Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
IWW
RWTH AACHEN UNIVERSITY

Hydro-numerische Modellierung Verdriftung Fischeier (2022)

Dr.-Ing. Jan Oetjen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

B2022014

Hydro-numerische Modellierung Verdriftung Fischeier (2022)

Dr.-Ing. Jan Oetjen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
D-52056 Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Institutsleitung
Aachen, im September 2022

Inhalt

1 Veranlassung und Einleitung 1
2 Methodik 2
2.1 Allgemeines Vorgehen und untersuchte Szenarien 2
2.2 Hydrodynamisches Modell in Delft3D-FLOW 3
2.3 Transportmodell in Delft3D-PART 6
2.4 Auswertung 7
3 Ergebnisse 9
3.1 Unsicherheiten 9
3.2 Hydrodynamisches- und Transport-Modell 9
3.3 Einfluss der Wasserentnahme auf die Verdriftung der Fischeier 11
4 Zusammenfassung und Fazit 15
Literatur 16
Anhang 17

1 Veranlassung und Einleitung

Im September 2021 beauftragte die RWE Power AG das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University damit, hydro-numerische Untersuchungen zu der Verdriftung von Fischeiern im freifließenden Rhein durchzuführen. Diese Untersuchungen dienen als Ergänzung zu bereits im Jahr 2016 (IWW, 2016) durchgeführten Simulationen und haben den Zweck, die Auswirkungen einer erhöhten Wasserentnahme (18 m³/s) auf die Verdriftung von Fischeiern in einem Teilgebiet des Rheins zu analysieren. Im speziellen soll betrachtet werden, ob die Wasserentnahme einen signifikanten Anteil an Fischeiern daran hindert, die FFH-Fischschutzzone Zons zu erreichen.

Im Rahmen der aktualisierten Untersuchungen wird dabei ein neues Modell in Delft3D (Deltares, 2014a-2014d) erstellt, welches auf aktuellen Daten zu der Vorlandtopographie und der Rhein-Bathymetrie beruht. Die Aktualisierung des Modells aus IWW (2016) umfasst dabei die Erstellung eines neuen numerischen Gitters und die Aktualisierung der unterliegenden Bathymetrie. Die übrigen Parameter (Abflussszenarien, Positionierung Entnahmestelle, Positionierung Laichplatz, Anzahl und Eigenschaften Fischeier/Partikel) werden entsprechend der Annahmen aus IWW (2016) belassen.

2 Methodik

2.1 Allgemeines Vorgehen und untersuchte Szenarien

Die im Rahmen des vorliegenden Berichtes durchgeführten Arbeiten umfassen fünf Arbeitsschritte (Abbildung 1). Dies umfasste zunächst die Beschaffung aktueller Daten zur Bathymetrie des Rheins und der Topographie der Vorländer sowie zu dem Abflussgeschehen im Rhein. Die erhaltenen Daten wurden mittels QGIS und MATLAB verschnitten bzw. so aufbereitet, dass sie als Eingangsdaten für das hydro-numerische Modell genutzt werden können. Die hydro-numerischen Betrachtungen umfassen insgesamt fünf Abflussszenarien (Tabelle 1) deren entsprechende Wasserstands-Abfluss-Beziehungen aus dem FLYS-Fachdienst der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gewonnen wurden (Tabelle A-1).

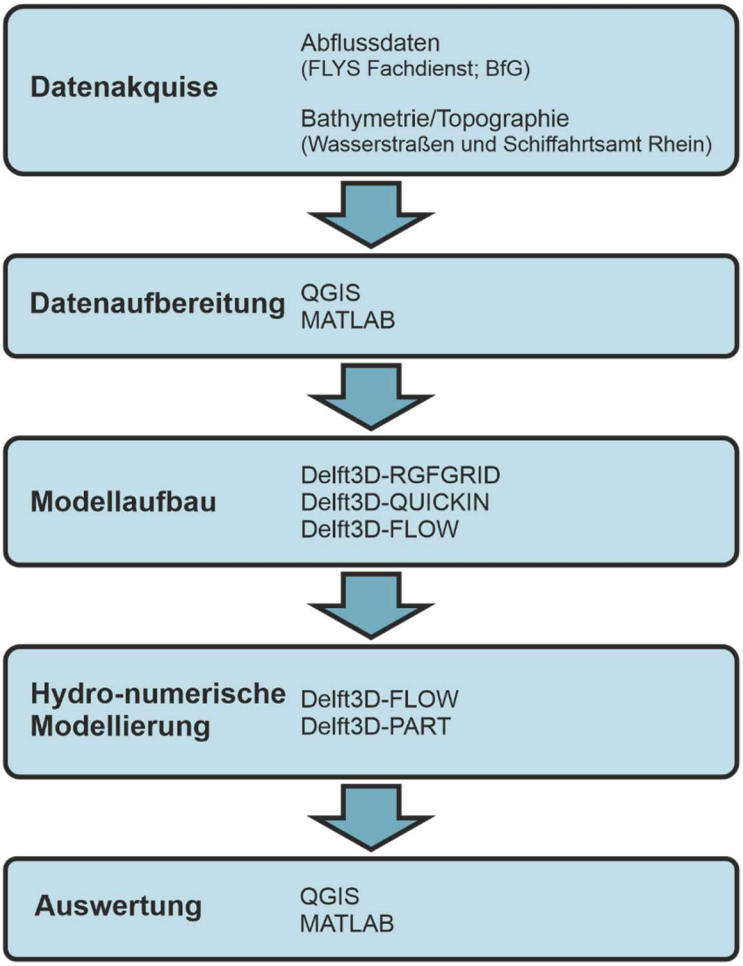

Abbildung 1: Durchgeführte Arbeitsschritte im Rahmen des vorliegenden Projektberichts.

Darauf aufbauend werden die Basisdaten für das hydro-numerische Modell in Delft3D-RGFGRID (Erstellung des numerischen Gitters; Deltares, 2014a) und Delft3D-QUICKIN (Interpolation der topographischen und bathymetrischen Daten auf das numerische Gitter; Deltares, 2014b) generiert. Die vorbereitenden Arbeitsschritte abschließend erfolgt der Aufbau der zehn Modelle und deren Simulation schließlich in Delft3D-FLOW (Deltares, 2014c). Die hydrodynamische Simulation wird offline mit dem

Delft3D-PART (Deltares, 2014d) Modell gekoppelt. Die *offline-Kopplung* beschreibt den Prozess, dass während der Simulation der hydrodynamischen Szenarien Zwischenergebnisse in Kommunikationsdateien geschrieben werden, welche als Eingangsdaten für das finale Transportmodell in Delft3D-PART dienen, in welchem schließlich die Verdriftung der Fischeier berechnet wird.

Da die in Delft3D enthaltenen Auswertungswerkzeuge in Form des *Quickplot* Moduls nur rudimentäre Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten beinhaltet, wird das Quickplot-Modul lediglich genutzt, um die Simulationsergebnisse in Form des MATLAB *Cell* Formats zu exportieren. Für die anschließende Auswertung wird auf Eigenentwicklungen in MATLAB und QGIS zurückgegriffen.

Insgesamt werden fünf Abflüsse (vgl. IWW, 2016), jeweils mit und ohne Wasserentnahme, simuliert und ausgewertet. In Summe ergeben sich so zehn untersuchte Szenarien (Tabelle 1):

Tabelle 1: Im Rahmen des vorliegenden Berichts untersuchte Szenarien.

		Szenario[1]				
		557 m³/s	**NNW[2]**	**MNW[2]**	**1410 m³/s**	**MW[2]**
Abfluss [m³/s]	Ohne Entnahme	557	705	1000	1410	2035
	Mit Entnahme	539	688	982	1392	2017
Wasserstand [m]	Ohne Entnahme	30,09	30,33	31	31,77	32,82
	Mit Entnahme	30,08	30,29	30,98	31,74	32,79

[1]Szenarienauswahl entspricht der Absprache mit dem Auftraggeber zu IWW (2016)
[2]Zugehörige Abflusswerte wurden dem FLYS Fachdienst der BfG entnommen

2.2 Hydrodynamisches Modell in Delft3D-FLOW

Das hydro-numerische Modell wird in Deflt3D-FLOW und Delft3D-PART aufgebaut, wobei die Berechnung der Hydrodynamik in Delft3D-FLOW erfolgt. Im Vorfeld zum eigentlichen Modellaufbau werden die in Einzeldateien vorliegen aktuellen topographischen und bathymetrischen Daten mittels QGIS verschnitten und das Datenformat entsprechend den Konventionen von Delft3D angepasst. Im folgenden Schritt wird in Delft3D-RGFGRID das numerische Gitter erstellt. Aufgrund der mäandrierenden Form des Rheins und der Verwendung rechteckiger numerischer Zellen kann hier die Orthogonalität der Rechengitters nicht über das gesamte Modellierungsgebiet innerhalb der von Deltares vorgebebenen Gütekriterien gehalten werden. Diese Areale mit verminderter Orthogonalität umfassen jedoch ausschließlich initial Zellen am Modellrand und haben keine signifikante Auswirkung auf die Genauigkeit der Simulationen.

Nach Erstellung des numerischen Gitters erfolgt die Interpolation der bathymetrischen und topographischen Daten auf das numerische Gitter in Delft3D-QUICKIN mittels der *Nearest Neighbor* Methode. Die letztendlich im Modell genutzte Bathymetrie ist in Abbildung 2 dargestellt.

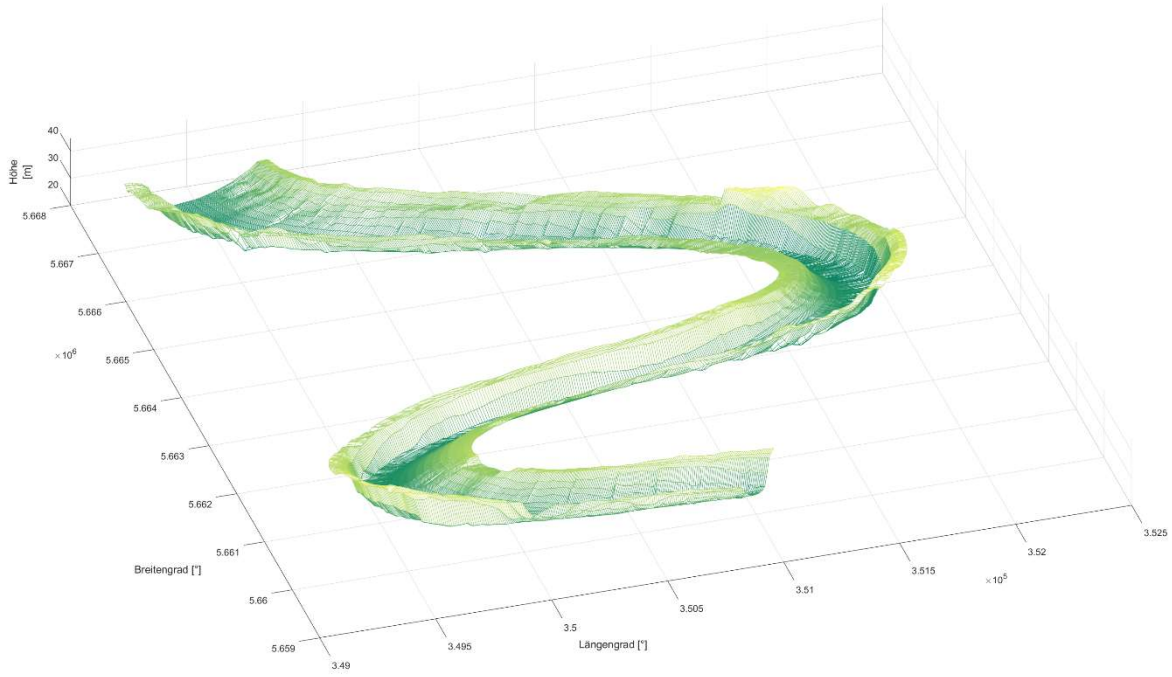

Abbildung 2: Finale, im Modell genutzte, Bathymetrie (überhöhte Darstellung).

Der eigentliche Modellaufbau erfolgt schließlich in Delft3D-FLOW. Die wichtigsten Modellparameter und Einstellungen lassen sich in Tabelle 2 finden. Alle nicht aufgeführten Parameter werden auf den Standard-Einstellungen belassen. Das Modell besteht aus 18 Zellen orthogonal zur Fließrichtung und 1.098 Zellen in Fließrichtung. Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den oberen Modellrand (Modellausgang) wurde dem FLYS-Fachdienst entnommen und besteht aus 500 Werten, deren Zwischenschritte von Delft3D-FLOW intern linear interpoliert werden. Die Randbedingung am Modelleingang wird als *Total Discharge* Randbedingung angesetzt. Hier kann der gewünschte Abfluss direkt eingestellt werden. Der in Delft3D-FLOW enthaltene Parameter α [-] kann genutzt werden, um ungewünschte Reflektionen an den Modellrändern zu vermeiden und wird an beiden Modellrändern auf α = 5000 [-] eingestellt.

Das durch das hydrodynamische Modell abgedeckte Areal sowie die Positionen des initialen Fischlaichs und der Wasserentnahme werden in Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 2: Modelleigenschaften und gewählte Parameter

	Parameter	Wert
Numerisches Gitter	Anzahl Zellen	19.764 (18 · 1.098 Zellen)
	Durchschnittliche Zellengröße Orthogonal	ca. 36 m
	Durchschnittliche Zellengröße in Fließrichtung	ca. 10 m
	Orthogonalität (Vorgabe: < 0,04 [-])	$0{,}18 \cdot 10^{-7}$ bis $0{,}67 \cdot 10^{-1}$ [-] (Durchschnitt 0,001)
	Smoothness Vertikal (Vorgabe: 1 – 1,2 [-])	1,0 bis 1,12 [-] (Durchschnitt 1,006)
	Smoothness Horizontal (Vorgabe: 1 – 1,2 [-])	1,0 bis 1,05 [-] (Durchschnitt 1,01)
Modellparameter	Simulationszeit	60 Stunden
	Numerischer Zeitschritt	0,01 Minuten
	Randbedingung Modelleingang	Total Discharge (Abflussvorgabe) (α = 5000 [-])
	Randbedingung Modellausgang	QH-Beziehung (α = 5000 [-])
	Dichte Wasser	1.000 kg/m³
	Intervall Kommunikationsdatei	2 Minuten
	Intervall Ergebnisausgabe	2 Minuten

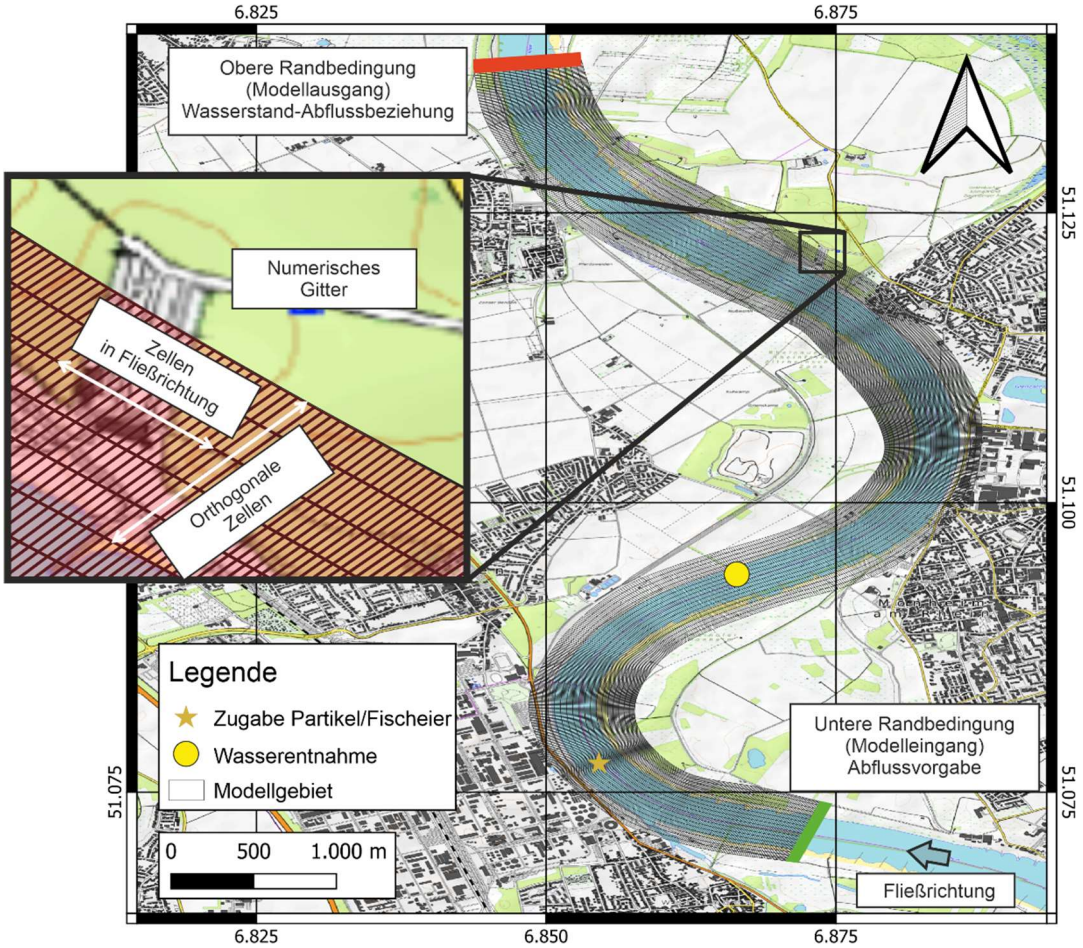

Abbildung 3: Abdeckung des hydro-numerischen Modells sowie Positionierung des Fischlaichs und der Entnahmestelle. Ebenfalls dargestellt werden die untere und obere Modellrandbedingungen.

2.3 Transportmodell in Delft3D-PART

Die Verdriftung der Fischeier wird mit dem *particle tracking* (PART) Modul von Delft3D simuliert. Dieses Modul dient ursprünglich der Simulation von Partikelbewegungen in einer Strömung. Zur Simulation von Fischeiern, wie in dem vorliegenden Modell, müssen die Eigenschaften der Partikel entsprechend angepasst werden. Diese werden als konservative Tracer betrachtet (kein Zerfall der Partikel). Die Anzahl und Eigenschaften der Fischeier entspricht dem Szenario aus IWW (2016):

- Laichaktivitäten eines Kleinschwarms bestehend aus fünf Weibchen
- Produktion von 180.000 Eiern je Weibchen: Insgesamt werden 900.000 Eier am Laichpatz angesetzt
- Gewicht je Fischei beträgt 0,05 g
  (Gesamtgewicht 45 kg)
- Es wird ein Durchmesser von 4,5 mm je (gequollenem) Fischei angenommen
  (Gesamtausdehnung 165 m; Abbildung 4)
- Die vertikale Positionierung der Fischeier erfolgt in einer Tiefe von 50 % der Gesamtwassertiefe

Um sicherzustellen, dass das hydrodynamische Modell einen kontinuierlichen Zustand erreicht hat und keine unerwarteten Abfluss- oder Wasserstandsschwankungen auftreten, erfolgt die Zugabe der Fischeier zum Modell erst nach 40 Stunden Modelllaufzeit.

Weitere Details zum Aufbau des PART-Modells und den Eigenschaften der Fischeier lassen sich in IWW (2016) finden.

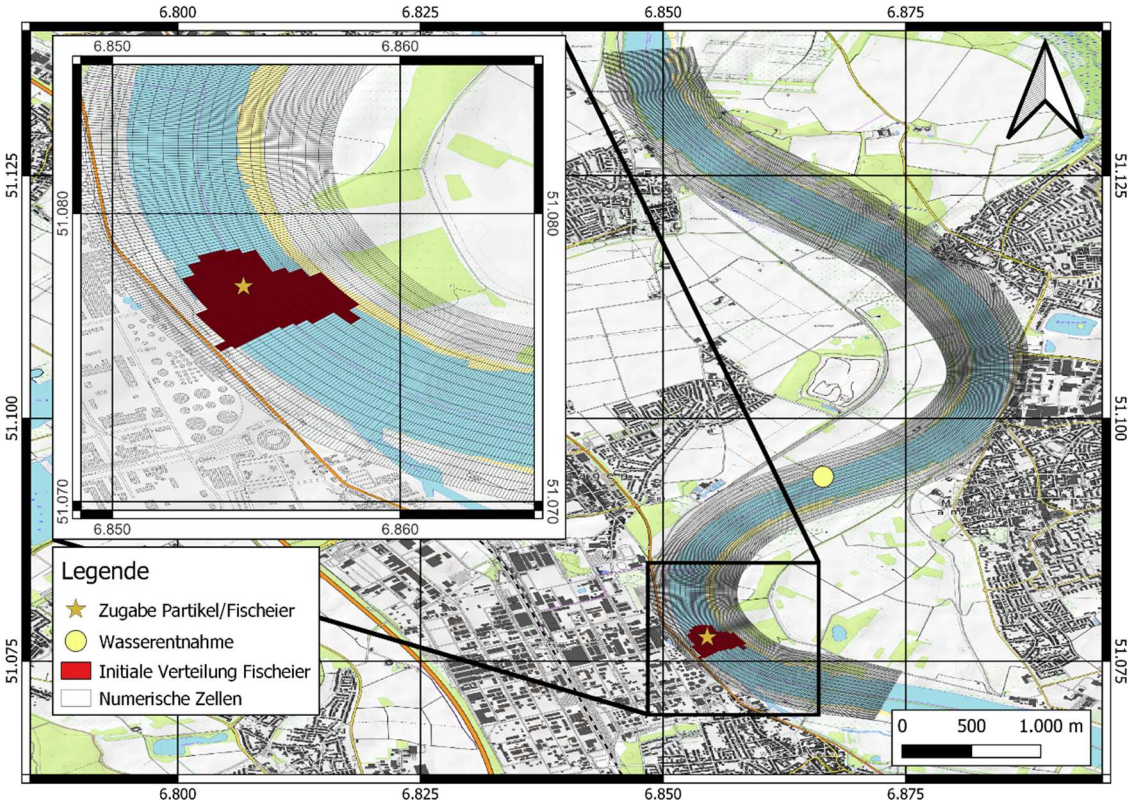

Abbildung 4: Positionierung und Ausdehnung des initialen Fischlaichs.

2.4 Auswertung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse wird im Vergleich zum Vorgehen in IWW (2016) grundlegend überarbeitet. Zum einen wird sich in der Analyse nun auf die konkrete Partikelanzahl konzentriert, wohingegen in IWW (2016) die Konzentration ($kg_{Fischeier}/m^3_{Wasser}$) zur Auswertung herangezogen wurde. Zum anderen findet der Vergleich der Szenarien „mit Entnahme“ und „ohne Entnahme“ nun auf Basis der im Gesamtmodell vorhandenen Anzahl an Fischeiern statt. In IWW (2016) wurde die Auswertung auf einen Querschnitt im oberen Bereich des Modellgebiets beschränkt.

Die grundlegende Fragestellung des vorliegenden Berichts behandelt die Frage, ob die Wasserentnahme einen Einfluss auf die Verdriftungsdistanz der Fischeier hat. Im Rahmen dieser Fragestellung liegt der Fokus darauf, ob die Wasserentnahme einen Einfluss darauf hat, dass die Fischeier das FFH-Gebiet Zons erreichen. In dem aufgebauten hydro-numerischen Modell liegt der Modellausgang dabei oberhalb des FFH-Gebiets. Im Verlauf der Ergebnisauswertung wird sich zeigen, dass der Großteil der

Fischeier sogar über das Modellgebiet hinaus transportiert wird. Daher kann der Einfluss der Wasserentnahme darüber bestimmt werden, ob sich die Anzahl an im Modellgebiet verbleibenden Fischeiern zwischen den Szenarien *mit* und *ohne* Entnahme, signifikant unterscheidet. Dies erfolgt im Rahmen des vorliegenden Berichts über die Auswertung der **.map* Ergebnisdateien des Delft3D-PART Moduls. In diesen Dateien sind für alle Zellen des Modellgebiets die jeweils enthaltene Anzahl an Fischeiern pro Zelle gespeichert.

Die Ausgabe aus dem PART-Modell erfolgt dabei in 2-Minuten Schritten (1801 Ergebnisdateien je Simulation), welche komplett in der anschließenden Analyse berücksichtigt werden. Zur Analyse werden die Ergebnisdateien mittel Delft3D-QUICKPLOT im MATLAB-Cell Format exportiert und mit MATLAB ausgewertet bzw. zu Darstellungszwecken in das *.csv Format konvertiert. Die graphische Ergebnisdarstellung erfolgt in QGIS auf Basis der konvertierten *.csv Dateien.

3 Ergebnisse

3.1 Unsicherheiten

Alle hydrodynamisch-numerischen Modellierungen besitzen aufgrund der verwendeten Modellansätze und Eingangsdaten bestimmte Unsicherheiten. Damit unterliegen auch die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse in einem gewissen Ausmaß Unsicherheiten.

Unsicherheiten entstehen durch die verfügbaren Eingangsdaten zu den Fischeiern. Sowohl Durchmesser als auch Gewicht basieren auf Annahmen und Durchschnittswerten, welche die natürlichen Bedingungen nicht exakt abbilden. Diese Werte haben jedoch unter Umständen einen bestimmten Einfluss auf die Transporteigenschaften der Fischeier. Die hier verwendeten Parameter beruhen auf KIFL (2016). Die Rheinpopulation zeigt sich außergewöhnlich homogen. Nach Mailkontakt mit Frau Dr. Garniel vom Kieler Institut für Landschaftsökologie vom 29.03.2016 minimiert dieser Umstand die Unsicherheiten zu den Eingangsgrößen der Fischeieigenschaften. Dies beruhe darauf, dass die Eigenschaften der Fischeier innerhalb einer genetisch homogenen Population nur wenig variieren und die hier verwendeten Parameter unveröffentlichten Erhebungen aus Frankreich folgen.

Weiterhin müssen auch die in numerischen Modellen enthaltenen Unsicherheiten berücksichtigt werden. So stellen numerische Modelle immer eine Vereinfachung der Natur dar, welche mit Hilfe mathematischer Gleichungen nachgebildet wird. Als Beispiel sei für den konkreten Bezug zu den hier vorgestellten Modellen der Ansatz der tiefengemittelten Geschwindigkeit genannt. Hier wird über die gesamte Wassersäule eine gemittelte Geschwindigkeit zur Bestimmung der Transportwege eines Partikels angesetzt. In der Natur herrschen solche Bedingungen nicht. Dort sind die Fließgeschwindigkeit und damit der Transport über die Wassersäule variabel. Auch alle im Modell veränderbaren Variablen wie Viskosität oder Dichte des Wassers werden im Modell über alle Zeitschritte konstant angenommen. Darüber hinaus ist bzgl. der Eingangsdaten und Vorgaben auf die Anlage Biologische und FFH-spezifische Eingangsparameter der hydronumerischen Modellierung der Verdriftung von Maifischeiern in der FFH-Verträglichkeitsuntersuchung für das FFH-Gebiet Rheinfischschutzzonen von Emmerich bis Bad Honnef zu verweisen.

Insgesamt sollte bei Anwendung der hier gewonnenen Ergebnisse beachtet werden, dass numerische Modelle immer nur eine Vereinfachung der Natur darstellen und damit die realen Vorgänge von den modellierten Prozessen abweichen können. Außerdem handelt es sich (nach IWW, 2016) erst um die zweite bekannte Anwendung des Delft3D-PART Moduls zur Simulation der Verdriftungswege von Fischeiern. Es handelt sich um einen dementsprechend fortschrittlichen und innovativen Ansatz, welcher aber gegebenenfalls noch von weiteren Unsicherheiten begleitet werden kann.

3.2 Hydrodynamisches- und Transport-Modell

Das Modell wurde wie in Kapitel 2 beschrieben aufgebaut. Nach der Warmlaufzeit des Modells zum Erreichen eines stationären Zustands bewegen sich Wasserstände und Abflüsse konstant auf dem Niveau, welche aus eingespeistem Abfluss und Wasserstands-Abfluss-Beziehung resultieren. Zu Kontrollzwecken wird der Durchfluss an einem Querprofil und der Wasserstand in Form einer Punktmessung (*Observation-Point*) gemessen.

Nach Erreichen des stationären Zustands (je nach Abfluss bis zu ca. 10 Stunden nach Modellstart) wird für die entsprechenden Szenarien die Wasserentnahme aktiviert. Im Gegensatz zu dem Vorgehen in IWW (2016) wird hier auch für das niedrigste Abflussszenario (557 m³/s) die volle Entnahmeleistung von $Q_{Entnahme}$ = 18 m³/s angesetzt und somit ein Worst-Case-Szenario abgebildet. In IWW (2016) wurde die Wasserentnahme bei diesem Abfluss gedrosselt.

Vier Stunden nach Anlaufen der Wasserentnahme werden schließlich die Fischeier in Form von Partikeln aktiviert und beginnen unmittelbar danach zu verdriften. Die einzelnen Modellphasen werden in Abbildung 5 und die Positionierung der Durchfluss- und Abflussmessung in Abbildung 6 dargestellt. Die Abflusswerte und Wasserstände lassen sich für alle Szenarien in Abbildung A- 1 im Anhang des vorliegenden Dokuments finden.

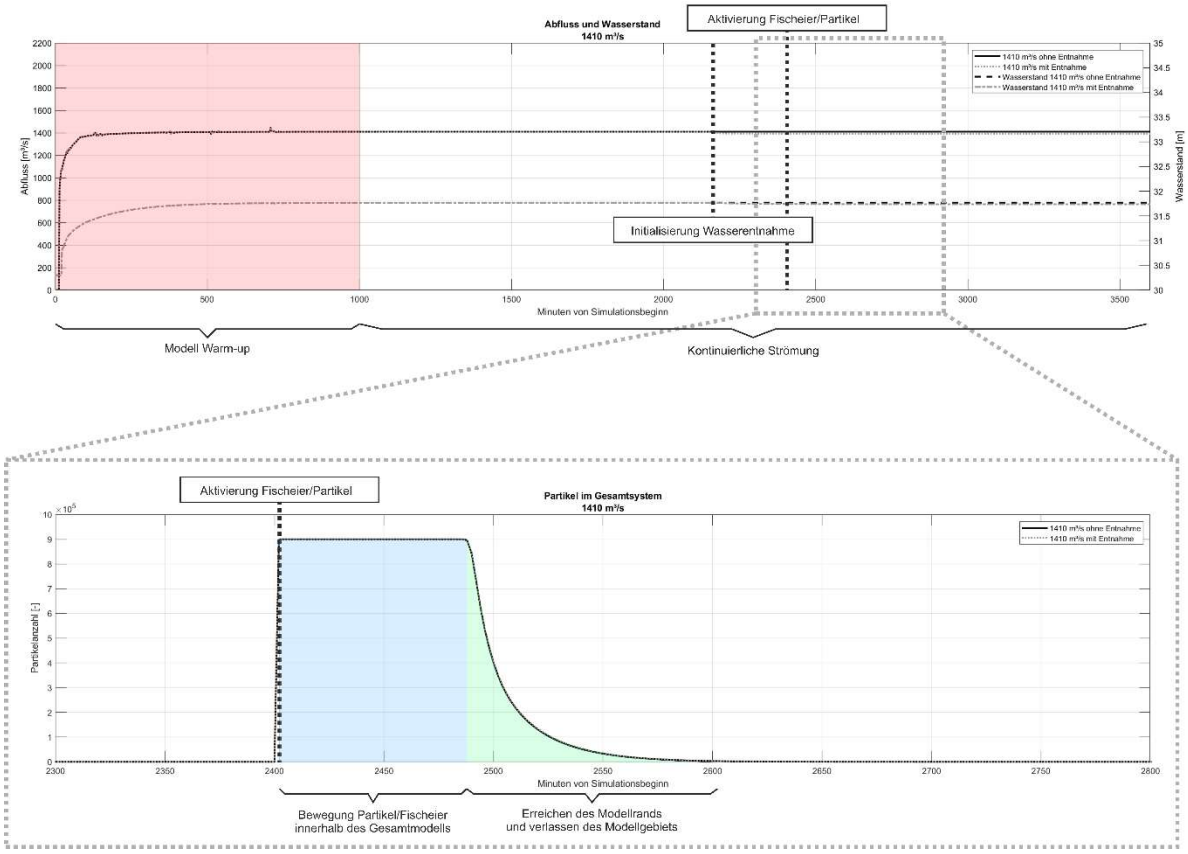

Abbildung 5: Darstellung der einzelnen Simulationsphasen Warm-up – (Initialisierung Wasserentnahme) – Initialisierung Fischlaich (Beispieldaten).

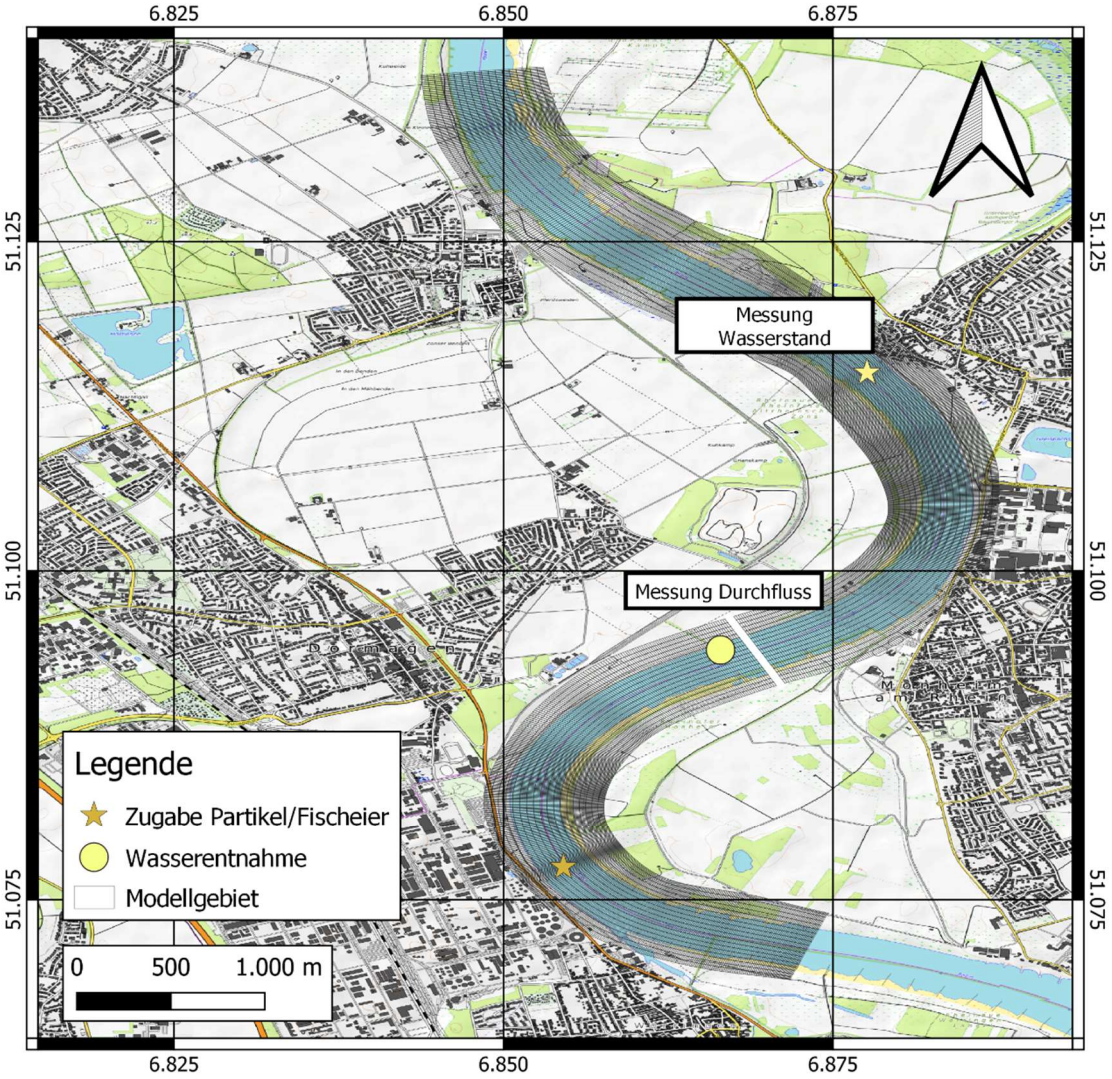

Abbildung 6: Positionierung der Durchfluss- und Wasserstandsmessung.

3.3 Einfluss der Wasserentnahme auf die Verdriftung der Fischeier

Im Rahmen der durchgeführten hydro-numerischen Untersuchungen konnte kein signifikanter Einfluss der Wasserentnahme auf die Verdriftung der Fischeier festgestellt werden. In Abbildung 7 werden die Graphen zur Gesamtanzahl an Fischeiern im Modellgebiet dargestellt. Aus diesen wird deutlich, dass sich optisch nur im Szenario 557 m³/s überhaupt ein Unterschied feststellen lässt, welcher jedoch lediglich den zeitlichen Verlauf der Verdriftung betrifft. Hier erreichen die Fischeier geringfügig später den Modellausgang bzw. werden geringfügig später aus dem betrachteten Gebiet transportiert.

In allen anderen Szenarien ist der Verlauf des Transportgeschehens nahezu unabhängig davon, ob die Wasserentnahme aktiv ist oder nicht. Tabelle 3 fast die Gesamtzahl an Fischeiern, welche sich am Ende der Simulationszeit noch im Modellgebiet befinden, zusammen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass mit abnehmendem Abfluss eine ansteigende Anzahl an Fischeiern im Modell verbleibt. Dies ist darauf zu-

rückzuführen, dass sich ein Teil des initialen Fischlaichs aufgrund der Ausdehnung von 165 m (Annahme entsprechen IWW, 2016) in trockenen Zellen oder Bereichen niedriger Fließgeschwindigkeiten am Rand des Flussschlauchs befindet und die dortigen Partikel somit nicht abtransportiert werden. Diese Problematik wird in Abbildung 8 anhand des Szenarios 557 m³/s verdeutlicht, hat jedoch auf das Gesamtergebnis (Einfluss der Wasserentnahme) keinen Einfluss. Dieser Effekt ist ausschließlich auf die initialen Annahmen zum Fischlaich zurückzuführen.

Weiterhin wird aus Tabelle 3 deutlich, dass nur für das Szenario 557 m³/s eine auffallende Differenz bezüglich der Fischeier vorliegt. Diese Differenz beträgt jedoch lediglich 0,44 % oder 3.968 Fischeier und ist bezogen auf die Gesamtanzahl an Fischeiern nicht signifikant.

Tabelle 3: Verbleibende Fischeier im Modellgebiet nach Ende der Simulationszeit.

		Ergebnisse 2021/2022		
	Szenario	Initiale Anzahl Fischeier	Verbleibende Anzahl Fischeier im Modellgebiet	Verbleibend in Prozent
1410 m³/s	**mit Entnahme**	900.000	24.868	2,76 %
	ohne Entnahme	900.000	24.868	2,76 %
557 m³/s	**mit Entnahme**	900.000	149.349	16,59 %
	ohne Entnahme	900.000	145.381	16,15 %
MW	**mit Entnahme**	900.000	1.734	0,19 %
	ohne Entnahme	900.000	1.734	0,19 %
MNW	**mit Entnahme**	900.000	85.130	9,46 %
	ohne Entnahme	900.000	85.130	9,46 %
NNW	**mit Entnahme**	900.000	99.353	11,04 %
	ohne Entnahme	900.000	99.353	11,04 %

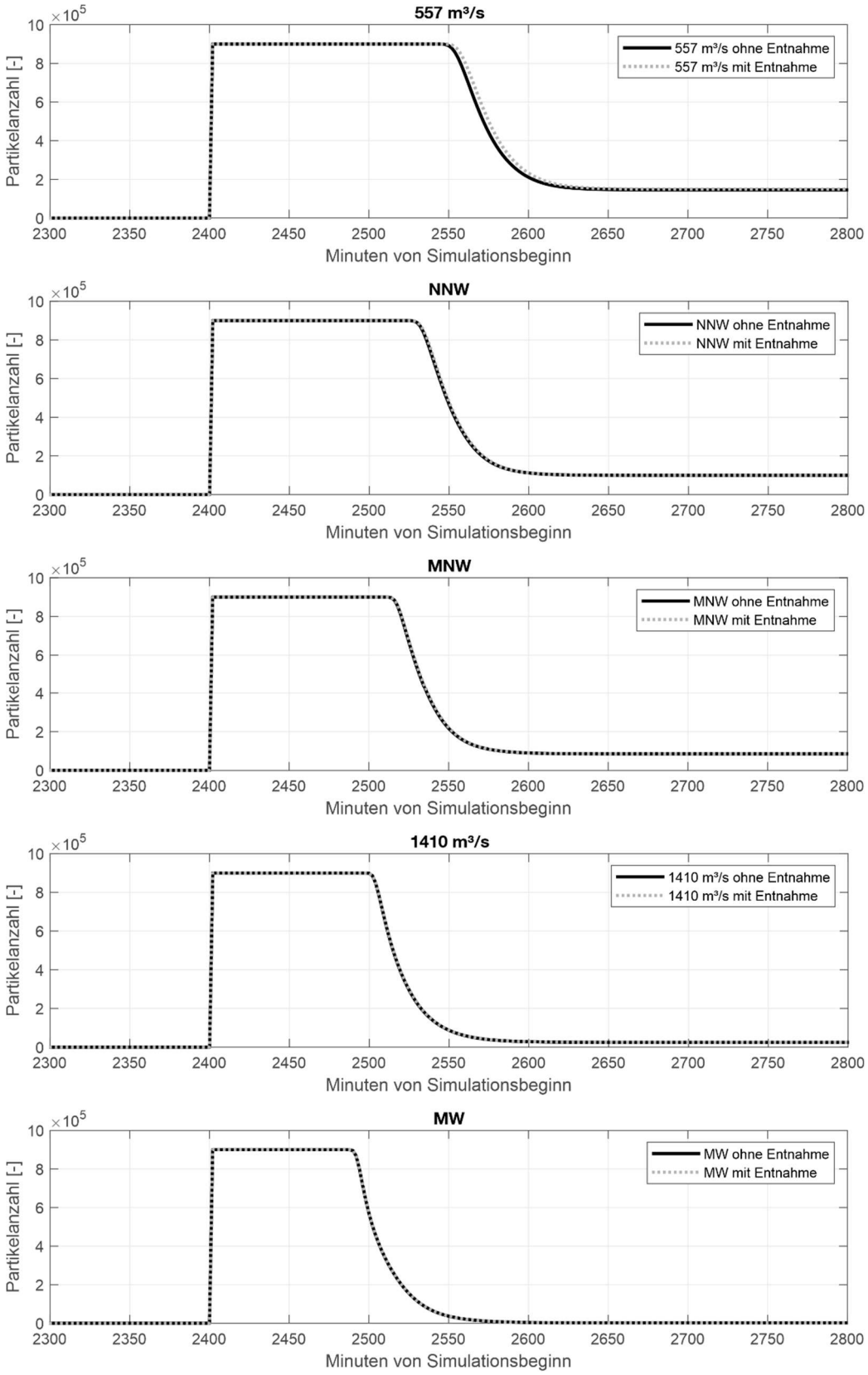

Abbildung 7: Graphische Darstellung des Verdriftungsverlaufs. Nur für das Szenario 557 m³/s lassen sich optisch Differenzen zwischen aktivierter und nicht-aktivierter Wasserentnahme feststellen, welche jedoch nur den zeitlichen Verlauf signifikant betreffen.

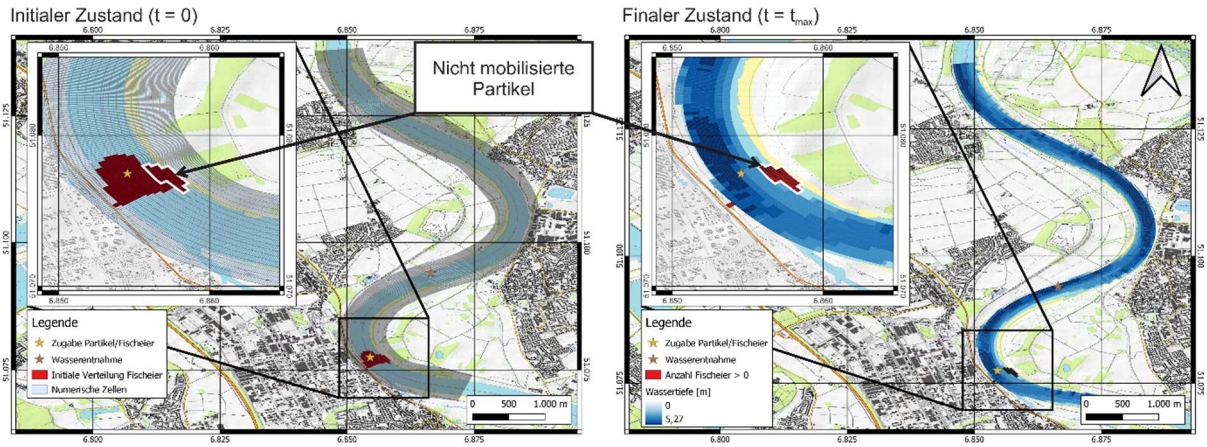

Abbildung 8: Aufgrund trockenfallender Zellen verbleibende Fischeier am Initialisierungsort (weiß umrandet).

4 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des hier bearbeiteten Projekts wurde mit der Software Delft3D die Verdriftung von Fischeiern in einem Teilgebiet des Rheins simuliert. Der Fokus lag hier darauf, abzuschätzen, ob eine Wasserentnahme von 18 m³/s einen signifikanten Einfluss auf die Verdriftungsdistanz der Fischeier erwarten lässt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt zehn Szenarien untersucht, welche fünf Abflusszustände jeweils mit und ohne Wasserentnahme umfassen. Das neu aufgebaute numerische Modell umfasst ca. 10 Rheinkilometer und beruht auf den aktuellsten zur Verfügung stehenden Daten zur Bathymetrie und dem Abflussgeschehen.

Der Einfluss der Wasserentnahme wurde basierend auf der Gesamtanzahl an Fischeiern im Modellgebiet abgeschätzt. Dabei konnte auf Basis der hydro-numerischen Untersuchungen **kein signifikanter Einfluss der Wasserentnahme auf die Verdriftungsdistanz der Fischeier** festgestellt werden. Sowohl in Bezug auf die Anzahl an Fischeiern als auch in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Verdriftung zeigen sich nur für das extrem niedrige und in der Realität sehr selten auftretende 557 m³/s Szenario wahrnehmbare Differenzen zwischen aktivierter und nicht-aktivierter Wasserentnahme. Auch hier liegen die Differenzen jedoch in einem sehr niedrigen und in der Realität nicht signifikantem Bereich (< 1 %).

Literatur

BFG, 2021: FLYS – Flusshydrologischer Webdienst, https://geoportal.bafg.de/, abgerufen am 10.11.2021

DELTARES, 2014a: RGFGRID User Manual, Version: 4.00.34074. Deltares, Delft, Niederlande.

DELTARES, 2014b: QUICKIN User Manual, Version: 4.00.34158. Deltares, Delft, Niederlande.

DELTARES, 2014c: Delft3D-FLOW User Manual, Version: 3.15.34158. Deltares, Delft, Niederlande.

DELTARES, 2014d: D-Waq PART User Manual, Version: 2.15.34131. Deltares, Delft, Niederlande.

IWW, 2016: Hydro-numerische Modellierung Verdriftung Fischeier. Bericht des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University. Berichtsnummer: B2016008.

KIFL, 2016: FFH-Verträglichkeitsuntersuchung für das FFH-Gebiet Rheinfischschutzzonen von Emmerich bis Bad Honnef. Juni 2016, Anlage B: Biologische und FFH-spezifische Eingangsparameter der hydronumerischen Modellierung der Verdriftung von Maifischeiern, Kieler Institut für Landschaftsökologie, Kiel, 2016, Unveröffentlicht.

Anhang

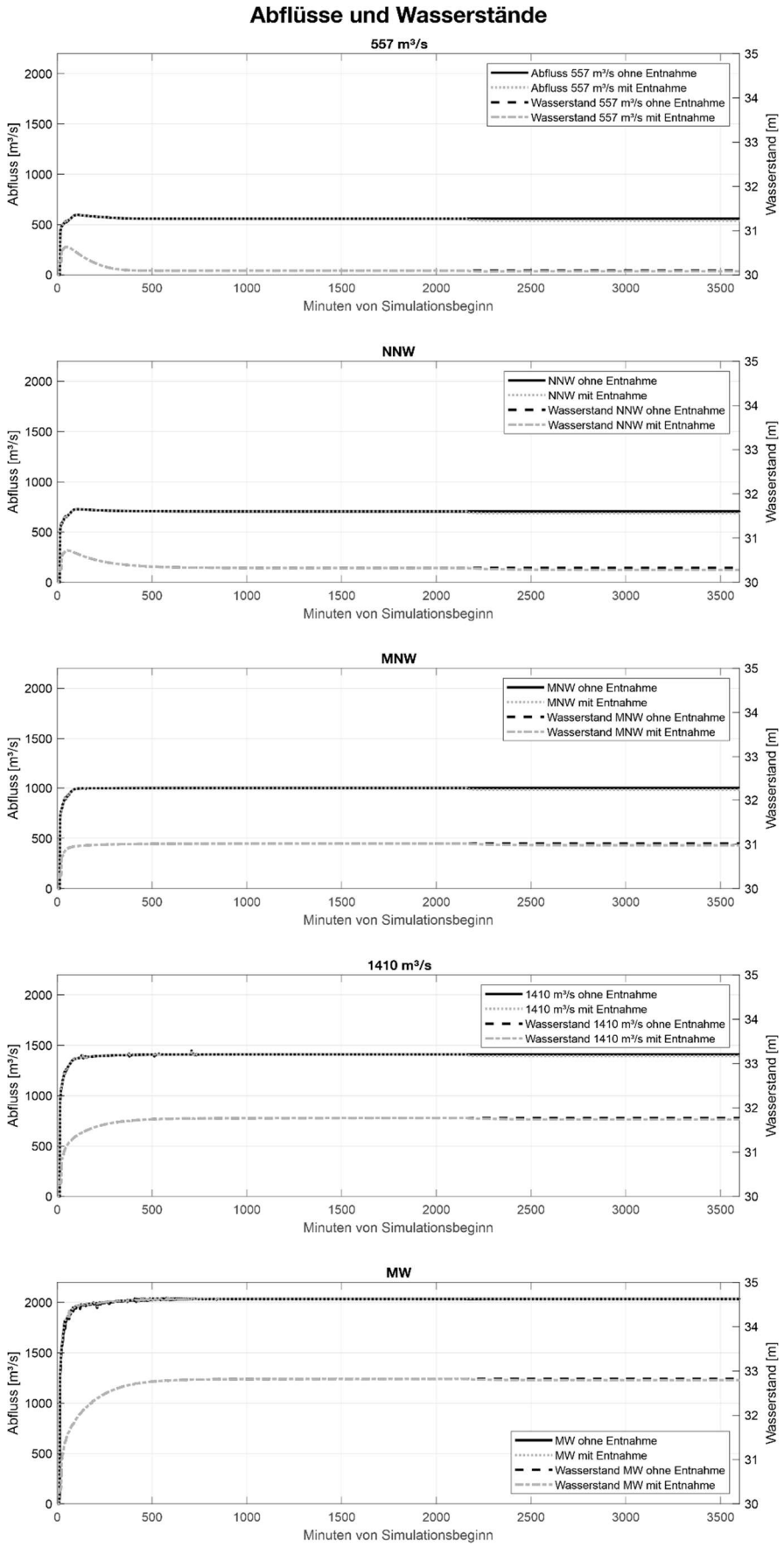

Abbildung A- 1: Abflüsse und Wasserstände für alle Szenarien.

Tabelle A- 1: Wasserstands-Abfluss Beziehung für die obere Modellrandbedingung.

Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]
637,00	29,86	3.569,60	34,30	6.502,20	37,23	9.434,80	39,38	12.367,40	41,02
666,33	29,94	3.598,93	34,33	6.531,53	37,26	9.464,13	39,39	12.396,73	41,03
695,65	30,01	3.628,25	34,36	6.560,85	37,28	9.493,45	39,41	12.426,05	41,05
724,98	30,08	3.657,58	34,39	6.590,18	37,30	9.522,78	39,43	12.455,38	41,06
754,30	30,15	3.686,90	34,42	6.619,50	37,33	9.552,10	39,45	12.484,70	41,08
783,63	30,22	3.716,23	34,45	6.648,83	37,35	9.581,43	39,47	12.514,03	41,09
812,96	30,29	3.745,56	34,48	6.678,16	37,37	9.610,76	39,49	12.543,36	41,11
842,28	30,36	3.774,88	34,51	6.707,48	37,40	9.640,08	39,51	12.572,68	41,13
871,61	30,43	3.804,21	34,54	6.736,81	37,42	9.669,41	39,52	12.602,01	41,14
900,93	30,50	3.833,53	34,57	6.766,13	37,44	9.698,73	39,54	12.631,33	41,16
930,26	30,57	3.862,86	34,60	6.795,46	37,47	9.728,06	39,56	12.660,66	41,17
959,59	30,63	3.892,19	34,63	6.824,79	37,49	9.757,39	39,58	12.689,99	41,19
988,91	30,70	3.921,51	34,66	6.854,11	37,51	9.786,71	39,59	12.719,31	41,20
1.018,24	30,76	3.950,84	34,69	6.883,44	37,53	9.816,04	39,61	12.748,64	41,22
1.047,56	30,82	3.980,16	34,72	6.912,76	37,56	9.845,36	39,62	12.777,96	41,23
1.076,89	30,87	4.009,49	34,75	6.942,09	37,58	9.874,69	39,64	12.807,29	41,25
1.106,22	30,93	4.038,82	34,78	6.971,42	37,60	9.904,02	39,66	12.836,62	41,27
1.135,54	30,98	4.068,14	34,82	7.000,74	37,62	9.933,34	39,67	12.865,94	41,28
1.164,87	31,04	4.097,47	34,85	7.030,07	37,65	9.962,67	39,69	12.895,27	41,30
1.194,19	31,09	4.126,79	34,88	7.059,39	37,67	9.991,99	39,71	12.924,59	41,31
1.223,52	31,14	4.156,12	34,91	7.088,72	37,69	10.021,32	39,72	12.953,92	41,33
1.252,85	31,19	4.185,45	34,95	7.118,05	37,71	10.050,65	39,74	12.983,25	41,34
1.282,17	31,24	4.214,77	34,98	7.147,37	37,74	10.079,97	39,76	13.012,57	41,36
1.311,50	31,29	4.244,10	35,01	7.176,70	37,76	10.109,30	39,77	13.041,90	41,37
1.340,82	31,34	4.273,42	35,04	7.206,02	37,78	10.138,62	39,79	13.071,22	41,39
1.370,15	31,39	4.302,75	35,08	7.235,35	37,80	10.167,95	39,81	13.100,55	41,41
1.399,48	31,44	4.332,08	35,11	7.264,68	37,82	10.197,28	39,82	13.129,88	41,42
1.428,80	31,49	4.361,40	35,14	7.294,00	37,85	10.226,60	39,84	13.159,20	41,44
1.458,13	31,53	4.390,73	35,18	7.323,33	37,87	10.255,93	39,86	13.188,53	41,45
1.487,45	31,58	4.420,05	35,21	7.352,65	37,89	10.285,25	39,87	13.217,85	41,47
1.516,78	31,62	4.449,38	35,24	7.381,98	37,91	10.314,58	39,89	13.247,18	41,48
1.546,11	31,67	4.478,71	35,28	7.411,31	37,93	10.343,91	39,91	13.276,51	41,50
1.575,43	31,71	4.508,03	35,31	7.440,63	37,95	10.373,23	39,93	13.305,83	41,51
1.604,76	31,76	4.537,36	35,34	7.469,96	37,97	10.402,56	39,94	13.335,16	41,53
1.634,08	31,81	4.566,68	35,38	7.499,28	38,00	10.431,88	39,96	13.364,48	41,54
1.663,41	31,86	4.596,01	35,41	7.528,61	38,02	10.461,21	39,98	13.393,81	41,56
1.692,74	31,91	4.625,34	35,44	7.557,94	38,04	10.490,54	39,99	13.423,14	41,57
1.722,06	31,96	4.654,66	35,48	7.587,26	38,06	10.519,86	40,01	13.452,46	41,59
1.751,39	32,02	4.683,99	35,51	7.616,59	38,08	10.549,19	40,03	13.481,79	41,60
1.780,71	32,07	4.713,31	35,54	7.645,91	38,10	10.578,51	40,04	13.511,11	41,62
1.810,04	32,13	4.742,64	35,58	7.675,24	38,12	10.607,84	40,06	13.540,44	41,63
1.839,37	32,18	4.771,97	35,61	7.704,57	38,15	10.637,17	40,08	13.569,77	41,65
1.868,69	32,23	4.801,29	35,64	7.733,89	38,17	10.666,49	40,09	13.599,09	41,66
1.898,02	32,28	4.830,62	35,68	7.763,22	38,19	10.695,82	40,11	13.628,42	41,68
1.927,34	32,34	4.859,94	35,71	7.792,54	38,21	10.725,14	40,12	13.657,74	41,69
1.956,67	32,38	4.889,27	35,74	7.821,87	38,23	10.754,47	40,14	13.687,07	41,70
1.986,00	32,43	4.918,60	35,77	7.851,20	38,25	10.783,80	40,16	13.716,40	41,72
2.015,32	32,48	4.947,92	35,81	7.880,52	38,27	10.813,12	40,17	13.745,72	41,73
2.044,65	32,52	4.977,25	35,84	7.909,85	38,30	10.842,45	40,19	13.775,05	41,75
2.073,97	32,57	5.006,57	35,87	7.939,17	38,32	10.871,77	40,21	13.804,37	41,76
2.103,30	32,61	5.035,90	35,90	7.968,50	38,34	10.901,10	40,22	13.833,70	41,78
2.132,63	32,65	5.065,23	35,93	7.997,83	38,36	10.930,43	40,24	13.863,03	41,79
2.161,95	32,69	5.094,55	35,97	8.027,15	38,38	10.959,75	40,25	13.892,35	41,81
2.191,28	32,74	5.123,88	36,00	8.056,48	38,40	10.989,08	40,27	13.921,68	41,82
2.220,60	32,77	5.153,20	36,03	8.085,80	38,42	11.018,40	40,29	13.951,00	41,84
2.249,93	32,81	5.182,53	36,06	8.115,13	38,44	11.047,73	40,30	13.980,33	41,85
2.279,26	32,85	5.211,86	36,09	8.144,46	38,47	11.077,06	40,32	14.009,66	41,87
2.308,58	32,89	5.241,18	36,12	8.173,78	38,49	11.106,38	40,34	14.038,98	41,88
2.337,91	32,93	5.270,51	36,15	8.203,11	38,51	11.135,71	40,35	14.068,31	41,89
2.367,23	32,96	5.299,83	36,18	8.232,43	38,53	11.165,03	40,37	14.097,63	41,91
2.396,56	33,00	5.329,16	36,21	8.261,76	38,55	11.194,36	40,38	14.126,96	41,92
2.425,89	33,04	5.358,49	36,24	8.291,09	38,57	11.223,69	40,40	14.156,29	41,94
2.455,21	33,07	5.387,81	36,27	8.320,41	38,59	11.253,01	40,42	14.185,61	41,95
2.484,54	33,11	5.417,14	36,30	8.349,74	38,61	11.282,34	40,43	14.214,94	41,97
2.513,86	33,15	5.446,46	36,33	8.379,06	38,64	11.311,66	40,45	14.244,26	41,98
2.543,19	33,18	5.475,79	36,36	8.408,39	38,66	11.340,99	40,47	14.273,59	42,00
2.572,52	33,22	5.505,12	36,39	8.437,72	38,68	11.370,32	40,48	14.302,92	42,01
2.601,84	33,25	5.534,44	36,42	8.467,04	38,70	11.399,64	40,50	14.332,24	42,02
2.631,17	33,29	5.563,77	36,44	8.496,37	38,72	11.428,97	40,51	14.361,57	42,04
2.660,49	33,33	5.593,09	36,47	8.525,69	38,74	11.458,29	40,53	14.390,89	42,05
2.689,82	33,36	5.622,42	36,50	8.555,02	38,76	11.487,62	40,55	14.420,22	42,07
2.719,15	33,40	5.651,75	36,53	8.584,35	38,78	11.516,95	40,56	14.449,55	42,08
2.748,47	33,43	5.681,07	36,56	8.613,67	38,80	11.546,27	40,58	14.478,87	42,10
2.777,80	33,46	5.710,40	36,58	8.643,00	38,82	11.575,60	40,60	14.508,20	42,11
2.807,12	33,50	5.739,72	36,61	8.672,32	38,84	11.604,92	40,61	14.537,52	42,12
2.836,45	33,53	5.769,05	36,63	8.701,65	38,86	11.634,25	40,63	14.566,85	42,14
2.865,78	33,57	5.798,38	36,66	8.730,98	38,89	11.663,58	40,64	14.596,18	42,15
2.895,10	33,60	5.827,70	36,69	8.760,30	38,91	11.692,90	40,66	14.625,50	42,17
2.924,43	33,63	5.857,03	36,71	8.789,63	38,93	11.722,23	40,68	14.654,83	42,18
2.953,75	33,67	5.886,35	36,74	8.818,95	38,95	11.751,55	40,69	14.684,15	42,20
2.983,08	33,70	5.915,68	36,76	8.848,28	38,97	11.780,88	40,71	14.713,48	42,21
3.012,41	33,73	5.945,01	36,79	8.877,61	38,99	11.810,21	40,72	14.742,81	42,22
3.041,73	33,76	5.974,33	36,81	8.906,93	39,01	11.839,53	40,74	14.772,13	42,24
3.071,06	33,79	6.003,66	36,84	8.936,26	39,03	11.868,86	40,76	14.801,46	42,25
3.100,38	33,82	6.032,98	36,86	8.965,58	39,05	11.898,18	40,77	14.830,78	42,27
3.129,71	33,86	6.062,31	36,88	8.994,91	39,07	11.927,51	40,79	14.860,11	42,28
3.159,04	33,89	6.091,64	36,91	9.024,24	39,09	11.956,84	40,80	14.889,44	42,30
3.188,36	33,92	6.120,96	36,93	9.053,56	39,11	11.986,16	40,82	14.918,76	42,31
3.217,69	33,95	6.150,29	36,95	9.082,89	39,13	12.015,49	40,83	14.948,09	42,32
3.247,01	33,98	6.179,61	36,98	9.112,21	39,15	12.044,81	40,85	14.977,41	42,34
3.276,34	34,01	6.208,94	37,00	9.141,54	39,17	12.074,14	40,86	15.006,74	42,35
3.305,67	34,04	6.238,27	37,02	9.170,87	39,19	12.103,47	40,88	15.036,07	42,37
3.334,99	34,07	6.267,59	37,05	9.200,19	39,21	12.132,79	40,89	15.065,39	42,38
3.364,32	34,10	6.296,92	37,07	9.229,52	39,23	12.162,12	40,91	15.094,72	42,40
3.393,64	34,12	6.326,24	37,09	9.258,84	39,25	12.191,44	40,93	15.124,04	42,41
3.422,97	34,15	6.355,57	37,12	9.288,17	39,27	12.220,77	40,94	15.153,37	42,42
3.452,30	34,18	6.384,90	37,14	9.317,50	39,29	12.250,10	40,96	15.182,70	42,44
3.481,62	34,21	6.414,22	37,16	9.346,82	39,31	12.279,42	40,97	15.212,02	42,45
3.510,95	34,24	6.443,55	37,19	9.376,15	39,33	12.308,75	40,99	15.241,35	42,47
3.540,27	34,27	6.472,87	37,21	9.405,47	39,36	12.338,07	41,00	15.270,67	42,48

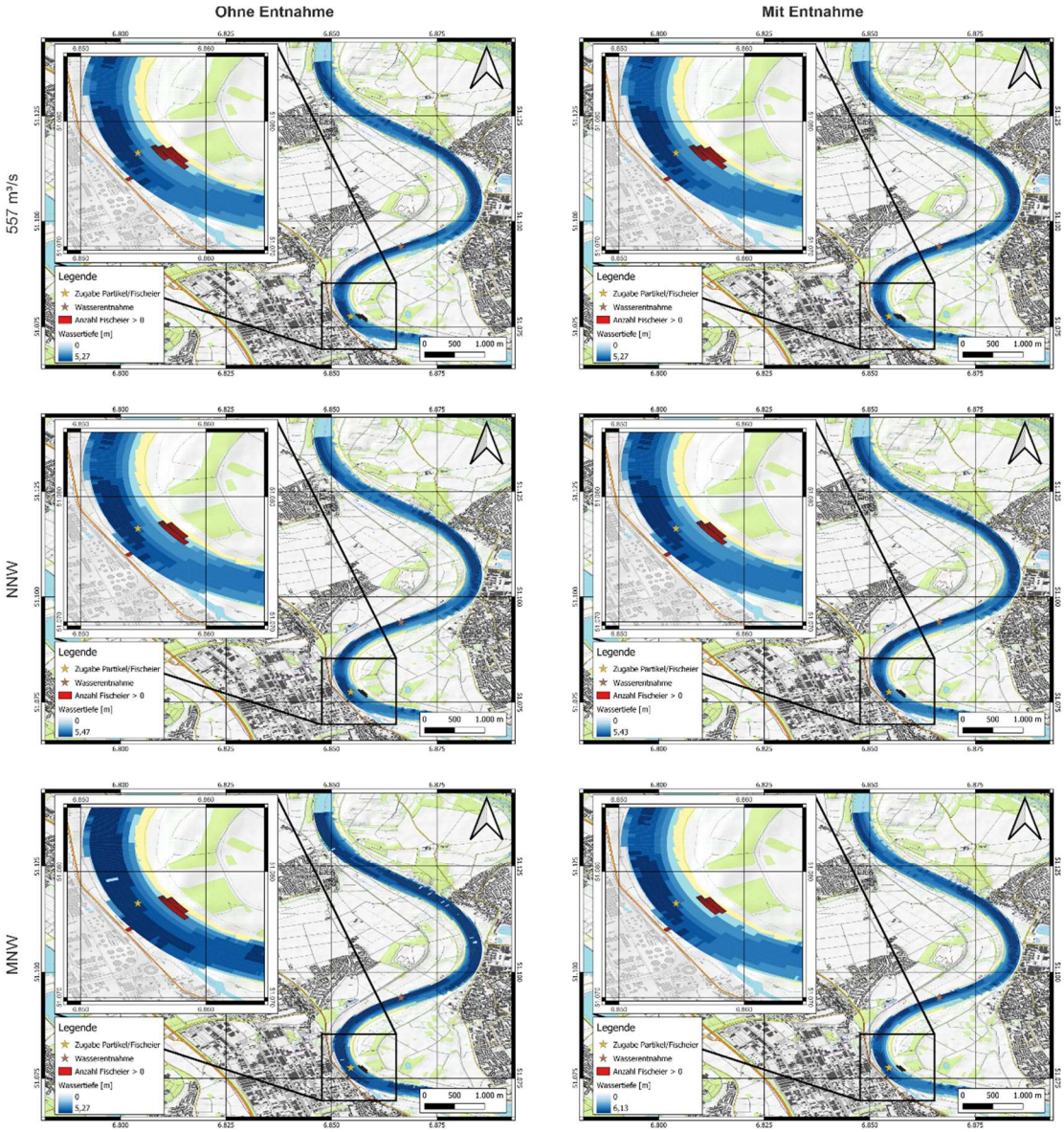

Abbildung A- 2: Darstellung der im Modellgebiet verbliebenen Fischeier für die Szenarien 557 m³/s, NNW und MNW.

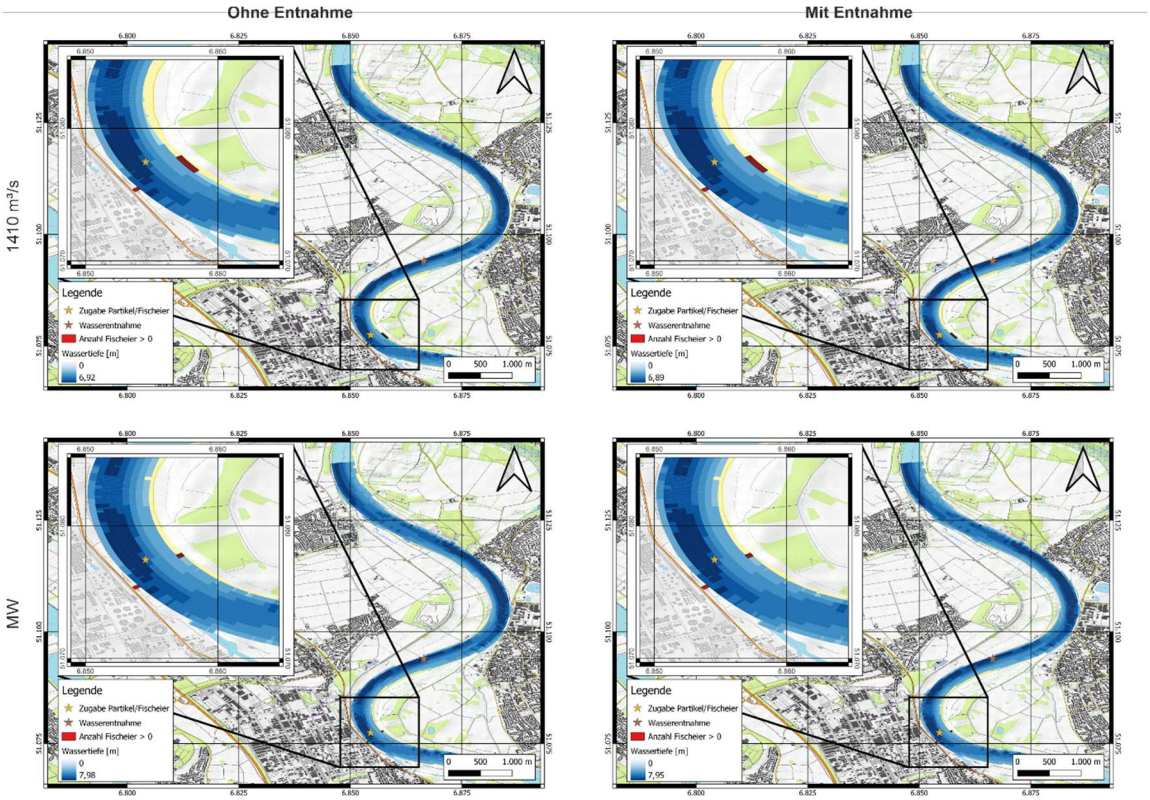

Abbildung A- 3: Darstellung der im Modellgebiet verbliebenen Fischeier für die Szenarien 1410 m³/s und MW.