweise die Ingenieurbio­logie, die Gefahrenkartierung, das Schutzwaldmanagement und das Sedimentmanagement auf Ebene Einzugsgebiet.

In der Ingenieurbio­logie werden seit Jahr­hun­derten Techniken angewendet, in denen die Wurzel­ver­stärkung eine wichtige Rolle spielt (Stokes et al 2014). Wenn ihre Wirkung quantifiziert und damit Kosten und Nutzen entsprechender Massnahmen systematisch berechnet werden können, wird ein Vergleich zu klassischen technischen Massnahmen möglich. In einer ersten Anwendung von SOSlope wurde zum Beispiel die Wirkung der Wurzel­ver­stärkung beim Einsatz von ingenieurbio­logischen Massnahmen in der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt (Schwarz et al 2017). Eine detaillierte Analyse der vorhandenen Daten zur Wurzel­ver­stärkung wird in der Zukunft auch die Implementierung eines partiellen Sicherheitsfaktors für diese Parameter erlauben. Eine solche normierte Quantifizierung wird es ermöglichen, ingenieurbio­logische Techniken als berechenbare Komponenten zu berücksichtigen. SOSlope dürfte damit im Sinne einer «quantitativen Ingenieurbio­logie» Eingang in die Praxis finden.

In der risikobasierten Bewertung des Schutz­waldes kann die Quantifizierung der Wurzel­ver­stärkung ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. In einem Pilotprojekt wurde die Wurzel­ver­stärkung in rutsch­ge­fährdeten Hängen entlang von Bahnstrecken mit­hilfe von SOSlope in Kombination mit einem Aus­laufmodell (M-Flow) simuliert (Schwarz et al 2019a). Die daraus entstandene Wurzel­ver­stärkungskarte (Abbildung 9) kann für die Detailplanung waldbau­licher Massnahmen verwendet werden (Schwarz et al 2019b). Mit SOSlope kann auch untersucht werden, wie sich die Wurzel­ver­stärkung bzw. die Schutz­wir-

kung des Waldes nach Störungen (z.B. Sturm, Feuer) oder wenn wegen des Klimawandels fremdländische Baumarten (z.B. Götterbaum, Pauwlonie; Wunder et al 2018), in einem Waldgebiet Überhand nehmen, verändert. Solche Studien stellen eine wertvolle Ergänzung zu den bisherigen empirischen Analysen (z.B. Bebi et al 2019, dieses Heft) dar.

Die Quantifizierung der Wurzel­ver­stärkung ist auch im Zusammenhang mit Bodenerosion und Geschiebehaushalt in Einzugsgebieten von grosser Bedeutung. Diesbezüglich zielen viele Arbeiten weltweit auf die Identifizierung von Sedimentquellen und die Quantifizierung von Milderungsmassnahmen (z.B. Schwarz et al 2016). Gasser et al (2018) zeigten, wie SlideforMAP dazu verwendet werden kann, das potenzielle Schwemmholumen in einem Einzugsgebiet zu berechnen und die räumliche Verteilung der Schutzwirkung des Waldes durch Wurzel­ver­stärkung zu quantifizieren. Der gleiche Ansatz könnte genutzt werden, um den potenziellen Eintrag von Feststoffsedimenten in das Gerin­nen­netz bei unterschiedlichen Wald- oder Landnut­zungsszenarien zu simulieren.

Im Fokus der Weiterentwicklung von SOSlope und SlideforMAP steht die Ergänzung mit zusätzli­chen Gehölzarten, die bei ingenieurbio­logischen Massnahmen und der Schutzwaldpflege von Bedeutung sind. Geplant sind neue experimentelle Arbeiten für Weisstanne, Bergahorn, Weisslerle und verschiedene Weidenarten. Daneben stellt die Vali­dierung und Weiterentwicklung der Modelle eine stetige, sehr anspruchsvolle Aufgabe dar (siehe z.B. Zahner 2018). Derzeit werden SOSlope und SlideforMAP für einzelne Rutschereignisse getestet. Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass der Austausch zwischen Forschung und Praxis sehr wichtig ist. Nur so kann ein guter Kompromiss zwischen einer mög­lichst exakten Berechnung der komplexen Prozesse und einer benutzerfreundlichen Anwendung gefunden werden. Nicht vergessen werden darf hierbei, dass auch das beste Modell die fachkompetente Beurteilung nicht zu ersetzen vermag. Modelle sind vielmehr als unterstützendes Werkzeug für die Kom­mu­nikation und die Entscheidungsfindung in der Praxis zu sehen. ■

*Eingereicht: 1. April 2019, akzeptiert (mit Review): 27. September 2019*

## Dank

Ein herzlicher Dank geht an alle Kollegen, die in den letzten Jahren zu den im Text genannten Forschungsaktivitäten beigetragen haben. Insbesondere danke ich Denis Cohen und Filippo Giadrossich für ihre langfristige und geduldige Zusammenarbeit. Viele Resultate wären zudem ohne die engagierte Unterstützung von Studierenden nicht möglich gewesen.

## Literatur

- ASKARINEJAD A, CASINI F, BISCHOF P, BECK A, SPRINGMAN SM (2012) Rainfall induced instabilities: a field experiment on a silty sand slope in northern Switzerland. *Ital Geotechn J* 3: 50–71.
- BANKHEAD N, KLIMETZ L, SIMONA (2013) BSTEM-Dynamic USER MANUAL. Davis CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 17 p.
- BEBI P, BAST A, GINZLER C, RICKLI C, SCHÖNGRUNDNER K ET AL (2019) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweiz Z Forstwes* 170: 318–325. doi: 10.3188/szf.2019.0318
- BISCHETTI GB, CHIARADIA EA, EPIS T, MORLOTTI E (2009) Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant Soil* 324: 71–89.
- CASADEI M, DIETRICH WE, MILLER N (2003) Controls on shallow landslide size. Proc 3<sup>rd</sup> Int Conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. 10–12 September 2003, Davos, Switzerland. pp. 91–101.
- CHEN W, SUN Z, HAN J (2019) Landslide susceptibility modeling using integrated ensemble weights of evidence with logistic regression and random forest models. *Appl Sci* 9: 171.
- COHEN D, SCHWARZ M (2017) Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surf Dynam* 5: 451–477.
- DAZIO E, CONEDERA M, SCHWARZ M (2018) Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *For Ecol Manage* 417: 63–76.
- DIETRICH W, MCKEAN J, BELLUGI D, PERRON T (2007) The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional landslide analysis in a digital terrain model. Proc 4<sup>th</sup> Int Conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment, 10–13 September 2007, Chengdu, China. 12 p.
- DOCKER BB, HUBBLE TCT (2008) Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology* 100: 401–418.
- FAILLETTAZ J, SORNETTE D, FUNK M (2010) Gravity driven instabilities: Interplay between state and velocity dependent frictional sliding and stress corrosion damage cracking. *J Geophys Res* 115 (B3).
- FAN CC, TSAI MH (2016) Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear. *Soil Tillage Res* 156: 1–15.
- GASSER E, SIMON A, PERONA P, DORREN L, HÜBL J ET AL (2018) Quantification of potential recruitment of large woody debris in mountain catchments considering the effects of vegetation on hydraulic and geotechnical bank erosion and shallow landslides. *E3S Web Conf.* 40 02046. doi: 10.1051/e3sconf/20184002046
- GEHRING E, CONEDERA M, MARINGER J, GIADROSSICH F, GUASTINI E ET AL (2019) Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Sci Rep* 9: 8638.
- GENET M, KOKUTSE N, STOKES A, FOURCAUD T, CAI X, JI J, MICKOVSKI S (2008) Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *For Ecol Manage* 256: 1517–1526.
- GIADROSSICH F, SCHWARZ M, COHEN D, PRETI F, OR D (2013) Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests. *Plant Soil* 367: 391–406.
- GIADROSSICH F, SCHWARZ M, COHEN D, CISLAGHI A, VERGANI C ET AL (2017) Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: a review. *Ecol Eng* 109: 256–271.
- GIADROSSICH F, COHEN D, SCHWARZ M, GANGA A, MARROSU R ET AL (2019) Large roots dominate the contribution of trees to slope stability. *Earth Surf Process Landforms* 44: 1602–1609.
- GREENWAY DR (1987) Vegetation and slope stability. In: Anderson MG, Richards KS, editors. *Slope stability*. Chichester: Wiley. pp. 187–230.
- GREENWOOD JR (2006) SLIP4EX – a program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotech Geol Eng* 24: 449.
- HILDEBRAND F (2015) Quantifizierung der Wurzelverstärkung von *Pinus radiata* Beständen in Neuseeland. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 73 p.
- LEHMANN P, OR D (2012) Hydromechanical triggering of landslides: From progressive local failures to mass release. *Water Resour Res* 48: w03535.
- LIN DG, HUANG BS, LIN SH (2010) 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. *Ecol Eng* 36: 992–1006.
- JI J, KOKUTSE N, GENET M, FOURCAUD T, ZHANG Z (2012) Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability: a case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China. *Catena* 92: 139–154.
- KOKUTSE NK, FOURCAUD T, KOKOU K, NEGLO K, LAC P (2006) 3D-Numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hillslopes stability. Proc Interpraevent, Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, 25–27 September 2006, Niigata, Japan. pp. 561–567.
- MAO Z, BOURRIER F, STOKES A, FOURCAUD T (2014) Three-dimensional modelling of slope stability in heterogeneous montane forest ecosystems. *Ecol Model* 273: 11–22.
- MATTLI J (2014) Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 79 p.
- MILLEDGE DG, BELLUGI D, MCKEAN JA, DENSMORE AL, DIETRICH WE (2014) A multidimensional stability model for predicting shallow landslide size and shape across landscapes: predicting landslide size and shape. *J Geophys Res* 119: 2481–2504.
- PIEGARI E, CATAUDELLA V, DI MAIO R, MILANO L, NICODEMI M (2006) A cellular automaton for the factor of safety field in landslides modeling. *Geophys Res Lett* 33: L01403.
- POLLEN N, SIMON A (2005) Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resour Res* 41: w07025.
- RICKLI C, GRAF F, BEBI P, BAST A, LOUP B ET AL (2019) Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank. *Schweiz Z Forstwes* 170: 310–317. doi: 10.3188/szf.0310
- SALVATICI T, TOFANI V, ROSSI G, D'AMBROSIO M, TACCONI-STE-FANELLI C ET AL (2018) Application of a physically based model to forecast shallow landslides at a regional scale. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18: 1919–1935.
- SCHWARZ M, COHEN D, OR D (2010A) Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *J Geophys Res* 115: f04035.
- SCHWARZ M, LEHMANN P, OR D (2010B) Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surf Process Landf* 35: 354–367.
- SCHWARZ M, PRETI F, GIADROSSICH F, LEHMANN P, OR D (2010C) Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy). *Ecol Eng* 36: 285–291.
- SCHWARZ M, COHEN D, OR D (2011) Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: experiments and modeling. *J Geophys Res* 116: f02007.
- SCHWARZ M, COHEN D, OR D (2012A) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: theory and case study. *Geomorphology* 171–172: 190–200.
- SCHWARZ M, THORMANN JJ, ZÜRCHER K, FELLER K (2012B) Quantifying root reinforcement in protection forests: Implications for slope stability and forest management. Proc Interpraevent 23–26 April 2012, Grenoble, France. pp. 791–802.
- SCHWARZ M, GIADROSSICH F, COHEN D (2013) Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrol Earth Syst Sci* 17: 4367–4377.

- SCHWARZ M, DORREN L, THORMANN JJ (2014) SLIDEFORNET: a web tool for assessing the effect of root reinforcement on shallow landslides. Proc Int Conference Analysis and management of changing risks for natural hazards, 18/19 November 2014, Padua, Italy. pp. FO4, 1–5.
- SCHWARZ M, RIST A, COHEN D, GIADROSSICH F, EGOROV P ET AL (2015) Root reinforcement of soils under compression. *J Geophys Res* 120: 2103–2120.
- SCHWARZ M, PHILLIPS C, MARDEN M, MCIVOR IR, DOUGLAS GB ET AL (2016) Modelling of root reinforcement and erosion control by ‘Veronese’ poplar on pastoral hill country in New Zealand. *N Z J For Sci* 46: 4–14.
- SCHWARZ M, COHEN D, LOUIS K (2017) Beurteilung der Wirkung biologischer Objektschutzmassnahmen: Anwendungsbeispiel des Modells SOSlope. *FAN Agenda* 2: 9–12.
- SCHWARZ M, DORREN L, KÜHNE K (2019A) Wirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen und Risikoreduktion auf Bahnanlagen und Bahnbetrieb der SBB AG: Anwendung des Konzepts PROTECT Bio anhand von drei Fallbeispielen in den Kantonen TI und LU. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Projektbericht.
- SCHWARZ M, DAZIO E, PIVIDORI M, BONARDI M, CONEDERA M (2019B) Ceduo castanile e frane superficiali – quali opzioni gestionali? *Sherwood* 241: 7–10.
- STOKES A, DOUGLAS GB, FOURCAUD T, GIADROSSICH F, GILLIES C ET AL (2014) Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant Soil* 377: 1–23.
- VERGANI C, SCHWARZ M, SOLDATI M, CORDA A, GIADROSSICH F ET AL (2016) Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. *CATENA* 143: 275–288.
- VERGANI C, GIADROSSICH F, BUCKLEY P, CONEDERA M, PIVIDORI M ET AL (2017) Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: a review. *Earth Sci Rev* 167: 88–102.
- VON RUETTE J, PAPRITZ AJ, LEHMANN P, RICKLI C, OR D (2011) Spatial statistical modeling of shallow landslides: Validating predictions for different landslide inventories and rainfall events. *Geomorphology* 133: 11–22.
- WALDRON LJ, DAKESSIAN S (1981) Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Sci* 132: 427–435.
- WU TH, MCKINNELL III WP, SWANSTON DN (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Can Geotechn J* 16: 19–33.
- WUNDER J, KNÜSEL S, DORREN L, SCHWARZ M, BOURRIER F ET AL (2018) Götterbaum und Paulownie: die «neuen Wilden» im Schweizer Wald? *Schweiz Z Forstwes* 169: 69–76. doi: 10.3188/szf.2018.0069
- ZAHNER A (2018) Analysis of shallow landslide probability influenced by radiata pine plantation management in New Zealand. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 87 p.

## Renforcement du sol dû aux racines et modélisation de la stabilité des pentes: une revue

Les sols enracinés sont comparables à des matériaux composites aux propriétés mécaniques très hétérogènes. L’analyse et la quantification de ces propriétés et de leur évolution dans le temps sont très difficiles et complexes, mais sont au cœur de nombreux aspects de l’ingénierie biologique et de la gestion des forêts de protection. L’article résume les connaissances récentes et les approches pour la quantification du renforcement du sol dû aux racines et leur mise en œuvre dans des modèles de stabilité des pentes. Le renforcement du sol par le système racinaire fait intervenir quatre mécanismes: renforcement basal, renforcement latéral sous tension, renforcement latéral sous compression et raidissement du corps glissant. Récemment, les modèles SlideforNET/SlideforMAP et SOSlope ont été développés pour une utilisation pratique. SlideforNET est un outil en ligne qui permet en quelques minutes, sur le terrain ou au bureau, d’évaluer la probabilité de glissement superficiel et l’effet protecteur de la forêt. SlideforMAP est basé sur la même approche que SlideforNET, mais il est résolu spatialement et prend en compte la structure de la forêt dans un bassin versant ou une région en détail. SOSlope aide en particulier à la quantification de l’efficacité de protection des peuplements forestiers, ainsi qu’à la planification de la protection des forêts et la mise au point de mesures biologiques. Les projets-pilotes initiaux montrent que les modèles permettent de passer d’une ingénierie biologique «qualitative» à «quantitative».

## Root reinforcement and slope stability modeling: a review

Rooted soils are comparable to composite materials that have very heterogeneous mechanical properties. The analysis and quantification of these properties and their change over time is very time-consuming and complex, but central to many practice-relevant aspects of soil bioengineering and protection forest management. The article summarizes recent knowledge and approaches for the quantification of so-called root reinforcement – the reinforcement of soil by roots – and its implementation in slope stability models. Root reinforcement involves four mechanisms: basal root reinforcement, lateral root reinforcement under tension, lateral root reinforcement under pressure, and stiffening of the landslide body. Recently, the SlideforNET/SlideforMAP and SOSlope models have been developed for practical use. SlideforNET is an online tool that allows to assess the likelihood of shallow landslides and the protective effect of forest cover within a few minutes. SlideforMAP is based on the same approach as SlideforNET, but is spatially distributed and takes into account the forest structure in a catchment area or a region in detail. In particular, SOSlope supports the quantification of the protective effectiveness of forest stands as well as the planning of protection forest management and of soil bioengineering measures. Initial pilot projects show that the models enable the transition from a “qualitative” to a “quantitative” soil bioengineering.