

Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen

Anlage 5.2 Geschiebmodellierung - Modellaufbau und Anpassung

Stand: 28. Mai 2018

Version: 04

1	Inhalt des Berichts.....	3
2	Vorgehensweise bei der Modellierung.....	3
3	2D-Feststofftransportmodell	6
3.1	Anfangs- und Randbedingungen.....	6
3.1.1	Ganglinien, Modellübertrag zwischen den Teilmodellen, Auslaufrandbedingung	6
3.1.2	Korngrößenverteilung der Gewässersohle	11
3.1.3	Tertiärschicht	18
3.1.4	Randbedingung – Eisenbahnerwehr und Wolfzahnuwehr	19
3.2	Auswertung der Geschiebetransportberechnungen.....	21
3.2.1	Werkzeuge zur Auswertung	21
3.2.2	Unsicherheiten in der Querprofil-Datengrundlage und Konsequenzen für die Auswertung.....	24
4	Ergebnisse	25
4.1	Ergebnisse der Sollumlagerungen Zeitraum Kalibrierung und Validierung	25
4.2	Ergebnisse Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit	27
4.2.1	Teilgebiet 1 „Auwald“	27
4.2.2	Teilgebiet 2 „Stadtbereich Augsburg“	35
4.3	Ergebnisse Kalibrierung "Auwald"	38
4.3.1	Ergebnisse Grobkalibrierung "Auwald".....	39
4.3.2	Ergebnisse Feinkalibrierung "Auwald".....	47
4.4	Ergebnisse Kalibrierung "Stadtgebiet"	54
4.4.1	Ergebnisse Grobkalibrierung "Stadtgebiet"	54
4.4.2	Ergebnisse Feinkalibrierung "Stadtgebiet"	61
4.5	Ergebnisse Validierung "Auwald"	70
4.6	Ergebnisse Validierung "Stadtgebiet"	75

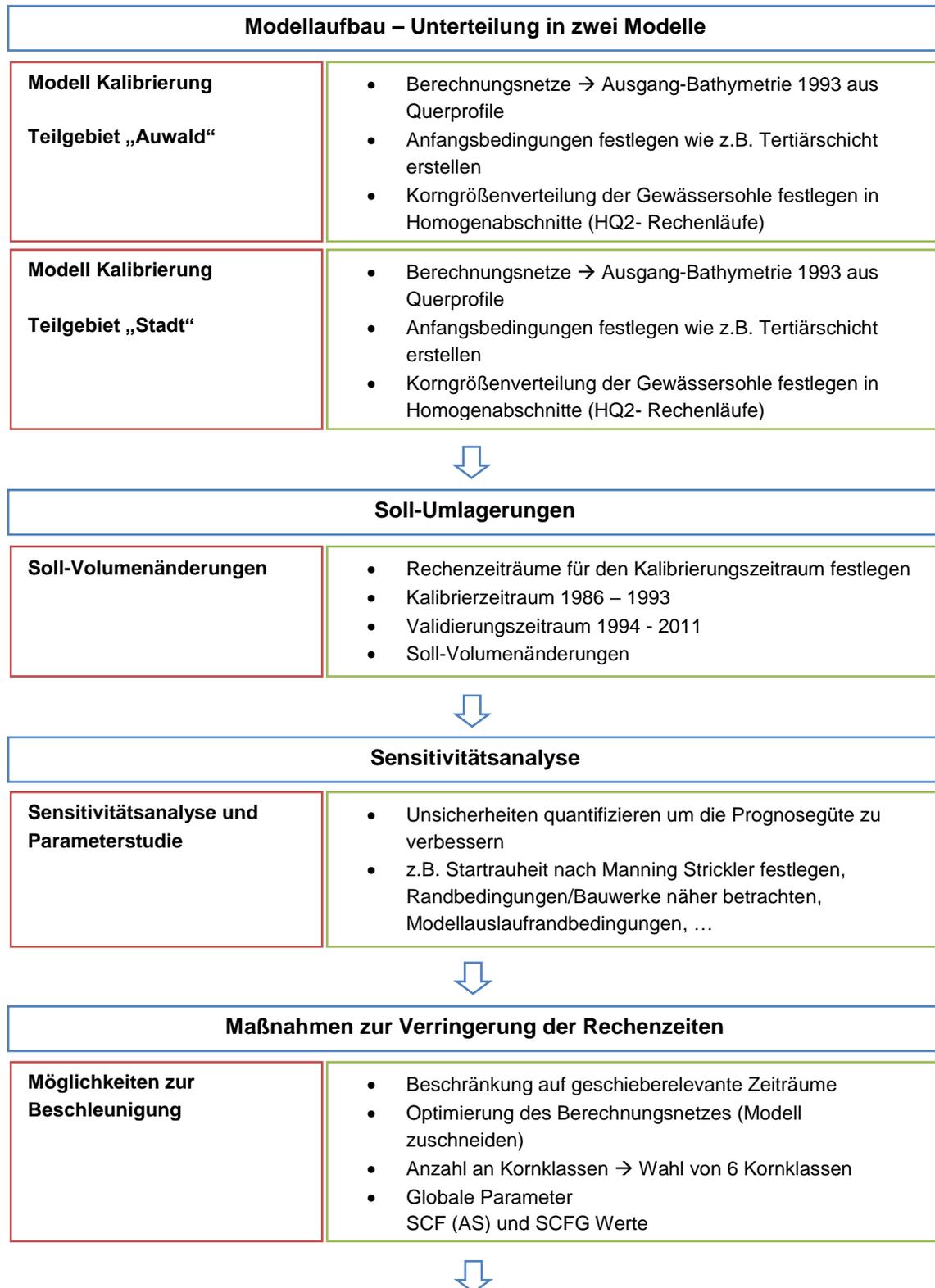
5	Sensitivitätsanalyse.....	81
5.1	Sensitivität - Modell	81
5.2	Sensitivität - Parameteranpassung für Variantenrechnung.....	83
5.3	Einfluss der Geschiebetrift durch den Hochablass auf das Modell „Stadtgebiet Augsburg“	86

1 Inhalt des Berichts

Der Lech im Bereich Augsburg ist aktuell Gegenstand einer morphologischen Untersuchung im Rahmen des Projekts Licca Liber. Der vorliegende Bericht beinhaltet einen kurzen Überblick über die Vorgehensweise bei der morphodynamischen 2D-Modellierung. Dabei werden die Anfangs- und Randbedingungen sowie Werkzeuge zur Auswertung der Geschiebetransportberechnung (Kapitel 3) beschrieben. Das Konzept der Kalibrierung und Validierung wurde bereits im Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) ausführlich erläutert. In diesem Bericht werden in Kapitel 4.2 die Ergebnisse zur Verringerung der Rechenzeit (Kapitel 4.2.1 und 4.2.2) und die Ergebnisse der Grob- und Feinkalibrierung beider Modellabschnitte („Auwald“ und „Stadtgebiet“) dargestellt. Anhand einer Sensitivitätsanalyse werden Modelleinstellungen, der kritische Abfluss Q_c sowie die Sensitivität der Parameteranpassung für die Variantenrechnung in Kapitel 5 näher erläutert.

2 Vorgehensweise bei der Modellierung

In der folgenden Übersicht sind die wichtigsten Vorgehensschritte angeführt, welche im Zuge des Modellaufbaues und der -anpassung durchgeführt wurden. Das Modellkonzept wurde bereits detailliert in Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) erläutert.



Geschiebehydraulische Modellierung (HYDRO_FT-2d)	
Kalibrierung	<ul style="list-style-type: none"> • Grobkalibrierung k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker) θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields) pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken) • Feinkalibrierung – umlagerungsbasierte Rauheitsanpassung Stellgrößen der Parameteranpassung k_{St} und $k_{St,r}$ (Gesamt- und Kornrauheit nach Strickler) bzw. der Riffel-Faktor $\mu = (k_{St}/k_{St,r})^{3/2}$
Modellübertrag zwischen Kalibrierung und Validierung	<ul style="list-style-type: none"> • Endsystemzustand aus Kalibrierung übernehmen Endzustand der Sohle, Fraktionierungen AL/UL/BL Parametereinstellungen anpassen
Validierung	<ul style="list-style-type: none"> • Modellparameter und End-Systemzustand werden aus der Kalibrierung übernommen • Vergleich Erosions- und Depositionsvolumina



Auswertung und Interpretation der Berechnungsergebnisse
--

3 2D-Feststofftransportmodell

Für die morphodynamischen Untersuchungen des vorliegenden Projektes werden die Module HYDRO_AS-2D (für reine Strömungsberechnungen) und HYDRO_FT-2D (Strömung und Geschiebetransport) genutzt. Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Programmversionen verwendet. Die Softwareupdates wurden von der Software Entwicklerfirma Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbh zur Verfügung gestellt. Bei der letztlich verwendeten Softwareversion, handelt es sich um die Beta – Version 4.3.0, welche bereits die Ausgabedateien in .h5 – Format ausgibt. Um alle Endversionen (Feinkalibrierung und Validierung) miteinander vergleichen zu können, wurden diese mit der gleichen Programmversion durchgeführt. Es kann jedoch in den vorhergegangenen Ergebnissen zu kleinen Abweichungen kommen, welche keine Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse haben. Zur Sicherheit wurden die Abweichungen an einem Beispiel überprüft.

3.1 Anfangs- und Randbedingungen

In diesem Kapitel werden die hydraulischen Anfangsbedingungen, Ganglinien, Korngrößenverteilung der Gewässersohle, die maximal erodierbare Tiefe der Sohle bis zur Tertiärschicht und Randbedingungen an den Wehren näher erläutert. Durch die Teilung des gesamten Modelles in zwei Teilgebiete, wird unter Kapitel 3.1.1 der Modellübertrag zwischen den Teilmodellen erklärt.

3.1.1 Ganglinien, Modellübertrag zwischen den Teilmodellen, Auslaufrandbedingung

Die hydrologische Randbedingung für das Teilgebiet 1 „Auwald“ umfasst alle transportrelevanten Abflüsse. Die stündliche Abflussganglinie wird am oberen Modellrand (Pegel „Haunstetten“) auf geschieberelevante Abflüsse $Q_c > 220 \text{ m}^3/\text{s}$ beschränkt. In Kapitel 4.2.1 wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Abflüsse auf die Modellierung untersucht. Das Ergebnis zeigt keine ausgeprägte Veränderung bei unterschiedlichen kritischen Abflüssen. Um möglichst wenig Zeitschritt zu bekommen wurde daher $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt. Die erstellten Ganglinien sind in diesem Kapitel zu finden. Am Zulauftrand des Teilgebiets 1 „Auwald“ wird kein Geschiebeeintrag angesetzt. Entsprechend dieser Vorgehensweise sind die Ganglinien für den Kalibrierungszeitraum und Validierungszeitraum nachfolgend dargestellt.

Kalibrierungszeitraum: 01.01.1986 bis 01.01.1994 → $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$

Die Abflussganglinie für den Kalibrierzeitraum weist keine nennenswerten Hochwässer auf. Der maximale Abfluss beträgt $443 \text{ m}^3/\text{s}$ (am 18.06.1991). Circa 1,3 % der

Abflusswerte liegen über dem $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$. Die verbleibende zu simulierende Zeitpanne ist 975 Stunden lang.

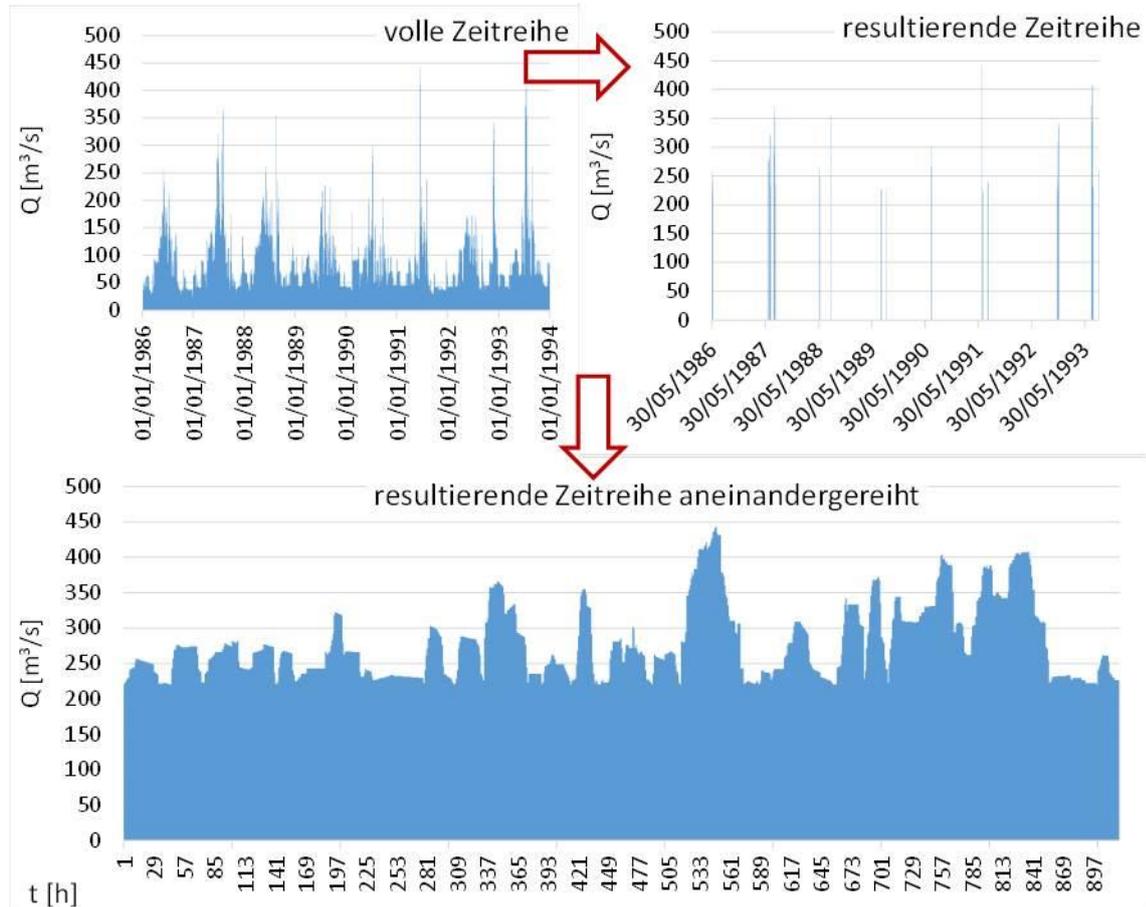


Abbildung 1: links oben gesamte Ganglinie im Kalibrierungszeitraum, rechts oben Kappung der Ganglinie Pegel „Haunstetten“ bei $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$, resultierende aneinandergereihte Abflusszeitreihe $Q(t)$

Validierungszeitraum: 01.01.1994 bis 01.01.2011 $\rightarrow Q_c = 250 \text{ m}^3/\text{s}$

Die verwendete stündliche Abflussganglinie für den Validierungszeitraum weist zwei nennenswerte Hochwässer in dem Jahr 1999 mit einer Abflussspitze von $1140 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Jahr 2005 mit einem Höchstabflusswert von $1120 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Laut Hochwassernachrichtendienst Bayern (HND) ergeben sich gering höhere Abflusswerte. Im Jahr 1999 erreichte die Abflussspitze einen Wert von $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Jahr 2005 wurde der höchste Abfluss mit $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ erfasst. Für die ausgewählte Ganglinie wurde ein $Q_c = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt um eine durchgehende Simulation, welche im Hydro_FT-2Dprogrammbedingt auf 2000 Zeitschritten begrenzt ist, durchführen zu können. Für die ausgewählte Ganglinie beträgt der Zeitanteil mit $Q \geq Q_c = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ ca. 1,3 %. Der

Validierungszeitraum kann so auf 1946 Stunden reduziert werden. In Abbildung 2 ist die resultierende Zeitreihe zu sehen.

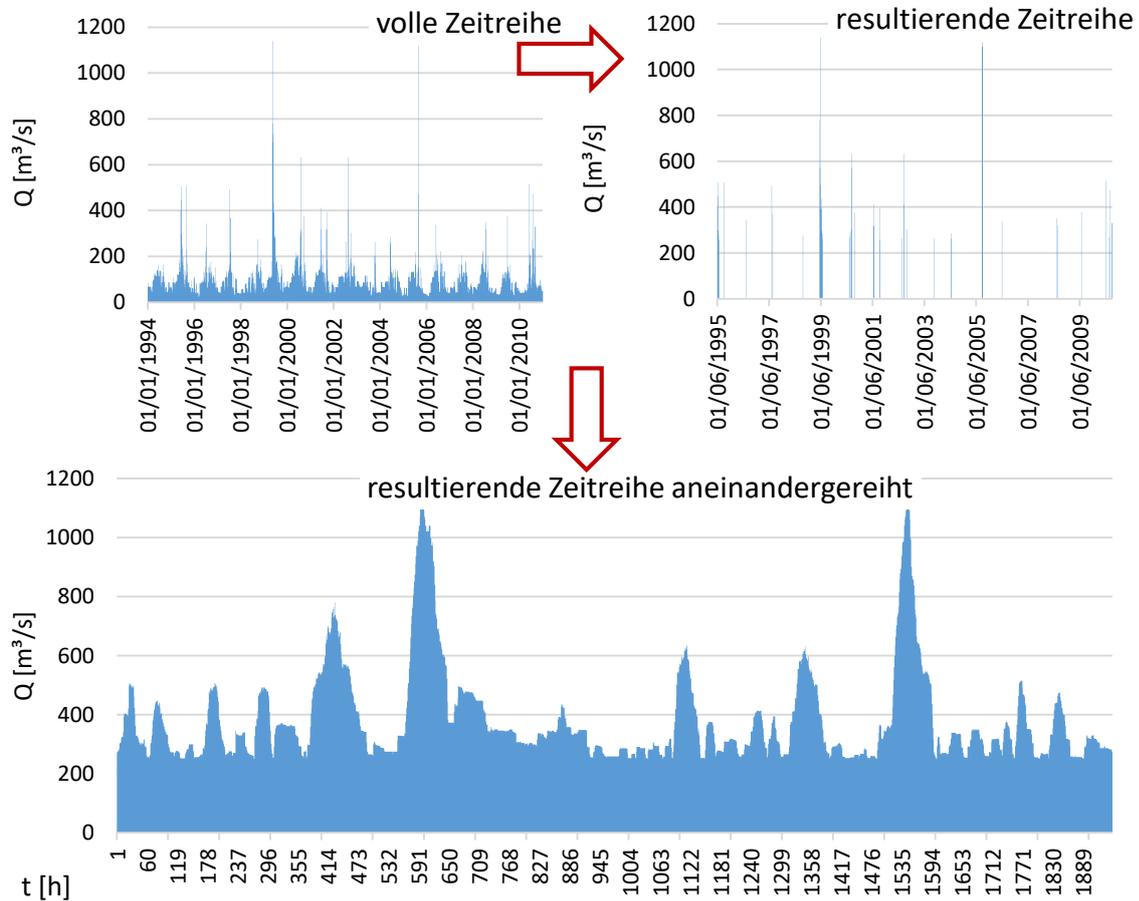


Abbildung 2: links oben gesamte Ganglinie im Validierungszeitraum, rechts oben Kappung der Ganglinie Pegel „Haunstetten“ bei $Q_c = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, resultierende aneinandergereihte Abflusszeitreihe $Q(t)$

Modellübertrag zwischen den Teilmodellen

Das Gesamtgebiet wurde in zwei Teilgebiete aufgeteilt. Der Hochablass, welcher mittels Abflussbeziehung gesteuert ist, wurde als Modellgrenze verwendet. Dieser hat auch eine Bedeutung zur Fixierung der Höhenlage der Sohle, dadurch kommt es zu einem Rückstau. Die linksufrig vorhandene Kiesschleuse wird beim Ansteigen des Abflusses, nach öffnen der Gegengewichtsklappen, geöffnet. Das Geschiebe wird somit bei geschieberelevanten Abflüssen flussabwärts weitergeleitet. Genaue Informationen gehen aus der zur Verfügung stehenden Betriebsvorschrift nicht hervor (siehe Betriebsvorschrift vom 03.11.2014 Kapitel 1.2.2.3 „Regelung des Abflusses“). Im Feststofftransportmodell „Teilgebiet 1“ wurde die Abflussbeziehung unverändert aus

dem hydraulischen Modell übernommen (siehe Bericht „Hydraulik – Modellaufbau und –anpassung“) und im Modell als „Auslauf W-Q“ Randbedingung angesetzt.

Die Zulauftrandbedingung des Teilgebietes 2 wird aus dem Teilgebiet 1 abgegriffen. Hydro- und Sedigraphen inklusive der Kornverteilung des transportierten Geschiebes werden als Transferinformation flussabwärts weitergegeben. Der mittlere Fraktionsanteil je Kornklasse (Kornverteilung) des transportierten Geschiebes wird zu jedem Zeitpunkt für drei definierte Abschnitte (Abbildung 3) am Ende des ersten Teilgebietes vor dem Hochablass ausgewertet. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der zeitlichen Entwicklung des transportierten Geschiebes in diesen drei Abschnitten. Es konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Fraktionsanteile in den einzelnen Abschnitten keine nennenswerten Unterschiede aufweisen. Dennoch wurde ein Mittelwert aus den drei Abschnitten für die Übertragung gebildet.

In Abbildung 4 und Abbildung 5 ist die prozentual gestufte Aufteilung des Geschiebeübertrages für die einzelnen Fraktionen (Fraktionszuordnung siehe Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“) in den einzelnen Abschnitten zu sehen. Die drei Ergebnisse aus den ausgewählten Abschnitten haben die gleiche Achsenbeschriftung wie für die gemittelte Abbildung (groß).

In Kapitel 5.3 wird der Einfluss des Hochablasses auf den Geschiebetransport für im Stadtgebiet näher erläutert. Dazu wurde als Extremfall eine weitere Berechnung des Kalibrierzeitraums für das Modell „Stadtgebiet“ ohne Geschiebeeintrag durchgeführt.

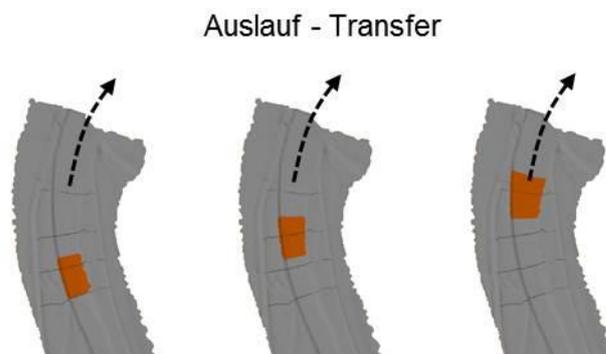


Abbildung 3: ausgewählte Abschnitte fürs Abgreifen des transportieren Geschiebes

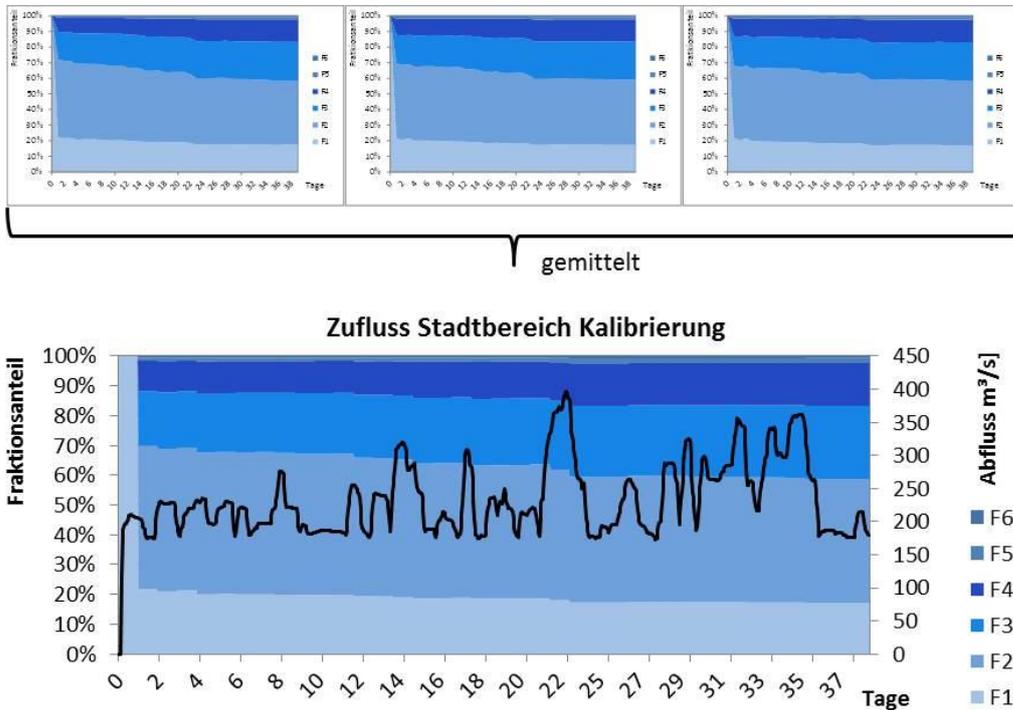


Abbildung 4: Ergebnisse der Fraktionsanteile in % in den einzelnen Abschnitten; gemittelte Zuflussganglinie $Q(t)$ und gemittelten Fraktionsanteile in % Transfer von Teilmodell 1 zu Teilmodell 2 für die Endkalibrierung

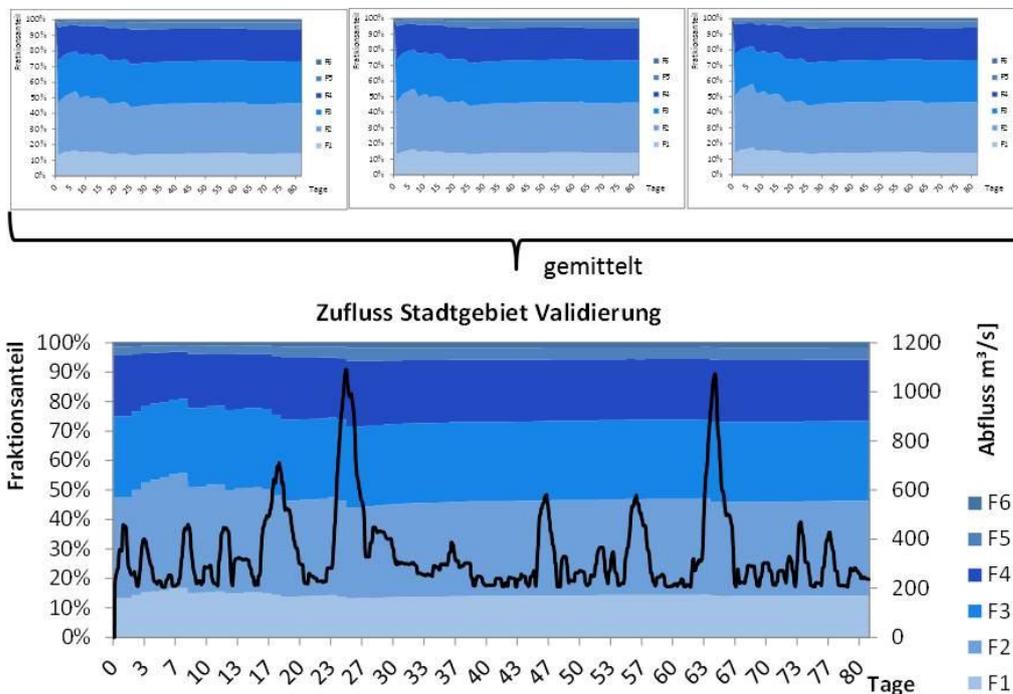


Abbildung 5: Ergebnisse der Fraktionsanteile in % in den einzelnen Abschnitten; gemittelte Zuflussganglinie $Q(t)$ und gemittelten Fraktionsanteile in % Transfer von Teilmodell 1 zu Teilmodell 2 für die Endkalibrierung

Die Feststoffgeschiebefracht am Zulauftrand des Teilgebiets „Stadt“ beträgt im Kalibrierungszeitraum ca. 29.800 m³ und im Validierungszeitraum ca. 125.800 m³. Unterstrom wurde die Schlüsselkurve der 2D-Hydraulik herangezogen.

3.1.2 Korngrößenverteilung der Gewässersohle

Für das Schichtenmanagement von HYDRO_FT-2D ist die Vorgabe eines Sohlenaufbaues notwendig. Am Beginn muss für jeden Netzknoten und jede vertikale Schicht (AL, UL, BL) eine Korngrößenverteilung in Form von Fraktionsanteilen p_i gesetzt werden. Die Grundsicht (BL) kann verwendet werden, um beispielsweise weitere geologische Schichten zu repräsentieren. Für die Gewässersohle liegen jedoch nur Daten über die beiden Schichten AL (Austauschschicht) und UL (Unterschicht) vor. Es ist anzunehmen, dass die Unterschicht (UL) in der Regel mächtiger ist, als die durch die Modellparameter p_{al} , p_{ul} und dem Größtkorndurchmesser d_{max} (siehe Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“) vorgegebene Dicke. Aus diesem Grund wird die unbekannte Grundsicht der Unterschicht gleichgesetzt und die Tertiärschicht mittels des DZG-Layers modelliert, welcher die maximale Erosionstiefe begrenzt.

Die Ableitung einer vollständigen flächigen Korngrößenverteilung alleine aus den (relativ) wenigen Punktaufnahmen ist nicht möglich. Es müssen weitere Annahmen getroffen werden. Zweckmäßigerweise wird die morphologisch aktive Gewässersohle in sogenannte Homogenabschnitte eingeteilt und gleichartigen Homogenabschnitten auch gleichartige Kornverteilungen, die aus den punktförmigen Sohlproben bestimmt wurden, zugewiesen. Dieser Ausgangszustand wird in weiterer Folge als „gestufte Verteilung“ bezeichnet. Alternativ dazu wurde die Kornverteilung der Austauschschicht (AL) jener der gestuften Verteilung der Unterschicht (UL) gleichgesetzt und als „gestufte US-Verteilung“ bezeichnet. Die dritte Variante mit dem Namen „konstante AS-Verteilung“ besteht aus einer konstanten Verteilung der Austauschschicht mit $d_{m,AS} = 55$ mm und einer gestuften Verteilung der Unterschicht.

Um eine bessere Aussage über die tatsächliche Verteilung der Korngrößen im Flussbett treffen zu können, wurden „Einschwemmrechenläufe“ mit den unterschiedlich definierten Start-Kornverteilungen ausgeführt und analysiert. Als oberstromige Randbedingung wurde jeweils ein konstanter Abfluss von 450 m³/s (entspricht einem HQ₂-Ereignis) über 2 Tage angesetzt. Aus diesen numerischen Simulationen wird ersichtlich, wie sich die Korngrößenverteilung im Längsverlauf verändert und welche Endzustände sich ausbilden. Basierend auf dieser Grundlage wurde eine resultierende neue Annahme der Kornverteilung in den Homogenabschnitten abgeleitet.

Ausgangszustände für das Teilmodell 1 „Auwald“:

- Gestufte Verteilung: rote Linie mit $d_{m,AS} \neq d_{m,US}$
- Gestufte US-Verteilung: blaue Linie mit $d_{m,AS} = d_{m,US}$
- Konstante AS-Verteilung: grüne Linie mit $d_{m,AS} = 55$ mm und $d_{m,US}$ gemäß der „gestuften Verteilung“

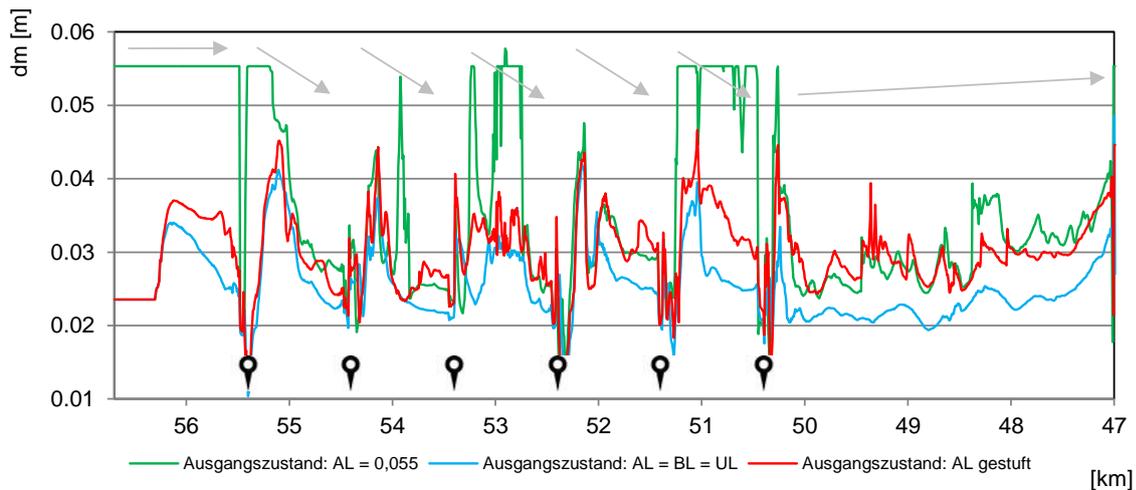


Abbildung 6: Endzustand der maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AS}$, $d_{m,US}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 1

Der Einschwemmrechenlauf mit der Annahme einer ausgeprägten Deckschicht (grüne Linie $d_{m,AS} = 55$ mm) zeigt, dass in hydraulisch belasteten Abschnitten die Deckschicht aufreißt und sich verfeinert. In einzelnen sohlstabilen Abschnitten bleibt die Deckschicht jedoch bestehen. Die Simulation „Gestufte US-Verteilung“, in welcher die Deckschicht der Unterschicht gleichgesetzt ist, zeigt hingegen, dass die Austauschschicht in manchen Bereichen mit Eintiefungstendenz zu fein gewählt ist. Der Einschwemmrechenlauf mit dem Ausgangszustand „Gestufte Verteilung“ ergibt ein realitätsnahes Ergebnis ohne unnatürlich große Korngrößen-Veränderungen im Verlauf der Simulation. Innerhalb der Abstürze ist eine Verfeinerung der Korngrößen (d_m) flussabwärts zu sehen (siehe graue Pfeile in Abbildung 6). Der Ausgangszustand „Gestufte Verteilung“ diente als Basis für die endgültige Zuweisung der Kornverteilungen in den Homogenabschnitten. Aufgrund des optisch erkennbaren Verlaufes in der Längsachse wurden sechs unterschiedliche AL Kornverteilungen definiert. Nennenswert ist die Verteilung zwischen den Abstürzen, welche aus drei Homogenabschnitten besteht. Der erste Abschnitt weist feineres Material auf (Lage direkt nach den Abstürzen), im Zwischenabschnitt wird eine gröbere Kornverteilung angesetzt und vor den Abstürzen wird wieder eine feinere Kornverteilung verwendet. Die angesetzten Kornverteilung für die Decksicht sind gemittelte Werte aus den

aufgenommenen Deckschichtkorngrößenverteilungen. Für das Vorlandgebiet wurde der Mittelwert aller Vorland-Schürfe verwendet (siehe Tabelle 1). Die Abstürze und Bauwerke sind so gebaut, dass Erosionen ausgeschlossen werden können. Im morphodynamischen Modell werden die maximalen Erosionstiefen durch den DZG-Layer festgelegt. Bei den Abstürzen/Bauwerken wird der DZG-Layer auf den Wert Null gesetzt und somit Erosionen unterbunden. 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 (siehe Tabelle 1). Diese Kornverteilung entspricht weitgehend dem Unterschichtenmaterial und damit dem laufenden Geschiebe im Hochwasserfall. Wie bereits aus der TUM-Studie hervorging, ist flussabwärts der Schwelle Fkm 50,40 faktisch keine stützende Sohlschicht mehr vorhanden, daher wurde in diesen Homogenabschnitten die Austauschschicht dem Unterschichtmaterial gleichgesetzt.

Tabelle 1: Fraktionsanteile – Vorland-Schürfe

Vorland-Schürfe	p_1 [-]	p_2 [-]	p_3 [-]	p_4 [-]	p_5 [-]	p_6 [-]
82169_2016_Ob.sch.	0.2226	0.2702	0.3038	0.1783	0.0251	0.0000
82170_2016_Un.sch.	0.3657	0.2578	0.2497	0.1268	0.0000	0.0000
S_2011_V5	0.1316	0.4472	0.3044	0.1024	0.0144	0.0000
S_2011_V10	0.1579	0.3162	0.2723	0.2109	0.0427	0.0000
Mittelwert	0.2195	0.3229	0.2826	0.1546	0.0204	0.0000

Für die Unterschicht wurden die Kornverteilungen der Geschiebeprobenahmen (Jahr 20100 und 2016) verwendet. Es wurden 15 unterschiedliche UL Kornverteilungen definiert. Für manche Abschnitte standen mehrere Informationen zur Zusammensetzung der Kornverteilung zur Verfügung. In diesen Fällen wurden diese gemittelt und zusammengefasst. Die Summe der Fraktionsanteile muss stets 100 % sein. Der maßgebende Korndurchmesser der Sohlsedimente für das Teilgebiet 1 ist in Abbildung 7 zu sehen. In Abbildung 8 und 9 sind die Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,AL}$ und Unterschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 1 zu sehen.

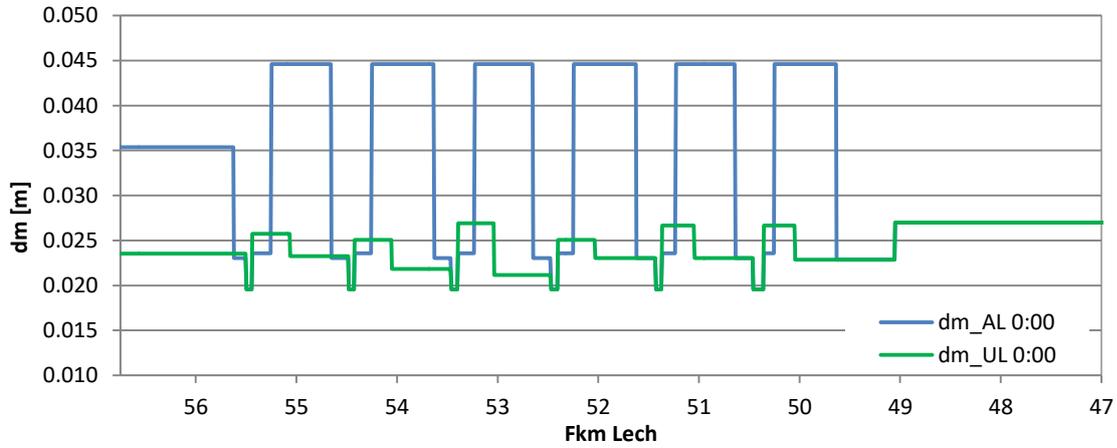


Abbildung 7: Ausgangszustand der Kornzusammensetzung für Austauschschicht $d_{m,AS}$ und Unterschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 1

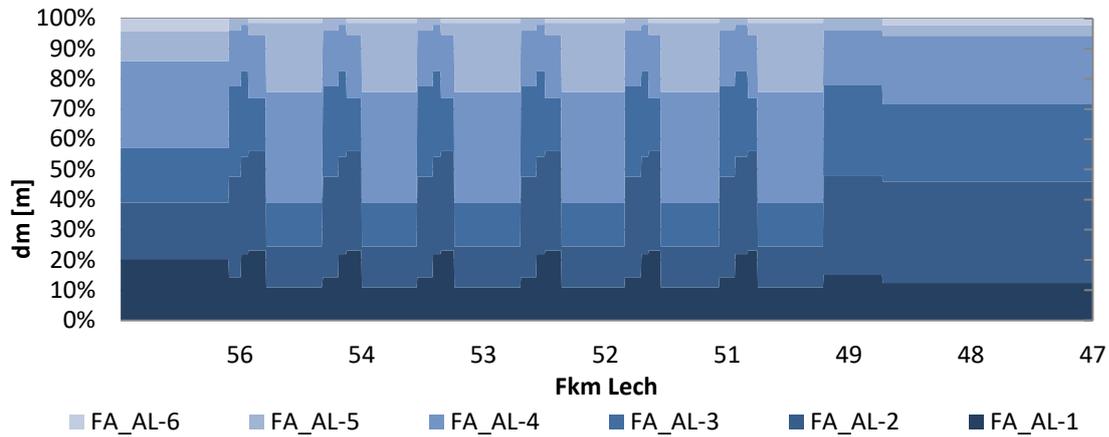


Abbildung 8: Ausgangszustand der Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,AL}$ für das Teilgebiet 1

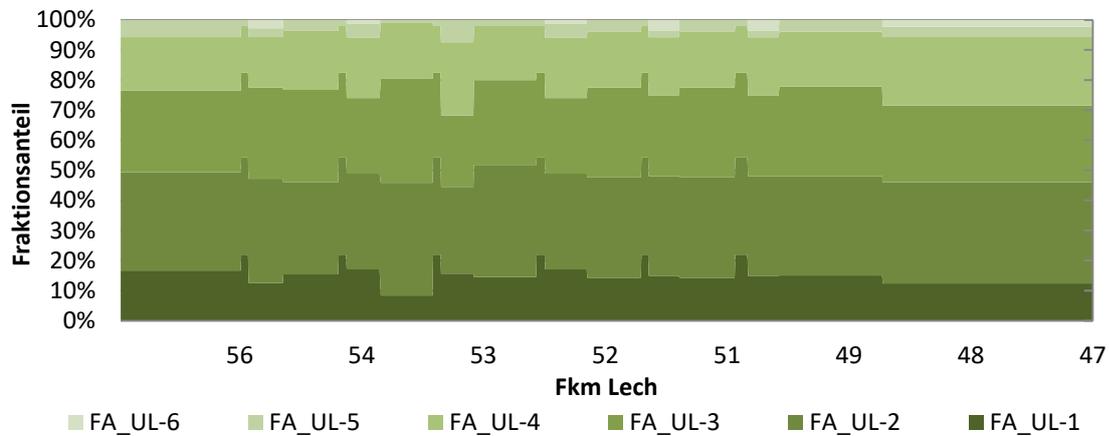


Abbildung 9: Ausgangszustand der Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 1

Die räumliche Kornverteilung für das 2D-Modell verlangt im Stadtbereich wiederum einer näheren Betrachtung. Durch die veränderten Randbedingungen im Projektverlauf wird in diesem Bericht der Endzustand der verwendeten Kornverteilung präsentiert.

Aus den ersten Modellergebnissen des Einschwemmrechenlaufs konnte festgestellt werden, dass im Teilgebiet 2 „Stadtgebiet Augsburg“ sich die Kornverteilung in Flussmitte deutlich unterschiedlich ausprägt als in den Uferbereichen. Die raren und schwer zugänglichen Sedimentproben, welche hauptsächlich in Ufernähe genommen wurden, können somit nicht für die gesamte Sohlbreite übernommen werden. Der Ausgangszustand wird vereinfacht. Das Endergebnis wird mit den aufgenommenen Sedimentproben abgeglichen.

Die Eckdaten zum Ausgangszustand für die Testrechnung im Teilmodell 2 sind nachfolgend zu sehen.

Ausgangszustände für das Teilmodell 2 „Stadtgebiet Augsburg“:

- blaue Linie: $d_{m,US} = \text{konstant } 17,76 \text{ mm}$
- rote Linie: $d_{m,US} = \text{gestufte Verteilung}$
oberer Abschnitt $d_{m,AS} = 35,65 \text{ mm}$
unterer Abschnitt $d_{m,AS} = d_{m,US} = 17,76 \text{ mm}$

Das Ergebnis präsentiert am Ende der Simulation eine relativ ähnliche Kornverteilung in Flussmitte über das gesamte Gebiet. Der mittlere Korndurchmesser der Austauschschicht verfeinert sich in Flussmitte und in Ufernähe formiert sich eine gröbere Kornverteilung. Die aufgenommenen Sedimentproben wurden hauptsächlich in Ufernähe genommen und können somit direkt übernommen werden. Im oberen Abschnitt wurde ein größerer $d_{m,AS}$ angesetzt. Flussabwärts wurde die $d_{m,AS} = d_{m,US}$ gleichgesetzt. Die Sedimentproben im Stadtgebiet Augsburg werden für einen qualitativen Abgleich gezielt herangezogen. Der Vergleich zwischen aufgenommenen Kornverteilungen aus den Sedimentproben und den Modellergebnissen der Kalibrierung zeigt eine gute Übereinstimmung (siehe Tabelle 2). Daher konnte für den Start-Ausgangszustand eine gleichbleibende Kornverteilung für die Unterschicht und eine zweigestufte Kornverteilung für die Austauschschicht angesetzt werden, welche in Abbildung 11 zu sehen ist. In Abbildung 12 und 13 sind die Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,AL}$ und Unterschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 2 zu sehen.

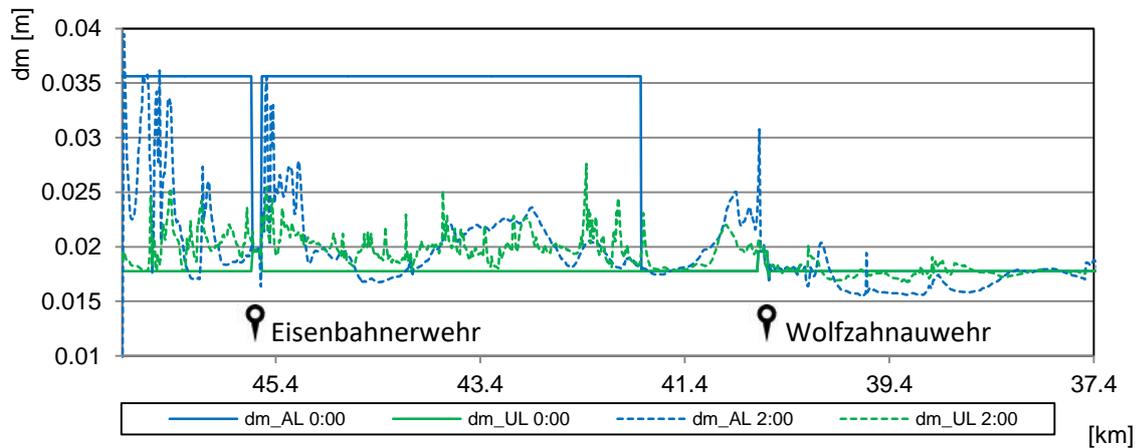


Abbildung 10: Entwicklung der maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AS}$, $d_{m,US}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 2

Tabelle 2: Abgleich maßgebender Korndurchmesser – Probennahme mit Simulationsergebnis aus der Kalibrierung

Abgleich der maßgebenden Korndurchmesser		
Fkm	Probennahme	Simulationsergebnis
39,70	AL = 48,17 mm UL = 21,10 mm	AL ~ 26,00 mm UL ~ 20,70 mm
42,65	MS = 31,44 mm	AL ~ 24,30 mm UL ~ 21,50 mm
45,45	AL = 37,37 mm UL = 15,55 mm	AL ~ 30,10 mm UL ~ 17,80 mm

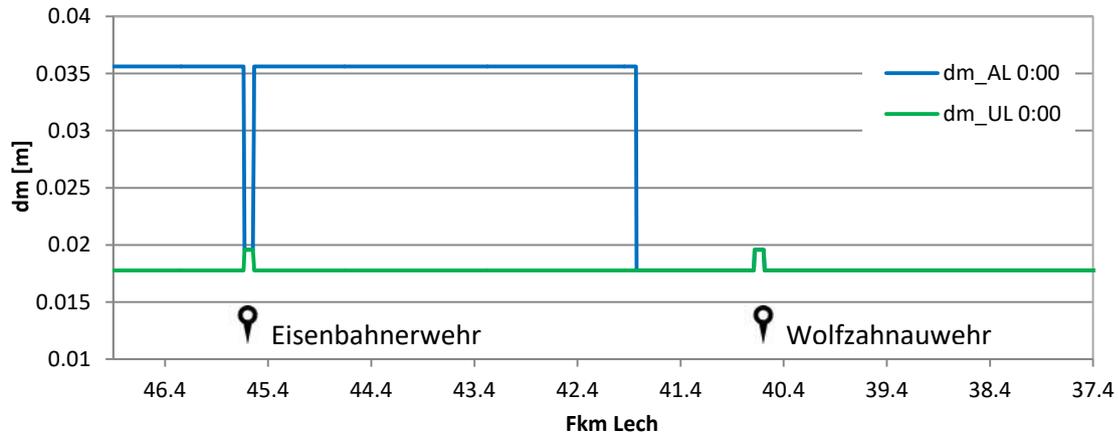


Abbildung 11: Ausgangszustand der Kornzusammensetzung für Austauschschicht $d_{m,AS}$ und Unterschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 2

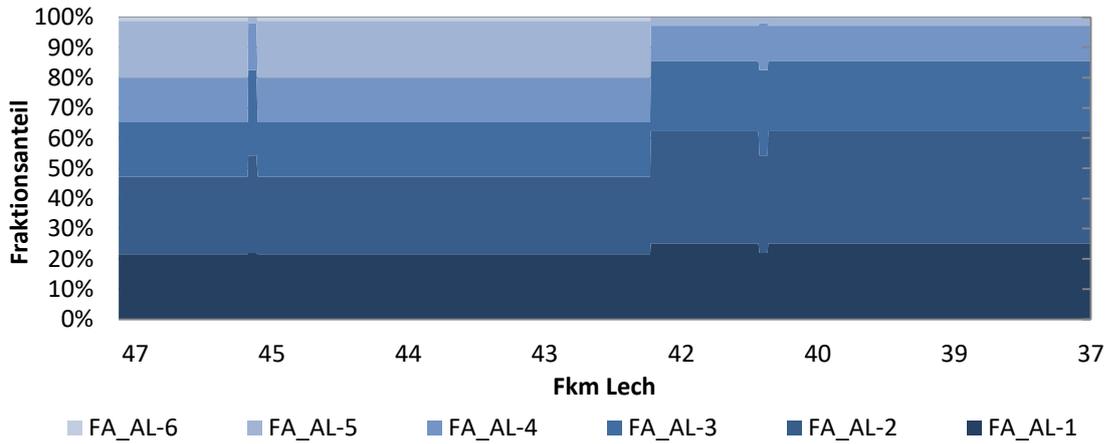


Abbildung 12: Ausgangszustand der Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,AL}$ für das Teilgebiet 2

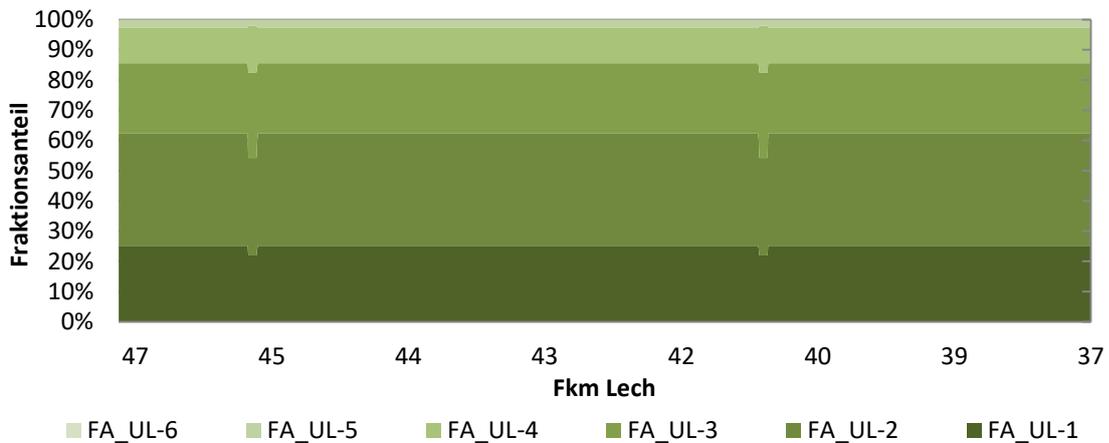


Abbildung 13: Ausgangszustand der Fraktionsanteile der Kornzusammensetzung für die Austauschschicht $d_{m,UL}$ für das Teilgebiet 2

3.1.3 Tertiärschicht

Wie bereits in Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) näher erläutert wurde, ist die schützende Kies-Sohlschicht an manchen Stellen relativ gering, d.h. dass die tertiäre Schicht erreicht wird. Die Datengrundlage für die Erstellung der Tertiärschicht wurde im Projektverlauf verbessert und angepasst. Dies hat zur Folge, dass diese Randbedingung nicht in allen Modellen gleich aussieht. Für die ersten Modellrechnungen wurden angenommen, dass die tertiäre Schicht, welche aus Punktinformationen entlang der Längsachse besteht, normal auf die Flussachse links- und rechtsufrig sich fortsetzt.

In der Grundwassermodellierung wurde eine flächige Tertiärschicht erstellt, welche den Vorteil hat, dass die Genauigkeit mit zunehmender Entfernung zur Längsachse höher ist. Im Zuge des Projektes wurden zusätzlich Erkundungsbohrungen durchgeführt, die speziell im Bereich bei Fkm 43,00 mehr Aufschluss über die Situation geben. Aus diesen beiden Datengrundlagen wurde eine Tertiärschicht abgeleitet. Diese Grundlage wird für alle Rechnungen herangezogen.

In nachfolgender Abbildung ist die verwendete Tertiärschicht dargestellt. Diese berücksichtigt auch die Information der Erkundungsmessungen der Firma Geoulm. Weiter Informationen zur Tertiärschicht sind im Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) zu finden.

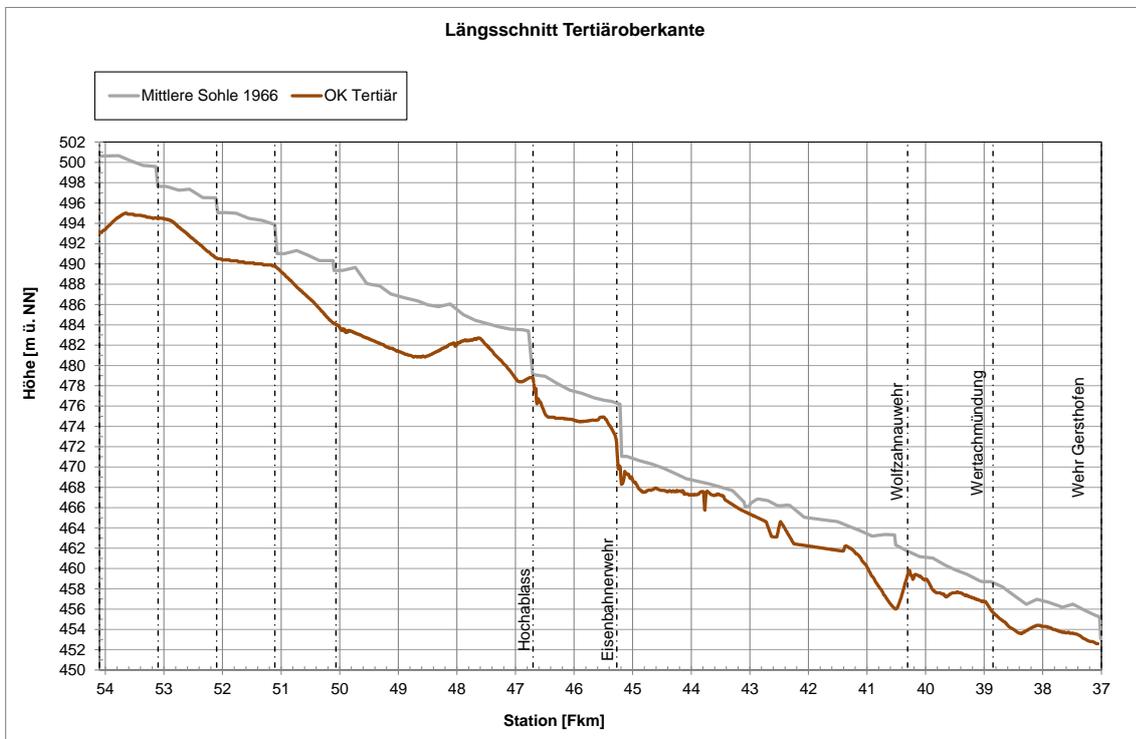


Abbildung 14: Längsprofil mit Flusssohle (mittlere Sohle 1966) und die angesetzte Tertiäroberkante

In Realität kann der Uferbereich durch die vorhandene Ufersicherung nicht erodieren. Aus diesem Grund wird im Modell eine Seitenerosion durch die Definition eines aktiven Bereiches (aktive Zone, siehe Abbildung 15) unterbunden. Diese „aktive“ Zone wird als bewegliche Sohle definiert, in welcher Sohlerosion möglich ist. Der sogenannte DZG-Layer begrenzt die maximale Erosionstiefe, welche durch die Höhenlage des Tertiärs vorgegeben ist.

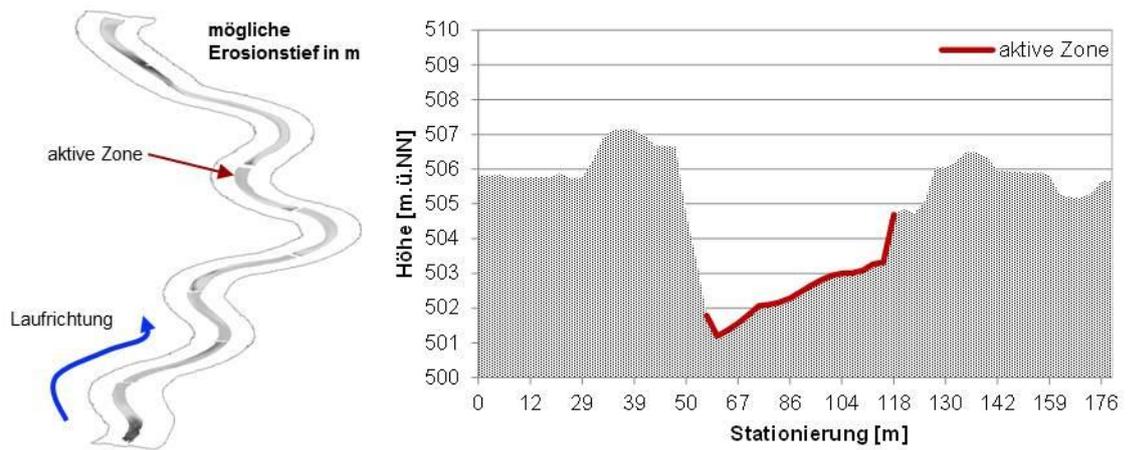


Abbildung 15: Beispielhafte Gliederung im Querschnitt, Lage der morphologisch aktiven Zone (bewegliche Sohle)

3.1.4 Randbedingung – Eisenbahnerwehr und Wolfzahnuwehr

Im gegenständlichen Projekt werden das Eisenbahnerwehr (Fkm 45,60) und Wolfzahnuwehr (Fkm 40,70) als „steuerbare Bauwerke“ definiert.

Diese Randbedingung besteht aus einer Kombination der softwarespezifischen Bedingungen „Auslauf W-Q/Wehr“ und „Zulauf gebunden an Auslauf“. Der zugehörige Steuerpegel liegt direkt am Auslaufquerschnitt. Die Wasser- und Geschiebemenge wird am Auslauf übernommen und direkt an den Zulauf übergeben. In den 2D-numerischen Geschiebetransport-Simulationen bei hohen Abflüssen treten hydraulische Instabilitäten auf, die Auswirkungen auf den Geschiebetransport haben. Es treten unnatürlich große Anlandungen direkt an einzelnen Zulaufknoten auf. Diese Instabilitäten sind vermutlich auf die Anwendung der Flachwassergleichungen auch in den steilen Abstürzen zurückzuführen. Zusätzlich verstärkt wird dieser Effekt durch die geometrische Unebenheit am Zulaufquerschnitt (Nodestring „Zulauf gebunden an Auslauf“). Der weiterzugebende Abfluss sowie das laufende Geschiebe werden durch HYDRO_FT-2D auf die Knoten des Zulaufquerschnitts aufgeteilt. Die Geometrie des Zulaufquerschnitts hat dabei einen entscheidenden Einfluss. Erst wenn dieser eben im Sinne einer gleichmäßigen Höhe bzw. gerade in der Draufsicht vorgegeben wird, können die auftretenden Instabilitäten auf ein geringes Maß reduziert werden. Im

Berechnungsnetz erfolgt daher eine geometrische Anpassung flussabwärts des Wehres. In Abbildung 16 ist die geometrische Veränderung zu sehen. Eine direkte Berücksichtigung der vorhandenen Kiesfallen bzw. Kiesschleusen ist derzeit im 2D-numerischen Modell HYDRO_FT-2D nicht möglich.

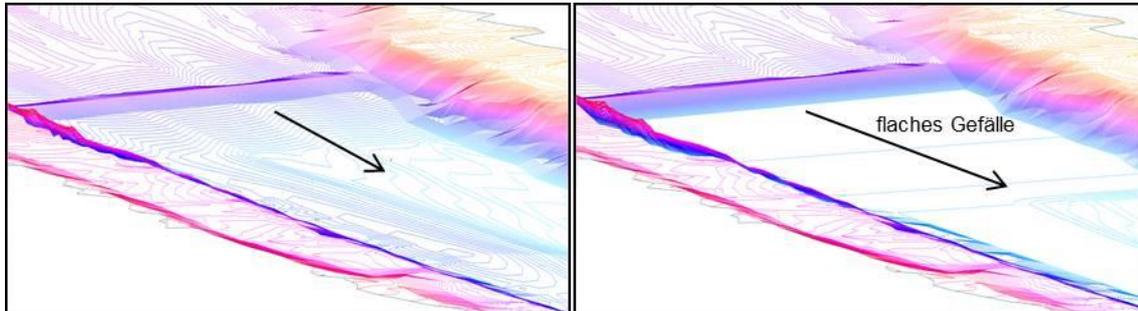


Abbildung 16: geometrische Veränderung im Ausgangsmodell (links), direkte Berücksichtigung im numerischen Modell (flaches gleichmäßiges Gefälle)

Aufgrund der geometrischen Veränderungen werden die kurzen Abschnitte direkt nach den Wehren für die Ergebnisbilanzierung nicht herangezogen.

Für die Berechnung der W-Q Beziehung am Eisenbahnerwehr wurden die zur Verfügung gestellten Antragsunterlagen herangezogen. Die Wasserstand-Abflussbeziehung, welche bis zu einem Abfluss von 200 m³/s zur Verfügung stand, wurde mit Hilfe der Überfallformel nach Poleni (siehe Bollrich 2015) bis 1450 m³/s extrapoliert. Der Überfallbeiwert μ_o beträgt für die weiteren Modellierungen $\mu_o = 0,70$. Durch einen qualitativen Abgleich der Wasserspiegellagen zwischen der WSP Fixierung während dem HW Ereignis 2005 und den Simulationsergebnissen, kann eine plausible Abflusssituation am Eisenbahnerwehr abgebildet werden. Die W-Q Beziehung für das Eisenbahnerwehr ist in Abbildung 17 zu sehen.

In den Antragsunterlagen zum Wolfzahnauwehr ist eine W-Q Beziehung bis zu einem Abfluss von 250 m³/s vorhanden. Diese wurde wiederum mit Hilfe der Überfallformel nach Poleni angepasst. Mit Berücksichtigung der WSP- Fixierung bei Fkm 40,80 bei dem Hochwasserereignis im Jahr 2005, konnte die W-Q Beziehung angepasst werden. Bei einem Überfallbeiwert $\mu_o = 0,88$ konnten der beobachtete Wasserspiegel nachvollzogen werden. Die W-Q Beziehung für das Wolfzahnauwehr ist in Abbildung 17 zu sehen.

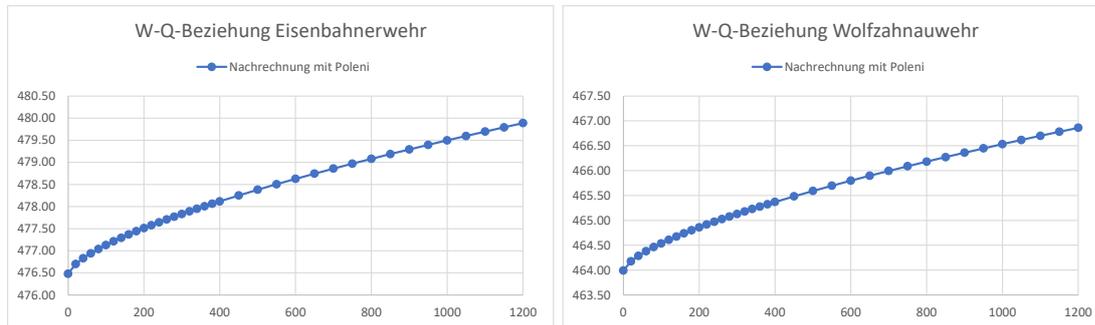


Abbildung 17: angepasste W-Q Beziehung für das Eisenbahnerwehr (Fkm 45,60) und Wolfzahnauwehr (Fkm 40,70)

3.2 Auswertung der Geschiebetransportberechnungen

3.2.1 Werkzeuge zur Auswertung

Im Zuge des Projektes wurde ein Werkzeug zur automatischen Auswertung von HYDRO_FT-2D Berechnungen entwickelt. Ein Überblick über mögliche Auswertungen ist nachfolgend gegeben:

- Auswertung je Abschnitt, Abschnitte haben ca. eine Länge von 200 m und sind lagemäßig ähnlich den Rauheitsabschnitten
 - Bilanzierung der Erosions- bzw. Auflandungsvolumina
 - minimaler, maximaler und mittlerer Korndurchmesser der Austauschschicht (AL) d_{ms} bzw. der Unterschicht (UL) d_{mo}
 - gemittelte Fraktionierung der einzelnen Schichten (AL und UL)
 - Auswertung des Sohlgefälles
 - weitere Auswertungen möglich
- Grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse (flächige Darstellung und Längsschnitte – Ende der Berechnungszeit)
 - Sohlagenänderung innerhalb des betrachteten Zeitraumes
 - Hydraulische Kenngrößen
 - Längenschnitt der mittleren Sohlagen an ausgewählten Querprofilen

Die Abbildung 18 und Abbildung 19 beinhalten eine Übersicht über die Zuordnung der einzelnen Abschnitte den Flusskilometern. Die Bauwerke wurden für die Auswertung ausgeschlossen.

Abschnitt	Fkm	Gefälle I_s	Energieliniengefälle I_E
46	47.20 - 47.00	0.17%	0.13%
45	47.40 - 47.20	0.09%	0.36%
44	47.60 - 47.40	0.17%	0.40%
43	47.80 - 47.60	0.24%	0.19%
42	48.00 - 47.80	0.11%	0.14%
41	48.20 - 48.00	0.01%	0.14%
40	48.40 - 48.20	0.13%	0.10%
39	48.60 - 48.40	0.29%	0.37%
38	48.80 - 48.60	0.35%	0.15%
37	49.00 - 48.80	0.23%	0.25%
36	49.20 - 49.00	0.03%	0.29%
35	49.40 - 49.20	0.25%	0.16%
34	49.60 - 49.40	0.05%	0.31%
33	49.80 - 49.60	0.09%	0.28%
32	50.00 - 49.80	0.33%	0.12%
31	50.20 - 50.00	0.45%	0.12%
30	50.32 - 50.20	0.36%	0.23%
<hr/>			
29	50.60 - 50.42	0.22%	0.14%
28	50.80 - 50.60	0.05%	0.20%
27	51.00 - 50.80	0.09%	0.22%
26	51.20 - 51.00	0.28%	0.10%
25	51.36 - 51.20	0.22%	0.08%
<hr/>			
24	51.60 - 51.42	0.23%	0.13%
23	51.80 - 51.60	0.03%	0.15%
22	52.00 - 51.80	0.39%	0.21%
21	52.20 - 52.00	0.34%	0.20%
20	52.37 - 52.20	0.65%	0.12%
<hr/>			
19	52.60 - 52.42	0.18%	0.12%
18	52.80 - 52.60	0.10%	0.40%
17	53.00 - 52.80	0.15%	0.60%
16	53.20 - 53.00	0.47%	0.32%
15	53.38 - 53.20	0.14%	0.19%
<hr/>			
14	53.60 - 53.42	0.06%	0.13%
13	53.80 - 53.60	0.12%	0.08%
12	54.00 - 53.80	0.10%	0.31%
11	54.20 - 54.00	0.10%	0.20%
10	54.38 - 54.20	0.04%	0.11%
<hr/>			
9	54.60 - 54.42	0.23%	0.21%
8	54.80 - 54.60	0.17%	0.10%
7	55.00 - 54.80	0.16%	0.20%
6	55.20 - 55.00	0.10%	0.11%
5	55.38 - 55.20	0.76%	0.15%
<hr/>			
4	55.60 - 55.42	0.04%	0.21%
3	55.80 - 55.60	0.26%	0.20%
2	56.00 - 55.80	0.15%	0.10%
1	56.20 - 56.00	0.15%	0.10%

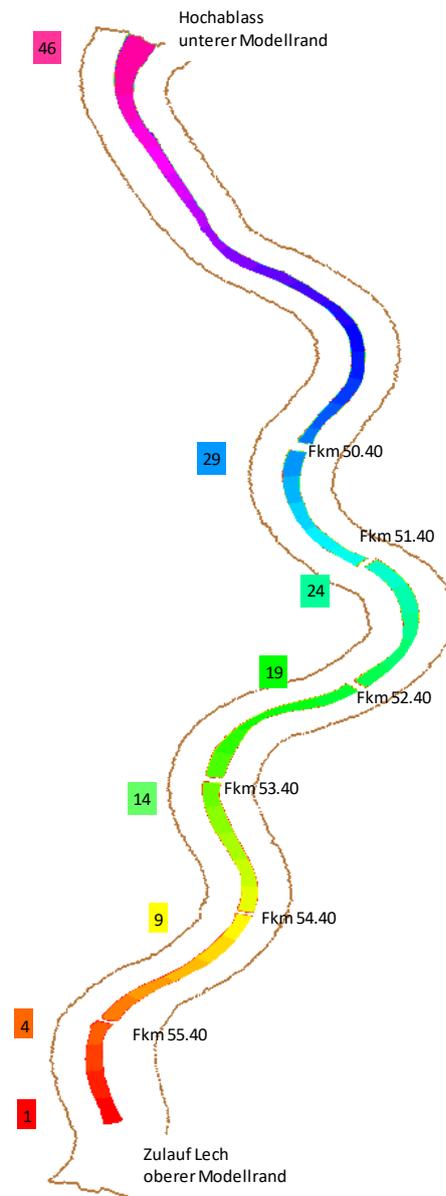


Abbildung 18: Abschnittseinteilung mit Kilometrierung und Abschnittdaten sowie der beispielhaften Auswertung des Energieliniengefälles für einen Abfluss von 226 m³/s im Teilgebiet 1 "Auwald" von Fkm 56,20 bis Fkm 47,20, Lücken: Lage der Abstürze

Die Berechnung der abschnittswisen Gefälle (Sohlgefälle und Energieliniengefälle) erfolgt mittels einer dreidimensionalen linearen Regression (Dissertation Klar, 2016).

3.2.2 Unsicherheiten in der Querprofil-Datengrundlage und Konsequenzen für die Auswertung

Als Datengrundlage für die Erstellung des numerischen Netzes dienen die vermessenen Querprofile und die Verzugsflächen zwischen den Profilen (siehe Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“, Kapitel 3.3). Naturgemäß entstehen durch diese Vorgangsweise Ungenauigkeiten zwischen den Profilen, die aufgrund der fehlenden Datengrundlagen allerdings nicht besser modelliert werden können. Zwischen den Abstürzen gestaltet sich die Sohle weitgehend homogen, sodass keine großen Unsicherheiten zu erwarten sind. Hingegen sind die jeweils ersten Abschnitte nach den Abstürzen von tendenziell großen Unsicherheiten betroffen. In Abbildung 20 ist zur Illustration ein Längenschnitt des Absturzes 54,40 und der entsprechenden Querschnitte Fkm 54,40 und 54,20 der Jahre 1986 und 1993 zu sehen. Gut erkennbar ist sich ergebende gleichmäßige Sohle (Verzug) zwischen den Querschnitten im Jahr 1993. Wohlgermerkt entspricht diese Annahme nicht der Realität. Hier bilden sich Kolke und Anlandungen aus, welche durch die Querprofilvermessung allerdings nicht dokumentiert werden können. In der numerischen Simulation bilden sich – wie in der Realität – genau diese Erosionen und Anlandungen aus. Vergleicht man diese allerdings mit den Soll-Sohllagenänderungen aus den Verzugsflächen, müssen sich zwangsläufig große Abweichungen ergeben. Dies ist auf die ebenso großen Unsicherheiten der Vermessung zurückzuführen.

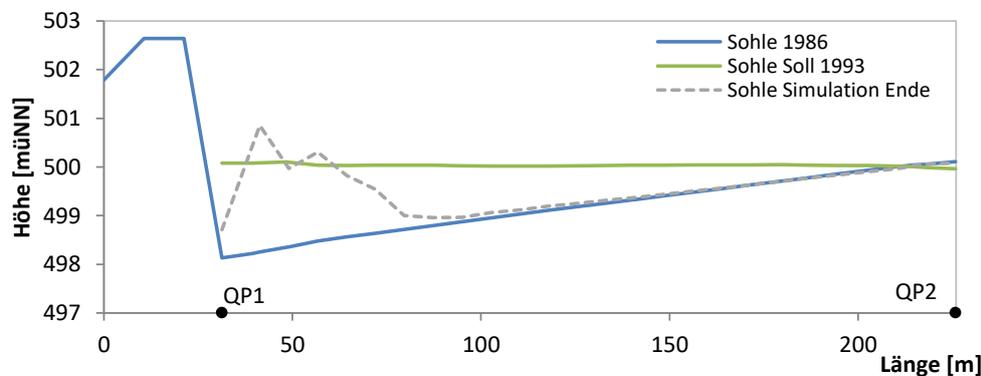


Abbildung 20: Längenschnitt durch Absturz 54,40 mit Sohle 1986 (blaue Linie) und der Sohle 1993 (grüne Linie) aus Querprofilverzug; grau strichlierte Linie ist das Ergebnis der Sohllagenänderung der Simulation; schwarze Punkte zeigen die Lage der Querprofile (QP)

Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Kapiteln, Abbildungen und Summenbilanzierungen auf eine Auswertung der ersten Abschnitte hinter den Abstürzen verzichtet. Folgende Abschnitte sind betroffen:

- Teilgebiet 1: Abschnitt 5, 10, 15, 20, 25, 30 (dargestellt z.B. in grauen Balken in Abbildung 50)
- Teilgebiet 2: Abschnitt 7, 31 (dargestellt z.B. in grauen Balken in Abbildung 68)

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Sollumlagerungen Zeitraum Kalibrierung und Validierung

Die Beurteilung der Qualität eines Kalibrierungszeitraums erfolgt mit einer vergleichenden Auswertung der resultierenden Erosions- und Depositionsvolumina sowie der mittleren Sohlhöhenentwicklung in den Sohlabschnitten mit den erwarteten Soll-Umlagerungsvolumina bzw. mittleren Soll-Sohlhöhenänderungen.

Die Soll-Bathymetrie wurde für das Jahr 1993 (für die Kalibrierungsperiode) und für das Jahr 2010 (für den Validierungszeitraum) erstellt, da hier eine gute Datengrundlage für den Querprofilverzug (siehe Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“, Kapitel 3.3) zur Verfügung stand.

Abbildung 21 und 22 zeigen die daraus errechneten Volumenbilanzen, welche innerhalb der jeweiligen Periode und der jeweiligen Abschnitte anlanden (positiv) oder erodieren (negativ). Die abschnittsweise Auswertung der Soll-Umlagerungen sowie der Umlagerungen aller Simulationsergebnisse erfolgt jeweils als **Feststoffvolumen** (im Bericht auch als Volumen bezeichnet), d.h. der Porenanteil im Flussbett, welcher im Modell mit 37 % berücksichtigt wurde, wird nicht mit kalkuliert.

Im Allgemeinen zeigen die Werte im Teilgebiet 1 „Auwald“ zwischen den Abstürzen eine deutliche Erosionstendenz. Abschnitte unmittelbar flussabwärts der Abstürze wurden aus den Grafiken entfernt, da diese Bereiche keine ausreichend guten Grundlagendaten für den Vergleich zu Soll-Umlagerungen aufweisen (siehe Erläuterungen Kapitel 5.1). Der Einfluss der Hydrologie auf die Umlagerungsdynamik ist im Validierungszeitraum gut ersichtlich, erkennbar durch die höheren Umlagerungen im Validierungszeitraum, bedingt durch die zwei markanten Hochwasserereignisse.

In Teilgebiet 2 zeigen die Volumenbilanzen wiederum eine eindeutige Erosionsentwicklung. Im Kalibrierungszeitraum ist ersichtlich, dass in den Abschnitten 21 bis 24 die Erosionsentwicklung sehr klein ist. Es handelt sich um jenen Bereich, der durch eine geringe Überdeckung der Tertiärschicht gekennzeichnet ist. Diese wird jedoch im Kalibrierungszeitraum nicht erreicht. Maximale Umlagerungen in den Abschnitten im Kalibrierungszeitraum erreichen Werte von ca. 4800 m³ und im Validierungszeitraum von ca. 6000 m³. Im Allgemeinen ist zu erwähnen, dass diese Soll-Vergleichswerte gewisse Unsicherheiten beinhalten. Diese resultieren einerseits aus der periodischen Vermessung der Querschnitte und fehlender flächigen Information im Zwischenbereich (die Sohle wird näherungsweise als Verzugsfläche modelliert) und andererseits aus fehlenden Querschnittsaufnahmen zu bestimmten Zeitpunkten (siehe Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“).

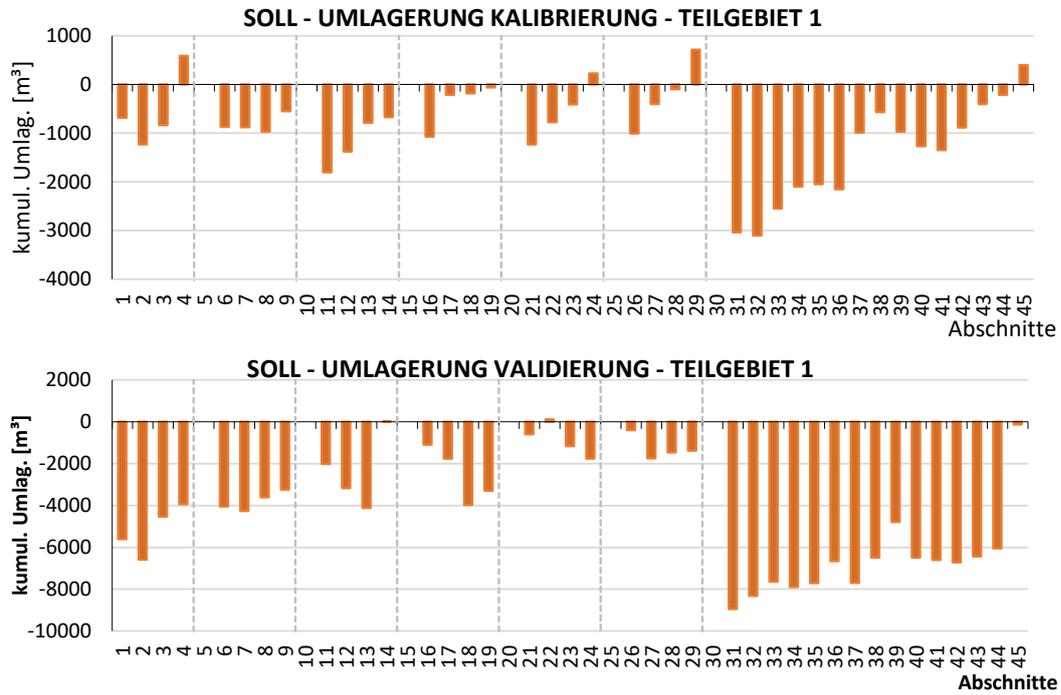


Abbildung 21: absolute Umlagerung der ermittelten Soll-Umlagerungen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum in Teilgebiet 1

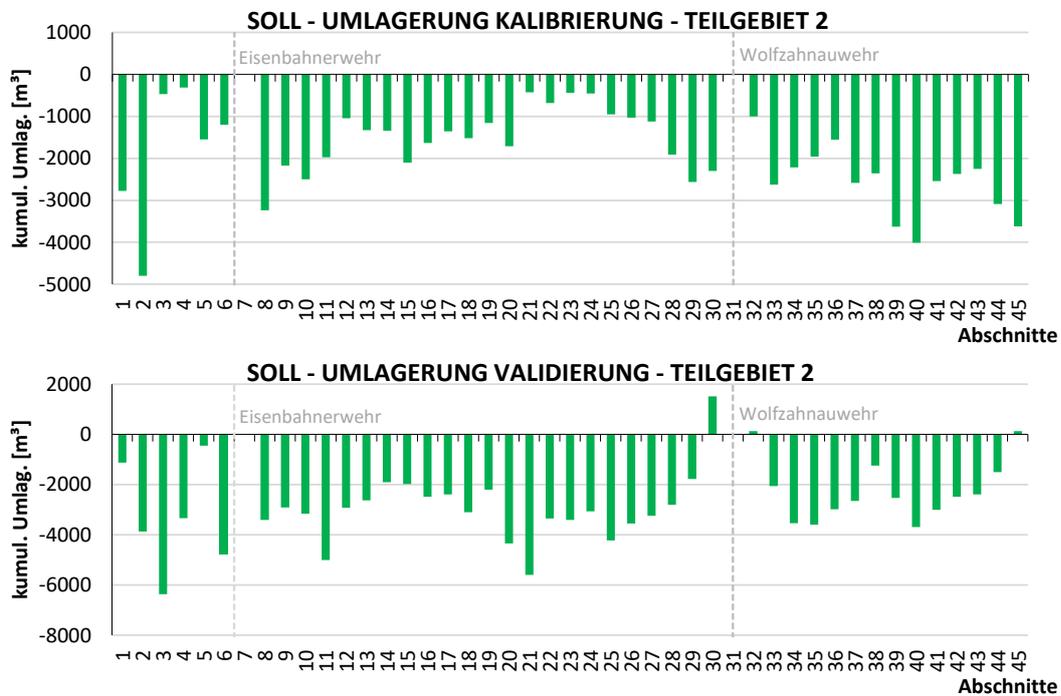


Abbildung 22: absolute Umlagerung der ermittelten Soll-Umlagerungen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum in Teilgebiet 2

4.2 Ergebnisse Maßnahmen zur Verringerung der Rechenzeit

4.2.1 Teilgebiet 1 „Auwald“

Die Optimierung der Rechenzeit spielt in der Langzeitmodellierung eine wichtige Rolle. Eine Maßnahme zur Verringerung der Rechenzeit stellt die Beschränkung der Anzahl an Kornklassen auf ein notwendiges Mindestmaß zur qualitativ hochwertigen Beschreibung aller auftretenden Kornverteilungen dar. Die Wahl der Kornklassen wurde bereits im Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) in Kapitel 4.3 genau erläutert. Eine weitere Maßnahme stellt die Wahl einer sinnvollen Modellabgrenzung dar, sodass die wasserbenetzten Bereiche im Hochwasserfall im Modell vorhanden sind. Des Weiteren wurde das Gesamtmodell in zwei Modelle unterteilt, um die Rechenzeiten weiter zu verkürzen. Die Modellabgrenzung erfolgte sinnvollerweise am Hochablass mit der vorgegebenen W/Q Beziehung. Der Einfluss des geschieberelevanten Abflusses auf das Modell „Stadtgebiet Augsburg“ wird anhand eines Extremfalles (Simulation ohne oberstromigen Geschiebeeintrag) in Kapitel Sensitivitätsanalyse im Unterkapitel 5.3 näher untersucht.

Die Verkürzung der Rechenzeit kann auch durch die Beschränkung auf die geschieberelevanten Zeiträume erreicht werden. Die Abflussganglinie am oberen Modellrand (Pegel „Haunstetten“ – Zeitreihe von 01.11.1975 bis 11.08.2016) wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Auswirkungen auf Erosions- und Depositionsvolumina untersucht. Es wurden drei verschiedene kritische Abflüsse zum Kappen der Ganglinie verwendet ($Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $185 \text{ m}^3/\text{s}$) mit dem Ziel, jenen Q_c – Wert zu finden, bei dem die Rechenzeit im Vergleich am kürzesten ist und es aber gleichzeitig noch zu keiner Veränderung (Verfälschung) der Ergebnisse kommt. Es zeigte sich, dass die angesetzten kritischen Abflüsse zu keinen großen Unterschieden in der Volumenbilanzierung führen (siehe Abbildung 23).

Auf allen nachfolgenden Abbildungen mit der Bezeichnung „prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz“ (z. B. Abbildung 23) sind jeweils die prozentuellen Abweichungen durch die vorgegebenen Maxima der Y-Achse ($\pm 250 \%$) begrenzt. D.h. die Abweichungen einzelner Abschnitte können u. U. größer sein. Eine Korrektur dieser abschnittswisen Abweichungen findet in der Feinkalibrierung statt.

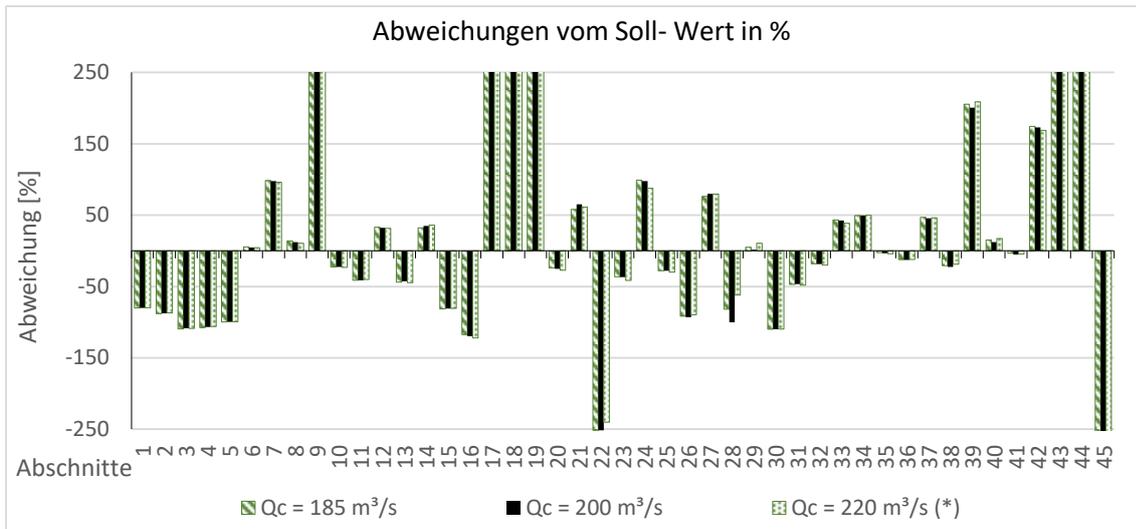


Abbildung 23: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen kritischen Abflusswerten

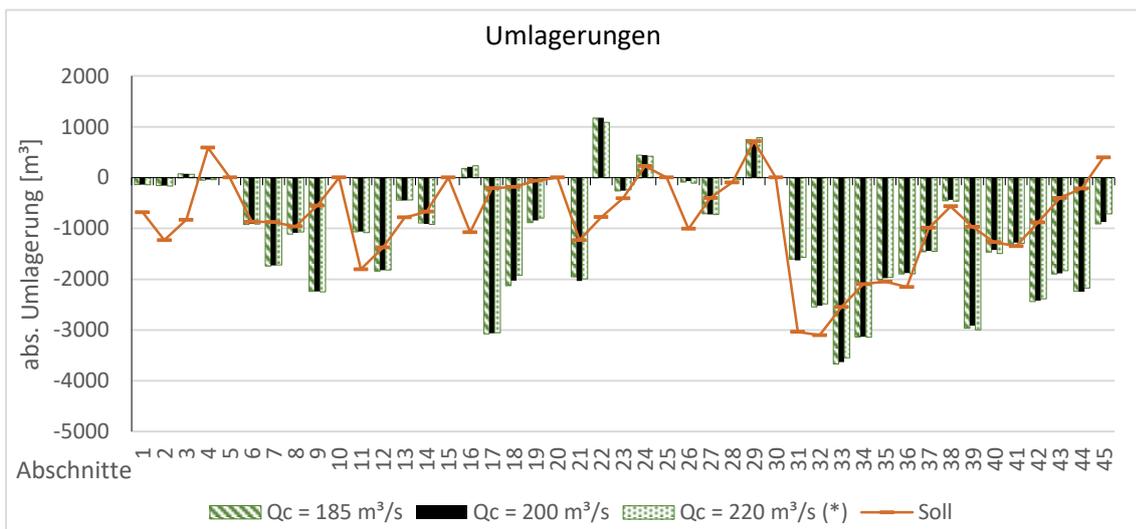


Abbildung 24: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen kritischen Abflusswerten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

In Abbildung 25 sind die maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AL}$, $d_{m,UL}$) am Ende der Simulationszeit der Feinkalibrierung dargestellt. Das Ergebnis ist als flächengewichtetes Mittelwert für die einzelnen Abschnitte ausgewertet. Aus der Grafik kann abgeleitet werden, dass die unterschiedlichen Q_c – Werte keine deutliche Auswirkung auf die Kornverteilung hat. Zwischen der letzten Staustufe und dem Hochablass kommt es zu kleinen Änderungen, welche sich jedoch im Millimeterbereich befinden.

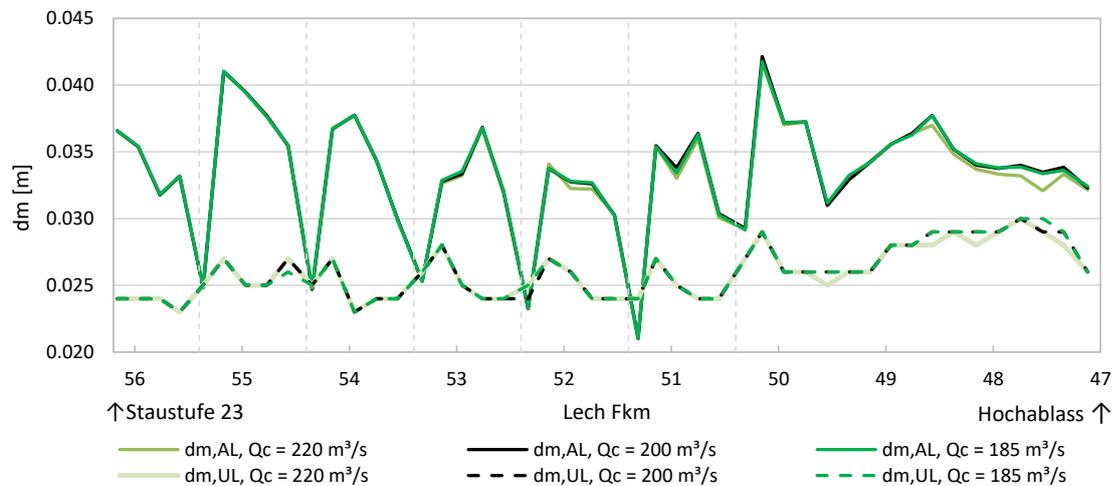


Abbildung 25: flächengewichteten Mittelwerte der maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AL}$, $d_{m,UL}$), Endzustand bei unterschiedlichen kritischen Abflusswerten (Kalibrierungszeitraum)

In Abbildung 26 wird anhand eines Kontrollquerschnitts der Zusammenhang zwischen Abfluss und Geschiebetransport aufgezeigt. Bei einem $Q_c = 185 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die transportierte Fracht ca. 30600 m^3 für den Kalibrierungszeitraum. Im Vergleich dazu reduziert sich die transportierte Fracht bei einem $Q_c = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ um $0,59 \%$ und bei einem $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Abweichung $1,54 \%$. Diese Abweichungen sind im Verhältnis zur Gesamtfracht sehr gering. Für die Geschiebehydraulische Langzeitmodellierung wurde der kritische Abfluss von $Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt, da die Ergebnisqualität kaum beeinflusst wird und der Transportbeginn im Mittel (siehe Morphologische Grundlagenstudie „Licca Liber“ – Freier Lech von der Technischen Universität München vom Januar 2012.) bei diesen Abflusszuständen liegt.

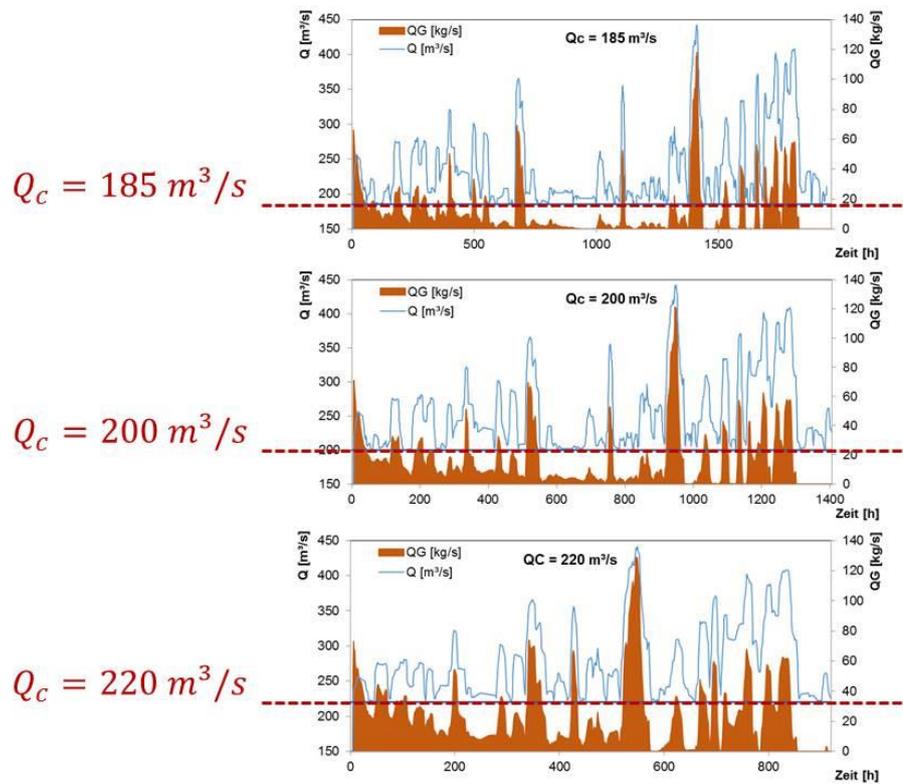
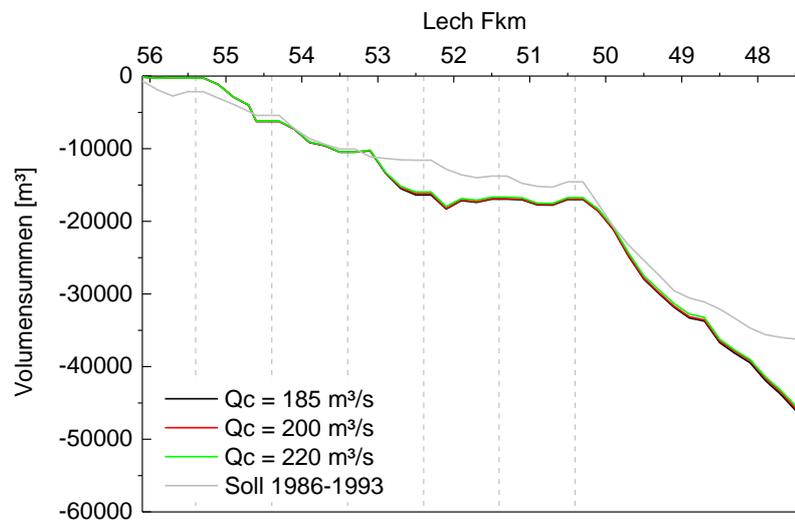


Abbildung 26: Auslaufganglinie $Q(t)$ mit dazugehörigen Sedigraphen $QG(kg/s)$ bei unterschiedlichen kritischen Abflüssen ($Q_c = 220 m^3/s, 200 m^3/s, 185 m^3/s$)

In

Abbildung 27 ist das Volumensummendiagramm für unterschiedliche kritische Abflüsse für das Teilgebiet 1 ersichtlich. Im Kalibrierungszeitraum beträgt die Geschiebefracht ca. $45000 m^3$.



kritische Abflusswerte	Volumensummen [m³]
$Q_c = 185 \text{ m}^3/\text{s}$	-46934
$Q_c = 200 \text{ m}^3/\text{s}$	-46615
$Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$	-46105
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 27: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen kritischen Abflüssen ($Q_c = 220 \text{ m}^3/\text{s}$, $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $185 \text{ m}^3/\text{s}$) und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)

Weitere Parameter zur Beschleunigung der Rechenzeiten stellen die Parameter SCF (AS) und SCFG dar. Diese Modellparameter werden von der verwendeten Software HYDRO_FT-2D zur Beschleunigung der Rechenzeit verwendet.

Erläuterung der HYDRO_FT-2D Parameter (Dissertation Klar, 2016):

SCF (AS): *Parameter zur Beschleunigung des Rechenlaufs [-]: Bei hochinstationären Prozessen führt eine Beschleunigung des Rechenlaufes zur Beeinflussung der Ergebnisse und im Extremfall zu Oszillationen und Instabilitäten in der Numerik.*

SCFG: *Skalierfaktor zur Beschleunigung der Berechnung [-]*

Durch die Variation der beiden Faktoren konnte gezeigt werden, dass sowohl der SCFG-Wert als auch der SCF(AS)-Wert mit dem Wert 3 geringere Abweichungen von der Soll-Umlagerung aufweisen. Daher können diese Faktoren mit dem Wert = 3 als konstant über die gesamte Simulationszeit angesetzt werden. In den nachfolgenden Grafiken ist der Ausgangsparametereinstellung mit (*) markiert.

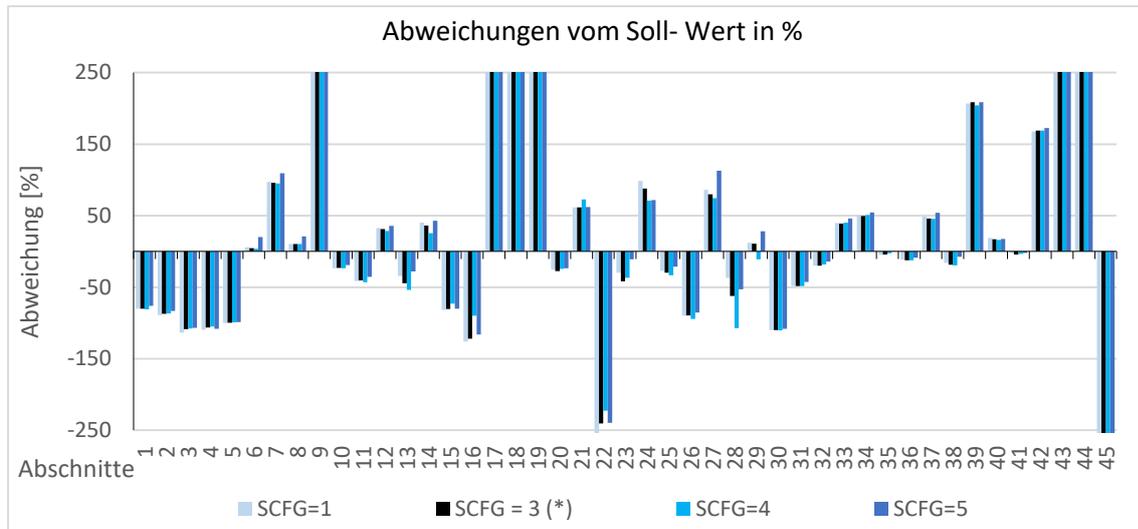


Abbildung 28: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen SCFG - Werten

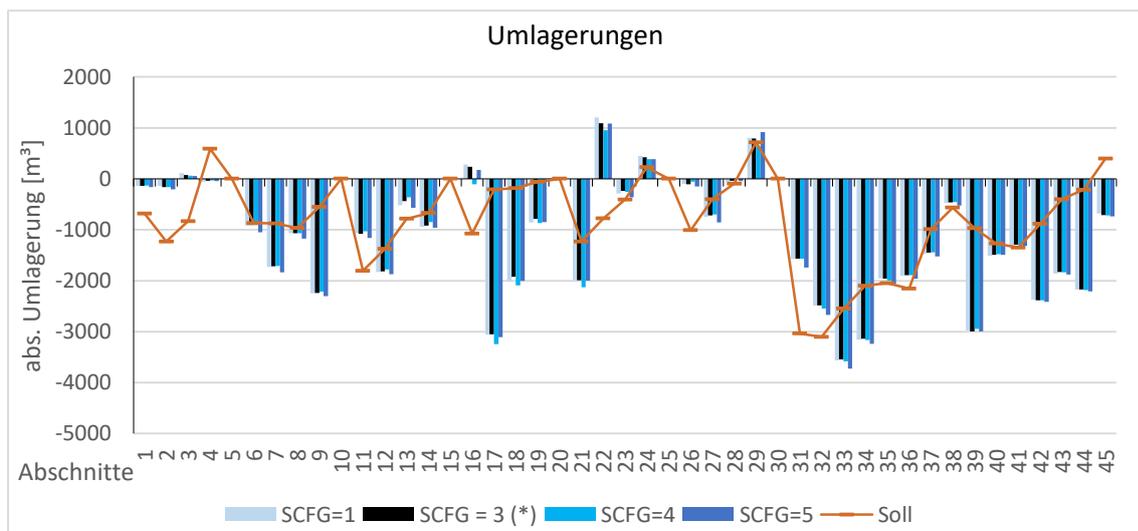


Abbildung 29: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen SCFG – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

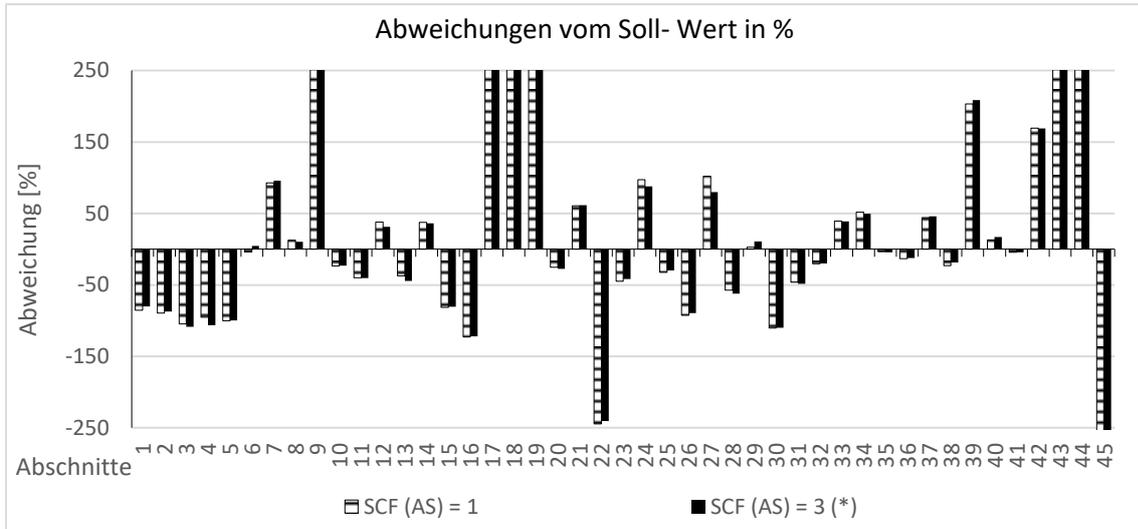


Abbildung 30: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen SCF (AS) – Werten

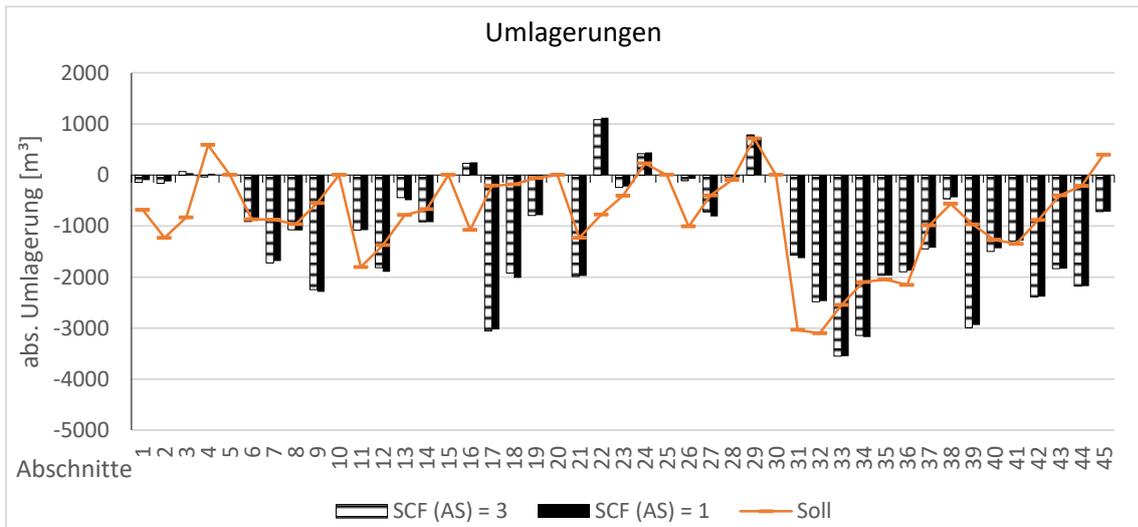
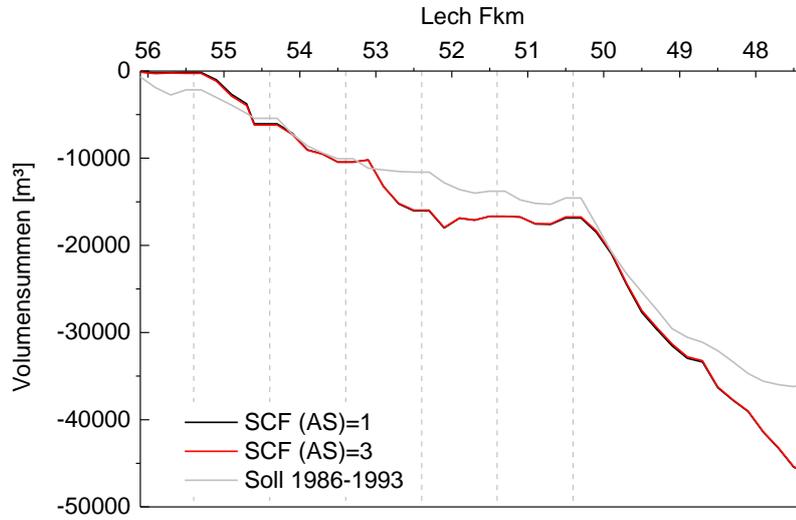
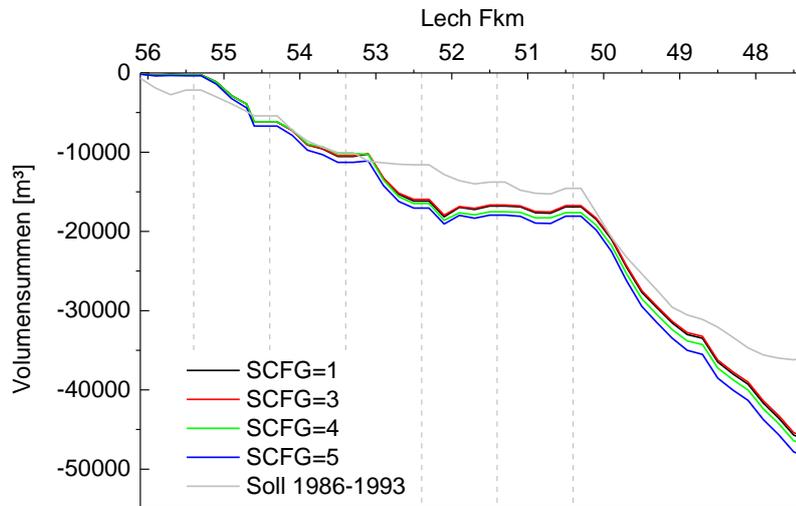


Abbildung 31: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen SCF (AS) – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

Abbildung 32 zeigt das Volumensummediagramm bei unterschiedlichen SCFG und SCF (AS) Werten. Es ist erkennbar, dass durch die Variation der Parameter kaum Veränderungen bei den Summenlinien auftreten.



Parameter	Volumensummen [m³]
SCF (AS) = 1	-46105
SCF (AS) = 3	-46159
Soll 1986 – 1993	-35803



Parameter	Volumensummen [m³]
SCFG = 1	-46377
SCFG = 3	-46105
SCFG = 4	-47125
SCFG = 5	-48563
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 32: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen SCFG –Werten und SCF (AS) –Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)

4.2.2 Teilgebiet 2 „Stadtbereich Augsburg“

Die Ergebnisse aus Teilgebiet 1 dienen als Grundlage für das Teilgebiet 2. Für die Optimierung der Rechenzeiten, wurde wiederum der Parameter SCF (AS) und SCFG untersucht. Durch die Erhöhung des SCFG – Wertes entsteht eine kleine Unterschätzung der Erosionen, diese Abweichung ist jedoch im Verhältnis zur Gesamtumlagerung relativ klein. Die Ergebnisse bei veränderten SCF (AS) Werten zeigen keine großen Differenzen. Für die Geschiebemodellierung im Stadtbereich können daher die Werte wie im Teilgebiet 1 verwendet werden.

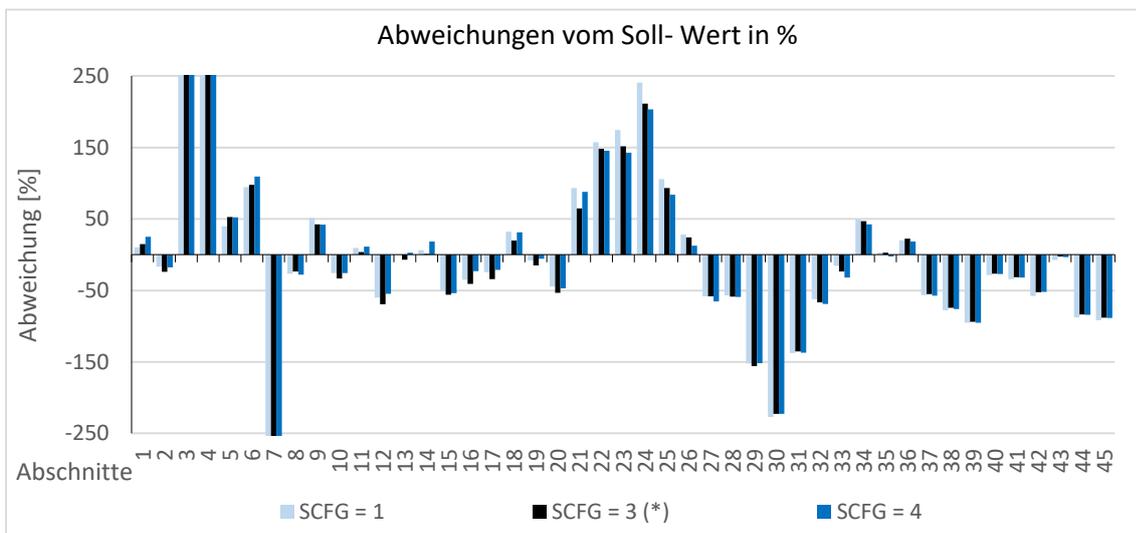


Abbildung 33: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen SCFG – Werten

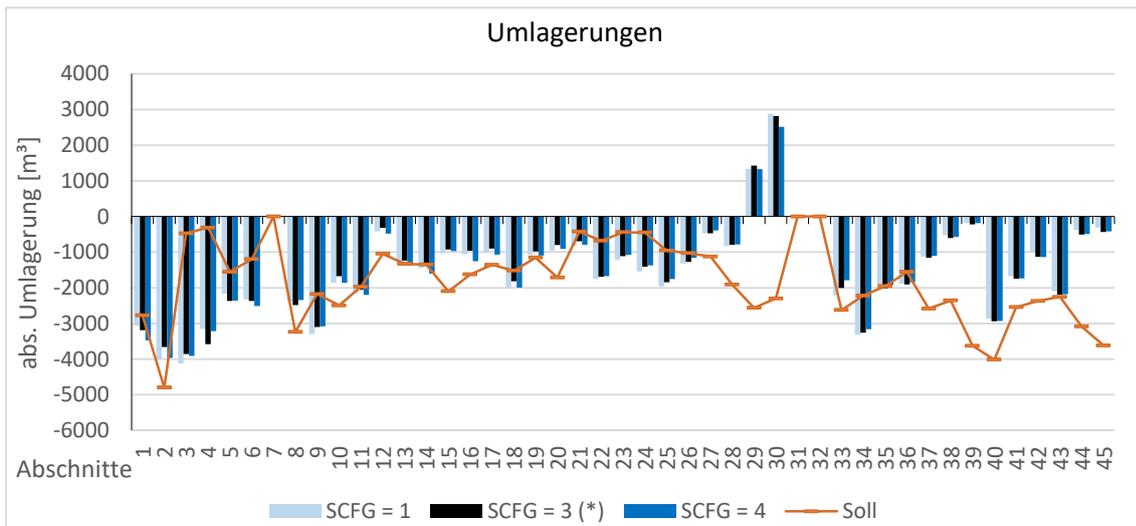


Abbildung 34: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen SCFG – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

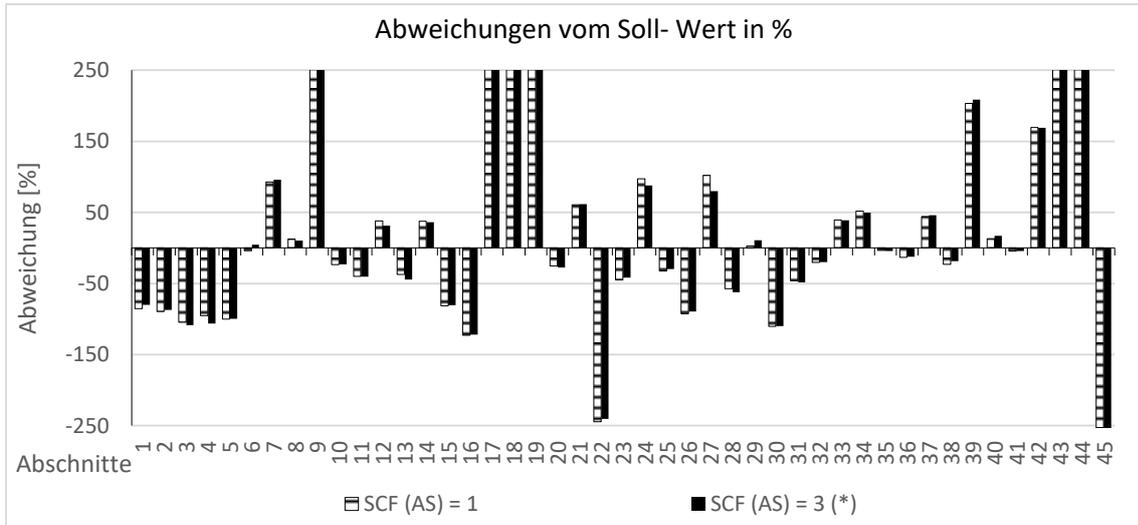


Abbildung 35: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen SCF (AS) – Werten

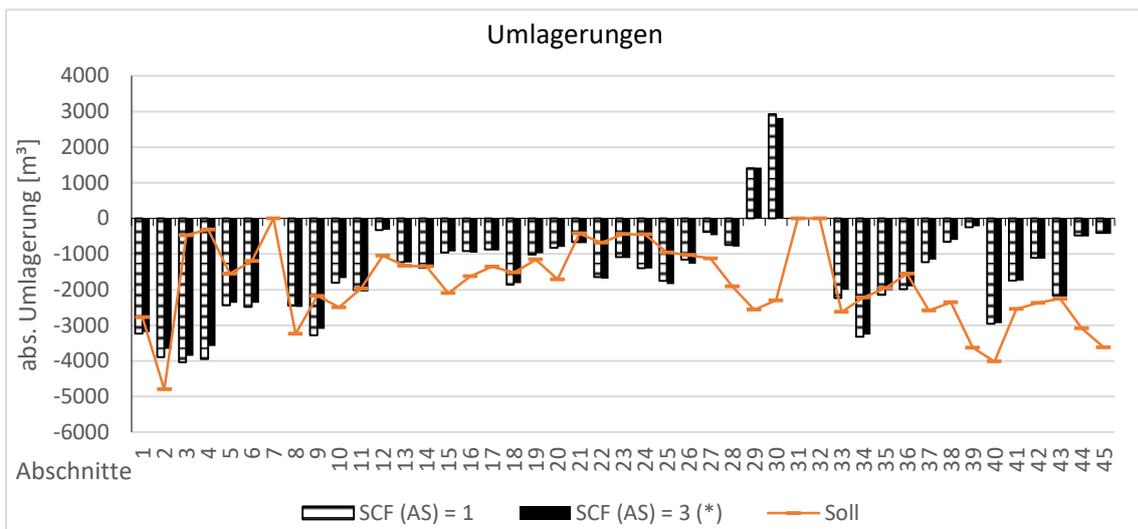
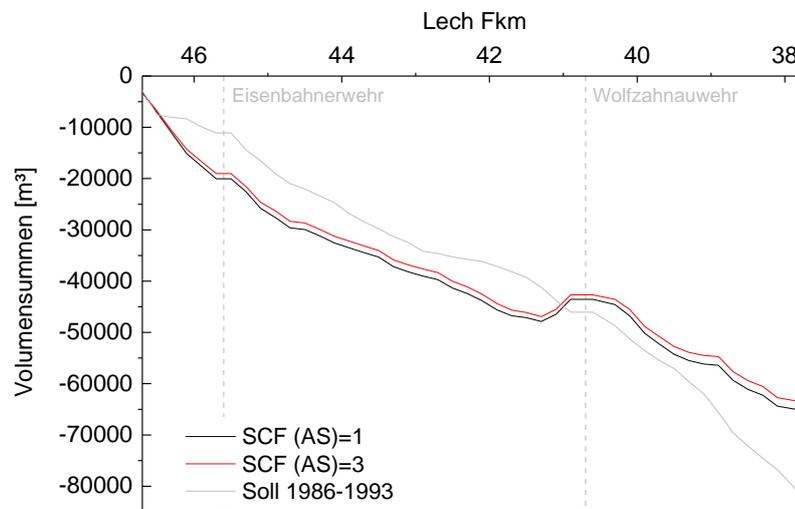
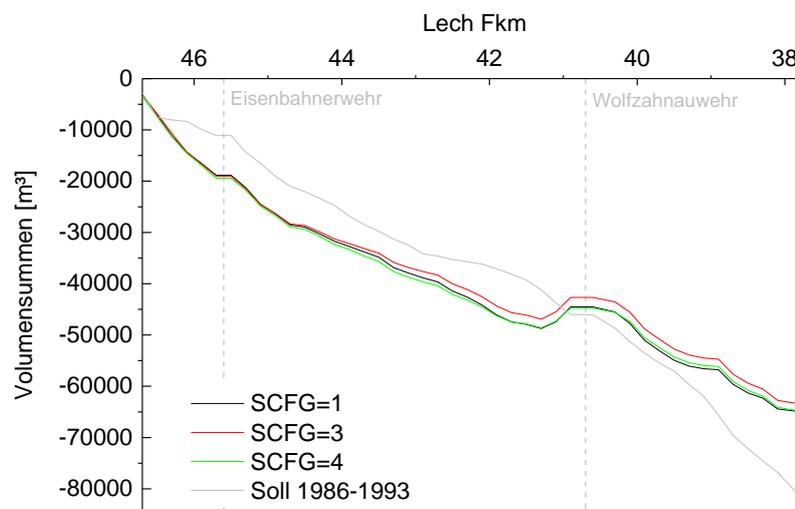


Abbildung 36: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen SCF (AS) – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

Die Volumensummediagramm für das Teilgebiet 2 (Stadtgebiet) für die Parameter SCFG und SCF (AS) sind in Abbildung 37 zu sehen. Die Bilanzierung für alle Auswertungen im Stadtgebiet erfolgt für die einzelnen Abschnitte.



Parameter	Volumensummen [m³]
SCF (AS) = 1	-65290
SCF (AS) = 3	-63673
Soll 1986 – 1993	-83491



Parameter	Volumensummen [m³]
SCFG = 1	-65094
SCFG = 3	-63673
SCFG = 4	-65032
Soll 1986 – 1993	-83491

Abbildung 37: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 2 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen SCFG –Werten und SCF (AS) –Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Wehranlagen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)

4.3 Ergebnisse Kalibrierung "Auwald"

Ziel der Kalibrierung ist das Finden von Modellparametern und Anfangsbedingungen, sodass die sich ausbildenden morphologischen Umlagerungen eines Kalibrierungszeitraums möglichst gut den gemessenen Werten entsprechen. Die Kalibrierung wurde in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt erfolgte die Grobkalibrierung und dient der Anpassung der Simulationsgrößen im Gesamtmodell. Der zweite Schritt beinhaltet eine Feinkalibrierung, hier werden die lokalen Abweichungen auf die Sollzustände angepasst. In Abbildung 38 ist der Ablauf der Kalibrierung mit den Zielen und den Anpassungsgrößen dargestellt.

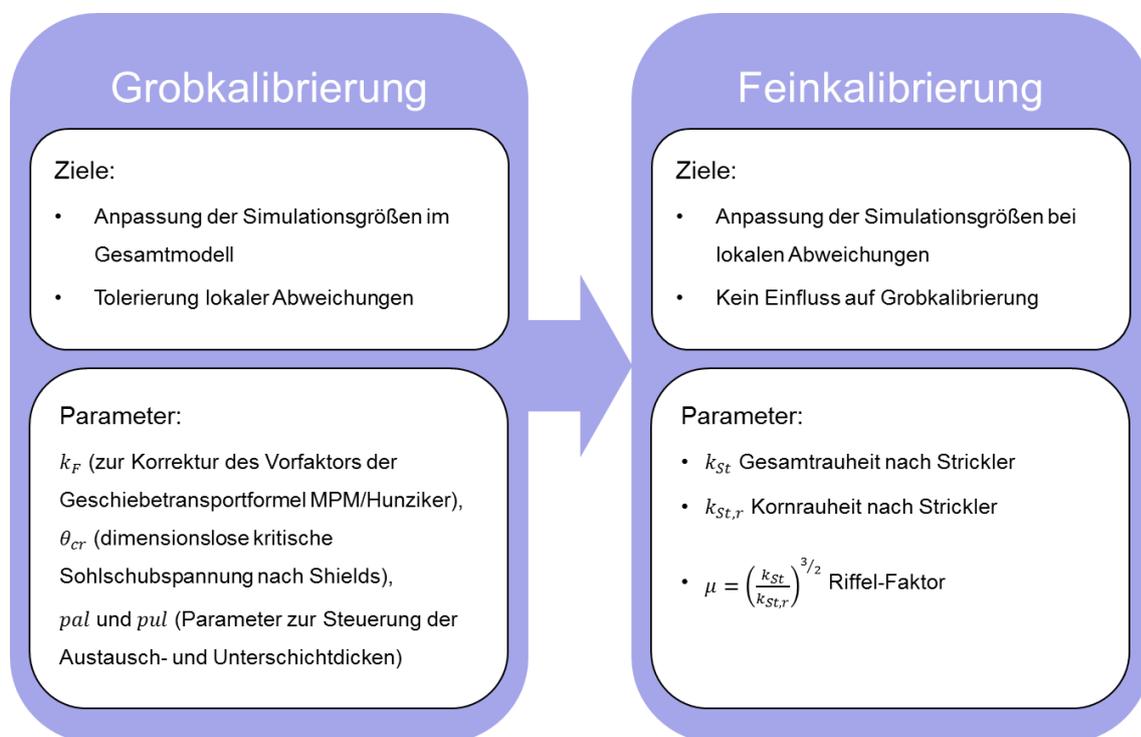


Abbildung 38: Übersicht Ablauf Kalibrierung

Die Ergebnisauswertung der Grobkalibrierung umfasst folgende Punkte:

- Abweichung von der Soll-Umlagerung als Feststoffvolumen [m^3] in % eines Sohlabschnitts (Sektor) V_F

Die Ergebnisauswertung der Feinkalibrierung wird zusätzlich mit folgenden Größen ergänzt:

- Tolerierung lokaler Abweichungen vom Soll-Wert erfolgt in zwei Toleranzgrenzen; sehr gute Übereinstimmung Abweichung +/- 30 % vom Sollwert, gute Übereinstimmung Abweichung zwischen +/- 30% und +/-50 % vom Sollwert

- Auswertung mittlerer absoluter Sohlhöhen im Querprofil für den Sollzustand und flächigen mittleren Sohlhöhendifferenzen zwischen Soll und Simulationsergebnis
- flächengewichteten Mittelwert der Soll-Sohlhöhendifferenz $\overline{\Delta z}$ in [m] eines Sohlabschnittes

4.3.1 Ergebnisse Grobkalibrierung "Auwald"

Die Parameter SCF (AS) und SCFG wurden bereits in Kapitel 4.2 untersucht. In der Grobkalibrierung wurden folgende modellspezifischen Parameter variiert:

- k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)
- θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)
- pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken)

Für die Grobkalibrierung wurde ein Ausgangszustand erstellt, welcher sich aus den nachfolgenden Parametern zusammensetzt. In den Grafiken wurde der Ausgangsparameter jeweils mit (*) gekennzeichnet.

Tabelle 3: Einstellung der Modellparameter für die Grobkalibrierung – Teilmodell 1

Parameterausgangszustand für die Grobkalibrierung – Teilmodell 1	
Q_c (kritischer Abfluss)	220 m ³ /s
Schichtenmanagement	$pal = 0,46$ (7 cm) $pul = 17,95$ (63 cm)
k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)	0,625
θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)	0,047
SCFG & SCF	3
$k_{St} = k_{St,r}$	37

k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)

Der Vorfaktor der Geschiebetransportformel von Meyer-Peter und Müller kann als Kalibriergröße für die Steuerung der Geschiebetransportraten und somit der Sohlumlagerungen verwendet werden. Der Original-Vorfaktor liegt bei 8, durch weitere Untersuchungen von Hunziker und Jaeggi (2002) und Wong und Parker (2006) wurde festgestellt, dass dieser eher im Bereich von 5 liegt und somit als $k_F = 0,625$ eingestellt werden kann. In der Grobkalibrierung wurde der k_F – Wert zwischen $0,625$ ($\hat{=}$ Vorfaktor von $5 = 0,625 \cdot 8$) und $1,0$ ($\hat{=}$ Vorfaktor von 8) variiert.

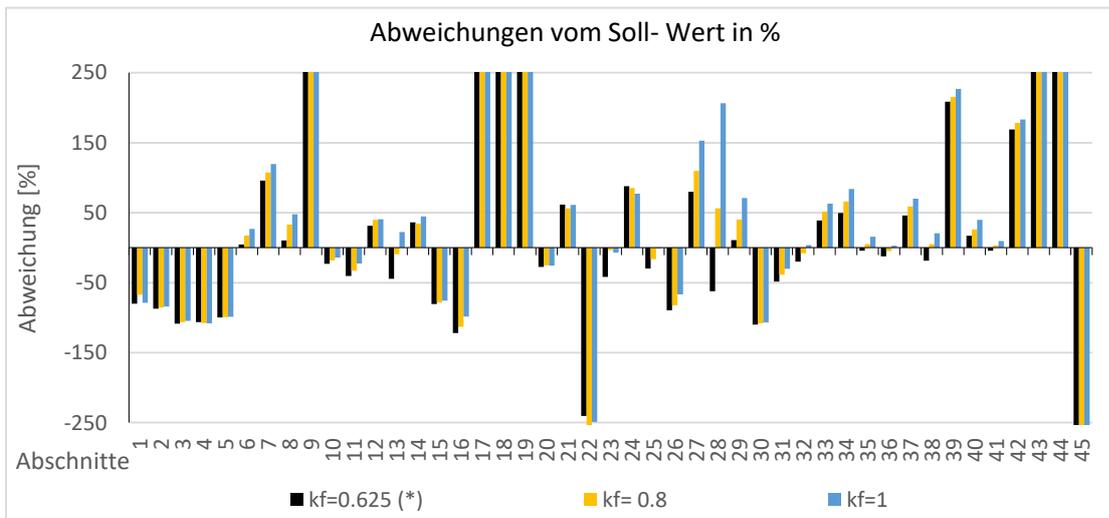


Abbildung 39: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen k_F – Werten - Teilgebiet 1

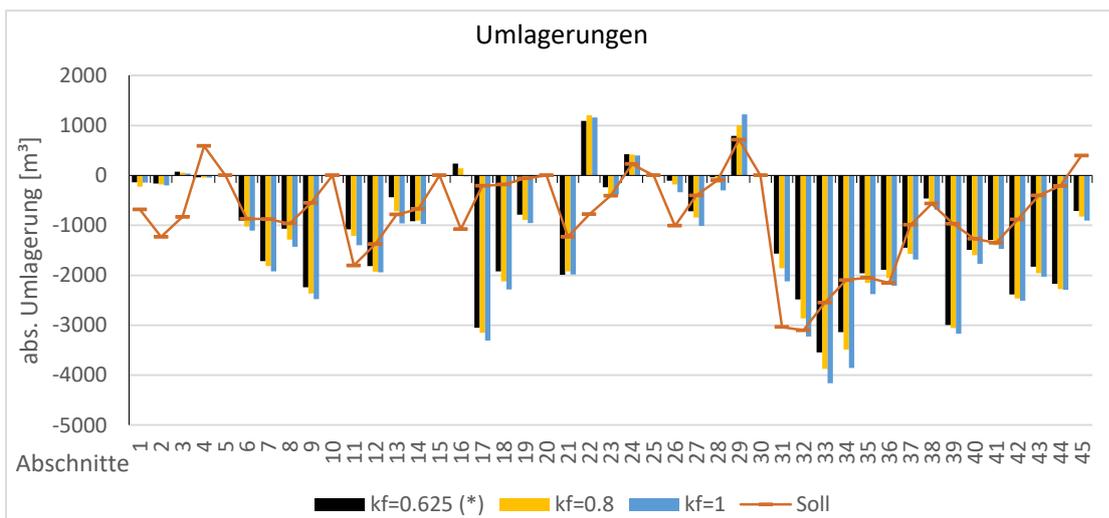


Abbildung 40: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen k_F – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

Durch die Variation konnte gezeigt werden, dass hohe Werte die Transportkapazität und somit die Erosionen vergrößern. Für diese Langzeitsimulation erzielt der Vorfaktor von $k_F = 0,625$ gute Ergebnisse. Dieser Wert wurde für die Feinkalibrierung und alle weiteren Simulationen verwendet.

θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)

Der Bewegungsbeginn kann mit Hilfe der dimensionslosen kritischen Sohlschubspannung gesteuert werden. Die Verwendung einer dimensionslosen kritischen Sohlschubspannung von 0,046 führt zu plausiblen Transportprozessen im untersuchten Modell.

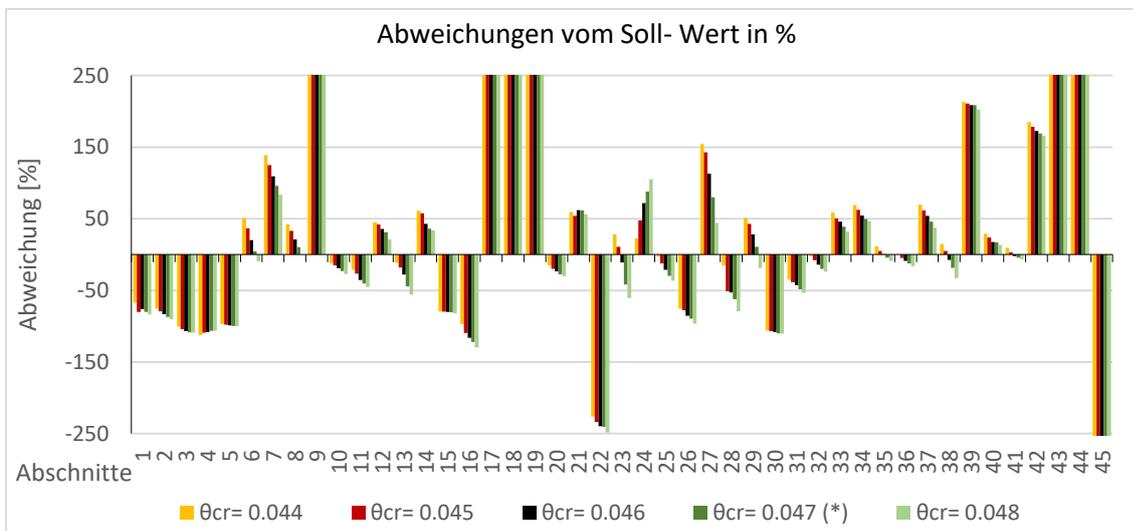


Abbildung 41: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen θ_{cr} – Werten - Teilgebiet 1

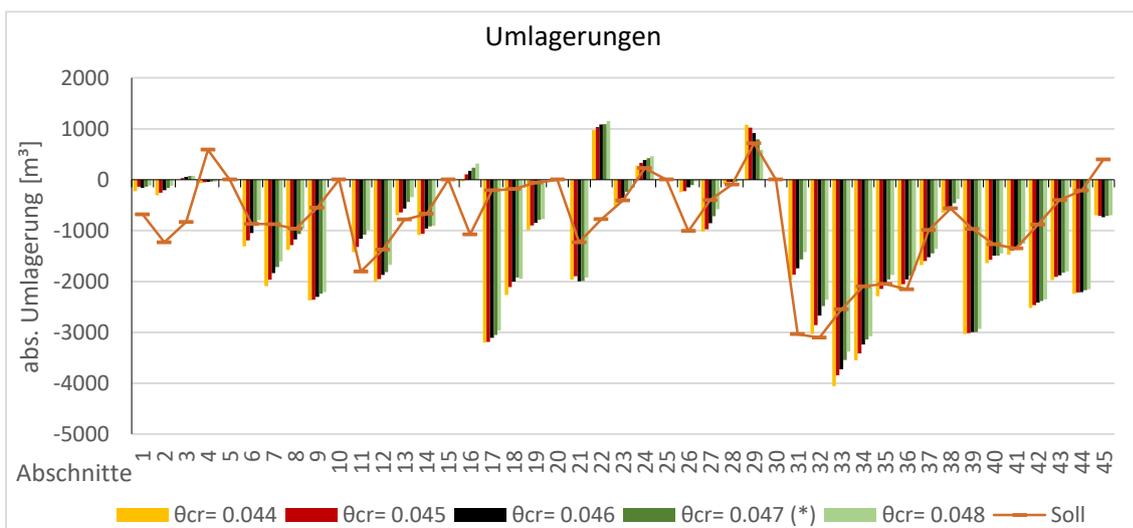


Abbildung 42: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen θ_{cr} – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken)

Das Schichtenmanagement in jeder Geschiebesimulation ist ein kritischer Parameter, welcher über die Parameter „pal“ und „pul“ angepasst werden kann. Die Dicke der Austauschschicht kann die Geschwindigkeit von Erosions- und Anlandungsprozessen steuern. Ein Nachteil von diesem Parameter stellt die konstante Dicke über das gesamte Modell dar, d.h. dass die verfügbare Deckschichten und Bereiche, wo keine Deckschicht mehr vorhanden ist, nicht gleichzeitig realitätsgetreu abgebildet werden können.

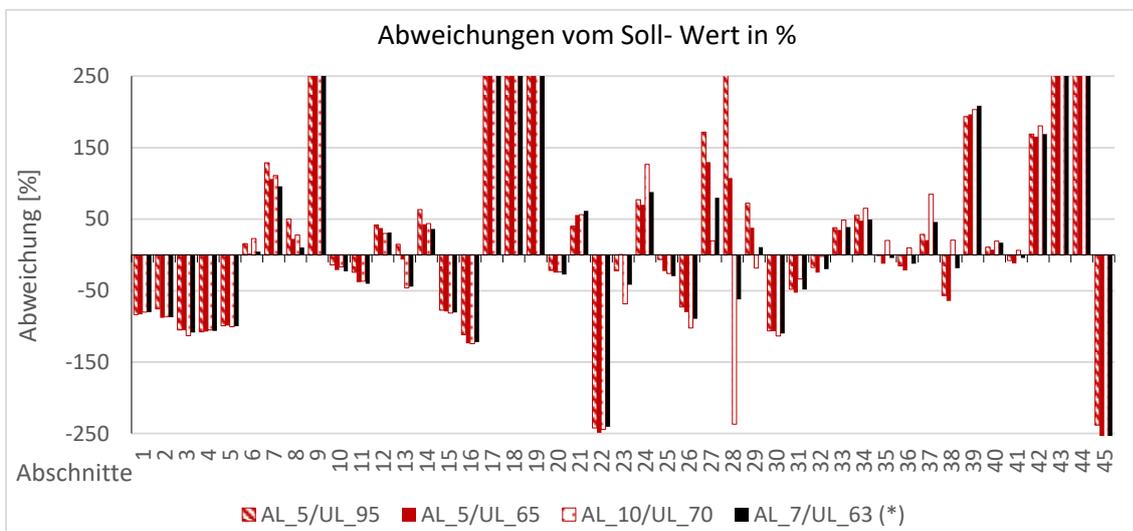


Abbildung 43: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis Kalibrierungszeitraum bei unterschiedlichen Schichtdicken für Austauschschicht und Unterschicht - Teilgebiet 1

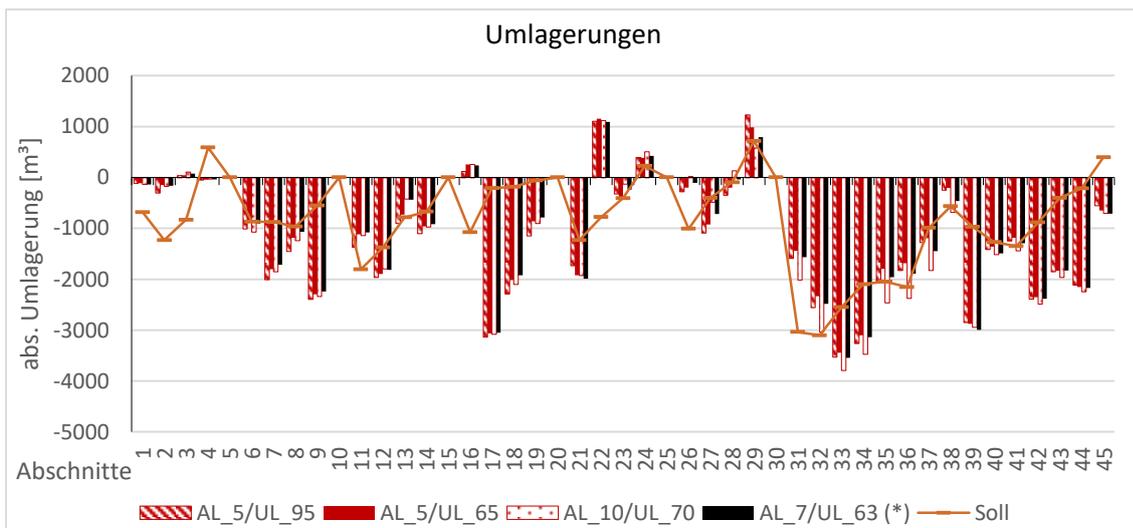
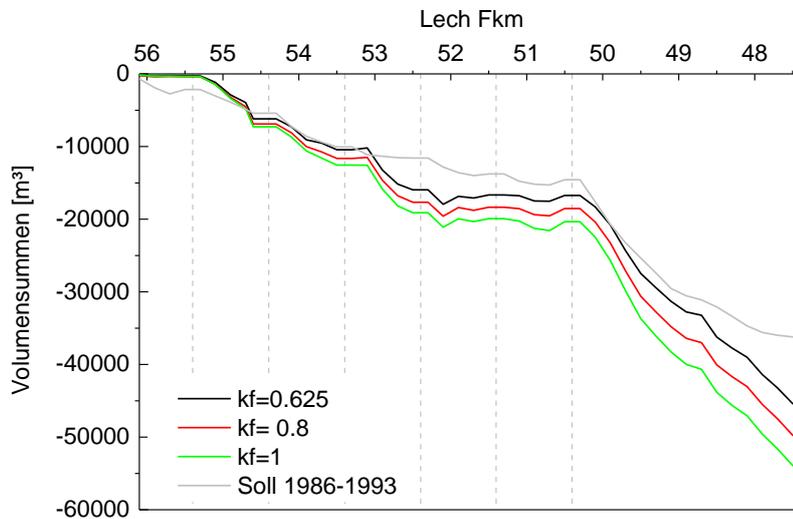


Abbildung 44: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen Schichtdicken für Austauschschicht und Unterschicht (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

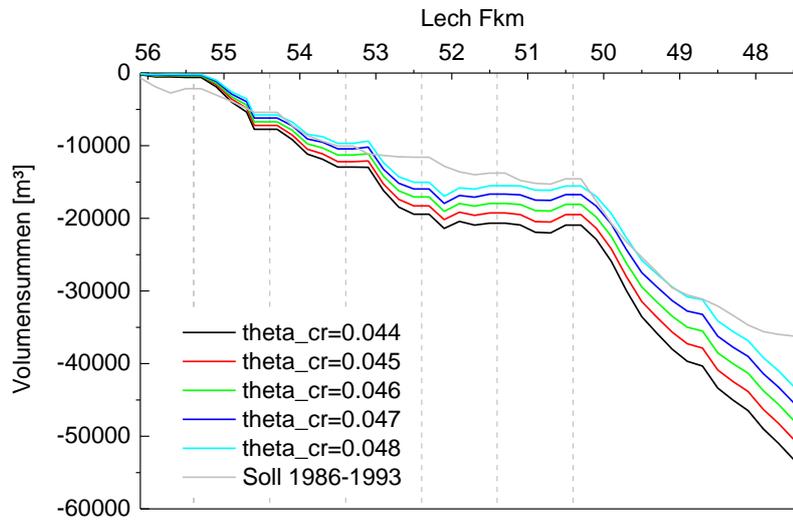
Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Kombination Austauschschichtdicke $AL = 7 \text{ cm}$ und Unterschichtdicke $UL = 63 \text{ cm}$ die Abweichungen vom Soll am geringsten ist. Dadurch, dass im Untersuchungsabschnitt des Lechs in vielen Abschnitten keine ausgeprägte Deckschicht mehr vorhanden ist, ist die Wahl einer geringeren Austauschschichtdicke geeignet.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Volumensummendiagramme zu sehen. Diese schwanken zwischen 43000 m^3 - 55000 m^3 . Hier ist anzumerken, dass die Abschnitte nach den Abstürzen nicht bilanziert worden sind. Diese Abschnitte werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2).



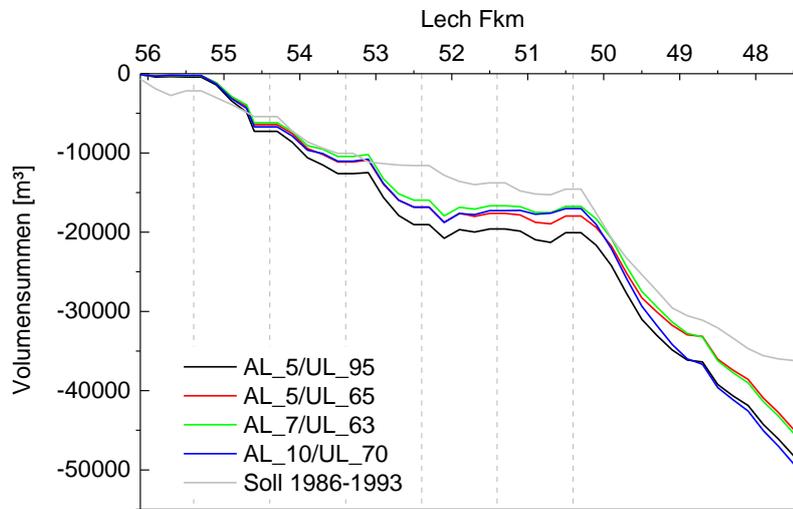
Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m^3]
$k_f = 0.625$	-46105
$k_f = 0.80$	-50570
$k_f = 1.00$	-54811
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 45: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen k_F – Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)



Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m³]
$\theta_{cr} = 0.044$	-53918
$\theta_{cr} = 0.045$	-51145
$\theta_{cr} = 0.046$	-48563
$\theta_{cr} = 0.047$	-46105
$\theta_{cr} = 0.048$	-43844
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 46: Volumensummediagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen θ_{cr} – Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt



Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m³]
AL 5 cm, UL 95 cm	-48769
AL 5 cm, UL 65 cm	-45566
AL 7 cm, UL 63 cm	-46105
AL 10 cm, UL 70 cm	-49952
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 47: Volumensummediagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen Schichtdicken und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt

Für die weitere Analyse wurde ein Ausgangszustand für die Feinkalibrierung erstellt. Dieser Ausgangszustand setzt sich aus folgenden Parametern zusammen:

Tabelle 4: Einstellung der Modellparameter für die Feinkalibrierung – Teilmodell 1

Parameterzustand für die Feinkalibrierung – Teilmodell 1	
Q_c (kritischer Abfluss)	220 m³/s
Schichtenmanagement	pal = 0,46 (7 cm) pul = 17,95 (63 cm)
k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)	0,625
θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)	0,046
SCFG & SCF	3
$k_{St} = k_{St,r}$	37

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der Feststoffvolumenänderung im Kalibrierzeitraum im Auwaldgebiet dargestellt. Zu sehen ist die kumulierte Umlagerung je Abschnitt. Als Zielgröße ist die Sollumlagerung 1986 – 1993 als orange Linie dargestellt. Die Abschnitte 5, 10, 15, 20, 25 und 30 werden nicht angegeben (siehe Kapitel 3.2.2). Das Gesamtumlagerungsvolumen im Ausgangszustandsmodell für die Feinkalibrierung zeigt eine deutliche Erosionsentwicklung, welche auch aus der Geometrie der Querprofile zwischen 1986 und 1993 zu sehen ist. Es gibt jedoch Abschnitte, welche noch stark von der Zielgröße abweichen. Diese werden im Zuge der Feinkalibrierung angepasst.

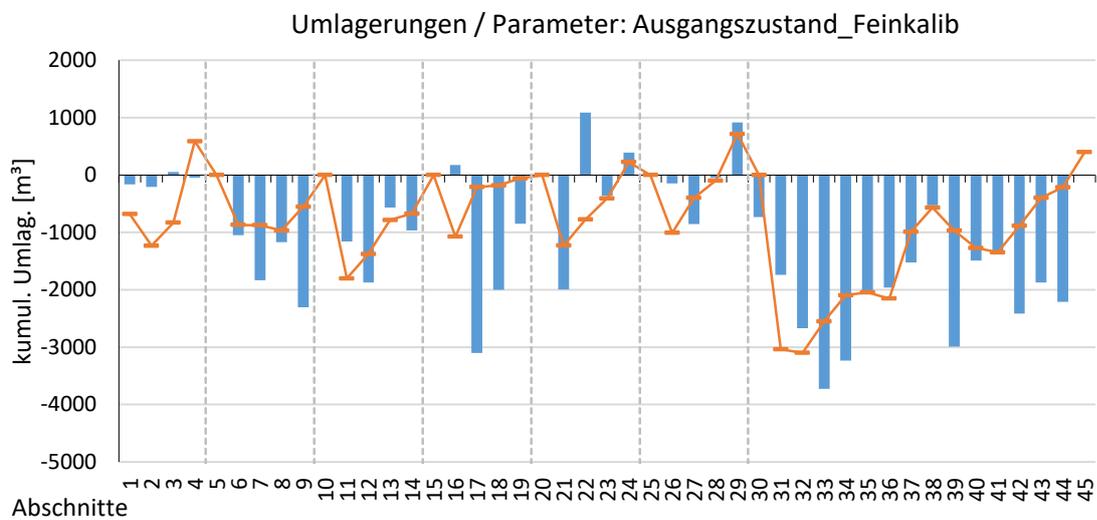


Abbildung 48: Gegenüberstellung kumulierte absolute Umlagerung des Sollzustandes dem Ausgangszustand der Feinkalibrierung - Teilgebiet 1

4.3.2 Ergebnisse Feinkalibrierung "Auwald"

Die Feinkalibrierung erfolgte in einem Kreisprozess, welcher bereits im Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ (Anlage 5.1) erläutert wurde. Die umlagerungsbasierte Rauheitsanpassung bedient sich der Veränderung der Rauheitsbeiwerte nach Strickler (k_{St} und $k_{St,r}$) entlang des Fließweges bis die Volumenänderung je Sohlabschnitt der Soll-Volumenänderung entspricht. In Fließrichtung flussabwärts werden die Abschnitte nacheinander adaptiert. Die numerische Berechnung umfasst einige Anpassungsversuche, bis die Soll-Volumenänderung mit einem zufriedenstellenden Ergebnis erreicht wurde.

Für den Startzustand der Parameteranpassung der Rauheitsbeiwerte wurden einheitliche k_{St} - Werte ($k_{St} = 37 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$) = 37 aus der Grobkalibrierung verwendet. Die angepassten Rauheitsbeiwerte k_{St} und $k_{St,r}$, welche im Zuge der morphodynamischen Feinkalibrierung angepasst wurden (siehe Vorgehensweise bei der Modellierung Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ - Anlage 5.1), sind in Abbildung 49 grafisch und als Zahlenwerte in Tabelle 5 dargestellt, ebenso der Riffel-Faktor μ . Aus der Feinkalibrierung ergibt sich, dass der Formanteil im Gesamtwiderstand in den einzelnen Abschnitten unterschiedlich zur Geltung kommt. In den Abschnitten zwischen den Abstürzen (z.B. Abschnitt 11 bis Abschnitt 14), ergibt sich die Tendenz von höheren Stricklerbeiwerten. Die Kornzusammensetzung verfeinert sich hier, damit wird die Sohle glatter und der Formwiderstand sinkt. Der maximale Rauheitsbeiwert wird in Abschnitt 44 mit $k_{St} = 44 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ erreicht, demgegenüber liegt der kleinste k_{St} - Wert bei $30 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ in Abschnitt 3.

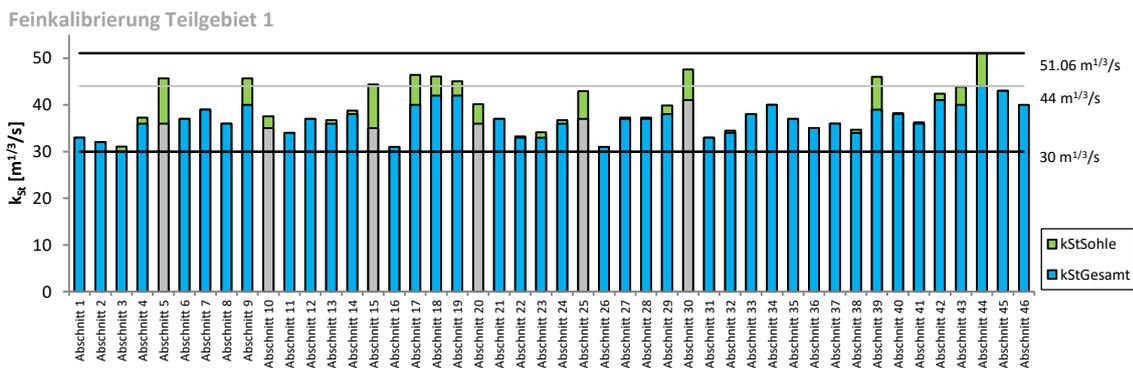


Abbildung 49: Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{St} und $k_{St,r}$ je Abschnitt, graue Balken: Abschnitte direkt nach den Abstürzen

Tabelle 5: Abschnitts-Kennwerte für die Feinkalibrierung – Teilgebiet 1, grau hinterlegte Zeilen markieren die Abschnitte flussabwärts der Abstürze

Abschnitte	Rauheitsbeiwerte für die Kalibrierung – Teilgebiet 1		
	$k_{StGesamt}$ [$m^{1/3}/s$]	$k_{StSohle}$ [$m^{1/3}/s$]	μ [-]
Abschnitt 1	33.00	33.00	1.00
Abschnitt 2	32.00	32.00	1.00
Abschnitt 3	30.00	31.04	0.95
Abschnitt 4	36.00	37.25	0.95
Abschnitt 5	36.00	45.66	0.70
Abschnitt 6	37.00	37.00	1.00
Abschnitt 7	39.00	39.00	1.00
Abschnitt 8	36.00	36.00	1.00
Abschnitt 9	40.00	45.66	0.82
Abschnitt 10	35.00	37.55	0.90
Abschnitt 11	34.00	34.00	1.00
Abschnitt 12	37.00	37.00	1.00
Abschnitt 13	36.00	36.74	0.97
Abschnitt 14	38.00	38.78	0.97
Abschnitt 15	35.00	44.40	0.70
Abschnitt 16	31.00	31.00	1.00
Abschnitt 17	40.00	46.42	0.80
Abschnitt 18	42.00	46.09	0.87
Abschnitt 19	42.00	45.06	0.90
Abschnitt 20	36.00	40.12	0.85
Abschnitt 21	37.00	37.00	1.00
Abschnitt 22	33.00	33.22	0.99
Abschnitt 23	33.00	34.15	0.95
Abschnitt 24	36.00	36.74	0.97
Abschnitt 25	37.00	42.93	0.80
Abschnitt 26	31.00	31.00	1.00
Abschnitt 27	37.00	37.25	0.99
Abschnitt 28	37.00	37.25	0.99
Abschnitt 29	38.00	39.88	0.93
Abschnitt 30	41.00	47.58	0.80
Abschnitt 31	33.00	33.00	1.00
Abschnitt 32	34.00	34.46	0.98
Abschnitt 33	38.00	38.00	1.00
Abschnitt 34	40.00	40.00	1.00
Abschnitt 35	37.00	37.00	1.00
Abschnitt 36	35.00	35.00	1.00
Abschnitt 37	36.00	36.00	1.00
Abschnitt 38	34.00	34.70	0.97
Abschnitt 39	39.00	46.03	0.78
Abschnitt 40	38.00	38.26	0.99
Abschnitt 41	36.00	36.24	0.99
Abschnitt 42	41.00	42.43	0.95
Abschnitt 43	40.00	43.89	0.87
Abschnitt 44	44.00	51.06	0.80
Abschnitt 45	43.00	43.00	1.00
Abschnitt 46	40.00	40.00	1.00

Im Vergleich zum Ausgangszustand zeigen die Berechnungsergebnisse der End-Feinkalibrierung eine gute Übereinstimmung mit den Soll-Volumenänderungen, welche in jeden Abschnitt bilanziert wurden. Die Ergebnisse prognostizieren ein gleichartiges Umlagerungsverhalten innerhalb der Abstürze. Direkt nach den Abstürzen erfolgt eine rapide Akkumulation, welche im weiteren Zeitverlauf kaum mehr remobilisiert und weitertransportiert wird (Ursache siehe Kapitel 3.2.2). In Abbildung 56 ist dieser Prozess zu sehen. In Abbildung 50 hingegen nicht, weil diese Abschnitte nicht bilanziert wurden. Nach den Abstürzen wird mehr Sediment ausgetragen, welches sich vor den Abstürzen wieder ansammelt. Sowohl in der Modellierung als auch aus den Querprofilaufnahmen kann dieser Zustand beobachtet werden. Nach Absturz Fkm 50,40 (ab Abschnitt 30) konnte die fortschreitende Sohleintiefung des Lechs gut erreicht werden. Die absoluten kumulierten Umlagerungen pro Abschnitt erreichen Werte von bis zu 3000 m³ im untersuchten Zeitraum. Flussabwärts Richtung Hochablass verringert sich die Sohleintiefung wiederum. Das Ziel einer morphodynamischen Kalibrierung für den Simulationszeitraum für die untersuchten Abschnitte wurde somit erreicht.

In der nachfolgenden Abbildung wird die Toleranzgrenze, welche in Kapitel 4.3 aufgelistet ist, als eine Art Ampelsystem mit farbigen Kugeln auf der Oberseite der Grafik dargestellt. Eine grün gefärbte Kugel zeigt eine sehr gute Übereinstimmung im Abschnitt (Abweichung vom Sollwert +/- 30 %) an, eine gelb gefärbte Kugel bedeutet eine gute Übereinstimmung (Abweichung zwischen +/- 30% und +/- 50 % vom Sollwert) und eine weiße Färbung kennzeichnet eine größere Abweichung vom Sollwert.

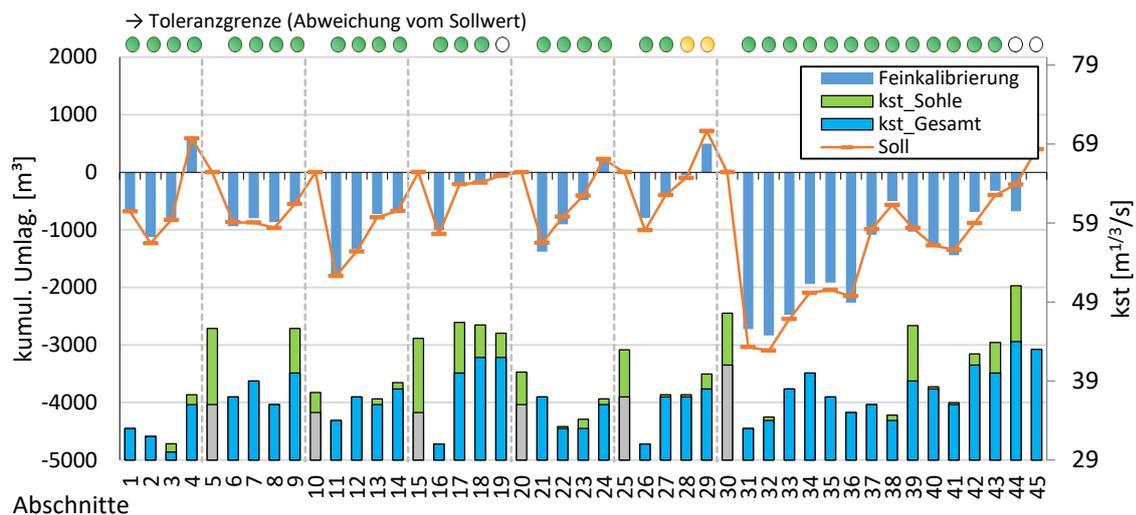
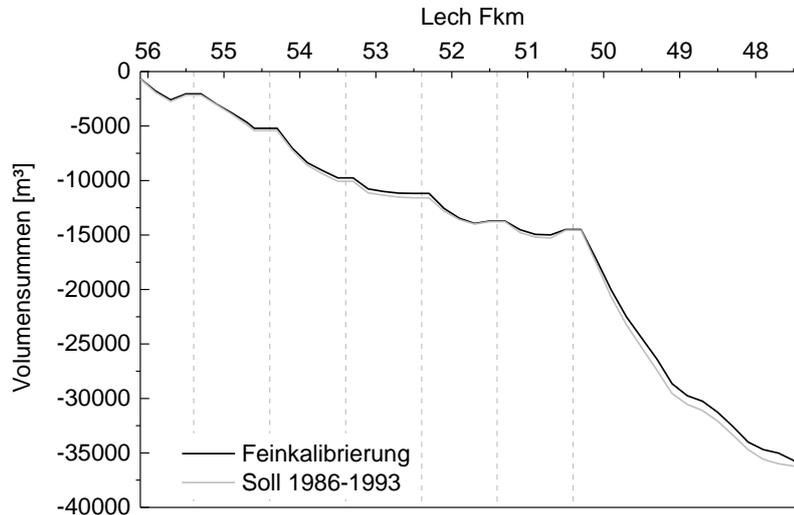


Abbildung 50: ermittelte absolute Umlagerung aus der Feinkalibrierung (blaue Balken) und Soll-Umlagerungen (orange Linie) und Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{St} und $k_{St,r}$ je Abschnitt für die EndEinstellung der Feinkalibrierung – Auwaldgebiet

In Abbildung 51 sind die Volumensummenlinien für die Feinkalibrierung und für die den Zeitraum 1986 – 1993, abgeleitet aus den Querprofilen, abgebildet. Wie bereits aus dem Ergebnis der absolute Umlagerung der Feinkalibrierung (Abbildung 50) hervorgeht, werden die Volumensummen sehr gut abgebildet.



<i>Kalibrierung</i>	<i>Volumensummen [m³]</i>
Endergebnis der Feinkalibrierung	-37107
Soll 1986 – 1993	-35803

Abbildung 51: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für die Feinkalibrierung (Teilgebiet 1) und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt

Für den Kalibrierungszeitraum zeigt die Simulation eine ausgeprägte Morphodynamik entlang der Fließgewässerstrecke. Der fehlende Geschiebeeintrag oberstrom und von der Seite führt zu deutlichen Sohleintiefungen, welche in der resultierenden Sohlage (siehe Abbildung 52) wiedergegeben werden kann.

Die umlagerungsbasierte Rauheitsanpassung analysiert auch die resultierenden abschnittswisen flächengewichteten Mittelwerte der Soll-Sohlhöhendifferenz $\overline{\Delta z}$ in [m]. Das Kalibrierungsmodell prognostiziert eine gute Übereinstimmung mit den Soll-Sohlhöhendifferenzen. Die Abschnitte direkt nach den Abstürzen sind mit einer gewissen Unschärfe, welche durch die Querprofilaufnahmen hervorgerufen werden, verbunden. Diese Abschnitte erreichen nicht den richtigen Sollwert, sowohl in der Umlagerungs- als auch Sohlhöhendifferenz, und müssen für die Kalibrierung unberücksichtigt bleiben. Interessant ist zudem, dass die Sohlhöhendifferenz in allen näher betrachteten Abschnitten innerhalb der Toleranzgrenze von +/- 0.05 m liegt. In Abbildung 53 sind die abschnittswisen flächengewichteten Mittelwerte der Soll-Sohlhöhendifferenz zu sehen.

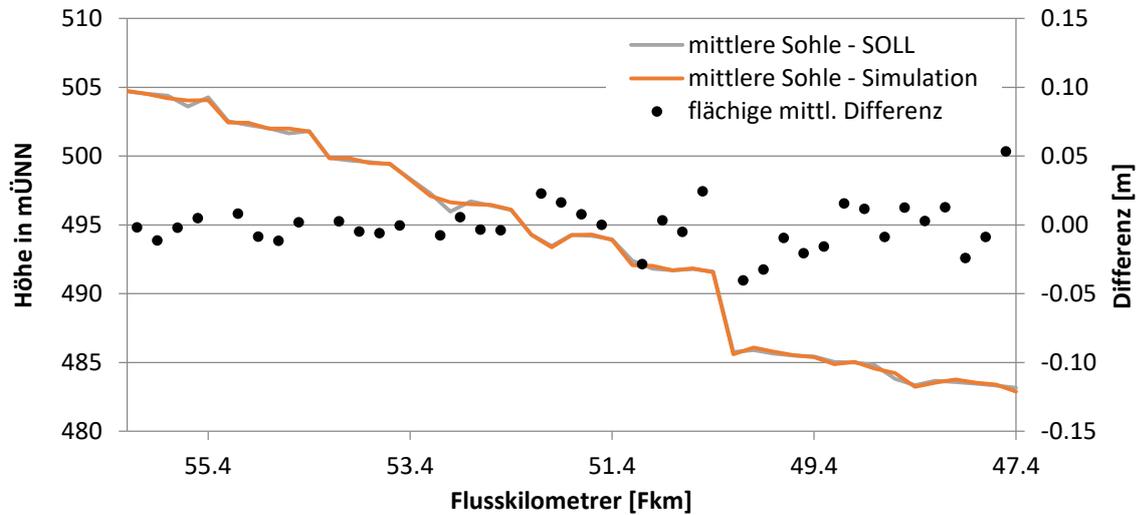


Abbildung 52: Ergebnis der mittleren Sohlage für den Sollzustand 1993 (graue Linie) und für den Endzustand der Simulation (orange Linie) an ausgewählten Querprofilen; schwarze Punkte: flächige mittlere Sohlhöhendifferenz zwischen SOLL und Simulation für jeden Abschnitt

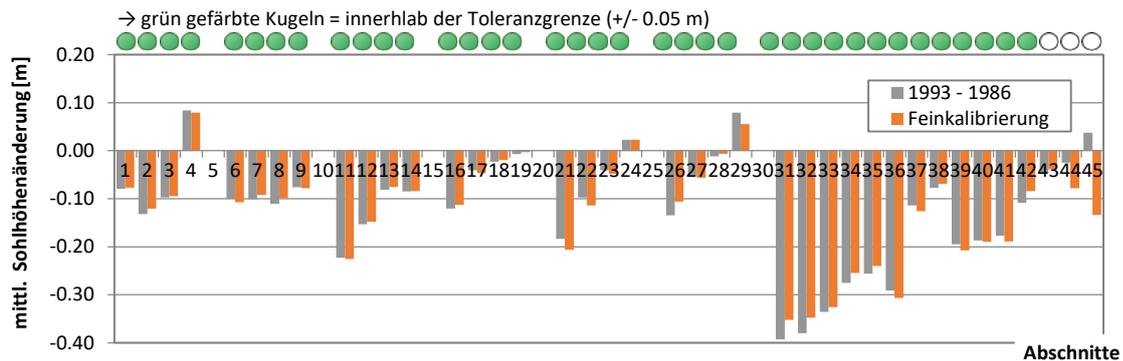


Abbildung 53: graue Balken: Änderung der abschnittswiseen flächengewichteten Mittelwerte der Soll-Sohlhöhendifferenz $\bar{\Delta z}$ in [m], orange Balken: Ergebnis $\bar{\Delta z}$ Feinkalibrierung, grüne gefärbte Kugeln: Differenz zwischen SOLL und Simulation innerhalb der Toleranzgrenze, weiß gefärbte Kugeln: Abweichung größer als die Toleranzgrenze

In Abbildung 54 ist der Endzustand der Kornzusammensetzung im Längenschnitt (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) zu sehen. Die zu erwartende Verfeinerung der Austauschschicht flussabwärts innerhalb der Abschnitte ist ersichtlich. Die Ergebnisse der Geschiebesimulation lassen den Bereich zwischen Fkm 49,00 – 47,20 erkennen, in dem die Austauschschicht deutlich feiner wird. Die Unterschicht zeigt im untersuchten Zeitraum keine große Änderung. Sowohl im Modell als auch bei den aufgenommenen Sedimentproben ist dieser Zustand zu erkennen. In Abbildung 55 sind die Kornklassen flächig gemittelt über jeden Sohlabschnitt am Ende der Simulationszeit zu sehen. Die Grafik, in welcher die Austauschschicht dargestellt

ist, zeigt, dass die Fraktionen FA_AL 1 bis FA_AL4 den größten Bestandteil der Kornzusammensetzung beinhalten. Kurz vorm Hochablass, ist die Verfeinerung der Anteile wiederum erkennbar. Die Unterschicht, dargestellt in der zweiten Grafik, weist keine nennenswerten großräumigen Veränderungen auf. Sie ist geprägt durch lokale dynamische Änderungen.

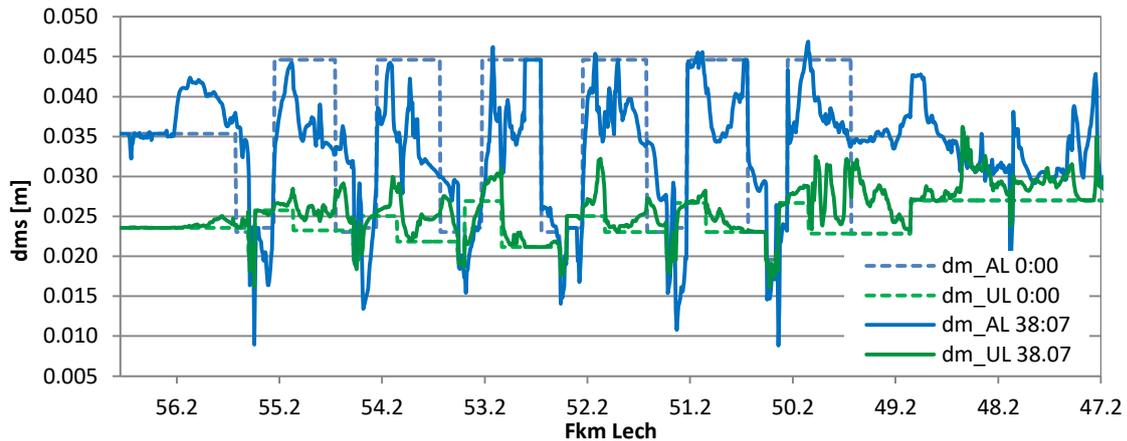


Abbildung 54: Endzustand der Feinkalibrierung der maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AS}$, $d_{m,US}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 1

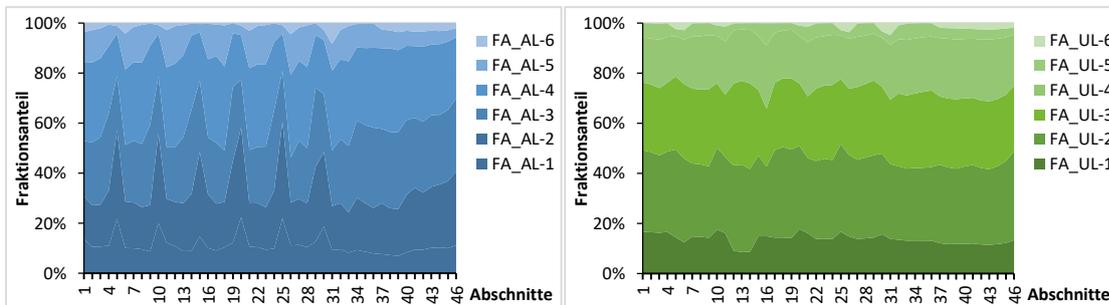


Abbildung 55: Anteile der Kornklassen flächig gemittelt über jeden Abschnitt am Ende der Simulationszeit, links für die Austauschschicht und rechts für die Unterschicht

Aus Abbildung 56 gehen die Sohllagenänderungen im Kalibrierungszeitraum von 1986 – 1993 hervor. Entsprechend der Vorgangsweise ist links die Gesamt-Soll-Umlagerung (Auflandung und Erosion) der Sohllagenänderung aus der Feinkalibrierung gegenübergestellt. Durch die morphologischen Veränderungen kommt es zu einer deutlichen Erosion im gesamten Untersuchungsgebiet (dargestellt in gelber/roter Farbe). Die Anlandungen nach den Abstürzen sind im morphologischen Modell enthalten, weichen jedoch vom Sollwert ab (siehe Kapitel 3.2.2).

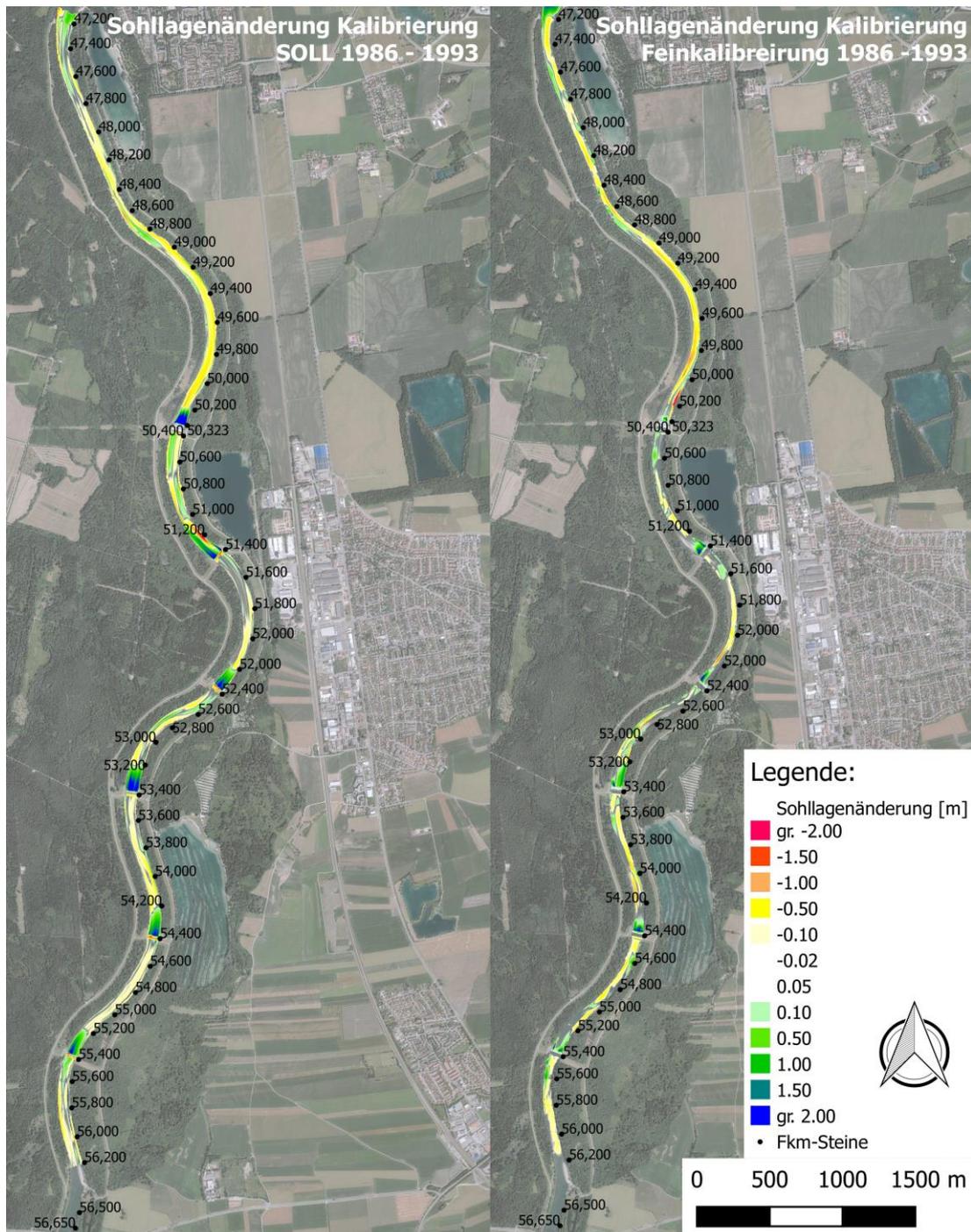


Abbildung 56: Sohllagenänderungen in Bezug zur Verzugsfläche aus QP-Daten von 1986 im untersuchten Teilgebiet 1 für den Kalibrierungszeitraum; links: Soll-Sohllagenänderung aus den Verzugsflächen 1986 - 1993; rechts: Ergebnis der Feinkalibrierung 1986 - 1993; Anlandungen nach den Abstürzen ergeben sich aufgrund der Unsicherheiten (siehe Ursache Kapitel 3.2)

4.4 Ergebnisse Kalibrierung "Stadtgebiet"

4.4.1 Ergebnisse Grobkalibrierung "Stadtgebiet"

Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, wurden folgende modellspezifischen Parameter variiert:

- k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)
- θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)
- pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken)

Die nachfolgenden Ergebnisse werden nur kurz erläutert, da detaillierte Informationen in Kapitel 4.3.1 zu finden sind. Zusätzlich ist hier zu erwähnen, dass diese Modelle die neue W-Q Beziehung, welche in der Feinkalibrierung angepasst wurde, nicht enthalten.

Für die weitere Analyse wurde ein Ausgangszustand für die Grobkalibrierung erstellt. Dieser Ausgangszustand setzt sich aus folgenden Parametern zusammen und ist in den nachfolgenden Grafiken mit (*) markiert.

Tabelle 6: Einstellung der Modellparameter für die Grobkalibrierung – Teilmodell 2

Parameterausgangszustand für die Grobkalibrierung – Teilmodell 2	
Q_c (kritischer Abfluss)	220 m ³ /s
Schichtenmanagement	$pal = 0,33$ (5 cm) $pul = 26,00$ (65 cm)
k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)	0,625
θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)	0,047
SCFG & SCF	3
$k_{St} = k_{St,r}$	37

k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)

Durch die Variation des Vorfaktors zwischen 5 und 8 konnte gezeigt werden, dass mit höheren k_F – Werten die Erosion zunimmt. Für die Langzeitsimulation werden wiederum mit kleineren k_F – Werten die Soll-Umlagerungen besser erreicht.

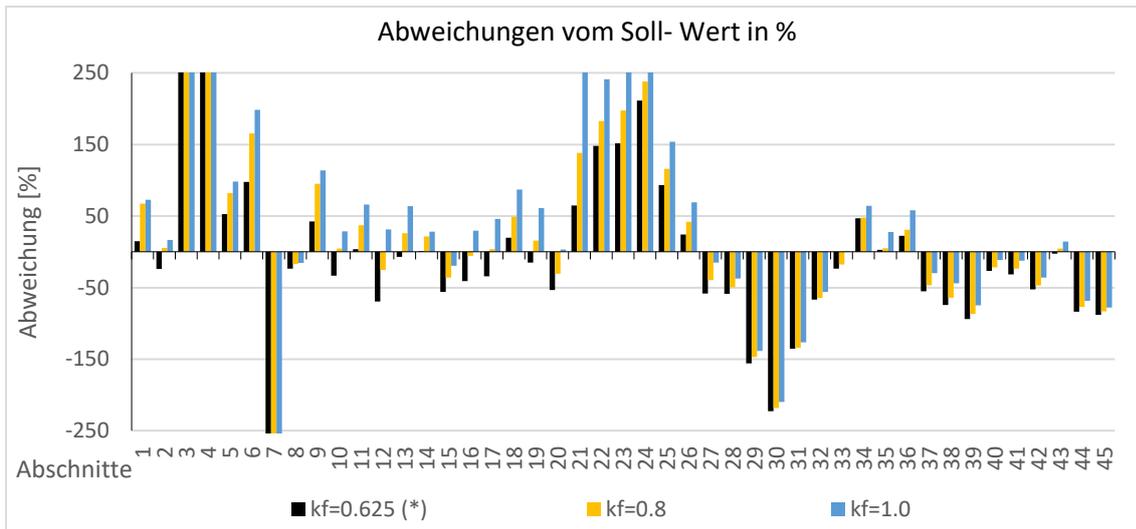


Abbildung 57: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis bei unterschiedlichen k_F – Werten - Teilgebiet 2

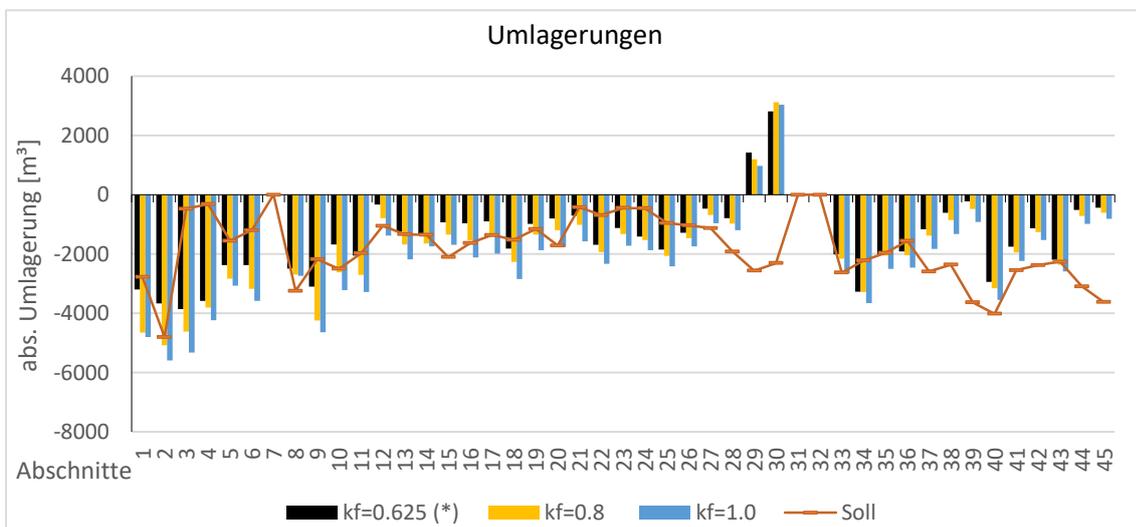


Abbildung 58: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen k_f – Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)

Die Abweichungen bei variablen θ_{cr} – Werten wurden anhand einer Sensitivität untersucht. Diese belegt für das Teilgebiet 2, dass durch die Veränderung des θ_{cr} – Wertes während des Kalibrierungszeitraumes keine signifikanten Unterschiede auftreten. Dennoch wurde ein $\theta_{cr} = 0,047$ für den Ausgangszustand definiert, da hier die Abweichungen vom Soll (Erosion und Akkumulation) am geringsten sind.

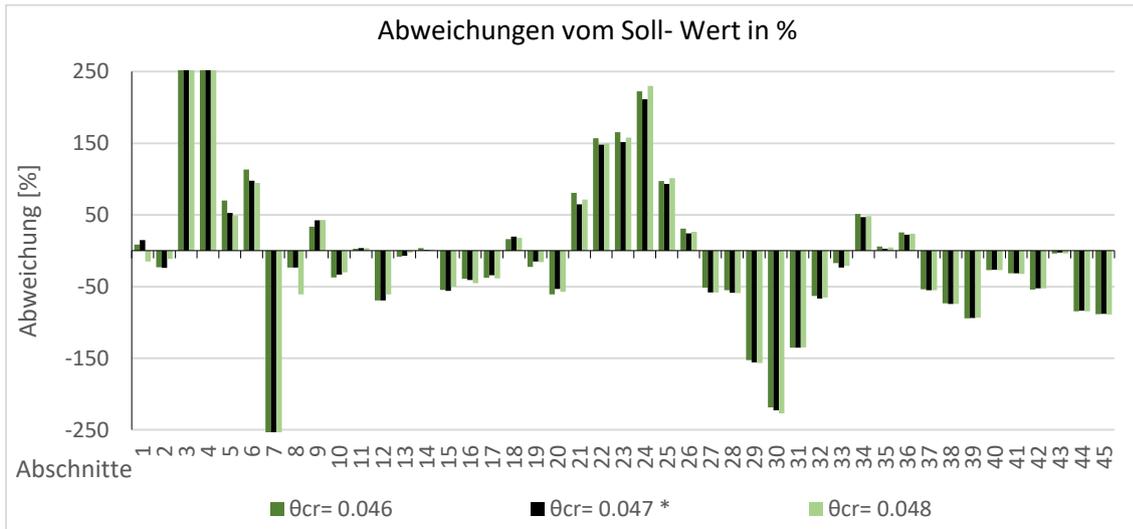


Abbildung 59: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis bei unterschiedlichen θ_{cr} – Werten – Teilgebiet 2

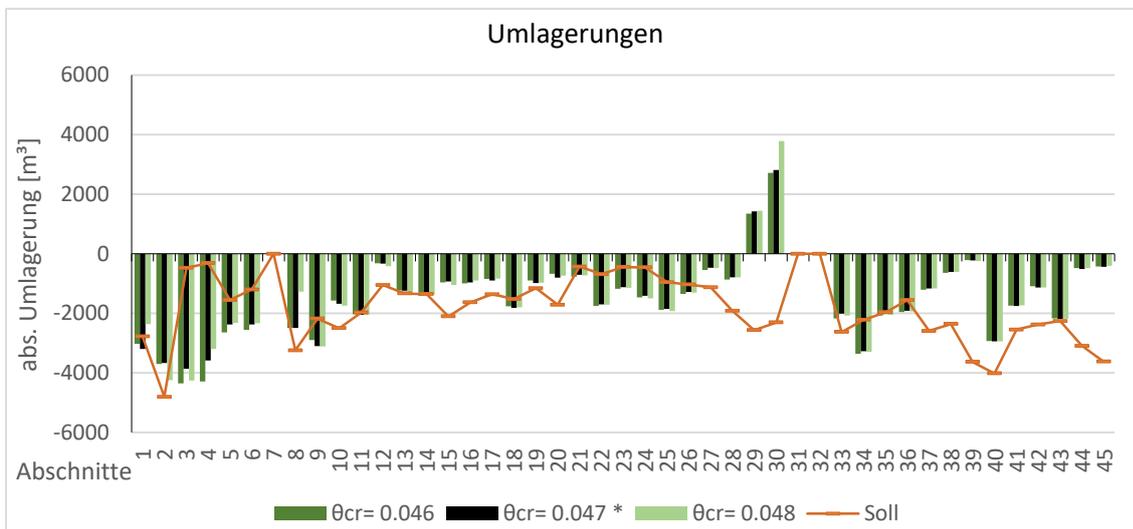


Abbildung 60: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen θ_{cr} - Werten (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

pal und pul (kritischer Parameter zur Steuerung der Austausch- und Unterschichtdicken)

In diesem Teilgebiet weist der Lech keine ausgeprägte Deckschicht mehr auf. In vereinzelt Gebieten wird die Tertiärschicht nur geringfügig mit einer Kiesauflage überdeckt, bzw. kommt schon zum Vorschein. Durch die Wahl einer passenden Schichtdicke kann das Modell kalibriert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Austauschschichtdicke zu raschen Veränderungen führt und die Unterschicht schneller mobilisiert. Dennoch ist die Wahl einer 2 cm dicken Austauschschicht nicht zielführend, da die vereinzelt vorhandene schützende Deckschicht nicht abgebildet werden können.

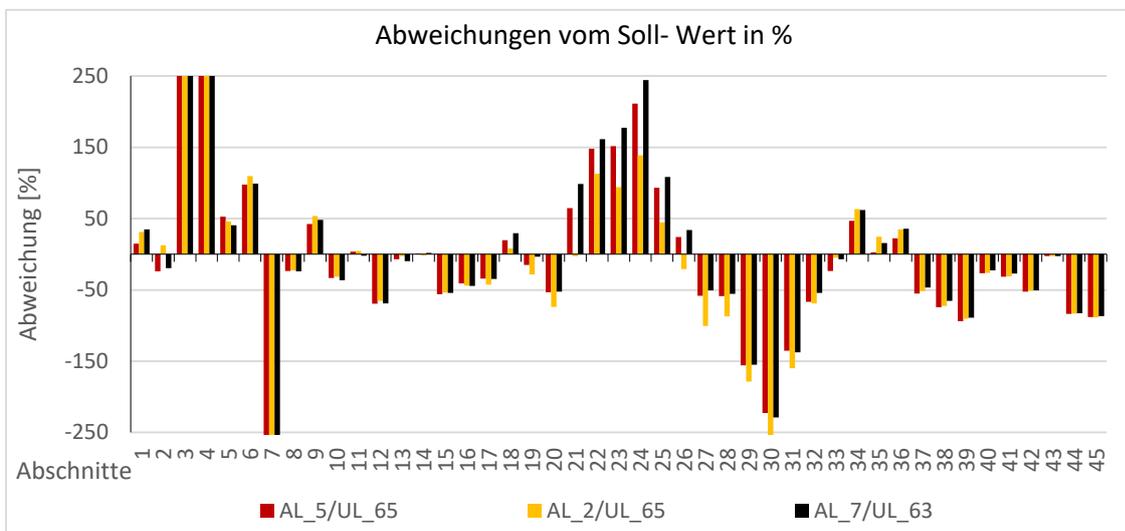


Abbildung 61: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis bei unterschiedlichen Schichtdicken für Austauschschicht und Unterschicht - Teilgebiet 2

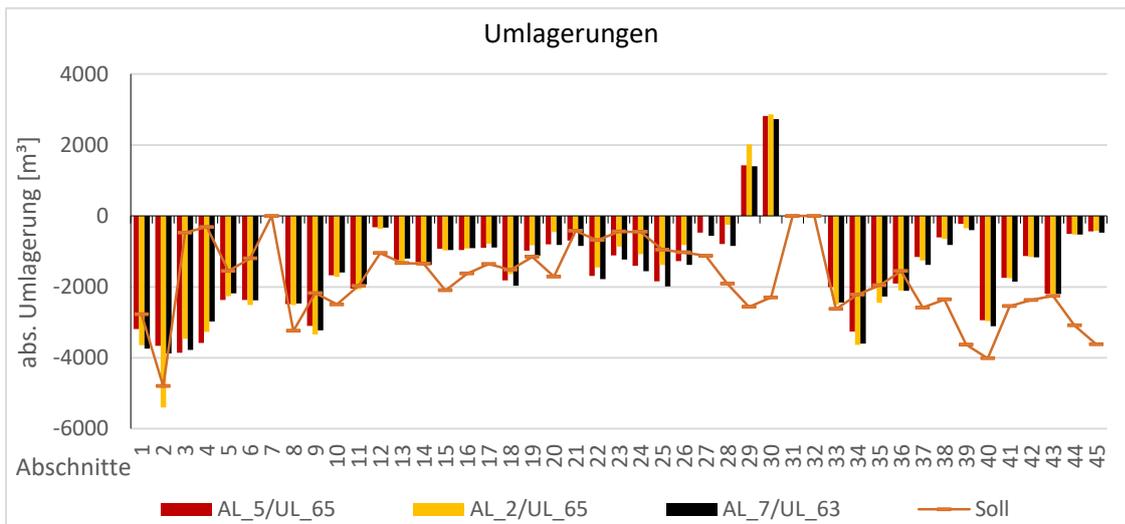
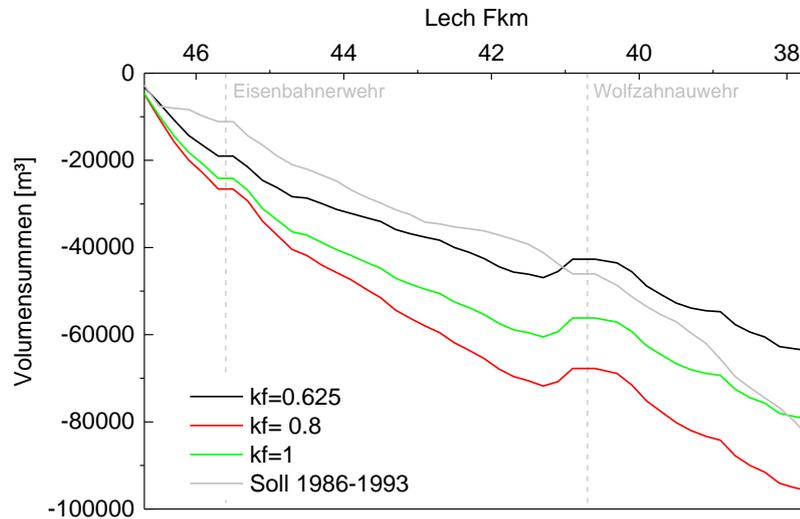


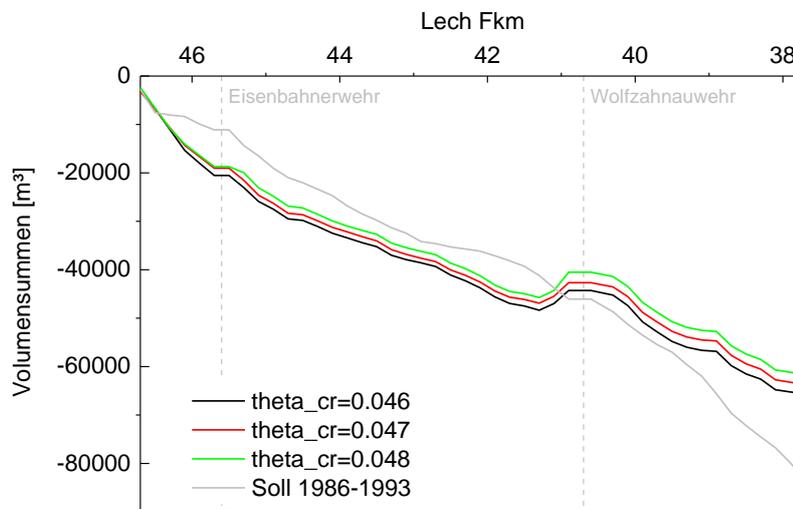
Abbildung 62: ermittelte absolute Umlagerung bei unterschiedlichen Schichtdicken für Austauschschicht und Unterschicht (Kalibrierungszeitraum) und Soll-Umlagerungen (orange Linie)

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Volumensummen-
 diagramme für das Teilgebiet 2 zu sehen.



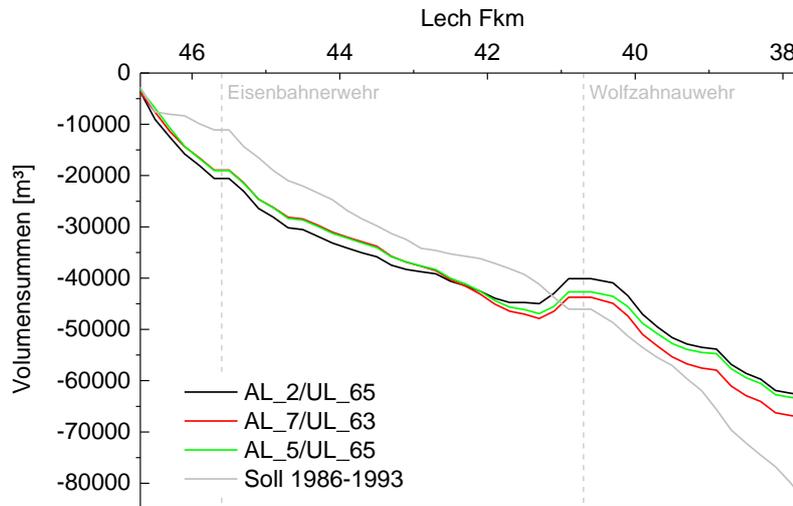
Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m³]
kf = 0.625	-63673
kf = 0.80	-95888
kf = 1.00	-79375
Soll 1986 – 1993	-83491

Abbildung 63: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 2 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen k_F – Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Wehranlagen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)



Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m³]
$\theta_{cr} = 0.046$	-65671
$\theta_{cr} = 0.047$	-63673
$\theta_{cr} = 0.048$	-61573
Soll 1986 – 1993	-83491

Abbildung 64: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 2 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen θ_{cr} – Werten und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)



Grobkalibrierungsparametern	Volumensummen [m³]
AL 2 cm, UL 65 cm	-62858
AL 7 cm, UL 63 cm	-67268
AL 5 cm, UL 65 cm	-63673
Soll 1986 – 1993	-83491

Abbildung 65: Volumensummendiagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für das Teilgebiet 1 (Kalibrierungszeitraum) bei unterschiedlichen Schichtdicken und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt (Ursache siehe Kapitel 3.2.2)

Für die weiteren Analysen wurde ein Ausgangszustand mit folgender Parameterzusammensetzung definiert:

Tabelle 7: Einstellung der Modellparameter für die Feinkalibrierung – Teilmodell 2

Parameterausgangszustand für die Feinkalibrierung – Teilmodell 2	
Zulauf	Übertrag aus Teilmodell 1
Schichtenmanagement	pal = 0,3279 (5 cm) pul = 26,00 (65 cm)
k_F (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker)	0,625
θ_{cr} (dimensionslose kritische Sohlschubspannung nach Shields)	0,047
SCFG & SCF (Beschleunigungsfaktoren)	3

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der Feststoffvolumenänderung im Kalibrierzeitraum im Stadtgebiet dargestellt. Zu sehen ist die kumulierte Umlagerung je Abschnitt. Als Zielgröße ist die Sollumlagerung 1986 – 1993 als orange Linie dargestellt. Das Gesamtumlagerungsvolumen im Ausgangszustandsmodell für die Feinkalibrierung zeigt eine deutliche Erosionsentwicklung im gesamten Gebiet

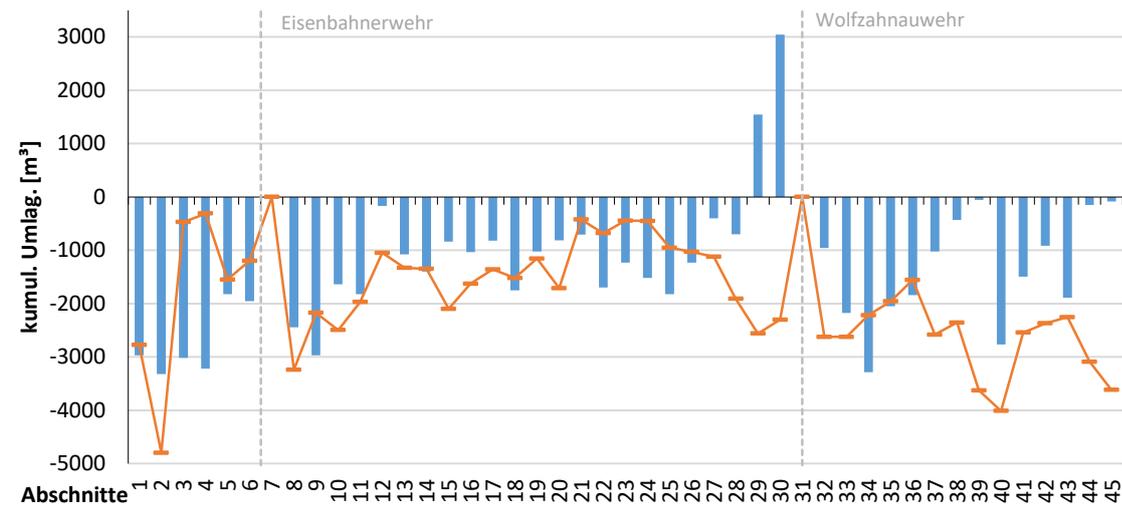


Abbildung 66: Gegenüberstellung kumulierte absolute Umlagerung des Sollzustandes dem Ausgangszustand der Feinkalibrierung - Teilgebiet 2

4.4.2 Ergebnisse Feinkalibrierung "Stadtgebiet"

Während der Modellierung zeichneten sich einige Probleme bei der Simulation mit der Software HYDRO_FT-2d ab. An den Wehranlagen kam es zu geometrischen Veränderungen und der Anpassung der Randbedingung (W-Q Beziehung). Die Simulationen der Feinkalibrierung berücksichtigen bereits die Veränderungen (siehe Kapitel 3.1.4).

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der angepassten Rauheitsbeiwerte k_{St} und $k_{St,r}$ je Abschnitt aus der Feinkalibrierungsrechnung. Diese Parameterabfolge ist grafisch in Abbildung 67 zu sehen. Der maximale Rauheitsbeiwert ist $k_{St} = 44 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und wird in mehreren Abschnitten erreicht. In Abschnitt 1 und 2 musste ein sehr niedriger k_{St} – Wert angesetzt werden um die entstandenen Erosionen zu erreichen. Der Geschiebeeintrag aus der Wertach wurde vernachlässigt. Als Maßnahme wurde im Mündungsbereich der Wertach ein niedrigerer k_{St} – Werte angesetzt. In den meisten Abschnitten wurde ein Riffelfaktor angesetzt.

Tabelle 8: Abschnitts-Kennwerte für die Feinkalibrierung – Teilgebiet 2, grau hinterlegte Zeilen markieren die Abschnitte flussabwärts der Wehranlagen

Abschnitte	Rauheitsbeiwerte für die Kalibrierung – Teilgebiet 2		
	$k_{StGesamt}$ [$m^{1/3}/s$]	$k_{StSohle}$ [$m^{1/3}/s$]	μ [-]
Abschnitt 1	31.00	31.00	1.00
Abschnitt 2	31.00	31.00	1.00
Abschnitt 3	43.00	50.75	0.78
Abschnitt 4	43.00	50.75	0.78
Abschnitt 5	41.00	41.56	0.98
Abschnitt 6	42.00	42.00	1.00
Abschnitt 7	28.00	28.00	1.00
Abschnitt 8	42.00	45.39	0.89
Abschnitt 9	41.00	42.13	0.96
Abschnitt 10	38.00	38.00	1.00
Abschnitt 11	40.00	42.29	0.92
Abschnitt 12	38.00	38.52	0.98
Abschnitt 13	39.00	39.80	0.97
Abschnitt 14	37.00	37.25	0.99
Abschnitt 15	34.00	34.00	1.00
Abschnitt 16	36.00	36.00	1.00
Abschnitt 17	36.00	37.25	0.95
Abschnitt 18	39.00	40.93	0.93
Abschnitt 19	36.00	36.49	0.98
Abschnitt 20	33.00	34.39	0.94
Abschnitt 21	39.00	39.26	0.99
Abschnitt 22	45.00	47.23	0.93
Abschnitt 23	44.00	45.21	0.96
Abschnitt 24	46.00	49.35	0.90
Abschnitt 25	46.00	50.48	0.87
Abschnitt 26	46.00	50.09	0.88
Abschnitt 27	45.00	48.27	0.90
Abschnitt 28	46.00	49.35	0.90
Abschnitt 29	39.00	40.93	0.93
Abschnitt 30	37.00	37.25	0.99
Abschnitt 31	33.00	33.00	1.00
Abschnitt 32	35.00	35.47	0.98
Abschnitt 33	40.00	40.00	1.00
Abschnitt 34	46.00	49.35	0.90
Abschnitt 35	46.00	46.00	1.00
Abschnitt 36	46.00	46.62	0.98
Abschnitt 37	40.00	40.27	0.99
Abschnitt 38	38.00	38.26	0.99
Abschnitt 39	34.00	34.00	1.00
Abschnitt 40	39.00	40.36	0.95
Abschnitt 41	38.00	39.32	0.95
Abschnitt 42	38.00	38.26	0.99
Abschnitt 43	41.00	42.43	0.95
Abschnitt 44	35.00	35.47	0.98
Abschnitt 45	34.00	34.00	1.00
Abschnitt 46	34.00	34.00	1.00

Feinkalibrierung Teilgebiet 2

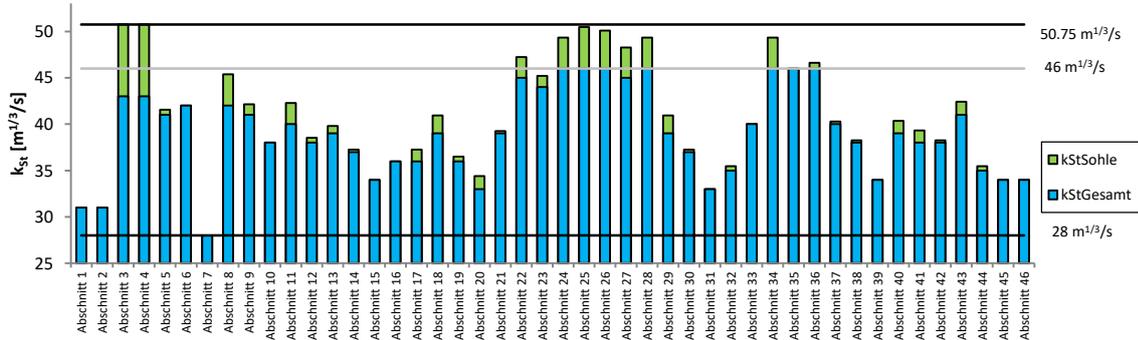


Abbildung 67: Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{St} und $k_{St,r}$ je Abschnitt

Die umlagerungsbasierte Rauheitsanpassung nutzt den Vorgang einer abschnittswisen Anpassung der Umlagerungen. Durch einen Kalibrierungszyklus konnte am Ende eine passende Rauheitseinstellung für den Kalibrierungszeitraum gefunden werden. Das beste Ergebnis ist in Abbildung 68 dargestellt. Die absoluten kumulierten Umlagerungen erreichen Werte von bis zu 3800 m³ im untersuchten Zeitraum. Im Kalibrierungszeitraum ist ein deutlicher Erosionstrend erkennbar. Die ersten Abschnitte sind stark geprägt von der Geschiebezufuhr aus Teilmodell 1. Die Geschiebezufuhr wird über die gesamte Gewässerbreite gleichmäßig verteilt zugegeben, dadurch kann es hier zu räumlichen Unterschieden kommen. Ab Abschnitt 22 verringert sich das Sohlgefälle als auch die Gewässerbreite. Durch konstant hohe Rauheitsbeiwerte kann die relativ geringe Erosion hier gut abgebildet werden. Es konnten alle Zielgrößen in den einzelnen Abschnitten gut erreicht werden. Die dynamisch veränderte Sohlage ist in Abbildung 70 zu sehen. In der Grafik ist die mittlere Sohlhöhe an ausgewählten Querprofilen für den Sollzustand 1993 und Simulationsergebnis dargestellt. Den Simulationsergebnissen zufolge, erreichen die Sohlhöhen die zu erwartende Höhe sehr gut. Kaum Veränderungen sind zwischen Fkm 42,70 und Fkm 41,60 erkennbar.

In der nachfolgenden Abbildung wird die Toleranzgrenze, welche in Kapitel 4.3 aufgelistet ist, als eine Art Ampelsystem mit farbigen Kugeln auf der Oberseite der Grafik dargestellt. Eine grün gefärbte Kugel zeigt eine sehr gute Übereinstimmung im Abschnitt (Abweichung vom Sollwert +/- 30 %) an, eine gelb gefärbte Kugel bedeutet eine gute Übereinstimmung (Abweichung zwischen +/- 30% und +/- 50 % vom Sollwert) und eine weiße Färbung kennzeichnet eine größere Abweichung vom Sollwert.

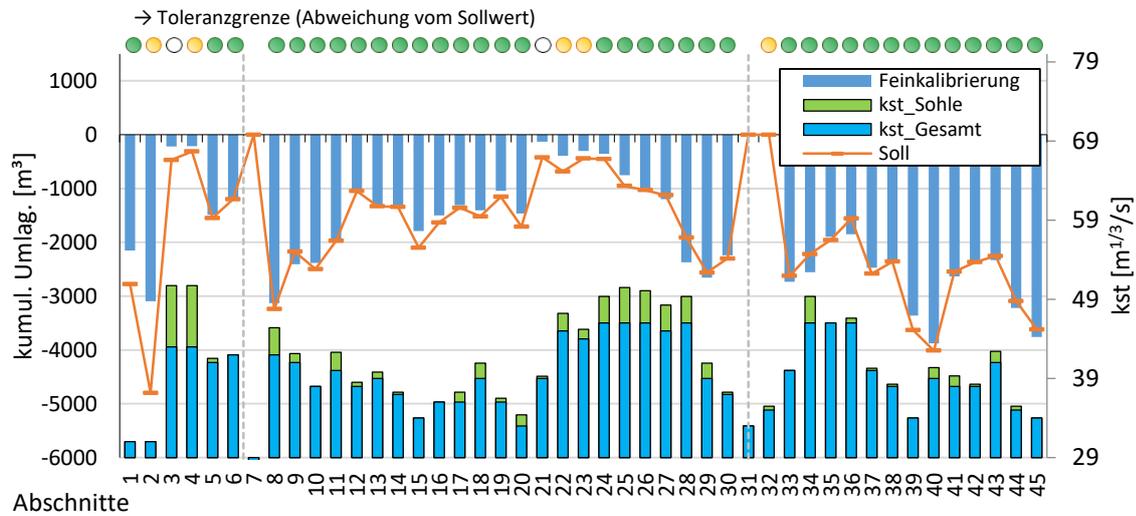
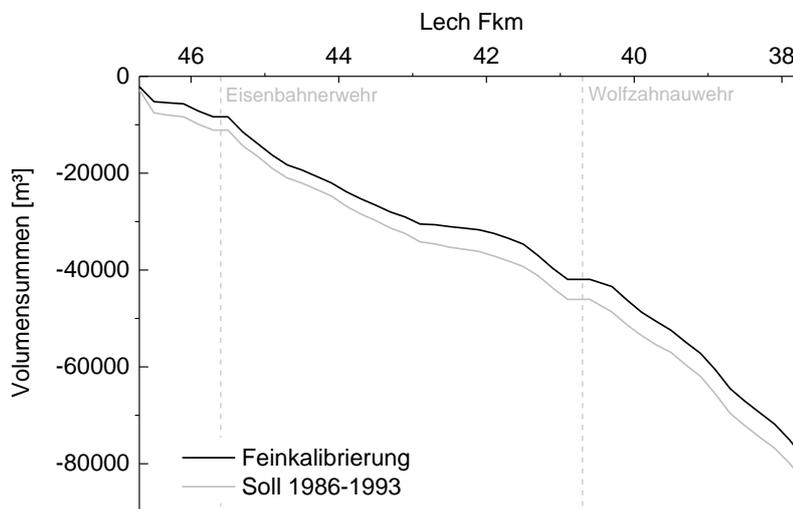


Abbildung 68: ermittelte absolute Umlagerung aus der Feinkalibrierung (blaue Balken) und Soll-Umlagerungen (orange Linie) und Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{St} und $k_{St,r}$ je Abschnitt für die EndEinstellung der Feinkalibrierung – Stadtgebiet

In Abbildung 69 sind die Volumensummenlinien für die Feinkalibrierung und für den Zeitraum 1986 – 1993, abgeleitet aus den Querprofilen, abgebildet. Wie bereits aus dem Ergebnis der absolute Umlagerung der Feinkalibrierung (Abbildung 68) hervorgeht, wird flussabwärts des Hochablasses das Erosionsvolumen nicht exakt



Kalibrierung	Volumensummen [m³]
Endergebnis der Feinkalibrierung	-78786
Soll 1986 – 1993	-83491

Abbildung 69: Volumensummediagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für die Feinkalibrierung (Teilgebiet 2) und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Wehranlagen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt

erreicht. Dies hat zur Folge dass die Volumensummenlinie der Feinkalibrierung von den Soll-Volumensummen sich verschiebt. Der Verlauf der Volumensummenlinien zeigt jedoch ein sehr gutes Ergebnis.

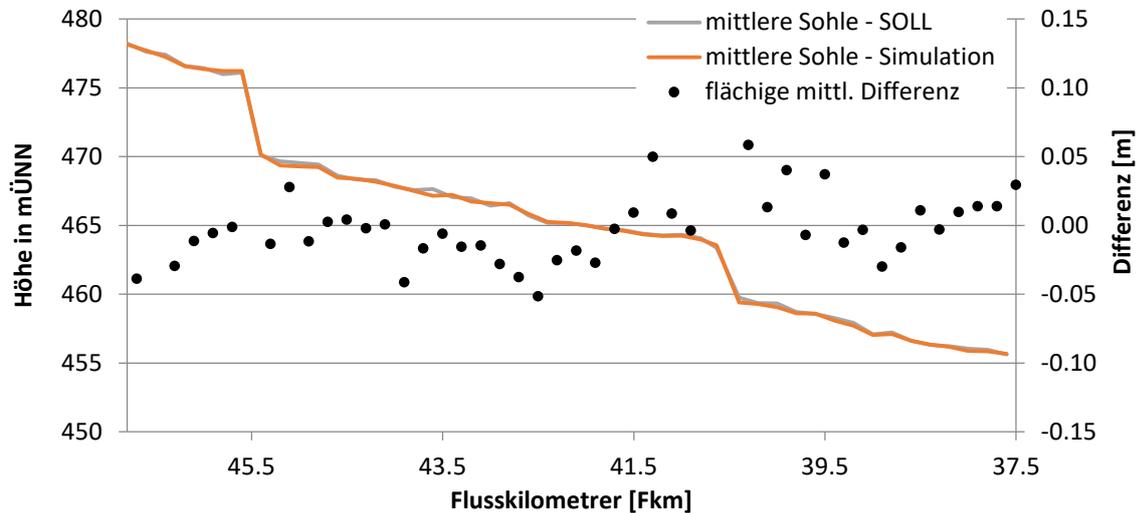


Abbildung 70: Ergebnis der mittleren Sohlage für den Sollzustand 1993 (graue Linie) und für den Endzustand der Simulation (orange Linie) an ausgewählten Querprofilen; schwarze Punkte: flächige mittlere Sohlhöhendifferenz zwischen SOLL und Simulation für jeden Abschnitt

Die morphodynamische Simulation ermöglicht am Ende ein abschnittsweise flächengewichtetes Mittel der Soll-Sohlhöhendifferenz $\overline{\Delta z}$ in [m] zu erstellen. Basierend auf der Ausgangssohle konnten gezeigt werden, dass die Abweichungen sehr gering sind. Ausgenommen von einzelnen Abschnitten liegen alle Abschnitte innerhalb der Toleranzgrenze von +/- 0.05 m. In Abbildung 71 sind die abschnittswisen flächengewichteten Mittelwerte der Soll-Sohlhöhendifferenz ersichtlich.

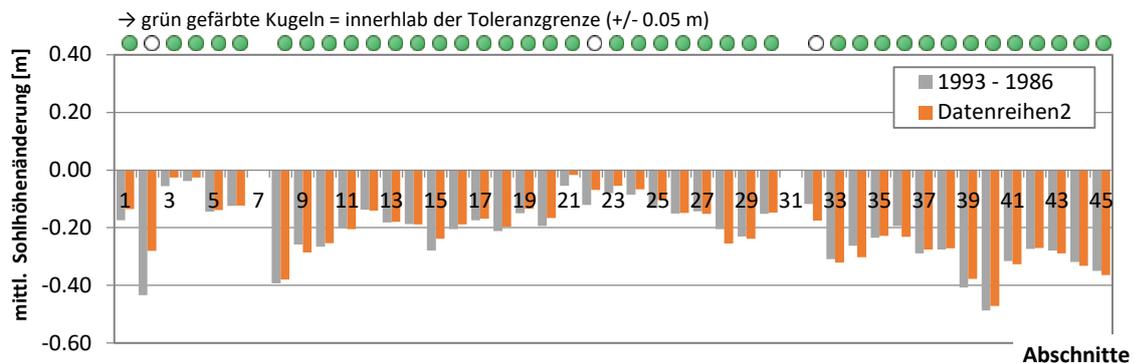


Abbildung 71: graue Balken: Änderung der abschnittswisen flächengewichteten Mittelwerte der Soll-Sohlhöhendifferenz $\overline{\Delta z}$ in [m], orange Balken: Ergebnis $\overline{\Delta z}$ Feinkalibrierung, grüne gefärbte Kugeln: Differenz zwischen SOLL und Simulation innerhalb der Toleranzgrenze, weiß gefärbte Kugeln: Abweichung größer als die Toleranzgrenze

In Abbildung 72 ist der Endzustand der Kornzusammensetzung im Längsschnitt (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) zu sehen. Die erwartete feine Kornzusammensetzung im Teilgebiet 2 „Stadtgebiet“ ist hier ersichtlich. Aus der Simulation geht hervor, dass die Austauschschicht in Flussmitte nicht mehr ausgeprägt vorhanden ist. Nach den Wehranlagen sammelt sich feines Material wieder an. Bei Fkm 43,80 – 44,10 liegt die Tertiärschicht nahe an der Gewässersohle, diese wird erreicht, dadurch kommt es in diesem Abschnitt zu einer Verfeinerung des Kornmaterials.

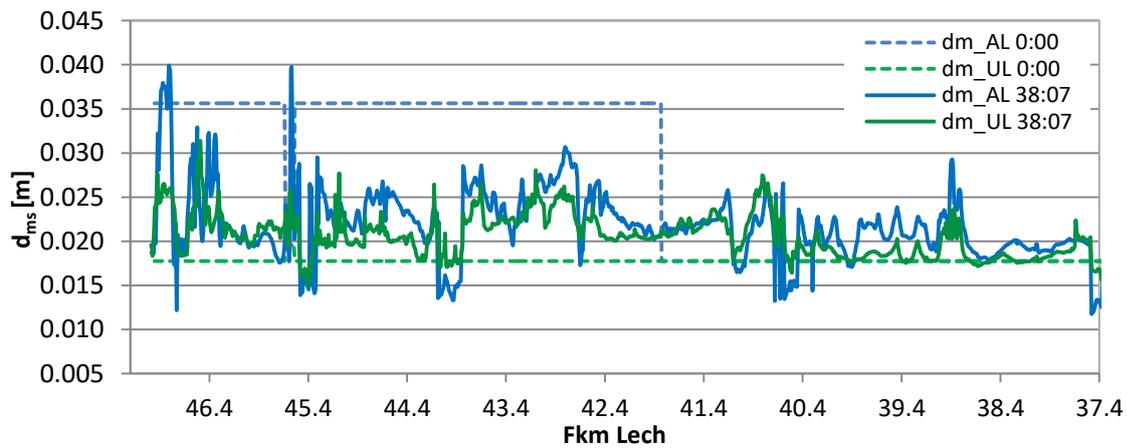


Abbildung 72: Endzustand der Feinkalibrierung der maßgebenden Korngrößen ($d_{m,AS}$, $d_{m,US}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 2

In Abbildung 73 sind die Fraktionsanteile je Kornklasse flächig gemittelt über jeden Sohlabschnitt am Ende der Modellierungszeit zu sehen. In der ersten Grafik (Fraktionsanteile der Austauschschicht) ist ersichtlich, dass vor den Wehranlagen ein Bereich entsteht, welcher durch feineres Material dominiert wird. Die ersten 4 Fraktionen prägen die Kornzusammensetzung der Sohle. Die Zusammensetzung der Unterschicht (rechtes Bild) zeigt keine ausgeprägte Veränderung entlang der Längsachse auf. Lokale dynamische Änderungen in einzelnen Abschnitten formen die Sohlzusammensetzung.

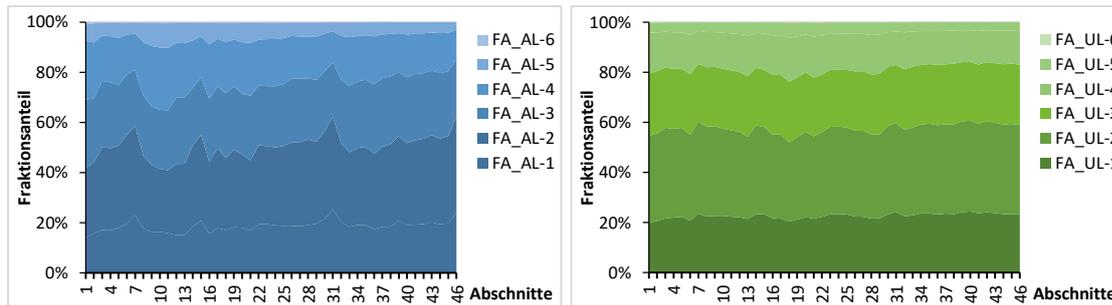


Abbildung 73: Anteile der Kornklassen flächig gemittelt über jeden Abschnitt am Ende der Simulationszeit, links für die Austauschschicht und rechts für die Unterschicht

In Abbildung 75 ist die Sohlagenänderung im Kalibrierungszeitraum von 1986 – 1993 dargestellt; die farbliche Darstellung repräsentiert die Erosionen und Anlandungen in dem untersuchten Zeitraum. Im linken Bild ist die Soll-Sohlagenänderung und in der rechten Abbildung die Sohlagenänderung aus den Simulationsergebnissen zu sehen. Durch die morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten kommt es zu dynamischen Veränderungen in der Gewässersohle. Allgemein kommt es zu Erosionen, dennoch gibt es im Fließquerschnitt Anlandungsbereiche welche sich im Laufe der Simulationszeit kontinuierlich verändern. In einer detaillierten Querschnittsbetrachtung ist zu erkennen, dass es abermalig zu einem Sohlniveauausgleich kommt. Ersichtlich z.B. bei Fkm 40,00. Im Mündungsbereich der Wertach zeigt sich, dass große Erosionen erreicht werden. Eine Erosionstendenz ist sowohl in der Soll-Sohllagerung ersichtlich, jedoch mit einem geringeren Ausmaß. Dadurch dass im Modell kein Geschiebeeintrag aus der Wertach angesetzt wurde, führt dies zu den erhöhten Erosionen (siehe Abbildung 74).

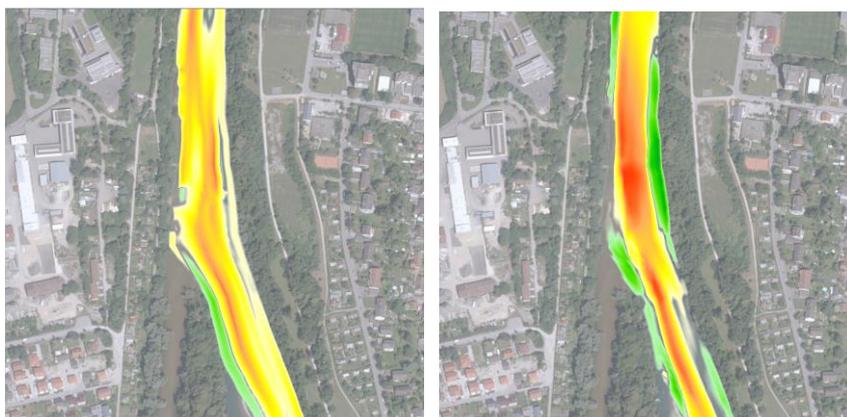


Abbildung 74: Detailausschnitt Mündungsbereich Wertach, links Soll-Sohlagenänderung (1986 – 1993), rechts Ergebnis aus der Feinkalibrierung (grün bedeutet Anlandung und rot Erosion)

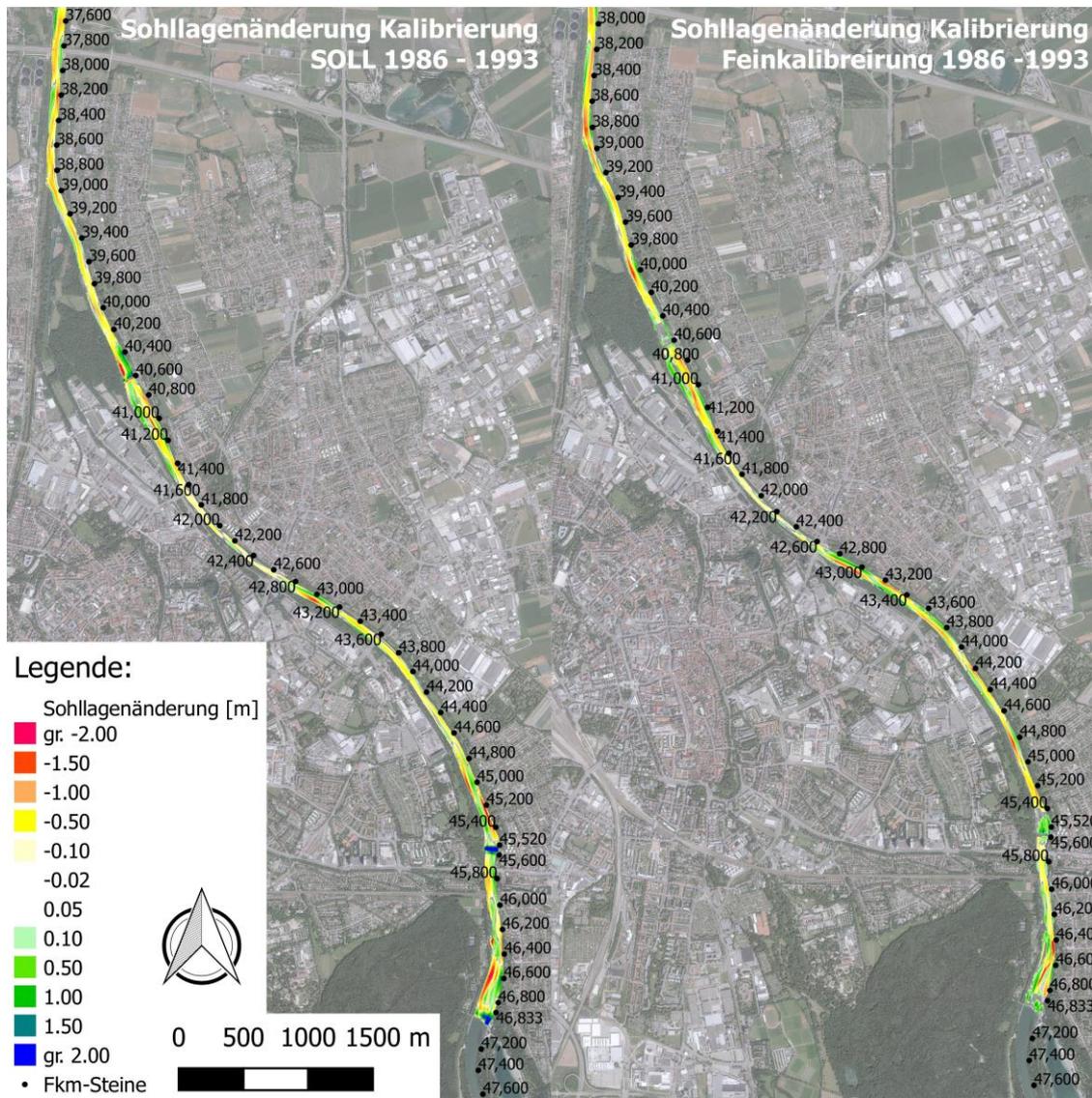


Abbildung 75: Sohllagenänderungen in Bezug zur Verzugsfläche aus QP-Daten von 1986 im untersuchten Teilgebiet 2 für den Kalibrierungszeitraum; links: Soll-Sohllagenänderung aus den Verzugsflächen 1986 - 1993; rechts: Ergebnis der Feinkalibrierung 1986 - 1993; Anlandungen nach den Abstürzen ergeben sich aufgrund der Unsicherheiten (siehe Ursache Kapitel 3.2.2)

4.5 Ergebnisse Validierung "Auwald"

Die Validierung spielt eine wichtige Rolle in der Modellerstellung. Der Validierungszeitraum wurde direkt an den Kalibrierungszeitraum angeschlossen (siehe Kapitel 3.1.1). Es werden alle Modellparameter aus der Kalibrierung übernommen. Des Weiteren ist es wichtig, den End-Systemzustand der finalen Kalibrierung zu übernehmen. Dies betrifft den Endzustand der Sohle und die Fraktionierungen in den einzelnen Schichten. Als letzten Start-Systemzustand musste noch die zulässige Erosionsschicht (bis zur Tertiärschicht) neu berechnet werden. Das Modell gilt als validiert, wenn die gemessenen Sohldifferenzen des Validierungszeitraums den berechneten Sohldifferenzen in ausreichend genauem Maße entsprechen.

Die Umlagerung je Abschnitt für den Validierungszeitraum ohne Anpassungen ist in Abbildung 76 dargestellt. Die zugrundeliegende Bedingung, welche keine Änderungen in den Parametereinstellungen erlaubt, führt dazu, dass die Simulationsergebnisse speziell in den ersten Abschnitten, bzw. in den Abschnitten 21 bis 23 zu groß sind. Demgegenüber ist das Ergebnis der Sohllagenänderung nach dem letzten großen Absturz bei Fkm 50,40 zu gering.

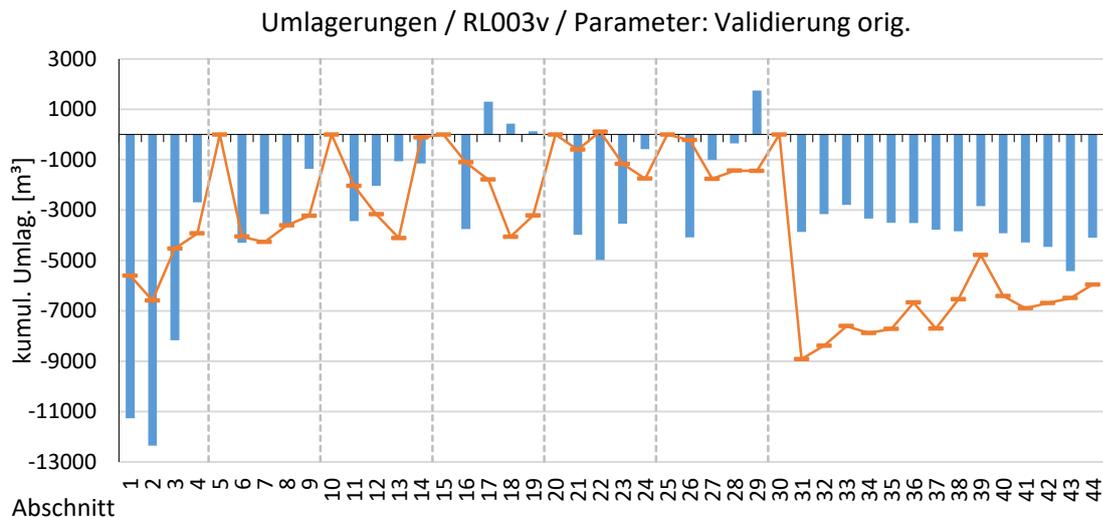


Abbildung 76: ermittelte absolute Umlagerung aus der Validierungsrechnung (blaue Balken) und Soll-Umlagerungen 1993 – 2010 (orange Linie) je Sohlabschnitt

In dem Kalibrierungszeitraum tritt kein nennenswertes Hochwasser auf, der maximale Abfluss liegt in etwa bei 440 m³/s. Die Simulationsperiode der Validierung beinhaltet jedoch zwei markante Hochwässer, welche zu starken Eintiefungen, speziell im unteren Abschnitt, führen. Mit diesem Hintergrundwissen wurde anhand von einer neuen Simulation, welche die Ganglinie mit $Q_c = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ beschränkt, eine Analyse durchgeführt, aus welcher die Bedeutung der Hochwässer in der Zeitreihe hervorheben soll. Das Ergebnis weist auf keinen eindeutigen Trend hin. Zusätzlich zu dieser

Simulation wurden weitere Parameter geändert, wie z.B. der k_F Wert (zur Korrektur des Vorfaktors der Geschiebetransportformel MPM/Hunziker). Alle Ergebnisse führten zu keiner deutlichen Verbesserung.

Aus diesen Ergebnissen geht wiederum hervor, dass die Dynamik jedes Fließgewässers zeitlich und räumlich sehr variabel ist. Transport- und Sortierprozesse führen zu einer ständigen Änderung der Kornzusammensetzung. Die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Geschiebetransport und Kornverteilung sollte daher in der Langzeitmodellierung berücksichtigt werden. Die Strickler-Rauheitsbeiwerte sind in den Modellen abschnittsweise als konstante Werte vorgegeben. Die morphodynamischen Änderungen im langen Berechnungszeitraum führen zu einer Veränderung der Kornverteilung im Lech, zu sehen in Abbildung 78.

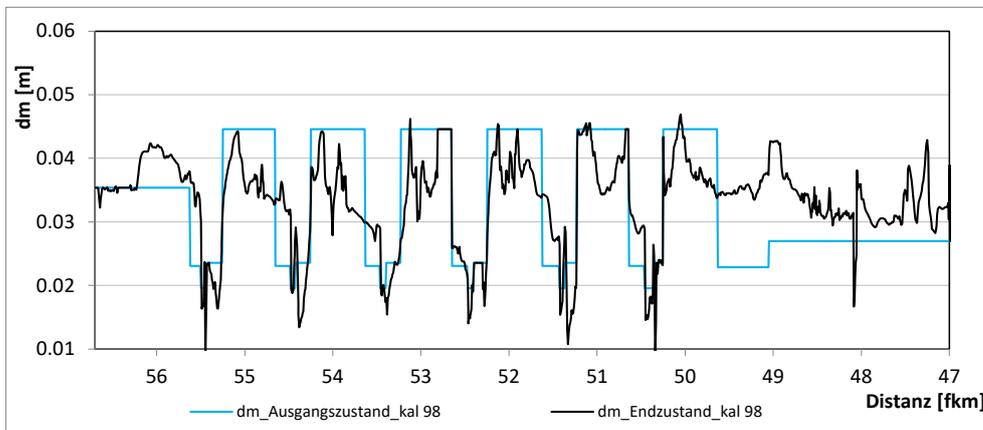


Abbildung 77: maßgebender Korndurchmesser ($d_{m,AS}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 1 Ausgangszustand und Endzustand der Feinkalibrierung

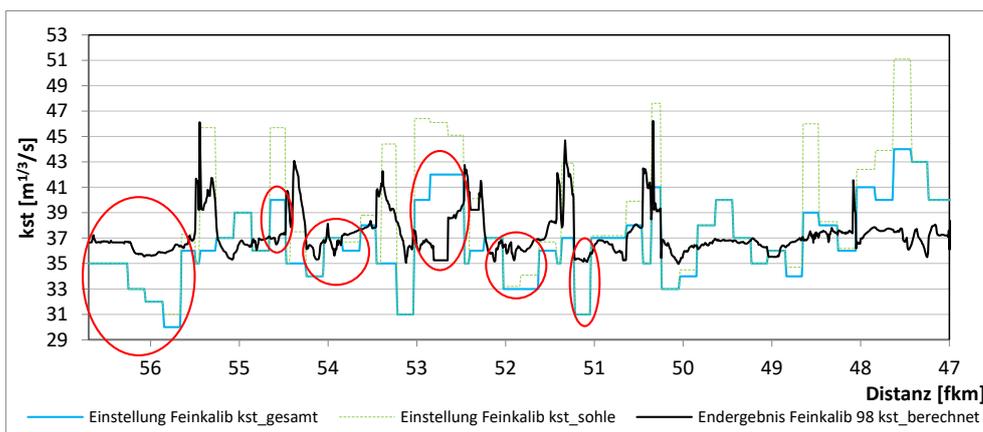


Abbildung 78: Manning Strickler-Werte, Einstellung der k_{St} und $k_{St,r}$ Werte inkl. berechnete k_{St} aus der Kornverteilung (Endzustand Feinkalibrierung) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse)

Durch eine Anpassung der Manning Strickler-Werte in einzelnen Abschnitten an den Endzustand der Kalibrierungsrechnung war es möglich, eine gute Validierungsrechnung zu erstellen. In Abbildung 79 ist die Feststoffvolumenänderung ersichtlich, zusätzlich sind die Rauheitsbeiwerte aus der Kalibrierungsrechnung der Validierungsrechnung gegenübergestellt. Durch die Erhöhung der k_{st} -Werte in den ersten Abschnitten wird eine geringe Umlagerung erreicht, welcher durch den fehlenden Geschiebeeintrag kompensiert wird. In den Abschnitten 17 bis 19 ist der ursprüngliche Rauheitsbeiwert aus der Kalibrierung zu hoch angesetzt. Dieser weicht auch von der dazugehörigen Kornzusammensetzung in diesen Abschnitten ab. Durch die Reduktion der k_{st} – Werte ergeben sich plausible Erosionsvolumina. Nach dem letzten großen Absturz bei Fkm 50,40 (nach Abschnitt 30) kann durch die Anpassung ein gutes Ergebnis erreicht werden, dennoch werden die Erosionen mit den Parametereinstellungen etwas unterschätzt. Aus den Analysen geht hervor, dass die Globalparametereinstellungen für das Gesamtmodell gut passen. Im morphologischen Modell reagiert die Sohle auf die hydraulischen Belastungen, welches durch die Hochwässer im Validierungszeitraum untersucht worden ist. Ein Zusammenhang zwischen Kornzusammensetzung der Sohle und den Rauheitsbeiwerten wird festgestellt, welcher in der Parameteranpassung der Langzeitbetrachtung berücksichtigt wird. Die Validierung wird in einem ausreichend genauen Maß darstellt, das Modell Teilgebiet 1 „Auwald“ gilt somit als validiert.

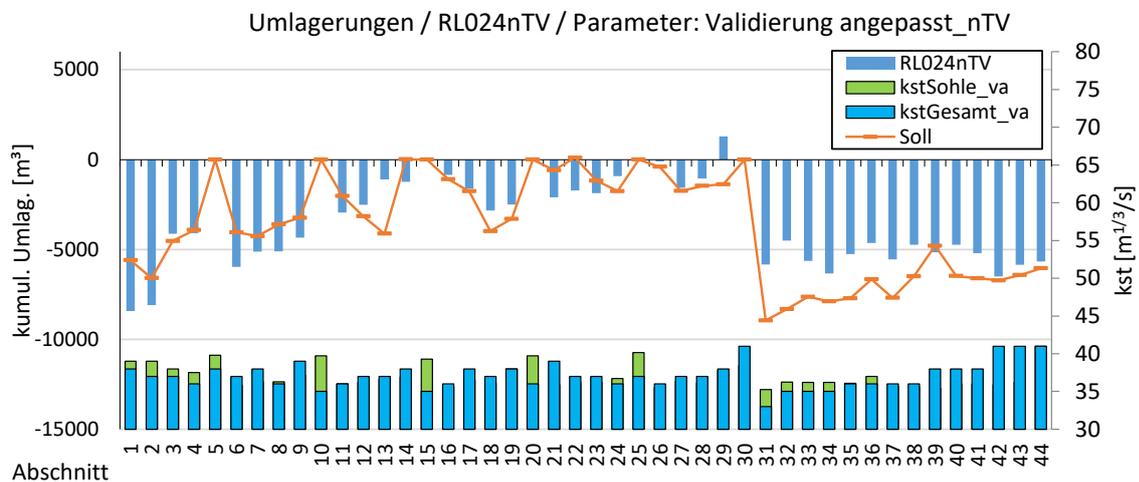
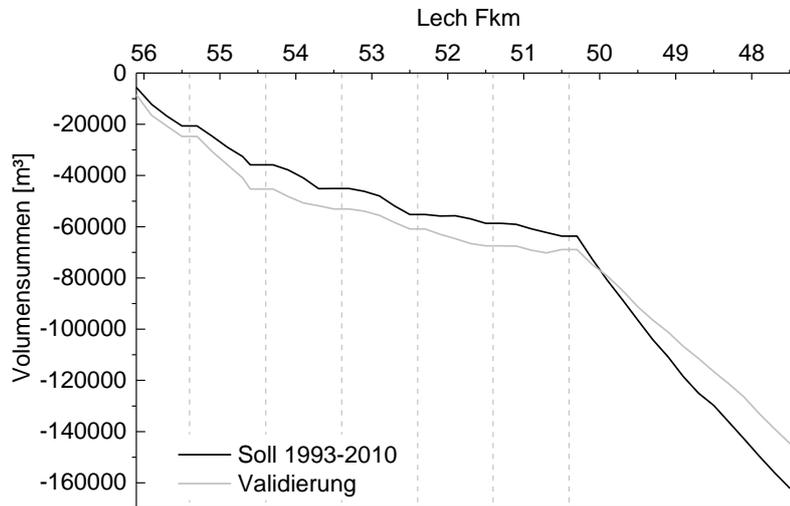


Abbildung 79: Endzustand der kumulierten absoluten Umlagerung für Soll- und Modellierungszustand (Validierungszeitraum); Vergleich der Stricklerbeiwerte aus der Kalibrierung und Validierung

In der nachfolgenden Abbildung sind die Volumensummenlinien für den Validierungszeitraum abgebildet. Die bereits aus dem Ergebnis der absoluten Umlagerungen (siehe Abbildung 79) hervorgeht, weichen die Umlagerungen in den einzelnen Abschnitten gering vom Sollwert ab. Aus den Volumensummenlinien und

dem entstehenden Verlauf kann abgeleitet werden, dass die Umlagerungen gute Ergebnisse liefern.



Validierung	Volumensummen [m³]
Endergebnis der Validierung	-147298
Soll Endzustand Feinkalibrierung 1993 und QP 2010	-162192

Abbildung 80: Volumensummediagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für die Validierung (Teilgebiet 1) und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Abstürzen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt

In Abbildung 81 und 82 sind Zwischenergebnisse der Umlagerungen je Abschnitt für das Hochwasser 1999 und 2005 dargestellt.

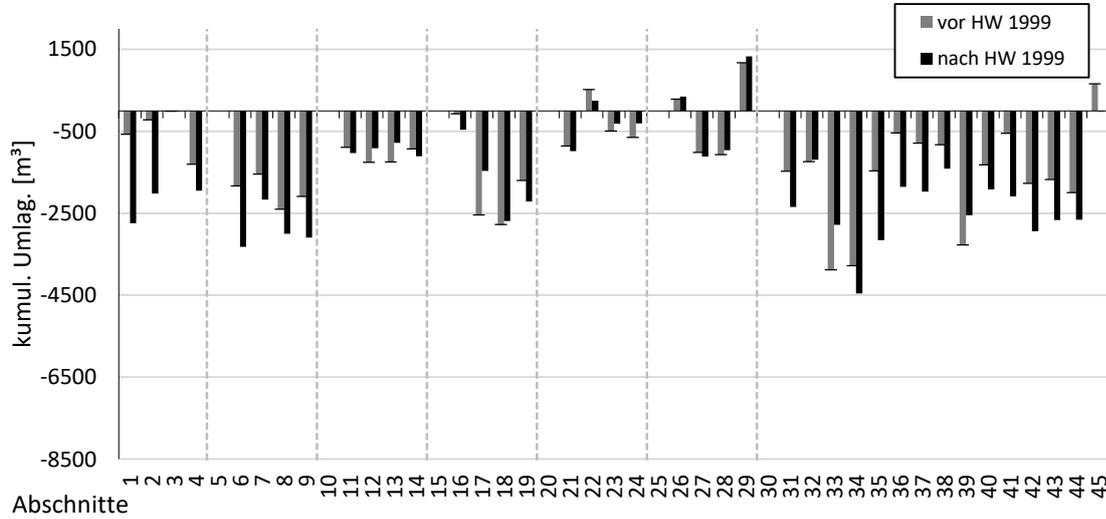


Abbildung 81: Zwischenergebnis der Umlagerungen je Abschnitt aus der Validierungssimulation vor dem Hochwasser 1999 (graue Balken) und nach dem Hochwasser 1999 (schwarze Balken)

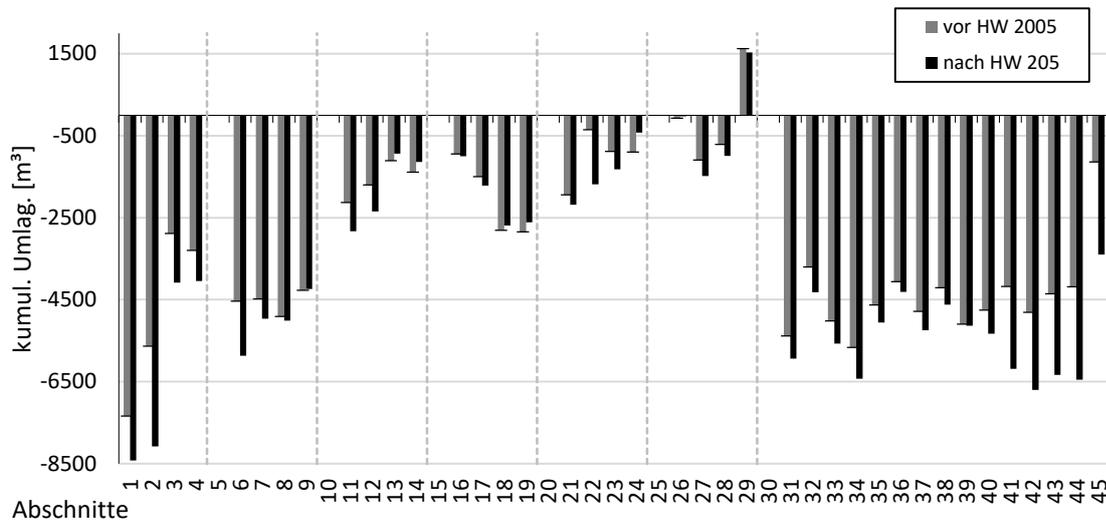


Abbildung 82: Zwischenergebnis der Umlagerungen je Abschnitt aus der Validierungssimulation vor dem Hochwasser 2005 (graue Balken) und nach dem Hochwasser 2005 (schwarze Balken)

4.6 Ergebnisse Validierung "Stadtgebiet"

In diesem Kapitel werden die Modellergebnisse der Validierung im „Stadtgebiet“ untersucht. Die Umlagerung je Abschnitt für den Validierungszeitraum ohne Änderung der Parametereinstellungen ist in Abbildung 83 dargestellt.

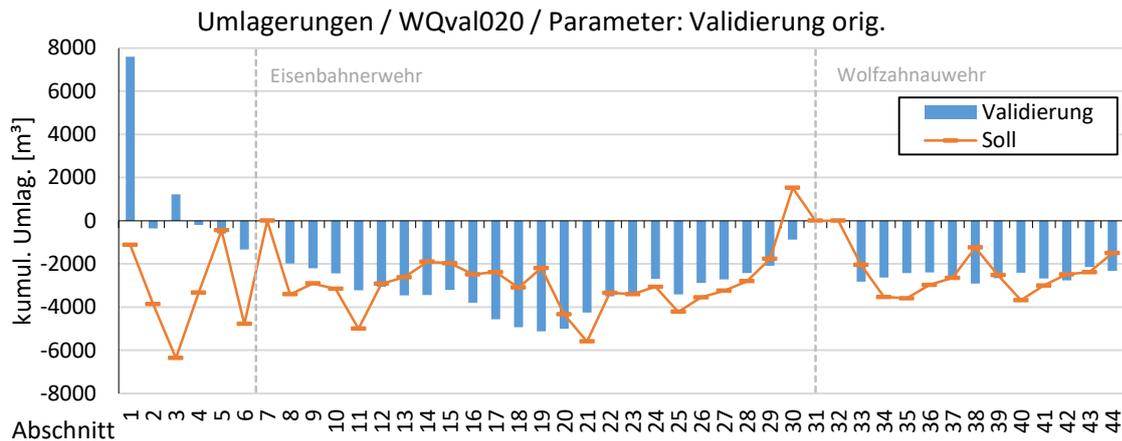


Abbildung 83: ermittelte absolute Umlagerung aus der Validierungsrechnung (blaue Balken) und Soll-Umlagerungen 1993 – 2010 (orange Linie) je Sohlabchnitt

Zwischen Hochablass und Eisenbahnerwehr werden die Erosionen nicht erreicht. Die Geschiebefracht, welche in Hochwassersituationen über den Hochablass transportiert wird, beinhaltet eine gewisse Unsicherheit. Die Umlagerungen in den einzelnen Abschnitten zwischen Eisenbahnerwehr und Wolfzahnauwehr liegen bis auf 4 einzelne Abschnitte im Toleranzbereich von +/- 50 % und liefern gute Ergebnisse für die Validierung. Flussabwärts des Wolfzahnauwehrs erreichen die Soll-Umlagerungen im Validierungszeitraum auch ohne Anpassungen gute Resultate. In der Validierungssimulationsperiode treten zwei nennenswerte Hochwässer auf. In Hochwassersituationen wird das laufende Geschiebe über das Wehr transportiert und lagert sich durch die geringen Schubspannungen flussabwärts des Wehres ab. Diese Anlandungen stehen nach dem Hochwasserereignis zur Wiederauffüllung der Erosionsbereiche zur Verfügung. Dadurch verringern sich die großräumigen Erosionsgebiete wieder. Folglich geht hervor, dass die zeitliche und räumliche dynamische Änderung eines Fließgewässers eine entscheidende Rolle spielt.

Wie bereits aus der Feinkalibrierung ersichtlich wurde, tritt eine Änderung der Kornverteilung im Gewässerbett entlang der Längsachse im Kalibrierungszeitraum auf (siehe Abbildung 84). Aus der Grafik geht hervor, dass kleinere dynamische Änderungen auftreten und im gesamten Gebiet die Kornverteilung gleichmäßiger ist, als flussauf des Hochablasses. Die Kornverteilung im Gewässerbett deutet zusätzlich

darauf hin, dass in einigen Bereichen keine deutliche Deckschicht mehr vorhanden ist. In den Abschnitten vor den Wehranlagen ist die Kornverteilung feiner. Der Manning Strickler-Wert aus dem flächigen mittleren Korndurchmesser zeigt wiederum, dass im gesamten Untersuchungsgebiet die Rauheitsverhältnisse ähnlich sein müssten (siehe Abbildung 85). Das Simulationsergebnis mit dieser Rauheitsveränderung zeigt nachstehendes Bild (siehe Abbildung 86). Es ist zu erwähnen, dass für die Abschnitte 1, 2 und 7 die Rauheitsbeiwerte manuell verändert wurden. Die Sollumlagerungen nach dem Hochablass werden dadurch besser erreicht. Zwischen Eisenbahnerwehr und Wolfzahnauwehr wird die Erosion verstärkt, liegt in einigen Abschnitten dennoch innerhalb der Toleranzgrenze. Flussabwärts des Wolfzahnauwehrs kommt es zu geringeren Erosionen, welche durch die größeren k_{St} - Werte verursacht werden.

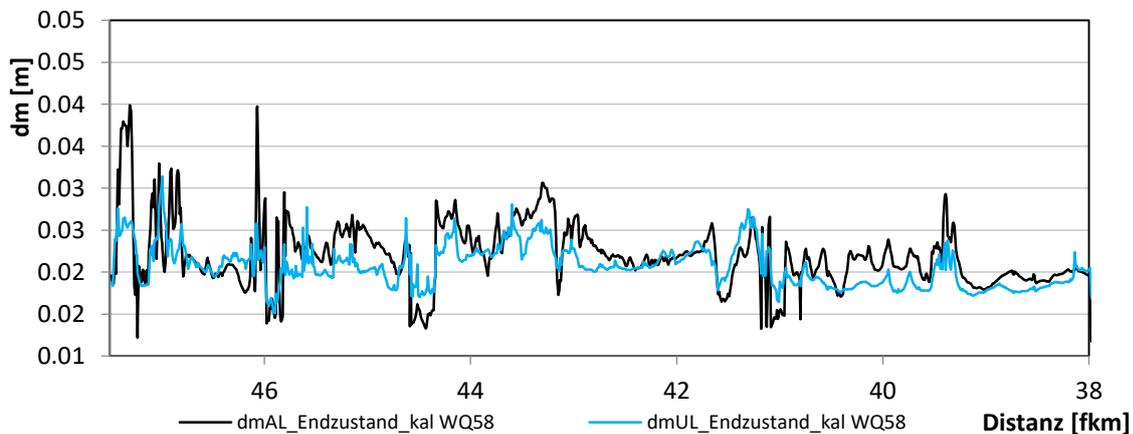


Abbildung 84: maßgebender Korndurchmesser ($d_{m,AL}$, $d_{m,UL}$) entlang der Längsachse (Aufnahme jeweils an einem Punkt in der Gewässerachse) in Teilgebiet 2 Endzustand der Feinkalibrierung

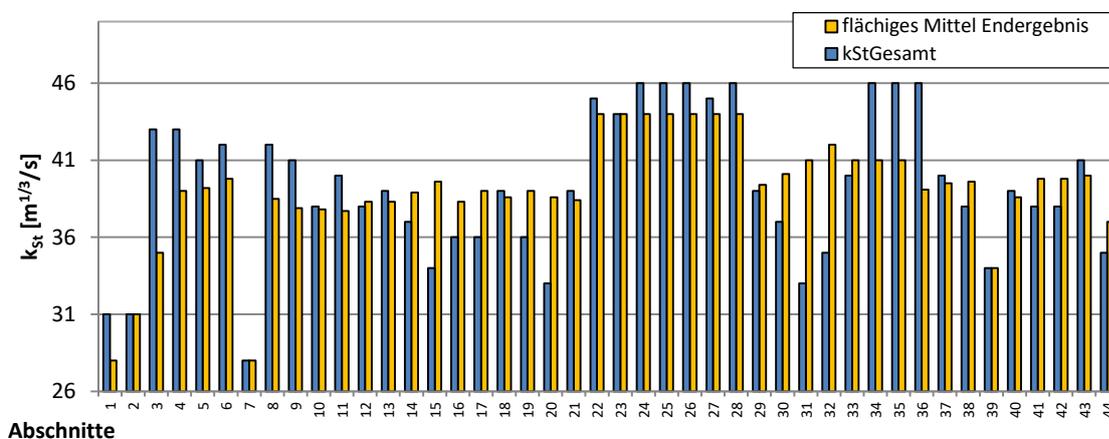


Abbildung 85: Parametereinstellung von k_{St} in der Feinkalibrierung (blaue Balken) und berechnete k_{St} -Werte aus dem flächigen mittleren Korndurchmesser - Endzustand der Feinkalibrierung

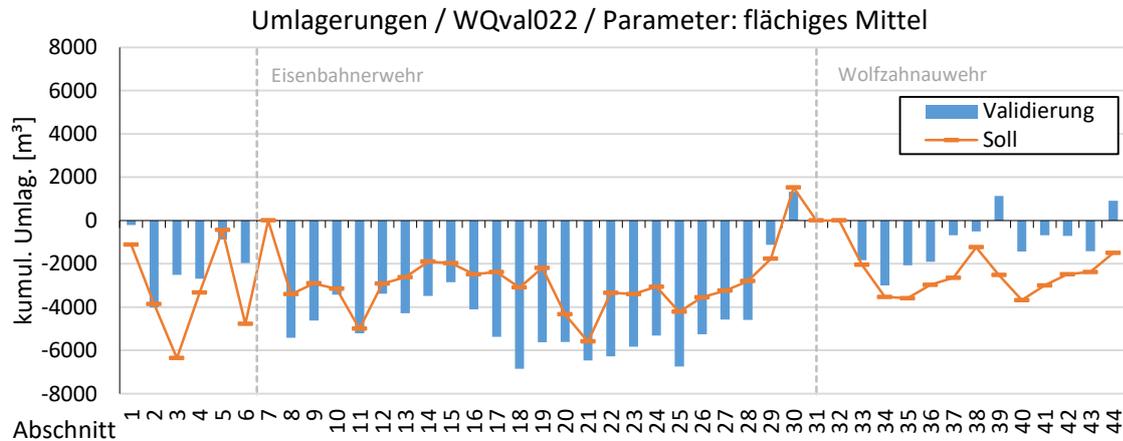


Abbildung 86: ermittelte absolute Umlagerung mit k_{St} -Werten aus dem flächigen mittleren Korndurchmesser der Feinkalibrierung (blaue Balken) je Sohlabschnitt, Soll-Umlagerungen 1993 – 2010 (orange Linie)

Bei einer genaueren Betrachtung der k_{St} – Parametereinstellungen konnten Bereiche festgestellt werden, welche in der Parameteranpassung berücksichtigt werden müssen. In den Abschnitten 1 – 4 muss auf Grund der Unsicherheiten in der Geschiebezugabe und der fehlende Vorlaufstrecke eine manuelle Parameteranpassung mit sehr kleinen k_{St} – Werten angenommen werden. Abschnitte 7, 31 und 32 sind durch die geometrische Veränderung (siehe Kapitel 3.1.4) beeinflusst und werden händisch angepasst. Die Gegenüberstellung der k_{St} – Werte aus der Feinkalibrierung und flächigen mittleren Korndurchmesser (Abbildung 85) zeigen insbesondere zwei Bereiche, welche deutlich von der flächigen mittleren Auswertung der Korndurchmesser abweichen. Dies betrifft die Abschnitte 22 – 28 und die Abschnitte 34 – 36. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass diese Bereiche durch zusätzliche Faktoren beeinflusst werden, wie z.B. die Dynamik zwischen Kiessohle und Feinmaterial aus der Tertiärschicht. Für diese Abschnitte wird ein erhöhter Rauheitsbeiwert angesetzt. Bei Abschnitt 39 muss wiederum ein niedriger k_{St} – Wert angesetzt werden, um das Geschiebeinput aus der Wertach, welcher im Modell vernachlässigt wurde, zu kompensieren. Diese Anpassung musste in der Feinkalibrierung bereits durchgeführt werden. Die Rauheitsanpassung in Abschnitt 44 – 46 ist zielführend, um die Modellauslaufsituation darstellen zu können.

Durch die Anpassung der Manning Strickler-Werte in den einzelnen Abschnitten und der Übernahme der k_{St} – Werte berechnet mit der Formel $k_{st,neu} = 21/d_m^{1/6}$ aus den flächigen mittleren Korndurchmesser des Endzustandes der Feinkalibrierung, war es möglich, eine gute Validierungsrechnung zu erstellen. Resultierend aus den oben genannten Gründen zeigt die Abbildung 87 das Endergebnis der Validierungsrechnung. Zu sehen sind die Umlagerungen in den einzelnen Abschnitten (blaue Balken) und der Soll-Umlagerung zwischen 1993 – 2010 (orange Linie). Das

räumliche Erosionsmuster, welches durch die hydrologischen Verhältnisse geprägt wird, kann sehr gut wiedergegeben werden. Durch die Randbedingungen der Wehranlagen und der relativ gleichmäßig feinen Kornverteilung der Austauschschicht im Stadtgebiet sind die dynamischen Veränderungen kleiner. Mit den Parameteranpassungen aus den oben genannten Gründen wird eine adäquate Validierung erreicht.

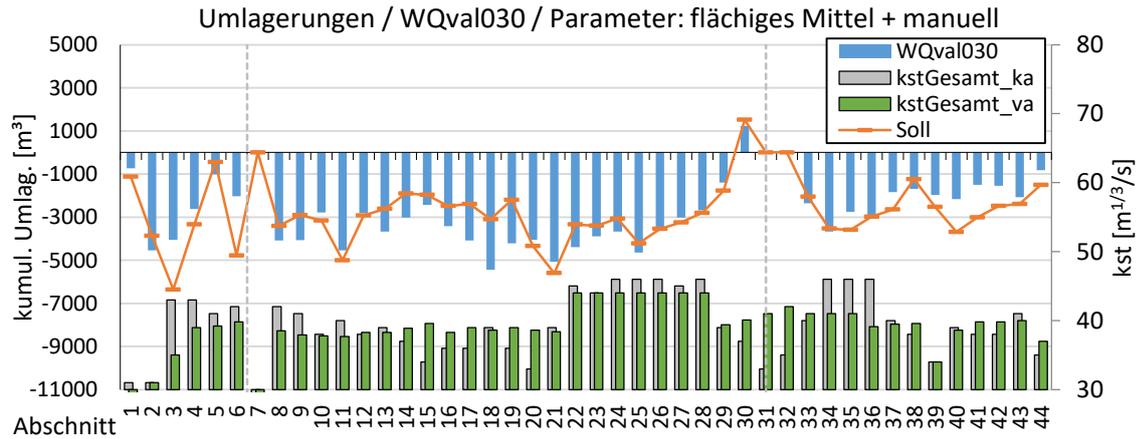
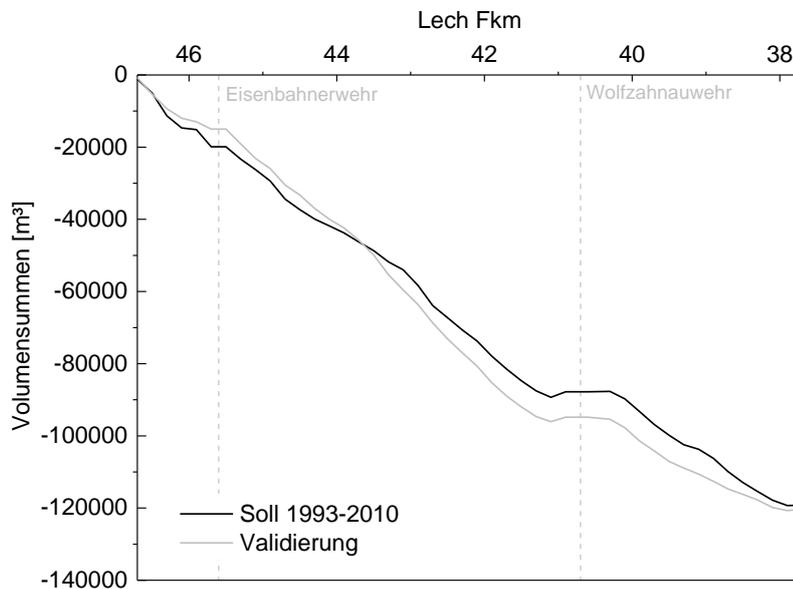


Abbildung 87: Endzustand der kumulierten absoluten Umlagerung für Soll- und Modellierungszustand (Validierungszeitraum); Vergleich der Stricklerbeiwerte aus der Kalibrierung und Validierung

Abbildung 88 zeigt das Endergebnis der Validierung abgebildet als Volumensummenlinien. Demgegenüber wird die Soll – Volumensummenlinie abgebildet. Wie bereits aus dem Ergebnis der absoluten Umlagerung hervorgeht, kann die Volumensumme über die Länge gut abgebildet werden. In einzelnen Abschnitten kommt weicht die Umlagerungssumme von dem Sollwert ab und führt so zu einer leichten Verschiebung. Die Gesamtvolumensummen am Ende des Teilgebietes „Stadtbereich“ liefern sehr gute Ergebnisse.



Validierung	Volumensummen [m³]
Endergebnis der Validierung	-119190
Soll Endzustand Feinkalibrierung 1993 und QP 2010	-120355

Abbildung 88: Volumensummediagramm und tabellarischer Vergleich der Volumensummen für die Validierung (Teilgebiet 2) und dem Sollzustand, Abschnitte nach den Wehranlagen (strichlierte Vertikalen) werden als horizontale Linien dargestellt

In den nachfolgenden Abbildungen sind Zwischenergebnisse der Umlagerungen je Abschnitt für das Hochwasser 1999 und 2005 dargestellt.

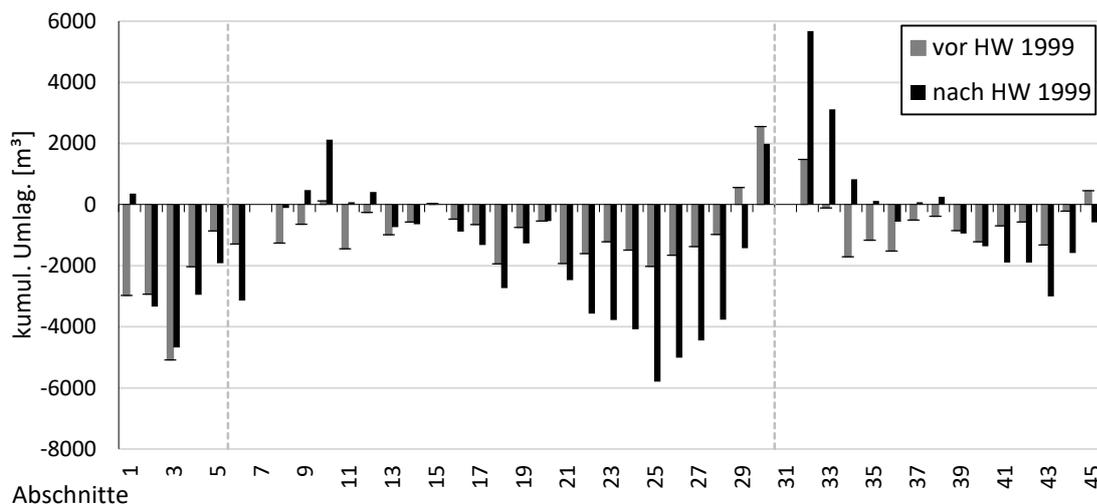


Abbildung 89: Zwischenergebnis der Umlagerungen je Abschnitt aus der Validierungssimulation vor dem Hochwasser 1999 (graue Balken) und nach dem Hochwasser 1999 (schwarze Balken)

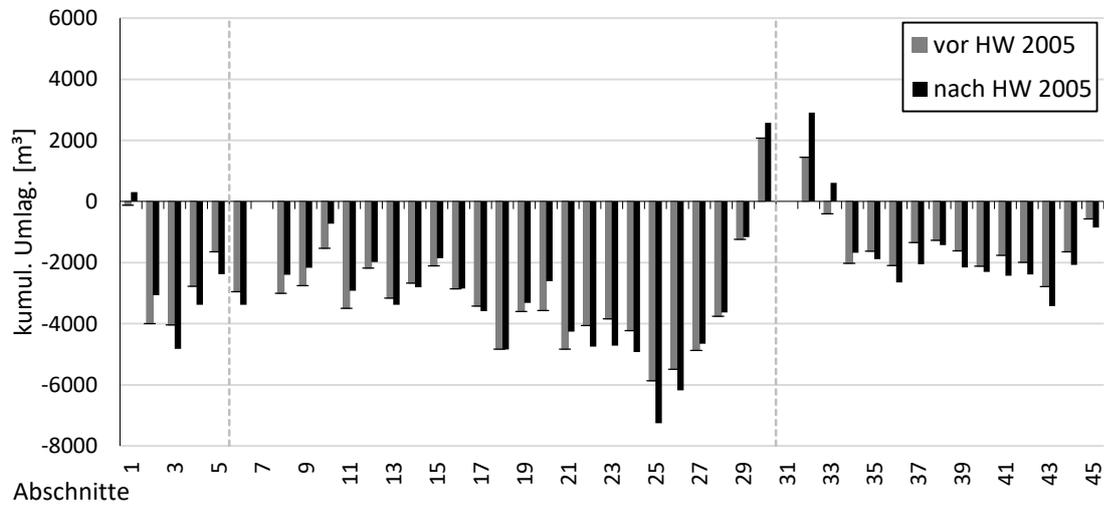


Abbildung 90: Zwischenergebnis der Umlagerungen je Abschnitt aus der Validierungssimulation vor dem Hochwasser 2005 (graue Balken) und nach dem Hochwasser 2005 (schwarze Balken)

5 Sensitivitätsanalyse

Wie bereits im Bericht „Geschiebetransportmodellierung - Modellkonzept“ erwähnt wurde, ist eine Sensitivitätsanalyse ein wichtiger Schritt um Unsicherheiten quantifizieren zu können. In diesem Kapitel wird im Detail die Sensitivität der Starrauheit für die Grobkalibrierung, Geometrieanpassungen Stadtbereich, Sensitivität der Datengrundlage bei den Abstürzen näher erläutert. Die Kappung der Ganglinie mit Q_c (siehe Kapitel 4.1) und die Grob- und Feinkalibrierung (siehe Kapitel 4.3 und 4.4) zählen auch zur Sensitivitätsanalyse und zeigen die unterschiedlichen Ergebnisse.

5.1 Sensitivität - Modell

Die Ausgangssituation („Default-Modell“) hat folgende Parameter, die global im gesamten Modell wirken:

kritische Sohlschubspannung nach Shields θ_{cr}	0,047
Parameter der Austauschschichtdicke pal	0,46 (\cong 7 cm)
Parameter der Austauschschichtdicke pul	17,95 (\cong 63 cm)
Formelskalierfaktor MPM-Formel k_F	0,625
SCFG	3
SCF	3
Q_c	220 m ³ /s

Starrauheit für die Grobkalibrierung

Die Starrauheit für die Grobkalibrierung wurde im Sinne einer Sensitivitätsanalyse variiert. Es wurden zwei Modelle mit Rauheitsbeiwerten nach Strickler von 35 m^{1/3}/s und 37 m^{1/3}/s analysiert. In der nachfolgenden Grafik wird die Abweichung der Volumenänderung in den vordefinierten Sohlabschnitten in Prozent [%] vom „Default-Modell“ dargestellt. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass dieser Parameter Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Als Starrauheit für die Feinkalibrierung wurde der Rauheitsbeiwert nach Strickler von 37 m^{1/3}/s gewählt. Im Zuge der morphodynamischen Feinkalibrierung wird dieser Parameter genau angepasst.

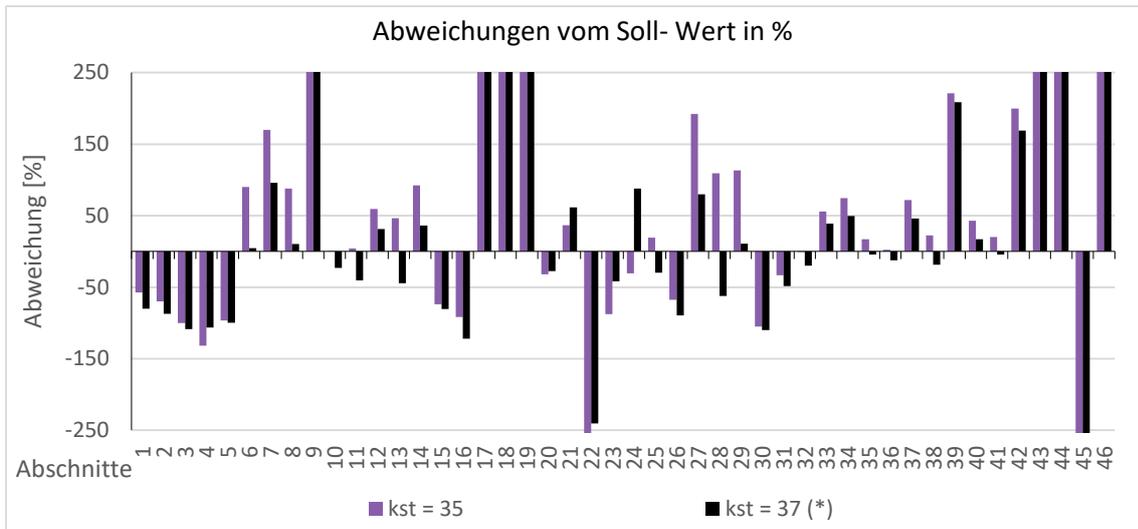


Abbildung 91: prozentuelle Abweichung von der Soll-Volumenbilanz, Ergebnis der unterschiedlichen Startrauheitsbeiwerte nach Manning Strickler

Geometrieadjustungen Stadtbereich

Als Datengrundlage für den geometrischen Ausgangszustand standen, wie bereits erwähnt, Querprofile aus mehreren Jahren zur Verfügung. Bedingt durch diesen Ausgangszustand weist die Gewässersohle für den Startzustand der Kalibrierung im Stadtgebiet einen verlandeten Stauraum vorm Gersthoferwehr auf. Durch diese Randbedingung verändert sich das Abflussverhalten nahe am Wehr. Dem entgegenzuwirken, wurde im Zuge der Sensitivitätsanalyse die Geometrie am Modellauslauf auf die Bezugsszustandssohle von 2010 gesetzt und fixiert.

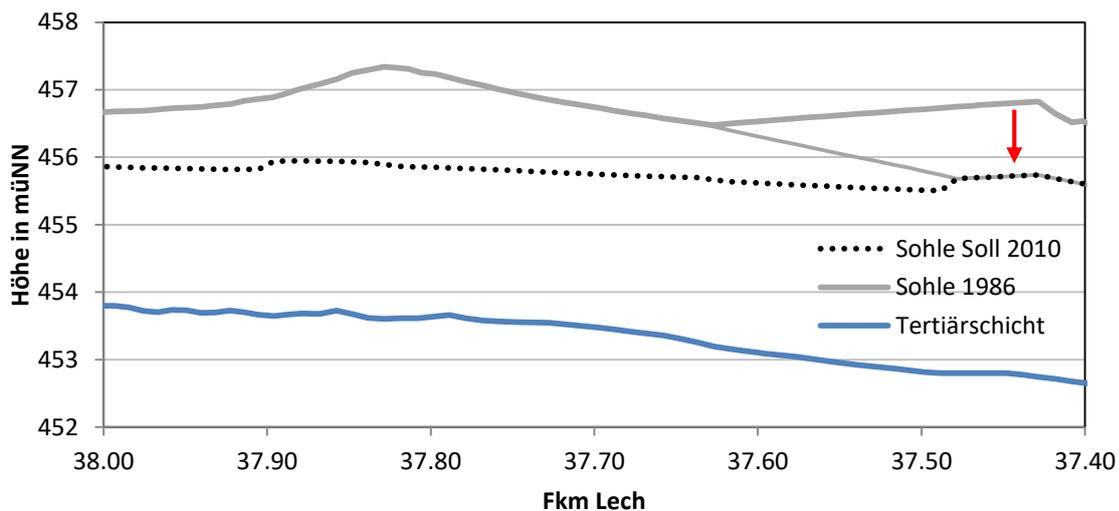


Abbildung 92: Veränderung der Modellgeometrie am Modellauslauf im Teilgebiet 2 „Stadtbereich Augsburg“

5.2 Sensitivität - Parameteranpassung für Variantenrechnung

Durch die morphodynamischen Änderungen der Sohle, welche sowohl eine räumliche als auch zeitliche Bedeutung haben, müssen die Rauheitsbeiwerte in einer Langzeitmodellierung angepasst werden. Resultierend aus den vorangegangenen Untersuchungen wurde versucht, eine Methode für die Parameteranpassung für die Variantenuntersuchungen zu entwickeln. Dazu wurde das Teilmodell 1 „Auwald“ herangezogen und als Zeitraum wurde der Validierungszeitraum für die Analysen verwendet.

Im ersten Ansatz wurde aus dem Endzustand der Feinkalibrierung der mittlere Korndurchmesser je Abschnitt ausgewertet. Ein mathematischer Ansatz von Strickler (1923) wurde für die Berechnung der Rauheitsbeiwerte k_{st} herangezogen. Dieser verwendet den mittleren Korndurchmesser des Sohlmaterials, berücksichtigt jedoch nicht die Sohlformen. Durch die hohen Abflüsse verlieren diese an Bedeutung und werden vernachlässigt.

$$\text{Rauheitsanpassung } k_{st,neu} \rightarrow k_{st} = \frac{21}{d_m^{1/6}}$$

Mit diesem Ansatz können die Veränderungen in der Gewässersohle, speziell der Kornzusammensetzung, welche durch die hydraulischen Belastungen hervorgerufen werden, berücksichtigt werden. Einen Einblick über die veränderten Rauheitsbeiwerte nach Strickler k_{st} gibt die Abbildung 93. In der Abbildung sind in violett die Rauheitsbeiwerte aus der Feinkalibrierung und in blau die gemittelten Rauheitsbeiwerte aus dem Endzustand der Feinkalibrierung dargestellt. Dabei ist hinzuzufügen, dass am Beginn und am Ende der Strecke die Rauheitsbeiwerte fixiert wurden.

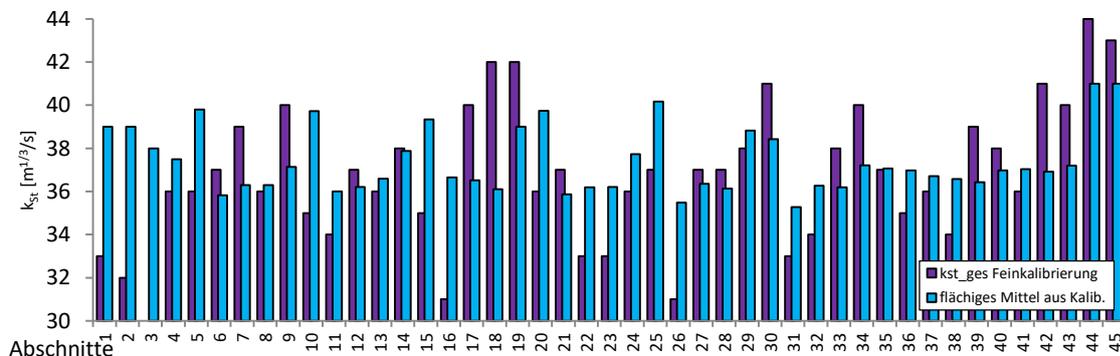


Abbildung 93: Vergleich der Rauheitsbeiwerte Aus Einstellung der Feinkalibrierung Auwald und dem berechneten flächigen Mittel aus der Kalibrierung (Endzustand)

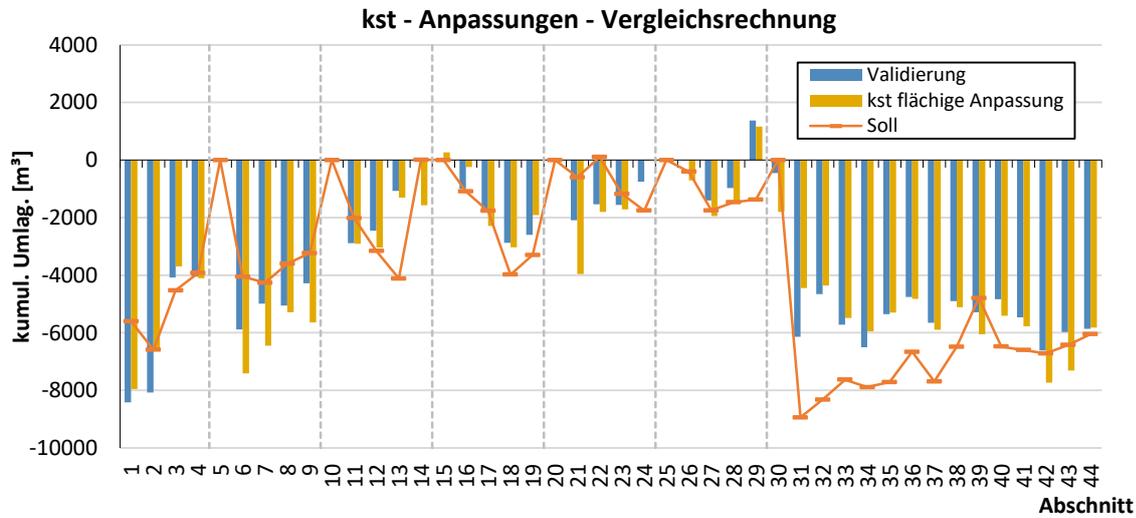


Abbildung 94: ermittelte absolute Umlagerung aus der Validierung (blaue Balken), flächige Rauheitsanpassung aus Endzustand der Feinkalibrierung (gelbe Balken) und Soll-Umlagerungen (orange Linie) je Abschnitt für das Auwaldgebiet

Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Validierungsrechnung. In einzelnen Abschnitten (z.B. Abschnitt 21) kommt es dennoch zu Zielverfehlungen, welche über die gesamte Strecke relativ gering ist. In Abschnitt 31 bis 38 fallen die Umlagerungen geringer aus als der Sollwert. Hier ist zu erwähnen, dass sowohl in der Sollumlagerung, welche aus den Querprofilen abgeleitet wurde, eine Unsicherheit mitberücksichtigt werden muss. Das Ergebnis führt vor Augen, dass durch die Rauheitsanpassung, abgeleitet aus den Endzustand des flächigen mittleren Korndurchmessers der Feinkalibrierung, ein gutes Ergebnis erzielt werden kann.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der mittlere Korndurchmesser aus der Feinkalibrierung noch einmal genauer untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass es Bereiche gibt in welchen eine ungenügende Deckschicht vorhanden ist.

Demzufolge wurde untersucht ob dieser Zustand durch eine Anpassung der Stricklerbeiwerte berücksichtigt werden kann. Im ersten Schritt wurde wiederum eine Anpassung der $k_{st,neu}$ Werte mit Hilfe dem flächigen Mittel der Korngrößen aus der Feinkalibrierung vorgenommen. In jenen Bereichen in welchen $1,30 < \frac{d_{ms}}{d_{mo}} > 1,00$ gilt wurde der $k_{st,alt} - 1$ reduziert. Dies gilt wenn der Korndurchmesser der Deckschicht d_{ms} sich verfeinert und ähnliche Korngrößen wie die Unterschicht d_{mo} erreicht. Dadurch kann die Deckschicht näherungsweise untersucht werden.

- **Test: Verstärkung des Transports bei „ungenügender“ Deckschichtbildung:**
 wenn $1,30 < \frac{d_{ms}}{d_{mo}} > 1,00$ dann $k_{st,neu} = k_{st,alt} - 1$ sonst $k_{st,neu} = \frac{21}{d_m^{1/6}}$

Abbildung 95 zeigt das Ergebnis der Rauheitsanpassung. In Rot sind die Balken dargestellt, welche die Deckschicht mitberücksichtigt haben. Beim Vergleich der beiden Ergebnisse mit leicht veränderten Rauheitsbeiwerten ist zu sehen, dass es zu keiner markanten Veränderung führt. In einzelnen Abschnitten wie z.B. in Abschnitt 24 werden die Sollumlagerungen besser erreicht. Dennoch hat diese Anpassung keine Bedeutung. Für die Variantenuntersuchung ist der Ansatz mit der dynamischen Anpassung der Rauheitsbeiwerte nach Strickler ausreichend.

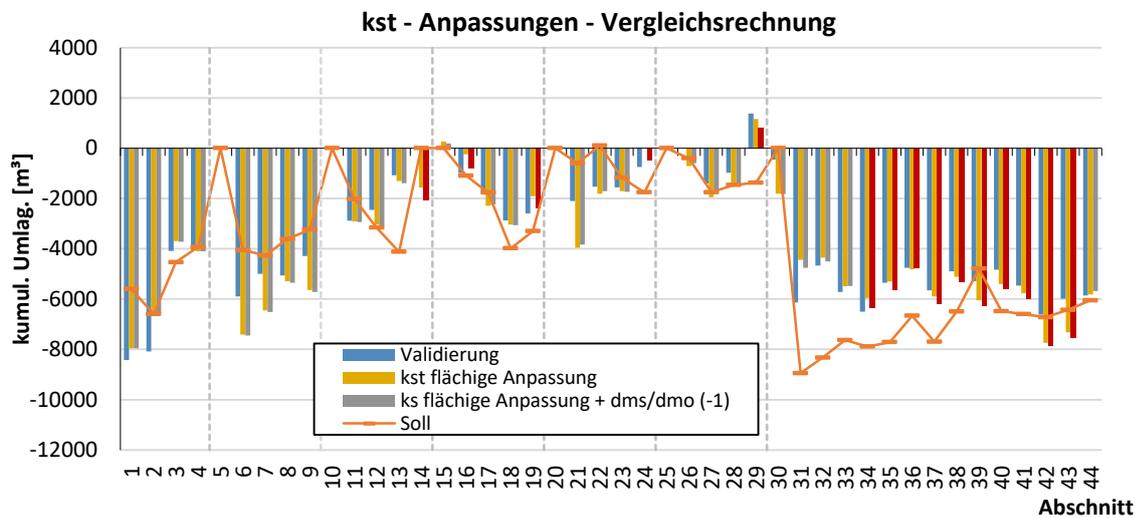


Abbildung 95: ermittelte absolute Umlagerung aus der Validierung (blaue Balken), flächige Rauheitsanpassung aus Endzustand der Feinkalibrierung (gelbe Balken), flächige Rauheitsanpassung mit Berücksichtigung der „ungenügenden“ Deckschicht (graue = flächige Anpassung, rote Balken = Berücksichtigung „ungenügender“ Deckschichtbildung) und Soll-Umlagerungen (orange Linie) je Abschnitt für das Auwaldgebiet

5.3 Einfluss der Geschiebetrift durch den Hochablass auf das Modell „Stadtgebiet Augsburg“

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Hochablasses auf den Geschiebetransport im Stadtgebiet erläutert. Dazu wurde als Extremfall eine Berechnung des Kalibrierzeitraums für das Modell „Stadtgebiet“ ohne Geschiebeeintrag durchgeführt. Das Ergebnis der Kalibrierungssimulation, welches in Abbildung 96 dargestellt ist, zeigt, dass die fehlende Geschiebezufuhr lediglich einen Einfluss auf die ersten Abschnitte hat. Das Erosionsvolumen ist gegenüber dem Ergebnis der Feinkalibrierung größer und liegt über der Soll-Umlagerung (1986 – 1993). Flussabwärts des Eisenbahnerwehres reduzieren sich die Unterschiede zwischen den beiden Ergebnissen. Die Abschnitte flussabwärts des Wolfzahnauwehres zeigen keine nennenswerten Unterschiede. Bei geschiebeführenden Abflüssen ist die Kiesschleuse des Hochablasses gemäß der Betriebsanordnung geöffnet. Somit werden die Ergebnisse der Feinkalibrierung mit kontinuierlicher Geschiebeweitergabe als realitätsnah angesehen.

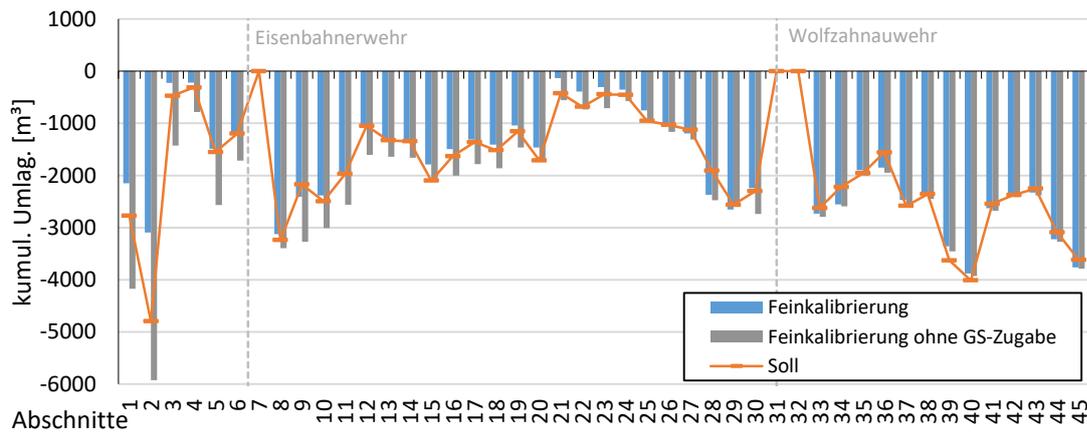


Abbildung 96: ermittelte absolute Umlagerung aus der Feinkalibrierung (blaue Balken), absolute Umlagerungen ohne Geschiebezugabe (graue Balken) und Soll-Umlagerungen (orange Linie) - Stadtgebiet