

Das Paket *Silviculture* für die automatisierte Simulation waldbaulicher Szenarien

Jan Hansen und Jürgen Nagel
Nordwestdeutsche Forstlichen Versuchsanstalt, Abt. Waldwachstum, Göttingen

Einführung

Waldbauliche Eingriffe haben auf das Wuchsverhalten von Waldbeständen einen wesentlichen Einfluss. Deshalb müssen bei der Simulation der Waldentwicklung Eingriffe möglichst realitätsnah abgebildet werden. Bei der Simulation einzelner Bestände mit einem Waldwachstumssimulator können waldbauliche Eingriffe interaktiv am Bildschirm durchgeführt werden. Möchte man jedoch die Waldentwicklung unter verschiedenen waldbaulichen Szenarien auf regionaler oder betrieblicher Ebene untersuchen, müssen die Eingriffe automatisiert erfolgen. In diesem Beitrag wird das Java-Paket *Silviculture* zur Simulation waldbaulicher Behandlungen vorgestellt, welches als neues Framework für das waldwachstumskundliche Simulationspaket TreeGrOSS (HANSEN und NAGEL 2014) geschaffen wurde.

Konzept

Das Java Paket *Silviculture* baut auf der Arbeit von DUDA (2006) auf, in welcher waldbauliche Handlungsanweisungen in einzelne abgeschlossene Arbeitsschritte (Behandlungselemente) zerlegt werden. Bei der Simulation von Wachstum und Eingriffen werden dann aus der Menge aller vorhandenen Behandlungselemente diejenigen zu einer Behandlungskette zusammengefügt, mit denen das gewünschte waldbauliche Szenario abgebildet wird. In dem neuen Paket ist die Behandlungskette in Phasen gegliedert, um zum Beispiel während des Waldumbaus, bevor der Bestand den gewünschten Waldentwicklungstyp erreicht hat eine andere Waldbehandlung simulieren zu können. Jede Phase gliedert sich in Höhenintervalle, wodurch erreicht wird, dass gewisse Behandlungselemente nur ausgeführt werden, wenn der Bestand in diesen Höhenbereich fällt. Dieses Vorgehen erleichtert es zum Beispiel, die Vorgaben der Hessischen Waldbaufibel (LANDESBETRIEB HESSENFORST 2016) in der die Behandlungsempfehlungen für Waldentwicklungsstadien für Oberhöhenbereiche vorgegeben werden, nachzubilden. Darüber hinaus wurden die Behandlungselemente durch die Implementierung des Java Interfaces *TreatmentElement* standardisiert. Dadurch sind die Behandlungselemente selbstbeschreibend und mit den gleichen Grundfunktionen ausgestattet. Durch die Standardisierung über das Interface und die Verwendung von Reflections (ULLENBOOM 2010) können neue Behandlungselemente hinzugefügt werden, ohne dass an der Verkettung, der Aufruflogik und den Einstellmöglichkeiten der Parameter der jeweiligen Elemente über die Benutzerschnittstelle etwas geändert werden muss. In der ersten Version des Java-Paketes *Silviculture* steht bereits ein großes Set an Behandlungselementen zur Verfügung. Diese ermöglichen Auswahl und Schutz von Bäumen, sowie weitere Maßnahmen wie Pflanzung, Erschließung, Durchforstung und Ernte.

Für die Festlegung eines waldbaulichen Szenarios in Form einer Behandlungskette werden zunächst eine oder mehrere Phasen definiert. Anschließend wird jede Phase in Höhenintervalle gegliedert. Die Behandlungselemente werden dann den Höhenintervallen zugeordnet und die elementspezifischen Parameter eingestellt. Der Algorithmus zur Ausführung des waldbaulichen Szenarios prüft, ob eine Phase aktiv ist und der Bestand in das Höhenintervall fällt. Ist das der Fall, werden alle Behandlungselemente des Höhenintervalls der Reihe nach abgearbeitet. Die Behandlungskette kann als XML-Datei gespeichert und geladen werden. Es ist auch möglich jedes einzelne Segment der Behandlungskette (Phase, Höhenintervall, Behandlungselement mit Parametereinstellung) als XML-Datei zu lesen und zu schreiben. Darüber hinaus stellt das Paket *Silviculture* ein graphisches User Interface (GUI) zum Erzeugen und Bearbeiten der Behandlungsketten zur Verfügung.

Behandlungskette

Die Behandlungskette besteht aus Phasen, Höhenintervallen und Behandlungselementen. Diese werden im Folgenden zur Erleichterung der Anwendung beschrieben.

A. Phase

Die Phasen dienen dazu, einen Bestand zum Beispiel während des Waldumbaus anders zu bewirtschaften als wenn die Zielbestockung erreicht ist. Meist wird man in der Simulation nur eine Phase benötigen. Die Anzahl der Phasen ist jedoch unbegrenzt. Jede Phase kann aktiv oder passiv geschaltet werden. Es ist möglich mehrere Phasen gleichzeitig aktiv zu schalten. Nur die Behandlungselemente einer aktiven Phase werden berücksichtigt. Eine Phase darf nur an eine Behandlungskette gehängt werden.

Parameter:

Name: Ein beliebiger Text zur Beschreibung der Phase. Dieser ist für die Abarbeitung der Behandlungskette nicht weiter relevant.

Schalter: Wenn dieser Schalter den booleschen Wert *true* hat bzw. im GUI aktiviert ist, dann ist die Phase grundsätzlich aktiv. Gleichzeitig muss jedoch die Variable *temp_Integer* aus der Klasse *Stand* des *TreeGrOSS*-Paketes den nachstehenden Wert (Indikatorzahl) enthalten. Ist der Schalter *false* oder nicht angehakt ist die Phase immer aktiv. Die Variable *temp_Integer* kann von den einzelnen Behandlungselementen gesetzt werden und somit einen bestimmten Bestandeszustand signalisieren (z.B. Umbau erfolgt).

Indikatorzahl: Ein ganzzahliger Wert, der mit der Variable *temp_Integer* übereinstimmen muss, damit die Phase aktiv ist.

B. Höhenintervall

Mit dem Höhenintervall kann die Ausführung von Behandlungselementen eingeschränkt werden. Grundsätzlich werden nur die Behandlungselemente ausgeführt, die zu einem Höhenintervall gehören, welches die Bestandesoberhöhe nämlich den Wert der Variable *h100* aus der Klasse *Stand* des *TreeGrOSS* Paketes einschließt. Es ist zu beachten, dass das Höhenintervall nicht zu klein gewählt wird, weil es sonst eventuell bei den 5jährigen Simulationsschritten und einem starken Höhenwachstum übersprungen werden könnte. Ein Höhenintervall darf nur an eine Phase gehängt werden.

Parameter:

Name: Ein beliebiger Text zur Beschreibung des Intervalls. Dieser ist für den Algorithmus nicht weiter wichtig.

Starthöhe [m]: Unterer Schwellenwert.

Endhöhe [m]: Oberer Schwellenwert. Dieser kann zum Beispiel auf den Wert 500m gestellt werden, wenn man sicherstellen möchte, dass die Behandlungselemente ab einer gewissen Höhe immer ausgeführt werden.

C. Behandlungselemente

In der ersten Version des Paketes *Silviculture* sind bereits die wichtigsten waldbaulichen Behandlungselemente integriert. Die Behandlungselemente dürfen nur einem Höhenintervall hinzugefügt werden. Sie werden strikt in der Reihenfolge abgearbeitet, wie sie im Höhenintervall angegeben sind. Es macht also einen großen Unterschied, ob zum Beispiel erst ein Behandlungselement zur Freistellung der Z-Bäume und danach das Behandlungselement zur Durchforstung der Zwischenfelder angegeben wird oder diese in der umgekehrten Reihenfolge ausgeführt werden.

1. TeProtection (Schutz): Mit diesem Behandlungselement lassen sich Restriktionen für die waldbauliche Behandlung setzen, die in allen anderen Elementen berücksichtigt werden. Ein gewählter Habitatbaum oder ein gewünschter Mindestschlussgrad führen dazu, dass auch im Fall eines Kahlschlags nicht alle Bäume genutzt werden. Das Behandlungselement kann entweder für die gesamte Phase oder aber für verschiedene Höhenbereiche unterschiedlich eingestellt werden. Alle einmal unter Schutz gestellten Bäume bleiben solange geschützt, bis dieser Status aktiv aufgehoben wird.

Die zu schützenden Bäume werden als Habitatbäume markiert und sind damit von allen waldbaulichen Maßnahmen ausgeschlossen. Beim Minderheitenschutz wird jeweils ein Baum pro Baumart als Z-Baum markiert und entsprechend gefördert.

Parameter:

Anzahl Habitatbäume [n/ha]: Es werden die stärksten Bäume, die keine Z-Bäume sind, ausgewählt. Habitatbäume sind von Durchforstungs- und Erntemaßnahmen ausgenommen. Sie werden allerdings nicht wie Z-Bäume speziell gefördert.

Typ: Es kann eingestellt werden, auf welche Baumarten die Habitatbaumwahl fallen darf. Die Auswahl kann auf Laubholz oder nur Eichen und Buchen eingeschränkt werden.

Minderheitenschutz: Die Aktivierung führt dazu, dass für Baumarten mit einem Grundflächenanteil <10% jeweils ein Baum als Z-Baum ausgewählt wird. Dadurch wird die Art aktiv gefördert.

Mindestschlussgrad: Dieser Wert sichert, dass im Rahmen von Erntemaßnahmen immer ein Mindestschlussgrad erhalten bleibt. Der Schlußgrad ist ein Wert zwischen 0 und 1.

Schutz BHD > x [cm]: Hier können alle Bäume ab einem vorgegebenem Durchmesser unter Schutz gestellt werden. Diese Bäume erhalten Habitatbaumstatus.

2. TeRestHabitatTrees (Habitatbaumauswahl zurücknehmen): Mit dem Behandlungselement kann die Auswahl der Habitatbäume zurückgenommen werden. Alle Habitatbaummarkierungen werden entfernt.

Parameter: keine

3. TeSTrails (Rückegassen): Es lassen sich Erschließungslinien im Bestand anlegen. Alle Bäume, die auf den Gassen stehen, werden ohne Mengenbegrenzung entnommen. Die Rückegassen werden in Nord-Südrichtung im Bestand angelegt, wobei die erste Rückegasse mit halben Rückegassenabstand an der westlichen Grenze beginnt. Alle Bäume auf den Gassen werden als durchforstet markiert. Habitatbäume werden in diesem Fall ebenfalls entnommen.

Parameter:

- Breite der Rückegasse [m]
- **Abstand der Rückegassen [m]:** Jeweils gerechnet von Gassenmitte zu Gassenmitte.

4. TeSelectCropTrees (Z-Baumauswahl): Das Element dient der Z-Baumauswahl und der Festlegung von Mischungsanteilen. Dies ist für die Simulation von Waldentwicklungstypen neben dem Zieldurchmesser die entscheidende Vorgabe. Die Z-Baumauswahl beginnt mit dem stärksten Baum des Bestandes und wählt weitere Bäume so aus, dass ein Mindestabstand zwischen den Z-Bäumen gesichert ist. Der Mindestabstand ergibt sich aus der Kronenbreite bei Zieldurchmesser und dem Mischungsanteil. Der Mindestabstand kann dazu führen, dass weniger Z-Bäume als gewünscht ausgewählt werden. Im Mischbestand wird jeweils abwechselnd von jeder Baumart ein Z-Baum gewählt. Es ist möglich die Klasse wiederholt aufzurufen und so Z-Bäume nachzuwählen.

Parameter:

- Führende Baumart bzw. Baumart: Code der Baumart
- **Z-Bäume [n/ha]:** Anzahl der Z-Bäume pro Hektar im Reinbestand
- **Mischungsanteil [%]:** Der Anteil den die jeweilige Baumart bezogen auf die Kronenschirmfläche haben soll.

5. TeRestCropTrees (Z-Baumauswahl zurücknehmen): Es wird die Auswahl der Z-Bäume zurückgenommen. Alle Z-Baummarkierungen werden auf den Wert *false* gesetzt.

Parameter: keine

6. TeThinCTByCompetition (Z-Bäume freistellen): Das Behandlungselement entnimmt Bedränger der Z-Bäume unter Berücksichtigung der Kronenkonkurrenz. Es wird iterativ der Z-Baum gesucht, der den größten Kronenkonkurrenzindex C66 aufweist und anschließend der Bedränger dieses Z-Baumes entnommen, dessen Krone am meisten mit der des Z-Baumes überlappt. Die Überlappung wird in der Höhe berechnet, in der für den Z-Baum die größte Kronenausdehnung vermutet wird, nämlich Baumhöhe – 1/3 der Kronenlänge. Bäume, deren Krone unterhalb dieser Höhe dem Z-Baum nahe sind, werden

nicht als Bedränger verstanden und deshalb ignoriert. Die iterative Entnahme wird so lange ausgeführt bis die maximale Erntemenge erreicht ist, alle Z-Bäume nicht mehr bedrängt werden oder die Zielgrundfläche erreicht ist. Nach jeder Entnahme werden die Konkurrenzindizes neu berechnet.

Parameter:

- **Maximales Volumen [m^3/ha]:** Das maximale Volumen begrenzt den Holzernteeingriff. Sollte diesem Behandlungselement bereits ein anderes Holzernteelement vorgeschaltet sein, so wird die Holzerntemenge, die bereits angefallen ist, mit berücksichtigt. Durch das Setzen eines sehr hohen Wertes kann diese Restriktion deaktiviert werden.
- **Maximale Überlappung [%]:** Gibt den Wert der erlaubten Kronenüberlappung an.
- **Durchforstungsstärke:** Mit Hilfe der Durchforstungsstärke wird die Zielgrundfläche für den Bestand berechnet, welche sich aus der maximalen Dichte und der Grundflächenleitkurve ergibt. Mit dem Faktor Durchforstungsstärke kann Grundfläche erhöht bzw. abgesenkt werden. Ein Wert von 1.0 entspricht genau der Grundflächenleitkurve, während andernfalls der Leitkurvenwert mit dem Faktor multipliziert wird.
- **Maximale Bestockungsgradabsenkung:** Um zum Beispiel einen überbestockten Fichtenbestand nicht durch einen zu starken Eingriff zu destabilisieren, kann der Eingriff auf eine maximale Bestockungsgradabsenkung begrenzt werden. Unter Bestockungsgrad wird hier das Verhältnis der Ist-Grundfläche des Bestandes zu der Grundfläche nach der Leitkurve verstanden.

7. TeThinCTByQD (Z-Bäume auskesseln): Mit dem Behandlungselement können die Z-Bäume ausgekesselt werden. Dieses Verfahren entspricht in etwa der QD-Strategie (WILHELM et al. 1999). Es werden alle Bäume entfernt, die mit ihrer Krone einen gewissen Abstand zur Krone des Z-Baumes unterschreiten. Alle Bäume, die die Bedingung erfüllen, werden durchforstet. Die maximale Erntemenge kann nicht begrenzt werden.

Parameter:

- **Minimale Distanz [m]:** Sie ist der minimale Abstand, der zwischen den Kronen des Z-Baumes und der des Bedrängers bestehen soll.

8. TeThinCTByAWert (Z-Bäume nach A-Wert freistellen): Mit dem Behandlungselement werden die Z-Bäume mit dem A-Wert nach Johann (1982) freigestellt. Es werden alle Bedränger entfernt, deren A-Wert größer als der vorgegebene A-Wert ist. Der A-Wert ergibt sich aus: $(\text{Höhe}_{Z\text{-Baum}} / \text{Abstand}_{Z\text{-Baum zu Bedränger}}) * (\text{BHD}_{\text{Bedränger}} / \text{BHD}_{Z\text{-Baum}})$. Die maximale Erntemenge kann nicht begrenzt werden.

Parameter:

- **Maximaler A-Wert:** Empfohlen wird ein Wert zwischen 4 und 6.

9. TeThinFromAbove (Hochdurchforstung): Für eine Hochdurchforstung sollte dieses Behandlungselement mit einer Z-Baumfreistellung (Elemente 6. bis 8.) kombiniert werden. Dieses Behandlungselement dient hauptsächlich der Entnahme von Bäumen zwischen den Z-Bäumen und sollte daher im Anschluss an die Z-Baumfreistellung aufgerufen werden. Zunächst wird berechnet, wie viel der Grundfläche im Bestand abgesenkt werden soll. Die Grundflächenabsenkung kann auf eine maximale Bestockungsgradabsenkung begrenzt werden, wie es z.B. bei schlecht gepflegten, älteren Fichtenbeständen ratsam ist. Dazu werden die Grundflächenleitkurven, die an der maximalen Dichte orientiert sind, berücksichtigt. Die Grundflächenabsenkung wird baumartenweise durchgeführt, wobei das angestrebte Mischungsprozent der jeweiligen Baumart berücksichtigt wird (siehe TeSelectCropTrees). Dies führt dazu, dass die Grundflächenentnahme für eine Baumart, deren Mischungsanteil zu gering ist, keine Bäume entnommen werden und bei den Baumarten mit einem zu hohem Mischungsprozent mehr Grundfläche entnommen wird. Im Sinne einer Hochdurchforstung wird jeweils der Baum (nicht Z-Baum oder Habitatbaum) bestimmt, der auf andere Bäume und Verjüngungsschichten die höchste Konkurrenzwirkung hat. Die Konkurrenzwirkung wird aus den durch ihn überschirmten Kronenanteilen anderer Bäume be-

stimmt. Der Entnahmealgorithmus läuft solange bis die maximale Erntemenge oder die vorgesehene Grundfläche erreicht ist.

Parameter:

- **Maximales Volumen [m^3/ha]:** Dies ist die maximale Erntemenge für den Zeitraum. Das bedeutet, dass vorgeschaltete Z-Baum Durchforstungen berücksichtigt werden.
- **Durchforstungsstärke:** Faktor, um den die Werte nach der Grundflächenleitkurve modifiziert werden. Ein Wert von 1,0 entspricht genau der Leitkurve, ein geringerer Wert reduziert die Leitkurvenvorgabe um den eingegebenen Faktor.
- **Maximale Bestockungsgradabsenkung:** Reduziert bei hohen Bestockungsgraden die Grundflächenentnahme.

10. TeThinFromBelow (Niederdurchforstung): Mit dem Behandlungselement kann eine Niederdurchforstung durchgeführt werden. Zunächst wird berechnet, wie viel der Grundfläche im Bestand abgesenkt werden soll. Die Grundflächenabsenkung kann auf eine maximale Bestockungsgradabsenkung begrenzt werden, wie es bei schlecht gepflegten älteren Fichtenbeständen ratsam ist. Dazu werden die Grundflächenleitkurven, die an der maximalen Dichte orientiert sind, berücksichtigt. Die Grundflächenabsenkung wird baumartenweise durchgeführt, wobei das angestrebte Mischungsprozent der jeweiligen Baumart berücksichtigt wird (siehe TeSelectCropTrees). Dies führt dazu, dass die Grundflächenentnahme für eine Baumart, deren Mischungsanteil zu gering ist, keine Bäume entnommen werden und bei den Baumarten mit einem zu hohem Mischungsprozent mehr Grundfläche entnommen wird. Im Sinne einer Niederdurchforstung wird jeweils der kleinste Baum (nicht Z-Baum oder Habitatbaum) entnommen. Der Entnahmealgorithmus läuft solange bis die maximale Erntemenge oder die zu vorgesehene Grundfläche erreicht ist.

Parameter:

- **Maximales Volumen [m^3/ha]:** Dies ist die maximale Erntemenge für den Zeitraum. Das bedeutet, dass vorgeschaltete Z-Baum Durchforstungen berücksichtigt werden.
- **Durchforstungsstärke:** Faktor, um den die Werte nach der Grundflächenleitkurve modifiziert werden. Ein Wert von 1,0 entspricht genau der Leitkurve, ein geringerer Wert reduziert die Leitkurvenvorgabe um den eingegebenen Faktor.
- **Maximale Bestockungsgradabsenkung:** Reduziert bei hohen Bestockungsgraden die Grundflächenentnahme.

11. TeThinUndoMinVol (Rücknahme der Durchforstung): Das Behandlungselement dient dazu, bei Durchforstungen realistische Eingriffsmengen zu fordern und bei zu geringem Holzanfall auf eine Durchforstung zu verzichten. Es wird geprüft, ob eine minimale Durchforstungsmenge erreicht wird, ansonsten werden alle zu dem Zeitpunkt durchforsteten Bäume als lebend markiert. Zur Berechnung der Durchforstungsmenge werden alle in dem Simulationsschritt markierten Bäume berücksichtigt. Das Element sollte immer erst nach den anderen Durchforstungselementen aufgerufen werden.

Parameter:

- **Minimales Volumen [m^3/ha]:** Ist das Volumen, welches bei allen Durchforstungen zu einem Zeitpunkt mindestens erreicht werden sollte.

12. TeHarvestByClearCut (Kahlschlag): Das Behandlungselement führt eine Kahlschlag durch. Es werden alle nicht geschützten Bäume entnommen. Es wird zunächst geprüft, ob der Kahlschlag eingeleitet werden soll. Dieser Fall ist gegeben, wenn die über die Eingabeparameter definierte Schwelle überschritten ist.

Parameter:

- **Kahlschlagsbeginn:** Hier kann ein Durchmesser, ein Alter oder eine Höhe vorgegeben werden, die für den Beginn des Kahlschlags überschritten sein muss.
- **ab:** Dies ist der Wert, der überschritten sein soll.

- **Wechsel in Phase:** Nach Abschluss der Holzernteroutine kann hier eine neue Phase angesteuert werden. Dies ist wichtig, wenn zum Beispiel der Bestand umgebaut wird und nach dem Abnutzen aller Altbäume eine andere Phase mit Einstellungen für einen anderen Waldentwicklungstyp angesteuert werden soll.

13. TeHarvestByTargetDBHStrict (Zielstärke): Das Behandlungselement führt eine klassische Zielstärkennutzung durch. Es werden jeweils nur die Bäume entnommen, deren BHD die Zielstärke überschreitet. Die Gesamtmenge des Eingriffs kann begrenzt werden. Es wird zunächst geprüft, ob eventuell schon Holz zu diesem Zeitpunkt geerntet wurde. Dieses wird auf die maximale Erntemenge angerechnet. Danach wird jeweils der Baum entfernt, dessen BHD den Zieldurchmesser am meisten überschreitet. Dieses wird solange durchgeführt, bis entweder keine Bäume mehr stärker als Zielstärke sind oder die maximale Ernte erreicht wurde.

Parameter:

- **Maximales Volumen [m^3/ha]:** Maximale Erntemenge zur Begrenzung der Eingriffe
- **Zielstärke:** „Default“ bedeutet, dass die vordefinierten Zielstärken benutzt werden. „Neue Eingabe“ wertet den Text des nächsten Parameters aus.
- **Zielstärke (Text):** In der Textzeile werden die gewünschten Zielstärken eingetragen. Dafür wird für jede Baumart: Codenummer, Gleichheitszeichen, Zielstärke und ein Semikolon eingetragen (z.B. 211=65;511=45;).

14. TeHarvestByShelter (Schirmschlag): Das Behandlungselement führt einen Schirmschlag in einem vorgegebenem Zeitraum durch. Es wird zunächst geprüft, ob der Schirmschlag eingeleitet werden soll. Dies passiert, wenn die über die Eingabeparameter definierte Schwelle überschritten ist. Die Erntemenge wird über die Anzahl der Eingriffe (n), die sich aus dem gewünschten Zeitraum geteilt durch 5 Jahre ergibt, ermittelt. Bei jedem Eingriff wird der Bestockungsgrad, welcher auf die Grundflächenleitkurve bezogen ist, um $1/n$ abgesenkt. Es werden jeweils die stärksten Bäume entnommen. Mit der Einleitung des Schirmschlags wird die Variable *stand.status* auf 50 gesetzt und mit jedem Ernteeingriff um den Wert 1 erhöht. Ist der Schirmschlag einmal eingeleitet, so wird er unabhängig von den Startwerten solange fortgesetzt, bis der Zeitraum abgelaufen ist.

Parameter:

- **Zeitraum [Jahre]:** Zeitraum für den Schirmschlag
- **Art:** Baumart auf die sich der Schirmschlagbeginn bezieht.
- **Schirmschlagbeginn:** Hier kann ein Durchmesser, ein Alter oder eine Höhe vorgegeben werden, die für den Beginn des Kahlschlags überschritten sein muss.
- **ab:** Dies ist der Wert, der überschritten sein soll.
- **Wechsel in Phase:** Nach Abschluss der Holzernteroutine kann hier eine neue Phase angesteuert werden. Dies ist wichtig, wenn zum Beispiel der Bestand umgebaut wird und nach dem Abnutzen aller Altbäume eine andere Phase mit Einstellungen für einen anderen Waldentwicklungstyp angesteuert werden soll.

15. TeHarvestByTargetDBHPeriod (Zielstärkennutzung Praxis): Das Behandlungselement führt eine modifizierte, praxisnahe Zielstärkennutzung durch. Diese ähnelt dem Schirmschlag. Es werden jedoch neben den stärksten Bäumen auch die schwächeren geerntet. Es wird zunächst geprüft, ob die Erntemaßnahme eingeleitet werden soll. Dies ist der Fall, wenn die über die Eingabeparameter definierte Schwelle überschritten wird. Die Erntemenge ergibt sich aus der Anzahl der Eingriffe (n), die sich aus dem gewünschten Zeitraum geteilt durch 5 Jahre ergibt. Bei jedem Eingriff wird der Bestockungsgrad, welcher auf die Grundflächenleitkurve bezogen ist, um $1/n$ abgesenkt. Jeweils 50% der Grundfläche werden zufällig von den Z-Bäumen und 50% vom Füllbestand entnommen. Wenn die Grundfläche in einem der beiden Kollektive nicht erreicht wird, werden jeweils Bäume des anderen geerntet. - Mit der Einleitung des Schirmschlags wird die Variable *stand.status* auf 50 gesetzt und mit jedem Ernte-

eingriff um den Wert 1 erhöht. Ist die Zielstärkennutzung einmal eingeleitet, so wird sie unabhängig von den Startwerten solange fortgesetzt, bis der Zeitraum abgelaufen ist.

Parameter:

- **Zeitraum [Jahre]:** Zeitraum für die praxisnahe Zielstärkennutzung.
- **Art:** Baumart auf die sich der Schirmschlagbeginn bezieht.
- **Schirmschlagbeginn:** Hier kann ein Durchmesser, ein Alter oder eine Höhe vorgegeben werden, die für den Beginn des Kahlschlags überschritten sein muss.
- **ab:** Dies ist der Wert, der überschritten sein soll.
- **Wechsel in Phase:** Nach Abschluss der Holzernteroutine kann hier eine neue Phase angesteuert werden. Dies ist wichtig, wenn zum Beispiel der Bestand umgebaut wird und nach dem Abnutzen aller Altbäume eine andere Phase mit Einstellungen für einen anderen Waldentwicklungstyp angesteuert werden soll.

16. TeHarvestByGap (Lochhieb, Femelschlag): Das Behandlungselement führt eine Holzernte durch, bei der Löcher im Sinne eine Femelschlags in den Bestand geschlagen werden. Es wird zunächst geprüft, ob die definierte Schwelle überschritten ist. Ist dies der Fall, werden bei jedem Eingriffe n Löcher mit dem eingestellten Lochdurchmesser in den Bestand geschlagen. Dies geschieht solange wie die Erntemenge nicht erreicht ist. Die Lochposition wird so ermittelt, dass im Bereich des Loches die größte Grundfläche zielstarker Bäume zu finden ist. - Mit der Einleitung des Lochhiebes wird die Variable *stand.status* auf 50 gesetzt und mit jedem Ernteeingriff um den Wert 1 erhöht. Ist die Lochhiebes einmal eingeleitet, so wird der Bestand durch neue Löcher weiter aufgelichtet, bis er abgenutzt ist.

Parameter:

- **Maximales Volumen [m^3/ha]:** Maximale Erntemenge zur Begrenzung der Eingriffe.
- **Lochdurchmesser [m]:** Durchmesser eines Lochhiebes.
- **Lochhiebeginn:** Hier kann ein Durchmesser, ein Alter oder eine Höhe vorgegeben werden, die für den Beginn des Lochhiebes überschritten sein muss.
- **Ab Wert:** Dies ist der Wert, der überschritten sein soll

17. TeHarvestRemaining (Räumen): Dieses Behandlungselement führt eine Räumung durch. Es werden alle nicht geschützten Bäume und wahlweise die Verjüngungsplatzhalter entnommen, wenn der Schlussgrad einen gewissen Wert unterschritten hat.

Parameter:

- **Verjüngung :** Hier kann kann zwischen „belassen“ und „entfernen“ gewählt werden.
- **Schlussgrad:** Schlussgrad ab dem der Bestand geräumt wird (Wert zwischen 0 und 1).
- **Wechsel in Phase:** Nach Abschluss der Holzernteroutine kann hier eine neue Phase angesteuert werden. Dies ist wichtig, wenn zum Beispiel der Bestand umgebaut wird und nach dem Abnutzen aller Altbäume eine andere Phase mit Einstellungen für einen anderen Waldentwicklungstyp angewendet werden soll.

18. TePlant (Pflanzen): Das Behandlungselement erzeugt sog. Verjüngungsplatzhalter¹ in einem vorgegebenen Verband, wenn der Schlussgrad des Oberstands einen gewissen Wert unterschreitet und keine ausreichende Verjüngung vorhanden ist. Zunächst wird die Textzeile Pflanzmaterial analysiert. Anschließend wird geprüft, ob der Bestand den Schlussgrad unterschreitet und im Unterstand weniger als 60% des Deckungsgrades gegeben sind, der sich aus dem Pflanzverband sowie der Größe der Verjüngungsplatzhalter und den Flächenanteilen der zu pflanzenden Baumarten errechnet. Ist dies der Fall wird für alle Rasterpunkte, auf denen im Radius von 1m kein Baum steht, ein Verjüngungsplatzhalter

¹ technisch ein Einzelbaum, der jedoch eine definierte, verjüngte Fläche abbildet.

erzeugt und auf der Position etabliert. Per Zufallszahl wird entschieden, welche Art dem Verjüngungsplatzhalter zugeordnet bzw. ob für die Position überhaupt ein Verjüngungsplatzhalter erzeugt wird.

Parameter:

- **Schlussgrad:** Schlussgrad des Oberstands bei dessen Unterschreitung eine Pflanzung ausgelöst wird.
- **Pflanzmaterial:** Hier kann als Textzeile eingegeben werden, welche Arten mit welchem Anteil und welcher Bonität gepflanzt werden sollen. Die Eingabe für jede Baumart wird mit einem Semikolon beendet. Pro Baumart werden drei Werte eingegeben, die wiederum mit Gleichheitszeichen voneinander getrennt werden. Z.B. gibt die Textzeile „211=0.6=32.5;511=0.2=36.4;“ an, dass auf der Fläche Buchen (Code 211) und Fichten (Code 511) gepflanzt werden sollen. Es sollen 60% aller Pflanzplätze mit Buche bepflanzt werden. Die Buchen haben eine geschätzte Oberhöhenbonität im Alter 100 von 32.5m. Fichten mit einer Oberhöhenbonität von 36.4 m werden auf 20% der Punkte gepflanzt. Die restlichen Punkte bleiben unbepflanzt.
- **Pflanzabstand [m]:** Abstand der Verjüngungsplatzhalter in Nord- Südrichtung.
- **Pflanzabstand [m]:** Abstand der Verjüngungsplatzhalter in West- Ostrichtung.

19. TePlantGap (Löcher auspflanzen): Das Behandlungselement erzeugt Verjüngungsplatzhalter in einem vorgegebenen Verband. Zunächst wird ein dem Pflanzverband entsprechendes Raster über den Bestand gelegt. Für jeden Rasterpunkt wird dann bestimmt, ob die Bedeckung im vorgegebenem Lochradius weniger als 30% beträgt. Ist dies der Fall, wird ein Verjüngungsplatzhalter erzeugt und auf der Position etabliert. Der Verjüngungsplatzhalter wird nicht erzeugt, wenn um den Rasterpunkt in einem Radius von 0.1m bereits eine andere Pflanze steht. Per Zufallszahl wird entschieden, welche Art dem Verjüngungsplatzhalter zugeordnet bzw. ob für die Position überhaupt ein Verjüngungsplatzhalter erzeugt wird. Letztere Situation ist gegeben, wenn die Summe der Flächenanteile < 1.0 ist.

Parameter:

- **Lochdurchmesser [m]:** Größe der Lücke für die der Überdeckungsgrad berechnet wird.
- **Pflanzmaterial:** Hier kann als Textzeile eingegeben werden, welche Arten mit welchem Anteil und welcher Bonität gepflanzt werden sollen. Die Eingabe für jede Baumart wird mit einem Semikolon beendet. Pro Baumart werden drei Werte eingegeben, die wiederum mit Gleichheitszeichen voneinander getrennt werden. Die Textzeile „211=0.6=32.5;511=0.2=36.4;“ gibt an, dass auf der Fläche Buchen und Fichten gepflanzt werden sollen. Es sollen 60% aller Pflanzplätze mit Buche bepflanzt werden. Die Buchen haben eine geschätzte Oberhöhenbonität im Alter 100 von 32.5m. Fichten mit einer Oberhöhenbonität von 36.4m werden auf 20% der Punkte gepflanzt. Die restlichen Punkte bleiben unbepflanzt.
- **Pflanzabstand [m]:** Abstand der Verjüngungsplatzhalter in Nord- Südrichtung.
- **Pflanzabstand [m]:** Abstand der Verjüngungsplatzhalter in West- Ostrichtung.

Beispiel

An einem fiktiven Beispiel soll die Anwendung des neuen Paketes *Silviculture* demonstriert werden. Hierzu wurde das Paket in den ForestSimulator (HANSEN und NAGEL, 2014) integriert.

Die Ausgangssituation ist ein 70-jähriger Kiefernreinbestand der I. Ertragsklasse mit einer Grundfläche von 30 m²/ha. Dieser Bestand soll, sobald er eine Zielstärke von etwa 40 cm erreicht hat, in einem 20-jährigen Zeitraum abgenutzt werden. Wenn der Bestand auf einen Schlussgrad von 0,3 aufgelichtet ist, soll er mit Buche und Douglasie unterbaut werden. Nach dem Umbau ist geplant, den Bestand als Douglasien/ Buchenmischbestand mit Zielstärkennutzung zu entwickeln.

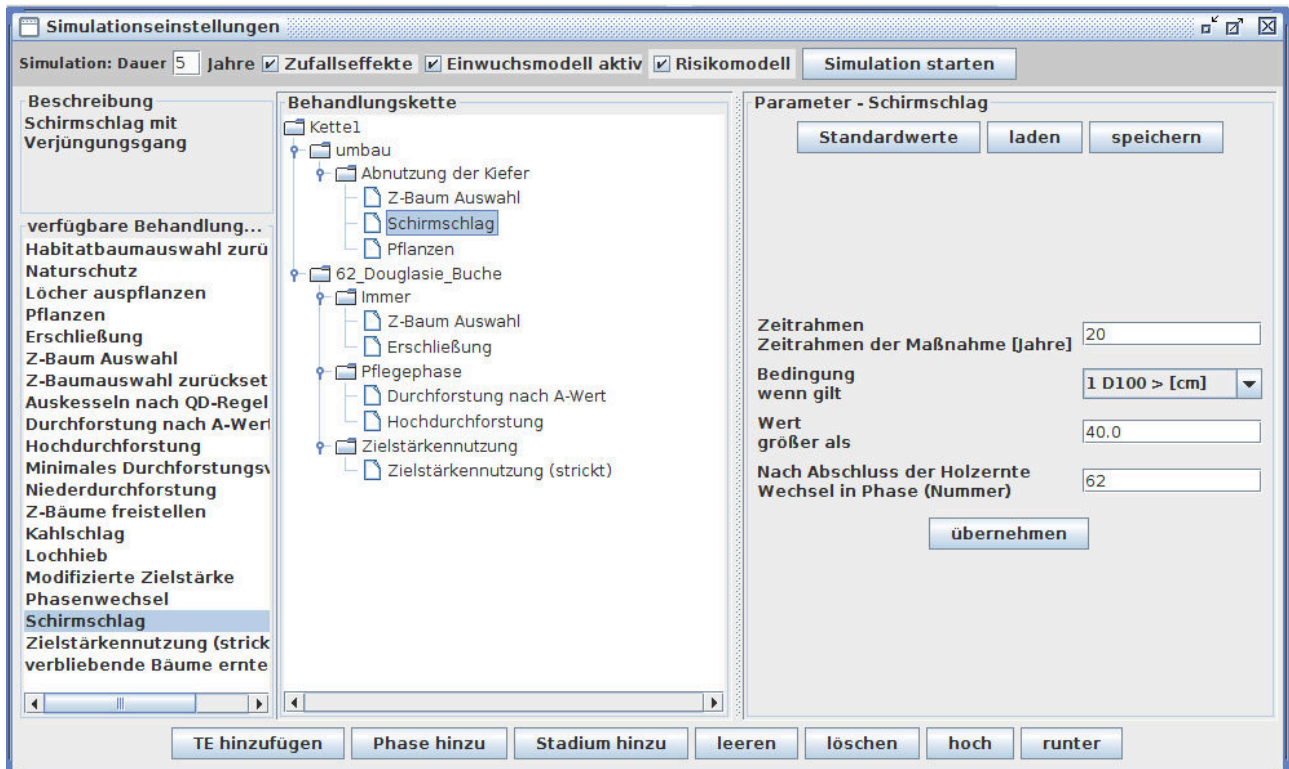


Abb 1: Grafisches Benutzerinterface des Paketes Silviculture im ForestSimulator

In Abbildung 1 ist das graphische Benutzerinterface des Paketes *Silviculture* dargestellt. Für das Beispiel wurde eine Behandlungskette mit zwei Phasen – „Umbau“ und „62_Douglasie_Buche“ – zusammengestellt. Die 1. Phase verfügt nur über ein Höhenintervall mit dem Namen „Abnutzung der Kiefer“. In diesem Höhenintervall werden die Behandlungselemente Z-Baumauswahl, der Schirmschlag und das Pflanzen der Douglasien und Buchen nacheinander aufgerufen. Das Behandlungselement Z-Baumauswahl prüft, ob die gewünschte Anzahl von Z-Bäumen ausgewählt wurde und wählt gegebenenfalls noch zusätzliche Bäume nach. Die Einstellung des Behandlungselementes Schirmschlag kann dem rechten Fenster in Abbildung 1 entnommen werden, weil das Behandlungselement angeklickt wurde. Die Einstellungen sehen einen Zeitraumen für die Nutzung aller Kiefern von 20 Jahren vor. Die Erntemaßnahme beginnt, wenn der D100 (Durchmesser der 100 stärksten Bäume) größer als 40 cm ist. Nach Abschluss des Schirmschlags wird die Phase mit der Nummer 62 aktiviert und die Umbauphase deaktiviert. Das Behandlungselement Pflanzen ist so eingestellt, dass die Douglasien- und Buchenpflanzen ab einem Kronenschlußgrad unter 0,3 auf die Fläche gebracht werden. Die zweite Phase „62_Douglasie_Buche“ ist in drei Höhenbereiche gegliedert. Der erste Höhenbereich ist so eingestellt, dass er immer zutreffend ist (0 bis 200m). Es wird geprüft, ob die gewünschte Anzahl von Z-Bäumen in der Douglasie und der Buche ausgewählt wurde. Darüber hinaus wird eine Erschließung angelegt. Das wiederholte Auslösen des Behandlungselementes Erschließung ist dabei kein Problem, weil nur bei der ersten Ausführung Holz anfallen wird. Die weiteren Aufrufe kommen eher einem Befahren der Rückengassen gleich, welches die Verjüngung zerstört. In der „Pflegephase“ (Einstellung 14 bis 30m Oberhöhe) werden die Z-Bäume nach dem A-Wert von JOHANN (1982) freigestellt. Zusätzlich werden die Bäume des Füllbestandes hochdurchforstet, wobei die Eingriffsstärke auf maximal 80 m³/ha Derbholz für beide Eingriffsarten begrenzt ist. Oberhalb von 34 m Oberhöhe werden im Bestand die zielstarken Bäume bis zu einer Gesamtmenge von 120 m³/ha und Eingriff entnommen.

In Abbildung 2 ist eine Simulation des Kieferbestandes über 100 Jahre dargestellt. Gleich zu Beginn wurden die Kiefern Z-Bäume ausgewählt (Abb. 1a). Bei einem Kronenschlußgrad von unter 0,3 wurde während des Schirmschlages neu gepflanzt (Abb. 1b). Es sei darauf hingewiesen, dass im ForestSimulator keine Verjüngungspflanzen sondern Verjüngungsplatzhalter simuliert werden. Nach weiteren 30 Jahren haben die Douglasien einen deutlichen Wachstumsvorsprung vor den Buchen (Abb. 1c). Dies hängt mit den für die Verjüngung eingestellten Bonitäten (Buche H100 =30,4m; Douglasie H100 =

37,0m) zusammen. Weitere 25 Jahre später haben sich die Buchen behaupten können und einzelne wurden als Z-Bäume gewählt (Abb. 1d).

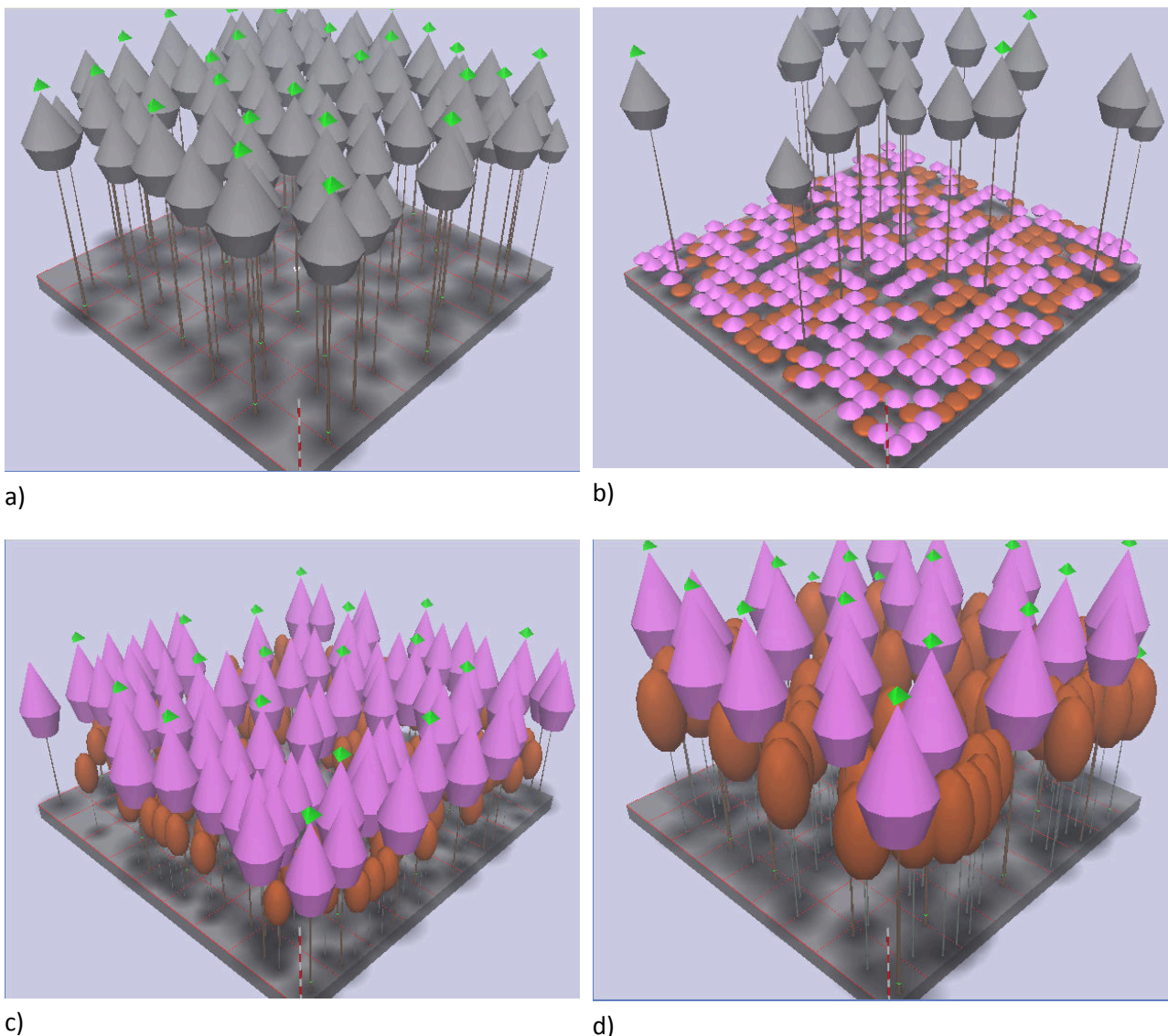


Abb. 2: Beispiel der Waldentwicklung. a) Nach der ersten Z-Baumauswahl. b) Während des Schirmschlags und nach der Pflanzung. c) Der 30jährige Douglasien Buchenbestand. d) Der 55jährige Douglasien Buchenbestand. (Kiefer = grau, Douglasie = pink, Buche = braun und Z-Baummarkierung = grün)

Diskussion und Ausblick

Mit dem neuen Java Paket *Silviculture* wurde für das TreeGROSS Paket ein neues Framework geschaffen, mit dem waldbaulichen Szenarien in Waldwachstumssimulatoren umgesetzt und automatisiert werden können. Durch die Untergliederung der Szenarien in verschiedene Phasen und Höhenintervalle kann der Nutzer sicherstellen, dass gewisse waldbauliche Maßnahmen nur dann ausgeführt werden, wenn dies seinen Vorstellungen entspricht bzw. mit den waldbaulichen Vorgaben, wie sie in Merkblättern und Betriebsanweisungen vorgesehen sind, korrespondiert. Alle Behandlungselemente implementieren das Java Interface *TreatmentElement* und sind damit standardisiert, internationalisierbar und selbsterklärend. Dies hat den Vorteil, dass weitere Behandlungselemente dem Paket einfach hinzugefügt werden können, ohne dass die Ausführung der Behandlungskette, das graphische Interface und die Speicherung sowie das Laden der XML-Dateien geändert werden müssen.

Jedes Behandlungselement kann separat ausgeführt werden. Das dürfte zu einem besserem Verständnis der Algorithmen beitragen. Die Transparenz und Nutzerfreundlichkeit des Systems wird weiterhin dadurch gefördert, dass jetzt nur noch die Parameter für die tatsächlich genutzten Behandlungselemente eingestellt werden müssen. Die standardisierte Form der Behandlungselemente vereinfacht die Pro-

grammierung weiterer Elemente. Die Möglichkeit ganze Behandlungsketten oder einzelne Phasen als XML-Datei zu speichern, erleichtert die Nachvollziehbarkeit von Szenarien und ermöglicht es, die waldbauliche Behandlung von Waldentwicklungstypen vorab zu definieren und diese Nutzern an die Hand zu geben.

In dem Beispiel konnte gezeigt werden, dass auch ein Waldumbau und anschließend die Bestandespflege gemäß eines Waldentwicklungstyps mit wenigen einfachen Einstellungen möglich ist. Allerdings hat sich in den Testläufen gezeigt, dass durch eine fehlerhafte Anordnung der Behandlungselemente manche Maßnahmen ausgeschaltet werden können. Werden zum Beispiel die Z-Bäume nur in einem sehr beschränkten Höhenintervall ausgewählt, kann es bei 5jährigen Simulationsschritten dazu kommen, dass dieser übersprungen wird, keine Z-Bäume gewählt und in den Durchforstungen freigestellt werden. Daher wäre es wünschenswert, wenn zukünftige Versionen die Behandlungsketten auf Plausibilität prüfen und korrigieren könnten. Im Augenblick stehen im *Silviculture* Paket insgesamt 19 Behandlungselemente zur Verfügung, welche sicherlich noch nicht jedes gewünschte Szenario abdecken.

Literatur:

- DUDA, H. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität in Göttingen. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 182 S.
- HANSEN, J.; NAGEL, J. (2014): Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS - Anwendung und theoretische Grundlagen. Beiträge aus der NW-FVA, Band 11, 224 S.
- JOHANN K. (1982): Der „A-Wert“ – ein objektiver Parameter zur Bestimmung der Freistellungsstärke von Zentralbäumen. Tagungsberichte der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten. pp. 146-158.
- LANDESTRIEB HESSENFORST (2016): Hessische Waldbaufibel, Kassel, 98S.
- ULLENBOOM, C. (2010): Java ist auch eine Insel Das umfassende Handbuch. Rheinwerk Computing, 1480S.
- WILHELM, G.J.; Letter, H.-A.; Eder, W. (1999): Konzeption einer naturnahen Erzeugung von Wertholz. Allgemeine Forst Zeitschrift/Der Wald, Nr. 5, S. 232 – 240.