Biodynamic River engineering:

Building agricultures using native vegetation

Bachelorarbeit

von Lukas Schöberl

Bauingenieurwesen B.Sc.

Matrikelnummer: 3285152

Universität Stuttgart

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS)

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Prüfer/-in: [Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht](https://www.iws.uni-stuttgart.de/institut/team/Wieprecht-00003/)

Betreuer/-in: Dr. Sebastian Schwindt

Ich erkläre hiermit, dass die vorliegende Arbeit von mir selbst und ohne fremde Hilfe, lediglich unter Benutzung der hier aufgeführten Literatur, angefertigt worden ist. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

(Datum, Unterschrift)

Ich stimme zu, dass die vorliegende Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken in den Bibliotheken des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart aufgestellt und zugänglich gemacht wird (Veröffentlichung nach § 6 Abs. 1 UrhG) und hieraus im Rahmen des § 51 UrhG zitiert werden kann.

(Datum, Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

[1 Einleitung I](#_Toc53233511)

[2 Grundlagen III](#_Toc53233512)

[2.1 Naturnahe Bauweisen III](#_Toc53233513)

[2.2 Funktionsweise VI](#_Toc53233514)

[2.3 Charakterisierung der Vegetation X](#_Toc53233515)

[2.4 Bewertungskriterien für den Erfolgreichen Einsatz XI](#_Toc53233516)

[2.5 Datenbankmanagement mit Python XI](#_Toc53233517)

[3 Beschreibung der Standorte XII](#_Toc53233518)

[3.1 Studiengebiete XII](#_Toc53233519)

[3.2 Bayerisches Alpenvorland XII](#_Toc53233520)

[3.2.1 Beschreibung der geographischen Lage und Flora XII](#_Toc53233521)

[3.2.2 Flusscharakteristik am Standort XIII](#_Toc53233522)

[3.2.3 Auswahl geeigneter Pflanzenarten XIV](#_Toc53233523)

[3.3 Breisach am Rhein XIV](#_Toc53233524)

[3.3.1 Beschreibung der geographischen Lage, Flora XIV](#_Toc53233525)

[3.3.2 Flusscharakteristik am Standort XIV](#_Toc53233526)

[4 Auswahl geeigneter Pflanzenarten XIV](#_Toc53233527)

[4.1 Niederrheinisches Tiefland und Kölner Bucht XIV](#_Toc53233528)

[4.1.1 Beschreibung der geographischen Lage, Flora XIV](#_Toc53233529)

[4.1.2 Flusscharakteristik am Standort XV](#_Toc53233530)

[4.1.3 Auswahl geeigneter Pflanzenarten XV](#_Toc53233531)

[5 Durchführung XV](#_Toc53233532)

[5.1 Identifikation nativer und invasiver Vegetation der Studiengebiete XV](#_Toc53233533)

[5.2 Anforderungen an die Vegetation XV](#_Toc53233534)

[5.3 Auswahl der Studienparameter XV](#_Toc53233535)

[5.4 Entwicklung eines Tools mit Python für die Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Pflanzen für naturbasierte Lösungen XV](#_Toc53233536)

[5.5 Code-Design XV](#_Toc53233537)

[6 Resultat und Diskussion XV](#_Toc53233538)

[7 Fazit XV](#_Toc53233539)

[Reference list XV](#_Toc53233540)

# Einleitung

Überschwemmungen in Folge von Hochwasser gehören zu den weltweit schädlichsten Naturereignissen (Dadson *et al.*, 2017). Global verursachen Sie im Durchschnitt jedes Jahr finanzielle Schäden in Höhe von 104 Milliarden US$ und machen damit rund 35% der gesamten Schadenssumme aller jährlichen Naturkatastrophen aus (Desai *et al.*, 2015). Die Schutzmaßnahmen bestehen heute meist aus dem Bauen von Dämmen, Deichen oder dem Anlegen von Kanälen und weiteren technischen Schutzmaßnahmen (Cook Brian *et al.*, 2016; Short *et al.*, 2019; van Wesenbeeck *et al.*, 2017). Diese Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes werden jedoch mittlerweile zunehmend hinterfragt, da Sie häufige Wartungen benötigen (Kline and Cahoon, 2010), oft mit sehr hohen Investitionskosten verbunden sind und Sie sich negativ auf den Lebensraum der Auen auswirken können (Acreman, Riddington and Booker, 2003; Jongman, 2018; Kondolf, 2011). Beispielsweise sind durch den Bau von Hochwasserschutzdeichen an vielen Abschnitten der Flüsse Rhein, Elbe, Donau und Oder mittlerweile nur noch 10 – 20 % der ursprünglichen Auen erhalten geblieben. Von den Bundesweiten rezenten Flussauen sind mittlerweile 90% deutlich bis sehr stark verändert worden (BMU and BfN, 2009). Diskutiert wird auch, in wie weit die technischen Hochwasserschutzmaßnahmen selbst zu einer Verschärfung der Hochwassersituation beitragen, da Deicherhöhungen zum Beispiel zwar eine deutliche Verbesserung des Hochwasserschutzes an lokalen Standorten bewirken, jedoch häufig den Fluss weiter beschleunigen und das Hochwasser flussabwärts erhöhen (Zielaskowski and Lüderitz, 2005). Der Verlust der natürlichen Retentionsflächen zusammen mit dem Flussnahen betreiben von Landwirtschaft und der generellen Bebauung des Umlandes, durch welche das Land aufgrund von Verdichtung und Versieglung nichtmehr genügend Wasser aufnehmen kann, fließt Niederschlagwasser schneller zu großen Hochwasserwellen zusammen und kann am Ende in Form von Überflutungen hohe finanzielle Schäden anrichten oder im schlimmsten Fall Menschenleben kosten (BN, no date; Hess *et al.*, 2010; McIntyre and Marshall, 2010; Zölch *et al.*, 2017). Doch es gibt nicht nur technische Lösungen für den Hochwasserschutz, naturbasierte Lösungen, welche das Hochwasserrisiko mindern und zum Wasserrückhalt beitragen, genießen mittlerweile immer mehr Aufmerksamkeit seitens Politik und Wissenschaft (Collentine and Futter, 2018; Raymond *et al.*, 2017). Von der Europäischen Kommission werden diese definiert als Handlungen, die von der Natur inspiriert, unterstützt oder kopiert werden, mit enormem Potential hinsichtlich Veränderungsresistenz und Energie- sowie Ressourceneffizienz. Geplant ist es, mithilfe einer EU-Agenda für Forschung und Innovation zu naturbasierten Lösungen, der EU zu ermöglichen zur weltweit führenden Institution hinsichtlich der Forschung und Entwicklung von naturbasierten Lösungen zu aufzusteigen (European Commission, 2015). Naturbasierte Lösungen können strukturelle Maßnahmen des Hochwasserschutzes als Objektschutz in urbanen Gebieten nicht komplett ersetzen, jedoch steigt die Signifikanz eines integrativen Hochwassermanagements zukünftig immer weiter an (Hauer *et al.*, 2010; Kondolf, 2011). Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit naturbasierten Lösungen für den Hochwasserschutz ist der dezentrale Wasserrückhalt als Maßnahme des natürlichen Hochwassermanagements (Reinhardt *et al.*, 2011; Short *et al.*, 2019). Ziel ist es, mit naturnahen Maßnahmen und dem Arbeiten mit natürlichen Prozessen im Einzugsgebiet zur Verringerung des Oberflächenabflusses, die Hochwasserspitzen zu verzögern und abzuschwächen (Janes *et al.*, 2017; Lane, 2017; Thorne, 2014). Es soll im Gegensatz zu den heutzutage angewandten, ausschließlich technischen Hochwasserschutzmaßnahmen, welche meist nur ortsspezifisch zum direkten Schutz von Gemeinden oder sonstiger Infrastruktur in Gewässernähe eingesetzt werden (Patt and Gonsowski, 2011), ein großflächiger, resilienter Hochwasserschutz sichergestellt werden, welcher die Ursachen von Überschwemmungen direkt angeht und somit das Ausmaß eines möglichen Hochwassers maßgeblich reduziert oder dieses gänzlich verhindert (Iacob *et al.*, 2014; Malcherek, 2019; Werritty, 2006). Anwendungsbeispiele des dezentralen Wasserrückhalts sind unter anderem das Pflanzen von geeigneter Vegetation und das Anlegen von Feuchtgebieten und Teichen im Einzugsgebiet (Dixon *et al.*, 2016; Waylen *et al.*, 2018). Während diese Maßnahmen auch als Wasserrückhalt in der Fläche bezeichnet werden, ist auch der Wasserrückhalt in Gewässern und Auen für erfolgreiche Hochwasserschutzstrategien von Bedeutung (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1995). Der Gedanke hierbei ist, den Flüssen wieder mehr von ihrem ursprünglich beanspruchten Platz zu geben und Sie, ebenso wie ihre natürlichen Auen, zu renaturieren und somit den Hochwasserschutz in das unmittelbar den Fluss umschließende Gebiet auszuweiten (Biron *et al.*, 2014; Fliervoet and van den Born, 2017; Hartmann, 2011). Für die Bereitstellung des dafür benötigten Raumes sind Maßnahmen wie das Freihalten von Überschwemmungsflächen, Flussaufweitungen sowie eine Beschränkungen der Landnutzung in Risikogebieten nötig (Aufleger, Gems and Klar, 2012; Köck and Maier, 2015; Lavers and Charlesworth, 2018). In diesem Zusammenhang wird auch von einem vorbeugendem Hochwasserschutz gesprochen, da es bei dem natürlichen Hochwassermanagement eher um die Reduzierung des Hochwasserrisikos geht als um den Schutz vor einem bereits eingetretenem Hochwasser (Dittrich and Worm, 2006; Hartmann, 2012). Neben dem Hochwasserschutz existieren viele weitere Vorteile, welche durch den Einsatz dieser Maßnahmen zu erwarten sind. Beispiele sind unter anderem die Förderung der biologischen Vielfalt, eine Verbesserte Wasserqualität durch die Renaturierung von Flussauen und die Wiederanbindung saisonaler Bäche und das Bereitstellen von neuen, natürlichen Lebensräumen (Anthony M. Rossi *et al.*, 2010; Gilvear, Spray and Casas-Mulet, 2013; Harmáčková, Lorencová and Vačkář, 2016; Hartmann, Slavíková and McCarthy, 2019). Trotz der vorhandenen Vorteile von naturbasierten Lösungen machen diese bisher „nur neun Prozent der vorgeschlagenen Maßnahmen in Hochwasserrisiko-Managementplänen der Bundesländer aus“ (Brillinger *et al.*, 2020). Laut einer Dokumentenanalyse von 19 Hochwasserrisikomanagementplänen der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen liegt der Hauptgrund für die Unterrepräsentation naturbasierter Lösungen darin, dass die Verantwortlichen diesen in ihrer Wirksamkeit häufig nicht vertrauen und die entstehenden Planungs- und Verwaltungskosten überschätzen(Brillinger *et al.*, 2020). Für die erfolgreiche Umsetzung ist zusätzliche die Kooperation von Landbesitzern und Gemeinden im Einzugsgebiet von entscheidender Bedeutung, dessen ungeachtet ergeben sich bisher für die Ausrichtung von Projekten dieser Art nur wenige Vorteile und es gibt derzeit noch keine finanzielle Entschädigung für den eventuellen Verlust von Nutzflächen (Howgate and Kenyon, 2009). Im Hinblick auf die Zukunft wird die Thematik jedoch immer bedeutsamer, durch den Klimawandel werden mit der Zeit steigende Abflussmengen der Flüsse erwartet wodurch das Risiko sowie Ausmaß eines potenziellen Hochwassers stetig steigt. (HIRABAYASHI *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2020; Jongman, Ward and Aerts, 2012; Milly *et al.*, 2002). Es ist nun also von Bedeutung, den Verantwortlichen und der Gesellschaft ein besseres Verständnis der Thematik sowie Wirksamkeit zu vermitteln und die mögliche Anwendung zu erleichtern (Hankin *et al.*, 2017; Naumann *et al.*, 2015; Santoro *et al.*, 2019).

# Grundlagen

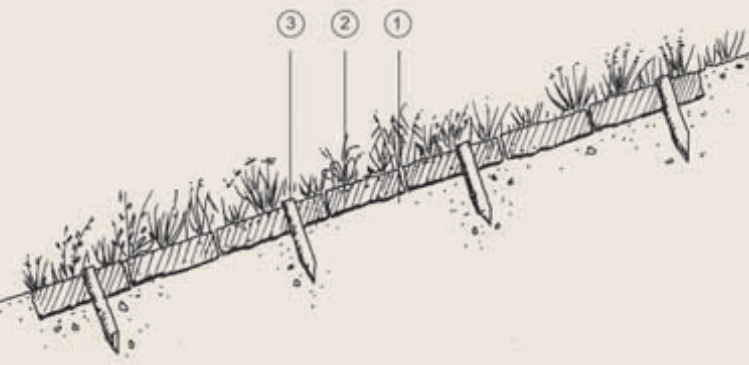
## Naturnahe Bauweisen

Naturnahe Bauweisen, im Falle von naturnahem Wasserbau, verfolgen das Ziel, Bauwerke mit Hilfe von naturraumtypischen Pflanzen und Baustoffen und unter möglichst geringem Eingriff in die natürlichen Abläufe herzustellen. Geltende Leitsätze sind unter anderen die Erhaltung oder Schaffung der landschaftstypischen Gewässermorphologie, der Gewässerdynamik, der Gewässersohle und der fließenden Retention sowie der Aufbau, Entwicklung und Pflege standortgerechter Vegetation (Schiechtl and Stern, 2002).

Der Fokus für diese Arbeit liegt auf den sogenannten Ingenieurbiologischen Bauweisen. Als Teilgebiet des naturnahem Wasserbaus beschäftigen sie sich mit dem verwenden von lebenden Pflanzen als Baustoff für den Wasserbau (Tobias, 2003). Eingesetzt werden diese Maßnahmen vor allem hinsichtlich Uferstabilisierung und Erosionsschutz sowie daraus folgend für den präventiven Hochwasserschutz durch die Wiederherstellung des naturgemäßen Abflussregimes. Unterschied zu ingenieurtechnischen Maßnahmen ist die Steigerung der Schutzwirkung von ingenieurbiologischen Bauweisen mit der Zeit, da sich das Wurzelwerk der verwendeten Vegetation weiter ausbildet und die Vegetationsdichte im Laufe der Jahre zunimmt. Dafür ist jedoch die Sicherungsfunktion unmittelbar nach der Fertigstellung der Schutzmaßnahme deutlich geringer. Die richtige Bauweise zur Anpflanzung der Vegetation ist entscheidend für die Sicherstellung der Baumaßnahme, es muss je nach Situation, sprich der zu erwartenden Belastung, der gewählten Pflanzenart und der Flussmorphologie, entschieden werden, welche Bauweise die richtige ist. Eine mögliche Unterscheidung kann erfolgen in punktueller, linearer und flächiger Wirkungsweise. Ebenfalls von Bedeutung ist der optimale Einbauzeitpunkt, bestimmt wird dieser durch den Wachstumsrhythmus der Pflanzen und der ausgewählten Bauweise (Gerstgraser *et al.*, 2005). Es folgen Beispiele für ingenieurbiologische Bauweisen aus Gerstgraser *et al.*, 2005).

*Rasensoden*

In der Weichholz- und Hartholzaue können Gräser, Kräuter, Wiesen und Rasen mittels Rasensoden eingebracht werden. Diese sind abgeschälte, wiederverwendbare Rasenstücke mit einer Mindestgröße von 25 cm2 und einer Dicke von 3 bis 7 cm welche einen sofortigen, Flächenwirksamen Schutz herstellen. Der Einbauzeitraum erstreckt sich hier vom späten Frühjahr bis zum Frühherbst bei Bodentemperaturen über 8 °C. Sie sind direkt nach dem Einbau begehbar und nach vier Wochen voll belastbar mit einer maximal zulässigen Schubspannung ≤ 60 N/m^2 und Wassergeschwindigkeiten ≤ 1,8 m/s. Für den Einbau muss die Böschungsoberfläche zunächst aufgeraut und planiert werden, danach werden die Rasensoden wie in **Abb. 2.1.1** dargestellt engfugig mit schräg in Fließrichtung ansteigenden Längsfugen aufgelegt und festgeklopft. Falls unmittelbar nach der Verlegung mit Überströmungen zu rechnen ist sind die Soden mit Holzpflöcken anzunageln. Vorteile sind eine schnelle Flächensicherung sowie Begrünung, Nachteil ist der hohe manuelle Aufwand beim Transport und Einbau (Gerstgraser *et al.*, 2005)

**

**Abb 2.1.1** Anlage von Rasensonden zur Uferbefestigung, Querschnitt (Stowasser nach Gerstgraser *et al.*, 2005)

*Steckhölzer*

Steckhölzer sind Bewurzelungsfähige, unverzweigte teile eines meist ein- bis dreijährigen Gehölztriebes eines Baumes oder Strauches mit glatter Rinde. Werden diese in die Erde gesteckt wächst daraus eine neue Pflanze heran. Diese werden in der Weichholzaue oder bei tonigen und schluffigen Böden auch in der Hartholzaue eingesetzt und eignen sich zur schnellen, einfachen Wiederbepflanzung und Initialisierung von Vegetation auf der gesamten Uferböschung. Einzelne Steckhölzer werden für eine punktuelle Schutzfunktion eingesetzt, ist ein flächiger Schutz nötig müssen sie als Steckholzverbund eingebaut werden. Für die Anwendung werden, in Abhängigkeit von dem Einsatzzweck, 1 bis 8 cm starke und 25 bis 80 cm lange Steckhölzer benötigt welche je nach Bodenaufbau entweder in vorgebohrte Löcher gesteckt oder direkt in den Boden eingeschlagen werden. Sie werden unregelmäßig versetzt und in verschiedenen Neigungen in der Vegetationsruhezeit von Oktober bis April, in manchen Fällen noch bis Mai, bei nicht gefrorenem Boden eingebracht (siehe **Abb. 2.1.2**). Da die Belastbarkeit im Anfangsstadium sehr gering ist, empfiehlt sich häufig eine Kombination mit Böschungsschutzmatten aus Naturfasergewebe oder Steinschüttungen. Die zulässige Schubspannung und Fließgeschwindigkeit bei Steckhölzern in Abständen von 1 bis 1,5 m kombiniert mit einem Kokosgewebe (700 g/m2) ergeben sich beispielhaft zu = 80 bis 120 N/m2 und = 2,2 bis 2,8 m/s. Die Vorteile sind hier das einfache Gewinnen, Herstellen und Einbauen der Steckhölzer, mit dem Nachteil der geringen Anfangsbelastbarkeit.



**Abb. 2.1.2** Einbau von Steckhölzern zur Ufersicherung, Querschnitt unterschiedliche Bewurzelung je nach Einbauwinkel zur Böschungsoberfläche (Stowasser nach Gerstgraser et al., 2005)

*Vegetationswalze*

Vegetationswalzen sind mit Hilfe von Naturfasergewebe umhüllte Walzen bestehend aus Grobkies, Röhrichtballen und Rhizomen (Siehe **Abb. 2.1.3**). Auf diese Weise können Röhricht- und Hochstaudenflure in der Röhrichtzone an stehenden bis langsam fließenden Gewässern in der Vegetationsruhezeit oder zu Beginn der Vegetationszeit während Mittel- oder Niedrigwasserabfluss angepflanzt werden. Hierdurch wird eine lineare Sicherung an dem Böschungsfuß hergestellt, wobei das Naturfasergewebe, welches die Erstsicherung gewährleistet, mit der Zeit verrottet und die Schutzfunktion durch die Wurzeln der Pflanzen übernommen wird. Für den Bau wird das Naturfasergewebe in zuvor ausgehobene, 30 bis 40 cm tiefe Gräben eingelegt, welche zur Wasserseite durch eingeschlagene Holzpfähle begrenzt werden. Nach dem Einlegen wird der Graben wieder bis zu zwei Drittel mit dem Aushub aufgefüllt. Im Anschluss werden dicht aneinander die Röhricht- und Hochstaudenballen aufgelegt und die aus der Grube schauenden Gewebereste umgeschlagen. Abschließend wird das Gewebe noch mit Holzpflöcken in der Böschung befestigt. Die zulässigen Belastungen ergeben sich hier zu einer Schubspannung von = 55 – 65 N/m2 und einer Fließgeschwindigkeit = 2,0 - 2,5 m/s. Die Bauweise ermöglicht eine gute Anpassung an den uferverlauf und durch das Naturfasergewebe wird ein sofortiger Schutz erreicht, jedoch ist die Ausführung mit hohem Arbeitsaufwand und Materialeinsatz verbunden.



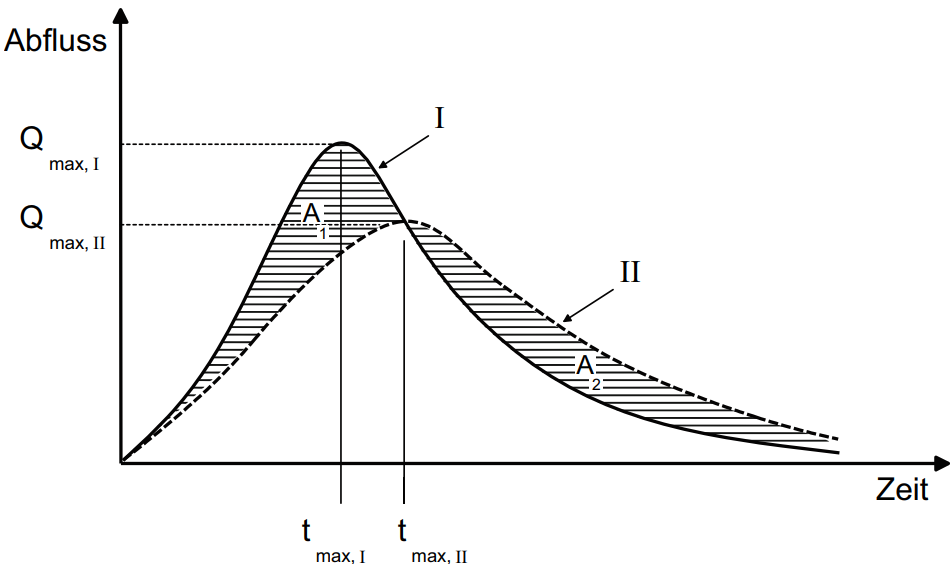
**Abb. 2.1.3** Vegetationswalze zur Anlage von Röhricht und Schilfbeständen zur Uferbefestigung, Querschnitt (Stowasser nach Gerstgraser *et al.*, 2005)

Neben der ingenieurbiologischen Bauweise gibt es noch weitere, naturnahe Maßnahmen, welche das Hochwasserrisiko von Flussabschnitten mindern. Diese umfassen vor allem das Wiederherstellen oder Erhalten der natürlichen Abflussdynamik und Flussmorphologie der Flussabschnitte. Beispiele hierfür sind der Rückbau begradigter und befestigter Fließgewässer und Ufer, das Ausweisen von Uferrandzonen, dem Belassen natürlicher Abflusshindernisse im Gewässerbett sowie die Rückverlegung von Dämmen und Deichrückverlagerungen.

## Funktionsweise

Durch die Renaturierung von Auen und dem Einzugsgebiet wird das für den Hochwasserschutz wichtige, ehemalige Retentionsvermögen des Umlandes, sprich die Speicherwirkung von Boden, Bewuchs und Gelände in den Einzugsgebieten sowie das Zurückhalten von Wasser am und im Gewässer, der entsprechenden Flussabschnitte wiederhergestellt (Dittrich and Worm, 2006; Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1995). Durch die Speicherung in den Einzugsgebieten wird der durch Niederschlag entstehende Oberflächenabfluss, in Folge dessen auch der maßgebende Hochwasserabfluss, verringert. Der Boden kann als leistungsfähigster Speicher eine Niederschlagsmenge entsprechend des Volumens seiner Mittelporen aufnehmen und durch Verdunstung mittels Transpiration der Pflanzen somit das Hochwasser maßgeblich reduzieren, vorausgesetzt dass das Wasser nicht durch Versieglung des Bodens von dem Eindringen abgehalten wird (Dittrich and Worm, 2006). Neben dem Boden ist somit auch der Bewuchs für die Wirksamkeit des Einzugsgebietes als Hochwasserschutz entscheidend. Dieser beeinflusst unter anderem die Infiltrationsfähigkeit des Bodens, die Interzeptionsverdunstung und die Oberflächenrauhigkeit, so wie daraus folgend die Abflussgeschwindigkeit (Kennel, 2004).

Durch das Zurückhalten von Wasser im bzw. am Flussabschnitt selbst wird die für das Ausmaß des Hochwassers maßgebende Abflussspitze zeitlich verzögert und für den unterhalb liegenden Flussabschnitt gemindert, dargestellt in **Abb. 2.2.1**. Dieser Effekt entsteht sobald das Hochwasser ausufern kann und eine Interaktion zwischen Vorland und Hauptgerinne zustande kommt.



**Abb. 2.2.1** Auswirkungen der Retention auf den Verlauf der Abflussganglinie

(Koenzen *et al.*, 2016)

Bepflanzen des Flusses sowie des Flussufers sorgt für die Erhöhung des Fließwiederstandes des Flusses und somit auch für eine Minderung der Fließgeschwindigkeit sowie eine Verbesserung der Ufersicherung gegen Erosion. Dieser Zusammenhang wird vereinfacht durch die folgenden Gleichungen beschrieben.

Berechnung der Abflussmenge

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| mit | | | (2.1) | | | | (1) |
|  |  | Fließgeschwindigkeit | |  | [m/s] |
|  |  | durchströmte Querschnittsfläche | |  | [m2] |

Fließformel nach Darcy-Weisbach

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

mit

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Fließgeschwindigkeit |  | [m/s] |
|  | Erdbeschleunigung |  | [m/s2] |
|  | hydraulischer Radius |  | [m] |
|  | Energielinien- bzw. Wasserspiegelgefälle |  | [ - ] |
|  | dimensionsloser Fließwiderstandsbeiwert |  | [ - ] |

Gesamtwiderstandsbeiwert

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

mit

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | benetzter Umfang |  | [m] |
|  | dimensionsloser Fließwiderstandsbeiwert |  | [ - ] |

Gleichung 2.2 zeigt, dass die Fließgeschwindigkeit des Wassers mit steigendem Widerstandsbeiwert abnimmt. Wie in 2.3 beschrieben, ist der Gesamtwiderstandsbeiwert eines Flussquerschnitts von den einzelnen Teilwiederständen der dazu gehörenden Querschnittsbereichen abhängig.

Die Berechnung des entstehenden Fließwiederstandes aufgrund einer durchströmten Pflanzengruppe wird durch folgende Gleichung beschrieben:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

mit

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | Widerstandsbeiwert einer durchströmten Pflanzengruppe |  | [ - ] |
|  |  | Fließtiefe |  | [m] |
|  |  | Breite der Baumstämme |  | [m] |
|  |  | Abstand der Bewuchselemente in Fließrichtung |  | [m] |
|  |  | Abstand der Bewuchselemente quer zur Fließrichtung |  | [m] |
|  |  | Widerstandsbeiwert einer durchströmten Pflanzengruppe |  | [ - ] |

Einfluss der Geschwindigkeit auf die Sohlenschubspannungen:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5) |

mit

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | Sohlenschubspannung in x-Richtung |  | [N/m2] |
|  |  | Sohlenschubspannung in y-Richtung |  | [N/m2] |
|  |  | Reibungsbeiwert nach Chézy |  | [/s] |
|  |  | Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit in x-Richtung |  | [m/s] |
|  |  | Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit in y-Richtung |  | [m/s] |
|  |  | Dichte des Wassers |  | [kg/m3] |

Und Schließlich der Zusammenhang zwischen den Sohlenschubspannungen und der Ufersicherung. Der Transport von Feststoff beginnt, sobald die einwirkenden Sohlschubspannungen die Grenzschubspannung überschreiten.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.6) |

mit der Grenzschubspannung nach Meyer-Peter

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7) |

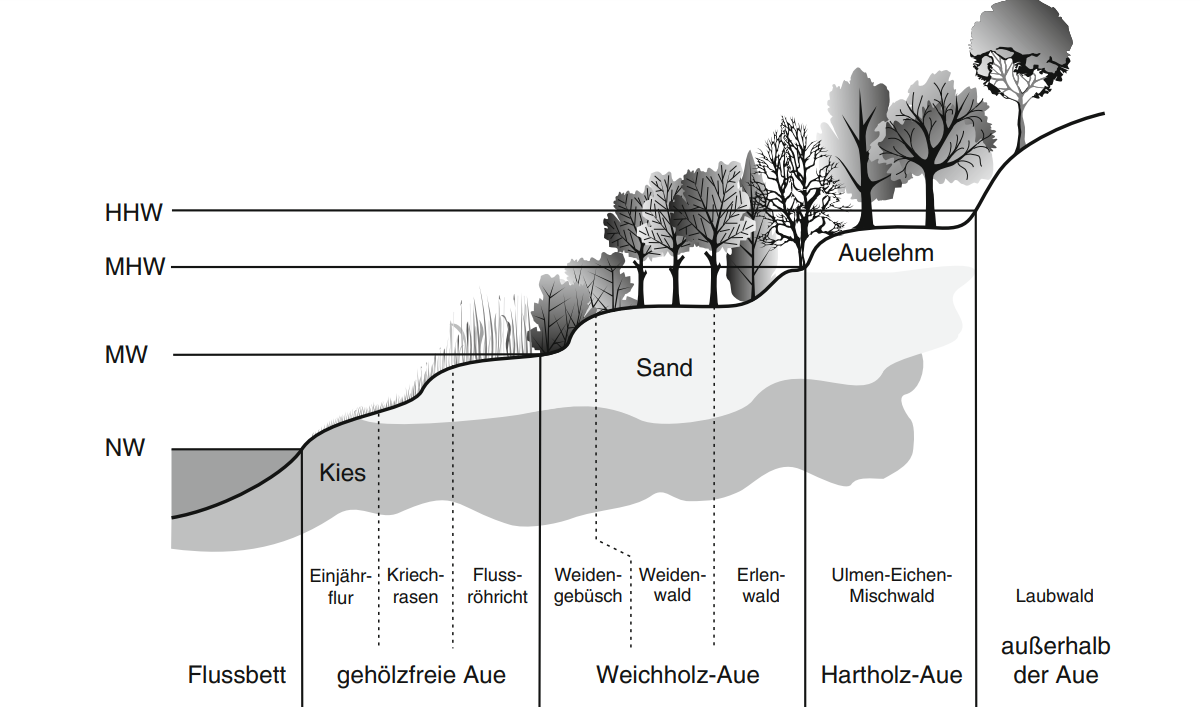
mit

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | Grenzschubspannung |  | [N/m2] |
|  |  | Charakteristische Korngröße |  | [N/m2] |
|  |  | Erdbeschleunigung |  | [m/s2] |
|  |  | Dichte des Geschiebes |  | [kg/m3] |
|  |  | Dichte des Wassers |  | [kg/m3] |

Obwohl der Abflussscheitel durch die Aue überregional absinkt, kommt es lokal bei der Weichholzaue zu einer Wasserspiegelanhebung. Da die Aue aufgrund des Bewuchses die Fließgeschwindigkeit mindert muss sich, wie in Gleichung 2.1 dargestellt, der durchströmte Querschnitt erhöhen um die gleiche Abflussleistung erbringen zu können. Insgesamt gibt es noch viele weitere Einflussfaktoren welche das Ausmaß dieser Erhöhung beeinflussen, wobei die absolute Wasserspiegelsteigerung hauptsächlich von der Gerinnerauigkeit und somit von der Fließgeschwindigkeit abhängig ist. Generell liegt diese Erhöhung des Wasserspiegels jedoch meist im Zentimeterbereich und kann deswegen vernachlässigt werden. (Jährling, 2003)

## Charakterisierung der Vegetation

Bei der Auswahl der zu verwendenden Pflanzenarten gilt es verschiedene Kriterien hinsichtlich ihrer Eignung zu berücksichtigen. Diese sind das Ziel der Maßnahmen, die Ökologische Konstitution der Arten, die Ökotechnische Konstitution der Arten und ihre Herkunft (Schiechtl and Stern, 2002). Allgemein werden sie im Fall der Flussaue unterschieden in Rasen bzw. Gräser, Röhrichte und Gehölze (Patt, 2018) sowie bei der Herkunft in einheimische (indigene) und Gebietsfremde, potentiell invasive (Neopyhten) Arten. Die in **Abb. 2.3.1** dargestellten Uferzonen beschreiben die jeweiligen Standorte in einer typischen Flussaue.



**Abb. 2.3.1**: Zonenaufteilung der Pflanzenarten in einer Flussaue, mit HHW - höchster Wasserstand, MHW – mittlerer Hochwasserstand, MW – Mittelwasserstand, NW – Niedrigwasserstand (Nützmann and Moser, 2016)

Die Charakterisierung der Pflanzen nach ihrem Standort in der Aue so wie ihrer Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich des Hochwasserschutzes erfolgt unter anderem mithilfe der Auswahl passender, numerischer Parameter. Da das Auftreten unter anderem von dem Wasserspiegel des betrachteten Fließgewässers sowie dem sich daraus einstellenden Grundwasserspiegel abhängig ist, eignen sich die minimal benötigte bzw. maximal zulässige Grundwassertiefe als Parameter zur Charakterisierung so wie die maximal bzw. minimal zulässigen Fließgeschwindigkeiten , welche wie in Gleichung 2.1 beschrieben wird in direktem Zusammenhang mit dem Querschnitt stehen, sprich mit dem Wasserstand und der Breite eines Fließgewässers. Um die Einsatzmöglichkeiten für die Ufersicherung zu bestimmen sind wieder die zulässigen Fließgeschwindigkeiten sowie die maximal aushaltbaren Sohlschubspannungen der Pflanze ausschlaggebend. Weitere wichtige Parameter sind die maximale Überflutungsdauer und Überflutungshöhe, diese erlauben eine Charakterisierung der Vegetation anhand ihrer Hochwasserresistenz im Hinblick auf die Mortalitätsrate.

## Bewertungskriterien für den Erfolgreichen Einsatz

Um ingenieurbiologische Bauweisen erfolgreich umsetzen zu können ist der zu renaturierende Standort hinsichtlich seiner hydromorphologischen sowie hydrologischen Eigenschaften und des vorhandenen Abflussregimes zu betrachten. Die richtige Wahl der zu verwendenden Vegetation ist entscheidend und muss auf die Situation vor Ort genau abgestimmt sein.

## Datenbankmanagement mit Python

# Betrachtete Standorte

## Studiengebiete

Für die Vorliegende Arbeit werden als Studiengebiete das Bayrische Alpenvorland, niederrheinisches Tiefland und die Oberrheinische Tiefebene gewählt. Dies geschieht aufgrund der unterschiedlichen Standortbedingungen und den daraus entstehenden Einwirkungen auf die Vegetation. Während das Bayerische Alpenvorland und die Oberrheinische Tiefebene von Staunässe und großen Abflussmengen geprägt sind, herrscht im niederrheinischen Tiefland an Großteilen des Jahres ein Wassermangel für die Pflanzen.

## Bayerisches Alpenvorland

### Beschreibung der geographischen Lage und Flora

Das Bayerische Alpenvorland, als Teil der Großlandschaft Alpenvorland (BfN, 2016), wird nach naturräumlichen Kriterien begrenzt durch die Donau im Norden und den nördlichen Alpenrand im Süden. Seitliche Begrenzungen liefern die Flüsse Salzach und Inn im Osten sowie die Iller im Westen (Böhm, 2011). Unterteilt wird es in vier verschiedene hydrogeologische Teilräume, dem Tertiär-Hügelland, der Iller-Lech-Schotterplatten, dem Süddeutschen Moränenland und die Fluvioglazialen Schotter. Letztere beheimaten die ergiebigsten und bedeutsamsten Grundwasservorkommen in Bayern. Die in dem bayerischen Alpenvorland vorkommenden, gefällereichen sowie schottergeprägten Flussauen tragen den alpinen Wildflusscharakter bis in die Donau. Sie sind die morphologisch dynamischsten Auen Deutschlands, ihre bestimmenden standörtlichen Verhältnisse sind die häufigen Umlagerungen der Schotterflure sowie sommerliche Überflutungen während der Vegetationsperiode (Patt, 2016).



**Abb. 3.2.1** Hydrogeologische Großräume Bayern, Alpenvorland hier Gelb gekennzeichnet. (Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Aufgrund ständiger Unterbrechungen der pflanzlichen Sukzession und Bodenentwicklung durch die herrschende Morphodynamik naturnaher alpiner Flusslandschaften ist ein hoher Anteil vegetationsfreier oder schwach mit Pioniervegetation bewachsener rohbodenstandorte typisch. Aufgrund dieses Umstandes reicht es bei alpinen Gewässern nicht, die Gliederung der Auenstandorte rein durch die Häufigkeit und Höhe der Überflutungen zu bestimmen. Es muss eine Unterteilung erfolgen in Überflutungsgesellschaften, welche nur von der Überflutung abhängig sind, und Pioniergesellschaften, welche zusätzlich mit der Morphodynamik zusammenhängen. Die Standörtlich vorkommenden Typen der Auenvegetation werden von *Müller 1995* unterschieden in Pioniervegetation der Rohbodenstandort, gehölzfreie Überflutungsvegetation, Verlandungsvegetation der Altwasser, periodisch und episodisch überflutete Auwälder und Auenvegetation außerhalb der rezenten Auendynamik. (Müller, 1995).

### Flusscharakteristik am Standort

Die großen Fließgewässer des Alpenvorlandes zeichnen sich, aufgrund der in den Alpen liegenden Quellen, durch ihren Alpinen Charakter aus. Es gibt einen hohen Geschiebebetrieb bestehend vor allem aus Kies, Sand und Blöcken, Flussabwärts gibt es eine Abnahme des mittleren Geschiebekorndurchmessers. Durch die auftretende Erosion bei Hochwasser entstehen hier vegetationsfreie Inseln und Schotterbänke in den gekrümmten Gewässerläufen. Das herrschende voralpine Abflussregime zeichnet sich durch maximale Abflüsse in den Sommermonaten aus, entstehend durch Schneeschmelze und hohe Sommerniederschläge sowie die winterlichen Niedrigwasserperioden, mit generell stark ausgeprägten Extremabflüssen. Auen werden hier im Schnitt an 150 Tagen des Jahres überflutet (Döbbelt-Grüne *et al.*, 2013).

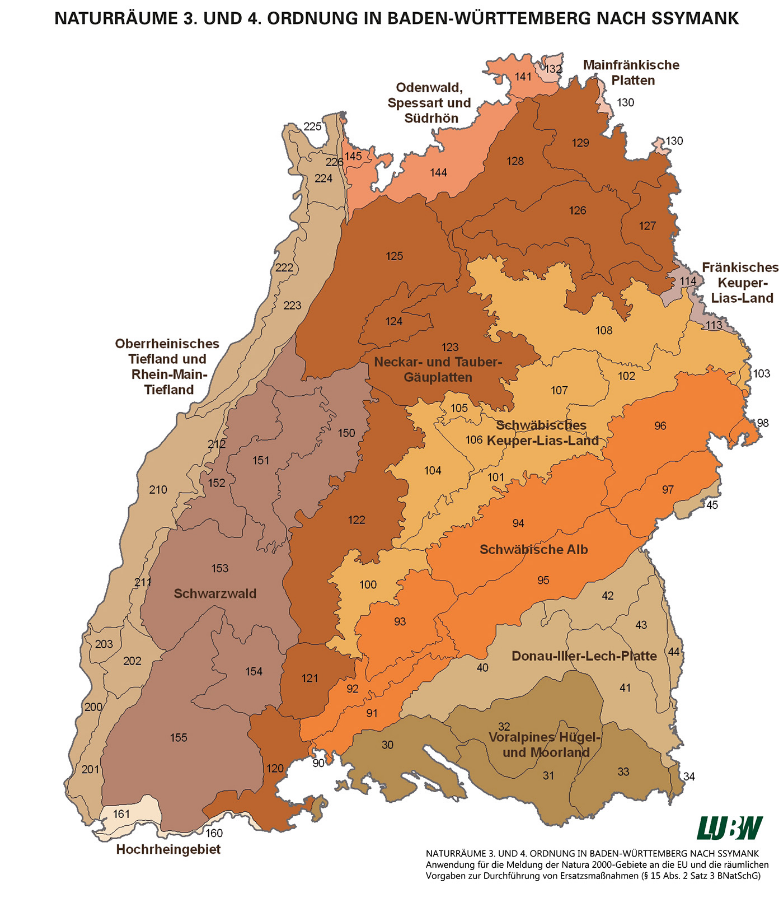
### Anforderungen an die Vegetation

Aufgrund des herrschenden Abflussregimes im Alpenvorland werden hohe Ansprüche an die Vegetation hinsichtlich ihrer Überflutungstoleranz gestellt, Sie muss großen Überflutungshöhen sowie einer hohen Anzahl an Überflutungstagen standhalten. Zusätzlich muss Aufgrund des hohen Geschiebebetriebes eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Erosions- und Sedimentationsvorgängen gegeben sein.

## Oberrheinisches Tiefland

### Beschreibung der geographischen Lage, Flora

Das Oberrheinische Tiefland liegt im Westen Baden-Württembergs, es verläuft von Lörrach im Süden bis nach Mannheim im Norden. Die Begrenzung im Osten stellt der Schwarzwald, der nördliche Kraichgau und der Odenwald dar, Südöstlich das Hochrheingebiet. In Süden sowie Westen wird der deutsche Teil des Oberrheinischen Tieflandes durch die Landesgrenze beschränkt. Hervorzuheben ist die Offenburger Rheinebene, diese bildet den mittleren Teil des Oberrheinischen Tieflandes, in Abb. 3.3.1 dargestellt mit der Nummer 210, da diese vom Bundesamt für Naturschutz als besonders Schutzwürdige Landschaft eingestuft wird. Sie liegt zwischen 130 m und 200 m ü. NN und erstreckt sich mit ungefähr 80 km Länge sowie einer breite zwischen 6 und 10 km auf einer Fläche von 835 km2. Das Gebiet wird von einer Vielzahl an Bächen durchflossen, welche in den Rhein entwässern. Unterschiedliche Vegetation tritt hier in Form von Feucht- und Trockengesellschaften auf (BfN, 2012b). Im Südwesten, in Abb. 3.3.1 dargestellt mit Nummer 200, liegt der Auenbereich der Markgräfler Rheinebene. Die auf dem Rheinniveau von 190m bis 240m ü. NN liegende Aue besitzt eine Fläche von 79 km2 (Stand 2012) und erstreckt sich von Basel im Süden bis zum Kaiserstuhl im Norden. Durch menschliche Eingriffe am Verlauf des Rheines ist die Aue heute stark bis mäßig geschädigt und ist Teil verschiedener Schutzgebiete (BfN, 2012a). Im Norden liegt die Nördliche Oberrheinniederung, in Abb. 3.3.1 dargestellt mit Nummer 222, auf einer Höhe von 110 m ü. NN im Süden bis 84 m ü. NN im Norden. Überflutungsauen kommen hier nur noch mit kleiner Fläche in den Bereichen des Hochwasserdammsystems vor. Der oberflächennahe Boden besteht aus feinsandigen und lehmigen Auenböden abwechselt mit organischen Nassböden. Die in der hier beheimateten Aue vorkommenden Au- und Bruchwälder sowie die großflächigen Röhrichtbestände, Großseggenrieder und Pfeifengraswiesen sind aus naturschutzlicher Sicht bedeutend (BfN, 2012c).



Gesamt hat das Oberrheinische Tiefland eine Länge von ungefähr 250 km, die Breite beträgt zwischen 10 und 30 km. Mit einem generell sehr warmen Klima liegt die durchschnittliche Jahrestemperatur bei 10,5 °C, Niederschläge steigen hier von Westen nach Osten stark an.

### Flusscharakteristik am Standort

Im Oberrheingebiet besitzt der südliche Oberrhein aufgrund seines Einzugsgebietes in den Alpen ein glaziales Abflussregime mit hoher mittlerer Wasserführung zwischen Mai bis August durch die Schneeschmelze in den Alpen während den Sommermonaten.

## Niederrheinisches Tiefland und Niederrheinische Bucht

### Beschreibung der geographischen Lage, Flora

Die Grenzen des Niederrheinischen Tieflandes und der Niederrheinischen Bucht stellen die Deutsch-Niederländische Grenze im Westen und Norden, die Eifel und das Mittelrheingebiet im Süden, die Westfälische Bucht im Nord-Osten und das Bergische Land im Süd-Osten dar. Die Geländehöhe steigt von ungefähr 10 m ü. NN im Norden auf ungefähr 60 m ü. NN im Süden an. Extremwerte beheimaten die Niederrheinischen Höhen mit bis zu 100 m ü. NN Geländehöhe. Das Klima ist aufgrund der Lage in Meer nähe typisch atlantisch bis subatlantisch mit jährlichen Niederschlägen zwischen 731 und 758 mm, 339mm Niederschlag fallen davon in den Monaten von Mai bis September. Die Jahresmitteltemperatur liegt hier zwischen 9-11°C, in der daraus resultierenden langen Vegetationszeit von 170-190 Tagen im Jahr herrscht eine Temperatur von durchschnittlich 15-17°C (Wald und Holz NRW, no date, no date). Die für das niederrheinische Tiefland charakteristische Vegetation setzt sich in den Auen vor allem zusammen aus Stieleichen- Hainbuchwald und Eichen-Ulmenwald in der Hartholzaue, Silberweidenwald und Schwarzpappeln in der Weichholzaue sowie unter anderem Erlenbuchwald in Grundwassernahen Standorten



### Flusscharakteristik am Standort

### Auswahl geeigneter Pflanzenarten

# Durchführung

## Identifikation nativer und invasiver Vegetation der Studiengebiete

Da sich die vorliegende Arbeit auf die Nutzung von nativer Vegetation beschränkt müssen die ausgewählten Pflanzenarten auf ihre Herkunft überprüft werden. Hierfür gibt es ein großes Angebot an online verfügbaren Datenbanken, durch welche die Überprüfung erfolgt. Nachdem die Pflanzen für die ausgesuchten Studiengebiete als potentiell brauchbar erklärt werden erfolgt die Identifikation durch Datenbankabfragen. Neben Angaben zu dem Status, welcher angibt wie lange die Arten in einem betrachteten Gebiet vorkommen und in wie weit Sie in diesem etabliert sind, gibt es auch weitere Angaben hinsichtlich der Gefährdung und eines eventuell vorhandenen gesetzlichen Schutzes der Arten. Zu beachten ist die weitere Unterscheidung der Vegetation in einheimische (indigene) und gebietsfremde Arten (neophyten). Auch auf den Gefährdungsstatuts wird geachtet, ist eine Pflanzenart stark bedroht kann sie in Deutschland unter Gesetzlichem Schutz stehen, was Sie unter Umständen je nach Gesetzgebung für Wasserbauliche Nutzung ausschließt oder bei der Verwendung mit verschiedenen Auflagen verbunden sein kann, welche den Schutz der Pflanzenart sicherstellen sollen.

## Auswahl der Studienparameter

Für die Anwendung sowie für die Auswahl von geeigneter Vegetation werden verschiedene Parameter betrachtet. Diese Unterscheiden sich je nach Pflanzenart

## Auswahl von geeigneter Vegetation

Die Auswahl geeigneter Vegetation erfolgt mittels Literatur Recherche. Um die Eignung festzustellen werden Verweise auf schon vor dem menschlichen Eingreifen bestehende Ansiedlungen in den betrachteten Gebieten verwendet. Kommen die Pflanzen nachweislich schon natürlicherweise in den Auen vor, sind diese ebenso für das Renaturieren und Anlegen weiterer Flussauen mit ähnlichen Standortbedingungen innerhalb des betrachteten Gebietes geeignet. Gibt es für ausgewählte Pflanzenarten keine Dokumentation über ihr natürliches Vorkommen in den Studiengebieten, bedarf es weiterführender Recherche hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Widerstandsfähigkeit gegenüber den in dem betrachteten Gebiet auftretenden Einwirkungen. Mithilfe von bestehenden Studien zu den Pflanzenarten über zum Beispiel deren benötigten Grundwasserflurabständen, ihrem Auftreten in verschiedenen Höhenlagen oder die für das Wachstum benötigte Bodenzusammensetzung wird weitere, potentiell geeignete Vegetation für die Studiengebiete identifiziert. In Folgenden Tabellen nach Lebensraum gegliedert folgen die ausgewählten Pflanzen. Für die Übersicht werden Pflanzen welche in mehr als einem Studiengebiet auftreten mehrfach aufgenommen.

Niederrheinisches Tiefland

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Latein. Name** | **Deutscher Name** | **Habitat** | **Gefährdung in Deutschland** |
|  |  |  |  |
| Betula pendula | Hänge-Birke | niederrheinisches Tiefland | - |
| Quercus robur | Stiel-Eiche | niederrheinisches Tiefland | - |
| Betula pubescens | Moor-Birke | niederrheinisches Tiefland | - |
| Alnus glutinosa | Schwarz-Erle | niederrheinisches Tiefland | - |
| Fraxinus excelsior | Gewöhnliche Esche | niederrheinisches Tiefland | - |
| Frangula alnus Mill. | Echter Faulbaum | niederrheinisches Tiefland | - |
| Ribes rubrum | Rote Johannisbeere | niederrheinisches Tiefland | - |
| Ribes nigrum | Schwarze Johannisbeere | niederrheinisches Tiefland | - |
| Rubus caesius | Kratzbeere | niederrheinisches Tiefland | - |
| Populus nigra | Schwarz-pappel | niederrheinisches Tiefland | Gefährdet |
| Viburnum opulus | Gewöhnlicher Schneeball | niederrheinisches Tiefland | - |
| Prunus padus | Gewöhnliche Trauben-Kirsche | niederrheinisches Tiefland | - |
| Ulmus laevis Pall. | Flatter-Ulme | niederrheinisches Tiefland | Vorwarnliste |
| Salix fragilis | Bruch-Weide | niederrheinisches Tiefland | - |
| Salix viminalis | Korb-Weide | niederrheinisches Tiefland | - |
| Salix aurita | Ohr-Weide | niederrheinisches Tiefland | - |
| Salix purpurea | Purpur-Weide | niederrheinisches Tiefland | - |
| Ribes uva-crispa | Stachelbeere | niederrheinisches Tiefland | - |
| Ulmus minor | Feld-Ulme | niederrheinisches Tiefland | - |
| Salix cinerea | Grau-Weide | niederrheinisches Tiefland | - |

Alpenvorland

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Latein. Name** | **Deutscher Name** | **Habitat** | **Gefährdung in Deutschland** |
|  |  |  |  |
| Alnus Incana | Grau-Erle | Alpenvorland | - |
| Carex sylvatica | Wald-Segge | Alpenvorland | - |
| Carex acuta | Schlanke Segge | Alpenvorland | - |
| Circaea lutetiana | Großes Hexenkraut | Alpenvorland | - |
| Clematis Vitalba | Gewöhnliche Waldrebe | Alpenvorland | - |
| Fraxinus excelsior | Gemeine Esche | Alpenvorland | - |
| Hydrocharis morsus-ranae | Froschbiss | Alpenvorland | Vorwarnliste |
| Humulus Lupulus | Gewöhnlicher Hopfen | Alpenvorland | - |
| Myricaria germanica | Deutsche Tamariske (Rispelstrauch) | Alpenvorland | Vom Aussterben bedroht |
| Phalaris arundinacea | Rohrglanzgras | Alpenvorland | - |
| Phragmites australis | Gewöhnliches Schilf | Alpenvorland | - |
| Populus nigra | Schwarz-Papppel | Alpenvorland | Gefährdet |
| Populus alba | Silber-Pappel | Alpenvorland | - |
| Potamogeton pectinatus | Kamm-Laichkraut | Alpenvorland | - |
| Salix purpurea | Purpur-Weide | Alpenvorland | - |
| Salix alba | Silber-Weide | Alpenvorland | - |
| Salix fragilis | Bruch-Weide | Alpenvorland | - |
| Salix eleagnos | Lavendel-Weide | Alpenvorland | Vorwarnliste |
| Solanum Dulcamara | Bittersüßer Nachtschatten | Alpenvorland | - |
| Sparganium erectum | Ästiger Igelkolben | Alpenvorland | - |
| Typha latifolia | Breitblättriger Rohrkolben | Alpenvorland | - |
| Calamagrostis pseudophragmites | Purpur-Reitgras | Alpenvorland | stark gefährdet |

Oberrheinisches Tiefland

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Latein. Name** | **Deutscher Name** | **Habitat** | **Gefährdung in Deutschland** |
|  |  |  |  |
| Groenlandia densa (L.) Fourr. | Dichtes Fischkraut | Oberrheingebiet | stark gefährdet |
| Potamogeton pectinatus | Kamm-Laichkraut | Oberrheingebiet | - |
| Potamogeton perfoliatus | Durchwachsenes Laichkraut | Oberrheingebiet | Vorwarnliste |
| Hippuris vulgaris | Gewöhnlicher Tannenwedel | Oberrheingebiet | Vorwarnliste |
| Epilobium dodonaei | Rosmarin-Weidenröschen | Oberrheingebiet | - |
| Scrophularia canina | Hunds-Braunwurz | Oberrheingebiet | - |
| Calamagrostis pseudophragmites | Ufer-Reitgras | Oberrheingebiet | stark gefährdet |
| Gypsophila repens | Kriechendes Gipskraut | Oberrheingebiet | - |
| Salix nigricans | Schwarz-Weide | Oberrheingebiet | - |
| Hippophae rhamnoides subsp. fluviatilis Soest | Fluss-Sanddorn | Oberrheingebiet | Gefährdet |
| Ulmus minor | Feld-Ulme | Oberrheingebiet | - |
| Quercus robur | Stiel-Eiche | Oberrheingebiet | - |
| Alnus glutinosa | Schwarz-Erle | Oberrheingebiet | - |
| Populus nigra | Schwarz-pappel | Oberrheingebiet | Gefährdet |
| Populus alba | Silber-Pappel | Oberrheingebiet | - |
| Salix purpurea | Purpur-Weide | Oberrheingebiet | - |
| Salix alba | Silber-Weide | Oberrheingebiet | - |
| Salix eleagnos | Lavendel-Weide | Oberrheingebiet | Vorwarnliste |
| Fraxinus excelsior | Gewöhnliche Esche | Oberrheingebiet | - |

## Entwicklung eines Tools mit Python für die Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Pflanzen für naturbasierte Lösungen

Für die Entwicklung des Tools wird zunächst eine Datenbank mit den ausgewählten Pflanzen und den zugehörigen Parametern angelegt. Für den Anfang geschieht dies in dem die gesammelten Daten zunächst in Form einer Excel Tabelle angelegt werden und so eine Übersicht geschaffen wird. Diese Tabelle wird in Form einer CSV-Datei (Comma-seperated values) in Python eingelesen und steht damit zur Verwendung in Python bereit.

## Code-Design

# Resultat und Diskussion

# Fazit

Reference list

Acreman, M., Riddington, R. and Booker, D. (2003) ‘Hydrological Impacts of Floodplain Restoration: A Case Study of the River Cherwell, UK’, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7. doi: 10.5194/hess-7-75-2003

Anthony M. Rossi *et al.* (2010) ‘Pilot Study on the Effects of Partially Restored Riparian Plant Communities on Habitat Quality and Biodiversity along First-Order Tributaries of the Lower St. Johns River’, *Journal of Water Resource and Protection*, Vol.02No.09, p. 12. doi: 10.4236/jwarp.2010.29090

Aufleger, M., Gems, B. and Klar, R. (2012) ‘Flussaufweitungen als flussbauliche Methode – Grundsätze und Werkzeuge’, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 64(7), pp. 363–378. doi: 10.1007/s00506-012-0006-x

Biron, P.M. *et al.* (2014) ‘Freedom Space for Rivers: A Sustainable Management Approach to Enhance River Resilience’, *Environmental Management*, 54(5), pp. 1056–1073. doi: 10.1007/s00267-014-0366-z

Böhm, O. (2011) *Hochwassergeschichte des bayerischen Alpenvorlandes: Die Hochwasser der Sommermonate im Kontext der Klimageschichte Mitteleuropas.* Universität Augsburg.

Brillinger, M. *et al.* (2020) ‘Exploring the uptake of nature-based measures in flood risk management: Evidence from German federal states’, *Environmental Science & Policy*, 110, pp. 14–23. doi: 10.1016/j.envsci.2020.05.008

BUND Naturschutz in bayern e.V. (BN) (no date) *INTAKTE AUEN: NATÜRLICHER HOCHWASSERSCHUTZ FÜR BAYERN*. Available at: https://​www.bund-naturschutz.de​/​natur-​und-​landschaft/​fluesse-​und-​auen-​in-​bayern/​natuerlicher-​hochwasserschutz.html (Accessed: 25 August 2020).

Bundesamt für Naturschutz (ed.) (2016) *Daten zur Natur 2016*. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2012a) *Landschaftssteckbrief: 20002 Auenbereich der Markgräfler Rheinebene,* 1 March. Available at: https://​www.bfn.de​/​landschaften/​steckbriefe/​landschaft/​show/​20002.html (Accessed: 19 October 2020).

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2012b) *Landschaftssteckbrief: 21001 Offenburger Rheinebene,* 1 March. Available at: https://​www.bfn.de​/​landschaften/​steckbriefe/​landschaft/​show/​21001.html (Accessed: 19 October 2020).

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2012c) *Landschaftssteckbrief: 22200 Nördliche Oberrheinniederung,* 1 March. Available at: https://​www.bfn.de​/​landschaften/​steckbriefe/​landschaft/​show/​22200.html (Accessed: 19 October 2020).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) and Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2009) *Auenzustandsbericht: Flussauen in Deutschland*. Berlin.

Collentine, D. and Futter, M.N. (2018) ‘Realising the potential of natural water retention measures in catchment flood management: trade-offs and matching interests’, *Journal of Flood Risk Management*, 11(1), pp. 76–84. doi: 10.1111/jfr3.12269

Cook Brian *et al.* (2016) ‘Competing paradigms of flood management in the Scottish/English borderlands’, *Disaster Prevention and Management*, 25(3), pp. 314–328. doi: 10.1108/DPM-01-2016-0010

Dadson, S.J. *et al.* (2017) ‘A restatement of the natural science evidence concerning catchment-based ‘natural’ flood management in the UK’, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2199), p. 20160706. doi: 10.1098/rspa.2016.0706

Desai, B. *et al.* (2015) *Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Genève, Suisse. Available at: https://​archive-ouverte.unige.ch​/​unige:​78299.

Directorate-General for Research and Innovation (European Commission) (2015) *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities' (full version)*. Available at: https://​op.europa.eu​/​en/​publication-​detail/-/​publication/​fb117980-​d5aa-​46df-​8edc-​af367cddc202.

Dittrich, S. and Worm, W. (2006) ‘Dezentraler Hochwasserschutz’, in Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 11/2006,* edited by Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Available at: https://​nbn-resolving.org​/​urn:​nbn:​de:​bsz:​14-​ds-​1210683362779-​67638 (Accessed: 29 September 2020).

Dixon, S.J. *et al.* (2016) ‘The effects of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology’, *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(7), pp. 997–1008. doi: 10.1002/esp.3919

Döbbelt-Grüne, S. *et al.* (2013) ‘Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen; Anhang 1 von „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle “’, *Umweltbundesamt*, 43, p. 2014.

Fliervoet, J.M. and van den Born, R.J.G. (2017) ‘From implementation towards maintenance: sustaining collaborative initiatives for integrated floodplain management in the Netherlands’, *International Journal of Water Resources Development*, 33(4), pp. 570–590. doi: 10.1080/07900627.2016.1200962

Gerstgraser, C. *et al.* (2005) *Ufersicherung – Strukturverbesserung: Anwendung ingenieurbiologischer Bauweisen im Wasserbau Handbuch (1)*. Dresden. Available at: https://​publikationen.sachsen.de​/​bdb/​artikel/​11219/​documents/​11434 (Accessed: 13 September 2020).

Gilvear, D.J., Spray, C.J. and Casas-Mulet, R. (2013) ‘River rehabilitation for the delivery of multiple ecosystem services at the river network scale’, *Journal of Environmental Management*, 126, pp. 30–43. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.026

Hankin, B. *et al.* (2017) ‘Strategies for Testing the Impact of Natural Flood Risk Management Measures’, in Theodore Hromadka and Prasada Rao (eds.) *Flood Risk Management.* Rijeka: IntechOpen, Ch. 1.

Harmáčková, Z.V., Lorencová, E.K. and Vačkář, D. (2016) ‘Ecosystem-Based Adaptation and Disaster Risk Reduction: Costs and Benefits of Participatory Ecosystem Services Scenarios for Šumava National Park, Czech Republic’, in Renaud, F.G. *et al.* (eds.) *Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice.* Cham: Springer International Publishing, pp. 99–129.

Hartmann, T. (2011) ‘Den Flüssen mehr Raum geben – Umsetzungsrestriktionen in Recht und Praxis’, *Raumforschung Und Raumordnung*, 69(4), pp. 257–268. doi: 10.1007/s13147-011-0091-5

Hartmann, T. (2012) ‘Land policy for German rivers: making space for the rivers’, in Warner, J.F., van Buuren, M.W. and Edelenbos, J. (eds.) *Making space for the river: Governance experiences with multifunctional river flood management in the US and Europe.* London: IWA Publ, pp. 121–133.

Hartmann, T., Slavíková, L. and McCarthy, S. (2019) ‘Nature-Based Solutions in Flood Risk Management’, in Hartmann, T., Slavíková, L. and McCarthy, S. (eds.) *Nature-Based Flood Risk Management on Private Land: Disciplinary Perspectives on a Multidisciplinary Challenge.* Cham: Springer International Publishing, pp. 3–8.

Hauer, C. *et al.* (2010) ‘Neue Herausforderungen an den technischen Hochwasserschutz: mobile Hochwasserschutzsysteme, Objektschutz, Instandhaltung von Dämmen, Zustandserfassung und -bewertung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung’, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 62(1), pp. 22–29. doi: 10.1007/s00506-009-0152-y

Hess, T.M. *et al.* (2010) ‘Estimating the impact of rural land management changes on catchment runoff generation in England and Wales’, *Hydrological Processes*, 24(10), pp. 1357–1368. doi: 10.1002/hyp.7598

HIRABAYASHI, Y. *et al.* (2008) ‘Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate’, *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), pp. 754–772. doi: 10.1623/hysj.53.4.754

Howgate, O.R. and Kenyon, W. (2009) ‘Community cooperation with natural flood management: a case study in the Scottish Borders’, *Area*, 41(3), pp. 329–340. doi: 10.1111/j.1475-4762.2008.00869.x

Huang, Y. *et al.* (2020) ‘Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management’, *WIREs Water*, 7(3), e1421. doi: 10.1002/wat2.1421

Iacob, O. *et al.* (2014) ‘Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective’, *Hydrology Research*, 45(6), pp. 774–787. doi: 10.2166/nh.2014.184

Jährling, K.-H. (2003) ‘Die Weichholzauen und deren Bedeutung für den Hochwasserschutz im Elbegebiet’, *Naturschutz im Land Sachsen-Anhalt*, 40(2), pp. 27–34.

Janes, V.J. *et al.* (2017) ‘The Impacts of Natural Flood Management Approaches on In-Channel Sediment Quality’, *River Research and Applications*, 33(1), pp. 89–101. doi: 10.1002/rra.3068

Jongman, B. (2018) ‘Effective adaptation to rising flood risk’, *Nature Communications*, 9(1), p. 1986. doi: 10.1038/s41467-018-04396-1

Jongman, B., Ward, P.J. and Aerts, J.C.J.H. (2012) ‘Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes’, *Global Environmental Change*, 22(4), pp. 823–835. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004

Kennel, M. (2004) *Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wald und Forstwirtschaft in Bayern: Ergebnisse eines Demonstrationsvorhabens*. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising (LWF Wissen 44).

Kline, M. and Cahoon, B. (2010) ‘Protecting River Corridors in Vermont1’, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), pp. 227–236. doi: 10.1111/j.1752-1688.2010.00417.x

Köck, W. and Maier, J. (2015) ‘Die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten in Sachsen’, *Natur und Recht*, 37(12), pp. 805–811. doi: 10.1007/s10357-015-2924-4

Koenzen, U. *et al.* (2016) ‘Planung der Fließgewässer- und Auenentwicklung’, in Patt, H. (ed.) *Fließgewässer- und Auenentwicklung: Grundlagen und Erfahrungen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 271–398.

Kondolf, G.M. (2011) *Setting Goals in River Restoration: When and Where Can the River “Heal Itself”?* (Geophysical Monograph Series, vol. 194). Washington, D.C.: American Geophysical Union. Available at: doi://​10.1029/​2010GM001020.

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1995) ‘Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz: Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen’. Available at: https://​www.stmuv.bayern.de​/​themen/​wasserwirtschaft/​hochwasser/​doc/​leitlinien\_​zukunft.pdf (Accessed: 13 September 2020).

Lane, S.N. (2017) ‘Natural flood management’, *WIREs Water*, 4(3), e1211. doi: 10.1002/wat2.1211

Lavers, T. and Charlesworth, S. (2018) ‘Opportunity mapping of natural flood management measures: a case study from the headwaters of the Warwickshire-Avon’, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), pp. 19313–19322. doi: 10.1007/s11356-017-0418-z

Malcherek, A. (2019) ‘Hochwasser’, in Malcherek, A. (ed.) *Fließgewässer: Hydraulik, Hydrologie, Morphologie und Wasserbau.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 397–436.

McIntyre, N. and Marshall, M. (2010) ‘Identification of rural land management signals in runoff response’, *Hydrological Processes*, 24(24), pp. 3521–3534. doi: 10.1002/hyp.7774

Milly, P.C.D. *et al.* (2002) ‘Increasing risk of great floods in a changing climate’, *Nature*, 415(6871), pp. 514–517. doi: 10.1038/415514a

Müller, N. (1995) ‘Wandel von Flora und Vegetation nordalpiner Wildflußlandschaften unter dem Einfluß des Menschen’, *Berichte ANL*, 19, pp. 125–187.

Naumann, S. *et al.* (2015) *Ökosystembasierte Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz im deutschsprachigen Raum* (BfN-Skripten 395).

Nützmann, G. and Moser, H. (eds.) (2016) *Elemente einer analytischen Hydrologie: Prozesse - Wechselwirkungen - Modelle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Patt, H. (ed.) (2016) *Fließgewässer- und Auenentwicklung: Grundlagen und Erfahrungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Patt, H. (2018) ‘Baumaterialien im naturnahen Wasserbau und in der Ingenieurbiologie’, in Patt, H. (ed.) *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 393–413.

Patt, H. and Gonsowski, P. (2011) ‘Technischer Hochwasserschutz – Bauvorsorge’, in Patt, H. and Gonsowski, P. (eds.) *Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 159–177.

Raymond, C.M. *et al.* (2017) ‘A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas’, *Environmental Science & Policy*, 77, pp. 15–24. doi: 10.1016/j.envsci.2017.07.008

Reinhardt, C. *et al.* (2011) ‘Dezentraler Hochwasserrückhalt–Maßnahmen, Potentiale und ein Fallbeispiel aus dem Mittleren Erzgebirge’, *Dezentraler Hochwasserrückhalt – Maßnahmen, Potentiale und ein Fallbeispiel aus dem Mittleren Erzgebirge // Hochwasserdynamik und Risikomanagement - neue Ansätze für bekannte Probleme? Beiträge zum gemeinsamen Kolloquium am 24.11.2011 in Berlin.* Freie Universität Berlin; Technische Universität Braunschweig; Kolloquium Hochwasserdynamik und Risikomanagement - Neue Ansätze für Bekannte Probleme?; Gemeinsames Kolloquium der TU Braunschweig, TU Kaiserslautern, der Hochschule Magdeburg-Stendal und der FU Berlin. Aachen: Shaker, pp. 61–76.

Santoro, S. *et al.* (2019) ‘Assessing stakeholders' risk perception to promote Nature Based Solutions as flood protection strategies: The case of the Glinščica river (Slovenia)’, *Science of The Total Environment*, 655, pp. 188–201. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.116

Schiechtl, H.M. and Stern, R. (2002) *Naturnaher Wasserbau: Anleitung für ingenieurbiologische Bauweisen*: John Wiley & Sons.

Short, C. *et al.* (2019) ‘Capturing the multiple benefits associated with nature-based solutions: Lessons from a natural flood management project in the Cotswolds, UK’, *Land Degradation & Development*, 30(3), pp. 241–252. doi: 10.1002/ldr.3205

Thorne, C. (2014) ‘Geographies of UK flooding in 2013/4’, *The Geographical Journal*, 180(4), pp. 297–309. doi: 10.1111/geoj.12122

Tobias, S. (2003) ‘Einführung in die Ingenieurbiologie’, *Skriptum. Zürich*.

van Wesenbeeck, B.K. *et al.* (2017) *Implementing nature based flood protection : principles and implementation guidance (English)*. Washington, D.C.. Available at: http://​documents.worldbank.org​/​curated/​en/​739421509427698706/​Implementing-​nature-​based-​flood-​protection-​principles-​and-​implementation-​guidance (Accessed: 26 August 2020).

Wald und Holz NRW (no date) *Wuchsgebiet 42: Niederrheinisches Tiefland: Zahlen und Fakten*. Available at: https://​www.wald-und-holz.nrw.de​/​wald-​in-​nrw/​wuchsgebiete/​niederrheinisches-​tiefland/​ (Accessed: 17 October 2020).

Wald und Holz NRW (no date) *Wuchsgebiet 43: Niederrheinische Bucht: Zahlen und Fakten*. Available at: https://​www.wald-und-holz.nrw.de​/​wald-​in-​nrw/​wuchsgebiete/​niederrheinische-​bucht (Accessed: 18 October 2020).

Waylen, K.A. *et al.* (2018) ‘Challenges to enabling and implementing Natural Flood Management in Scotland’, *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S1078-S1089. doi: 10.1111/jfr3.12301

Werritty, A. (2006) ‘Sustainable flood management: oxymoron or new paradigm?’ *Area*, 38(1), pp. 16–23. doi: 10.1111/j.1475-4762.2006.00658.x

Zielaskowski, J. and Lüderitz, V. (2005) ‘Hochwasserschutz und Naturschutz–Synergien und Konflikte am Beispiel der Elbe in Sachsen–Anhalt’, *Hochwassermanagement.= Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte*, 1, pp. 119–138.

Zölch, T. *et al.* (2017) ‘Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – An assessment at the micro-scale’, *Environmental Research*, 157, pp. 135–144. doi: 10.1016/j.envres.2017.05.023