



**Universität für Bodenkultur Wien**  
Department für Wald- und Boden-  
wissenschaften

# **Produktivitätsevaluierung des seilgestützten Forwarders John Deere 1110E**

## **Masterarbeit**

Erstellt von:

Thomas Holzfeind

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer  
Dipl.-Ing. Dr. Franz Holzleitner

Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
Institut für Forsttechnik

Wien, Januar 2017

## INHALTSVERZEICHNIS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | EINLEITUNG .....                                    | 1  |
| 1.1   | Problemstellung .....                               | 1  |
| 1.2   | Zielsetzung .....                                   | 2  |
| 2     | ASPEKTE - VOLLMECHANISIERTE ERNTE-TECHNOLOGIE ..... | 3  |
| 2.1   | Bestandesschäden .....                              | 3  |
| 2.2   | Bodenschäden .....                                  | 4  |
| 2.3   | Physische und psychische Belastung .....            | 6  |
| 2.4   | Arbeitssicherheit .....                             | 7  |
| 2.5   | Anbieter von Seilforwardern .....                   | 8  |
| 3     | MATERIAL UND METHODEN .....                         | 9  |
| 3.1   | Modellhypothese .....                               | 9  |
| 3.2   | Beschreibung der Aufnahmegebiete .....              | 11 |
| 3.2.1 | Kapfenberg .....                                    | 12 |
| 3.2.2 | Jauerling .....                                     | 13 |
| 3.2.3 | Viessling .....                                     | 14 |
| 3.3   | Arbeitsweise .....                                  | 15 |
| 3.4   | Maschinenbeschreibung .....                         | 17 |
| 3.5   | Datenerhebung - Zeitstudie .....                    | 21 |
| 3.6   | Datenauswertung .....                               | 23 |
| 4     | ERGEBNISSE .....                                    | 24 |
| 4.1   | Deskriptive Statistik .....                         | 24 |
| 4.2   | Prozessanalyse Seilmontage .....                    | 27 |
| 4.3   | Produktivitätsmodell .....                          | 29 |
| 4.3.1 | Teilmodell Fahren .....                             | 29 |
| 4.3.2 | Teilmodell Laden .....                              | 31 |
| 4.3.3 | Teilmodell Entladen .....                           | 32 |
| 4.3.4 | Gesamtmodell Forwarder .....                        | 33 |
| 4.4   | Maschinenkostenkalkulation .....                    | 36 |
| 5     | DISKUSSION .....                                    | 39 |
| 5.1   | Systemvergleiche .....                              | 39 |
| 5.1.1 | Seilforwarder und Forwarder .....                   | 39 |
| 5.1.2 | Vergleich zwischen Seilforwardern .....             | 41 |
| 5.1.3 | Seilforwarder und Seilgerät .....                   | 42 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2 Einsatzempfehlungen.....                   | 43 |
| 6 ZUSAMMENFASSUNG .....                        | 44 |
| 7 LITERATURVERZEICHNIS .....                   | 45 |
| 7.1 Abbildungsverzeichnis .....                | 48 |
| 7.2 Tabellenverzeichnis .....                  | 49 |
| 7.3 Formelverzeichnis .....                    | 50 |
| 8 ANHANG .....                                 | 51 |
| 8.1 Ergebnisse der statistischen Analyse ..... | 51 |
| 8.1.1 Teilmodell Fahren.....                   | 51 |
| 8.1.2 Teilmodell Laden .....                   | 53 |
| 8.1.3 Teilmodell Entladen .....                | 55 |
| 8.1.4 Aufnahmeformulare .....                  | 57 |

## Abstract

In fully mechanised timber harvesting operations the forwarder represents the limiting machine in steeper terrain. In order to operate also in the steep terrain and on soft soils with low traction they are equipped with traction winches.

The objective of this study was to evaluate machine productivity of the cable assisted forwarder John Deere 1110E, investigate set up time for the cable and to calculate harvesting costs based on the productivity model.

The developed productivity model for the cable assisted Forwarder John Deere 1110E is based on 75 observed loads within 18 skid trails. The study was carried out in three different stands using detailed productivity and process analyses. Factors, which are influencing machine productivity, are log volume, load volume, inclination, distance during loading activities and extraction distance.

With an average observed log volume of  $0.10 \text{ m}^3$  without bark and an average load volume of  $9.25 \text{ m}^3$ , the cable-winch assisted forwarder reached a productivity of  $13.73 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ . By an annual utilization of 1,900 hours forwarding the costs for the entire system are  $110.68 \text{ €/PSH}_{15}$ .

The detailed process analysis also showed different solutions for mounting the cable depending on operating downhill, operating uphill, terrain, passability through the stock and availability of the harvester. Average set up time for the cable operating downhill was 21.6 minutes.

Keywords: forwarder, cable-winch forwarder, extraction, productivity

## KURZFASSUNG

Forwarder stellen im vollmechanisierten Holzerntesystem die limitierende Maschine in steilerem Gelände dar. Damit diese im Übergangsbereich zwischen Schlepper- und Seilgelände arbeiten können, wurden sie mit Traktionshilfswinden ausgerüstet.

Ziel dieser Arbeit war es, die Produktivität des seilgestützten Forwarder John Deere 1110E zu evaluieren, eine Prozessanalyse der Seilmontage durchzuführen und aufgrund des entwickelten Produktivitätsmodells die Erntekosten zu kalkulieren.

Die Rückung mit seilgestütztem Forwarder wurde auf 3 verschiedenen Standorten anhand detaillierter Produktivitäts- und Prozessanalysen untersucht. Das entwickelte Produktivitätsmodell basiert auf 75 Fuhren in 18 Trassen. Als signifikante Einflussfaktoren auf die Produktivität erwiesen sich das Stückvolumen, das Fuhrevolumen, die Rückedistanz, die Neigung der Rückedistanz und die Ladedistanz.

Bei einem durchschnittlich beobachteten Stückvolumen von  $0,10 \text{ m}^3$  ohne Rinde und einem durchschnittlichen Fuhrevolumen von  $9,25 \text{ m}^3$  erreichte der Seilforwarder eine Produktivität von  $13,73 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ . Die Systemkosten betragen bei einer jährlichen Auslastung von 1.900 Stunden  $110,68 \text{ €/PSH}_{15}$ .

Die Prozessanalyse der Seilmontage ergab, dass in Abhängigkeit vom Gelände, der Verfügbarkeit des Harvesters und der Durchfahrbarkeit des Bestandes mehrere Möglichkeiten bestehen, das Seil in der Trasse zu befestigen. Für die Bergabrückung konnte festgestellt werden, dass die Rüstzeiten durchschnittlich 21,6 Minuten pro Trasse betragen.

Schlüsselwörter: Forwarder, Seilforwarder, Rückung, Produktivität

## **Vorwort**

Mit Fertigstellung dieser Arbeit beende ich mein Studium für Forstwissenschaften. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer und Dipl.-Ing. Dr. Franz Holzleitner, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Auch der Firma Huber & Tazreiter möchte ich herzlich dafür danken, dass ich meine Daten während der Einsätze ihres Seilforwarders aufnehmen durfte.

Vor allem aber möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir während meiner Studienzeit stets einen starken Rückhalt bot und mich finanziell unterstützte. Größter Dank gilt auch meiner Freundin Judith, die meine Studienzeit in Wien wesentlich verschönerte.

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Problemstellung

Die ständige Weiterentwicklung vollmechanisierter Holzerntesysteme führte in den letzten Jahrzehnten zu einem vermehrten Einsatz von Harvestern und Forwardern im Seilgelände. Mit dem Raupenharvester Valmet 911 Snake können unter günstigen Bedingungen Hangneigungen bis zu 70% bewältigt werden (STAMPFER et al., 2001). Der Einsatz konventioneller Forwarder in steilerem Gelände birgt aber gleichzeitig ein erhöhtes Unfallrisiko für den Fahrer sowie negative Umweltauswirkungen durch erhöhte Spurrinnenbildung. Der Forwarder stellt somit im vollmechanisierten Holzerntesystem die limitierende Maschine in steilerem Gelände dar.

Untersuchungen von HITTENBECK (2011) zeigten, dass die maximal befahrbare Hangneigung in Abhängigkeit von den Bodenbedingungen für Forwarder ohne Traktionshilfsmittel zwischen 17% und 46% liegt. Im Vergleich dazu gibt STAMPFER (2002a) bei günstigen Bodenbedingungen eine maximal befahrbare Hangneigung von 45% an. Somit scheidet der Forwarder als Rückemaschine spätestens bei 45% Hangneigung aus Gründen der sicheren Befahrbarkeit aus.

Bei der Rückung mit dem Forwarder kann es bereits bei geringeren Hangneigungen als 45% zu Problemen beim Überwinden kleinerer Geländekuppen oder anderer Hindernisse (z. B. Wurzelstöcken) kommen. Um diese Probleme zu lösen, und das System Harvester-Forwarder auch im moderaten Seilgelände einsetzen zu können, wurde somit 1992 der erste Prototyp eines seilgestützten Forwarders mit tiltbarem Kran und nivellierbarem Fahrersitz von Klaus Herzog, Gründer der Firma Herzog Forsttechnik AG, gebaut (HERZOG FORSTTECHNIK AG, 2016). Nach mehreren technischen Adaptierungen wurde 2004 der erste marktreife Forwarder mit Traktionshilfswinde des Typs Forcar FC200 fertiggestellt.

Die Traktionshilfswinde versucht die Schlupfbildung der Räder zu unterbinden und ermöglicht somit auch ein Fahren in steilerem Gelände. Einen weiteren Aspekt spielen dabei auch die Bestandes- und Bodenschäden. Durch die Seilunterstützung soll einerseits ein kontrolliertes Fahren in der Trasse ermöglicht werden und andererseits sollen Verletzungen am verbleibenden Bestand möglichst gering gehalten werden. Untersuchungen von WRATSCHKO (2006) zeigen hierzu, dass die Spurrinnentiefe durch die Seilunterstützung maßgeblich verringert wird.

Aus den zuvor genannten Gründen und wegen der Tatsache, dass 38% der österreichischen Waldfläche, das sind 1,52 Mio. Hektar, Neigungen von 31% bis 60% aufweisen (NEMESTÓTHY, 2014), steigt in Österreich das Interesse an seilgestützten Holzerntesystemen im Übergangsbereich zwischen Schlepper- und Seilgelände zunehmend. Ob der seilgestützte Forwarder in diesem moderaten Seilgelände eine gute Alternative zu Seilgeräten darstellt, soll anhand von Vergleichen mit alternativen Arbeitssystemen überprüft werden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Studie ist es, die Rückung mit seilgestütztem Forwarder anhand detaillierter Produktivitäts- und Prozessanalysen zu untersuchen. Mit Hilfe eines Produktivitätsmodells soll anschließend eine Kostenanalyse inklusive Systemvergleich erstellt werden. Zusätzlich gilt es mittels Systemvergleichen, sowohl zwischen seilgestütztem Forwarder und konventionellem Forwarder, als auch zwischen seilgestütztem Forwarder und Rückung mit Seilgeräten, diese Ernte-technologie zu bewerten.

Darüber hinaus wird in dieser Studie auch auf die Vor- und Nachteile dieser neuen Erntetechnologie eingegangen. Zusätzlich wird auch der Zeitaufwand für die Seilmontage und -demontage, welcher bisher gänzlich unbekannt ist, anhand von Prozessanalysen dargestellt. Bei der untersuchten Maschine handelt es sich um einen seilgestützten Forwarder vom Typ „John Deere 1110E“.

Konkret soll in dieser Masterarbeit eine Produktivitätsanalyse eines seilgestützten Forwarders durchgeführt werden. Ebenfalls sollen die Montage- und Demontageprozesse der Seilunterstützung analysiert werden. Die Einsatzkosten sollen kalkuliert werden, um in weiterer Folge Systemvergleiche durchführen zu können. Schlussendlich sollen noch Empfehlungen für den Einsatzbereich abgegeben werden.

## 2 ASPEKTE - VOLLMECHANISIERTE ERNTE TECHNOLOGIE

### 2.1 Bestandesschäden

Als Bestandesschäden versteht man den Anteil an geschädigten Bäumen im Verhältnis zu der Anzahl der im Bestand verbleibenden Bäume. Diese Schäden können durch den Fäll-Prozess als auch durch den Rücke-Prozess entstehen. Die Bestandesschäden sind eine Funktion von Fahrereigenschaften, Arbeitsverfahren, Rückerichtung, Eingriffszeitpunkt, Eingriffsstärke, Bestandesdichte, Baumartenmischung und Geländebeziehungen (STAMPFER, 2002b).

Zur Feststellung von Bestandesschäden wird zumeist die Methode nach MENG (1978) herangezogen. Das generelle Problem von Fäll- und Ruckeschäden ist insbesondere der ökonomische Schaden, der vor allem als Folgeschaden durch holzerstörende Mikroorganismen auftritt. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Nutzholzungtauglichkeit und spiegelt sich in einem geringeren Holzerlös wider.

Nach Schätzungen von BUTORA & SCHWAGER (1986) verursachen Bestandesschäden in Durchforstungen einen um circa 11,5 % geringeren Holzerlös. Um eine nachhaltige Bewirtschaftung zu gewährleisten, gilt es also die Bestandesschäden so gering wie möglich bzw. innerhalb bestimmter Grenzen zu halten. Laut BUTORA & SCHWAGER (1986) liegt der maximal zu tolerierende Anteil an Bestandesschäden in Durchforstungen bei 15 %, da dieser Prozentsatz bei Folgedurchforstungen wieder entnommen werden kann. Für österreichische Gebirgswälder können in Abhängigkeit vom Arbeitssystem folgende Grenzwerte für Bestandesschäden abgegeben werden (STAMPFER et al., 2002):

- Harvester Forwarder <10 % Schäden am verbleibenden Bestand
- Harvester und Seilgerät <15 % Schäden am verbleibenden Bestand
- Seilrückung im Baumverfahren zwischen 20 % bis maximal 30 % Schäden am verbleibenden Bestand

Beim Einsatz von konventionellen Harvestern und Forwardern im Steilgelände wurden Bestandesschäden von mehr als 30 % am verbleibenden Bestand festgestellt (SAUTER et al., 1998). Dieser hohe Wert ist als inakzeptabel zu betrachten und ist wohl auf die damals noch nicht ausgereifte Technik der Maschinen für den Hang zurückzuführen. Bei einer neueren Studie über die Maschinenkombination Harvester-Seilforwarder im steileren Gelände stellte WRATSCHKO (2006) fest, dass lediglich 11,7 % der verbleibenden Bäume beschädigt wurden, wobei nur 40 % dieser Schäden direkt auf den Seilforwarder zurückzuführen sind.

## 2.2 Bodenschäden

Aufgrund der im Vergleich zum Harvester häufigeren Überfahrten des Forwarders in der Trasse und des höheren Gewichtes, sind Bodenschäden hauptsächlich auf den Forwarder zurückzuführen. Dabei kommt es durch die Befahrung zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte. Dies führt in weiterer Folge zu einer Verringerung des Porenvolumens sowie zu einer Beeinflussung des Wasserhaushaltes und Gasaustausches im Boden. Um den bodenverträglichen Einsatz von Forwardern zu verbessern, gibt es eine reiche Palette an technischen Maßnahmen (Tabelle 1).

Einen schonenden Effekt von Bogiebändern auf die Grobporenreduktion konnten KREMER et al. (2007) feststellen. Die Autoren empfehlen auf jeden Fall den Einsatz von Bogiebändern, wobei die Wahl des Bandtyps in Bezug auf den Bestand wohl überlegt sein muss. Gleichzeitig empfiehlt sich der Einbau einer Reisigmatte in die Rückegasse, da diese den Bodendruck der Forstmaschine auf eine größere Fläche verteilt und somit den spezifischen Druck pro Flächeneinheit reduziert. Laut Untersuchungen von KREMER et al. (2004) kann die Anlage einer Reisigmatte Verdichtungen reduzieren und zum Erhalt des Gesamtporenraumes beitragen.

Auch im Bereich der Reifen gewährleisten technische Maßnahmen eine verbesserte Bodenschonung. So konnte zum Beispiel EBEL (2006) zeigen, dass bei einem niedrigeren Reifendruck eine verbesserte Lastverteilung auf weichem Untergrund erreicht werden kann. Da aber auf harten Untergründen, wie es auf Forststraßen der Fall ist, höhere Reifendrucke vorteilhafter sind, ist die Absenkung des Reifendruckes nur bedingt möglich. Hier wäre die Ausstattung des Forwarders mit einer Druckregelanlage hilfreich, was aber wiederum mit erhöhten Anschaffungskosten verbunden ist. Des Weiteren kann die Verwendung von Radialreifen statt Diagonalreifen empfohlen werden, welche aufgrund ihres Aufbaues den Bodendruck und die Traktion positiv beeinflussen (WEISE, 2008).

Betreffend Bodenschäden soll an dieser Stelle noch speziell auf den seilgestützten Forwarder eingegangen werden. WRATSCHKO (2006) konnte nämlich nachweisen, dass sich durch den Einsatz einer Traktionshilfswinde die Spurrinntiefe signifikant verringert. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich der Schlupf durch den Einsatz der Traktionshilfswinde deutlich verringert. Alle diese technischen Maßnahmen nützen in Bezug auf die Bodenschonung jedoch nicht maßgeblich, wenn die Witterungsverhältnisse und Bodenart nicht miteinbezogen werden. Die Tragfähigkeit des Bodens wird nämlich vor allem durch die Bodenart und den Wassergehalt beeinflusst. So steigt beispielsweise mit sinkendem Wassergehalt und bei Bodenfrost die Tragfähigkeit des Bodens (HAUCK, 2001).

**Tabelle 1: Mögliche technische Maßnahmen des Bodenschutzes (WEHNER et al., 2010)**

| <b>Technische Maßnahme</b>                              | <b>Umsetzbarkeit (Zeithorizont)</b> | <b>Aufwand, Kosten</b>           | <b>Effizienz, Priorität</b> | <b>Konsequenzen</b>   |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---|
| <b>Reisigmatten</b>                                     | Sofort                              | Niedrig bis mittel               | Mittel                      | Hohe Eingriffsstärke notwendig, Nährstoffkonzentration, beschränkt auf wenige Bestandestypen                            |
| <b>Aus- bzw. Fortbildung (Fahrer)</b>                   | Sofort                              | Gering bis mittel                | Hoch                        | Klar definierte Vorgaben durch den Forstbetrieb notwendig, Überprüfung der Vergabepaxis, eigener Planungsaufwand größer |
| <b>Fülldruck der Reifen</b>                             | Sofort                              | Gering                           | Gering                      | Geringe Flexibilität, mehr Aufklärungsarbeit seitens Hersteller/Vertreiber erforderlich                                 |
| <b>Befahrungsmanagement (Software auf der Maschine)</b> | Sofort                              | Hoch (sehr breiter Kostenrahmen) | Hoch                        | Aufwand je nach Fragestellung (Routenoptimierung, Einsatzplanung)   |
| <b>Online Spurtiefenmessung</b>                         | Mittelfristig                       | Gering                           | Hoch (forschungsbedarf)     | Höhere Kosten   |
| <b>Radialreifen</b>                                     | Sofort                              | Gering bis mittel                | Hoch                        | Höhere Kosten (1000 €/Reifen) Wissenslücke: Lebensdauer   |
| <b>Vollautomatische Druckregelanlage</b>                | Sofort                              | Hoch                             | Hoch                        | Hohe Kosten (ca. 15000 – 20000 €)   |
| <b>Großer Reifendurchmesser</b>                         | Sofort                              | Niedrig                          | Mittel                      | Begrenzte Reifenzahl (kein Bogie), Achsen schwerer, höherer Schwerpunkt   |
| <b>Traktionshilfswinde</b>                              | Sofort                              | Hoch                             | Sehr hoch                   | Hohe Kosten, enges Einsatzspektrum  |
| <b>Tragende Bogiebänder</b>                             | Sofort                              | Gering                           | Hoch (forschungsbedarf)     | Geringere Traktion, Unfallgefahr am Hang  |
| <b>Aggressive Bogiebänder</b>                           | Sofort                              | Gering                           | Hoch                        | Wurzel- und Bodenschaden, Ergonomie, Wegeschäden  |

## 2.3 Physische und psychische Belastung

Mit zunehmender Mechanisierung von Holzerntesystemen kommt es auch zu einer Änderung der Belastungsstruktur des bedienenden Personals im Vergleich zu konventionellen Holzerntesystemen. Verschiedenste Studien (BÖLTZ, 1988; STAMPFER et al., 1997) zeigen, dass es bei konventionellen Holzerntesystemen mit motormanueller Fällung zu deutlichen Überschreitungen der Dauerleistungsgrenze kommt.

Laut Untersuchungen von STAMPFER (1996) kann die Arbeit mit dem Forwarder aber als körperlich leicht eingestuft werden, da die Arbeitspulse deutlich unter der Dauerleistungsgrenze liegen. Zu Problemen kommt es insbesondere durch die überwiegend sitzende Arbeitshaltung des Maschinenführers, welche zu einer einseitigen statischen Belastung im Bereich der Nacken-, Schulter- und Rückenmuskulatur führt und somit eine Schwächung des Stütz- und Halteapparates folgt (GRÖGER & LEWARK, 2002). Jährlich verspüren mehr als die Hälfte aller Maschinenbediener in Schweden Schmerzen im Nacken- und Schulterbereich. Auch Probleme mit der Lendenwirbelsäule, Ellbogen und Knie treten unter Maschinenbedienern regelmäßig auf. (GELLERSTEDT, 2000)

Neben diesen Beschwerden sind vor allem mit zunehmender Mechanisierung der Holzernte psychische Belastungen und Zeitdruck zu nennen. Untersuchungen von SCHMID-VIELGUT (1985) zeigen bei höher mechanisierten Systemen eine höhere psychische Aktiviertheit und ein deutlicheres Auftreten von Ermüdungserscheinungen. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass beim Bedienen der Maschinen vom Maschinenführer höchste Konzentration und ständige Aufmerksamkeit gefordert werden. In Zusammenhang mit langen Arbeitstagen, Schichtarbeit und Forderung nach hohen Produktivitäten, können auch Magenprobleme, Kopfschmerzen und Gereiztheit auftreten (GELLERSTEDT, 2000). Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Belastungsfaktor ist die soziale Abgeschlossenheit am Arbeitsplatz. Diese lässt sich zumindest durch Telefon- bzw. Funkkonferenzen mit Arbeitskollegen vermindern.

Belastungen durch Lärm, Schadstoffe und Vibrationen spielen für den Maschinenbediener im Vergleich zu motormanuellen Systemen aufgrund der klimatisierten und gut schallisolierten Fahrerkabinen der modernen Maschinen kaum eine Rolle.

## 2.4 Arbeitssicherheit

Um die Arbeit in steilerem Gelände möglich zu machen, gibt es zwei Voraussetzungen. Das Vorhandensein einer selbstnivellierenden Fahrerkabine und eines tiltbaren Krans ist zur Verbesserung der Ergonomie unbedingt notwendig. Des Weiteren muss für die Sicherheit gegen ein Abrutschen am Hang gesorgt sein. Um diese zu gewährleisten, darf die Schwerkraft, welche die Maschine nach unten zieht, die Traktionskraft, welche die Maschine auf dem Boden entwickeln kann, nicht überschreiten. Der Vorteil einer eingebauten Traktionshilfswinde liegt darin, dass die Zugkraft der Winde die Traktionskraft erhöht, und dadurch höhere Hangneigungen befahren werden können (VISSER & STAMPFER, 2015).

Um eine Gefährdung von Mensch und Maschine zu verhindern, sollte der Einsatz des Seilforwarders aber nur bis zu einer Hangneigung erfolgen, bei der im Falle eines Seilrisses noch ein sicherer Stand gegen Abrutschen in der Trasse gewährleistet ist. Für eine 32 Tonnen Maschine ist somit eine sichere Befahrbarkeit bis circa 70 Prozent Hangneigung unter guten Bodenbedingungen (trockene feste Böden – Traktionskoeffizient 0,7) möglich. Bei schlechten Bodenbedingungen (nasse weiche Böden – Traktionskoeffizient 0,4) hingegen ist eine sichere Befahrbarkeit nur bis circa 40 Prozent Hangneigung gewährleistet.

Grundsätzlich sollten beim Einsatz des Seilforwarders folgende Punkte beachtet werden (HAAS MASCHINENBAU, 2016).

- Die Traktionshilfswinde soll der Maschine zur Erhöhung der Traktion dienen und nicht zum „Abseilen“ in der Trasse.
- Der Kraftschluss mit dem Boden muss auch bei einem Seilriss oder gelöstem Seil gehalten werden können.
- Die maximale Hangneigung muss immer den Gelände- und Bodenverhältnissen angepasst werden.
- Die Kontrolle des Seiles auf Beschädigungen muss regelmäßig durchgeführt werden.
- Ankerbäume und –stümpfe müssen richtig ausgewählt werden und regelmäßig kontrolliert werden.
- Ein Abseilen oder Bergen anderer Maschinen oder Personen mit der Traktionshilfswinde ist verboten.
- Es dürfen sich keine Personen im Gefahrenbereich aufhalten.

## 2.5 Anbieter von Seilforwardern

Derzeit gibt es vier Unternehmen, die sich auf die Herstellung von Traktionshilfswinden bzw. seilgestützter Forwarder spezialisiert haben:

- Herzog Forsttechnik AG
- Haas Maschinenbau GmbH & Co. KG
- Komatsu Forest GmbH
- HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau GmbH & Co. KG

Vergleicht man die Hersteller hinsichtlich dem Windensystem so fällt auf, dass sowohl Spillwinden als auch Trommelwinden verwendet werden. Die Zugkraft variiert unter den Herstellern zwischen 9 Tonnen und 15 Tonnen. Bei allen Herstellern ist ein Frontaufbau als auch ein Heckaufbau der Winde möglich (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Vergleich der Traktionshilfswinden der verschiedenen Hersteller (KASTNER, 2016)**

| Hersteller                         | Haas             | Komatsu    | HSM        | Herzog     |
|------------------------------------|------------------|------------|------------|------------|
| <b>Windensystem</b>                | Spill            | Spill      | Trommel    | Trommel    |
| <b>Zugkraft (t)</b>                | 0-9              | 0-7,2      | 0-15       | 0-10       |
| <b>Seildurchmesser (mm)</b>        | 14               | 14         | 16         | 14/15      |
| <b>Max. Seillänge (m)</b>          | 300-500          | 350-500    | 450        | 340/280    |
| <b>Rechnerische Bruchkraft (t)</b> | 21,1             | 22,1       | 27,6       | 21,1/24,4  |
| <b>Anbau</b>                       | Front/Heck/Mobil | Front/Heck | Front/Heck | Front/Heck |
| <b>Besonderheit</b>                | tiltbar          |            |            |            |

### 3 MATERIAL UND METHODEN

#### 3.1 Modellhypothese

Mit Produktivitätsmodellen kann die Systemleistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern geschätzt werden. Um die Einsatzmöglichkeiten von Forstmaschinen zu beurteilen und Vergleiche zwischen verschiedenen Holz-erntesystemen durchzuführen, ist das Verständnis der Einflussgrößen auf die Produktivität ein wichtiger Faktor (STAMPFER, 2002b).

In vorangegangenen Forwarderstudien wird die Produktivität zumeist als eine Funktion von Fuhrevolumen, Stückvolumen, Rückedistanz, Hangneigung und Ladedistanz angegeben (u.a. AFFENZELLER, 2005; WRATSCHKO, 2006).

$$PROD_{Forw.} = f(\text{Fuhrevolumen, Stückvolumen, Rückedistanz, Hangneigung, Ladedistanz})$$

Das Produktivitätsmodell wurde anfangs einfachheitshalber in drei unterschiedliche Komponenten zerlegt.

1. Fahrtkomponente
2. Ladekomponente
3. Entladekomponente

Für die einzelnen Teilmodelle wurden folgende Annahmen getroffen:

##### 1. Fahreffizienz

Anstatt der Fahreffizienz wird die abhängige Hilfsvariable Fahren (min) verwendet. Für diese kann angenommen werden, dass sie von der Rückedistanz und von der Neigung der Rückedistanz beeinflusst wird. Um nachfolgend wieder die Fahreffizienz zu erhalten, muss durch das Fuhrevolumen dividiert werden (Formel 1).

##### 2. Ladeeffizienz

Bei der Ladeeffizienz geht man davon aus, dass diese vom Stückvolumen, der Ladedistanz und der Neigung auf der Rückegasse beim Laden beeinflusst wird (Formel 2).

##### 3. Entladeeffizienz

Für die Entladeeffizienz wird angenommen, dass sie lediglich vom Stückvolumen beeinflusst wird (Formel 3).

$$\text{Fahreffizienz} = \frac{f(RD, NRD)}{FV} \quad \text{Formel 1}$$

$$\text{Ladeeffizienz} = f(StV, LD, NLD) \quad \text{Formel 2}$$

$$\text{Entladeeffizienz} = f(StV) \quad \text{Formel 3}$$

Tabelle 3: Beschreibung der abhängigen Variablen

| Bezeichnung      | Beschreibung   | Einheit                  |
|------------------|--|--------------------------|
| Fahren           | Benötigte Zeit für die Fahrtätigkeit (Leer- und Lastfahrt) | min                      |
| Laden            | Benötigte Zeit für die Ladetätigkeit                       | min                      |
| Entladen         | Benötigte Zeit für die Entladetätigkeit                    | min                      |
| Fahreffizienz    | Systemeffizienz Fahren                                     | min/m <sup>3</sup> o. R. |
| Ladeeffizienz    | Systemeffizienz Laden                                      | min/m <sup>3</sup> o. R. |
| Entladeeffizienz | Systemeffizienz Entladen                                   | min/m <sup>3</sup> o. R. |

Tabelle 4: Beschreibung der Kovariaten

| Abkürzung | Bezeichnung          | Beschreibung   | Einheit              |
|-----------|----------------------|--|----------------------|
| StV       | Stückvolumen         | Durchschnittliches Stückvolumen einer Fuhre  | m <sup>3</sup> o. R. |
| FV        | Fuhrevolumen         | Durchschnittliches Volumen einer Fuhre   | m <sup>3</sup> o. R. |
| RD        | Rückedistanz         | Mittelwert aus dem am nächsten und dem am weitesten entfernten Ladepunkt zur Entladestelle | m                    |
| NRD       | Neigung Rückedistanz | Durchschnittliche Neigung der Rückegasse auf der Rückedistanz                              | %                    |
| LD        | Ladedistanz          | Distanz vom ersten Aufladen bis zum letzten Aufladen                                       | m                    |
| NLD       | Neigung Ladedistanz  | Durchschnittliche Neigung der Rückegasse auf der Ladedistanz                               | %                    |

Um anschließend ein Gesamtmodell zu erhalten, müssen die einzelnen Effizienzen addiert werden. Als Zeitschema wird die produktive Systemstunde inklusive Unterbrechungen kleiner 15 Minuten ( $PSH_{15}$ ) verwendet, da dies bei forstlichen Zeitstudien üblich ist. Deshalb muss ein sogenannter „k1“ – Faktor berücksichtigt werden, welcher eine Umrechnung von  $PSH_0$  in  $PSH_{15}$  ermöglicht. Dieser Korrekturfaktor k1 kann selbst aus der gesamten Aufnahmezeit ermittelt werden, oder man entnimmt ihn aus der Literatur. Der Korrekturfaktor für diese Studie wurde aus der Literatur entnommen und beträgt 1,30 (STAMPFER, 2002b).

Um die Systemproduktivität in  $\text{m}^3/\text{PSH}_{15}$  zu erhalten, muss noch der Kehrwert gebildet werden, wobei der Wert 60 zur Umrechnung von Minuten auf Stunden dient. Die Herleitung der Systemproduktivität findet sich in Formel 4. Die dazugehörigen Variablen werden in Tabelle 5 erklärt.

$$PROD. = \frac{60}{(1 + (k1)) * (Effiz.F. + Effiz.L. + Effiz.E.)} \quad \text{Formel 4}$$

**Tabelle 5: Erklärung der Variablen für die Systemproduktivität**

| Bezeichnung     | Beschreibung  | Einheit                               |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| <b>PROD.</b>    | Systemproduktivität des John Deere 1110E                              | $\text{m}^3$ o. R./ $\text{PSH}_{15}$ |
| <b>k1</b>       | Umrechnungsfaktor von Zeitbedarf $\text{PSH}_0$ auf $\text{PSH}_{15}$ |                                       |
| <b>Effiz.F.</b> | Systemeffizienz Fahren  | $\text{min}/\text{m}^3$ o. R.         |
| <b>Effiz.L.</b> | Systemeffizienz Laden   | $\text{min}/\text{m}^3$ o. R.         |
| <b>Effiz.E.</b> | Systemeffizienz Entladen  | $\text{min}/\text{m}^3$ o. R.         |

### 3.2 Beschreibung der Aufnahmegebiete

Die Aufnahmen für diese Studie wurden an drei unterschiedlichen Orten durchgeführt:

1. Kapfenberg (Steiermark)
2. Jauerling (Niederösterreich)
3. Viessling (Niederösterreich)

Die durchschnittliche Trassenlänge über alle Aufnahmegebiete hinweg betrug 129,5 Meter bei einer durchschnittlichen Neigung von 50,6 %. Der durchschnittliche Holzanfall pro Trasse betrug  $38,5 \text{ m}^3$  (Tabelle 6). Somit ergibt sich ein durchschnittlicher Holzanfall von  $0,3 \text{ m}^3/\text{lkm}$ . Dieser niedrige Wert lässt sich daraus erklären, dass sowohl Endnutzungen als auch Vornutzungen durchgeführt wurden.

**Tabelle 6: Statistische Kennwerte über alle Trassen**

|                           | Länge (m) | Neigung (%) | Holzanfall ( $\text{m}^3$ ) |
|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------------|
| <b>Mittelwert</b>         | 129,5     | 50,6        | 38,5                        |
| <b>Standardabweichung</b> | 70,5      | 10,1        | 44,5                        |
| <b>Spannweite</b>         | 210,0     | 34,0        | 133,4                       |

### 3.2.1 Kapfenberg

In Kapfenberg handelte es sich um einen 100-jährigen Fichtenbestand mit vereinzelt Lärchennestern. Insgesamt wurden in Kapfenberg drei Trassen aufgenommen, in denen sowohl Sägerundholz, Industrieholz als auch Brennholz gerückt wurden. Die Rückung fand einerseits in Durchforstungen als auch in Kahlschlägen statt (Abbildung 1). Dies erklärt auch den relativ hohen Holzanfall von bis zu 138 m<sup>3</sup> pro Trasse (Tabelle 7).

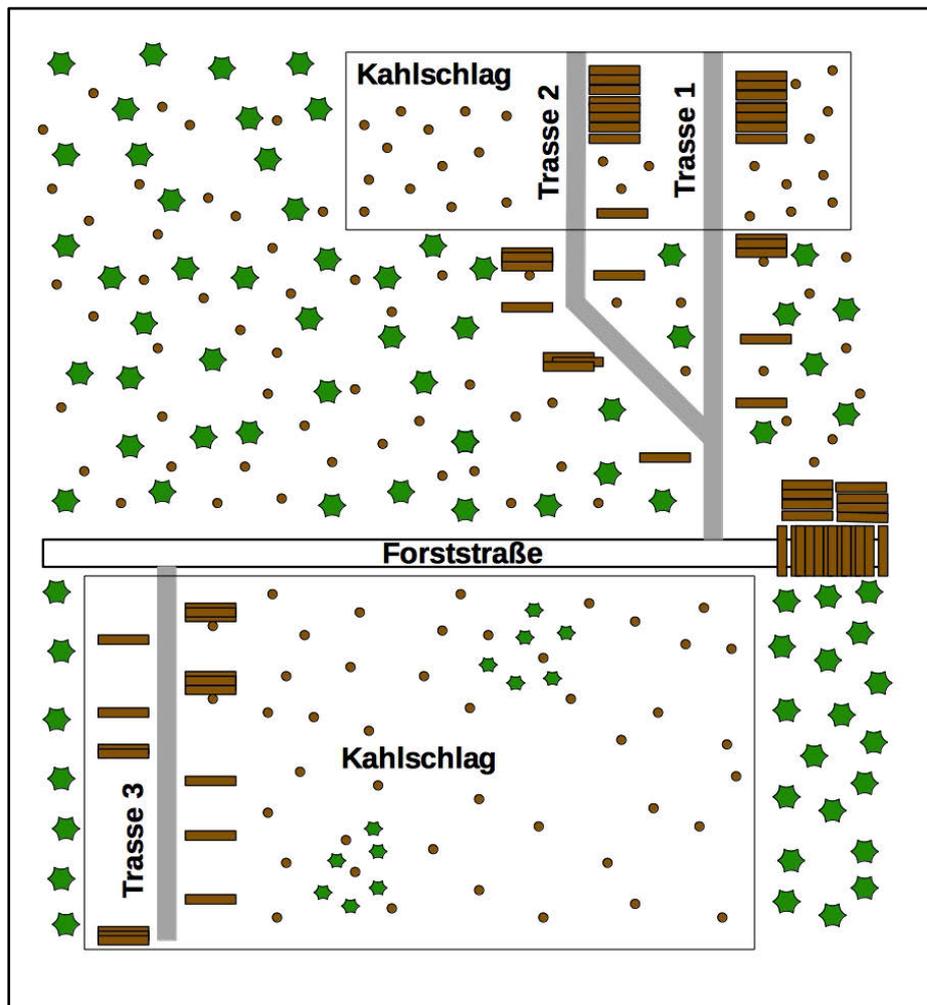


Abbildung 1: Skizze des Aufnahmegebietes bei Kapfenberg

Tabelle 7: Daten zu den Trassen bei Kapfenberg

| Trasse | Länge (m) | Ø Neigung (%) | Rückung | Holzanfall (m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------|---------------|---------|------------------------------|
| 1      | 250       | 33,5          | bergab  | 131.4                        |
| 2      | 240       | 35            | bergab  | 138.2                        |
| 3      | 120       | 40,4          | bergauf | 127.4                        |

### 3.2.2 Jauerling

Die erhobenen Fuhren am Jauerling umfassten einerseits eine Kahlschlagfläche, andererseits eine Durchforstung in einem 40-jährigen Fichtenbestand, welcher durch Eisbruch geschädigt war. Je nach Schadholzanteil entschied man sich für einen Kahlschlag oder eine Durchforstung (Abbildung 2). Zusätzlich wurde auf der gesamten Fläche der Schlagabraum mit dem Forwarder zur Forststraße transportiert. Insgesamt wurden sechs Trassen mittels Prozessanalyse erfasst, in denen Sägerundholz, Industrieholz, als auch Brennholz gerückt wurden.

Der Industrieholzanteil überwog gegenüber dem Sägerundholzanteil aufgrund des geringen Bestandesalters. Die Neigungen der Trassen variierten zwischen 57,7 % und 67,5% (Tabelle 8).

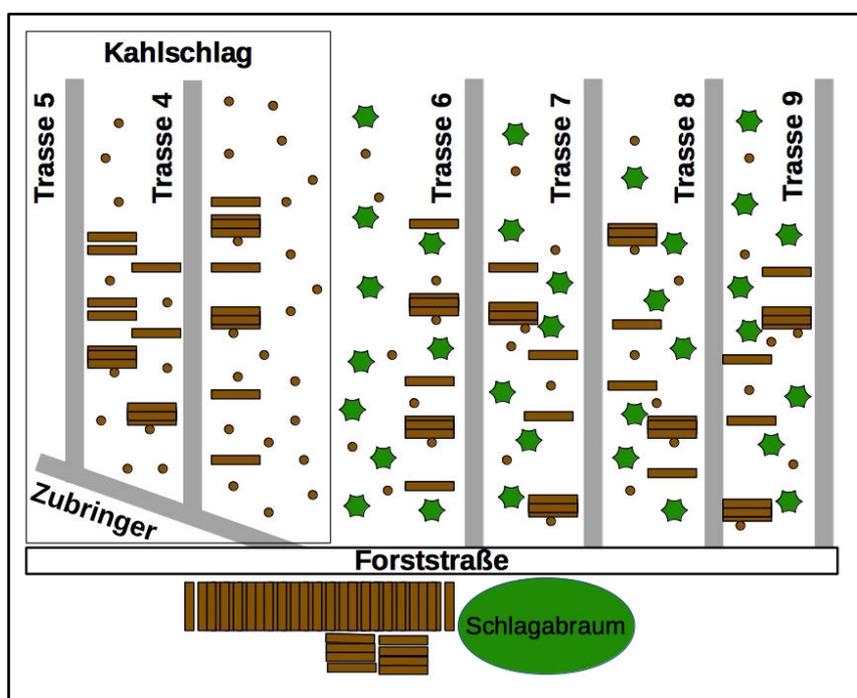


Abbildung 2: Skizze des Aufnahmegebietes am Jauerling

Tabelle 8: Daten zu den Trassen am Jauerling

| Trasse | Länge (m) | Ø Neigung (%) | Rückung | Holzanfall (m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------|---------------|---------|------------------------------|
| 4      | 75        | 58,9          | bergab  | 10,9                         |
| 5      | 66        | 57,7          | bergab  | 43,8                         |
| 6      | 62        | 61,3          | bergab  | 32,5                         |
| 7      | 52        | 66,2          | bergab  | 16,2                         |
| 8      | 50        | 67,5          | bergab  | 13,3                         |
| 9      | 40        | 64,9          | bergab  | 7,9                          |

### 3.2.3 Viessling

Der 50-jährige Bestand in Viessling war ebenfalls von Eisbruchschäden geprägt. Teilweise mussten geschädigte Bäume stehen gelassen werden, da es Vorgabe des Besitzers war, Kahlf Flächen zu vermeiden (Abbildung 3). In den neun erfassten Trassen wurden Sägerundholz, Industrieholz als auch Brennholz gerückt.

Die Neigungen der Trassen variierten zwischen 44,5 % und 49,9 %. Trassenlängen von 100 m bis 228 m wurden erreicht, wobei bergauf als auch bergab gerückt wurde (Tabelle 9).



Abbildung 3: Skizze des Aufnahmegebietes bei Viessling

Tabelle 9: Daten zu den Trassen bei Viessling

| Trasse | Länge (m) | Ø Neigung (%) | Rückung | Holzanfall (m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------|---------------|---------|------------------------------|
| 10     | 120       | 45,6          | bergab  | 17,4                         |
| 11     | 200       | 49,9          | bergauf | 7,0                          |
| 12     | 115       | 45,6          | bergab  | 18,6                         |
| 13     | 120       | 49,9          | bergauf | 4,8                          |
| 14     | 180       | 46,6          | bergauf | 22,6                         |
| 15     | 103       | 47,7          | bergab  | 18,8                         |
| 16     | 100       | 44,5          | bergauf | 19,0                         |
| 17     | 210       | 46,8          | bergauf | 41,7                         |
| 18     | 228       | 49,4          | bergauf | 22,0                         |

### 3.3 Arbeitsweise

Bei der vollmechanisierten Holzernte mit Harvester-Forwarder arbeiten beide Maschinen getrennt voneinander. Bevor der Harvester mit der Arbeit beginnt, wird zuerst am Bestandesrand festgelegt, wo die Trassen verlaufen werden. Der Trassenabstand richtet sich nach der Kranreichweite des Harvesters. Generell gilt, dass der Trassenabstand die doppelte Kranreichweite betragen soll. Nachdem der Harvester die Arbeit in der ersten Trasse beendet hat, kann der Forwarder mit dem Rücken des in der Trasse vorkonzentrierten Holzes beginnen. Vor dem Start der Rückung muss zunächst jedoch noch das Seil der Traktionshilfswinde befestigt werden. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten.

Rückt der Forwarder bergauf, so wird das Windenseil direkt oberhalb der Forststraße an einem Ankerbaum befestigt und dann in die Trasse eingefahren. Wird bergab gerückt und ist ein Einfahren von oben in die Trasse nicht möglich, so kann das Seil auf unterschiedliche Arten an das obere Trassenende gebracht werden.

Ist der Harvester vorhanden, so ist es möglich, dass der Harvester das Seil bis zum Trassenende hinaufzieht. Steht kein Harvester zur Verfügung, kann das Seil mittels Hilfswinde, welche am Forwarder montiert ist, zum oberen Trassenende gezogen werden. Dies geschieht, indem der Fahrer das Kunststoffseil der Hilfswinde schon beim Forwarder am schwereren Stahlseil der Traktionshilfswinde einhängt und anschließend mit dem Kunststoffseil die Trasse hinaufgeht. Am oberen Trassenende wird das Kunststoffseil dann idealerweise um eine Umlenke-rolle gelegt. Danach wird mittels Funk die Hilfsseilwinde betätigt und das Stahlseil hinaufgezogen. Nachdem das Stahlseil das Trassenende erreicht hat, wird das Kunststoffseil vom Stahlseil gelöst und wieder eingezogen. Anschließend wird das Stahlseil an einen geeigneten Ankerbaum oder Baumstumpf befestigt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der Forwarder leer die Trasse soweit hinauffährt, bis kein Weiterkommen mehr möglich ist. Kommt der Forwarder nicht bis ans obere Trassenende, so bleiben die oben beschriebenen Möglichkeiten übrig, um das Seil an einem geeigneten Ankerbaum zu befestigen. Aus Gründen der Sicherheit ist diese Methode jedoch abzulehnen.

Beim Umhängen des Seiles in eine andere Gasse bestehen grundsätzlich die gleichen Möglichkeiten wie bereits beschrieben. Zusätzlich ist es möglich, dass der Harvester am oberen Trassenende eine kleine Verbindungsgasse zur nächsten Trasse für den Forwarder freischneidet. Ist eine Verbindungsgasse vorhanden, oder ist es auf Grund des Bestandes möglich, in die anschließende Gasse zu fahren, so kann sich der Forwarder am Ankerbaum/Stumpf der anschließenden Gasse einhängen und sich so in diese Gasse ziehen.

Generell beginnt der Forwarder mit dem Laden immer am oberen Trassenende bei der Bergabrückung und am unteren Trassenende bei der Bergaufrückung (Abbildung 4 und Abbildung 5). Dabei wird normalerweise zuerst das Sägerundholz, dann das Industrieholz, anschließend das Brennholz und, falls gewünscht, noch der Schlagabraum gerückt.

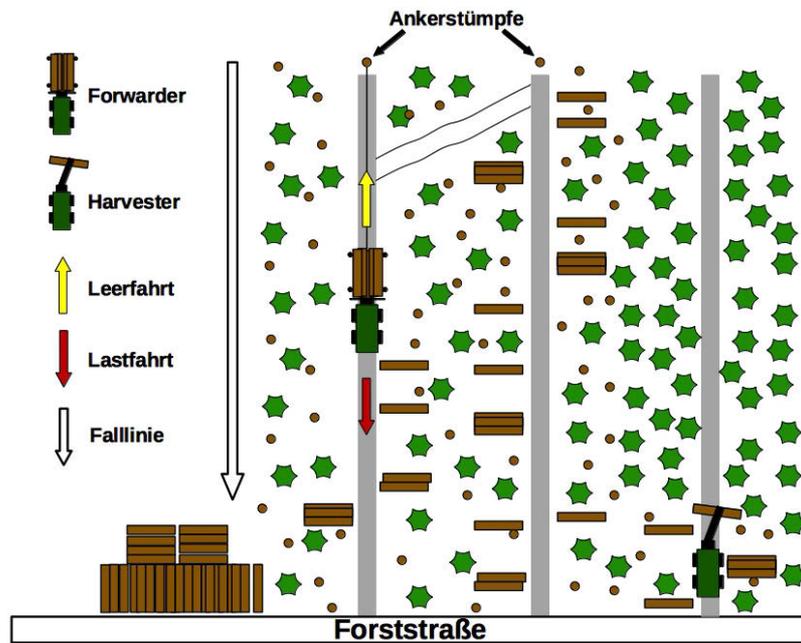


Abbildung 4: Darstellung der Arbeitsweise bei der Bergabrückung

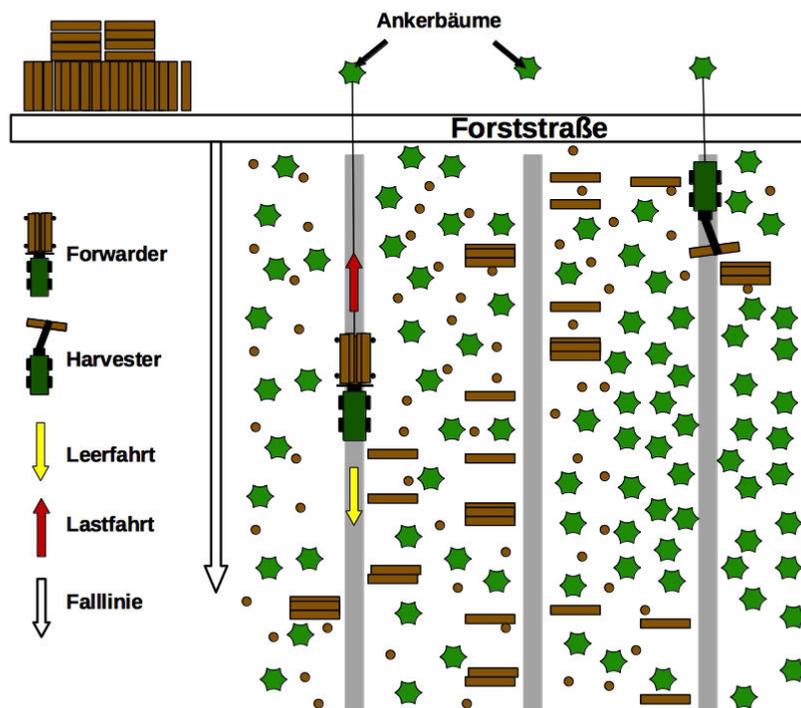


Abbildung 5: Darstellung der Arbeitsweise bei der Bergaufrückung

### **3.4 Maschinenbeschreibung**

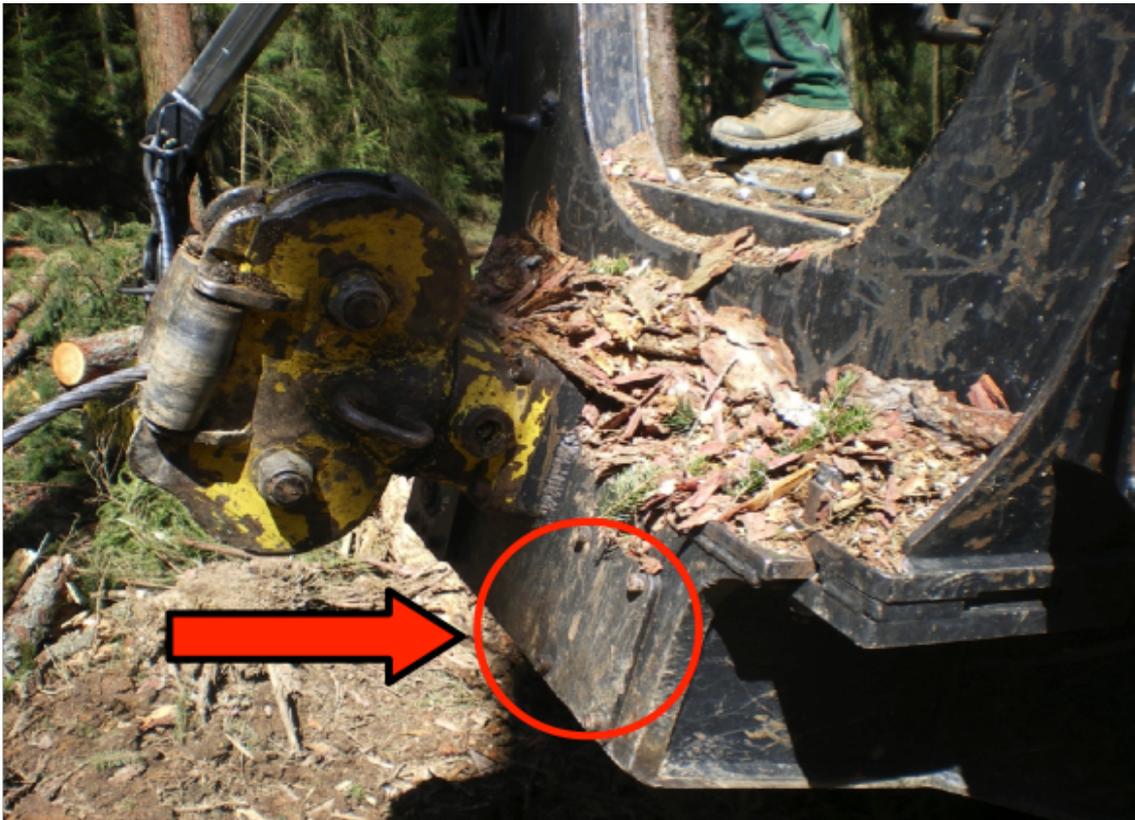
Bei der zu untersuchenden Maschine handelt es sich um einen mittelgroßen Rückezug des Typs John Deere 1110E, der als Allroundgerät sowohl in der Durchforstung als auch bei der Endnutzung eingesetzt werden kann. Der Forwarder hat eine drehbare, selbstnivellierende Kabine und verfügt über eine Zuladungskapazität von 12 Tonnen, bei einer Motorleistung von 136 kW (Tabelle 10). Die drehbare Kabine ermöglicht es dem Fahrer, den Kranbewegungen bequem zu folgen, was ein sichereres und ergonomischeres Laden der Stämme zur Folge hat. Mit einer Kranreichweite von zehn Metern ist es möglich, einen Rückegassenabstand von zwanzig Metern einzuhalten.

**Tabelle 10: Technische Daten des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016)**

| <b>JOHN DEERE 1110E</b>                        |  |
|--|--|
| <b>Zuladung</b>                                | 12 000 kg  |
| <b>Dieselmotor</b>                             | John Deere 6068 PowerTech Plus mit Turbolader und Ladluftkühlung, 6 Zylinder, Hubraum 6,8 Liter  |
| <b>Maximale Leistung</b>                       | 136 kW (1900 U/min)/ 183 PS  |
| <b>Drehmoment</b>                              | 780 Nm bei 1400 U/min  |
| <b>Kraftstofftank</b>                          | 167 l  |
| <b>Getriebe</b>                                | Hydrostatisch-mechanisches Zweigang-Getriebe   |
| <b>Zugkraft</b>                                | 160 kN   |
| <b>Fahrgeschwindigkeit, 1. Gang</b>            | 0-7,5 km/h   |
| <b>Fahrgeschwindigkeit, 2. Gang</b>            | 0-23 km/h  |
| <b>Lenkung</b>                                 | Proportionale Lenkung mit elektrischem Minihebel   |
| <b>Lenkwinkel</b>                              | +/- 44°  |
| <b>Bremsen</b>                                 | Bei den Betriebsbremsen handelt es sich um hydraulisch betätigte Ölbad-Lamellenbremsen; Feststell- und Notbremse werden durch Federn betätigt; die Rahmenbremse wird automatisch betätigt. |
| <b>Achsen/Bogies</b>                           | Portaltandemachsen mit Ausgleichssystem und Differenzialsperre   |
| <b>Spannung</b>                                | 24V  |
| <b>Batterien</b>                               | 2x145 Ah   |
| <b>Drehstromgenerator</b>                      | 150 A / 28 V   |
| <b>Beleuchtung Halogen</b>                     | 8 Arbeits-, 2 Seiten-, 1 Rück- und 2 Kranscheinwerfer; LED-Scheinwerfer als Option   |
| <b>Arbeitshydraulik</b>                        | Lastabhängig   |
| <b>Pumpenleistung</b>                          | 140 cm <sup>3</sup>  |
| <b>Betriebsdruck</b>                           | 24 MPa   |
| <b>Hydrauliktank</b>                           | 161 l  |
| <b>Kran</b>                                    | CF5  |
| <b>Max. Reichweite</b>                         | 7,2/8,5/10 m   |
| <b>Bruttohbmoment</b>                          | 102 Nm   |
| <b>Schwenkmoment</b>                           | 24 Nm  |
| <b>Schwenkwinkel</b>                           | 380°   |
| <b>Drehbare und selbstnivellierende Kabine</b> | Drehbar oder drehbar und nivellierend  |
| <b>Drehwinkel</b>                              | +20 / -270°  |
| <b>Seitliche Neigung</b>                       | +/- 10°  |
| <b>Neigung nach vorn/hinten</b>                | +/- 6°   |

Bei der montierten Winde handelt es sich um das Modell „Highgrade“ der Firma Haas mit neun Tonnen Zugkraft. Die Zugkraft ist stufenlos einstellbar und die Seilgeschwindigkeit ist auf den Fahrtrieb abgestimmt. Der Seildurchmesser beträgt 14 Millimeter bei einer Seillänge von 450 Laufmetern. Um die Seilspannung zu überwachen, gibt es neben dem Seileinzug eine Kamera mit Bildübertragung in die Fahrerkabine (Abbildung 6).

Um bei der Bergabrückung das Einhängen in die Trasse möglichst komfortabel zu machen, ist zusätzlich noch eine Hilfswinde montiert. Die Hilfswinde verfügt über ein 300 Laufmeter langes Kunststoffseil mit einem Durchmesser von 6 Millimetern und ist über Funk bedienbar.

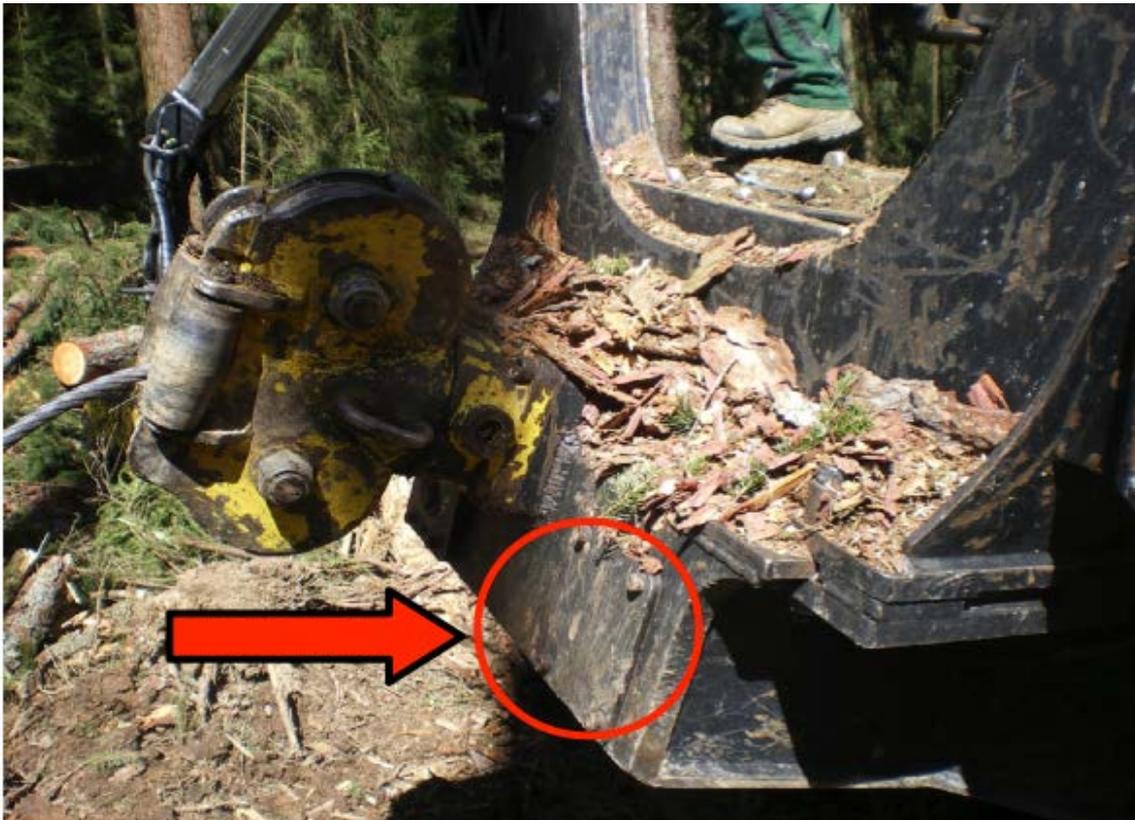


**Abbildung 6: Kamera neben dem Seileinzug (Foto: Verfasser)**

Die Länge des Forwarders beträgt 9,72 Meter bei einer Breite von 2,7 Metern (Tabelle 11 und Abbildung 7). Die Breite (Innenbreite) des Rungenkorbs wurde mittels Maßband nachgemessen, da hier Veränderungen vom Forstunternehmer vorgenommen wurden. Bei der Starkholzernte werden die Rungen einfach ausgeklappt, um mehr Holz transportieren zu können, das heißt der Forwarder benützt in der Endnutzung auch die erweiterbare Kapazität. Bei der Durchforstung werden die Rungen wieder eingeklappt, da hier meist eine geringere Breite gewünscht ist, um nicht zu viele Schäden am verbleibenden Bestand zu verursachen. In der Vornutzung fährt der Forwarder also mit verminderter Kapazität. Der Unterschied zwischen aus- und eingeklappten

Bei der montierten Winde handelt es sich um das Modell „Highgrade“ der Firma Haas mit neun Tonnen Zugkraft. Die Zugkraft ist stufenlos einstellbar und die Seilgeschwindigkeit ist auf den Fahrtrieb abgestimmt. Der Seildurchmesser beträgt 14 Millimeter bei einer Seillänge von 450 Laufmetern. Um die Seilspannung zu überwachen, gibt es neben dem Seileinzug eine Kamera mit Bildübertragung in die Fahrerkabine (Abbildung 6).

Um bei der Bergabrückung das Einhängen in die Trasse möglichst komfortabel zu machen, ist zusätzlich noch eine Hilfswinde montiert. Die Hilfswinde verfügt über ein 300 Laufmeter langes Kunststoffseil mit einem Durchmesser von 6 Millimetern und ist über Funk bedienbar.



**Abbildung 6: Kamera neben dem Seileinzug (Foto: Verfasser)**

Die Länge des Forwarders beträgt 9,72 Meter bei einer Breite von 2,7 Metern (Tabelle 11 und Abbildung 7). Die Breite (Innenbreite) des Rungenkorbs wurde mittels Maßband nachgemessen, da hier Veränderungen vom Forstunternehmer vorgenommen wurden. Bei der Starkholzernte werden die Rungen einfach ausgeklappt, um mehr Holz transportieren zu können, das heißt der Forwarder benützt in der Endnutzung auch die erweiterbare Kapazität. Bei der Durchforstung werden die Rungen wieder eingeklappt, da hier meist eine geringere Breite gewünscht ist, um nicht zu viele Schäden am verbleibenden Bestand zu verursachen. In der Vornutzung fährt der Forwarder also mit verminderter Kapazität. Der Unterschied zwischen aus- und eingeklappten

Rungen beträgt 20 Zentimeter, das heißt, dass eine Verbreiterung von 10 Zentimetern auf jeder Seite vorgenommen wurde.

Tabelle 11: Maße des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016)

| Abmessungen                        | Standard-Radstand            |
|------------------------------------|------------------------------|
| Länge (A)                          | 9720 mm                      |
| Radstand (B+C)                     | 5100 mm                      |
| Bogiemitte - Mittelgelenk (B)      | 1700 mm                      |
| Mittelgelenk - Bogiemitte (C)      | 3400 mm                      |
| Stirngitter - Bogiemitte (D)       | 2600 mm                      |
| Bogiemitte - Heck (E)              | 1900 mm                      |
| Breite - 600er Reifen (F)          | 2700 mm                      |
| Breite - 700er Reifen (F)          | 2890 mm (6-Rad 2790-2970 mm) |
| Äußerer Wendekreis - 700er Reifen  | 8243 mm                      |
| Innerer Wendekreis - 700er Reifen  | 4493 mm                      |
| Transporthöhe                      | 3800 mm                      |
| Bodenfreiheit - 6-Rad/8-Rad (G)    | 605 mm                       |
| Reifen, vorne - 6-Rad/8-Rad        | 34-14 / 26,5-20              |
| Reifen, hinten                     | 26,5-20                      |
| Minimales Maschinengewicht - 6-Rad | 15 500 kg                    |
| Minimales Maschinengewicht - 8-Rad | 17 300 kg                    |
| Böschungswinkel - 6-Rad/8-Rad      | 25° / 36°                    |

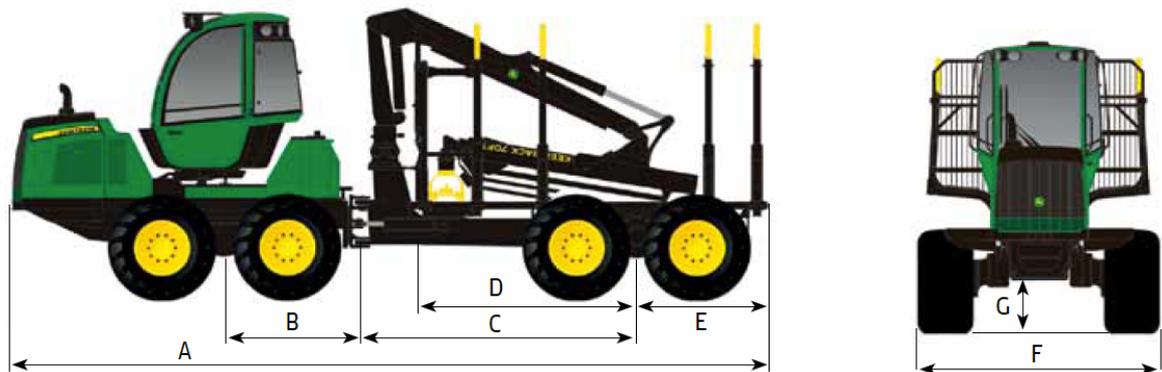


Abbildung 7: Beschreibung der Maße des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016)

### 3.5 Datenerhebung - Zeitstudie

Die Zeitstudie wurde mit Hilfe der GoBandit Action Camera mit Weitwinkelfunktion durchgeführt. Die Kamera wurde an der Kabine montiert, sodass der gesamte Arbeitsablauf des Seilforwarders auf dem Videomaterial ersichtlich war. Somit wurde der gesamte Arbeitstag des Forwarders fast lückenlos aufgenommen. Lediglich die Zeit für das Wechseln der Akkus wurde nicht in die Zeitstudie miteinbezogen. Da dieser Schritt bei der Forwardertätigkeit im normalen Arbeitsablauf nicht vorkommt, wurde dieser auch bei der Zeitstudie nicht berücksichtigt. Die Forwardertätigkeit wurde in 12 Arbeitstakte unterteilt (Tabelle 12). Die produktive Arbeitszeit ohne Unterbrechungen ( $PSH_0$ ) ergibt sich aus den Arbeitstakten Leerfahrt, Laden, Lastfahrt und Entladen.

**Tabelle 12: Beschreibung der Arbeitstakte für die Forwardertätigkeit**

| <b>Bezeichnung</b>                    | <b>Beschreibung</b>   |
|---------------------------------------|---|
| <b><math>PSH_0</math></b>             | Produktive Systemstunde ohne Unterbrechungen  |
| <b>Leerfahrt</b>                      | Vom Bewegen der Räder an der Entladestelle bis zum ersten Bewegen des Ladekrans an der ersten Ladestelle                      |
| <b>Laden</b>                          | Von der Bewegung des Ladekrans an der ersten Ladestelle bis zum Stillstand des Ladekrans nach der letzten Ladetätigkeit       |
| <b>Lastfahrt</b>                      | Vom Stillstand des Ladekrans nach der letzten Ladetätigkeit bis zur ersten Bewegung des Ladekrans an der Entladestelle        |
| <b>Entladen</b>                       | Von der ersten Bewegung des Ladekrans an der Entladestelle bis zum Stillstand des Ladekrans nach der letzten Entladetätigkeit |
| <b>Markieren der Fuhre</b>            | Vom Stillstand der Räder bis zur Bewegung der Räder nach dem Markieren  |
| <b>Seil anhängen</b>                  | Vom Stillstand der Räder bis zur Bewegung der Räder nach dem Anhängen (nur bei der ersten Trasse)                             |
| <b>Seil umhängen</b>                  | Vom Stillstand der Räder bis zur Bewegung der Räder nach dem Umhängen (zwischen den Trassen)                                  |
| <b>Unterbrechungen kleiner 15 min</b> | Unterbrechungen, die kleiner als 15 Minuten sind  |
| <b>Unterbrechungen größer 15 min</b>  | Unterbrechungen, die größer als 15 Minuten sind   |
| <b>Sortierarbeiten</b>                | Blochsartierung auf der Forststraße   |
| <b>Aufräumarbeiten</b>                | Äste und Steine von Forststraße entfernen, usw.   |

Zur Überprüfung der Modellhypothesen, und damit zur Erstellung eines passenden Regressionsmodells, wurden zusätzlich noch benötigte Variablen für die Forwardertätigkeit aufgenommen (Tabelle 13).

**Tabelle 13: Beschreibung der Einflussgrößen für die Forwardertätigkeit**

| <b>Bezeichnung</b>      | <b>Beschreibung</b>  | <b>Einheit</b> |
|-------------------------|--|----------------|
| <b>Fuhrevolumen</b>     | Volumen einer Fuhre  | m <sup>3</sup> |
| <b>Stückvolumen</b>     | Durchschnittliche Stückvolumen einer Fuhre   | m <sup>3</sup> |
| <b>Rückedistanz</b>     | Mittelwert aus dem am nächsten und dem am weitesten entfernten Ladepunkt zur Entladestelle | m              |
| <b>Leerfahrtdistanz</b> | Distanz von Forststraße bis zum ersten Aufladen  | m              |
| <b>Lastfahrtdistanz</b> | Distanz vom letzten Aufladen bis zur Forststraße   | m              |
| <b>Ladedistanz</b>      | Distanz zwischen erstem und letztem Aufladen   | m              |
| <b>Trassenneigung</b>   | Neigung der Trasse   | %              |
| <b>Trassenlänge</b>     | Länge der Trasse   | m              |

Da es zur Ermittlung des Fuhrevolumens nicht möglich war, jedes geladene Stück zu vermessen, wurde ein Stirnflächenverfahren zur Hilfe genommen. Dieses Stichprobenverfahren dient zur Vermessung von Holzpoltern, welche sich in diesem Fall im Rungenkorb des Forwarders befinden. Bevor der Maschinist mit dem Entladen des Rungenkorbes beginnt, wird an der Heckseite der Ladung von einer Seite des Rungenkorbes zur anderen Seite eine Linie an der Stirnseite der Bloche gezogen und jedes markierte Bloch nummeriert (Abbildung 8). Anschließend wird mittels Foto die gesamte Fuhre mit den geladenen Blochen festgehalten. Nach dem Entladen erfolgt die Vermessung der zuvor markierten und nummerierten Bloche. Dabei werden die Bloche nur an der Stirnseite gemessen, da von einer zufälligen Verteilung der Bloche im Rungenkorb ausgegangen werden kann. Zusätzlich zum Durchmesser werden noch die Länge und die Baumart bestimmt, welche für die Berechnung des Rindenabzuges notwendig sind. Mittels dem durchschnittlichem Volumen der gemessenen Bloche und der Anzahl der Bloche der Fuhre kann anschließend auf das Fuhrevolumen geschlossen werden.



Abbildung 8: Stichprobeverfahren für Volumenaufnahme (Foto: Verfasser)

### 3.6 Datenauswertung

Das aufgenommene Videomaterial wurde im Microsoft Excel mit Hilfe eines Zeitstudienmakros ausgewertet. Aufgrund der Videos konnten die Arbeitsschritte genau abgegrenzt werden. Die statistische Auswertung erfolgte mittels der Statistik -Software SPSS 21.

## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Deskriptive Statistik

Insgesamt wurden 49,25 Stunden Videomaterial aufgenommen, wobei aber nicht die gesamte aufgenommene Zeit für diese Studie verwendbar ist. Lediglich 83,6 % der gesamten aufgenommenen Zeit können verwendet werden. Während der restlichen Zeit transportierte der Forwarder Schlagabraum, rückte ohne Seil, oder es gab Probleme mit dem Akku der Kamera (Tabelle 14). Die für diese Zeitstudie verwendbare Zeit beträgt demnach 41,2 Stunden und wird für die folgenden Auswertungen als Basis angenommen.

**Tabelle 14: Aufteilung der gesamt aufgenommenen Zeit**

| Datenverwendbarkeit             | Minuten        | Stunden      | Prozent       |
|---------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| ohne Seil oder nicht verwendbar | 120,20         | 2,00         | 3,94          |
| mit Seil                        | 2562,80        | 41,17        | 83,59         |
| Akku leer                       | 54,55          | 0,91         | 1,85          |
| Schlagabraum                    | 310,16         | 5,17         | 10,50         |
| <b>Summe</b>                    | <b>2955,76</b> | <b>49,25</b> | <b>100,00</b> |

Insgesamt wurden 75 Fuhren (Zyklen) mit einem Gesamtvolumen von 820,70 m<sup>3</sup> mit Rinde aufgenommen. Durch Rindenabzug nach „Altherr“ ergibt das 693,40 m<sup>3</sup> ohne Rinde. Die Stückzahl über alle Fuhren betrug 6.825 Stück mit einem durchschnittlichen Stückvolumen von 0,10 m<sup>3</sup> ohne Rinde. Die Stücklänge variierte zwischen 3, 4 und 5 Metern. Die durchschnittliche Distanz der Leerfahrt betrug 127,7 Meter. Jene der Lastfahrt lag mit 94,7 Metern deutlich unter jener der Leerfahrt, da die Distanz von der Entladestelle zum ersten Ladeplatz größer ist als die Distanz vom letzten Ladeplatz bis zur Entladestelle.

Die Ladedistanz betrug bei einer durchschnittlichen Neigung von 44,5 % im Durchschnitt 34,5 Meter. Die Neigung der Leerfahrt mit 32,6 %, als auch die Neigung der Lastfahrt mit 25,9 %, liegt deutlich unter der Neigung der Ladedistanz. Dies ist dadurch erklärbar, dass sich der Forwarder bei der Leer- und Lastfahrt auch auf der Forststraße bewegt, welche eine wesentlich geringere Neigung aufweist als die Trassen. Die durchschnittliche Rückedistanz, welche sich aus der Lastfahrt- und Leerfahrtdistanz ermitteln lässt, beträgt 111,2 Meter und die dazugehörige Neigung beträgt 29,2 % (Tabelle 15).

**Tabelle 15: Statistische Kennwerte für die Kovariaten**

| abhängige Variablen             | Mittelwert | Standardabweichung | 5. Perzentil | 95. Perzentil | Einheit             |
|---------------------------------|------------|--------------------|--------------|---------------|---------------------|
| <b>Stückvolumen</b>             | 0,10       | 0,14               | 0,03         | 0,46          | m <sup>3</sup> o.R. |
| <b>Fuhrevolumen</b>             | 9,25       | 4,74               | 2,36         | 17,86         | m <sup>3</sup> o.R. |
| <b>Distanz<sub>Leer</sub></b>   | 127,71     | 69,25              | 39,40        | 241,00        | m                   |
| <b>Neigung<sub>Leer</sub></b>   | 32,57      | 10,35              | 7,76         | 47,24         | %                   |
| <b>Distanz<sub>Laden</sub></b>  | 34,52      | 31,60              | 0,00         | 73,60         | m                   |
| <b>Neigung<sub>Laden</sub></b>  | 44,51      | 14,04              | 21,26        | 66,19         | %                   |
| <b>Distanz<sub>Last</sub></b>   | 94,67      | 76,48              | 11,60        | 240,00        | m                   |
| <b>Neigung<sub>Last</sub></b>   | 25,88      | 12,75              | 5,36         | 45,57         | %                   |
| <b>Distanz<sub>Rücken</sub></b> | 111,19     | 70,85              | 29,10        | 240,00        | m                   |
| <b>Neigung<sub>Rücken</sub></b> | 29,22      | 10,68              | 7,47         | 46,20         | %                   |

Wie erwartet wurde, war der Arbeitsschritt Laden mit 36,3 % der zeitintensivste Arbeitsschritt, gefolgt vom Entladen mit 18,8 %. Fasst man Seil anhängen und Seil umhängen zusammen, so wurden für diese Arbeitsschritte 9,5 % der Arbeitszeit benötigt. Für die Fahrkomponente (Leer- und Lastfahrt) wurde 20% der Arbeitszeit in Anspruch genommen. Lediglich ein geringer Prozentsatz wurde für Sortier- und Aufräumarbeiten benötigt (Tabelle 16).

**Tabelle 16: Anteil der Arbeitsschritte am Seil**

| Phase           | Minuten        | Stunden      | Prozent       |
|-----------------|----------------|--------------|---------------|
| Leerfahrt       | 274,00         | 4,57         | 11,09         |
| Laden           | 896,62         | 14,94        | 36,29         |
| Lastfahrt       | 222,62         | 3,71         | 9,01          |
| Entladen        | 465,59         | 7,76         | 18,84         |
| Seil anhängen   | 40,58          | 0,68         | 1,64          |
| Seil umhängen   | 192,86         | 3,21         | 7,81          |
| Unterbrechungen | 293,53         | 4,89         | 11,88         |
| Sortierarbeiten | 42,29          | 0,70         | 1,71          |
| Aufräumarbeiten | 42,76          | 0,71         | 1,73          |
| <b>Summe</b>    | <b>2470,85</b> | <b>41,17</b> | <b>100,00</b> |

Den größten Anteil der Unterbrechungen nahmen mit 82 % die Unterbrechungen kleiner 15 Minuten ein. Lediglich 18 % der Unterbrechungen waren größer als 15 Minuten (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Aufteilung der Unterbrechungen**

| Einteilung                        | Minuten | Stunden | Prozent |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| <b>Unterbrechungen &lt;15 Min</b> | 240,67  | 4,01    | 81,99   |
| <b>Unterbrechungen &gt;15 Min</b> | 52,86   | 0,88    | 18,01   |
| <b>Summe</b>                      | 293,53  | 4,89    | 100     |

Über alle 75 Fahren wurden pro Fuhre für das Laden im Durchschnitt 12 Minuten, für das Entladen 6,2 Minuten und für die Leerfahrt 3,7 Minuten benötigt. Die Lastfahrt benötigte mit 3 Minuten pro Fuhre im Durchschnitt am wenigsten Zeit, was wiederum aus der kürzeren Distanz der Lastfahrt gegenüber der Leerfahrt erklärbar ist. Fasst man Leerfahrt und Lastfahrt zusammen, so wurden für die abhängige Variable Fahren durchschnittlich 6,62 Minuten pro Fuhre benötigt (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Statistische Kennwerte für die abhängigen Variablen**

| <b>abhängige Variablen</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Standard-abweichung</b> | <b>5. Perzentil</b> | <b>95. Perzentil</b> | <b>Einheit</b> |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| <b>Leerfahrt</b>           | 3,65              | 2,02                       | 1,11                | 7,32                 | min/Fuhre      |
| <b>Laden</b>               | 11,95             | 3,63                       | 5,81                | 18,21                | min/Fuhre      |
| <b>Lastfahrt</b>           | 2,97              | 2,22                       | 0,52                | 7,45                 | min/Fuhre      |
| <b>Entladen</b>            | 6,21              | 2,07                       | 2,60                | 9,46                 | min/Fuhre      |
| <b>Fahren</b>              | 6,62              | 3,93                       | 1,74                | 13,48                | min/Fuhre      |

## 4.2 Prozessanalyse Seilmontage

Für die Seilmontage konnte mittels der aufgenommenen Daten kein Modell zur Errechnung der Montagezeiten in Abhängigkeit von Trassenlänge und Trassenneigung erstellt werden. Grund dafür ist, dass bei der Seilmontage nicht immer der gleiche Arbeitsablauf stattfindet. Wie schon in Punkt 3.3 beschrieben, gibt es in Abhängigkeit von bestimmten Faktoren (Durchfahrbarkeit des Bestandes, Gelände, Verfügbarkeit des Harvesters) für den Forwarderfahrer mehrere Möglichkeiten, die Seilmontage durchzuführen.

Zusammenfassend kann für die Seilmontage aber gesagt werden, dass sie in dieser Studie circa 9,5 % der Arbeitszeit in Anspruch genommen hat (Tabelle 19). Ein wesentlicher Unterschied in der Methodik zwischen den Prozessen „Seil Anhängen“ und „Seil Umhängen“ war nicht feststellbar. Der einzige Unterschied zwischen diesen beiden Prozessen liegt darin, dass das Anhängen des Seiles am Beginn des Arbeitstages stattfindet, und dass dafür kein Lösen des Seiles aus der vorherigen Trasse notwendig ist.

**Tabelle 19: Zeitaufwand für Seilmontage**

| <b>Zeit am Seil</b>           | <b>Minuten</b> | <b>Stunden</b> | <b>In Prozent</b> |
|-------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| <b>Seil Anhängen</b>          | 40,58          | 0,68           | 1,64              |
| <b>Seil Umhängen</b>          | 192,86         | 3,21           | 7,81              |
| <b>andere Arbeitsschritte</b> | 2329,36        | 38,82          | 90,55             |
| <b>Gesamt</b>                 | 2562,80        | 42,71          | 100,00            |

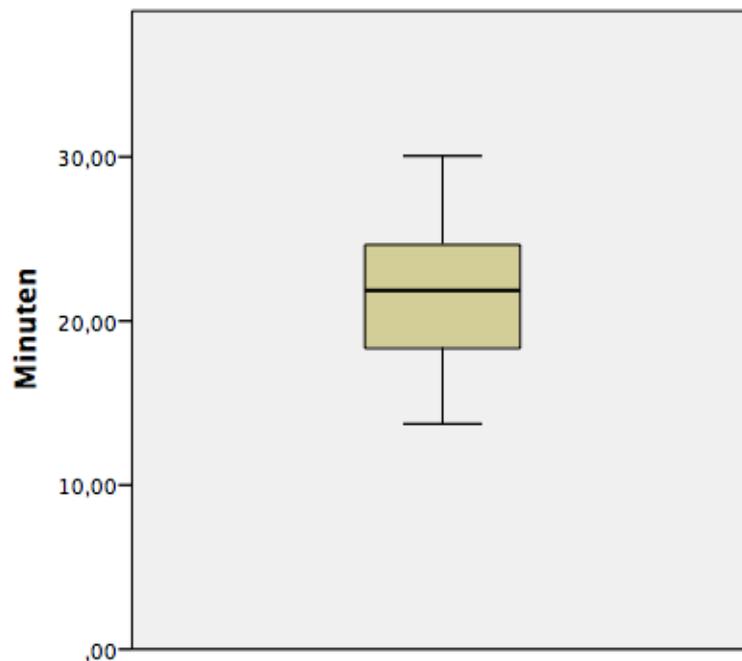
Insgesamt wurden bei der Zeitstudie 14 Montageprozesse beobachtet und aufgenommen, von denen 12 auf die Rückungsart „bergab“ und lediglich 2 auf „bergauf“ entfallen (Tabelle 20). Betrachtet man die Bergaufrückungen, so kann daraus geschlossen werden, dass hierbei die Montagezeit wesentlich kürzer ausfällt. Dies ist darauf zurückzuschließen, dass die Montage des Seiles direkt an einem Baum oberhalb der Forststraße erfolgen kann und somit kein großer Seilauszug notwendig ist.

Aufgrund der geringen Anzahl an aufgenommenen Montagezeiten für die Bergaufrückung können daraus keine statistischen Kennwerte errechnet werden. Dasselbe gilt auch für das erstmalige Anhängen in eine Trasse sowie für das Lösen des Seiles einer Trasse am Ende des Arbeitstages.

**Tabelle 20: Übersicht der Montagezeiten verschiedener Trassen**

| Nr. | Beschreibung                        | Minuten | Rückungsart |
|-----|-------------------------------------|---------|-------------|
| 1   | Trasse 1 anhängen                   | 26,54   | bergab      |
| 2   | Wechsel von Trasse 1 auf Trasse 2   | 15,12   | bergab      |
| 3   | Wechsel von Trasse 2 auf Trasse 1   | 18,33   | bergab      |
| 4   | Wechsel von Trasse 1 auf Trasse 2   | 21,98   | bergab      |
| 5   | Wechsel von Trasse 4 auf Trasse 5   | 13,74   | bergab      |
| 6   | Wechsel von Trasse 5 auf Trasse 6   | 24,65   | bergab      |
| 7   | Wechsel von Trasse 6 auf Trasse 7   | 19,99   | bergab      |
| 8   | Wechsel von Trasse 7 auf Trasse 8   | 21,74   | bergab      |
| 9   | Wechsel von Trasse 8 auf Trasse 9   | 26,81   | bergab      |
| 10  | Trasse 9 lösen                      | 10,49   | bergab      |
| 11  | Wechsel von Trasse 11 auf Trasse 12 | 23,68   | bergab      |
| 12  | Wechsel von Trasse 14 auf Trasse 15 | 30,05   | bergab      |
| 13  | Wechsel von Trasse 12 auf Trasse 13 | 1,40    | bergauf     |
| 14  | Trasse 16 lösen                     | 2,73    | bergauf     |

Betrachtet man jedoch bei der Bergabrückung lediglich die 10 Wechsel von einer Trasse auf die Andere, so lässt sich feststellen, dass dafür durchschnittlich 21,6 Minuten pro Wechsel benötigt wurden (Abbildung 9). Ein Wechsel der Trasse beinhaltet dabei immer das Lösen des Seiles aus der vorangegangenen Trasse und das Anhängen des Seiles in der nächsten Trasse.

**Abbildung 9: Boxplot für Rüstzeiten bei der Bergabrückung**

### 4.3 Produktivitätsmodell

Vor der Erstellung des Produktivitätsmodelles wurden für die einzelnen Teilmodelle Punktdiagramme erstellt, welche sich im Anhang befinden. Durch optische Kontrolle konnten daher schon Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen gemacht werden. Auffällig war, dass die Fahren 51 und 73 immer wieder größere „Ausreißer“ darstellten. Es konnten bei der Kontrolle der Aufnahmedaten und bei den Auswertungen jedoch keine Fehler gefunden werden. Aufgrund dieser Tatsache wurden diese Fahren nicht aus dem Produktivitätsmodell ausgeschlossen.

#### 4.3.1 Teilmodell Fahren

Um die zuvor getroffene Annahme, dass die Fahreffizienz von der Rückedistanz und von der Neigung der Rückedistanz abhängig ist, zu untersuchen, wurde zuerst eine Kovarianzanalyse durchgeführt. Als abhängige Variable wurde „Fahren“ gewählt. Um anschließend auf die Fahreffizienz zu kommen, muss durch das Fahrenvolumen dividiert werden.

Die Hypothese, dass Rückedistanz und die Neigung der Rückedistanz einen Einfluss auf die Fahrzeit haben, konnte bestätigt werden (Tabelle 21). Der Einfluss der Rückedistanz auf die Fahrzeit ist auch im Punktdiagramm sichtbar. Mit zunehmender Rückedistanz nimmt die Fahrzeit in Minuten zu (Abbildung 10). Die Punktdiagramme für die anderen Variablen finden sich im Anhang.

**Tabelle 21: Kovarianzanalyse; abhängige Variable = Fahren**

| Quelle                           | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F        | Signifikanz |
|----------------------------------|--------------------------|----|---------------------|----------|-------------|
| <b>Modell</b>                    | 4302,168                 | 2  | 2151,084            | 1238,063 | ,000        |
| <b>Distanz</b> <sub>Rücken</sub> | 1093,491                 | 1  | 1093,491            | 629,362  | ,000        |
| <b>Neigung</b> <sub>Rücken</sub> | 32,705                   | 1  | 32,705              | 18,823   | ,000        |
| <b>Fehler</b>                    | 126,835                  | 73 | 1,737               |          |             |
| <b>Gesamt</b>                    | 4429,003                 | 75 |                     |          |             |

R-Quadrat = ,971 (korrigiertes R-Quadrat = ,971)

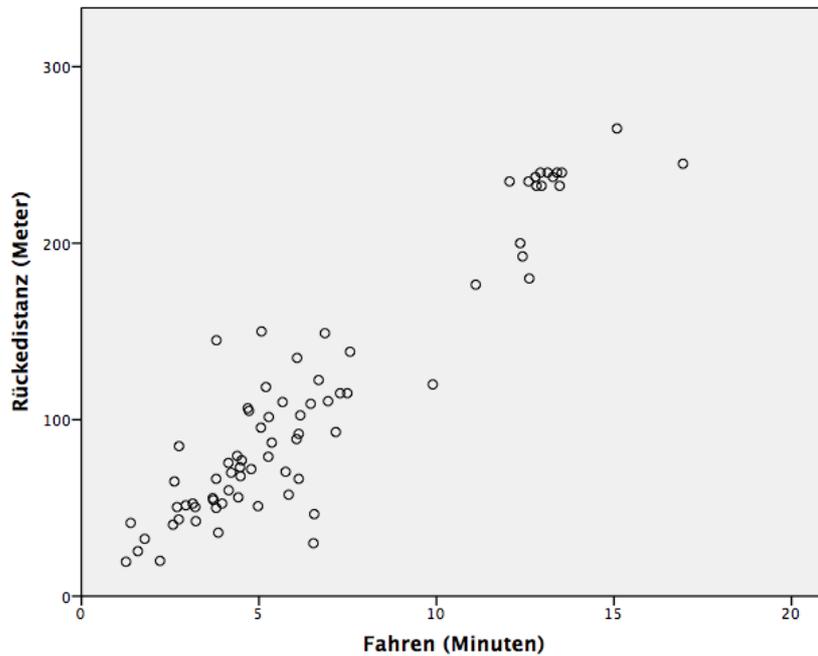


Abbildung 10: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit von der Rückedistanz

Anschließend wurde eine lineare Regression gerechnet, um die Koeffizienten für die Schätzung der Fahreffizienz zu ermitteln. Aus dem R-Quadrat mit ,971 ist ersichtlich, dass die Variablen Rückedistanz und Neigung Rückedistanz 97,1 % der Streuung erklären (Tabelle 22).

Tabelle 22: Anova für das Teilmodell Fahren

|                                       | Quadratsumme          | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz |
|---------------------------------------|-----------------------|----|---------------------|---------|-------------|
| <b>Regression</b>                     | 4302,168              | 2  | 2151,084            | 1238,06 | ,000        |
| <b>Nicht standardisierte Residuen</b> | 126,835               | 73 | 1,737               |         |             |
| <b>Gesamt</b>                         | 4429,003 <sup>d</sup> | 75 |                     |         |             |

R-Quadrat = ,971 (korrigiertes R-Quadrat = ,971)

Aus den Ergebnissen der Regressionsanalyse (Tabelle 23) ergibt sich somit folgender Ansatz zur Herleitung der Fahreffizienz (Formel 5). Das Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve befindet sich im Anhang (Abbildung 17).

Tabelle 23: Regressionskoeffizient für das Teilmodell Fahren

|                       | Koeffizient | Standardfehler | T      | Signifikanz |
|-----------------------|-------------|----------------|--------|-------------|
| <b>Rückedistanz</b>   | ,050        | ,002           | 25,087 | ,000        |
| <b>Neigung Rücken</b> | ,037        | ,008           | 4,339  | ,000        |

$$Fahreffizienz = \frac{0,050 * RD + 0,037 * NRD}{FV} \quad \text{Formel 5}$$

|                     |  |
|---------------------|--|
| Fahreffizienz ..... | Systemeffizienz Fahren (min/m <sup>3</sup> )   |
| RD .....            | Mittelwert aus dem am nächsten und dem am weitesten entfernten Ladepunkt zur Entladestelle (m) |
| NRD .....           | durchschnittliche Neigung der Rückedistanz (%)   |
| FV .....            | durchschnittliches Fuhrevolumen (m <sup>3</sup> o.R.)  |

### 4.3.2 Teilmodell Laden

Die getroffenen Annahmen, dass die Ladeeffizienz vom Stückvolumen, der Ladedistanz und der Neigung der Ladedistanz abhängig ist, konnten nicht zur Gänze bestätigt werden. Die Hypothese, dass die Neigung der Ladedistanz einen signifikanten Einfluss auf die Ladeeffizienz hat, konnte nicht bestätigt werden. Alle anderen Variablen haben jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Ladeeffizienz (Tabelle 24).

Tabelle 24: Kovarianzanalyse; abhängige Variable = *Effiz.Laden*

| Quelle                      | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz |
|-----------------------------|--------------------------|----|---------------------|---------|-------------|
| Modell                      | 282,154 <sup>a</sup>     | 3  | 94,051              | 129,853 | ,000        |
| Ladedistanz                 | 12,075                   | 1  | 12,075              | 16,672  | ,000        |
| NeigungLadedistanz          | 2,075                    | 1  | 2,075               | 2,865   | ,095        |
| Stückvolumen <sup>0,3</sup> | 23,501                   | 1  | 23,501              | 32,459  | ,000        |
| Fehler                      | 52,149                   | 72 | ,724                |         |             |
| Gesamt                      | 334,303                  | 75 |                     |         |             |

R-Quadrat = ,844 (korrigiertes R-Quadrat = ,838)

Da die unabhängige Variable „NeigungLadedistanz“ keinen signifikanten Einfluss auf die Ladeeffizienz hat, wurde sie aus dem Modell ausgeschlossen. Durch die Variablen Stückvolumen und Ladedistanz lassen sich 84 % der Streuung erklären (Tabelle 25).

Tabelle 25: Anova für das Teilmodell Laden

|                                | Quadratsumme         | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz       |
|--------------------------------|----------------------|----|---------------------|---------|-------------------|
| Regression                     | 280,079              | 2  | 140,039             | 188,531 | ,000 <sup>c</sup> |
| Nicht standardisierte Residuen | 54,224               | 73 | ,743                |         |                   |
| Gesamt                         | 334,303 <sup>d</sup> | 75 |                     |         |                   |

R-Quadrat = ,838 (korrigiertes R-Quadrat = ,833)

Mit den Ergebnissen der Regressionsanalyse (Tabelle 26) ergibt sich folgender Ansatz zur Herleitung der Ladeeffizienz (Formel 6). Das Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve befindet sich im Anhang (Abbildung 20).

**Tabelle 26: Regressionskoeffizienten für das Teilmodell Laden**

|                              | Koeffizient | Standardfehler | T      | Signifikanz |
|------------------------------|-------------|----------------|--------|-------------|
| Stückvolumen <sup>-0,3</sup> | ,706        | ,070           | 10,119 | ,000        |
| Ladedistanz                  | ,012        | ,003           | 3,745  | ,000        |

$$\text{Ladeeffizienz} = 0,706 * StV^{-0,3} + 0,012 * LD$$

**Formel 6**

|                    |   |
|--------------------|---|
| Ladeeffizienz..... | Systemeffizienz Laden (min/m <sup>3</sup> )           |
| StV .....          | Durchschnittliches Stückvolumen (m <sup>3</sup> o.R.) |
| LD .....           | Distanz vom ersten Aufladen bis zum letzten Aufladen  |

#### 4.3.3 Teilmodell Entladen

Die zuvor getroffene Annahme, dass die Entladeeffizienz vom durchschnittlichen Stückvolumen abhängig ist, konnte bestätigt werden (Tabelle 27).

**Tabelle 27: Kovarianzanalyse; abhängige Variable Effizienz Entladen**

| Quelle                       | Quadratsumme vom Typ III | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz |
|------------------------------|--------------------------|----|---------------------|---------|-------------|
| Modell                       | 56,538 <sup>a</sup>      | 1  | 56,538              | 374,395 | ,000        |
| Stückvolumen <sup>-0,3</sup> | 56,538                   | 1  | 56,538              | 374,395 | ,000        |
| Fehler                       | 11,175                   | 74 | ,151                |         |             |
| Gesamt                       | 67,713                   | 75 |                     |         |             |

R-Quadrat = ,835 (korrigiertes R-Quadrat = ,833)

Aus den Ergebnissen der Regressionsanalyse ist ersichtlich, dass die Variable Stückvolumen 83 % der Streuung erklärt (Tabelle 28).

**Tabelle 28: Anova für das Teilmodell Entladen**

|                                | Quadratsumme        | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz       |
|--------------------------------|---------------------|----|---------------------|---------|-------------------|
| Regression                     | 56,538              | 1  | 56,538              | 374,395 | ,000 <sup>c</sup> |
| Nicht standardisierte Residuen | 11,175              | 74 | ,151                |         |                   |
| Gesamt                         | 67,713 <sup>d</sup> | 75 |                     |         |                   |

R-Quadrat = ,835 (korrigiertes R-Quadrat = ,833)

Mit Hilfe des errechneten Regressionskoeffizienten (Tabelle 29) ergibt sich folgender Ansatz zur Herleitung der Ladeeffizienz (Formel 7). Das Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve befindet sich im Anhang (Abbildung 25).

**Tabelle 29: Regressionskoeffizient für das Teilmodell Entladen**

|                              | Koeffizient | Standardfehler | T      | Signifikanz |
|------------------------------|-------------|----------------|--------|-------------|
| Stückvolumen <sup>-0,3</sup> | ,411        | ,021           | 19,349 | ,000        |

$$Entladeeffizienz = 0,411 * StV^{-0,3} \quad \text{Formel 7}$$

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Entladeeffizienz..... | Systemeffizienz Entladen (min/m <sup>3</sup> ) |
| StV .....             | Durchschnittliches Stückvolumen                |

#### 4.3.4 Gesamtmodell Forwarder

Durch Zusammenfügen der einzelnen Teilmodelle kann die Produktivität des Forwarders berechnet werden (Formel 8). Die Bedeutung der Abkürzungen sowie die einzelnen Koeffizienten mit dazugehörigem Standardfehler finden sich in der Tabelle 30.

$$PROD = \frac{60}{(1 + (k1)) * ((\frac{0,05 * RD + 0,037 * NRD}{FV}) + 0,706 * StV^{-0,3} + 0,012 * LD + 0,411 * StV^{-0,3})} \quad \text{Formel 8}$$

**Tabelle 30: Koeffizienten zur Herleitung der Produktivität**

| Bezeichnung | Bedeutung                          | Koeffizient | Standardfehler |
|-------------|------------------------------------|-------------|----------------|
| StV         | Stückvolumen                       | 0,706       | 0,070          |
| StV         | Stückvolumen                       | 0,411       | 0,021          |
| RD          | Rückedistanz                       | 0,050       | 0,002          |
| NRD         | Neigung der Rückdistanz            | 0,037       | 0,008          |
| LD          | Ladedistanz                        | 0,012       | 0,003          |
| k1          | Korrekturfaktor von PSH0 auf PSH15 | 0,300       |                |
| FV          | Fuhrevolumen                       |             |                |

Mit dem erstellten Modell erreichte der Forwarder bei einem durchschnittlichen Stückvolumen von 0,10 m<sup>3</sup>, einem durchschnittlichen Fuhrevolumen von 9,25 m<sup>3</sup>, einer durchschnittlichen Rückedistanz von 111,2 m, einer durchschnittlichen Neigung der Rückedistanz von 29,2 % und einer Ladedistanz von 34,5 m eine Produktivität von 13,73 m<sup>3</sup>/PSH<sub>15</sub>.

In Abbildung 11 ist die Produktivität in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Stückvolumen dargestellt. Für alle anderen Variablen wurden die Durchschnittswerte der Aufnahmen herangezogen.

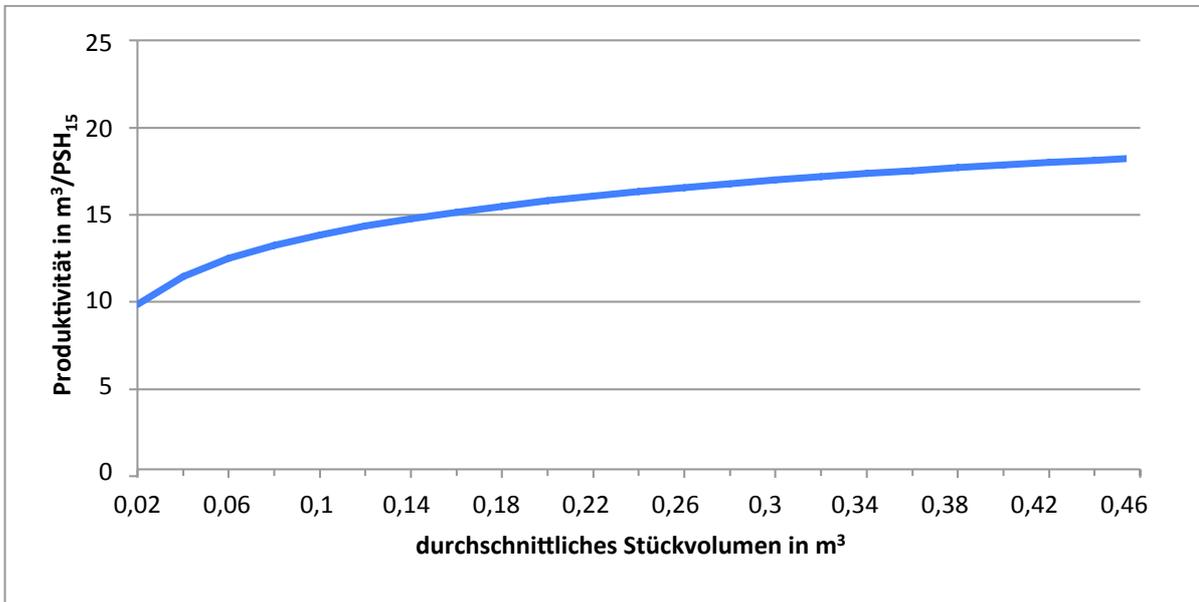


Abbildung 11: Produktivität in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Stückvolumen

In Abbildung 12 ist die Produktivität in Abhängigkeit von Stückvolumen und Fuhrevolumen dargestellt. Alle anderen Daten dieser Abbildung sind wieder die Durchschnittswerte der Aufnahmen.

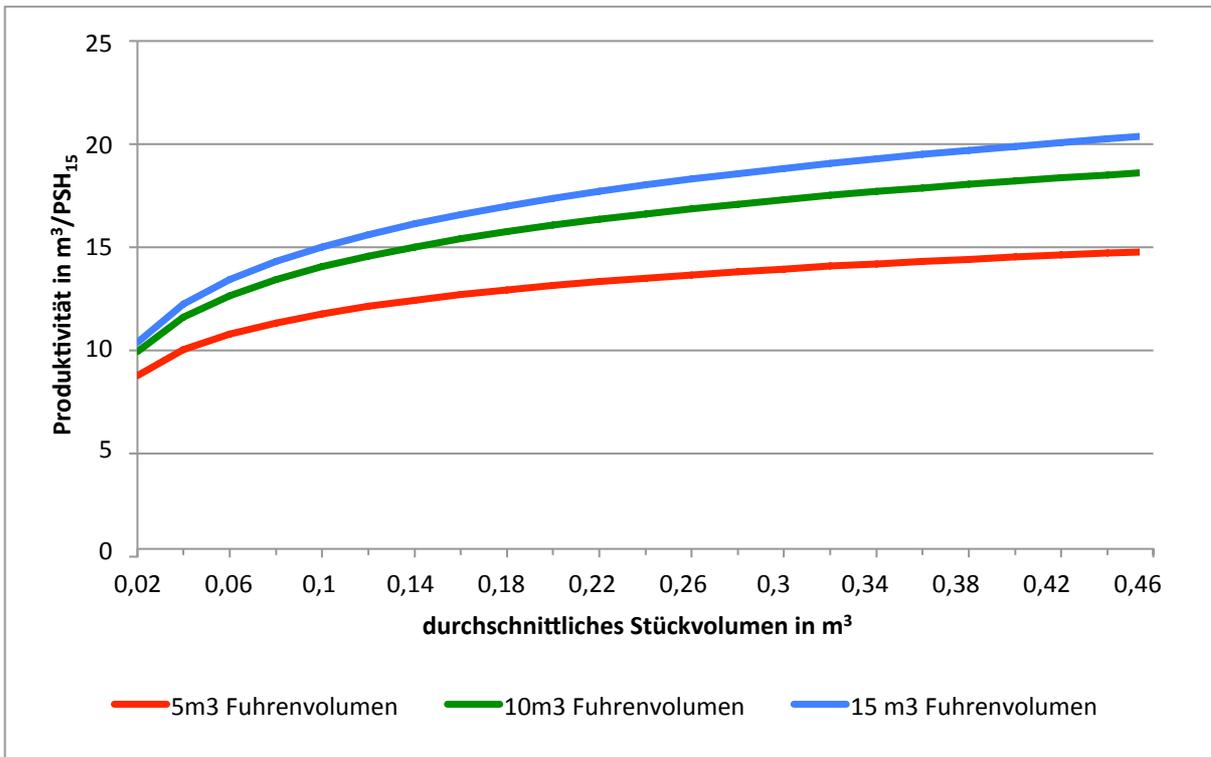


Abbildung 12: Produktivität in Abhängigkeit von Stückvolumen und Fuhrevolumen

In Abbildung 13 ist der Einfluss von Stückvolumen und Rückedistanz auf die Produktivität zu sehen. Zur Berechnung wurden für alle anderen Variablen die Durchschnittswerte der Aufnahmen herangezogen.

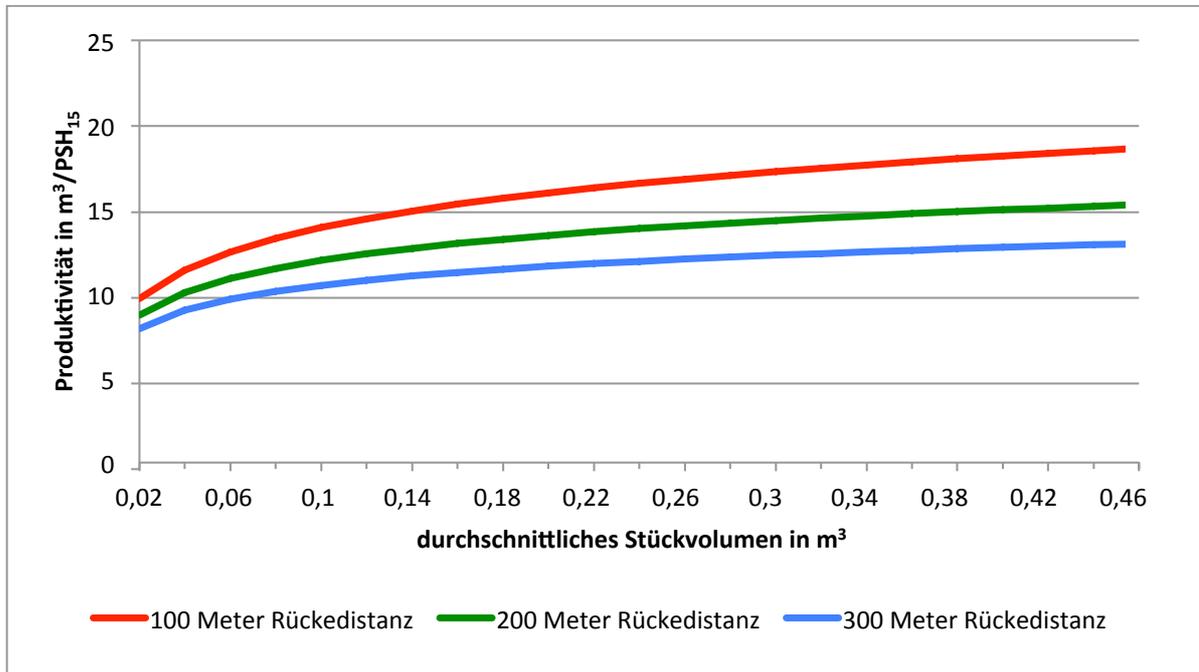


Abbildung 13: Produktivität in Abhängigkeit vom Stückvolumen und der Rückedistanz

Die Produktivität in Abhängigkeit von Stückvolumen und der Ladedistanz ist in Abbildung 14 zu sehen. Auch hier wurden für alle anderen Variablen zur Berechnung die Durchschnittswerte der Aufnahmen verwendet.

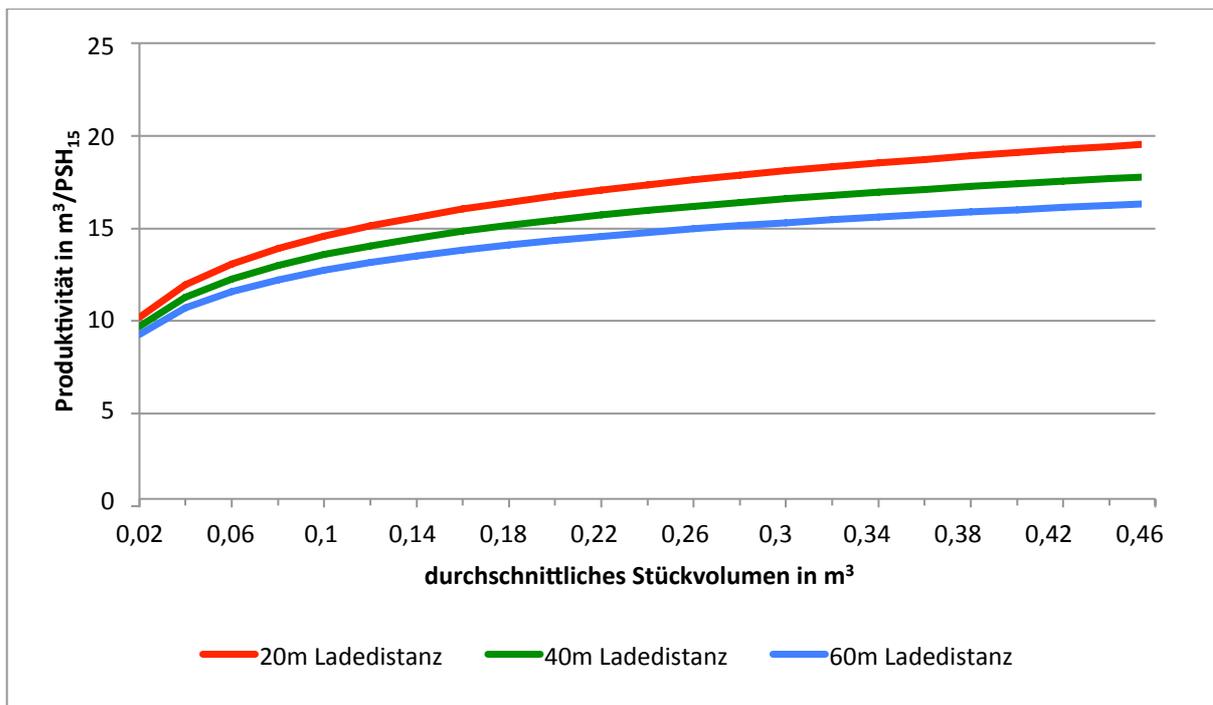


Abbildung 14: Produktivität in Abhängigkeit vom Stückvolumen und der Ladedistanz

#### 4.4 Maschinenkostenkalkulation

Die Systemkosten, welche sich aus Sachkosten und Lohnkosten zusammensetzen, betragen 110,68 €/PSH<sub>15</sub> (Tabelle 31). Folgende Annahmen wurden für die Kostenkalkulation getroffen:

Die Anschaffungskosten für den Forwarder inklusive Seilwinde betragen laut HUBER-TAZREITER (2016) 365.000 Euro netto. Die normale Nutzungsdauer beträgt 12.000 Stunden, was bei einem Verfallzeitraum von 8 Jahren eine Auslastungsschwelle von 1.500 Stunden ergibt. Laut HUBER-TAZREITER (2016) wird mit dem John Deere 1110E eine jährliche Auslastung von 1.800-2.000 Stunden erreicht. Aufgrund dieser Information wurde die jährliche Auslastung mit 1.900 Stunden angenommen.

Die Annahmen für Zinsfaktor, Reparaturkostenquote, Treibstoffkosten und Schmiermittelkosten stammen vom BFW (2016). Die Sachkosten für die Reifen und das Kunststoffseil der Seilwinde wurden extra berechnet (Tabelle 32 und Tabelle 33). Die Annahmen hierfür stammen ebenfalls von HUBER-TAZREITER (2016) und BFW (2016).

Die Summe aller Sachkosten beträgt somit 79,68 €/PSH<sub>15</sub>. Um zu den Systemkosten zu kommen müssen noch die Lohnkosten für den Forwarderfahrer miteinbezogen werden, welche mit 31 €/PSH<sub>15</sub> angenommen werden.

**Tabelle 31: Kostenkalkulation John Deere 1110E nach FAO/ECE - Schema**

| <b>Eingangsdaten</b>   |                  |               |
|--|------------------|---------------|
| Anschaffungskosten Forwarder AF  | [€]              | 290.000       |
| Anschaffungskosten Winde AW  | [€]              | 75.000        |
| Anschaffungskosten gesamt AG   | [€]              | 365.000       |
| Normale Nutzungsdauer (H)  | [PSH15]          | 12.000        |
| Veralterungszeitraum (N)   | [Jahre]          | 8             |
| Jährliche Auslastung (J)   | [PSH15]          | 1.900         |
| Auslastungsschwelle (SW) (SW=H/N)  | [PSH15]          | 1.500         |
| Zinsfaktor (p)   | [%]              | 5,00          |
| Reparaturkostenquote (r)   |                  | 0,80          |
| Treibstoffkosten (Verbrauch*€/Liter)   | [€/PSH15]        | 10,35         |
| Schmiermittelkosten (25% v. Treibstoffkosten)                                | [€/PSH15]        | 2,59          |
| <b>Sachkosten</b>  |                  |               |
| Zinsen $((AG/2*p/100)/J)$  | [€/PSH15]        | 4,80          |
| Versicherung 600€/Jahr   | [€/PSH15]        | 0,32          |
| Unterstellkosten 1350€/Jahr  | [€/PSH15]        | 0,71          |
| Abschreibung $Ab=AG/H$ wenn $J \geq SW$ $Ab=AG/(J*N)$ wenn $J < SW$          | [€/PSH15]        | 30,42         |
| Reparaturkosten $R=AG*r/H$ wenn $J \geq SW$ $R=(AG*r*N*J)/H^2$ wenn $J < SW$ | [€/PSH15]        | 24,33         |
| Treibstoffkosten   | [€/PSH15]        | 10,35         |
| Schmiermittelkosten  | [€/PSH15]        | 2,59          |
| Reifen   | [€/PSH15]        | 3,45          |
| Seil   | [€/PSH15]        | 2,72          |
| Summe Sachkosten   | [€/PSH15]        | 79,68         |
| Lohnkosten Forwarderfahrer   | [€/h]            | 31,00         |
| <b>Systemkosten</b>  | <b>[€/PSH15]</b> | <b>110,68</b> |

**Tabelle 32: Kostenkalkulation Reifen**

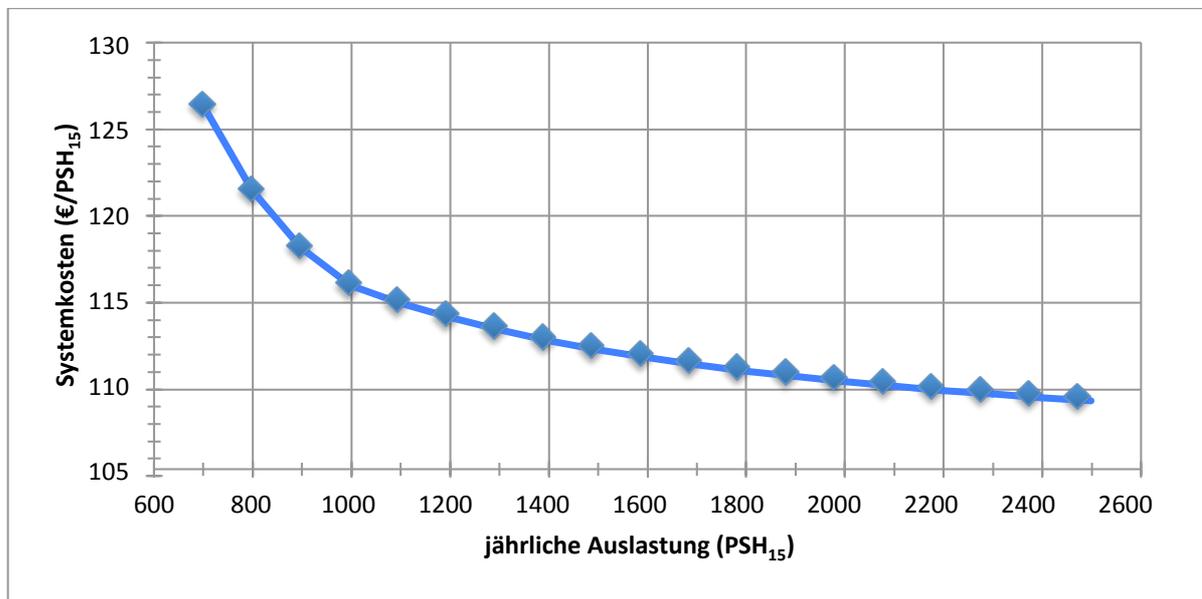
| <b>Eingangsdaten</b>  |                  |             |
|---|------------------|-------------|
| Anschaffungskosten gesamt AG  | [€]              | 18.581      |
| Normale Nutzungsdauer (H)   | [PSH15]          | 5.800       |
| Veralterungszeitraum (N)  | [Jahre]          | 8           |
| Jährliche Auslastung (J)  | [PSH15]          | 1.900       |
| Auslastungsschwelle (SW) (SW=H/N)                                   | [PSH15]          | 725         |
| Zinsfaktor  | [%]              | 5           |
| <b>Sachkosten</b>   |                  |             |
| Zinsen $((AG/2*p/100)/J)$   | [€/PSH15]        | 0,24        |
| Abschreibung $Ab=AG/H$ wenn $J \geq SW$ $Ab=AG/(J*N)$ wenn $J < SW$ | [€/PSH15]        | 3,20        |
| <b>Summe Sachkosten</b>   | <b>[€/PSH15]</b> | <b>3,45</b> |

**Tabelle 33: Kostenkalkulation Seil**

| Eingangsdaten   |                  |             |
|---|------------------|-------------|
| Seillänge   | [m]              | 450         |
| Kosten pro lfm  | [€]              | 3           |
| Anschaffungskosten gesamt AG                          | [€]              | 1.350       |
| Normale Nutzungsdauer (H)                             | [PSH15]          | 500         |
| Veralterungszeitraum (N)                              | [Jahre]          | 4           |
| Jährliche Auslastung (J)                              | [PSH15]          | 1.900       |
| Auslastungsschwelle (SW) (SW=H/N)                     | [PSH15]          | 125         |
| Zinsfaktor  | [%]              | 5           |
| Sachkosten  |                  |             |
| Zinsen ((AG/2*p/100)/J)                               | [€/PSH15]        | 0,02        |
| Abschreibung Ab=AG/H wenn J>=SW Ab=AG/(J*N) wenn J<SW | [€/PSH15]        | 2,70        |
| <b>Summe Sachkosten</b>                               | <b>[€/PSH15]</b> | <b>2,72</b> |

In der Maschinenkostenkalkulation sind Overheads, Risiko, Unternehmervergewinn, Überstellungskosten sowie mögliche Kosten für PKW nicht enthalten.

In der Abbildung 15 sind die Systemkosten in Abhängigkeit von der jährlichen Auslastung dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Systemkosten unter der jährlichen Auslastungsschwelle (1.500 PSH<sub>15</sub>) überproportional ansteigen. Ist die Auslastungsschwelle jedoch erreicht, so sinken die Systemkosten nur mehr geringfügig.



**Abbildung 15: Systemkosten in Abhängigkeit von der jährlichen Auslastung**

Mit den errechneten Systemkosten von 110,68 €/PSH<sub>15</sub> und einer Produktivität von 13,73 m<sup>3</sup>/PSH<sub>15</sub> ergeben sich somit über die gesamten Aufnahmen Kosten von 8,06 €/m<sup>3</sup> für das Rücken.

## 5 DISKUSSION

### 5.1 Systemvergleiche

#### 5.1.1 Seilforwarder und Forwarder

Wie in Tabelle 34 ersichtlich, unterscheiden sich die Produktivitätsangaben für diverse Forwarder deutlich. In Abhängigkeit von bestimmten Faktoren können Produktivitäten von  $7,8 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  bis zu  $26,6 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  erreicht werden. Hervorzuheben ist, dass konventionelle Forwarder im steileren Gelände hinsichtlich Produktivität mit Seilforwardern nicht mithalten können. Bei einer Studie von SAUTER et al. (1998) erreichte der Forwarder im steileren Gelände nämlich nur eine Produktivität von  $7,8 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass es für den Forwarder nicht möglich war, von unten in die Trasse einzufahren. Somit musste der Forwarder den Hang umfahren, um von oben in die Trasse einfahren zu können, was mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden war. Aufgrund des steilen Geländes war es auch nicht möglich den Rungenkorb vollständig zu beladen, was ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Produktivität ausübte.

Untersuchungen von BACHER-WINTERHALTER (2004) zeigen, dass konventionelle Forwarder in der Ebene (Nr. 5 in Tabelle 34) bei einem durchschnittlichem Stückvolumen von  $0,22 \text{ m}^3$ , ähnlichem durchschnittlichem Fuhrevolumen, gleicher Sortenlänge und ähnlicher durchschnittlicher Rückedistanz wie beim Seilforwarder, eine Produktivität von etwa  $19,7 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  erreichen. Setzt man in das erstellte Modell des Seilforwarders ebenfalls ein durchschnittliches Stückvolumen von  $0,22 \text{ m}^3$  ein, so erreicht dieser eine Produktivität von  $16 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ .

Daraus ist zu schließen, dass Seilforwarder hinsichtlich der Produktivität nicht in vollem Umfang mit konventionellen Forwardern mithalten können. Außerdem muss noch angemerkt werden, dass sich die Montage des Traktionsseiles mehr oder minder negativ auf die Produktivität des Seilforwarders auswirkt, je nachdem, ob bergauf oder bergab gerückt wird. Aus den Aufnahmen geht hervor, dass für die Bergabrückung durchschnittlich 21.61 Minuten an Rüstzeiten pro Trasse benötigt wurden. Für praktische Kalkulationen ist daher ein Rüstzeitbedarf von circa 30 Minuten pro Trasse für die Bergabrückung zu empfehlen. Für die Bergaufrückung spielen die Rüstzeiten nur eine minimale Rolle, da im Normalfall das Seil direkt oberhalb der Böschung an einem passenden Anker befestigt werden kann.

Tabelle 34: Produktivitäten für Forwarder und Seilforwarder

| Nr. | Maschine                            | Anzahl an Zyklen | Sortenlänge (m)                   | Hangneigung (%) | mittlere Rückedistanz (m) | mittleres Volumen je Ladung (m <sup>3</sup> o. R.) | mittlere Stückmasse (m <sup>3</sup> o.R.) | Produktivität (m <sup>3</sup> /PSH <sub>15</sub> ) | Quelle                      |
|-----|-------------------------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------------|--|---|--|-----------------------------|
| 1   | GREMO 950 R (Seilforwarder)         | 44               | 4, 5                              | Ø 39 (31-50)    | 135,8                     | 11,7   | 0,19                                      | 15,60 <sup>a</sup>                                 | (WRATSCHKO, 2006)           |
| 2   | JOHN DEERE 1110E (Seilforwarder)    | 75               | 3, 4, 5                           | Ø 45 (21-66)    | 111,2                     | 9,25   | 0,10                                      | 13,73 <sup>a</sup>                                 | (HOLZFEIND (2016)           |
| 3   | PONSSE Buffalo Dual (Kombimaschine) | 40               | 3, 4                              | Ø 11 (5-20)     | 169,3                     | 8,3  | 0,10                                      | 11,90 <sup>a</sup>                                 | (AFFENZELLER, 2005)         |
| 4   | FMG 250 ÖSA                         | 5                | 3, 4,5                            | 29-57           | k.A.                      | 6,6  | k.A.                                      | 7,80 <sup>a</sup>                                  | (SAUTER et al., 1998)       |
| 5   | TIMBERJACK 1010                     | 44               | NH (2, 4, 5)<br>LH (3, 4)         | 0-20            | 148,8 *                   | 8,1  | 0,22                                      | 19,70 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 6   | TIMBERJACK 1010                     | 35               | NH (2, 4, 5)<br>LH (3, 4)         | 0-20            | 296,7 *                   | 9,2  | 0,22                                      | 17,30 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 7   | VALMET 860                          | 25               | NH (4, 5)                         | 0-20            | 210,2 *                   | 12,9   | 0,42                                      | 25,50 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 8   | PONSE CARIBOU                       | 37               | NH (4, 5)                         | 0-20            | 153,5 *                   | 9,8  | 0,43                                      | 26,60 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 9   | WELTE 210                           | 41               | NH (3, 4, 5, 4,5)<br>LH (4-18)*** | 21-45           | 109,9 *                   | 7,1  | 0,48                                      | 25,50 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 10  | WELTE 210                           | 103              | NH (4, 5/IH 3-6)<br>LH (>3)***    | 21-45           | 142,9 *                   | 8,0  | 0,34                                      | 25,80 <sup>b</sup>                                 | (BACHER-WINTERHALTER, 2004) |
| 11  | JOHN DEERE 1110D                    | 9                | 4, 6                              | 10-20%          | 1100**                    | 12,68  | 1,31****                                  | 10,80 <sup>c</sup>                                 | (SLAMKA & RADOCHA, 2010)    |
| 12  | JOHN DEERE 1110D                    | 8                | 4, 2,5                            | 0-10            | 420**                     | 14,18  | 1.03 ****                                 | 14,70 <sup>c</sup>                                 | (SLAMKA & RADOCHA, 2010)    |

\* Distanz für die Leerfahrt (vom Polter zum ersten Beladeplatz)

\*\* skidding distance = Rückedistanz

\*\*\* Laubholz mit Klemmbank transportiert

\*\*\*\* mittleres Baumvolumen

NH = Nadelholz; LH = Laubholz; IH = Industrieholz

<sup>a</sup> PSH<sub>15</sub> = PSH<sub>0</sub>\*1,3

<sup>b</sup> PSH<sub>15</sub> = PSH<sub>0</sub>\*1,2

<sup>c</sup> Produktivität ist PSH<sub>0</sub>

### 5.1.2 Vergleich zwischen Seilforwardern

Vergleicht man die vorliegenden Ergebnisse mit Untersuchungen von WRATSCHKO (2006), so sind die in Tabelle 35 dargestellten Unterschiede erkennbar. Das durchschnittliche Fuhrenvolumen dieser Studie ist um ca.  $2,5 \text{ m}^3$  o.R. geringer und das mittlere Stückvolumen ist ebenfalls um  $0,09 \text{ m}^3$  o. R. geringer.

Dies ist wohl dadurch erklärbar, dass sowohl Sägerundholz, Industrieholz als auch Brennholz gerückt wurden. Das Industrieholz hatte dabei eine Blochlänge von 3 Metern, welches zu einem geringeren durchschnittlichen Volumen führt. Beim Rücken des Brennholzes waren die Fuhren nie voll, was ebenfalls zu einer Verringerung des durchschnittlichen Fuhrenvolumens führte. Des Weiteren gibt es Unterschiede bei der mittleren Rücke- und der Ladedistanz.

**Tabelle 35: Systemvergleich John Deere 1110E und Gremo 950R**

|  | HOLZFEIND (2016)      | WRATSCHKO (2006)      |
|--|-----------------------|-----------------------|
| <b>Maschine</b>  | John Deere 1110E      | Gremo 950R            |
| <b>Anzahl an Fuhren</b>  | 75                    | 44                    |
| <b>Sortenlängen (m)</b>  | 3, 4 und 5            | 4 und 5               |
| <b>Hangneigung (%)</b>   | durchschn. 45 (21-66) | durchschn. 39 (31-50) |
| <b>mittlere Rückedistanz (m)</b>                                     | 111,2                 | 135,8                 |
| <b>mittlere Neigung der RD (%)</b>                                   | 29,2                  | 30,25                 |
| <b>Ladedistanz (m)</b>   | 34,5                  | 60,2                  |
| <b>mittleres Volumen je Ladung (<math>\text{m}^3</math> o.R.)</b>    | 9,25                  | 11,7                  |
| <b>mittlere Stückvolumen (<math>\text{m}^3</math> o.R.)</b>          | 0,10                  | 0,19                  |
| <b>k-Faktor</b>  | 0,30                  | 0,31                  |
| <b>Produktivität (<math>\text{m}^3</math> o.R./PSH<sub>15</sub>)</b> | 13,73                 | 15,60                 |

Die Produktivitäten beider Studien sind aber trotzdem annähernd gleich. Vergleicht man beide Studien hinsichtlich der Spannweite der Produktivitäten, so kann gesagt werden, dass Seilforwarder Produktivitäten von circa  $5\text{-}21 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  in Abhängigkeit von bestimmten Faktoren (Stückvolumen, Rückedistanz, Neigung der Rückedistanz, Ladedistanz, Fuhrenvolumen) erreichen (Abbildung 16).

Der größere Unterschied zwischen den beiden Produktivitätsmodellen, speziell bei geringem Stückvolumen, könnte durch eine unterschiedliche Vorkonzentrationsqualität des Harvesters verursacht worden sein. Sind die Bloche nämlich schlecht vorkonzentriert, braucht der Forwarderfahrer speziell bei niedrigem Stückvolumen länger, um die Bloche aufzulegen. Bei größerem Stückvolumen spielt die Vorkonzentration nicht mehr so eine große Rolle, da größere Bloche meistens einzeln geladen werden.

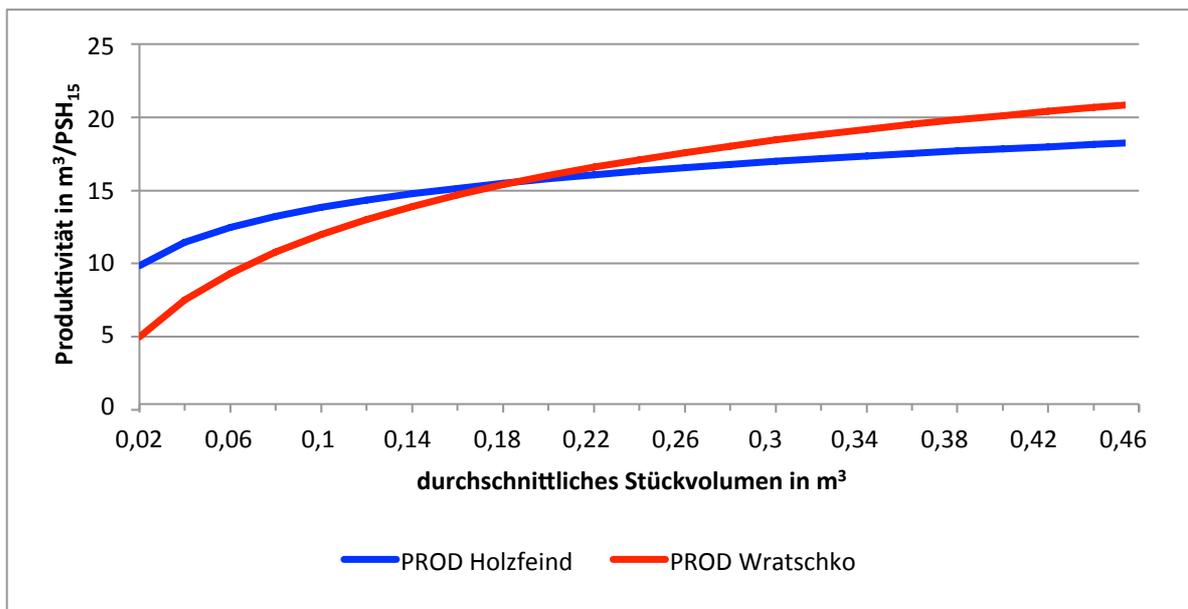


Abbildung 16: Vergleich der Produktivitätsmodelle zwischen Holzfeind und Wratschko

### 5.1.3 Seilforwarder und Seilgerät

Da sich das Einsatzgebiet des Seilforwarders vor allem im moderaten Seilgelände (30-70 % Hangneigung) befindet, ist ein Vergleich zwischen Seilforwarder und Seilgerät durchaus sinnvoll und zweckmäßig.

Ein erster Vergleich hinsichtlich der Montagezeiten zeigt schon die Vorteile des Seilforwarders. So ist nämlich der Montagezeitbedarf des Traktionsseiles mit circa 30 Minuten pro Trasse für die Bergabrückung im Vergleich zum Seilgerät verschwindend gering. Untersuchungen von KANZIAN (2003) zeigen, dass in Abhängigkeit von Trassenlänge und Stützenhöhe die Installationszeit (Aufbauzeit + Abbauzeit) von Seilgeräten circa 7,5 bis 25 Mannstunden beträgt. Außerdem muss noch darauf hingewiesen werden, dass Bergabtrassen einen wesentlich höheren Installationszeitbedarf aufweisen, da zumindest der Einsatz eines Drei-Seil-Systems erforderlich ist.

Überschreitet die Trassenlänge 450 Meter, so ist der Einsatz eines Seilforwarder jedoch kritisch zu hinterfragen, denn die maximale Seillänge der Traktionshilfswinde beträgt 450 Meter. In solch einem Fall müsste ein Zwischenlager errichtet werden und dann das Seil umgehängt werden. Wie sich diese Situation auf die Produktivität und die Kosten eines Seilforwarders auswirkt, kann aus heutiger Sicht nicht beurteilt werden, da hier noch Forschungsbedarf besteht.

Vergleicht man Seilforwarder und Seilgerät hinsichtlich ihrer Produktivität, so hat das nur Sinn, wenn bei beiden Systemen eine Vorkonzentration des Holzes durch den Harvester stattfindet. Als Vergleich soll hier eine Studie von STAMPFER & STEINMÜLLER (2004) herangezogen werden. Die Autoren untersuchten unter anderem die Produktivität des Seilgerätes vom Typ Syncrofalke nach Vor-

konzentration eines Harvesters vom Typ Valmet 911.1 X3 M. Geht man davon aus, dass Seillinie und Harvestertrasse gleich sind, so wird die höchste Produktivität erreicht. Bei einem Stückvolumen von  $0,15 \text{ m}^3$  beträgt die Produktivität somit  $17,7 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ . Die Produktivität des Syncrofalken ist somit um  $2,8 \text{ m}^3$  höher, da der seilgestützte Forwarder nur eine Produktivität von etwa  $14,9 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  bei einem Stückvolumen von  $0,15 \text{ m}^3$  erreicht.

In der Regel sind jedoch die Kosten der ausschlaggebende Punkt, ob ein Holzernteverfahren zum Einsatz kommt oder nicht. Obwohl der Syncrofalke nach Vorkonzentration durch den Harvester höhere Produktivitäten als der Seilforwarder erreicht, so sind die Systemkosten jedoch maßgeblich höher und können durch die höhere Produktivität nicht mehr wettgemacht werden.

Beispielsweise geben STAMPFER & STEINMÜLLER (2004) Systemkosten von  $196,4 \text{ €/PSH}_{15}$  für den Syncrofalke bei Bergabrückung an. Für den Seilforwarder dieser Studie ergeben sich lediglich Systemkosten von  $110,68 \text{ €/PSH}_{15}$ . Das ergibt einen Unterschied von circa  $85 \text{ €/PSH}_{15}$ . Nimmt man die oben genannten Produktivitäten für ein Stückvolumen mit  $0,15 \text{ m}^3$  an, so ergeben sich alleine für die Rückung Kosten von  $10,98 \text{ €/m}^3$  für den Syncrofalke und Kosten von  $7,43 \text{ €/m}^3$  für den Seilforwarder.

Des Weiteren wären noch die Kosten für die Installation zu berücksichtigen, welche beim Seilgerät aufgrund des höheren Zeitbedarfs weitaus höher ausfallen. Daraus lässt sich schließen, dass aus ökonomischer Sicht der Seilforwarder im moderaten Seilgelände einem Seilgerät vorzuziehen ist. Sollte jedoch eine besonders bodenschonende Rückung gewünscht sein, so stellt das Seilgerät wohl die ökologisch bessere Variante dar.

## 5.2 Einsatzempfehlungen

Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie sollte der Seilforwarder aus ökonomischen Gründen in seinem Einsatzbereich bis circa 70 % Hangneigung, wenn möglich immer dem Seilgerät vorgezogen werden. Unter schlechten Witterungs- und Bodenverhältnissen kann sich die maximal befahrbare Hangneigung jedoch schnell auf 40 % reduzieren. Auch in Beständen mit hohen Böschungswinkeln, welche ein Einfahren für konventionelle Forwarder erschweren, sollte der Seilforwarder bevorzugt werden. Dasselbe gilt auch für Bestände, wo abschnittsweise steilere Hänge oder Kuppen vorhanden sind. Der Seilforwarder sollte auch immer dann eingesetzt werden, wenn ein Befahren der Bestände ohne Seilunterstützung zu höheren Schäden führen könnte. Ein Einsatz ist sowohl in der Vor- als auch in der Endnutzung möglich. Selbst bei niedrigem Stückvolumen in der Vornutzung erreicht der Seilforwarder noch eine Produktivität von circa  $10 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ . Voraussetzung dafür ist allerdings eine gute Vorkonzentration des Holzes durch den Harvester.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Produktivitätsevaluierung, Montagezeitenabschätzung, Prozessanalyse der Seilmontage sowie Kostenanalyse eines seilgestützten Forwarders. Ziel dieser Studie war es, diese neue Erntetechnologie hinsichtlich Produktivität und Kosten zu evaluieren, um praktische Einsatzempfehlungen abgeben zu können.

Bei der zu untersuchenden Maschine handelte es sich um einen Forwarder des Typs John Deere 1110E. Dieser mittelgroße Rückezug kann als Allroundgerät sowohl in der Durchforstung als auch bei der Endnutzung eingesetzt werden. Um ein Befahren bis zu einer Hangneigung von circa 70 % zu ermöglichen, ist auf der Maschine eine Traktionshilfswinde angebaut. Bei der montierten Winde handelt es sich um ein Modell der Firma Haas mit neun Tonnen Zugkraft. Die Zugkraft ist stufenlos einstellbar und die Seilgeschwindigkeit ist auf den Fahrtrieb abgestimmt.

Die Datenerhebung umfasste zwei Bestände in Niederösterreich und einen Bestand in der Steiermark. Der Zeitstudie liegen 75 Fuhren (Zyklen) auf 18 Trassen mit einem durchschnittlichen Fuhrevolumen von  $9,25 \text{ m}^3$  zu Grunde. Über alle 75 Zyklen (Fuhren) die beobachtet wurden, erreichte der Seilforwarder eine Produktivität von  $13,73 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$  bei einem durchschnittlichen Stückvolumen von  $0,10 \text{ m}^3$  ohne Rinde. Als signifikante Einflussfaktoren auf die Produktivität erwiesen sich das Stückvolumen, die Rückedistanz, die Neigung der Rückedistanz und die Ladedistanz.

Die Prozessanalyse der Seilmontage ergab, dass in Abhängigkeit vom Gelände, der Verfügbarkeit des Harvesters und der Durchfahrbarkeit des Bestandes, mehrere Möglichkeiten bestehen, das Seil in der Trasse zu befestigen. Für die Bergabrückung konnte festgestellt werden, dass die Rüstzeiten durchschnittlich 21,6 Minuten betragen. Für die Bergaufrückung konnte keine statistische Analyse durchgeführt werden, da zu wenig Datenmaterial aufgenommen wurde. Es kann lediglich gesagt werden, dass der Rüstzeitbedarf für die Bergaufrückung sehr gering ist.

Die Kostenkalkulation ergibt Systemkosten in der Höhe von  $110,68 \text{ €/PSH}_{15}$  bei einer jährlichen Auslastung von 1.900 Stunden. Über die gesamten Aufnahmen ergeben sich somit Kosten von  $8,06 \text{ €/m}^3$ . Vor allem aus ökonomischer Sicht betrachtet kann aufgrund der durchgeführten Studie gesagt werden, dass der Seilforwarder im moderaten Seilgelände durchaus eine sinnvolle Alternative zu Seilgeräten darstellt. Ob der Seilforwarder auch aus ökologischer Sicht eine gute Alternative darstellt, kann nicht beurteilt werden, da dies nicht Gegenstand dieser Studie war.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

AFFENZELLER, G. (2005). *Integrierte Harvester-Forwarder-Konzepte (Harwarder)*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Wien.

BACHER-WINTERHALTER, M. (2004). *Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzertesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes*. Dissertation, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

BÖLTZ, K. (1988). *Entwicklung der psycho-physischen Belastung und Beanspruchung als Folge der Mechanisierung Teilautomatisierung der Holzernte*. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

BUTORA, A., & SCHWAGER, G. (1986). *Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen*. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Schweiz.

EBEL, A. (2006). *Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen*. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August Universität, Göttingen.

FORBRIG, A., LELEK, S., & NICK, L. (2004). Holzernte am Hang mit Seiltragschlepper - verfahrenstechnische Nische oder zukunftsweisender Quantensprung. *KWF Forsttechnische Informationen* (11+12), S. 153-156.

GELLERSTEDT, S. (2000). Ergonomic guidelines for forest machines. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, S. 477-480.

GRÖGER, V., & LEWARK, S. (2002). *Der arbeitende Mensch im Wald - eine ständige Herausforderung für die Arbeitswissenschaft*. Dortmund/Berlin/Dresden: Wirtschaftsverlag NW.

HAAS MASCHINENBAU. (2016). Bedienungsanleitung für JD Harvester mit HAAS-Traktionshilfsseilwinde.

HAUCK, B. (2001). Aspekte des Bodenschutzes bei der Entwicklung, beim Kauf und dem Einsatz von Forstmaschinen. *KWF Forsttechnische Information* (4), S. 41-46.

HITTENBECK, J. (2011). Überprüfung von Einsatzgrenzen für die hochmechanisierte Holzernte in geneigtem Terrain. *AFZ-Der Wald* (5), S. 30-33.

JOHN DEERE. (2016). *John Deere 1110E - Technische Daten*.

KANZIAN, C. (2003). *Modelle zur Abschätzung der Installationszeit von Seilgeräten*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Wien.

KASTNER, M., HOLZLEITNER, F., ERBER, G., HOLZFEIND, T., BRANDTNER, N., & STAMPFER, K. (2016). *Vollmechanisierte Holzernte mit seilgestützten Harvestern und Forwardern*. Projektendbericht, FHP-Projektstudie, Institut für Forsttechnik, Department für Wald- und Bodenwissenschaften.

KREMER, J., SCHARDT, M., BORCHERT, H., MATTHIES, D., & GANTER, C. (2007). Bogiebänder an Forwardern schonen den Boden. *AFZ-Der Wald* (6), S. 279-282.

KREMER, JOHANN; UHL, ENNO; WALTER, HERMANN SAUL. (2004). *Untersuchungen zu Wurzel- und Bodenschäden nach Einsatz des MHT 9002 HV mit Felastec- und konventionellem Fahrwerk*. Abschlussbericht, Kooperationsprojekt LWF-FELA-STOPUR-WFW-MHT.

MENG, W. (1978). *Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung*. Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Stuttgart: Selbstverlag der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg.

NEMESTÓTHY, N. (2014). Kosten und Nutzen einer zeitgerechten Durchforstung. *BFW Praxisinformation* (35), S. 24-27.

SAUTER, U., MEHLIN, I., & GRAMMEL, R. (1998). Vollmechanisierte Holzernte am Steilhang mit Vollerntetechnik. *AFZ-Der Wald* (14), S. 722-724.

SCHMID-VIELGUT, B. (1985). *Psycho-physische Beanspruchung der Arbeitskräfte in Holzertesystemen unterschiedlicher Mechanisierungsgrade*. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Freiburg.

SLAMKA, M., & RADOCHA, M. (2010). Results of Harvesters and Forwarders operations in Slovakian Forests. *Forestry Journal* (56), S. 1-15.

STAMPFER, K. (1996). *Belastungs- und Beanspruchungsermittlung bei verschiedenen mechanisierten forstlichen Arbeitssystemen*. Wien: Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik Universität für Bodenkultur.

STAMPFER, K. (2002a). Einsatzmöglichkeiten von Harvestern im Steilgelände. *Bündnerwald* (4), S. 28-35.

STAMPFER, K. (2002b). *Optimierung von Holzertesystemen im Gebirge*. Habilitationsschrift, Institut für Forsttechnik, Wien.

STAMPFER, K., & STEINMÜLLER, T. (2004). *Harvester und Seilgerät am Steilhang - Valmet 911.1 X3 M und Syncrofalke*. Universität für Bodenkultur Wien. Wien: Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik.

STAMPFER, K., LIMBECK-LILIENAU, B., & STEINMÜLLER, T. (2002). Bestandsschäden bei der mechanisierten Holzernte am Steilhang. *Bündnerwald* (4), S. 37-42.

STAMPFER, K., PIECHL, S., STAMPFER, E., & TRZESNIOWSKI, A. (1997). *Belastungen und Beanspruchungen bei der Holzernte im Gebirge* (Bd. 7). Wien: Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik Universität für Bodenkultur.

STAMPFER, K., STEINMÜLLER, T., & SVATON, R. (2001). Grenzen der Steigfähigkeit. *Österreichische Forstzeitung (Arbeit im Wald)* (112), S. 1-3.

VISSER, R., & STAMPFER, K. (2015). Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain. *Croatian journal of forest engineering* , S. 312-331.

WEHNER, T., JACKE, H., & DREEKE, R. (2010). Realitäten und Visionen beim bodenverträglichen Einsatz von Forstmaschinen. *AFZ-Der Wald* (18), S. 24-27.

WEISE, G. (2008). Entwicklung und Einsatz von Forstreifen. *LWF aktuell* (67), S. 24-27.

WRATSCHKO, B. (2006). *Einsatzmöglichkeiten von Seilforwardern*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik, Wien.

## **ELEKTRONISCHE QUELLEN**

BFW. (2016). *Forstmaschinen Database*. Abgerufen am 21. 04 2016 von <http://bfw.ac.at/fmdb/maschinen.web?kat=1771&lang=1>

HERZOG FORSTTECHNIK AG. (2016). Abgerufen am 20. 4 2016 von [www.herzog-forsttechnik.ch](http://www.herzog-forsttechnik.ch)

## **PERSÖNLICHE MITTEILUNGEN**

HUBER-TAZREITER. (2016). Persönliche Mitteilung von Michael Katzensteiner.

## 7.1 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Skizze des Aufnahmegebietes bei Kapfenberg .....  | 12 |
| Abbildung 2: Skizze des Aufnahmegebietes am Jauerling .....  | 13 |
| Abbildung 3: Skizze des Aufnahmegebietes bei Viessling .....   | 14 |
| Abbildung 4: Darstellung der Arbeitsweise bei der Bergabrückung .....  | 16 |
| Abbildung 5: Darstellung der Arbeitsweise bei der Bergaufrückung .....   | 16 |
| Abbildung 6: Kamera neben dem Seileinzug (Foto: Verfasser) .....   | 19 |
| Abbildung 7: Beschreibung der Maße des<br>John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016) .....                                    | 20 |
| Abbildung 8: Stichprobeverfahren für Volumenaufnahme (Foto: Verfasser) .....   | 23 |
| Abbildung 9: Boxplot für Rüstzeiten bei der Bergabrückung .....  | 28 |
| Abbildung 10: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit<br>von der Rückedistanz .....                                   | 30 |
| Abbildung 11: Produktivität in Abhängigkeit vom<br>durchschnittlichen Stückvolumen .....                               | 34 |
| Abbildung 12: Produktivität in Abhängigkeit von Stückvolumen und<br>Fuhrevolumen .....                                 | 34 |
| Abbildung 13: Produktivität in Abhängigkeit vom Stückvolumen und der<br>Rückedistanz .....                             | 35 |
| Abbildung 14: Produktivität in Abhängigkeit vom Stückvolumen und der<br>Ladedistanz .....                              | 35 |
| Abbildung 15: Systemkosten in Abhängigkeit von der jährlichen Auslastung .....   | 38 |
| Abbildung 16: Vergleich der Produktivitätsmodelle zwischen<br>Holzfeind und Wratschko .....                            | 42 |
| Abbildung 17: Histogramm der standardisierten Residuen mit<br>Normalverteilungskurve für das Teilmodell Fahren .....   | 51 |
| Abbildung 18: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit von der<br>durchschnittlichen Neigung der Rückedistanz .....    | 52 |
| Abbildung 19: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit vom Fuhrevolumen ...  | 52 |
| Abbildung 20: Histogramm der standardisierten Residuen mit<br>Normalverteilungskurve für das Teilmodell Laden .....    | 53 |
| Abbildung 21: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit<br>vom Stückvolumen <sup>-0,3</sup> .....                  | 53 |
| Abbildung 22: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit vom<br>Fuhrevolumen .....                                  | 54 |
| Abbildung 23: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit<br>von der Neigung der Ladedistanz .....                   | 54 |
| Abbildung 24: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit<br>von der Ladedistanz .....                               | 55 |
| Abbildung 25: Histogramm der standardisierten Residuen mit<br>Normalverteilungskurve für das Teilmodell Entladen ..... | 55 |
| Abbildung 26: Punktdiagramm - Entladeeffizienz in Abhängigkeit vom<br>Stückvolumen <sup>-0,3</sup> .....               | 56 |

## 7.2 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Mögliche technische Maßnahmen des Bodenschutzes (WEHNER et al., 2010).....           | 5  |
| Tabelle 2: Vergleich der Traktionshilfswinden der verschiedenen Hersteller (KASTNER, 2016)..... | 8  |
| Tabelle 3: Beschreibung der abhängigen Variablen.....   | 10 |
| Tabelle 4: Beschreibung der Kovariaten.....   | 10 |
| Tabelle 5: Erklärung der Variablen für die Systemproduktivität.....                             | 11 |
| Tabelle 6: Statistische Kennwerte über alle Trassen.....  | 11 |
| Tabelle 7: Daten zu den Trassen bei Kapfenberg.....   | 12 |
| Tabelle 8: Daten zu den Trassen am Jauerling.....   | 13 |
| Tabelle 9: Daten zu den Trassen bei Viessling.....  | 14 |
| Tabelle 10: Technische Daten des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016).....                       | 18 |
| Tabelle 11: Maße des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016).....                                   | 20 |
| Tabelle 12: Beschreibung der Arbeitstakte für die Forwardertätigkeit.....                       | 21 |
| Tabelle 13: Beschreibung der Einflussgrößen für die Forwardertätigkeit.....                     | 22 |
| Tabelle 14: Aufteilung der gesamt aufgenommenen Zeit.....                                       | 24 |
| Tabelle 15: Statistische Kennwerte für die Kovariaten.....                                      | 25 |
| Tabelle 16: Anteil der Arbeitsschritte am Seil.....   | 25 |
| Tabelle 17: Aufteilung der Unterbrechungen.....   | 25 |
| Tabelle 18: Statistische Kennwerte für die abhängigen Variablen.....                            | 26 |
| Tabelle 19: Zeitaufwand für Seilmontage.....  | 27 |
| Tabelle 20: Übersicht der Montagezeiten verschiedener Trassen.....                              | 28 |
| Tabelle 21: Kovarianzanalyse; abhängige Variable = Fahren.....                                  | 29 |
| Tabelle 22: Anova für das Teilmodell Fahren.....  | 30 |
| Tabelle 23: Regressionskoeffizient für das Teilmodell Fahren.....                               | 30 |
| Tabelle 24: Kovarianzanalyse; abhängige Variable = <i>Effiz.Laden</i> .....                     | 31 |
| Tabelle 25: Anova für das Teilmodell Laden.....   | 31 |
| Tabelle 26: Regressionskoeffizienten für das Teilmodell Laden.....                              | 32 |
| Tabelle 27: Kovarianzanalyse; abhängige Variable Effizienz Entladen.....                        | 32 |
| Tabelle 28: Anova für das Teilmodell Entladen.....  | 32 |
| Tabelle 29: Regressionskoeffizient für das Teilmodell Entladen.....                             | 33 |
| Tabelle 30: Koeffizienten zur Herleitung der Produktivität.....                                 | 33 |
| Tabelle 31: Kostenkalkulation John Deere 1110E nach FAO/ECE - Schema.....                       | 37 |
| Tabelle 32: Kostenkalkulation Reifen.....   | 37 |
| Tabelle 33: Kostenkalkulation Seil.....   | 38 |
| Tabelle 34: Produktivitäten für Forwarder und Seilforwarder.....                                | 40 |
| Tabelle 35: Systemvergleich John Deere 1110E und Gremo 950R.....                                | 41 |

### 7.3 Formelverzeichnis

|                |    |
|----------------|----|
| Formel 1 ..... | 10 |
| Formel 2 ..... | 10 |
| Formel 3 ..... | 10 |
| Formel 4 ..... | 11 |
| Formel 5 ..... | 31 |
| Formel 6 ..... | 32 |
| Formel 7 ..... | 33 |
| Formel 8 ..... | 33 |

## 8 ANHANG

### 8.1 Ergebnisse der statistischen Analyse

#### 8.1.1 Teilmodell Fahren

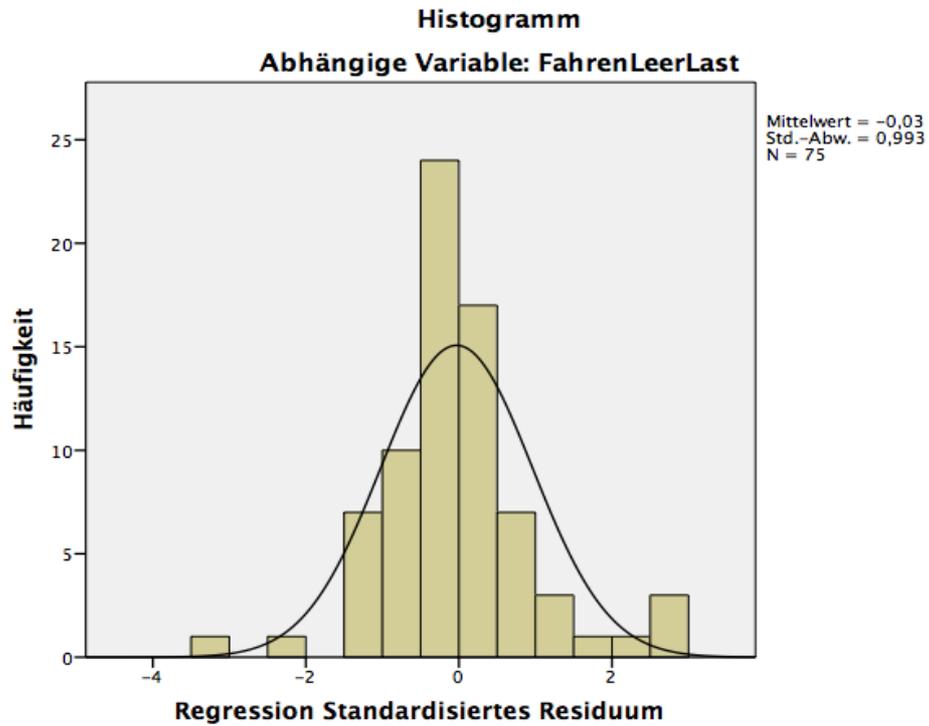


Abbildung 17: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Fahren

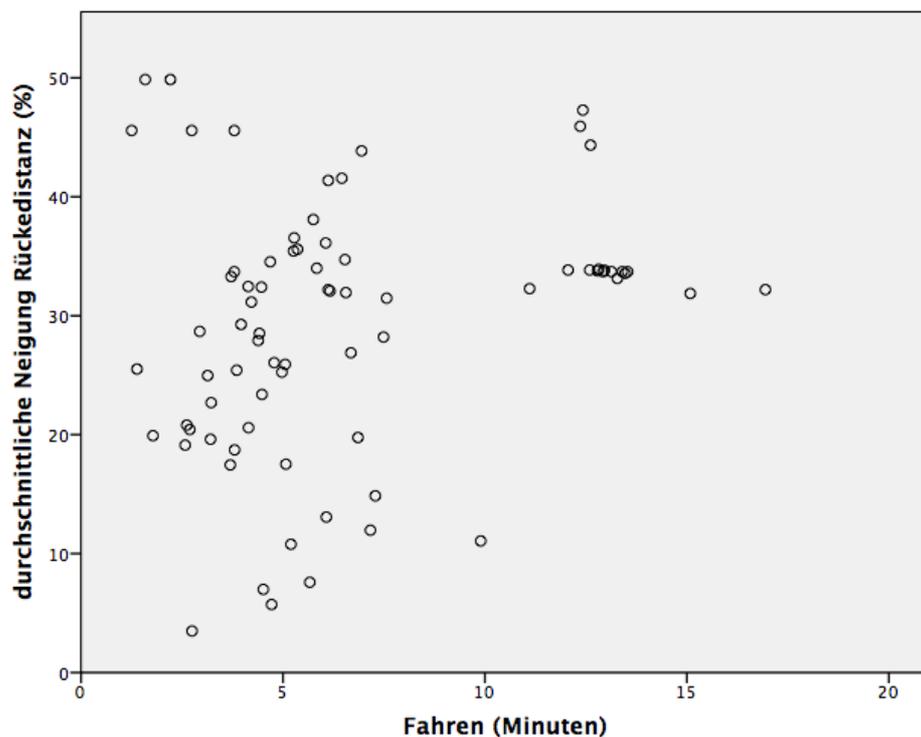


Abbildung 18: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Neigung der Rückedistanz

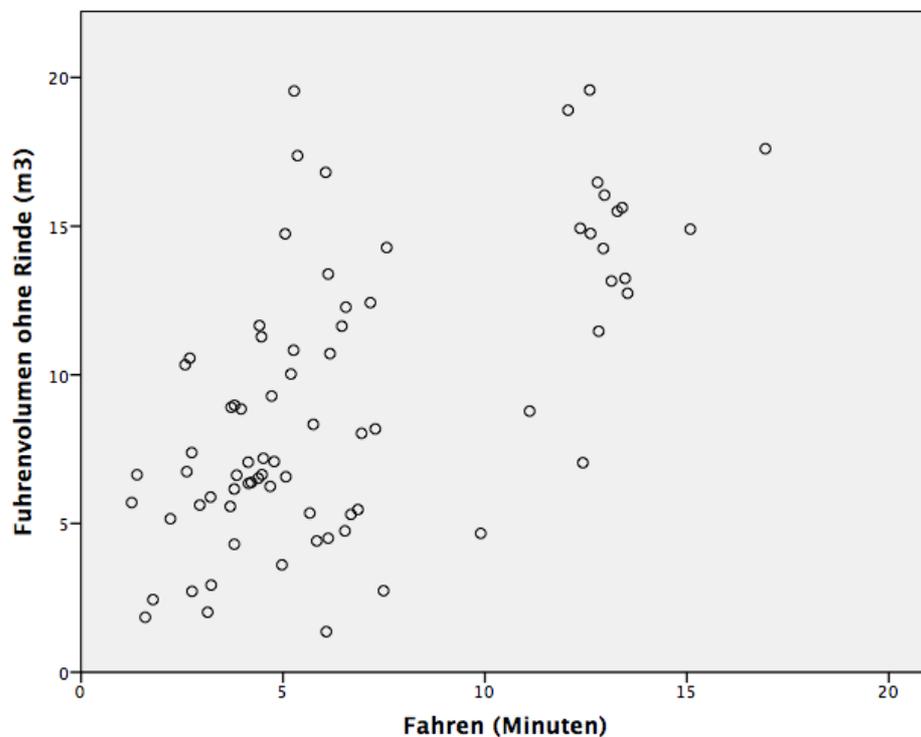


Abbildung 19: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit vom Fuhrenvolumen

### 8.1.2 Teilmodell Laden

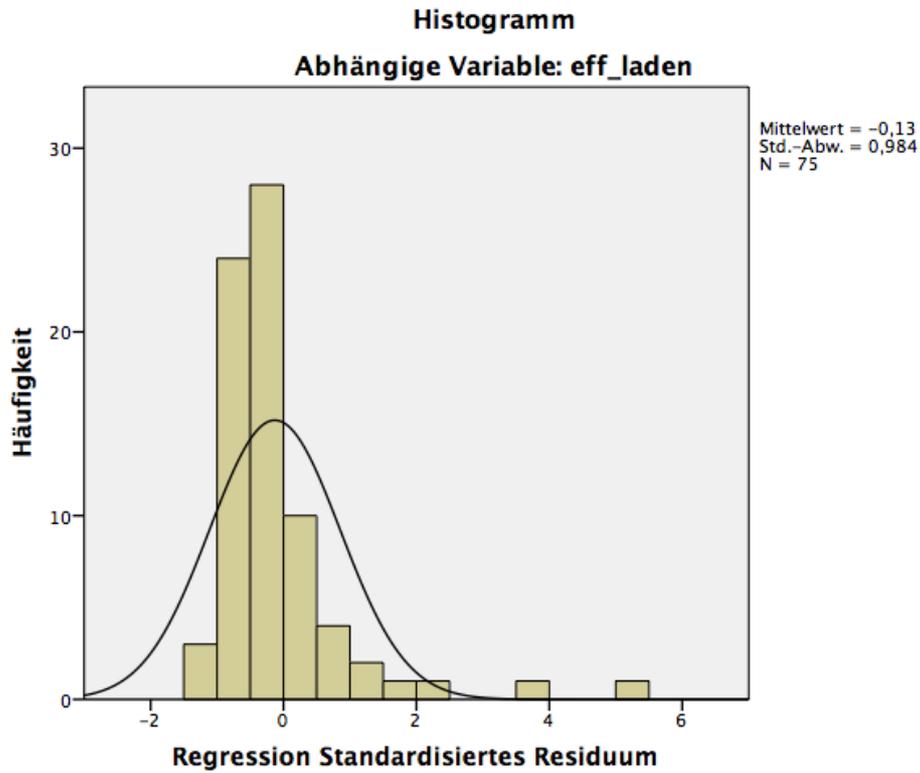


Abbildung 20: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Laden

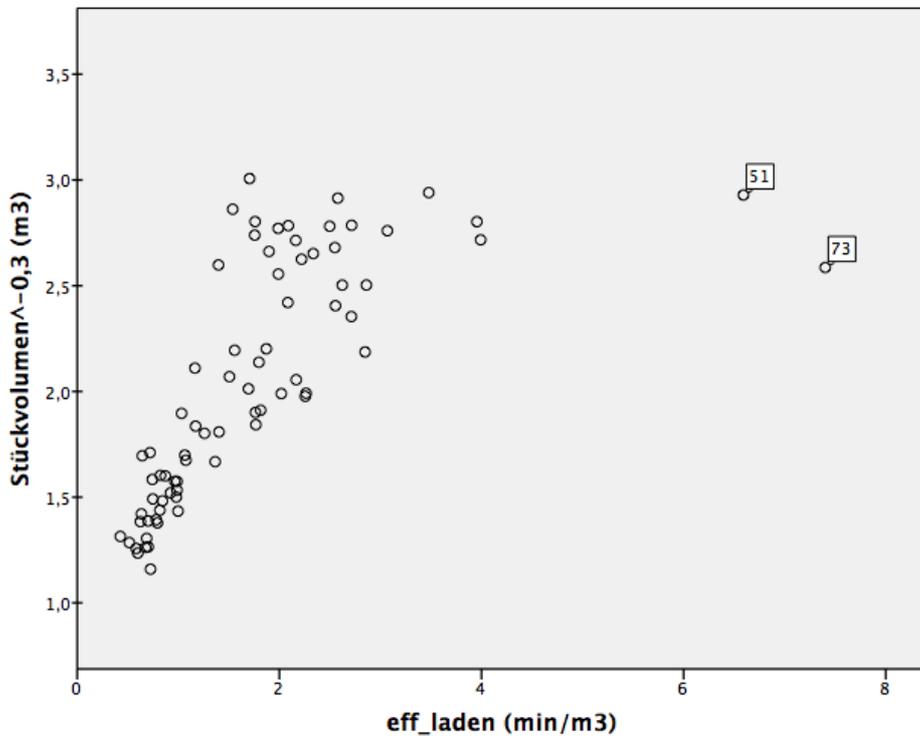


Abbildung 21: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit vom Stückvolumen<sup>-0,3</sup>

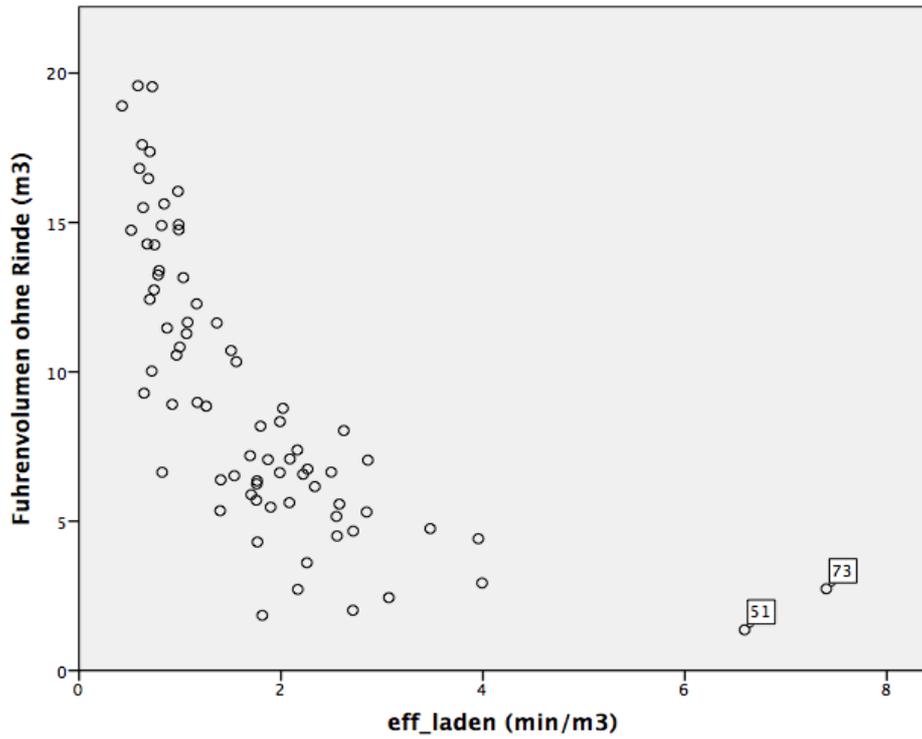


Abbildung 22: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit vom Fuhrevolumen

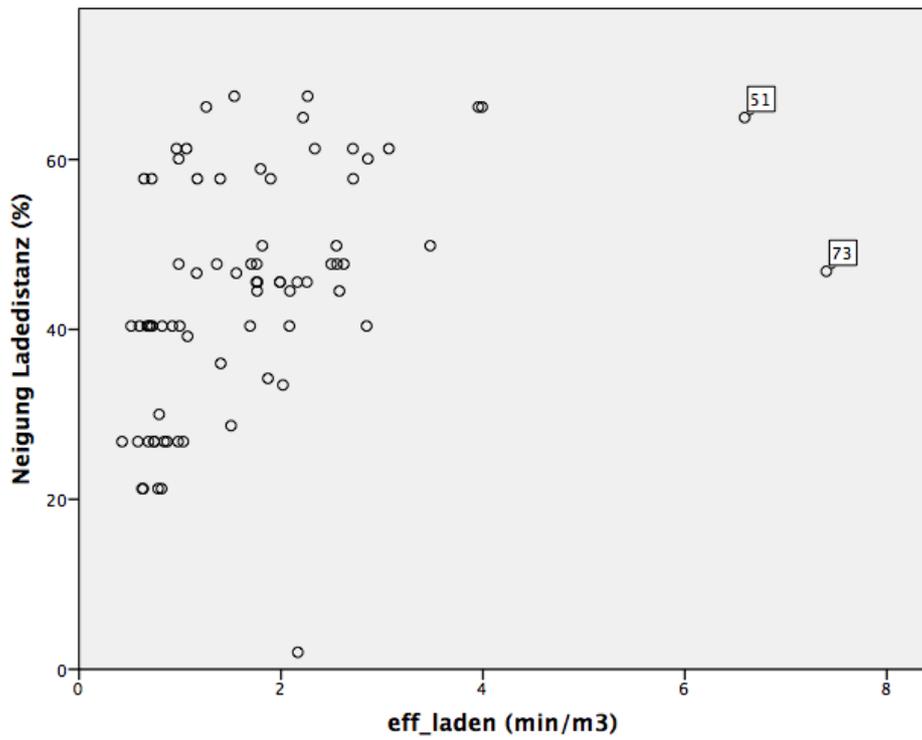


Abbildung 23: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit von der Neigung der Ladedistanz

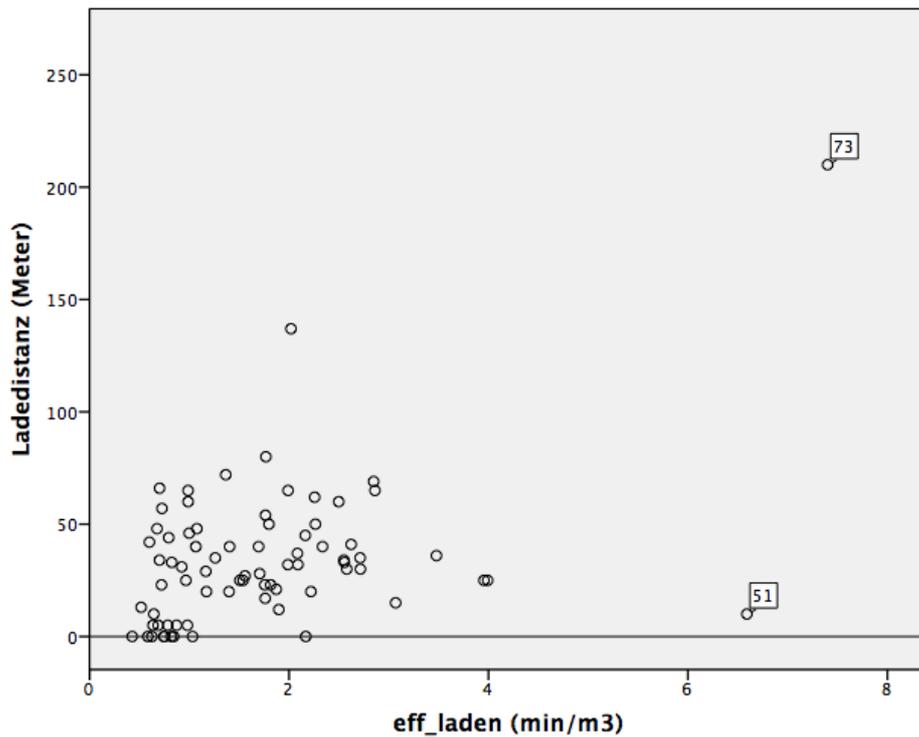


Abbildung 24: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit von der Ladedistanz

### 8.1.3 Teilmodell Entladen

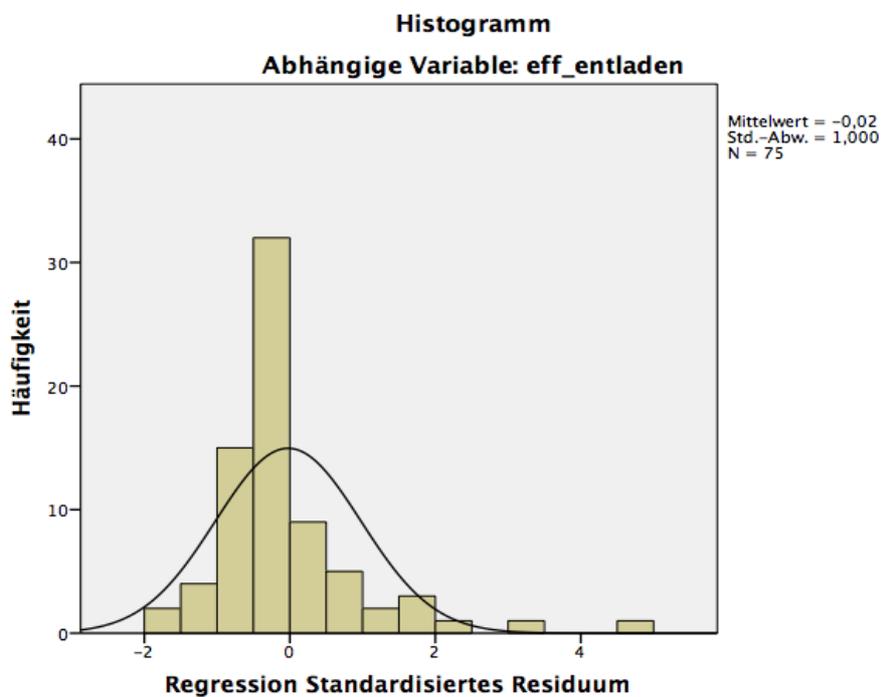


Abbildung 25: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Entladen

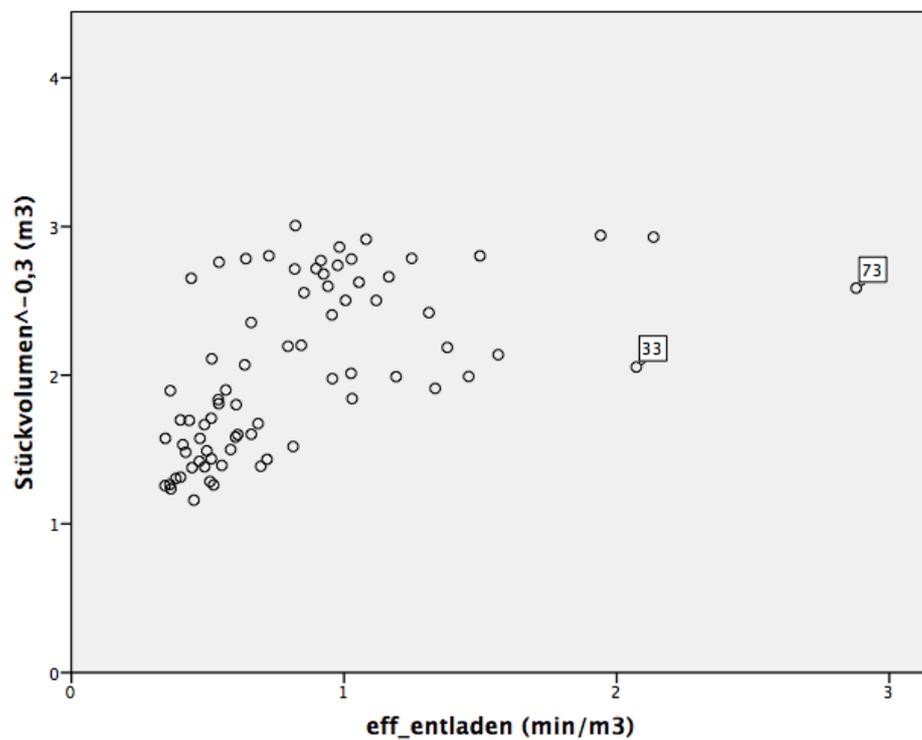


Abbildung 26: Punktdiagramm - Entladeeffizienz in Abhängigkeit vom Stückvolumen<sup>-0,3</sup>

### 8.1.4 Aufnahmeformulare

| <b>Aufnahmeformular für Führen</b> |         |             |       |                 |
|------------------------------------|---------|-------------|-------|-----------------|
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |         |             |       |                 |
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Trassennummer:</b>              |         |             |       | <b>Datum:</b>   |
| <b>Fuhrennummer:</b>               |         |             |       | <b>Uhrzeit:</b> |
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Stückzahl/Fuhre:</b>            |         |             |       |                 |
| <b>Markierte Stücke/Fuhre:</b>     |         |             |       |                 |
|                                    |         |             |       |                 |
| Baum-NR.                           | Baumart | Durchmesser | Länge | Anmerkungen     |
| 1                                  |         |             |       |                 |
| 2                                  |         |             |       |                 |
| 3                                  |         |             |       |                 |
| 4                                  |         |             |       |                 |
| 5                                  |         |             |       |                 |
| 6                                  |         |             |       |                 |
| 7                                  |         |             |       |                 |
| 8                                  |         |             |       |                 |
| 9                                  |         |             |       |                 |
| 10                                 |         |             |       |                 |
| 11                                 |         |             |       |                 |
| 12                                 |         |             |       |                 |
| 13                                 |         |             |       |                 |
| 14                                 |         |             |       |                 |
| 15                                 |         |             |       |                 |
| 16                                 |         |             |       |                 |
| 17                                 |         |             |       |                 |
| 18                                 |         |             |       |                 |
| 19                                 |         |             |       |                 |
| 20                                 |         |             |       |                 |
| 21                                 |         |             |       |                 |
| 22                                 |         |             |       |                 |
| 23                                 |         |             |       |                 |
| 24                                 |         |             |       |                 |
| 25                                 |         |             |       |                 |

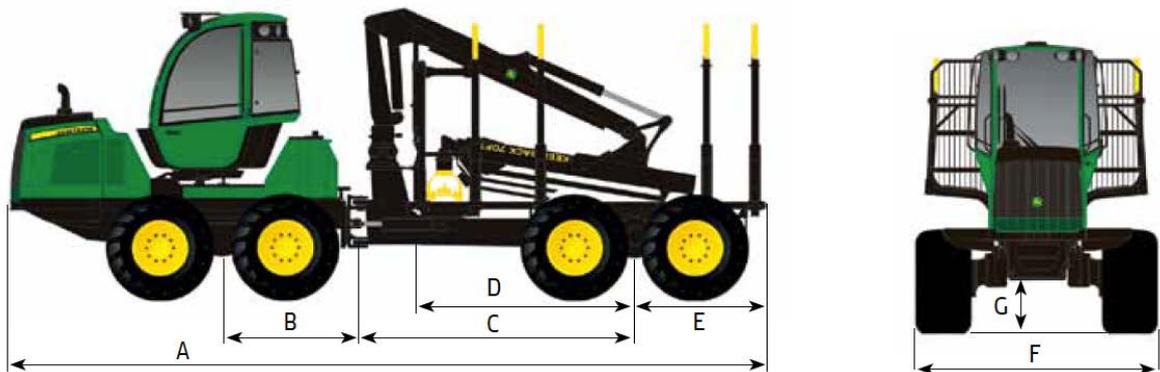
| <b>Aufnahmeformular für Trasse</b> |  |               |  |
|------------------------------------|--|---------------|--|
|                                    |  |               |  |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |  |               |  |
|                                    |  |               |  |
| <b>Trassennummer:</b>              |  | <b>Datum:</b> |  |
| <b>Fuhrenummer:</b>                |  | <b>Zeit:</b>  |  |
|                                    |  |               |  |
| Trassenlänge                       |  |               |  |
| Neigung Trasse                     |  |               |  |
| Distanz bis zum ersten Aufladen    |  |               |  |
| Distanz bis zum letzten Aufladen   |  |               |  |
| Distanz Forststraße                |  |               |  |
| Neigung Forststraße                |  |               |  |
|                                    |  |               |  |

| <b>Aufnahmeformular für Trasse</b> |  |               |  |
|------------------------------------|--|---------------|--|
|                                    |  |               |  |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |  |               |  |
|                                    |  |               |  |
| <b>Trassennummer:</b>              |  | <b>Datum:</b> |  |
| <b>Fuhrenummer:</b>                |  | <b>Zeit:</b>  |  |
|                                    |  |               |  |
| Trassenlänge                       |  |               |  |
| Neigung Trasse                     |  |               |  |
| Distanz bis zum ersten Aufladen    |  |               |  |
| Distanz bis zum letzten Aufladen   |  |               |  |
| Distanz Forststraße                |  |               |  |
| Neigung Forststraße                |  |               |  |

Rungen beträgt 20 Zentimeter, das heißt, dass eine Verbreiterung von 10 Zentimetern auf jeder Seite vorgenommen wurde.

**Tabelle 11: Maße des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016)**

| <b>Abmessungen</b>                        | <b>Standard-Radstand</b>     |
|---|------------------------------|
| <b>Länge (A)</b>                          | 9720 mm                      |
| <b>Radstand (B+C)</b>                     | 5100 mm                      |
| <b>Bogiemitte - Mittelgelenk (B)</b>      | 1700 mm                      |
| <b>Mittelgelenk - Bogiemitte (C)</b>      | 3400 mm                      |
| <b>Stirngitter - Bogiemitte (D)</b>       | 2600 mm                      |
| <b>Bogiemitte - Heck (E)</b>              | 1900 mm                      |
| <b>Breite - 600er Reifen (F)</b>          | 2700 mm                      |
| <b>Breite - 700er Reifen (F)</b>          | 2890 mm (6-Rad 2790-2970 mm) |
| <b>Äußerer Wendekreis - 700er Reifen</b>  | 8243 mm                      |
| <b>Innerer Wendekreis - 700er Reifen</b>  | 4493 mm                      |
| <b>Transporthöhe</b>                      | 3800 mm                      |
| <b>Bodenfreiheit - 6-Rad/8-Rad (G)</b>    | 605 mm                       |
| <b>Reifen, vorne - 6-Rad/8-Rad</b>        | 34-14 / 26,5-20              |
| <b>Reifen, hinten</b>                     | 26,5-20                      |
| <b>Minimales Maschinengewicht - 6-Rad</b> | 15 500 kg                    |
| <b>Minimales Maschinengewicht - 8-Rad</b> | 17 300 kg                    |
| <b>Böschungswinkel - 6-Rad/8-Rad</b>      | 25° / 36°                    |

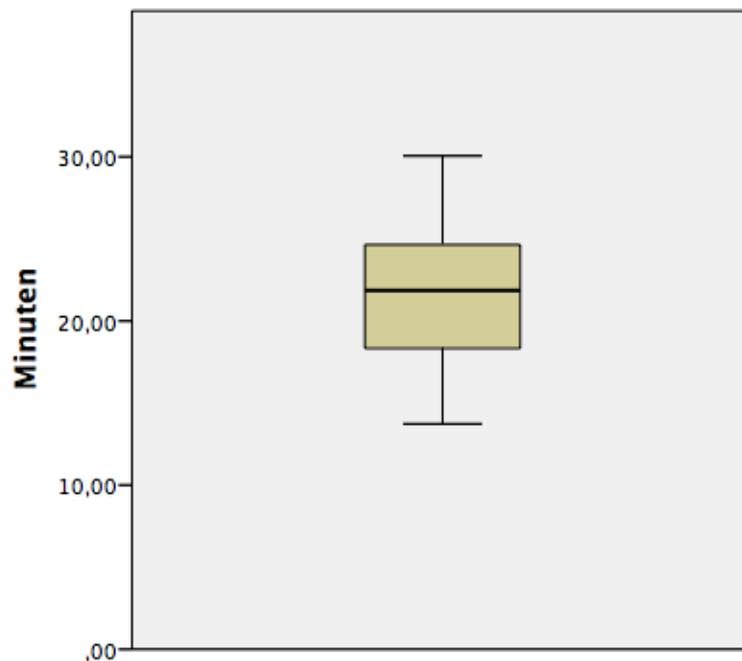


**Abbildung 7: Beschreibung der Maße des John Deere 1110E (JOHN DEERE, 2016)**

**Tabelle 20: Übersicht der Montagezeiten verschiedener Trassen**

| Nr. | Beschreibung                        | Minuten | Rückungsart |
|-----|-------------------------------------|---------|-------------|
| 1   | Trasse 1 anhängen                   | 26,54   | bergab      |
| 2   | Wechsel von Trasse 1 auf Trasse 2   | 15,12   | bergab      |
| 3   | Wechsel von Trasse 2 auf Trasse 1   | 18,33   | bergab      |
| 4   | Wechsel von Trasse 1 auf Trasse 2   | 21,98   | bergab      |
| 5   | Wechsel von Trasse 4 auf Trasse 5   | 13,74   | bergab      |
| 6   | Wechsel von Trasse 5 auf Trasse 6   | 24,65   | bergab      |
| 7   | Wechsel von Trasse 6 auf Trasse 7   | 19,99   | bergab      |
| 8   | Wechsel von Trasse 7 auf Trasse 8   | 21,74   | bergab      |
| 9   | Wechsel von Trasse 8 auf Trasse 9   | 26,81   | bergab      |
| 10  | Trasse 9 lösen                      | 10,49   | bergab      |
| 11  | Wechsel von Trasse 11 auf Trasse 12 | 23,68   | bergab      |
| 12  | Wechsel von Trasse 14 auf Trasse 15 | 30,05   | bergab      |
| 13  | Wechsel von Trasse 12 auf Trasse 13 | 1,40    | bergauf     |
| 14  | Trasse 16 lösen                     | 2,73    | bergauf     |

Betrachtet man jedoch bei der Bergabrückung lediglich die 10 Wechsel von einer Trasse auf die Andere, so lässt sich feststellen, dass dafür durchschnittlich 21,6 Minuten pro Wechsel benötigt wurden (Abbildung 9). Ein Wechsel der Trasse beinhaltet dabei immer das Lösen des Seiles aus der vorangegangenen Trasse und das Anhängen des Seiles in der nächsten Trasse.

**Abbildung 9: Boxplot für Rüstzeiten bei der Bergabrückung**

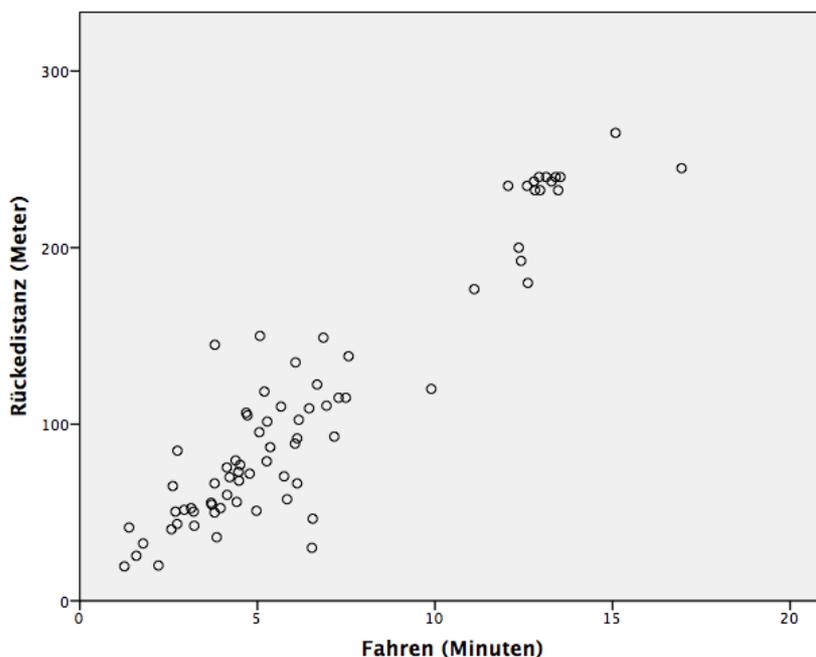


Abbildung 10: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit von der Rückedistanz

Anschließend wurde eine lineare Regression gerechnet, um die Koeffizienten für die Schätzung der Fahreffizienz zu ermitteln. Aus dem R-Quadrat mit ,971 ist ersichtlich, dass die Variablen Rückedistanz und Neigung Rückedistanz 97,1 % der Streuung erklären (Tabelle 22).

Tabelle 22: Anova für das Teilmodell Fahren

|                                       | Quadratsumme          | df | Mittel der Quadrate | F       | Signifikanz |
|---------------------------------------|-----------------------|----|---------------------|---------|-------------|
| <b>Regression</b>                     | 4302,168              | 2  | 2151,084            | 1238,06 | ,000        |
| <b>Nicht standardisierte Residuen</b> | 126,835               | 73 | 1,737               |         |             |
| <b>Gesamt</b>                         | 4429,003 <sup>d</sup> | 75 |                     |         |             |

R-Quadrat = ,971 (korrigiertes R-Quadrat = ,971)

Aus den Ergebnissen der Regressionsanalyse (Tabelle 23) ergibt sich somit folgender Ansatz zur Herleitung der Fahreffizienz (Formel 5). Das Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve befindet sich im Anhang (Abbildung 17).

Tabelle 23: Regressionskoeffizient für das Teilmodell Fahren

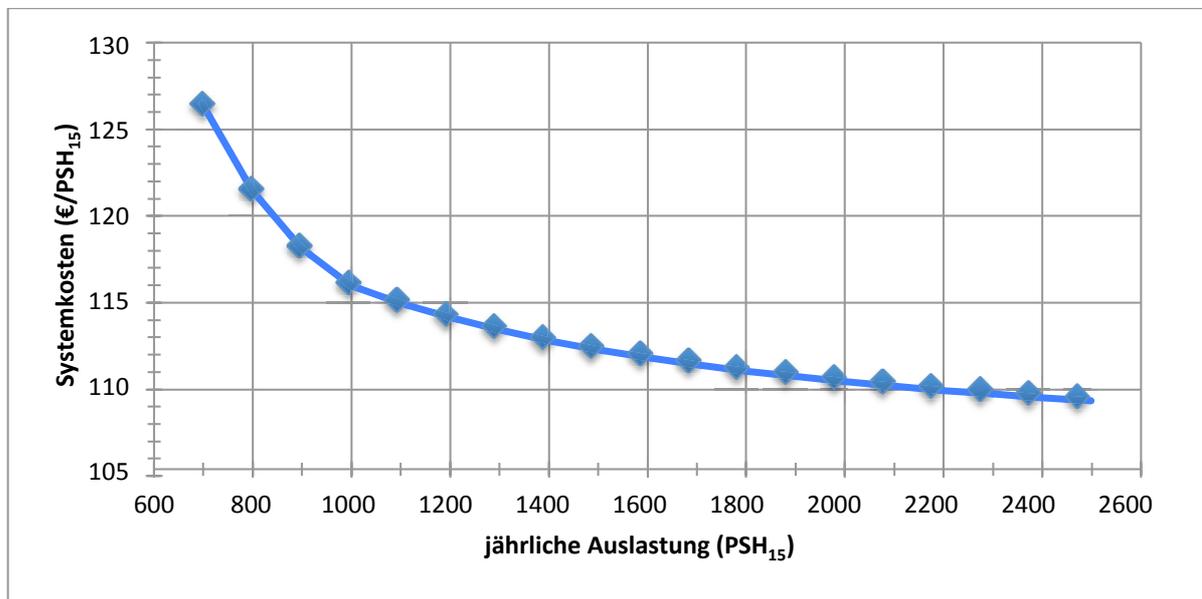
|                       | Koeffizient | Standardfehler | T      | Signifikanz |
|-----------------------|-------------|----------------|--------|-------------|
| <b>Rückedistanz</b>   | ,050        | ,002           | 25,087 | ,000        |
| <b>Neigung Rücken</b> | ,037        | ,008           | 4,339  | ,000        |

**Tabelle 33: Kostenkalkulation Seil**

| Eingangsdaten   |                  |             |
|---|------------------|-------------|
| Seillänge   | [m]              | 450         |
| Kosten pro lfm  | [€]              | 3           |
| Anschaffungskosten gesamt AG  | [€]              | 1.350       |
| Normale Nutzungsdauer (H)   | [PSH15]          | 500         |
| Veralterungszeitraum (N)  | [Jahre]          | 4           |
| Jährliche Auslastung (J)  | [PSH15]          | 1.900       |
| Auslastungsschwelle (SW) (SW=H/N)   | [PSH15]          | 125         |
| Zinsfaktor  | [%]              | 5           |
| Sachkosten  |                  |             |
| Zinsen $((AG/2 \cdot p/100)/J)$   | [€/PSH15]        | 0,02        |
| Abschreibung $Ab=AG/H$ wenn $J \geq SW$ $Ab=AG/(J \cdot N)$ wenn $J < SW$ | [€/PSH15]        | 2,70        |
| <b>Summe Sachkosten</b>   | <b>[€/PSH15]</b> | <b>2,72</b> |

In der Maschinenkostenkalkulation sind Overheads, Risiko, Unternehmergewinn, Überstellungskosten sowie mögliche Kosten für PKW nicht enthalten.

In der Abbildung 15 sind die Systemkosten in Abhängigkeit von der jährlichen Auslastung dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Systemkosten unter der jährlichen Auslastungsschwelle (1.500 PSH<sub>15</sub>) überproportional ansteigen. Ist die Auslastungsschwelle jedoch erreicht, so sinken die Systemkosten nur mehr geringfügig.



**Abbildung 15: Systemkosten in Abhängigkeit von der jährlichen Auslastung**

Mit den errechneten Systemkosten von 110,68 €/PSH<sub>15</sub> und einer Produktivität von 13,73 m<sup>3</sup>/PSH<sub>15</sub> ergeben sich somit über die gesamten Aufnahmen Kosten von 8,06 €/m<sup>3</sup> für das Rücken.

## 8 ANHANG

### 8.1 Ergebnisse der statistischen Analyse

#### 8.1.1 Teilmodell Fahren

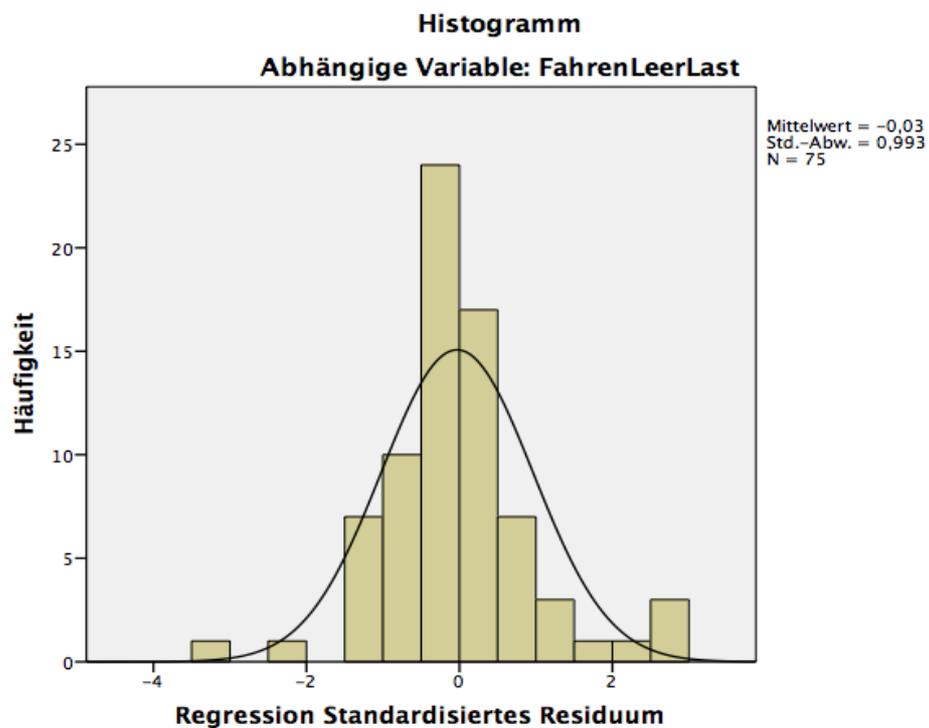


Abbildung 17: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Fahren

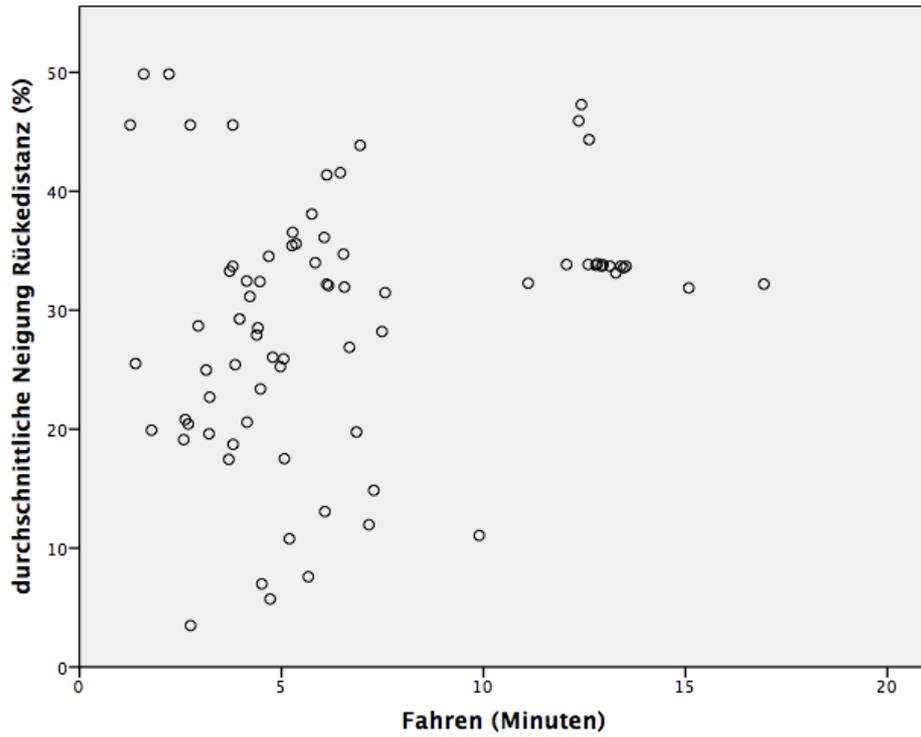


Abbildung 18: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Neigung der Rückedistanz

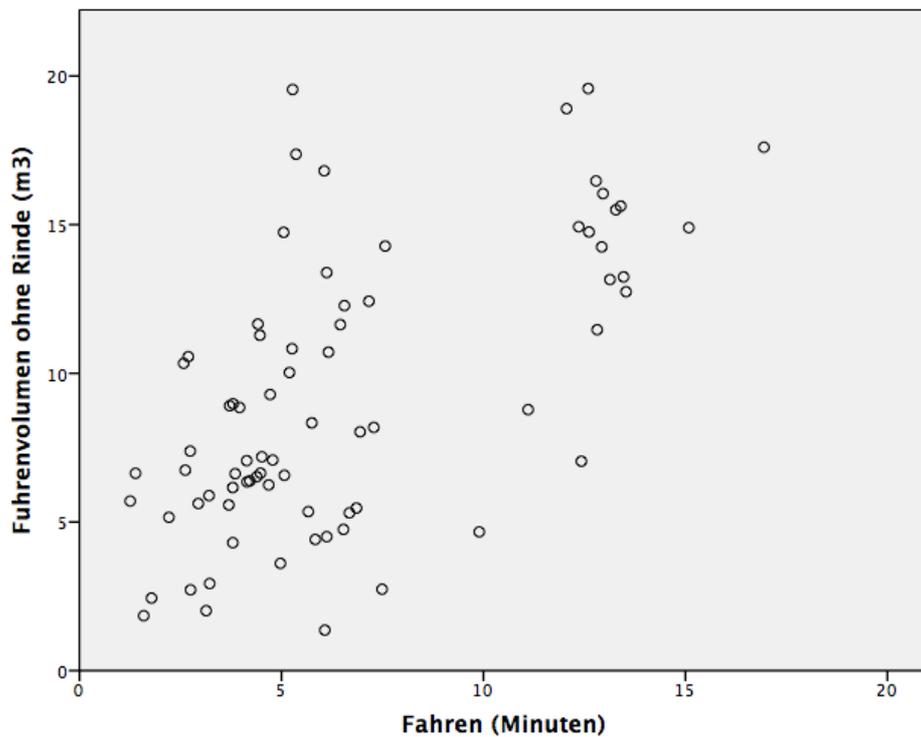


Abbildung 19: Punktdiagramm - Fahrzeit in Abhängigkeit vom Fuhrenvolumen

### 8.1.2 Teilmodell Laden

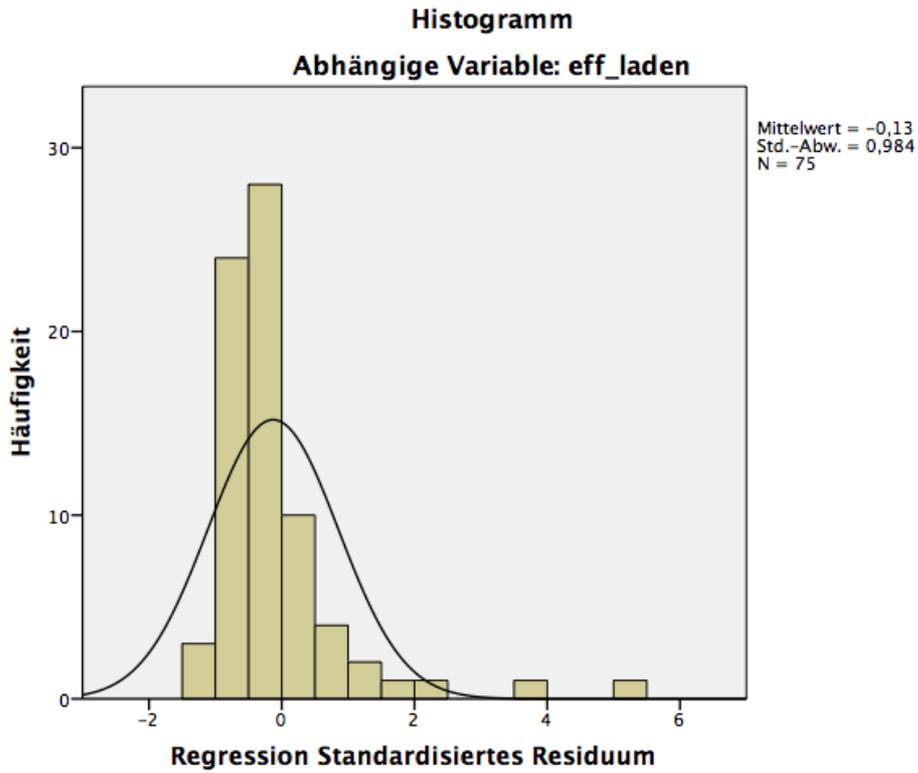


Abbildung 20: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Laden

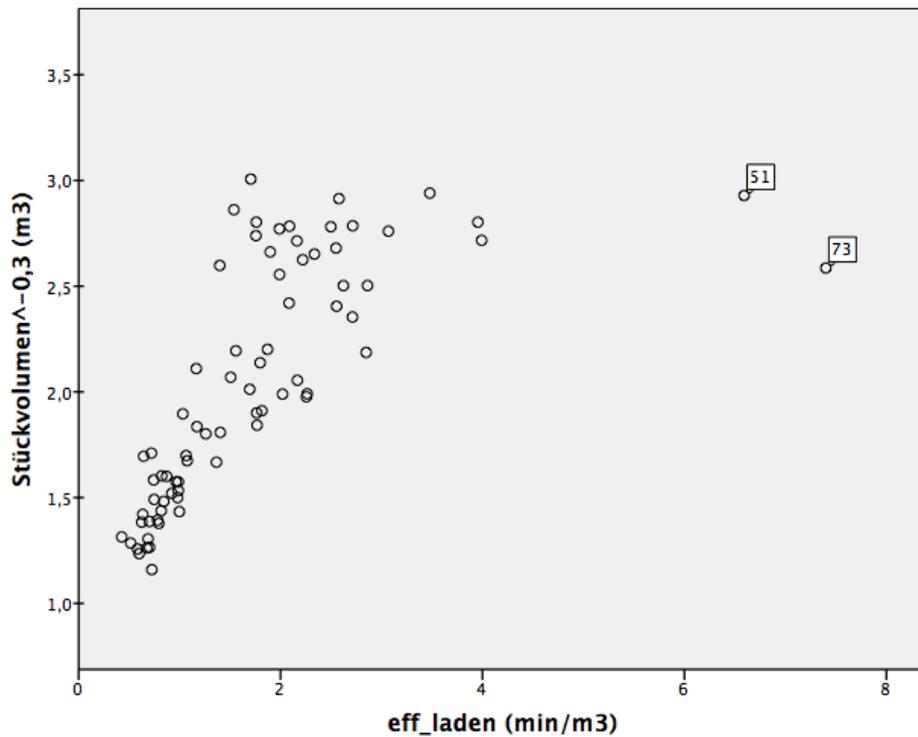


Abbildung 21: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit vom Stückvolumen<sup>-0,3</sup>

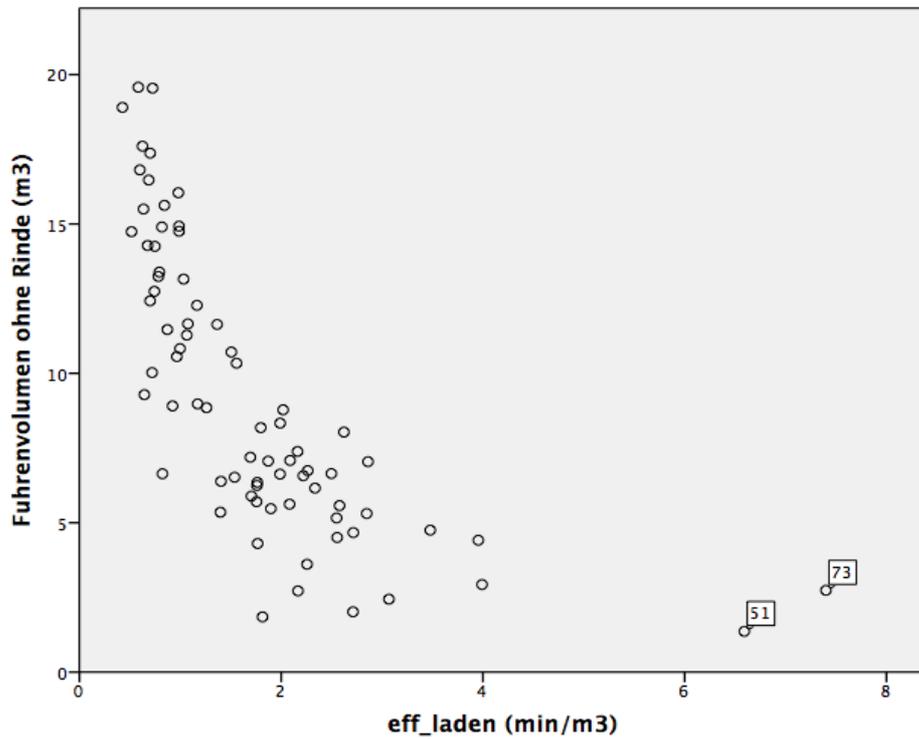


Abbildung 22: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit vom Fuhrenvolumen

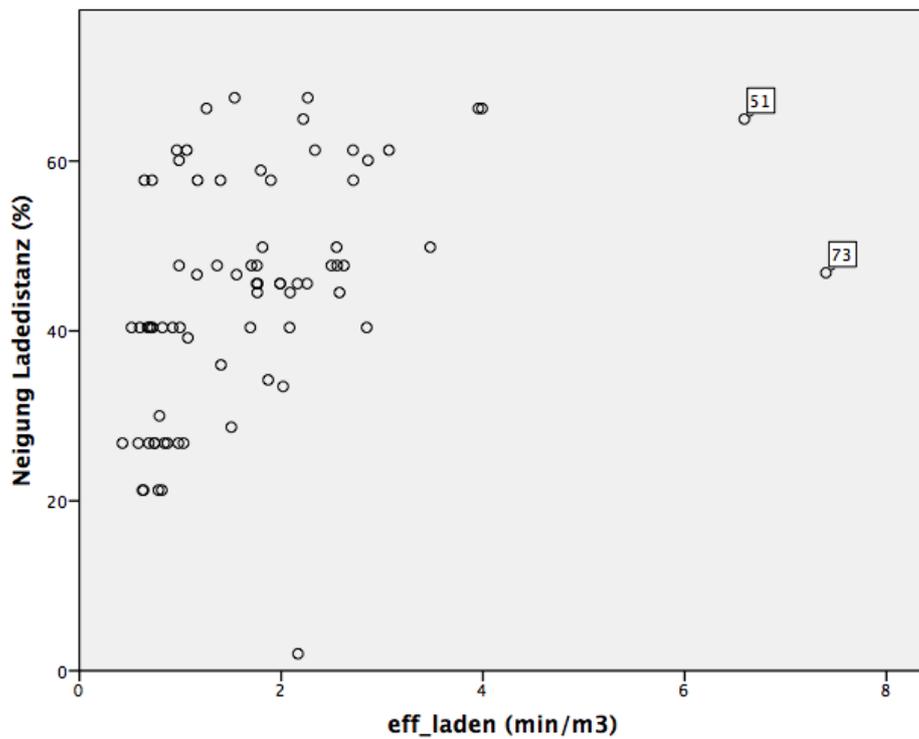


Abbildung 23: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit von der Neigung der Ladedistanz

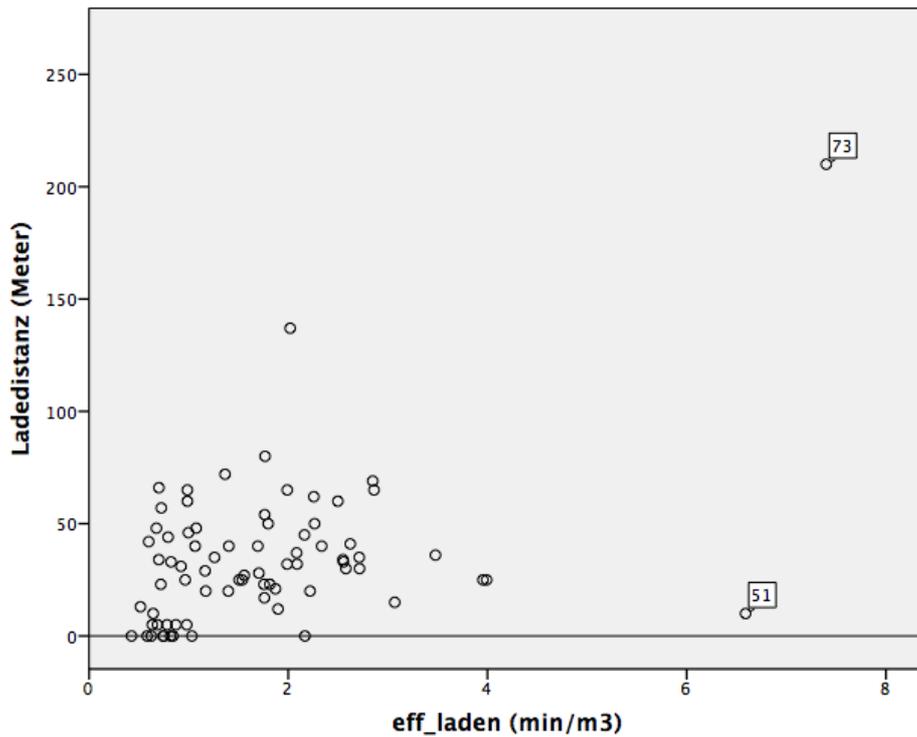


Abbildung 24: Punktdiagramm - Ladeeffizienz in Abhängigkeit von der Ladedistanz

### 8.1.3 Teilmodell Entladen

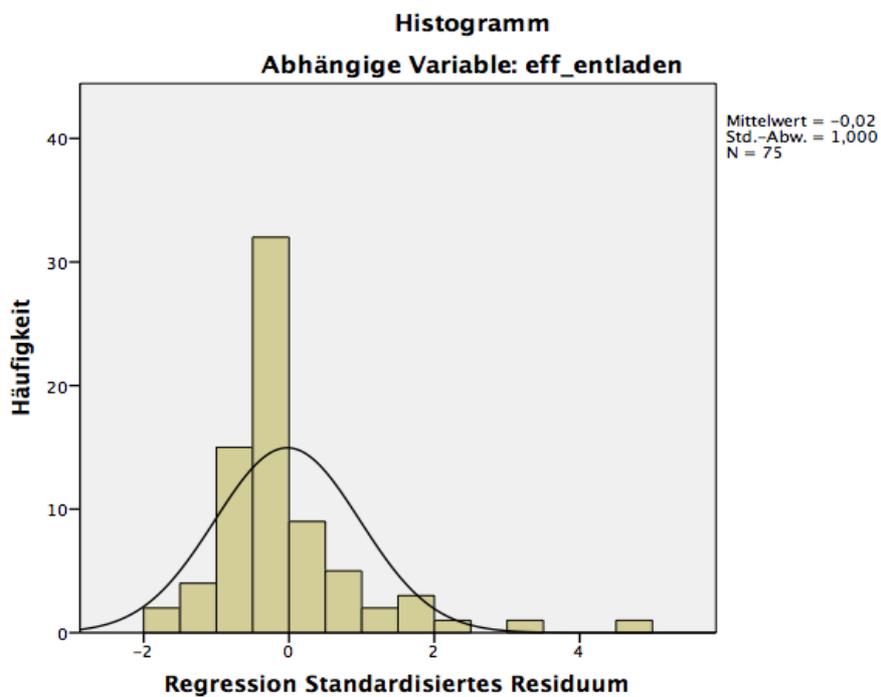


Abbildung 25: Histogramm der standardisierten Residuen mit Normalverteilungskurve für das Teilmodell Entladen

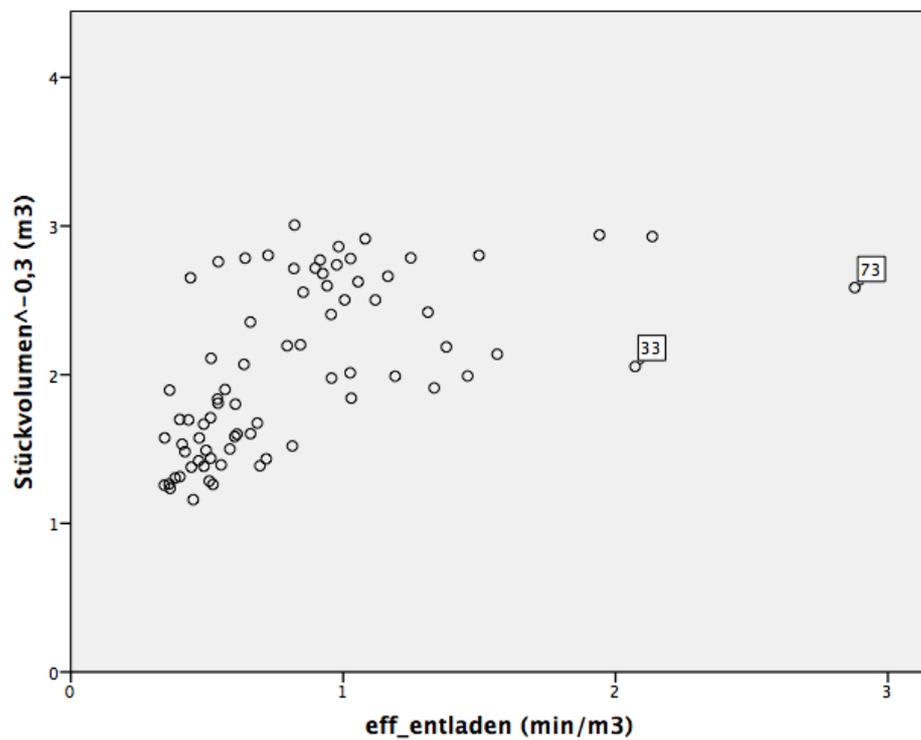


Abbildung 26: Punktdiagramm - Entladeeffizienz in Abhängigkeit vom Stückvolumen<sup>-0,3</sup>

**8.1.4 Aufnahmeformulare**

| <b>Aufnahmeformular für Führen</b> |         |             |       |                 |
|------------------------------------|---------|-------------|-------|-----------------|
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |         |             |       |                 |
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Trassennummer:</b>              |         |             |       | <b>Datum:</b>   |
| <b>Führennummer:</b>               |         |             |       | <b>Uhrzeit:</b> |
|                                    |         |             |       |                 |
| <b>Stückzahl/Fuhre:</b>            |         |             |       |                 |
| <b>Markierte Stücke/Fuhre:</b>     |         |             |       |                 |
|                                    |         |             |       |                 |
| Baum-NR.                           | Baumart | Durchmesser | Länge | Anmerkungen     |
| 1                                  |         |             |       |                 |
| 2                                  |         |             |       |                 |
| 3                                  |         |             |       |                 |
| 4                                  |         |             |       |                 |
| 5                                  |         |             |       |                 |
| 6                                  |         |             |       |                 |
| 7                                  |         |             |       |                 |
| 8                                  |         |             |       |                 |
| 9                                  |         |             |       |                 |
| 10                                 |         |             |       |                 |
| 11                                 |         |             |       |                 |
| 12                                 |         |             |       |                 |
| 13                                 |         |             |       |                 |
| 14                                 |         |             |       |                 |
| 15                                 |         |             |       |                 |
| 16                                 |         |             |       |                 |
| 17                                 |         |             |       |                 |
| 18                                 |         |             |       |                 |
| 19                                 |         |             |       |                 |
| 20                                 |         |             |       |                 |
| 21                                 |         |             |       |                 |
| 22                                 |         |             |       |                 |
| 23                                 |         |             |       |                 |
| 24                                 |         |             |       |                 |
| 25                                 |         |             |       |                 |

| <b>Aufnahmeformular für Trasse</b> |  |               |  |
|------------------------------------|--|---------------|--|
|                                    |  |               |  |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |  |               |  |
|                                    |  |               |  |
| <b>Trassennummer:</b>              |  | <b>Datum:</b> |  |
| <b>Fuhrenummer:</b>                |  | <b>Zeit:</b>  |  |
|                                    |  |               |  |
| Trassenlänge                       |  |               |  |
| Neigung Trasse                     |  |               |  |
| Distanz bis zum ersten Aufladen    |  |               |  |
| Distanz bis zum letzten Aufladen   |  |               |  |
| Distanz Forststraße                |  |               |  |
| Neigung Forststraße                |  |               |  |
|                                    |  |               |  |

| <b>Aufnahmeformular für Trasse</b> |  |               |  |
|------------------------------------|--|---------------|--|
|                                    |  |               |  |
| <b>Aufnahmeperson:</b>             |  |               |  |
|                                    |  |               |  |
| <b>Trassennummer:</b>              |  | <b>Datum:</b> |  |
| <b>Fuhrenummer:</b>                |  | <b>Zeit:</b>  |  |
|                                    |  |               |  |
| Trassenlänge                       |  |               |  |
| Neigung Trasse                     |  |               |  |
| Distanz bis zum ersten Aufladen    |  |               |  |
| Distanz bis zum letzten Aufladen   |  |               |  |
| Distanz Forststraße                |  |               |  |
| Neigung Forststraße                |  |               |  |