

# Produktivitätsmodell "Schlepper 2014"

## Teil B: Analyse der Datensätze und Diskussion der Modellierung

Dario Pedolin, WSL Birmensdorf

10. Dezember 2014

Co-Autoren: Fritz Frutig  
Renato Lemm  
Oliver Thees  
Leitung: Oliver Thees

### **Zusammenfassung**

Anhand eines Datensatzes über die Leistungen von Rückearbeiten mit Schlepper soll ein Modell für die Berechnung der Zeitaufwände erstellt werden. Das Model erklärt 72% der im Datensatz ( $N=277$ , totale Holzmenge = 90'565 m<sup>3</sup> o.R., 5 Schleppertypen) gefundenen Varianz.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Analyse Produktivitäten</b>	<b>4</b>
2.1	Beschreibung der Prozesse . . . . .	4
2.2	Beschreibung der Einheiten und Masse . . . . .	4
2.3	Erstellen und testen des Modells . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
3.1	Diskussion der Datengrundlage . . . . .	9
3.2	Diskussion des Modells . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Modelle einsetzen</b>	<b>13</b>
4.1	Formel, Koeffizienten und Systemgrenzen . . . . .	13
4.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>18</b>
5.1	Testen auf Verletzungen der Annahmen für linearen Zusammenhang	18
5.2	Beschreibung der 'Ausreisser' . . . . .	27
5.3	Kreuzvalidierung . . . . .	29
5.4	ANOVA . . . . .	32
5.5	Transformationstabellen . . . . .	32
5.6	Beschreibung der im Modell benutzten Messgrößen . . . . .	33
5.7	Anhang zur Diskussion und Sensitivitätsanalyse . . . . .	36
5.8	Angaben zu den Maschinen . . . . .	40
5.9	Erweiterung des Modells für kleine $V_{\text{mit}}$ [ $\text{m}^3$ o.R.] . . . . .	44

# 1 Einleitung

Ein Datensatz bestehend aus 291 Rückearbeiten aus den Jahren 2007 bis 2012 aus zwei Deutschen Forstbetrieben wurde benutzt, um ein Modell für die Produktivität (in Kubikmeter o.R. pro Maschinenstunde,  $[m^3 \text{ o.R.}/PMH15]$ ) des Rückens mit Schlepper zu erstellen. In einer ersten Analyse wurden Ausreisser identifiziert. In einem zweiten Schritt wurden diese Ausreisser aus der Analyse ausgeschlossen und ein Modell für die gemessene Produktivität erstellt. Das Modell wurde in der Residuenanalyse auf Verletzungen der Voraussetzungen für lineare Modellierung untersucht (Anhang Abbildung 8 bis 14). Abschliessend wurden eine Sensitivitätsanalyse für die Parameter (Abschnitt 'Diskussion') sowie ein Vergleich der Vorhersagen des neu erstellten Modells mit den Prognosen bestehender Modelle gemacht (Teil 'Vergleich mit bestehenden Modellen') sowie eine Kreuzvalidierung durchgeführt (Anhang Abbildung 16).

## 2 Analyse Produktivitäten

### 2.1 Beschreibung der Prozesse

Der Prozess 'Rücken mit Schlepper' umfasst folgende Arbeitsschritte des Rückens: Rundholzabschnitte, welche flächig im Bestand liegen oder an eine Rückegasse/Maschinenweg vorgeliefert sind, werden ggf. mit der Seilwinde zum Schlepper zugezogen (Vorrücken) und in einem kombinierten oder separaten Arbeitsgang mit einem Schlepper an eine lastwagenfahrbare Strasse gerückt und dort abgelegt. Sinngemäss gilt das auch für Vollbäume, die anschliessend mit einem Prozessor an der Feinerschliessung oder an der Waldstrasse aufgearbeitet werden (aus Lemm et al. (2003)).

### 2.2 Beschreibung der Einheiten und Masse

Alle Zeiten (Stunden [h] oder [MAS]) sind PMH15 (Produktive Arbeitszeit mit Unterbrechungen bis 15 Minuten, vergleiche Anhang Abbildung 23). Die Mengenangaben [ $\text{m}^3$  o.R.] sowie die Eingangsgrösse mittleres Stückvolumen des gerückten Holzes, nachfolgend  $V_{\text{mit}}$  sind in Kubikmeter Holz ohne Rinde erfasst.

### 2.3 Erstellen und testen des Modells

Die Datengrundlagen für diese Auswertungen stammten aus zwei unterschiedlichen Betrieben und umfassten unterschiedliche Parameter. Deshalb mussten einige Anpassungen an den Variablen, die nicht in allen Datensets (auf die gleiche Art) vorkommen, vorgenommen werden. Die (metrische) Messgrösse 'Fahrentfernung [m]' wurde nach den im Anhang Tabelle 9 gezeigten Skala in (diskrete) Klassen transformiert. Die Maschinen Typen wurden von fünf auf drei Ausprägungen reduziert (vergl. Anhang Tabelle 10). Die für die nachfolgenden Auswertungen benutzten Maschinen lauten wie folgt (siehe auch Anhang 'Angaben zu den Maschinen') :

- KranS = Kranschlepper
- SeilS = Seilschlepper
- KlemmS = Klemmbankschlepper

Die erfassten Messgrössen wurden mittels der R Methode 'lm' ('Fitting Linear Models') auf ihren Einfluss auf die abhängige Variable 'Kubikmeter o.R. pro Stunden MAS' untersucht. Dabei wurden nur Fälle benutzt deren gemessene Produktivität weniger als  $26 \text{ m}^3 \text{ o.R.}/\text{PMH15}$  betrug<sup>1</sup>.

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Analyse vorgestellt.

Tabelle 1 zeigt, das Ergebnis der Analyse für die Abhängigkeit der Produktivität [ $\text{m}^3 \text{ o.R.}/\text{PMH15}$ ] von den aufgeführten Variablen. Das korrigierte  $R^2$  für die Modellbildung beträgt 0.65.

---

<sup>1</sup>Datensätze mit höheren Leistungen wurden als nicht repräsentativ eingestuft.

Tabelle 1: Resultat der Analyse des linearen Zusammenhangs und Schätzung der Modellkoeffizienten

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	15.9488	0.2306	69.15	0.0000
ln(FahrentfKlasse)	-2.0922	0.4339	-4.82	0.0000
MaschineKranS	-3.6672	0.5028	-7.29	0.0000
MaschineSeilS	-6.4806	0.5222	-12.41	0.0000
ln(Vmit):MaschineKlemmS	8.2987	0.5373	15.45	0.0000
ln(Vmit):MaschineKranS	3.0466	0.6917	4.40	0.0000
ln(Vmit):MaschineSeilS	1.1691	0.6494	1.80	0.0729

Die mittlere Abweichung der berechneten Werte von den gemessenen beträgt 1.6 Kubikmeter o.R./Stunde (Median: 1.2 Kubikmeter o.R./Stunde), Zusätzlich wurde auch die relative mittlere Abweichung berechnet (= Residue/gemessener Wert) (Park und Stefanski (1998)). Diese mittlere relative Abweichung beträgt 14% (Median: 11%) .

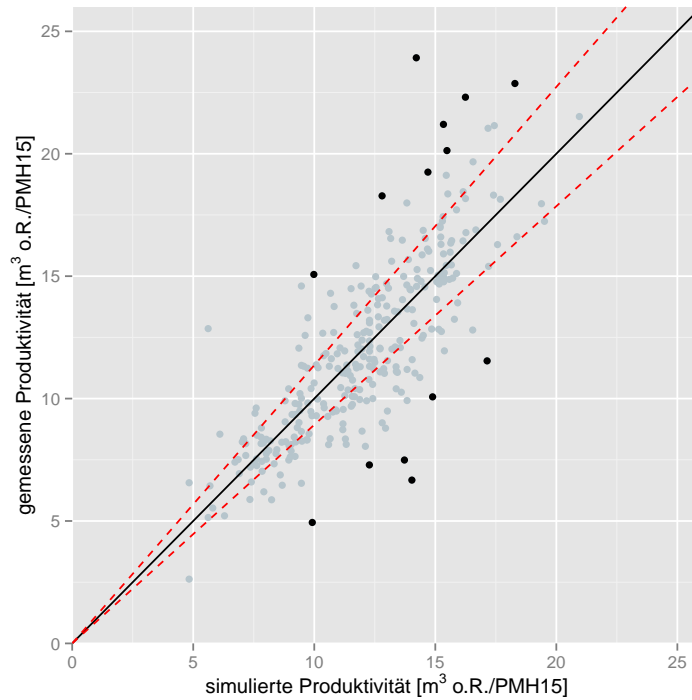


Abbildung 1: Vergleich der mittels des Modells berechneten (simulierten) Produktivitäten  $[\text{m}^3 \text{ o.R./PMH15}]$  mit den gemessenen Produktivitäten  $[\text{m}^3 \text{ o.R./PMH15}]$ . Für Punkte, die auf der grauen Linie liegen, ist der Schätzwert gleich gross wie der gemessene Wert. Liegen die Punkte links der Linie unterschätzt das Modell die Werte. Liegen sie rechts der Linie, werden die Produktivitäten vom Modell überschätzt. Die roten gestrichelten Linien grenzen den Bereich von 12% Abweichung ein. Messwerte deren Residuen (= gemessener Wert - durch das Modell geschätzter Wert) grösser als 2 Standardabweichungen über dem Mittelwert der Residuen liegen, sind schwarz markiert.

Werden die 14 Ausreisser aus Abbildung 1 aus der Analyse ausgeschlossen<sup>2</sup>, ergibt die Analyse des Modells folgende Werte<sup>3</sup> (für Details zu den Ausreissern siehe Anhang Tabelle 4 und 5).

Tabelle 2: Resultat der Analyse des linearen Zusammenhangs und Schätzung der Modellkoeffizienten nach Ausschluss der Ausreisser

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	15.8005	0.1995	79.20	0.0000
ln(FahrentfKlasse)	-1.7838	0.3687	-4.84	0.0000
MaschineKranS	-3.5725	0.4169	-8.57	0.0000
MaschineSeilS	-6.4945	0.4366	-14.88	0.0000
ln(Vmit):MaschineKlemmS	8.0771	0.4585	17.62	0.0000
ln(Vmit):MaschineKranS	3.0337	0.5652	5.37	0.0000
ln(Vmit):MaschineSeilS	1.1923	0.5306	2.25	0.0254

Tabelle 2 zeigt das Ergebnis der Analyse für die Abhängigkeit der Produktivität [ $\text{m}^3$  o.R./PMH15] von den aufgeführten Variablen. Die vom Modell erklärte Varianz ( $R^2$ ) beträgt 72%. Bis auf den Interaktionseffekt 'log(fmPROstk):MaschineSeilS' sind alle Koeffizienten bei einem Signifikanzniveau von 0.05 signifikant.

<sup>2</sup>Die 14 Ausreisser machen 5% der Grundgesamtheit aus.

<sup>3</sup>Für die Ergebnisse der ANOVA siehe Anhang Tabelle 8

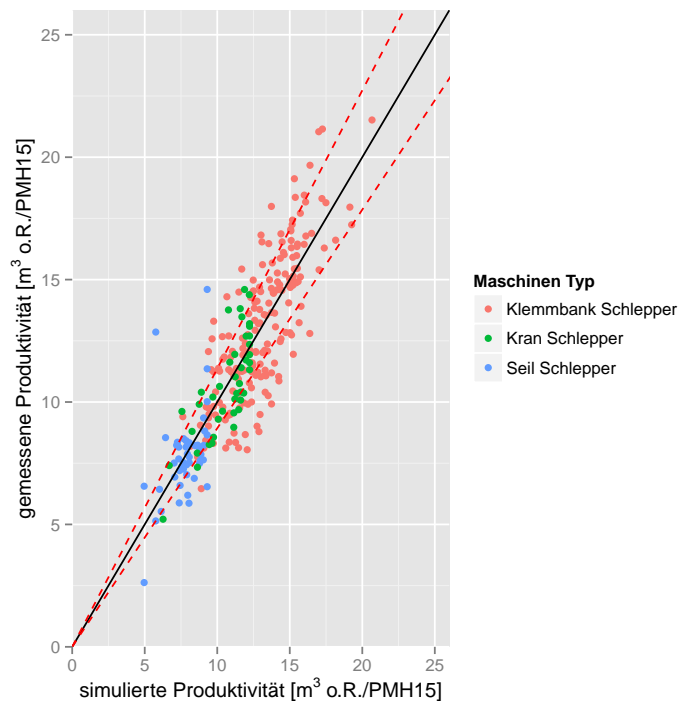


Abbildung 2: Vergleich der mittels des Modells berechneten (simulierten) Produktivitäten [ $\text{m}^3$  o.R./PMH15] mit den gemessenen Produktivitäten [ $\text{m}^3$  o.R./PMH15], nachdem Ausreisser aus dem Datensatz entfernt worden sind. Für Punkte, die auf der grauen Linie liegen, ist der Schätzwert gleich gross wie der gemessene Wert. Liegen die Punkte links der Linie unterschätzt das Modell die Werte. Liegen sie rechts der Linie, werden die Produktivitäten vom Modell überschätzt. Die roten gesichelten Linien grenzen den Bereich von 12% Abweichung ein. Die vom Modell erklärte Varianz ( $R^2$ ) beträgt 72%. Zusätzlich sind die eingesetzten Maschinen (Farbe der Messpunkte) eingezeichnet. Die mittlere Abweichung der berechneten Werte von den gemessenen beträgt 1.4 Kubikmeter o.R./Stunde (Median: 1.1 Kubikmeter o.R./Stunde), die mittlere relative Abweichung beträgt 12% (Median: 10%) .



## 3 Diskussion

### 3.1 Diskussion der Datengrundlage

Die dieser Auwertung zugrundeliegenden Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen. Deshalb mussten für einige Variablen Klassifizierungen vorgenommen werden. Die Variablen 'Fahrentfernung' und 'Bezugsdistanz' wurden im einen Datensatz nur als Klassen erfasst. Die kontinuierlichen Werte aus dem zweiten Datensatz wurden in diese Klassen transformiert (siehe auch Anhang Tabelle 9).

Der in Abbildung 3 dargestellte Unterschied der gemessenen mittleren Produktivitäten aus beiden Datenquellen kann mit den in Abbildung 4 bis 5 gezeigten Unterschieden bei der Fahrentfernung erklärt werden.

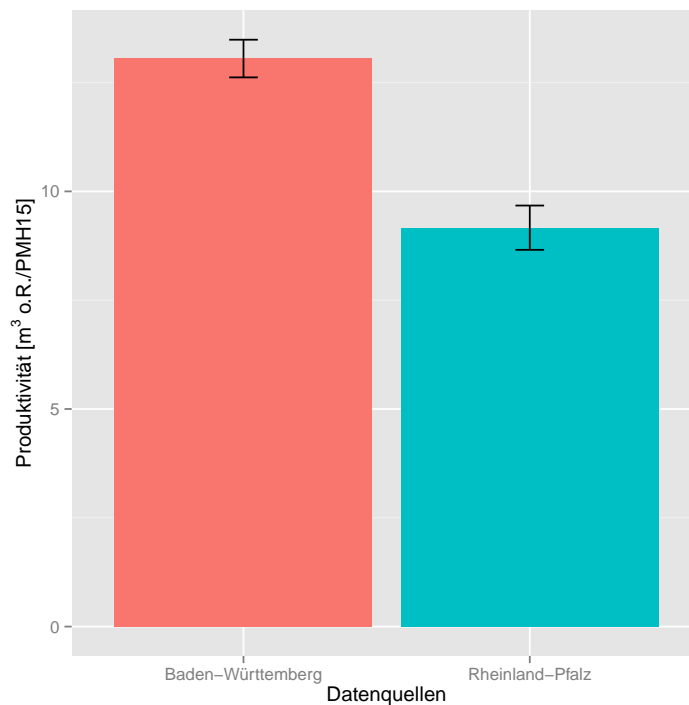


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen, mittleren Produktivitäten [ $\text{m}^3 \text{ o.R./PMH15}$ ] für die Datenquellen. Dargestellt sind die Mittelwerte der gemessenen Produktivitäten sowie die 95% Vertrauensintervalle.

Die exakte Anzahl der an den Arbeiten beteiligten Personen ist nicht bekannt. Es wird von einem Normalfall mit einem Maschinenführer und einer Maschine ausgegangen.

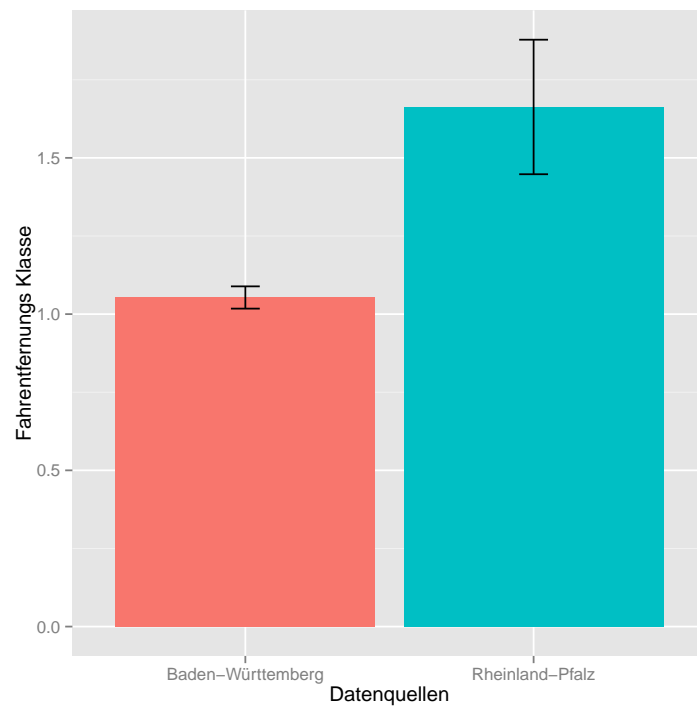


Abbildung 4: Vergleich der mittleren Fahrentfernungs-Klassen für die Datenquellen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Fahrentfernungs-Klassen sowie die 95% Vertrauensintervalle.

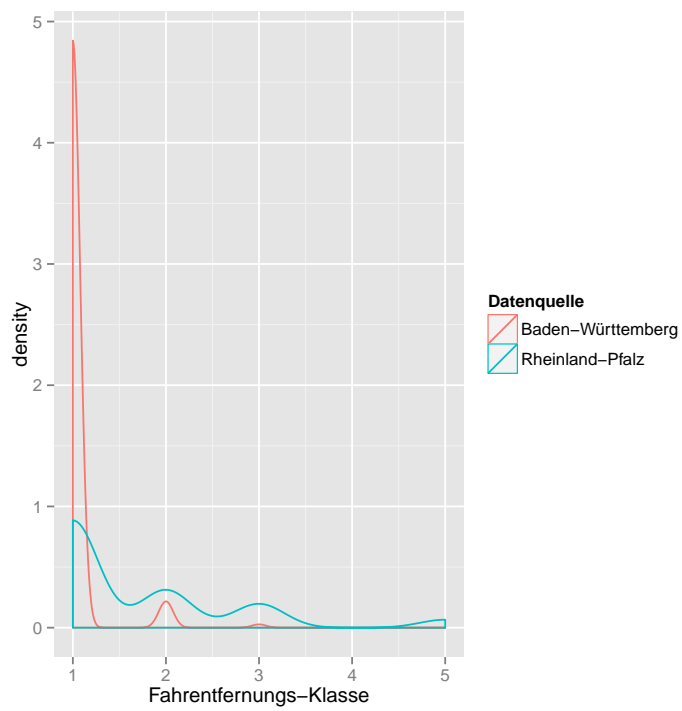


Abbildung 5: Verteilung der Fahrentfernungs-Klassen für die Datensatzquellen. Dargestellt ist die Dichtefunktion der Variable Fahrentfernungs-Klassen.

### 3.2 Diskussion des Modells

Das in Tabelle 2 gezeigte Modell für die Produktivität des Rückens mit Schlepper beinhaltet Größen für den eingesetzten Maschinentyp, die Fahrentfernungs-Klasse sowie die Wechselwirkungen zwischen der eingesetzten Maschine und der mittleren  $V_{\text{mit}}$  der zu rückenden Stücke. Je nach Maschinentyp ist die Fahrentfernungsklasse oder die  $V_{\text{mit}}$  die Grösse mit dem stärksten Einfluss auf die Produktivität [ $\text{m}^3$  o.R./PMH15]. Im folgenden Abschnitt sind die Einflüsse der Variablen grafisch dargestellt.

## 4 Modelle einsetzen

### 4.1 Formel, Koeffizienten und Systemgrenzen

Die Modelle liefern sinnvolle Resultate für Wertebereiche, in denen sie gut definiert sind (das heisst Bereiche, die von den Trainingsdaten abgedeckt werden (siehe 'Parameter Min/ Max' in der Tabelle unten, bzw. 'Beschreibung der Messgrößen' im Anhang).

Der Einsatz der Modelle kann mittels Excel oder anderen Programmen geschehen. Dabei werden für die kontinuierlichen Variablen (metrisches Skalenniveau, Bsp. Entfernungs-Klasse) die Koeffizienten mit den Werten der Variable verrechnet, für die kategorialen Variablen (nominales Skalenniveau, Bsp. Maschine) die zu der Kategorie gehörenden Werte eingesetzt. Die Formel für 'Produktivitätsmodell Rücken mit Schlepper' lautet:

$$\begin{aligned} \text{Produktivität } \left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right] = & a \\ & + b * \ln(\text{Fahrentfernungs-Klasse [Klasse]}) \\ & + c_{\text{Maschine}} \\ & + d_{\text{Maschine}} * \ln(V_{\text{mit}}) [m^3 o.R.] \end{aligned} \quad (1)$$

Formel 1 zeigt das Modell aus Tabelle 2 in mathematischer Form. Das Modell umfasst alle Teilprozesse des Moduls Rücken mit Schlepper. Die Koeffizienten dazu sind:

Tabelle 3: Koeffizienten Produktivitätsmodell 'Rücken mit Schlepper'. Die Min und Max Werte geben die unteren und oberen Grenzen für die einzusetzenden Variablen an, für die das System definiert ist. Insbesondere die obere Grenze für die Variable 'V<sub>mit</sub>' wird durch die vorhandenen Daten eingeschränkt (vergleiche Anhang Abbildung 19).

Koeff.	Kategorie	Koeffizienten		Parameter	
		Wert	Einheiten	Min.	Max.
a	Konstante	15.8	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right]$		
b	Fahrentfernungs-Klasse	-1.784	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right]$	1	5
c <sub>Maschine</sub>	falls Maschine Seilschlepper	-6.495	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right]$		
c <sub>Maschine</sub>	falls Maschine Kranschlepper	-3.573	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right]$		
c <sub>Maschine</sub>	falls Maschine Klemmbankschlepper	0	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h} \right]$		
d <sub>Maschine</sub>	falls Seilschlepper: V <sub>mit</sub>	1.192	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h * \ln(m^3 o.R.)} \right]$	0.14	1
d <sub>Maschine</sub>	falls Kranschlepper: V <sub>mit</sub>	3.034	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h * \ln(m^3 o.R.)} \right]$	0.14	1
d <sub>Maschine</sub>	falls Klemmbankschlepper : V <sub>mit</sub>	8.077	$\left[ \frac{m^3 o.R.}{h * \ln(m^3 o.R.)} \right]$	0.36	1.8

## 4.2 Sensitivitätsanalyse

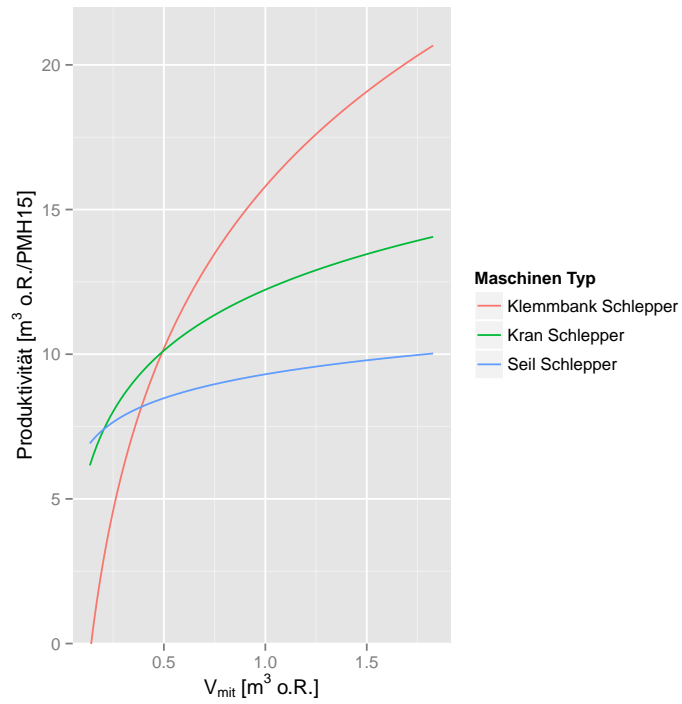


Abbildung 6: Sensitivitätsanalyse für das Produktivitätsmodell 'Rücken mit Schlepper' für die Variable 'mittlerer Stückinhalt des gerückten Holzes'  $V_{mit}$  [ $m^3$  o.R.].

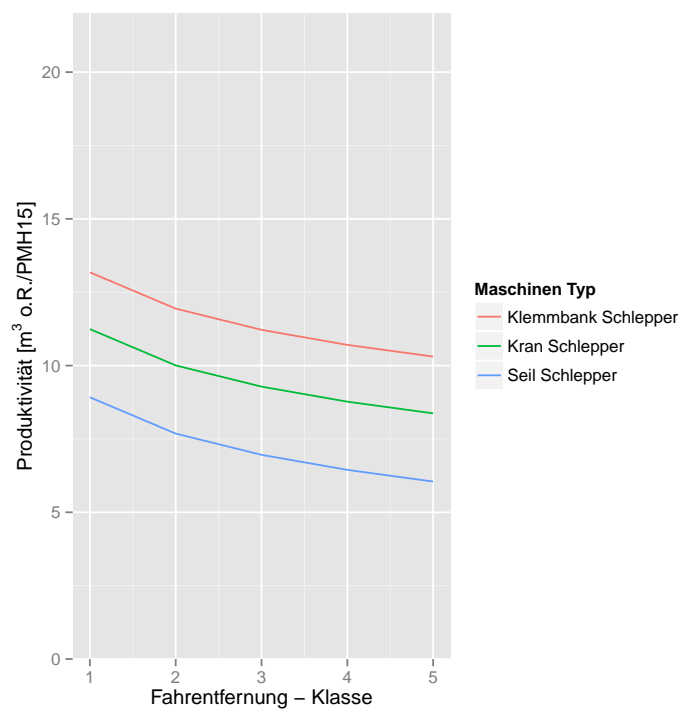


Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse für das Produktivitätsmodell 'Rücken mit Schlepper' für die Variable 'Fahrentfernungs-Klasse'.

Das untersuchte Modell reagiert am stärksten auf die Variable 'mittlerer Stückinhalt des gerückten Holzes'  $V_{\text{mit}}$  [ $\text{m}^3$  o.R.]. Die Variablen 'Fahrentfernungs-Klasse' und 'Beizugs-Klasse' haben einen schwächeren Einfluss. Auffallend ist, dass die Produktivität vor allem für die Maschine 'Klemmbankschlepper' (und in geringerem Masse die Maschine 'Kranschlepper') extrem stark auf Änderung der Variable  $V_{\text{mit}}$  reagiert. Im Anhang Abbildung 18 und 19 sind die zugrundeliegenden Daten für ausgewählte Fälle (= Fälle bei denen alle vom Modell benutzten Variablen bis auf die Grösse  $V_{\text{mit}}$  konstant sind) aufgezeichnet. Es gibt nur wenige Fälle mit einem Wert von grösser als 2 für  $V_{\text{mit}}$ , d.h. die Kurve ist für diesen Bereich nur schlecht definiert, aber die Messpunkte für 'Klemmbankschlepper' zwischen 1 und 2  $V_{\text{mit}}$  geben einen klaren Trend mit negativen Zusammenhang vor. Für die Maschinen des Typs 'Klemmbankschlepper' stehen 188 Fälle zur Verfügung, für die restlichen beiden Maschinen Typen nur 89 Fälle.



## Literatur

- Cahmbers, J. und Hastie, T. (1992). *Linear models. Chapter 4 of Statistical Models in S*. Wadsworth & Brooks/Cole. 624 Seiten.
- Lemm, R., Erni, V., Frutig, F., Oswald, K., Riechsteiner, D., and Thees, O. (2003). *Produktivitätsmodelle für Verjüngung, Jungwaldpflege und Holzernte mit Hilfe komponentenbasierter Softwaretechnologie. Zusammenstellung der Grundlagen für die Programmierung*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Internes Dokument.
- Park, H. und Stefanski, L. (1998). Relative-error prediction. *Statistics & Probability Letters*, 40(3):227 – 236.
- Schweizer, S., (Redaktion) (2011). *Schweizerischer Forstkalender 2012*. Verlag Huber Frauenfeld.
- Thees, O. und Lemm, R. (Hrsg.) (2009). *Management zukunftsfähige Waldnutzung: Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, vdf Hochschulverlag. 816 Seiten

## 5 Anhang

### 5.1 Testen auf Verletzungen der Annahmen für linearen Zusammenhang

Die Methode der linearen Regression sowie der hier angewendeten R Funktion *lm* (Cahmbers und Hastie (1992)) geht von den nachfolgend aufgeführten Annahmen über den 'wahren' Zusammenhang zwischen der abhängigen- und den unabhängigen Variablen aus:

1. Linearität: Der Zusammenhang abhängige- vs. unabhängige Variable muss linear sein, bzw. das gewählte Modell muss den 'wahren' Zusammenhang genügend gut abbilden. In einem Scatterplot der geschätzten Werte vs. gemessenen Werte der abhängigen Variable sollten die Punkte entlang der Diagonalen durch den Nullpunkt mit der Steigung 1 zu liegen kommen.
2. Unabhängigkeit der Residuen: Die Residuen dürfen nicht mit einer der unabhängigen Variablen korrelieren. In einem Scatterplot der Residuen vs. unabhängige Variable sollte kein Trend zu erkennen sein (d.h. eine Regressionsgerade sollte mit der Steigung 0 durch den Nullpunkt gehen).
3. keine Autokorrelation: Die Residuen dürfen keine Autokorrelation aufweisen (vor allem bei Zeitreihen relevant).
4. Normalverteilung der Residuen: Die nicht erklärte Varianz (Residuen) sollte um den Mittelwert 0 normalverteilt sein. (d.h. ein Dichteplot der Residuen sollte deckungsgleich mit dem einer Normalverteilung sein).

Diese Anforderungen werden in den nachfolgenden Tests und Grafiken diskutiert. Auf die Anforderung 'keine Autokorrelation' wird nicht weiter eingegangen.

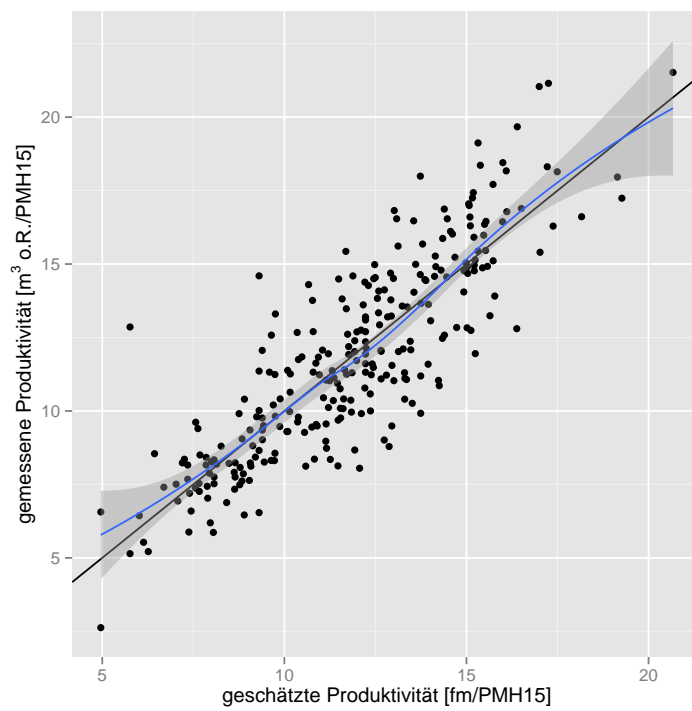


Abbildung 8: Test Modellannahmen 1: Linearität. Die Punkte streuen um die Diagonale, es gibt keine Anzeichen für einen systematischen Fehler.

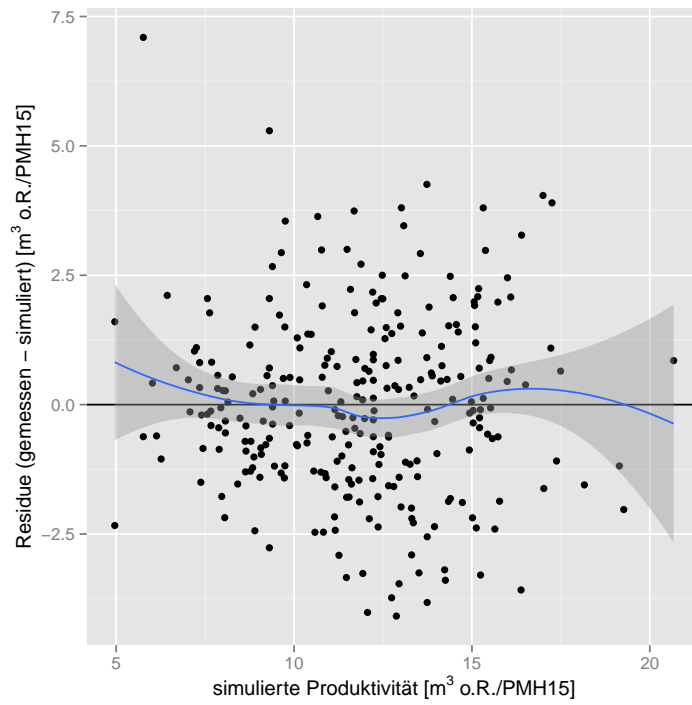


Abbildung 9: Modellannahme 1: Normalverteilung der Residuen. Tukey-Anscombe Plot für das Modell aus Tabelle 1. Der p-Wert der ANOVA der Mittelwertunterschiede der Residuen über die vier Quartile beträgt 0.7469.

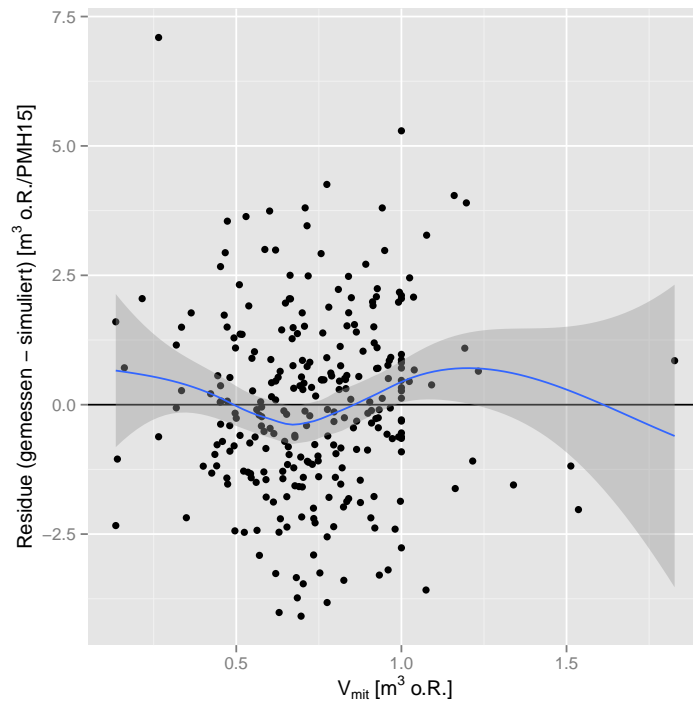


Abbildung 10: Test Modellannahmen 2: Korrelation der Residuen mit unabhängiger Variable I ( $V_{\text{mit}}$  [m³ o.R.]). Die blaue Linie steht für das gleitende Mittel. Der p-Wert der ANOVA der Mittelwertunterschiede der Residuen über die vier Quartile beträgt 0.4245.

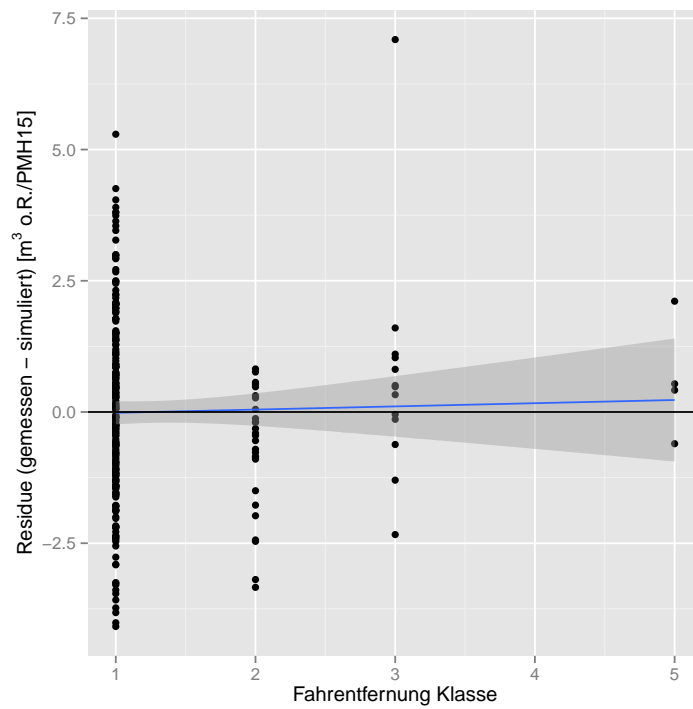


Abbildung 11: Test Modellannahmen 2: Korrelation der Residuen mit unabhängiger Variable II Fahrentfernung [Klasse 0 - 4]. Die blaue Linie steht für das gleitende Mittel. Der p-Wert der ANOVA der Mittelwertunterschiede der Residuen über die vier Quartile beträgt 0.04907

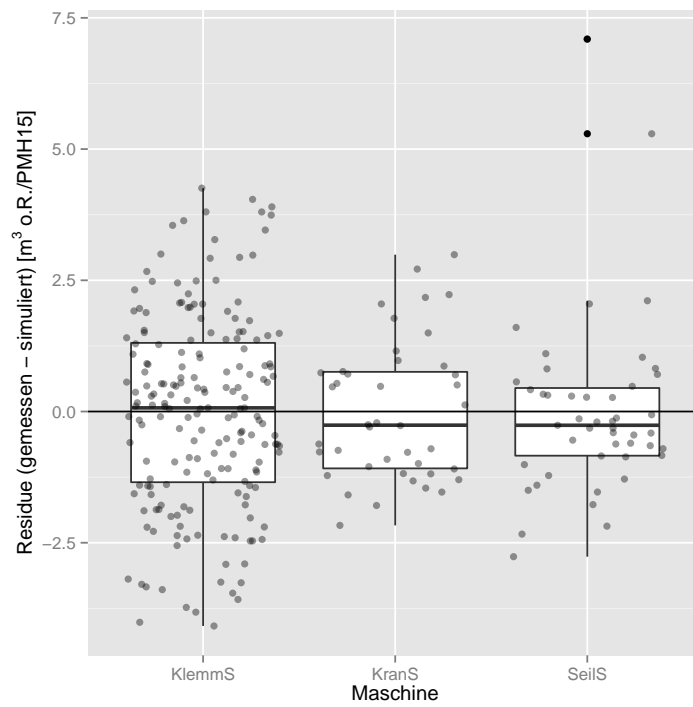


Abbildung 12: Test Modellannahmen 2: Korrelation der Residuen mit unabhängiger Variable III (Maschine). Um die Lesbarkeit zu erhöhen sind die eingezeichneten Messwerte (Punkte) auf der x-Achse versetzt gezeichnet.

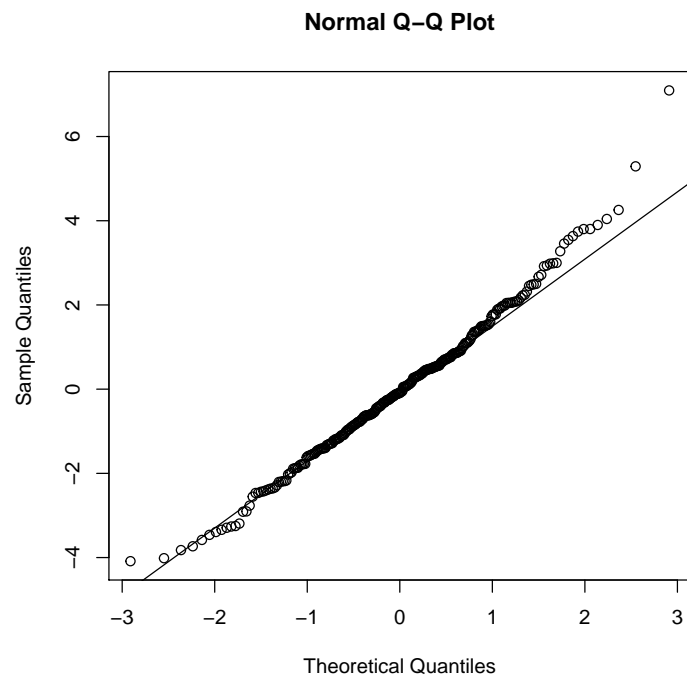


Abbildung 13: Test Modellannahmen 4: Normalverteilung der Residuen: Die Residuen folgen annähernd einer t-Verteilung, allerdings gibt es kleinere Abweichungen für ganz kleine und ganz grosse Residuen (liegen die Punkte auf der Diagonale, folgt die Verteilung der Residuen exakt einer t-Verteilung).



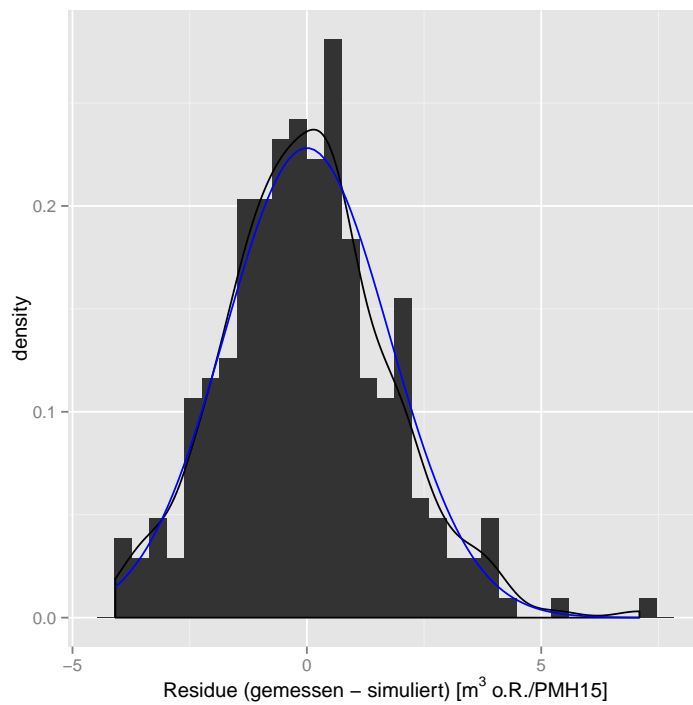


Abbildung 14: Test Modellannahmen 4: Normalverteilung der Residuen: Dichtefunktion der Residuen. Als Referenz ist die Dichtefunktion einer normalverteilten Variable blau eingezeichnet.

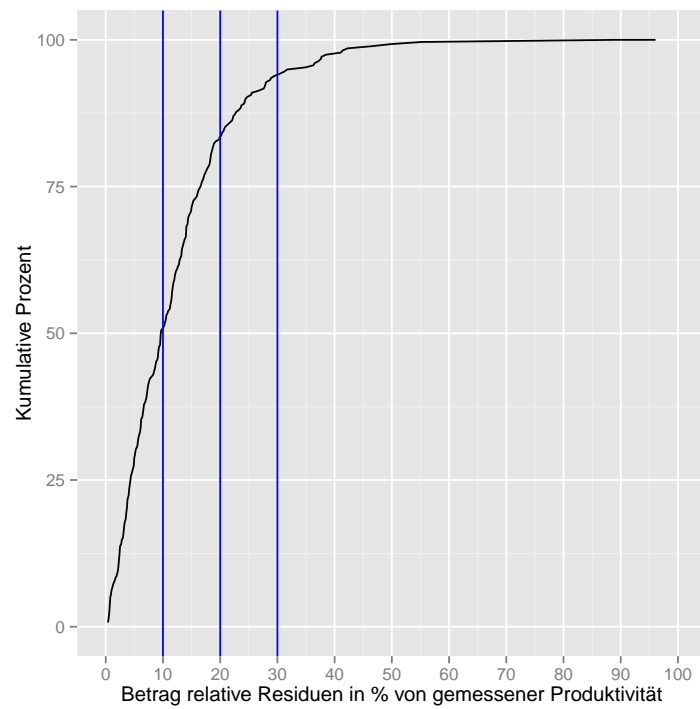


Abbildung 15: Kumulative Verteilung der absoluten relativen Residuen. Die vertikalen blauen Linien grenzen die Bereiche von bis 10% , 20% bzw. 30% Abweichung ein.

## 5.2 Beschreibung der 'Ausreisser'

Tabelle 4: Beschreibung der Ausreisser

ID	Maschine	m3/PMH15	Residue [m3/PMH15]	rel. Residue	Herkunft	Revier
26 - 2007	WelteW130K	11.54	5.60	49 %	bw	1
39 - 2012	Welte	22.31	-6.06	-27 %	bw	3
39 - 2009	WelteW130K	20.13	-4.65	-23 %	bw	4
97 - 2010	WelteW130K	6.67	7.36	110 %	bw	4
28 - 2009	WelteW130K	15.07	-5.09	-34 %	bw	4
59 - 2008	WelteW130K	10.07	4.82	48 %	bw	9
22 - 2009	WelteW130K	18.28	-5.48	-30 %	bw	9
125 - 2009	WelteW130K	22.87	-4.58	-20 %	bw	9
71 - 2009	WelteW130K	23.92	-9.71	-41 %	bw	9
80 - 2009	WelteW130K	7.29	4.99	68 %	bw	9
30 - 2012	Welte	21.20	-5.86	-28 %	bw	9
41 - 2011	WelteW130K	19.25	-4.55	-24 %	bw	9
28 - 2012	Welte	4.94	4.98	101 %	bw	9
56 - 2012	Welte	7.49	6.24	83 %	bw	9

Tabelle 5: Relative Anteile der Ausreisser in den Revieren

Revier	N Original	N Ausreisser	% Ausreisser
1	14	1	7
2	1		
3	8	1	12
4	11	3	27
5	0		
6	5		
7	0		
8	24		
9	129	9	7
10	10		
11	9		
12	9		
13	15		
14	9		
15	2		
16	24		
17	2		
18	19		

Die 14 Ausreisser verteilen sich auf einige wenige Reviere. Zu erwarten wären jeweils ca. 4% Ausreisser (=Anteil der Ausreisser über alle Datensätze), bei drei Revieren finden sich aber bis zu 17% Ausreisser. Das heisst, dass die Ausreisser

systematisch in einigen wenigen Revieren vorkommen.

### 5.3 Kreuzvalidierung

Tabelle 6: Resultat der Analyse des linearen Zusammenhangs und Schätzung der Modellkoeffizienten für den Trainingsdatensatz

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	15.7574	0.2496	63.12	0.0000
ln(FahrentfKlasse)	-1.5530	0.4386	-3.54	0.0005
MaschineKranS	-3.4390	0.5227	-6.58	0.0000
MaschineSeilS	-6.8355	0.5349	-12.78	0.0000
ln(Vmit):MaschineKlemmS	8.1814	0.5711	14.33	0.0000
ln(Vmit):MaschineKranS	3.1588	0.6245	5.06	0.0000
ln(Vmit):MaschineSeilS	0.8359	0.6065	1.38	0.1698

Tabelle 6 gibt die Koeffizienten-Schätzungen für den Trainingsdatensatz wieder. Das korrigierte  $R^2$  für die Modellbildung beträgt 0.7162.

Tabelle 7: Resultat der Analyse des linearen Zusammenhangs und Schätzung der Modellkoeffizienten für den Trainingsdatensatz - Unterschiede der Koeffizientenschätzungen

	p-Wert	alle Daten	Trainingsset	% Diff
(Intercept)	0.00	15.80	15.76	0.30
ln(FahrentfKlasse)	0.00	-1.78	-1.55	12.90
MaschineKranS	0.00	-3.57	-3.44	3.70
MaschineSeilS	0.00	-6.49	-6.84	-5.20
ln(Vmit):MaschineKlemmS	0.00	8.08	8.18	-1.30
ln(Vmit):MaschineKranS	0.00	3.03	3.16	-4.10
ln(Vmit):MaschineSeilS	0.03	1.19	0.84	29.90

Tabelle 7 zeigt die Unterschiede für die Koeffizientenschätzung aus allen Daten (N= 277) vs. Koeffizientenschätzung aus Trainingsdaten (N= 194). Der p-Wert bezieht sich auf die Schätzung aus allen Daten.

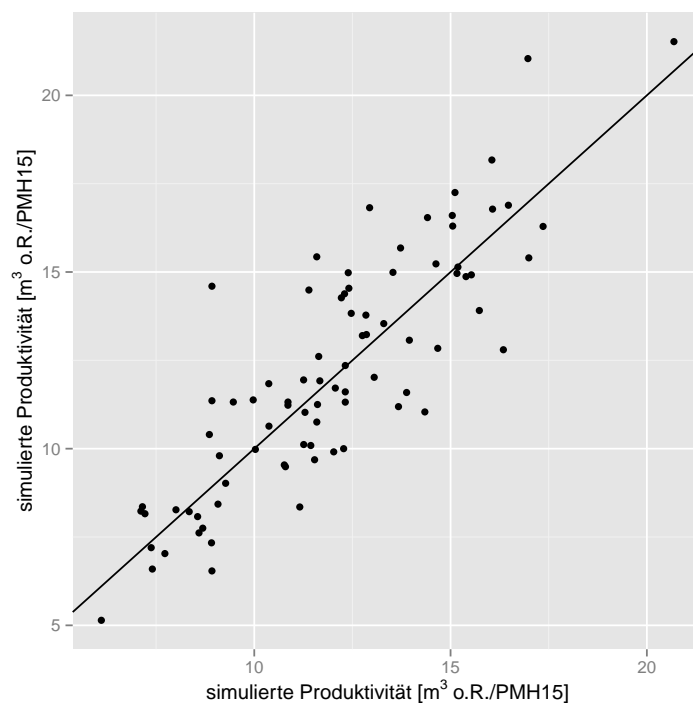


Abbildung 16: Die Korrelation zwischen der simulierten Produktivität  $[\text{m}^3 \text{ o.R./PMH15}]$  und der gemessenen Produktivität  $[\text{m}^3 \text{ o.R./PMH15}]$  beträgt 0.86.

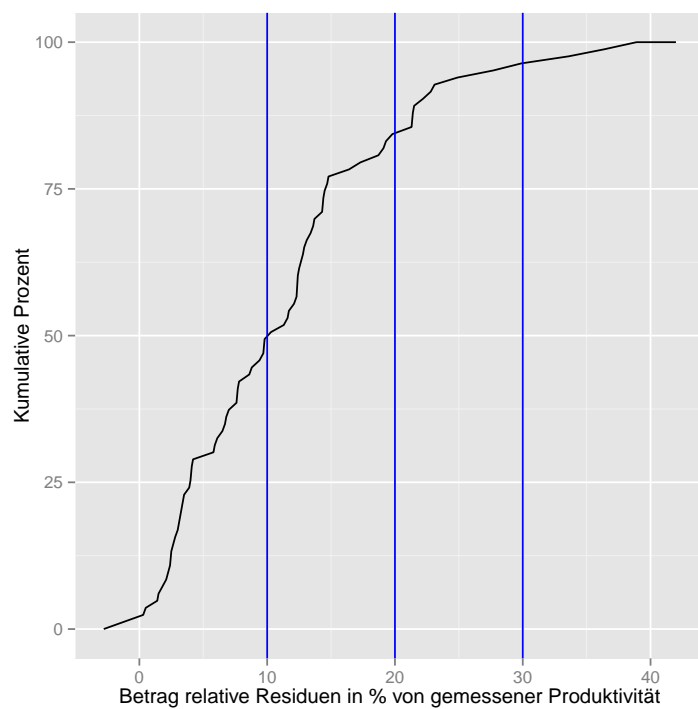


Abbildung 17: Kumulative Verteilung der Beträge der relativen Residuen für die Kreuzvalidierung. Die vertikalen blauen Linien grenzen die Bereiche von bis 10% und 20% bzw. 30% Abweichung ein. Der mittlere relative Fehler beträgt 11% (Median: 10%).

## 5.4 ANOVA

$\text{fmPROMAS} \sim \log(\text{FahrentfKlasse}) + \log(\text{fmPROstk}): \text{Maschine} + \text{Maschine}$

Modell Formel für Rücken mit Schlepper

Tabelle 8: Ergebnis der Anova für das Modell

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
log(FahrentfKlasse)	1	699.53	699.53	223.84	0.0000
Maschine	2	499.22	249.61	79.87	0.0000
log(fmPROstk):Maschine	3	1075.87	358.62	114.75	0.0000
Residuals	270	843.79	3.13		

## 5.5 Transformationstabellen

Variable	Original	Klasse
Fahrentfernung [m]	0 - 300	1
	301 - 500	2
	501 - 700	3
	701 - 900	4
	> 900	5

Tabelle 9: Tabelle zur Transformation der kontinuierlichen Werte in Klassen

Original	Modell
HSM I	Seilschlepper
HSM II	Seilschlepper
HSM III	Kranschlepper
Welte	Klemmbankschlepper
Welte W130K	Klemmbankschlepper

Tabelle 10: Tabelle zur Transformation der Maschinen Typen



## 5.6 Beschreibung der im Modell benutzten Messgrößen

Für die nachfolgenden Tabellen gelten folgende Abkürzungen: n = Anzahl gültiger Datensätze für diese Variable, mean = Mittelwert, sd = Standardabweichung, median = Median, min = kleinster Wert, max= grösster Wert, skew = Schiefe (wie stark neigt die Verteilung nach links (+) oder rechts (-)), se = Standardfehler des Mittelwerts. (Die Werte beziehen sich auf alle Fälle, inklusive den in Abbildung 1 identifizierten Ausreissern)

Tabelle 11: Beschreibung der Produktivitäten [ $m^3$ /PMH15] der Trainings- und Validierungsdaten

Daten	n	mean	sd	median	min	max	skew	se
Alle Daten	277	11.80	3.36	11.48	2.62	21.52	0.29	0.20
Trainingsdaten	194	11.65	3.36	11.34	2.62	21.15	0.28	0.24
Validierungsdaten	83	12.16	3.35	11.72	5.14	21.52	0.31	0.37

Tabelle 12: Beschreibung der Variable 'Bezugsdistanz Klasse' der Trainings- und Validierungsdaten

Daten	n	mean	sd	median	min	max	skew	se
Alle Daten	277	1.18	0.52	1.00	1.00	5.00	3.69	0.03
Trainingsdaten	194	1.18	0.46	1.00	1.00	4.00	2.94	0.03
Validierungsdaten	83	1.20	0.64	1.00	1.00	5.00	3.95	0.07

Tabelle 13: Beschreibung der Variable 'Fahrentfernung Klasse' der Trainings- und Validierungsdaten

Daten	n	mean	sd	median	min	max	skew	se
Alle Daten	277	1.25	0.68	1.00	1.00	5.00	3.39	0.04
Trainingsdaten	194	1.27	0.73	1.00	1.00	5.00	3.41	0.05
Validierungsdaten	83	1.20	0.54	1.00	1.00	3.00	2.50	0.06

Tabelle 14: Beschreibung der Variable 'RVmit [ $m^3$ ]' [ $m^3$ /Stück] der Trainings- und Validierungsdaten

Daten	n	mean	sd	median	min	max	skew	se
Alle Daten	277	0.74	0.23	0.72	0.14	1.83	0.44	0.01
Trainingsdaten	194	0.73	0.23	0.73	0.14	1.54	0.17	0.02
Validierungsdaten	83	0.77	0.24	0.72	0.26	1.83	0.90	0.03

Tabelle 15: Beschreibung der Variable 'Prozent Komplettruecken' der Klemmbank der Trainings- und Validierungsdaten

Daten	n	mean	sd	median	min	max	skew	se
Alle Daten	188	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00		0.00
Trainingsdaten	132	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00		0.00
Validierungsdaten	56	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00		0.00

Tabelle 16: Beschreibung (Häufigkeiten) der Variable 'Maschine Original' (bevor Transformation)

	HSMI	HSMII	HSMIII	Welte	WelteW130K
Alle Daten	20	27	42	26	162
Trainingsdaten	17	16	29	20	112
Validierungsdaten	3	11	13	6	50

Tabelle 17: Beschreibung (Häufigkeiten) der Variable 'Maschine'

	KlemmS	KranS	SeilS
Alle Daten	188	42	47
Trainingsdaten	132	29	33
Validierungsdaten	56	13	14

Tabelle 18: Beschreibung der Maschinen im Datenset

Maschine	N_total	m3_total	N_Maschinen	N_rlp	m3_rlp	N_bw	m3_bw
KlemmS	188	71309.92	2	0		188	71309.92
KranS	42	10970.20	1	42	10970.20	0	
SeilS	47	8285.84	2	47	8285.84	0	

Tabelle 19: Beschreibung (Häufigkeiten) der Variable 'Maschine' für die Reviere

	KlemmS	KranS	SeilS
Altsteußlingen	13	0	0
Bernstadt	1	0	0
Dietenheim	7	0	0
Ingstetten	8	0	0
Kronau Östring	0	0	0
Lauterach	5	0	0
Lonsee	0	0	0
Mochental	24	0	0
Ringingen	120	0	0
Suppingen	10	0	0
Beuren	0	6	3
Gusenburger-Grimburg	0	6	3
Hermeskeil	0	11	4
Königsfeld-Thiergarten	0	2	7
Reinsfeld-Rösterkopf	0	2	0
Sternfeld	0	13	11
züsch	0	0	2
Züsch	0	2	17

Tabelle 20: Beschreibung (Häufigkeiten) der Variable 'Datenherkunft'

	bw	rlp
Alle Daten	188	89
Trainingsdaten	132	62
Validierungsdaten	56	27

## 5.7 Anhang zur Diskussion und Sensitivitätsanalyse

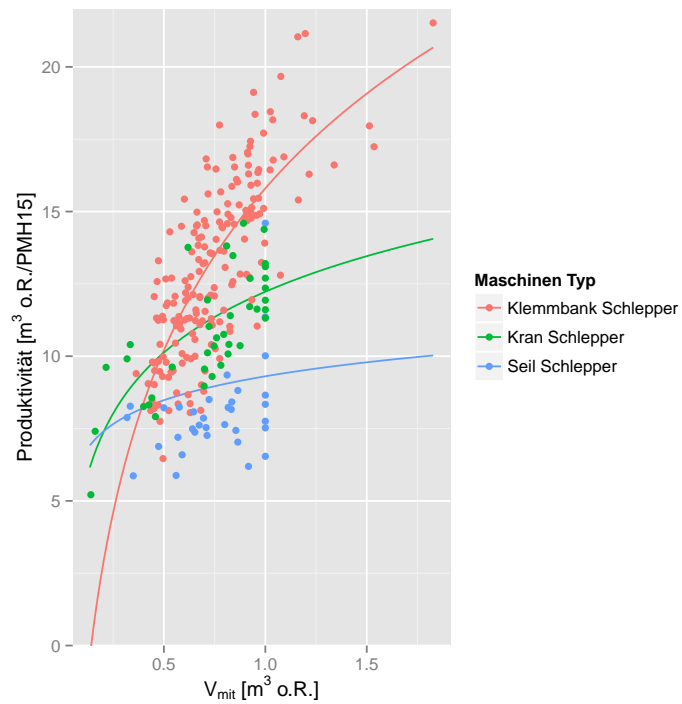


Abbildung 18: Erläuterung zur in der Sensitivitätsanalyse gefundenen starken Abhängigkeit der Produktivität von der Variable ' $V_{mit}$ ' [ $m^3 \text{ o.R.}$ ]. Die Line steht für die Werte aus dem Modell, die Punkte für die tatsächlichen Messungen (Fahrentfernungs Klasse = 1 und 2).

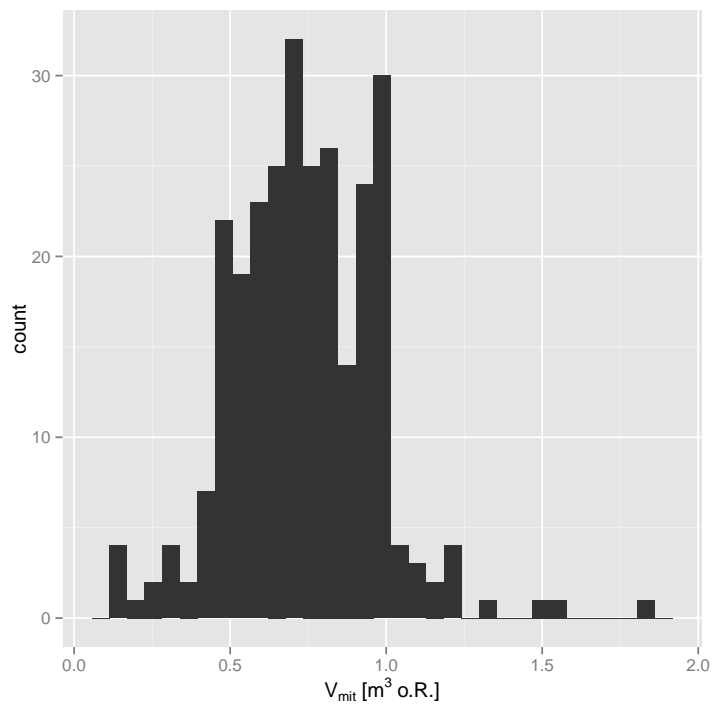


Abbildung 19: Verteilung der Variable  $V_{mit}$ . Es gibt fast nur Fälle für  $V_{mit}$  zwischen  $0.2 \text{ m}^3 \text{ o.R.}$  bis  $2 \text{ m}^3 \text{ o.R.}$ . Das Modell ist dementsprechend schlecht definiert für Werte ausserhalb dieses Bereichs.

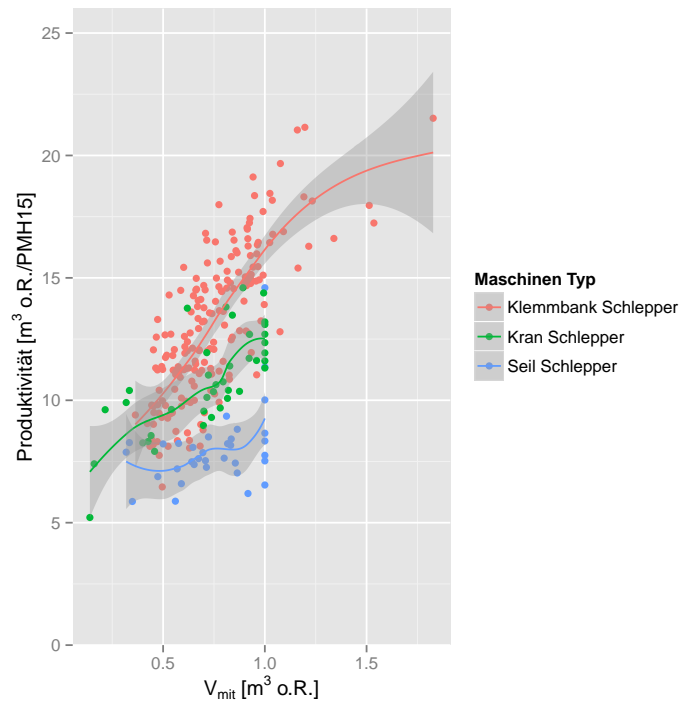


Abbildung 20: Abhängigkeit der Produktivität von der Grösse der Stücke (Variable:  $V_{mit} [m^3 \text{ o.R.}]$ ). Es sind nur Datensätze mit Fahrtfernung Klasse 1 und 2 aufgezeichnet. Die Punkte markieren die tatsächlichen Messungen, die Linien das gleitende Mittel für jeden Maschinen Typ.

```

function(Vmit, FahrDist, ZuzugDist, Sortiment, M0=0.00, M1=0.1, M2=0, M5=-0.05, M6=0.15, M7=0, M8=-0.1, M10=0){
  # M0: RÄckeart=sonst, M1: Schleppertyp=Forstspezial, M2: NA=0, M3: Fahrdist.,
  # M4: Beizugdist., M5: Zuzugart=sonst, M6: Anz_Pers=0.15, M7: RÄcken im Saft=nein,
  # M8:Schlagordnung= nicht eingeh., M9=SrtimentAnzahl, M10: Bes.VerhÄltnisse= mittel

  A1 = -1.06866
  A2 = 19.04929
  V0 = 0.704
  p = 0.85735

  # M3 <- ifelse(FahrDist < 201, 0, ifelse(FahrDist < 401, -0.1, ifelse(FahrDist >= 400, -0.2,)))
  M3 <- ifelse(FahrDist < 201, 0, ifelse(FahrDist < 401, -0.1, -0.2))
  M4 <- ifelse(ZuzugDist < 21, 0, ifelse(ZuzugDist < 41, -0.1, -0.15))
  M9 <- ifelse(Sortiment < 4, 0, ifelse(Sortiment < 7, -0.05, -0.1))

  GP <- A2 + (A1-A2)/(1 + (Vmit / V0) ^ p)

  sumM <- M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10
  productivity <- (1 + sumM )*GP
  return(productivity)
}

```

Abbildung 21: Modell zur Berechnung der Produktivitäten nach bestehendem HeProMo.

## 5.8 Angaben zu den Maschinen

Welte W130K<sup>4</sup>

Technische Daten

Masse

- Länge 7.130 mm
- Breite 2.500 mm mit 600er Bereifung
- Höhe 3.440 mm
- Bodenfreiheit 580 mm
- Wenderadius ca. 3.400 mm

Motor

- Deutz 4-Zylinder wassergekühlter TCD 2013
- Hubraum 4.764 ccm
- W 130K – 113 kW (154 DIN PS) bei 2.300 U/min.
- W 130K – 129 kW (176 DIN PS) bei 2.300 U/min.
- Elektronische Motor-Regelung EMR
- Kraftstofftank ca. 160 l

Arbeitshydraulik

- Verstellregelpumpe mit elektronischer Regelung 200 l/min. bei 2.000 U / min.
- Systemdruck bis 380 bar

Kraftübertragung

- Hydrostatischer Fahrtrieb mit elektronischer Leistungsregelung
- 2-Gang-Getriebe mit Achsschaltung hinten

- Planetachsen und Bogieachse mit im Ölbad laufenden Lamellenbremsen

- 100% getrennt zuschaltbare Differentialsperren

Geschwindigkeit

- 1. Gang max. 0 – 14 km / h
- 2. Gang max. 0 – 38 km / h

Elektrische Anlage

- Systemspannung 24 V
- Batterieleistung 2 x 92 Ah
- Lichtmaschine 80 A

Lenkung

- Rahmenknicklenkung mit doppelwirkenden Zylindern
- für Strassenfahrt Orbitrolgeber mit Notlenkeinrichtung
- Lenkeinschlag +/- 46 Grad

Kabine

- geräumige Kippkabine mit Lexan-Margard Scheiben im hinteren Gefahrenbereich
- Warmwasserheizung mit Gebläse und Scheibenentfrostung
- Scheibenwischer vorne und hinten
- bei Kranaufbau 2 x 4-Achs-Joystick für alle Bedienfunktionen
- Drehsitz mit Pedalen – luftgefedert

<sup>4</sup>Übernommen aus [http://www.welte.de/serien\\_w130k.html](http://www.welte.de/serien_w130k.html)



<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle wichtigen Fahrzeuginformationen durch Anzeigeelemente und Kontrollleuchten</li> <li>• 8 Arbeitsscheinwerfer</li> <li>• Kabine ROPS, FOPS und OECD geprüft</li> </ul>	Kran
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• z.B. M 70 F 86</li> <li>• z.B. Epsilon S100 oder Loglift F71/F91</li> </ul>
Bereifung (z. B. W 130)	Rungenbank
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vorne – 600/60 – 30,5</li> <li>• hinten – 600/50 – 22,5</li> <li>• oder grössere Bereifung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsteckungen für Kurzholz</li> <li>• Schutzgitter für Kurzholz</li> <li>• Einsteckbare Rahmenverlängerung mit Rungentaschen</li> </ul>
Rahmen	Klemmbank im Schnellwechselsystem
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorderrahmen in stabilem Kastenprofil mit integriertem Ölbehälter</li> <li>• Hinterrahmen in stabiler Kastenbauweise</li> <li>• stabiles Mittelgelenk mit Kegelrollenlager</li> <li>• Rahmenverwindung gelagert durch starken Rollendrehkranz +/- 22°</li> <li>• Verwindungssperre durch doppelwirkende Hydraulikzylinder</li> <li>• Bodenwannen klappbar für Wartungsarbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klemmbank mit Seilspannung</li> <li>• Klemmbank mit Loglift Greifer TX86b o. Andere</li> </ul>
	Forstausrüstung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welte Doppeltrommelwinde HZM 14 mit 14 Tonnen Zugkraft</li> <li>• Höhenverstellbarer Rollenträger</li> <li>• Heckschild – höhenverstellbar unabhängig vom Rollenträger</li> <li>• Neigungverstellung vom Heckschild</li> <li>• Frontpolter-Einrichtung</li> </ul>

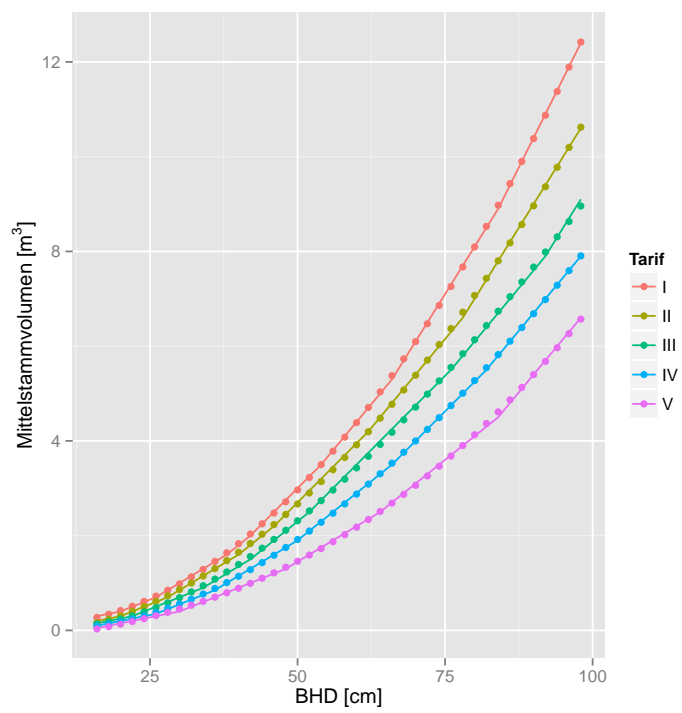


Abbildung 22: Verwendeter Tarif (Luzerner Tarif I bis V) zur Berechnung des Volumens pro Baum aus BHD (Schweizer (2011)).

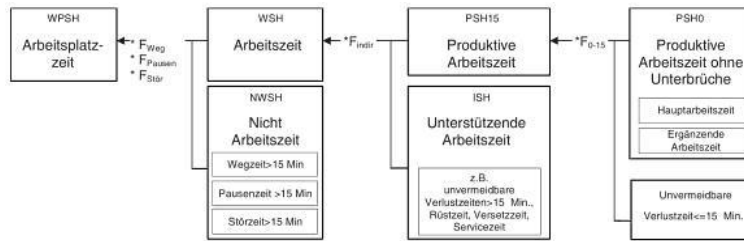


Abbildung 23: Zeitsystem (übernommen aus Thees und Lemm (2009)).

### 5.9 Erweiterung des Modells für kleine $V_{\text{mit}}$ [ $\text{m}^3$ o.R.]

Da das Modell im Bereich  $V_{\text{mit}} < 0.5 \text{ m}^3$  o.R. nicht durch gemessene Werte gestützt werden kann (vergleiche Verteilung der  $V_{\text{mit}}$  in den Daten, Abbildung 24), wurden für diese Bereiche Sonderlösungen implementiert. Für Rückearbeiten mit  $V_{\text{mit}} > 0.05 \text{ m}^3$  o.R. (ausser bei Maschine 'Klemmbankschlepper') ist die Produktivität zwischen  $0 \text{ m}^3$  o.R./PMH15 bei  $V_{\text{mit}} 0 \text{ m}^3$  o.R. und der Produktivität bei  $0.14 \text{ m}^3$  o.R. linearisiert. Für die Maschine 'Klemmbankschlepper' werden für  $V_{\text{mit}} < 0.36 \text{ m}^3$  o.R. keine Produktivitäten berechnet (dasselbe gilt für alle Schlepper Arten bei  $V_{\text{mit}} < 0.05 \text{ m}^3$  o.R., der Einsatz dieser Maschinen für so kleine  $V_{\text{mit}}$  ist nicht wirtschaftlich).

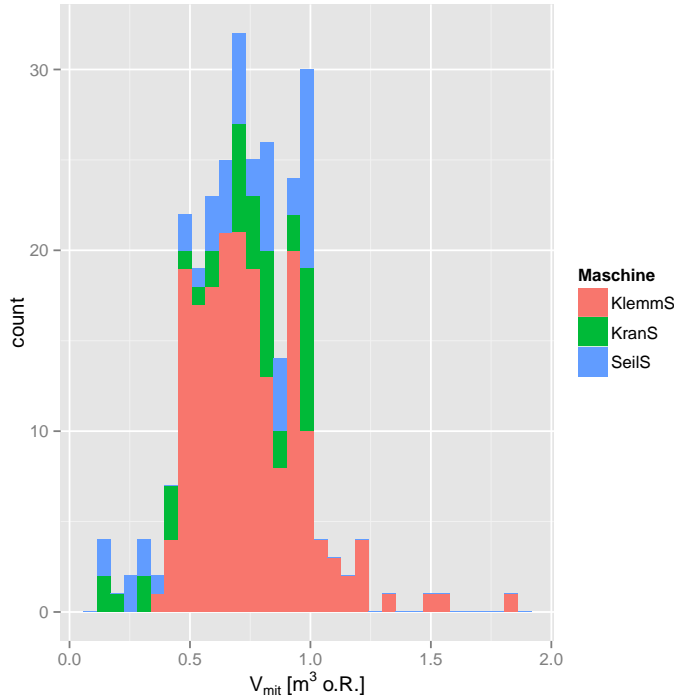


Abbildung 24: Histogramm der  $V_{\text{mit}}$  [ $\text{m}^3$  o.R.] im zur Modellierung benutzten Datenset.

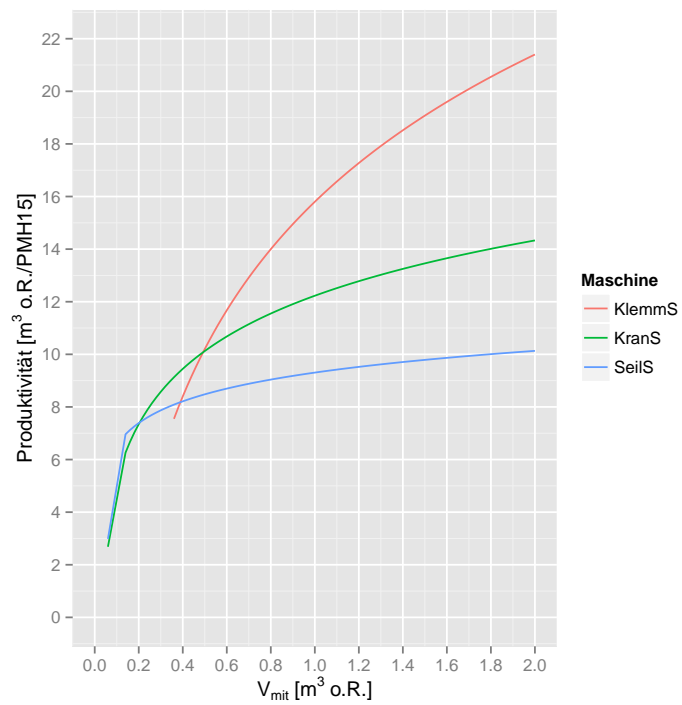


Abbildung 25: Zusammenhang Mittelstammvolumen und Produktivität mit Speziallösungen für Fälle mit sehr kleinem oder grossem Mittelstammvolumen (Fahrentfernungsklasse = 1).