

# Drohnen-gestützte Analyse der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation einer Aue an der Lahn zur Abschätzung des Aufwertungspotenzials des Stauraums



## **Masterarbeit**

im Studiengang „Umweltplanung“  
Institut für Umweltplanung  
Fakultät für Architektur und Landschaft  
Leibniz Universität Hannover

## **Bearbeitung**

Henrike Philipp  
Matr.-Nr.: 3140980  
henrike.philipp@web.de

## **Betreuung**

Dr. Daniela Kempa  
Dr. Stefan Schmidt

Hannover, Dezember 2020

## Zusammenfassung

Beiträge zur Reduzierung von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre sind in Rahmen des alarmierenden Anstiegs des Erdklimas von besonderem gesellschaftlichen Wert. An diesem Punkt knüpft die vorliegende Masterarbeit an und untersucht die Ökosystemleistung „Kohlenstoffspeicherung“ in der Vegetation am Beispiel einer ausgewählten Aue an der Lahn unter Einsatz einer Drohne. Auf Basis der aktuellen Kohlenstoffspeicherung in der Aue werden Maßnahmen vorgeschlagen, die zu einer Aufwertung der Strukturvielfalt sowie einer höheren Kohlenstoffspeicherung in der Aue beitragen. Zuletzt wird der Einsatz der Drohne für die Ziele dieser Arbeit evaluiert. Die Arbeit wurde in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz, insbesondere den Referaten „Geodäsie und Fernerkundung“ sowie „Vegetationskunde und Landschaftspflege“, erstellt.

Die vorgestellten Methoden zur Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung beruhen zum einen auf dem Einsatz einer Drohne und der darauf basierenden fernerkundungstechnischen Datenauswertung und zum anderen auf manuellen Methoden. Für die manuellen Methoden wurden Vegetationsaufnahmen vorgenommen und auf deren Basis eine Datengrundlage geschaffen. Mittels der Drohne wurden Luftbildaufnahmen des Untersuchungsgebietes angefertigt und zu einem digitalen Orthophoto sowie digitalen Oberflächenmodell verarbeitet. Auf Basis der Höheninfos aus dem digitalen Oberflächenmodell sowie der Datengrundlage der Vegetationsaufnahmen konnte mit Hilfe passender Regressionsfunktionen anderer Forschungen die Biomasse der Vegetation errechnet werden. Anschließend konnte mittels eines Umrechnungsfaktors der Kohlenstoffanteil in der Vegetation bestimmt werden.

In der Vegetation der untersuchten Aue werden zum Zeitpunkt der Aufnahmen ca.  $9.413 \pm 5.431 / - 2.351$  kg Kohlenstoff gespeichert. Der breite Schwankungsbereich resultiert aus den hohen Abweichungen zwischen den drohnenbasierten Berechnungen und den manuellen Berechnungen. Im Rahmen des Szenarios „Stauraumstrukturierung“ zeigte sich, dass Maßnahmen wie die Anlage eines Nebengerinnes, die Aufweitung des Uferbereichs sowie der Austausch technischer Ufersicherung zu technisch-biologischer Ufersicherung durch eine Weidenspreitlage positive Auswirkungen auf die Strukturvielfalt des Auenbereichs haben. Neben der Erhöhung der Lebensraumqualität kann bei Nutzungsaufgabe im Uferbereich und im Bereich der Nebengerinne eine auentypische Zonierung mit Ansiedlung von Weidengebüsch und Hartgehölzen erreicht werden. Es zeigt sich außerdem, dass die strukturelle und ökologische Aufwertung des Auenbereiches eine Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung mit sich bringt. So kann im Szenario „Stauraumstrukturierung“ angenommen werden, dass ca. 16.915 kg Kohlenstoff gespeichert werden, wodurch die Speicherkapazität um über 50 % gesteigert wird.

## Abstract

Contributions to reducing greenhouse gases such as CO<sub>2</sub> in the atmosphere are of particular social value in the context of the alarming rise in the earth's climate. This master thesis connects to this issue, analysing the ecosystem service "carbon storage" in vegetation using the example of a selected floodplain on the Lahn. Based on the current carbon storage in the floodplain, measures have been developed which contribute to an enhancement of the structural diversity and higher carbon storage in the floodplain. Finally, the use of the drone for the objectives of this work is evaluated. The work was carried out in cooperation with the Federal Institute of Hydrology (BfG) in Koblenz, in particular the departments "Geodesy and Remote Sensing" and "Vegetation Science and Landscape Management".

The methods presented for estimating carbon storage are on the one hand based on the use of a drone and the remote sensing data evaluation and on the other hand on field-based methods. For the field-based methods, vegetation surveys were carried out, thus creating a data basis. The drone was used to take aerial photographs of the study area and to process them into a digital orthophoto and digital surface model. Based on the altitude information from the digital surface model and the data basis of the vegetation images, the biomass of the vegetation was calculated with the help of suitable regression functions from other research. Then, a conversion factor was used to determine the carbon content of the vegetation.

The vegetation of the investigated floodplain stores approximately  $9,413^{+5,431/-2,351}$  kg carbon at the time of the vegetation surveys. The wide range of variation results from the high deviations between the drone-based calculations and the field based calculations. Within the framework of the "reservoir structuring" scenario, it was shown that measures such as the creation of a side channel, the widening of the riverbank area and the replacement of technical bank protection with technical-biological bank protection by a willow spread have positive effects on the structural diversity of the floodplain area. In addition to increasing the habitat quality, a typical floodplain zoning with the settlement of willow bushes and hardwoods can be achieved in the event of abandonment of use in the bank area and in the area of the side channel. It has also been shown that the structural and ecological upgrading of the floodplain area leads to an improvement in carbon storage. In the "reservoir structuring" scenario, it can be assumed that 16,915 kg of carbon are stored, which increases the storage capacity by more than 50%.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Hintergrund</b> .....	1
<b>2. Zielsetzung</b> .....	4
<b>3. Methodik</b> .....	5
3.1 Überblick über das methodische Vorgehen .....	5
3.2 Vorbereitung für die Drohnenbefliegung .....	7
3.2.1 Planung der Befliegung .....	7
3.2.2 Beantragung der Aufstiegserlaubnis .....	9
3.2.3 Drohnenführerschein .....	11
3.2.4 Technische Vorstellung der Drohne .....	11
3.2.5 Planung der Flugstrecke mit Anwendungssoftware Dronelink.....	12
3.3 Datenerhebung.....	14
3.3.1 Vermessung der Ground Control Points .....	14
3.3.2 Erstellung der Luftbildaufnahmen .....	15
3.3.3 Vegetationsaufnahmen .....	16
3.4 Datenauswertung .....	17
3.4.1 Generierung des Orthophotos und des Oberflächenmodells.....	17
3.4.2 Biomasse- und Kohlenstoffberechnungen der Vegetation.....	18
3.5 Entwicklung des Szenarios „Stauraumstrukturierung“ .....	24
3.6 Kohlenstoffberechnungen der Vegetation im Szenario „Stauraumstrukturierung“ .....	25
3.7 Evaluierung des Drohneneinsatzes zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung.....	26
<b>4. Ergebnisse</b> .....	27
4.1 Digitales Orthophoto und Oberflächenmodell .....	27
4.2 Bestand der Vegetation .....	32
4.3 Aktuelle Kohlenstoffspeicherung im Untersuchungsgebiet.....	35
4.3.1 Gehölze .....	35
4.3.2 Weiden .....	37
4.3.3 Krautige Pflanzen .....	38
4.3.4 Gesamte Kohlenstoffspeicherung im aktuellen Bestand .....	39
4.4 Szenario Stauraumstrukturierung .....	41
4.4.1 Ausgangsbedingungen .....	41
4.4.2 Ziel der Stauraumstrukturierung.....	44
4.4.3 Maßnahmen der Stauraumstrukturierung .....	44
4.4.4 Kohlenstoffspeicherung der Stauraumstrukturierung .....	50
4.5 Evaluierung des Drohneneinsatzes zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung.....	53

<b>5 Diskussion</b> .....	55
5.1 Erhebung und Auswertung der Drohnenbilder .....	55
5.2 Statistische Unsicherheiten und Potenziale der Berechnungsmethoden.....	56
5.3 Unsicherheiten und Potenziale des Szenarios „Stauraumstrukturierung“ .....	59
<b>6. Fazit und Ausblick</b> .....	59
<b>7. Quellenverzeichnis</b> .....	61
<b>8. Eidesstaatliche Erklärung</b> .....	66
<b>9. Anhang</b> .....	67

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verortung des UG in Deutschland (rechts oben) und an der Lahn.....	3
Abb. 2: Ablaufdiagramm der methodischen Schritte .....	6
Abb. 3: Frontale und seitliche Überlappung bei der Erstellung von Luftbildaufnahmen (Press, 2017: www) .....	7
Abb. 4: Planung der Flugroute mit der Anwendung „Dronelink“ im UG .....	8
Abb. 5: Verortung der den Drohneinsatz einschränkender Infrastruktur .....	10
Abb. 6: Flugsystem DJI Phantom 4 und Steuerungseinheit .....	12
Abb. 7: Einteilung der Befliegungsbereiche der Aue und des Ufers für die Luftbildaufnahmen .....	13
Abb. 8: GCP (laminiertes Papier), fixiert mit Nägeln (links).....	14
Abb. 9: Ausgerichteter GNSS-RTK-Empfänger beim Vermessen des GCP (rechts).....	14
Abb. 10: Ableitung der Volumina aus den Luftbildaufnahmen.....	18
Abb. 11: Ablaufdiagramm zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in der krautigen Vegetation.....	24
Abb. 12: Einzelne Luftbildaufnahmen mittel Structure from Motion (SfM) Methoden zusammengefügt zum Orthophoto (Ausschnitt).....	27
Abb. 13: DOP der Lahnaue (links) mit zwei Detailausschnitten (rechts oben: Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> ) und Bruchweide ( <i>Salix fragilis</i> ), unten rechts GCP) .....	28
Abb. 14: DOM der Lahnaue (links) mit Detailausschnitt (rechts oben: Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> )).....	30
Abb. 15: DOM der Vegetation mit Detailausschnitt (rechts oben: Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> )) .....	31
Abb. 16: Luftbildaufnahme an der Lahn mit rot markierter Ufersicherung aus Steinen.....	32
Abb. 17: Verortung der Vegetationstypen, Gräben und Vegetationsaufnahmen .....	34
Abb. 18: Dauerlinie der untersuchten Aue mit dem durchschnittlichen Wasserstand und der Unterschreitungsdauer in Tagen (BfG 2013) .....	41
Abb. 19: Digitales Geländemodell der untersuchten Aue im aktuellen Zustand .....	42
Abb. 20: Typische Auenzonierung mit standorttypischer Vegetation (nach Ellenberg (1986), verändert).....	43
Abb. 21: Verortung der Maßnahmen zum Szenario der Stauraumstrukturierung .....	45
Abb. 22: Verändertes Geländemodell mit Anpassungen des Geländes im Bereich des abgeflachten Ufers (nördlich) und im Bereich des Nebengerinnes .....	46
Abb. 23: Skizze des veränderten Geländeprofiles im Uferbereich (Vegetation nicht maßstabsgetreu dargestellt).....	48
Abb. 24: Naturnahes Nebengerinne an einer strukturarmen Wasserstraße (Fachgruppe Blaues Band, 2020: 32) .....	49
Abb. 25: Szenario Stauraumstrukturierung- Entwicklung der Vegetation im Laufe der Sukzession.....	52
Abb. 26: Fläche der Vegetationsaufnahme für landwirtschaftliches Grünland.....	67
Abb. 27: Vegetationsaufnahme fläche der Rubusflur .....	68
Abb. 28: Vegetationsaufnahme fläche der Brennesselflur .....	69
Abb. 29: Vegetationsaufnahme fläche der Gräserflur .....	70
Abb. 30: Vegetationsaufnahme fläche mit hauptsächlich <i>Chaerophyllum temulum</i> in der Krautschicht .....	72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Regressionsmodelle auf Ziegenhorns (2017) Datensatz .....	21
Tabelle 2: Regressionskonstanten der in diese Arbeit eingeflossenen Wuchsformengruppen nach Bolte (2006) .....	23
Tabelle 3: Elementkonzentrationsgruppen mit der in die Arbeit eingeflossenen mittlere Kohlenstoffkonzentration nach Bolte (2006) .....	23
Tabelle 4: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Gehölze aus manuellen und drohnengestützten Berechnungen.....	35
Tabelle 5: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Gemeinen Fichten .....	36
Tabelle 6: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Weiden aus der Regressionsfunktion.....	37
Tabelle 7: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff des Grünlands .....	38
Tabelle 8: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff des Grünlands des krautigen Uferbereichs .....	39
Tabelle 9: Übersicht über die Kohlenstoffspeicherung in den einzelnen Vegetationstypen ...	39
Tabelle 10: Ergebnisse der anzunehmenden Kohlenstoffspeicherung im Szenario der Stauraumstrukturierung .....	51
Tabelle 11: Vegetationsaufnahme des landwirtschaftlich genutzten Grünlands .....	67
Tabelle 12: Vegetationsaufnahme der Rubusflur im Uferbereich .....	68
Tabelle 13: Vegetationsaufnahme der Brennesselflur im Uferbereich.....	69
Tabelle 14: Vegetationsaufnahme der Gräserflur im Uferbereich .....	70
Tabelle 15: Vegetationsaufnahme mit Esche und Chaerophyllum temulum in der Krautschicht .....	71
Tabelle 16: Berechnungen des gespeicherten Kohlenstoffs der Gehölze mit allen einbezogenen Parametern aus der manuellen Methodik .....	73
Tabelle 17: Berechnungen des gespeicherten Kohlenstoffs der Gehölze mit allen einbezogenen Parametern aus der drohnenbasierten Methodik .....	74
Tabelle 18: Berechnungen des gespeicherten Kohlenstoffs der Weiden mit allen einbezogenen Parametern .....	75
Tabelle 19: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes aus den Vegetationsaufnahmen.....	75
Tabelle 20: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes aus den Vegetationsaufnahmen.....	75
Tabelle 21: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Biomasse- und Kohlenstoffspeicherung in der landwirtschaftlich genutzten Grünlandfläche .....	76
Tabelle 22: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des Uferbereiches aus den Vegetationsaufnahmen .....	76
Tabelle 23: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des Uferbereiches aus den Vegetationsaufnahmen .....	76
Tabelle 24: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Biomasse- und Kohlenstoffspeicherung in der krautigen Vegetation des Uferbereichs .....	77

# 1. Hintergrund

Naturnahe Auen bieten Lebensräume für viele spezialisierte Arten, die auf ein natürliches Überflutungsregime aus dem angrenzenden Fließgewässer angewiesen sind (BMU und BFN, 2009: 4). Fließgewässer und ihre angrenzenden Auen stehen in einem engen ökologischen Zusammenhang zueinander und sind daher stets als Einheit zu betrachten (ebd). Eine Möglichkeit, um die Bedeutung von Auen und Fließgewässern zu beschreiben, bietet das Konzept der Ökosystemleistungen. Das Konzept beschreibt die Vielfalt an Leistungen, die von verschiedenen Ökosystemen ausgehen und zum Wohlbefinden der Menschen beitragen (ALBERT, V. HAAREN UND GALLER, 2012: 142). Durch eine Bewertung der ökologischen sowie sozioökonomischen Leistung, wird der Wert von Ökosystemen hervorgehoben und vereinfacht die Integration in Entscheidungsfindungsprozesse (DE GROOT et al. 2010: 261).

Auen und Fließgewässer stellen eine Vielzahl an Ökosystemleistungen bereit und sind daher als besonders wertvoll zu erachten. Auen sind bei einer Überflutung wichtige Retentionsflächen und leisten einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz (DEHNHARDT ET AL., 2015: 173). Beim Einsickern von Wasser durch die Bodenschichten der Auen wird das Wasser gereinigt und bildet neues Grundwasser. Weiterhin leisten Auen einen wichtigen Beitrag für die Reduzierung von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die Anreicherung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre aufgrund der Energieproduktion, des Verkehrs und der Industrie trägt zum Anstieg des Erdklimas bei (IPCC 2007: 600f). Im Rahmen des Pariser Klimaabkommens hat sich Deutschland verpflichtet eine langfristige Entwicklungsstrategie für die Beschränkung der Erderwärmung umzusetzen (UN FCCC 2015: 4). Ein Potenzial als natürliche CO<sub>2</sub>-Senken bilden Pflanzen. Diese nehmen während der Photosynthese Kohlenstoffdioxid aus der Umgebung auf und wandeln dieses mit Hilfe des Lichts um. Dabei wird Kohlenstoff assimiliert und als Biomasse, hauptsächlich im verholzten Teil der Pflanze, gespeichert. Nicht verholzte Pflanzenteile sterben nach Ablauf ihres Lebenszyklus ab und tragen zur Mineralisierung des Bodens bei. Der Humus im Boden dient als wichtiger Kohlenstoffspeicher (SCHOLZ et al. 2012: 176). Die Speicherung von Kohlenstoff in naturnahen Auenböden in Verbindung mit der Kohlenstoffspeicherung in verholzter Biomasse von auentypischem Wald erreicht Werte, die andere Waldökosysteme weit übertreffen (MEHL et al., 2013: 496).

Bei Betrachtung der Verteilung der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte fällt auf, dass Böden mit 80 % deutlich mehr einspeichern als die Vegetation mit einem Anteil von 20 % (KÖGEL-KNABNER, 2002: 64). Jedoch stammt ein Großteil des gespeicherten Kohlenstoffs in Böden aus abgestorbenem Pflanzenmaterial (vgl. KUZYAKOV & DOMANSKI, 2000). Daher tragen Maßnahmen zur Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation zur Anreicherung des Kohlenstoffs im Boden bei.



Durch die Messung und Berechnung des gespeicherten Kohlenstoffs in der Vegetation kann ein Ausgangspunkt definiert werden, auf dessen Basis Veränderungen der Landnutzung und Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung bewertet werden können. Mittels der Messung der Kohlenstoffspeicherung als Ökosystemleistung von Auen kann der Wert konkreter definiert werden und zum Schutz von Auen beitragen.

Der Schutz von Auen ist von aktueller Bedeutung. Die Nutzung von Gewässern und den Auenbereichen in Form von Begradigungen, Verbau der Ufer und intensiver Landwirtschaft beeinträchtigt die Struktur und die Funktionsfähigkeit des Ökosystems (SCHOLZ et al. 2012: 19). Typische Pflanzen und Tiere in Auen sind auf die wechselhaften Hoch- und Niedrigwasser angewiesen und werden durch den Wegfall der natürlichen Wasserdynamik von durchsetzungsstärkeren Arten verdrängt (BUSCH 2006: 19). Diese Entwicklung spiegelt sich in der Gefährdungseinstufung der Roten Liste wieder. Mehr als drei Viertel aller im ökologischen Zusammenhang stehenden Arten der Gewässer- und Auenbiotoptypen sind gefährdet (vgl. Riecken et al., 2006). Neben der ökologischen Verschlechterung ist die Morphodynamik durch Stauregulierung eingeschränkt. Durch Eingriffe wie den Erbau von Querbauwerken, früheren Begradigungen sowie Vertiefungen des Flussbettes werden Flüsse morphologisch verändert. Dadurch steigt die Fließgeschwindigkeit sowie die Sohlenerosion und führt zu einem vertieften Gewässerbett und der Absenkung des Grundwassers (UBA und BMU, 2017: 79).

Die Lahn ist ein beeinträchtigtes, von Stauhaltung geprägtes Fließgewässer. Auf dem 246 km langen Fluss regulieren 29 Staustufen den Gewässerstand (GOLDSTICKER, 1984). Die Lahn ist zwar als Bundeswasserstraße eingestuft (BMVI, 2016: 14), jedoch ist der Gütertransport eingestellt und die hauptsächliche Nutzung erfolgt durch Motor- und Sportboote. Das im Jahr 2015 gestartete EU-Life-Projekt Living Lahn hat die ökologische Aufwertung und eine lebenswertere Gestaltung der Lahn zum Ziel und fördert die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen, die dieses Ziel verfolgen (SCHLEUTER et al. 2017: 8; HMKLV o. J.: [www](http://www.livinglahn.de)). Die in dieser Arbeit untersuchte Aue ist Teil des Projektbereichs von Living Lahn, jedoch kein konkretes Maßnahmengebiet. Die Aue liegt im Stauraum zwischen der Schleuse in Nassau im Flusskilometer 117,6 und der Schleuse in Dausenau auf Flusskilometer 122,4 in Rheinland-Pfalz (s. Abb. 1). Nur 13 km flussabwärts mündet die Lahn auf 69 m Höhe NHN in den Rhein (GOLDSTICKER, 1984). Das Untersuchungsgebiet (UG) ist 4,31 ha groß, mit einer Länge von ca. 650 m und einer Breite von 50 m bis 90 m an der breitesten Stelle. Es besteht hauptsächlich aus Grünland und einem kleineren Fichtenforst. Der Uferbereich an der Lahn ist mit Gehölzen und krautigen Pflanzen bewachsen.

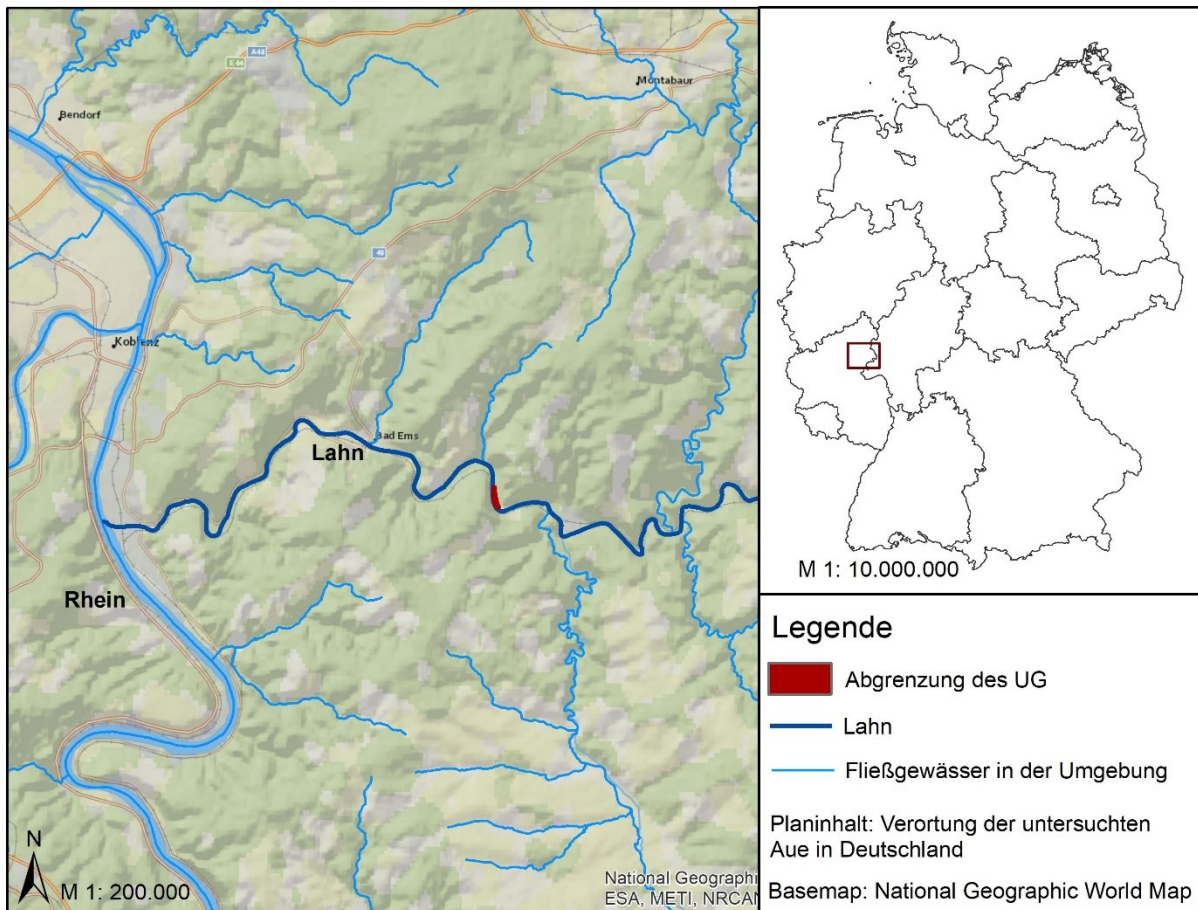


Abb. 1: Verortung des UG in Deutschland (rechts oben) und an der Lahn

Der ökologische Zustand des Gewässerabschnittes nach der Klassifizierung der Wasserrahmenrichtlinie entspricht einem unbefriedigenden Zustand (UBA, 2016: 53). Durch die Anlage von Totholz, Kiesinseln, Nebengerinnen und der Entwicklung standortgerechter Vegetation besteht ein erhebliches Potenzial den ökologischen Zustand von Auenbereichen zu verbessern (BMUB, 2015: 12). Solch eine Neustrukturierung des Stauraums hat Auswirkungen auf die Vegetation der Aue und damit einhergehend auf die Kohlenstoffspeicherung. Diese Zusammenhänge gilt es im Rahmen dieser Arbeit mittels der Analyse der Kohlenstoffspeicherung in der oberirdischen Biomasse zu untersuchen. Während manuelle Methoden zur Analyse der Kohlenstoffspeicherung in der oberirdischen Biomasse bereits methodisch etabliert sind (vgl. RAVINDRANATH und OSTWALD, 2008), werden vermehrt drohnenbasierte Verfahren zur Kohlenstoffanalyse erprobt (vgl. FERNANDES, 2020). In dieser Arbeit wird erstmalig die drohnen-gestützte Fernerkundung für die flächendeckende Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation eines ausgewählten Auenabschnitts an der Lahn erprobt.

## 2. Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Speicherung von Kohlenstoff in der oberirdischen Vegetation der ausgewählten Lahnaue als Beitrag zum Klimaschutz zu analysieren und das Potenzial einer höheren Kohlenstoffspeicherung als Ökosystemleistung durch die planerische Stauraumstrukturierung zu bewerten. Dazu wird mit Hilfe manueller sowie drohnengestützter Methoden die aktuelle Vegetation im ausgewählten Auenbereich erfasst und die Kohlenstoffspeicherleistung abgeleitet. Ausgehend davon wird der Stauraum in einem Szenario neu strukturiert und die Kohlenstoffspeicherung innerhalb des Szenarios abgeschätzt. Im Zusammenhang mit der Untersuchung gilt es außerdem die Potenziale und Grenzen des Einsatzes der Drohne zur Analyse der Kohlenstoffspeicherung der untersuchten Aue abzuschätzen, um die Eignung des Drohneneinsatzes zu evaluieren. Somit ergeben sich folgende drei Forschungsfragen:

1. Wie viel Kohlenstoff wird aktuell in der oberirdischen Biomasse der Vegetation im Untersuchungsgebiet gespeichert?
2. Welche potenziellen Auswirkungen hat die Durchführung einer Stauraumstrukturierung im Untersuchungsgebiet auf die Kohlenstoffspeicherung in der oberirdischen Biomasse der Vegetation?
3. Wie geeignet ist der Einsatz drohnengestützter Fernerkundungstechnik zur Analyse der Kohlenstoffspeicherung in der untersuchten Aue?

### **3. Methodik**

#### **3.1 Überblick über das methodische Vorgehen**

Die Methodik wurde in die beiden Bereiche „Bestandsaufnahme“ und „Planung“ aufgeteilt. In der Bestandsaufnahme wird die Herangehensweise zur Bilanzierung der Kohlenstoffspeicherung im Untersuchungsgebietes (UG) erläutert. Das darauffolgende Kapitel „Planung“ zeigt das Vorgehen zur Erarbeitung einer Neustrukturierung des Stauraums im UG.

Die Vorgehensweise zur Bestandsaufnahme unterteilt sich in Vorbereitung für die Geländearbeit, Datenerhebung und Datenauswertung. Die beiden wesentlichen Methoden waren die drohnengestützte Erstellung von Luftbildaufnahmen und die Vegetationsaufnahmen der Gehölze und krautigen Arten. Die Luftbildaufnahmen (s. Abb. 2, dargestellt im gelben Kasten) wurden für die Weiterverarbeitung in ein digitales Oberflächenmodell (DOM) und ein digitales Orthophoto (DOP) genutzt. Basierend darauf sowie auf der Anwendung einer Biomassefunktion, konnte die Biomasse und die Kohlenstoffspeicherung in den Gehölzen ermittelt werden. In der Abb. 2 im blauen Kasten dargestellt, wird der methodische Ablauf zur Bestimmung der Kohlenstoffspeicherung mit Hilfe der Vegetationsaufnahmen abgebildet. In der Phase der Vorbereitung sowie der Datenerhebung wurden die eingangs geschilderten Methoden noch isoliert angewandt. Zur Auswertung wurden diese dann kombiniert, um die Biomasse und die Kohlenstoffspeicherung für das gesamte UG zu berechnen und die erste Forschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten.

Auf Basis der Berechnung der aktuellen Kohlenstoffspeicherung im UG und mit Hilfe einer Literaturrecherche und den Vorschlägen der Mitarbeitern der BfG wurde ein Szenario zur Neugestaltung des Stauraums entwickelt. Auf Basis der Planung konnte die Kohlenstoffspeicherung im Szenario abgeleitet werden und die zweite Forschungsfrage beantwortet werden.

Der drohnengestützte Ansatz wurde schließlich qualitativ analysiert, um die Eignung des Drohneneinsatzes für die Ziele dieser Arbeit zu reflektieren und die dritte Forschungsfrage zu beantworten (s. Abb. 2, dargestellt im grünen Kasten).

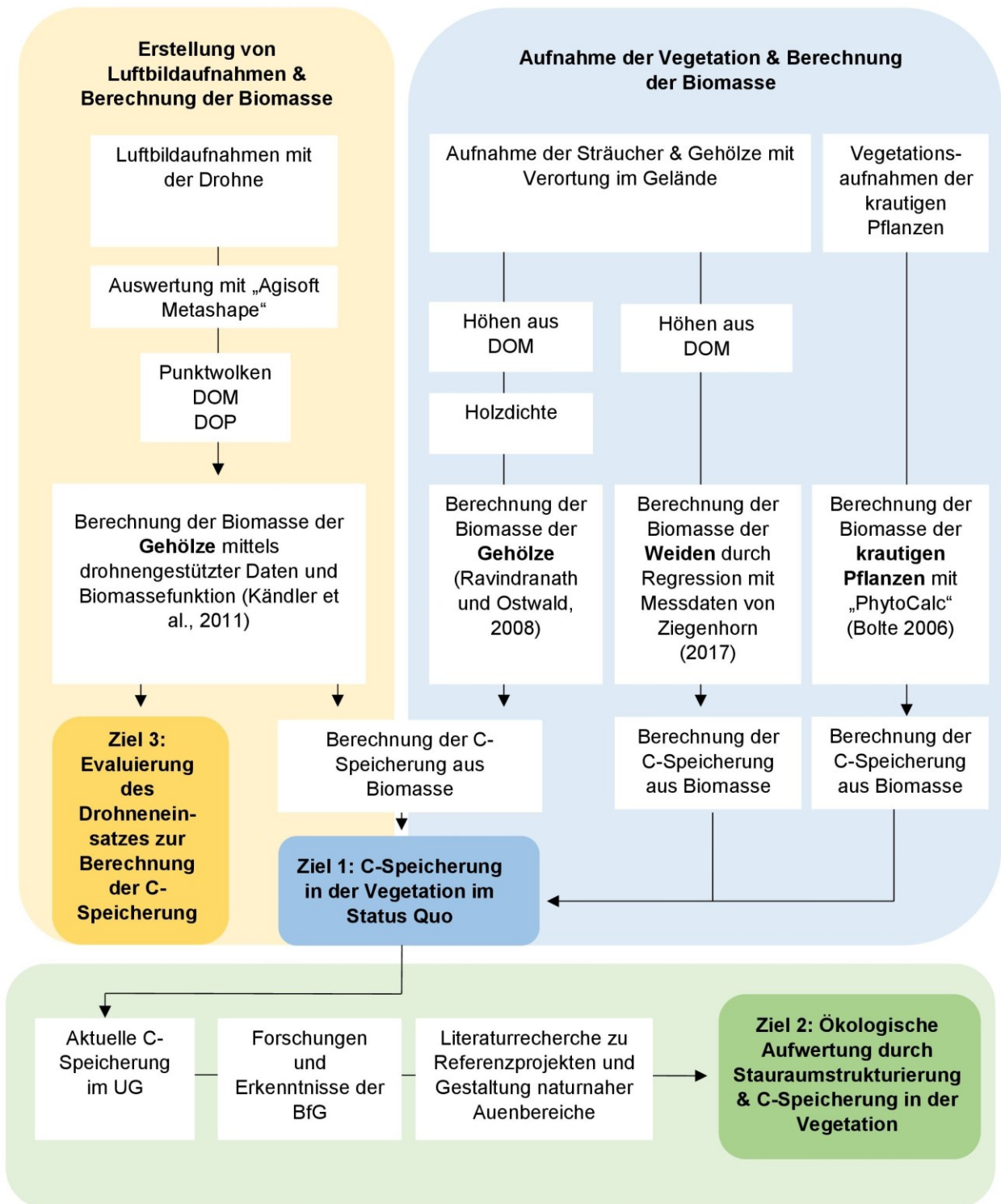


Abb. 2: Ablaufdiagramm der methodischen Schritte

## 3.2 Vorbereitung für die Drohnenbefliegung

### 3.2.1 Planung der Befliegung

Die Planung der Befliegung erfolgte unter Absprache mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, insbesondere dem Referat M 5 – Geodäsie und Fernerkundung. Die Befliegung mit der Drohne dient der Erstellung eines Orthophotos sowie digitalem Oberflächenmodell, aus dem die Höhen der Vegetation abzuleiten sind. Die Software „Agisoft Metashape“ erläutert in ihrem Benutzerhandbuch die Anforderungen des Bilddatensatzes zur Erstellung von DOP (AGISOFT LLC, 2020: 9). Entscheidend ist eine ausreichende Überlappung der aufeinanderfolgenden Bilder. Der Begriff der Überlappung bezieht sich auf die Überschneidung der Darstellungsbereiche, die während einer Befliegung nacheinander aufgenommen werden. Die Abb. 3 zeigt ein Befliegungsmuster mit einzelnen Luftbildaufnahmen. In Ausrichtung der Flugstrecke überlappen sich die Bilder frontal, während die seitliche Überlappung durch Bilder zweier nebeneinanderliegenden Flugreihen definiert ist. Ausschlaggebend für die Überlappung sind die Bildhöhe und -breite. Die Prozentzahl der Überlappung gibt an, wieviel Prozent des ersten Bildes das zweite Bild ebenfalls enthält. Für Luftbildaufnahmen wird eine seitliche Überlappung von mindestens 60 %, sowie eine frontale Überlappung von mindestens 80 % empfohlen (AGISOFT LLC, 2020: 9).

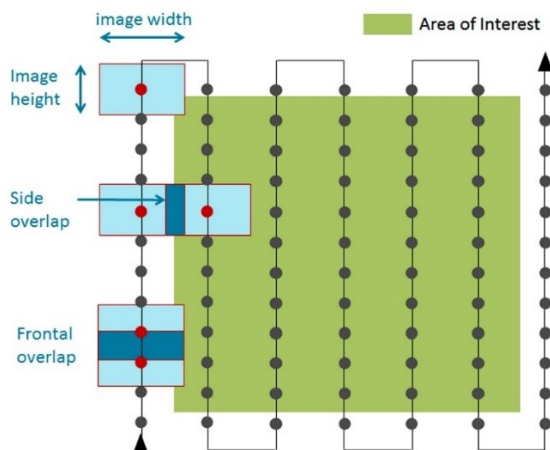


Abb. 3: Frontale und seitliche Überlappung bei der Erstellung von Luftbildaufnahmen (Press, 2017: www)

Als Zwischenschritt zur Erstellung des DOM und DOP ist die Erhebung von 3D-Messdaten, zusammengefügt in einem 3D-Modell, notwendig (ELIAS, 2012: 282). Dafür wurde das „Structure-from-motion“ Verfahren angewandt. Dieses ist ein Verfahren der Photogrammetrie und bezeichnet den automatischen Prozess, die dreidimensionale Struktur von Objekten anhand von zweidimensionalen Bildern, aufgenommen aus verschiedenen Blickwinkeln, zu erkennen (WESTOBY et al., 2012: 301). Eine hohe Überlappung der Bilder ist wichtig, da die „Structure-from-motion“-Software markante Punkte detektieren muss, die sich auf den einzelnen Bildern wiederholen.

Bei hohem Windaufkommen kann die Detektion zu Problemen führen, da sich die Vegetation im Wind bewegt und so markante Punkte eventuell nicht reidentifiziert werden.

Bei einer Kreuzbefliegung wird die Befliegung durch Querstreifen erweitert, wodurch der Datensatz durch die zusätzlichen Aufnahmen verbessert wird (LINDSTAEDT UND KERSTEN, 2018: 84). Zur Visualisierung von Kreuzbefliegungen zeigt die Abb. 4 das Befliegungsmuster in einem Teilbereich des UG.



Abb. 4: Planung der Flugroute mit der Anwendung „Dronelink“ im UG

Je höher die Überlappung, desto mehr Bilder werden aufgenommen, was zu einer längeren Flugdauer und erhöhtem Akkuverbrauch führt. Auf Grund einer begrenzten Akkulaufzeit und eingeschränktem Zeitfenster der Befliegung wurde eine seitliche Überlappung von 70 %, sowie eine frontale Überlappung von 80 % gewählt. Da die Luftbildaufnahmen in senkrechter Ausrichtung zum Boden, also Nadir (Shorter und Kasparis, 2009: 731), aufgenommen werden sollten, wurde der Kamerawinkel auf -90 Grad eingestellt.

In Absprache mit der BfG wurde neben der Kreuzbefliegung eine Schrägluftbild-Befliegung mit einem geneigten Kamerawinkel über den Ufergehölzen der Lahn sowie dem Fichtenforst geplant. Durch die ergänzenden Aufnahmen der Gehölze von zwei Seiten wurde die Datengrundlage für die Erstellung des 3D-Modells verbessert. Die Gehölzbereiche wurden mit einem Kamerawinkel von -45 Grad befliegen.

Die Flughöhe ist ein entscheidender Parameter für eine Drohnenbefliegung und war im Vorfeld festzulegen. Da die geringste Entfernung des UG zur Straße 30 m beträgt, ist zum Zeitpunkt der Befliegung aktuellen, rechtlichen Lage die maximale Flughöhe auf 30 m zu begrenzen (vgl. Kapitel 3.2.2: Beantragung der Aufstiegserlaubnis). Die Flughöhe für die Kreuzbefliegung über dem UG wurde daher auf 30 m angesetzt.

Dies geschah unter dem Vorbehalt, dass die höchsten Gehölze im Befliegungsgebiet nicht höher als 30 m abzüglich eines Sicherheitsabstands waren. Für den Flug über der Lahn wurde vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt eine Mindestflughöhe von 10 m festgelegt. Über der Lahn ist es nicht zweckmäßig niedriger zu fliegen, da sonst die Bilder mit geneigtem Kamerawinkel die Gehölze nicht komplett erfassen konnten.

Zur späteren Georeferenzierung der Aufnahmen wurden sogenannte Ground-Control-Points (GCP) auf Basis eines Luftbildes im UG geplant. GCP dienen als Referenzpunkte für die Lokalisation und sind zur Weiterverarbeitung der Luftbilddaufnahmen erforderlich (AGISOFT LLC, 2020: 8). Unter Rücksprache mit der BfG wurden insgesamt 12 GCP im UG festgelegt, 4 davon an den Eckpunkten des Gebietes und die restlichen 8 GCP in maximal 200 m Abstand voneinander.

### 3.2.2 Beantragung der Aufstiegserlaubnis

Für den Betrieb einer Drohne gelten die Vorgaben der Luftverkehrsordnung und des Luftverkehrsgesetzes. Innerhalb der Luftverkehrsordnung sind Verbotstatbestände festgelegt, die unter anderem den Betrieb einer Drohne in weniger als 100 m seitlichen Abstand von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen einschränken (§ 21b Abs. 1 Nr. 5 LuftVO). In direkter Umgebung des UG verlaufen die Verkehrsachsen der Bahntrasse von Koblenz nach Limburg, die Bundesfernstraße B260 und die Lahn als Bundeswasserstraße (s. Abb. 5). Damit die Befliegung möglich ist, wurde eine Ausnahmeerlaubnis bei der Landesluftfahrtbehörde beantragt. Für Aufstiegsgenehmigungen in Rheinland-Pfalz ist der Landesbetrieb für Mobilität (LBM) zuständig. Zusätzlich zum LBM wurde der Grundstückseigentümer der Fläche kontaktiert, da einzelne Flurstücke als Startplatz vom Eigentümer genehmigt werden müssen. Im Zuge der Erteilung der Fluggenehmigung setzt der LBM Nebenbestimmungen zum Betrieb der Drohne fest (Deutsche Flugsicherung, 2018: 6). Eine solche Nebenbestimmung ist die 1:1 Regelung, die besagt, dass die maximale Flughöhe über Grund stets kleiner als der seitliche Abstand zur Verkehrsinfrastruktur sein muss. Das bedeutet für das UG, dass bei einer Flughöhe von 30 m, ein Mindestabstand von 30 m zur Bahntrasse und Straße eingehalten werden muss (DFS, 2018: 6). Zur Aufnahme der Vegetation über der Lahn als Bundeswasserstraße konnte kein seitlicher Abstand eingehalten werden. Für die Erteilung der Aufstiegserlaubnis war daher der Kontakt zum Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt erforderlich. Das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt legte fest, dass Freizeitschifffahrt sowie Menschen am Ufer nicht überflogen werden dürfen und eine Mindestflughöhe von 10 m über der Lahn gilt (DFS, 2018: 6). Die notwendigen Unterlagen zur Erteilung einer Ausnahmeerlaubnis wurden Ende April 2020 beim LBM eingereicht. Die Aufstiegserlaubnis der Befliegung an der Lahn für Anfang Juni wurde am 13.05.2020 erteilt.



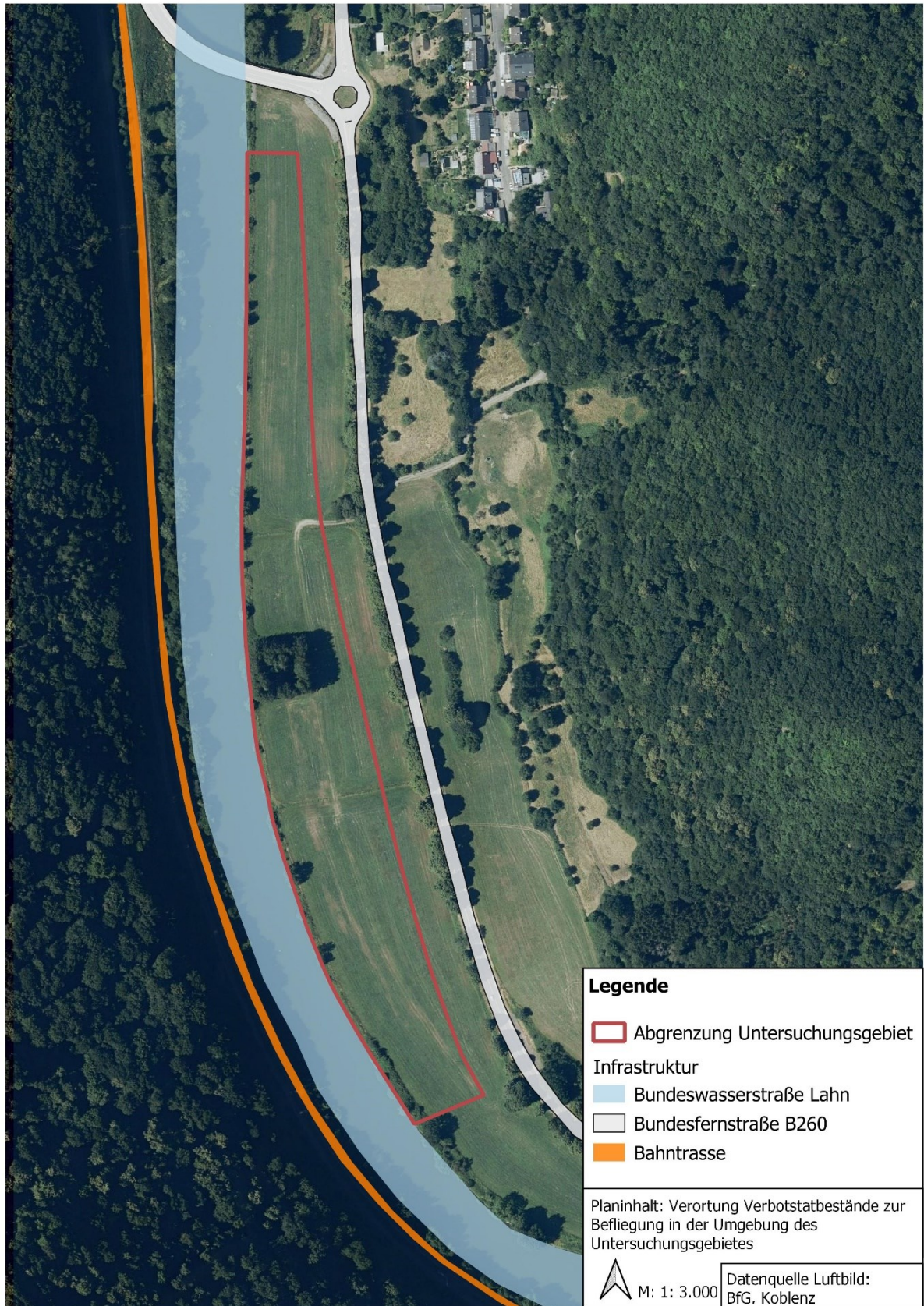


Abb. 5: Verortung der den Drohneneinsatz einschränkender Infrastruktur

### 3.2.3 Drohnenführerschein

Der umgangssprachlich „Drohnenführerschein“ genannte Befähigungsnachweis zur Steuerung eines unbemannten Luftfahrtsystems unterteilt sich in den Nachweis von Kenntnissen gemäß § 21 a Abs. 4 LuftVO sowie in den praktischen Befähigungsnachweis. Allgemein gilt, dass der Nachweis nur bei einer Startmasse von 2 kg erforderlich ist. Da die für diese Arbeit verwendete Drohne über ein Gesamtgewicht von ca. 1,4 kg verfügt, ist der Kenntnissnachweis sowie der Befähigungsnachweis generell nicht erforderlich. Für die Erteilung der Ausnahmeerlaubnissen behalten sich die Landesluftfahrtbehörden des jeweiligen Bundeslandes vor, Kenntnisse gemäß § 21 a Abs. 4 LuftVO gegebenenfalls anzufordern. Für das Vorhaben dieser Arbeit war dies im Zuge der Ausnahmeerlaubnis in Rheinland-Pfalz nicht erforderlich. Dennoch zeigte sich bei den ersten Flugversuchen und Recherchen, dass Grundkenntnisse und Flugpraxis für einen sicheren Flugbetrieb notwendig sind. Daher wurde Ende Mai eine Prüfung bei der GmbH „Kopter-Profi“ in Müden (KOPTER-PROFI, 2020: www) in den Disziplinen der Anwendung und Navigation von Drohnen, luftrechtlichen Grundlagen sowie der Meteorologie abgelegt und der Kenntnissnachweis erbracht. Für den praktischen Befähigungsnachweis mussten Flugmanöver im GPS /GLONASS sowie im „nicht positionierten“ Modus geflogen werden.

Der Ende Mai abgelegte „Drohnenführerschein“ trug zu einem sicheren Umgang mit der Drohne bei und war ein Schritt zur Flugvorbereitung an der Lahn.

### 3.2.4 Technische Vorstellung der Drohne

Bei der eingesetzten Drohne handelt es sich um die „DJI PHANTOM 4 PRO+ V2.0“. Das Fluggerät verfügt über eine Positionsbestimmung durch GPS sowie GLONASS, wodurch das Fluggerät vorher programmierte Koordinaten präzise ansteuern kann (DJI, 2020: www).

Die nach vorne, nach hinten, sowie nach oben gerichteten Sichtsysteme mit Infrarotsensoren vermeiden die Kollision mit Objekten beim Flug. Die Drohne ist mit einer RGB-Kamera von 20 Megapixeln ausgestattet. Die Brennweite der Kamera beträgt 8,8 mm. Die Bilder können als JPEG oder dem RAW-Format, DNG, gespeichert werden. Das Gimbal ist die Aufhängung der Kamera an der Drohne und dient zur Bildstabilisation. Der Nickwinkel des Gimbals kann im Bereich von – 90 Grad bis + 30 Grad bewegt werden, wobei -90 eine senkrechte Ausrichtung zum Boden (Nadir) bedeutet. Die Fernsteuerung der Drohne besteht aus der Steuerungseinheit sowie einem integrierten Bildschirm mit einem Android Betriebssystem. Die Abb. 6 zeigt die DJI Phantom 4 und die Fernsteuerung.



Abb. 6: Flugsystem DJI Phantom 4 und Steuerungseinheit

### 3.2.5 Planung der Flugstrecke mit Anwendungssoftware Dronelink

Eine Automatisierung des Drohnenflugs mit Hilfe einer Anwendungssoftware war notwendig, da beim manuellen Lenken der Drohne nicht klar erkennbar ist, welche Bereiche noch nicht befliegen wurden. Bei der Auswahl der App stand neben der Kompatibilität mit Android-Geräten die einstellbaren Parameter im Vordergrund. Die Anwendung Dronelink erwies sich als geeignet, da die Koordinaten der Eckpunkte der Kreuzbefliegung, die Höhe des Flugs, die Überlappung zwischen den Bildern sowie der Aufnahmewinkel einzustellen waren (Dronelink LLC, 2020: www). Während in der Desktopversion eine präzise Flugplanung vorgenommen wird, fliegt die Drohne die programmierte Route im Gelände über Aktivierung der App automatisch ab.

Die Drohne muss während des Flugs stets im Sichtfeld des Piloten liegen (BUNDESANZEIGER, 2017: 683). Der Fichtenforst mittig des UG, ca. 29 m hoch, schränkt den stetigen Sichtkontakt ein. Daher war es notwendig den Befliegungsbereich in Abschnitte zu gliedern. Die Kreuzbefliegung im Auenbereich wurde in drei Abschnitte gegliedert (s. Abb. 7: Auenbereich). Die Befliegung mit einem geneigten Kamerawinkel über der Lahn wurde in zwei Bereiche unterteilt (s. Abb. 7: Uferbereich).



Abb. 7: Einteilung der Befliegungsbereiche der Aue und des Ufers für die Luftbildaufnahmen

## 3.3 Datenerhebung

### 3.3.1 Vermessung der Ground Control Points

Bevor die Befliegung starten konnte, mussten die Ground Control Points (GCP) zur nachträglichen Georeferenzierung des DOP eingemessen werden. Das verwendete Gerät zur Vermessung ist der GNSS-RTK-Empfänger „GRS-1“ von Topcon (TOPCON COOPERATION, 2009). Die Abkürzung „GNSS“ steht für „Globales Navigationssatellitensystem“ und wird zur Positionsbestimmung durch den Empfang von Signalen von Navigationssatelliten eingesetzt (AWANGE, 2012: 24). „RTK“ ist die Abkürzung von „Real-Time-Kinematic“ und entspricht einem Referenzdatenempfänger, welcher die Genauigkeit der empfangenen Satelliten durch den Abgleich mit Positionsdaten langjähriger, stationärer Messungen vergleicht und verbessert (ebd.). Der verwendete GNSS-RTK-Empfänger unterstützt ESRI-GIS Anwendungen, wodurch die Vermessungspunkte innerhalb eines Shapefiles gespeichert werden können.

Die Koordinaten der in der Vorbereitung der Befliegung festgelegten GCP wurde über die mobile App „Google Maps“ aufgesucht. Anschließend wurde je ein GCP ausgelegt und mit Vermessungsnägeln im Boden fixiert (s. Abb. 8). In die Kerbe des mittleren Nagels wurde anschließend der GNSS-RTK-Empfänger platziert und mit Hilfe einer integrierten Präzisionslibelle exakt senkrecht ausgerichtet (s. Abb. 9).



Abb. 8: GCP (laminiertes Papier), fixiert mit Nägeln (links)



Abb. 9: Ausgerichteter GNSS-RTK-Empfänger beim Vermessen des GCP (rechts)

Zum Einmessen eines GCP wurde über die ArcGIS Anwendung des Geräts ein Punkt in einem vorher angelegten Shape gesetzt. Der GNSS-RTK-Empfänger maß daraufhin die genaue Verortung des GCP aus und speicherte diesen in das Shapefile. In der Attributtabelle des Shapefiles wurde die Nummer des GCP notiert.

Nach abgeschlossener Vermessung wurde der GNSS-RTK-Empfänger auf den nächsten GCP im UG gesetzt, während die GCP fest verortet verbleiben. Dieser Vorgang wurde für die 12 GCP durchgeführt.

Um die Genauigkeit der Messung zu überprüfen und zu verbessern, war es notwendig die Einmessung nach frühestens 3 Stunden zu wiederholen (AWANGE, 2012: 24). Die Navigationssatelliten rotieren in diesem Zeitraum ihrem Orbit folgend weiter. Dadurch kann eine andere Satellitenkonstellation empfangen und die Genauigkeit der Vermessung verbessert werden.

### 3.3.2 Erstellung der Luftbildaufnahmen

Die Luftbildaufnahmen wurden am 03.06.2020 mit Unterstützung von Björn Hoppe von der BfG erstellt. Die Temperatur lag bei ca. 28 °C mit wolkenlosem Himmel bis ca. 12 Uhr. Ab 12 Uhr zogen Wolken auf und das Windaufkommen erreichte Geschwindigkeiten von 20 km/h (DWD, 2020: www).

Die Luftbilder wurden mit einer Brennweite von 8,80 mm und einer Auflösung von 5464 x 3070 px aufgenommen (DJI, 2020: www). Die RGB-Kamera der DJI ist mit den Standardparametern der Drohne aufgenommen (s. Abschnitt 3.2.4.).

Aus den Kennwerten der im Flug verwendeten Kamera sowie der Flughöhe von 30 m lässt sich die ground sample distance ableiten. Die ground sample distance ist eine etablierte Kenngröße für photogrammetrische Projekte und bezeichnet die Bodenauflösung der Luftbildaufnahmen (ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN, 2012: 15). Je geringer die GSD, desto hochauflösender ist das Luftbild.

Für die Luftbildaufnahmen wurde mit dem Auenbereich 1 begonnen (s. Abb. 7). Beim Start der Drohne war auf einen glatten Untergrund zu achten, damit ein sicherer Aufstieg gewährleistet ist. Ein zu beachtender Aspekt war die Verbindung zwischen der Dronelink App auf der Fernsteuerung mit der Drohne. Sobald keine Fehlermeldung angezeigt wurde, konnte die Drohne gestartet werden und ein paar Meter in die Höhe geflogen werden. Anschließend galt es die passende Flugroute über Dronelink zu öffnen und zu starten. Die Drohne ist daraufhin die zuvor geplante Flugroute abgeflogen. Sobald ein geringer Akkustand erreicht wurde, landete die Drohne automatisch am Startplatz und der Akku wurde ausgetauscht. Die Drohne ist nach Start der Flugroute zu dem Punkt zurückgekehrt, bei dem die Route unterbrochen wurde. Zuerst wurden die Kreuzbefliegungen der Auenbereiche durchgeführt. Anschließend wurde die Schrägluftbild-Befliegung der Lahn und des Fichtenforstes durchgeführt. Mit einer kurzen Unterbrechung um ca. 14 Uhr aufgrund eines Regenschauers dauerte die Befliegung ca. von 11 Uhr bis 16 Uhr.

### 3.3.3 Vegetationsaufnahmen

Es wurde ein Vorgehen gewählt, dass die Höhendaten aus den Luftbildaufnahmen mit manuellen Erfassungen der Vegetation im UG verknüpft, um die CO<sub>2</sub>-Speicherung der Vegetation abschätzen zu können. In RAVINDRANATH und OSTWALD (2008) werden verschiedene Vorgehensweisen vorgestellt, um die Kohlenstoffspeicherung mit den aus dem Gelände zur Verfügung stehenden Daten zu berechnen. Da sich die Ansätze für Pflanzen verschiedener Wuchsformen unterscheiden, unterteilen RAVINDRANATH und OSTWALD ihre Methodik in Vegetationstypen. Ausgehend davon wurden die im UG vorkommenden Vegetationstypen klassifiziert. Über das bereits zur Verfügung stehende Luftbild (s. Abb. 7) konnten die folgenden Vegetationstypen abgeleitet werden.

#### 1) Gehölze

Bäume sind verholzte mehrjährige Pflanzen mit meist einem Hauptstamm (RAVINDRANATH und OSTWALD, 2008: 138). Sträucher sind eine Wuchsform der Gehölze mit einem kleinen Stamm als Hauptachse und mehreren dünneren Stämmen nahe am Boden (ebd.). Die vorkommenden Bäume und Sträucher werden im Folgenden als Gehölze zusammengefasst. Im UG ist das Ufer mit Gehölzen ausgebildet. Weiterhin besteht ein Forst mittig des UG aus einer Ansammlung aus Nadelgehölzen. Die Erfassung und Verortung der Gehölzarten war notwendig, um nachfolgend die artspezifische Gehölzdichte zu ermitteln und die Biomasse zu berechnen. Jedem Gehölz im UG wurde eine Nummer zugeordnet und diese auf dem ausgedruckten Luftbild eingetragen, damit eine spätere Zuordnung der Gehölze im GIS stattfinden konnte. Anschließend wurde die Gehölzart bestimmt und der Stammumfang in 130 cm Höhe mit einem Maßband erfasst. Bestand ein Baum aus mehreren Stämmen wurde die Anzahl der Stämme aufgenommen und der Stammumfang in 130 cm Höhe gemessen. Dieses Vorgehen wurde für alle am Ufer befindlichen Gehölze vorgenommen. Der Brusthöhenumfang der Gehölze im mittig gelegenen Forst wurden geschätzt, da der Bereich eingezäunt war.

#### 2) Weiden

Weiden gehören zu dem Vegetationstyp der Gehölze. Sie werden an dieser Stelle getrennt aufgeführt, da sich die Berechnungsmethodik zu dem der Gehölze unterscheidet. Die aufzunehmenden Parameter im Gelände waren die Weidenart, die Verortung im Luftbild, der Umfang der Weiden in 130 cm Höhe und die Anzahl der Triebe.

#### 3) Krautige Pflanzen

Krautige Pflanzen können ein oder mehrere Jahre überdauern und bilden keine verholzten Pflanzenteile (RAVINDRANATH und OSTWALD, 2008: 294). Das Ziel der Aufnahme der krautigen Biomasse ist eine Datengrundlage zu schaffen, um die krautige Biomasse nach dem Vorgehen

von „PhytoCalc“ (BOLTE, 2006) zu berechnen. Das allgemeine Vorgehen der Vegetationsaufnahmen entspricht dem Verfahren nach Braun-Blanquet (vgl. BRAUN-BLANQUET, 1964). Die Aufnahmeflächen sollten über eine homogene Artenzusammensetzung und eine ähnliche Wuchshöhe der Vegetation verfügen (ebd.). Die Größe der Aufnahmeflächen richtet sich nach den Empfehlungen von DIERSSEN (1990). Nach Auswahl der Fläche wurden die Flächenlängen nach Schrittmaß abgegangen und die Eckpunkte abgesteckt.

Anschließend wurden die folgenden Parameter entweder direkt im Gelände aufgenommen oder anschließend nachgetragen:

- Die Gemeinde, Gemarkung, Flurnummer und Flurstücksnummer
- Die GPS Verortung, aufgenommen mit einem Handy und anschließender Korrektur über GIS und dem vorliegenden Luftbild
- Die Nutzung der Fläche
- Die Größe der Aufnahmefläche
- Der Standort, bzw. die Belichtungssituation
- Die vorliegende Schichtung (Kraut- Strauch- Baumschicht)
- Die geschätzte Deckung

Anschließend wurden alle im abgesteckten Bereich vorkommenden Arten mit der Nomenklatur nach WISSKIRCHEN & HAEUPLER (1998) im Aufnahmebogen notiert. Die Schätzung der Abundanz nach BRAUN-BLANQUET (1964) ist als Datengrundlage für die weitere Biomassebestimmung mit PhytoCalc zu ungenau. Daher war eine prozentgenaue Schätzung der Deckung der einzelnen Artenvorkommen notwendig. Bei einer Schätzung ab 5 % der Art wurde die gestreckte Sprosslänge bzw. Blattlänge in cm von ca. 10 Individuen gemessen und notiert. Die Messung der Länge wurde mithilfe eines Maßbands vorgenommen.

Die Anzahl der vorgenommenen Vegetationsaufnahmen richtete sich nach der Strukturvielfalt des UG. In die Berechnung des Kohlenstoffgehalts nach BOLTE (2006) flossen lediglich krautige Arten ein, weshalb nur diese in den Vegetationsaufnahmen des zuvor genannten Vorgehens berücksichtigt wurden.

## 3.4 Datenauswertung

### 3.4.1 Generierung des Orthophotos und des Oberflächenmodells

Ein digitales Orthofoto (DOP) ist eine verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildung der Erdoberfläche (ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN, 2012: 15). Berechnet werden DOPs auf Grundlage von Luftbildern und 3D-Messdaten. Luftbilder geben die Erdoberfläche verzerrt wieder, da die unterschiedlichen Höhen der Landschaft nicht



berücksichtigt werden. Die Darstellung von Höhen findet in digitalen Höhenmodellen statt, wobei zwischen zwei Modellen unterschieden wird. Im digitalen Geländemodell (DGM) werden Höhen des Erdbodens ohne der darauf befindlichen Vegetation oder Bebauung abgebildet. Das digitale Oberflächenmodell (DOM) beschreibt die verschiedenen Höhen, die aus der vorhandenen Vegetation oder Bebauung resultieren (ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN, 2012: 33). Die Verarbeitungsschritte von den Drohnenbildern hin zum DOM und DOP wurden von Tobias Brehm von der BfG mithilfe von „Structure from Motion“ Methoden mit der Software Agisoft Metashape übernommen.

Bereits zur Verfügung stand das DGM mit einer Rasterauflösung von 1 m x 1 m (Bezugsquelle: LVerGeo, Rheinland-Pfalz). Durch die Subtraktion der Höhen des Geländes im DGM mit den Höhen der Oberfläche inklusive Bewuchs ergab sich ein Raster mit den tatsächlichen Höhen der Gehölze und Weiden. Die Höhe der Vegetation war für die verwendeten Methoden zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung notwendig.

Aus den mit der Drohne erhobenen Daten konnte innerhalb des Programms Agisoft Metashape (AGISOFT LLC, 2020: www) die Kronenschirmfläche der Gehölze in Quadratmeter abgeleitet werden. Diese ist die Gesamtfläche der aus dem Luftbild abzugrenzenden Kronen der Gehölze. Sind mehrere Gehölze in eine Kronenschirmfläche zusammengefasst, wird der prozentuale Anteil geschätzt und die Kronenschirmfläche entsprechende der Anteile aufgeteilt (s. Abb. 10).

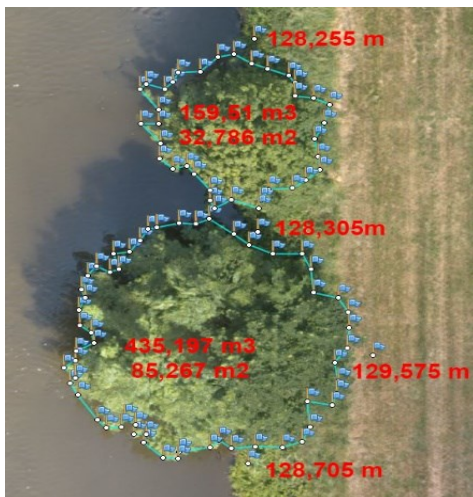


Abb. 10: Ableitung der Volumina aus den Luftbildaufnahmen

### 3.4.2 Biomasse- und Kohlenstoffberechnungen der Vegetation

Die Berechnung der Biomasse erfolgte innerhalb der Einteilung in den Vegetationstypen (s. 3.2.6). Für die Gehölze inklusive der Weiden wird die Biomasse sowie Kohlenstoffspeicherung jedes Individuums berechnet. Für die krautigen Pflanzen wurde die die Kohlenstoffspeicherung anhand der Aufnahmen der krautigen Biomasse bestimmt und dann auf ähnlich bewachsene Bereiche extrapoliert. Über das erstellte DOP wurde die genaue Abgrenzung der

Grünlandfläche und des Ufersaums mit ArcGIS digitalisiert. Dies erfolgte im Maßstab 1:100, um eine genau Abgrenzung der Vegetationstypen zu ermöglichen.

## **Gehölze**

Die Berechnung der Gehölze erfolgte für die oberirdische Biomasse, da die angewandten Methoden die Erfassung von Wurzeln oder Laub nicht ermöglichen. Die Biomasse gibt das Gewicht des Gehölzes bzw. des Stammes an.

Der erste Ansatz orientiert sich an den manuell im Gelände erhobenen Daten und nutzt lediglich die erhobenen Höheninfos der Gehölze aus dem DOM. Das Grundprinzip in der manuellen Bestimmung der Biomasse der Gehölze ( $BM$ ) war die Berechnung des Volumens der Stämme ( $V$ ). Das Volumen wurde mit der Dichte des Holzes ( $D$ ) der jeweiligen Art multipliziert, um das Trockengewicht zu berechnen (RAVINDRANATH, OSTWALD, 2008: 138).

$$BM = V * D \quad (1)$$

Als Eingangsparameter zur Berechnung des Volumens wurde der Umfang des Gehölzes in 130 cm Höhe im Gelände gemessen. Aus dem Umfang ( $U$ ) lässt sich mit folgender Formel der Radius ( $r$ ) berechnen.

$$r = \frac{U}{2\pi} \quad (2)$$

Die Information der Höhe der Gehölze ( $H$ ) wurde aus dem Höhenmodell der Drohne entnommen.

$$V = \pi r^2 H \quad (3)$$

Es wurde ein artspezifischer Ansatz gewählt, da die Dichte der Arten je nach Art variiert und das Ergebnis der Biomasse beeinflusst (RAVINDRANATH UND OSTWALD, 2008: 138). Damit die jeweiligen Gehölze im Luftbild richtig zugeordnet werden, war die Verortung mit Hilfe einer Markierung auf dem Luftbild im Gelände notwendig.

Über eine Literaturrecherche wurde der Referenzwert der Holzdichte der jeweiligen Art ermittelt. Die Internetseite „Tree Functional Attributes and Ecological Database“, dient unter anderem als eine Datenbasis zur Recherche von Holzdichten (World Agroforestry, 2020: www). Initiator ist das „World Agroforestry Centre“, das auf internationaler Ebene die Agroforstwirtschaft im Zusammenhang mit dem Klimaschutz untersucht (World Agroforestry: www). Über die Seite können Veröffentlichungen gefunden werden, in denen die Biomasse

von verschiedenen Arten untersucht und deren Holzdichte ermittelt wurde. Die Werte für die Holzdichte wurden hauptsächlich BRZEZIECKI & KIENAST, (1994) und ROLOFF et al. (2008) entnommen. Falls keine Informationen bestimmter Arten zu finden sind, raten RAVINDRANATH und OSTWALD (2008: 261), die Dichte morphologisch ähnlicher aufgebauter Bäume zur Berechnung heranzuziehen.

Einige Gehölze bestehen aus mehreren Stämmen mit unterschiedlichem Brusthöhendurchmesser (BHD). In dem Fall wurde die Biomasse jedes Stamms berechnet und anschließend für das Gehölz summiert. Bei der manuellen Berechnungsmethode konnte die Biomasse der Äste nicht berechnet und in der Kohlenstoffspeicherung berücksichtigt werden.

Nach Berechnung der Biomasse wurde ein Faktor gesucht, der den Anteil des gespeicherten Kohlenstoffs in der Biomasse angibt. Der fixierte Kohlenstoff in der Biomasse bildet ca. 45- 50 % des Trockengewichtes von Pflanzen (CARVAJAL, o. J.: 4). Der Wert von 0.47 t C pro Tonne Biomasse in verholzter Vegetation wird auch für die nationalen Treibhausgasinventuren angenommen und von weiteren Quellen bestätigt (vgl. AALDE et al., 2006; RICHTER et al., 1995). In dieser Arbeit wird daher von einem Umrechnungsfaktor von 0,47 von Biomasse zu Kohlenstoff ausgegangen. Es wurde die Biomasse der Gehölze berechnet und mittels des Faktors 0,47 in Kohlenstoffspeicherung übersetzt.

Zusätzlich zur o.g. manuellen Methode wurde die Biomasse von Gehölzen durch eine statistische Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) und der drohnenbasierten Datenbasis berechnet. Die Biomassefunktion wurde im Rahmen einer Stadtbaum-Studie für Karlsruhe aufgestellt, bei der die oberirdische Biomasse von Einzelbäumen ermittelt wurde. Die Regressionsgleichung beruht auf einer Methodik, bei der die anzunehmende Verästelung der Bäume gemessen wurde und auf eine Korrelation mit der Biomasse des Stamms und der Äste untersucht wird. Dieser Zusammenhang ist innerhalb der Regressionsfunktion dargestellt und ermöglicht anhand der Parameter BHD, Höhe, Holzdichte sowie der Kronenschirmfläche eine Schätzung der Biomasse von Stämmen und Ästen anhand aus Luftbildern gewonnener Daten. Die Baumart ist kein Parameter der Biomassefunktion, wurde aber indirekt durch die mittleren Holzdichten berücksichtigt. Im Baumartenspektrum, auf dem die Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) beruht, werden keine Fichten berücksichtigt. Fichten sind schnell wachsende Gehölze mit einer geringen Holzdichte von etwa  $0,37 \text{ g/cm}^3$  (vgl. ROLOFF ET AL. 2008). Die mittlere Holzdichte des in der Biomassefunktion berücksichtigten Baumartenspektrums von KÄNDLER und ADLER (2011) ist höher als die der Fichten. Daher konnte die Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) nicht für die Fichten im UG angewendet werden. Folglich unterteilt sich der Vegetationstyp Gehölze in die beiden Untergruppen „Laubgehölze im Uferbereich und Forst“ und „Fichten im Forst“.

Zur Berechnung der Biomasse ( $BM$ ) der Gehölze im Uferbereich waren die Kronenschirmfläche ( $KSF$ ) und Höhe ( $H$ ) die Parameter. Diese standen durch das DOM sowie die Auswertung in Agisoft Metashape (AGISOFT LLC, 2020: www) zur Verfügung.

$$BM = 0,56758(\pm 0,18627) * KSF^{0,70596 (\pm 0,06715)} * H^{1,78331 (\pm 0,17443)} \quad (4)$$

Ausgehend von der errechneten Biomasse wurde der bereits in der o.g. manuellen Methode verwendete Faktor von 0,47 angewandt, um die Kohlenstoffspeicherung der Gehölze aus der berechneten Biomasse abzuleiten.

## Weiden

Die Biomasse der im Gelände vorkommenden Weiden konnte nicht nach der o. g. Methode für Gehölze berechnet werden, da für den Großteil der im Gebiet vorkommenden Weiden keine Referenzwerte der Gehölzdichte verfügbar sind (WORLD AGROFORESTRY, 2020: www). In einer Masterarbeit an der Uni Hannover in Kooperation mit der BfG zum Thema „Geotechnische und ökologische Wirksamkeit von Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen“ wurde die Biomasse von Weidenspreitlagen bestimmt (vgl. ZIEGENHORN, 2017). Die Berechnungen stützen sich auf Messdaten, bei denen Pflanzenteile von *Salix alba* und *Salix purpurea* im Ofen getrocknet wurden, um die Biomasse zu bestimmen (ZIEGENHORN, 2017: 55). Es bestehen Daten zu den Triebblängen und den Brusthöhendurchmesser der Weiden nach ZIEGENHORN (2017).

Die von Ziegenhorn erhobenen Daten wurde mittels einer Regression mit dem Microsoft Office Programm Excel auf eine Korrelation zwischen dem Volumen und der Biomasse untersucht. In einer Regression werden Messpunkte interpoliert und mittels einer Näherungskurve sowie einer Trendformel Zusammenhänge dargestellt (MERGEL, 2017: 311). Es zeigt sich, dass bei steigendem Volumen ein statistisch ähnlicher Anstieg der Biomasse besteht. Daher kann von einer positiven Korrelation zwischen dem Volumen und der Biomasse von Weidentrieben ausgegangen werden.

Der Vergleich verschiedener Regressionsmodelle durch das Bestimmtheitsmaß „ $R^2$ “ ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Regressionsmodelle auf Ziegenhorns (2017) Datensatz

Regressionsmodell	Regressionsformel	Bestimmtheitsmaß $R^2$
Exponentiell	$y = 548,07e^{0,0002x}$	0,6099
Linear	$y = 0,2124x + 403,46$	0,8223
Logarithmisch	$y = 920,05\ln(x) - 6101,1$	0,7762
Polynomisch (2. Grades)	$y = -1E-05x^2 + 0,4141x - 25,985$	0,8757
<b>Potenz</b>	<b><math>Y=1,2889x^{0,8338}</math></b>	<b>0,911</b>

Über das Bestimmtheitsmaß „R<sup>2</sup>“ kann der Zusammenhang zwischen Messwerten und einer Regressionsformel bewertet werden (MERGEL, 2017: 314). Es zeigt sich, dass die Potenzformel über das höchste Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> verfügt und damit am geeignetsten ist (s. Tabelle 1), um über das Volumen eines Weidentriebes auf die Biomasse zu schließen. Die Biomasse (*BM*) eines Weidentriebes aus den Vegetationsaufnahmen dieser Arbeit kann mittels des Volumens (*V*) (s. Funktion (3)) berechnet werden.

$$BM = 1,2889 * V^{0,8338} \quad (5)$$

Über Excel wurde eine Standardabweichung von  $\pm 0,9$  berechnet, die bei Anwendung der Formel (5) auf die im Gelände erhobenen Daten der Weiden berücksichtigt wurde. Da die Annäherungsformel das Gewicht eines einzelnen Triebes berechnet, wurde die angenäherte Biomasse mit der Anzahl der Triebe multipliziert. Ausgehend von der errechneten Biomasse wurde der zuvor verwendete Faktor von 0,47 angewandt, um die Kohlenstoffspeicherung in den verholzten Pflanzenteilen der Weiden zu berechnen.

Die zuvor angewandte Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) berücksichtigt im Baumartenspektrum keine Weiden und wurde daher nicht für die Weiden angewandt. Daher wurde zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung ausschließlich die manuelle Methode in Kombination mit den Höhen aus dem DOM und Berechnung über die o.g. Regression umgesetzt.

### **Krautige Pflanzen**

Ein gängiges Verfahren aus der Literatur zur Bestimmung der Biomasse von krautigen Pflanzenbeständen ist das Ernten von Beständen auf ca. 10 x 10 m Fläche und der anschließenden Trocknung bei 60 Grad Celsius für 48 Stunden im Ofen (vgl. ZERBE 2013; FERNANDES 2020; HUSSON et al. 2013). Anschließend wird das Trockengewicht gewogen. Dieses Vorgehen war im Rahmen dieser Arbeit zeitlich nicht umsetzbar. Daher wurde ein Verfahren gewählt, bei dem bereits Daten zur Biomasse und Anteil an gespeichertem Kohlenstoff von krautigen Pflanzen vorliegen. Das am Institut für Waldbau in Rheinland-Pfalz erarbeitete Verfahren PhytoCalc eignet sich zur Schätzung der oberirdischen Biomasse sowie des Kohlenstoffgehalts von krautigen Pflanzen (BOLTE, 2006: 1). Ursprünglich wurde das Schätzmodell PhytoCalc auf Basis von krautigen Pflanzen auf Waldflächen berechnet. Dabei wurden unterschiedliche Pflanzen auf ihre Morphologie untersucht und in verschiedene Wuchsformengruppen eingeteilt (BOLTE 2006: 8). Jede Wuchsformgruppe verfügt über Regressionskonstanten, die in die Formel zur Berechnung der Biomasse eingesetzt werden müssen (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Regressionskonstanten der in diese Arbeit eingeflossenen Wuchsformengruppen nach Bolte (2006)

Wuchsformengruppe	Regressionskonstanten		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Mittelkraut (MK)	0,10332	0,95776	0,62133
Großkraut (GK)	0,02123	1,03835	0,86312
Mittelgras (MG)	0,00345	0,95761	1,55756
Kleinstrauch (KST)	0,03421	0,99625	0,98869

Innerhalb der Aufnahmen der krautigen Biomasse dieser Arbeit wurden die vorkommenden Arten und ihr prozentgenauer Deckungsgrad bestimmt. Die vorgefundenen Arten wurden ihrer jeweiligen Wuchsformengruppe entsprechend BOLTE (2006) eingeteilt. Neben der Wuchsformgruppe war der Deckungsgrad entscheidend. Ähnlich zu dem Vorgehen von SCHMIDT und STREIT (2009: 7) wurde ab einem Deckungsgrad von 5 % einer Art einer Aufnahme­fläche die gestreckte Spross- oder Blattlänge von je 10 Individuen ermittelt.

Über die folgende Regressionsfunktion von (BOLTE, 2006: 7) kann artenscharf die Biomasse (*BM*) von krautigen Pflanzen mittels der im Gelände erhobenen Daten des Deckungsgrades (*D*) und der gemittelten Sprosslänge (*ML*) sowie der jeweiligen Regressionskonstanten (*a*, *b*, *c*) auf einem Quadratmeter berechnet werden.

$$BM = a * D^b * ML^c \quad (6)$$

Innerhalb des Programms PhytoCalc wurden Elementkonzentrationsgruppen für die untersuchten krautigen Pflanzen unterschieden und der Gehalt verschiedenerer Elemente, unter anderem Kohlenstoff ermittelt. Um aus den Ergebnissen der Biomasse die Kohlenstoffspeicherung zu berechnen, wurde der mittlere Kohlenstoffgehalt der den jeweiligen Arten zugeordneten Elementkonzentrationsgruppe mit der Biomasse multipliziert (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Elementkonzentrationsgruppen mit der in die Arbeit eingeflossenen mittlere Kohlenstoffkonzentration nach Bolte (2006)

Elementkonzentrationsgruppen	Mittlere Kohlenstoffkonzentration (%)
Kalkreiche Kräuter (K1)	0,4188
Nährstoffreiche Kräuter (K2)	0,4461
Nährstoffarme Kräuter (K4)	0,4502
Nährstoffreiche Süßgräser (G1)	0,4466
Nährstoffarme Süßgräser (G2)	0,4645
Rubus-Kleinsträucher (ST1)	0,4748

Mittels der Einteilung in Tabelle 3 wurde artspezifisch die berechnete Biomasse mit der jeweiligen Kohlenstoffkonzentration multipliziert.

Dieses Vorgehen wurde für jede angetroffene Art vorgenommen und innerhalb der Aufnahmen der krautigen Biomasse für einen Quadratmeter summiert. Von den insgesamt 5 erstellten Vegetationsaufnahmen bildet eine das landwirtschaftlich genutzte Grünland ab und 4 der Aufnahmen den Uferbereich. Die Aufteilung resultierte aus der homogenen Artenzusammensetzung der Grünlandfläche und dem heterogenen Uferbewuchs, der mehrere Vegetationsaufnahmen nötig machte, um das vielfältige Artenspektrum abzudecken. Es wurde das arithmetische Mittel der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter für die krautige Vegetation des Ufers und der Grünlandfläche gebildet. Anschließend wurden die Werte mit den Flächengrößen des Ufers und der Grünlandfläche im UG multipliziert. Das Verfahren für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung wird in der Abb. 11 visualisiert.



Abb. 11: Ablaufdiagramm zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in der krautigen Vegetation

Anders als bei der Berechnung der Kohlenstoffspeicherung der Gehölze, fließen keine Daten aus den Luftbildern in die Berechnung der krautigen Vegetation ein. Grund dafür ist der unzureichende Detailgrad für fernerkundliche Biomasseberechnungen kleinerer Pflanzen (ZAHAWI et al. 2015: 20).

### 3.5 Entwicklung des Szenarios „Stauraumstrukturierung“

Mittels der Szenariotechnik können mögliche Entwicklungsrichtungen und zukünftige Zustände aufgezeigt werden (V. HAAREN, 2004: 287). Für das Szenario „Stauraumstrukturierung“ dieser Arbeit wurden Ziele für den Entwicklungszustand der untersuchten Aue festgelegt. Anschließend wurden eine Literaturrecherche nach geeigneten Maßnahmen vorgenommen, um die Entwicklungsziele zu erreichen. Die konkrete Verortung der Maßnahmen in der Aue wurde unter Rücksprache mit dem Referat „Vegetationskunde und Landschaftspflege“ der BfG durchgeführt.

Innerhalb des Szenarios wurde die Annahme getroffen, dass nach Durchführung der Maßnahmen und Einstellung der Nutzung sich durch die Sukzession eine standorttypische

Vegetation entwickelt. Es wurde ein Szenario entwickelt, das alle Maßnahmen bündelt und schlussendlich die Vegetation des Zielzustandes im Szenario beschreibt. Auf Basis dessen konnte die Kohlenstoffspeicherung des Szenarios „Stauraumstrukturierung“ im nächsten Schritt bilanziert werden.

### 3.6 Kohlenstoffberechnungen der Vegetation im Szenario „Stauraumstrukturierung“

Die Kohlenstoffberechnungen der Vegetation im Szenario „Stauraumstrukturierung“ werden durchgeführt, um die Maßnahmen in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung mit dem aktuellen Bestand zu vergleichen und die dritte Forschungsfrage zu beantworten. Dafür wurden in GIS im Uferbereich und um das geplante Nebengerinne Weiden und Hartgehölze nach dem Vorbild einer autotypischen Vegetation nach ELLENBERG (1986) verortet. Die Anzahl der Individuen, mit der nachfolgend die Kohlenstoffspeicherung berechnet wird, resultierte aus dem zur Verfügung stehenden Platz im Uferbereich und um das Nebengerinne. Die Berechnung der Zielvegetation orientierte sich an dem zuvor durchgeführten Verfahren zur Kohlenstoffberechnung der aktuellen Vegetation. Da es sich um eine grobe Einordnung der Kohlenstoffspeicherung handelt, wurden die Schwankungen in den errechneten Ergebnissen der Vegetation nicht berücksichtigt.

Das Szenario „Stauraumstrukturierung“ basiert auf der Annahme der Zunahme von Weiden und Hartgehölzen. Es wurden keine detaillierten Daten zur Baumart, Höhe oder dem BHD im Szenario festgelegt. Daher wurde für die Gehölze das arithmetische Mittel der Kohlenstoffspeicherung aus dem Bestand erhobenen Daten gebildet und in einem einzelnen repräsentativen Gehölz dargestellt. Dieser Wert wurde auf die anzunehmende Anzahl der Gehölze im Szenario „Stauraumstrukturierung“ extrapoliert. Dieses Ergebnis wurde mit der Kohlenstoffspeicherung der Gehölze aus dem Bestand, die im Szenario erhalten bleiben, summiert.

Für die Weiden wurde wie bei den Gehölzen die durchschnittliche Kohlenstoffspeicherung in einer Weide berechnet und auf die anzunehmende Anzahl der Vegetation des Szenarios angewandt. Anschließend wurde der aktuelle Bestand an Weiden mit dem Ergebnis summiert.

Für die krautigen Arten im Uferbereich und im Bereich des Nebengerinnes wird auf die Berechnungen aus den Vegetationsaufnahmen zurückgegriffen. Zwar ist im Szenario von einer anderen Artenzusammensetzung auszugehen, dennoch repräsentieren die Vegetationsaufnahmen einen typischen Uferbewuchs an Gräsern und einjährigen Arten. Die Kohlenstoffspeicherung für einen Quadratmeter wird auf die Gesamtfläche des im Szenario prognostizierten krautigen Bewuchses extrapoliert.



Für die Grünlandfläche ist nach Umsetzung der Maßnahmen ebenfalls von einer anderen Artenzusammensetzung als zum jetzigen Zeitpunkt auszugehen. Diese kann allerdings nicht ausreichend präzise definiert werden, um die Kohlenstoffspeicherung nach BOLTE (2006) zu berechnen. Daher wird der für die Bestandsaufnahme berechnete Faktor der Kohlenstoffspeicherung pro Quadratmeter auf die im Szenario definierten Grünlandflächen extrapoliert.

In Weidenspreitlagen können nach ZIEGENHORN (2017: 130) ca. 6,3 kg Kohlenstoff pro Quadratmeter in den Trieben gespeichert werden. Dieser Wert wird für die im Szenario geplante Fläche der Weidenspreitlage extrapoliert.

### 3.7 Evaluierung des Drohneneinsatzes zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung

Die Evaluierung des Drohneneinsatzes zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung beantwortete die dritte Forschungsfrage: Wie geeignet ist der Einsatz drohnengestützter Fernerkundungstechniken zur Messung der Kohlenstoffspeicherung in der untersuchten Aue? Dafür wurde die Berechnung mittels der Drohne unter den Kriterien des möglichen Einsatzbereiches, der Grenzen der Methodik und dem zeitlichen Aufwand qualitativ diskutiert. Abschließend wurde ein Fazit darüber gezogen, wie geeignet der Einsatz der Drohne für den Einsatzbereich der untersuchten Aue war.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Digitales Orthophoto und Oberflächenmodell

Es wurden insgesamt 1.133 Luftbilder vom UG aufgenommen. Die Bilder haben eine Größe von 5464 x 3070 Pixel. Es wurde eine ground sample distance von 1,04 cm erreicht. Ein Pixel deckt somit 1,0816 cm<sup>2</sup> des UG ab.

Die aufgenommenen Luftbilder wurden zu einem DOP zusammengefügt. Die Abb. 12 zeigt einen Ausschnitt des UG, das einen Teil des DOP darstellt.



Abb. 12: Einzelne Luftbildaufnahmen mittel Structure from Motion (SfM) Methoden zusammengefügt zum Orthophoto (Ausschnitt)

Das DOP ist georeferenziert und trägt einen Maßstab, wodurch ein räumlicher Bezug möglich ist (s. Abb. 13). Das erstellte DOP weicht in der Darstellung von den Originalaufnahmen an einigen Stellen farblich ab. Das ist den Lichtverhältnissen und Position der Drohne zur Sonne während der Aufnahme geschuldet. Das gesamte Raster setzt sich aus 25534 Spalten und 84969 Zeilen mit einzelnen Rasterzellen zusammen. Die einzelnen Rasterzellen sind ausreichend hoch aufgelöst um die Art einzelner Bäume zu erkennen (s. Abb. 13, Detailausschnitt). Zusätzlich sind im Maßstab 1:100 die zuvor im Gelände vermessenen GCP zu erkennen (s. Abb. 13, Detailausschnitt).



Abb. 13: DOP der Lahnaue (links) mit zwei Detailausschnitten (rechts oben: Esche (*Fraxinus excelsior*) und Bruchweide (*Salix fragilis*), unten rechts GCP)

Im Ergebnis zeigt sich, dass das DOM hochaufgelöst ist und im Detailausschnitt die Baumstruktur deutlich zu erkennen ist (Abb. 13). Das entstandene Höhenmodell bildet die Vegetation im Gelände nach. Da das verwendete DGM in einer Rasterauflösung von 1 m x 1 m vorliegt, verschlechtert sich die Auflösung des Höhenmodells der Vegetation durch die Verarbeitung (Abb. 15). Die Vegetation im Gelände ist zwischen wenigen Zentimetern und 17 m hoch. Für den Fichtenforst gilt diese Einstufung nicht. Da die Drohne die Bäume nur knapp überflogen hat, war die Ermittlung der Höhen im DOM fehlerhaft. Es kann bei einer Flughöhe von 30 m und einem knappen Überflug der Fichten (*Picea abies*) von einer Höhe zwischen 28 m und 20 m der Fichten im Forst ausgegangen werden.

Die „Structure from motion“ Methode kann aufgrund der Lichtbrechung zwischen Luft und Wasser die Höheninformation der Sohle nicht erfassen (BALMES, 2019: 161). Daher ist die Höheninformation ab der Wasserkante im DOM nicht valid.

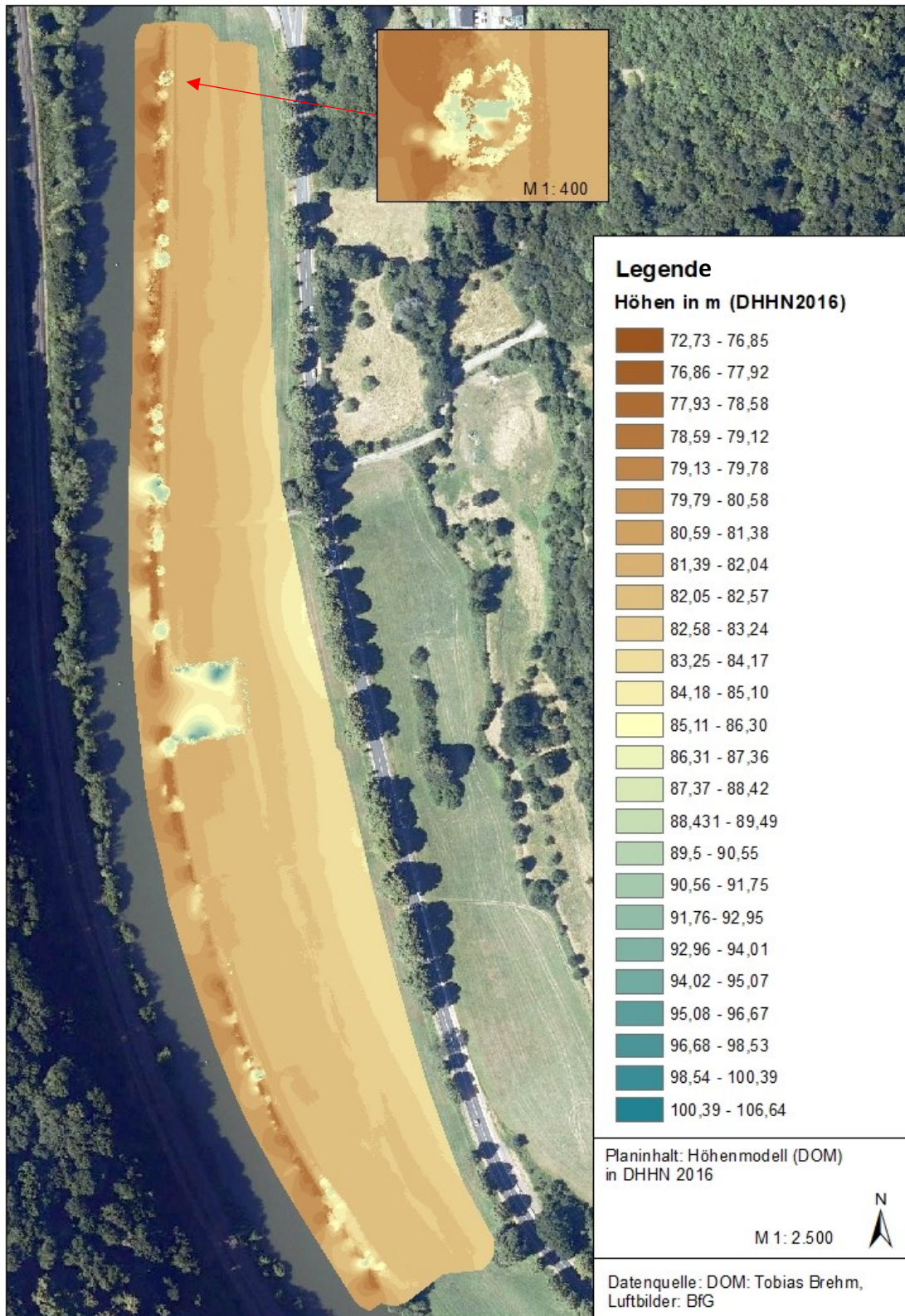


Abb. 14: DOM der Lahnaue (links) mit Detailausschnitt (rechts oben: Esche (*Fraxinus excelsior*))

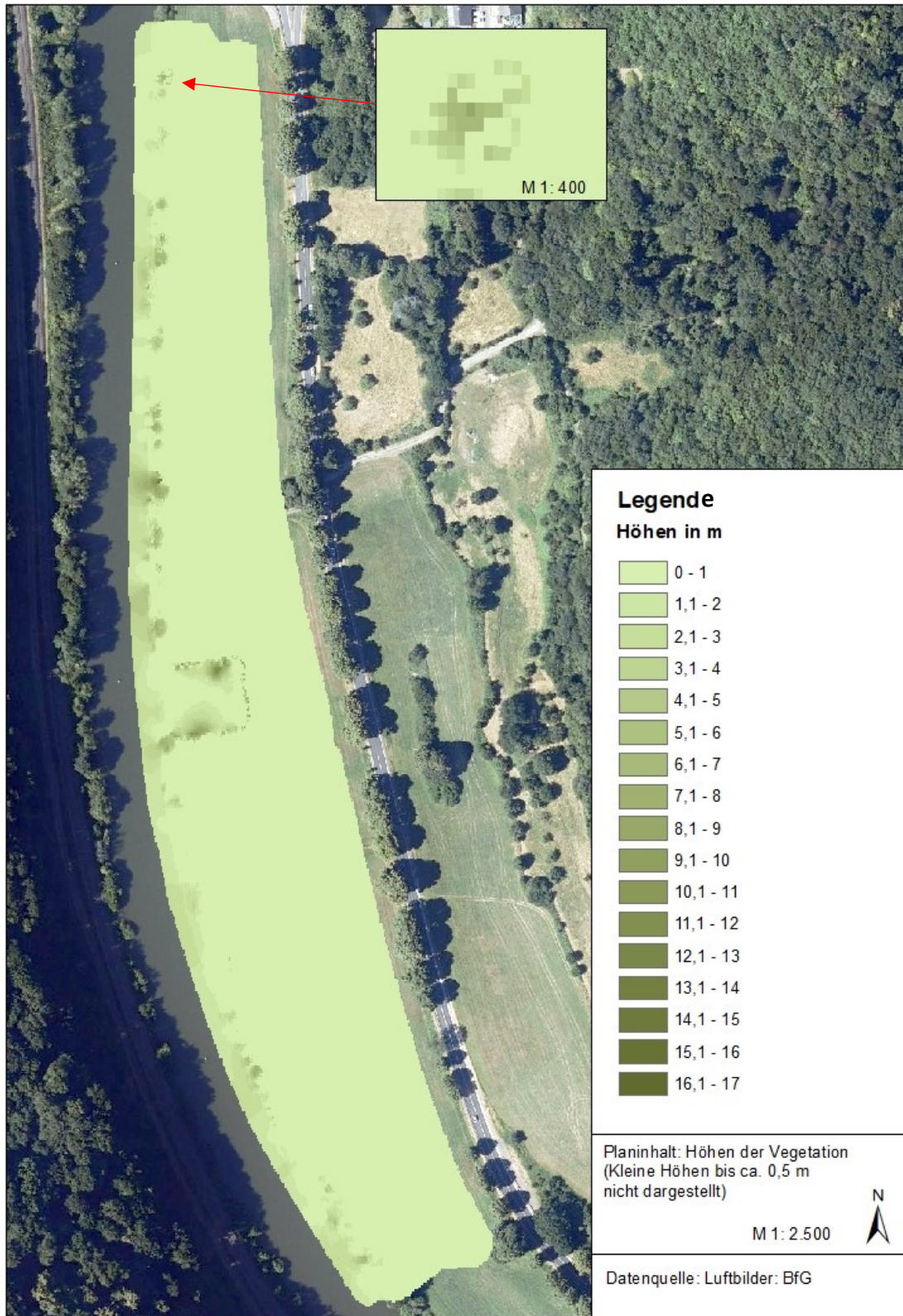


Abb. 15: DOM der Vegetation mit Detailausschnitt (rechts oben: Esche (*Fraxinus excelsior*))

## 4.2 Bestand der Vegetation

Die insgesamt 3,75 ha große Untersuchungsfläche besteht zu ca. 87 % aus einem intensiv bewirtschafteten, artenarmen Grünland (s. Abb. 17). Der Uferbereich macht ca. 9 % des UG aus und ist von krautigen Pflanzen, Gehölze und wenigen Sträuchern geprägt. Als ein ca. 3 m langer Uferstreifen findet sich als Neophyt der Japanische Staudenknöterich (*Fallopia japonica*) in der Vegetation. Das Ufer zur Lahn ist als Gleithang steil ausgebildet. An einigen Stellen beträgt der Höhenunterschied zwischen der Uferkante und der Lahn abhängig vom Wasserstand bis zu 2 m. Der Übergangsbereich zwischen der Vegetation und der Lahn ist mit Steinen gesichert (s. Abb. 16).



Abb. 16: Luftbildaufnahme an der Lahn mit rot markierter Ufersicherung aus Steinen

Im UG gibt es zwei kleinere Gräben, die senkrecht zur Lahn auf der Grünlandfläche verlaufen (s. Abb. 17). Während der Vegetationsaufnahmen im Sommer waren die Gräben trocken. Es konnten jedoch Arten wie Echtes Mädesüß (*Filipendula ulmaria*), Große Brennnessel (*Urtica dioica*) und Schilfrohr (*Phragmites australis*) angetroffen werden, die nach den Zeigerwerten Ellenbergs (Ellenberg et al., 1992) Frischezeiger bis Wechselwasserzeiger sind.

Insgesamt wurden 61 Gehölze im UG erfasst. Diese verteilen sich auf den Uferbereich an der Lahn und einen kleineren Forst (ca. 4 % des UG) und sind mittig im UG gelegen. Prägnant für Uferflurzonen ist das Vorkommen von Weiden als Gebüsch und Gehölz (vgl. Wisskirchen, 1995). Im UG wurden fünf verschiedene Weidenarten angetroffen. Mit insgesamt siebzehn Individuen ist die Weidenart Bruch-Weide (*Salix fragilis*) die am häufigsten vorkommende Art. Im Uferbereich kommen drei Ahornarten vor, unter denen der Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*) mit siebzehn Individuen die zahlreichste Art ist. Die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) kommt dreizehn Mal im Uferbereich vor. Im Forst mittig des UG wachsen hauptsächlich Gemeine Fichten (*Picea abies*) und vereinzelt Hänge-Birken (*Betula pendula*).

Das Vorkommen der krautigen Arten sowie deren Deckungsgrade ist in den Vegetationsaufnahmen zusammengefasst. Diese sind in vollständiger Form dem Anhang zu entnehmen.

Beginnend mit der landwirtschaftlich genutzten Grünlandfläche wurden auf 25 m<sup>2</sup> die Arten bestimmt und ihre Deckung geschätzt. Die drei dominantesten Arten der ersten Vegetationsaufnahme sind das Weidelgras (*Lolium perenne*), der Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*) sowie der Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*). Die restlichen angetroffenen Arten, die Parameter der Deckung sowie der mittleren Sprosslänge, die in die Biomasseberechnung eingeflossen sind, sind dem Anhang zu entnehmen.

Die übrigen vier Vegetationsaufnahmen decken das Spektrum der krautigen Artenzusammensetzung am Ufer der Lahn ab. In der ersten Vegetationsaufnahme des Ufers wurde das Artenspektrum am Ufer auf 10 m Länge und 3 m Breite untersucht. Es dominiert die Artengruppe der Brombeeren (*Rubus fruticosus*) mit einer Gesamtdeckung von ca. 95 %.

In einer weiteren Vegetationsaufnahme besteht die Artenzusammensetzung hauptsächlich aus *Urtica dioica* sowie aus Kratzbeeren (*Rubus Caesius*) und dem Gewöhnlichen Wasserdorst (*Eupatorium cannabinum*) mit einer jeweiligen Deckung um ca. 10 %.

Direkt angrenzend an die Brennesselflur bilden in der vierten Vegetationsaufnahmen Süßgräser eine bis zu 135 cm hohe Gräserflur. Mit dem höchsten Anteil an der Gesamtdeckung sind das Knäuelgras (*Dactylis glomerata*) und der Gewöhnliche Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) die prägnantesten Arten.

Eine weitere Vegetationsaufnahme bildet die Artenzusammensetzung unter einem Gehölz ab. In der Krautschicht dominiert der Hecken-Kälberkropf (*Chaerophyllum temulum*) während 16 weitere angetroffene Arten nur vereinzelt und mit geringer Deckung vorkommen. Die Ergebnisse der Biomassenberechnungen, die aus den Vegetationsaufnahmen und Gehölzlisten resultieren, werden in Kapitel 4.3.3 vorgestellt.



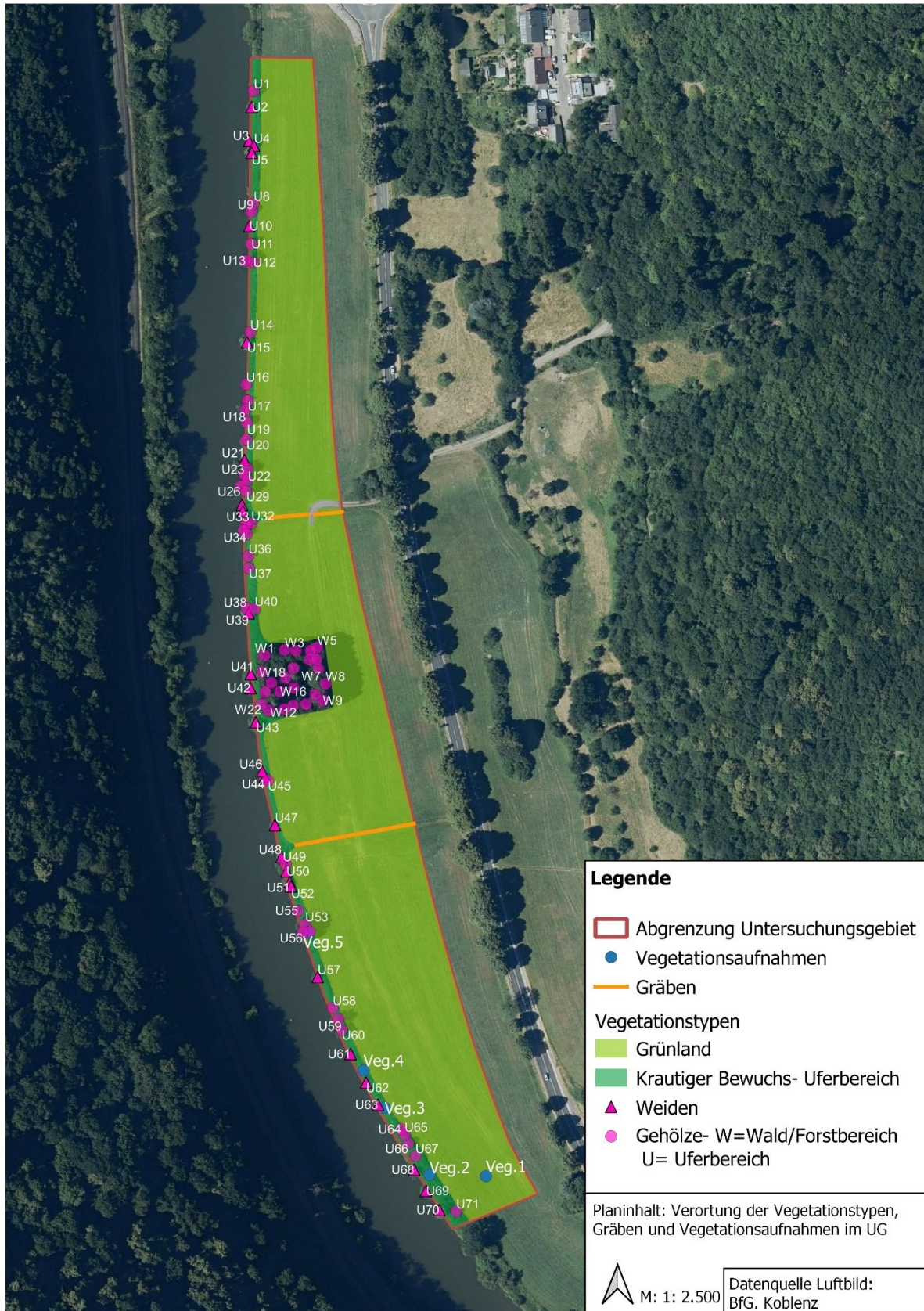


Abb. 17: Verortung der Vegetationstypen, Gräben und Vegetationsaufnahmen

## 4.3 Aktuelle Kohlenstoffspeicherung im Untersuchungsgebiet

### 4.3.1 Gehölze

Die Tabelle 4 zeigt die Gehölznummer, die Gehölzart und die ermittelte Biomasse aus den die Ufergehölze des UG und einzelne Laubbäume im Forst, für die die Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) anwendbar war. Eine vollständige Tabelle mit allen einbezogenen Berechnungsparametern kann dem Anhang entnommen werden.

Tabelle 4: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Gehölze aus manuellen und drohnengestützten Berechnungen

Nr.	Gehölzart	Kohlenstoff (kg)- Manuelle Berechnungen	Kohlenstoff (kg)- Drohnengestützter Ansatz		
			Ergebnis inkl. untere Standardabweichung (kg)	Mittleres Ergebnis (kg)	Ergebnis inkl. obere Standardabweichung (kg)
U1	<i>Fraxinus excelsior</i>	142,22	76,59	217,92	553,30
U8	<i>Acer campestre</i>	0,82	1,08	1,94	3,10
U9	<i>Acer platanooides</i>	1,28	5,39	11,57	22,16
U11	<i>Acer pseudoplatanus</i>	120,39	49,09	133,29	322,96
U12	<i>Acer pseudoplatanus</i>	138,89	48,37	131,07	316,90
U14	<i>Acer pseudoplatanus</i>	9,73	12,31	28,80	60,13
U16	<i>Alnus glutinosa</i>	0,16	1,23	2,25	3,66
U17	<i>Fraxinus excelsior</i>	11,70	12,05	28,14	58,64
U18	<i>Fraxinus excelsior</i>	66,30	36,26	95,25	223,26
U19	<i>Fraxinus excelsior</i>	78,82	39,68	105,34	249,50
U20	<i>Acer pseudoplatanus</i>	50,35	32,99	85,74	198,87
U13	<i>Fraxinus excelsior</i>	173,21	59,00	163,33	403,49
U24	<i>Acer pseudoplatanus</i>	6,83	57,90	160,05	394,76
U22	<i>Fraxinus excelsior</i>	8,44	4,80	10,16	19,15
U26	<i>Acer platanooides</i>	145,85	59,77	165,81	410,39
U23	<i>Fraxinus excelsior</i>	28,54	25,88	65,56	148,18
U29	<i>Acer pseudoplatanus</i>	36,24	28,45	72,80	166,26
U32	<i>Euonymus europaeus</i>	1,67	1,07	1,93	3,11
U33	<i>Acer pseudoplatanus</i>	70,20	36,14	94,98	222,75
U34	<i>Acer pseudoplatanus</i>	8,47	33,03	85,97	199,65
U35	<i>Acer pseudoplatanus</i>	7,58	15,36	36,79	78,64
U36	<i>Acer pseudoplatanus</i>	9,92	20,85	51,66	114,19
U38	<i>Acer pseudoplatanus</i>	11,56	43,58	116,75	279,08
U37	<i>Euonymus europaeus</i>	1,61	1,52	2,84	4,74
U49	<i>Acer pseudoplatanus</i>	25,51	7,80	17,35	34,44
U40	<i>Euonymus europaeus</i>	0,37	1,21	2,20	3,58
U53	<i>Fraxinus excelsior</i>	74,31	24,23	60,89	136,53
U45	<i>Carpinus betulus</i>	1,84	7,51	16,65	32,96

U56	<i>Carpinus betulus</i>	0,25	2,25	4,37	7,58
U54	<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,48	10,09	23,04	46,99
U55	<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,21	0,15	0,22	0,29
U59	<i>Fraxinus excelsior</i>	212,75	34,52	90,19	210,26
U60	<i>Acer pseudoplatanus</i>	143,01	45,86	123,57	297,09
U66	<i>Acer pseudoplatanus</i>	191,51	45,01	120,94	289,91
U64	<i>Fraxinus excelsior</i>	1,17	5,22	11,12	21,15
U65	<i>Euonymus europaeus</i>	1,07	1,04	1,86	2,99
U66	<i>Acer pseudoplatanus</i>	26,04	31,57	81,66	188,44
U71	<i>Euonymus europaeus</i>	4,04	1,42	2,63	4,36
W20	<i>Betula pendula</i>	58,91	135,98	411,82	1112,86
W21	<i>Betula pendula</i>	58,91	135,98	411,82	1112,86
W22	<i>Betula pendula</i>	58,91	135,98	411,82	1112,86
W25	<i>Sambucus nigra</i>	1,59	4,84	10,22	19,23
<b>Summe</b>		<b>1991,67</b>	<b>1333,06</b>	<b>3672,32</b>	<b>9091,21</b>

Im Ergebnis zeigt sich, dass mit der drohnengestützten Methode höhere Kohlenstoffwerte der Gehölze berechnet wurden. Durch einbezogene Standardabweichung im positiven und negativen Bereich ergibt sich für die drohnengestützte Kohlenstoffberechnung ein Ergebnis von ca. 3.672 (+ 5.419/ - 2.339) kg Kohlenstoff. Mittels der manuellen Methode wurde lediglich der Stamm des Baumes berechnet. Das Ergebnis von 1.992 kg Kohlenstoff des manuellen Ansatzes ist im Bereich des Ergebnisses der drohnenbasierten Berechnung enthalten.

Mit Hilfe der Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) konnte die Biomasse von Gemeinen Fichten nicht berechnet werden. Daher wurde die Kohlenstoffspeicherung der Gemeinen Fichten im UG ausschließlich mittels der manuellen Methode berechnet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Gemeinen Fichten

Nr.	Baumart	Kohlenstoff (kg)- Manuelle Berechnungen
W1	<i>Picea abies</i>	74,73
W2	<i>Picea abies</i>	74,73
W3	<i>Picea abies</i>	74,73
W4	<i>Picea abies</i>	74,73
W5	<i>Picea abies</i>	74,73
W6	<i>Picea abies</i>	177,13
W7	<i>Picea abies</i>	177,13
W8	<i>Picea abies</i>	177,13
W9	<i>Picea abies</i>	177,13
W10	<i>Picea abies</i>	177,13

W11	<i>Picea abies</i>	177,13
W12	<i>Picea abies</i>	177,13
W13	<i>Picea abies</i>	177,13
W14	<i>Picea abies</i>	387,48
W15	<i>Picea abies</i>	387,48
W16	<i>Picea abies</i>	387,48
W17	<i>Picea abies</i>	387,48
W18	<i>Picea abies</i>	387,48
W19	<i>Picea abies</i>	387,48
<b>Summe</b>		<b>4.115,58</b>

In den Stämmen der Gemeinen Fichten werden ca. 4.116 kg Kohlenstoff gebunden.

#### 4.3.2 Weiden

Die Biomasse der Weiden wurde methodisch separat zu den restlichen Gehölzen im UG berechnet. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 6 dargestellt. Die vollständigen Berechnungen mit den einbezogenen Parametern sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 6: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff der Weiden aus der Regressionsfunktion

Nr.	Weidenart	Anzahl Triebe	Biomasse (kg)	Kohlenstoff (kg)- Manuelle Berechnungen
U2	<i>Salix fragilis</i>	5	77,13	36,25
U3	<i>Salix triandra</i>	3	19,37	9,11
U4	<i>Salix triandra</i>	5	43,69	20,53
U5	<i>Salix eleagnos</i>	2	3,49	1,64
U10	<i>Salix fragilis</i>	2	1,33	0,62
U15	<i>Salix fragilis</i>	2	5,52	2,59
U21	<i>Salix purpurea</i>	5	0,17	0,08
U31	<i>Salix cinerea</i>	7	6,22	2,93
U39	<i>Salix fragilis</i>	5	2,92	1,37
U41	<i>Salix fragilis</i>	8	27,29	12,83
U42	<i>Salix caprea</i>	5	5,37	2,52
U43	<i>Salix fragilis</i>	5	77,78	36,56
U44	<i>Salix fragilis</i>	5	80,73	37,94
U46	<i>Salix fragilis</i>	8	21,11	9,92
U47	<i>Salix purpurea</i>	7	2,06	0,97
U48	<i>Salix fragilis</i>	5	13,88	6,52
U50	<i>Salix fragilis</i>	19	25,75	12,10
U51	<i>Salix fragilis</i>	28	25,22	11,85
U52	<i>Salix fragilis</i>	6	2,27	1,07
U57	<i>Salix fragilis</i>	16	11,45	5,38
U61	<i>Salix fragilis</i>	5	2,48	1,16

U62	<i>Salix fragilis</i>	4	1,83	0,86
U63	<i>Salix fragilis</i>	5	3,32	1,56
U68	<i>Salix purpurea</i>	5	12,57	5,91
U69	<i>Salix purpurea</i>	5	8,03	3,77
U70	<i>Salix fragilis</i>	5	14,53	6,83
<b>GESAMT</b>			<b>495,52</b>	<b>232,89</b>

Insgesamt bilden die Weiden am Lahnufer eine Biomasse von ca. 496 kg. Nach der Berechnungsmethode von zuvor angewandten Umwandlungsfaktor von 0,47 entspricht dies einer Kohlenstoffspeicherung von 233 kg in den 26 Weiden. Bei Berücksichtigung der Standardabweichung im Gesamtergebnis der Kohlenstoffspeicherung der Weiden, erweitert sich das Ergebnis um  $\pm 12$  kg.

### 4.3.3 Krautige Pflanzen

Die Tabelle 7 zeigt das Ergebnis der Kohlenstoffspeicherung innerhalb der Biomasse der Grünlandfläche. Die Summe der Kohlenstoffspeicherung der einbezogenen Arten bildet die Gesamtkohlenstoffspeicherung der Vegetation auf einem Quadratmeter. Eine Zusammenstellung der Zwischenergebnisse mit den einbezogenen Berechnungsparametern ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 7: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff des Grünlands

Vegetationsaufnahme Nr. 1	Biomasse (g)	Kohlenstoff (kg)
<i>Plantago lanceolata</i>	47,738	0,021
<i>Festuca pratensis</i>	5,109	0,002
<i>Lolium perenne</i>	6,488	0,003
Summe Kohlenstoff (kg)		<b>0,027</b>

Auf einem Quadratmeter Grünlandfläche wird zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahme ca. 0,027 kg Kohlenstoff gespeichert. Bei Extrapolation dieses Ergebnisses auf die Gesamtfläche des Grünlandes von 32.462 m<sup>2</sup> ergibt sich eine Kohlenstoffspeicherung von ca. 876 kg innerhalb der Vegetation der Grünlandfläche.

Zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung des krautigen Uferbewuchses werden die vier Vegetationsaufnahmen im Bereich des Ufers berücksichtigt. Basierend auf den jeweiligen Elementgehaltgruppen der erfassten Arten und der durch PhytoCalc ermittelten durchschnittlichen Kohlenstoffspeicherung kann der gespeicherte Kohlenstoff in den jeweiligen Vegetationsaufnahmen berechnet werden (s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Berechneter gespeicherter Kohlenstoff des Grünlands des krautigen Uferbereichs

	Biomasse (g)	Kohlenstoff (kg)
Vegetationsaufnahme Nr. 2		
<i>Rubus fruticosus agg.</i>	555,038	0,264
Vegetationsaufnahme Nr. 3		
<i>Urtica dioica</i>	81,370	0,034
<i>Rubus caesius</i>	33,534	0,016
<i>Eupatorium cannabinum</i>	9,677	0,004
Vegetationsaufnahme Nr. 4		
<i>Dactylis glomerata</i>	237,045	0,106
<i>Arrhenatherum elatius</i>	222,998	0,100
<i>Urtica dioica</i>	8,502	0,004
<i>Holcus lanatus</i>	35,404	0,016
<i>Rubus caesius</i>	26,039	0,012
Vegetationsaufnahme Nr. 5		
<i>Chaerophyllum temulum</i>	146,426	0,066
Summe Kohlenstoff (kg)		<b>0,6207</b>

Die Summe der Kohlenstoffspeicherung für einen Quadratmeter aus den vier Vegetationsaufnahmen ist 0,621 kg. Da die Vegetationsaufnahmen den charakteristischen Bewuchs des krautigen Uferbereichs darstellen, wird das arithmetische Mittel aus den Ergebnissen der Kohlenstoffspeicherung der vier Vegetationsaufnahmen gebildet. Es werden ca. 876 kg Kohlenstoff in der krautigen Vegetation des Grünlandes gespeichert. Der mittlere Kohlenstoffwert von 0,155 kg auf einem Quadratmeter wird auf die Gesamtfläche von 3.326 m<sup>2</sup> (s. Abb. 17) des Uferbewuchses extrapoliert. Entsprechend der Berechnungen werden ca. 516 kg Kohlenstoff in der krautigen Vegetation des Uferbereichs gespeichert.

#### 4.3.4 Gesamte Kohlenstoffspeicherung im aktuellen Bestand

Aus den zuvor erläuterten Berechnungen lässt sich eine Gesamtbilanz des zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahmen und Vegetationsaufnahmen gespeicherten Kohlenstoffs in der oberirdischen Vegetation der Aue an der Lahn ziehen. Die Bilanz ist der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Übersicht über die Kohlenstoffspeicherung in den einzelnen Vegetationstypen

Vegetationstyp	Flächengröße bzw. Artenanzahl	Kohlenstoffspeicherung (kg)
Gehölze im Uferbereich	42	3.672 (+ 5.419/ - 2.339)
Nadelgehölze im Forst	19	4.116
Weiden	26	233 ± 12
Krautige Pflanzen- Grünlandfläche	3,25 ha	876
Krautige Pflanzen- Uferfläche	0,33 ha	516
<b>GESAMT</b>		<b>9.413 (+ 5.431/ - 2.351)</b>

Mit diesem Ergebnis kann die erste Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet werden. Die Kohlenstoffspeicherung im UG zum Zeitpunkt der Aufnahmen liegt bei 9.413 (+ 5.431/ - 2.351) kg.

Die Fichten sind die höchsten Gehölze im UG und speichern daher trotz ihrer geringen Holzdichte einen großen Anteil des Kohlenstoffs im UG. Zwar kann eine hohe Kohlenstoffspeicherung aufgrund der Auswirkungen auf das Klima als positiv bewertet werden, es sind jedoch weitere Bewertungsmaßstäbe einzubeziehen. Das Vorkommen von Fichten in einer Aue ist nicht standorttypisch (WALENTOWSKI, 2008: 31). Das Artenvorkommen der Gehölze im Uferbereich ist mit den Weidenbüschen, den Eschen und den Ahornen als Hartholz standorttypisch für eine Aue (ebd.). Für den nächsten Schritt, dem Szenario einer Stauraumstrukturierung, gilt es die Bestandteile einer ökologisch funktionierenden Aue zu analysieren und auf das UG zu übertragen.

## 4.4 Szenario Stauraumstrukturierung

### 4.4.1 Ausgangsbedingungen

Die Lahn ist ein von Stauhaltung geprägtes Fließgewässer. Durch die Regulierungen an den Schleusen findet kein natürliches Überschwemmungsregime in der untersuchten Aue statt. Dies zeigt sich bei Betrachtung der langjährigen mittleren Überschwemmungsdauer (s. Abb. 18). Die langjährige mittlere Überschwemmungsdauer kann mittels der in der BfG zur Verfügung stehenden Software FLYS (vgl. BfG, 2013) berechnet werden. Bei Betrachtung des Höhenprofils der Aue in Abb. 19 fällt auf, dass die Auenfläche hauptsächlich auf einer Höhe zwischen 81 und 83 m liegt. Das in Abb. 18 dargestellte Diagramm zeigt die durchschnittliche Summe an Unterschreitungstagen der untersuchten Aue in Bezug auf die Höhenlagen. Eine Überflutung bis zu einer Höhe von 83 m tritt im Durchschnitt nicht auf. Der unmittelbare Uferbereich mit einer Höhe bis zu 81 m wird im Durchschnitt an ca. 5 Tagen im Jahr überflutet.

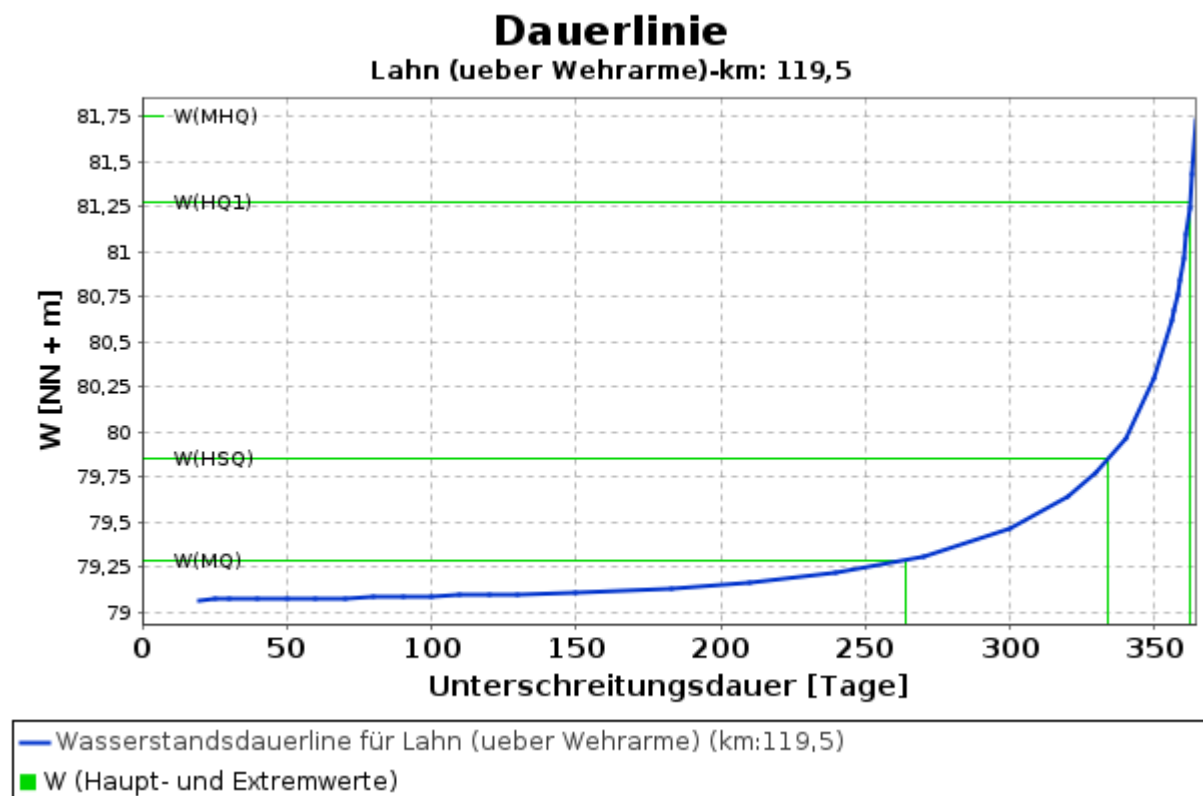


Abb. 18: Dauerlinie der untersuchten Aue mit dem durchschnittlichen Wasserstand und der Unterschreitungsdauer in Tagen (BfG 2013)

Während der Vegetationsaufnahmen zeigte sich, dass die Grünlandfläche an einigen Stellen vertrocknet war. Ein generelles Problem mit Trockenheit bestätigte außerdem der Bewirtschafter der Grünlandfläche.



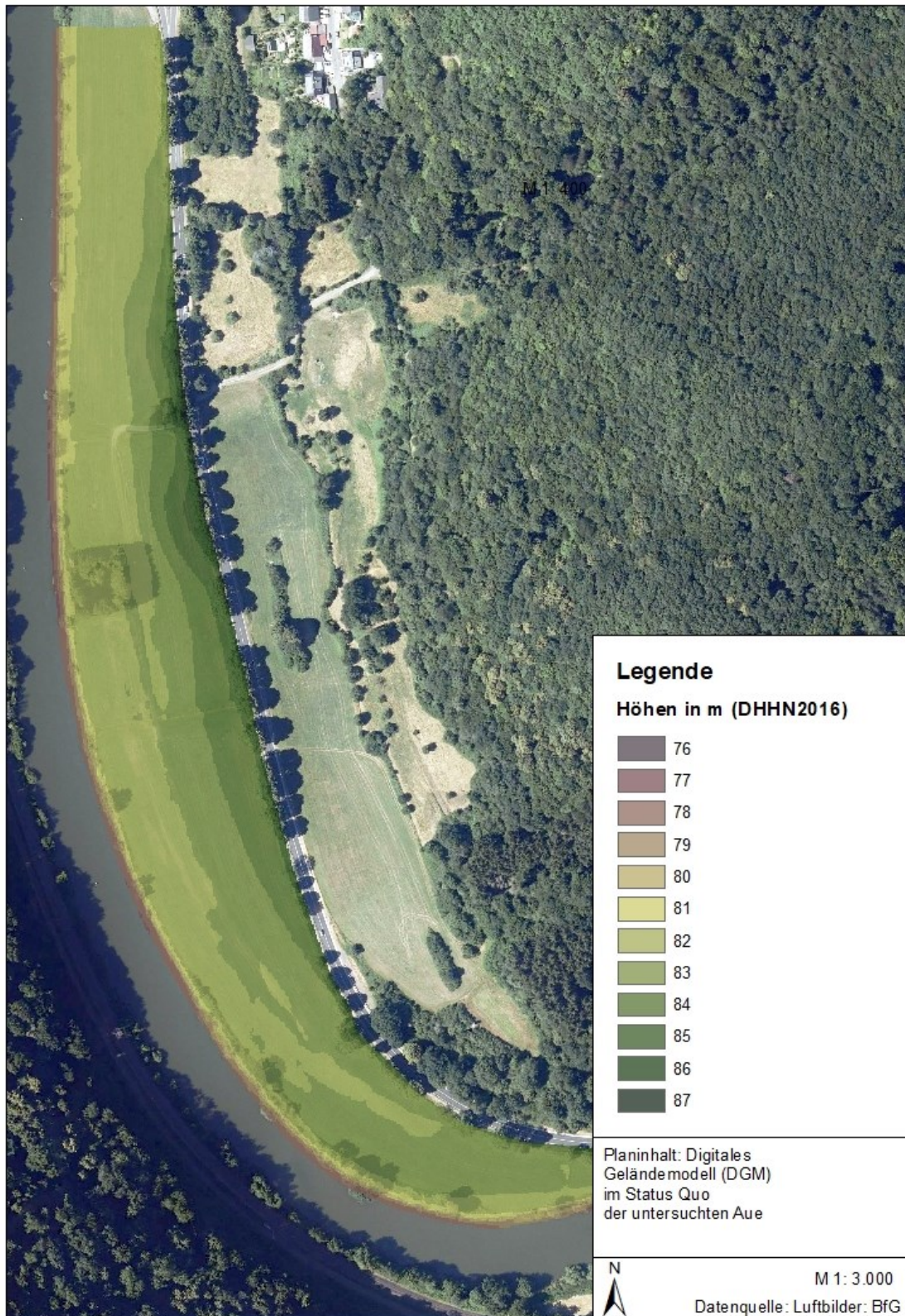


Abb. 19: Digitales Geländemodell der untersuchten Aue im aktuellen Zustand

Eine naturnahe Aue mit dem Vorkommen standorttypischer Vegetation ist auf den Wechsel von Überflutung und Trockenfallen angewiesen (DAMM, 2020: 126). Anhand der Vegetation lassen sich Auen an Fließgewässern nach ELLENBERG (1986) in verschiedene Zonen unterteilen.

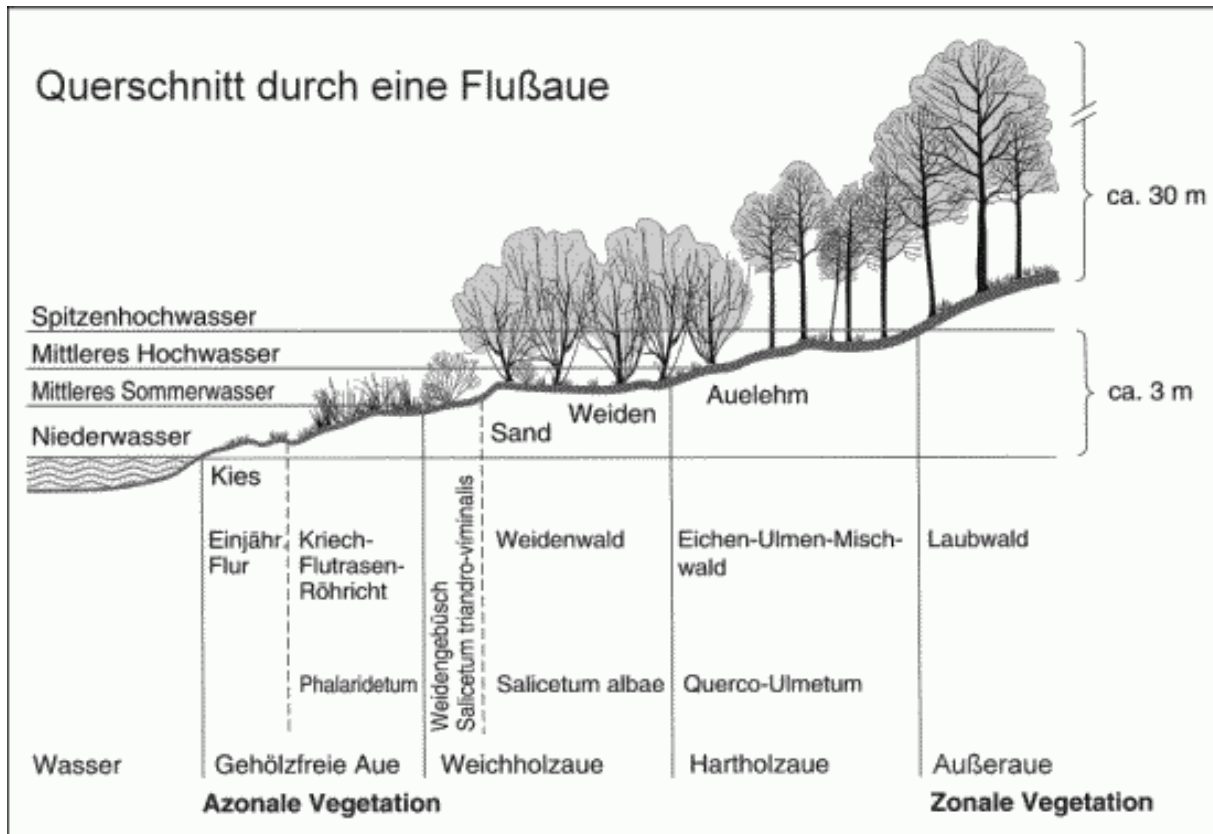


Abb. 20: Typische Auenzonierung mit standorttypischer Vegetation (nach Ellenberg (1986), verändert)

Die gehölzfreie Aue setzt sich aus einjährigen, krautigen Arten, Pioniergesellschaften und Röhrichten zusammen (s. Abb. 20). Durch regelmäßige Überschwemmungen können die hier wachsenden Arten nur kurz existieren. Die Weichholzaue wird im langjährigen Mittel an 80 bis 200 Tagen überflutet (STÄPS und HORCHLER, 2016: 109) und ist mit Weidengebüschen und größeren Weiden bewachsen. Weiden verfügen über ein hohes Regenerationsvermögen und sind für die Bedingungen am Flusssufer ideal angepasst (ebd.). Die Zone der Hartholzaue wird nur in seltenen Fällen sowie für kürzere Dauer und geringere Höhe als die vorherigen Zonen überschwemmt. Hier siedeln sich Hartgehölze wie Eichen, Eschen und Feld- und Flatter-Ulme an (Ellenberg, 1986). Die beschriebene Zonierung entspricht der standorttypischen Vegetation einer Aue. Aktuell kommen Bestandteile einer auentypischen Vegetation am Ufer durch die Weidenbüsche und die Hartgehölze vor, jedoch in keiner typischen Zonierung. Die Hauptgründe für die fehlende standorttypische Vegetation sind das stark veränderte Überflutungsregime, die veränderte hydromorphologische Situation sowie die intensive Bewirtschaftung.

Der größte Anteil der untersuchten Aue besteht aus einem landwirtschaftlich genutzten Grünland. Die Vegetationsaufnahmen ergaben, dass die Grünlandfläche artenarm ist und intensiv genutzt wird. Es ist davon auszugehen, dass die Grünlandfläche über einen längeren Zeitraum gedüngt wurde und Bestandteile von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Boden angereichert sind. Die Aue befindet sich in einem gesetzlich festgelegten Überschwemmungsgebiet (MUEEF, 2015: www). Dies erschwert bauliche Anlagen, kann aber im Zuge einer Ausnahmeregelung mit dem Vorsatz der Verträglichkeit von dem Hochwasserschutz genehmigt werden.

#### 4.4.2 Ziel der Stauraumstrukturierung

Die untersuchte Aue befindet sich im Projektraum des LIFE Projektes „Lila-Living Lahn“ ist aber kein konkretes Maßnahmengebiet des Projektes. Das Projekt „Lila-Living Lahn“ hat sich die ökologische Aufwertung der Lahn zum Ziel gemacht hat (SCHLEUTER et al. 2017: 8; HMUKLV o. J.: www). Bezogen auf den Lebensraum der Aue werden als weitere Ziele die Wiederherstellung von natürlichen Retentionsräumen und deren Eigenregulierung sowie die Verbesserung der strukturellen Vielfalt in Stauräumen angestrebt (ebd.). Neben den Zielen des Projektes „Lila-Living Lahn“ wird in dieser Arbeit das Ziel der Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation der Aue mittels einer Stauraumstrukturierung verfolgt.

#### 4.4.3 Maßnahmen der Stauraumstrukturierung

Die vorgeschlagenen Maßnahmen orientieren sich an dem Maßnahmenkatalog des Bundesprogramms „Blaues Band Deutschland“. Dieses Programm untersucht Potenziale zur zukünftigen Gewässer- und Auenentwicklung und dem Aufbau eines bundesweiten Gewässer- und Biotopverbundes (BMVI, 2017: 13). Die Maßnahmen sind unterteilt in die 3 Funktionsräume „Gewässer“, „Uferzone, Übergangsbereich“ und „Rezente Aue, Altaue“. Für die untersuchte Aue wurden Maßnahmen in den beiden Funktionsräumen „Uferzone & Übergangsbereich“ und „Rezente Aue / Altaue“ zur ökologischen Aufwertung der Aue in das Szenario integriert. Die Nummerierung der Maßnahmen entspricht der ursprünglichen Nummerierung des Maßnahmenkatalogs „Biotopverbund Blaues Band Deutschland“ (FACHGRUPPE BLAUES BAND, 2020: 2). Die Abb. 21 zeigt die Verortung der geplanten Maßnahmen. Da sich die Maßnahme der Anlage des Nebengerinnes außerhalb des UG befindet, wird in der Abbildung die gesamte Aue gezeigt. Im südlichen Bereich außerhalb des UG wurden keine Gehölze kartiert, weshalb in der Abbildung der Gehölzbestand nicht dargestellt wird. Das Geländeprofil wird für die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen angepasst und ist in Abb. 22 dargestellt.

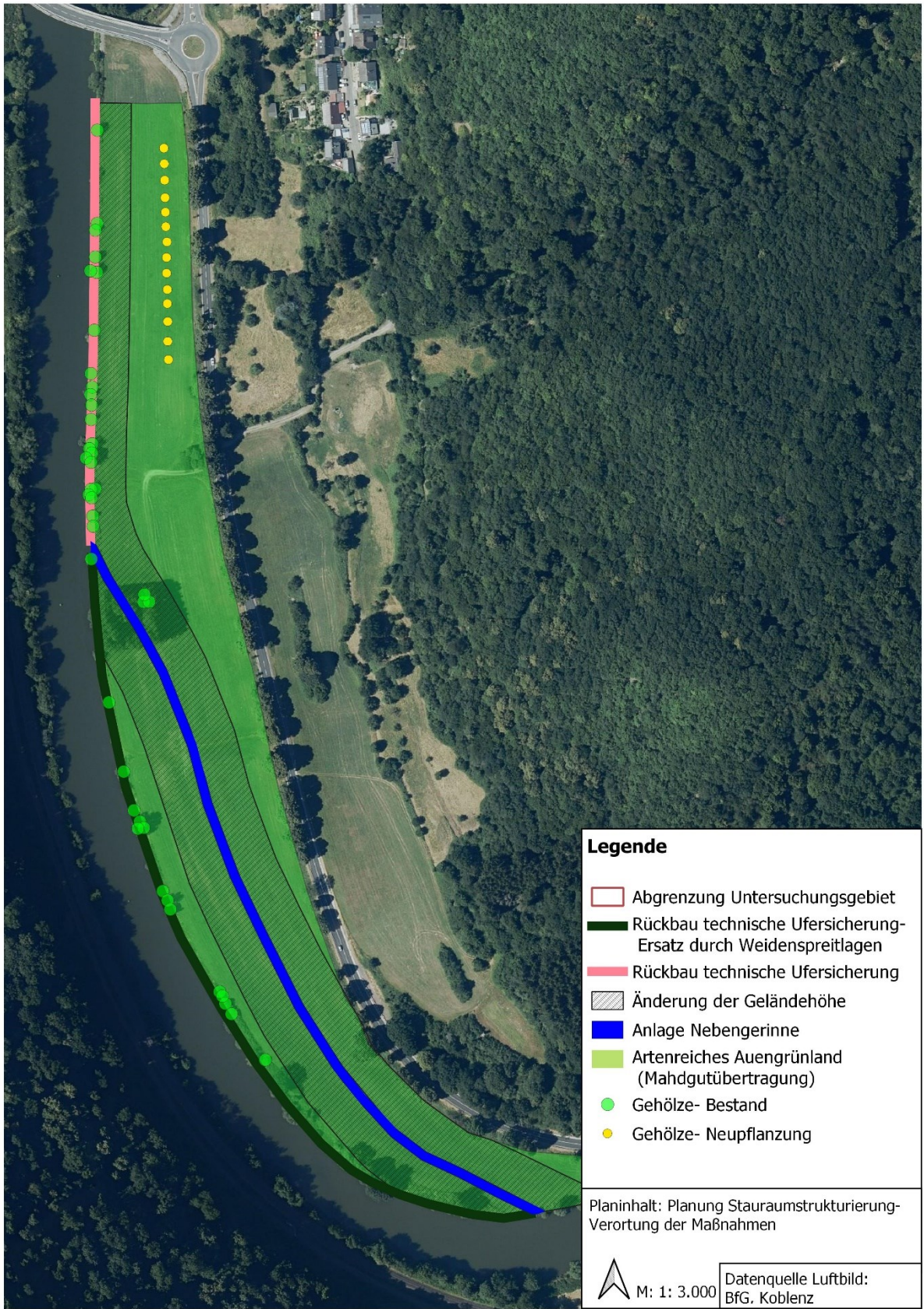


Abb. 21: Verortung der Maßnahmen zum Szenario der Stauraumstrukturierung

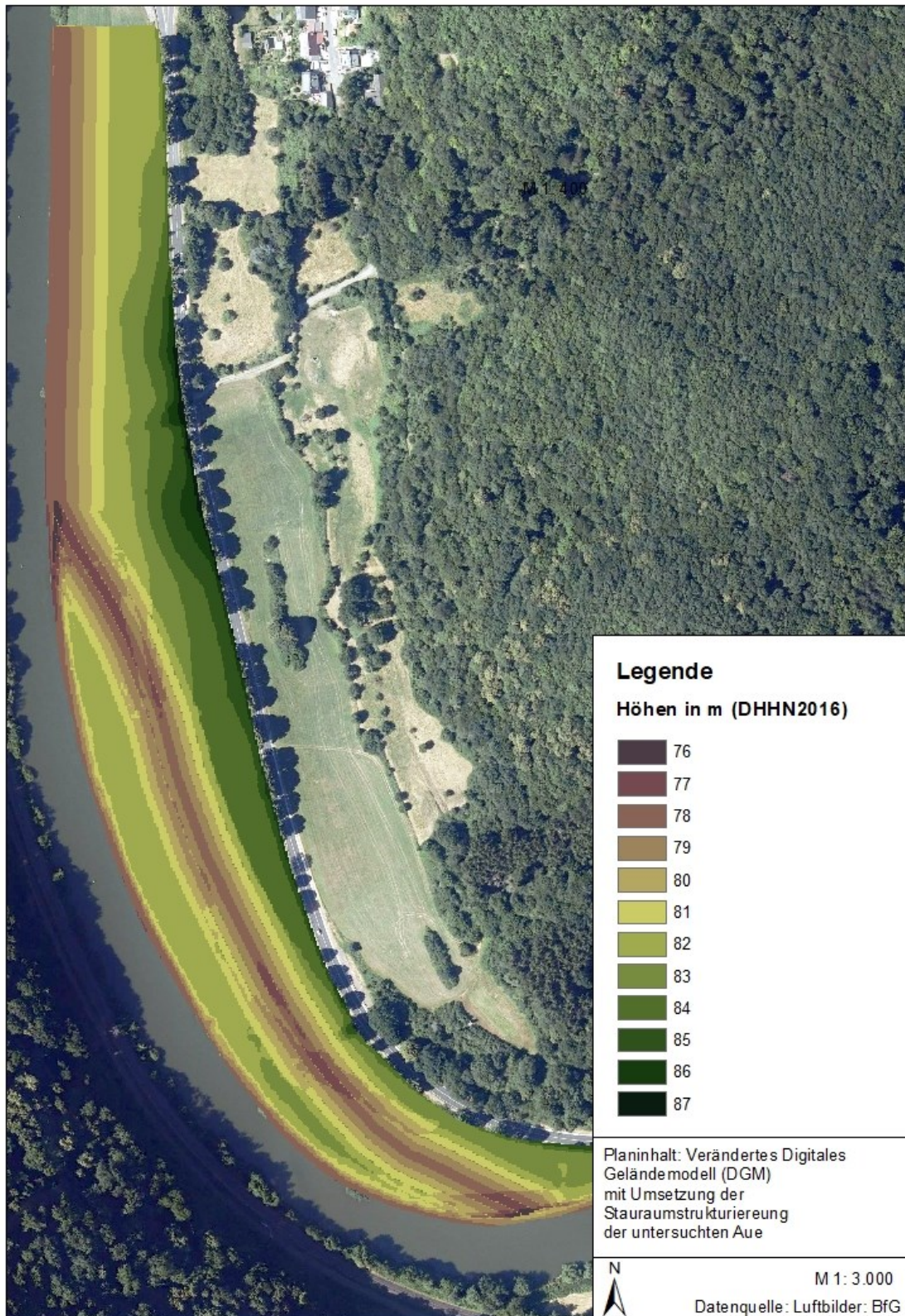


Abb. 22: Verändertes Geländemodell mit Anpassungen des Geländes im Bereich des abgeflachten Ufers (nördlich) und im Bereich des Nebengerinnes

Beginnend mit dem Funktionsraum „Uferzone & Übergangsbereich“ soll der Uferverbau vollständig zurückgebaut werden. Dies entspricht der Maßnahmennummer 7.1. Die aktuelle technische Ufersicherung aus einer Steinschüttung bietet keinen auentypischen Lebensraum. Im südlichen Teil des UG wird eine technisch-biologische Ufersicherung durch Weidenspreitlagen etabliert. Bei der Anlage einer Weidenspreitlage werden Weidentriebe längs zum Ufer mit Kontakt zum Boden aufgelegt. Die Triebe wurzeln in den Boden und bilden ein enges Weidengebüsch (LAMMERANNER und HASELSTEINER, 2010: 196). In durchgeführten Auenrenaturierungen zeigte die Anpflanzung von Weidenspreitlagen neben der Ufersicherung eine Erhöhung der Habitat- und Strukturvielfalt des Ufers (LIEBENSTEIN, 2016: 440). Weiterhin kann durch die Etablierung eines dichten Weidengebüsches Kohlenstoff in der Vegetation gespeichert werden.

In Bereichen mit einer geringen hydraulischen Belastung soll die Ufersicherung ohne naturnäheren Ersatz zurückgebaut werden. Dies wird im nördlichen Teil der Aue umgesetzt. Dafür wird das aktuelle Höhenprofil verändert und der Hang abgeflacht, um im Laufe der Sukzession eine auentypische Zonierung zu etablieren (s. Abb. 20, Abb. 23). Die Abflachung des Ufers ist den Maßnahmen „Profil aufweiten“ (8.1) sowie der Maßnahme „Naturnahe Uferstrukturen erhalten / entwickeln“ (8.2) zuzuordnen. Wie im DGM in Abb. 19 zu sehen, erstreckt sich der Uferbereich auf 3 m Höhenunterschied. Durch diesen Hang im Uferbereich kann sich keine auentypische Zonierung etablieren und das Überschwemmungsregime ist stark eingeschränkt. Durch den Ausgleich des Hangs werden Standorte für eine auentypische Vegetation geschaffen, die sich beginnend am Ufer bis weit in die Aue hinein entwickeln kann. Ein Höhenunterschied von 3 m wird aktuell auf 9 m Länge ausgeglichen. Diese Steigung von 1:3 soll auf 1:8 verändert werden, um ein flacheres Ufer zu etablieren. Das bedeutet, dass ein Höhenunterschied von 1 m auf 8 m Länge ausgeglichen wird und das Ufer bei einem Höhenunterschied von 3 m auf insgesamt 24 m der Aue abgeflacht wird.

Die Abb. 23 stellt skizzenhaft den aktuellen Hang und die geplante Geländemodellierung dar. Während im aktuellen Zustand die Gehölze bereits direkt am Ufer wachsen, soll das Ufer aufgeweitet werden. Das Wasser der Lahn kann so besser in die Aue einströmen. Während hauptsächlich Röhrichte und einjährige Gräser die Bereiche bis zu 8 m der Aue bewachsen, ist der Bereich darüber optimal für die Ansiedlung von Weidengebüschen (vgl. ELLENBERG 1984).

Es ist davon auszugehen, dass die Harthölzer des Bestandes die häufigeren und längeren Überflutungsperioden nicht überdauern. Umgefallenes Totholz bietet eine ökologische Aufwertung, weshalb die Gehölze nicht im Vorfeld entfernt werden sollten.

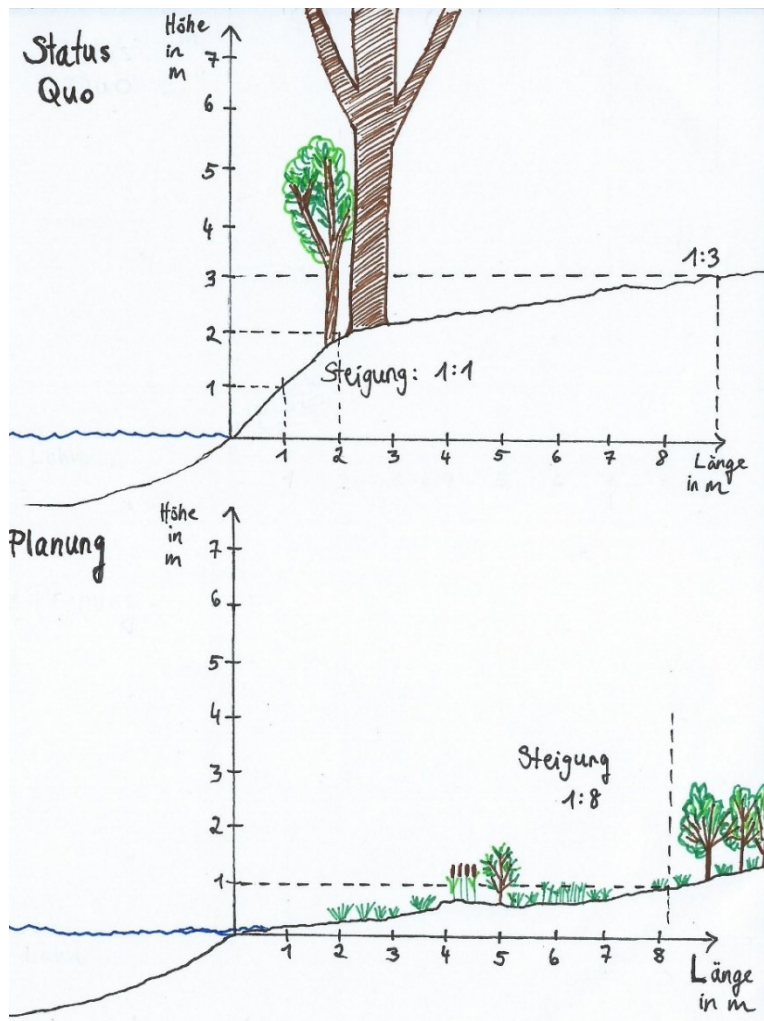


Abb. 23: Skizze des veränderten Geländeprofiles im Uferbereich (Vegetation nicht maßstabsgetreu dargestellt)

Um das Überschwemmungsregime in der Aue naturnäher zu gestalten wird ein Nebengerinne angelegt und an die Lahn angeschlossen. Diese Maßnahme ist innerhalb des Maßnahmenkatalogs als „Nebengerinne anlegen“ (10.4) definiert. Südlich des UG knickt die Lahn nach rechts (Norden) ab, weshalb an dieser Stelle mit einem geringen hydraulischen Strömungsangriff zu rechnen ist. Daher wird der Einlauf außerhalb des Untersuchungsgebietes im südlichen Teil angelegt (s. Abb. 21). Der Verlauf des Nebengerinnes soll mittig durch das UG führen und in einem Auslauf in die Lahn münden. Dadurch wird in dem kaum fließenden Gewässer eine Durchgängigkeit geschaffen, die naturnähere Verhältnisse für Fische und andere aquatische Arten schafft. Um eine dauerhafte Durchströmung zu erreichen, ist das Nebengerinne im Hinblick auf das Höhenprofil an der tiefsten Stelle 5 m auszubauen. In der Planung ist eine möglichst flache Steigung zum Rinnenmittelpunkt anzustreben, um eine auentypische Zonierung zu etablieren. Seitlich des anzulegenden Nebengerinnes ist die Aue ca. 30 m breit, bis sie von der Straße bzw. der Lahn eingegrenzt wird. Um den Flächenunterschied der 5 m auf dieser Fläche auszugleichen, wird eine Steigung von 1:5 angestrebt. Das veränderte Höhenmodell auf Basis der Planung ist in Abb. 22 zu sehen.

Die Impression eines angelegten Nebengerinnes einer renaturierten Aue ist der Abb. 24 zu entnehmen. Mit der Maßnahme der Anlegung einer Nebengerinne und der Abflachung des Geländes um Umkreis der Rinne kann das Retentionspotenzial vergrößert werden (REICHHOFF et al. 2010: 34). Bei Hochwasser gelangt das Wasser in die Auenfläche und kann dort versickern. Dadurch kann eine naturnahe Ausprägung auendynamischer Wasserverhältnisse erreicht werden.



Abb. 24: Naturnahes Nebengerinne an einer strukturarmen Wasserstraße (Fachgruppe Blaues Band, 2020: 32)

Aktuell stehen mittig des Gebietes ca. 19 Fichten in einem 1.400 m<sup>2</sup> großen Forst. Die Bäume stehen als Riegel senkrecht der Lahn entgegen und wirken als Barriere für einfließende Hochwasser. Außerdem ist das Vorkommen der Fichten nicht standorttypisch und sind für die Staurastrukturierung zu entfernen. Die einzelnen zwischen den Fichten stehenden Birken (*Betula pendula*) und der Holunder (*Sambucus nigra*) werden erhalten. Es wird angestrebt das Fließgewässer in die Fläche einlaufen zu lassen und eine natürliche Retentionsfläche zu schaffen. Als Ersatz für die gefällten Fichten werden auentypische und standortheimische Eschen und Eichen parallel zur Lahn in einer Reihe gepflanzt (s. Abb. 21.) Dadurch besteht keine Barriere mehr und nach der Aufwuchszeit werden die Hartgehölze aufgrund der höheren Holzdichte mehr Kohlenstoff als die Fichten speichern können (vgl. ROLOFF et al., 2008). Dadurch kann die Aue ökologisch aufgewertet und die Kohlenstoffspeicherung langfristig verbessert werden.



Aktuell wird die Grünlandfläche im UG intensiv bewirtschaftet. Die Fläche verfügt über eine geringe Strukturen- und Artenvielfalt. Um die Artenvielfalt des Grünlandes zu verbessern, soll eine Mahdgutübertragung stattfinden. Dabei wird eine geeignete Spenderfläche eines artenreichen Grünlandes in der Umgebung der Aue gemäht und das Pflanzenmaterial in die Aue eingebracht. Durch eine Mahdgutübertragung konnte in anderen Projekten bereits artenreiches Grünland etabliert und die Fläche ökologisch aufgewertet werden (vgl. HARNISCH et al., 2014). Das Grünland soll anschließend extensiv bewirtschaftet also die Düngung stark reduziert sowie die Mahdzeiträume verlängert werden. Eine geringere Düngung hat sich in vergleichbaren Projekten bereits positiv auf die Kohlenstoffspeicherung im Boden ausgewirkt (GATTINGER et al. 2013). Die Maßnahme der Auenextensivierung ist im Maßnahmenkatalog der Nr. 11.1 zugeordnet.

Die mittig in die Aue führende Schotterweg ist nicht von Bedeutung für die Zugänglichkeit der Fläche und soll daher zurückgebaut werden. An der Stelle des Weges soll das extensive Auengrünland ausgeweitet werden.

#### 4.4.4 Kohlenstoffspeicherung der Stauraumstrukturierung

Die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung setzt sich aus den Ergebnissen und den Berechnungen der anzunehmenden Sukzession nach Durchführung der Maßnahmen im Szenario der Stauraumstrukturierung zusammen (s. Abb. 25).

Aus dem aktuellen Bestand bleiben die Gehölze am Ufer erhalten. Im zu erhaltenen Bestand werden in 42 Gehölzen ca. 3.672 kg Kohlenstoff gespeichert. Im Szenario der Stauraumstrukturierung werden zu einem Teil Gehölze angepflanzt, zum anderen wird vorausgesetzt, dass sich die Vegetation sukzessiv entwickelt. Aus den Anpflanzungen als Ersatz zu den Fichten sowie dem zu erwartendem Aufwuchs an Hartgehölzen, ergibt sich eine Anzahl von 84 Gehölzen. Im Durchschnitt ist anzunehmen, dass ca. 6.120 kg Kohlenstoff in den Gehölzen gespeichert wird.

Im Szenario der Stauraumstrukturierung entstehen größere Bereiche am Ufer und im Umkreis des Nebengerinnes, an dem sich Weidengebüsche und höher gewachsene Weiden ansiedeln können. Im Durchschnitt wird im Szenario davon ausgegangen, dass 163 Weiden aufwachsen. Dies ergibt eine durchschnittliche Kohlenstoffspeicherung von 1.498 kg in den Weiden. Im Bestand werden in 26 Weiden ca. 239 kg Kohlenstoff gespeichert.

Im nördlichen Teil des UG wird der Uferbereich geweitet, so dass ca. 3.036 m<sup>2</sup> von krautigen und einjährigen Arten besiedelt werden können. Für den Bereich um die Nebengerinne wird das Gelände verändert und es ist mit einer krautigen Flur von ca. 6.942 m<sup>2</sup> auszugehen.

Insgesamt können ca. 1.542 kg Kohlenstoff in der krautigen Vegetation im Bereich des Ufers und dem Nebengerinne gespeichert werden. Die Grünlandfläche verkleinert sich im Szenario auf eine Fläche von 13.211 m<sup>2</sup>. Es können ca. 357 kg Kohlenstoff in der krautigen Vegetation des Grünlandes gespeichert werden. Nach Anlage der Weidenspreitlage ist von einem Aufwuchs der Weiden auszugehen. Auf einer Länge von 369 m werden ca. 3.487 kg Kohlenstoff in den Weiden der Spreitlage gespeichert.

Tabelle 10: Ergebnisse der anzunehmenden Kohlenstoffspeicherung im Szenario der Stauraumstrukturierung

<b>Vegetationstyp</b>	<b>Flächengröße bzw. Artenanzahl</b>	<b>Kohlenstoffspeicherung (kg)</b>
Gehölze (Bestand)	42	3.672
Gehölze (Szenario)	84	6.120
Weiden (Bestand)	26	239
Weiden (Szenario)	163	1.498
Krautige Pflanzen- Grünlandfläche (Szenario)	13.211 m <sup>2</sup>	357
Krautige Pflanzen- Uferfläche (Szenario)	9.978 m <sup>2</sup>	1.542
Weidenspreitlage (Szenario)	554 m <sup>2</sup>	3.487
<b>GESAMT</b>		<b>16.915</b>

Im Szenario der Stauraumstrukturierung wird eine Kohlenstoffspeicherung von 13.004 kg prognostiziert. Im Ergebnis mit der Speicherung im Bestand werden insgesamt ca. 16.915 kg Kohlenstoff gespeichert (s. Tabelle 10).

Nach dem Fällen der Fichten und der Einleitung der Baumaßnahmen für die Geländeänderungen wird die Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation zuerst sinken. Langfristig zeigt sich jedoch, dass von einer Steigerung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation um 56 % vom aktuellen Zustand ausgegangen werden kann. Es zeigt sich, dass mittels der Maßnahmen zur ökologischen Aufwertung der Aue eine Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation miteinhergeht.

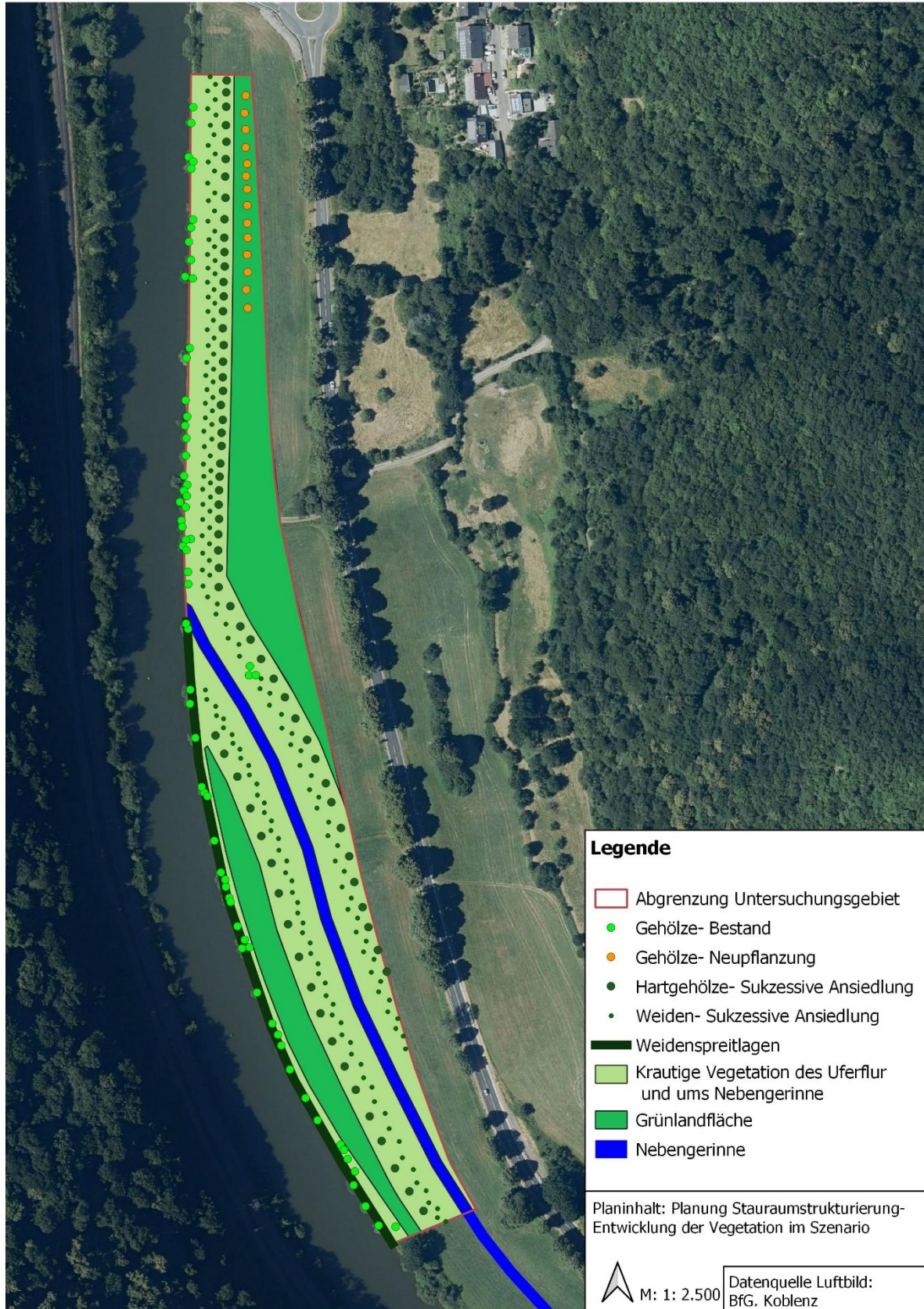


Abb. 25: Szenario Stauraumstrukturierung- Entwicklung der Vegetation im Laufe der Sukzession

## 4.5 Evaluierung des Drohneneinsatzes zur Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung

### **Einsatzbereich der Drohne**

Der Einsatz der Drohne ermöglichte die Erstellung des DOP und DOM. Über das DOP konnte die Vegetationstypen genau voneinander getrennt und deren Kronenschirmfläche ermittelt werden. Zusätzlich konnten Bäume in Bereichen, die im Gelände nicht einzusehen war, im Nachhinein über das Luftbild bestimmt werden. Die Ermittlung der Höhen mit Hilfe des DOM war sowohl für die manuellen Berechnungen, als auch für die Berechnung mit der Biomassefunktion notwendig. Der Einsatz der Drohne ermöglichte die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in den Gehölzen, ohne dass die Erhebung der Baumart oder des BHD im Gelände notwendig gewesen wären.

### **Grenzen des Drohneneinsatzes**

Aufgrund der Ungenauigkeit für die Vegetation in niedriger Höhe, wie es im UG für die Grünlandfläche und den krautigen Bewuchs am Ufer der Fall war, diente die Drohne lediglich für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung der Gehölze. Für den gewählten flächendeckenden Ansatz des gesamten UGs war die fernerkundliche Methode daher nicht ausreichend, um die Kohlenstoffspeicherung der gesamten Vegetation zu berechnen. Neben dieser Einschränkung traten außerdem Fehler im Höhenmodell mangels ausreichender Luftbildaufnahmen auf. Dadurch musste die Höhe einiger Gehölze im Nachhinein geschätzt werden, wodurch die Ungenauigkeit des Datensatzes stieg. In den Ergebnissen mittels der Fernerkundungsmethodik für die Kohlenstoffberechnung der Gehölze besteht ein großer Schwankungsbereich. Das Ergebnis ist daher weniger aussagekräftig und nur erschwert zu interpretieren. Die Herausforderungen, die aus dem „Structure from Motion“ Ansatz resultieren, werden in Kapitel 5.1 diskutiert.

### **Zeitlicher Aufwand**

Der Einsatz der Drohne ist mit einem zeitlichen Aufwand verbunden. Die zu befliegende Fläche muss im Vorfeld auf eventuelle Flugverbote untersucht und ggf. eine Fluggenehmigung bei der zuständigen Landesluftfahrtbehörde eingeholt werden. Die Fluggenehmigung muss mindestens zwei Wochen vor dem geplanten Flugtermin eingeholt werden. In einigen Bundesländern kann außerdem ein Drohnenführerschein von der Landesluftfahrtbehörde verlangt werden. Für den Drohnenführerschein sollten ca. drei Wochen zur Vorbereitung auf die theoretische und praktische Prüfung eingeplant werden. Für die Programmierung der Flugroute sollte ca. eine Woche eingeplant werden, da die Justierung der notwendigen Überlappung der einzelnen Aufnahmen und die Planung der Ground Control Points ausschlaggebend für den Erfolg der Befliegung ist. Der Zeitaufwand, der für Höhengermittlung

der Gehölze ohne die Drohne nötig gewesen wäre, ist zu berücksichtigen. Insgesamt war der Einsatz der Drohne mit einem deutlichen zeitlichen Mehraufwand verbunden.

### **Evaluierung des Drohneneinsatzes**

Für das Ziel dieser Arbeit war die Erstellung des DOP nicht unbedingt notwendig, hat sich aber im Laufe der Arbeit als nützlich erwiesen und bietet eine sehr gut aufgelöste Grundlage für den weiteren Planungsprozess. Eine alternative Höhenmessung im Gelände ohne Drohne wäre aufgrund des geringen Baumbestandes möglich gewesen. Für größere Untersuchungsgebiete mit höherem Baumbestand ist der Einsatz der Drohne daher geeignet. Besonders wenn die Biomasse größerer Baumflächen bestimmt werden soll und niedrige Vegetation nicht von Bedeutung ist, kann der Einsatz von Drohnen von großem Vorteil sein. Gleichzeitig ist die Erstellung eines verwendbaren 3D-Modells bei einer geschlossenen Baumkrone ohne Einsicht zum Boden erschwert. Die Problematiken bei der drohnengestützten Methodik werden in Kapitel 5.1 und 5.2 diskutiert und sind zu berücksichtigen, wenn der Einsatz einer Drohne zur Berechnung des Kohlenstoffs in der Vegetation in Erwägung gezogen wird.

Im Rahmen dieser Arbeit lieferte der Einsatz der Drohne ein Höhenmodell, ohne welches die Bestimmung der Biomasse nicht möglich gewesen wäre. Daher wird der Einsatz der Drohne für die Ziele dieser Arbeit trotz des erhöhten Aufwandes als sinnvoll erachtet. Es kann Aufwand und Zeit gespart werden, indem nur die Baumbereiche befliegen werden. Die Luftbildaufnahmen der Grünlandfläche waren nicht zielführend.

## 5 Diskussion

### 5.1 Erhebung und Auswertung der Drohnenbilder

Während der Befliegung stürzte die Dronelink Anwendung einige Male ab und musste erneut gestartet werden. Zwar wurde die Route an der Stelle des Abbruchs gestartet, jedoch reichte der Akku der Steuerungseinheit durch die häufigen Abbrüche nicht für die Durchführung der kompletten Mission aus. So konnte die Kreuzbefliegung des unteren Auenbereichs nicht beendet werden, wodurch die anhand der Drohnenaufnahmen generierte 3D-Punktwolke (3D-Modell) im südlichen Teil der Aue weniger dicht ausfällt. Zusätzlich wurde der Fichtenforst zu niedrig überflogen, was dazu führt, dass in diesem Bereich nicht alle aufgenommenen Drohnenbilder exakt verortet werden konnten (per „Structure from motion-Alignment“) und es daher im berechneten 3D-Modell auch hier zu größeren Ungenauigkeiten kommt. Daher konnten in diesem Bereich keine plausiblen Höhendaten der Gehölze erfasst werden. Die Gültigkeit der ermittelten Höhen auf deren Basis der Kohlenstoffanteil in den Gehölzen und Weiden berechnet wurde, ist daher eingeschränkt.

Die Generierung von 3D-Messdaten basiert auf dem „Structure from motion“ Verfahren (WESTOBY et al., 2012: 301). Die dafür notwendige Re-identifikation von Punkten im Gelände auf verschiedenen Aufnahmen, ist bei Bewegung der Vegetation durch den Wind erschwert. Da bei Aufnahme der Bilder Windgeschwindigkeiten bis zu 20 km/h erreicht wurden und zusätzlich eine Kreuzbefliegung akkubedingt nicht beendet wurde, konnten kein qualitativ hochwertiges 3D-Modell erzeugt werden. Es war angedacht über das 3D-Modell das Volumen der verholzten Biomasse abzuleiten und über die Multiplikation mit der Holzdichte und dem Kohlenstofffaktor von 0,47 den Kohlenstoffanteil zu berechnen. Das lückenhafte 3D-Modell bietet jedoch keine geeignete Grundlage um das Volumen der Vegetation abzuleiten. Besonders für die am Hang stehende Vegetation bedeutet das beträchtliche Unterschiede bei der Berechnung des Volumens, da die reale Geländehöhe nicht einbezogen wurde. Es bestand dennoch die Möglichkeit das Volumen der Gehölze mit größeren Unsicherheiten aufgrund der zuvor erläuterten Fehlerquellen aus Agisoft Metashape zu entnehmen. Dieses Volumen konnte jedoch nur inklusive der Luftzwischenräume sowie dem Laub aus Agisoft Metashape entnommen werden. Es erwies es sich als problematisch einen passenden Raumdichtefaktor aus anderen Studien zu finden, auf dessen Basis ausschließlich die verholzte Biomasse ableitbar wäre. Daher wurde auf die Kronenschirmfläche aus dem vom 3D Modell abgeleiteten Orthophoto zurückgegriffen und der Kohlenstoffanteil über die Biomassefunktion von KÄNDLER und ADLER (2011) berechnet.

## 5.2 Statistische Unsicherheiten und Potenziale der Berechnungsmethoden

Für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung wurden für die klassifizierten Vegetationstypen Gehölze, Weiden und krautige Pflanzen verschiedene Methoden angewandt. In der Methodik wurden die Ansätze nach manuell und drohnengestützt unterschieden. Es werden jedoch Daten aus beiden Ansätzen genutzt, um im Gesamtergebnis die Kohlenstoffanteile zu berechnen. Dabei wurden die Höheninformationen durch das drohnengestützte Verfahren erlangt. Nutzbar wurden sie aber erst durch die Erfassung der Vegetation im manuellen Verfahren.

Die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung über die von KÄNDLER und ADLER (2011) aufgestellte Regression ist mit statistischen Unsicherheiten verbunden. Die Biomassefunktion beruht auf dem Populations-Mittel der berücksichtigten Baumarten. Die in der untersuchten Aue vorkommenden Gehölzarten decken sich nicht vollständig mit den berücksichtigten Baumarten aus dem Populations-Mittel von KÄNDLER und ADLER (2011). Daher ist von statistischen Abweichungen bei Nutzung der Biomassefunktion für diese Arbeit auszugehen. Auf die Problematik der erzeugten Daten der Höhe und der Kronenschirmfläche wurde bereits hingewiesen. Dies verstärkt die Unsicherheit der Ergebnisse.

Die drohnengestützte Methodik bietet das Potenzial große Bereiche auf die Biomasse bzw. Kohlenstoffspeicherung hin zu untersuchen. Diese Methodik ist allerdings nur vielversprechend, wenn eine Biomassefunktion die Baumartenzusammensetzung im UG möglichst genau abdeckt. Im Falle dieser Arbeit ist die verwendete Biomassefunktion nicht für die Kohlenstoffberechnung von Fichten und Weiden zu nutzen. Die Aufstellung einer Regression erfordert Messdaten der getrockneten Biomasse. Dafür müssen zuerst eine breite Reihe von Gehölzen gefällt und getrocknet werden, um eine Korrelation zwischen den fernerkundlich erfassten Messdaten und der getrockneten Biomasse zu untersuchen. Die Genauigkeit des berechneten Kohlenstoffanteils wird bei der Integration eines breit gefächerten Baumartenspektrums vermutlich sinken, da die Holzdicke verschiedener Gehölze stark variiert (BRZEZIECKI & KIENAST, 1994 und ROLOFF et al., 2008). So zeigt sich auch bei der verwendeten Biomassefunktion ein sehr hoher Schwankungsbereich von + 5.419 und - 2.339 kg Kohlenstoff in den Ergebnissen.

Die manuelle Berechnung des Stamms ist im Bereich des Fichtenforstes und einigen unzugänglichen Uferbereichen mit Unsicherheiten verbunden, da der BHD geschätzt wurde. Der Einsatz einer Drohne wäre unter der Voraussetzung einer passenden Berechnungsmethode in unzugänglichen Bereichen von Vorteil. Zusätzlich fehlen wie oben beschrieben einige Höhendaten, weshalb für die Fichten die Ergebnisse der

Biomasseberechnungen ungenau sind. Die Stämme wurden auf Basis des höchsten Punktes im Bereich der Kronenschirmfläche berechnet. Bei mehreren Stämmen ist jedoch fraglich, ob alle Stämme die gleiche Höhe wie der Hauptstamm erreichen. Diese Problematik ist in den Ergebnissen zu erkennen. Die errechnete Biomasse eines Gehölzes mit mehreren Stämmen übertreffen die drohnengestützte Berechnung. So wurde für die Gemeine Esche (U59) aus den Stämmen eine Kohlenstoffspeicherung von 213 kg berechnet, während die drohnengestützte Berechnung eine Speicherung zwischen 35 kg und 210 kg schätzt. Hier zeigen sich also mutmaßliche Messfehler aufgrund der angewandten Methodik.

Mit Ausnahme der Gehölze mit mehreren Stämmen zeigt sich im Ergebnis, dass mit der drohnengestützten Methode Kohlenstoffspeicherungswerte berechnet werden können. Dies lässt sich damit begründen, dass bei der Anwendung der Biomassefunktion nach KÄNDLER und ADLER (2011) die Verästelung der untersuchten Bäume einbezogen wurde. Die manuelle Methode berechnet lediglich den im Stammvolumen gespeicherten Kohlenstoff. Die Ergebnisse der manuellen Methode können daher als minimal anzunehmende Kohlenstoffspeicherung interpretiert werden.

Die Kohlenstoffberechnung der Weiden wurde mittels manueller Aufnahmen und einer Regression mit den Messdaten nach ZIEGENHORN (2017) durchgeführt. Der verwendete Datensatz beruht auf den Messungen von Trieben einer Weidenspreitlage. Es fällt auf, dass die Weiden im UG dieser Arbeit im Durchschnitt einen doppelt so hohen BHD als die Weiden aus der Weidenspreitlage haben. Vergleicht man den morphologischen Aufbau von Weiden zeigt sich, dass Weiden in Spreitlagen deutlich dichter wachsen als die Weiden an der Lahn. Die hier verwendete Datengrundlage ist daher nicht optimal. Gleichzeitig konnte mittels der selbst aufgestellten Regression eine Methodik der Kohlenstoffberechnung aufgezeigt werden, die von der Methodik der Gehölze abweicht. Die Varianz der in dieser Arbeit gezeigten Methoden den Kohlenstoff in der Vegetation auf Basis zur Verfügung stehender Daten anderer Forschungen zu berechnen, ist als Potenzial zu erachten.

Die Methodik der Berechnung der Biomasse mit PhytoCalc (BOLTE, 2006) ist mit einigen Unsicherheiten verbunden. Es war im Rahmen dieser Arbeit zeitlich nicht möglich eigene Trocknungsversuche von abgeschnittenem Pflanzenmaterial durchzuführen, weshalb auf die Berechnung des Kohlenstoffgehalts in krautigen Pflanzen mittels PhytoCalc zurückgegriffen wurde. Phytocalc basiert auf Berechnungen der krautigen Vegetation im Unterwuchs im Wald. Daher waren in den Artenlisten hauptsächlich typische Waldarten zu finden. Für Arten des Grünlandes, die nicht in den Listen von PhytoCalc vorkamen, wurde auf Arten der gemeinsamen Pflanzenfamilie zurückgegriffen. HEINRICHS, BERNHARDT und SCHMIDT (2010) bewiesen, dass in offenen Landschaften mit höheren Werten der Kohlenstoffspeicherung zu rechnen ist als im Unterwuchs von Waldflächen. Daher besteht auch für die in dieser Arbeit



errechneten Ergebnisse der Kohlenstoffspeicherung der krautigen Pflanzen die Gefahr einer Unterschätzung. Mittels der Extrapolationen einzelner Ausschnitte, dargestellt in den Vegetationsaufnahmen, auf die gesamte Fläche des Vegetationstyps im UG, ist die Unsicherheit des Ergebnisses gestiegen. RAVINDRANATH und OSTWALD (2008) weisen auf den marginalen Anteil von krautigen Pflanzen an der Gesamtspeicherung des Kohlenstoffs in einem Gebiet hin. Auch für die Aue erwies sich der Anteil von ca. 15 % als vergleichsweise gering. Dies war im Vorfeld bewusst jedoch wurde in dieser Arbeit der Anspruch einer flächendeckenden Untersuchung der Kohlenstoffspeicherung erhoben. Zukünftig kann in Erwägung gezogen werden die krautigen Pflanzen in der Bilanzierung der Kohlenstoffspeicherung eines Gebiets nicht zu berücksichtigen.

Bei Zusammenführung der Kohlenstoffspeicherung gilt es zu beachten, dass ein Teil der berechneten Masse in verholzter Vegetation gespeichert ist und ein Teil in der krautigen Vegetation. Die krautigen Pflanzen sind ein- oder mehrjährig und sterben nach dem Verlauf ihres Lebenszyklus ab. Dabei wird ein Teil des Kohlenstoffs wieder an die Atmosphäre abgegeben und ein Teil im Boden abgelagert (KUZYAKOV und DOMANSKI 2010: 421). Die in dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse der Kohlenstoffspeicherung in der untersuchten Aue sind daher an den Zeitpunkt der Vegetationsaufnahmen (Juni 2020) sowie der Fortführung der aktuell stattfindenden Nutzung im Untersuchungsgebiet gebunden. In dieser Arbeit wurde lediglich die Kohlenstoffspeicherung in der oberirdischen Biomasse analysiert. Es ist von einer höheren Gesamtspeicherung des Kohlenstoffs im UG auszugehen, da die Wurzeln und der Boden zusätzlich Kohlenstoff speichern (vgl. FERNANDES et al. 2020; CIERJACKS et al., 2010).

Für diese Arbeit wurde ein flächendeckender Ansatz gewählt, der die Kohlenstoffspeicherung in der gesamten Vegetation der Aue untersucht. Die Methoden der Vegetationstypen berechnen den Kohlenstoffgehalt in unterschiedlichen Detailgraden. So wurden die krautigen Pflanzen auf Basis der durchschnittlichen Halmlänge berechnet, während für die Berechnung der Gehölze das Laub nicht berücksichtigt wurde. Das Gesamtergebnis der Kohlenstoffspeicherung setzt sich außerdem aus Ergebnissen zusammen, die mit unterschiedlichen statistischen Unsicherheiten verbunden sind. Dieser Aspekt ist bei Betrachtung der Ergebnisse von Bedeutung. Gleichzeitig zeigt die Arbeit durch den flächendeckenden Ansatz verschiedene Methoden auf die Kohlenstoffanteile in der Vegetation zu berechnen, ohne eigene Messungen mit Ernte und Trocknung der Vegetation durchzuführen.

### 5.3 Unsicherheiten und Potenziale des Szenarios „Stauraumstrukturierung“

Das in dieser Arbeit vorgestellte Szenario der „Stauraumstrukturierung“ verfolgt die Zielvegetation der autotypischen Zonierung mit Ansiedlung von Weidengebüschen und Hartgehölzen. Es wird lediglich ein Entwicklungspfad aufgezeigt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich die Vegetation mit Eintritt des veränderten Wasserregimes in der Auenfläche anders entwickelt.

Das in dieser Arbeit aufgestellte Ziel der Aufwertung des Stauraums auf Basis der Kohlenstoffberechnungen setzt den Fokus auf eine ökologische Aufwertung. Das sekundäre Ziel war die Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung. Um die Kohlenstoffspeicherung in der Aue zu maximieren, bieten sich Aufforstungen der Fläche mit Hartgehölzen an, die über eine möglichst hohe Holzdichte verfügen. Diese Planung würde sich negativ auf das Retentionspotenzial auswirken, da im Falle von Hochwasser die Gehölze dem einfließenden Wasser als Riegel entgegenstehen würden. Daher wurden Maßnahmen zur Renaturierung und ökologischen Aufwertung der Aue gewählt. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass mit einer naturnahen Gestaltung der Aue eine Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung einhergeht.

Die Berechnungen der Kohlenstoffspeicherung im Szenario wurden stark vereinfacht und auf Basis der bestehenden Werte im UG vorgenommen. Als neuer Vegetationstyp wurde lediglich Weidenspreitlagen aufgenommen, da Werte über die Kohlenstoffspeicherung nach ZIEGENHORN (2017) bereits bekannt waren. Für eine genauere Einschätzung der Speicherung wäre es außerdem sinnvoll weitere Vegetationstypen wie eine Röhrichtflur im abgeflachten Uferbereich im nördlichen Teil des UG einzubeziehen.

## 6. Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die flächendeckende Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation eines ausgewählten Auenabschnitts durchgeführt. Dies erfolgte mittels von einer Drohne aufgenommenen Bilder, die über 3D-Messdaten zu einem digitalen Oberflächenmodell und digitalen Orthophoto weiterverarbeitet wurden. Weiterhin wurden Vegetationsaufnahmen im Gelände vorgenommen. Die Daten wurden verwendet, um in den differenzierten Vegetationstypen der Gehölze, Weiden und krautigen Arten die Kohlenstoffspeicherung zu berechnen.

Ausgehend davon wurde auf Grundlage von durchgeführten Auenrenaturierungen Maßnahmen erarbeitet, die das gestörte Überflutungsregime verbessern sollen. Mittels

strukturschaffenden Maßnahmen, wie dem Einbau eines Nebengerinnes, der Abflachung des Ufers sowie Neupflanzungen soll sich die Auenfläche im Laufe der Sukzession naturnah entwickeln. Es stellte sich heraus, dass mittels der Neustrukturierung des Stauraums eine Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung einhergeht. Bereits der Austausch von technischer Ufersicherung zu technisch-biologischer Ufersicherung in Form von Weidenspreitlagen hat einen positiven Effekt auf die Kohlenstoffspeicherung in der Aue. Insgesamt kann in dem Szenario nach einigen Sukzessionsstadien von einer Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung von über 50 % zum aktuellen Zustand ausgegangen werden. In Bezug auf das Konzept der Ökosystemdienstleistungen steigt der Wert der Aue durch die verbesserte Kohlenstoffspeicherung.

Der Einsatz der Drohne erwies sich für die Messung der Höhen der Vegetation für diese Arbeit als wichtig. Einige Schwachstellen im Rahmen des Drohneneinsatzes zeigten sich in der Datenauswertung, da das Höhenmodell durch Probleme bei der Datenerfassung die Unsicherheiten des Ergebnisses über die Kohlenstoffspeicherung verstärkte. Zusätzlich konnten die Daten aus der Befliegung nicht für die Kohlenstoffmessung von Fichten, Weiden und krautigen Pflanzen verwendet werden.

Die in dieser Arbeit aufgezeigten Methoden und Problematiken bei der Analyse der Kohlenstoffberechnung unter Einsatz einer Drohne können bei zukünftigen Projekten mit dem Ziel der Kohlenstoffberechnung der Vegetation einbezogen werden. Für die zuverlässige Erstellung von Höhendaten bietet sich zukünftig eine Befliegung mit laserbasierter Entfernungsmessung (LIDAR) an (DUBAYAH, DRAKE, 2000: 45). Andere Forschungen zeigten bereits gute Ergebnisse für die Abschätzung der Biomasse und Kohlenstoffberechnung mit laserbasierten Fernerkundungsmethoden (vgl. HURTT, DUBAYAH, 2004). Gleichzeitig ist der benötigte Sensor schwerer als herkömmliche Drohnenkameras und es werden größere Drohnen eingesetzt, was mit mehr Aufwand verbunden ist. Zukünftig werden die Sensoren jedoch kleiner und können an kleineren Drohnen befestigt werden (zum Beispiel die DJI M300 mit L1 Sensor). Weiterhin besteht ein hohes Potenzial in der Kohlenstoffberechnung mittels einer Drohnenkamera mit Aufnahmemöglichkeiten im Infrarotbereich. Über die spektrale Reflektanz im Nachinfrarot kann das Chlorophyll errechnet und unter Anwendung von sogenannten Vegetationsindizes die Biomasse, bzw. Netto-Primärmasseproduktion von Pflanzen geschätzt werden (vgl. BENDIG et al., 2015).

## 7. Quellenverzeichnis

- AALDE, H., P. GONZALEZ, M. GYTARSKI, T. KRUG, et al., 2006: Chapter 2: Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. In: S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (Hrsg.): In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 21-259.
- AGISOFT LLC (Hrsg.), 2020: Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6.
- AWANGE J.L., 2012: Environmental Monitoring using GNSS. In: Awange J.L. (Hrsg.): The Global Positioning System. 23-39.
- ALBERT, C., V. HAAREN, C., GALLER, C., 2012: Ökosystemdienstleistungen – Alter Wein in neuen Schläuchen oder Impuls für die Landschaftsplanung. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 44 (4): 142-148.
- ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (Hrsg.), 2012: Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich.
- BALMES, P., 2019: Modell- und luftbildbasierte Untersuchungen zur hydraulischen Wirkung von Totholz in kleinen Fließgewässern. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): 21.Treffen junger WissenschaftlerInnen. 159-164.
- BENDIG, J., YU, K., AASEN, H., BOLTEN, et al., 2015: Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (39): 79-87.
- BfG - BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.), 2013: FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG. Kolloquium am 15./16. Mai 2013 in Koblenz. – Veranstaltungen 4/2013, Koblenz, Mai 2013.
- BMU- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT und BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.), 2009: Auenzustandsbericht- Flussauen in Deutschland.
- BMUB - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT, 2015: Den Flüssen mehr Raum geben. Renaturierung von Auen in Deutschland.
- BMVI - BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (Hrsg.), 2016: Bundesverkehrswegeplan 2030.
- BMVI - BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (Hrsg.), 2017: Bundesprogramm Blaues Band Deutschland. Eine Zukunftsperspektive für die Wasserstraßen.
- BOLTE, A., 2006: Biomasse- und Elementvorräte der Bodenvegetation auf Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, EU Level II). –Forschungszentrum Waldökosysteme (Reihe B) 72: 1-80.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1964: Pflanzensoziologie- Grundzüge der Vegetationskunde.
- BRZEZIECKI, B. and KIENAST, F. 1994. Classifying the life-history strategies of trees on the basis of the Grimian model. *Forest Ecology and Management* 69 (1): 167-187.

- BUNDESANZEIGER, Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 17 vom 30.03.2017: Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten.
- BUSCH, N, 2006: Hydrologische Grundlagen der Stauregelung von Flüssen. *Limnologie aktuell* (12): 19-35.
- CARVAJAL, M, o., J.: Untersuchung über die CO<sub>2</sub>- Aufnahme durch die wichtigsten Anbaupflanzen in der Region Murcia.
- CIERJACKS, A., KLEINSCHMIT, B., BABINSKY, M., KLEINSCHROTH, F., MARKERT, A., MENZEL, 2010: Carbon stocks of soil and vegetation on Danubian floodplains. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173 (5): 644-653.
- DAMM, C., 2020: Leitbilder für die Renaturierung von Flussauen schaffen. In: Earth System Knowledge Platform (Hrsg.): ESKP-Themenspezial Biodiversität im Meer und an Land. Vom Wert biologischer Vielfalt. 126-129.
- DE GROOT R.S., ALKEMADE R., BRAAT, L., HEIN L., WILLEMEN L., 2010: Challenges integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision-making. *Ecological Complexity* 7 (3): 260-272.
- DEHNHARDT, A., SCHOLZ, M., MEHL, D., SCHRÖDER, U., FUCHS, E., EICHHORN, A., RAST, G., 2015: Die Rolle von Auen und Fließgewässern für den Klimaschutz und die Klimaanpassung.
- DFS - Deutsche Flugsicherung, 2018: Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung von Erlaubnissen und die Zulassung von Ausnahmen zum Betrieb von unbemannten Fluggeräten gemäß § 21a und § 21b Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). In: Nachrichten für Luftfahrer.
- DIERSSEN, K., 1990: Einführung in die Pflanzensoziologie-Vegetationskunde.
- DJI, 2020: Phantom 4 Pro Technische Daten. Aufgerufen am 01.07.2020, <https://www.dji.com/de/phantom-4-pro/info>
- DRONELINK LLC, 2020: The Future of Flight Automation. Aufgerufen am: 19.08.2020, <https://www.dronelink.com/>
- DUBAYAH, R., DRAKE, J., 2000: Lidar Remote Sensing for Forestry. *Journal of forestry* 98 (6): 44-46.
- DWD – Deutscher Wetterdienst, 2020: Wetter und Klima vor Ort, Aufgerufen am 03.06.2020, [https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima\\_vorort/\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/_node.html)
- ELIAS, B., 2012: 3D-Geobasisinformationen.
- ELLENBERG, H., 1986: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. UTB für Wissenschaft. Große Reihe. (8104).
- FACHGRUPPE BLAUES BAND, 2020: Fachkonzept Biotopverbund Gewässer und Auen Hintergrunddokument Maßnahmenkatalog „Biotopverbund Blaues Band Deutschland“.
- FERNANDES, M., AGUIAR, F., MARTINS, M., RICO, N., FERREIRA, M., CORREIA, A., 2020: Carbon Stock Estimations in a Mediterranean Riparian Forest: A Case Study Combining Field Data and UAV Imagery. *Forests* 11 (4): 1-21.

- GATTINGER, A., SKINNER, C., MÜLLER, A., FLIESSBACH, et al., 2013: Kohlenstoffspeicherung und Treibhausgasflüsse in Böden unter biologischer und konventioneller Bewirtschaftung– Ergebnisse aus zwei globalen Meta-Analysen. In D. Neuhoff, C. Stumm, S. Ziegler, G. Rahmann, U. Hamm & U. Köpke (Hrsg.): Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landwirtschaft. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013.
- GOLDSTICKER, E., 1984: Die Lahn, historische Entwicklung einer Wasserstraße. In Bad Emser Hefte 24/25.
- HARNISCH, M., OTTE, A., SCHMIEDE, R., T. B. DONATH, 2014: Verwendung von Mahdgut zur Renaturierung von Auengrünland.
- HEINRICHS, S., BERNHARDT, M., SCHMIDT, W., 2010: The estimation of aboveground biomass and nutrient pools of understorey plants in closed Norway spruce forests and on clearcuts. *European Journal of Forest Research* 129 (2): 613-624.
- HMU KL V - HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ o. J.: Stauraumstrukturierung. Aufgerufen am: 17.06.2020, <https://www.lila-livinglahn.de/massnahmen/action-a-7-a-7a-und-c-6c-stauraumstrukturierung>
- HURTT, G., DUBAYAH, R., DRAKE, J., MOORCROFT, P., PACALA, S., BLAIR, B., FEARON, M., 2004: Beyond potential vegetation: Combining LIDAR data and a height-structured model for carbon studies. *Ecological Applications* 14 (3): 873-883.
- LAMMERANNER, W., HASELSTEINER, R., 2010: Ingenieurbiologische Bauweisen an Hochwasserschutzdeichen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 40. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. 191-200.
- LIEBENSTEIN, H., 2016: Technisch-biologische Ufersicherungen als Beitrag zur gewässerstrukturellen Entwicklung von Bundeswasserstraßen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement - Synergien, Konflikte und Lösungen aus EU-WRRRL und EU-HWRM-RL. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 57. Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. 433-442.
- MUEEF - MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, ERNÄHRUNG UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ. Aufgerufen am 10.09.2020, <https://hochwassermanagement.rlpumwelt.de/servlet/is/200127/>
- HUSSON, E., LINDGREN, F., ECKE, F., 2014: Assessing Biomass and Metal Contents in Riparian Vegetation Along a Pollution Gradient Using an Unmanned Aircraft System. *Water Air Soil Pollution* 225 (11): 1- 14.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Hrsg.), 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.
- KÄNDLER, G., ADLER, P., 2011: Konzept zur Erfassung der Kohlenstoff-Speicherleistung von Stadtbäumen am Beispiel der Stadt Karlsruhe.
- Kopter-Profi, 2020: Drohnenführerschein bei der Kopter-Profi GmbH. Aufgerufen am 31.10.2020, <https://www.kopter-profi.de/drohnen-fuehrerschein>

- KÖGEL-KNABNER, I., 2002: Organische Substanz. In: Scheffer, F., Schachtschabel, P. (Hrsg.): Lehrbuch der Bodenkunde. 51-82.
- Kuzyakov, Y., Domanski, G., 2000: Carbon Input by Plants into the Soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163 (4): 421-431.
- LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., 2018: Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aero triangulation UAV-basierter Bildflüge. 81 – 101, UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen 89. DVW- Schriftenreihe.
- Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) vom 29.10.2015 zuletzt geändert am 11.06.2017, Berlin.
- MEHL, D., SCHOLZ, M., SCHULZ-ZUNKEL, C., KASPERIDUS, H., BORN, W., EHLERT, T., 2013: Analyse und Bewertung von Ökosystemfunktionen und -leistungen großer Flussauen. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6 (9): 493-499.
- MERGEL D., 2017: Anpassung von Trendkurven an Messpunkte. In: Physik mit Excel und Visual Basic.
- PRESS, 2017: How a Sensor Gimbal Improves Efficiency of an Aerial Mapping Mission. Aufgerufen am 31.10.2020, <https://www.suasnews.com/2017/01/sensor-gimbal-improves-efficiency-aerial-mapping-mission/>
- RAVINDRANATH, N., OSTWALD, M., 2008: Carbon Inventory Methods: Handbook for Greenhouse Gas Inventory.
- REICHHOFF, L., EICHHORN, A., PATZAK, U., 2010: Hydraulische Aktivierung von Flutrinnen und Senken – Maßnahmen zur Revitalisierung von Auen im Rahmen der Managementplanung. *Naturschutz im Land Sachsen-Anhalt* 57 (1/2): 34–39.
- RICHTER, D., MARKEWITZ, D., DUNSCOMB, J., HEINE, P., WELLS, C., STUANES, A., ALLEN, J., URREGO, B., HARRISON, K., BONANI, G., 1995: Carbon Cycling in a Loblolly Pine Forest: Implications for the Missing Carbon Sink and for the Concept of Soil.
- RIECKEN, U., FINCK, P., RATHS, U., SCHRÖDER, E. und SSYMANK, A., 2006: Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Zweite fortgeschriebene Fassung 2006. Hrsg.: Bundesamt für Naturschutz.
- ROLOFF, A., WEISGERBER, H., LANG, U., STIMM, 2008: Enzyklopädie der Holzgewächse. Handbuch und Atlas der Dendrologie.
- SCHLEUTER M., NILSON E., BUSCH N., HATZ M. REEPS T., THEIS H., KLEINSCHMIDT J. HILLEBRAND G., FUCHS E., FEILER U., BRINKE A., SPIRA D. FISCHER H., BERGFELD-WIEDEMANN T., HORCHLER P., WEY J., SCHÖLL F., SCHÄFFER M. DAX G., 2017: Abschätzung von Wirkungszusammenhängen und Möglichkeiten einer Staulegung an der Lahn. Diskussionspapier- Teil 2: Auswirkungen auf Ökologie und Umwelt.
- SCHMIDT, W. und STREIT, M., 2009: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Diversität der Baumschicht und der Bodenvegetation? *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* (7), 5–19.
- SCHOLZ M., MEHL D., SCHULZ-ZUNKEL C., KASPERIDUS H. D., BORN W., HENLE K., 2012: Ökosystemfunktionen von Flussauen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 124 (2): 173-181.
- SHORTER, N., KASPARIS, T., 2009: Automatic Vegetation Identification and Building Detection from a Single Nadir Aerial Image. *Remote Sensing* 1 (4), 731-757.

- STÄPS, J. und HORCHLER, P., 2016: Analyse der Einnischung der Hohen Weide (*Salix rubens*) in den hydrologischen Gradienten an der Unteren Mittelalbe: Eine GIS-basierte Auswertung von Fernerkundungsdaten. In: Daten vom Fluss: Wissenschaftliche Untersuchungen und aktuelle Anwendungsaspekte in Auenlandschaften. Beiträge aus dem Nationalpark Unteres Odertal. (1).
- Topcon Cooperation (Hersteller) 2009: GRS-1 – Referenznetzfähiger GNSS-RTK-Empfänger.
- UBA - UMWELTBUNDESAMT, BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (Hrsg.), 2016: Die Wasserrahmenrichtlinie – Deutschlands Gewässer 2015
- UBA - UMWELTBUNDESAMT, BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (Hrsg.), 2017: Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen.
- UN FCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015: Adoption of the Paris Agreement.
- V. HAAREN, C. (Hrsg.), 2004: Landschaftsplanung.
- WALENTOWSKI, H., 2008: Ein Wald für das Hochwasser. In: LWF aktuell, Hrsg: Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. 66.
- WESTOBY M., BRASINGTON J., GLASSER N., HAMBREY M., REYNOLDS J., 2012: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.
- WISSKIRCHEN, R., 1995: Verbreitung und Ökologie von Flussufer-Pioniergesellschaften (*Chenopodium rubri*) im mittleren und westlichen Europa.
- WISSKIRCHEN, R. & HAEUPLER, H. 1998: Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands: Mit Chromosomenatlas von Focke Albers.
- World Agroforestry, 2020: What is Agroforestry? Aufgerufen am: 19.07.2020, <https://www.worldagroforestry.org/about/agroforestry>
- ZAHAWI, R. A., DANDOIS, J. P., HOLL, K. D., NADWODNY, D., REID, J. L., & ELLIS, E. C., 2015: Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation* 186: 287–295.
- ZERBE, S., STEFFENHAGEN, P., PARAKENINGS, K. TIMMERMANN, T., FRICK, A., GELBRECHT, J., ZAK, D., 2013: Ecosystem Service Restoration after 10 Years of Rewetting Peatlands in NE Germany. *Environmental Management* 51 (6): 1194–1209.
- ZIEGENHORN, L., 2017: Geotechnische und ökologische Wirksamkeit von Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen. Masterarbeit am Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover. Unveröffentlicht.



## 8. Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Passagen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher noch keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

H. Philipp, 15. 12. 2020 in Hannover

## 9. Anhang

### I Vegetationsaufnahmen

Tabelle 11: Vegetationsaufnahme des landwirtschaftlich genutzten Grünlands

Vegetationsaufnahme Nr. 1		
Gemeinde & Gemarkung:	Dausenau	
Flur:	32	
Flurstück:	59	
GPS-Verortung (UTM):	X: 412285,689, Y: 5574456,539	
Nutzung / pflege:	Intensiv genutztes Grünland	
Größe der Aufnahmefläche:	25 m <sup>2</sup>	
Belichtung:	Sonnig	
Schichtung:	Krautschicht	
Deckung:	97%	
Bemerkung	relativ artenarm	
Vorkommende Arten		
Arten	Deckungsgrad (%)	Bei Deckung ab 5%: Mittlere gestreckte Spross bzw. Blattlänge (cm)
<i>Lolium perenne</i>	59	35
<i>Festuca pratensis</i>	20	15
<i>Plantago lanceolata</i>	5	22,5
<i>Holcus lanatus</i>	3	
<i>Dactylis glomerata</i>	3	
<i>Poa pratensis</i>	2	
<i>Taraxacum officinale</i>	2	
<i>Trifolium pratense</i>	2	
<i>Heracleum sphondylium</i>	1	
<i>Bellis perennis</i>	1	
<i>Trifolium repens</i>	1	
<i>Rumex obtusifolius</i>	1	



Abb. 26: Fläche der Vegetationsaufnahme für landwirtschaftliches Grünland

Tabelle 12: Vegetationsaufnahme der Rubusflur im Uferbereich

Vegetationsaufnahme Nr. 2		
Gemeinde & Gemarkung:	Dausenau	
Flur:	32	
Flurstück:	138	
GPS-Verortung (UTM):	X: 412254,449, Y: 5574457,263	
Nutzung / pflege:	ungenutzter Uferstreifen	
Größe der Aufnahmefläche:	10m Länge, 3m Breite= 30 m <sup>2</sup>	
Belichtung:	Sonnig	
Schichtung:	Krautschicht	
Deckung:	100%	
Bemerkung	Rubus dominiert stark	
Vorkommende Arten		
Arten	Deckungsgrad (%)	Bei Deckung ab 5%: Mittlere gestreckte Spross bzw. Blattlänge (cm)
<i>Rubus fruticosus</i> agg.	95	175
<i>Arrhenatherum elatius</i>	1	
<i>Dactylis glomerata</i>	1	
<i>Urtica dioica</i>	1	
<i>Galium mollugo</i> agg.	1	
<i>Verbascum nigrum</i>	1	
<i>Lamium album</i>	< 1	
<i>Ranunculus repens</i>	< 1	
<i>Veronica chamaedrys</i>	< 1	
<i>Scrophularia nodosa</i>	< 1	



Abb. 27: Vegetationsaufnahmefläche der Rubusflur

Tabelle 13: Vegetationsaufnahme der Brennesselflur im Uferbereich

Vegetationsaufnahme Nr. 3		
Gemeinde & Gemarkung:	Dausenau	
Flur:	32	
Flurstück:	138	
GPS-Verortung (UTM):	X: 412229,624, Y: 5574494,322	
Nutzung / pflege:	ungenutzter Uferstreifen	
Größe der Aufnahmefläche:	5m Länge, 3m Breite= 15 m <sup>2</sup>	
Belichtung:	Sonnig	
Schichtung:	Krautschicht	
Deckung:	100%	
Bemerkung	Brennesselflur	
Vorkommende Arten		
Arten	Deckungsgrad (%)	Bei Deckung ab 5%: Mittlere gestreckte Spross bzw. Blattlänge (cm)
<i>Urtica dioica</i>	70	80
<i>Rubus caesius</i>	10	80
<i>Eupatorium cannabinum</i>	10	55
<i>Galium mollugo</i> agg.	2	
<i>Cruciata laevipes</i>	2	
<i>Lamium album</i>	2	
<i>Stellaria graminea</i>	2	
<i>Poa palustris</i>	1	
<i>Equisetum arvense</i>	1	



Abb. 28: Vegetationsaufnahmefläche der Brennesselflur

Tabelle 14: Vegetationsaufnahme der Gräserflur im Uferbereich

Vegetationsaufnahme Nr. 4		
Gemeinde & Gemarkung:	Dausenau	
Flur:	32	
Flurstück:	138	
GPS-Verortung (UTM):	X: 412217,846, Y: 5574515,136	
Nutzung / pflege:	ungenutzter Uferstreifen	
Größe der Aufnahmefläche:	5m Länge, 3m Breite= 15 m <sup>2</sup>	
Belichtung:	Sonnig	
Schichtung:	Krautschicht	
Deckung:	100%	
Bemerkung	Grasflur	
Vorkommende Arten		
Arten	Deckungsgrad (%)	Bei Deckung ab 5%: Mittlere gestreckte Spross bzw. Blattlänge (cm)
<i>Dactylis glomerata</i>	40	130
<i>Arrhenatherum elatius</i>	40	125
<i>Urtica dioica</i>	5	120
<i>Holcus lanatus</i>	5	125
<i>Rubus caesius</i>	5	135
<i>Galium mollugo agg.</i>	2	
<i>Lamium album</i>	1	
<i>Festuca pratensis</i>	1	
<i>Carduus crispus</i>	1	
<i>Humulus lupulus</i>	1	



Abb. 29: Vegetationsaufnahmefläche der Gräserflur

Tabelle 15: Vegetationsaufnahme mit Esche und Chaerophyllum temulum in der Krautschicht

Vegetationsaufnahme Nr. 5		
Gemeinde & Gemarkung:	Dausenau	
Flur:	32	
Flurstück:	138	
GPS-Verortung (UTM):	X: 412187,089, Y: 5574591,632	
Nutzung / pflege:	ungenutzter Uferstreifen	
Größe der Aufnahmefläche:	10m Länge, 3m Breite= 30 m <sup>2</sup>	
Belichtung:	Sonnig / Halbschatten	
Schichtung:	Baumschicht (B), Strauchschicht (S), Krautschicht (K)	
Deckung:	100%	
Bemerkung	Vegetation unter Eschenüberstand	
Vorkommende Arten		
Arten	Deckungsgrad (%)	Bei Deckung > 5%: Mittlere gestreckte Spross bzw. Blattlänge (cm)
<i>B Fraxinus excelsior</i>	65	
<i>B Acer pseudoplatanus</i>	4	
<i>S Euonymus europaeus</i>	25	
<i>K Chaerophyllum temulum</i>	60	110
<i>K Glechoma hederacea</i>	4	
<i>K Urtica dioica</i>	3	
<i>K Bromus inermis</i>	3	
<i>K Stachys sylvatica</i>	3	
<i>K Arctium lappa</i>	3	
<i>K Poa nemoralis</i>	3	
<i>K Lamium maculatum</i>	3	
<i>K Lamium album</i>	2	
<i>K Humulus lupulus</i>	2	
<i>K Silene dioica</i>	2	
<i>K Galium aparine</i>	2	
<i>K Aegopodium podagraria</i>	2	
<i>K Brachypodium sylvaticum</i>	2	
<i>K Chaerophyllum bulbosum</i>	2	
<i>K Artemisia vulgaris</i>	2	
<i>K Elymus caninus</i>	2	



Abb. 30: Vegetationsaufnahme­fläche mit hauptsächlich *Chaerophyllum temulum* in der Krautschicht







Tabelle 18: Berechnungen des gespeicherten Kohlenstoffs der Weiden mit allen einbezogenen Parametern

Nr.	Art	Umfang (cm)	BHD (cm)	Radius	Anzahl Triebe	Höhe (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Biomasse (g)	Gesamtbio- masse Weide	Kohlenstoffspeicherung (kg)
	Eingangswert	Eingangswert	Umfang/π	BHD/2	Eingangswert	Eingangswert	$V = \pi \times r^2 \times H$	$BM = 1,2889 \times V^{0,8338}$	Multiplikation mit Anzahl Triebe	$C = BM / 1000 \times 0,47$
U2	Salix fragilis	50	15,92	7,96	5,00	391,00	77786,98	15426,14	77130,72	36,25
U3	Salix triandra	40	12,73	6,37	3,00	215,00	27374,65	6457,74	19373,22	9,11
U4	Salix triandra	40	12,73	6,37	5,00	309,00	39343,10	8738,17	43690,87	20,53
U5	Salix eleagnos	15	4,77	2,39	2,00	318,00	5693,77	1743,70	3487,40	1,64
U10	Salix fragilis	15	4,77	2,39	2,00	100,00	1790,49	664,58	1329,16	0,62
U15	Salix fragilis	15	4,77	2,39	2,00	551,00	9865,62	2757,53	5515,06	2,59
U21	Salix purpurea	3	0,95	0,48	5,00	73,00	52,28	34,91	174,56	0,08
U31	Salix cinerea	10	3,18	1,59	7,00	319,00	2538,52	889,12	6223,82	2,93
U39	Salix fragilis	5	1,59	0,80	5,00	772,00	1535,85	584,78	2923,92	1,37
U41	Salix fragilis	40	12,73	6,37	8,00	100,00	12732,40	3411,09	27288,73	12,83
U42	Salix caprea	20	6,37	3,18	5,00	100,00	3183,10	1073,73	5368,66	2,52
U43	Salix fragilis	35	11,14	5,57	5,00	806,00	78570,82	15555,65	77778,23	36,56
U44	Salix fragilis	50	15,92	7,96	5,00	413,00	82163,74	16146,54	80732,72	37,94
U46	Salix fragilis	20	6,37	3,18	8,00	294,00	9358,31	2638,78	21110,26	9,92
U47	Salix purpurea	7	2,23	1,11	7,00	173,00	674,58	294,49	2061,41	0,97
U48	Salix fragilis	25	7,96	3,98	5,00	200,00	9947,18	2776,53	13882,63	6,52
U50	Salix fragilis	15	4,77	2,39	19,00	235,00	4207,66	1355,02	25745,29	12,10
U51	Salix fragilis	15	4,77	2,39	28,00	144,00	2578,31	900,72	25220,20	11,85
U52	Salix fragilis	15	4,77	2,39	6,00	51,00	913,15	379,07	2274,42	1,07
U57	Salix fragilis	8	2,55	1,27	16,00	384,00	1955,70	715,33	11445,28	5,38
U61	Salix fragilis	7	2,23	1,11	5,00	323,00	1259,47	495,63	2478,14	1,16
U62	Salix fragilis	12	3,82	1,91	4,00	100,00	1145,92	458,08	1832,32	0,86
U63	Salix fragilis	15	4,77	2,39	5,00	100,00	1790,49	664,58	3322,90	1,56
U68	Salix purpurea	15	4,77	2,39	5,00	493,00	8827,13	2513,30	12566,48	5,91
U69	Salix purpurea	15	4,77	2,39	5,00	288,00	5156,62	1605,42	8027,11	3,77
U70	Salix fragilis	15	4,77	2,39	5,00	587,00	10510,19	2906,95	14534,77	6,83

### III Berechnungstabellen der krautigen Arten

Tabelle 19: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes aus den Vegetationsaufnahmen

Arten	Deckungsgrad in %	„D“- Angepasster Deckungsgrad auf 100% (Gesamtdeckung) in %	„ML“-Mittlere Sprosslänge (cm)
<i>Lolium perenne</i>	59	65	35
<i>Festuca pratensis</i>	20	25	15
<i>Plantago lanceolata</i>	5	10	22,5

Tabelle 20: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes aus den Vegetationsaufnahmen

Arten	Wuchsformen- gruppe (WG)	Elements- gehaltsgruppe (EG)	Gemittelter Kohlenstoffgehalt in g	Funktionskonstanten basierend auf der Wuchsformengruppe		
				a	b	c
<i>Lolium perenne</i>	Mittelgras	G1	0,4466	0,00345	0,95761	1,55756
<i>Festuca pratensis</i>	Mittelgras	G2	0,4645	0,00345	0,95761	1,55756
<i>Plantago lanceolata</i>	Mittelkraut	K2	0,4461	0,10332	0,95776	0,62133

Tabelle 21: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Biomasse- und Kohlenstoffspeicherung in der landwirtschaftlich genutzten Grünlandfläche

	<i>Lolium perenne</i>	<i>Festuca pratensis</i>	<i>Plantago lanceolata</i>
Berechnung Biomasse (g):	47,7377	5,1090	6,4878
Berechnung Kohlenstoff (g)	21,3197	2,3731	2,8942
Berechnung Kohlenstoff(kg)	0,0213	0,0024	0,0029
<b>Summe Kohlenstoff in kg pro m<sup>2</sup></b>	<b>0,0266</b>		

Tabelle 22: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des Uferbereiches aus den Vegetationsaufnahmen

Arten	Deckungsgrad in %	Angepasster Deckungsgrad auf 100% (Gesamtdeckung) in %	Mittlere Sprosslänge (cm)
Vegetationsaufnahme Nr. 2			
<i>Rubus fruticosus agg.</i>	95	100	175
Vegetationsaufnahme Nr. 3			
<i>Urtica dioica</i>	70	74	80
<i>Rubus caesius</i>	10	13	80
<i>Eupatorium cannabinum</i>	10	13	55
Vegetationsaufnahme Nr. 4			
<i>Dactylis glomerata</i>	40	41	130
<i>Arrhenatherum elatius</i>	40	41	125
<i>Urtica dioica</i>	5	6	120
<i>Holcus lanatus</i>	5	6	125
<i>Rubus caesius</i>	5	6	135
Vegetationsaufnahme Nr. 5			
<i>Chaerophyllum temulum</i>	60	100	110

Tabelle 23: Berechnungsparameter für die Berechnung der Kohlenstoffspeicherung auf einem Quadratmeter des Uferbereiches aus den Vegetationsaufnahmen

Arten	WG	EG	C pro g	Funktionskonstanten basierend auf WG		
				a	b	c
Vegetationsaufnahme Nr. 2						
<i>Rubus fruticosus agg.</i>	Kleinstrauch	ST1	0,4748	0,0342	0,99625	0,9887
Vegetationsaufnahme Nr. 3						
<i>Urtica dioica</i>	Großkraut	K1	0,4188	0,0212	1,03835	0,8631
<i>Rubus caesius</i>	Kleinstrauch	ST1	0,4748	0,0342	0,99625	0,9887
<i>Eupatorium cannabinum</i>	Großkraut	K1	0,4188	0,0212	1,03835	0,8631
Vegetationsaufnahme Nr. 4						
<i>Dactylis glomerata</i>	Mittelgras	G1	0,4466	0,0035	0,95761	1,5576
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Mittelgras	G1	0,4466	0,0035	0,95761	1,5576
<i>Urtica dioica</i>	Großkraut	K1	0,4188	0,0212	1,03835	0,8631
<i>Holcus lanatus</i>	Mittelgras	G1	0,4466	0,0035	0,95761	1,5576
<i>Rubus caesius</i>	Kleinstrauch	ST1	0,4748	0,0342	0,99625	0,9887
Vegetationsaufnahme Nr. 5						
<i>Chaerophyllum temulum</i>	Großkraut	K4	0,4502	0,0212	1,03835	0,8631

Tabelle 24: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Biomasse- und Kohlenstoffspeicherung in der krautigen Vegetation des Uferbereichs

Vegetationsaufnahme Nr. 2					
	<i>Rubus fruticosus agg.</i>				
Biomasse (g):	555,0375				
Kohlenstoff (g)	263,5318				
Kohlenstoff (kg)	0,2635				
Vegetationsaufnahme Nr. 3					
	<i>Urtica dioica</i>	<i>Rubus caesius</i>	<i>Eupatorium cannabinum</i>		
Biomasse (g):	81,3695	33,5340	9,6773		
Kohlenstoff (g)	34,0776	15,9219	4,0529		
Kohlenstoff (kg)	0,0341	0,0159	0,0041		
Vegetationsaufnahme Nr. 4					
	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Urtica dioica</i>	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Rubus caesius</i>
Biomasse (g):	237,0449	222,9976	8,5021	35,4036	26,0391
Kohlenstoff (g)	105,8643	99,5907	3,5607	15,8113	12,3634
Kohlenstoff (kg)	0,1059	0,0996	0,0036	0,0158	0,0124
Vegetationsaufnahme Nr. 5					
	<i>Chaerophyllum temulum</i>				
Biomasse (g):	146,4255				
Kohlenstoff (g)	65,9208				
Kohlenstoff (kg)	0,0659				
<b>Summe Kohlenstoff in kg pro m<sup>2</sup></b>	<b>0,6207</b>				