

Licca liber - Weiterführende Untersuchungen

Anlage 5.3 Gewässermorphologische Langzeitprognose Bezugszustand

1	Inhalt des Berichts.....	2
2	Vorgehensweise bei der Modellierung.....	2
2.1	Generelles Modellierungskonzept	2
2.2	Berechnungsnetze und Ausgangsgeometrie	9
2.3	Anfangs- und Randbedingungen.....	10
3	Ergebnisse und Interpretation	14
3.1	Bezugszustand Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“).....	14
3.2	Bezugszustand Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“)	22
3.3	Interpretation.....	31
4	Anhang.....	32
4.1	Definition der Subperioden und Zulaufganglinien	32
4.2	Homogenabschnitte, Tertiäroberkante und Ausgangs-Sohlhöhen.....	35
4.3	Stoffeintrag von Teilgebiet Planungsbereich I in den Planungsbereich II..	39
4.4	Anfangszustand der Kornzusammensetzung und Rauheitsverteilung	44

1 Inhalt des Berichts

Gegenstand dieses Berichts ist die Langzeitprognosen der Sohlerwicklung 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 im Bezugszustand d.h. unter Beibehaltung aller derzeitigen flussbaulichen Randbedingungen. Dieser Bericht baut grundsätzlich auf den Erkenntnissen und dem Modellkonzept der Anlagen 5.1 und 5.2 auf. Zunächst wird die angewandte Methodik erläutert (Kapitel 2). Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst (Kapitel 3) und interpretiert. Der Anhang (Kapitel 4) gibt Einblick in Modellierungsdetails und erlaubt eine möglichst lückenlose Nachvollziehbarkeit der Prognoseberechnungen.

2 Vorgehensweise bei der Modellierung

2.1 Generelles Modellierungskonzept

Die Vorgehensweise für Langzeitprognose baut im Wesentlichen auf den vorangehend ausgeführten Arbeiten auf (siehe Anlage 5.1 und 5.2). Analog zu Kalibrierung und Validierung wird das Modellgebiet zweigeteilt:

- Teilgebiet Planungsbereiche I („Auwald“) von Staustufe 23 (Fkm 56,7) bis zum Hochablass (Fkm 47,0)
- Teilgebiet Planungsbereiche II („Stadt“) vom Hochablass (Fkm 47,0) bis zum Lechwehr Gersthofen (Fkm 37,4) (diese Einteilung wird auch für die gewässermorphologische Langzeitprognose der Planvarianten in Anlage 5.4 beibehalten)

Der Output aus dem oberen Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) wird als Input für das stromab liegende Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) weitergegeben. Dazu zählen der Reinwasserabfluss und die Geschieberaten inklusive der Kornverteilungen des ausgetragenen Materials.

Zur Modellierung des Teilgebietes Planungsbereich I („Auwald“) wird — wie zur Modellkalibrierung und Validierung (Anlage 5.2) — die Beta-Version 4.3.0 der Software HYDRO_FT-2D (Strömung und Geschiebetransport) der Firma Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH genutzt. Die Beta-Version 4.4.0 wurde der Universität Innsbruck erst ab Dezember 2017 zur Verfügung gestellt. 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. Diese neuere Version wird für

das Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) und die Prognoseberechnungen der Planvarianten (siehe Anlage 5.4) eingesetzt.

Generelle (globale) Einstellungen für den Betrieb des numerischen Modells werden aus den vorangegangenen Arbeiten übernommen (vgl. Anlage 5.2). Dazu zählen:

- Einstellungen der Schichtdicken pal und pul
- Dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields $\theta_{cr} = \theta_{ce}$
- Faktor k_F zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformeln MPM und MPM/Hunziker
- Beschleunigungsparameter SCF und SCFG
- Anzahl an Kornklassen
- Mittlere Korngrößen der Kornklassen bzw. Fraktionen

Zur Beschleunigung der Rechenläufe im Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) wird ein abflussabhängiger SCFG-Faktor definiert (Abbildung 1, möglich ab HYDRO_FT-2D Version 4.4.0). Dieser ermöglicht eine erhebliche Verkürzung der Rechenzeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit während bettbildender Hochwasserereignisse.

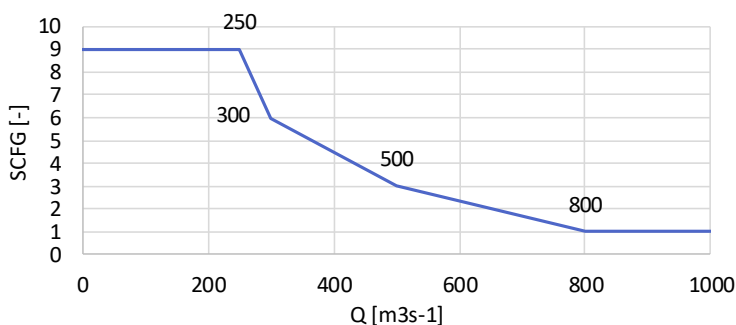


Abbildung 1: abflussabhängiger SCFG-Faktor, Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“)

Der Simulationszeitraum orientiert sich an den verfügbaren Daten der Messstelle Haunstetten (Fkm 50,4, Messstellen-Nr. 12003500, Stadt Augsburg). Hier liegt eine durchgängig gemessene Abflussganglinie in Form von Stundenmittelwerten ab November 1975 vor. Die höchsten Abflüsse im Beobachtungszeitraum traten am 22.05.1999 mit 1150 m³/s, am 24.08.2005 mit 1130 m³/s und am 14.05.1999 mit 796 m³/s auf. Als Enddatum der Betrachtung wurde der 1. Januar 2014 festgelegt. Damit ergibt sich eine etwa 38 Jahre umfassende Datengrundlage. Analog zu den vorangegangenen Arbeiten wird die Abflussganglinie auf geschieberelevante Zeiträume reduziert (Anlage 5.1, Kapitel 5.1). Zur Kappung der Zeitreihe wird der kritische Abfluss $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ verwendet, woraus 5 506 Abfluss-Stundenwerte bzw. Zeitschritte resultieren (Abbildung 2).

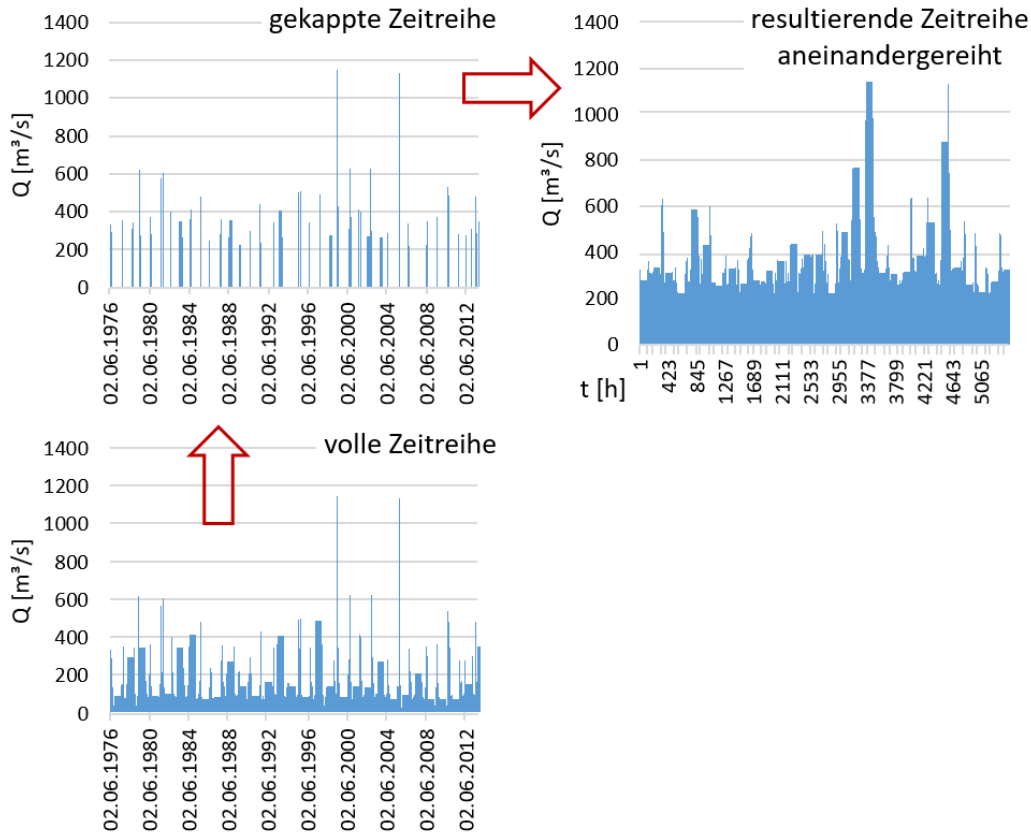


Abbildung 2: Kappen und Aneinanderreihen der Abflusszeitreihe $Q(t)$ am Pegel Haunstetten für $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$

Die Definition der Zuflussrandbedingungen ist in HYDRO_FT-2D auf 2 000 Zeitschritte limitiert. (Anmerkung: Die Felddimension für die Stoffeintragszeitreihen wurden erst in Version 5.0.0 aufgehoben, ein Versionsumstieg im Laufe der Projektbearbeitung war nicht mehr möglich.) Da die Zeitreihe nicht als Ganzes modelliert werden kann, werden stattdessen drei Subperioden definiert und in Kapitel 4.1 im Detail beschrieben. Die resultierenden Ganglinien dieser Subperioden werde als hydraulische Zuflussrandbedingung im Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) unterhalb der Staustufe 23 gesetzt. Um die Prognose auf einen längeren Zeitraum ausdehnen zu können, werden die drei Subperioden zweimal hintereinander berechnet. Somit ergibt sich ein Simulationszeitraum von insgesamt 76 Jahren inklusive vier hundertjähriger Hochwasserereignissen nach derzeitiger Hochwasserstatistik ($HQ_{100} = 1050 \text{ m}^3/\text{s}$). Bedingt durch den Klimawandel und der Möglichkeit zur Vorabsenkung des Forggensees (siehe Erläuterungsbericht, Kapitel 8.3.3) werden zukünftige veränderte Hochwasserabflüsse zu erwarten sein. Deren Entwicklung ist aber schwer abschätzbar. Eine eindeutige Steuervorschrift für Forggenseeabsenkungen ist nicht vorhanden, da dazu die jeweils aktuellen Randbedingungen wie z.B. Jahreszeit und Speicherfüllung beachtet werden müssen. Allerdings deuten die Häufung und Intensitätssteigerung der

Hochwasserereignisse in Mitteleuropa innerhalb der letzten Jahrzehnte in Richtung einer Verschärfung. Insofern erscheint die gewählte Vorgangsweise gerechtfertigt.

Das Modellierungskonzept sieht vor, die Endzustände aus den Subperioden als Anfangszustand für die darauffolgende Subperiode zu übernehmen. Für den Übertrag der Daten steht ein eigens entwickeltes Übertragungstool zur Verfügung, welches die benötigten HYDRO_FT-2D Startdateien automatisiert erzeugt bzw. diese modifiziert. Beim Aufsetzen der Anfangsbedingungen für eine Subperiode aus der vorhergehenden Subperiode ergeben sich zusätzlich Möglichkeiten der Modifikation, wie beispielsweise der Anpassung der Rauheitsbeiwerte und der Umsetzung von lokalen Geschiebezugaben (letztere sind für die gewässermorphologischen Langzeitprognosen der Planvarianten in Anlage 5.4 relevant).

Für die Langzeitprognose des Bezugszustandes wird angenommen, dass weder am oberen Modellrand unterhalb der Lechstufe 23 noch an irgendeiner anderen Gewässerstelle ein Geschiebeeintrag erfolgt.

Die Software HYDRO_FT-2D erlaubt die knotenweise Vorgabe einer maximalen Erosionstiefe (DZG_Layer-1). Dafür wird der Abstand von der jeweils aktuellen Sohlenkote bis zur modellierten Lage der Tertiärschicht gewählt. Dieses Konzept folgt der Argumentation in Anlage 5.1, Kapitel 4.2. Eine Modellierung lokaler Erosionen ist ab dem Erreichen des Tertiärs nicht mehr sinnvoll möglich und wird unterbunden.

In Abbildung 3 ist das Modellkonzept schematisch dargestellt.

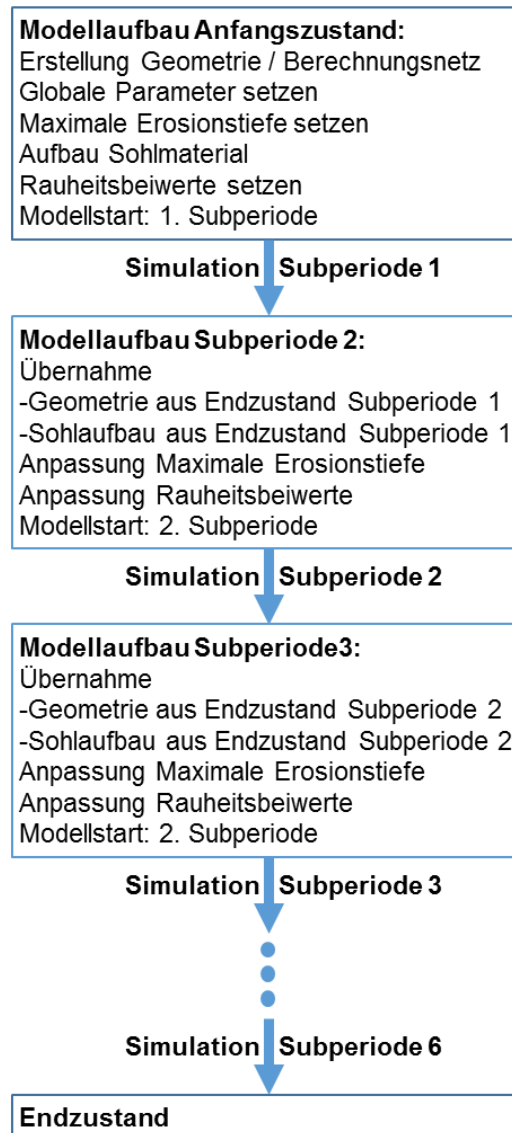


Abbildung 3: Modellkonzept zur Simulation langer Zeiträume als Prognosewerkzeug

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. Die Gewässersohle wird in sogenannte Homogenabschnitte unterteilt, die sich an der Lage der Querprofil-aufnahmen orientieren und die Bauwerke (Sohlstufen, Wehre) aussparen. Details zu den Homogenabschnitten finden sich in Kapitel 4.2. 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.

Der Informationsübertrag zwischen den Teilmodellen Planungsbereich I („Auwald“) und Planungsbereich II („Stadt“) wird analog der Vorgangsweise in Anlage 5.2, Kapitel 3.1.1 bewerkstelligt. Die Zulauftrandbedingungen je Subperiode des Reinwasserzuflusses für das Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) werden aus den Berechnungsergebnissen des Teilgebietes Planungsbereich I („Auwald“) abgeleitet (Abbildung 4). Die Abflussganglinien werden dabei um den konstanten Abfluss von 46 m³/s in den Stadtbach bei der linksufrigen Ableitung vor dem Hochablass (Abbildung 4 bzw. Anlage 4.1, Kapitel 3.1) vermindert (resultierende Ganglinien: siehe Kapitel 4.3).

Die Randbedingungen für den Stoffeintrag am Zulauf zum Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“) werden ebenfalls aus den Ergebnissen im Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) gewonnen. Dazu werden die Geschieberaten der Kornverteilung als Stundenwerte benötigt. Die Geschieberaten als Summe aller Fraktionsanteile in kg/s in stündlicher Auslösung werden vom Modell direkt bereitgestellt. In Version 4.3.0 der Software HYDRO_FT-2D liegt aber keine direkte Information über die zugehörige Kornverteilung des Geschiebeaustrags am Modellrand vor. HYDRO_FT-2D schreibt jedoch eine Reihe von flächigen Datensätzen im Binärformat aus, welche knotenweise Informationen über die Entwicklung der Sohle enthalten. Die zeitliche Auflösung der Ausschreibzeitpunkte muss vorgegeben werden. Die Erzeugung der Ergebnisdateien ist rechenintensiv und verlangsamt die Simulation deutlich. Daher wird ein Zeitschritt von 864 000 Sekunden gewählt (siehe Kapitel 4.1). Als Resultat ergeben sich somit alle 240 Stunden die Knotenwerte der Fraktionsanteile jeder Kornklasse des gerade laufenden Geschiebes.

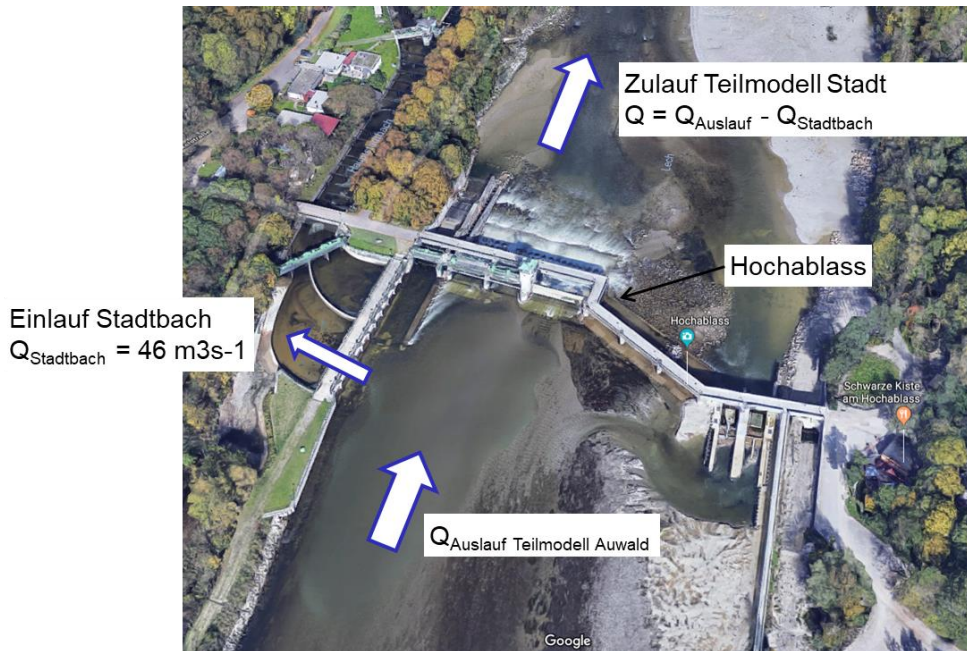


Abbildung 4: Auslauf aus Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“) und Zulauf zum Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“)

Analog zu Kapitel 3.1.1 in Anlage 5.2 werden aus diesen flächigen Knotenergebnissen die mittleren Fraktionsanteile des transportierten Geschiebes für drei Abschnitte am Modellende des Teilmodells Planungsbereich I („Auwald“) vor dem Hochablass ausgewertet (Abbildung 5) und wiederum gemittelt. Bedingt durch den großen Ausschreibe-Zeitschritt entstehen dennoch zeitliche Lücken. Zur Kompensation wird die Annahme getroffen, dass bei ähnlichen Abflüssen auch ähnliche Kornverteilungen transportiert werden. Die benötigten stundenweisen Ganglinien der Fraktionsanteile werden schließlich durch lineare Interpolation zwischen bekannten bzw. angenommenen Werten gewonnen. Die resultierenden Sedigraphen und weitere detaillierte Informationen finden sich in Kapitel 4.3.

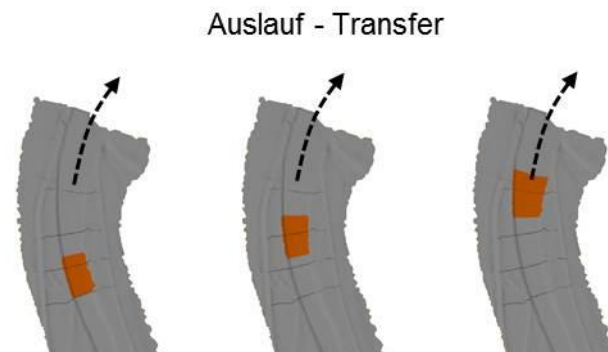


Abbildung 5: Abschnitte zur Ermittlung der Kornverteilung des transportierten Geschiebes am Auslauf des Teilgebietes Planungsbereich I („Auwald“)

2.2 Berechnungsnetze und Ausgangsgeometrie

Die Langzeitprognose der morphologischen Entwicklung der Gewässersohle wird für den Bezugszustand durchgeführt. Dieser soll möglichst gut die momentanen Gewässerverhältnisse widerspiegeln. Als Ausgangsgeometrie (Vorland, Böschungen und Gewässersohle) werden die Vermessungsdaten des Jahres 2010 und daraus abgeleitete Berechnungsnetze verwendet (siehe Anlage 5.1, Kapitel 3.3). Im Wesentlichen wird das Berechnungsnetz aus der Reinwasserhydraulik übernommen, in die beiden Teilgebiete Planungsbereich I („Auwald“) und II („Stadt“) aufgeteilt und zur Verkürzung der Rechenzeit auf den Hauptflussschlauch bis zur Dammkrone beschnitten.

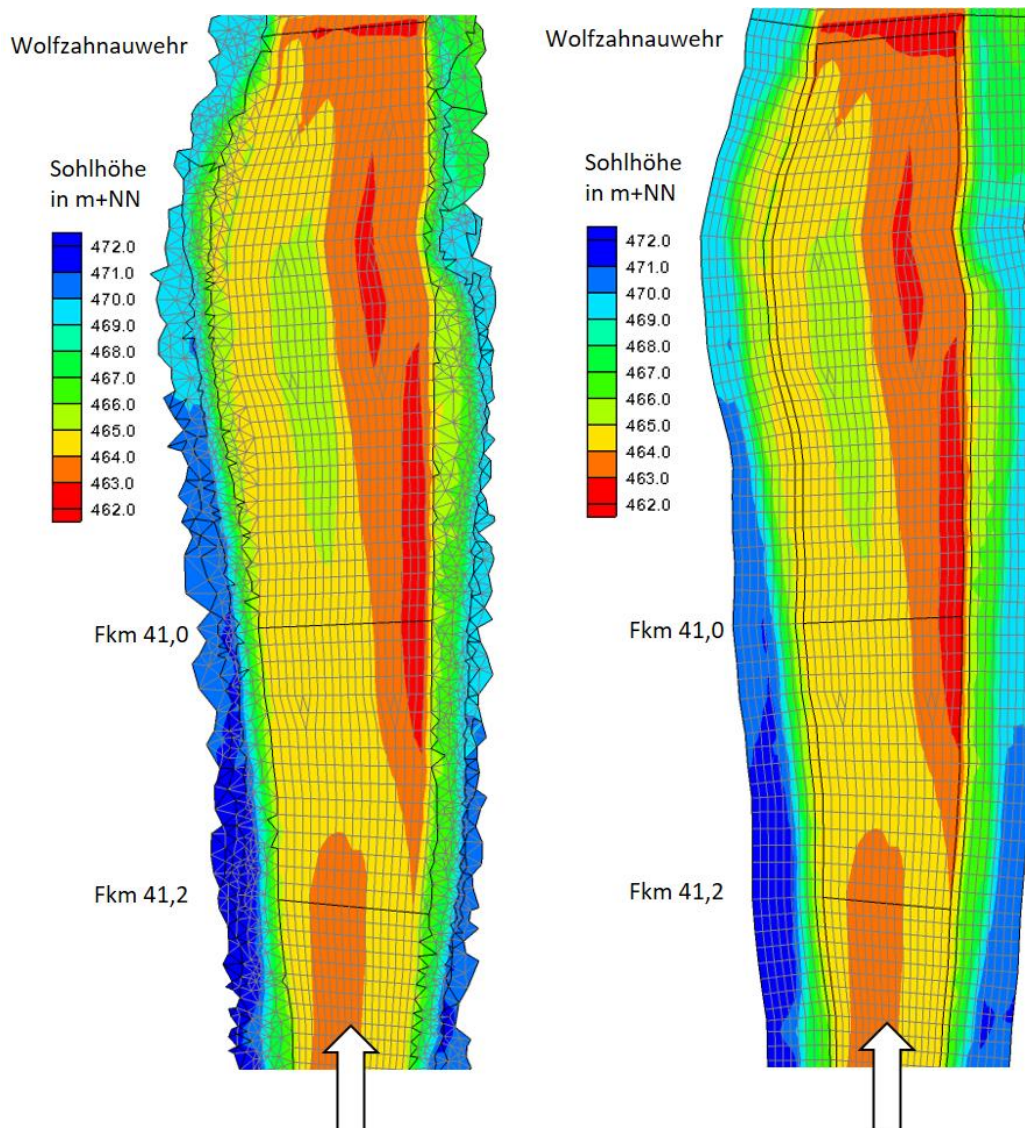


Abbildung 6: Beispielabschnitt des Berechnungsnetzes Teilgebiet Planungsbereich II; links: direkt aus der Reinwasserhydraulik; rechts: Rechenzeit-optimiert

Das Berechnungsnetz des Teilgebietes Planungsbereich II („Stadt“) wird zusätzlich hinsichtlich der benötigten Berechnungszeit optimiert (vgl. Anlage 5.1, Kapitel 5.1 „Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit“). Die oft sehr kleinen Elemente an den Böschungen werden durch regelmäßigeren Höhenschichtlinien-angepasste Netzelemente ersetzt und die Knotenhöhen übertragen (Abbildung 6). In Kapitel 4.2 finden sich Längsschnitte der Sohlhöhen im Anfangszustand (Jahr 2010) und der Lage der Tertiärschicht beider Teilmodelle.

2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Aus den vorangegangenen Arbeiten wird die Einteilung der Gewässerstrecke in Homogenabschnitte übernommen, für welche die Anfangsbedingungen vorzugeben sind. Der Sohlaufbau der drei Modellierungsschichten (Austausch-, Unter- und Grundsicht) wird aus dem Endzustand der Feinkalibrierung abgeleitet (Anlage 5.2). Dazu werden die knotenweise unterschiedlichen Korngrößenverteilungen des Endzustandes der Kalibrierungsberechnung für jeden Homogenabschnitt getrennt gemittelt. Diese Mittelwerte werden dann für dieselben Homogenabschnitte flächig als Anfangsbedingung der Langzeitprognose-Simulation definiert. Auf diese Weise wird ein homogenisierter Anfangszustand zum Start der Prognoseberechnungen hergestellt und die Übernahme lokaler Extremwerte der knotenweisen Korngrößenverteilung am Ende des Kalibrierungsrechenlaufs vermieden. Der resultierende Anfangszustand der Kornzusammensetzung wird im Detail in Kapitel 4.4 beschrieben.

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 4.4 finden sich zwei Längsschnitte mit den resultierenden abschnittskonstanten Rauheitsbeiwerten für beide Teilgebiete Planungsbereich I und **(Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)** II **(Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)**.

Sämtliche Randbedingungen entsprechen jenen der Kalibrierungs- und Validierungsmodelle in Anlage 5.2. Die Randbedingungen des numerischen Modells Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) 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 Kapitel 2.1 werden in Kapitel 4.1 im Detail beschrieben.

Tabelle 1 und Abbildung 7 zeigt u.a. die verwendete Wasserstand-Abfluss Beziehung (W-Q) am Hochablass.

Tabelle 1: Wasserstand-Abfluss Beziehungen (Typ: W-Q / Strickler) am Hochablass (Teilgebiet Planungsbereich I „Auwald“) und am Lechwehr Gersthofen (Teilgebiet Planungsbereich II „Stadt“)

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

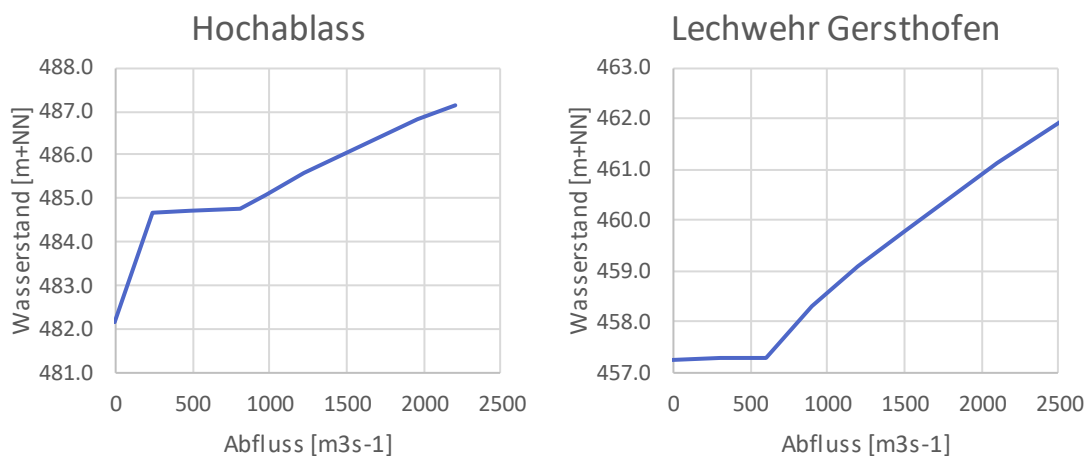


Abbildung 7: Wasserstand-Abfluss Beziehungen (Typ: W-Q / Strickler) am Hochablass (Teilgebiet Planungsbereich I „Auwald“) und am Lechwehr Gersthofen (Teilgebiet Planungsbereich II „Stadt“)

Die Randbedingungen des numerischen Modells Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) bestehen aus

- einem Zulauf am oberen Modellrand (HYDRO_FT-2D Nodestring Boundary Typ: Zulauf und Stoffeintrag) unterhalb des Hochablasses gekoppelt am Modellauslauf des Teilgebietes Planungsbereich I „Auwald“ (Methodik siehe Kapitel 2.1),
- 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 1 bzw. Abbildung 7 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 8 zeigt die die verwendete Wasserstand-Abfluss Beziehung dieser Wehre.

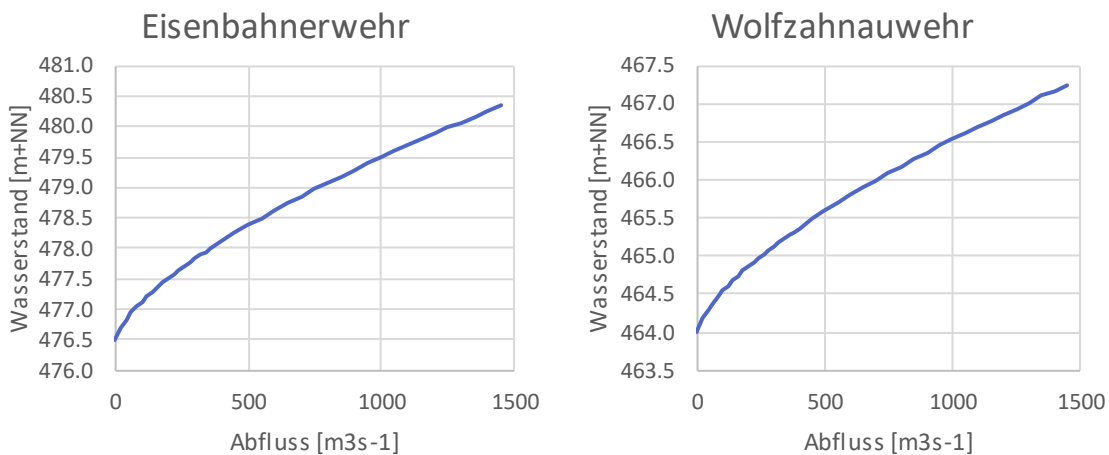


Abbildung 8: Wasserstand-Abfluss Beziehungen (W-Q / Strickler) am Eisenbahner- und Wolfzahnauwehr im Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“)

Eine schematische Darstellung des Gewässersystems und aller Ausleitungen im Bereich der Stadt Augsburg ist in Anlage 4.1 im Kapitel 3.1 enthalten. Anstelle der Ermittlung einer Zuflussganglinie der Wertach aus der Differenz der Ganglinie am Pegel „Augsburg u. d. Wertachmündung“ und Pegel "Haunstetten“ (siehe Anlage 5.1, Kapitel 4.5) wird vereinfachend ein konstanter mittlere Abfluss MQ angesetzt. Es ist anzunehmen, dass während der Baumaßnahmen des Renaturierungsprojekts Wertach Vital Geschiebe in der Wertach mobilisiert wurde und temporär die Morphologie des Lechs beeinflusst. Informationen über Geschiebeeinträge aus der Wertach und deren zeitliche Verläufe sind allerdings nicht verfügbar. In der Langzeitbetrachtung nach dem Abklingen der temporären Beeinflussung dürften jedoch die Mengen der möglichen Geschiebeeinträge aufgrund zahlreicher Querbauwerke und der wasserwirtschaftlichen Nutzung der Wertach nur von untergeordneter Bedeutung für die Morphologie des Lechs sein. Zudem gilt es vordringlich, die Erosionstendenz im Lech zu bewerten, vorbehaltlich verbessernder Effekte durch seitliche Geschiebeeinträge. Aus diesen Gründen wird vereinfachend auf die Modellierung eines Geschiebeeintrags aus der Wertach verzichtet. Beide Vereinfachungen haben sich bei Kalibrierung und Validierung bewährt, sodass die vermessenen Sohlveränderungen in den Modellen nachvollzogen werden konnten (Anlage 5.2).

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Bezugszustand Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“)

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Langzeitprognose für den Bezugszustand im Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) dargestellt. Abbildung 9 zeigt den Längsschnitt der Sohllagenentwicklung. Dargestellt sind die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung (Anfang), nach den ersten drei Subperioden (Ende Subperiode 3, vgl. Kapitel 4.1) und nach der zweimaligen Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6, simulierte Zeit: 76 Jahre). Außerdem sind die erosions sicher modellierten Abstürze, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 4.2 zur besseren Orientierung eingezeichnet.

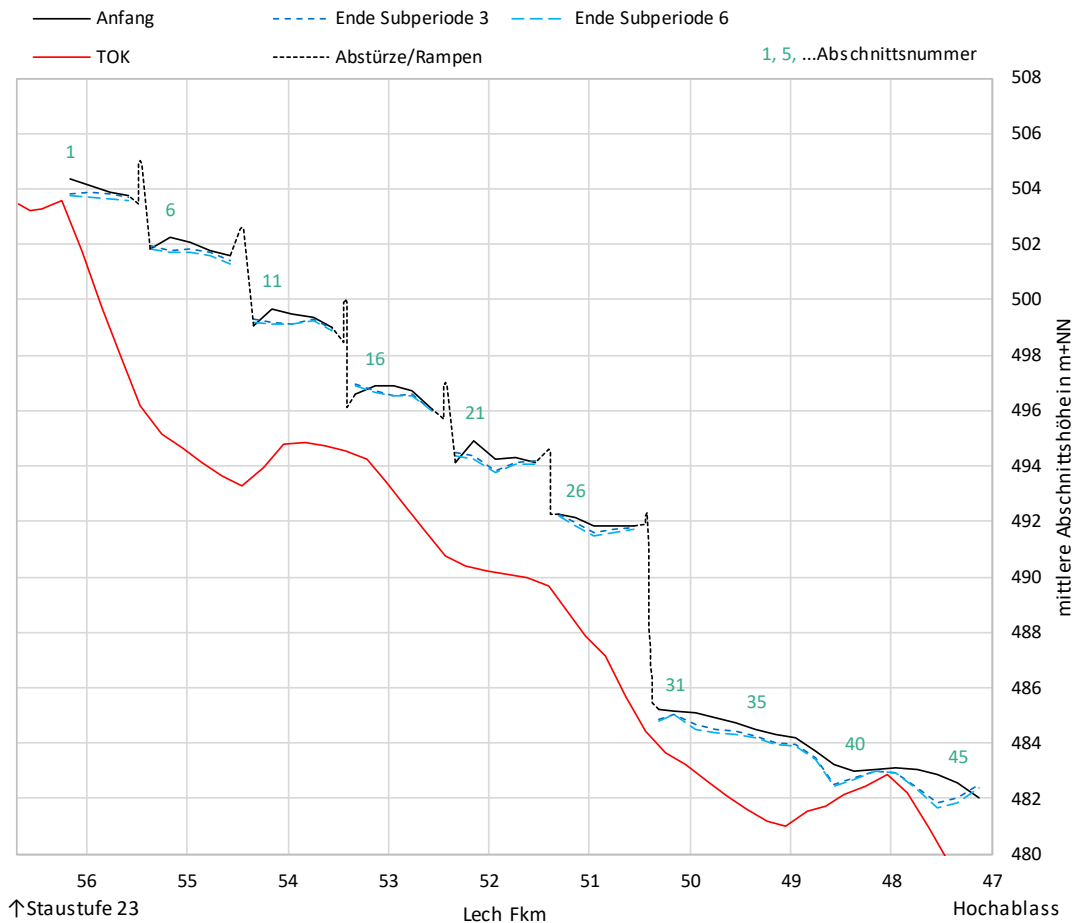


Abbildung 9: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 im Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“)

Insgesamt herrscht im gesamten Teilgebiet eine Erosionstendenz vor. Die größten Eintiefungen entstehen während des ersten Durchgangs der drei Subperioden von 1976 bis 2014. Während des zweiten Durchlaufs (Subperioden 4 bis 6) verhält sich die Sohle relativ stabil und es kommt nur noch zu geringen weiteren Sohleintiefungen. Im Zulaufbereich und im Bereich nach dem letzten Absturz bei Fkm 48,0 wird die Tertiärschicht an lokalen Stellen erreicht. Durch die Modelleinstellungen sind in der Folge in diesen Bereichen keine weiteren Erosionen zulässig (Kapitel 2.1). In der Realität könnte bei Erreichen des Tertiärhorizonts jedoch im schlimmsten Fall ein lokaler Sohldurchschlag erfolgen. Im Bereich unmittelbar vor dem Auslauf kommt es bedingt durch den Aufstau am Hochablass zu Materialanlandungen.

Abbildung 10 zeigt die Volumensummenänderung (Lockervolumen) am Berechnungsende jeder Subperiode. Lediglich in den Bereichen nach den Abstürzen kommt es zu kleineren und im Bereich vor dem Auslauf zu stärkeren Ablagerungen (gekennzeichnet durch ansteigende Graphen). Die generelle Eintiefungstendenz ist dennoch klar ersichtlich. Die Sohlumlagerungen sind in den ersten drei Subperioden (Jahre 1976 bis 2014) wesentlich stärker als in den darauffolgenden Subperioden. Die Summen des Sedimentaustrags am Modellauslauf (= Sedimenteintrag Teilgebiet Planungsbereich II, „Stadt“) sind in Kapitel 4.3 ersichtlich (z.B. in Abbildung 43 für die Subperiode 1) und korrespondieren mit den Werten der Volumensummenänderungen in Abbildung 10 am Hochablass. Insgesamt wird eine Sedimentfracht als Summe der Subperioden-Frachten von $6\,443 + 97\,574 + 32\,524 + 2\,922 + 39\,760 + 18\,678 = 197\,900 \text{ m}^3$ Lockervolumen im Prognosezeitraum aus dem Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) ausgebracht. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa $2\,600 \text{ m}^3$ Lockervolumen.

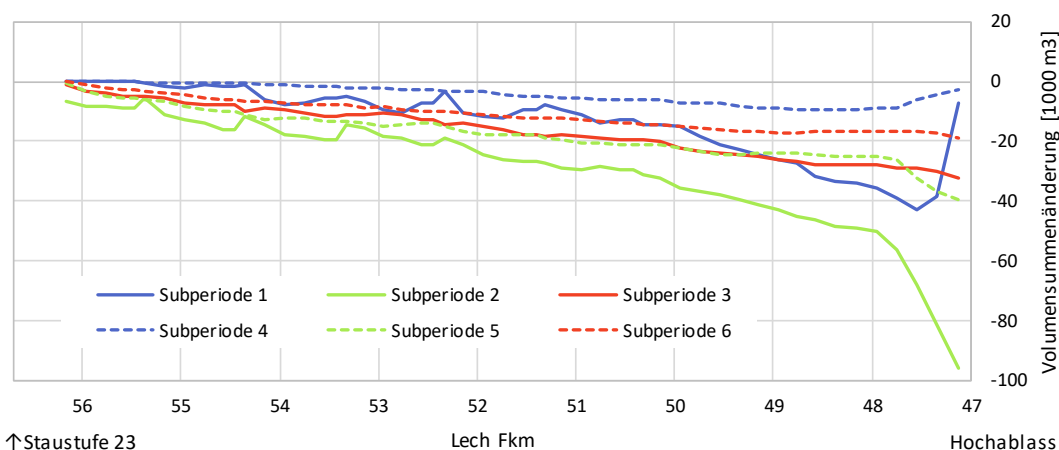


Abbildung 10: Volumensummendiagramm, Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“)

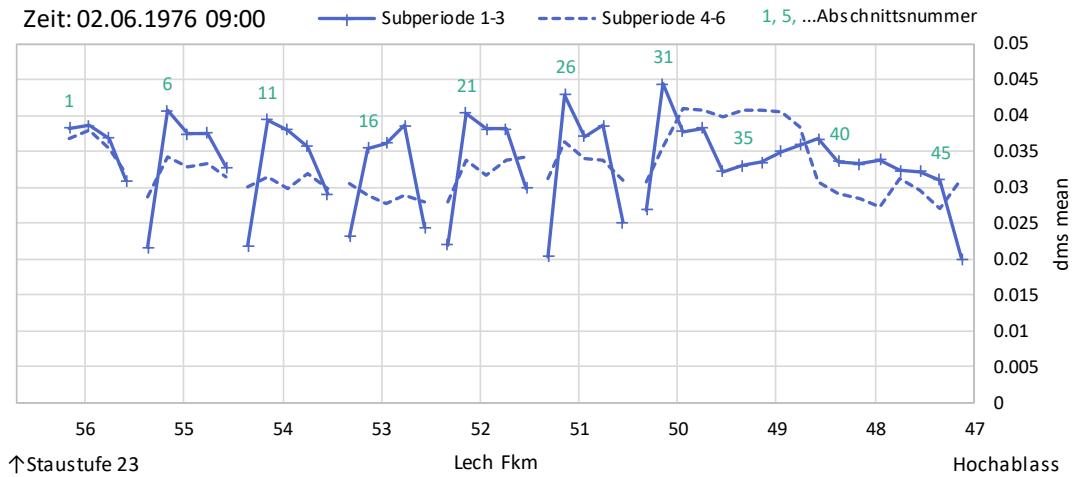


Abbildung 11: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

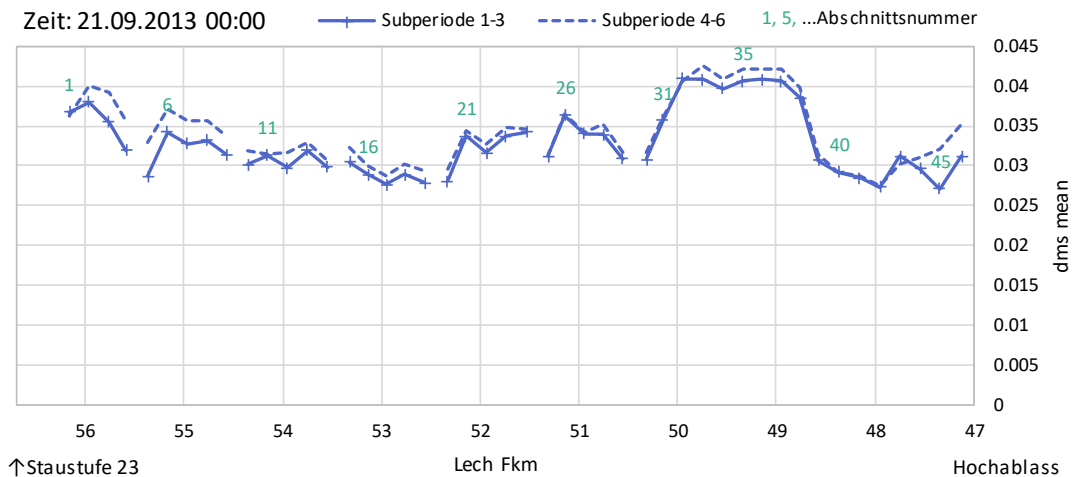


Abbildung 12: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 11 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. Lediglich in Bereichen nach Abstürzen kommt es zu einer Vergrößerung. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 12) zeigt, dass sich in der zweiten

Berechnungshälfte die Korndurchmesser wieder etwas vergrößern, insgesamt jedoch sehr stabil bleiben.

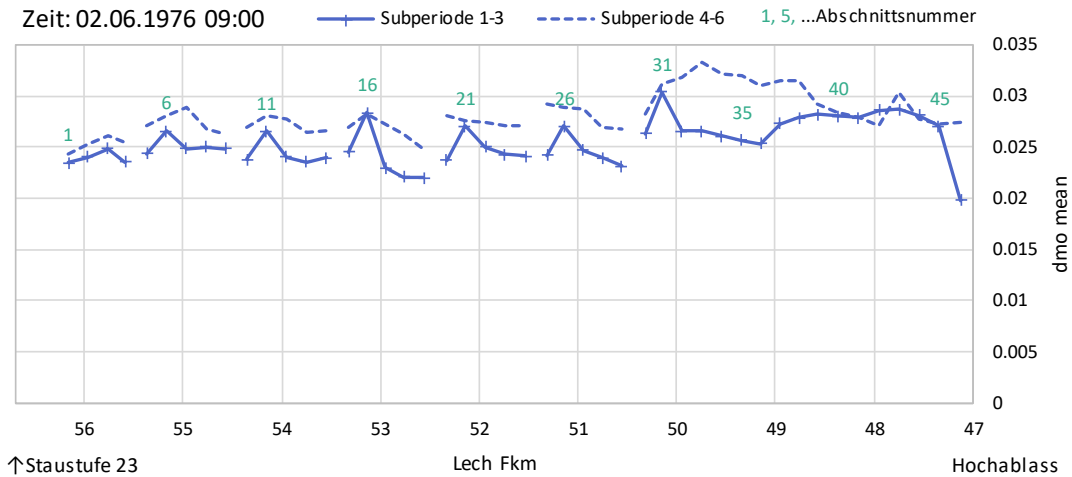


Abbildung 13: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

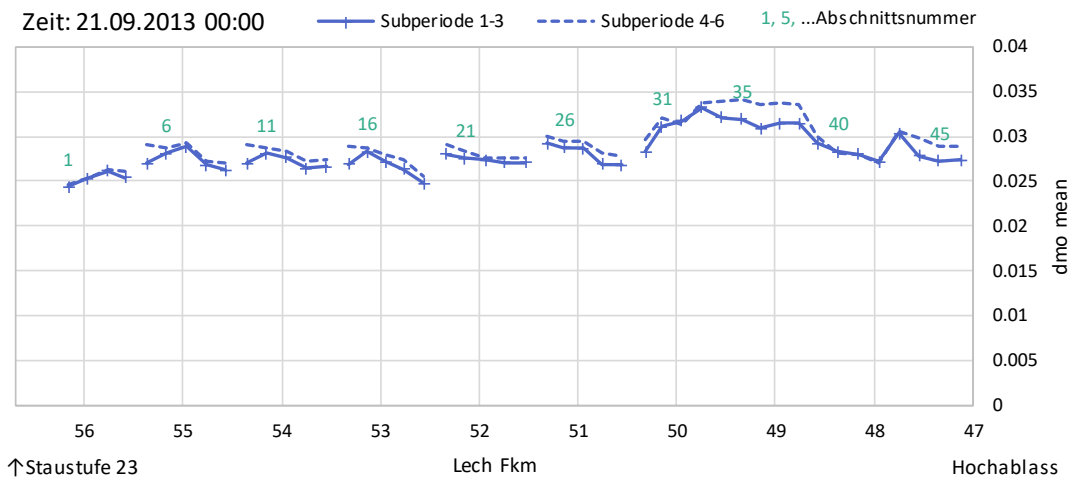


Abbildung 14: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} (d_{m_UL}) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 13 und Abbildung 14 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.

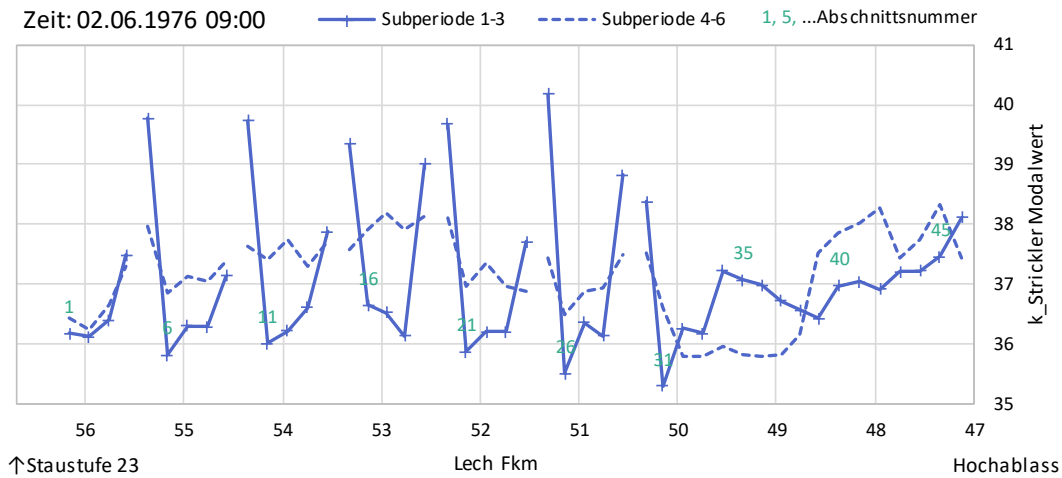


Abbildung 15: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

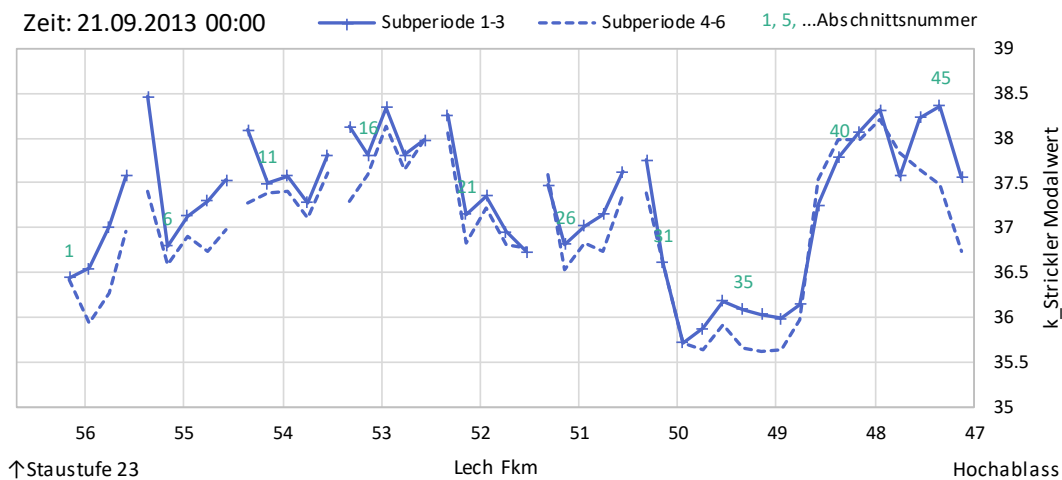


Abbildung 16: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} u.a. bei Simulationsbeginn und bei Simulationende. Insgesamt tritt eine Vergleichmäßigung der Werte entlang der Gewässerachse auf (Bandbreite: $35.5 < k_{St} < 38.5$).

Die Dynamik der morphologischen Veränderungen und Parameter-Modifikationen (Rauheitsanpassung) während des Berechnungsverlaufs können am besten mit Zeit-Kennwert-Diagrammen dargestellt werden. Exemplarisch wird dies für den Homogenabschnitt 6 zwischen Fkm 55,3 und Fkm 55,1 demonstriert. In Abbildung 17 ist gut der große Einfluss des historischen Hochwasserereignisses am 22.05.1999 erkennbar. Die mittlere Sohle tiefen sich hier um ca. 30 cm ein. Gleichzeitig verfeinert sich die Kornzusammensetzung der Austauschschicht (Abbildung 18). Die Methodik der Rauheitsanpassung (Kapitel 2.1) sorgt für eine entsprechende Änderung des Rauheitsparameters k_{St} am Start jeder Subperiode (Abbildung 19).

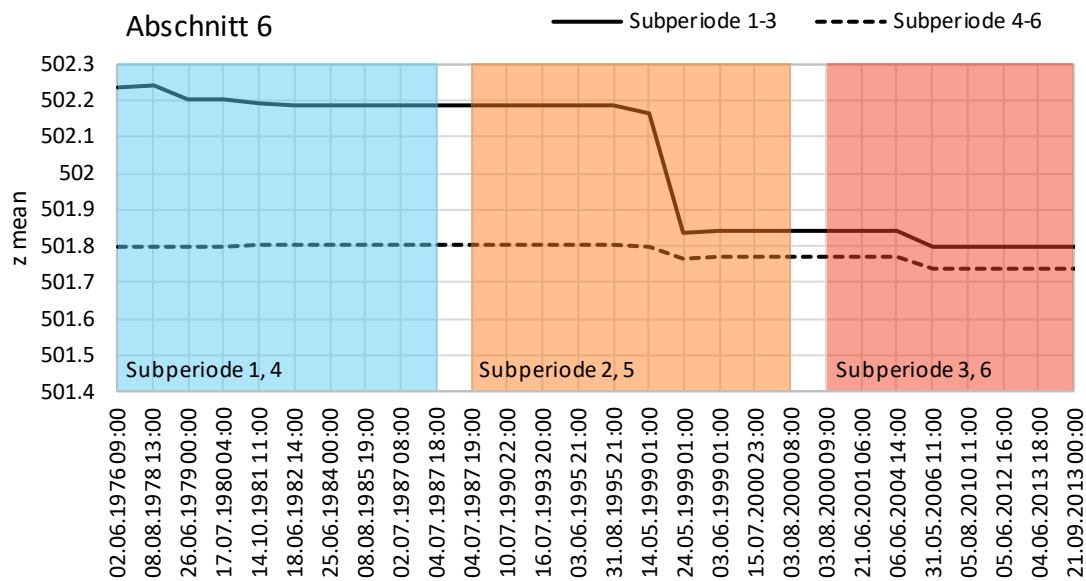


Abbildung 17: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 6 im zeitlichen Verlauf

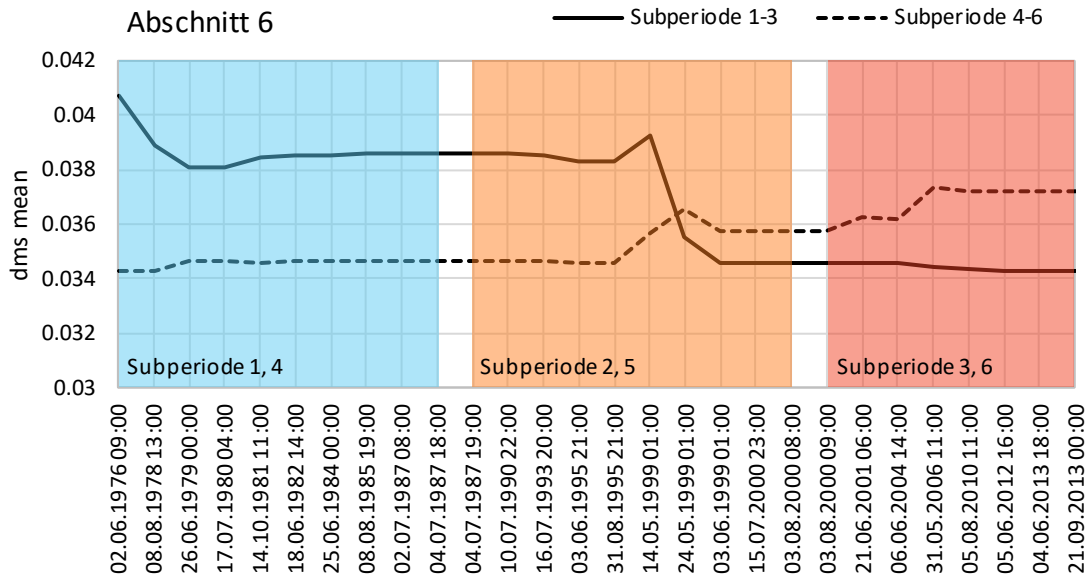


Abbildung 18: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 6 im zeitlichen Verlauf

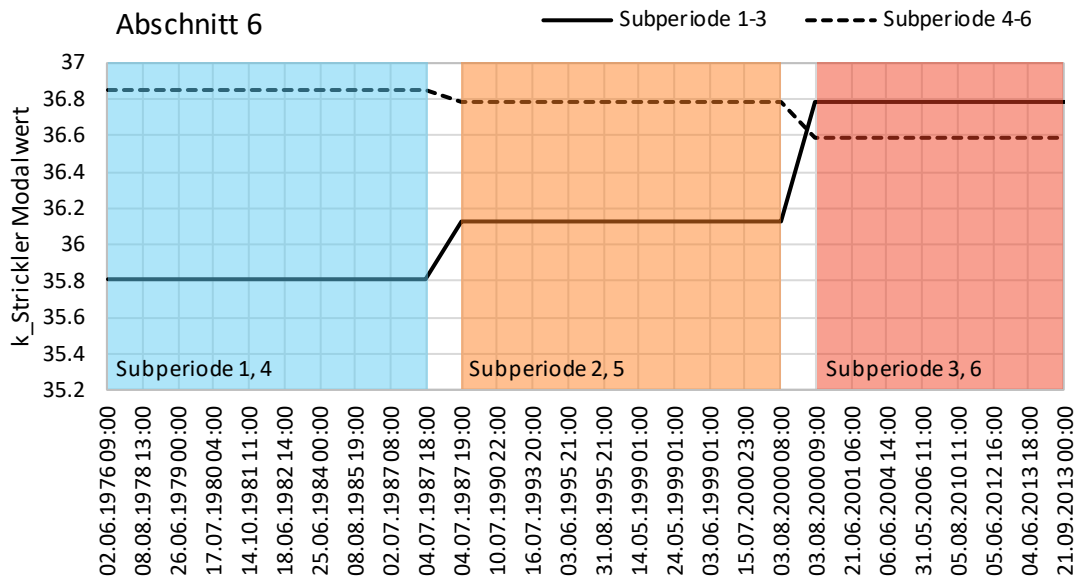


Abbildung 19: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 6 im zeitlichen Verlauf

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 5) und zu jedem Zeitschritt (Tabelle 4), 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_{m_s} (mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht), d_{m_o} (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 20 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 4.1) entlang des Längsschnittes.

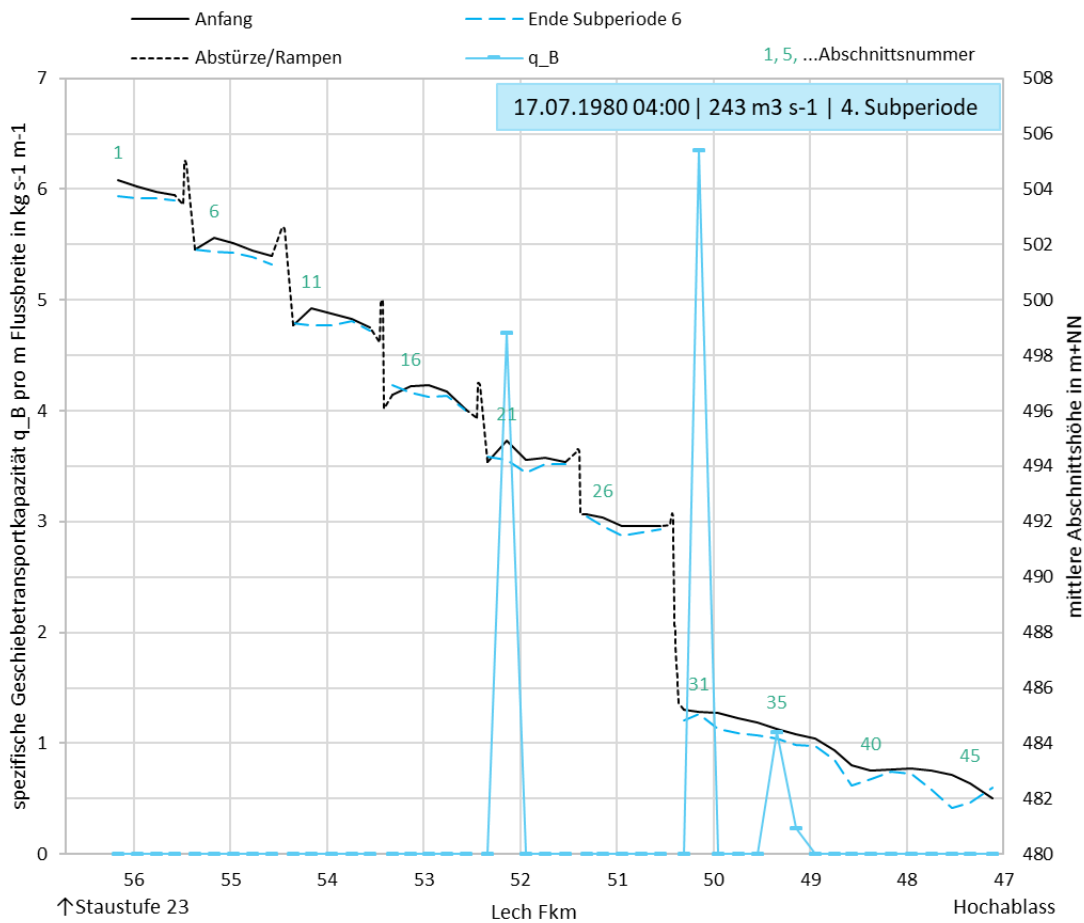


Abbildung 20: Längsschnitt der spezifischen Transportrate q_B , sowie der mittleren Abschnittshöhen am Simulationsanfang und -ende, Planungsbereich I

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>)

3.2 Bezugszustand Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“)

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Langzeitprognose für den Bezugszustand für das Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) dargestellt. Abbildung 21 zeigt den Längsschnitt der Sohlagenentwicklung. Wie schon in Abbildung 9 für das Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) sind hier die mittleren Abschnittshöhen am Anfang der Prognoseberechnung (Anfang), nach der ersten Subperiodenserie 1-3 (Ende Subperiode 3) und am Berechnungsende nach zweimaliger Simulation der Ganglinie von 1976 bis 2014 (Ende Subperiode 6) dargestellt. Außerdem sind das Eisenbahnerwehr, das Wolfzahnauwehr, die Oberkante der Tertiärschicht (TOK) sowie ausgewählte Abschnittsnummern der Homogenabschnitte gemäß Kapitel 4.2 eingezeichnet.

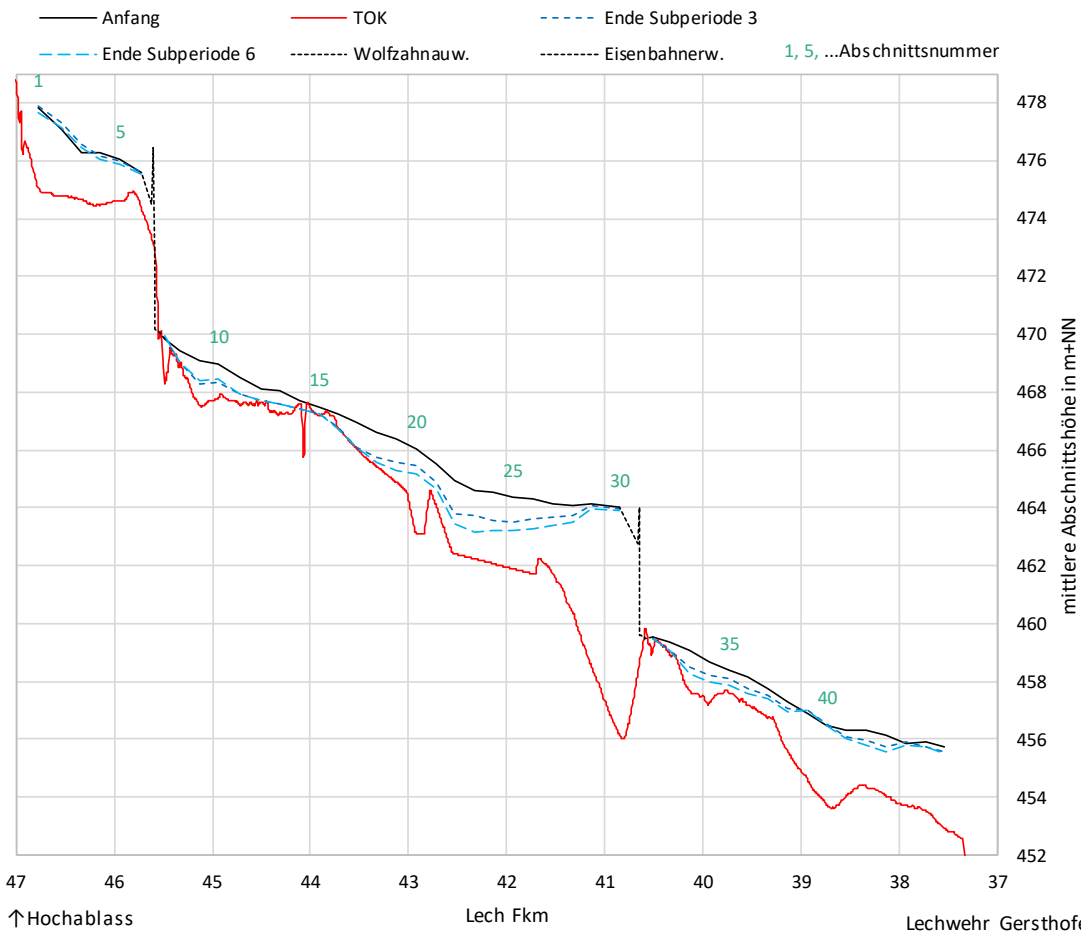


Abbildung 21: Längsschnitt der mittleren Abschnittshöhe am Anfang, am Ende der Subperiode 3 und am Ende der Subperiode 6 im Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“)

Das Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) zeigt im Vergleich zum Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) eine wesentlich stärkere Erosionstendenz.

Erneut entstehen die größten Eintiefungen während der ersten Subperiodenserie 1-3. In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung treten hingegen relativ geringe weitere Sohlintiefungen auf. Im Bereich zwischen dem Eisenbahnerwehr und Fkm 42,5 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 22 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 Teilgebiet Planungsbereich I („Auwald“) im Bereich vor dem Eisenbahnerwehr abgelagert. Stromab des Eisenbahnerwehrs zeigt sich jedoch erneut die durchgängige Erosionstendenz. Die weiteren Subperioden bestätigen diesen Trend. Bedingt durch die Begrenzung der maximalen Erosionstiefe durch den Tertiärhorizont, fallen die Erosionen allerdings etwas moderater aus.

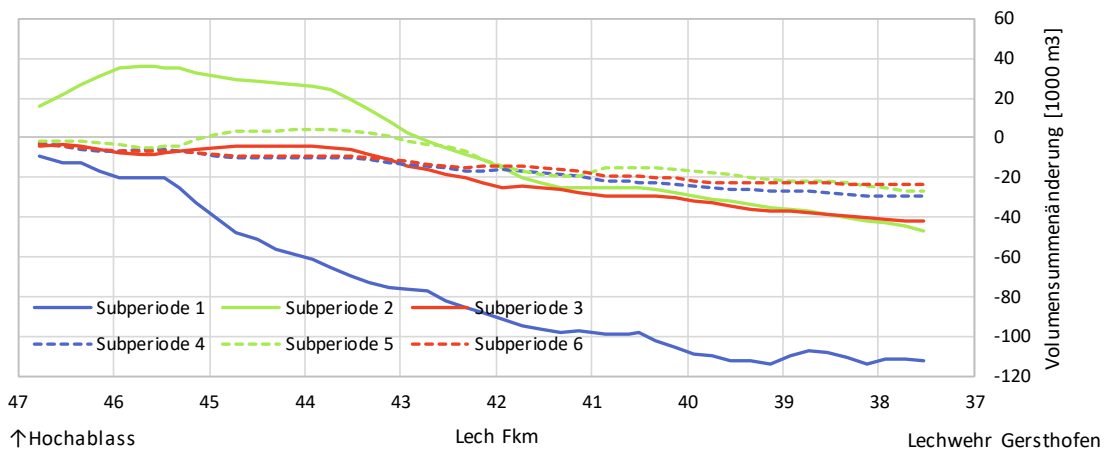


Abbildung 22: Volumensummendiagramm, Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“)

Tabelle 2 listet die Summen des eingetragenen, ausgetragenen 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 22 am Lechwehr Gersthofen. Insgesamt verlässt am unteren Modellrand eine Sedimentfracht von 484 141 m³ Lockervolumen das Modellgebiet Planungsbereich II („Stadt“).

Nach Abzug des Sedimenteintrags am oberen Modellrand (Hochablass) von 197 900 m³ verbleibt ein Geschiebedefizit von 286 240 m³ im Teilgebiet Planungsbereich II. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Defizit von etwa 3 800 m³ Lockervolumen.

Tabelle 2: 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
Subperiode 1	6 443	26 396	104 756	121 024
Subperiode 2	97 575	60 306	120 560	144 548
Subperiode 3	32 524	41 420	65 851	76 050
Subperiode 4	2 922	9 059	25 132	32 782
Subperiode 5	39 760	45 162	54 740	66 909
Subperiode 6	18 678	25 459	38 903	42 827
Summe	197 901	207 801	409 942	484 141

Abbildung 23 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 Vergrößerung des mittleren Korndurchmessers d_{ms} über die Großteils erodierende Gewässerstrecke zu beobachten. Lediglich in Bereichen, wo der Tertiärhorizont erreicht wird und eine weitere Erosion modelltechnisch unterbunden wird, findet eine Verfeinerung statt. Der Vergleich von d_{ms} am Ende der Subperiodenserien 1-3 und 4-6 (Abbildung 24) zeigt, dass in der zweiten Berechnungshälfte die Korndurchmesser sehr stabil bleiben.

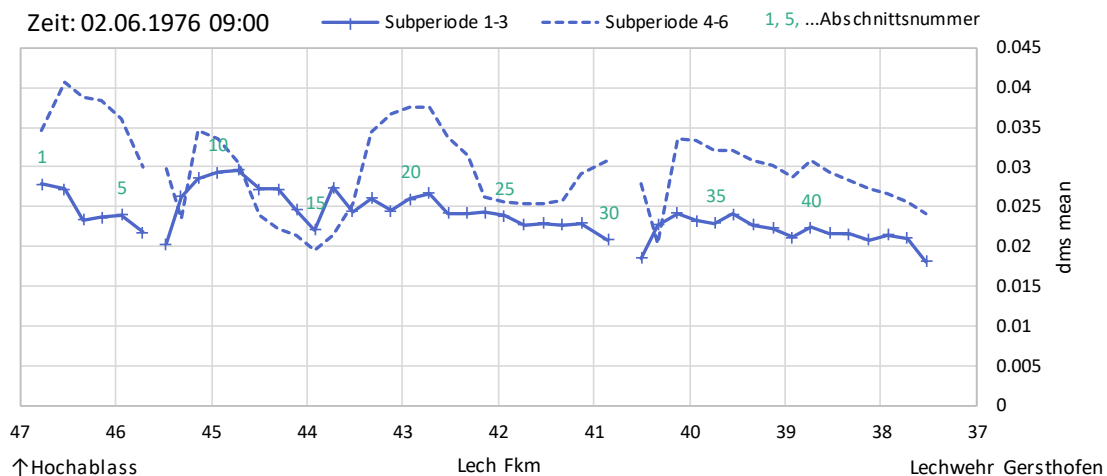


Abbildung 23: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

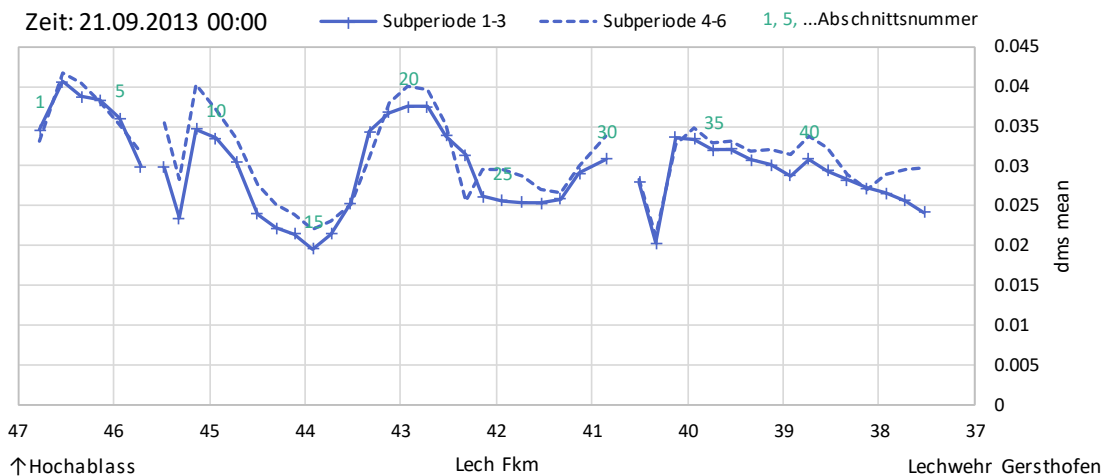


Abbildung 24: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Austauschschicht d_{ms} ($d_{m_{AL}}$) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 25 und Abbildung 26 illustrieren die Veränderungen des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} je Homogenabschnitt im Berechnungsverlauf. Tendenziell ist eine Vergrößerung des d_{mo} bzw. eine Annäherung an den d_{ms} entlang der Gewässerstrecke zu beobachten.

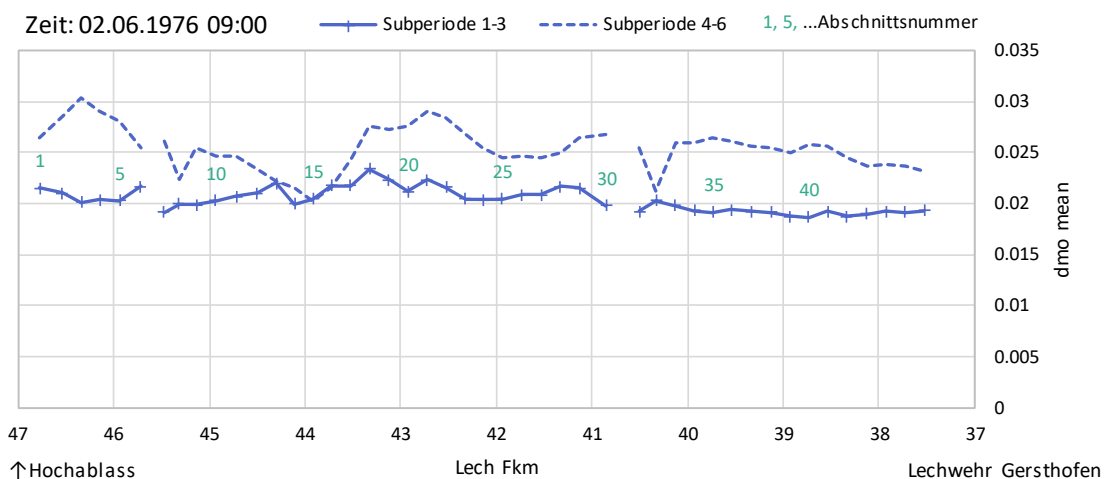


Abbildung 25: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} ($d_{m_{UL}}$) je Homogenabschnitt in Meter am Beginn (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

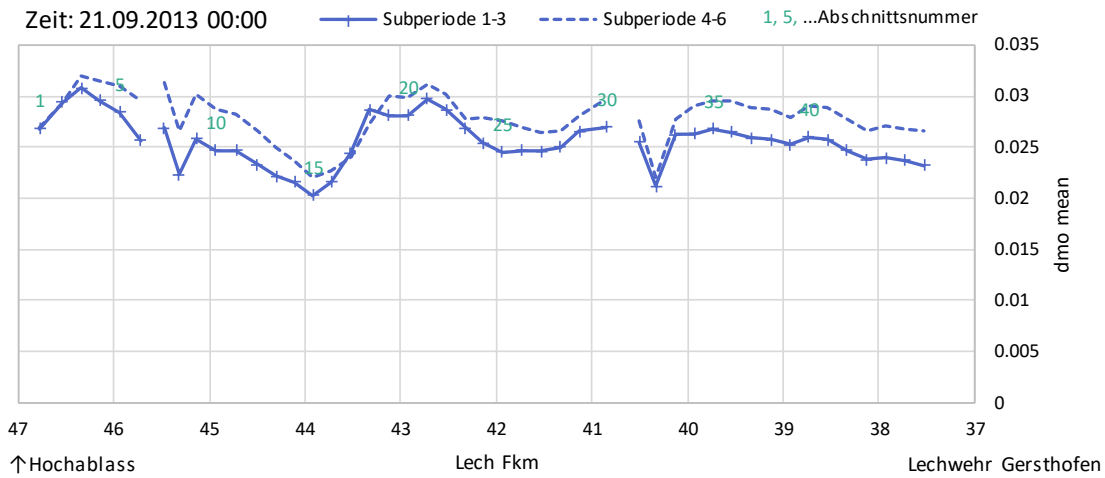


Abbildung 26: Längsschnitt des mittleren Korndurchmessers der Unterschicht d_{mo} ($d_{m_{UL}}$) je Homogenabschnitt in Meter am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen den Längsschnitt der Rauheitsbeiwerte k_{St} im Verlauf der Prognoseberechnung. Nach der ersten Subperiodenserie 1-3 steigt die Rauheit entlang der Gewässerachse tendenziell an. In der zweiten Hälfte der Prognoseberechnung zeigt sich eine ähnliche Tendenz, die jedoch nicht mehr so ausgeprägt ist.

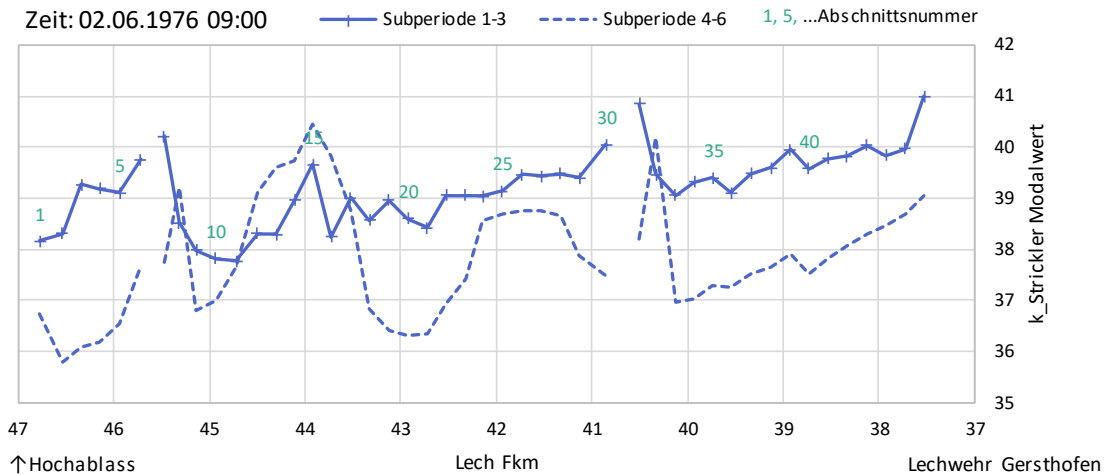


Abbildung 27: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Beginn (Datum u. Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

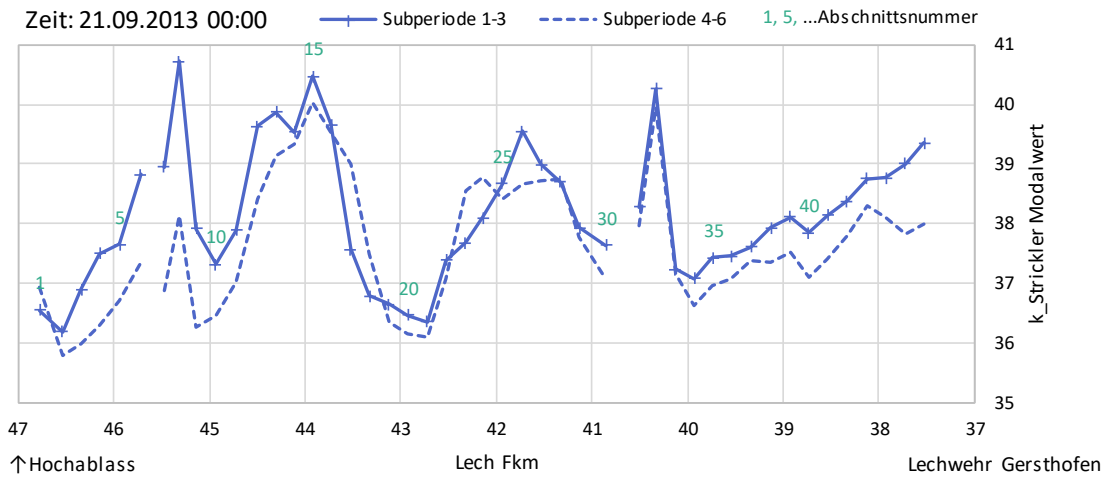


Abbildung 28: Längsschnitt des Rauheitsbeiwertes k_{St} nach Strickler je Homogenabschnitt in $m^{1/3}/s$ am Ende (Datum und Zeit: siehe linke obere Abb.-Ecke) der Subperiodenserien 1-3 bzw. 4-6

Exemplarisch wird die Dynamik der morphologischen Veränderungen und der Rauheitsanpassung für den Homogenabschnitt 25 zwischen Fkm 42,1 und Fkm 41,8 demonstriert. In Abbildung 29 ist u.a. gut die ausgeprägte Sohleintiefung während des Hochwasserereignisses am 22.05.1999 sichtbar. Parallel dazu verändert sich auch die Kornzusammensetzung der Austauschschicht (ausgedrückt durch den d_{ms} in Abbildung 30) sehr schnell. Die Methodik der Rauheitsanpassung (Kapitel 2.1) sorgt für eine korrespondierende Änderung des Rauheitsparameters k_{St} am Start jeder Subperiode (Abbildung 31).

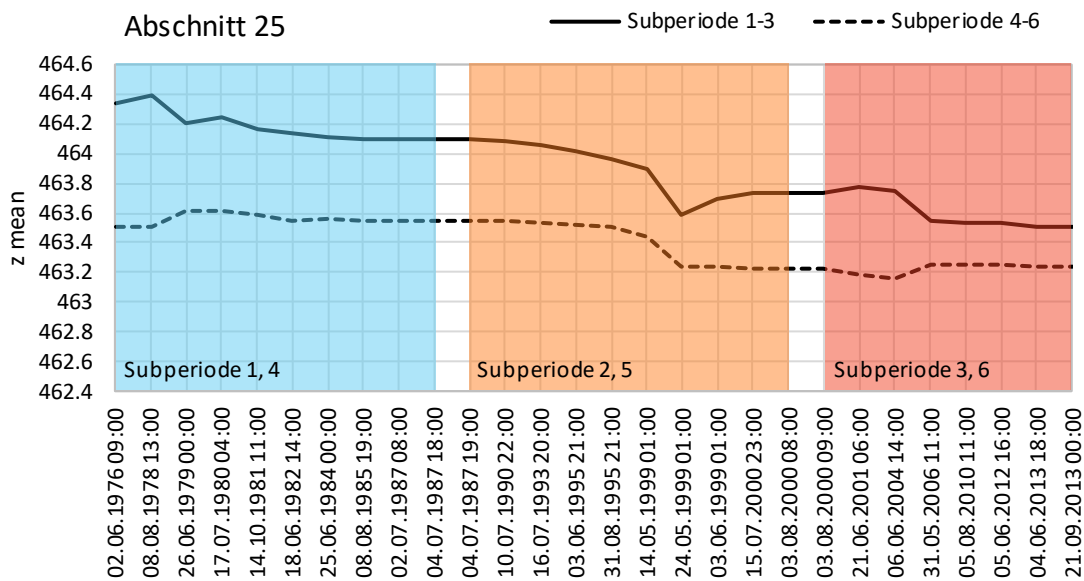


Abbildung 29: Mittl. Sohlhöhe in m+NN des Homogenabschnitts 25 im zeitlichen Verlauf

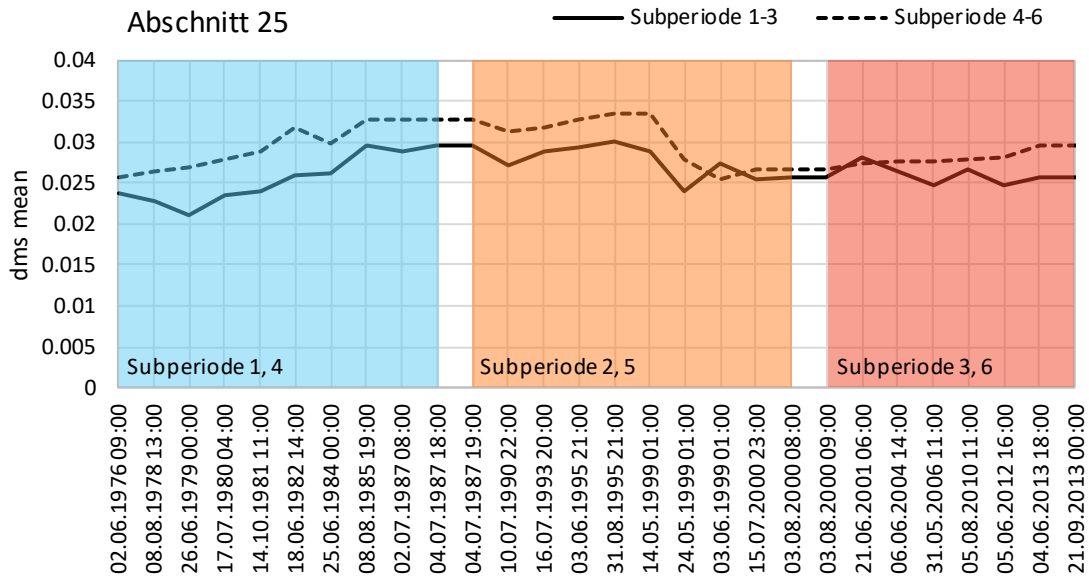


Abbildung 30: Mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht d_{ms} (d_{m_AL}) in Meter im Homogenabschnitt 25 im zeitlichen Verlauf

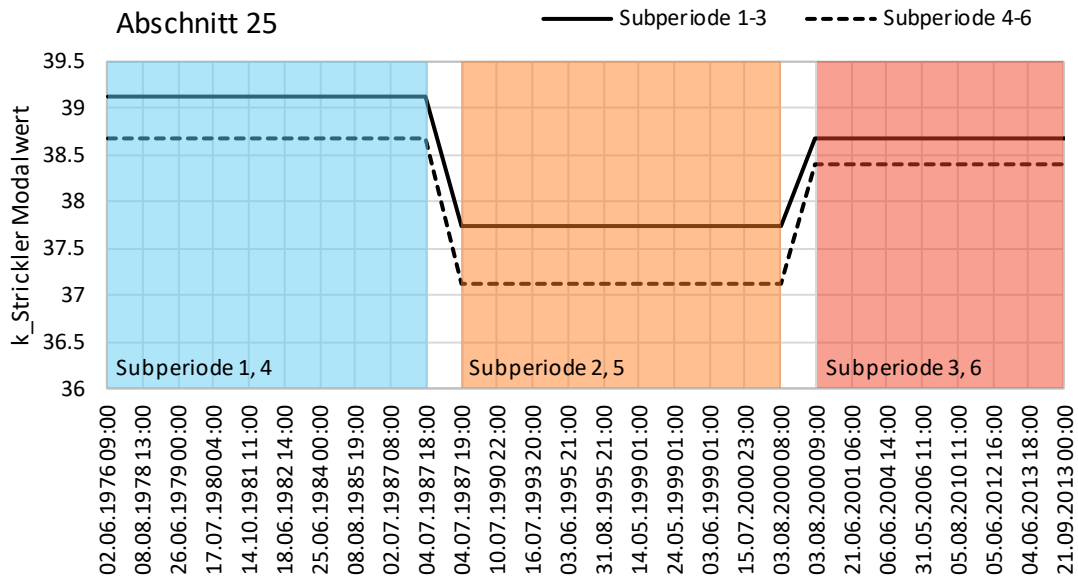


Abbildung 31: Rauheitsbeiwert k_{St} nach Strickler in $m^{1/3}/s$ des Homogenabschnitts 25 im zeitlichen Verlauf

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 5) und zu jedem Zeitschritt (Tabelle 4), 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 32 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 4.1) entlang des Längsschnittes.

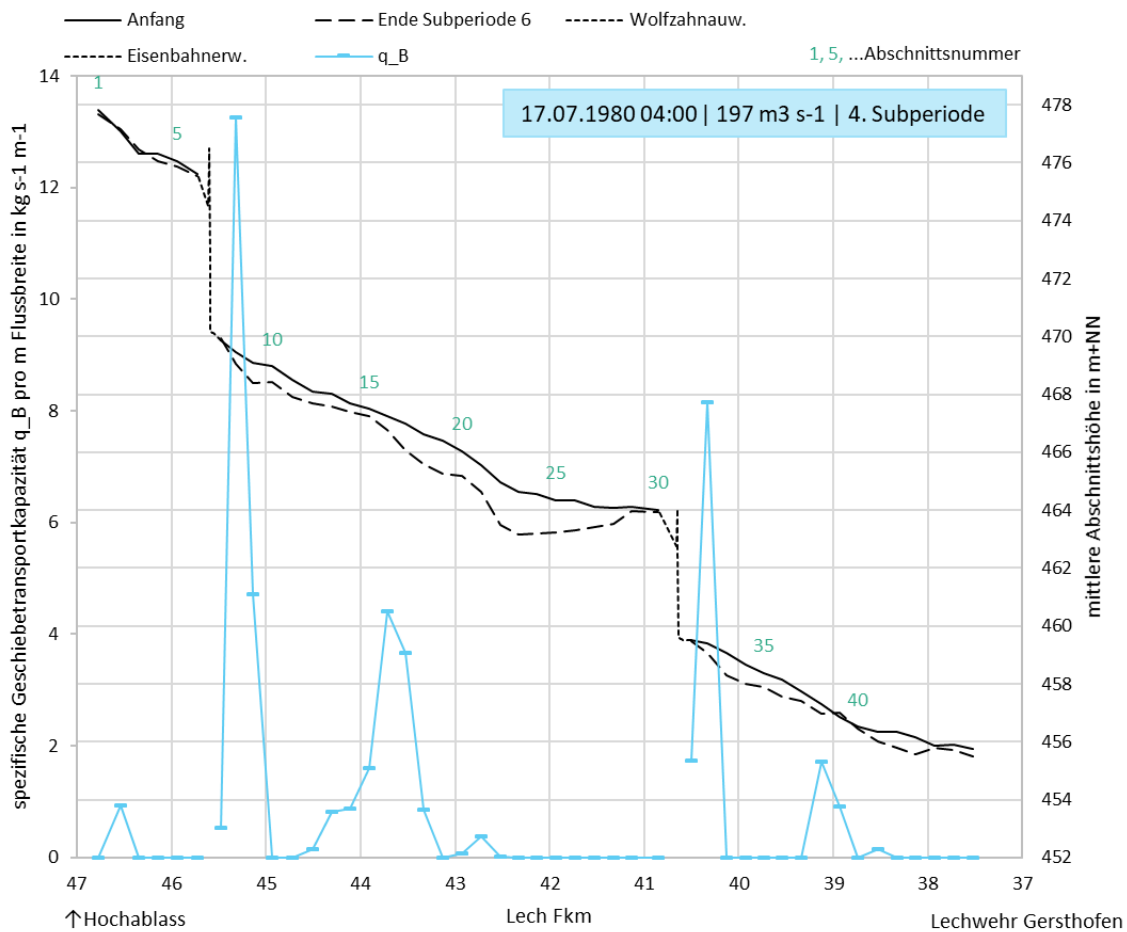


Abbildung 32: Längsschnitt der spezifischen Transportrate q_B , sowie der mittleren Abschnittshöhen am Simulationsanfang und -ende, Planungsbereich II

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>)

Exemplarisch für den Sedimentaustrag aus dem Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) am Lechwehr Gersthofen wird in Abbildung 33 für die Subperiode 2 (ca. 1987 bis 2000, siehe Kapitel 4.1) die Geschiebefracht mit den Fraktionsanteilen FA_x und der Abfluss Q im zeitlichen Verlauf dargestellt. Insgesamt verlässt eine Sedimentfracht von 144 548 m³ Lockervolumen das Modell. Die zeitliche Änderung des abflussabhängigen SCFG-Faktors zur Beschleunigung der Rechenläufe wird in Abbildung 34 gezeigt.

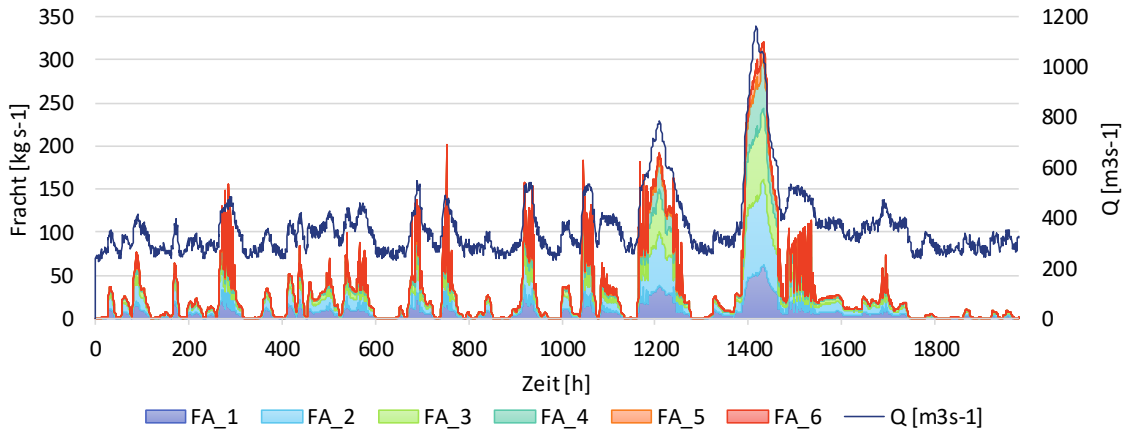


Abbildung 33: Sedimentaustrag aus dem Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“) in der Subperiode 2

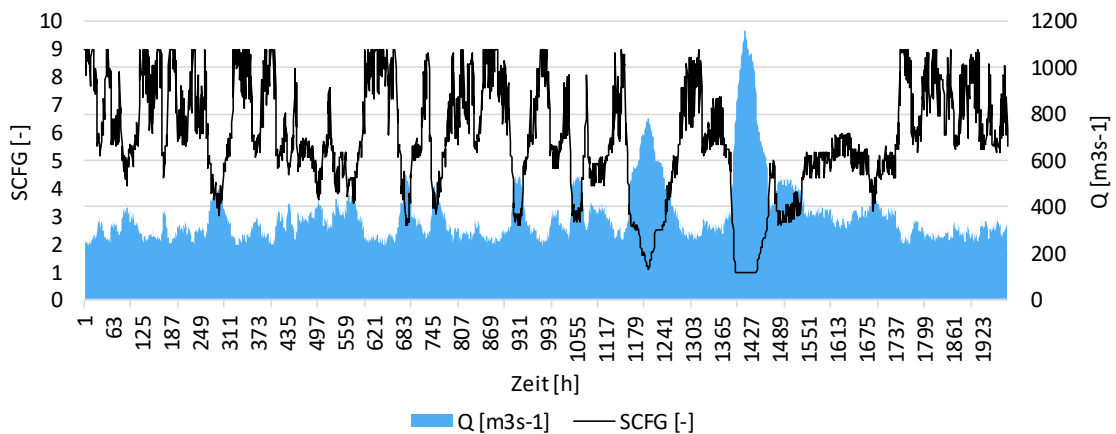


Abbildung 34: Beschleunigungsfaktor SCFG und Abfluss Q am Lechwehr Gersthofen (Modellauslauf) in der Subperiode 2

3.3 Interpretation

In den Kapiteln 3.1 und 3.2 sind die Ergebnisse der Langzeitprognose beider Teilmodelle Planungsbereich I und II dargestellt. Zusammenfassend zeigt sich, dass bei beiden Planungsbereichen in Zukunft ausgedehnte Erosionen zu erwarten sind. Der unterbundene natürliche Geschiebeeintrag im Lech durch die Staustufenkette oberhalb der Planungsbereiche führt zu einem generellen Geschiebedefizit. Die Sicherungsmaßnahmen der Vergangenheit zwängen den Fluss in ein vorgegebenes Flussbett mit fixierter Breite und Querbauwerken, die an einigen Stellen im Längsschnitt die Sohlhöhen fixieren. Bei bettbildenden Hochwasserabflüssen kann der Lech dem bestehenden Geschiebedefizit nur durch eine Ausbildung einer gröberen Deckschicht oder durch eine Veränderung des Längsgefälles begegnen. Die Wirksamkeit der ersten Möglichkeit ist durch den Mangel grober Kornfraktionen in der bestehenden Sohle begrenzt. Die zweite Möglichkeit ist in den Prognoseberechnungen gut in den Längsschnitten (Abbildung 9 und Abbildung 21) als eine Drehbewegung der Sohle um die Drehangelpunkte Abstürze und Wehre ersichtlich. Die größten Erosionen treten bereits beim Durchlaufen der ersten drei Subperioden auf (gemäß Kapitel 4.1 ca. 38 simulierte Jahre). Im weiteren Verlauf der Prognoseberechnungen ergeben sich hingegen weit geringere Sohlveränderungen. Im Planungsbereich I erreichen die Erosionen nur an einer lokalen Stelle bei Fkm 48,0 die Tertiärschicht während im Planungsbereich II ausgedehnte flächige Sohlbereiche betroffen sind. Da die Sohlhöhenentwicklung im feinen Tertiärmaterial nicht simuliert werden kann und weitere Erosionen in diesen Sohlbereichen modelltechnisch unterbunden wurden, könnte sich in Realität im Vergleich zur Simulation die Sohlentwicklung schneller und stärker gestalten. Im schlimmsten Fall drohen lokale Sohdurchschläge, sobald die schützende Kiesauflage verschwindet. Vor allem im Planungsbereich II zwischen Eisenbahner- und Wolfzahnauwehr besteht durch den geringen Abstand zum Tertiärhorizont zukünftig Handlungsbedarf. Ohne gezielte Maßnahmen drohen hier mitten im Stadtgebiet von Augsburg massive Eintiefungen.

4 Anhang

Der Anhang gibt Einblick in Modellierungsdetails, die nicht notwendigerweise zum Verständnis der Hauptkapitel 2 und 3 notwendig sind, aber bei Bedarf eine möglichst lückenlose Nachvollziehbarkeit der Prognoseberechnungen erlauben.

4.1 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 3).

Tabelle 3: 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 35 stellt die hydrologischen Zuflussganglinien für den oberen Modellrand des Teilgebietes Planungsbereich I („Auwald“) der drei definierten Subperioden dar. Diese resultieren aus der Kappung der Abflusszeitreihe $Q(t)$ am Pegel Haunstetten auf geschieberelevante Abflüsse (vgl. Kapitel 2.1).

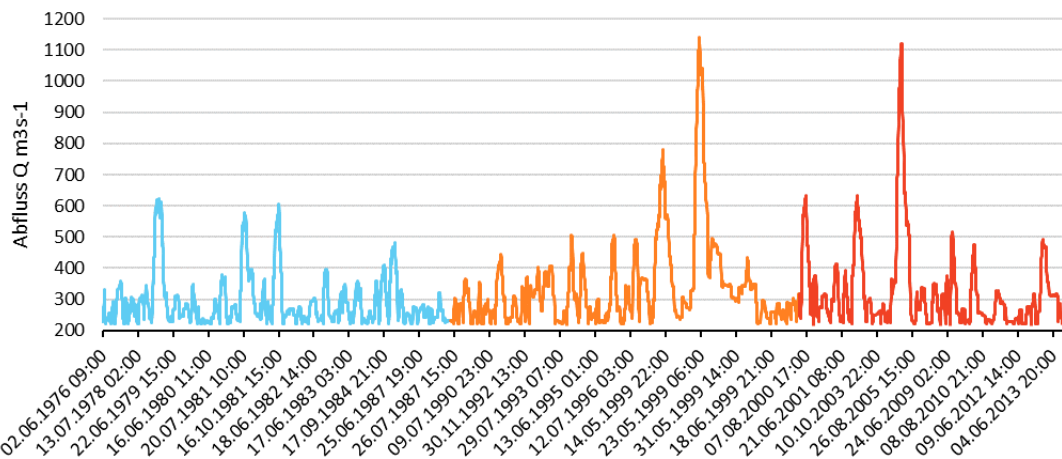


Abbildung 35: Zuflussganglinie Q als obere Randbedingung unterhalb der Lechstufe 23. Die drei Subperioden sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

In Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 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 4 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.

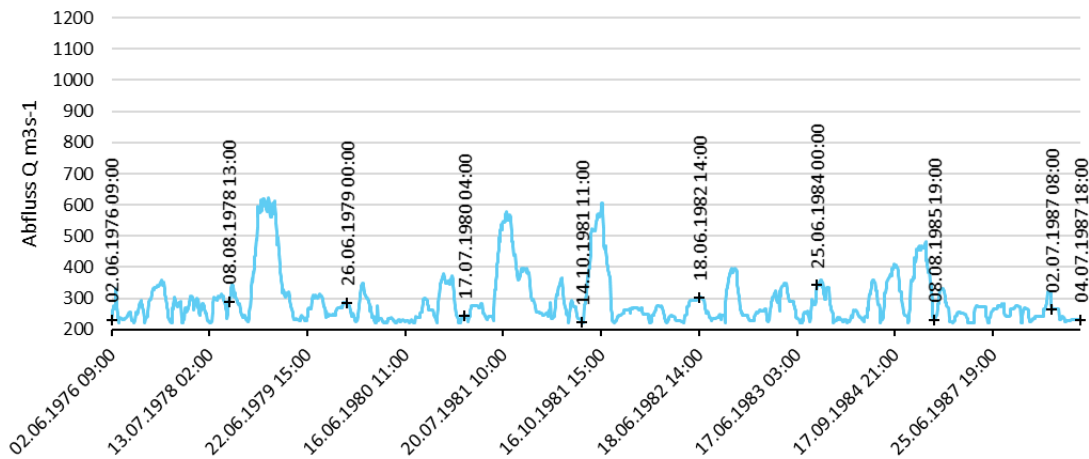


Abbildung 36: Zuflussganglinie Q der Subperiode 1 (vergleiche Abbildung 35) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

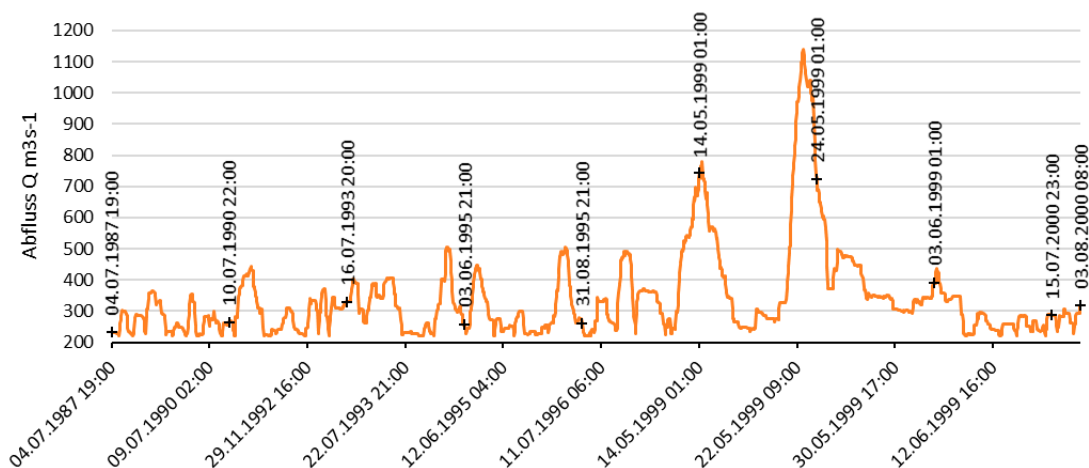


Abbildung 37: Zuflussganglinie Q der Subperiode 2 (vergleiche Abbildung 35) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

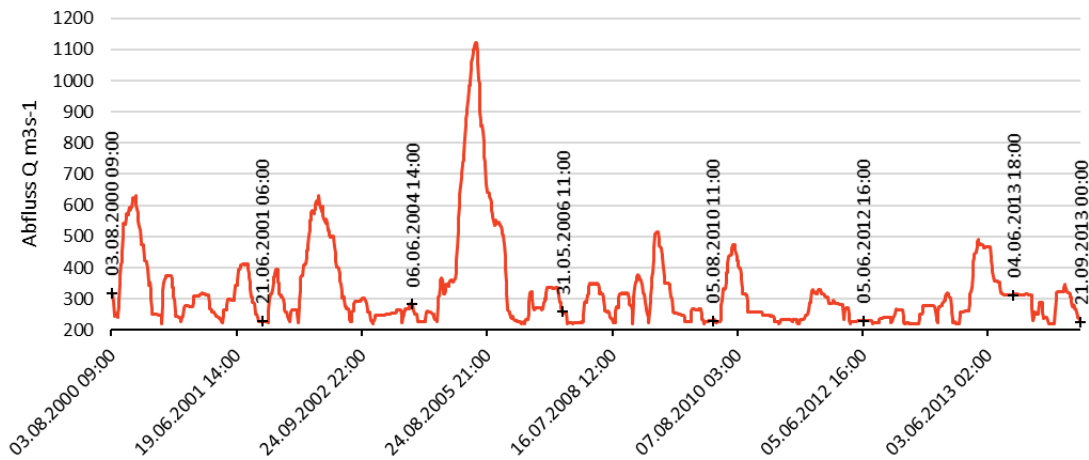


Abbildung 38: Zuflussganglinie Q der Subperiode 3 (vergleiche Abbildung 35) und Zeitpunkte des Ausschreibens flächiger HYDRO_FT-2D Ergebnisse

Tabelle 4: 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		

4.2 Homogenabschnitte, Tertiäroberkante und Ausgangs-Sohlhöhen

Die Flusssohle der numerischen Teilmodelle Planungsbereich I („Auwald“) und Planungsbereich II („Stadt“) wird in sogenannte Homogenabschnitte unterteilt. Diese orientieren sich an der Lage der Querprofilaufnahmen, sind meist 200 m lang und werden an den Ufern von der jeweiligen Böschungsunterkante begrenzt (Abbildung 39).

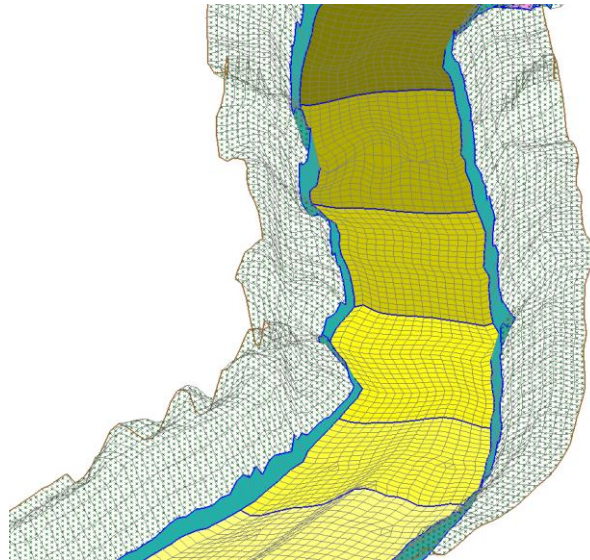


Abbildung 39: Ausschnitt eines Berechnungsnetzes mit farbig hervorgehobenen Homogenabschnitten

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 40 und Abbildung 41 ist die Lage der Homogenabschnitte zusammen mit der Sohlhöhe (zum Startzeitpunkt der Berechnungen = Sohlhöhen im Jahr 2010) sowie der Tertiäroberkante als Längsschnitt dargestellt. Nähere Information zur Definition der Tertiärschicht können der Anlage 5.2, Kapitel 3.1.3 entnommen werden. Tabelle 5 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 11).

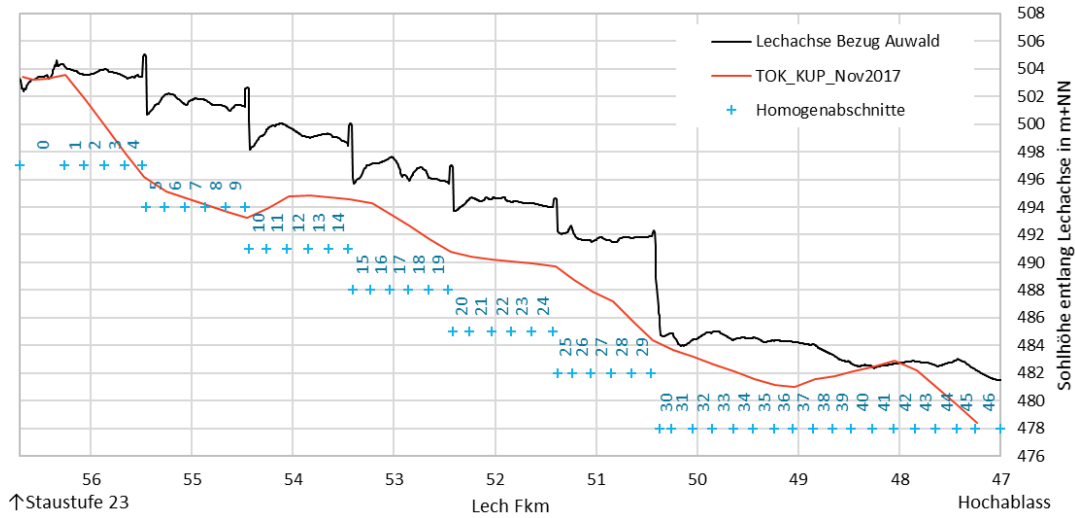


Abbildung 40: Homogenabschnitte, Tertiäroberkante (TOK) und Sohlhöhe (Jahr 2010) entlang der Lechachse im Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“).

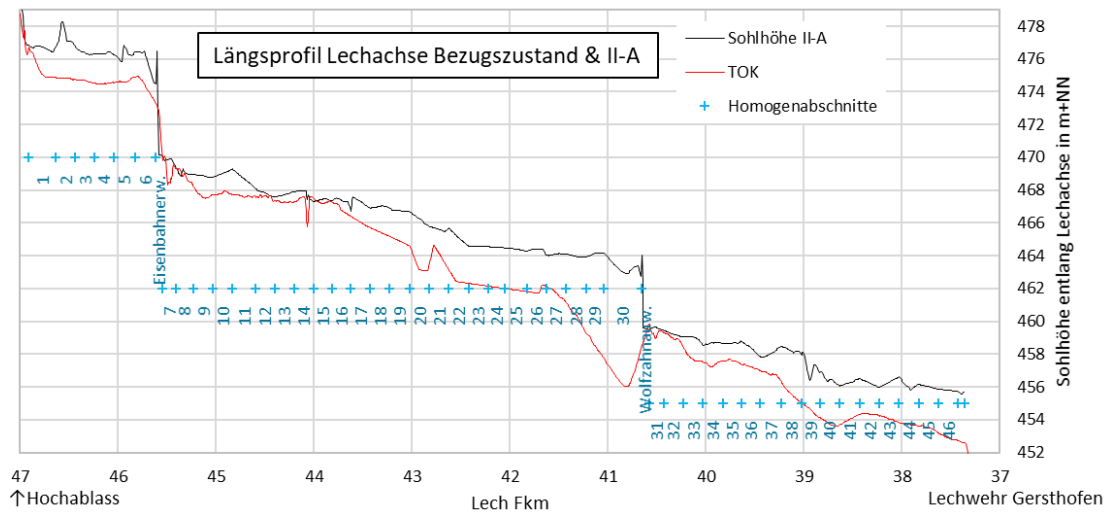


Abbildung 41: Homogenabschnitte, Tertiäroberkante (TOK) und Sohlhöhe (Jahr 2010) entlang der Lechachse im Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“).

Tabelle 5: Homogenabschnitte beider Teilmodelle (Planungsbereich I und II)

Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“)				Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“)			
Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende	Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende
0	56,5	56,7	56,3	1	46,8	46,9	46,6
1	56,2	56,3	56,1	2	46,5	46,6	46,4
2	56,0	56,1	55,9	3	46,3	46,4	46,2
3	55,8	55,9	55,7	4	46,1	46,2	46,0

Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“)				Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“)			
Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende	Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende
4	55,6	55,7	55,5	5	45,9	46,0	45,8
Absturz 1	55,5	55,5	55,5	6	45,7	45,8	45,6
5	55,4	55,5	55,3	Eisenbahnerw.	45,6	45,6	45,5
6	55,2	55,3	55,1	7	45,5	45,5	45,4
7	55,0	55,1	54,9	8	45,3	45,4	45,2
8	54,8	54,9	54,7	9	45,1	45,2	45,0
9	54,6	54,7	54,5	10	44,9	45,0	44,8
Absturz 2	54,5	54,5	54,4	11	44,7	44,8	44,6
10	54,3	54,4	54,3	12	44,5	44,6	44,4
11	54,2	54,3	54,1	13	44,3	44,4	44,2
12	54,0	54,1	53,8	14	44,1	44,2	44,0
13	53,7	53,8	53,6	15	43,9	44,0	43,8
14	53,6	53,6	53,5	16	43,7	43,8	43,6
Absturz 3	53,4	53,5	53,4	17	43,5	43,6	43,4
15	53,3	53,4	53,2	18	43,3	43,4	43,2
16	53,1	53,2	53,0	19	43,1	43,2	43,0
17	52,9	53,0	52,9	20	42,9	43,0	42,8
18	52,8	52,9	52,7	21	42,7	42,8	42,6
19	52,6	52,7	52,5	22	42,5	42,6	42,4
Absturz 4	52,4	52,5	52,4	23	42,3	42,4	42,2
20	52,3	52,4	52,3	24	42,1	42,2	42,1
21	52,1	52,3	52,0	25	41,9	42,1	41,8
22	51,9	52,0	51,8	26	41,7	41,8	41,6
23	51,7	51,8	51,6	27	41,5	41,6	41,4
24	51,5	51,6	51,4	28	41,3	41,4	41,2
Absturz 5	51,4	51,4	51,4	29	41,1	41,2	41,0
25	51,3	51,4	51,2	30	40,9	41,0	40,7
26	51,1	51,2	51,1	Wolfzahnauw.	40,6	40,7	40,6
27	51,0	51,1	50,8	31	40,5	40,6	40,4
28	50,8	50,8	50,7	32	40,3	40,4	40,2
29	50,6	50,7	50,5	33	40,1	40,2	40,0
Absturz 6	50,4	50,5	50,4	34	39,9	40,0	39,8
30	50,3	50,4	50,3	35	39,7	39,8	39,6
31	50,2	50,3	50,0	36	39,5	39,6	39,4
32	50,0	50,0	49,9	37	39,3	39,4	39,2
33	49,7	49,9	49,6	38	39,1	39,2	39,0
34	49,5	49,6	49,4	39	38,9	39,0	38,8
35	49,3	49,4	49,2	40	38,7	38,8	38,6

Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“)				Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“)			
Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende	Homogen- abschnitt Nr.	Fkm Mittel	Fkm Start	Fkm Ende
36	49,1	49,2	49,1	41	38,5	38,6	38,4
37	49,0	49,1	48,9	42	38,3	38,4	38,2
38	48,8	48,9	48,7	43	38,1	38,2	38,0
39	48,6	48,7	48,5	44	37,9	38,0	37,8
40	48,4	48,5	48,3	45	37,7	37,8	37,6
41	48,2	48,3	48,1	46	37,5	37,6	37,4
42	48,0	48,1	47,8				
43	47,7	47,8	47,6				
44	47,5	47,6	47,4				
45	47,3	47,4	47,3				
46	47,1	47,3	47,0				

4.3 Stoffeintrag von Teilgebiet Planungsbereich I in den Planungsbereich II

Folgende Abbildungen des Kapitels 4.3 zeigen die Fraktionsanteile (F1 bis F6 in Prozent), den mittleren Korndurchmesser d_m , den hydraulischen Abfluss Q als Zufluss zum Teilgebiet Planungsbereich II („Stadt“), den Sedimenteintrag QG im zeitlichen Verlauf sowie die Gesamtmenge des Sedimenteintrags als Lockervolumen in m^3 je Subperiode.

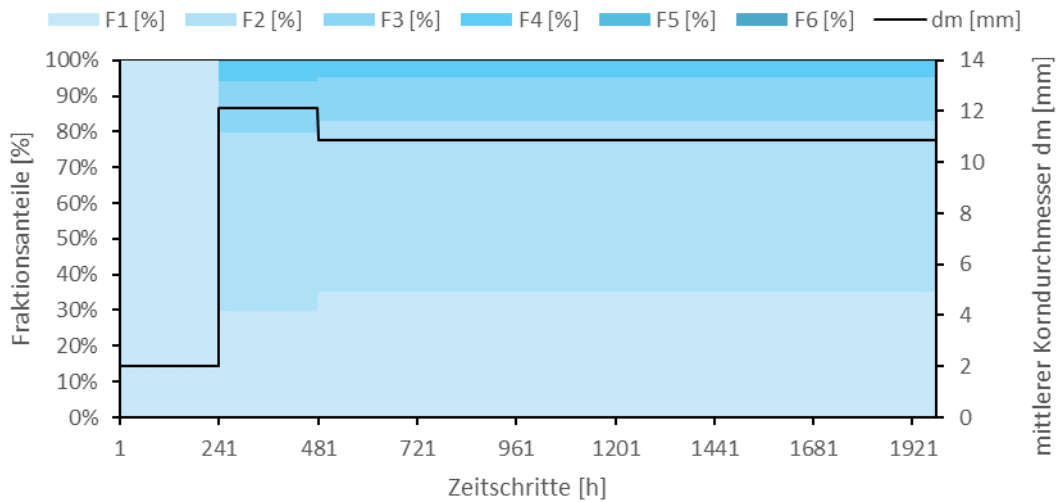


Abbildung 42: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 1

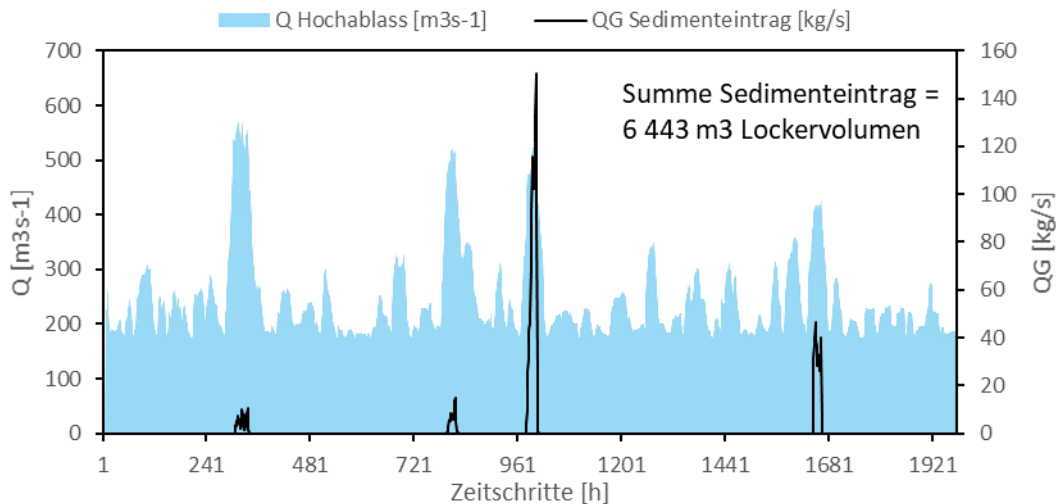


Abbildung 43: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 1

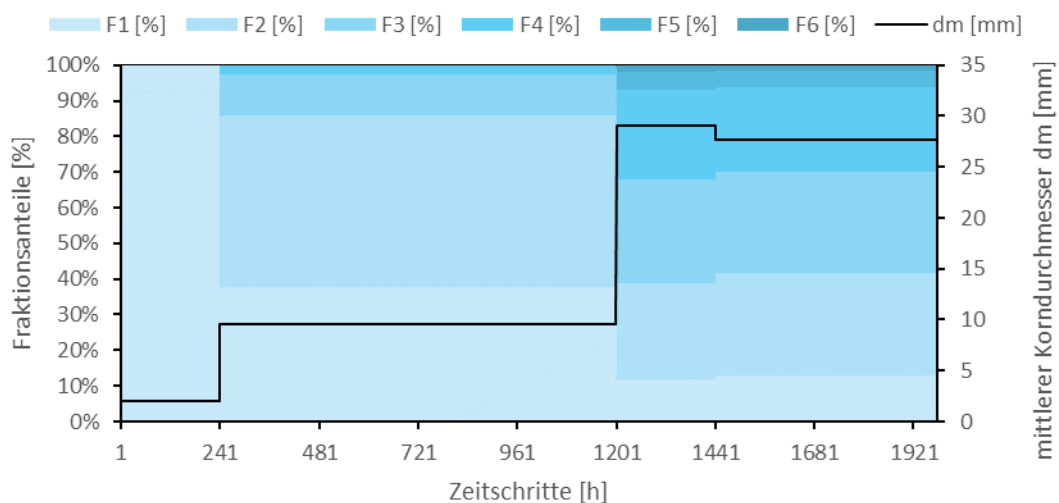


Abbildung 44: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 2

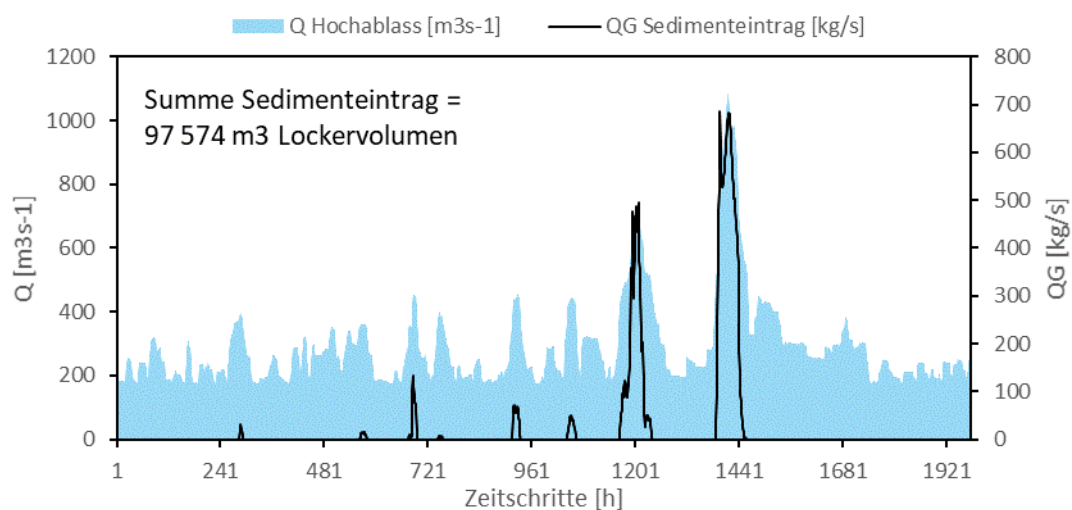


Abbildung 45: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 2

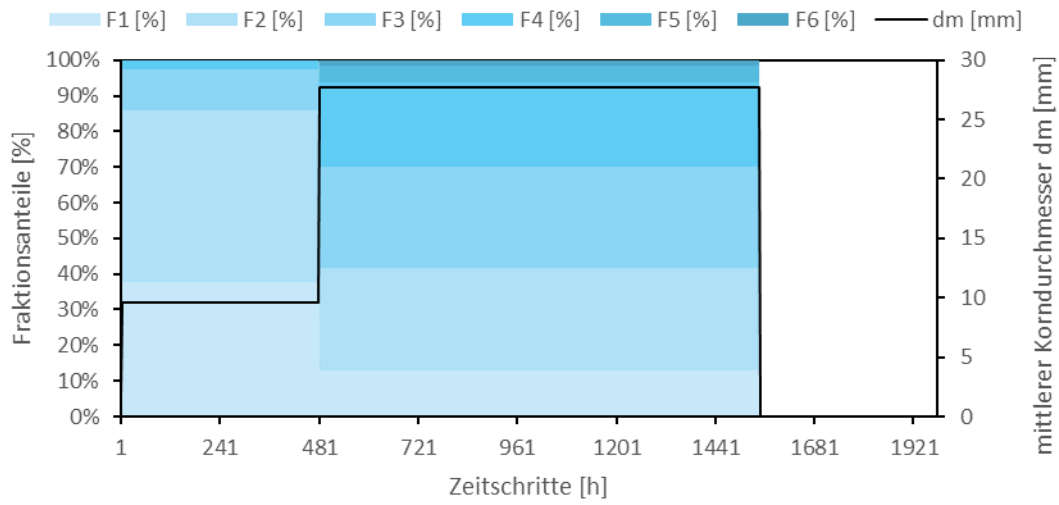


Abbildung 46: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 3

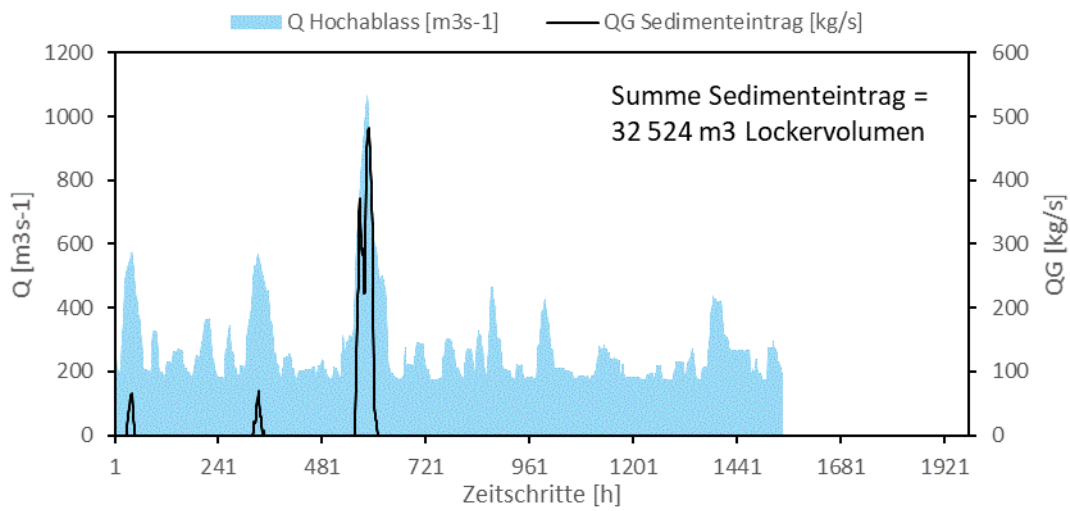


Abbildung 47: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 3

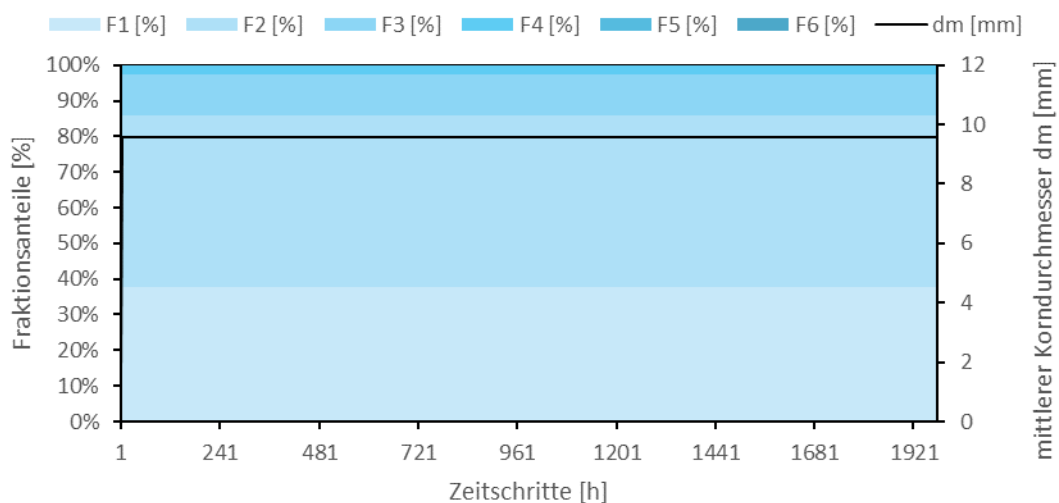


Abbildung 48: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 4

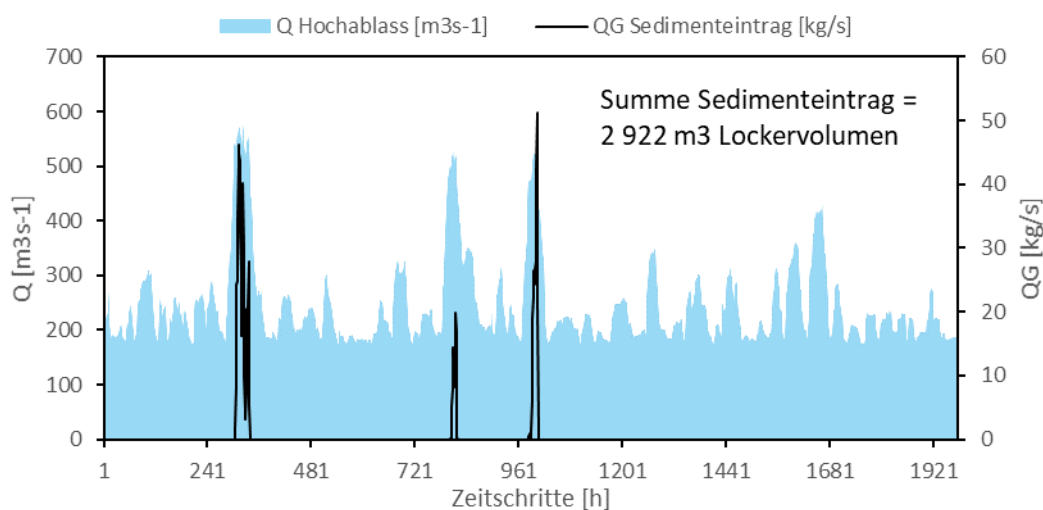


Abbildung 49: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 4

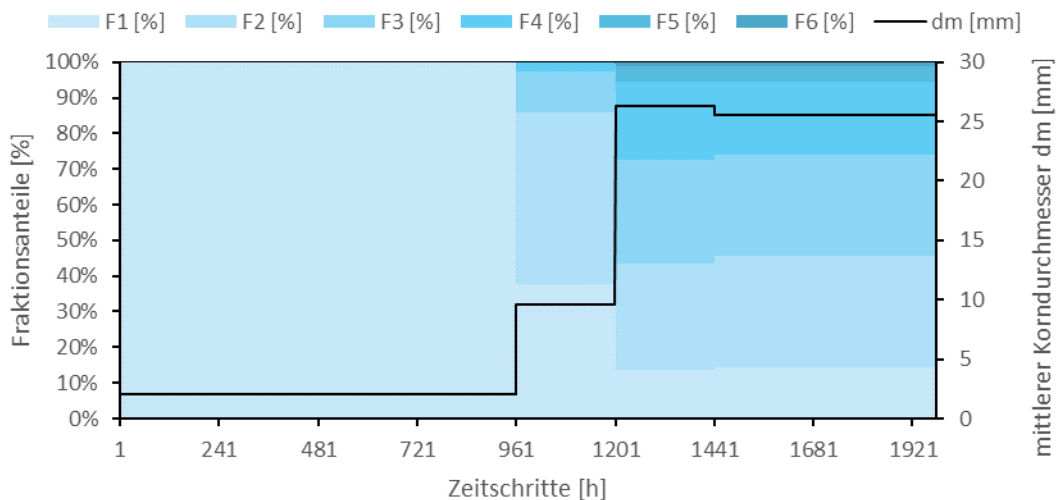


Abbildung 50: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 5

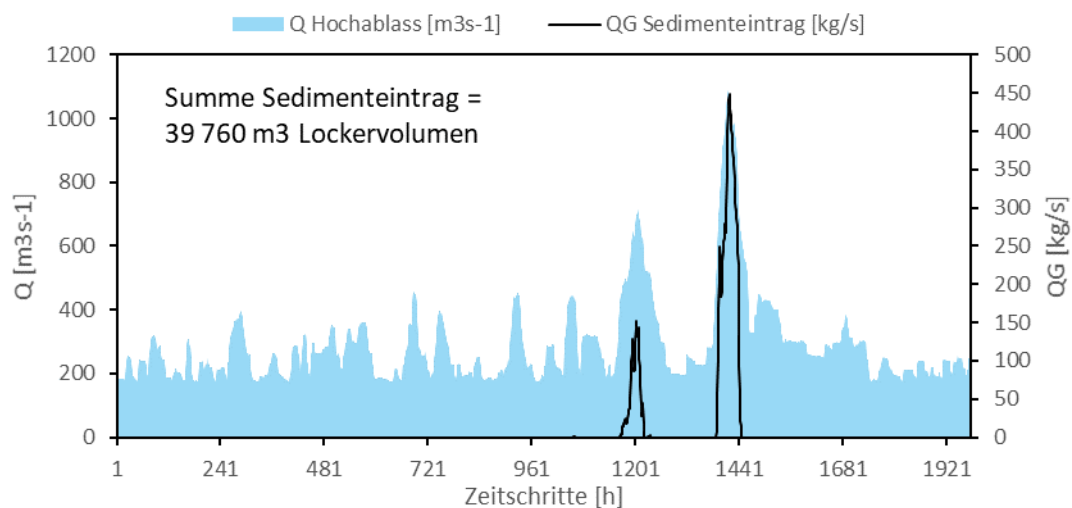


Abbildung 51: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 5

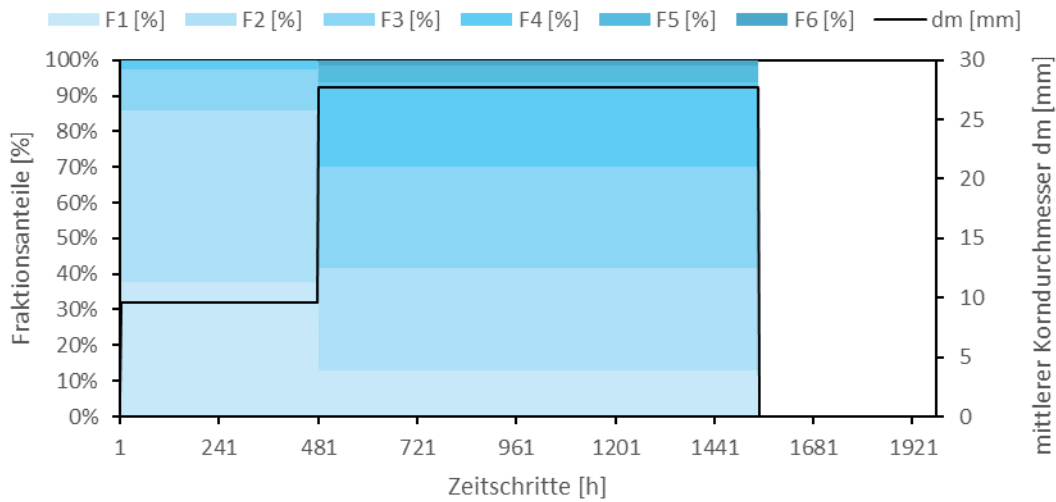


Abbildung 52: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser in der Subperiode 6

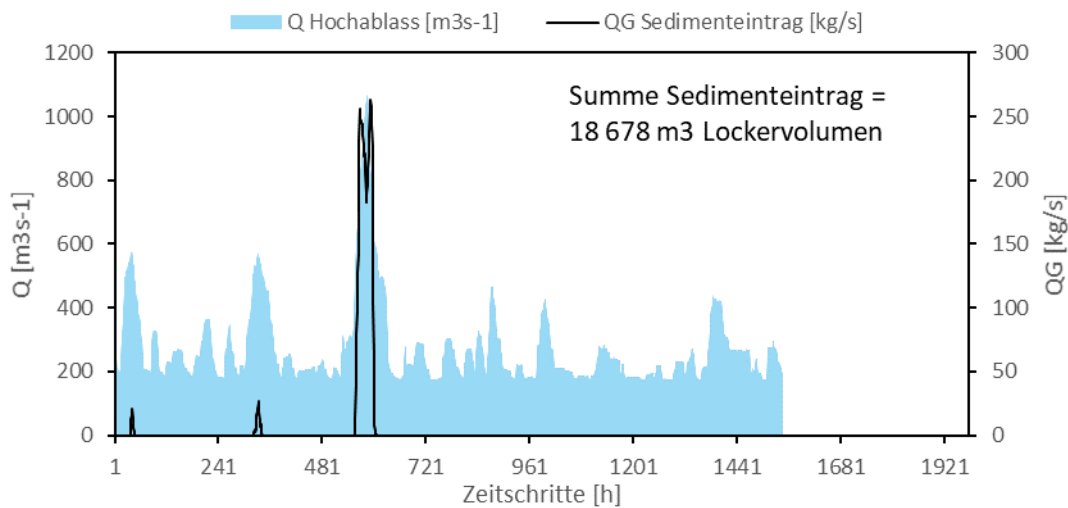


Abbildung 53: Abfluss und Sedimenteintrag in der Subperiode 6

4.4 Anfangszustand der Kornzusammensetzung und Rauheitsverteilung

Folgende Abbildungen des Kapitels 4.4 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 Abstürzen und Wehren 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 erosions sicher 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.

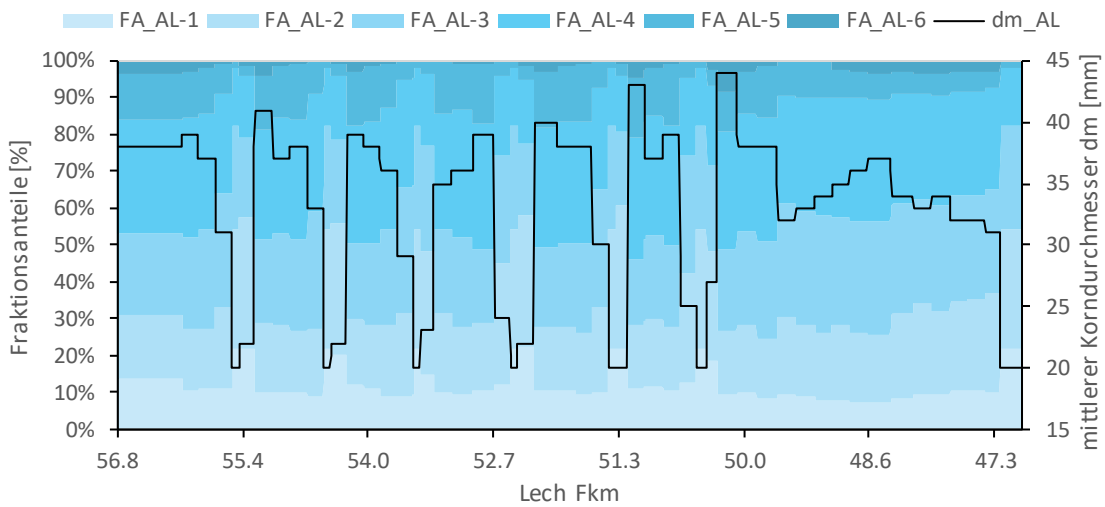


Abbildung 54: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht im Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“) bei Prognoseberechnungsstart

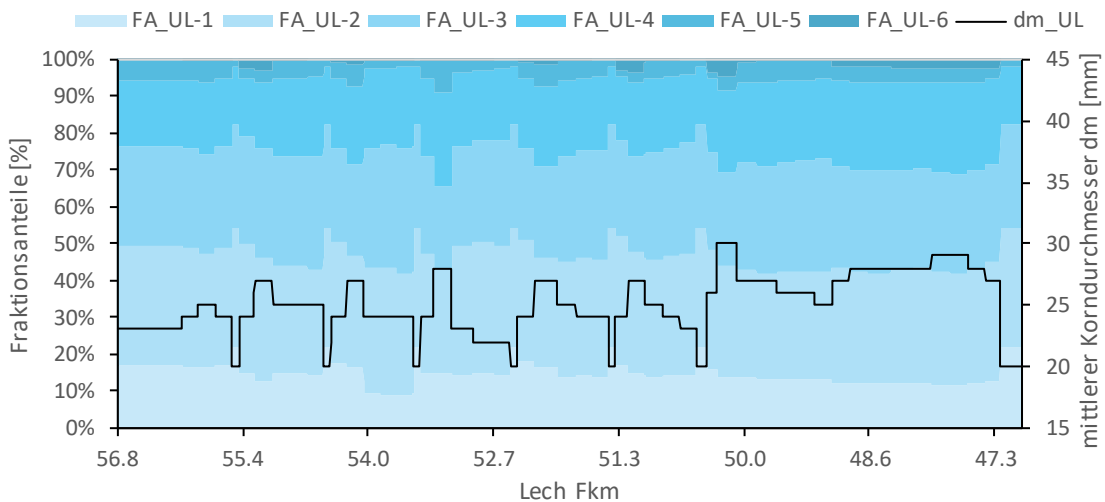


Abbildung 55: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht im Teilmodell Planungsbereich I („Auwald“) bei Prognoseberechnungsstart

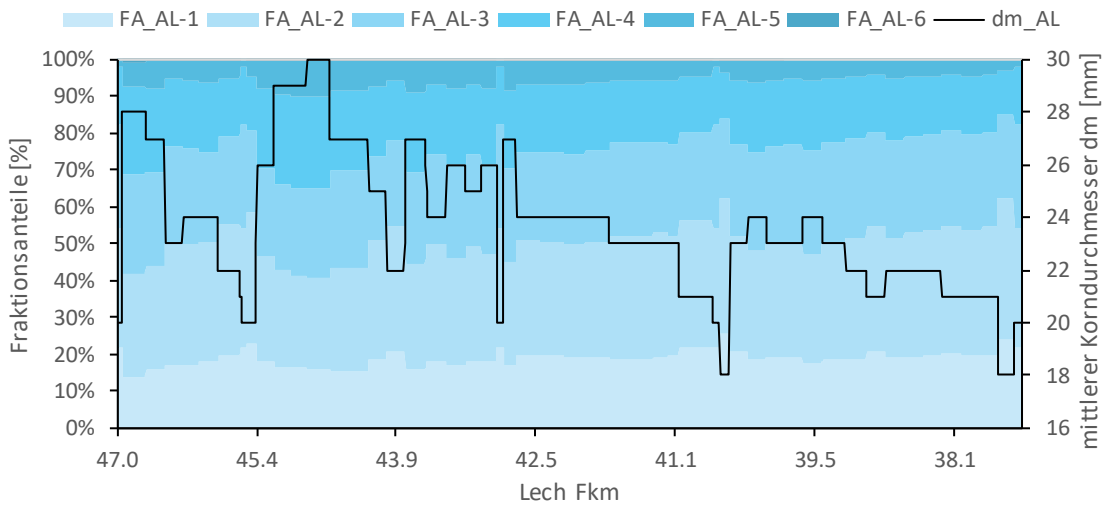


Abbildung 56: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht im Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“) bei Prognoseberechnungsstart

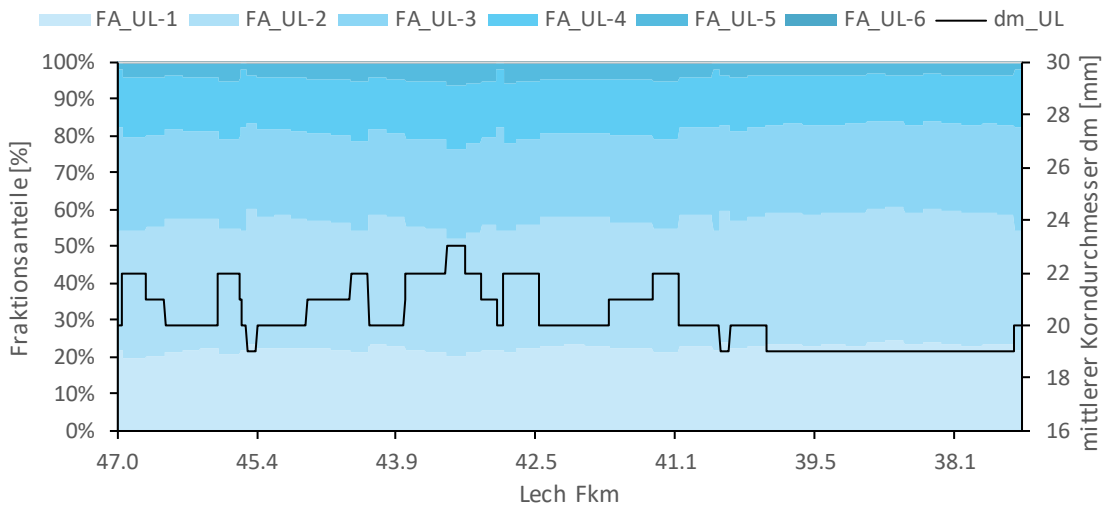


Abbildung 57: Fraktionsanteile und mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht im Teilmodell Planungsbereich II („Stadt“) bei Prognoseberechnungsstart

Abbildung 15 und Abbildung 27 zeigen die Rauheitsbeiwerte $k_{St} = k_{St,r}$ zum Zeitpunkt 2.6.1976 09:00 Uhr als Ausgangswerte der Prognoseberechnung (Subperiode 1) sowie die Veränderung nach drei Rauheitsanpassungen (Methodik: siehe Kapitel 2.1) am Beginn der Subperiode 4. Die Stricklerwerte bei Abstürzen und Wehren sind nicht dargestellt.