

PRAXISHILFE

**Geometrische
Richtwerte von
Waldwegen und
Waldstrassen**

1999



**Bundesamt für Umwelt, Wald und
Landschaft (BUWAL)**

PRAXISHILFE

**Geometrische
Richtwerte von
Waldwegen und
Waldstrassen**

1999

**Herausgegeben vom
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)**

Impressum

Herausgeber Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Projektleitung Hans Rudolf Heinimann,
Professor für forstliches Ingenieurwesen, ETH Zürich

Autoren und Gestaltung

Hans Rudolf Heinimann,
Professor für forstliches Ingenieurwesen, ETH Zürich
Othmar Bürgi, ETH Zürich
Stefan Rechberger, ETH Zürich

Begleitung Walter Schwab, BUWAL
Silvio Schmid, BUWAL

Titel der französischen Version

"Références géométriques pour les routes forestières et
les pistes de débardage"

Bezugsquelle Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Dokumentation
3003 Bern
Fax + 41 (0)31 324 02 16
E-Mail: docu@buwal.admin.ch
Internet: <http://www.admin.ch/buwal/publikat/d/>

Bestellnummer VU-7012-D

Preis Fr. 8.– (inkl. MWSt)
© BUWAL 1999

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Kurzfassung	5
1 Einleitung	6
2 Stand des Wissens - Analyse der geltenden Regelung	8
2.1 Massgebende geometrische Elemente für die konstruktive Gestaltung von Erschliessungsanlagen	8
2.2 Vertikale Linienführung	9
2.2.1 <i>Maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen</i>	9
2.2.2 <i>Maximal zulässige Längsneigung von Maschinen- und Bewirtschaftungswegen</i>	14
2.2.3 <i>Wesentliche Folgerungen</i>	15
2.3 Querschnittsgestaltung	15
2.3.1 <i>Fahrbahnbreite von Waldstrassen</i>	16
2.3.2 <i>Breite von Maschinenwegen</i>	17
2.3.3 <i>Gestaltung der Fahrbahnoberfläche von Waldstrassen</i>	18
2.3.4 <i>Wesentliche Folgerungen</i>	19
3 Kriterien für die Festlegung der geometrischen Elemente.....	20
3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	20
3.2 Vertikale Linienführung	20
3.2.1 <i>Maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen</i>	20
3.2.2 <i>Maximal zulässige Längsneigung von Maschinenwegen</i>	25
3.3 Querschnittsgestaltung	26
3.3.1 <i>Fahrbahnbreite von Waldstrassen</i>	26
3.3.2 <i>Breite von Maschinenwegen</i>	28
3.3.3 <i>Gestaltung der Fahrbahnoberfläche von Waldstrassen</i>	29
4 Anpassung der Richtwerte an den Stand der Technik.....	32
4.1 Zielsetzungen.....	32
4.2 Längsneigungen und Fahrbahnbreiten.....	32
4.2.1 <i>Richtwerte für Waldstrassen</i>	32
4.2.2 <i>Richtwerte für Maschinenwege</i>	33
4.3 Gestaltung der Fahrbahnoberfläche	34
5 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	35
Literaturverzeichnis.....	37
Stichwortverzeichnis	42

Vorwort

Für die Arbeit im Wald und den Abtransport des Holzes ist eine zweckmässige Erschliessung unerlässlich. Waldstrassen und Maschinenwege sind das Rückgrat der Walderschliessung. Bei der Wahl der geometrischen Ausgestaltung - etwa Breite oder Steigung - fliessen verschiedene Faktoren ein, so etwa Landschaftsbild, Art der Fahrzeuge, Sicherheit oder Transportbedürfnisse.

Die heute gültigen Richtlinien zur Ausgestaltung der Strassen und Wege basieren auf dem Stand der Transporttechnik der 60er Jahre. Inzwischen hat sich die Transporttechnologie entwickelt. Die Maschinen verfügen über bessere Bremsen und stärkere Motoren. Die Verfahren der Holzbringung haben sich geändert. So kann man sich denn fragen, ob die Richtlinien noch zeitgemäss sind. Gerade die bisherige Maximalsteigung von 12 % für subventionierte Waldstrassen wurde in Frage gestellt. Deshalb hat die Eidgenössische Forstdirektion die Professur für forstliches Ingenieurwesen mit einer Studie zu diesem Thema beauftragt. In der vorliegenden Publikation werden die Richtwerte diskutiert und Änderungen vorgeschlagen.

Das Kreisschreiben 11 der Eidgenössischen Forstdirektion, das die Subventionierung von forstlichen Erschliessungen regelt, wurde aufgrund der neuen Erkenntnisse bereits angepasst.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Eidgenössischer Forstdirektor

Heinz Wandeler

Kurzfassung

Waldstrassen sind eine unerlässliche Grundlage für alle mit der Nutzung und Pflege verbundenen Transportvorgänge im Wald. Bis anhin sicherten verbindliche Richtlinien eine gute Planung und Ausführung der Erschliessungsanlagen. Die geltenden Richtwerte basieren aber auf dem Stand der Transporttechnik der 60er Jahre.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit der Gestaltung der geometrischen Elemente forstlicher Strassen und Wege. Er versucht, offene Fragen im Bereich der maximal zulässigen Längsneigungen, der Breiten und der Fahrbahnoberflächen von Waldstrassen und Maschinenwegen abzuklären und flexibel anwendbare Richtwerte zu entwerfen.

Drei Aufgaben stehen im Zentrum dieser Arbeit:

- Stand des Wissens und Analyse der geltenden Regelung;
- Bestimmen der massgeblichsten Einflusskriterien auf Längsneigung, Breite und Fahrbahnoberfläche;
- Formulierung von flexibler anwendbaren, den heutigen Rahmenbedingungen angepassten Richtwerten.

Die geometrischen Elemente der Gestaltung forstlicher Strassen und Wege werden kritisch hinterfragt und mit den praktischen Empfehlungen der umliegenden Länder verglichen. Die Entstehung der Richtwerte wird aufgezeigt.

Die massgeblichen Einflusskriterien für die drei Bereiche werden ermittelt. Es wird versucht, mit Hilfe von Modellansätzen aufzuzeigen, welche Kriterien die geometrischen Elemente beeinflussen, und wie sie sich quantitativ auswirken.

Aufgrund der Modellansätze wird ein Versuch unternommen, flexibler anwendbare Richtwerte für die zulässige Längsneigung zu formulieren. Die Richtwerte können für den Einzelfall mit Hilfe von Kriterien neu beurteilt werden. Der bis anhin verwendete starre Richtwert von 12 % wird überwunden. Im Bereich der Minimalbreite von Waldstrassen ergibt sich eine kleine Veränderung zur geltenden Regelung. Neu wird die Minimalbreite auf 3.2-3.3 m festgelegt. Aus fahrdynamischen Gründen sollte diese nicht unterschritten werden. Zur Gestaltung der Fahrbahnoberfläche wird ein Vorschlag gemacht, der die bestehende Entscheidungshilfe ergänzt und die Einflussfaktoren zu gewichten versucht.

Einige Fragen bleiben weiterhin offen. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht in der Frage der Haftung Fahrzeug - Fahrbahnoberfläche. Die Auswirkungen spezieller Witterungsbedingungen oder Verschmutzungen der Oberfläche auf die Haftung können nicht genau quantifiziert werden. Die Erosionsanfälligkeit von ton-wassergebundenen Verschleisschichten kann nicht abschliessend beantwortet werden, weil das Zusammenwirken der einzelnen Einflussfaktoren nicht quantifiziert werden kann.

1 Einleitung

Die zweckmässige und hinreichende Erschliessung der Wälder ist eine der Voraussetzungen für den in der Schweiz praktizierten kleinflächigen und naturnah ausgerichteten Waldbau. Waldstrassen sind eine unerlässliche Grundlage für alle mit der Nutzung und Pflege verbundenen Transportvorgänge; sie gewährleisten die Zugänglichkeit der Bestände und bilden auch die Aufarbeitungs- und Lagerplätze für das geerntete Holz (HIRT, 1992).

Das Landesforstinventar 1995 weist eine Gesamtlänge der Waldstrassen mit Erschliessungs- und Transportfunktion von rund 30'000 km aus, was einer durchschnittlichen Erschliessungsdichte von 26 lm/ha entspricht. Die Erschliessungsdichte ist regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während die Voralpen rund 17 lm/ha aufweisen, ist der durchschnittliche Erschliessungsgrad in den Alpen 12 lm/ha und auf der Alpensüdseite lediglich 8 lm/ha.

Verbindliche Richtlinien sicherten bis anhin eine gute Planung und Ausführung der Erschliessungsanlagen. Die bisherigen Regelungen im Bereich der Linienführung der Strassenachse und der Querschnittsgestaltung des Strassenkörpers hielten sich an die Normen der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS, 1983) und an die Richtwerte der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Forstlichen Strassenbau (SAFS, 1989).

Die geometrische Gestalt von Verkehrsanlagen leitet sich primär aus dem für die Bemessung massgebenden Fahrzeug ab. Für die Geometrie von Waldstrassen stellt der Lastwagen (LKW) das kritische Fahrzeug dar.

Die geltenden Richtwerte basieren auf dem Stand der Transporttechnik der 60er Jahre. Der rasante technische Fortschritt und die schrittweise Anpassung der landesspezifischen Vorschriften an die Richtlinien der Europäischen Union erfordern eine Ueberprüfung und allfällige Anpassung der geltenden Bestimmungen. Insbesondere die zulässigen Maximalsteigungen und Breiten von Waldstrassen und Maschinenwegen sowie die Gestaltung der Fahrbahnoberflächen von Waldstrassen sind kritisch zu hinterfragen.

Ziel des Berichtes ist es, (1) den Stand der Technik zu analysieren und (2) die Richtwerte - wo nötig - an die heutigen Bedingungen anzupassen. Die Bestimmungen über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge wurden in den letzten dreissig Jahren schrittweise an die europäischen Regelungen angepasst. Am 19. Juni 1995 wurde die Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS) in Kraft gesetzt, welche die bis dahin gültige Verordnung über den Bau und die Ausrüstung der Strassenfahrzeuge (BAV) ablöste. Dabei stehen folgende Fragen im Zentrum der Betrachtungen:

1. Welche praktischen Empfehlungen existieren in den umliegenden Ländern mit vergleichbaren Rahmenbedingungen und aufgrund welcher Kriterien sind sie entstanden?
2. Welche rechtlichen und technischen Kriterien sind für die maximal zulässigen Längsneigungen bei Waldstrassen und Maschinenwegen massgebend?
3. Lassen sich die Längsneigungen aufgrund physikalischer Faktoren mit einer exakten Methode bestimmen?

4. Welchen Einfluss haben Kriterien der Gebrauchstauglichkeit wie Dauerhaftigkeit, Fahrsicherheit oder Fahrkomfort?
5. Welche Kriterien sind für die Bestimmung der Fahrbahnbreiten von Waldstrassen und Maschinenwegen massgebend?
6. Welche Faktoren bestimmen die Gestaltung der Fahrbahnoberfläche? Kann ihr Einfluss quantifiziert werden?

Zur Beantwortung dieser genannten Fragen wird folgender Ansatz gewählt: In Kapitel 2 werden der Stand des Wissens dargestellt, die geltenden Richtwerte analysiert und mit den Richtwerten umliegender Länder verglichen. Kapitel 3 beschreibt die massgebenden Einflussgrössen für Längsneigung, Fahrbahnbreite und Fahrbahnoberfläche und versucht, mit quantitativen Methoden Grenzwerte zu bestimmen. Kapitel 4 schlägt angepasste, flexibel anwendbare Richtwerte vor und diskutiert die Konsequenzen der praktischen Umsetzung. Kapitel 5 rundet die Ausführungen mit einigen Schlussfolgerungen ab und spricht offene Fragen an.

2 Stand des Wissens – Analyse der geltenden Regelung

Strassen und Wege im forstlichen Erschliessungswesen müssen so angelegt und ausgebaut werden, dass sie den gegebenen bzw. zu erwartenden Verkehrsanforderungen, den Anforderungen der Bewirtschaftung sowie den Anforderungen des Natur- und Landschaftsschutzes gerecht werden. Bestimmungsgrössen der Strassengestaltung sind insbesondere die Zusammensetzung und Menge des Verkehrs, die maximalen Abmessungen der verkehrenden Transportfahrzeuge und die Ausbaugeschwindigkeit. Die Anlagen werden so gebaut, dass bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand für den Neu- oder Ausbau eine möglichst lange Nutzungsdauer und niedrige Erhaltungskosten erwartet werden können.

2.1 Massgebende geometrische Elemente für die konstruktive Gestaltung von Erschliessungsanlagen

Die Geometrie der Strassen- und Weggestaltung umfasst die Bereiche Linienführung und Querschnittsgestaltung (Abbildung 1). Die Linienführung wird durch den horizontalen und vertikalen Verlauf der Strassenachse charakterisiert. Linienführung, Gradiente und Querschnitte bestimmen die Lage einer Strasse im Gelände (KUONEN, 1983).

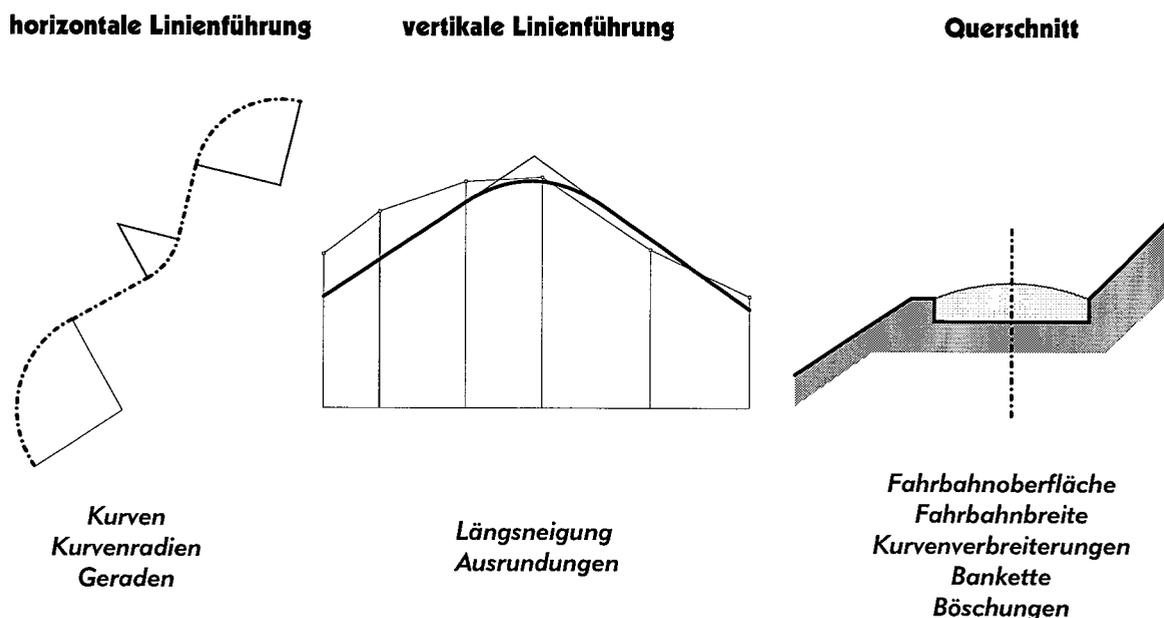


Abb. 1: **Massgebende geometrische Elemente für die Gestaltung von Erschliessungsanlagen.** Die Lage einer Strasse im Gelände wird durch ihre horizontale und vertikale Linienführung sowie durch Definition des Anlagen-Querschnitts bestimmt.

Die *horizontale Linienführung* beschreibt den auf die Horizontalebene (x, y - Ebene) projizierten Verlauf der Strassenachse. Sie wird auch als Grundrissgestaltung bezeichnet und besteht aus Geraden und tangential daran anschliessenden Kurven, die in der Schweiz als Kreisbögen ausgestaltet werden. Die *vertikale Linienführung* ist eine Projektion der Strassenachse auf jene Fläche, die senkrecht auf der Horizontalebene steht und deren Verlauf durch den Grundriss der Linienführung bestimmt wird. Die Vertikal-Projektion wird als Ebene betrachtet, die durch die Strassenlänge (l) und die Höhe (z) beschrieben wird (l, z - Ebene). Der vertikale Strassenverlauf wird mit Geraden konstanter Neigung und daran tangential anschliessenden Kurven (Parabeln, Kreise) dargestellt. Die Querschnittsgestaltung beschreibt die geometrische Form des Strassenkörpers senkrecht zur Strassenachse. Sie legt die Abmessungen der einzelnen Komponenten des Strassenkörpers fest (Fahrbahn, Böschungen, Bankette, Kunstbauten).

Die nachfolgenden Ausführungen gehen nicht näher auf die Grundrissgestaltung der Strassenachse (Geraden, Kurven, Kurvenradien) ein, weil die anerkannten Grundsätze ausführlich diskutiert wurden (KUONEN 1983) und sich die Wendigkeit der Fahrzeuge nicht wesentlich verändert hat (Wenderadien).

2.2 Vertikale Linienführung

Die Elemente der vertikalen Linienführung (Neigungen und Ausrundungen) wurden in der forstlichen Literatur ausgiebig diskutiert und in entsprechenden Richtlinien festgehalten. Die maximal zulässigen Längsneigungen von Strassen und Wegen werden aber in jüngster Zeit zunehmend hinterfragt. Als Hauptargumente werden angeführt, dass eine Erhöhung der zulässigen Maximalneigungen zu Kosteneinsparungen (Verkürzung der Strassenlängen) führen kann und dass geringere ökologische Beeinträchtigungen (weniger Flächenverlust, geringere Zerschneidungs-Effekte) zu erwarten wären. Der Grundsatz, dass aus Gründen der Strassenerhaltung und der Verkehrssicherheit möglichst moderate Längsneigungen anzustreben sind ($< 10\%$), wird nicht in Frage gestellt. Neigungen unter 2 bis 3 % sollten ebenfalls vermieden werden, da flach angelegte Waldstrassen mit einer Kiessand-Verschleisschicht zu Schlagloch-Bildung neigen (LIENERT 1983).

2.2.1 Maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen

Die geltenden Richtlinien im Bereich der maximal zulässigen Längsneigungen von Waldstrassen basieren auf den Normen der VSS (1983), die für Ausbaugeschwindigkeiten von 40 km/h den Richtwert von 12 % vorschreiben. Im Merkblatt Nr. 111 der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Forstlichen Strassenbau wird ebenfalls ein Grenzwert für die zulässige Längsneigung vorgeschlagen und erläutert (SAFS, 1989). Aufgrund von Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit bei Berg- und Talfahrt und untragbaren Erosionsschäden am Strassenkörper wird die maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen auf 10 % festgelegt, wobei in Ausnahmefällen auch 12 % als tragbar erachtet werden. Das eidgenössische Meliorationsamt sieht in seinen internen Richtlinien (EMA, 1989) für Güterstrassen mit Holzabfuhr bei normalen Verhältnissen eine Maximalneigung von 12 % vor, hingegen bei schwierigen topographischen Bedingungen eine solche von 15 % (Abbildung 2).

Ein Vergleich der schweizerischen Richtwerte mit den entsprechenden Werten des benachbarten Alpenraumes (Abbildung 2) lässt folgende Übereinstimmung erkennen:

- In Deutschland, Oesterreich und Frankreich gelten für die zulässigen Maximalneigungen im Normalfall Werte, die mit den schweizerischen Richtwerten vergleichbar sind;
- sowohl Deutschland als auch Oesterreich sehen bei speziell schwierigen topographischen Verhältnissen (Gebirgsregionen) und bei Strassen ohne Winteröffnung höhere Maximalneigungen vor.

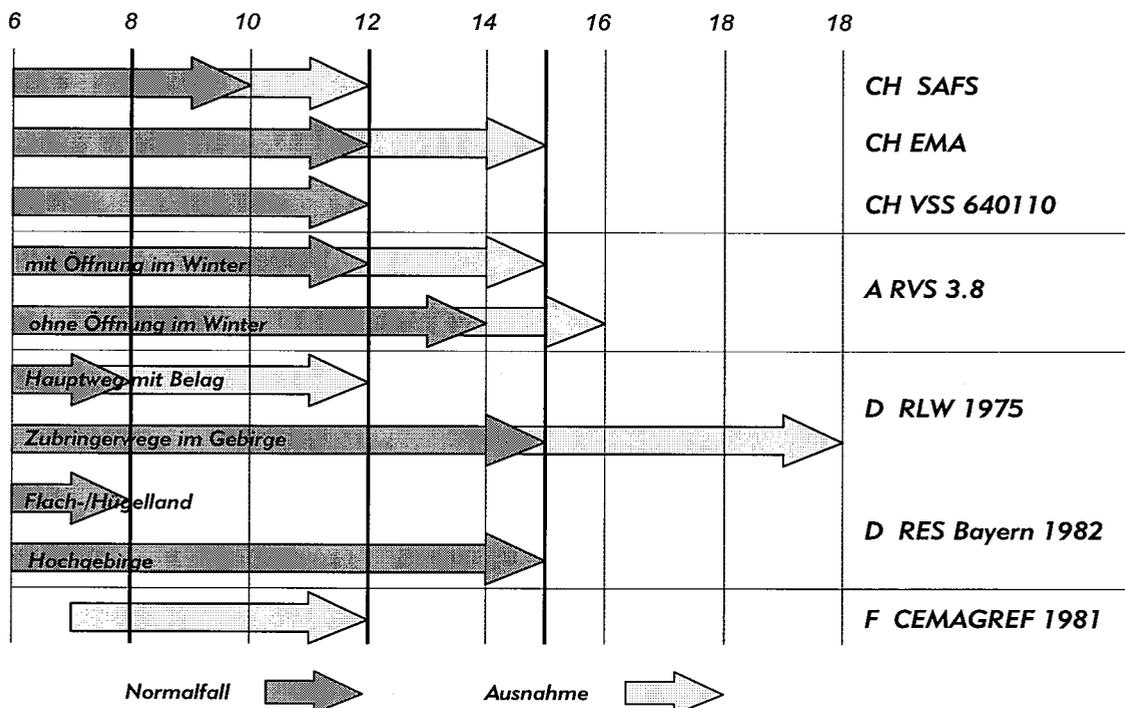


Abb. 2: **Richtwerte für die zulässige Maximalsteigung von Waldstrassen in %.** Die Richtwerte im benachbarten Alpenraum sind nahezu identisch mit denen der Schweiz. Deutschland und Oesterreich sehen aber für schwierige Verhältnisse z.T. wesentlich höhere Längsneigungen vor.

Zur Erklärung des Grenzwertes für die maximale Längsneigung von 12 % lassen sich verschiedene Überlegungen heranziehen. Nachfolgend werden drei Faktoren eingehender betrachtet:

- Die historische Entwicklung der Längsneigungs-Grenzwerte;
- der Einfluss von Bewirtschaftung und Strassenerhaltung;
- die Steigfähigkeit moderner Holztransport-Lastwagen.

Bereits in den Anfängen der forstlichen Erschliessungsplanung wurden Ueberlegungen zur maximal zulässigen Längsneigung angestellt. Die damalige Transporttechnologie basierte ausschliesslich auf Pferdefuhrwerken, weshalb verständlich ist, dass sich die forstliche Lehre für moderate Längsneigungen einsetzte. Die Richtwerte, wie sie unter anderen PFEIL (1831) und GAYER (1863) vorgeschlagen hatten, sahen Grenzneigungen von 6 bis 8 % vor. Bereits FANKHAUSER (1866) aber unterschied in seinem Leitfaden für die Bannwartenkurse im Kanton Bern zwischen Berg- und Taltransport und plädierte beim ausschliesslichen Taltransport für höhere Längsneigungen. DOTZEL (1898) stellte in seinem Handbuch des forstlichen Wege- und Eisenbahnbaus fest, dass sich für die maximale Längsneigung nicht ein allgemein gültiger Wert festlegen lasse. Er kommt zum Schluss, dass Waldwege, die mit beladenen Fuhrwerken nur bergab benützt werden, eine maximale Längsneigung von 12 % aufweisen können. Zur gleichen Zeit differenzierte FANKHAUSER (1905) diese Vorstellung für die Schweiz. Er forderte für Hauptwege ein maximales Gefälle von 10 % und für Nebenwege ein solches von 14 %.

Diese Einschätzung setzte sich in den Alpenländern allgemein durch, obwohl sich die Transporttechnologie entscheidend weiterentwickelte. Seit der Jahrhundertwende kamen für den Holztransport vermehrt Motorfahrzeuge und einfache Lastwagen zum Einsatz, der Grenzwert für die maximal zulässige Längsneigung erfuhr aber keine einschneidende Veränderung. HENNE (1926) stellte für die Schweiz fest, dass sich für Hauptstrassen 12 % und für Fahrwege 14 % als zweckmässig erwiesen hätten. Diese Einschätzung hat sich über Jahrzehnte gehalten (HESS, 1945).

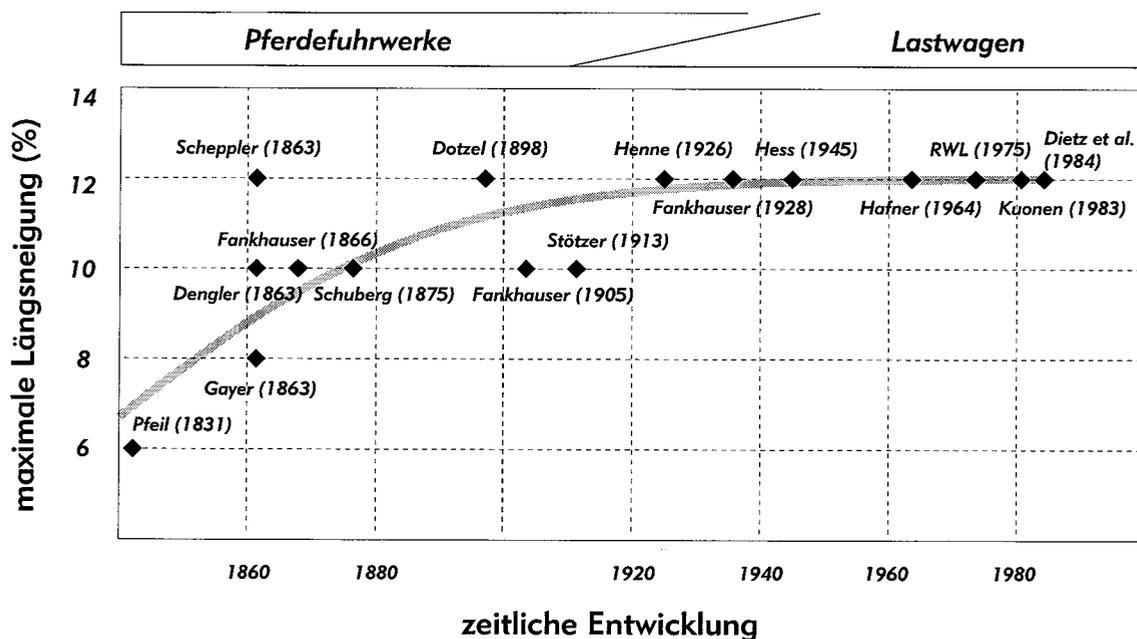


Abb. 3: **Historische Entwicklung des Längsneigungs-Grenzwertes für Waldstrassen.** Die zulässige Maximalsteigung von 12 % wurde bereits zu einer Zeit propagiert, die geprägt war durch einen gemischten Verkehr aus Pferdefuhrwerken und Lastwagen.

Aus Abbildung 3 wird ersichtlich, wie sich der Grenzwert der maximal zulässigen Längsneigung von Waldstrassen entwickelt hat und welche Transporttechnologie ihm zugrunde lag. Aufgrund der aufgezeigten historischen Entwicklung lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass der heute anerkannte Grenzwert von 12 % Maximalneigung bereits vor langer Zeit entstand und dass er in den letzten fünfzig Jahren kaum hinterfragt oder wesentlich verändert wurde.

Als Erklärung für das Beibehalten des 12 %-Grenzwertes lassen sich einerseits Aspekte der Bewirtschaftungstechnik, andererseits Gründe der Strassenerhaltung anführen. Bereits FANKHAUSER (1938) bestätigte diese Einschätzung, wenn er bemerkte, dass steile Strassen höchst unzweckmässig seien, weil sie einen kostspieligen Strassenunterhalt verlangten und im Gebirge ihre Flächenerschliessungswirkung verlören. HAFNER (1971) ergänzt dazu, dass steile Strassen häufigere Entwässerungsanlagen erfordern und auch bei den verkehrenden Fahrzeugen vermehrte Instandhaltungskosten verursachen. DIETZ ET AL. (1984) sehen einerseits verkehrstechnische Gründe, die für eine moderate Längsneigung sprechen, da die Verkehrssicherheit mit zunehmender Längsneigung vor allem im Winterhalbjahr stark abnimmt, andererseits auch nutzungstechnische Aspekte (Waldstrasse als Arbeitsfläche). Schliesslich erwähnen sie auch strassenbautechnische Gründe, d.h. Aspekte der Strasseninstandhaltung. Nach SCHÖNAUER (1983) wurde die heute allgemein anerkannte maximale Längsneigung von Waldstrassen schon um 1950 definitiv festgelegt, und zwar in der Erkenntnis, dass höhere Längsneigungen bei Kiessand-Strassen zu gefährlichen Erosionsschäden führen können.

Die Längsneigung von 12 % ist aber nicht das kritische Grenzgefälle, das Lastwagen bewältigen können. DIETZ ET AL. (1984) bestätigen, dass moderne Lastwagen wesentlich höhere Längsneigungen überwinden können. Vor allem aus dem nordamerikanischen Raum ist bekannt, dass Holztransportlastwagen beim Bergabtransport Längsneigungen von über 15 % sicher befahren können (SESSIONS ET AL., 1986). Als kritisches Element bezeichnet SESSIONS (1986) die maximale Steigfähigkeit von Holztransport-Lastwagen, die er aufgrund eines analytischen Modells herleitete.

Neben eigentlichen Richtlinien findet sich eine Vielzahl von Fachartikeln (Tabelle 1), die ein Bild über die Ansichten im europäischen und nordamerikanischen Raum ergeben. Die maximal zulässige Längsneigung für Waldstrassen von 12 % ist insbesondere in Europa sehr weit verbreitet. Verschiedene Autoren sehen aber für den Fall von schwierigen topografischen Verhältnissen oder auf kurzen Teilstrecken auch höhere Grenzneigungen vor. Dies wird vor allem mit Kosteneinsparungen, mit dem Wegfall von möglichen Natur- und Landschaftsschutzkonflikten oder der Querung von instabilen Zonen (Rutschhängen) begründet.

Land	Jahr	Autor	Strassenkategorien	min	opt	max	Ausnahme
I	1988	Baldini, S.	strade camionabili principali	2	3 - 8	10	12
			strade camionabili secondarie	3	4 - 8	10	18
	1984	Pozzatti, A. und Cercato, M.	strade camionabili principali	2 - 3	< 9	12	14
			strade camionabili secondarie	2 - 3	< 9	12	16
A	1983	Sedlak, O.	main road	2 - 3		9	
			subsidiary road	2 - 3		10	12
	1971	Hafner, F.	Lkw-Strassen mit Taltransport	2 - 3	< 9	10	12 (14)
	1982	Pestal, E.	Lkw-Strassen	2 - 3	< 9	10	12
	1990	Trzesniowski, A.	Lkw-Strassen	3		10	12 (20)
	1990	Holzwieser, O.	Lkw-Strassen			12	15
	1983	Schönauer, H.	Forststrassen			12	
	1986	Schwab, P.	Forststrassen			12	>12
USA	1984	Wenger, K.	primary roads			8	10
			secondary roads			10	12
			local road	2		15	
	1986	Walbridge, T.A.	primary roads			8	10
			secondary roads			10	12
	1986	Sessions, J.	forest roads			15	>15
CAN	1991	Bews, D. et al.	low-volume roads			16	
F	1987	Gambard, J.M.	very low-traffic roads			12	
D	1984	Dietz, P.	Hauptwege	2		8	10
			Zubringerwege	2		8	10
	1988	Kollmer, K.	2. class roads			8	12
			3. class roads			15	
	1991	Gaumitz, B.	Abfuhrwege	1		12	14
	1991	Oppermann, J.	Forststrassen	2	8	12	14
	1982	Pampel, W.	Abfuhrwege	1		12	
CH	1983	Kuonen, V.	Waldstrassen	3	< 6	10	12
			Güterstrassen	3	< 6	12	14
N	1980	Fronsdal, J.	assembly roads			13 - 14	20

Tab. 1: **Längsneigungs-Grenzwerte in der forsttechnischen Literatur.** Die maximal zulässige Längsneigung hat sich auch international dem Wert von 12 % angenähert. Insbesondere unter schwierigen Verhältnissen sind aber auch höhere Längsneigungen tragbar.

2.2.2 Maximal zulässige Längsneigung von Maschinen- und Bewirtschaftungswegen

Zur Frage der maximal zulässigen Längsneigungen von Maschinenwegen existiert in der Schweiz keine Richtlinie. Die von KUONEN (1983) postulierte Maximalneigung von 20 % ist in der forstlichen Praxis akzeptiert. WÜTHRICH (1992) ist der Ansicht, dass Maschinenwege auf erosionsgefährdeten Böden nicht steiler als 15 % sein sollten, Maschinenwege auf erosionsfesten Böden hingegen bis gegen 25 % Neigung gebaut werden können. Vor allem in Deutschland wird die maximal zulässige Längsneigung in den relevanten Richtlinien bei 25 % angesetzt, wobei der Frage der Rückerichtung ein starkes Gewicht beigemessen wird. Bei Bergauftransport sollten 15 % nicht überschritten werden, bei Bergabtransport sind hingegen Längsneigungen bis 25 % für moderne Rückefahrzeuge sicher befahrbar. Aus Oesterreich sind eher widersprüchliche Vorstellungen bekannt. Während SEDLAK (1983) maximale Längsneigungen von 16 % in Erwägung zieht, sieht TRZESNIEWSKI (1992) die Grenzen bei etwa 30 % (siehe Abbildung 4).

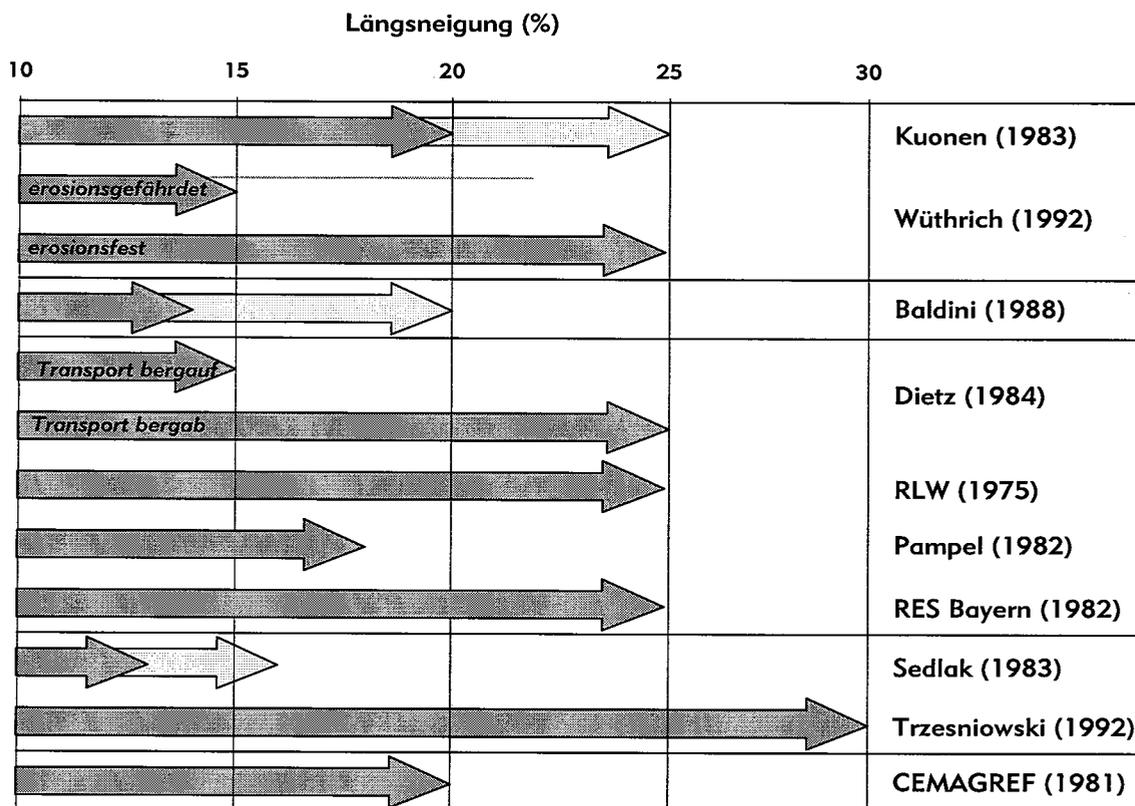


Abb. 4: **Richtwerte für die zulässige Maximalsteigung von Maschinenwegen in %.** Während in der Schweiz und in Oesterreich keine relevanten Richtwerte existieren, regeln Deutschland und Frankreich die maximal zulässigen Längsneigungen von Maschinenwegen in einer Richtlinie.

LÜNZMANN (1968) ermittelte die Grenzen des Bergaufrückens mit Schleppern auf Maschinenwegen aufgrund eines analytischen Modells. Unter Berücksichtigung der physikalischen Einflussfaktoren (Steigungs-, Roll- und Gleitwiderstand) kommt er - je nach Bodenverhältnissen - zu zulässigen Längsneigungen von 20 bis 25 %. WOLF-DRACK (1993) sieht die Grenzen der maximal zulässigen Längsneigungen von Maschinenwegen für Allradfahrzeuge bei Bergaufrückung bei 20 %, bei der Bergabrückung hingegen bei maximal 40 %.

2.2.3 Wesentliche Folgerungen

Aus den in den vorangehenden Abschnitten angestellten Ueberlegungen zur Analyse der geltenden Richtwerte für die maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen und Maschinenwegen lassen sich folgende wesentliche Folgerungen ziehen:

- Der Längsneigungs-Grenzwert von 12 % für Waldstrassen entstand zu einer Zeit, die durch einen gemischten Verkehr von Pferdefuhrwerken und Lastwagen geprägt war.
- Der 12 %-Grenzwert wurde aufgrund von Erfahrungswissen und durch qualitative Ueberlegungen festgelegt. Die dabei berücksichtigten Kriterien sind strassenbau- und nutzungs-technischer Natur.
- Analytische Modelle (LÜNZMANN 1968, CAIN 1981, SESSIONS ET AL. 1986), welche die Steigfähigkeit der Holztransportfahrzeuge abschätzen können, wurden für die Herleitung der geltenden Regelung nicht berücksichtigt.
- Im internationalen Vergleich sind die Schweizerischen Richtwerte starr und nicht auf Spezialfälle anwendbar.
- Für Maschinenwege lässt sich kein einheitlicher Grenzwert angeben. Die maximal zulässige Längsneigung hängt stark von den Bodenverhältnissen, der Transportrichtung und den technischen Eigenschaften der Rückfahrzeuge ab und ist für spezifische Einsatzbedingungen im einzelnen festzulegen.

2.3 Querschnittsgestaltung

Die Querschnittsgestaltung von Strassen und Wegen hat folgende Elemente zu berücksichtigen:

- Breite der Fahrbahn;
- Kurvenverbreiterungen;
- Querneigung der Fahrbahn;
- Lichtraumprofil;
- Gestaltung der Fahrbahnoberfläche (Material und Form);
- Bankette, Randabschlüsse und Böschungen;
- Ausweichstellen und Kehrplätze.

Nachfolgend werden lediglich die beiden Elemente Fahrbahnbreite und Fahrbahnoberfläche näher betrachtet. Die übrigen Elemente der Querschnittsgestaltung müssen nicht überprüft werden, da sie in der Literatur ausführlich diskutiert (KUONEN 1983, DIETZ ET AL. 1984) und nicht angepasst werden müssen.

Die Gestaltung der Querschnitte von Waldstrassen und Maschinenwegen richtet sich nach der Verkehrsbedeutung der Transportanlage, der Zusammensetzung und Menge des Verkehrs und den maximalen Breitenabmessungen der massgebenden Fahrzeuge. Daneben sind aber auch Bedürfnisse des Natur- und Landschaftsschutzes, eine haushälterische Bodennutzung und die Kosten von Bedeutung.

2.3.1 Fahrbahnbreite von Waldstrassen

Aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens auf Waldstrassen sind nur einspurige Anlagen vorzusehen, wobei die Fahrbahnbreite der Breite der Fahrspur entspricht. Als Fahrbahnbreite wird in der Folge die Breite des befestigten Strassenkörpers verstanden. Die Bemessung der Fahrbahnbreite richtet sich nach den Höchstbreiten der verkehrenden Fahrzeuge. Gemäss der Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge VTS (19. Juni 1995) beträgt die Höchstbreite 2.50 m, für breitwandige Isothermfahrzeuge sogar 2.60 m. Die Europäische Union erhöhte die maximale Breite von Fahrzeugen von 2.50 m auf 2.55 m, was von den Mitgliedstaaten bis zum 17. September 1997 umzusetzen war. Der Bundesrat beantragte dem Parlament, Art. 9 des Strassenverkehrsgesetzes zu ändern und die Kompetenz über die Ausmasse der Fahrzeuge an den Bundesrat zu übertragen. Die neu zulässige Höchstbreite von 2.55 m ist im Frühjahr 1998 auch in der Schweiz in Kraft getreten. Aus Gründen der Verkehrssicherheit sind der Fahrzeugbreite beidseitig Sicherheitsstreifen anzufügen (Abbildung 5). Sie betragen mindestens je 0.35 m (KUONEN, 1983) und werden mit zunehmender Geschwindigkeit grösser.

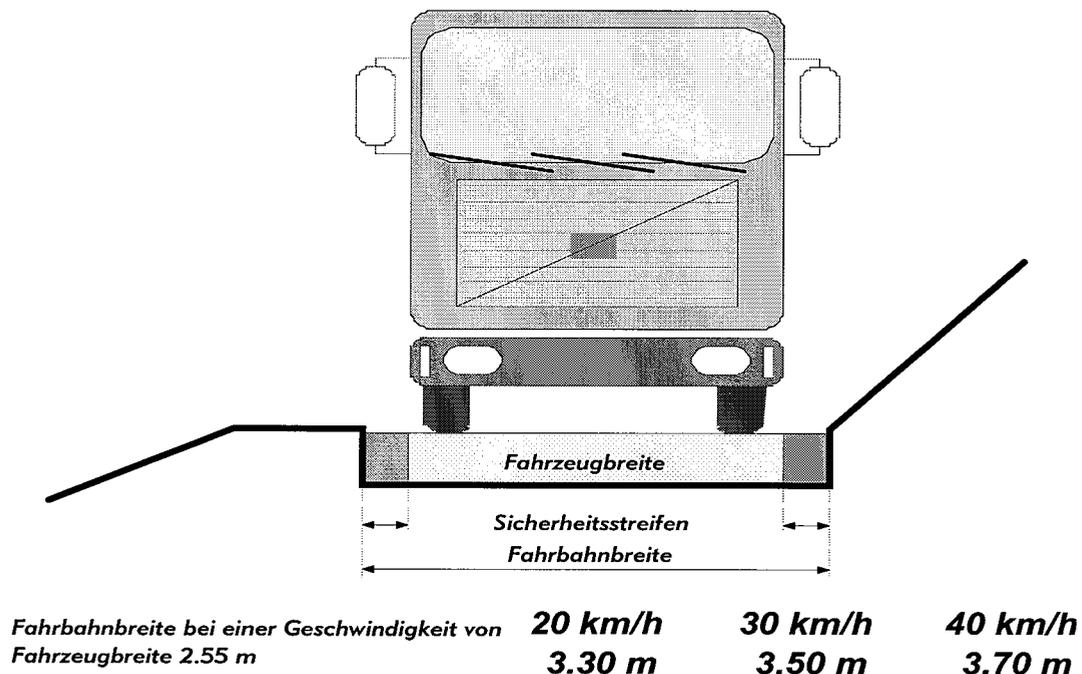


Abb. 5: **Minimale Fahrbahnbreite auf geraden Strassenabschnitten** (SAFS, 1989). Die Fahrbahnbreite richtet sich nach den Höchstbreitenabmessungen der massgebenden Fahrzeuge und einem Sicherheitsstreifen von je 0.35 m, der mit zunehmender Geschwindigkeit breiter wird.

Ein Vergleich mit den relevanten Richtlinien der benachbarten Länder zeigt, dass die Minimal-Fahrbahnbreiten von Waldstrassen gut übereinstimmen (Tabelle 2), wobei in Deutschland und Frankreich bei einspurigen Waldstrassen von einer Minimalbreite von mindestens 3.5 m ausgegangen wird.

<i>Waldstrassenbreite</i>	<i>Maschinenwegbreite</i>	<i>Quelle (Land)</i>
3.5 m	3.0 m	RLW 1975 (D)
3.5 m	2.5 - 3.0 m	RES Bayern (D)
3.5 - 4.0 m	3.0 m	CEMAGREF (F)
3.0 - 3.5 m		RVS 3.8 (A)
	3.0 m	Trzesniowski 1982 (A)
3.2 - 3.6 m		SAFS (CH)
	3.0 - 3.5 m	Kuonen 1982, Wüthrich 1992 (CH)

Tab. 2: **Minimalbreite von Waldstrassen- und Maschinenwegen im internationalen Vergleich.** Die Richtlinien im benachbarten Alpenraum sehen für Waldstrassen eine minimale Fahrbahnbreite von 3.0 m (A) bis 3.5 m vor (D, F). Für Maschinenwege gilt eine Minimalbreite von 3.0 m.

LIENERT (1983) hat in seiner Untersuchung im Kanton Schwyz festgestellt, dass der überwiegende Anteil an Waldstrassen eine Fahrbahnbreite von 3.0 m aufweist. Ältere Strassen sind zum Teil noch schmaler gebaut. Er weist nach, dass schmale Strassen häufiger Schäden aufweisen und überdurchschnittlich oft grosse massgebende Deflektionen haben.

2.3.2 Breite von Maschinenwegen

Für die Bemessung der Breite von Maschinenwegen existieren in der Schweiz keine eigentlichen Richtwerte. Die Breite richtet sich aber auch bei Maschinenwegen nach den Abmessungen der massgebenden Fahrzeuge (Windenschlepper, Klemmbankschlepper, Forwarder). Maschinenwege müssen demnach so breit sein, dass ein optimaler Einsatz der Rückefahrzeuge (Beweglichkeit) ermöglicht wird und eine genügende Fahrsicherheit gewährleistet werden kann. Deshalb fordert KUONEN (1983) eine Minimalbreite von 3.0 m. Nach WÜTHRICH (1992) beträgt die befahrbare Breite von Maschinenwegen 3.0 bis 3.5 m, damit die Anforderungen an die Beweglichkeit und an die Fahrsicherheit erfüllt werden können.

Der Vergleich mit Richtgrössen aus verschiedenen Ländern des Alpenraumes (Tabelle 2) zeigt, dass die geforderten Werte für Maschinenwege auch im benachbarten Alpenraum in der gleichen Grössenordnung liegen wie in der Schweiz.

WOLF-DRACK (1993) vertritt die Meinung, dass für Forstraktoren und landwirtschaftliche Schlepper eine Breite von 3.0 m ausreicht. Für Forwarder und andere Holzerntemaschinen, die mit Hydraulikkränen arbeiten, empfiehlt er jedoch grössere Breiten.

2.3.3 Gestaltung der Fahrbahnoberfläche von Waldstrassen

Das von HIRT (1977) vorgeschlagene Bewertungsschema (Abbildung 6), stellt einen ersten wertvollen Ansatz dar. Es baut auf den Kriterien Verkehr, Niederschläge, Steigung und Besonnung auf und ist die einzige Bewertungsgrundlage für die Oberflächengestaltung von Waldstrassen. Hirts Bewertungsschema ist im forstlichen Strassenbau anerkannt. Die praktische Anwendung hat jedoch gezeigt, dass der kritische Bereich, bei dem ein Wechsel von Naturstrasse zu bituminös gebundener Deckschicht stattfindet, von der Erosionsklasse 4 in den Bereich der Erosionsklasse 6 verschoben werden sollte. Eine strikte Anwendung des Hirt-Diagramms führt tendenziell zu zu hohen Ausbaustandards.

LIENERT (1983) stimmt den von HIRT (1977) postulierten Kriterien zu, weist jedoch nach, dass insbesondere Strassen mit hohem Verkehr und grossen Längsneigungen einen starken Anteil an Erosionsrinnen aufweisen. Den Einfluss der Niederschlagsmenge relativiert er, indem seiner Meinung nach die Degradierung der Fahrbahnoberfläche primär durch die Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen bestimmt wird.

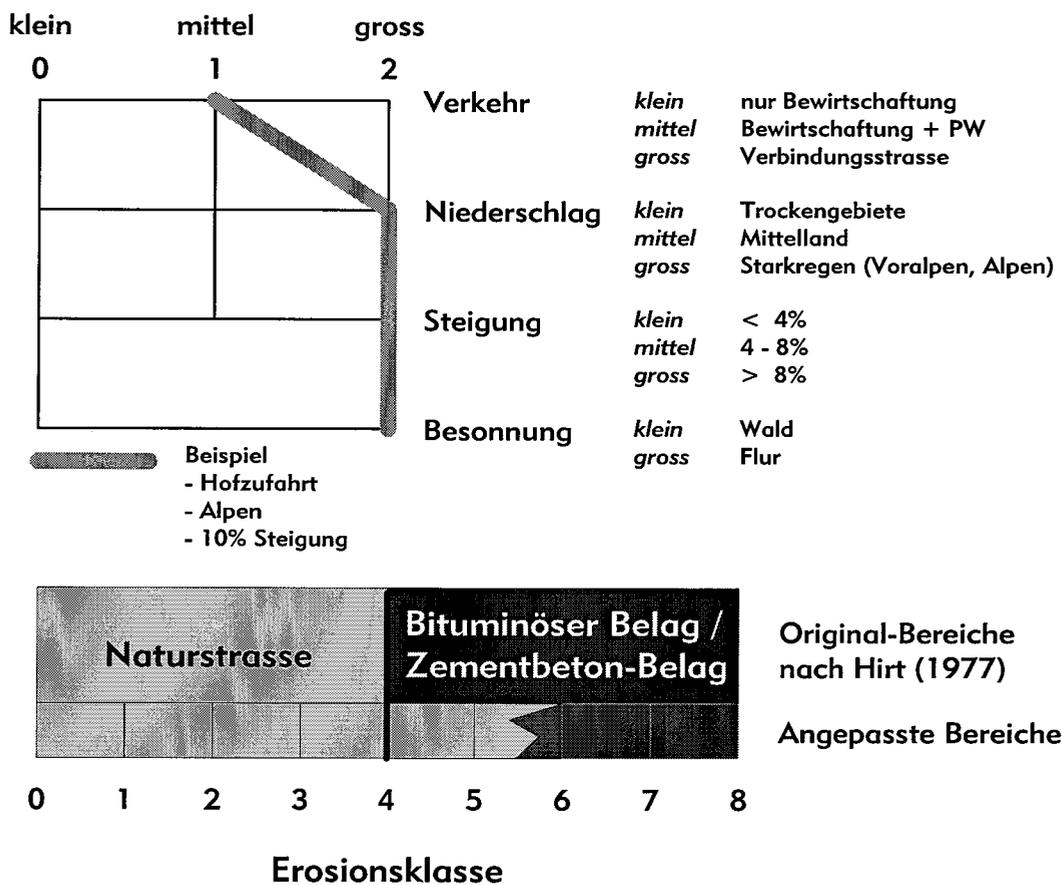


Abb. 6: **Bewertungsschema zur Wahl der Deckschicht** (HIRT, 1977). Die Kriterien Verkehr, Niederschläge, Steigung und Besonnung werden mit Punkten (0 bis 2) bewertet. Die Summe ergibt ein Mass für das Erosionsrisiko, das für die Wahl der Deckschicht benützt werden kann.

2.3.4 Wesentliche Folgerungen

Für die Breite von Waldstrassen und Maschinenwegen und die Ausgestaltung der Fahrbahnoberfläche lässt sich Folgendes ableiten:

- Die Minimalbreiten von Waldstrassen liegen - verglichen mit den Richtlinien der benachbarten Länder - an der unteren Grenze.
- Mit der Angleichung der Fahrzeugabmessung an die Richtwerte der Europäischen Union ist die Minimalbreite von Waldstrassen in der Schweiz neu auf 3.2-3.3 m festzusetzen.
- Die Breite von Maschinenwegen ist aufgrund der Höchstbreiten der Rückefahrzeuge zu ermitteln. Sie soll eine genügende Beweglichkeit und Verkehrssicherheit gewährleisten.
- Das Bewertungsschema zur Wahl der Fahrbahnoberfläche nach HIRT (1977) ist als Entscheidungsgrundlage akzeptiert. Die Bewertung geschieht rein gutachtlich, und der Einfluss der Kriterien Verkehr, Längsneigung und Niederschlagsintensitäten lässt sich damit nicht quantifizieren.

3 Kriterien für die Festlegung der geometrischen Elemente

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Das Strassenverkehrsgesetz vom 19. Dezember 1958 (SVG, SR 741.01) legt die rechtlichen Rahmenbedingungen fest, insbesondere die maximalen Abmessungen, Gewichte und Lasten der verkehrenden Fahrzeuge, die in Art. 9 festgeschrieben sind. Da auf Waldstrassen die gleichen Fahrzeuge wie auf dem übrigen Strassennetz zirkulieren, sind die Regelungen des SVG einzuhalten. Die derzeitige Revision von Artikel 9 des Strassenverkehrsgesetzes sieht vor, die Kompetenz für die Anpassung der Abmessungen der Fahrzeuge an den Bundesrat zu delegieren. Die *Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS)* vom 19. Juni 1995 legt die technischen Spezifikationen im einzelnen fest, insbesondere:

- **Minimales Adhäsionsgewicht** (Art. 39 Abs. 3 VTS): mindestens 25% des Betriebsgewichts des leeren, nur mit dem Fahrzeugführer / der Fahrzeugführerin besetzten Fahrzeuges müssen auf der Antriebsachse (bzw. den Antriebsachsen) ruhen.
- **Anfahrvermögen** (Art. 54 Abs. 3 VTS): Motorfahrzeuge und Fahrzeugkombinationen müssen mit voller Ladung in Steigungen bis 15 % einwandfrei anfahren können.
- **Minimale Nutzleistung** (Art. 97 Abs. 2 VTS): Die Nutzleistung des Antriebsmotors muss je Tonne des Gesamtgewichtes mindestens betragen: 7.35 kW bei Motorwagen und Fahrzeugkombinationen; 2.95 kW bei Traktorzügen.
- **Bremsverzögerung** (Anhang 7 VTS, Abs. 211, 241): Für Lastwagen muss die Verzögerung der Betriebsbremse mindestens 5m/sec^2 betragen, für landwirtschaftliche Traktoren 2.4m/sec^2 .
- **Feststellbremse** (Anhang 7 VTS, Abs. 213, 243): Die Feststellbremsanlage muss das beladene Fahrzeug auf einer Steigung und einem Gefälle von 18% im Stillstand halten können.

3.2 Vertikale Linienführung

3.2.1 Maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen

Nach ANDERSON ET AL. (1991) ist die Bestimmung der Längsneigung einer Waldstrasse eine komplexe Entscheidung, welche die Elemente Strassengestaltung, Strassenerhaltung, Verkehrsmenge, Art der Fahrzeuge, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen hat.

WEBER (1977) definiert die maximal zulässige Längsneigung einer Strasse als diejenige Grösse, die Sicherheit, Befahrbarkeit und Dauerhaftigkeit einer Anlage in einem annehmbaren Rahmen gewährleistet. Es handelt sich somit um eine Optimierung in einem mehrdimensionalen Zielsystem, das nie eine eindeutige Lösung liefern kann, sondern stark davon abhängt, welches Gewicht den einzelnen Kriterien beigemessen wird.

Abbildung 7 zeigt die Leitlinien, welche für die Gestaltung technischer Systeme allgemein gültig sind. Unter Funktionsfähigkeit werden sämtliche technischen Kriterien subsumiert, welche die Nutzungsanforderungen über einen gesamten Lebenszyklus umschreiben. Das Kriterium "Wirtschaftlichkeit" zielt darauf ab, die Bau- und Unterhaltskosten über den gesamten Lebenszyklus zu minimieren. Sicherheit schliesslich bezweckt, die mit dem Gebrauch der Anlagen verbundenen Risiken zu minimieren. Die Optimierung der Funktionsfähigkeit hat zum einen die technischen Machbarkeitsgrenzen abzuschätzen, zum andern die Gebrauchstauglichkeit der Anlagen über den ganzen Lebenszyklus in Betracht zu ziehen. Die Erfahrung zeigt, dass die Dauerhaftigkeit von Waldstrassen ein ganz entscheidendes Kriterium ist, das auch den Fahrkomfort massgebend mitbeeinflusst.

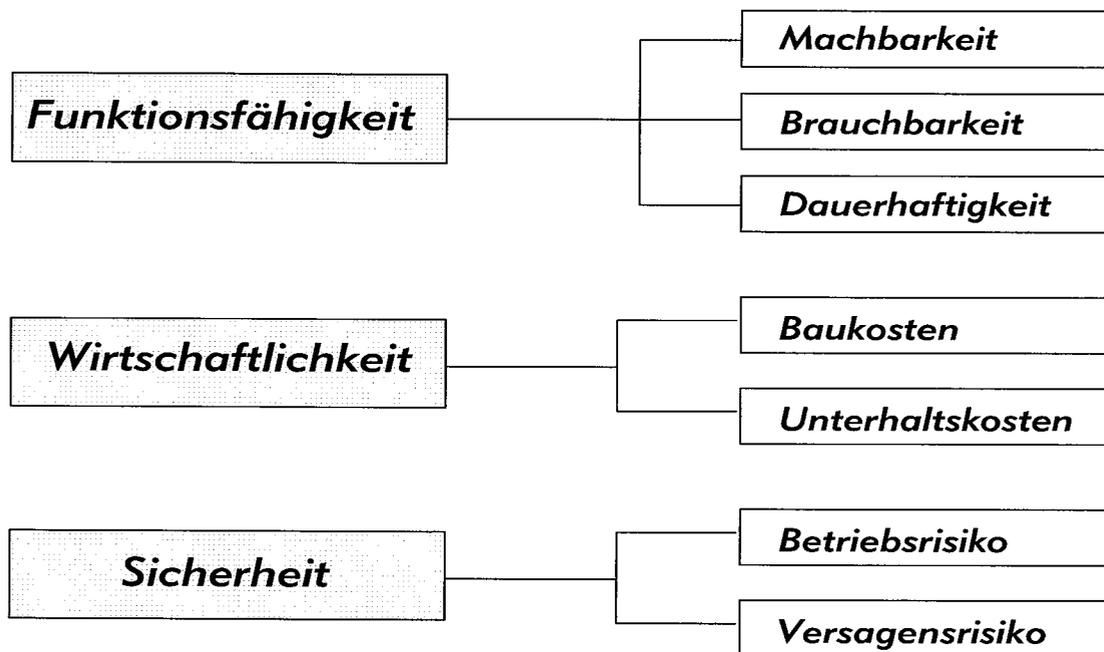


Abb. 7: **Kriterien zur Festlegung der zulässigen Längsneigung.** Die gleichzeitige Maximierung der Kriterien Funktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit ergibt jenen Lösungsbereich, aus dem Richtwerte für die maximal zulässige Längsneigung von Waldstrassen abgeleitet werden können.

Die Art der Transportfahrzeuge, die für die nachfolgenden Ausführungen von Bedeutung sind, richten sich nach den von BUTORA (1978) und AMSTUTZ (1981) für Schweizer Verhältnisse ermittelten gebräuchlichsten Lastwagentypen, die für Holztransporte eingesetzt werden. Es sind dies 2- und 3-Achs-Lastwagen sowie Anhängerzüge bestehend aus 2-Achs-Lastwagen und 2-Achs-Anhänger. Die für den Stammholztransport ebenfalls eingesetzten Langholzfahrzeuge werden nicht weiter betrachtet.

Die Herleitung maximal zulässiger Längsneigungen geht von Grenzzuständen des Befahrens aus. Beim Bergauffahren ergibt sich der Grenzzustand beim Anfahren mit Vollast, während beim Bergabfahren der Bremsvorgang mit Vollast massgebend wird. In beiden Fällen haben wir bei den Einwirkungen die Beschleunigungskraft, den Hangabtrieb, den Rollwiderstand und den Luftwiderstand zu betrachten. Dem steht der maximal verfügbare Schubwiderstand gegenüber, der zwischen Antriebsrädern und Strassenoberfläche entwickelt werden kann (vgl. Abbildung 8). Der Grenzzustand wird dann erreicht, wenn die Summe der einwirkenden Kräfte gleich der Summe der Widerstandskräfte ist.

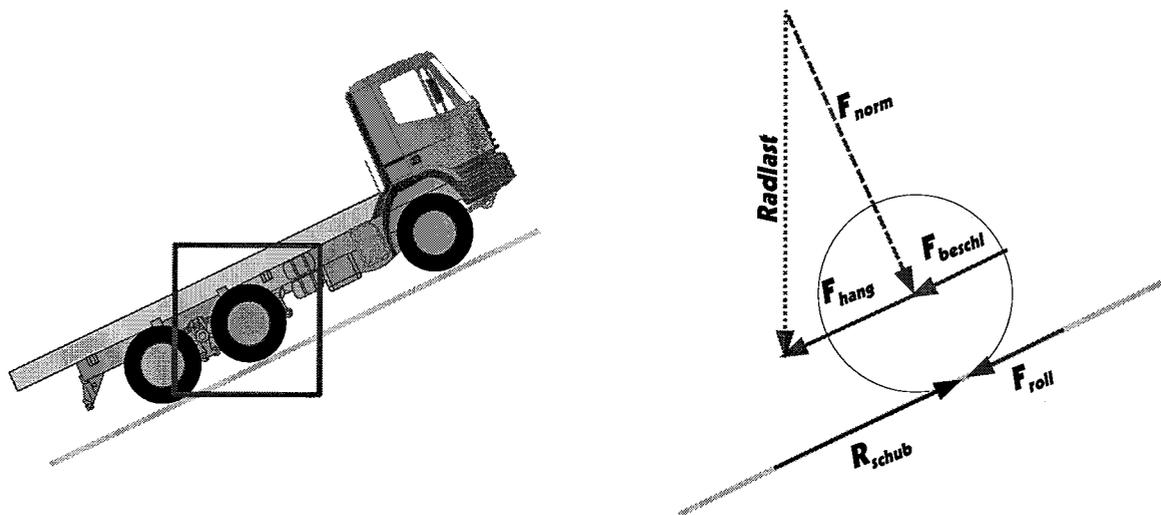


Abb. 8: **Modell zur Ableitung der Grenzsteigung.** Zur Ueberwindung der auftretenden Widerstände (Rollwiderstand F_{roll} , Steigungswiderstand F_{hang}) muss das Fahrzeug eine genügende Zugkraft aufbringen, die begrenzt wird durch den auftretenden Kraftschluss zwischen Fahrzeug und Fahrbahnoberfläche.

Verschiedene Autoren haben versucht, diese Grenzzustände zu modellieren (MC NALLY 1975, CAIN 1981). Die verwendeten Modelle haben teilweise empirische Komponenten. Sie sind darauf ausgerichtet, die zulässige Längsneigung zu berücksichtigen. Die Verordnung über die technischen Anforderungen an die Strassenfahrzeuge schreibt für das Bremsen von LKWs eine negative Beschleunigung von 5 m/s^2 vor. Dieser Beschleunigungswert dürfte weit über der Beschleunigung beim Anfahren liegen, womit das Bremsen mit Vollast beim Abwärtsfahren zum massgebenden Grenzzustand wird.

Die beiden zu betrachtenden Grenzzustände sind (1) das Anfahren beim Bergauftransport und (2) das Bremsen beim Bergabtransport. Der Grenzzustand „Anfahren“ lässt sich analytisch modellieren. Massgebende Parameter sind die Fahrzeuggeometrie, die Gewichtsverteilung, die Rollreibungs- sowie die Haftreibungskoeffizienten. Den stärksten Einfluss übt dabei der Haftreibungskoeffizient aus (ANDERSON ET AL., 1991). Er gibt Auskunft über den Kraftschluss zwischen den Reifen der angetriebenen Räder und der Fahrbahnoberfläche. Er hängt hauptsächlich vom Fahrzeug, den Umgebungsfaktoren und der Ausgestaltung der Fahrbahnoberfläche ab. Tabelle 3 gibt eine Uebersicht über die in der forstlichen Fachliteratur verwendeten Haftreibungskoeffizienten.

Fahrbahnoberflächen	Haftreibungskoeffizienten				Mittelwert
	Lünzmann (1968)	Hafner (1971)	Cain (1981)	Pampel (1982)	
Eis		0.11	0.10	0.10	0.10
Schnee (fest gefahren)	0.37	0.25	0.37	0.40	0.35
Erdweg (nass)	0.30	0.30	0.45	0.53	0.40
Erdweg (trocken)	0.65	0.60	0.60	0.70	0.64
Schotter (nass)	0.35	0.40	0.60	0.60	0.49
Schotter (trocken)	0.60	0.60	0.67	0.80	0.67
Asphalt (nass)	0.50	0.50	0.55	0.60	0.54
Asphalt (trocken)	0.70	0.65	0.62	0.80	0.69
Beton (nass)	0.65	0.61	0.62	0.68	0.64
Beton (trocken)	0.80	0.88	0.82	0.90	0.85

Tab. 3: **Haftreibungskoeffizienten für unterschiedliche Fahrbahnoberflächen und verschiedene Umgebungsbedingungen.** Der Haftreibungskoeffizient ist die wichtigste Variable bei der Modellierung von Grenzzuständen des Fahrens auf unterschiedlichen Strassenbelägen.

Im Grenzzustand befinden sich Widerstände (Schubkraft Fahrzeug-Strasse) und Einwirkungen (Hangabtrieb, Beschleunigung, Rollreibung, Luftreibung) im Gleichgewicht. Daraus leitet sich die Gleichgewichtsbedingung ab, die vereinfacht mit Formeln von MC NALLY (1975) und CAIN (1981) angegeben werden kann. Die nachstehende Formel gilt näherungsweise für den „Anfahren bergauf“ - Fall.

$$s = 100 \cdot \left[\left(\frac{Q_A}{Q} \right) \cdot \mu - f \cdot \left(1 - \frac{Q_A}{Q} \right) \right] \quad [1]$$

wobei

s	=	Grenzsteigung in %
Q _A	=	Gewicht auf den angetriebenen Rädern
Q	=	Gesamtgewicht
μ	=	Haftreibungskoeffizient
f	=	Rollreibungskoeffizient

Für den „Bremsen bergab“ - Fall lässt sich eine analoge Beziehung aufstellen. Anstelle der maximal verfügbaren Schubkraft, die nur von den angetriebenen Rädern aktiviert werden kann, muss die maximale Schubkraft eingesetzt werden, welche sämtliche gebremsten Räder aufbringen können.

Formel [1] ermöglicht es, die Grenzsteigung für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen und unterschiedliche Fahrbahnoberflächen zu schätzen. Moderne Holztransportlastwagen weisen ein weitaus höheres Adhäsionsgewicht auf als der von der VTS-Vorschrift geforderte Minimalwert von 25%, was auch Untersuchungen von SKAAR (1988) bestätigen. Das Adhäsionsgewicht bewegt sich im Mittel zwischen 36 % und 57 %, und zwar sowohl in unbeladenem als auch in beladenem Zustand. Für die Berechnungen der Grenzsteigungen, die in Abbildung 9 (beladener Lastwagen) dargestellt sind, wurde als mittlerer Rollreibungskoeffizient der Faktor 0.20 eingesetzt, wie ihn auch SESSIONS (1986) in seinen Berechnungen verwendete. Wird ein mittlerer Haftreibungskoeffizient von 0.50 (Schotterstrassen und Asphalt im nassen Zustand, siehe Tabelle 3) angenommen, erhalten wir für die verschiedenen Lastwagenkonfigurationen eine maximale Grenzsteigung zwischen 17 % (Anhängerzug) und 28 % (2-Achs-Lastwagen) im unbeladenen Zustand. Der 3-Achs-Lastwagen liegt dazwischen, wobei hier zu beachten ist, dass nur die schwächste Konfiguration mit nur einer angetriebenen Achse berücksichtigt wurde.

Bei beladenen Lastwagen bewegen sich die Grenzwerte bei einer mittleren Haftreibung von 0.50 zwischen 16 % und 26 % (Abbildung 9). Werden griffigere Fahrbahnoberflächen (z.B. Betonbeläge) ausgebildet, erhöht sich die maximale Grenzsteigung der Lastwagen beträchtlich. Bei Haftreibungskoeffizienten um 0.65 (nasser Betonbelag) liegt sie sowohl für den unbeladenen als auch den beladenen Lastwagen bei Werten zwischen 22 % (Anhängerzug) und 35 % (2-Achs-Lastwagen) (Abbildung 9).

Muss im Winter auf festgefahrener Schneeunterlage gefahren werden, so verringert sich die Grenzsteigung (Abbildung 9), kann aber mit dem Einsatz von Schneeketten etwas erhöht werden. Auch auf verschmutzten Fahrbahnoberflächen und bei nasser Witterung muss mit einer Reduktion der Haftreibung gerechnet werden, wodurch sich die Grenzsteigung stark reduziert. Im Modell nicht berücksichtigt wurde die Konstellation der Eisglätte, da dabei eine so geringe Haftung zustande kommt, dass nur ganz geringe Längsneigungen befahren werden können. Die Beschleunigungskräfte, die beim Anfahren benötigt werden, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt; sie bewirken eine Reduktion der Grenzsteigung, wie sie in der Abbildung 9 dargestellt ist.

Das Grenzgefälle, das sich aus der Bergabfahrt im beladenen Zustand ergibt, kann grundsätzlich auf dieselbe Art wie die Grenzsteigung ermittelt werden. Verschiedene Autoren (CAIN, 1981; SESSIONS ET AL., 1986; ANDERSON ET AL., 1991), die sich intensiv mit der Grenzsteigung von Holztransport-Lastwagen auseinandergesetzt haben, warnen vor Längsneigungen über 20 %, da sich bei der Bergabfahrt sonst Sicherheitsprobleme ergeben, da die Kontrolle über das Fahrzeug verloren geht. Strassen über 20 % Längsneigung sollten daher nur für temporären Gebrauch offenstehen (ANDERSON ET AL., 1991).

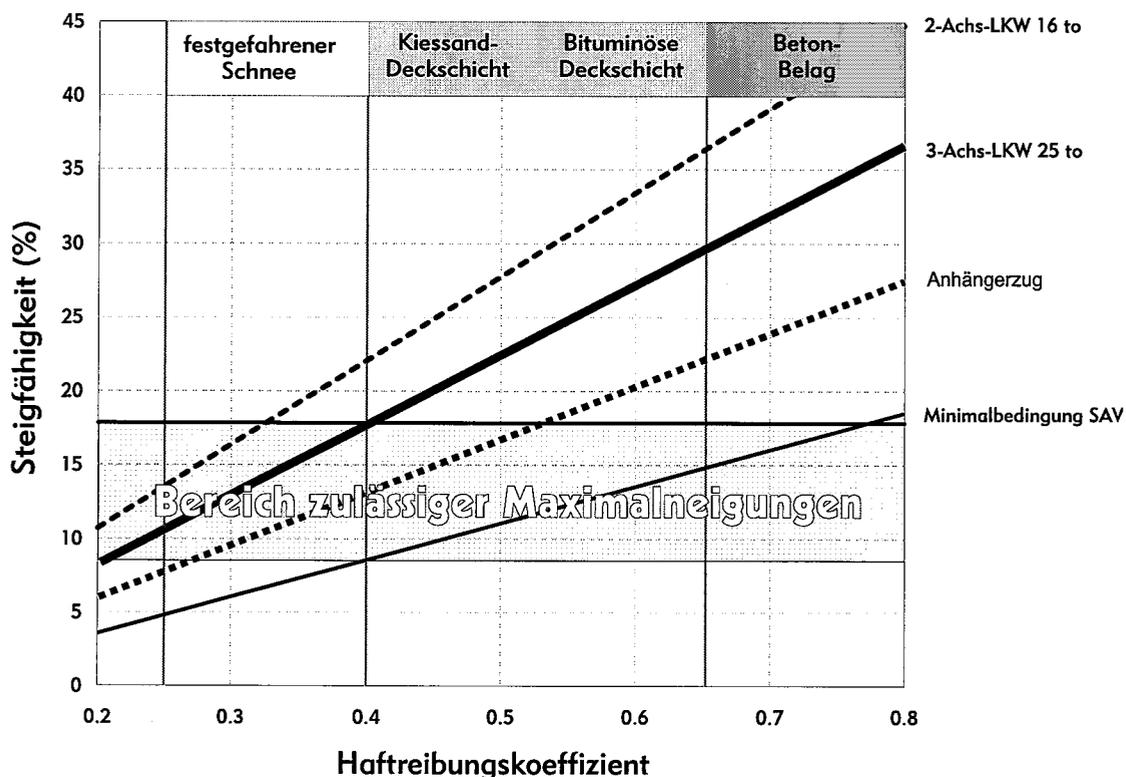


Abb. 9: **Steigfähigkeit beladener Holztransport-Lastwagen.** Mit zunehmendem Haftreibungskoeffizient, nimmt die Grenzsteigung deutlich zu.

Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche, insbesondere des Haftreibungskoeffizienten, auf die Grenzsteigung ist ausserordentlich hoch. Sind Längsneigungen von über 15 % zu befahren, muss eine genügend grosse Haftung vorhanden sein (> 0.60), was nur mit dem Einbau von griffigen Oberflächen erreicht wird. Wie die Untersuchungen von ANDERSON ET AL. (1991) zeigen, kann eine ausreichende Haftung auch erreicht werden, wenn als Tragdeckschicht gebrochener Schotter mit einem hohen Grobkornanteil verwendet wird.

3.2.2 Maximal zulässige Längsneigung von Maschinenwegen

Die massgebenden Kriterien zur Ermittlung der maximal zulässigen Längsneigung von Maschinenwegen sind:

- Bodentragfähigkeit;
- Transportrichtung;
- Ausrüstung der Rückfahrzeuge (Allradfahrzeuge, Niederdruck-Breitreifen).

Da moderne Rückfahrzeuge in der Regel als Allradfahrzeuge ausgebildet sind, können sie grundsätzlich sehr hohe Längsneigungen bewältigen. Bei Windschleppern müssen zusätzlich zum Steigungs- und Rollwiderstand des Fahrzeugs auch die Gleitreibungskraft, sowie die Hangabtriebskraft der Last überwunden werden. LÜNZMANN (1968) hat aufgrund dieser physikalischen Einflussfaktoren Grenzneigungen für den Rückfahrzeugeinsatz ermittelt. Für einen Windschlepper mit aufgesattelter Last berechnet er eine Grenzsteigung von 20 bis 25 %. Ein allradangetriebener Windschlepper, der beim Rücken 55 % der Last aufgesattelt hat, bewältigt nach der Modellbildung von LÜNZMANN (1968) Steigungen bis 26 % (Haftreibungskoeffizient von 0.40 (Erdweg), Rollreibungskoeffizient von 0.04).

Ist die Bodentragfähigkeit kleiner als 3 % CBR (z.B. Flyschböden), so verringert sich die Grenzsteigung beim Bergauftransport auf ca 15 %. Dieser Wert kann mit dem Einsatz von Niederdruck-Breitreifen etwas angehoben werden. Der Bergabtransport ermöglicht grundsätzlich die Bewältigung höherer Längsneigungen. Werte von 40 % (WOLF-DRACK, 1993) und mehr, wie sie auch Herstellerfirmen von Rückfahrzeugen angeben, sind aber aus Sicherheitsüberlegungen nicht realistisch. Der massgebende Grenzzustand ist das Bremsen und nicht das gleichmässige Bergabfahren.

3.3 Querschnittsgestaltung

3.3.1 Fahrbahnbreite von Waldstrassen

Die Fahrbahnbreite von Waldstrassen hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab:

- den maximalen Abmessungen der Fahrzeuge;
- dem Verkehrsaufkommen (Zusammensetzung und Menge des Verkehrs);
- der Entwurfsgeschwindigkeit.

Daraus ergeben sich die technischen Mindestanforderungen an die Breite. Aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens auf Waldstrassen werden nur einspurige Anlagen für den Geschwindigkeitsbereich von 30 - 40 km/h gebaut. Die zulässigen Höchstbreiten der Lastwagen dürfen 2.55 m nicht überschreiten. Um das Kreuzen mit entgegenkommenden Fahrzeugen zu ermöglichen, müssen deshalb Ausweichstellen gebaut werden.

Im weiteren sind bei der Querschnittsgestaltung von Waldstrassen aber auch funktionale, ökonomische und ökologische Kriterien zu berücksichtigen. Die Waldstrassen erfüllen neben ihrer Verkehrs-Funktion weitere wichtige Funktionen als Arbeitsplatz, als Lager- und Umladepplatz, was tendenziell eine Erhöhung der minimalen Fahrbahnbreiten erfordert. Demgegenüber stehen ökologische Kriterien wie haushälterische Bodennutzung, Zerschneidung von Lebensräumen (Trennwirkung) und Zerstückelung von Biotopen, die für eine möglichst schmale, nur den Mindestanforderungen genügende Fahrbahnbreite sprechen.

Die Bestimmung der Fahrbahnbreite kann mit verschiedenen empirischen Bemessungsmodellen erfolgen, die von unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgehen:

- dem Lichtraumprofil;
- dem Sicherheitsstreifen;
- dem Höchstbreitenfaktor oder
- der Fahr- bzw. Entwurfsgeschwindigkeit.

Nachfolgend geht es darum, die unterschiedlichen Bemessungsmodelle einander gegenüberzustellen (Tabelle 4).

Lichtraumprofil

Die Norm der VSS (1983) legt für alle Verkehrsteilnehmer ein Lichtraumprofil fest. Für die Bestimmung der Fahrbahnbreite werden zur Grundabmessung der massgebenden Verkehrsteilnehmer ein Bewegungsspielraum sowie ein Sicherheitszuschlag addiert. Der Bewegungsspielraum ist geschwindigkeitsabhängig und gleicht Fahrungenauigkeiten aus. Der Sicherheitszuschlag gilt als Zuschlag zu den Grundabmessungen.

Gemäss SN 640 201 (VSS, 1992) beträgt der Bewegungsspielraum im Geschwindigkeitsbereich 0 bis 40 km/h 0.0 bis 0.1 m, als Sicherheitszuschlag wird 0.3 m vorgegeben. Daraus ergibt sich eine totale Breite des Sicherheitsstreifens von $s = 0.3$ bis 0.4 m.

Sicherheitsstreifen

Nach PAMPEL (1982) setzt sich die Fahrspur aus der zulässigen Breite der massgebenden Verkehrsteilnehmer und einem beidseitigen Pendelstreifen (Sicherheitsstreifen) zusammen. Dieser Sicherheitsstreifen beschreibt den Bewegungsspielraum, der durch Fahrungenauigkeiten bedingt ist und der von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist. SCHWARZER (1987) beziffert die Grösse des Sicherheitsstreifens für den Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h auf 0.25 m. KUONEN (1983) bemisst die beidseitigen Sicherheitsabstände für Holztransportlastwagen auf Waldstrassen erfahrungsgemäss auf mindestens 0.35 m. Vor allem in Deutschland wird die Fahrbahnbreite mit einem beidseitigen Sicherheitsstreifen von je 0.35 bis 0.50 m bestimmt.

Höchstbreitenfaktor

KUONEN (1983) verweist auf den in der Literatur oftmals angewandten Faktor, mit welchem die minimale Fahrbahnbreite aus der Höchstbreite der zugelassenen Fahrzeuge abgeleitet wird. Der Faktor besitzt die Grösse 1.3 bis 1.5.

Fahr- bzw. Entwurfsgeschwindigkeit

RODRIGUEZ (1986) ermittelt die Fahrbahnbreite von Waldstrassen empirisch über die Fahrgeschwindigkeit. Sie setzt sich zusammen aus der Fahrzeugbreite und einem Faktor für die Fahrgeschwindigkeit.

GAUMITZ (1990) modifizierte diese Formel um die Diskrepanz zwischen den Interessengruppen (Forstwirtschaft und Naturschutz) auszugleichen. Er verminderte den Geschwindigkeitsfaktor und erhielt für den Geschwindigkeitsbereich von 20 bis 40 km/h Fahrbahnbreiten von 3.0 bis 3.2 m.

<i>Bemessungsmodell</i>	<i>massgebende Elemente</i>	<i>Fahrbahnbreite</i>
Lichtraumprofil	Bewegungsspielraum, Sicherheitszuschlag	3.15 bis 3.35 m
Sicherheitsstreifen	beidseitiger Pendelstreifen von 0.35 - 0.50 m	3.25 bis 3.55 m
Höchstbreitenfaktor	Faktor $f = 1.3 - 1.5$ (geschwindigkeitsabhängig)	3.30 3.80 m
Entwurfsgeschwindigkeit	Geschwindigkeitsfaktor $f = 2 \cdot \sqrt{0,01 + 0,005v}$	3.21 bis 3.47 m

Tab. 4: **Fahrbahnbreite von Waldstrassen aufgrund unterschiedlicher Bemessungsmodelle.** Die mit verschiedenen Modellen ermittelten Minimalbreiten liegen alle um den Wert von 3.20 m.

Die Minimalbreite von Waldstrassen lässt sich nicht direkt aus den Vorgaben des Lichtraumprofils ableiten, da es auf die Anforderungen und speziellen Bedingungen von steilen Waldstrassen nicht anwendbar ist. Auf einspurigen Waldstrassen, insbesondere auf steilen Abschnitten, muss der Verkehrssicherheit ein höheres Gewicht beigemessen werden. Wird die Fahrbahnbreite über das Modell des beidseitigen Pendelstreifens bemessen, kann der Verkehrssicherheit genügend Rechnung getragen werden. Daraus ergibt sich eine minimale Fahrbahnbreite von 3.2-3.3 Metern. Dieser Wert entspricht einem Grenzwert, der sich aus den fahrdynamischen Mindestanforderungen ableitet und nicht unterschritten werden darf. Die Minimalfahrbahnbreite deckt sich recht gut mit den errechneten Werten aus der empirischen Formel von RODRIGUEZ (1986) für den Geschwindigkeitsbereich von 20 km/h.

Werden dazu noch funktionale Kriterien (Waldstrasse als Arbeits- und Umladeplatz) mitberücksichtigt, kann eine maximale Fahrbahnbreite von 3.40 Metern auf geraden Teilstrecken vertreten werden. Speziell auf steilen Abschnitten ist es aus Gründen der Verkehrssicherheit sinnvoll, den Sicherheitsstreifen auf 0.50 m auszudehnen, was zu einer maximalen Fahrbahnbreite auf geraden Streckenabschnitten von 3.50 Metern führt.

3.3.2 Breite von Maschinenwegen

Folgende Kriterien beeinflussen die Breite von Maschinenwegen direkt:

- die maximalen Abmessungen der Rückefahrzeuge;
- die Fahrsicherheit und Beweglichkeit der Rückefahrzeuge;
- die Erosionsgefährdung des anstehenden Bodens;
- ökonomische Kriterien;
- ökologische Kriterien.

Die Maximalbreite von Rückefahrzeugen erfordert Maschinenwege, die sicher befahrbar sind. Aus Tabelle 5 geht hervor, dass in der Forstwirtschaft tendenziell immer breitere Rückefahrzeuge eingesetzt werden. Auf schlecht tragfähigen Bodenverhältnissen wird zudem der Einsatz von Breitreifen vorangetrieben, womit sich die maximalen Breitenabmessungen der Rückefahrzeuge nochmals beträchtlich erhöhen.

Rückfahrzeuge	Breitenabmessungen in (mm)				
	<2000	<2200	<2400	<2600	<2800
Forwarder	1	1	2	7	2
Klemmbankschlepper	0	0	2	0	0
Windenschlepper	5	2	4	3	2
Anzahl Fahrzeugtypen	6	3	8	10	4

Tab. 5: **Maximalbreite gängiger Rückfahrzeuge.** Die Fahrzeuge weisen Breiten auf, die sich den zulässigen Maximalbreiten von Lastwagen angleichen (zusammengestellt aufgrund des vorhandenen Dokumentationsmaterials).

Damit die Beweglichkeit der Rückfahrzeuge bei den anfallenden Beladevorgängen im Bestand gewährt ist, muss beidseitig der Fahrzeuge ein Bewegungs- und Sicherheitsspielraum von ca. 0.50 m eingerechnet werden. Somit ergeben sich Minimalbreiten von 3.0 Metern. WOLF-DRACK (1993) weist darauf hin, dass eine Breite von 3.0 Metern zwar für konventionelle landwirtschaftliche Windenschlepper eine genügende Sicherheit und Beweglichkeit gewährleisten kann, dass aber der Einsatz von Forwardern, die mit Hydraulikkränen arbeiten, Maschinenwegbreiten von mindestens 3.5 Metern erfordert, was sich aufgrund der in Tabelle 5 aufgeführten Werte bestätigen lässt. WÜTHRICH (1992) verweist auf den vermehrten Einsatz von Niederdruck-Breitreifen und fordert für einen rationellen Einsatz ebenfalls eine Minimalbreite von 3.5 Metern.

3.3.3 Gestaltung der Fahrbahnoberfläche von Waldstrassen

Die Gestaltung der Fahrbahnoberfläche wird primär durch das Kriterium der Dauerhaftigkeit bestimmt. Dies gilt insbesondere für die geringen Verkehrsfrequenzen, wie sie auf Wald- und Güterstrassen auftreten. Das Schema von HIRT (1977) orientiert sich am Kriterium der Dauerhaftigkeit und berücksichtigt die Faktoren Verkehr, Niederschlag, Längsneigung und Besonnung, um das Erosionsrisiko abzuschätzen. Die Untersuchung von PATERSON (1991) stellt ein Modell zur Verfügung, das den Zerstörungsprozess von Naturstrassen vorhersagen kann. Obwohl PATERSON (1991) seine Untersuchungen auf ein umfangreiches Datenmaterial abstützt, das in verschiedenen Kontinenten gewonnen wurde, ist die direkte Uebertragung auf Wald- und Güterstrassenverhältnisse in der Schweiz doch begrenzt. Das Verkehrsvolumen, auf dem das Datenmaterial aufbaut, liegt zwischen rund 100'000 und 3 Millionen Normachslasten, was wesentlich über den Verkehrsvolumina der Waldstrassen liegt, die wir je nach Funktion der Strasse zwischen etwa 10'000 und 150'000 Normachslasten annehmen. Abbildung 10 zeigt die Sensitivität des Paterson-Modells für den Bereich von 100'000 Normachslasten.

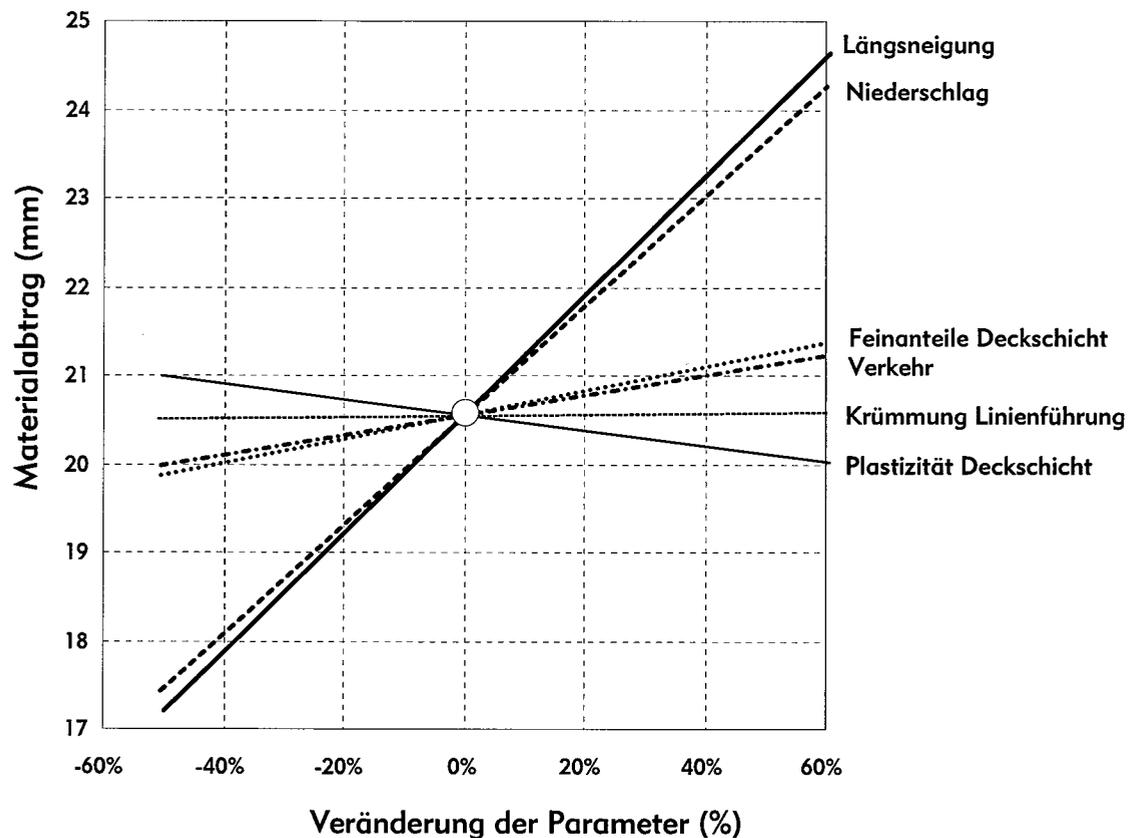


Abb. 10: **Sensitivität des Schadenmodells von PATERSON (1991).** Der Referenzpunkt basiert auf folgenden Modellparametern: Längsneigung 6%, Niederschlag 130 mm pro Monat, Verkehr 20 Fahrzeuge pro Tag, Plastizitätsindex Deckschichtmaterial 10, Feinanteile der Deckschicht 40%.

Die dominierenden Faktoren für die Degradation der Strassenoberfläche sind die Längsneigung und die Niederschlagsverhältnisse. Das tägliche Verkehrsvolumen hat nur noch rund einen Fünftel des Einflusses der beiden erstgenannten Faktoren. Interessant ist auch, dass die Materialeigenschaften Feinkornanteil und Plastizitätsindex eine Art Abriebfestigkeit repräsentieren. Mit zunehmendem Feinanteil nimmt die Abriebfestigkeit ab, während sie mit zunehmendem Plastizitätsindex leicht zunimmt. Patersons Modell zeigt, dass bei sehr geringem Verkehrsvolumen nur noch die Neigung und die Niederschläge massgebend sind, währenddem bei Verkehrsvolumina oberhalb von etwa 500'000 Normachslasten der Verkehr zum massgebenden Kriterium wird.

Aus praktischer Erfahrung ist bekannt, dass die geometrische Gestaltung des Querprofils einen massgebenden Einfluss auf die Zerstörung der Strassenoberfläche hat. Bombierte Strassen beeinflussen die Dauerhaftigkeit günstig, während horizontal ausgebildete Querprofile die Dauerhaftigkeit eher ungünstig beeinflussen. Aufgrund der Daten von LIENERT (1983) lässt sich der Einfluss der Querschnittsgestaltung, der Längsneigung, des Wald/Feld-Effekts und teilweise auch des Niederschlagseffekts quantifizieren (vgl. HEINIMANN 1998).

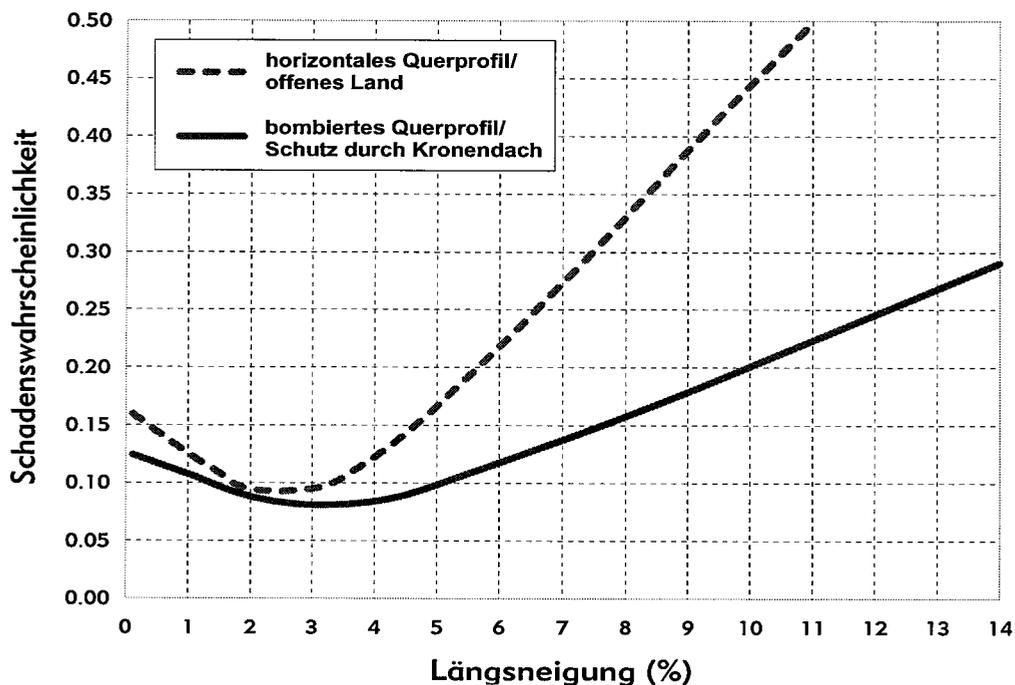


Abb. 11: **Schadenswahrscheinlichkeit von Schlaglöchern und Erosionsrinnen** (HEINIMANN, 1998). Ab einer Längsneigung von 6 % nimmt die Schadenswahrscheinlichkeit von Erosionsrinnen bei tonwassergebundenen Verschleisssschichten extrem zu. Durch eine bombierte Fahrbahnoberfläche kann diese Anfälligkeit erheblich reduziert werden. Schlaglöcher sind nur bei Längsneigungen unter 3 % von Bedeutung.

Abbildung 11 zeigt ein daraus abgeleitetes Modell, das die Verletzlichkeit als Schadenswahrscheinlichkeit quantifiziert. Die untere Kurve gilt für bombierte Querprofile, die durch das Kronendach des Waldes vor Austrocknung und Starkniederschlägen geschützt werden. Die obere Kurve gibt den Zustand für horizontal ausgestaltete Querprofile und Verlauf der Strasse im offenen Feld wieder. Das linksseitige Ansteigen der Schadenswahrscheinlichkeit unterhalb einer Längsneigung von 3 % ist auf die Schlaglochbildung zurückzuführen, während das Ansteigen der Schadenswahrscheinlichkeit zwischen 3 und 14 % auf zunehmende Erosionsrinnen zurückzuführen ist. Aufgrund der Ueberlegungen von PATERSON (1991) und HEINIMANN (1998) sind für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit drei wesentliche Faktorenbereiche zu berücksichtigen:

- Die geometrischen Eigenschaften des Strassenkörpers (Längsneigung, Gestaltung des Querprofils);
- die Umgebungsbedingungen (Schutz durch das Kronendach, Starkniederschläge). Die Starkniederschlagsempfindlichkeit eines Gebietes kann mit Hilfe der Untersuchungen von GEIGER ET AL. (1991) abgeschätzt werden. Dabei sind die 2.33jährigen Starkniederschlagswerte zu berücksichtigen;
- Die Materialeigenschaften der Deckschicht, welche die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion bestimmen.

Es wird in Zukunft abzuklären sein, ob die Starkniederschlagswerte von GEIGER ET AL. (1991) in ein Verletzlichkeitsmodell, wie es in Abbildung 11 vorgeschlagen wird, integriert werden können.

4 Anpassung der Richtwerte an den Stand der Technik

4.1 Zielsetzungen

Aufgrund der Ueberlegungen in den vorangegangenen Kapiteln werden nachfolgend Richtwerte für die geometrische Gestaltung forstlicher Strassen und Wege hergeleitet. Die Richtwerte sollen

- den aktuellen Rahmenbedingungen angepasst sein (Art und Ausrüstung der Fahrzeuge);
- den gesetzlich vorgegebenen Rahmen beachten;
- mithelfen, die Lebenszykluskosten von forstlichen Erschliessungsanlagen zu minimieren und landschaftsschonende Linienführungen ermöglichen;
- für jeden Einzelfall aufgrund von Kriterien neu beurteilt werden können.

4.2 Längsneigungen und Fahrbahnbreiten

4.2.1 Richtwerte für Waldstrassen

Der Grundsatz der möglichst moderaten Längsneigungen soll weiterhin gelten. Optimale Längsneigungen liegen im Bereich unter 10 %. Neigungen unter 3 % sollten aus Gründen der Strassenerhaltung (vermehrte Schlaglochbildung, siehe Abbildung 11) vermieden werden. Der Richtwert der VSS (SN Norm 640110) von 12 % soll weiterhin als Richtgrösse dienen.

Der Grenzwert von 15%, wie er für das Anfahrvermögen (Art. 54 Abs. 3 VTS) aus den gesetzlichen Rahmenbedingungen hervorgeht, soll als Grenzwert für die Maximalsteigung gelten. Ausnahmsweise sind auch Steigungen von 18% zuzulassen, wie sie als Grenze für die Funktionsfähigkeit von Feststellbremsen vorgeschrieben sind (Anhang 7 VTS, Abs 213, 243).

Abbildung 12 zeigt ein Schema zur Bestimmung der maximalen Längsneigung, das die zulässigen Maximalwerte in Abhängigkeit der Verkehrsfrequenz und der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche abschätzen lässt. Die Benutzungshäufigkeit von Wald- und Güterstrassen liegt im Bereich „mehrmals täglich“ bis „mehrmals jährlich“. Daraus ergibt sich ein flexibler Grenzwertbereich, der am unteren Ende bei 8% an das übergeordnete Strassennetz anschliesst und am oberen Ende bei 18% durch den Funktionsfähigkeits-Grenzwert für Feststellbremsen beendet wird. Längsneigungen von 18 % sollten allerdings nur in ganz wenigen und gut begründeten Ausnahmefällen angestrebt werden. Solche Strassen sind für den allgemeinen Verkehr zu sperren und sollten einen Belag mit hoher Rauigkeit aufweisen.

Haftung Fahrzeug-Strassenoberfläche	hoch (ausserhalb Frostzeit, griffige Oberfläche)	12	15	18
	mittel (ausserhalb Frostzeit)	10	12	15
	gering (ganzjährig befahren)	8	10	12
		mehrmals täglich	mehrmals wöchentlich	mehrmals jährlich
		Benutzungshäufigkeit		

Abb. 12: **Längsneigungs-Grenzwert in Abhängigkeit der Benutzungshäufigkeit und der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche.**

Die Ueberprüfung der Fahrbahnbreiten von Waldstrassen mit verschiedenen Modellansätzen hat gezeigt, dass die geltenden Richtwerte geringfügig an die grösseren Fahrzeugbreiten angepasst werden müssen. Die minimale **Fahrbahnbreite von 3.2-3.3 m** auf geraden Strassenabschnitten ergibt sich aus den fahrdynamischen Mindestanforderungen und darf aus Sicherheitsgründen nicht unterschritten werden. Auf steilen Strassen kann eine maximale Breite von 3.40 (3.50) m vertreten werden.

4.2.2 Richtwerte für Maschinenwege

Erschliessungsanlage	Maximal zulässige Längsneigung (%)	minimale Fahrbahnbreite (m)
Maschinenweg		
- Rücken bergauf	bis 15 % 1)	3.00 bis 3.50 m²⁾
- Rücken nur bergab	bis 25 %	3.00 bis 3.50 m

- 1) Auf Böden mit einer Tragfähigkeit von weniger als 3% CBR (z.B. Flysch) sollte dieser Wert in keinem Fall überschritten werden.
- 2) Werden für den Transportprozess hauptsächlich Forwarder eingesetzt oder Niederdruck-Breitreifen verwendet, darf eine minimale Maschinenwegbreite von 3.50 m nicht unterschritten werden, damit eine genügende Sicherheit und Beweglichkeit gewährleistet werden kann.

4.3 Gestaltung der Fahrbahnoberfläche

Die Wahl der Deckschicht richtet sich primär nach dem Kriterium der Dauerhaftigkeit. Die Untersuchungen von PATERSON (1991) und HEINIMANN (1998) ermöglichen es, das HIRT-Diagramm durch ein Nomogramm abzulösen, das die Nichtlinearität gewisser Effekte berücksichtigt (Abbildung 13).

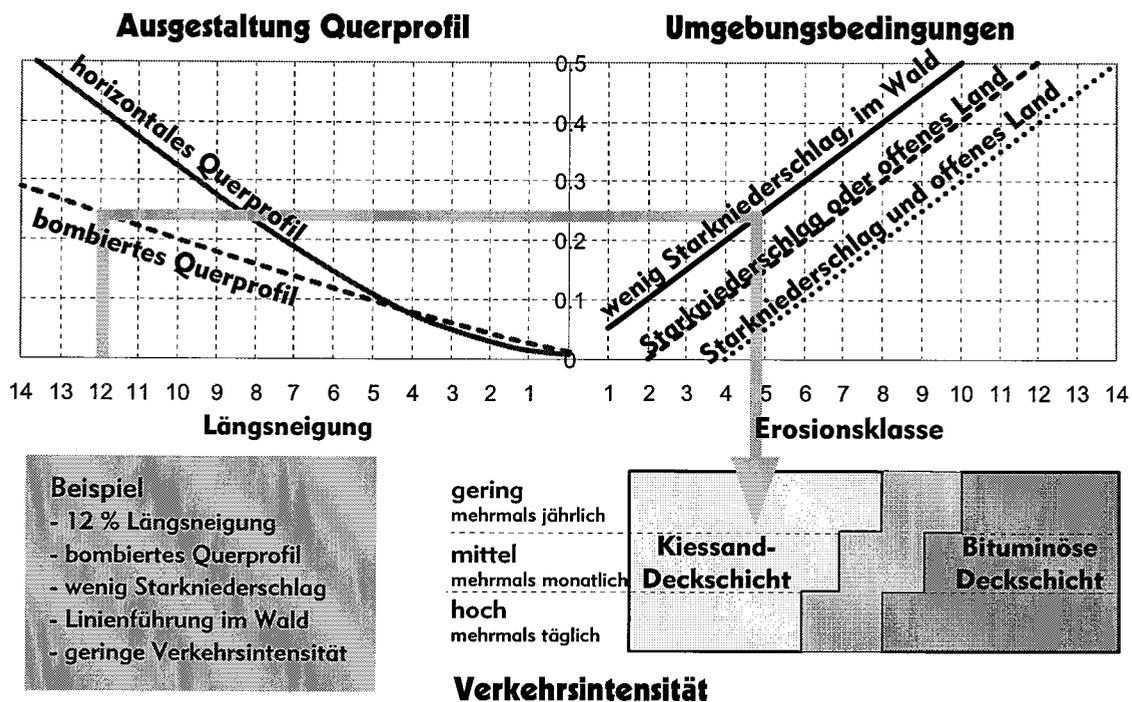


Abb. 13: **Bewertungsdiagramm für die Wahl der Deckschicht bei Wald- und Güterstrassen.** Eingangsgrößen sind (1) die Längsneigung, (2) die Gestaltung des Querprofils, (3) die Umweltbedingungen und (4) die zu erwartende Verkehrsfrequenz. Die Benützung des Nomogramms beginnt links mit der Wahl der Längsneigung und geht im Uhrzeigersinn weiter, bis zur Verkehrsfrequenz.

Die Beurteilung beginnt mit den geometrischen Eigenschaften des Strassenkörpers. Mit einer bestimmten Längsneigung wird als nächstes Kriterium die Ausgestaltung des Querprofils angenommen, womit die Schadensempfindlichkeit abgeschätzt werden kann (Ordinatenwerte zwischen 0 und 0.5). Die Schadensempfindlichkeit wird mit den Umgebungsbedingungen Kronenschluss und Starkniederschläge korrigiert und mit den Verkehrsfrequenzen, wie sie auf den Klassen Erschliessungsstrasse, Sammelstrasse und Verbindungsstrasse zu erwarten sind, verglichen. Das Nomogramm zeigt, dass bei guter Bombierung und kleinem Verkehr auch bei Längsneigungen von über 10 % Kies-Sand-Deckschichten angebracht sind. Es ist zu vermuten, dass die Abriebfestigkeit des Deckschichtmaterials durch die Faktoren Feinanteile und Plastizitätsindex im Sinne des Modells von PATERSON (1991) zusätzlich beeinflusst wird. Konkrete Hinweise dazu fehlen allerdings.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Bericht ging von sechs Fragen aus, die zu beantworten waren:

1. Welche praktischen Empfehlungen existieren in den umliegenden Ländern mit vergleichbaren Rahmenbedingungen und aufgrund welcher Kriterien sind sie entstanden?
2. Welche rechtlichen und technischen Kriterien sind für die maximal zulässigen Längsneigungen bei Waldstrassen und Maschinenwegen massgebend?
3. Lassen sich die Längsneigungen aufgrund physikalischer Faktoren mit einer exakten Methode bestimmen?
4. Welchen Einfluss haben Kriterien der Gebrauchstauglichkeit wie Dauerhaftigkeit, Fahrsicherheit oder Fahrkomfort?
5. Welche Kriterien sind für die Bestimmung der Fahrbahnbreiten von Waldstrassen und Maschinenwegen massgebend?
6. Welche Faktoren bestimmen die Gestaltung der Fahrbahnoberfläche? Kann ihr Einfluss quantifiziert werden?

Der anerkannte Grenzwert von 12 % für die Längsneigung von Waldstrassen ist aus Erfahrung entstanden, dies in einer Zeit, die durch gemischten Verkehr von Pferdefuhrwerken und Lastwagen charakterisiert war. Der starre Grenzwert von 12 % soll durch eine flexible Lösung abgelöst werden, die den Grenzwert für jeden Einzelfall in einem Rahmen zwischen 8 % und 18 % festlegt. Dabei sind zwei Kriterien zu beurteilen: (1) die Befahrungshäufigkeit und (2) die Griffbarkeit des Strassenbelags. Hohe Befahrungshäufigkeiten und geringe Griffbarkeiten der Fahrbahnoberfläche (z.B. Befahren im Winter) führen zu einem Grenzwert von 8 %, während bei geringem Verkehr und hoher Griffbarkeit ein Grenzwert von 18 % ausnahmsweise zulässig ist.

Die Längsneigung hat einen grossen Einfluss auf die Erosionsempfindlichkeit der Fahrbahnoberfläche. Das akzeptierte Bewertungsmodell von HIRT (1977) für die Wahl der Deckschicht vermag die unterschiedlichen Einflüsse der einzelnen Faktoren nicht in einer Form wiederzugeben, wie sie aufgrund von quantitativen Untersuchungen der Schadensentwicklung an Naturstrassen erforderlich wäre. Ein neues Bewertungs-Modell berücksichtigt die unterschiedlichen Gewichte der einzelnen Faktoren und quantifiziert den Einfluss bombierter und horizontaler Fahrbahngestaltung. Gut bombierte Naturstrassen sind bei geringem Verkehr auch bei Längsneigungen von über 10% vertretbar. Eine gute Bombierung reduziert die Erosionsempfindlichkeit von Kiessand-Deckschichten mehr als sie durch zunehmende Niederschläge erhöht wird.

Die minimale Strassenbreite wird massgeblich durch die zulässigen Fahrzeugbreiten bestimmt. Bis 1995 galten in der Schweiz Höchstbreiten von Lastwagen von 2.30 m. Mit der Angleichung an die EU-Richtlinien wurde die zulässige Breite im Jahre 1995 auf 2.50 m festgelegt, und im Frühjahr 1998 wurde der Grenzwert auf 2.55 m angepasst. Die Minimalbreiten für lastwagenfahrbare Wege wurden in den bisherigen schweizerischen Richtlinien mit 3.00 m angegeben. Durch die Erhöhung der zulässigen Fahrzeugbreiten ist eine Anpassung der minimalen Breite von Waldstrassen auf 3.2-3.3 m unerlässlich.

Für die Breite von Maschinenwegen lassen sich vergleichbare Entwicklungen feststellen. Die Verbesserung der Rückefahrzeuge bezweckt unter anderem, die Schädigung des zu befahrenden Bodens zu verkleinern. Die Ablösung des Windschleppers durch den Forwarder und die Verwendung von Niederdruck-Breitreifen führten in den letzten Jahren zu einer Vergrößerung der Fahrzeugbreite. Eine minimale Maschinenwegbreite von 3.00 m bis 3.50 m ist für ein sicheres Befahren und für das Arbeiten mit Kränen unbedingt erforderlich.

Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass einige Fragen weiterhin zu wenig geklärt sind. Um die zulässige Längsneigung analytisch zu bestimmen, sind vertiefte Kenntnisse der massgebenden Grenzzustände („Anfahren bergauf“, „Bremsen bergab“) nötig. Zusätzliche Untersuchungen zu den Haft- und Rollreibungskoeffizienten sowie zu den Beschleunigungs- respektive Verzögerungswerten könnten die Modellierung verfeinern. Die Verletzlichkeit und die Schadensentwicklung von Kiessand-Fahrbahndecken sind erst ansatzweise bekannt. Der Einfluss unterschiedlicher Starkniederschlagsintensitäten und verschiedener Erosionsfestigkeiten der Deckschichtmateriale auf die Erosionsempfindlichkeit erlaubten es, die vorhandenen Bewertungsmodelle weiter zu verbessern.

Literaturverzeichnis

- Amstutz, U. (1981): Die Holztransporte in der Schweiz. Untersuchungsbericht der Schweizerischen Interessengemeinschaft Industrieholz. Ber. EAFV 222. Birmensdorf
- Anderson, P. and Sessions, J. (1991): Factors affecting maximum gradeability of a log truck around a curve. Transportation Research Record 1291: 15-19. Washington D.C.
- Anderson, P.T.; Pyles, M.R. and Sessions, J. (1987): The operation of logging trucks on steep, low-volume roads. Transportation research record 1106: 104-111. Washington D.C.
- Arbeitsgemeinschaft CULTEERRA (1993): Flur- und Wanderwege heute: asphaltiert, betoniert, befestigt. Schaan FL
- Bayerische Forstverwaltung (1982): Richtlinien für die Erschliessung des Staatswaldes in Bayern vom 5. März 1982 (RES). Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München
- Baldini, S. (1988): Viabilità forestale: Forstliche Erschliessung. IV convegno nazionale di genio rurale, Porto Conte-Alghero 4-6 Maggio 1988. Rivista di ingegneria agraria, Quad 10/2: 542-547. Florenz
- Bews, D. (1991): In: Papers presented at the Fifth International Conference on Low-Volume Roads, Raleigh, North Carolina. Transportation Research Board. Washington DC
- Birrer, H.J.; Frieden, P.(1995): Forst- und Güterstrassen, Asphalt oder Kies? Schriftenreihe Umwelt Nr. 247. Dokumentationsdienst, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern
- Blumer, M. (1991): Strassenbau und Strassenerhaltung. Baufachverlag AG. Dietikon
- Bollinger, F.; Müller, U. (1990): Ländlicher Wegebau: alternative Möglichkeiten zur Befestigung der Oberfläche in steilen Lagen. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 6/1990: 317-321.
- Burlet, E. (1980): Dimensionierung und Verstärkung von Strassen mit geringem Verkehr und flexiblem Oberbau. Diss. ETH-Nr. 6711. Zürich
- Butora, A. (1978): Stammholztransport mit Lastwagen. Ber. EAFV 192. Birmensdorf
- Cain, C. (1981): Maximum grades for log trucks on forest roads. Eng. Field Notes. Vol. 13, No. 6. USDA Forest Service, Eng. Techn. Inf. Syst. Washington D.C.
- CEMAGREF (1981): Caractéristiques des voies et réseaux de desserte. Note technique Nr. 46. Ministère de l'agriculture
- Dengler, L. (1863): Weg-, Brücken- und Wasserbaukunde für Land- und Forstwirthe, 1. Aufl. Karlsruhe
- Dietz, P., Knigge, W. und Löffler, H. (1984): Walderschliessung. Ein Lehrbuch für Studium und Praxis. Parey-Verlag. Hamburg und Berlin
- Dietz, P. und Textor, H. (1978): Eignungsvergleich verschiedener Deckenbauweisen für Waldfahrwege. Forstarchiv 49/1978: 193-198. Hannover
- Dotzel, K. (1898): Handbuch des forstlichen Wege- und Eisenbahnbaus. Berlin

- EMA (1989): Interne Grundsätze für Wegebreiten, maximales Längsgefälle und Wahl der Deckschicht auf subv. Güterwegen. Eidg. Meliorationsamt. Bern
- Erlacher, G. (1991): Trassierung und Projektierung mit der Strassenachse. Oester. Forstzeitung 4/1991: 7-9. Wien
- Fankhauser, F. (1866): Leitfaden für die Bannwartenkurse im Kanton Bern. 1. Auflage. J. Heuberger. Bern
- Fankhauser, F. (1905): Leitfaden für Schweizerische Unterförster- und Bannwartenkurse. 4. Auflage. Fr. Semminger. Bern
- Fankhauser, F. (1938): Leitfaden für Schweizerische Unterförster- und Bannwarten-Kurse. 7. Auflage. Selbstverlag. Bern
- Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Strassenwesen (1987): Ländliche Strassen und Wege. RVS 3.8. Wien
- Fronsdal, J. (1980): Assembly roads in steep terrain. Tidsskr-Skogbruk. Oslo, Norske skogselskap. 1980. V. 88 (1) p. 93-97.
- Gambard, J.M. (1987): Design of low-traffic roads in France. In: Minor rural roads. Planning, design and evaluation; In: Proceedings of a european Workshop: Minor rural roads. 129-134. Wageningen
- Gaumitz, B. (1991): Beziehungen zwischen Längsneigung, Schnittwinkel und Geländetyp bei der Walderschliessung. Forstarchiv, 62/3: 121-122. Alfeld
- Gaumitz, B. (1990): Festlegung von Fahrbahnbreiten forstlicher Abfuhrwege. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 39/6: 95-97. Dresden
- Gayer, K. (1863) Die Forstbenutzung. Carl Krebs. Aschaffenburg
- Geiger, H.; Zeller, J.; Rötthlisberger, G. (1991): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. WSL Birmensdorf
- Glennon J.C. (1979): Design and traffic control guidelines for low-volume rural roads. Transportation research board 214. Washington D.C.
- Gorton, F. (1985): Oesterreichischer Weg der landschaftsangepassten Trassierung von Forststrassen. Internat. Holzmarkt 12/76: 1-6. Wien
- Hafner, F. (1971): Forstlicher Strassen- und Wegebau. Agrarverlag. Wien
- Hafner, F. (1957): Das deutschsprachige Schrifttum über den Waldwegebau im Zusammenhang mit der geschichtlichen Entwicklung der Forstaufschliessung im dt. Sprachgebiet. Der Forst- und Holzwirt 12/1957: 267-270. Hannover
- Heinimann, H. R. (1998): Aggregate-surfaced forest roads – analysis of vulnerability due to surface erosion. In: Proceedings of the IUFRO/FAO Seminar on „Forest operations in Himalayan Forests with special consideration of ergonomic and socio-economic problems (Heinimann, H. R.; Sessions, J.; eds.). In press
- Henne, A. (1926) Waldwegbau. Sonderabdruck aus der Festschrift zum fünfzigjährigen bestehen der eidg. Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei. Lausanne
- Hess, E. (1945) Generelle Wegnetze. Schweiz. Z. Forstwesen 5,6/1945: 110-122. Zürich
- Hinterstoisser, H. (1990): Naturschutz fordert ökologische Mindeststandards für Forststrassen; Forststrassen als Störfaktor im landschaftlichen Gefüge. Oesterr. Forstzeitung 6/1990: 53-56. Wien

- Hirt, R. (1977): Bau- und Unterhaltskosten von Wald- und Güterstrassen. Schweiz. Z. Forstwesen 128/4: 199-217. Zürich
- Hirt, R. (1986): Belagswahl bei Wald- und Güterstrassen. Bündner Wald 7/86: 16-21. Chur
- Hirt, R. (1992): Erschliessung und Holzernte im Schweizer Berggebiet. In: Forsttechniker-Treffen 1992. 94 - 107. Birmensdorf
- Holzwieser, O. (1990): Forststrassen - ein notwendiges Element der Waldbewirtschaftung. Oesterr. Forstzeitung, 6/1990: 57-60. Wien
- Jackson, R.K. and Sessions, J. (1987): Logging truck speed on curves and favorable grades of single-lane roads. Transportation Research Record 1106: 112-118. Washington D.C.
- Kollmer, K. (1988): Planning, design and realisation of minor rural road networks in German land consolidation projects. In: Proceedings of a European workshop on minor rural roads. 25 - 37. Wageningen
- Kuonen, V. (1983): Wald- und Güterstrassen. Planung - Projektierung - Bau. Eigenverlag. Pfaffhausen
- Kuonen, V. und Litzka, J. (1987): Ländliche Strassen. Planung - Bau - Erhaltung. Reihe Verkehrswesen 14. Wien
- Kuratorium für Wasser und Kulturbauwesen e.V. (KWK) (1976): RLW 1975. Richtlinien für den ländlichen Wegebau. Parey-Verlag. Hamburg und Berlin.
- Lienert, S. (1983): Zustand, Unterhalt und Ausbau von Wald- und Güterstrassen. Diss. ETH Nr. 7399. Zürich
- Lienert, S. (1986): Strassenunterhalt - Wahl der Deckschicht, Organisation des Strassenunterhalts, Strassenbenutzung - Fahrverbot. Bündner Wald 7 / 86: 50-56. Chur
- Lünzmann, K. (1968): Rechnerische Grundlagen, physikalische Einflussfaktoren und daraus abgeleitete Grenzen des Holztransportes. Forstwissenschaft. Centralblatt 1968: 100-125. Hamburg und Berlin
- Mc Nally, J.A. (1975): Trucks and Trailers and their Application to Logging Operations. A Reference Manual. Department of Forest Engineering, Univ. of New Brunswick Canada. Fredericton
- Moser, W. (1992): Die Feinerschliessung ein Luxus? Oesterr. Forstzeitung 7/1992: 40-42. Wien
- Oppermann, J. (1991): Wegeneu- und Ausbauten in den alten Bundesländern - Konzeption und Organisation. AFZ 26/46: 1350-1352. München
- Ou, Fong L. (1986): Road Standards and traffic Performance. Journal of forestry 5/84: 47-49. Washington D.C.
- Pampel, W.; Haschke, P.; Gaumitz, B. (1982): Holztransport. 303 S. Berlin
- Paterson, W.D.O. (1991): Deterioration and Maintenance of Unpaved Roads: Models of Roughness and Material Loss. Transportation Research Record 1291: 143-156. Washington D.C.
- Pestal, E. (1982): Forstaufschliessung morgen - Optimierung und Alternativen. AFZ 1/93: 8-11. Wien
- Pfeil, W. (1831) Forstbenutzung und Forsttechnologie. J. W. Boike. Berlin

- Porta, P. (1983): Anlage und Dimensionierung von Güterwegnetzen in traktorbefahrbarcm Gelände unter spezieller Berücksichtigung der schweiz. Verhältnisse. Diss ETH Nr. 7398. Zürich
- Pozzati, A. und Cercato, M. (1984): Note pratiche sulla progettazione delle strade forestali (la parte). Italia forestale e montana 5/39: 263-274. Florenz
- RES (1982): Richtlinien für die Erschliessung des Staatswaldes in Bayern (RES). Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München.
- RLW (1975): Richtlinien für den ländlichen Wegebau (RLW 1975). Herausgeber: Kuratorium für Wasser und Kulturwesen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft. Heft 103. Kommissionsverlag Paul Parey. Hamburg und Berlin
- Rodriguez (1986), nach Notario A: Untersuchungen zur generellen Erschliessungsplanung in den Wäldern der Republik Kuba unter Nutzung von Verfahren der Fernerkundung. Diss. Techn. Universität Dresden 1988, 191 S.
- Rowan, A.A. (1976): Forest Road Planning. Forestry commission booklet 43. London
- RVS (1987): Ländliche Strassen und Wege (RVS 3.8, Stand September 1992). Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Strassenwesen. Wien
- SAFS (1989): Detailprojektierung: Grundlagen. Merkblätter über den Bau und Unterhalt von Wald- und Güterstrassen 111. Schweiz. Arbeitsgemeinschaft. f. forstl. Strassenbau. Zürich
- Scheppler, K. (1863): Der Waldwegebau und das Nivelliren (1. Aufl.). Aschaffenburg
- Scheidegger, F. (1984): Forstwege in Beton. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtech. 1/84: 8-12. Zürich
- Schlaghamersky, A. (1987): Feinerschliessung von Waldbeständen. Rat. Kuratorium f. Landwirtschaft / 6.1.3. 111 - 212. Kiel
- Schönauer, H. (1983): Forst- und Güterwege – Grundlage der Bewirtschaftung des ländlichen Raumes. AFZ 94/10: 257-259. München
- Schuberg, K. (1875): Der Waldwegebau, Band 2. Karlsruhe
- Schwab, P. (1986): Holzernte im Winter; Holzlieferung im Gebirgswald; Landschaftsschonender Forststrassenbau: in alpine Umweltprobleme. Beiträge zur Umweltgestaltung XX-XXII: 13-62. Berlin
- Schwarzer, W. (1987): Geschwindigkeit auf Stadtstrassen und ihr Einfluss auf die Fahrspurbreite. DIE STRASSE 1987/3: 70-74.
- Schweiz. Eidgenossenschaft (1992): Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG) vom 4. Oktober 1991 (SR 921.0). Bern
- Schweiz. Eidgenossenschaft (1992): Strassenverkehrsgesetz (SVG) vom 19. Dezember 1958 (Stand 1.1.92) (SR 741.01). Bern
- Schweiz. Eidgenossenschaft (1991): Verkehrsregelnverordnung (VRV) vom 13. November 1962 (Stand 1.7.91) (SR 741.11). Bern
- Schweiz. Eidgenossenschaft (1992): Verordnung über Bau und Ausrüstung der Strassenfahrzeuge (BAV) vom 27. August 1969 (Stand 1.7.92) (SR 741.41). Bern
- Schweiz. Eidgenossenschaft (1995): Verordnung über technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS) vom 19. Juni 1995 (SR 741.41). Bern

- Sedlak, O. (1983): General Principles of planning forest road nets in: Logging and transport in steep terrain. FAO forestry paper 14 Rev. 1 / 1985: 17-36. Rom
- Sessions, J.; Stewart, R.; Anderson, P. and Tuor, B. (1986): Calculating the maximum grade a log truck can climb. Western Journal of applied Forestry; 1(2)/1986: 43-55.
- Skaar, R. (1988): Truck Transportation Systems and Forest Road Standards. Medd.Nor.inst.skogforsk. 41.28: 383-394. Oslo
- Stoetzer, H. (1913) Waldwegebaukunde. 5. Auflage. Frankfurt a. Main
- Tognini, F. (1989): Konzept der "langen Strasse" für den schweizerischen Alpenraum. Schweiz. Z. Forstwesen, 140/1: 57-71. Zürich
- Trzesniowski, A. (1990): Walderschliessung im Gebirge Oesterreichs. Forstarchiv 61/1: 22-25. Wien
- Trzesniowski, A. (1992): Perspektiven der Forstarbeit im Gebirge Oesterreichs. In Tagungsbericht zum 19. Forsttechnikertreffen. WSL. Birmensdorf
- UN Food and Agriculture Organisation (FAO) (1977): Planning forest roads and harvesting systems. FAO forestry paper 2/1977. Rom
- UN Food and Agriculture Organisation (FAO) (1989): Watershed management field manual. Road design and construction in sensitive watersheds. FAO conservation guide 13/5. Rom
- VSS (1983): Linienführung: Elemente der vertikalen Linienführung. Schweizer Norm SN 640110. Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute. Zürich
- VSS (1992): Geometrisches Normalprofil: Grundabmessungen und Lichtraumprofil der Verkehrsteilnehmer. Norm SN 640201. Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute. Zürich
- Walbridge, T.A. jr (1986): All about forest Roads. American forests 3/92: 40-43, 65-66. Washington D.C.
- Weber, R. (1977): Zur Anlage eines Güterwegnetzes. Veröffentlichung Institut f. Kulturtechnik 65, ETH Zürich. Zürich
- Weiger, F. (1984): Entwicklung und Zielsetzung der Walderschliessung in Baden-Württemberg. AFZ 42/1984: 1042-1044. München
- Wenger, K. F. (1984): Forestry Handbook. Forest Road Engineering. 1041-1087. Wiley. New York
- Wolf-Drack, F. (1993) Feinerschliessung in schlepperbefahrbarem Gelände. Oester. Forstzeitung 7/1993: 18-19. Wien
- Wüthrich, W. (1992): Die Feinerschliessung von Waldbeständen - Planung, Anlage und Benützung. Ber. EAFV 332. Birmensdorf.

Stichwortverzeichnis

- Abriebfestigkeit 30, 34
 Adhäsionsgewicht 20, 24
 Alpen 6
 Alpensüdseite 6
 Anfahren beim Bergauftransport 22
 Anfahrvermögen 20, 32
 Anhängerzüge 21
 Anpassung 6, 20, 32, 36
 Antriebsachse 20
 Asphalt 23, 24
 Aufarbeitungsplätze 6
 Ausbaugeschwindigkeit 8, 9
 Ausbaustandard 18
 Ausführung 5, 6
 Ausrundung 9
 Austrocknung 31
 Ausweichstellen 15, 26
 Bankette 9, 15
 Baukosten 6, 21
 Befahrbarkeit 20
 Befahrungshäufigkeit 35
 Bemessung 6, 16, 17
 Bemessungsmodell 27, 28
 Benutzungshäufigkeit 32, 33
 Bergabfahren 22, 26
 Bergabrückung 15
 Bergabtransport 12, 14, 22, 26
 Bergauffahren 22
 Bergaufrückung 15
 Bergauftransport 14, 22, 26
 Bergtransport 11
 Beschleunigung 22, 23
 Beschleunigungskraft 22
 Beschleunigungswerte 36
 Besonnung 18, 29
 Betonbeläge 24
 Betriebsgewicht 20
 Beweglichkeit 17, 19, 28, 29, 33
 Bewegungsspielraum 27, 28, 29
 Bewertungsdiagramm 34
 Bewertungsmodell 35, 36
 Bewertungsschema 18, 19
 Bewirtschaftung 8
 Bewirtschaftungsanforderung 10
 Bewirtschaftungstechnik 12
 Bewirtschaftungsweg 14
 Biotope 26
 Bodennutzung 16, 26
 Bodentragfähigkeit 25, 26, 33
 Bodenverhältnisse 15, 28
 Bombierte Strassen 30
 Bombierung 34, 35
 Böschung 9, 15
 Breite 5, 15, 16, 17, 19, 26, 27, 28, 29, 33, 36
 Breitenabmessungen 16, 28, 29
 Breitreifen 28
 Bremsen beim Bergabtransport 22
 Bremsen mit Vollast 22
 Bremsverzögerung 20
 Dauerhaftigkeit 7, 20, 21, 29, 30, 31, 34, 35
 Deckschicht 18, 30, 31, 34, 35
 Deckschichtmaterial 30, 34, 36
 Deutschland 10, 14, 17, 27
 Eidgenössisches Meliorationsamt 9
 Einflussfaktoren 5, 15, 26
 Einflusskriterien 5
 Eisglätte 24
 Empfehlungen 5, 6, 35
 Entscheidungshilfe 5
 Entwässerungsanlagen 12
 Entwurfsgeschwindigkeit 26, 27, 28
 Erhaltungskosten 8
 Erosion 18, 31
 Erosionsanfälligkeit 5
 Erosionsempfindlichkeit 35, 36
 Erosionsfestigkeit 36
 Erosionsgefährdung 28
 Erosionsklasse 18
 Erosionsrinnen 18, 31
 Erosionsrisiko 18, 29
 Erosionsschäden 9, 12
 Erschliessung 6
 Erschliessungsanlagen 5, 6, 8, 32
 Erschliessungsdichte 6
 Erschliessungsfunktion 6
 Erschliessungsgrad 6
 Erschliessungsplanung 11
 Erschliessungsstrasse 34
 Erschliessungswesen 8
 Europäische Union 6, 16, 19
 Fahrbahn 9, 15, 24, 26
 Fahrbahnbreite 7, 15, 16, 17, 26, 27, 28, 32, 33, 35
 Fahrbahnoberfläche 5, 6, 7, 15, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 29, 31, 32, 33, 34, 35
 Fahrgeschwindigkeit 27
 Fahrkomfort 7, 21, 35
 Fahrsicherheit 7, 17, 28, 35
 Fahrspur 16, 27
 Fahrungenauigkeiten 27
 Fahrwege 11
 Fahrzeugabmessungen 19, 20, 26
 Fahrzeugbreite 16, 27, 36
 Fahrzeuge 5, 6, 9, 16, 17, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 32
 Fahrzeuggeometrie 22
 Fahrzeugkombinationen 20
 Fahrzeugkonfiguration 24
 Feinanteil 30, 34
 Feinkornanteil 30
 Feststellbremsen 20, 32
 Flächenerschliessungswirkung 12
 Flächenverlust 9
 Forschungsbedarf 5
 forstliche Strassen und Wege 5, 32
 forstlicher Strassenbau 18
 Forstwirtschaft 27, 28
 Forwarder 17, 29, 33, 36
 Frankreich 10, 14, 17
 Funktionsfähigkeit 21, 32
 Gebrauchstauglichkeit 7, 21
 Gefälle 11, 20
 geltende Bestimmungen 6
 geltende Regelung 5, 8, 15
 Geometrie von Waldstrassen 6
 geometrische Elemente 5, 8, 20
 geometrische Gestalt 6
 Geraden 9
 Gernzsteigung 22
 Gesamtgewicht 23
 Geschwindigkeit 16
 Geschwindigkeitsfaktor 27, 28
 Gewicht 23
 Gewichtsverteilung 22
 Gleitreibungskraft 26
 Gradiente 8
 Grenzgefälle 12, 24
 Grenzneigungen 11, 12, 26
 Grenzsteigung 23, 24, 25, 26
 Grenzwert 15, 33
 Grenzwertbereich 32
 Grenzwerte 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 24, 28, 32, 35, 36
 Grenzzustand 22, 23, 26, 36
 Grenzzustände des Befahrens 22
 Griffigkeit 32, 35
 Grundabmessung 27
 Grundrissgestaltung 9
 Güterstrassen 9, 13, 29, 32, 34
 Haftreibungskoeffizient 22, 23, 24, 25, 26, 36
 Haftung 5, 24, 25
 Hangantrieb 22, 23
 Hangantriebskraft 26
 Hauptstrassen 11
 historische Entwicklung 10, 11, 12
 Höchstbreite 16, 19, 26, 27, 36
 Höchstbreitenfaktor 27, 28
 Holztransport 10, 11, 12, 21, 24, 25
 Holztransportlastwagen 12, 24, 27
 horizontale Linienführung 8, 9
 horizontale Querprofile 30
 Instandhaltung 12
 Instandhaltungskosten 12
 internationaler Vergleich 15, 17
 Kehrplätze 15
 Klemmbankschlepper 17, 29
 Kosten 16

- Kosteneinsparung 9, 12
 Kriterien 5, 6, 7, 15, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 28, 32, 35
 Kunstbauten 9
 Kurven 9
 Kurvenverbreiterung 15
 Lage im Gelände 8
 Lagerplätze 6
 Längsneigung 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
 Lastwagen 6, 10, 11, 12, 15, 20, 21, 24, 25, 26, 29, 35, 36
 Lastwagentypen 21
 Lebensräume 26
 Lebenszyklus 21
 Lebenszykluskosten 32
 Lichtraumprofil 15, 27, 28
 Linienführung 6, 8, 9, 20, 32
 Luftreibung 23
 Luftwiderstand 22
 Machbarkeitsgrenzen 21
 Maschinenweg 5, 6, 7, 14, 15, 16, 17, 19, 25, 28, 33, 35, 36
 Maschinenwegbreite 17, 29, 33, 36
 maximale Längsneigung 11, 12
 Maximalneigung 9, 10, 12, 14
 Maximalsteigung 10, 11, 14, 32
 Mindestanforderungen 26, 28, 33
 Minimalbreite 5, 17, 19, 28, 29, 36
 Modellansätze 5, 33
 Natur- und Landschaftsschutz 8, 12, 16
 Naturschutz 27
 Naturstrassen 18, 29, 35
 Neigung 9, 32
 Niederdruck-Breitreifen 25, 26, 29, 33, 36
 Niederschläge 18, 29, 30, 35
 Niederschlageffekt 30
 Niederschlagsintensität 19
 Niederschlagsmenge 18
 Niederschlagsverhältnisse 30
 Normachslast 29, 30
 normale Verhältnisse 9
 Nutzleistung 20
 Nutzungsanforderungen 21
 Nutzungsdauer 8
 Oberfläche 5, 25
 Oberflächengestaltung 18
 Oesterreich 10, 14
 ökologische Beeinträchtigungen 9
 Pendelstreifen 27, 28
 Pferdefuhrwerke 11, 15, 35
 physikalische Faktoren 6, 35
 Planung 5, 6
 Plastizitätsindex 30, 34
 Querneigung 15
 Querprofil 30, 31, 34
 Querschnitt 8, 16
 Querschnittsgestaltung 6, 8, 9, 15, 26, 30
 Rahmenbedingungen 5, 6, 20, 32, 35
 Randabschlüsse 15
 Rauigkeit 32, 33
 Richtlinien 5, 6, 9, 12, 14, 17, 36
 Richtwerte 5, 6, 7, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 19, 21, 32, 33
 Rollreibung 23
 Rollreibungskoeffizient 22, 23, 24, 26, 36
 Rollwiderstand 22, 26
 Rückefahrzeuge 14, 15, 17, 19, 25, 26, 28, 29, 36
 Rückefahrzeugeinsatz 26
 Rückerichtung 14
 Rutschhänge 12
 Sammelstrasse 34
 Schadenmodell 30
 Schadensempfindlichkeit 34
 Schadensentwicklung 35, 36
 Schadenswahrscheinlichkeit 31
 Schlaglochbildung 9, 31, 32
 Schlaglöcher 31
 Schlepper 15
 Schneeunterlage 24
 Schotterstrassen 24
 Schubkraft 23
 Schubwiderstand 22
 Schweiz 6, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 29, 36
 Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Forstlichen Strassenbau 6, 9
 schwierige Verhältnisse 10, 12
 Sicherheit 20, 21, 29, 33
 Sicherheitsabstand 27
 Sicherheitsgründe 33
 Sicherheitsspielraum 29
 Sicherheitsstreifen 16, 27, 28
 Sicherheitszuschlag 27, 28
 Spezialfälle 15
 Starkniederschläge 18, 31, 34
 Starkniederschlagsempfindlichkeit 31
 Starkniederschlagsintensität 36
 Starkniederschlagswerte 31
 Steigfähigkeit 10, 12, 15, 25
 Steigung 18, 20
 Steigungswiderstand 15, 22, 26
 Strassen- und Weggestaltung 8
 Strassenachse 6, 8, 9
 Strassenbeläge 23
 Strassenbreite 36
 Strassenerhaltung 9, 10, 12, 20, 32
 Strassenfahrzeuge 6, 16, 20, 22
 Strassengestaltung 8, 20
 Strassenkategorien 13
 Strassenkörper 6, 9, 16, 31, 34
 Strassenlänge 9
 Strassennetz 20, 32
 Strassenoberfläche 22, 30
 Strassenunterhalt 12
 Strassenverkehrsgesetz 16, 20
 Taltransport 11, 13
 technische Kriterien 35
 technischer Fortschritt 6
 topographische Bedingungen 9
 Tragdeckschicht 25
 Traktoren 20
 Transportanlage 16
 Transportfahrzeuge 8, 21
 Transportfunktion 6
 Transportprozess 33
 Transportrichtung 15, 25
 Transporttechnologie 5, 6, 11, 12
 Transportvorgang 5, 6
 Ueberprüfung 6, 33
 Umgebungsbedingungen 23, 31, 34
 Umgebungsfaktoren 22
 Umweltbedingungen 34
 Unterhaltskosten 21
 Verbindungsstrasse 34
 Verkehr 8, 11, 15, 16, 18, 19, 26, 29, 30, 32, 34, 35
 Verkehrsanforderung 8
 Verkehrsanlage 6
 Verkehrsaufkommen 16, 26
 Verkehrsbedeutung 16
 Verkehrsfrequenz 29, 32, 34
 Verkehrsmenge 20
 Verkehrssicherheit 9, 12, 16, 19, 20, 28
 Verkehrsteilnehmer 27
 Verkehrsvolumen 29, 30
 Verletzlichkeit 31, 36
 Verletzlichkeitsmodell 31
 Verschleisssschicht 5, 9
 Verschmutzungen 5
 vertikale Linienführung 8, 9
 vertikaler Strassenverlauf 9
 Verzögerungswerte 36
 Voralpen 6
 Wald/Feld-Effekt 30
 Waldbau 6
 Waldstrasse 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 35, 36
 Waldwege 11
 Widerstandsfähigkeit 31
 Windenschlepper 17, 26, 29, 36
 Winteröffnung 10
 Wirtschaftlichkeit 20, 21
 Witterungsbedingungen 5
 Zerschneidungs-Effekte 9
 Zerstörungsprozess 29
 Zugänglichkeit 6
 zulässige Längsneigung 6, 9, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 35