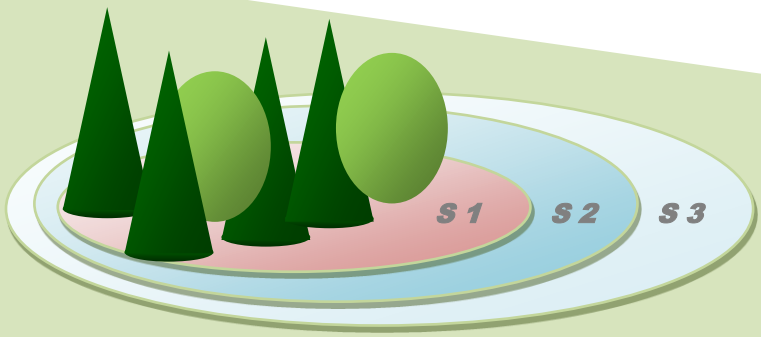
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Institut fédéral de recherches WSL
Istituto federale di ricerca WSL
Swiss Federal Research Institute WSL

Trinkwasserschutz-Tool

Berechnung von Mehraufwand und Minderertrag infolge des Trinkwasserschutzes im Wald

Schlussbericht, Februar 2012



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer:	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
AutorInnen:	Clemens Blattert, Anton Bürgi, Renato Lemm, Sandra Thöny (alle WSL)
Begleitung BAFU:	Silvio Schmid (Abt. Wald)
Hinweis:	Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS ..... **I**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... **II**

TABELLENVERZEICHNIS ..... **III**

1. EINLEITUNG **1**

2. BESCHRÄNKUNGEN IN DEN WASSERSCHUTZZONEN **2**

2.1 ÜBERSICHT DER GESETZLICHEN VORSCHRIFTEN UND EMPFEHLUNGEN 2
2.2 MÖGLICHE KOSTENVERURSACHENDE MASSNAHMEN INFOLGE DER VORSCHRIFTEN UND EMPFEHLUNGEN 3

3. BERECHNUNGSMETHODE **7**

3.1 KEINE CHEMISCHE BEHANDLUNG VON GELAGERTEM HOLZ / KEINE LAGERUNG VON BEHANDELTEM HOLZ (VS3) 9
3.2 KEINE UNGESCHÜTZTE LAGERUNG UND UMFÜLLUNG VON BETRIEBSSTOFFEN (ES3) 10
3.3 BODENSCHONENDE BEFAHRUNG (ES3) 11
3.4 UMWELTVERTRÄGLICHE TREIB- UND SCHMIERSTOFFE (ES3) 12
3.5 BEVORZUGEN VON LAUBBAUMARTEN (ES3) 13
3.6 KEIN BETANKEN VON MASCHINEN (ES2) 15
3.7 ENTFERNEN VON SCHLAGABRAUM (ES2) 16
3.8 ZUSAMMENFASSUNG 17

4. FALLBEISPIELE **18**

5. ERGEBNISSE DER KOSTENBERECHNUNGEN IM TRINKWASSERSCHUTZ-TOOL **20**

5.1 KEINE CHEMISCHE BEHANDLUNG VON GELAGERTEM HOLZ / KEINE LAGERUNG VON BEHANDELTEM HOLZ (VS3) 20
5.2 KEINE UNGESCHÜTZTE LAGERUNG UND UMFÜLLUNG VON BETRIEBSSTOFFEN (ES3) 21
5.3 BODENSCHONENDE BEFAHRUNG (ES3) 22
5.4 UMWELTVERTRÄGLICHE TREIB- UND SCHMIERSTOFFE (ES3) 22
5.5 LAUBBÄUME BEVORZUGEN (ES3) 23
5.6 KEIN BETANKEN VON MASCHINEN (ES2) 24
5.7 ENTFERNEN VON SCHLAGABRAUM (ES2) 25
5.8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE 25

6. DISKUSSION **28**

ANHANG **32**

A 1: HERLEITUNG DER HOLZERLÖSE 32
A 2: HERLEITUNG DER HOLZERNTEKOSTEN 40
A 3: ERNTEKOSTENFREIE ERLÖSE 51
A 4: GESAMTE ERNTEKOSTEN JE FALLBEISPIEL UND HOLZERNTEVERFAHREN 52

LITERATURVERZEICHNIS **53**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusätzliche Rückedistanz auf der Waldstrasse bis ausserhalb der Schutzzone 3. 9
Abbildung 2: Zusätzliche Marschdistanz bis zum Fahrzeug zum Auftanken der Motorsäge. 16
Abbildung 3: Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3 (ZK_{TRANS}). 21
Abbildung 4: Zusätzliche Kosten für Auffangwannen (ZK_{WANNE}). 21
Abbildung 5: Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche (ZK_{UMS}). 22
Abbildung 6: Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ZK_{TS}). 23
Abbildung 7: Differenz im erntekostenfreien Erlös bei Erhöhung des Laubholzanteils ($DIFF_{LHNH}$). 24
Abbildung 8: Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 (ZK_{MARSCH}). 25
Abbildung 9: Zusätzliche Kosten durch Entfernen von Ernterückständen (ZK_{ER}). 25
Abbildung 10: Zusammensetzung von Mehraufwand/Minderertrag je Fallbeispiel und Holzernteverfahren ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$). .. 26
Abbildung 11: Mehraufwand/Minderertrag durch Vorschriften und Empfehlungen pro Hektar und Jahr ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$). 27
Abbildung 12: Vergleich der Ergebnisse aus dem Tool mit den Ergebnissen aus dem ersten Projekt von 2008 ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$). ... 30
Abbildung 13: Benutzeroberfläche von SorSim mit Eingabemöglichkeit für den zu verwendenden Schaftanteil und Mindestzopf. 34
Abbildung 14: Darstellung der Sortimentseinteilung nach SorSim mit einem zu verwendenden Schaftanteil von 1.0 und 0.5. 34
Abbildung 15: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 1). 42
Abbildung 16: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 1). 42
Abbildung 17: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 3). 43
Abbildung 18: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Radharvester. 43
Abbildung 19: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Radharvester. 44
Abbildung 20: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Schlepper. 44
Abbildung 21: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Schlepper. 45
Abbildung 22: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Forwarder. 45
Abbildung 23: Modellwald für die Berechnung mit dem Modul Forwarder. 46
Abbildung 24: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Forwarder. 46
Abbildung 25: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Mobilseilkran. 47
Abbildung 26: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Mobilseilkran. 47

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VORSCHRIFTEN (V) UND EMPFEHLUNGEN (E) FÜR DIE SCHUTZZONE 3 (S 3). 3
TABELLE 2: VORSCHRIFTEN (V) UND EMPFEHLUNGEN (E) FÜR DIE SCHUTZZONE 2 (S 2). 3
TABELLE 3: ZUSAMMENFASSUNG DER ABGELEITETEN MASSNAHMEN UND IHRE BERÜCKSICHTIGUNG IM TOOL. 7
TABELLE 4: STANDARD-HOLZERNTEVERFAHREN, DIE FÜR DIE BERECHNUNGEN IM TRINKWASSERSCHUTZ-TOOL UNTERSCHIEDEN WERDEN. 8
TABELLE 5: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER ZUSÄTZLICHEN TRANSPORTKOSTEN. 9
TABELLE 6: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN FÜR AUFFANGWANNEN. 10
TABELLE 7: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN FÜR DAS UMSETZEN AUF EINE AUSWEICHFLÄCHE. ... 12
TABELLE 8: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN DURCH UMWELTVERTRÄGLICHE TREIB- UND SCHMIERSTOFFE. 13
TABELLE 9: ERNTEKOSTENFREIE ERLÖSE FÜR DIE BAUMART FICHTE JE BONITÄT UND HOLZERNTEVERFAHREN. 14
TABELLE 10: ERNTEKOSTENFREIE ERLÖSE FÜR DIE BAUMART BUCHE JE BONITÄT UND HOLZERNTEVERFAHREN. 14
TABELLE 11: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER DIFFERENZ IM ERNTEKOSTENFREIEN ERLÖS. 15
TABELLE 12: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER ZUSÄTZLICHEN KOSTEN FÜR DAS BETANKEN DER MOTORSÄGE IN S3. 16
TABELLE 13: ERLÄUTERUNG DER FORMELGRÖSSEN ZUR BERECHNUNG DER KOSTEN DURCH ENTFERNEN VON ERNTERÜCKSTÄNDEN. 17
TABELLE 14: DIE FORMELN ZUR BERECHNUNG DER KOSTENRELEVANTEN MASSNAHMEN WERDEN JE HOLZERNTEVERFAHREN INDIVIDUELL BERÜCKSICHTIGT. FÜR DIE BERECHNUNG DER ZUSÄTZLICHEN KOSTEN INFOLGE UMWELTVERTRÄGLICHE TREIB- UND SCHMIERSTOFFE WIRD FÜR JEDES HV EINE EXTRA FORMEL ERSTELLT ($X_{(1)}$, $X_{(2)}$, $X_{(3)}$). 18
TABELLE 15: KENNGRÖSSEN ZU DEN DREI FALLBEISPIELEN: BSP. 1 BOIS DES MEULES; BSP. 2 HEIMENHOLZ; BSP. 3 LES ORGÈRES. 19
TABELLE 16: KOSTENANSÄTZE FÜR DIE TEILPROZESSE „FÄLLEN UND AUFARBEITEN“ UND „RÜCKEN“ DER DREI HOLZERNTEVERFAHREN. .. 19
TABELLE 17: ZUSÄTZLICHE KOSTEN FÜR TRANSPORT DES HOLZES AUSSERHALB S3 (ZK_{TRANS}). 20
TABELLE 18: ZUSÄTZLICHE KOSTEN FÜR AUFFANGWANNEN (ZK_{WANNE}). 21
TABELLE 19: ZUSÄTZLICHE KOSTEN FÜR UMSETZEN AUF AUSWEICHFLÄCHE (ZK_{UMS}). 22
TABELLE 20: ZUSÄTZLICHE KOSTEN FÜR UMWELTVERTRÄGLICHE TREIB- UND SCHMIERSTOFFE (ZK_{TS}). 23
TABELLE 21: DIFFERENZ IM ERNTEKOSTENFREIEN ERLÖS BEI ERHÖHUNG DES LAUBHOLZ-ANTEILS ($DIFF_{LHNH}$). 24
TABELLE 22: ZUSÄTZLICHE KOSTEN FÜR DAS BETANKEN DER MOTORSÄGE IN S3 (ZK_{TANK}). 24
TABELLE 23: ZUSÄTZLICHE KOSTEN DURCH ENTFERNEN VON ERNTERÜCKSTÄNDEN (ZK_{ER}). 25
TABELLE 24: PROZENTUALE ANTEILE DER KOSTENRELEVANTEN MASSNAHMEN AM GESAMTEN MEHRAUFWAND/MINDERERTRAG JE FALLBEISPIEL UND HOLZERNTEVERFAHREN (%). 26
TABELLE 25: MEHRAUFWAND/MINDERERTRAG JE FALLBEISPIEL UND HOLZERNTEVERFAHREN ZUZÜGLICH DER ERNTEKOSTEN ($FR.A^{-1}$). ... 28
TABELLE 26: BONITÄTEN UND UMTRIEBSZEITEN FÜR FICHTE. 32
TABELLE 27: BONITÄTEN UND UMTRIEBZEITEN FÜR BUCHE 32
TABELLE 28: SUMME DER AUSSCHEIDENDEN UND VERBLEIBENDEN STÄMME FÜR DIE BAUMART FICHTE UND BUCHE JE BONITÄT SOWIE ANGESTREBTER UMTRIEBZEIT; AUS ERTRAGSTAFEL. 32
TABELLE 29: ERRECHNETE BAUMHÖHEN FÜR DIE EINZELNEN DURCHMESSERSTUFEN JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT. 33
TABELLE 30: VOLUMEN OHNE RINDE (VOL O.R.; M^3/HA) FÜR DIE VERSCHIEDENEN BONITÄTEN (18, 22, 26, 30) UND UMTRIEBSZEITEN (120, 110, 100, 90) DER **FICHTE**; **SCHAFTANTEIL = 1.0**. 35
TABELLE 31: VOLUMEN OHNE RINDE (VOL O.R.; M^3/HA) FÜR DIE VERSCHIEDENEN BONITÄTEN (18, 22, 26) UND UMTRIEBSZEITEN (120, 120, 100) DER **BUCHE**; **SCHAFTANTEIL = 1.0**. 35
TABELLE 32: VOLUMEN OHNE RINDE (VOL O.R.; M^3/HA) FÜR DIE VERSCHIEDENEN BONITÄTEN (18, 22, 26) UND UMTRIEBSZEITEN (120, 120, 100) DER **BUCHE**; **SCHAFTANTEIL = 5.0**. 35
TABELLE 33: VERGLEICH DER ERRECHNETEN HOLZMENGEN JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT MIT ERTRAGSTAFELWERTEN. 36
TABELLE 34: PROZENTUALE QUALITÄTSANTEILE JE SORTIMENT BEI DER BAUMART FICHTE (ROSSET ET AL. 2009). 36
TABELLE 35: PROZENTUALE QUALITÄTSANTEILE JE SORTIMENT BEI DER BAUMART BUCHE (ROSSET ET AL. 2009). 36
TABELLE 36: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR FICHTE, BONITÄT 18 UMTRIEBSZEIT 120. 37
TABELLE 37: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR FICHTE, BONITÄT 26 UMTRIEBSZEIT 100. 37

TABELLE 38: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR FICHTE, BONITÄT 22 UMTRIEBSZEIT 110. 37
TABELLE 39: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR FICHTE, BONITÄT 30 UMTRIEBSZEIT 90. 37
TABELLE 40: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR BUCHE, BONITÄT 18 UMTRIEBSZEIT 120. 37
TABELLE 41: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR FICHTE, BONITÄT 22 UMTRIEBSZEIT 120. 37
TABELLE 42: SORTIMENTSMENGEN JE QUALITÄT FÜR BUCHE, BONITÄT 26 UMTRIEBSZEIT 100. 38
TABELLE 43: HOLZPREISE FÜR FICHTE..... 38
TABELLE 44: HOLZPREISE FÜR BUCHE..... 38
TABELLE 45: HOLZPREISE JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT WERDEN AUFSUMMIERT UND DURCH DIE UMTRIEBSZEIT DIVIDIERT. 39
TABELLE 46: EINGANGSGRÖSSEN FÜR HEPROMO JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT..... 40
TABELLE 47: UMRECHNUNG DER WPPH IN PSH_{15} FÜR DIE MOTORMANUELLE HOLZHAUEREI IM EBENEN GELÄNDE (0-30%) 48
TABELLE 48: UMRECHNUNG DER WPPH IN PSH_{15} FÜR DIE MOTORMANUELLE HOLZHAUEREI IM STEILEN GELÄNDE (51-70%)..... 48
TABELLE 49: PRODUKTIVITÄTEN FÜR DIE TEILPROZESSE DER DREI HOLZERNTEVERFAHREN JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT. ... 49
TABELLE 50: ERNTEKOSTEN PRO HEKTAR UND JAHR FÜR DIE VERSCHIEDENEN HOLZERNTEVERFAHREN JE BAUMART, BONITÄT UND UMTRIEBSZEIT. 49
TABELLE 51: ERNTEKOSTENFREIE ERLÖSE FÜR FICHTE..... 51
TABELLE 52: ERNTEKOSTENFREIE ERLÖSE FÜR BUCHE..... 51
TABELLE 53: KOMPLETTE ERNTEKOSTEN JE FALLBEISPIEL UND HOLZERNTEVERFAHREN ($FR.A^{-1}$). 52

1. Einleitung

Trinkwasser ist neben Holz eines der wichtigsten Güter, die der Wald für die Gesellschaft zur Verfügung stellt. Um die Waldgebiete, welche nachweislich eine besondere Bedeutung für die Wasserqualität und -quantität haben, vor Verunreinigungen zu bewahren, werden diese Gebiete durch sogenannte Grundwasserschutzzonen geschützt. Diese untergliedern sich jeweils in einen Fassungsbereich (Schutzzone S1), eine engere Schutzzone (S2) und eine weitere Schutzzone (S3). Die Fläche der Schutzzone S1 umfasst vielfach die Kernzone mit den Zisternen, innerhalb der nur bauliche Eingriffe und Tätigkeiten zulässig sind, die der Trinkwasserversorgung dienen und für welche der Fassungseigentümer verantwortlich ist. Diese Eigentumsbeschränkung kommt einer Enteignung gleich und folglich sollte diese Zone wenn möglich durch die Wasserversorgung käuflich erworben werden (Spjevak et Bürgi 2008). Die Ausweisung einer Waldfläche zu einer Grundwasserschutzzone S2 und S3 ist für die Forstbetriebe mit einer Reihe von gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen verbunden, die sie in der Waldbewirtschaftung beeinflussen. Eine Einhaltung dieser Vorgaben bedeutet für die Forstbetriebe zusätzliche Kosten, die sich negativ auf das Betriebsergebnis auswirken.
Um Klarheit darüber zu erlangen, wie hoch die zusätzlichen Kosten infolge des Trinkwasserschutzes sind, wurden durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) bereits in zwei vorhergehenden Projekten Kostenschätzungen diesbezüglich durchgeführt. Im ersten Projekt wurde hierzu anhand von drei reellen Fallbeispielen, mit einer Spanne von kleinen bis sehr grossen Grundwasserschutzzonen, der Mehraufwand und Mindererertrag infolge des Trinkwasserschutzes ermittelt (Spjevak et Bürgi 2008). In einem zweiten Projekt wurden die entsprechenden Kosten zusätzlich getrennt nach den fünf Produktionsregionen (Jura, Mittelland, Voralpen, Inneralpen und Alpensüdseite) und für die Fläche der gesamten Schweiz ermittelt (Usbeck et al. 2010). Die Ergebnisse aus den Projekten haben gezeigt, dass der Mehraufwand und Minderertrag je nach Grösse der Grundwasserschutzzone einen beachtlichen Wert erreichen kann.
Die Resultate basieren jedoch auf den drei Fallbeispielen und den Grossflächen der Produktionsregionen. Als Grundlage für eine sachpolitische Diskussion (Thema Ausgleichzahlungen) zwischen den von Grundwasserschutzzonen betroffenen Forstbetrieben und den Wasserversorgern können Sie nicht herangezogen werden. Hierzu sind konkrete Angaben zu den einzelnen Grundwasserschutzzonen selbst notwendig.

Im Rahmen dieses dritten Projektes soll den von Grundwasserschutzzonen Betroffenen ermöglicht werden, den Mehraufwand und Minderertrag für eine konkrete Schutzzone zu berechnen. Zu diesem Zweck wird ein einfach zu handhabendes und auf Microsoft Excel basierendes Kalkulations-Tool entwickelt. Dieses Tool ermöglicht einer fachkundigen Person (Revierleiter und/oder Vertreter der Wasserversorger) unter Eingabe der wichtigsten Eigenschaften und Bewirtschaftungsmethoden einer Schutzzone die zusätzlichen Kosten zu errechnen, welche durch die gesetzlichen Vorschriften und die Empfehlungen entstehen. Der mit dem Trinkwasserschutz-Tool ermittelte Mehraufwand und Minderertrag bildet ein wesentliches Fundament für die Kommunikation zwischen den Waldbesitzern und den Wasserversorgern.

2. Beschränkungen in den Wasserschutzzonen

2.1 Übersicht der gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen

Der Mehraufwand und Minderertrag, der durch die Ernennung von Grundwasserschutz bei der Waldbewirtschaftung anfällt, ist die Folge von verschiedenen gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen. In Tabelle 1 und 2 sind die für im Rahmen der Berechnungen im Tool berücksichtigen Vorgaben zum Schutz des Trinkwassers aufgelistet. Tabelle 1 enthält die Vorschriften und Empfehlungen für die weitere Schutzzone S3. In Tabelle 2 sind die ergänzenden Vorgaben für die engere Schutzzone S2 aufgelistet. Diese gliedern sich an die ersten beiden Projekte an (vgl. Spjevak et Bürgi 2008 und Usbeck et al. 2010). Die abgebildeten gesetzlichen Vorschriften haben ihren Ursprung in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) und der Verordnung über den Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF). Die aufgeführten Empfehlungen sind die Vorgaben des BAFU (BUWAL 2004 und BUWAL 2005). Sie erweitern die gesetzlichen Vorgaben zum Schutz des Grundwassers.
Im Vergleich zu den ersten beiden Projekten wird die gesetzliche Vorschrift „Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen“, welche von der VWF abgeleitet ist, zu den Empfehlungen des BAFU verschoben. Dieses Vorgehen ist durch die zwischenzeitliche Ausserkraftsetzung der VWF zu begründen.
Weiterhin wird in dieser Arbeit gegenüber den ersten beiden Projekten die Empfehlung „keine grossflächigen Holzschläge“ nicht mehr berücksichtigt. Diese Empfehlung wurde im ersten Projekt durch die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Erlös aus einer schlagweisen Hochwaldbewirtschaftung und aus einer Dauerwaldbewirtschaftung berechnet. Durch diese Vorgehensweise ergaben sich jedoch keine Mindererträge, sondern zusätzliche Gewinne für den Betrieb. Die Gründe für dieses Ergebnis waren (Spjevak et Bürgi 2008):

- Es wurden nur Eingriffe im starken Baumholz mit einem Oberdurchmesser von ca. 60 cm berücksichtigt. Starke Dimensionen bei den ausscheidenden Bäumen weisen einen höheren Anteil guter Sortimente auf und erzielen dadurch höhere Erlöse. Gleichzeitig bedeuten starke Dimensionen auch grosse Stückvolumen und eine hohe Produktivität bzw. niedrige Erntekosten pro m^3 (Stück-Masse-Gesetz).
- Eingriffe in den schwächeren Entwicklungsstufen, die bei der Überführung eines schlagweisen Hochwaldes in einen Dauerwald entstehen und Kosten verursachen, wurden hingegen vernachlässigt.

Die Resultate zu den Berechnungen „keine grossflächigen Holzschläge“ sind daher als unrealistisch anzusehen. Da eine wirklichkeitsnahe Bewertung schwierig zu berechnen ist, wurde die Empfehlung für dieses Projekt weggelassen. Zu diesem Entschluss hat auch die Tatsache beigetragen, dass ein entsprechendes Kahlschlagsverbot bereits Bestandteil des WaG (Waldgesetzes) ist.

Tabelle 1: Vorschriften (V) und Empfehlungen (E) für die Schutzzone 3 (S 3).

Vorschriften - VS 3	Empfehlungen - ES 3
• Keine chemische Behandlung von gelagertem Holz und keine Lagerung von behandeltem Holz *(ChemRRV)*	• Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen *(VWF)* • Bodenschonende Befahrung *(BUWAL 2005)* • Umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe *(BUWAL 2005)* • Bevorzugen von Laubbaumarten *(BUWAL 2005)* • Keine grossflächigen Holzschläge *(BUWAL 2005)*

VS3 bedeutet: Vorschrift für die Schutzzonen S2 und S3
ES3 bedeutet: Empfehlung für die Schutzzonen S2 und S3

Tabelle 2: Vorschriften (V) und Empfehlungen (E) für die Schutzzone 2 (S 2).

Vorschriften - VS 2	Empfehlungen - ES 2
• Kein Betanken von Maschinen *(BUWAL 2004)*	• Entfernen von Schlagabraum *(BUWAL 2005)* • Kein Betanken von Motorsägen[1]

VS2 bedeutet: Zusätzliche Vorschrift für die Schutzzone S2
ES2 bedeutet: Zusätzliche Empfehlung für die Schutzzone S2

2.2 Mögliche kostenverursachende Massnahmen infolge der Vorschriften und Empfehlungen

Die in Kapitel 2.1 genannten gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen haben einen Einfluss auf den Arbeitsablauf bei der Holzernte und die waldbauliche Behandlung eines Bestandes (Erhöhung des Laubholzanteils). Dieser Einfluss kann sich auf unterschiedliche Art und Weise manifestieren. Im Folgenden werden eine oder mehrere Massnahmen definiert, wie sie aufgrund der gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen in der forstlichen Praxis auftreten können. Jeweils eine dieser Massnahmen wird anschliessend für die Berechnungen im Trinkwasserschutz-Tool herangezogen (fett hinterlegt). Wichtiges Kriterium für die Auswahl ist die Voraussetzung der einfachen Kalkulierbarkeit, d.h. das Tool soll mit einfach zu erhebenden Eingangsgrössen rechnen können. Den zukünftigen Anwender wird dadurch die Möglichkeit gegeben, mit einem geringen Aufwand für die Erfassung und Erhebung von Eingangsgrössen Kostenschätzungen durchzuführen. Ein weiteres Kriterium zur Auswahl einer Massnahme besteht darin, ob die Höhe des zu erwartenden Mehraufwandes oder Minderertrages kostenrelevant sein wird oder ob er vernachlässigt werden kann. Nicht zuletzt wird auch die Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Massnahmen berücksichtigt. Praxistauglichkeit meint in

[1] Diese Empfehlung wird von der Vorschrift „Kein Betanken von Maschinen“ abgeleitet. Da Motorsägen aber nicht direkt mit Baumaschinen verglichen werden können, wird diese Vorgabe als Empfehlung aufgeführt und nicht als Vorschrift (vgl. Kap. 2.2, S. 5).

diesem Fall die Bewertung der Massnahme auf ihre Durchführung unter Berücksichtigung der derzeit in der forstlichen Praxis angewandten Methoden.

Keine chemische Behandlung von gelagertem Holz/keine Lagerung von behandeltem Holz (VS3)
Mögliche Massnahmen:

- Sofortige Abnahme des frischgeschlagenen Holzes („Just-in-time"). Die Lieferung des geschlagenen Holzes verlangt einen hohen Aufwand für die Planung der logistischen Abläufe. Eine Just-in-time Abfuhr des Holzes ist aber nur bedingt umsetzbar, insbesondere bei schlechter Witterung. → schwer kalkulierbar
- Das Holz wird unbehandelt in der Schutzzone gelagert. Dies führt auf Grund des Käfer- und Pilzbefalles anschliessend zu Mindererträgen beim Holzerlös. → schwer kalkulierbar
- **Die Lagerung des behandelten Holzes findet ausserhalb von S3 statt**. Dadurch entstehen zusätzliche Transportkosten für das Rücken des Holzes zu einem Holzlagerplatz ausserhalb von S3.

Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen (ES3)
Mögliche Massnahmen:

- Maschinen die bei der Holzernte eingesetzt werden, müssen zum Auftanken ausserhalb der Schutzzone S3 fahren. Grössere Forstmaschinen, wie Harvester, Forwarder und Forstspezialschlepper können jedoch aufgrund ihres grossen Tankvolumens einmal täglich ausserhalb der Schutzzone aufgetankt werden. Ein voller Tank reicht in der Regel für einen Arbeitstag aus. Der einmalige zusätzliche Aufwand zum Verlassen der Schutzzone kann vernachlässigt werden.
- **Motorsägen dürfen nur mit einer entsprechenden Auffangwanne betankt werden.** Die Auffangwanne schützt den Boden vor eventuellen Verschüttungen von Treib- oder Schmierstoffen beim Betanken der Motorsäge. Für die Betriebe entstehen dadurch zusätzliche Kosten durch die Anschaffung der entsprechenden Auffangwannen.

Bodenschonende Befahrung (ES3)
Mögliche Massnahmen:

- Der Einsatz von Erntemaschinen wird auf die Waldwege und Rückegassen beschränkt. Diese Massnahme ist jedoch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Bodenfruchtbarkeit im Allgemeinen erhalten werden muss (Umweltschutzgesetz, Verordnung über Belastungen des Bodens), zu mild. Insbesondere, weil die Rückegassen noch zur produktiven Holzbodenfläche gezählt werden.
- Kosten für die technische Anpassung der Erntemaschinen und Rückefahrzeuge zur Gewährleistung eines bodenschonenden Arbeitseinsatzes werden quantifiziert. Ein bodenschonender Einsatz kann einerseits durch eine Reduzierung des Gewichts, z.B. durch eine geringere Eigenmasse des Fahrzeuges, einer Reduzierung der Nutzlast (Ladevolumen des Forwarders) oder durch eine zusätzliche Ausstattung mit einer bodenschonenden Ausrüstung erreicht werden (breitere Reifen, Reifendruckregelanlage, Bogiebänder). → schwer kalkulierbar
- **Forstlichen Arbeiten werden bei einer zu hohen Bodenfeuchte eingestellt.** Bei einer hohen Bodenfeuchte ist der Bestand besonders durch das Eigengewicht und insbesondere durch das Ladevolumen der Maschinen gefährdet. Das Einstellen von forstlichen Arbeiten bei schlechter Witterung verhindert Verdichtungen und Verformungen im Boden, welche die Bodenfunktionen (Wassersickerung, Durchwurzelung, Lebensraum für Bodenfauna) beeinträchtigen. Optisch ist diese Beeinträchtigung in einer Spurbildung erkennbar. Beim Auftreten des sogenannten Spurtyp 3 sollten die forstlichen Arbeiten zum Schutz des Bodens unterbrochen (Lüscher et al. 2009) und die Maschinen an ei-

nen alternativen Einsatzort verlagert werden. Durch das sogenannte Umsetzen entstehen zusätzliche Kosten für den Forstbetrieb.

Umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ES3)

Mögliche Massnahmen:

- **Konventionelle Treib- und Schmierstoffe werden durch ökologische Betriebsmittel ersetzt.** Motorsägen werden mit einem aromatenfreien Gerätebenzin betrieben und die Kette mit einem umweltverträglichen Kettenöl geschmiert. Bei grösseren Forstmaschinen wie Harvester, Forwarder, Forstspezialschlepper und Seilkran werden umweltverträgliche Hydrauliköle verwendet. Die Kette des Harvester wird ebenfalls, wie bei der Motorsäge, mit einem umweltverträglichen Kettenöl geschmiert. Die ökologischen Treib- und Schmierstoffe sind teurer als die konventionellen und führen zu zusätzlichen Kosten.

Laubbäume bevorzugen (ES3)

Mögliche Massnahmen:

- **Erhöhung des Laubholzanteiles um die Differenz, die zwischen dem effektiven und dem nach pflanzensoziologischer Einheit natürlichen Laubholzanteil liegt.** Diese waldbauliche Massnahme führt längerfristig zu einem Minderertrag im Betrieb, da der erntekostenfreie Erlös von Laubholz niedriger als der erntekostenfreie Erlös von Nadelholz ist. Durch die Erhöhung des Laubholzanteils erleidet ein Forstbetrieb einen Rückgang im Gesamterlös.

Kein Betanken von Maschinen (VS2)

Mögliche Massnahmen:

- Das Betanken von Maschinen und Fahrzeugen ist bei Bauarbeiten in der Zone S2 verboten. Unter der Annahme, dass die Holznutzung mit einer Bauarbeit gleichgestellt werden kann, werden die Zusatzkosten berechnet, die dadurch entstehen, dass die Maschinen aus der Schutzzone S2 gebracht werden müssen (Spjevak et Bürgi 2008). Das Tankvolumen grösserer Forstmaschinen wie Harvester, Forwarder und Forstspezialschlepper reicht jedoch in der Regel für einen Arbeitstag aus. Ein einmaliges Auftanken pro Tag ausserhalb der Schutzzone genügt dementsprechend. Dieser einmalige Aufwand kann jedoch vernachlässigt werden (vgl. Empfehlung „Keine ungeschützten Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen“).
  Bei einem Holzernteeinsatz mit Seilkran kann die Annahme getroffen, dass das Trägerfahrzeug in der Regel ausserhalb der S2 aufgestellt werden kann. Die durchschnittliche Flächengrösse der Schutzzone S2 beträgt in der Schweiz 2,8 ha (Usbeck et al. 2010). Die gesetzliche Vorschrift kommt in diesem Fall nicht zum Tragen.
- **Die Forstwarte müssen zum Betanken der Motorsäge die S2 verlassen.** Ist die Tankfüllung der Motorsäge aufgebraucht, begeben sich die Forstwarte zur Zone S3, um die Säge wieder aufzutanken. Der Zeitaufwand für den Hinweg und Rückweg verursacht zusätzliche Kosten. Diese Massnahme wird für die Berechnungen im Tool herangezogen. **Da Motorsägen aber nicht direkt mit Baumaschinen verglichen werden können, wird diese Massnahme als eine Empfehlung aufgeführt** und nicht als Vorschrift.

Entfernen von Schlagabraum (ES2)

Mögliche Massnahmen:

- Die geernteten Bäume werden zusammen mit ihren Ästen in einem Stück aus S2 und S3 entfernt. Durch eine solche Vollbaumnutzung verbleiben keine Ernterückstände im Bestand. Im ebenen, befahrbaren Gelände wird eine Vollbaumnutzung jedoch in der Regel nicht durchgeführt, da dies beim Rücken der Bäume starke Schäden am verbleibenden Bestand verursachen kann. Lediglich bei einem Seilkraneinsatz im Steilhang wird dieses Verfahren in der Praxis angewandt.
- **Die bei der Aufarbeitung der Bäume entstandenen Ernterückstände werden aus dem Bestand entfernt und mit einem mobilen Hacker gehackt.** Für den Ablauf dieses Prozesses gibt es zwei unterschiedliche Varianten. Bei der Ersten Variante erfolgt das Hacken direkt im Bestand mittels eines mobilen Hackers, der auf einem Forwarder montiert ist und auf der Rückegasse fährt. In der zweiten Variante werden die Ernterückstände gebündelt und zentral an der Waldstrasse gehackt. Die Berechnungen im Trinkwasserschutz-Tool erfolgen anhand der zweiten Variante, da diese in der Praxis am meisten angewandt wird.

Nachfolgende Tabelle fasst die aufgrund der gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen abgeleiteten Massnahmen und ihre Berücksichtigung im Tool zusammen. Die gesetzlichen Vorschriften müssen von den Forstbetrieben bei der Waldbewirtschaftung eingehalten werden. Die Einhaltung der Empfehlungen des BAFU obliegt hingegen dem jeweiligen Forstbetrieb. Sie können allenfalls Gegenstand einer Vereinbarung zwischen den Forstbetrieben und den Nutzern der Grundwasservorkommen sein.

Tabelle 3: Zusammenfassung der abgeleiteten Massnahmen und ihre Berücksichtigung im Tool.

Vorschrift / Empfehlung		Massnahme	Berücksichtigung im Tool
Keine chemische Behandlung von gelagertem Holz / keine Lagerung von behandeltem Holz *(ChemRRV)*	Vorschrift S3	Lieferung des Holzes „Just-in-time“	schwer kalkulierbar
		unbehandelte Lagerung des Holzes (Käfer-/Pilzbefall)	schwer kalkulierbar
		Zusätzlicher Transport des Holzes ausserhalb S3	**berücksichtigt** *(Kap. 3.1)*
Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen *(VWF)*	Empfehlung S3	Betanken der Forstmaschinen ausserhalb S3	vernachlässigbar
		Betanken der Motorsägen mit Auffangwannen	**berücksichtigt** *(Kap. 3.2)*
Bodenschonende Befahrung *(BUWAL 2005)*	Empfehlung S3	Einsatz der Erntemaschinen auf Rückegasse beschränken	unzureichend
		Technische Anpassung der Erntemaschinen	schwer kalkulierbar
		Umsetzen der Erntemaschinen bei hoher Bodenfeuchte	**berücksichtigt** *(Kap. 3.3)*
Umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe *(BUWAL 2005)*	Empfehlung S3	Verwendung von umweltverträgl. Treib- und Schmierstoffen	**berücksichtigt** *(Kap. 3.4)*
Bevorzugen von Laubbaumarten *(BUWAL 2005)*	Empfehlung S3	Erhöhung des Laubholz-Anteils	**berücksichtigt** *(Kap. 3.5)*
Kein Betanken von Maschinen *(BUWAL 2004)*	Vorschrift S2	Betanken der Forstmaschinen ausserhalb S2; Aufstellen des Seilkrans ausserhalb S2	vernachlässigbar
	Empfehlung S2	Betanken der Motorsäge ausserhalb S2 (zu Fuss)	**berücksichtigt** *(Kap. 3.6)*
Entfernen von Schlagabraum *(BUWAL 2005)*	Empfehlung S2	Vollbaumnutzung	nur bei Seilkraneinsatz im Steilhang
		Hacken der Ernterückstände	**berücksichtigt** *(Kap. 3.7)*

3. Berechnungsmethode

Die in Kapitel 2.2 berücksichtigten abgeleiteten Massnahmen zu den gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen werden zur Berechnung des Mehraufwandes und Minderertrages jeweils in eine mathematische Formel gefasst und anschliessend in Microsoft Excel implementiert. Für eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Werte und für die Ermittlung der anfallenden Gesamtkosten, werden die einzelnen Formeln so gestaltet, dass die Ergebnisse jeweils die Einheit Franken pro Hektar und Jahr ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$) aufweisen. In den folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.7 werden die Formeln in ihrem Aufbau beschrieben. Eine ergänzende Tabelle fasst jeweils die Eingangsgrösse einschliesslich ihres Status im Trinkwasserschutz-Tool zusammen. Folgende Stati werden im Tool unterschieden:

- „i“ = individueller Wert:
  Eingangsgrösse, welche vom Anwender des Tools zur Abbildung der individuellen Situation in der Wasserschutzzone eingegeben werden muss (z.B. Grösse der Schutzzone).

- „d“ = Defaultwert:
  Als Defaultwert gekennzeichnete Grössen, werden dem Anwender im Tool als vordefinierte Werte zur Berechnung angeboten. Diese können jedoch mit eigenen Werten überschrieben werden (z.B. Kostenansätze für die Holzernte, Holzpreise).
- „f“ = Fixwert:
  Bei den Fixwerten handelt es sich um vorgegebene Standardwerte. Diese können vom Anwender nicht geändert werden (z.B. Verbrauch von Hydrauliköl).

Bei der Formelerstellung wird zwischen drei in der Praxis gängigen Holzernteverfahren (HV) unterschieden, die sich jeweils in die Prozesse „Fällen und Aufarbeiten“ und „Rücken“ unterteilen (vgl. Tabelle 4). HV 1 beschreibt ein motormanuelles Ernteverfahren. Der Prozess des Fällens und Aufarbeitens (Entasten und Einteilung der Sortimentsabschnitte) wird dabei manuell mit der Motorsäge ausgeführt. Für den Rückeprozess an die LKW-befahrbare Waldstrasse wird der Einsatz eines Forstspezialschleppers angenommen. HV 2 beschreibt demgegenüber ein vollmechanisiertes Ernteverfahren. Für den Prozess Fällen und Aufarbeiten wird ein Harvester unterstellt, für den anschliessenden Prozess des Rückens ein Forwarder. HV 3 berücksichtigt ein in der Praxis angewandtes Ernteverfahren für Steillagen. Der Prozess Fällen und Aufarbeiten wird dabei ebenfalls manuell mit Motorsäge ausgeführt. Für den Prozess des Rückens wird der Einsatz eines Mobilseilkrans angenommen.
Durch diese Aufteilung in drei HV wird indirekt der Geländesituation Rechnung getragen, indem zwischen befahrbaren (HV 2) und nicht befahrbaren Beständen (HV 3) unterschieden werden kann. Gleichzeitig wird indirekt auch der BHD des ausscheidenden Bestandes berücksichtigt. BHDs über 50 cm können in der Regel nicht mehr durch einen Harvester geerntet, sondern müssen motormanuell gefällt werden.
Für die entsprechenden Prozesse „Fällen und Aufarbeiten“ sowie „Rücken“ können im Trinkwasserschutz-Tool durch die Anwender entsprechende Kostenansätze für das Personal und die Maschinen eingegeben werden. Die Kostenansätze können z.B. den jährlich erscheinenden Vorgaben des Verbandes Schweizerischer Forstunternehmungen entnommen werden (VSFU 2010a, 2010b, 2010c). Die Kostenansätze differieren je nach HV unterschiedlich stark und haben einen Einfluss auf die Höhe des Mehraufwandes und Minderertrages.
Die gesonderte Unterscheidung der HV bietet gegenüber den Berechnungen in den ersten beiden Projekten die Möglichkeit, auf die besonderen Gegebenheiten einer konkret zu bewertenden Grundwasserschutzzone einzugehen. Dadurch lassen sich die Aussagen für die einzelnen Schutzzonen verbessern.

Tabelle 4: Standard-Holzernteverfahren, die für die Berechnungen im Trinkwasserschutz-Tool unterschieden werden.

Holzernteverfahren (HV)	Prozess „Fällen und Aufarbeiten“	Prozess „Rücken“
1. Motormanuelles Verfahren	motormanuell	Forstspezialschlepper
2. Vollmechanisiertes Verfahren	Harvester	Forwarder
3. Verfahren für Steillagen	motormanuell	Mobilseilkran

3.1 Keine chemische Behandlung von gelagertem Holz / keine Lagerung von behandeltem Holz (VS3)

Zur Berechnung der zusätzlichen Transportkosten (ZK_{Trans}) infolge der Lagerung des behandelten Holzes ausserhalb von S 3, wird die Annahme getroffen, dass 100 % des geschlagenen Holzes behandelt werden. Diese Annahme wird jedoch nur für das HV 1 und HV 2 unterstellt. Beim HV 3 erfolgt das Rücken in der Regel entlang von 400 bis 800m langen Seillinien. Im Falle des HV 3 kann daher ein direktes Rücken ausserhalb der S3 unterstellt werden.
Wesentliche Einflussfaktoren für die Höhe des Mehraufwandes sind die Kosten für den zurückgelegten Weg und die notwendige Anzahl an Fahrten. Die Kosten für den zurückgelegten Weg sind massgeblich abhängig von der Rückedistanz auf der Waldstrasse bis ausserhalb S3 (D), wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Distanz des Hin- und Rückwegs (x 2) wird mit dem jeweiligen Kostenansatz für den Rückeprozess ($K_{Rück}$) multipliziert und durch die durchschnittliche Geschwindigkeit des Rückefahrzeuges (V_{Fahrz}) dividiert. Der Kostenansatz für den Rückeprozess richtet sich nach dem vom Anwender gewählten HV. Die Anzahl notwendiger Fahrten ergibt sich aus der Nutzungsmenge in S2 und S3 pro Hektar und Jahr (N_{S2+3}), dividiert durch das Lastvolumen des Rückefahrzeuges (L_{Vol}). Das Lastvolumen ist wiederum abhängig von dem jeweiligen gewählten HV.

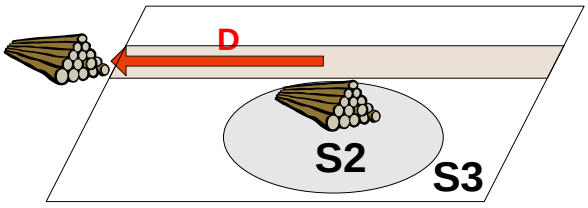


Abbildung 1: Zusätzliche Rückedistanz auf der Waldstrasse bis ausserhalb der Schutzzone 3.

Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3:
Kosten für den zurückzulegenden Weg (Fr.) multipliziert mit der Anzahl Fahrten (pro ha und Jahr)

$$ZK_{Trans} = \frac{2 \times D \times K_{Rück} \times N_{S2+3}}{V_{Fahrz} \times L_{Vol}}$$

Tabelle 5: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der zusätzlichen Transportkosten.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Zusätzliche Rückedistanz auf der Waldstrasse bis ausserhalb S3 (1 Weg)	D	km	i		abhängig von Schutzzone
Durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit	V_{Fahrz}	kmh^{-1}	d	10	Erfahrungswert
Kostenansatz Prozess Rücken (Maschine und Fahrer)					
HV 1 – Forstspezialschlepper	$K_{Rück}$	$Fr.h^{-1}$	d	190	VSFU (2010a, 2010b)
HV 2 – Forwarder	$K_{Rück}$	$Fr.h^{-1}$	d	200	VSFU (2010a)
Nutzungsmenge in S2 und S3 pro Hektar und Jahr	N_{S2+3}	$m^3ha^{-1}a^{-1}$	i		abhängig von Schutzzone
Lastvolumen					
HV 1 – Forstspezialschlepper	L_{Vol}	m^3	d	4	Erfahrungswert
HV 2 – Forwarder	L_{Vol}	m^3	d	18	Erfahrungswert
Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3	**ZK_{Trans}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.2 Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen (ES3)

Unter Berücksichtigung der Massnahme, dass Motorsägen nur mit einer entsprechenden Auffangwanne betankt werden dürfen, fallen zusätzliche Kosten für deren Anschaffung an. Diese Massnahme wird jedoch nur beim HV 1 und HV 3 berücksichtigt, da lediglich bei diesen beiden HV beim Prozess des Fällens und Aufarbeitens der Einsatz einer Motorsäge vorgesehen ist. Die Berechnung der zusätzlichen Kosten erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die benötigte Anzahl an Auffangwannen (A_{Wanne}) ermittelt, indem die Gesamtfläche von S2 und S3 (A_{S2+S3}) durch 200 ha dividiert wird. 200 ha werden als durchschnittlicher Einsatzradius einer Auffangwanne angenommen. Das Ergebnis der Berechnung wird auf die nächst grössere ganze Zahl gerundet (Beispiel: A_{Wanne} = 0,3 → 1).

Benötigte Anzahl an Auffangwannen:
Gesamtfläche S2 und S3 dividiert durch 200 ha

$$A_{Wanne} = \frac{A_{S2+S3}}{200\ ha}$$

Die Anzahl an Auffangwannen fliesst im Anschluss in die eigentliche Formel zur Berechnung der zusätzlichen Kosten für Auffangwannen ein (ZK_{Wanne}). Hierzu wird die Anzahl mit einem entsprechenden Kostenansatz für eine Wanne (K_{Wanne}) multipliziert und durch deren Lebensdauer (L_{dauer}) dividiert. Daraus ergeben sich die jährlichen Kosten, welche durch die Gesamteinsatzfläche der Auffangwannen (A_{S2+S3}) dividiert wird. Beim Kostenansatz für die Wanne und deren Lebensdauer handelt es sich um Defaultwerte. Entsprechende Kostenansätze für Auffangwannen können auf Internetseiten von Anbietern entnommen werden. Bei der Lebensdauer handelt es sich um eine Annahme. Die gewählte Grösse von fünf Jahren scheint jedoch realistisch, in Anbetracht des hohen Verschleisses, dem die Wannen in der Praxis unterliegen.

Zusätzliche Kosten für Auffangwannen:
Jährliche Kosten (Fr. pro Jahr) dividiert durch die Gesamteinsatzfläche der Auffangwannen (ha)

$$ZK_{Wanne} = \frac{A_{Wanne} \times K_{Wanne}}{L_{dauer} \times A_{S2+S3}}$$

Tabelle 6: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der Kosten für Auffangwannen.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Anzahl benötigter Wannen	A_{Wanne}	-	i		
Anschaffungskosten einer Auffangwanne	K_{Wanne}	Fr.	d	42	pro Wanne; www.roland-bertschi.ch, (15.04.10)
Lebensdauer einer Auffangwanne	L_{dauer}	a	d	5	Annahme
Fläche S2 und S3	A_{S2+S3}	ha	i		abhängig von Schutzzone
Zusätzliche Kosten für Auffangwannen	**ZK_{Wanne}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.3 Bodenschonende Befahrung (ES3)

Bei einer zu hohen Bodenfeuchte, wie sie insbesondere nach langanhaltenden Regenfällen eintritt, werden die forstlichen Arbeiten mit schweren Maschinen eingestellt und die betroffenen Maschinen an einen alternativen Arbeitsort umgesetzt. Im Falle vom HV 1 und HV 3 wird die Annahme getroffen, dass kein zusätzlicher Mehraufwand durch ein entsprechendes Umsetzen entsteht. Grund: für den im HV 1 vorgesehenen Forstspezialschlepper wird das Szenario unterstellt, dass die Maschine eine Ruhepause einlegt und der Maschinenführer als Überbrückung einer alternativen Beschäftigung nachgeht. Das Rücken des Holzes im HV 3 mit Hilfe eines Seilkrans, ist ein sehr bodenschonendes Verfahren und kann unabhängig der Bodenfeuchte durchgeführt werden. Es wird dementsprechend ebenfalls nicht berücksichtigt.
Für die Berechnung des Mehraufwands im Falle von HV 2 erfolgt die Herleitung in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Wahrscheinlichkeit des Umsetzens berechnet (p_{ums}). Hierzu werden die notwendigen Hiebstage pro Jahr ermittelt ($p_{t/a}$). Diese ergeben sich aus dem Quotient der jährlichen Nutzungsmenge in S2 und S3 (N_{S2+3}) und der täglichen Maschinenleistung (L_{Tag}). Ausgehend von der Hiebsdauer wird die Umsetzwahrscheinlichkeit abgeleitet. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass das Regenrisiko mit zunehmender Hiebsdauer steigt. Mit längerer Hiebsdauer steigt dementsprechend auch die Wahrscheinlichkeit des Umsetzens.

Wahrscheinlichkeit des Umsetzens pro Jahr:
Jährliche Nutzungsmenge in S2 und S3 dividiert durch die tägliche Maschinenleistung ergibt die Hiebstage pro Jahr, davon abgeleitet wird die Wahrscheinlichkeit des Umsetzens.

$$\boxed{p_{t/a} = \frac{N_{S2+3}}{L_{Tag}}}$$

Ergebnis:	falls $p_{t/a}$	< 3	→	ist p_{ums}	= 0
	“	> 3 - 5	→	“	= 0,5
	“	> 5 - 10	→	“	= 0,75
	“	> 10 - 20	→	“	= 1
	“	> 20	→	“	$= \frac{p_{t/a}}{20}$

Im zweiten Schritt wird die Umsetzwahrscheinlichkeit mit den Kosten für das Umsetzen eines Forwarders multipliziert und durch die betroffene Fläche dividiert. Beim Umsetzen wird neben einem entsprechenden Kostenansatz für einen Tieflader (K_{Tief}), auf welchem die Maschinen transportiert werden, lediglich der Kostenansatz für den Forwarder ($K_{Rück}$) berücksichtigt. Grund: in den seltensten Fällen arbeitet in der Praxis ein Harvester und Forwarder gemeinsam auf einer Fläche. Für die Auswahl des Forwarders war seine Bodenbelastung ausschlaggebend, die bei einem Ladevolumen von bis zu 12t weitaus grösser als bei einem Harvester ist. Die beiden Kostenansätze werden anschliessend mit dem Hin- und Rückweg des Tiefladers (durchschnittliche Umsetzdistanz = D_{ums} x 2) multipliziert und durch die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit (V_{Fahrz}) sowie die Gesamtfläche von S2 und S3 (A_{S2+S3}) dividiert. Bei der durchschnittlichen Umsetzdistanz und der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit handelt es sich, neben den Kostenansätzen für den Forwarder und den Tieflader, um Defaultwerte, die vom Anwender überschrieben werden können.

Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche:
Kosten für einmal Umsetzen des Forwarders (Fr.) multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit der Umsetzungen (pro Jahr) dividiert durch die betroffene Fläche (ha)

$$ZK_{Ums} = \frac{(K_{Tief} + K_{Rück}) \times 2 \times D_{ums} \times p_{ums}}{V_{Fahrz} \times A_{S2+S3}}$$

Tabelle 7: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der Kosten für das Umsetzen auf eine Ausweichfläche.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Hiebstage pro Jahr	$P_{t/a}$	Tag a^{-1}	i		
Jährliche Nutzungsmenge in S2 und S3	N_{S2+3}	m^3a^{-1}	i		abhängig von Schutzzone
Tägliche Maschinenleistung	L_{Tag}	m^3Tag^{-1}	d	100	Erfahrungswert
Wahrscheinlichkeit des Umsetzens pro Jahr	p_{ums}	a^{-1}	i		
Kostenansatz Tieflader + Fahrer	K_{Tief}	$Fr.h^{-1}$	d	150	Erfahrungswert
Kostenansatz Forwarder + Fahrer	$K_{Rück}$	$Fr.h^{-1}$	d	200	VSFU (2010a)
Durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit des Tiefladers	V_{Fahrz}	kmh^{-1}	d	50	Erfahrungswert
Durchschnittliche Umsetzdistanz	D_{ums}	km	d	20	Schätzwert
Fläche S2 und S3	A_{S2+S3}	ha	i		abhängig von Schutzzone
Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche	**ZK_{Ums}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.4 Umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ES3)

Basierend auf der Empfehlung zur Verwendung von umweltverträglichen Treib- und Schmierstoffen, werden für die in den verschiedenen HV definierten Maschinen ökologische Betriebsmittel verwendet. Zur Berechnung der zusätzlichen Kosten durch umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ZK_{TS}) wird die Nutzungsmenge pro Hektar und Jahr (N_{S2+3}) mit den Mehrkosten der ökologischen Betriebsmittel und dem entsprechenden Verbrauch der jeweiligen Maschine multipliziert. Bei den Werten für die Mehrkosten (Preisdifferenz zwischen herkömmlichen und umweltverträglichen Treib- und Schmierstoffen) handelt es sich um Defaultwerte, wodurch sich Preisschwankungen abbilden lassen. Die einzelnen Verbrauchswerte für die Maschinen sind hingegen Fixwerte. Aufgrund der in den drei HV differenzierten maschinellen Ausstattung der Prozesse „Aufarbeiten und Fällen“ sowie „Rücken“, unterscheiden sich die Formeln zur Herleitung der zusätzlichen Kosten. Nachfolgend sind die Formeln für die drei HV separat dargestellt.

Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe:
Produkt aus Mehrkosten für ökologische Betriebsmittel (Fr. pro l) und Verbrauch der jeweiligen Maschine (l pro m^3) wird mit der Nutzungsmenge (m^3 pro ha und Jahr) multipliziert

HV 1 Motorsäge und Forstspezialschlepper:

$$ZK_{TS} = N_{S2+3} \times K_{gb} \times Vg_{ms} + K_{kö} \times Vk_{ms} + K_{hö} \times Vh_{fs}$$

HV 2 Harvester und Forwarder:

$$ZK_{TS} = N_{S2+3} \times K_{hö} \times Vh_{hv} + Vh_{fw} + K_{kö} \times Vk_{hv}$$

HV 3 Motorsäge und Seilkran:

$$ZK_{TS} = N_{S2+3} \times K_{gb} \times Vg_{ms} + K_{kö} \times Vk_{ms} + K_{hö} \times Vh_{skran}$$

Tabelle 8: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der Kosten durch umweltverträgliche Treib- und. Schmierstoffe.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Preisdifferenz zwischen herkömmlichem und umweltverträglichem Gerätebenzin	K_{gb}	$Fr.l^{-1}$	d	2.2	mündl. Mitteilung Motorex (Stand 01.04.09)
Preisdifferenz zwischen herkömmlichem und umweltverträglichem Hydrauliköl	$K_{hö}$	$Fr.l^{-1}$	d	4.7	www.blaser.com (Stand 15.04.10)
Preisdifferenz zwischen herkömmlichem und umweltverträglichem Sägekettenöl	$K_{kö}$	$Fr.l^{-1}$	d	1.8	www.blaser.com (Stand 15.04.10)
Verbrauch des Gerätebenzins Motorsäge	Vg_{ms}	lm^{-3}	f	0.5	
Verbrauch des Hydrauliköls Harvester	Vh_{hv}	lm^{-3}	f	0.04	
… Forwarder	Vh_{fw}	lm^{-3}	f	0.01	
… Forstspezialschlepper	Vh_{fs}	lm^{-3}	f	0.03	
… Mobilseilkran	Vh_{skran}	lm^{-3}	f	0.03	
Verbrauch des Sägekettenöls Harvester	Vk_{hv}	lm^{-3}	f	0.1	
… Motorsäge	Vk_{ms}	lm^{-3}	f	0.1	
Nutzungsmenge in S2 und S3 pro Hektar und Jahr	N_{S2+3}	$m^3ha^{-1}a^{-1}$	i		abhängig von Schutzzone
Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe	**ZK_{TS}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.5 Bevorzugen von Laubbaumarten (ES3)

Durch eine Erhöhung des Laubholzanteils erwächst dem Waldbesitzer in der Regel ein Minderertrag. Gründe hierfür sind unter anderem die geringeren Zuwächse als auch die tendenziell höheren Anteile schlechter Qualitäten beim Laubholz. Ermitteln lässt sich der Minderertrag aus der Differenz zwischen den erntekostenfreien Erlösen von Laubholz und Nadelholz. Die Faktoren, die den erntekostenfreien Erlös beeinflussen sind vielfältig. So spielen insbesondere der zu erhöhende Laubholzanteil, die Standortsgüte (Bonität), die geerntete Holzmenge, die Qualität des Holzes, der aktuelle Holzpreis und die Holzerntekosten eine entscheidende Rolle. Die Berücksichtigung aller dieser Faktoren in einer Formel erschwert nicht nur deren Herleitung, sondern verlangt auch von den späteren Anwendern des Trinkwasserschutz-Tools einiges an Aufwand, um die entsprechenden Grössen zu bestimmen. Insbesondere wegen der Benutzerfreundlichkeit für die späteren Anwender, wird für die Berechnungen im Tool eine Formel hergeleitet, die mit wenigen Eingaben auskommt. Um dies zu gewährleisten, wird eine Formel geschaffen, für welche die Anwender aus zwei vordefinierten Tabellen für die Baumarten Buche und Fichte bereits entsprechende erntekostenfreie Erlöse entnehmen können. Diese untergliedern sich in die drei HV und umfassen mehrere Werte für verschiedene Bonitäten je Baumart (vgl. Tabelle 9 und 10). Ausgehend vom gewählten HV und einer der Grundwasserschutzzone ent-

sprechenden Standortsgüte, kann der Anwender für die Baumarten Fichte und Buche, die stellvertretend für Laubholz und Nadelholz stehen, einen erntekostenfreien Erlös aus der Tabelle auswählen.
Die Berechnung der Werte zu den erntekostenfreien Erlösen fand in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt wurden mit Hilfe der Ertragstafeln für Fichte (EAFV 1968) und Buche (EAFV 1967) sowie unter Verwendung des von der Eidg. Forschungsanstalt WSL entwickelten Modells SorSim (Sortimentssimulator; Lemm et Erni 2009) die zu erwartenden Holzmengen je Sortiment (1a bis 6) für eine festgesetzte Umtriebszeit berechnet. Die Sortimentsmengen wurden anschliessend nach Qualitäten differenziert (vgl. Tabelle 34 und 35 im Anhang 1) und mit den Holzpreisempfehlungen für 2011 multipliziert (vgl. Tabelle 43 und 44 Anhang 1). Daraus ergaben sich die Holzerlöse je Baumart und Bonität. Im zweiten Schritt wurden mit dem ebenfalls von der Eidg. Forschungsanstalt WSL entwickelten Modell HeProMo (Holzernteproduktivitätsmodell; Frutig et al. 2009) die Produktivitäten für die Teilprozesse der drei definierten HV ermittelt. Zur Berechnung der Holzerntekosten wurden die Produktivitätswerte im Anschluss mit festgelegten Kostenansätzen je Teilprozess der drei HV und der geernteten Holzmenge pro Jahr multipliziert (eine detaillierte Beschreibung der Berechnung der erntekostenfreien Erlöse findet sich im Anhang 1 bis 3).
Die Werte für die erntekostenfreien Erlöse in den Tabellen sind jedoch nicht statisch, sondern können im Tool über eine Korrektur der Holzpreise und der Kostenansätze für die HV verändert werden. Auf diese Weise lassen sich Preisschwankungen im Holzmarkt als auch sich verändernde Löhne, z.B. aufgrund des Teurungsausgleichs, bei den Berechnungen berücksichtigen (vgl. Anhang 1 und 2 sowie Benutzerhandbuch Kapitel 3.8).
Dank dieser Vereinfachung lässt sich die Gesamtdifferenz im erntekostenfreien Erlös bei einer Erhöhung des Laubholzanteils ($DIFF_{LH\ NH}$) durch die Anwender des Tools sehr einfach ermitteln. Die Veränderung im Erlös lässt sich somit aus der Differenz zwischen dem aktuellen (LH_{ist}) und dem angestrebten Laubholzanteil (LH_{soll}), multipliziert mit der Differenz aus dem erntekostenfreien Erlös von Fichte (E_{Fi}) und Buche (E_{Bu}) berechnen. Die Anwender müssen somit lediglich noch den Prozentsatz des aktuellen und den Prozentsatz des Laubholzanteils gemäss einer potentiellen natürlichen Vegetation in S2 und S3 bestimmen.
Schutzzonen, die bereits einen Laubholzanteil aufweisen, der nahe der potentiellen natürlichen Vegetation liegt, können alternativ auch einen für den Standort minimalen Laubholzwert für die Berechnung heranziehen. Als Grundlage können hierzu die Werte aus der Studie „Grundanforderung an den naturnahen Waldbau“ dienen, in welcher für verschiedene Standorte in den Produktionsregionen der Schweiz natürliche Baumartenzusammensetzungen definiert werden (Kaufmann et al. 2010). Durch diese Vorgehensweise wird der bereits vorhandene hohe Laubholzanteil einer Wasserschutzzone einer „Vorleistung des Waldbesitzers“ gleichgesetzt.

Tabelle 9: Erntekostenfreie Erlöse für die Baumart Fichte je Bonität und Holzernteverfahren.

Bonität	Erntekostenfreier Erlös ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$)		
	HV 1	**HV 2**	**HV 3**
18	67	513	-12
22	239	796	143
26	365	1114	238
30	500	1402	342

Tabelle 10: Erntekostenfreie Erlöse für die Baumart Buche je Bonität und Holzernteverfahren.

Bonität	Erntekostenfreier Erlös ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$)		
	HV 1	**HV 2**	**HV 3**
18	-89	116	-91
22	47	288	9
26	96	432	42

Differenz im erntekostenfreien Erlös bei Erhöhung des Laubholz-Anteils:
Differenz zwischen den LH-Anteilen SOLL und IST multipliziert mit der Differenz der entsprechenden erntekostenfreien Erlöse (Fr. pro ha und Jahr)

$$\mathrm{DIFF}_{\mathrm{LH\ NH}} = \frac{\mathrm{LH}_{\mathrm{soll}} - \mathrm{LH}_{\mathrm{ist}} \times \mathrm{E}_{\mathrm{fi}} - \mathrm{E}_{\mathrm{bu}}}{100}$$

Tabelle 11: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der Differenz im erntekostenfreien Erlös.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Laubholzanteil ist	LH_{ist}	%	i		abhängig von Schutzzone
Laubholzanteil soll	LH_{soll}	%	i		abhängig von Schutzzone
Erntekostenfreier Erlös Fichte	E_{fi}	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	d		abhängig von Holzernte-verfahren und Bonität
Erntekostenfreier Erlös Buche	E_{bu}	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	d		abhängig von Holzernte-verfahren und Bonität
Differenz im erntekostenfreier Erlös bei Erhöhung des Laubholz-Anteils	**$DIFF_{LHNH}$**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.6 Kein Betanken von Maschinen (ES2)

Innerhalb der Schutzzone S2 sollen Motorsägen möglichst nicht betankt werden. Bei den HV 1 und 3 müssen sich die Forstwarte daher aus der Schutzzone herausbegeben, wenn die Tankfüllung der Motorsäge aufgebraucht ist. Daraus ergeben sich zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 (ZK_{Tank}). Diese berechnen sich aus den Kosten für den zurückgelegten Weg multipliziert mit der Anzahl Tankvorgänge. Der zu berücksichtigende Weg beschränkt sich aber nicht nur auf die Distanz bis zur Zonengrenze zwischen S2 und S3, da in S3 aufgrund der gesetzlichen Vorschrift zur ungeschützten Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen ein Betanken der Motorsäge nur mit Auffangwanne erlaubt ist. Diese befindet sich wegen ihrer Dimension beim Fahrzeug, mit dem die Forstwarte zum Einschlagsort fahren. Für die Berechnung wird somit die durchschnittliche Marschdistanz (M_{dist}) bis zum Fahrzeug berücksichtigt (vgl. Abbildung 2).
Aus der doppelten Marschdistanz (Hin- und Rückweg) multipliziert mit dem Kostenansatz für einen Forstwart (K_{for}) und dividiert durch die Marschgeschwindigkeit (M_{gesch}), ergeben sich die Kosten für den zurückgelegten Weg. Diese werden anschliessend mit der Anzahl Tankvorgänge multipliziert, welche sich aus der jährlichen Nutzungsmenge pro Hektar (N_{S2+3}), multipliziert mit dem Verbrauch der Motorsäge (V_{gms}), dividiert durch das Fassungsvermögen des Treibstofftanks (T_{vol}) errechnet. Der Verbrauch der Motorsäge wird als Fixwert vorgegeben. Die Marschgeschwindigkeit, wie auch das Fassungsvermögen des Treibstofftanks und der Lohnansatz für den Forstwart werden hingegen als Defaultwerte vorgegeben. Dabei können von den Anwendern insbesondere über die Marschgeschwindigkeit die Geländeverhältnisse (Ebene vs. Steilhang) berücksichtigt werden.

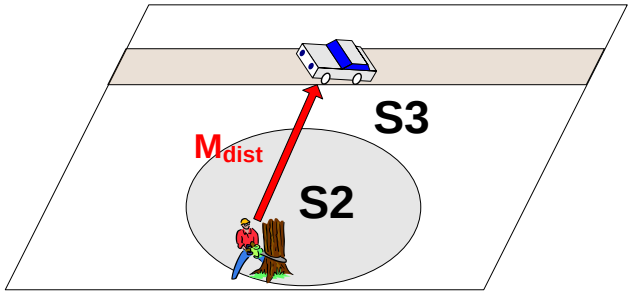


Abbildung 2: Zusätzliche Marschdistanz bis zum Fahrzeug zum Auftanken der Motorsäge.

Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3:

Kosten für den zurückzulegenden Weg (Fr.) multipliziert mit der Anzahl Tankvorgänge (pro ha und Jahr)

$$ZK_{Tank} = \frac{2 \times M_{dist} \times K_{for} \times N_{S2+3} \times Vg_{ms}}{M_{gesch} \times T_{vol}}$$

Tabelle 12: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der zusätzlichen Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Nutzungsmenge in S2 und S3 pro Hektar und Jahr	N_{S2+3}	$m^3ha^{-1}a^{-1}$	i		abhängig von Schutzzone
Verbrauch des Gerätebenzins Motorsäge	Vg_{ms}	lm^{-3}	f	0.5	$=lh^{-1} \cdot hm^{-3}$ (Verbrauch mal mittl. Effizienz); Quelle: Z.A.T. Husqvarna, Stihl
Fassungsvermögen Treibstofftank Motorsäge	T_{vol}	l	d	0.7	www.husqvarna.ch (Stand 15.04.10)
durchschnittliche Marschdistanz Grenze S2/Fahrzeug (1 Weg)	M_{dist}	m	i		abhängig von Schutzzone
Marschgeschwindigkeit	M_{gesch}	kmh^{-1}	d	5	abhängig von Hangneigung
Lohnansatz Forstwart (motormanuelle Holzhauerei)	K_{for}	$Fr.h^{-1}$	d	75	VSFU (2010b)
Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3	**ZK_{Tank}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.7 Entfernen von Schlagabraum (ES2)

Für die Berechnung der zusätzlichen Kosten für das Entfernen von Ernterückständen, wird das Szenario unterstellt, dass die Rückstände mit einem Forwarder gebündelt und an die Waldstrasse transportiert werden, wo sie anschliessend von einem mobilen Hacker gehackt werden. Dieses Szenario wird jedoch nur für das HV 1 und HV 2 unterstellt. Für das HV 3 wird die Annahme getroffen, dass eine Vollbaumnutzung stattfindet, bei welchem die Bäume mit dem Seilkran in einem Stück aus dem Bestand gerückt werden und somit direkt an der Waldstrasse aufgearbeitet werden können.

Für das HV 1 und HV 2 errechnen sich die zusätzlichen Kosten für das Entfernen von Ernterückständen aus der jährlichen Nutzungsmenge pro Hektar in S2 multipliziert mit dem Anteil an Ernterückständen und einem

einheitlichen Kostenansatz für die Schlagräumung, das Rücken und Hacken. Der Anteil an Ernterückständen wird als Defaultwert in die Formel einbezogen. Der Kostenansatz für die Schlagräumung, Rücken und Hacken wurde mit dem Modell HeProMo hergeleitet und fliesst ebenfalls als Defaultwert in die Formel ein.

Zusätzliche Kosten durch Entfernen von Ernterückständen:
Kosten des Rückens und Hackens (Fr. pro m^3) multipliziert mit dem Anteil der Ernterückstände an der gesamten Nutzungsmenge (m^3 pro ha und Jahr)

$$\boxed{ZK_{Er} = K_{ha} \times N_{S2} \times P_{ernt}}$$

Tabelle 13: Erläuterung der Formelgrössen zur Berechnung der Kosten durch Entfernen von Ernterückständen.

Beschreibung	Abk.	Einheit	d/f/i	Wert	Quelle/Bemerkung
Nutzungsmenge in S2 pro Hektar und Jahr	N_{S2}	$m^3ha^{-1}a^{-1}$	i		
Anteil Ernterückstände	P_{ernt}	-	d	0.1	Erfahrungswert
Kosten der Schlagräumung, des Rückens mit Forwarder und des Hackens mittels mobilem Hacker auf Lastwagen	K_{ha}	$Fr.m^{-3}$	d	25	Berechnet mit HeProMo
Zusätzliche Kosten durch Entfernen v. Ernterückständen	**ZK_{Er}**	**$Fr.ha^{-1}a^{-1}$**			

3.8 Zusammenfassung

Die im Trinkwasserschutz-Tool für die Berechnung vorgenommene Differenzierung von drei Standard-Holzernteverfahren bedingt die individuelle Berücksichtigung der darin abgebildeten Prozesse und ihrer personellen und maschinellen Ausstattung bei der Herleitung der einzelnen Formeln. Diese zusätzliche Unterteilung ermöglicht dadurch eine bessere Abbildung der jeweiligen Situation in den Grundwasserschutzzonen. Die Auswirkungen sind auf zweierlei Arten erkennbar. Einerseits werden, wie im Fall der Berechnung der zusätzlichen Kosten bei der Verwendung von umweltverträglichen Treib- und Schmierstoffen (vgl. Kapitel 3.4), die Formeln explizit an die jeweilige Maschinenausstattung je HV angepasst, was drei verschiedene Formeln zur Folge hat.
Andererseits werden die aufgrund der gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen abgeleiteten Massnahmen einzeln hinterfragt, ob sie für das jeweilige HV aus praktischer Sicht relevant sind. Wo dies nicht der Fall ist, werden die kostenrelevanten Massnahmen für das jeweilige HV ausgeklammert. So werden die zusätzlichen Transportkosten in Folge der gesetzlichen Vorschrift zur chemischen Behandlung und Lagerung von behandeltem Holz nur beim HV 1 und HV 2 berücksichtigt, da beim HV 3 eine direktes Rücken mit dem Seilkran ausserhalb der Schutzzone S3 angenommen wird. Zusätzliche Kosten für Auffangwannen entstehen nur im HV 1 und HV 3, wo ein entsprechender Einsatz der Motorsäge vorgesehen ist. Das gleiche gilt für die Empfehlung, wonach das Betanken von Motorsägen in der S 2 vermieden werden soll. Die daraus entstehenden zusätzlichen Kosten werden ebenfalls nur im HV 1 und HV 3 berechnet, wo der Prozess „Fällen und Aufarbeiten“ motormanuell durchgeführt wird. Die Empfehlung zur bodenschonenden Befahrung wird wiederum nur beim HV 2 berücksichtigt, wo die Holzernte vollmechanisiert mit Harvester und Forwarder durchgeführt wird. Bei der Empfehlung zur Erhöhung des Laubholzanteils werden die Kosten für die Holzernte individuell je HV berechnet und von den Erlösen je Baumart und Bonität abgezogen, was einen Einfluss auf die Höhe der

erntekostenfreien Erlöse hat. Die Steigerung des Laubholzanteils ist eine langfristige waldbauliche Strategie, die unabhängig vom Holzernteverfahren ist und dementsprechend bei allen drei HV berücksichtigt wird. Die zusätzlichen Kosten infolge des Entfernens von Ernterückständen werden wiederum nur beim HV 1 und HV 2 berechnet, da beim Rücken des Holzes mit dem Seilkran im HV 3 eine Vollbaumnutzung unterstellt wird, dass eine Aufarbeitung der Bäume direkt an der Waldstrasse vorsieht.
Tabelle 14 gibt eine Übersicht, inwiefern die gesetzlichen Vorschriften und Empfehlen und die daraus abgeleiteten kostenrelevanten Massnahmen bei den drei HV berücksichtigt werden. Dieses Schema bildet gleichzeitig auch die Grundstruktur für das Trinkwasserschutz-Tool (vgl. Benutzerhandbuch, Kapitel 2).

Tabelle 14: Die Formeln zur Berechnung der kostenrelevanten Massnahmen werden je Holzernteverfahren individuell berücksichtigt. Für die Berechnung der zusätzlichen Kosten infolge umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe wird für jedes HV eine extra Formel erstellt ($X_{(1)}$, $X_{(2)}$, $X_{(3)}$).

Beschränkung → abgeleitete Massnahme	HV 1	HV 2	HV 3
Keine chemische Behandlung/Keine Lagerung von behandeltem Holz (VS 3) → *Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3 (ZK_{Trans})*	**X**	**X**	
Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen (ES 3) → *Zusätzliche Kosten für Auffangwannen (ZK_{Wanne})*	**X**		**X**
Bodenschonende Befahrung (ES 3) → *Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche (ZK_{Ums})*		**X**	
Umweltverträglicher Treib- und Schmierstoffe (ES 3) → *Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ZK_{TS})*	**X (1)**	**X (2)**	**X (3)**
Bevorzugen von Laubbaumarten (ES 3) → *Differenz im erntekostenfreien Erlös bei Erhöhung des Laubholz-Anteils ($DIFF_{LHNH}$)*	**X**	**X**	**X**
Kein Betanken von Maschinen (ES 2) → *Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 (ZK_{Tank})*	**X**		**X**
Entfernen von Schlagabraum (ES 2) → *Zusätzliche Kosten durch Entfernen von Ernterückständen (ZK_{Er})*	**X**	**X**	

4. Fallbeispiele

Anhand von drei Fallbeispielen (kleine, mittlere und grosse Schutzzone) werden die in Microsoft Excel implementierten Formeln exemplarisch durchgerechnet. Bei den für die Berechnung herangezogenen Beispielen handelt es sich um die Grundwasserschutzzonen:

- Bsp. 1 Bois des Meules in Surpierre (Kanton FR) klein
- Bsp. 2 Heimenholz in Rheinfelden (Kanton AG) mittel
- Bsp. 3 Les Orgères in Bassins (Kanton VD) gross

Diese drei Fallbeispiele wurden schon im ersten Projekt von 2008 zur Berechnung des Mehraufwandes und Minderertrages infolge des Trinkwasserschutzes herangezogen (Spjevak et Bürgi 2008, Bürgi et Spjevak 2009). In Tabelle 15 sind die wichtigen Kenngrössen der Grundwasserschutzzonen zusammengefasst, wie sie für die Berechnungen im Trinkwasserschutz-Tool Verwendung finden.

Die Angaben zu der Grösse von S2 und S3, die durchschnittliche Marschdistanz zur Grenze von S2, die zusätzliche Rückedistanz bis ausserhalb von S3 sowie die aktuellen Laubholzanteile wurden bereits im Projekt von 2008 als Eingangsgrössen für die Berechnungen verwendet. Sie wurden gemeinsam mit zuständigen Ansprechpersonen vor Ort erhoben.
Die Angaben über die jährlichen Nutzungsmengen in S2 und S3 sind von der Referenzsituation abgeleitet, mit welcher die Schutzzonen zur Berechnung des Mehraufwandes und Minderertrages im ersten Projekt verglichen wurden (Spjevak et Bürgi 2008). Die jährliche Nutzungsmenge pro Hektar in S2 und S3 beträgt daher für alle drei Beispiele 11,3 m^3. Für die gesamte jährliche Nutzungsmenge in den Schutzzonen wurde diese Grösse mit der jeweiligen Fläche von S2 und S3 multipliziert. Diese Eingangsgrössen bilden nicht die reale Situation in den Schutzzonen ab, sie ermöglichen aber einen besseren Vergleich zwischen den Ergebnissen aus dem Projekt von 2008 und den Resultaten aus dem Trinkwasserschutz-Tool. Ebenfalls aus der Referenzsituation abgeleitet ist der Bonitätswerte 26 für die Baumart Fichte und der Bonitätswert 22 für die Buche.

Tabelle 15: Kenngrössen zu den drei Fallbeispielen: Bsp. 1 Bois des Meules; Bsp. 2 Heimenholz; Bsp. 3 Les Orgères.

Beschreibung	Einheit	Bsp. 1	Bsp. 2	Bsp. 3
Grösse Grundwasserschutzzone S2	ha	1	14	130
Grösse Grundwasserschutzzone S3	ha	1.5	47	4675
Ø Marschdistanz zur Grenze von S2	km	0.05	0.26	0.75
Ø zusätzl. Rückedistanz auf der Strasse bis ausserhalb S3	km	0.14	0.6	1.5
Jährliche Nutzungsmenge S2	m^3a^{-1}	11.3	158	1469
Jährliche Nutzungsmenge S3	m^3a^{-1}	17	531	52828
Nutzungsmenge S2 und S3 pro Hektar und Jahr	$m^3ha^{-1}a^{-1}$	11.3	11.3	11.3
Laubholzanteil IST	%	50	50	60
Laubholzanteil SOLL	%	100	100	100
Bonität Fichte	-	26	26	26
Bonität Buche	-	22	22	22

Für die Kostenansätze der Teilprozesse „Fällen und Aufarbeiten“ sowie „Rücken“ werden die Lohn- und Tarifempfehlungen des Verbandes Schweizerischer Forstunternehmungen herangezogen (VSFU 2010a, 2010b, 2010c; vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Kostenansätze für die Teilprozesse „Fällen und Aufarbeiten“ und „Rücken“ der drei Holzernteverfahren.

Beschreibung	Einheit	Kostenansatz
HV 1: motormanuelle Holzhauerei +	$Fr.h^{-1}$	75
Forstspezialschlepper	$Fr.h^{-1}$	190
HV 2: Radharvester	$Fr.h^{-1}$	300
Forwarder	$Fr.h^{-1}$	200
HV 3: motormanuelle Holzhauerei	$Fr.h^{-1}$	75
Mobilseilkran	$Fr.h^{-1}$	230

Eine Differenzierung in drei HV zur Berechnung des Mehraufwandes und Minderertrages wurde im Projekt von 2008 noch nicht berücksichtigt. Im Folgenden werden daher für die drei Fallbeispiele jeweils alle HV exemplarisch durchgerechnet. Dies umfasst auch das HV3, obwohl die Gebiete in Realität nicht einem typischen Seilkrangebiet entsprechen.

5. Ergebnisse der Kostenberechnungen im Trinkwasserschutz-Tool

In den Kapiteln 5.1 bis 5.7 werden die Ergebnisse der Berechnungen im Trinkwasserschutz-Tool für die verschiedenen gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen je Fallbeispiel und HV kurz erläutert. In Kapitel 5.8 werden die Einzelergebnisse zusammengefasst und die Gesamthöhe des Mehraufwandes und Minderertrages dargestellt.

5.1 Keine chemische Behandlung von gelagertem Holz / keine Lagerung von behandeltem Holz (VS3)

Die zusätzlichen Transportkosten nehmen innerhalb eines HV mit grösser werdender Schutzzonenfläche zu. Dies hängt mit der zusätzlichen Rückedistanz auf der Strasse bis ausserhalb von S3 zusammen, welche im ersten Bsp. lediglich 0.14 km, im zweiten Bsp. 0.6 km und im dritten Bsp. 1.5 km beträgt. Je weiter das Holz gerückt werden muss, desto höher sind dementsprechend die zusätzlichen Transportkosten. Im Vergleich zum HV 2, sind die Kosten im HV 1 um rund das Vierfache grösser. Dies resultiert aus dem im jeweiligen HV definierten Rückefahrzeug und dessen Lastvolumen. Beim Forstspezialschlepper wird für das Lastvolumen mit einem Defaultwert von 4 m^3 gerechnet, wohingegen für den Forwarder ein Lastvolumen von 18 m^3 angenommen wird. Der Forwarder benötigt damit weniger Fahrten als der Forstspezialschlepper, um das geerntete Holz aus der Schutzzone heraus zu transportieren.

Tabelle 17: Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3 (ZK_{Trans}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	15.06	3.52	
Bsp. 2: Heimenholz		64.38	15.06	
Bsp. 3: Les Orgères		161.03	37.67	

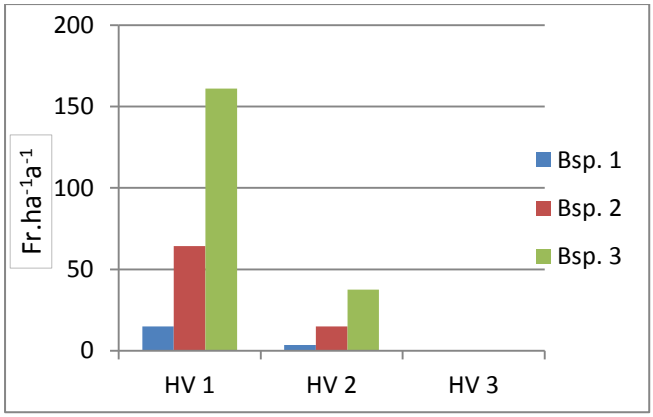


Abbildung 3: Zusätzliche Kosten für Transport des Holzes ausserhalb S3 (ZK_{Trans}).

5.2 Keine ungeschützte Lagerung und Umfüllung von Betriebsstoffen (ES3)

Die zusätzlichen Kosten für Auffangwannen sind sehr gering. Sie belaufen sich für die kleine Schutzzone in Bois des Meules auf 3.36 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ und für die grosse Schutzzone in Les Orgères auf lediglich 0.04 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$. Grund für diesen „Kosteneinbruch“ liegt in dem für die Berechnung unterstellten Einsatzbereich der Auffangwannen, welcher mit 200 ha veranschlagt wurde. Für die kleine Schutzzone in Bois des Meules verteilen sich die Anschaffungskosten für eine Wanne auf lediglich 2.5 ha. Im Fall der Schutzzone in Les Orègers wird hingegen der volle Einsatzbereich einer Wanne ausgenutzt, was die Kosten pro Hektar reduziert.

Tabelle 18: Zusätzliche Kosten für Auffangwannen (ZK_{Wanne}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	3.36		3.36
Bsp. 2: Heimenholz		0.14		0.14
Bsp. 3: Les Orgères		0.04		0.04

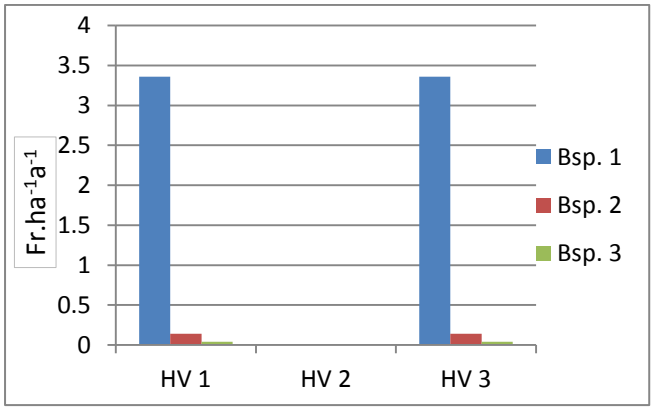


Abbildung 4: Zusätzliche Kosten für Auffangwannen (ZK_{Wanne}).

5.3 Bodenschonende Befahrung (ES3)

Für die Grundwasserschutzzone in Bois des Meules fallen keine zusätzlichen Kosten für das Umsetzen auf eine Ausweichfläche an. Durch die geringe Nutzungsmenge in S2 und S3 von rund 28 m^3 pro Jahr, beträgt die berechnete Hiebsdauer lediglich 0.3 Tage, woraus sich eine Umsetzungswahrscheinlichkeit von null ableitet. Im Beispiel der Schutzzone Heimenholz belaufen sich die Kosten hingegen auf 3.44 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$. Wegen der höheren jährlichen Nutzungsmenge von 689 m^3a^{-1} ergibt sich in dieser Schutzzone eine Hiebsdauer von rund 7 Tagen, woraus eine Umsetzwahrscheinlichkeit von 0.75 folgt. In Les Orgères liegen die zusätzlichen Kosten für das Umsetzen trotz einer höheren jährlichen Nutzungsmenge von 54‘297 m^3a^{-1} und einer abgeleiteten Umsetzwahrscheinlichkeit von 27.15 wiederum niedriger als im Beispiel 2. Dort betragen die zusätzlichen Kosten 1.58 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$. Dies hängt mit der Gesamtgrösse von S2 und S3 zusammen. Die rund 27 errechneten notwendigen Umsetzungen verteilen sich auf 4805 ha, was die Kosten pro Hektar reduziert.

Tabelle 19: Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche (ZK_{Ums}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$		0.00	
Bsp. 2: Heimenholz			3.44	
Bsp. 3: Les Orgères			1.58	

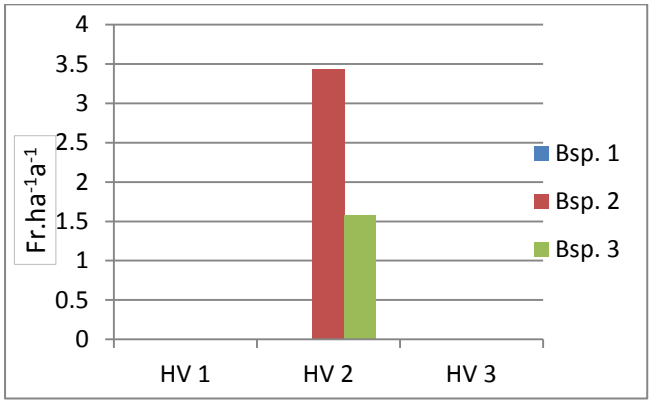


Abbildung 5: Zusätzliche Kosten für Umsetzen auf Ausweichfläche (ZK_{Ums}).

5.4 Umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ES3)

Die berechneten zusätzlichen Kosten für Treib- und Schmierstoffe sind mit rund 16 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ beim HV 1 und HV 3 über alle Fallbeispiele hinweg identisch. Dieses Resultat kommt durch zwei Gründe zustande. Der erste Grund liegt in den gleichen Verbrauchswerten bei Treib- und Schmierstoffen der im HV definierten Maschinen. Beide HV sehen für den Prozess „Fällen und Aufarbeiten“ den Einsatz einer Motorsäge vor. Gleichzeitig haben die im Prozess „Rücken“ definierten Maschinen Forstspezialschlepper und Seilkran den gleichen Hydraulikölverbrauch als Fixwert. Der zweite Grund liegt in der für die Fallbeispiele angenommenen identischen jährlichen Nutzungsmengen pro Hektar, welche von der Referenzsituation aus dem ersten Projekt abgeleitet wurde. Sie bildet auch die Ursache für die minimalen Unterschiede im Rappenbereich. Die jährliche Nutzungsmenge pro Hektar ($m^3ha^{-1}a^{-1}$) wird selbst nicht im Trinkwasserschutz-Tool eingeben. Auf der Benutzer-

oberfläche des Tools werden nur die gesamten Nutzungsmengen je Schutzzone eingegeben (m^3a^{-1}). Diese werden für die drei Beispiele aber über die jährliche Nutzungsmenge pro Hektar und die Schutzzonengrösse abgeleitet. Durch das Runden der Werte entstehen die minimalen Unterschiede.
Die zusätzlichen Kosten für Treib- und Schmierstoffe sind im HV 2 mit 4.70 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ niedriger als bei den anderen HV. Beim HV 2 wird der Prozess „Fällen und Aufarbeiten“ durch den Harverster und nicht motormanuell mit der Motorsäge durchgeführt. Der Verbrauch an Gerätebenzin bei der Motorsäge ist im Vergleich zu den restlichen Verbrauchswerten recht hoch, was den Kostenunterschied zwischen den HV hervorruft.

Tabelle 20: Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ZK_{TS}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	16.09	4.70	16.09
Bsp. 2: Heimenholz		16.05	4.69	16.05
Bsp. 3: Les Orgères		16.06	4.69	16.06

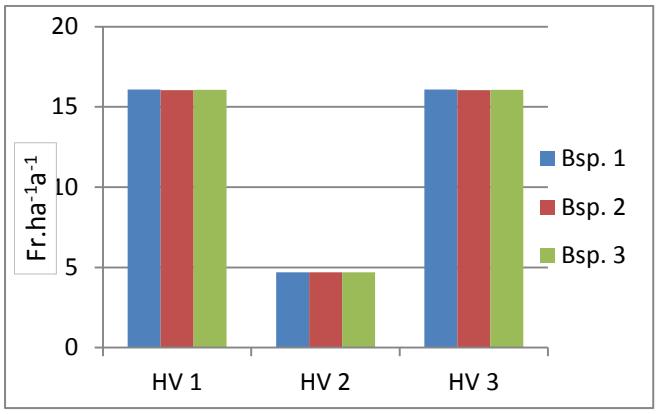


Abbildung 6: Zusätzliche Kosten für umweltverträgliche Treib- und Schmierstoffe (ZK_{TS}).

5.5 Laubbäume bevorzugen (ES3)

Die errechneten Differenzen im erntekostenfreien Erlös sind im Beispiel Bois de Meules und Heimenholz je HV identisch, da in beiden Fällen der Laubholzanteil um 50% erhöht werden soll. Im Beispiel Les Orgères wird der Laubholzanteil hingegen nur um 40% erhöht, wodurch die Differenzen im erntekostenfreien Erlös etwas niedriger liegen. Vergleicht man die Werte zwischen den HV, erkennt man sehr deutlich den Einfluss der unterschiedlichen Erntekosten. Am höchsten sind die Differenzen beim vollmechanisierten HV 2. Dieses ist im Vergleich zum HV 1 und HV 3 ein sehr effizientes und wirtschaftliches Ernteverfahren, was sich in niedrigen Holzerntekosten ausdrückt. In befahrbaren Lagen sind somit die Einbussen für einen Forstbetrieb infolge der Empfehlung zur Bevorzugung von Laubbäumen am grössten. Das HV 1 und HV 3, mit ihrer motormanuellen Holzernte und insbesondere das HV 3 mit seinem Seilkraneinsatz sind hingegen sehr kostenintensive Ernteverfahren. Dementsprechend sind die Differenzen im erntekostenfreien Erlös niedriger als im Vergleich zum HV 2. Dennoch bedeuten sie mit 114.50 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ und 159 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ immer noch eine beachtliche Einbusse für den Forstbetrieb.

Tabelle 21: Differenz im erntekostenfreien Erlös bei Erhöhung des Laubholz-Anteils ($DIFF_{LHNH}$).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	159.00	413.00	114.50
Bsp. 2: Heimenholz		159.00	413.00	114.50
Bsp. 3: Les Orgères		127.20	330.40	91.60

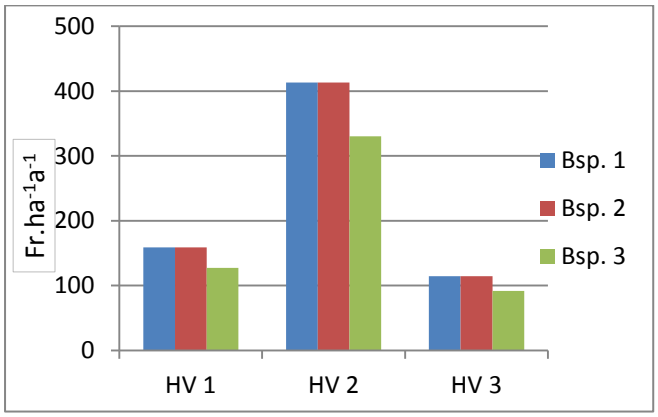


Abbildung 7: Differenz im erntekostenfreien Erlös bei Erhöhung des Laubholzanteils ($DIFF_{LHNH}$).

5.6 Kein Betanken von Maschinen (ES2)

Die zusätzlichen Kosten, die aufgrund der gesetzlichen Vorschrift entstehen, welche das Betanken von Motorsägen in S2 verbietet, steigen mit zunehmender Schutzzonengrösse an und betragen im Beispiel der kleinen Schutzzone Bois des Meules 12.13 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$ und im Falle der grossen Schutzzonen Les Orgères 181.61 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$. Der Grund für diesen Anstieg liegt in den zunehmenden Distanzen bis zur Zonengrenze von S2 bzw. bis zum Fahrzeug, in welchem sich die Auffangwanne zum geschützten Betanken der Motorsäge befindet (vgl. Kapitel 3.6). Die Werte im HV 1 und HV 3 sind identisch, da in beiden Ernteverfahren die gleichen Eingangsgrössen gewählt wurden. Durch eine Reduzierung der Marschgeschwindigkeit im HV 3 (Verfahren für Steillagen) könnten die Ergebnisse jedoch noch detailgetreuer der Situation im Ernteverfahren angepasst werden, wodurch sich die Werte auch unterscheiden würden.

Tabelle 22: Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 (ZK_{Tank}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	12.13		12.13
Bsp. 2: Heimenholz		62.93		62.93
Bsp. 3: Les Orgères		181.61		181.61

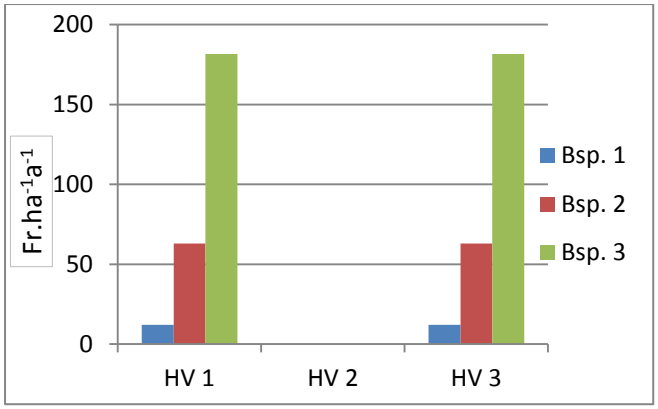


Abbildung 8: Zusätzliche Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 (ZK_{Marsch}).

5.7 Entfernen von Schlagabraum (ES2)

Die Höhe der zusätzlichen Kosten durch das Entfernen von Ernterückständen ist in allen Fällen identisch, da jeweils der gleiche Anteil an Ernterückständen entfernt wird. Die minimalen Unterschiede im Rappenbreich resultieren, wie im Falle der Berechnung der zusätzlichen Kosten infolge umweltverträglicher Treib- und Schmierstoffe, aus den identisch angenommenen jährlichen Nutzungsmengen pro Hektar ($m^3ha^{-1}a^{-1}$), welche von der Referenzsituation aus dem ersten Projekt abgeleitet wurde (vgl. Kapitel 5.4).

Tabelle 23: Zusätzliche Kosten durch Entfernen von Ernterückständen (ZK_{Er}).

Beispiel	Einheit	HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	$Fr.ha^{-1}a^{-1}$	28.25	28.25	
Bsp. 2: Heimenholz		28.21	28.21	
Bsp. 3: Les Orgères		28.25	28.25	

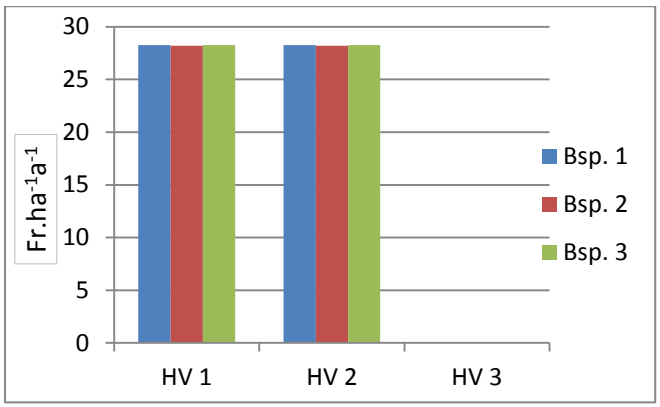


Abbildung 9: Zusätzliche Kosten durch Entfernen von Ernterückständen (ZK_{Er}).

5.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Gesamtkosten für die Fallbeispiele pro Hektar und Jahr ergeben sich aus der Summe der einzelnen kostenrelevanten Massnahmen und liegen zwischen 146 $Fr.ha^{-1}a^{-1}$, für die Grundwasserschutzzone Bois des

Meules mit dem HV 3, und 514 Fr.ha^{-1}a^{-1} für die Grundwasserschutzzone Les Orgères mit dem HV 1 (vgl. Abbildung 10). Die grössten Kostenanteile über alle Fallbeispiele resultieren aus den Mindererträgen infolge der Erhöhung des Laubholzanteils. Vor allem in den Berechnungen zum vollmechanisierten HV 2 haben diese jeweils einen Anteil von über 80 % (vgl. Tabelle 24). Lediglich im Falle der grossen Schutzzone in Les Orgères werden durch die zusätzlichen Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 und den Transportkosten im HV 1 und HV 3 höhere Werte erzielt. Die Betankungs- und Transportkosten stehen in der Gesamtbetrachtung an zweiter Stelle. Mit steigender Flächengrösse der Schutzzone steigen diese Kosten an, da weitere Marsch- und Rückedistanzen zurückgelegt werden müssen. Im Beispiel der kleinen Schutzzone in Bois des Meules befinden sie sich jedoch im einstelligen Prozentbereich. Ebenfalls von Bedeutung sind die zusätzlichen Kosten, welche durch die Entfernung von Ernterückständen und die Verwendung von umweltverträglichen Treib- und Schmierstoffen anfallen. Der Mehraufwand für die Anschaffung von Auffangwannen (HV 1 und HV 3) und für das Umsetzen der Maschinen (HV 2) spielt hingegen an den Gesamtkosten pro Hektar und Jahr eine untergeordnete Rolle.

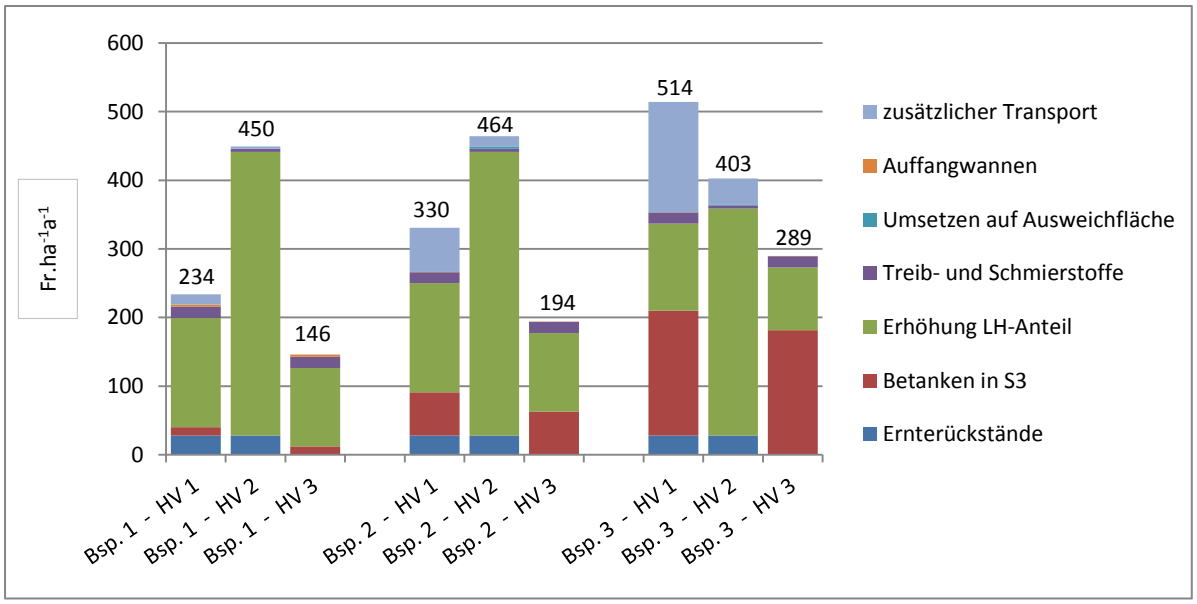


Abbildung 10: Zusammensetzung von Mehraufwand/Minderertrag je Fallbeispiel und Holzernteverfahren (Fr.ha^{-1}a^{-1}).

Tabelle 24: Prozentuale Anteile der kostenrelevanten Massnahmen am gesamten Mehraufwand/Minderertrag je Fallbeispiel und Holzernteverfahren (%).

		Bsp. 1: Bois des Meules			Bsp. 2: Heimenholz			Bsp. 3: Les Orgères		
		HV 1	HV 2	HV 3	HV 1	HV 2	HV 3	HV 1	HV 2	HV 3
zusätzlicher Transport	(ZK_{Trans})	6	1		19	3		31	9	
Auffangwannen	(ZK_{Wanne})	1		2	0		0	0		0
Umsetzen auf Ausweichfläche	(ZK_{Ums})		0			1			0	
Treib- und Schmierstoffe	(ZK_{TS})	7	1	11	5	1	8	3	1	6
Erhöhung LH-Anteil	$(DIFF_{LHNH})$	68	92	78	48	89	59	25	82	32
Betanken in S3	(ZK_{Tank})	5		8	19		33	35	0	63
Ernterückstände	(ZK_{Er})	12	6		9	6		5	7	
Gesamt		100	100	100	100	100	100	100	100	100

Das Verhältnis von gesetzlichen Vorschriften (bestehend aus den zusätzlichen Transportkosten) zu Empfehlungen (bestehend aus den Kosten für Auffangwannen, den Kosten für das Umsetzen auf eine Ausweichfläche, den Kosten für Treib- und Schmierstoffe, der Erhöhung des LH-Anteils, dem Betanken der Motorsäge in S3 und dem Hacken der Ernterückständen) liegt über alle Fallbeispiele und HV hinweg bei rund 10% zu 90% (vgl. Abbildung 11). Die Empfehlungen des BAFU machen demnach den wesentlichsten Bestandteil am Mehraufwand und Minderertrag aus.

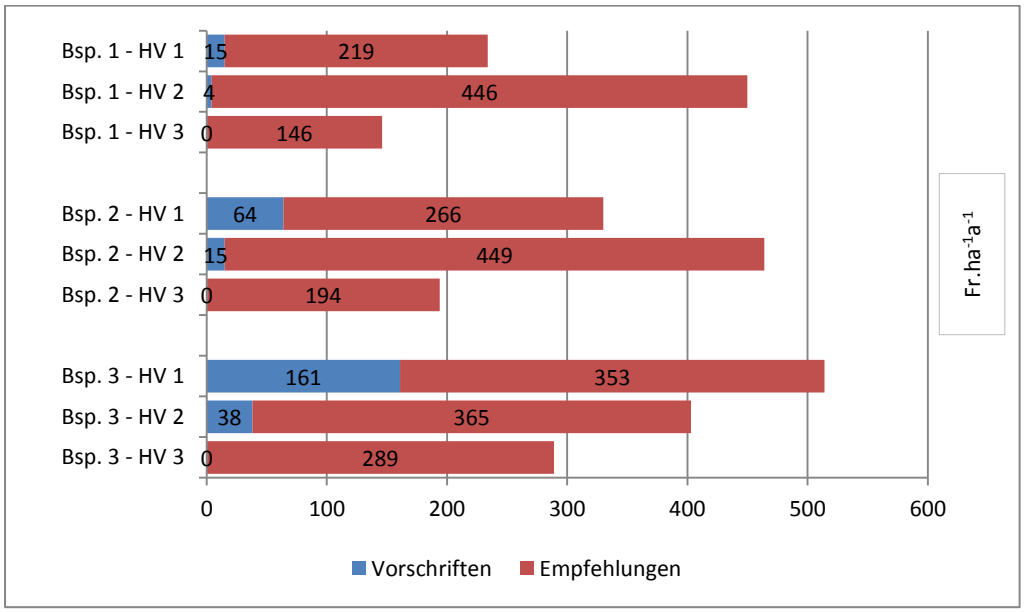


Abbildung 11: Mehraufwand/Minderertrag durch Vorschriften und Empfehlungen pro Hektar und Jahr (Fr.ha^{-1}a^{-1}).

Um den Mehraufwand und Minderertrag für die Gesamtfläche der Grundwasserschutzzonen zu ermitteln (Fr.a^{-1}), werden die einzelnen kostenrelevanten Massnahmen mit ihrem jeweiligen Gültigkeitsbereich (Fläche von S2 und S3) multipliziert. In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Trinkwasserschutz-Tool für die Gesamtfläche der drei Fallbeispiele zusammengefasst. Der geringste Mehraufwand und Minderertrag infolge des Trinkwasserschutzes fallen demnach auf der Fläche Bois des Meules mit dem HV 3 an und betragen 347 Fr.a^{-1}. Der grösste Wert wird auf der Fläche Les Orgères mit dem HV 2 erreicht. Dort erreicht der Mehraufwand und Minderertrag für den Forstbetrieb rund 1,8 Mio. Fr.a^{-1}, was eine enorme finanzielle Einbusse bedeutet.

Bei allen drei Berechnungsbeispielen werden im HV 2 die höchsten Mindererträge erreicht. Diese Resultate sind massgeblich auf die niedrigen Erntekosten des vollmechanisierten Verfahrens zurückzuführen. Der Minderertrag errechnet sich aus der Differenz der erntekostenfreien Erlöse des aktuellen, nadelholzreicheren Bestandes und des angestrebten Bestandes mit höherem Laubholzanteil (vgl. Kapitel 3.5 und 5.5). Da die vollmechanisierte Holzernte die kostengünstigste Variante ist, um Holz zu ernten und Nadelholz zudem gegenüber Laubholz derzeit höhere Erlöse am Markt erzielt, ist die Differenz zwischen den beiden erntekostenfreien Erlösen besonders gross.

Die hohen Mindererträge im HV 2 dürfen jedoch nicht zu dem Trugschluss führen, auf den Waldflächen, die für eine vollmechanisierte Holzernte geeignet sind, das Holz zukünftig nur motormanuell (HV 1) oder mit dem Seilkran (HV 3) zu ernten, um damit niedrigere Entschädigungen zu erzielen. Bei diesen beiden Ernteverfahren sind die Erntekosten aufgrund der motormanuellen Arbeit, des unwegsamen Geländes und der hohen Installations- und Betriebskosten eines Seilkrans besonders hoch (vgl. Tab. 25). Würde zum Schutz des

Grundwassers an den Forstbetrieb ergänzend die Forderung gerichtet, anstelle des HV 2 das HV 1 anzuwenden, muss dem Betrieb zusätzlich die Differenz der Erntekosten zwischen den Verfahren entschädigt werden. Im Falle des Bsp. 1 müssten daher zu den 524 Fr.ha^{-1}a^{-1} weitere 1‘239 Fr.a^{-1} (1‘908 – 669 Fr.a^{-1}) dazu addiert werden. Bei der Ermittlung der Mehraufwände und Mindererträge mit dem Trinkwasserschutz-Tool muss deshalb immer das HV ausgewählt werden, welches der jeweiligen Geländesituation entspricht.

Tabelle 25: Mehraufwand/Minderertrag je Fallbeispiel und Holzernteverfahren zuzüglich der Erntekosten (Fr.a^{-1}).

		HV 1	HV 2	HV 3
Bsp. 1: Bois des Meules	Mehraufwand/Minderertrag	524	1081	347
	Erntekosten$_{\text{Bsp. HV}}$	**1'908**	**669**	**2'113**
Bsp. 2: Heimenholz	Mehraufwand/Minderertrag	15'890	27'003	8'853
	Erntekosten$_{\text{Bsp. HV}}$	**46'543**	**16'318**	**51'545**
Bsp. 3: Les Orgères	Mehraufwand/Minderertrag	1'489'576	1'802'369	541'113
	Erntekosten$_{\text{Bsp. HV}}$	**3'352'929**	**1'216'626**	**3'703'694**

(Für die Herleitung der Erntekosten$_{\text{Bsp. HV}}$ siehe Anhang 4)

6. Diskussion

Um den Mehraufwand und Minderertrag zu berechnen, der bei der Waldbewirtschaftung zum Schutz des Grundwassers anfällt, wurde im Auftrag des BAFU ein auf Excel basierendes Tool entwickelt, das unter der Verwendung von wesentlichen Kenngrössen einer Grundwasserschutzzone und der Berücksichtigung von gängigen Bewirtschaftungsmethoden, verlässliche Werte ermittelt. Mit dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten Trinkwasserschutz-Tools können anhand der folgenden individuellen Kenngrössen:

- Grösse der Grundwasserschutzzone S2 und S3,
- durchschnittlicher Weg zur Grenze von S2,
- durchschnittliche Rückedistanz bis ausserhalb S3,
- jährliche Nutzungsmenge in S2 und S3,
- minimaler Laubholzanteil und pflanzensoziologischer Laubholzanteil, sowie
- der Bonitätswerte für Buche und Fichte (stellvertretend für Laub- und Nadelholz),

sehr einfach und schnell der Mehraufwand und Minderertrag für eine konkrete Grundwasserschutzzone berechnet werden. Ermöglicht wird dies durch die Definition von drei standardisierten Holzernteverfahren (HV 1: motormanuelle Holzhauerei + Rücken mit Forstspezialschlepper; HV 2: vollmechanisierte Holzernte mit Harvester + Forwarder; HV 3: motormanuelle Holzhauerei + Rücken mit Seilkran), zwischen welchen die Anwender auswählen können und der zusätzlichen Vorgabe von Defaultwerten. Durch die Unterteilung in die drei Holzernteverfahren können die in den Grundwasserschutzzonen spezifischen Bewirtschaftungsmethoden gebührend berücksichtigt werden. Die Vorgabe von Defaultwerten sorgt dafür, dass sich der Erhebungsaufwand für zahlreiche Eingangsgrössen im Rahmen hält und das Tool trotzdem flexibel bleibt. Sind entsprechende Grössen für die Defaultwerte vorhanden, können diese vom Anwender überschrieben werden, wodurch sich zonenspezifische Besonderheiten noch detaillierter abbilden lassen.

Anhand der drei Fallbeispiele Bois des Meules in Surpierre (FR), Heimenholz in Rheinfelden (AG) und Les Orgères in Bassins (VD), wurde die Konsistenz des Trinkwasserschutz-Tools überprüft. Für die drei Grundwasserschutzzonen, die bereits im ersten Projekt von 2008 zur Ermittlung des Mehraufwandes und Minderertrages infolge des Trinkwasserschutzes herangezogen wurden, sind jeweils alle drei Holzerntevarianten mit den gleichen Eingangsgrössen durchgerechnet worden. Betrachtet man die Ergebnisse, so lässt sich erkennen, dass die Werte je Fallbeispiel über die verschiedenen Holzerntevarianten hinweg stark variieren. So bewegen sich der Mehraufwand und Minderertrag in Beispiel Bois des Meules zwischen 347 Fr.a^{-1} im Holzernteverfahren 3 und 1'081 Fr.a^{-1} im Holzernteverfahren 2. Im Beispiel von Les Orgères variieren die Werte sogar zwischen 541'113 Fr.a^{-1} und 1'802'369 Fr.a^{-1}. Grössere Grundwasserschutzzonen sind stärker von den gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen betroffen, als kleinere Schutzzonen und bedeuten für diese Betriebe eine erhebliche finanzielle Belastung.

Vergleicht man jedoch den Mittelwert aus den Gesamtkosten pro Hektar und Jahr je Fallbeispiel mit den Gesamtkosten pro Hektar und Jahr aus dem ersten Projekt, so lässt sich feststellen, dass die Abweichungen lediglich 7 % bis 13 % ausmachen (vgl. Abbildung 12). Dieser Vergleich zeigt, dass man sich mit dem Trinkwasserschutz-Tool in der richtigen Grössenordnung befindet.

Die vorhandenen Unterschiede zwischen den Gesamtkosten je Holzernteverfahren sind auf die individuelle Berücksichtigung der kostenrelevanten Massnahmen je Holzernteverfahren zurückzuführen (vgl. Kapitel 3.8 Tabelle 14). Diese gesonderte Betrachtung der einzelnen abgeleiteten Massnahmen je Holzernteverfahren hat den Vorteil, dass sich die unterstellten Szenarien mehr an der Realität ausrichten. Für ein vollmechanisiertes Verfahren (HV 2) wäre es zum Beispiel unrealistisch, die zusätzlichen Kosten für das Betanken der Motorsäge in S3 zu berücksichtigen.

Die Unterschiede gegenüber dem ersten Projekt bei den einzelnen Massnahmen selbst resultieren aus den teils neu abgeleiteten Formeln. Für eine leichtere Berechnung, insbesondere im Hinblick auf das Vorhandensein und Erfassen der notwendigen Eingangsgrössen, wurden die Formeln gegenüber dem Projekt von 2008 modifiziert. Ziel ist es, dass die Anwender ohne grossen zusätzlichen Aufwand für die Erfassung von Eingangsgrössen einfache und schnelle Kalkulationen durchführen können. Die Modifizierung spiegelt sich unter anderem an den Transportkosten und den Kosten für das Betanken in S3 (vor allem im Beispiel 3) wie auch an den zusätzlichen Kosten für die Anschaffung von Auffangwannen, die nach dem neuen Formelansatz kaum noch von Bedeutung sind. Auch bei den zusätzlichen Kosten für das Umsetzen der Maschinen ist die Veränderung gut ersichtlich. Hier hat sich jedoch nicht nur die Formel geändert, sondern auch die kostenrelevante Massnahme selbst, von welcher diese abgeleitet wurde. Im ersten Projekt wurde zur Berechnung der zusätzlichen Kosten infolge einer bodenschonenden Befahrung die Ausstattung der Forstmaschinen mit einer bodenpfleglichen Ausrüstung (Bogiebänder, Reifendruckanlage) als kostenrelevante Massnahme abgeleitet. Dieser Ansatz wurde zugunsten der Umsetzkosten verworfen, welche für individuell zu bewertende Grundwasserschutzzonen leichter zu ermitteln sind.

Am stärksten ins Gewicht fällt die unterschiedliche Ausprägung der Mindererträge infolge der Erhöhung des Laubholzanteils. Der Grund hierfür liegt in dem neu gewählten Ansatz zur Ermittlung der erntekostenfreien Erlöse. Neben der differenzierten Betrachtung der Holzernteverfahren, welche mit unterschiedlichen Kosten verbunden sind, wurde auch der Berechnung der zu erntenden Holzmengen ein neuer Ansatz unterstellt. Die wesentlichen Unterschiede in diesem Ansatz gegenüber dem Projekt von 2008 sind: (i) Die Simulation der Bestände fand nicht mit dem Modell FBSM (Forstbetriebssimulationsmodell) statt, sondern auf Basis der Ertragstafel und dem darin unterstellten Eingriffsturnus von 10 Jahren. (ii) Die Holzmengen der Baumarten Fichte und Buche wurden für verschieden Bonitäten und Umtriebszeiten berechnet. (iii) Für die Berechnungen wurden Holzpreise sowie Lohn- und Tarifempfehlungen für 2011 verwendet.

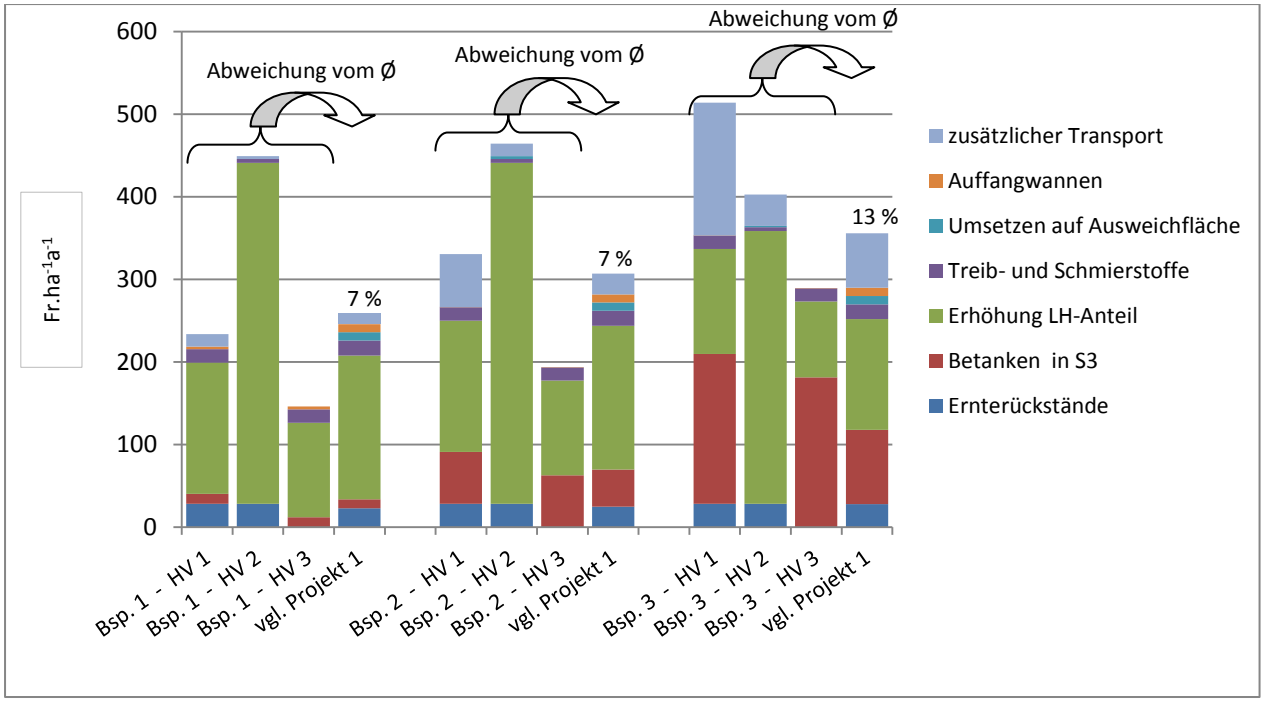


Abbildung 12: Vergleich der Ergebnisse aus dem Tool mit den Ergebnissen aus dem ersten Projekt von 2008 ($Fr.ha^{-1}a^{-1}$).

Abschliessend lässt sich sagen, dass es mit Hilfe des Trinkwasserschutz-Tools den betroffen Forstbetrieben ermöglicht wird, den aufgrund der gesetzlichen Vorschriften und Empfehlungen zum Schutz des Trinkwasser verursachten Mehraufwand und Minderertrag schnell und einfach zu berechnen. Die mit dem Tool ermittelten Ergebnisse können eine wesentliche Grundlage für die Kommunikation zwischen den Waldbewirtschaftern und den Wasserversorgern bilden. Bei der Verwendung der Ergebnisse ist aber zu berücksichtigen, dass für die Berechnung eine Reihe von Annahmen getroffen werden mussten und sie deshalb mehr als Richtwerte zu betrachten sind. Ebenfalls bleibt anzumerken, dass sich Fehler (z.B. bei der Ermittlung des Laubholzanteils auf der Basis von pflanzensoziologischen Kartierungen oder bei der Auswahl des Holzernteverfahrens) massgeblich auf die Höhe der Ergebnisse auswirken können.

Die Benutzung des Trinkwasserschutz-Tools selbst sollte sich auf fachkundige Personen beschränken, die mit den örtlichen Gegebenheiten gut vertraut sind. Insbesondere die Ermittlung der Standortseigenschaften (Bonität) sowie der zusätzlichen Marsch- und Transportdistanzen setzt eine gute Fach- und Ortskenntnis voraus. Ideal wäre es, wenn die örtlichen Revierleiter gemeinsam mit den zuständigen Wasserversorgern den Mehraufwand und Minderertrag berechnen würden. Aus der Zusammenarbeit ergibt sich automatisch auch gegenseitiges Vertrauen und Vertrauen in die Resultate. Dies ist wiederum eine wesentliche Voraussetzung für eine sachliche Diskussion im Rahmen der Inwertsetzung von Waldleistungen.

Anhang

A 1: Herleitung der Holzerlöse

Schritt 1:

Anhand der Ertragstafel (EAFV 1967 und EAFV 1968) wird die Stammzahlverteilung für den ausscheidenden und verbleibenden Bestand je Bonität und angestrebter Umtriebszeit (U) ermittelt. Berücksichtigt werden Durchmesserstufen ab 14 cm.

Tabelle 26: Bonitäten und Umtriebszeiten für Fichte

Bonität	Umtriebszeit (Jahre)
18	120
22	110
26	100
30	90

Tabelle 27: Bonitäten und Umtriebzeiten für Buche

Bonität	Umtriebszeit (Jahre)
18	120
22	120
26	100

Tabelle 28: Summe der ausscheidenden und verbleibenden Stämme für die Baumart Fichte und Buche je Bonität sowie angestrebter Umtriebzeit; aus Ertragstafel.

	Durchmesserstufe (cm)																		
	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82	Total
Fl18 U120	439	263	183	137	99	80	58	56	52	35	22	15	7						1446
Fl22 U110	325	243	198	132	95	75	60	50	50	46	36	25	15	9	5				1364
Fl26 U100	387	319	239	161	113	96	70	48	45	41	33	32	21	15	9	7	1		1637
Fl30 U90	377	297	275	208	116	77	69	56	41	37	33	28	23	17	14	8	7	1	1684
Bu18 U120	368	202	180	98	93	77	69	49	35	19	9								1199
Bu22 U120	384	255	162	111	85	65	50	43	38	36	26	18	9	6	4				1292
Bu26 U100	373	272	189	130	86	67	52	34	35	35	34	26	18	11					1362

Zu den einzelnen Durchmesserstufen werden je Baumart und Bonität die Baumhöhen errechnet. Wesentliche Eingangsgrössen für die Berechnung sind die Oberhöhe (h_{dom}) und der Oberdurchmesser (d_{dom}) zum Zeitpunkt U aus der Ertragstafel.

Formel zur Ermittlung der Baumhöhe in Abhängigkeit vom Durchmesser (Erni et Lemm 1995):

$$h\ x\ = 1.3 + a\ \ 1 - \exp\ -b\ \times x$$

wobei:

$$a = h_{max} - 1.3$$

$$b = \frac{-\ln\ 1 - \frac{h_{dom} - 1.3}{a}}{d_{dom}}$$

$$h_{max} = 100 \div 1 + exp\ d_{11} - d_{12} \times BON$$

Abkürzungen:

h_{dom} Oberhöhe in m
d_{dom} Oberdurchmesser in cm
x Durchmesserstufe in cm
h_{max} maximale Höhe
d_{11} Parameterwert für Maximalhöhe bei Buche = 1.82; bei Fichte = 0.65
d_{12} Parameterwert für Maximalhöhe bei Buche = 0.0932; bei Fichte = 0.056

Tabelle 29: Errechnete Baumhöhen für die einzelnen Durchmesserstufen je Baumart, Bonität und Umtriebszeit.

	Durchmesserstufe (cm)																	
	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82
FI18 U120	12	15	17	20	22	24	26	28	30	32	33	35	36					
FI22 U110	13	16	18	21	23	26	28	30	32	33	35	37	38	40	41			
FI26 U100	13	16	19	22	24	27	29	31	33	35	37	39	40	42	43	45	46	
FI30 U90	14	17	20	23	25	28	30	33	35	37	39	41	42	44	45	47	48	50
Bu18 U120	13	16	18	20	22	24	26	28	29	31	32							
Bu22 U120	14	17	19	22	24	27	29	31	32	34	35	37	38	39	41			
Bu26 U100	14	18	21	23	26	28	31	33	35	37	39	40	42	43				

Schritt 2:

Die errechneten Baumhöhen dienen neben der Durchmesserstufe und der Baumart als Eingangsgrössen für das Modell SorSim (Sortimentssimulator; Lemm et Erni 2009). SorSim modelliert ausgehend von den Eingangsgrössen eine Schaftform und simuliert anschliessend eine Einteilung der Stämme in Sortimente (von 1a bis 6). Für jede Bonität wird eine Baumliste mit einem exemplarischen Stamm je Durchmesserstufe in das Modell eingelesen und sortimentiert.

Für die Sortimentssimulation wurde für die beiden Baumarten mit folgenden Einstellungen in SorSim gerechnet (vgl. Abbildung 13):

- Fichte: als Sägeholz zu verwendender Schaftanteil = 1.0 MindestZopf = 7 cm
- Buche: als Sägeholz zu verwendender Schaftanteil = 0.5 MindestZopf = 7 cm
  als Sägeholz zu verwendender Schaftanteil = 1.0 MindestZopf = 7 cm

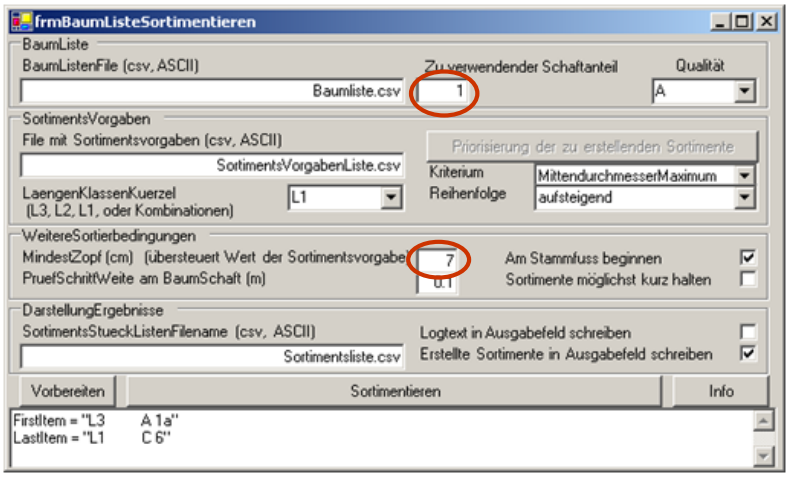


Abbildung 13: Benutzeroberfläche von SorSim mit Eingabemöglichkeit für den zu verwendenden Schaftanteil und Mindestzopf.

Für die Baumart Buche wird die Sortimentseinteilung einerseits mit einem zu verwendenden Schaftanteil von 0.5 sowie mit einem Schaftanteil von 1.0 gerechnet. Der Grund liegt in der tendenziellen Unterschätzung des Restholzvolumens[2] bei der Berechnung mit einem zu verwendenden Schaftanteil von 0.5 (vgl. Abbildung 14). Um diese Unterschätzung auszugleichen, berechnet man für die Baumart Buche ebenfalls eine Sortimentseinteilung mit einem zu verwendenden Schaftanteil von 1.0. Aus der Differenz der beiden Ergebnisse lässt sich die effektive Restholzmenge für die Baumart Buche bestimmen (vgl. Formel S. 35, Anhang 1).

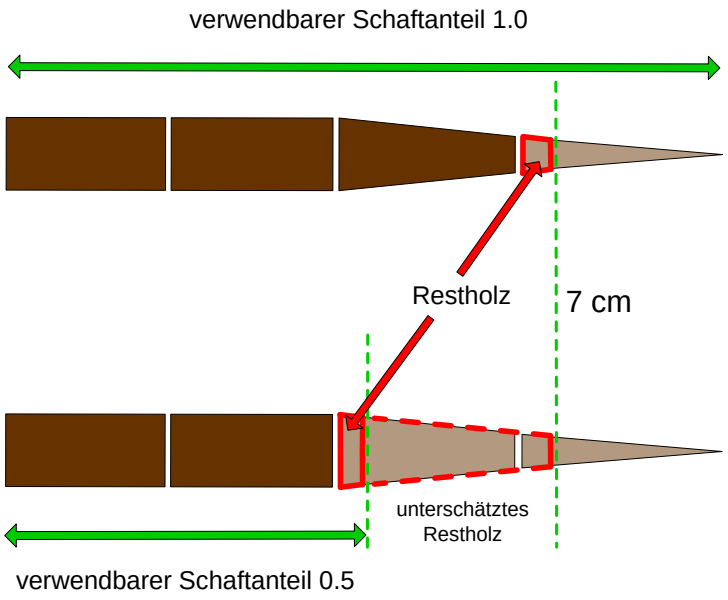


Abbildung 14: Darstellung der Sortimentseinteilung nach SorSim mit einem zu verwendenden Schaftanteil von 1.0 und 0.5.

Die Ergebnisse aus SorSim beziehen sich auf einen exemplarischen Stamm je Durchmesserstufe und Bonität. Die Sortimentseinteilung je Stamm wird dementsprechend noch mit der Summe der Stämme des ausscheidenden und des verbleibenden Bestandes zum Zeitpunkt U aus der Ertragstafel multipliziert. Anschliessend werden die Holzmengen gleicher Sortimentseinteilung addiert.

[2] Als Restholz bezeichnet man Schaft-Derbholz (Ø >= 7cm), das nicht mehr in Sortiments-Abschnitte eingeteilt werden kann.

Tabelle 30: Volumen ohne Rinde (Vol o.R.; m^3/ha) für die verschiedenen Bonitäten (18, 22, 26, 30) und Umtriebszeiten (120, 110, 100, 90) der **Fichte**; **Schaftanteil = 1.0**.

Sortiment	Fi18 U120	Fi22 U110	Fi26 U100	Fi30 U90
1a	85	79	97	104
1b	106	123	162	189
2a	86	103	136	149
2b	119	133	150	159
3a	142	157	188	178
3b	122	127	133	150
4	143	257	300	317
5	29	73	125	164
6	0	9	32	58
Restholz	29	25	19	22

Tabelle 31: Volumen ohne Rinde (Vol o.R.; m^3/ha) für die verschiedenen Bonitäten (18, 22, 26) und Umtriebszeiten (120, 120, 100) der **Buche**; **Schaftanteil = 1.0**.

Sortiment	Bu18 U120	Bu22 U120	Bu26 U100
1a	78	79	90
1b	97	112	136
2a	68	96	97
2b	118	85	116
3a	109	163	151
3b	76	78	122
4	67	207	215
5	0	69	142
6	0	19	20
Restholz	17	20	18

Tabelle 32: Volumen ohne Rinde (Vol o.R.; m^3/ha) für die verschiedenen Bonitäten (18, 22, 26) und Umtriebszeiten (120, 120, 100) der **Buche**; **Schaftanteil = 5.0**.

Sortiment	Bu18 U120	Bu22 U120	Bu26 U100
1a	27	28	27
1b	58	77	106
2a	43	48	56
2b	83	51	62
3a	99	102	116
3b	70	86	93
4	67	199	206
5	0	69	142
6	0	19	20
Restholz	185	249	279

Formel zur Ermittlung der Restholzmenge für die Buche bei einem Schaftanteil von 0.5 (vgl. Tabelle 31, 32):

$$\boxed{\text{Vol Rest o.R.}_{0.5} = Vol\ o.R._{1.0} + Vol\ Rest\ o.R._{1.0} - Vol\ o.R._{0.5}}$$

Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu überprüfen, werden die errechneten Werten von SorSim (Vol. in Rinde + Restholz ohne Rinde) mit den entsprechenden Ertragstafelwerten (Gesamtleistung an Derbholz in Rinde bis zum Zeitpunkt U) verglichen. Bei der Sortimentierung wird jeweils das Zumass berücksichtigt, was einen Teil der Differenz erklärt. Der Rest ist auf unterschiedliche Höhenkurven respektive Tarife zurückzuführen.

Tabelle 33: Vergleich der errechneten Holzmengen je Baumart, Bonität und Umtriebszeit mit Ertragstafelwerten.

	SorSim (m^3)	Ertragstafelwert (m^3)	Unterschied (%)
Fi18 U120	949	976	3 %
Fi22 U110	1201	1261	5 %
Fi26 U100	1485	1513	3 %
Fi30 U90	1650	1740	5 %
Bu18 U120	658	779	16 %
Bu22 U120	970	1144	15 %
Bu26 U100	1158	1323	13 %

Schritt 3:

Die errechneten Sortimentsmengen (vgl. Tabelle 30 und 32) werden nach Qualitäten differenziert. Hierzu werden sie mit prozentualen Qualitätsanteilen (vgl. Tabelle 34 und 35) multipliziert.

Tabelle 34: Prozentuale Qualitätsanteile je Sortiment bei der Baumart Fichte (Rosset et al. 2009).

Sort.	%-Anteil nach Qualität			
	D	C	B	A
1a	100			
1b	10	50	40	
2a	10	50	40	
2b	10	50	40	
3a	10	40	50	
3b	10	40	50	
4	10	40	50	
5	10	35	50	5
6	10	40	45	5

Tabelle 35: Prozentuale Qualitätsanteile je Sortiment bei der Baumart Buche (Rosset et al. 2009).

Sort.	%-Anteil nach Qualität			
	D	C	B	A
1a	100			
1b	100			
2a	100			
2b	100			
3a	30	50	18	2
3b	30	50	18	2
4	20	40	38	2
5	20	40	37	3
6	20	35	40	5

Tabelle 36: Sortimentsmengen je Qualität für Fichte, Bonität 18 Umtriebszeit 120.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	85			
1b	11	53	43	
2a	9	43	34	
2b	12	59	48	
3a	14	57	71	
3b	12	49	61	
4	14	57	71	
5	3	10	14	1
6	0	0	0	0

Tabelle 37: Sortimentsmengen je Qualität für Fichte, Bonität 26 Umtriebszeit 100.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	97			
1b	16	81	65	
2a	14	68	54	
2b	15	75	60	
3a	19	75	94	
3b	13	53	66	
4	30	120	150	
5	13	44	63	6
6	3	13	14	2

Tabelle 38: Sortimentsmengen je Qualität für Fichte, Bonität 22 Umtriebszeit 110.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	79			
1b	12	62	49	
2a	10	52	41	
2b	13	67	53	
3a	16	63	79	
3b	13	51	64	
4	26	103	128	
5	7	25	36	4
6	1	4	4	0

Tabelle 39: Sortimentsmengen je Qualität für Fichte, Bonität 30 Umtriebszeit 90.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	104	0	0	0
1b	19	94	76	0
2a	15	75	60	0
2b	16	79	63	0
3a	18	71	89	0
3b	15	60	75	0
4	32	127	159	0
5	16	57	82	8
6	6	23	26	3

Tabelle 40: Sortimentsmengen je Qualität für Buche, Bonität 18 Umtriebszeit 120.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	27			
1b	58			
2a	43			
2b	83			
3a	30	49	18	2
3b	21	35	13	1
4	13	27	25	1
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0

Tabelle 41: Sortimentsmengen je Qualität für Fichte, Bonität 22 Umtriebszeit 120.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	28			
1b	77			
2a	48			
2b	51			
3a	31	51	18	2
3b	26	43	15	2
4	40	80	76	4
5	14	28	26	2
6	4	7	7	1

Tabelle 42: Sortimentsmengen je Qualität für Buche, Bonität 26 Umtriebszeit 100.

Sort.	m^3 o.R./ha			
	D	C	B	A
1a	27	0	0	0
1b	106	0	0	0
2a	56	0	0	0
2b	62	0	0	0
3a	35	58	21	2
3b	28	47	17	2
4	41	82	78	4
5	28	57	53	4
6	4	7	8	1

Schritt 4:

Für die einzelnen Qualitäten je Sortiment werden Holzpreise festgelegt. Als Richtlinie dienen die Holzpreisempfehlungen für die Längenklasse L1 der Holzproduzenten der Kantone Aargau, beide Basel, Bern und Solothurn (Aargauischer Waldwirtschaftsverband et al. 2010).
Über die Holzpreise wird bei der Energieholzbereitstellung auch das Hacken berücksichtigt (Abzug der Hackkosten von den Energieholzpreisen).

Tabelle 43: Holzpreise für Fichte.

Sort.	Holzpreise (Fr./m^3)			
	D	C	B	A
1a	25			
1b	25	70	80	
2a	70	100	115	
2b	75	105	125	
3a	75	110	130	
3b	75	110	135	
4	75	110	150	
5	75	105	170	600
6	75	105	190	600
Restholz	15			

Tabelle 44: Holzpreise für Buche

Sort.	Holzpreise (Fr./m^3)			
	D	C	B	A
1a	30			
1b	30			
2a	30			
2b	30			
3a	65	65	75	500
3b	65	75	85	500
4	65	80	110	500
5	65	85	135	500
6	65	90	145	500
Restholz	30			

*) Preise wurden über den Brennholzpreis abgeleitet: Brennholzpreis (Fr./Rm) x 0,7 (→ 1 Rm = 0,7 m^3)
*) Preise basieren auf Erfahrungswerten. In den Holzpreisempfehlungen werden A-Qualitäten nicht genannt, da diese in der Praxis grösstenteils über Wertholzsubmissionen verkauft werden.

Die mengenmässigen Qualitätsanteile je Baumart, Bonität und Umtriebszeit (vgl. Tabelle 36 - 42) werden anschliessend mit den Holzpreisen multipliziert. Die Einzelergebnisse je Sortiment und Qualität werden aufsummiert und die Gesamtsumme durch die Umtriebszeit dividiert. Als Ergebnis erhält man den Holzerlös pro Hektar und Jahr (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: Holzpreise je Baumart, Bonität und Umtriebszeit werden aufsummiert und durch die Umtriebszeit dividiert.

Sort.	Holzpreise				
	D	C	B	A	
1a	Fr./ha	...	...		→ Summe
1b					"
2a					"
2b					"
...	...				"
6					"
Restholz					"
					= **Gesamtsumme (Fr./ha)** / **Umtriebszeit**

Nachfolgend sind die berechneten Holzerlöse (in Fr. pro Hektar und Jahr) je Baumart, Bonität und Umtriebszeit aufgeführt (basierend auf den Preisen von 2010):

- Fi 18 U 120: **710** $Fr.ha^{-1}a^{-1}$
- Fi 22 U 110: **1047** "
- Fi 26 U 100: **1454** "
- Fi 30 U 90: **1814** "
- Bu 18 U 120: **260** "
- Bu 22 U 120: **484** "
- Bu 26 U 100: **705** "

A 2: Herleitung der Holzerntekosten

Schritt 1:

Die Eingangsgrössen für die Holzernteproduktivitätsmodelle (HeProMo) werden berechnet. Mit den Produktivitätsmodellen wird die Produktivität der Holzerntemassnahmen für die unterschiedlich bonitierten Bestände der beiden Baumarten ermittelt. Wesentliche Eingangsgrössen für die Modelle sind:

- die „Holzmenge i.R." sowie entweder
- der „Massenmittelstamm"
- der „durchschnittliche BHD" oder
- das „mittlere Stückvolumen" eines Bestandes.

Die Werte werden aus den Ergebnissen von SorSim und der Summe der Stämme aus der Ertragstafel (ausscheidender Bestand bis zum Zeitpunkt U und verbleibender Bestand im Zeitpunkt U) errechnet. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die mit den Stammzahlverteilungen aus der Ertragstafel und mit SorSim über die komplette Umtriebszeit simulierten Holzmengen in einer Holzerntemassnahme geerntet werden, was eine Vereinfachung darstellt.

Tabelle 46: Eingangsgrössen für HeProMo je Baumart, Bonität und Umtriebszeit

	Holzmenge (m^3 i.R.), vgl. Tabelle 29	Massenmittelstamm (m^3 i.R.)	Ø BHD des Aushiebes (cm)	mittl. Stückinhalt mit Reststücken (m^3 i.R.)	mittl. Stückinhalt ohne Reststücke (m^3 i.R.)
Fi18 U120	949	0,66	24	(0,20)	0,29
Fi22 U110	1201	0,88	27	(0,23)	0,32
Fi26 U100	1485	0,91	26	(0,24)	0,32
Fi30 U90	1650	0,98	27	(0,25)	0,33
Bu18 U120	658	0,55	24	0,24	-
Bu22 U120	970	0,75	25	0,31	-
Bu26 U100	1158	0,85	25	0,32	-

Für die Baumart Fichte wird der mittlere Stückinhalt einmal „mit" und „ohne" Berücksichtigung der von SorSim simulierten Anzahl an Reststücke berechnet. Das mit SorSim berechnete Volumen des Restholzes ist bei Fichte mit durchschnittlich 19 - 29 m^3 pro ha über die komplette Umtriebszeit relativ niedrig. Eine zusätzliche Betrachtung des Restholzes als einzelne Abschnitte drückt den mittleren Stückinhalt unverhältnismässig nach unten (vgl. Tabelle 46).

Formel zur Berechnung des mittleren Stückinhaltes mit Reststücken (Anzahl Reststücke = Anzahl Stämme):

$$\boxed{\text{mittl. Stückinhalt} = \frac{Vol\ i.R. + Vol\ Rest}{Anzahl\ Stücke + Anzahl\ Stämme}}$$

Formel ohne Reststücke:

$$\boxed{\text{mittl. Stückinhalt} = \frac{Vol\ i.R. + Vol\ Rest}{Anzahl\ Stücke}}$$

Für die weiteren Berechnungen mit HeProMo (vgl. Schritt 2) wurde bei der Baumart Fichte der mittlere Stückinhalt ohne Reststücke herangezogen.

Schritt 2:

Zu den Teilprozessen der drei Holzernteverfahren werden mittels HeProMo die Produktivitäten berechnet (Frutig et al. 2009). Folgende Modelle werden verwendet:

- Holzhauerei motormanuell
- Schlepper
- Radharvester
- Forwarder
- Mobilseilkran

Beim Modul Holzhauerei motormanuell wird die Produktivität in PSH_{15} (Arbeitsleistung in m^3 i.R. pro produktive Systemarbeitsstunde) angegeben. Bei den Modulen zur maschinellen Holzernte wird die Produktivität als PMH_{15} (Arbeitsleistung in m^3 i.R. pro produktive Maschinenstunde) definiert.
Die Modelle wurden entwickelt, um die Produktivität und die Holzerntekosten für bestimmte Hiebe zu berechnen. Es bietet dadurch zur genauen Berücksichtigung der Geländesituation verschiedenen Einstellmöglichkeiten, anhand derer die Einflüsse des Geländes auf die Produktivität abgebildet werden, wie z.B. Erschliessung und Hindernisse im Gelände. Um Durchschnittswerte zu erhalten, wird daher mit „mittleren Angaben“ gerechnet. Die Hangneigung wird indirekt über das Holzernteverfahren 3 (motormanuelle Holzhauerei + Mobilseilkran) berücksichtigt.
In den folgenden Abbildungen werden die mittleren Standardeinstellungen in den verschiedenen Modulen kurz dargestellt. Als Beispiel dienen die Eingangsgrössen von Fi18 U120 in Tabelle 46.

Modul Holzhauerei motormanuell:

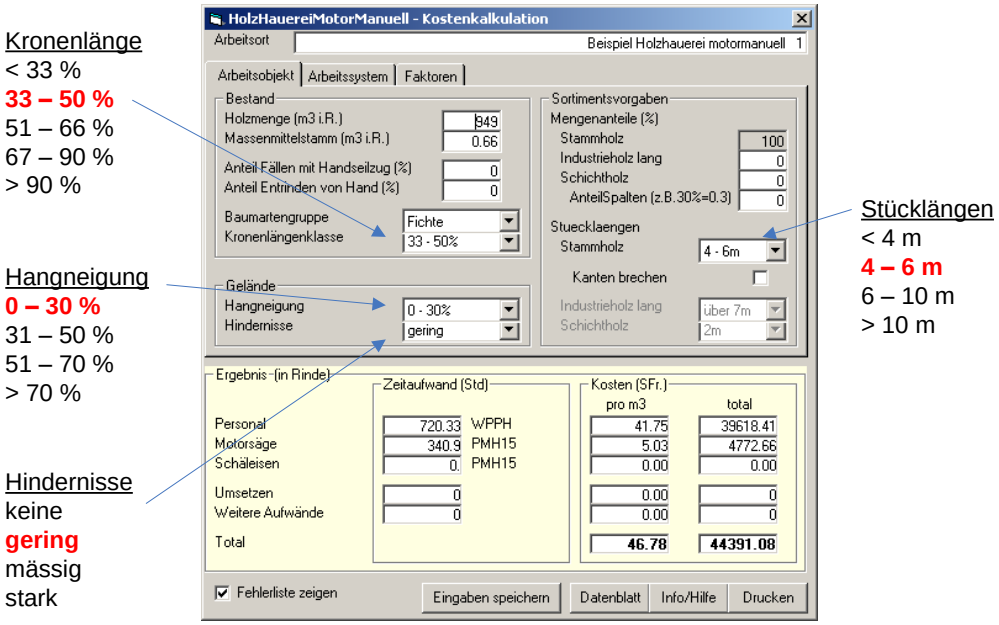


Abbildung 15: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 1).

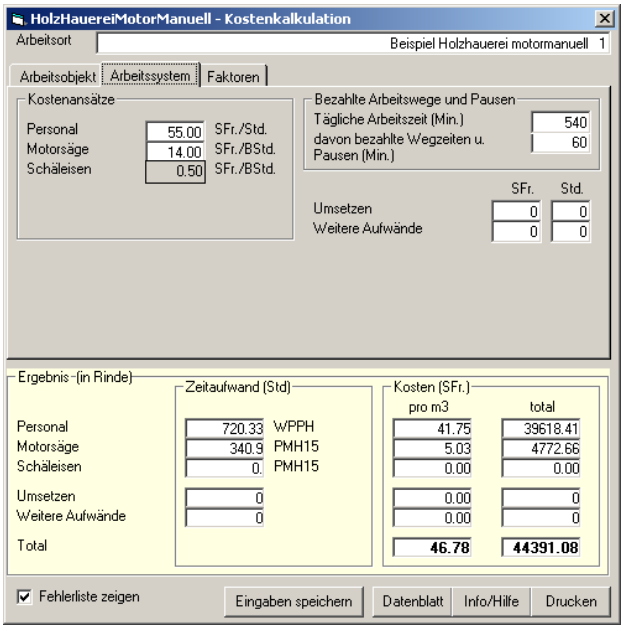


Abbildung 16: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 1).

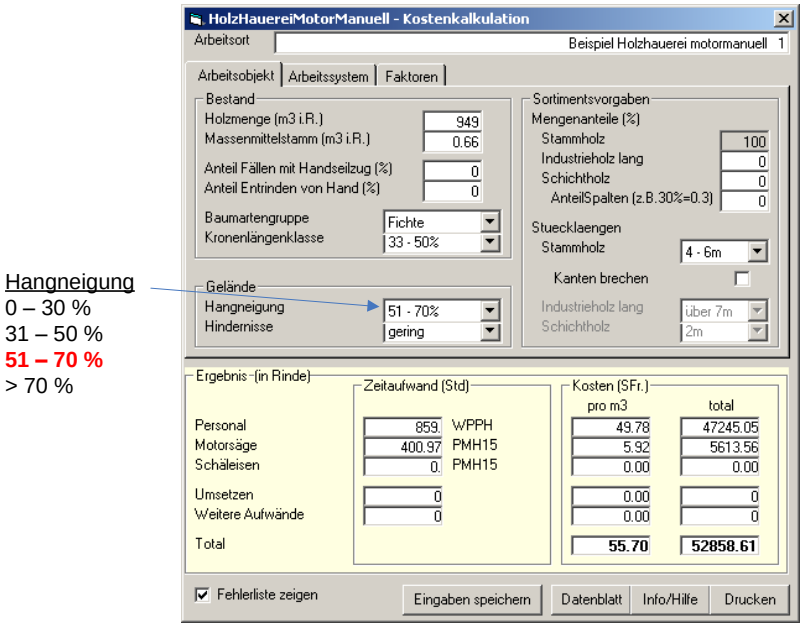


Abbildung 17: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Holzhauerei motormanuell (für HV 3).

Für das HV 3 (motormanuelle Holzhauerei in Kombination mit dem Mobilseilkran), wird eine Hangneigung von 51-70% angenommen. Die übrigen Angaben bleiben gleich wie beim HV 1 (vgl. Abbildung 17).

Modul Radharvester:

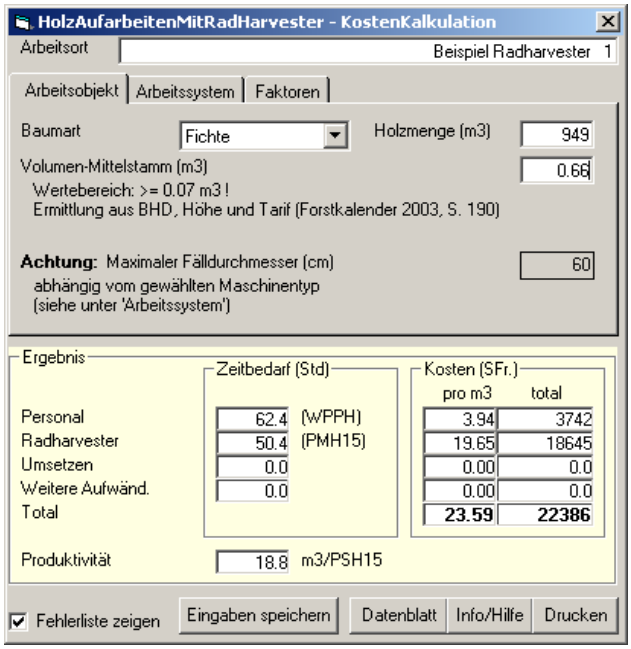


Abbildung 18: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Radharvester.

Für die Bestände mit Buche wird ebenfall mit der Baumart Fichte gerechnet. Alternativ stehen nur die Baumarten „Kiefer und Lärche“ zur Auswahl (vgl. Abbildung 18).

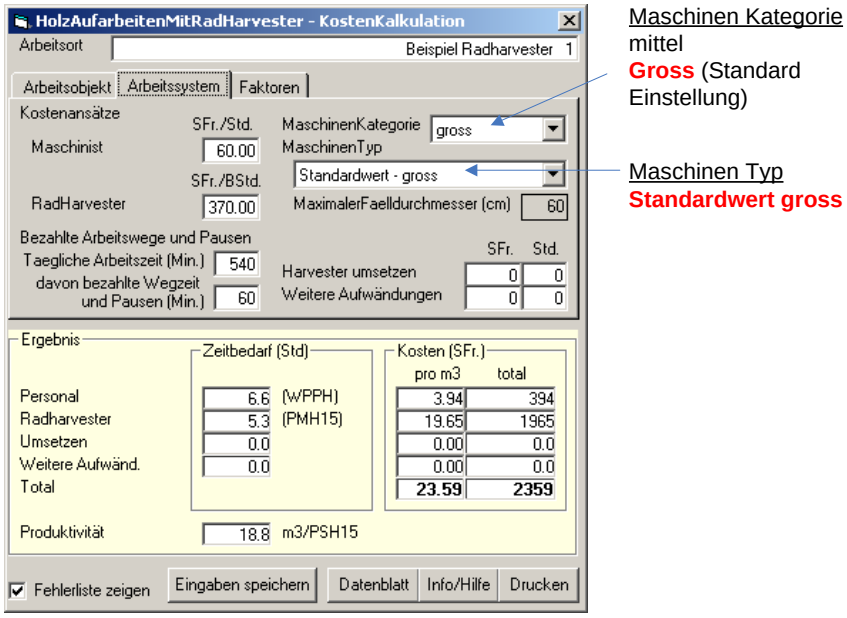


Abbildung 19: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Radharvester.

Modul Schlepper:

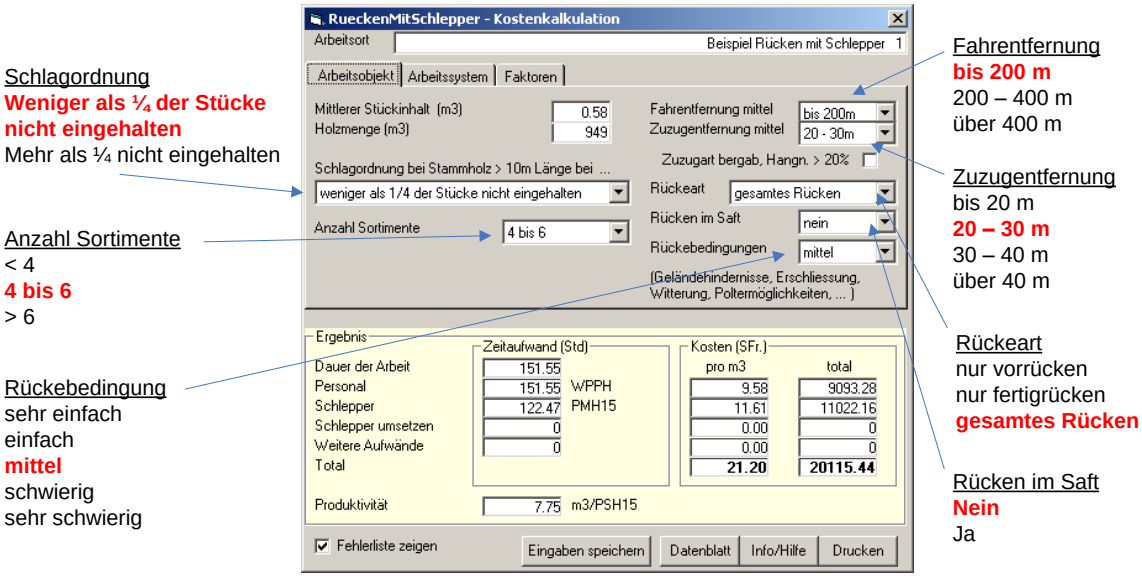
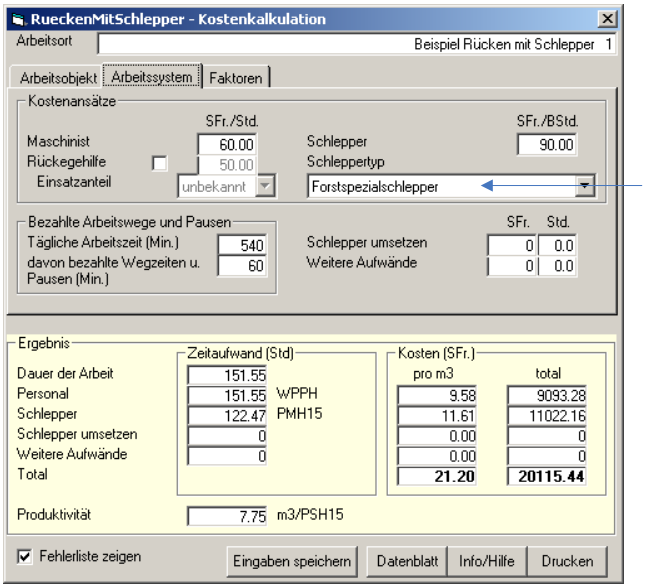


Abbildung 20: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Schlepper.

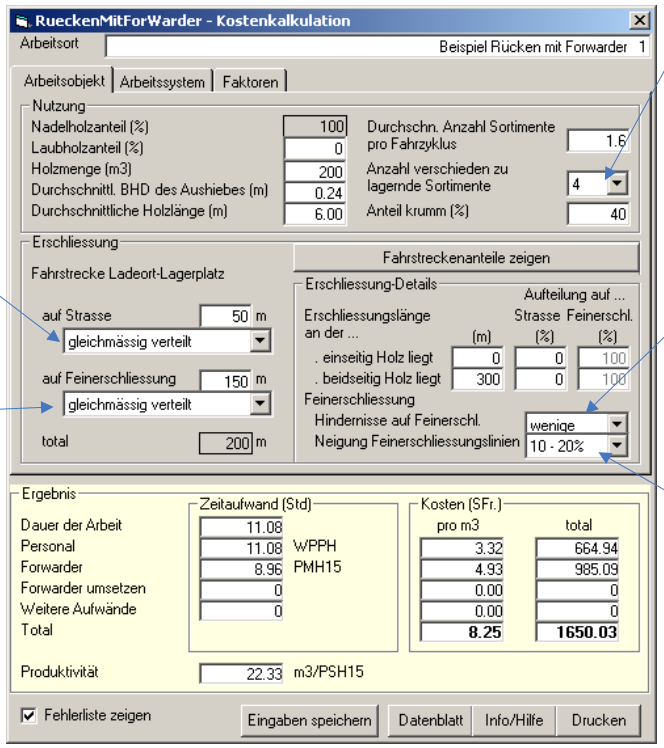
Der mittlere Stückinhalt beim Modul Schlepper (0.29 m^3; vgl. Tabelle 46) wird mit 2 multipliziert (vgl. Abbildung 20). Grund: Die durchschnittliche Stammlänge beim Rücken durch den Schlepper ist ca. 15m. Die Länge der Stammabschnitte von SorSim beträgt i.d.R. jedoch 6 m.



Schleppertyp
anderer Schlepper
Forstspezialschlepper
(**erst ab** mittl. Stückinhalt von **0.51 m³** möglich)

Abbildung 21: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Schlepper.

Modul Forwarder:



Anzahl Sortimente
1
2
3
4

Fahrstrecke auf Strasse
Lastf. vorw. bergauf
Lastf. vorw. Bergab
Lastf. vorw. eben
gleichmässig verteilt

Fahrstrecke auf Feinerschl.
Lastf. vorw. bergauf
Lastf. vorw. Bergab
Lastf. vorw. eben
gleichmässig verteilt

Hindernisse auf Feinerschl.
keine
wenige
viele
sehr viele

Neigung Feinerschl.
kleiner 10 %
10 – 20 %
über 20 %

Abbildung 22: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Forwarder.

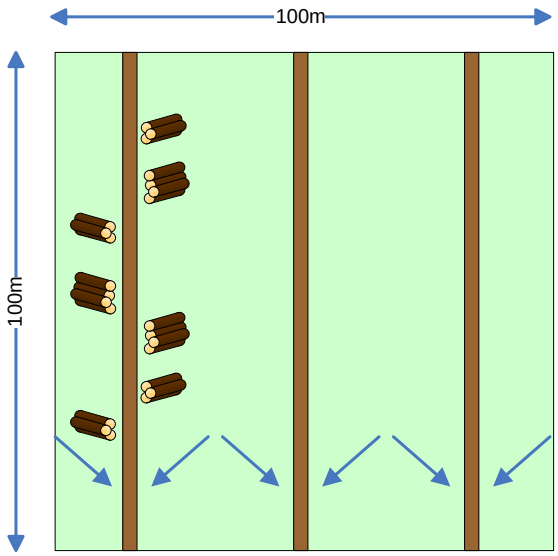


Abbildung 23: Modellwald für die Berechnung mit dem Modul Forwarder.

Die Produktivität im Modul „Forwarder“ wird umso höher, je grösser die Holzmenge ist. Für die Berechnung wird daher ein Modellwald mit einer Fläche von 1 ha (100 x 100m), 3 Rückegassen und 600 Vfm angenommen, wovon 200 m^3 (1/3) genutzt werden (vgl. Abbildung 23). Dadurch ergeben sich eine „Fahrstrecke Ladeort-Lagerplatz auf Strasse“ von 50 m und eine „Fahrstrecke Ladeort-Lagerplatz auf Feinerschliessung“ von 150 m. Die Erschliessungslänge an der beidseitig Holz liegt beträgt 300 m. Diese Grössen werden auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Forwarder eingegeben (vgl. Abbildung 22)

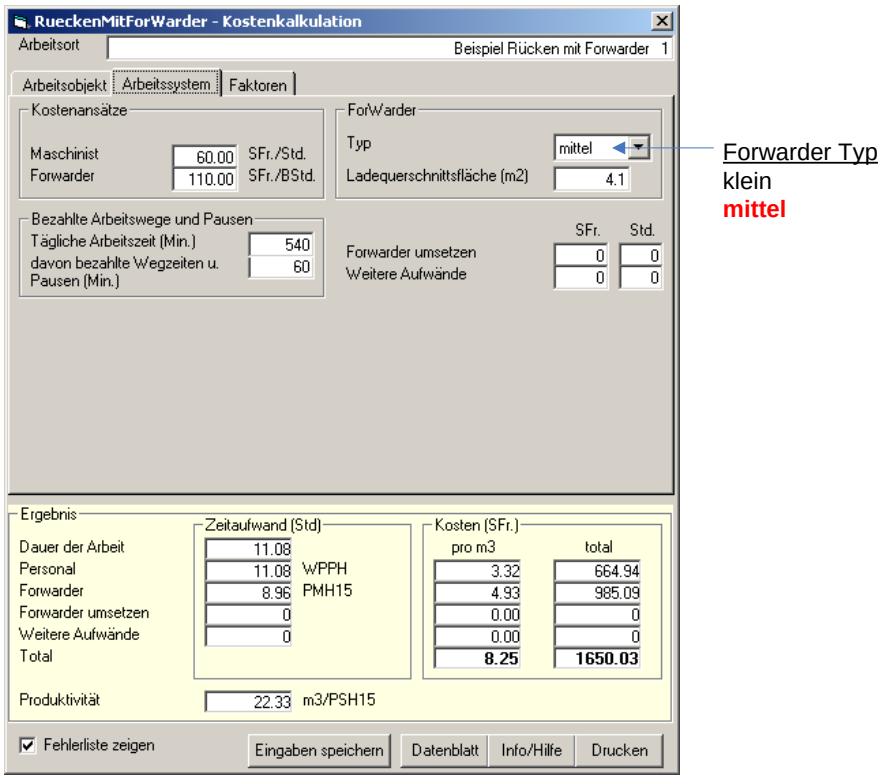


Abbildung 24: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Forwarder.

Modul Mobilseilkran:

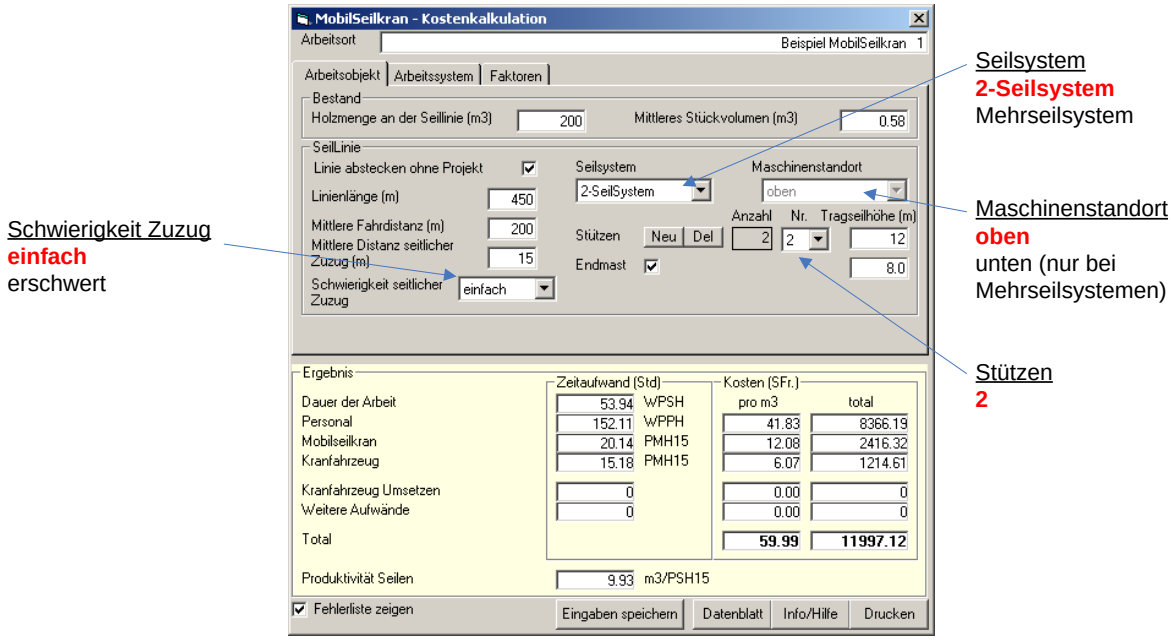


Abbildung 25: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitsobjekt im Modul Mobilseilkran.

Der mittlere Stückinhalt (vgl. Tabelle 46) wird im Modul Mobilseilkran ebenfalls mit 2 multipliziert. Grund: Beim Seilkran wird von einer Vollbaumrückung ausgegangen. Die Länge der Stammabschnitte von SorSim beträgt i.d.R. jedoch 6 m. Die Produktivität im Modul „Mobilseilkran“ wird umso höher, je grösser die Holzmenge; beim Mobilseilkran wird dementsprechend mit einem Holzanfall von 0,5 m^3 je Meter Seillinie gerechnet; bei 400 m effektiv nutzbarer Seillinie (+ 50 m für Befestigung) ergibt dies 200 m^3 (vgl. Abbildung 25).

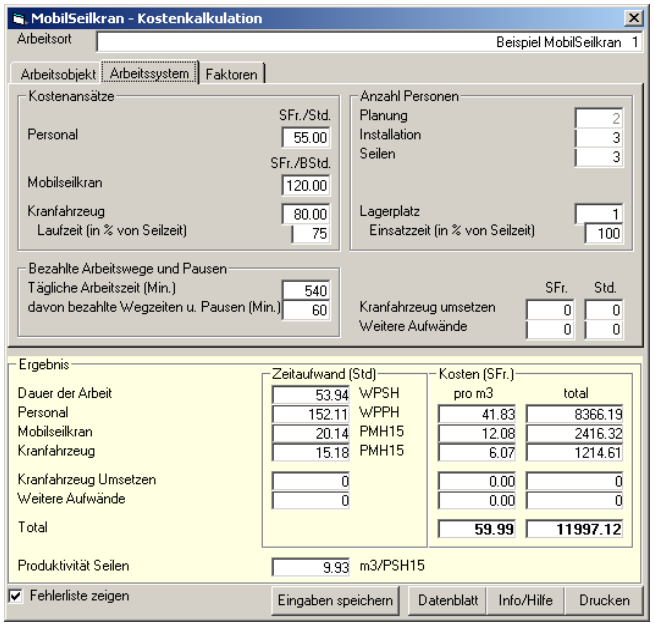


Abbildung 26: Einstellungen auf der Benutzeroberfläche Arbeitssystem im Modul Mobilseilkran.

Die Anzahl Lagerplätze hat auf die Produktivität entlang der Seillinie keinen Einfluss.

Ergebnisse der Berechnungen mit HeProMo:

Die Ergebnisse der Berechnungen aus dem Modul „motormanuelle Holzhauerei“, angegeben in WPPH (Work Place Personal Hour = Arbeitszeit des Motorsägenführers inkl. Wegzeiten, Pausen und Störungen), werden in PSH_{15} (Arbeitsleistung in m^3 pro Produktive Systemarbeitsstunde) umgerechnet.
Zur Berechnung der Produktivität wird die Holzmenge (m^3) durch WPPH dividiert. WPPH bezieht sich auf einen Arbeitskraft. Für die spätere Ermittlung der Erntekosten muss der Anwender des Trinkwasserschutz-Tools dementsprechend einen mittleren Kostenansatz für einen Arbeiter inklusive Motorsäge je Arbeitsstunde festlegen.

Formel zur Umrechung von WPPH in PSH_{15}:

$$\boxed{\text{Produktivität} = \frac{Holzmenge}{WPPH}}$$

Tabelle 47: Umrechnung der WPPH in PSH_{15} für die motormanuelle Holzhauerei im ebenen Gelände (0-30%)

	WPPH (Std.)	Vol i.R. + Vol Rest (m^3)	Produktivität (m^3/PSH15)
Fi18 U120	720,33	949	1,32
Fi22 U110	812,19	1201	1,48
Fi26 U100	991,03	1485	1,50
Fi30 U90	1069,50	1650	1,54
Bu18 U120	291,83	658	2,25
Bu22 U120	392,56	970	2,47
Bu26 U100	451,82	1158	2,56

Tabelle 48: Umrechnung der WPPH in PSH_{15} für die motormanuelle Holzhauerei im steilen Gelände (51-70%).

	WPPH (Std)	Vol i.R. + Vol Rest (m^3)	Produktivität (m^3/PSH15)
Fi18 U120	859,00	949	1,10
Fi22 U110	968,96	1201	1,24
Fi26 U100	1182,36	1485	1,26
Fi30 U90	1276,09	1650	1,29
Bu18 U120	345,66	658	1,90
Bu22 U120	466,38	970	2.08
Bu26 U100	537,39	1158	2,15

Tabelle 49: Produktivitäten für die Teilprozesse der drei Holzernteverfahren je Baumart, Bonität und Umtriebszeit.

	Produktivität je Holzernteverfahren und Prozess (m^3/PSH15)					
	1)		2)		3)	
	manuell	Schlepper	Harvester	Forwarder	manuell	Seilkran
Fi18 U120	1,32	7,75	18,8	22,33	1,10	9,93
Fi22 U110	1,48	8,15	21,1	22,75	1,24	10,28
Fi26 U100	1,50	8,15	21,4	22,62	1,26	10,28
Fi30 U90	1,54	8,28	22,0	22,75	1,29	10,39
Bu18 U120	2,25	6,25	17,5	21,87	1,90	9,34
Bu22 U120	2,47	8,02	19,8	21,98	2.08	10,16
Bu26 U100	2,56	8,15	20,8	21,98	2,15	10,28

Schritt 3:

Zur Berechnung der Erntekosten (Fr.$ha^{-1}a^{-1}$) wird die Produktivität mit dem Kostenansatz für die Einzelprozesse der Holzernteverfahren (Fr.h^{-1}; vorgegebenen Standardwerte, die vom Anwender des Tool überschrieben werden können) und der gesamten Holzmenge pro Hektar (m^3ha^{-1}; vgl. Tabelle 46) multipliziert und anschliessend durch die Umtriebszeit (a) dividiert

$$\text{Erntekosten} = \frac{\frac{1}{Produktivität} \times Kostenansatz\ Arbeitsprozess \times ges.Holzmenge\ pro\ ha}{Umtriebszeit}$$

Für die Berechnung gewählte Kostenansätze (vgl. VSFU 2010a, 2010b, 2010c):

- Motormanuelle Holzhauerei: 75 Fr./h (Regielohn)
- Forstspezialschlepper: 190 Fr./h (inkl. 83 Fr./h Regielohn Maschinist)
- Radharvester (mittelgross): 300 Fr./h (inkl. Fahrer)
- Forwarder (mittelgross): 200 Fr./h (inkl. Fahrer)
- Mobilseilkran (mittelgross): 230 Fr./h (inkl. 83 Fr./h Regielohn Maschinist)

Tabelle 50: Erntekosten pro Hektar und Jahr für die verschiedenen Holzernteverfahren je Baumart, Bonität und Umtriebszeit.

	Erntekosten je Holzernteverfahren und Prozess (Fr.$ha^{-1}a^{-1}$)								
	1)			2)			3)		
	manuell	Schlepper	**gesamt**	Harvester	Forwarder	**gesamt**	manuell	Seilkran	**gesamt**
Fi18 U120	449	194	**643**	126	71	**197**	539	183	**722**
Fi22 U110	553	255	**808**	155	96	**251**	660	244	**905**
Fi26 U100	743	346	**1089**	208	131	**339**	884	332	**1216**
Fi30 U90	893	421	**1314**	250	161	**411**	1066	406	**1472**
Bu18 U120	183	167	**349**	94	50	**144**	216	135	**351**
Bu22 U120	245	192	**437**	122	74	**196**	291	183	**474**
Bu26 U100	339	270	**609**	167	105	**272**	404	259	**663**

Die Erntekosten für Fichte liegen in Tabelle 50 über denen der Buche. Grund: die Kosten sind bezogen auf die absoluten Holzmengen je Hektar und Jahr. Die mit SorSim modellierten Holzmengen liegen bei Fichte höher als bei Buche (vgl. Tabelle 46). Es muss dementsprechend mehr Holz geerntet werden.

A 3: Erntekostenfreie Erlöse

Tabelle 51: Erntekostenfreie Erlöse für Fichte.

Bonität	Holzernteverfahren		
	1)	2)	3)
18	67	513	-12
22	239	796	143
26	365	1114	238
30	500	1402	342

Tabelle 52: Erntekostenfreie Erlöse für Buche.

Bonität	Holzernteverfahren		
	1)	2)	3)
18	-89	116	-91
22	47	288	9
26	96	432	42

Die erntekostenfreien Erlöse können über die Holzpreise und die Kostenansätze im Trinkwasserschutz-Tool vom Anwender verändert werden. Dadurch lassen sich Preisschwankungen am Holzmarkt und Lohnerhöhungen infolge des Teurungsausgleiches abbilden.

A 4: Gesamte Erntekosten je Fallbeispiel und Holzernteverfahren

Für die Berechnung der gesamten Erntekosten je Fallbeispiel und Holzernteverfahren (Erntekosten $_{\text{Bsp. HV}}$) wird das derzeitige Laub-Nadelholz-Verhältnis der Fläche unterstellt. Die Erntekosten werden nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Erntekosten}_{\text{Bsp. HV}} = \text{Fläche}_{\text{S2 S3}} \times \frac{\text{Ek Fi}_{\text{HV,Bonität}} \times \text{Anteil Fi} + \text{Ek Bu}_{\text{HV,Bonität}} \times \text{Anteil Bu}}{100}$$

Die Werte für die Erntekosten je Baumart (Ek Fi/Bu $_{\text{HV, Bonität}}$) werden entsprechend dem Holzernteverfahren und der Bonität (Fi = 26; Bu = 22) aus der Tabelle 50 entnommen. In Tabelle 53 sind die Eingangsgrössen und die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 53: Komplette Erntekosten je Fallbeispiel und Holzernteverfahren (Fr.a^{-1}).

Fallbsp.	Holzernte-verfahren	Fläche $_{\text{S2 S3}}$ (ha)	Anteil Fi/Bu (%)	Ek Fi/Bu$_{\text{HV, Bonität}}$ (Fr.ha^{-1}a^{-1}) Fi	Bu	Erntekosten $_{\text{Bsp. HV}}$ (Fr.a^{-1})
Bsp. 1	HV 1	2,5	50 / 50	1089	437	1‘908
	HV 2			339	196	669
	HV 3			1216	474	2‘113
Bsp. 2	HV 1	61	50 / 50	1089	437	46‘543
	HV 2			339	196	16‘318
	HV 3			1216	474	51‘545
Bsp. 3	HV 1	4805	40 / 60	1089	437	3‘352‘929
	HV 2			339	196	1‘216‘626
	HV 3			1216	474	3‘703‘694

Literaturverzeichnis

Aargauischer Waldwirtschaftsverband et al. (2010): Holzproduzenten der Kantone Aargau, beide Basel, Bern und Solothurn, Empfehlungen zum Rundholzverkauf 2010/2011. 2 S.

Blattert, C.; Bürgi, A.; Lemm, R. (2012): Benutzerhandbuch. In: Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) Trinkwasserschutz-Tool - Berechnung von Mehraufwand und Minderertrag infolge des Trinkwasserschutzes im Wald. 25 S.

Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG) vom 4. Oktober 1991. SR 921.0

BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 141 S.

BUWAL (2005): Grundwasserschutz im Wald. Merkblatt Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 6 S.

Bürgi, A.; Spjevak, S. (2009): Grundwasserschutz im Wald kostet. In: Wald und Holz 2/09. S. 30-33

EAFV (1967): Ertragstafel für Buche. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.

EAFV (1968): Ertragstafel für Fichte. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.

Erni, V.; Lemm, R. (1995): Ein Simulationsmodell für den Forstbetrieb – Entwurf, Realisierung und Anwendung. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 341 S.

Frutig, F.; Thees, O.; Lemm, R.; Kostadinov, F. (2009): Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo - Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In: Thees, O.; Lemm, R. (Hrsg.) Management zukunftsfähige Waldnutzung. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. VDF Hochschulverlag, Zürich. S. 441-466

Kaufmann, G.; Staedeli, M.; Wasser, B. (2010): Grundanforderungen an den naturnahen Waldbau. Ökogramme. Bundesamt für Umwelt, Bern. 29 S. Quelle: www.umwelt-schweiz.ch/ud-1031-d (Stand: April 2011)

Lemm, R.; Erni, V. (2009): Bessere Nutzungs- und Allokationsentscheide mit dem Sortierungssimulator SorSim. In: Thees, O.; Lemm, R. (Hrsg.) Management zukunftsfähige Waldnutzung. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. VDF Hochschulverlag, Zürich. S. 415 - 439

Lüscher, P.; Frutig, F.; Sciacca, S.; Spjevak, S.; Thees, O. (2009): Physikalischer Bodenschutz im Wald, Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen, Merkblatt für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 12 S.

Rosset, C.; Hässig, J.; Thees, O.; Lemm, R.; Frutig, F.; Bürgi, A.; Hensler, U.; Brang, P. (2009): Potenziale und Verfügbarkeit des Schweizer Holzes – Funktionsweise und erste Anwendung der dynamischen Waldholzverfügbarkeitskarte WVK. In: Thees, O.; Lemm, R. (Hrsg.) Management zukunftsfähige Waldnutzung. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. VDF Hochschulverlag, Zürich. S. 157 – 190

Spjevak, S.; Bürgi, A. (2008): Mehraufwand / Minderertrag in der Waldwirtschaft infolge des Trinkwasserschutzes. WSL/BAFU-Projekt. 37 S.

Usbeck, T.; Thöny, S.; Bürgi, A.; Lemm, R. (2010): Mehrkosten und Mindererträge in den forstlichen Produktionsregionen der Schweiz infolge des Grundwasserschutzes. WSL/BAFU-Projekt. 40 S.

VSFU (2010a): Maschinentarif 2010. Verband Schweizerischer Forstunternehmungen. 1 S. Quelle: www.vsfu.ch/d/info.asp (Stand: 14.12.2010)

VSFU (2010b): Regielöhne 2010. Verband Schweizerischer Forstunternehmungen. 1 S. Quelle: www.vsfu.ch/d/info.asp (Stand: 14.12.2010)

VSFU (2010c): Seilkrantarif 2010. Verband Schweizerischer Forstunternehmungen. 1 S. Quelle: www.vsfu.ch/d/info.asp (Stand: 14.12.2010)

Verordnung über den Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF) vom 1. Juli 1998. SR 814.202

Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV) vom 18. Mai 2005. SR 814.81