

# Entwicklung und Validierung einer neuen Methode für die Beurteilung und Planung der minimalen Schutzwaldpflege auf rutschgefährdeten Hängen



Schlussbericht Projekt Nr. 2010.12  
Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung

Juli 2013

**Projektverantwortlicher**

Jean-Jacques Thormann

**Projektleitung**

Dr. Massimiliano Schwarz

**Redaktion**

Karin Feller, Massimiliano Schwarz, Jean-Jacques Thormann, Kathrin Kühne

**an der Durchführung der Studie beteiligte Personen**

Dr. Massimiliano Schwarz, wiss. Mitarbeiter HAFL, Zollikofen

Jean-Jacques Thormann, Dozent HAFL, dipl. Forsting. ETH, Zollikofen

Marc Günther, wiss. Mitarbeiter HAFL, dipl. Geograph, Zollikofen

Lukas Dämpfle, Zivildienstleistender, cand. MSc Forstwissenschaften BOKU, Wien

Regina Kurschat, Assistentin HAFL, Forsting. FH, Zollikofen

Karin Feller, Assistentin HAFL, Forsting. ETH, Zollikofen

**Unterstützende Personen des Amt für Waldes des Kantons Bern:**

Karin Allensbach, Forsting. ETH, Schutzwaldverantwortliche KAWA, Bern

Jörg Häberle, Geologe, Abteilung Naturgefahren, KAWA, Interlaken

**am Praxistest im Herbst 2012 beteiligte Personen**

Christian von Grünigen, Oberförster, Waldabteilung 2, KAWA, Spiez

Christian Kuonen, Revierförster, Thunersee – Sultal, Krattigen (Waldabteilung 2)

Markus Rüfenacht, Revierförster, Schwarzenegg-Röthenbach, (Waldabteilung 3)

Walter Marti, Oberförster, Waldabteilung 4, KAWA, Bärau

Philipp Mösch, Oberförster, Waldabteilung 5, KAWA, Riggisberg

Thomas Heimann, Förster Revier Alpen, Staatsforstbetrieb, Interlaken

Peter Piller, Revierförster, Rüschiegg Nord, Rüschiegg – Heubach (Waldabteilung 5)

Arthur Sandri, Forsting. ETH, Bundesamt für Umwelt BAFU, Ittigen

André Wehrli, Bundesamt für Umwelt BAFU, Ittigen

Luuk Dorren, Bundesamt für Umwelt BAFU, Ittigen

Stéphane Losey, Forsting. ETH Bundesamt für Umwelt BAFU, Ittigen

# 1 Inhalt

2	Zusammenfassung .....	2
3	Einleitung .....	3
3.1	Kontext .....	3
3.2	Ziele des Projekts .....	4
3.3	Bedeutung für Forschung und Praxis .....	4
3.4	Stand der Forschung .....	5
4	Material und Methoden .....	6
4.1	Versuchsflächen .....	7
4.1.1	Wahl der Flächen .....	7
4.1.2	Flächen .....	7
4.2	Feldaufnahmen – Datenerhebung .....	11
4.2.1	Messung der Wurzelverteilung .....	11
4.3	Modellierung: Kalibrierung & Validierung der Modelle .....	12
4.3.1	Modell Wurzel-Verteilung .....	12
4.3.2	Modell Wurzel-Verstärkung .....	13
4.3.3	Modelle für Hangstabilitätsberechnungen .....	15
4.4	Methode für die Praxis .....	20
4.4.1	Entwicklung neuer Methoden zur Abschätzung der Waldwirkung in der Praxis .....	20
4.4.2	Praxis-Test .....	20
5	Resultate .....	22
5.1	Felddaten-Messung und modellierte Resultate der Wurzelverteilung .....	22
5.2	Modellierte Wurzelverstärkung .....	27
5.3	Berechnete Hangstabilität .....	29
5.3.1	Neue Methode für die Praxis .....	29
5.3.2	Resultate des Praxistests .....	33
6	Diskussion und Schlussfolgerungen .....	36
6.1	Wurzelverteilung .....	36
6.2	Kalibrierung Wurzelverteilungsmodell .....	38
6.3	Berechnung Wurzelverstärkung .....	38
6.4	Berechnung der Hangstabilität & Anwendung neuer Beurteilungsmethoden im Feld .....	39
6.5	Praxis-Test .....	40
6.6	Monitoring-System .....	40
7	Bedeutung der Resultate und Ausblick .....	41
8	Literatur .....	42
9	Anhang .....	46

## 2 Zusammenfassung

Die Schutzfunktion des Waldes hat in der Schweiz eine grosse Bedeutung. Um eine entsprechende Schutzwirkung kontinuierlich zu garantieren, können gezielte waldbauliche Eingriffe eingesetzt werden. Die Entscheidungen für die Bewirtschaftung der Schutzwälder basiert jedoch noch nicht immer auf wissenschaftlich quantitativen Angaben.

Im Bereich Rutschgefahren bilden neue Erkenntnisse und Modelle über die Wirkung der lateralen Wurzelverstärkung eine wichtige Grundlage für die Formulierung neuer Ansätze zur Berücksichtigung der Vegetation in Hangstabilitätsmodellen. Für die Umsetzung dieser Erkenntnisse in die Praxis wurde bisher sowohl in der Schweiz wie auch weltweit nur wenig gemacht, da sich dies als schwierig und aufwendig erweist.

Das vorliegende Projekt hat sich nun genau dies zum Ziel gemacht. Es soll eine neue praxis-taugliche Methode für eine nachvollziehbare Beurteilung der Schutzwaldwirkung in rutschgefährdeten Hängen entwickelt werden. Dies als Instrument für die Planung von waldbaulichen Massnahmen im Sinne der minimalen Waldpflege im Rutschungs-Schutzwald nach NaiS.

In einer ersten Phase wurden die neuen Wurzelverteilungs- und Wurzelverstärkungsmodelle mit weiteren spezifischen, waldstandorts- und baumartenabhängigen Daten kalibriert und validiert. Diese Daten wurden in Zusammenarbeit mit dem Amt für Wald des Kantons Bern (KAWA) an verschiedenen Probebäumen auf drei rutschgefährdeten Pilotflächen im Emmental, Berner-Oberland und im Gantrisch-Gebiet mittels manueller Auszählung der Wurzeln in Abhängigkeit ihres Durchmessers gewonnen.

In einem zweiten Schritt wurden auf Basis dieser Modelle zwei einfache quantitative Beurteilungsmethoden der Schutzwirkung des Waldes bezüglich flachgründiger Rutschungen und der Planung von waldbaulichen Maßnahmen in instabilen Hängen entwickelt (A: standortspezifische Tabelle für die Schätzung der maximalen Lückenlänge; B: Übersichtskarte über die potentielle Waldwirkung). Mittels Praxis-Tests durch Forstpersonal des Kantons Bern wurden diese Methoden daraufhin auf ihre Anwendbarkeit und Nachvollziehbarkeit hin erprobt.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und neu vorhandenen experimentellen Einrichtungen in drei Pilotgebieten wird vorgeschlagen, ein Monitoringkonzept für eine langfristige Analyse der Interaktion zwischen Waldbewirtschaftung, Wurzelwachstumsdynamik, Wurzelverstärkung und Hangstabilität aufzubauen.

Die Resultate dieses Projekts zeigen, dass:

- 1) Wurzelverteilung und Wurzelverstärkung je nach Baumart und Standort unterschiedlich sind,
- 2) die Schutzwirkung des Waldes von der Waldstruktur und Baumartenmischung abhängt,
- 3) die zwei verschiedenen Methoden (A und B) als nützliche Anzeichnungshilfen im Wald brauchbar sind, aber noch auf weiteren Standorten getestet werden müssen,
- 4) der Unterschied zwischen der herkömmlichen Anzeichnung nach NaiS und der Anwendung der neuen Methode (A) auf Standorten mit heterogener Waldstruktur und nicht angepasster Baumartenmischung am deutlichsten ist,
- 5) neue numerische Modellierungsansätze (SOSlope Model) und die daraus erzeugte Wirkungskarte nützlich sein können für Anwendungen wie Kosten-Nutzen-Analysen in der Schutzwaldpflege oder bei der Berücksichtigung der Waldwirkung in Gefahrenkarten.

Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben neue quantitative Hinweise zur Schutzwirkung des Waldes gegenüber Rutschungen und lassen sich gut mit der Grundphilosophie von NaiS nach einem standortgerechten Waldbau vereinbaren.

Dank der verwendeten Ansätze wird der Schritt von einer qualitativen hin zu einer quantitativen Schätzung der Schutzwirkung des Waldes gegen Rutschungen möglich. Dies erlaubt die For-

mulierung aussagekräftiger Grundlagen für die Praxis auf verschiedenen Entscheidungsebenen (Bund: NaiS und ProtectBio, Kantone: Priorisierung der Schutzwaldflege, Gemeinden: Objektschutz).

## 3 Einleitung

### 3.1 Kontext

Die Schutzwirkung gegen Naturgefahren ist eine Waldfunktion, welche in den Alpen schon lange anerkannt ist. Die grossen sozio-ökonomischen Änderungen in den letzten Jahrzehnten im Alpenraum haben die Ansprüche an die verschiedenen Waldfunktionen (Schutz-, Nutz-, Erholungs-, und Naturschutzfunktion) erhöht. Besonders in den Bergregionen der Schweiz hat die Schutzwirkung des Waldes eine grosse Bedeutung. Nach einer Abschätzung des BAFU (Rauch-Schwegler, 1994), wurde der ökonomische Wert des Waldes je nach Leistungsgruppe in der Schweiz wie folgt gewertet: 45% Schutzwald, 30% Naturschutz, 20% Erholung und 5% Holzproduktion. Diese approximativen Werte zeigen allgemein, wie wichtig die Berücksichtigung der Schutzwirkung in einer multifunktionalen, nachhaltigen Waldbewirtschaftung ist. 49% der Waldfläche der Schweiz ist nach neusten Erkenntnissen Schutzwald (Losey und Wehrli, 2013). Die effektive Schutzwirkung des Waldes ist in jeder Situation von vielen verschiedenen Faktoren abhängig und ändert sich ständig. Dazu gehören auch Faktoren wie die Waldstandorte, der Waldzustand und dessen Nutzung. Wie bereits in der Schweizer Wegleitung für Schutzwaldflege „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS“ (Frehner et al., 2005) des BAFU beschrieben, kann der Waldzustand und damit seine Schutzwirkung als ungenügend, minimal oder ideal definiert werden. Um einen minimalen Waldzustand und eine entsprechende Schutzwirkung kontinuierlich zu garantieren, können gezielte waldbauliche Eingriffe getätigt werden.

Der Bund und die Kantone finanzieren mit mehreren Millionen Franken pro Jahr diese Minimalpflege der Schutzwälder. Aufgrund der teilweise noch fehlenden wissenschaftlichen Kenntnisse ist eine nachvollziehbare Quantifizierung der Waldwirkung gegenüber den verschiedenen Naturgefahrenprozessen schwierig zu formulieren. Entsprechend basieren die Entscheidungen bei der Bewirtschaftung der Schutzwälder nicht immer auf wissenschaftlich quantitativen Angaben. Die Forschung liefert ständig neue Resultate und trägt so dazu bei, diese Wissenslücke zu schließen.

Im Bereich Rutschgefahren hat man festgestellt, dass mehr als 95% aller bodennahen Rutschungen, welche in der Schweiz erforscht wurden, ein Volumen von weniger als 400 m<sup>2</sup> mit einer Tiefe zwischen 1 und 2 m aufweisen (Rickli et al., 2002; Rickli und Graf, 2009). Verschiedene Studien zeigen zudem, dass die Verstärkung des Bodens durch laterale Wurzeln bei diesen oberflächennahen Rutschprozessen eine wichtigere Rolle spielen als die Basalwurzeln (Renau and Dietrich, 1987; Schmidt et al., 2001) und Rutschungen bis 1000 m<sup>2</sup> stabilisieren können (Schwarz et al., 2010a).

Diese Erkenntnisse aus der Forschung bildeten die Grundlage für die Formulierung neuer Ansätze zur Berücksichtigung der Vegetation in Hangstabilitätsmodellen (Schmidt et al. 2001; Roering et al., 2003; Schwarz et al., 2010a). Denn bis anhin wurde bei Berechnungen der Hangstabilität dieser laterale Befestigungseffekt meist nicht berücksichtigt.

Mittels Labor- und Feldversuchen wurde die stabilisierende mechanische Wirkung gegen Erosions- und Rutschprozesse verschiedener Waldstrukturen erfasst und daraus Modelle entwickelt

(Schwarz and Cohen, 2011; Schwarz et al., in Review), welche aus der Verteilung der Bäume im Gelände die Ausdehnung und mechanischen Eigenschaften der Baumwurzeln ableiten und die mechanischen Kräfte im Hang berechnen. Dieser neue Ansatz ermöglicht es, die Wirkung des Schutzwaldes in Rutschgebieten zu bestimmen. Er liefert eine bessere Grundlage für die Schutzwaldpflege.

Die Umsetzung in die Praxis bleibt aber, trotz dem Vorhandensein dieser neuen und innovativen Kenntnisse, schwierig und aufwändig. Es wurde bis anhin sowohl in der Schweiz wie auch weltweit nur wenig in diese Richtung gearbeitet.

In der Forstpraxis im Kanton Bern wurde erkannt, dass das vorhandene Anforderungsprofil nach NaiS (Frehner et al., 2005) gewisse Schwächen aufweist. Wegen Unklarheit über Eingriffsstärke und maximale Eingriffsoffnung war das Amt für Wald des Kantons Bern (KAWA) an diesem Forschungsprojekt sehr interessiert. Durch den Einbezug eines Spezialisten der Abteilung Naturgefahren, des zuständigen Oberförsters und der Schutzwaldspezialistin, sowie durch die Teilnahme am Praxistest der zuständigen Förster unterstützte das KAWA dieses Projekt.

### 3.2 Ziele des Projekts

Das allgemeine Ziel dieses Projektes ist die Umsetzung der neuen Forschungskenntnisse bezüglich der mechanischen Waldwirkung auf Rutschungen in die Praxis. Es soll eine neue Anwendungsmethode für eine nachvollziehbare, einfache quantitative Beurteilung der Schutzwaldwirkung in rutschgefährdeten Hängen entwickelt werden und deren Machbarkeit mittels ersten Erfahrungen abgeklärt werden.

Diese soll auch ein Instrument für die Planung von waldbaulichen Massnahmen im Sinne der minimalen Waldpflege im Rutschungs-Schutzwald sein.

Im Detail sind dies folgende Teilziele:

- a) Gewinnung von weiteren Daten zur Kalibrierung der neuen Hangstabilitäts-Modelle (Schwarz et al., 2010b; Schwarz et al., 2010c), um die standortspezifische Interaktion Rutschung - Vegetation besser zu verstehen (Wurzelverteilung je nach Baumart und Standort).
- b) Entwicklung und Testen einer neuen Anwendung für die Praxis zur einfachen quantitativen Beurteilung der mechanischen Waldwirkung bezüglich flachgründiger Rutschungen im Wald. Sie sollte einfach anwendbar und nachvollziehbar sein und auf robusten, quantitativen Forschungsdaten basieren.
- c) Vorschlag eines einfachen Monitoringsystems (Erfolgskontrolle) anhand repräsentativer Beispiele zur Beurteilung der Schutzwaldpflege in einem mittleren bis langfristigen Zeitraum in Rutschungs-Schutzwäldern.

### 3.3 Bedeutung für Forschung und Praxis

Die Bedeutung des Projektes für die Forschung liegt bei der Kalibrierung und Validierung der neuen Modelle (Schwarz et al., 2010b; Schwarz et al., 2010c) mit zusätzlichen Felddaten zum besseren Verständnis der standortsspezifischen Interaktionsprozesse.

Dieses Projekt liefert auch eine wichtige Grundlage für die einfachere quantitative Abschätzung der Schutzwirkung des Waldes gegenüber Rutschungen. Solche Grundlagen können effizient in komplexe Modelle für das Risikomanagement im Schutzwald implementiert werden.

Die Bedeutung für die Praxis dieses Projekts liegt in der Formulierung der wissenschaftlichen Resultate und Kenntnisse in einer einfachen, anwendbaren Form. Dank der Entwicklung einer praxistauglichen, pragmatischen Methode wird eine bessere quantitative und nachvollziehbare Beurteilung und Planung der Schutzwaldflege ermöglicht, welche später auch ins Anforderungsprofil von NaiS einfließen kann.

### 3.4 Stand der Forschung

Es ist bekannt, dass die Verstärkung des Bodens durch Wurzeln einen grossen Einfluss auf die Auslösungsmechanismen und Geometrie von bodennahen Rutschungen hat (Schmidt et al., 2001; Rickli et al., 2002; Roering et al., 2003). So ist die Forschung bezüglich Wurzelverstärkung weltweit seit etwa 30 Jahren sehr aktiv (Wu et al., 1979; Waldron and Dakessian, 1981; Pollen and Simon., 2005; Schwarz et al., 2010b). Die Wirkungen der Wurzeln unter Zug- und Scherbedingungen wurden von vielen Autoren untersucht (Wu et al., 1979; Zhou et al., 1998; Mickovski et al., 2007; Schwarz et al., 2010c) und modelliert (Wu et al., 1979; Ennos, 1990; Ekanayake and Phillips, 1999; Schwarz et al., 2011; Dupuy et al., 2005; Pollen and Simon, 2005).

Zahlreiche Studien über die Abschätzung der Wurzelverstärkung basieren jedoch nur auf der Kartierung der vertikalen Wurzelverteilung (Bischetti et al., 2005; Genet et al., 2008, Hales et al., 2009; Thomas and Pollen-Bankhead, 2010). Nur in wenigen Fällen wird auch die laterale Verteilung der Wurzeln kartiert oder modelliert (Sakals and Sidle, 2004; Roering et al., 2003).

Die Verstärkung durch Wurzeln wird daher in den meisten Modellen nur als statische, scheinbare Kohäsion in die Hangstabilitätsberechnung eingeführt (Montgomery and Dietrich, 1994 (TOPOG, SHALSTAB); Sidle and Wu, 200 (dSLAM); Bathurst et al., 2007 (SHETRAN); Simoni et al., 2007 (GEOTop)), ohne Berücksichtigung des lateralen Befestigungseffekts. Studien haben jedoch gezeigt, dass die laterale Verstärkung der Wurzeln wichtiger ist als die basale Verstärkung (Reneau and Dietrich, 1987; Schmidt et al., 2001; Schwarz et al., 2010a) und Rutschungen bis 1000 m<sup>2</sup> stabilisieren können (Schwarz et al., 2010a).

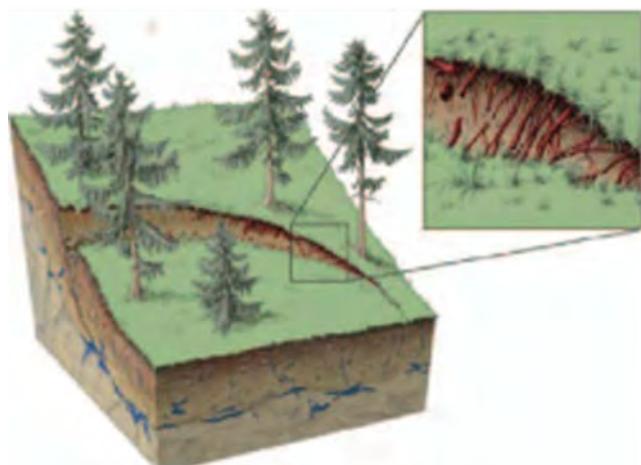


Abbildung 1: Wirkung des Wurzelwerks bei flachgründigen Rutschungen (Schwarz et al., 2010b).

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass für eine Quantifizierung der Vegetationswirkungen punkt- zu Hangstabilität eine feine (0.1-1 m) räumliche Auflösung der Wurzelverteilung (bzw. detaillierte Charakterisierung der Waldstruktur), eine dynamische Charakterisierung der Wurzelverstärkung sowie die Berücksichtigung der lateralen Verteilung der Kräfte notwendig sind (Pollen and Simon, 2005; Schwarz et al., 2010b; Sakals and Sidle, 2004; Schmidt et al., 2001; Roering et al., 2003).

Mittlerweile wurden einige neue Ansätze entwickelt, um all diese Aspekte bei der Berechnung der Hangstabilität zu berücksichtigen (Kukotse et al., 2006; Genet et al., 2008; Schwarz, 2010b) und die Hangstabilitätsmodelle mit der Vegetationswirkung zu ergänzen (Schmidt et al., 2001; Roering et al., 2003; Schwarz et al., 2010a).

So wurde mittels Feld- und Laborversuchen im Rahmen einer Doktorarbeit an der WSL die stabilisierende Wirkung verschiedener Waldstrukturen genauer untersucht. Daraus wurden Modelle entwickelt (Schwarz and Cohen, 2011; Schwarz et al., 2012a), welche aus der Verteilung der Bäume im Gelände die Ausdehnung und mechanischen Eigenschaften der Baumwurzeln ableiten und die mechanischen Kräfte im Hang berechnen.

Dies ermöglicht es, die Wirkung des Schutzwaldes in Rutschgebieten zu bestimmen. Damit sind bessere Grundlagen für die Schutzwaldflege sowie die Erarbeitung von Gefahrenkarten vorhanden.

In der Praxis werden diese neuen Ansätze noch nicht benutzt, weil einerseits die entsprechenden Inputparameter noch zu zahlreich und deren Erfassung zu aufwändig ist und andererseits eine einfache, für die Praxis taugliche Anwendung der neuen Erkenntnisse noch nicht ausgearbeitet wurde. Die Handlungsanleitung für die Schutzwaldflege in der Schweiz (NaiS, Frehner et al., 2005) sowie ausländische Dokumente basieren bis heute also nur auf qualitativen Kenntnissen.

Die Kombination eines Wurzelverteilungsmodells (Schwarz et al., 2010b) mit einem neuen mechanischen Modell für die Berechnung des Verstärkungs-Dehnungsdiagrammes eines Bündels von Wurzeln, in der Mechanik als „fiber bundle model“ bekannt (Schwarz et al., 2010c; Cohen et al., 2011), erlaubt nun aber die Berechnung der maximalen Wurzelverstärkung in Abhängigkeit vom Abstand des Baumstammes. Diese neuen Daten aus der Forschung bieten ein grosses Potential für eine einfache Umsetzung dieses Wissens in der Praxis.

## 4 Material und Methoden

Das methodische Vorgehen gliedert sich grob in drei Teile:

- *Felddaten-Erhebung zur Quantifizierung und Validierung des Wurzelverteilungs-Modells*  
Es werden geeignete Versuchsflächen in rutschungsgefährdeten Gebieten gesucht und ausgeschieden. Auf diesen wird die Wurzelverteilung an Probebäumen verschiedener Baumarten mittels manuellem Verfahren erhoben.
- *Quantifizierung Wurzelverstärkung für verschiedene Baumarten*  
Mit den erhaltenen Felddaten werden die Wurzelverteilung und die Wurzelverstärkung der verschiedenen Baumarten pro Bestand modelliert. Daraus wird die Hangstabilität der einzelnen Flächen berechnet und neue spezifische Erkenntnisse gewonnen.

- *Entwicklung einer neuen Methode zur praktischen Beurteilung und Planung im Feld*

Die Erkenntnisse aus den Modellierungen werden in eine in der Praxis anwendbare Form gebracht und in einem ersten Feld-Test mit Forstfachleuten aus der Praxis auf Tauglichkeit und Umsetzbarkeit geprüft (Praxis-Test).

## 4.1 Versuchsflächen

### 4.1.1 Wahl der Flächen

Die zu wählenden Versuchsflächen dienen sowohl der Erhebung der Feld-Daten zur Validierung und Quantifizierung der Modelle als auch der praktischen Anzeichnung im Praxis-Test und könnten auch für das zukünftige Monitoring verwendet werden. Diese Flächen sollen in erster Linie Situationen repräsentieren, bei welchen die Hänge gegenüber Rutschungen anfällig sind (v.a. abhängig von der Hangneigung und Art des Gesteinsmaterials (NaiS, Frehner et al., 2005)) und dies wiederum bei der forstlichen Bewirtschaftung im Zuge der Schutzfunktion als wichtiges Kriterium berücksichtigt wird. Insbesondere wurden daher die Geologie und die Bodeneigenschaften bei der Wahl beachtet. Molasse und Flyschgebiete sind bekannte Gebiete, wo Rutschphänomene regelmässig vorkommen und welche im Kanton Bern zu finden sind.

Wenn möglich sollen sich die darauf befindenden Waldbestände in einem hiebsreifen Alter befinden, damit bereits im mittelfristigen Zeitrahmen Aussagen anhand des Monitorings gemacht werden können.

Zudem sollen die Baumarten Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*) und Buche (*Fagus silvatica*) vorhanden sein, um Aussagen bezüglich der Wirkung gegen Rutschungen auf Flächen machen zu können, auf welchen die drei in der Schweiz häufigsten Baumarten vorkommen.

Aus logistischer Sicht ist es wichtig, dass das Gebiet erschlossen ist und die Bewilligung des Grundstückeigentümers für die Versuche eingeholt wird.

In Zusammenarbeit mit dem Forstdienst des Kantons Bern wurden verschiedene, den obigen Anforderungen entsprechende Flächen zusammengetragen. Durch eine Feldbegehung wurde die jeweilige Situation überprüft und die drei optimalsten Flächen aufgrund des vorhandenen Bestandes, der Baumarten und der Zugänglichkeit ausgewählt.

### 4.1.2 Flächen

Die drei ausgewählten Flächen werden nachfolgend beschrieben. Eine Fotodokumentation befindet sich in Anhang 2.

## Fläche 1: „Honegg Nord“ Schangnau (Sc)

**Lage:** „Honegg Nord“ Nähe Schangnau i.E., Kt. Bern

**Topogr. Karte:** Blatt 1188 „Eggiwil“

**Koordinaten:** 629/350 // 185/025 (Praxistest-Fläche: Ecke unten links)  
N 46° 48.944 / E 7° 49.393

### Naturräumliches:

**Region:** Nördliche Randalpen

**Höhe- / Stufe:** 1000 m ü.M. / obernort

**Exposition:** Nord-Nord-Ost exponiert

**Klima:** ozeanisch

**Geologie:** Tertiär, dominiert von der Molasse, tlw. mit Moräne überlagert; Konglomerate, Brekzien, tlw. Sandstein

**Boden:** Braunerde, Regosol tlw. vergleyt mit tiefer Tonschicht, sandiger Ton, schwach bis stark sauer, frisch; Gründigkeit: im Mittel tiefer als 2 m (USDA Boden Taxonomie)

**Hangneigung:** 25°

**Naturgefahr:** Prozess „Rutschungen“, Entstehungsgebiet

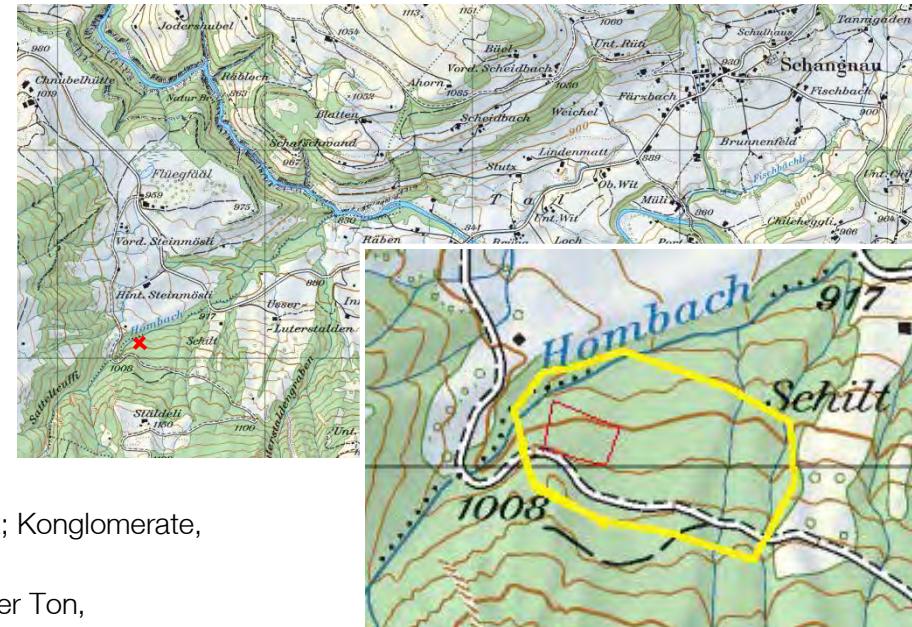


Abbildung 2: Übersichtskarte / Detailkarte mit Versuchsfläche (gelb) und Praxistest-Fläche (rot).

### Waldspezifische Angaben:

**Waldgesellschaften:** 18a, Typischer Tannen-Buchenwald tlw. 26ho / 27ho (Berner Schlüssel)

18, Waldschwingel-Tannen-Buchenwald tlw. 26h Ahorn-Eschenwald und 27h Bach-Eschenwald (NaiS),

**Bestand:** Einschichtiger Bestand aus Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*) mit einzelnen Buchen (*Fagus sylvatica*) und Bergahornen (*Acer pseudoplatanus*). Homogene, 25 m hohe Kronenschicht unterbrochen von kleinen Lücken (max. 5m gross) mit einem Deckungsgrad von 80%. Die Verjüngung mit einem Deckungsgrad von 20-60% wird dominiert von Tanne (*Abies alba*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*).

**Zuwachs:** 11 m<sup>3</sup>/ha/Jahr

**Eigentümer:** Staatswald Kt. Bern

### Probefläche Praxis-Test: (Fläche mit 100 Bäumen)

**Fläche:** ≈25a;

**Mittlerer BHD:** 38.91 cm;

Total Tfm: 176.83;

**Mittlere Höhe:** 29.07 m;

Basal-Fläche: 61 m<sup>2</sup>;

### Bestand pro Durchwuchsklassen:

	Anzahl	Prozent	Tfm
20 – 30 cm BHD:	32	32	15.87
30 – 50 cm BHD:	48	48	80.79
>50 cm BHD:	20	20	80.18

## Fläche 2: „Spisibach“ Leissigen (Sp)

*Lage:* „Egelholz“ Nähe Leissigen, Kt. Bern

*Topogr. Karte:* Blatt 1228 „Lauterbrunnen“

*Koordinaten:* 625/828 // 165/046 (Praxis-Testfläche: Ecke unten links)

N 46° 38.169 / E 7° 46.556

### Naturräumliches:

*Region:* Nördliche Randalpen

*Höhe-/Stufe:* 1240 m ü.M. / obermontan

*Exposition:* Nord-West exponiert

*Klima:* ozeanisch

*Geologie:* Ultra Helvetikum; Flysch, tlw. sandsteinreich

*Boden:* vernässte Braunerden und Regosol, tlw. vergleyt, verbraunt

*Hangneigung:* 35°

*Naturgefahr:* Prozess „Erosion und Rutschungen“, Entstehungsgebiet

### Waldspezifische Angaben:

*Waldgesellschaften:* 18w Tannen-Buchenwald mit Schlaffer Segge (Berner Schlüssel)

18w Typischer Buntreitgras-Tannen-Buchenwald (NaiS)

*Bestand:* Mehrschichtiger Bestand aus Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*) mit einzelnen Buchen (*Fagus silvatica*) und Bergahornen (*Acer pseudoplatanus*). Heterogene Kronenschicht mit kleinen Lücken (max. 10 m gross) und einem Deckungsgrad von 90%. Die Verjüngung, v.a. in den Lücken mit einem Deckungsgrad von 50-80%, wird dominiert von Bergahornen (*Acer pseudoplatanus*).

*Zuwachs:* 8 m<sup>3</sup>/ha/Jahr

*Eigentümer:* Burgergemeinde Leissigen

### Probefläche Praxis-Test: (Fläche mit 100 Bäumen)

*Fläche:* ≈35a;

*Mittlerer BHD:* 40.55 cm;

*Mittlere Höhe:* 25.78 m;

Total Tfm: 186.89;

Basal-Fläche: 64 m<sup>2</sup>;

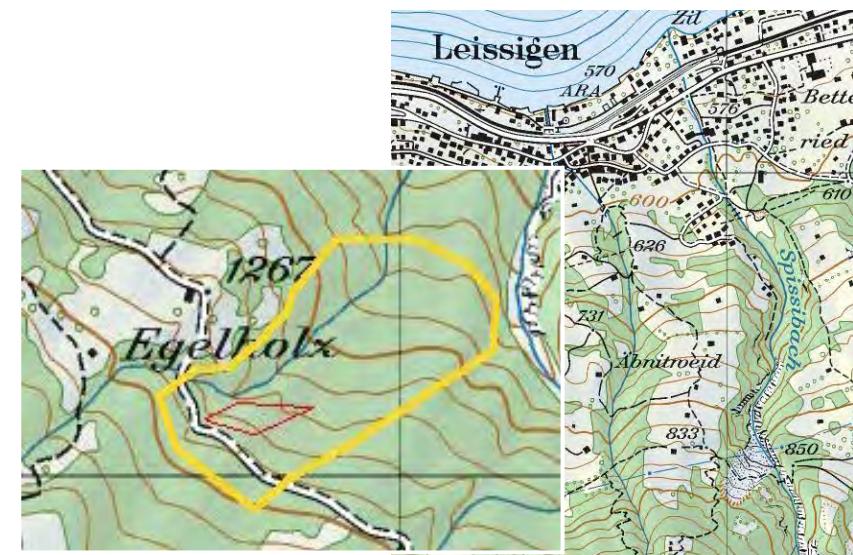
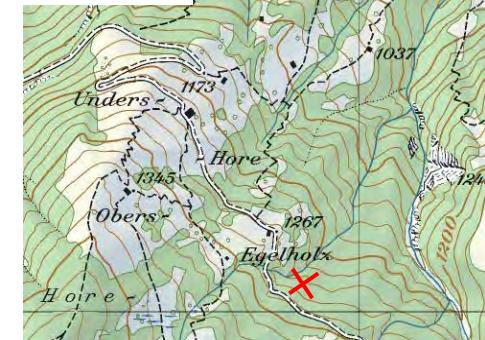


Abbildung 3: Übersichtskarte / Detailkarte mit Versuchsfäche (gelb) und Praxis-Testfläche (rot).



### Bestand pro Durchwuchsklassen:

	Anzahl	Prozent	Tfm
20 – 30 cm BHD:	35	35	15.26
30 – 50 cm BHD:	36	36	52.29
>50 cm BHD:	29	29	119.34

### Fläche 3: „Under Scheidwald“ Gantrisch (Ga)

**Lage:** „Under Scheidwald“ Nähe Riffenmatt, Kt. Bern  
**Topogr. Karte:** Blatt 1206 „Guggisberg“  
**Koordinaten:** 594/776 // 178/095 (Praxis-Testfläche: Ecke unten links)  
 N 46° 45.241 / E 7° 22.216

#### Naturräumliches:

**Region:** Nördliche Randalpen  
**Höhe-/Stufe:** 1220 m ü.M. / obermontan  
**Exposition:** Nord-West exponiert  
**Klima:** ozeanisch  
**Geologie:** obere Süßwassermolasse Mergel tlw. mit Sandstein  
**Boden:** Gley- und Moorböden, gleyige Braunerde  
**Hangneigung:** 15°  
**Naturgefahr:** Prozess „Rutschungen und Hochwasser“, Entstehungsgebiet

#### Waldspezifische Angaben:

**Waldgesellschaften:** 46, Peitschenmoos-Fichten-Tannen-Wald (Ellenberg & Klötzli)  
 46 Typischer Heidelbeer-Tannen-Fichtenwald (NaiS)  
**Bestand:** Einschichtiger Bestand aus Fichte (*Picea abies*) und Tanne (*Abies alba*). Homogene, 25 m hohe Kronenschicht unterbrochen von kleinen Lücken (max. 5 m gross) mit einem Deckungsgrad von 90%. Die Verjüngung, mit einem Deckungsgrad von 0-30%, wird dominiert von Tanne (*Abies alba*) und Fichte (*Picea abies*).  
**Zuwachs:** 8 m<sup>3</sup>/ha/Jahr  
**Eigentümer:** Burgergemeinde Rüschiweg

#### Probefläche Praxis-Test: (Fläche mit 100 Bäumen)

**Fläche:** ≈30;  
**Mittlerer BHD:** 41.43 cm;      **Total Tfm:** 197.49;  
**Mittlere Höhe:** 28.95 m;      **Basal-Fläche:** 65 m<sup>2</sup>;

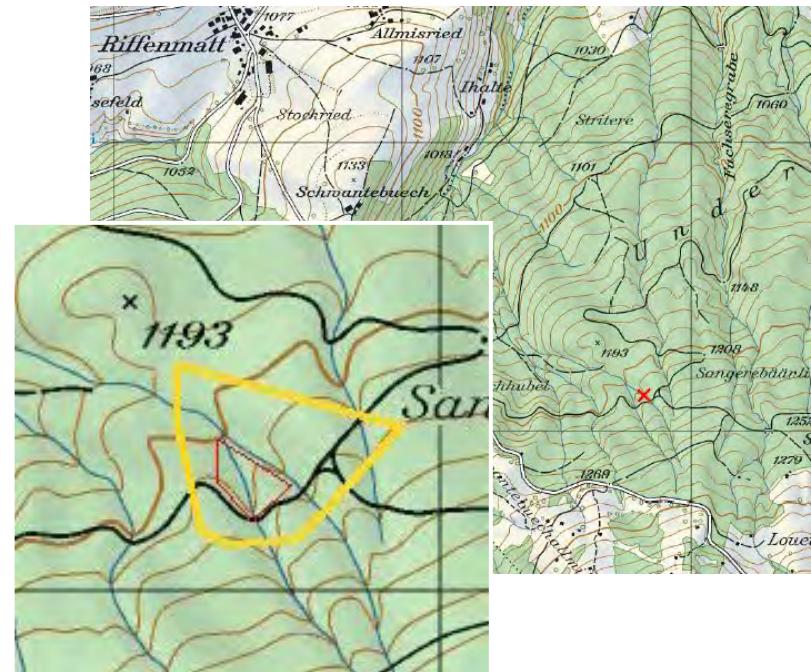


Abbildung 4: Übersichtskarte / Detailkarte mit Versuchsfläche (gelb) und Praxis-Testfläche (rot).

#### Bestand pro Durchwuchsklassen:

	Anzahl	Prozent	Tfm
20 – 30 cm BHD:	21	21	12.14
30 – 50 cm BHD:	57	57	100.57
>50 cm BHD:	22	22	84.78

## 4.2 Feldaufnahmen – Datenerhebung

### 4.2.1 Messung der Wurzelverteilung

Für die Quantifizierung und Validierung der Modelle wurden auf den drei Versuchsfächern Daten zur Wurzelverteilung erhoben. Die Wurzelverteilung wird dabei durch eine lateral-horizontale Verteilungsgröße charakterisiert und durch die Anzahl Wurzeln pro Wurzeldurchmesser-Klasse beschrieben. Die vertikale Wurzelverteilung gilt für Rutschprozesse in tiefgründigen Böden als weniger wichtig, da in der Regel nur wenige Wurzeln die Scherebene der Rutschungen durchqueren (zwischen 1 und 2 m Tiefe, siehe Rickli et al. (2002) und Rickli und Graf (2009)). Damit kann ihr Beitrag zur Stabilität vernachlässigt werden (Schwarz et al., 2010a).

Auf jeder Versuchsfäche wurden pro Baumart (Fichte, Tanne und Buche) 4-6 Bäume aufgrund ihres Durchmessers (BHD), der sozialen Stellung im Bestand und Erscheinung zur Beprobung ausgewählt (= Probebäume).

Neben jedem Probebaum wurden, wie in Abbildung 5 gezeigt, drei Bodenprofile im Abstand von 0.5, 1.5 und 2.5 m (zum Teil 3.5 m) zum Stamm ausgehoben. Diese Profile wiesen eine Breite von 0.5 m und eine Tiefe von 0.5 m auf. Die Richtung der Profile wurde so gewählt, dass der mögliche Wurzelkonkurrenz-Effekt durch Nachbarbäume minimiert wird.

In jedem Bodenprofil wurde sodann der Durchmesser (mit Wurzel-Cortex) jeder lebenden, zum Probebaum gehörenden Wurzel gemessen und die Anzahl pro Wurzeldurchmesser-Klasse notiert.

Unter Feinwurzeln werden dabei Wurzeln mit Durchmesser  $\leq 1.5$  mm verstanden und Grobwurzeln als Wurzeln mit Durchmesser  $> 1.5$  mm, welche in 1 mm-Durchmesserklassen klassifiziert werden.

Die Zugehörigkeit der Wurzeln zum Probebaum wurde anhand der baumartenspezifischen Wurzelmerkmale (Rindenfarbe, Morphologie und Topologie) bestimmt. Tote Wurzeln wurden aufgrund der Konsistenz des Wurzel-Phloems/Xylems und des Cortex ausgeschieden (Schwarz et al., 2012a).

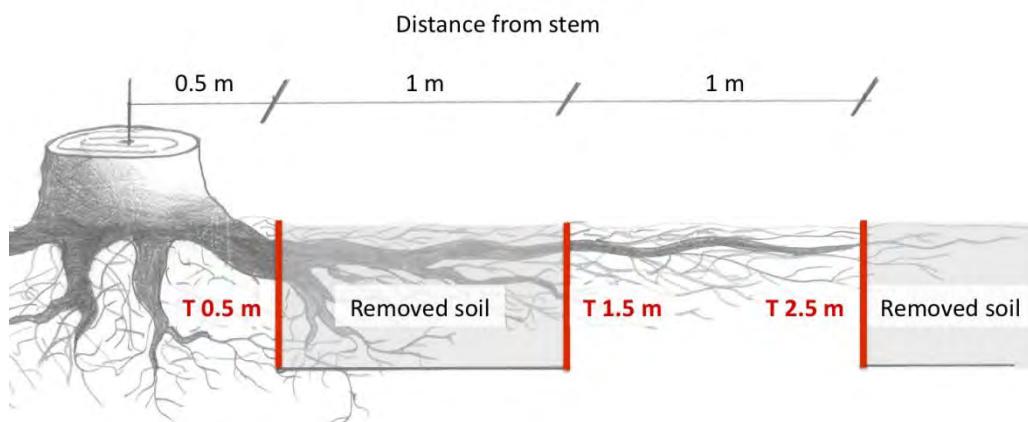


Abbildung 5: Schema der Bodenprofil-Positionen der Wurzelverteilungsaufnahmen pro Probebaum (aus Paper Interpraevent: Schwarz, 2012a).

## 4.3 Modellierung: Kalibrierung & Validierung der Modelle

### 4.3.1 Modell Wurzel-Verteilung

Das für die Simulation der Wurzelverteilung benutzte Modell (Schwarz et al., 2010b) erzeugt die Zahl der Wurzeln verschiedener Wurzeldurchmesserklassen in Abhängigkeit verschiedener Abstände vom Stamm und verschiedener Stammdurchmesser (BHD). Es basiert auf den vier Parametern: Pipe coefficient<sup>1</sup>, maximaler lateraler Wurzelabstand, einem Skalierungsfaktor und einem verwendetem Exponenten zur Berechnung der Grobwurzel-Dichte („Decay exponent“). Schwarz et al. (2010b) zeigen, wie diese Parameter aus der Literatur und/oder aus Feld-Messungen erhoben werden kann und wie dieser Ansatz eine realistische Abschätzung der Wurzelverteilung für eine Baumart ermöglicht, welche durch Wurzeldurchmesser-Klassen und Häufigkeit charakterisiert wird (Abbildung 6). Die Aufskalierung der Wurzelverteilung auf Bestandesebene erfolgte unter Berücksichtigung einer einfachen Überlagerung der einzelnen Wurzel-Systeme.

Infolge der unterschiedlichen Wurzelsysteme verschiedener Baumarten und klimatischen Eigenheiten werden verschiedene Kalibrierungen des Modells benötigt, um spätere Aussagen über die Schutzwirkung des jeweiligen nicht homogenen Waldes machen zu können.

Mit den neuen, in den ausgewählten Untersuchungsgebieten gesammelten Wurzel-Daten der Probebäume wird das Modell daher für die Baumarten Fichte, Tanne und Buche kalibriert. Ist das Modell einmal kalibriert, so kann die Dimension und die Anzahl der Wurzeln in einem beliebigen Abstand zum gewählten Baum vorhergesagt werden.

Um eine quantitative, aber relative Schätzung der Güte der Anpassungen des Modells durch die Kalibrierung zu erhalten, wird die absolute Fehler-Quadratsumme der Residuen (SSE - Sum of squared errors) für die Kalibrierung der Modellparameter minimiert und die SSE der Kalibrierung mit den SSE der validierten Daten verglichen.

Die Validierung der Modellparameter für die Abschätzung der Wurzelhäufigkeit in verschiedenen Wurzeldurchmesser-Klassen erfolgte mittels „gewichteter“ Fehler-Quadratsumme der Residuen (wSSE). Der Gewichtungsfaktor wird auf Basis der mechanischen Eigenschaften der Wurzeln so berechnet, dass die Kalibrierung die Wirkungen, welche die Wurzelverteilung auf die Berechnung der Wurzel-Verstärkung (die Überschätzung der großen Wurzeln ist höher als die Überschätzung der kleinen Wurzeln) hat, berücksichtigt (Schwarz et al., 2010b).

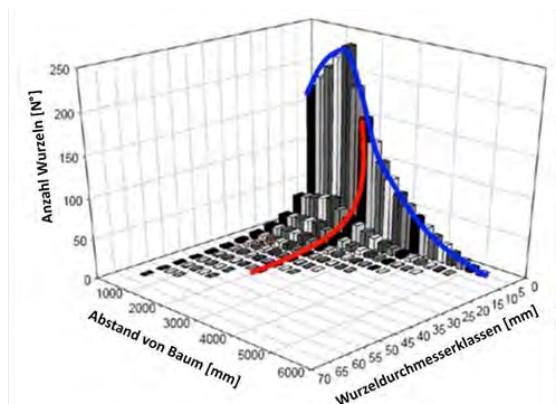


Abbildung 6: Beispiel der Resultate einer Simulation mit dem Wurzelverteilungsmodell (Schwarz et al., 2010b). Die blaue Linie zeigt die Projektion der Feinwurzelverteilung in Abhängigkeit des Baumabstandes. Die rote Linie zeigt die Wurzelverteilung je nach Wurzeldurchmesserklasse bei einem bestimmten Baumabstand.

<sup>1</sup> Ein Parameter, welcher die Gesamtzahl an Feinwurzeln eines Wurzelsystems mit dem BHD verknüpft

## 4.3.2 Modell Wurzel-Verstärkung

### 4.3.2.1 Wurzel-Bündel-Modell (RBM)

Um die mechanische Wurzel-Verstärkung abschätzen zu können, wird eine modifizierte Version des Wurzel-Bündel-Modells (RBM) (Schwarz et al., 2010c) verwendet. Dieses modifizierte Modell ist eine Erweiterung des Faserbündel-Modells, bei welchem aus vielen Wurzeln mit unterschiedlich geometrischen und mechanischen Eigenschaften das Dehnungs-Kraft-Diagramm der Bündel hergeleitet wird. Diese Eigenschaften ergeben sich durch drei Grundgesetz-Gleichungen (1), (2) und (3), welche sich auf das Durchmesser-Längen-Verhältnis, das scheinbare Elastizitätsmodul und die maximale Zugkraft der Wurzel beziehen.

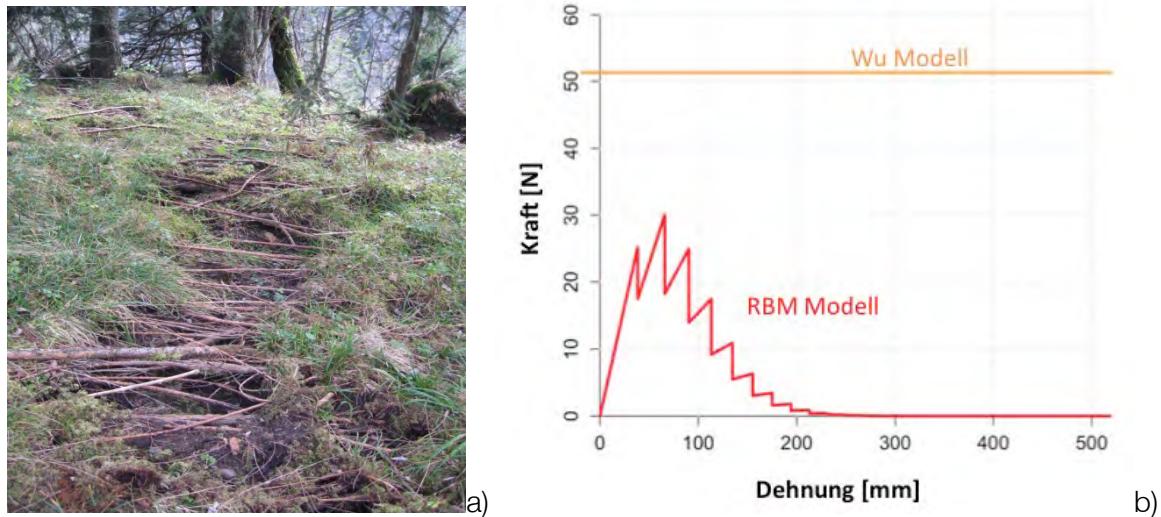


Abbildung 7: Beispiel eines ausgedehnten Bündels von Wurzeln bei einer Anrisszone im Wald (Photo: U. Hunziger) (a), und ein Dehnungs-Kraft-Diagramm der Wurzelverstärkung berechnet mittels Wu-Modell (Wu et al., 1979) und RBM (Schwarz et al., 2011).

Basierend auf der RBM-Parameterstudie von Schwarz et al. (2010b) ist die Wurzellänge einer derjenigen Parameter, der die grösste Wirkung auf die Bündelkraft hat. Die Grundgesetz-Gleichung der Wurzellänge ist dabei gegeben durch:

$$L_{(\Phi)} = L_0 \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^\gamma \quad [m] \quad (1)$$

Wobei  $L_{(\Phi)}$  die gewundene Wurzellänge,  $L_0$  eine empirische charakteristische Länge,  $\Phi$  der Wurzeldurchmesser,  $\Phi_0$  der Referenzdurchmesser (hier in der Gleichung  $\approx 1$  (ergibt dimensionsloses Verhältnis)), und  $\gamma$  ein empirischer Exponent des Grundgesetzes ist.

Der scheinbare Elastizitätsmodul wird berechnet durch diese Grundgesetz-Gleichung:

$$E_{(\Phi)} = E_0 \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^{-\beta} r \quad [Pa] \quad (2)$$

Wobei  $E_{(\Phi)}$  der gesuchte Elastizitätsmodul,  $E_0$  ein empirisch charakteristischer Elastizitätsmodul,  $\beta$  ein empirischer Exponent des Grundgesetzes und  $r$  ein dimensionsloser Koeffizient ist,

welcher eingeführt wird, um die Auswirkungen der Wurzel-Windungen auf das Zugverhalten der Wurzel zu berücksichtigen (siehe Schwarz et al., 2010c).

Die maximale Zugkraft (bis zum Versagen) als Funktion des Durchmessers ist gegeben durch die folgende Grundgesetz-Gleichung:

$$F_{\max(\Phi)} = F_0 \left( \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^\zeta \quad [N] \quad (3)$$

Wobei  $F_{\max(\Phi)}$  die maximale Zugkraft,  $F_0$  eine empirisch charakteristische Zugkraft und  $\zeta$  ein empirischer Exponent des Grundgesetzes ist.

Die Werte der Parameter in den Gleichungen (1), (2) und (3) sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Literatur-Werte der mechanischen Parameter für das RBM der verschiedenen, verwendeten Baumarten.

Baumart	$L_0$	$\gamma$	$E_0$	$\beta$	$F_0$	$\zeta$	Referenz
<i>Picea abies</i>	285	0.7	600	1	28	1.3	Schwarz et al., 2010c
<i>Abies alba</i> *	285*	0.7*	600*	1*	28*	1.3*	-
<i>Fagus sylvatica</i>	285*	0.7*	600*	1*	41	0.9	Bischetti et al., 2009

\*wo keine Literatur-Daten aufgefunden wurden, wurden Werte von anderen bekannten Arten angewendet.

Unter der Annahme, dass Wurzeln sich wie elastisch-spröde Fasern verhalten und unter Verwendung der Gleichungen (1) bis (3), berechnet das RBM das Dehnung-Kraft-Diagramm eines Wurzel-Bündels als Funktion der Verschiebung während der bewegungsgesteuerten Belastung des Bündels. Mit zunehmender Verschiebung wird die Kraft in jeder Wurzel erhöht und die Wurzeln versagen schrittweise von der Schwächsten zur Stärksten.

Basierend auf Feld-Zug-Tests, welche darauf hindeuten, dass die meisten Wurzeln durch Bruch versagen (Schwarz et al., 2010c; Schwarz et al., 2011), gehen wir in dieser modifizierten Version des RBMs davon aus, dass alle Wurzeln brechen anstatt aus der Bodenmatrix herausrutschen.

#### 4.3.2.2 Rahmenmodell der räumlichen Verteilung der Wurzelverstärkung

Die räumliche Verteilung der Wurzel-Verstärkung wird durch Aufskalierung des mechanischen Verhaltens jeder einzelnen Wurzel auf eine große Anzahl von Wurzeln im Waldbestand mit Hilfe des Rahmen-Modells von Schwarz et al. (2010b) geschätzt.

Dieses Rahmen-Modell vereinigt die zwei unabhängigen Modelle:

- **Wurzel-Verteilungsmodell** für sekundäre seitliche Wurzeln (in Kap. 4.3.1 erläutert) und
- **Wurzelbündel-Modell (RBM)** zur Berechnung der Wurzel.

Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass...

- ... die Wurzelverteilung eines einzelnen Baumes symmetrisch und nicht durch Nachbarbäume beeinflusst ist;

- ... das Verhalten der Wurzelkraft einer einzelnen Wurzel nicht durch Nachbarwurzeln beeinflusst ist (Giadrossich et al., 2012);
- ... die laterale Wurzel-Verstärkung richtungsunabhängig ist (isotropisch).

Die Umsetzung dieses Rahmenmodells in einem räumlichen Bezugssystem (unter Berücksichtigung der Position und der Abmessungen der Bäume) erlaubt die räumliche Charakterisierung der Verteilung der Wurzelverstärkung auf Bestandesebene. Dieses Modell wird "RootMap" genannt, auf welches jedoch in diesem Projekt nicht weiter eingegangen wird.

#### 4.3.3 Modelle für Hangstabilitätsberechnungen

##### 4.3.3.1 3D Grenzgleichgewichtzustand

Für die Berechnung der Hangstabilität wird der Grenzgleichgewichtzustand für eine elliptische Rutschung angewendet. Die Bedingung zum Versagen der Rutschungsmasse an der Scherfläche wird mit dem Mohr-Coulomb Kriterium quantifiziert. Der Einbezug der lateralen Wurzelverstärkung in die Hangstabilitätsberechnung wird durch die Berücksichtigung einer zusätzlichen stabilisierenden Kraft der Wurzeln parallel zur Scherfläche und proportional zur mittleren Wurzelverstärkung erreicht. Zusätzlich wird das Kraft-Gleichgewicht für verschiedene Formen und Dimensionen von Rutschungen berechnet (Variieren des Verhältnisses der beiden Hauptachsen einer Rutschung).

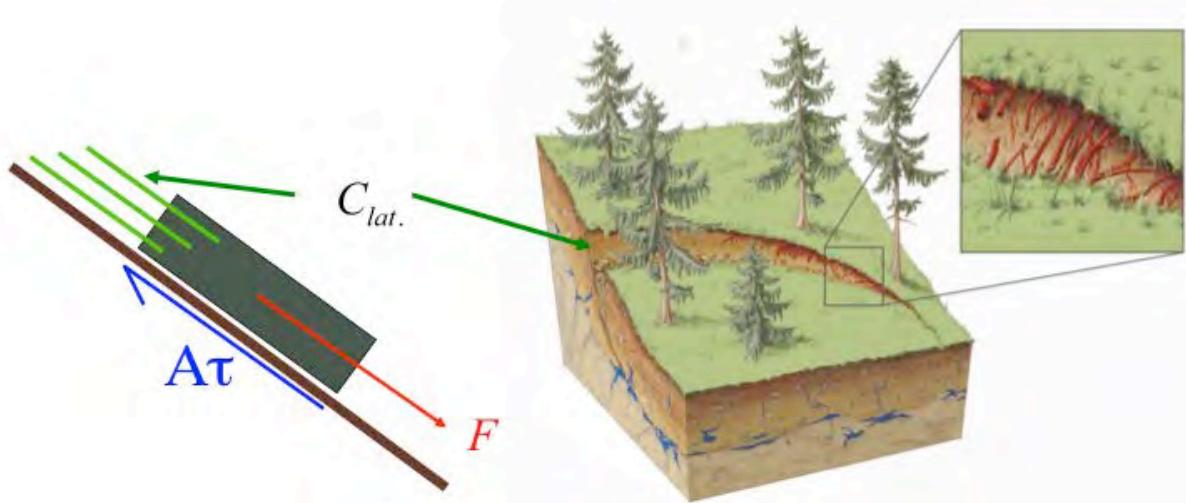


Abbildung 8: Darstellung des Prinzips einer Grenzgleichgewichtsberechnung, wobei die treibende Kraft ( $F$ ) mit der stabilisierenden Kraft ( $A\tau$  = Scherfestigkeit und  $C$  = laterale Wurzelverstärkung) verglichen wird.

Die Standard-Formel des Grenzgleichgewichtszustandes für eine unendliche Steigung lautet:

$$SF = \frac{A \cdot \tau_{bas}}{F_{par}} \quad [-] \quad (4)$$

Wobei SF der Sicherheitsfaktor, A die Grundfläche [ $m^2$ ] der Rutschung,  $\tau_{bas}$  die Scherfestigkeit bei der Bruchstelle [kPa] und  $F_{par}$  die destabilisierende Kraft parallel zur Bruchstelle ist.

Die modifizierte Formel des Grenzgleichgewichtzustandes unter Einbezug der lateralen Wurzelverstärkung lautet:

$$SF = \frac{A \cdot \tau_{bas} + F_{lat.veg.}}{F_{par}} \quad [-] \quad (5)$$

In diesem Sicherheitsfaktor SF sind hier nun die lateralen und basalen Kräfte  $F_{lat.veg.}$  und  $\tau_{bas}$  sowie die treibende Kraft  $F_{par}$  einbezogen.

Diese Elemente der Formel des Grenzgleichgewichtszustandes prägen sich wie folgt aus:

[kN] (6)

$$F_{lat.veg.} = \frac{lateral\_Area}{2} \cdot c_{lat} \quad [kN] \quad (7)$$

$$\tau_{bas.} = c + \sigma^* \cdot \tan \phi' \quad [kPa] \quad (8)$$

$$c = c_s + c_{bas.veg.} \quad [kPa] \quad (9)$$

$$\sigma^* = \sigma - u \quad [kPa] \quad (10)$$

$u$  = Porenwasserdruck [kPa]

$\sigma$  = effektive Normalspannung [kPa]

$A$  = Grundfläche [ $m^2$ ]

$\phi'$  = verbleibender Reibungswinkel

$\gamma$  = Rohdichte des Bodens [ $t/m^3$ ]

$h$  = Bodentiefe [m], senkrecht zum Hang

$\beta$  = Hangneigung [ $^\circ$ ]

$m_{veg}$  = Gewicht der Vegetationsdecke [ $t/m^2$ ]

$g$  = Gravitationskraft [ $m/s^2$ ]

$c_s$  = verbleibender Bodenzusammenhalt [kPa]

$c_{lat.veg.}$  = laterale Wurzelverstärkung [kPa]

$c_{bas.veg.}$  = basale Wurzelverstärkung [kPa]

Die wichtigste Voraussetzung des Einbezugs der Wurzelverstärkung in die Hangstabilitätsberechnung ist, dass die Wurzeln entlang der Bruchfläche ähnlichen Störungen unterworfen sind. In Wirklichkeit jedoch werden Wurzeln im oberen Bereich der Bruchfläche vor den Wurzeln im seitlichen Bereich aktiviert. Zur Quantifizierung dieses Bündel-Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wird das RBM-Model mittels Daten aus einer Reihe von statischen, weggesteuerten Belastungen auf Wurzelbündel mit Variation der Wurzel-Eigenschaften (z.B. Variation des Elastizitätsmodul und maximaler Zugfestigkeit, als Funktion des Wurzeldurchmessers) angewendet. Zur Rückermittlung der gesuchten lateralen Wurzelverstärkung ( $c_{lat.root}$ ) für unterschiedliche Hangneigungen, Bodenarten und Rutschungsdimensionen wird die folgende Formel verwendet:

$$c_{lat.root} = \frac{((SF * F_{par.}) - (A \tau))}{A_{lat}} \quad [kPa] \quad (11)$$

Wobei  $A_{lat}$  [ $m^2$ ] die laterale Fläche bezeichnet, auf welche die Wurzelverstärkung wirkt. In unserem Fall wird sie durch die obere Hälfte der lateralen Fläche (mit Tiefe  $h$ ) einer typischen elliptischen Rutschung, bei welcher die Längsachse doppelt so gross ist wie die Breite (Graf und Rickli, 2009), definiert.

Zur Vereinfachung der Abschätzung der bodenmechanischen Eigenschaften werden die USGS Bodentypen in die vier folgenden Klassen zusammengefasst:

- Soil class 1 ( $\phi = 20-25^\circ \pm 5^\circ$ ): MH, OH, OL, CH.
- Soil class 2 ( $\phi = 26-30^\circ \pm 5^\circ$ ): CL, SC-CL, GC-CL.
- Soil class 3 ( $\phi = 31-35^\circ \pm 5^\circ$ ): ML, SC, SM, GM-ML, GC.
- Soil class 4 ( $\phi = 36-40^\circ \pm 5^\circ$ ): SP, SW, GM, GP, GW.

Die minimale Bestandesdichte wird mit Hilfe des minimalen Abstandes zur Erreichung des definierten Minimalwertes der Wurzelverstärkung zwischen zwei Baumindividuen berechnet. Der gesuchte minimale Abstand setzt sich, wenn zum Beispiel die benötigte Wurzelverstärkung 5 kPa beträgt und so der einzelne Baum den Wert von 2,5 kPa erreichen muss, aus dem verdoppelten extrapolierten Wert aus der Wurzelverstärkungskurve zusammen. Diese Berechnung geht davon aus, dass sich die Wurzelverstärkungen von zwei sich überlappenden Wurzelsystemen linear addieren lassen. Für die Ermittlung der minimalen Bestandesdichte (N°Bäume/ha) werden Flächen des mittleren minimalen Abstands zwischen den Bäumen auf einer Hektare aufgeteilt. Dies unter der Annahme einer quadratischen Flächenausdehnung pro Baum.

Bei der Berechnung der maximalen Lückengröße wird von einer mittleren Wurzelverstärkung entlang der Lückenränder ausgegangen. Bei der Rückrechnung der minimalen Fläche einer flachgründigen Rutschung für einen Sicherheitsfaktor = 1 wird von einer Form der Rutschung ausgegangen, bei welcher die Hauptachse dreimal grösser ist als die senkrechte Achse. Die Lückenränder werden wie nach NaiS als Grenze der Kronenprojektion auf den Boden definiert.

#### 4.3.3.2 Numerische Modellierung mit SOSlope

Das SOSlope Modell (Schwarz and Cohen, 2011) ist ein Feder-Block-Modell für die Simulation der Entstehung von flachgründigen Rutschungen (bis 2 m Tiefe) in bewaldeten Gebieten mit heterogener Wurzelverteilung.

Ein Hang wird in 1x1 m Blöcke mit einer vordefinierten Tiefe (bis 2 m), welche der Stelle einer potentiellen Gleitfläche entspricht, unterteilt (Abbildung 9). Jeder einzelne Block ist durch „Federn“ mit der Gleitfläche und mit den Nachbarblöcken verbunden. Die mechanischen Eigenschaften jedes Blockes werden auf Grund der bodenmechanischen und hydrologischen Bedingungen und der Wurzelverteilung berechnet.

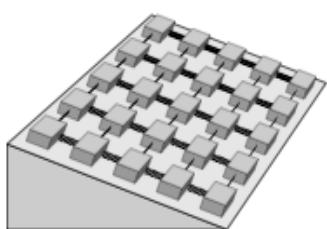


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines Hangs, modelliert mittels eines Feder-Block-Ansatzes (Hergarten, 2003).

Die destabilisierenden Kräfte jedes Blockes werden nach einem klassischen, unendlichen Böschungsverfahren berechnet. Dabei werden die dreidimensionalen Ausdehnungen der Kraftkomponenten nach dem topographischen Gradient berechnet.

Die „Federn“, welche die Blöcke zur Gleitfläche hin verbinden, sind auf Scherkräfte respektive Zugkräfte belastet. Die Scherfestigkeit des Bodens an der Scherfläche wird mit einem Mohr-

Coulomb-Ansatz für ungesättigte Bedingungen berechnet. Die progressive Abnahme der Scherfestigkeit aufgrund von Niederschlagsereignissen wird durch eine Reduktion der gesamten Scherfestigkeit mittels sogenannter „loading steps“ simuliert. Die räumliche Heterogenität der Scherfestigkeit ist durch die Berechnung von Zufallszahlen für die Bodenkohäsion (Annahme einer bestimmten Statistik der Variabilität dieses Parameters) berücksichtigt.

Die lateralen „Federn“ können unter Zug- und Druck-Belastungen aktiviert werden. Abbildung 10 zeigt ein typisch berechnetes, mechanisches Verhältnis einer „Feder“ in Abhängigkeit der Dehnung unter Zug (grün) und unter Druck (braun). Unter Zugbelastungen wird angenommen, dass nach einem initialen Adhäsionseffekt durch die Bodenkohäsion von der Bodenmatrix keine Kraft aufgenommen wird. Sind hingegen Wurzeln vorhanden, so können diese Zugkräfte aufnehmen. Die Verstärkung der Wurzeln unter Zugbelastungen ist mit dem RBM-Modell berechnet. Unter Druckbelastungen wird angenommen, dass sowohl die Bodenmatrix wie auch die Wurzeln Kräfte übertragen können. Für die Quantifizierung der mechanischen Verhältnisse von durchwurzelten Böden unter Druckbelastungen wurde das Modell „COROS“ entwickelt (Schwarz et al., in preparation). Das COROS-Modell berechnet den quasi-statischen, passiven Erddruck eines Bodenvolumens in Abhängigkeit der Dehnung und unter Berücksichtigung der Wirkung von Wurzelbündeln.

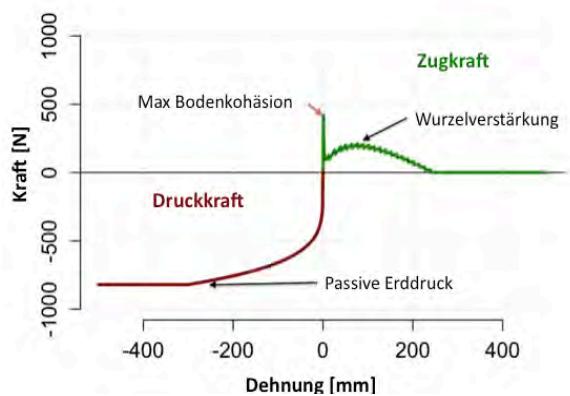


Abbildung 10: Darstellung des Prinzips einer Grenzgleichgewichtsberechnung, wobei die treibenden Kräfte ( $F$ ) mit den stabilisierenden Kräften ( $A\tau$  = Scherfestigkeit und  $C_w$  = laterale Wurzelverstärkung) verglichen werden (Schwarz and Cohen, 2011).

Die Dynamik der Auslösung einer flachgründigen Rutschung wird im SOSlope-Modell iterativ simuliert. Die Eigenschaft dieses Modells besteht in der Anwendung eines sogenannten „strain step loading“ Ansatzes zur Berechnung der Verteilung der Kräfte zwischen Nachbarblöcken und schlussendlich der gesamten Stabilität eines Hanges. Wenn zum Beispiel ein Block instabil wird (treibende Kräfte > stabilisierende Kräfte) und sich 1 mm in Fallrichtung bewegt, dehnen sich die „Federn“, welche ihn mit den Nachbarblöcken verbinden entsprechend und die Kräfte in jeder „Feder“ werden neu berechnet (Zug oder Druck). Die Summe der neu berechneten Kräfte zeigen, ob der Block stabil ist oder nicht, und ob auch Nachbar-Blöcke instabil werden. Das Gleichgewicht der Kräfte wird für jeden Block bei jeder Iteration neu berechnet. Als Resultat der Simulationen ergibt sich die Bestimmung der Position und Dimension der flachgründigen Rutschungen, welche bei jedem „loading step“ ausgelöst werden.

Die Implementierung der Wurzelverstärkung entsteht durch Anwendung des Wurzelverteilungsmodells und des RBMs. Dafür braucht es eine genaue Angabe der Position, der Dimension und

der Art der Bäume, die den Hang bewalden. Mittels Stereo Analyst für ArcGIS (SAFAG) Extension von ERDAS werden hierzu ADS-80 Luftbildstreifen der swisstopo in 3D visualisiert und die Baumspitzen digitalisiert. Im ArcMap-Projekt steht auch das 2 m-Oberflächenmodell der Schweiz zur Verfügung. Mit dem Werkzeug „Extract multiple Value to Points“ können die Werte des Höhemodells der Attributentabelle der „Baum Feature Class“ hinzugefügt werden. Mittels des Werkzeugs „Raster Calculators“ können sodann die Höhen der Bäume berechnet werden, indem die Höhen des Oberflächenmodells von der Höhe der Baumspitzen abgezogen werden. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel der Anwendung von Stereoanalysis für die räumliche Berechnung der maximalen Wurzelverstärkung dank der Anwendung des Wurzelverteilungsmodells und des RBMs. Abbildung 12 zeigt die Resultate der Simulationen mit dem SOSlope-Modell für die Lokalisierung von möglichen Anrissgebieten flachgründiger Rutschungen bei einem Starkniederschlagereignis für die Untersuchungsfläche 1 bei Schangnau (Emmental, BE) ohne Wald und unter Berücksichtigung der Wurzelverstärkung.

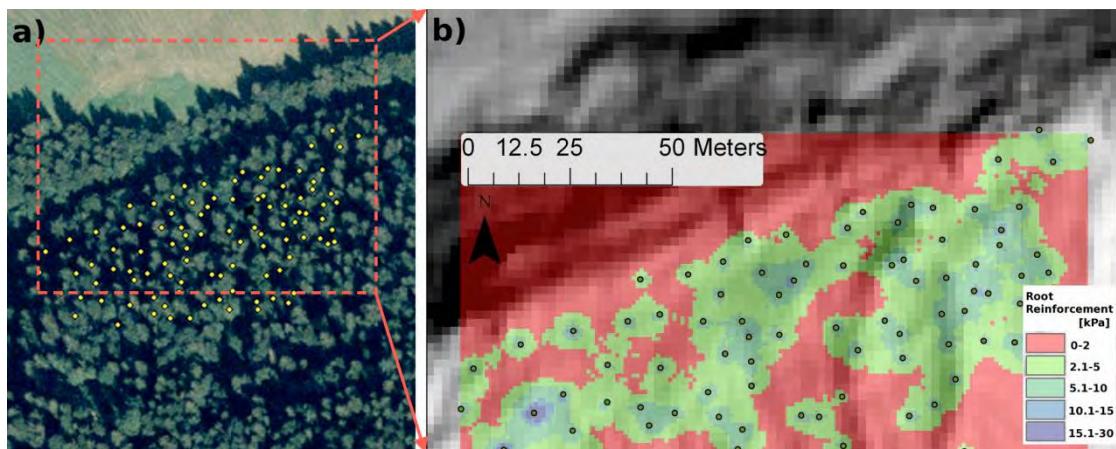


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Wurzelverstärkung mit der Fernerkundungsmethode: a) Auswertung eines Luftbildes mit Stereoanalysis (Foto: M. Günter), b) Räumliche Darstellung der Resultate der Modelle (Schwarz und Thormann, 2012).

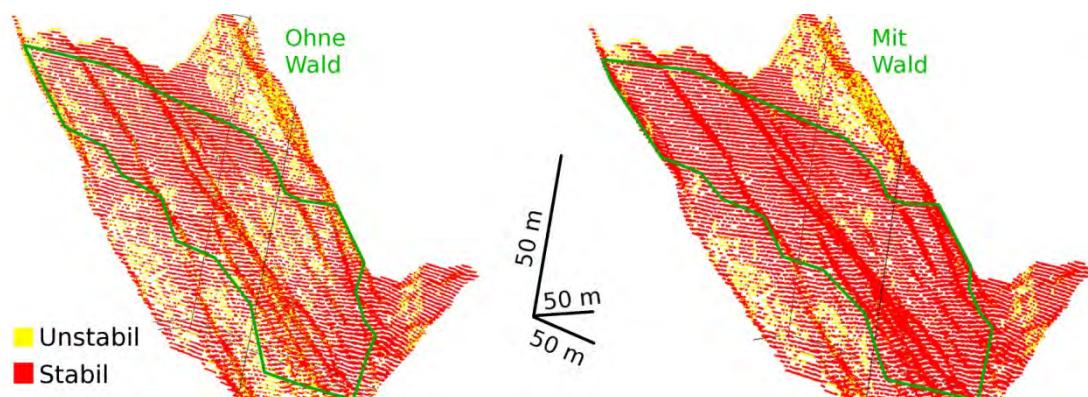


Abbildung 12: Resultate der Simulationen mit dem SOSlope Modell für die Lokalisierung von möglichen Anrissgebieten flachgründiger Rutschungen bei einem Starkniederschlagereignis für die Fläche 1 „Honegg-Nord“ bei Schangnau (Emmental, BE). Das Bild zeigt die Unterschiede der Resultate ohne und unter Berücksichtigung der Wurzelverstärkungen im Bereich, in dem die einzelnen Bäume digitalisiert wurden (innerhalb des grünen Polygons). Gelbe Zonen sind unstabil und rote Zonen sind stabil (Schwarz und Thormann, 2012).

## 4.4 Methode für die Praxis

### 4.4.1 Entwicklung neuer Methoden zur Abschätzung der Waldwirkung in der Praxis

Die neuen Erkenntnisse aus den Modellberechnungen sollen mittels neuen Anforderungen an die Waldbestände auf rutschgefährdeten Hängen in die Waldbewirtschaftung einfließen.

Zwei Varianten von neuen Anwendungsmethoden in der Praxis wurden ausgearbeitet:

**Variante A „Tabellen“:** Tabellen mit Anforderungen bezüglich minimaler Stammzahl und maximaler Lückenlänge des/im Bestand(s) gemäss Grenzgleichgewichtsberechnungen.

Aus den Ergebnissen der neuen Hangstabilitätsberechnungen und den Informationen aus dem kalibrierten Wurzelverstärkungsmodell ergibt sich die Möglichkeit, minimale Anforderungen an die Waldstruktur zu charakterisieren, welche die Faktoren wie Hangneigung, Bodenmaterial und Vegetationsparameter berücksichtigen.

In der Variante A „Tabellen“ sollen diese Ergebnisse in Form von tabellarischen Anforderungen aufbereitet werden, so dass diese mit geringen Aufwand im Feld benutzt werden können.

**Variante B „Wirkungskarte“:** Karte mit den aktuellen und potentiell möglichen Wirkungen des Waldes bezüglich Rutschungen, berechnet mit dem SOSlope-Modell.

Dank der Anwendung von Fernerkundung (Stereo analysis von Luftbildern oder LiDaR Techniques) zur Gewinnung von räumlichen Informationen der Waldstruktur (Position und Baumdimension), können die Resultate des Wurzelverstärkungsmodells auch räumlich dargestellt und für die Hangstabilitätmodellierung mit SOSlope verwendet werden (Schwarz et al., 2012a).

In Variante B „Wirkungskarte“ sollen für die jeweiligen Praxistest-Flächen der Ist-Zustand der Wurzelverstärkung des Bestandes basierend auf den neuen Berechnungen auf einer Karte der Testfläche dargestellt werden.

### 4.4.2 Praxis-Test

#### 4.4.2.1 Aufgabe/Ablauf Praxis-Test

Zur Prüfung dieser neuen Methoden auf ihre handhabbare Anwendung im Feld, ihre Nachvollziehbarkeit in der Praxis sowie mögliche Veränderungen der aktuellen Anzeichnungspraxis wurden Forstfachleute (Förster / Forstingenieure) von Bund und dem Kanton Bern zu einem Praxis-Test eingeladen.

Der Ablauf des Tests gliederte sich in drei Teile:

- Einführung: Information über das Ziel und die neuen Methoden, deren Grundlagen/Forschung, Aufgabe und Ablauf des Tests (*1/2 Tag, gemeinsam*)
- Anzeichnung: selbstständige Holz-Anzeichnung in 2-3 Testflächen, Anzeichnungsformular inkl. Bemerkungen / schriftliches Feedback erstellen und retournieren (*ca. 1 Tag, individuell*)

- Diskussion: mündliches Feedback zur Anwendbarkeit einholen, Präsentation Ergebnisse Anzeichnungen, Diskussion. (1/2 Tag, gemeinsam)

Als Hauptteil zeichnen die Testpersonen in den rutschgefährdeten Testflächen je einmal nach gängiger Praxis (NaiS), einmal nach neuer Methode Variante A und einmal nach neuer Methode Variante B fiktiv einen Holzschlag an. Dabei gelten für alle drei Varianten das gleiche fiktive Holzerntekonzept (Vollbaumverfahren mit Helikopter) sowie die Anweisung, die maximal durch die Anforderungen mögliche Holzmenge herauszunehmen. Dies soll gewährleisten, dass die Resultate miteinander verglichen werden können.

Die Anzeichnung nach gängiger Praxis wird als Referenzanzeichnung benötigt. Als Grundlage gelten dort die Anforderungen aufgrund des Standorts und aufgrund der Naturgefahr „Rutschung“ nach NaiS.

Die individuellen Anzeichnungen sollen in ein Beurteilungs- & Anzeichnungsformular (siehe Anhang 1) eingetragen und Schwierigkeiten bzw. Bemerkungen festgehalten werden.

#### 4.4.2.2 Aufbereitung Praxistestflächen

Für die konkreten Holzschlag-Anzeichnungen wurde pro Versuchsfläche eine Teilfläche ( $\approx 25-35$  a) mit jeweils 100 Bäumen (Klupschwelle 20 cm) (vgl. rote Abgrenzung der Abbildungen in Kap. 4.1.2) ausgeschieden.

Die sich darin befindenden Bäume mit  $\geq 20$  cm BHD wurden im Feld für die Anzeichnung markiert: Eck- & Grenzäume mit einem gelben Band und die restlichen Bäume mit einem roten Band. Zudem wurde jeder der Bäume mit einer Nummer-Tafel beim Wurzelansatz eindeutig bezeichnet.

Bei der Vollkluppierung der Bäume im Feld wurden die Masse Höhe, BHD und Baumart für verschiedene Auswertungen aufgenommen. Mit Hilfe der jeweiligen lokalen Tarife wurde daraus auch der Vorrat für Grundlageninputs zur Anzeichnung ermittelt.

Zudem wurde die genaue geographische Lage dieser Bäume mit GPS bestimmt. Dies einerseits, um die Anzeichnungen des Praxis-Tests mit der Wirkungskarte genau auszuwerten – daher die fiktiven Veränderungen des Bestandes durch die verschiedenen Anzeichnungen mit der Wirkungskarte der Variante B zu überlagern - und andererseits, um die realen Veränderungen des Bestandes im Zuge der Bewirtschaftung längerfristig verfolgen zu können (Monitoring).

Zu dieser Lagebestimmung wurde ein Differential-GPS (DGPS) System, bestehend aus einem GPRS fähigen Trimble Nomad 900G und einem externen Trimble ProXT Empfänger, eingesetzt. Mit diesem System lässt sich die Genauigkeit durch Einbezug einer Referenzstation (stationärer GPS-Empfänger, dessen Koordinaten genau bekannt sind) weiter steigern.



Abbildung 13: Nomad 900E und Trimble ProXT.

Dabei wurden die Messungen im Feld so korrigiert, dass mit unserem mobilen GPS-Empfänger eine Genauigkeit im Bereich von wenigen Dezimetern erreicht werden konnte. Dieses differenti-

elle Verfahren wurde in Echtzeit durchgeführt. Voraussetzung war allerdings eine intakte Funkverbindung zur Website von swisstopo, um die Korrekturdaten abrufen zu können.

## 5 Resultate

### 5.1 Felddaten-Messung und modellierte Resultate der Wurzelverteilung

Insgesamt wurden auf den drei verschiedenen Standorten – Fläche: Schangnau (Sc), Fläche 2: Spisibach (Sp) und Fläche 3: Gantrisch (Ga) – innerhalb der drei Baumarten Fichte (*Picea abies*), Weisstanne (*Abies alba*) und Buche (*Fagus silvatica*) 32 Bäume ausgewählt und deren Wurzelsysteme anhand von 96 Bodenprofilen untersucht. Für jede Baumart und jeden Standort wurden Bäume mit Durchmessern (BHD) zwischen 0.15 m und 0.49 m ausgewählt. Tabelle 2 stellt einen Überblick über die ausgewählten Bäume dar.

Tabelle 2: Übersicht der ausgewählten Bäume zur Datenerhebung der Wurzelverteilung.

Schangnau (Sc) Baum N°	Art	BHD [m]	Spisibach (Sp) Baum N°	Art	BHD [m]	Gantrisch (Ga) Baum N°	Art	BHD [m]
1	Fichte	0.37	1	Fichte	0.27	1	Fichte	0.14
2	Fichte	0.22	2	Fichte	0.18	3	Fichte	0.40
3	Fichte	0.20	3	Fichte	-	5	Tanne	0.21
4	Fichte	0.37	4	Tanne	0.45	6	Tanne	0.20
5	Tanne	0.22	5	Tanne	0.73	7	Tanne	0.36
6	Tanne	0.38	6	Fichte	0.45	8	Tanne	0.43
7	Tanne	0.24	7	Fichte	0.50	9	Fichte	0.19
8	Tanne	-	8	Tanne	0.22	10	Fichte	0.49
9	Tanne	0.24	9	Tanne	0.24	11	Fichte	0.34
10	Buche	0.36	10	Buche	0.24	12	Fichte	0.45
11	Buche	0.35	11	Buche	0.20			

Als wichtige Daten für die Eichung des Wurzelverteilungsmodells wurde die Verteilung der Feinwurzeln in Abhängigkeit vom Abstand zum Stamm dargestellt. Die Plots in Abbildung 14 zeigen die Anzahl der gemessenen Feinwurzeln (Durchmesser < 1.5 mm) mit zunehmendem Abstand vom Baum für die beiden Baumarten Fichte (F) und Tanne (T). In der Legende wurde unterschieden, ob der Stammdurchmesser (BHD) grösser oder kleiner als 0.3 m ist. Allgemein ist zu sehen, dass die Anzahl Feinwurzeln mit der Entfernung vom Stamm abnehmen – von 10 bis 70 Stück bei 0.5 m Abstand bis 0 bis 20 Stück bei 3.5 m Abstand. Am meisten Feinwurzel hat man im Gebiet Schangnau gefunden (oft mehr als 40 Stück bei 0.5 und 1.5 m Abstand), und am wenigsten im Gebiet Spisibach (maximal 30 bei 1.5 m Abstand). Im Gebiet Gantrisch wurde ausnahmsweise bis 3.5 m Abstand vom Baum gemessen und bei Fichte und Tanne noch etwa 10 bis 20 Feinwurzel gefunden. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der gemessenen Feinwurzeln repräsentativ für eine Bodenprofilfläche von 0.5 m Breite und 0.5 m Tiefe sind.

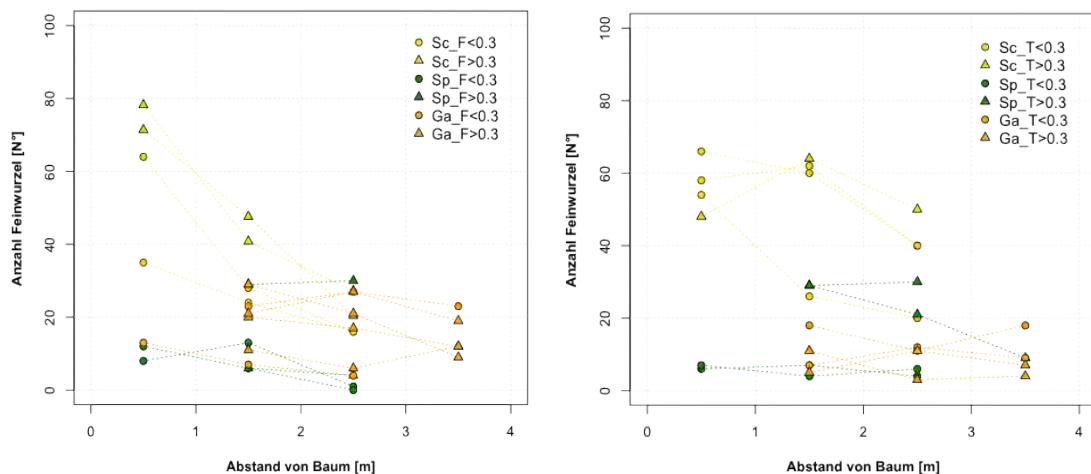


Abbildung 14: Feinwurzelverteilung der Fichten und Tannen je nach Abstand zum Baumstamm. Die Legenden zeigen in welchem Gebiet (Sc=Schangnau, Sp=Spisibach, Ga=Gantrisch), für welche Baumart (F=Fichte, T=Tanne), und für welchen Stammdurchmesser BHD (grosser als 0.3 m, oder kleiner als 0.3 m) die Werte gemessen wurden.

Als zweiten wichtigen Zusammenhang zur Kalibrierung der Modelle wurde die Wurzelverteilung in den verschiedenen Wurzeldurchmesserklassen analysiert.

Abbildung 15 zeigt die Anzahl der gemessenen Wurzeln der Fichten in verschiedenen Wurzeldurchmesserklassen (1 bis 20 mm) in allen Untersuchungsgebieten und gruppiert anhand der Abstände vom Baumstamm (0.5, 1.5, 2.5, und 3.5 m).

Bei allen Graphiken nimmt die Anzahl der Wurzeln mit zunehmender Durchmesserkasse potentiell ab (negativer Exponent). Bei 0.5 und 1.5 m Abstand hat man am meisten Wurzeln im Gebiet Schangnau und dies teilweise bis zu acht Mal mehr als im Gebiet Spisibach. Bei 2.5 und 3.5 m Abstand nimmt die Anzahl der grösseren Wurzeln im Vergleich zu den geringeren Abständen 0.5 und 1.5 m ab. Allgemein zeigen die Resultate, dass die Anzahl der Feinwurzeln mit zunehmendem Abstand vom Baum stark abnehmen, dass aber auch bei Abständen von 3.5 m immer noch Wurzeln mit Durchmesser grösser als 10 mm vorhanden sind (= maximaler Durchmesser gemessener Wurzeln nimmt mit zunehmendem Abstand vom Baum langsam ab). Aussagen über die maximale Ausbreitung der Wurzelsysteme sind mit diesen Daten nicht möglich und wurden mit Daten aus der Literatur ergänzt (Schwarz et al., 2010b).

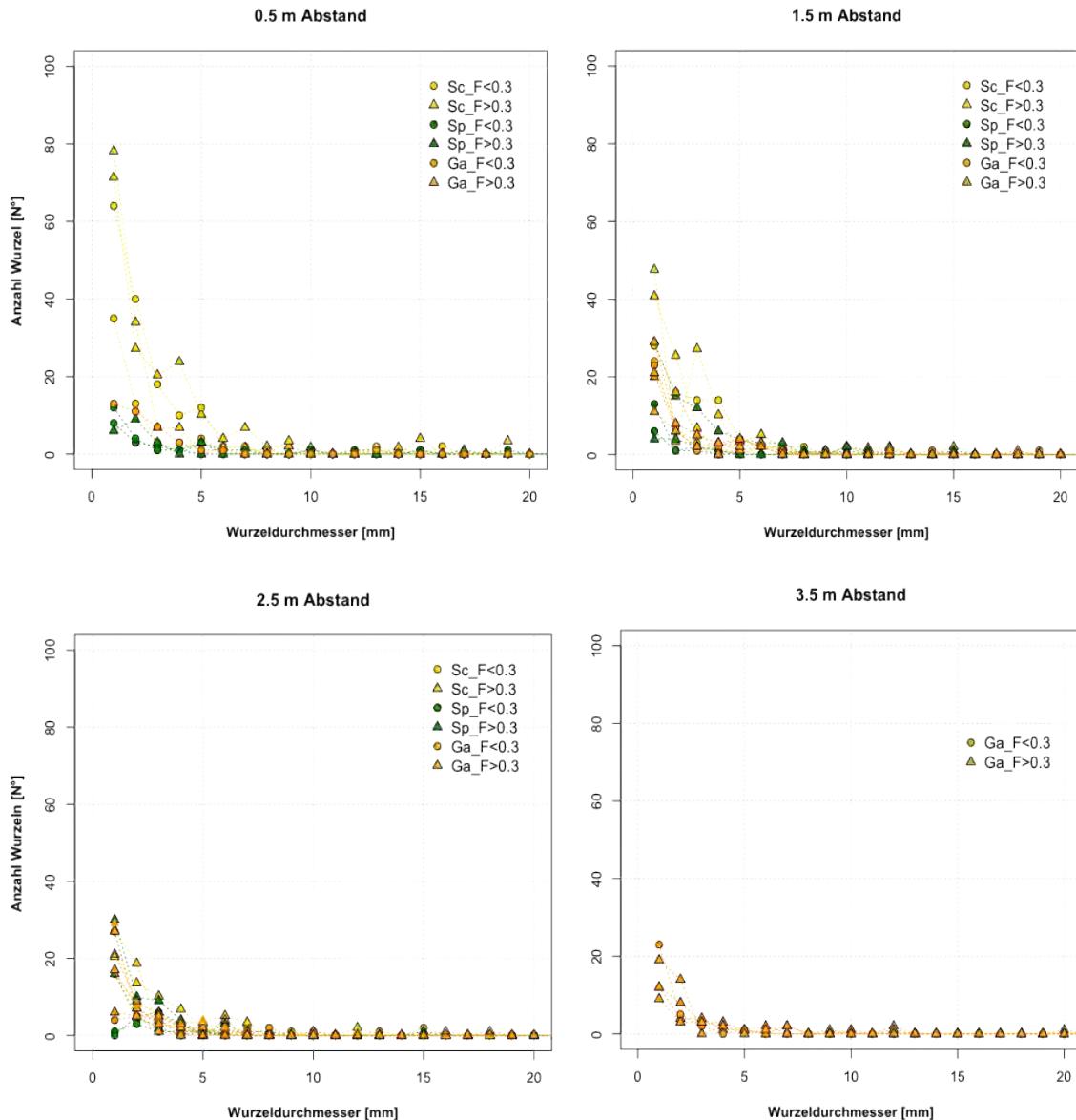


Abbildung 15: Wurzelverteilung der Fichte je nach Wurzeldurchmesserkategorie (1 bis 20 mm) bei vier Abständen vom Baumstamm (0.5, 1.5, 2.5, und 3.5 m). Die Legenden sind wie in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 16 und Abbildung 17 stellen die Resultate der Wurzelverteilung der Tanne und der Buche dar.

Wie bei der Fichte nimmt die Anzahl der Wurzeln mit zunehmender Wurzeldurchmesserkategorie stark ab. Auch in diesem Fall ist die Anzahl der Wurzeln im Gebiet Schangnau grösser als im Gebiet Spisibach. Die Werte der Tannen im Gebiet Gantrisch sind etwa gleich hoch wie im Spisibach.

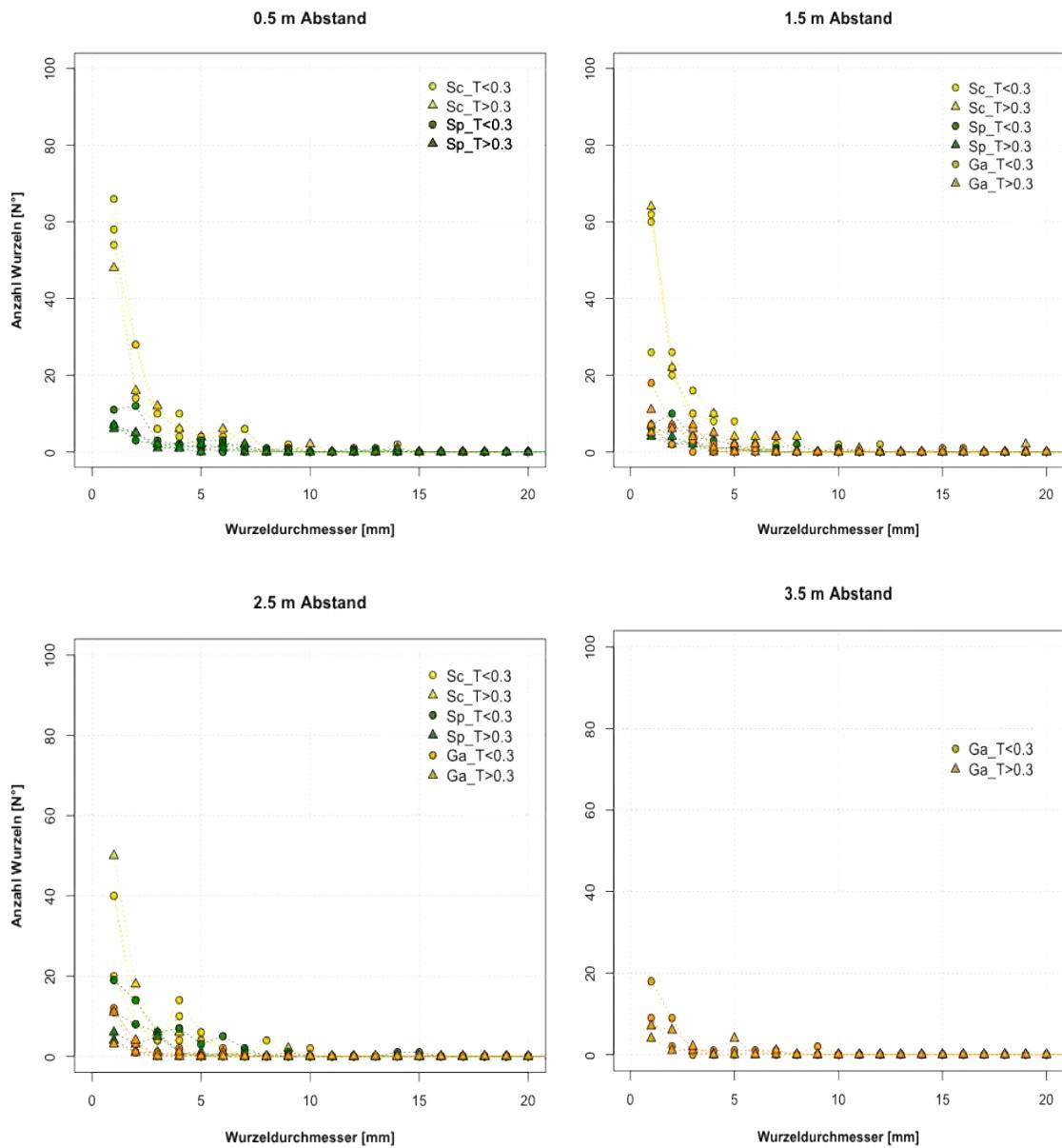


Abbildung 16: Wurzelverteilung der Tanne je nach Wurzeldurchmesserklasse (1 bis 20 mm) bei vier Abständen vom Baumstamm (0.5, 1.5, 2.5, und 3.5 m). Die Legenden sind wie in Abbildung 14 dargestellt.

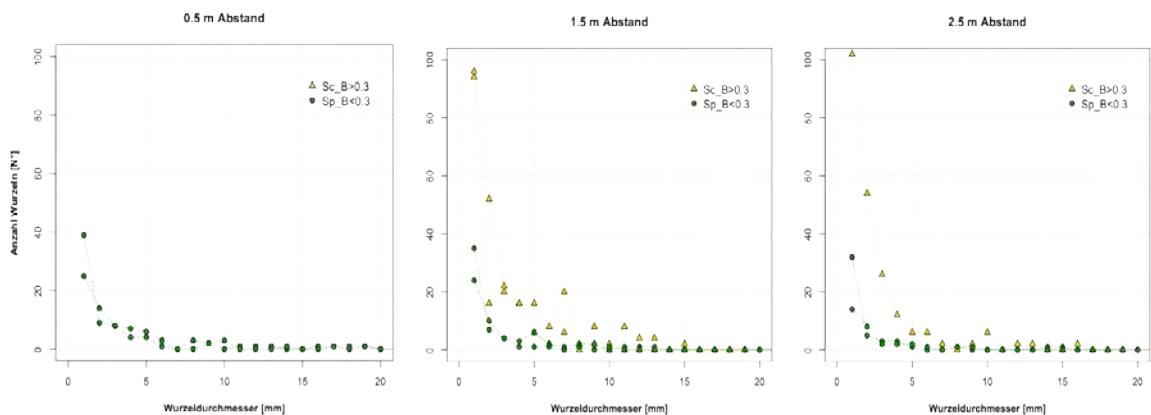


Abbildung 17: Wurzelverteilung der Buche je nach Wurzeldurchmesserklasse (1 bis 20 mm) bei drei Abständen vom Baumstamm (0.5, 1.5, und 3.5 m). Die Legenden sind wie in Abbildung 14 dargestellt.

Die Kalibrierung des Wurzelverteilungsmodells wurde für jede Kombination von Baumart, BHD und Untersuchungsgebiet separat gemacht. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel der Kalibrierung des Modells mit Daten der Fichte für das Gebiet Schangnau – einmal für Bäume mit  $BHD < 0.3$  m, und einmal für Bäume mit  $BHD > 0.3$  m. Die Summe der quadratischen Fehler für sechs Messungen (=sechs untersuchte Bodenprofile) liegt in diesem Beispiel etwa bei 40. Im Durchschnitt hat man ein Fehler von 7 Feinwurzeln pro Bodenprofil. Der durchschnittliche Fehler für alle Untersuchungen liegt bei ca. 10 Feinwurzeln pro Bodenprofil. Bei der Kalibrierung der Grobwurzelverteilungskurven wurde der Exponent und der „Scaling factor“ geeicht. Abbildung 19 zeigt ein Beispiel der Resultate des kalibrierten Modells für die Abschätzung der Grobwurzelverteilung. Tabelle 3 listet die Werte der Parameter „Pipe coefficient“ und „decay exponent“ auf, welche für die verschiedenen Gebiete und Baumarten kalibriert wurden. Der „pipe coefficient“ ist ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Feinwurzelverteilung, während der „decay exponent“ ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Grobwurzelverteilung darstellt.

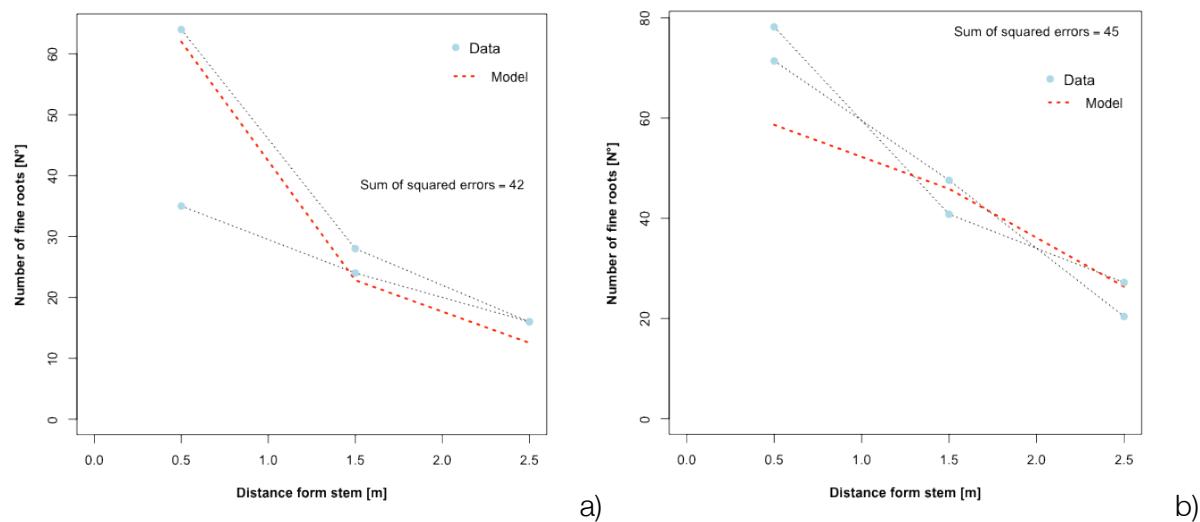


Abbildung 18: Beispiel der Kalibrierung des Wurzelverteilungsmodells für die Feinwurzelverteilung der Fichte in Schangnau: a)  $BHD < 0.3$  m (Baum N° 2 und 3), b)  $BHD > 0.3$  m (Baum 1 und 4).

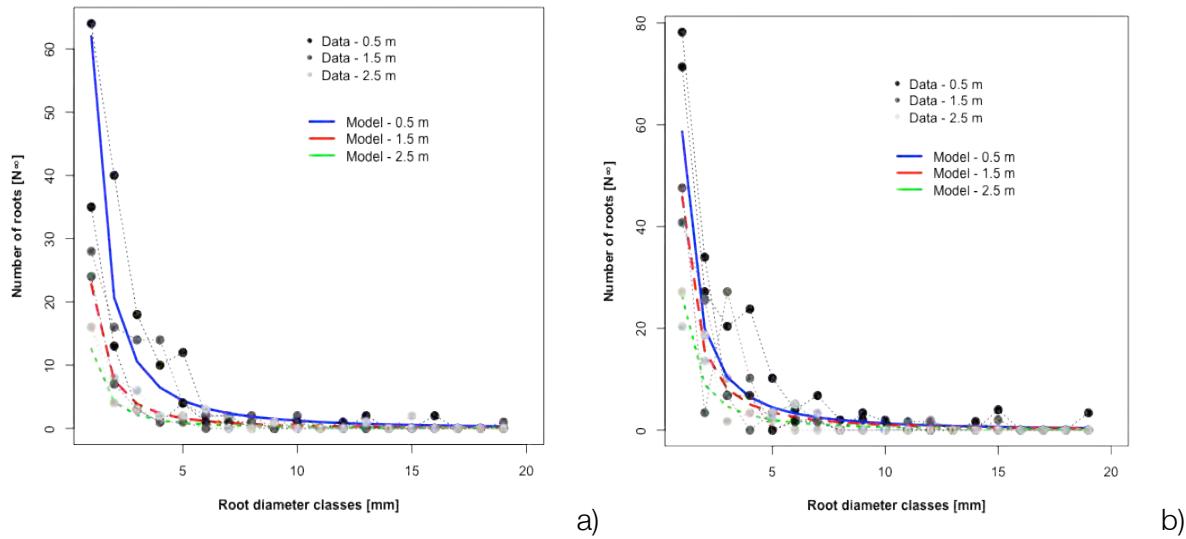


Abbildung 19: Beispiel der Kalibrierung des Wurzelverteilungsmodells für die Grobwurzeln der Fichte in Schangnau: a) BHD < 0.3 m (Baum N° 2 und 3), b) BHD > 0.3 m (Baum 1 und 4).

Tabelle 3: Kalibrierte Werte.

	Schangnau		Spisibach		Gantrisch	
	Pipe Coeff.	Decay Exponent	Pipe Coeff.	Decay Exponent	Pipe Coeff.	Decay Exponent
F	0.13	-1.4	0.010	-1.53	0.070	-1.69
T	0.40	-1.6	0.012	-1.13	0.025	-1.01
B	0.80	-1.6	0.120	-1.30	-	-

## 5.2 Modellierte Wurzelverstärkung

Unter Verwendung des kalibrierten RBM's ist es möglich, die Verteilung der Wurzelverstärkung zu quantifizieren. Die Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Resultate dieser berechneten Wurzelverstärkung für die drei Baumarten in vier Wurzeldurchmesserklassen.

Die Fichte zeigt den kleinsten Wurzelverstärkungswert und eine starke Abnahme mit zunehmendem Abstand vom Baumstamm. Das Wurzelsystem der Tanne zeigt höhere Verstärkungswerte, wobei bereits kleine Durchmesserklassen hohe Verstärkungswerte (bis zu 5 kPa) erreichen. Das Wurzelsystem der Buche ergibt die besten Verstärkungswerte. Allerdings scheint die laterale Ausdehnung der Wurzeln dieser Baumart limitiert zu sein.

Die berechnete Wurzelverstärkung kann als repräsentativ für die ersten 0.5 m Bodentiefe wahrgenommen werden. Bei tieferen Horizontschichten nimmt diese Wurzelverstärkung exponentiell ab.

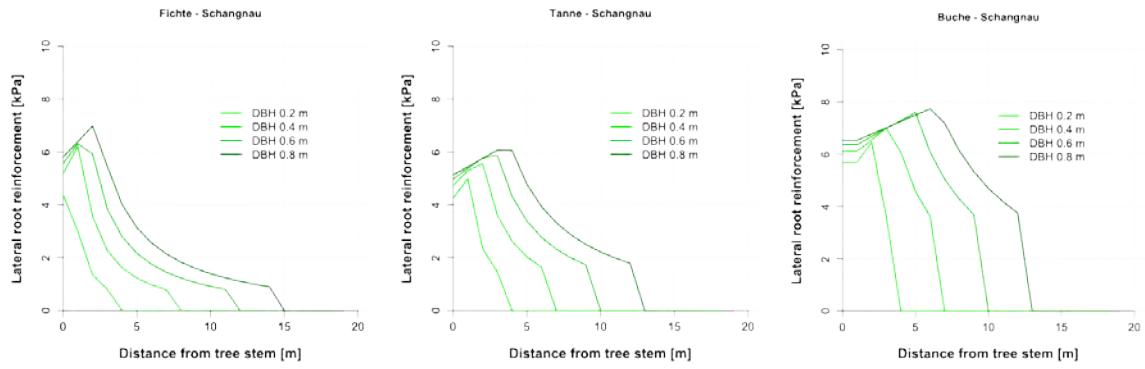


Abbildung 20: Berechnete Wurzelverstärkung für die untersuchten Baumarten (Fichte, Tanne und Buche) im Gebiet Schangnau. Die Legende beschreibt die für die Simulation angenommenen Stammdurchmesser (BHD) der Bäume.

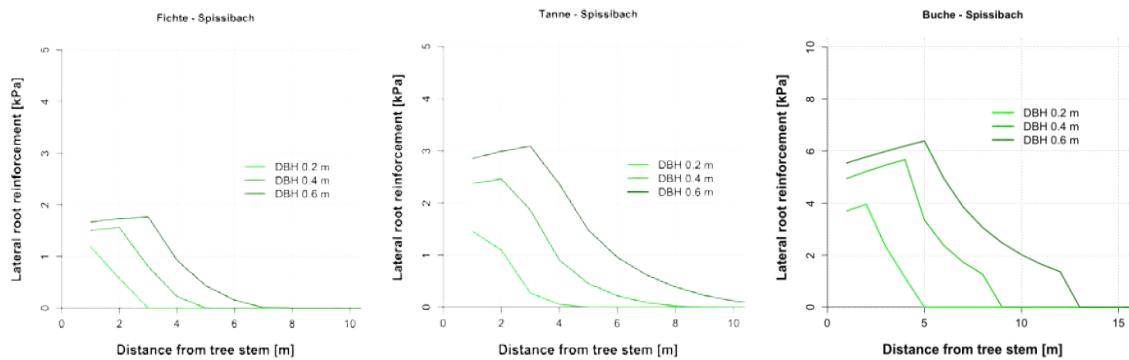


Abbildung 21: Berechnete Wurzelverstärkung für die untersuchten Baumarten (Fichte, Tanne und Buche) im Gebiet Spissibach. Die Legende beschreibt die für die Simulation angenommenen Stammdurchmesser (BHD) der Bäume.

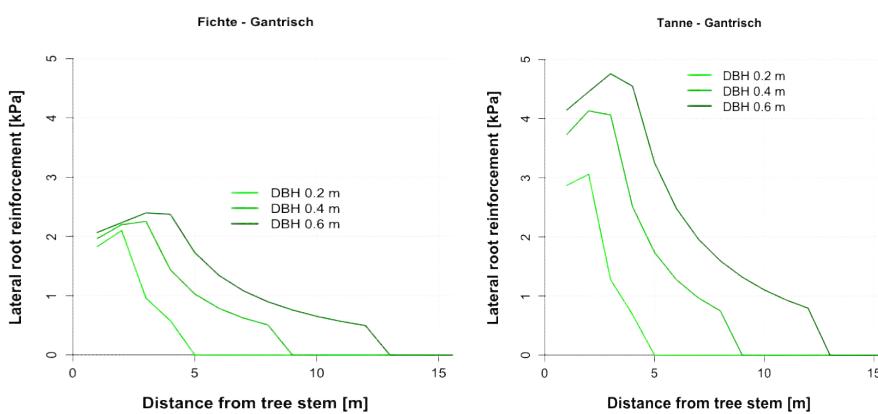


Abbildung 22: Berechnete Wurzelverstärkung für die untersuchten Baumarten (Fichte und Tanne) im Gebiet Gantrisch. Die Legende beschreibt die für die Simulation angenommenen Stammdurchmesser (BHD) der Bäume.

## 5.3 Berechnete Hangstabilität

### 5.3.1 Neue Methode für die Praxis

#### 5.3.1.1 Variante A

Die erste Variante der Aufbereitung der Resultate in einer vereinfachten Form, um die Anwendung in der Praxis zu erleichtern, ist als Tabelle dargestellt. Für jedes Untersuchungsgebiet wurden zwei Tabellen mit Informationen bezüglich der minimalen Bestandesdichte (Anzahl Bäume / ha) und Lückenlänge (m in Fallrichtung), welche in den kalibrierten Modellen berechnet wurden, erstellt. Die farbigen Markierungen der Werte zeigen, ob die berechneten Werte - gemäss LFI - plausibel sind (gelb, grün, und blau) oder nicht (keine Farbe). Die Bereiche ohne Werte (-) zeigen die Situationen, bei welchen nie genug Wurzelverstärkung erreicht werden kann.

Die Werte der Tabelle wiederspiegeln die Resultate der Wurzelverteilung und der Wurzelverstärkung. In Schangnau können weniger Bäume stehen und grössere Lücken vorhanden sein, um eine minimale oder ideale Schutzwirkung zu erreichen, weil mehr Wurzeln vorhanden sind. Schon 150 Bäume pro ha mit kleineren Durchmessern haben in Schangnau dieselbe Wirkung wie in Gantrisch bei 200 Bäume pro ha. Im Gebiet Spisibach ist es zum Teil unmöglich, die gewünschte Schutzwirkung zu erreichen (Fichte mit BHD < 0.2 m).

Die Lückenlänge ist ein wichtiger Anhaltspunkt, um die maximale Grösse von Öffnungen möglicher Eingriffe abzuschätzen. Die Resultate zeigen, dass Lücken in Beständen mit starken BHD-Klassen ( $BHD > 0.5$  m) bis 20-25 m lang sein können, während bei von Stangenholz-Klassen ( $BHD < 0.5$  m) dominierten Beständen der Spielraum für die Planung der Öffnungen viel kleiner (5-15 m) ist.

Die Unterschiede zwischen den minimalen und idealen Profilen sind gross, wobei für gut entwickelte Bestände die Werte im plausiblen Bereich bleiben. Allgemein kann man interpretieren: Je mehr Verstärkung jedes Wurzelsystem gewährleistet, desto geringer werden die Unterschiede zwischen minimalem und idealem Profil.

Tabelle 4: Tabelle zur Bestimmung der minimalen **Bestandsdichte (Nº Bäume/ha)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Schangnau. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LFI; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	≥ 150	≥ 150	≥ 140	≥ 2500	≥ 400	≥ 150
0.4	≥ 100	≥ 70	≥ 60	≥ 400	≥ 120	≥ 70
0.6	≥ 40	≥ 30	≥ 25	≥ 120	≥ 70	≥ 30
0.8	≥ 25	≥ 17	≥ 15	≥ 70	≥ 30	≥ 17

Tabelle 5: Tabelle zur Bestimmung der maximalen **Lückenlänge (m)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Schangnau. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LFI; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	8	8	8.5	2	5	8
0.4	10	12	13	5	9	12
0.6	16	18	20	9	12	18
0.8	20	24	26	12	18	24

Tabelle 6: Tabelle zur Bestimmung der minimalen **Bestandsdichte (Nº Bäume / ha)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Spisibach. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LFI; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	.	≥ 625	≥ 160	.	-	≥ 280
0.4	≥ 280	≥ 160	≥ 40	.	≥ 625	≥ 51
0.6	≥ 160	≥ 70	≥ 17	-	≥ 160	≥ 30

Tabelle 7: Tabelle zur Bestimmung der maximalen **Lückenlänge (m)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Spisibach. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LFI; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	-	4	8	-	-	6
0.4	6	12	16	-	4	14
0.6	8	16	24	-	8	18
0.8						

Tabelle 8: Tabelle zur Bestimmung der minimalen **Bestandsdichte (Nº Bäume / ha)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Gantrisch. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LF; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	≥ 280	≥ 160	?	-	≥ 625	?
0.4	≥ 100	≥ 51	?	-	≥ 160	?
0.6	≥ 45	≥ 25	?	-	≥ 70	?

Tabelle 9: Tabelle zur Bestimmung der maximalen **Lückenlänge (m)** in Funktion der durchschnittlichen BHD-Klassen in Gantrisch. Die Farben weisen auf plausible Werte der Basalfläche hin (LF; Brändli, 2010) (gelb 0-20 m/ha, blau 21-40 m/ha, grün 41-60 m/ha).

BHD [m]	Minimal Profil Wurzelverstärkung (2 [kPa])			Ideal Profil Wurzelverstärkung (5 [kPa])		
	Fichte	Tanne	Buche	Fichte	Tanne	Buche
0.2	6	8	?	-	4	?
0.4	10	14	?	-	8	?
0.6	15	20	?	-	12	?
0.8						

### 5.3.1.2 Variante B

Die zweite vorgeschlagene Variante der Aufbereitung der Resultate in einer vereinfachten Form, um die Anwendung in der Praxis zu erleichtern, ist eine detaillierte Karte der Schutzwirkung. Die numerischen Simulationen der Hangstabilität mit und ohne Berücksichtigung der Wurzelverstärkung erlaubt die räumliche Darstellung der Schutzwirkung des Waldes. Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Resultate der Modellierung für die zwei Untersuchungsgebiete, bei welchen der Wald mit Stereoanalysis digitalisiert wurde (Schangnau und Spisibach). Die Resultate zeigen deutlich, wie der Wald in Schangnau im heutigen Zustand eine wichtige Schutzwirkung (rote Fläche) erfüllt, während in Spisibach die heutige Bestockung praktisch keine Schutzwirkung bietet. Mit einer anderen Baumartenzusammensetzung und einer anderen Struktur könnte der Wald auch in diesem Gebiet eine gute Schutzwirkung leisten.

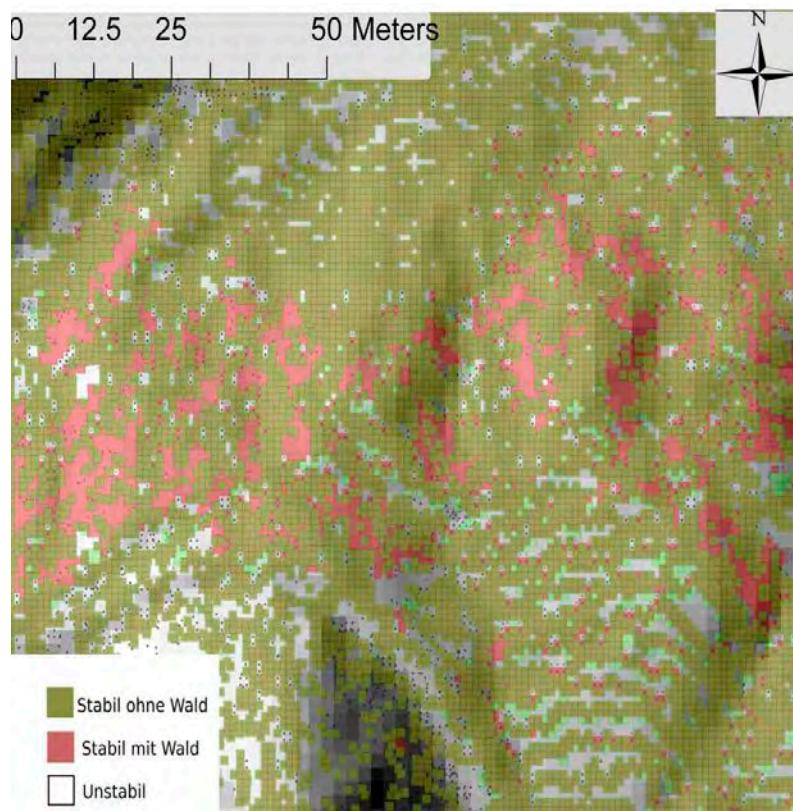


Abbildung 23: Räumliche Darstellung der stabilisierenden Wirkung der Wurzeln in Schangnau. Durchsichtige Flächen zeigen instabile Zonen, die grünen Flächen sind Zonen, die auch ohne Wald stabil sind und rote Flächen sind Zonen, welche ohne Wald instabil sind. Es ist anzumerken, dass der Wald nicht über das ganze Gebiet digitalisiert wurde.

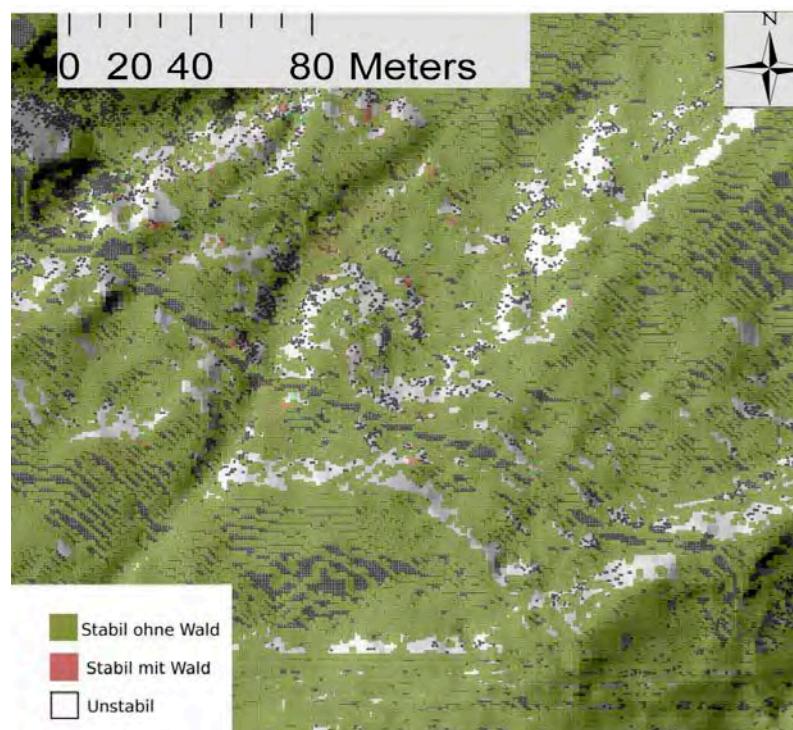


Abbildung 24: Räumliche Darstellung der stabilisierenden Wirkung der Wurzeln in Schangnau. Durchsichtige Flächen zeigen instabile Zonen, die grünen Flächen sind Zonen, die auch ohne Wald stabil sind und rote Flächen sind Zonen, welche ohne Wald instabil sind. Es ist anzumerken, dass der Wald nicht über das ganze Gebiet digitalisiert wurde.

### 5.3.2 Resultate des Praxistests

Im Zeitraum von August bis September 2012 nahmen zwölf Forstfachleute von Bund und Kanton Bern am Praxis-Test teil. Insgesamt wurden von ihnen 24 fiktive Anzeichnungen nach den drei Anzeichnungsvarianten auf den drei Testflächen vorgenommen und die dabei gemachten Erfahrungen festgehalten.

Da für die Testfläche „Gantrisch“ bis zum Zeitpunkt des Tests keine Schutzwirkungskarte nach Variante B zur Verfügung stand, beschränkt sich der dortige Test auf die Variante A. Tabelle 10 zeigt die Anzahl der Anzeichnungen je Variante pro Standort.

*Tabelle 10: Anzahl der fiktiven Anzeichnungen pro Standort und Variante.*

Testfläche	Variante „wie bis anhin“	Variante A	Variante B
Gantrisch	4	4	3
Schängnau	8	8	8
Spisibach	3	3	3

#### 5.3.2.1 Mündliche und schriftliche Feedbacks

Nachfolgend ist ein Zusammenzug der verschiedenen Anmerkungen aus den Anzeichnungsformularen, den direkten Feedbacks beim Anzeichnen sowie der Feedbackrunde an der Resultatesitzung aufgeführt:

#### Tabelle (Variante A)

- Baumabstand ist konkreter handhabbar als Stammzahl
- Lückenlänge in Hangfalllinie besser als Abstand (Stammzahl)
- In stufigen Beständen mit mehreren Baumarten schwierig zu interpretieren bzw. zu handhaben (z.B. Plenterwald; welche Werte des BHD bzw. welche Baumart nehmen? Wie wird Verjüngung einbezogen?)
- Grundlagen (wie Standortkarte, Stammzahl, Fläche) müssen vorhanden sein

#### Wirkungskarte (Variante B)

- Karte ist v.a. zusätzliche Hilfe, ob grosszügig angezeichnet werden kann oder speziell ein Augenmerk auf die Naturgefahrenwirkung gelegt werden muss; anderer Handlungsspielraum  
→ Hilfsmittel für betriebliche & regionale Ebene, wenn grossflächig vorhanden
- Nur in Kombination mit Standortkarte dienlich

#### Allgemeine Anforderungen aus Sicht der Praxis an neue Anforderungen / Methoden

- Muss einfach handhabbar sein
- wesentliche Kenntnisse in NaIS einbauen → bessere Grundlage NaIS / aber z.Zt. kein Widerspruch zu NaIS sichtbar geworden
- Rutsch und Hangmuren gleich behandeln
- Einbezug der Geologie/ des Boden
- Anpassung Silva-Protect bei neuen Erkenntnissen

### 5.3.2.2 Resultate der Anzeichnungen

Die einzelnen Anzeichnungen wurden numerisch ausgewertet und grafisch dargestellt. Neben einer Zusammenstellung aller Anzeichnungen pro Standort (siehe Abbildung 25) wurden auch die einzelnen Anzeichnungs-Varianten gegeneinander ausgewertet (siehe Abbildung 26 & Abbildung 27).

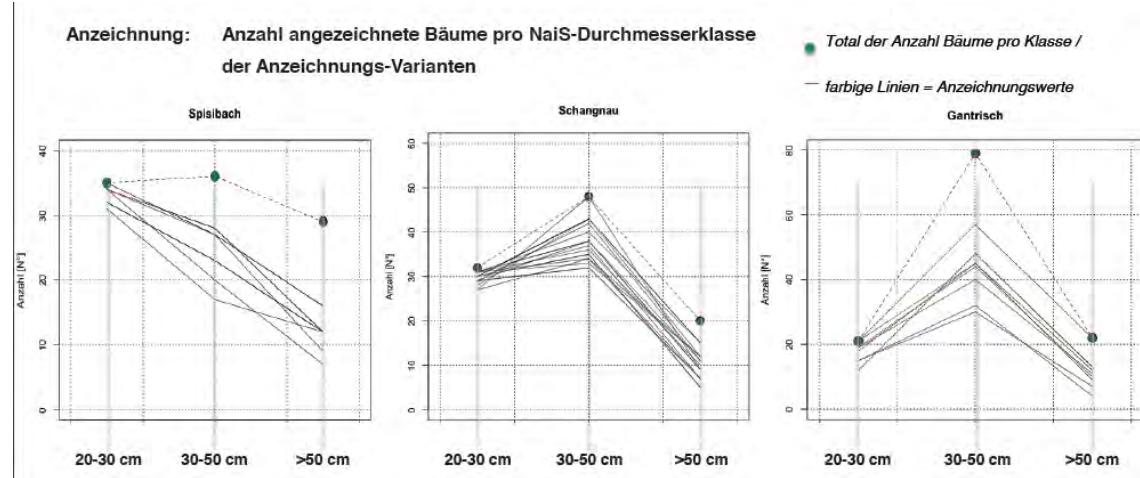


Abbildung 25: Anzahl der angezeichneten Bäume pro NaiS-Durchmesserkategorie aller Anzeichnungen des einzelnen Standorts.

Die Darstellung der angezeichneten Bäume aller Anzeichnungen macht ersichtlich, dass die einzelnen Anzeichnungen mit Ausnahme in der 20-30 cm Durchmesserkategorie stark variieren. Trotzdem können allgemeine Tendenzen festgehalten werden. So wird in der Durchmesserkategorie >50 cm auf allen Standorten am wenigsten Bäume angezeichnet und in der Durchmesserkategorie 30-50 cm - mit Ausnahme der Fläche Spisibach - am stärksten eingegriffen. In der 20-30 cm Durchmesserkategorie zeigt sich allgemein die Tendenz, jeweils fast die ganze Anzahl der Bäume anzuziehen.

#### Vergleich der Volumen [%] der verschiedenen Anzeichnungs-Varianten total:

##### Ist-Zustand – „wie bis anhin“ (NaiS)

→ Zeigt die Menge & Diversität der angezeichneten Volumen (Methode NaiS) der einzelnen Teilnehmer.

##### „wie bis anhin“ (NaiS) – Tabelle (Var. A)

→ Zeigt den Unterschied der Volumen der Anzeichnungen nach NaiS und Tabelle der einzelnen Teilnehmer.

##### „wie bis anhin“ (NaiS) – Wirkungs-Karte (Var. B)

→ Zeigt den Unterschied der Volumen der Anzeichnungen nach NaiS und Karte der einzelnen Teilnehmer.

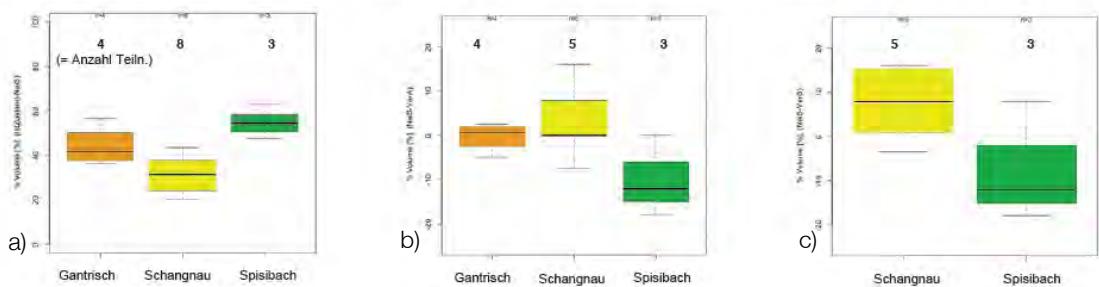


Abbildung 26: a) Referenzanzeichnung „wie bis anhin“ pro Standort. b) & c) vergleicht die Volumen [%] der verschiedenen Anzeichnungs-Varianten miteinander pro Standort.

Abbildung 26 a zeigt die Menge und die Diversität der angezeichneten Volumen der Variante „wie bis anhin“ der einzelnen Teilnehmer und gilt als Referenzvolumen für den Vergleich mit den anderen beiden Varianten. Die Anzeichnungen der einzelnen Teilnehmenden variieren dabei in

einem geringen Bereich von 10-15% zueinander. Es wurde zwischen 20-50% des Vorrates angezeichnet; auf der Testfläche Spisibach am meisten und in Schangnau am wenigsten.

Beim Vergleich der beiden Volumen der Variante „wie bis anhin“ und der Variante A (Abbildung 26 b) zeigt sich, dass die Unterschiede der Anzeichnungen der einzelnen Teilnehmenden untereinander allgemein ebenfalls relativ gering sind. Betrachtet man jedoch die einzelnen Testflächen, so wird deutlich, dass auf der Fläche Schangnau mit den Anforderungen der Variante A gegenüber der Variante „wie bis anhin“ weniger angezeichnet wird, während auf der Fläche „Spisibach“ deutlich mehr angezeichnet wird. Auf der Fläche „Gantrisch“ sind keine grossen Unterschiede zwischen den beiden Varianten ersichtlich.

Beim Vergleich der Variante B mit der Variante „wie bis anhin“ (Abbildung 26 c) streuen die Unterschiede der Anzeichnungen der einzelnen Teilnehmende allgemein stärker. Bezuglich des Standortes zeigt sich bei den Teilnehmenden jedoch wiederum das gleiche Verhalten wie beim Vergleich mit der Variante A: auf der Fläche „Spisibach“ wird gegenüber der Variante „wie bis anhin“ mehr und auf der Fläche „Schangnau“ weniger angezeichnet.

#### Vergleich der Volumen [%] der verschiedenen Anzeichnungs-Varianten pro Durchmesserklasse:

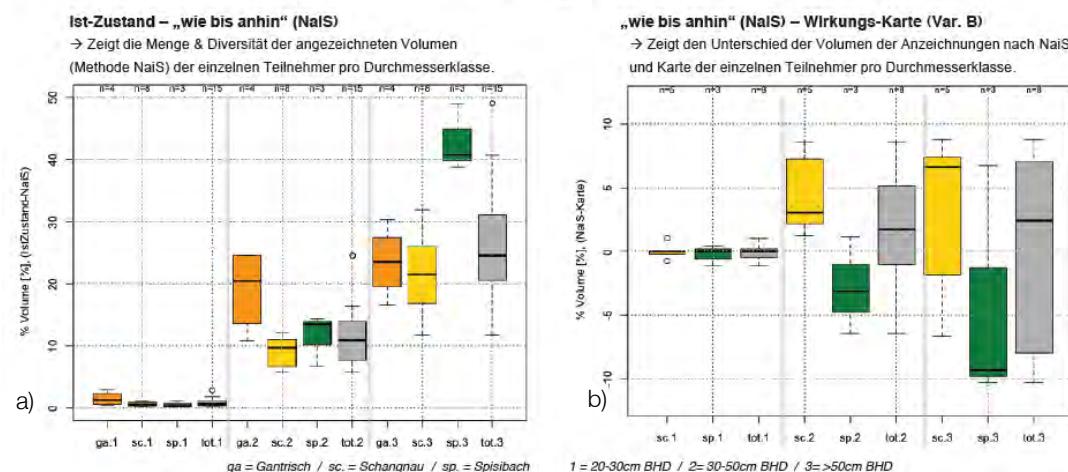


Abbildung 27: a) Referenzanzeichnung „wie bis anhin“ pro Durchmesserklasse nach NaiS. b) & c) vergleicht die Volumen [%] der verschiedenen Anzeichnungs-Varianten miteinander pro Durchmesserklasse nach NaiS.

Die Abbildung 27a zeigt die Menge und die Diversität der angezeichneten Volumen der Variante „wie bis anhin“ der einzelnen Teilnehmenden pro Durchmesserklasse. Allgemein ist zu sehen, dass die Variabilität der Anzeichnungen der Teilnehmenden in den einzelnen Testflächen in der Durchmesserklasse 20-30 cm (ga.1, sc.1, sp.1) am kleinsten ist. Volumenmässig wurde in dieser Klasse auch am wenigsten angezeichnet, während in der Klasse der > 50 cm Durchmesser am meisten Holz herausgenommen wird. Auffallend ist die grosse Variabilität der Teilnehmenden in der Durchmesserklasse 30-50 cm auf der Testfläche „Gantrisch“ (ga.2) sowie das hohe Volumen auf der Testfläche „Spisibach“ in der BHD-Klasse > 50 cm (sp.3).

Beim Vergleich der beiden Volumen der Variante „wie bis anhin“ und der Variante B (Abbildung 26b) zeigt sich, dass die Variabilität der Anzeichnungen der einzelnen Teilnehmenden in der BHD-Klasse 20-30 cm (sc.1, sp.1) am kleinsten ist, während die Unterschiede in den beiden anderen Klassen relativ gross sind. Betrachtet man die einzelnen Testflächen, dann wird deutlich, dass auf der Fläche „Schangnau“ bei der Anzeichnung nach Variante B gegenüber der Variante „wie bis anhin“ sowohl in der BHD-Klasse 30-50 cm (sc.2) wie auch in der > 50 cm-

Klasse (sc.3) weniger Volumen angezeichnet wird. In letzterer variiert dies jedoch von Teilnehmer zu Teilnehmer sehr. Auf der Fläche „Spisibach“ wird dagegen in beiden Klassen (sp.2, sp.3) mehr Volumen im Vergleich zur Variante „wie anhin“ angezeichnet.

## 6 Diskussion und Schlussfolgerungen

### 6.1 Wurzelverteilung

Die Resultate zeigen je nach Untersuchungsgebiet Unterschiede in der Wurzelverteilung - vor allem in der Anzahl der Wurzeln (Feinwurzeln und Grobwurzeln). Wie schon bei anderen Studien diskutiert (Lawrence et al., 2012), kann die Wurzelverteilung von vielen Faktoren beeinflusst werden (Niederschlag, Temperatur, pH des Bodens, bodenphysikalische Eigenschaften, Bestandesstruktur, usw.). Bei den drei untersuchten Gebieten sind die Unterschiede der Höhenlage und der Bodentypen die wahrscheinlichsten Faktoren, welche die Wurzelverteilung beeinflussen. Die unterschiedlichen ökologischen Faktoren wiederspiegeln sich in der Klassifikation der Standorte und in der Position dieser Standorte in den Ökogrammen nach NaS (Frehner et al., 2005). Die drei Standorte sind wechselfeuchte Standorte mit unterschiedlichen Bodentypen (Schangnau: Braunerde Spisibach: vernässte Braunerde, Gantrisch: Hanggley) und pH-Werten (18: mittel sauer, 18w: weniger sauer, und 46: saurer). Man könnte daraus schliessen, dass je vernässter ein Gebiet ist, desto ungünstigere Bedingungen zur Bildung dichter Wurzelsysteme herrschen. Es ist ebenfalls zu sehen, dass diese Tendenz für alle drei untersuchten Baumarten gilt, wobei Buche und Linde tendenziell eine grössere Wurzelzahl als Fichte zeigen. Dieselbe Tendenz wiederspiegelt sich dann in den Resultaten der Wurzelverstärkungsberechnungen, worin auch die unterschiedlichen, mechanischen Eigenschaften der Wurzeln berücksichtigt sind. Diese Resultate sind ein Hinweis, dass eine detaillierte Charakterisierung der Wurzelverteilung wichtiger sein kann als die Quantifizierung der unterschiedlichen, mechanischen Eigenschaften der Wurzeln pro Baumart (wie z.B. maximale Zugspannung versus Wurzeldurchmesser - Kurven).

Die Daten der Feinwurzelverteilungen stimmen gut mit der theoretischen Vorstellung, dass die Anzahl Feinwurzeln mit zunehmendem Abstand von Baumstamm abnimmt, überein (Schwarz et al, 2010b). In einzelnen Fällen konnte nachgewiesen werden, dass die Anzahl der Feinwurzeln nahe beim Baumstamm klein ist, ein Maximum bei einem bestimmten Abstand erreicht und bei grösserem Abstand wieder stark abnimmt. Andere Arbeiten wie Ammer und Wagner (2005) zeigen dies ebenfalls. Für Fichte wurde nachgewiesen, dass im Stammbereich die Anzahl der Feinwurzeln durch einen Mangel an Nährstoffen - Wasser und Mineralien - limitiert ist (Puhe, 2003) und die Anzahl Feinwurzeln erst im Bereich der Kronenprojektion ein Maximum erreichen (Patritan et al., 2011). Untersuchungen von Lawrence et al. (2012) haben gezeigt, dass in einem gemischten Fichtenbestand (*Picea glauca*) 80% der Feinwurzeln innerhalb von 3.2 m Abstand vom Baum liegen. Bei überlappenden Wurzelsystemen erreichen die Anzahl Feinwurzeln durch die Summierung der Wurzeln der einzelnen Wurzelsystemen sowie durch die Konkurrenz einen konstanten Wert. Bei interspezifischer Konkurrenz haben Studien gezeigt, dass die Verteilung der Wurzeln sich je nach Eigenschaften der einzelnen Baumarten stratifiziert – die Wurzeln der Buche zum Beispiel wachsen in tiefere Bodenhorizonte, während Fichtenwurzeln sich mehr auf die Bodenoberfläche begrenzen, wenn sich diese beiden Baumarten konkurrenzieren (Lei et al., 2012). Studien haben gezeigt, dass die Biomasse der Feinwurzeln mit zunehmender Dimension der Bäume zunimmt (Patritan et al., 2011). Die Erneuerung („Turnover“) der Feinwurzeln wurde in zahlreichen Studien quantifiziert. Für Fichte kann es dabei zu sehr hohen Werten kommen;

bis zu 300-1500 kg/ha in einer Wachstumsperiode ( $0.25 - 1.09 = \text{"annual root biomass production/stand soil biomass"}$ , und  $0.18 - 0.59 = \text{"annual root necromass deposition/stand soil biomass"}$ , wobei „stand soil biomass“ die durchschnittliche Biomasse der Wurzeln in den obersten 20 cm Bodentiefe ist) (Godbold et al., 2003). Ähnliche Werte (1-7 t/ha) wurden von Persson und Stadenberg (2010) aus der Literatur zusammengefasst. Das heisst, dass in einer Wachstumsperiode alle Feinwurzeln mehrmals erneuert werden können und je saurer der Standort ist, desto mehr Feinwurzeln sterben rasch ab und werden erneuert. Die relativ grosse Feinwurzeldynamik zeigt eine gute Plastizität des Wurzelsystems gegenüber dem Einfluss von Umweltfaktoren; dies gilt auch für forstpathologische Kalamitäten (wie Käfer oder Pilze), welche in kurzer Zeit die Wurzelverteilung und Wurzelwachstumsdynamik von ganzen Beständen rasch ändern können (Gaitnieks, 2006). Mao et al. (2013) haben die saisonale Änderung der Feinwurzeln in zwei alpinen Gebieten untersucht und eine hohe Wachstumsaktivität der Feinwurzeln von April bis November gemessen; das Absterben von Feinwurzeln findet daher von März bis September statt. Weiter haben Mao et al. (2013) gezeigt, dass je nach Jahr grosse Unterschiede in der Feinwurzeldynamik, vermutlich durch unterschiedliche klimatische Bedingungen, stattfinden können. Die beschriebene, hohe Dynamik von Feinwurzeln gilt jedoch nicht für Grobwurzeln ( $>1.5 \text{ mm}$ ), welche für mehrere Jahre aktiv bleiben (Mao et al., 2013). Für zukünftige Arbeiten muss der Zeitpunkt der Feldmessungen besser berücksichtigt werden, weil diese saisonale Wurzeldynamik einen Einfluss auf den Vergleich der in verschiedenen Zeitphasen und auf verschiedenen Standorten aufgenommenen Daten hat. Persson und Stadenberg (2010) haben anhand von vier verschiedenen Aufnahmen während einer Wachstumsperiode auf demselben Standort gezeigt, dass sich die Feinwurzelbiomasse (Durchmesser  $< 2 \text{ mm}$ ) von  $224 \pm 162$  bis  $410 \pm 207 \text{ g m}^{-2}$  innerhalb weniger Wochen ändern kann. Lei et al. (2012) haben gezeigt, dass die Dynamik des Wurzelwachstums in jungen Beständen (5-6 jähriger Aufforstung) auch durch die Baumartenmischnutzung des Bestandes positiv beeinflusst werden kann: Je mehr Baumarten, desto rascher ist die Zunahme von Feinwurzelbiomasse. Diese Studie zeigt auch, dass die Produktion von Feinwurzeln nicht durch Konkurrenz beeinflusst wird. Diese Erkenntnisse sind wichtig, um die Resilienz und die Schutzwirkung eines forstlichen Ökosystems besser zu verstehen.

Die laterale Wurzelverteilung innerhalb eines Bestandes hat eine grosse Bedeutung für die Quantifizierung der Wurzelverstärkung und damit der Schutzwirkung der Wälder. Obwohl die Resultate dieser Studie auf maximal 2.5-3.5 m Abstand vom Baumstamm begrenzt sind, ist es interessant zu sehen, dass die Trends der Resultate für Fichte die Literaturdaten (Patritan et al., 2011) bekräftigen. Die Literaturdaten zeigen diesbezüglich eine grosse Variabilität des maximalen Horizontal-Abstandes der Feinwurzeln mit Werten von 5 bis zu 15 m für Bestände unterschiedlichen Alters und Bestockungsdichte. Diese Variabilität wurde in vorherigen Studien auch durch die Unterschiede der Bestandesökologie und Bestandesstruktur erklärt. Je lockerer die Stammesdichte ist und je schwieriger die Bestandesbedingungen sind, desto breiter sind die Wurzelsysteme. Unter günstigen Bedingungen hingegen sind die Wurzelsysteme weniger breit. Die kleinräumige Variabilität der Wurzelverteilung wird auch beeinflusst durch die kleinräumige (wenige Meter Abstand), heterogene Qualität des Bodens (arme und günstige „microsites“) (Puhle, 2003). Diese Schlussfolgerungen können auch durch Beobachtungen dieser Studie bestätigt werden.

Die Resultate bestätigen auch die exponentielle Abnahme der Feinwurzeldichte in vertikaler Richtung, bei welcher mehr als 90% der Feinwurzeln innerhalb der ersten 0.5 m Bodentiefe gefunden wurden. Dies wird auch in anderen Studien (Bischetti et al., 2005 oder Patritan et al., 2011) gezeigt. Die punktuelle vertikale Wurzelverteilung in einem Bestand wird beeinflusst durch

die Bodendichte, die Vernässung und die chemischen Reaktion der Mineralbodenhorizonte (Godbolt et al., 2003; Puhe, 2003).

## 6.2 Kalibrierung Wurzelverteilungsmodell

Die Wurzelverteilungsdaten wurden benutzt, um das Wurzelverteilungsmodell zu eichen. Weil die Anzahl der Daten pro Kombination der Variablen (Baumart, BHD-Klasse und Standort) für eine Validierung nicht gereicht hatte, wurde das Modell nur kalibriert.

Die Aufnahmen konzentrierten sich auf die ersten Meter neben den Baumstämmen (bis 3.5 m Abstand), weil sich dort der grosse Teil der Wurzeln konzentriert. Dies erlaubt vor allem für die Schätzung der Anzahl Feinwurzeln und Grobwurzeln eine gute Kalibrierung des Modells. Die Anzahl der Wurzeln ist der räumlich entscheidende Parameter zur Berechnung der Wurzelverstärkung auf der Hangskala. Die Bestimmung der maximalen Horizontalausbreitung der Wurzelsysteme wurde aufgrund von Literaturdaten vorgenommen (Schwarz et al., 2010b). Weitere Studien sollten diesen Aspekt besser untersuchen, wobei auch bei diesem Parameter eine grosse Variabilität zu erwarten ist. Für eine Anwendung in der Praxis reichen die konservativen Literaturwerte aus.

Bei den Resultaten aus dem Wurzelverteilungsmodell ergab sich eine grosse Streuung der Fehler von 5 bis 50%. Trotz dieser Fehler erlaubt das Modell immerhin die Unterschiede zwischen den Standorte zu charakterisieren, bei welchen die Anzahl Wurzeln zum Teil bis zu 800% unterschiedlich sein können. Statistische Modelle für die räumliche Feinwurzelverteilung können nur 25% der Wurzelvariabilität erklären (Patritan et al., 2011). Ammer und Wagner (2005) haben die Grenzen solcher Modelle diskutiert und argumentieren, dass die Resultate auf Bestandesebene repräsentativ sein können, aber nicht für punktuelle Untersuchungen verwendet werden können. In anderen Worten: Die Statistik auf Bestandesebene der räumlichen Verteilung der Wurzeln kann gut mit Waldstruktur-Modellen beschrieben werden, aber die punktuellen Abweichungen können sehr gross sein.

Auf Grund der Variabilität der punktuellen Wurzelverteilung wurde auf eine einzelne komplett Ausgrabung der Wurzelsysteme verzichtet. Als bester Kompromiss zwischen Aufwand und Repräsentativität der Messungen wurden daher mehrere punktuelle Aufnahmen (0.5 m breite Bodenprofile) im ganzen Bestand gewählt. Idealerweise wären mehr als zwei Messungen pro Variablenkombination (BHD, Baumart, Standort, Abstand von Stamm) wünschenswert gewesen.

## 6.3 Berechnung Wurzelverstärkung

Die berechnete Verteilung der Wurzelverstärkung entspricht ziemlich genau der Tendenz der Wurzelverteilung, bei welcher die mechanischen Eigenschaften der Wurzeln, wie in Schwarz et al. (2012) erläutert, auch eine wichtige Rolle spielen. Auffallend sind die massiven standörtlichen Unterschiede der Wurzelverstärkung der Fichte. So ist sie in Spisibach und Gantrisch etwa dreimal kleiner als in Schangnau und zeigt in Spisibach die kleinste laterale Ausbreitung (bis etwa 6 m für 0.6 m BHD). Diese Resultate sind insofern wichtig, weil erstmals gezeigt wurde, welchen Einfluss der Standort auf die baumartenspezifische Entwicklung der Wurzelverstärkung hat. Die Resultate zeigen zudem, dass die Unterschiede zwischen den Standorten baumartenspezifisch sind, so dass sich Baumarten unterschiedlich auf demselben Standort entwickeln. Auf den untersuchten Standorten bildet die Buche die besseren Wurzelsysteme - infolge ihrer höheren Anzahl an Wurzeln - zur Verstärkung eines Hanges aus. Folge dieser Erkenntnis könnte

eine eventuelle Anpassung der NaiS-Profile hinsichtlich einer optimalen Schutzwirkung (z.B. Erhöhung des Mischungsanteils der Buche in besonders rutschgefährdeten Hängen) sein.

Der Vergleich dieser Wurzelverstärkungsresultate ist schwierig, weil erst wenige Studien denselben Ansatz (RBM) angewendet haben. Es wurde nachgewiesen, dass das am meisten verwendete Wu-Modell eine Überschätzung der Wurzelverstärkung von bis zu 300% geben kann (Schwarz et al., 2010b; Cohen et al., 2011). Schwarz et al. (2010) zeigen viel höhere Werte der Wurzelverstärkung der Fichte auf einem subalpinen Standort im Lötschental (VS, Schweiz). Die bis zu 60-70 kPa erreichenden Werte resultieren aus einer höheren Anzahl von Fein- und Grobwurzeln, die mit einem Exponent von -0.8 berechnet wurden (siehe Tabelle 3 zum Vergleich). Dieser Wert des Exponenten ist deutlich tiefer als der kalibrierte Exponent dieser Studie. Die Resultate dieser Studie sind vergleichbar mit den berechneten Werten in Schwarz et al. (2010c) für einen Fichtenbestand auf dem Uetliberg (ZH, Schweiz), welche 3 kPa erreichen. Am Uetliberg waren die Anzahl der Feinwurzeln sehr tief (2-10 pro 0.5 m breite Bodenprofil), was die tiefen Werte der Wurzelverstärkung erklärt.

## 6.4 Berechnung der Hangstabilität & Anwendung neuer Beurteilungsmethoden im Feld

In dieser Studie wurden zwei neue Methoden für die Beurteilung und Planung der minimalen Schutzwaldflege in rutschgefährdeten Hängen entwickelt und getestet. Die Variante A in Form von Tabellen wurde mit einem in der Literatur etablierten Ansatz erzeugt. Dieser Ansatz wird als „limit equilibrium approach“ bezeichnet. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die relative Vereinfachung der Berechnungen - auch in drei Dimensionen. Hingegen können durch diese Vereinfachung die genauen Auslösungsmechanismen einer flachgründigen Rutschung nicht berücksichtigt werden. Zudem bietet dieser Ansatz keine detaillierte räumliche Auflösung der Schutzwirkung durch die Wurzelverstärkung, sondern eine generelle Quantifizierung der minimal benötigten Wurzelverstärkung, um einen Hang zu stabilisieren. Die Resultate dieser Studie zeigen, dass es aufgrund dieses Ansatzes möglich ist, eine grobe aber signifikante Erfassung der unterschiedlichen Schutzwirkung des Waldes je nach Baumart und Bestand zu machen. Das bedeutet, dass dieser Ansatz zur Implementierung in Richtlinien wie NaiS (Frehner et al., 2005) geeignet ist, da das minimale und ideale Profil eines Bestandes für viele verschiedene Situationen (Topographie, Gefahrenintensität, usw.) und für spezifische Standorte definiert werden kann.

Weil ein in Entwicklung stehendes, numerisches Modell für die Hangstabilität (SOSlope; Schwarz and Cohen, 2011) so weit entworfen werden konnte, dass erste Simulationen durchgeführt werden konnten (Variante B), wurde dieser neue Ansatz für Schangnau und Spisibach verwendet. Die Resultate dieser numerischen Modellierung lieferten eine detaillierte räumliche Quantifizierung der Wurzelverstärkung und Schutzwirkung auf der Hangskala. Diese Resultate sind in dieser Form weltweit die Ersten und eröffnen einen neuen Ansatz zur Diskussion der Schutzwirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen. Insbesondere wird mit diesem neuen Ansatz die Dynamik der Auslösung von Rutschungen berücksichtigt und dadurch auch die Wirkung der Wurzelverstärkung nicht nur als Erhöhung der Scherfestigkeit, sondern auch als Erhöhung der Zug- und Druckfestigkeit/Steifigkeit der lateral durchwurzelten Bodenelemente einer Rutschung einbezogen. Dieses Modell ist wahrscheinlich der beste erweiterte Ansatz für die realistische Implementierung der Wurzelverstärkung in Hangstabilitätsberechnungen. Es müssen aber auch in diesem erweiterten Ansatz noch viele Aspekte – in erster Linie die Hydrologie - einfließen und validiert werden. Die Anwendung mit SOSlope hat sich für eine detaillierte

Beurteilung der Schutzwirkung und der entsprechenden Berücksichtigung im Entscheidungsprozess der Anzeichnung der Bäume im Feld bewährt.

Es hat sich allgemein ergeben, dass die Tabellen der Variante A als allgemeine Orientierung bezüglich ökologischem und waldbaulichem Potenzial der Schutzwirkung des Waldes dienen und ein möglicher Weg zur Verbesserung der heutigen Richtlinien darstellen. Auf der anderen Seite bietet das SOSlope Modell (Variante B) die Möglichkeit, Karten in Hangskala für eine detaillierte und genauere Quantifizierung der Schutzwirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen für verschiedene Szenarien zu erzeugen. Konkrete Anwendung dafür gäbe es bei der Kosten-Nutzen-Analyse der Schutzwaldflege oder bei der Berücksichtigung der Waldwirkung in Gefahrenkarten.

## 6.5 Praxis-Test

Die numerischen Auswertungen der fiktiven Anzeichnungen zeigen, dass die einzelnen Anzeichnungen in der Gesamtschau (Abbildung 25) stark, teilweise bis zu 60%, voneinander variieren, diese Unterschiede in der Variante „wie bis anhin“ (Abbildung 26 a & Abbildung 27 a) jedoch nicht vorhanden sind. Daraus lässt sich schliessen, dass diese Varianz nicht etwa auf Grund grundsätzlich unterschiedlichem Anzeichnen der einzelnen Teilnehmenden zustande kommt, sondern dass man davon ausgehen kann, dass die verschiedenen Anzeichnungsvarianten anders anzeichnen lassen. Insofern haben die neu ausgearbeiteten Varianten also einen Einfluss auf die gängige Anzeichnungspraxis.

Betrachtet man die Ergebnisse genauer und bringt sie in Bezug zum herrschenden Bestand auf den Testflächen, so werden folgende Punkte deutlich:

- Die nur kleinen Unterschiede der verschiedenen Varianten der Anzeichnungen in den Durchmesserklasse 20-30 cm lassen uns schliessen, dass in diesen hiebsreifen Beständen die neuen Methoden keinen entscheidenden Einfluss auf die Anzeichnung der jüngeren Bäume haben.
- Bei den Anzeichnungen nach Variante A wird vor allem bei den heterogenen Beständen von der Anzeichnungspraxis nach NaiS abgewichen, wie die Resultate von Abbildung 26 b) der Fläche Schangnau und Spisibach zeigen.

Bei Anzeichnungen mit der Variante B wird allgemein von der gängigen Praxis abgewichen. Die Interpretation der Karte aus Variante B lässt also eine grosse Anzeichnungs-Variabilität zu.

## 6.6 Monitoring-System

Die aus diesem Projekt gewonnenen Daten und Erfahrungen erlauben uns, als nächsten Schritt ein längerfristiges „Monitoringkonzept“ zu planen, welches in unterschiedlichsten Bereichen der Forstwissenschaften relevant ist (beispielsweise Waldwachstum, Entwicklung der Waldstruktur, Biomasse-Allokation, Wurzelverteilung usw.). Die im Projekt digitalisierten Waldbestände (georeferenzierte Vollklippierungen) bilden die Basis für ein Monitoring der Waldentwicklung und dessen Schutzwirkung vor und nach waldbaulichen Eingriffen, ähnlich den Weiserflächen im Kanton Bern. Der Bestand in Spisibach wurde bereits 2012 waldbaulich behandelt. In Schangnau wurde im Juni 2013 eingegriffen, weil Holz für die Sanierung der Strassenböschung der Zufahrtsstrasse benötigt wurde. Im Gurnigel ist in den nächsten Jahren ein Eingriff geplant. Damit das

Monitoring ohne allzu grossen Aufwand gewährleistet ist, ist die Einbindung ins kantonale Weisflächennetz anzustreben.

Dazu könnten regelmässig Parameter der Waldstruktur und der Wurzelverteilung in Zeitintervallen von 3 bis 5 Jahren aufgenommen und komplementäre und intensivere Felduntersuchungen implementiert werden, wie zum Beispiel die Analyse des saisonalen Wachstums der Feinwurzeln (zeitliche und räumliche Verteilung der Feinwurzeln) oder die hydrologische Charakterisierung des Bestandes.

## 7 Bedeutung der Resultate und Ausblick

Die Resultate haben zum ersten Mal quantitativ bestätigt, dass ein standortgerechter Waldbau ein gutes Kriterium ist, um die günstigste Wurzelverstärkung bezüglich Rutschungen durch eine standortgerechte Auswahl der Baumartenmischung zu erreichen.

Die Methoden haben sich bewährt; sowohl für eine allgemeine erste Beurteilung (wie im Fall der Tabellen, Variante A), sowie auch für eine detaillierte Beurteilung der Situation im Feld (Karte Schutzwirkung, Variante B). Die Anwendung von numerischen Modellierungen (SOSlope) würde zudem in spezifischen Fällen die Beurteilung der Schutzwirkung für verschiedene Szenarien (Waldstruktur, Baumartenmischung, Niederschlagsintensität) erlauben.

Offene Fragen und mögliche Ansatzpunkte neuer Projekte:

- Schweiz weiter Workshop mit der Praxis: Obwohl sich der für den Kanton Bern organisierte Praxistest sehr bewährt und einen konstruktiven Dialog mit der Praxis gefördert hat, bleibt die Anzahl der durchgeföhrten Beispiele limitiert. Deshalb wäre es interessant, dieselbe Methode auf nationaler Ebene anzuwenden, um aussagekräftigere Resultate zu erhalten. Die Planung eines solchen weiteren Praxistests würde sich im Umfang eines Workshops zum Thema Schutzwald und flachgründige Rutschungen gut erarbeiten lassen.
- Verknüpfung der Resultate mit Erkenntnissen aus der Erforschung der hydrologischen Wirkung: Eine mögliche Erweiterung der Modellansätze für die Hangstabilitätsberechnung liesse sich gut kombinieren mit solchen aus dem Bereich Hochwasserschutz und hydrologische Modellierung. Neue Erkenntnisse aus laufenden Projekten, welche die hydrologische Wirkung der Vegetation quantifizieren, sollen im SOSlope Modell implementiert werden.
- Charakterisierung der Steifigkeit durchwurzelter Böden: Neue Resultate haben gezeigt, dass nebst der Verstärkung der Wurzel unter Zug- oder Scherbelastungen auch die erhöhte Steifigkeit des Bodens durch Wurzeln eine wichtige Rolle in der Auslösung flachgründiger Rutschungen spielt. Erkenntnisse aus neuen Projekten in diesem Bereich (zum Beispiel Projekt CoRoS, Schwarz et al., in preparation) werden laufend in das Modell SOSlope eingebunden.
- Waldwachstum und Wurzelverteilung: In Zusammenarbeit mit anderen Institutionen und Forschungsgruppen (Uni Mailand, Uni Sassari) wird im Moment die zeitliche Entwicklung der Wurzelverteilung nach waldbaulichen Eingriffen untersucht. Weitere Projekte sollen diese Informationen mit einem Waldwachstumsmodell kombinieren, um die zeitliche und räumliche Verteilung der Wurzelverstärkung zu quantifizieren.

- Untersuchungen anderer Baumarten mit grosser Bedeutung für Hangstabilisierung (Bergahorn, Esche, Grünerle, Weisserle): Die in diesem Projekt entwickelte Methode könnte für andere Baumarten getestet werden, etwa für Bergahorn, Esche, Grünerle oder Weisserle. Diese sind zwar weniger verbreitet als die im vorliegenden Projekt untersuchten Arten, kommen aber oft in rutschgefährdeten Hängen vor.
- Erarbeitung der minimalen Stammzahl- und Abstandstabelle (Variante A) für die wichtigsten potentiellen NaiS-Hauptstandorte, auf denen flachgründige Rutschungen vorkommen können. Dadurch ergäben sich neue Anforderungsprofile für flachgründige Rutschungen je nach Standort (unter dem Motto: „nicht alle Wälder schützen gleich gegen flachgründige Rutschungen) in NaiS: Wenn man im Minimal-Profil die Erreichung eines Minimums von 2kPa lateraler Wurzelverstärkung innerhalb des Bestandes definiert, dann gibt es verschiedene Kombinationen des Standortes, der Baumartenmischung und der Waldstruktur, um dieses minimale Profil zu erreichen.
- Grossfläche Anwendung des Modells SOSlope (Variante B) über ganze Gebiete, die potentiell rutschgefährdet sind. Verknüpfung mit den Rutschungssimulationen von Silvaproject.

## 8 Literatur

AMMER C. und WAGNER S. (2005): «An approach for modelling the mean fine-root biomass of Norway spruce stands», *Trees* 19: 145-153.

BATHURST J. C., MORETTI G., EL-HAMES A., BEGUERIA S. and GARCIA-RUIZ J. M. (2007): «Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment», Spanish Pyrenees, *Hydrology and Earth System Science*, 11(1), 569 - 583.

BRÄNDLI U.-B. (Red.) (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU. 312 S.

BISCHETTI G.B., CHIARADIA E. A., LIMONATO T., SPEZIALI B., VITALI P., VULLO P. and ZOCCHI A. (2005): «Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)», *Plant and Soil*, 278, 11-22.

COHEN D., SCHWARZ M. and OR D. (2011): «An analytical fiber bundle model for pullout of root bundles», *J. Geophys. Res.*, 116, F03010, doi: 10.1029/2010JF001886.

DUPUY L., FOURCAUD T. and STOKES A. (2005): «A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension», *European Journal of Soil Science*, 56, 319-327.

ENNOS A. R. (1990): «The anchorage of leek seedlings: the effect of root length and soil strength», *Annals of Botany*, 65, 409-416.

EKANAYAKE J. C. and PHILLIPS C. J. (1999): «A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach», *Can. Geotech. J.*, 36, 1172-1184.

FREHNER M., SCHWITTER R., WASSER B. (2005) : «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion», Herausgeber: BAFU.

GAITNIEKS T. (2006): «Vitality of Norway spruce fine roots in stands infected by *Heterobasidion annosum*», <http://www.skogoglandskap.no/filearchive/talisa-2006-1.pdf>, 25.2.2013.

GENET M., KOKUTSE N., STOKES A., FOURCAUD T., CAI X., JI J. and MICKOVSKI S. B. (2008): «Root reinforcement in plantation of Cryptomeria japonica D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability», Forest Ecology and Management, 256, 1517 - 1526.

GIADROSSICH F., SCHWARZ M., PRETI F., OR D. (2012): «Mechanical interaction between neighbors roots during pullout tests», Plant and Soil, DOI 10.1007/s11104-012-1475-1.

GODBOLD D. L., FRITZ H.-W., JENTSCHKE G., MEESENBURG H. and RADEMACHER P. (2003) «Root turnover of root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity», Tree Physiology, 23, 915 - 921.

HALES T. C., FORD C. R., HWANG T., VOSE J. M. and BAND L. E. (2009): «Topographic and ecologic controls on root reinforcement», Journal of Geophysical Research, 114, F03013.

HERGARTEN S. (2003) «Landslides, sandpiles, and self-organised criticality». Natural Hazards and Earth System Sciences, 3: 505514, European Geosciences Union.

KOKUTSE N., FOURCAUD T., KOKOU K., NEGLO K. and LAC P. (2006): «3D Numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability». In: Marui, H., Marutani, T., Watanabe, N., Kawabe, H., Gonda, Y., Kimura, M., Ochiai, H., Ogawa, K., Fiebiger, G., Heumader, J., Rudolf-Miklau, F., Kienholz, H., Mikos, M., (Eds), Interpraevent 2006, Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, 2527 September, 2006, Niigata, Japan. Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan, ISBN 4-946443-98-3, pp. 561 - 567.

LAWRENCE D. J., LUCKAI N., MEYER W. L., SHAHI C., FAZEKAS A. J., KESANAKURTI P. and NEWMASTER S. (2012): «Distribution of white spruce lateral fine roots as affected by the presence of trembling aspen: root mapping using simple sequence repeat DNA profiling», Canadian Journal of Forest Research, 42 (8), 1566-1576.

LEI P., SCHERER-LORENZEN M. and BAUHUS J. (2012): «The effect of tree species diversity on fine-root production in a young temperate forest», Oecologia, 169, 1105-1115.

LOSEY, S. und WEHRLI, A. (2013): Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. p. 29 und Anhänge. Bundesamt für Umwelt, Bern.

MAO Z., JOURDAN C., BONIS M. L., PAILLER F., REY H., SAINT-ANDRE' L. and STOKES A. (2013): «Modelling root demography in heterogeneous mountain forests and applications for slope stability analysis», Plant and Soil, 363, 357-382.

MICKOVSKI S. B., BENGOUGH A. G., BRANSBY M. F., DAVIES M. C. R., HALLET P. D. and SONNENBERG R. (2007): «Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems», European Journal of Soil Science, 58: 1471-1481.

MONTGOMERY D. R. and DIETRICH W. E. (1994): «A physical based model for the topographic control on shallow landsliding», Water Resources Research, 30, 1153-1171.

PATRITAN I. C., von Lupke B. and Petritan A. M. (2011): «Fine roots of overstory Norway spruce (*Picea abies*): distribution and influence on growth of underplanted beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings», *Forest System*, 20(3), 407-419.

PERSSON H. and STADENBERG I. (2010): «Fine root dynamics in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forest in eastern Sweden», *Plant Soil* 330, 320-344.

POLLEN N. and SIMON A. (2005): «Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model», *Water Resources Research*, 41, w07025.

PUHE J. (2003): «Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands – a review», *Forest Ecology and Management*, 175, 253-273.

RAUCH-SCHWEGLER T. (1994): «Wie viel ist der Schweizer Wald wert?», *Kapital Wald*. BU-WAL, Zürich, 26 S.

RENEAU S. L. and DIETRICH W. E. (1987): «Size and location of colluvial landslides in a steep forested landscape. In Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim», *Proceedings of the Corvallis Symposium*, August 1987, IAHS Publication, 165, 39-48.

RICKLI C. und GRAF F. (2009): «Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland», *For. Snow Landsc. Res.*, 82 (1): 33-44.

RICKLI C., ZÜRCHER K., FREY W., LÜSCHER P. (2002): «Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse», *Schweiz. Z. Forstwes.* 153 (2002) 11: 437– 445.

ROERING J.J., SCHMIDT M., STOCK J.D., DIETRICH W.E. and MONTGOMERY D.R. (2003): «Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range», *Can. Geotech. J.*, 40: 237–253.

SAKALS M. E. and SIDLE R. C. (2004): «A spatial and temporal model of root cohesion in forest soils», *Can. J. For. Res.*, 34, 950 - 958.

SCHMIDT K.M., ROERING J.J., STOCK J.D., DIETRICH W.E., MONTGOMERY D.R. and SCHAUB T. (2001): «The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range», *Can. Geotech. J.*, 38, 995-1024.

SCHWARZ M., RIST A., EGOROV, P., STOLZ, M. and THORMANN J.J (in preparation): Analysis of compressed rooted soil behaviors as key factor for the triggering of shallow landslides, *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, in preparation.

SCHWARZ M. und THORMANN J.J (2012): «Neue Ansätze zur Quantifizierung der Schutzwaldwirkung», *Geosciences*, 2/2012, 26-29.

SCHWARZ M., THORMANN J.J, ZÜRCHER K. und FELLER K. (2012c): «Quantifying root reinforcement in protection forests: implications for slope stability and forest management», 12<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble/France Conference Proceedings.

SCHWARZ M., GÜNTER M., FELLER K. und THORMANN J.J. (2012b): «Einsatz der Fernerkundung zur Erfassung der Schutzwirkung des Waldes gegenüber Rutschungen», *Geosummit Congress 2012*, Bern, Conference Proceedings.

SCHWARZ M., COHEN D. and OR D. (2012a): «Spatial Characterization of Root Reinforcement at Stand Scale: Theory and Case Study», *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.020.

SCHWARZ M. and COHEN D. (2011): «Influence of root distribution and compressibility of rooted soil on the triggering mechanism of shallow landslides», *Geophysical Reserach Abstracts*, 13, EGU2011-4817, EGU General Assembly 2011.

SCHWARZ M., COHEN D. and OR D. (2011): «Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil - experiments and modeling», *J. Geophys. Res.*, 116, F02007, doi:10.1029/2010JF001753.

SCHWARZ M., COHEN D. and OR D. (2010c): «Soil-root mechanical interactions during pullout and failure of root bundles», *J. Geophys. Res.*, 115, F04035, doi: 10.1029/2009JF001603.

SCHWARZ M., LEHMANN P. and OR D. (2010b): «Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes - from a bundle of roots to tree stands», *Earth Surface Processes and Landform*, 35(3), 354-367. doi: 10.1002/esp.1927.

SCHWARZ M., PRETI F., GIADROSSICH F., LEHMANN P. and OR D. (2010a): «Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)», *Ecological Engineering*, 36, 285 - 291.

SIDLE R. C. and WU W. (2001): «of the temporal and spatial impacts of timber harvesting on landslide occurrence», *Water Science and Application*, 2, 179 - 193.

SIMONI S., ZANOTTI F., BERTOLDI G. and RIGON R. (2007): «Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTop-FS», *Hydrological Processes*, 22, 532 - 545.

THOMAS R.E. and POLLEN-BANKHEAD N. (2010): «Modeling root-reinforcement with a fiber-bundle model and Monte Carlo simulation», *Ecol. Eng.*, 36, 47-61, doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.09.008.

WALDRON L. J. and DAKESSIAN S. (1981): «Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties», *Soil Science*, 132, 427–435.

WU T. H., MCKINNELL W. P. and SWANSTON D. N. (1979): «Strength of tree roots and landslides on Price of Wales Island, Alaska», *Can. Geotech. J.*, 16, 19-33.

ZHOU Y., WATTS D., LI Y. and CHENG X. (1998): «A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil», *Forest Ecology and Management*, 103, 107-120.

## 9 Anhang

Anhang 1: Anzeichnungsformular

Anhang 2: Fotodokumentation Versuchsflächen

Anhang 3: Publikationen