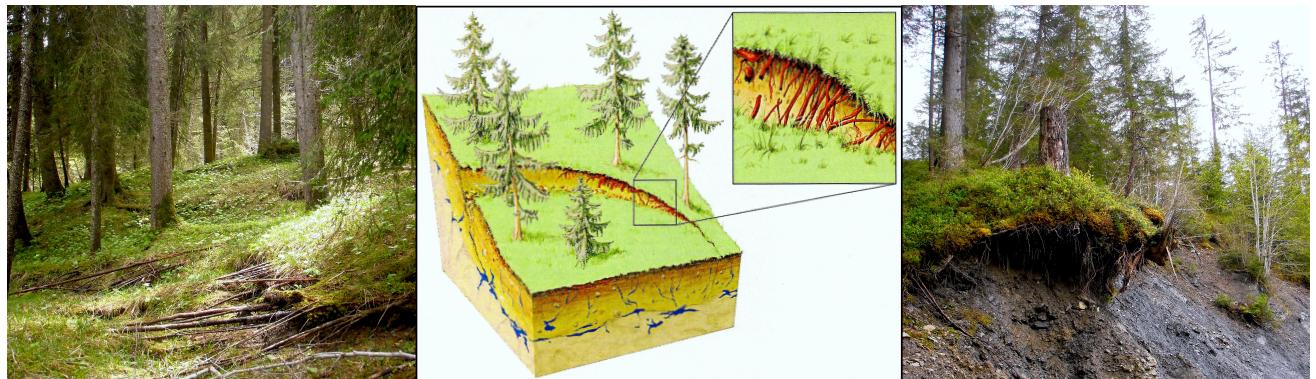


Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald

Bachelor Thesis BSc in Forstwirtschaft



Josias R. Mattli
BSc in Forstwirtschaft
Gebirgswald und Naturgefahren
HAFL Zollikofen

Bern, den 08. August 2014
vorgelegt bei Dr. Massimiliano Schwarz



Berner Fachhochschule

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften

Selbstständigkeitserklärung

Durch meine Unterschrift erkläre ich, dass

- ich den „Verhaltenskodex HAFL zur Verwendung von Informationsquellen“ kenne und mir die Konsequenzen bei dessen Nichtbeachtung bekannt sind,
- ich diese Arbeit in Übereinstimmung mit diesen Grundsätzen erstellt habe,
- ich diese Arbeit persönlich und selbstständig erstellt habe.

Ort, Datum

Unterschrift



Berner Fachhochschule



Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften

Mitteilung über die Verwendung von Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten der Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften HAFL

Alle Rechte an Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL sind im Besitz des/der Verfasser/in der Arbeit. Die HAFL geniesst jedoch ein kostenloses, unbefristetes, nicht-exklusives Nutzungsrecht an den Arbeiten ihrer Studierenden.

Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten sind Bestandteile des Ausbildungsprogramms und werden von den Studierenden selbstständig verfasst. Die HAFL übernimmt keine Verantwortung für eventuelle Fehler in diesen Arbeiten und haftet nicht für möglicherweise daraus entstehende Schäden

Zollikofen, Mai 2011

Der Direktor



Haute école spécialisée bernoise



Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires

Avis concernant l'utilisation des travaux de semestre, de bachelor et de minor issus de la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL

Tous les droits relatifs aux travaux de semestre, de bachelor ou de minor sont propriété de l'auteur-e. Cependant, la HAFL détient, à titre non exclusif, un droit d'usage gratuit et non limité dans le temps.

Les travaux de semestre, de bachelor et de minor font partie du programme de formation de la HAFL et sont rédigés par les étudiant-e-s de manière autonome. L'école ne se porte pas garante du contenu des travaux, susceptibles de contenir des erreurs, et ne répond pas des dommages que celles-ci pourraient éventuellement entraîner.

Zollikofen, mai 2011

La Direction

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	7
Abstract	9
1 Einleitung	11
2 Stand der Forschung	12
2.1 Schutzwald und Naturgefahren.....	12
2.1.1 Bedeutung des Schutzwaldes in der Schweiz.....	12
2.1.2 Beurteilung der Schutzfunktion gegen Naturgefahren.....	12
2.2 Erosion und Rutschungen.....	13
2.2.1 Natürliche Faktoren, welche Rutschungen beeinflussen.....	14
2.3 Vegetationswirkung und Rutschungen.....	16
2.3.1 Waldwirkung auf rutschgefährdete Hänge.....	17
2.3.2 Waldnutzung.....	21
2.4 Quantifizierung der Wurzelverstärkung.....	23
3 Material und Methoden	26
3.1 Feldaufnahmen.....	26
3.1.1 Untersuchungsfläche und Aufnahmestandort.....	26
3.1.2 Feldarbeit.....	29
3.2 Modellierung.....	31
3.2.1 Wurzel Geometrie und Mechanik.....	31
3.2.2 Weibull Überlebensfunktion für Wurzeln.....	32
3.2.3 Wurzelbündel-Verstärkung.....	32
3.3 Grundlagen für die Berechnung der Wurzelverstärkung.....	34
3.3.1 Relevante Wurzeleigenschaften.....	34
3.3.2 Wurzelverteilungsmodell.....	36
3.4 Aufskalierung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene.....	37
3.4.1 Datenauswertung früherer Feldaufnahmen.....	37
3.4.2 Auswertungen mit Slidefor ^{NET}	38
4 Resultate	38
4.1 Untersuchte Bäume.....	38
4.2 Wurzelverteilung.....	39
4.2.1 Gemessene Wurzelverteilung.....	39
4.2.2 Modellierte Wurzelverteilung.....	40
4.3 Wurzelverstärkung.....	41

4.3.1	Wurzelverstärkung individueller Wurzeln.....	41
4.3.2	Wurzelverstärkung von (gemessenen) Wurzelbündel.....	42
4.4	Aufskalierung der Wurzelverstärkung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene..	43
4.4.1	Rückschlüsse für die Bestandesebene durch Kraft-Abstands-Diagramme.	43
4.4.2	Praxisorientierte Tabellen zur Abschätzung der Wurzelverstärkung.....	44
4.4.3	Datenauswertung früherer Feldaufnahmen.....	46
4.5	Auswertungen mit Slidefor ^{NET} zur Sensibilitätsanalyse der Hangstabilität.....	47
4.5.1	Situation im untersuchten Teil des Rotwalds.....	47
4.5.2	Hypothetische Situationen in flacherem und steilerem Gelände.....	48
5	Diskussion.....	49
5.1	Untersuchte Bäume.....	49
5.2	Wurzelverteilung.....	50
5.2.1	Gemessene Wurzelverteilung.....	51
5.2.2	Modellierte Wurzelverteilung.....	53
5.3	Wurzelverstärkung.....	55
5.3.1	Wurzelverstärkung individueller Wurzeln.....	56
5.3.2	Wurzelverstärkung von (gemessenen) Wurzelbündel.....	57
5.4	Aufskalierung der Wurzelverstärkung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene..	60
5.4.1	Rückschlüsse für die Bestandesebene durch Kraft-Abstands-Diagramme.	60
5.4.2	Praxisorientierte Tabellen zur Abschätzung der Wurzelverstärkung.....	63
5.4.3	Datenauswertung früherer Feldaufnahmen.....	65
5.5	Auswertungen mit Slidefor ^{NET} zur Sensibilitätsanalyse der Hangstabilität.....	67
5.5.1	Situation im untersuchten Teil des Rotwalds.....	67
5.5.2	Situation in flacherem und steilerem Gelände.....	67
5.6	Weitere Aspekte.....	68
5.6.1	Vorgaben aus NaiS.....	68
5.6.2	Waldweide.....	70
5.6.3	Waldbauliche Eingriffe.....	72
6	Schlussfolgerungen.....	74
7	Dank.....	75
8	Literaturverzeichnis.....	76

Anhang (digital)

Abkürzungsverzeichnis

AWN:	Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Graubünden
BAFU:	Bundesamt für Umwelt
BHD:	Durchmesser des Baumstammes auf Brusthöhe (1.3 m)
DG:	Deckungsgrad (durch Kronenprojektion des Baumes abgedeckte Bodenfläche)
E-modul:	Elastizitätsmodul (auch Young's modulus; nach Thomas Young)
FBM:	Faserbündel-Modell (fibre bundle model nach Pollen und Simon 2005)
FRB:	Feinwurzelbiomasse (fine-root biomass)
HAFL:	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften
IRM:	Integrales Risikomanagement
KWaV:	Kantonale Waldverordnung vom 03. Dezember 2012 (Stand 01.01.2013) des Kantons Graubünden (KWaV-GR; BR 920.110)
NaiS:	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (Frehner et al. 2005)
R:	R-Software (Quelle: The R Foundation for Statistical Computing, 2012. http://www.R-project.org)
RBM:	Root Bundle Model (nach Schwarz et al. 2010b)
RBMw:	Erweiterung des RBM mit der Weibull Überlebensfunktion (Schwarz et al. 2013)
SLF:	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos (WSL-Institut)
St/ha:	Stammzahl pro Hektar
WaG:	Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 (Stand am 01.01.2008) über den Wald (WaG; SR 921.0)
WSL:	Eidg. Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Zusammenfassung von Charakteristiken der sieben untersuchten Bäume
- Tab. 2: Stammzahlen, Baumabstände und Deckungsgrade verschiedener Wurzelverstärkungen und BHD
- Tab. 3: Minimale Stammzahl pro Hektar mit entsprechenden Baumabständen für verschiedene BHD und Deckungsgrade
- Tab. 4: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (29°)
- Tab. 5: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (24°)
- Tab. 6: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (34°)
- Tab. 7: Unterschiede der Mittelwerte der Wurzelbündelkräfte bis 5 mm Durchmesser

Abbildungsverzeichnis

- Titelbl.: links: Gschwändwald, Unteriberg (SZ); mittig: Wurzelverstärkung (Quelle: Rüdy (ohne Datum); abgebildet in Schwarz et al. 2010a, 355); rechts: Wärgistal, Grindelwald (BE)

- Abb. 1: Entstehung einer Rutschung mit möglichem Schadenpotential (Quelle: Rüdy 2013)
- Abb. 2: Rutschaktivität in Sachseln (OW) im Sommer 1997 (Quelle: Frehner et al. 2005, Anhang 1, 10)
- Abb. 3: Waldwirkung, gezeigt an der verminderten Rutschaktivität gegenüber Freiland (Quelle: Phillips (ohne Datum); abgebildet in Schwarz und Thormann 2008, 27)
- Abb. 4: Verlauf der Wurzelverstärkung in einer Fläche nach einem Kahlschlag (Quelle: Sidle und Ochiai 2006, 95)
- Abb. 5: Erhöhte Wurzelverstärkung oberhalb des Rutschansisses, nahe des Wärgistalbaches (Grindelwald (BE))
- Abb. 6: Wurzelarmierung in Anriss (Quelle: Hunziker (ohne Datum); abgebildet in Schwarz und Thormann 2008, 27)
- Abb. 7: Rutsch innerhalb einer Waldlücke im beweideten Rotwald, St. Antönien (GR) (Quelle: Rickli et al. 2008, 41)
- Abb. 8: Progressives Wurzelversagen (Quelle: Rüdy (ohne Datum); abgebildet in Schwarz et al. 2010b, 3)
- Abb. 9: Karten- und Luftbildausschnitt der Lage der untersuchten Bäume in St. Antönien (GR) (Quelle: swisstopo 2014)
- Abb. 10: Rutschungen im Rotwald (St. Antönien), Hochwasserereignis im August 2005 (Quelle: Rickli et al. 2008, 90)
- Abb. 11: Thematische Besichtigung von Rutschflächen im Rotwald (F. Caflisch, P. Bebi, M. Schwarz, C. Cicigoi v. l.)
- Abb. 12: Grabarbeiten in Zweierteams pro Baum und Bodenprofil (M. Schwarz und F. Caflisch v. l.)
- Abb. 13: Abnehmende Wurzelanzahl mit zunehmender Wurzeldurchmesserkategorie (Quelle: Caflisch 2014, verändert)
- Abb. 14: Boxplots der Wurzelanzahl bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen untersuchten Profile
- Abb. 15: Modellierte Wurzelanzahl verschiedener BHD mit zunehmender Distanz vom Baum weg; links 5 mm, rechts 15 mm Ø
- Abb. 16: Zugkräfte individueller Wurzeln; links bis 5 mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser
- Abb. 17: Zugkräfte in verschiedenen Profilen für 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser
- Abb. 18: Boxplots der Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen untersuchten Profile
- Abb. 19: Modellierte Wurzelbündelkraft mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg; links 5 mm, rechts 15 mm Ø
- Abb. 20: Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen berücksichtigten Rutsch- und Kontrollflächen
- Abb. 21: Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser der Auswahl an sieben Rutsch- und Kontrollflächen
- Abb. 22: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (29°)
- Abb. 23: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (24°)
- Abb. 24: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (34°)
- Abb. 25: Wurzelanzahl jedes Baumes pro Profil; links bis 5 mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser
- Abb. 26: Wurzelanzahl aus der Modellierung sowie die gemessenen Werte für Baum 2 und 3 auf verschiedenen Distanzen
- Abb. 27: Maximale Wurzelverstärkung jedes Baumes pro Profil; links bis 5 mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser
- Abb. 28: Wurzelbündelkraft der Modellierung sowie die gemessenen Werte für Baum 2 und 3 auf verschiedenen Distanzen
- Abb. 29: Effizienz der Waldwirkung in Form der Wurzelverstärkung in Abhängigkeit der Hangneigung

Abstract

MATTLI, Josias R.: Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Abschätzung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Dabei geht es grundsätzlich um eine quantitative Beurteilungsmöglichkeit des Beitrags forstlicher Vegetation (Bäume) an die stabilisierende Wirkung in einem rutschgefährdeten Hang. Diese kommt einerseits durch eine hydrologische, andererseits durch eine mechanische Komponente zum Ausdruck. Da bei flachgründigen Rutschungen v. a. die mechanische Wirkung durch die Wurzelarmierung des Bodens bedeutend ist, wurden Untersuchungen bei Wurzelsystemen von sieben Fichten (*Picea abies*) in einem subalpinen Schutzwald mit Waldweidebewirtschaftung auf dem Gemeindegebiet von St. Antonien (Prättigau, GR) ausgeführt. Dabei wurden Bodenprofile ausgehoben, um die Durchmesser der Wurzeln und deren laterale Verteilung innerhalb des Bodens zu vermessen, wodurch Rückschlüsse auf die Wurzelverstärkung gewonnen werden konnten.

Die erhobenen Daten wurden in ein digitales Modell zur Quantifizierung der Wurzelverstärkung (RBMw) implementiert, um diese daraus zu berechnen. Es resultierten Angaben zu den Zugkräften von Einzelwurzeln und durch deren Aufsummierung, Ergebnisse zu Wurzelverstärkungen von ganzen Wurzelbündeln. Diese wurden in Zusammenhang mit einfachen Bestandesparametern (Baumabstand, Stamzahl pro Hektar, Deckungsgrad) gebracht, um Aussagen zur Waldwirkung gegen flachgründige Rutschungen und zur Schutzwaldbewirtschaftung machen zu können.

Die Resultate zeigen, dass die Waldbestockung im Rotwald bei entsprechend gutem Zustand, passender Entwicklungsstufe und Bestandesdichte einen wesentlichen Beitrag zur Senkung der Gefährdung vor flachgründigen Rutschungen erbringen kann, was v. a. durch die laterale Wurzelverstärkung geschieht. Diese nimmt mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg ab wie auch die durchschnittliche Wurzelanzahl und der durchschnittliche Wurzeldurchmesser. Die Wurzelverteilung sowie die Wurzelverstärkung zeigen, selbst auf gleicher Distanz vom Baumstamm entfernt eine relativ hohe Variabilität: Die Wurzelanzahl auf 1.5 m Distanz kann zwischen rund 100 - 250 Wurzeln variieren, die entsprechenden Wurzelverstärkungen für Wurzeldurchmesser bis 5 mm zwischen rund 1.7 - 4.5 kPa, je nach Wurzeldurchmesserverteilung.

Bestandeslücken werden mit steigender Grösse zunehmend problematisch für die Schutzfunktion des Waldes gegen flachgründige Rutschungen. Deshalb kann die andauernde Beweidung im Wald beeinträchtigend auf die Schutzfunktion gegen flachgründige Rutschungen wirken. Dies kommt durch Verbisschäden an der Verjüngung, Bodenverdichtung durch Viehtritte und Nährstoffeintrag durch Kuhdung zum Ausdruck. Dadurch können mehr und grössere Bestandeslücken entstehen, was durch eine geringere (laterale) Durchwurzelung des Bodens zu Rutschrissen führen kann.

Eine Schutzwirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen ist aber nur dann möglich, wenn die topologischen (Hangneigung) und pedologischen Bedingungen überhaupt eine entsprechende Wirkung auf die Hänge erlauben.

Keywords: root reinforcement, root bundle model, protection forest, slope stability, shallow landslides

1 Einleitung

Durch die topographischen Verhältnisse in der schweizerischen Gebirgslandschaft besteht eine grundsätzliche Gefährdung von Mensch, erheblichen Sachgütern und Infrastruktur. Neben rein gravitativen und hydrologischen Naturgefahrenprozesse stellen auch rutschgefährdete Hänge ein Gefährdungspotenzial dar. Der Wald als grossflächiges Landschaftselement kann dabei gleichzeitig vor verschiedenen Naturgefahren schützen (BAFU 2013a), u. a. auch vor Rutschprozessen. Die Erschliessungsmöglichkeiten der Wurzeln im Boden sind aber begrenzt und erlauben nur gegen flachgründige Rutschungen eine stützende Wirkung durch die mechanische Bodenarmierung. Trotzdem zeigen die rund 27 % aller Schutzwälder, welche rund die Hälfte des Schweizer Waldes ausmachen, die hohe Bedeutung der Schutzwälder gegen Rutschprozesse auf (Losey und Wehrli 2013, 24ff).

Diese Zahlen verdeutlichen auch die Wichtigkeit deren Beurteilung, wobei bis anhin v. a. qualitative Merkmale bestimmen waren („*Wald ist besser als kein Wald*“). Es wäre aber wichtig, die Schutzwirkung genau(er) bestimmen zu können. Dafür ist es aber nötig, das Wissen über Rutschprozesse an sich, aber auch jenes über die Vegetationswirkung (Wald) zukünftig noch zu verfeinern. Damit soll eine effektive und effiziente Schutzwaldbewirtschaftung innerhalb der Naturgefahrenabwehr und dem Integralen Risikomanagement (IRM) mit einem optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnis möglich werden.

Forstliche Vegetation spielt eine wichtige Rolle gegen flachgründige Rutschungen, indem sie die Hangstabilität durch komplexe Prozessinteraktionen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen verbessert. Die mechanischen Effekte der Wurzelverstärkung werden als einer der wichtigsten Faktoren betrachtet, welche die Stabilität bewachsener Hänge fördert. Deren Abschätzung ist wegen der räumlichen Variabilität der Wurzelverteilung und der mechanischen Wurzeleigenschaften jedoch noch immer herausfordernd (Vergani et al. 2014, 3; Schwarz et al. 2013, 4367).

Für die vorliegende Arbeit erfolgten Untersuchungen an sieben subalpinen Fichten (*Picea abies*) in St. Antönien (Prättigau, GR), wobei deren Wurzelverteilungen auf verschiedenen Distanzen aufgenommen wurden, um mithilfe von Modellierungen Rückschlüsse auf die Wurzelverstärkung machen zu können. Die quantifizierten Wurzelverteilungen und -verstärkungen wurden für zwei verschiedene Spektren von Wurzeldurchmesserklassen (bis 5 mm und bis 15 mm) gezeigt und verglichen. Weiter wurden Datenerhebungen zur Rutschaktivität aus demselben Untersuchungsperimeter (Moos 2014, unveröffentlicht) ausgewertet und Berechnungen mit einem Teiltool aus Slidefor^{NET} (Schwarz 2014b) durchgeführt, um die grundsätzlich mögliche Waldwirkung für die lokalen Verhältnisse zu quantifizieren. So mit bewegt sich die Arbeit in den betrachteten Skalen von Einzelwurzeln bis zur Bestandesebene, woraus praxisorientierte Tabellen als Rückschlüsse für die Schutzwaldbewirtschaftung erstellt wurden. Folgende Fragestellungen bildeten das Grundgerüst der vorliegenden Arbeit:

- *Wie ist die räumliche Wurzelverteilung der Fichte an diesem spezifischen Standort und wie viel beträgt die berechnete Wurzelverstärkung?*
- *Welchen Einfluss hat die Wurzelverstärkung im Zusammenhang mit der Waldstruktur auf die Schutzwirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen?*
- *Welche Schlüsse lassen sich aus der Modellierung für das waldbauliche Handeln im Schutzwald ziehen?*

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die bisherigen Erkenntnisse und der aktuelle Stand der Wissenschaft wiedergegeben, wobei deren Synthese aufbauend vom Schutzwald über den Naturgefahrenprozess der flachgründigen Rutschung bis hin zur Wirkung der Wurzelverstärkung erläutert wird.

2.1 Schutzwald und Naturgefahren

Wie wichtig die Funktion der Schutzwälder gegen Naturgefahren ist, wird nachfolgend erörtert.

2.1.1 Bedeutung des Schutzwaldes in der Schweiz

Die Definition des Schutzwaldes wurde auf Anregung der Konferenz der Kantonsoberförster laut Losey und Wehrli (2013, 5) folgendermassen formuliert: „*Ein Schutzwald ist ein Wald, der ein anerkanntes Schadenpotenzial gegen eine bestehende Naturgefahr schützen oder die damit verbundene Risiken reduzieren kann.*“

Laut dem LFI (2012) sind rund 31,8 % bzw. 1,313 Mio. ha der Schweizer Fläche mit Wald bedeckt. Somit bildet der Wald ein grossflächiges Element der Landschaft und besitzt u. a. eine wichtige Schutzfunktion vor Naturgefahrenprozessen (Losey und Wehrli 2013, 5). Laut dem Bundesamt für Umwelt (BAFU; 2013a) verfügen 49 % des Schweizer Waldes über eine solche Schutzfunktion, wobei der Anteil pro Kanton sehr unterschiedlich, in Gebirgsregionen aber tendenziell höher ist (Losey und Wehrli 2013, 26).

Die Rolle des Schutzwaldes im IRM ist zentral. Die Schutzwirkung des Waldes als eine „Ökosystemdienstleistung“ ist aber abhängig vom Waldzustand und muss nachhaltig gesichert werden. Der Wald ist jedoch ein dynamisches System und kann nur bedingt und nur durch eine effektive Pflege in einem bestimmten Zustand gehalten werden. Die Wegleitung „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald“ (NaiS; Frehner et al. 2005) dient dem BAFU daher zur Qualitätssicherung der Schutzwaldbewirtschaftung (Losey und Wehrli 2013, 26f).

Nach NaiS gilt die Annahme, dass die Schutzwirkung dann maximiert werden kann, wenn der Wald möglichst seinem standortgerechten Optimalzustand (u. a. Baumartenmischung, Waldstruktur und Verjüngungssituation) entspricht. Daher definiert NaiS Anforderungsprofile bezüglich Waldstandort und Naturgefahr, nach welchen die Schutzwaldpflege erfolgen soll, womit eine nachhaltige Schutzwirkung erreicht und erhalten werden kann (Rickli et al. 2002, 438).

2.1.2 Beurteilung der Schutzfunktion gegen Naturgefahren

Die Wirkung von Schutzwäldern konnte durch die komplexen Interaktionen zwischen Vegetation und Naturgefahrenprozesse bis anhin v. a. qualitativ bewertet werden. Für die Schutzwaldbewirtschaftung wäre es jedoch praktikabel, die Schutzwirkung des Waldes gegenüber der vorhandenen Naturgefahr quantifizieren zu können (Schwarz und Thormann 2012, 26). Bei den v. a. gravitativ geprägten

Gefahrenprozesse wie Lawinen und Steinschlag ist die quantitative Beurteilung innerhalb des Naturgefahrenmanagements in der Schweiz schon weit fortgeschritten. Die Quantifizierung der Rutsch- und Hochwasserprozesse unterliegt einer viel komplexeren Thematik, da neben dem starken Witterungseinfluss (ebd.) (v. a. das Niederschlagsregime; räumliche und zeitliche Verteilung sowie Intensität der Niederschlagsmenge (Bider und Thams 1951, 1)) viele verschiedene Faktoren ebenfalls stark auf die Entwicklung der Prozesse einwirken, womit sich die Schutzwirkung ständig ändern kann.

Der minimal zu erhaltende Waldzustand wird innerhalb von NaiS festgehalten, jedoch ist die Schutzwirkung des Waldes und eine nachvollziehbare Quantifizierung bei Rutschprozessen wegen teilweise noch fehlender wissenschaftlicher Kenntnisse schwierig zu formulieren. Die Entscheidungen werden deshalb oft nach qualitativen Kriterien gefällt, welche demnach nicht zu quantifizieren sind (Schwarz und Thormann 2012, 26).

2.2 Erosion und Rutschungen

Rutschungen sind bedeutende natürliche geomorphologische Prozesse, welche Gebirgsräume formen und Sedimente in flacheres Terrain umverteilen. Das geschichtliche, momentane und auch zukünftige „Aussehen“ der Erdoberfläche ist massgeblich durch Rutschaktivitäten beeinflusst und kann im Bereich von menschlicher Anwesenheit (Siedlung, Infrastruktur etc.) als potielles Schadenzpotential zu natürlichen Unglücksfällen und Katastrophen führen. Zusätzlich hat die anthropogene Aktivität einen Einfluss auf das räumliche und zeitliche Auftreten v. a. von flachgründigen Rutschungen (Landnutzung; bspw. Bauaktivität, Waldweiden etc.) (Abb. 1 und 2).

Rutschungen bezeichnen eine grosse Varietät von Prozessen, welche aus einer gravitativen Bewegung von unterschiedlichem Erdmaterial (Steine, Erde, Auflage) in unterschiedlichen Dimensionen besteht. Dabei ist die Gravitation der primär treibende Faktor, wobei Wasser immer zwingend mitwirkt. Wasser als treibende oder transportierende Kraft unterscheidet Rutschungen somit auch von anderen erodierenden Oberflächenprozessen (Sidle und Ochiai 2006, 1).



Abb. 1: Entstehung einer Rutschung mit möglichem Schadenpotential (Quelle: Rüdy 2013)

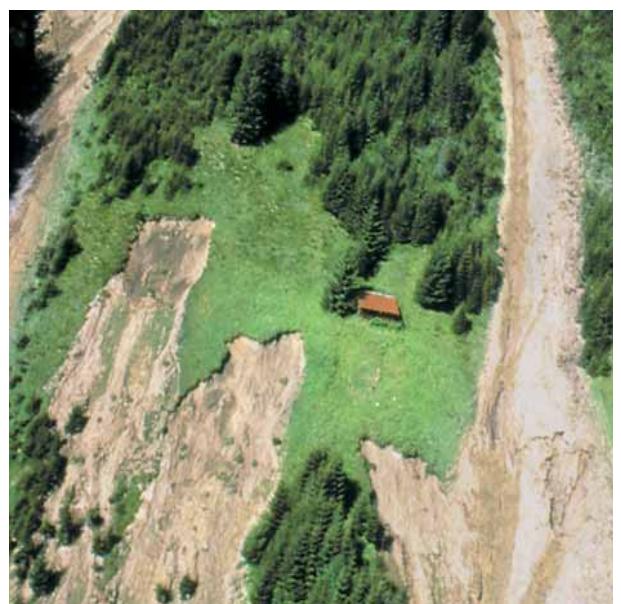


Abb. 2: Rutschaktivität in Sachseln (OW) im Sommer 1997 (Quelle: Frehner et al. 2005, Anhang 1, 10)

Entstehung: Flachgründige Rutschungen entstehen oft in durch Starkniederschläge betroffenen Gebieten (Abb. 1, S. 13). Sie stellen durch ihr plötzliches Auftreten mit raschem Materialabfluss ein erhebliches Gefährdungspotential dar v. a., weil es nur begrenzte Prognosemöglichkeiten gibt (Rickli et al. 2008, 4; Rickli 2013a).

Die natürlichen Eigenschaften und Faktoren, welche die Hangstabilität beeinflussen, befinden sich oftmals in einem prekären Gleichgewicht. Neben der Witterung können auch anthropogene Aktivitäten diese Umweltbedingungen beeinflussen, bspw. durch die Reduktion der Vegetation und somit auch der Durchwurzelung des Bodens. Dadurch kann das Auftreten von Rutschungen provoziert werden und sich auf Mensch, erhebliche Sachwerte und die natürliche Umwelt schädigend auswirken (Sidle und Ochiai 2006, 2). Es können daraus direkte (bspw. Tote, Sachschäden) und indirekte Kosten (bspw. Auswirkungen auf die Wirtschaft) entstehen (ebd., 2ff; Genet et al. 2008, 1518; BAFU 2013b).

Charakteristiken verschiedener Rutschungstypen: Laut Sidle und Ochiai (2006, 23ff) gibt es sehr unterschiedliche Klassifizierungen für Rutschungen und Massenbewegungen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf oberflächennahe bzw. flachgründige Rutschungen und beruht auf der Klassifizierung gemäss Sidle und Ochiai (ebd., 26ff). Nachfolgend bezeichnen „Rutschungen“ grundsätzlich nur flachgründige Rutschungen, wenn nicht anders beschrieben.

Flachgründige Rutschungen kommen im steilen Gelände (meist $> 25^\circ$ Hangneigung) vor, sind typischerweise weniger als zwei Meter mächtig und ihr Ausgangsmaterial liegt direkt über dem Muttergestein oder einer anderen wenig durchlässigen Bodenschicht, welche als meist ungefähr hangparallele Gleitfläche (bzw. Versagensfläche) dient. Diese translozierenden Rutschungen sind typischerweise länger als breit, haben ein Verhältnis von < 0.1 von Länge zu Tiefe und können klein- bis grossflächig auftreten (ebd., 26). Bei 95 % aller erforschten flachgründigen Rutschungen ist das in Bewegung geratene Volumen kleiner als 400 m^3 (Schwarz und Thormann 2012, 26).

Flachgründige Rutschungen werden typischerweise durch grosse Niederschlagsereignisse, rasche Schneeschmelze, Erdbeben oder aus einer Kombination dieser Faktoren ausgelöst. Die bei solch einem Ereignis vorherrschende Bodenfeuchte hat einen massgebenden Einfluss auf eine mögliche Auslösung einer Rutschung (Sidle und Ochiai 2006, 27), da mit zunehmender Bodenfeuchte auch der wirksame Porenwasserdruck zunimmt, wodurch sich die Scherfestigkeit des Bodens vermindert, da die stabilisierende Normalspannung reduziert wird (Zentrum Geotechnik (ohne Datum), 12).

Bei Verletzung der Bodenoberfläche können nachfolgend (zusätzliche) erodierende Prozesse auftreten, welche wiederum gefährdend für Mensch, erhebliche Sachwerte und die natürliche Umwelt sein können (Verklausungen, Murgänge etc.) (Sidle und Ochiai, 26ff; 65f).

2.2.1 Natürliche Faktoren, welche Rutschungen beeinflussen

Geologische Faktoren: Rutschungen treten weltweit in unterschiedlichen geologischen Substraten auf, wobei es eine Korrelation zwischen gewissen davon und dem Auftreten von Rutschungen gibt. Dieses Wissen gibt Anhaltspunkte für die Beurteilung der Hangstabilität, es sind daraus aber keine genauen räumlichen und zeitlichen Vorhersage für Rutschungen möglich. Die vorhandenen biologisch-

en, chemischen und physikalischen Verwitterungsfaktoren geben neben dem geologischen Substrat Hinweise auf dessen Rutschgefährlichkeit und sind wichtig in der Beurteilung der Hangstabilität (ebd., 41f).

Bodeneigenschaften: Die für die Hangstabilität relevanten Bodeneigenschaften bzw. deren Kombination werden gemäss Rickli et al. (2008, 88f) nach folgenden Aspekten beurteilt:

- *Bodenentwicklung:* Untersuchungen ergaben, dass die Bodenentwicklung für die Gefahrenbeurteilung hinsichtlich Rutschungen ungeeignet ist, da es keine konsistente Ergebnisse gibt. Auch die Kartierung vernässter Gebiete ist nicht ausreichend, um die Gefährdung von Rutschungen räumlich zu beurteilen.
- *Wasserdurchlässigkeit:* Für die Gefahrenbeurteilung sollte gut durchlässiger Boden auf stark gehemmt bis undurchlässige Bodenschichten kritisch beurteilt werden, da bei solchen Übergängen intensive Niederschläge zu einem Wasserstau führen können.
- *Makroporen:* Makroporen (bspw. Wurmgänge, Wurzelkanäle, Mauslöcher) ermöglichen eine schnelle Infiltration von Wasser und somit eine rasche Aufsättigung des Bodens und sollten deshalb als nachteilig betrachtet werden (Rickli et al. 2002, 438).
- *Durchwurzelung:* Das Bodenvolumen im Wald ist erwartungsgemäss intensiver durchwurzelt und mächtiger als im Freiland. Dabei hat die Verbindung von lockeren oberflächennahen mit tieferen, dichteren und stabileren Bodenschichten einen positiven Effekt auf die Hangstabilität. Liegt die Gleitschicht jedoch tiefer als der erschlossene Wurzelraum und wird deshalb nicht durchdrungen, kommt der lateralen Wurzelwirkung (Verstärkung im Anriss und in den seitlichen Bruchflächen) zusätzlich eine noch höhere Bedeutung zu (Rickli et al. 2008, 88).

Zwischen den jeweils vorhandenen Bodenkomponenten können verschiedene biologische, chemische oder physikalische Prozesse ablaufen, welche die Stabilität der Böden fördert oder gefährdet (Sidle und Ochiai 2006, 42f). So bilden weiche und deformierte tonreiche Lockerböden oftmals die Gleitschicht für auftretende Rutschungen (ebd., 42; Rickli et al. 2008, 85).

Hangneigung: Diese wird grundsätzlich durch die Bodenfestigkeit (bzw. den natürlichen Scherwinkel) bestimmt. In natürlichen, ungestörten Böden traten mehr als 60 % aller von Sidle und Ochiai (ebd., 57) beobachteten flachgründigen Rutschungen bei Hangneigungen $\geq 34^\circ$ auf. Weiter wurden solche bis 70° beobachtet, wobei ab einer Hangneigung von 45° die Frequenz nach oben tendenziell wieder abnimmt. Sind Böden anthropogen beeinflusst (Rodung, Waldweide) nimmt die empfindliche Hangneigung tendenziell ab (ebd.). Frehner et al. (2005, Anhang 1, 11) weisen daraufhin, dass im Zusammenhang mit der Hangneigung die Lockergesteinsart begutachtet werden muss, da sich daraus verschiedene Richtwerte für die kritische Hangneigung ergeben. Für mergel- oder tonreiche Böden beträgt die untere Grenze 25° .

Hangform: Während die Anzahl Rutschungen von divergenten (konvex; Kuppen) über planare (Ebene) zu konvergenten (konkav; Mulden, Runsen) Hangformen hin zunimmt, nimmt die Hangstabilität ab, was zu einem grossen Teil auf den unterirdischen Wasserabfluss zurückzuführen ist (Konzentra-

tion bei konvergierenden Hangformen). Haben konvergierende Hangteile erstmal versagt, können über einen langen Zeitraum hinweg erodierende Prozesse auftreten (Sidle und Ochiai 2006, 58f). Nach einer Rutschung beginnt sich die entstandene Geländevertiefung zu regenerieren, was mehrere Jahrzehnten dauern kann. Dies geschieht durch Akkumulation von Erdmaterial aus dem angrenzenden Gelände, welches dort erodiert und in die Geländevertiefung hinein sedimentiert (ebd., 62).

Exposition und Höhenlage: Diese haben grundsätzlich keinen wesentlichen Einfluss auf das Auftreten von Rutschungen, sondern werden viel mehr durch andere Faktoren überdeckt (ebd., 63f).

Hydrologische Faktoren: Die Hydrologie eines Hanges hat einen wesentlichen Einfluss auf die Auslösung von Rutschungen. Der signifikanteste hydrologische Prozess beinhaltet den (atmosphärischen) Niederschlag, welcher durch das Niederschlagsregime sehr stark variieren kann, die Infiltration von Wasser in Böden, laterale und vertikale Wasserbewegungen innerhalb des Lockerbodens sowie die Evapotranspiration und Interzeption der Vegetation (ebd., 67f).

Atmosphärischer Niederschlag: Die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlags assoziiert direkt mit dem Auftreten von Rutschungen, wobei vier Niederschlagseigenschaften einen starken Effekt auf deren Auslösung haben:

1) Niederschlagsmenge, 2) Intensität, 3) vor dem Unwetter aufgetretene Niederschläge sowie 4) die Unwetterdauer. Diese Eigenschaften haben einen Einfluss auf die Bodenfeuchte bzw. den Porenwasserdruck, welcher wiederum die Hangstabilität beeinflusst. Denn einerseits korreliert das Auftreten von Rutschungen mit zunehmender Dauer, andererseits mit zunehmender Intensität von Niederschlägen. Die Auslösung von Rutschungen hängt somit vom kombinierten Einfluss der durchschnittlichen maximalen stündlichen Intensität, Dauer und kumulativen Niederschlag ab. Der Einfluss des Niederschlags zusammen mit den hydrologischen Bodenbedingungen muss somit berücksichtigt werden (ebd., 68f).

Hydrologische Eigenschaften von Böden und verwittertem Muttergestein: Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften des Bodens, welche die Hangstabilität beeinflussen sind neben der Wasserspeicherkapazität jene, welche die Bewegung des Wassers in und durch den Hang regeln. Zusätzlich haben auch die Struktur, die Dichte und die Orientierung der Risse und Spalten im Grundgestein einen Einfluss darauf, ob Wasser drainieren oder aus dem Muttergestein in den Lockerboden infiltrieren kann. Auf Ebene des Hanges müssen für die Beurteilung der Hangstabilität neben diesen Faktoren auch intrinsische Eigenschaften des Bodens wie die Kornverteilung und die Porengrößen beachtet werden. Weiter stellen die präferenziellen Fliesswege eine der wichtigsten, aber auch eine der am schwersten zu quantifizierbaren Eigenschaft des Lockerbodens dar (ebd., 70f).

2.3 Vegetationswirkung und Rutschungen

Zwischen Wald und Freiland ist ein grundsätzlicher Unterschied festzustellen: Im Wald brechen wesentlich weniger flachgründige Rutschungen an als im Freiland (Sidle und Ochiai 2006, 107f), auch wenn

das Gelände oft steiler und ungünstiger ist. Der Waldzustand übt aber neben den anderen Umweltfaktoren einen grundlegenden Einfluss aus (Rickli et al. 2008, 78), wodurch eine sehr hohe Variabilität in der Massenerosion in bewaldeten Gebirgsregionen besteht (Sidle und Ochiai 2006, 107).

2.3.1 Waldwirkung auf rutschgefährdete Hänge

(Verholzende) Vegetation, vornehmlich Bäume haben einen bedeutenden, positiven Einfluss auf die Hangstabilität (Schwarz et al. 2013, 4367f; Rickli et al. 2002, 438; Sidle und Ochiai 2006, 89) (Abb. 3),



Abb. 3: Waldwirkung, gezeigt an der geringeren Rutschaktivität gegenüber Freiland (Quelle: Phillips (ohne Datum))

welcher primär auf zwei Arten zum Ausdruck kommt; einerseits durch eine hydrologische und andererseits durch eine mechanische Wirkung (ebd.). Weiter wird die Bodenstruktur auch durch die Stoffwechselprodukte von Wurzeln und Pilz-Wurzel-Interaktionen (Ektomykorrhiza) positiv beeinflusst, wobei auch das Bodenaggregat gefördert wird (Graf et al. 2003, 7; Graf 2008). Auch hat die Bestockung einen Einfluss auf den Transit und die Ablagerung von Rutschungen oder Hangmuren: Rickli et al. (2008, 79) beobachteten während den Feldaufnahmen zur Ereignisanalyse Hochwasser 2005 (Bezzola und Hegg 2008)

mehrfach einen erhöhten Rückhalt von Bodenmaterial durch die Bestockung.

Hydrologische Wirkung: Aus der Evapotranspiration ergibt sich der wichtigste hydrologische Vorteil durch Vegetationsbedeckungen (Rickli et al. 2002, 438; Sidle und Ochiai 2006, 108), was zu trockeneren Bodenbedingungen vor Niederschlagsereignissen und somit zu einer potentiell verringerten Zunahme der Porenwasserdrücke, speziell bei grossen Ereignissen und der Schneeschmelze führt (ebd.). Die Vegetationsbedeckung beeinflusst die Evapotranspiration stark und somit auch das saisonale Bodenwasser-Gleichgewicht. Dies v. a. dann, wenn Wasser limitierend wirkt oder die Evapotranspiration hoch ist (ebd., 90f). Die Effekte der Evapotranspiration auf den Bodenwassergehalt lassen sich wie folgt unterteilen:

- *Interzeption* durch den Deckungsgrad der Vegetation, wodurch der aufgefangene Niederschlag anschliessend an die Atmosphäre ab-/zurückgegeben wird;
- *Transpiration* von infiltriertem Wasser, um die physiologischen Bedürfnisse der Vegetation zu decken und
- *Evaporation* des Bodens oder der Auflagehorizonten (Litter).

Die ersten zwei oben genannten Teil-Prozesse bilden den wesentlichen Anteil der Evapotranspiration auf die Interaktion zwischen der Vegetation und der Hangstabilität. Sie ist dabei stark von den Eigenschaften der Bäume, des Bestandes und den lokalen Klimabedingungen abhängig. Die Evaporation aus der Bodenoberfläche ist meist gering, v. a. in dicht bewachsenen Landschaften (ebd., 91).

Die Interzeption der Vegetationsbedeckung kontrolliert den Bodenkontakt des Niederschlags einerseits mengenmässig, andererseits zeitlich, wobei die verholzende Vegetationsbedeckung (Bäume, v.

a. immergrüne) einen bedeutenden Einfluss hat (dichte Nadelwälder fangen durch Interzeption bis zu 30 - 50 % des Jahresniederschlags auf) (ebd.).

Unabhängig von der Art der Vegetationsbedeckung haben die vorhandene Feuchtigkeit und die Dauer bzw. Intensität des Niederschlags einen wesentlichen Einfluss auf die effektive Interzeption. Kurz an-dauernder und schwacher Niederschlag kann bis zu 100 % abgefangen werden, mengenmässig oder zeitlich intensiverer Niederschlag teilweise nur zu weniger als 5 %. Das Potential der Vegetation, über die Evapotranspiration einen Einfluss auf die Hangstabilität zu haben, hängt stark von deren Typus, deren Deckungsgrad und den biogeoklimatischen Bedingungen ab. Da die einzelnen Prozesse schwierig auseinander zu halten sind, werden sie in der Berechnung der Hangstabilität als ein einziger Prozess (Evapotranspiration) betrachtet (ebd., 92).

Mit Vegetation bewachsene Landflächen weisen entsprechend einer erhöhten Oberflächenrauhigkeit organischer Auflagen, der Präsenz von Wurzelsystemen und damit zusammenhängenden präferenzielle Fliesswege eine höhere Infiltration auf (ebd., 108), was aufgrund der oftmals besseren Durchlässigkeits des Bodens als negativ gewertet werden muss (Rickli et al. 2002, 438).

Tiefwurzelnde Bäume haben durch die Fähigkeit, räumlich und zeitlich mehr Wasser aufzunehmen einen bedeutenderen Einfluss auf die Reduktion von Wasser in instabilen Lockerböden (Sidle und Ochiai 2006, 94). Im Gegensatz dazu kann tiefwurzelnde Vegetation durch die Verringerung der Bodenfeuchte möglicherweise die Entwicklung von Dürrebrüchen speziell in Lockerböden mit einem hohen Tonanteil provozieren, was wiederum präferenzielle Fliesswege und eine tiefere Infiltration ermöglicht. Diese Dürrebrüche schliessen sich typischerweise in der feuchten Saison, trotzdem dürfte eine verbesserte hydraulische Leitfähigkeit bestehen bleiben.

Gleichwohl wird davon ausgegangen, dass keiner der Prozesse, welche eine höhere Infiltration fördern, das Auftreten von Rutschungen wesentlich erhöht. Laterale Wurzeln (lebende wie tote) und andere hangparallele präferenzielle Fliesswege in bewachsenen Hängen könnten die Drainage verbessern und nebenbei die Entwicklung von exzessiven Porenwasserdrücken an kritischen Punkten im Hang verhindern. Demnach überwiegen die Vorteile aus der Evapotranspiration und der verbesserten unterirdischen Drainage die Nachteile einer erhöhten Infiltration (ebd., 108); ganz zu schweigen von den Vorteilen gegen die Oberflächenerosion (ebd.; Rickli et al. 2002, 438).

In temperierten Breitengraden ist der hydrologische Einfluss der Vegetation beim Auftreten von flachgründigen Rutschungen jedoch nur bedingt wichtig (Sidle und Ochiai 2006, 89).

Bodenarmierung durch Wurzelverstärkung: Der mechanische Beitrag der Vegetationswurzeln zur Scherfestigkeit des Bodens ist in der Hangstabilisierung gegen flachgründige Rutschungen bedeutender als der hydrologische Beitrag über die Evapotranspiration, besonders ausserhalb der humiden Klimazonen (ebd., 92ff). So haben verschiedene weltweite Untersuchungen von forstlich bestocktem steilem Gelände gezeigt, dass innerhalb von 3 bis 15 Jahren nach der Holzernte, 2 bis 10 mal mehr Erosionsprozesse auftreten (ebd., 168). Diese Zunahme an Erosions- und Rutschprozessen findet während einer Periode der minimalen Wurzelverstärkung statt, also zwischen der Entfernung der Bestockung bis zum Beginn ihrer Regeneration (Abb. 4; S. 19). Dabei impliziert die minimale Wurzelverstärkung nicht, dass Rutschungen zu einem bestimmten Zeitpunkt auftreten, sondern dass das

Auftreten von Erosions- oder Rutschprozessen wahrscheinlicher wird oder anders ausgedrückt, der Schwellenwert für die Auslösung von Rutschprozessen während der minimalen Wurzelverstärkung am tiefsten liegt (ebd., 94).

Unabhängige Tests des Einflusses der Holzernte auf die Wurzelverstärkung und Scherversuche haben gezeigt, dass nach der Entfernung von Vegetation die Frequenz von Rutschungen zunimmt. Wenn sich Hänge in einem labilen Stabilitäts-Gleichgewicht befinden (Abb. 5), können Wurzeln den ausschlaggebenden, stabilisierenden Faktor bilden, v. a. während Unwettern oder der Schneeschmelze (ebd., 94).

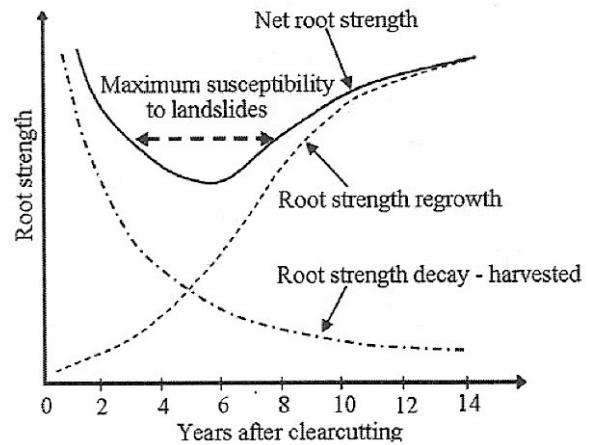


Abb. 4: Verlauf der Wurzelverstärkung in einer Fläche nach einem Kahlschlag (Quelle: Sidle und Ochiai 2006, 95)

Die eigentliche Wirkung der Wurzeln beschreiben Rickli et al. (2008, 79) wie folgt:

1) Armierung der oberen Bodenhorizonte durch Baumwurzeln (Abb. 6); 2) Durchdringung bzw. "Vernagelung" der Bruchzone mit Wurzeln (Abb. 6); 3) Wirkung auf die physikalischen Bodeneigenschaften (Durchlässigkeit, Dichte etc.) und 4) günstige Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes.

Die mechanische Schutzwirkung bezieht sich somit auf die Stabilisierung und Verstärkung des Bodens durch die Wurzeln der Bäume (Sidle und Ochiai 2006, 89ff). Dabei hängt diese von der Anzahl und Grösse der Wurzeln ab (Schwarz et al. 2008, 12).



Abb. 5: Erhöhte Wurzelverstärkung oberhalb des Rutschansisses, nahe des Wärgistalbaches (Grindelwald (BE))



Abb. 6: Wurzelarmierung in Anriss (Quelle: Hunziker (ohne Datum); abgebildet in Schwarz und Thormann 2008, 27)

Bei 95 % aller erforschten bodennahen bzw. flachgründigen Rutschungen ist das in Bewegung geratene Volumen kleiner als 400 m³ und rutscht in einer Tiefe von ein bis zwei Meter ab. In diesem flachgründigen Bereich hat die Wurzelverstärkung einen grossen Einfluss auf die Auslösemechanismen und es können potentielle Rutschungen bis zu 1000 m³ stabilisiert werden (Schwarz und Thormann 2012, 26).

Einfluss der Wurzeln auf die Hangstabilität: Die wichtigsten mechanischen Vorteile von Wurzelsystemen auf die Stabilisierung von Hängen bestehen aus: 1) der Verankerung/-wachsung instabiler Bodenschichten; 2) die Bereitstellung einer Verstärkungsmembran innerhalb des Bodenmantels; 3) die Bindung entlang potentieller Hang-Anrisszonen durch Schwachflächen hindurch; 4) Bereitstellung lokaler Zentren effektiver Verstärkung in der Nachbarschaft einzelner Baumstämme durch Bodenausbeulung und -stützung. Mehrere Berichte zeigten die Vorteile der Wurzelpenetration durch flachgründige Schwachschichten hindurch zur Verankerung in stabileren Substraten (Rickli et al. 2002, 438; Sidle und Ochiai 2006, 109).

Typischerweise haben bewaldete Böden dichte und verflochtene Wurzelmatten in den oberen Bodenschichten. Diese sind fähig, ein starkes Verstärkungssystem zu bilden und ermöglichen Schutz gegen Rutschungen (ebd.), wobei diese mechanische Wurzelverstärkung einerseits in die Tiefe, andererseits lateral wirkt. Der laterale Einfluss ist mindestens gleichwertig, wenn nicht sogar wichtiger für die Hangstabilität (ebd., 239; Schwarz und Thormann 2012, 26). Weiter scheint diese Membrankraft der Wurzelsysteme die darunter liegenden, potentiell labileren Bodenschichten zu stabilisieren (Sidle und Ochiai 2006, 109). Das Ausmass der Wurzelarmierung ist aber stark von der Art und Mächtigkeit der Bodenhorizonte abhängig (Boden Typ) (Rickli et al. 2002, 438). Dennoch können Baumwurzeln gerade in Hängen mit komplizierter Topographie die Kräfte im Hang optimal verteilen (Schwarz et al. 2008, 12).

Negative Auswirkungen einer Bewaldung: Bei der mechanischen Wirkung ist die Armierung des Bodens durch Wurzeln äusserst bedeutend, jedoch können Bäume je nach Situation auch destabilisierend auf den Boden wirken (Rickli et al. 2002, 438):

In gewissen Fällen können das Gewicht der Bäume oder die durch den Stamm in den Boden geleiteten Windkräfte geringe mechanische Instabilitäten in Hängen hervorrufen (Frehner et al. 2005, 11; Sidle und Ochiai 2006, 109f). Die Effekte, welche daraus resultieren wurden bis anhin nicht genügend dokumentiert und wissenschaftlich aufgearbeitet. Sie scheinen jedoch an windexponierten Stellen bzw. Waldrändern und Lichtungen vermehrt aufzutreten, der Zusammenhang von Ursachen und Wirkungen ist jedoch noch ungeklärt (ebd.). Ein weiteres Problem kann die nach einem Windwurf verletzte Bodenoberfläche darstellen, was wiederum die Rutschgefährdung und die Oberflächenerosion begünstigt (Frehner et al. 2005, Anhang 1, 11).

Da in den meisten Fällen das Gewicht des Bodens jenes der Vegetation um ein Vielfaches übertrifft, ist der Effekt des Baumgewichtes auf die standörtliche Stabilität grundsätzlich gering. Auch wenn das Baumgewicht einen negativen Einfluss auf die Hangstabilität haben könnte, wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Vorteile aus der Wurzelverstärkung deutlich überwiegen (Sidle und Ochiai 2006, 109f; Schwarz 2013, mündliche Mitteilung).

Schwarz (ebd.) und Thormann (2012, mündliche Mitteilung) wiesen jedoch darauf hin, dass geworfene Bäume bzw. deren Wurzelteller einerseits Erd- und Steinmaterial ansammeln können, wodurch Quellen für gravitative Massenbewegungen entstehen, aber auch sogenannte Wurzelseen gebildet werden können. Dabei sammelt sich überdurchschnittlich viel Wasser an, welches in den Boden infiltriert und Rutschungen auslösen kann. Pommerening (2012, mündliche Mitteilung) erwähnte, dass die vom Wind durch den Baum auf den Boden übertragenen Bewegungen und Energien zu einer Verdichtung

dieselben führen können. Weiter werden auch die (Fein-)Wurzeln geschädigt, was zu einer Verminderung der Vitalität des Baumes führen kann.

2.3.2 Waldnutzung

Holzernte und waldbauliche Praktiken: Mit Ausnahme von Untersuchungen zur Kahlschlagbewirtschaftung befassen sich nur wenige Studien mit dem Einfluss von Eingriffsmethoden im Wald auf Rutschprozesse (Sidle und Ochiai 2006, 163ff; Rickli et al. 2002, 438). In Hängen steiler als 31° zeigte sich eine 5 bis 9-fach höhere Dichte an Rutschungen bei Kahlschlägen im Vergleich zu durchforsteten Beständen oder unverdünnten Sekundärwäldern. Weiter stellte sich heraus, dass in unverdünnten Beständen ein leicht höheres Aufkommen von Rutschungen registriert wurde als in behandelten Beständen, was sich auf die Bewirtschaftung zurückführen lässt (Sidle und Ochiai 2006, 163ff).

Schwarz (2013, mündliche Mitteilung) weist daraufhin, dass in gewissen Fällen die Entfernung grosser, schwerer Bäume zu Gunsten kleinerer „leichterer“ Bäume durchaus Sinn macht und zu empfehlen ist. Er beobachtet in der Praxis oftmals die Extreme „überalterter Hochwald“ mit dicken, schweren Bäumen und „Kahlschlag“ bzw. sehr grosse Lücken – eine konsequente Waldpflege mit dem Ziel einer guten Baumartenmischung und Stufigkeit im Bestand, sollte als goldener Mittelweg dienen. Denn dadurch werden die Bodenschichten (Tiefe, Dichte) durch unterschiedliche Wurzelsystemtypen und -grössen variantenreicher, und somit besser erschlossen.

Ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Rutschungen und gewissen Holzernteverfahren zeigt sich auch, wenn der Boden oder der verbleibende Bestand dabei beschädigt wird, was einen negativen Einfluss auf die Wurzelverstärkung bewirken kann. Dieser Umstand besteht v. a. bei bodengestützten Verfahren, wobei viel mehr Unterwuchs beschädigt oder zerstört wird als bei Seilkranverfahren oder Holzernte per Helikopter. Dieser Unterwuchs wäre wichtig für den Erosionsschutz bei der Entfernung von Teilen der Baumvegetation. Aber auch der Einfluss auf den Boden an und für sich ist bei bodengestützten Verfahren (Verdichtung, v. a. punktuell) um einiges höher, wodurch auch die Regenerationsfähigkeit des Waldes beeinträchtigt wird. Auch Erschliessungen führen zum vermehrten Auftreten von Erosions- oder Rutschprozessen (Konzentration des Wasserabflusses) (Sidle und Ochiai 2006, 173f).

Weiter gibt es baumartenspezifische Unterschiede in der Dauerhaftigkeit und Abbaurate von Wurzelstöcken genutzter Bäume. Während dem allmählichen Vermorschen nimmt der Einfluss der Wurzelarmierung ab, weshalb eine gesicherte Verjüngung wichtig ist, welche die Wurzelarmierung fortschreitend übernehmen kann (Rickli et al. 2002, 438).

Identifikation instabiler Hänge: Die Meidung von sehr instabilen Hängen zählt zu den effektivsten und ökonomischsten Methoden, Landnutzungen und Holzernteprozesse in rutschgefährlichen Gebieten zu planen. Neben hohen Hangneigungen sind v. a. Geländedepressionen (Mulden, Runsen) rutschgefährlich und somit Anzeichen für instabiles Gelände (Sidle und Ochiai 2006, 179). Schwer oder nicht durchlässige Schichten (Stau-/Gleitflächen) sowie Oxidations- oder Reduktionsspuren im Bodenprofil weisen auf schwierige Verhältnisse hin (ebd., 180f). Und neben schon vorhandenen Scher- und Span-

nungsrissen im Boden gibt auch die Vegetation Anzeichen für rutschgefährige Gebiete, einerseits über Zeigerpflanzen, andererseits über Wuchsformen (bspw. Säbelwuchs) (ebd., 181).

Beweidung in steilem Gelände: Weltweit wird eine Zunahme von Rutschungen nach der Umwandlung von Wald in Weideland beobachtet (ebd., 209; Genet et al. 2008, 1518), was v. a. auf den Verlust der hydrologischen und mechanischen Wurzelwirkung zurückzuführen ist. Dabei treten Rutschungen grundsätzlich 5 bis 7 mal häufiger auf (Sidle und Ochiai 2006, 209).

Auch innerhalb des Waldes treten bei Beweidung deutlich mehr Rutschungen auf, denn die Verjüngung wird bedeutend beeinträchtigt (Tritt- und Verbisschäden). Bis anhin gibt es keine Studien über den Einfluss von Viehtritten auf das Auftreten von Rutschungs-Erosion. Durch Beweidung verursachte Bodenverdichtung kann die Infiltration des Wassers und die Anzahl dessen präferenzieller Fliesswege reduzieren sowie Gleitflächen initiieren (ebd., 211).

Waldzustand: Der vorherrschende Waldzustand hat einen erheblichen Einfluss auf die Rutschaktivität. Wälder mit standortgerechter Bestockung und einer vielfältigen Struktur mit wenig Lücken weisen kaum Rutschprozesse auf. Deutlich mehr Rutschungen treten in geschädigten Wäldern (Kalamitäten) oder Wäldern mit schlechtem Waldzustand (viele Lücken) auf. Durch die waldbauliche Behandlung sollten Bestände begründet oder gefördert werden, welche eine standortgerechte Baumartenmischung und einen ausreichenden Verjüngungsansatz mit einem möglichst nachhaltig stabilen Bestandesaufbau besitzen (Rickli 2013b; Rickli et al. 2002, 444).

Zum Wald im Untersuchungsgebiet in St. Antönien haben Rickli et al. (2008) qualitative Aussagen gemacht: In den rottenförmigen und meist beweideten Altbeständen sowie in den einwachsenden Flächen des Rotwalds war die Rutschungsaktivität hoch, was nach gutachtlichen Beobachtungen mit einem verhältnismässig kleineren Deckungsgrad korreliert, wobei viele Rutschungen in unmittelbarer Nähe von Waldlücken entstanden (Abb. 7). Neben dem geringeren Deckungsgrad scheint auch die fort-dauernde Beweidung, welche das Aufkommen der Verjüngung in Waldlücken verhindert, einen Einfluss zu haben. Denn die Rutschaktivität in unbeweideten Waldbeständen ist ebenso bedeutend geringer wie in den geschlossenen Altbeständen des Leidwalds (ebd., 81ff).

Die vielen Waldlücken und die im Gebirgswald eher lockere Bestockung scheinen einen einschränkenden Einfluss auf die stabilisierende Wurzelwirkung zu haben. Bei geringerem Deckungsgrad (bzw. weniger durch Wurzeln erschlossenem Bodenvolumen) kann davon ausgegangen werden, dass die Wurzelarmierung reduziert ist. Dies wurde auch im Bereich von Sturmschadensflächen beobachtet, was wiederum einen Hinweis auf die Bedeutung des Waldzustandes hinsichtlich der Hangstabilität gibt. Besondere Angriffspunkte bieten Bodenverletzungen bspw. ausgedrehte Wurzelstücke, wodurch Wasser besonders einfach in den Boden infiltrieren kann (ebd., 82).



Abb. 7: Rutsch innerhalb einer Waldlücke im beweideten Rotwald, St. Antönien (GR) (Quelle: Rickli et al. 2008, 41)

Rickli et al. (ebd., 83) gehen davon aus, dass mit geeigneten waldbaulichen Pflegemassnahmen das Risiko von Schadenflächen reduziert werden kann, wodurch auch die Stabilität gegenüber oberflächennahen Rutschungen gefördert würde.

2.4 Quantifizierung der Wurzelverstärkung

Es wurden schon mehrere Studien zur Quantifizierung der Vegetationswirkung verfasst, wobei diese zu Erkenntnissen für die Berechnung der Hangstabilität führen sollen. Nachfolgend eine kleine Ein- sicht in verschiedene wissenschaftliche Methoden und Herangehensweisen.

Wissenschaftliche Messungen und Versuche: Die Wurzelverstärkung kann auf verschiedene Arten quantitativ gemessen oder abgeschätzt werden, bspw. über Spannung- und Scherkraft-Messungen von einzelnen Wurzeln mit unterschiedlichen Durchmessern (Sidle und Ochiai 2006, 95), über „in situ“ Auszugversuche lebender Wurzeln (Schwarz 2014a, mündliche Mitteilung) oder über Scherversuche von durchwurzelten Bodenproben im Labor (Sidle und Ochiai 2006, 95; Rickli et al. 2013a). Zum Beispiel zeigten Waldron et al. (1983, zitiert in Sidle und Ochiai 2006, 97) dass die Scher-Resistenz eines mit Föhren-Wurzeln durchsetzten Bodens ca. dem zweifachen Wert der Scher-Resistenz eines nicht durchwurzelten Bodens entspricht.

Durch solche Versuche kann der Einsatz verschiedener Vegetationsbedeckungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen an steilen Hängen überprüft werden (Rickli et al. 2013a), wobei das Ziel auch darin besteht, gute Bedingungen für eine nachfolgende Sukzession autochthoner Vegetation bereitzustellen (Graf et al. 2003, 7).

Kontrollierte Messungen des Bruchverhaltens von Wurzeln verschiedener Durchmesser wurden benutzt, um die Wurzelverstärkung abzuschätzen (Sidle und Ochiai 2006, 95). Dabei haben ein Grossteil der Untersuchungen an Anrisszonen von Rutschungen gezeigt, dass die meisten Wurzeln unter Zugbelastung brechen, was indiziert, dass die Auszug-Resistenz die Zugkraft der Wurzeln meist überschreitet. Die Ankerwirkung von Bäumen wurde u. a. auch unter dem Aspekt der Sturmresistenz untersucht, wobei vermutet werden kann, dass die Wurzelverstärkung proportional zur Entwurzelungs- Resistenz ist (ebd., 97f). Diese Wurzelverstärkung kann über das Kartieren der vertikalen und horizontalen Wurzelverteilung eruiert werden (Schwarz und Thormann 2012, 26).

In den letzten gut dreissig Jahren wurden zur Bestimmung der Wurzelverstärkung drei bedeutende Methoden erstellt: Der Ansatz von Wu et al. (1979) war, ist und wird wegen seiner Einfachheit noch immer verwendet. Jüngst haben mehrere Studien (Pollan und Simon 2005, 2; Cohen et al. 2011, 18; Schwarz et al. 2011, 13) jedoch gezeigt, dass dieser zu Folgefehlern in der Bestimmung der Wurzelverstärkung führt, da dabei die Hypothese vertreten wird, dass alle Wurzeln simultan, also gleichzeitig bzw. unter derselben Belastung versagen.

Pollan und Simon (2005) bestimmen die Wurzelverstärkung mit einer schrittweisen Belastungszunahme über das Faserbündel-Modell (FBM). Dessen Vorteil besteht darin, dass Wurzeln verschiedenen Durchmessers nicht unter der gleichen Belastung versagen; ein Nachteil dieses Ansatzes bildet die

Vernachlässigung der Wurzeldehnung eines realen Wurzelbündels (bspw. wenn Wurzeln verschiedener Elastizitäten in einem Bündel vorhanden sind). Um dieses Problem zu bewältigen, haben Schwarz et al. (2010a; 362) den Ansatz der schrittweisen Belastungszunahme in das Root Bundle Model (RBM; Schwarz et al. 2010b) implementiert.

Die Hauptvorteile des RBM sind:

- Berechnung der gesamten Verschiebungs-Kraft-Kurve eines Wurzelbündels (= „root bundle“)
- Kraftneuverteilung auf jede Wurzel, basierend auf geometrischen und mechanischen Eigenschaften

Die Reissfestigkeit von Wurzeln wird stark durch deren Länge und Dicke beeinflusst, wodurch ersichtlich wird, dass nicht alle Wurzeln unter der gleichen Belastung brechen können. Schwarz et al. (2008, 12) haben dazu ein einfaches Beispiel zur Verdeutlichung angewandt:

Unter der Annahme, dass Wurzeln bei 10 % Dehnung brechen, würden bei einer Bodenmassenverschiebung um 200 mm nur diejenigen Wurzeln halten, welche dicker als 20 mm sind. Die zunehmende Verschiebung korreliert mit der Anzahl gerissener Wurzeln (Abb. 8), wobei ein komplexer Zusammenhang zwischen Dehnung (Verschiebung) und Spannung (Kraft) entsteht (s. u. 4.3.1).

Um die Kraft-Verschiebungs-Beziehung berechnen zu können, müssen mechanische und geometrische Wurzeleigenschaften bekannt sein. Anzahl und Grösse der Wurzeln können als Funktion von Baumparametern (Art, Entwicklungsstufe), Bodeneigenschaften und der Distanz vom Baumstamm weg abgeleitet werden. Für diese Angaben werden im RBM unabhängig von der Wurzelstruktur die Kraft-Verschiebungs-Beziehung und die maximalen Zugkräfte berechnet, wobei v. a. die lateralen Kräfte gut quantifiziert werden können.

In einer Vereinfachung des RBM haben Cohen et al. (2011) eine analytische Lösung vorgeschlagen, welche nur die wichtigsten relevanten Parameter berücksichtigt. Seit dem Modell von Wu et al. (1979) sind folgende wichtige Fortschritte in der Modellierung der Wurzelverstärkung erfolgt:

1) Wurzeln brechen nicht simultan (Pollen und Simon 2005, 11) 2) und unter verschiedenen Versagensmechanismen (Bruch, Ausreissen) (ebd., 3), 3) wobei dies u. a. durch die Tortuosität beeinflusst wird, welche auch die scheinbare Elastizität von Wurzeln beeinflusst (Schwarz et al. 2011, 10). 4) Die Wurzelgeometrie und das Elastizitätsmodul (E-modul) sind Funktionen des Wurzeldurchmessers (Waldron und Dakessian 1981; zitiert in Schwarz et al. 2013, 4368; Schwarz et al. 2010a, 357).

Obwohl Wurzeln hochvariable mechanische Eigenschaften aufweisen, wurde lange davon ausgegangen, dass diese nur in Funktion ihrer Durchmesser stehen und alle Wurzeln desselben Durchmessers homogen sind. Schwarz et al. (2013, 4368) verfolgen realistischere Abschätzungen für die Wurzelverstärkung durch Implementierung der mechanischen Variabilität. Daraus haben sie (ebd., 4375) einen neuen Ansatz (RBMw) entwickelt, welcher die strenge Variabilität jeder Wurzel-Durch-

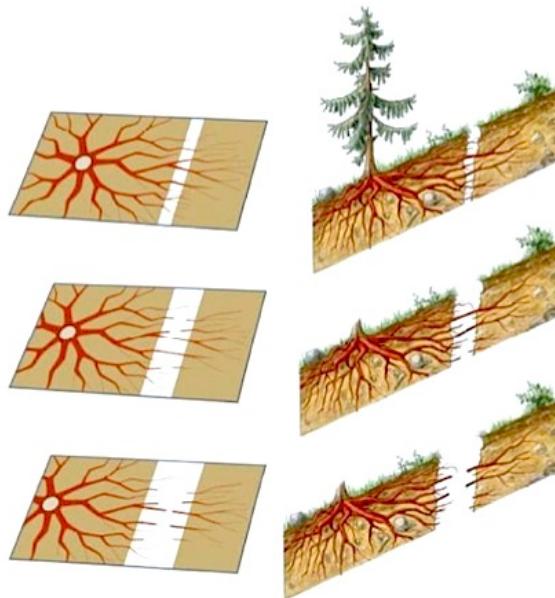


Abb. 8: Progressives Wurzelversagen (Quelle: Rüdy (ohne Datum); abgebildet in Schwarz et al. 2010b, 3)

messerklasse durch den Einsatz der Weibull Überlebensfunktion berücksichtigt. Ihre Resultate zeigen die Wichtigkeit der Berücksichtigung der strengen Variabilität für die Aufskalierung der Wurzelverstärkung für Wurzelbündel mit einer grossen Anzahl Wurzeln, besonders für die gesamte Quantifizierung des Verschiebung-Kraft-Verhaltens statt nur die Abschätzung der maximalen Auszieh-Kraft eines Bündels.

Das RBMw erlaubt im Vergleich zu einfacheren Modellen (Wu et al. (1979)) eine komplettere Charakterisierung der Kraft-Verschiebung der Wurzelverstärkung für ein Wurzelbündel mit nur wenig mehr Parameter und macht zeitgleich gleichwertige Prognosen wie kompliziertere Modelle, bspw. das originale RBM (Schwarz et al. 2010b). Die Wichtigkeit der Berücksichtigung des zunehmenden Versagens von Wurzeln analog einer heterogenen Verteilung der Wurzeldurchmesser wurde schon in früheren Arbeiten erkannt, was sich durch die zunehmende Anwendung von FBM-Ansätzen anstatt einfacheren Modellen (bspw. Wu et al. (1979)) zeigt. Auch innerhalb eines engen Bereichs von Wurzeldurchmessern zeigt sich die Variabilität der Wurzelkraft, welche das progressive Versagen eines Wurzelbündels unter Zug stark beeinflusst (Schwarz et al. 2013, 4375).

Das RBMw sowie das RBM und andere FBM (bspw. Pollen and Simon 2005; Cohen et al. 2011) ergeben besser Abschätzungen der maximalen Kraft bei Verschiebung als die Abschätzung aus dem Modell von Wu et al. (1979). Jenes Modell überschätzt das Maximum der Kraft um rund 150 % und prognostiziert nicht die Verschiebung bei maximaler Kraft, weil es annimmt, dass alle Wurzeln simultan brechen (Schwarz et al. 2013, 4372).

Von der Wissenschaft in die Praxis: Aus den Erkenntnissen der Forschung sollen neue Modelle für die Berücksichtigung bzw. die Quantifizierung der Vegetation in Hangstabilitätsberechnungen in der Praxis gebildet werden. Dabei sollen über Ansprache von pragmatischen Baum- oder Bestandesparameter Rückschlüsse auf die Ausbildung der Wurzelsysteme und somit auf die Wurzelverstärkung gemacht werden können.

Für diese Quantifizierung ist eine feine räumliche Auflösung der Wurzelverteilung, eine Charakterisierung der Waldstruktur und eine dynamische Charakterisierung der Wurzelverstärkung nötig. Diese Modelle leiten aus der Verteilung der Bäume im Gelände die Ausdehnung der Baumwurzeln ab und berechnen die mechanischen Kräfte im Hang. Dadurch soll die Wirkung des Schutzwaldes in Rutschgebieten nachvollziehbar beurteilt werden, damit bessere Grundlagen für die Schutzwaldbewirtschaftung und die Erarbeitung von Naturgefahrenkarten geliefert werden können (Risikomanagement) (Schwarz und Thormann 2012, 26f). Gemäss Schwarz und Thormann (ebd., 27f) gibt es zwei Modellierungsansätze: Das Wurzelverteilungsmodell nach Schwarz et al. (2010a) kann mit verschiedenen Daten über Wald und Standort aus (aufwändigen) Feldaufnahmen kalibriert werden, so wie es Caflisch (2014, unveröffentlicht) in seiner Arbeit gemacht hat. Es berechnet die Anzahl Wurzeln verschiedener Durchmesserklassen in verschiedenen Abständen vom Baumstamm entfernt unter Berücksichtigung des Baumdurchmessers. Die Resultate aus diesem Modell werden für das RBM benutzt, um die maximale Wurzelverstärkung an diversen Abständen zum Baumstamm hin zu quantifizieren (Schwarz und Thormann 2012, 28), so wie es oben erklärt und nachfolgend in der vorliegenden Arbeit gezeigt wird. Dadurch sollen auch die idealen Baumabstände auf einem rutschgefährdetem Hang abgeschätzt werden, woraus einfache Tabellen über den Zusammenhang der relevanten Faktoren (Gelände-, Boden- und Ve-

getationsparameter) zur Charakterisierung der minimalen Waldstruktur abgeleitet werden können (ebd.). Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus der Kombination mit der Fernerkundung (Stereoanalyse von Luftbildern oder LiDaR Techniken), wodurch eine räumliche Darstellung der Resultate aus dem Wurzelverstärkungsmodell möglich wird (RootMap-Modell). Dadurch sollen Informationen über die Waldstruktur (Baumdimension und -position) gewonnen werden, was in einer Zusammenführung mit den Resultaten aus dem Wurzelverteilungsmodell räumliche Informationen für die Beurteilung der Schutzwaldwirkung ergibt (ebd., 28f).

Das SOSlope-Modell als Weiterentwicklung des RootMap-Modells, berücksichtigt auch die Dynamik und Mechanik des durchwurzelten Bodens. Dies dient der Charakterisierung und Simulation der Auslösemechanismen von Rutschungen und ermöglicht somit die Lokalisierung von potentiellen Anrisszonen und die Abschätzung der potentiellen Rutschmasse. Dadurch wird eine detailliertere Beurteilung von Rutschprozessen oder eine Kosten-Nutzen Analyse von Schutzwäldern erleichtert (ebd., 29).

3 Material und Methoden

Diese Arbeit fügt sich in eine Reihe von Projekten ein, welche seit dem grossen Hochwasserereignis im Spätsommer 2005 initiiert wurden, wobei u. a. im Gebiet von St. Antönien flachgründige Rutschereignisse intensiv von der Eidg. Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) bzw. dem WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) untersucht wurden (Rickli et al. 2008, 5).

In der vorliegenden Arbeit ging es einerseits darum, über Feldaufnahmen Daten zur Wurzelverteilung zu gewinnen, um damit die Wurzelverstärkung zu quantifizieren. Andererseits wurden von Caflisch (2014, unveröffentlicht) im Wurzelverteilungsmodell kalibrierte Werte weiterverarbeitet, um diese wiederum ins RBMw zu implementieren, womit die Wurzelverstärkung für hypothetische Bäume berechnet wurden. Diese Wurzelverstärkungen wurden weiter für verschiedene Waldstrukturen bzw. Baumabstände extrapoliert und mit Daten aus einer früheren Untersuchung (Moos 2014, unveröffentlicht) verglichen. Zusammen mit dem Tool Slidefor^{NET} konnten dadurch Aussagen zur Hangstabilität im Rotwald gemacht werden.

3.1 Feldaufnahmen

Im folgenden Unterkapitel wird auf das Untersuchungsgebiet und das Vorgehen der eigentlichen Arbeiten im Feld eingegangen.

3.1.1 Untersuchungsfläche und Aufnahmestandort

Die Feldaufnahmen der Bodenprofile fanden im Rotwald im westlichen Teil des Gemeindegebiets von St. Antönien im Prättigau (GR) statt (Abb. 9, links; S. 27). St. Antönien weist als ursprüngliches Walserdorf eine typische Streusiedlungsstruktur auf, wobei neben den landwirtschaftlichen Flächen auch heute noch Flächen im Wald durch (Rind-)Vieh beweidet werden. Vom Tschatschuggen (2'173

m ü. M.) reichen bis zum Chüenihorn (2'413 m ü. M.) grossflächige Lawinenverbauungen und auch ältere Häuser weisen durch oftmals bergseitig bestehende Lawinenschütze (Ebenhöch, Keil) auf die erhöhte Lawinenaktivität hin (Rickli et al. 2008, 8).

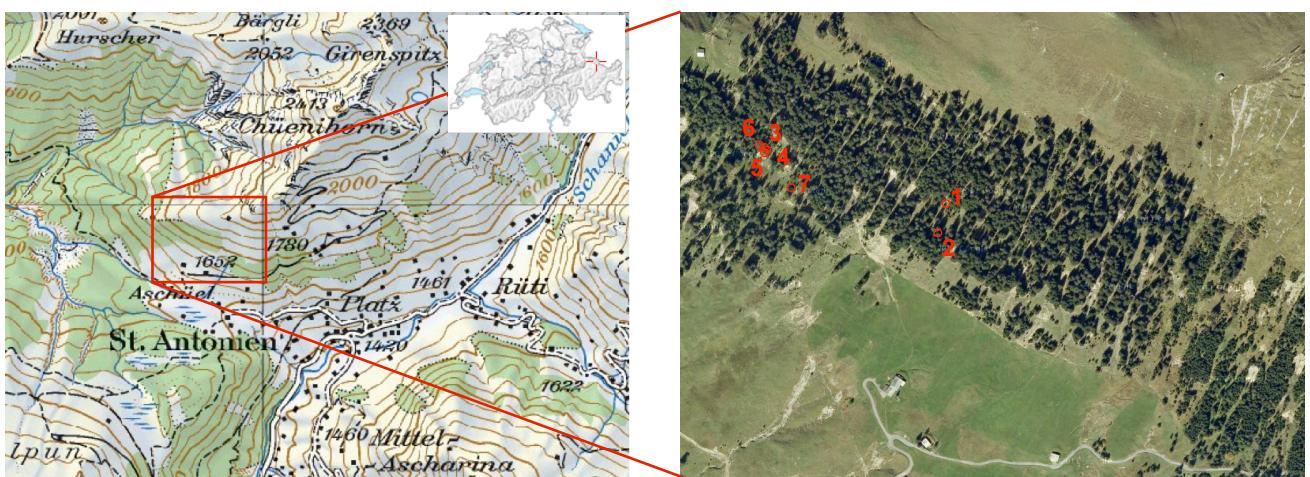


Abb. 9: Karten- und Luftbildausschnitt der Lage der untersuchten Bäume in St. Antönien (GR) (Quelle: swisstopo 2014)

Klimatisch gesehen befindet sich St. Antönien in den noch ozeanisch geprägten Nördlichen Zwischenalpen (Frey et al. 1998, 1), wobei gemäss dem Klimabericht des Kanton Graubünden (Schlegel et al. 2012, 16) jährlich durchschnittlich 1'300 - 1'500 mm Niederschlag fallen, wovon gut ein Drittel in den Sommermonaten fällt (AmbiWebGmbH, ohne Datum). Die Temperatur beträgt durchschnittlich 2 - 4°C (Schlegel et al. 2012, 16); das Gebiet wird gemäss der Klimaklassifikation nach Köppen und Geiger als Dfc klassifiziert (Heyer et al. 1988; zitiert in Mühr 2012).

Die untersuchten Bäume befinden sich im Rotwald zwischen 1'710 und 1'770 m. ü. M. an der Südflanke des Tschatschuggen ober- und unterhalb des Fussweges zur Hütte beim „Spizzi Obersäss“ (Abb. 9, rechts). Die Hangneigungen sind relativ gleichmässig zwischen 20° und 40°, wobei es bei den einzelnen untersuchten Bäume lokale Unterschiede gibt. Das untersuchte Waldstück befindet sich im unteren Teil der subalpinen Höhenstufe in welcher die Verjüngungsgunst örtlich und zeitlich beschränkt ist und ein erfolgreiches Aufkommen der Verjüngung nicht mehr nur licht-, sondern v. a. schon wärme-abhängig ist. Auf einem ausgeprägten Standortmosaik besteht eine deutliche Tendenz zur Rottenbildung, bei welcher die gegenseitige Konkurrenz zwischen den Bäumen zugunsten der Strategie der gegenseitigen Hilfe innerhalb der Rotte gering ist (Frey et al. 1998, 3f).

Der Rotwald besteht demnach vorwiegend aus Fichten, es sind aber auch einzelne Lärchen (*Larix decidua*) und Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia*) beigemischt. Die untersuchten Bäume befinden sich in einer Übergangszone von einschichtig geschlossenem Wald zu stufig und in Rotten strukturierten Beständen (Rickli et al. 2008, 9). Der Kronenschluss ist dabei typisch für einen Gebirgswald eher locker bis lückig, der Deckungsgrad weist entsprechende Werte von 40 - 60 % auf (ebd., 40f) und es kommen oftmals unregelmässige und teilweise aufgelöste Waldränder vor (ebd., 35). Entwicklungsstufen sind praktisch alle vorhanden, es mangelt jedoch teilweise an Verjüngung. Der Rotwald ist v. a. durch die Höhenlage bzw. das Klima, aber auch stark durch die Beweidung geprägt (ebd., 40f), welche auch heute zum Teil noch betrieben wird (ebd., 9). Es sind dadurch verbreitet Trittschäden am Boden und v. a. an vernässten Stellen zu beobachten (ebd.). Die eigentliche Vorrangfunktion des Wald-

es besteht jedoch in der Naturgefahrenabwehr (Lawinen, Rutschungen etc.) (ebd., 41).

Aufgrund der starken anthropogenen Beeinflussung des Rotwaldes durch die Beweidung ist die Bestimmung der Waldgesellschaft erschwert (bspw. Waldstruktur oder Nährstoffeintrag durch Viehdung). Trotzdem konnten die einzelnen untersuchten Bäume dreien Standortstypen bzw. einem Mosaik von zweien davon zugeordnet werden. Die Bestimmung erfolgte im Feld gemäss NaiS und wurde später im Abgleich mit der Waldstandortskarte des Kantons Graubünden (AWN 2014) verifiziert.

Gemäss NaiS stocken die untersuchten Bäume 2 - 7 auf einem kleinfeldigen Mosaik von „60 Typischer Hochstauden-Fichtenwald“ und „60A Hochstauden-Fichtenwald mit Alpenwaldfarn“. Baum 1 auf dem basischeren Standort (mit Kalknachweis) „60* Buntreitgras-Fichtenwald“, welcher aber ähnliche Feuchtigkeitsverhältnisse aufweist.

Die Aufnahmeformulare sowie Details und Photos zu den einzelnen Bäumen befinden sich im Anhang 1.

Geologisch betrachtet befinden sich die untersuchten Bäume auf der Fadura-Serie im Unteren Senonien mit Flyschkalken, kieselig-sandigen Kalken und Lagen von mergelig-tonigen Schiefern (Prättigauer Flysch) (SGK 1980; zitiert in Rickli et al. 2008, 9; 85) und wird teilweise durch Moränematerial überlagert (SGTK 1963; zitiert in ebd.). Weiter sind neben den flachgründigen auch Anzeichen von mittelgründigen Rutschungen zu finden, bspw. Geländeformungen wie Rutschnischen und buckelförmige Ablagerungen oder Säbelwuchs an der Baumvegetation (ebd., 9; 84)

Da die Prognosemöglichkeiten für Rutschungen noch sehr begrenzt sind, hat die WSL in stark betroffenen Regionen seit geraumer Zeit Untersuchungsperimeter eingerichtet, um Prozesserkenntnisse bezüglich durch Unwetter ausgelöste Rutschungen zu erhalten, woraus Rückschlüsse für die Grundlagen der Gefahrenkartierung gezogen werden können. Neben anderen wurde auch im Leidwald und im Rotwald in St. Antönien ein solcher Untersuchungsperimeter eingerichtet (Abb. 10).

Dabei wurden alle Rutschungen mit einem Mindestvolumen von 30 m³ innerhalb des untersuchten Perimeters erfasst und zahlreiche Parameter (Ausmass der Rutschung, Topographie und Standortsverhältnisse, Vegetation und Landnutzung, Rutschmechanismen und Prozessabläufe) beschrieben.

Diese Angaben werden zur statistischen Auswertung in einer Datenbank erfasst, was einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des Umgangs mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren erlaubt. Durch die Zusammenarbeit der WSL mit der Abteilung Gefahrenprävention des BAFU und verschiedenen kantonalen Fachstellen werden beobachtete Ereignisse in der Datenbank zusammengetragen. Diese Daten werden verschiedenen Nutzern aus Forschung und Praxis zur Verfügung gestellt (Rickli 2013a).



Abb. 10: Rutschungen im Rotwald (St. Antönien), Hochwassereignis im August 2005 (Quelle: Rickli et al. 2008, 90)

Bei den Untersuchungen im Zuge der Ereignisanalyse zum Hochwasser 2005 (Bezzola und Hegg 2008) haben Rickli et al. (2008, 78f) u. a. auch den Einfluss der Vegetation berücksichtigt. Dabei wurde beobachtet, dass im Perimeter St. Antönien kein

signifikanter Unterschied in der Anzahl Rutschungen zwischen Wald und Freiland besteht. Dies gegenüber Untersuchungen in anderen Perimeter, bei welchen im Wald signifikant weniger (weniger als halb so viele) Rutschungen ausgelöst wurden. Es wird davon ausgegangen, dass die ungünstigen geologischen und pedologischen Verhältnisse (ebd., 79; 85) sowie ein teilweise schlechter Waldzustand (starke Beweidung; viele Lücken) im Perimeter von St. Antönien dafür verantwortlich sind.

3.1.2 Feldarbeit

Nachfolgend wird der Ablauf der Arbeiten im Zusammenhang mit den Feldaufnahmen erläutert.

Vorbereitung: Vor den Feldaufnahmen erfolgte eine Einführung in die Thematik durch Dr. Massimiliano Schwarz an der HAFL, wobei das Projekt und seine Zielstellungen näher vorgestellt wurden. Danach wurden in Absprache mit Schwarz eigene Aufnahmeformulare für die Beurteilung und Messung der Baum- und Wurzeleigenschaften erstellt, wobei alle für vorliegende Arbeit relevanten Parameter berücksichtigt wurden (s. Anhang 1).

Für die Feldarbeiten wurden diverse Grab- und Messwerkzeuge verwendet.

Vorgehensweise bei den Feldaufnahmen: Die Feldaufnahmen im Untersuchungsgebiet fanden an zwei Wochenenden im Spätherbst 2013 statt. Die Feldaufnahmen wurden grundsätzlich vom Autor und Flurin Caflisch (Student FWI15, HAFL) ausgeführt; am ersten Feldtag wurde sie noch durch Dr. Peter Bebi (SLF), Dr. Massimiliano Schwarz (HAFL) und Corinne Cicigoi (freiwillige Helferin) unterstützt. Dr. Bebi ist durch frühere Untersuchungen ortskundig und zeigte dem Team während einer thematischen Besichtigung die lokalen Verhältnisse (Abb. 11). Dabei nahm er Bezug zu den vorangegangenen Untersuchungen mit speziellem Augenmerk auf die flachgründigen Rutschungen.



Abb. 11: Thematische Besichtigung von Rutschflächen im Rotwald (F. Caflisch, P. Bebi, M. Schwarz, C. Cicigoi v. l.)



Abb. 12: Grabarbeiten in Zweiteams pro Baum und Bodenprofil (M. Schwarz und F. Caflisch v. l.)

In einem ersten Arbeitsschritt wurden geeignete Bäume für die Analyse gesucht, wobei Fichten mit einem Baumstammdurchmesser auf Brusthöhe (1.3 m) (BHD) zwischen 40 und 50 cm bevorzugt wurden. Diese sollten bergseitig möglichst frei stehen, damit die später untersuchten Wurzeln auch den entsprechenden Bäumen zugeordnet werden können. Weiter sollten ihre Wuchs- und Standorts-

bedingungen möglichst ähnlich und somit vergleichbar sein. Schlussendlich wurden sieben für die Untersuchung geeignete Bäume bestimmt.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurden bei jedem Baum bergseitig drei Bodenprofile im Abstand von je 1.5 m, 2.5 m und 3.5 m ab Mitte Baumstamm entlang des Geländes gegraben. Das Team arbeitete in Zweierteams pro Baum und Bodenprofil (Abb. 12, S. 29), wobei als erstes jeweils das entfernteste Profil (3.5 m) gegraben wurde, damit bereits bestehende Profile hangabwärts nicht wieder mit Bodenmaterial verfüllt würden. Die Bodenprofile wiesen bei allen Bäumen und bei allen Distanzen identische Dimensionen von 1 m Breite und 0.5 m Tiefe auf, wie mit Schwarz abgesprochen. Auch Vergani et al. (2014, 21) haben diese Tiefe gewählt, da sich > 80 % der Biomasse im oberen Teil des Bodens (0.4 - 0.5 m Tiefe) befinden.

Das Fertigstellen der Grabungsarbeiten, die Aufnahme und Beurteilung von Baum-, Boden- und Standortsparameter sowie die Messungen der Wurzeln wurden durch die zwei Studierenden ausgeführt.

Baum- und Bodenprofilaufnahmen: Die Bäume wurden nummeriert, vermessen und entsprechend des Formulars im Anhang 1 beschrieben, wobei u. a. BHD (über Kreuz gemessen), Baum- und Kronendimension (über Kreuz gemessen) sowie die Lage des Baumes im Gelände festgehalten (Beschreibung und grobe Koordinaten) wurden. Weiter wurden anhand der Bodenprofile verschiedene Bodeneigenschaften (u. a. Hydrologie, pH-Wert, Skelettgehalt) beurteilt und festgehalten.

Vor dem eigentlichen Vermessen wurden die Wurzeln in allen Profilen vorsichtig freigelegt, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen. Der Autor mass die Durchmesser der Wurzeln mit einer elektronischen Schublehre und kappte die bereits gemessenen Wurzeln vorzu ab, um Doppelmessungen zu vermeiden. Es wurden nur lebende Wurzeln vermessen, da tote Wurzeln wegen ihrer tiefen Zugkraft nur noch eine geringe Verstärkung zur Hangstabilität erbringen, weshalb gleich wie bei Mao et al. (2013, 363) entschieden wurde, dass der Verlust der mechanischen Resistenz im Prinzip sofort nach Absterben der Wurzeln eintritt. Diese Annahme führt dadurch letztendlich zu einer konserватiveren Abschätzung der Wurzelverstärkung.

Caflisch notierte die Messwerte in Durchmesserklassen (0 - 15.5 mm in je 1 mm-Schritten und grösstere über kreuz gemessen in totalen Zahlen) für je drei Tiefenniveaus (0 - 0.15 m, 0.15 - 0.30 m und 0.30 m - 0.50 m) pro Bodenprofil (s. Anhang 1).

Der Boden zeigt in den meisten Profilen Vernässungsmerkmale (von Mangankonkretionen, über Rostflecken bis zu reduzierten Verhältnissen), welche zum Teil von auftretenden, relativ dichten Schieferton-Schichten mitverursacht werden. Der Skelettgehalt, welcher grundsätzlich eher niedrig ist (zwischen 10 und 20 %) nimmt wie auch der Tongehalt mit zunehmender Profiltiefe zu. Dies scheint auch für die Bodendichte zu gelten, wodurch wahrscheinlich weniger (Makro-)Poren für eine einfache Durchwurzelung vorhanden sind. Der pH-Wert befindet sich mit einer Ausnahme (Baum 1: 6 - 7.5 mit Kalknachweis) meist zwischen 4 und 5. Die Auflagehorizonte bzw. die Humusformen sind an intensiv beweideten Standorten dadurch stark beeinflusst; so zeigen gewisse Bodenprofile eine Überlagerung der Rohhumus- oder Moderschicht durch mullartigen Moder, wenn überhaupt ein Auflagehorizont vorhanden ist (Viehritte). Die Ah-Horizonte besitzen meist eine Mächtigkeit von rund 10 cm, die B oder El-Bt-Horizonte rund 35 cm und der Übergang zum C-Horizont (BC) befindet sich meist am unteren

Ende der gegrabenen Bodenprofile (40 cm und tiefer). Zusammenfassend könnte der Boden somit grob als zum Teil pseudovergleyte Parabraunerde bezeichnet werden.

3.2 Modellierung

Diese Beschreibung basiert auf Schwarz et al. (2013), welche einen Ansatz zur Quantifizierung der Wurzelverstärkung unter Berücksichtigung der Variabilität der mechanischen Eigenschaften jeder Durchmesserklasse präsentierten (ebd., 4367). Viele Faktoren tragen zur Variabilität der Wurzelkraft und zum mechanischen Verhalten von Wurzelbündeln bei, selbst bei einer einzigen Durchmesserklasse.

3.2.1 Wurzel Geometrie und Mechanik

Das Modell nimmt an, dass jede Wurzel eine linear-elastische Faser ist, welche bei einer Grenzverschiebung bricht (ebd., 4368f). Die Zugkraft in einer Wurzel wird unter Verwendung der Gleichung der linearen Elastizität abgeschätzt, wobei geometrische (Durchmesser, Länge, Tortuosität) und mechanische Eigenschaften (maximale Zugkraft, E-modul) bekannt sein müssen.

Aus Wurzeldaten können durchschnittliche Werte für die Länge L , die maximale Zugkraft einer individuellen Wurzel F_{\max} und das E-modul E modelliert werden, welche zusammen als Kraft-Gesetz in Funktion des Wurzeldurchmessers ϕ dienen:

$$L(\phi) = L_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^\gamma, \quad (1)$$

$$F_{\max}(\phi) = F_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^\xi, \quad (2)$$

$$E(\phi) = E_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^\beta, \quad (3)$$

wobei ϕ_0 , L_0 , F_0 und E_0 gröszenverändernde Faktoren und γ , ξ und β Kraft-Gesetz-Exponenten sind. Für wird ϕ_0 angenommen gleich 1 zu sein, wobei folgende Gleichung nicht explizit so geschrieben wird: $\frac{\phi}{\phi_0} = \phi$.

Für das E-modul, also den Quotienten der Wurzelkraft (Spannung) über der Versagensbelastung (Dehnung), wird die Sekante desselben genutzt, da diese sich besser eignet, das Maximum der Belastung bei Versagen abzuschätzen. Wurzeln in natürlichen Böden sind meist gewunden und die nötige Kraft, um sie in ihre volle Länge zu ziehen ist relativ klein (ebd., 4368). Dieser Effekt der Wurzeltortuosität wird mit der Verwendung des Koeffizienten r berücksichtigt, welcher das E-modul reduziert (Schwarz et al. 2010a, 357; 361; zitiert in Schwarz et al. 2013, 4369):

$$E(\phi) = r E_0 \phi^\beta \quad (4)$$

wobei der Koeffizient r für Felddaten gleich 1 entspricht. Dieser Koeffizient beeinflusst nur die Dehnung (Verschiebung), bei welcher die maximale Kraft beobachtet wird und nicht die Abschätzung der

maximalen Zugkraft einer Wurzel. Die Gleichungen (1) und (4) zusammen mit der Gleichung der Elastizität ergeben für die Zugkraft F in einer einzelnen Wurzel als eine Funktion der Verschiebung Δx :

$$F(\phi, \Delta x) = \frac{r\pi E_0}{4L_0} \phi^{2+\beta-\gamma} \Delta x, \quad F(\phi, \Delta x) < F_{\max}(\phi), \quad (5)$$

und die Verschiebung $\Delta x_{\max}^{\text{fit}}$, an welcher die Wurzel versagt, ist:

$$\Delta x_{\max}^{\text{fit}}(\phi) = \frac{4F_0 L_0}{r\pi E_0} \phi^{\gamma+\xi-\beta+2}. \quad (6)$$

3.2.2 Weibull Überlebensfunktion für Wurzeln

Die Überlebensfunktion nach Weibull (1939; zitiert in Schwarz et al. 2013, 4369) ist eine Wahrscheinlichkeits-Funktion, welche in einer Vielzahl von Anwendungen die Fehlerwahrscheinlichkeit eines komplexen Systems jenseits eines Schwellenwertes erfasst. Die Weibull-Verteilung stammt ursprünglich von der Studie der Erschöpfung (ebd.,) und wird in Ingenieurwissenschaften benutzt, um die Zeit des Versagens zu bestimmen; im vorliegenden Modell für das Faserversagen der Wurzeln.

Schwarz et al. (ebd.,) nehmen an, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit einer Wurzel eine Funktion einer normalisierten Verschiebung Δx^* und durch die Zwei-Parameter-Weibull-Überlebensfunktion gegeben ist:

$$S(\Delta x^*) = \exp \left[- \left(\frac{\Delta x^*}{\lambda^*} \right)^\omega \right], \quad (7)$$

wobei ω der Weibull Exponent (Berechnungsbeiwert) und λ^* der Skalierfaktor ist. Die normalisierte Verschiebung ist gegeben durch:

$$\Delta x^*(\phi) = \frac{\Delta x}{\Delta x_{\max}^{\text{fit}}(\phi)}. \quad (8)$$

Diese Normalisierung, welche den Effekt des Wurzeldurchmessers am Maximum der Verschiebung abschätzt, wird benötigt, um eine Überlebensfunktion zu konstruieren, bei welcher ω die relative Variabilität der Wurzelkraft in Abhängigkeit des Wurzeldurchmessers ausdrückt (ebd., 4369). Ein kleines ω (bspw. 2) indiziert, dass die Bündel bildende Wurzeln hochvariable mechanische Eigenschaften besitzen; höhere Werte indizieren homogenere Wurzelbündel, was zu höher geschätzten maximalen Kräften beiträgt (ähnlich denen von Wu et al. (1979)) (ebd., 4372).

3.2.3 Wurzelbündel-Verstärkung

Die Zugkraft eines Wurzelbündels, also die Wurzelverstärkung erhält man durch die Summe der beitragenden Kräfte jeder Wurzel multipliziert mit der Überlebensfunktion S :

$$F_{\text{tot}}(\Delta x) = \sum_{i=1}^N F(\phi_i, \Delta x) S(\Delta x_i^*), \quad (9)$$

wobei N die Anzahl Wurzeln wiedergibt. Diese Erweiterung des RBM wird RBMw genannt (ebd., 4369), wobei die Vorteile gegenüber dem RBM die Berücksichtigung der strengen Variabilität innerhalb der Wurzel-Durchmesserklassen und die einfachere mathematische Formulierung sind, wobei diese simpel in numerische Modelle implementiert werden können (nur 4 Gleichungen; 1, 2, 4 und 7). Im Gegensatz zum RBM (Schwarz et al. 2010b) kann das RBMw Wurzelbündel mit mehreren Wurzeln effektiv berechnen, indem es nur den Durchschnittswert des mechanischen Verhaltens jeder Wurzel-Durchmesserklasse verwendet. Für eine detaillierte Analyse des Auszieh-Verhaltens weniger Wurzeln ist das RBM jedoch angebrachter.

Die Aufskalierung des mechanischen Verhaltens von einzelnen Wurzeln zu einem gesamten Bündel durch eine simple Summierung der einzelnen Kräfte an verschiedenen Verschiebungen impliziert die Annahme, dass die einzelnen Wurzeln keine mechanischen Interaktionen untereinander haben (Schwarz et al. 2013, 4372). Giadrossich et al. (2013, 404; zitiert in ebd.) haben in Laborexperimenten und numerischen Analysen gezeigt, dass für realistische Wurzeldichten von Bäumen in einem Waldbestand, die mechanischen Interaktionen zwischen benachbarten Wurzeln (bis 15 mm Durchmesser) minimal sind und dieser Effekt deshalb vernachlässigt werden kann, somit auch im RBMw.

Im Vergleich zum RBM werden die Versagensmechanismen im RBMw nicht explizit berücksichtigt. Das ist dann kein Problem, wenn die Kalibrierung mit Daten aus Feld-Zugversuchen erfolgt. In diesem Fall berücksichtigt die Anpassung der Kraft-Durchmesser-Funktion den Versagensmechanismus.

Aus der Verteilung der Wurzeldurchmesser eines Wurzelbündels ist es möglich, das Kraft-Verschiebungs-Verhalten des ganzen Bündels zu berechnen (ebd.). Dafür wird die Gleichung (9) unter Berücksichtigung der Anzahl Wurzeln n in einer gegebenen Wurzel-Durchmesserklasse Φ eines Bündels, in folgender Form wiedergegeben (ebd., 4369):

$$F_{\text{tot}}(\Delta x) = \sum_{\Phi=1}^{\Phi_{\max}} n_{\Phi} F(\phi_{\Phi}, \Delta x) S(\Delta x_{\Phi}^*), \quad (10)$$

wobei ϕ_{Φ} der durchschnittliche Wurzel-Durchmesser jeder Wurzel-Durchmesserklasse, Φ_{\max} die maximal berücksichtigte Wurzel-Durchmesserklasse und Δx_{Φ}^* die normalisierte Verschiebung jeder Wurzel-Durchmesserklasse Φ ist.

Schwarz et al. (ebd., 4367) zeigten in ihren Resultaten, dass die Variabilität der Wurzelverstärkung in jeder Durchmesserklasse einen Haupteinfluss auf das Verhalten eines Wurzelbündels hat. Sensitivitätsanalysen zeigten, dass die Kalibrierung der Gleichungen der Druckkräfte, der Elastizität der Wurzeln und die Wurzelverteilung die wichtigsten Schritte sind. Das RBMw erlaubt die Charakterisierung der Wurzelverstärkung unter den Bedingungen der maximalen Zugkraft, Steifigkeit und Energie. Zudem wird die Implementierung der Wurzelverstärkung im Vergleich zum RBM, in der Hangstabilitätsberechnung vereinfacht. Die realistische Quantifizierung der Wurzelverstärkung für Druck-, Scher- und Spannungsverhalten erlaubt die Berücksichtigung der Stabilisationseffekte durch die Wurzelwerke auf steile Hänge und den Einfluss auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen (ebd.).

3.3 Grundlagen für die Berechnung der Wurzelverstärkung

Nachfolgend werden die für die Wurzelverstärkung relevanten Wurzeleigenschaften sowie das Wurzelverteilungsmodell nach Schwarz et al. (2010a) präsentiert.

3.3.1 Relevante Wurzeleigenschaften

Die bekannten Schlüsseleigenschaften von Wurzeln, welche Einfluss auf die mechanische Verstärkung von steilen Hanglagen haben, sind die Wurzelgrösse (Länge, Durchmesser), die räumliche Gestaltung (Verteilung) und assoziierte mechanische Boden-Wurzel-Interaktionen. Folgend wird kurz darauf eingegangen (Schwartz et al. 2010, 355f):

Wurzeltypen: Eine weitverbreitete Klassifikation der Wurzeltypen basiert auf den Wurzeldurchmessern und unterscheidet zwischen sogenannten Fein- und Grobwurzeln:

Feinwurzeln sind im Durchmesser < 2 mm und repräsentieren typischerweise weniger als 5 % der totalen Baumbiomasse. Trotzdem werden mehr als 90 % der Wasser- und Nährstoffversorgung durch das Wurzelsystem, von Feinwurzeln bereitgestellt. Innerhalb dieser Wurzelklasse werden andere physio-genetische Klassen von Wurzeln unterschieden, um die komplexen topologischen Eigenschaften (meist das Verzweigungssystem) darzustellen. Die Feinwurzeln unterliegen einer den lokalen Bedingungen entsprechenden hohen Umsetzungsrate (Auf- und Abbau), welche etwa dem Lebenszyklus der Blätter bzw. Nadeln entspricht.

Grobwurzeln (> 2 mm) machen ca. 15 - 25 % der totalen Baumbiomasse aus und werden in die vier Klassen Pfahl-, Seiten-, Basal- und Senkerwurzeln eingeteilt, wobei diese sich weiter in primäre und sekundäre Wurzeln gliedern lassen. Sekundäre zweigen von den primären Wurzeln ab, welche wiederum direkt mit dem Stamm verbunden sind. Die Grobwurzeln haben eine strukturelle Funktion (Wurzelgerüst), wobei deren Verteilung weniger von der unterirdischen Konkurrenz beeinflusst ist.

Wurzeldurchmesser-Dichte-Verteilung und Wurzellänge: Die räumliche Verteilung der Wurzeldurchmesser rund um den Baum definiert die Wurzelarchitektur, welche aufgrund verschiedener (räumlich und zeitlich) beeinflussender (Umwelt-)Faktoren selten symmetrisch ist und in drei Klassen eingeteilt wird: Herzwurzelsystem, Flachwurzelsystem und Pfahlwurzelsystem.

Die Feinwurzelbiomasse (FRB) nimmt mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg ab, wobei die Dichte der FRB innerhalb eines Bestandes durch Überlappungen mit anderen Bäumen maximiert und gleichmässig verteilt ist und von der Bestandesdichte beeinflusst wird. In Beständen mit extremen klimatischen Faktoren oder irregulärer Waldbedeckung gibt es räumliche Variationen der Wurzelverteilungen und somit auch der Wurzelbiomasse.

Es herrscht eine strenge Korrelation zwischen dem BHD und dem effektiven lateralen Radius der Wurzelzone (maximale Distanz Baumstamm bis äusserste Grobwurzel), welche typischerweise 1 - 3 mal grösser als der Kronenradius ist.

Die Wurzellänge hat einen grossen Einfluss auf die maximale Zugkraft und korreliert linear mit dem Wurzeldurchmesser. Schwarz et al. (ebd., 357) definiert die Wurzellänge als die Summe aller Segmente von einer Hauptwurzel bis zur äussersten Wurzelspitze (Länge zum Ende des Wurzelsystems).

Geometrische Wurzelfunktionen: Wurzelsysteme sind als komplexe Strukturen gekoppelter Faser-elemente geformt (Wurzel-Architektur), wobei die hydromechanische Funktion beeinflusst wird und die Verzweigungsanordnung eine wichtige Charakteristik hat, da Anzahl und Anordnung der Abzweiger wichtig für den Auszugswiderstand sind. Weiter wichtig in der Wurzel-Geometrie ist die Tortuosität (Wurzelwindungen), da sie die Werte des E-moduls stark beeinflussen kann (ebd.).

Die Widerstandskraft jeder Wurzel während eines Geländeversagens besteht aus der Funktion ihrer Orientierung und Spannung, wobei in einem Streubereich möglicher Orientierung und Tortuosität manche Wurzeln brechen, während andere sich erst weiter anspannen und wiederum andere noch gar nicht angespannt sind. Der Korrekturfaktor für geometrische Effekte auf den Scherwiderstand wird mit dem Durchschnittswert von 1.2 beziffert.

Mechanische Wurzeleigenschaften von individuellen Wurzeln: Die Scherfestigkeit an der Grenzfläche zwischen Wurzeln und Boden ist aufgrund der Abhängigkeit von mehreren Faktoren (u. a. Bodentyp) einer der am schwierigsten zu quantifizierenden Parameter. Wurzelhaare und Wurzelabsonderungen fördern die Verankerung von jungen Wurzeln aufgrund der verbesserten Kontaktfläche zwischen Wurzeln und Boden, wobei ein abnehmender Wassergehalt die Produktion längerer Wurzelhaare anregen kann, was zu einer höheren Reibung in trockenen Böden führt. Die Reibung zwischen Wurzeln und Boden legt den Typ des mechanischen Versagens fest: In kohäsiven Böden tendieren kleine Wurzeln dazu, unter trockenen Bedingungen zu brechen und unter feuchten Bedingungen auszureißen. Wenn Wurzeln brechen, springt die beobachtete Wurzelkraft abrupt auf Null, wogegen bei einem Ausreissen die auftretende Kraft auf tiefere Werte fällt, was exponentiell mit der Wurzellänge abnimmt (ebd., 357f).

Die Wurzel-Boden-Reibung wird durch den Reibungskoeffizienten repräsentiert, welcher die aktivierte Wurzellänge während des Ausziehens festlegt und die dabei auftretende Zugsteifigkeit der Wurzeln beeinflusst. Dieser wird wiederum durch die Anzahl Verzweigungspunkte beeinflusst, wobei eine Zunahme die Auszugskraft erhöht und den Versagenstyp beeinflusst (ebd., 358; auch Giadrossich et al. 2013, 404).

Mechanische Eigenschaften von Wurzelbündeln: Das Bezugssystem für das FBM beschreibt die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Faserpopulationen, verlinkt mit dem ansetzenden Stress der makroskopischen Verschiebung von Bündeln, wobei sich die Spannungs-Dehnungs-Kurve auf von hochvariablen Verstärkungen zugeführten wenige Zentimeter der Verschiebung bezieht (Schwarz et al. 2010a, 358). Das FBM hat sich für die Modellierung der mechanischen Ermüdung und des Versagens zusammengesetzter Materialien (weithin) etabliert und wird, wie oben schon erwähnt, seit längerem auch zur Beschreibung der Wurzelverstärkung herangezogen. Durch die Berücksichtigung des natürlichen zusammengesetzten Verhaltens des gesamten Wurzelsystems und des progressiven Versagens, werden realistischere Werte als durch Verwendung von Einzelwurzelmodelle (wie Wu et

al. 1979) erreicht. Auch sind zahlreiche Möglichkeiten verfügbar, den FBM-Ansatz auszuweiten, um die verschiedenen Versagensmechanismen, Lastenverteilungen und Fasereigenschaften zu berücksichtigen. Die einfachste und klassische Anwendung des FBM verwendet die Regeln der globalen Lastenverteilung, wobei der Stress gleichmäßig zwischen allen überlebenden Fasern in den Bündeln umverteilt wird und die Spannungs-Dehnungs-Beziehung anschliessend unter Berücksichtigung des konstanten E-moduls berechnet wird. Außerdem werden die Grenzwerte der maximalen Zugkraft der verschiedenen Faserklassen gewöhnlich durch statistische Modelle abgeschätzt (so wie die Weibull-Verteilung) (ebd.).

3.3.2 Wurzelverteilungsmodell

Da die Charakterisierung der Wurzelverteilung mit aufwändiger Feldarbeit verbunden ist (so wie in der vorliegenden Arbeit), sollte sie auch von einfach zu messenden Eigenschaften des Baumes abgeleitet werden können. Die Frequenz von Wurzeln verschiedener Durchmesserklassen an verschiedenen Positionen in einem Waldbestand ist für die Quantifizierung der Wurzelverstärkung von essentieller Bedeutung. Dabei gibt es inter- und intraspezifische Unterschiede, die bspw. durch die Baumart oder die standörtlichen Bedingungen bedingt sind.

Das Wurzelverteilungsmodell nach Schwarz et al. (2010a) ermöglicht eine realistische Abschätzung der Wurzelverteilung, wobei diese Modellierung durch die Wurzelanzahl und die Wurzeldurchmesser charakterisiert wird und auf vier weiteren Parametern (*Röhren-Koeffizient, maximale laterale Durchwurzelungsdistanz, Skalierungsfaktor und ein Exponent, um die Dichte von Grobwurzeln zu berechnen*), basiert (Schwarz et al. 2012, 794). Die Feinwurzelanzahl kann aus dem BHD und der Distanz vom Baumstamm weg berechnet werden. Für die Verteilung der Wurzeldurchmesser, welche mit primären und sekundären Wurzelsystemen assoziiert, kann angenommen werden, dass diese stark mit der durchschnittlichen Feinwurzel-Verteilung und der Distanz vom Baumstamm weg korreliert (Schwarz et al. 2010a, 359).

Nachdem das Modell gemäss den vorherrschenden Bedingungen kalibriert wurde, kann der Umfang der Wurzelanzahl auf verschiedenen Distanzen vom Baumstamm weg bestimmt werden (Schwarz et al. 2012, 794). Neben vorliegender Arbeit wurde im selben Untersuchungsgebiet diese Kalibrierung von Caflisch (2014, unveröffentlicht) vollzogen und auch für diese Arbeit verwendet (s. u. und 4.2.2).

Die Wurzelanzahl kann als Funktion der Wurzeldurchmesser auf der Basis empirischer Daten berechnet werden, so wie es Caflisch (2014, unveröffentlicht) gezeigt hat.

Die Feinwurzelverteilung ist ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Frequenz gröberer Wurzeln. Die Abb. 13 (S. 36) zeigt die typische Beziehung zwischen der Anzahl der Grobwurzeln und den

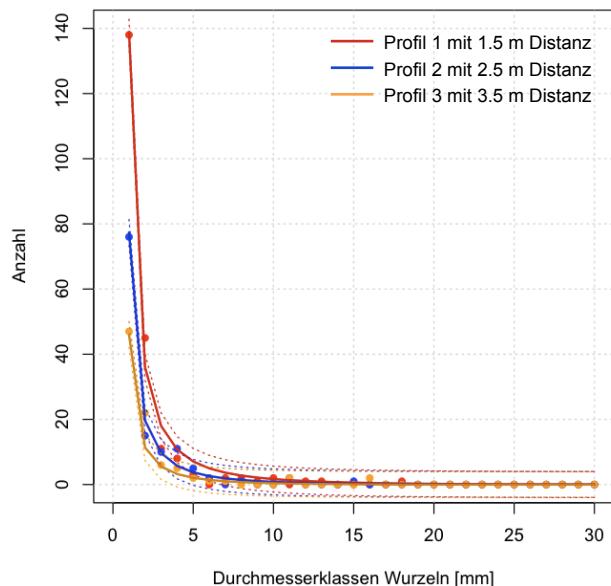


Abb. 13: Abnehmende Wurzelanzahl mit zunehmender Wurzeldurchmesserklasse (Quelle: Caflisch 2014, verändert)

verschiedenen Wurzeldurchmesserklassen für die drei Distanzen 1.5 m, 2.5 m und 3.5 m vom Baumstamm weg und zwar für Baum 4.

Die Wurzelanzahl nimmt exponentiell mit zunehmender Wurzeldurchmesserklasse ab. Die Gesamtzahl der Wurzel und die maximalen Wurzeldurchmesser nehmen mit zunehmender Distanz vom Baumstamm ab. Die Wurzelanzahl für jede Durchmesserklasse auf verschiedenen Distanzen vom Baumstamm weg wird als Input für die Berechnung der Wurzelverstärkung mit dem RBMw verwendet (Schwarz et al. 2012, 798).

Basierend auf den Beziehungen zwischen der Wurzelanzahl verschiedener Wurzeldurchmesser auf verschiedenen Distanzen vom Baumstamm entfernt, ist es möglich, die räumliche Grob- und Feinwurzel-Verteilung rund um den Baum zu beschränken (Schwarz et al. 2010a, 360).

3.4 Aufskalierung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene

In einem weiteren Schritt zeigt diese Arbeit eine Möglichkeit auf, wie von berechneten Wurzelverstärkungen eines Einzelbaumes auf die Wirkung eines Waldbestandes geschlossen werden kann. Dafür wurden drei Ansätze gewählt: Erstens wurden innerhalb zweier Tabellen die Wurzelverstärkungen in Zusammenhang mit Bestandescharakteristiken gebracht; zweitens wurden Daten aus Feldaufnahmen einer Arbeit von Moos (2014, unveröffentlicht) über den Einfluss der Waldstruktur auf flachgründige Rutschungen in St. Antönien ausgewertet; drittens wurden Berechnungen in einem R-Tool für flachgründige Rutschungen gemacht, um die theoretisch mögliche Waldwirkung des Rotwalds aufzuzeigen.

3.4.1 Datenauswertung früherer Feldaufnahmen

Aus einer von Moos (2014, unveröffentlicht) zur Verfügung gestellten Tabelle von Daten aus Feldaufnahmen wurden entsprechend der Lage der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Bäume passende Datensätze gewählt, bei welchen u. a. die Abstände der jeweils fünf nächsten Bäume neben Rutsch- (49) und Kontrollflächen (47) verwertet wurden. Diese Abstände wurden im Feld per Messband von den (potentiellen) Auslösepunkten zu den fünf nächststehenden Bäumen gemessen. Die Kontrollflächen wurden von Moos (ebd., 14) per Analyse in einem Geoinformationssystem ermittelt, wobei Flächen mit gleichen Hangneigungen und Deckungsgrade wie bei Rutschflächen, miteinander verschritten, ein Mindestabstand von 30 m zu den Rutschungen eingehalten und in der daraus entstehenden Restfläche zufällig gesetzte Punkte bestimmt wurden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Unterschiede zwischen den Wurzelverstärkungen in einer gemäss den untersuchten Bäumen passenden Auswahl von 17 bzw. 7 nicht gerutschten Kontrollfläche und 29 bzw. 7 Rutschflächen aufgezeigt. Dies erfolgte durch die Bestimmung von Werten aus den modellierten Wurzelverstärkungen entsprechend den Abständen der fünf nächsten Bäume gemäss Moos (ebd.).

3.4.2 Auswertungen mit Slidefor^{NET}

Um die theoretisch mögliche Wirkung des untersuchten Teils des Rotwalds bezüglich flachgründigen Rutschungen zu zeigen, wurden in einem Auszug des internetbasierten Tools Slidefor^{NET} (Schwarz und Dorren 2014) innerhalb einer R-Version (Schwarz 2014b) Auswertungen mit Eingangsdaten aus dem Untersuchungsgebiet gemacht, wobei eigene Feldaufnahmen und Angaben von Rickli et al. (2008, Anhang) zu Bodenparametern benutzt wurden. Weiter wurden zur Sensibilitätsanalyse zwei weitere Berechnungen durchgeführt, wobei nur der Eingangswert der Hangneigung verändert wurde, um den Einfluss auf das Modell bzw. die dabei grundsätzlich mögliche Waldwirkung zu zeigen.

Dieses Modell basiert auf der Berechnung von 10'000 hypothetischen Rutschungen (verschiedene Flächen und Mächtigkeiten), welche u. a. aufgrund der aus den Eingangsparametern (Hangneigung, Rutschkörpermächtigkeit, Reibungswinkel und Kohäsion des Bodens) bestimmten Verhältnissen theoretisch auftreten können. Dabei geht das Modell davon aus, dass nur die obere Hälfte des potentiellen Rutschkörpers lateral durchwurzelt ist (Schwarz et al. 2010c, 288). In einem weiteren Schritt kann die Waldwirkung anhand variierender Angaben bezüglich der Wurzelverstärkung abgeschätzt werden, wobei für diese Arbeit nur die laterale Wurzelverstärkung beachtet wird. Bei den Resultaten der Berechnung soll das Augenmerk nicht auf der Gesamtzahl der möglichen Rutschungen liegen, sondern auf dem Verhältnis zwischen den Situationen ohne Wald und mit Wald, wobei der Waldaufbau und der Waldzustand einen bedeutenden Einfluss auf die Wurzelverstärkung hat. Daraus lässt sich eine prozentuale Waldwirkung errechnen.

4 Resultate

In diesem Kapitel werden die Resultate der Feldaufnahmen und Modellierungen der Einzelbäume sowie die Auswertungen aus der Aufskalierung auf die Bestandesebene wiedergegeben. Die verwendeten Wurzeldurchmesser reichen jeweils einen halben mm weiter als benannt ($5 \text{ mm} \triangleq 5.5 \text{ mm}$).

4.1 Untersuchte Bäume

In der Natur können Exemplare derselben Baumart auf dem gleichen Standort selbst in unmittelbarer Nähe zu einander unterschiedlich ausgeprägte Eigenschaften haben, welche von den lokalen Umwelt- und Bestandesbedingungen sowie von genetischen Faktoren beeinflusst sind, was die natürliche Variabilität wiedergibt (BFW 2014). Nachfolgend wird eine Zusammenfassung von Charakteristiken der sieben im Feld untersuchten Bäume aufgeführt, welche für die nachfolgend aufgeführten Resultate zu gemessenen Werten die Datengrundlage boten. Die vollständigen Angaben zuzüglich Photographien sind in Anhang 1.3 abgelegt.

Bemerkung: Bei Baum 6 konnte wegen der sehr grossen bergseitigen Wurzelanläufe (s. Photo im Anhang 1.3) kein Profil auf 1.5 m gegraben werden.

Tab. 1: Zusammenfassung von Charakteristiken der sieben untersuchten Bäume

Baum Nr.	BHD [m]	Baumhöhe [m]	Ø Krone [m]	Kronenlänge [%]	Profilanzahl [n]	Wurzelanzahl bis 5 mm [n]			Wurzelanzahl bis 15 mm [n]		
						P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	0.42	22.5	6	100	3	115	170	71	133	185	85
2	0.42	28	4	40	3	104	57	15	114	62	15
3	0.45	30	6	50	3	255	200	200	273	218	224
4	0.46	27	5	75	3	205	117	82	214	123	86
5	0.38	27	5.5	85	3	152	130	81	165	155	97
6	0.53	32	6.5	60	2	–	112	43	–	120	49
7	0.47	26	6	80	3	150	57	25	162	64	27
Ø	0.45	27.5	5.6	70	Total: 20	164	120	74	177	132	83

Die Tab. 1 bringt u. a. zum Ausdruck, dass auch bei Bäumen mit ähnlichen Werten bestimmter Eigenschaften (BHD), andere (Baumhöhe) durchaus grössere Unterschiede aufweisen können, was die oben genannte natürliche Variabilität widerspiegelt. Auffallend dabei ist die zum Teil sehr unterschiedliche Wurzelanzahl, auf welche im nachfolgenden Unterkapitel näher eingegangen werden soll.

4.2 Wurzelverteilung

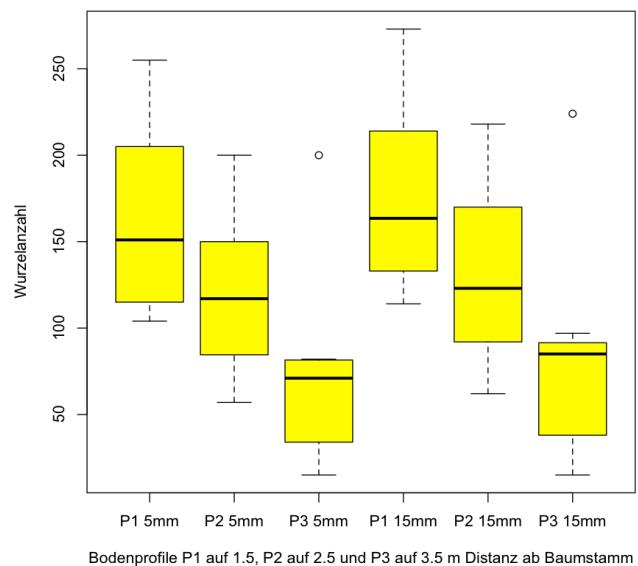
Um überhaupt auf die Wurzelverstärkung schliessen zu können, sind Angaben zur Wurzelverteilung nötig. Diese können in aufwändigen Feldaufnahmen erhoben werden oder mit einem Wurzelverteilungsmodell, bspw. nach Schwarz et al. (2010a), berechnet werden. Die Wurzelverteilung wird durch die Wurzelanzahl je Wurzeldurchmesserklasse charakterisiert (Schwarz et al. 2012, 793), wobei in dieser Arbeit nur die laterale Wurzelverteilung berücksichtigt wird. Denn die vertikale Wurzelverteilung hat oft nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Wurzelverstärkung, da der oftmals tiefer liegende Scherhorizont nicht oder nur von wenigen Wurzeln durchwachsen wird (Schwarz et al. 2010c, 290; zitiert in Schwarz et al. 2012, 793).

4.2.1 Gemessene Wurzelverteilung

In diesem Unterkapitel wird auf die räumliche Wurzelverteilung am spezifischen Standort im Untersuchungsgebiet des Rotwalds eingegangen. Untenstehende Boxplots (Abb. 14, S. 40) zeigen die Wurzelanzahl bis je 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in den drei Bodenprofilen mit 1.5 m, 2.5 m und 3.5 m Distanz von der Baumstammmitte entfernt.

Die Boxplots zeigen eine Abnahme der Wurzelanzahl mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg, wobei die Unterschiede in der Wurzelanzahl zwischen 5 und 15 mm nicht gross sind. Beide Profile 1 (P1) zeigen eine eher symmetrische Verteilung mit schwacher Tendenz zu einer linksgipf-

ligen rechtsschiefen Verteilung, die Profile 2 gegen eine fast symmetrische Verteilung auf. Die Profile 3 zeigen bis auf je einen hohen Ausreisser mit über 200 Wurzeln eine kompakte rechtsgipflige linksschiefe Verteilung. Die Werte reichen bei P1 5mm von 104 bis 255, bei P2 5mm von 57 bis 200, bei P3 5mm von 15 bis 200, bei P1 15mm von 114 bis 273, bei P2 15mm von 62 bis 218, bei P3 15mm von 15 bis 224 Wurzeln. Die Mittelwerte betragen bei P1 5mm 163.5, bei P2 5mm 120.4, bei P3 5mm 73.86, bei P1 15mm 176.8, bei P2 15mm 132.4 und bei P3 15mm 83.29. Die Unterschiede von 5 zu 15 mm betragen bei P1 + 8.1 %, bei P2 + 10.0 % und bei P3 + 12.8 %.



Bodenprofile P1 auf 1.5, P2 auf 2.5 und P3 auf 3.5 m Distanz ab Baumstamm

Abb. 14: Boxplots der Wurzelanzahl bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen untersuchten Profile

4.2.2 Modellierte Wurzelverteilung

Die Wurzelverteilung kann neben der Erhebung von aufwändigen Feldaufnahmen auch modelliert werden. Nachfolgend werden Diagramme (Abb. 15) zur modellierten Wurzelverteilung bis je 5 und 15 mm, in Abhängigkeit von der Distanz vom Baumstamm weg gezeigt. Die durchschnittlichen Werte der Wurzelverteilungen werden als gezogene Linie dargestellt. Weiter wurde über die Standardabweichung, berechnet aus der Varianz aller gemessenen Bäume gemäss Caflisch (2014, unveröffentlicht), die jeweilige Bandbreite der Wurzelverteilung als 95 %-Vertrauensintervall innerhalb der gestrichelten Linien dargestellt, wobei die obere den maximalen und die untere den minimalen Wert darstellt.

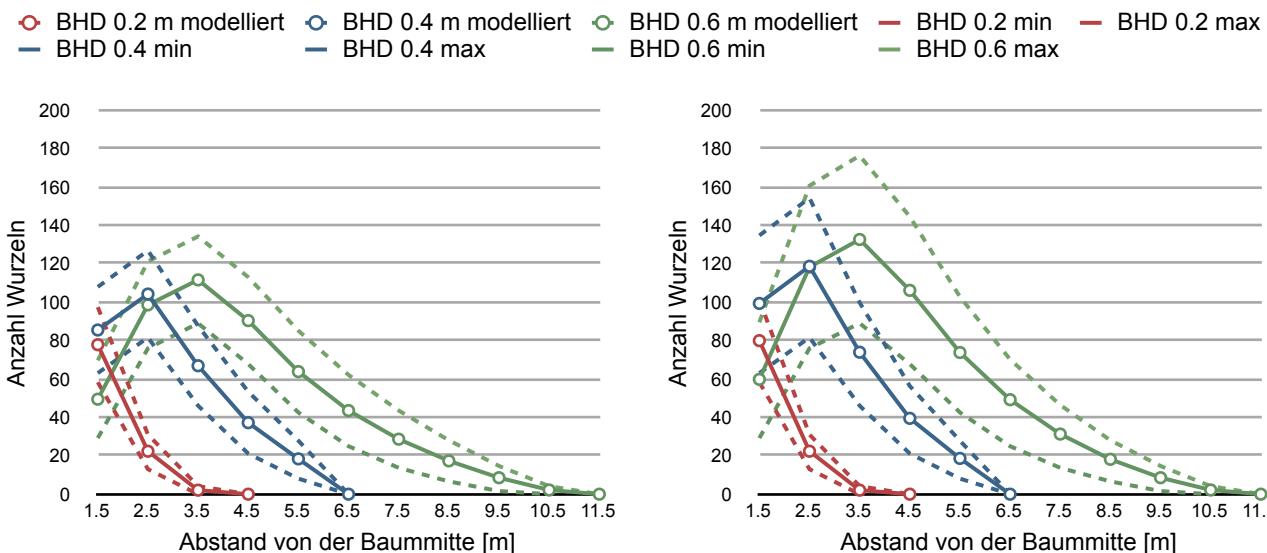


Abb. 15: Modellierte Wurzelanzahl verschiedener BHD mit zunehmender Distanz vom Baum weg; links 5 mm, rechts 15 mm

Die modellierte Wurzelverteilung nimmt bis zu einem Peak hin zu und danach wieder ab. Dieser Peak ist grundsätzlich BHD abhängig (Schwarz et al. 2010a, 359), wobei sich dieser Peak mit zunehmen-

dem BHD weiter weg von der Baumstammmitte verschiebt. Die Zunahme der Bandbreite der möglichen Verteilungen korreliert mit zunehmendem BHD und mit zunehmender Wurzelanzahl bis zum Peak, danach nimmt sie entsprechend der Wurzelanzahl auch wieder ab.

4.3 Wurzelverstärkung

In diesem Unterkapitel werden die im RBMw aus den Wurzelverteilungen der Feldaufnahmen und Modellierungen erzeugten Werte präsentiert. Denn von einem kalibrierten Modell der Wurzelverteilung, wie es Caflisch (2014, unveröffentlicht) für die untersuchten Bäume erstellt hat, ist es möglich, die Verteilung der Wurzelverstärkung zu quantifizieren (Schwarz et al. 2012, 799).

4.3.1 Wurzelverstärkung individueller Wurzeln

Nachfolgend wird auf die Wurzelverstärkung am spezifischen Standort im Untersuchungsgebiet des Rotwalds eingegangen. Die Kräfte individueller Wurzeln korrelieren mit der Zunahme ihrer Durchmesser, wobei auch die mögliche Verschiebung zunimmt. Dieser Zusammenhang ist deshalb zu berücksichtigen, da die Korrelation der zunehmenden Verschiebung mit zunehmender Kraft in Relation mit Zugbrüchen wichtig ist, welche bei Auslösungsprozessen von Rutschungen auftreten (Vergani et al. 2014, 23f). In unten stehender Abb. 16 wird dies in Kraft-Verschiebungs-Diagrammen für die gemessenen Wurzeldaten aufgezeigt.

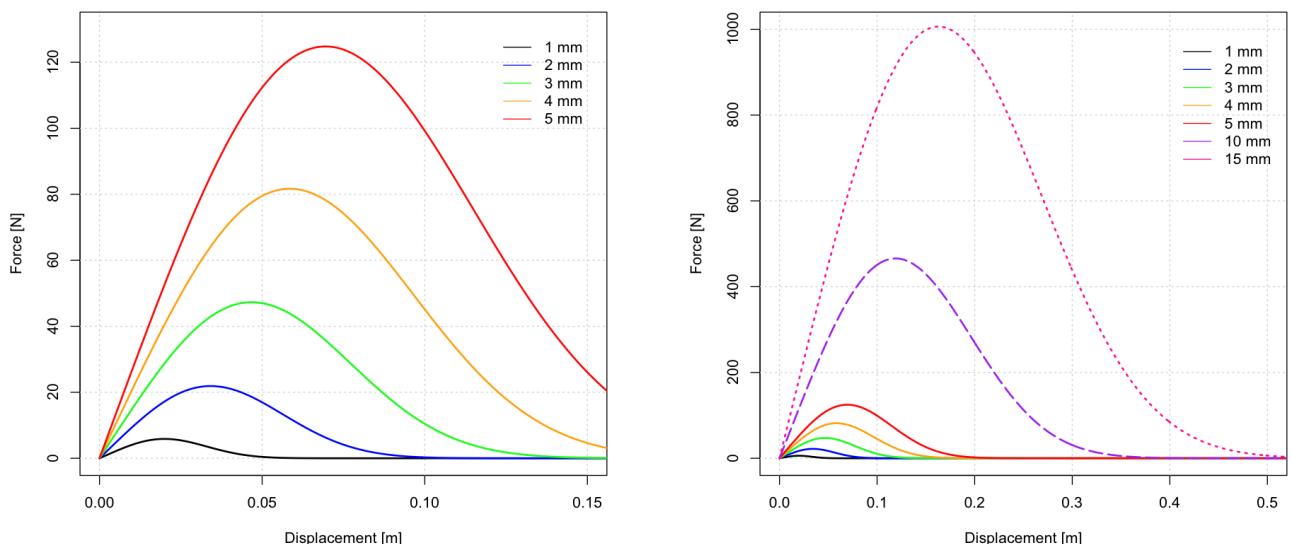


Abb. 16: Zugkräfte individueller Wurzeln; links bis 5 mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser

Die Kurven zeigen die maximale Zugfestigkeit am höchsten Punkt der Kurven und sagen u. a. aus, dass die Zugkraft, welche eine einzelne 15 mm Wurzel aufnehmen kann, derjenigen von ca. 200 Wurzeln mit 1 mm oder von 8 Wurzeln mit 5 mm entspricht.

4.3.2 Wurzelverstärkung von (gemessenen) Wurzelbündel

Die Summe aller individuellen Zugkräfte der Wurzelanzahl aus den Feldaufnahmen ergeben jeweils die Kraft aus dem RBMw pro Bodenprofil in nachfolgenden Diagrammen (Abb.17a-f), wobei in der linken Spalte jene bis 5 mm Wurzeldurchmesser und in der rechten Spalte jene bis 15 mm Wurzeldurchmesser gezeigt werden.

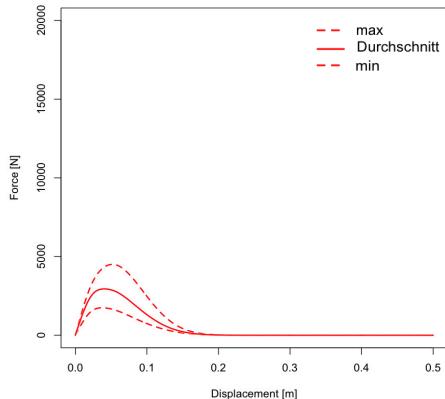


Abb. 17a: Zugkräfte Profile 1 [5 mm Ø]

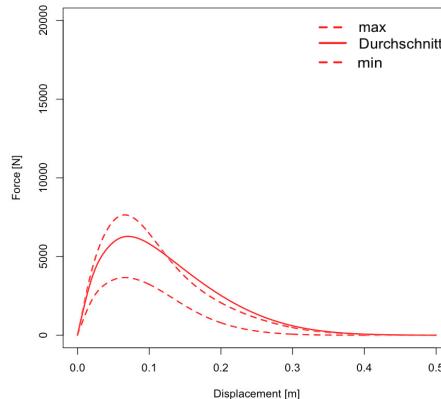


Abb. 17b: Zugkräfte Profile 1 [15 mm Ø]

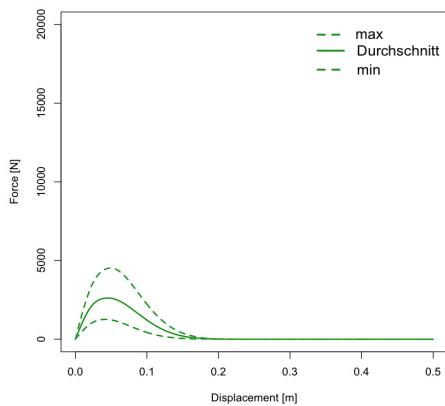


Abb. 17c: Zugkräfte Profile 2 [5 mm Ø]

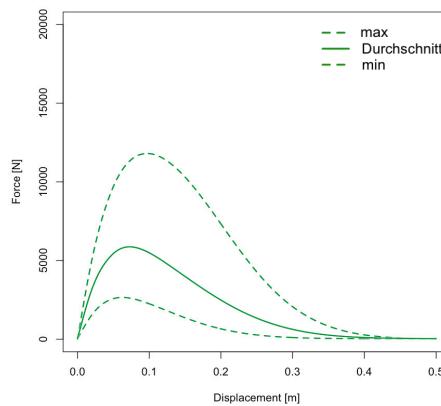


Abb. 17d: Zugkräfte Profile 2 [15 mm Ø]

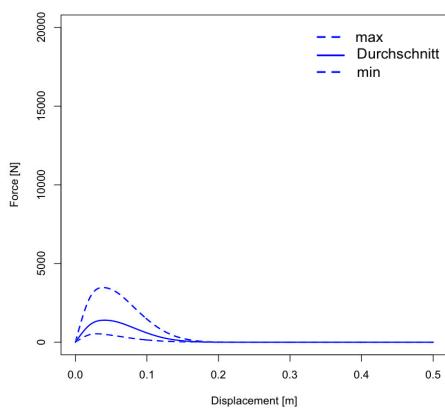


Abb. 17e: Zugkräfte Profile 3 [5 mm Ø]

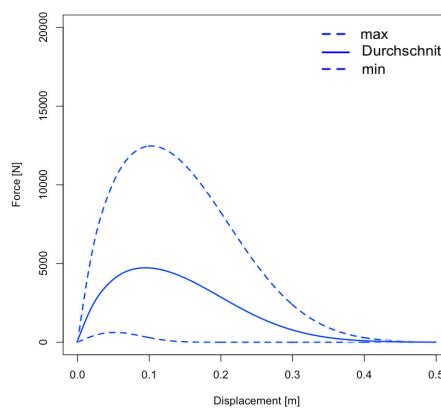


Abb. 17f: Zugkräfte Profile 3 [15 mm Ø]

was sich auch in der Zusammenfassung aller Profile in Abb. 18 (S. 43) zeigt.

Im Anhang 3.2 sind die Tabellen A und B mit den genauen Zahlen und der Zusammenfassung der Werte in den Teildiagrammen der Abb. 17 sowie die Unterschiede der Wurzelbündelkräfte abgelegt.

Nachfolgende Darstellung (Abb. 18) zeigt Boxplots der Wurzelverstärkung in den jeweiligen drei Profilen für 5 mm und 15 mm Wurzeldurchmesser. Dieser Vergleich zeigt auf, dass die Streuung bei den Wurzeln bis 15 mm deutlich grösser ist als bei denen bis 5 mm und dass die Streuung von Profil 1 bis 3 zunimmt. Bei beiden Wurzeldurchmesserspektren gleich sind die Korrelation zwischen zunehmender Distanz vom Baumstamm weg und die gleichzeitige Abnahme der durchschnittlichen Wurzelverstärkung, wobei die Medianen der Kräfte im Profil 2 bis 5 mm und im Profil 3 bis 15 mm vergleichbar gross sind.

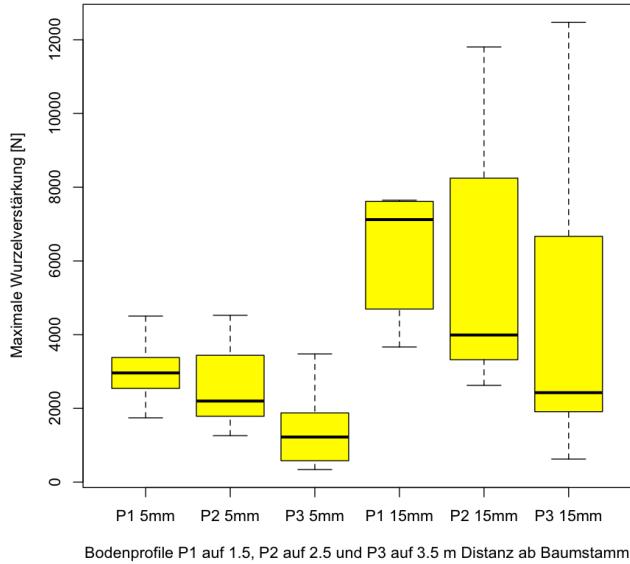


Abb. 18: Boxplots der Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen untersuchten Profile

P1 5mm 3'015 N, bei P2 5mm 2'634 N, bei P3 5mm 1'422 N, bei P1 15mm 6'311 N, bei P2 15mm 5'936 N und bei P3 15mm 4'668 N. Die Unterschiede von 5 zu 15 mm betragen bei P1 + 109.3 %, bei P2 + 225.4 % und bei P3 + 228.3 %.

Der Boxplot beim Profil 1 bis 5 mm zeigt eine symmetrische Verteilung, die Profile 2 und 3 bis 5 mm eher eine linksgipflige rechtsschiefe Verteilung. Der Boxplot beim Profil 1 bis 15 mm zeigt eine stark rechtsgipflige linksschiefe Verteilung, ganz im Gegensatz zu denen der Profile 2 und 3 bis 15 mm; diese zeigen eine linksgipflige rechtschiefe Verteilung bei grosser Streuung. Die Werte reichen bei P1 5mm von 1'744 bis 4'504 N, bei P2 5mm von 1'260 bis 4'525 N, bei P3 5mm von 537 bis 3'477 N, bei P1 15mm von 3'665 bis 7'649 N, bei P2 15mm von 2'625 bis 22'804 N, bei P3 15mm von 624 bis 12'474 N Wurzelverstärkung.

Die Mittelwerte betragen bei P1 5mm 3'015 N, bei

4.4 Aufskalierung der Wurzelverstärkung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene

Damit die aus Wurzelverteilungs- und Wurzelverstärkungsmodellen berechneten Resultate auch eine Bedeutung für die Schutzwaldbewirtschaftung haben, müssen Hochrechnungen von einzelnen Wurzeln über einzelne Bäume bis zu Waldbeständen möglich sein, wobei folgende Resultate erzielt wurden.

4.4.1 Rückschlüsse für die Bestandesebene durch Kraft-Abstands-Diagramme

Um die Wurzelverstärkung innerhalb von Beständen aufzeigen zu können, müssen die von den Wurzeln erzeugten Kräfte auf verschiedenen Distanzen vom Baumstamm weg bekannt sein. Dafür wurden untenstehende Kraft-Abstands-Diagramme erzeugt (Abb. 19; S. 44).

Damit die Wurzelverstärkung dargestellt werden konnte, wurden die modellierten Daten für Wurzelbündel aus dem Wurzelverteilungsmodell in das RBMw implementiert. In unten stehender Abb. 19 (S. 44) wurden die Kräfte der Wurzelbündel (5 und 15 mm) für hypothetische Bäume mit einem BHD von je 0.2 m, 0.4 m und 0.6 m in Abhängigkeit von der Distanz vom Baumstamm weg modelliert. Die durchschnittlich-

en Werte der Wurzelverstärkung werden als gezogene Linie dargestellt. Weiter wurde die jeweilige Bandbreite der Wurzelverstärkung entsprechend der Bandbreite der Wurzelverteilung innerhalb der gestrichelten Linien dargestellt, wobei die obere den maximalen und die untere den minimalen Wert darstellt.

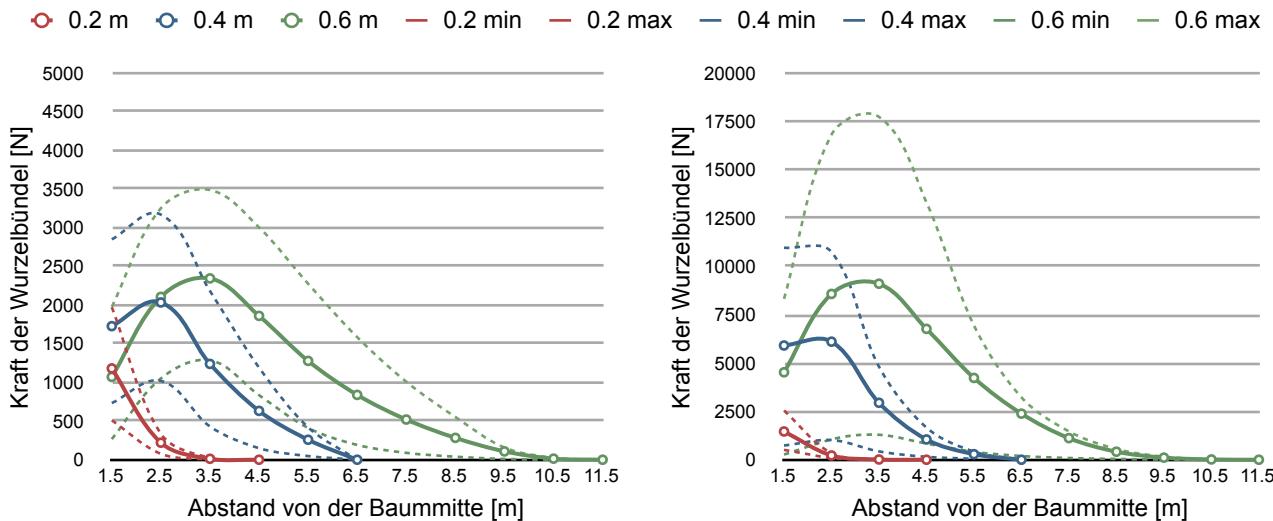


Abb. 19: Modellierte Wurzelbündelkraft mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg; links für 5 mm, rechts für 15 mm Ø

Die modellierte Kraft der Wurzelbündel nimmt abhängig von der Distanz und analog zur modellierten Wurzelverteilung (Abb. 15; S. 40) bis zu einem Peak hin zu und danach wieder ab. Dieser Peak ist grundsätzlich BHD-abhängig, wobei sich mit zunehmendem BHD dieser Peak weiter von der Baumstammmitte weg verschiebt (Schwarz et al. 2010a, 363). Die Zunahme der Bandbreite der möglichen Verstärkung korreliert mit der modellierten Wurzelverteilung und mit zunehmendem BHD bis zum Peak, danach nimmt sie wieder ab. Es zeigt sich beim rechten Diagramm (Abb. 19) eine sehr grosse Streuung der möglichen Wurzelverstärkungen.

Der Vergleich der modellierten (Abb. 19) mit den Wurzelverstärkungen gemessener Wurzelbündel (Abb. 18, S. 43) zeigt, dass entsprechend der Wurzelverteilung bei den gemessenen Daten die Wurzelverstärkung mit zunehmender Distanz abnimmt und nicht in einem Peak auf 2.5 oder 3.5 m wie in Abb. 19 gipfelt. Ähnlichkeiten zeigen sich hingegen beim Streubereich: Der grosse Streubereich im zweiten und dritten Profil der gemessenen Daten bis 15 mm (Abb. 18, S. 43) widerspiegelt sich in den modellierten Daten. Auch der Vergleich der Daten bis 5 mm zeigt eine Ähnlichkeit bezüglich des Streubereichs, welcher um einiges kleiner ist als bei 15 mm.

4.4.2 Praxisorientierte Tabellen zur Abschätzung der Wurzelverstärkung

Um für die waldbauliche Praxis Aussagen machen zu können, braucht es pragmatische Formulierungen der wissenschaftlichen Berechnungen. Nachfolgend werden zwei praxisorientierte Tabellen (Tab. 2 und 3, S. 45) präsentiert, welche Rückschlüsse aus den Kraft-Abstands-Diagrammen (Abb. 19) ziehen. Dabei sollen durch eine einfache Aufsummierung der Kräfte von Bäumen auf einer gewissen Distanz die mögliche Wurzelverstärkung gezeigt werden, wodurch sich Mindestabstände für die Bäume im untersuchten Teil des Rotwalds ergeben. Denn der Baumabstand bzw. der Abstand zwischen den jeweiligen Wurzelsystemen ist durch die Bodenerschliessung der Wurzeln und der damit zusammenhängen-

den Armierung des Bodens massgebend für die Waldwirkung im Zusammenhang mit der Hangstabilität. Die Ergebnisse zeigen Werte für homogene Fichten-Bestände mit spezifischen Eingangsparametern aus den Feldaufnahmen. Damit die jeweilige Wurzelverstärkung im gesamten Bestand erreicht werden kann, wurde der potentielle Anrisspunkt in die Mitte eines hypothetischen Quadrates gelegt, welcher dem Punkt der minimalen Verstärkung entspricht. Die Distanzen der vier Bäume zu diesem Anrisspunkt wurden für die entsprechenden Wurzelverstärkungen aus den modellierten Daten unter 4.4.1 für die bis 15 mm dicken Wurzeln abgeleitet. Folgende Berechnungen wurden angewendet:

Die Distanz der Bäume zum Anrisspunkt wird für $x \text{ kPa}/4$ aus dem Diagramm (Abb. 19) abgelesen. Dieser Wert mal 2 ergibt den diagonalen Baumabstand, womit über den Pythagoras-Satz der effektive Baumabstand bestimmt werden kann. Wird dieser Wert quadriert und eine Hektare durch jenen geteilt, ergibt sich die Stammzahl je Hektar (St/ha). Der Deckungsgrad (DG) ergibt sich aus dem Verhältnis einer Hektare zur Multiplikation der St/ha mit der Fläche der Kronenprojektion des jeweiligen BHD, welche wiederum vom Durchschnitt der untersuchten Bäume aus der Tab. 2 proportional abgeleitet wurde. Nachfolgende Tab. 2 gibt die St/ha von BHD 0.2 m, 0.4 m und 0.6 m und die dazu nötigen Baumabstände (BA) für verschiedene Wurzelverstärkungen wieder. Die Spalte DA (Distanz Anriss) zeigt die jeweilige Distanz der vier Bäume zum potentiellen Anrisspunkt in der Mitte des hypothetischen Quadrates.

Tab. 2: Stammzahlen, Baumabstände und Deckungsgrade verschiedener Wurzelverstärkungen und BHD

BHD	Wurzelverstärkung															
	2 [kPa]				5 [kPa]				10 [kPa]				15 [kPa]			
	St/ha [n]	BA [m]	DA [m]	DG [%]												
0.2	1033	3.11	4.4	51	1960	2.26	1.60	96	–	–	–	–	–	–	–	–
0.4	192	7.21	10.2	38	260	6.20	4.38	51	370	5.20	3.68	73	450	4.70	3.32	88
0.6	73	11.7	16.6	32	90	10.5	7.42	40	120	9.10	6.43	53	160	8.00	5.66	71

Die Daten zeigen, dass für höhere Wurzelverstärkungen auch eine zunehmende Anzahl Bäume nötig sind, wobei ab einem gewissen Punkt nur noch grössere BHD dies noch erreichen. Für 10 kPa sind bspw. mind. eine Anzahl von rund 370 Bäumen mit BHD 0.4 m oder 120 mit BHD 0.6 m notwendig. Tab. 3 zeigt die maximale Wurzelverstärkung für BHD 0.2 m, 0.4 m und 0.6 m bei verschiedenen DG sowie die entsprechenden Stammzahlen pro Hektar und die dazu nötigen Baumabstände, was durch Zurückrechnen der verschiedenen Werte aus der Tab. 2 oben erzeugt wurde.

Tab. 3: Minimale Stammzahl pro Hektar mit entsprechenden Baumabständen für verschiedene BHD und Deckungsgrade

DG [%]	BHD 0.2				BHD 0.4				BHD 0.6			
	F _{max} [N]	St/ha [n]	BA [m]	DA [m]	F _{max} [N]	St/ha [n]	BA [m]	DA [m]	F _{max} [N]	St/ha [n]	BA [m]	DA [m]
10-30	48	408	4.95	3.50	0	102	9.90	7.01	56	45	14.90	10.54
40-60	2200	1020	3.13	2.21	4800	255	6.26	4.43	8800	115	9.33	6.60
70-90	4400	1633	2.48	1.75	11760	408	4.95	3.50	19200	180	7.45	5.27
> 90	5200	1940	2.27	1.61	18000	485	4.54	3.21	23500	215	6.82	4.82

Die entsprechenden Werte der Wurzelverstärkungen stammen aus den modellierten Daten unter 4.4.1 für bis 15 mm dicke Wurzeln. Für die verschiedenen Deckungsgrade wurde mit folgenden gemittelten Werten gerechnet: 10 - 30 % (aufgelöst - lückig): 20 %, 40 - 60 % (lückig - normal): 50 %, 70 - 90 % (normal - dicht): 80 und > 90 % (dicht - geschlossen): 95 %.

Die Resultate zeigen eine grundsätzliche Korrelation zwischen zunehmenden Wurzelverstärkungen, zunehmenden Deckungsgraden und zunehmendem BHD.

4.4.3 Datenauswertung früherer Feldaufnahmen

Ereignisanalysen dienen dem Sammeln von Daten und dem Aufstellen von Hypothesen, während im Vergleich mit Modellierungen Aussagen daraus abgeleitet werden können. Unten stehende Boxplots (Abb. 20 und 21, S. 47) zeigen die Verteilungen der maximalen Wurzelverstärkung zweier Auswahlen von aufgenommenen Punkten von Rutschungen (R) und Kontrollpunkten (K) aus dem Untersuchungsperimeter St. Antönien (s. Karte im Anhang 3.1), welche von Moos (2014, unveröffentlicht) bestimmt wurden. Damit sollen im Vergleich zu den oben dargestellten hypothetischen Rückschlüsse für die Bestandesebene, konkrete Situationen aus dem Rotwald dargestellt werden.

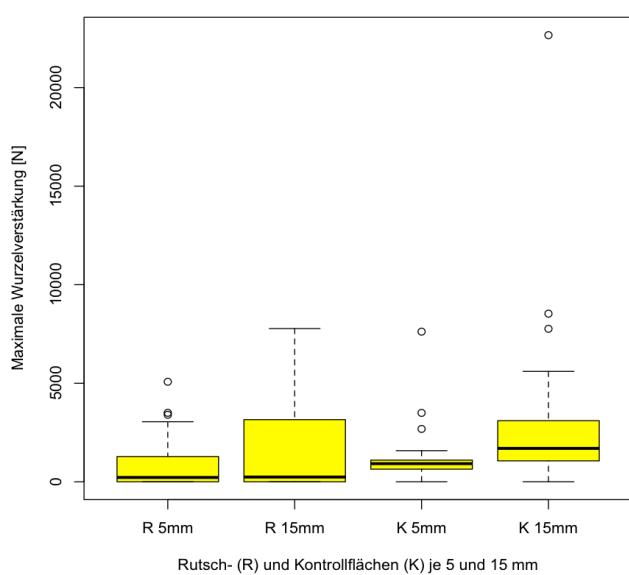


Abb. 20: Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser in allen berücksichtigten Rutsch- und Kontrollflächen

In der Abb. 20 wurden alle vergleichbaren Punkte gemäss der Karte im Anhang 3.1 verwendet, welche sich im Rotwald befinden. Dabei zeigt sich, dass bis auf den Boxplot der K 5 mm (symmetrisch) alle anderen eine linksgipflige rechtsschiefe Verteilung aufzeigen, wobei die Streuung durch Ausreisser zum Teil sehr hoch ist.

Die Werte reichen bei den Rutschungsflächen von 0 bis gut 5'000 N bei R 5mm und bis knapp 7'800 N bei R 15mm. Bei den Kontrollflächen reichen sie von rund 5 N bis gut 7'600 N bei K 5mm und bis gut 22'600 N (grober Ausreisser) bei K 15mm. Die Mittelwerte betragen bei R 5mm 937 N, bei K 5mm 1'452 N, bei R 15mm 1'631 N, und bei K 15mm 3'701 N.

Für die untenstehende Boxplots (Abb. 21, S. 47) wurde eine weitere Auswahl aus den Rutsch- und Kontrollflächen (ebd.) getroffen. Dabei wurden je sieben Flächen bestimmt, welche sich in der Nähe der untersuchten Bäume befinden, möglichst ähnliche Hangneigungen aufweisen und entsprechend dem Kriterium des DG kategorisiert wurden. Dieser macht unterschwellig auch eine Aussage über die Bestandesdichte, welche durch den Abstand und die Anzahl Bäume einen wesentlichen Einfluss auf die Wurzelverstärkung hat. Ausgewählt wurden je eine Fläche mit einem DG von 10 - 24% (Einzelbäume), 50 - 64 % (locker) und > 65 % (normal-gedrängt) und je zwei Flächen mit DG 25 - 34 % (aufgelöst) und 35 - 49 % (lückig). Diese Aufteilung wurde deshalb gewichtet, da die Kategorien zwischen

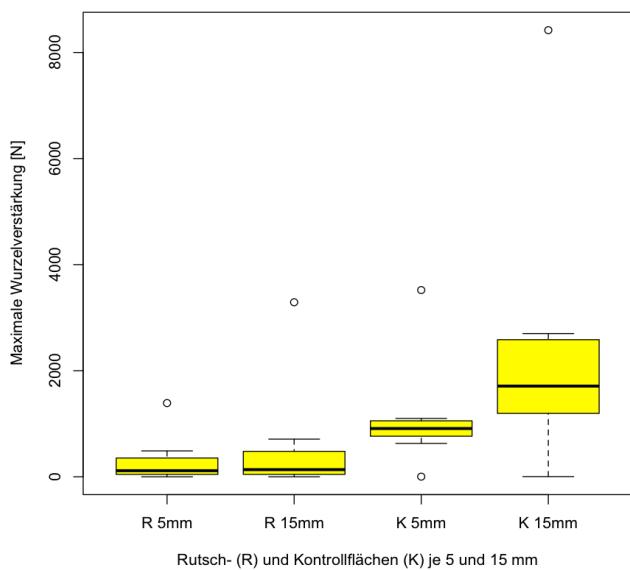


Abb. 21: Wurzelverstärkung bis 5 und 15 mm Wurzeldurchmesser der Auswahl an je sieben Rutsch- und Kontrollflächen

(grober Ausreißer) bei K 15mm. Die Mittelwerte betragen bei R 5mm 329 N, bei K 5mm 1'153 N, bei R 15mm 639 N und bei K 15mm 2'527 N.

25 und 50 % DG stärker im Rotwald vertreten sind und dies dadurch berücksichtigt werden soll. Die Boxplots in Abb. 21 zeigen die Unterschiede zwischen den Rutsch- und Kontrollflächen um einiges deutlicher auf als jene in Abb. 20 (S. 46), wobei die von R 5mm und R 15mm linksgipflig rechtsschief verteilt sind und je einen Ausreißer aufweisen. Die Boxplots der K 5mm und K 15mm sind fast symmetrisch verteilt, wobei K 5mm zwei Ausreißer und Boxplot K 15mm eine etwas größere Streuung zeigt. Die Werte reichen bei den Rutschungsf lächen von 0 bis knapp 1'400 N bei R 5mm und bis knapp 3'300 N bei R 15mm. Bei den Kontrollflächen reichen sie von knapp 5 N bis gut 3'500 N bei K 5mm und bis gut 8'400 N

4.5 Auswertungen mit Slidefor^{NET} zur Sensibilitätsanalyse der Hangstabilität

In diesem Unterkapitel wird auf die quantifizierte Waldwirkung zur Hangstabilisierung bezüglich Verhinderung der Auslösung flachgründiger Rutschungen eingegangen. Dies wird anhand von Auswertungen mit einem R-Skript-Auszug von Slidefor^{NET} (Schwarz 2014b) einerseits für Eingangsdaten aus dem Untersuchungsgebiet gezeigt, wobei eigene Feldaufnahmen und Angaben von Rickli et al. (2008, xx; Bodenparameter) und Schwarz (2014a, mündliche Mitteilung) benutzt wurden. Andererseits wurde eine Sensibilitätsanalyse der grundsätzlichen Waldwirkung für ähnliche Situationen durchgeführt, wobei allein die Hangneigung variiert ($\pm 5^\circ$).

4.5.1 Situation im untersuchten Teil des Rotwalds

Die Eingangsdaten aus dem Untersuchungsgebiet betragen folgende Werte: Hangneigung 29° , Bodenreibungswinkel 29° , Bodenkohäsion 1.5 kPa und Rutschkörpermächtigkeit 1.2 m. Die folgende Darstellung (Abb. 22, S. 48) zeigt die potentielle Waldwirkung unter den oben genannten Bedingungen und die daneben stehende Tabelle (Tab. 4, S. 48) zeigt dies in bezifferten Werten.

Die Darstellung ist wie folgt zu lesen: Die leeren Balken zeigen das gesamte Rutschvolumen in zunehmenden Größenklassen (x-Achse) ohne Waldwirkung ((0.0 kPa); Situation wie im Freiland), wobei diese nach einer Ereigniswahrscheinlichkeit (y-Achse) aufgeteilt sind. Die bunten Balken geben die Waldwirkung mit der jeweils gegebenen bis zur gemäss Slidefor^{NET} maximal möglichen Wurzelverstärkung von 15.0 kPa bei optimalem Waldaufbau und -zustand wieder.

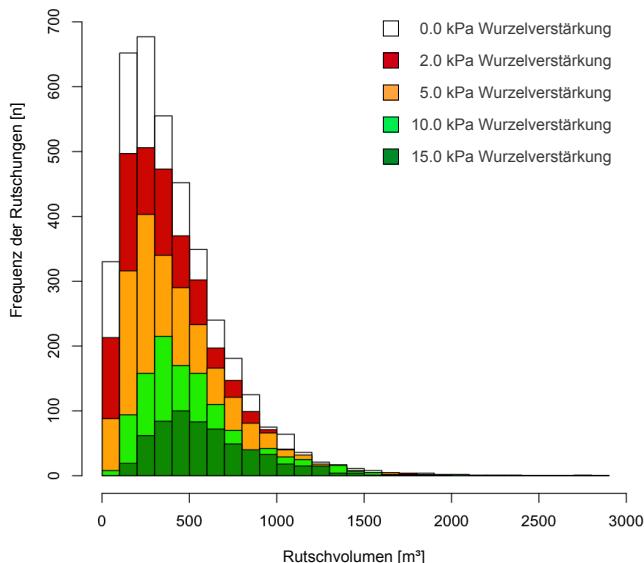


Abb. 22: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (29°)

Tab. 4 zeigt die Größenveränderung des mobilisierbaren Rutschvolumens bei verschiedenen Wurzelverstärkungen. Bei optimalem Waldzustand können die Bäume über die Wurzelverstärkung das gesamte theoretisch mobilisierte Rutschvolumen auf fast einen Fünftel senken, wobei die Wirkung mit zunehmender Rutschvolumenklasse proportional abnimmt.

4.5.2 Hypothetische Situationen in flacherem und steilerem Gelände

Nachfolgend wird die Waldwirkung auf die Hangstabilität in flacherem (24°) und steilerem (34°) Gelände gezeigt. In der Abb. 23 mit zugehöriger Tab. 5 werden die Auswertungen aus Slidefor^{NET} mit einer Hangneigung von 24° gezeigt.

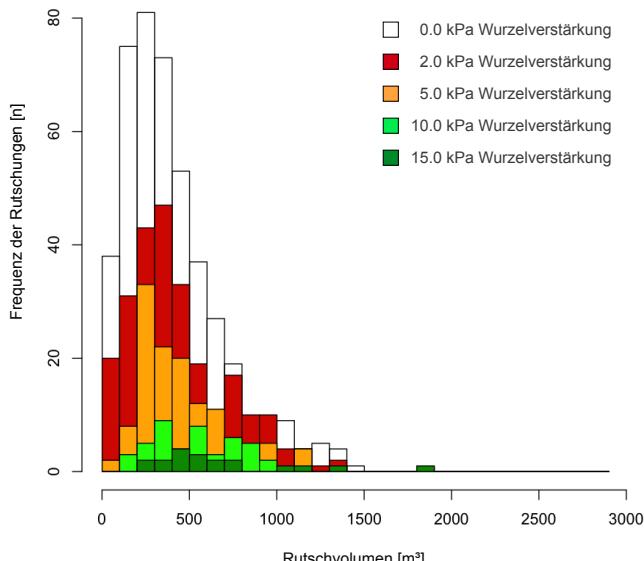


Abb. 23: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (24°)

Es wird dabei deutlich, dass im Vergleich mit Abb. 22 durchschnittlich kleinere Rutschvolumina mit geringeren Frequenzen auftreten, wobei der Wald eine grössere Wirkung ausüben kann. Das mobil-

Tab. 4: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (29°)

Laterale Wurzelverstärkung	Mobilisiertes Rutschvolumen	Prozentualer Anteil
0.0 kPa	1'892'360.0 m ³	100.0 %
2.0 kPa	1'583'802.0 m ³	83.7 %
5.0 kPa	1'182'725.0 m ³	62.5 %
10.0 kPa	690'711.4 m ³	36.5 %
15.0 kPa	412'606.2 m ³	21.8 %

Tab. 5: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (24°)

Laterale Wurzelverstärkung	Mobilisiertes Rutschvolumen	Prozentualer Anteil
0.0 kPa	215'219.6 m ³	100.0 %
2.0 kPa	137'085.9 m ³	63.7 %
5.0 kPa	70'938.7 m ³	33.0 %
10.0 kPa	33'524.3 m ³	15.6 %
15.0 kPa	15'796.5 m ³	7.3 %

isierte Rutschvolumen kann schon bei einer Verstärkung von 5 kPa auf einen Drittel reduziert werden. Unten (Abb. 24 und Tab. 6) sind die Resultate mit einer Hangneigung von 34° aufgeführt.

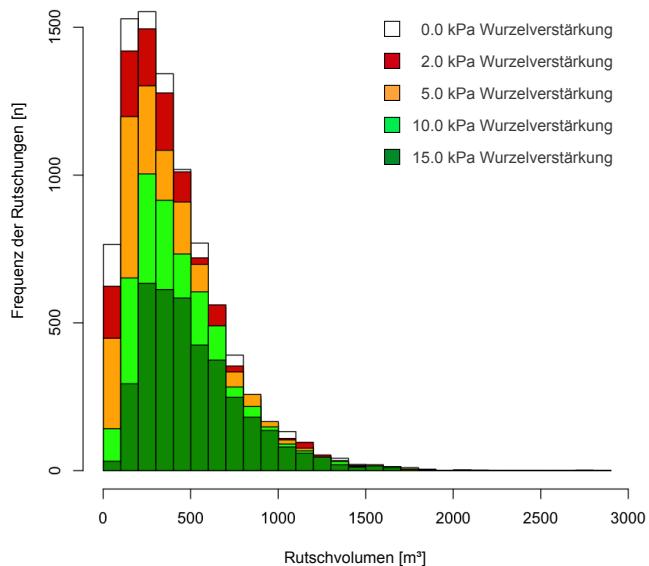


Abb. 24: Wurzelverstärkungseinfluss auf die Rutschmasse (34°)

Tab. 6: Rutschvolumen versch. Wurzelverstärkungen (34°)

Laterale Wurzelverstärkung	Mobilisiertes Rutschvolumen	Prozentualer Anteil
0.0 kPa	4'142'466.0 m³	100.0 %
2.0 kPa	4'017'658.0 m³	97.0 %
5.0 kPa	3'660'686.0 m³	88.4 %
10.0 kPa	3'066'550.0 m³	74.0 %
15.0 kPa	2'340'373.0 m³	56.5 %

Es wird ersichtlich, dass im Vergleich mit den Auswertungen tieferer Hangneigungen durchschnittlich grössere Rutschvolumina mit höheren Frequenzen auftreten, wobei der Wald eine geringere Wirkung ausüben kann. Das mobilisierte Rutschvolumen kann auch bei maximaler Verstärkung von 15 kPa nur um knapp die Hälfte reduziert werden.

5 Diskussion

In den folgenden Unterkapiteln werden die erzielten Resultate differenziert betrachtet, kritisch beurteilt und mit Daten aus der Literatur in Verbindung gebracht.

5.1 Untersuchte Bäume

Im Vergleich mit NaiS (Frehner et al. 2005, Anhang 2B, 19ff) bezüglich subalpiner Nadelwälder (ohne Föhren- und Arvenwälder; 1'500 - 2'000 m ü.M.) zeigt sich eine gute Übereinstimmung, wodurch die untersuchten Bäume durchaus repräsentativ für diesen Standort und diese Höhenstufe sind:

Die Fichte bildet die Klimaxbaumart im Rotwald mit einem den extremen klimatischen Verhältnissen in subalpiner Höhenstufe entsprechenden meist offenen Kronendach, wobei der Schlussgrad oft räumig bis aufgelöst und der Bestandesaufbau tendenziell stufig ist. Der h/d-Wert zwischen 50 und 70 zeigt einen guten Stabilitätswert auf, was bei abholzigen Bäumen oft der Fall ist. Die Kronen entsprechen durchschnittlich gut 2/3 der Baumlänge und sind relativ breit, was die Lage der Bäume am Rand (von Rotten) zu offeneren Flächen wiedergibt.

5.2 Wurzelverteilung

Da in der vorliegenden Arbeit die Wurzelverstärkung aus der Wurzelverteilung berechnet wird, ist es wichtig, diese korrekt zu quantifizieren. Wie nachfolgend aufgezeigt wird, gibt es zwischen den gemessenen Daten aus dem Feld und den Daten aus dem Wurzelverteilungsmodell (Schwarz et al. 2010a) viele Ähnlichkeiten, aber zum Teil auch grosse Unterschiede, was u. a. auch eine hohe Variabilität wiedergibt, so wie sie in der Natur vorkommen kann.

Bei den Feldaufnahmen ist eine gute Vorbereitung und Zusammenarbeit von grossem Vorteil, da dadurch sehr effektiv und effizient gearbeitet werden kann. So konnten entgegen der ursprünglichen zeitlichen Planung bei sieben, statt nur bei fünf Bäumen Bodenprofile ausgehoben werden. Aber es gibt auch immer Unerwartetes: So erwies sich die Auswahl geeigneter Bäume schwieriger und zeitintensiver als erwartet. Die Zusammenarbeit in Zweierteams pro Baum und Bodenprofil erschien optimal. Für das Graben, die Baum- und Standortbeurteilungen sowie die Wurzelaufnahmen an den 20 Bodenprofilen wurden insgesamt vier Tage benötigt (2 Bodenprofile pro Fachkraft und Tag), wobei zum Teil sehr widrige Witterungsbedingungen herrschten. Auch Schwarz et al. (2012, 800) benötigten in etwa den gleichen Zeitrahmen (2 - 4 Bodenprofile pro Fachkraft und Tag), wobei sie hinzufügen, dass dieser grosse Zeitaufwand ausführlichere Datenerhebungen limitiert. Der Umstand, dass in vorliegender Arbeit durch das grössere Bodenprofil (1 m anstatt 0.5 m Breite bei 0.5 m Tiefe) im Durchschnitt eine höhere Wurzelanzahl untersucht wurde, relativiert den im unteren Bereich liegende Zeitaufwand pro Bodenprofil verglichen mit Schwarz et al. (ebd.). Weiter soll angemerkt werden, dass solche Aufnahmen zukünftig sicherlich früher im Jahr als erst im Spätherbst stattfinden sollten, da in subalpinen Lagen um diese Zeit doch schon mit Schneefällen gerechnet werden muss.

Die Wahl einer Bodentiefe von 0.5 m ergibt sich daraus, dass Wurzeln, welche aus dem A- oder oberen B-Horizonts knapp unter der Bodenoberfläche stammen, dazu tendieren, parallel zur Bodenoberfläche zu wachsen. Wurzeln, welche in tieferen Bodenschichten auftreten, wachsen eher gravitropisch, wobei nur wenige Wurzeln in den C-Horizont eindringen. Somit befindet sich rund 90 % des Wurzelvolumens in steilen Hängen innerhalb der oberen 0.4 m des Bodens (Nicoll et al. 2006, 706), was wiederum die Wichtigkeit der lateralen im Gegensatz zur basalen Wurzelverstärkung zeigt, da sonst kaum Rutschungen tiefer als ein Meter stabilisiert werden würden. Auch andere Autoren zeigten auf, dass sich der grösste Teil der Wurzelmasse im obersten halben Meter Bodentiefe befindet (Genet et al. 2008, 1521; Mao et al. 2013, 376).

Die Resultate, welche nachfolgend diskutiert werden, stehen unter der Annahme, dass die Arbeiten im Feld, speziell die Aufnahmen zu den Wurzelverteilungen, korrekt und exakt ausgeführt wurden.

Bezüglich des Messverfahrens gibt es sehr unterschiedliche Methoden, um die Wurzelverteilung festzustellen, wobei auch verschiedene Grössenkategorien (bspw. Durchmesserklassen) und Einheiten (bspw. Wurzelanzahl, deren Gewicht bzw. Masse oder Wurzeldichte im Boden) verwendet werden. Beispiele: Genet et al. (2008, 1519) sammelten Daten zur Bestimmung der Wurzelmasse durch Entnahme von Bodenproben, bei welchen mittels Siebverfahren die Wurzeln extrahiert, getrocknet und das Verhältnis des Gewichts mit dem von nichtdurchwurzelten Bodenproben verglichen wurden. Ji et al. (2012, 140f) gruben je drei Profile mit 0.5 auf 0.5 m Dimension lotrecht zum Hang, berg- und tal-

seitig auf einer Distanz von 0.25 und 0.5 m vom Baumstamm weg. Die Wurzeln wurde gezählt und in die Durchmesserklassen <1, 1 - 2, 2 - 5 und 5 - 10 mm eingeteilt, gleich wie Genet et al. (2008, 1519) diese klassifiziert haben.

Es ist augenscheinlich, dass durch solch unterschiedliche Aufnahmemethoden bei Aufskalierungen auf andere Ebenen stark unterschiedliche Resultate entstehen können. Und wie schon Vergani et al. (2014, 22) festhalten, wäre es von Vorteil, einem standardisierten Verfahren für die Ermittlung der Wurzelverteilung zu folgen, da dadurch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien verbessert werden könnte.

Für künftige Studien empfehlen Mao et al. (2013, 357) die Saisonalität der Wurzeldynamik bei der Untersuchung der Wurzelverteilung bzw. Wurzelverstärkung unbedingt zu berücksichtigen, da die Ausprägung des Wurzelsystems sehr grossen saisonalen Schwankungen unterliegt (ebd., 373). So wurden bspw. im September Spitzenwerte in der Ausprägung und Menge der monatlichen Wurzelmortalität beobachtet (ebd.), woraus geschlossen werden kann, dass die Wurzelanzahl der vorliegenden Arbeit zu anderen Jahreszeiten noch höher liegen könnte. Die Saisonalität wird dabei v. a. durch die Bodentemperatur und den Bodenwassergehalt geprägt, wobei in subalpinen Lagen sicherlich die Bodentemperatur der dominante Faktor ist (ebd., 377). Bezüglich dieser zwei Faktoren spielt aber auch die Lage der Bäume innerhalb des Bestandes eine gewisse Rolle, wobei Unterschiede in der Wurzeldichte bei Bäumen am Rand und innerhalb von Rotten beobachtet wurden (ebd., 374f). Dies könnte somit auch für die untersuchten Bäume im Rotwald relevant sein, da diese sich talseitig von mehr oder weniger freien Flächen befinden.

5.2.1 Gemessene Wurzelverteilung

Die Abnahme der Wurzelanzahl aus den Feldaufnahmen korreliert mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg, was den Resultaten aus den modellierten Werten widerspricht (s. u. und Kap. 4.2.2). Schwarz et al. (2010a, 360) zeigen in ihrer Arbeit, dass die Wurzelanzahl bei Bäumen mit BHD 0.3 m einen Peak zwischen 1.5 m und 2 m Distanz erreicht und erst dann abnimmt. Dazu führen Schwarz et al. (2012, 797) weiter aus, dass zwar die Feinwurzelanzahl (bei allen Spezies) zu einer Abnahme mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg tendiert, im Distanzbereich von ca. 5 - 8 mal den BHD diese aber eine maximale Intensität (Peak) erreicht.

Nicoll et al. (2006, 707) hingegen zeigen bei der Betrachtung der Grobwurzeldichten (Durchmesser > 5 mm), dass diese mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg abnehmen. Und auch Genet et al. (2008, 1521f) stellten fest, dass die mittlere Wurzeldichte (für Wurzeldurchmesser bis 10 mm) mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg abnimmt, wobei bei sehr hohen Bestandesdichten diese beinahe homogen sein kann (Genet et al. 2008, 1521f).

Wenn von einer Abnahme der Wurzelanzahl bei zunehmendem Wurzeldurchmesser ausgegangen wird, wie von Schwarz et al. (2010a, 360) oder Caflisch (2014, unveröffentlicht) gezeigt (s. 3.3.2), kann zurückgeschlossen werden, dass von Wurzeldichten auch auf die Wurzelanzahl geschlossen werden kann. Weiter scheint es gemäss vorliegender Arbeit möglich zu sein, von der Anzahl Wurzeln bis 5 mm auf die Anzahl Wurzeln bis 15 mm grob schliessen zu können, wenn rund 10 % (bzw. 5 - 15 %)

der Wurzelanzahl bis 5 mm Durchmesser dazugerechnet werden, wie in den Resultaten unter 4.1.1 gezeigt wird. Es ist jedoch auch darauf hinzuweisen, dass die Bäume untereinander einen ähnlichen BHD von 0.45 ± 0.08 m ($\pm 17\%$) aufweisen. Ob das Verhältnis von rund 10 % auch bei anderen BHD-Klassen oder Baumarten besteht, kann anhand dieser Daten nicht erläutert werden.

Es lässt sich weiter folgern, dass die Wurzelanzahl mit Durchmesser zwischen 5 und 15 mm nur ca. 10 % der Wurzelanzahl bis 5 mm ausmachen, was auch in Schwarz et al. (2012, 8) etwa so abgebildet wurde, wobei sie ebenfalls bei Daten aus dem Feld von einer exponentiellen Abnahme der Wurzelanzahl mit zunehmendem Durchmesser ausgehen. Dasselbe zeigen auch Daten von Schwarz et al. (2010a, 360) innerhalb einer Modellierung sowie Nicoll et al. (2006, 707) in Abbildungen.

Die symmetrischen Verteilungen in den Profilen 1 und 2 sowie die Ausreisser in den Profilen 3 (Abb. 14, S. 40) zeigen wahrscheinlich die natürliche Bandbreite der Variabilität der Wurzelverteilung, welche stark von den lokalen Umweltbedingungen oder auch von genetischen Charakteristiken abhängen können (Genet et al. 2008, 1518; zitiert in Schwarz et al. 2010a, 356). Die rechtsgipflige linksschiefe Verteilung in den Profilen 3 deutet an, dass auf dieser Distanz einerseits eine gewisse Wurzelanzahl vorhanden sein kann, andererseits kann diese aber bereits zu sehr tiefe Werte tendieren, was auf einen kurzen Wurzelradius schliessen lässt.

Vergleicht man Abb. 15 (S. 40) mit folgenden Diagrammen (Abb. 25), welche die Wurzelverteilungen der einzeln untersuchten Bäume in den untersuchten Bodenprofilen zeigen, so weisen alle bis auf Baum 1 und 3 eine Abnahme der Wurzelanzahl mit zunehmender Distanz vom Baumstamm auf.

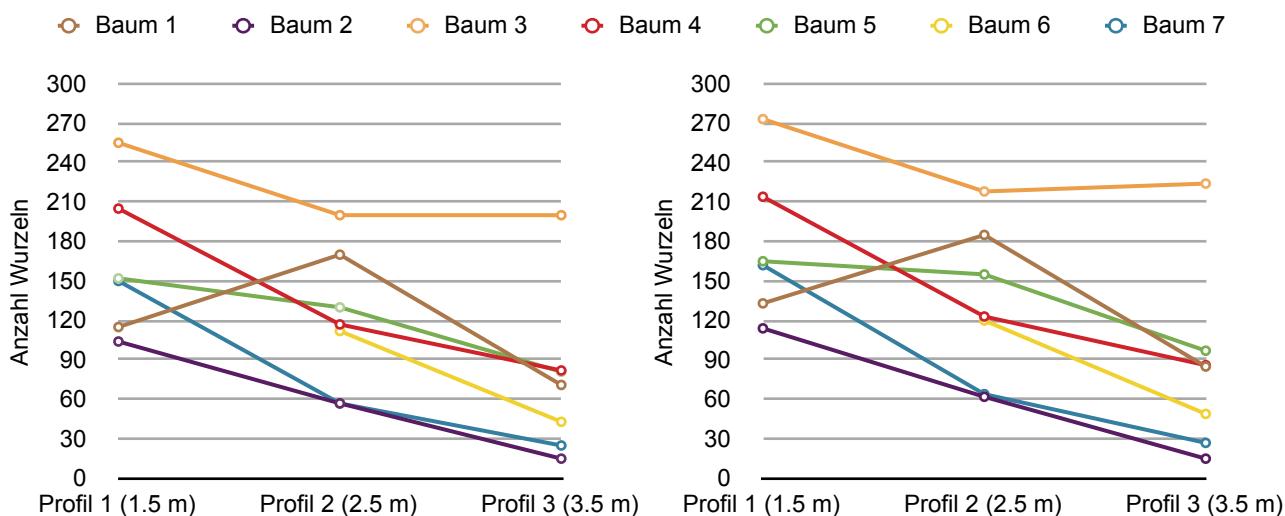


Abb. 25: Wurzelanzahl jedes Baumes pro Profil; links bis 5mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser

Baum 1 zeigt in beiden Diagrammen einen Verlauf mit einem Peak im Profil 2, wie es die Modellierung in der vorliegenden Arbeit gemäss der maximalen Intensität im Distanzbereich von 5 - 8 mal den BHD nach Schwarz et al. (2012, 797) aufweist oder ähnlich wie Schwarz et al. (2010a, 360) es zeigen. Baum 1 ist der einzige untersuchte Baum, welcher als freistehender Einzelbaum in Erscheinung tritt, was eine mögliche Erklärung dafür sein könnte. Alle anderen Bäume stehen jeweils im Randbereich einer Rotte, wobei es möglich wäre, dass dies den entscheidenden Unterschied in der Wurzelverteilung ausmachen könnte. Baum 1 ist mit 20° auch der Baum mit der tiefsten Hangneigung, wobei deren

Auswirkung weniger stark in Erscheinung treten könnte, was weiter unten (5.2.3) noch näher erläutert wird.

Baum 3 zeigt (Abb. 15, S. 52) im Gegensatz zu den anderen Bäumen grundsätzlich eine hohe, auf 3.5 m Distanz sogar eine ungewöhnlich hohe Wurzelanzahl, was wahrscheinlich auf die standörtlichen Verhältnisse zurückzuführen ist. Die Bodenprofile von Baum 3 (s. Aufnahmeformular Anhang 1.3) zeigen fast als einzige keine Vernässungsmerkmale, keine verdichteten Schichten und kaum Skelett auf. Die in der vorliegenden Arbeit aufgenommenen Wurzelverteilungen sind deutlich höher als jene, die Schwarz et al. (2012, 798) in ihrem Untersuchungsgebiet in Schangnau (BE) bestimmt haben, was auch dann der Fall wäre, wenn die Bodenprofile die gleiche Dimension aufweisen würden (1 m anstatt 0.5 m Breite bei 0.5 m Tiefe wie bei ebd., 793)). Dort wurden auf 1.5 m Distanz nur noch knapp 60, auf 2.5 m nur noch knapp 30 Wurzeln gefunden, was etwa der Hälfte der tiefsten Werte im rechten Diagramm der Abb. 25 (S. 52) entspricht. Auch wenn der BHD bei Schwarz et al. (2012, 797) durchschnittlich bei 0.37 m etwas tiefer liegt im Vergleich zu 0.45 m, wäre die Verteilung bei gleichem BHD kaum viel höher. Das ist neben dem kleineren Bodenprofil wahrscheinlich auf ungünstigere äußere Umwelt- und Bodenbedingungen zurückzuführen, denn die Hangneigung beträgt nur 25°, was gemäss Sidle und Ochiai (2006, 26) der tiefsten kritischen Hangneigung für sehr rutschgefährliche Böden entspricht.

5.2.2 Modellierte Wurzelverteilung

Die Berechnungen der Wurzelverteilungen basieren auf dem nach Caflisch (2014, unveröffentlicht) kalibrierten Modell mit den entsprechend angepassten Eingangsparametern für die Verhältnisse im untersuchten Gebiet. So erfolgte auch die Berechnung der Bandbreite der Wurzelverteilungen aus dem Mittelwert der Varianzen aller untersuchten Bäume, welche Caflisch (ebd.; Anhang) in seiner Arbeit gezeigt hat. Diese sind in totalen Zahlen berechnet worden, wobei davon ausgegangen wird, dass eine Angabe in Prozent genauere Resultate liefern würde (Schwarz 2014a, mündliche Mitteilung). Die modellierten Wurzelverteilungen sollten gemäss Modellierung in etwa als solche im untersuchten Bestand im Rotwald auftreten.

Die Zunahme der Bandbreite der Wurzelverteilungen korreliert mit der zunehmenden Wurzelanzahl und der Betrachtung grösserer Wurzeldurchmesser (Abb. 15, S. 40). So zeigt der Vergleich der Modellierungen zwischen 5 und 15 mm bei BHD 0.2 m noch kaum Unterschiede auf, was daran liegen könnte, dass die Bäume entsprechend ihres BHD noch einer kleinen Entwicklungsstufe angehören und die Anzahl gröberer Wurzeldurchmesser (> 5 mm) sich noch nicht prägend auf die Gesamtanzahl Wurzeln auswirkt. Bei den BHD 0.4 m und 0.6 m bis 15 mm Wurzeldurchmesser nimmt neben dem Durchschnittswert v. a. die Bandbreite nach oben hin zu.

Die modellierten minimalen Wurzelverteilungen bei allen BHD sind bei 15 mm Wurzeldurchmesser gleich gross wie bei 5 mm, was einer stark konservativen Verteilung entspricht, in welcher kaum Wurzeldurchmesser > 5 mm auftreten. Es scheint als zeige das Modell bei zunehmender Wurzelanzahl einen grösseren Streubereich auf, wobei es noch abzuklären gilt, wo das Modell allenfalls noch angepasst werden müsste.

Die Abb. 15 (S. 40) zeigt weiter, dass auf 1.5 m Abstand die durchschnittliche Wurzelanzahl bei BHD 0.6 m unter den durchschnittlichen Werten von BHD 0.4 m und 0.2 m liegt. Dies scheint auf den ersten Blick sonderbar, könnte aber dadurch erklärt werden, dass mit zunehmendem BHD auch die Anzahl dickerer Wurzeln zunimmt, wobei die dünneren Wurzeln proportional weniger vertreten sein könnten. Daher verschiebt sich auch die maximale Wurzelanzahl mit zunehmendem BHD auf entferntere Distanzen vom Baumstamm weg. Weiter tritt hier auch der von Schwarz et al. (2012, 797) erwähnte Peak in einem Distanzbereich von 5 - 8 mal den BHD in Erscheinung, wobei näher und weiter vom Baumstamm entfernt die Wurzelanzahl abnimmt.

Um einen Vergleich zwischen den gemessenen und modellierten Wurzelverteilungen zu schaffen, wurden untenstehende Diagramme (Abb. 26) erstellt. Diese zeigen die modellierten Wurzelverteilungen zusammen mit den Werten der untersuchten Bäume 2 und 3, welche die minimal (Baum 2; BHD 0.42 m) und maximal gemessenen Werte (Baum 3; BHD 0.45 m) wiedergeben.

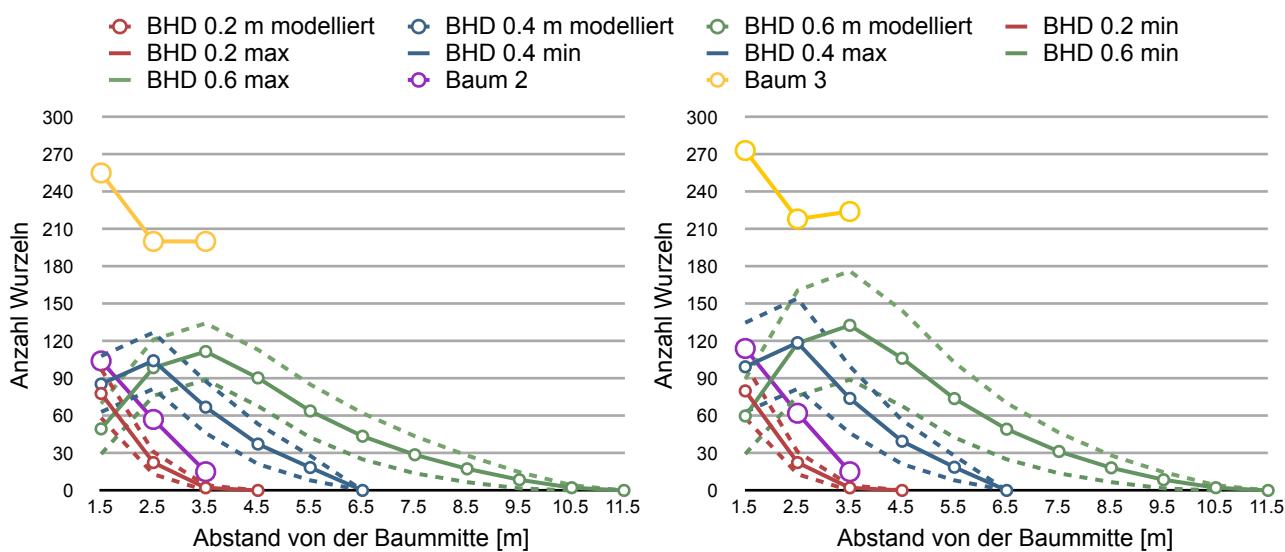


Abb. 26: Wurzelanzahl aus der Modellierung sowie die gemessenen Werte für Baum 2 und 3 auf verschiedenen Distanzen

Beim Vergleich (Abb. 26) der gemessenen (Abb. 14, S. 40) mit der modellierten Wurzelverteilung (Abb. 15, S. 40) fällt auf, dass die gemessenen Werte durchschnittlich etwas höher liegen als die modellierten für BHD 0.4 m und dass sie (bis auf Baum 1) keinen Peak im zweiten Profil aufweisen, obwohl die untersuchten Bäume alle einen BHD zwischen 0.38 und 0.53 m (Durchschnitt 0.45 m) besitzen und dies somit durch das Modell impliziert würde.

Dazu könnten die Untersuchungen von McMinn (1963; zitiert in Nicoll et al. (2006, 708) über die Wurzelentwicklung in steilen Hängen eine aufschlussreiche Begründung geben: Wurzelsysteme von Bäumen auf horizontaler Fläche besitzen einen gleichmässigen Wurzelradius, wohingegen die Wurzelsysteme von Bäumen in Steilhängen so ausgebildet sind, dass die talseitig gerichteten Wurzeln auf relativ kurzer Distanz tiefer in den Boden wachsen und die hangparallelen und bergseitig gerichteten Wurzeln oberflächennah grössere Distanzen zurücklegen. Weitere Faktoren, welche einen Einfluss auf die Symmetrie von Wurzelsystemen haben könnten, sind u. a. Lichtverhältnisse (Krone), ungleiche Verfügung von Nährstoffen und Bodenwasser, Landwirtschaft (s. u. Kap. 5.6.2 Waldweide) und Varia-

tionen in den bodenphysikalischen Bedingungen (Nicoll et al. 2006, 710). Daraus ergeben sich unterschiedliche mechanische Eigenschaften und Verhaltensweisen zwischen Wurzelsystemen in horizontalem und steilem Gelände (ebd., 709). Weiter könnte die Richtung, in der die wenigsten strukturellen Wurzeln wachsen, für die Baum- wie auch die Bodenstabilität wichtig sein, da dort eine erhöhte Verletzlichkeit (bspw. Windwurf) besteht (Coutts et al. 1999; zitiert in Nicoll et al. 2006, 711).

Entgegen der Idee, dass Wurzelsysteme richtungsabhängige Strukturen entwickeln, wenn sie von mechanischen Störungen (bspw. Wind) betroffen sind oder in Steilhanglagen stocken, folgerten Ji et al. (2012, 148) aus ihren Resultaten, dass die Wurzel- pro Bodenfläche (Root Area Ratio (RAR)) für Wurzeln kleiner 10 mm nicht in ihrer Richtung beeinflusst werden. Die Asymmetrie von Wurzelstrukturen wurde normalerweise nur für Grobwurzeln beobachtet und es kann gefolgert werden, dass diese Asymmetrie ein Resultat der adaptiven Antwort auf verschiedene Umweltfaktoren ist (Di Iorio et al. 2005, 360; zitiert in Ji et al. 2012, 148). Es ist jedoch anzumerken, dass die feineren Wurzeln jeweils von größeren Wurzeln abzweigen und somit von der Verteilung derselben abhängig sind, weshalb die Resultate von Ji et al. (2012, 148) aus dieser Sicht nicht aussagekräftig sind.

Auch Genet et al. (2008, 1522) fanden keine signifikanten Unterschiede in der Wurzeldichte in verschiedenen Richtungen um Bäume in steilen Lagen. Wenn dies in Relation mit den Resultaten von McMinn (1963; zitiert in Nicoll et al. 2006, 708; s. o.) gesetzt wird, könnte daraus geschlossen werden, dass trotz der unterschiedlichen Wuchsrichtungen der Wurzeln von Einzelbäumen die Wurzeldichte bei genügender Bestandesdichte trotzdem homogen ist (bei Genet et al. (2008, 1519) sind die Bestandesdichten mit bspw. gut 2'200 St/ha für BHD knapp 0.2 m relativ hoch). In solchen Situationen ist es umso wichtiger, grosse Lücken im Bestand zu vermeiden; dazu Näheres weiter unten (5.4).

Die Richtungsabhängigkeit von Wurzelsystemen in Hanglagen könnte daher als Erklärung für die eher hohe gemessene Wurzelanzahl sein, da diese bergseitig aufgenommen wurde. Es wird deshalb auch angenommen, dass die Wurzelverteilung talseitig der Bäume anders ist und sich radial somit keine gleichmässigen Wurzelverteilungen von Einzelbäumen im Hang ergeben. Um dies in Relation mit den modellierten Wurzelverteilungen zu setzen, muss erwähnt werden, dass die Modelle zur Wurzelverteilung und -verstärkung von Schwarz et al. (2010a, 363) von gleichmässigen Wurzelverteilungen ausgehen, wodurch der oben gezeigte (Abb. 26, S. 54) Unterschied entstehen könnte (Baum 3 liegt überhalb der maximalen Werte der Bandbreite).

5.3 Wurzelverstärkung

Um die erhaltenen Resultate der vorliegenden Arbeit einem Vergleich zu unterziehen, wird nachfolgend u. a. auch auf die Arbeit von Vergani et al. (2014) eingegangen. Deren Arbeit sollte aufzeigen, welchen Einfluss das RBMw durch die mechanischen Wurzeleigenschaften (Durchmesser-Kraft-Funktionen, Weibull-Exponent) und die Wurzelverteilung erfährt, wofür Fichten aus den Italienischen und Schweizer Alpen in Feldaufnahmen untersucht wurden (ebd., 2). Dabei sollte die Variabilität der gemessenen Wurzelkräfte zwischen den verschiedenen Durchmesserklassen (0.5 - 5.5 mm in 1 mm Schritten) und innerhalb der jeweiligen Durchmesserklasse gezeigt werden sowie die Variabilität der Wurzelverteilungen, auch innerhalb einer Durchmesserklasse. Es wurden dabei verschiedene Auf-

nahme- und Messmethoden angewendet, um eine Relation zu Literaturdaten herzustellen, damit Fehlerquellen identifiziert und in der Quantifizierung der Wurzelverstärkung vermieden werden können (ebd., 6ff). Dabei stellte sich heraus, dass die Unterschiede in den Resultaten zum Teil so gross sind, dass Vergani et al. (2014, 20; 22) fordern, künftig ein standardisiertes Verfahren zu verwenden, damit die Daten besser vergleichbar werden. Auch für die vorliegende Arbeit wurde nicht immer übereinstimmend mit den Methoden von Vergani et al. (ebd.) gearbeitet; so weist bspw. das Bodenprofil doppelt so grosse Dimensionen auf (1 m Breite anstatt 0.5 m Breite bei 0.5 m Tiefe), was grundsätzlich repräsentativere Resultate liefern sollte, da die Untersuchung pro Bodenprofil umfangreicher wird.

Weiter wurden (ebd., 8f) aus den Wurzeldaten Durchmesser-Kraft-Funktionen für verschiedene Annahmen erstellt, welche untereinander grössere Unterschiede aufweisen. Danach wurden im RBMw die Wurzelverstärkungen und Verschiebungen von Wurzelbündeln gemäss diesen Durchmesser-Kraft-Funktionen berechnet und in Relation mit den Wurzelverteilungen gesetzt. Dabei zeigen ihre Resultate, dass die Einflüsse der standörtlichen Charakterisierung der mechanischen Wurzeleigenschaften und Wurzelverteilungen fundamental für die Quantifizierung der Wurzelverstärkung auf der Bestandesebene sind (ebd., 2; 24). Vor allem die Variabilität der Wurzelverteilung kann signifikant variierende Werte für die Abschätzung der Wurzelverstärkung erzeugen, selbst im selben Untersuchungsgebiet (ebd.), was die Wichtigkeit der Modellierung der lateralen Wurzelverstärkung unterstreicht (ebd., 25). Dabei spielen speziell die Wurzeldurchmesser eine dominante Rolle in der Beeinflussung des RBMw.

5.3.1 Wurzelverstärkung individueller Wurzeln

Die Berechnungen der Wurzelverstärkungen im RBMw erfolgten mit einem Tortuositäts-Koeffizienten r gleich 1, was grundsätzlich für Daten aus Feldversuchen gilt. Daher ergeben sich für die Verschiebung, bei welcher die maximale Wurzelverstärkung erreicht wird, tendenziell tiefere Werte; die Höhe der Wurzelverstärkung bleibt jedoch unverändert (wie unter 3.2.1 beschrieben).

Die Diagramme in Abb. 16 (S. 41), welche aus dem RBMw erstellt wurden, zeigen die Zunahme der Kraft und die mögliche Verschiebung mit zunehmendem Wurzeldurchmesser bis hin zum Bruch, ähnlich den Daten, welche Schwarz et al. (2013, 4371) aus Labor- und Feldwerten dargestellt haben.

Im Gegensatz dazu erwähnen Ji et al. (2012, 151), dass für viele Spezies mit zunehmendem Wurzeldurchmesser eine Abnahme der Kraft dokumentiert wurde. Es scheint, als zeigten verschiedene Baumarten mit unterschiedlichen Holzzusammensetzungen und -eigenschaften entsprechend auch variierende Zugkräfte, im Gegensatz zur Fichte. Wahrscheinlicher ist aber der unterschiedliche Ansatz der Modellierung, wobei jene in vorliegender Arbeit die Zugkräfte einzelner Wurzeln in Abhängigkeit von der Verschiebung zeigt, im Gegensatz zum direkten Vergleich zwischen Kraft und Wurzeldurchmesser in vielen früheren Studien (Schwarz et al. 2013, 4375).

Die Werte in Abb. 16 (S. 41) für die verschiedenen Wurzeldurchmesser sind um rund 1/4 kleiner als die gemittelten Werte und sogar um 2/3 kleiner als die maximalen Werte, welche Vergani et al. (2014, 9f) aus all ihren berücksichtigten Datensets für Fichte gezeigt haben. So beträgt bspw. die maximale Kraft, welche eine 5 mm Wurzel aufnehmen kann, in vorliegender Arbeit gut 120 N im Gegensatz zu über 150 N für die gemittelten und gut 360 N für die maximalen Werte (das dreifache der Werte aus der vorliegenden Arbeit) bei Vergani et al. (ebd.). Dies bedeutet, dass die Wurzelbündel in St. Antönien

bei gleicher Wurzelanzahl, weniger Kraft aufnehmen können als jene, welche Vergani et al. (2014, 7f) an verschiedenen Standorten gefunden haben. Es kann angenommen werden, dass dies auf die unterschiedlichen lokalen Verhältnisse (Umwelt- und Bodenbedingungen sowie anthropogene Einflüsse) zurückgeführt werden kann, welche neben dem Wurzeleigenschaften auch die Wurzelverteilung beeinflussen können, so wie es Nicoll et al. (2006, 710) bereits im Bezug auf die Symmetrie von Wurzelsystemen erwähnt haben.

Entsprechend der grossen Unterschiede in den beobachteten Wurzelkräfte innerhalb derselben Spezies und zur Relevanz der möglichen Konsequenzen einer Überschätzung der Wurzelverstärkung auf die Abschätzung der Hangstabilität, erachten es Vergani et al. (2014, 20) als wichtig, dass auch die Wurzelzugkraft als ein kritischer Faktor in der Beurteilung der Hangstabilität berücksichtigt werden sollte, wie es auch schon von Ji et al. (2012) gemacht wurde.

5.3.2 Wurzelverstärkung von (gemessenen) Wurzelbündel

Die linke Spalte der Abb. 17 (S. 42) mit den Zugkräften bis zum Wurzeldurchmesser 5 mm zeigt den typischen und zu erwartenden Verlauf der Kraft in den Diagrammen und widerspiegelt sich in der Abb. 18 (S. 43). Auch die rechte Spalte zeigt die entsprechenden Werte in der Abb. 18, wobei auffällt, dass in Abb. 17b die Kurve der durchschnittlichen Werte jene des Baumes mit der höchsten Kraft überkreuzt und leicht übersteigt. Das weist auf die hohe Anzahl Wurzeln mit eher tiefem Durchmesser bei der maximalen Kurve hin, welche dem Baum 5 entspricht. Die anderen Bäume erreichen zwar nur eine tiefere Kraft, aber durch eine andere Durchmesserverteilung mit durchschnittlich höheren Durchmessern als bei Baum 5, wird die Verschiebung leicht erhöht. Dies zeigt auf, dass die Wurzeln grösser als 5 mm Durchmesser nicht nur die Kraft, sondern eben auch die Verschiebung stark beeinflussen können, was gemäss Vergani et al. (2014, 23f) beim Auslösungsprozess von Rutschungen einen wichtigen Einfluss hat und demnach für die Abschätzung der Wurzelverstärkung die Berücksichtigung gröberer Wurzeln als 5 mm ebenfalls erfolgen sollte. Dies fordern Vergani et al. (ebd., 25) auch deshalb, da grobe Wurzeln (> 2 mm) einen grösseren Einfluss auf das Modell haben als feine Wurzeln (< 2 mm), selbst wenn von jenen eine grosse Anzahl (> 100) berücksichtigt wird. Als Konsequenz sollten dickere Wurzeln ebenfalls für die Abschätzung der Wurzelverstärkung berücksichtigt werden, da davon ausgegangen wird, dass diese, falls vorhanden, tatsächlich eine Hauptrolle im mechanischen Verhalten von Wurzelbündeln spielen.

So zeigt die Betrachtung der Abb. 18 (S. 43), dass der Einbezug der Wurzeldurchmesser bis 15 mm, welche ja anzahlmässig nur schwach vertreten sind, einen immensen Einfluss auf die Wurzelverstärkung hat, welche dadurch, gegenüber 5 mm, um das zwei- bis dreifache ansteigt. Jedoch gibt es entsprechend der grossen Streuung auch grosse Unterschiede in der Kraft, was jeweils von der Wurzelanzahl der oberen bzw. aller berücksichtigten Durchmesserklassen abhängt.

Diese grosse Streuung kann sogar noch zunehmen, wenn zusätzlich Folgendes berücksichtigt wird: Wie in den Resultaten von Vergani et al. (2014, 9f) deutlich wird, fällt bei der Betrachtung der gemittelten Werte für die Kraft pro Durchmesserklasse auf, dass eine Wurzel von 5 mm Durchmesser eine Kraft zwischen ca. 80 und 250 N aufweisen kann. Daraus lässt sich folgern, dass mit zunehmendem

Wurzeldurchmesser auch die Variabilität der möglich aufzunehmendem Kraft zunimmt. Dies könnte bedeuten, dass eine nur auf die Wurzelanzahl pro Durchmesserkategorie konzentrierte Betrachtungsweise nicht ausreichend ist, um die Quantifizierung der Wurzelverstärkung genügend genau bewerten zu können.

Auch der Vergleich der Wurzelverstärkung mit der Wurzelverteilung aus den gemessenen Daten zeigt den bedeutenden Einfluss grösserer Wurzeldurchmesser (> 5 mm) auf die maximale Wurzelverstärkung: Obwohl, wie schon oben erwähnt, bei den Mittelwerten anzahlmässig nur rund 10 % mehr Wurzeln zwischen 5 und 15 mm hinzukommen, nimmt die gemittelte Kraft um das zwei- bis dreifache zu. Es scheint, als hätten ein paar wenige stärkere Wurzeln (5 - 15 mm) einen grossen Einfluss auf die Berechnung der maximalen Wurzelverstärkung, was wahrscheinlich wiederum auf den ebenfalls oben schon erwähnten Modellansatz zurückzuführen ist.

Im unten stehenden Diagramm (Abb. 27) wird die Wurzelverstärkung jedes Baumes auf den drei Profildistanzen gezeigt, um neben den Boxplots (Abb. 18, S. 43) als zusammengefasste Aussage, eine Darstellung für die Variabilität zwischen den jeweiligen Bäumen zu erzielen.

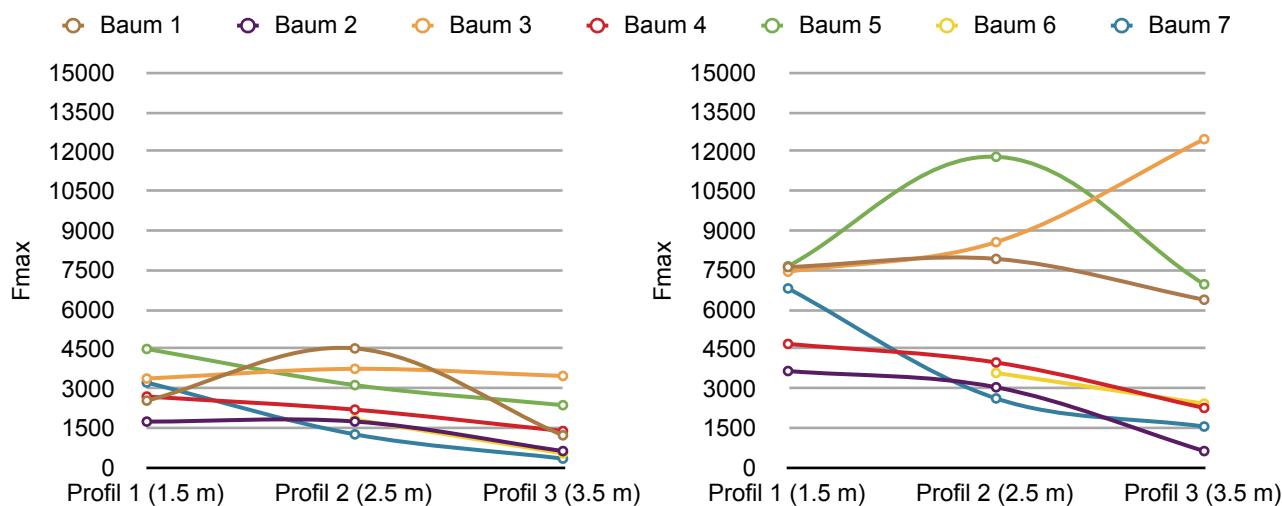


Abb. 27: Maximale Wurzelverstärkung jedes Baumes pro Profil; links bis 5 mm, rechts bis 15 mm Wurzeldurchmesser

Die obige Darstellung (Abb. 27) zeigt, wie schon für die Wurzelverteilung oben unter 5.2.1 erwähnt, ebenfalls nicht die von Schwarz et al. (2012, 797) erwähnte maximale Intensität im Distanzbereich von 5 - 8 mal BHD, ausser bei Baum 1 in beiden und bei Baum 5 im rechten Diagramm.

Auch in dieser Darstellung zeigen sich die bereits erwähnte natürliche Variabilität und die Unterschiede in der Betrachtung der Wurzeldurchmesserklassen zwischen 5 und 15 mm, wobei wenige Wurzeln grösseren Durchmessers die Wurzelverstärkung gemäss RBMw enorm beeinflussen: Beispielsweise wurden beim untersuchten Baum 2 kaum Wurzeln mit einem Durchmesser > 5 mm gezählt, was sich zusammen mit einer im Vergleich mit den anderen Bäumen eher tiefen Gesamt-wurzelanzahl stark auf die maximale Wurzelverstärkung auswirkt. Im Gegensatz dazu weist Baum 5 v. a. im Profil 2 eine grössere Wurzelanzahl mit einem Durchmesser > 5 mm auf, was sich entsprechend auf die maximale Wurzelverstärkung auswirkt.

Auch Vergani et al. (2014, 23f) haben diesen Effekt beschrieben, wobei bei ihren Auswertungen eine grosse Wurzelanzahl (1/3) mit 1 mm Durchmesser nur einen verhältnismässig kleinen Teil (8 %) zur

Wurzelverstärkung beträgt, wohingegen bei einem Wurzeldurchmesser von 5 mm das Gegenteil auftrat (8 % aller Wurzeln – knapp 1/3 der Kraft). In diesem Zusammenhang wird auch auf die Wichtigkeit verwiesen, die Resistenz von gröberen Wurzeln (> 5 mm) zu zeigen (ebd., 24).

Im Gegensatz dazu befanden Mao et al. (2013, 357), dass Wurzeln mit einem Durchmesser zwischen 1 und 2 mm im Vergleich zu anderen Durchmesserklassen den höchsten Beitrag zur mechanischen Kohäsion im Boden erbringen, da sie eine hohe Produktion (gegenüber grösseren Durchmessern) mit einer tiefen Mortalität (gegenüber tieferen Durchmessern) aufweisen und sich dadurch die Funktionsverschiebung von der absorbierenden zur strukturierenden Rolle ergibt (ebd., 378).

Was die Resultate in vorliegender Arbeit nicht augenscheinlich wiedergeben, ist die Tatsache, dass die Wurzeln mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg, über ihre jeweilige Länge und Verzweigungspunkte sich in kleinere Durchmesserklassen aufteilen. Auch weitere Einflüsse auf die Wurzelarchitektur sind vorstellbar, wobei die gezeigten Ausreisser (Abb. 18, S. 43) evtl. von Wurzeln stammen könnten, die quer abgezweigt sind und erst im dritten Profil erscheinen, ohne in den näheren zwei Profilen vertreten zu sein. Dies wäre eine mögliche Erklärung für die Kurve des Baum 3 (Abb. 27, S. 58), welche entsprechend einer höheren Wurzelanzahl > 15 mm im Gegensatz zur sonst eher mit der Distanz abnehmenden Wurzelanzahl diese hohen Werte im Profil 3 erreicht. Dies würde auf die Annahme hinweisen, dass die Wurzelsysteme speziell in Hängen keine Symmetrie aufweisen, wie es oben bereits erwähnt wurde (gemäss McMinn 1963; zitiert in Nicoll et al. 2006, 708).

Um die Sensitivität des Modells bezüglich der verschiedenen Wurzelverteilungen abzuschätzen, haben Vergani et al. (2014, 17ff) die Peak-Kräfte für die verschiedenen Aufnahmestandorte berechnet, wobei mit der Kraft-Verschiebungs-Funktion aus der minimalen Durchmesser-Kraft-Funktion gerechnet wurde. Dabei kann im Vergleich mit den in der vorliegenden Arbeit erhaltenen Resultate folgendes gezeigt werden: Die Wurzelverstärkung nimmt bis auf eine Ausnahme mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg ab, wobei die Werte für einen mittleren BHD von 0.3 m zwischen 200 N und 1'106 N liegen. Dies wurde auch in der vorliegenden Arbeit gezeigt, wobei die gemittelten Werte (bis 5 mm) für einen mittleren BHD von 0.45 m zwischen 399 N und 4'525 N liegen (Tab. 7). Die durchschnittlichen Unterschiede zwischen den maximalen und minimalen Wurzelbündelkräften aus den einzelnen Untersuchungsgebieten sind bei Vergani et al. (ebd., 18f) um gut die Hälfte tiefer ($\pm 29\%$) als bei jenen aus dem Rotwald ($\pm 65\%$). Der Vergleich der Werte für Wurzeldurchmesser bis 5 mm bezüglich den unterschiedlichen Distanzen vom Baumstamm weg werden in nachfolgender Tabelle gezeigt (Tab. 7):

Tab. 7: Unterschiede der Mittelwerte der Wurzelbündelkräfte bis 5 mm Durchmesser

Wurzelbündelkräfte	P1 [n]	Differenz [n]	Differenz [%]	P2 [n]	Differenz [n]	Differenz [%]	P3 [n]	Differenz [n]	Differenz [%]
Maximaler Wert	4'504	+ 1'489	+ 49.4	4'525	+ 1'891	+ 71.8	3477	+ 2'055	+ 144.5
\emptyset Wert	3'015		100.0	2'634		100.0	1'422		100.0
Minimaler Wert	1'744	-1'271	-42.2	1'260	- 1'374	-52.2	339	-1083	-76.2

Die zunehmenden Unterschiede zwischen den minimalen und maximalen Werten zeigen eine Korrelation mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg, was wiederum auf unterschiedliche Wurzel-

verteilungen von ähnlichen Bäumen auf demselben Standort verweist, was auch Vergani et al. (2014, 23) erwähnt haben: Es ergibt sich selbst dann eine gewisse Variabilität im Effekt von der Distanz vom Baumstamm weg, wenn im gleichen Aufnahmestandort dieselbe Distanz betrachtet wird, was dann neben den verschiedenen BHD auch der unterschiedlichen mikrotopographischen Variabilität zugeschrieben werden kann. Auch Bischetti et al. (2009, 1) beobachteten in ihrer Untersuchung eine grosse Variabilität der Wurzelkohäsion innerhalb derselben Spezies auf verschiedenen und sogar auf demselben Standort.

Die Betrachtung der Werte in Tab. 7 (S. 59) zeigt auch, dass die Werte (bis 5 mm) in der vorliegenden Arbeit mit durchschnittlich 2'357 N, jene aus den Schweizer Standorten von Vergani et al. (2014, 18f) zwischen 265 ± 67 N und 748 ± 329 N um ein Vielfaches (2.5 - 11 fache) übersteigen. Setzt man dies nun in Verbindung mit den individuellen Kräften der Wurzeln, lässt sich daraus schliessen, dass die untersuchten Bäume in dieser Arbeit eine viel grössere Wurzelanzahl besitzen, als jene die Vergani et al. (2014) aufgenommen haben. Dies scheint durchaus möglich zu sein, da der durchschnittliche BHD bei Vergani et al. (2014, Anhang) mit 0.3 m deutlich kleiner als jener der in vorliegenden Arbeit untersuchten Bäume mit 0.45 m ist. Weiter weist Schwarz (2014c, schriftliche Mitteilung) darauf hin, dass der Standort in Wiler (VS) der einzige in der subalpinen Höhenstufe ist, welcher von Vergani et al. (2014) untersucht wurde. Dabei wurde beobachtet, dass mit zunehmend schwierigeren Standortverhältnissen die Wurzelsysteme breiter bzw. grösser werden.

5.4 Aufskalierung der Wurzelverstärkung vom Einzelbaum auf die Bestandesebene

Das Aufskalieren von Daten aus kleinen auf grössere Bezugsebenen ist deswegen problematisch, da allfällige bedeutende Einflussfaktoren vielleicht nicht angemessen berücksichtigt werden. Die Berechnung der Resultate unter 4.4 erfolgte teilweise durch gleichzeitige Verwendung von gemessenen und modellierten Daten, wobei die gemessenen spezifisch und die Aussagen dadurch räumlich begrenzt sind.

5.4.1 Rückschlüsse für die Bestandesebene durch Kraft-Abstands-Diagramme

Um die Kraft-Abstands-Diagramme einem Vergleich zu unterziehen, wurden sie in Verhältnis zu den Resultaten von Schwarz et al. (2012, 799) gesetzt. Dort wurde gezeigt, dass die Fichte mit einem BHD von 0.2 m eine maximale Wurzelverstärkung von ca. 2.5 kPa auf 1.5 m Abstand vom Baum weg erbringt, was einer fast doppelt so hohen Wurzelverstärkung als in vorliegender Arbeit entspricht. Für BHD 0.4 m erreichen die Werte mit rund 6.1 kPa einen ähnlich hohe Wert wie das Maximum der durchschnittlichen Werte in vorliegender Arbeit, jedoch bei einer Distanz von rund 1.5 m im Gegensatz zu 2.5 m. Bei BHD 0.6 m sind deutliche Unterschiede zu finden; so ist die durchschnittliche Wurzelverstärkung auf 3.5 m um rund 50 % grösser als bei Schwarz et al. (ebd.) mit gut 6.2 kPa bei ca. 1.5 m Distanz. Es muss hier jedoch angemerkt werden, dass im Gegensatz zu Schwarz et al. (ebd.) nicht alle Durchmesserklassen berücksichtigt worden sind, denn dann würden wahrscheinlich höhere Werte resultieren, ausser bei BHD 0.2 m. Dort würde der Unterschied trotzdem kaum geringer, da dieser zwischen den berücksichtigten Wurzeldurchmesserklassen von 5 auf 15 mm schon sehr gering ist.

Der Vergleich der modellierten (Abb. 19, S. 44) mit den gemessenen Wurzelverstärkungen (Abb. 18, S. 43) zeigt entsprechend der Wurzelverteilung, dass bei den gemessenen Daten die Wurzelverstärkung mit zunehmender Distanz abnimmt und nicht in einem Peak auf 2.5 oder 3.5 m wie in Abb. 19 gipfelt. Dort zeigen die Diagramme die von Schwarz et al. (2012, 797) erwähnte maximale Intensität der Wurzelverteilung in einem Distanzbereich von ca. 5 - 8 mal den BHD. Ähnlichkeiten zeigen sich hingegen beim Streubereich: Der grosse Streubereich im zweiten und dritten Profil der gemessenen Daten bis 15 mm (Abb. 18, S. 43) widerspiegelt sich in den modellierten Daten. Auch der Vergleich der Daten bis 5 mm zeigt eine Ähnlichkeit bezüglich des Streubereichs, welcher um einiges kleiner ist als bei 15 mm.

Nachfolgend werden die modellierten und die gemessenen Wurzelverstärkungen zusammen in der Abb. 28 dargestellt, um einen direkten Vergleich zu erhalten.

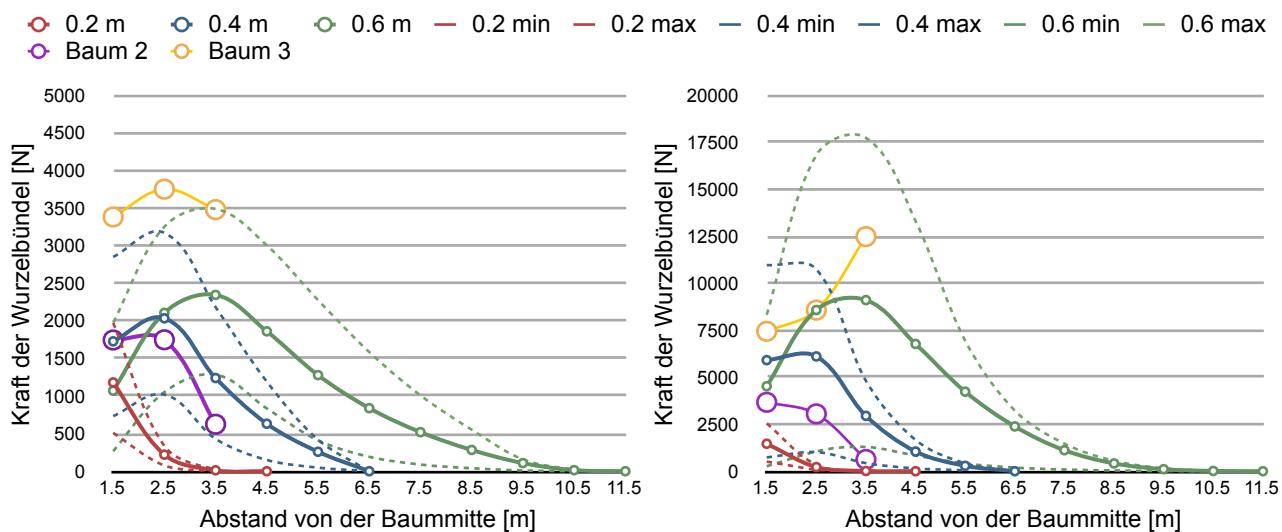


Abb. 28: Wurzelbündelkraft der Modellierung sowie die gemessenen Werte für Baum 2 und 3 auf verschiedenen Distanzen

Die Diagramme (Abb. 28) zeigen, dass sich die gemessenen Werte zum Teil stark von den modellierten Werten unterscheiden können. Die Felddaten aus St. Antönien zeigen demnach die grosse Variabilität der Wurzelverstärkung aufgrund der vorhandenen Wurzelverteilung auf. Beide Bäume 2 und 3 sind etwas dicker (0.42 m bzw. 0.45 m) als der modellierte BHD 0.4 m, weisen aber zum Teil, und dabei v. a. Baum 3 grosse Unterschiede bei der Wurzelverstärkung auf. Diese Werte aus den Feldaufnahmen legen nahe, dass die Wurzelverteilung und -verstärkung neben dem BHD auch anderweitig stark beeinflusst zu sein scheint (bspw. Standortbedingungen, Waldzustand etc.), was oben schon näher erklärt wurde.

Im linken Diagramm (5 mm; Abb. 28) zeigt sich die Kraft aus der enorm hohen Wurzelanzahl bei Baum 3, wodurch die Kurve über der maximalen Kurve für BHD 0.4 m liegt. Baum 2 erreicht auf einer Distanz bis knapp 3 m fast durchschnittliche Werte, stürzt aber im weiteren Verlauf stark ab. Dies kann auf die sehr geringe Zahl größerer Wurzeln (> 5 mm) zurückgeführt werden, welche sich auf grössere Distanzen auch kaum mehr in kleinere verzweigen können. Im rechten Diagramm (Abb. 28; 15 mm) weist Baum 3 überdurchschnittlich hohe Werte bis gut 2.5 m Distanz auf, danach schiessen sie stark nach oben aus, was wahrscheinlich auf die hohe Wurzelanzahl zurückzuführen ist. Die Werte von

Baum 2 zeigen im rechten noch deutlicher als im linken Diagramm (Abb. 28, S. 61) die wenigen bzw. fehlenden gröberen Wurzeln (> 5 mm).

Was hier ebenfalls wie schon bei der Wurzelverteilung wieder in Erscheinung tritt, sind die tieferen Werte bei BHD 0.6 m im Vergleich zu BHD 0.2 m oder 0.4 m auf 1.5 m Distanz. Dies könnte auf möglicherweise bessere Verhältnisse in einem gemischten (Baumarten) oder stufigen Bestand (Entwicklungsstufen) hinweisen, in welchem die Wurzelverteilung flächig gesehen ausgeglichener ist, als bei einem Reinbestand mit Fichte 0.6 m BHD. Denn je höher die Anzahl Bäume und je kleiner die durchschnittliche Distanz zwischen den Bäumen, desto höher ist die Wurzelverstärkung (Genet et al. 2008, 1525) bzw. ist der Einfluss auf die Hangstabilität bei gegebenen Voraussetzungen.

Der Vergleich der Diagramme in Abb. 26 (S. 54) und 28 (S. 61) zeigt wiederum den grossen Einfluss des Wurzeldurchmessers auf. Denn beim Baum 3 nimmt zwar die Anzahl Wurzeln von Profil 1 zu 2 ab, aber die Kraft nimmt gleichzeitig zu, was wahrscheinlich auf die Verschiebung der Wurzeldurchmesser zu grösseren Dimensionen zurückzuführen ist. Dies kommt bei den Diagrammen bis 15 mm noch deutlicher zum Vorschein, dort nimmt die Kraft von Profil 1 bis Profil 3 deutlich zu, wobei dies nur durch eine geringe Zunahme der Wurzelanzahl vom zweiten zum dritten Profil zu Stande kommt.

Wenn berücksichtigt wird, dass die Wurzelverteilung in Steilhanglagen allenfalls radial nicht gleichmässig verteilt ist (wie oben bereits unter 5.2.3 erwähnt) müssen die Kraft-Abstands-Diagramme (Abb. 19, S. 44) mit Vorsicht genossen werden. Denn die Angaben zu den Baumabständen müssen bei der Herleitung aus den Wurzelverteilung bergseitig des Baumes als absolutes Minimum gelten. Es wird empfohlen, bei zukünftigen Untersuchungen diese Unterschiede zu quantifizieren, da sich so genauere bzw. richtungsangepasste Baumabstände ergeben und da dies für die Abschätzung der Waldwirkung auf die Hangstabilität bedeutend ist. Sonst könnten zu grosse Lücken durch Eingriffe im Bestand entstehen, wodurch die Hangstabilität nicht mehr garantiert werden könnte.

Viele bisherige Arbeiten beschäftigten sich vertieft mit der basalen Wurzelverstärkung bzw. mit der Wurzelverteilung in Abhängigkeit der Bodentiefe. Dabei wurde gezeigt (u. a. Genet et al. 2008, 1521; Ji et al. 2012, 146f; Nicoll et al. 2006, 706) dass ein Grossteil der Wurzeln sich im ersten halben Meter des Boden befindet. Trotzdem werden viele Rutschmassen durch die Wurzelverstärkung stabilisiert, obwohl angenommen werden kann, dass die Scherfläche zum Teil um einiges tiefer liegt (1 m und mehr), als der Wurzelraum hinab reicht. Dies weist wiederum auf die hohe Bedeutung der lateralen Wurzelverstärkung hin, wobei flachwurzelnde Baumarten eine höhere Bedeutung zukommen könnte, als ihnen bis anhin beigemessen wurde. Vor allem in Waldungen, in denen keine hohen Bestandesdichten möglich sind (bspw. in der sub- bis obersubalpinen Höhenstufe), nimmt die Bedeutung lateral ausladender Wurzelsysteme gegenüber tiefgründiger Wurzelsysteme zu. Denn die Wurzelverstärkung soll nicht nur lokal sehr hoch sein, sondern flächig im gesamten Bestand in minimaler Ausprägung bezüglich der vorhandenen Rutschgefährdung vorhanden sein. Mit zunehmend möglicher Bestandesdichte verschiebt sich der Schwerpunkt in Richtung lateral zwar kürzeren, dafür basal weitreichender Wurzelsysteme, wodurch eine mögliche Durchwachsung der potentiellen Scherfläche zusätzliche Stabilität ermöglichen könnte.

5.4.2 Praxisorientierte Tabellen zur Abschätzung der Wurzelverstärkung

Zusammen mit den Auswertungen von Slidefor^{NET} können Daten wie aus den Tabellen 2 und 3 unter 4.4.2 eine Aussage über die mögliche Waldwirkung und den dazu nötigen Waldzustand und -aufbau machen, was dann mit einer entsprechenden Bewirtschaftung realisiert werden soll. Jedoch bestehen auch hier Einschränkungen durch die standörtlichen Bedingungen, wodurch der anzustrebende Waldzustand möglicherweise gar nicht realisierbar ist (Höhenstufe im Zusammenhang mit den nötigen Stammzahlen pro Hektar etc.)

Die Tab. 2 und 3 (S. 45) geben nur grobe Anhaltspunkte für das waldbauliche Handeln, da die Annahme von homogenen Fichtenbeständen eine grobe Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse im subalpinen Fichtenwald darstellt. Denn die Baumpositionen innerhalb von natürlichen Beständen weisen meist eine heterogene räumliche Verteilung auf, was sogar in älteren gepflanzten Beständen vorkommen kann (Genet et al. 2008, 1520), da durch die Pflege eine Auswahl an Z-Bäumen getroffen wird. Speziell in der subalpinen Höhenstufe kann die Verteilung durch eine Mischung der Entwicklungsstufen und die beginnende bis fortgeschrittenen Rottenausbildung sehr heterogen sein (Bachofen und Zingg 2005, 456).

Um die Hangstabilität auf Bestandesebene genau zu berechnen, sollte die effektive räumliche Verteilung der Bäume aber berücksichtigt werden, da sich die Wurzelsysteme, anders als bei der Annahme der vorliegenden Arbeit, nicht immer homogen (wenn überhaupt) überlappen (Schwarz et al. 2008, 13). Es ist jedoch bei sehr hohen Bestandesdichten möglich, dass trotz der abnehmenden Wurzelverstärkung mit zunehmender Distanz vom Baumstamm entfernt, eine beinah homogene Wurzelverteilung und somit auch Wurzelverstärkung möglich ist (Genet et al. 2008, 1521f). Der Ansatz der räumlichen Verteilung wird u. a. im RootMap-Modell (Schwarz et al. 2012, 795) verfolgt, in welchem jedem Baum eine bestimmte Fläche zugeordnet wird, in welcher dessen Wurzelkräfte dominieren.

Trotz diesen Einschränkungen lassen sich gewisse Aussagen und Tendenzen aus den Tab. (2 und 3, S. 45) herauslesen: Mit zunehmend nötiger Wurzelverstärkung wird grundsätzlich auch eine Zunahme der Anzahl Stämme pro Hektar und/oder eine Zunahme des BHD als Indikator für die Zunahme der Wurzelsystemgrösse bzw. des Radius und der Wurzelanzahl nötig. Dies wird im Prinzip auch durch eine Zunahme des Deckungsgrades bzw. der Stammzahl pro Hektar ersichtlich, jedoch ist dies wiederum von der Entwicklungsstufe abhängig. Bspw. kann ein junges Stangenholz mit einem geschlossenen Kronendach kaum mehr als 5 kPa Wurzelverstärkung aufbringen, was kraftmässig einem lückigen Bestand aus Baumholz 3 entsprechen würde (s. Tab. 2, S. 45).

Auch wird aus der Tab. 2 (S. 45) ersichtlich, dass kleinere Entwicklungsstufen bald an die Grenzen ihrer Wirkung stossen (höhere St/ha physiologisch kaum möglich; Wurzelverstärkung an sich eingeschränkt), was aber nicht per se heissen soll, dass sie nicht wichtig sind. Im Bezug auf die Tab. 2 ist grundsätzlich zu erwähnen, dass mit der Betrachtung von homogenen Beständen (Baumart, Entwicklungsstufe, Baumabstände) ein eher vorsichtiges Bild gezeigt wird; eine Mischung aller Art wäre sicher vorteilhaft. Im Vergleich der berechneten Werten in der Tab. 2 mit denen aus Schwarz et al. (2012, 800) zeigt sich eine um 25 - 65 % höhere Waldwirkung durch die von jeder einzelnen Fichte jeweils höher erbrachten Wurzelverstärkung. Somit sind weniger Stämme je Hektar nötig, um eine bestimmte Verstärkung zu generieren bzw. sind bei höheren Bestandesdichten höhere Verstärkungen möglich.

Schwarz et al. (2012, 800) beschrieben die Wurzelsysteme der Fichten als eher flachgründig dafür weitreichend, wobei unter Bezug auf frühere Untersuchungen angenommen wurde, dass die Wurzelarchitektur stark von den Bestandesbedingungen (u. a. Waldweide, s. 5.6.2) abhängt, was eine Begründung für die erhaltenen Unterschiede sein könnte. Betrachtet man eine weitere Tabelle von Schwarz et al. (2012, 800) über die maximale Grösse der Bestandeslücken durch Fläche und Breite, ergeben sich einzuhaltende Werte von < 300 m² und < 17 m.

Im Bezug auf die Tab. 3 (S. 45) ergibt sich Folgendes: Die Kategorisierung nach Deckungsgraden wird als sinnvoll angesehen, was auch mit den Erfahrungen aus NaiS zusammenhängt, wo ebenfalls oft mit dem DG gearbeitet wird. Es ist ein einfach und pragmatisch zu erfassender Indikator für die Flächenerschliessung durch den Wald (Bestandesdichte), jedoch nur im Zusammenhang mit der Entwicklungsstufe, wie oben schon angedeutet wurde. Es wäre demnach für die Quantifizierung der Wurzelverstärkung sinnvoll, eine weitere Kategorisierung der DG im Zusammenhang mit der vorherrschenden Entwicklungsstufe vorzunehmen. Denn der eigentlich wichtige Indikator ist die Stammzahl pro Hektar, aber ebenfalls nur im Zusammenhang mit der Entwicklungsstufe.

Bei BHD 0.6 m fallen in der Tab. 3 (S. 45) die sehr hohen Wurzelverstärkungen ab einem DG von 70 - 90 % auf, bei BHD 0.4 m jene ab > 90 %: Das Tool Slidefor^{NET} geht von einer maximal möglichen Verstärkung von plausiblen, aber konservativen 15 kPa aus, jedoch scheint es gemäss den Berechnungen in Tab. 3 möglich zu sein, höhere Werte zu erhalten, falls der Wald einen entsprechenden Aufbau (St/ha, Entwicklungsstufen) und Zustand (Gesundheit, Stabilität) aufweist. Auch Schwarz et al. (2012, 799f) nennen mögliche Werte für die Wurzelverstärkung, welche bis 30 kPa reichen können; in ihrem Untersuchungsgebiet sind aber kaum Werte über 10 kPa möglich.

Auch in den Daten von Moos (2014, unveröffentlicht) weist bei den Kontrollflächen bis 15 mm (K 15mm; Abb. 20, S. 46) eine davon einen Wert über 22 kPa auf, was um 50 % höher ist, als was Slidefor^{NET} als Maximum (15 kPa) annehmen würde (s. u.). Weiter ist auch darauf hinzuweisen, dass nur die Wurzeldurchmesserverteilung bis 15 mm betrachtet wurde. Wie bei den Feldaufnahmen beobachtet, gibt es durchaus Wurzeln viel grösseren Durchmessers (bis über 100 mm), wobei davon auszugehen ist (wie die Abb. 16, S. 41 implementiert), dass diese immense Kräfte aufnehmen können, falls das Verhalten unter Zugkraft nicht durch das veränderte Verhältnis zwischen Volumen und Oberfläche einen allzu grossen Einfluss hat. Zhang et al. (2013) weisen auch darauf hin, dass die Wurzelverstärkung durch das veränderte Verhältnis der Zusammensetzung aus Zellulose (fördernd) und Lignin (mindernd) mit zunehmenden Wurzeldurchmessern wieder abnimmt. Falls dieser Umstand für die meisten einheimischen Baumarten ebenfalls zutreffen würde, müsste dies Eingang in die Modellierung der Wurzelverstärkung finden. Bis anhin ist diese Thematik vielleicht noch nicht ausreichend erforscht, da v. a. Versuche und Messungen mit kleinen Wurzeldurchmessern durchgeführt wurden (v. a. bis 5 mm).

Die Wichtigkeit der kleinen Wurzeldurchmesser wird auch dadurch gegeben, da die Umsetzung, also der Auf- und Abbau viel schneller und öfters geschieht (Schwarz et al. 2010a, 356) und somit allfällig beschädigte Wurzeln schneller ersetzt werden. Dies zeigen auch Mao et al. (2013, 357) in ihren Untersuchungen auf.

Weiter fallen in der Tab. 3 (S. 45) die kleinen Unterschiede bei DG 10 - 20% zwischen den Wurzelverstärkungen der verschiedenen BHD auf; die Wurzelverteilung scheint auf die Distanz bei BHD 0.2 m

proportional zum Kronenradius (als Ausgangswert für die Berechnung des DG) höher zu sein als bei BHD 0.4 m. Bei halb so grossen Abständen stehen bei BHD 0.2 m viermal mehr Bäume gegenüber BHD 0.4 m. Auch die Kraft bei 0.6 m ist beinah gleich gross wie bei BHD 0.2 m. Gerade bei tiefen DG scheint die Anzahl Bäume an Wichtigkeit zuzunehmen im Vergleich zu grösseren Wurzelsystemen bei höheren Entwicklungsstufen.

Auch hier wieder die Anmerkung, dass durch die Verwendung standortspezifischer Daten, die Tab. 2 und 3 (S. 45) nicht im grösseren Umfang repräsentativ sind, sondern v. a. für die Verhältnisse im untersuchten Teil des Rotwalds, da die Werte u. a. vom Kronendurchmesser der untersuchten Bäume abhängig sind. Die Anwendung durchschnittlicher Eingangsparameter würde eine grössere Repräsentativität zu lassen, jedoch könnten sich die Werte stärker von den spezifischen aus dem Rotwald unterscheiden.

Im Prinzip dürften für einen realen natürlichen Wald höhere Wurzelverstärkungen als in den Tab. 2 und 3 (S. 45) erwartet werden, da mit einer Mischung an Entwicklungsstufen in einem stufigen Gebirgswald mehr Bäume auf derselben Fläche stocken und diese dadurch tendenziell näher beieinander stehen. Hier kommt aber irgendwann die Verjüngungsproblematik in den oberen Höhenstufen ins Spiel. Ohne direktes Sonnenlicht, welches in diesen Höhen v. a. auch Wärme spendet, ist ein Aufkommen der Verjüngung zum Teil kaum möglich (Frehner et al. 2005, Anhang 2B, 19). Es besteht somit eine Diskrepanz zwischen Verjüngungsöffnungen im Bestand und gleichzeitigen Lücken im Bereich der Wurzelsysteme. Die Wurzeln geernteter Bäume halten zwar noch eine gewisse Zeit und sollten zukünftig durch die neuen Bäume ersetzt werden, jedoch spielen der Faktor Zeit und die vorherrschenden Standortbedingungen eine bedeutende Rolle beim Abbauprozess (Marcandella und Rickli, 2010, 7f): Bleibt der Hang so lang stabil, bis die Verjüngung die minimale Schutzwirkung übernehmen kann oder kommt vorher bspw. ein grosses Niederschlagsereignis?

Genet et al. (2008) weisen jedenfalls daraufhin, dass bei Durchforstungen auf labilen Hängen darauf geachtet werden soll, nicht allzu grosse Lücken zwischen Bäumen zu schaffen, da deren Einfluss auf die Hangstabilität über die Zeit angewachsen ist.

Die Tab. 2 und 3 (S. 45) zeigen letztendlich auch, dass kleinere Bäume näher beieinander stocken müssen als grössere, da die Wurzelsysteme und -radien neben den Standortsbedingungen auch entsprechend ihrer Entwicklungsstufe ausgebildet sind. Damit eine maximale Waldwirkung auf die Hangstabilität gewährleistet werden kann, muss der Wald in einem minimal nötigen Zustand gehalten werden. Die optimale Waldstruktur kann sich situativ verändern, jedoch scheint es von Vorteil, eine Baumartenmischung und die Stufigkeit zu fördern, da der Boden somit besser erschlossen werden kann (bspw. Fichten als Flachwurzler zusammen mit Lärchen als Herz- oder Tannen (*Abies alba*) als Pfahlwurzler). Dabei stehen natürliche, standortgerechte Verjüngungen im Vordergrund und auf Pflanzungen sollte nur in bestimmten (Not-)Fällen, oder wenn die Situation sehr aussichtsreich ist, zurückgegriffen werden.

5.4.3 Datenauswertung früherer Feldaufnahmen

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass ab einem bestimmten Grenzwert der Wurzelverstärkung die Hänge unter ähnlichen Bedingungen stabil bleiben sollten. Wenn nur eine räumliche Eingrenzung, wie

bei der Berechnung der Abb. 20 (S. 46) gemacht wird, zeigt sich, dass auch in Rutschflächen zum Teil relativ hohe Wurzelverstärkungen erreicht werden. Diese reichen möglicherweise darum nicht aus, da in diesem Boxplot alle aufgenommenen Rutschflächen im Rotwald berücksichtigt wurden, also auch diejenigen, in denen der Wald rein aus topologischen (steile Hangneigung) oder pedologischen Gründen (mächtigere Rutschkörper) oder anderen bedeutenden Einflussfaktoren, eine sehr geringe bis gar keine Wirkung hat. Daraus lässt sich folgern, dass es auch in spezifischen Situationen, wie hier für den Rotwald schwierig ist, einen Schwellenwert für die Wurzelverstärkung zu definieren, ohne spezifisch auf alle bedeutenden Einflussfaktoren Rücksicht zu nehmen. Zukünftig müssten sicherlich die wichtigsten davon identifiziert werden.

Trotzdem sprechen die Mediane und Mittelwerte eine deutliche Sprache: Bei der Betrachtung bis 5 mm ist die mittlere Wurzelverstärkung in den Kontrollflächen um 55 % grösser als in den Rutschflächen; bei 15 mm ist sie sogar um 126.9 % grösser. Aus den Daten von Moos (2014, unveröffentlicht) geht auch hervor, dass die durchschnittlichen Abstände zwischen dem Anrißpunkt einer Rutschung und den fünf nächsten Bäumen mit 7.2 m grösser sind, als diejenigen bei den Kontrollflächen mit 6.6 m.

Die Auswertungen mit der kleineren und passenderen Auswahl an Rutsch- und Kontrollflächen zeigen demnach auch die aussagekräftigeren Resultate (Abb. 21, S. 47). Die Wurzelverstärkungen in den Kontrollflächen liegen noch deutlicher über denen der Rutschflächen: Bei der Betrachtung bis 5 mm ist die mittlere Kraft in den Kontrollflächen um 250.5 % grösser als in den Rutschflächen; bei 15 mm sind sie sogar um 395.5 % grösser. Die durchschnittlichen Abstände der fünf nächsten Bäume betragen bei den Rutschflächen 8.2 m und bei den Kontrollflächen 6.8 m. Das ist kohärent mit den Berechnungen rund um die zwei Abb. 20 und 21 (S. 46f): Bei der kleineren Auswahl, welche die deutlicheren Resultate zeigt, ist auch der Unterschied zwischen der durchschnittlichen Distanz grösser (1.4 m) als bei der Auswahl aus dem ganzen Rotwald (0.6 m). Aber auch hier gibt es wieder Ausreisser (R 5mm und R 15mm), bei welchen von der Kraft her gesehen und im Vergleich zu den Kontrollflächen die Hänge hätten stabil bleiben sollen. Es werden die gleichen Vermutungen wie oben angestellt, aber auch darauf hingewiesen, dass für eine genauere Analyse die verschiedenen Flächen zu unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Wird nun ein Bezug zwischen den Daten aus der Tab. 2 (S. 45) und denen über die benötigte Wurzelverstärkung in Abhängigkeit des Reibungswinkels (ϕ) und der Hangneigung aus Schwarz et al. (2012, 800) genommen, zeigt sich, dass für den untersuchten Teil des Rotwalds ($\phi = 29^\circ$; Hangneigung 29°) eine minimale Wurzelverstärkung von 5 kPa nötig wäre. Diese liesse sich durch ein dichtes Stangenholz-Baumholz 1 genau so gut realisieren, wie mit einem lückig-normalen Baumholz 3. Wird dies in Bezug mit den Daten von Moos (2014, unveröffentlicht) gesetzt, zeigt sich, dass die geringere durchschnittlichere Distanz der fünf nächsten Bäume bei den Kontrollflächen (6.8 m) eine entsprechende Verstärkung von 6 kPa (4 mal 1.5 kPa) bei BHD 0.6 m ergibt. Bei den Rutschflächen ergibt sich aufgrund der höheren durchschnittlichen Entfernung (8.2 m) nur noch eine Verstärkung von 2.2 kPa (4 mal 0.55 kPa), was nur einem guten Drittel der Kontrollflächen entspricht. Es muss noch angemerkt werden, dass die Werte für BHD 0.6 m stellvertretend für den durchschnittlichen BHD von 0.45 m im Rotwald deshalb genommen wurde, da nur Wurzeln bis 15 mm Durchmesser berücksichtigt wurden.

5.5 Auswertungen mit Slidefor^{NET} zur Sensibilitätsanalyse der Hangstabilität

Damit nicht immense Bemühungen in eine Schutzwaldbewirtschaftung gesteckt werden, bei welcher die Waldwirkung auf die Hangstabilität keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss hat, bietet das Tool Slidefor^{NET} gewisse Anhaltspunkte, in welchem Umfang waldbauliche Möglichkeiten vorhanden sind bzw. in wieweit der Waldzustand potentiell einen Einfluss auf die Hangstabilität haben könnte. Bei schlechten Voraussetzungen ist die Waldwirkung denn auch bei einem optimalen Waldzustand nur noch minim.

5.5.1 Situation im untersuchten Teil des Rotwalds

Die Berechnung in Slidefor^{NET} ist grundsätzlich nur spezifisch für die benutzten Eingangsparameter repräsentativ, was deshalb angemerkt werden muss, da es im Boden zum Teil schon auf kleiner Fläche eine sehr grosse Variabilität innerhalb der Eigenschaften gibt, wodurch es umso schwieriger wird, die Waldwirkung quantitativ genau abzuschätzen. Die unter 4.3.2 gezeigte Simulation kann also nur begrenzt für den gesamten Rotwald angewendet werden und ist nur im Bereich der untersuchten Bäume wirklich aussagekräftig. Grundsätzlich ist aber eine gewisse Waldwirkung im gesamten Rotwald möglich, ausser dort, wo sich die Grössen der Rutschkörper zusammen mit Steilhanglagen negativ kumulieren. Denn die Waldwirkung nimmt mit zunehmendem Rutschvolumen proportional ab, da das Verhältnis zwischen Rutschvolumen und durchwurzelter Fläche grösser wird und sich somit negativ auf die mögliche Wirkung der Wurzelverstärkung auswirkt (Schwarz 2014a, mündliche Mitteilung).

5.5.2 Situation in flacherem und steilerem Gelände

Die Berechnungen für flacheres bzw. steileres Gelände zeigen die schon unter 4.5.2 erwähnten Resultate, dass mit zunehmender Hangneigung bei gleich bleibenden anderen Eingangsparametern die proportionale Waldwirkung abnimmt. Dies ist einerseits auf das erhöhte Aufkommen proportional grösserer Rutschvolumina (bei 34° um 2.2 mal grösser als bei 29° und um 19.2 mal grösser als bei 24°) und andererseits auf die proportional erhöhte Frequenz zurückzuführen (knapp 9 mal mehr bei 29° als bei 24° und knapp 19 mal mehr bei 34°).

Nicht nur die Hangneigung, sondern auch die anderen Eingangsparameter zeigen bei ändernden Werten einen Einfluss auf die potentielle Waldwirkung. Jedoch sind einige davon wiederum vom Wald beeinflusst (bspw. Boden durch Interzeption), wohingegen die Hangneigung unbeeinflusst bleibt.

Um die verschiedenen Hangneigungen einem direkten Vergleich zu unterziehen, wurde nebenstehendes Diagramm (Abb. 29) erstellt.

Dieses Diagramm zeigt die Effizienz der Waldwirkung, ausgedrückt in Werten der Wurzelverstärkung,

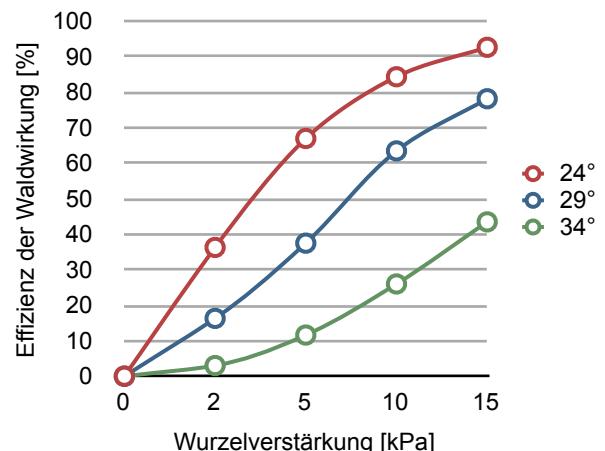


Abb. 29: Effizienz der Waldwirkung in Form der Wurzelverstärkung in Abhängigkeit der Hangneigung

wobei ersichtlich wird, dass mit zunehmender Wurzelverstärkung die Effizienz erhöht wird. Jedoch ist diese stark von der Hangneigung abhängig, was sich in der Effizienzabnahme bei zunehmender Hangneigung zeigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Werte entsprechend der gezeigten Tendenz verhalten und die Waldwirkung ab einer Hangneigung von über 40° fast vernachlässigbar klein wird, wenn davon ausgegangen wird, dass 15 kPa die maximal erreichbare Wurzelverstärkung ist.

5.6 Weitere Aspekte

In diesem abschliessenden Unterkapitel werden auf die Voraussetzungen und Beschränkungen von NaiS, von der Waldbeweidung und vom Waldbau kurz eingegangen.

5.6.1 Vorgaben aus NaiS

Nachfolgend wird auf die Vorgaben aus NaiS zur Situation im untersuchten Gebiet näher eingegangen.

Naturgefahr: Frehner et al. (2005, Anhang 1, 9ff) bezeichnen die potentielle Wirkung des Waldes im Entstehungsgebiet von flachgründigen Rutschungen und oberflächlicher Erosion grundsätzlich als gross, jedoch nimmt sie ab einer Hangneigung von ca. 40° unabhängig vom Waldzustand stark ab, was sich auch mit Resultaten aus Slidefor^{NET} deckt.

Die bisher anerkannten effektiven Indikatoren zur Beurteilung der Waldwirkung gegen Rutschungen beziehen sich v. a. auf die Bestandesstruktur, namentlich die Lückengrösse (dauernde Durchwurzelung), den Deckungsgrad (flächendeckende Durchwurzelung) und die Baumartenmischung (intensive und tiefgründige Durchwurzelung) (ebd., 12). Diese sind aber noch nicht vollumfänglich für die Wurzelverstärkung quantifizierbar, wodurch der Waldbewirtschafter demnach nur wenig Anhaltspunkte hat, wie viel Holz er von welcher Entwicklungsstufe an welchem Ort in seinem Bestand entfernen darf.

Weiter sehen die Vorgaben aus NaiS (ebd., 9ff) keine grösseren Lücken und eine gesicherte Verjüngung im Bestand vor. Der Deckungsgrad soll beim minimalen Profil mind. 40 % beim idealen Profil mind. 60 % betragen. Die Anmerkung, dass bei Übergängen die Baumartenmischung des feuchteren/stärker vernässten Typs anzustreben ist, wird als sinnvoll erachtet, da die Auslösung von flachgründigen Rutschungen stark hydrologisch beeinflusst ist. Eine bessere Anpassung der Baumarten an nasse Verhältnisse sollten daher von Vorteil sein, da dann auch die Wurzeln die höhere Feuchtigkeit besser ertragen und somit langfristiger und nachhaltiger den Boden durchwurzeln (v. a. bei den Feinwurzeln zwischen 1 und 2 mm sehr wichtig, welche durch eine hohe Produktion und tiefe Mortalität auch einen grossen Anteil an die Schutzwirkung beitragen (Mao et al. 2013, 357)).

Zudem wird darauf hingewiesen, dass die Baumartenwahl in rutschgefährdeten Hängen v. a. auch im Zusammenhang mit den Bodeneigenschaften erfolgen sollte: Entscheidend dabei ist v. a. die Verankerung der Baumarten in schweren, verdichteten und temporär vernässten Böden (ebd., 12). Die Fichte ist bezüglich Vernässung nicht besonders anfällig und erträgt grundsätzlich stagnierendes, saures Wasser (Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz und Dendrologie der ETH Zürich 1995, 41). Bezuglich den anderen oben genannten Bodeneigenschaften weist die Fichte aber keine guten Verhaltensweisen auf, denn neben ihrem grossen Anspruch an den Lufthaushalt reduziert sie bei ver-

dichteten Böden ihr grundsätzlich schon wenig tiefreichendes Wurzelwerk auf noch oberflächen-nahere Bodenschichten. Unter reinen Fichtenbeständen kann eine vorhandene Vernässung demnach sogar zunehmen (Frehner et al. 2005, Anhang 2B, 58).

Mit dem Vermerk „keine schweren Bäume“ sollte vorsichtig umgegangen werden, denn dieser könnte dazu verleiten, den durchschnittlichen BHD teilweise massiv zu reduzieren, um damit auch langfristig eine diesbezügliche Wirkung zu erzielen. Die Resultate aus vorliegender Arbeit weisen aber darauf hin, dass die laterale Wurzelwirkung bzw. deren Radius, mit zunehmendem BHD und mit zunehmender Wurzelverstärkung korreliert. Falls nun v. a. auf Flächen mit eher tiefem Deckungsgrad viele grosse (schwere) Bäume entfernt werden, könnte sich die Stabilität des Hangs massiv verschlechtern. Instabile, schwere und somit auch sturmgefährdete Bäume sind aber unbedingt zu entfernen, da bei einem allfälligen Wurf die Bodenoberfläche verletzt werden könnte, sich dort Wasser ansammeln und infiltrieren kann und dadurch die Hangstabilität lokal negativ beeinflussen würde.

Genau bei solchen Situationen muss die Quantifizierung der Wurzelverstärkung ansetzen: Aus den Verhältnissen im Hang (Topographie, Boden etc.), welche den Grad der möglichen Waldwirkung vorgeben (Resultate aus Slidefor^{NET}) und den Eigenschaften des Waldes lässt sich durch die in dieser Arbeit vollzogenen Berechnungen und Modellierungen (Wurzelverteilung und RBMw) die minimal nötige Schutzwirkung des Waldes ableiten. Dies sollte dann zu einem entsprechenden Waldbau mit angepassten Eingriffen führen (gemäss Tab. 2 und 3, S. 45 für den Rotwald).

NaiS (Frehner et al. 2005, Anhang1, 12) sieht dabei vor, dass die nachhaltigste Gewährleistung dieser Waldwirkung durch kleinflächige ungleichaltrige Bestände mit möglichst grossem Deckungsgrad gegeben ist, wobei erwartet wird, dass sich die Stufigkeit im Bestand im Wurzelraum widerspiegelt. Dadurch ist die Waldbestockung auch bei einer allfälligen Kalamität gewährleistet, da die Verjüngung schon vorhanden ist. Dies könnte im Rotwald jedoch problematisch werden, da dort durch die bis heute vollzogene Waldweidebewirtschaftung eine Verjüngungsproblematik zumindest lokal und kleinflächig besteht, was dort durch geringere Bodendurchwurzelung eine kritische Bodenstabilität ergibt; zu diesem Thema weiter unten (5.6.2) mehr.

Waldgesellschaften im Rotwald: Die Vorgaben aus NaiS (Frehner et al. 2005, Anhang 2A, 113ff) bezüglich der Waldgesellschaften 60, 60A und 60*, welche für den untersuchten Teil des Rotwaldes bestimmt wurden, sehen gut verankerte, lotrechte (stabile) Bäume in mindestens zwei, besser drei Entwicklungsfähigen BHD-Klassen vor, wobei keine starken Hänger vorhanden sein sollten. Das lässt sich mit den Erkenntnissen aus der Quantifizierung der Wurzelverstärkung gut vereinbaren, denn dadurch kann eine nachhaltige Bewaldung gesichert werden, wobei auch der Boden optimal und langfristig durchwurzelt würde.

Bei den Anforderungen an die Verjüngung gilt es, Vorsicht walten zu lassen, denn es ist herausfordernd, genügend grosse Öffnungen für die Verjüngung im Gebirgswald zu schaffen, welche auf direkte Sonneneinstrahlung, nicht nur für Licht, sondern v. a. auch für Wärme angewiesen ist, ohne dass die Lückengrösse die Wirkung des Schutzwaldes beeinträchtigen. Dadurch könnte die Gefahr entstehen, dass die Bodenarmierung durch die Wurzeln zu stark reduziert würde.

Bei 60/60A wird beim idealen Profil ein höherer Fichten-Anteil als beim minimalen Profil gefordert. Bezüglich der Problematik im Schutzwald gegen Rutschungen scheint dies ein wenig problematisch,

denn je kritischer die Situation bzw. je knapper die Waldwirkung ist, desto wichtiger wird eine möglichst umfassende Erschliessung des Bodens durch Wurzeln. Und dabei kann eine Baumartenmischung durchaus förderlich sein, da verschiedene Baumarten mit verschiedenen Typen von Wurzelsystemen verschiedene ökologische aber auch räumliche Nischen besetzen können; bspw. Fichten als Flach-, Lärchen als Herz- und Tannen als Pfahlwurzler. So zeigten auch Schwarz et al. (2012, 800f), dass die Wurzelsysteme von Buche (*Fagus sylvatica*) und Tanne eine andere Architektur (tieferreichend) aufweisen als Fichte (oberflächlicher, aber lateral weitreichend).

Die Beimischung von anderen Baumarten soll aber nicht erzwungen werden; es wird eine natürliche Verjüngung empfohlen. Wie schon erwähnt, dürfte rein von der Waldgesellschaft her gesehen gemäss dem idealen Profil nur Fichte vorhanden sein. Da im Schutzwald aber die Schutzwirkung oberste Priorität hat, sollte im Rotwald der Anforderung des minimalen Profils bezüglich der Baumartenmischung Vorrang gegeben werden.

5.6.2 Waldweide

Was bei der Betrachtung der Resultate unbedingt beachtet werden muss, ist der Umstand, dass der Rotwald bis heute beweidet wird. Dieser Einfluss auf Bestand (Verbiss, Trittschäden) und Boden (Verdichtung durch Viehtritte, Nährstoffeintrag durch Dung) hat sicherlich Auswirkungen auf die Wurzelverteilung, somit auch auf die Wurzelverstärkung und letztlich auf die Hangstabilität. Daher ist es nicht so ohne weiteres möglich, die erhaltenen Resultate mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen zu vergleichen.

Obwohl die heutige Waldweidepraxis in der subalpinen Höhenstufe mit Rindvieh während weniger Wochen im Sommer sehr extensiv ist (Mayer et al. 2004, 1) und die Waldweide gemäss Art. 16 des Bundesgesetzes über den Wald (WaG)¹ nicht mehr explizit als nachteilige Nutzung bezeichnet wird, kann die Beweidung mit Grossvieh u. a. trotzdem Bodenverdichtung und Erosion nach sich ziehen (Stuber und Bürgi 2001, 492). So wird die Waldweidebewirtschaftung im Kanton Graubünden gemäss Art. 24 Abs. 1 der Kantonalen Waldverordnung (KWaV)² auch noch immer als nachteilig betrachtet.

Um die Schäden durch die Viehwirtschaft im subalpinen Wald möglichst gering zu halten, besteht die wichtigste Voraussetzung in der Begrenzung der Tierbesatzstärke, damit eine zufriedenstellende Verjüngung trotz des Viehdrucks aufkommen kann. Denn wie Meusburger und Alewell (2008, 509) zeigten, können Änderungen in der Landnutzung ein Risiko für die Stabilität alpiner Böden bedeuten, wobei deren Intensität mit einer sinkenden Weidefläche pro Tier einhergeht (ebd., 515). Zusammen mit grossen Niederschlagsereignissen korreliert die Rutschanzahl dementsprechend mit der Be- stossungszahl der Weideflächen (ebd.), weshalb sehr extensiv genutzte oder landwirtschaftlich auf- gegebene Flächen weniger anfällig auf Rutschungen sind (ebd., 518).

Die aus ökologischer und touristischer Sicht positive heterogene Waldstruktur, bestehend aus einem Mosaik von offenen und geschlossenen Flächen (Mayer et al. 2004, 42), muss im Bezug auf die Hangstabilität negativ bewertet werden, wenn durch die Lückengrösse die Wurzelverstärkung unter

¹ Bundesgesetzes vom 4. Oktober 1991 (Stand am 01.01.2008) über den Wald (WaG; SR 921.0)

² Kantonale Waldverordnung vom 03. Dezember 2012 (Stand 01.01.2013) des Kantons Graubünden (KWaV; BR 920.110)

das nötige Minimum gedrückt wird. Jedoch kommen durch etwas grössere Öffnungen auch positive Aspekte zum Ausdruck: In beweideten und somit weniger dichten Wälder stocken vermehrt Lärchen im Wald, was durch einen anderen Wurzelsystem-Typ (Herzwurzler) auch einen positiven Einfluss auf die Wurzelarmierung des Bodens hat. Die höhere Sonneneinstrahlung hat weiter auch einen positiven Effekt auf das Aufkommen der (Fichten-) Verjüngung (Bebi et al. 2001; zitiert in Mayer et al. 2004, 41). Frehner et al. (2005, Anhang 1, 12) fordern deshalb auch, dass Bestandesöffnungen so klein als möglich (Hangstabilität) und so gross wie nötig (Verjüngung) sein sollen.

Ott et al. (1997; zitiert in Mayer 1999, 175) weisen denn auch darauf hin, dass für die langfristige Sicherstellung verjüngungsgünstiger Kleinstandorte (bspw. Totholz für Kadaververjüngung) in der subalpinen Höhenstufe ein kleinflächiges Nebeneinander verschiedener Entwicklungsstufen optimal ist, da die Verjüngung bevorzugt in kleinen Lücken mit direkter Sonneneinstrahlung aufkommt.

Neben der weniger dichten Waldbestockung kann auch ein anderes durch die Beweidung verursachtes Problem auftreten: Schleicher et al. (2011) weisen darauf hin, dass sich die Bodenverdichtung durch Viehritte gravierender auf die Schutzwirkung des Waldes auswirkt als der Verbiss, was jedoch auch wieder von der Beweidungsintensität und der Tierart abhängig ist. Somit kommt es zu einer Volumenabnahme der Wurzeln in Korrelation mit zunehmender Bodendichte, zunehmendem Skelettgehalt und periodischer Vernässung in zunehmender Bodentiefe (Nicoll et al. 2006, 706). Schwarz (2014c, schriftliche Mitteilung) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Vernässung und nicht die Bodendichte an sich limitierend ist, da nach seinen Beobachtungen, kleinste Lücken und Risse im Bodenmaterial von Wurzeln ausgenutzt werden. Auch Clark et al. (2003; zitiert in Schwarz et al. 2010a, 356), haben beobachtet, dass es zu einer Klumpung von Wurzeln in Makroporen kommt.

Bezüglich der Bodenverdichtung haben Montagu et al. (2001; zitiert in Schwarz et al. 2010a, 356) aufgezeigt, dass Ersatzwachstum auftreten kann, wenn Wurzeln auf horizontal verdichtete Schichten treffen. Aber auch das gesamte Wachstum der Pflanze leidet bei Bodenverdichtung, was sich in einem um über 50 % kleinerer Leaf Area Index (Blattfläche pro Bestandesfläche) von Versuchspflanzen gegenüber solchen in Lockerböden ausdrückt.

Die Auswirkungen der Bodenverdichtung können sich gemäss Kozlowski (1999; zitiert in Meyer und Trezmüller (ohne Datum), 15f) durch die Verringerung von Durchwurzelungsmöglichkeiten (weniger Makroporen) und erschwertes Wurzelwachstum durch die höhere Bodendichte zeigen, wodurch tieferen Bodenschichten nicht oder kaum mehr durchwurzelt werden. Weiter kann dies zu Ausbildung von kürzeren und dickeren Wurzeln führen, was dann wiederum einer Verkürzung der lateralen Wurzelverteilung entspricht. Weiter kann die Bodenverdichtung, wie oben erwähnt auch zu Wasserstau oder Vernässung und somit zu Fäulegefahr und durch die verminderte Wasserspeicherkapazität zu Nährstoffauswaschung und erhöhtem Oberflächenabfluss sowie erhöhter Erosionsgefahr führen (ebd.). Gerade die Fichte ist erheblich fäulegefährdet (Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz und Dendrologie der ETH Zürich 1995, 40), wobei die durchschnittliche Gesundheit eines Fichtenbestandes bei entsprechend verdichteten Böden leiden könnte.

Faktoren, welche die Schadwirkung begünstigen sind u. a. sehr feuchte und nasse Böden (Bodenverdichtung, Zuwachsdefizit), steile Hanglagen (Erosion, Zuwachsdefizit) und Lage in grosser Höhe (langsame Regeneration der Gehölze), wobei Bodenverdichtungen am ausgeprägtesten durch schweres Rindvieh verursacht werden (Gotsch et al. 2002, 23).

Ein weitere Beeinflussung durch das Rindvieh auf den Wald und somit auch auf den Wurzelraum besteht im Nährstoffeintrag durch den Kuhdung. Majdi (2001, 1057) verweist in seiner Arbeit über den Einfluss von Dünger auf die Produktion und Lebensdauer von Feinwurzeln darauf, dass die Produktion im Vergleich mit unbehandelten Kontrollwurzeln signifikant zunimmt, die Lebensdauer hingegen gleichzeitig signifikant abnimmt.

Rickli und Graf (2009, 38) beobachteten im Perimeter St. Antönien, dass im Wald deutlich mehr Rutschungen angerissen sind als im Freiland, im Gegensatz zur allgemeinen Situation (Freiland > Wald) (ebd., 41). Dies könnte zu einem grossen Teil auf die Beweidung des Waldes mit entsprechend schlechterem Waldzustand bzw. geringeren Bestandesdichte zurückgeführt werden. Möglicherweise wird dieser Einfluss auf den Wald noch zusätzlich durch Viehtritte verursachte Bodenverdichtung verstärkt, wobei zusätzlich Stauhorizonte innerhalb des Bodens entstehen könnten, welche als Versagensflächen für Rutschkörper dienen könnten. Diese Annahme wird auch durch den Umstand gefestigt, dass die Rutschiefen im Wald geringer als im Freiland waren, was auf oberflächennahe Scherflächen schliessen lässt (ebd., 39).

5.6.3 Waldbauliche Eingriffe

Bezüglich der Rutschungsgefährdung ergeben sich für die Waldbewirtschaftung gewisse Einschränkungen und richtungsweisende Empfehlungen, was folgend behandelt wird.

Da die Dynamik in subalpinen Fichtenwäldern durch klimatische Bedingungen sehr langsam abläuft, ist es äusserst wichtig, waldbaulich sorgfältig und nachhaltig zu wirken, denn nur mit geeigneten Pflegemassnahmen können diese Wälder langfristig und nachhaltig verjüngt werden. Untersuchungen des SLF (Krumm et al. 2014) haben denn auch gezeigt, dass es 50 - 100 Jahre dauern kann, bis ein Baum vollständig ersetzt wird. Wälder mit Südexposition haben dabei einen entscheidenden Vorteil: Die biologischen Prozessabläufe laufen entsprechend einer höheren Sonneneinstrahlung (mehr Licht und Wärme) schneller ab, wodurch auf Beeinflussungen des Waldes rascher Reaktionen folgen. Deshalb fordern Frehner et al. (2005, Anhang 2B, 21) bezüglich den waldbaulichen Eingriffen in der subalpinen Höhenstufe, dass möglichst immer auch auf der ganzen Fläche die Verjüngung gefördert werden soll. Dabei kommen v. a. die verjüngungsgünstigen Kleinstandorte zum Zug, in welchen eine genügende Sonneneinstrahlung aufkommen soll (Fichte mind. 2 h Junisonne pro Tag). Dafür reicht an Südhängen das Entfernen weniger Bäume im Gegensatz zu relativ grossflächigen Öffnungen an Nordhängen (ca. 1/2 Baumlänge breit und 1 1/2 - 2 Baumlängen lange Linien schräg zur Falllinie) (ebd.), wobei nicht vergessen werden darf, dass sich grössere Kahlflächen immer ungünstig auf die Rutschgefährdung auswirken, da nach wenigen Jahren auch die stabilisierende Wirkung toter Wurzeln abnimmt, während die Verjüngung erst aufkommt (ebd., Anhang 1, 12). Auch Genet et al. (2008, 1517) weisen daraufhin, dass Rücksicht auf die Lückengrösse genommen werden soll, da plötzlich auftretende (zu) grosse Baum- oder auch Rottenabstände zu lokalen Rutschrisiken führen könnten. Weiter können auch in Abhängigkeit von Alter und Struktur von Waldbeständen signifikante Unterschiede in der Hangstabilität resultieren. So kann diese in Abhängigkeit der Baumabstände verschiedener Entwicklungsstufen variieren. Die waldbaulichen Eingriffe können dabei einen entscheid-

enden Einfluss dadurch ausüben, dass in den Lücken nach Durchforstungen viele Wurzeln verfaulen und absterben, wobei dieses Bodenvolumen noch nicht durch die verbleibenden Bäume wieder erschlossen werden kann, da diese eine gewisse Reaktionszeit benötigen. Wird dies zusätzlich in Zusammenhang mit möglicherweise heterogenen Wurzelverteilungen in Steilhängen gelegt (McMinn 1963; zitiert in Nicoll et al. 2006, 708), ist es umso wichtiger, zu grosse Lücken im Bestand zu vermeiden.

Es kann noch nicht abschliessend erklärt werden, weshalb die Wurzeldichte Spitzen in verschiedenen Altersstufen erreicht (Genet et al. 2008, 1524). Mehrere Untersuchungen zeigen (u. a. Vogt et al. 1987; zitiert in ebd.), dass die Entwicklung des Wurzelwachstums vom oberirdischen Status abhängig sein kann, wobei die Spitze bei der Schliessung des Kronendaches erreicht werden könnte. Diese ist wiederum von der Baumart, Bestandesdichte (Konkurrenz um Nährstoffe und Licht) und Wuchsigkeit des Standortes abhängig. Die Wurzeldichte nimmt ab der Keimung rasch zu, da die jungen Bäume mehr Ressourcen (Nährstoffe, Wasser) erschliessen müssen und kommt während einer frühen Reife- phase zur Spitze, danach nimmt sie kontinuierlich bis zum Gleichgewicht ab, welches in späteren Altersstufen erreicht wird. In diesem Alter nimmt die Blattfläche langsam ab, wodurch auch der Bedarf an Wasser und Nährstoffe wieder sinkt und die Feinwurzelmasse langsam wieder abnimmt, wobei zum Teil strukturelle Grobwurzeln daraus gebildet werden (Peichl und Arain 2006; zitiert in ebd.).

Falls die Bestandesdichte nicht schon fast maximale Werte erreicht, kann durch die Erhöhung der Anzahl Bäume auch die Hangstabilität verbessert werden (Genet et al. 2008, 1523), wenn die grundsätzlichen Voraussetzungen einer Waldwirkung gegeben sind.

Der Bestandesstabilität kommt grundsätzlich die höchste Bedeutung zu (stabile Rotten > stabile Einzelbäume) (ebd., Anhang 2B, 21), im Zusammenhang mit rutschgefährdeten Hängen sollte das Augenmerk jedoch sicherlich auch auf die Hangstabilität gelegt werden. Denn durch unsachgemässse Waldbewirtschaftung kann besonders auf empfindlichen Böden eine massive Bodenverdichtung verursacht werden. Dabei kann der Wurzelraum, welcher für die Stabilität des Waldbestandes und des Bodens entscheidend ist, langfristig (Jahrzehnte) beeinträchtigt werden. Die waldbaulichen Eingriffe müssen somit immer auch durch bestandes- und bodenschonende Massnahmen erfolgen (Frehner et al. 2005, Anhang 1, 12f).

Auch grosse, windwurfgefährdete Bäume können die Hangstabilität beeinträchtigen, da bei allfälligem Wurf der Boden verletzt werden könnte, wodurch eine erhöhte Infiltration und Verwitterung auftreten kann, was zu einem potentiellen Anrißpunkt für Rutschprozesse führen kann (ebd., 12). Dies ist v. a. bei der Fichte problematisch, da sie erhöht sturmgefährdet ist (Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz und Dendrologie der ETH Zürich 1995, 41).

Vergani et al. (2014, 2) weisen darauf hin, dass die Einflüsse der standörtlichen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und Wurzelverteilung fundamental für die Quantifizierung der Wurzelverstärkung auf Bestandesebene sind. Die Empfehlung wäre demnach, in Gebieten mit für Rutschungen entsprechend anfälligen Bedingungen, den Wald möglichst dicht werden zu lassen, wobei aber auf eine gute Mischung (Baumarten, Entwicklungsstufen) zu achten ist. Und auch dort wo der Wald nur sehr wenig über die mechanische Wurzelverstärkung beiträgt, ist es wichtig die Bewaldung zu erhalten und allenfalls zu fördern (Lücken), da auch die hydrologische Wirkung vorhanden und wichtig ist. Es lässt sich folgern, dass bei abnehmender mechanischer Wirkung, die Wichtigkeit der hydrologischen zunimmt.

6 Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die eingangs formulierten Fragestellungen beantwortet:

- *Wie ist die räumliche Wurzelverteilung der Fichte an diesem spezifischen Standort und wie viel beträgt die berechnete Wurzelverstärkung?*

Die Wurzelanzahl (Wurzelverteilung) nimmt mit zunehmendem Wurzeldurchmesser und in Korrelation mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg ab. Dabei ist die Bandbreite der Wurzelanzahl pro Baum und Bodenprofil zum Teil sehr unterschiedlich (bis zu rund 150 Wurzeln), obwohl die BHD-Verteilung relativ gering ist ($0.45 \text{ m} \pm 0.08 \text{ m}$), was u. a. auf lokal unterschiedliche Umwelt- und Bodenbedingungen zurückgeführt wird.

Die durchschnittliche Wurzelverstärkung nimmt entsprechend der gemessenen Wurzelverteilung in Korrelation mit zunehmender Distanz vom Baumstamm weg ab, wobei der Kraftunterschied bei Betrachtung der Wurzeldurchmesserklassen von 5 bis 15 mm um das zwei- bis dreifache zunehmen kann. Dies zeigt die Bedeutung grössere Wurzeldurchmesser auf, welche trotz einer geringeren Anzahl einen grossen Beitrag an die Wurzelverstärkung erbringen können. Auch hier tritt eine grosse Bandbreite zwischen der auf derselben Distanz berechneten minimalen und maximalen Wurzelverstärkung auf.

- *Welchen Einfluss hat die Wurzelverstärkung im Zusammenhang mit der Waldstruktur auf die Schutzwirkung des Waldes gegen flachgründige Rutschungen?*

Je höher der durchschnittliche BHD und die Stammzahl pro Hektar, desto höher ist die potentiell mögliche Wurzelverstärkung, falls die Waldwirkung aufgrund topographischer und pedologischer Bedingungen überhaupt einen bedeutenden Einfluss auf die Hangstabilität ausüben kann. Stufigkeit und eine Mischung an Baumarten sollte zur Verbesserung der Bodenerschliessung bzw. Bodenarmierung durch Wurzeln führen und somit erhalten und gefördert werden.

Lücken im Bestand müssen möglichst vermieden werden, da mit zunehmender Grösse die Wurzelverstärkung innerhalb davon abnimmt. Somit kann die Beweidung im Wald durch dabei entstehende Bestandeslücken und Bodenverdichtung einen negativen Einfluss auf die Hangstabilität ausüben.

- *Welche Schlüsse lassen sich aus der Modellierung für das waldbauliche Handeln im Schutzwald ziehen?*

Ein minimaler Deckungsgrad bzw. minimale Stammzahl pro Hektar in Abhängigkeit der Hangneigung und der Entwicklungsstufen, sollte immer erhalten bleiben, damit der Boden im Hang entsprechend der minimal nötigen Wurzelverstärkung stabil bleibt. Dabei erbringen grössere Bäume tendenziell eine höhere Wurzelverstärkung aufgrund einer höheren Wurzelanzahl, jedoch sollte eine Überalterung des Bestandes wegen der zunehmenden Instabilität und Fäulegefahr vermieden werden.

Ausblick und Forschungsbedarf: Um Rückschlüsse für die Schutzwaldbewirtschaftung zu erhalten, sollte für wichtige (Haupt-)Baumarten auf verbreiteten Waldstandorten ein quantifizierbarer Wert für die potentielle Wurzelverstärkung bzw. die Hangstabilität berechnet werden können, weshalb entsprechende Untersuchungen der Wurzelverteilung nötig werden. Weiter sollte neben der Wurzelverteilung auch die Wurzelkraft durch Auszugversuche näher untersucht werden, wobei ebenfalls verschiedene bzw. grössere Wurzeldurchmesser (> 5 mm) unterschiedlicher Baumarten berücksichtigt werden sollen, wodurch Modelle wie das Wurzelverteilungsmodell (Schwarz et al. 2010a), das RBMw (Schwarz et al. 2013) oder Slidefor^{NET} (Schwarz und Dorren 2014) exakter kalibriert werden können. Der Einfluss der Waldweidebewirtschaftung, v. a. bezüglich den Einwirkungen auf den Boden bedingt eine nähere Betrachtung aus Sicht der Schutzwaldbewirtschaftung bzw. der Hangstabilität.

7 Dank

Mein Dank richtet sich an meinen Betreuer Herrn Dr. Massimiliano Schwarz, welcher sich für meine Anliegen immer viel Zeit genommen und mir viel Freiraum bei der Ausrichtung meiner Arbeit geboten hat. Seine engagierte und motivierende Betreuung umfasste neben der Beantwortung meiner Fragen auch richtungsweisende Anregungen zu inhaltlichen Aspekten.

Weiter danke ich Herrn Dr. Peter Bebi (Gruppenleiter Gebirgsökosysteme am SLF, Davos) für die thematische Besichtigung des Untersuchungsperimeters in St. Antönien, die Bereitstellung der Grabwerkzeuge sowie für die Hilfe bei der Beschaffung von Datenmaterial bezüglich anderen Untersuchungen im Rotwald.

Ein besonderer Dank will ich an Herrn Flurin Caflisch (Student HAFL, FWI 2015) aussprechen für die sehr gute Zusammenarbeit im Feld bei der Grabung der Profile und der Aufnahme der Wurzeleigenschaften, trotz teils sehr widrigen Wetterbedingungen. Für seinen weiteren Studien an der HAFL wünsche ich ihm viel Erfolg.

„*Last but not least*“ einen Dank an meine Familie, speziell an meinen Vater und an meine Lebenspartnerin, welche mich in meinem Wirken jederzeit unterstützt haben.

8 Literaturverzeichnis

AmbiWebGmbH, ohne Datum. Klima: St. Antönien Ascharina. Abgerufen am 13.07.2014, <http://de.climate-data.org/location/163865/>

BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2013a. SilvaProtect-CH - Schutzwald in der Schweiz. 11.02.2013, abgerufen am 17.06.2014, <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01920/01964/index.html?lang=de>

BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2013b. Zustandsbericht Naturgefahren. 05.07.2013, abgerufen am 17.06.2014, <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/status/03995/index.html?lang=de>

Bezzola G R, Hegg Chr, 2008. Ereignisanalyse Hochwasser 2005 - Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern; Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, S. 431, 04.03.2014, <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00100/index.html?lang=de&download=NHzLpZig7t.lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YuqZ6gpJCGdnx4fWym162dpYbUzd.Gpd6emK2Oz9aGodeitmqaN19XI2ldvoaCVZ.s-.pdf>

BFW, 2014. Institut für Waldgenetik - Herkunft und Züchtung. Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), Wien. Abgerufen am 12.07.2014, <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=4278>

Bider M, Thams J C, 1951. Das Niederschlagsregime nord- und südwärts der Alpen auf Grund zehnjähriger Pluviographenregistrierungen. In: Astronomisch-Meteorologische Anstalt der Universität Basel und Osservatorio Ticinese della Centrale Meteorologica Svizzera, Locarno-Monti (Hrsg.). Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B. Springer-Verlag, Luxemburg/Berlin, S. 123-148, 17.06.2014, <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02242596#page-1>

Clark L J, Whalley W R, Barraclough P B, 2003. How do roots penetrate strong soil? Plant and Soil, 255, 93-104.

Cohen D, Schwarz M, Or D, 2011. An analytical fiber bundle model for pullout mechanics of root bundles. Journal of Geophysical Research, 116, 20 S. Abgerufen am 26.06.2014, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JF001886/full>

Frehner M, Wasser B, Schwitter R, 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). BAFU (Bundesamt für Umwelt), Bern, 30 S.

Frey H-U, Preiswerk T, Bichsel M, Aebi B, 1998. Auszug Waldgesellschaften und Waldstandorte Graubündens: Region 2; „Prättigau“ - Gliederung der Höhentufen (Version 3.1). Atragene, Fachgemeinschaft für Standortskunde und Ökologie, Chur, 5 S.

Giadrossich F, Schwarz M, Cohen D, Preti F, Or D, 2013. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests. Plant and Soil, 367, 391-406. Abgerufen am 01.07.2014, http://www.researchgate.net/publication/234310959_Mechanical_interactions_between_neighbouring_roots_during_pull_out_tests/file/72e7e5224a5a845686

Graf F, 2008. Vegetationswirkungen und Bodenstabilität. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 28.08.2008, abgerufen am 21.02.2014, http://www.wsl.ch/fe/okosystem/gebirgsoekosysteme/projekte/vegetationswirkung_bodenstabilitaet/index_DE

Graf Chr, Böll A, Graf F, 2003. Pflanzen im Einsatz gegen Erosion und oberflächennahe Rutschungen. Merkblatt für die Praxis Nr. 37, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 8 S.

Heyer E, Hupfer P, Kuttler W, 1988. Witterung und Klima. B G Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart/Leipzig, 554 S.

Krumm F, Panayotov M, Bebi P, Ulrich M, Gollut C, Kulakowski D, Spiecker H, 2014. Natürliche Dynamik von subalpinen Lawinenschutzwäldern. Eidgenössisches Forschungsinstitut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos, Eidgenössische Anstalte für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf. Abgerufen am 15.07.2014, http://www.slf.ch/ueber/organisation/okologie/gebirgsoekosysteme/projekte/schutzwalddynamik/index_DE

LFI (Landesforstinventar), 2012. LFI4a: Fläche Wald/Gebüschwald/Nichtwald. 20.03.2012, abgerufen 17.06.2014, <http://www.lfi.ch/resultate/resultate-karte.php?zigrNr=1&befundNr=329&invNr=451&auswNr=435&p=prod&prodNr=9&frmFnc=Resultate%2Banzeigen&itNr=15767&rowIdx=2>

Losey S, 2013. SilvaProtect-CH: Schadenpotenzial. Bundesamt für Umwelt BAFU (Abteilung Gefahrenprävention), Bern, 3 S., abgerufen am 05.08.2013, http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01920/01964/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t.lnp6l0NTU042l2Z61n1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCHdHt5hGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

Losey S, Wehrli A, 2013. Schutzwald in der Schweiz - Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt BAFU (Abteilung Gefahrenprävention), Bern, 29 S., abgerufen am 17.06.2014, http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01920/01964/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t.lnp6l0NTU042l2Z61n1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCHdHt5gym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

Majdi H, 2001. Changes in fine root production and longevity in relation to water and nutrient availability in a Norway spruce stand in northern Sweden. *Tree Physiology*, 21, 1057-1061.

Marcandella D, Rickli Chr, 2010. Zugfestigkeit von Wurzeln abgestorbener Bäume. Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN), FAN-Agenda, 2/10, 7-9.

Meusburger K, Alewell C, 2008. Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 509-520. Abgerufen am 13.07.2014, <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/95/25/PDF/nhess-8-509-2008>

Moos Chr, 2014. Effect of forest structure on shallow landslides based on statistical prediction models. Unveröffentlichter Entwurf Masterthesis, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos, Eidg. Anstalt für Wald- Schnee- und Landschaft (WSL), Birmensdorf. 69 S.

Mühr B, 2012. Die Klimaklassifikation nach W. Köppen. Klimadiagramme weltweit, 03.05.2012, abgerufen am 13.07.2014, <http://www.klimadiagramme.de/Frame/koeppen.html>

Phillips C, ohne Datum. Portfolio Leader Soils and Landscapes, Landcare Research, Lincoln, New Zealand.

Pollen N, Simon A, 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41 11 S. Abgerufen am 25.06.2014, <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2004WR003801/asset/wrcr10239.pdf?v=1&t=hwtjyi4o&s=c2f0c5ea603885553d36502d1cd14239603b49a8>

Pommerening A, 2012. Ehemaliger Dozent Abteilung Forstwirtschaft, Fachbereich Waldbau und Waldwachstumskunde. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). Mündliche Mitteilung während des Unterrichts im Modul „BLFf106 Waldinventur, Waldwachstum und Forstliche Planung“ am 01.10.2012.

Rickli Chr, 2013a. Flachgründige Rutschungen und Hangmuren. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 03.05.2013, abgerufen am 21.02.2014, http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/oberflaechennahe_rutschungen/index_DE

Rickli Chr, 2013b. Vegetationswirkungen und Rutschungen. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 24.04.2013, abgerufen am 21.02.2014, http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/vegetationswirkungen_rutschungen/index_DE

Rickli Chr, Graf F, 2009. Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. Forest, Snow and Landscape Research, 82, 33-44. Abgerufen am 24.02.2014, http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/oberflaechennahe_rutschungen/fosnola

Rickli Chr, Kamm S, Bucher H, 2008. Flachgründige Rutschungen - Teilprojekt Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 114 S, 07.2008, abgerufen am 04.03.2014, <http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/Hanmurendatenbank/Rutschungen>

Rickli Chr, Zürcher K, Frey W, Lüscher P, 2002. Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweizerische Zeitung für Forstwesen, 153, 437-445.

Schlegel T, Bader S, Begert M, Croci-Maspoli M, Scherrer S, 2012. Klimabericht Kanton Graubünden 2012. Fachbericht MeteoSchweiz, 242, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich, 56 S. Abgerufen am 13.07.2014, https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/ekud/anu/projekte/Dokumente_Luft/Klimabericht_GR_2012.pdf

Rüdy F, ohne Datum. Wissenschaftlicher Illustrator FH. <http://andraia.ch>

Rüdy F, 2013. Visualisierung einer Hangrutschung. Wissenschaftlicher Illustrator FH. Abgerufen am 16.06.2014, <http://andraia.ch>

Schwarz M, 2014a. Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Forstwirtschaft, Fachgruppe Gebirgswald und Naturgefahren. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). Mündliche Mitteilungen innerhalb von Fachgesprächen während der Betreuungstreffen zur Bachelorthesis im Frühling und Sommer 2014.

Schwarz M, 2014b. Angepasstes R-Skript als Auszug aus dem internetbasierten Tool zur Rutschungsmodellierung Slidefor^{NET} von EcorisQ, Genf. Erhalten an einem Fachgespräch am 01.07.2014.

Schwarz M, 2014c. Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Forstwirtschaft, Fachgruppe Gebirgswald und Naturgefahren. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). Schriftliche Mitteilung als Betreuer vorliegender Arbeit im Frühling und Sommer 2014.

Schwarz M, 2013. Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung Forstwirtschaft, Fachgruppe Gebirgswald und Naturgefahren. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). Mündliche Mitteilung innerhalb eines Fachgesprächs während einer thematischen Exkursion des Moduls „BLFg026 Naturgefahren und Risikomanagement“ am Wärgistalbach (Grindelwald (BE)) am 17.05.2013.

Schwarz M, Cohen D, Or D, 2010b. Soil-root mechanical interactions during pullout and failure of root bundles, Journal of Geophysical Research, 115, 14 S. Abgerufen am 26.06.2014, <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2010JF001753/asset/jgrf775.pdf?v=1&t=hwvtykao&s=8c75263ee7572d9744d0eb022bb985d1266d205a>

Schwarz M, Cohen D, Or D, 2011. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil – experiments and modeling. Journal of Geophysical Research, 116, 14 S. Abgerufen am 26.06.2014, <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2010JF001753/asset/jgrf775.pdf?v=1&t=hwvtykao&s=8c75263ee7572d9744d0eb022bb985d1266d205a>

Schwarz M, Dorren L K A, 2014. Slidefor^{NET}. Internetbasiertes Tool zur Rutschungsmodellierung. EcorisQ, Genf. 18.02.2014, abgerufen am 06.07.2014, <http://www.ecorisq.org/slidesfor-net-en>

Schwarz M, Giadrossich F, Cohen D, 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 17, 4367 -4377.

Schwarz M, Lehmann P, Cohen D, Or D, 2008. Neue Ansätze zur Quantifizierung des Wurzeleinflusses auf die Stabilität von Rutschhängen. Agenda Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN), 2, 11-14. Abgerufen am 11.07.2014, http://www.planat.ch/fileadmin/FAN/fan_pdf/FAN-Agenda_2_08_def_klein

Schwarz M, Lehmann P, Or D, 2010a. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes - from a bundle of roots to tree stands. Earth Surface Processes and Landforms (ESPL), 35, 354-367.

Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, Lehmann P, Or D, 2010c. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). Ecological Engineering, 36, 285-291. Abgerufen am 06.08.2014, http://www.researchgate.net/publication/229350143_Quantifying_the_role_of_vegetation_in_slope_stability_A_case_study_in_Tuscany_%28Italy%29

Schwarz M, Thormann J-J, 2012. Neue Ansätze zur Quantifizierung der Schutzwaldwirkung. Geosciences ACTUEL, 2, 26-29.

SGK, 1980. Geologische Karte 1:500'000. Schweizerische Geologische Kommission (SGK), Bern.

SGTK, 1963. Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000. Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK), Zürich.

swisstopo, 2014. swisstopo Geodaten. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo). Abgerufen am 17.06.2014, <http://map.geodataviewer.admin.ch/geodataviewer.php>

Sidle R C, Ochiai H, 2006. Landslides - Processes, Prediction, and Land Use (3. Auflage). American Geophysical Union, Washington DC, 312 S.

Thormann J J, 2012. Dozent Forstwirtschaft, Fachgruppe Gebirgswald und Naturgefahren. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL). Mündliche Mitteilung während einer thematischen Exkursion des Moduls „BLF074 Grundlagen Gebirgswald“ im Grunigel (BE) am 08.10.2012.

Waldrion L J, Dakessian S, Nemson J A, 1983. Shear Resistance Enhancement of 1.22-Meter Diameter Soil Cross Sections by Pine and Alfalfa Roots. Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Societies (ACSESS), abgerufen am 18.06.2014, <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssj/abstracts/47/1/SS0470010009>

Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N, 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, 16, 19-33.

Zentrum Geotechnik, ohne Datum. Übung zur Böschungsstabilität - Grundbau und Bodenmechanik. Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität München (TUM), 19 S. Abgerufen am 17.12.2012, <http://www.gb.bv.tum.de/download/uebung/j.pdf>