

16

Hans Rudolf Heinemann (Hrsg.)

Beiträge zur forstlichen Verfahrenstechnik

Tagungsbericht
über das 28. Internationale Symposium
"Mechanisierung der Waldarbeit"
vom 28.8.-2.9.94 in Langnau i.E., Schweiz

Die Wirtschaftlichkeit von Lastwagen-transporten unter Berücksichtigung der Belastung und Abnutzung von Waldstrassen

Eskioglou Panagiotis
Aristoteles Universität, Thessaloniki, Griechenland

1. Einleitung

Der starke Verkehr der Lastwagen, die aus dem Wald Holz abtransportieren, verursacht Schäden und Verzerrungen an Waldstrassen und der Umwelt, die anfangs als Erdrisse und Senkungen und im folgenden als Erdrutsche an Strassen erscheinen.

Diese Phänomene, die Finanz- und Transportprobleme im Öko-System des Waldes bereiten, sind auf das Überladen, die kleine Geschwindigkeit der Bewegung und die Art der Achsbelastungen der verkehrenden Lastwagen zurückzuführen.

Eine vorsichtige Analyse dieser Phänomene führt zur Feststellung, dass die Hauptgründe dieser Erscheinungen der Kontaktdruck der Räder und die unregelmäßige Verteilung der Achsbelastung der Lastwagen sind.

Anlass zur Verwirklichung dieser Forschungsarbeit war also, das Herausfinden der optimalen Achsverteilung der Lastkraftwagen - auch wegen der grossen Achsdifferenzen der verkehrenden Lastkraftwagen -, so dass bei gleichzeitig grösseren zu transportierenden Holzmengen nur eine minimale Zerstörung der Waldwege durch die schweren Lastkraftwagen für den Holztransport beobachtet werden kann.

2. Bisherige Erfahrungen

Bis zur Zeit der grossen Strassenversuche über die Strassenstärke und der beobachtbaren Verzerrungen des Bodens durch die Bewegung der Lasten, wurden die Reaktionen der Verteilung der äquivalenten Achsen wenig erforscht.

Es galt damals, dass zwei Lastkraftwagen des gleichen Bruttogewichtes aber mit unterschiedlicher Achsverteilung, die gleiche Abschwächung hervorrufen. Dies jedoch hat sich durch die Forschung als falsch erwiesen.

Weil in der Praxis eine Vielzahl von Lastkraftwagen, Achsen und Achsbelastungen existiert, war es nötig, Vereinfachungsannahmen zu treffen, die das Bild einer Anhäufung von Schäden, die durch die Belastung hervorgerufen werden, nicht direkt verändern. Eine solche Annahme ist die Umwandlung der verkehrenden Lasten in äquivalente Achsen von 8,2 t, wenn es sich um eine Einzelachse mit Zwillingenrädern, in Achsen von 6,34 t (Einzelachse und Einzelräder) oder letztendlich in Achsen von 14,5 t (Zwillingsachsen und Zwillingenräder). Diese Umwandlung erfolgt mit der mathematischen Relation (1)

$$f = \left(\frac{W}{Wt} \right)^4 \quad (1)$$

Wobei:

- Wt = Die Last 6,34 t, 8,2 t oder 14,5 t, analog der Achsbelastung, die als Zentren äquivalenter Achsen gelten.
- W = Die Last die wir zur Umwandlung von äquivalenten Achsen verlangen.
- f = der Koeffizient zur Umwandlung der Last W in äquivalente Achsen.

Auf der Grundlage der Gleichung (1) entspricht eine Achsbelastung $W = 10$ t einer Einzelachse mit Zwillingenreifen $f = (10/8.2)^4 = 2,2$ äquivalente Achsen von 8,2 t. Das heisst, dass die konkrete Last den Waldweg um 2,2 äquivalente Achsen oder 2,2 mal mehr als die Belastung, die eine Achsenlast von 8,2 t hervorruft, belastet. Die gleiche Belastung ruft auch eine Achsenlast $W = 7,7$ t einer Einzelachse mit Einzelrädern hervor, weil $f = (7.7/6.34)^4 = 2,2$ äquivalenten Achsen entspricht.

In beiden Fällen ist verständlich, dass die konkreten Achsbelastungen eine 2,2 mal grössere Belastung der Fahrbahn hervorrufen, im Gegensatz zur

Gleichung; und darüber hinaus, dass je schwerer die Last ist, um so mehr wird der verursachte Schaden vervielfacht.

Aus theoretischen Forschungen (Deacon, 1969) liess sich beweisen, dass die Schäden, die durch Achsen mit Einzelrädern verursacht werden, 3 mal grösser sind als jene, die durch eine Achse mit Zwillingrädern gleichen Gewichts verursacht werden.

Ebenfalls liess sich beweisen, dass, wenn sich Nachbarräder in einem grösseren Abstand als 1 m befinden, keine Wechselwirkung zur Belastung der Fahrbahn existiert. Nach all diesen Annahmen erscheint als Hauptfaktor für die Schäden der Fahrbahn die Zahl äquivalenter Achsen jedes Lastkraftwagens. Sie beeinflusst das Ausmass der Belastung, im Gegensatz zur Geschwindigkeit der Lasten.

3. Untersuchungsobjekte und Methoden

Die Untersuchungen wurde in 2 Forstämtern ,in denen ein starker Verkehr schwerer Lastwagen für den Holztransport beobachtet wird, durchgeführt. Es handelt sich dabei um die Forststationen von Xanthi und Stavroupoli, die Sie während des letzten Symposiums in Griechenland besuchten. Erforscht wurde die Hauptstrasse Oreon - Xanthi, über welche jährlich 20.512 m^3 Buchen-, Eichen- und Fichtenholz transportiert werden und die Strassen Paranesti - Pashalia (ab Brücke Paranesti) und Likodromio - Livaditis, über die jährlich 7.000 m^3 bzw. 9.000 m^3 Eichen- und Buchenholz transportiert werden. Der Boden dieses Landbereiches ist sandig-lehmig bzw. sandig und entstand aus Gneiss und Granit. Die Verkehrsmessungen fanden in den Sommermonaten der Jahre 1992 und 1993 statt, wobei der Transport von 64 % der jährlich zu transportierenden Holzmenge gemessen wurde.

Die verkehrenden Lastwagen waren zwei- und dreiachsige LKWs, die immer vollbeladen, teilweise zu 5 - 20 % über das erlaubte Gewicht beladen waren. Dieser Überladungsgrad wurde bei der Beobachtung - zur Selektion des Forschungsmaterials - festgestellt, da er auf die Art der Verteilung der Achsbelastungen einen Einfluss ausübt, weil die Belastung des Motors und der Fahrerkabine in der Regel auf die Vorderachse verlegt wird und dadurch die Last konstant hält.

Auf der anderen Seite aber nehmen die anderen Achsen einen sehr kleinen Teil des gleichen Gewichts des Lastkraftwagens auf, wenn dieser leer ist. Sie nehmen aber fast die gesamte Ladung auf, wenn der LKW beladen ist. Bei zweiachsigen Lastkraftwagen beträgt das Verhältnis des Gewichts bei voller Ladung: ein Drittel des Gewichts auf der Vorderachse und zwei Drittel

auf der Hinterachse. Bei den dreiachsigen LKWs ist ein Viertel des Gewichts auf der Vorderachse und drei Viertel auf den zwei Hinterachsen.

An den Untersuchungsorten wurden alle Lastwagen, die auf den Waldstrassen verkehrten und Holz transportierten, gezählt und aufgelistet (Tabelle 1, Spalte 1). Sowohl aus Fragen an die Fahrer, als auch über technische Charakteristika an die Baufirmen, konnten folgende Daten zur Vervollständigung der Tabelle eingesammelt werden :

- Bruttogewicht der Fahrzeuge (B.G), Verteilung des Gewichts auf die Vorderachse (V.A.) und auf die Hinterachsen (H.A.) (Spalte 2).
- Mit der Relation $f = (W/Wt)^4$ wurden die Achsbelastungen W in Belastungen äquivalenter Achsen umgewandelt, analog zur Art der Achse und der Zahl der Reifen. Nach dieser Umwandlung bildete sich die Spalte 3, die die Zahl äquivalenter Achsen jedes Lastwagens pro Achse und in ihrer Gesamtheit aufzeigt.
- Die zu transportierende Holzmenge jedes Fahrzeugtyps und die Menge, die von einer äquivalenten Achse transportiert wird. Die letztere Zahl entstand aus der Dividierung der gesamten zu transportierenden Holzmenge durch die Gesamtzahl äquivalenter Achsen jedes Lastkraftwagens (Spalte 4).
- Aus der Relation der transportierten Holzmenge zu jedem Lastkraftwagen und der Gesamtzahl äquivalenter Achsen liess sich die Anzahl äquivalenter Achsen für jedes Fahrzeug finden, die nötig ist, damit es 100 m^3 Holz transportieren kann (Spalte 5).

Die Ergebnisse der Spalte 5 lassen sich gleichzeitig als ein Vergleichsmass des Abschwächungsgrades der Waldstrassen jedes Fahrzeugs darstellen, wenn sie die gleiche Holzmenge transportieren. Dieses Ergebnis wird in äquivalenten Achsen ausgedrückt.

Fahrzeugtyp	Achsverteilung V.A./H.A (Bruttogewicht) in t	äquivalente Lasten je Achse und (insgesamt)	Transportierte Holzmenge insgesamt (und pro äquivalente Achse) m ³	Gemessene äquivalente Achsen zum Transport von 100 m ³ Holz
1	2	3	4	5
Mercedes 1632	8/11 (19)	2.28/3.23 (5.51)	14.9 (2.7)	36.7
Mercedes 1924, 1926 DAF DH 385 Magirus 64 Steyr k38,044 Volvo GT 10	6/13 (19)	0.72/6.2 (6.92)	14.4 (2.05)	48
Mercedes 1932	7/20 (27)	1.32/3.13 (4.45)	19.4 (4.35)	23
Mercedes 2626, 2632	6.5/20 (27)	1/3.13 (4.13)	25.14 (6.02)	16.5
Steyr	6.5/2*11 (28.5)	1/4.58 (5.6)	26 (4.63)	21
Mercedes 2226, 2232	6.5/2*8 (22.5)	1/1.27 (2.27)	20.59 (9)	11
Mercedes 2226 (6.2)	6.5/10/6 (22.5)	1/1.27 (2.27)	22.01 (9.7)	10.3
Mercedes 2628, DAF, Volvo F 89, MAN	6.5/2*10 (27)	1/3.13 (4.13)	28.4 (6.87)	14.5
Volvo 25	5/2*10 (25)	0.35/3.13 (3.48)	21.7 (6.23)	16
DAF 28	8/2*10 (28)	1/3.13 (4.13)	21 (5.08)	19.7
Mercedes 32	5/5/22 (32)	0.7/4.58 (5.28)	29.9 (5.66)	17.6
DAF (4ax)	14/22 (36)	0.35/1.43/4.58 (6.36)	36.92 (5.8)	17.23
Mercedes 8x2	6/6/20 (32)	1.8/3.13 (4.93)	30 (6)	16.5
Mercedes 1926 AS 32	7.5/12.5/16 (36)	1.7+6+1.3 (8.9)	31.2 (3.5)	28.5

Tab. 1: Verteilung von äquivalenten und einfachen Lastwagenachsen; von äquivalenten Achsen transportierte Holzmengen

4. Ergebnisse

Aus den Daten der Tabelle 1 lässt sich folgendes ableiten:

- Achsenbelastungen, die grösser sind als die äquivalenten Achsen (6.34 t für Einzelachsen mit Einzelrädern, 8.2 t für Einzelachsen mit Zwillingsrädern und 14.5 t für Zwillingsachsen mit Zwillingsrädern) verursachen übermässig grössere Abschwächungen an Waldstrassen je mehr sich die Belastungen vergrössern.
- Achsbelastungen, die kleiner sind als die äquivalenten Achsen verursachen wesentlich geringere Abschwächungen (in Relation mit der Achsbelastung von 8.2 t, u.s.w.).
- Die zweiachsigen Lastkraftwagen schwächen wegen der kleinen Achsenzahl und speziell wegen der grossen Achsbelastung der Hinterachse die Fahrbahn beim Transport von 100m³ Holz übermässig ab. Die gemessenen äquivalenten Achsen bewegen sich für den konkreten Transport zwischen 36.7 und 48, was auf die geringe Menge des zu transportierenden Holzes durch eine äquivalente Achse dieser Fahrzeuge zurückzuführen ist. Die Zahl liegt um 2.5m³.
- Die dreiachsigen Lastwagen schwächen aufgrund der Verteilung der Nutzlast auf die beiden hinteren Achsen die Fahrbahn weniger ab, im Gegensatz zu den zweiachsigen Lastwagen.
- Die zu transportierende Holzmenge von Dreiachsern schwankt zwischen 19.4 m³ und 28.4 m³, ohne dass die entsprechende Abschwächung existiert (23 und 14.5 äquivalente Achsen).
- Es lässt sich also feststellen, dass es Lastkraftwagen gibt, die, obwohl sie mehr Holz transportieren, die Waldstrasse viel weniger abschwächen. Obwohl der Mercedes 2226 (6x2) eine grössere Menge transportiert (22m³) als der Mercedes 1932 (19.5 m³), ist die Belastung der Waldstrasse beim ersten Fahrzeug genau halb so gross wie die Belastung beim zweiten Fahrzeug.
- Zwischen LKWs des gleichen Bruttogewichts existiert ein Unterschied bei der zur transportierenden Holzmenge. Im folgenden lässt sich beobachten, dass obwohl der Mercedes 2626 mit einem Bruttogewicht von 27 t 25m³ Holz transportiert, den Waldweg um 16.5 äquivalente Achsen abschwächt. Auf der anderen Seite transportiert der Mercedes 2628 mit dem gleichen Bruttogewicht 28.5 m³ und schwächt den Waldweg nur um 14.5 äquivalente Achsen ab.
- Die Lastkraftwagen Mercedes 2226 (6x2) und der Mercedes 2232 transportieren 100 m³ Holz und schwächen dabei den Waldweg weniger als jeder andere Lastwagen, ob zweiachsig, dreiachsig oder vierachsig. Die Abschwächung entspricht 10.3 bzw. 11 äquivalenten Achsen.

- Die grösste Belastung erreicht der Mercedes 1932 mit 23 äquivalenten Achsen. Relativ niedrige Werte erreichen DAF und Volvo F.89 ,MAN und der Volvo 25.
- Die vierachsigen Fahrzeuge, mit Ausnahme des Spezialfahrzeugs 1926 AS 32, verursachen relativ niedrige Belastungswerte, die äquivalenten Achsenwerten von 16.5 (Mercedes 8x2) bis 17.6 (Mercedes 32) beim Transport von 100m^3 Holz entsprechen. Diese Werte entsprechen ungefähr den Mittelwerten der Belastung (Abschwächung), die durch dreiachsige Fahrzeuge verursacht werden.
- Der Mercedes 1926 AS 32 bewirkt eine Abschwächung der Fahrbahn um 28.5 äquivalente Achsen beim Transport von 100m^3 Holz. Seine Nützlichkeit bei speziellen Transporten muss natürlich mitbedacht werden.
- Wenn wir die geometrischen Charakteristika der Waldstrassen übersehen, die uns zur Benutzung eines Fahrzeuges zwingen, (wie auch die Betriebskosten jedes schweren Fahrzeugtyps), werden wir, aus Gründen der Fahrbahnabschwächung, zur Benutzung von dreiachsigen Fahrzeugen für den Holztransport im Wald tendieren. Die Fahrzeuge die dabei bevorzugt werden sind die Mercedes 2226 und 2232.
- Im Falle eines schnellen Holztransportes müssten auch die Betriebskosten des Fahrzeugs in Zusammenhang mit der zu transportierenden Holzmenge auf einer Strecke mitbedacht werden. In diesem Fall haben Fahrzeuge mit grosser Nutzlast den Vorrang, jedoch nur bei unwesentlicher Abschwächung der Fahrbahn.
- Die Untersuchung kam schlussfolgernd zur Auswahl zweier charakteristischer Fahrzeugtypen: Der dreiachsige Mercedes 2628, Volvo F89 und MAN mit einer Nutzlast von 28.5m^3 , die von 4.13 äquivalenten Achsen getragen werden, und der vierachsige DAF, welcher bei 6.36 äquivalenten Achsen eine Nutzlast von 36.92m^3 aufweist.
- Fahrzeuge, die die Waldstrassen nur gering belasten, können Baufirmen vorgeschlagen werden. Sie haben folgende Charakteristika:
 - Die Vorderachse, die Einzelräder besitzt, darf den Wert $W= 6.34\text{ t}$, der einer äquivalenten Achse entspricht, nur gering überschreiten.
 - Bei mehrachsigen Lastwagen dürfen die Zwillingssachsen mit Zwillingssreifen die Last von $W= 14.5\text{ t}$ ebenfalls nicht überschreiten.
 - Bei einer Einzelachse mit Zwillingssreifen darf die Last den Wert $W = 8.2\text{ t}$ nicht sehr viel überschreiten, was ebenfalls einer äquivalenten Achse entspricht.

5. Folgerungen

Beim Transport von Holzprodukten mit Lastwagen liess sich als erstes feststellen, dass kein Verhältnis zwischen der zu transportierenden Holzmenge und der äquivalenten Achsen dieser Fahrzeuge existiert.

Die Fahrzeuge verkehren regelmässig mit Überladung, was zu einer übermässig grossen Erhöhung der Achsbelastung der Hinterräder und einer vorzeitigen Zerstörung der Waldstrassen führt.

Im Untersuchungsgebiet wurden alle schweren, verkehrenden Fahrzeuge aufgelistet und die von ihnen transportierte Holzmenge, ihr Bruttogewicht und die Gesamtsumme der äquivalenten Achsen erfasst. Ebenso wurde auch die Belastung der Waldstrasse - in äquivalenten Achsen - aller Fahrzeuge gezählt, unter der Annahme, dass alle 100m³ Holz transportiert haben.

Festgestellt wurde, dass die zweiachsigen Lastwagen, obwohl sie eine kleinere Menge transportieren, die Fahrbahn übermässig stark belasten. Diese Fahrzeuge müssen also ausgeschlossen werden, ausser wenn ihre Benutzung wegen der Masse der zu transportierenden Produkte und der geometrischen Charakteristika der Strasse als notwendig erachtet wird.

Bei den dreiachsigen Lastwagen haben wir die Mercedes 2226 und 2232, die zum Transport von 100 m³ Holz die Waldstrasse um 10.3 bzw. 11 äquivalente Achsen abschwächen. Diese Werte sind die kleinsten dieser Kategorie, obwohl der Durchschnittswert der Abschwächung, verursacht von dreiachsigen LKWs, 17.5 äquivalente Achsen beträgt.

Dieser Wert korrespondiert mit den Abschwächungswerten, wie sie von vierachsigen Fahrzeugen (Mercedes 32) verursacht werden.

All dies lässt sich aussagen, wenn wir die geometrischen Daten der Strasse und die Betriebskosten der Fahrzeuge nicht berücksichtigen.

Sind wir an einem schnellen Transport interessiert, müssen auch die Betriebskosten der Fahrzeuge und die zu transportierenden Mengen auf einer Strecke mitbedacht werden.

In diesem Fall werden Dreiachser und Vierachser, die eine grössere Holzmenge transportieren ohne die Waldstrasse über den Durchschnittswert zu belasten (Mercedes 2628, Volvo F 89, MAN und DAF), bevorzugt.

Ein befriedigender Wert der zu transportierenden Menge unter diesen Verhältnissen ist 6-6.5 m³ pro äquivalente Achse.

6. Kurzfassung

Für den Holztransport innerhalb des Waldes bis zu den Verbrauchszentren werden schwere Lastkraftwagen verwendet, die sich auf die Waldwege und die Umwelt ungünstig auswirken.

Zwei wichtige Faktoren verstärken diese Auswirkung: die Überladung und die nicht rationelle Achsverteilung der Fahrzeuge.

In der vorliegenden Arbeit werden alle Lastkraftwagentypen ausführlich vorgestellt. Die bisherige Ansicht, dass gleichschwere Lastwagen die gleichen Schäden am Boden verursachen, erweist sich als unrichtig.

Darüberhinaus bezieht sich das einzige mathematische Verhältnis "Gewicht-Schaden" auf die Achsenberechnung.

Es werden nicht nur das Bruttogewicht und die Nutzlast, sondern auch die Achsverteilung und die Belastung und Abnutzung angegeben, die sie auf den Waldwegen hervorrufen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Schlussfolgerungen über den Lastkraftwagentyp zu ziehen, der die geringste Belastung auf den Boden und den Waldweg verursacht, während er die grösste Holzmenge transportiert.

Wenn uns weder die Betriebskosten der Fahrzeuge noch die Transportgeschwindigkeit interessieren, dann sollen die dreiachsigen Fahrzeuge Mercedes 2226 und 2232 bevorzugt werden.

Im Falle jedoch, wo wir bei einer geringen Belastung des Planums eine Verminderung der Betriebskosten und gleichzeitig eine Erhöhung der Transportgeschwindigkeit erreichen, soll man die Lastkraftwagen Mercedes 2628, Volvo F 89, MAN und den vierachsigen DAF bevorzugen.

Literaturverzeichnis

- AASHO (1961): Standard Specification for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing. Ottawa 1961.
- Burlet, E. (1982): Dimensionierung und Verstärkung von Strassen mit geringem Verkehr und flexiblen Oberbau. Zürich.
- Eskioglou, P. (1988): The negative impact of vehicles overloading in forest roads. 4th Congress of Forestry Society. Larisa (GR).
- Eskioglou, P. (1991): Durable and economic pavements in Mountain forest roads. Doctoral Thesis. Thessaloniki (GR).
- Eskioglou, P. (1993): Boden - und Fahrbahnverformungen von Forstwegen unter den Einwirkungen der Belastungen der Mechanisierungsmittel. 27es Internationales Symposium "Mechanisierung der Waldarbeit". Thessaloniki(GR).
- Stergiadis, G. (1985): Bodenmechanische Verhältnisse und Probleme beim Bau der Waldwege. Thessaloniki.
- Yoder, E.; Witzack, M. (1965): Principles of pavement Design. New York.