



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

Verjüngung von Gebirgswäldern mit schlitzartigen Eingriffen - Evaluierung der Holznutzung mit Mastseilgeräten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium technicarum (Dr. nat. techn.)

Erstellt von:

Diplom Forstwirt Armin Haberl

Betreuer:

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

Dipl.-Ing. Dr. Gernot Erber

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

Wien, im Oktober 2020

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	4
2. STAND DES WISSENS	6
2.1. Bewirtschaftungskonzepte für Gebirgswälder	6
2.2. Vorratshaltung und Zuwachs in Gebirgswäldern	9
2.3. Seilrückung im Baumverfahren	10
2.3.1. Kombination von Prozessor und Seilgerät	10
2.3.2. Vom Sortiments- zum Baumverfahren	15
2.4. Arbeitssysteme in Steillagen	16
2.5. Produktivität bei der Holzernte im Baumverfahren	19
2.6. Bestandespfleglichkeit bei der Holzernte im Baumverfahren	21
2.7. Arbeitsbelastung und Arbeitsbeanspruchung	22
2.8. Arbeitsunfälle in der Seiltechnik	25
2.8.1. Arbeitsunfälle bei den BaySF	25
2.8.2. Arbeitsunfälle bei der ÖBf AG	26
3. SCHLITZVERFAHREN	29
3.1. Erste schlitzartige Verjüngungseingriffe	29
3.2. Das Schlitzverfahren	32
3.2.1. Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf	32
3.2.2. Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergab	35
3.2.3. Nachhaltige Nutzung beim Schlitzverfahren	36
3.3. Vorteile des Schlitzverfahrens	37
3.4. Arbeitssicherheit beim Schlitzverfahren	39
3.5. Forsttechnische Umsetzung des Schlitzverfahrens	44
3.5.1. Anforderungen an das eingesetzte Seilgerät	44
3.6. Praktische Einsatzempfehlungen	45
3.6.1. Hiebsvorbereitung	45
3.6.2. Mitarbeiterinsatz	45
3.6.3. Ausrüstung	46
4. MATERIAL UND METHODEN	47
4.1. Maschinenbeschreibungen und Umsetzung der Verfahren	47
4.1.1. Schlitzverfahren mit dem Koller K 507 (BaySF)	47

4.1.2. Kahlschlagbetrieb mit dem Syncrofalken 4 to (MM).....	50
4.2. Datenerhebungskonzept BaySF	53
4.3. Datenerhebungskonzept MM.....	55
4.4. Datenaufbereitung und -analyse.....	56
4.4.1. Zeitbedarfsmodell Fällung, Rückung und Aufarbeitung (BaySF) ..	57
4.4.2. Zeitbedarfsmodell Montage und Demontage	57
4.5. Kostenvergleich	58
4.5.1. Effizienz Schlitzverfahren im Vergleich zum Kahlschlag.....	58
4.5.2. Fallstudie Schlitzverfahren „Prügelmöser“	59
5. ERGEBNISSE.....	62
5.1. Deskriptive Statistik	62
5.1.1. Koller K 507 (BaySF)	62
5.1.2. Syncrofalke 4 to (MM).....	64
5.2. Zeitbedarfsmodell Koller K 507 (BaySF)	65
5.3. Produktivitätsmodell Koller K 507 (BaySF)	66
5.4. Montagevergleich	69
5.4.1. Deskriptive Statistik Montage und Demontage	69
5.4.2. Zeitbedarfsmodell Montage K 507 und Syncrofalke 4 to	72
5.5. Kostenvergleich	73
5.5.1 Effizienz Fällung, Seilung und Aufarbeitung	73
5.5.2 Fallstudie Schlitzverfahren „Prügelmöser“	75
6. DISKUSSION.....	81
7. AUSBLICK	86
8. ZUSAMMENFASSUNG	87
9. QUELLENVERZEICHNIS	90
9.1. Literaturverzeichnis	90
9.2. Internetquellen, betriebsinterne Aufzeichnungen und andere Quellen ...	96
10. ANHANG.....	98
10.1. Abbildungsverzeichnis	98
10.2. Tabellenverzeichnis	99

EINHEITENVERZEICHNIS

h = Stunden

m³ = EFM o.R.

Vfm = VFM m.R.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BaySF = Bayerische Staatsforsten AÖR

DB = Deckungsbeitrag

EN = Endnutzung

FTBaySF = Forsttechnik Bayerische Staatsforsten AÖR

GJ = Geschäftsjahr

MMForstTechnik = Mayr-Melnhof Forsttechnik GmbH

MM = Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau

PSA = Persönliche Schutzausrüstung

ÖBf AG = Österreichische Bundesforste AG

PUS = Pflege unter Schirm

VJ = Verjüngungsnutzung

UZ = Umtriebszeit

ABSTRACT

As a result of climate change, human settlements in the alpine valleys are increasingly threatened by natural hazards. Protection is most efficiently provided by forests and particularly by well-structured, site-adapted forests consisting of a mix of spruce, beech and fir. Timely tending and rejuvenation is required to establish resilient mountain forests and has therefore become the main task of forestry in Bavaria.

Though the most cost-efficient solution for rejuvenation on steep terrain, the province of Bavaria as its owner, as well the Bavarian State Forests (BaySF), have put a ban on clear-cutting in their regulations for its many adverse effects. To maintain profitability in management of mountain forest without clear-cuts, the so-called “slit-cut method” has been developed as an alternative. For rejuvenation, slits of one mature tree’s length and half a mature tree’s width are cut alternatingly and in a ladder-like fashion along a yarding corridor, which are then widened during subsequent treatments. When situating the slits, tree diameters are taken into account, as well as patches of already established rejuvenation. Lighting conditions differ on the slits, which enhances establishment of a mix of different species by natural rejuvenation. Thus, productive, well-structured, mixed-species mountain forests can be established, while at the same time saving costs for planting and tending due to natural regeneration and differentiation.

The effect of applying the slit-cut method on the performance of a Koller K507 cable yarder and a crew of three has been systematically monitored over a period of 7 years and total yarded volume amounted to 66.000 m³. During this period, time consumption and harvesting operation parameters were recorded. From this data a time consumption model could be developed, which estimated time consumption per m³ of yarded timber depending on piece volume, yarding direction, yarding distance and silvicultural treatment. Piece volume had a larger effect on productivity than yarding distance and productivity increases with increasing intervention strength and larger intervention area with regard to silvicultural treatments. The model explained 48 % of the variation in time consumption and can be employed for pre-calculating future treatments.

To compare the performance when working in slot-cut method to working in clear-cut, a comparable dataset was retrieved for a Syncrofalke 4to and a crew of four of the Mayr-Melnhof-Saurau forest enterprise (MM) in Styria / Austria, which included yarding operations with a total yarded volume of 47,000 m³. It showed that installation time consumption was higher under the slit-cut treatment, because the corridors had to be cut before installation, while there is no need for that in clear-cutting operations.

A respective model was developed for estimating installation time consumption in man hours PSH_{15} and 46 % of its variation could be explained by yarding distance, yarding direction and treatment type, where time consumption increase with yarding distance and is generally higher in downhill direction and for the slit-cut method. For example, at an average yarding distance 330 m, 55.2 and 44.3 man hours PSH_{15} are required for installation in downhill and uphill yarding directions, respectively, under the slit-cut method, while considerably less time is required (42.3 and 31.5 man hours PSH_{15}) when working in clear-cut method.

At the same average tree volume, yarding distance, productivity was considerably higher in the clear-cut treatment ($15,2 \text{ m}^3/PSH_{15}$; $13,7 \text{ m}^3/PSH_{15}$) than in the slit-cut treatment ($10,8 \text{ m}^3/PSH_{15}$; $10,1 \text{ m}^3/PSH_{15}$) in uphill and downhill yarding direction, respectively. Harvesting costs were € 25,0/ m^3 in uphill and € 26,8/ m^3 in downhill yarding operations and thus between 5,8 €/m³ (uphill; +30 %) and 6,0 €/m³ (downhill; +28%) more expensive than clear-cutting.

Nevertheless, the slit-cut method can be considered a suitable method for low-intensity and small-scale rejuvenation of mountain forests, which allows profitable forest management. Within the frame of a case study, the total cost and revenues of a slit-cut and a clear-cut treatment were compared for a rotation period of 95 years. Not taking interest into account, the economic advantage of the slit-cut method amounted to approximately € 11,723/ha due to higher average timber revenues and lower expenditures for tending, protection against game browsing and thinning. However, at interest rates of 2 % and 3 %, its economic advantage skyrocketed to € 133,444/ha and € 176,134/ha. With this in mind, clear-cutting can no longer be considered a prerequisite for profitable management of mountain forests.

KURZFASSUNG

Die Gebirgswaldbewirtschaftung in Bayern ist im Zuge der aktuellen Klimaveränderung, mit häufigen Extremereignissen, zu einer Kernaufgabe der Forstwirtschaft zur Sicherung des alpinen Lebensraumes der Bevölkerung in den Tallagen der Alpen geworden. Im Gebirgswald kann ein standortsgerechter und strukturierter Mischwald aus den Baumarten Fichte, Buche und Tanne die Waldfunktionen am besten erfüllen.

Zur Sicherung einer nachhaltigen Gebirgswaldbewirtschaftung, unter Vermeidung von Kahlschlägen, wurde von den Bayerischen Staatsforsten AöR (BaySF) das in der Schweiz entwickelte „Schlitzverfahren“ als waldbauliches Verjüngungsverfahren adaptiert und im Rahmen dieser Arbeit die forsttechnische Umsetzung evaluiert.

Beim Schlitzverfahren werden beidseits der Seiltrassen einseitig leiterförmig verteilte Bestandesschlitzte in den Verjüngungsbestand geschlagen. Das Anlegen der Schlitzte erfolgt über die Aspekte Zielstärke des Baumes und Verjüngungsmöglichkeiten des Altbestandes. Durch die unterschiedlichen Lichtverhältnisse auf den Schlitzten wird eine natürliche Verjüngung der Fichte, Tanne und der Buche eingeleitet. Dadurch können Kultur- und in der Folge, durch eine natürliche Differenzierung der Baumarten auf den Schlitzten bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen, Pflegekosten eingespart werden. Im Rahmen einer zuwachsorientierten Starkholznutzung entstehen auf ganzer Fläche ertragreiche und strukturierte Bergmischwälder mit einem hohen Anteil an Vorausverjüngung.

Im Rahmen einer 7-jährigen Holzerntestudie mit dem Mastseilgerät Koller K 507 mit Prozessor Woody 60, betrieben im 3-Mann Betrieb bei den BaySF, wurden verschiedene waldbauliche Eingriffe in einer Nutzungshöhe von 66.000 m³ durchgeführt, aufgezeichnet und evaluiert. Fällen, Rücken und Aufarbeiten des Holzes wurde in geschlossener Arbeitskette ausgeführt.

Anhand der trassenweise dokumentierten Einschläge im Baumverfahren konnte ein Produktivitätsmodell entwickelt werden. Die statistische Analyse ergab, dass das Stückvolumen und die Trassenlänge sowie die Rückerichtung (bergauf oder bergab) und die waldbauliche Eingriffsart einen Einfluss auf die Produktivität des Mastseilgerätes haben. Diese Parameter erklären 48 % der Variabilität der Produktivität. Das Modell ermöglicht den Vergleich der waldbaulichen Eingriffsarten Z-Baum und schlitzartige Durchforstung bzw. schlitzartige und femelartige Verjüngung in Bezug auf die bei der Holzernte mit Mastseilgeräten zu erzielende Produktivität. Der Einfluss des Stückvolumens hatte auf die Produktivität einen größeren Einfluss als die Rückedistanz. Bei den waldbaulichen Eingriffen steigt die Produktivität mit steigender Eingriffsstärke und -fläche an.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Schlitzverfahrens im Vergleich zu einem Kahlschlagbetrieb nach dem Altersklassenwaldmodell, wurden durchgeführte Einschläge in einer Nutzungshöhe von 47.000 m³, aufgearbeitet von einem Syncrofalken 4 to mit Prozessor Woody 60 im Baumverfahren in unterbrochener Arbeitskette im 2-Mann Betrieb beim Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau (MM) in Steiermark/ Österreich analysiert. Die mit dem Mastseilgerät zu rückenden Bäume wurden von zwei Waldarbeitern mit Motorsäge vorgeschlägert.

Als wichtiges Ergebnis der Arbeit zeigte sich, dass die Montagezeiten bei den BaySF im Schlitzverfahren signifikant höher als bei MM im Kahlschlagbetrieb sind. Das hat unter anderem damit zu tun, dass bei einer Bewirtschaftung im Schlitzverfahren im Rahmen der Montagearbeiten oft neue Seiltrassen trassiert und vor der eigentlichen Rückung freigeschnitten werden müssen, was die Montagezeiten erhöht.

Anhand der Betriebsdaten der beiden Mastseilgeräte konnte ein Zeitbedarfsmodell für die Montage/Demontage des Seilsystems erstellt werden. Die Parameter Trassenlänge, Rückerichtung und Betrieb haben einen signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf in Mannstunden (PSH₁₅). Diese Parameter können 46 % der Variabilität des Zeitbedarfs für Montage und Demontage erklären. Bei der mittleren Trassenlänge der BaySF (330 m) liegt der Zeitbedarf für Montage und Demontage bei 55,2 Mannstunden PSH₁₅ (bergab) bzw. 44,3 Mannstunden PSH₁₅ (bergauf). Bei MM wird bei der gleichen Trassenlänge deutlich weniger Zeit benötigt (42,3 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergab und 31,5 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergauf).

Mit steigender Trassenlänge steigt bei beiden Seilgeräten der Montageaufwand. Bei beiden Seilgeräten sind die Montagezeiten in der Rückerichtung bergab höher als in der Rückerichtung bergauf. Der größere Zeitbedarf lässt sich auf die Notwendigkeit der Errichtung eines Rückholseiles zurückführen.

Im Kahlschlagbetrieb war die Produktivität des Syncrofalken 4 to beim MM war bei gleichem Stückvolumen und gleicher Trassenlänge in der Rückerichtung bergauf mit 15,2 m³/PSH₁₅ (bergab 13,7 m³/PSH₁₅) deutlich höher als beim Koller K 507 im Schlitzverfahren mit 10,8 m³/PSH₁₅ (bergab 10,1 m³/PSH₁₅).

Abgeleitet von den Systemkosten und der Produktivität der Mastseilgeräte lagen die Erntekosten im Kahlschlagbetrieb bei MM bei 19,3 €/m³ in der Rückrichtung bergauf und bei 20,9 €/m³ in der Rückerichtung bergab. Bei den BaySF lagen die Erntekosten im Schlitzverfahren bei 25,0 €/m³ bergauf und bei 26,8 €/m³ in der Bergabrückung. Im Vergleich zum Kahlschlagbetrieb war das Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf um 5,8 €/m³ (+30%) und bergab um 6,0 €/m³ (+28%) teurer.

Als praktisch verwertbares Ergebnis der vorliegenden Arbeit kann festgehalten werden, dass eine kleinflächige Verjüngung von Gebirgswäldern, auch bei geringen Holzanfällen im Schlitzverfahren bei den BaySF kosteneffizient durchgeführt werden kann.

Im Zuge des Musterhiebes Prügelmöser im Schlitzverfahren wurde ein Betriebsklassenvergleich mit einer klassischen Nutzung im Altersklassenwald mit Kahlschlag, am Ende der 95-jährigen Umtriebszeit, durchgeführt. Der durchschnittlich höhere Holzerlös, der niedrige Aufwand für Kultur- und Pflege, Verbiss- und Fegeschutz und ein geringerer Aufwand für Bestandespflege und Durchforstung führten zu einem ökonomischen Vorteil von 11.723 €/ha für das Schlitzverfahren gegenüber einer Bewirtschaftung im Kahlschlagbetrieb.

Kalkuliert man eine Verzinsung für das eingesetzte Kapital für die Ausgaben und für die erzielten Deckungsbeiträge bis zum Ende der Umtriebszeit, so schneidet eine Bewirtschaftung im Schlitzverfahren betriebswirtschaftlich besser ab. Bei einer Verzinsung des Kapitals und der Deckungsbeiträge mit 2 % ergeben sich Kostenvorteile für die Zuwachsabhängige, schlitzartige Bewirtschaftung in Höhe von ca. 133.444 €/ha. Bei einem Zinssatz von 3 % ergeben sich wirtschaftliche Vorteile in Höhe von ca. 176.134 €/ha.

Eine Bewirtschaftung im Kahlschlagbetrieb ist für die Gebirgswälder Mitteleuropas keine Voraussetzung mehr für eine ertragreiche Gebirgsforstwirtschaft.

Danksagung

Der Betriebsleitung der MMForstTechnik GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Willibald Ehrenhöfer, Herrn Ing. Anton Karlon sowie dem Konsultanten Herrn Ing. Johannes Loschek möchte ich für die Überlassung der Betriebsdaten des Syncrofalken 4 to und für zahlreiche Fotos im Bereich der Seiltechnik recht herzlich danken. Durch den Vergleich des Seilgerätes Syncrofalke 4 to mit dem Seilgerät Koller K 507 der BaySF, konnten wertvolle Rückschlüsse über die Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und die Einsatzmöglichkeiten des Schlitzverfahrens gewonnen werden.

Dem Kollegen Herrn Ing. Franz Obermeier am FB Ruhpolding/BaySF möchte ich für zahlreiche Anregungen und die Einbringung seiner langjährigen waldbaulichen Erfahrungen, mit kleinflächigen Eingriffen in Verjüngungsbeständen recht herzlich danken.

Dem Kollegen Herrn Ing. Georg Berger am FB Berchtesgaden/BaySF sei für die zur Überlassung wichtiger Bestandes-, Betriebs- und Holzverkaufsdaten beim Musterhieb Prügelmöser und die Einbringung seiner langjährigen waldbaulichen Erfahrungen recht herzlich gedankt.

Dem Betriebsleiter des Forstbetriebes Abtenau der ÖBf AG, Herrn Dipl. Ing. Erwin Stampfer danke ich ebenfalls herzlich für die Überlassung wichtiger Betriebsdaten. Dadurch konnte ein betriebswirtschaftlicher Vergleich des Schlitzverfahrens mit dem Altersklassenwaldmodell durchgeführt werden.

Dem stellvertretenden Betriebsleiter des FB Sonthofen, Herrn Dipl. FW Tobias Ochs, möchte ich für die Unterstützung bei der EDV-Analyse der BaySF Hochgebirgsbetriebe, recht herzlich danken.

Meinem Sohn Michael Haberl und meinem rotarischen Freund Dr. Andreas Greither möchte ich für die Lektüre der Dissertation ebenfalls recht herzlich danken.

Bei Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rien Visser möchte ich mich für die konstruktiven Anregungen im Zuge der Erstellung der Arbeit ebenfalls recht herzlich bedanken.

Weiter bedanke ich mich herzlich bei meinem Betreuer, Herrn Dipl. Ing. Dr. Gernot Erber, für die stets tatkräftige Unterstützung und sehr gute Betreuung.

Schließlich möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Stampfer, für seine kollegiale, zielführende und intensive Betreuung bedanken, die mich bis ins Ziel geleitet hat.

1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Der bayerische Alpenraum ist das größte Wassereinzugsgebiet für die südbayerischen Flüsse. Die enorme Flächenausdehnung in Verbindung mit hohen Niederschlägen führt zu einer großen Bedeutung des Raumes für den Hochwasserschutz im bayerischen Hochgebirge. Annähernd die Hälfte des bayerischen Alpenraumes ist mit Wald (250.000 ha) bedeckt, davon sind zwei Drittel als Schutzwald nach dem Bayerischen Waldgesetz ausgewiesen. Dem Gebirgswald kommt daher eine besondere Bedeutung für den Schutz vor Naturgefahren zu (Brosinger und Rothe, 2003).

Im Zuge der globalen Erwärmung kommt es im bayerischen Alpenraum vermehrt zu extremen Klimaereignissen. Starkniederschläge, Nassschneefälle und abrupte Tauphasen führen zu Lawinen- und Murenabgängen und gefährden die Stabilität des Lebensraumes im Gebirge. Das Schneechaos im Berchtesgadener Land im Winter 2018/19 kann durchaus in Zusammenhang mit dem Klimawandel und der Erderwärmung gebracht werden. Das Jahr 2018 war das wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Deutschland. In Folge wurden auch die Ozeane stärker als normal erwärmt. Dadurch ist mehr Feuchtigkeit in der Atmosphäre. Bei Einstellung einer Nordwest-Strömung bringt diese hohe Niederschläge nach Deutschland und an die Alpen. Der Gebirgseffekt verstärkt solche Ereignisse. Wenn sich die Strömung klimabedingt verändert, kommt es häufiger zu Nord-Süd-Wetterlagen in Verbindung mit Starkregen oder starkem Niederschlag in Form von Schnee (Hoffmann, 2019).

Durch die massiven Schneefälle im Winter 2018/19 kam es im Bereich des Forstbetriebes Berchtesgaden zu immensen Schneebruchschäden (ca. 170.000 m³ oder 170 % des Jahreshiebsatzes). Bestandes bedrohliche Schäden, durch das Abbrechen von Fichtengipfeln, entstanden teilweise flächig in mittelalten Nadelholzbeständen der Höhenlagen von 600-1.200 m. Der Erhalt und die Verjüngung der Bergmischwälder in Schutzwaldlagen wird zu einer Kernaufgabe der Forstwirtschaft als Beitrag zu einer Sicherung des alpinen Lebensraumes für den Menschen.

Gebirgswälder können bei einem einzelnen Niederschlagsereignis je nach Baumart und Dichte des Kronendaches ca. 4-6 mm Wasser im Kronenraum zurückhalten und so zum Erhalt des Lebensraumes beitragen (Markart et al., 2007).

Im bayerischen Hochgebirge kann ein standortsgerechter, stufig aufgebauter und gut strukturierter Mischwald aus den Baumarten Fichte, Tanne und Buche die Aufgaben des Hochwasserschutzes am besten erfüllen. Dieser typische Bergmischwald ist vielfach noch in Beständen von über 130 Jahren vorhanden. In den 20- 80 Jahre alten Wäldern ist der Tannenanteil gering und liegt nur noch bei 1 %.

Gleichzeitig nehmen gleichförmige und labile Fichtenreinbestände in dieser Altersspanne einen besonders großen Anteil ein. Bei dieser Ausgangslage kommt einer rechtzeitigen und ausreichenden Verjüngung der Bergwälder eine besondere Bedeutung zu. Eine stufige Dauerbestockung aus den Hauptbaumarten des Bergmischwaldes lässt sich nur über eine funktionierende Verjüngung auf großer Fläche erreichen. Die Verjüngung soll über langfristige und kleinflächige Verfahren erfolgen und dadurch eine dauerhafte Waldbestockung ermöglichen (Brosinger und Rothe, 2003).

Aktuelle Vorgaben des Freistaates Bayern als Eigentümer sowie Auflagen der Zertifizierung nach PEFC (PEFC, 2017) schließen kahlschlagartige Eingriffe zur Verjüngung von Bergmischwäldern aus und fordern eine kleinflächige, möglichst natürliche Verjüngung der Bergmischwälder. Die aktuellen Grundsätze für die Waldbewirtschaftung im Hochgebirge (BaySF, 2018) berücksichtigen diese Vorgaben und sehen kleinflächige Eingriffe zur Verjüngung des Gebirgswaldes vor.

Ökonomischer Erfolg schafft die Grundlage für eine umfassende und vorbildliche Bewirtschaftung des Staatswaldes (BaySF, 2014). Die BaySF erzielten im Geschäftsjahr 2018, bei einem Umsatz von 371,9 Mio. Euro (Einschlag 4,79 Mio. m³) ein positives Betriebsergebnis in Höhe von 54,1 Mio. Euro (Vorjahr 70,1 Mio. Euro. Mit 362,1 Mio. Euro bei einem Einschlag von 4,7 Mio. m³ entfielen dabei 90 % der Umsatzerlöse auf das Hauptgeschäftsfeld Holz (BaySF, 2017).

Der Deckungsbeitrag aus der Holzproduktion und damit das Betriebsergebnis der BaySF hängen stark von den Holzerntekosten ab. Im Geschäftsjahr 2017 wurden 60 % des Holzeinschlages (Umfang 55 Mio. Euro) von Unternehmern getätigt. Insgesamt betrugen die Holzerntekosten 84,7 Mio. Euro (Vorjahr 80,3 Mio. Euro) oder 18 €/m³ über den Gesamteinschlag (BaySF, 2017).

Annähernd 10 % des Holzeinschlages der BaySF erfolgt im Hochgebirge, davon die Hälfte in Hanglagen mit einer Neigung von > 50 % und somit nach aktuellem Stand der Forsttechnik im Seilgelände (Neft, 2015). In Steillagen sind die Holzerntekosten deutlich höher als im befahrbaren Gelände. In Zeiten niedriger Holzpreise kommt es bei den BaySF mitunter zu einem Einschlagsverzicht in steilen Lagen. Waldbaulich notwendige Eingriffe werden deshalb örtlich verschoben, was sich mittelfristig negativ auf die Stabilität des Gebirgswaldes auswirken kann.

Angeichts hoher Erntekosten in Steillagen und dem Anspruch des Eigentümers auf eine ertragreiche Bewirtschaftung seiner Wälder, werden beim Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau (MM) Kahlschläge als waldbauliches „Ultima Ratio“ für hiebsreife Altbestände in der Verjüngungsnutzung angesehen und durchgeführt. Ein gleichartiges Vorgehen ist für die BaySF durch die Vorgaben des Eigentümers und den Vorgaben des Waldbaus nicht möglich. Ein wesentlicher Punkt für eine profitable Holzproduktion im Gebirgswald liegt in der Optimierung des Holzernteprozesses.

Nach Stampfer (2002) gibt es für das befahrbare Gelände bereits ausgereifte, meist vollmechanisierte Holzerntesysteme. Für die Holzernte im steilen Gelände ist noch erhebliches Innovationspotential vorhanden.

Bei Nutzungen im Rahmen einer naturnahen Waldbewirtschaftung kommt es zu einem geringen und räumlich wenig konzentrierten Holzanfall. Dies stellt die Forsttechnik vor die Herausforderung, wirtschaftlich einsetzbare Holzerntesysteme für diese veränderten Rahmenbedingungen zu entwickeln. Besonders dringlich stellt sich dieses Problem in Gebirgslagen, wo aufgrund topographischer Einschränkungen der zwingende Einsatz von seilgestützten Rückesystemen erforderlich ist.

Bislang gibt es noch kein wirtschaftlich überzeugendes und wissenschaftlich überprüftes Holzerntesystem, welches in Steillagen kleinflächige bis einzelstammweise Eingriffe zu vertretbaren Kosten ermöglicht.

In diesen Lagen erfordern überzeugende Lösungen eine besonders sorgfältige Einsatzplanung (Heinimann, 1986; Trzesniowski, 1989; Trzesniowski, 1993). Durch eine getrennte, oftmals auch konkurrierende Betrachtung der waldbaulichen Planung der Nutzungseingriffe einerseits, und andererseits dem anschließenden Versuch, diese auch technisch und wirtschaftlich vertretbar umzusetzen, kommt es oftmals zu keinen optimalen Lösungen. Im Rahmen eines systemanalytischen Ansatzes empfiehlt es sich daher, bei der Planung von Verjüngungseingriffen im Seilgelände die waldbaulichen und forsttechnischen Lösungsansätze, welche in Wechselwirkung stehen, im Sinne eines „Concurrent Engineering“ (Chryssolouris, 1992; Heinimann, 1998) zu betrachten.

Unkritische technische Vorgaben oder die Vorgabe von Mindesteingriffsmengen kann nicht nur die Lösung von Problemen ermöglichen, sondern birgt auch Gefahren in sich. So kann durch die Vorgabe von Mindestmengen für eine Seilrückung bei einem geringen Bestandesvorrat zu überstarken Eingriffen bis hin zum Kahlschlagzwang führen (FPP, 1986; ÖBF, 1992).

Deshalb sollen außer Nutzenüberlegungen auch mögliche negative Auswirkungen und Risiken in die Entscheidungsfindung einbezogen werden (Heinimann, 1996). Formale Ansätze einer Technikfolgenabschätzung, wie sie in anderen Fachgebieten schon seit längerem eingesetzt werden (u.a. Bullinger, 1994, Dierkes, 1993), fehlen in Bezug auf Maßnahmen in der Waldbewirtschaftung allerdings weitgehend. Zur Beurteilung der Gesamteignung einer mehrdimensionalen Handlungsalternative (waldbauliche Eingriffsart und –stärke, eingesetztes Holzerntesystem, konkreter Lage der Seillinien vor Ort), sollten neben der Wirtschaftlichkeit des eigentlichen Nutzungseingriffes die Auswirkungen einer Alternative in Bezug auf zu erwartende Schäden an Bestand, Boden und bestehender Verjüngung sowie in Bezug auf wirtschaftlich relevante waldbauliche Parameter (i.e. Qualitätsniveau des verbleibenden Bestandes, Stabilität) beurteilt werden (Vacik et al., 2002).

Zur Lösung des Zielkonfliktes zwischen den waldbaulichen Vorgaben (Leistungsspezifikationen) und der forsttechnischer Machbarkeit bei geringen Ressourcenverbrauch, überschaubarem Risiko und günstigen Erntekosten (Erstellungsspezifikationen) ist es notwendig geworden, ein geeignetes Verjüngungsverfahren für Gebirgswälder bei den BaySF zu entwickeln (Abbildung 1).

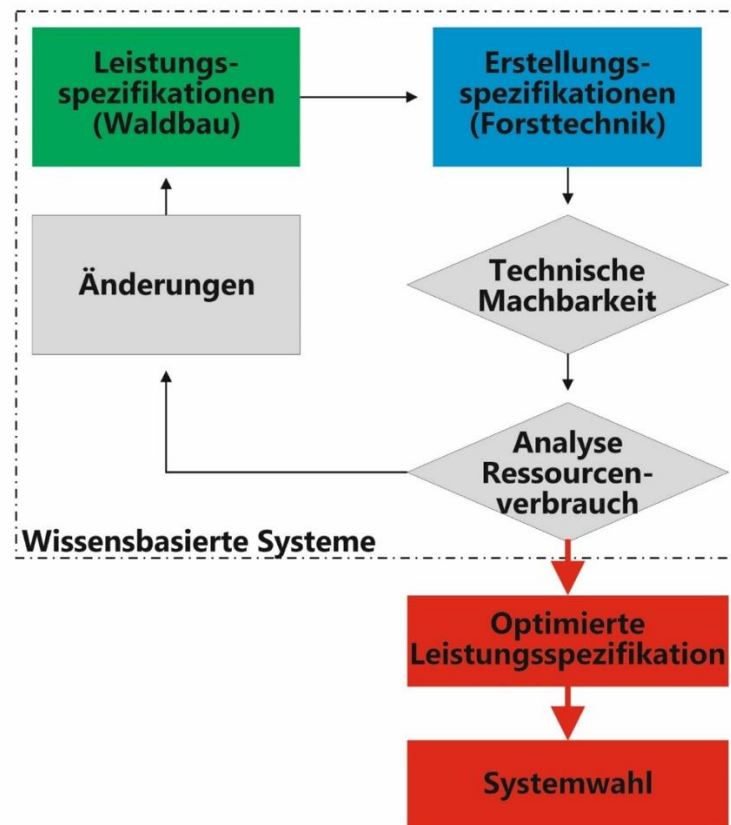


Abbildung 1: Vorgangsweise für die Entwicklung eines waldbaulich-forsttechnischen Optimalverfahrens zur Verjüngung von Gebirgswäldern (Stampfer, 2018)

1.2. Zielsetzung

Ausgehend von den Überlegungen, dass speziell im Falle von Verjüngungseingriffen in Gebirgswaldbeständen die Abstimmung von waldbaulicher Planung und forsttechnischer Umsetzung einer Optimierung bedarf, und dazu notwendigerweise neben wirtschaftlichen Überlegungen auch mögliche negative Auswirkungen von Handlungsalternativen mitberücksichtigt werden müssen, soll im Rahmen dieser Arbeit ein waldbaulich-forsttechnisches Optimalverfahren für die Verjüngung von Gebirgswäldern der BaySF entwickelt werden. Das Verfahren soll eine kleinflächige Verjüngung von Gebirgswäldern in Steillagen zu möglichst geringen Erntekosten ermöglichen.

Bei Anwendung des Verfahrens sollen mögliche Zielkonflikte zwischen den waldbaulichen Vorgaben und den ökonomischen Anforderungen vermieden werden.

Weiter soll die Wissenslücke über die Möglichkeiten schlitzartiger Verjüngungseingriffe in Gebirgswäldern geschlossen werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob eine Verjüngung des Gebirgswaldes durch schlitzartige Eingriffe eine wirtschaftliche Alternative zum Kahlschlagbetrieb sein kann.

Im Einzelnen werden folgende Teilziele verfolgt:

- Forsttechnische Umsetzung der Verjüngung von Bergmischwäldern im Schlitzverfahren.
- Zusammenstellung forsttechnischer und praktischer Einsatzempfehlungen sowie Mitarbeiteranforderungen für die Umsetzung des Schlitzverfahrens.
- Entwicklung eines Zeitbedarfs- und eines Produktivitätsmodells für die Holzernte mit Mastseilgeräten im Baumverfahren auf Basis von Leistungsnachweisen.
- Ökonomischer Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren mit einer Bewirtschaftung im Altersklassenwaldmodell mit Kahlschlag.
- Durchführung einer Fallstudie des neuen Waldbauverfahrens in einem Hochgebirgsbestand in Bayern und Erstellung einer Deckungsbeitragsrechnung.

2. STAND DES WISSENS

2.1. Bewirtschaftungskonzepte für Gebirgswälder

Basierend auf den ersten forstwissenschaftlichen Untersuchungen im Gebirgswald wurden in der Vergangenheit bereits plenter- bis femelartige Eingriffe als Bewirtschaftungskonzept empfohlen. Landolt (1895) beschäftigte sich mit dem Zustand der Hochgebirgswaldungen der Schweiz. In seinem Gutachten über den Hochgebirgswald favorisierte er plenter- bis femelartige Eingriffe. Er beschreibt die Plenter- und Femelwaldungen, sofern sie nicht übernutzt sind, als die natürlichste Behandlung des Waldes nach dem Urwald. Er fordert eine regelmäßige Plenterung des Schutzwaldes unter Erhalt seiner Widerstandsfähigkeit und unter Bewahrung seiner Verjüngungsmöglichkeit.

Möller (1922) formulierte den Dauerwaldgedanken als Bewirtschaftungskonzept. Er sah es als notwendig an, den Wald ganzheitlich zu betrachten und pfleglich mit ihm umzugehen. Der Wald ist dabei dauerhaft als Produktionssystem zu erhalten. Im Rahmen eines naturnahen Waldpflege- und Nutzungskonzeptes, soll eine Waldbewirtschaftung in Form von mehrschichtigen, ungleichaltrigen Beständen erfolgen. Umgesetzt wird das Bewirtschaftungskonzept, durch eine kahlschlagfreie Waldbewirtschaftung mit Einzelstammnutzung, dem Erhalt einer ausreichend bevorrateten Waldbestockung in gemischter Zusammensetzung zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und dem Streben nach Naturverjüngung auf ganzer Fläche.

Nach Mayer und Ott (1991) haben ungleichalte Bergmischwälder ein hohes Resilienzvermögen gegenüber Schadereignissen und erfüllen am ehesten die geforderten Kriterien an stabile Gebirgswälder. Sie schlagen zum Erreichen dieses Betriebszieles drei Pflegephasen vor:

- Phase der Verjüngungssicherung (Oberhöhe bis 1,8 m) und Ausbildung der Bestandesstruktur (Oberhöhe bis 5 m) als Grundlage für das Tragsystem.
- Phase der Schaft- und Bestandesausformung als Grundlage für die Tragelement-Funktion. Verhinderung einer einschichtigen, gleichförmigen Struktur. Erhalt der Rotten (Oberhöhe 5-12 m).
- Erneuerungsphase durch gezielte Kronenöffnung. Die Erneuerung/Verjüngungsphase spielt für die Holzernte die entscheidende Rolle, da lediglich in dieser Phase verwertbares Holz anfällt.

Nach Heinimann (2003) unterscheidet sich die Bewirtschaftung von Schutzwäldern maßgeblich von der Bewirtschaftung der Wälder in tieferen Lagen. Die Schutzwaldpflege bezweckt die Stabilität von Waldökosystemen dauerhaft auf hohem Niveau zu halten. Eine nachhaltige Bewirtschaftung von Ertragswäldern soll dem Besitzer einen wirtschaftlichen Ertrag liefern, ohne die Stabilität des Waldökosystems zu gefährden.

Heylighen (2003) weist auf die hohe Bedeutung der Bestandesstabilität hin. Er definiert Stabilität als Fähigkeit eines Systems, seine qualitativen Eigenschaften auch dann zu erhalten, wenn externe Störungen einwirken. Dieses Verständnis der Stabilität berücksichtigt das Holling-Resilienz-Konzept (Holling, 1973 und 2001). Resilienz ist die Fähigkeit eines Systems, bei durch externe Störungen ausgelösten Systemfluktuationen, in einem stabilen Systemzustand zu bleiben oder in einen solchen zurückzukehren. Abgeleitet davon ist ein Waldökosystem also eine sich selbst erhaltende Struktur, welches die Fähigkeit hat, sich nach Schadereignissen zu erholen oder zu erneuern.

Heinimann (2003) vergleicht stabile Schutzwälder mit einem mechanischen Tragwerk, welches aus dem Tragsystem sowie aus den einzelnen Tragelementen mit der Fähigkeit zur Erneuerung besteht:

- Die Tragsystem Funktion (Bestandeszusammensetzung und Bestandesstruktur) ist wichtig für die Widerstandsfähigkeit des Bestandes gegen mechanische Einwirkungen (Schnee, Sturm oder Steinschlag).
- Die Tragelement-Funktion (Bäume) ist wichtig für eine hohe Widerstandsfähigkeit der einzelnen Elemente gegen mechanische Einwirkungen.
- Die Resilienz-Funktion ist wichtig für eine Regeneration und Erneuerung des Bestandes nach Schadereignissen.

Brosinger und Rothe (2003) fordern für den bayerischen Gebirgswald einen standortsgerechten, stufig aufgebauten und gut strukturierten Mischwald aus den Baumarten Fichte, Buche und Tanne. Eine stufige Dauerbestockung aus den Hauptbaumarten des Bergmischwaldes lässt sich nur über eine funktionierende Verjüngung auf großer Fläche erreichen. Die Verjüngung soll über langfristige und kleinflächige Verfahren erfolgen.

Stocker (2007) beschreibt das Schalenwild als größten Widersacher des Dauerwaldes. In der Halbschattenwirtschaft des Dauerwaldes wird mit Naturverjüngung und geringen Stammzahlen gearbeitet. Ein Verbiss hat deshalb größere Auswirkungen als im schlagweisen Hochwald. Das Jugendwachstum der Bäume ist langsam und es besteht über Jahre hinaus ein Verbiss Risiko durch das Schalenwild. In hohen Lagen verlaufen die Ansamung und der Aufwuchs von jungen Bäumen noch langsamer. Hier kann jedes Stück Reh, Rot- oder Gamswild bereits zu viel sein. Was von Schalenwild nicht gefressen wird, kann später verfegt werden. Stocker (2007) fordert deshalb eine konsequente Bejagung des Schalenwildes als Voraussetzungen für einen erfolgreichen Dauerwaldbetrieb.

Bei den BaySF wurden Nutzungen im Gebirgswald in der Vergangenheit oft schirmschlagartig durchgeführt. Hiebsreife Fichten wurden entnommen und beigemischte Buchen und Tannen haben davon profitiert. Die Buchen konnten in Folge ihre Kronen ausbauen und sich im Halbschatten flächig natürlich verjüngen. Der Schirmschlagbetrieb führte vielerorts zu einer flächigen Buchenvorausverjüngung mit einzelnen Tannen bei einem zu geringen Anteil der lichtbedürftigen Fichte. Im Gegenzug kam es bei zu starken Eingriffen an sturmexponierten Westlagen zu einer vorzeitigen Auflösung der Altbestände, was in der Folge zu einer flächigen Verjüngung der Fichte führte und damit eine Entmischung des Bergmischwaldes verursachte.

Angesichts der negativen Erfahrungen mit schirmschlagartigen Eingriffen bei den BaySF wurde die ursprünglich aus der Schweiz kommende Vorgehensweise (Trepp, 1955), eine Verjüngung des Gebirgswaldes durch schlitzartige Eingriffe einzuleiten, wieder aufgegriffen.

Am FB Ruhpolding/BaySF und am FB Berchtesgaden/BaySF gab es zu Beginn der Arbeit bereits zahlreiche gelungene Naturverjüngungen nach durchgeführten schlitzartigen Eingriffen in Verjüngungsbeständen (Abbildung 2).



Abbildung 2: Bergmischwaldverjüngung auf 8-jährigem Schlitz am FB Berchtesgaden (2008)

2.2. Vorratshaltung und Zuwachs in Gebirgswäldern

Seit 1905 werden in der Schweiz Plenterwälder auf Versuchsflächen beobachtet. Die älteste Fläche liegt im Toppwald bei Konolfingen. Sie erlebte 17 Mess- und Durchforstungskampagnen und produzierte über 1.200 Vfm Holz pro Hektar was einem durchschnittlichen Zuwachs von 12 Vfm/ha entspricht (Zingg, 2003).

Lenk und Kenk (2007) berichten über das langfristige Wachstum in Plenterwäldern des Schwarzwaldes. Als durchschnittlich periodisch jährlicher Volumenzuwachs im Zeitraum von 1950 bis 2001 konnten 11 Vfm/ha ermittelt werden. Obwohl das Starkholz am Gesamtvorrat (Volumen) nur etwa ein Drittel ausmacht, leistet es gut drei Viertel des Volumenzuwachses.

Untersuchungen von Pretzsch et al. (2014) in Kreuth am FB Schliersee/BaySF, zeigen die Stammzahl- und Vorratsverteilung über Durchmesserstufen für Bergmischwaldbestände auf. Die beobachtete Stammzahlverteilung nach Durchmesserstufen (Abbildung 3) kommt dem Bestandesaufbau eines Plenterwaldes recht nahe.

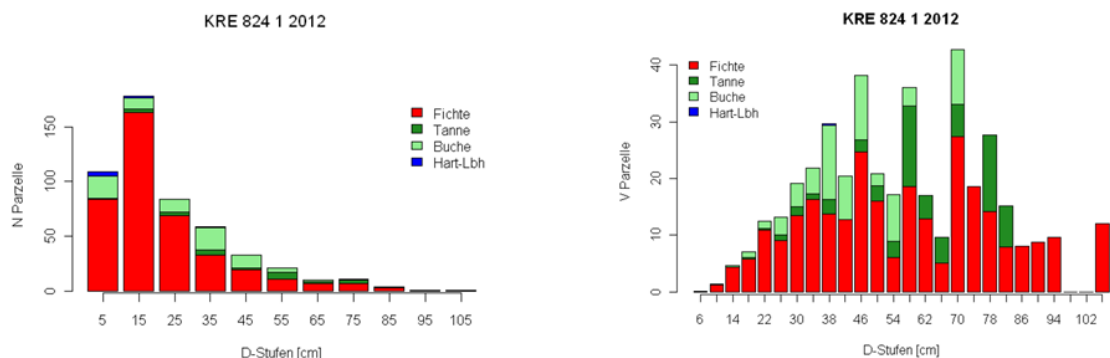


Abbildung 3: Stammzahl- und Vorratsverteilung in Durchmesserstufen Parzelle KRE 824-1; Aufnahmejahr 2012 (Pretzsch et al., 2014)

Im Vergleich mit der Stammzahlverteilung eines Plenterwaldes sollten in den kleinen Durchmesserstufen mehr Bäume vorhanden sein. Erste Strukturverluste bei einer hohen Bevorratung lassen sich bereits erkennen. Die Vorratsverteilung nach Durchmesserstufen reicht von einem BHD von 6 cm bis zu 106 cm.

Die durchgeführten Zuwachsuntersuchungen auf den unterschiedlich dicht bestockten Parzellen der Versuchsflächen im Bergmischwald, ergaben eine nur geringe Abnahme des Zuwachses bei einer Reduktion des Bestandesvorrates (Abbildung 4).

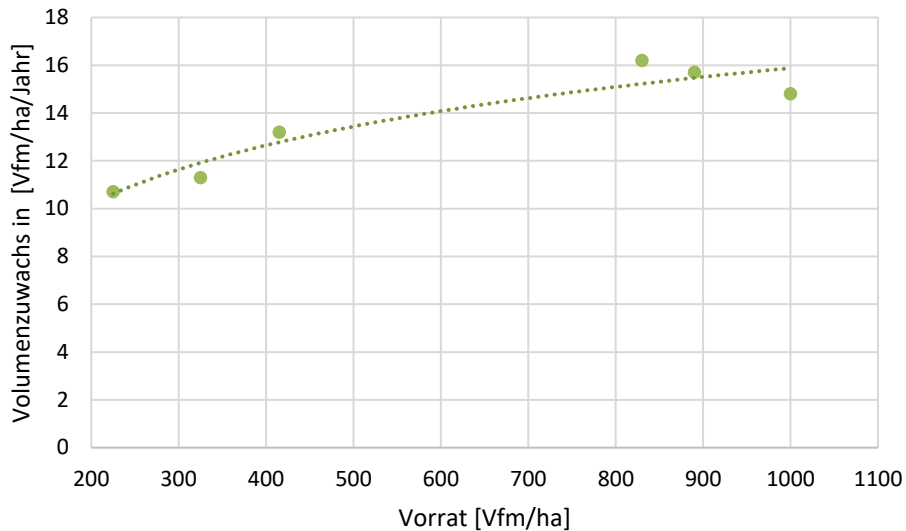


Abbildung 4: Vorrat und Zuwachs im Bergmischwald Kreuth/BaySF (Pretzsch et al., 2014)

2.3. Seilrückung im Baumverfahren

2.3.1. Kombination von Prozessor und Seilgerät

Im Jahr 1973 entwickelte MMForstTechnik den vollhydraulisch angetriebenen Hydrokran (Abbildung 5). Der hydraulische Antrieb ermöglichte erstmalig eine einfache Kraftübertragung auf mehrere Winden und eine stufenlose Regelung aller Windenarbeiten.

Beim Hydrokran werden alle vier Seile (Tragseil, Zugseil, Rückholseil, Hilfsseil) hydraulisch angetrieben. Die Umstellung auf den vollhydraulischen Windenbetrieb schaffte erstmals die technische Voraussetzung für eine Holzernte im Baumverfahren mit Aufarbeitung durch einen in das Seilgerät integrierten Prozessor. Der Hydrokran wurde ab 1975 mit einem Seilspillantrieb für Zug- und Rückholseil ausgestattet. Damit erreichte man einen sehr guten Gleichlauf der beiden ab- und aufspulenden Seile. Die Zugkraft und die Geschwindigkeit waren konstant und konnten durch einen Joystick gesteuert werden. Für den Maschinisten des Seilgerätes ergab sich dadurch eine wesentliche Vereinfachung der Steuerung.

Im Jahr 1979 wurde bei den Österreichischen Bundesforsten (ÖBf AG) am Bau- und Maschinenhof Steinkogl der Prozessor „Strenab 35“ zur maschinellen Aufarbeitung von Schwachholz bis zu einem Durchmesser von 35 cm entwickelt. Der Kran-Prozessor wurde mit einem auf einem Lastkraftwagen aufgebauten Koller K 300 Mastseilgerät kombiniert. Es entstand das Seilgerät „Mauko“ mit gekoppelter Prozessoraufarbeitung (Abbildung 6), benannt nach dem Entwickler Ing. Maurer in Zusammenarbeit mit der Fa. Koller (ÖBf AG, 2005).



Abbildung 5: Hydrokran (Foto: K. Vyplel / MMForstTechnik)



Abbildung 6: Seilgerät Mauko (Foto: ÖBf AG)

Die MMForstTechnik entwickelte im Jahr 1982 erstmals eine Ziel- und Sattelautomatik mit Kabelfernsteuerung. Dadurch konnten die Prozesse Rücken mit dem Seilgerät und Aufarbeiten bereits angelandeter Bäume durch den Prozessor unabhängig voneinander durchgeführt werden. Bei der KWF Tagung 1985 in Ruhpolding wurde der Prototyp RM 2001 vorgestellt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Prototyp RM 2001 (Foto: MMForstTechnik)

Beim Seilgerät RM 2001 wurde das Zug- und Rückholseil als Seilspill ausgeführt. Der RM 2001 wurde mit einem mechanischen Laufwagen mit Vierseilbetrieb kombiniert. Der Prototyp RM 2001 von MMForstTechnik lieferte die technischen Grundlagen für die spätere Einführung des Turmfalken (Abbildung 8) der ursprünglich als Anhängerseilgerät ausgeliefert und erstmals auf der KWF Tagung in Ruhpolding 1985 vorgestellt wurde.

Der Turmfalke 2,5 to konnte sowohl mittleres als auch starkes Holz rücken. Er verfügte über eine Ziel- und Sattelautomatik und konnte im Vierseilbetrieb bergauf wie bergab eingesetzt werden. Durch die Zielautomatik fährt der Laufwagen automatisch bis zum letzten Ladepunkt der Last und zurück zum Anlandepunkt des Seilgerätes. Die Sattelautomatik ermöglicht die Programmierung von Stützen und deren Überfahren mit einer angepassten Fahrgeschwindigkeit.



Abbildung 8: Seilgerät Turmfalke 2,5 to (Foto: MMForstTechnik)

Im Jahr 1993 entwickelte Johann Tröstl den Syncromat mit direkter hydraulischer Ansteuerung. Der Syncromat bestand aus zwei auf einer Welle gelagerten, gleich großen Seiltrommeln, welche von einem Hydraulikmotor angetrieben wurden. Das Zug- und Rückholseil werden auf die sich in gleicher Richtung drehenden Trommeln gegenläufig aufgespult. Dadurch kam es zu einem Synchronlauf der Trommeln.

Die Lizenzrechte wurden von MMForstTechnik erworben und in der Folge entstand 1995 der Syncrofalke 2,5 to (Abbildung 9) als serienreife Neuentwicklung der 3-Seil Syncro-Technologie. Der Syncrofalke 2,5 to wurde im selben Jahr erstmalig auf der Holzmesse in Klagenfurt vorgestellt. Er war ursprünglich mit dem Kurzholzladekran von Jonsered und dem Laufwagen MM Sherpa U 3 ausgestattet. Die Zugseil- und Tragseilklemme konnte beim Sherpa Laufwagen wechselseitig angesteuert werden. Dies ermöglichte ein Verfahren des Laufwagens bei ausgezogenem Zugseil. Dadurch können Schäden während des Vorrückens am verbleibenden Bestand verhindert werden.

Der Syncrofalke kann im Bergauf- und Bergabbetrieb als auch in der Ebene eingesetzt werden. Mit dem Ankauf des Syncrofalken 2,5 to durch den ehemaligen Seilstützpunkt Laubau der Bayerischen Staatsforstverwaltung (StaFO) im Jahr 1998 gab es erstmals ein Mastseilgerät, welches eine Aufarbeitung im Baumverfahren im 3-Mann-Verfahren in der Bayrischen Staatsforstverwaltung ermöglichte.



Abbildung 9: Syncrofalke 2,5 to mit Ladekran Vkran 20.88 und Prozessor Woody 50

Bei einer Aufarbeitung im Baumverfahren reichte die Zugkraft des Syncrofalken 2,5 to im Starkholzbereich nicht immer aus. Die Bäume mussten teilweise abgeschnitten werden, was zu einer Verzögerung des Arbeitsablaufes führte. Mit der Markteinführung des Syncrofalken 4 to im Jahr 2002 wurde dieses Problem beseitigt.

2.3.2. Vom Sortiments- zum Baumverfahren

Im Zuge der Verlegung der Aufarbeitung der Bäume auf die Forststraße wurde das ursprünglich verwendete Sortimentsverfahren in der Rückrichtung bergauf vom Baumverfahren ersetzt.

Beim **Sortimentsverfahren** kommen bei der Holzernte folgende Prozesse vor:

- Fällung, Aufarbeitung und Vermessung der Bäume durch Waldarbeiter mit Motorsäge im Bestand (Sortimentsaushaltung)
- Rückung der Sortimente mit Seilgerät
- Losbildung durch Seil- oder Rückegerät mit Holzzange auf der Forststraße

Beim **Baumverfahren** kommen folgende Prozesse vor:

- Fällung der Bäume durch Waldarbeiter mit Motorsäge auf der Fläche
- Rückung der Bäume mit Seilgerät
- Aufarbeitung und Vermessung der Bäume auf der Forststraße durch Prozessor
- Fließpolterbildung durch den Prozessor mit fortwährender Abfuhr durch Rundholz-LKW

Loschek (1997) nennt folgende grundsätzliche Vorteile des Baumverfahrens im Vergleich zum Sortimentsverfahren:

- Geringer Personalaufwand durch den Prozesseinsatz
- Verkürzte Durchlaufzeiten vom Wald zum Werk
- Geringe Einbußen bei der Holzqualität
- Gute Sortierung und bessere Ausbeute des Rundholzes
- Anpassungsmöglichkeit der Sortimentsausformung während der Hiebsmaßnahme

Ebenso bietet das Baumverfahren Erleichterungen für die Holzernte in der winterlichen Einschlagsperiode. Die Schneehöhe spielt bei einer Rückung im Baumverfahren eine geringere Rolle als bei einer Aufarbeitung im Sortimentsverfahren. Es sind weniger Stücke als beim Sortimentsverfahren anzuhängen und die gefällten Bäume können bei Neuschnee mit ihren Ästen leichter gefunden und angehängt werden (Loschek, 1997).

Bei der Rückung im Baumverfahren haben die Bäume in der Regel Bodenkontakt mit dem Gipfel auf der Seiltrasse. Dadurch wird eine stabile Führung während der Rückung in der Seiltrasse erreicht.

2.4. Arbeitssysteme in Steillagen

Der Anteil der Hiebe in Eigenregie, bei denen die Fällarbeiten und die Aufarbeitung mit eigenem Personal ausgeführt werden, hat sich beim Forstbetrieb MM in den letzten Jahren deutlich reduziert (Abbildung 10).

Bis zu Beginn der 80er Jahre wurde nahezu der komplette Holzeinschlag durch eigene Arbeitskräfte mit Motorsäge aufgearbeitet und mittels Schlepper oder Seilgerät gerückt oder händisch geliefert (Nutzung 1974-2016: 84.275 m³).

Ab dem Jahr 1982 sank der Einschlag mit eigenen Kapazitäten kontinuierlich bis auf zuletzt 18 % ab. Davon wird die Hälfte mit dem betriebseigenen Syncrofalken 3 to im Baumverfahren eingeschlagen. Der Anteil des Unternehmereinsatzes mit einem hohen Anteil an mechanisierter Holzernte stieg von 1988 bis 2016 auf nunmehr fast zwei Drittel des Einschlages an.

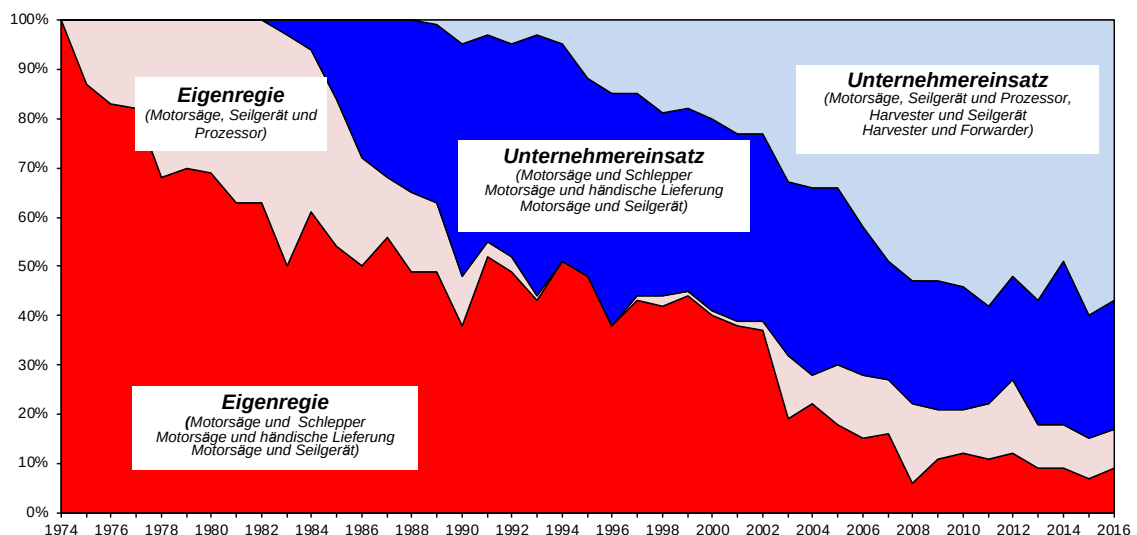


Abbildung 10: Anteil Regie- und Unternehmereinsatz beim Forstbetrieb MM (MM, 2017)

Ähnliche Entwicklungen bei der Durchführung der Holzernte können auch bei den Bayerischen Staatsforsten beobachtet werden. Während sich die Höhe des Einschlages wenig verändert hat (Geschäftsjahr 2006: 4,9 Mio. m³; Geschäftsjahr 2018: 4,8 Mio. m³), sank der Anteil des Einschlages mit eigenen Waldarbeitern von 53 % im Jahr 2006 (2,6 Mio. m³) auf 28 % (1,5 Mio. m³) im Jahr 2018 (Abbildung 11).

Der Anteil des Unternehmereinsatzes, welcher überwiegend maschinell erfolgt, ist von 40 % (2 Mio. m³) im Geschäftsjahr 2006 auf 64 % (3,1 Mio. m³) im Geschäftsjahr 2018 gestiegen. Der Einschlag durch die betriebseigene Forsttechnik liegt bei 4- 5 % (0,2 Mio. m³) und der Anteil an Selbstwerbern bei konstant 3 % (0,1 Mio. m³).

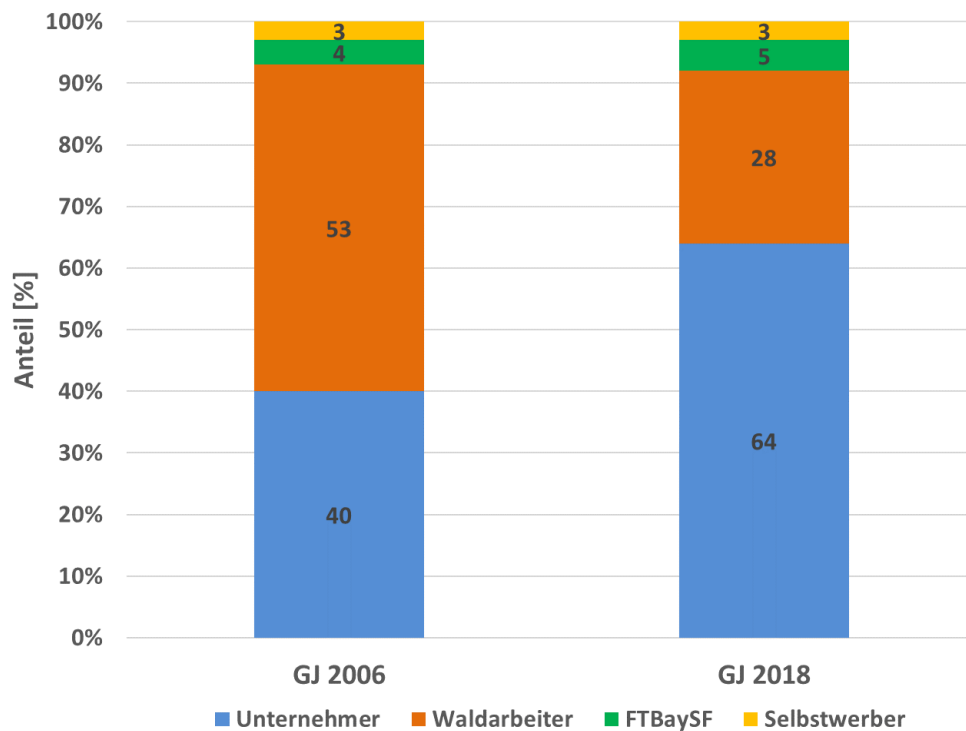


Abbildung 11: Anteile von Fällung und Rückung durch Unternehmer, Waldarbeiter in Eigenregie, betriebseigene Forsttechnik; Unternehmer- und Selbstworbereinsatz bei den BaySF (Geschäftsjahr 2006 und 2018)

Das Hochgebirge der BaySF umfasst eine Fläche von 196.000 ha. Davon sind 143.000 ha Holzboden mit einem Schutzwaldanteil von 66 %. Die Differenzfläche zur Gesamtfläche (53.000 ha) besteht aus Latschenfeldern, Mooren und Felsregionen. Der Anteil der Holzbodenfläche im Gebirge an der BaySF Gesamtfläche beträgt 20 %. Von der Holzbodenfläche (143.000 ha) im Hochgebirge der BaySF stehen 58.000 ha in permanenter Hiebsruhe, 22.500 ha in temporärer Hiebsruhe und 62.500 ha werden regelmäßig bewirtschaftet.

Der Zuwachs im Hochgebirge beträgt ca. 900.000 m³. Als nachhaltiger Hiebsatz wurde im Geschäftsjahr 2014 ein Einschlag von 447.000 m³ geplant, was einem Anteil von 9 % des BaySF Gesamthiebsatzes entspricht (Neft, 2015).

Im Hochgebirge der Bayerischen Staatsforsten wurden im Zeitraum 2008-2017 durchschnittlich 354.684 m³ eingeschlagen. In Folge des steigenden Unternehmereinsatz bei den BaySF ist der Anteil mechanisierter Holzerntesysteme im Hochgebirge bei den BaySF deutlich gestiegen (Abbildung 12).

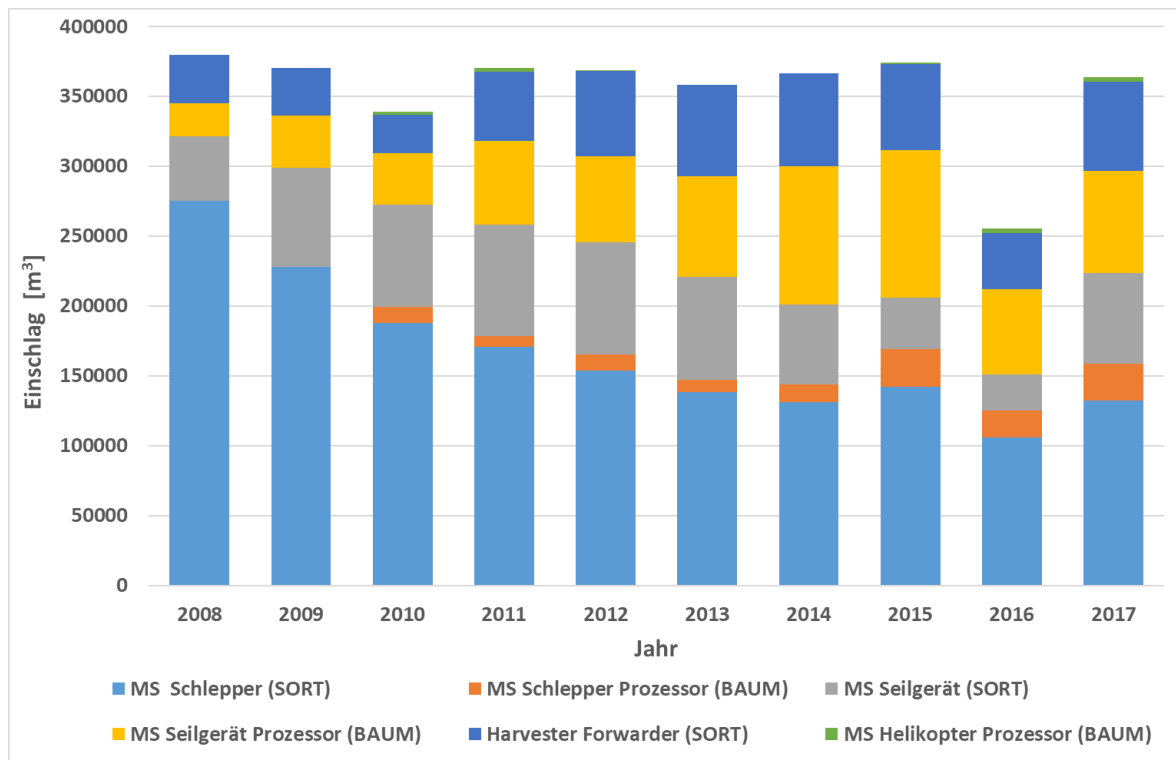


Abbildung 12: Arbeitssysteme im Hochgebirge der BaySF 2008-2017 (BaySF, 2017)

Der Anteil des Einschlags mit Seilgeräten hat sich während den letzten 10 Jahre von 18 % auf 38 % erhöht. Innerhalb des Einschlags mit Seilgeräten hat sich der Anteil der Seilhiebe im Baumverfahren verdoppelt und erreicht den gleichen Anteil wie Einschläge im Sortimentsverfahren. Bei den BaySF werden Seilhiebe in der Rückerichtung bergauf überwiegend im Baumverfahren durchgeführt. Seilhiebe in der Rückerichtung bergab werden, zur Vermeidung von Bestandesschäden, vielerorts im Sortimentsverfahren ausgeführt.

Die vollmechanisierte Aufarbeitung mit Harvester und Rückung durch einen Forwarder ist in den letzten 10 Jahren von einem Anteil von 9 % zuletzt auf 18 % angestiegen. Dieser Anteil liegt deutlich niedriger als beim Forstbetrieb MM.

Die FTBaySF hat im Geschäftsjahr 2017 ca. 95 % der durchgeführten Nutzungen im Seilgelände im Baumverfahren durchgeführt. Ein geringer Teil des Einschlags (5 %) wurde in der Rückerichtung bergab in einem modifizierten Baumverfahren (Aushaltung von Doppel- oder Mehrfachlängen mit Durchführung der restlichen Trennschnitte und Entastung durch den Prozessor) erledigt (FTBaySF, 2017).

Bei der Forsttechnik Steinkogl der ÖBf AG wurden im Geschäftsjahr 2017 nahezu alle Hiebe mit Seilgeräten im Baumverfahren getätigt. Das Sortimentsverfahren wird bei der ÖBf AG Forsttechnik aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht mehr praktiziert (ÖBf AG, 2017).

2.5. Produktivität bei der Holzernte im Baumverfahren

Die Produktivität eines Seilgerätes wird von den Eigenschaften des Erntebestandes, seiner Lage und der vorhandenen Erschließung mit LKW-befahrbaren Forststraßen beeinflusst (Abbildung 13).

Die Geländetopografie mit den vorhandenen negativen Kardinalpunkten (Gräben, Nass- und Felsbereiche) gibt ebenfalls einen Teil der Rahmenbedingungen für die mögliche Erschließung des Bestandes mit Seiltrassen vor. Die Hangneigung und Begehrbarkeit des Bestandes (natürlicher Bewuchs, Tragfähigkeit und Beschaffenheit des Bodens) spielen für die Waldarbeiter eine wichtige Rolle.

Die Dimension der Bäume und die Art der waldbaulichen Auszeige durch den Förster beeinflussen maßgeblich die Produktivität eines Seilgerätes. Die passende Seiltechnik (Windenleistung, Reichweite und Montagefreundlichkeit), die trassierte Seilführung (Trassenlänge, Trassenabstand, Montageaufwand) sowie die Tragseilhöhe wirken sich ebenso auf die Produktivität eines Mastseilgerätes aus.



Abbildung 13: Einflussgrößen auf die Produktivität im Baumverfahren

Erfolgt die geplante Nutzung schematisch (schlitz-, femel-, oder kahlschlagartig), haben die Zufäller eine höhere Leistung, was indirekt die Produktivität einer Seilanlage fördert. Bei einer einzelstammweisen Nutzung mit schwierigen Fällbedingungen in einem dichten Altbestand (Gefahr von Baumhängerbildung während der Fällung) und in Verbindung mit langen Laufwegen für die Mitarbeiter kommt es zu einer Verringerung der Produktivität.

Die Zusammensetzung des Bedienpersonals und deren Fähigkeiten haben einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität eines Seilgerätes (Abbildung 13). Werden möglichst viele dieser Faktoren berücksichtigt und eine geeignete Technik mit geübtem Personal eingesetzt, ermöglicht dies eine produktive, umweltverträgliche und zugleich kostengünstige Holzernte in Steillagen.

In der forstwissenschaftlichen Literatur finden sich unterschiedliche Angaben über die Produktivität eines Seilsystems im Baumverfahren (Tabelle 1).

Die Produktivität in der Durchforstung ist aufgrund des geringeren Baumvolumens erwartungsgemäß niedriger als bei Einsätzen in der Verjüngungsnutzung. In Abhängigkeit vom jeweiligen Baumvolumen konnte in der Durchforstung eine Produktivität von 6 bis 12 m³/PSH₁₅ beobachtet werden.

Loschek (2013) identifizierte den Baumdurchmesser (BHD) des ausscheidenden Bestandes, die Rückedistanz und die Rückerichtung als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Erntekosten bei der Durchforstung im Baumverfahren. Anhand der Produktionsdaten konnte für die Rückerichtungen bergauf und bergab eine Erntekostenfunktion für das Baumverfahren in der Durchforstung hergeleitet werden, wobei die Erntekosten in der Rückerichtung bergab um ca. 8 €/m³ höher waren. In der Untersuchung wurde in der Rückerichtung bergauf bei einem BHD von 18 cm die Kosten vom durchschnittlichen Holzerlös (50 €/m³) gedeckt.

Tabelle 1: Produktivität im Baumverfahren in der Rückerichtung bergauf

Seilgerät	Zugkraft [kN]	Baum- volumen [m ³]	Produktivität [m ³ /PSH ₁₅]	Eingriffsart	Quelle
Turmfalke	1,5	0,28	6-8	Durchforstung	Toplitsch (1992)
Syncrofalke	3	0,68	7,9-8,6	Durchforstung	Limbeck-Lilienau (2000)
Wanderfalke	1,5	0,59	5,3-5,8	Durchforstung	Viertler (2003)
Wanderfalke	1,5	0,28	6,7	Durchforstung	Stampfer (2003)
Syncrofalke	3	0,64	11,5	Durchforstung	Stampfer (2003)
Syncrofalke	3	0,68	11,5	Verjüngung	Karlon und Loschek (2017)
KMS 4000	4	2,0	15,8	Verjüngung	Frutig et al. (2007)
Koller K 507	4	1,9	17,0	Verjüngung	Frutig et al. (2007)

Die beobachtete Produktivität in der Verjüngungsnutzung lag bei den untersuchten Einschlügen im Baumverfahren, in Abhängigkeit vom eingesetzten Seilgerät und vom gemessenen Baumvolumen in der Rückerichtung bergauf zwischen $11,5 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ und $17 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$.

2.6. Bestandespfleglichkeit bei der Holzernte im Baumverfahren

Das Ausmaß und die Auswirkungen entstandener Schäden nach einer durchgeführten Holznutzung, kann über das Verhältnis an geschädigten Bäumen zu der Gesamtzahl an verbleibenden Bäumen und über die beobachtete Schadensgröße beurteilt werden (Meng, 1978).

Ein Baum gilt als geschädigt, wenn er nach einem Eingriff eine oder mehrere Beschädigungen (Rinden- oder Wurzelschäden) von einer Mindestgröße von 10 cm^2 aufweist. Die Aufnahme von Bestandesschäden wird häufig nach dem von Meng (1978) vorgeschlagenen Aufnahmeverfahren ermittelt. Schon Kudjelka (1977) wies nach, dass die Schädigung des verbleibenden Bestandes unabhängig vom Rückverfahren mit zunehmender Hangneigung steigt. Meng (1978) sowie Butora und Schwager (1986) stellten fest, dass ältere und größere Bäume leichter verletzt werden, und dass mit der Baumstärke auch die Schadensgröße steigt. Diese Autoren wiesen auch einen Zusammenhang zwischen Erntezeitpunkt und Bestandesschäden nach. Bei Sommernutzungen sind die Schäden größer und intensiver als im Winter.

Limbeck-Lilienau (2002) untersuchte die Bestandesschäden im Baumverfahren bei der Arbeit mit einem Syncrofalken. Im Sommer wurden zwischen 22-32 % des Restbestandes geschädigt und im Winter 25-39 %. Bei einer Bergabrückung entstanden in der Durchforstung nicht mehr Schäden als bei einer Bergaufrückung. Die Größe, Art und Lage am Baum unterschied sich zwischen Sommer- und Wintereinschlägen. Im Sommer waren die Beschädigungen der Bäume 30 % größer als im Winter und es wurde ein wesentlich höherer Anteil an Wurzelschäden festgestellt.

Viertler (2003) untersuchte die Schäden im Baumverfahren. Über alle Trassen waren etwa 10 % der verbleibenden Bäume geschädigt. Die Schadensanalyse ergab, dass jede zweite Verletzung im Stammbereich auf über einem Meter Höhe entstanden war. Als Schadursache dafür ermittelte er die Fällung. Vier von zehn Schäden hatten eine Größe von $10\text{-}50 \text{ cm}^2$. Bei 50 % der Verletzungen war das Holz freigelegt.

Stampfer (2002) definierte folgende Schadenspräferenzwerte für die einzelnen Arbeitssysteme:

- Harvester und Forwarder von 10 %
- Arbeitssystem, Harvester und Seilgerät von 15 %
- Seilrückung im Baumverfahren von 20 % bis maximal 30 %

Die beobachteten Schadprozente am verbleibenden Bestand im Baumverfahren lagen zwischen 10 bis 39 % und im Sortimentsverfahren zwischen 14 bis 34 % (Tabelle 2).

Tabelle 2: Baumbeschädigungen bei der Seilrückung

Arbeitsverfahren	Anteil geschädigter Bäume	Quelle
Sortimentsverfahren	34 %	Butora und Schwager (1986)
Baumverfahren	29-39 %	Fairweather (1991)
Sortimentsverfahren	14-20 %	Han und Kellog (1997)
Sortimentsverfahren	14 %	Steinmüller und Stampfer (2000)
Baumverfahren	22-39 %	Limbeck-Lilienau (2002)
Baumverfahren	10 %	Viertler (2003)

Bei strikter Einhaltung der Fällordnung können nach Viertler (2003) bei der Holzernte im Baumverfahren Schadenswerte von maximal 10 % erreicht werden. Dies liegt im Bereich der Schadenspräferenzwerte von Stampfer (2002) beim Arbeitssystem Harvester und Forwarder.

2.7. Arbeitsbelastung und Arbeitsbeanspruchung

Die Arbeitsbelastung und -beanspruchung der Mitarbeiter bei der seilgestützten Holzernte wurde von Stampfer et al. (1997) bei einzelnen Teilarbeiten in Steillagen untersucht.

Bei der Holzernte treten hohe **Belastungen** bei Arbeiten mit der Motorsäge und beim Rücken mit dem Seilgerät auf.

Beim Arbeiten mit der Motorsäge kommt es zu einer hohen Abgasbelastung. Die Ergebnisse der durchgeführten Abgasuntersuchung zeigten eine deutliche Kohlenmonoxid-Belastung der Mitarbeiter. Beim Fällschnitt traten die größten Belastungen auf. Der Mittelwert für mehrere Schichten ergab 19,9 (konventioneller Kraftstoff) bzw. 15,6 ppm (Alkylatkraftstoff) CO, womit der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) für CO von 30 ppm (aktueller Grenzwert 20 ppm) nicht überschritten wurde. Im Untersuchungszeitraum konnten auch keine Überschreitungen des KZW-Wertes (Kurzzeitwert) festgestellt werden. Die Auslöseschwelle (7,5 ppm) als Hinweis für die Notwendigkeit von Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit wurde allerdings erreicht, was arbeitsgestalterische Maßnahmen erforderlich macht.

Durch den Einsatz von Alkylatkraftstoff konnte die CO-Belastung um 27,5 % verringert werden. Durch die Verwendung von Sonderkraftstoffen kann ein wesentlicher Beitrag zu Humanisierung der Waldarbeit unter Gebirgsbedingungen erreicht werden. Bei den BaySF wurden Sonderkraftstoffe aus Gründen des Gesundheitsschutzes im Jahr 2013 verpflichtend eingeführt und den Mitarbeitern nebst Motorsäge kostenlos zur Verfügung gestellt.

Als zweite wichtige Belastungsgröße wurde der Lärm der Motorsäge identifiziert. Im Rahmen von Lärmuntersuchungen bei Arbeiten mit der Motorsäge wurde ein durchschnittlicher Tages-Leq von 100 dB(A) festgestellt. Der Geräuschpegel folgte sehr exakt dem Drehzahlverlauf und der höchste Sekunden-Leq während des Aufnahmetages trat bei der Fällung mit 114 dB(A) auf. Dies ist eine kritische Größe angesichts der beobachteten geringen Tragehäufigkeit von Gehörschutzmaßnahmen. Nach Stampfer et al. (1997) kann die Lärmbelastung der Mitarbeiter durch eine verstärkte Aufklärungsarbeit und eine aktive Kontrolle vom Tragen des persönlichen Gehörschutzes verringert werden. Das Tragen eines Gehörschutzes wird inzwischen von den Mitarbeitern der BaySF akzeptiert und auch konsequent befolgt.

Rottensteiner (2014) untersuchte die Auswirkungen von Vibrationen auf die Mitarbeiter bei manuellen und maschinellen Holzerntemaßnahmen sowie bei maschinellen Arbeiten im Bereich Wegebau. Nach derzeitigem Wissensstand besteht dabei keine Gesundheitsgefahr für den Maschinisten eines Mastseilgerätes mit einem Belastungswert von $0,3 \text{ m/s}^2$. Dies liegt deutlich unter dem zulässigen Grenzwert. Beim Einsatz von Motorsägen in der Holzernte überschreiten diese den Auslösewert von $2,5 \text{ m/s}^2$ für Vibrationen, nicht aber den Expositionsgrenzwert von $5,0 \text{ m/s}^2$, wobei die Vibrationen am hinteren Handgriff der Motorsäge stärker als am Bügel sind. Durch ein Nachschärfen der Kette oder das Auswechseln einer stumpfen Kette konnten die Vibrationen deutlich reduziert werden.

Für den Maschinisten eines Seilgerätes kann die Arbeitsbelastung durch den Einsatz von dem Stand der Technik entsprechenden Mastseilgeräten reduziert werden. So sollte das Anlanden (z.B. vergrößerte Plattformen) und das Abhängen (z.B. Ladekran, Funkchokerschlingen) erleichtert werden. Durch schallgeschützte Arbeitskabinen können die Belastungen durch Lärm und Vibration vermieden werden.

Als zusätzliche Maßnahmen könnte durch Job-Enrichment die Belastungen für das Team eines Seilgerätes verringert werden. Im Zuge des Job-Enrichment können Arbeiten für die Einsatzvorbereitung (Trassierung, Auszeige) und Zuarbeiten für den Holzverkauf (Zuarbeit zur Frachtlogistik, Holzvermessung, Qualitätskontrolle) erledigt werden.

Diese Arbeiten können mit einem geringeren körperlichen Einsatz umgesetzt werden, was zu einer Verringerung der Gesamtbelastung der Mitarbeiter führt. Die Qualifikationsanforderungen an die einzelnen Mitarbeiter des Teams steigen dadurch auf ein gleichmäßiges hohes Niveau an, was in der Folge auch eine Angleichung der Lohnhöhe der einzelnen Mitarbeiter mit sich bringt und damit die Arbeitszufriedenheit der Mannschaft des Seilgerätes fördert.

Bei den BaySF sind nach einer Einarbeitungsphase alle Mitarbeiter eines Mastseilgerätes in der gleichen Lohngruppe eingeteilt.

Anhand der Herzfrequenz wurden die **Beanspruchung** der Waldarbeiter während den Fällarbeiten mit der Motorsäge im Sortiments- wie im Stammverfahren untersucht. Im Gegensatz zur Fällung und Aufarbeitung im Sortimentsverfahren, bei der beträchtliche Überschreitungen der Dauerleistungsgrenze während der Gesamtarbeitszeit aufgetreten sind, bewegten sich die Waldarbeiter im Stammverfahren knapp an bzw. unter diesem Grenzwert. Für den Durchschnitt aller Waldarbeiter ergab sich eine Überschreitung der Dauerleistungsgrenze von 45 %. Nach Stampfer et al. (1997) sind deshalb arbeitsgestalterische Maßnahmen für den Motorsägenführer vorzunehmen. Durch eine gezielte und ausreichende Pausengestaltung können Spitzenbelastungen bei Arbeiten mit der Motorsäge reduziert werden.

Im Rahmen der Untersuchung wurde die Beanspruchung der Mitarbeiter während den Rückearbeiten im Sortiments- wie im Stammverfahren anhand der Herzfrequenz untersucht. Bei den Arbeitstakten, Vorbereiten der Last sowie Gehen im Gelände mit oder ohne Chokerschlingen wurde beim Anhänger eine hohe Beanspruchung beobachtet. Im Stammverfahren konnten sogar Überschreitungen der Dauerleistungsgrenze beim Mitarbeiter, während 57 % der Gesamtarbeitszeit, festgestellt werden. Die höchsten Herzfrequenzen entstanden bei der Lastbildung, dem Ausziehen des Zugseils und beim Gehen im Gelände. Im Gegensatz zum Anhänger lag die Belastung beim Maschinisten deutlich unter der Dauerleistungsgrenze.

Bei der Rückung mit Seilgeräten sind nach Stampfer et al. (1997) arbeitsgestalterische Maßnahmen für den Anhänger zwingend notwendig. Dies kann durch eine Job-Rotation zwischen Maschinisten und Anhänger erfolgen. Durch den Einsatz von Laufwägen mit aktiver Zugseilausspaltung kann eine deutliche Verbesserung der Beanspruchung für den Anhänger erreicht werden. Aus ergonomischen Überlegungen sollte nach Stampfer et al. (1997) der Einsatz von zwei Anhängern erwogen werden. Durch die Verwendung von Kunststoffseilen kann die Arbeitsbeanspruchung der Mitarbeiter um bis zu 30 % reduziert werden (Stampfer et al., 2010). Abspannseile aus Kunststoff können im Gegensatz zu Stahlseilen von einem Mann ausgezogen werden und reduzieren vor allem bei der Bergaufrückung die Beanspruchung der Mitarbeiter.

2.8. Arbeitsunfälle in der Seiltechnik

2.8.1. Arbeitsunfälle bei den BaySF

Im Jahr 2009 haben die Bayerischen Staatsforsten ein eigenes Arbeitsschutz-Management System entwickelt und durch die Gewerbeaufsicht nach OHRIS (Occupational Health- and Risk-Managementsystem) zertifizieren lassen.

Als konkretes Ziel für den Arbeitsschutz wurde für alle Betriebe das Ziel „Null Unfälle bei der Waldarbeit“ ausgegeben. Der Arbeits- und Gesundheitsschutz ist bei den BaySF als hochrangiges Betriebsziel definiert. Zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit müssen im Zweifelsfall ökologische oder ökonomische Betriebsziele in den Hintergrund treten (BaySF, 2013). Im Bereich der Seilrückung der ehemaligen Bayerischen Staatsforstverwaltung wurden Arbeitsunfälle am Seilstützpunkt Laubau registriert, dokumentiert und für den Zeitraum von 1970-2005 ausgewertet worden (Wolf, 2017).

Die Daten wurden hinsichtlich Unfallursache, Verletzungsart und Schwere der Verletzungen (Tabelle 3) ausgewertet und von Wolf (2017) präsentiert. Besonders schwere Unfälle ereigneten sich im Zusammenhang mit Totholz, welches entweder bei der Fällung unkontrolliert zu Boden fiel oder seitlichen Beizug unter Spannung kam und plötzlich durch die Luft wirbelte. Die von Totholzteilen getroffenen Mitarbeiter wurden fallweise im Rückenbereich getroffen und teilweise schwer verletzt. Durch einen plötzlichen Seilriss kam es sogar zu einem tödlichen Unfall.

Tabelle 3: Unfälle bei der Bayerischen Staatsforstverwaltung 1970-2005 (Wolf, 2017)

Unfallursache	Verletzungsart	Verletzungsschwere
Ausrutschen	Zerrungen, Prellungen	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus
Abfallende Lasten	Prellungen, Brüche	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus
Beschädigte Seile	Stiche, Schnitte	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus
Seilriss	Prellungen, Brüche	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus, Todesfall
Steinschlag	Prellungen, Wunden	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus
Totholz	Prellungen, Brüche	Erste Hilfe, Arztbesuch, Krankenhaus

In der Unfalldatenbank der FTBaySF (BaySF, 2017) wurden im Zeitraum 2005-2017 für die FTBaySF insgesamt 54 Unfälle registriert.

Im Bereich der Seiltechnik der FTBaySF haben sich in diesem Zeitraum sechs leichte bis mittelschwere Unfälle ereignet. Bei Montagearbeiten kam es zu 2 Unfällen durch herabfallende Gegenstände und durch das Ausschlagen von unter Spannungen stehenden Bäumen. Es kam zu Prellungen, Wunden und einem Rippenbruch.

Die anderen Unfälle entstanden durch ein Ausrutschen der Mitarbeiter (4 Unfälle) auf nassen und glitschigen Untergrund in Verbindung mit liegendem Totholz. Die Mitarbeiter rutschten während der Bewegung im Gelände aus. Sie hatten Werkzeuge, Motorsäge, Kraftstoffkanister oder Ausrüstung in den Händen und konnten sich daher nicht mehr rechtzeitig abstützen. Dadurch kam es zu Prellungen und Zerrungen an den Armen und Beinen.

Zur Vermeidung von Rutschunfällen im schwierigen Gelände wurde den Mitarbeitern kostenlos steigeisenfestes Schuhwerk mit Tricouni-Beschlägen sowie Steigeisen für den Winter zur Verfügung gestellt.

Durch die Vorgabe alles gefährdende Totholz im Trassen- und Vorrückungsbereich vorausschauend zu fällen, konnten die in der Vergangenheit aufgetretenen schweren Arbeitsunfälle durch unter Spannung stehendes Totholz, bislang erfolgreich verhindert werden.

Im Durchschnitt wurden von den Seilanlagen der BaySF 21.000 m³/Jahr oder insgesamt 244.500 m³ aufgearbeitet und gerückt. Die registrierten 6 Unfälle im Bereich der Seiltechnik entsprachen einer Unfallquote von 25 Unfällen bezogen auf einen Einschlag von 1 Mio. m³. Der Einschlag in den letzten 12 Jahren der 5 Seilgeräte der BaySF wurde überwiegend durch schlitzartige Eingriffe in der Verjüngungsnutzung realisiert.

Die Holzernte im Schlitzverfahren ist forsttechnisch betrachtet, komplizierter als ein Einschlag im Kahlschlagbetrieb. Prinzipiell müssten deshalb mehr Unfälle als bei einer Holzernte im Kahlschlagbetrieb entstehen.

Im Vergleich zu den dokumentierten Arbeitsunfällen bei der ÖBf AG (Unfallquote 37 Unfällen/1 Mio. m³) war die Unfallquote bei den BaySF mit 25 Unfällen/1 Mio. m³ geringer. Der Holzeinschlag im Schlitzverfahren bei den BaySF war statistisch betrachtet, sicherer als der Holzeinschlag im Kahlschlag bei der ÖBf AG.

2.8.2. Arbeitsunfälle bei der ÖBf AG

Im Forsttechnikbereich der ÖBf AG (Betriebe Steinkogel und St. Johann) ereigneten sich im Zeitraum 2001-2008 im Durchschnitt jedes Jahr 11 Unfälle. Bei einem Gesamteinschlag von 2,4 Mio. m³ entspricht dies einer Unfallquote von 37 Unfällen/1 Mio. m³.

Tageszeitlich gesehen gab es bei den Arbeitsunfällen zwei Schwerpunkte. In der Zeit vor der Mittagspause (10 bis 11 Uhr) sowie unmittelbar nach der Mittagspause (14 bis 15 Uhr) gab es auffallend viele Unfälle (Abbildung 14).

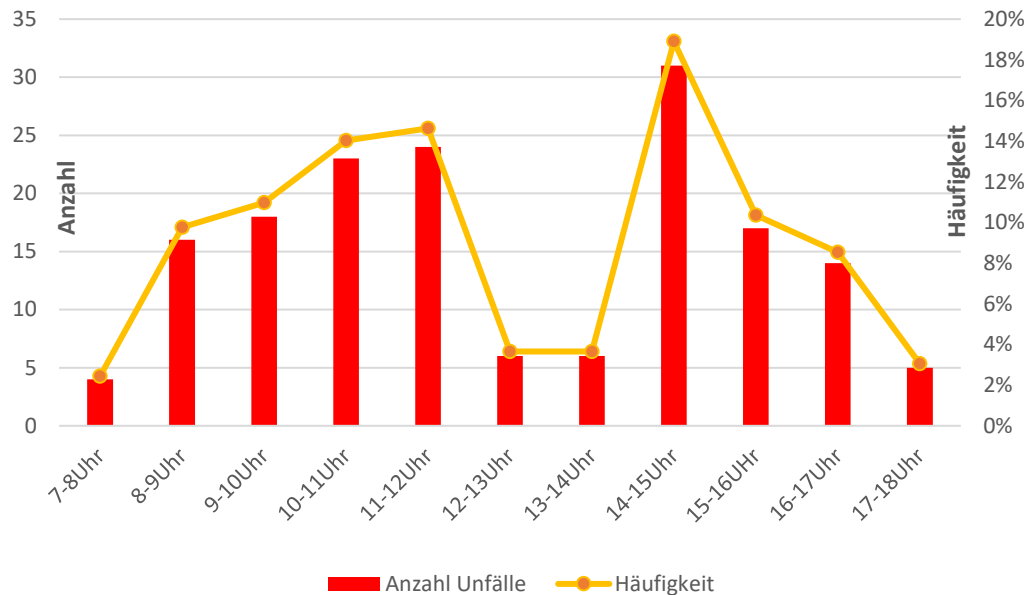


Abbildung 14: Anzahl/Anteil der Seilunfälle im Tagesverlauf bei den ÖBf (Eiwegger, 2010)

Knapp 60 % der Unfälle ereigneten sich während des Seilbetriebs und 40 % der Unfälle bei Montagetätigkeiten, sowie bei Reparaturen und Wartung. Ein Großteil der Unfälle (64 %) entstand in Zusammenhang mit schnellenden Seilen, herabfallenden Gegenständen und bei der Montage, sowie durch nachgebende Ankerbäume (Abbildung 15).

Weitere Unfallschwerpunkte waren Verletzungen durch herabfallende Lasten (12 %), Abstürze von Mitarbeitern bei Steigerarbeiten (12 %), Stiche durch abstehende Seillitzen (5 %) und sonstige Ursachen (7 %). Zur Verbesserung der Arbeitssicherheit, sollte ein besonderes Augenmerk auf eine angepasste Lastenbildung und eine fachkundige Auswahl geeigneter Stützen- und Ankerbäume gelegt werden. Verschlossene Seile sind rechtzeitig auszutauschen, um die Unfallursache Stichschäden zu verringern.

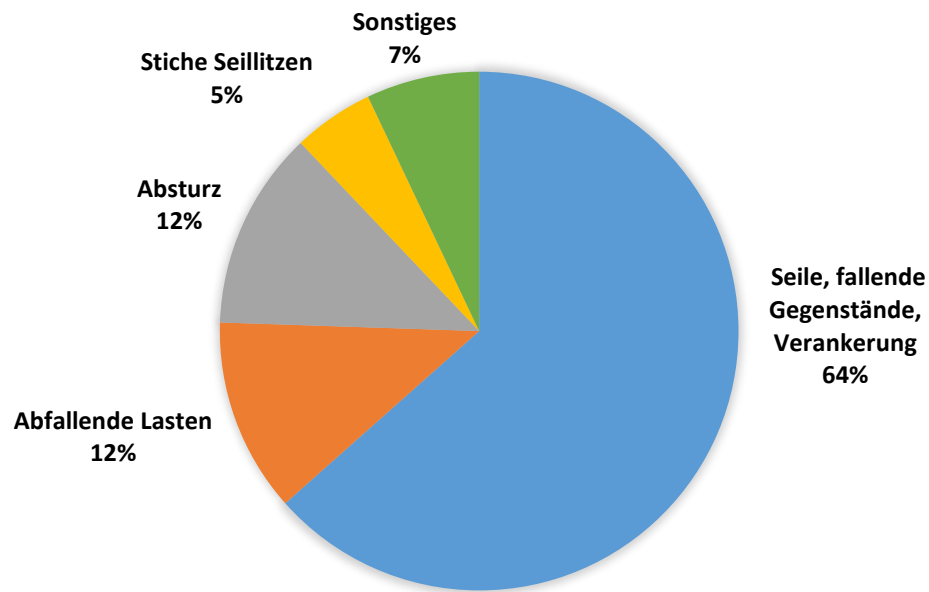


Abbildung 15: Unfallursachen bei der Seilrückung bei den ÖBf (Eiwegger, 2010)

Betrachtet man die Unfallschwere und deren Auswirkungen, entstanden die längsten Ausfallzeiten und damit die schwersten Unfälle durch herabfallende Lasten oder Lastteile bzw. durch Absturz von Mitarbeitern bei Steigerarbeiten während der Montage der Seilanlage. Ein Unfall hatte im Durchschnitt 18 Ausfalltage zur Folge (Eiwegger, 2010).

3. SCHLITZVERFAHREN

3.1. Erste schlitzartige Verjüngungseingriffe

Trepp berichtete in den 1950er Jahren über eine reichlich ankommende Naturverjüngung auf Seiltrassen in Verjüngungsbeständen (Wunder und Brang, 2003). Er schlug vor „schmale schlitzartige Bestandeslücken“ anzulegen, um dadurch eine Bestandesverjüngung zu erreichen.

Laut Ott (1997) soll in der Erneuerungsphase für Hochlagen-Schutzwälder das Kronendach gezielt geöffnet werden, um die Ansamung und den Anwuchs der nächsten Bestandesgeneration einzuleiten. Abgeleitet von der aus Stabilitätsgründen erwünschten Rottenstruktur des Bergwaldes, soll das Kronendach in Größe ganzer Rotten („Bienenwaben-Struktur“ mit einem Standflächendurchmesser von 12 m) geöffnet werden. Die Art der Öffnung, die geometrische Anordnung und die Größe der Kronenöffnungen sind auf die standörtlichen Besonderheiten abzustimmen. Vielfach genügt der Licht- und Wärmeeinfall zum Ansamen nicht, und in diesen Fällen sollen schmale Schlitz mit einer Breite von $< 0,5$ Baumlängen und einer Länge von $> 1,5$ Baumlängen in Richtung der Morgensonne angelegt werden (Abbildung 16).

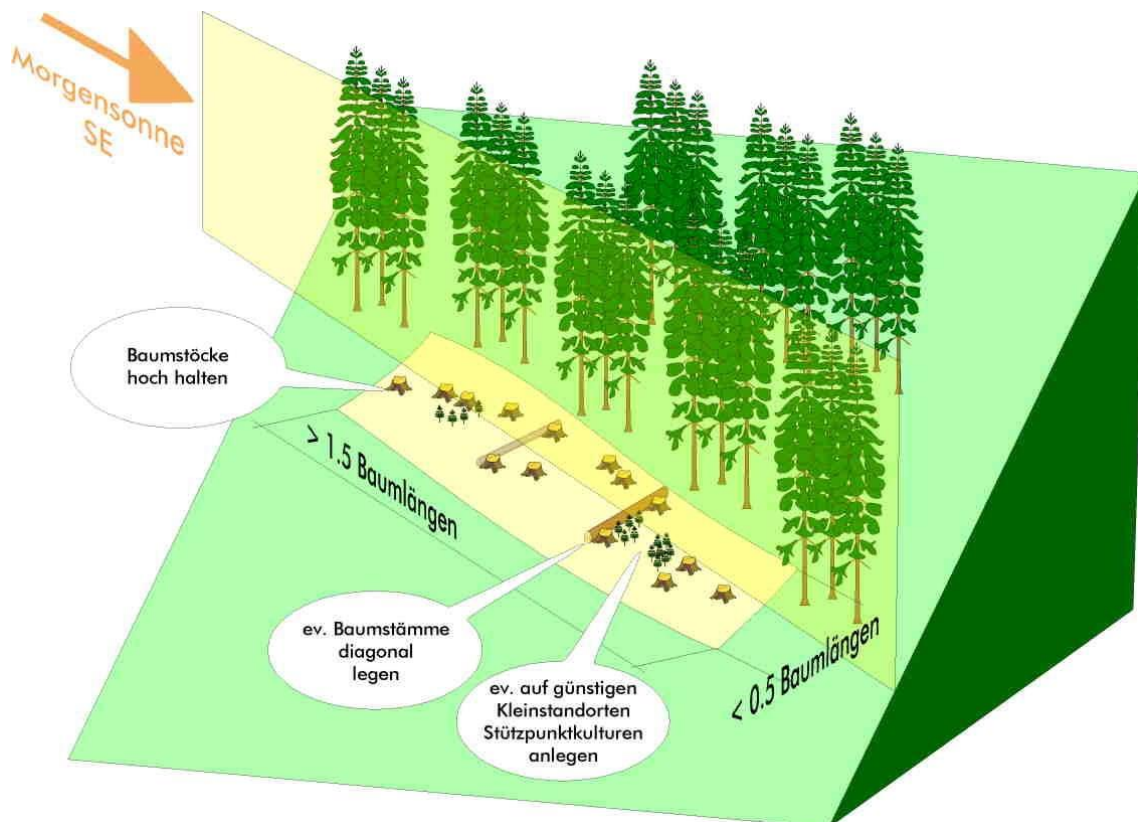


Abbildung 16: Prinzipskizze eines Verjüngungsschlitzes (Ott, 1989)

In den Jahren 1992 und 1996 wurden im Forstkreis Ilanz im Bündner Vorderrheintal 50 Verjüngungsschlitze in Schutzwäldern geschlagen und in der Folge wissenschaftlich begleitet (Wunder und Brang, 2003). Im Rahmen einer Kontrollaufnahme konnte eine erfolgreiche Naturverjüngung auf den Schlitzen beobachtet werden. Die vorgefundene Baumartenverteilung entsprach der natürlichen Zusammensetzung von Nadelwäldern der subalpinen Stufe. Die Verjüngung in den Schlitzen bestand im Aufnahmejahr 2011 zu 72 % aus Fichte und zu 28 % aus Vogelbeere.

Hirsinger et al. (2013) kommen im Rahmen einer Wiederholungsaufnahme der Schlitze zu dem Ergebnis, dass schlitzförmige Bestandesöffnungen geeignet sind, die Verjüngung der Fichte in höheren Lagen einzuleiten. Die Verjüngungsdichte war 20 Jahre nach dem Aushauen der Schlitze deutlich höher als im angrenzenden Altbestand.

Aufgrund von positiven, praktischen Erfahrungen innerhalb der BaySF mit schlitzartigen Eingriffen in montanen Bergmischwäldern (Abbildung 17) wurde das Schlitzverfahren als waldbaulich-forsttechnisches Optimalverfahren für die Verjüngung von Gebirgswäldern der BaySF entwickelt und evaluiert.

Bei der Entwicklung des Schlitzverfahrens bei den BaySF wurden im Rahmen des Prozesses Concurrent Engineering folgende waldbauliche Forderungen berücksichtigt:

- Strukturierter, stabiler Bestandesaufbau
- Natürliche Verjüngung der Hauptbaumarten des Bergmischwaldes
- Ernte von Bäumen bei Erreichen des Zieldurchmessers (BHD >60 cm)
- Vorratskorridor (400-500 m³/ha) in Abhängigkeit vom Standort
- Möglichkeit der Einbringung von Mischbaumarten
- Geringe Kultur- und Pflegekosten nach der Nutzung
- Vermeidung von Freiflächenklima, Erosion und Humusschwund
- Hohes Resilienzvermögen des Bestandes gegenüber Schadereignissen

Die Forderung des Waldbaus auf eine möglichst kleinflächige Verjüngung des Bestandes kann durch die Begrenzung der Nutzung auf die Bestandesschlitze umgesetzt werden. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse in den Schlitzen führt zu einer natürlichen Verjüngung aller Baumarten des Bergmischwaldes (Abbildung 17).

Auf den Schlitzen können bei Bedarf fehlende Mischbaumarten gepflanzt werden. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse in den Schlitzen reduzieren die Kultur- und Pflegekosten durch eine natürliche Differenzierung der Verjüngung unter dem Schirm des Altbestandes. Die vorhandene Naturverjüngung in den Schlitzen erhöht darüber hinaus das Resilienzvermögen des Gebirgswaldes im Hinblick auf Kalamitäten.



Abbildung 17: Naturverjüngung Bergmischwald im Schlitz. FB Berchtesgaden/Revier Weißbach

Die Holznutzung wird beim Schlitzverfahren auf 25 % der Fläche begrenzt, was hilft die Bestandesstabilität zu erhalten und die Bestandesschäden zu reduzieren (Ohain, 2017). Ein für das Wachstum von Jungbäumen hinderliches Freiflächenklima oder ein Humusschwund nach Kahlschlag kann ebenfalls verhindert werden.

Wird auf der Fläche der Zielvorrat von 500 m³/ha erreicht, kann wieder eine Nutzung erfolgen. Bei einer zuwachsorientierten Bewirtschaftung innerhalb des Zielvorratskorridor kann das Wuchspotential auf der ganzen Bestandesfläche genutzt werden.

Nach einem Kahlschlag dauert es im Gebirgswald bis zu 60 Jahre, bis eine Durchforstung mit einem positiven Deckungsbeitrag durchgeführt werden kann. Bei einer zuwachsorientierten Nutzung im Schlitzverfahren, unter Beachtung des Zielvorrates, kann ein praktischer Nutzungsverzicht bis zu einer ersten kosten-deckenden Durchforstung im Alter von 60 Jahren vermieden werden.

3.2. Das Schlitzverfahren

3.2.1. Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf

Zu Beginn der Entwicklung des Schlitzverfahrens wurde versucht eine waldbaulich wie forsttechnisch möglichst optimale Ausformung und Verteilung der Schlitze zu entwickeln. Die bislang gemachten praktischen Erfahrungen mit Bestandesschlitzten wurden in hochmontanen bis subalpinen Schutzwaldlagen gemacht. Vorrangiges Ziel war es, eine geeignete Schlitzausformung zu finden. Die ausgezeichneten Bäume sollten von den Mitarbeitern gut zu fällen und mit dem Mastseilgerät einfach zu rücken sein und dies bei möglichst geringen Bestandesschäden. Innerhalb der Schlitze sollen die Bäume von der Seiltrasse weg und parallel zum Schlitzverlauf gefällt werden.

Gute Ergebnisse wurden mit einer Schlitzlänge von einer Altbaumlänge und einer Schlitzbreite von einer halben Altbaumlänge erreicht. Die Bestandesschlitzte werden wechselseitig verteilt entlang der Seiltrasse, in den zu verjüngenden Bestand geschlagen (Abbildung 18). Der Abstand der Schlitze entlang der Seiltrasse soll etwa eine Baumlänge betragen. Der Seiltrassenabstand im Schlitzverfahren beträgt in der Verjüngungsnutzung zwei Altbaumlängen oder ca. 60 m.

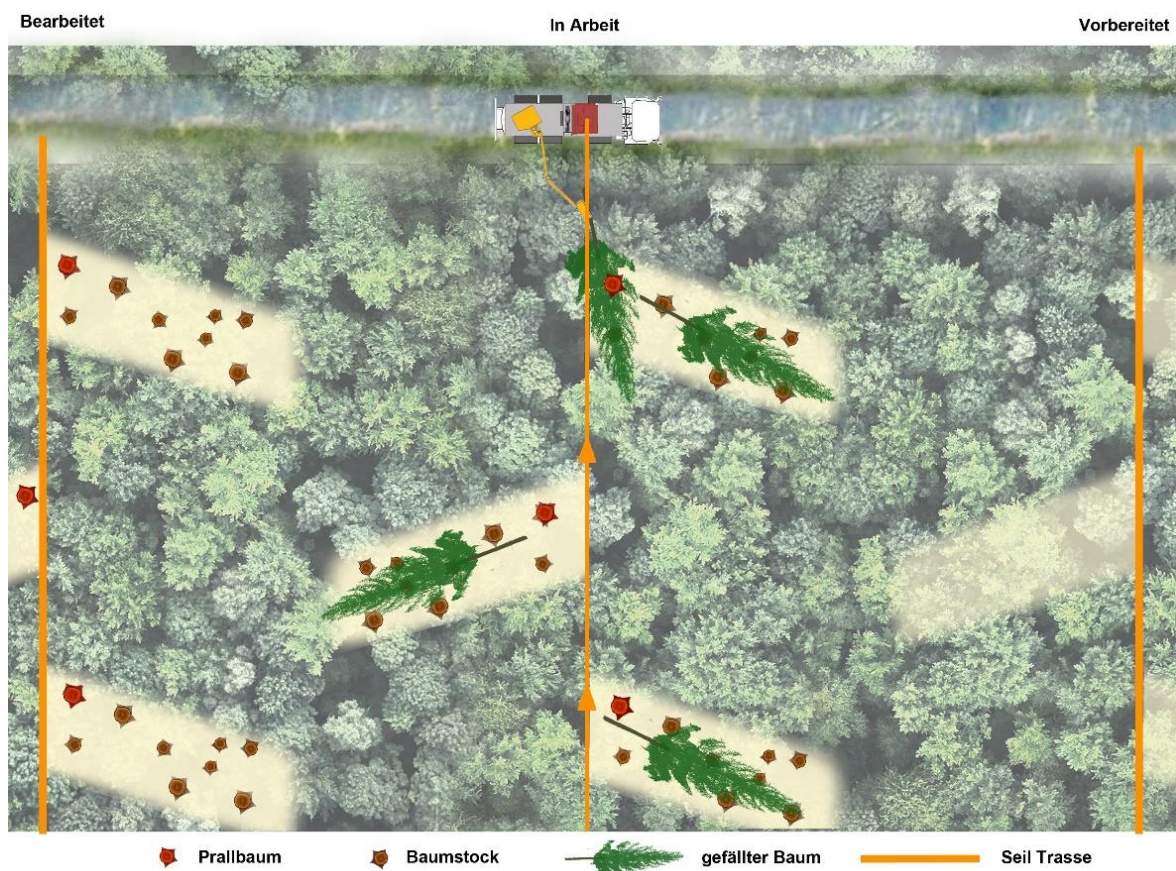


Abbildung 18: Erstanlage der Verjüngungsschlitze entlang der Seiltrasse (Erster Eingriff)

Bei entsprechender Anordnung können drei Verjüngungsschlitze je Hektar in den Altbestand geschlagen werden. Bei einem durchschnittlichen Bestandesvorrat von $500 \text{ m}^3/\text{ha}$ ergibt sich bei der erstmaligen Anlage der Bestandesschlitze zusammen mit dem anfallenden Trassenholz ($25 \text{ m}^3/\text{ha}$) eine Entnahmemenge von ca. $120 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Zur Reduzierung von Rückeschäden am verbleibenden Bestand werden die Schlitze in der Rückerichtung bergauf fischgrätenartig von oben nach unten verlaufend angelegt und ein Prallbaum (als roter Stock dargestellt) an der Seiltrasse belassen. Der Prallbaum verhindert ein Beschädigen des verbleibenden Bestandes beim Einschwenken der Bäume in die Seiltrasse. Er kann nach dem erfolgten Eingriff bei erheblichen Beschädigungen geerntet werden.

Durch das erhöhte Lichtaufkommen auf den Schlitzen kommt es zu einer natürlichen Verjüngung auf der Eingriffsfläche. Sobald die Verjüngung im Schlitz gesichert ist, wird dieser in einem zweiten Eingriff seitlich und längs erweitert (Abbildung 19). Bei diesem Eingriff werden zusätzlich entlang der Seiltrasse hiebsreife Stämme der Zielstärke von BHD $>60 \text{ cm}$ entnommen. Dadurch wird das Aufkommen der natürlichen Verjüngung im Bereich der Seiltrasse nochmals gefördert.

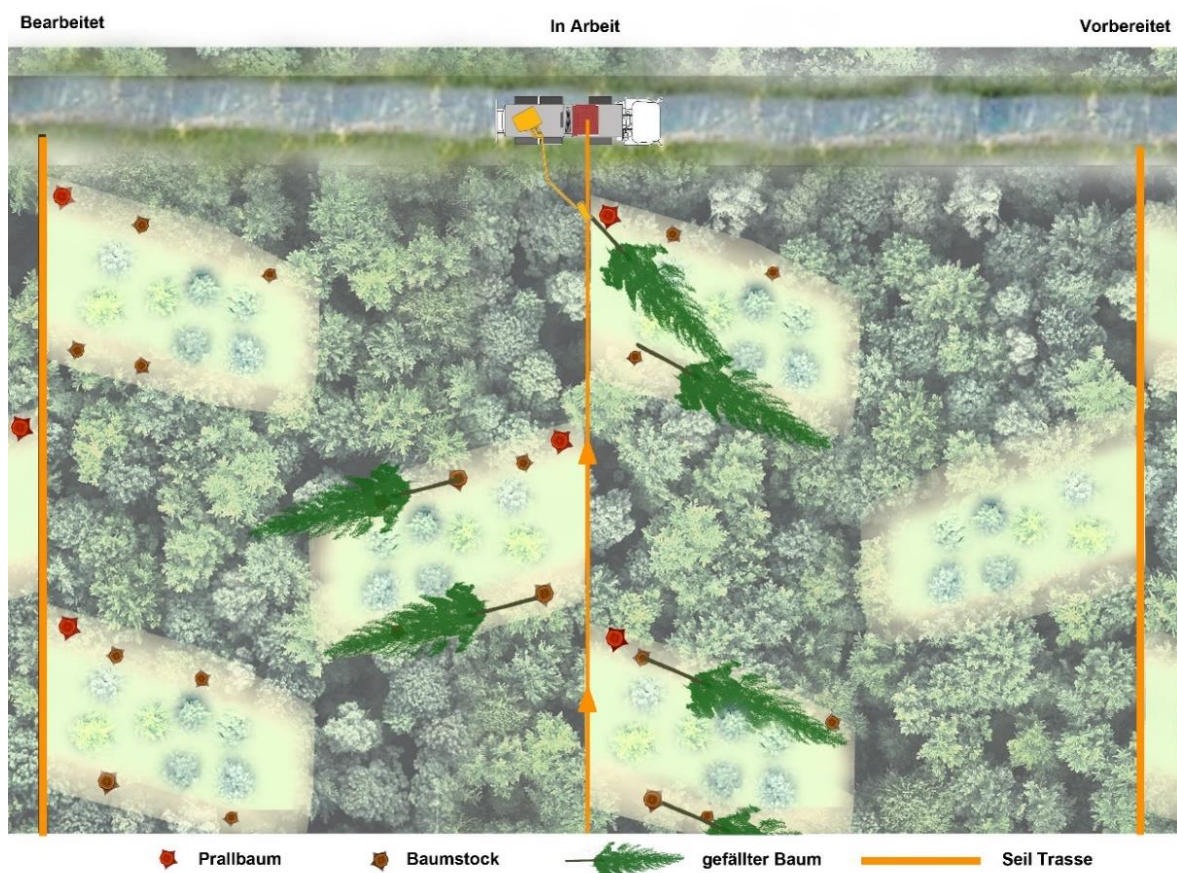


Abbildung 19: Erweiterung der Schlitze zur Förderung der Verjüngung (Zweiter Eingriff)

Zur Schonung der bereits vorhandenen Verjüngung bei einem Nachlichten der Schlitzte im zweiten Eingriff werden die ausgezeichneten Bäume vor der Montage des Tragseils gefällt. Die Montage des Tragseils erfolgt über die bereits gefällten Bäume. Eventuell erforderliche Stützenbäume müssen bereits vor dem Einschlag ausgewählt werden, um ein ungewolltes Fällen zu vermeiden. Bäume mit großen Kronen werden mit dem Gipfel zur Seiltrasse aufeinander gefällt, um die Naturverjüngung zu schonen. Beim Vorrücken der Bäume werden die sperrigen Gipfel durch den Hubeffekt des höher montierten Tragseiles schnell nach oben gezogen, was hilft Schäden an der Verjüngung zu reduzieren. Durch die Möglichkeit den Laufwagen während der Vorrückung auf dem Tragseil zu versetzen, können Schäden am verbleibenden Bestand begrenzt werden.

Zu Beginn der nächsten Hiebsmaßnahme sind die Seiltrassen mit einer üppigen Naturverjüngung, bestehend aus den Bäumen des Bergmischwaldes, überzogen. Bei einem dritten Eingriff werden die bereits mit Naturverjüngung bedeckten Seiltrassen aufgegeben und in die Zwischenräume neue Seiltrassen gelegt (Abbildung 20). Zusätzlich zum anfallenden Trassenholz, werden entlang der neuen Seiltrassen hiebsreife Bäume im Rahmen der Zielstärkennutzung mit einem BHD von >60 cm entnommen.

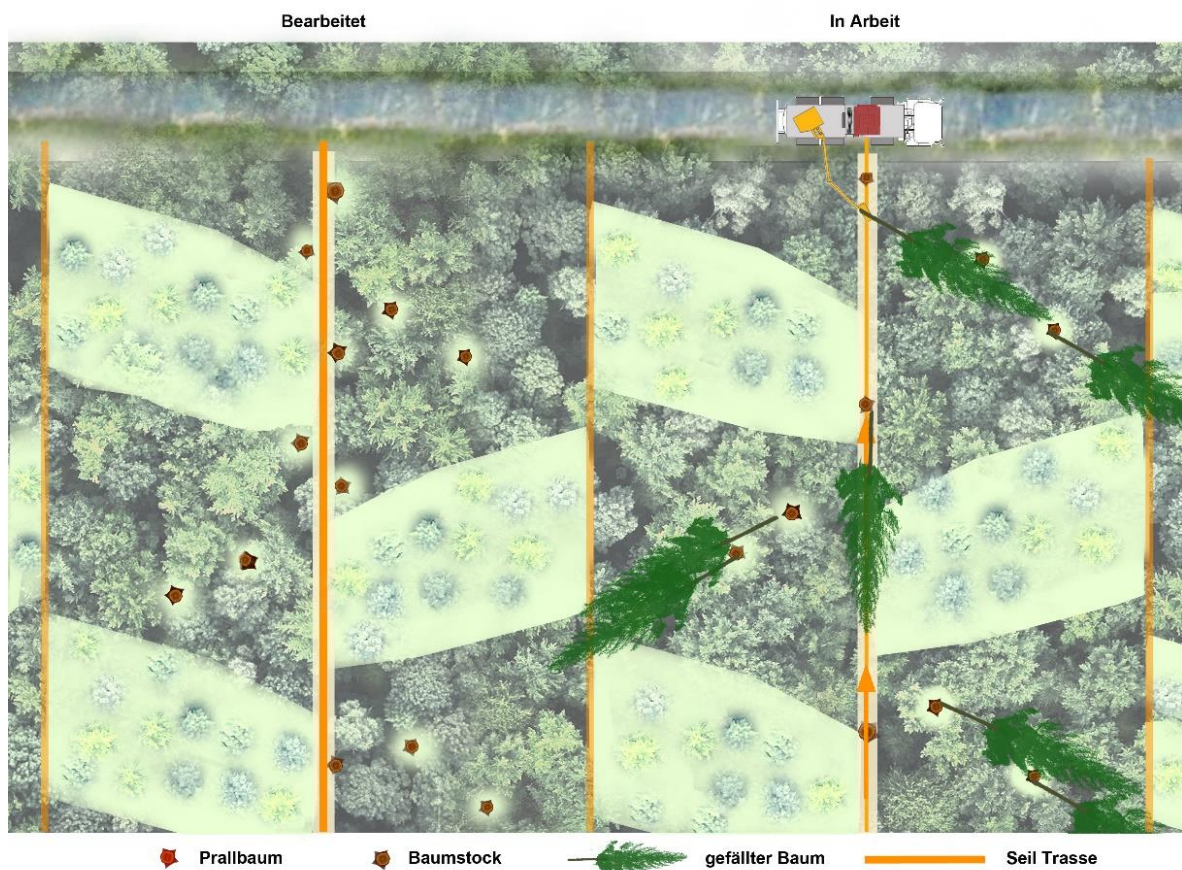


Abbildung 20: Verlegung der Seiltrassen und Zielstärkennutzung (Dritter Eingriff)

Auf den in der Vergangenheit bereits bearbeiteten Schlitzen hat sich inzwischen eine Naturverjüngung von Fichte, Tanne und Buche etabliert, welche in den Folgebestand übernommen werden kann.

Danach werden im vierten Schritt neue Bestandesschlitz in vorratsreiche Bestandesteile mit wenig vorhandener Naturverjüngung eingelegt (Abbildung 21). Durch die Neuanlage der Schlitz kommt es auch in diesen Bereichen zu einer Verjüngung der Baumarten des Bergmischwaldes. Allmählich entstehen auf der ganzen Bestandesfläche fließende Übergänge aller Entwicklungsphasen des Bergmischwaldes.

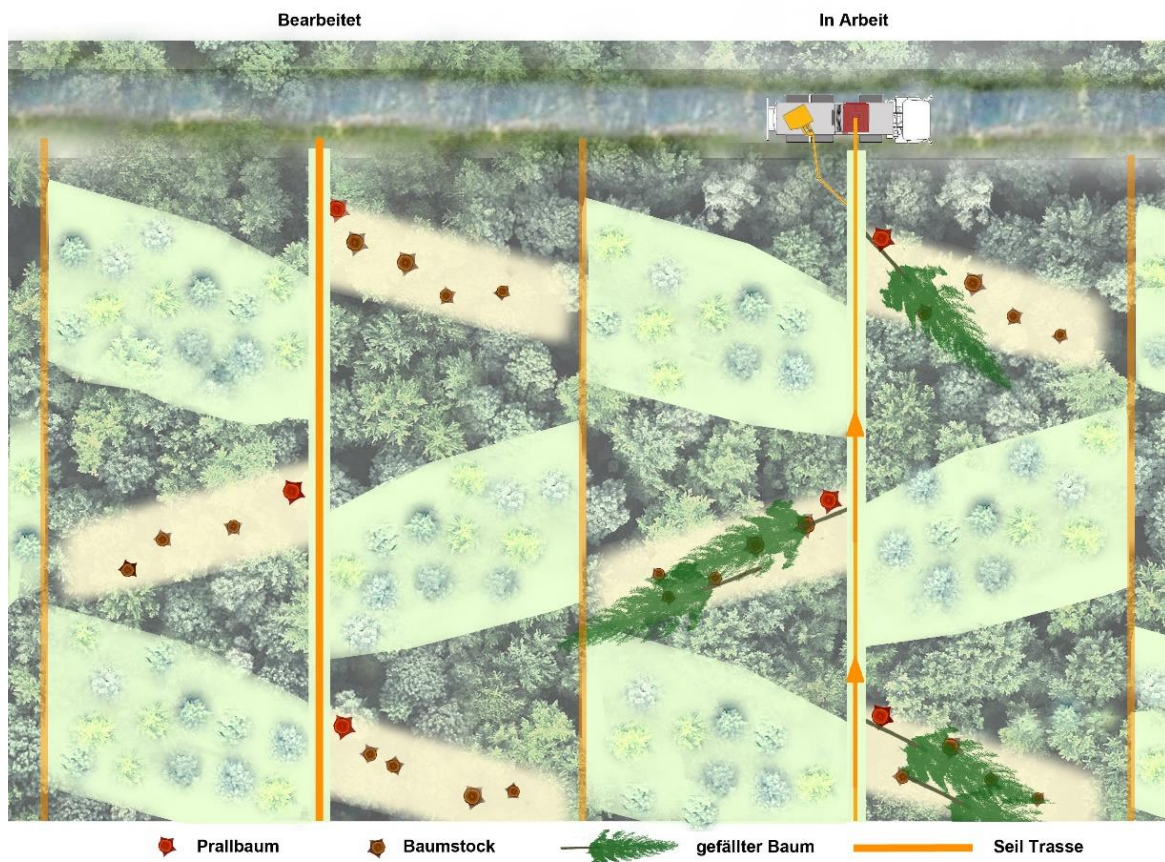


Abbildung 21: Schlitzanlage in vorratsreichen Zwischenräumen (Vierter Eingriff)

3.2.2. Schlitzverfahren in der Rückrichtung bergab

Im Gegensatz zu der Rückrichtung bergauf werden die Schlitz in der Rückrichtung bergab mit einer in der Hangrichtung nach unten verlaufender Ausrichtung eingelegt (Abbildung 22).

Der Prallbaum befindet sich am unteren Ende des Schlitzes. Durch die ausschließliche Nutzung in den Bestandesschlitz fallen im Restbestand kaum Bestandesschäden an. Eine Nutzung ist deshalb auch in der Saftzeit möglich. Die Neigung der Schlitz sollte der Hangneigung angepasst werden.

In besonders steilen Hängen ist aus Gründen der Arbeitssicherheit nur eine geringe Neigung der Schlitzze bei der Anlage zu wählen. Die weiteren Eingriffe erfolgen analog zu den beschriebenen Eingriffen in der Rückerichtung bergauf.

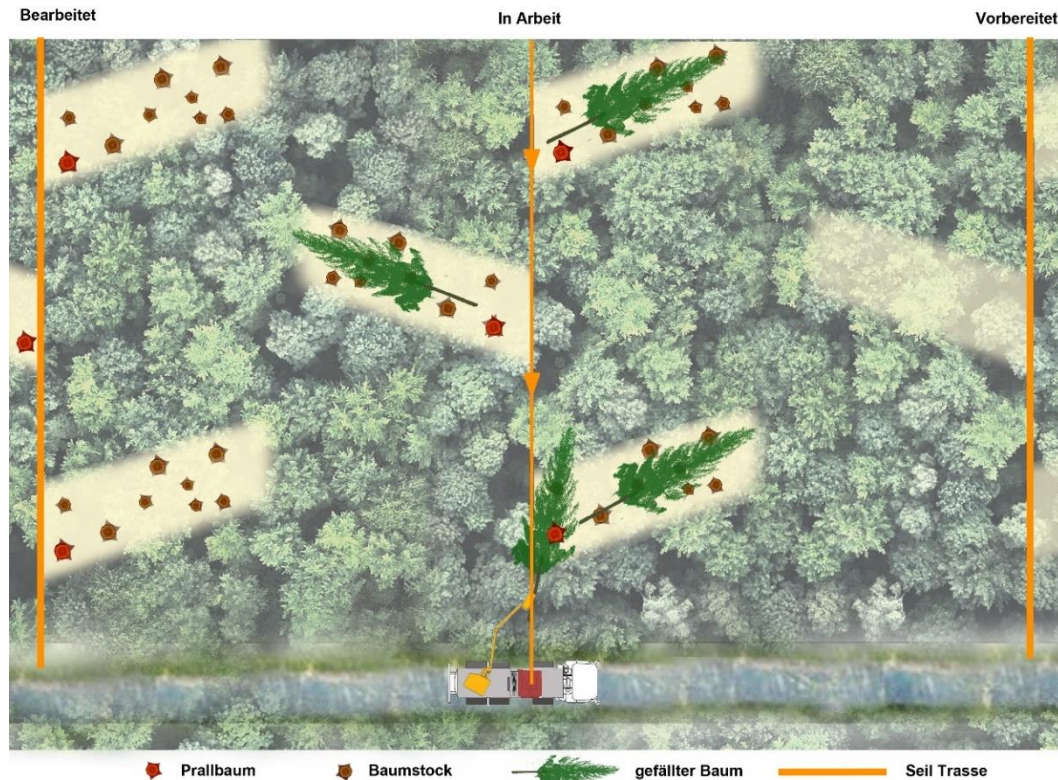


Abbildung 22: Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergab (Umkehrung des Schlitzverlaufes)

3.2.3. Nachhaltige Nutzung beim Schlitzverfahren

Erfolgt beim Schlitzverfahren die Nutzung in Höhe des, seit dem letzten Einschlag akkumuliertem Bestandesvorrates, so kann auf der einzelnen Bestandesfläche nachhaltig wertvolles Baumholz geerntet werden.

Entsprechend den waldbaulich geplanten Nutzungsmöglichkeiten des Bestandes werden Schlitzze in den Verjüngungsbestand eingelegt. Die Fällung der Bäume erfolgt durch Waldarbeiter mit der Motorsäge. Die Bäume werden vom Seilgerät gerückt und mit dem Kranprozessor des Seilgerätes aufgearbeitet. Wird bei den einzelnen Eingriffen nicht mehr als der seit dem letzten Eingriff akkumulierte Bestandeszuwachs entnommen, so stabilisiert sich der Bestandesvorrat innerhalb einer Zielspanne von 400-500 m³/ha. Bei diesem Bestandesvorrat beträgt der laufende Zuwachs ca. 9 m³/ha. Nach dem Zeitraum von 15 Jahren kann erneut eine Nutzung mit ca. 125 m³/ha erfolgen.

Nach der Holzernte kommt es zu einer natürlichen Verjüngung der Baumarten des Bergmischwaldes auf den Schlitzen. Durch die unterschiedlichen Lichtbedingungen unter dem Schirm des Altbestandes differenziert sich diese weitgehend selbstständig. Die Naturverjüngung kann bei Bedarf im Hinblick auf die gewünschte Baumartenzusammensetzung im Rahmen einer Pflege unter Schirm (PUS) durch die betriebseigenen Waldarbeiter gepflegt werden. Bei Bedarf wird eine ergänzende Pflanzung auf den Schlitzen durchgeführt (Abbildung 23).



Abbildung 23: Nutzungsablauf beim Schlitzverfahren

3.3. Vorteile des Schlitzverfahrens

Bei der Verjüngung von Gebirgswäldern im Schlitzverfahren können **ökonomische Vorteile** (Abbildung 24) genutzt werden. Die Erntekosten sind geringer als bei einer einzelstammweisen Nutzung auf ganzer Fläche. Eine Holzernte im Schlitzverfahren kann in beiden Rückerichtungen bestandesschonend durchgeführt werden. Die Seilrückung kann auch während Nassphasen bodenschonend angewendet werden. Eine Begrenzung der Nutzung auf den laufenden Zuwachs ermöglicht eine nachhaltige Bewirtschaftung des Bergmischwaldes auf der gesamten Bestandesfläche. Im Gegensatz zu einer Nutzung im Kahlschlagbetrieb kommt es zu keinem Nutzungsverzicht wegen zu schwacher Baumdimensionen, der bei diesem Verjüngungsverfahren bis zur ersten kostendeckenden Durchforstung im Alter von 65 Jahren Usus ist.

Durch die dauerwaldartigen Strukturen entfallen die Nachteile einer Kahlschlagwirtschaft (Kulturkosten, Pflegekosten, Baumartenverlust und verstärkte Erosion).

Das Schlitzverfahren bietet für eine Waldbewirtschaftung in Steillagen auch **ökologische Vorteile**. Mit geübtem Personal kommt es zu geringen Bestandeschäden. Gut eingearbeitete Waldarbeiter können Bestandesschäden bei den Fällarbeiten durch Einhaltung der Fällordnung bei der Anlage der Schlitze vermeiden. Beim Einschwenken der Bäume von den Schlitzen in die Seiltrasse, während der Rückung, können Schäden durch Festlegung von Prallbäumen am Rande der Schlitze vermieden werden.

Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse auf der Fläche ermöglichen das Etablieren einer für den Bergmischwald typischen Naturverjüngung aus Fichte, Tanne und Buche. Das Landschaftsbild wird bei einer Nutzung im Schlitzverfahren kaum beeinträchtigt. Großflächige Kahlschläge hingegen werden von weiten Teilen der Bevölkerung Deutschlands als negativ empfunden.



Abbildung 24: Vorteile des Schlitzverfahrens

Das Schlitzverfahren hat für den Revierleiter und die Waldarbeiter **ergonomische Vorteile**. Das Auszeichnen der Schlitze lässt sich für den Förster mit einem geringen Aufwand durchführen. Bei der Auszeichnung kommt es darauf an, die Verteilung der Schlitze im Bestand und deren Anzahl festzulegen. Dadurch reduzieren sich die Auszeichnungszeiten erheblich. Die Schlitze entlang der Seiltrasse sind für die Waldarbeiter leicht zu finden und die Laufwege reduzieren sich im Vergleich zu einer Nutzung auf der ganzen Fläche. Die Bäume lassen sich in den Schlitzen einfach fällen und es kommt zu wenig Aufhängern im Zuge der Fällarbeiten der Waldarbeiter mit der Motorsäge.

Das Schlitzverfahren kommt an seine Grenzen bei sturmexponierten, wechselfeuchten oder instabilen Standorten. Dort kann es nach einer Schlitzanlage im Zuge von Schadereignissen zu einer vorzeitigen Bestandesauflösung kommen. In solchen Fällen bieten sich saumartige Verjüngungseingriffe gegen die Hauptwindrichtung an, um die Bestandesstabilität nicht zu gefährden.

3.4. Arbeitssicherheit beim Schlitzverfahren

Für eine möglichst unfallfreie Holzernte im Schlitzverfahren ist es unerlässlich, die bestehenden Gefahren mit den Mitarbeitern zu besprechen. Bei den BaySF wird dazu vom zuständigen Einsatzleiter (Förster, Forstwirtschaftsmeister) bei Beginn des Einsatzes ein schriftlicher Arbeitsauftrag erstellt und mit der Mannschaft des Seilgerätes gemeinsam besprochen und unterschrieben (Einsatzleiter und Vorarbeiter des Seilgerätes).

Der Arbeitsauftrag besteht aus einer:

- situativen Gefährdungsanalyse
- Arbeitstechnische Vorgaben für eine sichere Fällung, Rückung und Aufarbeitung
- Vorgaben für die Aushaltung des Rundholzes
- Information und Einweisung in die Rettungskette mit Rettungsplan

Darüber hinaus wurden von den BaySF (2018) Betriebsanweisungen im Anhalt an die Empfehlungen von FHP (2011) erarbeitet. Die Inhalte der Betriebsanweisungen werden jährlich bei der Personalversammlung mit den Mitarbeitern besprochen. Für den Bereich Seiltechnik wurden bei den BaySF Betriebsanweisungen formuliert, welche in den wichtigsten Passagen wiedergegeben werden.

Bei der Bedienung eines Seilgerätes treten folgende Gefahren auf:

- Seilbruchgefahr aufgrund von Materialermüdung oder Überlastung
- Versagen der Ankerpunkte von Mast und Seilen
- Einknicken von Stützenbäumen oder künstlicher Stützen
- Herabfallen der Last während der Rückung

Bei der Aufarbeitung des Holzes können Gefahren auftreten:

- Zusammenarbeit von Fäller und Anhänger im Sicherheitsbereich
- Fällung von Bäumen mit Motorsäge in schwierigem Gelände
- Ungewollte Fällung auf das Tragseil während des Seilbetriebes
- Fällung von Bäumen während der Seilarbeiten
- Ausschlagendes Totholz während des seitlichen Beizugs der Bäume
- Ausschlagende Baumteile während der Rückung
- Abrollende Stämme bzw. abgleitende Steine im Bestand
- Kettenschuss beim Prozessorbetrieb

Zur Vermeidung von Unfällen werden zwei Gefahrenbereiche gebildet:

- **roter Bereich** Aufenthaltsverbot für alle Mitarbeiter
- **grüner Bereich** Aufenthaltsbereich Mitarbeiter

Unter Spannung stehende Seile können plötzlich nachgeben oder abreißen. Bei einer Holzernte im Baumverfahren in beiden Rückerichtungen besteht ein grundsätzliches Aufenthaltsverbot unterhalb des Trageisls sowie im Bereich beidseits des Laufwagens während dem Beizug von Bäumen. Bei Holzerntemaßnahmen im Baumverfahren in der Rückerichtung bergab besteht zusätzlich die Gefahr, dass das belastete Rückholseil bei einem plötzlichen Seilriss oder Rollenbruch ausschlägt oder seine Lage verändert. Daher ist zu diesem Seil stets ein entsprechender Abstand einzuhalten.

Eine Absicherung durch dazwischenstehende Bäume kann erfolgreich Unfälle verhindern (Abbildung 25).

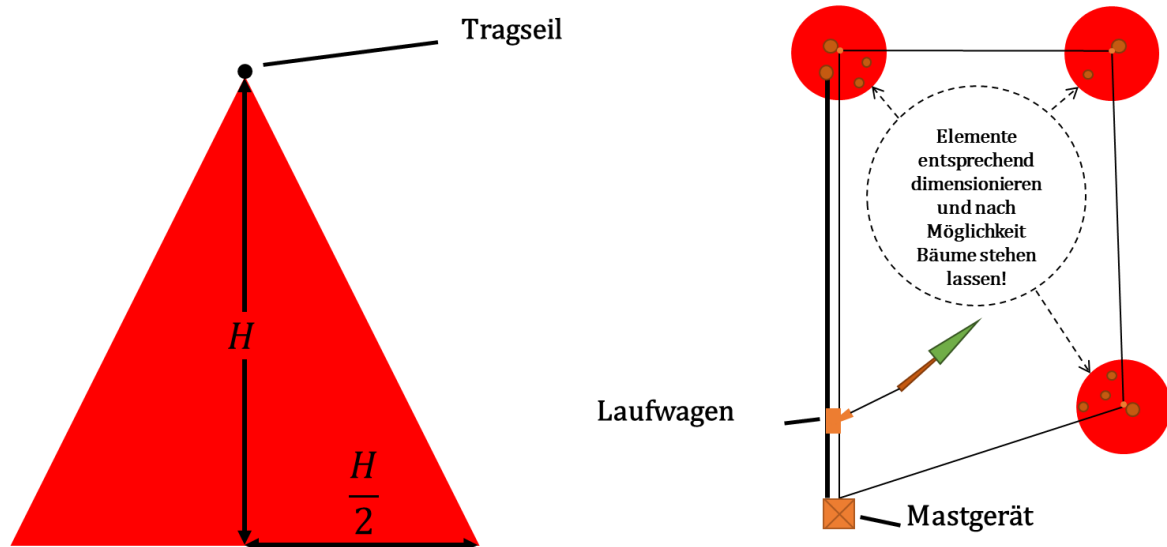


Abbildung 25: Definition des Gefahrenbereichs gespannter Seile (links) und Gefahrenbereiche beim Aufenthalt im Innenwinkel eines belasteten Seils (nach FHP, 2011)

Bei der Anlage von Schlitten in der Rückerichtung bergab ist darauf zu achten, dass es beim Vorrücken zur Seiltrasse zu einer Beschleunigung der angehängten Bäume kommen kann. So können während dem Vorrücken liegende Baumteile oder Steine ins Rollen gebracht werden, welche Mitarbeiter oder das Mastseilgerät gefährden (Abbildung 26). Wichtig ist der Erhalt des Bodenkontaktes der Bäume mit dem Gipfel, um ein sicheres Rücken bergab zu ermöglichen. Aus Gründen der Arbeitssicherheit sind in der Rückerichtung bergab die Stützen besonders langsam zu überqueren. Gleiches gilt für Hänge mit Blocküberlagerung oder Hangneigungen in Steilhängen von über 50-60 % in der Rückerichtung bergab. In solchen Fällen empfiehlt es sich die Seiltrasse bewusst nicht im Lot zur Forststraße zu wählen, um das Seilgerät mit Maschinisten nicht zu gefährden.

Unfälle können bei Montagearbeiten durch folgende Maßnahmen vermieden werden:

- Situative, sorgfältige Gefährdungsbeurteilung (Baumbeurteilung)
- Nutzung ausreichend belastbarer Ankerpunkte
- Anschlagpunkt nicht übersteigen
- Ständige Sicherung im absturzgefährdeten Bereich
- Einsatz geeigneter Ausrüstung (PSA) gegen Absturz
- Der Gefahrenbereich ist vor dem Abwerfen oder Abseilen von Objekten zu überprüfen und ein Warnruf ist abzugeben.
- Bei Arbeiten an Stromleitungen Sicherheitsabstand von mindestens 5 m
- Bei Geräteeinsatz sichere und stabile Arbeitsposition einnehmen
- Bei Gefahr der Seildurchtrennung (z.B. durch Handsäge) ist eine durchtrenngeschützte Sicherung zu verwenden
- Erprobte Knoten und Endverbindungen verwenden, Seilenden sichern
- Nur selbst blockierende Einstellvorrichtungen verwenden
- Karabinerhaken mit mindestens zwei Bewegungen zum Öffnen verwenden
- Die Ausrüstung ist vor, während und nach der Benutzung zu überprüfen
- Defekte Ausrüstung oder schadhafte Teile sofort austauschen
- Ausrüstung jährlich von einem Sachkundigen überprüfen lassen

Neben den Montagearbeiten besteht während der **Fällung** der Bäume mit der Motorsäge und der **Lastbildung** gefällter Bäume durch den Anhänger ein hohes Unfallrisiko.

Durch folgende Maßnahmen können Unfälle beim Fällen und Rücken der Bäume beseitigt werden:

- Stehendes Totholz bei Auftrieb der Trasse im Bereich von 5 m beiderseits des Tragseiles vor den Rückarbeiten vollständig entfernen
- Gefährdendes Totholz im Fäll- und Zuzugsbereich vorausschauend fällen
- Liegendes Totholz / Stämme im Fällungsbereich kleinschneiden
- Anhänger hält sich ab Beginn des Fällschnittes in der Rückweiche auf
- Sichere und bewährte Fällmethoden wählen mit folgenden Ausnahmen:
 - Bruchstufe nicht zwingend erforderlich (Abziehen angelehnter Bäume durch das Seilgerät möglich)
 - Anlage einer negativen Bruchstufe (Hänger)
 - Für eine gemeinsame Lastbildung dürfen angelehnte Bäume kurzfristig belassen werden
 - Weitere Bäume dürfen nur angelehnt werden, wenn diese außerhalb des Gefahrenbereichs bereits angelehnter Bäume stehen
 - Kein Aufenthalt im Gefahrenbereich angelehnter Bäume
- Seilauslegung ohne Schlingen- und Knickbildung
- Last sicher befestigen (Chokerseile verwenden)

- Beim seitlichen Vorrücken die Last beobachten, bis diese in die Seiltrasse eingeschwenkt ist
- Seitlichen Zuzug der Last erst auslösen, wenn sich Fäller und Anhänger außerhalb des Gefahrenbereiches befinden
- Störungen sofort dem Maschinisten anzeigen
- Bei Seilschäden, Spannungsverlust eines Seiles die Anlage sofort abstellen,
- Bei Ausfall des Kommunikationssystems Kontakt zu den Arbeitskollegen aufnehmen, ggfs. Arbeit einstellen
- Eindringen von Hydraulikölen in die Umwelt unterbinden
- In Wasserschutzgebieten bei Ölschaden den Forstbetrieb sofort informieren
- Tägliche Überprüfung der Betriebssicherheit der Seilanlage (z.B. Stützenbäume, Abspannung, verwendete Geräte)
- Keine Hydrauliköl-Leck Suche, wenn Hydrauliksystem unter Druck steht
- Beschädigte Hydraulikleitungen umgehend austauschen

Der **Seilgeräte-Maschinist** hat eine zentrale Rolle für eine sichere Holzernte im Baumverfahren. Er steuert das Mastseilgerät, bedient den Kranprozessor und ist für die Aufarbeitung und das Aushaltung der Bäume verantwortlich. Dadurch beeinflusst er direkt die Wertschöpfung des Holzernteprozesses. Bei plötzlichen Störungen (Tragseilbruch, Seilrisse, Stützenverlust) kann er durch Sofortmaßnahmen (Notabstellung der Anlage, Notbremse beim Laufwagen) Unfälle verhindern und bei Verletzungen den Notruf absetzen. Weiter muss er durch eine laufende Kontrolle und Überwachung des Seilgerätes die Betriebssicherheit der Anlage gewährleisten.

Durch arbeitstechnische Maßnahmen können Unfälle beim Betrieb eines Seilgerätes im Baumverfahren begrenzt werden:

- Einsatz von Funkchokern statt herkömmlicher Chokerschlingen
- Beim manuellen Öffnen von Chokerseilen nicht auf Baumstämme steigen
- Aufarbeitung mit Kranprozessor neben der Kabine. Dadurch kann die Gefährdung der Kollegen bei einem Kettenschuss reduziert werden
- Arbeitskabine in Richtung Prozessor geschlossen halten (Kettenschussgefahr für den Maschinisten)
- PSA am Mann (Sicherheitsschuhe, Warnkleidung, Schutzhelm bei Verlassen der Kabine und Schutzhandschuhe beim Bedienen der Chokerseile)
- Notschnellabsenkung bei Gefahrensituationen (Seilriss, Instabilität der Abspannung, Stützenverlust)
- Kein Verlassen der Kabine des Maschinisten während des Seilbetriebes

3.5. Forsttechnische Umsetzung des Schlitzverfahrens

3.5.1. Anforderungen an das eingesetzte Seilgerät

Zur forsttechnischen Umsetzung des Schlitzverfahrens werden idealerweise Mastseilgeräte eingesetzt. Aufgrund der angestrebten Zielstärke von BHD > 60 cm sind dafür Seilgeräte mit einer Windenleistung von 4 (3-5) to und einer Tragseilspannkraft von 10-15 to erforderlich.

Besonders geeignet sind leicht umsetzbare, auf LKW aufgebaute Mastseilgeräte mit Prozessorkran. Die Reichweite dieser Anlagen sollte zwischen 600 und 1.000 (1.500) m betragen was gut zu der durchschnittlichen Erschließungsdichte von 20 lfm/ha bei den BaySF im Hochgebirge passt. Bewährt haben sich Seilgeräte mit einem aufgebauten Kranprozessor mit Sortierfunktion der 60 cm Aufarbeitungs-klasse. Die Aufarbeitung bis zu diesem Durchmesser erfolgt durch die Waldarbeiter mit der Motorsäge.

Über Funk sollte sowohl das Seilgerät (Montage- und Seilbetrieb) wie der Laufwagen des Mastseilgerätes (Seilbetrieb) mit folgenden Funktionen gesteuert werden können:

- Bedienung der Abspannseile (4-6) für Mastausrichtung und -stabilisierung
- Bedienung der seitlichen Abstützpratzen zur Fahrzeugausrichtung
- Bedienung des Maststützzyinders zur Abstützung des Mastes am Boden
- Steuerung der beidseitigen, hydraulisch verstellbaren Rampen
- Bedienung des Montageseiles zur Montage des Seilgerätes
- Steuerung des Laufwagenbetriebes (Ein- Ausspulen des Zugseiles, Fixierung des Laufwagens am Tragseil und Versetzmöglichkeit des Laufwagens während des Vorrückens)
- Reichweite der Funksteuerung entspricht Reichweite der Seilanlage

Optimal sind Masthöhen von ca. 14 (11) m. Die technische Möglichkeit den Mast horizontal zu nivellieren lässt eine Aufstellung auf Forststraßen von bis zu 20 % Längsneigung zu. Bei Einsatz eines Laufwagens der 4 to Gewichtsklasse < 700 kg kann, in Abhängigkeit von der Masthöhe und dem Relief des Geländes, bei Trassenlängen von bis ca. 150 (200) m oft auf eine zusätzliche Stütze zwischen Seilgerät und Endmast verzichtet werden, was sich positiv auf die Montagekosten auswirkt.

Der Laufwagen sollte einen seitlichen Beizug von 100 (120) m ermöglichen. Optimal sind Endlosausspuler mit geringem Gewicht, wie z.B. der Bergwald 5000 Hybrid von Hochleitner (700 kg), welcher aktuell beim Mastseilgerät Mounty 4000 U der FTBaySF eingesetzt wird.

Durch eine Verankerung des Mastseilgerätes mit 6 Abspannseilen kann die statische Kraftverteilung am Mast verbessert werden.

Fünf der Abspannseile können dabei zum Abspannen des Mastseilgerätes in Rückerichtung verwendet werden, während das sechste zum Absichern der Seilanlage gegen einen plötzlichen Tragseilriss oder ein abruptes Nachgeben von Stützen- oder Ankerbäumen entgegen der Rückerichtung montiert wird.

Generell muss ein Mastseilgerät möglichst schnell und unkompliziert versetzt und aufgebaut werden können, um kostenintensive Montage- und Überstellzeiten zu reduzieren. Die Überstellzeiten einer Seilanlage lassen sich bei großen zusammenhängenden Waldflächen durch einen geblockten Einsatz (Aufarbeitung kompletter Bestände oder sogar ganzer Abteilungen) auf einem niedrigen Niveau halten.

3.6. Praktische Einsatzempfehlungen

Bei der Durchführung des Schlitzverfahrens können folgende praktische Empfehlungen für eine erfolgreiche Umsetzung gegeben werden.

3.6.1. Hiebsvorbereitung

- Seiltrasse vor dem Auszeigen festlegen und markieren
- Markierung der Anker-, Stützen- und Endmastbäume
- Markierung des Stellplatzes der Seilanlage mit Abspannbäumen
- Beim Auszeigen auf schadensfreie und praktikable Fällrichtung achten
- Sortimentsbegrenzung fördert die Produktivität beim Seilgerät
- Laufendender Holzabfluss sichert die Holzqualität
- Manuelle Vermessung durch die Mitarbeiter vermeiden
- Manipulationskosten für Polterbildung am Seilgerät vermeiden
- Winterhiebe sichern eine ganzjährige Auslastung der Seilanlage

3.6.2. Mitarbeitereinsatz

- Geeignete Mitarbeiter (Forstfacharbeiter, technische Lehrberufe) einsetzen
- Eignung der Mitarbeiter für Seilkletterarbeiten sicherstellen
- Neue Mitarbeiter zuverlässig einarbeiten und ins Team integrieren
- Laufende Schulungen für die Mitarbeiter in Forst-, Fäll- und Seilklettertechnik
- Entlohnung im Zeitlohn mit Qualitäts- und Produktivitätszuschlägen
- Prämie für unfallfreies Arbeiten vorsehen (Teamprämie)
- Einhaltung der Sicherheitsvorschriften durch schriftlichen Arbeitsauftrag und Kontrolle auf der Fläche sichern
- Organisation eines beheizbaren Schutzwagens mit Trockenmöglichkeit
- Geländegängiges Begleitfahrzeug mit Werkstattausrüstung und Mobiltank
- Rettungskette durch Rettungspläne und Rettungsübungen sicherstellen
- Geringer Leistungsdruck sichert Qualität der Arbeiten
- Ortsnahe, wintertaugliche Unterbringung der Arbeiter

3.6.3. Ausrüstung

- Funksteuerung aller Arbeitsseile der Seilanlage
- Integration des Laufwagenfunks in die Funksteuerung des Seilgerätes (keine separate Funksteuerung)
- Montagefunkt für Montageseil, Tragseil, Abspannseile, und Rampen
- Reichweite der Funksteuerung entspricht der Reichweite des Seilgerätes
- Montageseil aus Dyneema zur Erleichterung der Montagearbeiten
- Funkchokerschlingen
- Ziel- und Sattelautomatik
- Anzeige des aktuellen Laufwagenstandortes/Trassenlänge im Seilgerät
- Verfahrbarkeit des Laufwagens bei ausgezogenem Zugseil
- Stabiler, möglichst leichter Laufwagen der 4 (5) to Klasse
- Aktive Ausspulmöglichkeit von bis zu 100 m für das Lastseil
- Leistungsstarker Kran mit Prozessoraufbau mit Reichweite von ca. 10-12 m
- Ausreichende Hydraulikleistung des Trägerfahrzeuges für gleichzeitige Prozessortätigkeit und Kranbewegungsmöglichkeit bei Baummanipulationen
- Tragseilhöhe sollte zwei Drittel der Bestandeshöhe nicht unterschreiten
- Trassenabstand Durchforstung 30 m; Verjüngungsnutzung 60 m

4. MATERIAL UND METHODEN

4.1. Maschinenbeschreibungen und Umsetzung der Verfahren

4.1.1. Schlitzverfahren mit dem Koller K 507 (BaySF)

Das eingesetzte Mastseilgerät Koller K 507 wird von der Fa. Koller Forsttechnik GmbH in Kufstein auf einen Allrad LKW von MAN TGS 41.440 aufgebaut. Der Neupreis des Mastseilgeräts Koller K 507 mit dem Laufwagen Koller MSK 3 betrug bei Erwerb am 2. April 2007 netto 537.000 € (Abbildung 27).

Das Seilgerät Koller K 507 hat bergauf wie bergab eine Zugkraft von 4 to (Tabelle 4). Als Kranprozessor ist der Woody 60 H von Konrad Forsttechnik installiert, welcher über eine Sägeeinheit mit 60 cm Aufarbeitungsstärke und über eine Zopfsäge am anderen Ende des Aggregats verfügt. Beim Koller K 507 ist der Prozessorkran mit Kabine fest mit dem Fahrzeugrahmen verbunden und wird über zwei seitliche Abstützpratzen horizontal ausgerichtet und abgestützt. Der Mast der Seilanlage kann über ein integriertes Knickgelenk in der horizontalen Ebene ausgerichtet werden. Dadurch kann das Seilgerät auch auf geneigten Forststraßen eingesetzt werden. Der K 507 ist mit Montagefunk und einem Montageseil aus Dyneema ausgestattet.

Als Laufwagen ist der Koller MSK 3 integriert, welcher dank der Motorausspulmöglichkeit des Zugseils (Dieselmotor mit 7,5 PS; Ausspulkraft 620 kg, zwei Ausspulgeschwindigkeiten von 0,8 m/s oder 1,2 m/s) ein quasi unbegrenztes, seitliches Vorrücken ermöglicht. Der Koller K 507 verfügt über die Koller-Multi-Matik Steuerung für den Anhänger (mobile Steuerung) und den Maschinisten in der Kabine. Sie ermöglicht eine Ziel- und Sattelautomatik.

Die Transporthöhe der Seilanlage beträgt 4 m bei einer Gesamtlänge von 12,6 m. Der vordere Kranüberstand beträgt 2,9 m. Das Gesamtgewicht des Seilgerätes liegt bei knapp 40 to (Abbildung 28).

Der Arbeitsablauf bei den BaySF im Schlitzverfahren ist im 3-Mann Team organisiert. Vor der Auszeige werden die Seiltrassen markiert und geeignete Stützen- und Ankerbäume gekennzeichnet. Geeignete Stützenbäume (inklusive Reservebäume) sind so auszuwählen, dass sie auch für weitere Eingriffe genutzt werden können. Der Revierleiter bestimmt die Lage der Verjüngungsschlitzte entlang der Seiltrasse durch Markierung der Schlitzränder mit Farbspray. Nach Überstellung der Seilanlage an den neuen Einschlagsort (in der Regel mehrere Seilaufstellungen) beginnen zwei Forstwirte mit dem Fällen der Bäume in der Seiltrasse. Der dritte Mann bereitet das Aufstellen des Mastes und die Abspannung des Seilgerätes vor. Wenn notwendig, unterstützt er seine Kollegen beim Durchschneiden der Seiltrasse. Die Seiltrassen werden generell möglichst schmal (2–3 m) angelegt, um die Bestandesstabilität nicht zu beeinträchtigen. Nach Fertigstellung der Seiltrasse wird das Seilsystem vom 3-Mann Team des Mastseilgerätes aufgebaut (Montagearbeiten).



Abbildung 27: Mastseilgerät Koller K 507 mit Laufwagen Koller MSK 3

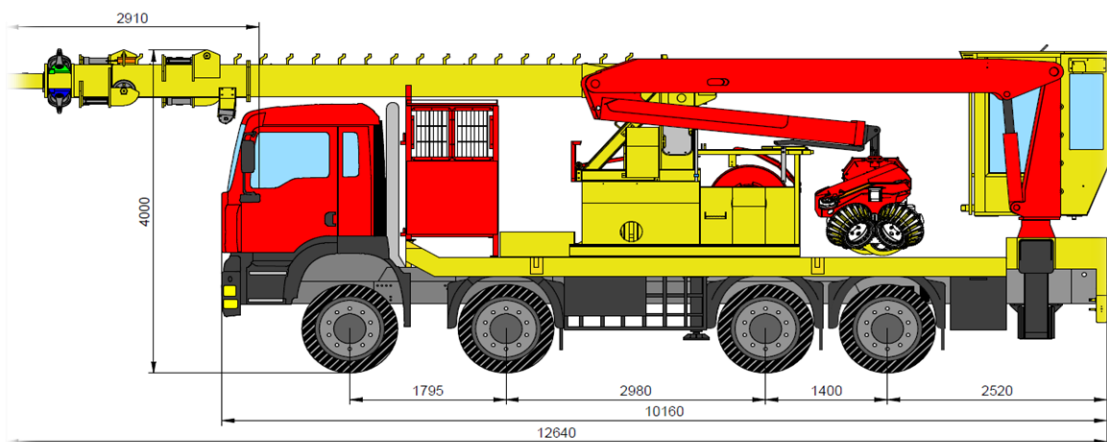


Abbildung 28: Mastseilgerät Koller K 507 (Koller Forsttechnik GmbH)

Die Fällung der Bäume in den Verjüngungsschlitzten erfolgt mit Motorsäge durch den Zufäller in unmittelbarer Abstimmung mit dem Anhänger, um Gefährdungen für den Anhänger während der Fällung und für den Zufäller während der Rückung zu reduzieren. Die gefällten Bäume werden vom Anhänger mittels Funkchokerschlingen fixiert und mit dem ausgespulten Zugseil bis zum Laufwagen beigezogen. Sobald die Bäume am Laufwagen unter dem Trageil hängen, betätigt der Anhänger die Zielautomatik, wodurch der Laufwagen samt Last selbstständig zum Mastseilgerät fährt.

Tabelle 4: Technische Daten des Mastseilgerätes Koller K 507

Mastseilgerät	K 507 Koller Forsttechnik GmbH	
LKW MAN TGS 41.440	Leistung	480 PS
	Antrieb	Allrad 8x8
	Abgasnorm	Euro 4
	Gewicht	39 to
	Kraftstoff	Tank 400 l + 400 l
	Fahrerhausschutz	beidseitig
Kran LH L 26.94 K	Hubmoment	230 kN
	Schwenkmoment	46 kN
	Reichweite	9,3 m
Mast	Höhe	11 m
Funkchoker Ludwig	Gewicht	1700 g
Laufwagen Koller MSK 3	Gewicht	590 kg
Beseilung	Trageil 800 m	22 mm
	Rückholseil 1700 m	11 mm
	Zugseil 1000 m	12 mm
	Montageseil 1600 m	6 mm
	Ankerseil 4x75 m	22 mm
Prozessor Woody 60 H	Aufarbeitungsstärke (Sägeeinheit)	65 cm
	Vorschubkraft	30-37 kN
	Gewicht	1.350 kg
	Zopfsäge	40 cm

Anschließend geht der Anhänger zu den nächsten vorgefällten Bäumen und befestigt so lange Chokerschlingen bis die maximale Nutzlast der Seilanlage von ca. 4 to erreicht ist (Lastoptimierung). Der Zufäller fällt in Abstimmung mit dem Anhänger laufend weitere Bäume.

Die selbständige Fahrt des Laufwagens endet etwa 20 m vor dem Seilgerät. Dort übernimmt der Maschinist die Kontrolle über den Laufwagen und führt die Fahrt des Laufwagens bis zur Anlanderampe des Mastseilgerätes fort. Die Bäume werden auf der Rampe oder auf dem Boden vor dem Seilgerät abgelegt. Per Funk öffnet der Maschinist aus der Kabine die Chokerschlingen und sendet den Laufwagen zu dem von der Zielautomatik gespeicherten letzten Lastaufnahmeort zurück.

In der Zwischenzeit werden die angelandeten Bäume mit dem Prozessor entastet und entsprechend der Aushaltungsvorgaben ausgeformt. Zum Ablegen der einzelnen Sortimente in Fließpolter kann der Prozessor Woody 60 H die Stachelwalzen seitlich wegklappen und anschließend als Sortiergreifer verwendet werden. Das aufgearbeitete Rundholz wird mit dem Prozessor vermessen, in Fließpolter auf oder neben der Forststraße abgelegt und als Waldmaß trassenweise erfasst. Der Prozessor wird wöchentlich kalibriert. Um Qualitätsminderungen beim Rundholz zu vermeiden, wird dieses laufend mit dem LKW zum Sägewerk (Frei-Werk Lieferung bei den BaySF auf eine bestehende Bankbürgschaft) abgefahren und dort mit Hilfe der Werkseingangsvermessung endgültig vermessen und in Qualitätsstufen eingeteilt. Das Rundholz wird nach der Werksvermessung im Gutschriftverfahren laufend mit den BaySF abgerechnet.

4.1.2. Kahlschlagbetrieb mit dem Syncrofalken 4 to (MM)

Das Seilgerät Syncrofalke 4 to wurde von MMForstTechnik gebaut. Der Neupreis des von den BaySF erworbenen Syncrofalken mit dem Laufwagen Sherpa U4 XL betrug im Jahr 2015 netto 632.000 €.

Das Mastseilgerät ist auf einem MAN-LKW 8 x 8 mit 480 PS aufgebaut. Die Transporthöhe beträgt 4 m bei einer Gesamtlänge von 11,40 m. Die Breite des Lastkraftwagens beträgt 2,55 m (Abbildung 29). Das Gesamtgewicht liegt bei knapp 40 to. Die namensgebende Technik bilden zwei große auf einer Welle gelagerte Seiltrommeln, die von einem Hydraulikmotor angetrieben werden. Beim Syncrofalken werden die statischen Belastungskräfte des Mastes während der Seilarbeit mittels hydraulischem Stützzylinder direkt auf den Untergrund übertragen.

Der hydraulisch auf eine Höhe von 12,3 m ausfahrbare Teleskopmast richtet sich selbstständig entsprechend der Schwerkraft bei der Aufstellung aus (statisch bestimmter Mast). Dadurch kann er auch auf steilen Forststraßen problemlos eingesetzt werden. Die Mastfußkonstruktion ermöglicht ein Drehen der Seileinheit von jeweils 150° auf beide Seiten des Trägerfahrzeuges, sowie ein Kippen des Mastes von 12° in alle Richtungen. Die Seiltrommeln für das Trag-, Zug- und Rückholseil sowie die Ankerseile sind unmittelbar am Mast befestigt.

Der Antrieb der Seile erfolgt hydrostatisch, wodurch während des Seilbetriebes schnelle Richtungsänderungen und eine stufenlose Geschwindigkeitsregulierung ermöglicht werden.

Die maximalen Seilgeschwindigkeiten liegen zwischen 4,0 und 5,4 m/s bei Lastfahrten und 7,6 und 10,0 m/s bei Leerfahrten mit Schnellgang (Tabelle 5). Die maximale Seilgeschwindigkeit von 10 m/s im unbeladenen Zustand qualifiziert den Syncrofalken besonders für weite Rückedistanzen.



Abbildung 29: Mastseilgerät Syncrofalken 4 to der FTBaySF (Foto MMForstTechnik)

Vergleicht man die technischen Daten des Koller K 507 mit jenen des Syncrofalken erkennt man, dass beide Seilgeräte weitgehend leistungsgleich sind.

Der Syncrofalken hat technische Vorteile bei der Bewegung des Laufwagens im unbelasteten Zustand. Im Bereich der Bergabrückung hat der Koller K 507 technische Vorteile durch eine höhere Zugkraft in Höhe von 4 to. Im Bereich der Bergaufrückung benötigt der K 507 kein Rückholseil zum Ausspulen des Zugseiles. Dadurch können Montagezeiten reduziert werden.

Die Seilgerätesteuerung Syncrotronic ermöglicht eine Streckenautomatik. Die wichtigsten Funktionen des Mastseilgerätes und Laufwagens können beim Syncrofalken mit der Funkfernsteuerung alternierend durch den Maschinisten oder Anhänger gesteuert werden. Der Syncrofalken ist mit einem Montageseil aus Dyneema ausgestattet. Das Montageseil kann im Zuge von Montagearbeiten auch vom Handfunkgerät aus durch den Anhänger gesteuert werden.

Tabelle 5: Technische Daten des Mastseilgeräts Syncrofalke 4 to

Mastseilgerät	Syncrofalke 4to MM Forsttechnik	
LKW MAN TGS 41.480	Leistung	480 PS
	Antrieb	Allrad 8x8
	Abgasnorm	Euro 5
	Gewicht	39 to
	Kraftstoff	Tank 200l + 900 l
	Fahrerhausschutz	beidseitig
Kran LH L 24.94 S	Hubmoment	230 kN
	Schwenkmoment	46 kN
	Reichweite	9,3 m
Mast	Höhe	12 m
Laufwagen MM-Sherpa U4 XL	Gewicht	720 kg
	Tragseil 800 m	22 mm
	Zugseil 1900 m	12 mm
	Rückholseil 1600 m	10 mm
	Ankerseil 4x75 m	22 mm
	Montageseil 1600 m	6 mm
Beseilung	Aufarbeitungsstärke (Sägeeinheit)	65 cm
	Vorschubkraft	30-37 kN
	Gewicht	1350 kg
	Zopfsäge	40 cm

In der Rückerichtung bergauf können bei Einsatz des Laufwagens Sherpa U4 XL (Abbildung 30) das Zugseil und Rückholseil in der Seiltrasse geführt werden. Dafür werden am Laufwagen seitliche Führungsrollen installiert, die ein Überschlagen der beiden Seile und des Tragseils während des Fahrens des Laufwagens verhindern.

Der seitliche Beizug der Bäume kann beim Laufwagen Sherpa U4 XL bis zu einer Entfernung von 120 m durchgeführt werden. Der Laufwagen verfügt auch über eine aktive Zugseilzwangsausspülung.



Abbildung 30: Laufwagen Sherpa U4 XL

4.2. Datenerhebungskonzept BaySF

Die Zeit- und Betriebsparameter des Koller K 507 der BaySF (Tabelle 6) wurden anhand Trassen genauer Aufzeichnungen mit dem Lieferschein der FTBaySF ermittelt. Auf dem Lieferschein werden folgende Daten erhoben:

- Forstbetrieb
- Revier
- Einsatzort
- Arbeitszeitraum
- Rückrichtung und Trassenlänge
- Waldbauliche Eingriffsart
- Arbeitszeiten nach Tätigkeit (Überstellung, Montage mit Trassenschneiden, Seilung und Aufarbeitung (inklusive Fällung), Reparaturen)
- Erntevolumen, Holzanfall, Stückvolumen und Stückzahl des Holzes (aus der Vermessung des Prozessoraggregates Woody 60 H).

Tabelle 6: Zeit- und Betriebsparameter BaySF

Zeitparameter	Einheit	Beschreibung
Gesamte Arbeitszeit	h PSH ₁₅	Summe von Überstellung, Montage sowie Fällung, Seilung und Aufarbeitung
Überstellung	h PSH ₁₅	Zeit für Überstellung des Mastseilgerätes zum nächsten Einsatzort inklusive Unterbrechungen <15 min
Montage	h PSH ₁₅	Zeit für das Freischneiden der Seiltrasse, Auf- und Abbau der Seilanlage inklusive Unterbrechungen <15 min
Fällung, Seilung, Aufarbeitung	h PSH ₁₅	Fäll-, Rücke- und Aufarbeitungszeit (Stunden des Maschinisten) inklusive Unterbrechungen <15 min
Reparaturen	h	Unterbrechungen >15 min
Betriebsparameter	Einheit	Beschreibung
Trassenlänge	lfm	Länge der Seiltrasse
Erteevolumen	m ³	Volumen des pro Seillinie geernteten Holzes
Holzanfall	m ³ /lfm	Erteevolumen pro Laufmeter Seiltrasse
Stückvolumen	m ³	Mittleres Stückvolumen je Seiltrasse
Stückzahl	n	Anzahl der pro Seillinie aufgearbeiteten Sortimentsstücke
Rückerichtung	Faktor	Bergauf und bergab
Waldbauliche Eingriffsart	Faktor	Z-Baum Durchforstung, schlitzartige Durchforstung, schlitzartige Verjüngung und femelartige Verjüngung
Produktivität	m ³ /PSH ₁₅	Geerntetes Volumen pro Zeiteinheit

Der Lieferschein Seiltechnik wird bei der Hiebsabnahme vom örtlichen Einsatzleiter des Forstbetriebes und vom Maschinisten der Seilanlage in zweifacher Ausführung gegengezeichnet. Ein Exemplar kommt zum Forstbetrieb und das zweite Exemplar verbleibt bei der FTBaySF. Die Abrechnung der aufgearbeiteten Holzmenge wird bei den BaySF vom Forstbetrieb mit den Daten des Lieferscheins der FTBaySF im Gutschrift-Verfahren durchgeführt.

Auf dem Lieferschein Seiltechnik wird zwischen folgenden **waldbaulichen Eingriffsarten** unterschieden:

- **Z-Baum Durchforstung** nach der Fichtenrichtlinie der BaySF (2012). Auf der Bestandesfläche werden auf ganzer Fläche ca. 100 Z-Bäume (Zukunftsbäume) pro ha ausgewählt und die beiden stärksten Bedränger entnommen. Die Vorrückung erfolgt möglichst schonend durch den verbleibenden Bestand. Der Seiltrassenabstand in der Durchforstung beträgt 30 m.
- **Schlitzartige Durchforstung:** Hier werden Bestandesschlitz (20 m x 10 m) neben den Gassen stehenden ausgewählten 100 Z-Bäumen in den Bestand eingelegt. Die Vorrückung erfolgt auf den ausgewählten Gassen zum Seilgerät. Dadurch können Streif- oder Rückeschäden am verbleibenden Bestand vermieden werden. Der Seiltrassenabstand beträgt 30 m.

- **Schlitzartige Verjüngung:** Hier werden 35 m x 20 m große Schlitzte wechselseitig versetzt entlang der Seiltrasse angelegt. Der Abstand zum nächsten Schlitz beträgt eine Altbaumlänge (35 m). Der Seiltrassenabstand in der Verjüngungsnutzung beträgt 60 m.
- **Femelartige Verjüngung** bezeichnet das Nachlichten über den bereits verjüngten Bereichen. Die Femellöcher werden etwa 40 m x 40 m groß angelegt. Ziel des Eingriffs ist eine vollständige Verjüngung des Bestandes zu erreichen. Der Seiltrassenabstand beträgt ebenfalls 60 m.

4.3. Datenerhebungskonzept MM

Die Zeit- und Betriebsparameter des Syncrofalken 4 to wurden anhand der Leistungsdatenaufschreibungen von MM ermittelt (Tabelle 7). Auf dem Leistungsschein von MM werden folgende Daten erhoben:

- Forstbetrieb
- Revier
- Einsatzort
- Arbeitszeitraum
- Fällungsstunden je Trasse
- Gedingnummer mit Trassenanzahl als Abrechnungsgrundlage
- Anzahl Fahrten Laufwagen; Fahrten je Stunde und Festmeter je Lastfahrt
- Nutzungsarten (Kahlhieb, Räumung und Kalamitätsanteil)
- Rückerichtung und Trassenlänge
- Brusthöhendurchmesser der ausgezeigten Bäume
- Einsatzstunden für Überstellung, Montage sowie Rückung und Aufarbeitung
- Arbeitsverfahren (Baum, Doppellängen oder Stamm)
- Volumen und Stückzahl des aufgearbeiteten Holzes
- Mittlerer Durchmesser der Werkseingangsvermessung

Die Regieeinschläge im **Kahlschlagbetrieb** wurden mit einer zeitlichen Unterbrechung zwischen den Prozessen Fällen und Rückung/Aufarbeitung (unterbrochene Arbeitskette) durchgeführt. Die zu entnehmenden Bäume werden vor dem Eintreffen des Mastseilgerätes von einer Zweimannrotte eingeschlagen. Nach erfolgter Vorausfällung des Bestandes wird das Mastseilgerät an den Einsatzort überstellt. Die Montagearbeiten des Syncrofalken 4 to bei MM werden im 4-Mann Team durchgeführt. Die anschließende Rückung und Aufarbeitung im Baumverfahren erfolgten im 2-Mann Team (Maschinist und Anhänger). Die zwei anderen Mitarbeiter wechseln zum Vorschneiden auf die nächste Einsatzfläche.

Tabelle 7: Zeit- und Betriebsparameter MM

Zeitparameter	Einheit	Tätigkeit
Gesamte Arbeitszeit	h PSH ₁₅	Summe von Fällung, Überstellung, Montage, Seilung und Aufarbeitung
Fällung	h PSH ₁₅	Vorausfällung, Freischneiden der Seiltrasse inklusive Unterbrechungen <15 min
Überstellung	h PSH ₁₅	Zeit für die Überstellung zum nächsten Einsatzort inklusive Unterbrechungen <15 min
Montage	h PSH ₁₅	Zeit für Auf- und Abbau der Seilanlage inklusive Unterbrechungen <15 min
Seilung, Aufarbeitung	h PSH ₁₅	Rücke- und Aufarbeitungszeit inklusive Unterbrechungen <15 min
Reparaturen	h	Unterbrechungen >15 min
Betriebsparameter	Einheit	Variable
Trassenlänge	l _{fm}	Länge der Seiltrasse
Erntevolumen NH	m ³	Volumen gerücktes Sägerundholz – Nadelholz
Erntevolumen IL	m ³	Volumen gerücktes Laubholz – und Nadelholz-IL
Erntevolumen	m ³	Volumen des geernteten Holzes pro Seillinie
BHD ausscheidend	cm	Geschätzter mittlerer Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes
Mitteldurchmesser Sägerundholz	cm	Mittlerer Sortimentsdurchmesser aus der Vermessung im Sägewerk
Holzanfall	m ³ /l _{fm}	Erntevolumen pro Laufmeter Seiltrasse
Baumanzahl	n	Anzahl der gerückten Bäume
Rückerichtung	Faktor	Bergauf und Bergab
Produktivität	m ³ /PSH ₁₅	Geerntetes Volumen pro Zeiteinheit

Das Erntevolumen des Sägerundholz-Nadelholz wurde aus der Werksvermessung vom Sägewerk von MM übernommen. Das Erntevolumen des Laub- und Nadelholz-IL wurde im Wald im Raummaß erhoben. Beim den IL- Sortimenten wurde ein mittlerer Durchmesser oder das Stückvolumen nicht erhoben.

4.4. Datenaufbereitung und -analyse

Die Aufbereitung und statistische Analyse aller Daten erfolgte mit der Statistiksoftware R (R Core Team 2014). Für die grafische Darstellung wurde Microsoft Excel verwendet. Beide Datensätze (Lieferscheine der Seiltechnik der BaySF und Leistungsscheine von MM) wurden in einem ersten Schritt auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Die Datensätze wurden deskriptiv beschrieben und die Ergebnisse in tabellarischer und grafischer Form dargestellt (Erntevolumen, Stückzahl, Stückvolumen, Trassenlänge, Holzanfall und Produktivität, Verteilung der Rückerichtung und waldbaulichen Eingriffsarten auf die Rückerichtungen, Verteilung des Zeitbedarfs).

Allerdings waren im Falle von MM manche Daten eingeschränkt oder nicht verfügbar. So waren auf den Leistungsscheinen keine Baumvolumina erhoben worden und diese konnten nur näherungsweise und auf Basis der Schätzung des mittleren Brusthöhendurchmessers des ausscheidenden Bestandes durch den auszeigenden Förster hergeleitet (Denzin-Formel) werden. Darüber hinaus lagen das mittlere Stückvolumen und die Anzahl der ausgeformten Sortimente nur für das Sägerundholz vor. Diese Daten stammten aber nicht direkt vom Seilgerät, also aus der Vermessung durch den Prozessorkopf, sondern aus der Vermessung im Sägewerk. Das Volumen der Sortimente Industrie- und Brennholz wurde für jeden Einsatz nur summarisch angegeben, ohne dass dabei Anzahl oder mittleres Stückvolumen erfasst wurde.

Im nächsten Schritt konnte ein Modell für die Schätzung des Zeitbedarfs pro m³ für die Fällung, Rückung und Aufarbeitung in Abhängigkeit von Einsatzparametern entwickelt werden, wobei sich dies aufgrund der ungeeigneten Datengrundlage im Fall von MM auf den Datensatz der BaySF beschränkte. Abschließend gelang es ein Modell für die Schätzung des Zeitbedarfs für die Montage und Demontage in Mannstunden PSH₁₅ in Abhängigkeit von Einsatzparametern zu entwickeln, wobei hier auch im Fall von MM alle benötigten Daten vorlagen und somit ein betriebsübergreifendes Modell erstellt werden konnte. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgangsweise bei der Entwicklung beider Modelle findet sich in den folgenden beiden Kapiteln.

4.4.1. Zeitbedarfsmodell Fällung, Rückung und Aufarbeitung (BaySF)

Das Modell sollte den Zeitbedarf für die Fällung, Rückung und Aufarbeitung mit Motorsäge und Koller K 507 mit Prozessor Woody 60 H in h PSH₁₅ pro m³ in Abhängigkeit einsatzspezifischer Parameter (Rückerichtung, Trassenlänge, Holzanfall je lfm, Stückvolumen und waldbauliche Eingriffsart) schätzen.

In einem ersten Schritt wurde zuerst visuell und dann mittels ANOVA geprüft, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf für Fällung, Rückung und Aufarbeitung haben. Parameter mit signifikantem Einfluss wurden in das multiple lineare Modell übernommen. Nach der Parameterschätzung wurde überprüft, ob das Modell die Anforderungen an ein lineares Modell erfüllt.

4.4.2. Zeitbedarfsmodell Montage und Demontage

Für die Montagearbeiten im Schlitzverfahren (Koller K 507 der BaySF) und im Kahlschlag (Syncrofalke des Forstbetriebs MM) wurde ein betriebsübergreifendes Modell zur Schätzung des Zeitbedarfs für die Montage und Demontage der Seilanlage entwickelt, wobei der Betrieb als Dummy-Variable ins Modell inkludiert wurde. Das Modell sollte den Zeitbedarf für die Montage und Demontage in Mannstunden PSH₁₅ in Abhängigkeit einsatzspezifischer Parameter schätzen.

In einem ersten Schritt wurde zuerst visuell und dann mittels ANOVA geprüft, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf für Montage und Demontage haben. Parameter mit signifikantem Einfluss wurden in das multiple lineare Modell übernommen. Nach der Parameterschätzung wurde überprüft, ob das Modell die Anforderungen an ein lineares Modell erfüllt.

4.5. Kostenvergleich

4.5.1. Effizienz Schlitzverfahren im Vergleich zum Kahlschlag

Bei den Seilgeräten wurden die Erntekosten je Kubikmeter durch eine Division der Systemkosten durch die erreichte Produktivität errechnet. Bei den BaySF setzen sich die Systemkosten aus dem Seilgerät mit Prozessor inklusive Fällen mit Motorsäge (geschlossene Arbeitskette) zusammen. Im Zuge der Betriebsaufzeichnungen wurden als PSH₁₅ die Stunden des Maschinisten auf dem Lieferschein Seil der FTBaySF aufgezeichnet. Darüber hinaus gehende Mannstunden für die Zufällung wurden auf den Lieferschein als sonstige Stunden notiert und auf den Auftrag verrechnet. Dadurch sind die PSH₁₅ des Seilgerätes mit jenen des Syncrofalken vergleichbar. Die Systemkosten beim Koller K 507 wurden aus der Betriebsbuchhaltung der FTBaySF hergeleitet (Tabelle 8). Im Vergleichszeitraum mit dem Syncrofalken (2008-2009) betrugen sie 270,5 €/PSH₁₅

Tabelle 8: Systemkosten Koller K 507 BaySF

Jahr	Einschlag m ³	Ko Koller €/PSH ₁₅
2008	2.951	255
2009	12.255	286
Sa/Mittel	7.603	270,5

Die Erntekosten bei MM errechnen sich aus der Summe der Kosten für die vorausgehende Fällung (2 Waldarbeiter mit Motorsäge) und den Kosten für die Rückung und Aufarbeitung mit dem Syncrofalken 4 to. Die Systemkosten für das Vorausfällungsteam bei MM betrugen 71,5 €/PSH₁₅. Die Kosten für das Rücken und die Aufarbeitung mit dem Syncrofalken betrugen 231 €/PSH₁₅ (Tabelle 9).

Tabelle 9: Herleitung der Systemkosten beim Arbeitssystem MM (Quelle: Johannes Loschek)

Jahr	BHD cm	Ko WA €/PSH ₁₅	Prod WA m ³ / PSH ₁₅	Ko Syn. €/PSH ₁₅	Prod Syn. m ³ / PSH ₁₅
2008	42,1	71	9	235,0	14,0
2009	40,4	72	8,5	227,0	13,1
Mittel	41,3	71,5	8,8	231	13,6

Um einen Vergleich der Erntekosten pro m³ einer Nutzung im Schlitzverfahren mit einem Kahlschlagbetrieb zu ermöglichen, wurde das mittlere Stückvolumen (0,25 m³) und die mittlere Rückedistanz (225 m) der Einsätze bei MM in das Zeitbedarfsmodell für den Koller K 507 eingesetzt und die Differenz zu den beobachteten Werten beim Syncrofalken ermittelt. Da beim Syncrofalken lediglich das mittlere Stückvolumen des Sägerundholzes (0,29 m³) vorlag, wurde das mittlere Stückvolumen gemäß der Schätzformel nach Lexer et al. (2017) aus dem bereits geschätzten Baumvolumen ermittelt. Bedenkt man, dass in das mittlere Stückvolumen auch Industrie- und Energieholzsortimente einfließen, so scheint der errechnete Wert durchaus plausibel.

4.5.2. Fallstudie Schlitzverfahren „Prügelmöser“

Zum finanziellen Vergleich einer Bewirtschaftung im Schlitzverfahren mit einer herkömmlichen Bewirtschaftung nach dem Atersklassenwaldmodell, wurde ein Musterhieb am FB Berchtesgaden/BaySF im Revier Inzell durchgeführt.

Die Nutzung im Schlitzverfahren erfolgte in der Abteilung Prügelmöser im Revier Inzell des Forstbetriebes Berchtesgaden der BaySF. Auf einer Fläche von 10,8 ha wurde im Zeitraum Januar bis Februar 2016 der Musterhieb durchgeführt.

Der Bergmischwald war 105 Jahre alt und bestand aus Fichte (79 %), Tanne (7 %), Lärche (7 %) und Buche (7 %). Der Bestandesvorrat betrug bei einem durchschnittlichen Bruthöhendurchmesser vom 55 cm laut Forsteinrichtung (BaySF, 2008) 570 Vfm/ha. Im Jahr der Nutzung (2016) lag der Vorrat bei ca. 680 Vfm/ha (Zuwachs 110 Vfm/ha seit der FE).

Als nachhaltiger Zuwachs für die Bewirtschaftung mit dem Schlitzverfahren wurde analog zu den Zuwachsuntersuchungen von Pretzsch et al. (2014) eine Starkholznutzung von jährlich 9 m³/ha unterstellt. Die Nutzungsmöglichkeit während der kalkulierten Umtriebszeit von 95 Jahren beträgt demnach 855 m³/ha.

Die auf der Bestandesfläche entnommene Holzmenge betrug 100 m³/ha und entsprach damit dem seit der letzten Nutzung (2006) akkumulierten Vorrat. Das mittlere Baumvolumen lag bei 2,5 m³. Die stärksten Stämme hatten bei einem BHD von bis zu 85 cm ein Volumen von bis zu 7 m³/Baum.

Das Hauptsortiment war Langholz der Güteklasse L B/C für ein örtliches Sägewerk in Inzell. Mit dem daraus erzeugten Schnittholz werden Holzhäuser für den örtlichen Markt gefertigt. Starke Tannen- und Fichtenholz Standardlängen der Stärkeklasse L 4+ der Güteklasse B/C gingen an ein Starkholzsägewerk mit Blockbandsäge-technik in Lofer/Salzburg. Die sägefähigen Nadelholzstandardlängen der Stärkeklasse SL 1b-3b wurden an ein Großsägewerk mit Profilerspaner Sägewerks-technik nach Leogang/Salzburg geliefert.

Standartlängen der Güteklasse D der Stärkeklasse SL 1b- 6 wurden an ein auf die Produktion von Kisten- und Paletten spezialisiertes Sägewerk nach Leutasch/Tirol verkauft. Das restliche Rundholz wurde als Energieholz EH ausgehalten und an ein Heizkraftwerk in Berchtesgaden geliefert.

Die Aufwendungen für notwendige Kultur- und Pflegemaßnahmen sind beim Schlitzverfahren gering. Laut ersten Erfahrungen am FB Berchtesgaden sind 3 Pflegedurchgänge unter dem Schirm des Altbestandes (PUS) erforderlich, um die gewünschte Baumartenzusammensetzung und Mischungsform zu realisieren. Der Aufwand für die PUS beträgt ca. 2.400 € (3 Durchgänge zu je 20 h/ha mit eigenen Waldarbeitern).

Für die herkömmliche Bewirtschaftung nach dem Altersklassenmodell wurden folgende Eingriffe unterstellt:

- Durchforstungen im Bestandesalter von 65, 75 und 85 Jahren
- Kahlschlag im Alter von 95 Jahren
- Kultur und Pflegemaßnahmen bis zu einer ersten kostendeckenden Durchforstung im Alter von 65 Jahren

Die für die Kalkulation notwendigen Daten entstammen der Fichtenertragstafel von Assmann–Franz (1963) Oberhöhe O-34. Die Ertragstafel unterstellt bis zum Ende der Umtriebszeit eine Gesamtwuchsleistung von ca. 950 m³/ha. Die in der Ertragstafel unterstellte Bestandeshöhe und Vorratsentwicklung für die Baumart Fichte stimmt mit den örtlich gemessenen Bestandesdaten für die Baumart Fichte im Bereich des Musterhiebess gut überein. Der Sortimentsanfall in den Durchforstungen stammt aus der Bestandessortentafel für Fichte von Schöpfer und Dauber (1989). Die Holzpreise aus der Holzpreisstatistik des FB Berchtesgaden/BaySF aus dem Jahr 2016.

In der forstlichen Praxis am FB Berchtesgaden/BaySF findet erfahrungsgemäß ein erster kostendeckender Durchforstungseingriff im Alter von ca. 65 Jahren statt. Dabei werden inklusive des Holzanfalls auf den Seiltrassen ca. 100 m³/ha entnommen. Bei einem zweiten (Bestandesalter 75 Jahre) und dritten Eingriff (Bestandesalter 85 Jahre) werden nochmals 100 m³/ha entnommen. Im Alter von ca. 95 Jahren wird der Altbestand komplett eingeschlagen und verwertet (Bestandesvorrat 650 m³/ha). Nach dem Kahlschlag im Alter von 95 Jahre sind in der Folge Aufwendungen für eine Neukultur/Verjüngungsergänzung und deren Pflege erforderlich.

Die nach Kahlschlag anfallenden Kultur- und Pflegekosten sowie der Aufwand für den notwendigen Verbiss- und Fegeschutz wurden vom FB Abtenau der ÖBf AG zur Verfügung gestellt und für die Kalkulation verwendet (Stampfer, 2017). Aktuell betragen die Kosten bis zu einer ersten kostendeckenden Nutzung im Alter von 65 Jahren 9.200 €/ha (Tabelle 10).

Tabelle 10: Kultur- und Pflegekosten ÖBf AG

Kostenart	Betrag	Maßnahme
Kulturrkosten	4.000 €	3.500 € Erstanlage und 500 € für Nachbesserungen
Kulturpflege	3.500 €	5 Durchgänge mit eigenen Waldarbeitern
Dickungspflege	1.200 €	1 Durchgang mit eigenen Waldarbeitern
Verbissschutz	5.000 €	5 Durchgänge mit eigenen Waldarbeitern
Gesamtkosten	9.200 €	

Abschließend wurden die Erträge und Kosten beider Varianten mit Zinssätzen von 2 % und 3% bis zum Ende der Umtriebszeit prolongiert und gegenübergestellt.

5. ERGEBNISSE

5.1. Deskriptive Statistik

5.1.1. Koller K 507 (BaySF)

Beim Koller K 507 wurden im Untersuchungszeitraum die Fällung, Rückung und Aufarbeitung von 211 Seiltrassen aufgezeichnet und ausgewertet (Tabelle 11). Auf dem Großteil der Trassen (134 Trassen) wurde in der Rückrichtung bergauf gearbeitet. Bei den angewandten waldbaulichen Eingriffsarten in der Verjüngungsnutzung überwogen schlitzartige (102 Seiltrassen) vor femelartigen Eingriffen (18 Seiltrassen).

Tabelle 11: Verteilung der waldbaulichen Eingriffsarten auf die Rückerichtungen beim Koller K507 der BaySF

Eingriffsarten	Rückerichtung		Summe
	bergab	bergauf	
Z-Baum Durchforstung	12	9	21
Schlitzartige Durchforstung	22	48	70
Femelartige Verjüngung	6	12	18
Schlitzartige Verjüngung	37	65	102
Summe	77	134	211

Das durchschnittliche Erntevolumen pro Seiltrasse lag bei 313 m³ (Tabelle 12) und schwankte zwischen 30 m³ und 865 m³. Das mittlere Stückvolumen über alle Trassen lag bei 0,30 m³. Die durchschnittliche Seiltrasse war 326 m lang, bei einem mittleren Holzanfall von 1,05 m³ pro Laufmeter Seiltrasse. Im Durchschnitt erreichte das Seilgerät eine Produktivität von 10,2 m³/PSH₁₅.

Tabelle 12: Deskriptive Statistik der Einsatzparameter Koller K 507

Parameter	Einheit	Mittel	SD	Median	Minimum	Maximum
Erntevolumen	m ³	313	158	290	30	865
Stückzahl	n	1.150	649	1.003	150	4.513
Stückvolumen	m ³	0,30	0,11	0,27	0,13	0,79
Trassenlänge	lfm	326	139	300	90	800
Holzanfall	m ³ /lfm	1,05	0,48	0,98	0,27	3,00
Produktivität bergauf	m ³ /PSH ₁₅	10,4	2,3	10,3	5,7	17,8
Produktivität bergab	m ³ /PSH ₁₅	9,6	2,4	9,4	5,4	15,5
Produktivität	m ³ /PSH ₁₅	10,2	2,3	10,0	5,4	17,8

Die gesamte Arbeitszeit pro Seiltrasse lag im Mittel bei 49,1 h PSH₁₅ (Tabelle 13). Dabei wurden 31,5 h PSH₁₅ für Fällung, Seilung, und Aufarbeitung aufgewendet. Das Mastseilgerät wurde 158 Mal von einem Einsatzort zu einem anderen überstellt. Dies dauerte im Durchschnitt 1,5 h PSH₁₅. Die Montagezeit für eine Seiltrasse lag bei durchschnittlich 16,1 h PSH₁₅. Notwendige Reparaturen (Unterbrechungen >15 Minuten) lagen bei 7,5 h/Trasse auf 180 Seiltrassen.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik der Zeitparameter Koller K 507

Parameter	Einheit	Anzahl	Mittel	SD	Median	Min	Max
Gesamte Arbeitszeit	h PSH ₁₅	211	49,1	20,7	45,5	4,0	116,5
Überstellung	h PSH ₁₅	158	1,5	0,9	1,0	0,5	5,0
Montage	h PSH ₁₅	211	16,1	6,6	15,0	1,0	42,0
Fällung, Seilung, Aufarbeitung	h PSH ₁₅	211	31,5	16,2	28,0	3,0	89,0
Reparaturen	h	180	7,5	7,7	5,0	0,5	47,0

Der Anteil für Fällung, Seilung und Aufarbeitung beim K 507 an der gesamten Arbeitszeit lag bei 64 % (Abbildung 31). Ein Drittel der Zeit (33,0 %) wurde für Montagearbeiten und 3 % der Zeit für Überstellungen aufgewendet.

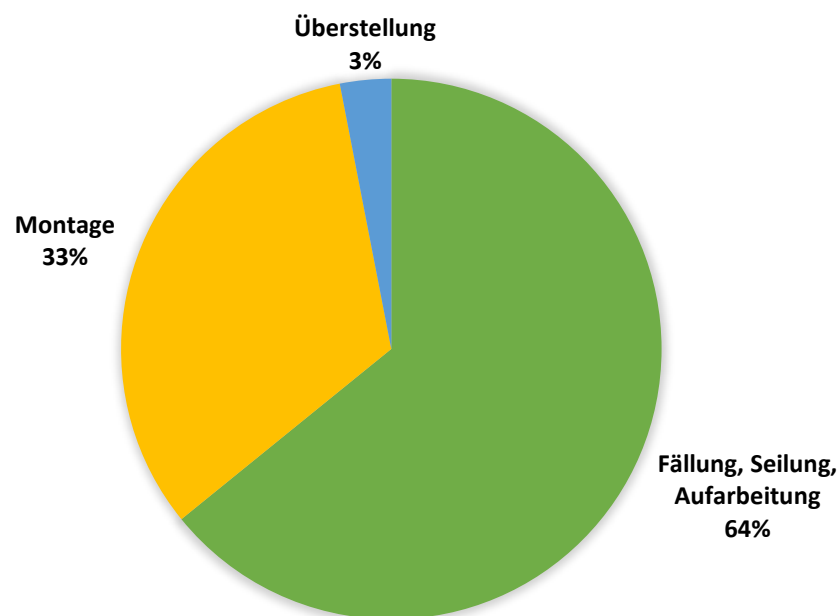


Abbildung 31: Aufteilung der Prozesszeiten beim Schlitzverfahren Koller K 507 bei den BaySF

5.1.2. Syncrofalke 4 to (MM)

Der Syncrofalke wurde im Kahlschlag eingesetzt, wobei bei insgesamt 139 Seiltrassen die Rückerichtung bergauf (78 Seiltrassen) gegenüber bergab (61 Seiltrassen) überwog.

Pro Seiltrasse wurden im Mittel 341 m³ gerückt und aufgearbeitet (Tabelle 14). Bei einer Seiltrasse konnten 955 m³ geerntet werden. Der geringste Anfall bei einer Aufstellung ergab 143 m³. Die mittlere Trassenlänge betrug 225 m. Die Trassenlänge variierte zwischen 100 m und 500 m. Der Holzanfall schwankte zwischen 0,6 m³/lfm und 3,8 m³/lfm und lag im Mittel bei 1,6 m³/lfm Seiltrasse.

Im Durchschnitt erreichte der Syncrofalke eine Produktivität von 14,4 m³/PSH₁₅ mit einer Schwankung von 7,0 - 25,3 m³/PSH₁₅. In der Rückerichtung bergauf wurde eine durchschnittliche Produktivität von 15,2 m³/PSH₁₅ erreicht, während in der Rückerichtung bergab die Produktivität bei 13,7 m³/PSH₁₅ lag.

Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Einsatzparameter Syncrofalke 4 to

Parameter	Einheit	Mittel	SD	Median	Minimum	Maximum
Erntevolumen	m ³	341	158	288	143	955
Baumanzahl	n	217	113	187	70	745
Baumvolumen*	m ³	1,32	0,34	1,26	0,72	2,42
Stückvolumen Sägerundholz	m	0,29	0,01	0,28	0,18	0,46
Trassenlänge	m	225	87	197	100	500
Holzanfall	m ³ /lfm	1,60	0,63	1,57	0,57	3,76
Produktivität bergauf	m ³ /PSH ₁₅	15,2	3,38	14,6	8,3	24,5
Produktivität bergab	m ³ /PSH ₁₅	13,7	3,88	13,1	7,0	25,3
Produktivität	m ³ /PSH ₁₅	14,4	3,68	14,3	7,0	25,3

Mit * markierter Parameter wurde basierend auf dem Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes geschätzt.

Die gesamte Arbeitszeit je Seiltrasse lag im Mittel bei 56,8 h PSH₁₅ (Tabelle 15) bei einer Schwankung zwischen 44 PSH₁₅ und 240 PSH₁₅. Der Aufwand für die Fällung betrug im Durchschnitt 18,9 h PSH₁₅. Das Mastseilgerät wurde 65 Mal von einem Einsatzort zu einem anderen überstellt. Dies dauerte im Durchschnitt 1,2 h PSH₁₅. Für die anschließende Seilung und Aufarbeitung wurden im Mittel 28,6 h PSH₁₅ aufgewendet. Die Montagezeit für eine Seiltrasse lag bei durchschnittlich 8,1 h PSH₁₅ mit einer Schwankung zwischen 7 und 22 h PSH₁₅ für die einzelnen Seiltrassen.

Tabelle 15: Deskriptive Statistik der Zeitparameter Syncrofalke 4 to

Parameter	Einheit	Anzahl	Mittel	SD	Median	Min	Max
Gesamte Arbeitszeit	h PSH ₁₅	139	56,8	28,6	43,5	4,5	239,8
Fällung	h PSH ₁₅	139	18,9	8,8	16	7,9	53
Überstellung	h PSH ₁₅	65	1,2	0,78	1,0	0,2	4
Montage	h PSH ₁₅	139	8,1	3,59	7	3	22,0
Seilung, Aufarbeitung	h PSH ₁₅	139	28,6	14,7	23	10	70
Reparaturen	h	37	3,0	3,5	3,0	2,4	3,6

Der Anteil für die Vorausfällung an der gesamten Arbeitszeit lag bei 33 %, während der Anteil für Seilung und Aufarbeitung 51 % betrug (Abbildung 32). Ein Siebtel der Arbeitszeit (14 %) wurden für Montagearbeiten und 2 % der Zeit für Überstellungen aufgewendet.

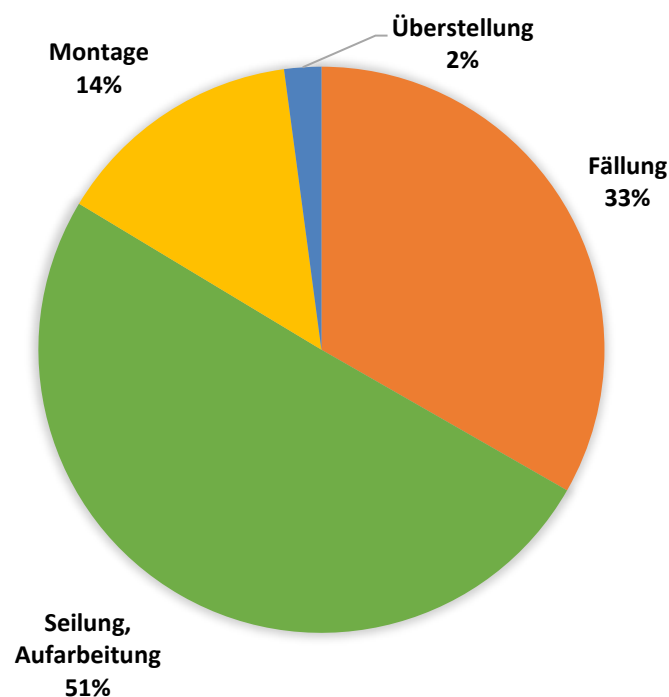


Abbildung 32: Aufteilung der Prozesszeiten beim Kahlschlagverfahren Syncrofalke 4 to bei MM

5.2. Zeitbedarfsmodell Koller K 507 (BaySF)

Die Parameter Stückvolumen, Rückerichtung, Trassenlänge und waldbauliche Eingriffsart hatten statistisch signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf für die Fällung, Seilung und Aufarbeitung mit dem Koller K 507 und wurden in das Zeitbedarfsmodell (Formel 1) integriert. Diese Parameter erklären 48 % der Variabilität des Zeitbedarfs. Der Standardfehler einer Schätzung liegt bei 0,017 h PSH₁₅/m³.

Als Gültigkeitsgrenzen für das Modell wurden die 5. und 95. Perzentile der Eingangsparameter Stückvolumen (0,16 m³ bzw. 0,49 m³) und Trassenlänge (140 m bzw. 560 m) festgelegt. Eine Modellschätzung weicht im Mittel $9,46 \times 10^{-20} \pm 0,02$ h PSH₁₅/m³ von der Beobachtung ab.

Formel 1: Zeitbedarfsmodell für Fällung, Seilung und Aufarbeitung mit dem Mastseilgerät Koller K 507

$$\text{Zeitbedarf Fällung, Seilung und Aufarbeitung [h PSH}_{15} \text{ m}^{-3}] = a + b \times \text{Stückvolumen}^{-0,9} + c \times \text{Rückrichtung} + d \times \text{Trassenlänge} + e \times \text{waldbauliche Eingriffsart}$$

Die zum Zeitbedarfsmodell gehörenden Koeffizienten können aus der Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Koeffizienten des Zeitbedarfsmodells Koller K 507

Parameter	Einheit	ID	Koeffizient	SD	t-Wert	p-Wert
Absolutglied	-	a	$9,00 \times 10^{-2}$	$6,60 \times 10^{-3}$	13,72	$< 2,00 \times 10^{-16}$
Stückvolumen	m ³	b	$1,09 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^{-3}$	8,93	$2,50 \times 10^{-16}$
Rückrichtung						
bergab			0,00			
bergauf	-	c	$-7,34 \times 10^{-3}$	$2,50 \times 10^{-3}$	-2,94	$3,70 \times 10^{-3}$
Trassenlänge	m	d	$2,01 \times 10^{-5}$	$8,72 \times 10^{-6}$	2,31	$2,19 \times 10^{-2}$
Waldbauliches Verfahren						
Z-Baum Durchforstung			0,00			
Schlitzartige Durchforstung		e	$-2,33 \times 10^{-2}$	$4,34 \times 10^{-3}$	-5,37	$2,10 \times 10^{-7}$
Schlitzartige Verjüngung			$-2,91 \times 10^{-2}$	$4,24 \times 10^{-3}$	-6,88	$7,00 \times 10^{-11}$
Femelartige Verjüngung			$-3,95 \times 10^{-2}$	$5,58 \times 10^{-3}$	-7,09	$2,10 \times 10^{-11}$

5.3. Produktivitätsmodell Koller K 507 (BaySF)

Die Produktivität kann als Kehrwert des Zeitbedarfs errechnet werden (Formel 2).

Formel 2: Produktivitätsmodell für Fällung, Seilung und Aufarbeitung mit dem Mastseilgerät Koller K 507/BaySF

$$\text{Produktivität Fällung, Seilung und Aufarbeitung [m}^3 \text{ PSH}_{15}^{-1}] = \frac{1}{a + b \times \text{Stückvolumen}^{-0,9} + c \times \text{Rückrichtung} + d \times \text{Trassenlänge} + e \times \text{waldbauliche Eingriffsart}}$$

Unabhängig von der waldbaulichen Eingriffsart steigt die Produktivität mit zunehmendem Stückvolumen an, ist in der Rückerichtung bergauf generell höher als in der Rückerichtung bergab und nimmt mit zunehmender Rückedistanz ab.

Innerhalb der waldbaulichen Eingriffsarten weist die Z-Baum-Durchforstung das niedrigste Produktivitätslevel auf. Etwas darüber liegt jenes der schlitzartigen Durchforstung, gefolgt von der schlitzartigen Verjüngungsnutzung. Die höchste Produktivität wird bei einem femelartigen Eingriff erzielt (Abbildung 33).

Bei einer durchschnittlichen Trassenlänge von 326 m und einem durchschnittlichen Stückvolumen von 0,30 m³ liegt die Produktivität in einer schlitzartigen Durchforstung (9,52 m³/PSH₁₅) bei der Bergabrückung um 1,73 m³/PSH₁₅ über jener der Z-Baum-Durchforstung (7,79 m³/PSH₁₅). In Rückerichtung bergauf liegt dieser Unterschied bei 1,95 m³ (10,20 m³ gegenüber 8,25 m³).

Unter den oben angesetzten Bedingungen wird in Rückerichtung bergab bei femelartigem Eingriff (11,28 m³/PSH₁₅) eine um 1,21 m³/PSH₁₅ höhere Produktivität als bei schlitzartiger Verjüngungsnutzung (10,07 m³/PSH₁₅) erzielt. Wird bergauf gerückt, erhöht sich der Abstand auf 1,42 m³/PSH₁₅ (12,26 m³ zu 10,84 m³/PSH₁₅).

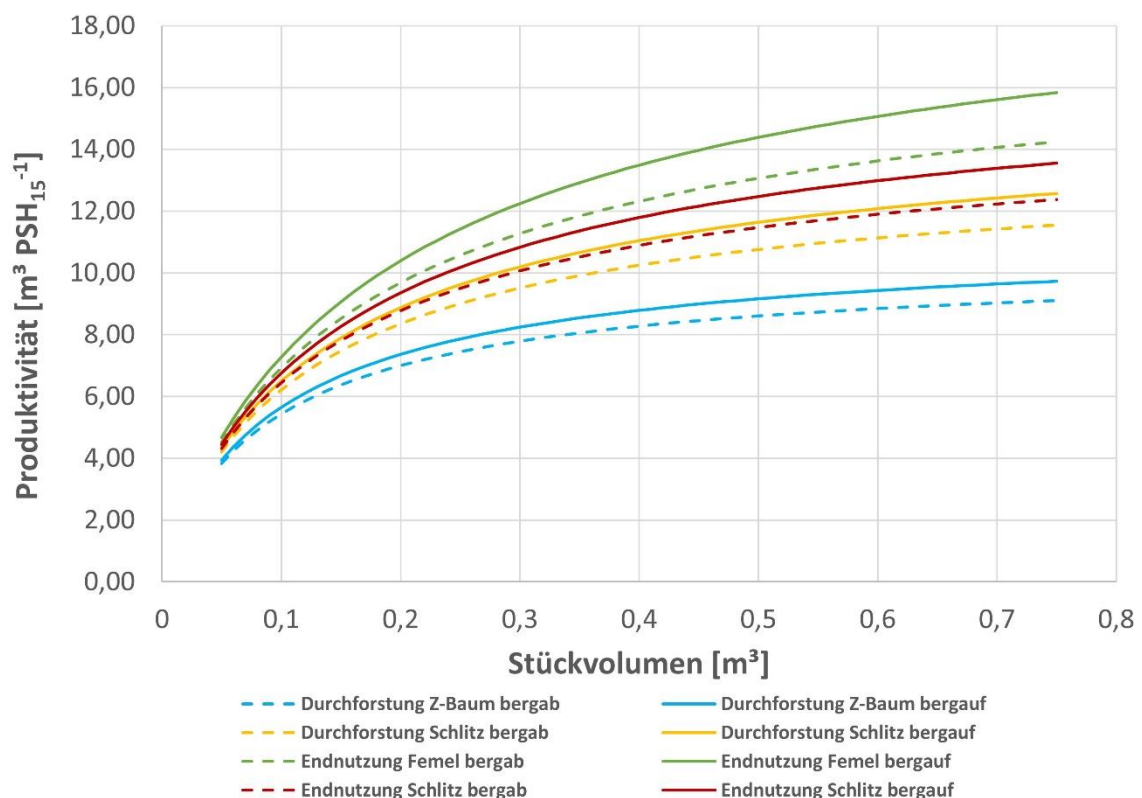


Abbildung 33: Einfluss des Stückvolumens und der waldbaulichen Eingriffsart auf die Produktivität bei der Fällung, Seilung und Aufarbeitung mit dem K 507 bei einer Rückedistanz von 326 m

Erhöht sich das Stückvolumen bei unveränderter Rückedistanz um $0,10 \text{ m}^3$ auf $0,40 \text{ m}^3$, so nimmt die Produktivität in der schlitzartigen Durchforstung stärker zu ($0,73 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ in Rückerichtung bergab und $0,85 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ bergauf) als in der Z-Baumdurchforstung ($0,49 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ und $0,54 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$) (Abbildung 33).

Bei der Verjüngungsnutzung nimmt die Produktivität bei femelartigem Eingriff in Rückerichtung bergab ($1,05 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ gegenüber $0,83 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$) und bergauf ($1,24 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ gegenüber $0,96 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$) stärker zu als bei schlitzartiger Nutzung.

Die Rückedistanz hat einen geringeren Einfluss auf die Produktivität als das Stückvolumen (Abbildung 34). Erhöht man die Rückedistanz um ein Drittel von 326 m auf 435 m, so sinkt die Produktivität in der Z-Baum-Durchforstung mit $0,12 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ (Rückerichtung bergab) und $0,15 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ (Rückerichtung bergauf) weniger stark als bei schlitzartiger Durchforstung ($0,19 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ und $0,22 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$).

In der Verjüngungsnutzung nimmt die Produktivität bei femelartigem Eingriff mit $0,26 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ und $0,32 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ stärker ab als beim schlitzartigen Eingriff ($0,21 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ und $0,25 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$).

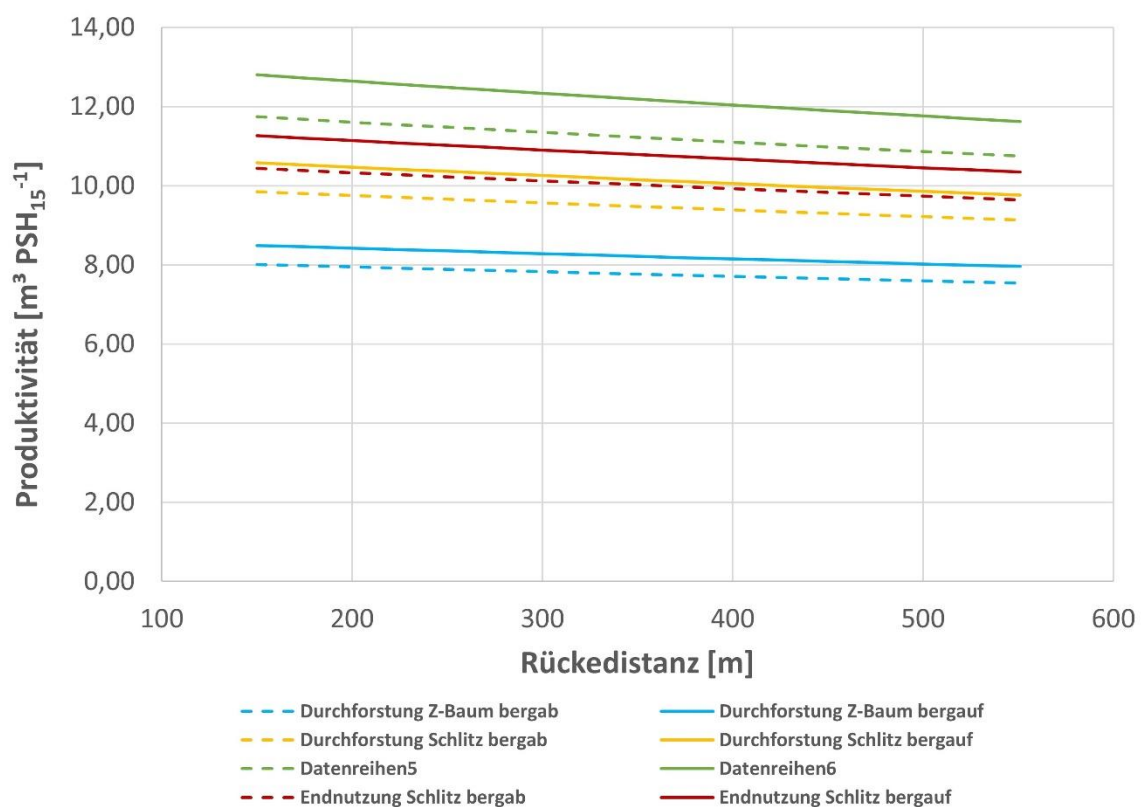


Abbildung 34: Einfluss der Rückedistanz und der waldbaulichen Eingriffsart auf die Produktivität bei der Fällung, Seilung und Aufarbeitung des K 507 bei einem Stückvolumen von $0,30 \text{ m}^3$

Betrachtet man nur die schlitzartigen Eingriffsarten, so zeigt sich, dass bei der mittleren Rückedistanz von 326 m in Abhängigkeit vom Stückvolumen und innerhalb der Gültigkeitsgrenzen des Modells bei schlitzartiger Durchforstung eine Produktivität zwischen 7,70 m³/PSH₁₅ und 10,65 m³/PSH₁₅ (Rückrichtung bergab) und zwischen 8,17 m³/PSH₁₅ und 11,55 m³/PSH₁₅ (Rückrichtung bergauf) erwartet werden kann (Abbildung 35).

In der Verjüngungsnutzung liegt die geschätzte Produktivität in der Bergabrückung zwischen 8,07 m³/PSH₁₅ und 11,36 m³/PSH₁₅ und in der Bergaufrückung zwischen 8,58 m³/PSH₁₅ und 12,39 m³/PSH₁₅.

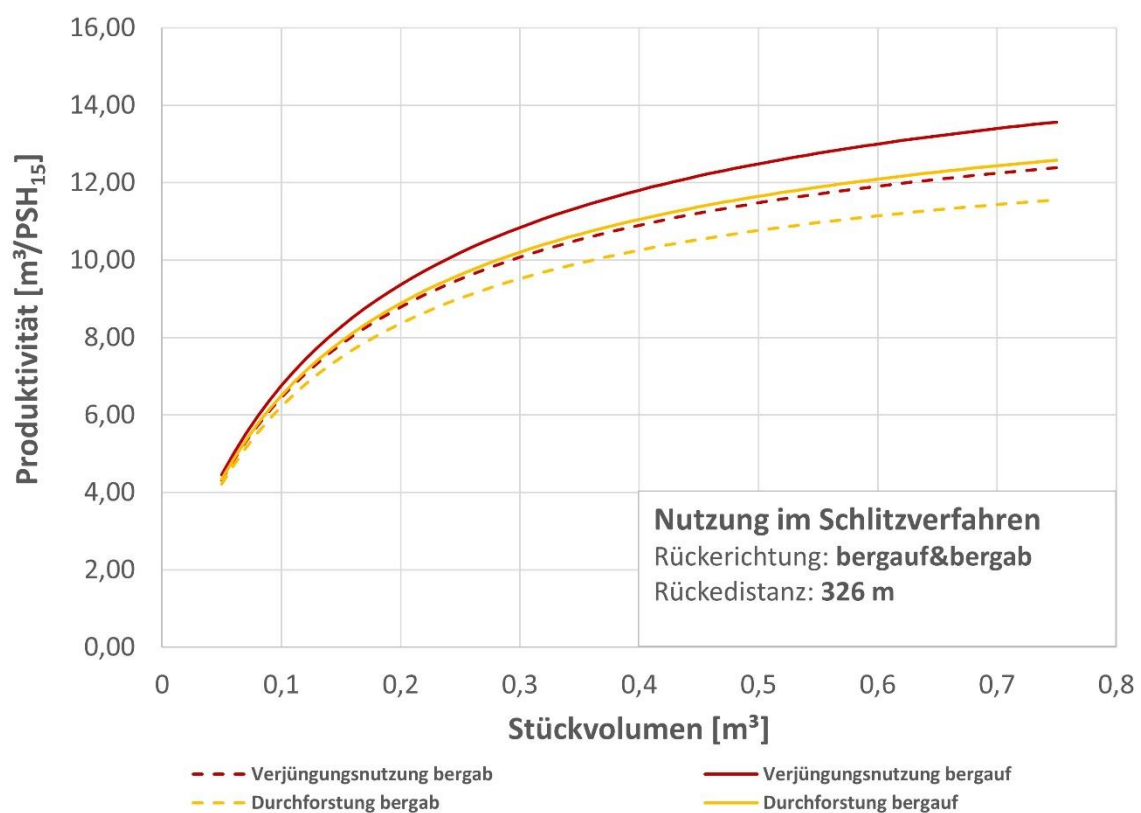


Abbildung 35: Einfluss von Stückvolumen und Rückrichtung auf die Produktivität bei schlitzartigen Eingriffsarten (Verjüngung und Durchforstung)

5.4. Montagevergleich

5.4.1. Deskriptive Statistik Montage und Demontage

Der Zeitbedarf für Montage und Demontage unterscheidet sich zwischen den beiden Betrieben signifikant. Werden bei den BaySF im Schnitt 48,1 Mannstunden PSH₁₅ pro Trasse aufgewendet, so sind es beim MM lediglich 29,2 Mannstunden PSH₁₅. Ein noch deutlicher Unterschied ist in Rückrichtung bergab (54,0 Mannstunden PSH₁₅ zu 28,0 Mannstunden PSH₁₅) zu beobachten.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den BaySF die Fällung der Seiltrasse im Zeitbedarf inkludiert ist, während bei MM durchwegs vorgeschlägert wird und die höheren Montagezeiten bei den BaySF mit dem zeitaufwendigen Freischneiden der Seiltrasse vor der Montage (Abbildung 36) in Zusammenhang stehen.

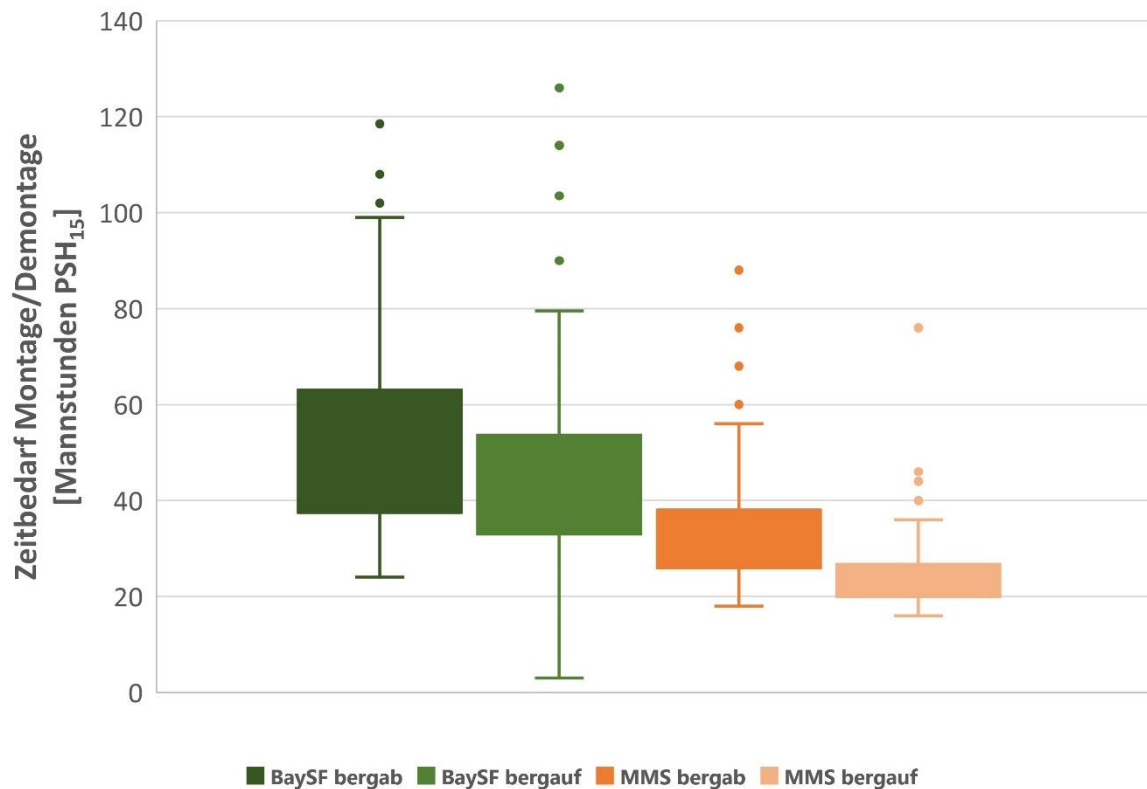


Abbildung 36: Zeitbedarf für Montage und Demontage nach Betrieben und Rückrichtungen

Die beiden Betriebe unterscheiden sich hinsichtlich der Trassenlängen (Abbildung 37) signifikant. In beiden Betrieben ist die Trassenlänge in Rückrichtung bergauf im Durchschnitt länger (BaySF: 341 m bzw. 307 m, MM: 237 m bzw. 212 m), was einer Mehrlänge von 11 % bzw. 14 % gegenüber der Rückrichtung bergab entspricht. Die maximale Trassenlänge beim Forstbetrieb MM liegt mit 500 m deutlich unter jener der BaySF (800 m). Die minimale Trassenlänge ist in beiden Betrieben fast gleich (90 m BaySF und 100 m MM). Im Zusammenhang mit der Trassenlänge muss davon ausgegangen werden, dass bei längeren Trassen mehr Stützen errichtet werden müssen, was den Zeitbedarf für Montage und Demontage erhöht. Diese Annahme kann allerdings aufgrund eines Mangels an Aufzeichnungen zur tatsächlichen Anzahl an Stützen nicht überprüft werden.

Die Betriebe unterscheiden sich darüber hinaus auch signifikant bezüglich des Holzanfalles (Abbildung 38). Der Holzanfall beim Forstbetrieb MM liegt im Mittel bei 1,60 m³ pro Laufmeter Trasse und damit um 53 % höher als bei den BaySF. Da mit steigendem Holzanfall der Zeitbedarf für Montage und Demontage pro gerücktem m³ sinkt, ist dies von besonderer Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse.

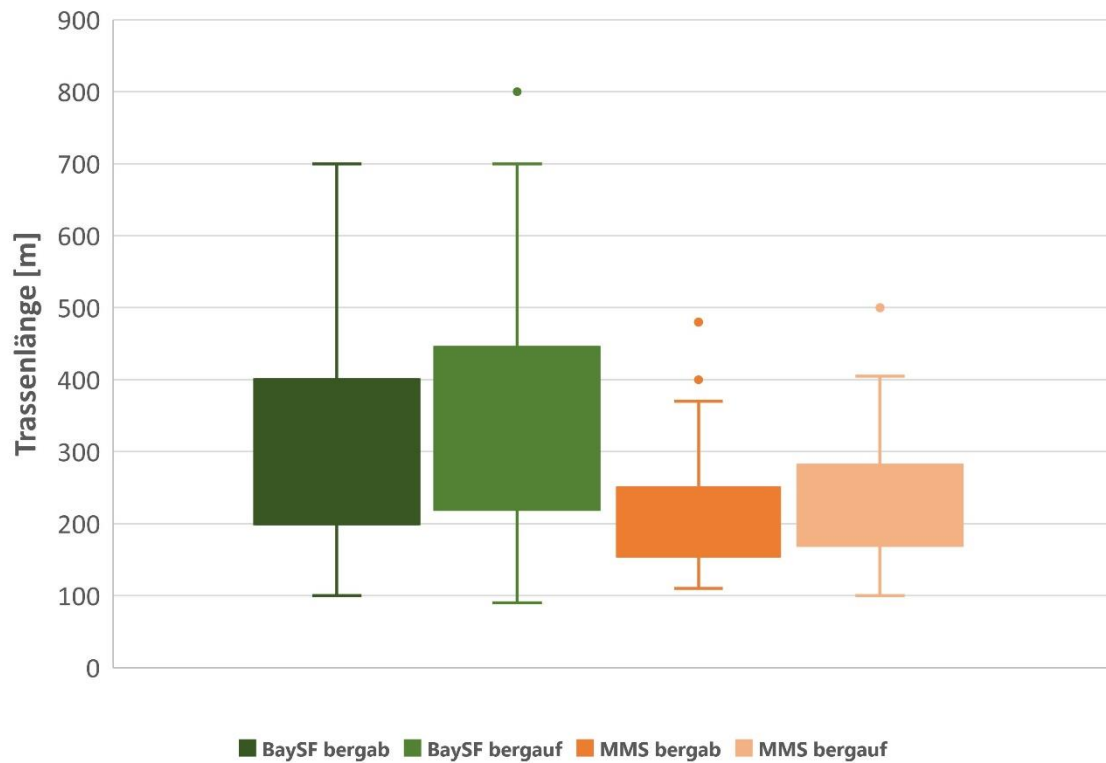


Abbildung 37: Trassenlängen nach Betrieben und Rückrichtungen

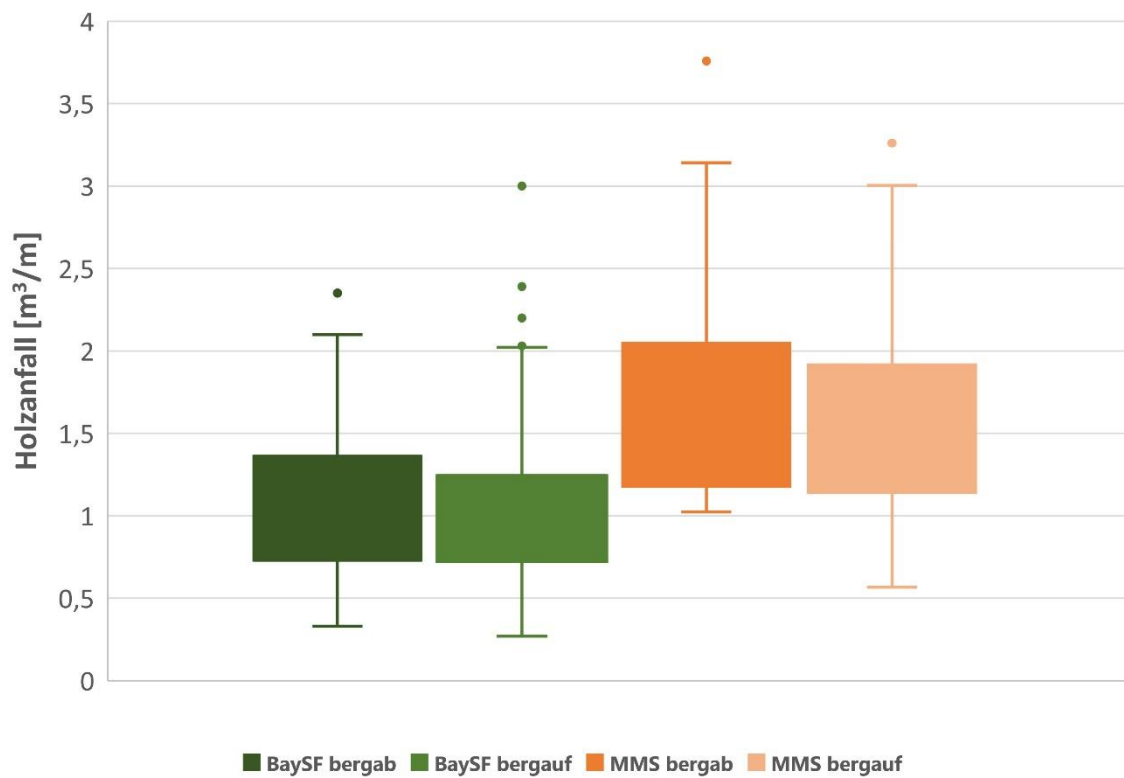


Abbildung 38: Holzanfall nach Betrieben und Rückrichtungen

5.4.2. Zeitbedarfsmodell Montage K 507 und Syncrofalke 4 to

Die Parameter Trassenlänge, Rückerichtung und Betrieb hatten einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf für Montage und Demontage der Seilanlage und wurden in das Zeitbedarfsmodell (Formel 2) integriert.

Mit dem Modell können 46 % der Variabilität des Zeitbedarfs für die Montage bzw. Demontage einer Seilanlage erklärt werden. Der Standardfehler einer Schätzung liegt bei 14,4 Mannstunden PSH₁₅. Als Gültigkeitsgrenzen für das Modell wurden die 5. und 95. Perzentile des Eingangsparameters Trassenlänge festgelegt. Bei den BaySF entsprechen diese einer Trassenlänge von 140 m bzw. 560 m, bei MM sind das 134 m bzw. 405 m. Die Schätzung des Modells weicht im Mittel um $7,21 \times 10^{-17} \pm 0,104$ Mannstunden PSH₁₅ von der Beobachtung ab.

$$\text{Zeitbedarf Montage/Demontage}_{\text{Mannstunden PSH}_{15}} = a + b \times \text{Trassenlänge} + c \times \text{Rückerichtung} + d \times \text{Betrieb} \quad \text{Formel 3}$$

Tabelle 17: Koeffizienten des Zeitbedarfsmodells Koller K 507 und MM

Parameter	Einheit	ID	Koeffizient	SD	t-Wert	p-Wert
Absolutglied	-	a	33,0	2,40	13,75	$< 2,000 \times 10^{-16}$
Trassenlänge	m	b	0,067	0,0063	10,63	$< 2,000 \times 10^{-16}$
Rückerichtung						
bergab	-	c	0,0000			
bergauf	-		-10,85	1,57	-7,61	$2,387 \times 10^{-11}$
Betrieb						
BaySF	-	d	0,0000			
MM	-		-12,9	1,69	-7,61	$2,400 \times 10^{-13}$

Unabhängig von der Trassenlänge und Rückerichtung liegt der Zeitaufwand für die Montage und Demontage bei den BaySF über jenem des Forstbetriebs MM.

Bei einer mittleren Trassenlänge von 330 m (BaySF) liegt der Zeitbedarf für Montage und Demontage bei 55,2 Mannstunden PSH₁₅ (bergab) bzw. 44,3 Mannstunden PSH₁₅ (bergauf). Bei MM wird bei gleicher Trassenlänge deutlich weniger Zeit benötigt (42,3 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergab und 31,5 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergauf) (Abbildung 39).

Bei der mittleren Trassenlänge von 225 m (MM) liegt der Zeitbedarf für Montage und Demontage bei 35,3 Mannstunden PSH₁₅ (bergab) bzw. 24,4 Mannstunden PSH₁₅ (bergauf). Bei den BaySF wird der gleichen Trassenlänge deutlich mehr Zeit benötigt (48,2 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergab und 37,3 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergauf) (Abbildung 39).

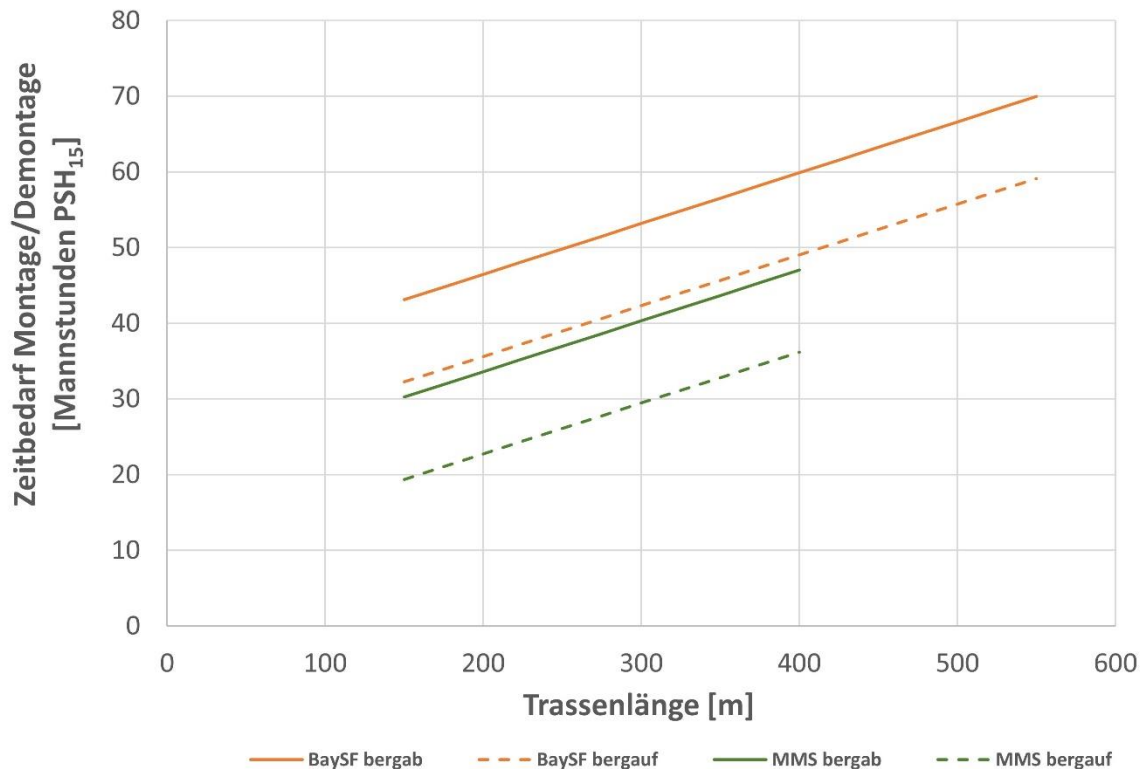


Abbildung 39: Einfluss von Trassenlänge, Rückerichtung und Betrieb auf den Zeitbedarf für Montage bzw. Demontage der Seilanlage

5.5. Kostenvergleich

5.5.1 Effizienz Fällung, Seilung und Aufarbeitung

Erwartungsgemäß wurde bei gleichem Stückvolumen und entsprechender Rückedistanz im Kahlschlagbetrieb in der Rückerichtung bergauf mit dem Syncrofalken eine deutlich höhere Produktivität von 15,2 m³/PSH₁₅ als beim Koller K 507 im Schlitzverfahren mit 10,8 m³/PSH₁₅ erreicht (Tabelle 18).

In der Rückerichtung bergab war die Produktivität beim Syncrofalken um 1,5 m³/PSH₁₅ niedriger als in der Rückerichtung bergauf. Der gleiche Effekt konnte auch beim Koller K 507 beobachtet werden. Dies ist ein Indiz, dass beide Seilgeräte von geübten Mannschaften bedient wurden, und dass menschliche Einflussgrößen ausgeschlossen werden können.

Der Syncrofalke erreichte aufgrund der schematischen und mengenmäßigen Vorteile des Kahlschlagbetriebes eine höhere Produktivität als der Koller K 507 im schlitz- bzw. femelartigen Eingriff. Im Vergleich zum Schlitzverfahren erreichte der Syncrofalke im Kahlschlagbetrieb in der Rückerichtung bergauf eine um 30 % höhere Produktivität als der Koller. Die Auswirkung der schematischen Eingriffsform bzw. Eingriffsstärke kann beim Koller K 507 analog beobachtet werden. Wurde der Koller K 507 in der Verjüngungsnutzung in femelartiger Eingriffsart eingesetzt, war die Produktivität sowohl in der Bergauf-Rückung um 1,5 m³/PSH₁₅ als auch bei der Bergab-Rückung um 1,2 m³/PSH₁₅ höher (Tabelle 18).

Tabelle 18: Erntekostenvergleich bei unterschiedlichen waldbaulichen Eingriffsarten

Waldbauliche Eingriffsart	Syncrofalke 4 to		Koller K 507			
	Überwiegend Kahlschlag mit Vorausfällung		Femelartige Nutzung mit laufender Fällung		Schlitzartige Nutzung mit laufender Fällung	
	bergauf	bergab	bergauf	bergab	bergauf	bergab
Rückerichtung						
Prod Fällung	8,8	8,8				
SysKo Fällung	71,5	71,5				
SysKo Fällung (€/m³)	4,1	4,1				
Prod Rückung (m³/PSH₁₅)	15,2	13,7	12,3	11,3	10,8	10,1
SysKo Rück (€/PSH₁₅)	231	231	270,5	270,5	270,5	270,5
SysKo Rück (€/m³)	15,2	16,9				
Erntekosten in €/m³	19,3	20,9	22,0	23,9	25,0	26,8
Abweichung in €/m³			2,7	3,0	5,8	6,0
Abweichung in %			+14 %	+14 %	+30 %	+28 %

Beim Syncrofalken, eingesetzt überwiegend im Kahlschlagbetrieb, ergaben sich in der Rückerichtung bergauf Erntekosten von 19,3 €/m³ und 20,9 €/m³ in der Rückerichtung bergab.

Beim Koller K 507 ergaben sich im Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf Erntekosten von 25,0 €/m³ und 26,8 €/m³ in der Rückerichtung bergab. Wurden mit dem Koller K 507 femelartige Einschläge durchgeführt, so entstanden in der Rückerichtung bergauf Erntekosten von 22,0 €/m³ und 23,9 €/m³ in der Rückerichtung bergab.

Damit sind die Erntekosten im Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf um 5,8 €/m³ (+30 %) und in der Rückerichtung bergab um 6 €/m³ (+28 %) höher als im Kahlschlagbetrieb.

5.5.2 Fallstudie Schlitzverfahren „Prügelmöser“

Im Rahmen des Musterhiebs wurden auf 6 Seiltrassen in der Rückerichtung bergauf insgesamt 1.074 m³ Holz (Tabelle 19) genutzt. Der Langholzanteil L B/C betrug 61 %, der Fixlängenanteil SL B/C 23 %, der Fixlängenanteil SL D 7 % und der Energieholzanteil EH 9 %.

Die Erntekosten wurden durch Division der Systemkosten des Kollers K 507 durch die Produktivität aus dem Modell errechnet und betrugen 25,0 €/m³. Über alle Sortimente errechnet sich ein durchschnittlicher Deckungsbeitrag von 68,6 €/m³ (Tabelle 20). Der höchste Deckungsbeitrag wurde mit 80 €/m³ beim Langholz Sortiment erreicht.

Tabelle 19: Sortenverteilung Musterhieb Prügelmöser (L=Langholz; SL=Standardlängen; EH=Energieholz)

Trasse	L B/C	SL B/C	L B 4+	SL D	EH	Summe
Einheit	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
1	81,6	21,2	0,0	18,5	25,8	147,1
2	162,3	26,9	0,0	14,5	18,0	221,7
3	190,0	37,2	17,6	14,1	20,9	279,8
4	170,0	18,1	32,4	21,2	11,4	253,1
5	39,1	16,7	35,6	3,4	7,5	102,3
6	12,7	21,1	19,6	3,2	13,1	69,7
Summe	655,7	141,2	105,2	74,9	96,7	1073,7

Tabelle 20: Deckungsbeitrag Fallstudie Prügelmöser (L=Langholz; SL=Standardlängen; EH=Energieholz)

Parameter	Einheit	L B/C	SL B/C >L 4	SL B/C	SL D	EH	Summe / Mittel
Anfall	m ³	655,7	141,2	105,2	74,9	96,7	1073,7
Anteil	%	61	13	10	7	9	100
Holzerlös	€/m ³	105,0	100,0	90,0	75,0	25,0	
Preisanteil	€/m ³	64,2	13,2	8,8	5,2	2,3	93,6
Erntekosten	€/m ³	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Deckungsbeitrag	€/m³	80,0	75,0	65,0	50,0	0	68,6

Im Laufe der Umtriebszeit von 95 Jahren kann in vergleichbaren Verjüngungsbeständen ein Gesamtzuwachs von 855 m³ (Zuwachs 9 m³/ha/Jahr) im Schlitzverfahren geerntet werden.

Abgeleitet von dem durchschnittlichen Holzerlös von 93,6 €/m³ und Erntekosten von 25,0 €/m³ bei der Fallstudie Prügelmöser ergibt sich ein rechnerischer Deckungsbeitrag von 58.653 €/ha (855 m³ x 68,6 €/m³) für den Zeitraum der gewählten Umtriebszeit.

Bei einer kalkulierten Nutzung nach dem **Altersklassenwaldmodell** wurden 3 Durchforstungen im Alter von 65-, 75- und 85 Jahren sowie ein Kahlschlag mit 95 Jahren unterstellt.

Bei der ersten Durchforstung im Alter von 65 Jahren mit 100 m³/ha betragen die Erntekosten im Mittel 35,5 €/m³. Beim durchschnittlichen Holzerlös von 71,3 €/m³ ergibt sich somit ein Deckungsbeitrag von 35,8 €/m³ oder 3.580 €/ha (Tabelle 21).

Tabelle 21: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 65 Jahre

Parameter	Einheit	Fixlängen B/C 2b+	Fixlängen B/C 2a	Fixlängen B/C 1b	Fixlängen D	Energieholz IL	Summe / Mittel
Anfall	m ³	40	20	10	5	25	100
Anteil	%	40	20	10	5	25	100
Holzerlös	€/m ³	95,0	85,0	70,0	55,0	26,0	
Preisanteil	€/m ³	38,0	17,0	7,0	2,8	6,5	71,3
Erntekosten	€/m ³	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5	35,5
Deckungs- beitrag	€/m³	59,5	49,5	34,5	19,5	-9,5	35,8

Die Erntekosten für den zweiten Eingriff mit 100 m³/ha betragen 32,5 €/m³. Bei einem durchschnittlichen Holzerlös von 75,8 €/m³ ergibt sich ein Deckungsbeitrag von 43 €/m³ oder 4.300 €/ha (Tabelle 22).

Tabelle 22: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 75 Jahre

Parameter	Einheit	Fixlängen B/C 2b+	Fixlängen B/C 2a	Fixlängen B/C 1b	Fixlängen D	Energieholz IL	Summe / Mittel
Anfall	m ³	45	25	5	5	20	100
Anteil	%	45	25	5	5	20	100
Holzerlös	€/m ³	95,0	85,0	70,0	55,0	26,0	
Preisanteil	€/m ³	42,8	21,3	3,5	2,8	5,2	75,8
Erntekosten	€/m ³	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Deckungs- beitrag	€/m³	62,5	52,5	37,5	22,5	-6,5	43,0

Die Erntekosten für den dritten Eingriff mit 100 m³/ha betragen 29 €/m³. Der durchschnittliche Holzerlös liegt bei 81,3 €/m³. Der Deckungsbeitrag beträgt 52,3 €/m³ oder 5.230 €/ha (Tabelle 23).

Tabelle 23: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 85 Jahre

Parameter	Einheit	Fixlängen B/C 2b+	Fixlängen B/C 2a	Fixlängen B/C 1b	Fixlängen D	Energieholz IL	Summe / Mittel
Anfall	m ³	50	28	5	7	10	100
Anteil	%	50	28	5	7	10	100
Holzerlös	€/m ³	95,0	85,0	70,0	55,0	26,0	
Preisanteil	€/m ³	47,5	23,8	3,5	3,9	2,6	81,3
Erntekosten	€/m ³	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
Deckungs- beitrag	€/m³	66,0	56,0	41,0	26,0	-3,0	52,3

Die Erntekosten für den Kahlschlag mit 650 m³/ha betragen 19,2 €/m³. Als durchschnittlicher Holzerlös ergeben sich 81,8 €/m³. Der Deckungsbeitrag beträgt 62,5 €/m³ oder 40.625 €/ha (Tabelle 24).

Tabelle 24: Deckungsbeitrag Kahlschlag Alter 95 Jahre

Parameter	Einheit	Fixlängen B/C 2b+	Fixlängen B/C 2a	Fixlängen B/C 1b	Fixlängen D	Energieholz IL	Summe / Mittel
Anfall	m ³	390	98	52	45	65	650
Anteil	%	60	15	8	7	10	100
Holzerlös	€/m ³	95	85,0	70,0	55,0	26,0	81,8
Preisanteil	€/m ³	57	12,8	5,6	3,9	2,6	81,8
Erntekosten	€/m ³	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
Deckungs- beitrag	€/m³	75,7	65,7	50,7	35,7	6,7	62,5

Als Deckungsbeitrag des Altersklassenwaldes ergeben sich 44.530 €/ha. Dieser Deckungsbeitrag liegt unter dem Deckungsbeitrag einer Bewirtschaftung mit dem Schlitzverfahren mit 56.253 €/ha (Tabelle 25). Die Differenz der beiden Werte ergibt einen finanziellen Vorteil in Höhe von 11.723 €/ha für das Schlitzverfahren.

Tabelle 25: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell ohne Berücksichtigung einer Verzinsung

Eingriff	Zeitpunkt	Deckungsbeitrag Schlitzverfahren	Ernte- menge	Deckungsbeitrag Altersklassenwald	Ernte- menge
	Jahr	€/ha	m ³	€/ha	m ³
Kultur anlegen	1	0		-4000	
Verbissschutz	5	0		-500	
Kulturpflege	10	0		-3500	
Mischungs- regulierung	10	-1200		-1200	
Durchforstung	20	-1200			
Durchforstung	65			3575	100
Durchforstung	75			4300	100
Durchforstung	85			5230	100
Kahlschlag	95			40625	650
Holzernte	14	8379	122		
Holzernte	27	8379	122		
Holzernte	40	8379	122		
Holzernte	54	8379	122		
Holzernte	67	8379	122		
Holzernte	81	8379	122		
Holzernte	95	8379	122		
Deckungsbeitrag		56253		44530	
Erntemenge			855		950
Differenz		11723			

Bei einer Verzinsung der entstehenden Kosten und Erträge bis zum Ende der Umtriebszeit zeigt es sich, ergeben sich deutliche finanziellen Vorteile einer zuwachsorientierten Nutzung im Schlitzverfahren gegenüber einer kahlschlagartigen Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell. Nach einem Kahlschlag müssen erhebliche Investitionen für die Kultur und deren Pflege investiert werden.

Der finanzielle Vorteil einer Bewirtschaftung im Schlitzverfahren gegenüber dem Altersklassenwaldmodell prolongiert auf eine Umtriebszeit von 95 Jahren liegt bei einem kalkulierten Zinssatz von 2 % bei 133.444 €/ha (Tabelle 26).

Tabelle 26: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell und Verzinsung der Kosten und Erträge bis zur Umtriebszeit von 95 Jahren mit 2 %

Eingriff	Zeitpunkt	Deckungsbeitrag Schlitzverfahren		Deckungsbeitrag Altersklassenwald	
		Verzinst (2 %)	Verzinsungszeitraum	Verzinst (2 %)	Verzinsungszeitraum
	Jahre	€/ha	Jahre	€/ha	Jahre
Kultur anlegen	1			-25732	94
Verbissschutz	5			-2972	90
Kulturpflege	10			-18840	85
Mischungsregulierung	10	-6459	85	-5851	80
Durchforstung	20	-5299	75	0	
Durchforstung	65			6476	30
Durchforstung	75			6390	20
Durchforstung	85			6375	10
Kahlschlag	95			40625	
Holzernte	14	41668	81		
Holzernte	27	32211	68		
Holzernte	40	24900	55		
Holzernte	54	18871	41		
Holzernte	67	14588	28		
Holzernte	81	11056	14		
Holzernte	95	8379	0		
Deckungsbeitrag		139915		6471	
Differenz		133444			

Unterstellt man einen Zinssatz von 3 % auf die anfallenden Kosten und Erträge, so erhöht sich dieser Betrag sogar noch auf 176.134 €/ha (Tabelle 27).

Tabelle 27: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell und Verzinsung der Kosten und Erträge bis zur Umtriebszeit von 95 Jahren mit 3 %

Eingriff	Zeitpunkt	Deckungsbeitrag Schlitzverfahren		Deckungsbeitrag Altersklassenwald	
		Verzinst (3 %)	Verzinsungszeitraum	Verzinst (3 %)	Verzinsungszeitraum
	Jahre	€/ha	Jahre	€/ha	Jahre
Kultur anlegen	1			-64381	94
Verbissschutz	5			-43175	90
Kulturpflege	10			-12769	85
Mischungsregulierung	10	-6459	85	-7150	80
Durchforstung	20	-5299	75	0	
Durchforstung	65			8677	30
Durchforstung	75			7766	20
Durchforstung	85			7029	10
Kahlschlag	95			40625	
Holzernte	14	91835	81		
Holzernte	27	62535	68		
Holzernte	40	42583	55		
Holzernte	54	28153	41		
Holzernte	67	19171	28		
Holzernte	81	12674	14		
Holzernte	95	8379	0		
Deckungsbeitrag		239512		-63378	
Differenz		176134			

6. DISKUSSION

Zur Umsetzung der **waldbaulichen Vorgaben** der BaySF auf eine kleinflächige, langfristige und natürliche Verjüngung des Gebirgswaldes wurde das in der Schweiz entwickelte Schlitzverfahren adaptiert und erprobt.

Bei dem von den BaySF praktizierten Schlitzverfahren, werden beidseits der Seiltrasse schlitzartige Verjüngungsflächen von größer 1 Baumlänge und der Breite von $<0,5$ Baumlängen in den Verjüngungsbestand geschlagen. Die Größe der Verjüngungsschlitze wie deren Anordnung unterscheidet sich den Vorschlägen von Ott (1989), der als Voraussetzung für eine erfolgreiche Verjüngung in hochmontanen-subalpinen Bergwäldern eine nach der Sonne ausgerichtete Anlage der Schlitze fordert. Die Schlitze sollten länger sein ($>1,5$ Baumlängen) als von den BaySF praktiziert.

Im Rückblick auf die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten schlitzartigen Eingriffe, hatte der Sonnen- bzw. Wärmeeintrag keine so große Bedeutung für das Ankommen der Naturverjüngung, als in den hochmontanen-subalpinen Bergwäldern der Schweiz. Nach eigenen Beobachtungen entwickelte sich bei angepassten Wildbeständen, unabhängig von der Exposition des Schlitzes zur Sonne, eine natürliche Verjüngung des Bergmischwaldes. Nach Stocker (2007) spielt der Wildverbiss für ein Funktionieren der Naturverjüngung in Dauerwäldern eine entscheidende Rolle. Er bezeichnet das Schalenwild als größten Widersacher des Dauerwaldes und forderte eine konsequente Bejagung des Schalenwildes.

Aktuell gibt es allerdings noch kein standardisiertes Arbeitssystem, welches eine kostengünstige Holzernte bei geringen Eingriffsmengen in Steillagen ermöglicht. Das Wissen über die forsttechnische Umsetzung von schlitzartigen Eingriffen beschränkt sich derzeit nur auf Ansätze aus der Praxis. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, ein seilgestütztes Holzerntesystem für die Verjüngung von Gebirgswaldbeständen im Schlitzverfahren zu entwickeln und die Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und den Menschen zu evaluieren sowie Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Im Zuge der Untersuchungen zeigte es sich, dass der **Montageaufwand** bei beiden Seilgeräten in der Rückerichtung bergauf geringer ist als in der Rückerichtung bergab. Der Zeitbedarf für die Montagearbeiten ist in der Rückerichtung bergab um ca. 10 Mannstunden höher als in der Rückerichtung bergauf. Sowohl beim Schlitzverfahren wie beim Kahlschlagbetrieb steigt der Montageaufwand mit der Trassenlänge linear an.

Auch Stampfer et al. (2006) ermittelten für die Rückerichtung bergab einen höheren Montagezeitbedarf und führten das auf die zusätzliche Installation des Rückholseiles, welches den Laufwagen zurück zum Einsatzort bringt, zurück. Das trifft beim vorliegenden Vergleich nur auf den Koller K 507 zu, welcher im Bergaufbetrieb mit Trag- und Zugseil auskommt. Der Laufwagen MSK 3 fährt bergab mit der Schwerkraft und die aktive Ausspülung des Zugseiles erfolgt über einen in den Laufwagen integrierten Motor. Beim Syncrofalke 4 to sind dagegen sowohl in der Rückerichtung bergab als auch bergauf drei Seile zu installieren. Dabei wird je nach Konfiguration einmal das Zugseil durch das Rückholseil zwangsausgespült oder umgekehrt. Bei einigen Aufstellungen ist es allerdings möglich, dass das Zug- und Rückholseil in der Seilgasse geführt wird, was Montagezeit spart.

Weiter zeigte es sich, dass die geforderte kleinflächige Verjüngung von Bergmischwäldern im Schlitzverfahren direkte Auswirkungen auf die Montagearbeiten beim Seilgerät hat. Unabhängig von der Rückerichtung war der Zeitbedarf für die Montage beim Schlitzverfahren im Vergleich zum Kahlschlagbetrieb deutlich größer. So muss beim Schlitzverfahren vor der Montage zuerst die Seiltrasse von den Waldarbeitern freigeschnitten werden. Beim Kahlschlagbetrieb kann entlang des verbleibenden Altbestandes das Tragseil auf dem zuvor festgelegten Trassenverlauf montiert und an den markierten Anker- und Stützenbäumen befestigt werden. In der Rückrichtung bergauf betrug im Schlitzverfahren bei einer Trassenlänge von 225 m der durchschnittliche Montageaufwand 37,3 Mannstunden und beim Kahlschlagbetrieb 24,4 Mannstunden.

Im Vergleich zum Kahlschlagbetrieb ist die **forsttechnische Umsetzung des Schlitzverfahrens** schwieriger. Die Erntemengen auf den Schlitzen sind begrenzt und die Schlitze liegen wechselseitig verteilt entlang der Seiltrasse im Abstand von >1 Baumlängen. Bei einem Kahlschlagbetrieb liegen die gefällten Bäume gleichmäßig verteilt entlang der Seiltrasse. Die Laufwege sind kürzer und der Anhänger kann die Auslastung der Transportkapazität des Seilgerätes einfacher bewerkstelligen.

Um trotz dieser ungünstigen Ausgangslage einen möglichst hohen Deckungsbeitrag zu erreichen, ist die Effizienz bei der Holzernte von besonderer Bedeutung. Die **Holzrückung im Baumverfahren** (Mastseilgerät mit integriertem Prozessor) ermöglicht eine kostengünstige Rückung und Aufarbeitung der gefällten Bäume.

Das Baumverfahren generell wird bei den BaySF überwiegend in der Rückerichtung bergauf angewendet. Die Einschläge in der Rückerichtung bergab werden bei den BaySF, zur Vermeidung von Bestandesschäden, meistens im Sortimentsverfahren durchgeführt (BaySF, 2017). Bei Anwendung des Schlitzverfahrens, kann der Anteil der Aufarbeitung im Baumverfahren in der Rückerichtung bergab bei geringen Bestandesschäden gesteigert werden, was hilft die Effizienz der Holznutzungen zu verbessern.

Es wurde ein **Produktivitätsmodell** für die Fällung mit Motorsäge, Rückung mit Mastseilgerät und Aufarbeitung mit Prozessor im Schlitzverfahren entwickelt. Die Produktivität steigt mit zunehmendem Stückvolumen und sinkt umso länger die Trasse ist. Die Seilrückung ist in der Rückerichtung bergauf produktiver als bergab. Innerhalb der waldbaulichen Eingriffsarten weist die Z-Baum-Durchforstung das niedrigste Produktivitätslevel auf. Etwas darüber liegt jenes der schlitzartigen Durchforstung, gefolgt von der schlitzartigen Verjüngungsnutzung. Die höchste Produktivität wird bei einem femelartigen Verjüngungseingriff erzielt.

Die höhere Produktivität in der **Rückerichtung** bergauf, ist auf unterschiedliche Rückegeschwindigkeiten zurückzuführen. Aus Sicherheitsgründen wird bei den BaySF die Laufwagengeschwindigkeit bei der Bergabrückung reduziert. Das passiert vor allem bei steilen Trassen mit Blocküberlagerung und bestehender Steinschlaggefahr sowie beim Überqueren von Stützen, um eine Gefährdung des Maschinisten im Seilgerät durch losgelöste Steine oder Stammteile während des seitlichen Beizugs oder der Rückung zu verringern. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Ghaffariyan et al. (2009) und Loschek (2009), welche die höhere Produktivität in der Rückerichtung bergauf über die unterschiedlichen Seilgeschwindigkeiten erklärten.

Aus **waldbaulicher Sicht** hatte die Größe der Eingriffsfläche und die Art des Eingriffs auch in der Durchforstung einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität. Beim Vergleich von Z-Baum artigen mit schlitzartigen Durchforstungseingriffen, wurde in der Rückerichtung bergauf eine Produktivitätssteigerung von 24 % beobachtet. Dadurch konnten die Erntekosten in der Durchforstung deutlich gesenkt werden.

Im Zuge der Auswertungen konnte die **Produktivität** des Koller K 507 im Schlitzverfahren, hergeleitet aus dem Produktivitätsmodell, mit einem Syncrofalken 4 to, eingesetzt im Kahlschlagbetrieb bei gleichen Einsatzbedingungen (Trassenlänge 225 m, Rückerichtung bergauf, Stückvolumen $0,25 \text{ m}^3$) verglichen werden. Im Zuge des Vergleiches stellte sich heraus, dass im Kahlschlagbetrieb, bei größerer Angriffsfläche, eine höhere Produktivität als beim Schlitzverfahren erreicht wurde. Beim Syncrofalken 4 to im Kahlschlagbetrieb in der Rückerichtung bergauf lag die Produktivität bei $15,2 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$. Beim Koller K 507 wurde im Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergauf eine Produktivität von $10,8 \text{ m}^3/\text{PSH}_{15}$ erreicht.

Die **Kosten bei der Holzernte** im Schlitzverfahren sind sowohl in der Rückerichtung bergauf als auch bergab höher als im Kahlschlagbetrieb, was sich gut mit Ergebnissen der Literatur deckt, wo die Erntekosten beim großflächigen Kahlschlagbetrieb bei gleicher Stückmasse immer am niedrigsten sind (Kellogg et al., 1996; Baumgras et al., 1995; Hartley und Han, 2007). Hartley und Han (2007) kamen zum Schluss, dass die Rundholzpreise und unterschiedlichen waldbaulichen Eingriffsarten einen größeren Einfluss auf den Deckungsbeitrag haben als die Kosten der verschiedenen Holzerntesysteme.

Weiters erfolgten **betriebswirtschaftliche Untersuchungen** über die langfristigen finanziellen Auswirkungen schlitzartiger Eingriffe in Verjüngungsbeständen. Im Einzelnen wurde untersucht, ob schlitzartige Eingriffe mit Mastseilgeräten in Verjüngungsbeständen rentabel sein können und ob sie sogar eine wirtschaftliche Alternative zu einem Kahlschlagbetrieb darstellen. Als wichtiges praktisch verwertbares Ergebnis der Untersuchung kann festgehalten werden, dass eine kleinflächige Verjüngung von Gebirgswäldern, auch bei geringen Holzanfällen im Schlitzverfahren bei den BaySF rentabel durchgeführt werden kann.

Zur Untersuchung der langfristigen finanziellen Auswirkungen des Schlitzverfahrens wurde bei den BaySF der Musterhieb Prügelmöser durchgeführt. Mit den erhobenen Daten erfolgte im Rahmen dieser Arbeit ein Vergleich der Nutzung im Schlitzverfahren mit einer klassischen Bewirtschaftung mit Kahlschlag nach dem Altersklassenwaldmodell. Dabei zeigte es sich, dass der der Nachteil höherer Erntekosten beim Schlitzverfahren gegenüber dem Kahlschlagbetrieb bis zum Ende der Umtriebszeit ausgeglichen werden kann. Die Erntekosten lagen beim Schlitzverfahren um 5,8 €/m³ (Rückrichtung bergauf) bzw. 6,0 €/m³ (Rückrichtung bergab) über den Erntekosten des Kahlschlagbetriebes.

Die langfristigen ökonomischen Vorteile des Schlitzverfahrens gegenüber einem Kahlschlagbetrieb bis zum Ende einer Umtriebszeit können auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden. Beim Schlitzverfahren werden bei den BaySF höhere durchschnittliche Holzerlöse in Höhe von 93,6 €/m³ realisiert. Dies sind 17 % mehr als beim Altersklassenwald mit 80 €/m³ (Durchschnitt von Durchforstungen und Kahlschlag). Am FB Berchtesgaden ist hochwertiges Langholz am Markt gefragt und es können höhere Erlöse als für Standardlängen erzielt werden. Die durchschnittlichen Erntekosten (Durchforstungen und Kahlschlag) sind beim Kahlschlagbetrieb mit 23,5 €/m³ niedriger als beim Schlitzverfahren mit 25 €/m³. Insgesamt ergibt sich bei der Holzernte für das Schlitzverfahren ein höherer Deckungsbeitrag in Höhe von 4.923 €/ha während der Umtriebszeit.

Der geringere Aufwand für Kultur- und Pflegearbeiten beim Schlitzverfahren, infolge der Ausnutzung von Naturverjüngung und einer Selbstdifferenzierung der Mischbaumarten in den Schlitzen, schlägt ebenfalls positiv zu Buche. Am FB Berchtesgaden der BaySF betragen die Kosten für eine Mischungsregulierung und eine Pflege unter dem Schirm des Altbestandes während der kalkulierten Umtriebszeit ca. 2.400 €/ha. Nach Stampfer (2017) betragen die Kosten bis zu einer ersten kostendeckenden Nutzung im Alter von 65 Jahren nach einem Kahlschlag beim FB Abtenau der ÖBf AG ca. 9.200 €/ha. Durch die geringeren Aufwendungen für die Verjüngung und Pflege ergeben sich Einsparungen von in Höhe von 6.800 €/ha.

Insgesamt ergibt sich ein ökonomischer Vorteil von 11.723 €/ha während der Umtriebszeit von 95 Jahren für eine Zuwachsabhängige Nutzung im Schlitzverfahren gegenüber einem Kahlschlagbetrieb. Bei einer Verzinsung des eingesetzten Kapitals (Kultur-, Pflege- und Verbissschutz- und Mischungsregulierungskosten) und der erzielbaren Erträge (Deckungsbeiträge aus den Durchforstungen im Altersklassenwald, Deckungsbeiträge der Starkholznutzungen im Schlitzverfahren) kommen die ökonomischen Vorteile einer laufenden Nutzung im Schlitzverfahren noch deutlicher zum Vorschein.

Bei einer Verzinsung des Kapitals/Erlöse mit einem Zinssatz von 2 % ergeben sich während der Umtriebszeit wirtschaftliche Vorteile für das Schlitzverfahren in Höhe von 133.444 €/ha. Bei einem Zinssatz von 3 % ergeben sich sogar wirtschaftliche Vorteile in Höhe von 176.134 €/ha.

Allerdings basieren die Ergebnisse des betriebswirtschaftlichen Vergleiches auf den örtlichen Verhältnissen des Musterhiebes am FB Berchtesgaden/BaySF. Der höhere Holzerlös für Lang- und Starkholz liegt an der aktuell hohen Nachfrage nach diesen Sortimenten am FB Berchtesgaden.

Die Kalkulation wurde anhand von Erfahrungswerten und Kostenwerten der BaySF und der ÖBf AG erstellt und gibt die aktuellen Verhältnisse an beiden Forstbetrieben wieder, was sich in der Zukunft ändern kann.

Durch die Begrenzung des Eingriffs auf die Bestandesschlitzte ermöglicht das Schlitzverfahren eine Holzernte bei geringen **Bestandesschäden**. Beim Schlitzverfahren können die Bestandesschäden nach Ohain (2017) durch die Begrenzung des Eingriffs auf die Schlitzflächen auf 25 % der Bestandesfläche reduziert werden. Im Rahmen der Arbeit konnten keine detaillierten Schadensaufnahmen durchgeführt werden.

Die von Stampfer (2002) definierten Schadenspräferenzwerte für das Arbeitssystem Seilrückung im Baumverfahren von 20 % bis maximal 30 % werden beim Schlitzverfahren erfahrungsgemäß unterschritten. Die Schadenshöhe dürfte noch unter der von Viertler (2003) beobachteten Schadenshöhe von 10 % bei einer Holzernte im Baumverfahren bergauf, bei Einhaltung der Fällordnung, liegen.

Als Ergebnis der Arbeit können Auswirkungen auf die **Arbeitssicherheit** bei Einschlägen im Schlitzverfahren gegenüber jenen im Kahlschlagbetrieb vermutet werden. Die deutlich niedrigere Unfallquote bei der BaySF mit 25 Unfällen/1 Mio. m³ bei einem Großteil der Einschläge im Schlitzverfahren legt nahe, dass das Schlitzverfahren eventuell eine sichere Variante darstellt. Bei der ÖBf AG Seiltechnik wurde eine Unfallquote von 36 Unfällen/1 Mio. m³ bei einer überwiegenden Holzernte im Kahlschlagbetrieb von Eiwegger (2010) beobachtet. Dieser Umstand sollte Gegenstand einer zukünftigen Untersuchung sein, um zu überprüfen, ob hier ein Zusammenhang besteht, und ob bei Einsatz des Schlitzverfahrens die Unfallhäufigkeit reduziert werden kann.

7. AUSBLICK

Das Schlitzverfahren wird seit 2018 bei den BaySF als Waldbauverfahren zur kleinflächigen Verjüngung von Bergmischwäldern eingesetzt und wurde als wesentliches Element in die Bergwaldrichtlinie der BaySF aufgenommen (BaySF, 2018). Bei konsequenter Anwendung in den Hochgebirgsbetrieben der BaySF entstehen mittelfristig strukturierte Bergmischwälder mit einem hohen Anteil an Vorausverjüngung, was hilft, das Betriebsrisiko im Hinblick auf zukünftige Kalamitäten zu reduzieren.

Im Geschäftsjahr 2017 wurden 38 % des Einschlages (135.000 m³) der BaySF im Hochgebirge mit Seilgeräten gerückt, die Hälfte davon (68.000 m³) im Sortimentsverfahren. Das Sortimentsverfahren wird aufgrund einer erwarteten höheren Bestandesschonung überwiegend in der Rückerichtung bergab eingesetzt. Hier könnte das Schlitzverfahren, welches eine schadensarme Holzernte im Baumverfahren auch in der Rückerichtung bergab ermöglicht, eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Alternative sein. Bei Anwendung des Schlitzverfahrens in der Rückerichtung bergab, bestehen erhebliche Einsparmöglichkeiten bei den BaySF von ca. 500.000 €/Jahr.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die forsttechnische Umsetzung des Schlitzverfahrens als spezifisches waldbauliches Verfahren für eine kleinflächige Verjüngung des Gebirgswaldes der Bayerischen Staatsforsten (BaySF) entwickelt und verprobt. Das Schlitzverfahren berücksichtigt mögliche Zielkonflikte zwischen den waldbaulichen Vorgaben auf eine kahlschlagfreie und kleinflächige Verjüngung von Altbeständen und den betriebswirtschaftlichen Forderungen nach einer kostengünstigen Holzernte im Gebirgswald.

Zur Evaluierung der forsttechnischen Umsetzung wurden während eines 7-jährigen Untersuchungszeitraumes, Holzeinschläge im Baumverfahren mit dem Mastseilgerät Koller K 507 mit Prozessor Woody 60 H in der Höhe von ca. 66.000 m³ innerhalb der BaySF (Bayern/Deutschland) in Steillagen durchgeführt, aufgezeichnet und analysiert. Zur Beurteilung der Effizienz des Schlitzverfahrens in der Verjüngungsnutzung im Vergleich mit einem Kahlschlagbetrieb wurden über einen Zeitraum von 4 Jahren Daten des Forstbetriebes Mayr-Melnhof-Saurau (MM) (Steiermark/Österreich) analysiert. Im Untersuchungszeitraum wurden mit dem Syncrofalke 4 to mit Prozessor Woody 60 H ca. 47.000 m³ Holz, überwiegend in kahlschlagartiger Nutzung, im Baumverfahren gerückt und aufgearbeitet.

Bei einem Vergleich der beiden Seilgeräte stellte es sich heraus, dass die geforderte kleinflächige Verjüngung von Bergmischwäldern bei den BaySF unmittelbare Auswirkungen auf die Montagezeiten des Koller K 507 hat. Diese sind bei den BaySF im Schlitzverfahren signifikant höher als bei MM im Kahlschlagbetrieb. Bei der mittleren Trassenlänge der BaySF (330 m) liegt der Zeitbedarf für Montage, Demontage bei 55,2 Mannstunden PSH₁₅ (bergab) bzw. 44,3 Mannstunden PSH₁₅ (bergauf). Bei MM wird bei der gleichen Trassenlänge deutlich weniger Zeit benötigt (42,3 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergab und 31,5 Mannstunden PSH₁₅ in Rückerichtung bergauf). Der Unterschied zwischen den Forstbetrieben liegt an dem höheren Aufwand bei den BaySF für das Trassieren und für das Freischneiden der Seiltrassen vor der Rückung. Mit steigender Trassenlänge steigt bei beiden Seilgeräten der Montageaufwand.

Bei beiden Seilgeräten sind die Montagezeiten in der Rückerichtung bergab höher als in der Rückerichtung bergauf. Bei einer Trassenlänge von 400 m werden bei den BaySF in der Rückerichtung bergab 60 Mannstunden und in der Rückerichtung bergauf 48 Mannstunden benötigt. Bei MM werden bei einer Trassenlänge von 400 m in der Rückerichtung bergab 48 Mannstunden und in der Rückerichtung bergauf 36 Mannstunden benötigt. Der größere Zeitbedarf in der Bergabrückung lässt sich für die BaySF auf die Notwendigkeit der Installation eines zusätzlichen Rückholseiles für den Rücktransport des Laufwagens zum Einsatzort zurückführen.

Anhand der Betriebsdaten der beiden Mastseilgeräte konnte ein Zeitbedarfsmodell für die Montage erstellt werden. Die Parameter Trassenlänge, Rückerichtung und Betrieb hatten einen signifikanten Einfluss auf den Zeitbedarf für die Montage in Mannstunden PSH_{15} und können 46 % der Variabilität der Produktivität erklären.

Beim Produktivitätsmodell für die Holzernte mit dem Koller K 507 bei den BaySF bilden das Stückvolumen, die Rückerichtung, die Trassenlänge und die waldbauliche Eingriffsart die maßgeblichen Einflussfaktoren. Diese Parameter erklären 48 % der Variabilität der Produktivität.

Unabhängig von der waldbaulichen Eingriffsart steigt die Produktivität mit steigendem Stückvolumen an und ist in der Rückerichtung bergauf höher als in der Rückrichtung bergab. Der Einfluss des Stückvolumens hat auf die Produktivität einen größeren Einfluss als die Rückedistanz. Bei den waldbaulichen Eingriffen steigt die Produktivität mit steigender Eingriffsstärke und größerer Eingriffsfläche an.

Die Rückerichtung ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Produktivität eines Mastseilgerätes. In der Rückrichtung bergab besteht in Steillagen eine höhere Gefährdung für die Mannschaft und das Mastseilgerät durch herabrollende Steine oder Stammteile, weshalb die Geschwindigkeit des Laufwagens reduziert wird.

Die beobachtete durchschnittliche Produktivität des Syncrofalken 4 to beim MM war bei überwiegend kahlschlagartigen Eingriffen bei ähnlichem Stückvolumen und vergleichbarer Trassenlänge in der Rückerichtung bergauf mit $15,2 \text{ m}^3/PSH_{15}$ (bergab $13,7 \text{ m}^3/PSH_{15}$) höher als beim Koller K 507 im Schlitzverfahren mit $10,8 \text{ m}^3/PSH_{15}$ (bergab $10,1 \text{ m}^3/PSH_{15}$).

Abgeleitet von den Systemkosten und der Produktivität der Mastseilgeräte lagen die Erntekosten bei überwiegend kahlschlagartiger Nutzung bei MM bei $19,3 \text{ €/m}^3$ in der Rückrichtung bergauf und bei $20,9 \text{ €/m}^3$ in der Rückerichtung bergab. Bei den BaySF lagen die Erntekosten im Schlitzverfahren bei 25 €/m^3 bergauf und bei $26,8 \text{ €/m}^3$ in der Bergabrückung. Im Vergleich zum Kahlschlagbetrieb war das Schlitzverfahren bergauf um 30 % ($5,8 \text{ €/m}^3$) und bergab um 28 % ($6,0 \text{ €/m}^3$) teurer als eine Holzernte im Kahlschlagbetrieb.

Im Zuge der Fallstudie Prügelmöser wurde das Schlitzverfahren zur Verjüngung eines Gebirgswaldes am FB Berchtesgaden/BaySF angewendet und die Ergebnisse für einen betriebswirtschaftlichen Vergleich mit einer herkömmlichen Nutzung entsprechend dem Altersklassenwaldmodell verwendet.

Bei dem Vergleich der Starkholznutzung im Schlitzverfahren mit einem Kahlschlagbetrieb im Laufe in einer 95-jährigen Umtriebszeit schneidet das Schlitzverfahren, finanziell betrachtet, besser ab. Der höhere Deckungsbeitrag (+4.923 €) der Holzernte sowie ein geringerer Aufwand für Kultur- und Pflegekosten (- 6.800 €/ha) führen zu einem ökonomischen Vorteil in Höhe von 11.723 €/ha für das Schlitzverfahren gegenüber dem Kahlschlagbetrieb.

Bei einer Verzinsung des eingesetzten Kapitals für die Ausgaben und für die vorzeitig anfallenden positiven Deckungsbeiträge der Nutzungen bis zum Ende der Umtriebszeit, schneidet das Schlitzverfahren betriebswirtschaftlich erheblich besser ab. Bei einer Verzinsung von 2 % ergeben sich wirtschaftliche Vorteile für Schlitzverfahren in Höhe von ca. 133.444 €/ha. Verteilt man den finanziellen Vorteil gleichmäßig auf die Umtriebszeit so ergeben sich jährliche Vorteile von 1.405 €/ha/Jahr. Bei einem Zinssatz von 3 % ergeben sich sogar wirtschaftliche Vorteile in Höhe von ca. 176.134 €/ha während der kalkulierten Umtriebszeit von 95 Jahren. Verteilt man den finanziellen Vorteil gleichmäßig auf die Umtriebszeit so ergeben sich jährliche Vorteile von 1.854 €/ha/Jahr.

9. QUELLENVERZEICHNIS

9.1. Literaturverzeichnis

Assmann, E.; Franz, F. 1963. Vorläufige Fichten-Ertragstafel mit Zuwachs-Reduktionstafel für Bayern 1963. 125 S.

Baumgras, J; Miller, G.; LeDoux C. (1995). Economics of Hardwood Silviculture using Sykyline and conventional Logging. Hardwood Symposium Proceedings. May 17-20, 1995.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2007. Jahresbericht Geschäftsjahr 2006. Bayerische Staatsforsten AöR Regensburg. 101 S.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2015. Jahresbericht Geschäftsjahr 2014. Bayerische Staatsforsten AöR Regensburg. 46 S.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2016. Jahresbericht Geschäftsjahr 2015. Bayerische Staatsforsten AöR Regensburg, 39 S.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2017. Jahresbericht 2016. Bayerische Staatsforsten AöR Regensburg. 65 S.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2018. Jahresbericht 2017. Bayerische Staatsforsten AöR Regensburg. 51 S.

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2018. Waldbauhandbuch Bayerische Staatsforsten. Richtlinie für die Waldbewirtschaftung im Hochgebirge, 138 S.

Brosinger, F.; Rothe, A. 2003. Intakter Bergwald - unverzichtbar für den Hochwasserschutz in Bayern. Berichte aus der LWF 40, 34-38.

Bullinger, H.-J. 1994. Einführung in das Technologiemanagement – Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. B.G. Teubner Stuttgart. 329 S.

Butora, A.; Schwager, G. 1986. Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Bericht der eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Nr. 288. Schweiz 47 S.

Chryssolouris, G. 1992. Manufacturing Systems – Theory and Practice. Springer. New York. 419 S.

Daxner, P. 1998. Produktivität und Effizienz des selbstfahrenden Laufwagens "Woodliner". Diplomarbeit. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 71 S.

Dierkes, M. 1993. Was ist und wozu betreibt man Technologiefolgen. Abschätzung. In: Dierkes, M. (Hrsg.): Die Technisierung und ihre Folgen. Zur Biographie eines Forschungsfeldes. Ed. Sigma. Berlin. 318 S.

Eggenberger, M. 2005. Optimierung und Einsatz moderner Holzerntesysteme im Gebirgswald. Abteilung Umweltwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 71 S.

Erber, G.; Haberl, A.; Pentek, T.; Stampfer, K. 2017. Impact of operational parameters on the productivity of whole tree cable yarding – a statistical analysis based on operation data. *Austrian Journal of Forest Science* 134: 1–18.

Eriksson, M., Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large followup datasets. *International Journal of Forest Engineering* 25: 179-200.

Eiwegger, A. 2009. Arbeitssicherheit bei der Seilrückung - Auswertung von Arbeitsunfällen. Diplomarbeit am Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 57 S.

Fairweather, S.E. 1991. Damage to residual trees after cable logging in northern hardwoods. *Northern Journal of Applied Forestry* 8: 15-17.

Frutig, F.; Fahrni, F.; Stettler, A.; Egger, A. 2007. Mechanisierte Holzernte in Hanglagen. *Wald und Holz* 4/2007: 47-52.

FPP (1986) (Kooperationsabkommen Forst - Platte - Papier). Holzernte in der Durchforstung - Verfahren, Planung - Seilgelände. Bohmann Druck und Verlag AG, Wien. 106 S.

FHP (2008) (Hrsg.) Holzernte im Seilgelände. Planung. Forst Holz Papier 4. Auflage, Wien. 108 S.

FHP (2011) (Hrsg.). Holzernte im Seilgelände. Organisation. Forst Holz Papier 12. Auflage, Wien. 116 S.

Ghaffariyan, M. R.; Stampfer, K.; Sessions, J. 2009. Production equations for tower yarders in Austria. *International Journal of Forest Engineering* 20, 17-21.

Grabherr G., Koch G., Kirchmeier H., Reiter K. 1998. Hemerobie österreichischer Waldökosysteme. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-ProgramM, Band 17, Wien. 493 S.

Grieshofer, H. 2000. Gebirgsharvester Mounty 4000. Österreichische Forstzeitung (Arbeit im Wald): 8-9.

Gschwantner, T.; Prskawetz, M. 2012. Wie unterscheidet sich Altersklassenwald vom übrigen Ertragswald? Österreichische Forstzeitung 2012/1: 8-10.

Han, H.-S.; Kellog, L.D. 1997. Comparison of damage characteristics to young Douglas fir stands for commercial thinning using foot timber harvesting systems. In COFE (Council of Forest Engineering), Rapid City, South Dakota, USA, July 28-30, 1997, 10 p.

Heinimann, H. R. 1986. Seilkraneinsatz in den Schweizer Alpen. Eine Untersuchung über die Geländeverhältnisse, die Erschließung und den Einsatz verschiedener Seilanlagen. Dissertation, ETH Zürich Nr. 7929. 169 S.

Heinimann, H. R. 1996. Umweltverträgliche Forsttechnik als Voraussetzung für naturnahe Waldwirtschaft. *Forst und Holz* (51) 9: 299-310.

Heinimann, H. R. 1998. Waldbau und Forsttechnik - von einer linearen zu einer integrierten Denkweise. In: Beiträge zur Walderschließung und forstlichen Arbeitswissenschaft. Festschrift zur Emeritierung von Professor Trzesniowski. Stampfer (Hrsg.). Band 8 der Schriftenreihe des Instituts für Forsttechnik der Universität für Bodenkultur Wien: 27-35.

Heinimann, H.R.; Stampfer, K.; Loschek, J.; Caminada, L. 2001. Perspectives on 11th Pacific Northwest Skyline Symposium. Seattle, Washington, USA, Dec. 10 – 12, 2001, 268-279.

Heinimann, H.R. 2003. Holzerntetechnik zur Sicherstellung einer minimalen Schutzwaldpflege. ETH Zürich Forest Engineering. Interner Bericht, 12-41.

Heinimann, H. R.; Stampfer, K.; Loschek, J.; Caminada, L. 2006. Stand und Entwicklungsmöglichkeiten der mitteleuropäischen Seilgerätetechnik. Centralblatt für das gesamte Forstwesen (Austrian Journal of Forest Sciences): 121-139.

Hirsinger, E.; Gmür, P.; Wasem, U.; Wunder, J.; Brang, P. 2013. 10 Jahre Erfolgskontrolle in schlitzförmigen Lücken. Wald und Holz 3/13: 29-32.

Heylighen, F.; Joslyn, C.; Turchin V. (editors). 2003. Resilience [online]. Available from <http://pepmc1.vub.ac.be/ASC/Resilience.htm>

Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics 4:1-23.

Holling, C.S. 2001. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. Ecosystems 4: 390-405.

Holzleitner, F.; Stampfer, K. 2005. Seilrückung im Baumverfahren. Wald und Holz 11: 48-51.

Holzleitner, F.; Stampfer, K.; Visser, R. 2011. Utilization Rates and Cost Factors in Timber Harvesting Based on Long-term Machine Data. Croatian Journal of Forest Engineering 32: 501-508.

Hartley, D.; Han S. (2007). Effects of Alternative Silvicultural Treatments on Cable Harvesting Productivity and Cost in Western Washington. West. J. Appl. For. 22(3).

Howard, A. F. 1989. A sequential approach to sampling design for time studies of cable yarding operations. Canadian Journal of Forest Research 19: 973 – 980.

Kanzian, C. 2003. Modelle zur Abschätzung der Installationszeit von Seilgeräten. Diplomarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur Wien, 63 S.

Karlon, A.; Loschek, J. 2017. Neue Leistungsdimensionen. Forstzeitung 11/2017: 22-23.

Kellog, L.; Bettinger, P.; Edwards, R. 1996. A Comparison of Logging Planning, Felling, and Skyline Yarding Costs Between Clearcutting and Five Group-Selection Harvesting Methods. WJAF 11(3) 1996

Kohn, K.A., Franklin, J.F. 1997. Creating a forestry for the 21st century: the science of ecosystem management. Island Press, Washington, D.C

Kudjelka, W. 1977. Versuch einer Erfassung und Bewertung von Rückeschäden bei der Durchforstung in Fichten- und fichtenreichen Jungbeständen (Stangenorten). Dissertation, Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur, Wien. 116 S.

Landolt, E., 1895. Der Wald, seine Verjüngung, Pflege und Benutzung. Bearbeitet für das Schweizer Volk. Hrsg. Schweiz. Forstverein. Zürich: Schulthess, 421 S.

Lenk, E.; Kenk, G. 2007. Langfristiges Wachstum Schwarzwälder Plenterwälder. AFZ/Der Wald, Nr. 3, S. 132-135.

Leitner, T. 2009. Funkchoker bei der Seilrückung-Effizienzanalyse und ergonomische Beurteilung. Diplomarbeit am Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 44 S.

Lexer M.J.; Vacik H.; Stampfer K. 2017. Unterlagen zur Lehrveranstaltung 913.329 Waldbau und Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien.

Limbeck-Lilienau, B. 2002. Hochmechanisierte Holzernte mit schräger Seiltrasse. Diplomarbeit, Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 67 S.

Loschek, J. Rationalisierung der Holzernte im Seilgelände notwendig. Österreichische Forstzeitung: 1997, Nummer 8 S. 7-9.

Loschek, J. 2009. Oberhalb der Forststraßen - Bergabseilung von Schwachholz Wald und Holz 6: 4-6.

Loschek, J. 2013. Bergabseilung von Schwachholz. Oberhalb der Forststraßen. Wald und Holz 2013 1/13. S. 22-24.

Markart, G.; Kohl, B.; Perzl, F. 2007. Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung - eine unterschätzte Größe? LWF Wissen, Freising: 34-43.

Meyer H.; Ott E.K. 1991. Gebirgswaldbau-Schutzwaldpflege. Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. 2. vollständig neu bearb. Aufl. Ed. Stuttgart (etc.): Fischer. XVII, 587 S.

Mayer, H. 1992. Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 4. Teilw. neu bearb. Aufl. - Stuttgart [u.a.]: Fischer, XXV, 522 S.

Meng, W. 1978. Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei dem Holzernte-Ausmaß und Verteilung; Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Schriftenreihe der LFV Baden-Württemberg 53, 159 S.

Möller, A., 1922. Der Dauerwaldgedanke; Sein Sinn und seine Bedeutung. Berlin: Springer, 1922, 84 S.

Neft, R. 2015. Vortrag im Bayerischen Landtag. Landwirtschaftsausschuss; Maßnahmen zum Schutz des Bergwaldes, 32 S.

Neumeyer, M.; Neft R. 2015. baysfintern Ausgabe Nr. 86, 24 S.

Ohain, W. 2017. Überführung von Altersklassenwald in plenterartigen Dauerwald im Gebirge. Bachelorarbeit Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 74 S.

Ott, E.K. 1997. Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt, Bern. 287 S.

Ott, E.K. 1989. Verjüngungsschlitz Prinzipskizze. Unterlagen zur Vorlesung Gebirgswaldbau.

ÖBF AG (Österreichische Bundesforste) (1992). Mechanisierte Holzernte – Arbeitsgestaltung (Planung, Organisation, Ausführung und Entlohnung). Runderlass 11000.

PEFC Deutschland (Hrsg.) 2014. PEFC-Standards für nachhaltige Waldbewirtschaftung, Deutschland, 15 S.

Plessl, W. 2013. Maschinendaten basiertes Modell für Produktivität und Kraftstoffverbrauch für Erntemaschinen. Diplomarbeit. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 39 S.

Pretzsch, H.; Uhl, P.; Steinacker, E.; Moshhammer, R. 2014. Struktur und Dynamik von Bergmischwäldern am Forstbetrieb Schliersee; Exkursionsführer MWW-EF 154, 30 S.

Pröll, W. 2000. Gebirgsharvester Koller K-501 mit Woody 50 – Leistung und Kosten. Österreichische Forstzeitung (Arbeit im Wald) 3: 1–3.

Purfürst, T. 2009. Der Einfluss des Menschen auf die Leistung von Harvester-systemen. Dissertation. Institut für Forstnutzung und Forsttechnik, Technische Universität Dresden, Deutschland. 93 S. plus Anhang.

Rottensteiner, C. 2014. Vibration analysis of forest operations and road construction. Dissertation. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 47 S.

Spinelli, R.; Visser, R. 2008. Analyzing and estimating delays in harvester operations. International Journal of Forest Engineering 19: 36-41.

Schöpfer, W.; Stoehr, D. 1991. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Freiburg 50: 102 S.

Schöpfer, W.; Dauber, E. 1989. Bestandessortentafeln. Freiburg i. Br.

Stampfer, K. 1995. Seilbringung in Österreich. Österreichische Forstzeitung 7: 8-12.

Stampfer, K.; Piechl, S.; Stampfer, E.; Trzesniowski, A. 1997. Belastungen und Beanspruchung bei der Holzernte im Gebirge. Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 60 S.

Stampfer, K.; Daxner, P. 1998. Ein Produktivitätsmodell für ein selbstfahrendes Seilgerät Typ „Woodliner“. Centralblatt für das gesamte Forstwesen: Heft 4, S. 249- 260.

Stampfer, K. 2002. Möglichkeiten und Grenzen des Harvester- und Forwardereinsatzes am Steilhang. In: Gefahren und Risiken bei Harvester- und Forwardereinsatz. Pichl, Steiermark. 24 S.

Stampfer, K. 2002. Optimierung von Holzerntesystemen im Gebirge. Habilitationsschrift. Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 101 S.

Stampfer, K.; Limbeck-Lilienau, B.; Steinmüller, T. 2002. Bestandsschäden bei der mechanisierten Holzernte am Steilhang Bündner Wald: 37-42 und Arbeit im Wald: 6-7.

Stampfer, K.; Limbeck-Lilienau, B.; Kanzian, K.; Viertler, K. 2003. Baumverfahren im Seilgelände. Verfahrensbeispiele. Forst Holz Papier (FHP), Wien. 26 S.

Stampfer, K.; Steinmüller, T. 2004. Leistungsdaten Valmet 911.1 X3 M, Wien: Endbericht einer Untersuchung von BOKU und FHP Kooperationsabkommen Forst-Holz- Papier, 11/2004 (vormals FPP).

Stampfer, K.; Visser, R.; Kanzian, C. 2006. Cable corridor installation times for European yarders. International Journal of Forest Engineering 17(2): 71-77.

Stampfer, K.; Leitner, T.; Karpf, F. 2010. Effizienzsteigerungen und ergonomische Verbesserungen bei der Holzernte mit Seilgeräten. Eine Studie im Auftrag von Lebensministerium, Land Salzburg, ÖBf AG, AUVA, Gritzer und Teufelberger. Eigenverlag des Instituts für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien. 90 S.

Stampfer, K.; Leitner, T.; Visser, R. 2010. Efficiency and Ergonomic Benefits of Using Radio Controlled Chokers in Cable Yarding. Croatian Journal of Forest Engineering 31: 1-9.

Steinmüller T.; Stampfer K. 2000. Seilrückung nach Harvester. Produktivität und Bestandesschäden. AIW 05/00, 6-7.

Stocker, R. 2007. Aktive Jagd ist Voraussetzung. Wald und Holz 2/07, S 36-38.

Trzesniowski, A. 1989. Mobile Seilgeräte für die Holzrückung. Forstarchiv (60) 3: 132-134.

Trzesniowski, A. 1993. Umweltgerechter Technikeinsatz im Groß- und Kleinbetrieb. Österreichische Forstzeitung (104) 11: 28-30.

Trzesniowski, S. 1994. Leistung, Kosten und Investition von Mastseilgeräten. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien. 259 S.

Vacik, H. 2002. CONES - Computergestützte Entscheidungshilfe für Verjüngungseingriffe im Seilgelände. Manuskript für Beitrag bei den Mariabrunner Waldbautagen 2002.

Viertler, K. 2003. Baumverfahren im Seilgelände in schwächeren Baumdimensionen. Diplomarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur Wien. 43 S.

Wasser, B. und Frehner, M. 1996. Wegleitung Minimale Pflegemaßnahmen für Schutzwälder. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

Wunder, J.; Brang, P. 2003. Fichtenverjüngung im Gebirgswald. Erfolgskontrolle in Schlitzen. Informationsblatt Forschungsbereich Wald, (13), 1-3.

Österreichische Bundesforste AG, (Hrsg.) 2005. Chronik der Österreichischen Bundesforste 1925-2005. Autor Weinfurtnner P. Herausgeber und Verleger Österreichische Bundesforste AG, Purkersdorf. Österreich. 212 S.

Zing, A. 2003. Dauerwald - ein neues Thema der Waldwachstumsforschung. Informationsblatt Forschungsbereich Wald, (15), 1-3.

9.2. Internetquellen, betriebsinterne Aufzeichnungen und andere Quellen

Bayerische Staatsforsten AöR (Hrsg.) 2017: Betriebsanweisung Holzernte mit Seilgerät. Betriebsanweisung für Mitarbeiter.

Bayerische Staatsforsten AöR, 2009: Arbeitsschutzmanagementsystem zertifiziert nach OHRIS (Occupational Health- and Risk-Managementsystem). Strategie Null Unfälle.

Bayerische Staatsforsten AöR, 2012: Bewirtschaftung von Fichten- und Fichtenmischbeständen, 83 S.

Bayerische Staatsforsten AöR, 2013: Handbuch Arbeits- und Gesundheitsschutz, 16 S.

Bayerische Staatsforsten AöR, 2013: Lizenz zum Schneiden. Einsatz von Sonderkraftstoff und biologisch schnell abbaubaren Kettenhaftölen. Pressemitteilung vom 11.2.2013.

Bayerische Staatsforsten FTBaySF, 2017: Einschlagszahlen Seilbereich, Foris Betriebsbuchhaltung.

Bundeswaldinventur 2012: Die Bundeswaldinventur 2012 für Bayern, LWF.

Hoffmann, P., Institut für Klimaforschung Potsdam (2019): Darum wird das Schneechaos in den Alpen durch den Klimawandel begünstigt. Internetartikel auf www.wetter.de.

Jauk, G. 2017: Vertrieb MM Forsttechnik GmbH. Auskunft über Kaufpreis Syncrofalke 4,0 to mit Laufwagen Sherpa U 4 to XL.

Karlon, A. 2017: Betriebseinschlag Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau. Arbeitsverfahren und Einschlag mit eigenen Kapazitäten.

Koller Forsttechnik Kufstein 2017: Schemazeichnung Koller K 507; Leistungsdaten der Seilanlagen.

Konrad Forsttechnik Preitenegg 2017: Leistungsdaten Prozessor Woody 60.

Lindner, A. 2017: Vertrieb Fa. Koller Kufstein. Auskunft über Kaufpreis Koller K 507 mit Laufwagen MSK 4.

Loschek, J 2018: Fotos mit Erläuterungen zu der Entwicklung der Seiltechnik in Österreich und bei MM Forsttechnik GmbH.

Loschek, J. 2017: Betriebsdaten Syncrofalke 4 to mit Laufwagen Sherpa U 4 betrieben am Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau.

LWF 2010: Holzernte in Steillagen. Merkblatt 13.

MM Forsttechnik GmbH 2017: Schemazeichnung Syncrofalke 4 to; Technische Entwicklungen; Leistungsdaten der Seilanlagen und Laufwagen Sherpa.

PEFC 2009: PEFC Standards für Deutschland. PEFC D 1002:2009.

PEFC 2017: Homepage PEFC Deutschland.

Ruf, M. 2017: Auszug aus der Unfallstatistik der BaySF.

Stampfer, E. 2017: Kultur- und Pflegekosten nach Kahlschlag bis zur ersten kostendeckenden Durchforstung am FB Abtenau ÖBF. E-Mail vom 26.07.2017.

Wolf, J. 2015: Arbeitssicherheit im Seilbereich bei den BaySF. Fachkraft für Arbeitssicherheit bei den Bayerischen Staatsforsten. Vortrag bei der Landesunfallkasse Bayern, 6 S.

10. ANHANG

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgangsweise für die Entwicklung eines waldbaulich-forsttechnischen Optimalverfahrens zur Verjüngung von Gebirgswäldern (Stampfer, 2018)	4
Abbildung 2: Bergmischwaldverjüngung auf 8-jährigem Schlitz am FB Berchtesgaden (2008)	8
Abbildung 3: Stammzahl- und Vorratsverteilung in Durchmesserstufen Parzelle KRE 824-1; Aufnahmejahr 2012 (Pretzsch et al., 2014)	9
Abbildung 4: Vorrat und Zuwachs im Bergmischwald Kreuth/BaySF (Pretzsch et al., 2014)	10
Abbildung 5: Hydrokran (Foto: K. Vyplel / MMForstTechnik)	11
Abbildung 6: Seilgerät Mauko (Foto: ÖBf AG)	11
Abbildung 7: Prototyp RM 2001 (Foto: MMForstTechnik)	12
Abbildung 8: Seilgerät Turmfalke 2,5 to (Foto: MMForstTechnik)	13
Abbildung 9: Syncrofalke 2,5 to mit Ladekran Vkran 20.88 und Prozessor Woody 50	14
Abbildung 10: Anteil Regie- und Unternehmereinsatz beim Forstbetrieb MM (MM, 2017)	16
Abbildung 11: Anteile von Fällung und Rückung durch Unternehmer, Waldarbeiter in Eigenregie, betriebseigene Forsttechnik; Unternehmer- und Selbstwerbereinsatz bei den BaySF (Geschäftsjahr 2006 und 2018)	17
Abbildung 12: Arbeitssysteme im Hochgebirge der BaySF 2008-2017 (BaySF, 2017)	18
Abbildung 13: Einflussgrößen auf die Produktivität im Baumverfahren	19
Abbildung 14: Anzahl/Anteil der Seilunfälle im Tagesverlauf bei den ÖBf (Eiwegger, 2010)	27
Abbildung 15: Unfallursachen bei der Seilrückung bei den ÖBf (Eiwegger, 2010)	28
Abbildung 16: Prinzipskizze eines Verjüngungsschlitzes (Ott, 1989)	29
Abbildung 17: Naturverjüngung Bergmischwald im Schlitz. FB Berchtesgaden/Revier Weißbach	31
Abbildung 18: Erstanlage der Verjüngungsschlitz entlang der Seiltrasse (Erster Eingriff)	32
Abbildung 19: Erweiterung der Schlitz zur Förderung der Verjüngung (Zweiter Eingriff)	33
Abbildung 20: Verlegung der Seiltrassen und Zielstärkennutzung (Dritter Eingriff)	34
Abbildung 21: Schlitzanlage in vorratsreichen Zwischenräumen (Vierter Eingriff)	35
Abbildung 22: Schlitzverfahren in der Rückerichtung bergab (Umkehrung des Schlitzverlaufes)	36
Abbildung 23: Nutzungsablauf beim Schlitzverfahren	37
Abbildung 24: Vorteile des Schlitzverfahrens	38

Abbildung 25: Definition des Gefahrenbereichs gespannter Seile (links) und Gefahrenbereiche beim Aufenthalt im Innenwinkel eines belasteten Seils (nach FHP, 2011)	40
Abbildung 26: Gefahrenbereiche im Baumverfahren in Rückerichtung bergauf (links) und bergab (rechts; nach FHP, 2011)	41
Abbildung 27: Mastseilgerät Koller K 507 mit Laufwagen Koller MSK 3.....	48
Abbildung 28: Mastseilgerät Koller K 507 (Koller Forsttechnik GmbH)	48
Abbildung 29: Mastseilgerät Syncrofalke 4 to der FTBaySF (Foto MMForstTechnik)	51
Abbildung 30: Laufwagen Sherpa U4 XL	53
Abbildung 31: Aufteilung der Prozesszeiten beim Schlitzverfahren Koller K 507 bei den BaySF	63
Abbildung 32: Aufteilung der Prozesszeiten beim Kahlschlagverfahren Syncrofalke 4 to bei MM	65
Abbildung 33: Einfluss des Stückvolumens und der waldbaulichen Eingriffsart auf die Produktivität bei der Fällung, Seilung und Aufarbeitung mit dem K 507 bei einer Rückedistanz von 326 m	67
Abbildung 34: Einfluss der Rückedistanz und der waldbaulichen Eingriffsart auf die Produktivität bei der Fällung, Seilung und Aufarbeitung des K 507 bei einem Stückvolumen von 0,30 m ³	68
Abbildung 35: Einfluss von Stückvolumen und Rückerichtung auf die Produktivität bei schlitzartigen Eingriffsarten (Verjüngung und Durchforstung)	69
Abbildung 36: Zeitbedarf für Montage und Demontage nach Betrieben und Rückerichtungen	70
Abbildung 37: Trassenlängen nach Betrieben und Rückerichtungen	71
Abbildung 38: Holzanfall nach Betrieben und Rückerichtungen	71
Abbildung 39: Einfluss von Trassenlänge, Rückerichtung und Betrieb auf den Zeitbedarf für Montage bzw. Demontage der Seilanlage	73

10.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktivität im Baumverfahren in der Rückerichtung bergauf.....	20
Tabelle 2: Baumbeschädigungen bei der Seilrückung	22
Tabelle 3: Unfälle bei der Bayerischen Staatsforstverwaltung 1970-2005 (Wolf, 2017).....	25
Tabelle 4: Technische Daten des Mastseilgerätes Koller K 507.....	49
Tabelle 5: Technische Daten des Mastseilgeräts Syncrofalke 4 to	52
Tabelle 6: Zeit- und Betriebsparameter BaySF	54
Tabelle 7: Zeit- und Betriebsparameter MM	56
Tabelle 8: Systemkosten Koller K 507 BaySF	58
Tabelle 9: Herleitung der Systemkosten beim Arbeitssystem MM (Quelle: Johannes Loschek)	58
Tabelle 10: Kultur- und Pflegekosten ÖBf AG	61

Tabelle 11: Verteilung der waldbaulichen Eingriffsarten auf die Rückerichtungen beim Koller K507 der BaySF.....	62
Tabelle 12: Deskriptive Statistik der Einsatzparameter Koller K 507	62
Tabelle 13: Deskriptive Statistik der Zeitparameter Koller K 507.....	63
Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Einsatzparameter Syncrofalke 4 to.....	64
Tabelle 15: Deskriptive Statistik der Zeitparameter Syncrofalke 4 to	65
Tabelle 16: Koeffizienten des Zeitbedarfsmodells Koller K 507	66
Tabelle 17: Koeffizienten des Zeitbedarfsmodells Koller K 507 und MM.....	72
Tabelle 18: Erntekostenvergleich bei unterschiedlichen waldbaulichen Eingriffsarten.....	74
Tabelle 19: Sortenverteilung Musterhieb Prügelmöser (L=Langholz; SL=Standardlängen; EH=Energieholz)	75
Tabelle 20: Deckungsbeitrag Fallstudie Prügelmöser (L=Langholz; SL=Standardlängen; EH=Energieholz)	75
Tabelle 21: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 65 Jahre	76
Tabelle 22: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 75 Jahre	77
Tabelle 23: Deckungsbeitrag einer Durchforstung im Alter 85 Jahre	77
Tabelle 24: Deckungsbeitrag Kahlschlag Alter 95 Jahre	78
Tabelle 25: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell ohne Berücksichtigung einer Verzinsung..	78
Tabelle 26: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell und Verzinsung der Kosten und Erträge bis zur Umtriebszeit von 95 Jahren mit 2 %	79
Tabelle 27: Betriebswirtschaftlicher Vergleich einer dauerwaldartigen Nutzung im Schlitzverfahren und einer Nutzung nach dem Altersklassenwaldmodell und Verzinsung der Kosten und Erträge bis zur Umtriebszeit von 95 Jahren mit 3 %	80