

Gemeinde Steffisburg

Gemeinde Fahrni

Oberingenieurkreis I

Tiefbauamt

des Kantons Bern

Auflageprojekt
Beilage 3.7

Gewässer	Zulg	Gewässer-Nr.	548
Gemeinden	Steffisburg, Fahrni	Projekt-Nr.	1143
Erfüllungspflichtiger	Gemeinde Steffisburg		
Projekt vom	10. Oktober 2015		
Revidiert			

Unterlage

Absenkung Müllerschwelle Beurteilung der Sohlenabsenkung

HOCHWASSERSCHUTZ UND LÄNGSVERNETZUNG ZULG

Projektverfassende



Herzog Ingenieure AG

Wasserbau Tiefbau Grundbau

Seestrasse 2
3600 Thun

Tel. 0848 415 000

buero@herzog-ingenieure.ch
www.herzog-ingenieure.ch



Gemeinde Steffisburg

Absenkung Müllerschwelle, Beurteilung der Sohlenveränderungen

Technischer Bericht

Auflage

Bern, 20. November 2018



Flussbau AG SAH
dipl. Ing. ETH/SIA flussbau.ch

Schwarztorstr. 7, CH-3007 Bern Tel. 031 - 370 05 80

Impressum

Projekttitle	Zulg Müllerschwelle
Auftraggeber	Gemeinde Steffisburg
Projektbearbeitung	Flussbau AG saH, Schwarztorstrasse 7, 3007 Bern, Tel. 031 370 05 80
	<ul style="list-style-type: none">– Thomas Berchtold, Dr. sc. ETH, Dipl. Bau-Ing. ETH– Nina Bless, BSc FHO Bauing.– Rolf Künzi, dipl. Kulturing. ETH
Dokumententitel	TB_Muellerschwelle_181116_v3_0.docx
Dokumentendatum	20.11.2018
Version	v3.0

Inhalt

1	Zusammenfassung	5
2	Grundlagen	7
3	Ausgangslage und Auftrag	9
4	Verwendete Grundlagen	11
4.1	Korngrößen	11
4.2	Hydrologie	12
4.3	Geschiebe	14
4.4	Sondagen	16
5	Methodik	17
5.1	Geschiebetransportmodell MORMO	17
5.2	Geschiebetransportmodell TREPPE	17
5.3	Geometrie	17
5.4	Massnahmen und untersuchte Szenarien	18
5.4.1	<i>Optimierung Vorprojekt</i>	18
5.4.2	<i>Nachweis Bauprojekt</i>	18
6	Ergebnisse	21
6.1	Optimierung Vorprojekt	21
6.1.1	<i>Sohlenveränderung bei Absenkung der Schwelle um 2.1 m</i>	21
6.1.2	<i>Sohlenveränderung bei Absenkung der Schwelle um 1.0 m</i>	23
6.1.3	<i>Schwachstellen bei Einzelereignis HQ100</i>	24
6.1.4	<i>Optimierung Gerinnegeometrie zwischen Gummsteg und Müllerschwelle</i>	25
6.2	Nachweis Bauprojekt	26
6.2.1	<i>Allgemein</i>	26
6.2.2	<i>Nachweis Geschiebedurchgängigkeit Bauprojekt</i>	26
6.2.3	<i>Auswirkungen von häufigen Hochwassern (Ganglinie über 20 Jahre)</i>	28
6.2.4	<i>Auswirkungen von Gewitterereignissen</i>	29
6.2.5	<i>Auswirkungen von langen Ereignissen</i>	30
6.2.6	<i>Auswirkungen von Flutwellenszenarien</i>	31
6.2.7	<i>Sohlenveränderung Zulgboden</i>	32
6.2.8	<i>Geschiebedefizit aufgrund des Holzrückhalts Zulgboden</i>	33
6.2.9	<i>Erhöhtes Geschiebeaufkommen während Bauausführung</i>	34
7	Schlussfolgerungen	39
Anhang		41

1 Zusammenfassung

Die Herzog Ingenieure AG erarbeitet im Auftrag der Gemeinde Steffisburg ein Hochwasserschutzprojekt an der Zulg. Als Teil des Projekts soll die Müllerschwelle abgesenkt werden. Die Flussbau AG SAH wurde beauftragt, die sich einstellende Sohlenlage mit numerischen Geschiebemodellierungen zu prognostizieren.

Eine Absenkung der Müllerschwelle hat weitreichende Erosion in den Oberlauf zur Folge, wenn keine Sohlensicherungen in der Zulg erstellt werden. Basierend auf dieser Erkenntnis soll der Abschnitt zwischen Gummsteg und Müllerschwelle mit Querbauwerken befestigt werden, um Erosion zu verhindern. Die Transportrechnungen haben gezeigt, dass durch diese Massnahmen auf dem Projektabschnitt keine Auflandungen zu erwarten sind und dass das Geschiebe auch durch den Unterlauf bis zur Mündung in die Aare transportiert wird.

Untersuchungen der Sohlenlage im Zulgboden haben ergeben, dass die Sohle im obersten Abschnitt des Zulgbodens bei seltenen Ereignissen angehoben werden kann. Im mittleren und unteren Teil des Zulgbodens variiert die Sohlenlage auf einer Länge von rund 450 m auch bei sehr seltenen Ereignissen nur geringfügig.

Im Zulgboden sind Schwemmholtzrückhaltevorrichtungen geplant, die so ausgelegt sind, dass grundsätzlich möglichst wenig Geschiebe zurückgehalten wird. Bei grossen Ereignissen ist dennoch mit Geschieberückhalt zu rechnen. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein temporärer Geschieberückhalt während grosser Ereignisse keinen nennenswerten Einfluss auf das Nettogefälle zwischen Gummsteg und Müllerschwelle hat und somit keine weiteren Massnahmen notwendig sind.

2 Grundlagen

- [1] Flussbau AG SAH, geo7 AG: Gefahrenkarte Steffisburg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. April 2009.
- [2] Herzog Ingenieure AG: Pläne Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Vorabzug vom 24.02.2014.
- [3] Herzog Ingenieure AG: Pläne Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Vorabzug vom 30.03.2014
- [4] Herzog Ingenieure AG: Pläne Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Vorabzug vom 02.09.2015.
- [5] Schälchli, Abegg + Hunzinger: Längsvernetzung Zulg. Hydrologische und geschiebetechnische Grundlagen – Geschiebetransportmodell. Im Auftrag des Fischereiinspektorats des Kantons Bern. April 2004.
- [6] Hochschule für Technik Rapperswil (HSR): Technischer Bericht Modellversuche Holzrückhalt Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Projekt-Nr. 3600305, 08.06.2017.
- [7] Herzog Ingenieure AG: Pläne Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Vorabzug Längenprofile (Plan-Nr. 216, 217) vom 17.04.2018.
- [8] Herzog Ingenieure AG: Technischer Bericht Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg. Im Auftrag der Gemeinde Steffisburg. Vorabzug Version 4.0 vom 17.04.2018 (Beilage 3.2 Auflagedossier).
- [9] Hunziker, Zarn & Partner: Aare Thun bis Bern – Aktualisierung Geschiebetransportmodell anhand Vermessung 2015. Im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern. Februar 2018.

3 Ausgangslage und Auftrag

In der Gefahrenkarte (GK) Steffisburg [1] wird ein Schutzdefizit unter anderem für den Abschnitt der Zulg oberhalb der Müllerschwelle ausgewiesen. Bereits bei einem HQ_{30} ist mit einem linksufrigen Wasseraustritt zu rechnen. Zur Verbesserung der Gefährdungssituation hat das Büro Herzog Ingenieure AG Hochwasserschutzmassnahmen an der Zulg erarbeitet und unter anderem eine Absenkung der Müllerschwelle vorgeschlagen. Damit soll neben einer Sohlenabsenkung auch die Geschiebedurchgängigkeit in der Zulg verbessert und folglich keine regelmässige Geschiebeentnahme mehr notwendig sein werden.

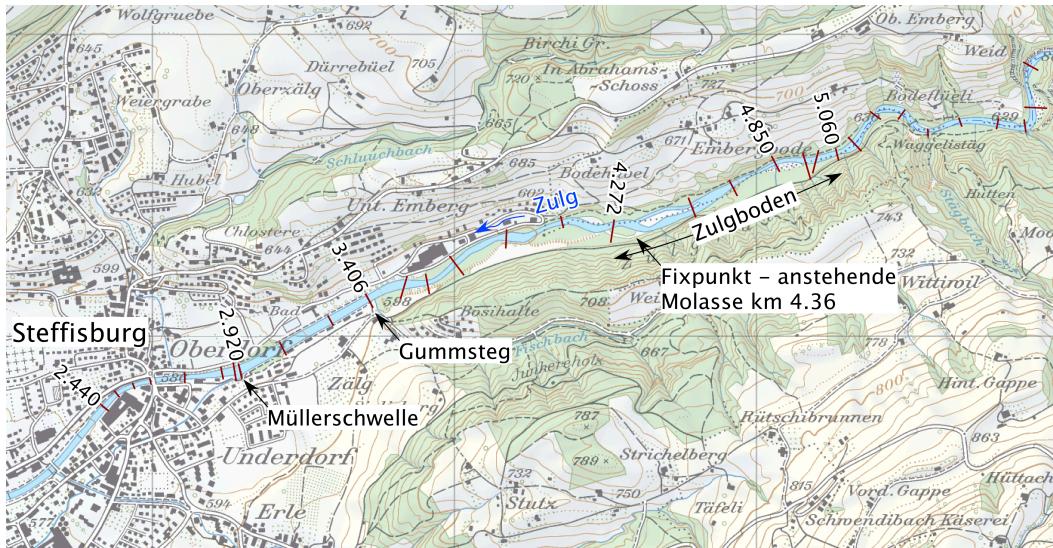


Abb. 1: Situation der Zulg oberhalb Steffisburg. Quelle: swisstopo.

Die Flussbau AG SAH wurde beauftragt, die Projektierung mit numerischen Geschiebemodellierungen zu begleiten. Im Rahmen des Vorprojekts sollten die Auswirkungen unterschiedlicher Absenkungen der Müllerschwelle auf die Sohle und den Geschiebehaushalt untersucht und eine Optimierung der Massnahmen ermöglicht werden.

Für das Bauprojekt sind für verschiedene Abflusszenarien nachzuweisen, dass mit den geplanten Massnahmen die Sohle zwischen Müllerschwelle und Gummsteg stabil bleibt und dass das Geschiebe durch den Perimeter und bis zur Mündung in die Aare durchtransportiert werden kann.

Weiter sind im Hinblick darauf, dass der Zulgboden als möglicher Standort für eine Schwemmholzrückhaltemassnahme in Frage kommt, für verschiedene Ereignisse die Sohlenveränderungen im Bereich des Zulgbodens abzuschätzen. Die Erkenntnisse aus diesen Berechnungen sollen als Grundlage für die Projektierung eines angedachten Schwemmholzrückhalts (Projekt der Herzog Ingenieure AG) dienen.

Da mit einem Holzrückhalterechen im Zulgboden bei grossen Ereignissen möglicherweise auch Geschiebe zurückgehalten wird, ist abzuklären, ob ein temporäres Geschiebedefizit die Sohlenlage im Projektabschnitt zwischen Gummsteg und Müllerschwelle negativ beeinflusst.

4 Verwendete Grundlagen

4.1 Korngrößen

Aus dem Projekt Längsvernetzung Zulg [5] konnten einige Linienproben verwendet werden (Abb. 2 und Abb. 3, zulg1 bis zulg9).

Drei zusätzliche Deckschicht-Linienproben (Abb. 2, Zulg14_01 bis 03) wurden zwischen km 3.7 und 4.0 aufgenommen, damit die Stabilität der Deckschicht besser bestimmt werden konnte.

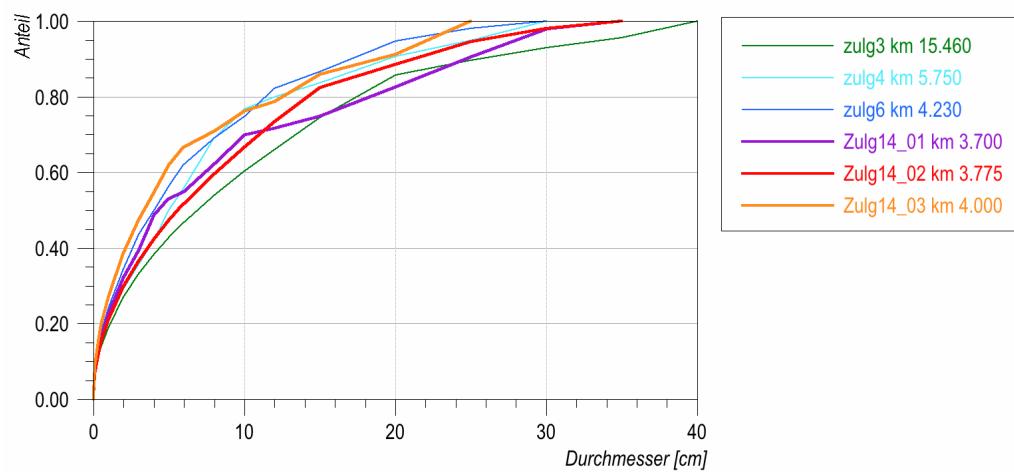


Abb. 2: Kornverteilung verschiedener Deckschicht-Linienproben in der Zulg.

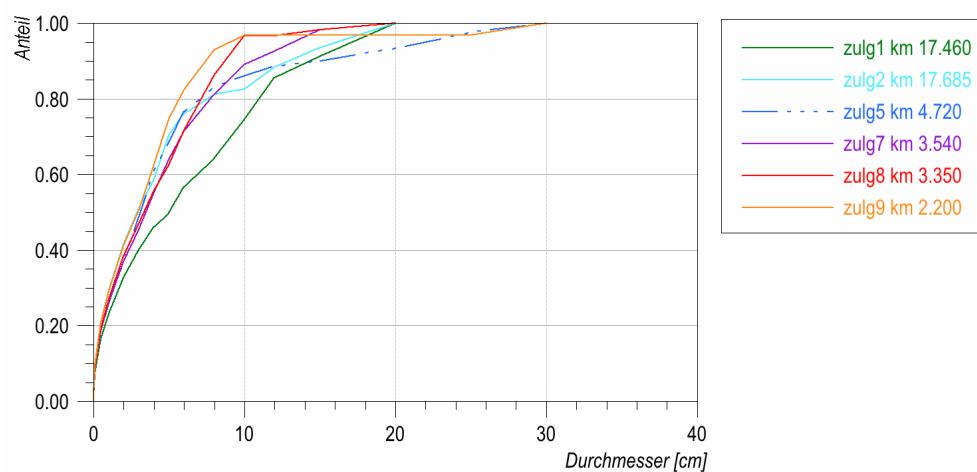


Abb. 3: Kornverteilung verschiedener Geschiebe-Linienproben in der Zulg; die Probe zulg5 wurde nicht weiter verwendet.

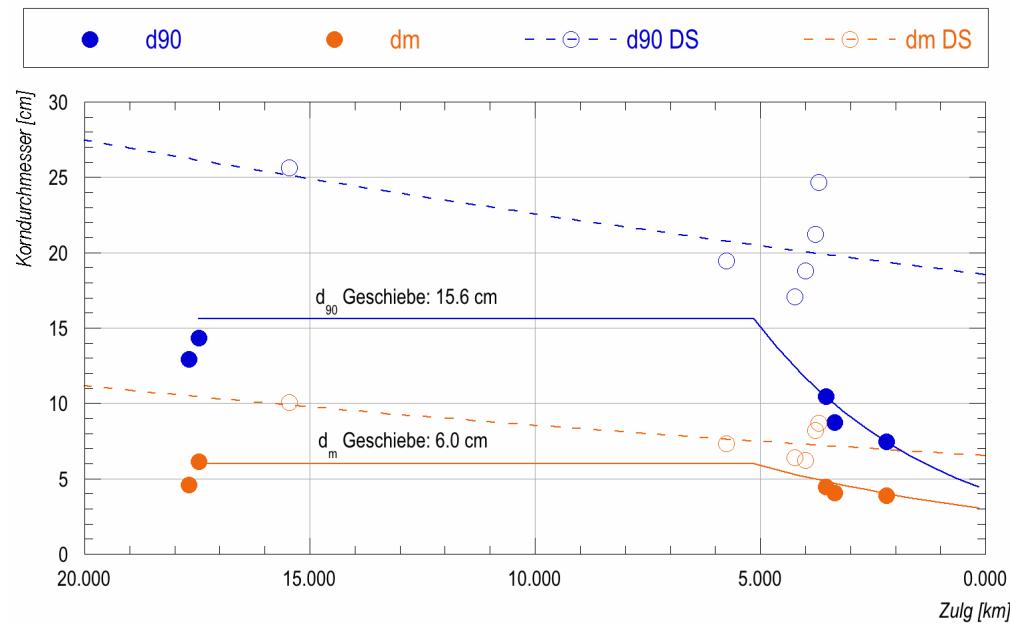
Linienproben werden aufgrund ihrer Kornverteilung dem Geschiebe oder dem Sohlenmaterial zugeordnet. Unter Geschiebe (Abb. 3) werden die Feststoffe verstanden, welche bei kleineren und mittleren Hochwasserereignissen transportiert werden. Das Flussbett (Sohle) wird aus dem Sohlenmaterial (Abb. 2) gebildet, welches in der Regel größer ist als das Geschiebe. Sohlenmaterial kann bei grossen Hochwasserereignissen transportiert werden, wenn die Deckschicht aufgebrochen wird.

Aus den in Abb. 2 und Abb. 3 abgebildeten Kornverteilungskurven werden die charakteristischen Korndurchmesser d_{90} und d_m des Geschiebes und des Sohlenmaterials berechnet und gemäss der Lage der Probenahme in der Zulg in Abb. 4 aufgetragen. Die

mittleren Korndurchmesser d_m des Geschiebes sind massgebend für die Berechnung der Transportkapazität. d_{90} (Deckschicht) und d_m (Deckschicht), also die charakteristischen Korndurchmesser der Sohle, bestimmen die Rauheit der Sohle und die Stabilität der Deckschicht.

Der Durchmesser von Geschiebe und Sohlenmaterial nimmt aufgrund von Abriebprozessen entlang der Zulg ab. Die Abnahme für Geschiebe wurde aus [5] unverändert übernommen. Die Abnahme der Korndurchmesser der Deckschicht wurde für diese Studie neu bestimmt.

Abb. 4: Abnahme des charakteristischen Korndurchmessers von Geschiebe und Deckschicht entlang der Zulg zwischen km 20 und der Mündung in die Aare.



4.2 Hydrologie

Für das Einzugsgebiet der Zulg liegen keine Abflussmessungen über eine ausreichend lange Messdauer vor. Zur Erzeugung möglichst plausibler Abflusskurven wurden im Projekt Längsvernetzung Zulg [5] Abflussdaten aus den zwei vergleichbaren Gewässern ausgewertet und umgerechnet. Dabei wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Die Hochwasserspitzen HQ_{100} in der Zulg sowie in den zwei vergleichbaren Gewässern Emme und Urnäsch wurden mit verschiedenen empirischen Methoden geschätzt und daraus ein Mittel gebildet (Anwendung des Programms HQx_meso_CH)
- Die Hochwasserspitzen von Emme und Urnäsch wurden mit einer statistischen Auswertung von gemessenen Abflüssen (Frequenzanalyse der Jahreshöchsthochwasser) bestimmt.
- Die empirischen Schätzungen der Abflussspitzen von Emme und Urnäsch wurde anhand der Ergebnisse der Frequenzanalyse geeicht.
- Die Korrektur an den Ergebnissen der empirischen Schätzungen wurde auf die Schätzung der Hochwasserabflüsse der Zulg angewandt.

Obwohl beide Vergleichseinzugsgebiete demjenigen der Zulg ähnlich sind, wurde wegen der geographischen Nähe die Emme als Referenzgewässer für die Zulg verwendet. Damit können auch die für die emmentalischen Gewässer typischen geringen Unterschiede der Abflussspitzen unterschiedlicher Jährlichkeit erfasst werden.

Die detaillierte Ermittlung der Ganglinien ist in [5] beschrieben.

Ganglinie über 20 Jahre

Mit einer Ganglinie über 20 Jahre werden hauptsächlich häufigere, bett bildende Ereignisse mit Wiederkehrdauer HQ_1 bis HQ_5 berücksichtigt. Dadurch kann eine sich längerfristig einstellende Gleichgewichtssohle abgeschätzt werden.

Die Ganglinie über eine Dauer von 20 Jahren wurde in [5] aus gemessenen Abflüssen der Emme der Jahre 1992 – 2001 konstruiert und auf das Einzugsgebiet der Zulg angepasst (Abb. 5). Dazu mussten die konstruierten Abflussdaten von 1992 – 2001 zweimal aneinander gehängt werden, wobei das Hochwasserereignis vom 12.06.1997 in der zweiten Dekade weggelassen wurde.

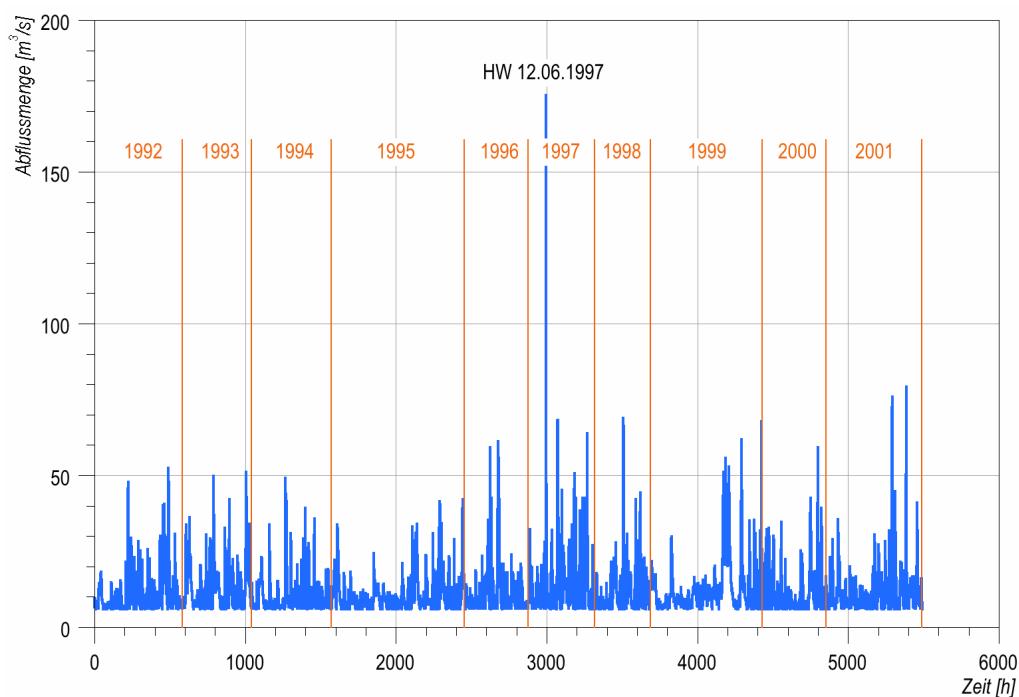


Abb. 5: Konstruierte Ganglinie der Zulg von 1992 – 2001.

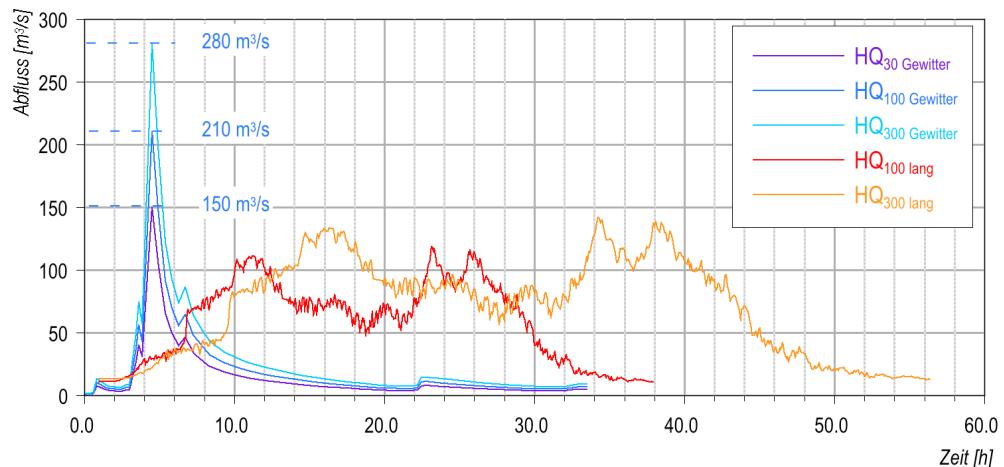
Kurze und lange Hochwasserereignisse

Weiter wurden die in der Abb. 6 dargestellten, ebenfalls aus Abflussdaten der Emme konstruierten Ganglinien verschiedener Ereignisse (Gewitterereignisse, lange Ereignisse und Flutwellenszenarien) mit Wiederkehrdauer HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} für die Transportrechnungen verwendet. Die Hochwasserspitzen der Zulg in Steffisburg sind in Tab. 1 aufgelistet.

aus GK Steffisburg [1]	Gewitter	lange Ganglinie	Flutwelle
HQ_{30}	150 m³/s	- (nicht beurteilt)	- (nicht beurteilt)
HQ_{100}	210 m³/s	119 m³/s	223 m³/s
HQ_{300}	280 m³/s	142 m³/s	251 m³/s

Tab. 1: Hochwasserabflüsse der Zulg in Steffisburg aus [1].

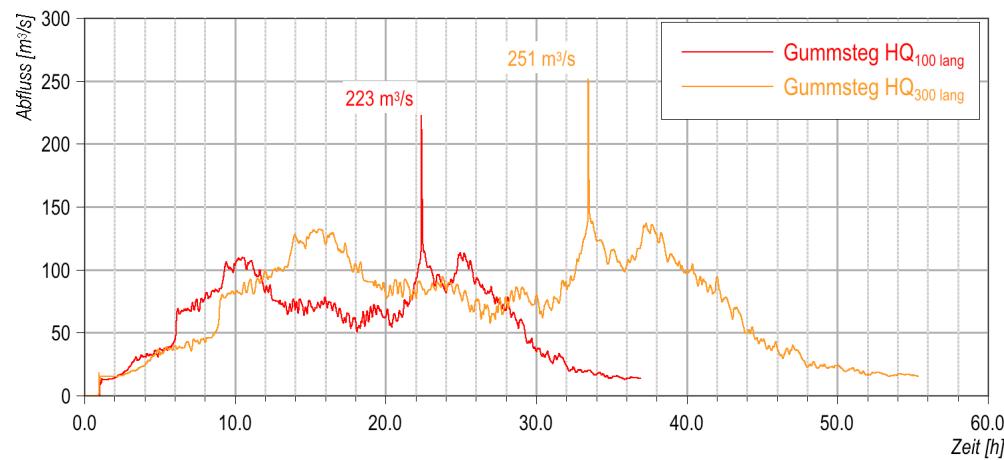
Abb. 6: Ganglinie für ein Kurzereignis HQ₃₀ sowie kurze und lange Ereignisse HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ an der Zulg aus [1].



Flutwellenszenario

Auf der heutigen Umlagerungsstrecke bei km 9.52 staute im Jahre 1986 eine grosse Rutschung im Bereich des Hirschgrabens die Zulg, so dass sich ein See bildete. Glücklicherweise hielt der Damm und der See wurde in der Zwischenzeit mit Geschiebe aufgefüllt. Die Gefahrenbeurteilung ergab, dass die grossen Rutschungen entlang der Zulg eher auf langandauernde Niederschläge reagieren. Bei zeitgleichem Hochwasser in der Zulg kann der durch die Rutschung entstandene Damm überströmt werden, was aufgrund der Erosion zu einem Dammbruch und einer Flutwelle führen kann. Dieses Szenario wurde aus der GK Steffisburg [1] übernommen. Die verwendeten Abflussganglinien sind in der Abb. 7 dargestellt.

Abb. 7: Ganglinien HQ₁₀₀ und HQ₃₀₀ mit Flutwelle aus [1].



4.3 Geschiebe

Bei der Erarbeitung der Grundlagen für das Projekt Längsvernetzung Zulg [5] wurde das Geschiebeaufkommen im Einzugsgebiet der Zulg eingehend untersucht. Einerseits wurde das Geschiebepotential anhand verschiedener Berechnungsmethoden abgeschätzt, andererseits wurde das Feststoffpotential im Rahmen von Felduntersuchungen plausibilisiert. Die Erarbeitungsmethodik ist in [5] detailliert umschrieben.

Als Resultat wurden die in Steffisburg zu erwartenden mittleren jährlichen Geschiebefrachten und die Geschiebefrachten bei einzelnen Hochwassereignissen bestimmt (Tab. 2).

Szenario	Geschiebefracht [m^3]
Jahresmittel	3'000
G_{20}	2'500 - 3'300
G_{30}	2'900 - 3'700
G_{50}	3'200 - 4'100
G_{100}	4'100 - 4'900
G_{300}	5'400 - 6'100

Tab. 2: Geschiebefrachten der Zulg am unteren Ende der Schluchtstrecke [5].

Andererseits wurde in [5] eine Geschiebefunktion ermittelt, über welche der Geschiebe-transport während der Abflussganglinie über 20 Jahre (vgl. Kapitel 4.2) festgelegt ist. Die Geschiebefunktion ist in der Abb. 8 dargestellt.

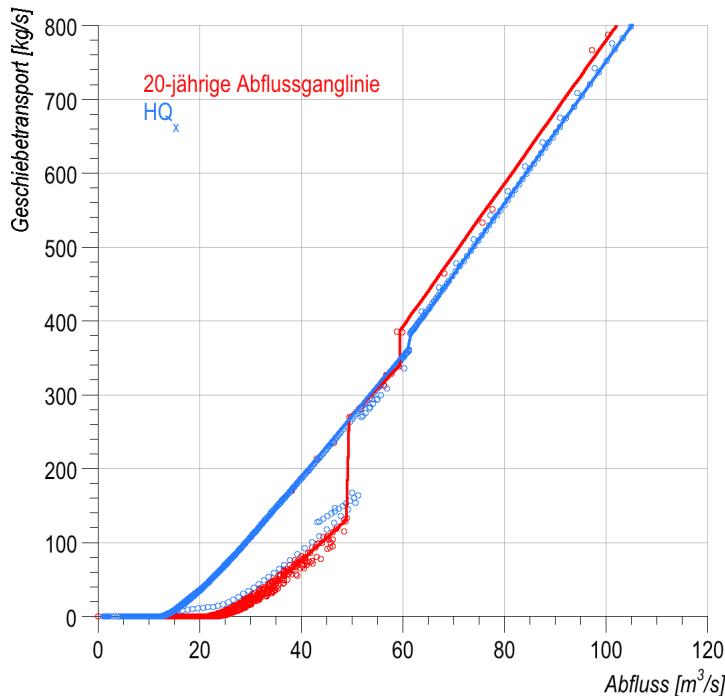


Abb. 8: Geschiebefunktion am unteren Ende der Schlucht (aus [5]).

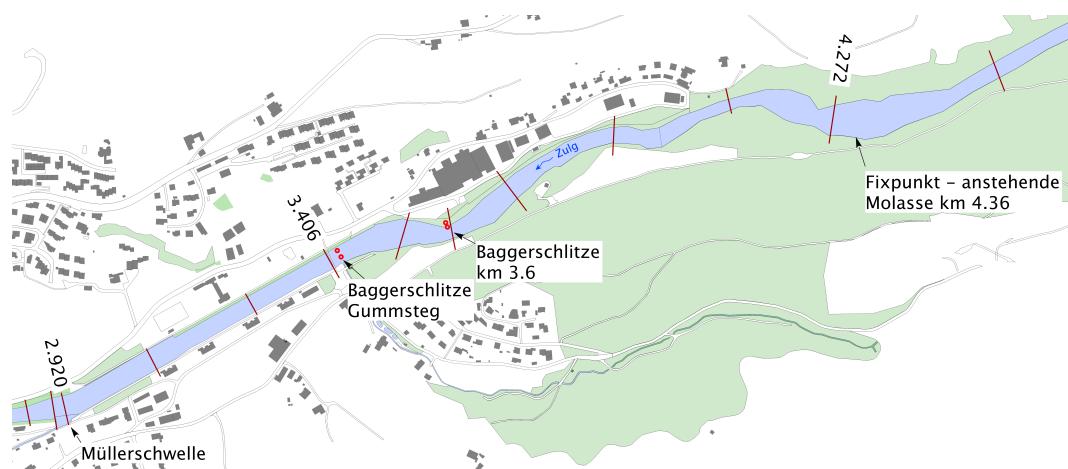
Die Geschiebefrachten und die Geschiebefunktion wurden komplett aus [5] übernommen.

4.4 Sondagen

Bei km 4.36 der Zulg tritt der Fels sichtbar an die Oberfläche und bildet einen natürlichen Sohlenfixpunkt (Abb. 12). Mit zwei Sondagen weiter unterstrom wurde geprüft, ob allenfalls ein zusätzlicher natürlicher Sohlenfixpunkt besteht, der eine Rückwärtserosion verhindern könnte (Abb. 9). Bei km 3.4 unmittelbar oberhalb des Gummstegs konnte bis 3 m unterhalb der heutigen Flussohle kein Fels geortet werden.

Bei km 3.6 wurde erst in 3 m Tiefe Fels gefunden. Zwischen km 4.36 und der Müllerschwelle hat der vorhandene Fels im Untergrund auf die zu erwartenden Sohlenveränderungen keinen Einfluss.

Abb. 9: Lage der Felssondagen.



5 Methodik

5.1 Geschiebetransportmodell MORMO

Der Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen wurden für die Optimierung des Vorprojektes bis zur Müllerschwelle und im zweiten Beurteilungsschritt bis zur Mündung in die Aare eindimensional mit dem Simulationsprogramm MORMO (MORphologisches Modell) berechnet. Die Geometrie des Fließgewässers wird mit Querprofilen beschrieben (inklusive Angaben der Rauhigkeit von Sohle und Böschung).

Für jeden Zeitschritt der Abflussganglinie werden in jedem Querprofil die Wasserspiegel-lagen und Fließgeschwindigkeiten mit einer Staukurvenberechnung berechnet. An-schliessend wird in jedem Querprofil die Transportrate bestimmt und durch Lösung der Sedimentkontinuitätsbedingung eine vertikale Sohlenveränderung ermittelt. Im nächsten Zeitschritt wird die Prozedur mit dem folgenden Abfluss und mit der veränderten Sohlen-lage wiederholt.

5.2 Geschiebetransportmodell TREPPE

Unterhalb der Müllerschwelle wurde zur Berechnung des Geschiebetransports auf der Schwellenstrecke im ersten Bearbeitungsschritt (Optimierung Vorprojekt) das Geschiebe-transportmodell TREPPE verwendet. Dieses Modell weist gegenüber MORMO einige Ver-einfachungen auf, so wird beispielsweise mit einem Trapezprofil mit konstanter Breite je Gerinneabschnitt (Sperrenfeld) gerechnet. Es hat aber den Vorteil, dass Geschiebeablage-rungen bei wechselnden Strömungszuständen (von strömend zu schiessend und umge-kehrt) besser abgebildet werden. Im zweiten Bearbeitungsschritt (Nachweis Bauprojekt) wurde der Unterlauf der Zulg in die MORMO-Berechnung integriert.

5.3 Geometrie

Für die Erarbeitung der Studie Längsvernetzung Zulg [5] und der Gefahrenkarte Steffisburg [1] wurde ein eindimensionales Abfluss- und Transportmodell der Zulg erstellt. Die Geometrie dieses Modells wurde auf die Vorgaben des Projekts der Herzog Ingenieure AG mit Absenkung der Müllerschwelle angepasst ([2], [3] und [4]). Im Oberlauf wurde das Modell um 1.4 km verlängert bzw. mit elf weiteren Profilen ergänzt, welche aus dem digi-talen Terrainmodell DTM erzeugt wurden.

Zur Ermittlung der optimalen Geometrie zwischen Gummsteg und Müllerschwelle wurde eine weitere Anpassung am Modell vorgenommen. So wurde im Projektabschnitt in der Geometrie berücksichtigt, dass die Sohlenbreite bei Erosion ab- und bei Auflandung zu-nimmt (vgl. Abb. 10). In der Modellierung hat dies insofern einen Einfluss, als dass die Belastung auf die Sohle infolge Erosion und damit zusammenhängender geringerer Sohl-nebreite zunimmt.

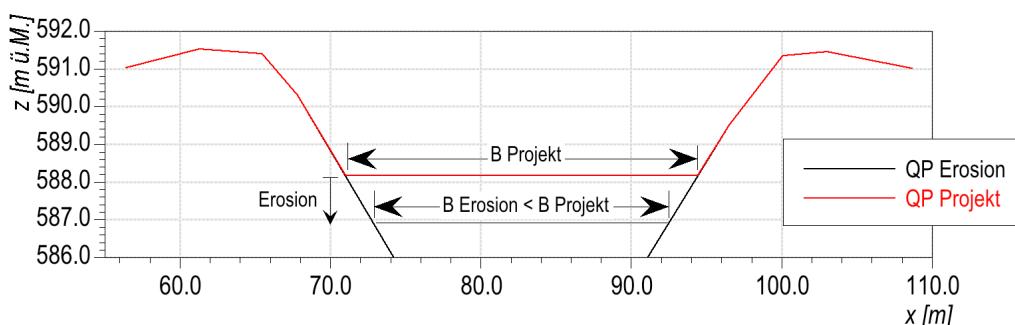


Abb. 10: Muster-querprofil im Pro- jektabschnitt; Be- rücksichtigung der Erosion.

5.4 Massnahmen und untersuchte Szenarien

5.4.1 Optimierung Vorprojekt

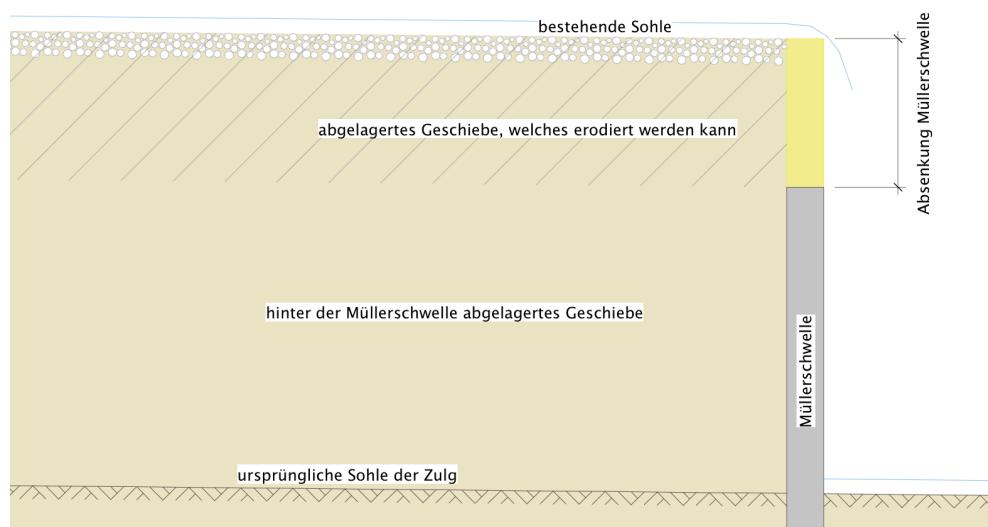
In einem ersten Optimierungsschritt wurden die Auswirkungen einer Absenkung der Müllerschwelle ohne Massnahmen im Oberwasser geprüft (Abb. 11). Es wurden zwei Szenarien untersucht, einmal eine Absenkung der Müllerschwelle um 2.1 m (wie im Vorprojekt vorgesehen) und einmal um 1 m [2]. Für die Transportrechnung wurde die Ganglinie über 20 Jahre und die Gewitterganglinie des HQ_{100} verwendet (vgl. Kapitel 4.2). Es wurde geprüft,

- ob und wie die Zulg das hinter der Schwelle abgelagerte Material austrägt,
- welche Sohlenlage und welches Gleichgewichtsgefälle sich im Oberwasser der Zulg einstellt und
- wo das ausgetragene Geschiebe im Unterwasser abgelagert wird.

Basierend darauf wurden die Schwachstellen bei einem Einzelereignis HQ_{100} aufgezeigt.

In einem weiteren Schritt wurde das Projekt durch die Herzog Ingenieure AG unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Überprüfung des Vorprojekts angepasst und weiter ausgearbeitet [3]. Die für den Geschiebetransport wesentlichen Anpassungen sind eine Absenkung der Müllerschwelle um 2.0 m auf eine Kote von 585.5 m ü. M. und eine konstante Sohlenbreite von 23 m zwischen Gummsteg und Müllerschwelle. Die Projektsohle zwischen der bestehenden Sohlenhöhe beim Gummsteg und der abgesenkten Schwellenkote verläuft kontinuierlich. Der abzutragende Geschiebekeil wird maschinell entfernt. Die Flussbau AG SAH untersuchte daraufhin die zu erwartenden Gleichgewichtsgefälle und lieferte die Grundlagen für eine weitere Optimierung der Geometrie mit baulichen Massnahmen zwischen Gummsteg und Müllerschwelle.

Abb. 11: Skizze für die Absenkung der Müllerschwelle ohne Massnahmen im Oberwasser.



5.4.2 Nachweis Bauprojekt

Die Herzog Ingenieure AG hat aufgrund der Vorprojekt-Optimierung Projektanpassungen vorgenommen [4]. Zwischen Gummsteg und Müllerschwelle sind acht befestige Querriegel zur Stabilisierung der Sohle vorgesehen. Dadurch wird ein minimales Bruttolängsgefälle von 1.3 % garantiert. Die Querriegel sind so tief zu fundieren, dass das Längsgefälle zwischen den Querriegel durch Sohlenerosion ein minimales Nettogefälle von 0.8 % aufweisen kann.

Das überarbeitete Vorprojekt wurde in das bestehende Geschiebemodell eingearbeitet und die sich unter den neuen Rahmenbedingungen einstellende Sohlenlage berechnet. Auf dieser Sohlenlage wurde geprüft, wie sich das System einerseits bei kleineren Hochwasserereignissen über 20 Jahre (Berechnung mit Ganglinie über 20 Jahre) und andererseits bei verschiedenen grossen Hochwasserereignissen (Gewitterereignisse, lange Ereignisse sowie Flutwellenszenarien verschiedener Jährlichkeiten) verhält.

Im Laufe der Projektierung (Auflageprojekt) wurden zwei geschieberelevante Projektänderungen vorgenommen:

- Zwischen Gummsteg und Müllerschwelle wurde das Bruttogefälle von 1.3 % auf 1.2 % reduziert und damit die Anzahl Querriegel zur Stabilisierung der Sohle von acht auf zehn erhöht.
- Im Zulgboden wurden Holzrückhaltevorrichtungen mit Hilfe von physikalischen Modellversuchen projektiert. Es ist damit zu rechnen, dass bei grossen Ereignissen temporär auch Geschiebe zurückgehalten wird.

Es wurde geprüft, ob die bisherige geschiebetechnische Untersuchung auch mit den beiden neuen Massnahmen ihre Gültigkeit behält (vgl. Abschnitte 6.2.2 und 6.2.8).

6 Ergebnisse

6.1 Optimierung Vorprojekt

6.1.1 Sohlenveränderung bei Absenkung der Schwelle um 2.1 m

Erosion im Oberwasser

Das hinter der Müllerschwelle abgelagerte Material wird bei einer Absenkung dieses Sohlenfixpunktes ausgetragen. Bei einem mittleren Hochwasserereignis kann auch eine wo möglich vorhandene alte Deckschicht aufgerissen werden. Oberhalb der Müllerschwelle stellt sich nach 20 Jahren bis zu km 4.1 ein Gefälle von rund 1 % ein, was auf der Höhe des Gummistegs eine Erosion von rund 1.8 m bedeutet. Infolge einer Parallelerosion stellt sich ein ähnliches Gefälle ein wie im Ist-Zustand (Abb. 13). Die Erosion reicht bis zum nächsten oberhalb liegenden Fixpunkt in der Zulg bei km 4.36 (Abb. 13), wo die anste hende Molasse einen natürlichen Sohlenfixpunkt bildet (Abb. 12).

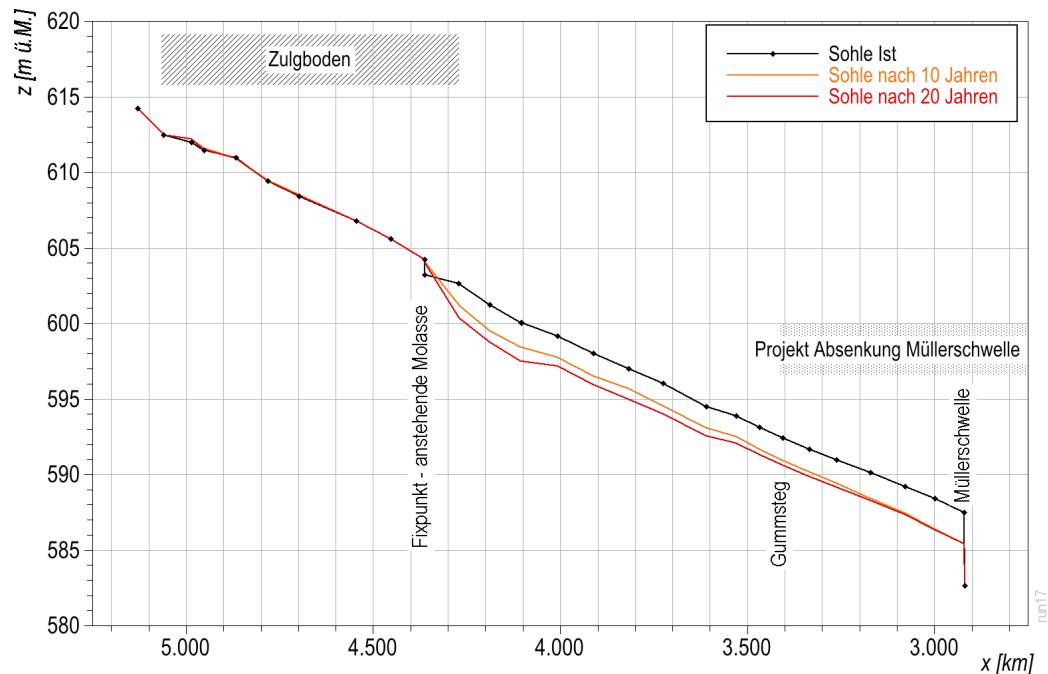


Abb. 12: Natürlicher Sohlenfixpunkt in der Zulg bei km 4.36.

Das maximale Erosionsvolumen bei einer Absenkung der Müllerschwelle um 2.1 m ohne Stabilisierung der Sohle beläuft sich auf rund 60'000 m³ innerhalb von 20 Jahren. Weitere rund 50'000 m³ Geschiebe werden gemäss den Untersuchungen zur Längsvernetzung Zulg [5] innerhalb derselben Zeitspanne aus dem Oberlauf der Zulg in den Abschnitt eingetragen.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass zwischen dem Molasseriegel bei km 4.36 und der Müllerschwelle weitere von Kies überdeckte Sohlenfixpunkte liegen, welche ohne zusätzliche Sondagen nicht erkannt werden können.

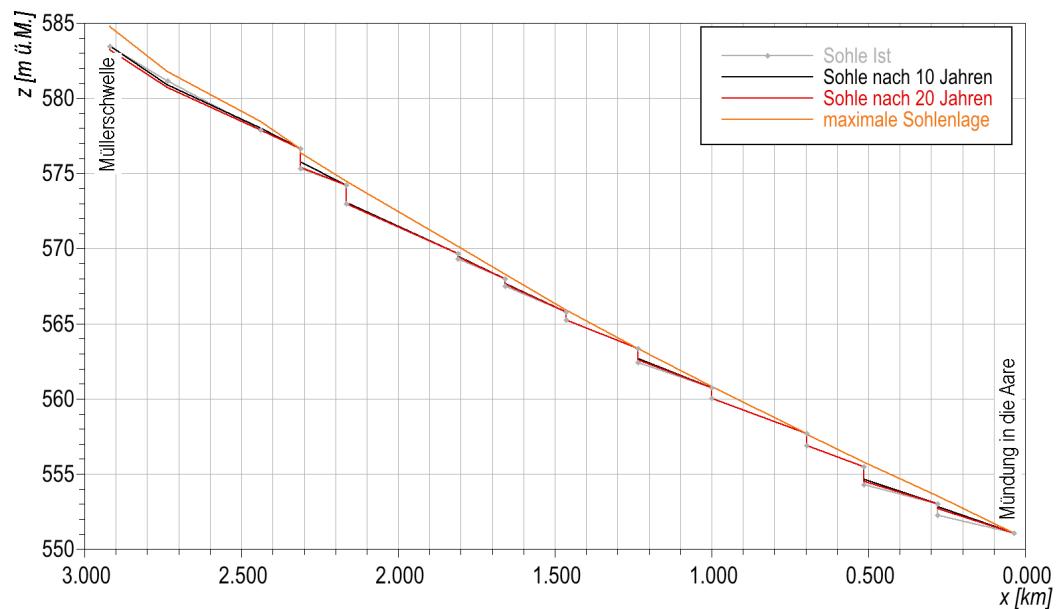
Abb. 13: Längenprofil Zulgboden bis Müllerschwelle bei Absenkung von 2.1 m nach 10 bzw. 20 Jahren.



Ablagerung im Unterwasser

Aus dem Abschnitt oberhalb der Müllerschwelle werden innerhalb von 20 Jahren rund 110'000 m³ Geschiebe in den unteren Abschnitt eingetragen. Dieser Geschiebeeintrag führt dazu, dass die Schwellen im Unterwasser innerhalb der betrachteten 20 Jahre vorübergehend eingekiest werden können. Dem Längenprofil in Abb. 14 ist zu entnehmen, dass nach Durchgang der Ganglinie über 20 Jahre fast alles Geschiebe durch den Abschnitt des Unterwassers bis in die Aare transportiert wurde und sich nahezu wieder die Sohlenlage des Ist-Zustands einstellt.

Abb. 14: Längenprofil unterhalb der Müllerschwelle bei Absenkung von 2.1 m nach 10 bzw. 20 Jahren. Ebenfalls eingezeichnet ist die maximale Sohlenlage innerhalb der betrachteten Zeitspanne.



6.1.2 Sohlenveränderung bei Absenkung der Schwelle um 1.0 m

Erosion im Oberwasser

Auch eine geringere Absenkung der Müllerschwelle von 1 m führt, ohne Sohle sichernde Massnahmen, zu einer Parallelerosion der Sohle und reicht bis zum natürlichen Sohlenfixpunkt bei km 4.36. Das Erosionsvolumen fällt mit einem Gesamtvolumen von 20'000 m³ jedoch geringer aus als bei einer Absenkung um 2.1 m. Die Erosion beim Gummsteg beträgt 0.9 m, das mittlere Längsgefälle zwischen km 4.1 und der Müllerschwelle beträgt rund 1 %.

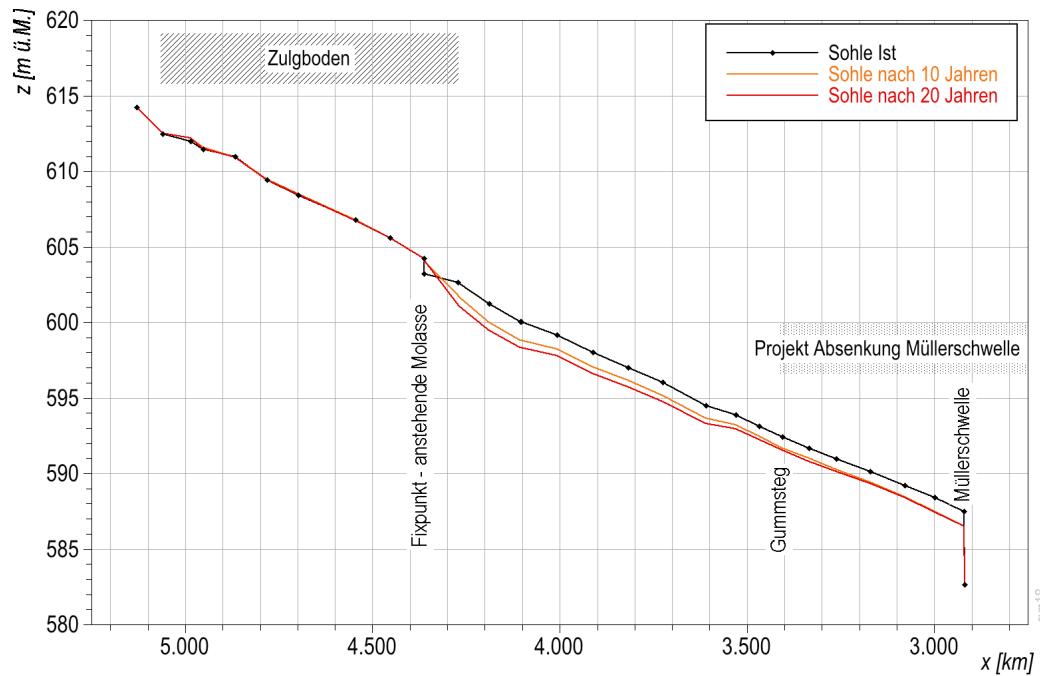
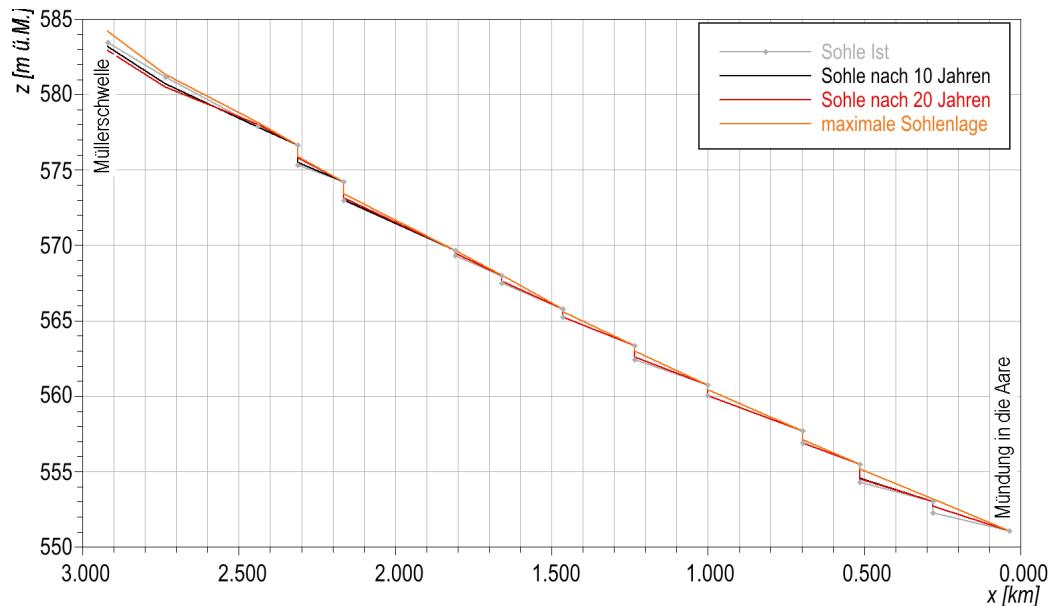


Abb. 15: Längenprofil Zulgboden bis Müllerschwelle bei Absenkung von 1.0 m nach 10 bzw. 20 Jahren.

Ablagerung im Unterwasser

Aus dem Abschnitt oberhalb der Müllerschwelle werden innerhalb von 20 Jahren rund 70'000 m³ Geschiebe in den unteren Abschnitt eingetragen, wobei 50'000 m³ als Geschiebe aus dem Oberlauf in den betrachteten Abschnitt eingetragen werden. Dieser Geschiebeeintrag führt dazu, dass einige Schwellen im Unterwasser innerhalb der betrachteten 20 Jahre vorübergehend eingekiest werden (Abb. 16).

Abb. 16: Längenprofil unterhalb der Müllerschwelle bei Absenkung von 1.0 m nach 10 bzw. 20 Jahren. Ebenfalls eingezeichnet ist die maximale Sohlenlage innerhalb der betrachteten Zeitspanne.



6.1.3 Schwachstellen bei Einzelereignis HQ₁₀₀

In der GK Steffisburg [1] sind entlang der Zulg sieben Schwachstellen ausgewiesen (Tab. 3). Die oberste Schwachstelle befindet sich oberhalb der Müllerschwelle und bezieht sich auf die ungenügende Gerinnekapazität. Diese Schwachstelle wird durch die Absenkung der Müllerschwelle entschärft und wird nicht weiter untersucht.

Die übrigen sechs Schwachstellen liegen unterhalb der Müllerschwelle. Dort ist aufgrund der Absenkung der Müllerschwelle vorübergehend mit Auflandungen und dadurch mit zusätzlich reduzierter Abflusskapazität zu rechnen (siehe Abb. 14 und Abb. 16).

Tab. 3: Schwachstellen an der Zulg in Steffisburg aus [1].

Schwachstelle	km
1: Gerinnekapazität oberhalb Müllerschwelle	3.0
2: Gerinnekapazität oberhalb Dorfbrücke linksseitig	2.7
3: Dorfbrücke	2.6
4: Gerinnekapazität unterhalb Dorfbrücke linksseitig	2.4
5: Gerinnekapazität rechtsseitig oberhalb Holzbrücke	1.3
6: Brücke Bernstrasse	1.0
7: Eisenbahnbrücke	0.9

Absenkung der Schwelle um 2.1 m

Im ungünstigsten Fall, wenn ein HQ₁₀₀ zeitgleich mit der maximalen vorübergehenden Auflandung eintritt, kann der Wasserspiegel zwischen Müllerschwelle und km 2.44 ca. 0.5 m höher liegen. Für die Schwachstellen 2 und 3, die sich auf diesem Abschnitt befinden, verschärft sich die Situation solange Auflandungen vorliegen.

Absenkung der Schwelle um 1.0 m

Die Auflandungen im unteren Abschnitt sind bei einer Absenkung der Müllerschwelle um 1 m deutlich geringer als bei einer Absenkung um 2.1 m (vgl. Abb. 14 und Abb. 16). Der Wasserspiegel bei einem HQ_{100} zum Zeitpunkt der maximalen Auflandung weicht nur wenig von demjenigen im Ist-Zustand ab. In diesem Fall wird keine Verschärfung der Situation an den Schwachstellen erwartet.

6.1.4 Optimierung Gerinnegeometrie zwischen Gummsteg und Müllerschwelle

Im Projekt der Herzog Ingenieure AG ist zwischen Müllerschwelle und Gummsteg ein kontinuierliches mittleres Längsgefälle von 1.3 %, eine Sohlenbreite von 23 m und beidseitige Böschungsneigungen von 2:3 vorgesehen [3]. Unter der Randbedingung, dass der Geschiebehaushalt der Zulg nicht massgeblich verändert wird, stellt sich nach der Ganglinie über 20 Jahre und einem anschliessenden HQ_{300} ein Gleichgewichtsgefälle von rund 0.8 % ein (Abb. 17). Dieses kommt dadurch zustande, dass sich die Sohle infolge starker Erosion und aufgrund der Böschungsneigung auf bis zu 16 m Breite verschmälert.

Zur Ermittlung dieses Gleichgewichtsgefälles wurde eine Transportrechnung mit den folgenden Randbedingungen gerechnet:

Ganglinie:	Ganglinie über 20 Jahre mit HW1997 (Abb. 5) und anschliessend HQ_{300}
Geschiebe:	Input wie in der Gefahrenkarte Steffisburg [1], abhängig vom Abfluss
Geometrie:	Breite der Querprofile zwischen Müllerschwelle und Gummsteg $B=23$ m; bei Erosion wird die Sohle schmäler, bei Auflandung breiter (vgl. Abb. 10); Einsetzen eines Fixpunkts unterhalb des Gummstegs zur Einschränkung der rückschreitenden Erosion (Simulation einer Blockrampe).

Die Modellierungen zur Optimierung der Gerinnegeometrie zeigen, dass das zu erwartende Gleichgewichtsgefälle für eine Sohlenbreite von 23 m geringer als 1.3 % ist. Für ein Gleichgewichtsgefälle von 1.3 % müsste das Gerinne breiter gebaut werden, was aufgrund der Projektrandbedingungen (Siedlungsraum) nicht vorgesehen ist. Die Tatsache, dass das errechnete Längsgefälle von 0.8 % bei einer Gerinnebreite deutlich kleiner als 23 m zustande kam, zeigt, dass das zu erwartende Gleichgewichtsgefälle für eine Sohlenbreite von 23 m grösser als 0.8 % (Abb. 17) sein wird. Es liegt zwischen 0.8 und 1.3 %.

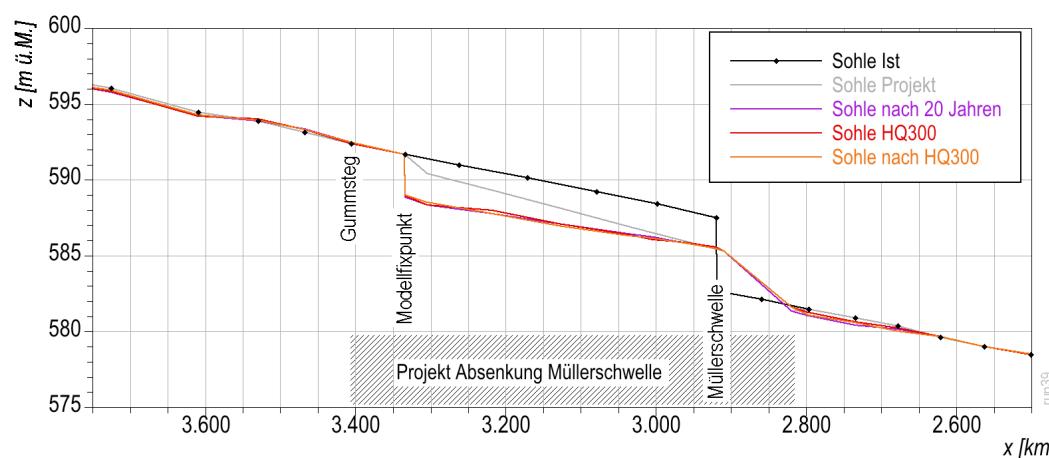


Abb. 17: Sich einstellendes Gleichgewichtsgefälle oberhalb der abgesenkten Müllerschwelle.

6.2 Nachweis Bauprojekt

6.2.1 Allgemein

Im überarbeiteten Projekt (Bauprojekt) sind die Erkenntnisse aus der Optimierung Vorprojekt ([4], beschrieben in Kapitel 6.1) berücksichtigt.

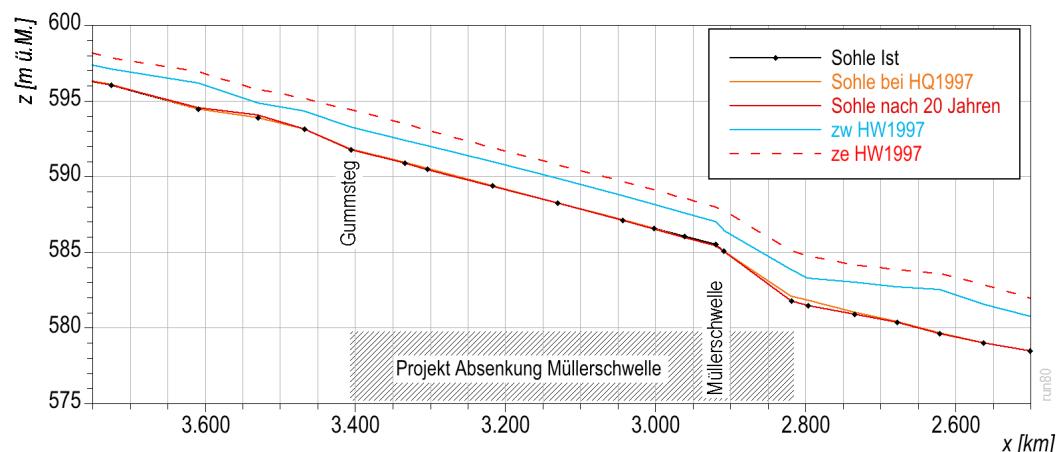
6.2.2 Nachweis Geschiebedurchgängigkeit Bauprojekt

Im Bauprojekt ist die Sohle oberhalb der (abgesenkten) Müllerschwelle mit fischgängigen Querbauwerken fixiert. Eine Parallelabsenkung der Sohle durch Erosion wird verhindert. Das Bruttogefälle ist im Projekt auf 1.2 % angesetzt, um die Höhendifferenz zwischen abgesenkter Schwellenkrone (OK Müllerschwelle 585.52 m ü.M.) und bestehender Sohle beim Gummsteg zu überwinden. Das zu erwartende minimale Nettogefälle zwischen den Querbauwerken entspricht dem Gleichgewichtsgefälle für die projektierte Sohlenbreite von 23 m und liegt zwischen 0.8 und 1.3 % (vgl. Kapitel 6.1.4). Entsprechend tief sind die Querbauwerke zu fundieren.

Die Modellierung der Ganglinie über 20 Jahre zeigt, dass es zwischen Gummsteg und Müllerschwelle zu keinen Ablagerungen kommt. Das Nettogefälle zwischen den Querbauwerken wird zwischen 0.8 und 1.3 % liegen und während der Ereignisse variieren. Die Geschiebedurchgängigkeit ist gewährleistet (Abb. 18 und Abb. 20). Gegenüber dem ursprünglich geplanten Projekt wurde das Bruttogefälle von 1.3 % auf 1.2 % reduziert [7]. Die untenstehend dargestellten Resultate berücksichtigen noch ein Bruttogefälle von 1.3 % und wurden nicht angepasst, ihre Aussagekraft bleibt aber gleich. Die Geschiebedurchgängigkeit bleibt auch mit einem Bruttogefälle von 1.2 % gewährleistet. Sollte sich ein eher unwahrscheinliches, steileres Gleichgewichtsgefälle $> 1.2\%$ einstellen, würden die Querbauwerke geringfügig eingekiest.

Zwischen der Müllerschwelle und der Zulgmündung beträgt das Bruttogefälle ca. 1.2 %. Die Nettogefälle zwischen den Schwellen liegen im Bereich von 0.7 bis 1.0 %. Die Sohlenbreiten nehmen gegen die Mündung hin ab und sind im Allgemeinen kleiner als oberhalb des Gummstegs. Die meisten Querprofile weisen eine Sohlenbreite von weniger als 23 m auf. Lokal beträgt die Sohlenbreite vereinzelt 24 bis 27 m. Die Sohlenbreiten und Bruttogefälle im Unterlauf liegen in der gleichen Größenordnung wie zwischen Müllerschwelle und Gummsteg. Wie in den Abb. 19 und Abb. 21 ersichtlich ist, wird das Geschiebe aus dem Oberlauf auch unterhalb der Müllerschwelle in Richtung Zulgmündung durchtransportiert.

Abb. 18: Längenprofil des Projektabschnitts mit Resultaten aus der Transportrechnung mit Ganglinie über 20 Jahre.



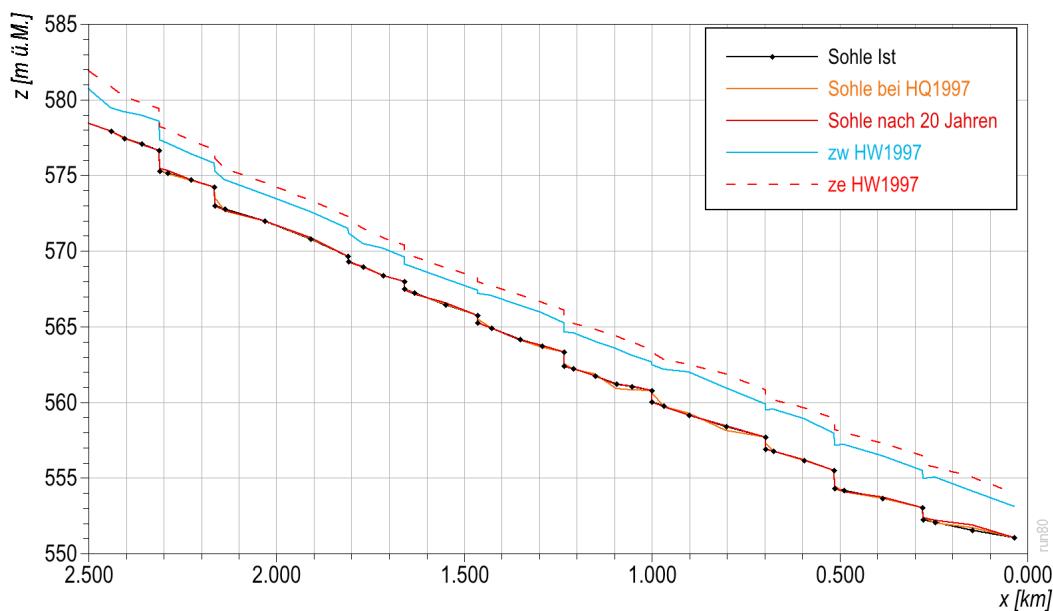


Abb. 19: Längenprofil des Unterlaufs mit Resultaten aus der Transportrechnung mit Ganglinie über 20 Jahre.

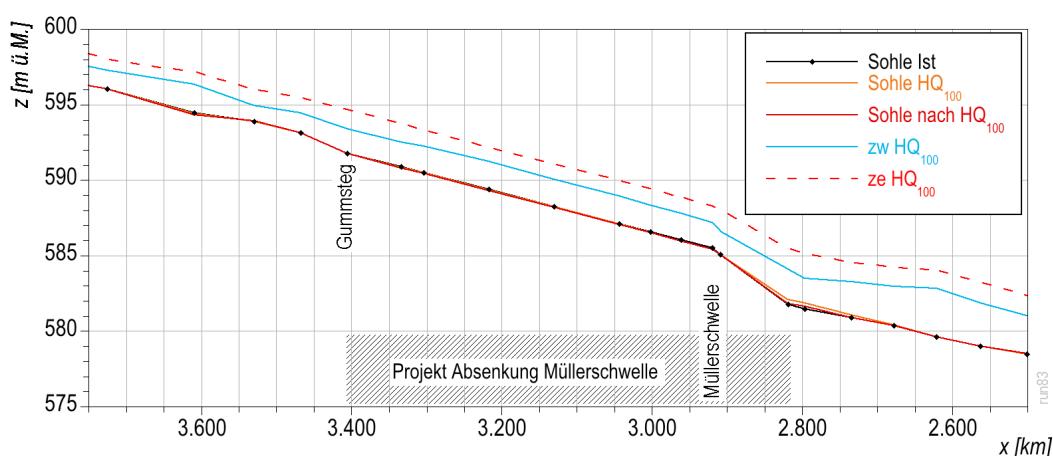
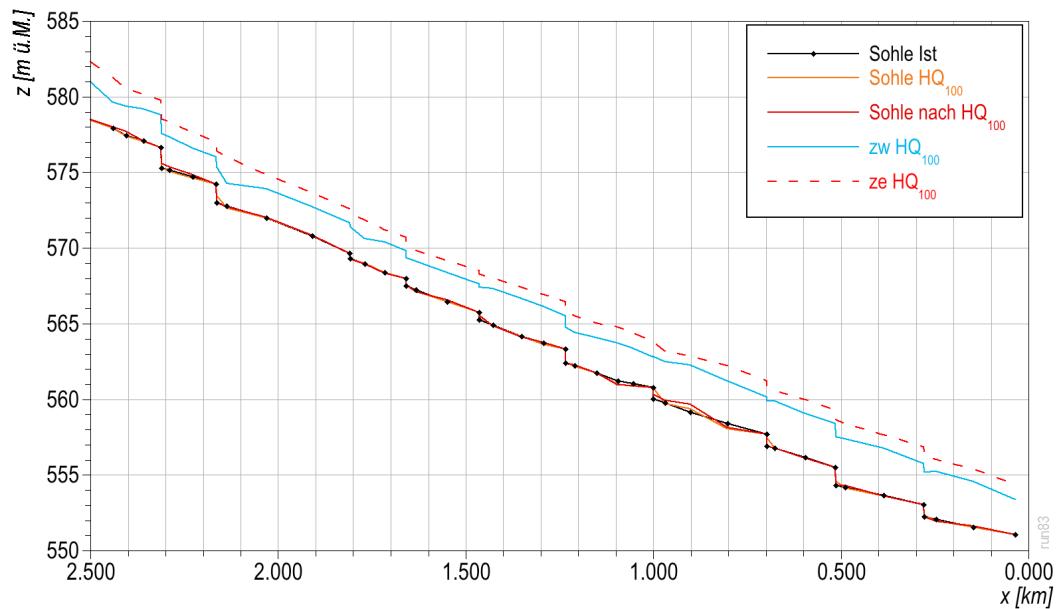


Abb. 20: Längenprofil des Projektabschnitts mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ100.

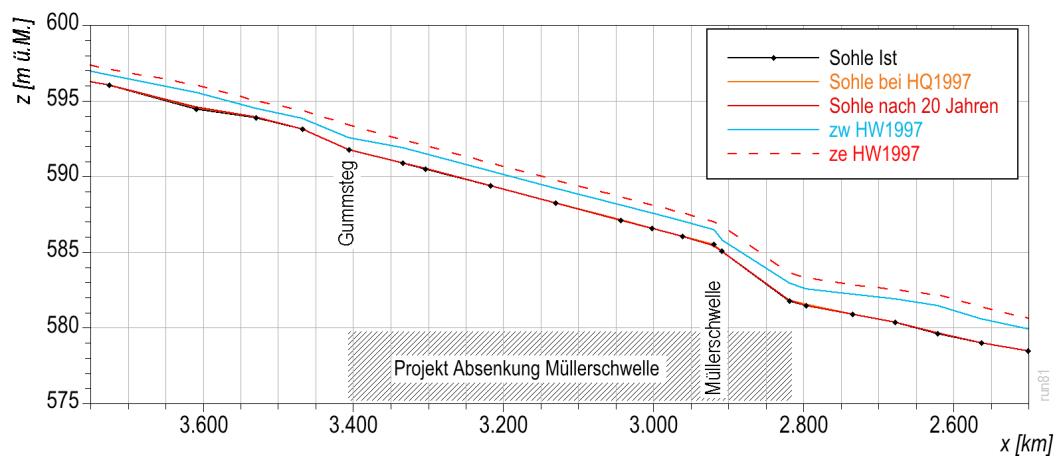
Abb. 21: Längenprofil des Unterlaufs mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ100.



6.2.3 Auswirkungen von häufigen Hochwassern (Ganglinie über 20 Jahre)

Im folgenden Längenprofil (Abb. 22) ist ersichtlich, dass über eine Zeitspanne von 20 Jahren kaum Sohlenveränderungen feststellbar sind, sofern keine grösseren Hochwassereignisse auftreten.

Abb. 22: Längenprofil des Projektabschnitts mit Resultaten aus der Transportrechnung mit Ganglinie über 20 Jahre ohne HW von 1997.



6.2.4 Auswirkungen von Gewitterereignissen

Anders als die häufigen Hochwasserereignisse haben 30-jährliche oder seltener Hochwasser einen Einfluss auf die Sohlenlage der Zulg. Die Sohlenveränderungen sind jedoch hauptsächlich auf dem Abschnitt zwischen dem Zulgboden und dem Projektperimeter feststellbar (vgl. Abb. 23). Die Sohle im Abschnitt zwischen Gummsteg und Müllerschwelle bleibt stabil. In den Abb. 23 und Abb. 24 sind als Beispiel für eine Transportrechnung eines kurzen Ereignisses die Resultate des HQ_{300} abgebildet. Die Diagramme mit den Längenprofilen für das HQ_{30} sowie das HQ_{100} sind im Anhang.

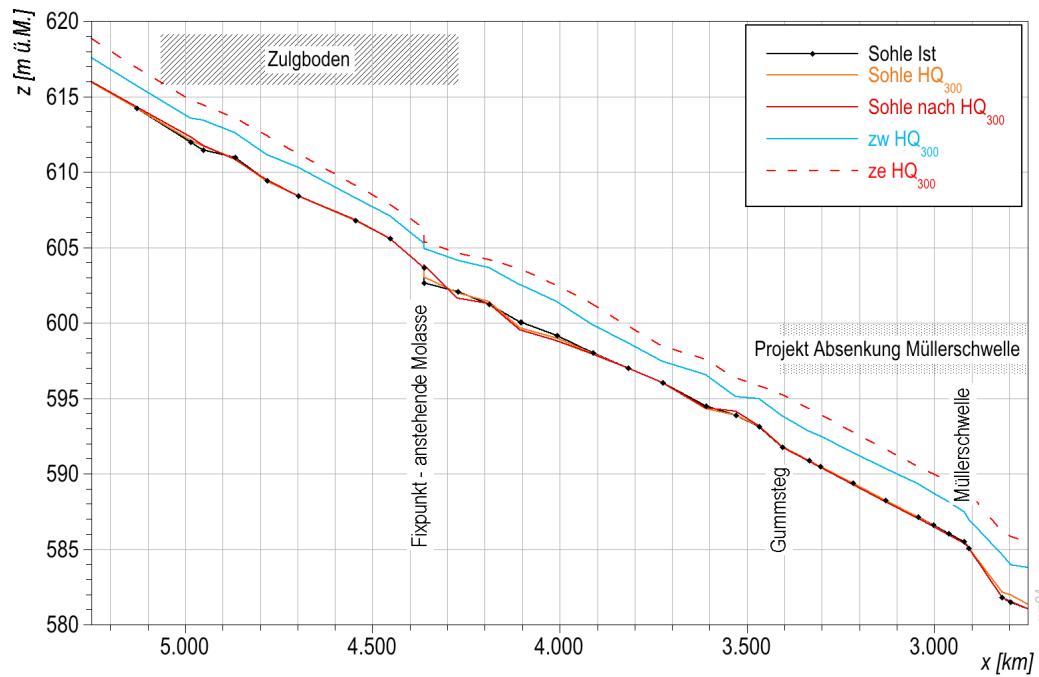


Abb. 23: Längenprofil Zulgboden bis Müllerschwelle mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ_{300} .

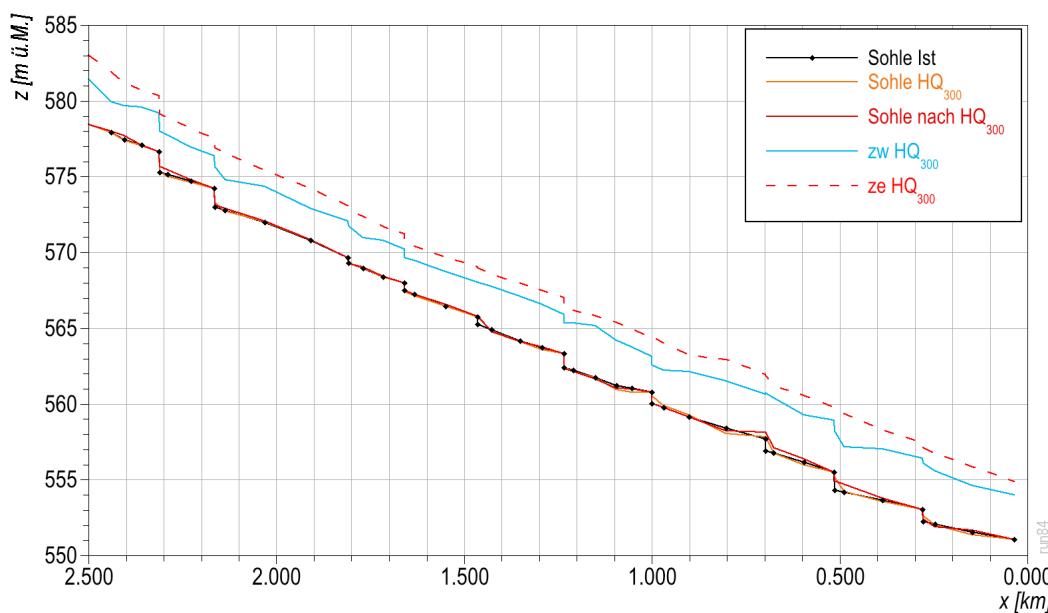


Abb. 24: Längenprofil des Unterlaufs der Zulg mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ_{300} .

6.2.5 Auswirkungen von langen Ereignissen

Hochwasserereignisse mit langer Dauer haben eine ähnlich Auswirkung auf die Sohlenlage der Zulg wie die kurzen Ereignisse. Die Sohlenlage im Projektabschnitt verändert sich auch bei dieser Belastung kaum. Am oberen Rand des Zulgbodens jedoch wird Geschiebe abgelagert, zwischen Zulgboden und Gummsteg wird das Geschiebe wieder mobilisiert. In den Abb. 25 und Abb. 26 sind stellvertretend für lange Ereignisse die Ergebnisse aus der Transportrechnung des *HQ300 lang* abgebildet. Die Diagramme mit den Längenprofilen für das *HQ100 lang* sind im Anhang.

Abb. 25: Längenprofil Zulgboden bis Müllerschwelle mit Resultaten aus der Transportrechnung *HQ300 lang*.

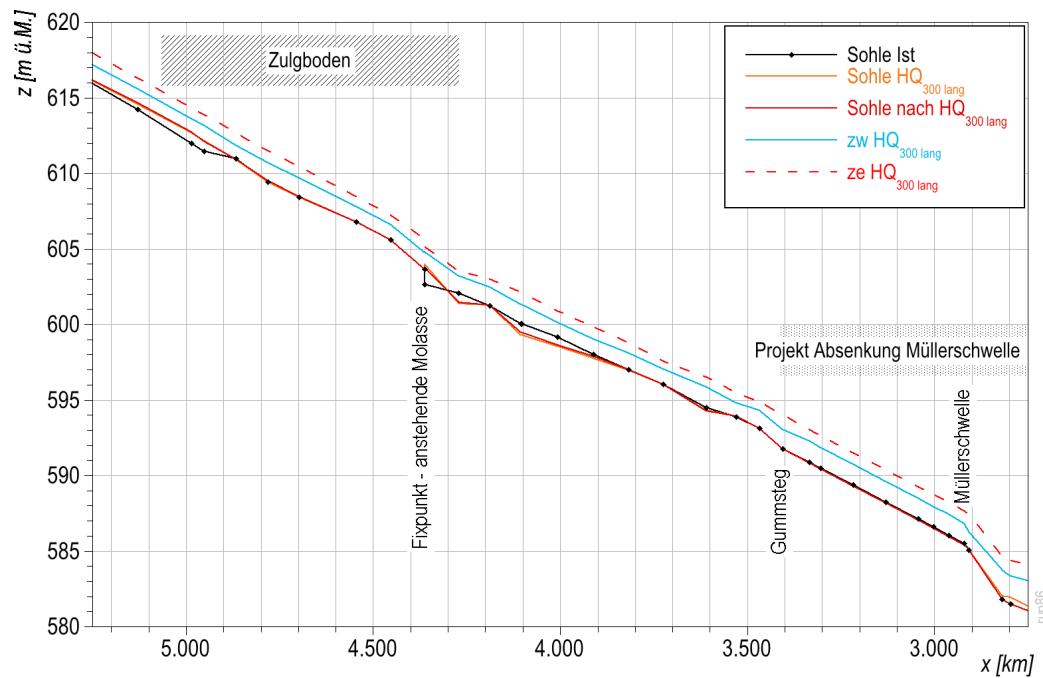
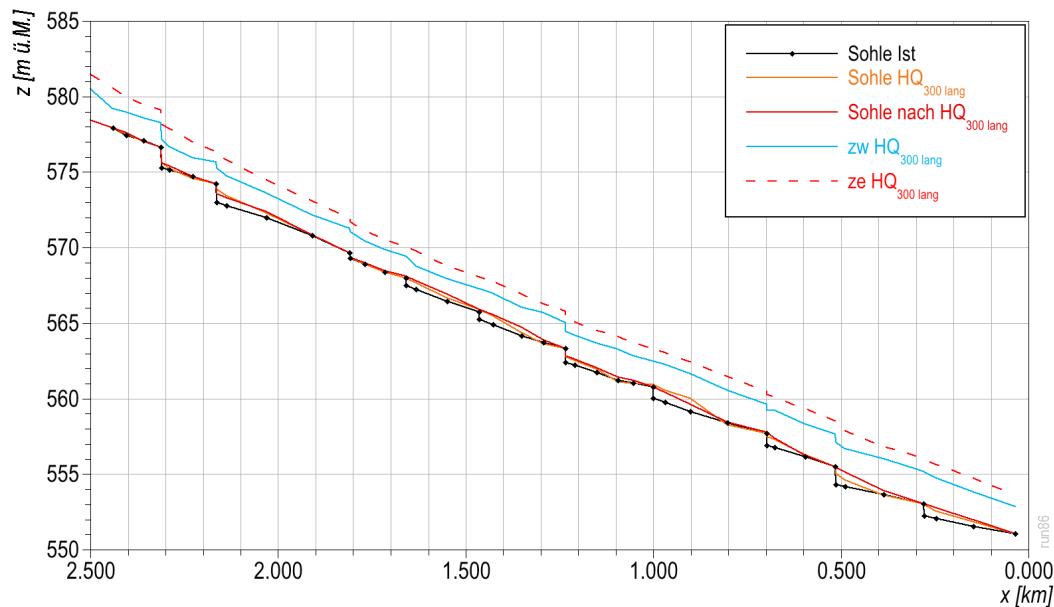


Abb. 26: Längenprofil des Unterlaufs mit Resultaten aus der Transportrechnung *HQ300 lang*.



6.2.6 Auswirkungen von Flutwellenszenarien

Abgesehen von den höheren Wasserspiegellagen sind im Längenprofil der Transportrechnung mit Flutwellenszenarien keine Veränderungen gegenüber der Berechnung mit langen Ereignissen feststellbar (vgl. Abb. 27 und Abb. 28). Die Diagramme mit den Längenprofilen für das *HQ100 Flutwelle* sind im Anhang.

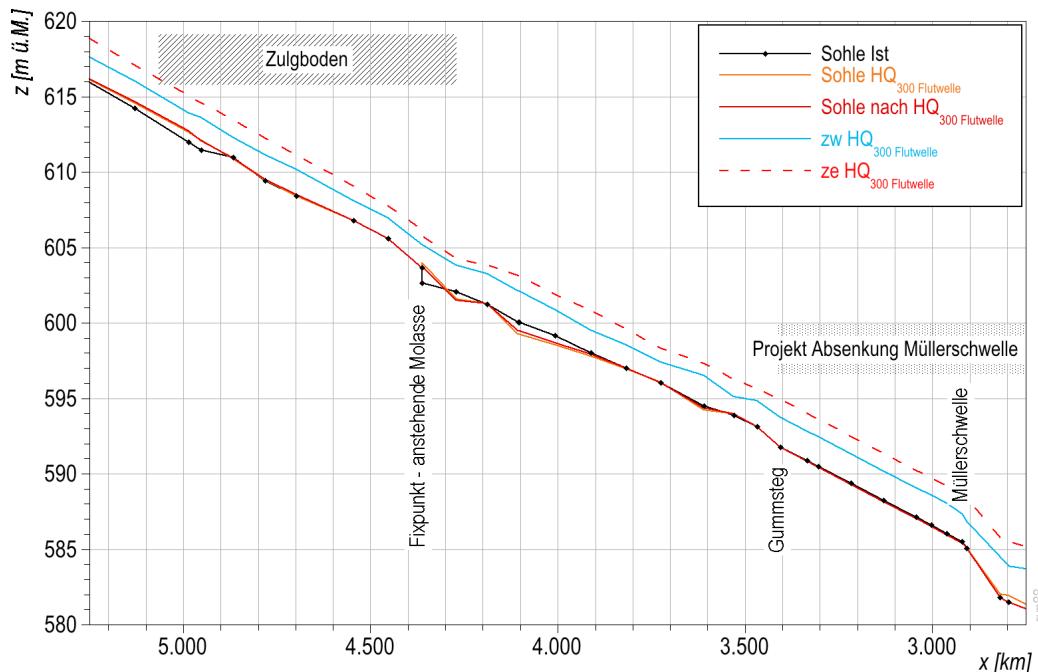


Abb. 27: Längenprofil Zulgboden bis Müllerschwelle mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ300 Flutwelle.

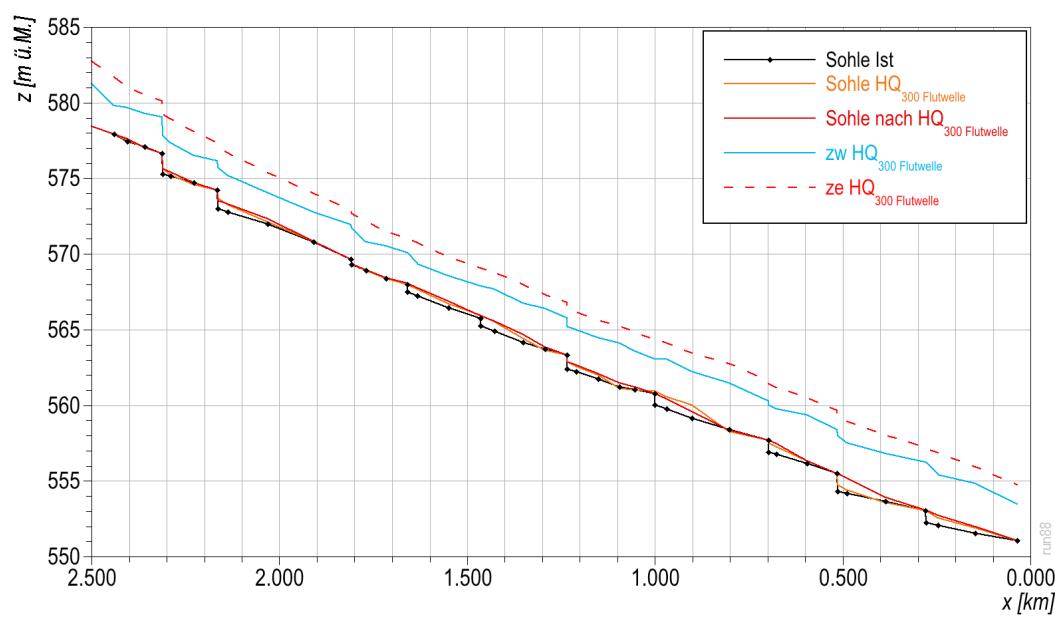


Abb. 28: Längenprofil des Unterlaufs mit Resultaten aus der Transportrechnung HQ300 Flutwelle.

6.2.7 Sohlenveränderung Zulgboden

Die Transportrechnungen mit verschiedenen Szenarien haben gezeigt, dass die Sohlenlage im unteren Bereich des Zulgbodens (zwischen km 4.4 und 4.85) nur geringen Schwankungen unterliegt (vgl. Abb. 30 bis Abb. 32). Bei km 4.36 befindet sich eine natürliche Schwelle, die anstehende Molasse tritt hier an die Oberfläche (vgl. auch Abb. 12). Im Modell wird der Absatz unterhalb der Schwelle mit Geschiebe aufgefüllt, was in Natur nicht erwartet wird. Die hohen Sohlendifferenzen von bis zu 1.5 m bei km 4.36 sind also ein Modelleffekt.

Abb. 29: Längenprofil auf dem Abschnitt Zulgboden mit Sohlenlagen im Ist-Zustand sowie während der Spitze des Hochwassers von 1997 und nach 20 Jahren.

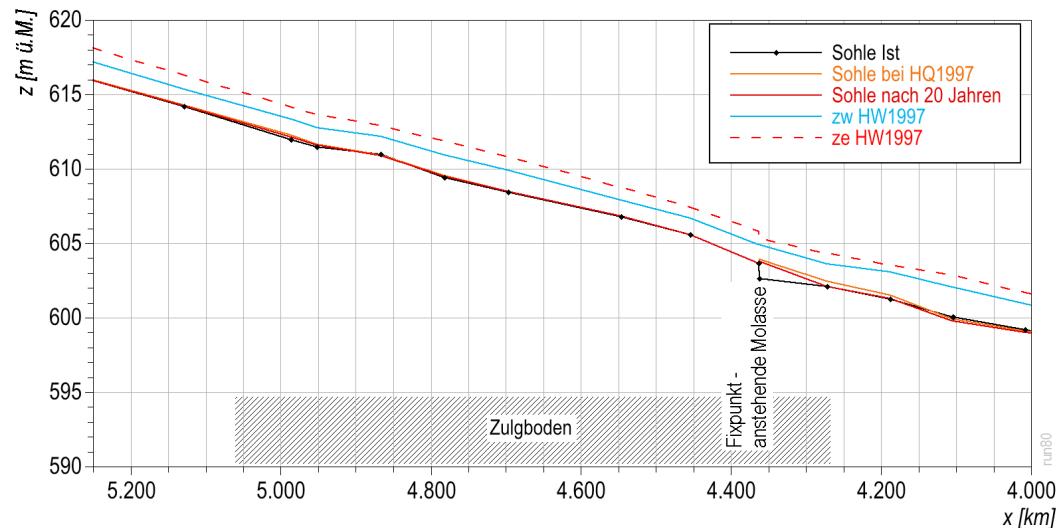
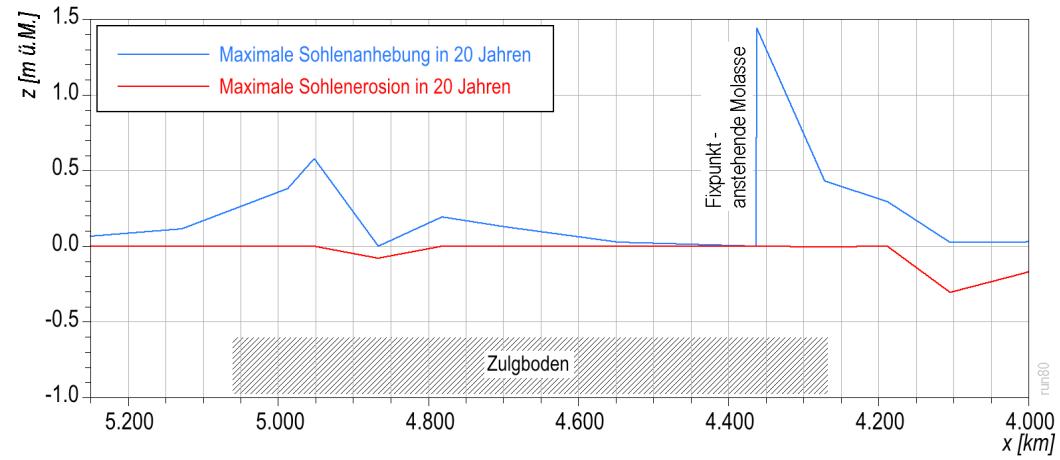


Abb. 30: Sohlendifferenzen auf dem Abschnitt Zulgboden während 20 Jahren.



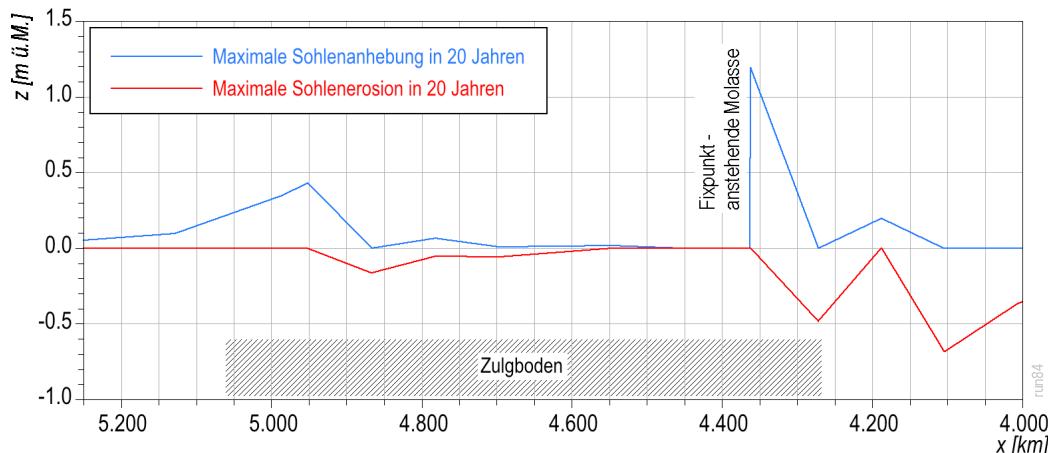


Abb. 31: Sohlendifferenzen auf den Abschnitt Zulgboden während eines Ereignisses HQ300 Gewitter.

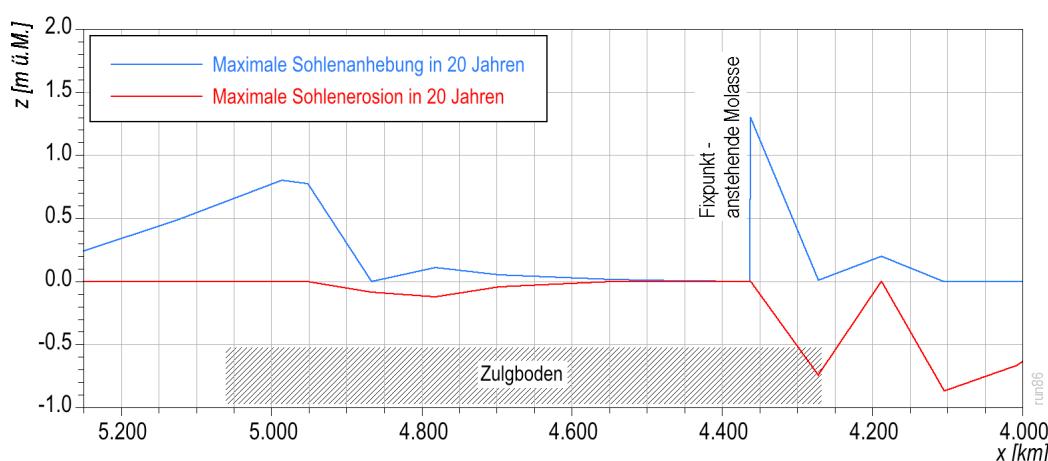


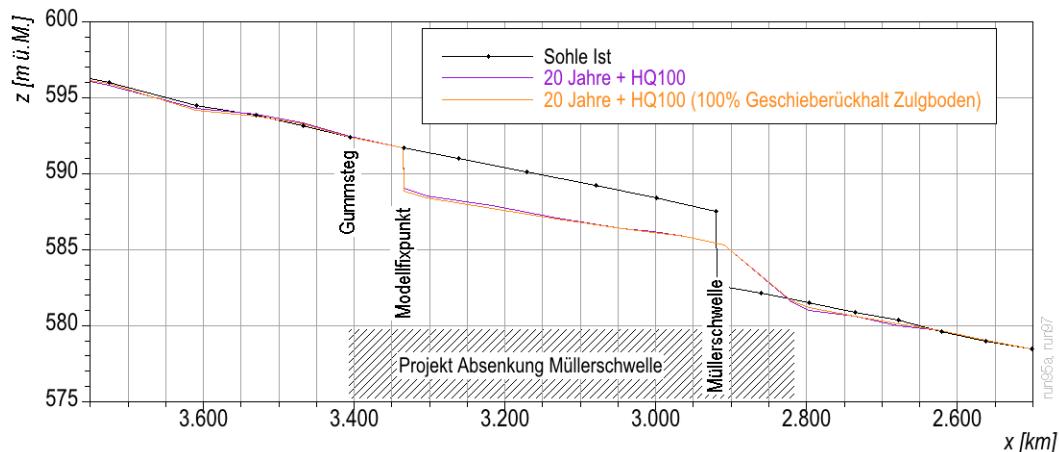
Abb. 32: Sohlendifferenzen auf dem Abschnitt Zulgboden während eines Ereignisses HQ300 lang.

6.2.8 Geschiebedefizit aufgrund des Holzrückhalts Zulgboden

Der Holzrückhalt im Zulgboden wurde mit Hilfe physikalischer Modellversuche untersucht [6]. Die Resultate zeigten, dass bei grossen Ereignissen und viel zurückgehaltenem Holz auch Geschiebe abgelagert wird. Es muss damit gerechnet werden, dass der Geschiebe-transport bei grossen Ereignissen um 20 – 40 % reduziert wird [8] und dadurch weiter unten ein temporäres Geschiebedefizit entsteht. Die Geschiebeablagerungen traten in den Modellversuchen jeweils nach Erreichen der Hochwasserspitze auf.

Unter der konservativen Annahme, dass aufgrund des Holzrückhalts im Zulgboden nach Erreichen der Hochwasserspitze 100 % des Geschiebes zurückgehalten wird, wurde analog zu Abschnitt 6.1.4 untersucht, wie sich daraufhin das Gleichgewichtsgefälle (jeweils ohne fixierende Querbauwerke) zwischen Gummsteg und Müllerschwelle verändern würde. Ein Vergleich des Gleichgewichtsgefälles nach einer Ganglinie von 20 Jahren und einem nachgelagerten 100-jährlichen Hochwasserereignis einmal ohne und einmal mit Geschieberückhalt im Zulgboden zeigt, dass die Auswirkungen sehr gering sind (Abb. 33). Ähnliche Ergebnisse wurden auch für ein HQ300 Ereignis erhalten. Das kurzzeitige Geschiebedefizit wird durch Aufnahme von Material aus der Sohle kompensiert. Das minimale Nettogefälle zwischen den geplanten Querbauwerken dürfte sich etwas reduzieren. Wie unter 6.1.4 aber vermerkt, kommt dieses flache Gleichgewichtsgefälle bei einer Gerinnebreite deutlich kleiner als 23 m zustande, was mit den geplanten Querbauwerken verhindert wird. Es ist somit nicht zu erwarten, dass das Nettogefälle zwischen den Querbauwerken auch mit einem vorübergehenden Geschiebedefizit geringer als 0.8 % ausfallen wird.

Abb. 33: Sich einstel- lendes Gleich- gewichtsgefälle ober- halb der abgesenkten Müllerschwelle unter Einfluss von Geschie- berückhalt im Zul- genden.



6.2.9 Erhöhtes Geschiebeaufkommen während Bauausführung

Nach Realisierung des Projekts Hochwasserschutz und Längsvernetzung Zulg wird sich das Geschiebeaufkommen im Unterlauf der Müllerschwelle bis zur Zulgmündung langfristig nicht verändern. Gemäss Rücksprache mit Herrn Deiss von der Gemeindeverwaltung Steffisburg wurde bisher oberhalb der Müllerschwelle zwar Geschiebe aus der Zulg entnommen, sämtliches Material aber sogleich unterhalb der Müllerschwelle wieder in die Zulg zurück gegeben. Somit wurde die Geschiebebilanz in der Zulg bisher nicht verändert. Nach Absenkung der Müllerschwelle sollte sämtliches Geschiebe in der Zulg die Müllerschwelle ohne künstliche Eingriffe passieren können. Die langfristige Geschiebebilanz ändert sich durch das Projekt nicht.

Gemäss Auskunft der Planer von Herzog Ingenieuren wird die Absenkung der Müllerschwelle 24'000 – 30'000 m³ Aushubmaterial freigeben. Es ist vorgesehen, 2/3 davon wieder zu verwenden und 1/3 davon über drei Jahre verteilt unterhalb der Müllerschwelle in die Zulg zu schütten. Somit werden während den Bauarbeiten gegenüber dem langjährigen Mittel jährlich ca. 3'000 m³ mehr Material im Unterlauf anfallen.

Das zusätzliche Material im Unterlauf der Zulg von 3'000 m³/a entspricht, unter der konservativen Annahme, dass es sich dabei ausschliesslich um Geschiebe handelt, einer mittleren jährlichen Geschiebefracht in der Zulg. Der Geschiebeeintrag in den Unterlauf wird somit während drei Jahren verdoppelt.

Daraus stellen sich die beiden Fragen,

- ob das temporär erhöhte Materialaufkommen im Unterlauf zu Problemen führen kann,
- ob das zusätzliche Material durch die Aare weitertransportiert werden kann, ohne dass sich die Hochwassersicherheit in der Aare bedeutend verschärfen wird.

a) Maximale Ablagerungen im Unterlauf

Es wurde eine Modellrechnung durchgeführt unter folgender Annahme: Die Abflussganglinie geht über 20 Jahre und setzt sich aus der zwei Mal hintereinander gereihten Ganglinie von 1992 bis 2001 (ohne Extremhochwasser von 1997) zusammen. Nach vier Jahren wird in drei aufeinander folgenden Frühjahren 1996, 1997 und 1998 je 3'000 m³ Geschiebe unterhalb der Müllerschwelle zusätzlich beigegeben. Mit den folgenden auftretenden grösseren Abflüssen und kleineren Hochwassern wird das Material mittransportiert und im Unterlauf verteilt. Abb. 34 zeigt für jedes Querprofil die während der modellierten Ganglinie maximal auftretende Sohlenlage, sowie die Ausgangs- und Endsohlenlage und die Sohlenlagen nach 7 Jahren (ein Jahr nach der dritten Zugabe von Aushubmaterial).

Die Resultate zeigen, dass die Sohle in den Zwischenfeldern der Treppen vorübergehend keilförmig auflandet, die Treppen dadurch aber nicht eingekiest werden. Das Gefälle wird temporär vergrössert, erreicht das Bruttogefälle aber nicht. Die maximale Sohlenlage zeigt unterhalb der Müllerschwelle eine starke Auflandung. Diese kommt durch die drei Schüttungen zustande, welche im Modell einfachheitshalber jeweils in kurzer Zeit und nur in einem Querprofil stattfinden. Die Schüttungen vor Ort sollten grossflächig verteilt werden.

Abb. 35 zeigt den Einfluss des zugegebenen Aushubmaterials auf die Sohlenlage im Unterlauf. Die Graphen zeigen jeweils die Sohlendifferenz zwischen der Situation mit und ohne Beigabe von Aushubmaterial für die Zeitpunkte 1 Jahr, 2 Jahre und 3 Jahre nach der ersten Zugabe, am Ende der Modellierung sowie für die maximale Sohlenlage während der modellierten Periode von 20 Jahren.

Die maximalen Auflandungen treten unterhalb km 1.7 auf, jeweils unterhalb der Schwellen. Dies führt zu den oben beschriebenen keilförmigen Ablagerungen. Im Laufe der Ganglinie wird das Material wieder ausgeschwemmt und das Längsprofil nimmt wieder einen ähnlichen Verlauf an wie ohne Zugabe von Aushubmaterial.

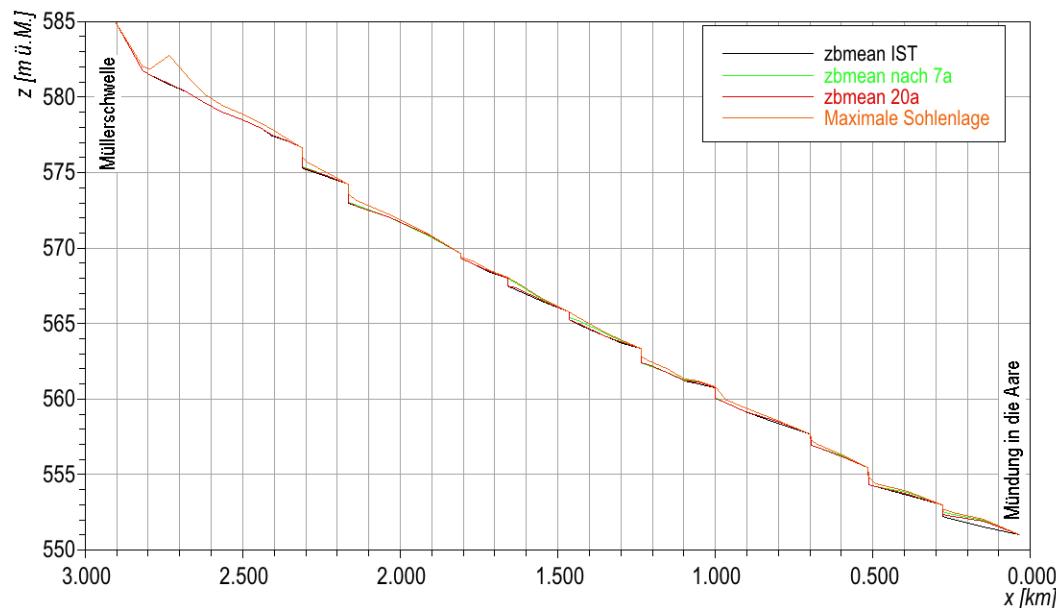
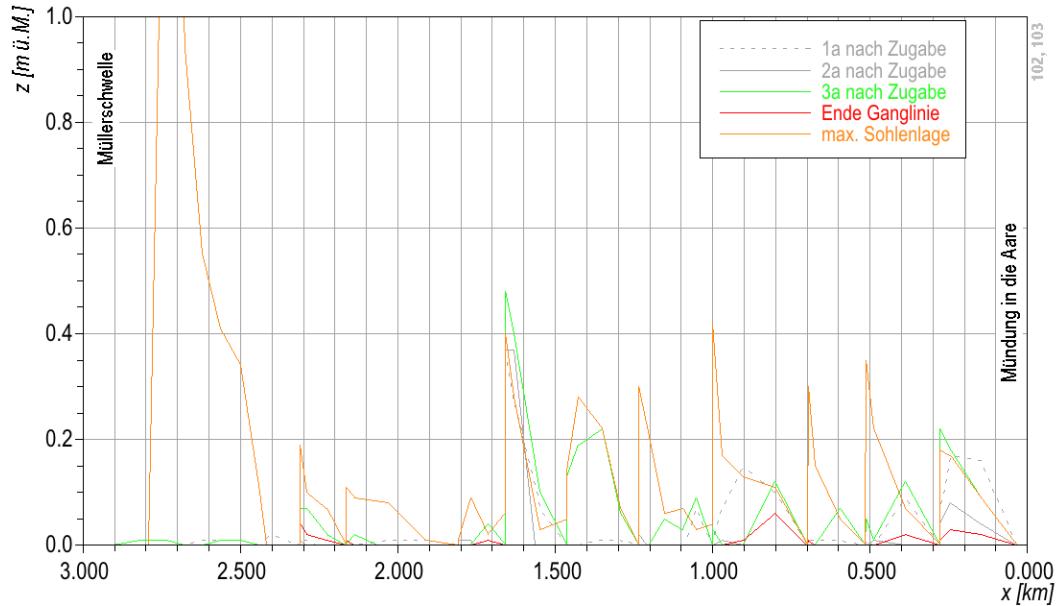


Abb. 34: Längenprofil unterhalb der Müllerschwelle vor, 3 Jahre nach und 16 Jahre nach der ersten Zugabe von Aushubmaterial sowie die maximal modellierte Sohlenlage während der ganzen 20-jährigen Ganglinie.

Abb. 35: Differenz der Sohlenlage mit und ohne Zugabe von Aushubmaterial 1, 2 und 3 Jahre nach erstmaliger Zugabe sowie am Ende der Ganglinie und Differenz der maximalen Sohlenlage während der 20-jährigen Ganglinie.



b) Weitertransport durch die Aare

Das Material wird im Unterlauf verteilt und allmählich in die Aare transportiert. Je nach Abflusskombination Aare / Zulg wird das Material in der Zulgmündung vorübergehend zwischengelagert oder durch den Hochwasserabfluss in der Aare weitertransportiert.

Die oben genannten Modellierungen zeigen, dass das zusätzlich in die Zulg eingebrachte Geschiebe verzögert die Mündung erreicht und nicht in der selben Konzentration in die Aare gelangt wie es unterhalb der Müllerschwelle zugegeben wird. Die summierten Geschiebefrachten in Abb. 36 zeigen, dass der Unterschied mit/ohne Aushubmaterial am unteren Ende der Zulg (Mündung) kleiner ist als unterhalb der Müllerschwelle. Während der Geschiebeeintrag in die Zulg unterhalb der Müllerschwelle während 3 Jahren ca. 200 % des langjährigen Mittels entspricht, betragen die Geschiebefrachten während der maximalen Abflussspitzen im Mündungsbereich nur ca. 150 % des durchschnittlichen Aufkommens. Ca. 2 bis 3 Jahre nach der letzten Geschiebezugabe normalisiert sich der Geschiebeaustausch aus der Zulg wieder und erreicht die üblichen, langjährigen Werte.

Grundsätzlich weist die Aare bis zur Schützenfahrbrücke ein Geschiebedefizit auf und erodiert Geschiebe aus der Flussohle. Sensitivitätsmodellierungen in der Aare zeigen, dass auch mit einem erhöhten Geschiebeeintrag aus der Zulg von + 30 % die Geschiebe-transportkapazität in der Aare keineswegs erschöpft ist [9]. Temporäre Ablagerungen im Bereich der Zulgmündung können die mittlere Sohlenlage der Aare vorübergehend anheben, werden bei ansteigendem Aareabfluss sogleich wieder wegerodiert und in Richtung Bern verfrachtet.

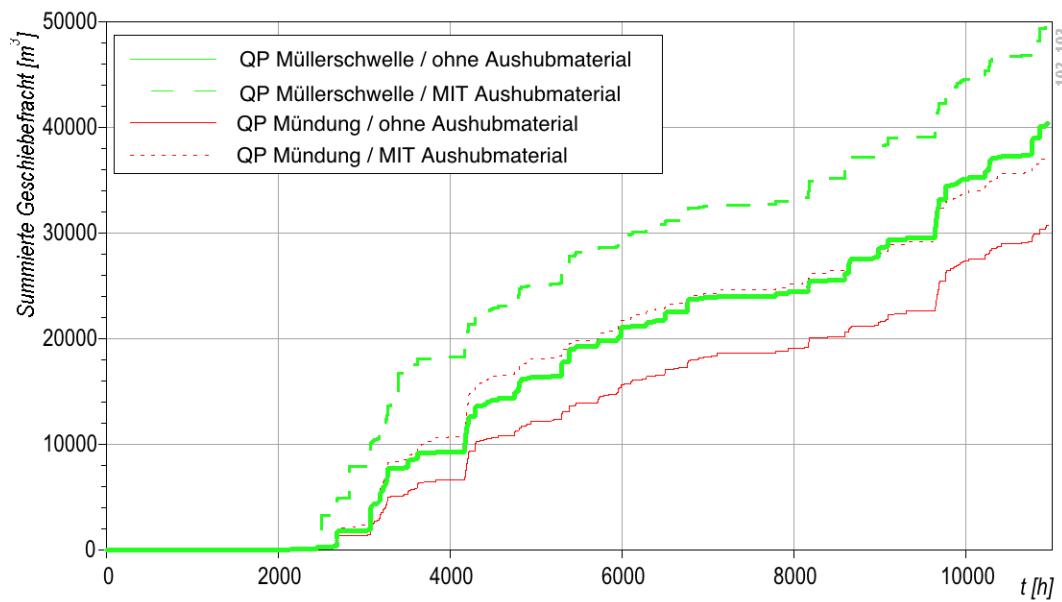


Abb. 36: Summierte Geschiebefracht unterhalb der Müllerschwelle (QP_39) und an der Mündung (QP_4) jeweils mit und ohne Zugabe von Aushubmaterial.

Fazit

Auch wenn bei Hochwasserspitzen infolge der Zugabe von Aushubmaterial kurzfristig 50 bis 100 % mehr Geschiebe in die Aare eingetragen wird, besteht gemäss unserer Beurteilung kaum ein Risiko, dass die Hochwassergefahr dadurch lokal erhöht werden könnte.

7 Schlussfolgerungen

Eine Absenkung der Müllerschwelle führt zur Mobilisierung grosser Geschiebekubaturen und zu Ablagerungen unterstrom der Müllerschwelle. Durch eine Absenkung der Müllerschwelle um mehr als 1 m wird die Abflusskapazität im Unterwasser infolge der Ablagerungen im ungünstigsten Fall so stark reduziert, dass die Situation bei vorhandenen Schwachstellen verschärft wird.

Bei einer Absenkung der Müllerschwelle um mehr als 1 m wird empfohlen, anstehendes Geschiebe oberhalb der Müllerschwelle maschinell zu entfernen und nicht durch die Zulg erodieren zu lassen.

Durch die Absenkung der Müllerschwelle stellt sich durch Rückwärtserosion ein neues, der Sohlenbreite angepasstes Gleichgewichtsgefälle ein. Das zu erwartende Gleichgewichtsgefälle für eine Sohlenbreite von 23 m beträgt zwischen 1.3 % und 0.8 %. Mit Sondagen wurde geprüft, ob im Bereich des Gummstegs anstehender Fels vorhanden ist und dieser einen natürlichen Sohlenfixpunkt bilden und die Rückwärtserosion beeinflussen könnte. Anstehender Fels wurde jedoch erst auf einer Kote 3 m unter der heutigen Flussohle gefunden. Die Sohle muss folglich mit baulichen Massnahmen fixiert werden.

Die Projektgeometrie des Bauprojekts sieht zwischen Gummsteg und der um 2 m abgesenkten Müllerschwelle eine Abfolge von zehn Querbauwerken vor, welche mit einem Bruttogefälle von 1.2 % eingebaut werden sollen. Das Bruttogefälle ist etwa gleich gross wie das zu erwartende theoretische Gleichgewichtsgefälle, entsprechend sind kaum Auflandungen zu erwarten. Dies konnte mit finalen Transportrechnungen für verschiedene Hochwasserszenarien für ein Bruttogefälle von 1.3 % gezeigt werden. Untersucht wurden kleinere Hochwasserereignisse im Rahmen einer Ganglinie über 20 Jahre, seltene Ereignisse HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} als Gewitterereignis sowie HQ_{100} und HQ_{300} als Folge eines langanhaltenden Niederschlagsereignisses. Zudem wurden die langandauernden Szenarien zu Flutwellenszenarien erweitert, welche einen Seeausbruch (Rückstau durch Murgang) abbilden. In allen Fällen wurde das eingetragene Geschiebe durch den Projektperimeter hindurch transportiert. Eine Reduktion des projektierten Bruttogefälles von 1.3 % auf 1.2 % führt kaum zu einer ungenügenden Geschiebetransportkapazität.

Das aus dem Oberlauf eingetragene Geschiebe kann unterhalb der Müllerschwelle ohne grossräumige Auflandungen in Richtung Zulg mündung weiter transportiert werden. Einige Schwellen können bei seltenen Ereignissen vorübergehend eingekiest werden.

Wird während der Ausführung in drei aufeinander folgenden Jahren Aushubmaterial in die Zulg gegeben jeweils vom Umfang einer durchschnittlichen Jahresfracht, kommt es mit durchschnittlichen Abflussereignissen im Unterlauf vorübergehend zu keilförmigen Ablagerungen in den Zwischenfeldern, ohne dass dadurch die Schwellen eingekiest werden. Das zusätzlich in den Unterlauf eingetragene Material wird langfristig wieder ausgeschwemmt und in die Aare weitertransportiert.

Als Grundlage für die Planung eines angedachten Schwemmholtzrückhaltes im Zulgboden wurde die Sohlenveränderung für die unterschiedlichen Ereignisse im Abschnitt Zulgboden untersucht. Im oberen Teil des Zulgbodens kann es bei seltenen Ereignissen zu Auflandungen von ca. 0.5 m kommen. Unterhalb von km 4.85 unterliegt die Sohle nur geringen Schwankungen, auch bei seltenen Ereignissen.

Die Beurteilung der Sohlenveränderung aufgrund der Absenkung der Müllerschwelle im Rahmen dieses technischen Berichts wurde ohne Berücksichtigung eines Schwemmholtzrückhalts gemacht. Die Realisierung eines Schwemmholtzrückhalts kann den Geschiebe-transport beeinflussen. Wird mit dem Rückhalten von Schwemmholtz auch Geschiebe zurückgehalten, kann dies zu veränderten Geschiebehaushaltsbedingungen im Unterlauf führen. Für diesen Fall wurde die Sohlenveränderung innerhalb des Projektperimeters

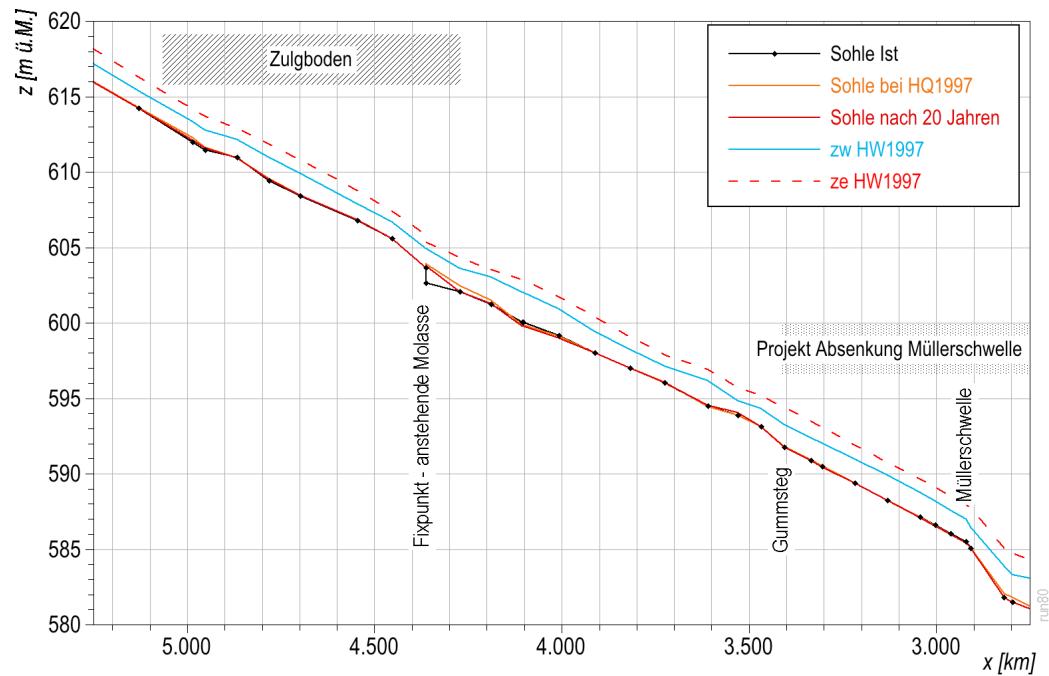
unter Berücksichtigung eines reduzierten Geschiebeintrags berücksichtigt. Unter Annahme eines temporären Geschiebedefizits erst nach Erreichen des Spitzenabflusses bei grossen Hochwasserereignissen (HQ100, HQ300) sind die Veränderungen des Nettogefälles im Projektperimeter gering und können durch die Sohlensicherung durch Querbauwerke aufgefangen werden. Das minimale Nettogefälle zwischen den Querbauwerken wird auch mit einem temporären Geschiebedefizit nicht unter 0.8 % zu liegen kommen. Die Fundation der Querbauwerke sollte darauf ausgelegt sein.

<i>Geschiebekapazität in der Aare</i>	Der langfristige Geschiebeintrag in die Aare verändert sich durch das Projekt nicht. Nur das Aushubmaterial, welches zusätzlich in die Zulg geschüttet wird, führt vorübergehend zu erhöhtem Geschiebeintrag in die Aare. Eine Verdoppelung des Geschiebeaufkommens unterhalb der Müllerschwelle während drei Jahren führt zu einer Erhöhung der in die Aare eingetragene Geschiebefracht um ca. 50 bis 100 %. Der Geschiebeüberschuss im Unterlauf wird durch den allmählichen Transport gedämpft. Eine Sensitivitätsstudie [9] bestätigt, dass eine selbst langfristige Erhöhung des Geschiebeintrags aus der Zulg die Erosionstendenz in der Aare noch nicht aufheben könnte. Aufgrund des übergeordneten Geschiebedefizits in der Aare dürfte der <i>temporäre</i> Geschiebeüberschuss aus der Zulg von 50 bis 100 % ohne negativen Konsequenzen durch die Aare aufgenommen und weiterverfrachtet werden.
---------------------------------------	---

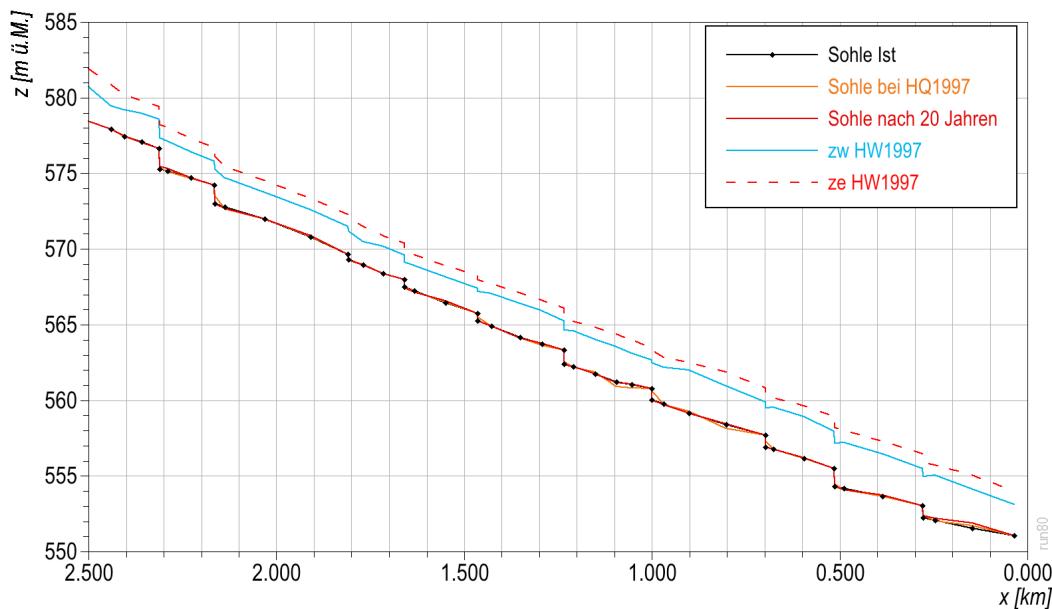
Anhang

Längenprofile Ganglinie über 20 Jahre

Zulgeboden bis Müllerschwelle

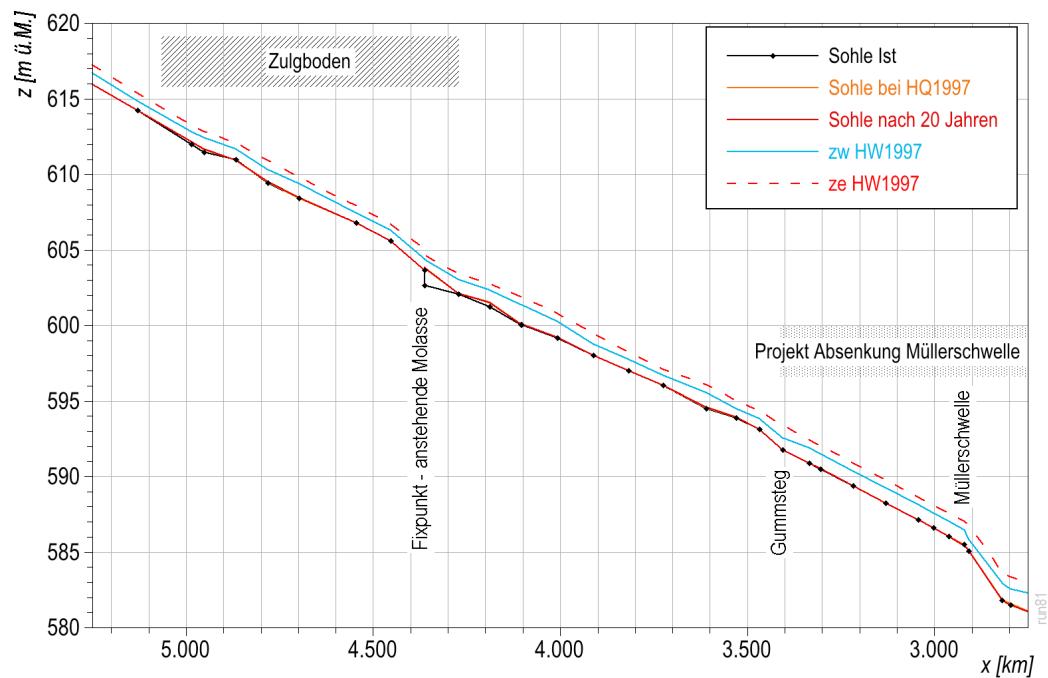


Unterlauf

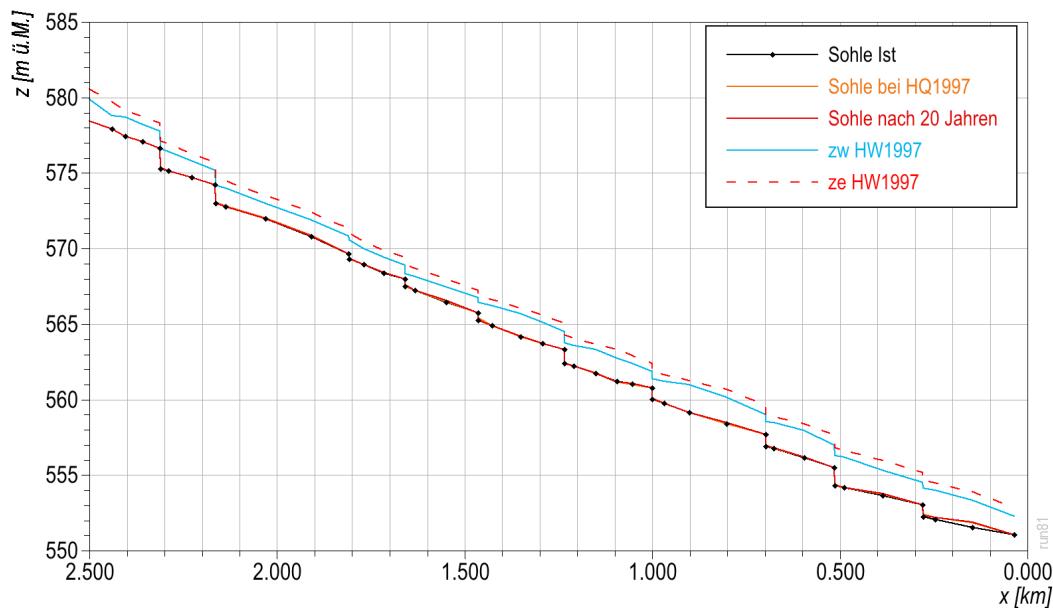


Längenprofile Ganglinie über 20 Jahre ohne HW 1997

Zulgboden bis Müllerschwelle

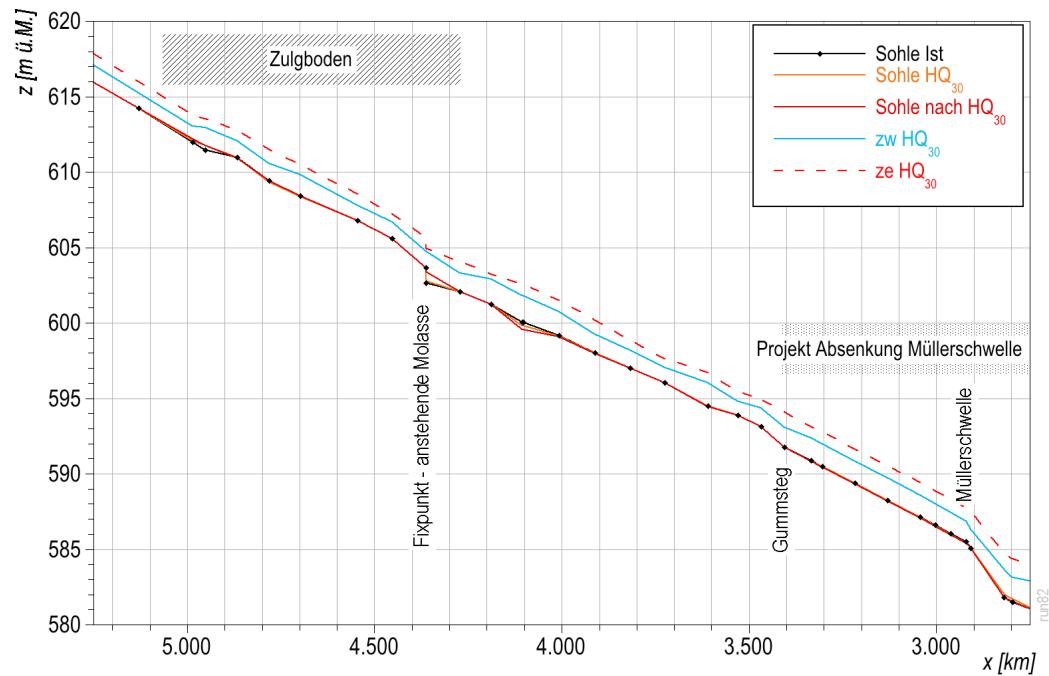


Unterlauf

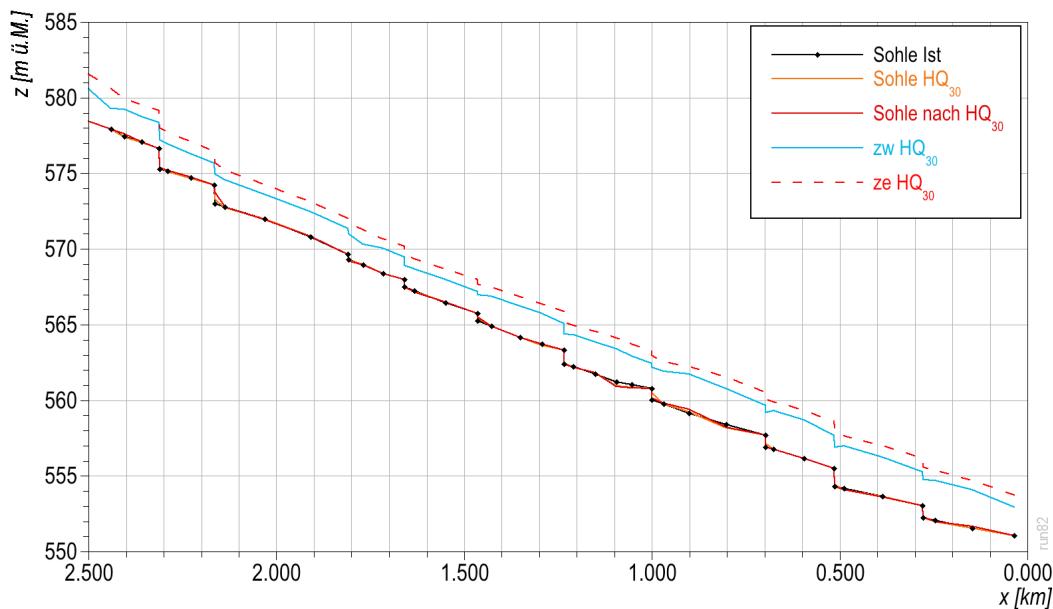


Längenprofil Gewitterereignis HQ30

Zulgeboden bis Müllerschwelle

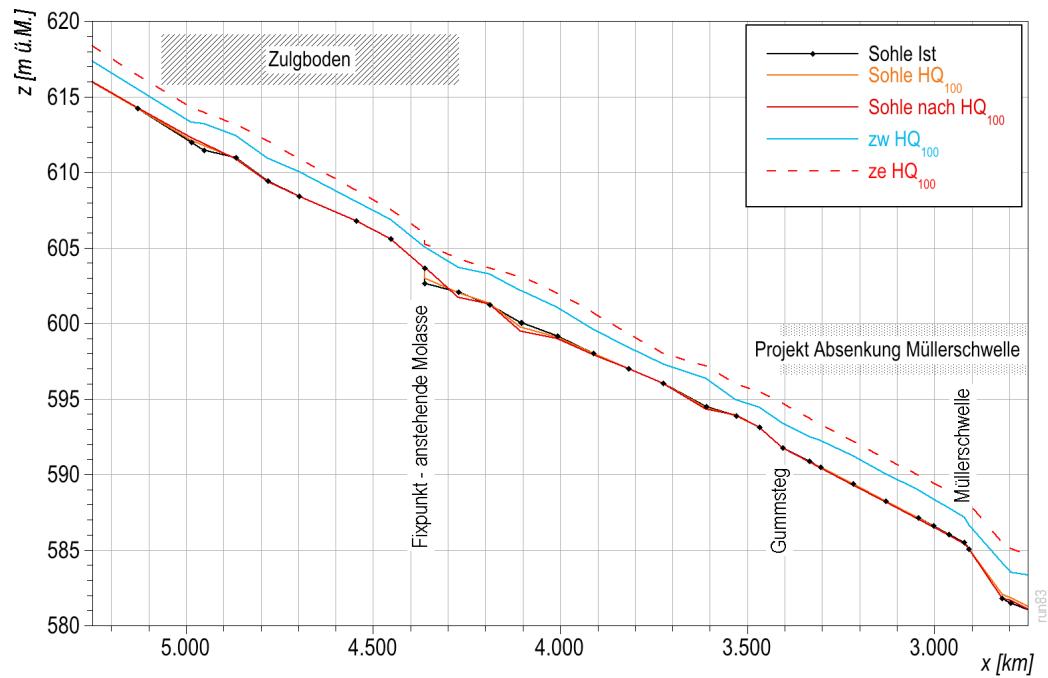


Unterlauf

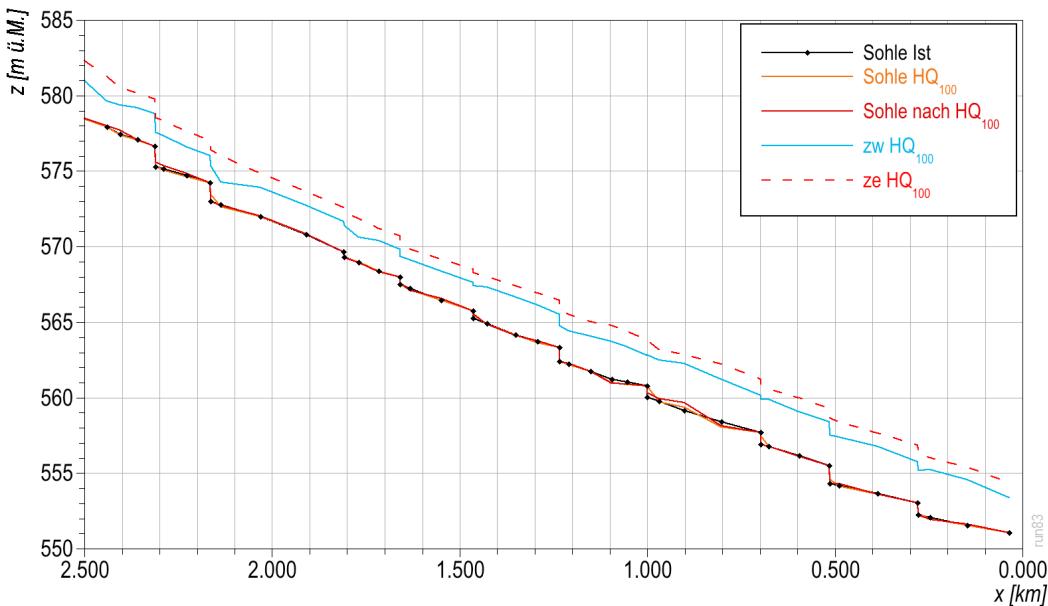


Längenprofil Gewitterereignis HQ100

Zulgboden bis Müllerschwelle

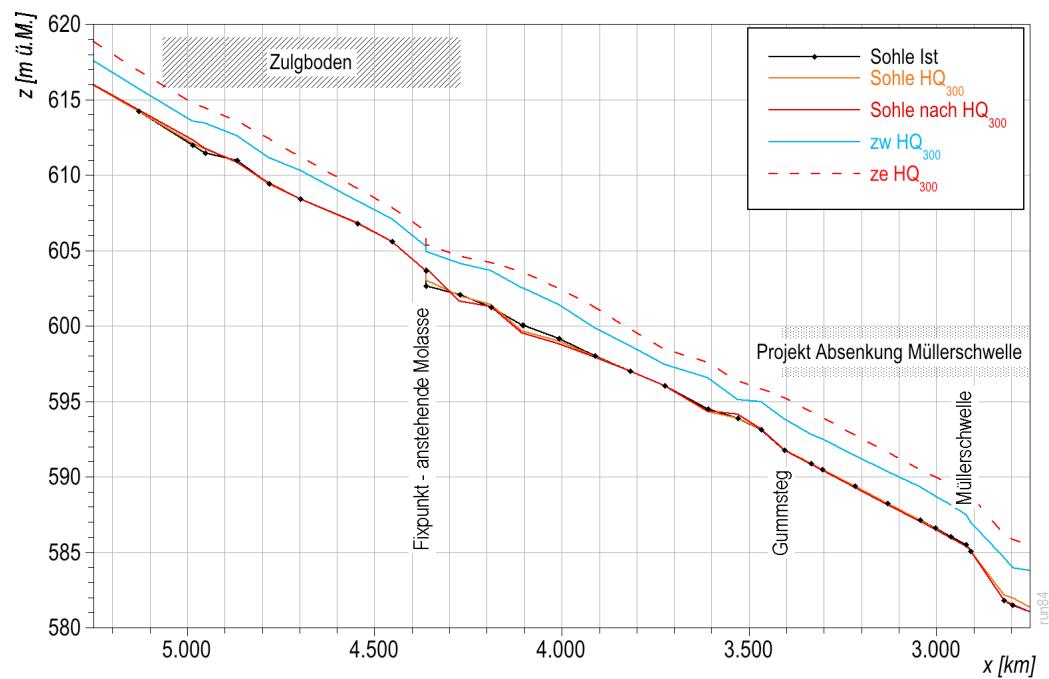


Unterlauf

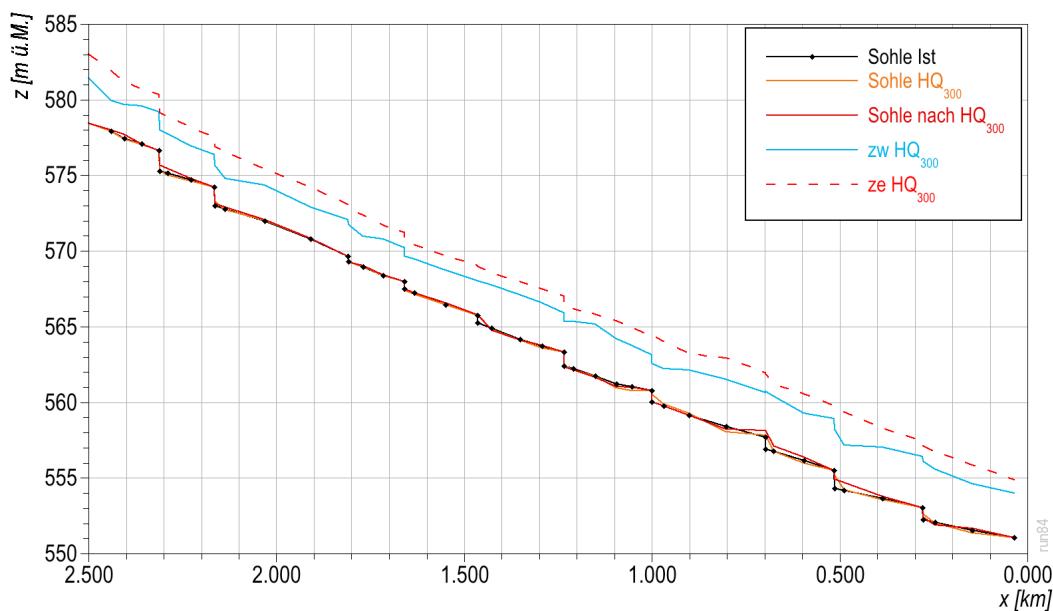


Längenprofil Gewitterereignis HQ300

Zulgeboden bis Müllerschwelle

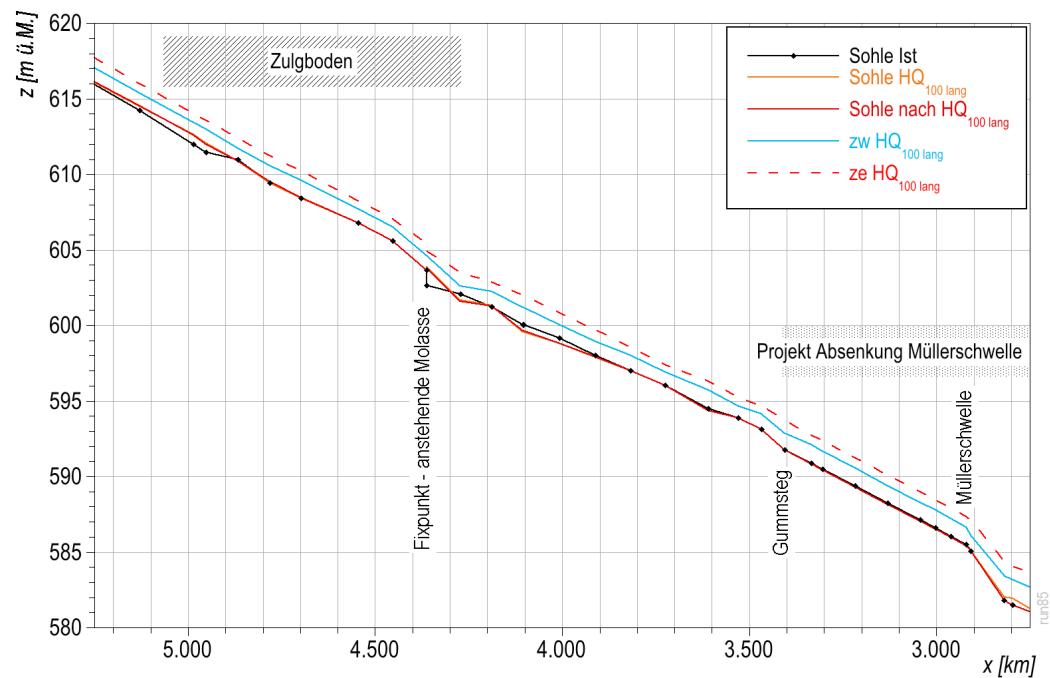


Unterlauf

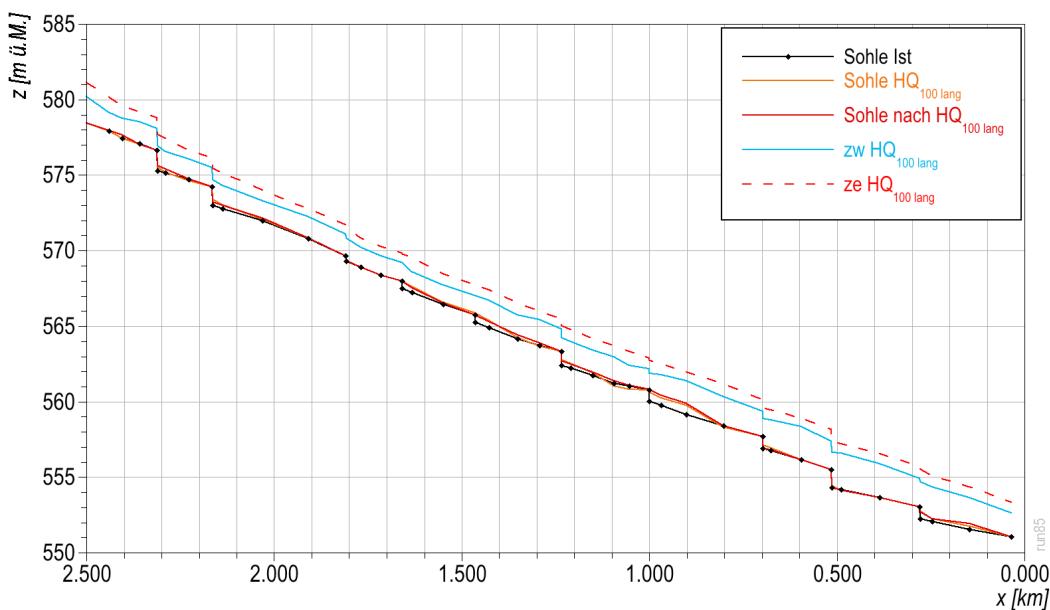


Längenprofil langes Ereignis HQ100 lang

Zulgboden bis Müllerschwelle

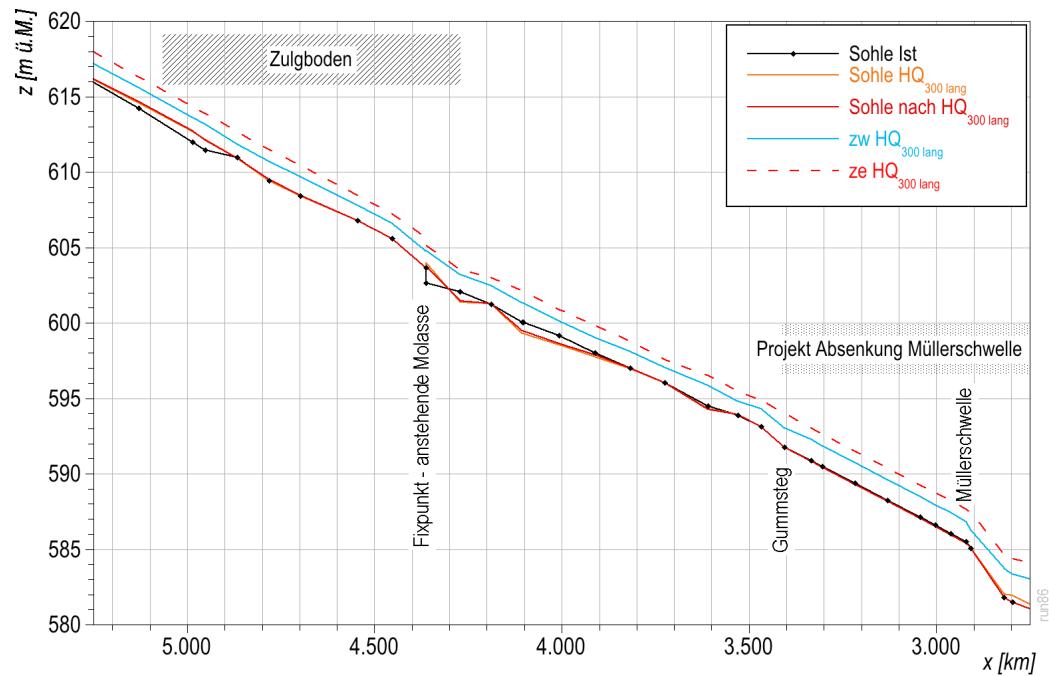


Unterlauf

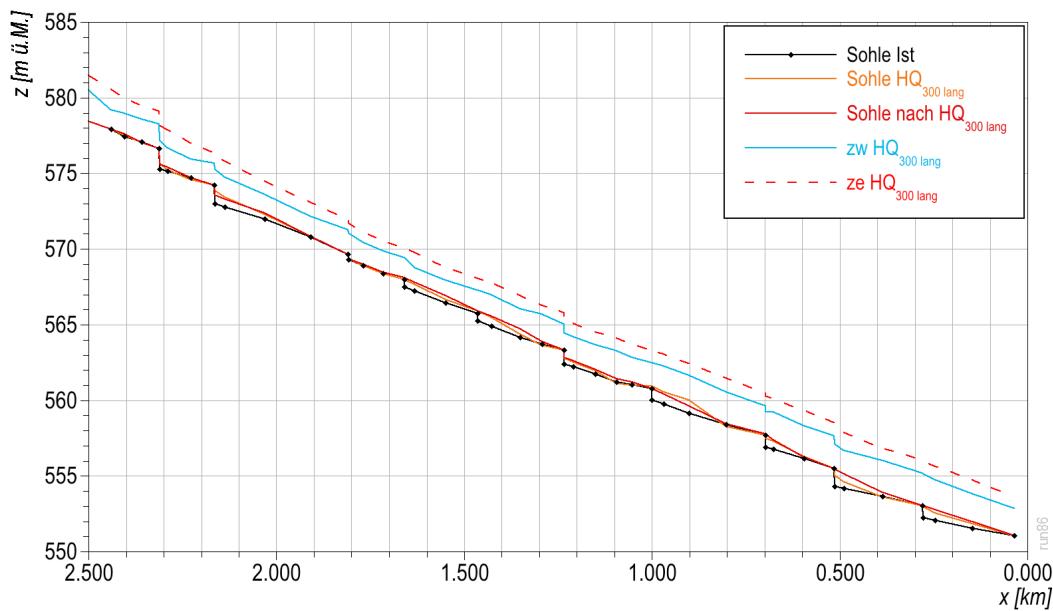


Längenprofil langes Ereignis HQ300 lang

Zulgeboden bis Müllerschwelle

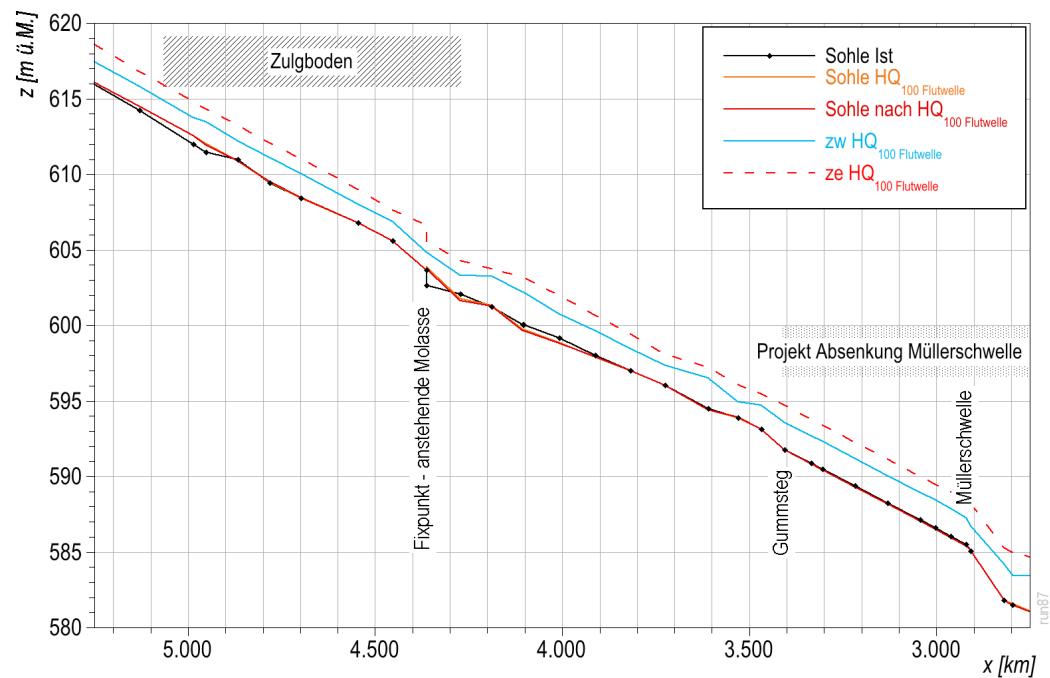


Unterlauf

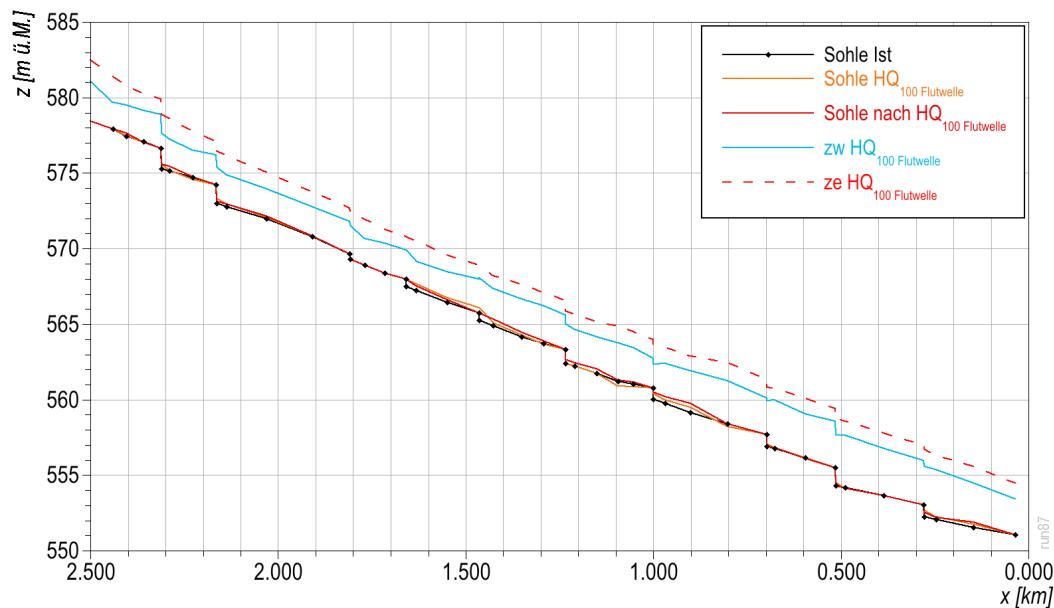


Längenprofil Flutwellenszenario HQ100 Flutwelle

Zulgboden bis Müllerschwelle

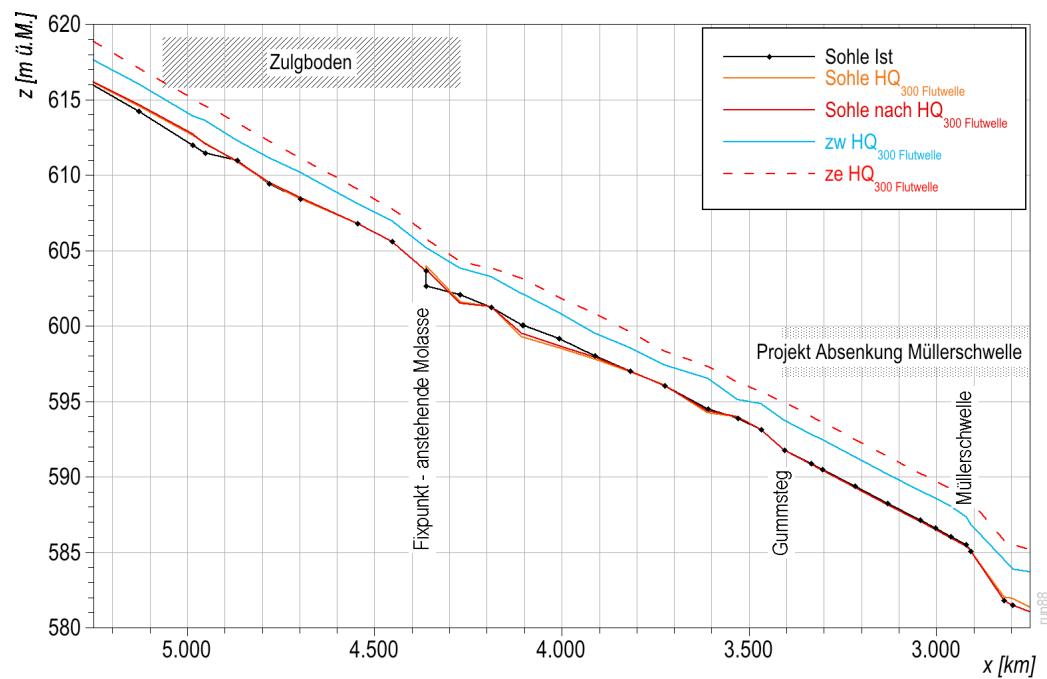


Unterlauf



Längenprofil Flutwellenszenario HQ300 Flutwelle

Zulgeboden bis Müllerschwelle



Unterlauf

