

Einfluss von natürlichen Wasserrückhaltemaßnahmen auf die Wasserspeicherung im March Teil-Einzugsgebiet: Eine Vorstudie (H₂O-March)



Endbericht

Projektleitung	Bano Mehdi-Schulz Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, BOKU University
Projektbearbeitung	Viktoria Arnold Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, BOKU University Martin Tschikof Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, BOKU University
Projektmitarbeit	Jurrien Westerhof & Michael Stelzhammer WWF Österreich

Projektdauer 01.06.2024 – 31.01.2025

07. Januar, 2026

Dieses Projekt wurde unter anderem durch die finanzielle Unterstützung der Oesterreichischen Nationalbank ermöglicht

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Kurzfassung.....	iii
1. Hintergrund der Studie	1
1.2. Ziele der Modellstudie	3
2. Methodik.....	4
2.1. Untersuchungsgebiet.....	4
2.2. Erstellung eines Maßnahmenkatalogs	5
2.3. Aufsetzung des SWAT+ Modells.....	6
2.3.1. Referenz-Modell	9
2.3.2. Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 1 – Maßnahmen in der Landschaft	10
2.3.3. Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 2 – Maßnahmen am Marchfluss	12
2.4. Aufteilung des Untersuchungsgebiet	13
3. Ergebnisse.....	14
3.1. Katalog der Maßnahmen zur Wasserrückhalt	14
3.2. Bewertung der SWAT+ -Modellleistung	14
3.3. Charakteristiken des Referenz-Modells	15
3.4. Modellerte Wasserrückhaltemaßnahmen	16
3.5. Auswirkungen der Wasserrückhaltemaßnahmen auf die Hydrologie	17
3.5.1. Änderungen des Bodenwassergehalts	18
3.6. Niedrigwasserperioden	26
3.6.1. Veränderungen der Niedrigwasserereignisse am Pegel <i>Niederabsdorf</i>	26
3.6.2. Eine Untersuchung der Niedrigwasserereignisse im Jahr 2017	28
3.7. Hochwasserereignisse.....	35
3.7.1. Detaillierte Analyse ausgewählter Hochwasserereignisse	39
3.8. Auswirkungen von Gruppe 2 – Maßnahmen am Marchfluss auf den Abfluss am Pegel <i>Angern an der March</i>	40

4. Schlussfolgerungen	41
4.1. Auswirkungen der Maßnahmen auf den Wasserrückhalt in der Landschaft	41
4.2 Auswirkungen der Maßnahmen auf Hochwasserspitzen	42
4.3. Schlusswort.....	43
5. Zukünftige Forschung	45
6. Literaturverzeichnis.....	46
Anhang I: Maßnahmenkatalog.....	50
Anhang II: Datensätze des SWAT+ Modells	52
Anhang III: Ergebnisse der SWAT+ -Kalibrierung und -Validierung	53
Anhang IV: Räumliche Verteilung der Maßnahmen	54
Anhang V: Wasserbilanzen der Feldfrüchte.....	57

Kurzfassung

Die vorliegende Studie bewertet die Wirkung ausgewählter natürlicher Wasserrückhaltemaßnahmen auf die Wasserspeicherfähigkeit der Landschaft. Grundlage der Analyse war das hydrologische Modell SWAT+, das für ein 1.485 km² großes Teileinzugsgebiet der March vom Pegel Hohenau bis zum Pegel Angern a. d. March aufgesetzt wurde und Flächen in Österreich sowie in der Slowakei umfasst. Analysiert wurden verschiedene hydrologische Komponenten – darunter Verdunstung, Bodenwasser, Niedrigwasserabflüsse und Spitzenabflüsse – unter Berücksichtigung von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen sowie der Implementierung von Biberdämmen und flussbaulichen Maßnahmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Wasserrückhaltemaßnahmen grundsätzlich wirksam sind und einen positiven Beitrag zur Stärkung der Resilienz der Landschaft gegenüber klimatischen Extremen leisten können. Besonders die Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Direktsaat und Winterbegrünung bieten vielversprechende Ansätze, um den Bodenwassergehalt zu erhöhen, die Wasserspeicherung zu fördern und die Auswirkungen von Trockenperioden abzumildern. In von Trockenheit geprägten Einzugsgebieten können diese Maßnahmen langfristig zur Sicherung landwirtschaftlicher Erträge und zur Stabilisierung des Wasserhaushalts beitragen. Allerdings kann der Herbizidbedarf bei Direktsaat zunehmen, was aus gewässerökologischer Sicht nachteilig ist. Biberdämme zeigten zudem das Potenzial, Niedrigwasserphasen über mehrere Tage abzufedern.

Gewässerrandstreifen mit ausgewachsenen Laubbäumen sowie die Umwandlung von Agrarland in Grünland – insbesondere für Feuchtgebiete, Abflusswege und Überschwemmungsflächen mit einem Wiederkehrintervall von 300 Jahren – führten zu einer Verringerung des (Spitzen-) Abflusses und des Bodenwassergehalts. Gleichzeitig reduzierten sowohl Laubbäume als auch Grünland den Oberflächenabfluss, was positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserqualität haben kann.

In dieser Studie konnten für flussbauliche Maßnahmen aufgrund der Modellgrenzen keine signifikanten Veränderungen der Abflüsse nachgewiesen werden.

Die Wirksamkeit der beschriebenen Maßnahmen hängt stark von ihrer räumlichen Verteilung im Einzugsgebiet und den jeweiligen Standortbedingungen ab. Je nach Zielsetzung ist daher eine kombinierte und räumlich gezielte Umsetzung einzelner Maßnahmen entscheidend.

Der Modellansatz erwies sich als effektiv zur Quantifizierung hydrologischer Prozesse und zum besseren Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Landnutzung, Wasserhaushalt und Vegetation. Die Ergebnisse zeigen, dass Prozessketten in der Landschaft vielfältig miteinander verknüpft sind und sich je nach räumlicher Kombination unterschiedlich auswirken, wobei die

Maßnahmen bei Niedrigwasser- und Hochwasserereignissen deutlich unterschiedliche Wirksamkeiten zeigen.

Als Vorstudie konzentriert sich die Arbeit darauf, die Wirksamkeit der untersuchten Maßnahmen in verschiedenen Bereichen des Einzugsgebiets zu bewerten. Die Ergebnisse liefern eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur räumlichen Optimierung und Kombination einzelner Maßnahmen in der Landschaft.

1. Hintergrund der Studie

Die vorliegende Studie hat das Ziel, ausgewählte Wasserrückhaltemaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Wasserspeicherfähigkeit der Landschaft zu evaluieren, insbesondere unter Bedingungen zunehmender Trockenheit, aber auch bei Hochwasser. Dazu wurde ein hydrologisches Modell für ein Teil-Einzugsgebiet des March-Flusses (insgesamt 37 km Flusslänge) aufgesetzt. Die untersuchte Region umfasst sowohl ein Teil der Slowakei als auch ein Teil von Österreich.

Die Studie umfasst das Teil-Einzugsgebiet der March vom Pegel *Hohenau an der March* bis Pegel *Angern an der March*, mit einer Gesamtfläche von 1.484,7 km². Für diese Studie liegen die betrachteten Flächen in Österreich (Niederösterreich, Weinviertel) und in der Slowakei (insbesondere der Randbereich Bratislavas sowie in der Trnavský Region). Diese Teile gehören zum pannonischen Becken und zur pannonischen Klimazone mit einem kontinental geprägten, trocken-warmen Binnenklima.

Die Region Weinviertel gehört zu den niederschlagsärmsten Gebieten Österreichs. Für den Zeitraum 1971–2000 wurden am Standort Mistelbach eine durchschnittliche Jahresniederschlagssumme von 508 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 9,5 °C ermittelt (alpS GmbH, o. D.). Zudem ist seit 1980 im March-Einzugsgebiet ein Trend zu höheren Lufttemperaturen von ca. + 1,9°C verzeichnet worden (Stanzel et al., 2022a). Das österreichische March-Teileinzugsgebiet ist aufgrund der flachen und fruchtbaren Böden zu rund 70 % landwirtschaftlich genutzt. Für die Bewässerung werden dort jährlich im Durchschnitt rund 427.000 m³ Grundwasser entnommen (pers. Komm. H. Weyermayr, Marchfeldkanal, 27.05.2025). Nach Prognosen des Bundesministeriums wird die Grundwasserentnahme in dieser Region künftig weiter zunehmen (BMLRT, 2021).

Neben dem Wasserbedarf der Menschen muss auch der Wasserbedarf der Ökosysteme gewährleistet werden. Das WWF-Auenreservat Marchegg befindet sich an der March flussabwärts von *Angern an der March*. Das Reservat liegt innerhalb der March Überschwemmungsflächen und ist ein Naturschutzgebiet. Das Auenreservat bietet zahlreichen Tier- und Pflanzenarten einen geeigneten Lebensraum, z.B. sind die feuchten Senken für den stark gefährdeten Donau-Kammolch überlebenswichtig, da er auf feuchte und nasse Bedingungen angewiesen ist. Der Marchfluss hat in den letzten Jahrzehnten viele Veränderungen durchlaufen, die sich auf diese Lebensräume ausgewirkt haben.

Im 20. Jhdt. wurde die March begradigt und ihre Ufer verbaut. Eine Folge der Begradigung ist die steigende Eintiefung der March (seit Begradigung je nach Standort, ca. 1 m im Durchschnitt), wodurch die bereits geringe laterale Konnektivität weiter zurück geht (Hohensinner et al., 2023). Zwischen 2014 und 2019 wurden außerdem vermehrt geringe bis sehr geringe Abflüsse in der March

dokumentiert (Stanzel et al., 2022a). Stetig sinkende Grundwasserstände sind im Auenreservat feststellbar (bei der Betrachtung der monatlichen Grundwassermessung am Pegel Marchegg, Bl 260 von 01.1979 bis 12.2022 (BMLUK, 2025)). Zudem ist zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 eine zeitliche Verschiebung der Niedrigwasserereignisse von Herbst/Winter zu Frühsommer/Sommer erkennbar (Stanzel et al., 2022b). Die Eintiefung des Flussbetts und die Verschiebung der Niedrigwasserabflüsse in die Sommermonate gefährden die Anbindung des WWF-Auenreservats an den Wasserstand der March. Dadurch können die Ökosystemleistungen und die Biodiversität des Reservats erheblich beeinträchtigt werden.

Um mehr Wasser in der Landschaft zu speichern und Hochwasserspitzen abzupuffern, werden Flüsse zunehmend renaturiert (Lamberty et al., 2020). Auch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen werden untersucht, um mehr Bodenwasser lokal zu speichern (z.B. das EJP SoilX-Projekt; Turek et al., 2025). Zudem sollen naturnahe Landnutzungs- und Landbewirtschaftungsmaßnahmen in der Abminderung der Hochwassergefahr dienen (ICPDR 2009). Darüber hinaus zielt die im Jahr 2024 beschlossene EU-Renaturierungsverordnung (VO (EU) 2024/1991) u.a. auf die Wiederherstellung natürlicher Wasserhaushalte ab. Zu den geförderten Maßnahmen zählen die Renaturierung von Auen und Flusslandschaften sowie die Wiederherstellung von Feuchtgebieten. Darüber hinaus werden angepasste landwirtschaftliche Praktiken (z. B. reduzierte Bodenbearbeitung) sowie Wiederbewaldung und naturnahe Waldbewirtschaftung unterstützt. Diese Maßnahmen können auch unter dem Begriff „natürliche Wasserrückhaltemaßnahmen in der Landschaft“ zusammengefasst werden.

Unter Natürlichen Wasserrückhaltemaßnahmen (NWRM, aus dem Englischen *natural water retention measures*) werden Ansätze verstanden, die natürliche Prozesse und Ökosysteme nutzen, um Wasserressourcen zu schützen und nachhaltig zu bewirtschaften (European Union, 2014). Angestrebt wird die Erhaltung bzw. Verbesserung der multifunktionalen Leistungen des Ökosystems insbesondere die Speicherung von Wasser in Landschaft und Böden (Office International de l'Eau, 2024).

1.2. Ziele der Modellstudie

Ziel der Studie ist es, wirksame natürliche Wasserrückhaltemaßnahmen zu identifizieren, die zur Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit der Landschaft beitragen. Dazu wurden zwei Hauptschritte durchgeführt:

1. Die Erstellung eines Maßnahmenkatalogs anhand einer Literaturrecherche zur Identifizierung von potenziellen Wasserrückhaltemaßnahmen in der Landschaft
2. Die Modellierung der natürlichen Wasserrückhaltemaßnahmen und die Bewertung ihres Potenzials mit dem hydrologischen Modell „Soil and Water Assessment Tool“ (SWAT+). Dazu wurden ausgewählte Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts in der Landschaft in das Modell integriert und ihre Wirkung quantifiziert.

Die Studie ist als Vorstudie angelegt, um zunächst die Wirksamkeit ausgewählter Maßnahmenkombinationen in unterschiedlichen Landschaftstypen (Oberlauf, Mittellauf, Unterlauf) zu analysieren.

1. Bestimmung der Auswirkungen ausgewählter natürlicher Wasserrückhaltemaßnahmen auf den Bodenwassergehalt im untersuchten Teil-Einzugsgebiet und die Produktion der wichtigsten Feldfrüchte.
2. Quantifizierung des Einflusses natürlicher Wasserrückhaltemaßnahmen auf ausgewählte Niedrigwasser- und Spitzenabflüsse der March-Zubringer.

2. Methodik

2.1. Untersuchungsgebiet

Das March-Einzugsgebiet von der Quelle der March bis zum Pegel *Hohenau an der March* umfasst 26.734,4 km² (BMLFUW, 2014). Das Untersuchungsgebiet ist ein Teil-Einzugsgebiet der March und erstreckt sich vom Pegel *Hohenau an der March* bis *Angern an der March* (Flusskilometer 67 bis 30), und beträgt 1.484,7 km² (Abbildung 1). Das Gebiet liegt sowohl auf österreichischem als auch auf slowakischem Staatsgebiet, wobei die March als Grenzfluss fungiert. Rund zwei Drittel dieser Fläche (953,8 km²) befinden sich in Österreich. Die Höhenlage des Gebiets variiert zwischen 132 m und 747 m ü.d.M.. Das Gelände ist überwiegend flach, insbesondere in den Bereichen nahe der March. Im Westen des Gebiets findet sich eine hügelige Landschaft, während im Osten nur vereinzelt Erhebungen auftreten.

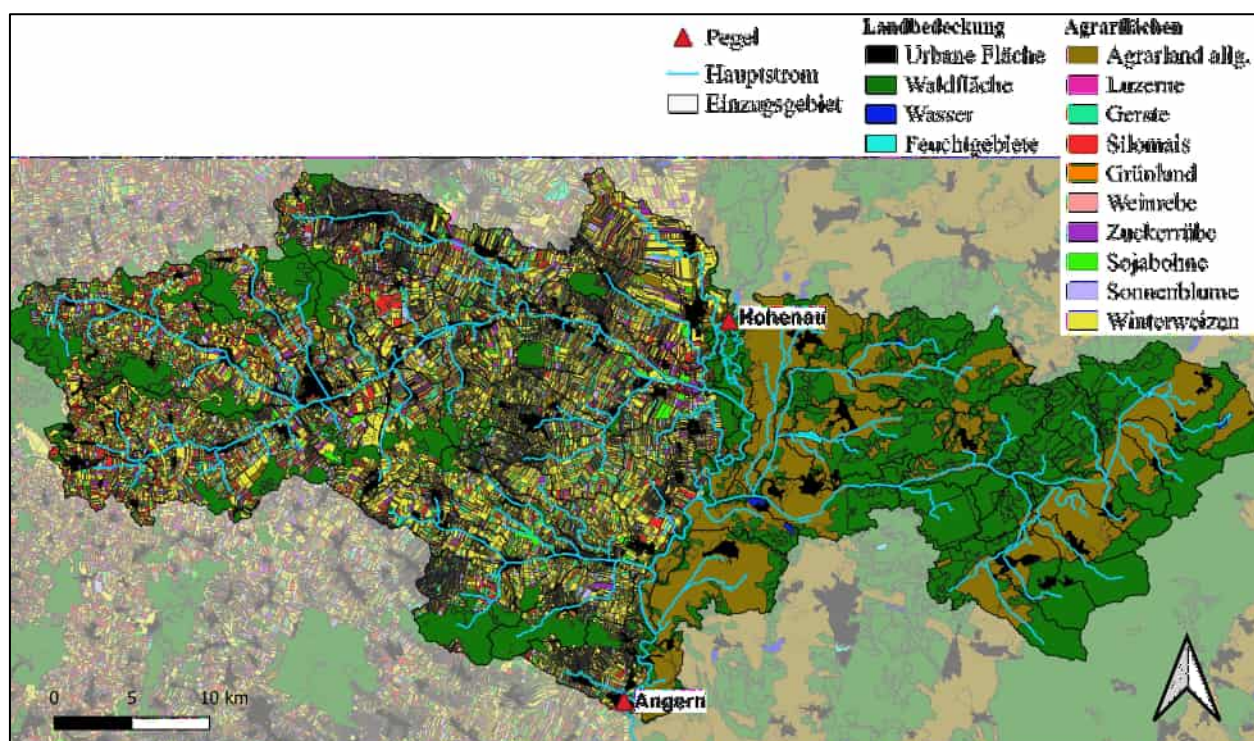


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet von *Hohenau a.d. March* bis *Angern a.d. March* mit der Landbedeckung und den Flussläufen dargestellt mit dem Modell SWAT+

Die Landnutzung im Untersuchungsgebiet ist vielfältig, wobei Agrarland mit einem Anteil von 67,3 % dominiert. Waldflächen machen 27,1 % der Fläche aus, urbane Gebiete 5,2 %, und Feuchtgebiete 0,4 % (Abbildung 1). Die wichtigste Kulturpflanze in der Region sind Wintergetreide, v.a. Winterweizen, welches zu ca. 30% auf den Agrarflächen in Niederösterreich im Jahr 2024 angebaut wurde und Mais mit einem Flächenanteil von ca. 15% (Statistik Austria, 2025a). Im Modell mussten Agrarflächen berücksichtigt werden, die mangels Datengrundlage keiner spezifischen Kulturart

zugeordnet werden konnten. Diese treten überwiegend auf slowakischem Staatsgebiet auf und wurden als „Agrarland allg.“ klassifiziert. Mehr als die Hälfte der Agrarflächen (54 %) wird im österreichischen Teil des Untersuchungsgebiets mit konservierender Bodenbewirtschaftung bewirtschaftet (Statistik Austria, 2016).

Im Untersuchungsgebiet beträgt der Jahresniederschlag etwa 550 mm, wobei der Großteil in den Monaten Mai bis September fällt. In diesem Zeitraum liegt der durchschnittliche Monatsniederschlag bei 60 bis 75 mm (Abbildung 2). Von Oktober bis April liegen die Niederschläge zwischen 20 und 35 mm, Februar ist der trockenste Monat mit knapp über 20 mm Niederschlag.

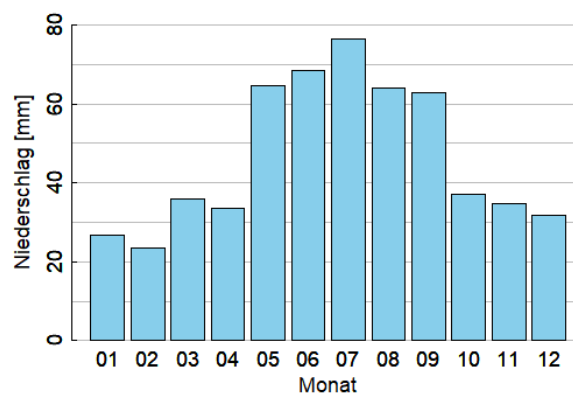


Abbildung 2: Durchschnittlicher monatlicher Gebietsniederschlag im Untersuchungsgebiet von 1991-2021 (Daten: Spartacus; GeoSphere Austria, 2020).

2.2. Erstellung eines Maßnahmenkatalogs

Ziel des Maßnahmenkatalogs war es, natürliche Wasserrückhaltemaßnahmen zu identifizieren, die einen positiven Einfluss auf die Wasserspeicherfähigkeit der Landschaft haben. Zu seiner Erstellung wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Sechs Quellen wurden herangezogen:

- Der „LAWA-BLANO Maßnahmenkatalog“ (LAWA, 2020),
- die Website „European NWRM+“ (Office International de l’Eau, 2024),
- die „Steckbriefe für die Praxis“ (WBW, 2018),
- der Katalog „Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Agrarlandschaft“ (DVL, 2021),
- der Katalog des Projektes „WADKlim“ (Stein et al., 2023) und
- der Katalog des „DANUBE4all“-Projekts (Szabo-Meszaros et al., 2024).

Als zusätzliche Naturschutzmaßnahme wurden Biberdämme berücksichtigt, die in der oben genannten Literatur nicht beschrieben waren und daher in einer separaten Literaturrecherche untersucht wurden (Grygoruk & Nowak, 2014; Henschel et al., 2018; Larsen et al., 2021; Neumayer et al., 2020; Zahner, 2018). Der vollständige Maßnahmenkatalog ist im Anhang I aufgeführt.

Die Maßnahmen beeinflussen die lokale Hydrologie auf unterschiedliche Weise (z. B. durch erhöhte Infiltration oder verstärkte Evapotranspiration) und wurden entsprechend in der Tabelle bewertet. In einem Folgeschritt wurden wesentliche Maßnahmen gemeinsam mit dem WWF nach mehreren Kriterien ausgewählt. Berücksichtigt wurden dabei ihr räumlicher Einsatz in der Landschaft, ihre Relevanz für die Region, ihre Wirksamkeit hinsichtlich hydrologischer Prozesse sowie ihre Modellierbarkeit mit dem hydrologischen Modell SWAT+.

Die folgenden Wasserrückhaltemaßnahmen wurden in diese Modellstudie berücksichtigt:

- Anlage von Wald-Uferstreifen
- Konversion ackerbaulich genutzter ehemaliger Feuchtgebiete in Dauergrünland
- Einführung der Direktsaat auf landwirtschaftlichen Flächen
- Umwandlung von Nadelwaldflächen in Laubwaldflächen
- Duldung und aktive Förderung der Errichtung von Biberdämmen
- Remäandrierung der March

2.3. Aufsetzung des SWAT+ Modells

Das hydrologische Modell SWAT+ (Soil & Water Assessment Tool; Bieger et al., 2017) ist ein prozessbasiertes, räumlich explizites und kontinuierliches Modell mit einem täglichen Zeitschritt. Es simuliert sowohl den Wasserkreislauf als auch Pflanzenwachstumsprozesse und die Akkumulation von Biomasse. Bewirtschaftungsmaßnahmen und Pflanzenparameter können im Modell individuell gesteuert und angepasst werden. Für das Modell benötigte Eingangsdaten sind: tägliche Wetterdaten (Niederschlag und Temperatur), digitales Geländemodell, Bodenkarte, Landnutzungskarte und landwirtschaftliche Bewirtschaftungsweisen. Das Modell definiert das Einzugsgebiet und den Flussverlauf anhand der Topographie und den vorgegebenen Flussabschnitte.

Von jeder Flussabzweigung bis zur nächsten werden Teil-Einzugsgebiete bestimmt. Diese Teil-Einzugsgebiete werden wiederum in zwei „Landscape Units“ (LSU) unterteilt (Abbildung 3), die LSU-
Hanglage (Fläche oberhalb des Flusses) und die LSU-Aue (Fläche direkt am Fluss). Die Definition dieser zwei Flächen wird selbst festgelegt. Innerhalb dieser LSUs werden die einzelnen Flächen mit einer bestimmten Landnutzung definiert. Durch die Unterteilung in LSU-Hanglage und LSU-Aue ist eine genauere Darstellung der hydrologischen Komponenten möglich, da der Oberflächenabfluss und der laterale Abfluss (seitlicher Abfluss im Boden/Interflow) der LSU-Hanglage tlw. in der LSU-Aue zwischen gespeichert werden, bevor diese in den Fluss übergehen (Bieger et al., 2017).

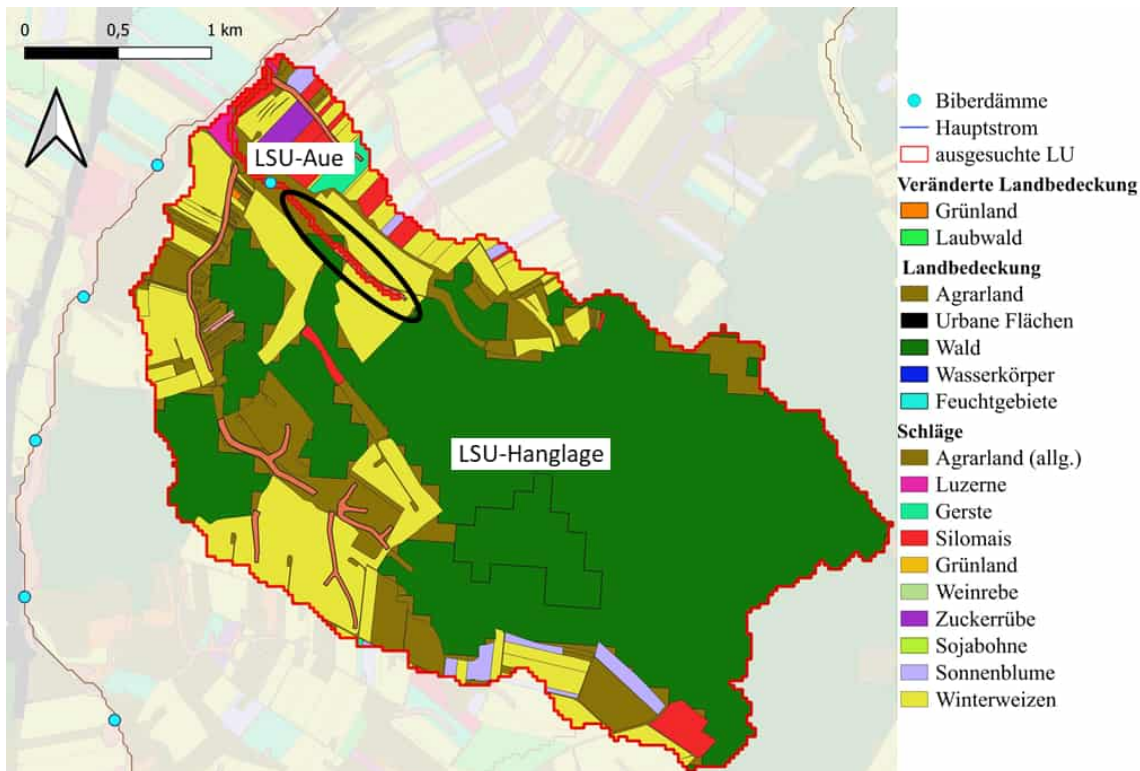


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer LSU-Aue und einer LSU-Hanglage am Beispiel eines Mittellaufs (LSU-Aue schwarz eingekreist, LSU-Hanglage = übriger Bereich).

Für diese Studie wurden drei eigenständige und individuelle SWAT+ Modelle aufgesetzt, um den Zielsetzungen nachzugehen:

- Referenz Modell: Der „Ist-Zustand“ des untersuchten March Teil-Einzugsgebiet für die Periode 1991 bis 2021. Das kalibrierte und validierte Modell dient als Grundlage für die Erstellung der nächsten Modelle.
- Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 1 – umgesetzte Wasserrückhaltemaßnahmen in der Landschaft: Das kalibrierte und validierte Modell wurde als Grundlage verwendet, in das ausgewählte Maßnahmen implementiert wurden. Das Modell zur Umsetzung von Wasserrückhaltemaßnahmen in der Landschaft besteht aus drei aufeinander aufbauenden Schritten.
 - 1.1 Änderung der Landbedeckung: in diesem Szenario werden jene Flächen analysiert, die im Modell in Laubwald und Grünland umgewandelt wurden.
 - Laubwälder werden als Wald-Uferstreifen im Modell implementiert, mit der Überlegung, das Pufferstreifen den Oberflächenabfluss verringern und Bäume den Bibern Baumaterial liefern.
 - Zusätzliches Grünland wird im Modell in den ehemaligen Feuchtgebieten, Überflutungsflächen und begrünten Abflusswegen implementiert.

Feuchtgebiete wurden ausgewählt, da vor der Begradigung, die March ein Fluss mit vielen Auen und Feuchtgebieten war (Hohensinner et al., 2023). HQ300 Flächen (=überschwemmte Fläche bei einem 300-jährigen Hochwasserereignis) wurden ausgewählt, um einen möglichst hohen Hochwasserschutz zu haben. Begrünte Abflusswege sind flach ausgeformte, mit Vegetation bedeckte Rinnen oder Senken, die den Oberflächenabfluss verlangsamen, Erosion mindern und zur Rückhaltung von Sedimenten sowie Nährstoffen beitragen. Diese wurden in extensives Grünland gesetzt, um den Oberflächenabfluss möglichst effizient zu verringern.

- 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung: Zusätzlich zur Landbedeckung, wurden in diesem Szenario die Land- und Waldbewirtschaftung geändert. Hier wurden Maßnahmen gewählt, welche auch von den Landwirt:innen in der Region umgesetzt werden könnten.
 - Mit der Wahl von Direktsaat mit Ernterückständen (Mulch) und Winterbegrünung wird nicht die Feldfrucht, sondern die Bewirtschaftungsmethode verändert. Zudem werden diesen Maßnahmen auch Vorteile für die Regeneration des Bodens zugesprochen.
 - Änderung der Nadelwaldflächen zu Laubwaldflächen wurden gewählt, weil Fichten in Österreich immer stärker vom Borkenkäfer befallen werden und Laubwälder tendenziell höheren Temperaturen standhalten können.
- 1.3 Implementierung von Biberdämmen: Diese wurden im Modell eingefügt, da im Gebiet immer mehr Biber gesichtet wurden und deren Ausbreitung kontrovers zwischen Vertreter:innen der Landwirtschaft und des Prozess- und Naturschutzes diskutiert wird (pers. Komm. J. Westerhof, WWF 02.10.2024). Die Hypothese ist, dass Biberdämme wie kleine natürliche Reservoirs wirken und somit einen Einfluss auf die Wasserspeicherung und den Abfluss ausüben können. Durch Biberdämme können Oberflächen- und Grundwasserstände angehoben und so eine verbesserte Verbindung zwischen Fließgewässern und Feuchtgebieten hergestellt werden (Pearce et al., 2021).
- Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 2 – Maßnahmen innerhalb des Marchflusses: Maßnahmen innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe des Marchflusses auf österreichischer und slowakischer Seite. Das kalibrierte und validierte Modell wurde erneut als Grundlage verwendet, um Maßnahmen am Fluss zu implementieren. Die Maßnahmen der Gruppe 1 waren davon nicht betroffen. Im Modell wurden zwei Maßnahmen umgesetzt: die Remäandrierung des Flusslaufes sowie die extensive Bewirtschaftung von

Überschwemmungsgebieten. Dabei wurden ausschließlich die HQ300-Flächen der March berücksichtigt.

Mit dem Referenz-Modell wurden die relativen Veränderungen der Maßnahmen aus Gruppe 1 und Gruppe 2 verglichen und ihre Wirksamkeit in Bezug auf die Wasserrückhaltung in der Landschaft bewertet. Die drei Modelle werden im Folgenden beschrieben.

2.3.1. Referenz-Modell

Das Referenz-Modell repräsentiert die historische Periode von 1991 bis 2021 in dem March Teil-Einzugsgebiet (Abbildung 1). Folgende Programme wurden verwendet: SWAT+ 61.0.1 (Arnold et al., 2024), SWAT+ Editor 3.0.8 (SWAT+ Development Team, 2024), QGIS Desktop 3.34.6 (QGIS.org, 2024) und SWAT+ Toolbox 3.0.7 (Chawanda, 2025). Des Weiteren wurde das im Jahre 2019 erstellte SWAT2012-Modell des NitroClim.AT-Projektes (Mehdi-Schulz et al., 2022) als Vorlage genutzt. Es umfasst das Einzugsgebiet der Zaya, das größte Einzugsgebiet im Untersuchungsgebiet.

Die verwendeten Datensätze sind im Anhang II ersichtlich. Der simulierte Zeitraum für diese Studie liegt bei 1991-2021 plus fünf Jahre Aufwärmzeit (1986-1990). Die im Modell verwendeten Landnutzungsdaten stellen eine durchschnittliche Momentaufnahme des simulierten Zeitraums dar. Das untersuchte March Teil-Einzugsgebiet in Österreich ist auf Grund der besseren öffentlich zugänglichen Datenlage in Österreich detaillierter modelliert wurden. Die LSU-Aue wurde definiert als zweimal die Flussbreite am linken und am rechten Ufer (entspricht ca. zwischen 10 und 200 m auf jeder Uferseite). Die restliche Fläche wird der LSU-Hanglage zugerechnet.

Im Modell werden die landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmethoden und die Pflanzenwachstumsparametern vom NitroClim.AT-Projekt übernommen. Für die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration (ETp) wurde im Modell die Hargreaves Methode ausgewählt, diese wird über die tägliche minimale und maximale Temperatur berechnet (Hargreaves & Samani, 1985). Die Stickstoff- und Phosphordüngung erfolgt im SWAT+ Modell mit Hilfe einer automatisierten Düngung. Nach Angaben von Statistik Austria (2016) werden rund 50 % der Agrarflächen bodenkonservierend bewirtschaftet (z. B. mit verringerter Pflugtiefe von 10 cm). Im Modell wurde dieser Anteil auf die Untersuchungsflächen übertragen und – gewichtet nach Flächengröße – mit reduzierter Pflugtiefe parametrisiert. Eine Bewässerung wurde für Agrarland allg., Gerste, Silomais, Sojabohne und Zuckerrübe implementiert. Die Bewässerung der Feldfrüchte Agrarland allg., Gerste und Silomais wurde auf bestimmte Tage im Jahr festgelegt, für die Entscheidung des Zeitpunktes wurde die Studie von Santos (2023) herangezogen. Bei den Feldfrüchten Zuckerrübe und Sojabohne wurde eine automatische Bewässerung implementiert, da ihre Erträge infolge von

Wasserstress andernfalls erheblich reduziert worden wären. Im Modell erfolgte die Berechnung durch Wasserentnahme aus dem tieferen Grundwasser. Die Bewässerungsmengen wurden angepasst, sodass die errechneten Beträge +/- 10% der Pflanzen-Erträge der Statistik Austria (2025b) entsprachen.

Die umfassende Kalibrierung und Validierung des SWAT+-Modells wurde durchgeführt und wird in der Masterarbeit von Arnold (2025) ausführlich dargestellt. Zusammenfassend wurde zunächst eine „Soft-Kalibrierung“ des Wasserhaushalts und der Erträge der Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet durchgeführt (andere Vegetationstypen und die Biomasse von Bäumen wurden hierbei nicht berücksichtigt). Anschließend erfolgte eine „Hard-Kalibrierung“ anhand der Abflussdaten der verfügbaren Pegelstationen. Die Validierung erfolgte anhand der täglichen Abflussdaten am Pegel *Niederabsdorf*. Für die Kalibrierung wurden die täglichen Abflussdaten unter Anwendung des statistischen Kennwerts Kling-Gupta Efficiency (KGE) herangezogen; es konnten KGE-Werte > 0,5 erreicht werden. Die Ergebnisse der Kalibrierung/Validierung sind in Anhang III dokumentiert.

2.3.2. Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 1 – Maßnahmen in der Landschaft

Das SWAT+ Referenz-Modell wurde als Grundlage für die nachfolgenden Szenarien verwendet, wobei nur das Landnutzungs- oder Landschaftselement entsprechend geändert wurde. Die Maßnahmen und deren realistisch-optimistische Umsetzung wurden in mehrere Diskussionsrunden mit WWF-Experten J. Westerhof und M. Stelzhammer festgelegt. Eine bildliche Veranschaulichung der umgesetzten Szenarien ist im Anhang IV ersichtlich.

2.3.2.1. Szenario 1.1 Änderung der Landbedeckung

Die Änderung der Landbedeckung basiert auf zwei Änderungen:

- 1.) Die Implementierung von Gewässerrandstreifen durch eine Umwandlung der Flächen zu Laubwald an allen Fließgewässern (ausgenommen March) innerhalb Österreichs. Diese Maßnahmen wurden mit dem Ziel gerechtfertigt, den Oberflächenabfluss zu reduzieren, Schatten für die Gewässer zu spenden und Baumaterial für Biber bereitzustellen. Dafür werden 10 m am linken und am rechten Ufer Laubwald angelegt. Die Default-Parameter im Modell für Laubwald wurden übernommen. Diese entsprechen einer maximalen Biomasse von 100 t/ha, einem LAI von 5, einer Baumkronenhöhe von 6 m und einer maximalen Wurzeltiefe von 3,5 m.

2.) Die Wiedervernässung ehemaliger Feuchtgebiete, die Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten sowie die Begrünung von Abflusswegen durch die Umwandlung der Flächen in Grünland (Tabelle 1). Diese Maßnahmen basieren auf den Überlegungen die Auen und Feuchtgebiete, welche vor der Begradigung der Fließgewässer die Landschaft geprägt haben, wieder zu vernässen und zu beleben. Die Überschwemmungsgebiete erhöhen den Hochwasserschutz und bieten Lebensraum für eine Vielzahl an aquatischen und terrestrischen Organismen. Begrünte Abflusswege sind in den Agrarflächen so verteilt, dass die Erosionswege bepflanzt werden und somit den Oberflächenabfluss als auch die Bodenerosion verringern.

Es wurden Agrarflächen in Grünland bzw. Laubwald umgewandelt, auf welchen folgende Kulturarten wuchsen: Luzerne, Gerste, Silomais, Grünland, Zuckerrübe, Sojabohne, Sonnenblume Winterweizen & Agrarland allg., weil diese die einjährigen Feldfrüchte darstellen.

Tabelle 1: Verwendete Datensätze um die Maßnahmen im Modell zu implementieren.

Maßnahme	Anmerkung	Datensatz
Feuchtgebiete	Zuschnitt von INSPIRE - Feuchtgebiete und Torfflächen 2022 und COPENICUS – Water and Wetness 2018	INSPIRE (2022b), European Union's Copernicus Land Monitoring Service information (2018a)
Begrünte Abflusswege	INSPIRE -begrünte Abflusswege	INSPIRE (2022a)
Remäandrierung	Historischer Flussverlauf der March 1896, Abschnitt <i>Hohenau an der March</i> bis <i>Angern an der March</i>	Hohensinner et al. (2023)
Überschwemmungsgebiete	HWRL - HQ300 Flächen 2013 (Wasserfläche eines statistisch alle 300 Jahre auftretenden Hochwassers)	Umweltbundesamt (2013)

2.3.2.2. Szenario 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung

In diesem Szenario wurden Maßnahmen festgelegt, um die Wasserspeicherung im Boden für die Vegetation (insbesondere für die Landwirtschaft) zu verbessern und Verluste durch Oberflächenabfluss zu minimieren. Die Änderung der Landbewirtschaftung besteht aus zwei Maßnahmen:

- 1.) Bei der Änderung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden wurden solche Anbauweisen ausgewählt, die sich für Landwirt:innen in naher Zukunft implementieren lassen und den ÖPUL Maßnahmen entsprechen (<https://www.bmluk.gv.at/oepul>), z.B. Direktsaat und Winterbegrünung. Die Anbauweise aller Feldfrüchte in Österreich wurde als Direktsaat mit Ernterückständen (Mulch) auf folgenden Flächen implementiert:

Winterweizen, Gerste, Silomais, Zuckerrüben, Sojabohnen, Sonnenblumen & Agrarland allg.. Eine Winterbegrünung wurde dagegen nur bei den Sommerkulturen im Modell berücksichtigt.

- 2.) Eine Änderung der forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung. Eine Flächenänderung von Laubwäldern an der Stelle von Nadelwäldern wurde im Modell implementiert. Diese Maßnahme wurde ausgewählt auf Grund einer höheren Resistenz gegenüber Borkenkäfern und steigenden Temperatur, um somit die Stabilität der Wälder zu gewährleisten. Die Änderung der Wälder betrifft vor allem die Slowakei, da im österreichischen Teilgebiet nur wenige Nadelwälder vorhanden sind.

2.3.2.3. Szenario 1.3 Implementierung von Biberdämmen

Dieses Szenario untersucht die hydrologischen Auswirkungen aufgrund der Zunahme der Anzahl von Biberdämmen. Die Biberdämme wurden innerhalb Österreichs an allen Flüssen mit der Flussordnung 1 und in Waldnähe im Abstand von 900m angelegt (pers. Komm. J. Westerhof, WWF 16.10.2024). Die Biberdämme wurden als Reservoir mit Feuchtgebieten in SWAT+ modelliert. Zu diesem Zweck erfolgte eine Umwandlung der gesamten LSU-Aue oberhalb des Biberdamms in Feuchtgebiete (s. Anhang IV, Abb. 30).

2.3.3. Wasserrückhaltemaßnahmen Gruppe 2 – Maßnahmen am Marchfluss

Die zweite Gruppe an Maßnahmen befasst sich damit, dem Fluss mehr Raum zu geben und wurde nur innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe zur March umgesetzt. Hier wurden zwei Maßnahmen angewendet:

- 1.) Die Remäandrierung soll den Flusslauf verlängern, den Abfluss der March verlangsamen und somit die Eintiefung reduzieren und den Grundwasserstand anheben. Zudem entstehen dadurch neue Lebensräume im aquatischen System. Dafür wurde der historische Verlauf der March aus dem 19. Jhdt. vor den umfangreichen Mäanderdurchstichen angenommen (Hohensinner et al., 2023).
- 2.) Die Wiederherstellung der Überschwemmungsgebiete soll zu einem höheren Hochwasserschutz führen und Lebensraum für die Natur bieten. Bei der Wiederherstellung der Überschwemmungsgebiete wurden die HQ300 Flächen auf der österreichischen und slowakischen Seite zu Grünland umgewandelt (Tabelle 1). Es wurden nur Agrarflächen in Grünland umgewandelt, auf welchen folgende Kulturarten wuchsen: Winterweizen, Luzerne, Gerste, Silomais, Grünland, Zuckerrübe, Sojabohne, Sonnenblume & Agrarland allg..

2.4. Aufteilung des Untersuchungsgebiet

Um die Maßnahmenwirksamkeit in verschiedenen Größenebenen zu untersuchen, wurde das Untersuchungsgebiet in drei Teilgebiete unterteilt (Abbildung 4). Das Taschlbach-Einzugsgebiet (EZG) dient als Beispiel für einen hydrologischen Oberlauf und umfasst eine Fläche von 104,8 km². Das Zaya-Einzugsgebiet ist ein Beispiel für einen Mittellauf. Es ist dem Pegel *Niederabsdorf* zugeordnet und umfasst eine Fläche von 533,6 km². Der Unterlauf, March Teil-EZG, umfasst das gesamte Untersuchungsgebiet mit einer Größe von 1.484,4 km².



Abbildung 4: Aufteilung des Untersuchungsgebiet in Taschlbach-EZG (Oberlauf), Zaya-EZG (Mittellauf) und March Teil-EZG (Unterlauf). Die kleineren EZG sind jeweils in den größeren enthalten.

Der Oberlauf ist der quellnahe, höchst geneigte Abschnitt mit einer schmalen Flussbreite und relativ hoher Fließgeschwindigkeit, bewaldeten Abschnitten und einer zentralen Rolle bei der Abflussbildung im Einzugsgebiet.



Zaya im Oberlauf (Foto: Wikipedia)

Der Mittellauf ist durch ein moderates Gefälle, eine zunehmende Wasserführung und breitere Flussabschnitte charakterisiert und verläuft größtenteils durch intensiv landwirtschaftlich genutzte Gebiete.



Marchfeld (Foto: DariuszPa, iStock)

Der Unterlauf zeichnet sich durch flaches Terrain, geringes Gefälle und niedrige Fließgeschwindigkeiten aus; in naturnahen Bereichen entstehen ausgedehnte Auenlandschaften mit hoher Retentionswirkung.



Renaturierter Seitenarm der March (Foto: Martin Tschikof)

3. Ergebnisse

3.1. Katalog der Maßnahmen zur Wasserrückhalt

Aus dem Maßnahmenkatalog (Anhang I) geht hervor, dass verschiedene Wasserrückhaltmaßnahmen in unterschiedlichem Ausmaß zur Wasserspeicherung in der Landschaft beitragen können. Als besonders wirksam zur Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens - beispielsweise durch eine Verlangsamung des Oberflächenabflusses (4. Spalte, +++) - erwiesen sich folgende Maßnahmen: Direktsaat, Biberdämme, die Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten, Renaturierung, Verbesserung der Durchgängigkeit des Flusses, sowie Aufforstung bzw. die Umwandlung von Landflächen in Wald. Allerdings ist mit letzterer Maßnahme auch eine erhöhte Evapotranspiration verbunden.

3.2. Bewertung der SWAT+ -Modelleistung

Nach der Soft-Kalibrierung konnten die beobachteten Erträge durch das Modell mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. In Tabelle 2 werden die simulierten Erträge der verschiedenen Kulturarten den gemessenen Werten gegenübergestellt. Die Zuckerrübe wird im SWAT+-Modell entsprechend der US-amerikanischen Anbauweise als Futterrübe modelliert. Da sich diese deutlich von der in Österreich angebauten Zuckerrübe unterscheidet, ergeben sich größere Ertragsabweichungen.

Tabelle 2: Prozentualer Vergleich der simulierten mittleren Pflanzenerträge aus dem SWAT+ Referenz-Modells (1991-2021) zu den berechneten Pflanzenerträge aus der niederösterreichischen Statistik (2000-2020) (Statistik Austria, 2025b).

Feldfrucht	Erträge [Trockenmasse t/ha]		Differenz [%]
	NÖ Statistik	SWAT+	
Luzerne	6,74	6,84	1,5
Gerste	4,11	3,84	6,6
Silomais	9,99	9,52	4,7
Grünland	3,58	3,39	5,3
Sojabohne	2,44	2,61	7,0
Sonnenblume	2,69	2,79	3,7
Winterweizen	5,24	5,06	3,4
Zuckerrübe	30,39	23,95	21,2

Die Hard-Kalibrierung und -Validierung des Modells ergab im täglichen Zeitschritt KGE-Werte < 0,5 (Anhang III). Abbildung 4 zeigt hierzu den Vergleich von beobachteten und simulierten Abflussganglinien am Pegel *Niederabsdorf*.

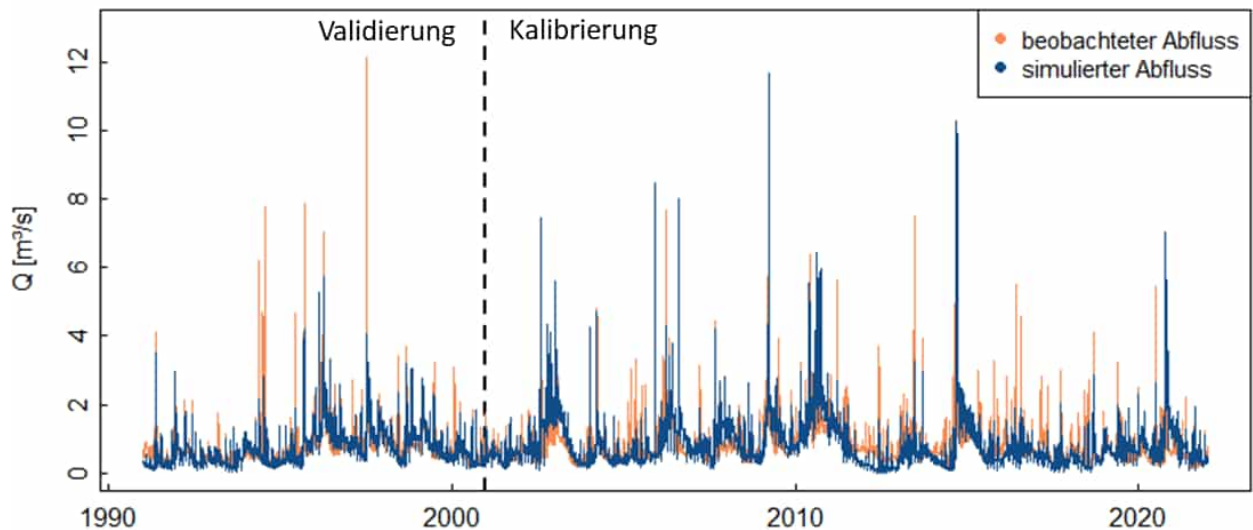


Abbildung 5: Verlauf des beobachteten und simulierten Abflusses am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) im Zeitraum 1991-2021 (Validierung von 1991-2000, Kalibrierung von 2001-2021).

3.3. Charakteristiken des Referenz-Modells

Die hydrologischen Kennwerte des Mittellaufs und Oberlaufs sind in Tabelle 3 aufgeführt. Bei dem Pegel *Niederabsdorf* liegt der mittlere Abfluss bei $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und das HQ100 bei $42,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Q95 in *Niederabsdorf* liegt bei $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, während das Modell-berechnete $Q95_{\text{REF}}$ für den Zeitraum vom 1991 bis 2021 bei $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt. Wie erwartet zeigen die Messungen an dem Pegel *Angern an der March* höhere Werte. Der MQ liegt hier bei $105,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und das HQ100 bei $1400,0 \text{ m}^3/\text{s}$. In der Abbildung 6 sind die hydrologischen Kennzahlen des Pegel *Niederabsdorf* an der Abflussganglinie des Referenz-Modells dargestellt.

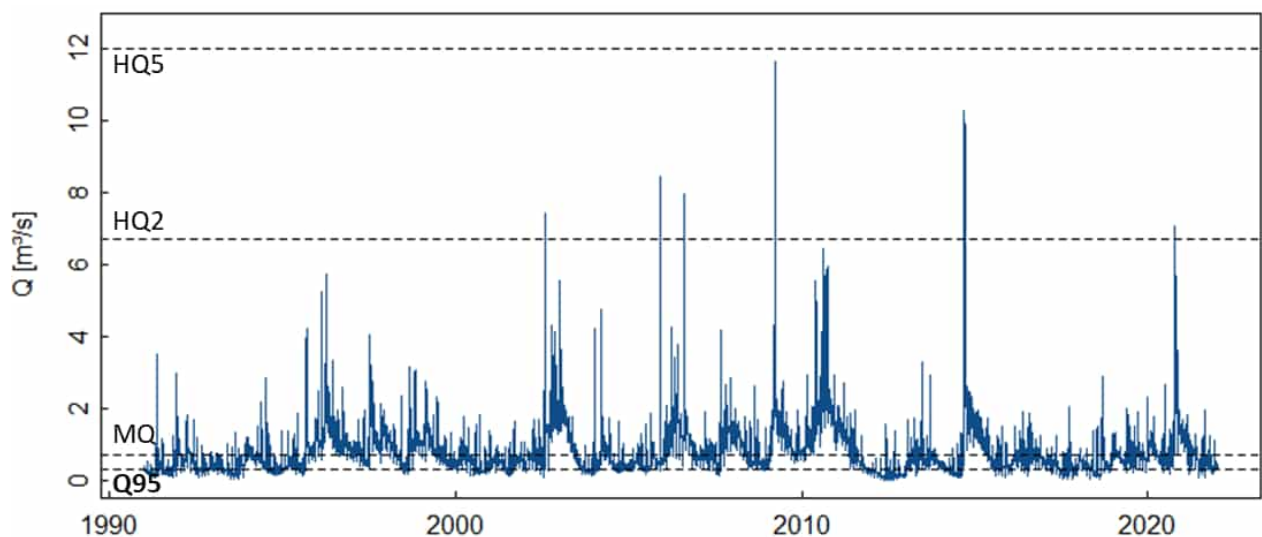


Abbildung 6: Abflussganglinie des simulierten Abflusses am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) des Referenz-Modells mit den hydrologischen Kennzahlen (1991-2021).

Tabelle 3: Hydrologische Kennzahlen am Pegel *Niederabsdorf* (Zaya-EZG) und *Angern a.d. March* (March Teil-EZG) (Amt der NÖ Landesregierung, 2025; BMLUK, 2015), $Q95_{REF}$ ist der berechnete Q95 Wert am Pegel *Niederabsdorf* auf Basis der simulierten Abflüsse des Referenz-Modells.

Pegel	MQ	HQ1	HQ2	HQ5	HQ100	Q95
	[m ³ /s]					
Niederabsdorf	0,7	5,0	6,7	12,0	42,0	0,3
Angern an der March	105,0	460,0	600,0	720,0	1400,0	-

3.4. Modellierte Wasserrückhaltemaßnahmen

Tabelle 4 stellt die Flächenanteile der einzelnen Maßnahmen dar. In Gruppe 1: Maßnahmen in der Landschaft wurden 0,4% der gesamten Fläche zu Gewässerrandstreifen mit Laubwald verändert. Die Wiedervernässung ehemaliger Feuchtgebiete, die Wiederherstellung von Überschwemmungsgebieten sowie die Begrünung von Abflusswegen erhöhten die Fläche an zusätzlichem Grünland um 3,0%. Die Änderung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsweise bezog sich auf 43,0% der Gesamtfläche des March Teil-Einzugsgebiets und umfasst somit ca. 2/3 der österreichischen Fläche. Die Waldänderung von Nadel- zu Laubwald belief sich auf eine Fläche von 6,9% des Untersuchungsgebiets. Insgesamt wurden 68 Biberdämme im österreichischen Teil des Untersuchungsgebiets implementiert. In Gruppe 2: Für die Maßnahmen innerhalb des Marchflusses wurden 3,1% der Fläche in Grünland umgewandelt und die March verlängerte sich um 7 km (19%) mit ca. 12 zusätzlichen Mäandern.

Tabelle 4: Flächenanteile der umgesetzten Maßnahmen von Gruppen 1 und 2 im Vergleich zum gesamten Untersuchungsgebiet.

Veränderte Landbedeckung/Landnutzung	Fläche [km ²]	Anteil zur Gesamtfläche [%]
Referenzprojekt		
March Teil-EZG (<i>Hohenau a.d. March</i> bis <i>Angern a.d. March</i>)	1.484,7	100
Einzugsgebietsfläche in Österreich	953,8	64,2
Marchflusslänge	37,0 [km]	100
Gruppe 1: Maßnahmen in der Landschaft		
1.1 Gewässerrandstreifen mit Laubwald	5,8	0,4
1.1 Grünland auf Abflusswege, Feuchtgebiete, HQ300	44,0	3,0
1.2 Agrarland mit Direktsaat mit Mulch, Winterbegrünung	637,9	43,0
1.2 Laubwald statt Nadelwälder (v.a. in SK)	102,5	6,9
1.3 Biberdämme	68 [-]	
Gruppe 2: Maßnahmen innerhalb des Marchfluss		
2.1 Grünland auf HQ300	45,4	3,1
2.1 Re-Mäander mit zusätzlichen 12 Mäander	44,0 [km]	119,0

3.5. Auswirkungen der Wasserrückhaltemaßnahmen auf die Hydrologie

Die durchschnittlichen Auswirkungen der Wasserrückhaltemaßnahmen der Gruppe 1 in den drei Teileinzugsgebieten (Oberlauf, Mittellauf und Unterlauf) sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Szenarien 1.1 bis 1.3 bauen im Modell für den Zeitraum 1991–2021 aufeinander auf.

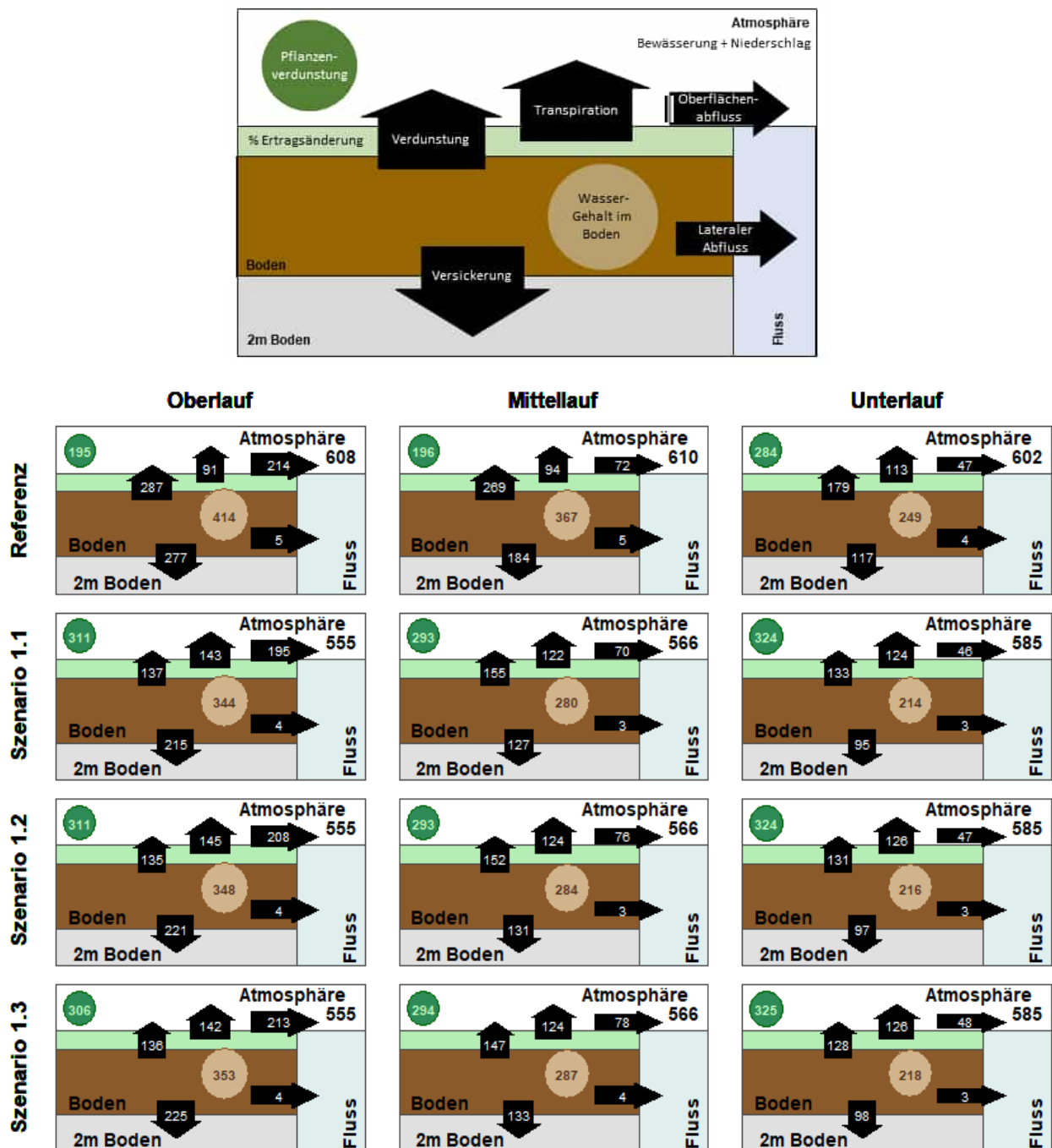


Abbildung 7: Schematische Darstellung der untersuchten Prozesse und die durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für alle LSU-Aue im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) Änderungen der Verdunstung

Im Szenario 1.1 (Änderung der Landbedeckung) tritt die stärkste Veränderung der Verdunstung im Vergleich zum Referenzmodell im Oberlauf des Untersuchungsgebiets auf der Flussebene (LSU-Aue, unabhängig von der Landbedeckung) auf (Abbildung 7). Die monatlichen Änderungen der aktuellen Evapotranspiration in Abbildung 8 verdeutlichen den Effekt des Laubwaldes: In den Monaten mit der größten Blattbedeckung (Juni bis September) werden die höchsten Unterschiede in der Evapotranspiration simuliert. Der Effekt zeigt sich insbesondere auf den LSU-Flächen, die in Laubwald umgewandelt wurden, und ist in allen Abschnitten des Einzugsgebiets nachweisbar.

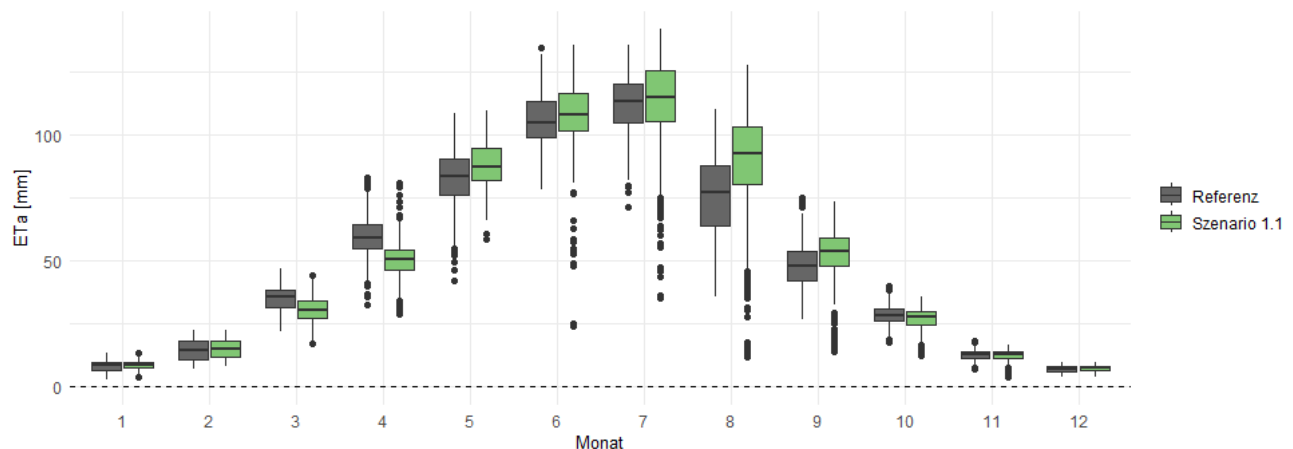


Abbildung 8: Monatliche Verdunstung [mm] des Referenzszenarios und der Änderung der Landbedeckung (1.1) in den LSU-Aue des Oberlaufs (Taschlbach EZG) im Zeitraum 1991-2021.

Ausgewachsene Laubbäume als Gewässerrandstreifen führten im Modell zu erhöhtem Wasserverbrauch durch Transpiration, insbesondere im August und September. Im Modell wurde angenommen, dass die Bäume eine Biomasse von 100 t/ha, eine LAI von 5 und eine Höhe von 6 m aufweisen. Diese Modellparameter entsprechen einem normalen bis dichten Waldbestand, was für Gewässerrandstreifen eine relativ hohe Dichte darstellt. Offen bleibt die Frage, in welchem Maße kleinere Bäume bzw. weniger dichte Laubwälder den Wasserhaushalt beeinflussen. Unstrittig ist, dass Bäume durch ihre Wirkung auf Infiltration, Beschattung und Biodiversität positive Effekte auf das Ökosystem haben. Je nach Baumart und Vegetationsstruktur unterscheiden sich jedoch die hydrologischen Reaktionen, die in dieser Studie nicht näher untersucht wurden.

3.5.1. Änderungen des Bodenwassergehalts

Aus der Abbildung 7 geht hervor, dass im Szenario 1.1 im Vergleich zum Referenzmodell eine Verringerung der 2m-Bodenfeuchte (hellbraune Kreise) auftritt. Besonders deutlich wird dies in den Ober- und Mittelläufen, wo im Modell zahlreiche Laubwälder als Uferstreifen implementiert wurden.

Eine Gesamtbetrachtung der monatlichen durchschnittlichen Bodenfeuchte im Zaya-EZG für den Zeitraum 1991–2021 ergibt, dass die Maßnahmen zur Änderung der Landbedeckung in allen Monaten

zu einer Abnahme führten, wobei die stärkste Abnahme in den Sommermonaten erfolgte (Daten nicht dargestellt). Die starke Abnahme konnte auf die Maßnahme Gewässerrandstreifen durch Laubwälder sowie auf den erhöhten Wasserverbrauch von Wäldern, der auch in den Sommermonaten vorliegt, zurückgeführt werden. Dies lag an der erhöhten Transpiration der Laubwälder und Grünland-Flächen im Vergleich zu Agrarland vor allem in den Trockenzeiten und ist in der Literatur auch beschrieben (Verstraeten et al., 2005; Fohrer et al., 2001). Die begrünten Abflusswege wiesen nur einen schwachen Einfluss auf die Verringerung des Bodenwassergehalts auf.

Im Verhältnis zur Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) wurde bei der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) eine Zunahme des Bodenwassergehalts verzeichnet (s. Kapitel 3.5.2.3.). Diese Zunahme ist sowohl bei der gesamten Betrachtung der Flächen als auch bei der separaten Betrachtung der LSU-Hanglage erkennbar.

Die Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) hat nur einen Einfluss auf die Ufer des Fließgewässers und auf der Fläche innerhalb des Fließgewässers. Daher ist bei der Betrachtung der LSU-Hanglage keine Änderung der Bodenfeuchte im Vergleich zum Szenario 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung feststellbar (Abbildung 10 & 11). In der Gesamtbetrachtung zeigt sich eine Zunahme des Bodenwassergehalts (Daten nicht dargestellt). Die folgenden Kapitel enthalten Einzelheiten zu diesen Ergebnissen.

2.5.1.1. Auswirkungen von Veränderungen der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen

Die Maßnahmen des Szenarios 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung (unter Berücksichtigung, dass die Änderung der Landbedeckung auch in diesem Szenario implementiert ist) führten zu einer positiven Entwicklung der Ernteerträge im Untersuchungsgebiet. Im gesamten March-Teileinzugsgebiet konnte eine mittlere Ertragszunahme nachgewiesen werden (Tabelle 5). Durch die Maßnahmen der Direktsaat und der Winterbegrünung der Sommerkulturen konnte bei allen Kulturarten - außer bei der Zuckerrübe - eine Ertragssteigerung simuliert werden. Der flächenmäßig dominierende Winterweizen verzeichnete die stärkste Zunahme mit +7,9%. Die Ertragssteigerung hängt mit dem höheren Bodenwassergehalt zusammen. Auf den Anbauflächen der betrachteten Feldfrüchte zeigte sich im gesamten Untersuchungsgebiet (Oberlauf, Mittellauf und Unterlauf) in 0–2 m Bodentiefe eine durchschnittliche Zunahme des Bodenwassergehalts um rund 10 mm gegenüber dem Referenzmodell (Tabelle 6). Direktsaat mit Pflanzenresten und Winterbegrünung erhöhen im Modell den Wassergehalt des Bodens, wie zahlreiche Studien auch belegen (Basche et al., 2016; Yang et al., 2018), was zur Ertragssteigerung beitragen kann (Bescansa et al., 2006).

Tabelle 5: Prozentuale Änderungen der Erträge von den Szenarien Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) verglichen zum Referenz-Modell von 1991-2021 und dem gesamten Untersuchungsgebiet (March Teil-EZG).

Feldfrüchte	Anteil der Erträge zu den Referenzwerten [%] für den Unterlauf (March Teil-EZG)			
	Referenz-Modell	Szenario 1.1 +Landbedeckung	Szenario 1.2 +Landbedeckung +Landbewirtschaftung	Szenario 1.3 +Landbedeckung +Landbewirtschaftung +Biberdämme
Gerste	100	+0,1	+3,3	+3,3
Silomais	100	+0,3	+2,1	+2,1
Zuckerrübe	100	+0,0	-2,2	-2,2
Sojabohne	100	+0,0	+2,2	+2,2
Sonnenblume	100	+0,2	+2,0	+2,0
Winterweizen	100	+0,1	+7,9	+7,9

Tabelle 6: Durchschnittlicher Bodenwassergehalt der Feldfrüchte (Gerste, Silomais, Zuckerrübe, Sojabohne, Sonnenblume, Winterweizen) von 1991-2021 im Referenz-Modell und im Szenario 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung.

Einzugsgebiet	Ø Bodenwassergehalt bei Feldfrüchten [mm/2 m]	
	Referenz-Modell	Landbewirtschaftung (1.2)
Oberlauf (Taschlbach EZG)	231	241
Mittellauf (Zaya EZG)	224	236
Unterlauf (March Teil-EZG)	213	224

2.5.1.2. Durchschnittliche Wasserbilanz für Winterweizen- und Silomais-Flächen

Der simulierte Wasserhaushalt der Kulturarten konnte durch die Analyse der Flächen - z.B. einer Winterkultur (Winterweizen) und einer Sommerkultur (Silomais) – untersucht werden. Dabei konnten die Veränderungen der hydrologischen Komponenten im Zeitraum 1991–2021 ermittelt werden. Bei dem Anbau von Sommerkulturen wurde Direktsaat mit Mulch und Winterbegrünung im Modell umgesetzt, während bei Winterkulturen nur Direktsaat mit Mulch implementiert wurde.

Im Vergleich zum Referenzmodell führte die geänderte Landbewirtschaftung zu einer höheren Infiltration bzw. Versickerung in den Boden. Dieser höhere Bodenwassergehalt führte zu einer Zunahme der Pflanzentranspiration (Abbildung 7). Bei Winterweizen (Abbildung 9) und Silomais (Abbildung 10) zeigte sich ein Anstieg des durchschnittlichen Bodenwassergehalts, der mit einer erhöhten Transpiration verbunden war. Zudem weist Silomais als C4-Pflanze eine höhere Wassernutzungseffizienz als C3-Pflanzen auf, wodurch die Biomasseproduktion und damit auch die absolute Transpiration stärker zunimmt.

Eine verringerte Bodenverdunstung (und eine erhöhte Bodenfeuchte) ist im Modell auf die Mulchdecke aus Pflanzenrückständen sowie die Bodenbedeckung durch Winterbegrünung

zurückzuführen. Zudem wird die Wasserinfiltration durch eine Bodenbedeckung erhöht. Dies wird in der Literatur bestätigt (Hovis et al., 2021; Yang et al., 2018).

Die Unterschiede in der Wasserbilanz waren in den Ober-, Mittel- und Unterlauf ähnlich, wobei sie im Oberlauf am stärksten ausgeprägt waren. Durch die Implementierung von Biberdämmen war keine Änderung im Vergleich zur Änderung der Landbewirtschaftung erkennbar und wies somit keinen Einfluss auf die Feldfrüchte auf. Die Wasserbilanzen weiterer Feldfrüchte sind im Anhang V dokumentiert.

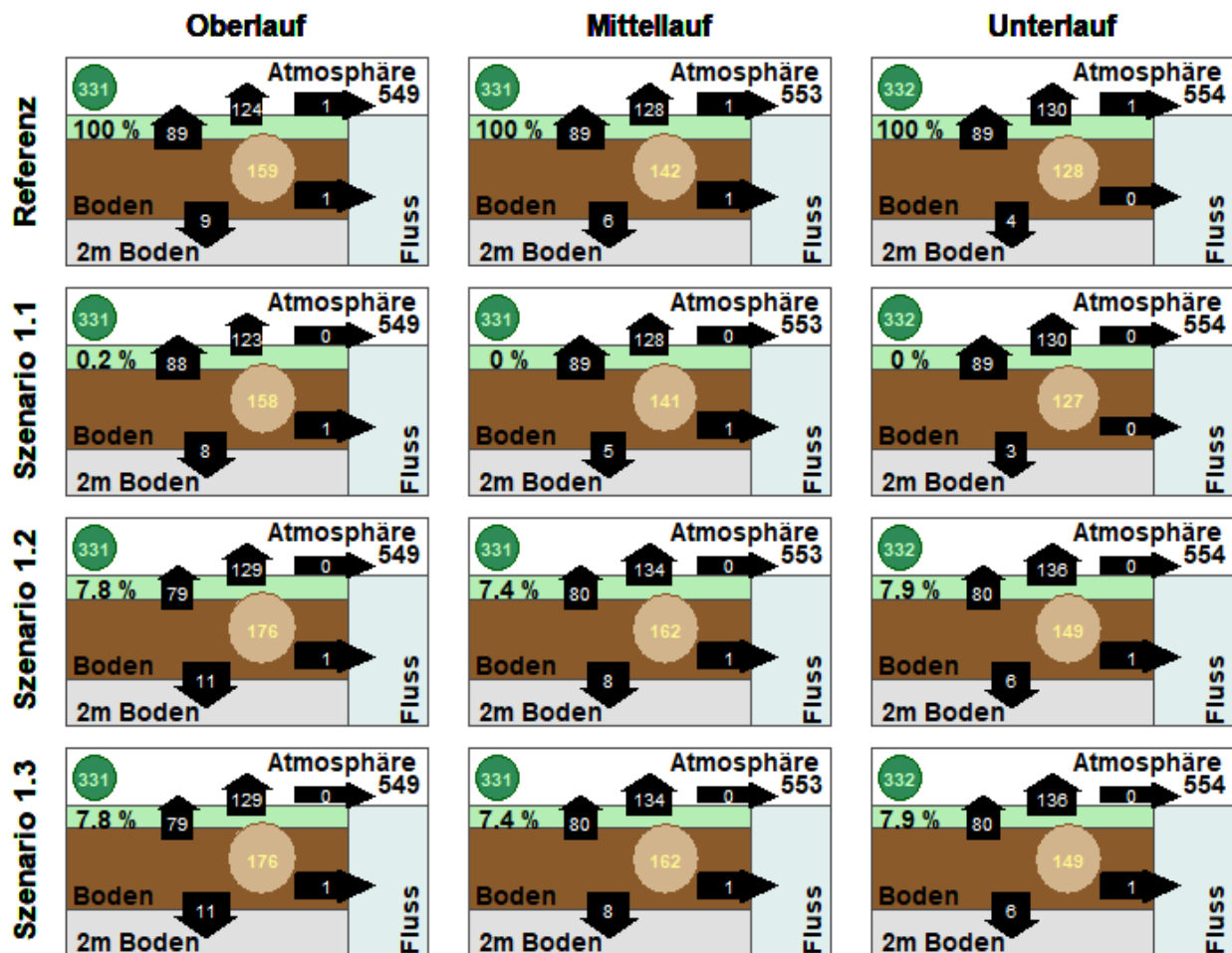


Abbildung 9: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für Winterweizen im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Wert oben rechts: Niederschlag + Bewässerung, Wert links: prozentuale Ertrags-Änderung im Vergleich zu Referenz, Wert im grünen Kreis: Pflanzenverdunstung, Wert im braunen Kreis: Bodenwassergehalt 0-2m, Pfeil links nach oben: Bodenverdunstung, Pfeil rechts nach oben: Pflanzentranspiration, Pfeil oben nach rechts: Oberflächenabfluss, Pfeil unten nach rechts: lateraler Abfluss, Pfeil nach unten: Versickerung in tiefere Bodenschichten). Alle Angaben, mit Ausnahme der Erträge, sind absolute Werte in Millimetern. Die Erträge sind prozentuale Änderungen im Vergleich zum Referenz-Modell.

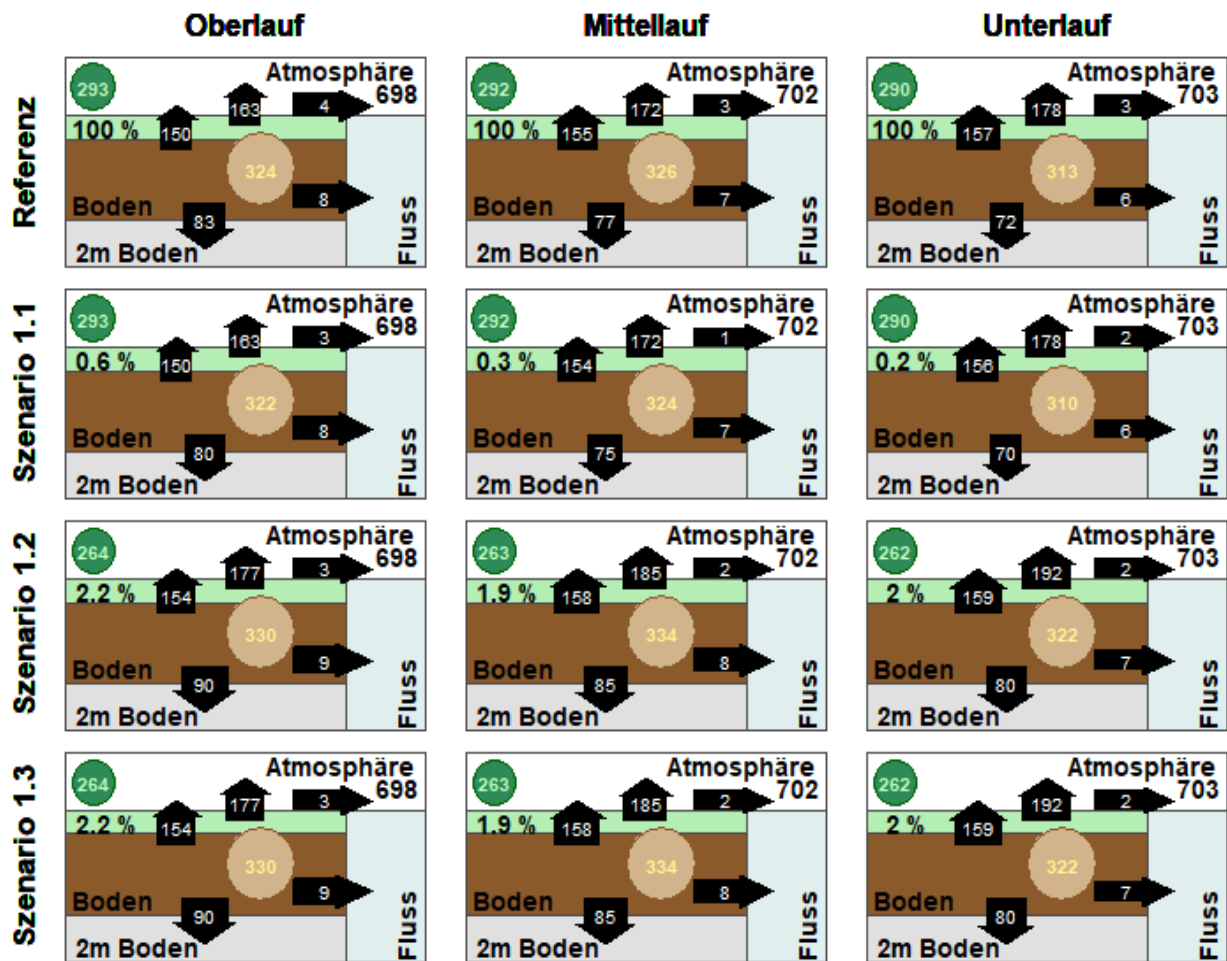


Abbildung 10: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für Silomais im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Wert oben rechts: Niederschlag + Bewässerung, Wert links: prozentuale Ertrags-Änderung im Vergleich zu Referenz, Wert im grünen Kreis: Pflanzenverdunstung, Wert im braunen Kreis: Bodenwassergehalt 0-2m, Pfeil links nach oben: Bodenverdunstung, Pfeil rechts nach oben: Pflanzentranspiration, Pfeil oben nach rechts: Oberflächenabfluss, Pfeil unten nach rechts: lateraler Abfluss, Pfeil nach unten: Versickerung in tiefere Bodenschichten). Alle Angaben, mit Ausnahme der Erträge, sind absolute Werte in Millimetern. Die Erträge sind prozentuale Änderungen im Vergleich zum Referenz-Modell.

2.5.1.3. Eine Untersuchung der Änderungen der Bodenfeuchte im Jahr 2017

Das Jahr 2017 war ein außergewöhnlich trockenes Jahr mit historisch niedrigen mittleren Jahresabflüssen an der March und an der Thaya (Stanzel et al., 2022a). In dem Referenz-Modell wurde von Juni bis Dezember 2017 in jedem Monat ein Niedrigwasserereignis simuliert.

Die Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die monatlichen durchschnittlichen Bodenwassergehälte in der Bodenschicht 0-2 m für alle Flächen in das March Teil-EZG (Unterlauf). Abbildung 11 stellt die Unterschiede zwischen den Referenz-Modell und Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) dar, während Abbildung 12 die Unterschiede zwischen dem Referenz-Modell und der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) darstellt. Aufgrund der detaillierten modellierten landwirtschaftlichen Flächen wies die österreichische Seite größere Unterschiede auf.

Die LSU-Auenflächen sind in den Abbildungen schwer zu erkennen, da sie nur geringe Flächen entlang der Fließgewässer einnehmen. In den Karten bezieht sich die farbliche Darstellung der Ergebnisse vor allem auf die LSU-Hanglagen. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der LSU-Aue und LSU-Hanglage und verdeutlicht, dass im Szenario 1.1 (Änderung der Landbedeckung) die Maßnahme Gewässerrandstreifen vor allem in der LSU-Aue umgesetzt wird. Da der Großteil der Überschwemmungs- und Feuchtgebietsflächen innerhalb der LSU-Aue liegt, wird die LSU-Hanglage in erster Linie durch die Maßnahme begrünte Abflusswege beeinflusst.

Die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) zeigt eine Verringerung der Bodenfeuchte (durchschnittliche Verringerung von 3,4% im Untersuchungsgebiet), was auf die höhere Transpiration von Grünland im Vergleich zu Agrarland zurückzuführen ist und wird auch von der Literatur bestätigt (Thomas et al., 2011). Im Gegensatz dazu zeigte die Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) im Vergleich zur Änderung der Landbedeckung (Abbildung 12) eine Zunahme der Bodenfeuchte (durchschnittliche Zunahme von 2,2% im March Teil-EZG in den LSU-Hanglagen). Maßnahmen wie Direktsaat mit Mulch und Winterbegrünung wirken sich positiv auf die Bodenfeuchte aus, was sowohl in Kapitel 3.5.2 dargestellt als auch in der Literatur belegt ist (Basche et al., 2016; Yang et al., 2018). Hierbei ist zu beachten, dass in diesem Szenario (1.2) auch die Landbedeckungsänderung einfließt und der positive Effekt, der auf die Bewirtschaftungsform zurückzuführen ist, somit als weitaus größer anzusehen ist.

Durch die Änderungen der Landbedeckung (Szenario 1.1) traten die größten Unterschiede im Bodenwassergehalt in den Monaten Januar bis März auf (Abbildung 11). In diesem Zeitraum zeigte das Szenario 1.1 geringere Bodenwassergehalte als das Referenz-Szenario. Dies ist auf die anhaltende Transpiration der Vegetation im Vergleich zum kahlen Agrarboden im Referenz-Modell zurückzuführen. Bei der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) wiesen die meisten LSU-Hanglagen eine Zunahme der Bodenfeuchte auf. Dies ist auf die Maßnahmen wie das Mulchen zurückzuführen, da dadurch die Evaporationsverluste minimiert werden (Abbildung 12). Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass der geringere Bodenwassergehalt im Vergleich zum Referenz-Modell auch auf die höhere Wasseraufnahme der Vegetation zurückzuführen ist und entsprechende höhere Transpiration. Dies zeigt sich in den höheren Erträgen, die in diesem Szenario erzielt wurden (s. Kapitel 3.5.2). Die Prozesse der verringerten Bodenverdunstung und der höheren Wasseraufnahme durch Pflanzen gehen Hand in Hand.

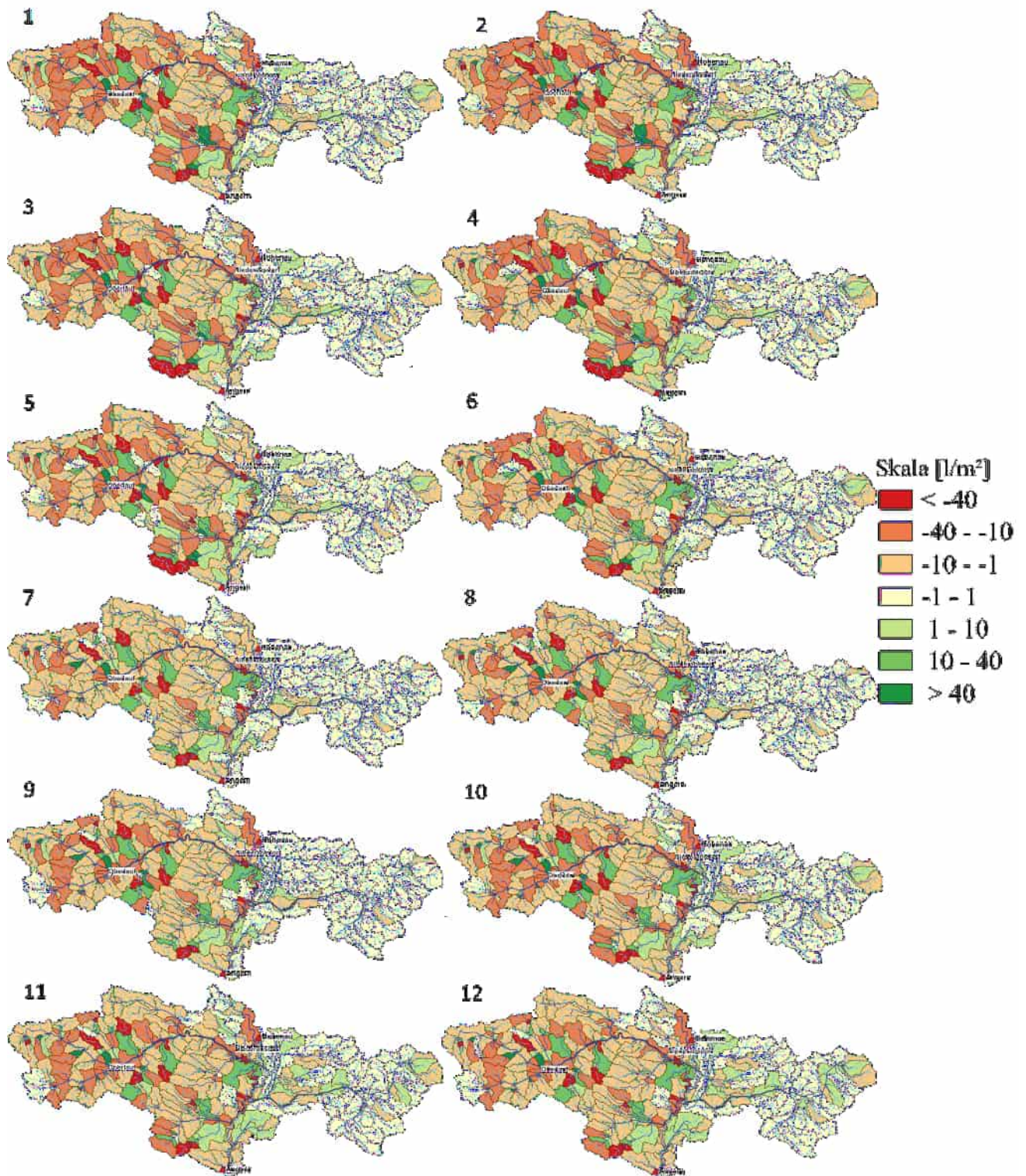


Abbildung 11: Monatliche Unterschiede der durchschnittlichen Bodenwassergehalte (0–2 m) in den LSU-Flächen zwischen dem Referenzmodell und Szenario 1.1 (Landbedeckungsänderung) für das Jahr 2017 (rot = geringerer Bodenwassergehalt im Szenario 1.1; grün = höherer Bodenwassergehalt im Szenario 1.1)

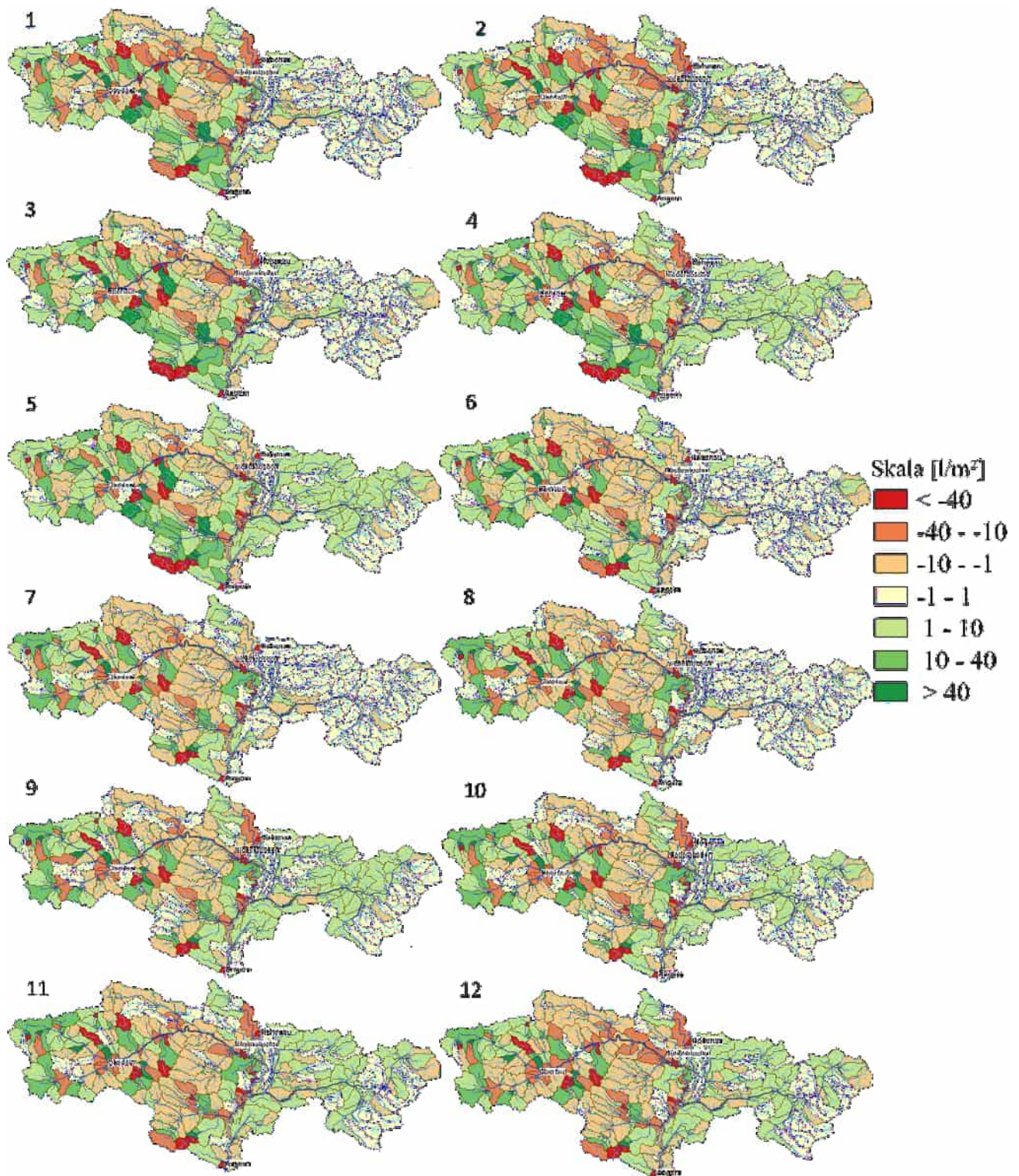


Abbildung 12: Monatliche Unterschiede der durchschnittlichen Bodenwassergehälte (0-2 m) in den LSU-Flächen zwischen dem Referenz-Modell und Szenario 1.2 (Änderung der Landbewirtschaftung) für das Jahr 2017 (rot: geringerer Bodenwassergehalt im Szenario 1.2, grün: höherer Bodenwassergehalt im Szenario 1.2).

In der Slowakei zeigen sich im Vergleich zum Referenz-Modell höhere Bodenwassergehalte in den Monaten April, Mai sowie September bis Dezember, was auf die großflächige Umwandlung von Nadelwäldern in Laubwälder zurückzuführen ist (Abbildung 12).

3.6. Niedrigwasserperioden

Insgesamt ist der Mittellauf (das Zaya-EZG) von geringen Abflüssen mit wenigen Hochwasserereignissen in der simulierten Periode von 1991-2021 geprägt (Abbildung 6). Der mittlere Abfluss am Pegel *Niederabsdorf* (Zaya-EZG) liegt bei $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und der Q95 bei $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelle 3). Als Vergleich ist der mittlere Abfluss der March am Pegeln *Angern an der March* $105,0 \text{ m}^2/\text{s}$. Der berechnete Q95-Wert auf Basis der simulierten Abflüsse des Referenz-Modells im Zeitraum 1991-2021 ist das $Q95_{\text{REF}}$ und liegt bei $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Wert wird verwendet, um Niedrigwasserereignisse zu identifizieren.

Ein Niedrigwasserereignis startet, sobald ein durchschnittlicher Tagesabflusswert unterhalb des $Q95_{\text{REF}}$ ($0,16 \text{ m}^3/\text{s}$) liegt. Jedes Ereignis wird über einen Zeitraum von sieben Tagen analysiert. Nach Ablauf dieser sieben Tage kann ein neues Ereignis definiert werden. Die Quantifizierung der Ereignisse erfolgt anhand der Kennwerte NQ7 und $Q_{\text{min_t}}$. Der NQ7 beschreibt die Summe der mittleren Tagesabflüsse über sieben aufeinanderfolgende Tage im Zeitraum des jeweiligen Ereignisses. Das $Q_{\text{min_t}}$ bezeichnet den Tag, an dem der minimale Abfluss (Q_{min}) innerhalb dieses Zeitraums auftrat.

3.6.1. Veränderungen der Niedrigwasserereignisse am Pegel *Niederabsdorf*

Der Pegel Niederabsdorf entwässert das Zaya-EZG und ist hydrologisch dem Mittellauf zuzuordnen. Für die Analyse der Niedrigwasserereignisse von 1991 bis 2021 wurden die monatlichen Unterschiede der NQ7-Werte zwischen den Gruppe-1-Maßnahmen in der Landschaft und dem Referenz-Modell sowie die zeitliche Verschiebung der minimalen Abflüsse (Q_{min}) herangezogen. Es wurden 103 Ereignisse in den Jahren 1991-2021 verzeichnet und der Großteil der Ereignisse (60) lag in den Sommermonaten (Juni – September).

Im Szenario 1.1 - Änderung der Landbedeckung lag der NQ7 in allen Monaten signifikant unter den Werten des Referenz-Modells (Abbildung 13), was bereits für das Jahr 2017 nachgewiesen werden konnte. Die Mediane des NQ7 der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) und der Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) lagen mit einzelnen Ausnahmen (April und August) über den NQ7 des Referenz-Modells. Bei der Betrachtung des NQ7 zwischen den Szenarien waren bei der Änderung der Landbewirtschaftung höhere prozentuale Werte verzeichnet als bei der Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1). Diese Beobachtung ist in den Monaten Juni bis Oktober stark erkennbar. Bei dem Vergleich der Implementierung der Biberdämme zu der Änderung der Landbewirtschaftung waren keine klaren Tendenzen feststellbar, nur dass die Werte sich in einem

ähnlichen Bereich befinden. Bei der Betrachtung der absoluten Werte wurden Änderungen von $\pm 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ verzeichnet und die absoluten NQ7 Mediane des Referenz-Modells lagen zwischen $1,0$ und $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Es ist wiederum zu berücksichtigen, dass die Szenarien 1.1 bis 1.3 nacheinander in den Modellen umgesetzt werden und aufeinander aufbauen.

Die Ergebnisse der Änderung der Landbedeckung (1.1) unterstreichen wiederum die höhere Transpiration von Wäldern vor allem in Trockenzeiten. Diese fördert das Wachstum, verringert aber auch die lokale Wasserverfügbarkeit und somit die Niedrigwasserabflüsse (Fohrer et al., 2001).

Bei der Änderung der Landbewirtschaftung, zu Direktsaat mit Ernterückständen und Winterbegrünung, wurden höhere NQ7 im Vergleich zum Referenz-Modells festgestellt. Eine Bodenbedeckung kann die Wasserinfiltration erhöhen und dadurch das Bodenwasser anreichern. Dies kann zu einer steigenden Versickerung in tiefere Bodenschichten führen, wie auch in der Wasserbilanz des Winterweizens und Silomais ersichtlich (Kapitel 3.5.2.2.). Wodurch höheren lateralen Abflüssen entstehen können, welche die Abflüsse bei Niedrigwasser anheben können.

In keinem der drei Szenarien (Änderung der Landbedeckung, Änderung der Landbewirtschaftung, Implementierung von Biberdämmen) konnte eine eindeutige zeitliche Verschiebung des minimalen Abflusses nachgewiesen werden (Abbildung 14), jedoch wurden in einzelnen Monaten (z. B. März und November) Verzögerungen um 1–3 Tage beobachtet. Im Szenario 1.3 (Implementierung Biberdämme) war in fünf von zwölf Monaten eine Tendenz zu späteren Abflussscheitel-Zeitpunkten feststellbar

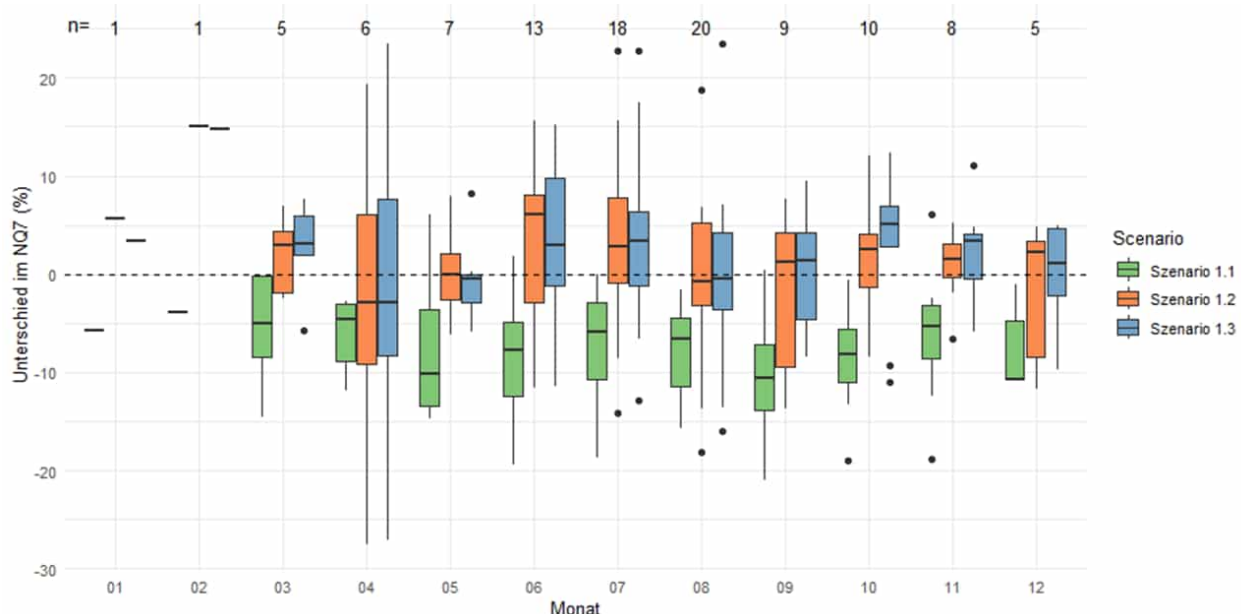


Abbildung 13: Unterschiede im NQ7 am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) im monatlichen Vergleich von den Szenarien Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung

von Biberdämmen (1.3) zum Referenz-Modell, n: Anzahl der Ereignisse (0: NQ7 des Szenarios = NQ7 des Referenz-Modells).

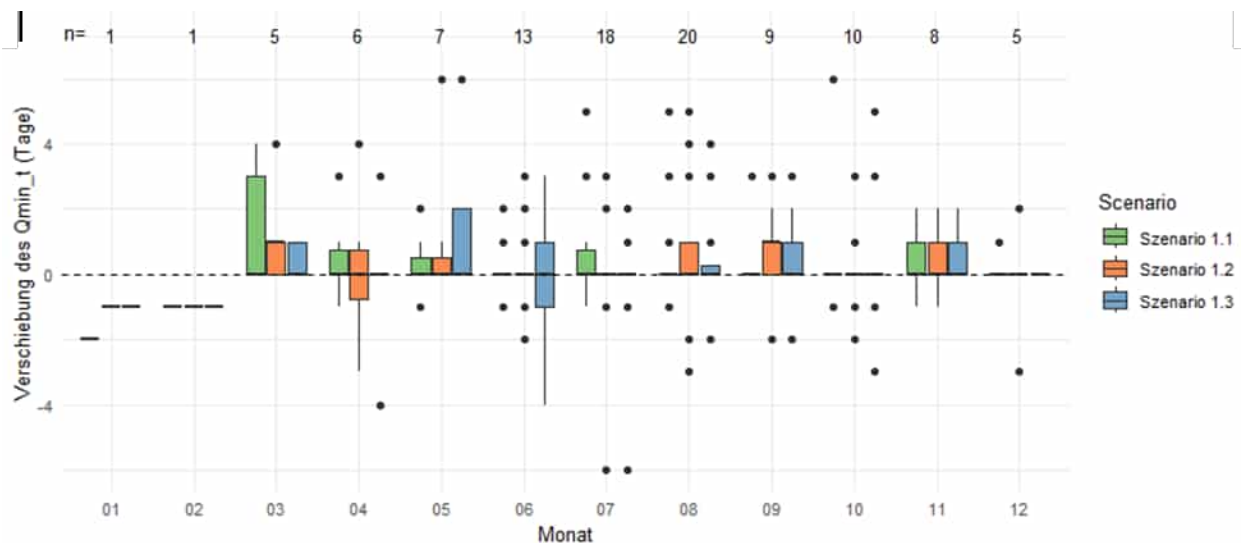


Abbildung 14: Zeitliche Verschiebung des Qmin am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) im monatlichen Vergleich von den Szenarien Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) zum Referenz-Modell, n: Anzahl der Ereignisse (0: Qmin_t des Szenarios = Qmin_t des Referenz-Modells)

3.6.2. Eine Untersuchung der Niedrigwasserereignisse im Jahr 2017

Das Jahr 2017 war ein sehr trockenes Jahr, welches zu Niedrigwasserabflüssen in der March als auch in der Thaya führte (Stanzel et al., 2022a). Im Referenz-Modell wurden 12 Niedrigwasserereignisse im Jahr 2017 verzeichnet, bei welchen der Abfluss die $Q_{95_{REF}}$ Marke unterschritt. Bei sieben Ereignissen wurde die Abflussganglinie genauer betrachtet und der Start-Zeitpunkt wurde auf den ersten Tag mit negativer Steigung verschoben (Abbildung 15). Diese lagen in den Monaten Juni bis Dezember 2017.

Am stärksten beeinflusst war der Niedrigwasserabfluss im Oberlauf durch die Wasserrückhaltmaßnahmen (Tabelle 7). Bei der Änderung der Landbedeckung waren überwiegend negative Veränderungen des NQ7 erkennbar. Der geringere Abfluss ist auf die Bodenwasseraufnahme der Bäume zurückzuführen (siehe Abschnitt 3.5.2.). Durch die Änderung der Landbewirtschaftung traten mehr positive Tendenzen beim Niedrigwasser-Abfluss auf. Im Ereignis 4 wurde eine maximale Zunahme des NQ7 simuliert, um ca. 40 % (ca. $+0,06 \text{ m}^3/\text{s}$). Obwohl auch bei NQ7 negative Veränderungen auftraten, führten die Veränderungen in der Landbewirtschaftung im Vergleich zu der veränderten Landbedeckung in Szenario 1.1 nur im Ereignis Nr. 3 (im August) zu einem noch stärkeren Rückgang des Abflusses. Bei den übrigen Ereignissen war durch den Vergleich zwischen der Änderung der Landbedeckung und der Änderung der Landbewirtschaftung eine Zunahme des Abflusses erkennbar. Im Vergleich zur Änderung der Landbewirtschaftung wurde,

durch die Implementierung von Biberdämmen, der Abfluss in einigen Fällen verringert (z. B. Ereignis 4 im September) und in anderen Fällen erhöht (z. B. Ereignis 7 im Dezember). In den meisten Ereignissen waren jedoch nur geringe Änderungen durch die Implementierung von Biberdämmen erkennbar.

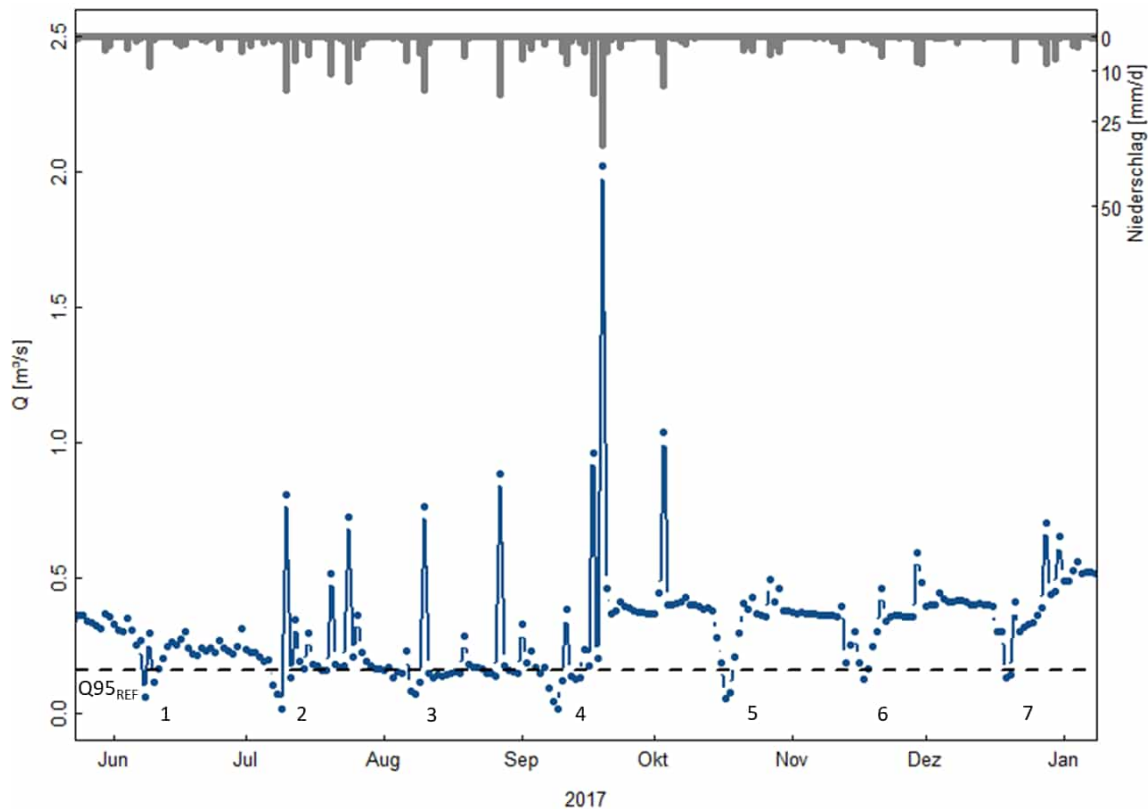


Abbildung 15: Abflussganglinie des Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) im Referenz-Modell von Juni 2017 bis Januar 2018 mit den (sieben) Niedrigwasser-Ereignissen, $Q_{95_REF} = 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hinsichtlich der Verschiebung des minimalen Abflusses zeigten die Änderungen der Landbedeckung entweder eine Verschiebung zu einem früheren Zeitpunkt oder keine Verschiebung, mit Ausnahme eines Ereignisses im Juni (Nr. 1). Bei der Änderung der Landbewirtschaftung wurde der minimale Abfluss in drei Ereignissen um bis zu drei Tage verschoben, während in drei weiteren Ereignissen keine Verschiebung feststellbar war. In einem Ereignis wurde eine Verschiebung zu einem früheren Zeitpunkt beobachtet (Nr. 5), wie auch im Szenario Änderung der Landbedeckung. Die Implementierung von Biberdämmen zeigte keinen Einfluss auf die Verschiebung des minimalen Abflusses.

Die Ergebnisse im Mittellauf für das Zaya-EZG (Pegel *Niederabsdorf*) ähnelten denen im Oberlauf (Tabelle 7). Die Änderungen der Landbedeckung führte in allen sieben Ereignissen zu einer Verringerung der NQ7. Im Vergleich zur Änderung der Landbedeckung zeigten die Änderungen der Landbewirtschaftung überwiegend steigende Tendenzen, mit Ausnahme der Monate August und September (Nr. 3 und 4). Im Oberlauf wurde im September die größte Zunahme des Abflusses

verzeichnet, während der Mittellauf in diesem Monat eine der beiden Abnahmen zeigte. Die Implementierung von Biberdämmen zeigte gemischte Ergebnisse mit sowohl Zunahmen als auch Abnahmen des Abflusses. Durch die Maßnahmen war jedoch in jedem Ereignis eine Veränderung der NQ7 erkennbar.

Eine geringe Änderung des Zeitpunkts des minimalen Abflusses wurde im gesamten Mittellauf festgestellt. Im Szenario Änderung der Landbedeckung wurde nur im Dezember eine positive Änderung von +1 Tag beobachtet (Nr. 7). Im Szenario Änderung der Landbewirtschaftung wurden drei Änderungen festgestellt, darunter zwei Verschiebungen zu einem früheren Zeitpunkt. Im Szenario Implementierung von Biberdämmen wurde eine Verschiebung von +2 Tagen im Ereignis 1 und eine Verschiebung von -1 Tag im Ereignis 2 festgestellt.

Im Jahr 2017 waren im Unterlauf kaum Unterschiede zwischen den Szenarien und dem Referenz-Modell feststellbar (Tabelle 8), was an dem um ein Vielfaches größeren Marcheinzugsgebiet außerhalb des Untersuchungsgebietes liegt.

Es ist erneut wichtig zu beachten, dass das Aufforsten von größeren Laubbäumen mit ca. 100 t/ha Biomasse in semi-ariden Gebieten tendenziell negative Auswirkungen auf den Abfluss von Fließgewässern hat, da die Transpirationsprozesse lokal zunehmen (Ellison et al., 2012). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Szenarien 1.1 bis 1.3 nacheinander in den Modellen umgesetzt werden und aufeinander aufbauen.

Tabelle 7: Unterschiede im NQ7 und Qmin_t in den Niedrigwasserereignissen aus dem Jahr 2017 im Oberlauf und Mittellauf auf Basis des prozentuellen Unterschieds der einzelnen Ergebnisse zum Referenz-Modell (NQ7_{REF} = Summe der 7-tägigen mittleren Niedrigabflusswert des Referenz-Modells).

Niedrigwasserereignisse 2017								
Nr.	Event-Start	NQ7 _{REF} [m ³]	Verändertes NQ7 [%]			Verändertes Qmin_t [Tage]		
			Sze 1.1 Land- bedeckung	Sze 1.2 +Landbewirt- schaftung	Sze 1.3 +Biberdämme	Sze 1.1 Land- bedeckung	Sze 1.2 +Landbewirt- schaftung	Sze 1.3 +Biberdämme
Pegel „Oberlauf“ (Oberlauf)								
1	04.06	0,25	-8,9	14,4	14,4	1	3	3
2	03.07	0,16	-14,8	21,2	21,2	0	2	2
3	02.08	0,21	1,0	-6,6	-8,0	0	0	0
4	03.09	0,16	1,7	39,2	28,2	-2	1	1
5	14.10	0,26	-7,4	-4,1	-3,8	-1	-1	-1
6	15.11	0,33	-14,3	-13,6	-11,5	0	0	0
7	16.12	0,28	-5,5	3,1	3,8	-2	0	0
Pegel <i>Niederabsdorf</i> (Mittellauf)								
1	04.06	1,66	-6,7	-0,5	2,7	0	0	2
2	03.07	1,02	-12,3	-10,3	-16,1	0	-1	-1
3	02.08	1,00	-11,6	-19,9	-13,9	0	-3	0
4	03.09	0,88	-11,9	-13,5	-16,7	0	0	0
5	14.10	1,49	-9,9	-2,4	-4,4	0	0	0
6	15.11	1,80	-7,6	3,8	-1,0	0	1	0
7	16.12	2,00	-10,0	-7,4	-6,8	1	0	0

Tabelle 8: Unterschiede im NQ7 und Qmin_t in den Niedrigwasserereignissen aus dem Jahr 2017 im Unterlauf auf Basis des prozentuellen Unterschieds der einzelnen Ergebnisse zum Referenz-Modell (NQ7_{REF} = Summe der 7-tägigen mittleren Niedrigabflusswert des Referenz-Modells).

Niedrigwasserereignisse 2017											
Nr.	Event-Start	Qmin _{REF} [m³/s]	NQ7 _{REF} [m³]	Verändertes NQ7 [%]				Verändertes Qmin_t [Tage]			
				Sze 1.1 Land- bedeckung	Sze 1.2 +Landbewir- t-schaftung	Sze 1.3 +Biber- dämme	Sze 2 March- fluss	Sze 1.1 Land- bedeckung	Sze 1.2 +Landbewir- t-schaftung	Sze 1.3 +Biber- dämme	Sze 2 March- fluss
Pegel Angern a.d. March (Unterlauf)											
1	04.06	30.9	228,2	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0	0	0	0
2	03.07	21.1	150,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0	0	0	0
3	02.08	20.8	150,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0	0	0	1
4	03.09	19.5	149,3	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0	0	0	0
5	14.10	35.9	284,7	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0	0
6	15.11	57.3	488,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
7	16.12	57.6	476,4	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0	0	0	0

Das Ereignis Nr. 4 vom September 2017, wurde genauer untersucht, da im Oberlauf und Mittellauf bei der Änderung der Landbewirtschaftung unterschiedliche Tendenzen des NQ7 festgestellt wurden.

3.6.2.1. Detaillierte Analyse ausgewählter Niedrigwasserereignisse

Am 06.09.2017 wurde im Oberlauf ein geringer Niederschlag registriert, kurz vor dem minimalen Abfluss des Referenz-Modells (Abbildung 16). Durch die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) sank der Abfluss zunächst deutlich unter den Wert des Referenz-Modells, reagierte jedoch stark auf Niederschläge und milderte so den Abfluss des Referenzmodells. Durch die Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) wurde der Abfluss am Niederschlagstag für zwei Tage gehalten, bevor er mit zweitägiger Verzögerung auf ein Minimum fiel. Bei der Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) ähnelte der anfängliche Verlauf der Landbedeckungsmaßnahmen (Szenario 1.1), jedoch mit einer geringeren Spitze und höheren Werten zwischen dem 06. und 08.09. Am 09.09. folgte ein Rückgang wie durch die Landbewirtschaftungsmaßnahmen (Szenario 1.2), jedoch weniger stark, sodass kein so niedriges Niveau wie im Referenz-Modell erreicht wurde. Die Fläche des Oberlaufs (EZG Taschlbach) beträgt 7 % der insgesamt untersuchten Flächen.

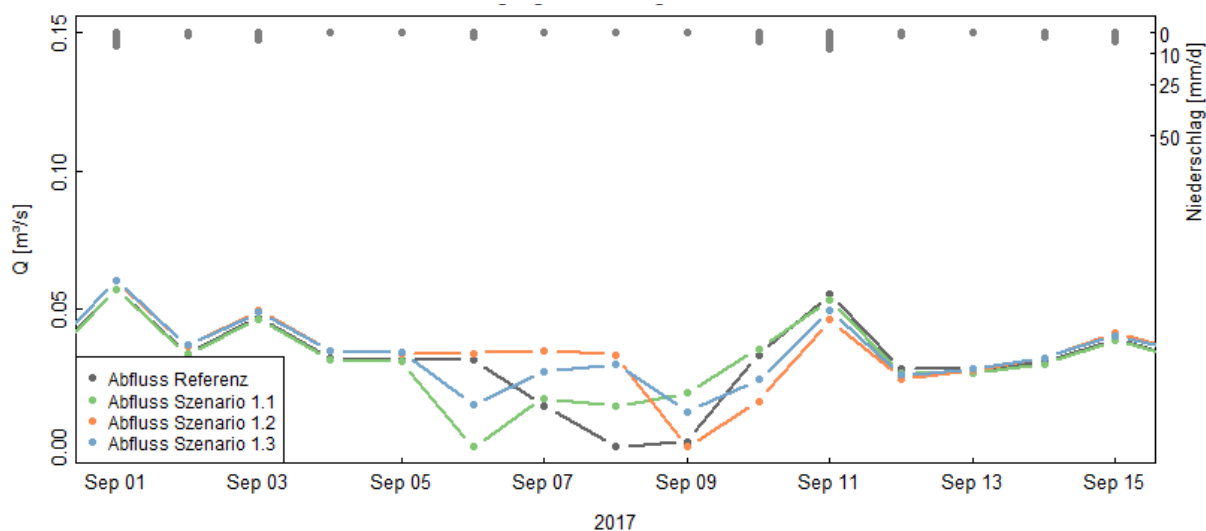


Abbildung 16: Abflussganglinie (Nr. 4) am Pegel „Oberlauf“ (Oberlauf) von 01.-15.09.2017 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

Im Mittellauf zeigte die Implementierung von Biberdämmen einen ähnlichen Verlauf wie im Oberlauf (Abbildung 17). Auch hier wurde durch die Maßnahmen zu keinem Zeitpunkt der niedrigste Abfluss des Referenz-Modells erreicht. Die Änderung der Landbedeckung bewirkte im Mittellauf eine geringere Änderung und verhielt sich ähnlich zum Referenz-Modell, jedoch mit etwas niedrigeren Abflusswerten an den meisten Tagen. Bei der Änderung der Landbewirtschaftung waren einige Schwankungen des Abflusses vor dem Ereignis erkennbar mit einer folgenden wieder Annäherung an die Abflussganglinie des Referenz-Modells. Somit wurde der minimale Abfluss am selben Tag und mit einem ähnlichen Abfluss erreicht.

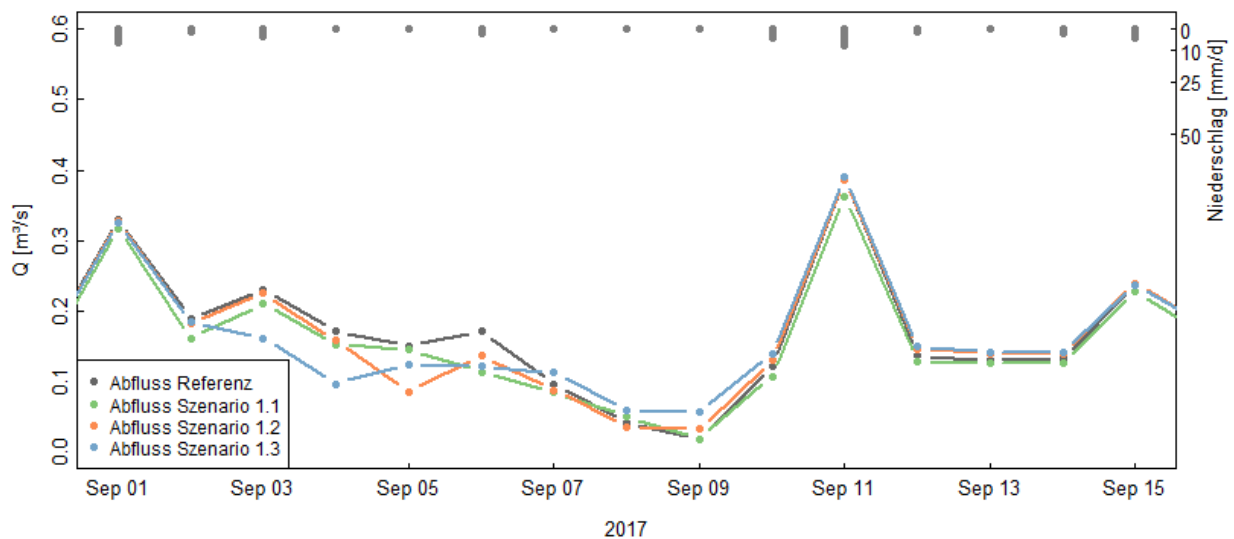


Abbildung 17: Abflussganglinie (Nr. 4) am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) von 01.-15.09.2017 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

Um die möglichen Auswirkungen der Maßnahmen in anderen Jahren und an anderen Ereignissen zu betrachten, wurden zwei weitere Ereignisse am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) dargestellt, September 1993 und Juli 2002. Die Fläche des Mittellaufs (EZG Zaya) beträgt 36 % der insgesamt untersuchten Flächen.

Im September 1993 war eine Verschiebung von +1 Tag bei der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) und Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) erkennbar (Abbildung 18). Zudem war ein geringer Anstieg des minimalen Abflusses durch die Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) ersichtlich.

Im Juli 2002 war eine Verschiebung von +2 Tagen und ein leichter Anstieg des minimalen Abflusses bei der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) und Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) feststellbar (Abbildung 19). Zudem dämpfte auch die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) den minimalen Abfluss ab.

Diese Verschiebungen um einige Tage, gekoppelt mit einem erhöhten Abfluss, können dabei helfen, die Periode bis zum nächsten Regenfall zu überbrücken.

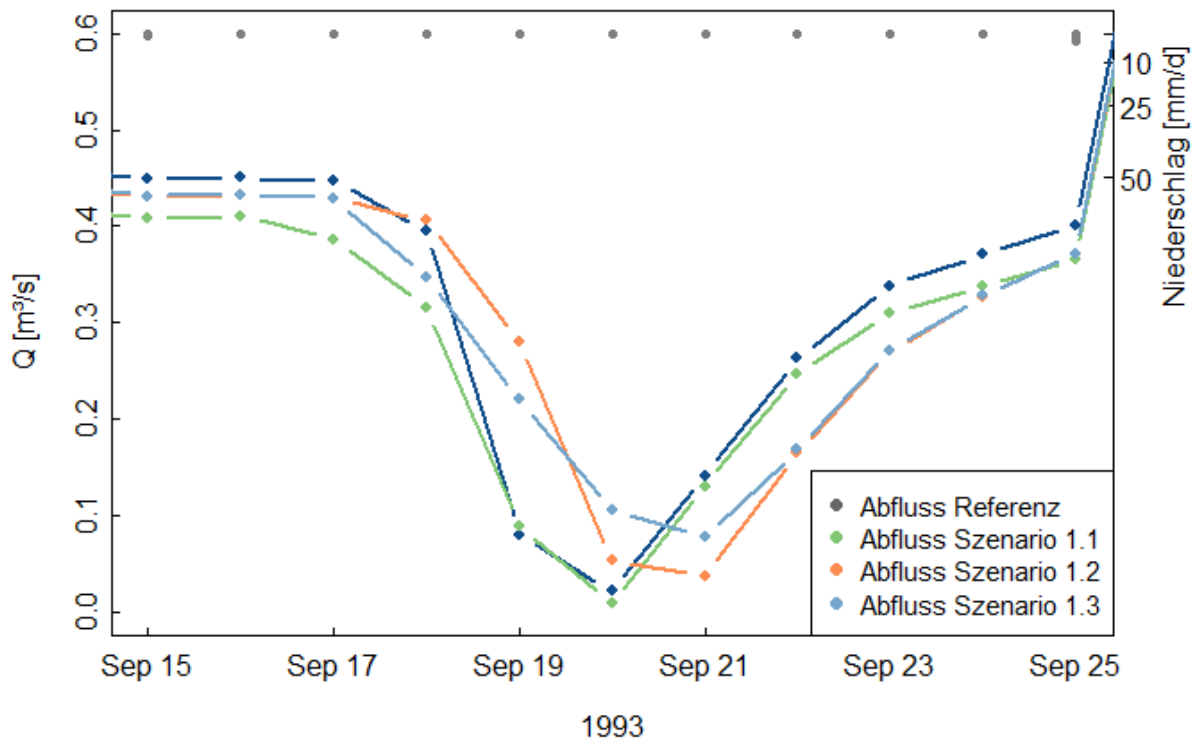


Abbildung 18: Abflussganglinie am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) von 15.-25.09.1993 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

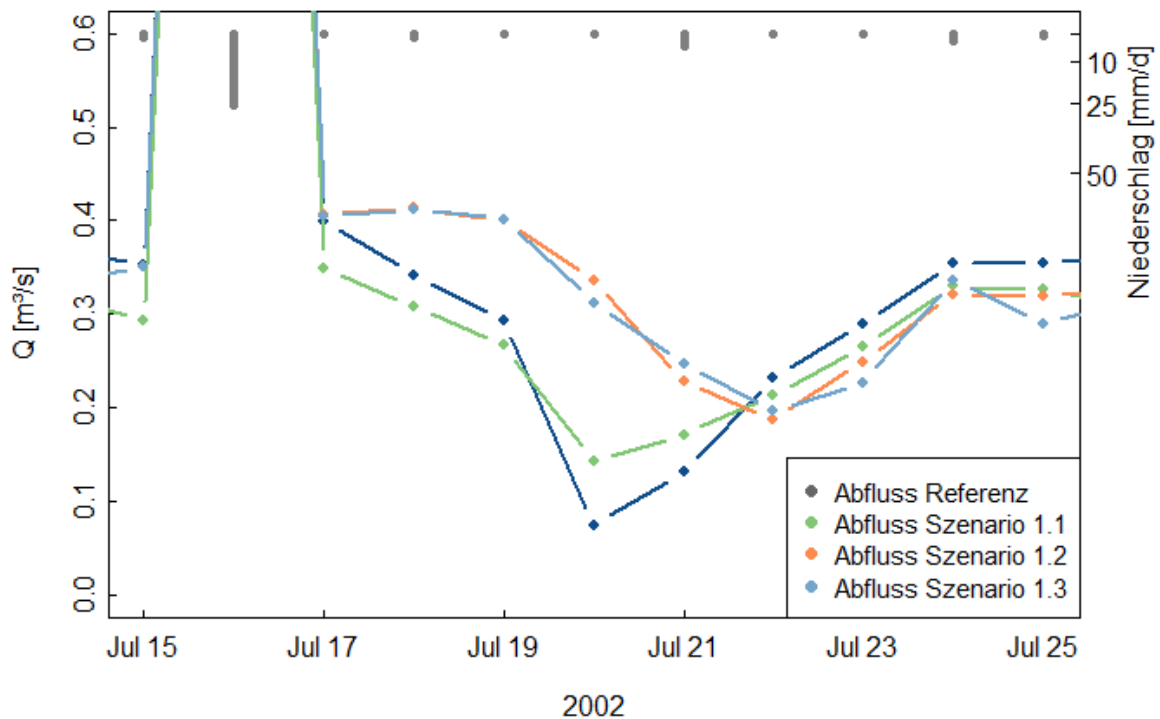


Abbildung 19: Abflussganglinie am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) von 15.-25.07.2002 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

3.7. Hochwasserereignisse

Das Zaya-EZG ist von wenigen Hochwasser- und zahlreichen Niedrigwasserereignissen geprägt (Abbildung 20). Während der gesamten simulierten Periode von 1991 bis 2021 wurde kein HQ5-Ereignis verzeichnet und nur sechs HQ2-Ereignisse. Bei zwei dieser Hochwasserereignisse, Ereignis 5 und 6, wurden jeweils zwei Spitzenabflüsse verzeichnet.

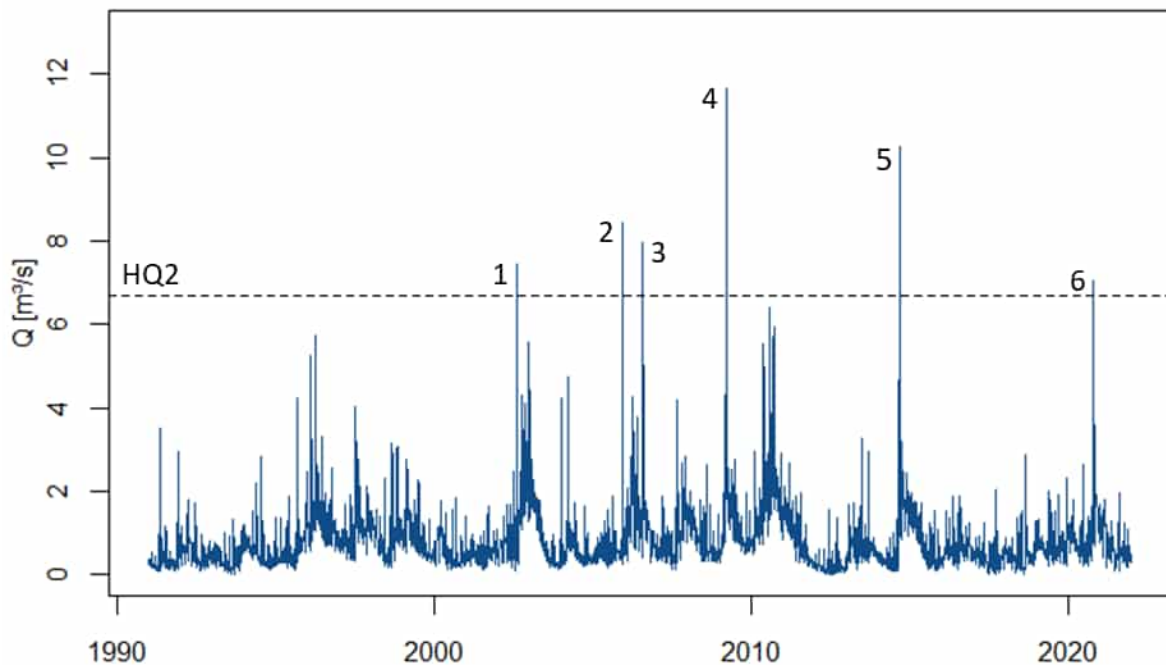


Abbildung 20: Abflussganglinie des Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) im Referenz-Modell von 1991-2021 mit den (sechs) HQ2-Ereignisse, HQ2 = 6,7 m³/s.

Die Spitzenabflüsse wurden im Oberlauf durch die Gruppe 1 - Maßnahmen in der Landschaft reduziert (Tabelle 9). In allen Ereignissen wurde die Abflussspitze durch die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) verringert. Wie auch aus dem Maßnahmenkatalog hervorgeht, ist dies darauf zurückzuführen, dass Bäume und Grünlandflächen durch ihre im Vergleich zum Referenzmodell höhere Evapotranspiration insgesamt eine Verringerung des Abflusses bewirken. Denn sowohl Wälder, als auch Grünflächen können Oberflächenabflüsse verringern und verlangsamen (Iacob et al., 2014; Wechsung et al., 2000). Eine Ausnahme bildete die zweite Spitze des HQ2-Ereignisses Nr. 5 (Tabelle 9), bei der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) sowie Implementierung der Biberdämme (Szenario 1.3) eine Zunahme des Abflusses feststellbar war.

Die Änderungen der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) dämpfte in einigen Fällen (z.B. Ereignis Nr. 2 in Abbildung 21) die Abflussspitzen stärker ab als die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1),

während in anderen Ereignissen keine oder eine Erhöhung der Abflüsse beobachtet wurde (Abbildung 22).

Die Dämpfung der Spitzen war im Oktober und Dezember erkennbar (Ereignisse Nr. 2 & 6) und die Zunahme in den Monaten März und August (Ereignisse Nr. 1,3 & 4). Dies könnte auf die veränderten Bewirtschaftungsmaßnahmen hindeuten. Denn in den Wintermonaten wurde in den Sommerkulturen die Winterbegrünung etabliert, während in den Sommermonaten die Direktsaat mit Mulch auf diesen Flächen vorliegt. Durch die Winterbegrünung lag eine Bodenbedeckung vor, die zu einer verbesserten Infiltration und einer Verringerung des Oberflächenabflusses im Vergleich zum Referenz-Modell beitrug. Die Anwendung von Direktsaat mit Mulch sollte zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses führen (Scanlon et al., 2008; Soane et al., 2012). Die Bewirtschaftungsmaßnahmen in Szenario 1.2 umfassten jedoch auch Maßnahmen zur Landbedeckung (Szenario 1.1), weshalb nicht eindeutig ist, welchen Maßnahmen welche Auswirkungen zuzuordnen sind. Durch die Implementierung von Biberdämmen (Szenario 1.3) waren im Vergleich zu der Änderung der Landbewirtschaftung (Szenario 1.2) nur minimale Änderungen erkennbar.

Im Mittellauf zeigten sich ähnliche Tendenzen wie im Oberlauf mit überwiegend geringeren prozentualen Änderungen. Im Unterlauf wurden kaum Änderungen festgestellt und dieser wird nicht weiter betrachtet.

Tabelle 9: Vergleich der HQ2 Spitzenabflüsse im Oberlauf, Mittellauf und Unterlauf der Szenarien Änderung der Landbedeckung 1.1, Änderung der Landbewirtschaftung 1.2 & Implementierung von Biberdämmen 1.3 zum Referenz-Modell, AMC5 = Summe der Niederschläge der 5 Tage vor dem Ereignis.

HQ2-Ereignisse im Zeitraum 1991-2021								
Nr.	Zeitpunkt	AMC5 _{REF}	AMC5 _{REF} [mm]	HQ2 _{REF} [m³/s]	Verändertes HQ2 im Vergleich zum HQ2 _{REF} [%] (Veränderungen [m³/s])			
					Sze 1.1 Land- bedeckung	Sze 1.2 +Landbewirt- schaftung	Sze 1.3 +Biberdämme	Sze 2 Marchfluss
Pegel „Oberlauf“ (Oberlauf)								
1	13.08.2002	mittel	49,4	1,7	-12,7 (-0,2)	-5,0 (-0,1)	-4,6 (-0,1)	-
2	06.12.2005	trocken	1,6	0,6	-4,1 (-0,02)	-21,5 (-0,1)	-20,2 (-0,1)	-
3	07.08.2006	feucht	58,5	2,9	-10,8 (-0,3)	-10,3 (-0,3)	-9,5 (-0,3)	-
4	29.03.2009	trocken	2,7	3,6	-7,2 (-0,3)	-1,8 (-0,1)	-1,8 (-0,1)	-
5	11.09.2014	trocken	3,9	2,1	-9,6 (-0,2)	-11,5 (-0,2)	-11,1 (-0,2)	-
	13.09.2014	feucht	59,2	1,7	-7,1 (-0,1)	4,8 (0,1)	5,3 (0,1)	-
6	13.10.2020	mittel	26,2	1,5	-8,8 (-0,1)	-20,1 (-0,3)	-19,5 (-0,3)	-
	16.10.2020	feucht	72,1	1,3	-8,2 (-0,1)	-20,1 (-0,3)	-19,9 (-0,3)	-
Pegel <i>Niederabsdorf</i> (Mittellauf)								
1	13.08.2002	mittel	47,2	7,4	-7,6 (-0,6)	-0,5 (0,0)	0,3 (0,0)	-
2	06.12.2005	trocken	1,9	8,4	-4,4 (-0,4)	-30,7 (-2,6)	-29,9 (-2,5)	-
3	07.08.2006	feucht	58,9	8,0	-9,4 (-0,8)	-4,7 (-0,4)	-3,6 (-0,3)	-
4	29.03.2009	trocken	2,9	11,6	-3,4 (-0,4)	-1,0 (-0,1)	-1,1 (-0,1)	-
5	11.09.2014	trocken	12,3	10,3	-4,9 (-0,5)	-3,8 (-0,4)	-3,5 (-0,4)	-
	13.09.2014	feucht	72,4	9,9	-7,5 (-0,7)	5,9 (0,6)	6,2 (0,6)	-
6	13.10.2020	mittel	31,2	7,0	-4,7 (-0,3)	-13,0 (-0,9)	-12,6 (-0,9)	-
	16.10.2020	feucht	78,9	5,0	-3,6 (-0,2)	-11,4 (-0,6)	-11,0 (-0,6)	-
Pegel <i>Angern a.d. March</i> (Unterlauf)								
1	16.08.2002	feucht	85,1	453,3	-0,04 (-0,2)	0,04 (0,2)	0,04 (0,2)	0,0 (0,0)
2	08.12.2005	mittel	32,2	139,9	-0,07 (-0,1)	-0,07 (-0,1)	-0,07 (-0,1)	-0,1 (-0,1)
3	10.08.2006	feucht	88,3	417,7	-0,05 (-0,2)	0,02 (0,1)	0,02 (0,1)	0,0 (0,0)
4	31.03.2009	mittel	44,9	500,9	-0,06 (-0,3)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)
5	16.09.2014	feucht	88,5	310,8	-0,10 (-0,3)	0,03 (0,1)	0,03 (0,1)	-0,1 (-0,3)
6	16.10.2020	feucht	72,8	773,4	-0,03 (-0,2)	-0,17 (-1,3)	-0,16 (-1,3)	0,0 (0,0)

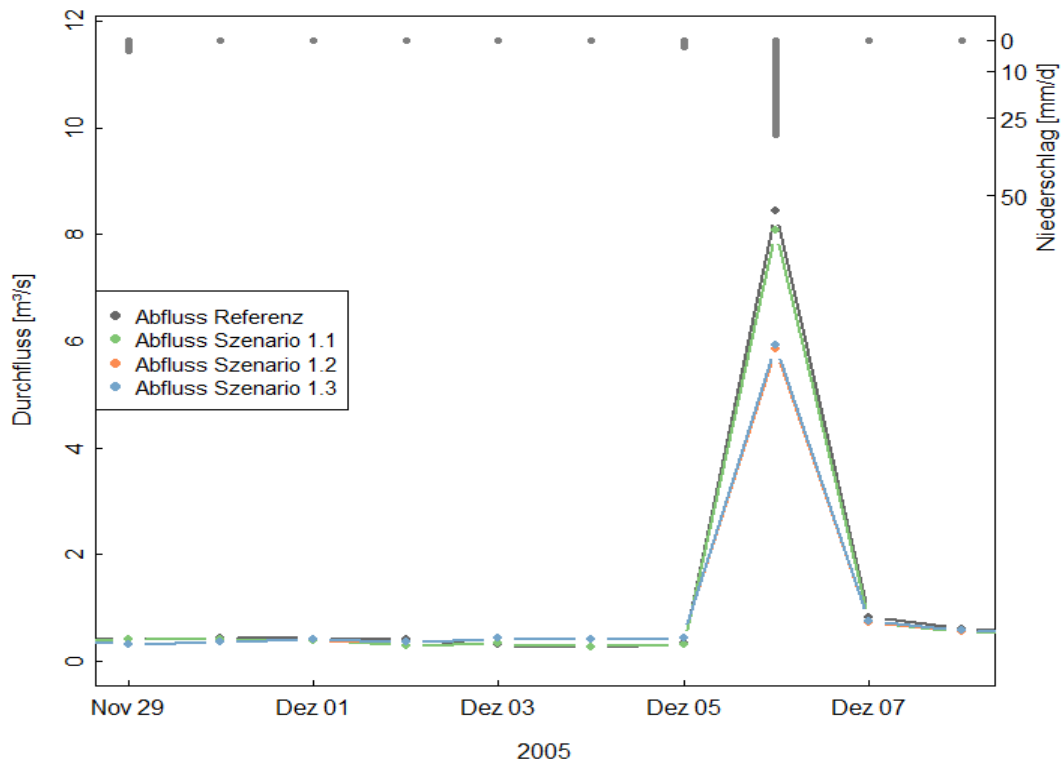


Abbildung 21: Abflussganglinie (Ereignis Nr. 2) am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) vom 29.11-08.12.2005 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

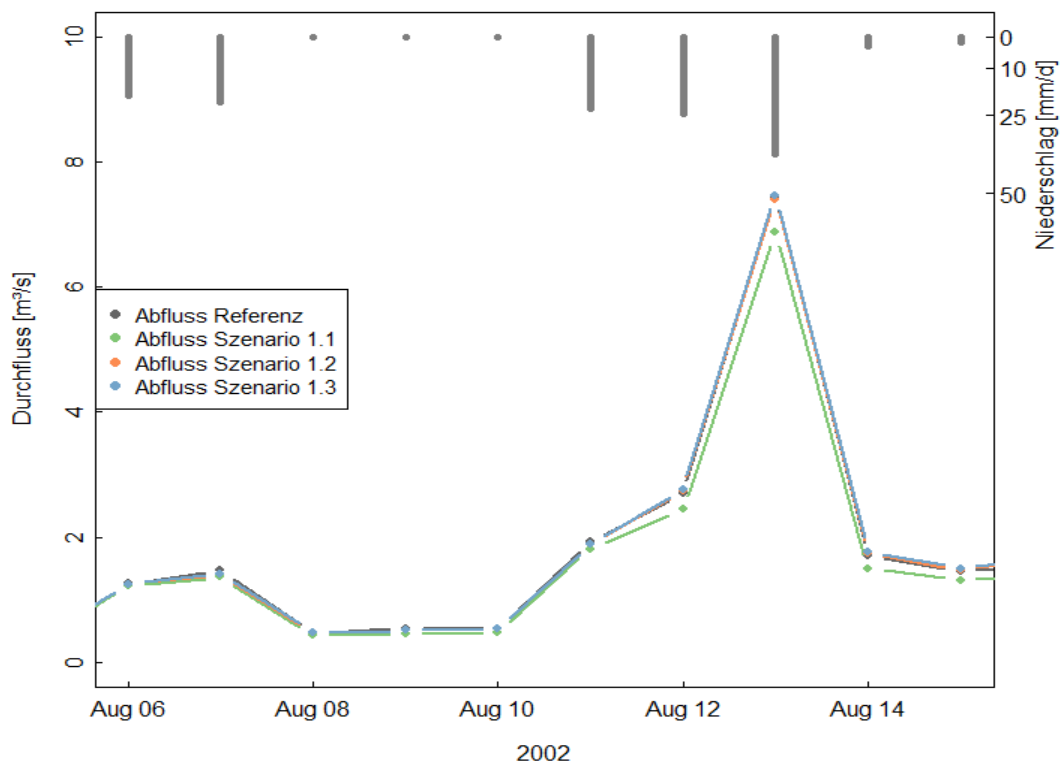


Abbildung 22: Abflussganglinie (Ereignis Nr. 1) am Pegel *Niederabsdorf* (Mittellauf) vom 06.08-15.08.2002 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

3.7.1. Detaillierte Analyse ausgewählter Hochwasserereignisse

Für die Beurteilung der Zunahme der zweiten Abflussspitze im September 2014 und im Oktober 2020 wurden Ereignis Nr. 5 & 6 genauer untersucht. Im September 2014 wurden starke und durchgehende Niederschläge über einen Zeitraum von drei Tagen registriert (Abbildung 23). In diesen drei Tagen entstanden beide Abflussspitzen. Im Oktober 2020 wurden drei Spitzenabflüsse verzeichnet, darunter eine kleinere und zwei größere Spitzen. Zwischen den starken Niederschlägen lag jeweils eine Pause von einem Tag (Abbildung 24). Die Ergebnisse entfalten, dass die Änderung der Landbedeckung (Szenario 1.1) ebenso wie die Kombination mehrerer Maßnahmen (Szenario 1.3) wirksam zur Reduktion der Hochwasserspitzen sind, wie im Maßnahmenkatalog dokumentiert.

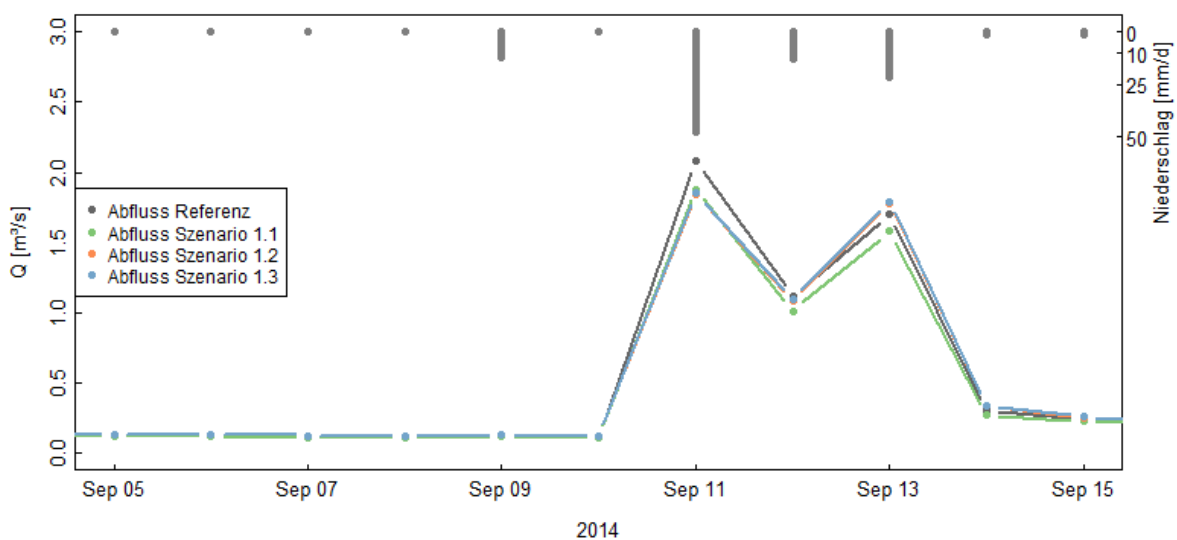


Abbildung 23: Abflussganglinie (Ereignis Nr. 5) am Pegel „Oberlauf“ (Oberlauf) vom 5.-15. 09 2014 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

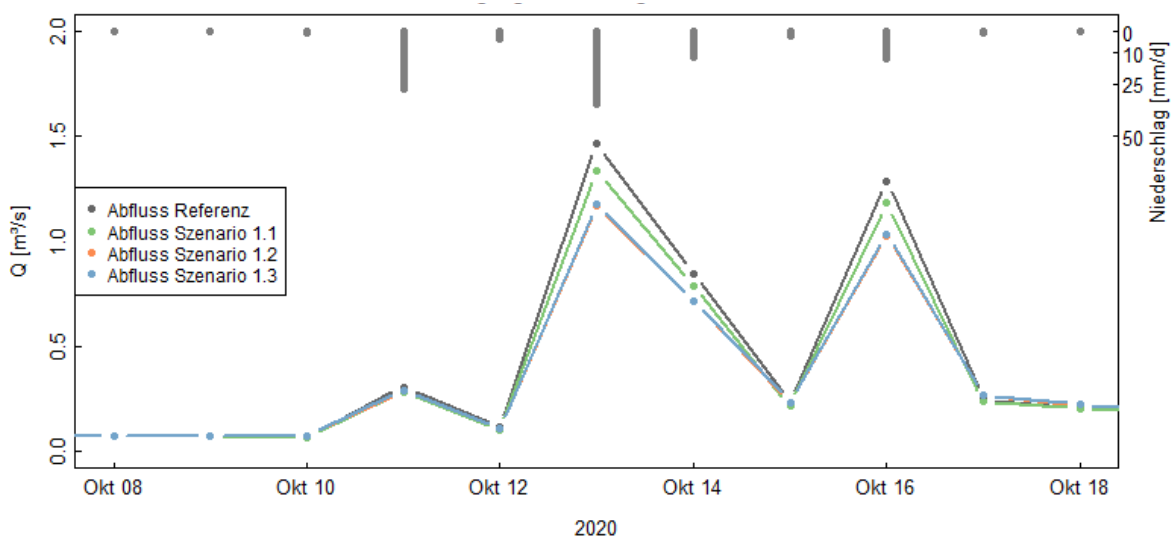


Abbildung 24: Abflussganglinie (Ereignis Nr. 6) am Pegel „Oberlauf“ (Oberlauf) vom 8.-18. 10 2020 von den Szenarien Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2) & Implementierung von Biberdämmen (1.3) mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

3.8. Auswirkungen von Gruppe 2 – Maßnahmen am Marchfluss auf den Abfluss am Pegel *Angern an der March*

Um die Auswirkungen der Maßnahmen im March-Flusslauf zu untersuchen, wurden die größtmöglichen Unterschiede bei hydrologischen Ereignissen der simulierten Perioden analysiert. Dazu wurde das HQ100-Ereignis im April 2006 (Abbildung 25) sowie der minimale Abfluss im August 2018 (Abbildung 26) betrachtet. Bei der Analyse dieser beiden Ereignisse konnten keine relevanten Unterschiede in den Abflüssen festgestellt werden. Folglich lässt sich mit dieser Studie kein Einfluss über Maßnahmen innerhalb des Marchfluss auf den Abfluss der March nachweisen. Das SWAT+-Modell ist ein hydrologisches Modell, das für hydrologische Prozesse in einem Einzugsgebiet sehr gut geeignet ist. Um die flussbaulichen Maßnahmen innerhalb des Marchflusses zu ermitteln, sollten diese mithilfe eines hydraulischen Modells neu modelliert werden.

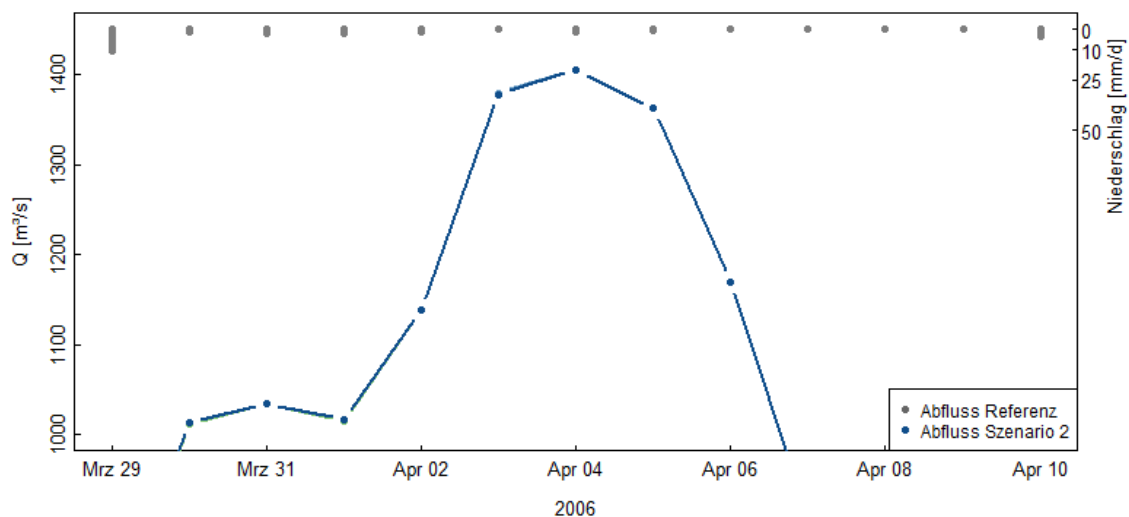


Abbildung 25: Abflussganglinie des Referenz-Modells und des Szenarios 2: Maßnahmen innerhalb des Marchfluss am Pegel *Angern a.d. March* (Unterlauf) vom 29.03 – 10.04.2006 mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

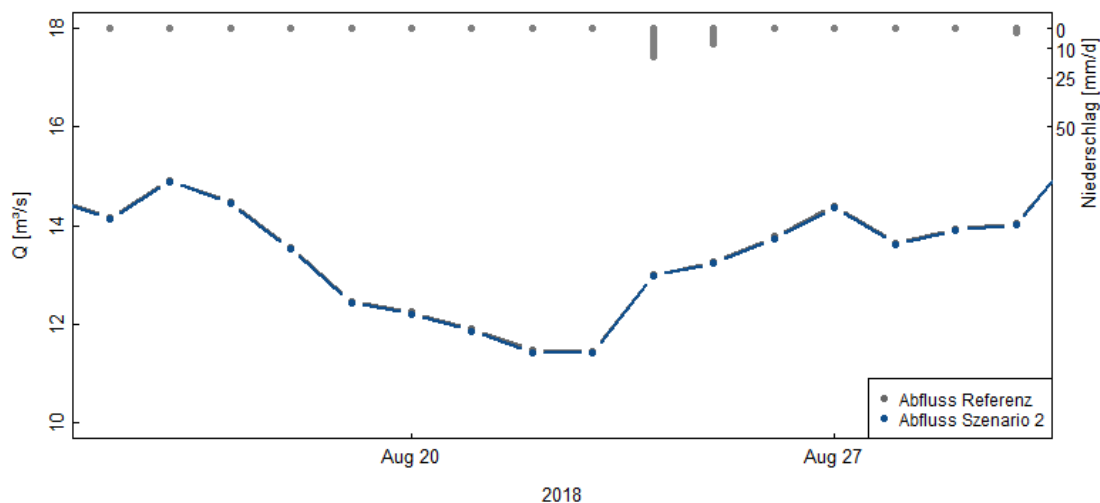


Abbildung 26: Abflussganglinie des Referenz-Modells und des Szenarios 2: Maßnahmen innerhalb des Marchfluss am Pegel *Angern a.d. March* (Unterlauf) vom 15.-30.08. 2018 mit den täglichen Gebietsniederschlägen.

4. Schlussfolgerungen

Die Gesamtwirksamkeit der verschiedenen Wasserrückhaltemaßnahmen konnte mithilfe der Szenarien ermittelt werden.

4.1. Auswirkungen der Maßnahmen auf den Wasserrückhalt in der Landschaft

Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Betriebsebene zeigten sich im Modell als die am wirksamsten Strategien, um die Bodenverdunstung zu verringern, die Wasserspeicherung in der Landschaft zu verbessern und gleichzeitig höhere Erträge zu erzielen. Maßnahmen wie Direktsaat mit Mulch und Winterbegrünung tragen nachweislich zur Erhöhung der Bodenfeuchte bei. Besonders in trockenen Gebieten zeigen diese Ansätze eine hohe Effektivität, da sie die Infiltration steigern und die Verdunstung verringern. Dies führt zu mehr pflanzenverfügbarem Wasser im Boden, was insbesondere bei Winterkulturarten zu einer Ertragssteigerung beiträgt. Zudem fördern diese Maßnahmen die Versickerung in tiefere Bodenschichten und können zur Dämpfung von Hochwasserspitzen (z. B. HQ2) beitragen. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen wurden auf einer Fläche von 638 km² umgesetzt, was 43% des Untersuchungsgebiets entspricht. Die realistische Umsetzung dieser Maßnahmen wurde jedoch nicht ermittelt. In den ersten Jahren der Direktsaat kann es zudem zu einem erhöhten Einsatz von Herbiziden kommen, was negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie und die Wasserqualität zur Folge hat.

Die zusätzliche Simulation von Biberdämmen zeigen eine Tendenz, dass die Niedrigwasserabflüsse im Referenzmodell in den Monaten Mai bis September für ein bis drei Tage überschritten werden. Dadurch ermöglichen sie eine Abpufferung von Niedrigwasserphasen und helfen die Zeit bis zum nächsten Regenereignis zu überbrücken. Allerdings sind zu diesem Thema weitere empirische Untersuchungen erforderlich, insbesondere hinsichtlich der Verweilzeit des Wassers in der Landschaft. Ein besseres Verständnis über die Auswirkung auf den Wasserhaushalt sollte neben landwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Aspekten verstärkt in den Diskurs über den Biber als „Ökosystemingenieur“ eingehen.

Die Implementierung ausgewachsener Laubbäume (Biomasse von 100t/ha) im Modell als 10 m breite Uferstreifen auf beiden Seiten allen Fließgewässern (ausgenommen der Marchfluss) innerhalb Österreichs führte im ersten Szenario zu einer Abnahme des Bodenwassergehaltes. Die Laubbäume im Modell führten aufgrund der erhöhten Transpiration zu einer Reduzierung des Bodenwassergehaltes und des Abflusses. Laubbäume weisen generell eine höhere Transpiration und Verdunstung auf als Agrarland. Die Rolle von Wäldern sollte jedoch differenziert betrachtet werden.

Bäume als Randstreifen können durch die Beschattung von Fließgewässern zu einer wichtigen Senkung der Wassertemperaturen beitragen, was angesichts steigender Temperaturen in Gewässern, wie z.B. der March, ein wichtiger Aspekt ist (Anstieg in der March von rund 1°C zwischen den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Stanzel et al., 2022b)). Neben vielen weiteren Ökosystemleistungen, halten bewaldete Gewässerrandstreifen diffuse Nähr-, Schweb- und Schadstoffeinträge aus der Landwirtschaft effizient zurück, stellen wichtige Lebensräume und Korridore zur Verfügung und speichern Kohlenstoff aus der Atmosphäre (Borin et al., 2010; Cole et al., 2020). Zudem beeinflussen Wälder die Bildung von lokalem Niederschlag (Ellison et al., 2012), ein Effekt, der in den Modellen bislang nicht vollständig abgebildet werden kann. Zur Gestaltung von Gewässerrandstreifen in trockenen Gebieten sollte eine Durchmischung aus hochwachsenden Gebüschern oder Gräsern, beispielsweise *Typha sp.*, zusammen mit Bäumen angestrebt werden, anstatt der im Modell vorgesehen Laubbaum-Uferstreifen.

4.2 Auswirkungen der Maßnahmen auf Hochwasserspitzen

Die Änderung der Flächen von Agrarland zu Grünland (für die Feuchtgebiete, Abflusswege und Überschwemmungsgebiete) in unmittelbarer Nähe von Gewässern führte zu einer Verringerung des (Spitzen-)Abflusses und des Bodenwassergehalts. Gleichzeitig verringern sowohl Laubbäume als auch Grünland den Oberflächenabfluss, was positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserqualität haben kann. Die räumliche Verteilung der Maßnahmen spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Die innerhalb des Marchflusses umgesetzten Maßnahmen bezogen sich ausschließlich auf diesen Bereich und auf unmittelbar angrenzende Flächen. Ein Einfluss auf den Bodenwassergehalt von Feldfrüchten konnte daher nicht analysiert werden. Im Modell zeigten diese Maßnahmen keine messbaren Auswirkungen auf die Abflüsse in der March. Dies ist einerseits auf die geringe Größe des Untersuchungsgebiets und dessen geringen Anteil am gesamten Einzugsgebiet der March bis zum Pegel *Angern an der March* (ca. 5 %) zurückzuführen, und andererseits auf die Limitierungen des SWAT+-Modells. Ein hydraulisches Modell könnte die Ausdehnung und die Änderungen der Flussbettprozesse, insbesondere im Hinblick auf Überflutungen und dynamische Abflussverzögerungen, besser abbilden. Für spezifische Fragestellungen zum Retentionsverhalten der March und ihrer Auen im Rahmen der Projekte ProDam (viadonau, 2022) und Polder Soutok (viadonau, 2023), wurden in der Vergangenheit bereits hydrodynamische 2D-Modelle der erfolgreich erstellt. Deren Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zum regionalen Hochwasserschutzmanagement, können jedoch nicht direkt auf das gegenständliche Projektgebiet und die Szenarien übertragen werden.

Mehrere Studien legen nahe, dass Remäandrierungen den Wasserrückhalt bei kleinen bis mittleren Hochwässern steigern können, insbesondere durch die erhöhte Kapazität des Flussbetts, geringere Fließgeschwindigkeiten und eine verbesserte hydraulische Anbindung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser (Costaz-Puyou et al., 2025; Kasahara & Hill, 2008). Weitaus anerkannter ist die Rolle der Auen als wichtiger Retentionsraum größerer Hochwässer (Schober et al., 2015). Eine Landnutzungsänderung von Agrarland zu Grünland kann zudem die Oberflächenrauigkeit einer Au und die Infiltration des Oberflächenwassers beeinflussen, sowie die Bodenerosion reduzieren (Milazzo et al., 2023). Trotz dieser Unsicherheiten führten die in dieser Studie untersuchten Maßnahmen zu strukturellen Diversifizierungen der Fluss- und Auenlebensräume, und größtenteils zu nachweislichen Verbesserungen des ökologischen Zustandes.

4.3. Schlusswort

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die untersuchten Wasserrückhaltemaßnahmen grundsätzlich wirksam sind und einen positiven Beitrag zur Stärkung der Resilienz der Landschaft gegenüber klimatischen Extremen leisten können. Die beschriebenen Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie Direktsaat mit Mulch, Winterbegrünung oder Biberdämme, bieten vielversprechende Ansätze, um den Bodenwassergehalt zu erhöhen, die Wasserspeicherung zu fördern und die Auswirkungen von Trockenperioden abzumildern. Insbesondere in von Trockenheit geprägten Einzugsgebieten können diese Maßnahmen langfristig zur Sicherung der landwirtschaftlichen Erträge und zur Stabilisierung des Wasserhaushalts beitragen.

Besonders deutlich wird, dass keine einzelne Maßnahme isoliert betrachtet werden sollte. Erst die Kombination verschiedener Ansätze ermöglicht es, hydrologische Trade-offs – wie zwischen Verdunstung, Bodenwasserspeicherung und Abfluss – zu erkennen und in ein ausgewogenes Maßnahmenkonzept zu integrieren. Weiters ist zu betonen, dass die Maßnahmenwirksamkeit bei Niedrigwasser- und Hochwasserereignissen sehr unterschiedlich ist. Für eine effektive Umsetzung ist es daher entscheidend, die Wechselwirkungen und dynamischen Effekte im Gesamtsystem zu analysieren. Entscheidungsträger sollten dabei sowohl die positiven als auch die potenziellen negativen Auswirkungen einzelner Maßnahmen berücksichtigen, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. Zudem ist eine gezielte räumliche und zeitliche Planung erforderlich, um die Maßnahmen an die spezifischen Zielsetzungen und Bedingungen des Einzugsgebiets anzupassen.

Der eingesetzte Modellansatz (SWAT+) erwies sich als wertvolles Werkzeug, um hydrologische Prozesse in der Landschaft zu analysieren und die Wirkungszusammenhänge zwischen Landnutzung, Wasserhaushalt und Vegetation besser zu verstehen. Dabei zeigte sich, dass Prozessketten in der Landschaft in unterschiedlichen räumlichen und funktionalen Kombinationen

in Gang gesetzt werden können und sich gegenseitig beeinflussen. Gleichzeitig sollten Entscheidungsträger die langfristigen Vorteile, wie die verbesserte Wasserspeicherung durch Auen und Moore, die Senkung der Wassertemperaturen durch Wälder, oder den Erhalt der Biodiversität in ihre Überlegungen einbeziehen. Eine solche ganzheitliche Betrachtung ermöglicht es, die Maßnahmen gezielt auf die multiplen Herausforderungen des Klimawandels auszurichten und deren Wirksamkeit nachhaltig zu steigern.

Da es sich um eine Vorstudie handelt, liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung, ob und in welche Flächen des Einzugsgebiets die untersuchten Maßnahmen wirksam sind. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können künftige Arbeiten vertiefend untersuchen, wie Einzelmaßnahmen räumlich optimiert, kombiniert und in bestehende Planungs- und Anpassungsstrategien integriert werden können, um langfristig eine klimaresiliente und nachhaltige Landschaftsentwicklung zu fördern.

5. Zukünftige Forschung

Für zukünftige Analysen sollte die Wirksamkeit von Wasserrückhaltemaßnahmen, ihre räumliche Verteilung sowie ihr Potenzial zur Wasserspeicherung systematisch untersucht werden. Zunächst durch eine separate Modellierung einzelner Maßnahmen und in einem weiteren Schritt durch die Ermittlung der optimalen räumlichen Verteilung dieser Maßnahmen in einem Einzugsgebiet, um eine solide Grundlage für die rurale Raumplanung zu schaffen.

Dem Maßnahmenkatalog ist zu entnehmen, dass eine Landnutzungsumwandlung zu Wäldern die Verdunstung erhöht. Dies kann auf großen Flächen zu einem höheren Wasserverlust aus der Landschaft führen. Die Interaktion zwischen der Vegetationszusammensetzung und den Evapotranspirationsprozessen sollte näher untersucht und Kompromisse in trockenen Gebieten minimiert werden.

Um präzisere Ergebnisse zu erzielen, ist eine höhere Auflösung der Inputdaten notwendig, etwa durch die Nutzung von eBOD-Daten (Zeitfogel et al., 2023), die Informationen zur Grundwasserneubildung und Ks-Werten liefern. Eine Kopplung des SWAT+-Modells mit dem Grundwassermodell MODFLOW bietet zudem die Möglichkeit, Wasserstände detaillierter zu simulieren. Die Berechnung der eingesparten Wassermenge, beispielsweise für die Bewässerung, kann standort- und kulturartspezifisch erfolgen.

Zur Quantifizierung des Hochwasserrückhalts in renaturierten Flächen, wie beispielsweise im Marchfluss, ist der Einsatz eines hydraulischen Modells erforderlich.

6. Literaturverzeichnis

- Agrarmarkt Austria. (2022). *INVEKOS Schläge Österreich 2022*. Abgerufen am 29.08.2024. <https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/invekos-schlage-osterreich-2022>
- alpS GmbH. (o. D.). *Klimainfoblatt Mistelbach*.
- Amt der NÖ Landesregierung. (2025). *Wasserstandsnachrichten und Hochwasserprognosen*. Abgerufen am 16.06.2025. www.noel.gv.at/wasserstand/#/de/Messstellen
- Arnold, J. G., Čerkasova, N., White, M. J., Bailey, R., Thorp, K., Jeong, J., Zhang, X., Ugraskan, T., Griensven, A., Rathjens, H., Raj, C., Cai, X., Geter, W. F., David, O., Carlson, J. R., & Le, K. N. (2024). *Soil and Water Assessment Tool Plus (SWAT+) (61.0.1)*.
- Arnold, V. E. (2025). *Einfluss von natürlichen Wasserrückhalte-Maßnahmen auf die Wasserspeicherung im March Teil-Einzugsgebiet* Masterarbeit. BOKU University
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S. V., Jaynes, D. B., Sauer, T. J., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40-50. doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006
- Bescansa, P., Imaz, M. J., Virto, I., Enrique, A., & Hoogmoed, W. B. (2006). Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 19-27. doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115-130. doi.org/10.1111/1752-1688.12482
- BMLFUW (Hrsg.). (2014). Flächenverzeichnis der Flussgebiete: Donaugebiet von der Enns bis zur Leitha. *Beiträge zur Hydrografie Österreichs*, 62, 148.
- BMLUK. (2015). *eHAO, Hydrologischer Atlas Österreichs*. Abgerufen am 16.06.2025. <https://ehao.boku.ac.at/>
- BMLUK. (2021) *Wasserschatz Österreichs: Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers*. Wien: BMLRT, Abteilung I/2.
- BMLUK. (2025). *eHYD, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft*. Abgerufen am 27.08.2024. ehyd.gv.at/
- Borin, M., Passoni, M., Thiene, M., & Tempesta, T. (2010). Multiple functions of buffer strips in farming areas. *European Journal of Agronomy*, 32, 103-111. doi.org/10.1016/j.eja.2009.05.003
- Chawanda, C. J. (2025). *SWAT+ Toolbox (Version 3.0.7)*. Webseite: celray.github.io/SWATPlusToolbox/3.0.0/downloads/. Abgerufen am 11.11.2024
- Cole, L. J., Stockan, J., & Helliwell, R. (2020). Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 296, 106891 doi.org/10.1016/j.agee.2020.106891
- Costaz-Puyou, I., Williams, R., Black, A., Spray, C., & MacDonell, C. (2025). Re-meandering attenuates frequent high-flows and diversifies physical habitat in a gravel-bed river. *Journal of Environmental Management*, 388, 125672. doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125672
- DVL. (2021). *Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Agrarlandschaft* (Landschaft als Lebensraum).
- Ellison, D., N. Futter, M., & Bishop, K. (2012). On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 18(3), 806-820. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x
- European Union's Copernicus Land Monitoring Service information. (2012). *EU-Hydro River Network Database 2006-2012 (vector), Europe*. Abgerufen am 18.11.2024. doi.org/10.2909/393359a7-7ebd-4a52-80ac-1a18d5f3db9c
- European Union's Copernicus Land Monitoring Service information. (2018a). *COPERNICUS Water and Wetness 2018*. Webseite: <https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-water-and-wetness>

- European Union's Copernicus Land Monitoring Service information. (2018b). *CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly*. Abgerufen am 27.08.2024. doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0
- European Union. (2014). *EU policy document on Natural Water Retention Measures*.
- European Union. (2024) *Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. OJ L 2024/1991*, 29 July. In Kraft seit 18 August 2024.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K., & Frede, H. G. (2001). Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7), 577-582. doi.org/10.1016/S1464-1909(01)00052-1
- GeoSphere Austria. (2020). *SPARTACUS v2.1 Tagesdaten*. Abgerufen am 30.04.2024. doi.org/10.60669/m6w8-s545
- Grygoruk, M., & Nowak, M. (2014). Spatial and Temporal Variability of Channel Retention in a Lowland Temperate Forest Stream Settled by European Beaver (*Castor fiber*). *Forests*, 5(9), 2276-2288. doi.org/10.3390/f5092276
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Henschel, T., Metzger, T., Deutschmann, K., & Kraier, W. (2018). Wasserwirtschaftliche Zusammenfassung zum Abschlussbericht des Projekts „Die Wirkung des europäischen Bibers (*Castor fiber*) auf den natürlichen Wasserhaushalt an ausgewählten Fließgewässern Bayerns“.
- Hohensinner, S., Denzel, J., Rehberger, O., Stuppacher, K., & Schwab, F. (2023). *Flussmorphologische Entwicklung der March und der Thaya entlang der österreichischen Staatsgrenze seit dem 18. Jahrhundert Endbericht*.
- Hovis, M., Hollinger, J. C., Cabbage, F., Shear, T., Doll, B., Kurki-Fox, J. J., Line, D., Fox, A., Baldwin, M., Klondike, T., Lovejoy, M., Evans, B., West, J., & Potter, T. (2021). Natural Infrastructure Practices as Potential Flood Storage and Reduction for Farms and Rural Communities in the North Carolina Coastal Plain. *Sustainability*, 13(16). doi.org/10.3390/su13169309
- Iacob, O., Rowan, J. S., Brown, I., & Ellis, C. (2014). Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective. *Hydrology Research*, 45(6), 774-787. doi.org/10.2166/nh.2014.184
- ICPDR. (2009). Flood Action Plan in the Morava River Basin: The ICPDR Flood Action Programme. Report, 36 pp.
- INSPIRE. (2022a). *begrünte Abflusswege* Webseite: inspire.lfrz.gv.at/000504/ds/begruente_abflusswege.gpkg
- INSPIRE. (2022b). *Feuchtgebiete und Torfflächen 2022*. Webseite: inspire.lfrz.gv.at/000504/ds/feuchtgebiete_torfflaechen.gpkg
- Kasahara, T., & Hill, A. R. (2008). Modeling the effects of lowland stream restoration projects on stream–subsurface water exchange. *Ecological Engineering*, 32(4), 310-319. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.12.006
- Land Niederösterreich Landwirtschaftliche Bildung in NÖ –Versuche 2015; Abgerufen am 04.09.2020 www.lako.at/de/versuche/?lang=de&a=179&a_urlname=versuche&versuche_a=1
- Larsen, A., Larsen, J. R., & Lane, S. N. (2021). Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 218. doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103623
- LAWA. (2020). *LAWA-BLANO Maßnahmenkatalog (WRRL, HWRMRL, MSRL)*. B. L.-A. W. (LAWA).
- López-Ballesteros, A., Nielsen, A., Castellanos-Osorio, G., Trolle, D., & Senent-Aparicio, J. (2023). *Digital Soil OpenLand Map (DSOLMap)*. Abgerufen am 19.11.2024. www.wateritech.com/data
- Mehdi-Schulz, B., Schürz, C., Wang, C., Strenge, E., Zoboli, O., Zessner-Spitzenberg, M., Schönhart, M., Jost, E., Schmid, E., & Schulz, K. (2022). *Sustainable nitrogen management under climate change in Austria. NitroClim.ATProjekt Publizerbarer Endbericht, ACRP 10th Call*.

- Mehdi-Schulz, B., Zoboli, O., Schurz, C., Strenge, E., Lima, E. M., Parajka, J., Wang, C., Zessner, M., & Schonhart, M. (2024). The impacts of climate change on nitrogen losses to the environment in Austria: A dual model analysis across spatial and temporal scales to support policy decisions. *Sci Total Environ*, 918, 170730. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170730
- Milazzo, F., Francksen, R. M., Zavattaro, L., Abdalla, M., Hejduk, S., Enri, S. R., Pittarello, M., Price, P. N., Schils, R. L. M., Smith, P., & Vanwallegghem, T. (2023). The role of grassland for erosion and flood mitigation in Europe: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348, 108443 doi.org/10.1016/j.agee.2023.108443
- NASA. (2000). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003 (1 arc second). 2000-02-11 to 2000-02-21*. Abgerufen am 18.11.2024.
- Neumayer, M., Teschemacher, S., Schloemer, S., Zahner, V., & Rieger, W. (2020). Hydraulic Modeling of Beaver Dams and Evaluation of Their Impacts on Flood Events. *Water*, 12(1). doi.org/10.3390/w12010300
- Office International de l'Eau. (2024). *Natural Water Retention Measures*. Abgerufen am 26.07.2024. www.nwrm.eu
- Pearce, C., Vidon, P., Lautz, L., Kelleher, C., & Davis, J. (2021). Impact of beaver dam analogues on hydrology in a semi-arid floodplain. *Hydrological Processes*, 35. doi.org/10.1002/hyp.14275
- QGIS.org. (2024). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. www.qgis.org
- Santos, P. (2023). *SWAT Modeling and Assessment of Agricultural Best Management Practices (BMP) for Improving Crop Water-Use Efficiency (WUE) under Climate Change in the Gnasbach and Zaya Watersheds, Austria* Masterarbeit, BOKU University
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Baumhardt, R. L., & Strassberg, G. (2008). Impact of deep plowing on groundwater recharge in a semiarid region: Case study, High Plains, Texas. *Water Resources Research*, 44(7). doi.org/10.1029/2008wr006991
- Schober, B., Hauer, C., & Habersack, H. (2015). A novel assessment of the role of Danube floodplains in flood hazard reduction (FEM method). *Natural Hazards*, 75(1), 33-50. doi.org/10.1007/s11069-013-0880-y
- Schürz, C., Čerkasova, N., Farkas, C., Nemes, A., Plunge, S., Strauch, M., Szabó, B., & Piniewski, M. (2022). *SWAT+ modeling protocol for the assessment of water and nutrient retention measures in small agricultural catchments (Version 1)*. Zenodo. doi.org/10.5281/zenodo.7463395
- Schürz, C., Hollosi, B., Matulla, C., Pressl, A., Ertl, T., Schulz, K., & Mehdi, B. (2019). A comprehensive sensitivity and uncertainty analysis for discharge and nitrate-nitrogen loads involving multiple discrete model inputs under future changing conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(3), 1211-1244. doi.org/10.5194/hess-23-1211-2019
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87. doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015
- Stanzel, P., Kling, H., & Fuchs, M. (2022a). *Regionalisierte Klimastudie für die March*. Endbericht, Februar 2022, Bestellnummer 20210085
- Stanzel, P., Kling, H., & Fuchs, M. (2022b). *Regionalisierte Klimastudie für die March - Ergänzung Auswirkung des Klimawandels auf die Wassertemperatur*. Endbericht Wassertemperatur, August 2022, Bestellnummer 20220044
- Statistik Austria. (2016). *Bodenbewirtschaftung. Herkömmliche Bodenbearbeitung mit Scharpflug und Anbaukombination, 2016*. Abgerufen am 30.04.2025. www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/land-und-forstwirtschaftliche-produktionsmethoden/bodenbewirtschaftung
- Statistik Austria. (2025a). *Anbau auf dem Ackerland, Agrarmarkt Austria (AMA), Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (INVEKOS). Tabelle: Anbau auf dem Ackerland 2024 nach Bundesland* www.statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau-dauergruenland

- Statistik Austria. (2025b). *STATcube - Feldfruchtproduktion ab 1970*. Abgerufen am 26.03.2025. Webseite: statcube.at/statistik.at/ext/statcube/jsf/tableView/tableView.xhtml
- Stein, U., Schritt, H., Reineke, J., & Uschan, T. (2023). *WADKlim Katalog für Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Landschaft*.
- SWAT. (2025). *SWAT Soil & Water Assessment Tool*. Webseite: swat.tamu.edu
- SWAT+ Development Team. (2024). *SWAT+ Editor (Version 3.0.8)*. Webseite: github.com/swat-model/swatplus-editor/releases
- Szabo-Meszaros, M., Zsidekova, B. H., Haimann, M., Molnar, S., Berlinskyi, N., Mariia, S., Hadri, Y. E., Pusch, M., Penning, E., Smederevac-Lalic, M., Marušić, M., Riveros, A., Spyrakos, E., Baranya, S., Parasiewicz, P., Belka, K., Buras, P., Leanitz, C. G. d., Segura, G., & Habersack, H. (2024). *Catalogue of action options to restore connectivity in the Danube River Basin*.
- Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O., & Lischeid, G. (2011). Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes: A review. *Journal of Hydrology*, 408(3-4), 296-307. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.045
- Turek, M. E., Pullens, J. W. M., Meurer, K. H. E., Moura Lima, E., Mehdi-Schulz, B., & Holzkämper, A. (2025). Pedotransfer Functions Versus Model Structure: What Drives Variance in Agro-Hydrological Model Results? *European Journal of Soil Science*, 76(2). doi.org/10.1111/ejss.70088
- Umweltbundesamt. (2013). *Überflutungsflächen HQ300, HWRL*. Webseite: www.data.gv.at/katalog/dataset/d954151c-bd28-4f7c-960a-3e1ee226fcf1#resources
- Verstraeten, W., Muys, B., Feyen, J., Veroustraete, F., Minnaert, M., Meiresonne, L., & De Schrijver, A. (2005). Comparative Analysis of the Actual Evapotranspiration of Flemish Forest and Cropland, Using the Soil Water Balance Model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi.org/10.5194/hessd-2-761-2005
- viadonau. (2022). *ProDaM – Protect Danube and Morava*. Abgerufen am 01.09.2025. www.viadonau.org/unternehmen/projektdatenbank/prodam-protect-danube-and-morava
- viadonau. (2023). *ETZ Projekt Polder Soutok*. Abgerufen am 01.09.2025. www.viadonau.org/unternehmen/projektdatenbank/aktiv/etz-projekt-polder-soutok
- WBW. (2018). *Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Kommunen. Steckbriefe für die Praxis*.
- Wechsung, F., Krysanova, V., Flechsig, M., & Schaphoff, S. (2000). May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? *Landscape and Urban Planning*, 51(2), 177-189. doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00108-0
- Yang, Y., Ding, J., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, J., Pan, X., Gao, C., Wang, Y., & He, F. (2018). Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 201, 299-308. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.003
- Zahner, V. (2018). Biberdämme und ihre Wirkung. *Zeitschrift für Naturschutz und angewandte Landschaftsökologie*, 40(2), 107-110.
- Zeitfogel, H., Feigl, M., & Schulz, K. (2023). Soil information on a regional scale: Two machine learning based approaches for predicting saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 433. doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116418

Anhang I: Maßnahmenkatalog

Tabelle 10: Maßnahmenkatalog: natürliche Wasserrückhaltemaßnahmen (gesp.=gespeicherten/s, Verlangs.= verlangsamt, Evapo.=Evapotranspiration).

Maßnahmen	Kategorie	Modellierbar	Relevant	Erhöht gesp. Oberflächenabfluss	Verlangs. den Oberflächenabfluss	Verlangs. das Flusswasser	Erhöht Evapo.	Erhöht Infiltration	Erhöht Bodenwasserrückhalt	Erhöht Wasserspeicherung	Erhöht Wasserdargebot in Trockenzeiten	Erhöht Hochwasserschutz
Landwirtschaft												
1 Konservierende Bodenbearbeitung												
1 Fruchtfolge (crop rotation)	LW	Ja	Ja		+++			++	++			
1 Zwischenfruchtanbau	LW	Ja	Ja	++	+++			+++	+	+		
1 Bodenbedeckung (Green cover)	LW	Ja	Ja		+++		++	++	++			
1 Direktsaat (Keine Bodenbearbeitung)	LW	Ja	Ja	+++				+++	++			
1 Frühe Aussaat	LW	Ja	tlw.		+++		++	+	+++			
1 Untersaat	LW	Ja		++								
1 Engsaat	LW	Ja		++								
1 Richtige Kulturart für erosionsgefährdete Flächen	LW	Ja	Ja								+++	+++
1 Mulchen	LW	Ja		++	+++			+	++			
1 Agroforstsysteme	LW	Ja										
1 Permakultur	LW	Ja						++			++	++
1 Verringerung der Tierbestandsdichte	LW	Ja			+++							
1 Bodenschutzkalkung	LW	Ja		++								
1 Wenig Bodenbearbeitung	LW	Ja							++			
Oberlauf und Unterlauf												
2 Landnutzungsänderung												
2 Landwirtschaftl. Landnutzungsänderung zu Wiesen & Weiden	LW	Ja	Ja		+++		++	+	++			
2 Begrünung/Brache	LW	Ja	Ja	++								
2 Aufforstung	LW	Ja	Ja	+++	+++		+++	+++	+++	++		
2 Landnutzungsumwandlung zu Waldflächen	LW	Ja		+++	+++		+++	+++	++	+++		
2 Mischwaldetablierung	LW	Ja	Ja	++								
HF: Hydromorphologie im Fluss (Maßnahmen direkt im Fluss), FL: Flusslandschaft (in Fluss nähe mit Wasserbezug), LW: Landwirtschaft (veränderte Bewirtschaftung) +++: Starke Erhöhung der hydrologischen Komponente, ++: Mittlere Erhöhung der hydrologischen Komponente, +: Geringe Erhöhung der hydrologischen Komponente												

Maßnahmen	Kategorie	Modellierbar	Relevant	Erhöht gesp. Oberflächenabfluss	Verlangs. den Oberflächenabfluss	Verlangs. Flusswasser	Erhöht Evapo.	Erhöht Infiltration	Erhöht Bodenwasserrückhalt	Erhöht Wasserspeicherung	Erhöht Wasserdargebot in Trockenzeiten	Erhöht Hochwasserschutz
3 Vegetationszonen												
3 Pufferzonen und Hecken	LW/FL	Ja	Ja		+++		++	+	++		+++	+++
3 naturnahe Gewässerrandstreifen	FL	Ja	Ja					++			++	++
3 Wald-Uferpuffer	FL	Ja	Ja	++	+++	+	++	+	++	+	++	++
4 Naturschutzmaßnahmen												
4 Biberdamm	HF	tlw.	Ja					+++		+++		+
4 Erhaltung der Waldbedeckung in Quellgebieten	FL	Ja	Ja	+++	+++		+++	+++	+++	+++		
5 Maßnahmen des natürlichen Wasserrückhalts												
5 Becken, Teiche, Retentionsmulden	FL	Ja	Ja	+++	+++			+++	+	+++	++	++
5 Sedimentauffangteiche	FL	Ja	Ja	++	++	+		+	+	++	+++	+++
5 Feuchtgebiete: Wiederherstellung & Bewirtschaftung, Wiedervernässung	FL	Ja	tlw.	+++	+++	++		++	++	++	++	++
5 Überschwemmungsgebiete: Wiederherstellung & Bewirtschaftung	FL	Ja	Ja	+++	+++	+++	++	+++	++	+++	++	++
5 Verschluss, Rückbau oder Steuerung von Drainage	LW/FL	tlw.									+++	+++
5 Verlegung von Hochwasserschutzdeichen	FL	tlw.	Ja					++			++	++
Im Gewässer												
6 Verbesserung der Gewässerstruktur												
6 Re-Mäandrieren, Verlängerung des Flusslaufes	FL	Ja	Ja	++	++	+++	+	++	++	++	++	
6 Flussaufweitung	HF	Ja	Ja					++			++	++
6 Bachrenaturierung	HF/FL	Ja	Ja	+++								
6 Uferrückbau	HF	tlw.	Ja	+	+	+++	+	+	+	++	++	
7 Verbesserung der Durchgängigkeit												
7 Wiederanbindung von Seitenarmen, alten Mäandern, Altwasserseen	FL	tlw.	Ja	+++	+++	+++	+	+++	++	++	++	++
7 Beseitigung von Querbauwerken	HF	Ja	Ja					++			++	++
HF: Hydromorphologie im Fluss (Maßnahmen direkt im Fluss), FL: Flusslandschaft (in Fluss nähe mit Wasserbezug), LW: Landwirtschaft (veränderte Bewirtschaftung) +++: Starke Erhöhung der hydrologischen Komponente, ++: Mittlere Erhöhung der hydrologischen Komponente, + : Geringe Erhöhung der hydrologischen Komponente												

Anhang II: Datensätze des SWAT+ Modells

Tabelle 11: Verwendete Datensätze für die Aufsetzung des SWAT+ Modells

Dateneingabe	Anmerkung	Datensatz
Digitales Gelände Modell (DGM)	Auflösung ~30x30m	NASA (2000)
Landnutzung	Zuschnitt von Landbedeckung (CORINE Land Cover 2018) und Feldbewirtschaftung (INVEKOS 2022), Feldbewirtschaftung wurde priorisiert	European Union's Copernicus Land Monitoring Service information (2018b), Agrarmarkt Austria (2022)
Flussnetz	Fließgewässernetz wurde auf Niederösterreich zugeschnitten	European Union's Copernicus Land Monitoring Service information (2012)
Bodenkarte	DSOLMap: drei Bodenschichten: 0-50cm, 50-100cm, 100-200cm, Auflösung 250x250m	López-Ballesteros et al. (2023)
Wetterdaten: Temperatur und Niederschlag	Spartacus, 1980 bis 2021, Zugeschnitten aufs Einzugsgebiet, Auflösung 1x1km	GeoSphere Austria (2020)
Marchzufluss	Tägliche Abflussdaten, Pegel <i>Hohenau an der March</i> (1980-2021)	BMLUK (2025)
Bewirtschaftung der Feldfrüchte	Vorlage war das Projekt <i>NitroClim-AT</i> für Aussaat-, Ernte- und Pflugtermine in der Region (Mehdi-Schulz et al., 2024). Die Bewirtschaftungstermine wurden bereits in früheren SWAT-Studien verwendet (Schürz et al., 2019) und basieren auf Informationen aus Studienberichten und Feldversuchen (z.B. Land NÖ, 2015). Die Termine wurden in diesem Projekt angepasst je nach Pflanzenwachstum und erzielten Erträgen.	Mehdi-Schulz (2024); Schürz et al., (2019); Land NÖ (2015),
Verwendete Pegel zur Kalibrierung	Tägliche Abflussdaten, Pegel <i>Niederabsdorf</i> und Pegel <i>Angern an der March</i> (1986-2020)	BMLUK (2025)
Pflanzenerträge	Niederösterreich	Statistik Austria (2016), Statistik Austria (2025b)

Anhang III: Ergebnisse der SWAT+ -Kalibrierung und -Validierung

Tabelle 12: Statistische Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung des SWAT+ Modells (1991-2000)

Pegel	Zeitschritte	KGE	NSE	PBias
Niederabsdorf	jährlich	0,71	0,79	-6,6
Niederabsdorf	monatlich	0,80	0,60	-6,6
Niederabsdorf	täglich	0,54	0,23	-6,6
Angern	jährlich	0,97	1,00	-0,8
Angern	monatlich	0,98	1,00	-0,8
Angern	täglich	0,97	0,96	-0,8

Anhang IV: Räumliche Verteilung der Maßnahmen

Szenario 1.1 Änderung der Landbedeckung



Abbildung 27: Beispiel der Änderung der Landbedeckung (1.1) an der Zaya (im Mittellauf), orange: Umwandlung zu Grünland (Überschwemmungsgebiete, Feuchtgebiete & begrünte Abflusswege), weiß: Umwandlung zu Laubwald (Gewässerrandstreifen).

Szenario 1.2 Änderung der Landbewirtschaftung

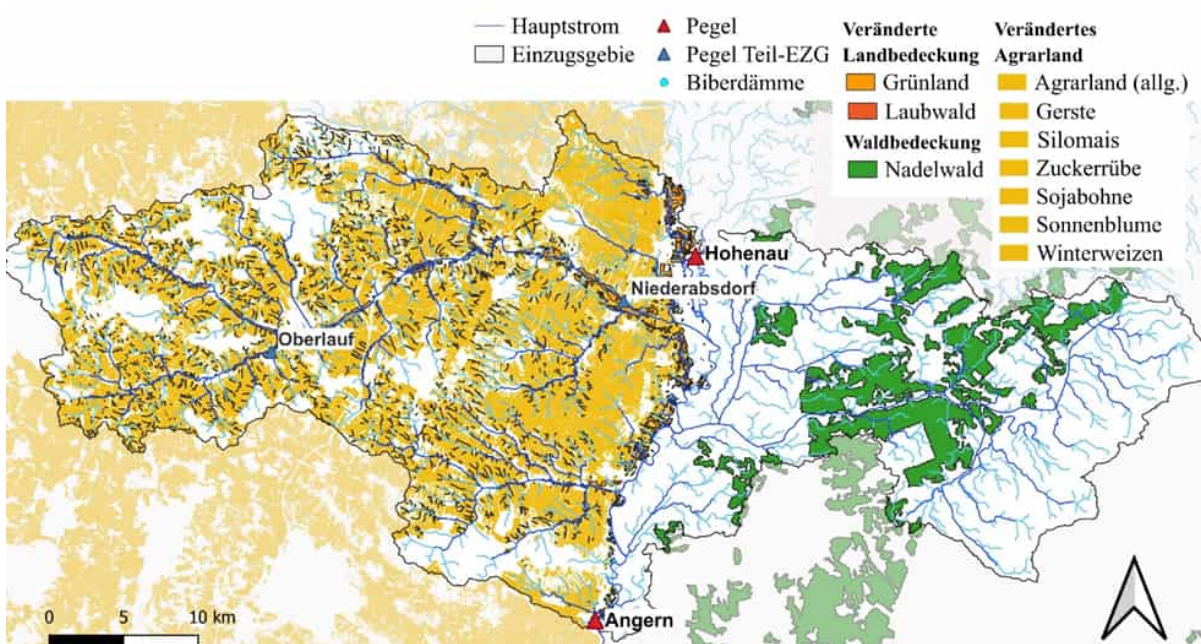


Abbildung 28: Untersuchungsgebiet mit Änderungen der Landbedeckung + Änderung der Landbewirtschaftung, gelb: Änderung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung (Verändertes Agrarland: Direktsaat mit Mulch + Winterbegrünung, Ausnahme: Winterweizen – nur Direktsaat mit Mulch), grün: Änderung der Wälder (Nadelwald zu Laubwald).

1.3 Implementierung von Biberdämmen

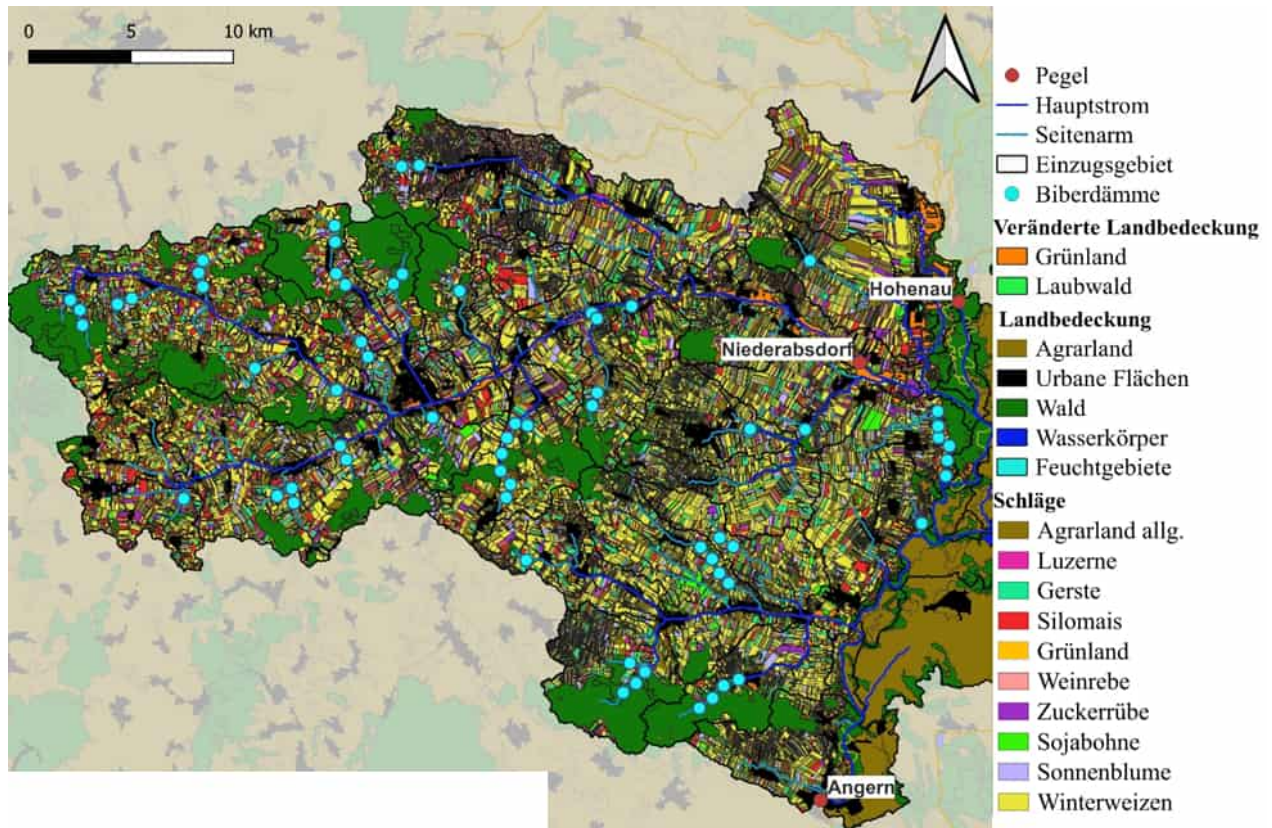


Abbildung 29: Untersuchungsgebiet mit Referenz Landbedeckung + Änderung der Landbedeckung + Änderung der Landbewirtschaftung + Implementierung der Biberdämme in Österreich (türkise Kreise).



Abbildung 30: Beispiel eines Biberdamms in SWAT+: Reservoir (türkiser Kreis) mit Feuchtgebiet (gelbe Fläche)

2 Maßnahmen innerhalb des Marchflusses

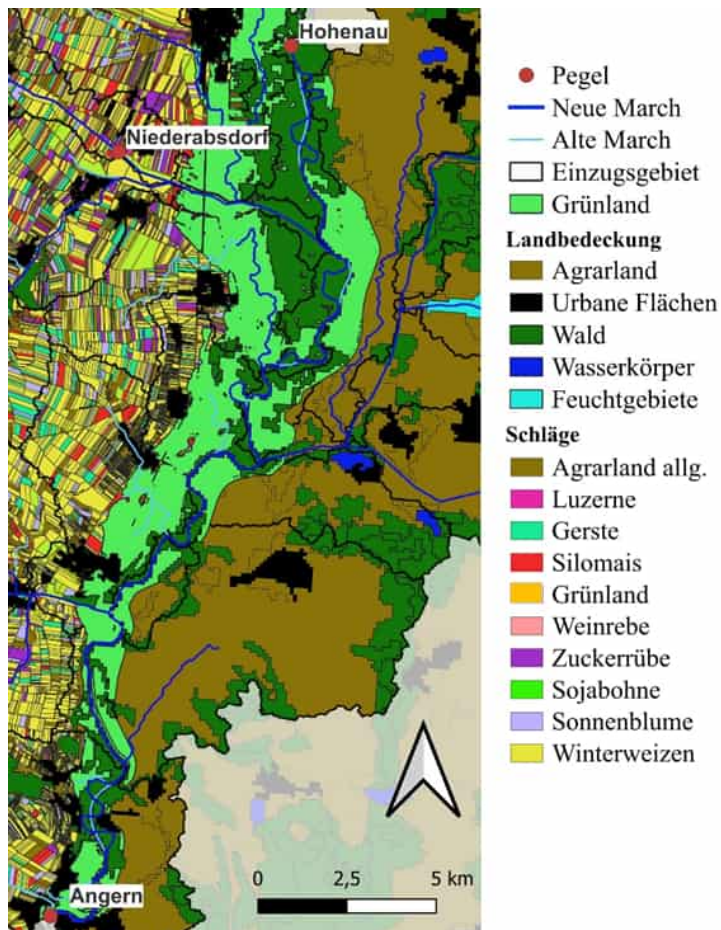


Abbildung 31: Untersuchungsgebiet mit Referenz Landbedeckung + Maßnahmen innerhalb des Marchflusses (dunkle blaue Linie: Re-Mäandrierte March, hell blaue Linie: Referenz March Verlauf, hellgrüne Fläche: Überschwemmungsflächen (Umwandlung zu Grünland)).

Anhang V: Wasserbilanzen der Feldfrüchte



Abbildung 32: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für **Gerste** im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Wert oben rechts: Niederschlag + Bewässerung, Wert links: prozentuale Ertrags-Änderung im Vergleich zu Referenz, Wert im grünen Kreis: Pflanzenverdunstung, Wert im braunen Kreis: Bodenwassergehalt 0-2m, Pfeil links nach oben: Bodenverdunstung, Pfeil rechts nach oben: Pflanzentranspiration, Pfeil rechts nach rechts: Oberflächenabfluss, Pfeil unten nach rechts: lateraler Abfluss, Pfeil unten nach unten: Versickerung in tiefere Bodenschichten).

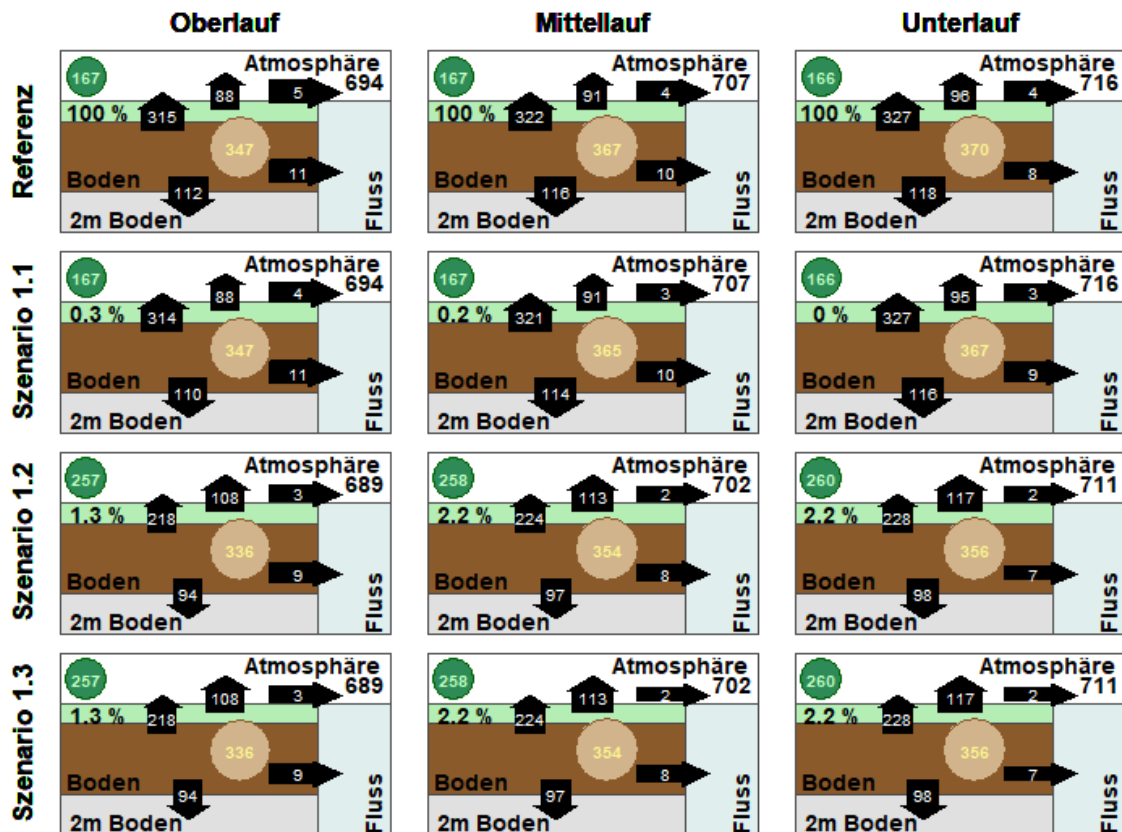


Abbildung 33: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für **Sojabohne** im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Erklärung der Werte siehe Gerste).

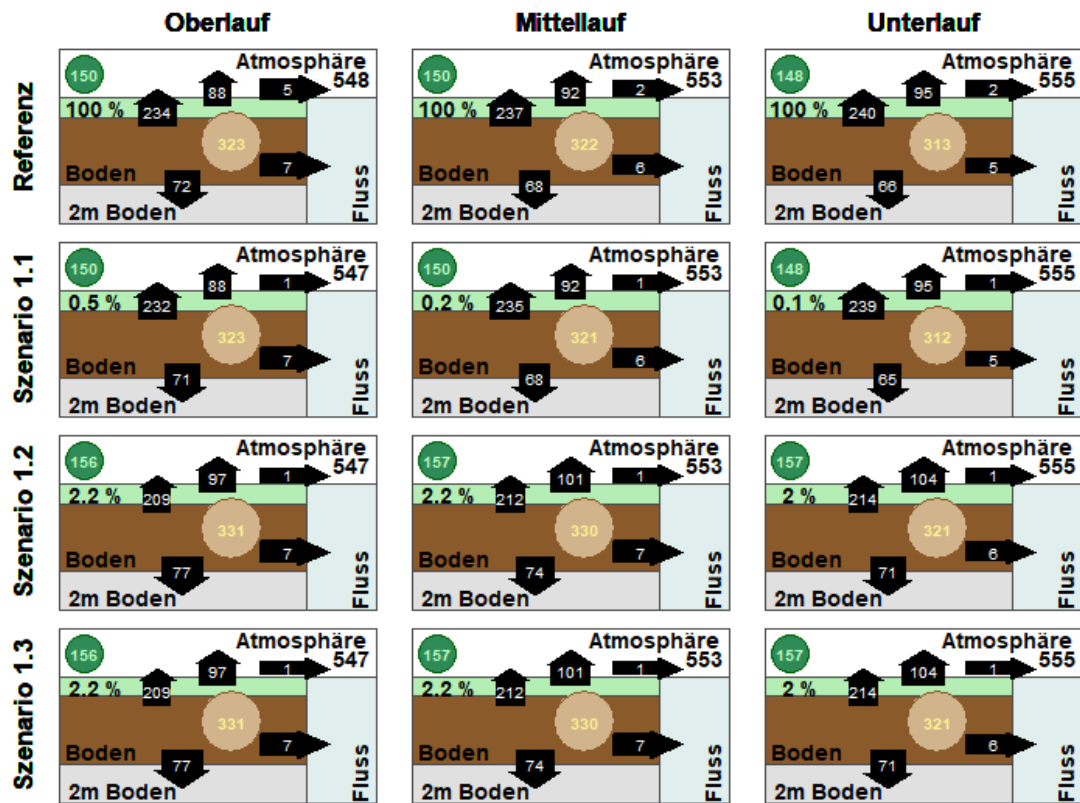


Abbildung 34: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für **Sonnenblume** im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Erklärung der Werte siehe Gerste).



Abbildung 35: Durchschnittliche Wasserbilanz (mm) 1991-2021 für **Zuckerrübe** im Oberlauf, Mittellauf & Unterlauf in den Szenarien: Referenz, Änderung der Landbedeckung (1.1), Änderung der Landbewirtschaftung (1.2), Implementierung von Biberdämmen (1.3) (Erklärung der Werte siehe Gerste).