

Licca liber - Weiterführende Untersuchungen

Anlage 5.4 Gewässermorphologische Langzeitprognose Planvarianten

1	Inhalt des Berichts.....	3
2	Vorgehensweise bei der Modellierung.....	3
2.1	Generelles Modellierungskonzept	3
2.2	Berechnungsnetze und Ausgangsgeometrie	10
2.3	Anfangs- und Randbedingungen.....	14
3	Planungsbereich I – Ergebnisse und Interpretation	17
3.1	Variante I-A1	18
3.2	Variante I-A2	27
3.3	Variante I-B.....	35
3.3.1	I-B.....	35
3.3.2	I-B ohne Beaufschlagung der Nebengewässer	44
3.4	Variante I-C.....	46
3.5	Interpretation.....	55
4	Planungsbereich II – Ergebnisse und Interpretation	59
4.1	Überblick der Varianten und Sensitivitätsuntersuchungen.....	59
4.2	Variante II-A.....	60
4.2.1	II-A_R0x Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich	60
4.2.2	II-A_R1x Geschiebezugabe fein, großer Bereich	65
4.2.3	II-A_R2x Geschiebezugabe grob, großer Bereich.....	70
4.3	Variante II-B1	75
4.3.1	II-B1_R1x.....	75
4.4	Variante II-B2.....	80
4.4.1	II-B2_R1x Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich	80
4.4.2	II-B2_R2x Geschiebezugabe grob, mittelgroßer Bereich	85
4.4.3	II-B2_R3x Geschiebezugabe grob, großer Bereich.....	90
4.5	Variante II-B3.....	96
4.5.1	II-B3 ohne Geschiebezugabe.....	97
4.5.2	II-B3.....	102
4.6	Interpretation.....	103
5	Anhang.....	108

5.1	Definition der Subperioden und Zulaufganglinien	108
5.2	Homogenabschnitte, Tertiäroberkante und Ausgangs-Sohlhöhen	112
5.3	Stoffeintrag von Planungsbereich I in den Planungsbereich II	116
5.3.1	Generische Abfluss-Geschiebetransport-Beziehung	116
5.3.2	Resultierender generischer Stoffeintrag	120
5.4	Ausgangszustand der Kornzusammensetzung und Rauheitsverteilung ..	123

1 Inhalt des Berichts

Gegenstand dieses Berichts ist die Langzeitprognosen der Sohlentwicklung des Lechs im Bereich Augsburg zwischen Staustufe 23 bei Fkm 56,7 und dem Lechwehr Gersthofen bei Fkm 37,4 mit Hilfe einer morphodynamischen 2D-Modellierung für verschiedene Planvarianten. Dieser Bericht baut grundsätzlich auf den Erkenntnissen und dem Modellkonzept der Anlagen 5.1, 5.2 und 5.3 (Bezugszustand) auf. Zunächst wird die angewandte Methodik erläutert (Kapitel 2). Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert (Kapitel 3 und 4). Der Anhang (Kapitel 5) gibt Einblick in Modellierungsdetails und erlaubt eine möglichst lückenlose Nachvollziehbarkeit der Prognoseberechnungen.

2 Vorgehensweise bei der Modellierung

2.1 Generelles Modellierungskonzept

Die Vorgehensweise für die Langzeitprognosen der Planvarianten basiert grundsätzlich auf jener der Modellierung des Bezugszustands in Anlage 5.3, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Es werden z.B. die gleichen generellen (globalen) Einstellungen für den Betrieb der numerischen Modelle verwendet und das Konzept der periodischen Rauheitsanpassung in den Homogenabschnitten beibehalten. Das Modellgebiet wird erneut zweigeteilt:

- Planungsbereich I von Staustufe 23 (Fkm 56,7) bis zum Hochablass (Fkm 47,0)
- Planungsbereich II vom Hochablass (Fkm 47,0) bis zum Lechwehr Gersthofen (Fkm 37,4)

Der Output aus dem Planungsbereich I dient als Input des stromab liegenden Planungsbereichs II. Dazu zählen der Reinwasserabfluss und die Geschieberaten inklusive der Kornverteilungen des ausgetragenen Materials.

Zur numerischen Strömungs- und Geschiebetransportmodellierung wird die Beta-Version 4.4.0 der Software HYDRO_FT-2D der Firma Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH eingesetzt. Sie bietet im Vergleich zur Version 4.3.0 u.a. eine abflussabhängige Beschleunigung der Berechnungen und die Ausgabe der Datei qq_fa.dat, welche den Geschiebetransport in kg/s pro Fraktion an den Kontrollquerschnitten enthält. Genauere Informationen zur Software und eine Beschreibung der globalen Modellparameter (z.B. SCFG-Faktor) sind in Anlage 5.1 enthalten.

Zur Beschleunigung der Rechenläufe aller Planvarianten wird ein abflussabhängiger SCFG-Faktor definiert (Abbildung 1). Dieser ermöglicht eine erhebliche Verkürzung der Rechenzeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit während bettbildender Hochwasserereignisse. Die Dynamik des SCFG-Faktors wird als Teil der Ergebnisse z.B. in Abbildung 29 (Kapitel 3.1) illustriert.

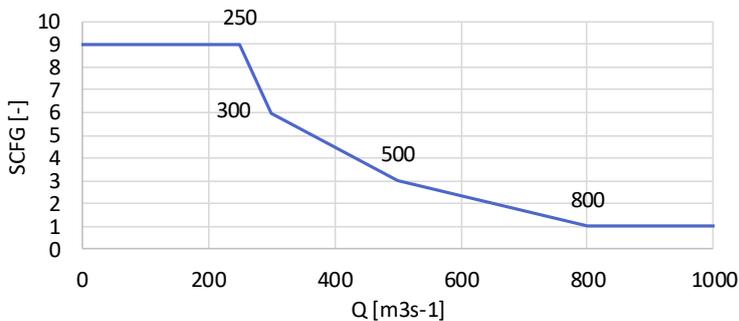


Abbildung 1: abflussabhängiger SCFG-Faktor

Die gesamte Simulationszeit der Langzeitprognose der Planvarianten, sowie die Methodik der Aufteilung in Subperioden und des Übertrags des sich ausbildenden Systemzustandes am Ende einer Subperiode als Anfangszustand der darauffolgenden Subperiode entspricht jener der gewässermorphologischen Langzeitprognose des Bezugzustands (Anlage 5.3, Kapitel 2.1). Die resultierenden drei Subperioden, die zweimal durchlaufen werden, sind in Kapitel 5.1 beschrieben.

Die maximale Erosionstiefe wird analog zur Langzeitprognose des Bezugzustands (Anlage 5.3) als Abstand der jeweiligen Ausgangssohle bis zum Horizont der Tertiärschicht definiert (Oberkante der Tertiärschicht siehe Anlage 5.2, Kapitel 3.1.3).

Für die Langzeitprognose des Bezugzustandes (Anlage 5.3) wird angenommen, dass kein Geschiebeeintrag von oberstrom erfolgt. Für die Planvarianten wird hingegen eine lokale Geschiebezugabe realisiert. Prinzipiell wäre die Vorgabe einer Geschiebe-ganglinie an einem beliebigen Zugabequerschnitt möglich. Dies würde allerdings voraussetzen, dass Geschieberate und Kornzusammensetzung bekannt sind, die vom jeweiligen Planmodell zu einem beliebigen Zeitpunkt und zugehörigem Abfluss transportiert werden kann. Würde die Geschiebezugaberate unterschätzt, so würde sich eine lokale Erosion einstellen. Im umgekehrten Fall würde sich eine Anlandung im Querschnitt bilden und ein künstlicher Aufstau entstehen. In der Realität werden künstliche Geschiebezugaben häufig als flächige Verklappung von Sedimenten direkt auf die Sohle oder als Geschiebeschüttungen im unmittelbaren Uferbereich realisiert. Bei bettbildenden Abflüssen holt sich der Fluss gewissermaßen genau jene Sedimentmenge in passender Kornzusammensetzung, die gerade gebraucht wird, bis die lokalen Depots erschöpft sind. Es liegt also nahe, diesen Prozess in den Modellen nachzubilden.

Wie in Anlage 5.3 erläutert, wird der gesamte Simulationszeitraum in Subperioden unterteilt und modelliert. Beim Übertrag des Systemzustandes am Ende einer Subperiode als Anfangsbedingung der darauffolgenden Subperiode können die Geometrie bzw. die Höhenlage des Flussbettes sowie die Kornzusammensetzung manipuliert werden.

Für die lokale Geschiebezugabe werden bestimmte Abschnitte (Rücksetzzonen) beim Übertrag der Geometrieinformation auf das ursprüngliche Niveau zurückgesetzt. Die neue Kornzusammensetzung innerhalb der Rücksetzzonen kann dabei optional beliebig vorgegeben werden (Füllmaterial). Für die Variante I-A1 im Planungsbereich I wird z.B. der Homogenabschnitt 1 stromab der Staustufe 23 und eine rund 100 m lange Rücksetzzone im geplanten ersten Nebengewässer gewählt (Abbildung 2). Die Volumendifferenz, die sich zwischen der Sohle im Endzustand einer Subperiode und der Ausgangssohle ergibt, entspricht der lokalen Geschiebezugabemenge im entsprechenden Zeitraum. In Abbildung 3 ist das Konzept für drei Subperioden anhand der Prognoseberechnung der Variante I-A1 (Kapitel 3.1) dargestellt.

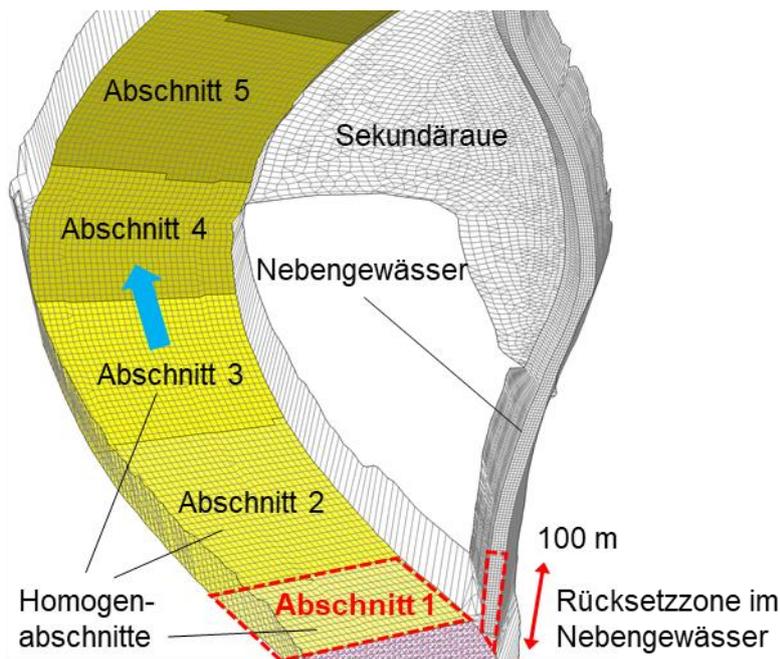


Abbildung 2: Realisierung der Geschiebezugabe im Planungsbereich I; Schrägansicht des Berechnungsnetzes der Variante I-A1 von der Staustufe 23 stromab; Rücksetzzonen sind rot gestrichelt markiert

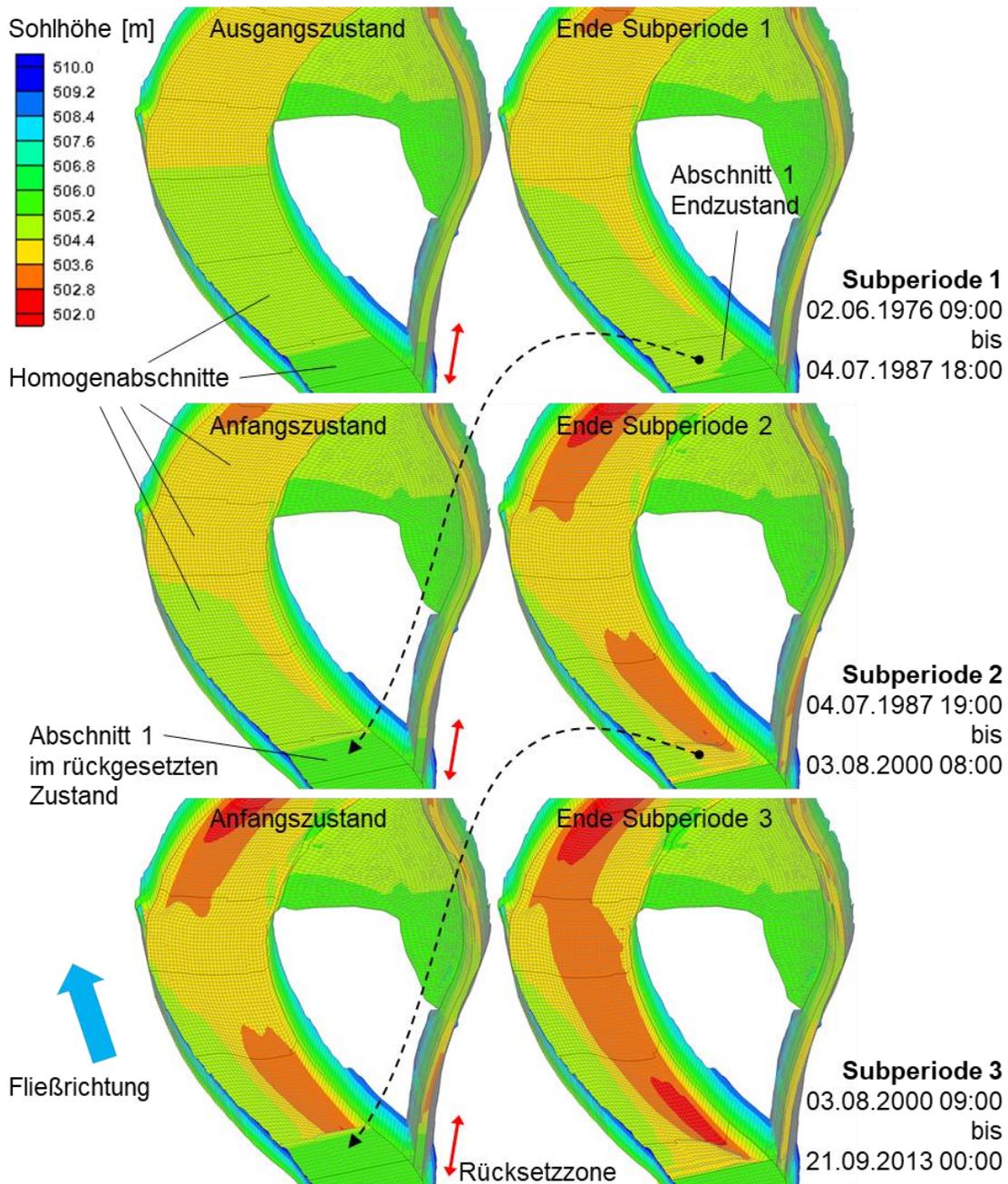


Abbildung 3: Geschiebezugabe über periodisches Rücksetzen von Sohlbereichen; Variante I-A1 (Kapitel 3.1) mit den Rücksetzzonen Abschnitt 1 und einem Bereich im ersten Nebengewässer (Abbildung 2)

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Sohlhöhe und des mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} im Verlauf der einzelnen Subperioden (Zeitpunkte siehe Tabelle 26, Kapitel 5.1) wird z.B. in Abbildung 23 und Abbildung 24 (Kapitel 3.1) gezeigt.

Das vorzugebende Füllmaterial hat ebenso wie die Wahl der Rücksetzonen großen Einfluss auf die Modellergebnisse. Im Sinne einer Sensitivitätsuntersuchung werden zwei Kornmischungen untersucht:

- Unterschichtenmaterial aus den Erhebungen der Vorland-Schürfe mit einem mittleren Korndurchmesser $d_m = 19.57$ mm (Anlage 5.2, Tabelle 1) und
- größeres Deckschichtmaterial mit $d_m = 38.28$ mm.

Tabelle 1 fasst die Fraktionsanteile der Füllmaterialien der mittleren Korndurchmesser $d_{i,m}$ der gewählten 6 Kornklassen ($d_{1,m} = 2$, $d_{2,m} = 10$, $d_{3,m} = 24$, $d_{4,m} = 47.5$, $d_{5,m} = 87$, $d_{6,m} = 152.5$ mm) übersichtlich zusammen.

Tabelle 1: Fraktionsanteile (F1, F2, ...) der Kornverteilung und mittlerer Korndurchmesser d_m des verklappten Geschiebes (Füllmaterial)

F1 [-]	F2	F3	F4	F5	F6	d_m in mm
0.1374	0.1706	0.2212	0.3118	0.1232	0.0358	38.28
0.2195	0.3229	0.2826	0.1546	0.0204	0.0000	19.57

Die Gewässersohle wird in sogenannte Homogenabschnitte unterteilt, die sich an der Lage der entsprechenden Abschnitte in den Bezugsmodellen (Anlage 5.3) orientiert. In Abbildung 4 ist die Übertragung der Abschnitte aus dem Bezugsmodell beispielhaft für die Variante I-A1 dargestellt. Die Homogenbereiche werden sowohl in die Breite bis zu den Böschungsunterkanten als auch in der Länge, falls z.B. Abstürze im Bezugzustand fehlen, extrapoliert. Details zu den Homogenabschnitten finden sich in Kapitel 5.2.

Nach Berechnung einer Subperiode werden die Rauheitsbeiwerte im Flussschlauch auf Basis des Ergebnisses der vorangegangenen Subperiode angepasst. Dazu wird die knotenweise Kornverteilung der Austauschschicht ausgewertet. Der flächige mittlere Korndurchmesser $d_{m,AL}$ je Homogenabschnitt des Endzustandes einer Subperiode wird zur Berechnung des Rauheitsbeiwertes $k_{St,neu}$ nach Strickler der folgenden Subperiode mittels folgender Beziehung verwendet: $k_{St,neu} = 21/d_{m,AL}^{1/6}$

Der Riffel-Faktor μ wird für die Langzeitprognosen gleich 1 gesetzt. Daraus folgt, dass der Wert der Kornrauheit $k_{St,r}$ dem Wert der Gesamtrauheit k_{St} entspricht. Gerade bei gewässermorphologischen Langzeitsimulationen mit dynamischer Sohlentwicklung müssen die damit verbundenen Auswirkungen auf den Fließwiderstand berücksichtigt werden. Die angewandte Methodik orientiert sich an der Modell-Validierung (Anlage 5.2, Kapitel 4.6). Hier hat sich gezeigt, dass die gewählte Form der Rauheitsanpassung zu überprüfbar guten Modellergebnissen führt.

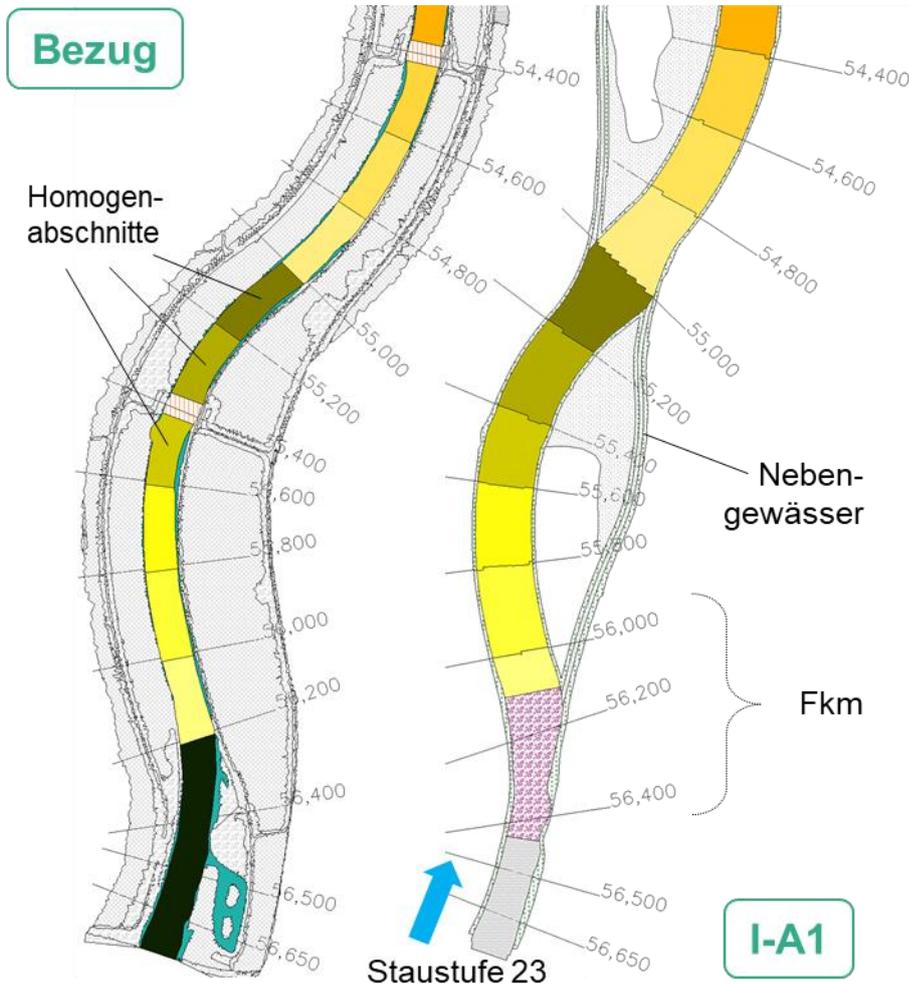


Abbildung 4: Einteilung der Homogenabschnitte im Bezugsmodell und Übertrag auf die Variante I-A1 im Planungsbereich I mit wesentlich breiterer Sohle

Der Informationsübertrag zwischen Planungsbereich I und II besteht aus der Weitergabe des Reinwasserabflusses und des Stoffaustrags. Der Reinwasserabfluss im Planungsbereich I am Hochablass (z.B. Abbildung 29) unterscheidet sich vom Reinwasserzufluss bei der Staustufe 23 nur geringfügig durch eine zeitliche Verzögerung. Daher werden für den Reinwasserzufluss im Planungsbereich II ebenso die Zulaufganglinien aus Kapitel 5.1 verwendet, jedoch um den seitlichen konstanten Abfluss von $Q = 46 \text{ m}^3/\text{s}$ am Hochablass in den Stadtbach/Kanustrecke vermindert. Die Überlegungen zum Stoffeintrag in den Planungsbereich II werden im Kapitel 5.3 im Detail ausgeführt. Aus der Analyse des Geschiebeaustrags sämtlicher Planvarianten im Planungsbereich I wird eine generische Abfluss-Geschiebetransport-Beziehung abgeleitet. Mit ihrer Hilfe werden fraktionierte generische Stoffeintragungsganglinien berechnet, welche den Varianten im Planungsbereich II als Stoffeintrags-Randbedingungen dienen.

Zusammenfassend entspricht das Modellkonzept demjenigen des Bezugszustands in Anlage 5.3 inkl. periodischer Rauheitsanpassung der Homogenabschnitte, welches um die Umsetzung einer lokalen Geschiebezugabe erweitert wird (Abbildung 5).

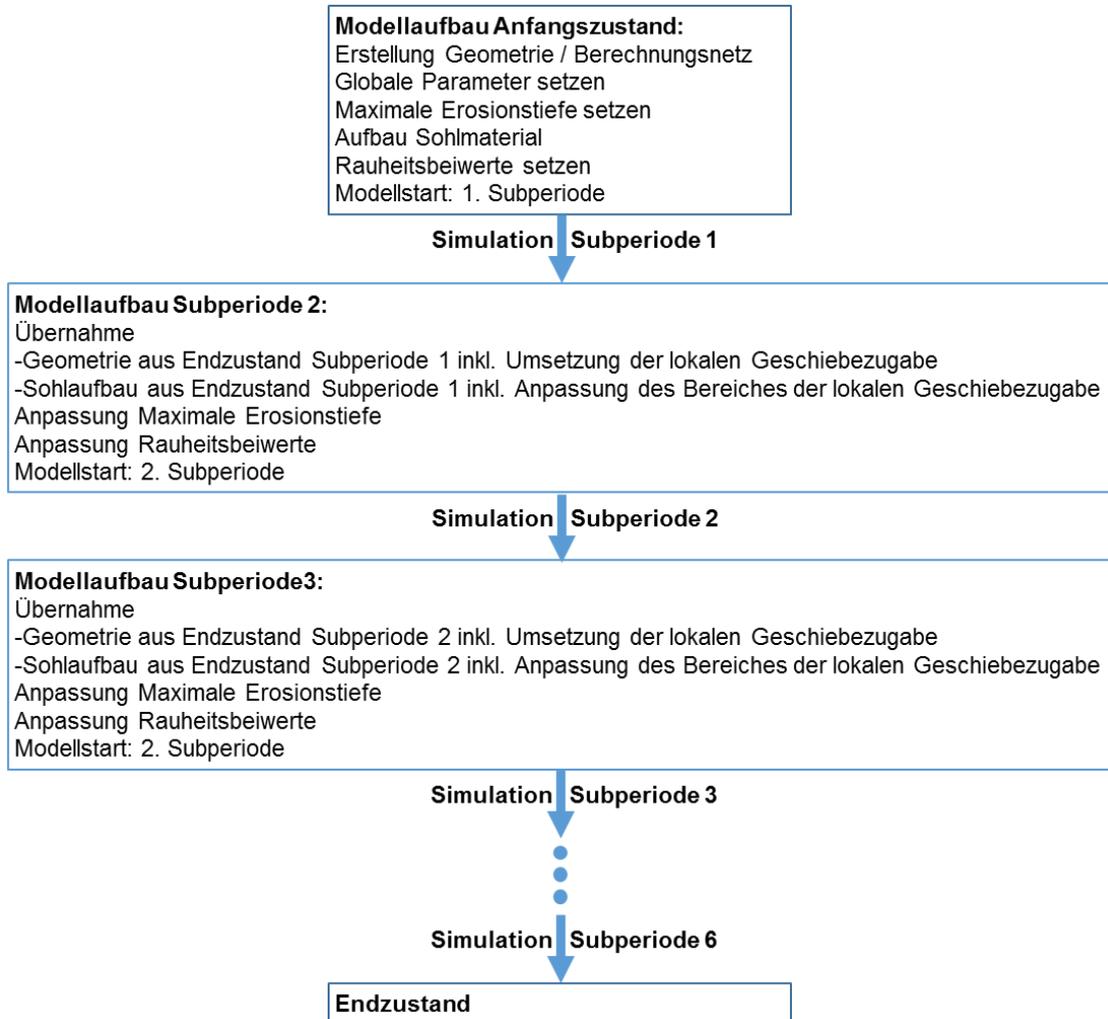


Abbildung 5: Modellkonzept zur Simulation langer Zeiträume als Prognosewerkzeug, Planvarianten

2.2 Berechnungsnetze und Ausgangsgeometrie

Als Ausgangsgeometrie (Vorland, Böschungen und Gewässersohle) werden die Berechnungsnetze der Planvarianten aus der Reinwasserhydraulik übernommen, in die beiden Teilgebiete Planungsbereich I und II aufgeteilt und zur Verkürzung der Rechenzeit auf den Hauptflussschlauch bis zur Dammkrone beschnitten. Zusätzlich werden die Berechnungsnetze hinsichtlich der benötigten Rechenzeit optimiert (vgl. Anlage 5.1, Kapitel 5.1 „Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit“). Gegebenenfalls werden kleine Elemente an den Böschungen durch regelmäßige Höhenschichtlinien-angepasste Netzelemente ersetzt und die Knotenhöhen übertragen (Abbildung 6). Der Modellumfang der Planungsmodelle umfasst die Überflutungsflächen bei Hochwasserereignissen nicht zur Gänze (vergleiche Anlage 4.2). Anstelle des Ausströmens eines geringen Teiles des Abflusses ins Vorland über die Dammkrone hinaus wird die Strömung somit parallel zum Modellrand abgelenkt und verursacht temporär geringfügig größere Sohlschubspannungen. Für die Morphodynamik des Lechs spielt diese Vereinfachung nur eine untergeordnete Rolle.

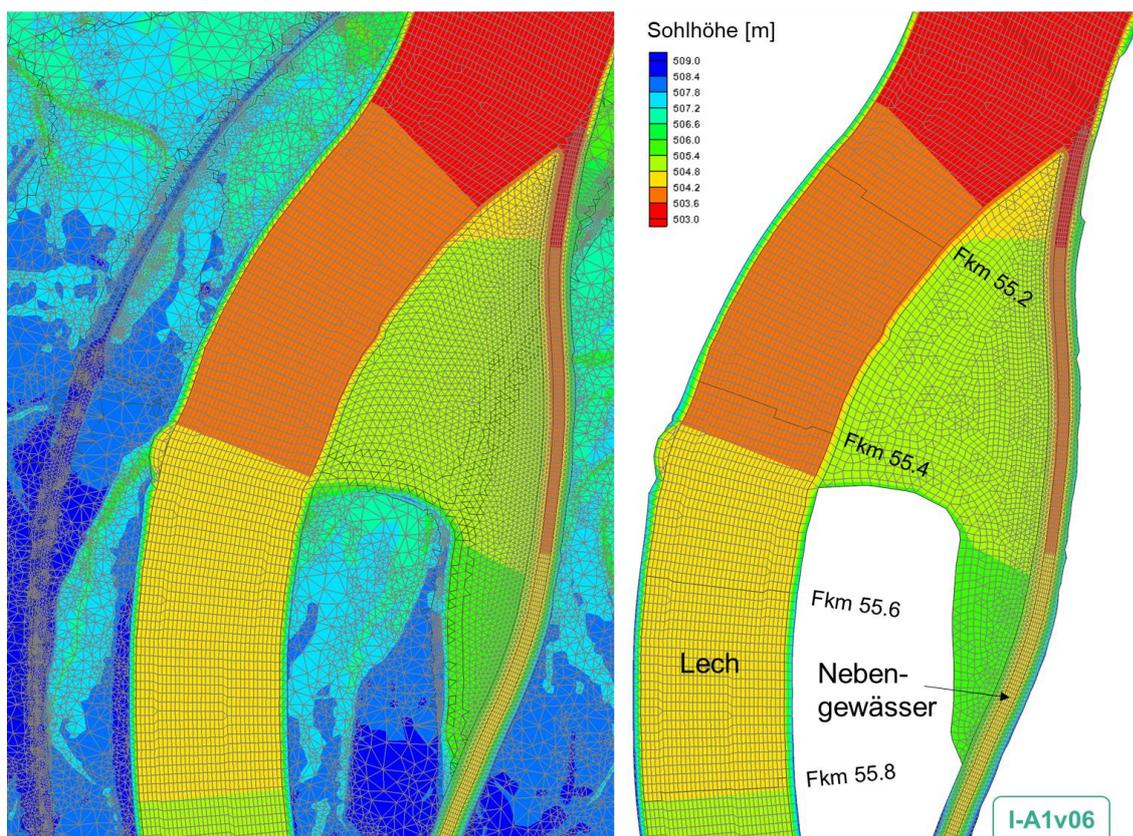


Abbildung 6: Aufbau Berechnungsnetz Planvariante I-A1v06; links: direkt aus der Reinwasserhydraulik; rechts: Rechenzeit-optimiert

Abbildung 7 zeigt eine Draufsicht der Teilmodelle im Planungsbereich I (I-A1, I-A2, I-B und I-C). Die Homogenabschnitte, Sohlrampen, Sekundärauen, Nebengewässer und Böschungsbereiche sind farblich unterschiedlich hervorgehoben. Für eine ausführliche Beschreibung der flussbaulichen Bausteine, die diese Planvarianten auszeichnet und voneinander unterscheidet, wird auf den Erläuterungsbericht Kapitel 9.3 verwiesen.

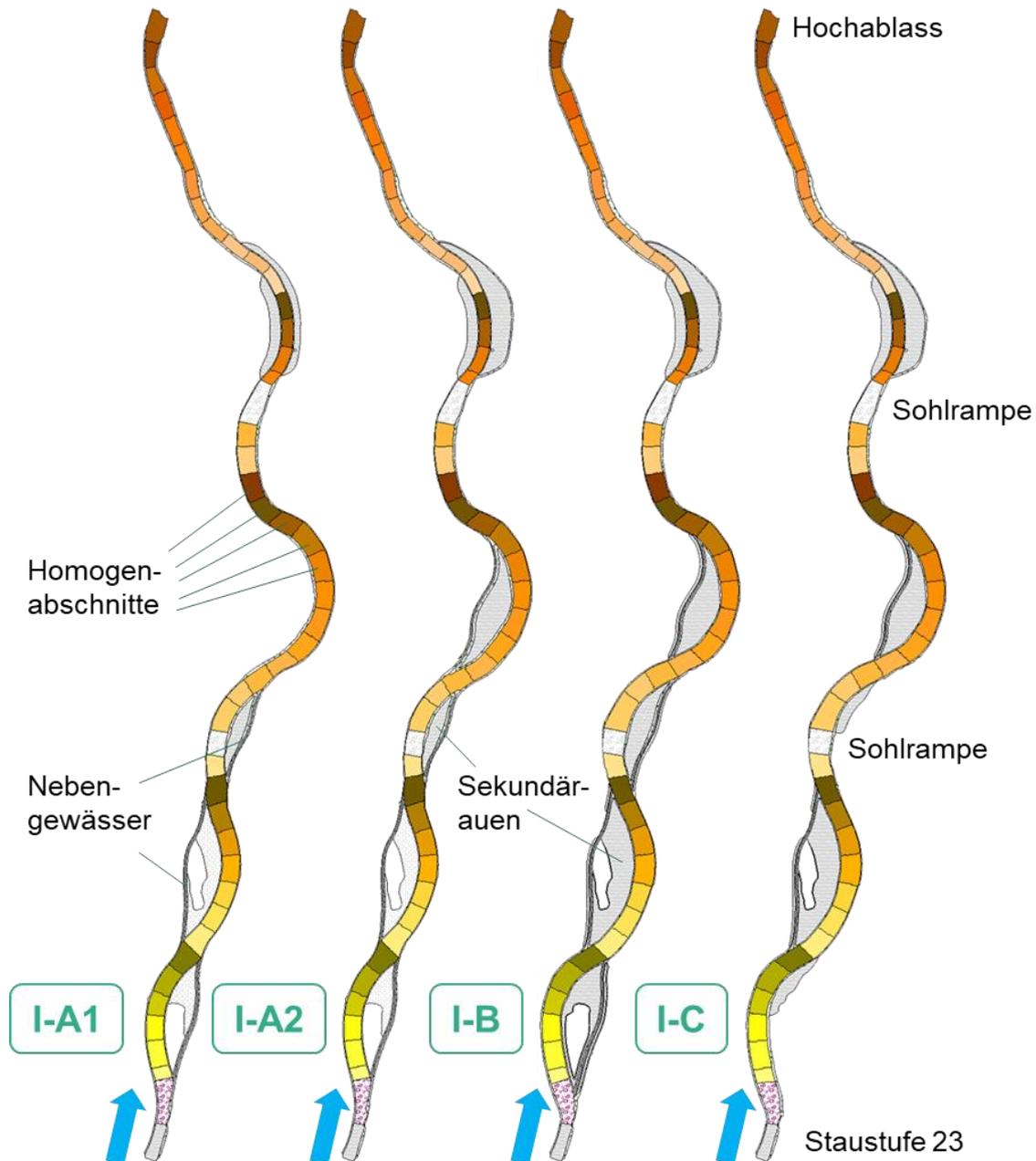


Abbildung 7: Berechnungsnetze der Varianten im Planungsbereich I mit farblich hervorgehobenen Homogenabschnitten

Abbildung 8 stellt die Teilmodelle im Planungsbereich II in einer Draufsicht dar (II-A, II-B1, II-B2 und II-B3). Die Homogenabschnitte, Wehre, Sohlrampen, Aufweitungen und Böschungsbereiche sind farblich unterschiedlich hervorgehoben. Für eine ausführliche Beschreibung der flussbaulichen Bausteine und geplanter Maßnahmen (Geschiebezugabe, Monitoring), die diese Planvarianten auszeichnet und voneinander unterscheidet, wird auf den Erläuterungsbericht Kapitel 9.4 verwiesen.

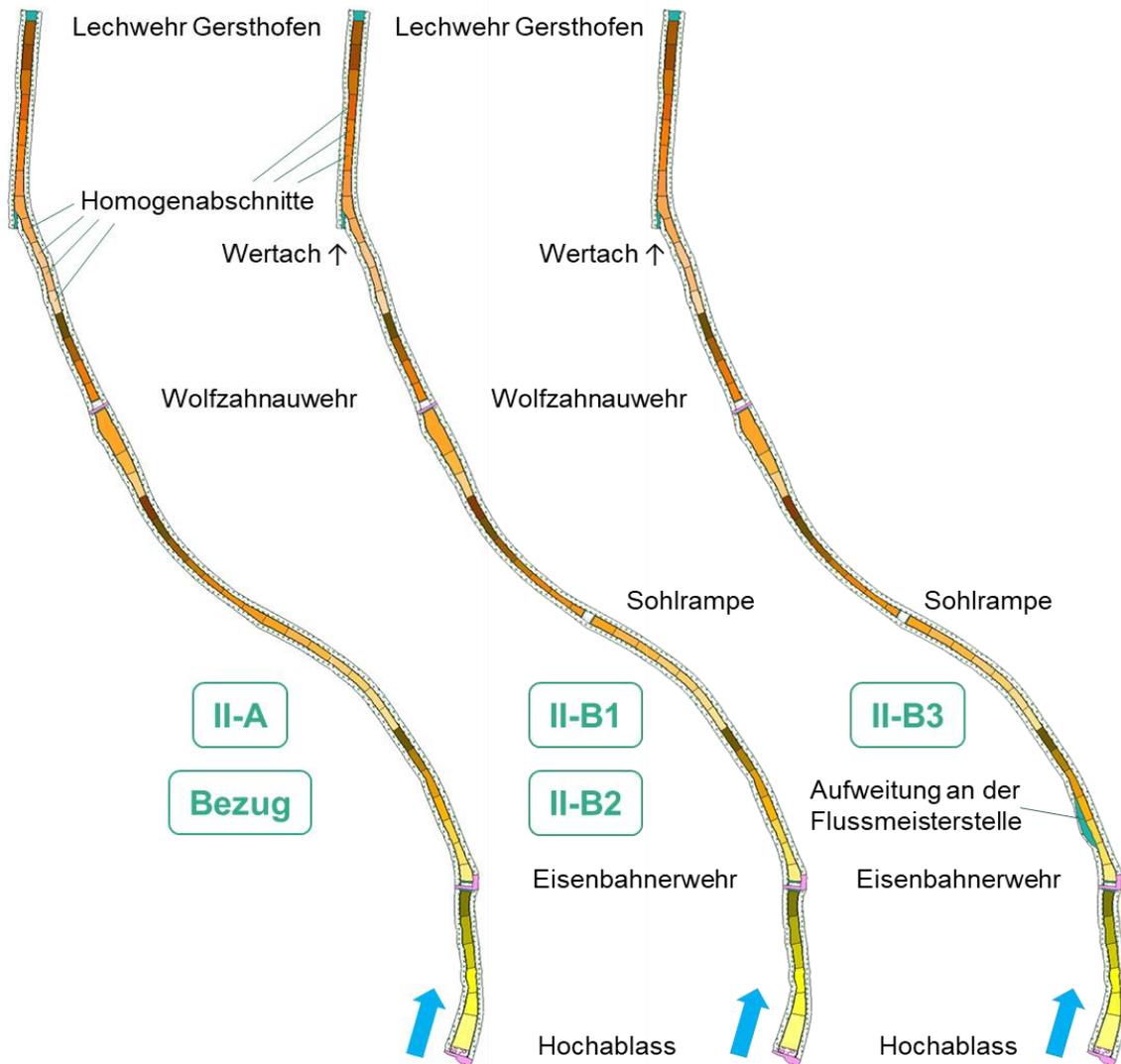


Abbildung 8: Berechnungsnetze der Varianten im Planungsbereich II mit farblich hervorgehobenen Homogenabschnitten (Modell II-A entspricht dem Modell des Bezugszustandes)

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen Längsschnitte der Varianten beider Planungsbereiche I und II mit den Sohlhöhen in m+NN entlang der Lechachse sowie dem Horizont der Tertiäroberkante.

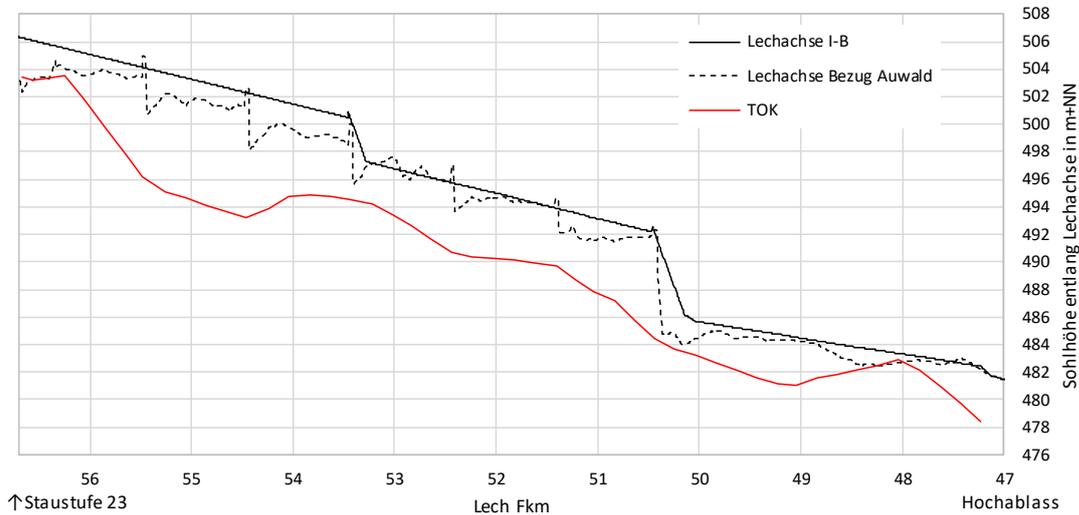


Abbildung 9: Längsschnitt mit den Sohlhöhen in m+NN entlang der Lechachse der Variante II-A (entspricht dem Bezugszustand) und II-B1 (entspricht II-B2 und II-B3) sowie dem Horizont der Tertiäroberkante (TOK)

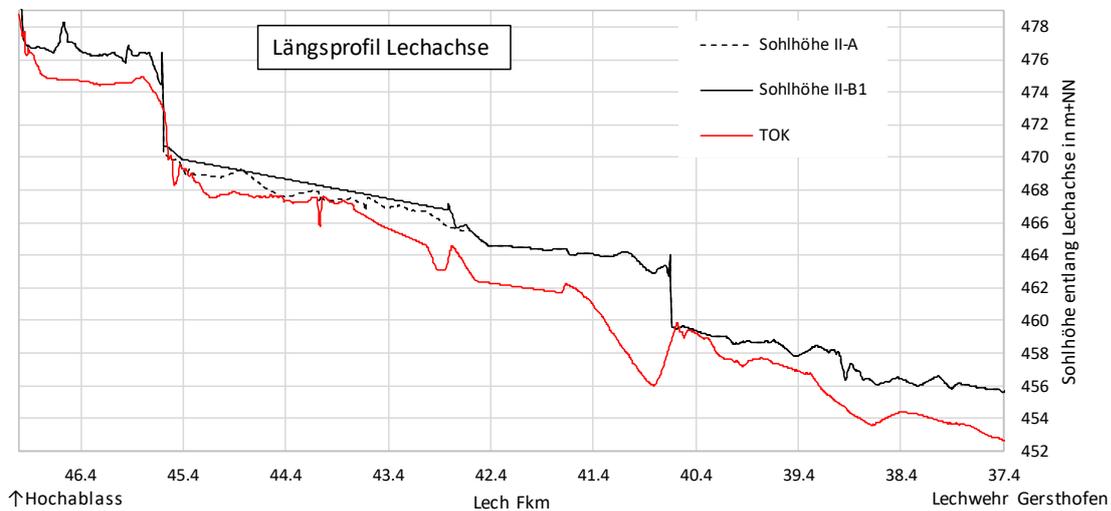


Abbildung 10: Längsschnitt mit den Sohlhöhen in m+NN entlang der Lechachse der Variante II-A (entspricht dem Bezugszustand) und II-B1 (entspricht II-B2 und II-B3) sowie dem Horizont der Tertiäroberkante (TOK)

Hinweis: In Kapitel 5.2 finden sich weitere Längsschnitte inklusive der eingezeichneten Homogenabschnitte der numerischen Modellierung.

2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Der Sohlaufbau zum Prognoseberechnungsstart der drei Modellierungsschichten (Austausch-, Unter- und Grundschicht) wird aus den Bezugsmodellen übernommen. Im Bezugsmodell des Teilbereichs „Auwald“ befinden sich Absturzbauwerke, die in den Varianten des Planungsbereichs I fehlen. Die Abstürze bei Fkm 53,4 und Fkm 50,4 werden in den Varianten der Planungsbereichs I in biologisch durchgängige Sohlrampen umgebaut und verlängern sich im Längsschnitt. Zudem ändern sich die Sohlbreiten im Vergleich zum Bezugszustand (vgl. Abbildung 4). Bei der Übertragung der Modelleingangsdaten aus dem Bezugsmodell müssen somit die Daten extrapoliert werden. Befindet sich z.B. in einem Planmodell ein Homogenabschnitt mit ebener Sohle an einer Position, an dem sich im Bezugsmodell ein Absturz befunden hat (Abbildung 9), so wird das Sohlmaterial des Homogenabschnitts oberstrom des Absturzbauwerkes im Bezugsmodell übertragen. In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind Vergleiche des Verlaufs der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht (AL) und Unterschicht (UL) für den Bezugszustand und der Varianten im Planungsbereich I im Längsschnitt dargestellt. Die Differenzen in den Längsschnitten lassen sich durch oben beschriebenen Sachverhalt erklären. Der resultierende Anfangszustand der Kornzusammensetzung wird im Detail in Kapitel 5.4 beschrieben.

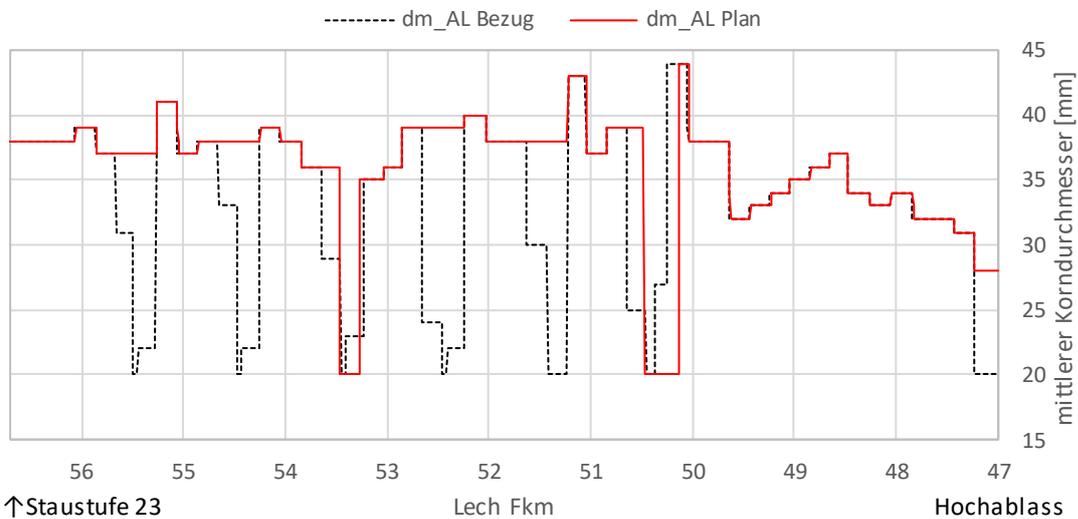


Abbildung 11: mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht im Planungsbereich I (d_{m_AL} Plan) und im Bezugszustand (d_{m_AL} Bezug) im Vergleich bei Prognoseberechnungsstart

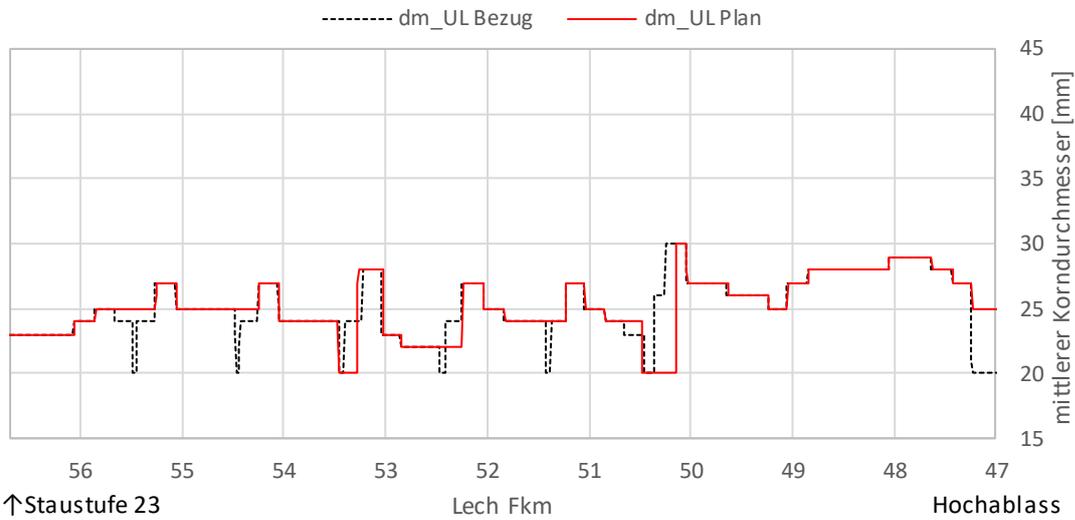


Abbildung 12: mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht im Planungsbereich I (d_{m_UL} Plan) und im Bezugszustand (d_{m_UL} Bezug) im Vergleich bei Prognoseberechnungsstart

Basierend auf den homogenisierten mittleren Korndurchmessern der Austauschschicht je Homogenabschnitt wird der Gesamt-Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler mit folgender Beziehung bestimmt (analog zur Methode der Anpassung der Rauheitsbeiwerte zwischen den Subperioden): $k_{St} = 21/d_{m_AL}^{1/6}$

Wie im Modellierungskonzept im Kapitel 2.1 beschrieben, wird der Riffel-Faktor μ für die Langzeitprognosen gleich 1 gesetzt. Die Kornrauheit $k_{St,r}$ entspricht also stets der Gesamtrauheit k_{St} . In Kapitel 5.4 finden sich zwei Längsschnitte mit den resultierenden abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerten für die beiden Planungsbereiche I und II (Abbildung 155 und Abbildung 156).

Die Randbedingungen der numerischen Modelle im Planungsbereich I bestehen aus dem hydraulischen Zufluss unterhalb der Staustufe 23 (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Zulauf) und dem Auslauf am unteren Modellrand beim Hochablass (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Auslauf W-Q / Strickler). Die Zulaufganglinien als Resultat der Überlegungen in Anlage 5.3, Kapitel 2.1 werden in Kapitel 5.1 im Detail beschrieben.

Tabelle 2 und Abbildung 13 zeigt u.a. die verwendete Wasserstand-Abfluss Beziehung (W-Q) am Hochablass.

Tabelle 2: Wasserstand-Abfluss Beziehungen am Hochablass (Planungs b. I) und am Lechwehr Gersthofen (Planungsbereich II)

Hochablass		Lechwehr Gersthofen	
Abfluss [m ³ s ⁻¹]	Wasserstand [m+NN]	Abfluss [m ³ s ⁻¹]	Wasserstand [m+NN]
0.00	482.16	0.00	457.26
245.00	484.69	300.00	457.28
490.00	484.71	600.00	457.30
811.86	484.74	900.00	458.29
980.00	485.10	1200.00	459.08
1225.00	485.57	1500.00	459.80
1470.00	486.00	1800.00	460.47
1715.00	486.41	2100.00	461.11
1960.00	486.80	2400.00	461.72
2205.00	487.16	2700.00	462.31

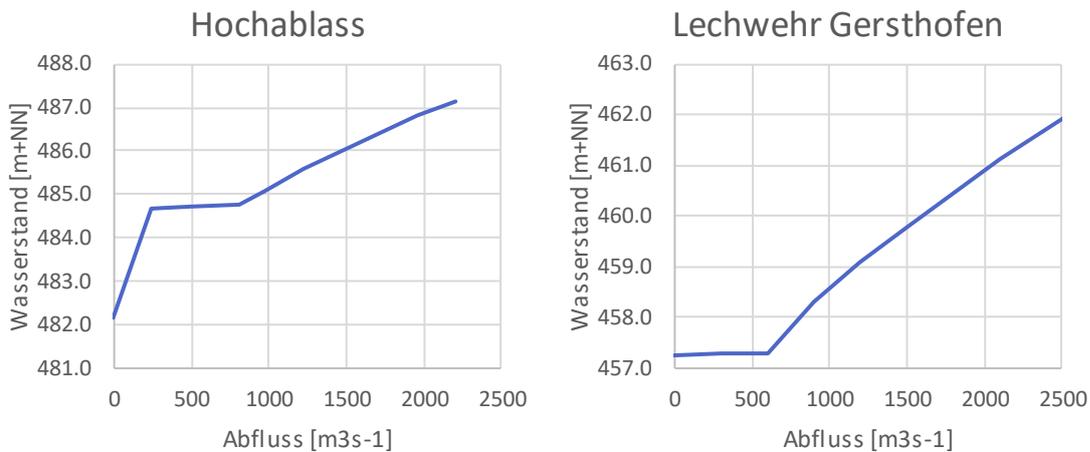


Abbildung 13: Wasserstand-Abfluss Beziehungen am Hochablass (Planungs b. I) und am Lechwehr Gersthofen (Planungsbereich II)

Die Randbedingungen der numerischen Modelle im Planungsbereich I bestehen aus

- einem Reinwasserzulauf am oberen Modellrand (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Zulauf) unterhalb des Hochablasses definiert durch die Zulaufganglinien in Kapitel 5.1 und vermindert um den seitlichen Auslauf beim Hochablass in Richtung Stadtbach/Kanustrecke mit konstantem Abfluss $Q = 46 \text{ m}^3/\text{s}$,
- einem Stoffeintrag am oberen Modellrand (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Stoffeintrag) unterhalb des Hochablasses (Methodik und resultierende generische Stoffeintragungslinien für die drei definierten Subperioden siehe Kapitel 5.3),

- dem Zulauf „Kanustrecke“ ca. bei Fkm 46,2 mit konstantem Abfluss $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$,
- dem Zulauf „Auslaufkanal“ bei Fkm 39,2 mit konstantem Abfluss $Q = 40.5 \text{ m}^3/\text{s}$,
- dem Zulauf „Wertach“ bei Fkm 39,0 mit konstantem Abfluss $Q = 26.0 \text{ m}^3/\text{s}$, dem Auslauf am unteren Modellrand beim Lechwehr Gersthofen (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Auslauf W-Q / Strickler) mit einer Wasserstand-Abfluss Beziehung gemäß Tabelle 2 bzw. Abbildung 13 und
- den „steuerbaren Bauwerken“ Eisenbahnerwehr (Fkm 45,6) und Wolfzahnauwehr (Fkm 39,7).

Letztere bestehend aus einer Kombination der HYDRO_FT-2D softwarespezifischen Bedingungen „Auslauf W-Q/Strickler“ und „Zulauf gebunden an Auslauf“. Die Wasser- und Geschiebemenge wird jeweils am Auslauf entnommen und stromab weitergegeben. Abbildung 14 zeigt die die verwendete Wasserstand-Abfluss Beziehung dieser Wehre.

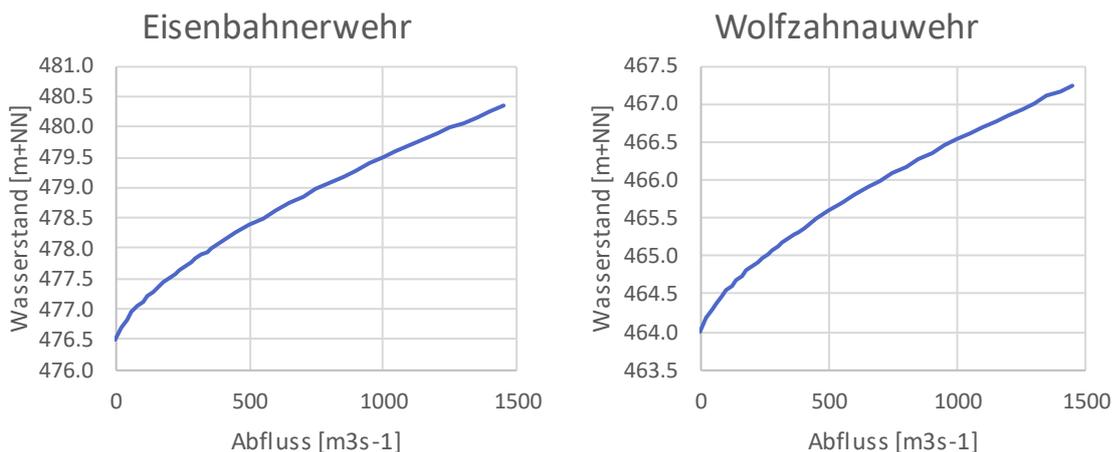


Abbildung 14: Wasserstand-Abfluss Beziehungen (W-Q / Strickler) am Eisenbahner- und Wolfzahnauwehr im Teilgebiet „Stadt“

Sämtliche Randbedingungen entsprechen jenen der Kalibrierungs- und Validierungsmodelle in Anlage 5.2.

3 Planungsbereich I – Ergebnisse und Interpretation

Das Kapitel 3 präsentiert ausgesuchte und aussagekräftige Ergebnisse der Langzeitprognose der Sohlentwicklung im Planungsbereich I der Varianten I-A1, I-A2, I-B und I-C. Für eine Beschreibung dieser Varianten im Sinne der zugrundeliegenden Überlegungen und verwendeten Entwurfselemente wird auf den Erläuterungsbericht, Kapitel 9.3 verwiesen.

3.1 Variante I-A1

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionsssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

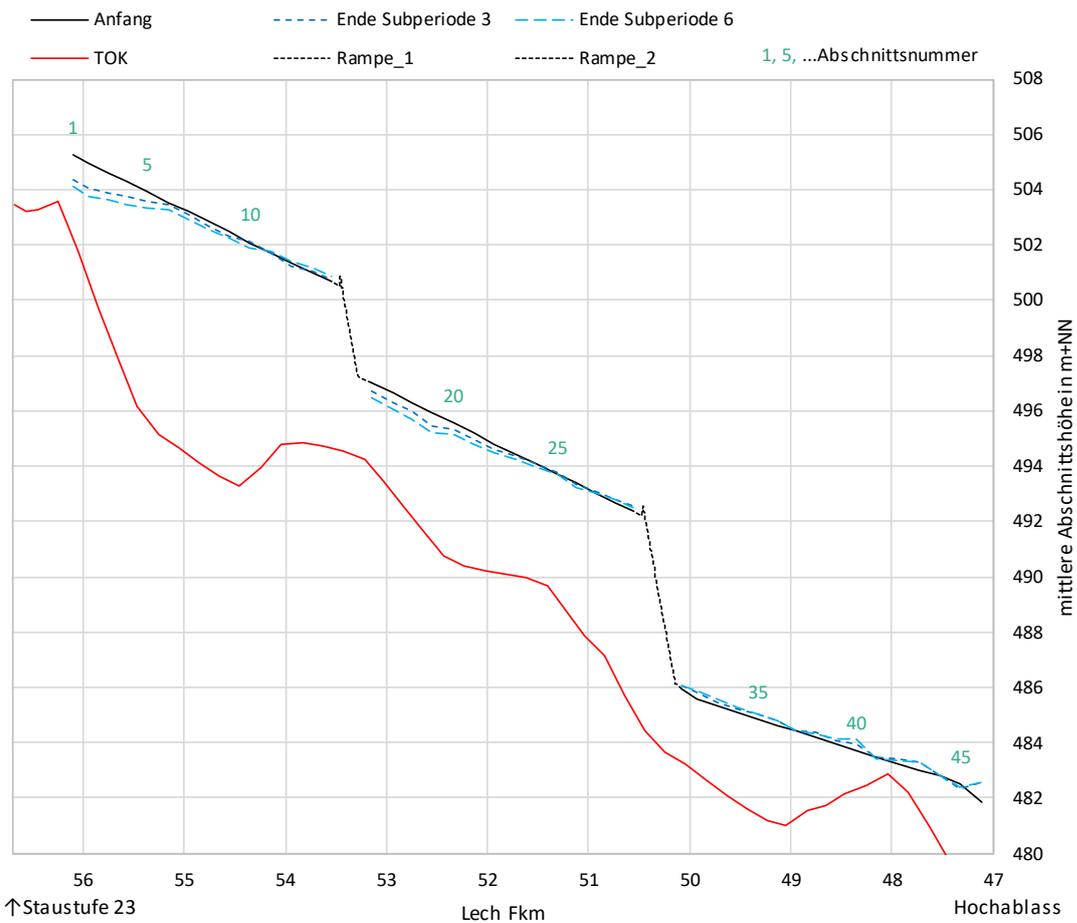


Abbildung 15: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante I-A1

Tabelle 3: Summen des verklappten Sediments im Abschnitt 1 und im ersten Nebengewässer, sowie des Geschiebeaustrags je Subperiode in m³ Lockervolumen

	Verklapp-Mat. (externer Eintrag)	Geschiebeaustrag (Hochablass)
I-A1R01	1 593	141
I-A1_R02	11 059	46 442
I-A1_R03	12 924	39 956
I-A1_R04	10 617	11 140
I-A1_R05	15 555	78 821
I-A1_R06	16 334	46 056
Summe	68 082	222 557

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 222 557 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 2 900 m³ Lockervolumen. Die Menge des verklappten Materials von durchschnittlich jährlich 900 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die Sohlerosion gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 55,0 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert. Die Eintiefungen fallen jedoch sehr moderat aus und stellen keine Gefahr für die Sohlstabilität dar. Es ist stets ausreichender Abstand zum Tertiärhorizont gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 900 m³ Lockervolumen pro Jahr die Sohle stabil bleibt. Abbildung 16 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Es zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Erosionstendenz im Vergleich der ersten drei mit den darauffolgenden Subperioden.

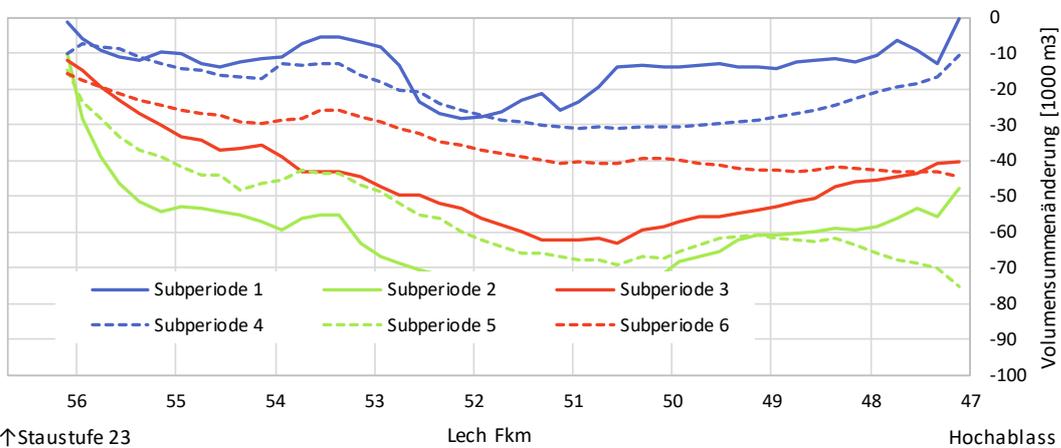


Abbildung 16: Volumensummendiagramm, Variante I-A1

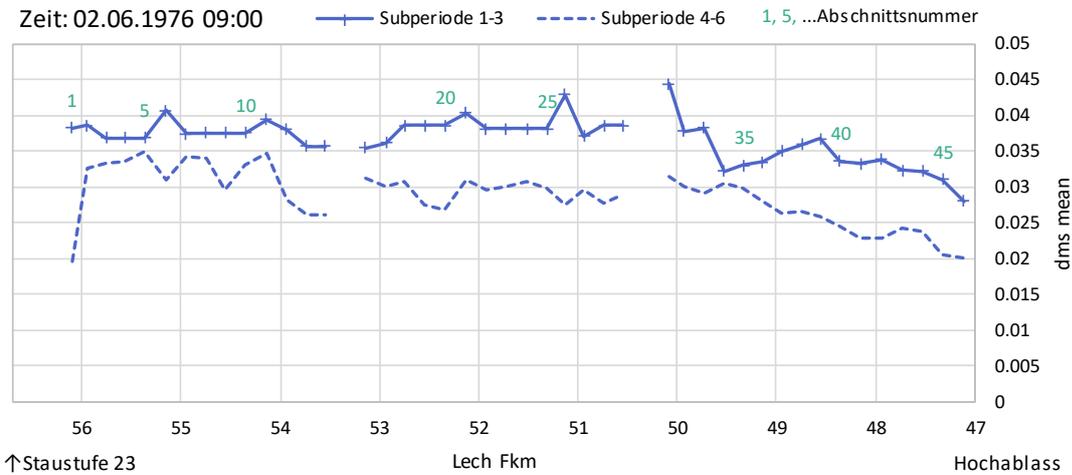


Abbildung 17: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

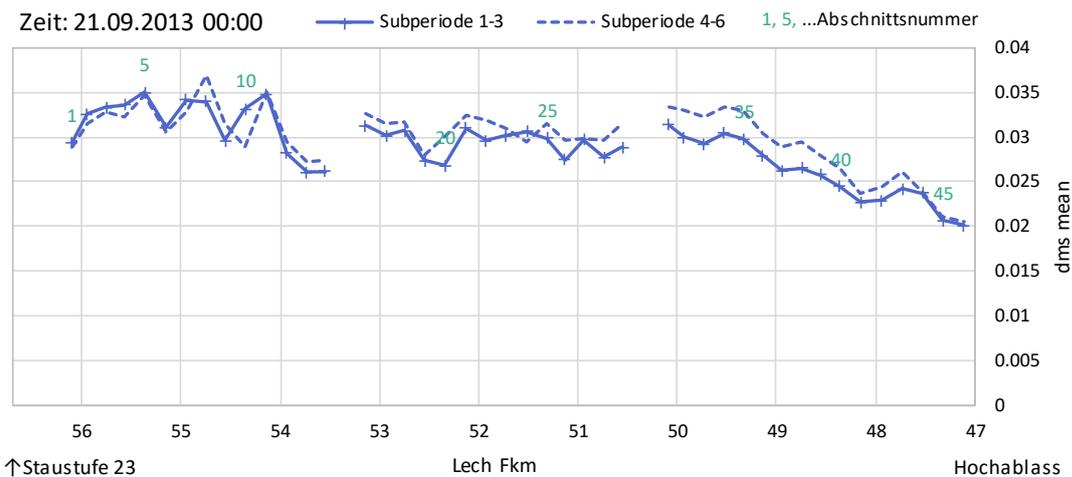


Abbildung 18: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 17 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Generell ist eine Verfeinerung des mittleren Korndurchmessers über die Gewässerstrecke zu beobachten. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 18) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser wieder etwas vergrößern, insgesamt jedoch sehr stabil bleiben.

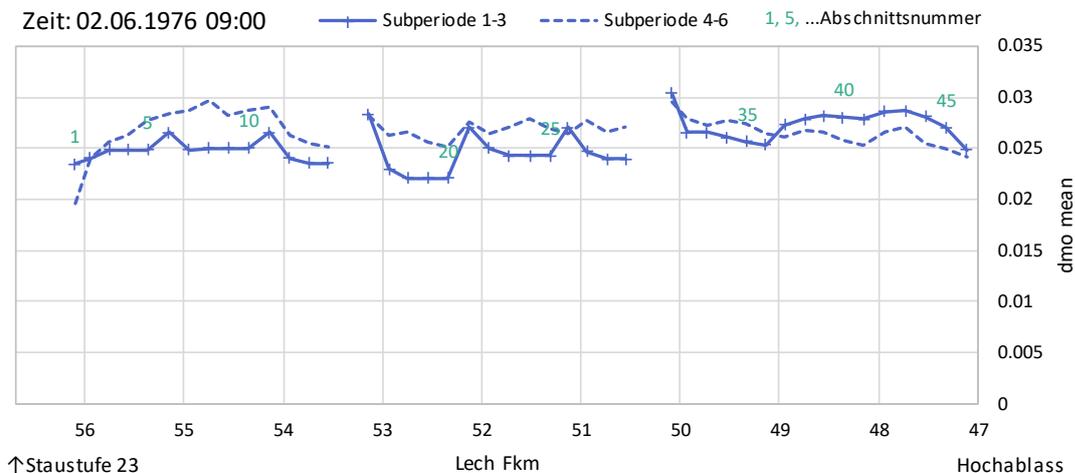


Abbildung 19: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

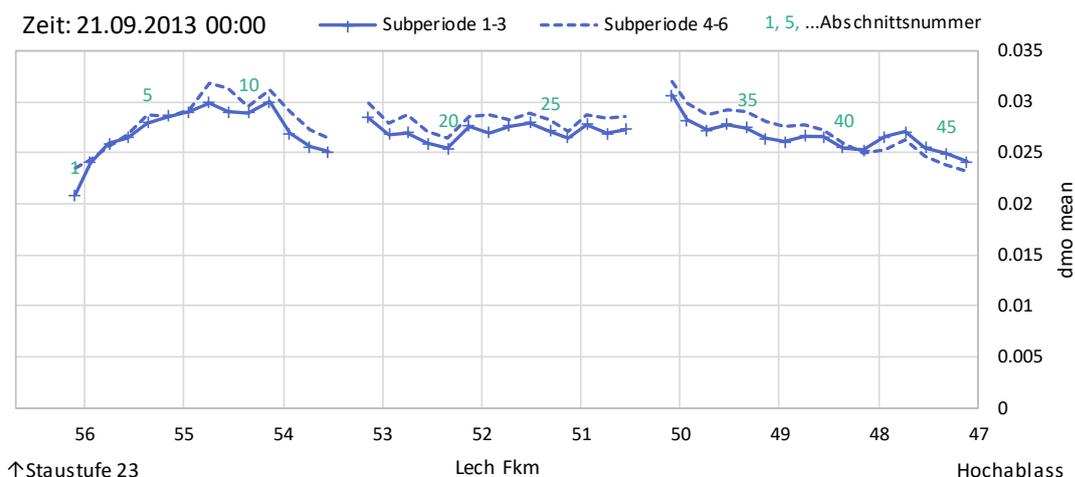


Abbildung 20: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 19 und Abbildung 20 illustrieren die Veränderungen des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} je Homogenabschnitt im Berechnungsverlauf. Tendenziell ist eine Vergrößerung des d_{mo} über die Gewässerstrecke zu beobachten.

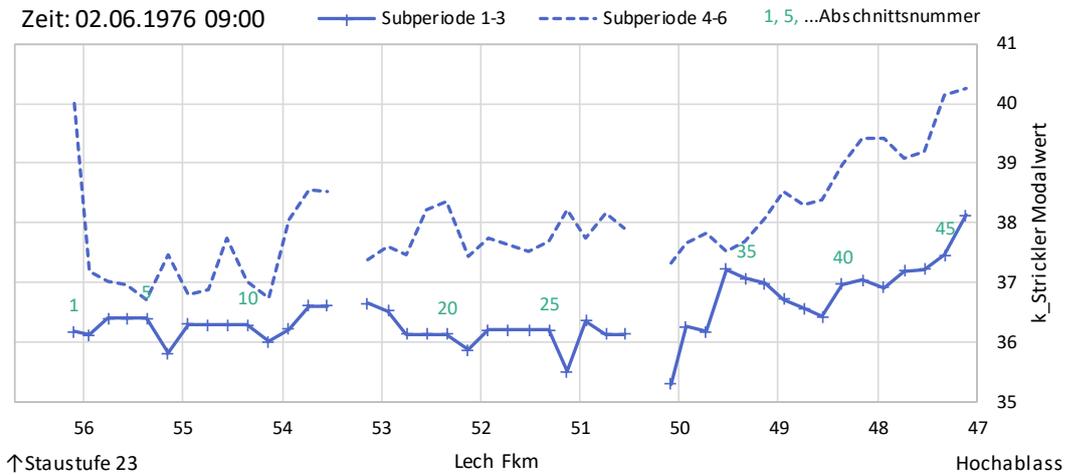


Abbildung 21: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

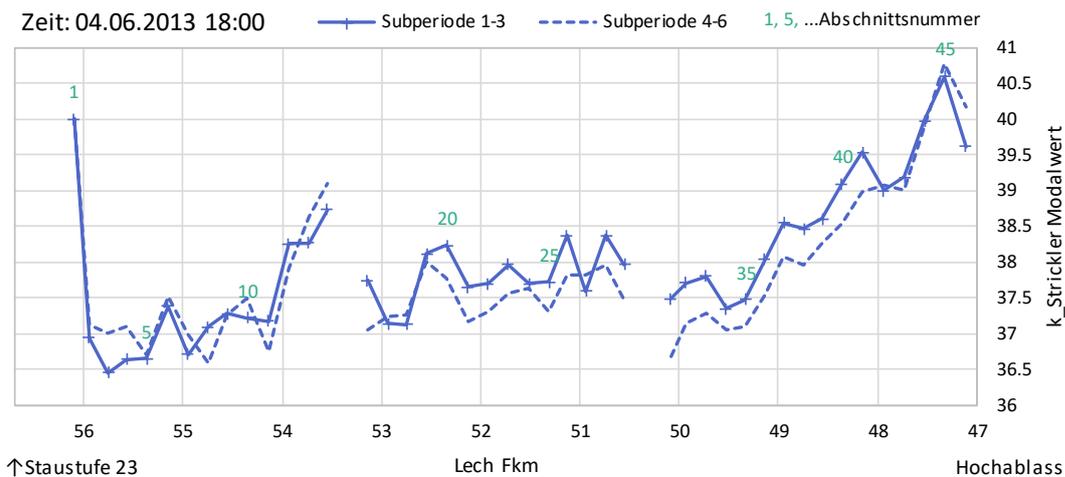


Abbildung 22: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationseende. Vor der ersten Sohlrampe und vor dem Hochablass landet feineres Material an und dementsprechend stellt sich dort die Rauheit glatter als im Rest der Gewässerstrecke ein.

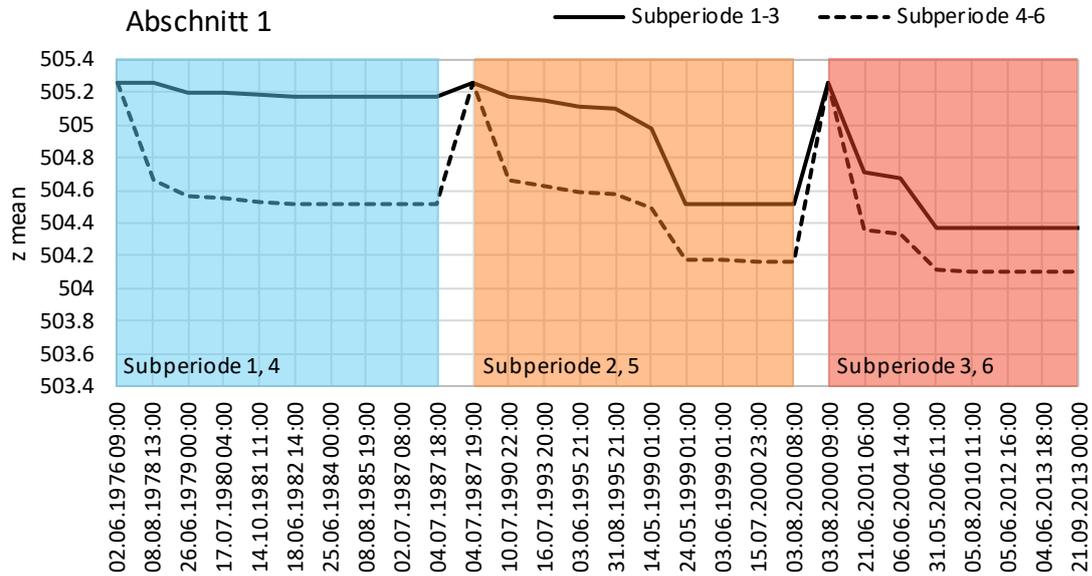


Abbildung 23: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Rücksetzung der Sohle auf das Anfangsniveau am Beginn jeder Subperiode

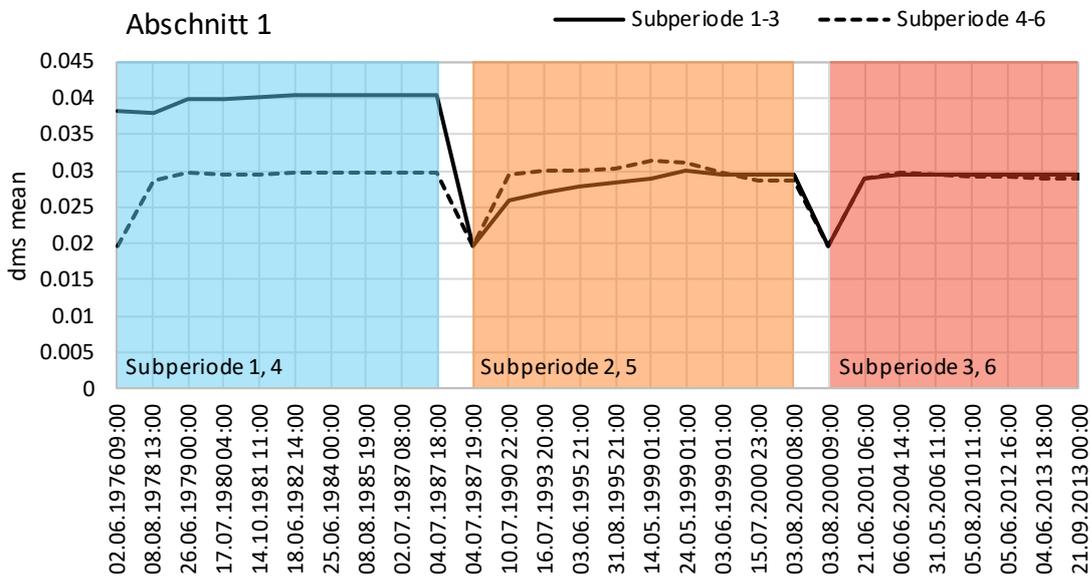


Abbildung 24: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 1 im zeitlichen Verlauf; ; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Sohlrücksetzung anhand der Auffüllung mit Unterschichtenmaterial $d_m = 19.57$ mm am Beginn jeder Subperiode

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die zeitlichen Veränderungen im Abschnitt 1, der als Rücksetzzone für die künstliche Geschiebezugabe sorgt.

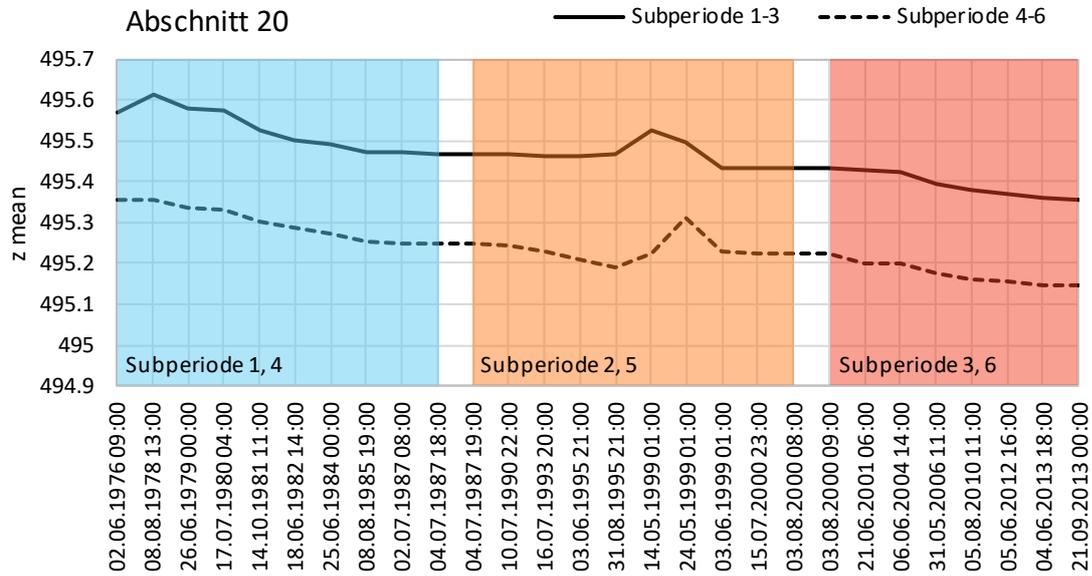


Abbildung 25: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Abschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

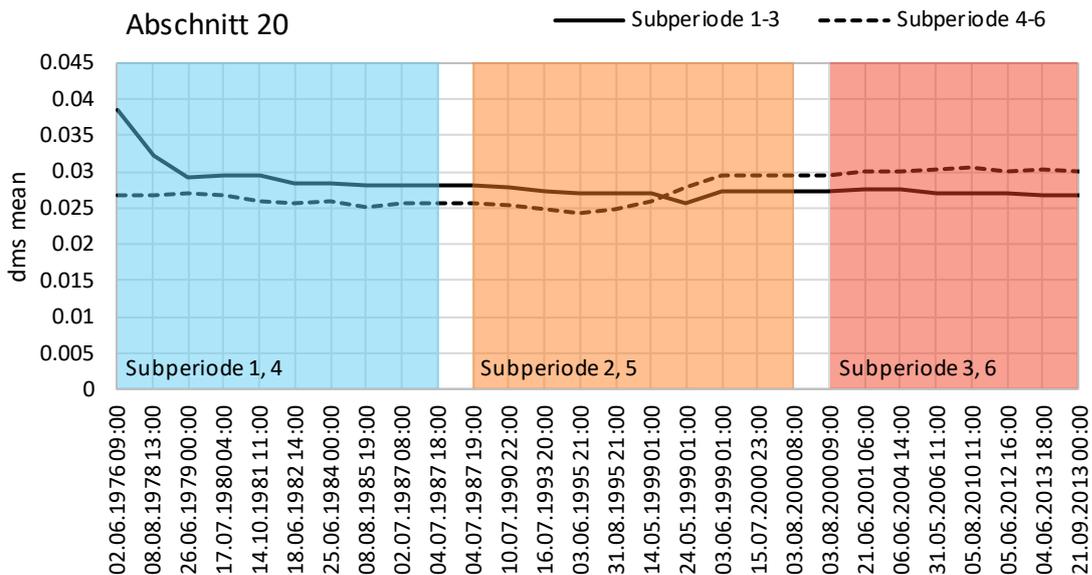


Abbildung 26: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 20 im zeitlichen Verlauf

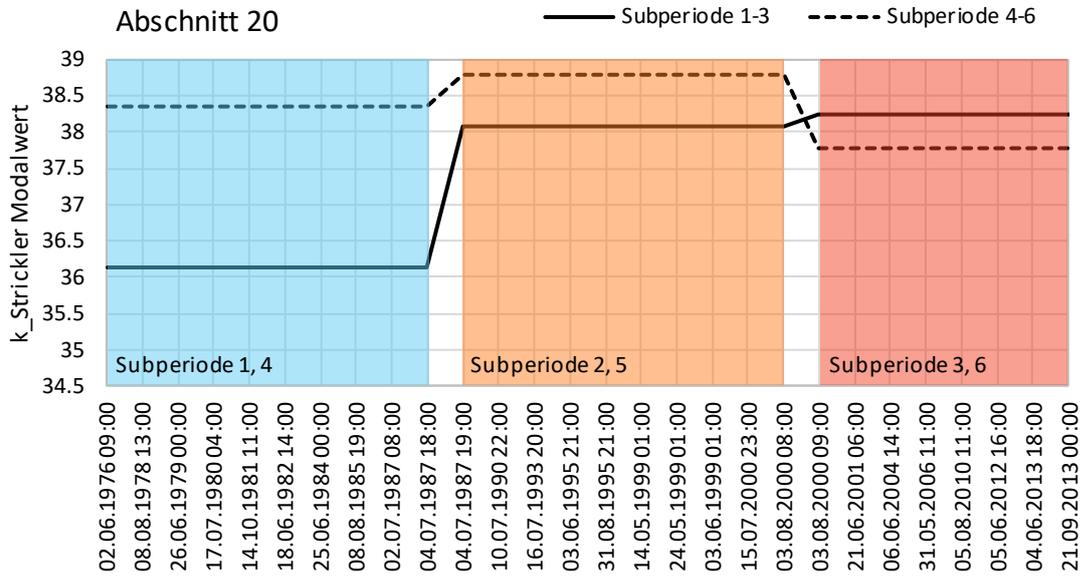


Abbildung 27: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 illustrieren beispielhaft die zeitlichen Veränderungen des Homogenabschnitts 20 zwischen Fkm 52,4 und 52,2. Die Auswirkungen des Hochwasserereignisses im Mai 1999 sind deutlich sichtbar. Ebenso wird die periodische Rauheitsanpassung basierend auf der sich ausbildenden Kornverteilung in der Austauschschicht gezeigt.

Exemplarisch für den Sedimentaustrag aus dem Modell der Variante I-A1 am Hochablass wird in Abbildung 28 in der Subperiode 2 (ca. 1987 bis 2000, siehe Kapitel 5.1) die Geschiebefracht mit den Fraktionsanteilen FA_x und der Abfluss Q im zeitlichen Verlauf dargestellt. Insgesamt verlässt eine Sedimentfracht von 46 442 m³ Lockervolumen das Modell. Die zeitliche Änderung des abflussabhängigen SCFG-Faktors zur Beschleunigung der Rechenläufe wird in Abbildung 29 gezeigt.

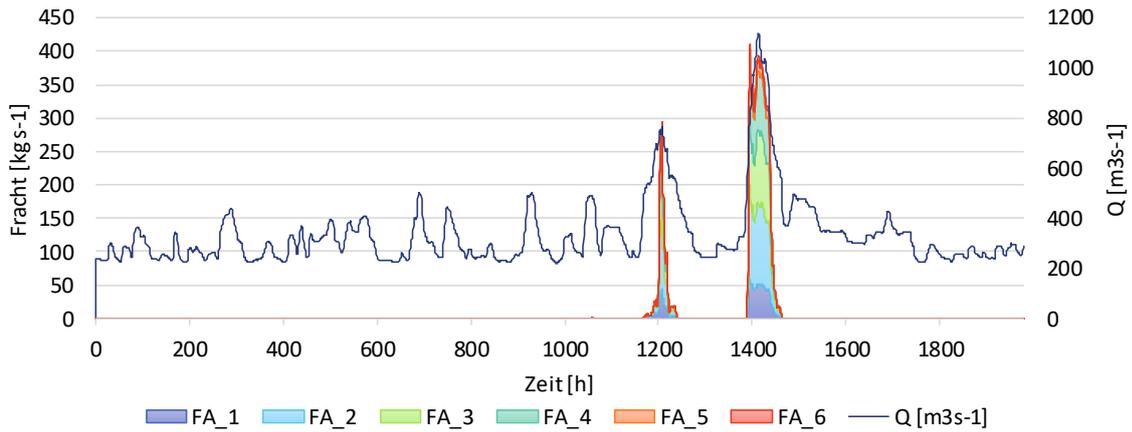


Abbildung 28: Sedimentaustrag aus dem Planmodell I-A1 in der Subperiode 2

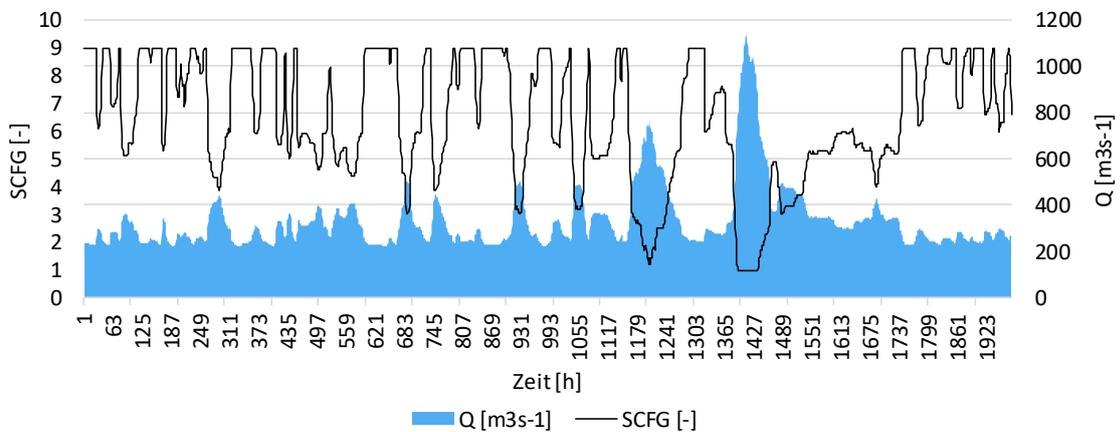


Abbildung 29: Beschleunigungsfaktor SCFG und Abfluss Q am Hochablass (Modellauslauf) in der Subperiode 2

3.2 Variante I-A2

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

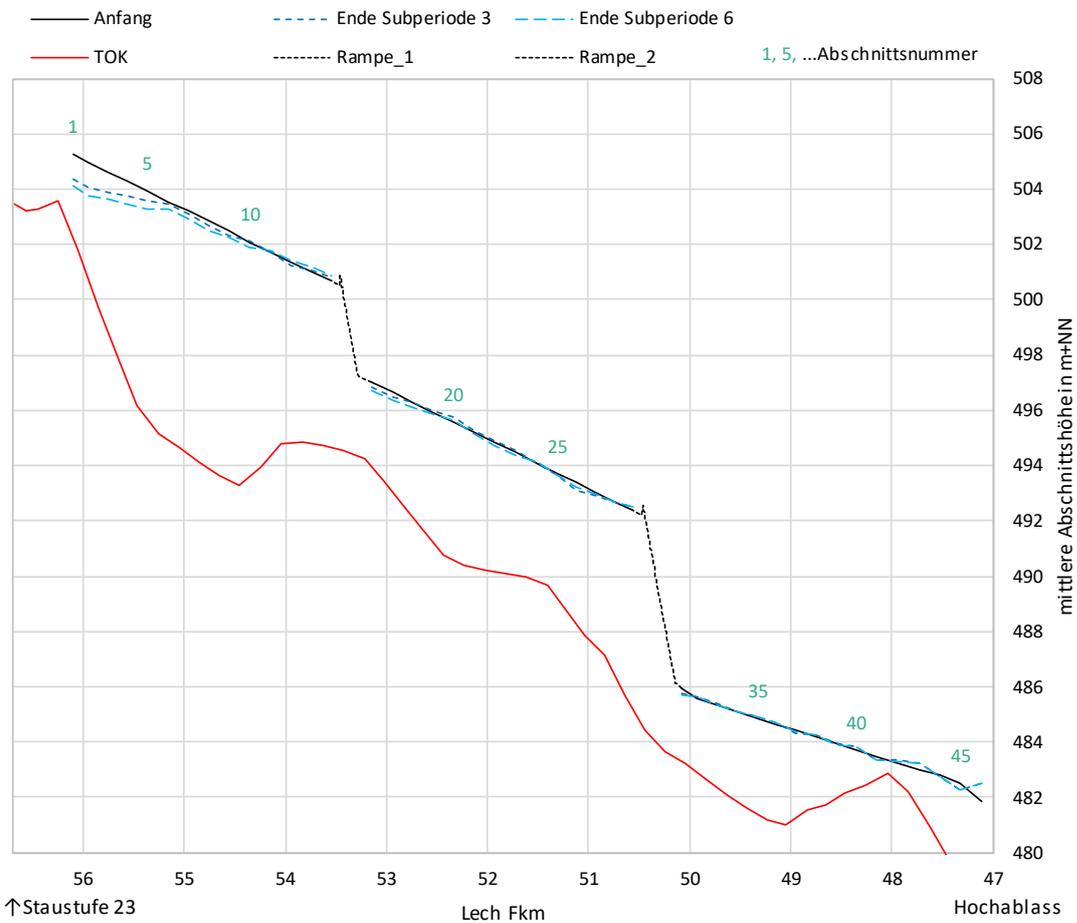


Abbildung 30: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante I-A2

Tabelle 4: Summen des verklappten Sediments im Abschnitt 1 und im ersten Nebengewässer, sowie des Geschiebeaustrags je Subperiode in m³ Lockervolumen

	Verklapp-Mat. (externer Eintrag)	Geschiebeaustrag (Hochablass)
I-A2_R01	1 594	121
I-A2_R02	11 065	40 211
I-A2_R03	12 936	34 991
I-A2_R04	10 620	7 934
I-A2_R05	15 609	66 455
I-A2_R06	16 393	42 049
Summe	68 218	191 760

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 191 760 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 2 500 m³ Lockervolumen. Die Menge des verklappten Materials von durchschnittlich jährlich 900 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die Sohlerosion gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 55,0 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert. Die Eintiefungen fallen jedoch sehr moderat aus und stellen keine Gefahr für die Sohlstabilität dar. Es ist stets ausreichender Abstand zum Tertiärhorizont gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 500 m³ Lockervolumen pro Jahr, die Sohle stabil bleibt. Abbildung 31 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Es zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Erosionstendenz im Vergleich der ersten drei mit den darauffolgenden Subperioden.

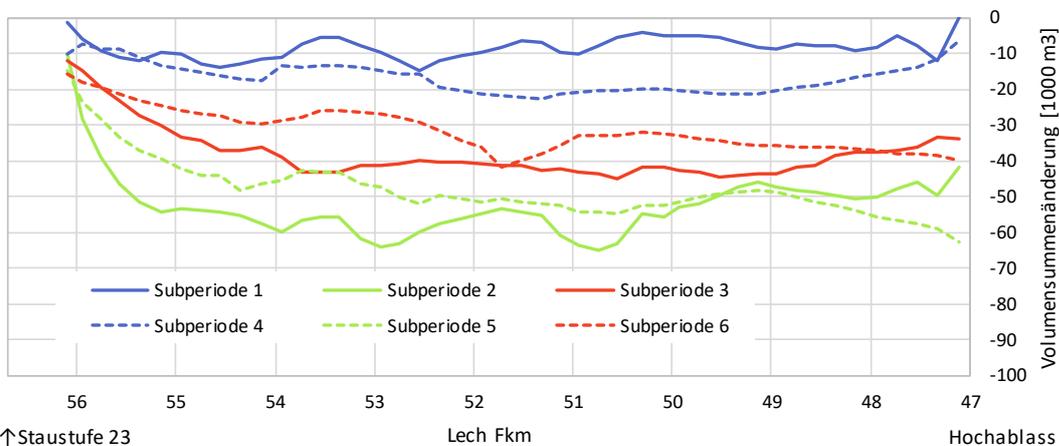


Abbildung 31: Volumensummendiagramm, Variante I-A2

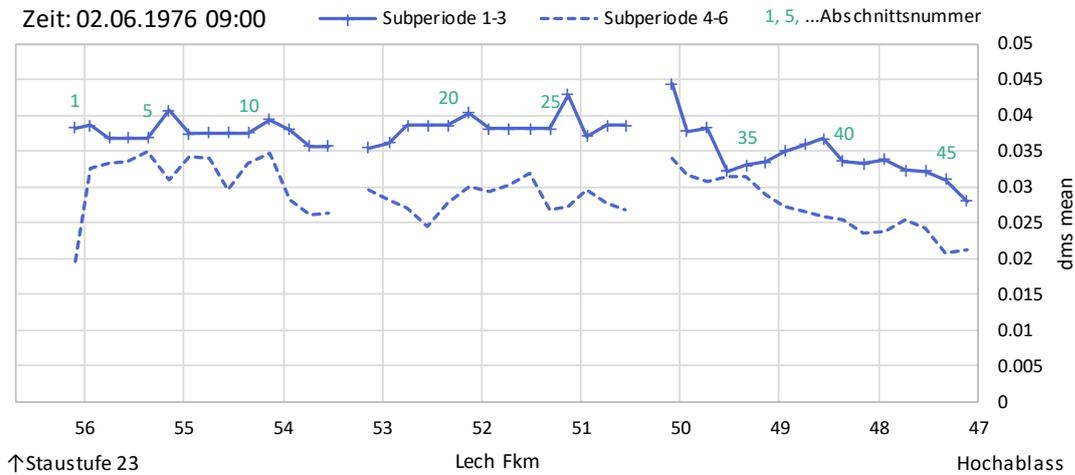


Abbildung 32: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

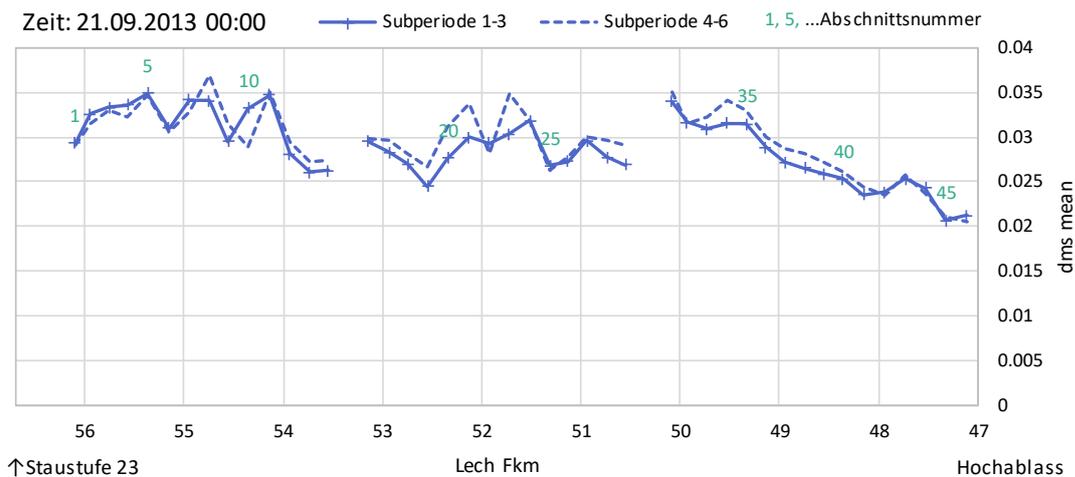


Abbildung 33: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Die Sohldynamik und die Veränderungen der Kornzusammensetzung entlang der Gewässerachse unterscheiden sich nur unwesentlich von jener der Langzeitberechnung der Variante I-A1 (Kapitel 3.1). Auf eine gesonderte Beschreibung der restlichen Abbildungen dieses Kapitel wird daher verzichtet.

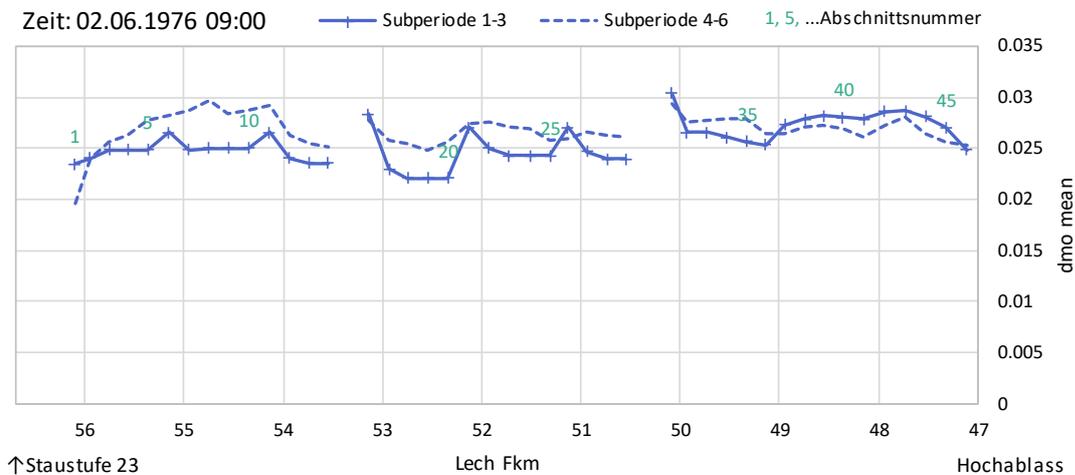


Abbildung 34: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

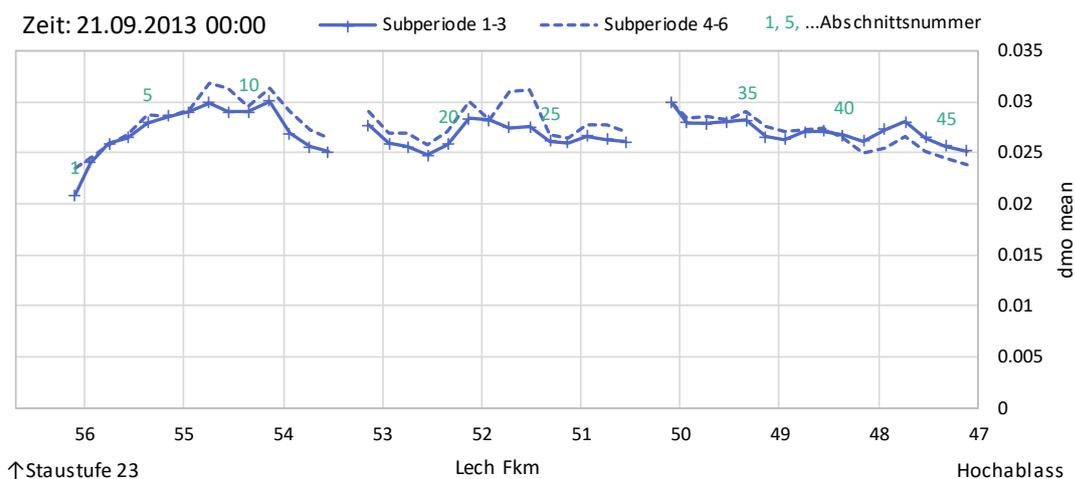


Abbildung 35: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

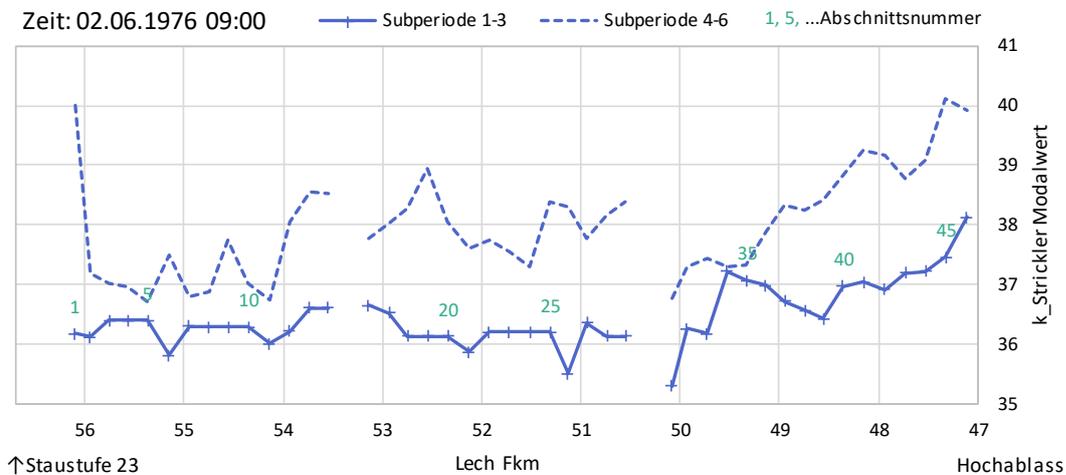


Abbildung 36: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

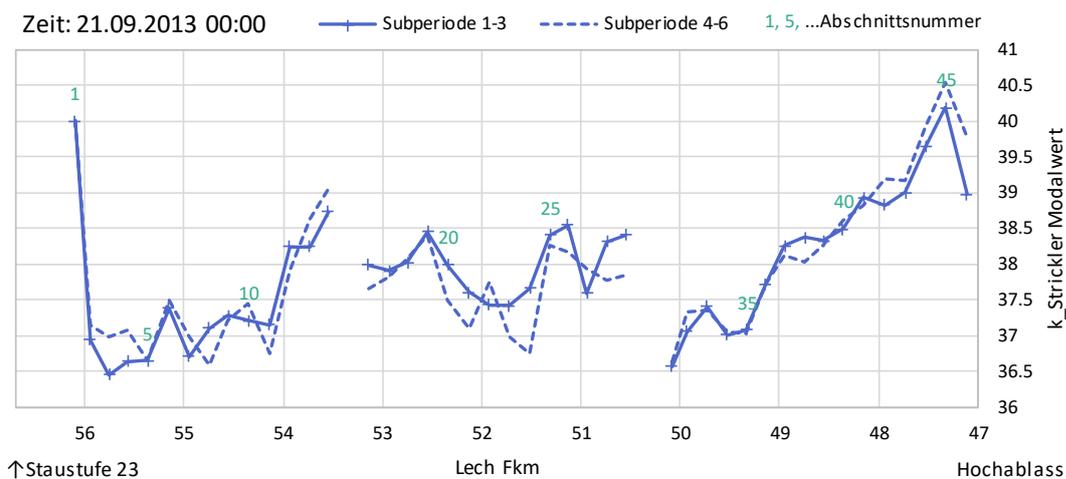


Abbildung 37: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

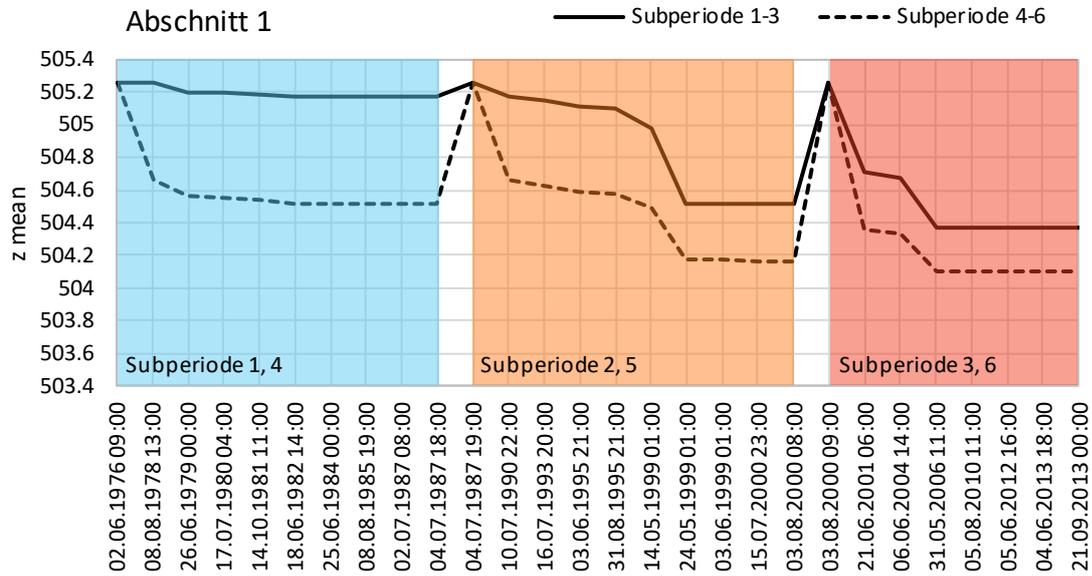


Abbildung 38: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Rücksetzung der Sohle auf das Anfangsniveau am Beginn jeder Subperiode

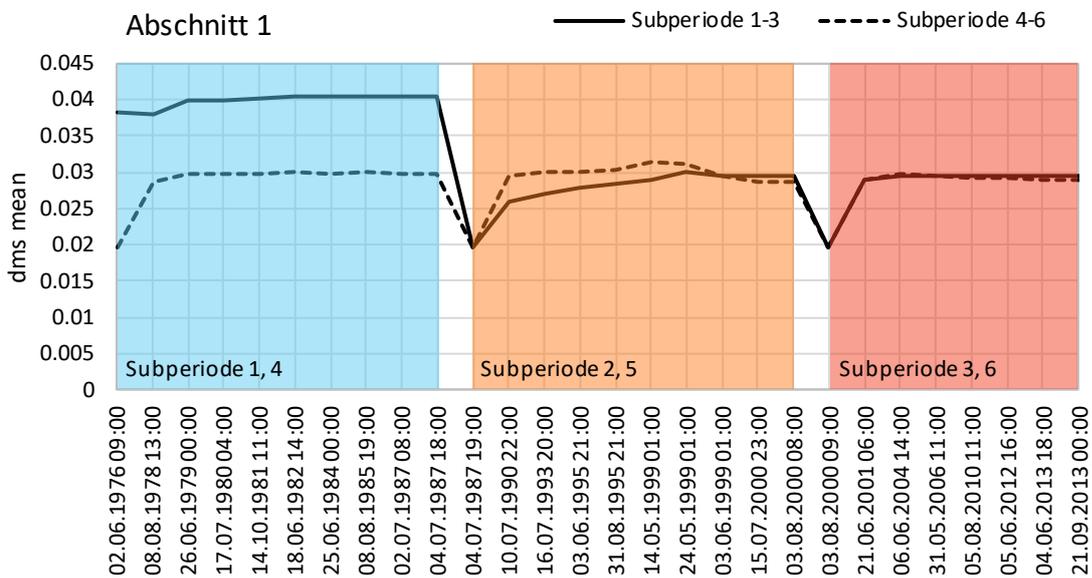


Abbildung 39: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Sohlrücksetzung anhand der Auffüllung mit Unterschichtenmaterial $d_m = 19.57$ mm am Beginn jeder Subperiode

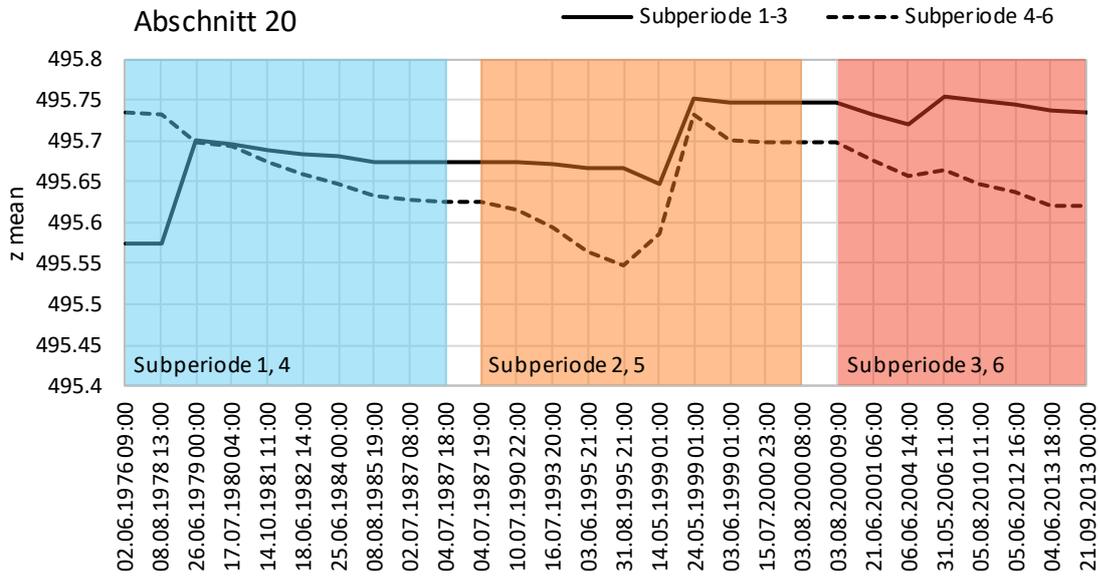


Abbildung 40: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Abschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

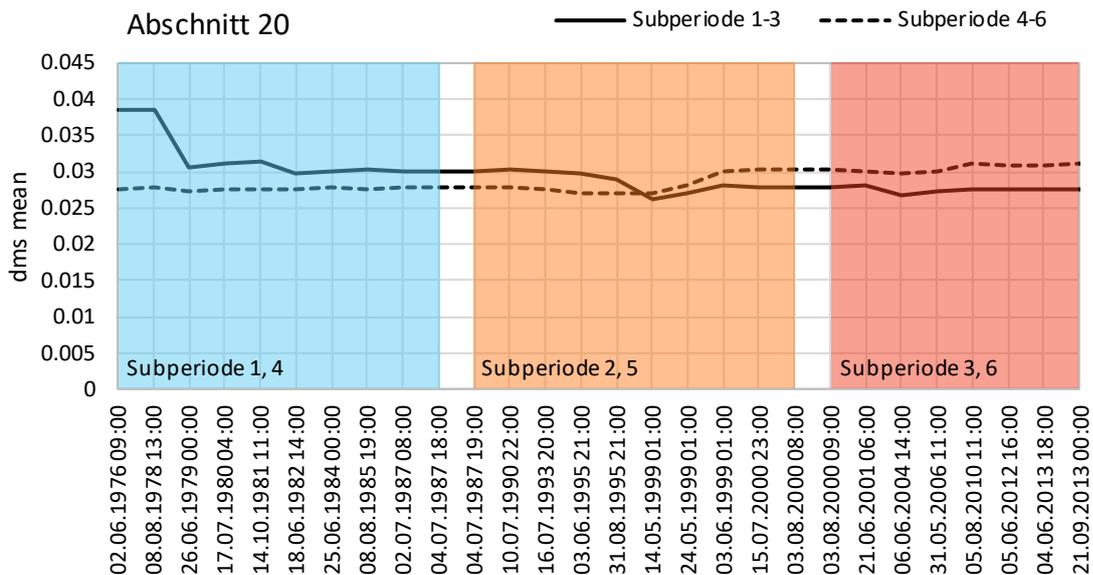


Abbildung 41: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 20 im zeitlichen Verlauf

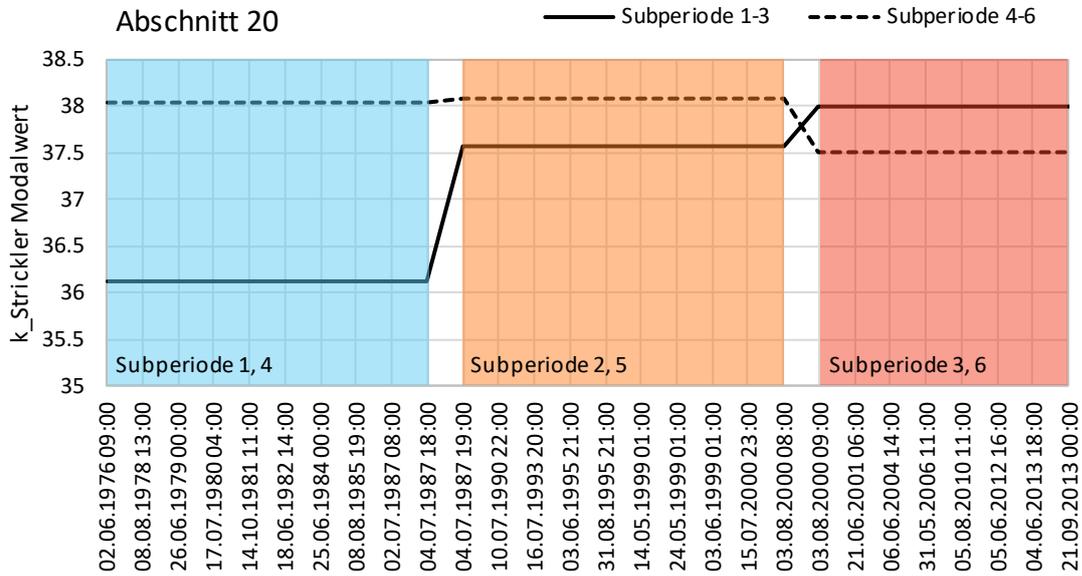


Abbildung 42: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

Exemplarisch für den Sedimentaustrag aus dem Modell der Variante I-A2 am Hochablass wird in Abbildung 43 in der Subperiode 2 (ca. 1987 bis 2000, siehe Kapitel 5.1) die Geschiebefracht mit den Fraktionsanteilen FA_x und der Abfluss Q im zeitlichen Verlauf dargestellt. Insgesamt verlässt eine Sedimentfracht von 40 211 m^3 Lockervolumen das Modell.

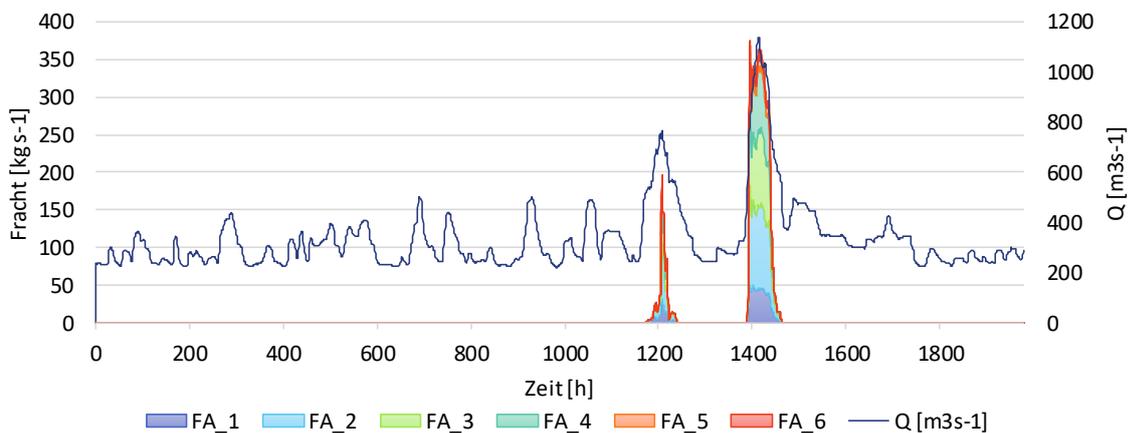


Abbildung 43: Sedimentaustrag aus dem Planmodell I-A2 in der Subperiode 2

3.3 Variante I-B

3.3.1 I-B

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionsssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

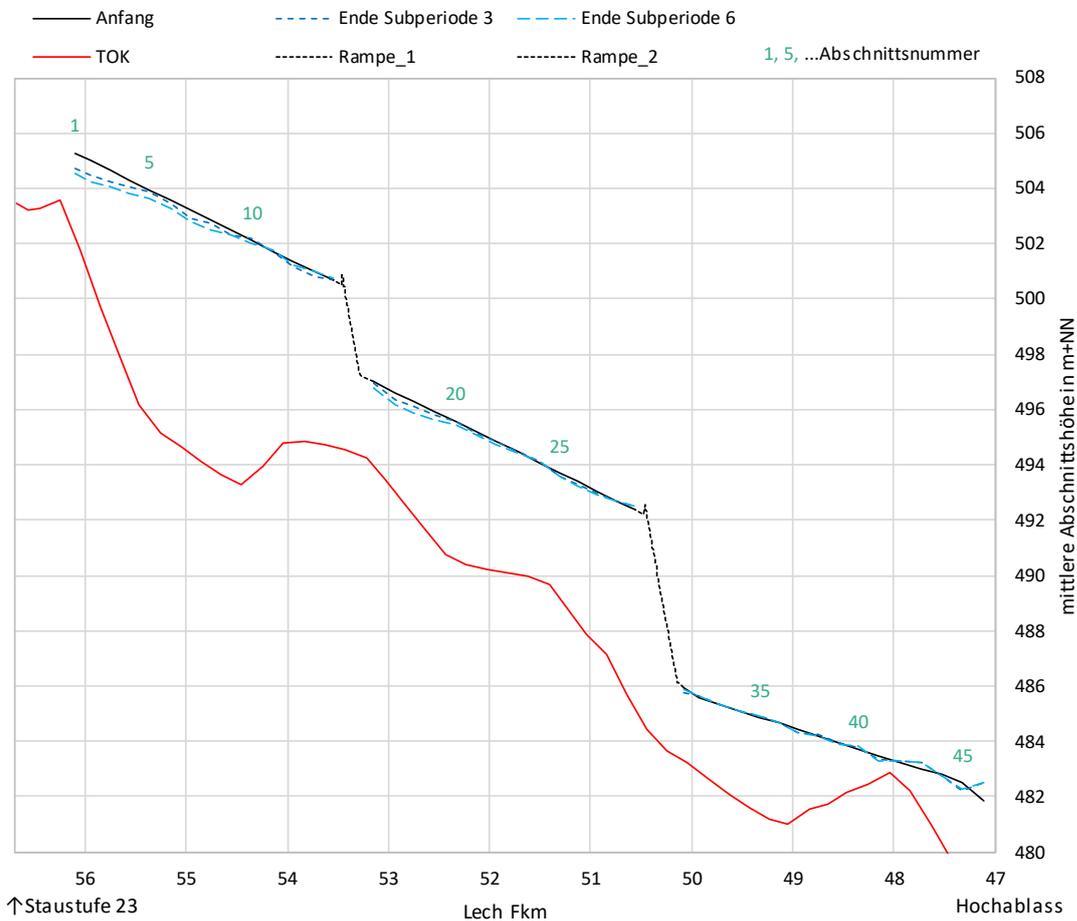


Abbildung 44: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante I-B

Tabelle 5: Summen des verklappten Sediments im Abschnitt 1 und im ersten Nebengewässer, sowie des Geschiebeaustrags je Subperiode in m³ Lockervolumen

	Verklapp-Mat. (externer Eintrag)	Geschiebeaustrag (Hochablass)
I-B_R01	119	125
I-B_R02	8 161	38 909
I-B_R03	9 954	34 471
I-B_R04	6 313	8 113
I-B_R05	12 559	65 508
I-B_R06	13 241	41 032
Summe	50 346	188 158

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 188 158 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 2 500 m³ Lockervolumen. Die Menge des verklappten Materials von durchschnittlich jährlich 665 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die Sohlerosion gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 54,5 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert. Die Eintiefungen fallen jedoch sehr moderat aus und stellen keine Gefahr für die Sohlstabilität dar. Es ist stets ausreichender Abstand zum Tertiärhorizont gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 500 m³ Lockervolumen pro Jahr, die Sohle stabil bleibt. Abbildung 45 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Es zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Erosionstendenz im Vergleich der ersten drei mit den darauffolgenden Subperioden.

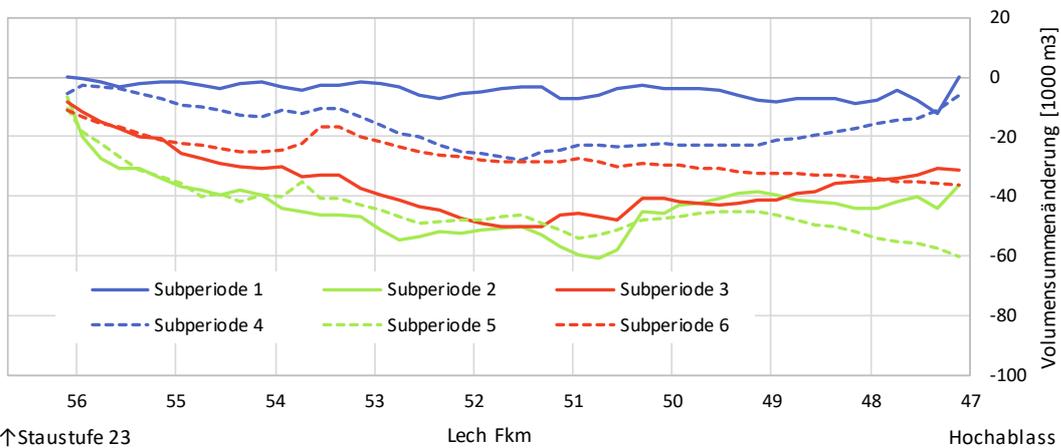


Abbildung 45: Volumensummendiagramm, Variante I-B

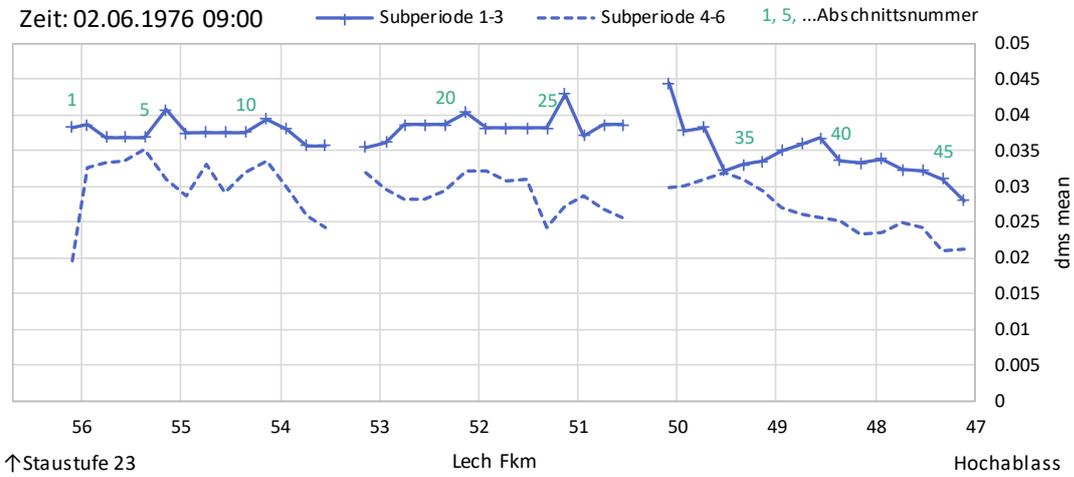


Abbildung 46: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

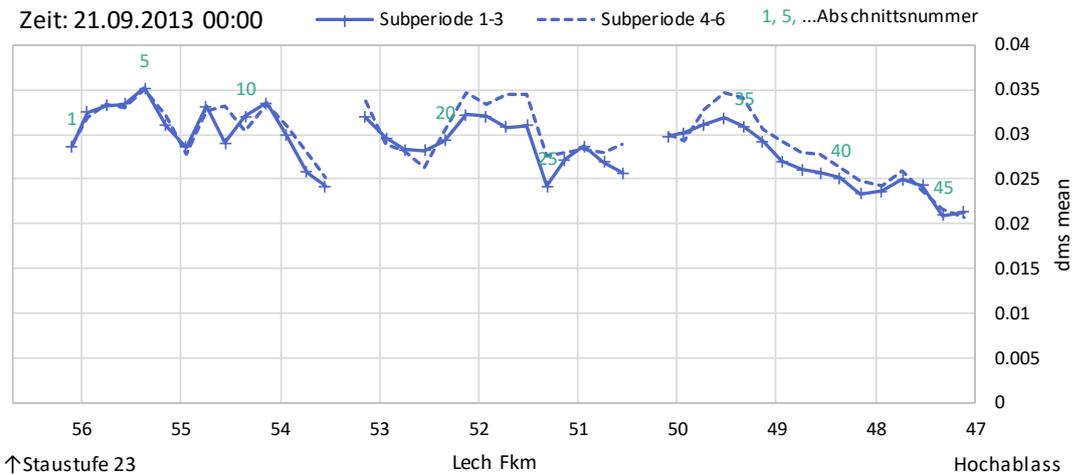


Abbildung 47: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Die Sohldynamik und die Veränderungen der Kornzusammensetzung entlang der Gewässerachse unterscheiden sich nur unwesentlich von jenen der Langzeitberechnungen der Varianten I-A1 und I-A2 (Kapitel 3.1 und 3.2). Auf eine gesonderte Beschreibung der restlichen Abbildungen dieses Kapitel wird daher verzichtet.

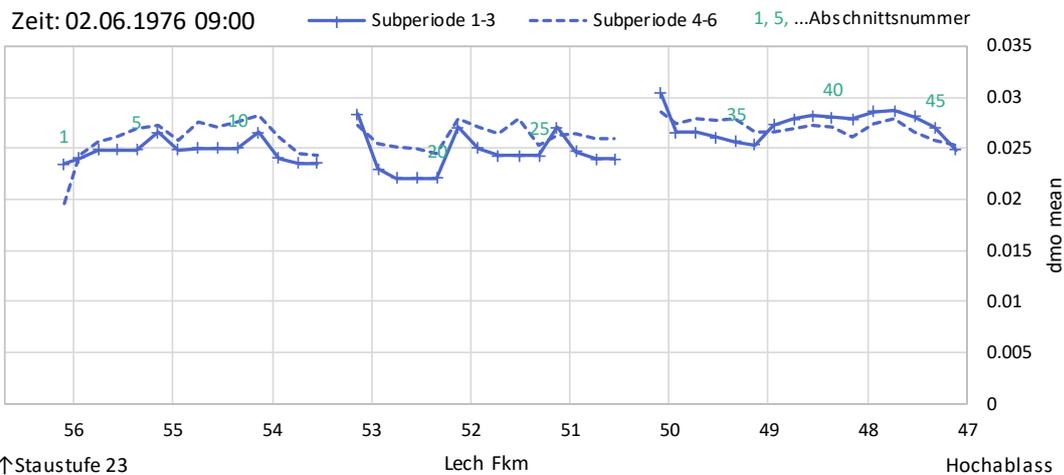


Abbildung 48: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

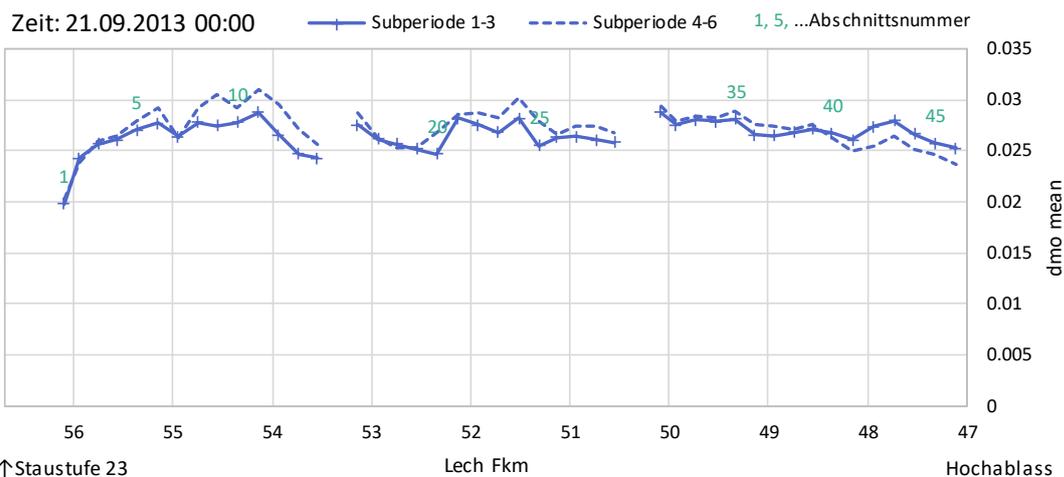


Abbildung 49: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

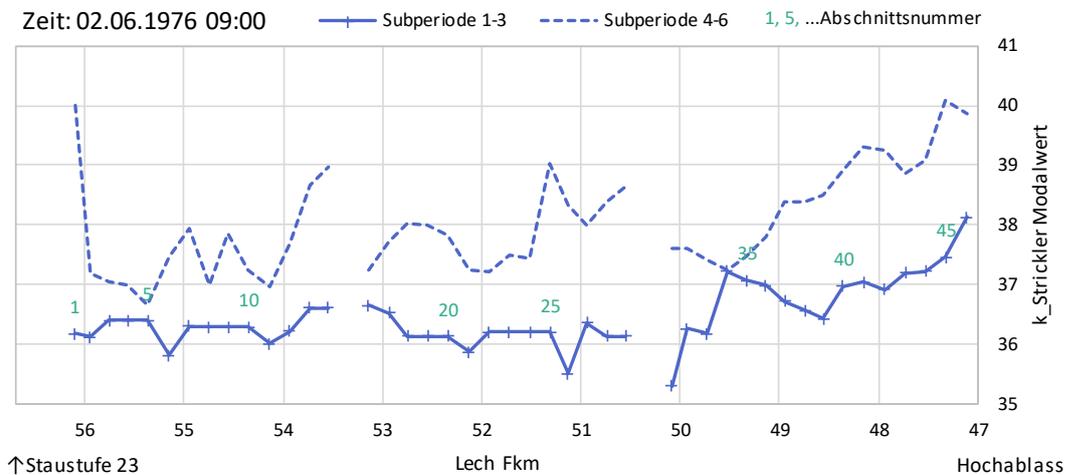


Abbildung 50: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

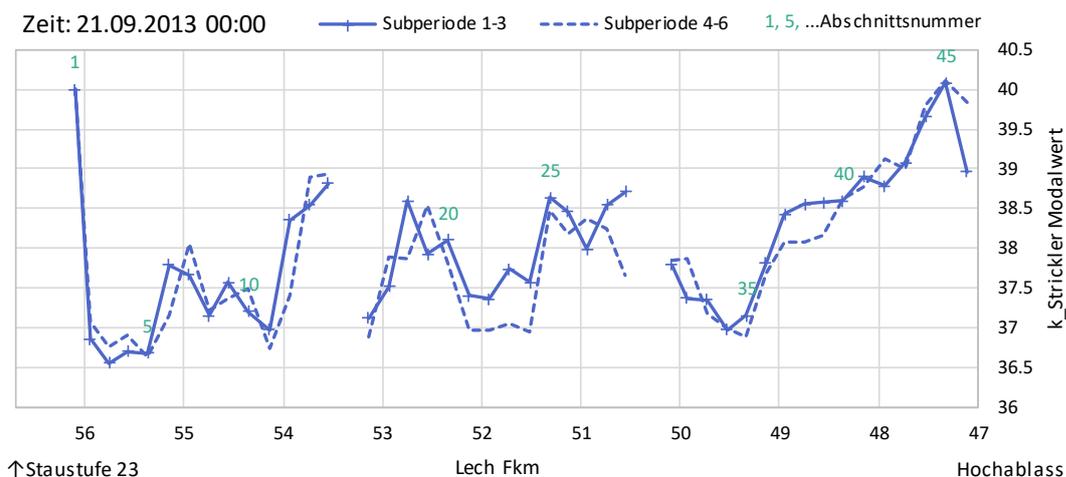


Abbildung 51: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

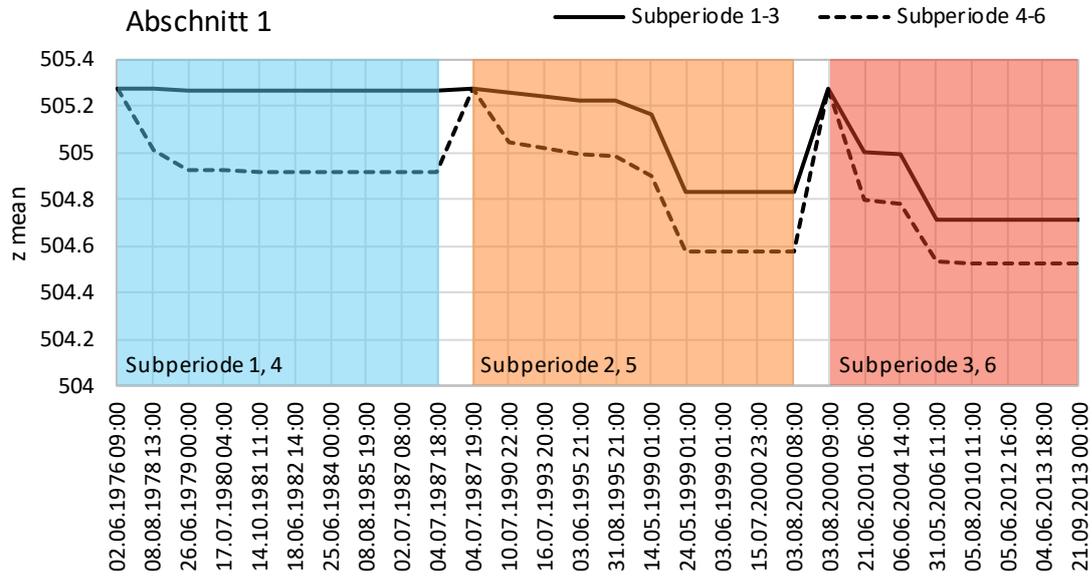


Abbildung 52: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Rücksetzung der Sohle auf das Anfangsniveau am Beginn jeder Subperiode

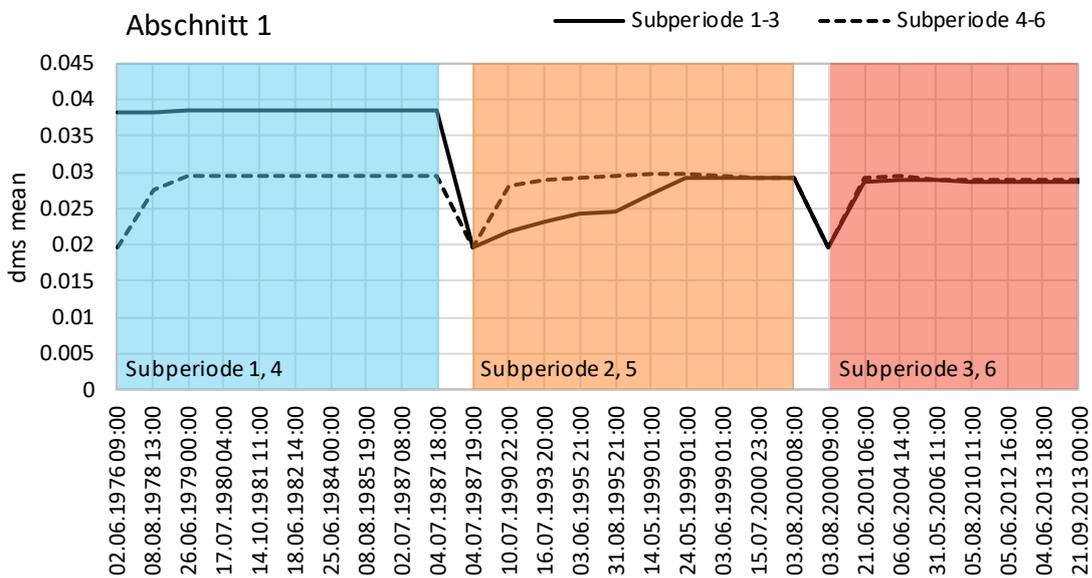


Abbildung 53: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 1 im zeitlichen Verlauf; ; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Sohlrücksetzung anhand der Auffüllung mit Unterschichtenmaterial $d_m = 19.57$ mm am Beginn jeder Subperiode

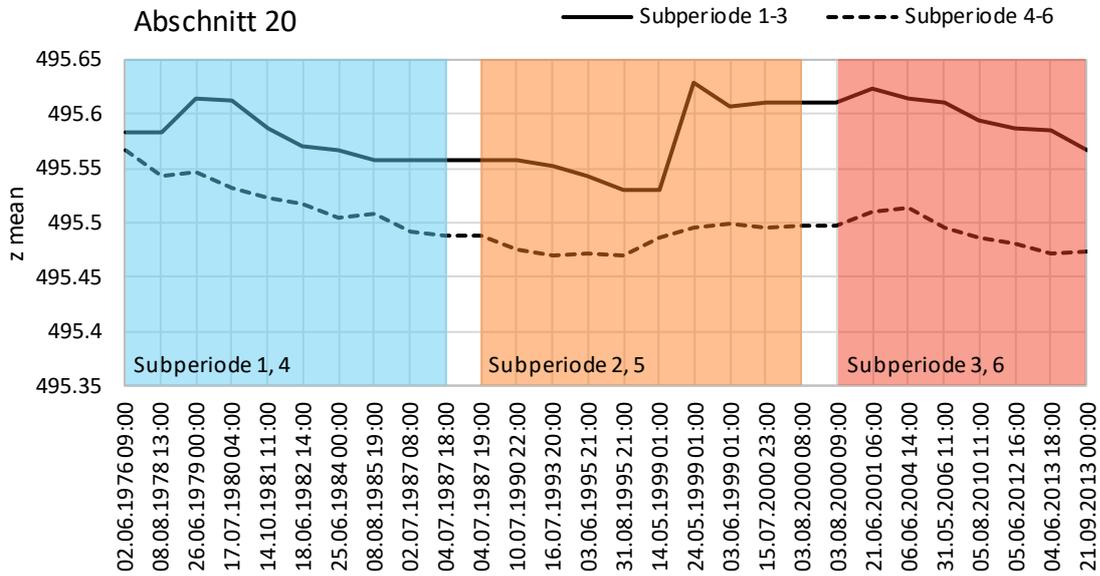


Abbildung 54: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Abschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

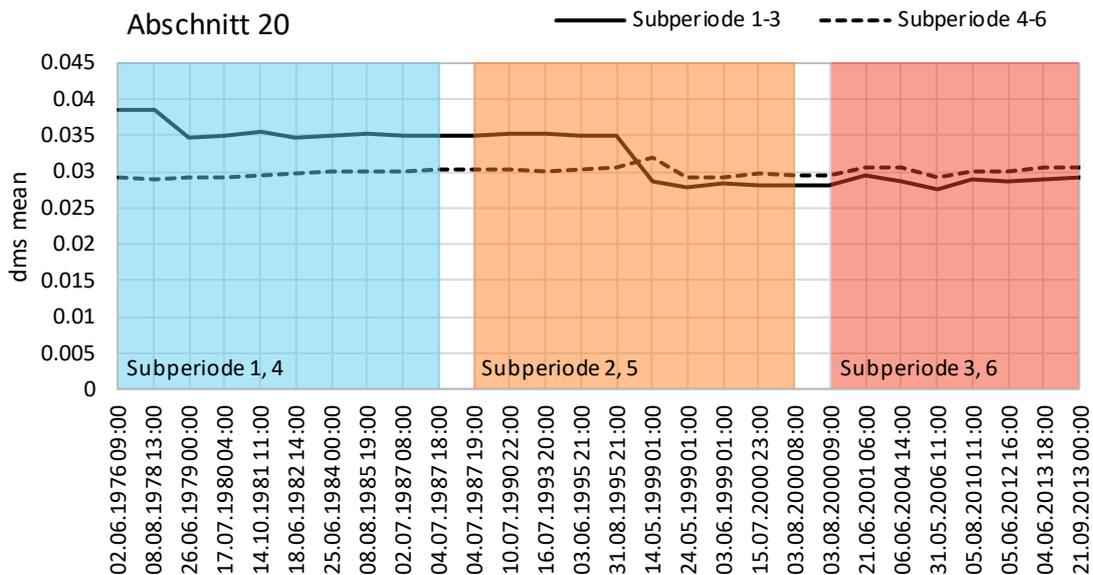


Abbildung 55: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 20 im zeitlichen Verlauf

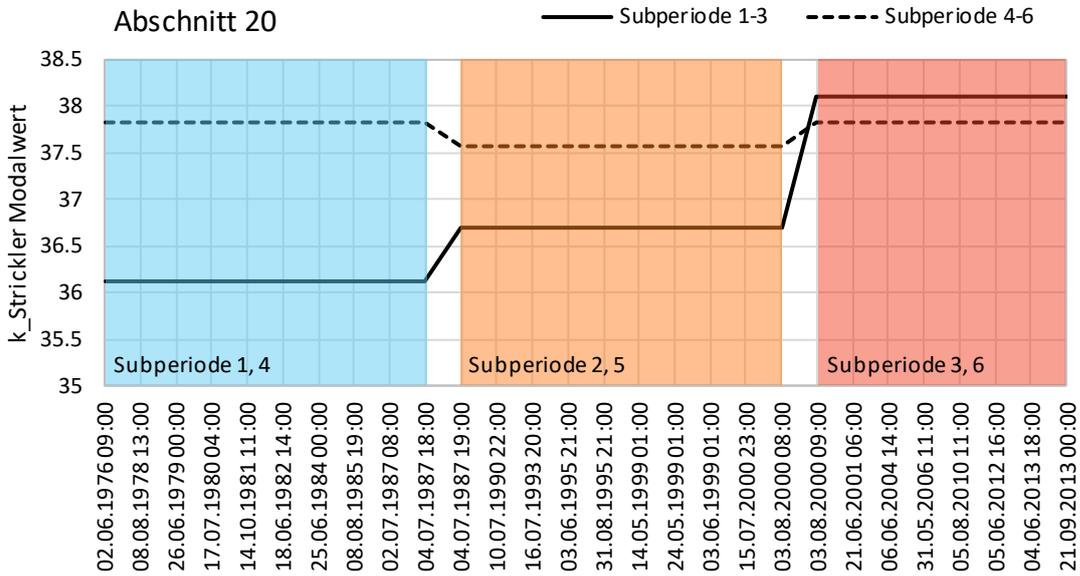


Abbildung 56: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

Exemplarisch für den Sedimentaustrag aus dem Modell der Variante I-B am Hochablass wird in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in der Subperiode 2 (ca. 1987 bis 2000, siehe Kapitel 5.1) die Geschiebefracht mit den Fraktionsanteilen FA_x und der Abfluss Q im zeitlichen Verlauf dargestellt. Insgesamt verlässt eine Sedimentfracht von 38 909 m^3 Lockervolumen das Modell.

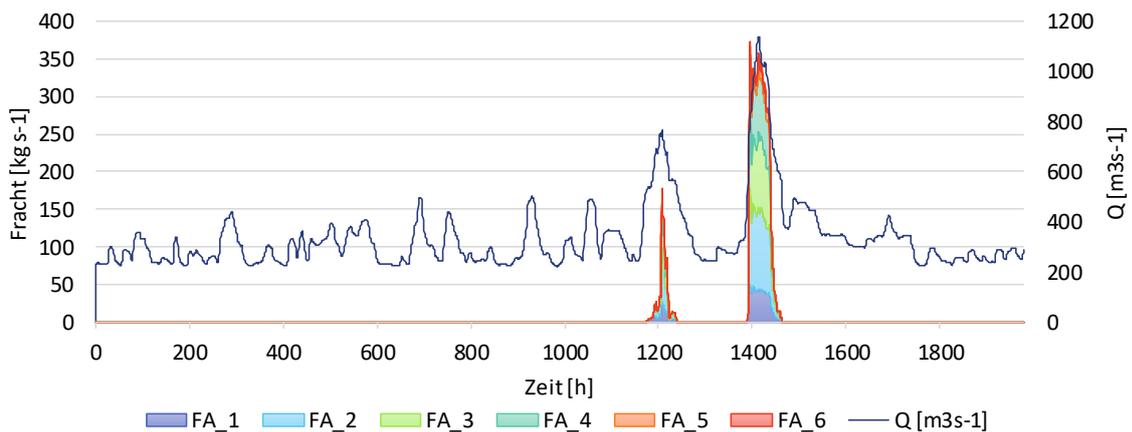


Abbildung 57: Sedimentaustrag aus dem Planmodell I-B in der Subperiode 2

Die mittlere spezifische Transportrate q_B des Mehrkornmodells der Software HYDRO_FT-2D nach Meyer-Peter, Müller und Hunziker kann indirekt für jeden Homogenabschnitt (Tabelle 27) und zu jedem Zeitschritt (Tabelle 26), zu denen ein Ausschreiben flächiger Ergebnisse erfolgt, berechnet werden. Dazu werden je

Homogenabschnitt die flächengewichteten Mittelwerte gemäß Klar (2016)¹, Kapitel 2.8 aller Netzknoten der Parameter d_{mS} (mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht), d_{mO} (mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht) und $FA_{AL,i}$ (Anteile der Kornklasse i in der Austauschschicht), sowie das Energieliniengefälle I_E gemäß Klar (2016)¹, Kapitel 3.4 ermittelt und die spezifische Transportrate q_B nach Klar (2016)¹, Kapitel 2.3.5, Gleichung 2.24 berechnet. Abbildung 58 zeigt beispielhaft q_B am 17.07.1980 um 04:00 Uhr bei 243 m³/s Zufluss an der Staustufe 23 beim zweiten Durchlauf der ersten Subperiode (Kapitel 5.1) entlang des Längsschnittes. Selbst bei solch geringen Abflüssen wird Geschiebe in einigen Homogenabschnitten mobilisiert.

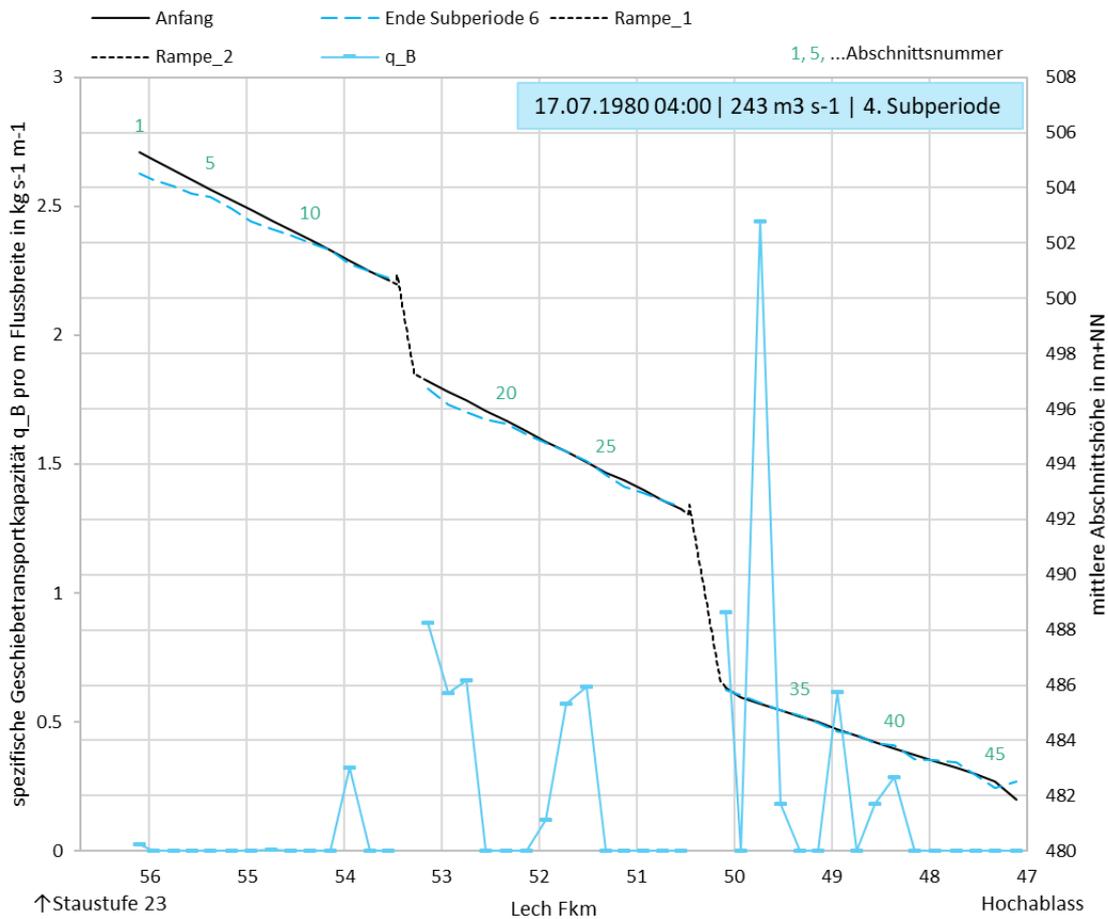


Abbildung 58: Längsschnitt der spezifischen Transportrate q_B , sowie der mittleren Abschnittshöhen am Simulationsanfang und -ende, Planungsbereich I

¹ Klar, Robert (2016): Langzeitsimulation des Geschiebetransports in alpinen Tälern: Weiterentwicklung von Methoden zur Modellierung der langfristigen Sohlagenentwicklung und zur Ermittlung von Hochwassergefahren in inneralpinen Tälern. Innsbruck: innsbruck university press (IUP). ISBN 978-3-903122-66-6. (<http://diglib.uibk.ac.at/ulbtirola/content/titleinfo/2556531>)

3.3.2 I-B ohne Beaufschlagung der Nebengewässer

Im Sinne einer Sensitivitätsuntersuchung werden die Auswirkungen einer Verlegung sämtlicher Nebengewässer der Variante I-B berechnet und bewertet. Abbildung 59 zeigt exemplarisch zwei Teilabschnitte des resultierenden Berechnungsnetzes. Die Verlegung der Nebengewässer wird durch eine Belegung der Einläufe der Nebengewässern mit „disabled elements“ bewerkstelligt. So kann weder Reinwasser noch Sediment in diese gelangen und die Schubspannungen im Hauptfluss fallen tendenziell stärker aus.

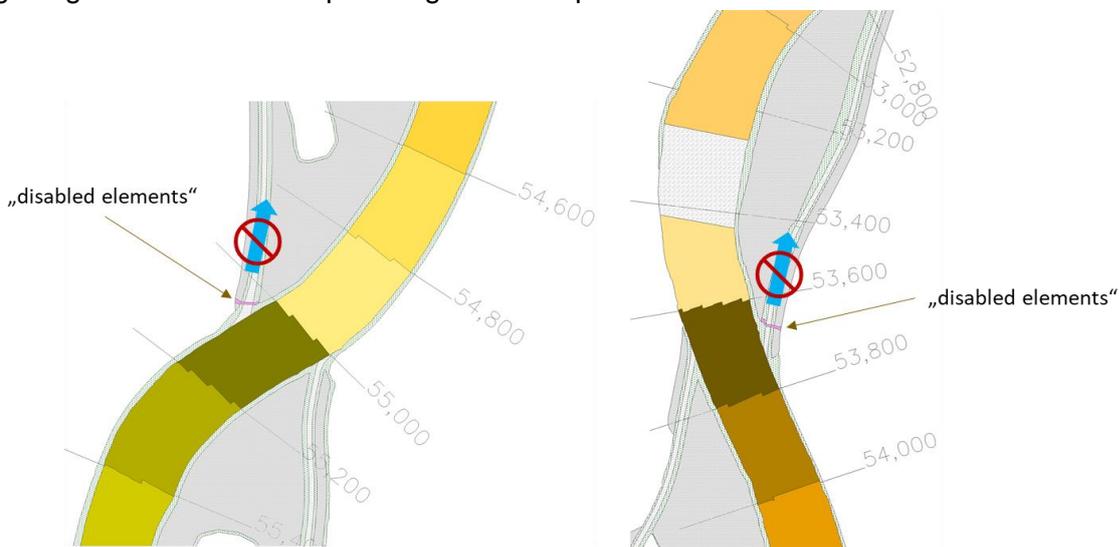


Abbildung 59: Exemplarische Teilabschnitte des Berechnungsnetzes der Variante I-B mit farblich hervorgehobenen Homogenabschnitten und mittels „disabled elements“ blockierten Zuläufen zu den Nebengewässern

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions-sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

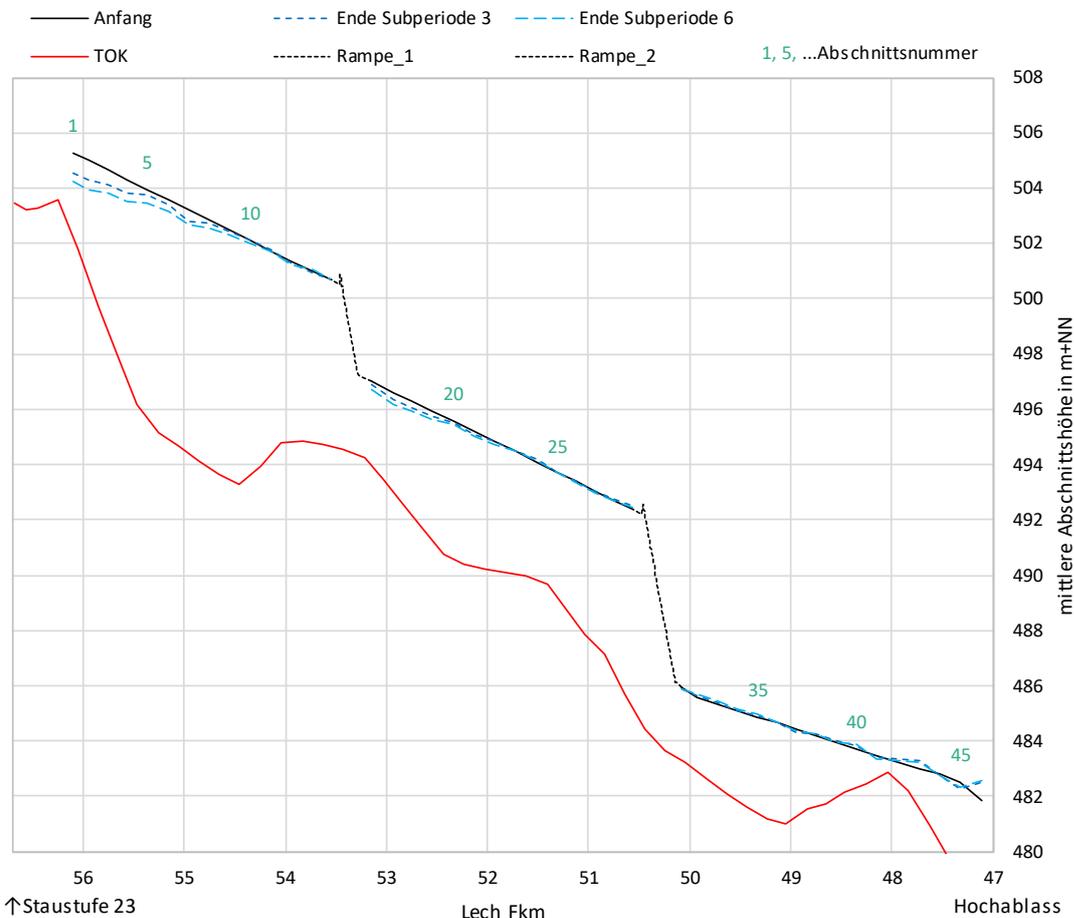


Abbildung 60: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante I-B mit blockierten Nebengewässern

Tabelle 6: Summen des verklappten Sediments im Abschnitt 1, sowie des Geschiebeaustrags je Subperiode in m³ Lockervolumen

	Verklapp-Mat. (externer Eintrag)	Geschiebeaustrag (Hochablass)
I-B_ohne_Nebengewässer_R01	347	127
I-B_ohne_Nebengewässer_R02	9 093	41 149
I-B_ohne_Nebengewässer_R03	11 526	35 735
I-B_ohne_Nebengewässer_R04	8 550	8 436
I-B_ohne_Nebengewässer_R05	14 551	67 262
I-B_ohne_Nebengewässer_R06	15 370	42 267
Summe	59 438	194 976

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 194 976 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 2 600 m³ Lockervolumen. Die Menge des verklappten Materials von durchschnittlich jährlich 786 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die Sohlerosion gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 54,5 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert. Die Eintiefungen fallen jedoch selbst bei blockierten Nebengewässern sehr moderat aus und stellen keine Gefahr für die Sohlstabilität dar. Es ist stets ausreichender Abstand zum Tertiärhorizont gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 600 m³ Lockervolumen pro Jahr, die Sohle stabil bleibt. Abbildung 61 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Es zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Erosionstendenz im Vergleich der ersten drei mit den darauffolgenden Subperioden.

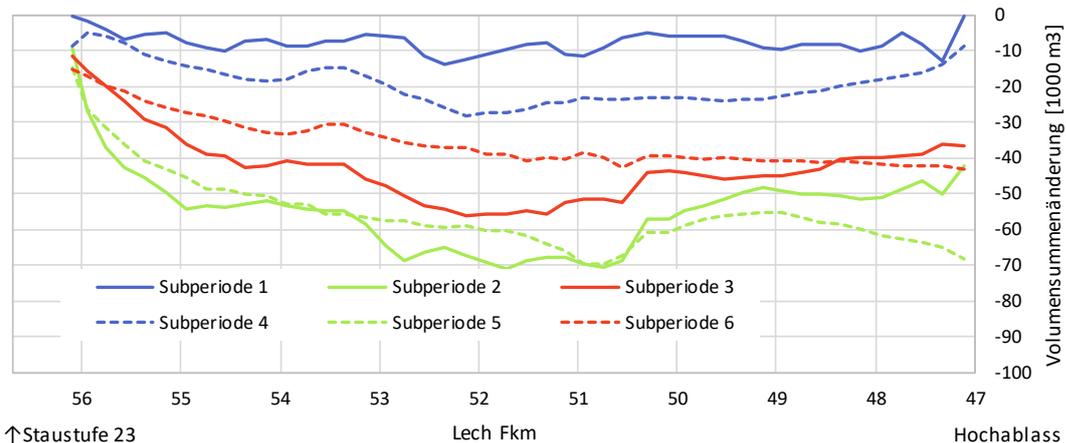


Abbildung 61: Volumensummenendiagramm, Variante I-B (blockierte Nebengewässer)

3.4 Variante I-C

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionsssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

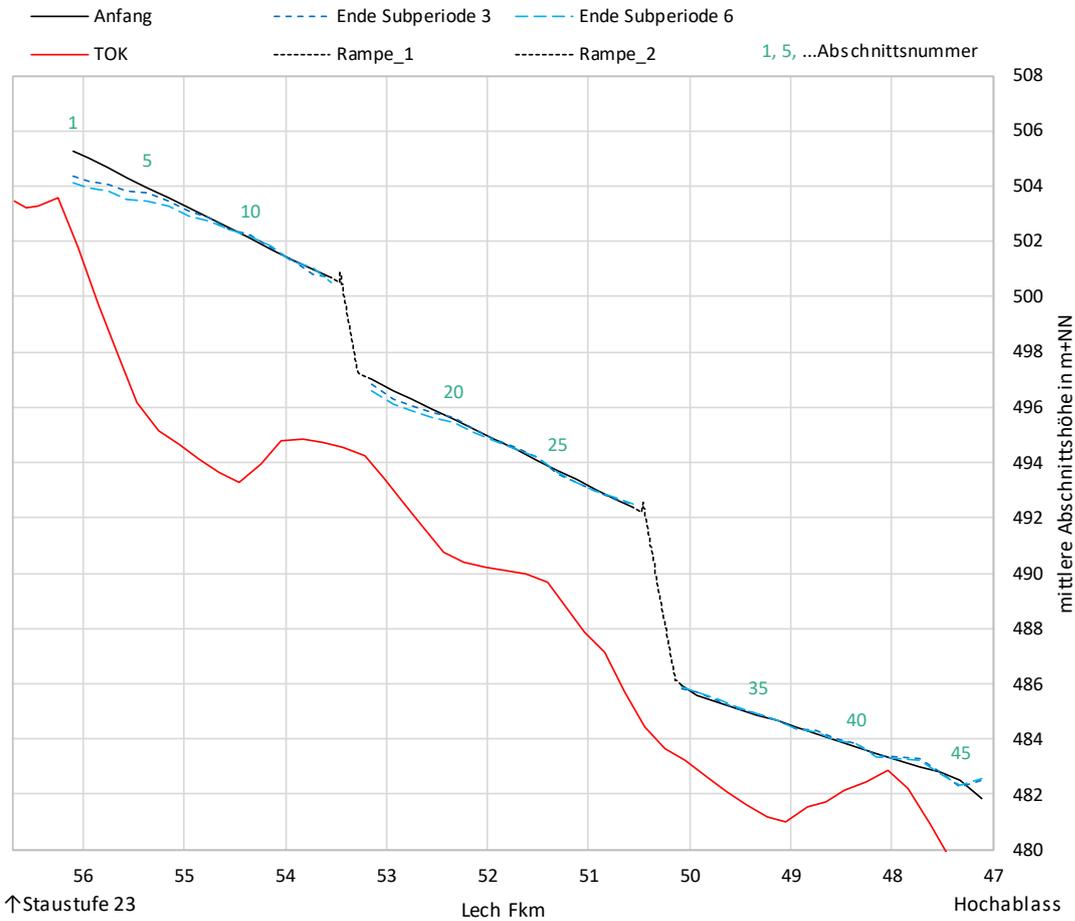


Abbildung 62: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante I-C

Tabelle 7: Summen des verklappten Sediments im Abschnitt 1, sowie des Geschiebeaustrags je Subperiode in m³ Lockervolumen

	Verklapp-Mat. (externer Eintrag)	Geschiebeaustrag (Hochablass)
I-C_R01	2 280	96
I-C_R02	12 407	39 794
I-C_R03	14 045	36 004
I-C_R04	10 271	8 873
I-C_R05	17 264	73 380
I-C_R06	17 801	45 149
Summe	74 068	203 295

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 203 295 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 2 700 m³ Lockervolumen. Die Menge des verklappten Materials von durchschnittlich jährlich 979 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die Sohlerosion gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 55,0 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert. Die Eintiefungen fallen jedoch sehr moderat aus und stellen keine Gefahr für die Sohlstabilität dar. Es ist stets ausreichender Abstand zum Tertiärhorizont gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 700 m³ Lockervolumen pro Jahr, die Sohle stabil bleibt. Abbildung 63 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Es zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Erosionstendenz im Vergleich der ersten drei mit den darauffolgenden Subperioden.

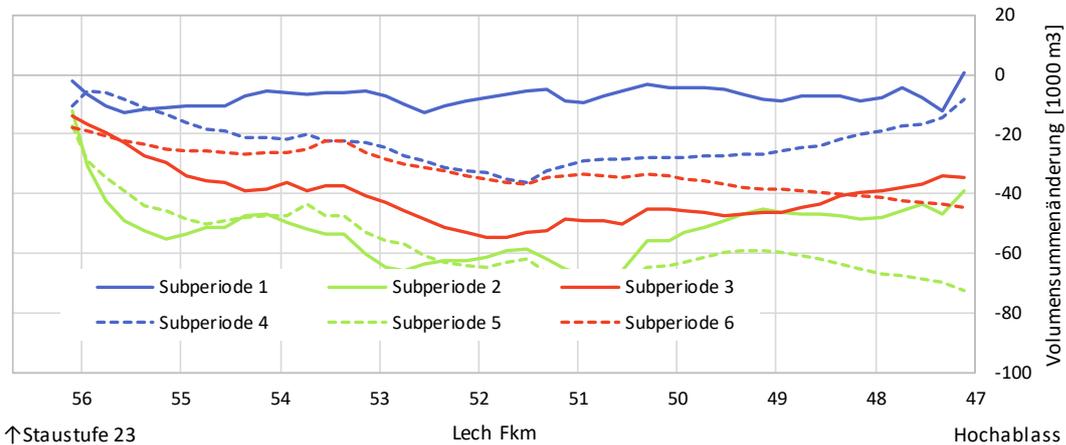


Abbildung 63: Volumensummenendiagramm, Variante I-C

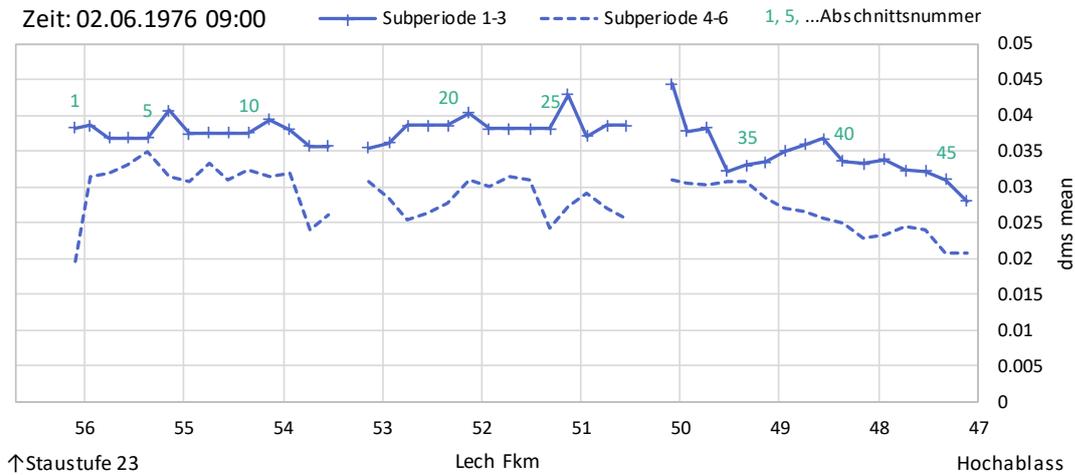


Abbildung 64: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

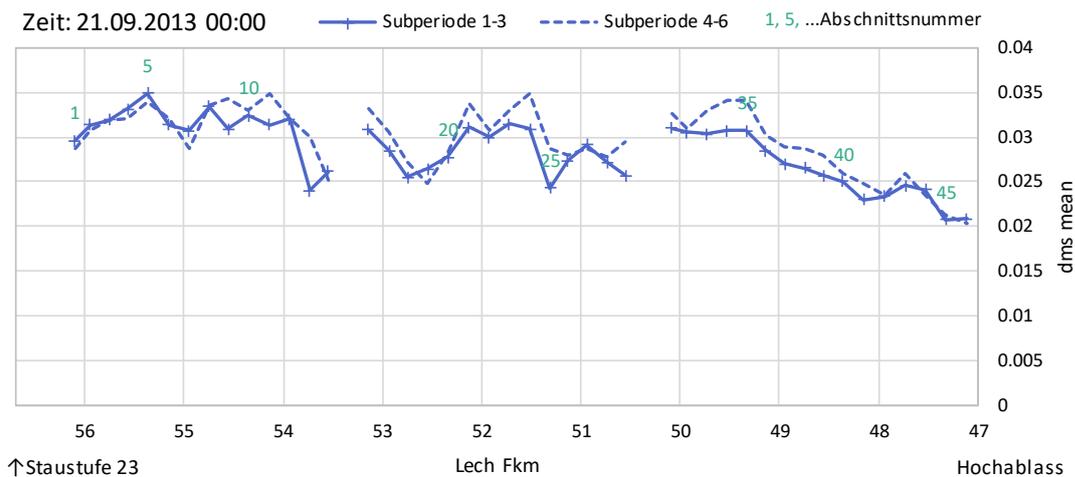


Abbildung 65: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Die Sohldynamik und die Veränderungen der Kornzusammensetzung entlang der Gewässerachse unterscheiden sich nur unwesentlich von jenen Langzeitberechnungen der Varianten I-A1, I-A2 und I-B (Kapitel 3.1, 3.2 und 3.3). Auf eine gesonderte Beschreibung der restlichen Abbildungen dieses Kapitel wird daher verzichtet.

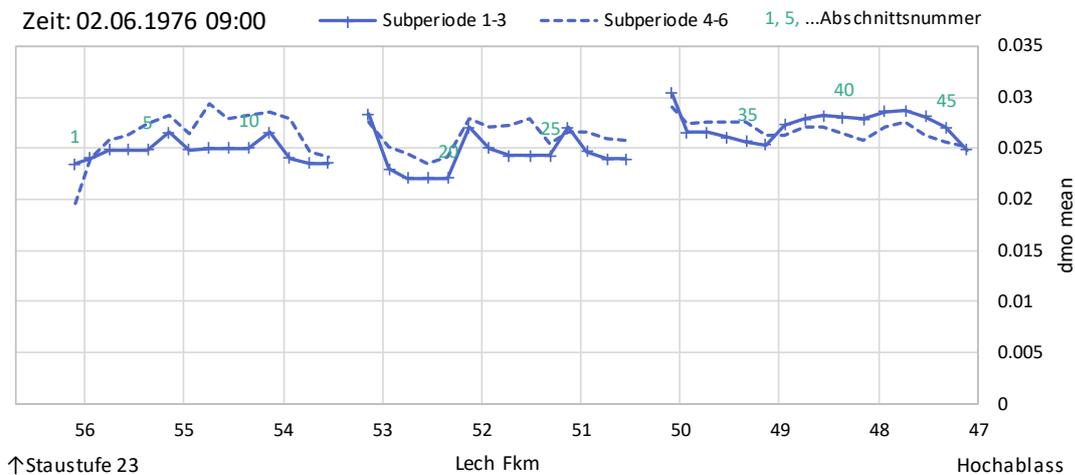


Abbildung 66: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

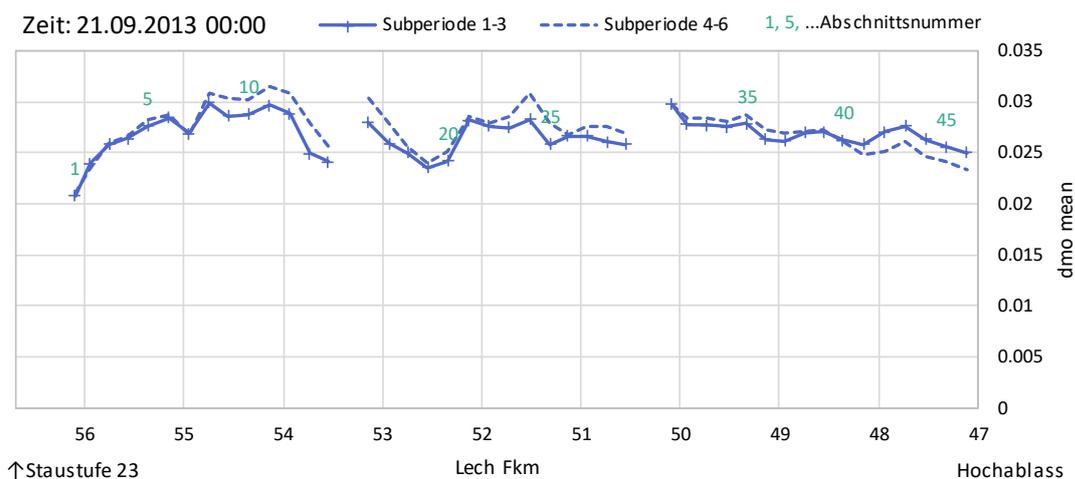


Abbildung 67: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

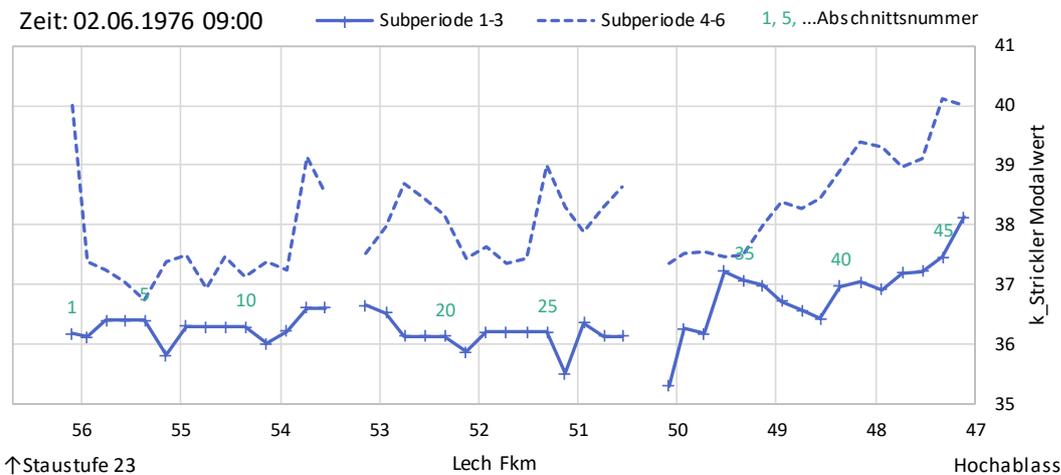


Abbildung 68: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

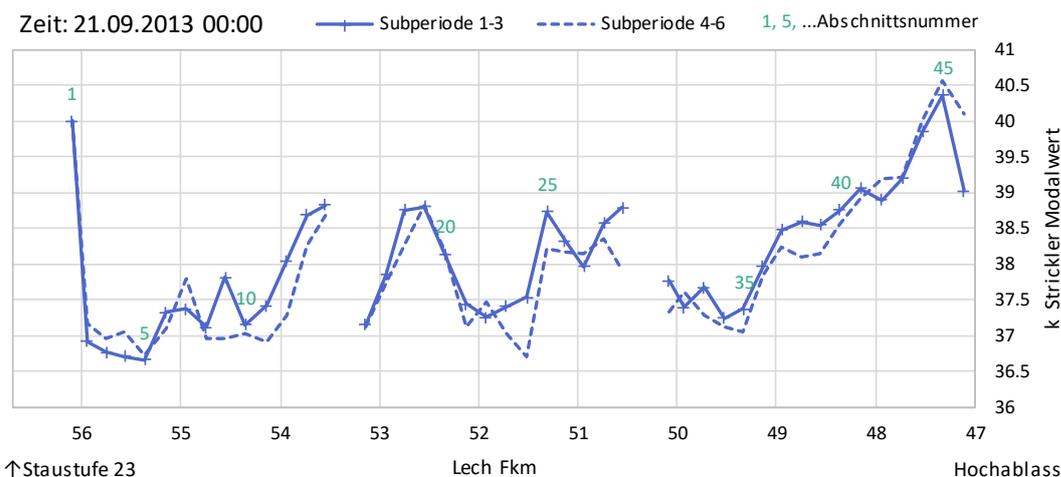


Abbildung 69: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

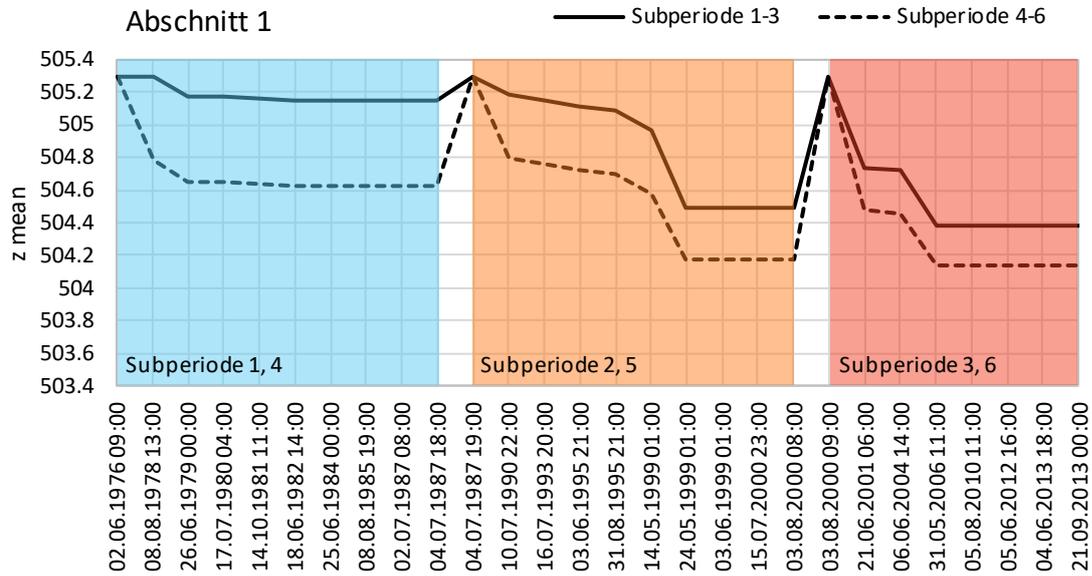


Abbildung 70: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Rücksetzung der Sohle auf das Anfangsniveau am Beginn jeder Subperiode

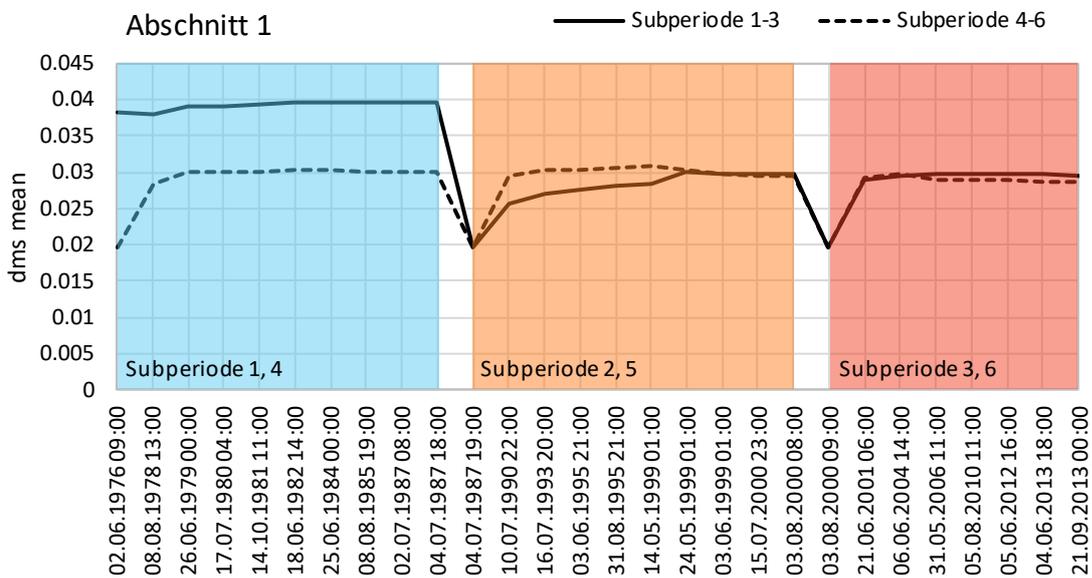


Abbildung 71: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 1 im zeitlichen Verlauf; gut erkennbar sind die Zeitpunkte der Sohlrücksetzung anhand der Auffüllung mit Unterschichtenmaterial $d_m = 19.57$ mm am Beginn jeder Subperiode

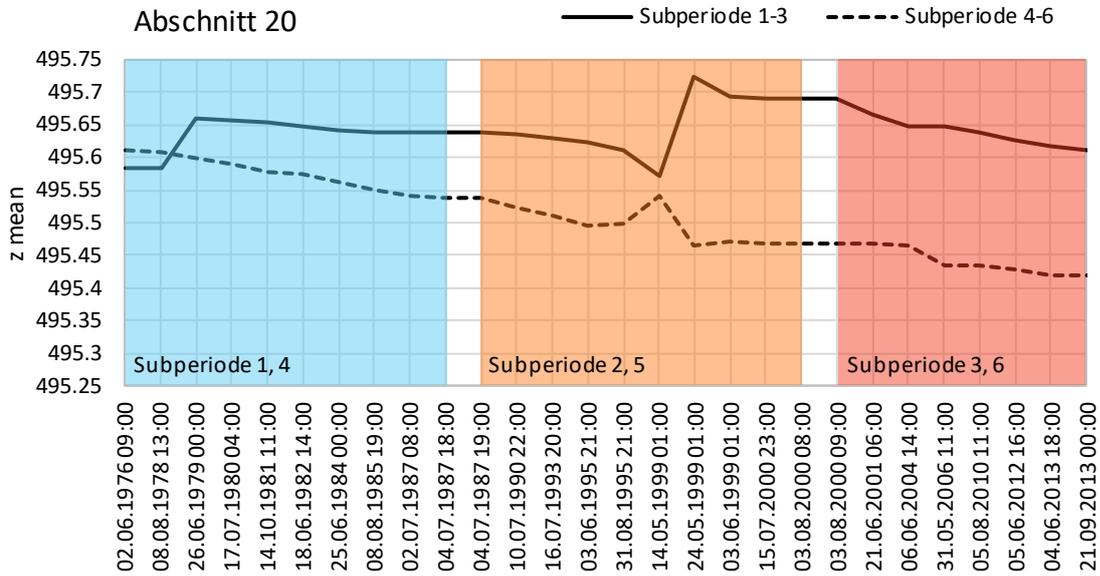


Abbildung 72: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Abschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

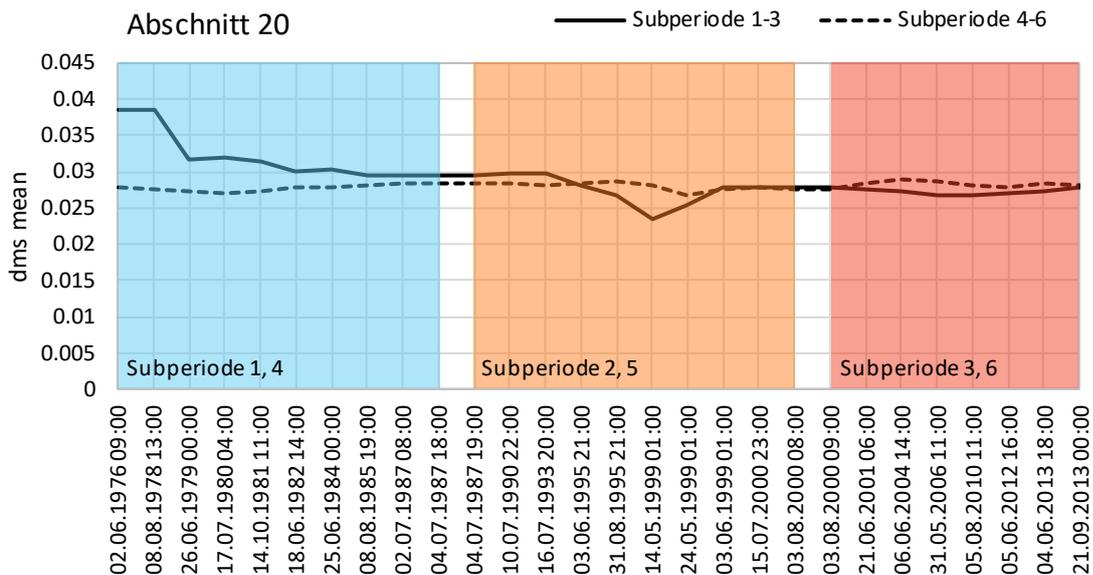


Abbildung 73: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 20 im zeitlichen Verlauf

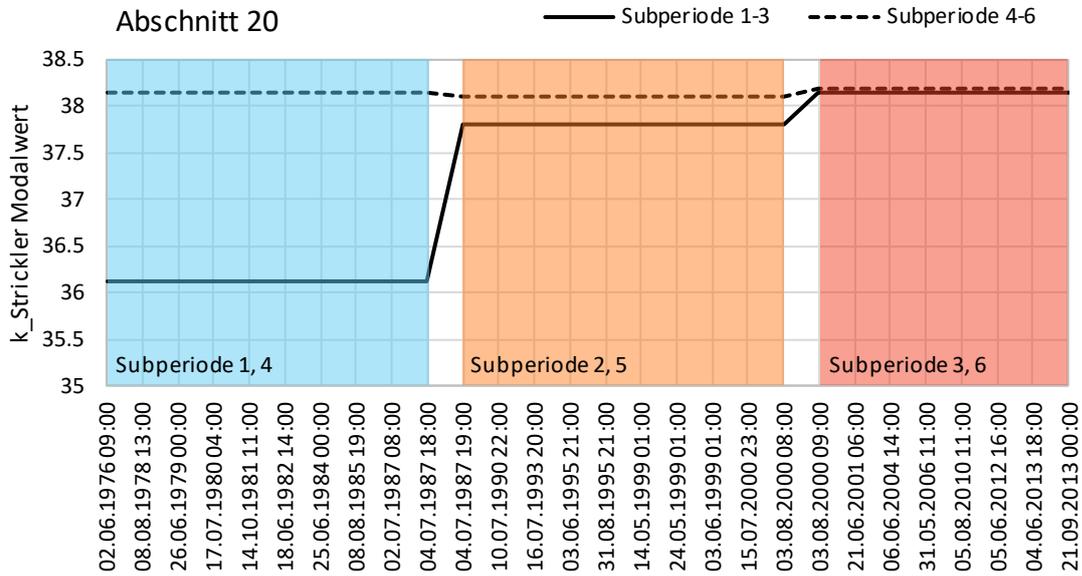


Abbildung 74: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 20 im zeitlichen Verlauf

Exemplarisch für den Sedimentaustrag aus dem Modell der Variante I-C am Hochablass wird in Abbildung 75 in der Subperiode 2 (ca. 1987 bis 2000, siehe Kapitel 5.1) die Geschiebefracht mit den Fraktionsanteilen FA_x und der Abfluss Q im zeitlichen Verlauf dargestellt. Insgesamt verlässt eine Sedimentfracht von 39 794 m^3 Lockervolumen das Modell.

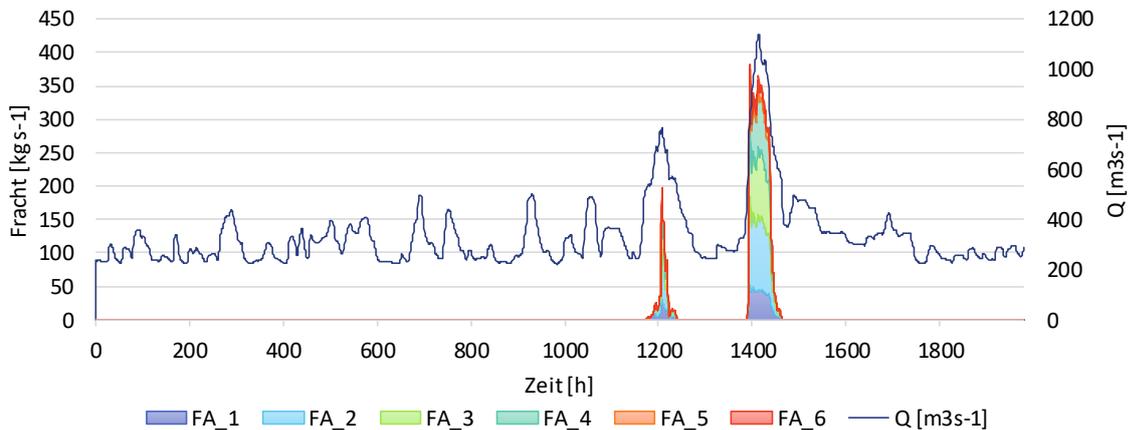


Abbildung 75: Sedimentaustrag aus dem Planmodell I-C in der Subperiode 2

3.5 Interpretation

Die Unterschiede der einzelnen Planvarianten zeigen sich am deutlichsten im Vergleich zum Bezugszustand (vergl. Anlage 5.3) bzw. im direkten Vergleich zueinander. In den Längsprofilen der folgenden Abbildungen 76, 77, 78 und 79 sind für ausgewählte Varianten jeweils die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6) eingezeichnet. Zudem wird die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) dargestellt.

Abbildung 76 vergleicht die Ergebnisse des Bezugszustandes gemäß Anlage 5.3 mit jenen der Planvariante I-A1 (Kapitel 3.1). Mit Ausnahme der mittleren Sohlhöhen rund um Fkm 53,0 ergibt sich bei Planvariante I-A1 stets ein größerer Abstand zur Tertiäroberkante als im Bezugszustand. Die Sohleintiefungen zwischen Simulationsanfang und -ende fallen moderat aus.

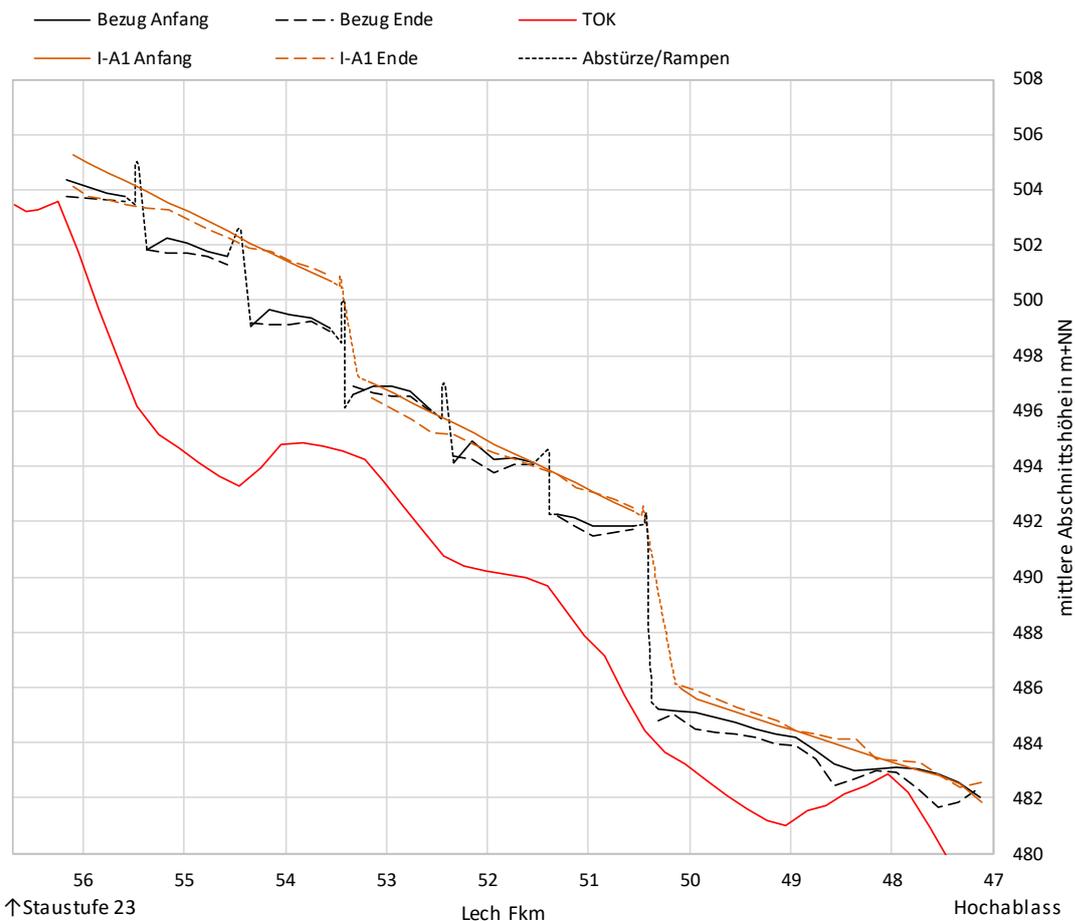


Abbildung 76: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante I-A1

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Abbildung 77 bzw. 78 im Vergleich der Ergebnisse des Bezugszustandes gemäß Anlage 5.3 mit jenen der Planvariante I-A2 (Kapitel 3.2). bzw. I-B (Kapitel 3.3.1). Hier fallen die Erosionen jeweils sogar noch etwas geringer aus.

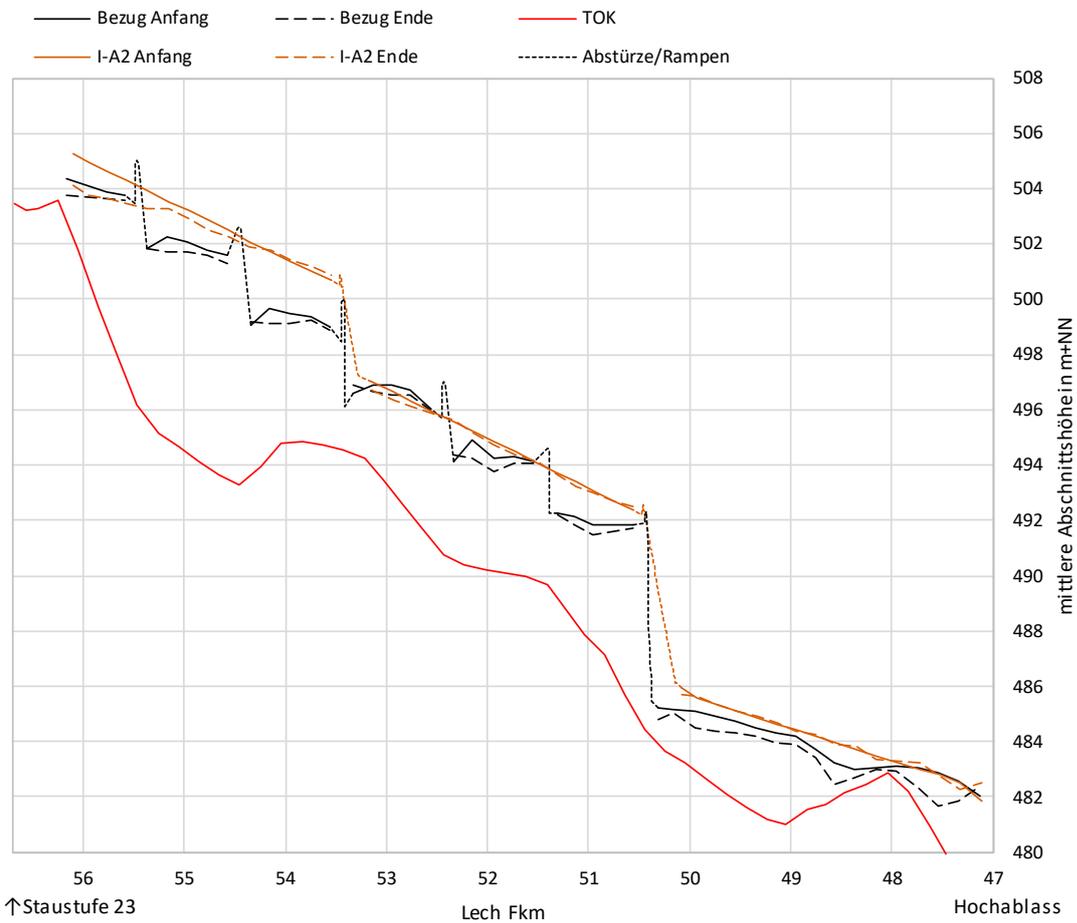


Abbildung 77: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante I-A2

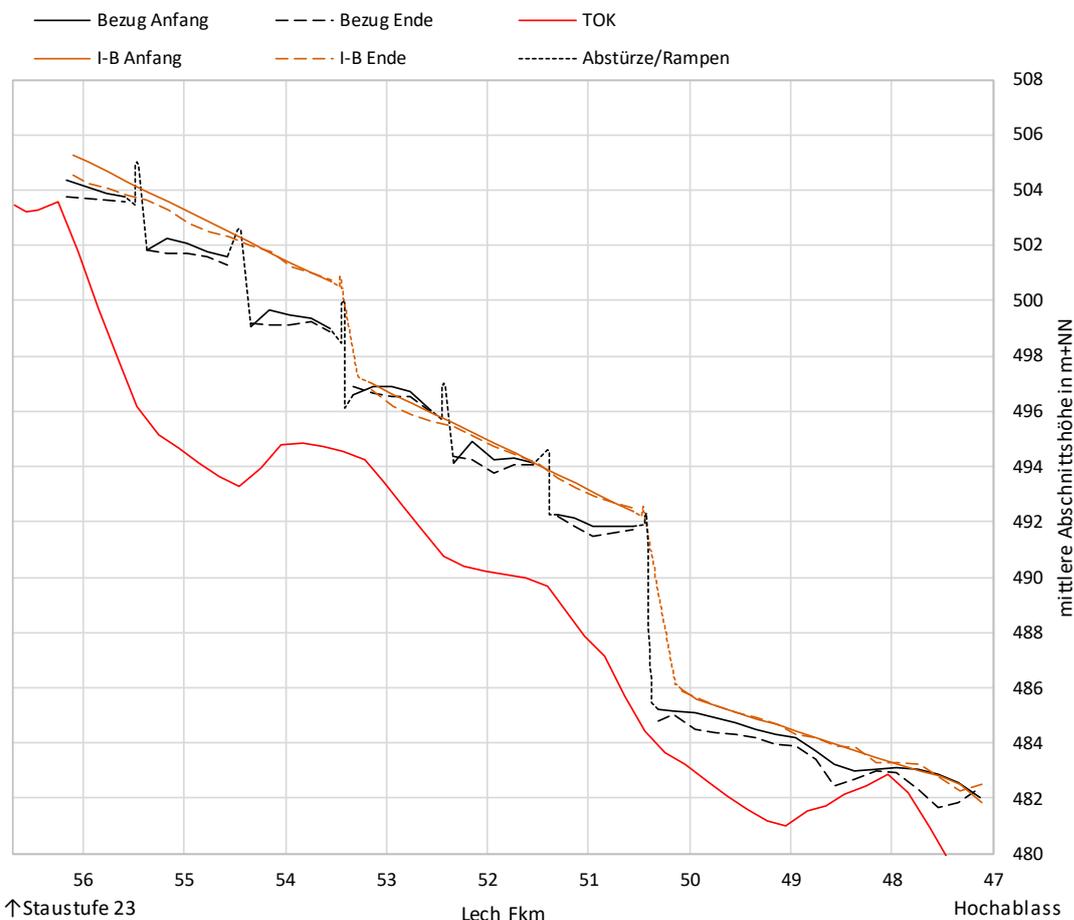


Abbildung 78: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante I-B

Tabelle 8: Geschiebesummen in m³ Lockervolumen im Vergleich zwischen den Varianten des Planungsbereichs I

Variante	Eintrag Verklapp-Material [m ³]	Austrag Lechwehr Gersthofen [m ³]	Ø Eintrag pro Jahr [m ³ /a]	Ø Austrag pro Jahr [m ³ /a]
I-A1	68 082	222 557	896	2 928
I-A2	68 218	191 760	898	2 523
I-B	50 346	188 158	662	2 476
I-C	74 068	203 295	975	2 675

Abbildung 79 fasst die mittleren Abschnittshöhen am Prognoseberechnungsende aller Varianten im Planungsbereich I zusammen. Die Unterschiede gestalten sich aus morphologischer Sicht gering. Allen gemein ist, dass die verklappte Geschiebemenge nicht ganz ausreicht, um die Sohlerosionen gänzlich zu unterbinden. Dementsprechend

wird vor allem zwischen Fkm 56,0 und 55,0 zusätzliches Material aus dem Gewässerbett mobilisiert.

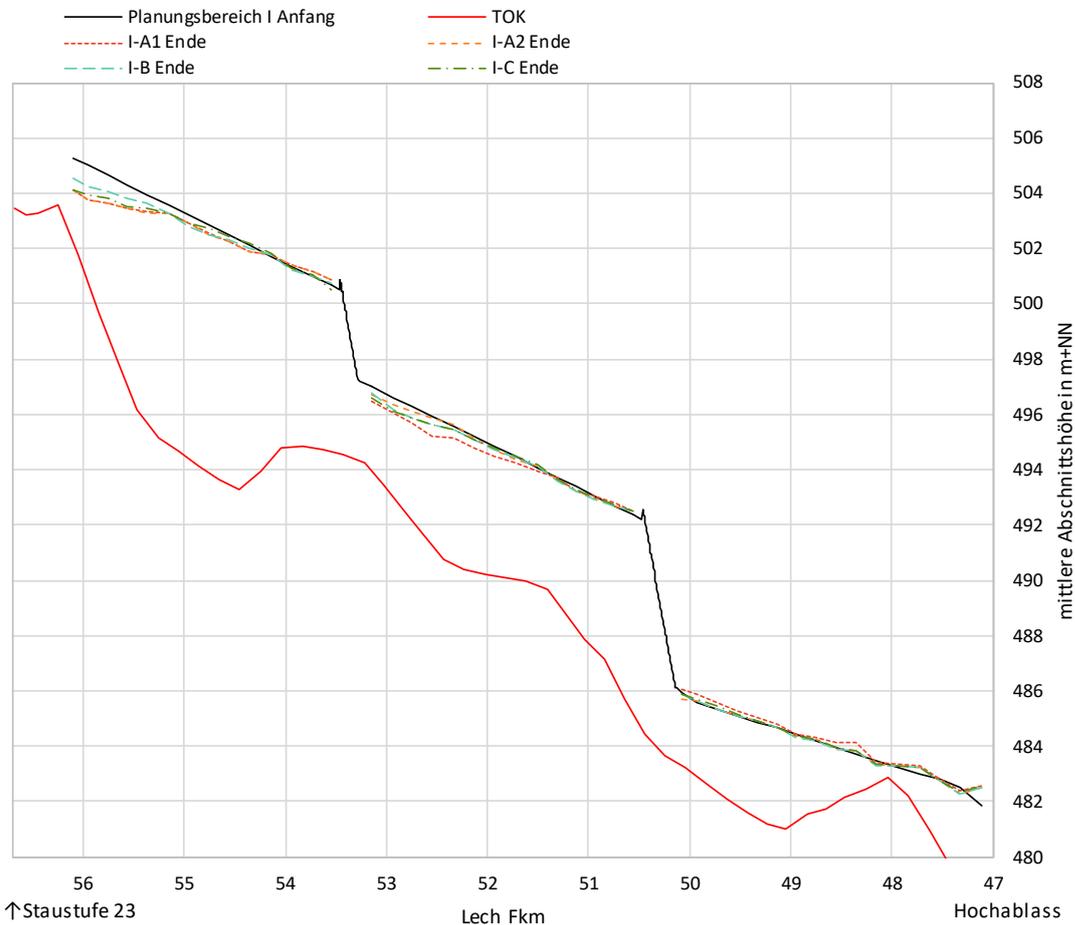


Abbildung 79: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 der Planvarianten I-A1, I-A2, I-B und I-C

Tabelle 8 listet die ein- und ausgetragenen Geschiebesummen aller Varianten im Planungsbereich I auf. Zwischen Ein- und Austrag besteht stets eine Differenz. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit einer größeren Geschiebezugabemenge im Bereich von durchschnittlich ca. 2 900 m³ Lockervolumen pro Jahr die Sohle bei allen Planvarianten stabil bleibt. Aus morphologischer Sicht sind somit alle Varianten des Planungsbereichs I gut geeignet, ein dynamisches Sohlgleichgewicht zu gewährleisten.

4 Planungsbereich II – Ergebnisse und Interpretation

Das Kapitel 4 präsentiert ausgesuchte und aussagekräftige Ergebnisse der Langzeitprognose der Sohlentwicklung im Planungsbereich II der Varianten II-A, II-B1, II-B2 und II-B3. Für eine Beschreibung dieser Varianten im Sinne der zugrundeliegenden Überlegungen und verwendeten Entwurfselemente wird auf den Erläuterungsbericht, Kapitel 9.4 verwiesen.

4.1 Überblick der Varianten und Sensitivitätsuntersuchungen

Im Planungsbereich II sind im Vergleich zum Planungsbereich I flussbauliche Veränderungen nur in geringerem Maße möglich. Daher muss stärker mit dem Baustein der Geschiebezugabe gearbeitet werden. Wie bereits im generellen Modellierungskonzept (Kapitel 2.1) geschildert, haben das Füllmaterial sowie die Wahl des Bereichs der Rücksetzungen großen Einfluss auf die Modellergebnisse. Aus diesem Grund werden mehrere Sensitivitätsvarianten unterschieden. Abbildung 80 definiert eine geeignete Namenskonvention und Tabelle 9 bietet eine Übersicht der Untersuchungen, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.



Abbildung 80: Namenskonvention der Varianten und Sensitivitätsuntersuchungen

Tabelle 9: Überblick der Varianten und Sensitivitätsuntersuchungen

Var.	Bausteine	Sensitivitätsvarianten mit Kurzbeschreibung
II-A	Geschiebezugabe + Monitoring	II-A_R0x: Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich
		II-A_R1x: Geschiebezugabe fein, großer Bereich
		II-A_R2x: Geschiebezugabe grob, großer Bereich
II-B1	Sohlrampe Fkm 42,6 + Sohlanhebung oberstrom	II-B1_R1x: keine Geschiebezugabe
II-B2	Sohlrampe Fkm 42,6 + Sohlanhebung oberstrom + Geschiebezugabe + Monitoring	II-B2_R1x: Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich unterhalb Eisenbahnerwehr
		II-B2_R2x: Geschiebezugabe grob, großer Bereich unterhalb Eisenbahnerwehr + kleiner Bereich unterhalb Rampe
		II-B2_R3x: Geschiebezugabe grob, großer Bereich unterhalb Eisenbahnerwehr + kleiner Bereich unterhalb Rampe + kleiner Bereich unterhalb Wolfzahnauwehr
II-B3	wie II-B2 + „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“	II-B3_R1x: Aufweitung nach Eisenbahnerwehr Geschiebezugabe wie bei Variante II-B2

4.2 Variante II-A

Bausteine (vgl. Erläuterungsbericht, Kapitel 9.4): Geschiebezugabe + Monitoring

4.2.1 II-A_R0x Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

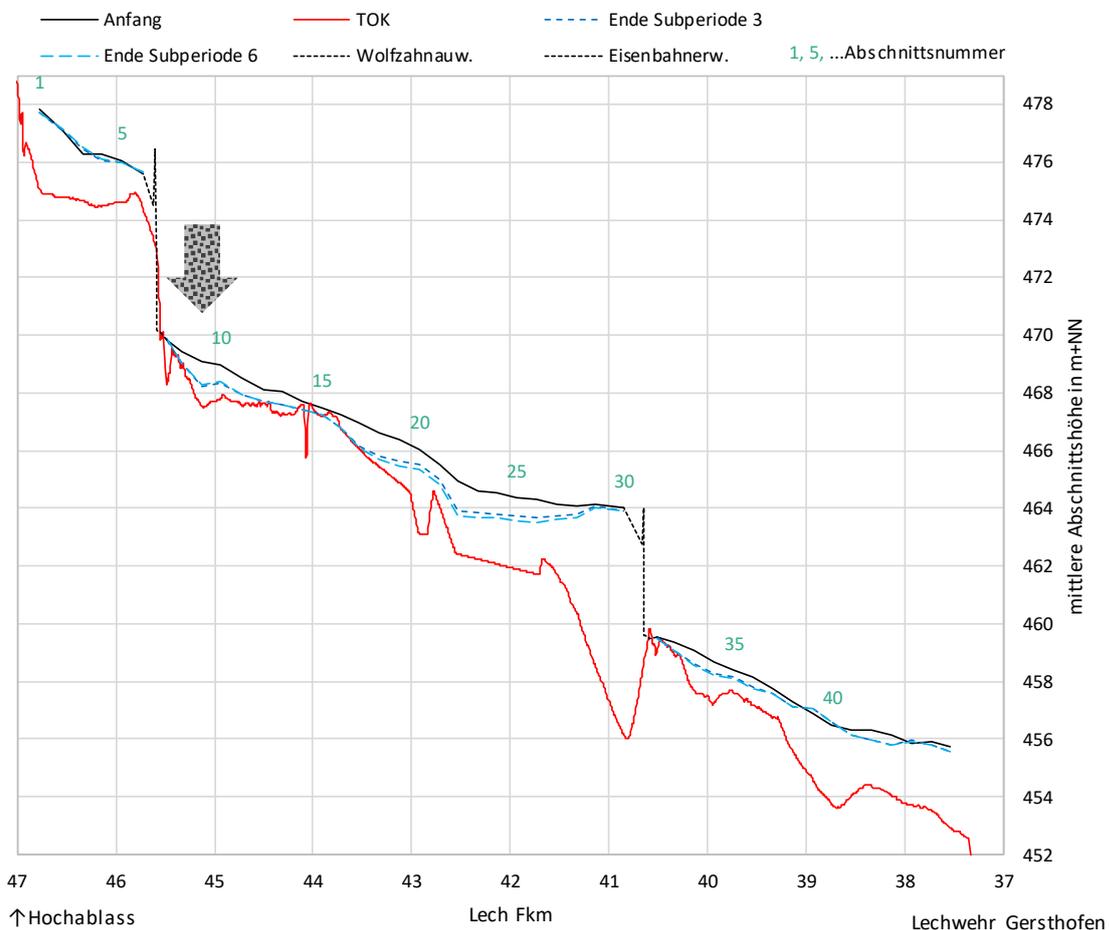


Abbildung 81: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-A_R0x; Geschiebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 und 9, Füllmaterial $d_m = 19.57$ mm

Tabelle 10: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8 und 9 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat.
II-A_R01	13 135
II-A_R02	16 095
II-A_R03	15 630
II-A_R04	16 223
II-A_R05	14 324
II-A_R06	14 912
Summe	90 319

Tabelle 11: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfzahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-A_R01	12 330	28 532	105 878	119 612
II-A_R02	67 113	56 944	129 879	148 653
II-A_R03	46 637	46 765	77 680	81 563
II-A_R04	12 331	19 036	39 103	43 865
II-A_R05	67 113	55 260	86 952	88 971
II-A_R06	46 637	47 587	62 781	60 190
Summe	252 161	254 124	502 273	542 853

Tabelle 10 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 11 listet die Summen des eingetragenen, ausgeprägten sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Würden sich für jede Subperiode die Summen entsprechen, dann gäbe es weder Auflandung noch Erosion im Modellgebiet. Die Differenz aus Sedimentausttrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 82 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 542 854 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgeprägt. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffausttrag von etwa 7 200 m³ Lockervolumen. Das oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und das verklappte Material von durchschnittlich jährlich 1 200 m³ Lockervolumen sind zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 82). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen

relativ geringe weitere Sohleintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 erreichen die Erosionen oft flächig den Tertiärhorizont. Unterstrom des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle ebenfalls bis zur Tertiärschicht ein. Im Bereich vor dem Auslauf (Lechwehr Gersthofen) sinkt die Tertiärschicht etwas ab und es verbleibt ein gewisser Abstand zur Gewässersohle. Die maximale Erosionstiefe ist modelltechnisch durch die Tertiärschicht begrenzt (vgl. Kapitel 2.1), da die Sohlhöhenentwicklung im feinen Tertiärmaterial nicht simuliert werden kann. In der Realität könnte bei Erreichen des Tertiärhorizonts jedoch im schlimmsten Fall ein lokaler Sohldurchschlag erfolgen.

Abbildung 82 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls deutlich auf. Bereits in der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen einerseits bedingt durch die Begrenzung der maximalen Erosionstiefe durch den Tertiärhorizont und andererseits durch die Entfaltung der Wirkung der Geschiebezugabe wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich.

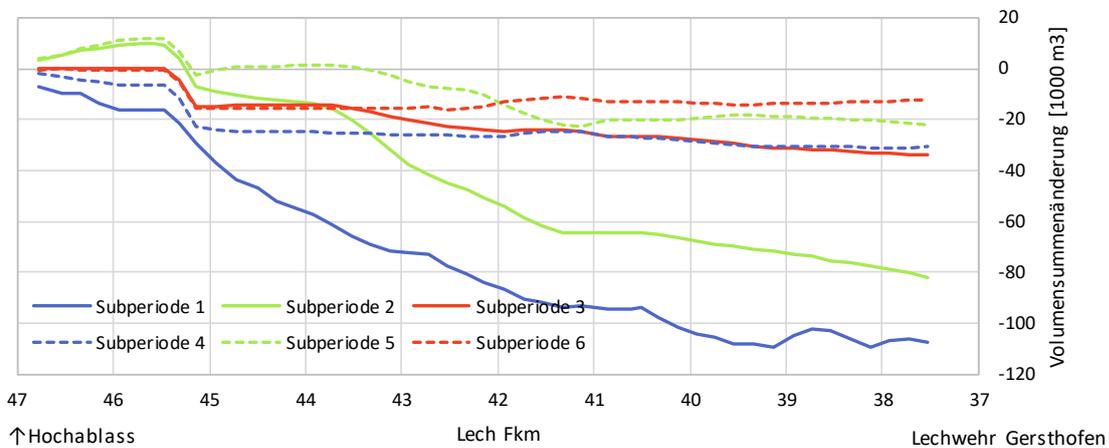


Abbildung 82: Volumensummenänderung, Variante II-A_R0x

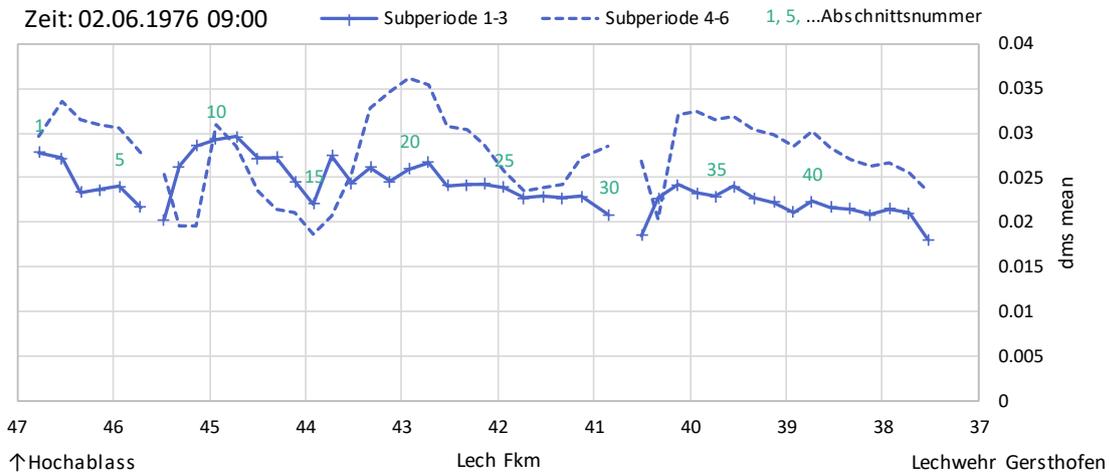


Abbildung 83: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

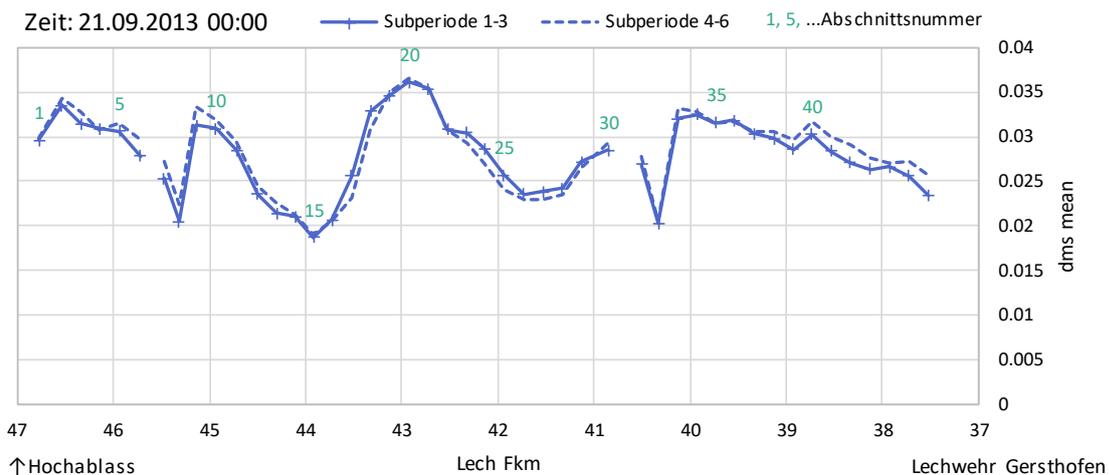


Abbildung 84: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 83 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das Füllmaterial der Rücksetzonen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 84) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

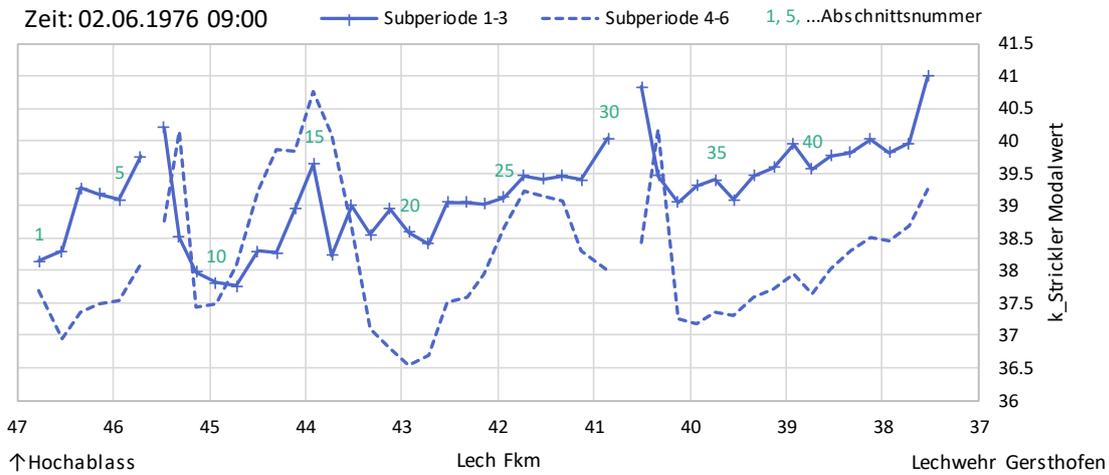


Abbildung 85: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

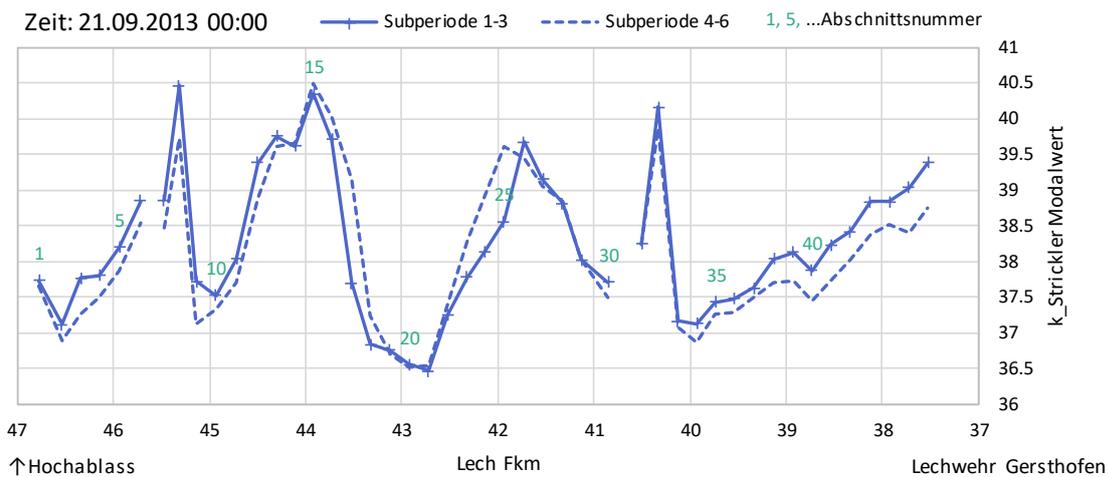


Abbildung 86: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 86) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.2.2 II-A_R1x Geschiebebezugabe fein, großer Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

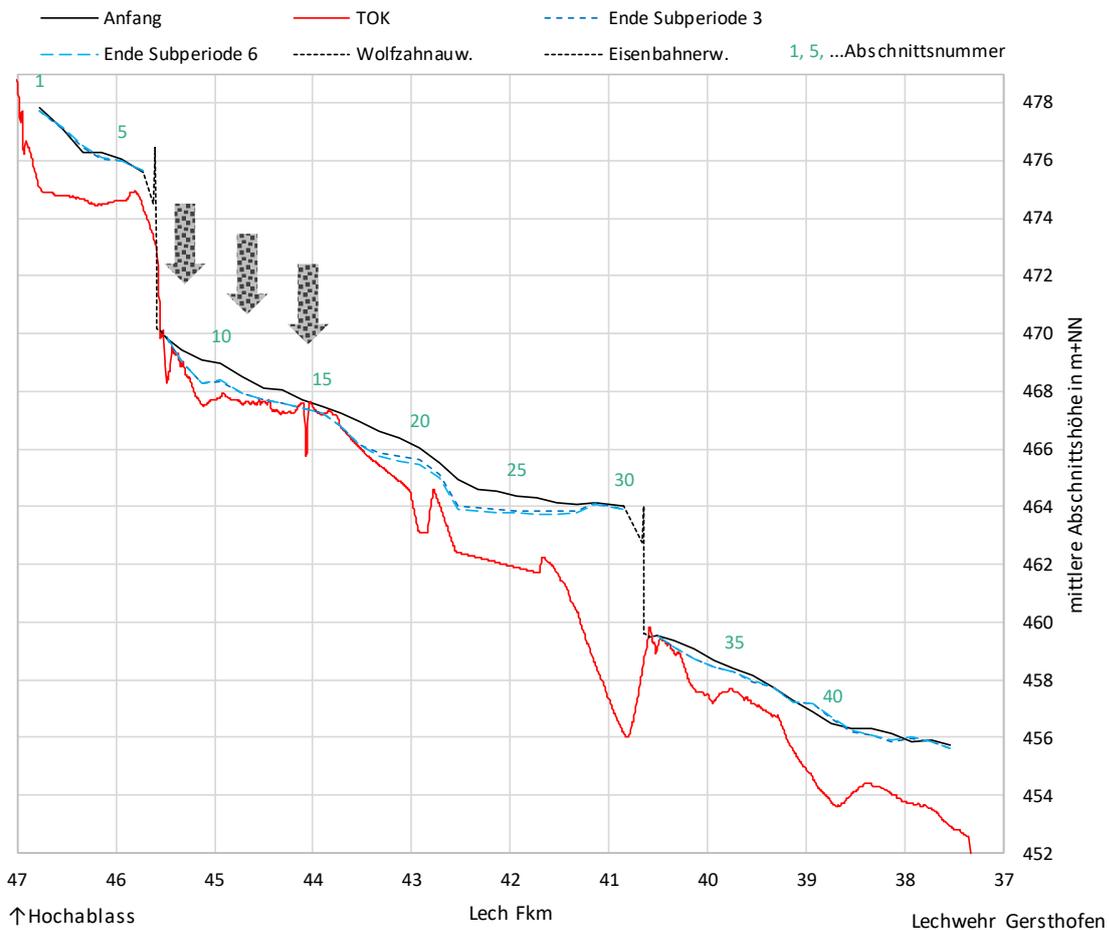


Abbildung 87: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-A_R1x, Geschiebebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 bis 14, Füllmaterial $d_m = 19.57$ mm

Tabelle 12: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8 bis 14 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat.
II-A_R11	38 475
II-A_R12	47 284
II-A_R13	44 705
II-A_R14	49 273
II-A_R15	42 933
II-A_R16	43 666
Summe	266 337

Tabelle 13: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfszahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-A_R11	12 330	27 001	101 431	118 984
II-A_R12	67 113	58 189	154 615	160 557
II-A_R13	46 637	47 098	99 170	94 722
II-A_R14	12 330	17 489	60 573	63 650
II-A_R15	67 113	56 241	130 198	124 592
II-A_R16	46 637	48 119	87 578	82 334
Summe	252 161	254 136	633 564	644 840

Tabelle 12 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 13 listet die Summen des eingetragenen, ausgehenden sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 88 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 644 840 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgehend. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 8 500 m³ Lockervolumen. Das oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und das verklappte Material von durchschnittlich jährlich 3 520 m³ Lockervolumen sind zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen gänzlich zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperioden 1 und 2 (Abbildung 88). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohlerosionen auf. Im Bereich zwischen dem

Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 erreichen die Erosionen oft flächig den Tertiärhorizont. Unterstrom des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle ebenfalls in einem relativ zur Sensitivitätsvariante II-A_R0x kleineren Bereich bis zur Tertiärschicht ein. Im Anschluss stromab bis zum Auslauf (Lechwehr Gersthofen) kann von einem dynamischen Sohlgleichgewicht ohne größere Anlandungen oder Erosionen gesprochen werden.

Abbildung 88 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls deutlich auf. In der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden entfaltet die Geschiebezugabe ihre Wirkung und sorgt für eine Abschwächung bzw. sogar für einen Stopp weiterer Erosionen.

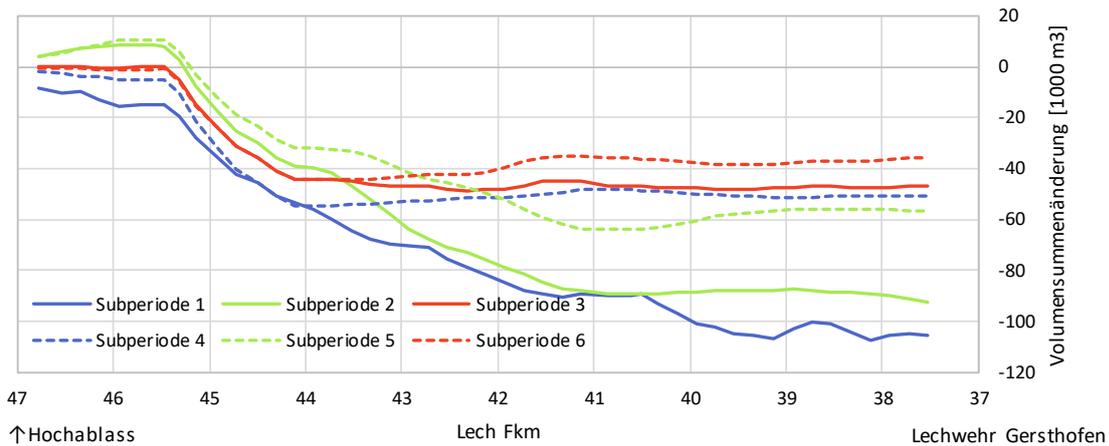


Abbildung 88: Volumensummendigramm, Variante II-A_R1x

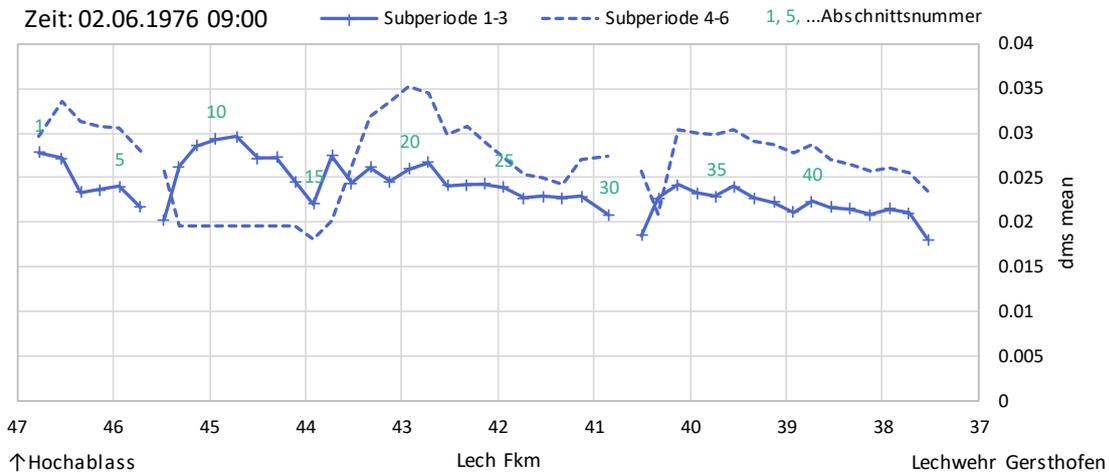


Abbildung 89: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

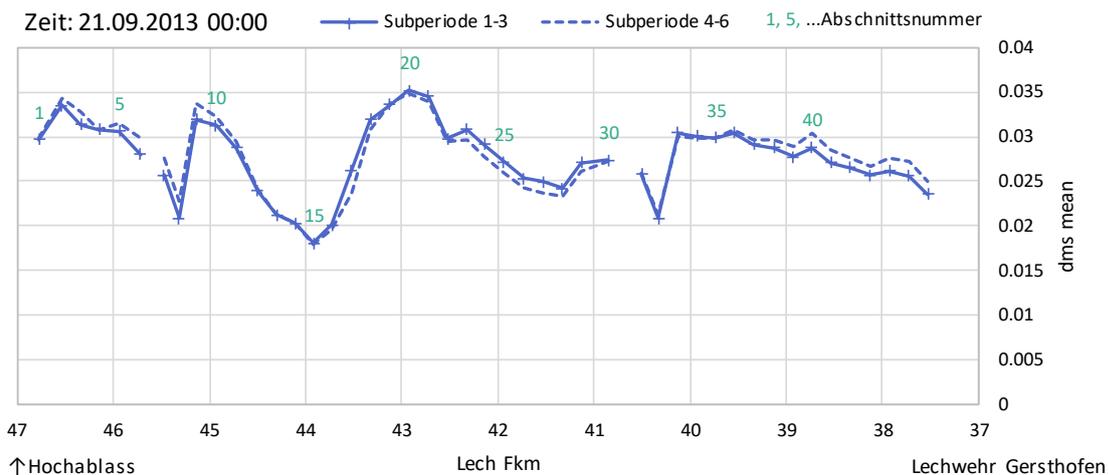


Abbildung 90: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 89 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das Füllmaterial der Rücksetzonen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 90) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

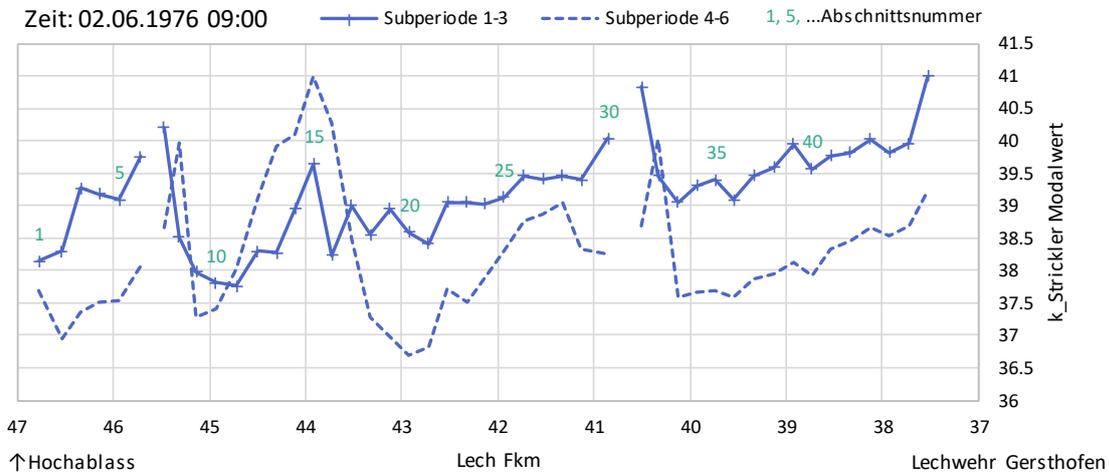


Abbildung 91: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

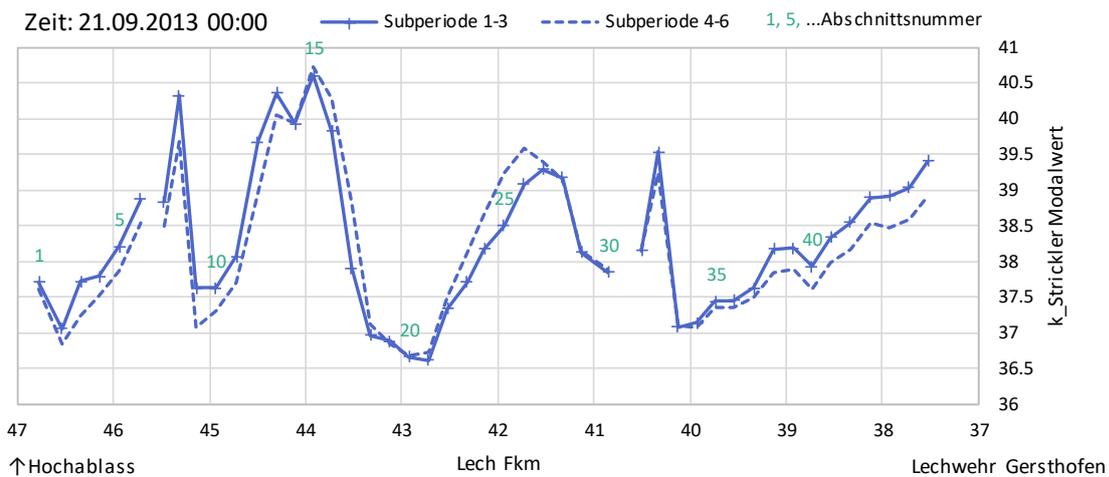


Abbildung 92: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationseende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 92) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.2.3 II-A_R2x Geschiebebezugabe grob, großer Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

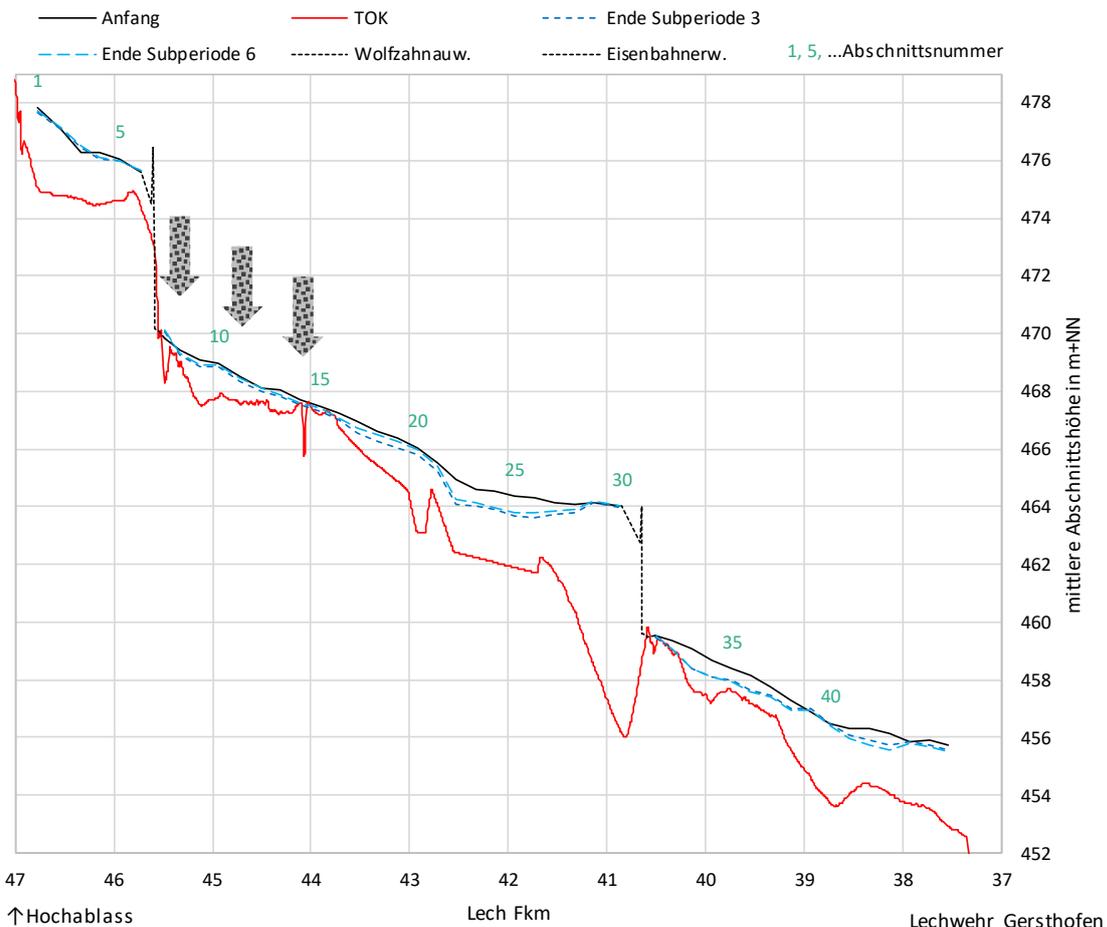


Abbildung 93: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-A_R2x, Geschiebebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 bis 14, Füllmaterial $d_m = 38.28$ mm

Tabelle 14: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8 bis 14 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat.
II-A_R21	38 475
II-A_R22	15 822
II-A_R23	14 790
II-A_R24	10 206
II-A_R25	14 678
II-A_R26	7 990
Summe	101 961

Tabelle 15: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfszahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-A_R21	12 330	27 001	101 431	118 984
II-A_R22	67 113	58 071	114 922	143 210
II-A_R23	46 637	47 341	55 251	71 106
II-A_R24	12 330	19 368	25 136	30 144
II-A_R25	67 112	55 055	55 684	66 233
II-A_R26	46 637	47 479	45 467	41 006
Summe	252 161	254 315	397 891	470 684

Tabelle 14 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 15 listet die Summen des eingetragenen, ausgehenden sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 94 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 470 684 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgehend. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 6 200 m³ Lockervolumen. Das oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und das verklappte Material von durchschnittlich jährlich 1 348 m³ Lockervolumen sind zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen gänzlich zu unterbinden. Allerdings können die Eintiefungen bedingt durch das gröbere Füllmaterial im Vergleich zu II-A_R1x reduziert werden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperioden 1 und 2 (Abbildung 94). In der zweiten Hälfte

der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohleintiefungen auf. Sogar im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 kann eine Verbesserung erzielt werden, wenngleich der Tertiärhorizont dennoch in begrenzten Bereichen erreicht wird. Unterstrom des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle kleinräumig bis zur Tertiärschicht ein. Im Anschluss stromab bis zum Auslauf (Lechwehr Gersthofen) treten durch den im Vergleich zu II-A_R1x geringeren Geschiebeeintrag aus den oberstrom liegenden Gebieten flächige Erosionen auf, die allerdings immer genügend Abstand zum Tertiärhorizont aufweisen.

Abbildung 94 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls - wenn auch weniger deutlich als in Abbildung 88 - auf. In der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden entfaltet die Geschiebezugabe ihre Wirkung und sorgt für eine Abschwächung bzw. sogar für einen Stopp weiterer Erosionen.

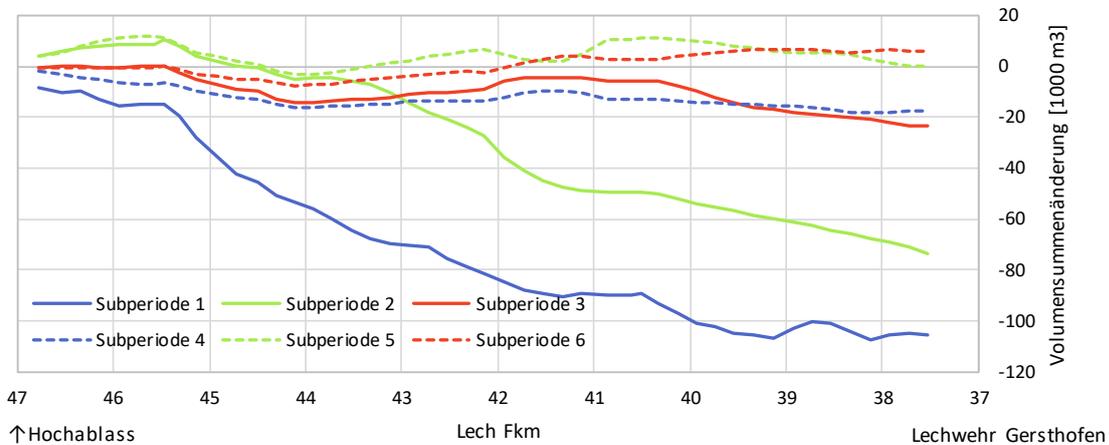


Abbildung 94: Volumensummendigramm, Variante II-A_R2x

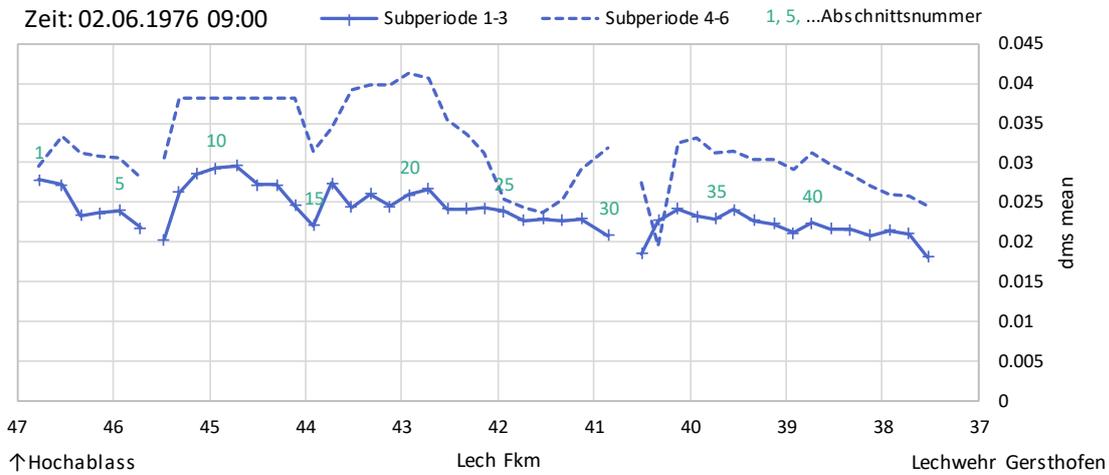


Abbildung 95: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

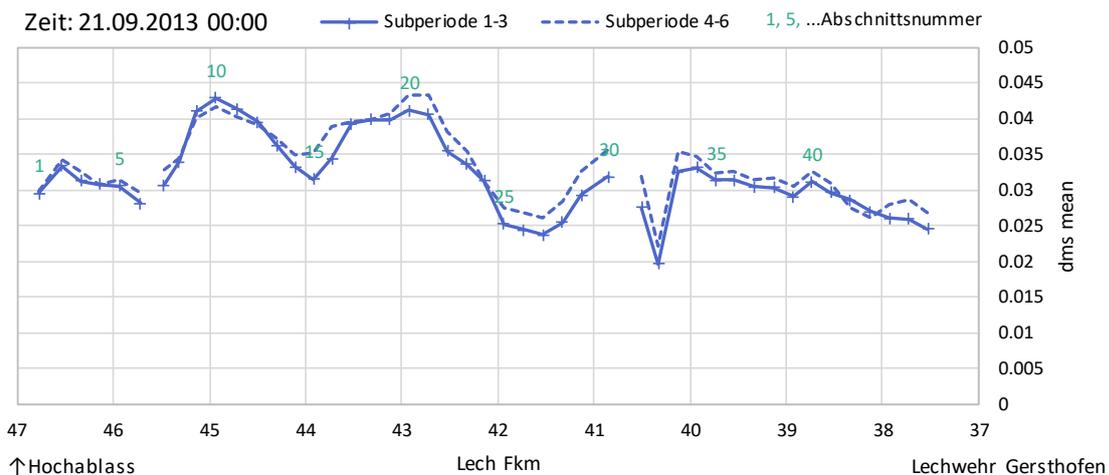


Abbildung 96: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 95 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das grobe Füllmaterial der Rücksetzzonen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 96) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

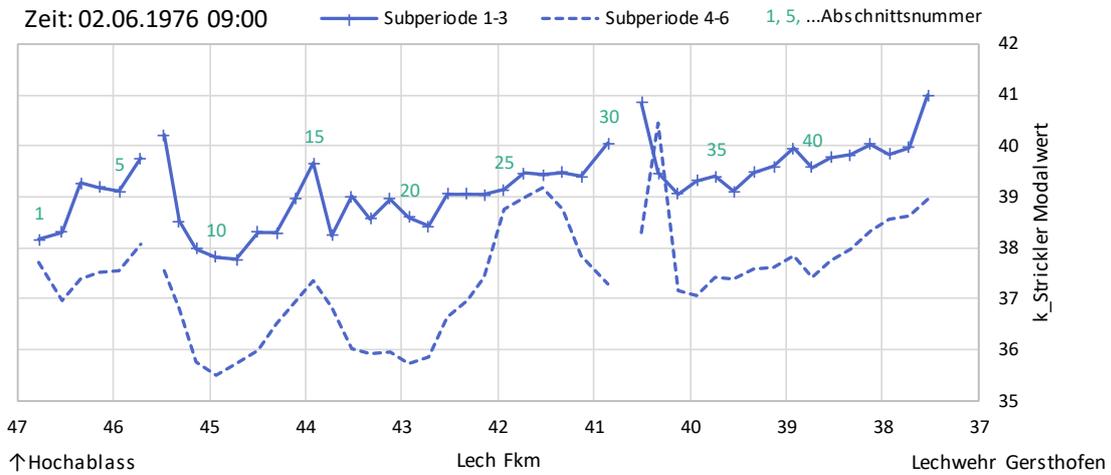


Abbildung 97: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

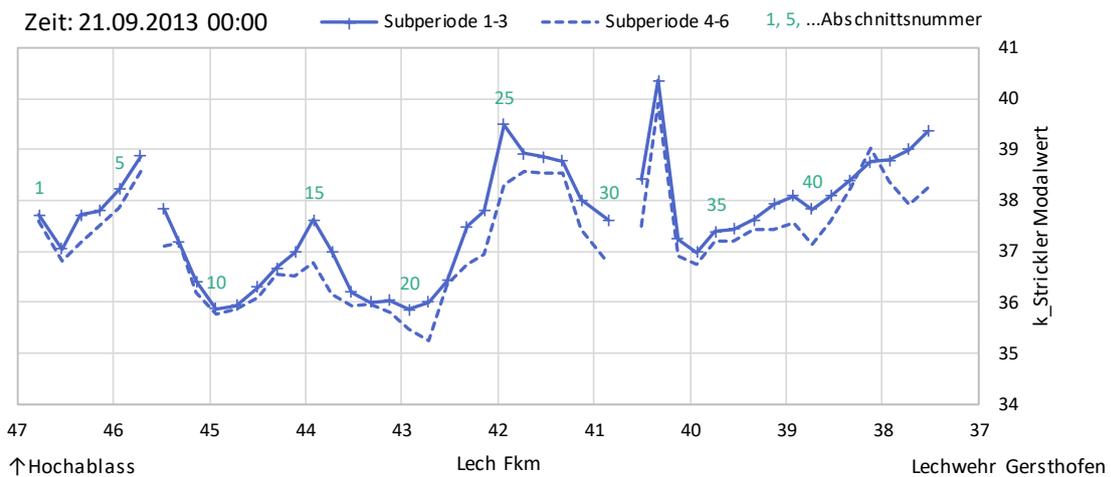


Abbildung 98: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 98) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.3 Variante II-B1

Bausteine (vgl. Erläuterungsbericht): Sohlrampe Fkm 42,6 + Sohlanhebung oberstrom

4.3.1 II-B1_R1x

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionsssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

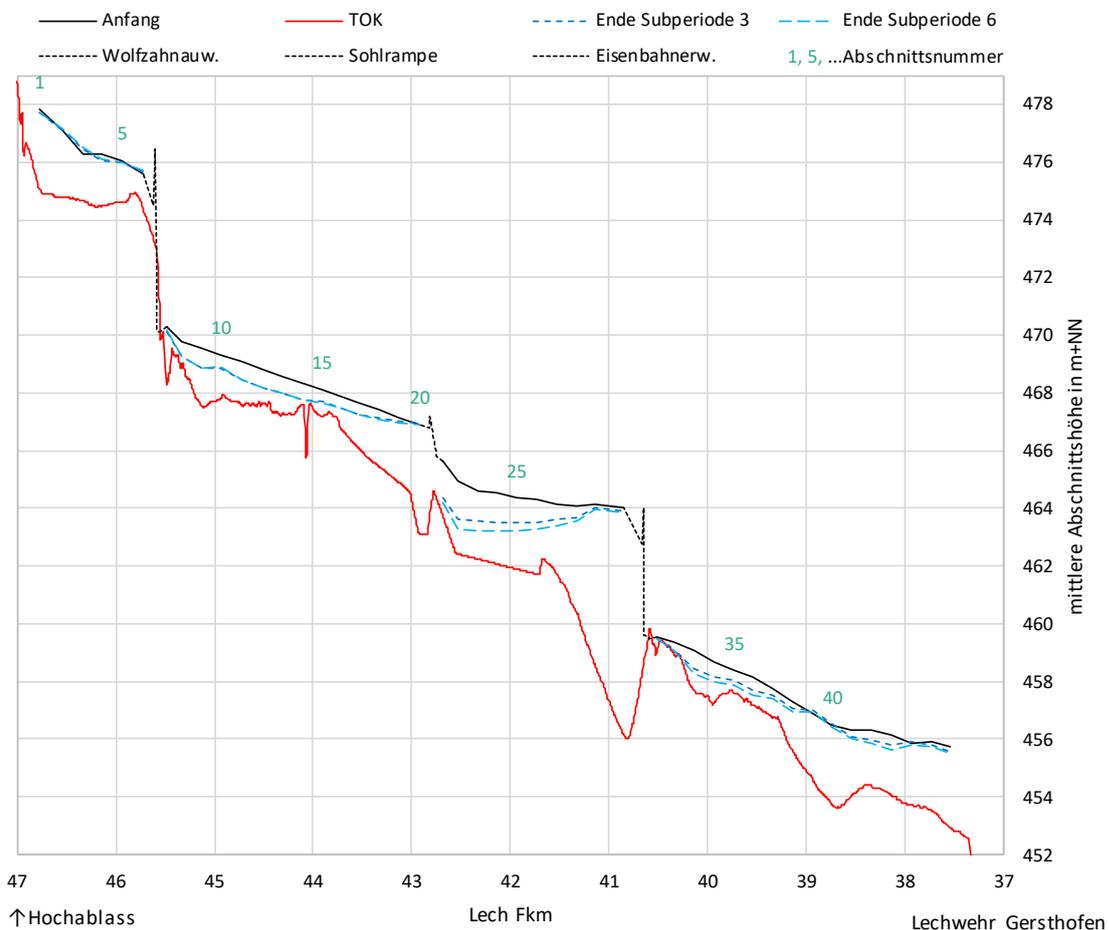


Abbildung 99: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-B1_R1x

Tabelle 16: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfzahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-B1_R11	12 330	28 575	90 784	111 545
II-B1_R12	67 113	57 248	123 242	143 327
II-B1_R13	46 637	46 891	70 724	78 005
II-B1_R14	12 330	19 014	31 067	38 919
II-B1_R15	67 113	53 106	68 412	77 793
II-B1_R16	46 637	49 057	46 053	50 825
Summe	252 161	253 892	430 282	500 414

Tabelle 16 listet die Summen des eingetragenen, ausgetragenen sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 100 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 500 414 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 6 600 m³ Lockervolumen. Die Kombination aus dem oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und der zwei Entwurfsbausteine Sohlrampe Fkm 42,6 und Sohlanhebung oberstrom ist zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 100). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohleintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 erreichen die Erosionen teilweise flächig den Tertiärhorizont. Unterstrom der Sohlrampe (Fkm 42,6) und des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle ebenfalls bis zur Tertiärschicht ein. Im Bereich vor dem Auslauf (Lechwehr Gersthofen) sinkt die Tertiärschicht etwas ab und es verbleibt ein gewisser Abstand zur Gewässersohle. Die maximale Erosionstiefe ist modelltechnisch durch die Tertiärschicht begrenzt (vgl. Kapitel 2.1), da die Sohlhöhenentwicklung im feinen Tertiärmaterial nicht simuliert werden kann. In der Realität könnte bei Erreichen des Tertiärhorizonts jedoch im schlimmsten Fall ein lokaler Sohldurchschlag erfolgen.

Abbildung 100 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Bereits in der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich. Die Sohle stabilisiert sich und weist nur noch eine geringe weitere Erosionstendenz auf.

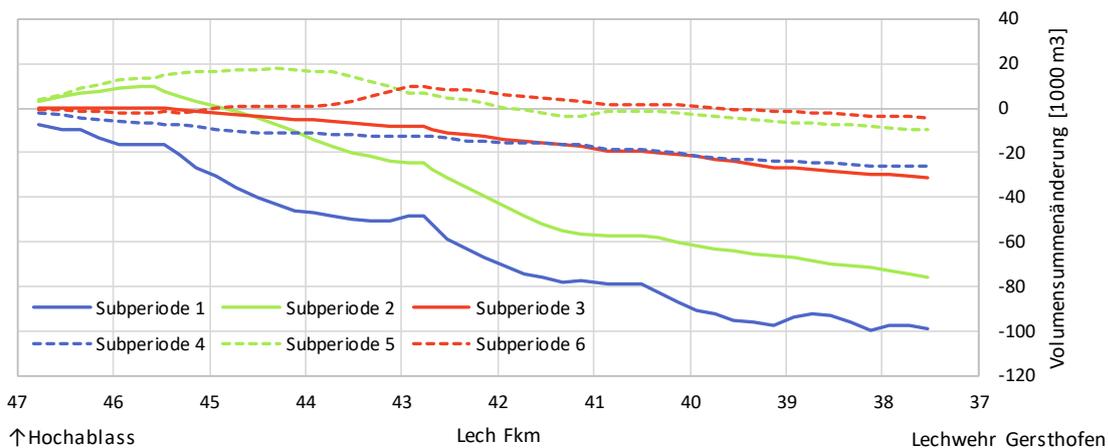


Abbildung 100: Volumensummendiagramm, Variante II-B1_R1x

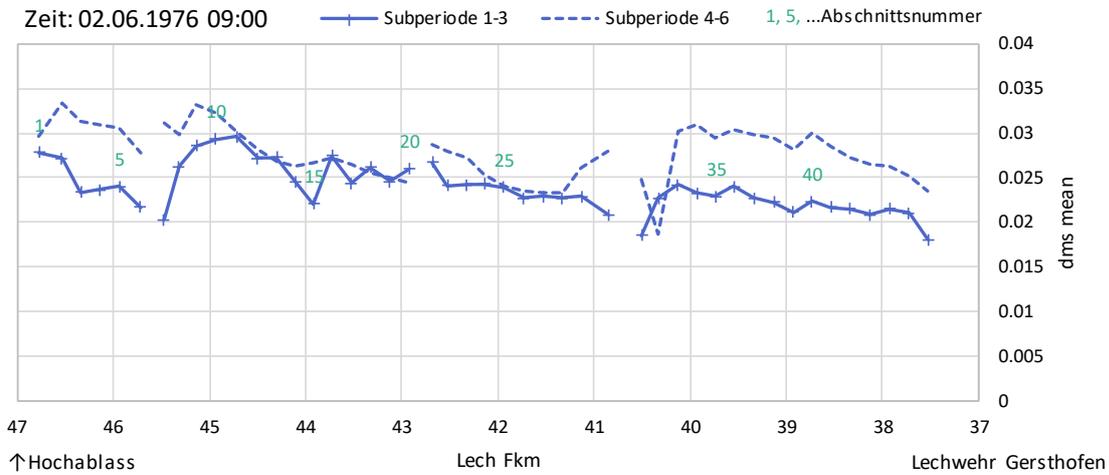


Abbildung 101: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

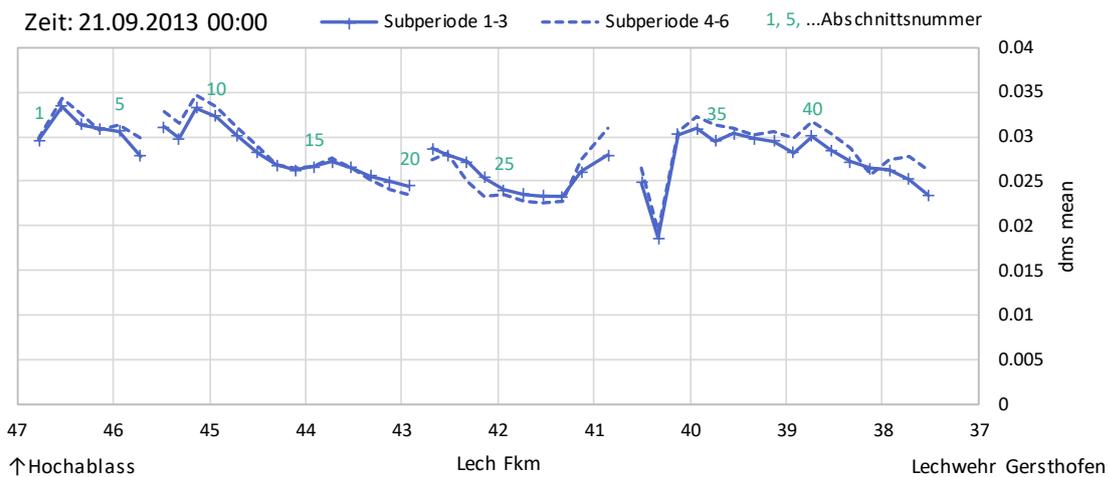


Abbildung 102: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 101 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 102) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

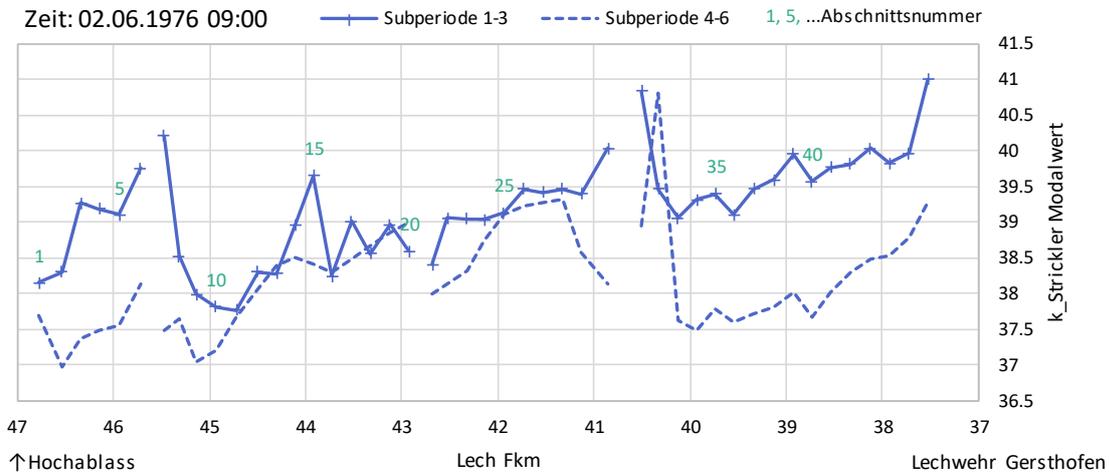


Abbildung 103: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

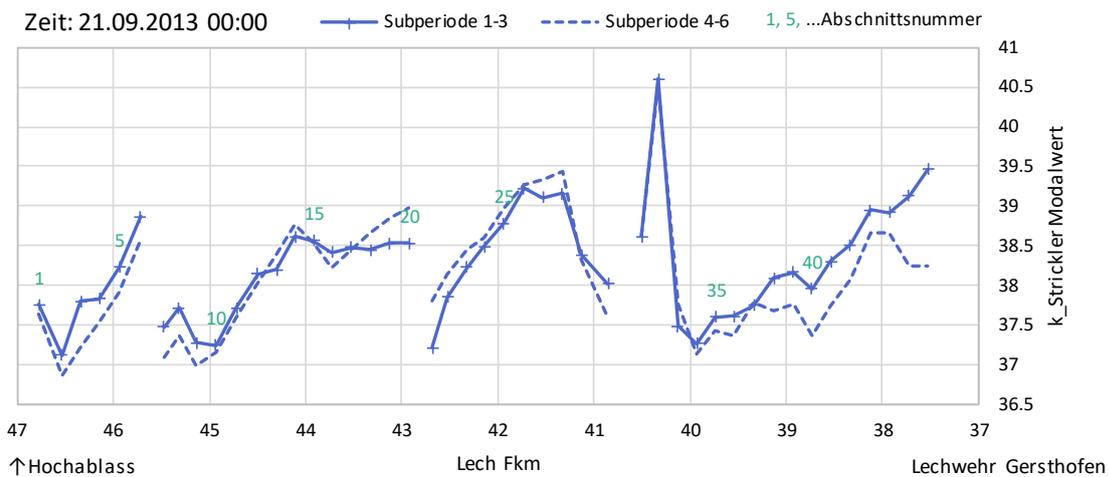


Abbildung 104: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 103 und Abbildung 104 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationseende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 104) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.4 Variante II-B2

Bausteine (vgl. Erläuterungsbericht): Sohlrampe Fkm 42,6 + Sohlanhebung oberstrom + Geschiebezugabe + Monitoring

4.4.1 II-B2_R1x Geschiebezugabe fein, kleiner Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

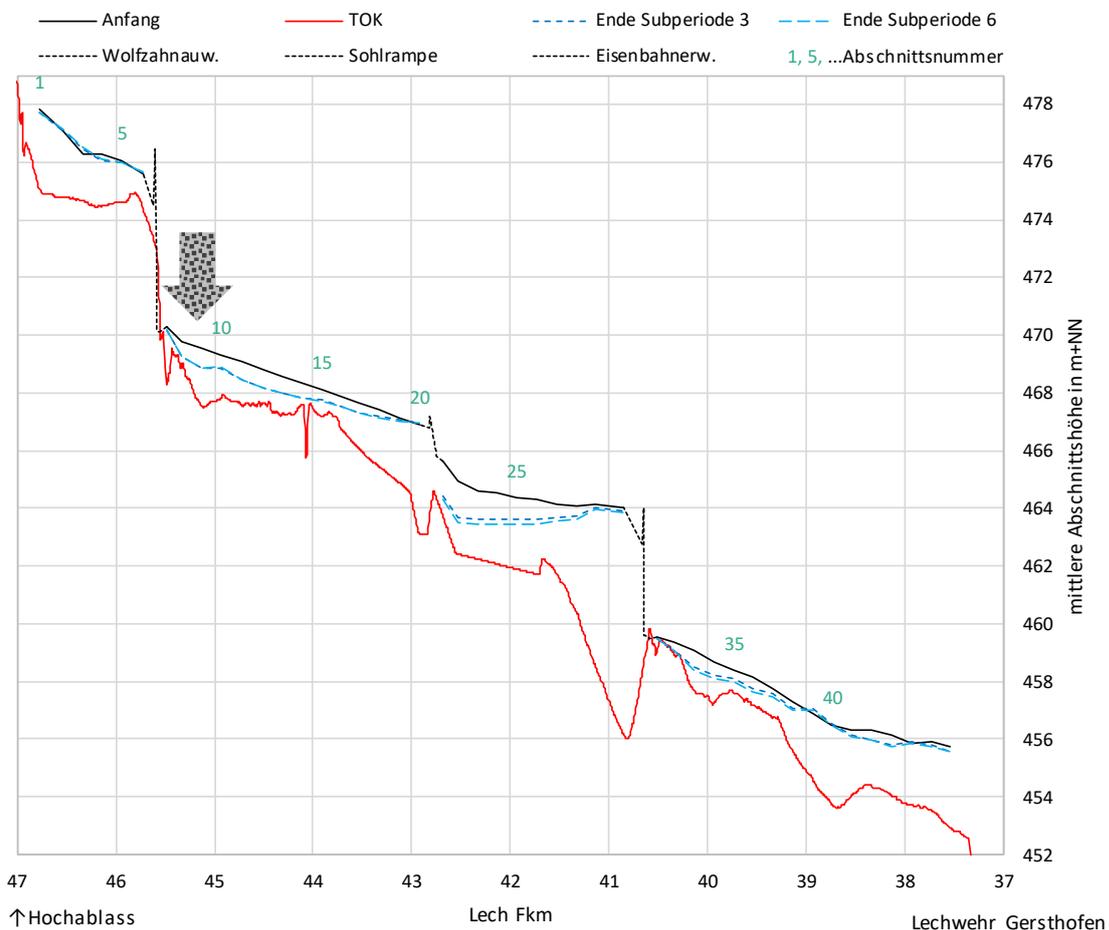


Abbildung 105: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-B2_R1x, Geschiebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 und 9, Füllmaterial $d_m = 19.57$ mm

Tabelle 17: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8 und 9 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat.
II-B2_R11	10 240
II-B2_R12	14 631
II-B2_R13	15 226
II-B2_R14	16 282
II-B2_R15	15 165
II-B2_R16	14 761
Summe	86 304

Tabelle 18: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfszahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-B2_R11	12 330	28 575	90 784	111 545
II-B2_R12	67 113	57 079	130 089	144 455
II-B2_R13	46 637	46 852	77 759	81 477
II-B2_R14	12 330	19 181	39 663	44 516
II-B2_R15	67 113	55 004	86 154	93 486
II-B2_R16	46 637	47 484	60 091	60 531
Summe	252 161	254 176	484 540	536 010

Tabelle 17 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 18 listet die Summen des eingetragenen, ausgeprägten sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 106 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 536 010 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgeprägt. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 7 100 m³ Lockervolumen. Die Kombination aus den Entwurfsbausteinen, dem oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und dem verklappten Material von durchschnittlich jährlich 1 141 m³ Lockervolumen ist zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 106). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Schleintiefungen auf. Im

Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 erreichen die Erosionen teilweise flächig den Tertiärhorizont. Unterstrom der Sohlrampe (Fkm 42,6) und des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle ebenfalls bis zur Tertiärschicht ein. Im Bereich vor dem Auslauf (Lechwehr Gersthofen) sinkt die Tertiärschicht etwas ab und es verbleibt ein gewisser Abstand zur Gewässersohle. Die maximale Erosionstiefe ist modelltechnisch durch die Tertiärschicht begrenzt (vgl. Kapitel 2.1), da die Sohlhöhenentwicklung im feinen Tertiärmaterial nicht simuliert werden kann. In der Realität könnte bei Erreichen des Tertiärhorizonts jedoch im schlimmsten Fall ein lokaler Sohldurchschlag erfolgen.

Abbildung 106 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls deutlich auf. Bereits in der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen einerseits bedingt durch die Begrenzung der maximalen Erosionstiefe durch den Tertiärhorizont und andererseits durch die Entfaltung der Wirkung der Geschiebezugabe wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich.

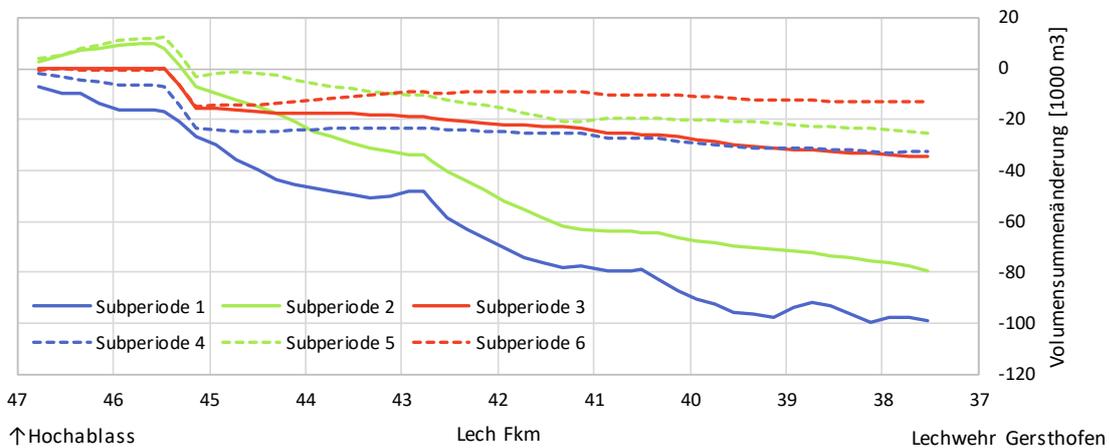


Abbildung 106: Volumensummendiagramm, Variante II-B2_R1x

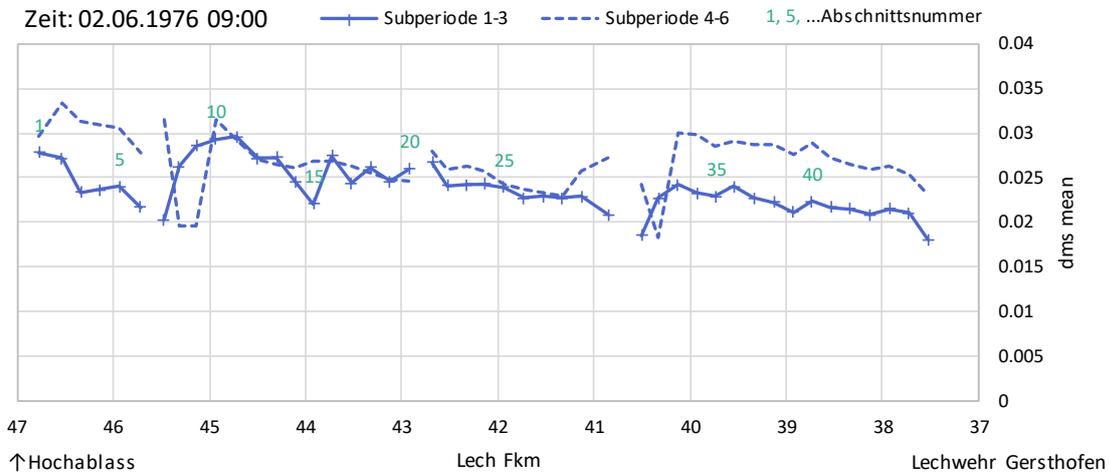


Abbildung 107: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

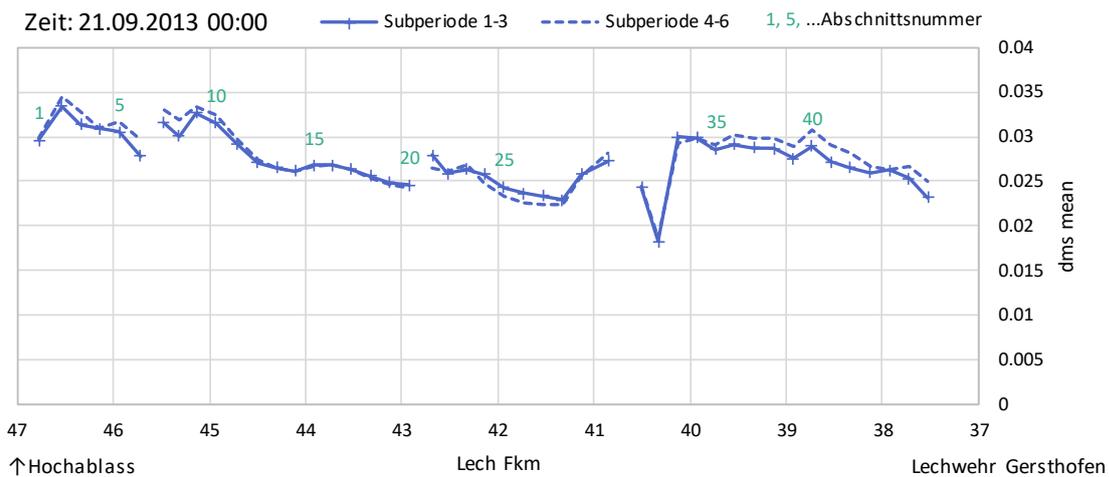


Abbildung 108: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 107 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das Füllmaterial der Rücksetzungen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 108) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

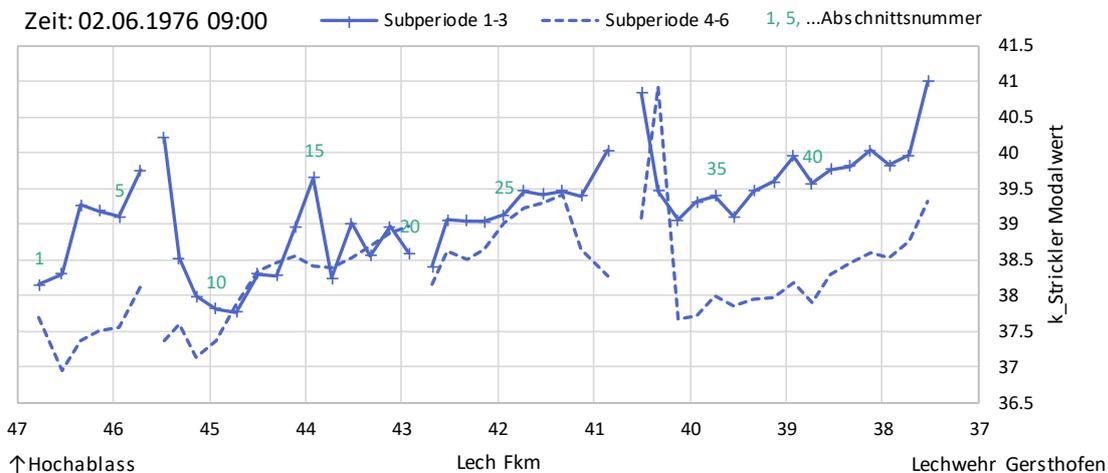


Abbildung 109: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

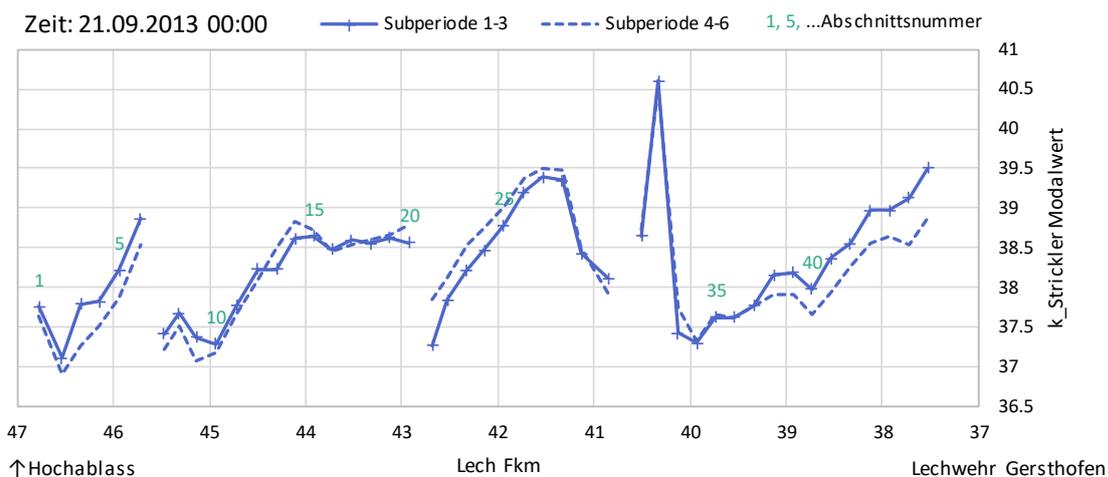


Abbildung 110: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 109 und Abbildung 110 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationseende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 110) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.4.2 II-B2_R2x Geschiebebezugabe grob, mittelgroßer Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

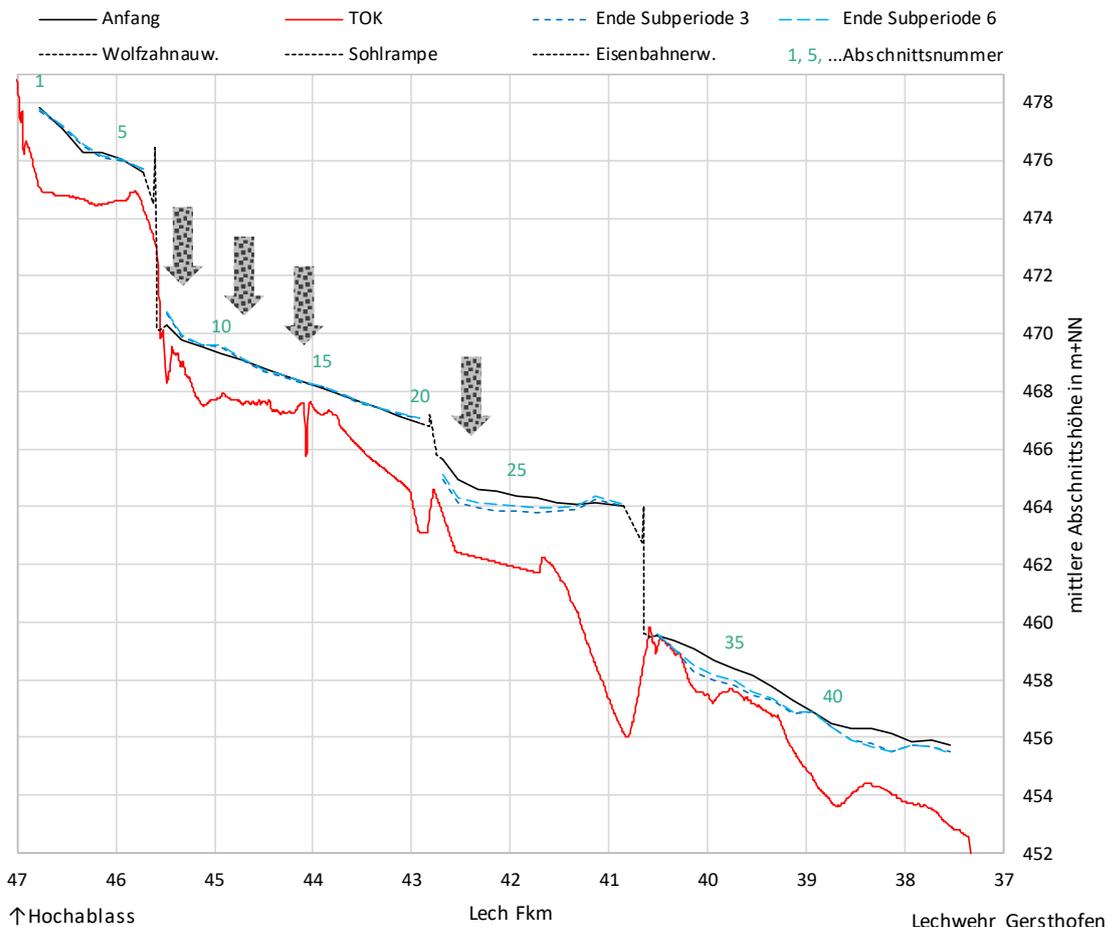


Abbildung 111: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-B2_R2x, Geschiebebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 bis 14 sowie 21 und 22, Füllmaterial $d_m = 38.28$ mm

Tabelle 19: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8 bis 14 sowie 21 und 22 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat. Abschnitte 8-14	Verklapp-Mat. Abschnitte 21 u. 22
II-B2_R21	40 226	10 052
II-B2_R22	19 693	14 836
II-B2_R23	9 211	11 254
II-B2_R24	6 253	8 956
II-B2_R25	8 262	9 698
II-B2_R26	2 615	8 725
Summe	86 260	63 521

Tabelle 20: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfzahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-B2_R21	12 331	26 914	86 873	111 758
II-B2_R22	67 112	54 547	79 778	129 845
II-B2_R23	46 637	46 392	46 241	60 338
II-B2_R24	12 331	19 273	20 886	24 691
II-B2_R25	67 113	54 162	53 355	56 717
II-B2_R26	46 637	47 655	46 778	32 867
Summe	252 161	248 943	333 910	416 217

Tabelle 19 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 20 listet die Summen des eingetragenen, ausgetragenen sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 112 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 416 217 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 5 500 m³ Lockervolumen. Die Kombination aus den Entwurfsbausteinen, dem oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und dem groben verklappten Material von durchschnittlich jährlich 1 979 m³ Lockervolumen ist noch immer zu wenig, um großflächige Sohlerosionen gänzlich zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 112). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe

weitere Sohleintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und der Sohlrampe bleibt die Sohle stabil. Unterstrom der Sohlrampe (Fkm 42,6) und des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle allerdings teilweise flächig ein. In einem kleinen Bereich unterhalb des Wolfzahnauwehrs wird die Tertiärschicht erreicht.

Abbildung 112 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls auf. Bereits in der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab der Sohlrampe zeigt sich jedoch erneut eine Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen bedingt durch die Entfaltung der Wirkung der Geschiebezugabe wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich.

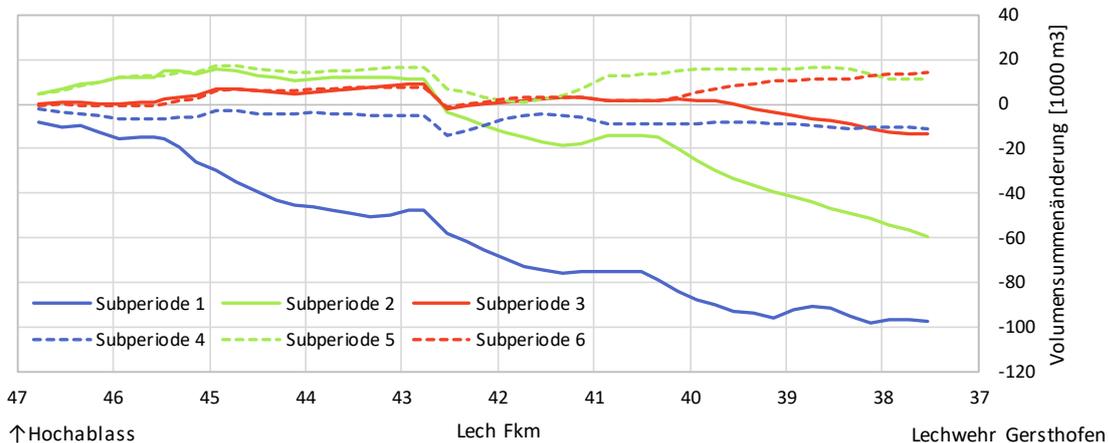


Abbildung 112: Volumensummenendiagramm, Variante II-B2_R2x

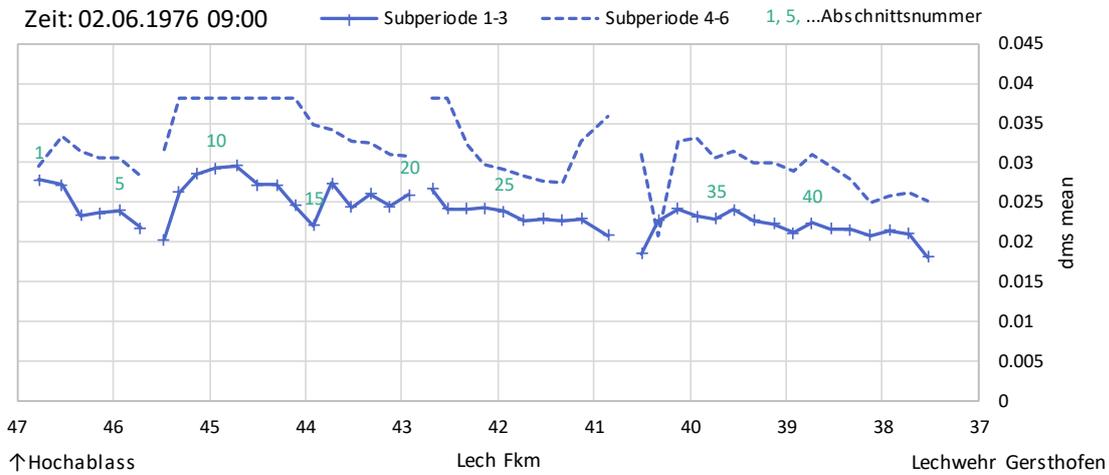


Abbildung 113: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

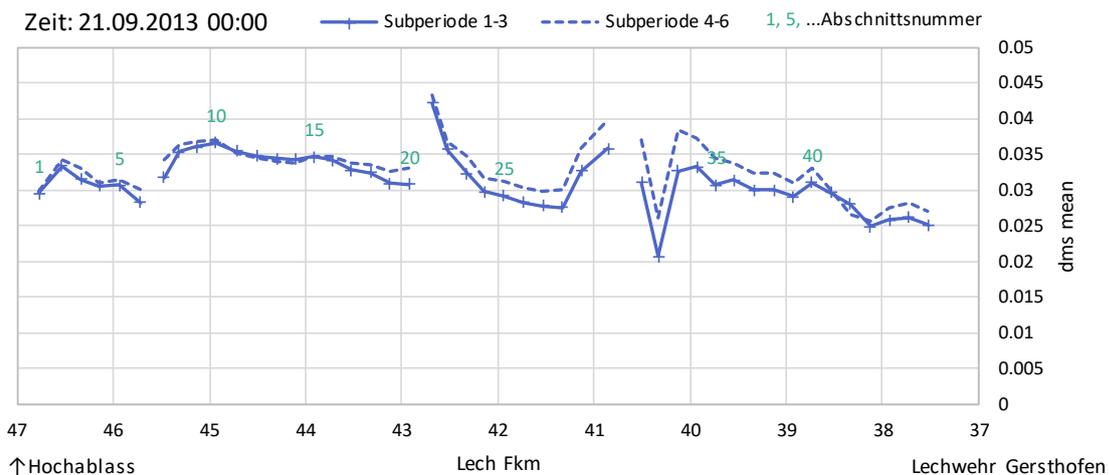


Abbildung 114: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 113 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das grobe Füllmaterial der Rücksetzzonen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 114) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

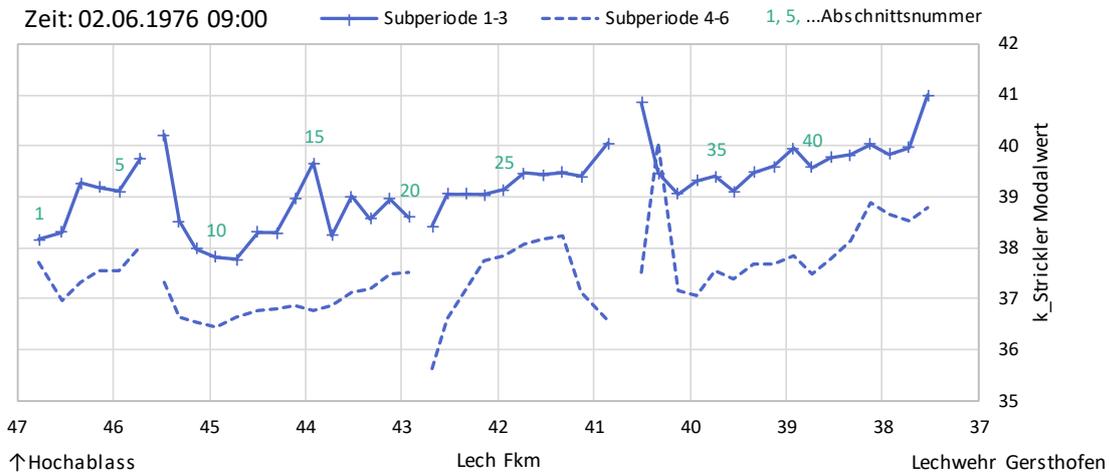


Abbildung 115: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

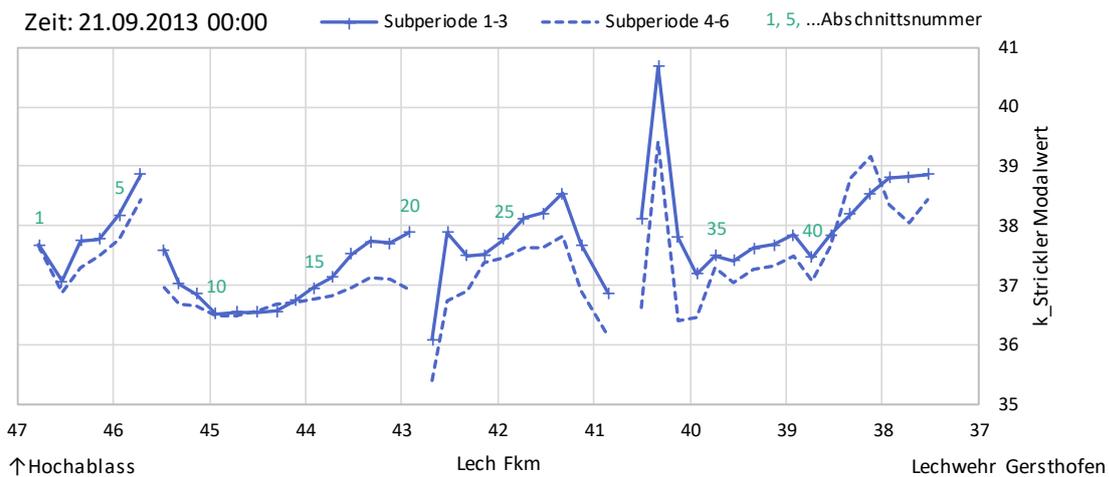


Abbildung 116: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 115 und Abbildung 116 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 116) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

4.4.3 II-B2_R3x Geschiebebezugabe grob, großer Bereich

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

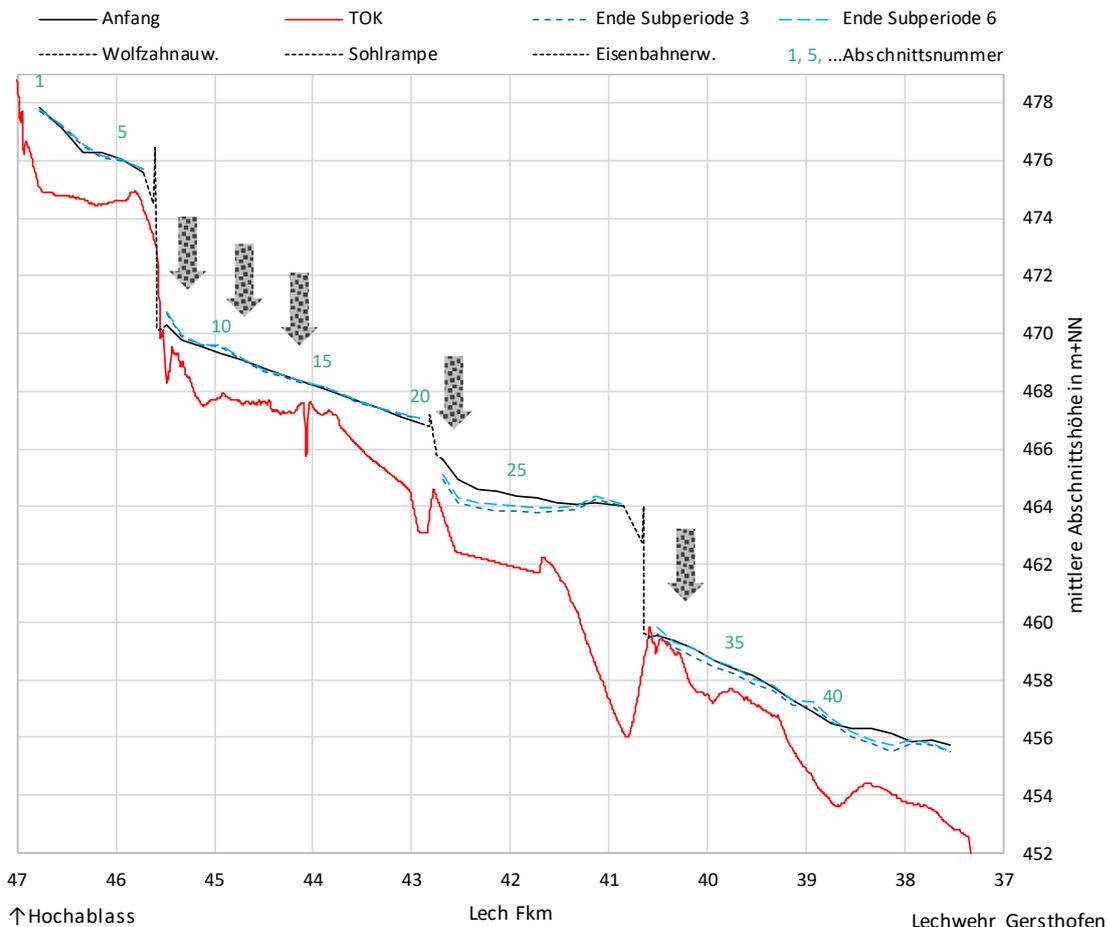


Abbildung 117: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-B2_R3x, Geschiebebezugabe über Rücksetzung der Abschnitte 8 bis 14, 21 & 22, sowie 32 & 33, Füllmaterial $d_m = 38.28$ mm

Tabelle 21: Summen des verklappten Sediments in m³ Lockervolumen in den Abschnitten 8-14, 21 & 22, sowie 32 & 33 je Subperiode und insgesamt

	Verklapp-Mat. Abschn. 8-14, 21 & 22	Verklapp-Mat. Abschnitte 32 u. 33
II-B2_R31	48 976	8 749
II-B2_R32	28 698	8 936
II-B2_R33	15 631	6 530
II-B2_R34	10 078	3 858
II-B2_R35	12 463	4 141
II-B2_R36	3 352	727
Summe	119 198	32 941

Tabelle 22: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfzahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-B2_R31	12 331	26 914	86 873	111 758
II-B2_R32	67 113	54 660	79 822	116 678
II-B2_R33	46 637	46 141	46 171	48 936
II-B2_R34	12 331	19 338	20 825	20 443
II-B2_R35	67 113	54 124	53 645	48 704
II-B2_R36	46 637	47 653	46 822	31 593
Summe	252 161	248 831	334 157	378 112

Tabelle 21 enthält die Zahlenwerte der verklappten Sedimentmengen. Tabelle 22 listet die Summen des eingetragenen, ausgetragenen sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 118 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 378 112 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 5 000 m³ Lockervolumen. Mit der Kombination aus den Entwurfsbausteinen, dem oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und dem groben verklappten Material von durchschnittlich jährlich 2 011 m³ Lockervolumen wird ein dynamisches Sohlgleichgewicht erreicht. Großflächige Sohlerosionen in Bereichen mit geringer Kiesauflage über der Tertiärschicht können wirkungsvoll unterbunden

werden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 118). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohleintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und der Sohlrampe bleibt die Sohle stabil. Unterstrom der Sohlrampe (Fkm 42,6) und des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle allerdings teilweise ein. Stromab des Wolfzahnauwehrs ist die Sohle stabil.

Abbildung 118 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Das verklappte Material scheint in dieser Bilanz ebenfalls auf. In der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab der Sohlrampe zeigt sich jedoch erneut eine Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen bedingt durch die Entfaltung der Wirkung der Geschiebezugabe wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich.

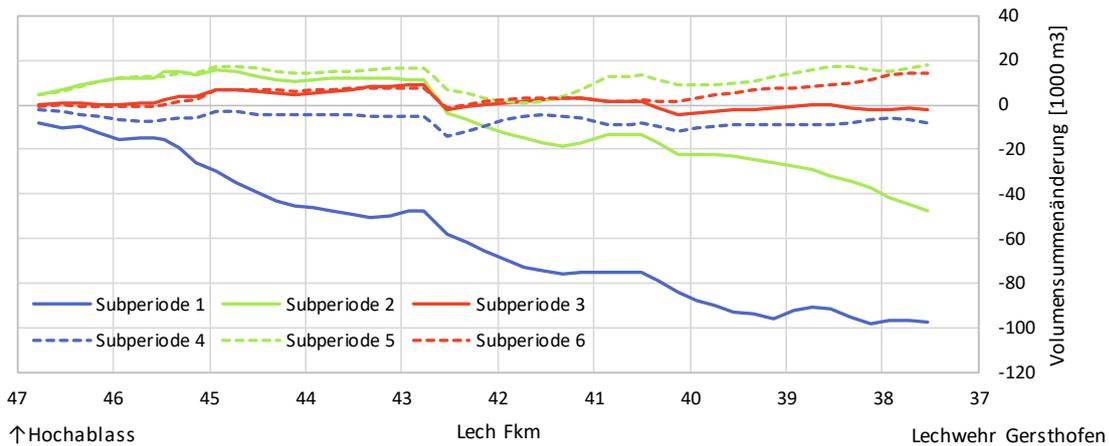


Abbildung 118: Volumensummendiagramm, Variante II-B2_R3x

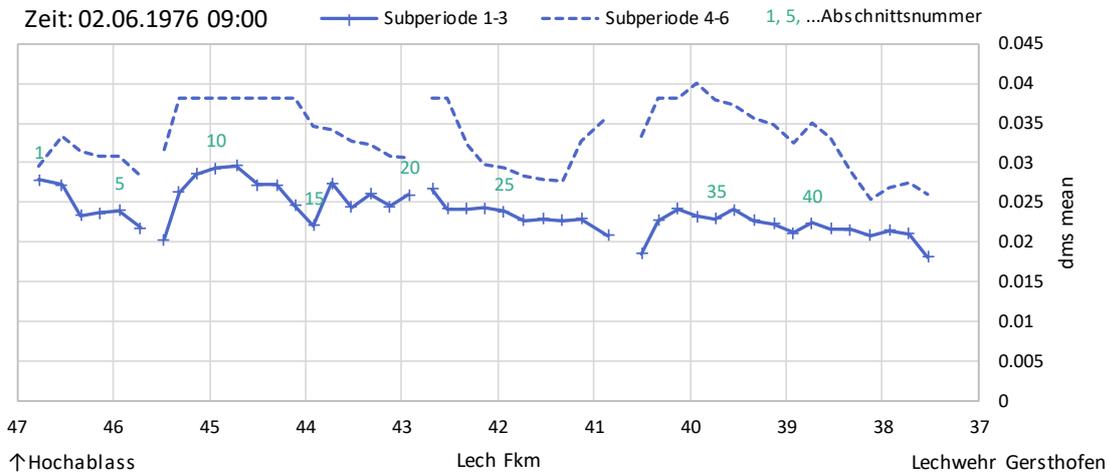


Abbildung 119: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

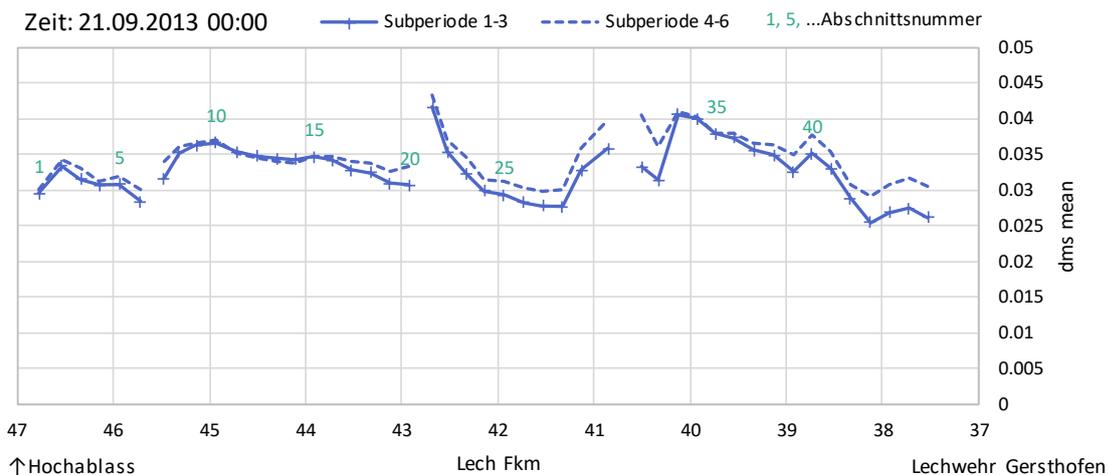


Abbildung 120: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 119 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Hier ist gut das grobe Füllmaterial der Rücksetzzonen zu sehen. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 120) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren.

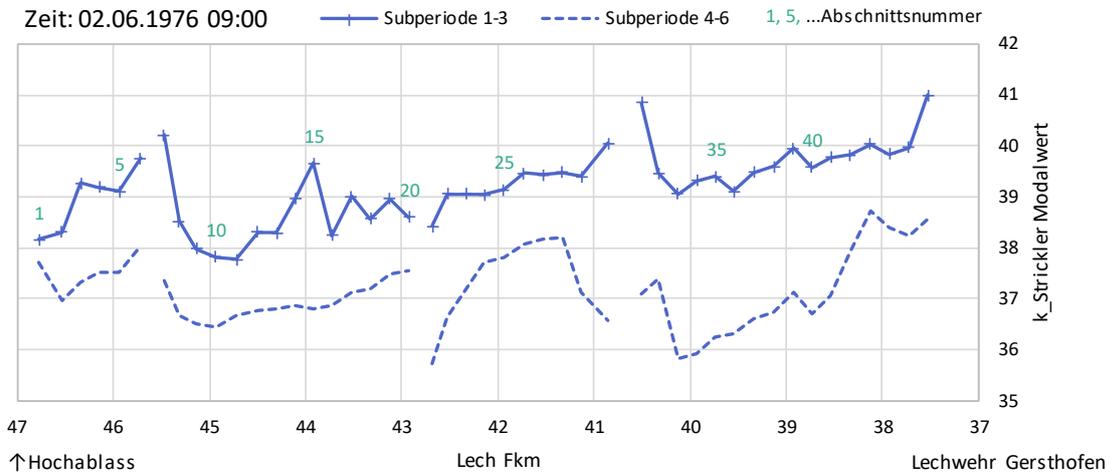


Abbildung 121: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

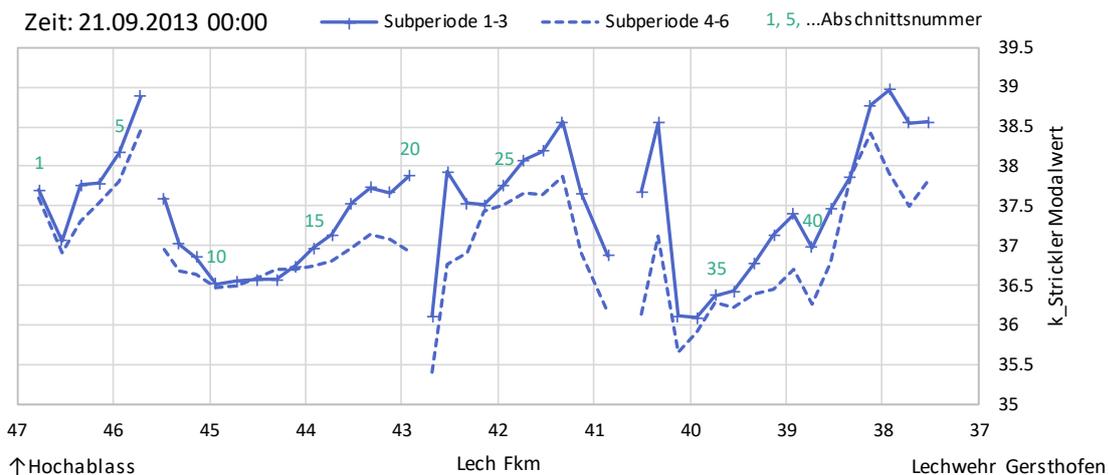


Abbildung 122: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 121 und Abbildung 122 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationende. Der Vergleich von k_{St} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 122) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerte stabilisieren.

Die mittlere spezifische Transportrate q_B des Mehrkornmodells der Software HYDRO_FT-2D nach Meyer-Peter, Müller und Hunziker kann indirekt für jeden Homogenabschnitt (Tabelle 27) und zu jedem Zeitschritt (Tabelle 26), zu denen ein

Ausschreiben flächiger Ergebnisse erfolgt, berechnet werden. Dazu werden je Homogenabschnitt die flächengewichteten Mittelwerte gemäß Klar (2016)², Kapitel 2.8 aller Netzknoten der Parameter d_{ms} (mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht), d_{mo} (mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht) und $FA_{AL,i}$ (Anteile der Kornklasse i in der Austauschschicht), sowie das Energieliniengefälle I_E gemäß Klar (2016)², Kapitel 3.4 ermittelt und die spezifische Transportrate q_B nach Klar (2016)², Kapitel 2.3.5, Gleichung 2.24 berechnet. Abbildung 123 zeigt beispielhaft q_B am 17.07.1980 um 04:00 Uhr bei 197 m³/s Zufluss am Hochablass beim zweiten Durchlauf der ersten Subperiode (Kapitel 5.1) entlang des Längsschnittes. Selbst bei solch geringen Abflüssen wird Geschiebe in einigen Homogenabschnitten mobilisiert.

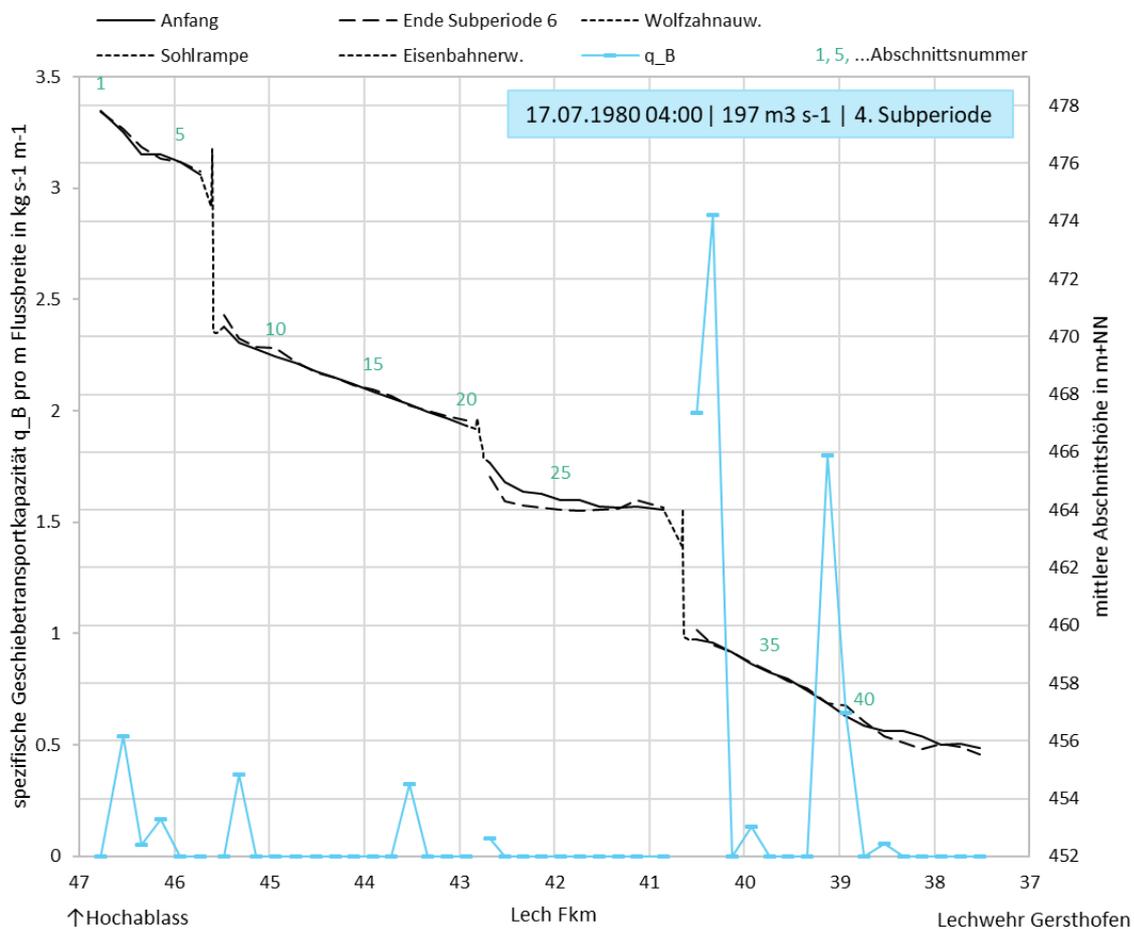


Abbildung 123: Längsschnitt der spezifischen Transportrate q_B , sowie der mittleren Abschnittshöhen am Simulationsanfang und -ende, Planungsbereich II

² Klar, Robert (2016): Langzeitsimulation des Geschiebetransports in alpinen Tälern: Weiterentwicklung von Methoden zur Modellierung der langfristigen Sohlagenentwicklung und zur Ermittlung von Hochwassergefahren in inneralpinen Tälern. Innsbruck: innsbruck university press (IUP). ISBN 978-3-903122-66-6. (<http://diglib.uibk.ac.at/ulbtirola/content/titleinfo/2556531>)

4.5 Variante II-B3

Bausteine (vgl. Erläuterungsbericht): Sohlrampe Fkm 42,6 + Sohlanhebung oberstrom + Geschiebezugabe + Monitoring + „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“

Die Variante II-B3 unterscheidet sich geometrisch von der Variante II-B1 bzw. II-B2 nur durch die „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“ (Abbildung 8). Neben diesem Unterschied in der Bathymetrie, fehlt in der Variante II-B1 im Vergleich zu den Varianten II-B2 und II-B3 der Baustein der Geschiebezugabe ergänzend zum Geschiebeeintrag aus dem Planungsbereich I.

Eine wesentliche Frage ist nun, inwieweit sich die geometrische „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“ morphologisch auswirkt. Zur Beantwortung werden zunächst im folgenden Kapitel 4.5.1 die Ergebnisse einer Langzeitberechnung zur Prognose der Sohlentwicklung der Variante II-B3 ohne Geschiebezugabe präsentiert. Im Vergleich dieser Ergebnisse mit jenen der Planvariante II-B1 (Kapitel 4.3.1) werden die reinen Auswirkungen des geometrischen Bathymetrie-Unterschieds der Aufweitung ohne Verfälschung anderer Einflüsse sichtbar. In Kapitel 4.5.2 werden schließlich die Schlussfolgerungen für die weitere Modellierung der Variante II-B3 gezogen. Stellt sich heraus, dass die Ergebnisse sehr ähnlich sind, kann konsequenterweise abgeleitet werden, dass sich alle Sensitivitätsvarianten II-B3 mit Geschiebezugabe nicht bzw. nur unwesentlich von jenen der Sensitivitätsvarianten II-B2 (Kapitel 4.4) unterscheiden würden. In diesem Fall gelten die Erkenntnisse der Geschiebetransportsimulationen der Planvariante II-B2 im Kapitel 4.4 folgerichtig ebenso für die Planvariante II-B3.

4.5.1 II-B3 ohne Geschiebezugabe

Die folgende Abbildung zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung, nach den ersten drei Subperioden (vgl. Kapitel 5.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6). Außerdem sind die erosionsssicher modellierten Sohlrampen, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 5.2 eingezeichnet.

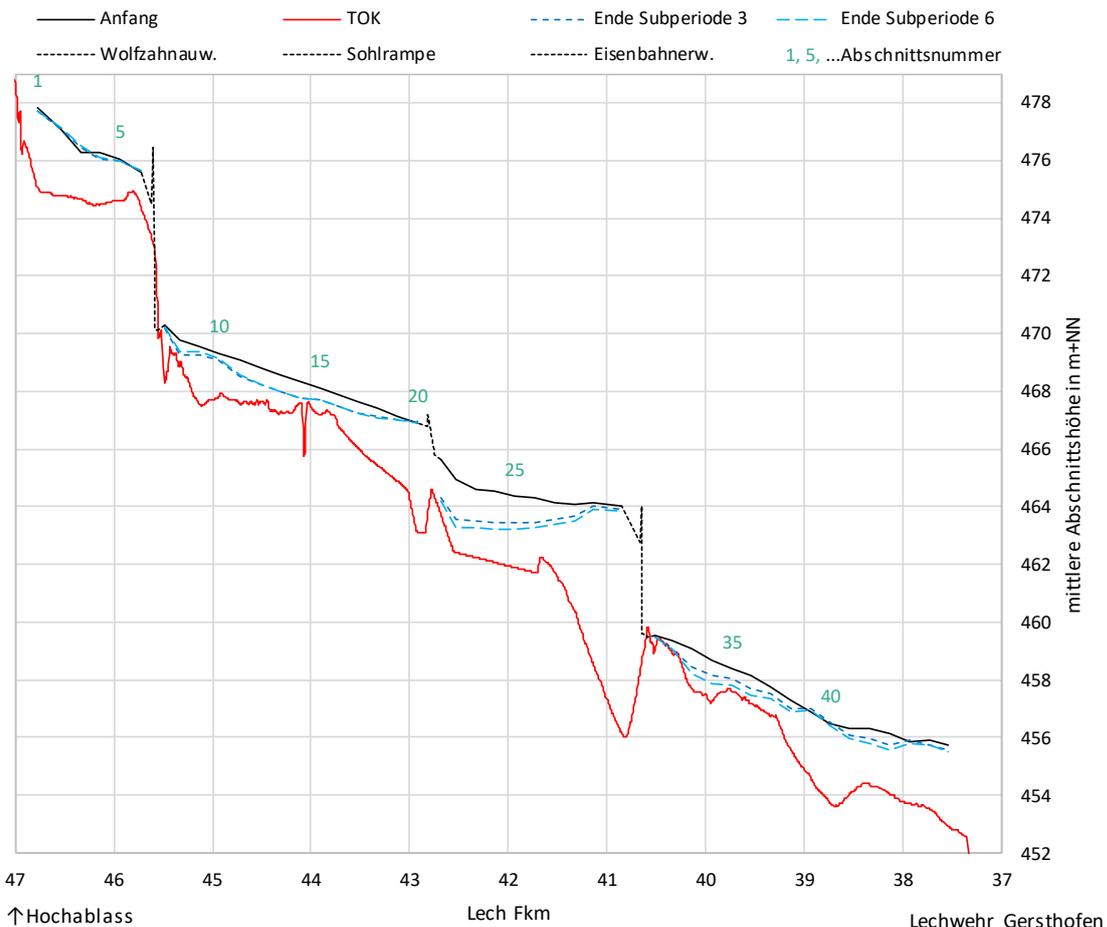


Abbildung 124: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 der Variante II-B3_R1x

Tabelle 23: Summen des transportierten Sediments in m³ Lockervolumen am Zu- und Auslauf sowie durch die Wehre je Subperiode und insgesamt

	Hochablass Zulauf	Eisenbahner- wehr	Wolfzahnau- wehr	Lechwehr Gersthofen
II-B3_R11	12 331	28 735	88 469	110 019
II-B3_R12	67 113	57 195	120 370	141 867
II-B3_R13	46 637	46 795	66 016	76 843
II-B3_R14	12 331	19 162	29 888	36 959
II-B3_R15	67 113	55 013	64 643	77 282
II-B3_R16	46 637	47 482	41 937	49 238
Summe	252 161	254 381	411 324	492 208

Tabelle 23 listet die Summen des eingetragenen, ausgetragenen sowie des durch die Wehre transportierten Sediments für alle 6 Subperioden auf. Die Differenz aus Sedimentaustrag am unteren Modellrand (Lechwehr Gersthofen) und dem -zulauf (Hochablass) korrespondiert mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 125 am Lechwehr Gersthofen.

Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von 492 208 m³ Lockervolumen im Prognosezeitraum ausgetragen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Stoffaustrag von etwa 6 500 m³ Lockervolumen. Die Kombination aus dem oberstrom eingetragene Sediment aus dem Planungsbereich I von durchschnittlich 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr und der zwei Entwurfsbausteine Sohlrampe Fkm 42,6 und Sohlanhebung oberstrom ist zu wenig, um die großflächigen Sohlerosionen zu unterbinden. Die größten Eintiefungen entstehen während der ersten Subperiodenserie 1-3 (Abbildung 125). In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohleintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 43,5 erreichen die Erosionen teilweise flächig den Tertiärhorizont. Unterstrom der Sohlrampe (Fkm 42,6) und des Wolfzahnauwehrs tieft sich die Gewässersohle ebenfalls bis zur Tertiärschicht ein. Im Bereich vor dem Auslauf (Lechwehr Gersthofen) sinkt die Tertiärschicht etwas ab und es verbleibt ein gewisser Abstand zur Gewässersohle. Die maximale Erosionstiefe ist modelltechnisch durch die Tertiärschicht begrenzt (vgl. Kapitel 2.1), da die Sohlhöhenentwicklung im feinen Tertiärmaterial nicht simuliert werden kann. In der Realität könnte bei Erreichen des Tertiärhorizonts jedoch im schlimmsten Fall ein lokaler Sohldurchschlag erfolgen.

Abbildung 125 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Bereits in der ersten Subperiode erodiert die Sohle in beträchtlichem Maße. In der zweiten Subperiode wird ein Teil des Sedimenteintrags aus dem Planungsbereich I im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. In den weiteren Subperioden fallen die Erosionen wesentlich moderater aus bzw. verschwinden sogar gänzlich. Die Sohle stabilisiert sich und weist nur noch eine geringe weitere Erosionstendenz auf.

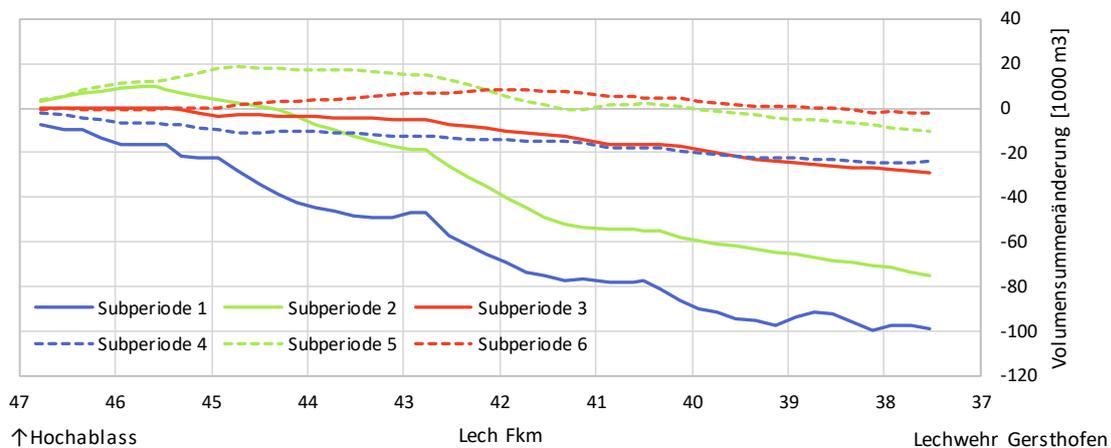


Abbildung 125: Volumensummendiagramm, Variante II-B3_R1x

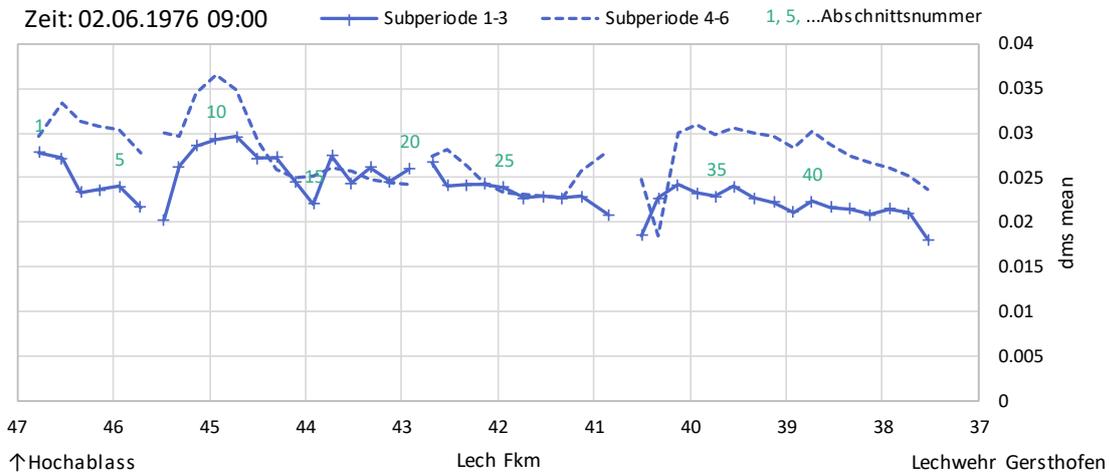


Abbildung 126: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

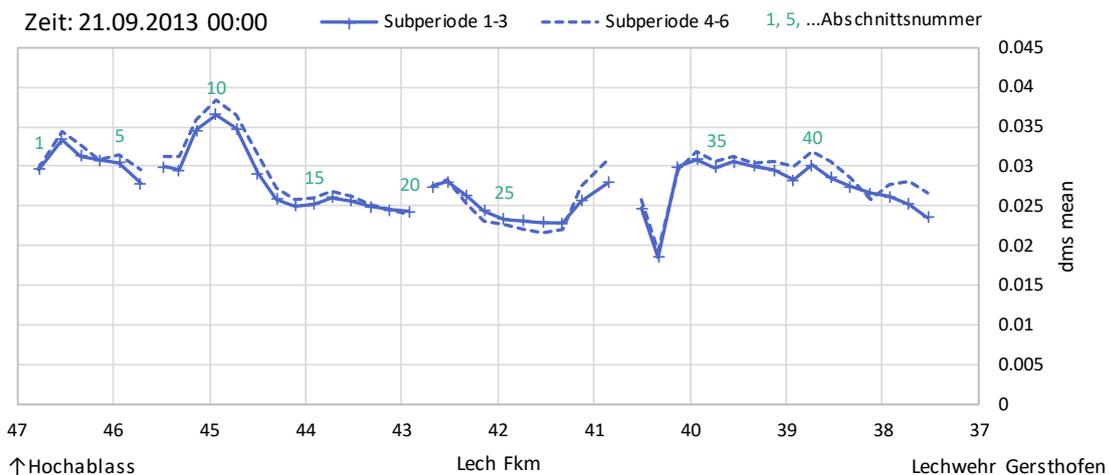


Abbildung 127: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 126 zeigt den Längsschnitt der mittleren Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} je Homogenabschnitt im Anfangszustand und nach Berechnung der ersten drei Subperioden (= Anfangszustand Subperiode 4). Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 127) zeigt, dass sich in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser insgesamt stabilisieren. Abbildung 128 und Abbildung 129 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationseende.

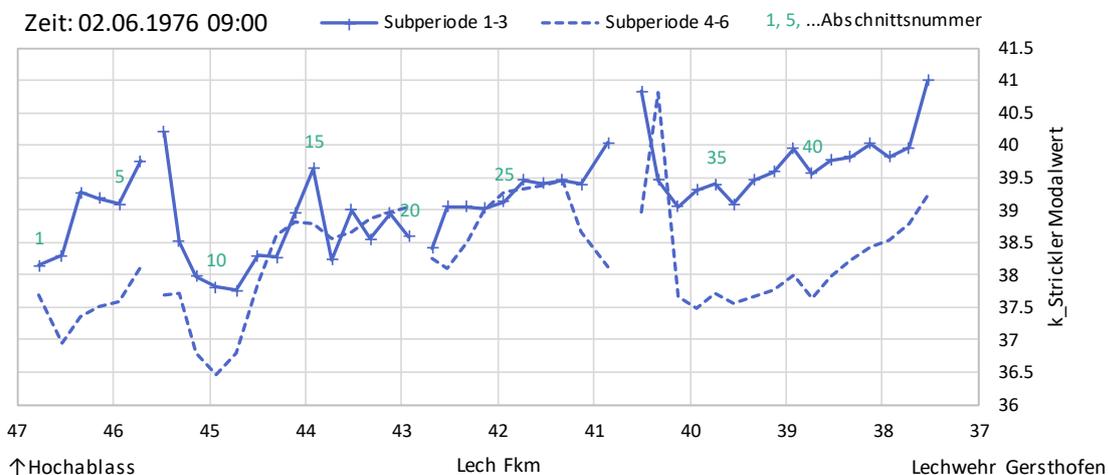


Abbildung 128: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

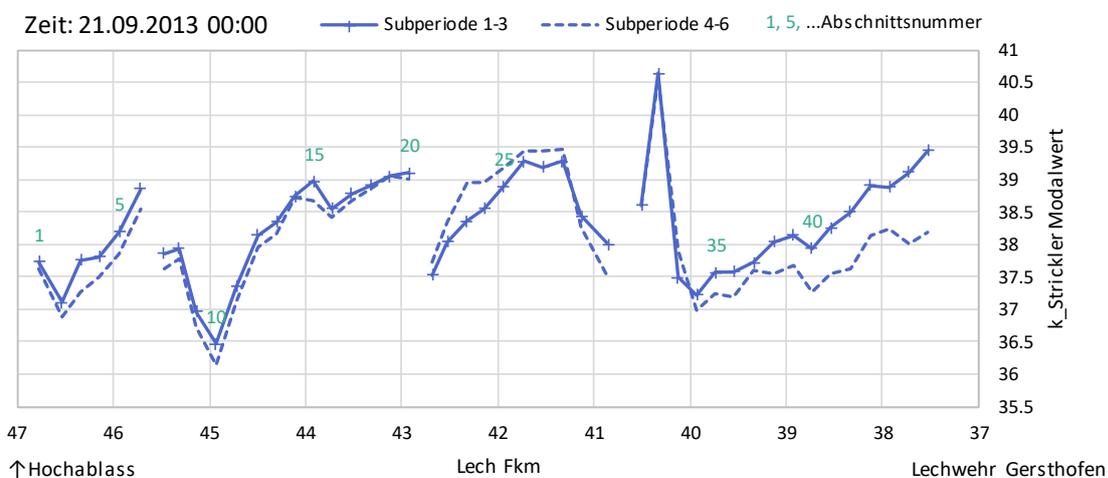


Abbildung 129: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

4.5.2 II-B3

Die Ergebnisse des Kapitels 4.5.1 unterscheiden sich von jenen der Planvariante II-B1 (Kapitel 4.3.1) nur in unbedeutenden Details. Die Beeinflussung der „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“ gestaltet sich aus gewässer-morphologischer Sicht derart gering, dass sich Prognoseberechnungen der Variante II-B3 mit Geschiebezugabe nur unwesentlich von jenen der Variante II-B2 in Kapitel 4.4 unterscheiden würden. Somit kann folgerichtig an dieser Stelle auf die Erkenntnisse der Planvariante II-B2 verwiesen werden. Diese gelten uneingeschränkt anstelle eigener Langzeitprognosen der Variante II-B3.

4.6 Interpretation

Die Unterschiede der einzelnen Varianten im Planungsbereich II sind am deutlichsten im Vergleich zum Bezugszustand (Anlage 5.3) bzw. im direkten Vergleich zueinander ersichtlich. In den Längsprofilen der folgenden Abbildungen 130, 131, 132 und 133 sind für ausgewählte Varianten jeweils die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6) eingezeichnet. Zudem wird die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) dargestellt.

Abbildung 133 vergleicht die Ergebnisse des Bezugszustandes gemäß Anlage 5.3 mit jenen der Planvariante II-A_R2x (Kapitel 4.2.3). Bei dieser Sensitivitätsvariante wird nach dem Eisenbahnerwehr über einen längeren Bereich externes Geschiebe mit einem mittleren Korndurchmesser $d_m = 38.28$ mm zugegeben. Dennoch reicht diese Maßnahme nicht aus, großflächige Sohlerosionen gänzlich zu unterbinden. Die Eintiefungen können lediglich reduziert werden.

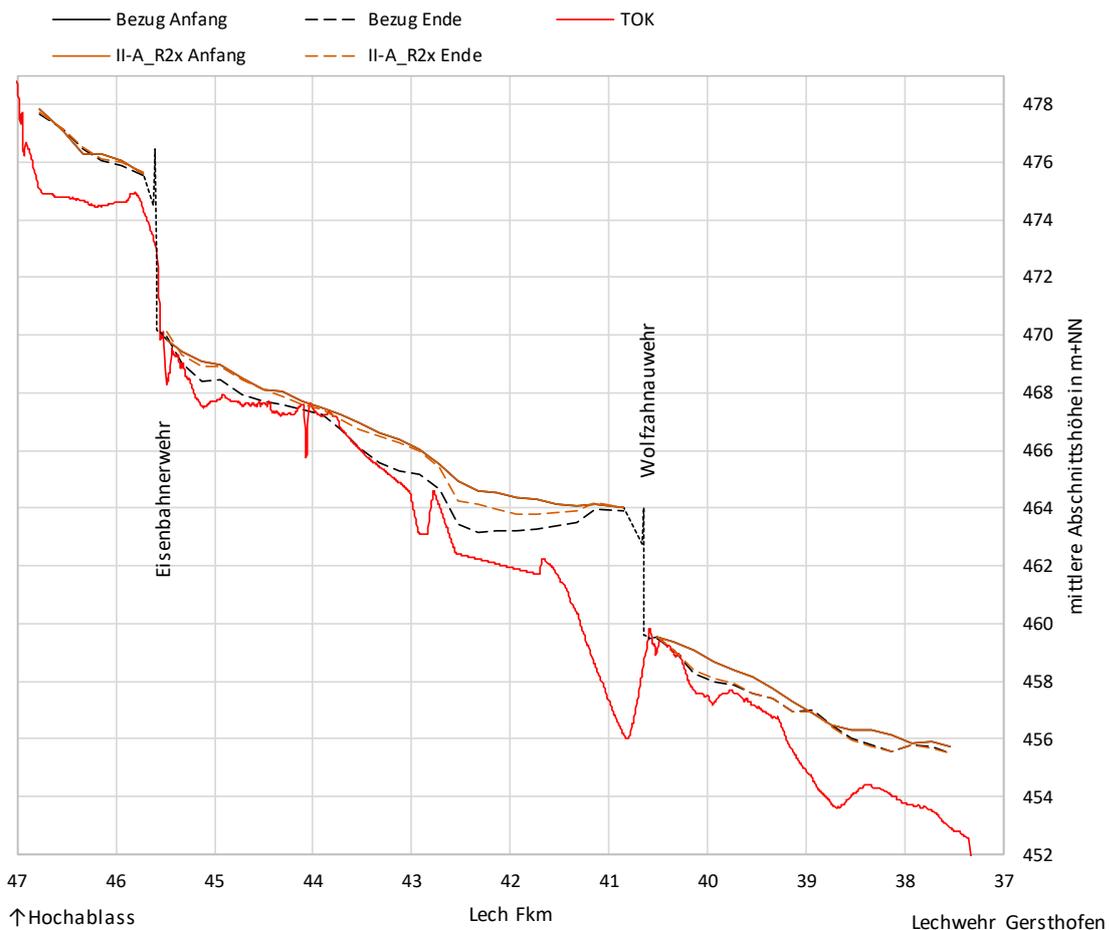


Abbildung 130: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante II-A_R2x

Abbildung 131 illustriert die morphologischen Auswirkungen der Sohlrampe bei Fkm 42,6 mit entsprechender oberstromigen Sohlhebung der Planvariante II-B1_R1x (Kapitel 4.3.1) in Relation zu den Ergebnissen des Bezugszustand gemäß Anlage 5.3. Eine Verbesserung ist nur zwischen Eisenbahnerwehr und der neuen Sohlrampe zu erkennen.

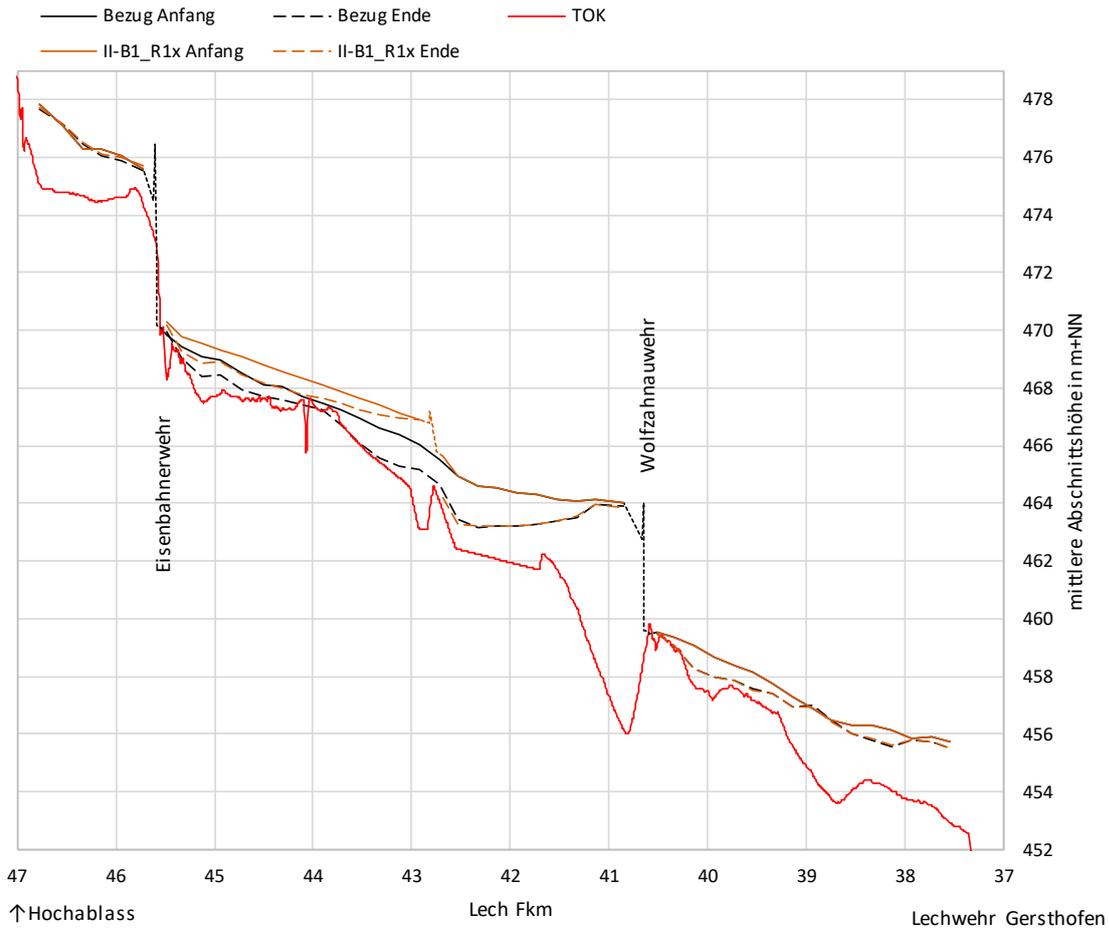


Abbildung 131: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante II-B1_R1x

Abbildung 132 vergleicht die Ergebnisse der Langzeitsimulation des Bezugszustandes mit jener der Planvariante II-B2_R3x (Kapitel 4.4.3). Die Maßnahmen Sohlrampe bei Fkm 42,6 mit oberstromiger Sohlanhebung werden hier ergänzt durch eine externe Geschiebezugabe, welche in der Sensitivitätsvariante II-B2_R3x die stärkste Wirkung entfaltet. Großflächige Sohlerosionen in Bereichen mit geringer Kiesauflage über der Tertiärschicht (TOK) können durch dieses Maßnahmenbündel wirkungsvoll unterbunden werden.

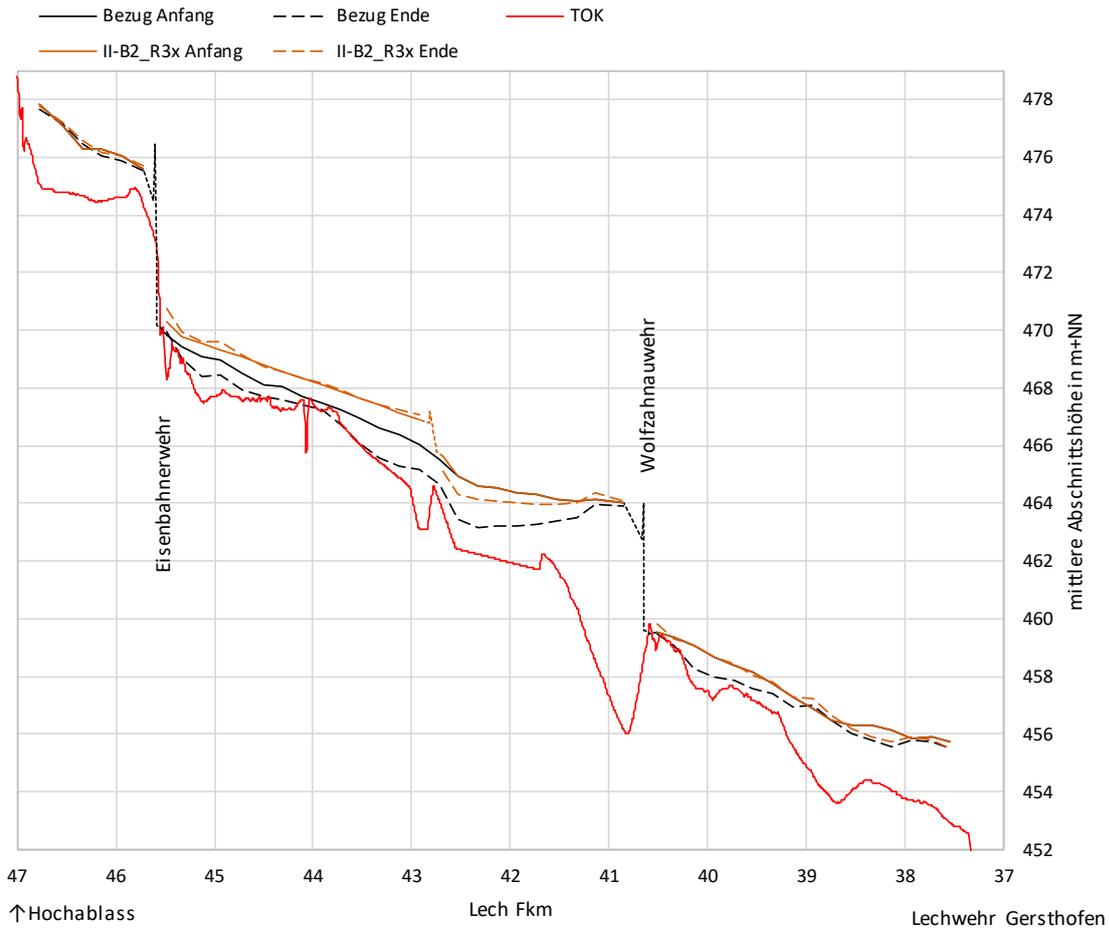


Abbildung 132: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 des Bezugszustandes und der Variante II-B2_R3x

Abbildung 133 fasst die mittleren Abschnittshöhen am Prognoseberechnungsende der morphologisch wirkungsstärksten Sensitivitätsvarianten im Planungsbereich II zusammen. Es zeigt sich, dass vor allem mit der Planvariante II-B2_R3x ein dynamisches Sohlgleichgewicht erreicht werden kann.

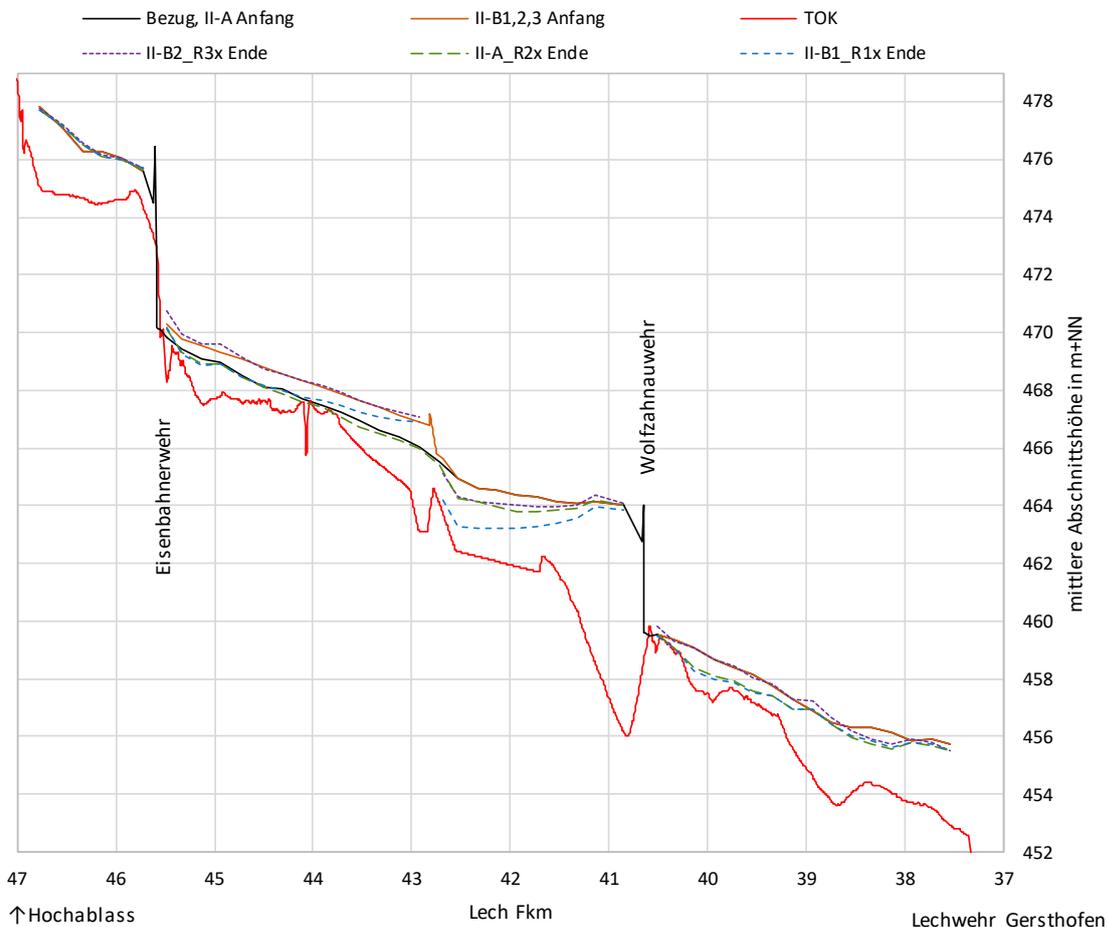


Abbildung 133: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang und am Ende der Subperiode 6 der Planvarianten II-A, II-B1 und II-B2

Tabelle 24: Geschiebesummen in m³ Lockervolumen im Vergleich zwischen den Varianten des Planungsbereichs II

Variante	Eintrag Hochablass [m ³]	Eintrag Verklapp-Material [m ³]	d _m Verklapp-Material [mm]	Austrag Lechwehr Gersthofen [m ³]	Ø Eintrag pro Jahr [m ³ /a]	Ø Austrag pro Jahr [m ³ /a]
II-A_R0x	252 161	90 319	19.57	542 853	4 506	7 143
II-A_R1x	252 161	266 337	19.57	644 840	6 822	8 485
II-A_R2x	252 161	101 961	38.28	470 684	4 660	6 193
II-B1_R1x	252 161	0	-	500 414	3 318	6 584
II-B2_R1x	252 161	86 304	19.57	536 010	4 453	7 053
II-B2_R2x	252 161	149 781	38.28	416 217	5 289	5 477
II-B2_R3x	252 161	152 139	38.28	378 112	5 320	4 975

Tabelle 24 listet u. a. die ein- und ausgetragenen Geschiebesummen aller Sensitivitätsvarianten im Planungsbereich II auf. Die Voraussetzung für ein echtes dynamisches Gleichgewicht als Planungsziel ist immer dann gegeben, wenn diese Mengen in der Langzeitbetrachtung eine ähnliche Größenordnung erreichen. Diese Bedingung wird von den Sensitivitätsvarianten II-B2_R2x und II-B2_R3x erfüllt. Beide unterscheiden sich nur in der Ausdehnung der Zugabebereiche. Aus morphologischer Sicht ist somit die Variante II-B2 besonders gut geeignet. Da sich die Variante II-B3 nur durch die „Aufweitung an der Flussmeisterstelle“ von II-B2 unterscheidet und diese keinen nennenswerten Einfluss auf die morphologische Entwicklung ausübt (Kapitel 4.5), ist auch sie als Vorzugsvariante zu benennen. Es ist davon auszugehen, dass bei den Planvarianten II-B2 und II-B3 mit einem regelmäßigen Monitoring und einer darauf abgestimmten externen Geschiebezugabe in Menge und Ausdehnung die Sohle wirkungsvoll und langfristig stabilisiert werden kann.

5 Anhang

Der Anhang gibt Einblick in Modellierungsdetails, die nicht notwendigerweise zum Verständnis der Hauptkapitel notwendig sind, aber bei Bedarf eine möglichst lückenlose Nachvollziehbarkeit der Prognoseberechnungen erlauben.

5.1 Definition der Subperioden und Zulaufganglinien

Der gesamte Simulationszeitraum der Langzeitprognose von 76 Jahren ergibt sich aus dem zweimaligen Durchlaufen der Subperioden 1 bis 3 (Tabelle 25).

Tabelle 25: Definition der Subperioden

Subperiode	von	bis	Simulationszeit [s]
1	01.01.1976	04.07.1987	7120800
2	04.07.1987	03.08.2000	7120800
3	03.08.2000	01.01.2014	5569200

Abbildung 134 stellt die hydrologischen Zuflussganglinien für den oberen Modellrand des Planungsbereichs I der drei definierten Subperioden dar. Diese resultieren aus der Kappung der Abflusszeitreihe $Q(t)$ am Pegel Haunstetten auf geschieberelevante Abflüsse (siehe Anlage 5.3, Kapitel 2.1 bzw. Anlage 5.1).

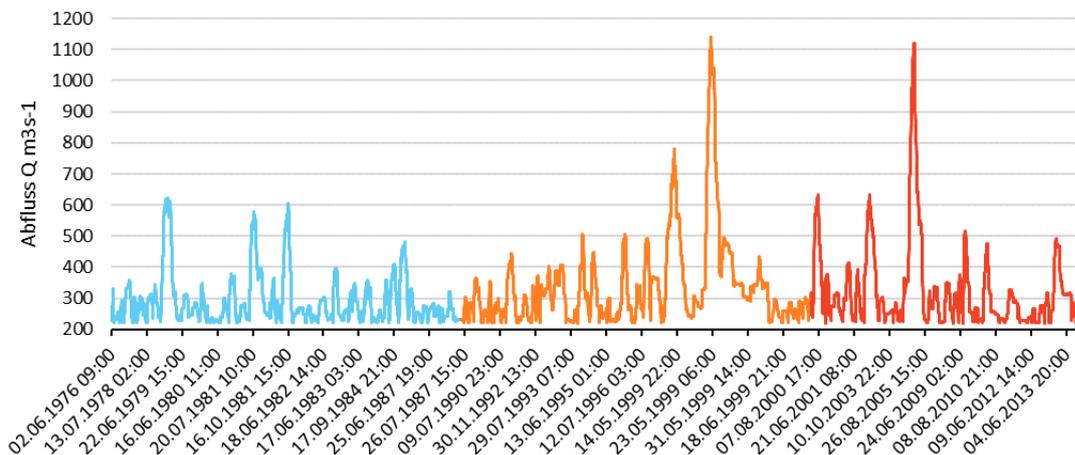


Abbildung 134: Zuflussganglinie Q als obere Randbedingung unterhalb der Lechstufe 23. Die drei Subperioden sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

In Abbildung 135, Abbildung 136 und Abbildung 137 werden die einzelnen Subperioden jeweils detailliert gezeigt. Die Zeitachsen stellen den Bezug zur Echtzeit (Datum und Uhrzeit) her. Zusätzlich sind die Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D

Ergebnisse (Knotenwerte der Sohlenhöhe, Kornverteilung, Wassertiefe, etc.) eingetragen (regelmäßig alle 864 000 Sekunden bzw. 10 Tage). Der Bezug zwischen den Zeitschritten der numerischen HYDRO_FT-2D Berechnungen und dem korrespondierenden Datum und Uhrzeit in Echtzeit kann außerdem mit Hilfe der Tabelle 26 hergestellt werden.

Die Subperiode 2 enthält sowohl den höchsten beobachteten Abfluss von 1150 m³/s am 22.05.1999 als auch den dritthöchsten Abfluss von 796 m³/s am 14.05.1999. Innerhalb der Subperiode 3 tritt am 24.08.2005 der zweithöchste Abfluss von 1130 m³/s auf. In den Subperioden 2 und 3 finden demnach zwei Abflussereignisse statt, die beide etwas größer als das $HQ_{100} = 1050 \text{ m}^3/\text{s}$ sind.

Die Subperioden und Zuflussganglinien sind identisch mit jenen der Langzeitprognose für den Bezugszustand in Anlage 5.3.

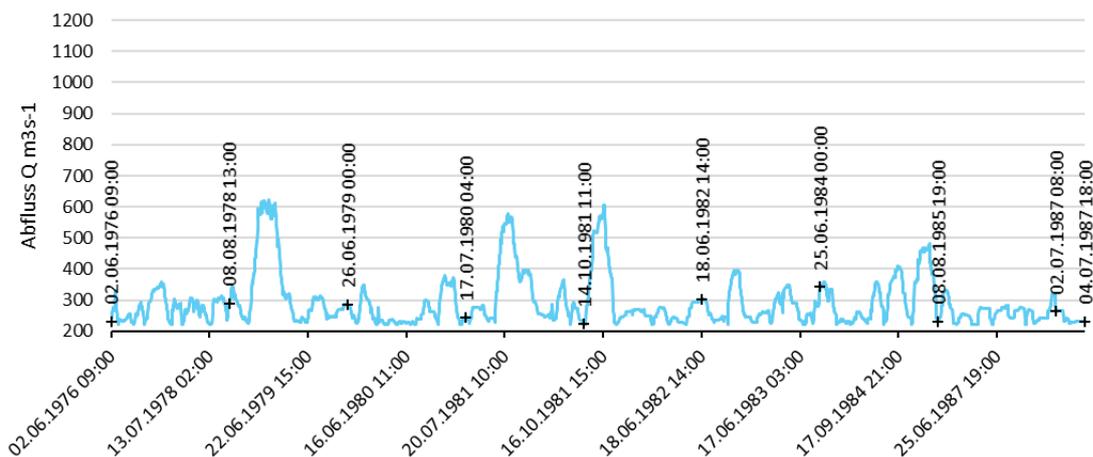


Abbildung 135: Zuflussganglinie Q der Subperiode 1 (vergleiche Abbildung 134) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

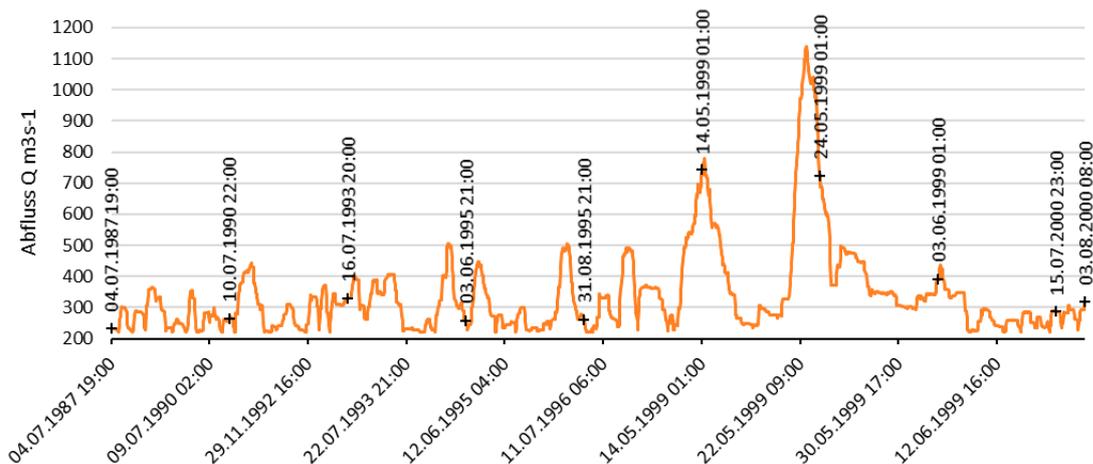


Abbildung 136: Zuflussganglinie Q der Subperiode 2 (vergleiche Abbildung 134) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

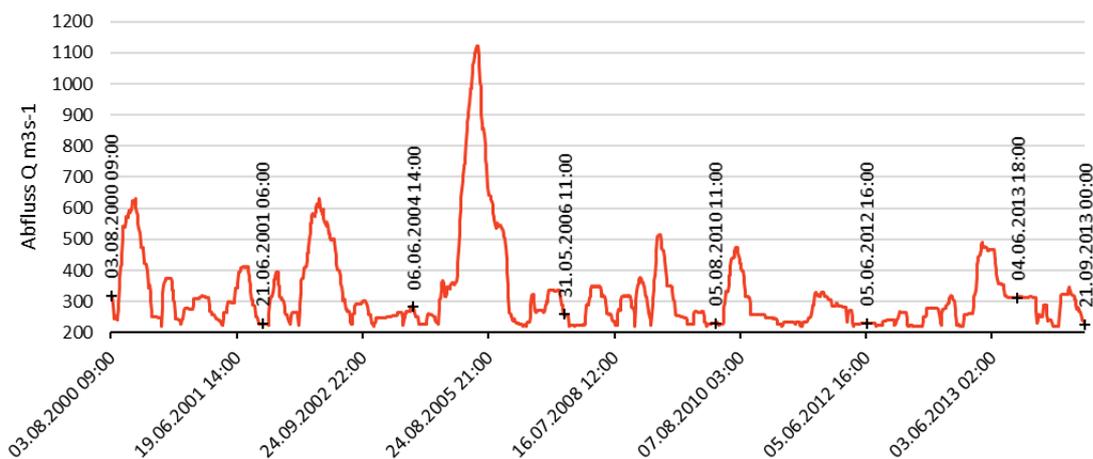


Abbildung 137: Zuflussganglinie Q der Subperiode 3 (vergleiche Abbildung 134) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

Tabelle 26: Zeitschritte der numerischen HYDRO_FT-2D Berechnungen, zu denen ein Ausschreiben flächiger Ergebnisse erfolgt, und korrespondierendes Datum und Uhrzeit in Echtzeit für die drei Subperioden

Subperiode 1		Subperiode 2		Subperiode 3	
Zeit [s]	Datum, Uhrzeit	Zeit [s]	Datum, Uhrzeit	Zeit [s]	Datum, Uhrzeit
0	02.06.1976 09:00	0	04.07.1987 19:00	0	03.08.2000 09:00
864000	08.08.1978 13:00	864000	10.07.1990 22:00	864000	21.06.2001 06:00
1728000	26.06.1979 00:00	1728000	16.07.1993 20:00	1728000	06.06.2004 14:00
2592000	17.07.1980 04:00	2592000	03.06.1995 21:00	2592000	31.05.2006 11:00
3456000	14.10.1981 11:00	3456000	31.08.1995 21:00	3456000	05.08.2010 11:00
4320000	18.06.1982 14:00	4320000	14.05.1999 01:00	4320000	05.06.2012 16:00
5184000	25.06.1984 00:00	5184000	24.05.1999 01:00	5184000	04.06.2013 18:00
6048000	08.08.1985 19:00	6048000	03.06.1999 01:00	5576400	21.09.2013 00:00
6912000	02.07.1987 08:00	6912000	15.07.2000 23:00		
7120800	04.07.1987 18:00	7120800	03.08.2000 08:00		

5.2 Homogenabschnitte, Tertiäroberkante und Ausgangs-Sohlhöhen

Die Flusssohle der numerischen Teilmodelle im Planungsbereich I und II wird in sogenannte Homogenabschnitte unterteilt. Diese orientieren sich an der Lage der Querprofilaufnahmen bzw. der Modelle des Bezugszustands (Anlage 5.3), sind meist 200 m lang und werden an den Ufern von der jeweiligen Böschungsunterkante begrenzt (Abbildung 138).

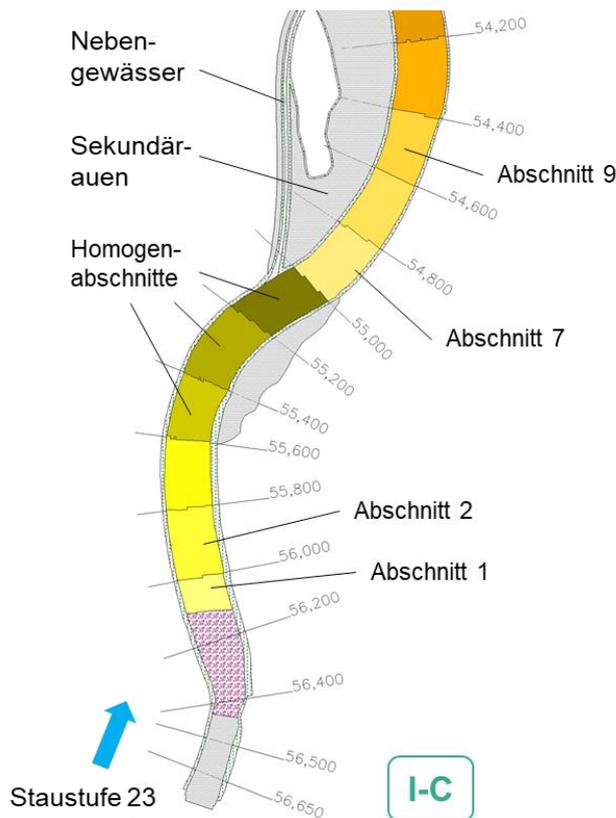


Abbildung 138: Ausschnitt des Berechnungsnetzes der Variante I-C mit farbiger hervorgehobenen Homogenabschnitten

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, Mittelwerte der numerischen HYDRO_FT-2D Knotenwerte innerhalb der Homogenabschnitte zu bilden und anhand dieser Informationen Schlussfolgerungen abzuleiten bzw. Anpassungen vorzunehmen. So erfolgt z. B. Anpassung der Rauheit aufgrund der Kornverteilung am Berechnungsende jeder Subperiode auf Basis der Mittelwerte innerhalb der Homogenabschnitte. In Abbildung 139, Abbildung 140 und Abbildung 141 ist die Lage der Homogenabschnitte zusammen mit der Sohlhöhe (zum Startzeitpunkt der Berechnungen), sowie der Tertiäroberkante als Längsschnitt dargestellt. Nähere Information zur Definition der Tertiärschicht können der Anlage 5.2, Kapitel 3.1.3 entnommen werden. Tabelle 27 gibt Auskunft über die Kilometrierung der oberen und unteren Grenze sowie dem mittleren

Flusskilometer je Homogenabschnitt. Letzterer wird für die Darstellung von mittleren Kenngrößen (z. B. Korndurchmesser, Rauheitsbeiwerte, Sohlhöhenänderungen, etc.) je Homogenabschnitt aus den HYDRO_FT-2D Knotenwerten zu verschiedenen Auswertungszeitpunkten in Längsschnitten verwendet (z.B. in Abbildung 15).

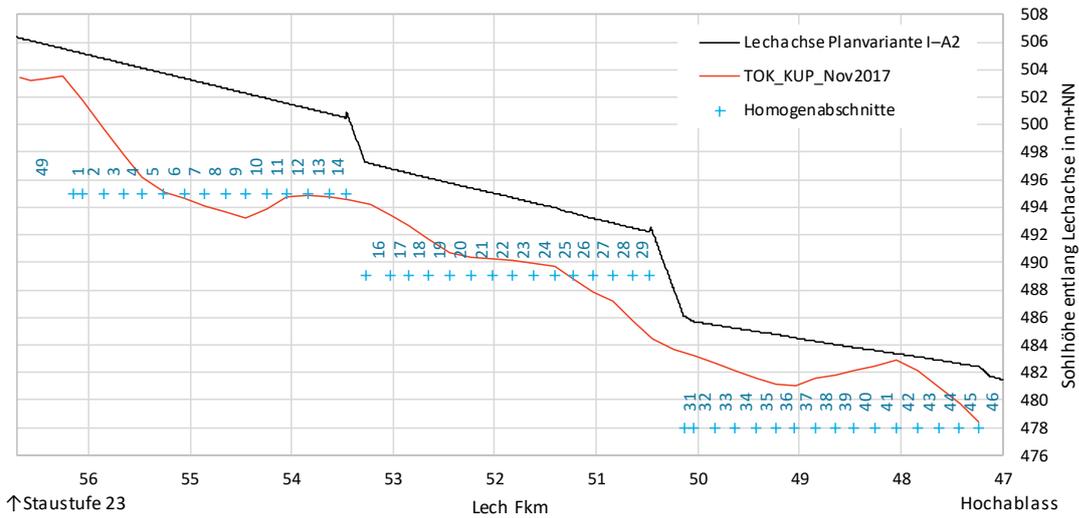


Abbildung 139: Homogenabschnitte, Tertiäroberkante (TOK) und Sohlhöhe entlang der Lechachse im Planungsbereich I (Varianten I-A1, I-A2, I-B und I-C)

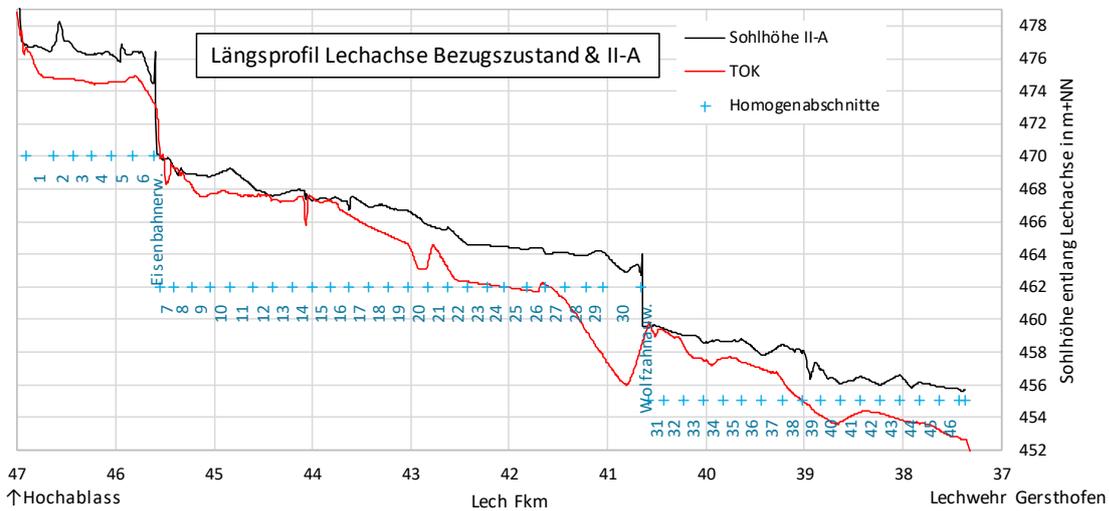


Abbildung 140: Homogenabschnitte, Tertiäroberkante (TOK) und Sohlhöhe entlang der Lechachse im Planungsbereich II (Variante II-A entspricht dem Bezugszustand)

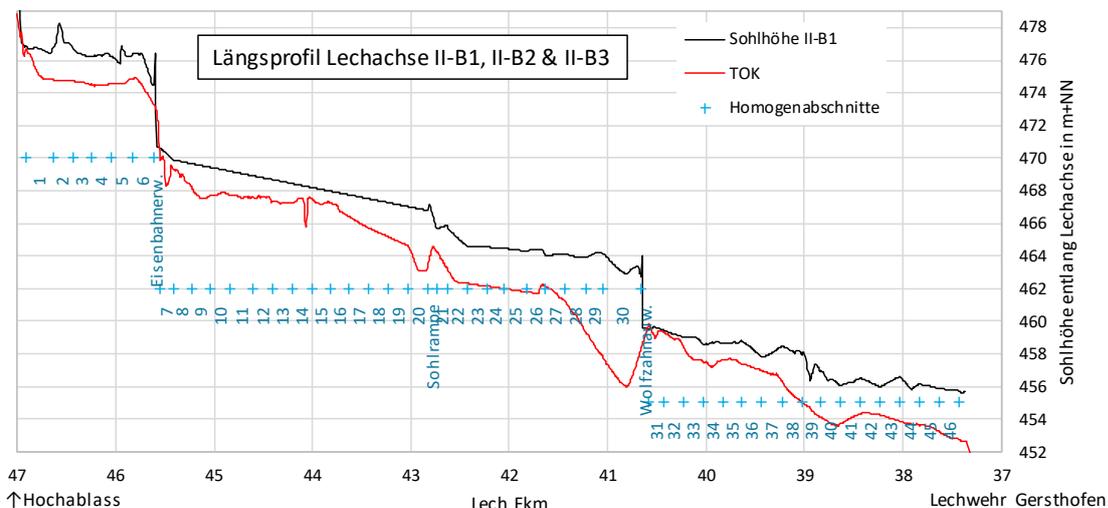


Abbildung 141: Homogenabschnitte, Tertiäroberkante (TOK) und Sohlhöhe entlang der Lechachse im Planungsbereich II (Varianten II-B1, II-B2, II-B3)

Tabelle 27: Homogenabschnitte der Teilmodelle im Planungsbereich I und II; bei der Variante II-A entfällt die Sohlrampe und der Abschnitt 21 ist entsprechend größer gewählt (Fkm Mittel: 42,72, Fkm Start: 42,8)

Teilmodelle Planungsbereich I				Teilmodelle Planungsbereich II (außer II-A)			
Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende	Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende
1	56,1	56,2	56,1	1	46,8	46,9	46,6
2	56,0	56,1	55,8	2	46,5	46,6	46,4
3	55,8	55,8	55,7	3	46,3	46,4	46,2
4	55,6	55,7	55,5	4	46,1	46,2	46,0
5	55,4	55,5	55,3	5	45,9	46,0	45,8
6	55,2	55,3	55,1	6	45,7	45,8	45,6
7	55,0	55,1	54,9	Eisenbahnerw,	45,6	45,6	45,5
8	54,8	54,9	54,7	7	45,5	45,5	45,4
9	54,6	54,7	54,5	8	45,3	45,4	45,2
10	54,3	54,5	54,2	9	45,1	45,2	45,0
11	54,1	54,2	54,0	10	44,9	45,0	44,8
12	53,9	54,0	53,8	11	44,7	44,8	44,6
13	53,7	53,8	53,6	12	44,5	44,6	44,4
14	53,5	53,6	53,5	13	44,3	44,4	44,2
Sohlrampe	53,4	53,5	53,3	14	44,1	44,2	44,0
16	53,1	53,3	53,0	15	43,9	44,0	43,8
17	52,9	53,0	52,8	16	43,7	43,8	43,6

Teilmodelle Planungsbereich I				Teilmodelle Planungsbereich II (außer II-A)			
Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende	Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende
18	52,7	52,8	52,6	17	43,5	43,6	43,4
19	52,5	52,6	52,4	18	43,3	43,4	43,2
20	52,3	52,4	52,2	19	43,1	43,2	43,0
21	52,1	52,2	52,0	20	42,9	43,0	42,8
22	51,9	52,0	51,8	Sohlrampe	42,8	42,8	42,7
23	51,7	51,8	51,6	21	42,67	42,7	42,6
24	51,5	51,6	51,4	22	42,5	42,6	42,4
25	51,3	51,4	51,2	23	42,3	42,4	42,2
26	51,1	51,2	51,0	24	42,1	42,2	42,1
27	50,9	51,0	50,8	25	41,9	42,1	41,8
28	50,7	50,8	50,6	26	41,7	41,8	41,6
29	50,6	50,6	50,5	27	41,5	41,6	41,4
Sohlrampe	50,3	50,5	50,1	28	41,3	41,4	41,2
31	50,1	50,1	50,0	29	41,1	41,2	41,0
32	49,9	50,0	49,8	30	40,9	41,0	40,7
33	49,7	49,8	49,6	Wolfzahnauw,	40,6	40,7	40,6
34	49,5	49,6	49,4	31	40,5	40,6	40,4
35	49,3	49,4	49,2	32	40,3	40,4	40,2
36	49,1	49,2	49,0	33	40,1	40,2	40,0
37	48,9	49,0	48,8	34	39,9	40,0	39,8
38	48,7	48,8	48,6	35	39,7	39,8	39,6
39	48,6	48,6	48,5	36	39,5	39,6	39,4
40	48,4	48,5	48,3	37	39,3	39,4	39,2
41	48,1	48,3	48,0	38	39,1	39,2	39,0
42	47,9	48,0	47,8	39	38,9	39,0	38,8
43	47,7	47,8	47,6	40	38,7	38,8	38,6
44	47,5	47,6	47,4	41	38,5	38,6	38,4
45	47,3	47,4	47,2	42	38,3	38,4	38,2
46	47,1	47,2	47,0	43	38,1	38,2	38,0
				44	37,9	38,0	37,8
				45	37,7	37,8	37,6
				46	37,5	37,6	37,4

5.3 Stoffeintrag von Planungsbereich I in den Planungsbereich II

5.3.1 Generische Abfluss-Geschiebetransport-Beziehung

Die folgenden Überlegungen zielen auf eine Ableitung einer generischen Geschiebeganglinie für den Planungsbereich II aus der Analyse des Geschiebeaustrags der Planvarianten im Planungsbereich I ab. Dazu werden zuerst die Ganglinien des Geschiebeaustrags je Subperiode sämtlicher Planvarianten analysiert. Abbildung 142 zeigt beispielhaft die Geschieberaten aufgegliedert in die sechs Fraktionsanteile FA_x in kg/s (möglich seit der Beta-Version 4.4.0 der Software HYDRO_FT-2D) und den Abfluss Q am Hochablass der Planvariante I-C im zeitlichen Verlauf der Subperiode 6.

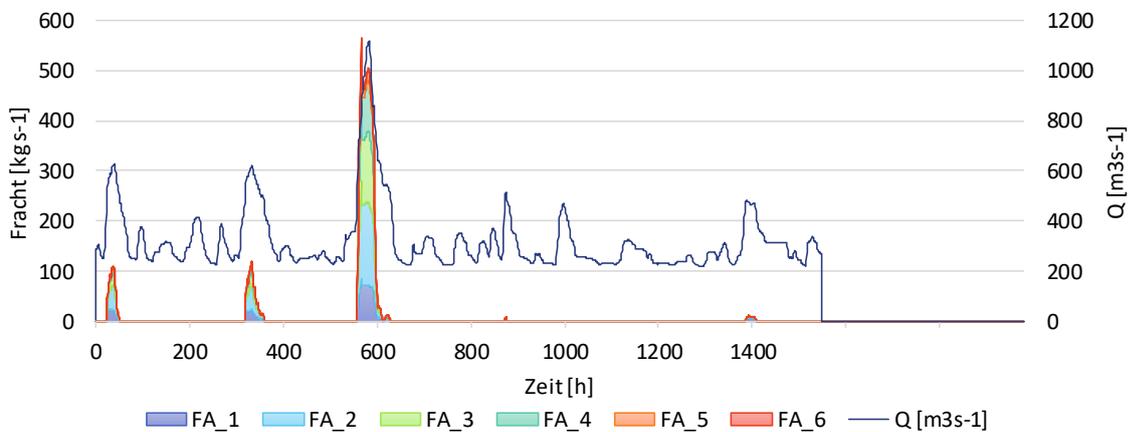


Abbildung 142: Sedimentaustrag der Planvariante I-C in der Subperiode 6

Die Fraktionstransportraten und die zugehörigen Abflüsse stehen in einer gewissen Abhängigkeit zueinander. Diese Beziehung lässt sich z.B. für den Sedimentaustrag in Subperiode 6 sämtlicher Varianten im Planungsbereich I in Abbildung 143 darstellen. Vereinfachend und mit gutem Korrelationskoeffizient kann die Abhängigkeit getrennt für jede Fraktion durch eine Regressionsgerade ausgedrückt werden.

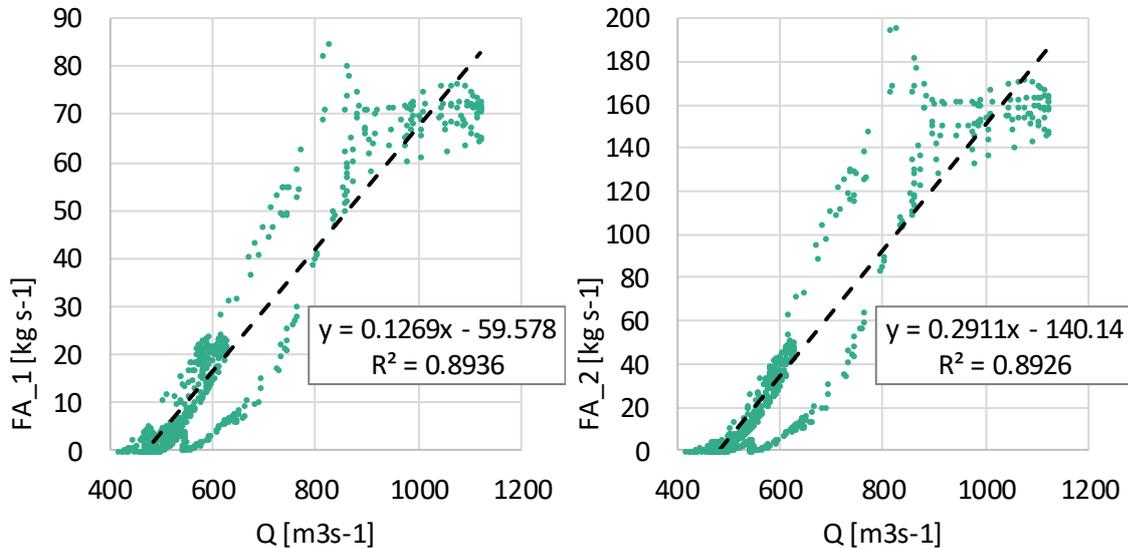


Abbildung 143: Beziehung Fraktionsrate FA_1 ($d_m = 2$ mm) bzw. FA_2 ($d_m = 10$ mm) zu Abfluss Q aus der Analyse der Varianten I-A1, I-A2, I-B und I-C in der Subperiode 6 mit eingezeichneten Regressionsgeraden

Tabelle 28 und Tabelle 29 fassen verschiedene Ergebnisse in Form von jährlichen Geschiebeaustragssummen zusammen. Dabei wird immer die Strategie der Analyse des Sedimentaustrags, der Ableitung von linearen Beziehungen zwischen FA_x und Q und der Anwendung dieser Beziehungen zur Berechnung von generischen Sedimentaustragsganglinien verfolgt. Unterschiede ergeben sich aus der Analyse unterschiedlicher Planvarianten und der Wahl der Subperiode. In Tabelle 28 wird die Subperiode 3 untersucht, während Tabelle 29 auf den Ergebnissen der Subperiode 6 basiert. In den Zeilen „I-A2“ werden z.B. ausschließlich die Auslaufganglinien der Variante I-A2 untersucht. Die Zeile „alle Varianten“ fasst die gleichzeitige Analyse der Auslaufganglinien sämtlicher Varianten I-A1, I-A2, I-B und I-C zusammen (in Abbildung 143 wird solch eine Analyse beispielhaft gezeigt).

Tabelle 28: Summen des resultierenden Geschiebeaustrags pro Jahr in m^3 Lockervolumen, Analyse der Subperiode 3

Subperiode → ↓Planvariante	1	2	3	Durchschnitt der drei Subperioden
I-A1	976	4 724	3 196	3 046
I-A2	773	4 197	2 805	2 666
I-B	748	4 153	2 768	2 630
I-C	817	4 313	2 891	2 749
alle Varianten	832	4 349	2 918	2 775

Tabelle 29: Summen des resultierenden Geschiebeaustrags pro Jahr in m³
Lockervolumen, Analyse der Subperiode 6

Subperiode → ↓Planvariante	1	2	3	Durchschnitt der drei Subperioden
I-A1	1 172	5 412	3 685	3 515
I-A2	979	4 997	3 365	3 200
I-B	1 000	4 893	3 309	3 151
I-C	1 130	5 342	3 627	3 458
alle Varianten	1 072	5 163	3 498	3 333

In den morphodynamischen Modellen des Planungsbereichs I werden im Laufe der Berechnungszeit die zugegebenen und aus der Sohle erodierten Sedimente stromab in Richtung Hochablass transportiert. Die Modelle benötigen eine gewisse Zeit, um sich „einzuschwingen“. Tendenziell werden die transportierten Mengen mit zunehmender Anzahl an berechneten Subperioden größer. Dennoch ergeben sich zwischen den Planvarianten kaum nennenswerte Unterschiede (vergleiche Tabelle 28 und Tabelle 29). Variante I-A1 liefert stets die größten und I-B die geringsten durchschnittlichen Geschiebeaustragsmengen pro Jahr in m³ Lockervolumen. Selbst zwischen den Analysen der Subperiode 3 und 6 sind die Unterschiede klein.

Als resultierende generische Ganglinie für den Stoffeintrag aus dem Planungsbereich I in den Planungsbereich II wird die Analyse der Subperiode 6 aller Planvarianten herangezogen (entspricht der letzten Zeile der Tabelle 29). Die Parameter der Regressionsgeraden der einzelnen Fraktionen, sowie das jeweilige Bestimmtheitsmaß und der Pearson-Korrelationskoeffizient werden in Tabelle 30 aufgelistet.

Tabelle 30: Regressionsgeraden der einzelnen Fraktionen für die generische Stoffeintragsganglinie

Regressionsgerade	FA_1	FA_2	FA_3	FA_4	FA_5	FA_6
Bestimmtheitsmaß	0.894	0.893	0.900	0.899	0.905	0.855
Pearson-Korrelationskoeff.	0.945	0.945	0.949	0.948	0.951	0.924
Achsenabschnitt	-59.578	-140.140	-122.325	-85.987	-16.517	-4.700
Steigung	0.127	0.291	0.242	0.167	0.032	0.009

Abbildung 144 illustriert die Anwendung der fraktionsweisen linearen Regressionen und stellt die sich ergebenden mittleren Korndurchmesser d_m sowie die Geschiebetransportraten QG in kg/s in Abhängigkeit des Abflusses Q dar.

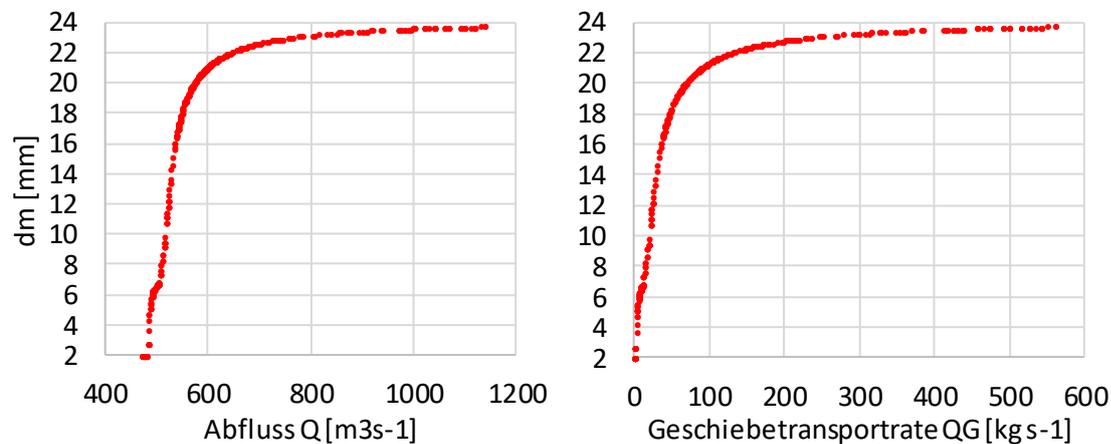


Abbildung 144: resultierende Q - d_m -Beziehung (links) und QG - d_m -Beziehung (rechts)

Das folgende Kapitel 5.3.2 wendet die gefundenen Beziehungen auf die Abflussganglinien der drei Subperioden (siehe Kapitel 5.1) an und präsentiert die resultierenden generischen Stoffeintragungslinien.

5.3.2 Resultierender generischer Stoffeintrag

Folgende Abbildungen zeigen als Resultat der Analyse aus Kapitel 5.3.1 die Fraktionsanteile (F1 bis F6 in Prozent), den mittleren Korndurchmesser d_m , den hydraulischen Abfluss Q als Zufluss zum Planungsbereich II, den Sedimenteintrag QG im zeitlichen Verlauf, sowie die Gesamtmenge des Sedimenteintrags als Lockervolumen in m^3 je Subperiode (siehe auch Tabelle 31).

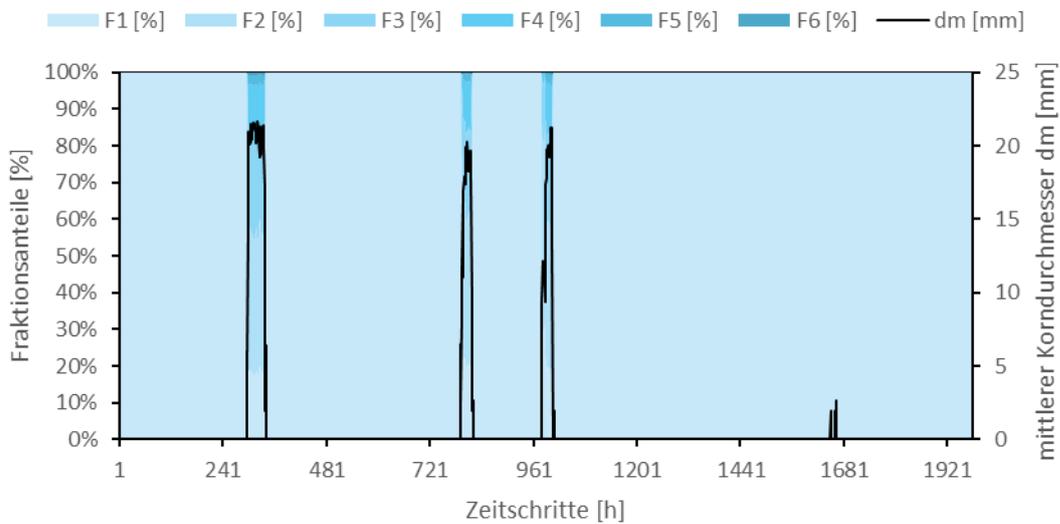


Abbildung 145: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser Subperiode 1 & 4

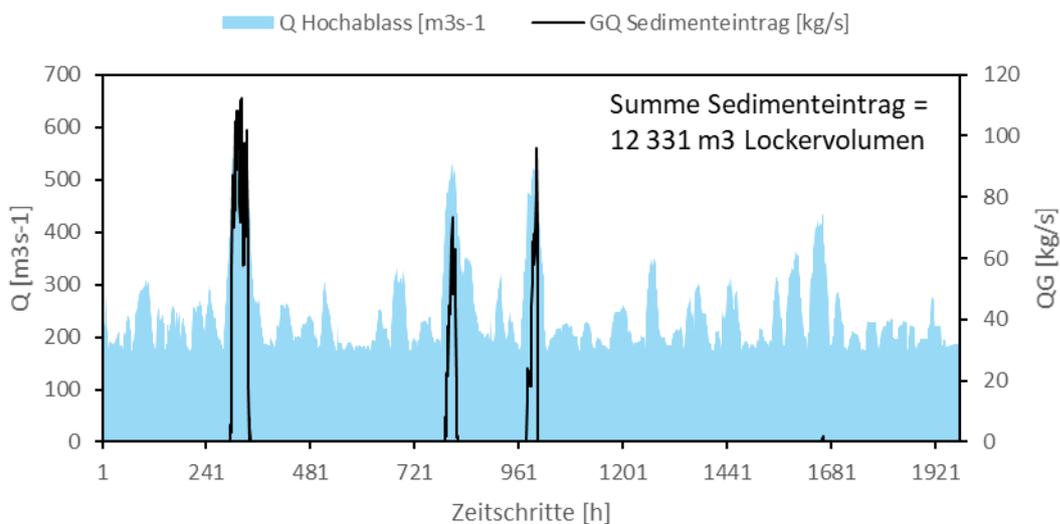


Abbildung 146: Abfluss und Sedimenteintrag Subperiode 1 und 4

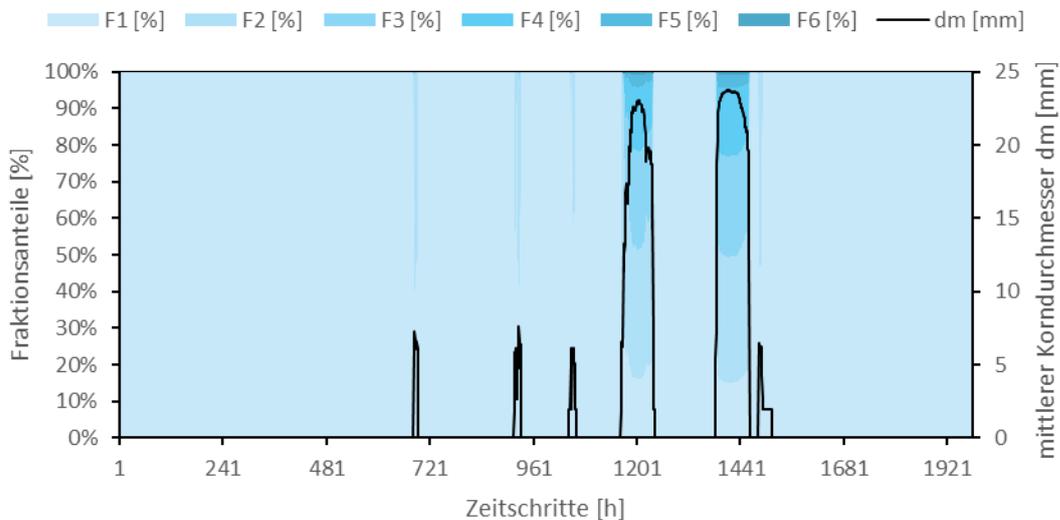


Abbildung 147: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser Subperiode 2 & 5

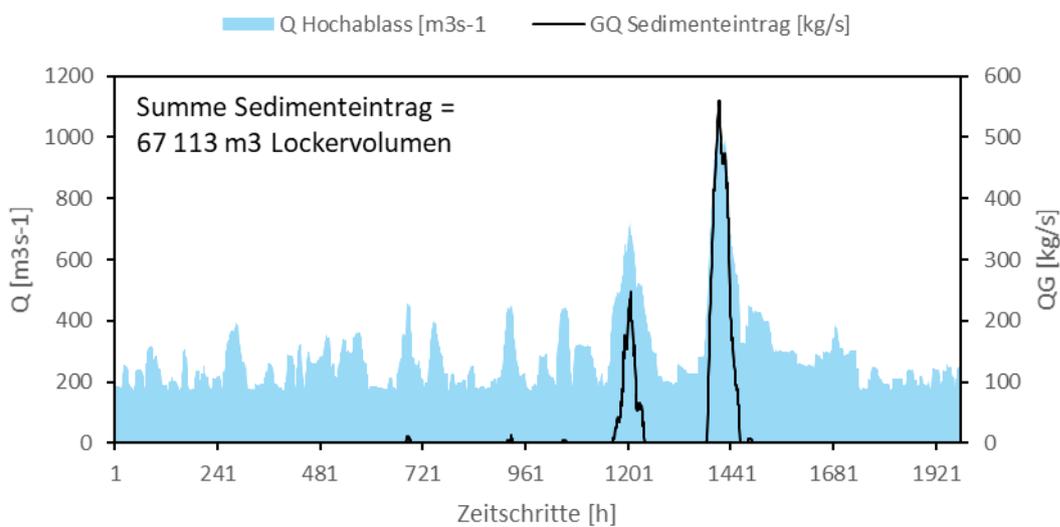


Abbildung 148: Abfluss und Sedimenteintrag Subperiode 2 und 5

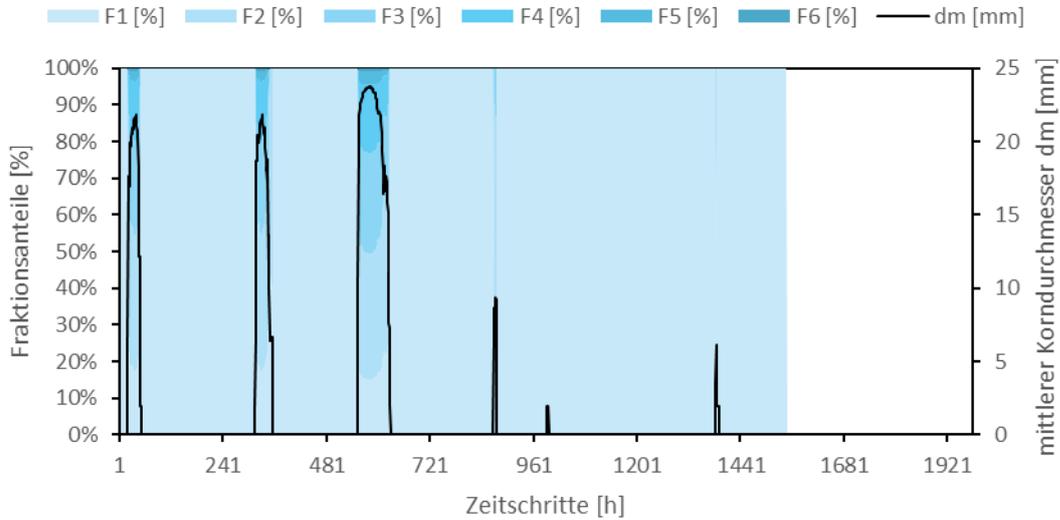


Abbildung 149: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser Subperiode 3 & 6

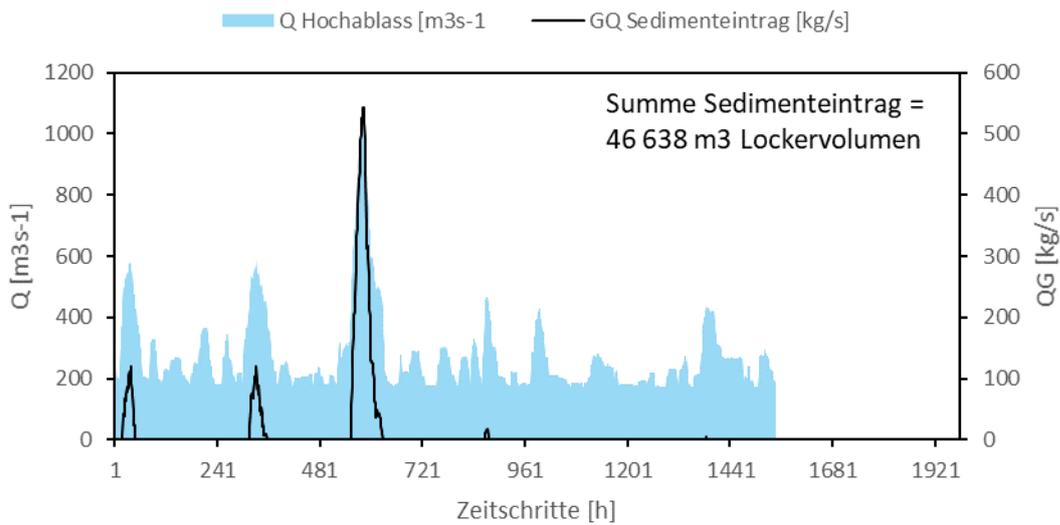


Abbildung 150: Abfluss und Sedimenteintrag Subperiode 3 und 6

Tabelle 31: Stoffeintragssummen in m³ Lockervolumen je Subperiode

Sub- periode	von (Datum)	bis (Datum)	Differenz Monate	Simulationszeit in Stunden	Stoffeintrag in m ³ Lockervolumen
1, 4	01.01.1976	04.07.1987	138	1978	12 331
2, 5	04.07.1987	03.08.2000	156	1978	67 113
3, 6	03.08.2000	01.01.2014	160	1547	46 638

Der durchschnittliche Stoffeintrag pro Jahr in m³ Lockervolumen ergibt sich aus der Division der Stoffeintragssummen durch die Differenz-Monate in Tabelle 31 und Multiplikation mit 12 Monaten pro Jahr. Tabelle 32 listet das Ergebnis auf, welches

definitionsgemäß mit den Werten der letzten Zeile in Tabelle 29 übereinstimmt. Der durchschnittliche Stoffeintrag in den Planungsbereich II beträgt somit 3 333 m³ Lockervolumen pro Jahr im Gesamtzeitraum.

Tabelle 32: durchschnittlicher Stoffeintrag pro Jahr in m³ Lockervolumen je Subperiode und im Gesamtzeitraum

Subperiode 1 bzw. 4	Subperiode 2 bzw. 5	Subperiode 3 bzw. 6	Gesamt- zeitraum
1 072	5 163	3 498	3 333

5.4 Ausgangszustand der Kornzusammensetzung und Rauheitsverteilung

Folgende Abbildungen zeigen die Fraktionsanteile (FA_AL-1 bis FA_AL-6 in Prozent) und den mittleren Korndurchmesser d_{m_AL} der Austauschschicht sowie die Fraktionsanteile (FA_UL-1 bis FA_UL-6 in Prozent) und den mittleren Korndurchmesser d_{m_UL} der Unterschicht. Die Fraktionierung der Grundsicht wird jener der Unterschicht gleichgesetzt. Die treppenartige Abstufung ist ein Resultat der flächenhaften Übernahme der gemittelten Knotenwerte der Kalibrierungsberechnung für die jeweiligen Homogenabschnitte. Es sind somit in den Diagrammen deutlich die Abschnittsgrenzen zu erkennen.

Bei den Sohlrampen wird ein mittlerer Korndurchmesser (Austausch- und Unterschicht) von $d_{m_AL} = d_{m_UL} = 19.6$ mm gesetzt (vgl. Anlage 5.2, Kapitel 3.1.2). Genau wie im Vorland sind diese Bereiche erosionssicher modelliert. Das laufende Geschiebe bewegt sich hier also über eine fixierte Sohle. Während der Berechnung findet dennoch eine ständige Bilanzierung mit der Austauschschicht statt, welche die Kornverteilung des laufenden Geschiebes beeinflusst. Um diese Beeinflussung möglichst gering zu halten, werden die Abstürze/Bauwerke mit der ermittelten Kornverteilung aus den Vorland-Schürfen belegt. Diese Kornverteilung entspricht weitgehend dem Unterschichtenmaterial und damit dem laufenden Geschiebe im Hochwasserfall.

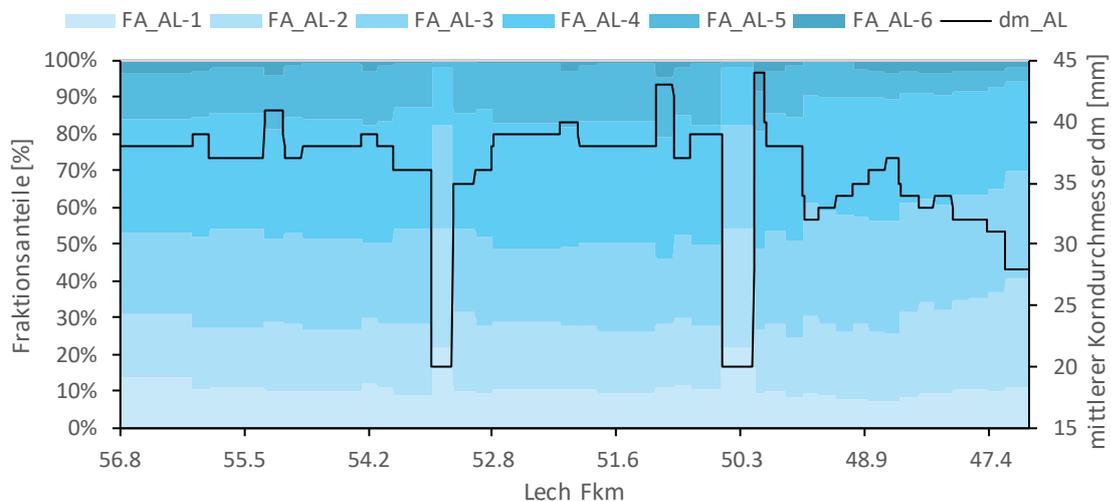


Abbildung 151: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht im Planungsbereich I bei Prognoseberechnungsstart

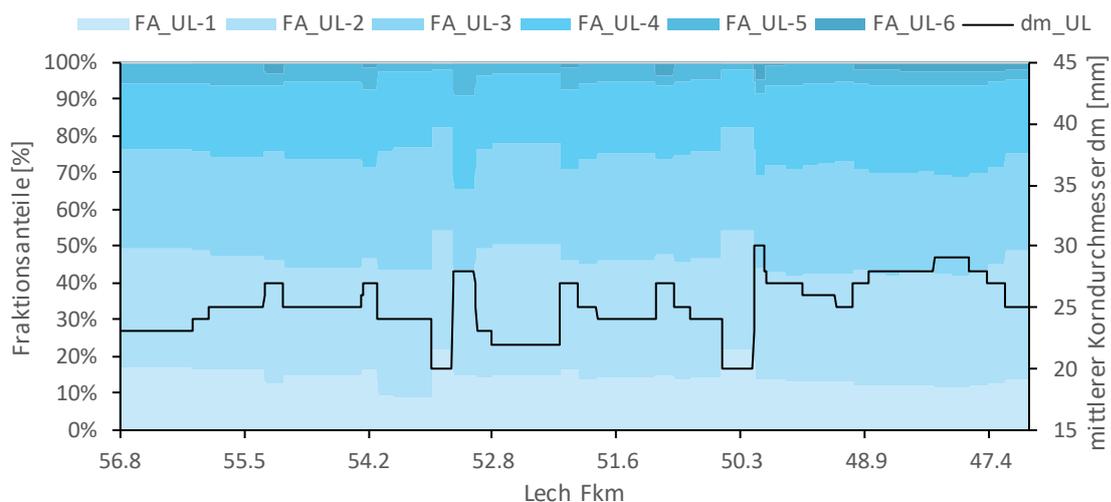


Abbildung 152: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht im Planungsbereich I bei Prognoseberechnungsstart

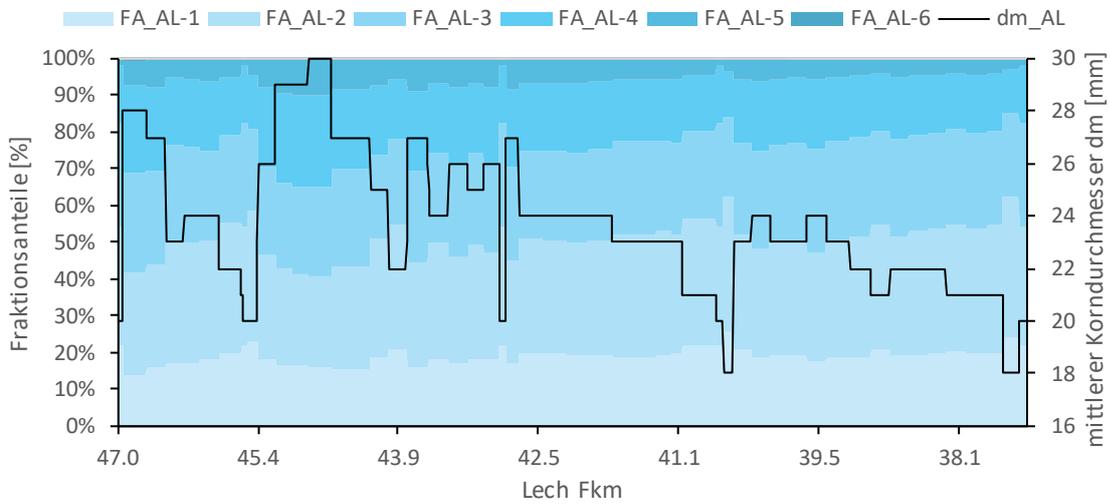


Abbildung 153: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht im Planungsbereich II bei Prognoseberechnungsstart

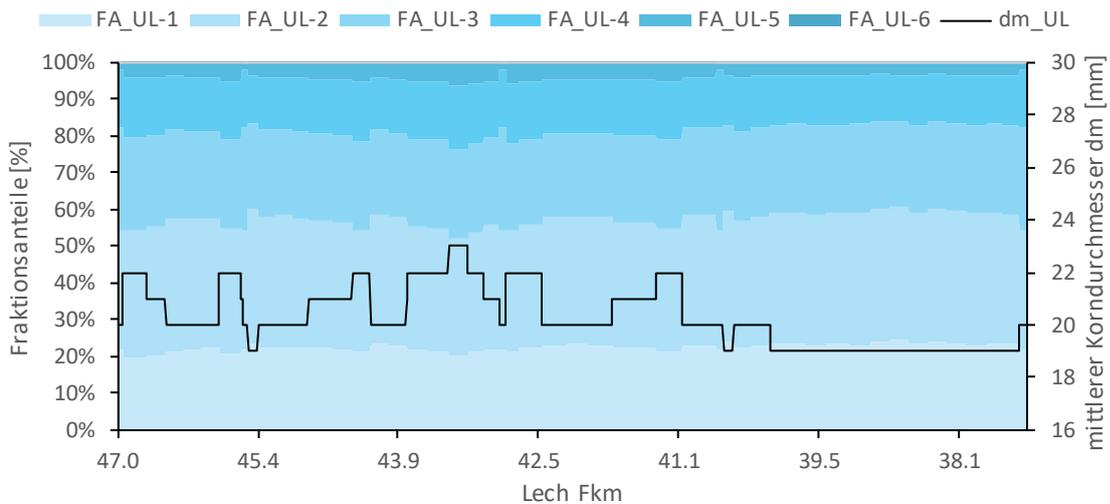


Abbildung 154: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht im Planungsbereich II bei Prognoseberechnungsstart

Abbildung 155 und Abbildung 157 zeigen die anfänglichen (zum Prognoseberechnungsstart) mittleren Korndurchmesser je Homogenabschnitt beider Planungsabschnitte (Resultate der Auswertung des Endzustandes der Kalibrierung, siehe Kapitel 2.3). Die Längsschnitte der anfänglichen Rauheitsbelegung beider Planungsbereiche sind in Abbildung 156 und Abbildung 158 dargestellt. Die Rauheitsbeiwerte $k_{St} = k_{St,r} = 21/d_{ms}^{1/6}$ nach Strickler werden direkt aus den mittleren Korndurchmessern der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) berechnet (siehe Kapitel 2.3).

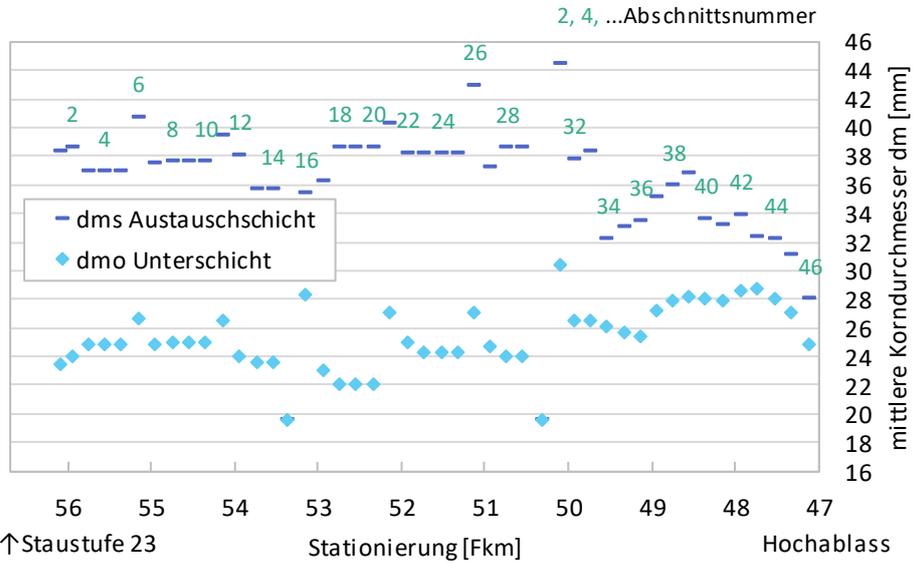


Abbildung 155: anfängliche abschnittskonstante mittlere Korndurchmesser d_{ms} (Austauschschicht) und d_{mo} (Unterschicht) im Planungsbereich I

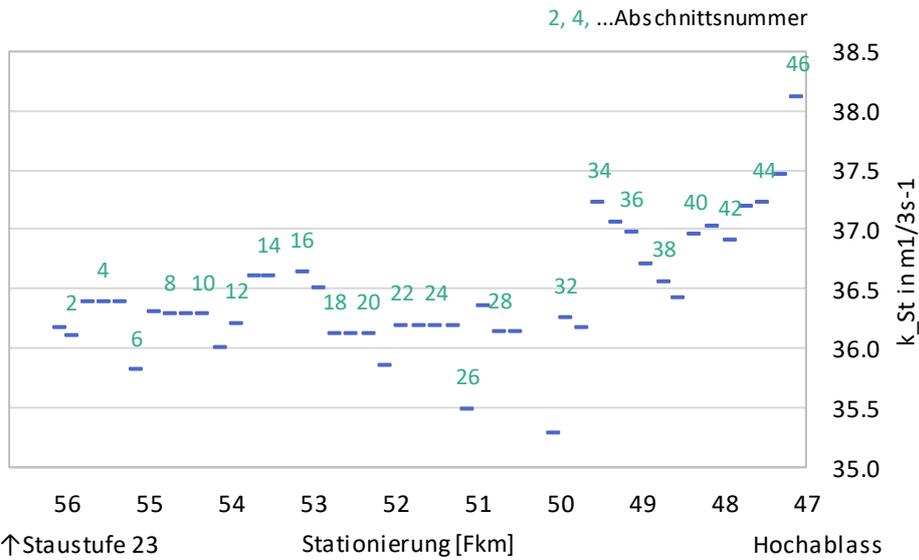


Abbildung 156: anfängliche Rauheitsbelegung $k_{St} = k_{St,r} = 21/d_{ms}^{1/6}$ (mit d_{ms} aus der Anfangsbelegung, Abbildung 155) im Planungsbereich I

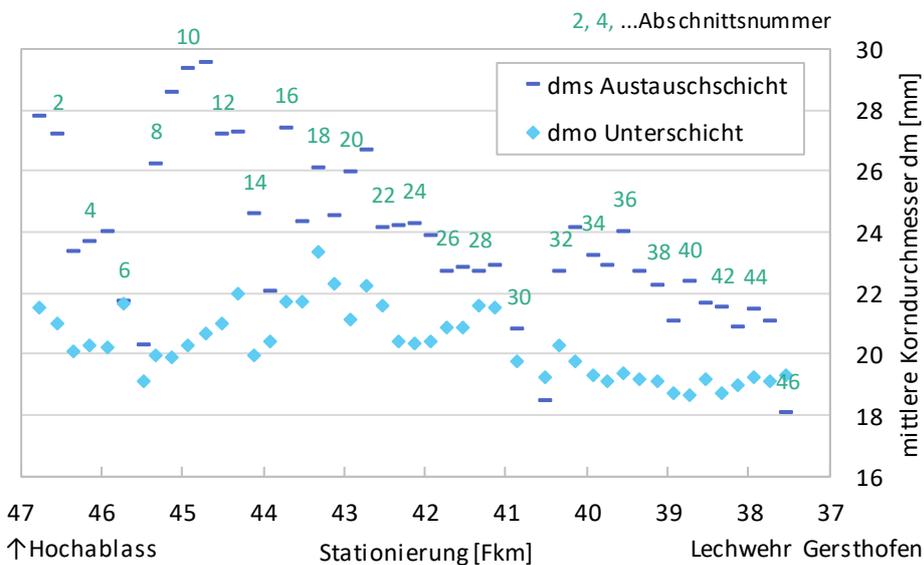


Abbildung 157: anfängliche abschnittskonstante mittlere Korndurchmesser d_{ms} (Austauschschicht) und d_{mo} (Unterschicht) im Planungsbereich II

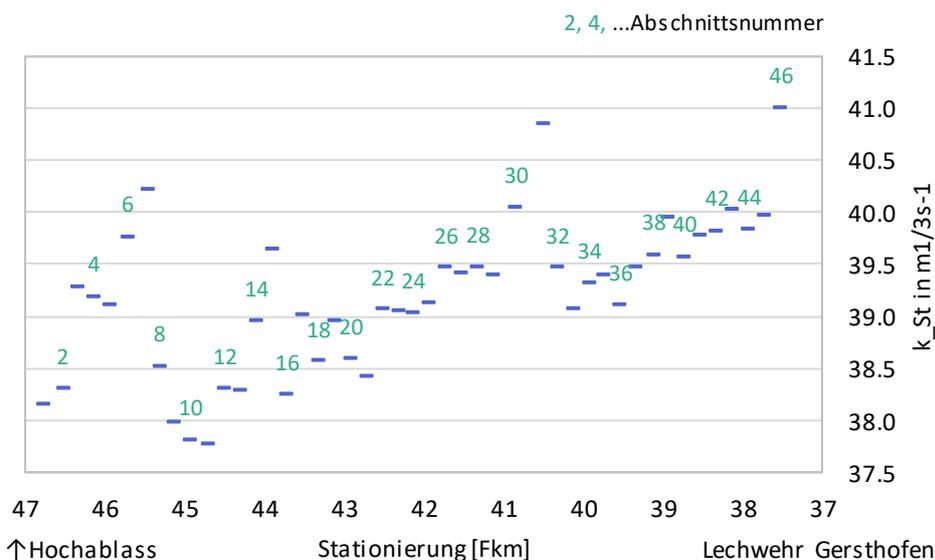


Abbildung 158: anfängliche Rauheitsbelegung $k_{St} = k_{St,r} = 21/d_{ms}^{1/6}$ (mit d_{ms} aus der Anfangsbelegung, Abbildung 157) im Planungsbereich II