

Bewässerung von Forstkulturen

Projektarbeit im Rahmen des Referendariats
im Forstamt Frankenberg



Abbildung 1: „Frankenberger Bewässerungsverfahren“ (Biederbick, 2020)

vorgelegt bei: Dr. Jörn Westphal (Regionalleiter Nord i. V.)
Dr. Markus Ziegeler (Forstamtsleiter Reinhardshagen)

von: David Biederbick (Forstreferendar Forstamt Frankenberg)

am: 16.06.2020

Inhalt

	Seite
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	IV
Anhangsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung/Anlass	1
2 Material und Methoden	2
2.1 Material	2
2.1.1 Standörtliche Grundlagen	2
2.1.2 Veränderung der Wachstumsbedingungen	2
2.1.3 Auswirkungen der Klimaveränderungen	3
2.2 Methoden	4
2.2.1 Definieren der Bewässerungsnotwendigkeit	4
2.2.2 Entwicklung verschiedener Bewässerungsverfahren.....	4
2.2.3 Kategorisieren von Kulturflächen	5
2.2.4 Wirksamkeit der Bewässerung, Außenaufnahme	5
2.2.5 Betriebswirtschaftliche Kalkulationen.....	6
2.2.5.1 Herleitung der IST-Kosten	6
2.2.5.2 Simulation einer Kulturfläche	6
3 Ergebnisse	6
3.1 Festlegen einer Bewässerungsnotwendigkeit.....	6
3.2 „Frankenberger-Bewässerungsverfahren“	7
3.3 Alternative Bewässerungsverfahren	8
3.4 Wasserbedarfsanalysen, Wasserspeicherkapazität	9
3.5 Wirtschaftlichkeit der Bewässerung.....	11
3.5.1 IST-Kosten der Bewässerung	11
3.5.2 Simulation der Kulturfläche.....	12
3.6 Erfolg der Bewässerung.....	13
4 Diskussion.....	14
4.1 Grundlegende Fragestellung	14
4.2 „Frankenberger Bewässerungsverfahren“	15
4.3 Physiologische Auswirkungen von Bewässerungen	15

4.4	Erfolg der Bewässerung.....	17
4.5	Alternativen zur Bewässerung.....	18
4.6	Wasserspeicherfähigkeiten	18
4.7	Ausblick.....	19
5	Zusammenfassung	20
	Literaturverzeichnis	v
	Eidesstattliche Erklärung.....	vii
	Anhang.....	viii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: „Frankenberger Bewässerungsverfahren“	1
Abbildung 2: Dürren in den Jahren 1952 bis 2019 in Deutschland	3
Abbildung 3: Entscheidungsbaum zur Bewässerungsnotwendigkeit.....	5
Abbildung 4: Technogramm "Frankenberger-Bewässerungsverfahren"	7
Abbildung 5: Temperaturanomalien der Jahre 1881-2018.....	viii
Abbildung 6: Niederschlagsanomalien der Jahre 1882 bis 2019	ix
Abbildung 7: Dürren in den Jahren 1952 bis 2019 in Deutschland	x
Abbildung 8: Legende zu Abbildung 7	x
Abbildung 9: Entscheidungsbaum zur Bewässerungsnotwendigkeit.....	xii
Abbildung 10: Kulturbarometer FA Frankenberger, Stand 04.06.2020.....	xiii
Abbildung 11: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren", Frontbehälter.....	xiv
Abbildung 12: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren", Heckbehälter mit Schlauchhaspeln, .	xiv
Abbildung 13: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren", Wasserlanze mit Durchflusszähler,....	xv
Abbildung 14: Tropfverfahren	xvi
Abbildung 15: Tropfverfahren	xvi
Abbildung 16: Wasserwerfer Wasserfass.....	xvi
Abbildung 17: Wasserkapsel-Versuch, Versuchsaufbau	xvii
Abbildung 19: Wasserkapsel-Versuch, Lagekarte	xviii
Abbildung 20: Holzpreisänderung, eigene Darstellung.....	xxi

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewässerungsnotwendigkeit anhand von Bodenfeuchtemessungen.....	6
Tabelle 2: Benötigtes Personal "Frankenberger-Bewässerungsverfahren"	8
Tabelle 3: Vergleich alternativer Bewässerungsverfahren	9
Tabelle 4: Wasserbedarfsanalyse.....	10
Tabelle 5: Kostensätze "Frankenberger-Bewässerungsverfahren" (netto).....	11
Tabelle 6: Benötigten Stunden nach Revieren, Bewässerungsversuch FA Frankenberg	11
Tabelle 7: angefallenen Kosten Bewässerungsversuch FA Frankenberg (netto)	12
Tabelle 8: Begründungskosten in Relation zum Bewässerungsintervall.....	13
Tabelle 9: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach Bewässerungsintervall	13
Tabelle 10: Messergebnisse der Bodenfeuchtemessung.....	14
Tabelle 11: Feuchtegrade von Nutzholz	xi
Tabelle 12: Holzfeuchten nach Baumarten	xi
Tabelle 13: Holzfeuchtemessungen im Forstamt Frankenberg	xi
Tabelle 14: Überlebenswahrscheinlichkeiten	xx
Tabelle 15: Überlebenswahrscheinlichkeiten nach Beinhofer.....	xx
Tabelle 16: Holzpreisentwicklung.....	xxii
Tabelle 17: Holzerntekostenentwicklung.....	xxii
Tabelle 18: Pflegekostenentwicklung.....	xxiii
Tabelle 19: Pflanzungskostenentwicklung	xxiii
Tabelle 20: Waldschutzkostenentwicklung.....	xxiv
Tabelle 21: Wegebaukostenentwicklung	xxiv
Tabelle 22: Verwaltungskostenentwicklung	xxv

Formelverzeichnis

Formel 1: Barwert.....	xix
Formel 2: Annuität	xix

Anhangsverzeichnis

	Seite
Grafiken DWD	viii
Temperaturanomalie.....	viii
Niederschlagsanomalie	ix
Dürremonitor	x
Holzfeuchten	xi
Richtwerte für Feuchtegrade	xi
Holzfeuchten nach Baumarten.....	xi
Holzfeuchtemessungen	xi
Entscheidungsbaum	xii
Kulturbarometer	xiii
Bilder	xiv
„Frankenberger Bewässerungsverfahren“	xiv
Alternative Bewässerungsverfahren	xvi
Wasserkapsel-Versuch	xvii
Versuchsaufbau	xvii
Lagekarte	xviii
Simulation einer Kulturfläche	xix
Herleitung der Zahlungsströme.....	xix
Investitionsrechnung.....	xix
Discounted Cash-Flow Modell.....	xix
Monte-Carlo Simulation	xx
Überlebenswahrscheinlichkeit der Baumarten.....	xx
Holzpreisentwicklung	xxi
Holzerntekostenentwicklung.....	xxii
Pflegekostenentwicklung	xxiii
Pflanzungskostenentwicklung	xxiii
Waldschutzkostenentwicklung.....	xxiv
Wegebaukostenentwicklung	xxiv
Verwaltungskostenentwicklung	xxv
Sonstige Kosten	xxv

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AB	ausscheidender Bestand
bspw.	beispielsweise
ca.	Zirka
d100	Durchmesser der 100 stärksten Bäume
DCF-Modell	Discounted Cash-Flow-Modell
Dg	Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes
DWD	Deutscher Wetterdienst
EK	Eigenkapital
etc.	et cetera
FA	Forstamt
Fa.	Firma
i	Kalkulationszinssatz (2 %)
Indw.	landwirtschaftlich
Louisd	Revierförsterei Louisendorf
min.	mindestens
n	Nutzungsdauer (100 Jahre)
nWSK	nutzbare Wasserspeicherkapazität
o. Ä.	oder Ähnliches
RCP	representative concentration pathway
s.	siehe
S.	Seite
Simulat.	Simulation
tlw.	teilweise
ÜW	Überlebenswahrscheinlichkeit
vgl.	vergleiche
Wangh.	Revierförsterei Wangershausen
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Einheiten

%	Prozent
€	Euro
a	Jahr
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Fm	Festmeter
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
L	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
ml	Milliliter
mm	Millimeter
N	Stück

Baumarten

Abkürzung	Beschreibung	botanischer Name
Bi	Birke	<i>Betula pendula</i>
Bu	Buche	<i>Fagus sylvatica</i>
Dgl	Douglasie	<i>Pseudotsuga mesnsiesii</i>
Lae	europäische Lärche	<i>Larxi decidua</i>
LB	Laubbäume	
NB	Nadelbäume	
Ta	Tanne	<i>Abies alba</i>

1 Einleitung/Anlass

Eine Veränderung des Klimas ist in Deutschland seit einigen Jahren messbar. Die Jahre 2018 und 2019 waren stellenweise die extremsten Jahre in Anbetracht der Abweichungen von Temperatur und Niederschlag zu langjährigen Mittelwerten. So gab es in vielen landwirtschaftlichen Betrieben aufgrund der Dürre Ertragsverluste. Auch in den Wäldern sind die Auswirkungen der Trockenperioden spürbar. Beginnend mit dem Sturmtief Friederike im Frühjahr 2018 und dem darauffolgenden Dürresommer herrschten optimale Bedingungen für eine Massenvermehrung von Borkenkäfern. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen negativen Faktoren, hat der Wald, auch in Nordhessen, stark gelitten. Die klimatische Wiederholung im Jahr 2019 war fatal und hat zum Teil noch nie dagewesenen Schäden hervorgerbracht. Neben der Vielzahl abgestorbener Bäume haben Preiseinbrüche und Absatzschwierigkeiten zu einem „worst case“ Szenario geführt. Viele Betriebe haben deshalb neben den naturalen Problemen auch mit finanziellen Schwierigkeiten zu kämpfen.

Der Wald deckt in Deutschland rund ein Drittel der terrestrischen Fläche ab - in Hessen sogar rund 40 %. Es wird große Anstrengungen benötigen, die zerstörten Waldflächen wiederzubewalden und einen klimastabilen Mischwald von Morgen zu etablieren. Das hessische Waldgesetz setzt hierfür eine Frist von sechs Jahren an (§ 7 (1) HWaldG). Deutschlandweit geben Experten (Stand Anfang 2020) Schätzungen ab, dass rund 600 Millionen Bäume gepflanzt werden müssten, um alle geschädigten Flächen wiederzubewalden. Allein in Hessen sind viele Millionen Bäume nötig. Dies benötigt neben finanziellen Mittel auch immense Arbeitskapazität.

Durch die anhaltende Trockenheit im April und Mai 2020 und den leeren Bodenwasserspeichern der Vorjahre, ist das Überleben vieler Jungbäumen aus der Frühjahrspflanzung in Gefahr. Bäume die im Frühjahr 2020 gepflanzt wurden, haben aufgrund der fehlenden Niederschläge keine Möglichkeit den umliegenden Boden mit ihren Wurzeln zu erschließen. Das teilweise flächige Absterben von Kulturen und die dadurch notwendigen Nachbesserungen, haben eine weitere Erhöhung des Arbeitsvolumens, steigende Preise auf dem Pflanzenmarkt und daraus resultierend eine zunehmende finanzielle Belastung zur Folge.

In der Landwirtschaft bildet die Bewässerung bei vielen Kulturen einen festen Bestandteil des Anbaukonzepts. Der sich in den vergangenen Jahren abzeichnende Wandel klimatischer Bedingungen erfordert auch in der Bewirtschaftung von Forstkulturen ein Umdenken. Kann eine Bewässerung zur Sicherung des Aufbaus klimaangepasster Waldbestände beitragen? Diese Frage hat sich auch das Forstamt Frankenberg gestellt. Selbstverständlich soll nicht die gesamte Waldfläche bewässert werden. Der Schwerpunkt liegt ausschließlich auf den Frühjahrskulturen des jeweiligen Jahres. Die Ausfälle der Kulturen sollen durch eine „Anschubbewässerung“ gemindert werden. Hierbei ist ein Verfahren, zusammen mit einem landwirtschaftlichen Lohnunternehmer, durch das Forstamt entwickelt worden. Versuchsweise konnten so rund 34 ha stammzahlarme Kulturen im Mai 2020 bewässert werden. Der Versuch wird im Rahmen dieser Projektarbeit näher erläutert. Aufgrund diverser weiterer Schäden (Rüsselkäfer etc.) zusätzlich zur Trockenheit, kann ein konkretes Ergebnis über den Erfolg der Bewässerung nur bedingt abgeleitet werden. Schwerpunkte dieser Arbeit sind daher die technische Betrachtung des Verfahrens, Analysen über die Bodenfeuchtigkeit und betriebswirtschaftliche Betrachtungen.

Diese Arbeit gilt als Prüfungsleistung zum Bestehen des Ausbildungsabschnitts „Projektarbeit“ im Rahmen des Forstreferendariats.

2 Material und Methoden

2.1 Material

2.1.1 Standörtliche Grundlagen

Das Forstamt Frankenberg erstreckt sich über eine Staatswaldfläche von knapp 14.700 ha. Es liegt überwiegend im Wuchsgebiet „nördliches hessisches Schiefergebirge“. Schwerpunkt bei den Ausgangssubstraten ist eine Mischung aus Tonschiefer und Grauwacke (tlw. mit Lösslehmauflage), vereinzelt sind Kieselschiefer und Quarzit anzutreffen. Der Geländewasserhaushalt kann größtenteils der Stufe mäßig frisch zugeordnet werden. Rund 3.000 ha sind in die Stufe frisch und 2.000 ha in die Stufe mäßig trocken zu kategorisieren (Stand 2011, heute z.T. vermutlich schlechter). Fast 100 % der Standorte sind mesotroph - nur wenige eutroph oder oligotroph. Mit jeweils gut einem Drittel sind die subatlantische Buchenzone und die subatlantische Buchen-Mischwaldzone vorzufinden. Knapp ein Viertel der Fläche ist der subkontinentalen Buchen-Mischwaldzone zuzuordnen.

Schwerpunkte der vergangenen Kalamitäten sind die Fichtenflächen. Insgesamt sind bei der Forsteinrichtung mit dem Stichtag 01.01.2011 rund 3.700 ha der Baumartengruppe Fichte zuzuordnen. Die Schwerpunkte der Fichtenbestände liegen hinsichtlich des Geländewasserhaushaltes im mäßig frischen und frischen Bereich, die sich in etwa gleichmäßig auf die im Forstamt anzutreffenden Wuchszonen aufteilen.

2.1.2 Veränderung der Wachstumsbedingungen

Seit einigen Jahren werden in Deutschland Veränderungen der klimatischen Bedingungen registriert. Die Jahre 2018 und 2019 zeigten jedoch Extreme auf, die es zuvor so noch nicht gegeben hat. Die im Anhang auf Seite viii f abgebildeten Grafiken verdeutlichen dies. Hierbei ist ersichtlich, welche Anomalien, besonders ab den 2000er Jahren, zu verzeichnen sind. Die Temperaturen liegen deutlich über dem langjährigen Mittel. Wird der Niederschlag der vergangenen Jahre verglichen, so ist eine geringere Anomalie festzustellen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Niederschlagsmenge z.T. konstant bleibt, sie jedoch häufiger außerhalb der Vegetationsperiode fallen und/oder als Starkregenereignisse auftreten. Somit ist ein Großteil des Niederschlags nicht pflanzenverfügbar. Immer häufiger sind auch Winde, die die Austrocknung des Bodens beschleunigen, messbar.

Neben der Forstwirtschaft hat auch die Landwirtschaft mit erheblichen Dürren zu kämpfen. Hierbei muss allerdings die unterschiedliche Morphologie der Pflanzen betrachtet werden. Bäume wurzeln oftmals über einen Meter tief. Auch die Fichte als klassischer Flachwurzler erschließt den Boden in Tiefen unterhalb von 25 cm. In der Landwirtschaft wurzeln die wenigsten Pflanzen bei den gängigen Bewirtschaftungssystemen tiefer als 25 cm. Nahezu alle Pflanzen erschließen lediglich den Oberboden. Dieser kann schon durch geringe Niederschlagsmengen feucht gehalten werden. Somit musste die Landwirtschaft in Waldeck-Frankenberg im Jahr 2019 gar keine oder nur wenige Ertragseinbußen verzeichnen (Vollbracht, 2020). Der Wald hingegen hat im vergangenen Jahr stark unter der Trockenheit gelitten. Die Niederschlagsmengen der Sommermonate konnten nicht in tiefere Bodenschichten eindringen.

Neben Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) kann auch auf diverse andere Wetter- und Klimadaten zugegriffen werden. Eine Möglichkeit bietet das *Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*. Dieses bietet unter anderem den sogenannten Dürremonitor an, der auf verschiedenen Datengrundlagen betrachtet werden kann. So können täglich Informationen über den Bodenfeuchtezustand abgerufen werden. Abbildung 2 (S. 3) zeigt Dürren innerhalb der Vegetationsperiode im Gesamtboden in den Jahren 1952 bis 2019. Erkennbar ist, dass es in der Vergangenheit immer wieder

zu Dürrejahren gekommen ist, die allerdings häufig regional begrenzt waren. Hier fand zudem ein Ausgleich durch höhere Niederschlagsmengen und niedrigeren Temperaturen in den darauffolgenden Jahren statt. Die Jahre 2017, 2018 und 2019 zeigen eine ansteigende Triade von Dürren, die es in den letzten 68 Jahren in Deutschland nicht gegeben hat (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, 2020).

Seit einigen Jahren sorgt der Klimawandel auch medial für eine große Aufmerksamkeit. Viele Klimaforscher beteiligen sich an der Diskussion, welche Ursachen, Auswirkungen und Gegenmaßnahmen möglich sind. In dieser Arbeit wird dies nicht näher betrachtet. Der Schwerpunkt liegt auf den messbaren Anomalien und den daraus resultierenden Folgen für den Wald.

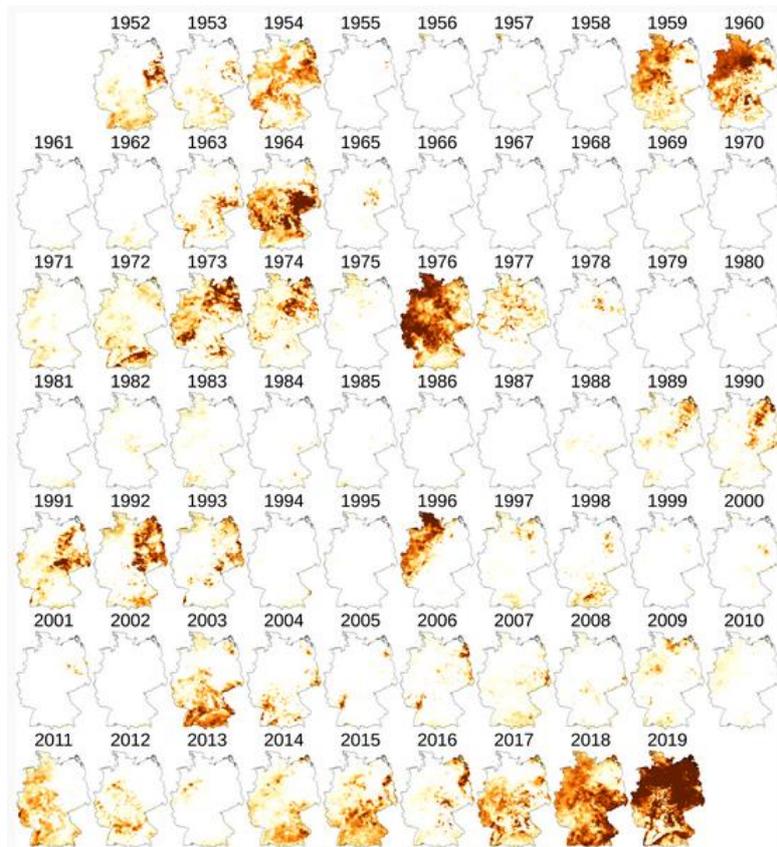


Abbildung 2: Dürren in den Jahren 1952 bis 2019 in Deutschland, Legende Anhang Seite x, (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, 2020)

2.1.3 Auswirkungen der Klimaveränderungen

Extremwetterjahre wie 2018 und 2019 hinterlassen unmittelbare Folgen für den Wald. Der Borkenkäfer hat im hessischen Staatswald viele tausend Hektar Fichtenbestände absterben lassen. Auch private und kommunale Forstbetriebe in Regionen mit hohen Fichtenanteilen sind betroffen. Im Forstamt Frankenberg wurden in den vergangenen zwei Jahren und im aktuellen Kalenderjahr rund 400.000 Fm Schadholz geerntet (Stand 02.06.2020, alle betreuten Betriebe). Davon ist ein Großteil auf Schäden durch rindenbrütende Käfer zurückzuführen. Wird ausschließlich der Staatswald betrachtet ist eine Schadholzmenge von 275.000 Fm zu verzeichnen. Davon entfallen rund 75 % auf die Baumartgruppe Fichte. Aus dem geernteten Holz und den noch stehenden toten Beständen ergibt sich eine schwer abzuschätzende Größe von Schadflächen. Für den Staatswald des Forstamtes Frankenberg kann eine Fläche von über 1.000 ha angenommen werden. Diese Fläche gilt es mit klimastabilen Baumarten wiederzubewalden. Eine Ermittlung der Schadflächengröße über Satellitenbilder brachte für das Forstamt Frankenberg keine nutzbaren Daten.

Doch nicht nur Fichtenbestände sind gefährdet. Auch viele andere Baumarten leiden unter dem Trockenstress. Im Frühjahr 2020 wurden Holzfeuchtemessungen im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Konzeptes zur Bekämpfung der Borkenkäferkalamität für das Forstamt Frankenberg durchgeführt. Hierbei sind Holzfeuchten im Splint von knapp 40 % bis rund 100 % gemessen worden. Eichen und Buchen wiesen dabei die höchsten Holzfeuchten mit knapp 100 % (Ei) und 75 % (Bu) auf. Bei allen Nadelbaumarten zeigen die Messungen Holzfeuchten von 40 % bis 45 %. Hierdurch ist ersichtlich, welchem Trockenheitsstress die Bäume schon zu Beginn des Jahres 2020 ausgesetzt sind (vgl. Anhang S. xi Tabelle 13). Die Holzfeuchten müssten im Normalzustand zum Teil deutlich über 100 % betragen. Ein Vergleich zu normalen Holzfeuchten ist in den Tabellen 11 und 12 auf Seite xi im Anhang zu finden.

Zusammenfassend ist schon jetzt eine deutliche Veränderung des Klimas in Deutschland messbar. Die Folgen sind vielerorts sowohl aus betriebswirtschaftlicher Sicht, als auch aus natürlicher Sicht verheerend. Aufgabe der Forstwirtschaft ist es, die Baumartenzusammensetzung und die Behandlungskonzepte auf die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Somit muss die zu bewältigende „Herkulesaufgabe“, die entstandenen Freiflächen wiederzubewalden, als Chance angesehen werden, eine Änderung in der Baumartenzusammensetzung zu erreichen.

2.2 Methoden

2.2.1 Definieren der Bewässerungsnotwendigkeit

Die beschriebenen Klimaveränderungen sorgen für Probleme bei der Wiederbewaldung. Ziel ist es, möglichst viele Schadflächen in einem bestimmten Zeitrahmen zu bepflanzen. Die Bewässerung der frisch gepflanzten Bäume stellt eine Möglichkeit dar, die Bäume vor der Austrocknung zu schützen. Dabei gilt es nicht die jungen Bäume über einen gewissen Zeitraum (> 1 Jahr) zu bewässern, sondern ausschließlich den Anwuchs zu ermöglichen. Im Weiteren wird dies auch als „Anschubbewässerung“ betitelt.

Niederschläge und Temperaturen differieren jedes Jahr. Belastbare Langzeitvorhersagen durch Klimainstitute fehlen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Grenzwert für eine Bewässerungsnotwendigkeit abgeleitet. Das bedeutet, wenn ein zuvor definierter Schwellenwert bzw. die definierte Bezugsgröße nicht erreicht wird, muss bewässert werden. Andernfalls wird eine Bewässerung als nicht notwendig angesehen.

2.2.2 Entwicklung verschiedener Bewässerungsverfahren

Die Entwicklung verschiedener Verfahren erfolgt in Kooperation mit einem landwirtschaftlichen Lohnunternehmer, bei dem zum Teil schon Erfahrungen im Zusammenhang mit Bewässerungen vorliegen. In der Landwirtschaft wird schon viele Jahre bewässert. Dadurch sind Materialien und Erfahrungen aus diesem Sektor vorhanden.

Landwirtschaftliche Bewässerungssysteme können allerdings nicht unverändert in der Forstwirtschaft angewendet werden. Die bedingte Befahrbarkeit und die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit führen zwingendermaßen zu Anpassungen. Die technische Umsetzung der entwickelten Ideen obliegt dem Lohnunternehmer - das Forstamt trifft die Flächenauswahl. Zudem sorgt das Forstamt für Rechtssicherheit bzgl. der Wasserentnahme. Es liegt eine Absprache zur Oberflächenentnahme von Wasser aus Schöningsteichen zu Versuchszwecken der Oberen Wasserbehörde in Kassel vor. Auch eine Genehmigung zur Wasserentnahme über das Versuchsstadium hinaus ist möglich. Die Verwendung von Trinkwasser wird ausgeschlossen.

Bei Praxisversuchen wurden Flächen in mehreren Revierförstereien versuchsweise bewässert. Dabei konnten Verfahrensmängel behoben und weitere Optimierungen vorgenommen werden, sodass das System mittlerweile praxistauglich ist.

2.2.3 Kategorisieren von Kulturflächen

Analog zur Wiederbewaldung muss auch bei der Bewässerung differenziert vorgegangen werden. Viele Flächen können aus technischer Sicht oder aus Kostengründen nicht bewässert werden. Je nach Relief oder Pflanzverband muss das Bewässerungsverfahren angepasst werden. Anhand der geernteten Festmeter Schadholz kann eine (näherungsweise) Rückrechnung¹ auf die Kalamitätsflächengröße vollzogen werden. Zusätzlich kommen die Flächen mit stehendem Totholz hinzu. Somit müssen im Staatswald des Forstamts Frankenberg Flächen von über 1.000 ha Größe wiederbewaldet werden. In diesem Frühjahr wurden 50 ha bepflanzt (vgl. Kulturbarometer Anhang S. xiii Stand 04.06.2020). Die Entscheidung über eine Bewässerung erfolgt analog dem nachgeführten Entscheidungsbaums (Abbildung 3). Eine flächige Bewässerung wird derzeit nicht praktiziert.

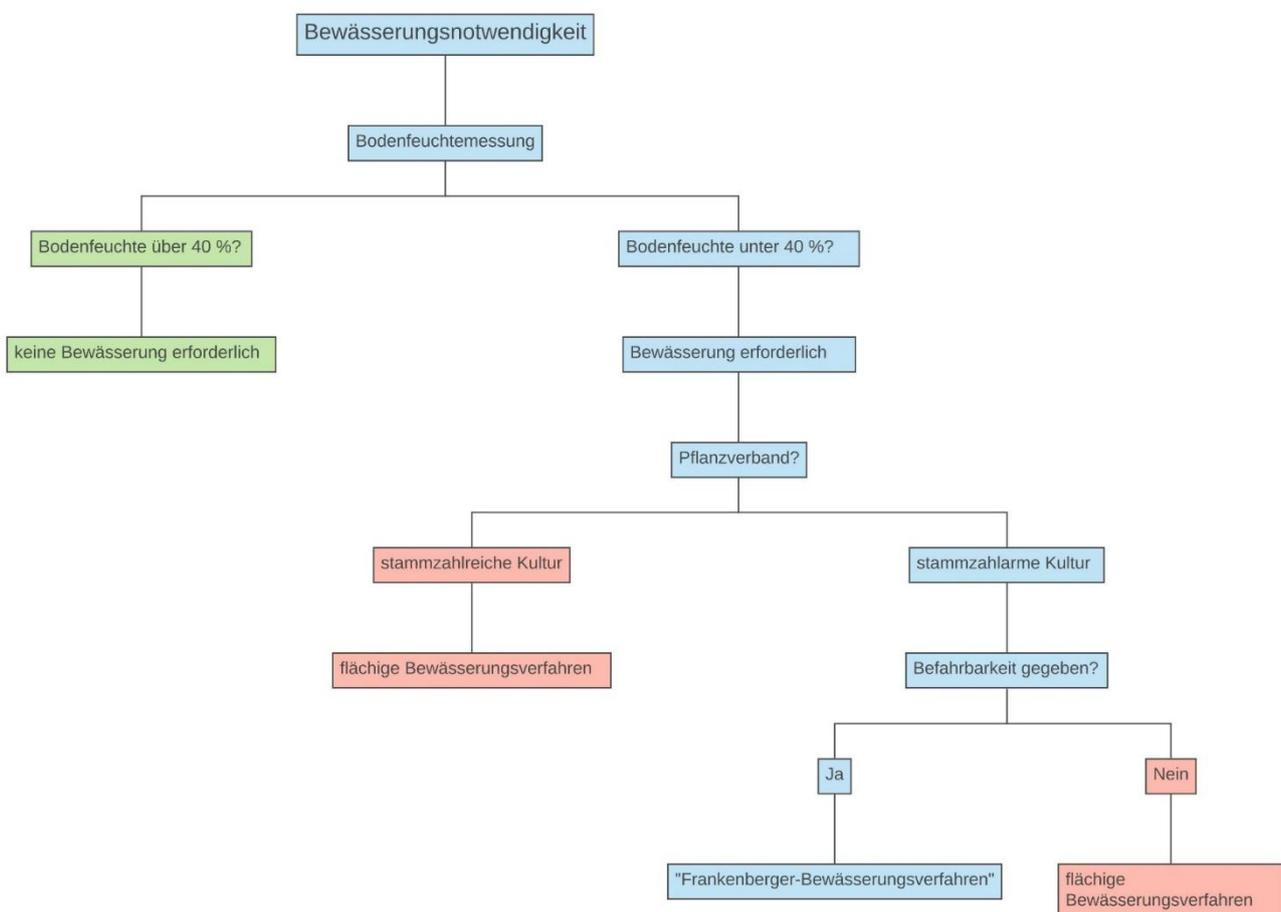


Abbildung 3: Entscheidungsbaum zur Bewässerungsnotwendigkeit, vergrößert s. Anhang S. xii (Biederbick, 2020)

2.2.4 Wirksamkeit der Bewässerung, Außenaufnahme

Wichtig sind neben Untersuchungen der Praxistauglichkeit der Verfahren, auch die Betrachtung ihrer Wirksamkeit. Auf jeder Versuchsfläche wurde ein Teil der Pflanzen nicht bewässert, um so eine Aussage über die Wirksamkeit der Bewässerung treffen zu können. Die Anzahl der Pflanzen, die nicht bewässert wurden, variiert zwischen den Flächen. Sie ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig

¹ Basierend auf Durchschnittsvorrat Baumart Fichte; abzüglich Anteile von Naturverjüngungs-, Sukzessions- und Kleinstflächen

gemacht worden. Auf der Fläche wird ca. 2-4 Wochen nach der Bewässerung eine Stichprobenaufnahme gemacht. Es werden die abgestorbenen Pflanzen auf der bewässerten Fläche als auch auf der unbewässerten Fläche erhoben. Zusätzlich werden weitere Schäden, wie bspw. Rüsselkäferfraß, erfasst. Pflanzen, die vor der Bewässerung bereits abgestorben waren, wurden bei Versuchsanlage gekennzeichnet.

2.2.5 Betriebswirtschaftliche Kalkulationen

2.2.5.1 Herleitung der IST-Kosten

Die betriebswirtschaftlichen Kalkulationen beruhen im ersten Schritt auf der Erfassung von IST-Daten (Zeitstudie). Hierbei zeichnete der Schlepperfahrer alle anfallenden Stunden auf und ordnete sie der jeweiligen Tätigkeit zu. Die Aufnahme wurde für jede Kulturfläche separat durchgeführt. So konnten die benötigten Stunden mit Kostensätzen verrechnet werden, um damit die Gesamtkosten der Maßnahme, als auch die Kosten je Hektar zu ermitteln. Im zweiten Schritt wurde eine Simulation einer fiktiven Kulturfläche vollzogen, welche im folgenden Kapitel erläutert wird.

2.2.5.2 Simulation einer Kulturfläche

Im Rahmen dieser Projektarbeit wird eine ausführliche Simulation eines fiktiven Bestandes für ein hundertjähriges Zeitfenster durchgeführt. Dadurch können die differenzierten Kosten (Bewässerung, keine Bewässerung), welche bei der Wiederbewaldung anfallen verglichen werden. Ebenso ist eine Beurteilung der zu erwartenden Erträge möglich. Die detaillierte Erläuterung der Simulation ist dem Anhang auf Seite xix ff zu entnehmen.

3 Ergebnisse

3.1 Festlegen einer Bewässerungsnotwendigkeit

Die Festlegung einer Bewässerungsnotwendigkeit wird auf der Grundlage der Empfehlungen des Thünen-Institutes durchgeführt. Sie orientiert sich an dem Bodenfeuchtegehalt. Sobald ein Bodenfeuchtegehalt von 40 % unterschritten wird und kein ausreichender Niederschlag innerhalb der nächsten Tage zu erwarten ist, wird die Bewässerung erforderlich. Es ist damit zu rechnen, dass der Bodenfeuchtegehalt weiter absinken und somit das Absterben einzelner Individuen wahrscheinlich wird.

Die Bodenfeuchte wird für diese Projektarbeit mit dem Trocknungsverfahren gemessen. Dieses Verfahren bietet eine kostengünstige Alternative zu Messgeräten. Zukünftig soll jedoch eine Messung mit einem Tensiometer durchgeführt werden. Dies stellt für die Revierleiter eine praxisnahe Möglichkeit dar, Bodenfeuchtigkeiten zu messen, um damit die Subjektivität der Bewässerungsnotwendigkeit möglichst zu minimieren.

Tabelle 1: Bewässerungsnotwendigkeit anhand von Bodenfeuchtemessungen (Sanders, 2020)

Bodenfeuchte	Auswirkung auf die Pflanze	Bewässerungsnotwendigkeit
> 40 %	keine	Nein
20 bis 39 %	positiv auf Pflanzenwachstum	Ja
< 20 %	positiv auf Überlebenswahrscheinlichkeit	Ja

Neben der Beurteilung der Bewässerungsnotwendigkeit anhand der Bodenfeuchte, muss gleichermaßen die Flächenbeschaffenheit betrachtet werden. Nicht jede Fläche eignet sich für eine Bewässe-

rung, obwohl sie eine Bewässerungsnotwendigkeit aufweist. Dies kann durch diverse Faktoren, wie Befahrbarkeit als auch durch den Pflanzverband gegeben sein. Eine Hilfestellung für die Praxis bietet wiederum der Entscheidungsbaum (Abbildung 3, S. 5).

3.2 „Frankenberger-Bewässerungsverfahren“

Im FA Frankenberger konnte ein teilmechanisiertes Bewässerungsverfahren entwickelt werden. Der grundsätzliche Ablauf ist dem Technogramm (Abbildung 4) zu entnehmen. Es besteht aus einem Wassertransport-LKW, einem landwirtschaftlichen Schlepper und Forstpersonal (Unternehmer oder eigenes Personal). Der Wassertransport-LKW liefert 28.000 Liter Wasser von der Wasserentnahmestelle (Schönungsteich Kläranlage Frankenberger) bis zur Waldstraße. Von dort aus wird das Wasser mittels Schläuchen in die Behälter des Schleppers gefüllt. Der Schlepper besitzt vier Behälter mit je 1.000 Liter Fassungsvermögen. Zusätzlich ist der Schlepper mit Forstbereifung ausgestattet. Dennoch ist die Befahrbarkeit von Rückegassen nicht wie mit einem Forstspezialschlepper gegeben. Das Wasser wird mittels zapfwellengetriebener Pumpe in zwei ½ Zoll Schläuche (jeweils 30 m Länge) gepumpt, die auf Schlauchhaspeln laufen. Die Schlauchhaspeln sind mit einem Federzug ausgestattet, der ein automatisches Einziehen der Schläuche ermöglicht. Am Schlauchende befinden sich Durchlaufzähler, Absperrventil und eine Wasserlanze. Eine Veranschaulichung des Verfahrens kann durch die Bilder im Anhang S. xiv f. **Das beschriebene System befindet sich in der Patentanmeldung, daher wird um Vertraulichkeit bis zum Abschluss des Anmeldeverfahrens gebeten.**

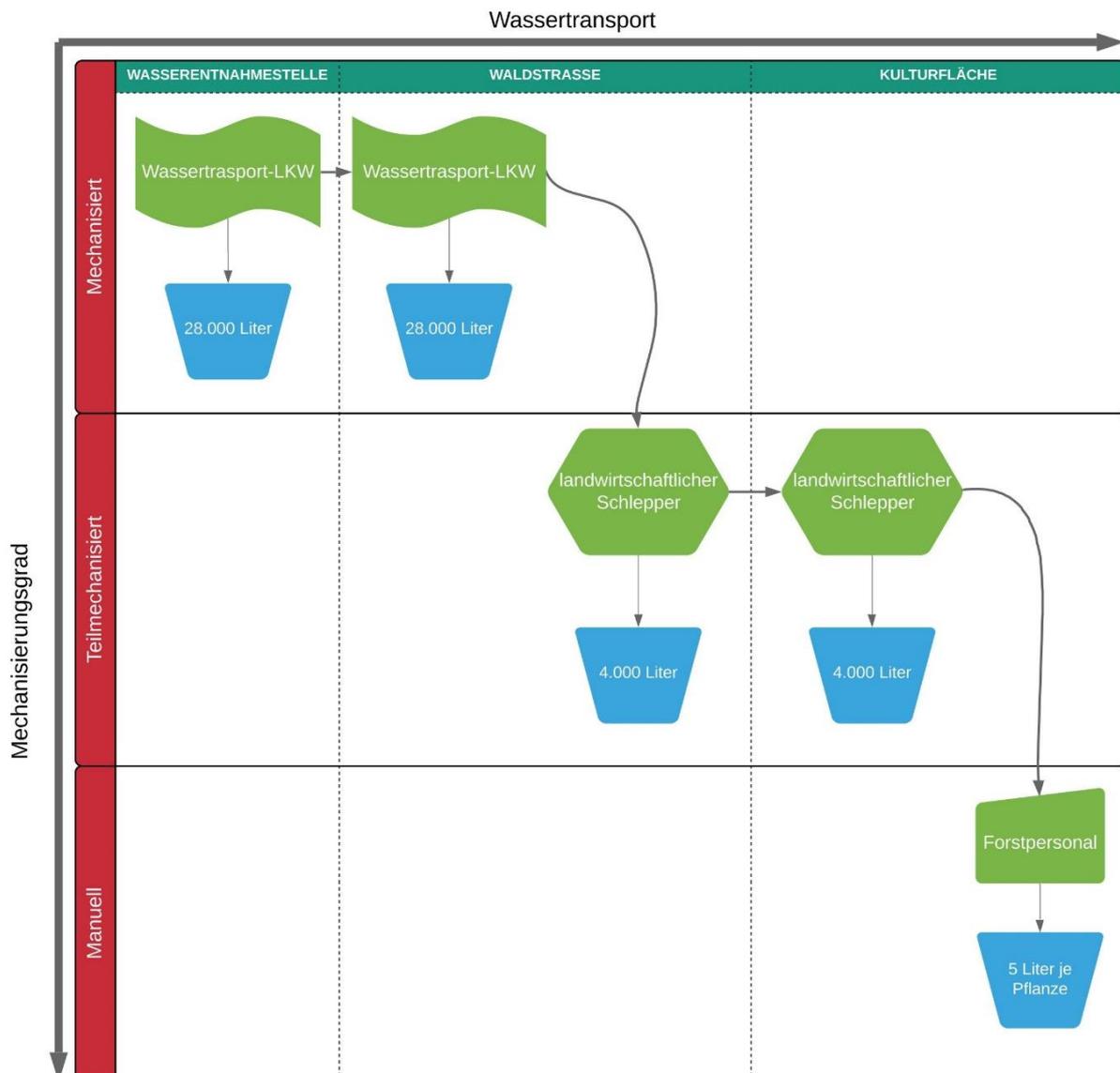


Abbildung 4: Technogramm "Frankenberger-Bewässerungsverfahren" (Biederbick, 2020)

Das Wasser wird aus dem Schönungsteich der Kläranlage Frankenberg entnommen. Ein Schönungsteich gilt als die vierte Filterstufe in Kläranlagen. Es ist also die unmittelbare Vorstufe vor dem Zufluss in ein Gewässer. Das Wasser befindet sich in einer Reinigungsstufe, bei der ein Großteil aller Schmutzpartikel bereits entfernt werden konnten. Somit findet kein zusätzlicher Nährstoffeintrag auf die Kulturflächen statt. Eine Düngung des Waldbodens ist daher nicht gegeben (Kaub & Biebersdorf, 2014). Eine Absprache mit der Oberen Wasserbehörde wurde getroffen.

Der landwirtschaftliche Schlepper transportiert das Bewässerungswasser auf die Kulturfläche. Dabei muss, auch bei komplett erschlossenen Kulturen (Arbeitsfeldbreite 20 m), nicht jede Gasse befahren werden. Mit diesem System kann eine Breite von 60 m bearbeitet werden. An jeder Pflanze wird die Wasserlanze in einem Abstand von ca. 10-15 cm neben der Pflanze in den Boden gestochen - bei Hanglagen auf der Hangoberseite. Es werden fünf Liter Wasser in einem Zeitraum von ca. 20 Sekunden in den Boden gegeben. Der abgegebene Wasserdruck wird bei Gefahr einer Ausspülung entsprechend angepasst.

Zur Betankung muss der Schlepper lediglich zum Wassertransport-LKW fahren. Das Befüllen der Tanks dauert je nach Wasserdruck zwischen 8 und 20 Minuten. Der LKW muss dabei nicht mit einem zusätzlichen Fahrer besetzt sein. Das benötigte Personal wird in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Benötigtes Personal "Frankenberger-Bewässerungsverfahren"

Art	Benötigtes Personal
Wassertransport-LKW	1 Fahrer, 1 „Abholer“ (nur zeitweise, ca. 20 % der Schlepperfahrer-Stunden)
landwirtschaftlicher Schlepper	1 Fahrer
Wasserlanzen	2 Personen

Eine Veranschaulichung des Verfahrens ist auf den Bildern im Anhang (S. xiv f) zu erkennen. Es ist anzumerken, dass es sich bei der Bauvariante um ein System handelt, bei dem durch weiteren Erfahrungsgewinn Veränderungen und Optimierungen vorgenommen wurden, sodass ein praxistaugliches System entwickelt wurde, welches bei Bedarf weiter angepasst werden kann.

3.3 Alternative Bewässerungsverfahren

Das „Frankenberger Bewässerungsverfahren“ stellt ein mögliches Verfahren zur Pflanzenbewässerung dar. Es wurde ausschließlich auf stammzahlarmen Kulturen (primär Douglasie) getestet und ist nach aktuellem Stand, nicht für stammzahlreiche Kulturen (z. B. Eiche) geeignet.

Dennoch wurden vor Beginn des Versuches weitere Verfahren analysiert. Eine Auflistung der Verfahren, sowie ihre Vor- und Nachteile sind Tabelle 3 zu entnehmen. Dazugehörige Bilder zur Veranschaulichung sind im Anhang (S. xvi) zu finden. Grundsätzlich ist das Ziel des Forstamtes, ein praxistaugliches Bewässerungsverfahren zu entwickeln und zu testen. Daher wurde der Versuch auf ein Verfahren beschränkt, um so eine möglichst gute Datengrundlage und Praxisreife zu erhalten. Die Vergleichsverfahren stellen mögliche Alternativen für das Forstamt Frankenberg dar. Je nach Flächenausstattung eines Forstamtes können die Vor- und Nachteile der Varianten variieren und ggf. ein anderes Verfahren als Arbeitsbestverfahren angesehen werden.

Der Grundgedanke bei der Entwicklung des „Frankenberger-Bewässerungsverfahrens“ ist es, eine möglichst große Fläche mit einer geringen Wassermenge bei vertretbaren Kosten zu bewässern.

Tabelle 3: Vergleich alternativer Bewässerungsverfahren

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Teilstationäres Beregnungssystem	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Wassercontainern, Inhalt 28 m³ oder 42 m³, inkl. Pumpe • Verlegen von Schlauchleitungen • Aufbau von Wassersprinklern (r= 20 m) 	<ul style="list-style-type: none"> • für alle Pflanzverbände geeignet • Ausbringungszeitfenster variabel (Ausbringung über Nacht möglich) 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Investitionskosten • hoher Wasserbedarf • Bewässerung von Begleitvegetation • Keine Bewässerung von Kleinstflächen → hohe Rüstzeiten
Wasserwerfer Wasserfass	<ul style="list-style-type: none"> • Montage von einem Wasserwerfer an landw. Güllefass, Inhalt 17,5 m³ • hydraulisch verstellbar • Wasserabgabe von Hauptweg oder Maschinenweg • Wurfweite von bis zu 60 m 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Personalaufwand • niedrige Investitionskosten • für alle Pflanzverbände geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wasserbedarf • nur wenige Flächen bewässerbar • Gefahr durch Erosion, hoher Druck, Umdrücken der Pflanzen • Bewässerung von Begleitvegetation
Schleppschläuche an Forwarder	<ul style="list-style-type: none"> • Montage von einem Wasserfass auf Rungenkorb von Forwarder • Wasserabgabe mittels Schleppschläuche über den Pflanzreihen 	<ul style="list-style-type: none"> • gute Befahrbarkeit durch Forstspezialmaschine • geringer Personalaufwand • mäßiger Wasserbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • keine exakte Bewässerung möglich, da Pflanzreihen nicht zwingend parallel zur Gasse • evtl. Auslassen von Pflanzen
Wasserausbringung mit Eimern und Gießkannen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbringung von Wasser mit ehrenamtlichen Helfern • Aufstellen von Wasserentnahmestellen mittels Fässern 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr geringe bis keine Personalkosten • hohe Flächenerreichbarkeit • geringer Wasserbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • zeitlich unflexibel • hoher Organisationsaufwand • nur wenige Flächen bearbeitbar • starke Abhängigkeit von externen Personen, dadurch keine Verlässlichkeit
Tropfverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbringen von „Tropfgestängen“ • Verlegen eines Tropfschlauches in den Standraum der Pflanze 	<ul style="list-style-type: none"> • gute Wasseraufnahme des Bodens • geringer Wasserbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Personalbedarf • ästhetisch abschreckend • hohe Investitionskosten

3.4 Wasserbedarfsanalysen, Wasserspeicherkapazität

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewässerung ist die Wassermenge, welche der Pflanze zugeführt wird, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die Systemkosten hat. Durch eine Verminderung oder Erhöhung der Wassermenge verändern sich die Transport- und Personalkosten in einem erheblichen Umfang. Daher ist es wichtig, Daten zu erhalten, die einen Annäherungswert einer Idealwassermenge geben. Hierbei wird ebenfalls auf Untersuchungsergebnisse des Thünen-Instituts zurückgegriffen. Demnach verdunsten Jungpflanzen 5 Gramm Wasser pro Tag. Dies bedeutet, dass eine Pflanze in einem Monat min. 0,15 Liter Wasser benötigt, um ihre Gesamtverdunstung aufrecht zu erhalten. (Sanders, 2020)

Ferner muss jedoch beachtet werden, dass jeder Boden unterschiedlich viel Wasser speichern kann und auch die Pflanzenverfügbarkeit zwischen den Bodenarten differiert. Einen Anhaltswert bietet die nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK). Diese wird in Liter je Kubikmeter Boden angegeben. Ein

Großteil der Forstamtsstandorte befindet sich in der Geländewasserhaushaltsstufe mäßig frisch. Hier liegt eine nWSK von 61 bis 90 Litern vor. Im Mittel also rund 75 Liter je Kubikmeter Boden.

Tabelle 4 zeigt eine Herleitung von der nWSK zur Wasserbedarfsdeckung durch den Boden für die Pflanze. Dies ist als eine theoretische Beispielrechnung anzusehen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass vorhandene Begleitvegetation und die Evaporation auf demselben Standraum auch Wasser verdunsten lassen. Zudem hat in den letzten Jahren keine vollständige Wassersättigung des Bodens stattgefunden - das Gegenteil ist häufig der Fall. Viele Standorte gehen mit einem erheblichen Niederschlagsdefizit in die Vegetationsperiode. Dennoch lässt die Beispielsrechnung erkennen, dass die Böden in der Lage sind, genug Wasser zu speichern, um Pflanzen Dürreperioden überstehen zu lassen. Somit müssen niederschlagsarme Perioden zwingend durch niederschlagsreiche Zeiten ausgeglichen werden. Geschieht dies nicht, wie in den Jahren 2018 und 2019, ist nicht mehr genug pflanzenverfügbares Wasser im Boden vorhanden.

Tabelle 4: Wasserbedarfsanalyse

nWSK je m ³	75 Liter
Standraum Jungpflanze	0,04 m ² (0,20 m x 0,20 m)
Standraumvolumen	0,008 m ³ (Tiefe 0,20 m)
nWSK im erschlossenen Standraum	0,6 Liter
Reduktionsfaktor Begleitvegetation	30 %
Reduktionsfaktor Evaporation	20 %
Wasserbedarf Pflanze	0,005 Liter je Tag (entspricht 5 Gramm je Tag)
Wasserbedarfsdeckung durch Standraum bei 100 % Wassersättigung des Bodens	ca. 60 Tage

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, kommen Niederschläge oftmals außerhalb der Vegetationsperiode und als Starkregenereignisse. Daher sind Überlegungen angestrebt worden, das Wasserspeichervermögen des Bodens künstlich zu verbessern. Hierfür konnte eine Wasserkapsel als mögliches Mittel gefunden werden.

Die Wasserkapsel hat eine Länge von gut 20 mm und eine Breite von knapp 10 mm. Ihre Hülle besteht aus Zellulose. Im Kern befindet sich ein Gramm vom sogenannten Hydrogel. Beide Bestandteile sind biologisch abbaubar und aus dieser Sicht bedenkenlos im Wald einsetzbar. Hydrogel stammt aus dem biomedizinischen Bereich. Bekannte Beispiele sind weiche Kontaktlinsen oder Gel zur Wundbehandlung (Protz, 2016). Die Wasserkapsel soll im Waldboden eine Wassermenge von 140 Milliliter Wasser speichern können. Um dies tun zu können, muss sich zuerst die Zellulose-Hülle abbauen, was in etwa 24 Stunden geschieht. Anschließend öffnet sich die Kapsel, sobald der Boden wassergesättigt ist. In Abhängigkeit vom Bodensalzgehalt dauert dies etwa 180 Minuten. Das Wasser selbst kann schon nach ca. 60 Minuten an den Boden wieder abgegeben werden. (John, 2020)

Zur Ermittlung hinsichtlich der Wirksamkeit von Wasserkapseln gibt es bislang wenige Versuche. Daher wurden im Rahmen dieses Bewässerungsversuchs, auch ein Versuch mit Wasserkapseln angelegt. Der Versuchsaufbau, und die Lagekarte sind dem Anhang (S. xvii) zu entnehmen. Ergebnisse können zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht gegeben werden.

3.5 Wirtschaftlichkeit der Bewässerung

3.5.1 IST-Kosten der Bewässerung

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit werden zwei verschiedene Ansätze betrachtet. Zuerst werden die Daten der Zeitstudie des Bewässerungsversuches ausgewertet. Innerhalb von drei Wochen konnten rund 34 ha bewässert werden. Hierbei wurden Aufzeichnungen der angefallenen Stunden vom Schlepperfahrer, dem Wassertransport mit LKW, Befüllen der Tanks am Schlepper und der Bewässerer abteilungsweise ausgewertet. Anhand der Stundenzahl und der Flächengröße der bewässerten Kulturfläche werden die IST-Kosten errechnet. Die Kostensätze aus Tabelle 5 wurden bei der Kostenberechnung zu Grunde gelegt. Da ein Wassercontainer für die ersten Versuche im Wald platziert worden ist, müssen zum Teil Mietkosten miteingerechnet werden. Im zukünftig angestrebten Verfahren findet der Wassercontainer keine Anwendung.

Tabelle 5: Kostensätze "Frankenberger-Bewässerungsverfahren" (netto)

Kosten Schlepper inkl. Fahrer	95,00 €/h
Kosten LKW inkl. Fahrer	85,00 €/h
Kosten Bewässerer	19,80 €/h
Kosten Container	13,00 €/Tag
Investitionskosten	9.000,00 €

Um ein praxistaugliches Verfahren entwickeln zu können, mussten Investitionen durch den Lohnunternehmer getätigt werden. Diese werden mit 9.000 € veranschlagt. Das System wird auf fünf Jahre abgeschrieben.

Tabelle 6 zeigt die benötigten Stunden für den Bewässerungsversuch. Das Revier Rodenbach darf nur bedingt betrachtet werden, da hier der Erstversuch gestartet wurde, wodurch vergleichsweise viele Stunden anfallen. Zudem fand die Bewässerung mit Absolventen eines Freiwilligen Sozialen Jahres statt. Im Anschluss wurde auf Mitarbeiter eines Baumschulbetriebes gewechselt. Die Reviere 460, 462 und 470 werden durch die gemeinsame Zeiterfassung durch den Unternehmer zusammen dargestellt. Im Durchschnitt kann beim laufenden System eine Flächenleistung von 2 ha am Tag veranschlagt werden. Wichtig für eine optimale Auslastung ist die Flächenauswahl durch das Forstpersonal.

Tabelle 6: Benötigten Stunden nach Revieren, Bewässerungsversuch FA Frankenberg

Revier	Summe Stunden Bewässerer [h]	Summe Stunden Schlepper [h]	Summe Stunden LKW [h]	Bewässerte Fläche [ha]
Rodenbach (463)	17,5	8,8	2,6	1,50
Hatzfeld (470)	95,5	47,7	16,7	10,56
Bromskirchen (465)	84,3	42,2	8,2	11,03
Louisd. (460), Wangh. (462), /Dodenau (467)	64,3	32,2	8,5	11,00
Gesamt	261,6	130,9	36	34,09

Nachstehender Tabelle 7 sind die tatsächlich angefallenen Kosten zu entnehmen. Sie werden aus den Kostensätzen (Tabelle 5) und den benötigten Stunden (Tabelle 6) errechnet. Es sind Gesamtkosten in Höhe von knapp 23.000 € angefallen. Auf einen Hektar bezogen sind dies, inklusive der Investitionen, 664,73€/ha (Flächenumfang 34,09 ha). Kosten für Verwaltung etc. sind in dieser Kalkulation nicht mitinbegriffen.

Tabelle 7: angefallenen Kosten Bewässerungsversuch FA Frankenberg (netto)

Revier	Kosten Bewässerer	Kosten Schlep- per	Kosten LKW	Kosten Contai- ner	Gesamtkosten	Kosten je ha
463	346,50 €	831,25 €	219,30 €	26,00 €	1.425,05 €	950,03 €
470	1.890,50 €	4.535,30 €	1.422,05 €	65,00 €	7.917,85 €	749,80 €
465	1.669,14 €	4.004,25 €	694,45 €	91,00 €	6.465,84 €	586,20 €
460, 462, 467	1.273,93 €	3.056,15 €	721,65 €	- €	5.051,73 €	459,25 €
				Investitionskosten/a	1.800,00 €	52,80 €
				Gesamtkosten (inkl. Investitionen)	22.660,48 €	664,73 €
				Investitionskosten	9.000,00 €	
				Abschreibungszeitraum [a]	5	

3.5.2 Simulation der Kulturfläche

Im zweiten Schritt erfolgt eine Waldwachstumssimulation einer fiktiven Kulturfläche. Es wird eine Fläche mit dem Waldwachstumssimulator BWIN-Pro, der auf der Waldwachstumsbibliothek TreeGrOSS basiert, erzeugt. Hier wird Douglasie im Verband von 3 m x 3 m gepflanzt. Zusätzlich samen sich Buche, Birke und Lärche an. Der Bestand wird im 5-Jahreszyklus wachsen gelassen. Im zehnten Jahr findet ein Voranbau von Weißtanne statt. Die Simulation wird für 100 Jahre vollzogen, bei der regelmäßige Durchforstungen stattfinden. Eine natürliche Mortalität wird ebenfalls berücksichtigt. Die Simulation wird dreifach durchgeführt: 1. ohne Bewässerung, 2. einmalige Bewässerung und 3. zweimalige Bewässerung jeweils im ersten Jahr der hundertjährigen Simulation.

Tabelle 8 auf der nachfolgenden Seite zeigt die zu Grunde gelegten Kostensätze. Für die Pflanzung werden die real angefallenen Kostensätze des Frühjahrs 2020 verwendet. Im Forstamt Frankenberg liegen die Kosten für eine Douglasie inkl. Pflanzung bei etwa 1,80 €. Dieser Kostensatz ist im Vergleich zu den vergangenen Jahren hoch. Durch den steigenden Pflanzenbedarf und die Verwendung von Containerpflanzen ist der Preis stark gestiegen. Zukünftig wird ebenfalls mit steigenden Kosten gerechnet, daher wird der Kostensatz von 1,80 € verwendet. Bei einem Pflanzverband von 3 m x 3 m ist mit 1.111 Douglasien (K-WEZ) je Hektar zu rechnen. Somit entstehen Kulturkosten im ersten Jahr von rund 2.000 €. Die angegebenen Ausfallprozente sind als Modellannahme zu sehen, es gibt keine zu Grunde liegenden Daten. Die Kosten für einen Bewässerungsturnus werden mit 700 € veranschlagt. Dieser Wert resultiert aus den ermittelten IST-Daten. Die Kosten für den Tannenvoranbau werden mit 1.000 € einberechnet.

Tabelle 8: Begründungskosten in Relation zum Bewässerungsintervall

Bewässerung	Maßnahme	Kostensatz	Annahme
keine Bewässerung	Pflanzung	2.000 €	80 % Ausfall Jahr 1
	Nachbesserung	1.600 €, 600 €	30 % Ausfall Jahr 2
	Bewässerung	keine Kosten	
einmalige Bewässerung	Pflanzung	2.000 €	20 % Ausfall Jahr 1
	Nachbesserung	keine Kosten	
	Bewässerung	700 €	
zweimalige Bewässerung	Pflanzung	2.000 €	10 % Ausfall Jahr 2
	Nachbesserung	keine Kosten	
	Bewässerung	1.400 €	

Unter Berücksichtigung der angegebenen Kostensätze und der Daten aus dem Wachstumssimulator werden verschiedene betriebswirtschaftliche Berechnungen durchgeführt. In Tabelle 9 befindet sich ein Vergleich der Berechnungen in Bezug auf die Bewässerungshäufigkeit. Dabei werden die Pflanzen einmalig mit fünf Litern Wasser, zweimalig mit jeweils fünf Litern Wasser (Abstand zwischen den Bewässerungen je nach Witterung 6 bis 8 Wochen) oder überhaupt nicht bewässert. Hierbei ist erkennbar, dass die einmalige Bewässerung die größte Wirtschaftlichkeit besitzt. Berücksichtigt werden muss, dass es sich um eine Simulation handelt, die viele Modellannahmen enthält.

Tabelle 9: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach Bewässerungsintervall

Bewässerungshäufigkeit	Investitionsrechnung Verzinsung (100 % EK)	DCF-Modell Annuität	Monte-Carlo-Simulation Annuität
keine	1,72 %	19,75 €/ha	111,48 €/ha
einmalige	1,87 %	80,37 €/ha	185,16 €/ha
zweimalig	1,82 %	64,13 €/ha	169,04 €/ha

Ein realitätsnahes Modell ergibt sich durch die Monte-Carlo-Simulation. Hier werden die meisten Faktoren mitberücksichtigt. Zum einen findet eine Diskontierung der Zahlungsströme statt und zum anderen werden Preis- und Kostensteigerungen berücksichtigt. Auch wenn das Modell viele Variablen enthält, so wird versucht, den Simulationsfehler durch 1000 Simulationen zu beschränken. Dadurch wird die Genauigkeit und Angemessenheit der Ergebnisse erhöht.

Vorausgesetzt die Bewässerung verspricht den unterstellten Erfolg, so ist nach der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Tabelle 9) eine einmalige Bewässerung zu empfehlen. Hierdurch lassen sich über 70 € höhere Annuitäten erzielen, als beim Unterlassen der Bewässerung. Zukünftig muss geschaut werden, welche physiologischen Reaktionen die Pflanze auf die Bewässerung zeigt. Anhand dieser Reaktionen und der Wirtschaftlichkeit muss eine Bewässerungshäufigkeit festgelegt werden.

3.6 Erfolg der Bewässerung

Ein konkreter Erfolg über die tatsächliche langfristige Überlebenswahrscheinlichkeit kann im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden. Hierfür sind langfristige Untersuchungen der bewässerten Kulturen notwendig. Gleichmaßen wurden Schäden durch den großen braunen Rüsselkäfer und Mängel bei der Pflanzung festgestellt, die auch zum Absterben von Pflanzen führen können.

Eine Aussage über die Wirksamkeit der Bewässerungsmaßnahme kann dennoch über die Bodenfeuchte gegeben werden. Anhand von Messungen der Bodenfeuchte kann abgeschätzt werden, wie lange die Feuchtigkeit der Bewässerung im Boden verbleibt. Sobald die kritische Grenze von 20 % Bodenfeuchtigkeit unterschritten wird, ist mit einer erhöhten Absterberate zu rechnen. Kann die Bodenfeuchtigkeit über diesem Wert, idealerweise sogar über 40 % in Dürreperioden, gehalten werden, ist mit einem Erfolg der Bewässerung zu rechnen.

In der nachstehenden Tabelle 10 sind die Messergebnisse der Bodenfeuchtemessung zu sehen. Hier ist erkennbar, welche Auswirkung eine Bewässerung auf die Bodenfeuchte hat. Ebenfalls ist ersichtlich, dass geringe Niederschlagsmengen im Wald eine eher geringe Auswirkung auf die Bodenfeuchte und die daraus resultierende Überlebenswahrscheinlichkeit haben. Ursachen hierfür sind die hohen Interzeptions- und Evaporationsraten. Die Daten der Bodenfeuchtemessung lassen erkennen, dass durch die Bewässerung eine Erhöhung der Bodenfeuchte von fast 60 % möglich ist. In den ersten zwei Wochen nach der Bewässerung ist die Übersteigerung des Schwellenwerts von 40 % möglich. Nach vier Wochen kann der Grenzwert von 20 % noch immer gehalten werden. Somit wirkt sich die Bewässerung mindestens vier Wochen lang positiv auf die Überlebenswahrscheinlichkeit der jungen Bäume aus.

Tabelle 10: Messergebnisse der Bodenfeuchtemessung

Ifd. Nummer	Gewicht frisch [g]	Gewicht darr-trocken [g]	Bodenfeuchte	Bemerkung
1	25	22	12%	vor Niederschlägen Anfang Juni
2	39	33	15%	nach ca. 6 Litern Niederschlag Wald
3	49	36	27%	nach ca. 6 Liter Niederschlag, Weidefläche
4	17	14	18	nach ca. 35 Liter Niederschlag
5	63	18	71	unmittelbar nach Bewässerung
6	36	19	47	1 Woche nach Bewässerung
7	38	22	42	2 Woche nach Bewässerung
8	35	23	34	3 Woche nach Bewässerung
9	31	22	29	4 Woche nach Bewässerung

4 Diskussion

4.1 Grundlegende Fragestellung

Unser aller Ziel ist es, den Wald mit seinen wichtigen Funktionen für das Allgemeinwohl zu erhalten. Durch die fatalen Kalamitäten der letzten Jahre sind jedoch einige Funktionen nicht mehr flächendeckend gewährleistet. Damit steht die Forstbranche vor der „Herkulesaufgabe“, die betroffenen Schadflächen mit klimastabilen Baumarten zukunftsfähig wiederzubewalden. Die nicht absehbaren zukünftigen Klimaveränderungen erschweren die Bewältigung dieser Aufgabe erheblich. Viele im Frühjahr 2020 wiederbewaldete Kulturflächen sind langanhaltender trockener Witterung ausgesetzt und dadurch gefährdet. Im Forstamt Frankenberg drohen dadurch hohe Ausfallprozente auf über 30 ha Kulturfläche. Neben biotischen Gefahren (Rüsselkäfer, Wildverbiss) ist zunehmend auch mit abiotischen Gefahren (Austrocknung) der Jungpflanzen zu rechnen. Gegen Letzteres kann die Bewässerung von Forstkulturen ein Mittel der Wahl sein. Hinreichende Erfahrungen gibt es auf diesem Gebiet

nicht. Daher muss untersucht werden, ob die Bewässerung von Forstkulturen einen positiven Effekt auf die Wiederbewaldung und die damit verbundene Funktionserfüllung des Waldes hat.

Die Untersuchung des Verfahrens der Bewässerung hat viele Fragen aufgeworfen. Einige können im Rahmen dieser Projektarbeit beantwortet werden. Dennoch ist klar, dass aufgrund des Versuchszeitraumes viele unbeantwortet bleiben und der Versuch langfristig weiterverfolgt werden muss. Nur so können aussagekräftige Daten ermittelt werden, die dadurch eine Entscheidungshilfe für die langfristige Verwendung bei Wiederbewaldungskonzepten sein können.

4.2 „Frankenberger Bewässerungsverfahren“

Mit dem „Frankenberger-Bewässerungsverfahren“ konnte innerhalb kurzer Zeit ein praxistaugliches System entwickelt werden. Dieses ist speziell für stammzahlarme Kulturen geeignet. Die Topographie der Bestände muss eine Befahrbarkeit gewährleisten. Mit Kosten von unter 700 €/ha ist das Verfahren, bei dem unterstellten Erfolg, auch wirtschaftlich rentabel. Eine Übertragung des Verfahrens auf vollständig andere Gegebenheiten ist bedingt möglich.

Die Besonderheiten des Verfahrens sind, dass nur eine geringe Menge Wasser benötigt wird, ein geringer Personal- als auch Betreuungsaufwand nötig ist und eine hohe Flexibilität gegeben ist. Die geringe Wassermenge hat auch erhebliche Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung. Nur dadurch kann eine Rentabilität gewährleistet werden. Bei der versuchsweisen Bewässerung von den 34 ha Kulturfläche waren permanent dieselben Bewässerer (Ausnahme Revier Rodenbach) im Einsatz. Diese haben sogar zum Teil die zuvor erfolgten Pflanzarbeiten ausgeführt. Diese Konstellation erwies sich als erheblicher Vorteil. Es wurde dadurch wenig Zeit für die Suche von Flächenabgrenzungen oder Reihenverläufen aufgewendet. Der Schlepperfahrer wurde im Laufe der Bewässerung einmalig gewechselt, auch hier konnte eine gewisse Routine zu einer Zeitersparnis führen. Ein weiterer Vorteil ist, der jedoch schwer beziffert werden kann, dass Mängel der Pflanzung (Schiefstellungen o.Ä.) korrigiert werden können.

Doch das entwickelte System besitzt auch Nachteile. Es ist sehr invariabel in Bezug auf den Pflanzverband. Das Verfahren ist ausschließlich für stammzahlarme Kulturen geeignet. Bei stammzahlreichen Kulturen (bspw. Eichenkulturen) ist dieses Verfahren anwendbar, aber nicht mehr rentabel. Gleiches gilt auch für Kulturen, die sehr schlecht erschlossen sind. Auch hier stößt das Verfahren an seine Grenzen. Dennoch kann mit diesem Verfahren ein bedeutender Anteil der Kulturen bewässert werden. Der Ausschluss von stammzahlreichen Eichenkulturen wird zurzeit nicht als Problem angesehen, da diese bislang mit Trockenperioden besser umgehen können als Nadelbaumkulturen (Meinardus & Bräuning, 2011). Daher ist die prioritäre Bewässerung von stammzahlarmen Nadelbaumkulturen durchaus sinnvoll.

4.3 Physiologische Auswirkungen von Bewässerungen

Die Bewässerungsnotwendigkeit wird nach Forschungsergebnissen des Thünen-Institutes festgelegt. Somit ist es sinnvoll, Kulturen ab einem Unterschreiten von 40 % Bodenfeuchtigkeit zu bewässern (Sanders, 2020). Fraglich ist, welche physiologischen Auswirkungen die Bewässerung auf das Wachstumsverhalten des einzelnen Individuums hat. Vielmehr muss auch die Frage gestellt werden, ob jede Bewässerung einen positiven Effekt erzielt. Diese Frage muss klar mit „Nein“ beantwortet werden (Sanders, 2020). Es ist möglich eine Pflanze falsch oder zu intensiv zu bewässern.

Feststeht, dass das Wasser für die Photosynthese und damit für das Überleben des Baumes unentbehrlich ist. Somit ist das Unterlassen der Bewässerung bei Bodenfeuchten von unter 20 % lebensbedrohlich für jede Pflanze. Oft wird in der Literatur beschrieben, dass sich Pflanzen nur langfristig über viele Jahrhunderte an Standorte anpassen können. Doch aktuelle Untersuchungen ergeben, dass auch kurz- bis mittelfristige Anpassungen möglich sind. Es hat sich gezeigt, dass die Übersetzung des genetischen Codes in den Phänotypen (Genexpression) nicht ausschließlich vom genetischen Code selbst, sondern auch von Klima- und Umweltfaktoren bedingt wird (Schüler, 2014). Dies bedeutet, dass sich Bäume ab dem Aufkeimen an einen bestimmten Standort anpassen können. Wird der Baum nach der Pflanzung zu oft gewässert, gewöhnt er sich an eine gute Wasserversorgung. Das Wachstum ist zwar zu Beginn sehr gut, allerdings kann ab dem Ausbleiben von Bewässerungen oftmals eine Anpassung an trockene Bedingungen nicht mehr erfolgen. Sichtbar ist dies an Altbäumen, die im Laufe der Jahre den Grundwasseranschluss verlieren und dadurch absterben.

Daher dürfen Intervall und Intensität der Bewässerung nicht zu intensiv sein. Ebenfalls muss die Bewässerungsdauer berücksichtigt werden. Gelingt es also mit einer einmaligen Bewässerung das Anwachsen des Baumes im Erdreich zu ermöglichen und so dessen Überleben zu sichern, wäre dies die Ideallösung. Hiermit wird eine einmalige Niederschlagsperiode simuliert, die aber keine langfristigen Veränderungen des Klimas vortäuscht. Somit kann die Pflanze anwachsen, sich aber nicht an eine höhere Bodenfeuchte gewöhnen (Sanders, 2020).

Reaktionen der Bäume auf Veränderungen im Geländewasserhaushalt sind das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen. Bei einem zu langen und intensiven Bewässerungszeitraum öffnen die jungen Pflanzen ihre Spaltöffnungen, um die Transpiration und die damit verbundene höhere Photosyntheseleistung zu ermöglichen. Hierbei verdunstet oftmals zu viel Wasser, wodurch es im Anschluss der Bewässerungsphase zum Absterben der Bäume kommen kann. Somit ist das Verfahren der einmaligen, höchstens zweimaligen Bewässerung ausschließlich im ersten Jahr eine ideale Vorgehensweise (Sanders, 2020).

Zusätzlich muss beachtet werden, dass der Bewässerungszeitraum nicht zu nah am Ende der Vegetationsperiode liegt. Zu Beginn der Wachstumsperiode bilden die Bäume Frühholz mit Wasserleitgefäßen aus, um einen besseren Wassertransport zu ermöglichen. Im Anschluss wird Spätholz, ab ca. der Mitte der Vegetationsperiode, gebildet. Findet eine Bewässerung während der Bildung von Spätholz statt, ist es möglich, dass der Baum eine falsche Jahrringausbildung beginnt, indem er wieder Frühholz bildet. Auch dies kann nach dem Ausbleiben der Bewässerung ein Absterben zur Folge haben (Sanders, 2020).

Schlussendlich ist auch die Berechnungsmenge zu hinterfragen. In Tabelle 4 (S. 10) sind Kennzahlen der Wasserbedarfsanalyse beschrieben. Wird ein Standraum von 0,04 m² angenommen, so ergibt sich durch die Bewässerung von fünf Litern, eine Niederschlagsmenge von 125 Litern je Quadratmeter. Das Standraumvolumen kann rechnerisch eine Menge von knapp einem guten halben Liter Wasser speichern. Dies kann zur Aussage veranlassen, dass fünf Liter deutlich zu viel sind. Hierbei müssen allerdings noch weitere Faktoren berücksichtigt werden. Würde nur mit einem halben Liter Wasser bewässert, müsste sichergestellt werden, dass das Wasser den Standraum der Pflanze nicht verlässt, um so eine volle Wassersättigung zu gewährleisten. Da dies nicht der Fall ist, dringt das Wasser auch außerhalb des Standraumes in den Boden ein. Wird davon ausgegangen, dass das Wasser in jeder Richtung ca. 15 cm den Standraum verlässt, so werden 3,2 Liter benötigt, um eine Wassersättigung herbeizuführen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Wassermenge evtl. reduziert werden kann,

eine Bewässerung mit fünf Litern jedoch nicht deutlich zu hoch liegt, da die Abzüge für Interzeption, Evaporation und Verlassen des Standraumes lediglich Annahmen sind.

Die 60 Tage Wasserbedarfsdeckung aus Tabelle 4 (S. 10) stellen einen theoretischen Wert dar. Bei der Berechnung wird mit einigen Variablen gearbeitet, die nicht exakt verifiziert werden können. Fakt ist, dass die Böden auch auf einem mäßig frischen Standort eine nutzbare Wasserspeicherkapazität aufweisen, die es den Pflanzen ermöglicht, Dürreperioden zu überstehen. Die Bedingung hierfür ist, dass die Böden die Möglichkeit zur Wasseraufnahme bekommen. Wie schnell ein Boden Wasser aufnehmen kann, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Genauere Aussagen können mit Tests über die Sickerfähigkeit des Bodens getroffen werden. Diese Tests sind umfangreich und können nicht im Rahmen dieser Projektarbeit durchgeführt werden.

Als Nachteil des Verfahrens muss die Wasserabgabemenge von fünf Litern innerhalb von 20 Sekunden gesehen werden. Es ist möglich, dass ein Teil des Wassers in dieser Zeit vom Boden nicht aufgenommen werden kann. Die 20 Sekunden stellen eine Balance zwischen Aufnahmefähigkeit des Bodens, geringen Personalkosten und Vermeidung der Unterspülung des Wurzelraumes dar. Bei einer Reduzierung der Abgabemenge auf bspw. vier Liter kann bei gleichem Zeitaufwand mit 20 % weniger Druck das Wasser ausgebracht werden, wodurch eine langsamere Wasseraufnahme durch den Boden möglich ist. Die Ausbringungsmenge und der Ausbringungsdruck sind derzeit die größte Einflussvariablen des Systems.

4.4 Erfolg der Bewässerung

Eine umfassende Aussage über den wachstumskundlichen Erfolg der Bewässerung kann im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden. Hierfür liegen verschiedene Gründe vor: Nach den niederschlagsreichen Monaten zu Beginn der ersten Jahreshälfte folgten trockene, von Ostwind geprägte Wochen. Diese ließen den Boden rasch austrocknen, wodurch viele Pflanzen Trocknisschäden aufwiesen. Zu diesem Zeitpunkt stand noch kein praxistaugliches Bewässerungssystem zur Verfügung. Die Entwicklung des „Frankenberger-Bewässerungsverfahrens“ benötigte eine gewisse Zeit, um in einen Praxisversuch gehen zu können. In dieser Phase waren die Pflanzen weiter der Dürre ausgesetzt, wodurch zum Teil erhebliche Ausfallprozente zu verzeichnen waren. Der Bewässerungszeitpunkt war zu spät. Zudem befinden sich auf vielen Flächen Fraßspuren des großen braunen Rüsselkäfers, die auch zum Absterben der Pflanzen führten. Bei Begehungen der Kulturflächen sind zudem Qualitätsmängel der Pflanzarbeiten, trotz Pflanzenkontrollverfahren, festgestellt worden. Diese Kombination aus mehreren Schäden ist auf einigen Flächen feststellbar. Die Trockenheit ist daher nicht als einziger Grund für das Absterben der Pflanzen zu sehen. Eine exakte Verifizierung der Ursachen ist somit nicht möglich.

Dennoch kann ein technischer Erfolg verzeichnet werden. Das Verfahren ist praxistauglich und wirtschaftlich. Mit diesem System können bei Bedarf weitere Bewässerungen zum benötigten Zeitpunkt durchgeführt werden. Obwohl anhand der Überlebenswahrscheinlichkeit bei diesem Versuch kein exakter Erfolg definiert werden kann, so ist trotzdem ein Erfolg an der Bodenfeuchte ersichtlich. Durch die Bewässerung kann eine deutliche Steigerung der Bodenfeuchte erreicht werden. Hierbei wird der untere Schwellenwert von 20 % für mindestens vier Wochen nach der Bewässerung überschritten. Somit kann in diesem Zusammenhang von einem Erfolg der Bewässerung ausgegangen

werden. Welche Bodenfeuchten, über den Zeitraum von vier Wochen hinaus, gehalten werden können, muss weiter untersucht werden.

4.5 Alternativen zur Bewässerung

Die Bewässerung von Forstkulturen stellt eine Möglichkeit dar, das Überleben junger Pflanzen zu sichern. Dennoch gibt es auch alternative Möglichkeiten. Hier sind unter anderem die Herbstpflanzung und die Verwendung von Pflanzcontainern zu nennen. Eine Herbstpflanzung bietet Vorteile, indem der Pflanze unmittelbar nach der Pflanzung eine niederschlagsreiche Zeit, anstatt einer Dürreperiode zur Verfügung steht. Oftmals ist es jedoch so, dass die Pflanzen es im Herbst nicht schaffen, (Dürren auch im Herbst möglich) den Mineralboden vollständig zu erschließen. Deshalb reichen ihnen oftmals die Wasserreserven des Winters nicht aus, um bei den ersten warmen Tagen des Jahres ihr Wachstum zu beginnen (Kreusch, 2019). Größtes Problem der Herbstpflanzung ist jedoch der zeitliche Korridor. Die geschätzte Größenordnung der wiederzubewaldeten Fläche im Forstamt Frankenberg beträgt über 1.000 ha. Das Waldgesetz schreibt eine Wiederbewaldungsfrist von sechs Jahren vor. Unabhängig von der Realisierbarkeit der Wiederbewaldung innerhalb der gesetzlichen Frist müssten jedes Jahr fast 170 ha wiederbewaldet werden. Bei einer Kombination aus stammzahlarmen (80 %, Verband 3x3 m) und stammzahlreichen (20 %, 8000 N/ha) Kulturen wären es fast 415.000 Pflanzen (ohne Nachbesserungen) jedes Jahr. Dies ausschließlich in der Herbstpflanzperiode zu realisieren, ist nicht umsetzbar. Daher kann eine Mengenverteilung auf den Herbst stattfinden, bei der die Frühjahrspflanzung dennoch nicht vollständig ausbleiben kann.

Die Verwendung von Containerpflanzen hat bereits im Frühjahr 2020 einen Großteil des Pflanzenmaterials im Forstamt Frankenberg ausgemacht. Trotz der Container, die während der Pflanzung sehr feucht waren, sind Trocknisschäden zu verzeichnen. Eine Differenzierung zu wurzelnackten Pflanzen ist nur bedingt möglich, da die Pflanzzeitpunkte differieren. Dennoch sind die Alternativen zur Frühjahrspflanzung begrenzt.

4.6 Wasserspeicherfähigkeiten

Da der Niederschlag häufig außerhalb der Vegetationsperiode fällt, ist zu untersuchen, wie die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens verbessert werden kann. Eine Möglichkeit bietet hier die Wasserkapsel. Sollte ihr Speichervolumen von 140 ml ausreichen, die Pflanze während Dürreperioden vor der Austrocknung zu schützen, so könnte diese unmittelbar bei der Pflanzung mit in das Pflanzloch gebracht werden. Theoretisch kann die Pflanze mit 140 ml Wasser knapp einen Monat auskommen. Somit müssen jedoch alle vier Wochen ausreichend Niederschläge fallen, um das Hydrogel der Kapsel mit Wasser zu versorgen. Ein Verwendung von mehreren Kapseln wird nicht empfohlen, da es sonst durch die Ausdehnung des Gels zu Wurzelabrissen kommen kann (John, 2020). Denkbar ist aber auch eine Kombination aus Wasserkapsel und zusätzlicher Bewässerung.

Eine weitere Möglichkeit bietet das wasserspeichernde Granulat „Stockosorb“. Dieses stammt aus dem Hygienebereich – genauer aus der Windelproduktion (Kemmerich, 2018). Unter freier Quellung kann ein Gramm dieses Granulats 180 ml Leitungswasser binden (Evonik Industries AG, 2014). Ähnlich arbeitet auch das Granulat „Agrisan“. Dieses stammt aus dem Bereich von Baum- und Rebschulen. Es wird aus der braunen Meeresalge gewonnen und besteht aus sogenanntem Alginat. Das Granulat wird je nach Pflanze in einer Dosierung von 0,5 % bis 2,0 % mit Wasser vermischt. Anschließend

findet eine Wurzeltauchung statt. Das entstandene Gel bleibt an der Wurzel haften und sorgt so für eine Wasserspeicherung (Flügel GmbH, 2017).

Die oben genannten Mittel stellen Möglichkeiten dar, um die Wasserspeicherfähigkeit künstlich zu erhöhen. Erfahrungen mit diesen Produkten sind meist nur in anderen Branchen vorhanden. Daher muss vorsichtig getestet werden, ob und wie sich diese für die Forstwirtschaft eignen.

4.7 Ausblick

Einen konkreten Ausblick zu geben, ist zum aktuellen Stand schwer möglich. Sehr wahrscheinlich ist, dass die Temperaturen in Zentraleuropa weiter ansteigen werden (Christensen et al., 2007). In welcher Größenordnung dies geschieht, ist weiterhin unklar. Der Weltklimarat hat im fünften Sachstandsbericht (2014/2015) sogenannte RCP-Szenarien (representative concentration pathway) beschrieben (Bastin et al., 2019), die sowohl Idealverläufe als auch „worst-case-Szenarien“ aufzeigen. Unabhängig vom eintretenden Szenario, müssen bei der Bewirtschaftung der Wälder die veränderten Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Grundlage für eine Bewirtschaftung mit veränderten Klimabedingungen ist die Baumartenzusammensetzung. Hierbei ist eine entscheidende Positionierung des Waldbesitzers unumgänglich. Grundlage hierfür stellt die „Richtlinie für die Bewirtschaftung des Staatswaldes“ (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2018) dar. Wird der Wald in seinen Nutz- und Schutzfunktionen im Sinne der CO₂ Speicherung und der Erzeugung von nachhaltigen Baustoffen gefordert, so müssen unter anderem schnellwachsende Nadelbaumarten zur Wiederbewaldung verwendet werden. Hier spielen Baumarten wie Douglasie und die große Küstentanne eine zentrale Rolle.

Durch die Verwendung von Weitverbänden ist es möglich, große Flächenanteile rasch einer Bestockung zurückzuführen. Eine Bewässerung der Jungpflanzen kann dazu beitragen, dass dies mit geringeren Arbeitskapazitäten und finanziellen Mitteln geschieht. Weiterhin dürfen die Veränderungen des Klimas nicht außer Acht gelassen werden. Bei Betrachtung des RCP 8.5 Szenarios („worst case“) wird zum Ende des Jahrhunderts in großen Teilen des Äquatorraums kein menschliches Leben mehr möglich sein (Deutsches Klimarechenzentrum, 2020). Somit würde sich auch die Landnutzung in Mitteleuropa stark verändern. Eine sichere Datengrundlage gibt es jedoch nicht. Somit müssen Systeme und Bewirtschaftungsformen regelmäßig den Umweltbedingungen angepasst werden.

Mit dem „Frankenberger-Bewässerungsverfahren“ wurde ein praxistaugliches System für die aktuell herrschenden Bedingungen geschaffen. Eine Modifikation des Verfahrens ist möglich und wird bei weiterem Erkenntnisgewinn auch durchgeführt. Gegebenenfalls muss auch ein Verfahren für stammzahlreiche Bestände entwickelt werden. Die kontinuierliche Beobachtung der Umweltgeschehnisse und die darauffolgenden Reaktionen des Waldes sind entscheidend.

Eine genauere Aussage über den Erfolg der Bewässerungsmaßnahme kann erst ab dem nächsten Jahr erfolgen. Hierbei ist wichtig, dass auch im zweiten Jahr eine deutliche Steigerung der Überlebensrate erkennbar bleiben sollte. Nur dann ist die Bewässerung erfolgreich und wirtschaftlich.

5 Zusammenfassung

Die Bewässerung von Forstkulturen wird mancherorts belächelt. Detaillierte Untersuchungen liegen dabei oftmals nicht zu Grunde. Im Rahmen dieser Projektarbeit wird erstmals für das Forstamt Frankenberg ein teilmechanisiertes Bewässerungssystem entwickelt. Die Kalamitäten der letzten Jahre hinterlassen Schadflächen in einer Größenordnung von über 1.000 Hektar im Forstamtsgebiet. Ziel ist es, diese möglichst schnell in eine klimastabile Bestockung zurückzuführen. Doch die weiterhin anhaltenden sommerlichen Trockenperioden sorgen für hohe Ausfallprozentage in den frisch begründeten Frühjahrskulturen.

Daher wurde das „Frankenberger-Bewässerungsverfahren“ entwickelt. Es basiert auf einer Kombination aus landwirtschaftlichen Unternehmern und der Forstwirtschaftsbranche. Mit einem Lastzug wird Wasser aus den Schönungsteichen einer Kläranlage in den Wald gebracht. Anschließend findet ein Umpumpen in kleinere Wasserbehälter statt, die an einem landwirtschaftlichen Schlepper montiert sind. Zusätzlich ist dieser mit einer Pumpe und halbautomatischen Schlauchhaspeln ausgestattet. Am Schlauchende befinden sich ein Durchlaufzähler und eine Wasserlanze.

Mit diesem Verfahren werden fünf Liter Wasser an jede Pflanze gebracht. Die Wasserabgabe erfolgt über die Wasserlanze unterirdisch innerhalb von ca. 20 Sekunden direkt in den Wurzelraum der Pflanzen. Hierdurch kann ein hochgerechneter Niederschlag von 125 L/m² zur Pflanze gebracht werden. Als Versuch wurden ca. 34 ha Douglasienkulturen bewässert. Dabei konnte eine durchschnittliche Leistung von zwei Hektar am Tag festgestellt werden. Die Kosten belaufen sich auf unter 700 €/ha, bei einer einmaligen Bewässerung. Eine Eignung des Verfahrens wird ausschließlich für stammzahlarme Kulturen ausgesprochen.

Die Idee ist, der Pflanze durch eine einmalige Bewässerung das Anwachsen im Mineralboden zu ermöglichen. Hierdurch sollen die Ausfallprozentage reduziert und Kulturbegründungskosten gespart werden. Werden die Annuitäten betrachtet, so kann mit einer einmaligen Bewässerung die Annuität nach dem Discounted Cash-Flow-Modell vervierfacht werden. Jedoch unter der Voraussetzung, dass die Bewässerung den gewünschten Erfolg zeigt. Eine langfristige Wirkung kann im Rahmen dieser Projektarbeit nicht beziffert werden, da zusätzlich noch andere Schäden zum Absterben der Pflanzen geführt haben und der Betrachtungszeitraum zu gering ist.

Ein Erfolg kann dennoch beschrieben werden. Es wurde innerhalb kurzer Zeit ein praxistaugliches Verfahren entwickelt, was bei Bedarf eingesetzt werden kann. Hierdurch sollen Kosten reduziert, der Pflanzenmarkt entlastet und Arbeitskapazität freigehalten werden. Ebenfalls kann die Bodenfeuchte von 12 % auf über die definierten Schwellenwerte von 20 % und 40 % erhöht werden und so zu einer Steigerung der Überlebenswahrscheinlichkeit führen. Hinzu sollen durch die Bewässerung die gesetzlichen, als auch die gesellschaftlichen Verpflichtungen an den Wald garantiert werden. So können auf den Freiflächen klimastabile und zukunftsfähige Mischwälder von Morgen entstehen.

Literaturverzeichnis

- Arlhelger, M. (3. Juni 2020). Technischer Produktionsleiter FA Annweiler. (D. Biederbick, Interviewer)
- Bastin et al. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLoS One*(14). Abgerufen am 9. Juni 2020 von <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>
- Beinhofer, B. (2009). *Zur Anwendung der Portfoliotheorie in der Forstwissenschaft - Finanzielle Optimierungsansätze zur Bewertung von Diversifikationseffekten*. München: Technische Universität München, Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung.
- Biederbick, D. (2020). *Selbstangefertigte Fotografien*.
- Biederbick, D. (2020). *Selbsterstelle Grafik*.
- Biederbick, D. (2020). *Wasserkapsel-Versuch Abteilung 2306 B1*. Frankenberg.
- Christensen et al. (2007). *Regional Climate Projections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Deutsches Klimarechenzentrum. (2020). *2m-Temperatur*. Hamburg. Abgerufen am 9. Juni 2020 von <https://www.dkrz.de/about/kontakt/impressum>
- Evonik Industries AG. (2014). *Stockosorb 660*. Krefeld.
- Finger, M. (2020). *Technische Holz Trocknung*. Abgerufen am 8. Juni 2020 von [holzwurm-page: http://www.holzwurm-page.de/technik/trocknen/technische.htm](http://www.holzwurm-page.de/technik/trocknen/technische.htm)
- Flügel GmbH. (2017). *AGRISAN, Natürliches Hydrocolloid aus der Meeresalge*. Osterode.
- Griess, V. C. (2012). *Zur Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte in Mischbeständen: Ansätze zur Verbesserung der bioökonomischen Modellierung von Waldbeständen*. München: Technische Universität München.
- Grosser, & Teetz. (2012). *Grundabmaße und Toleranzfelder für Holzbe- und -verarbeitung*.
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ. (2020). Abgerufen am 3. Juni 2020 von <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2018). *Richtlinie für die Bewirtschaftung des Staatswaldes*. Wiesbaden.
- Imbery et al. (2018). *Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018 - eine Bilanz extremer Wetterereignisse*. Offenbach.
- John, H. (2020). *Langzeitwasserdepot für Forstpflanzen*.
- Kaub, J. M., & Biebersdorf, N. (2014). *Kläranlage Neuenkirchen/Wettringen 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen*. Bochum: TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH.
- Kemmerich, T. (2018). *das Langzeit-Wasserspeicher Granulat Stockosorb*. Essen. Abgerufen am 9. Juni 2020 von <https://www.knappmann.de/blog/das-langzeit-wasserspeicher-granulat-stockosorb.html>

- Klemperer, W. D. (2003). *Forest Resource Economics and Finance*.
- Kreusch, M. (2019). *Aufforstung: Anpflanzung mit Douglasien-Jungpflanzen*. Bonn: Wald-Prinz.
- Meinardus, C., & Bräuning, A. (2011). Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen. *LWF-aktuell*(85).
- meprozet. (2020). *www.meprozet.pl*. Abgerufen am 4. Juni 2020 von http://www.meprozet.pl/Z_dzialkiem_wodnym_-_PN_-_60__4.html?lang=3
- Protz, K. (2016). *Moderne Wundversorgung*. München: Elsevier Verlag.
- Sanders, T. (3. Juni 2020). Leiterin Arbeitsbereich Waldökologie und Biodiversität, Kontaktperson Intensives forstliches Monitoring, Thünen Institut. (Biederbick, Interviewer)
- Schüler, S. (2014). *AdaptTree - Wie anpassungsfähig sind Waldbäume?* Wien: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft.
- Statistisches Bundesamt (a). (2020). *destatis*. Abgerufen am 4. Juni 2020 von https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=2EC8A97F79975EB35F133000E3345828.tomcat_GO_2_2?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1499773946721&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnung
- Statistisches Bundesamt (b). (2020). *destatis*. Abgerufen am 4. Juni 2020 von https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=6C89016216CF3AC73EF3D81F57C5E434.tomcat_GO_1_2?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1499333542729&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnung
- Strunz, R. (2020). *Bewässerung von Forstkulturen in der Startphase*. Passau.
- Vollbracht, M. (2. Juni 2020). Kreislandwirt Waldeck-Frankenberg. *persönliches Gespräch*. (D. Biederbick, Interviewer)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, David Biederbick, die Projektarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und sämtliche Stellen, die anderen benutzten Druck- oder digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht zu haben.

Die Versicherung gilt auch für Zeichnungen, Skizzen sowie bildliche und sonstige Darstellungen.

Dem Unterzeichneten ist bewusst, dass jedes Zuwiderhandeln als Täuschungsversuch zu gelten hat, der die Anerkennung der Projektarbeit als Leistungsnachweis ausschließt und weitere angemessene Sanktionen zur Folge haben kann.

Frankenberg, 16.06.2020

(Ort, Datum)



(Unterschrift)

Anhang

Grafiken DWD

Temperaturanomalie

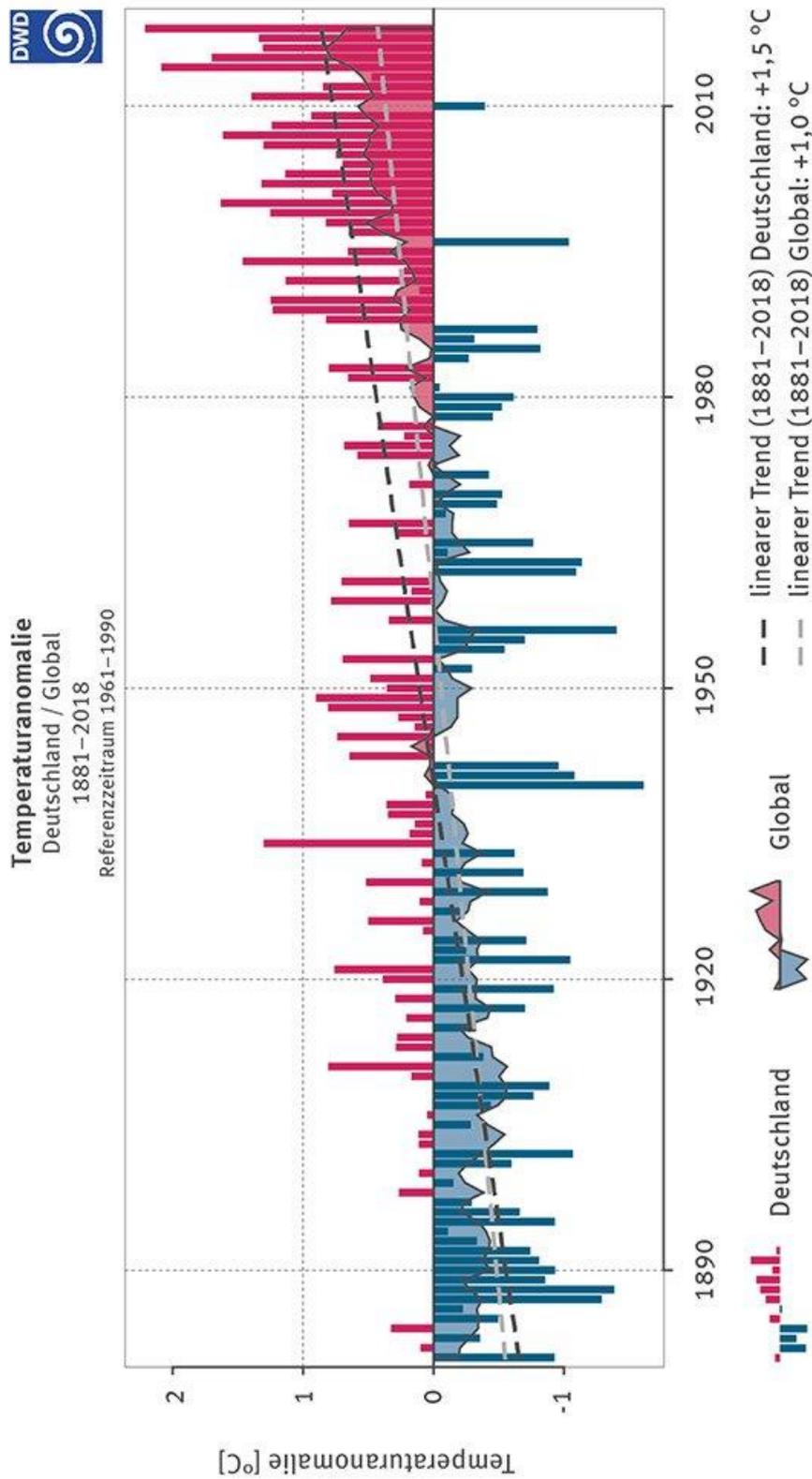


Abbildung 5: Temperaturanomalien der Jahre 1881-2018 (Imbery et al., 2018)

Niederschlagsanomalie

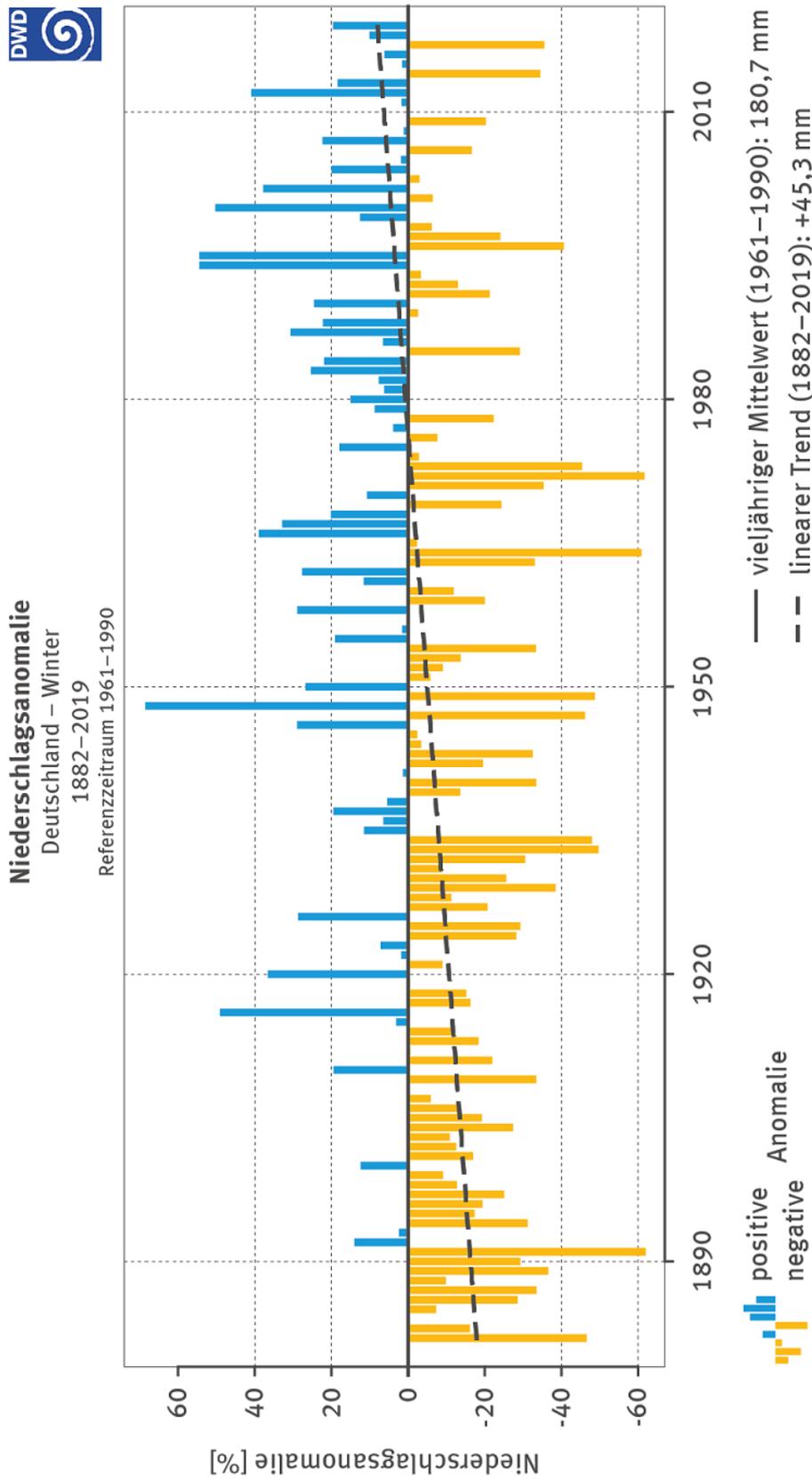


Abbildung 6: Niederschlagsanomalien der Jahre 1882 bis 2019 (Imbery et al., 2018)

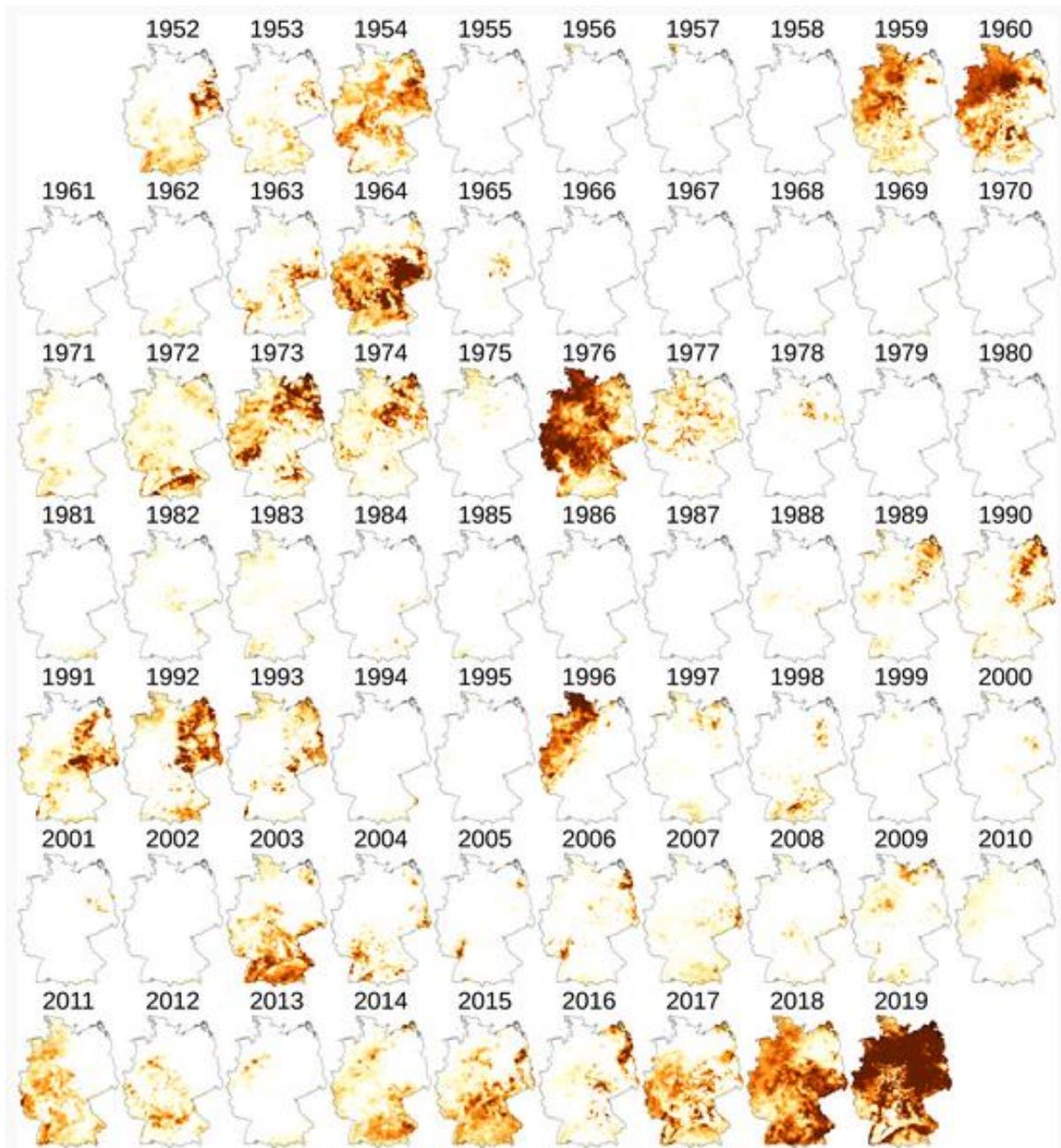
Dürremonitor

Abbildung 7: Dürren in den Jahren 1952 bis 2019 in Deutschland, (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, 2020)

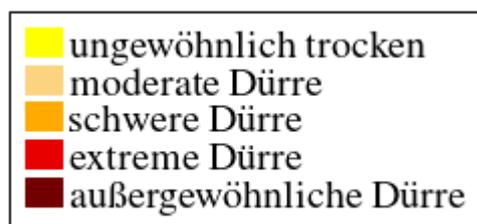


Abbildung 8: Legende zu Abbildung 7 (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, 2020)

Holzfeuchten

Richtwerte für Feuchtegrade

Tabelle 11: Feuchtegrade von Nutzholz (Finger, 2020)

Zustand	Holzfeuchte [%]
fällfrisch	bis 150
wassergesättigt	100
waldfrisch	Ca. 60
Fasersättigungsbereich	28-32
außengelagert	15-18
Fenster und Haustüren	12-15
Innenräume ohne Heizung	10-12
Innenräume mit Ofenheizung	8-10
Innenräume mit Zentralheizung	6-8
Darrzustand	0

Holzfeuchten nach Baumarten

Tabelle 12: Holzfeuchten nach Baumarten (Grosser & Teetz, 2012)

Eigenschaft	Fichte [%]	Tanne [%]	Eiche [%]
U_{\max} (saftfrisch)	140	165	73
Netto, waldfrisch	55-70	55-70	75
Normalfeuchte u_N	11,9	12,4	13,0

Holzfeuchtemessungen

Tabelle 13: Holzfeuchtemessungen im Forstamt Frankenberg

Holzfeuchtemessung, 22.04.2020 13:30 bis 15:15 Uhr						
Baumart	stehend, lebend	liegend, Windwurf, frisch				stehend, tot
		unteres Drittel	mittleres Drittel	oberes Drittel	Mittel	
Fichte	48%	36%	43%	41%	40%	57%
	52%	46%	51%	60%	52%	55%
	46%	55%	53%	46%	51%	37%
	44%	51%	58%	48%	52%	25%
	42%					41%
	53%					
	38%					
	43%					
Mittel	46%	47%	51%	49%	49%	43%
Lärche	50%					
	35%					
Mittel	43%					
Douglasie	48%					
	46%					
	52%					
Mittel	49%					
Buche	81%					
	79%					
	62%					
Mittel	74%					
Eiche	99%					

Entscheidungsbaum

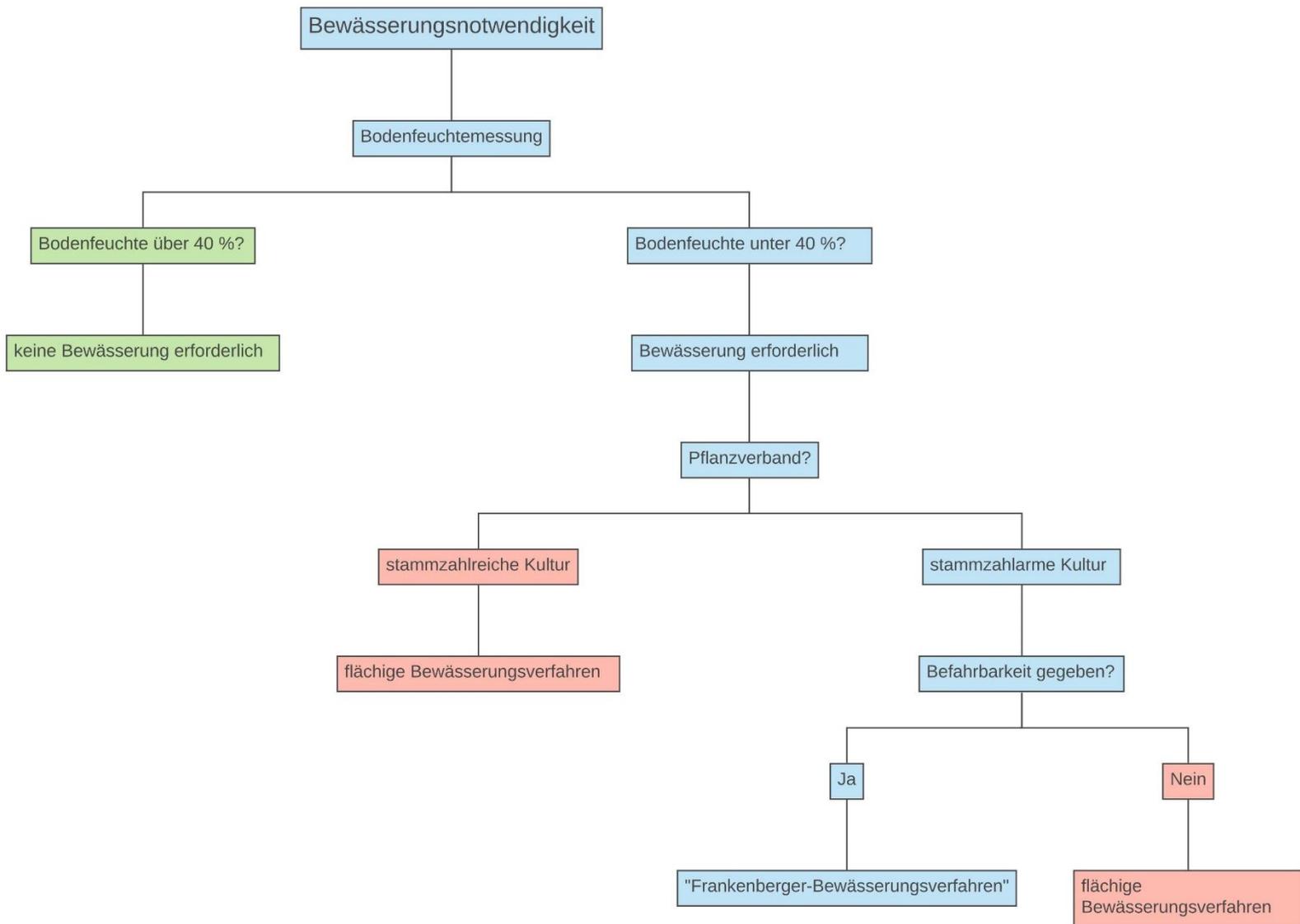


Abbildung 9: Entscheidungsbaum zur Bewässerungsnotwendigkeit (Biederbick, 2020)

Kulturbarometer

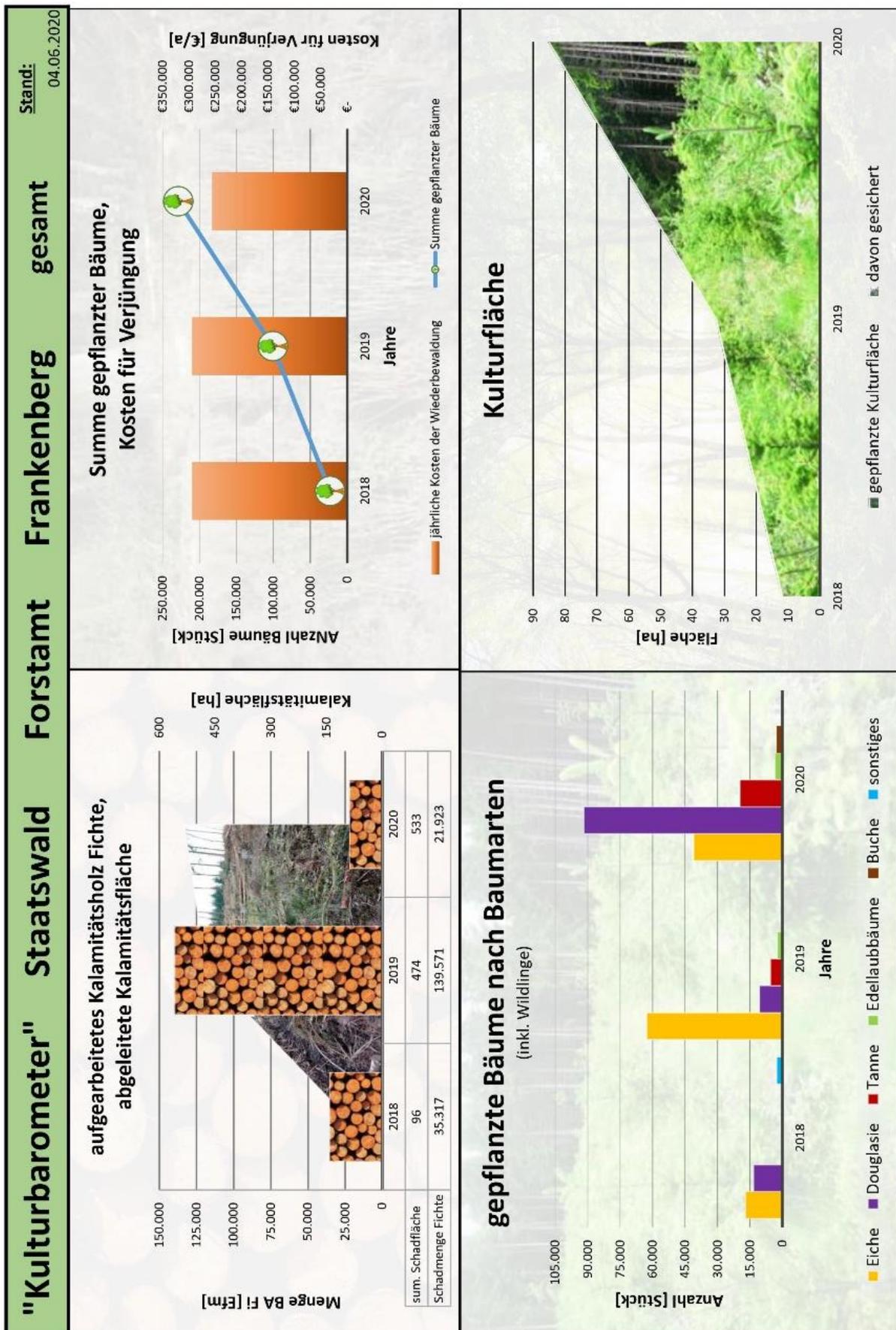


Abbildung 10: Kulturbarometer FA Frankenberg, Stand 04.06.2020 (Biederbick, 2020)

Bilder

„Frankenberger Bewässerungsverfahren“



Abbildung 11: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren", Heckbehälter mit Schlauchhaspeln, (Biederbick, 2020)



Abbildung 12: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren", Frontbehälter; (Biederbick, 2020)



Abbildung 13: Foto "Frankenberger-Bewässerungsverfahren",
Wasserlanze mit Durchflusszähler, (Biederbick, 2020)

Alternative Bewässerungsverfahren



Abbildung 16: Wasserwerfer Wasserfass, (meprozet, 2020)



Abbildung 14: Tropfverfahren, (Strunz, 2020)



Abbildung 15: Tropfverfahren, (Strunz, 2020)

Wasserkapsel-Versuch

Versuchsaufbau

Wasserkapsel-Versuch Abteilung 2603 B1

14.05.2020 von 13:00 Uhr bis 15:00 Uhr

Versuchsgegenstand:

- Untersuchung des Anwuchserfolgs von Douglasien-Containerpflanzen bei trockener Witterung
- Effizienz von Wasserkapseln

Teilnehmer:

- Andreas Schmitt (FAL)
- Dr. Jerome Metz (BLP)
- Andreas Knoche (FWM)
- Nicolai Graß (RJ)
- David Biederbick (FREF)

Methodik:

- Ausbringung von Douglasien-Containerpflanzen (Fa. Gilsbach) auf Kahlfläche
- Pflanzung mit (Name Pflanzwerkzeug??)
- Verband: 3 x 2 m
- reihenweise Mischung, dabei jede zweite Reihe mit Wasserkapsel im Pflanzloch versehen
- Pflanzen mit min. 2 Liter Wasser bewässert

Markierungen:

- jede Reihe ist zu Beginn, mittig und am Ende mit einem Stab versehen worden
- folgende Kennzeichnungen wurden angebracht
 - Gelbe Sprühfarbe: Pflanzen mit Wasserkapsel
 - Rot/Gelbes Markierungsband: Pflanzen ohne Wasserkapsel

Hinweise:

- der Verband wurde nicht planmäßig eingehalten, der Reihenabstand differiert
- Vor einige Reihen wurden übrige Pflanzen, noch vor dem Markierungsstab gesetzt. Diese sind alle ohne Wasserkapsel
- Reihe 7 ist sowohl mit, als auch ohne Wasserkapseln gepflanzt

Pflanzanzahlen:

- Die Pflanzanzahlen sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Reihen	Wasserkapsel	Pflanzanzahl in der Reihe	Zusätzliche Pflanzen vor Markierungsstab
1	Ja	11	0
2	Nein	12	1
3	Ja	12	1
4	Nein	10	2
5	Ja	12	1
6	Nein	12	1
7	Ja/Nein	6/10	1
8	Nein	12	1

Anlagen:

- Karte mit Skizzierung des Versuchsaufbaus

David Biederbick (FREF)

14.05.2020

Lagekarte

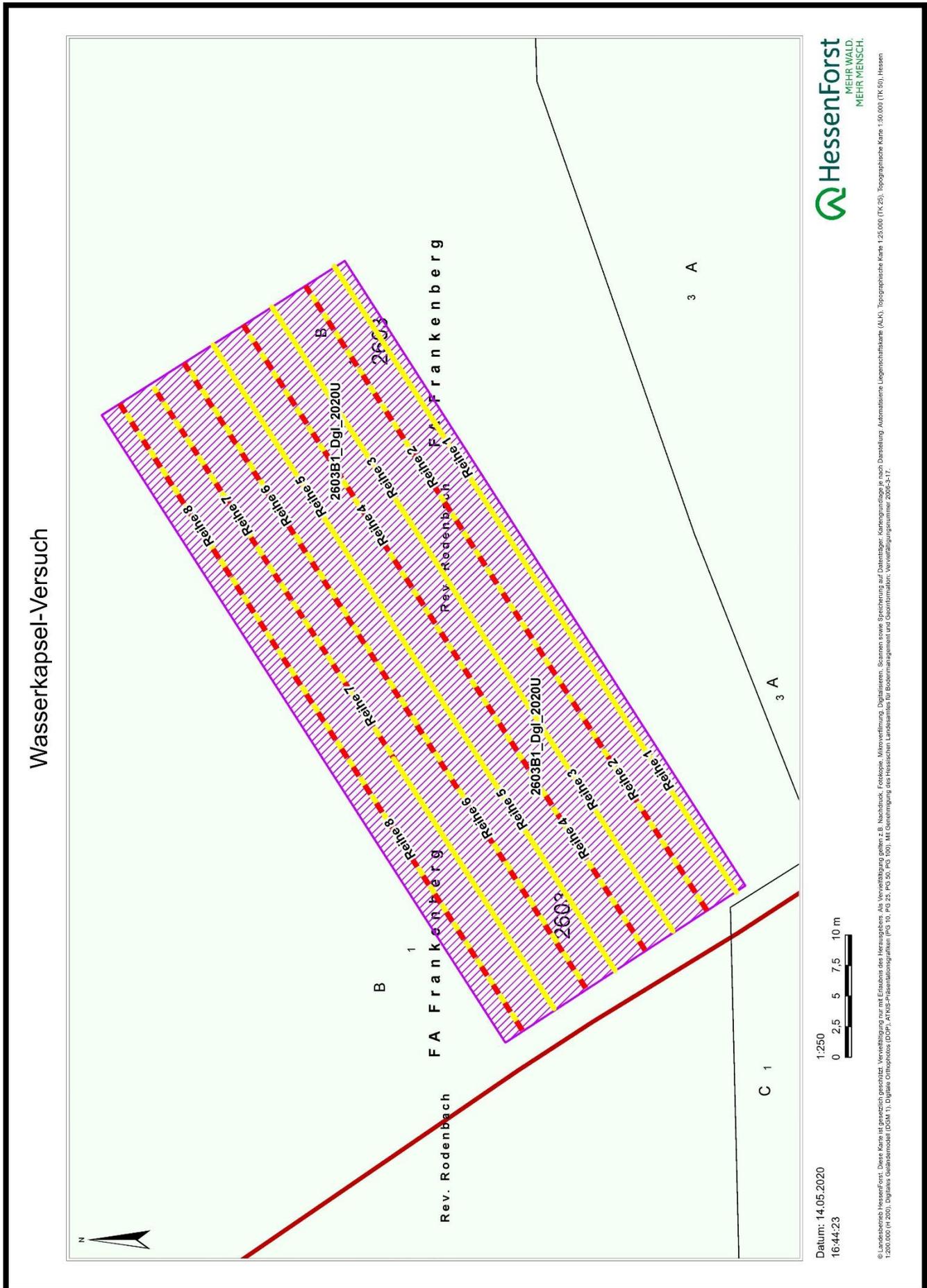


Abbildung 18: Wasserkapsel-Versuch, Lagekarte, (Biederbick, 2020)

Simulation einer Kulturfläche

Herleitung der Zahlungsströme

Die Herleitung der Zahlungsströme ist die Basis für alle folgenden Rechnungen. Hierzu werden die Daten aus dem Waldwachstumssimulator BWINPro genutzt. Die Betrachtung der Zahlungsströme lässt sich in vier Teile untergliedern, die jeweils für den gesamten Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2120 erfolgen. Zunächst werden der Deckungsbeitrag 1, der Deckungsbeitrag 2, der Deckungsbeitrag 3 und schließlich die Investition in die Kalkulation mit einbezogen.

Der Deckungsbeitrag 1 berechnet sich aus den Holzverkaufserlösen abzüglich der Holzerntekosten. Grundlage hierfür sind die Massen nach dem jeweiligen ausscheidenden Bestand, getrennt nach Baumarten. Zu beachten ist, dass die Berechnung mit dem Durchmesser der 100 stärksten Bäume (d100) erfolgt, da der waldbauliche Handlungsgrundsatz „vom dicken schlechten Ende“ im Modell beachtet wird. Die Erlöse werden baumartenspezifisch über den d100, die ausscheidende Masse über die Bestandessortentafeln ermittelt. Die Berechnung der Holzerntekosten im Deckungsbeitrag 1 erfolgt ebenfalls baumartenspezifisch über die entnommenen Erntefestmeter je Baumart.

Deckungsbeitrag 2 beinhaltet die Kosten für Läuterung, Kulturpflege und Astung sowie Pflanzungs-, Waldschutz- und Wegebaukosten und auch die Kosten einer eventuell anfallenden Bewässerung. Hier gilt es zu beachten, dass die jährlichen Kosten auf den 5-jährigen Durchforstungssturnus hochgerechnet werden, sofern sie jährlich anfallen (z.B. Waldschutz).

Der Deckungsbeitrag 3 berücksichtigt die anfallenden Verwaltungskosten. Auch hier werden die jährlich anfallenden Kosten auf den Durchforstungssturnus hochgerechnet.

Investitionsrechnung

Hier werden die hergeleiteten Zahlungsströme in Relation zur aufgewendeten Investition gestellt. Die Investitionsrechnung beinhaltet den Waldwert sowie die zugehörige Aufteilung in Eigenkapital (100 %) und Fremdkapital (0 %). Zusätzlich wird eine Verzinsung des aufgewendeten Kapitals ermittelt.

Discounted Cash-Flow Modell

Das Discounted Cash-Flow Modell betrachtet einen Gesamtbetrieb ähnlich der Bestimmung eines Kapitalwertes zur Ermittlung der optimalen Umtriebszeit eines Bestandes. Basis für diese Berechnung ist die beschriebene Tabelle für die Zahlungsströme. Hierzu werden die einzelnen Barwerte für die jeweiligen Zahlungen bei definiertem Kalkulationszinssatz errechnet (diskontiert). Als Kalkulationszinssatz werden 2 % verwendet.

Formel 1: Barwert (Klemperer, 2003)

$$\text{Barwert} = \frac{\text{Kapital}(n)}{(1+i)^n}$$

Die Summe aller Barwerte ist der Kapitalwert einer Investition. Hieraus wird wiederum die Annuität ermittelt.

Formel 2: Annuität (Klemperer, 2003)

$$\text{Annuität} = \text{Kapitalwert} * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

Monte-Carlo Simulation

Monte-Carlo Simulationen werden üblicherweise genutzt, um stochastische Prozesse zu analysieren, indem die möglichen Ausprägungen verschiedener Werte mit Hilfe von Zufallszahlen simuliert und in ein Modell integriert werden. Eine Stärke der Monte-Carlo Simulation liegt in der Möglichkeit, verschiedene Quellen von Risiken, die die Verteilung der finanzielle Ergebnisse beeinflussen, gleichzeitig in einem Modellansatz zu berücksichtigen. Entsprechend ist die Methode gut geeignet, um mögliche Handlungsalternativen des forstlichen Managements und ihre Konsequenzen realistisch abzubilden. (Griess, 2012, S. 32)

Als Basis für die durchgeführte Monte-Carlo Simulation dient das zuvor ermittelte Discounted Cash-Flow Modell. Für die Ermittlung der zufälligen Gesamtkosten und -erlöse werden für jeden Durchforstungseingriff (2020, 2025, 2030, [...] 2120) 1000 Simulationsläufe durchgespielt und daraus der Mittelwert ermittelt. Aus diesen Mittelwerten wird im Anschluss der zufällige Kapitalwert gebildet. Zusätzlich fließen in Monte-Carlo-Simulation weitere Variablen mit ein, diese werden im Weiteren detailliert erläutert.

Überlebenswahrscheinlichkeit der Baumarten

Tabelle 14: Überlebenswahrscheinlichkeiten, (Beinhofer, 2009)

Baumart	Überlebenswahrscheinlichkeit
Fichte (Dgl)	$\ddot{U}(A) = 6 \cdot 10^{-8} \cdot A^3 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot A^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot A + 1$
Tanne	wie Fichte
Lärche	wie Fichte
Buche	$\ddot{U}(A) = -1 \cdot 10^{-7} \cdot A^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot A + 1$
Birke	wie Buche

Da die Entwicklung in Richtung Mischwald geschieht und die Überlebenswahrscheinlichkeiten (ÜW) nach Beinhofer für den Altersklassenwald gelten, wird die ÜW nach Beinhofer um eine zufällige Änderung ergänzt. Daraus folgt, dass die zufällige ÜW zwischen der Beinhofer'schen ÜW und 1 liegt. So soll das reduzierte Ausfallrisiko aufgrund der intensiven vertikalen und horizontalen Struktur sowie der Baumartenmischung im Mischwald gegenüber dem Altersklassewald berücksichtigt werden.

Tabelle 15: Überlebenswahrscheinlichkeiten nach Beinhofer, (Beinhofer, 2009)

Überlebenswahrscheinlichkeit n. Beinhofer				Zufällige ÜW		
Alter		Fichte (NB)	Buche (LB)	Maximum	Fichte (NB)	Buche (LB)
2020	0	1	0,99	1	1	0,997288705
.
.
.
2120	100	0,69	0,89	1	0,704008094	0,996306684

Holzpreisentwicklung

Der Holzpreis ist die wohl einflussreichste Variable der Kalkulation. Um eine Prognose des Holzpreises zu entwickeln, wird die Holzpreisentwicklung von 1968 bis 2016 betrachtet. Durch die Betrachtung der Vergangenheit soll eine Prognose für die Zukunft erstellt werden. Diese Betrachtung wird mit der Zeitreihe „Rohholz insgesamt“ durchgeführt. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm kann nun in die Punktwolke eine Trendlinie bzw. Ausgleichsgerade eingelegt werden. Für diese Gerade wird die zugehörige Formel angezeigt. Diese Formel ist Basis für die Holzpreisentwicklung, ohne Einbeziehung von Preisschwankungen. Es wird eine lineare Entwicklung der Holzpreise unterstellt. Die Datengrundlage wird bis 2016 gewählt, da die extremen Einbrüche des Holzmarktes der letzten zwei Jahre als atypisch angesehen werden. Es wird angenommen, dass die Nachfrage nach Nadelholz in Zukunft steigen wird und dadurch eine Normalisierung des Holzmarktes stattfindet.

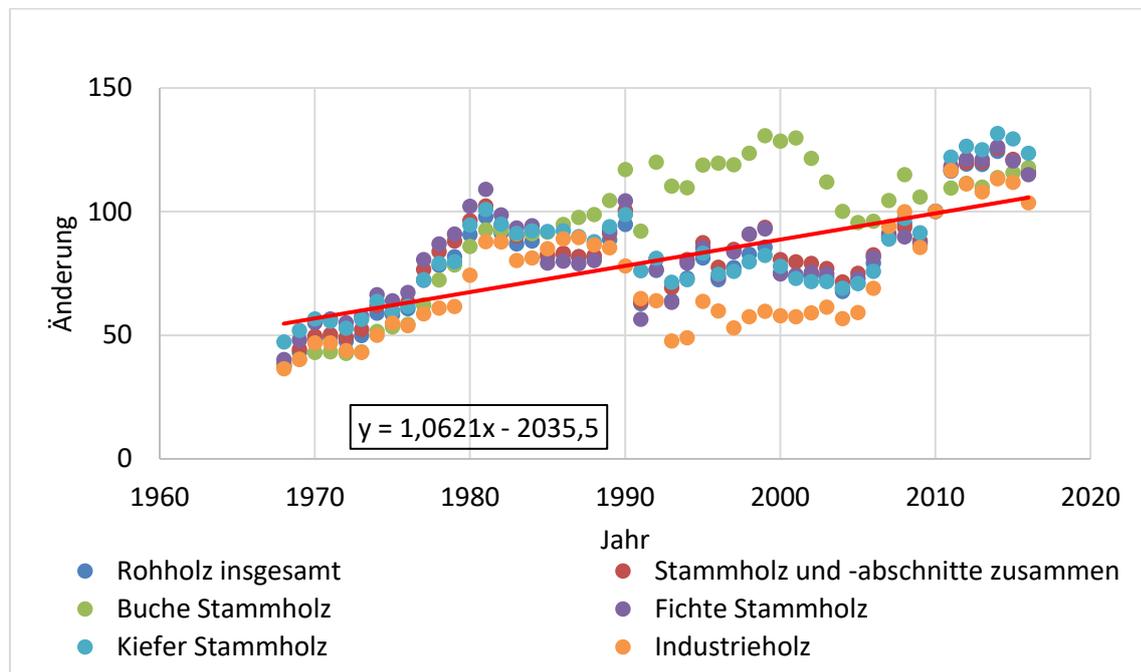


Abbildung 19: Holzpreisänderung, eigene Darstellung (Statistisches Bundesamt (a), 2020)

Um vorkommende Holzpreisschwankungen zu simulieren, werden wiederum Zufallszahlen eingesetzt. Basis der zufälligen Änderungen ist der zuvor hergeleitete langfristige Trend. Die Zufallszahlen schwanken jährlich um bis zu +/- 10 % um den Trend.

Tabelle 16: Holzpreisentwicklung

Jahr	Holzpreis- änderung	jährliche Holzpreis- änderung	Minimum Änderung (-10%)	Maximum Änderung (+10%)	Zufalls- zahl	zufällige Holzpreis- änderung	jährliche zufällige Holzpreis- änderung
	100%					100%	
2020	99%	0,68%	0,9	1,1	96,96%	96,31%	3,69%
.
.
.
2120	213%	1,06%	0,9	1,1	104,32%	222,16%	15,05%

Zusätzlich zur selbst hergeleiteten Holzpreisentwicklung wird mit der Excel Funktion „Prognose“ eine Holzpreisentwicklung dargestellt. Auffällig ist, dass der Wert der Holzpreissteigerung in 100 Jahren nahezu identisch ist (213 % (linear ohne Zufall) und 212 % (Excel Prognose)). Für die Monte-Carlo Simulation wird die selbst hergeleitete Holzpreisentwicklung genutzt.

Holzerntekostenentwicklung

Bei den Holzerntekosten wird eine langfristige Steigerung der Kosten angenommen, da eine Verknappung der Unternehmerschaft erwartet wird, aufwendigere Holzernteverfahren aufgrund der Dauerwaldstrukturen eingesetzt werden müssen und eine Steigerung der variablen Kosten auf Unternehmerseite vermutet wird (z.B. Dieselposten). Die zufällige Änderung liegt zwischen – 2 % und + 4 %.

Tabelle 17: Holzerntekostenentwicklung

Holzernte				
Jahr	Zufällige Änderung	Minimum (-2%)	Maximum (+4%)	Zufällige Änderung
2020	100%	0,98	1,04	-0,89%
.
.
.
2120	178,40%	0,98	1,04	1,46%

Pflegekostenentwicklung

Tabelle 18: Pflegekostenentwicklung

Pflege				
Jahr	Zufällige	Minimum	Maximum	Zufällige
2020	100%	0,98	1,06	3,75%
.
.
.
2120	294,35%	0,98	1,06	-0,68%

Für die Pflegekosten wird ebenfalls eine Preissteigerung erwartet. Es liegen die Annahmen zugrunde, dass die Arbeiten im Mischwald höhere Ansprüche an die Ausführenden stellen und die Verknappung der Unternehmerschaft sich ebenfalls auswirken wird. Die zufällige Änderung liegt zwischen – 2 % und + 6 %.

Pflanzungskostenentwicklung

Für die Pflanzkosten wird eine langfristige Kostensteigerung angenommen. Die zufällige Änderung liegt zwischen – 2 % und + 3 %.

Tabelle 19: Pflanzungskostenentwicklung

Pflanzung				
Jahr	zufällige	Minimum	Maximum	Zufällige
2020	100%	0,98	1,03	0,61%
.
.
.
2120	131,19%	0,98	1,03	0,84%

Waldschutzkostenentwicklung

Die zufällige Änderung der Waldschutzkosten liegt zwischen – 2 % und + 3 %. Es wird eine langfristig leichte Steigerung der Waldschutzkosten erwartet. Dies wird vor allem mit den vermutlich ansteigenden Lohnkosten begründet.

Tabelle 20: Waldschutzkostenentwicklung

Waldschutz				
Jahr	zufällige	Minimum	Maximum	Zufällige
2020	100%	0,98	1,03	1,16%
.
.
.
2120	134,98%	0,98	1,03	1,21%

Wegebaukostenentwicklung

Es wird ein Anstieg der Wegebaukosten erwartet. Gründe dafür können eine Steigerung der Materialkosten sowie der steigende Dieselpreis und der Fachkräftemangel sein. Die zufällige Änderung liegt zwischen – 2 % und + 4 %.

Tabelle 21: Wegebaukostenentwicklung

Wegebau				
Jahr	zufällige	Minimum	Maximum	Zufällige
2020	100%	0,98	1,04	2,81%
.
.
.
2120	195,69%	0,98	1,04	2,44%

Verwaltungskostenentwicklung

Für die Verwaltungskosten wird eine langfristige Kostensenkung erwartet. Zum einen kann diese durch Einsparung von Personal und dem technischen Fortschritt begründet sein. Die zufälligen Änderungen liegen zwischen $-2,25\%$ und $+2\%$.

Tabelle 22: Verwaltungskostenentwicklung

Verwaltung				
Jahr	Zufällige	Minimum	Maximum	Zufällige
2020	100%	0,975	1,02	0,04%
.
.
.
2120	72,54%	0,975	1,02	-0,94%

Sonstige Kosten

Eine Steigerung der Bewässerungskosten wird nicht mit eingerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Bewässerung ausschließlich zu Beginn der Simulation erforderlich ist. Eine Bodenpreisentwicklung wird ebenfalls nicht durchgeführt, da durch den Anteil von 100 % EK kein Verkauf der Fläche einbezogen wird.