

# Beurteilung der Holzerntesysteme und der Walderschliessung in der Schweiz: neue Produkte

Leo Bont<sup>1,\*</sup>, Marielle Fraefel<sup>2</sup>, Christoph Fischer<sup>3</sup>, Christian Temperli<sup>3</sup>, Fritz Frutig<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Gruppe Nachhaltige Forstwirtschaft (CH)

<sup>2</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Gruppe GIS (CH)

<sup>3</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Wissenschaftlicher Dienst LFI (CH)

## Abstract

Damit der Wald Ökosystemleistungen erbringen kann, sind waldbauliche Lenkungsmaßnahmen erforderlich. Für die effiziente Durchführung dieser Lenkungsmaßnahmen ist eine gute Erschliessung mit Waldstrassen nötig. In diesem Artikel werden drei neue Produkte des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) vorgestellt, die dazu beitragen, die Holzernte effizienter auszugestalten und die Walderschliessung zu optimieren. Beim ersten Produkt handelt es sich um ein Modell zur Herleitung des wirtschaftlich günstigsten Holzernteverfahrens auf jeder LFI-Probefläche. Dazu wurden räumliche Daten zur Topografie und zum Waldstrassennetz, Bestandesdaten und Informationen zu den auf den LFI-Probeflächen eingesetzten Holzernteverfahren sowie expertenbasierte Entscheidungsbäume verwendet. Die Resultate zeigen, dass unter Anwendung des wirtschaftlich besten Verfahrens allgemein höher mechanisierte Verfahren eingesetzt würden und somit Kosten eingespart werden könnten. Das zweite Produkt beinhaltet eine einheitliche und flächendeckende Beurteilung der Erschliessungsgüte. Dabei wurden unter anderem die Topografie, die Bodeneigenschaften, das Waldstrassennetz und die Hindernisse für die Holzernte berücksichtigt. Die Beurteilung ergab, dass sich die Erschliessung auf rund der Hälfte der Schweizer Waldfläche gut für eine effiziente Waldbewirtschaftung eignet, auf je einem Viertel aber nur bedingt oder gar nicht. Für das dritte Produkt wurde unter Berücksichtigung von Strassen- und Rückekosten die optimale Strassendichte ermittelt. Im Vergleich mit der aktuellen Strassendichte kann nun für grössere Gebiete ein Überblick über die ökonomische Effizienz von Walderschliessungen gewonnen werden. Die drei Produkte schaffen Grundlagen für eine detaillierte und flächendeckende Beurteilung der Erschliessungssituation und der Holzerntesysteme im Schweizer Wald und kamen auch schon in der kantonalen Waldplanung von Bern und Graubünden zur Anwendung.

**Keywords:** ecosystem services, timber harvesting, forest opening up, best-practice timber harvesting methods, economical assessment, National Forest Inventory, Switzerland

doi: 10.3188/szf.2021.0268

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail [leo.bont@wsl.ch](mailto:leo.bont@wsl.ch)

Wälder erbringen bedeutende Ökosystemleistungen: Dazu gehören die Bereitstellung von Holz, der Schutz vor Naturgefahren, die Erhaltung der Biodiversität, die Funktion als Erholungsraum, die Kohlenstoffspeicherung sowie die Trinkwasserfilterung und -speicherung. Damit die Wälder diese Dienstleistungen nachhaltig erbringen können, sind waldbauliche Lenkungsmaßnahmen erforderlich. Im Schutzwald, der gemäss Landesforstinventar (LFI) 42% des Schweizer Waldes umfasst (Brändli et al 2020), muss zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Waldverjüngung regelmässig eingegriffen werden (Brang et al 2006). Ausserdem sind viele Pflanzen-, Insekten- und Vogelarten auf gezielte Eingriffe angewiesen. Dadurch wird eine vielfältige Waldstruktur mit einem Nebeneinander von Altholz-, aber auch von Pionierwaldphasen ge-

schaffen (Hahn et al 2005). Auch um einen konstant hohen Zuwachs und damit eine hohe Assimilation von CO<sub>2</sub> aus der Luft zu erreichen, sind regelmässige Hiebe notwendig. Eine maximale Kohlenstoffsinkwirkung wird erreicht, wenn das geschlagene Holz für langlebige Holzprodukte verwendet wird, die den assimilierten Kohlenstoff speichern und energieintensive Baumaterialien wie Stahl und Beton ersetzen (Verkerk et al 2020). Die Förderung von Baumarten, die an künftige Klimaverhältnisse angepasst sind, sowie die Schaffung von störungsresistenteren und -resilienteren Bestandesstrukturen erfordern ebenfalls Lenkungsmaßnahmen (Brang et al 2016).

Voraussetzung für die effiziente Durchführung der Lenkungsmaßnahmen und insbesondere den Abtransport des dabei anfallenden Holzes ist eine gute Erschliessung des Waldes. Der finanzielle

Aufwand für die Holzernte und die Erschliessung ist beträchtlich. Bei den Betrieben des schweizerischen Testbetriebsnetzes macht dieser Aufwand 71% des Kerngeschäfts der Waldbewirtschaftung aus (Bürgi et al 2018). Deshalb sind verlässliche Informationen zur Holzernte- und Erschliessungssituation für eine nachhaltige und kosteneffiziente Waldbewirtschaftung von grosser Bedeutung.

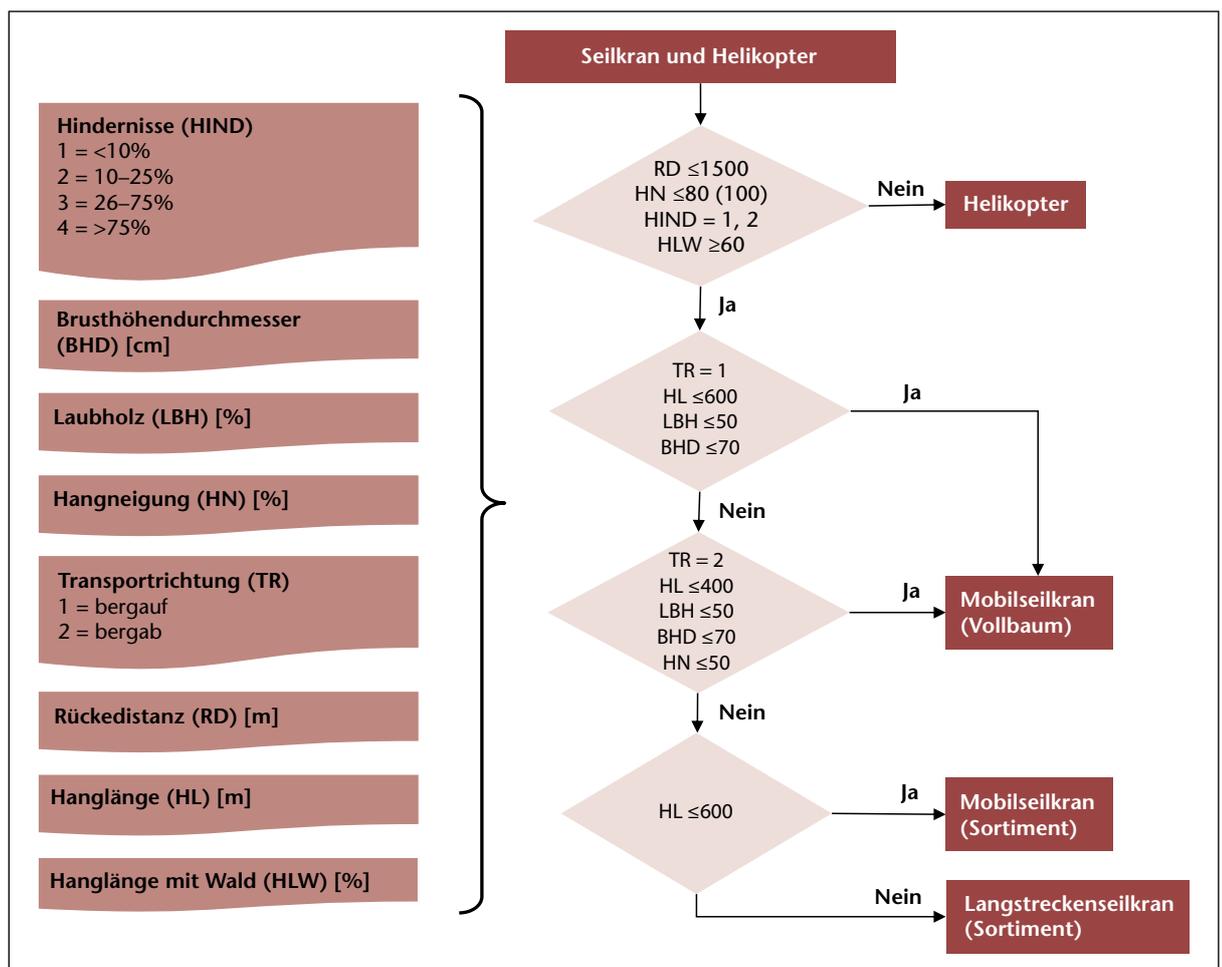
Im Rahmen des LFI wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Parameter erhoben und ausgewertet, die für Holzernte und Erschliessung relevant sind. Für jede Probefläche zeichneten beispielsweise die Revierförsterinnen und Revierförster die hypothetisch oder im Falle eines Eingriffs tatsächlich eingesetzten Rückemittel und Ernteverfahren sowie die Rückedistanzen auf. Die erhobenen Daten wurden mit Produktivitätsmodellen verknüpft. Daraus wurde der potenzielle Aufwand für die Bereitstellung des Holzes an der Waldstrasse berechnet.

Dieser klassische Ansatz erlaubt Aussagen über den aktuellen Zustand der Erschliessung und der Holzernte für die Schweiz und die einzelnen Forstregionen. Jedoch können aufgrund dieser Stichprobenerhebung keine räumlich höher aufgelösten Analysen oder Potenzialabschätzungen gemacht werden. Beispielsweise kann nicht aufgezeigt werden, in wel-

chen Tälern oder Gemeinden die Erschliessung für die Waldbewirtschaftung ungenügend ist. Um diese Wissenslücke zu schliessen, wurde die Produktpalette des LFI im Bereich «Holzernte und Erschliessung» erweitert. Dies mit dem Ziel, (1) auch Grundlagen für forstpolitische Strategien zu liefern und (2) neue, massgeschneiderte Analysemethoden für weiterführende Untersuchungen zu entwickeln (z.B. für den künftigen Erschliessungsbedarf, das Holznutzungspotenzial und Gesamtkonzepte für die Walderschliessung). Der Artikel gibt einen Überblick über die neuen LFI-Produkte und zeigt auf, wie sie genutzt werden können, um Fragen zur Erschliessungsgüte und zum Reengineering, wie sie beispielsweise bei der Revision des Bundesgesetzes über den Wald im Jahr 2016 (Beiträge an die Walderschliessung ausserhalb des Schutzwalds) aufgeworfen wurden, beantworten zu können.

### Modellierung des Bestverfahrens für die LFI-Probeflächen

Mittels Befragung der Revierförster wird im LFI für jede Probefläche das effektiv eingesetzte Holzernverfahren (inkl. Rückemittel) erfasst. Falls seit



**Abb 1** Entscheidungsbaum zur Herleitung des Bestverfahrens im nicht befahrbaren Gelände. Die Eingangsparameter stammen aus den LFI-Feldaufnahmen (HIND, BHD, LBH) sowie aus den Eigenschaften des Hanges und der modellierten möglichen Seillinie (HN, TR, HL, HLW).

der letzten Erhebung auf der Probefläche kein Eingriff stattgefunden hat, wird das Ernteverfahren erfasst, das nach Angabe der Revierförsterinnen im Falle eines Eingriffs eingesetzt würde. Eine Übersicht über die erhobenen Holzernteverfahren ist in Fischer & Stadelmann (2019) und in Fischer et al (2020) zu finden.

Um die im LFI erfassten Holzernteverfahren zu evaluieren, haben wir eine Methode entwickelt, mit der das auf einer LFI-Probefläche technisch machbare, den Umwelt- und Sicherheitsstandards genügende und gleichzeitig wirtschaftlichste Holzernteverfahren identifiziert werden kann. Dieses bezeichnen wir als «Bestverfahren». Durch die Bestimmung der Holzerntekosten für jede LFI-Probefläche können die Kosten des aktuell angewendeten Verfahrens mit den Kosten des Bestverfahrens verglichen werden.

### Daten und Methode

Für die Herleitung des Bestverfahrens wurden vier Gruppen von Datenquellen verwendet, die für die ganze Waldfläche der Schweiz verfügbar waren:

- 1. GIS-Daten:** ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 2 m, das durch das im LFI erhobene Waldstrassennetz, die LFI-Waldmaske (Waser et al 2015) sowie die Koordinaten der LFI-Probeflächen ergänzt wurde
- 2. Auf den LFI-Probeflächen erfasste Daten:** zum Beispiel Standortmerkmale, Brusthöhendurchmesser (BHD), Baumarten sowie Hindernisse für die Holzernte
- 3. Daten aus der Befragung der Revierförsterinnen und Revierförster:** Informationen zu Holz-

ernteverfahren und Walderschliessung (Waldstrassennetz der Schweiz)

**4. Expertenwissen für die Definition der Entscheidungsbäume:** Herleitung des technischen Rahmens, in dem ein bestimmtes Holzertesystem angewendet werden kann. Insgesamt wurden drei Entscheidungsbäume festgelegt. Der erste diente der Abgrenzung des befahrbaren Geländes vom nicht befahrbaren. Genutzt wurden für diesen Entscheidungsbaum das vom Revierförster oder der Revierförsterin angegebene Rückemittel, die Hangneigung und der Waldstandort. Mit den zwei anderen Entscheidungsbäumen wurden die Bestverfahren im befahrbaren bzw. nicht befahrbaren Gelände (Abbildung 1) abgegrenzt. Damit ist für jedes der Bestverfahren in Tabelle 1 die technische Grenze (z.B. maximale Rückedistanz) definiert.

Um das Bestverfahren für eine Probefläche zu bestimmen, wurden unter Zuhilfenahme der Datenquellen und der Entscheidungsbäume alle technisch möglichen Holzernteverfahren ermittelt. Anschließend wurden für jedes der technisch möglichen Holzernteverfahren der Holzernteaufwand und die Transportkosten bis zum übergeordneten Strassennetz ausserhalb des Waldes berechnet. Für die Berechnung der Aufarbeitungs- und Rückekosten wurde das Produktivitätsmodell HeProMo (Frutig et al 2016, Holm et al 2020) verwendet; die Transportdistanzen bis zum übergeordneten Strassennetz (d.h. Strassen, die jederzeit von einem Lastwagen mit 40 t Gesamtgewicht befahren werden können) wurden mittels Netzwerkanalyse berechnet, worauf die Transportkosten bestimmt werden konnten. Für jede LFI-Probefläche und somit für die ganze Waldfläche der Schweiz wurde

Verfahren	Beschreibung	Abkürzung	Anteile	
			Aktuell angewendetes Verfahren (%)	Bestverfahren (%)
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Schlepper (Sortiment)	MM_SK_A	34.3	16.1
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Vorrücken mit Schlepper, Rücken mit Forwarder (Sortiment)	MM_SK_FW_A	8.3	–
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Forwarder (Sortiment)	MM_FW_A	–	9.7
	Motormanuelles Fällen, Rücken mit Schlepper, Aufarbeiten mit Prozessor (Vollbaum)	PM_SK_F	3.8	–
	Vollmechanisiertes Fällen und Aufarbeiten mit Harvester, Rücken mit Forwarder (Sortiment)	FM_FW_A	8.5	26.3
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Mobilseilkran (Sortiment)	MM_TY_A	4.3	9.6
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Langstreckenseilkran (Sortiment)	MM_LY_A	5.9	11.1
	Motormanuelles Fällen, Rücken mit Mobilseilkran (Vollbaum/Kombiseilgerät oder MSK mit Prozessor)	PM_TY_F	10.7	11.0
	Motormanuelles Fällen, Rücken mit Langstreckenseilkran, Aufarbeiten mit Prozessor (Vollbaum)	PM_LY_F	4.8	–
	Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Helikopter (Sortiment)	MM_H_A	2.2	–
	Motormanuelles Fällen, Rücken mit Helikopter, Aufarbeiten mit Prozessor (Vollbaum)	PM_H_F	15.7	16.3
	Andere Verfahren, Schreitharvester und Mobilseilkran, mobiler Hacker, Reisten	Andere	1.6	–

**Tab 1** Häufigkeit (Anteil der LFI-Probeflächen) der effektiv angewendeten Holzernteverfahren gemäss LFI4 (2009–2017) und der modellierten Bestverfahren. Die Codierung ist aus dem Englischen abgeleitet und bedeutet folgendes: FM: vollmechanisiert, PM: teilmechanisiert, MM: motormanuell, FW: Forwarder, H: Helikopter, SK: Schlepper/Traktor, LY: konventioneller Seilkran, TY: Mobilseilkran, A: Sortiment, F: Vollbaum

das Verfahren mit den niedrigsten Gesamtkosten als das Bestverfahren aus wirtschaftlicher Sicht bestimmt.

### **Ergebnisse und Einsatzgebiet des Produkts**

Es zeigte sich, dass es bei Anwendung der Bestverfahren allgemein zu einer Verschiebung zugunsten höher mechanisierter und damit kostengünstiger Holzernteverfahren käme (Tabelle 1). So könnte zum Beispiel das im LFI4 (Erhebungen 2009–2017) am häufigsten angewendete Verfahren «Motormanuelles Fällen und Aufarbeiten, Rücken mit Schlepper» (MM\_SK\_A) oftmals durch das Holzernteverfahren «Vollmechanisiertes Fällen und Aufarbeiten mit Harvester, Rücken mit Forwarder» (FM\_FW\_A) ersetzt werden. Das würde zu einer Effizienzsteigerung führen, die in geringere Holzerntekosten münden würde. Neben den Kostenvorteilen ist aber auch die Reduktion der gesundheitlichen Risiken zu beachten, die mit der manuellen Holzernte einhergehen. Warum kommt trotz dieser Vorteile aktuell nicht flächendeckend das Bestverfahren zum Einsatz? Ein Grund dafür ist, dass viele Schweizer Forstbetriebe klein sind und einen zu hohen Eigenleistungsgrad aufweisen (Bürgi et al 2018). Um das eigene Personal und die eigenen Maschinen auslasten zu können, müssen suboptimale Verfahren eingesetzt werden. Mit der vorliegenden Studie wird somit eine Grundlage geschaffen, um die Differenz zwischen dem Ist-Zustand und dem potenziell möglichen Zustand aufzuzeigen und dadurch Handlungsperspektiven für Entscheidungstragende bereitzustellen.

### **Flächendeckende Analyse der Erschliessungsgüte**

Um einen Wald effizient bewirtschaften zu können, braucht es eine zeitgemässe Erschliessung mit Waldstrassen, insbesondere für die Holzernte und den Holzabtransport. Dies bedeutet, dass die Waldstrassen idealerweise ganzjährig mit 5-Achs-Lastwagen (40 t Gesamtgewicht) befahren werden können. Im Weiteren spielt das eingesetzte Ernteverfahren eine entscheidende Rolle. Kann aufgrund der Erschliessung kein effizientes Ernteverfahren eingesetzt werden, weil beispielsweise die Distanz zur Waldstrasse zu gross ist (z.B. Verwendung eines konventionellen Seilkrans anstatt eines Kombiseilgerätes), erhöhen sich die Produktionskosten.

Kantone und Forstbetriebe benötigen für ihre Planung eine flächendeckende Beurteilung der Güte der Erschliessung, um Prioritäten beim Bau und Unterhalt von Waldstrassen setzen zu können. Für den Bund wiederum sind Angaben zur Erschliessungsgüte über den gesamten Schweizer Wald und nach einheitlichen Kriterien wichtig in Bezug auf die Umsetzung der Ziele der Waldpolitik 2020 (BAFU 2013).

Diese Informationen können mit den bisher verwendeten Beurteilungsmethoden nur ungenügend bereitgestellt werden: Aussagen über die Strassendichte einer Geländekammer geben einen Durchschnittswert an und können nicht verwendet werden, um zu beurteilen, ob eine Waldparzelle effizient bewirtschaftet werden kann. Einfache räumlich aufgelöste Indikatoren wie die Distanz zur nächsten Strasse berücksichtigen weder unterschiedliche Rückemethoden noch den Transport auf der Strasse zu einem Sammelpunkt. Die Beurteilung von einzelnen kleinen Gebieten durch Fachleute erlaubt wiederum keine einheitliche Klassifikation über die ganze Schweiz. Im LFI wurde eine einheitliche und flächendeckende Methode zur Beurteilung der Erschliessung entwickelt, um mithilfe des Waldstrassennetzes, der Topografie und weiterer Einflussgrössen die oben genannten Schwächen in bisherigen Methoden der Erschliessungsbeurteilung zu beheben.

### **Daten und Methode**

Um flächendeckend und nicht nur für die LFI-Probeflächen Aussagen darüber machen zu können, wie gut die Waldparzellen erreichbar sind, haben wir ein Modell erstellt: Es bestimmt, für welche Waldparzelle sich welche Rückemethode eignet und auf welcher Route das geerntete Holz danach bis zum Sammelpunkt abtransportiert wird. Dabei werden Rücke- und Transportweg gemeinsam betrachtet, um stets die kostengünstigste Kombination zu finden. Da neben dem Waldstrassennetz auch boden-, seil- und luftgestützte Rückemethoden berücksichtigt werden, kann auf die unterschiedlichen Geländetypen in der Schweiz eingegangen werden.

Als Waldstrassennetz wird der Datensatz «Waldstrassen» des LFI4 verwendet, der auch Angaben zu verschiedenen Strasseneigenschaften enthält, zum Beispiel zum grössten Fahrzeugtyp, für den die Strasse dimensioniert ist (Müller et al 2016). Die Informationen zum Strassennetz wurden durch Befragung der Revierförsterinnen und Revierförster erhoben.

Unser Ansatz folgte der in Bont et al (2018) beschriebenen Methode. Sie wurde erweitert, damit sie nicht nur auf steiles, sondern auch auf flaches Gelände anwendbar wurde. Unabhängig voneinander wurden die Gebiete für boden- und seilgestütztes Rücken ausgeschieden. Für Letzteres wurden entlang des bestehenden Waldstrassennetzes in regelmässigen Abständen (alle 30 m) Punkte definiert, die als Installationsplätze für Seilkrane infrage kommen. Ausgehend von diesen Punkten wurde die Realisierbarkeit von Seillinien in verschiedene Richtungen geprüft. Berücksichtigt wurden dabei das Gelände sowie mögliche Hindernisse (z.B. Hochspannungsleitungen). Damit wurde die Fläche auf der Karte ausgeschieden, die sich für das Rücken mit Seilkran potenziell eignet. Waldgebiete, die für bodengestützte

Rückemethode	Limitierender LKW-Typ beim Abtransport	
	3-Achs-LKW	4-/5-Achs-LKW
Bodengestützt	Kategorie 2 (bedingt geeignet*)	Kategorie 1 (geeignet*)
Mobilseilkran	Kategorie 2 (bedingt geeignet*)	Kategorie 1 (geeignet*)
Langstreckenseilkran	Kategorie 2 (bedingt geeignet*)	Kategorie 2 (bedingt geeignet*)
Helikopter	Kategorie 3 (nicht geeignet*; für alle LKW-Typen)	

**Tab 2** Definition der Erschliessungskategorien aufgrund der einsetzbaren Rückemethode und des limitierenden Lastwagentyps beim Abtransport des Holzes. LKW: Lastwagen \*für eine effiziente Holzernte gemäss heutigem Stand der Technik

Verfahren infrage kommen, wurden anhand des Geländes und der Bodeneigenschaften ausgeschieden. Dazu wurde geprüft, ob alle befahrbaren Flächen auch an eine Waldstrasse angeschlossen sind. Das übrige Waldgebiet, das weder mit bodengestützten noch mit seilgestützten Verfahren erreicht werden kann, wurde der Kategorie «Helikopter» zugeteilt. Als Resultat ergab sich eine Karte, welche die jeweils am besten geeignete dieser drei Rückemethoden für jede Waldparzelle darstellt; und zwar mit den Prioritäten 1. boden-, 2. seil- und 3. luftgestützt. Auf der Grundlage dieser Karte kann auch eine Karte der Rückekosten erstellt werden. Die Auflösung der Karten liegt bei 10 m × 10 m.

Zur Abschätzung der Transportkosten wurde in einem ersten Schritt der Abtransport des Holzes aus dem Wald auf der Strasse mittels Netzwerkanalyse optimiert. Dabei wird nicht nur die Distanz berücksichtigt, sondern auch der grösste auf der jeweiligen Strasse zugelassene Fahrzeugtyp. Bei der Erschliessungserhebung wurden im LFI4 vier Gewichtsklassen unterschieden: bis 20 t (2-Achser), ab 26 t (3-Achser), 28–32 t (4-Achser) und 40–44 t (5-Achser). Auch wenn rund 72% der Waldstrassenlänge auf Strassen für 5-Achser fallen, sind doch rund 22% nur für 3- bis 4-Achser nutzbar (Cioldi et al 2020). Deshalb wurden in dieser Analyse alle Strassen berücksichtigt, die für ein Gesamtgewicht von mindestens 26 t dimensioniert sind. Bei der Berechnung der Transportkosten konnte somit berücksichtigt werden, dass grössere Lastwagen pro Fahrt ein grösseres Holzvolumen transportieren können und damit kostengünstiger sind. Als Ziel des Transports wurde auch hier das übergeordnete Strassennetz verwendet. Anhand der Transportkosten konnte für jeden Umschlagpunkt die kostengünstigste Route ermittelt werden. Diese Route bzw. diese Transportkosten wurden dann dem gesamten Waldgebiet zugeordnet, aus dem gemäss Modell zu diesem Umschlagpunkt gerückt wird. Die Transportkosten können somit ebenfalls als Karte mit einer Auflösung von 10 m × 10 m dargestellt werden. Aus der Kombination aus Rücke- und Transportkosten konnte eine Karte der Gesamtkosten erstellt werden.

Die flächendeckenden Informationen zu den Rückemethoden und den Transportwegen wurden dann verwendet, um das gesamte Waldgebiet der Schweiz hinsichtlich der Erschliessungsgüte einzuteilen: In Kategorie 1 eignet sich die Erschliessung für eine effiziente Holzernte gemäss heutigem Stand der Technik, in Kategorie 2 eignet sie sich bedingt und in Kategorie 3 eignet sie sich nicht dafür (Tabelle 2).

### Ergebnisse und Einsatzgebiet des Produkts

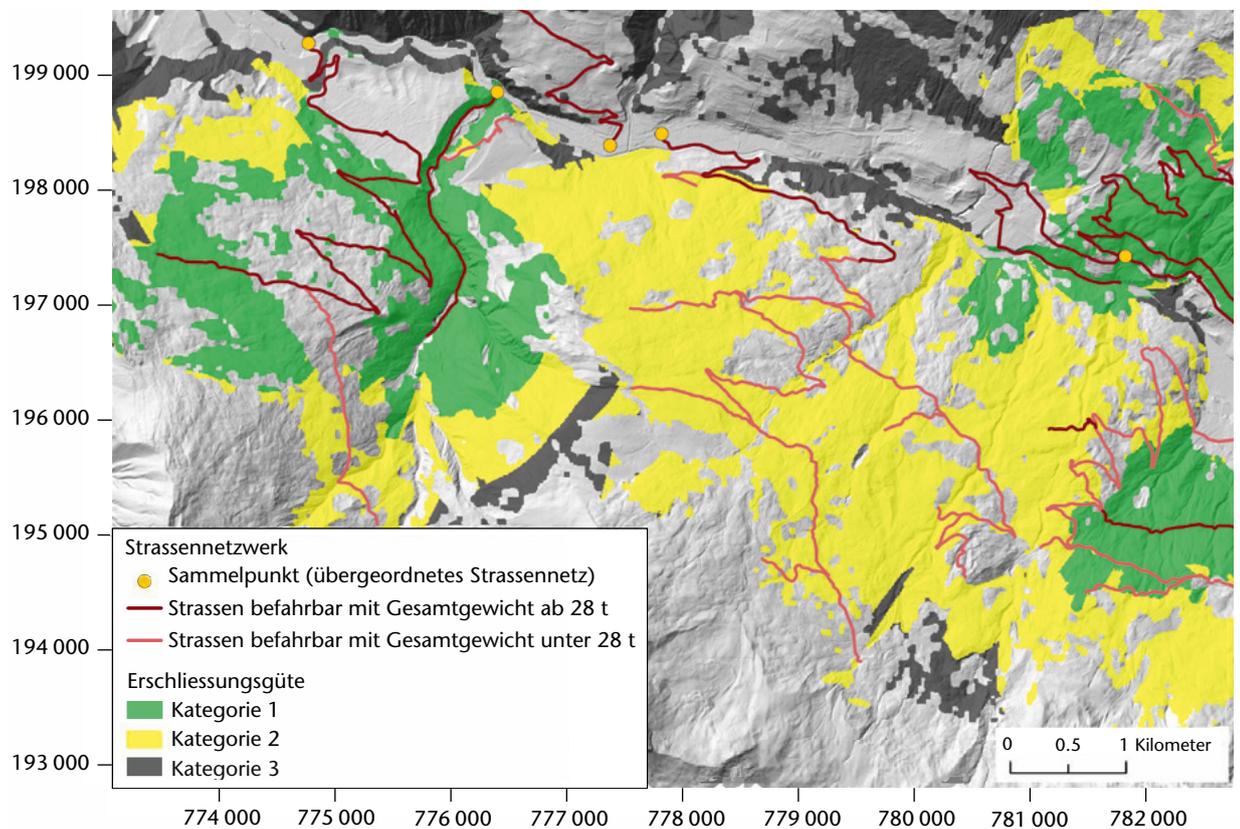
In der Schweiz kann rund die Hälfte des Waldes nach dem heutigem Stand der Technik effizient bewirtschaftet werden (Tabelle 3). Auf einem Viertel der Waldfläche ist eine effiziente Bewirtschaftung dagegen nur bedingt und auf einem Viertel nicht möglich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in die Analyse die gesamte Waldfläche einschliesslich aller Schutzgebiete einbezogen wurde, dass nur Strassen, die mit Lastwagen befahrbar sind (mind. 3-Achser, 26 t Gesamtgewicht), als relevant für die Erschliessung betrachtet wurden und dass die Eingriffsstärke nicht berücksichtigt wurde. Das Modell eignet sich, um Gebiete mit ungenügender Erschliessung auf einheitliche Art und Weise zu identifizieren (Abbildung 2). Das ist für den effizienten Einsatz der Mittel im Waldstrassenbau und -unterhalt hilfreich. Die Methode kann auch verwendet werden, um verschiedene Ausbauszenarien zu vergleichen. Neben der Güte können weitere Grössen analysiert werden, die für die Erschliessung relevant sind. Zum Beispiel können Schwachstellen in der Holztransportkette identifiziert werden, also Strassenstücke, die eine kleinere Tragfähigkeit oder eine geringere Breite besitzen als das in Transportrichtung vorangehende. Durch Verknüpfung der Methode mit zu den Holzernteverfahren passenden Produktivitätsmodellen kann abgeschätzt werden, wie viel Holz wo und zu welchen Kosten verfügbar ist.

### Ökonomische Bewertung von Erschliessungsnetzen

Durch die Analyse der Erschliessungsgüte konnte festgestellt werden, ob ein Waldstück nach dem Stand der Technik erschlossen ist. Diese Klas-

Erschliessungsgüte	Anteil an der Waldfläche (%)
Kategorie 1	52
Kategorie 2	23
Kategorie 3	25
Total	100

**Tab 3** Güte der Walderschliessung in der Schweiz. Kategorie 1: effiziente Bewirtschaftung möglich, Kategorie 2: effiziente Bewirtschaftung bedingt möglich, Kategorie 3: effiziente Bewirtschaftung nicht möglich



**Abb 2** Güte der Walderschliessung in der Region Küblis (GR). Kategorien: 1) effiziente Bewirtschaftung möglich; 2) effiziente Bewirtschaftung bedingt möglich; 3) effiziente Bewirtschaftung nicht möglich. Definition der Gütekategorien siehe Tabelle 2  
Quelle DTM: Bundesamt für Landestopografie

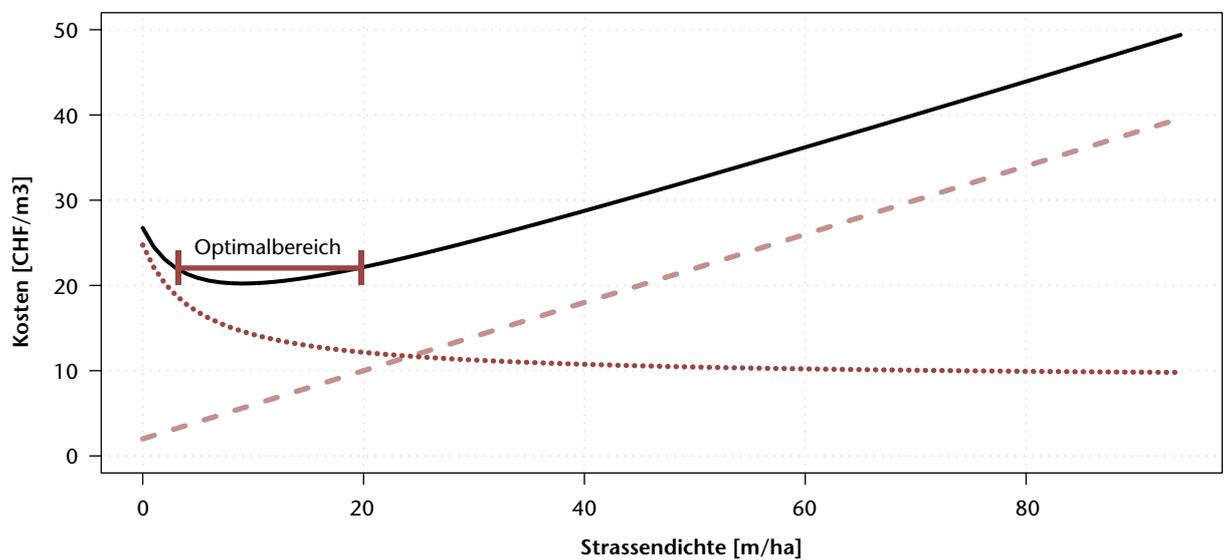
sierung erlaubt jedoch keine Aussagen darüber, ob ein Waldstrassennetz auch ökonomisch effizient gestaltet ist. Beispielsweise kann eine Waldparzelle gut erschlossen, die Erschliessung aber aus ökonomischen Gesichtspunkten trotzdem ineffizient sein, etwa wenn das Strassennetz zu dicht ist. Dieses Beispiel ist kein Einzelfall: Viele Strassennetze, die in der Mitte des letzten Jahrhunderts gebaut wurden, folgten der Idee, dass das Holz vom Bestand direkt (ohne Feinerschliessung wie Rückegassen oder Maschinenwege) auf die Strasse gerückt werden soll. Deshalb wurden im Mittelland und im Jura in vielen Wäldern sehr hohe Strassendichten von 60 bis 100 Laufmeter pro Hektare (m/ha) angestrebt. Für zeitgemässe Holzernteverfahren kann befahrbare Gelände mit Rückegassen feinerschlossen werden, sodass eine geringere Strassendichte erforderlich ist. Das führt in der forstbetrieblichen Planung unweigerlich zur Frage, welche Strassen eines bestehenden Erschliessungsnetzes weiterhin als Basiserschliessung verwendet und somit auch unterhalten werden sollen und welche Strassen aus wirtschaftlicher Sicht überflüssig geworden sind.

In der Literatur finden sich zahlreiche Grundlagen zur Bewertung der ökonomischen Effizienz von Erschliessungen. Matthews (1942) beschrieb als erster den funktionalen Zusammenhang zwischen Strassengeometrie und Rückedistanz. Der Ansatz wurde sukzessive ausgebaut und erlaubt mittlerweile

auch komplexe theoretische Analysen im steilen Gelände (Heinimann 1998). Bruno Abegg leitete bereits Ende der 1970er-Jahre mit analogen Modellüberlegungen optimale Strassendichten sowohl für befahrbare Gelände (Abegg 1978) als auch für Hanglagen (Abegg 1988) für die Schweiz her. Den Überlegungen liegt zugrunde, dass eine zunehmende Strassendichte folgende Konsequenzen hat:

1. abnehmende Kosten für Rücken und Lagern des Holzes, für Arbeitswege von der Strasse in den Bestand und für den Unterhalt der Rückegassen (Mulchen, Entfernen von Reisigmatten);
2. höhere Kosten für den Strassenbau (inkl. Amortisation und Verzinsung) und -unterhalt;
3. keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Kosten für die Erstellung der Rückegassen, für das Rücken des in Strassennähe anfallenden Holzes, für Personen-, Material- und Holztransporte auf dem Strassennetz sowie auf Ertragsausfälle durch Schneisen und Rückegassen.

Abegg errechnete optimale Strassendichten zwischen 30 und 50 m/ha für befahrbare Lagen (bis 30% Hangneigung; B) und 10 bis 50 m/ha für steilere, nicht befahrbare Lagen (S). Die Werte sind im Einzelnen abhängig vom Baugrund (S), von der Bodentragfähigkeit (B), der Holznutzung ( $m^3/[ha \times J]$ ) (S, B), dem Holztyp (Nadel-/Laubholz) (S), der Hangneigung (S) und dem Strassenbaukostenniveau (S, B). Dem ist anzufügen, dass die optimale Erschlies-



**Abb 3** Beispiel zur Herleitung einer bezüglich Gesamtkosten (Summe von Strassen- und Rückekosten) optimalen Strassendichte mit den Matthews-Formeln (Heinimann 2017) für die Region Bannwil/Niederbipp (BE). Auf der Kurve, die den Zusammenhang zwischen den Gesamtkosten und der Strassendichte darstellt, kann die optimale Strassendichte dort von der x-Achse abgelesen werden, wo die Kosten minimal sind. Zugrunde gelegte Werte: Rückekosten =  $0.021 \text{ CHF}/(\text{m}^3 \times \text{m})$ , Strassenunterhaltskosten =  $4 \text{ CHF}/(\text{m} \times \text{J})$ , Holzanfall =  $10 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{J})$ , Netzwerk-Korrekturfaktor = 1.2, Offroad-Korrekturfaktor = 1.25, Lebensdauer der Strassen = 50 Jahre, Zinssuss = 2%

sungsdichte keine exakte Grösse ist, sondern eher einen Richtwert (bezogen auf ein grösseres Gebiet) darstellt.

Die Anwendung der oben beschriebenen Methoden bzw. Richtwerte ist am einfachsten in homogenem Gelände, insbesondere bei Neukonzipierungen von Erschliessungen. Jedoch befinden sich Wälder häufig in inhomogenem Gelände, weil die Topografie innerhalb von kurzer Distanz stark variieren kann. Bei der Überarbeitung von bereits bestehenden Erschliessungen tritt zusätzlich das Problem auf, dass viele Strassennetzwerke nicht systematisch geplant wurden, sondern im Verlauf der Zeit gewachsen und dadurch «unstrukturiert» sind. Die Angabe eines Kennwertes der Strassendichte für eine Geländekammer oder ein Einzugsgebiet ist daher nicht zielführend, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Waldstrassen gleichmässig über die gesamte Fläche verteilt sind und das Gelände gleichförmig ist.

#### Daten und Methode

In einem ersten Schritt wurden Kennwerte für eine ökonomisch effiziente Erschliessung hergeleitet. Gleichzeitig wurden diese Kennwerte räumlich hoch aufgelöst dargestellt. Im zweiten Schritt konnte durch das Zusammenfügen der Indikatorwerte in einer räumlichen Darstellung eine Hinweiskarte erstellt werden.

Als Indikator für eine ökonomisch effiziente Erschliessung eignen sich entweder die Strassendichte ( $\text{m}/\text{ha}$ ) oder die normalisierten Holzerntekosten ( $\text{CHF}/[\text{ha} \times \text{J}]$ ) (Heinimann 1998). Grundsätzlich kann mit beiden Werten gearbeitet werden. Der erste Wert ist jedoch einfacher zu verstehen und wird des-

halb hier vorgestellt. Wir haben eingangs postuliert, dass sich die Strassendichte nicht als Indikator eignet, haben dies jedoch auf die Geländekammer bezogen. Nachfolgend berechnen wir die Strassendichte nicht für eine Geländekammer, sondern «hoch aufgelöst» für Feinerschliessungseinheiten. Mittels Modellüberlegungen können optimale Strassendichten (bzw. Bereiche nahe dem Optimum) für verschiedene Flächen hergeleitet werden. Entsprechende Modellüberlegungen wurden von Abegg (1978, 1988) oder Heinimann (1998) formuliert. Die wichtigsten Modellparameter sind die Rückekosten, die Personentransportkosten, die Strassenkosten und der Holzanfall. Da die Datengrundlagen wie die Kosten des Strassenunterhaltes oder die variablen Rückekosten mit grossen Unsicherheiten behaftet sind, werden diese Eingangsparameter variiert, um möglichst robuste Indikatorwerte herzuleiten. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel der Herleitung der optimalen Strassendichte, die in diesem Fall auf den Matthews-Formeln (Heinimann 2017) basiert und für flache Lagen gültig ist. In diesem Beispiel liegt die optimale Strassendichte im Bereich von 5–20  $\text{m}/\text{ha}$ . Für die räumliche Darstellung des Indikatorwerts wird das Strassennetzwerk in kleine Stücke unterteilt. Basierend auf einer Modellierung der Feinerschliessungseinheiten kann jedem Strassenstück die Waldfläche zugewiesen werden, die durch das entsprechende Strassenstück erschlossen wird.

#### Ergebnisse und Einsatzgebiet des Produkts

Als Teil der Ergebnisse liefert die ökonomische Bewertung eine Karte, in welcher der Indikator «Strassendichte» hoch aufgelöst für jede Feinerschlies-

sungseinheit dargestellt ist (Abbildung 4). Vergleicht man nun die «Kartenwerte» mit dem «Grenzwert» für eine ökonomisch effiziente Erschliessung (in diesem Fall liegt er bei rund 30–50 m/ha), können Gebiete mit Handlungsbedarf schnell identifiziert werden.

Der hier verwendete Grenzwert für eine zu dichte Erschliessung ist höher als der in Abbildung 3 dargestellte ökonomische Optimalbereich. Dafür gibt es mehrere Gründe. Für die Eingangsparameter in die Matthews-Formeln sind keine präzisen Werte verfügbar, insbesondere für Rückekosten und Unterhaltskosten der Forststrassen. Weiter liefern die Matthews-Formeln eine rein wirtschaftliche Kenngrösse. Schwer quantifizierbare Aspekte wie der Bodenschutz in der Holzernte werden nicht berücksichtigt. Bei dichter Erschliessung kann bei ungünstigen Witterungsbedingungen vermehrt von der Waldstrasse aus gearbeitet werden, die Rückegassen müssen weniger befahren werden. Bei dichter Erschliessung braucht es weniger Rückegassen, auf denen potenziell Befahrungsschäden auftreten könnten. Für die Bodenschutzaspekte fehlen heute verlässliche quantitative Grundlagen. Aus diesen

Gründen wurde der Grenzwert für eine optimale Strassendichte bewusst höher angesetzt als der mit den Matthews-Formeln berechnete wirtschaftliche Optimalbereich.

Um zu beurteilen, welche Strassen ausgebaut bzw. herabgestuft werden sollen, empfehlen wir, in Gebieten mit Handlungsbedarf den Zustand der Strassen vor Ort zu beurteilen (z.B. Koffertiefe und -breite per Locheisen ermitteln) und darauf aufbauend über die Weiterverwendung der einzelnen Strassensegmente zu entscheiden. Die Entscheidung sollte sich dabei an den folgenden Richtlinien/Zielen orientieren:

- Sackgassen vermeiden (ungünstig für Holztransporte);
- mit anderen Nutzungen abstimmen;
- Unterhalt möglichst gering halten (optimale Strassensteigung 3 bis 6%, Querneigungen bevorzugen, weite Kurvenradien, trockenes Gelände wählen).

In den meisten Fällen ist es wohl nicht sinnvoll, bestehende Strassen zu Maschinenwege oder Rückegassen zurückzubauen. Angezeigt ist eher, sie im Unterhalt herabzustufen und als Maschinenwege oder Rückegassen zu verwenden. Dies trägt bei entsprechender Planung zur Bodenschonung bei, da die Holzerntearbeiten bei ungünstigen Witterungsverhältnissen von diesen zurückgestuften Strassenabschnitten aus erfolgen können. Die Indikatorkarten eignen sich für die Analyse von grösseren zusammenhängenden Wäldern; entlang von Waldrändern und in kleinen, zerstückelten Wäldern müssen sie mit Vorsicht interpretiert werden.

## Diskussion und Verwendung in der Praxis

Die vorgestellten Methoden und Produkte schaffen die Grundlagen für die detaillierte Beurteilung und die Anpassung der Erschliessungssituation und der Holzernteverfahren im Schweizer Wald, indem sie das Erkennen von Handlungsbedarf und die Wahl von Massnahmen unterstützen. Sie ergänzen die bisherigen LFI-Produkte und entwickeln diese weiter; dabei sind sie nicht nur für das LFI selbst von Relevanz, sondern auch für Bund und Kantone. Beispielsweise erlauben sie es, Fragen zu beantworten, die anlässlich der Revision des Waldgesetzes im Jahr 2016 zur Walderschliessung aufgeworfen worden waren.

Aktuell erarbeiten einige Kantone Gesamtkonzepte für die Weiterentwicklung oder die Überarbeitung der Erschliessung. Im Kanton Bern wurden dazu in einem Pilotprojekt sowohl die Erschliessungsgüte als auch die ökonomische Bewertung verwendet und als Produkte mit grossem Nutzen und hoher Qualität gelobt. Das hier vorgestellte Gütekon-

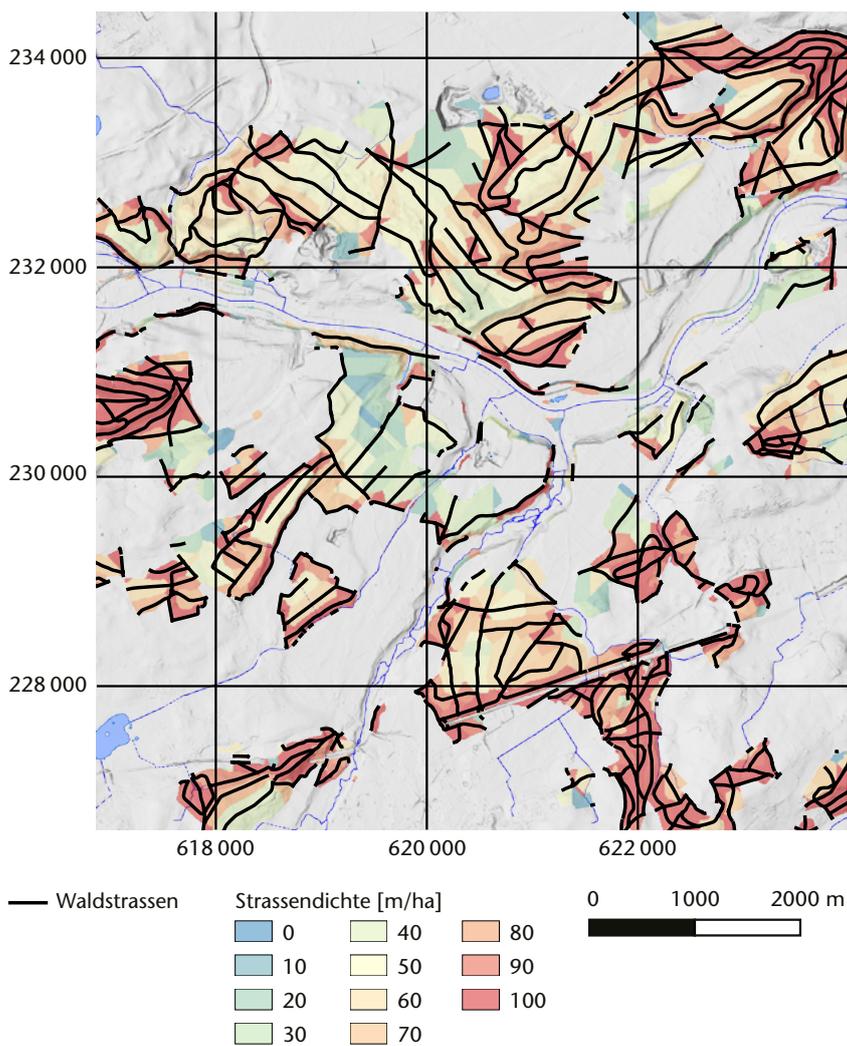


Abb 4 Karte der Strassendichten (m/ha) für die Region Bannwil/Niederbipp (BE).  
Relief: swisstopo

zept wurde spezifisch für den Kanton Bern deutlich erweitert und auf individuelle Bedürfnisse angepasst. Die Erkenntnisse daraus wurden wiederum für die Weiterentwicklung der LFI-Methode zur Beurteilung der Erschliessungsgüte verwendet. Im Kanton Graubünden flossen die Ergebnisse der Analyse der Erschliessungsgüte in den Waldentwicklungsplan<sup>1</sup> ein und dienen als objektives Instrument, um Prioritäten bei der Weiterentwicklung der Erschliessung zu setzen.

Die grössten Unsicherheiten bestehen bei der ökonomischen Bewertung bei der Festlegung der optimalen Strassendichte. Um zuverlässige Aussagen zu machen, müssen Grundlagen zu den Kosten des Strassenunterhalts und zu den distanzabhängigen Rückkosten erhoben werden. Ebenso müssen betriebliche Risikoüberlegungen in die Entscheidung einfließen – ein dichtes Strassennetz hat den Vorteil, dass selbst bei langen Regenperioden ein grosser Teil des Waldes von der Waldstrasse aus bewirtschaftet werden kann und der Waldboden dadurch geschont wird.

Geht es um das Reengineering, also um die Wahl der Strassen, die weiterhin für die Basiserschliessung benötigt werden, können Optimierungsmodelle eingesetzt werden, wie sie von Epstein et al (2006), Stückelberger et al (2007), Bont et al (2012) und Bont (2013, 2016) beschrieben und angewendet worden sind. Solche Optimierungsmodelle eignen sich aber nur für die Analyse kleiner Gebiete, da die benötigte Rechenleistung mit der Waldfläche exponentiell zunimmt. Um damit sinnvolle Resultate zu erzielen, ist es zudem zwingend erforderlich, detaillierte Eingabewerte bezüglich Strassenzustand und erwartetem Unterhalt der einzelnen Strassenstücke zu verwenden. Dies kann daher nicht im Rahmen eines landesweiten Produktes geschehen. Deshalb war es zielführender, im Rahmen dieses Projektes einen räumlichen Indikator bzw. eine Hinweiskarte zu erstellen, auf deren Basis eine Detailplanung erfolgen kann. ■

*Eingereicht: 4. November 2020, akzeptiert (mit Review): 19. April 2021*

<sup>1</sup> [www.wep.gr.ch](http://www.wep.gr.ch) (15.3.2021)

## Literatur

- ABEGG B (1978)** Schätzung der optimalen Dichte von Waldstrassen in traktorbefahrbareren Gelände. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt forstl. Vers.wes, Mitt 52: 99–213.
- ABEGG B (1988)** Wirtschaftliche Erschliessung von Wäldern in Hanglagen. Entscheidungsgrundlagen zur Beurteilung von Erschliessungsvarianten. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt forstl. Vers.wes, Ber 302. 176 p.
- BAFU, EDITOR (2013)** Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt. 66 p.
- BONT L (2013)** Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände. Schweiz Z Forstwes 164: 321–327. doi: 10.3188/szf.2013.0321.
- BONT L (2016)** Optimales Layout einer Walderschliessung. Schweiz Z Forstwes 167: 294–301. doi: 10.3188/szf.2016.0294.
- BONT L, HEINIMANN H, CHURCH R (2012)** Concurrent optimization of harvesting and road network layouts under steep terrain. Ann Oper Res 1–24.
- BONT LG, FRAEFEL M, FISCHER C (2018)** A spatially explicit method to assess the economic suitability of a forest road network for timber harvest in steep terrain. Forests 9: 169.
- BRÄNDLI UB, ABEGG M, ALLGAIER LEUCH B, EDITORS (2020)** Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 341 p.
- BRANG P, KÜCHLI C, SCHWITTER R, BUGMANN H, AMMANN P (2016)** Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess AR, Augustin AR, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 341–365.
- BRANG P, SCHÖNENBERGER W, FREHNER M, SCHWITTER R, THORMANN J ET AL (2006)** Management of protection forests in the European Alps: an overview. For Snow Landsc Res 80 (1): 23–44.
- BÜRGI P, THOMAS M, PAULI B, AUER N (2018)** Forstwirtschaftliches Testbetriebsnetz der Schweiz: Ergebnisse der Jahre 2014–2016. Neuenburg: Bundesamt Statistik. 48 p.
- CIOLDI F, BRÄNDLI UB, DIDION M, FISCHER C, GINZLER C ET AL (2020)** Waldressourcen. In: Brändli UB, Abegg M, Allgaier Leuch B, editors, Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. pp. 35–119.
- EPSTEIN R, WEINTRAUB A, SAPUNAR P, NIETO E, SESSIONS JB ET AL (2006)** A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. Operations Res 54: 1017–1027.
- FISCHER C, ROHNER B, HEROLD A, ALLGAIER LEUCH B, TEMPERLI C ET AL (2020)** Holzproduktion. In: Brändli UB, Abegg M, Allgaier Leuch B, editors. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. pp. 147–187.
- FISCHER C, STADELMANN G (2019)** Calculation of potential timber harvesting costs (HeProMo). In: Fischer C, Traub B, editors. Swiss National Forest Inventory – methods and models of the fourth assessment. Cham: Springer. pp. 257–263.
- FRUTIG F, HOLM S, PEDOLIN D, THEES O (2016)** Holzernte Produktivitätsmodelle HeProMo, Version 2.3. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
- HAHN P, HEYDEN D, INDERMÜHLE M, MOLLET P, BIRRER S (2005)** Holznutzung und Naturschutz. Praxishilfe mit waldbaulichen Merkblättern. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 113 p.
- HEINIMANN HR (1998)** A computer model to differentiate skidder and cable-yarder based road network concepts on steep slopes. J For Res (Japan) 3: 1–9.
- HEINIMANN HR (2017)** Forest road network and transportation engineering – state and perspectives. Croat J For 38: 188–173.
- HOLM S, FRUTIG F, LEMM R, THEES O, SCHWEIER J (2020)** HeProMo: A decision support tool to estimate wood harvesting productivities. PLOS ONE 15: e0244289.
- MATTHEWS DM (1942)** Cost control in the logging industry. New York: McGraw-Hill. 374 p.
- MÜLLER K, FRAEFEL M, CIOLDI F, CAMIN P, FISCHER C (2016)** Der Datensatz «Walderschliessungsstrassen 2013» des Schweizerischen Landesforstinventars. Schweiz Z Forstwes 167: 136–142. doi: 10.3188/szf.2016.0136

STÜCKELBERGER JA, HEINIMANN HR, CHUNG W (2007) Improved road network design models with the consideration of various link patterns and road design elements. *Can J For Res* 37: 2281–2298.

VERKERK PJ, COSTANZA R, HETEMÄKI L, KUBISZEWSKI I, LESKINEN P ET AL (2020) Climate-smart forestry: the missing link. *forest policy and economics* 115: 102164.

WASER LT, FISCHER C, WANG Z, GINZLER C (2015) Wall-to-wall forest mapping based on digital surface models from image-based point clouds and a NFI forest definition. *Forests* 6: 4510–4528.

### Nouveaux produits pour l'évaluation des systèmes de récolte de bois et de la desserte forestière

Pour que la forêt puisse offrir des services écosystémiques tels que la fourniture de bois, la protection contre les dangers naturels, la conservation de la biodiversité, les espaces de détente et le stockage du carbone, des mesures de gestion sylvicole sont nécessaires, et un bon accès avec des routes forestières est indispensable pour une mise en œuvre efficace de ces mesures. Cet article présente trois nouveaux produits de l'Inventaire forestier national suisse (IFN) qui contribuent à rendre la récolte de bois plus efficace et à optimiser la desserte forestière. Le premier de ces produits est un modèle qui permet de déterminer la méthode de récolte la plus favorable économiquement pour chaque placette de l'IFN. Il utilise pour cela des données spatiales relatives à la topographie, au réseau de routes forestières, des données concernant les peuplements et des informations quant à la méthode de récolte employée sur la placette ainsi que des arbres de décision basés sur des avis d'experts. Les résultats montrent qu'avec le procédé le plus économique, on augmenterait la mécanisation, ce qui pourrait baisser les coûts. Selon l'enquête réalisée durant l'IFN4 (relevés de terrains 2009–2017), le procédé entièrement mécanisé a été utilisé sur 8.5% des placettes, alors que selon le meilleur procédé, on aurait pu travailler ainsi sur 26.3% des placettes. Le deuxième produit contient une évaluation harmonisée et couvrante de la qualité de la desserte, en considérant notamment la topographie, les caractéristiques du sol, le réseau de routes forestières et les obstacles à la récolte de bois. Cette évaluation a montré que la desserte est adaptée pour une gestion forestière efficace sur environ la moitié de la surface forestière de la Suisse, alors que sur un quart, elle n'est que possible sous conditions et sur le dernier quart pas du tout. Le troisième produit a déterminé la densité optimale de routes forestières, en considérant les coûts de débardage et des routes, ce qui offre un aperçu pour de grands territoires de l'efficacité économique des dessertes forestières, en comparaison avec la densité actuelle. Les trois produits fournissent des bases pour une évaluation détaillée et couvrante de la situation de la desserte et des systèmes de récolte dans la forêt suisse, ce qui est déjà mis en œuvre dans les planifications cantonales de Berne et des Grisons.

### Assessing timber-harvesting systems and forest road networks in Switzerland: new tools

If forests are to perform ecosystem services such as supplying timber, providing protection against natural hazards, conserving biodiversity, providing recreational areas, and serving as a carbon sink, silvicultural control measures are required. To enable the implementation of such control measures, a well-developed network of forest roads is necessary. This paper describes three new tools of the Swiss National Forest Inventory (NFI) that help to make timber harvesting more efficient and to optimise forest access. The first tool is a model for selecting the best timber-harvesting method economically for each NFI sample plot. It uses spatial data on the topography and the forest road network, on the stand characteristics and on the timber-harvesting methods used on the NFI sample plots, as well as expert-based decision trees. The results indicate that, to ensure the economically best harvesting method is applied, more highly mechanised techniques, which save costs, should generally be used. For example, according to the NFI4 survey (field surveys 2009–2017), fully mechanised techniques are used on only 8.5% of the NFI sample plots but it would actually be best to use them on 26.3% of the plots. The second tool involved a standardised assessment of the quality of the forest road networks in Swiss forests, taking into account, among other things, topography, soil properties, the current forest road network and obstacles to timber harvesting. The assessment found that the current forest road network is suitable for efficient forest management on about half of the Swiss forest area, but only conditionally or not at all each on a quarter of it. For the third tool, the optimal road density was determined taking into account road and extraction costs. On the basis of the current road density, it is now possible to obtain an overview of the economic efficiency of forest road networks for larger areas. The three tools provide a useful basis for detailed area-wide assessments of the forest road networks and the timber-harvesting systems in Swiss forests. They have already been used for cantonal forest planning in the cantons of Bern and the Grisons.