

RKR2020 – Umweltplanung Modul 2



Stauabsenkung im Hochwasserfall am KW Reckingen – Auswirkungen auf Sohlschubspannungen und Abfluss- ganglinien

Anlage D7.14

18.08.2017

Berichtverfasser:

Dettman & Theobald

im Rahmen der

Arbeitsgemeinschaft Bosch & Partner / BNGF

Im Auftrag von

Kraftwerk Reckingen AG



**Stauabsenkung im Hochwasserfall am KW Reckingen –
Auswirkungen auf
Sohlschubspannungen und Abflussganglinien**

1D- und 2D-HN-Modellierung

Auftraggeber:

Kraftwerk Reckingen AG

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. U. Theobald

Prof. Dr.-Ing. S. Theobald

Kassel, Juni 2017

Inhalt

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	3
2	Kritische Sohlschubspannung für den Bewegungsbeginn	3
3	Simulation der Sohlschubspannungen	5
4	Prinzipielle Auswirkungen von Absenkvorgängen auf den Hochwasserablauf	12
5	Zusammenfassung	16

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Aktivierung des Geschiebetriebs in der Stauhaltung Reckingen im Hochwasserfall durch Stauspiegelabsenkung ist immer wieder Gegenstand von Überlegungen. Daher wurde das bestehende 2D-Strömungsmodell des Staauraums Reckingen genutzt, um Sohlschubspannungen bei verschiedenen Oberwasserständen zu ermitteln, was erste Abschätzungen zum Geschiebetrieb ermöglicht. Hierbei handelt es sich nicht um morphodynamische Untersuchungen, sondern auftragsgemäß um grobe Abschätzungen aufgrund der 2D-HN-Simulationen. Der vorliegende Kurzbericht beschreibt diese Simulationen sowie Voranalysen, welchen Einfluss die Stauabsenkungen und damit einhergehenden Sohlschubspannungen auf den Geschiebetransport haben könnten.

Für die Berechnungen wurden vom Auftraggeber die folgenden Randbedingungen vorgegeben:

- Abfluss $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$
- Oberwasserstand an der Stauanlage Reckingen
 - $331,94 \text{ m} + n\text{SH}$ (Stauziel)
 - $331,94 \text{ m} + n\text{SH} - 1,0 \text{ m} = 330,94 \text{ m} + n\text{SH}$
 - $331,94 \text{ m} + n\text{SH} - 4,0 \text{ m} = 327,94 \text{ m} + n\text{SH}$
 - $324,38 \text{ m} + n\text{SH}$ (Wasserspiegel bei komplett geöffnetem Wehr)

Des Weiteren wurden instationäre 1D-HN-Berechnungen zu Auswirkungen des Absenkvorgangs auf die Hochwasserganglinie durchgeführt.

2 Kritische Sohlschubspannung für den Bewegungsbeginn

Die Sohlschubspannung ist definiert als

$$\tau = r_{\text{hy}} \cdot I_{\text{E}} \cdot \rho \cdot g$$

Mit τ = Sohlschubspannung [N/m^2]

r_{hy} = hydraulischer Radius [m]

I_{E} = Energieliniengefälle [-]

ρ = Dichte [kg/m^3]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2]

In empirischen Untersuchungen verschiedener Autoren wurden die in der folgenden Tabelle 1 aufgetragenen kritischen Schubspannungen für den Bewegungsbeginn festgehalten:

Tabelle 1:

Sohlenmaterial	τ_{cr} N/m ²
Feinsand 0,063–0,2 mm	1
Mittelsand 0,2–0,63 mm	2
Grobsand 0,63–1,0 mm	3
Grobsand 1–2 mm	4
Kies-Sand-Gemisch, 0,63–6,3 mm, festgelagert	9
Mittelkies 6,3–20 mm	15
Grobkies 20–63 mm	40
Geröll 63–100 mm	60
Grobe Blöcke	> 240
lehmiger Feinsand	2
lockerer Schlamm	2,5
lehmiger Kies	15
lockerer Lehm	3,5
festgelagerter Lehm	12
Ton und festgelagerter Schlamm	12
Rasen, kurzfristig belastet	20–30
Rasen, längerfristig belastet	15–18
Buschmatte, Spreutlage	40
Pflaster je nach Dicke	70–200
Packwerk, oberflächlich gepflastert	170

Gemäß der Angaben des Auftraggebers bzw. des Masterplans „Massnahmen zur Geschiebereaktivierung am Hochrhein“ wird das Sohlmaterial des Rheins mit einem maßgeblichen mittleren Steindurchmesser $d_m = 2,2$ cm charakterisiert. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Rubriken Mittelkies (6,3 – 20 mm) und Grobkies (20 – 63 mm) aus obiger Tabelle für den Hochrhein als maßgeblich zu betrachten sind. Die kritische Schubspannung für einen nennenswerten Geschiebetransport läge somit gemäß Tabelle 1 zwischen 15 und 40 N/m².

3 Simulation der Sohlschubspannungen

Die Simulationen zu den Sohlschubspannungen im Oberwasser der Stauanlage Reckingen erfolgten mit dem bestehenden 2D-HN-Modell der Stauhaltung Reckingen, welches im Bericht „Hydraulische Untersuchungen im Rahmen der Konzessionserneuerung KW Reckingen – 2D-HN-Modellierung“ näher erläutert wurde.

Abb. 1 zeigt die Wasserspiegellängsschnitte in der Stauhaltung Reckingen für die verschiedenen Wasserstände an der Stauanlage Reckingen bei dem vorgegebenen Abfluss $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Stauanlage Reckingen befindet sich am rechten Rand der Grafik (Rhein-km 90,5), Eglisau am linken Rand bei Rhein-km 79,2. Ein Vergleich der Wasserspiegellagen bei einer Absenkung um 4,0 m unter Stauziel auf 327,94 m +nSH (schwarz) mit der tiefst möglichen Absenkung bei vollständiger Öffnung der Wehranlage (rot, Oberwasserstand 324,38 m +nSH) zeigt, dass sich die zusätzliche Absenkung in der oberen Hälfte der Stauhaltung nicht mehr auf die Wasserspiegellage auswirkt. Somit unterscheiden sich in diesem Abschnitt auch die Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen nicht, wie der Schubspannungs-Längsschnitt in der Rheinachse (Abb. 2) zeigt. Die zusätzliche Absenkung mit vollständiger Öffnung der Wehranlage verbessert somit die Geschiebetransportkapazität des Rheins in dieser oberen Hälfte der Stauhaltung Reckingen gegenüber der Absenkung um 4 m unter Stauziel nicht.

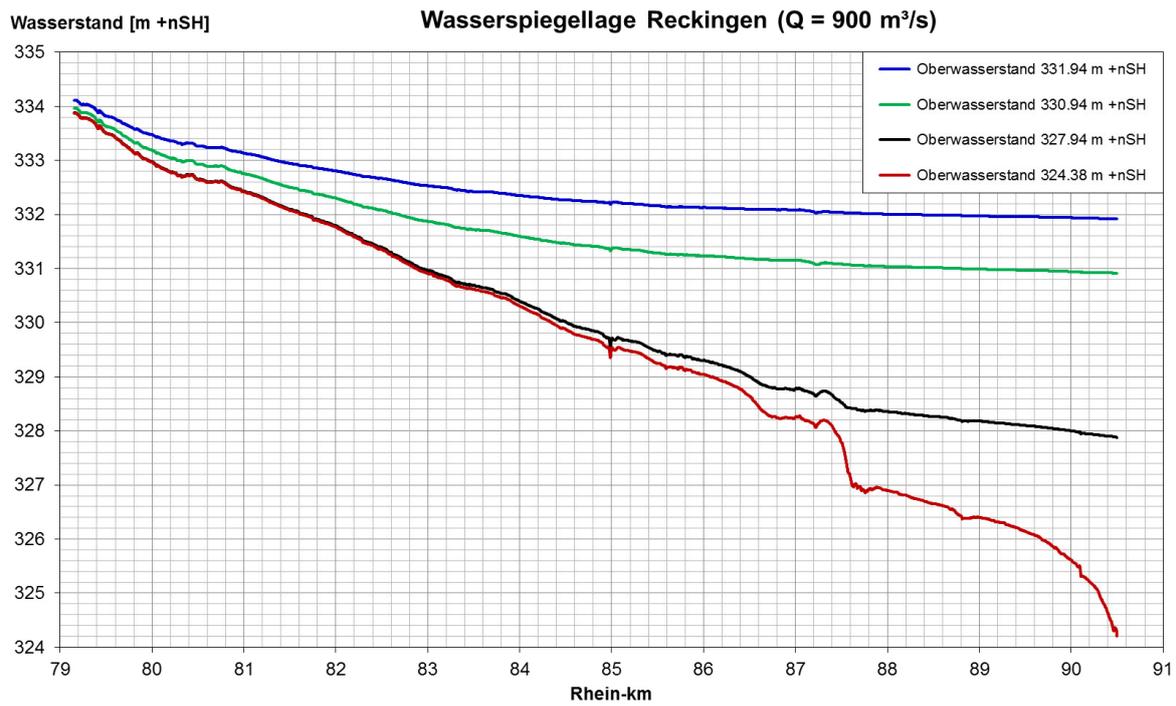


Abb. 1: Wasserspiegel-Längsschnitt in der Rheinachse (OW Reckingen)

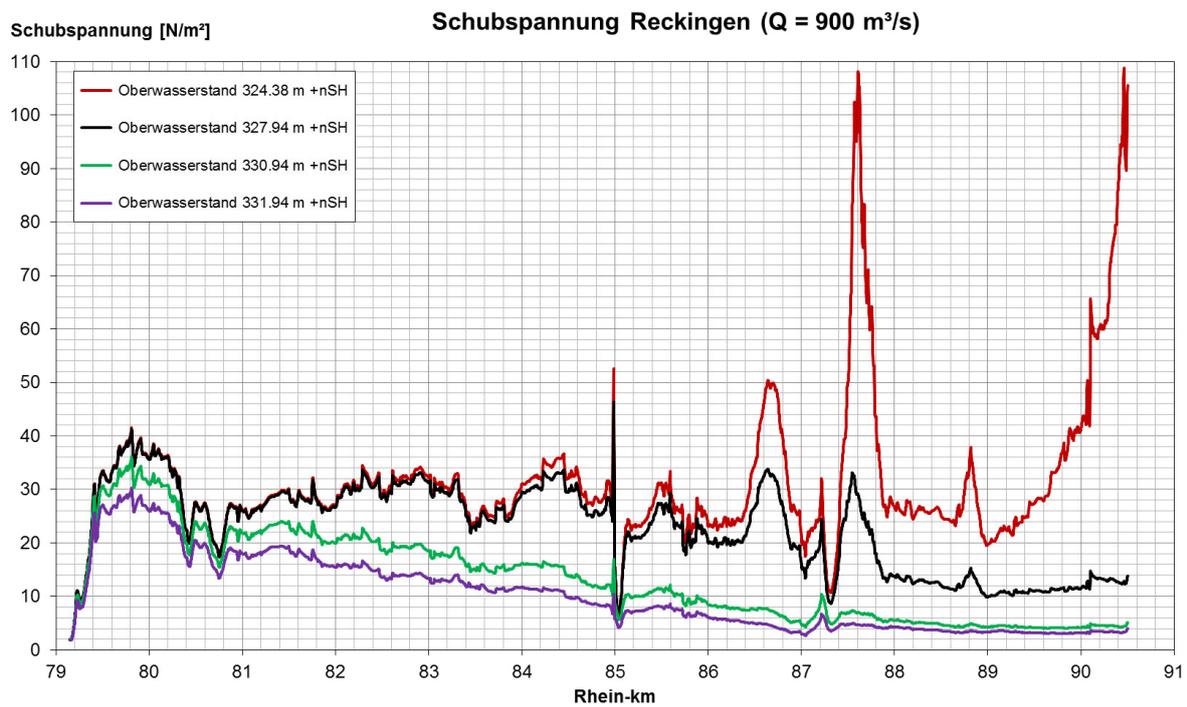


Abb. 2: Schubspannungs-Längsschnitt in der Rheinachse (OW Reckingen)

In Abb. 3 bis Abb. 6 sind die Sohlschubspannungen in der unteren Hälfte der Stauhaltung Reckingen für die verschiedenen Oberwasserstände dargestellt, Abb. 7 bis Abb. 10 geben den oberen Abschnitt wieder.

Sowohl der Längsschnitt (Abb. 2) als auch die flächige Darstellung belegen, dass ein Absenken des Oberwasserstandes um $\Delta y = 1$ m nur eine sehr geringe Erhöhung der Schubspannung im Oberwasser Reckingen bewirkt, die mit Werten bis zu $\tau = 8$ N/m² noch keinen Transport des Rhein-Kieses ermöglicht.

Eine Absenkung um $\Delta y = 4$ m auf einen Oberwasserstand von 327,94 m +nSH erzeugt bei einem Abfluss von $Q = 900$ m³/s einen Anstieg der Schubspannung auf $\tau = 8 - 16$ N/m² in einem ca. 2,5 km langen Abschnitt oberstrom der Stauanlage Reckingen. Weiter oberstrom bei Rümikon erhöht sich die Schubspannung bereichsweise auf Werte von $\tau = 30 - 40$ N/m². Es ist davon auszugehen, dass hier ein Geschiebetransport einsetzt, jedoch ein Großteil des in Bewegung gesetzten Geschiebes sich in dem genannten Abschnitt mit geringeren Sohlschubspannungen ablagert.

Eine Absenkung des Oberwasserspiegels auf 324,38 m +nSH erhöht die Schubspannungsspitzen bei Rümikon deutlich, zudem steigt die Schubspannung im Nahfeld der Stauanlage Reckingen stark an. Aufgrund des dazwischen befindlichen Abschnitts mit geringeren Schubspannungen ist davon auszugehen, dass das bei Rümikon in Bewegung gesetzte Geschiebe sich z.T. bereits kurz unterstrom von Rümikon wieder ablagert. Aus den vorliegenden Berechnungen kann keine Aussage getroffen werden, ob sich die im Nahfeld der Stauanlage durch die tiefe Absenkung mobilisierten Sedimente im Unterwasser der Stauanlage wieder absetzen oder ob diese weitertransportiert werden. Eine Berechnung der Sohlschubspannungen im Unterwasser Reckingen könnte hierzu konkrete Hinweise liefern.

In der oberen Hälfte der Stauhaltung Reckingen liegen die Schubspannungen durchweg höher als in der unteren Hälfte. Ein Absenken des Oberwasserstandes erhöht die Schubspannungen auch hier, jedoch nicht so stark wie in der unteren Hälfte.

Es ist davon auszugehen, dass im Oberwasser der Stauanlage Reckingen Feinsediment-Ablagerungen vorliegen (vgl. Masterplan Geschieberekonstruktivierung, Kapitel 2.4). Diese Feinsedimente werden durch die Absenkung des Oberwasserstandes im Hochwasserfall und die somit ansteigenden Sohlschubspannungen mobilisiert – je nach Tiefe der Absenkung in entsprechendem Umfang – und mit der Hochwasserwelle verhältnismäßig weit transportiert. Die ökologischen Auswirkungen dieser Mobilisierung und der damit einhergehenden Trübung sind separat von anderer Seite zu beurteilen.

Da Ablagerungen im Unterwasser des Kraftwerks Reckingen in Hinblick auf die Energieerzeugung kontraproduktiv wären, ist der Weitertransport bzw. ggf. die Ablagerung des durch die Stauabsenkung bei Reckingen induzierten Sedimenttransportes durch dementsprechende Untersuchungen zu überprüfen.

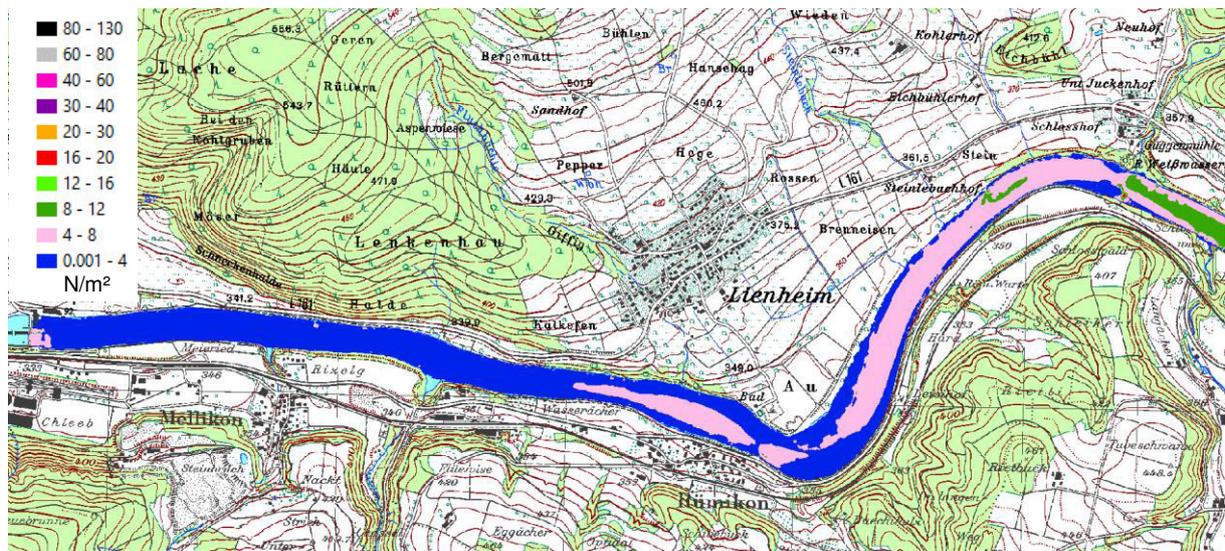


Abb. 3: Sohl Schubspannung bei einem Oberwasserstand von 331,94 m +nSH – unterer Abschnitt

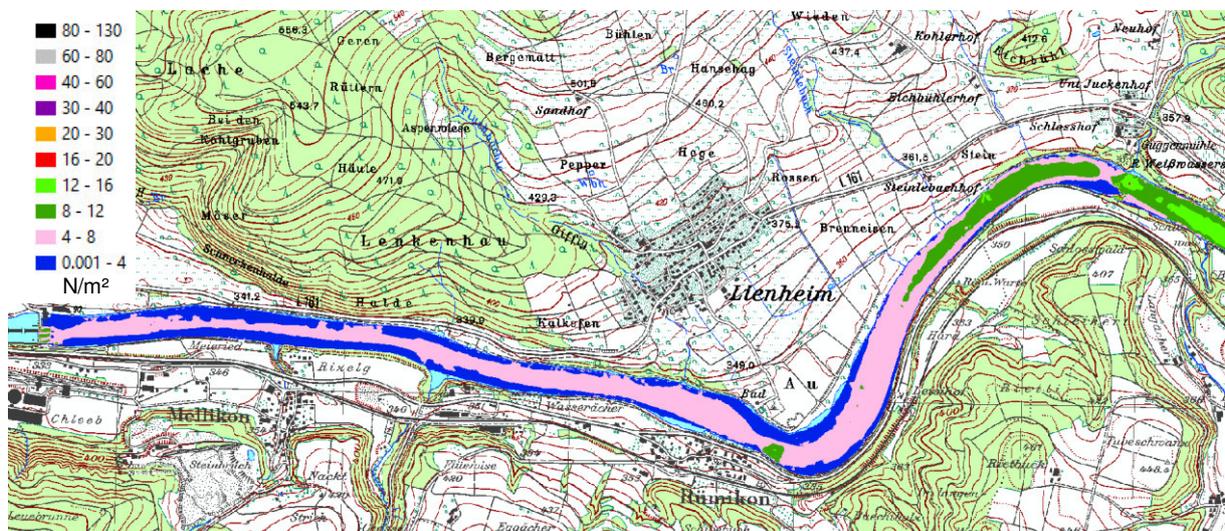


Abb. 4: Sohl Schubspannung bei einem Oberwasserstand von 330,94 m +nSH– unterer Abschnitt

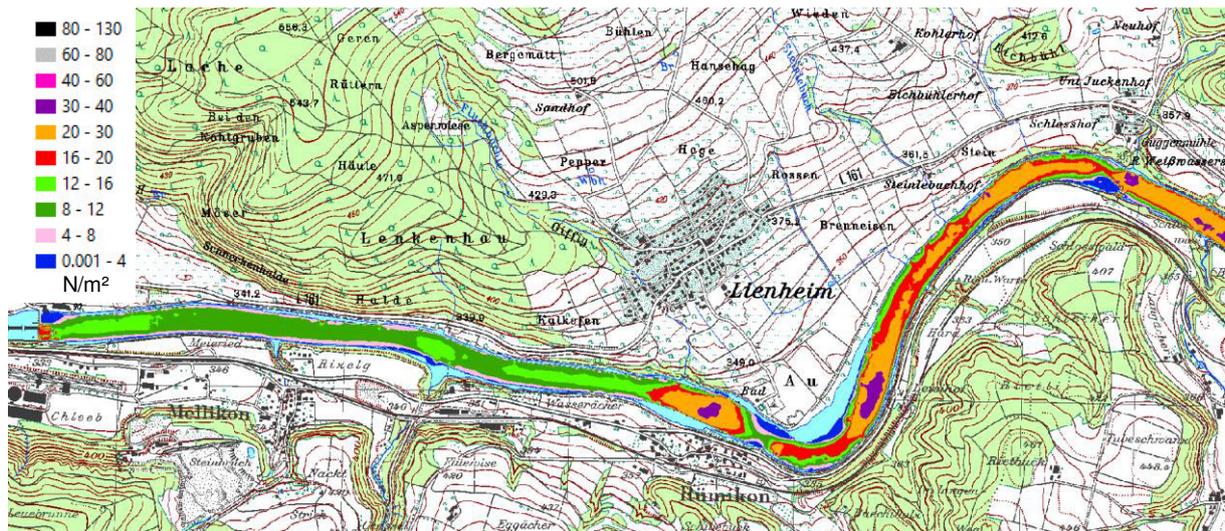


Abb. 5: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 327,94 m +nSH– unterer Abschnitt

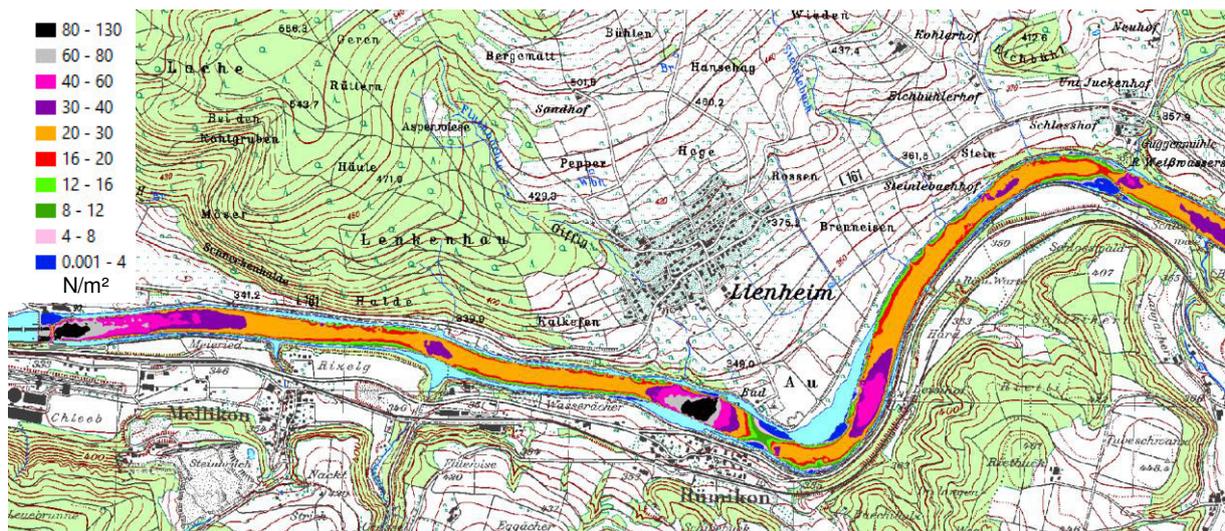


Abb. 6: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 324,38 m +nSH – unterer Abschnitt

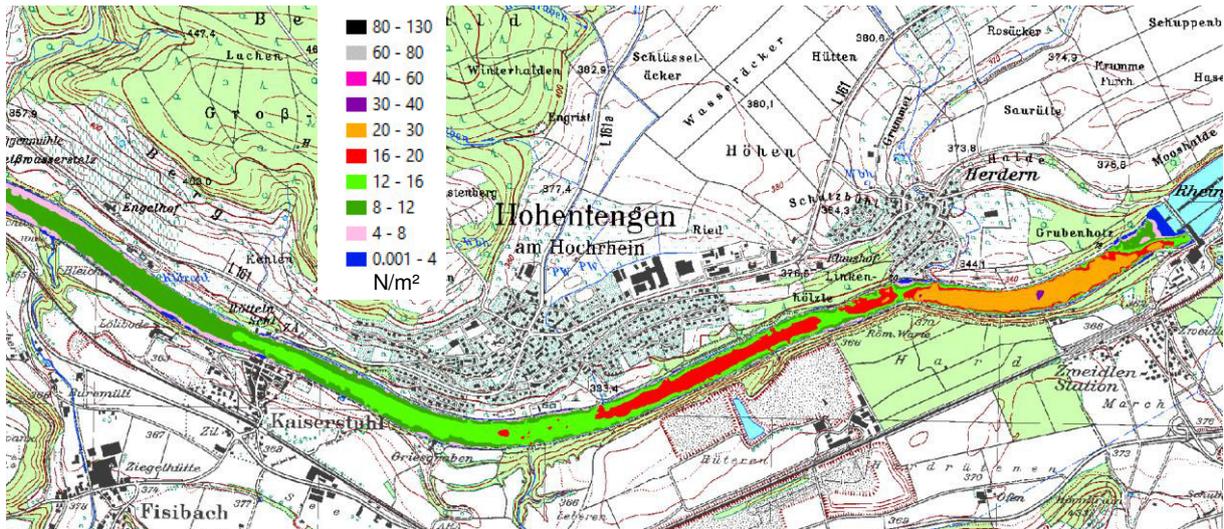


Abb. 7: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 331,94 m +nSH – oberer Abschnitt

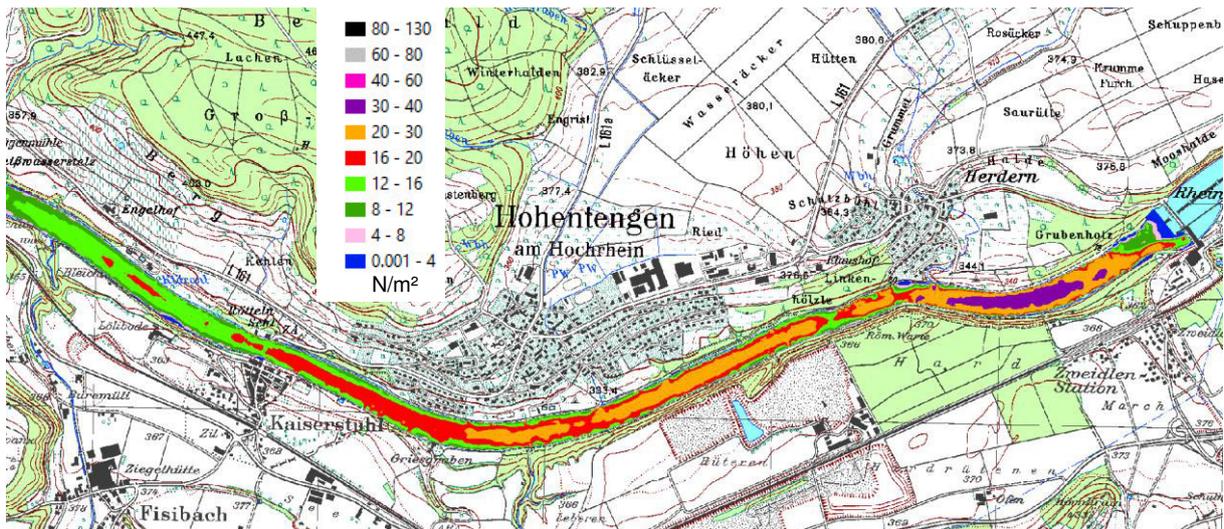


Abb. 8: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 330,94 m +nSH – oberer Abschnitt

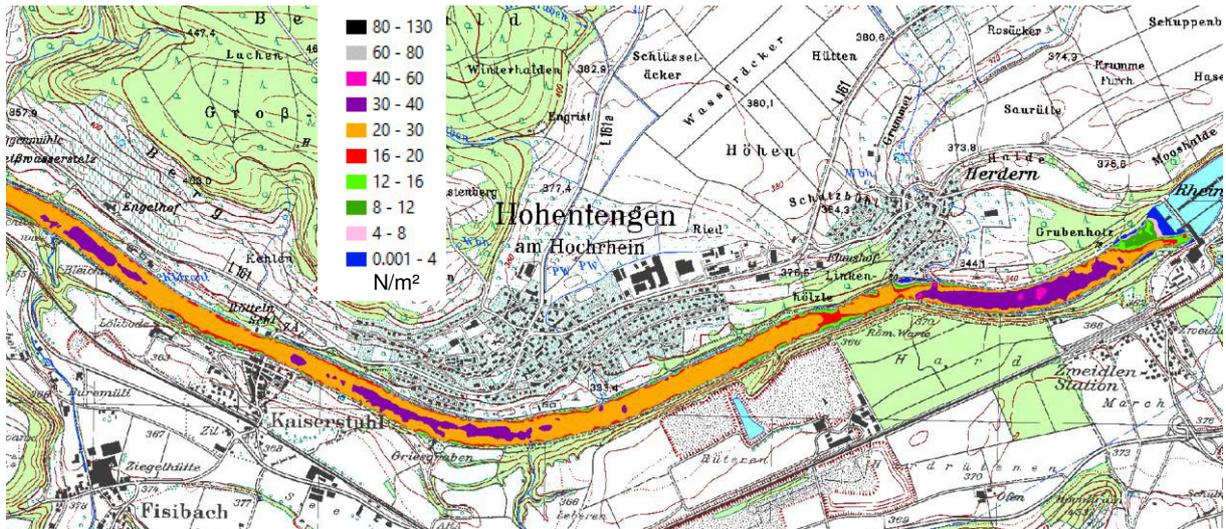


Abb. 9: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 327,94 m +nSH – oberer Abschnitt

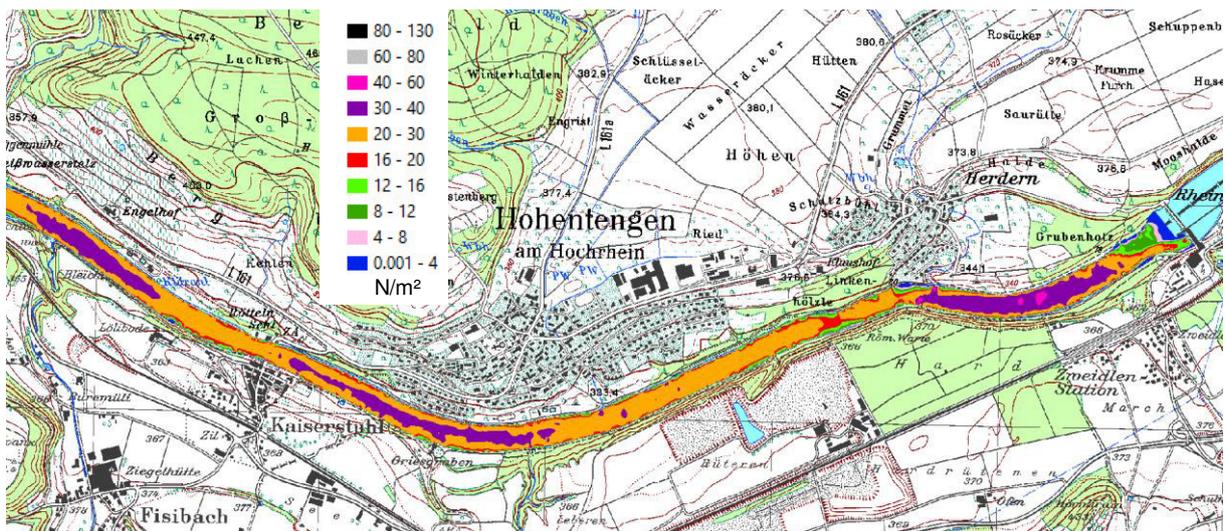


Abb. 10: Sohlschubspannung bei einem Oberwasserstand von 324,38 m +nSH – oberer Abschnitt

4 Prinzipielle Auswirkungen von Absenkvorgängen auf den Hochwasserablauf

Die Absenkung des Oberwasserstands Reckingen zur möglichen Reaktivierung des Geschiebetribs erfordert einen Absenkvorgang vor bzw. mit Beginn des Hochwasserereignisses. Mit dem 1D-HN-Modell wurden verschiedene instationäre Simulationen durchgeführt, mit denen exemplarisch die Auswirkungen des Absenkvorgangs auf die Hochwasserganglinie verdeutlicht werden sollen.

Die im Folgenden vorgestellte exemplarische Simulation verwendet die Zuflussganglinie des Hochwasserereignisses vom Juni 2013. Abb. 11 stellt bezogen auf die linke Achse den Zufluss (schwarz) und den Abfluss (rot) für verschiedene Varianten des Oberwasserstands-Verlaufs (blau, bezogen auf die rechte Achse) dar. Wird der Oberwasserstand gemäß Konzession ab $Q = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ nur leicht gesenkt, folgt der Abfluss dem Zufluss. Eine Absenkung des Oberwasserstandes um 4,0 m auf 327,94 m +nSH – in der Simulation als Absenkung in Funktion des Zuflusses zwischen $Q = 650 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen – erzeugt einen deutlichen Anstieg des Abflusses in diesem Zeitraum. Abb. 12 verdeutlicht die Abflussdifferenz gegenüber dem Betrieb gemäß Konzession – der Abfluss steigt kurzfristig um bis zu $\Delta Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Vergleich zur später folgenden Abflussspitze sind diese Erhöhungen jedoch nicht wesentlich und nicht schädlich für die Unterlieger.

Für die Ganglinie des Hochwassers vom Mai 1999 (vgl. Abb. 13) wurden zwei Varianten des Absenkvorgangs um $\Delta y = 4 \text{ m}$ simuliert. Zum einen wurde der Absenkvorgang ähnlich wie zuvor bei der Ganglinie des Hochwassers 2013 als Funktion des Zuflusses vorgenommen (durchgezogene Linien; Absenkung hier zwischen $Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$), zum anderen wurde die Absenkung bei einem Zufluss von knapp $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ begonnen und innerhalb von 12 Stunden gleichmäßig (linear) vorgenommen. Die Absenkung als Funktion des Zuflusses führt bei leicht schwankendem Zufluss zu einem stark schwankenden Abfluss; insbesondere werden Zuflussanstiege im Abfluss verstärkt, wie im Beispiel bei Simulationszeit $t \approx 48 - 50$ erfolgt. Eine über die Zeit gleichmäßige Absenkung des Oberwasserstandes sollte frühzeitig begonnen und mit einer geringen Absenkgeschwindigkeit durchgeführt werden, um unnötig starke Abflusserhöhungen zu vermeiden. In der vorliegenden Simulation wurde der Abfluss gegenüber dem Zufluss um bis zu $\Delta Q = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Im Vergleich zur später folgenden Abflussspitze sind die zur Absenkung erforderlichen Abflusserhöhungen nicht wesentlich und nicht schädlich für die Unterlieger.

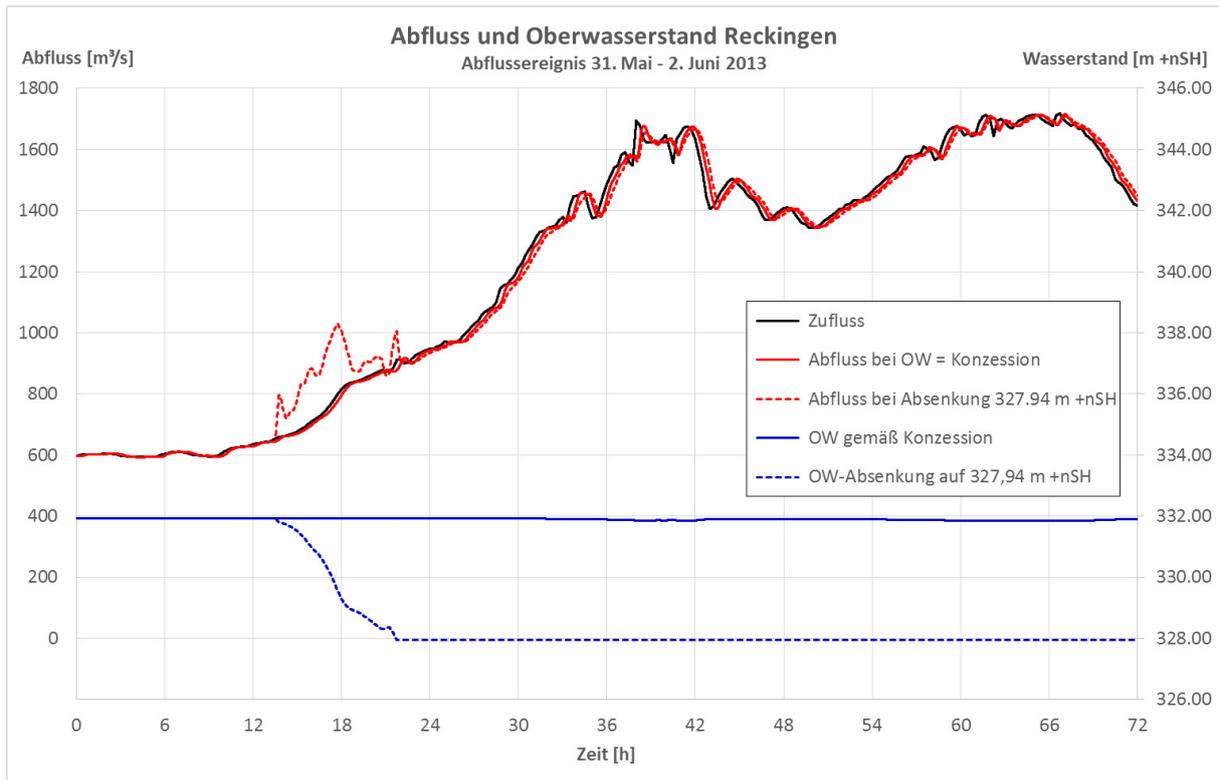


Abb. 11: Abfluss- und Wasserstandsverlauf (HW 2013)

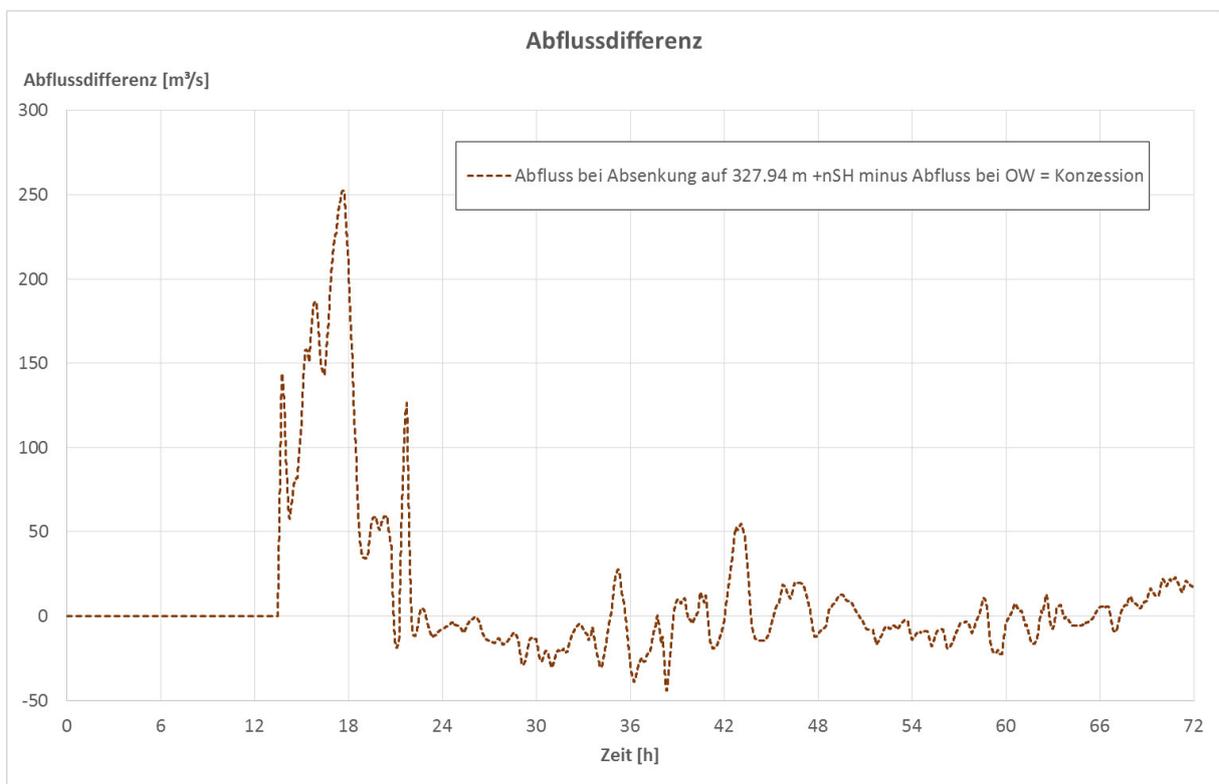


Abb. 12: Abflussdifferenz

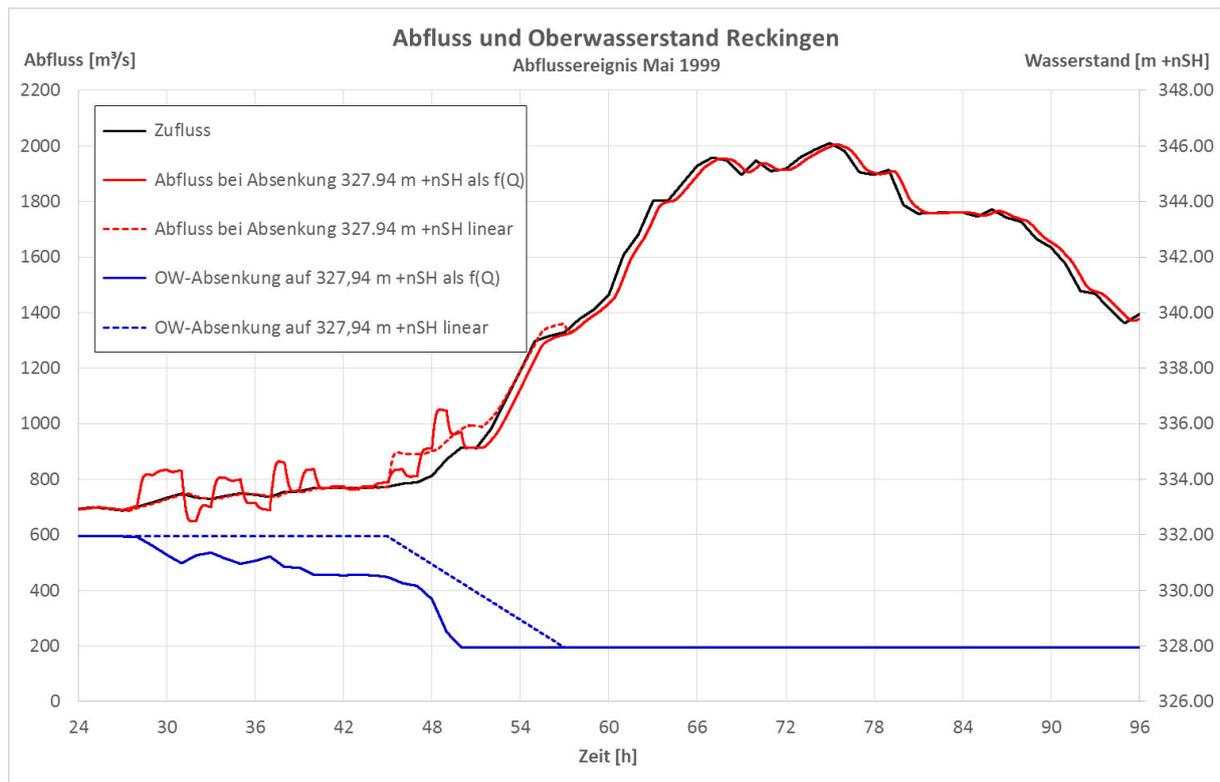


Abb. 13: Abfluss- und Wasserstandsverlauf (HW 1999)

Des Weiteren wurde ein Abflussereignis mit einem Maximalabfluss von ca. $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ konstruiert und eine Simulation mit einem Absenkvorgang um $\Delta y = 4,0 \text{ m}$ als Funktion des Zuflusses zwischen $Q = 650 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt, wie in Abb. 14 dargestellt. Die sich hieraus ergebende Abflusserhöhung steigt über den späteren Maximalwert des Zuflusses, die Abflussspitze wird somit durch den Absenkvorgang verstärkt und zeitlich beschleunigt. Die absolut auftretenden Abflussmengen stellen jedoch kein größeres Risiko dar.

Bei allen Absenkvorgängen ist die Uferstabilität zu berücksichtigen und dementsprechend die Absenkgeschwindigkeit zu begrenzen.

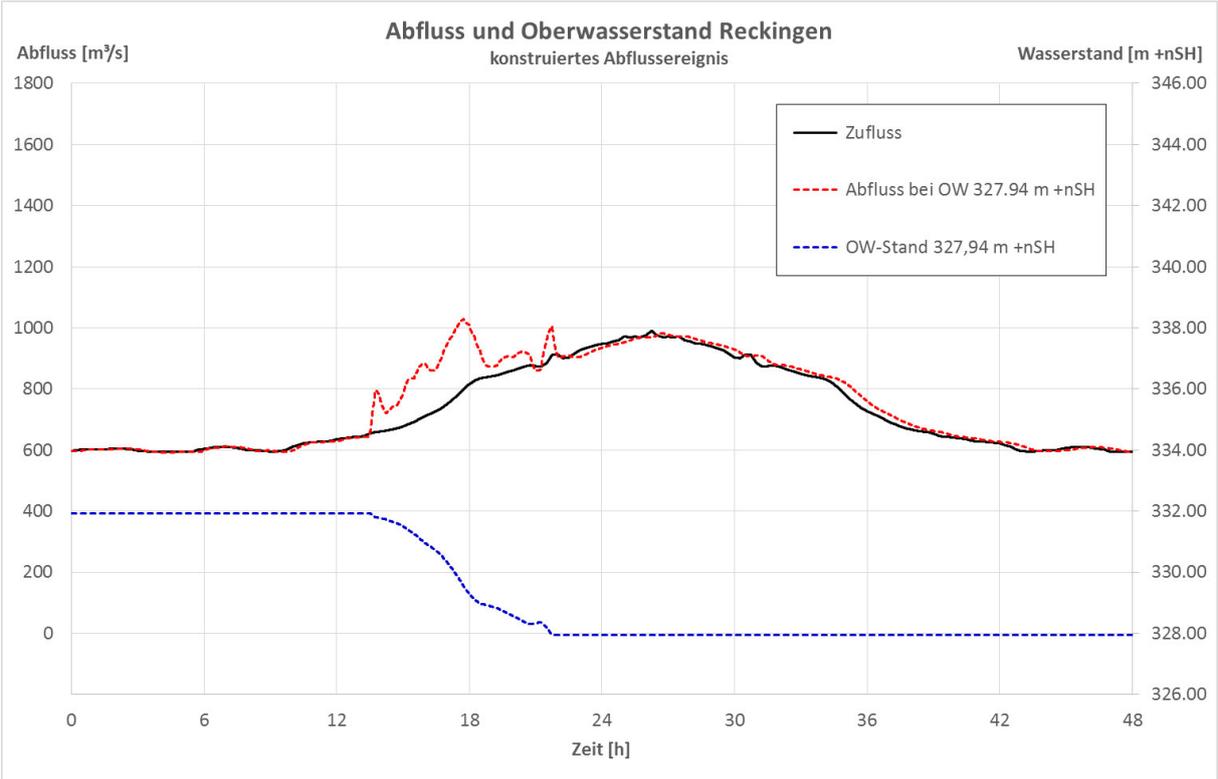


Abb. 14: Abfluss- und Wasserstandsverlauf (konstruiertes Abflussereignis)

5 Zusammenfassung

Die mit dem 2D-HN-Modell erfolgten Simulationen der Sohlschubspannungen bei einem Abfluss von $Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ mit verschiedenen Oberwasserständen zeigen, dass eine Absenkung um einen Meter nicht ausreichend ist, um die Geschiebetransportkapazität nennenswert zu erhöhen. Bei einer tieferen Absenkung um $\Delta y = 4 \text{ m}$ und mehr zeigt sich eine ungleichmäßige Erhöhung der Schubspannungen, welche möglicherweise einen lokalen Bewegungsbeginn und Ablagerungen an anderer Stelle verursacht. Eine durchgehende Geschiebetransportkapazität, die einen Transport von Material aus der Stauhaltung Eglisau bis in die freifließende Strecke unterstrom von Reckingen ermöglicht, kann nicht gewährleistet werden.

Die instationären Untersuchungen mit dem 1D-HN-Modell belegen, dass der Absenkvorgang frühzeitig und allmählich erfolgen sollte, um die erforderliche Abflusserhöhung auf ein unkritisches Maß zu begrenzen. Je nach Verlauf der Hochwasserganglinie kann es insbesondere bei kleineren Ereignissen zu einer Verstärkung und Beschleunigung der Hochwasserspitze durch den Absenkvorgang kommen. Des Weiteren ist die Absenkgeschwindigkeit in Hinblick auf die Uferstabilität zu beschränken.

Zur endgültigen Beurteilung, inwiefern eine Absenkung des Oberwasserstands Reckingen im Hochwasserfall zur Reaktivierung des Geschiebetriebs geeignet ist, sollten detaillierte Untersuchungen ggf. mittels eines morphodynamischen Modells durchgeführt werden und weitere Abwägungen zu den Vor- und Nachteilen dieses Ansatzes sowie eine Abschätzung möglicher Risiken vorgenommen werden.

Kassel, Juni 2017



Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald