



Sedimentmanagement Obere Isar

Flussmorphologische Grundlagenstudie



wasser



Auf einen Blick ...

Titel:	Sedimentmanagement Obere Isar: Flussmorphologische Grundlagenstudie
Themenbereiche:	Wasser
Stand:	November 2023
Herausgeber:	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Redaktion:	LfU, Markus Reisenbüchler, Gabriele Schwaller
Ausgabe:	Neuaufgabe (Stand Dezember 2023)
Shop-Link:	https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_was_00336.htm

Für wen die Publikation interessant ist

Wasserwirtschaftsämter, Umweltverbände, Kraftwerksbetreiber, Gemeinden in der Region Obere Isar

Warum sie relevant ist

- Die Veröffentlichung gibt einen Überblick über die flussmorphologische Entwicklung der Oberen Isar von der Landesgrenze bis zum Sylvensteinspeicher, unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse über fast 100 Jahre.
- Die Ausarbeitung ist damit auch Grundlage für weiterführende Untersuchungen zum Schutz und Erhalt der wertvollen Fließgewässerlandschaft, unter Berücksichtigung einer möglichen Neuverbescheidung des Walchenseesystems im Jahr 2030.
- Die verwendeten Methoden und erzielte Ergebnisse lassen sich auf andere Flusssysteme mit ähnlichen Fragestellungen übertragen.

Was neu ist

- Zusammenhängender Abriss der historischen, flussbaulichen Maßnahmen an der Oberen Isar
- Ganzheitlicher Überblick über die vorhandenen Daten und Studienlage zur Flussmorphologie der Oberen Isar
- Einheitliche Auswertung und Gegenüberstellung der maßgebenden flussmorphologischen Kenngrößen für die Isar und des Reißbachs, einer der maßgebenden Zuflüsse in diesem Abschnitt, unter anderem mittels
 - Abflussbilanzierungen
 - Grundwasserentwicklung
 - Höhenentwicklung der Gewässersohle
 - Entnahmestatistik

Hier gibt es mehr zum Thema ...

Homepage des LfU Bayern / Wasser / Flussmorphologische Studien



Sedimentmanagement Obere Isar

Flussmorphologische Grundlagenstudie

Impressum

Sedimentmanagement Obere Isar: Flussmorphologische Grundlagenstudie

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

LfU: Dr. Markus Reisenbüchler, Dr. Gabriele Schwaller

Redaktion:

LfU, Dr. Markus Reisenbüchler, Dr. Gabriele Schwaller

Titelbild:

LfU, Frank Herrmann

Bildnachweis:

Alle Abbildungen LfU, außer:

LDBV, Luftbild: Abb. 1, 2, 3, 12 (modifiziert), 18 (modifiziert)

StMUV, Birgit Heinrich: Abb. 4

Karten: Fachdaten: Bayerisches Landesamt für Umwelt; Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung (2022) und © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2022): Abb. 5, 9

Ertl (1948): Abb. 10

Schaipp (2006): Abb. 11, 14 (modifiziert), 15 (modifiziert), 16

Hubert (2022): Abb. 19, 20, 21

Wasserwirtschaftsamt Weilheim: Abb. 22 (modifiziert)

Reich und Rethschulte (2021): Abb. 59, 60, 61

Stand:

November 2023

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
1 Einleitung	6
1.1 Leitbild verzweigtes Gerinnesystem	7
2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage	8
2.1 Untersuchungsgebiet	8
2.2 Abfluss und Wasserstand	11
2.3 Grundwasser	14
2.4 Flussquerprofile	14
2.5 Korngrößenverteilung	17
2.6 Weitere morphologische Kenngrößen	18
3 Ergebnisse	19
3.1 Flussgeschichte	19
3.1.1 Historischer Zustand	19
3.1.2 Mittenwalder Korrektion und weitere Ufersicherungen	19
3.1.3 Bau der Ausleitungen an der Isar und Nebengewässern	20
3.1.3.1 Krüner Wehr	20
3.1.3.2 Rißbachwehr	22
3.1.3.3 Weitere Ausleitungen im Untersuchungsgebiet	23
3.1.4 Historisches Sedimentmanagement	23
3.1.5 Dynamisierungsmaßnahmen	26
3.1.6 Weitere Einflussfaktoren	27
3.1.6.1 Geschiebeeintrag aus Österreich	27
3.1.6.2 Anthropogene Nutzungen an der Oberen Isar	27
3.1.6.3 Änderungen durch Klimawandel	27
3.2 Flussmorphologische Entwicklungen	30
3.2.1 Abflussentwicklung	30
3.2.1.1 Krüner Wehr	31
3.2.1.2 Rißbachwehr	32

3.2.1.3	Betriebliche und konzeptionelle Spülungen	33
3.2.1.4	Hochwasserereignisse	33
3.2.2	Grundwasser	35
3.2.3	Feststoffhaushalt und Flussbettentwicklung	36
3.2.3.1	Isar von der Landesgrenze bis zur Vorsperre	36
3.2.3.2	Rißbach	45
3.2.3.3	Isar Krüner Wehr bis Weberwiese	47
3.2.3.4	Isarzuflüsse	49
3.2.3.5	Transportlängsschnitt Obere Isar	51
3.2.4	Korngrößenverteilungen	53
3.2.5	Morphologische Typisierung	56
3.2.6	Dynamik des Talwegs	58
4	Weiteres Vorgehen	61
4.1	Wiederherstellung eines verzweigten Fließgewässersystems	61
4.2	Datenerhebung	61
4.3	Numerische Sedimenttransportmodellierung	61
5	Literaturverzeichnis	62
6	Abbildungsverzeichnis	64
7	Tabellenverzeichnis	68
8	Anhang	69
8.1	Korngrößenverteilung der Isar	69
8.2	Klimaprojektion des Niedrigwasserhaushalts am Pegel Mittenwald	70
8.3	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar	71
8.4	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar	73
8.5	Längsschnitt der Mittleren Sohle des Rißbachs	75
8.6	Detaillierte Betrachtung zwischen Krüner Wehr und Weberwiese	76

Kurzfassung

Seit mehreren Jahrzehnten ist die Obere Isar oberhalb des Sylvensteinspeichers stark von der Wasserüberleitung zum Walchenseekraftwerk geprägt, was den natürlichen Abfluss- und Sedimenthaushalt verändert hat. Im Jahr 2030 läuft die wasserrechtliche Zulassung des Walchenseekraftwerks und der damit verbundenen Anlagen – im Weiteren als „Walchensee-System“ bezeichnet – aus. Im Zuge der vorgesehenen Neuverbescheidung des Walchensee-Systems ist der Sedimenthaushalt an der Oberen Isar zu untersuchen. Mit einem angepassten Sedimentmanagement sollen die flussmorphologischen Voraussetzungen zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung von Lebensräumen für die typischen Lebensgemeinschaften des alpinen Fließgewässers geschaffen werden.

Die vorliegende Grundlagenstudie stellt den ersten Baustein für ein angepasstes Sedimentmanagementkonzept dar. Dafür wurden die verfügbaren flussmorphologischen Daten im Projektgebiet aufbereitet und vergleichend gegenübergestellt. Insbesondere die Flussquerprofile sind dabei eine wichtige Informationsquelle. Der räumliche Umgriff der Studie umfasst die Isar von Scharnitz über Mittenwald und Krün bis zur Vorsperre des Sylvensteinspeichers, einschließlich des Reißbachs von der Reißbachüberleitung bis zur Mündung in die Isar.

Die Auswertung wurde ergänzt durch einen historischen Abriss über das bisherige Sedimentmanagement, welches fast 100 Jahre abdeckt. Die besonders gute Datenlage an der Isar ermöglicht es, die flussmorphologische Entwicklung weitgehend nachzuvollziehen und die ablaufenden Prozesse darzustellen. Aufbauend auf dieser Studie werden in einem nächsten Schritt, mittels einer numerischen Sedimenttransportmodellierung, detaillierte Varianten für ein optimiertes Sedimentmanagement untersucht und konkrete Vorschläge für das Wasserrechtsverfahren erarbeitet.

1 Einleitung

Die Obere Isar ist von besonderer naturschutzfachlicher Bedeutung (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2002). Der Abschnitt zwischen der Ortschaft Wallgau und dem Sylvensteinspeicher gilt als eine der letzten Wildflusslandschaften in Bayern und Deutschland. In diesem Bereich ist die Isar weitgehend unverbaut und kann sich je nach Abflusssituation frei im Tal bewegen. Besonders schützenswerte Arten finden dort ihren Lebensraum. Dennoch ist die Strecke nicht in einem komplett natürlichen Zustand, und die Einflüsse des Menschen prägen das Gewässer seit über 100 Jahren. Insbesondere der Bau des Walchenseekraftwerks hat die Fließgewässerlandschaft deutlich verändert. Seit dem Jahr 1924 wird Wasser der Isar und weiteren, kleineren Flüssen entzogen und zum Walchensee übergeleitet. Dadurch wurde das natürliche Einzugsgebiet des Sees von ehemals 75,5 km² auf 795,5 km² verzehnfacht und die Energieerzeugung am Walchenseekraftwerk erhöht.

Die Obere Isar ist aktuell stark von der Wasserüberleitung am Krüner Wehr beeinflusst und führt weitgehend nur noch die festgelegte Mindestwasserabgabe. Das dafür genutzte Wehrbauwerk unterbricht zudem das natürliche Sedimentkontinuum. Sedimente lagern sich im Stauration ab und werden, wenn betrieblich nötig, ins Unterwasser gespült. Der durch die Ausleitung reduzierte Abfluss scheint nicht mehr in der Lage zu sein, das ankommende Geschiebe über die angrenzenden Ortsbereiche Krün und Wallgau hinaus transportieren zu können. Dies führt zu Ablagerungen und damit zu einer höheren Gewässersohle, was den Hochwasserschutz dieser angrenzenden Orte gefährdet. Daher erfolgt jeweils bei Erreichen einer wasserrechtlich festgelegten Interventionskote in festgelegten Entnahmebereichen eine Ausbaggerung von Geschiebe. Dieses Ungleichgewicht zwischen Abfluss- und Sedimentverfügbarkeit hat auch Auswirkungen auf die unterhalb anschließende Fließgewässerlandschaft. In verschiedenen Studien wurde ein Rückgang des Verzweigungsgrades des Fließgewässers, ein untypisch hoher Anteil an Feinsedimenten und eine zunehmende Verbuschung durch Weidengewächse festgestellt (Reich 2005; Reich et al. 2008; Reich und Rethschulte 2021; Schaipp und Zehm 2009). Weiter flussabwärts, zwischen der Mündung des Reißbachs in die Isar bis zur Vorsperre am Sylvensteinspeicher ergibt sich jedoch ein anderes Bild. In diesem Bereich ist das Weidenwachstum nicht so stark ausgeprägt, und es dominieren die für die Region typischen alpinen Fließgewässer-Lebensgemeinschaften (Lebensraumtypen und Arten der Natura 2000 Richtlinie) in jungen, für einen Wildfluss typischen Sukzessionsstadien. Ebenso weist der Reißbach, trotz weitgehender Totalausleitung, einen ausgeprägt verzweigten Charakter und vegetationsfreie Kiesflächen auf (Haas 2006).

Im Zuge der Neuverbescheidung des Walchensee-Systems bis zum Jahr 2030 können die Randbedingungen dieses Systems neu ausgerichtet werden. Ein Ziel der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung ist die Wiederherstellung einer verzweigten Fließgewässerlandschaft und deren nachhaltiger Schutz. Einen wichtigen Baustein dafür stellt dabei der Sedimenthaushalt mit entsprechendem Abflussgeschehen dar, da ein ausgeglichenes Wechselspiel zwischen Erosion und Anlandung maßgeblich die Fließgewässerlandschaft und die natürliche Ausprägung und Verteilung der alpinen Fließgewässer-Lebensraumtypen bestimmt.

Um die morphologischen Randbedingungen der Neuverbescheidung zu definieren, wurde der behördenübergreifende *Arbeitskreis Geschiebemanagement* gegründet und daraus wiederum das Projekt *Sedimentmanagement Obere Isar* geschaffen, unter Federführung des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU), Referat 63. Das Projekt besteht aus dieser flussmorphologischen Grundlagenstudie und einer anschließenden numerischen Sedimenttransportmodellierung. Die Grundlagenstudie ist wie folgt aufgebaut: Beschreibung des Untersuchungsgebietes und Überblick über die verfügbaren Daten (Kapitel 2), historische Entwicklung der Isar und Datenanalyse mit Zusammenstellung der Ergebnisse (Kapitel 3), Konsequenzen und weiterer Handlungsbedarf (Kapitel 4).

1.1 Leitbild verzweigtes Gerinnesystem

Vorherrschendes Leitbild an der Oberen Isar ist eine dynamische, sich regelmäßig umlagernde Fließgewässerlandschaft ohne festgelegtes Gewässerbett. Charakteristisch dafür ist ein netzartiges System von Flussarmen mit ständiger Laufverlagerung des Hauptstromes und seiner Nebengerinne. Wird durch den hohen Geschiebeeintrag eine Rinne aufgefüllt, sucht das Wasser sich einen neuen Weg direkt daneben, bis das nächste Hochwasser einen anderen Arm zum Hauptstrom weitet (Mangelsdorf et al. 1990). Durch das relativ steile Gefälle besteht eine natürliche Tendenz zur Tiefenerosion. Das eingetragene Geschiebe wirkt jedoch einer Eintiefung entgegen. Erosion und Sedimentation stehen in einem dynamischen Gleichgewicht, so dass die Gewässersohle insgesamt stabil bleibt. Daher gilt, dass sich nur bei entsprechend großer Gerinnebreite und ausreichender Sedimentzufuhr von grobem, bettbildendem Geschiebe durch das fließende Wasser ein verzweigtes Gerinnesystem ausbildet. Nimmt die Gewässerbreite oder die Geschiebemenge ab, reduziert sich der Verzweigungsgrad und der Fluss bildet eine dominante Hauptrinne aus (Marti 2006). Bei Sedimentüberschuss erhöht sich hingegen der Verzweigungsgrad (Germanoski und Schumm 1993). Dieses dynamische System ist Grundlage für die an der Oberen Isar typischerweise vorkommenden Fließgewässerlebensgemeinschaften der Lebensraumtypen (LRT) 3220 „Alpine Flüsse mit krautiger Ufervegetation“, 3230 „Alpine Flüsse mit Ufergehölzen von *Myricaria germanica*“ und 3240 „Alpine Flüsse mit Ufergehölzen von *Salix eleagnos*“ der Natura 2000-Richtlinie sowie für das Vorkommen typischer Wildfluss-Tier- und Pflanzenarten wie Tamariske, Alpen-Steintäschel und Gefleckte Schnarrschrecke.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

In folgendem Kapitel wird das Untersuchungsgebiet räumlich abgegrenzt und die flussmorphologische Datengrundlage aufgeführt.

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Obere Isar im Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Landesgrenze südlich von Mittenwald (ca. FKM 264,00) bis zur Geschiebevorsperre am Sylvensteinspeicher (ca. FKM 230,00). Entlang dieser rund 34 km langen Fließstrecke hat die Isar mehrere Zuflüsse und passiert zahlreiche Sohlenbauwerke und Brücken. Größter Zubringer der Isar ist dabei der Reißbach, weswegen dieser in der Studie besonders betrachtet wird. Folgende Abbildungen (Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3) geben einen Eindruck von der Beschaffenheit der Oberen Isar:

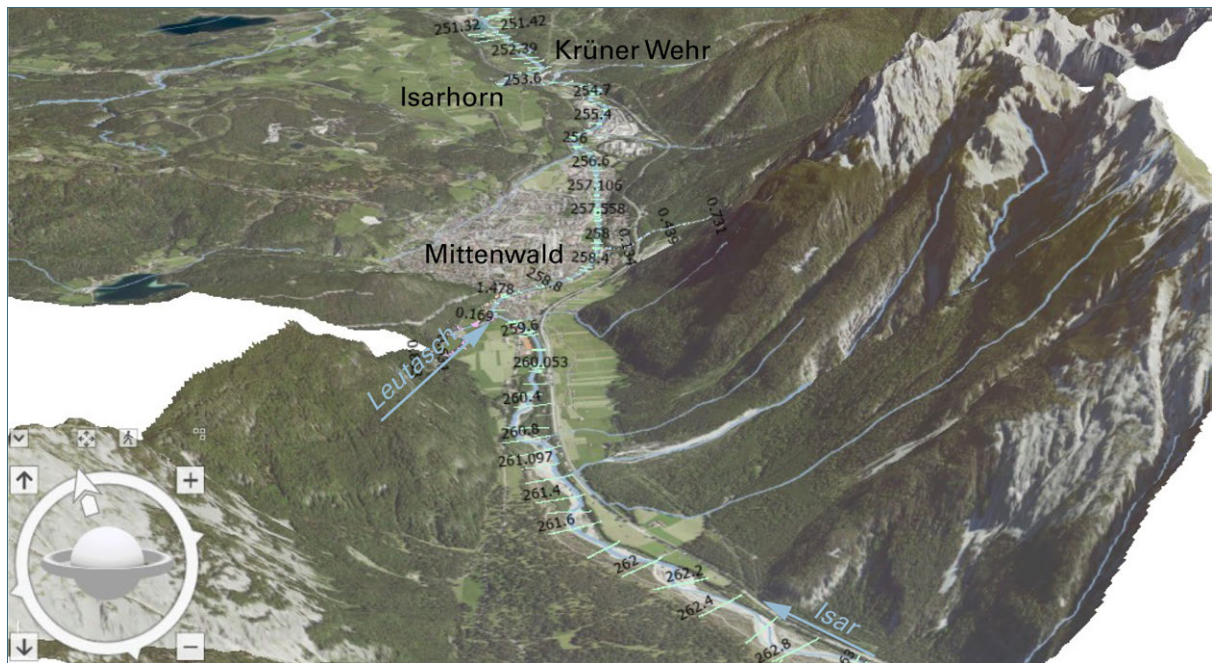


Abb. 1: 3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen von der Landesgrenze über Mittenwald bis zum Krüner Wehr

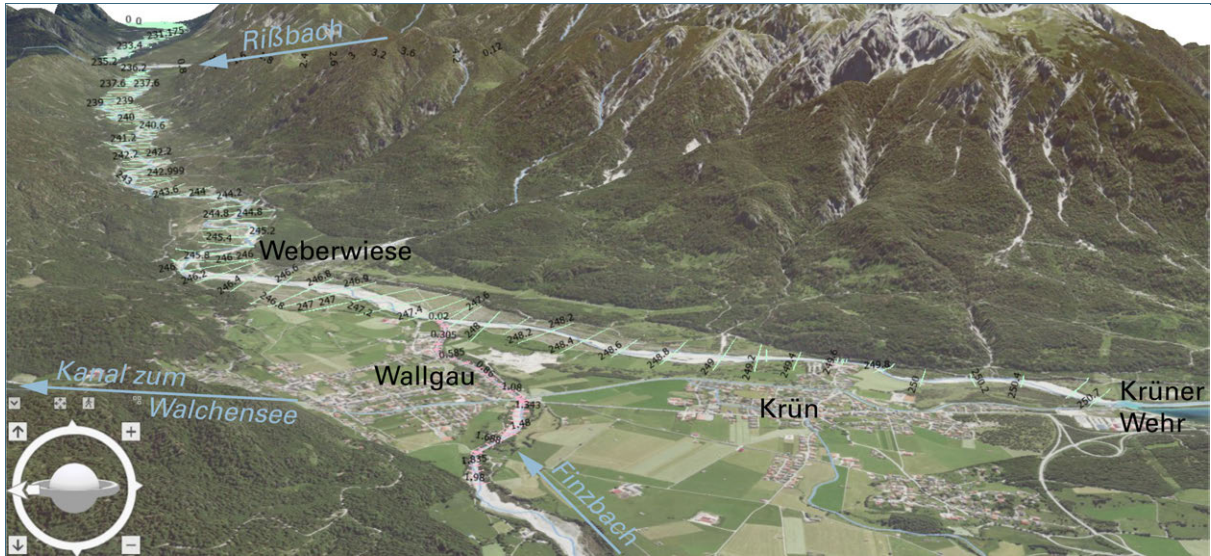


Abb. 2: 3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen vom Krüner Wehr über Finzbach- und Rißbachmündung zum Sylvensteinspeicher



Abb. 3: 3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen des Rißbachs mit Einmündung in die Isar

Das Schaubild in Abb. 4 gibt einen Überblick über das gesamte Walchensee-System im aktuellen Zustand mit den Ausleitungen und Mindestwasserregelungen.

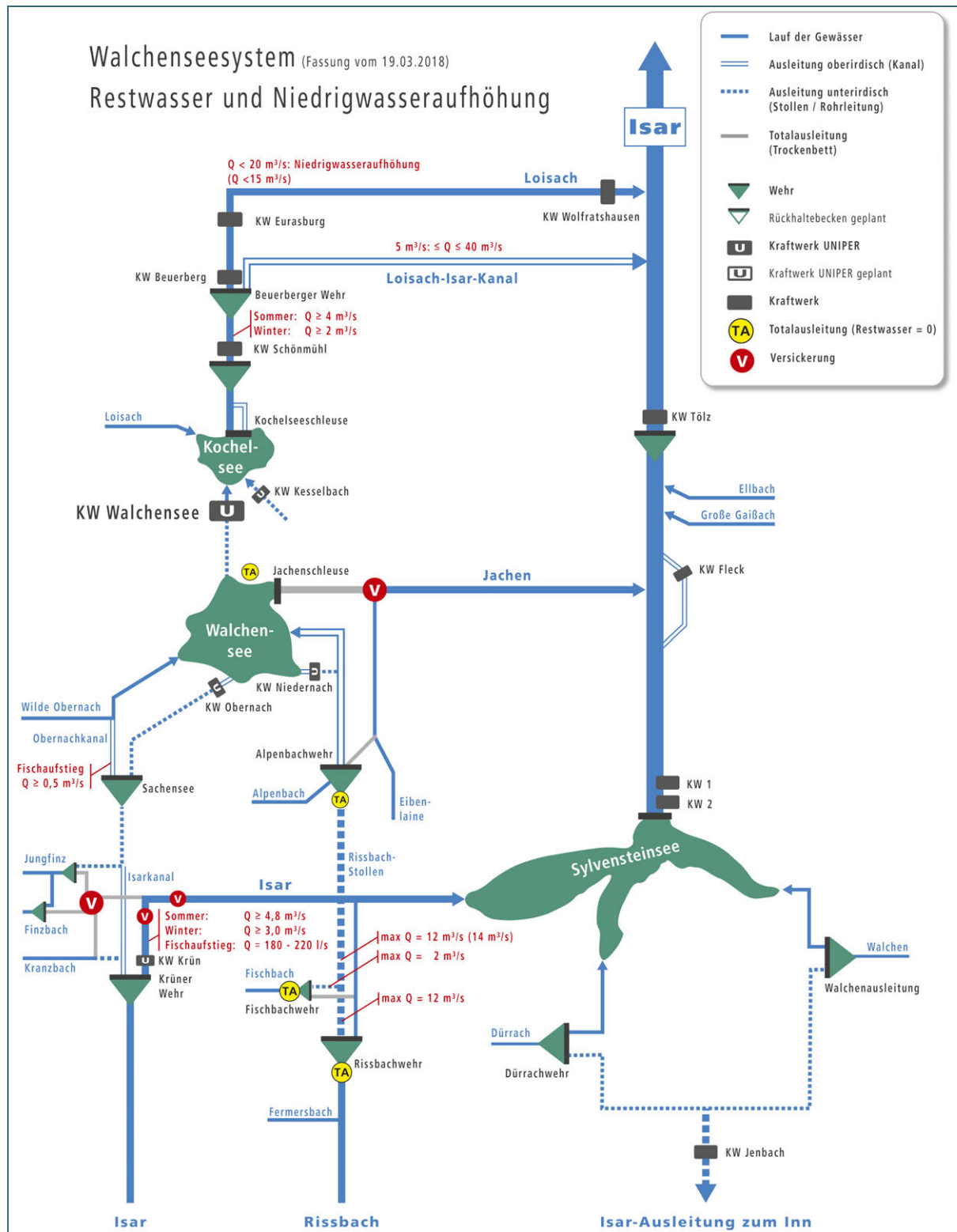


Abb. 4: Walchensee-System

Die Karte in Abb. 5 gibt einen Überblick über die verfügbaren und in der vorliegenden Studie genutzten Pegelstationen. Diese Informationen lassen sich im Detail im UmweltAtlas Bayern und dem Gewässerkundlichen Dienst Bayern nachvollziehen.

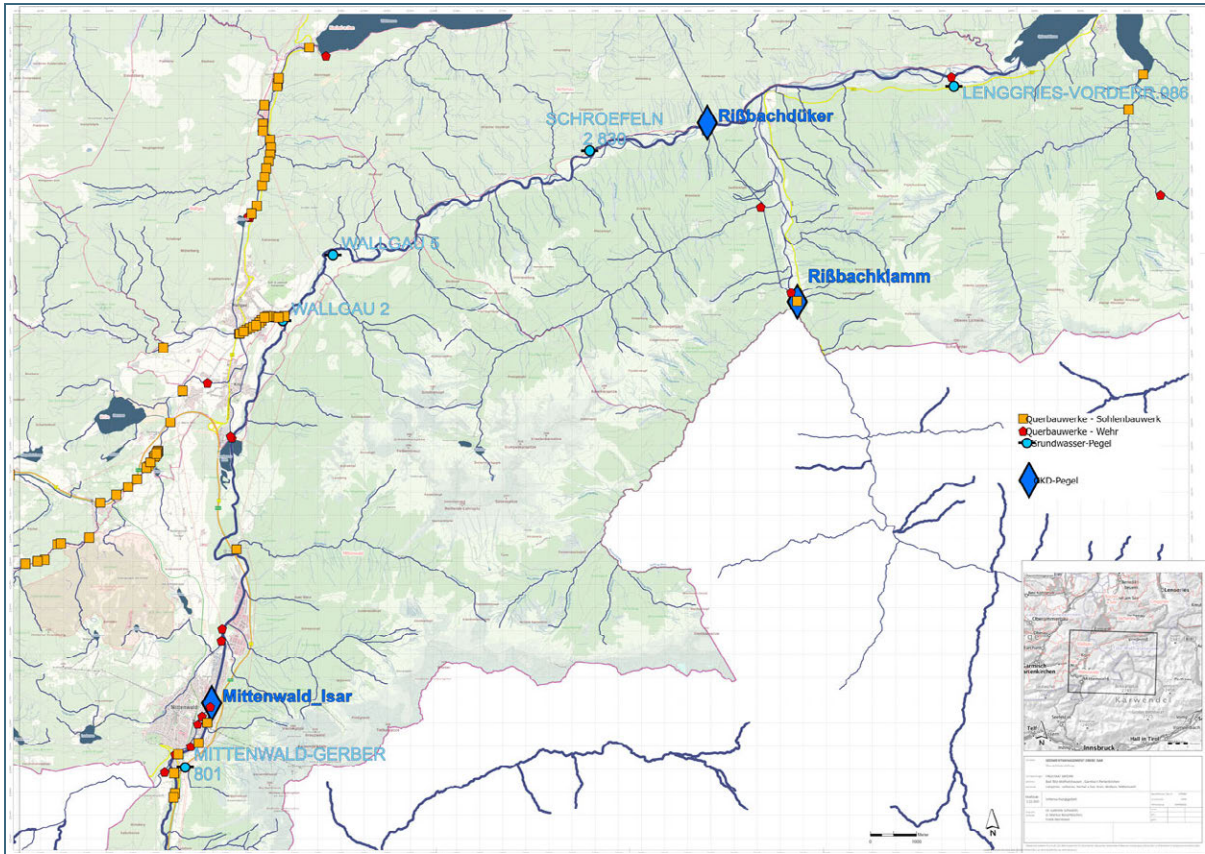


Abb. 5: Übersichtskarte für Pegelstationen für Abfluss und Wasserstand (blaue Raute) und Grundwasser (hellblaue Kreise), sowie Querbauwerke (rot/gelb)

2.2 Abfluss und Wasserstand

Im Untersuchungsgebiet sind die folgenden Pegelstationen für Abfluss und Wasserstand vorhanden, die Messwerte in 15-minütigen Intervallen bereitstellen (Tab. 1). Ergänzend zu den Pegeldaten der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung aus dem Gewässerkundlichen Dienst Bayern (GKD), stellte der aktuelle Betreiber, die Uniper Kraftwerke GmbH (UNIPER), Daten am Krüner Wehr und Rißbachwehr bereit. Während die GKD-Daten weitgehend fachlich geprüft sind, sind die Daten der UNIPER Rohdaten und beinhalten mehrere Lücken. Insbesondere während der so genannten Stauraumspülungen liefern die Messgeräte keine Werte oder geben Fehlwerte aus. Allerdings können die Verläufe abgeleitet werden, da Beginn und Ende sowie wiederkehrende Muster erkennbar sind.

Tab. 1: Überblick über die Wasserstand-Abfluss-Pegel im Projektgebiet

Stationsname	Gewässer	Flusskilo- meter [FKM]	Beschreibung	ID	Zeitraum		Quelle
					Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	
Mittenwald_Isar	Isar	257,51	oberhalb Krünerwehr	16000708	01.11.1970 – heute	15.06.1971 – heute	GKD
Rißbachdüker	Isar	236,70	oberhalb Rißbach	16001303	01.11.1980 – heute	01.11.1980 – heute	GKD
Rißbachklamm	Rißbach	4,60	oberhalb Ausleitung/Riß- bachwehr	16145008	01.11.1967 – heute	01.11.1967 – heute	GKD
IWK_00_OW	Isar	250,769	Stauraum Stausee Krün	-	-	18.06.2013 – heute	UNIPER
KRU_00_OW	Isar	250,769	Einlaufbecken Kraftwerk	-	-	16.06.2009 – heute	UNIPER

Stationsname	Gewässer	Flusskilo- meter [FKM]	Beschreibung	ID	Zeitraum		Quelle
					Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m]	
IWK_07_QV	Isar Auslei- tung	250,769	Abfluss Kanal, berechnet aus Schützenöffnung	-	03.04.2009 – heute	-	UNIPER
IWK_00_QAB_1	Isar Auslei- tung	250,769	Radarmessung Kanal	-	04.12.2020 – heute	-	UNIPER
IWK_00_QAB_2	Isar	250,769	Abfluss Isar aus Einzeldurch- flüssen	-	03.04.2009 – heute	-	UNIPER
RIS_00_OW	Rißbach	4,5	Stauraum Rißbachwehr	-		03.04.2009 – heute	UNIPER
RIS_00_QAb_1	Rißbach	4,5	Abfluss Rißbachstollen	-	03.04.2009 – heute		UNIPER
RIS_00_QAb_2	Rißbach	4,5	Abfluss Rißbach unterhalb Ausleitung	-	03.04.2009 – heute		UNIPER

Der Pegel Mittenwald (Isar) wurde im Zeitraum 2009 bis 2011 umgebaut. Daher stehen in diesem Zeitraum keine Messdaten zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der Pegel Scharnitz (Isar, Österreich) und Mittenwald (Leutasch) wurden die fehlenden Messwerte zum Zeitpunkt mittels folgender Regressionsbeziehung (Gl. 1) abgeleitet (Bellinger und Antl 2023):

$$Q_{Mittenwald}^t(Isar) = \beta_0 + \beta_1 * Q_{Scharnitz}^{t-60 min}(Isar) + \beta_2 * Q_{Mittenwald}^{t-60 min}(Leutasch) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (1)$$

mit $\beta_0 = 0,91$; $\beta_1 = 0,98$ und $\beta_2 = 1,03$

Ähnlich existieren empirisch ermittelte Beziehungen (Gl. 2 u. 3) zwischen dem Pegel Mittenwald und dem Abfluss am ca. 7 km unterhalb gelegenen Krüner Wehr (Bellinger und Antl 2023):

- bis 2014:

$$Q_{Krüner Wehr}^t = 1,14 * Q_{Mittenwald}^{t-60 min}(Isar) + 1,5 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2)$$

- ab 2014:

$$Q_{Krüner Wehr}^t = 1,15 * Q_{Mittenwald}^{t-90 min}(Isar) + 4,0 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3)$$


Zur Einordnung sind in Tab. 2 die Abflusshauptwerte der Pegelstationen Mittenwald, Rißbachdüker und Rißbachklamm aufgeführt:

Abflusshauptwerte [m³/s]		Winter	Sommer	Jahr
Mittenwald / Isar Hauptwerte (1926–2012) FKM: 257,51 km EZG: 401,70 km²	NQ	1,79	4,06	1,79
	MNQ	4,31	8,15	4,29
	MQ	7,42	16,9	12,2
	MHQ	22	57,8	57,9
	HQ	62,4	194	203
Rißbachdüker / Isar Hauptwerte (1981–2020) FKM: 236,70 km EZG: 523,90 km²	NQ	0,13	0,518	0,13
	MNQ	2,15	2,84	2,14
	MQ	3,06	6,05	4,57
	MHQ	14,4	100	101
	HQ	53,3	437	437
Rißbachklamm / Rißbach Hauptwerte (1941–2020) FKM: 4,60 km EZG: 182,30 km²	NQ	1,51	2,2	1,51
	MNQ	2,61	4,6	2,6
	MQ	5,67	12,3	9,03
	MHQ	31,3	75,1	75,6
	HQ	94,7	208	208

Tab. 2:
Abflusshauptwerte an den Pegeln
des Gewässerkundlichen Dienstes

Zusätzlich lassen sich aus dem vom LfU ermittelten hydrologischen Gewässerlängsschnitt der Isar die folgenden statistischen Hochwasserkennwerte entnehmen (Tab. 3):

Tab. 3: Hydrologischer Gewässerlängsschnitt der Isar

Bayerisches Landesamt für Umwelt 									
Hydrologischer Gewässerlängsschnitt Isar (bis Sperrenstelle Slyvensteinsee) (GKZ 16000000000000)									
Fließgewässerquerschnitt	A _{EO} in [km ²]	Hochwasserscheitelabfluss HQ _T in [m ³ /s] für das Wiederkehrintervall T							Bemerkung
		MHQ	HQ ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ _{Extrem}	
Pegel Scharnitz-Weidach	204	45	60	80	95	118	135	215	Ermittlung durch HD Tiroi, HQ _{Extrem} ergänzt durch LfU nach Kleeberg-Schumann
Staatsgrenze Österreich – Deutschland	270	50	67	88	105	130	150	240	
vor Leutasch	285	36 (51) ¹	42 (67) ¹	53 (88) ¹	60 (105) ¹	85 (130) ¹	105 (150) ¹	170 (240) ¹	Modellierung mit LARSIM-NA (siehe Erläuterungsbericht Az. LfU 86-4423.81-83540/2021) Werte für Pegel Mittenwald ohne Klammern aus Extremwertstatistik (GEVLM, Reihe 1926 – 2016 (2021))
nach Leutasch / vor Atzgrubenhaine	396	57 (72) ¹	75 (100) ¹	95 (130) ¹	120 (160) ¹	160 (200) ¹	200 (240) ¹	320 (390) ¹	
Pegel Mittenwald / nach Atzgrubenhaine / vor Lainbach	402	57 (72) ¹	75 (100) ¹	95 (130) ¹	120 (160) ¹	160 (200) ¹	200 (240) ¹	320 (390) ¹	HQ _{Extrem} für die Pegel nach Kleeberg-Schumann, für die übrigen Stützstellen aus Modellierung mit PEN-LAWA-Niederschlägen Werte ohne Klammern geben den oberirdischen Abfluss an, Werte in Klammern berücksichtigen den Grundwasserbegleitstrom
nach Lainbach / vor Gassellahnbach	414	61 (76) ¹	75 (100) ¹	105 (140) ¹	130 (170) ¹	175 (215) ¹	210 (250) ¹	340 (410) ¹	
nach Gassellahnbach / vor Seinsbach	424	66 (81) ¹	85 (110) ¹	115 (150) ¹	145 (185) ¹	190 (230) ¹	225 (265) ¹	375 (445) ¹	Am Krüner Wehr erfolgt eine Ausleitung von max. 25 m ³ /s zum Walchensee. Außerdem werden aus Kranzbach und Finzbach jeweils bis 1,5 m ³ /s entnommen und zum Walchensee übergeleitet. Die Ausleitungen werden bei HQ ₅₀ und größer als geschlossen angenommen. Für HQ ₂₀ und häufiger: Angaben mit ³ ; Abflüsse mit Berücksichtigung der Ausleitung. Angaben in [] ohne Ausleitung
nach Seinsbach	440	72 (87) ¹	95 (120) ¹	125 (160) ¹	160 (200) ¹	215 (255) ¹	245 (285) ¹	415 (485) ¹	
Zufluss Krüner Wehr	448	87	120	160	200	255	285	485	Für HQ ₂₀ und häufiger: Angaben mit ³ ; Abflüsse mit Berücksichtigung der Ausleitung. Angaben in [] ohne Ausleitung
nach Finzbach (mit Kranzbach) ²	488	77 ³ [105]	125 ³ [155]	175 ³ [155]	225 ³ [250]	320	360	640	
Pegel Rißbachdüker	524	101 ³ [129]	150 ³ [175]	200 ³ [230]	260 ³ [290]	360	450	740	GEVLM, Reihe 1981 - 2020
nach Rißbach	744						630	1030	Modellierung mit LARSIM-NA (siehe Erläuterungsbericht Az. LfU 86-4423.81-83540/2021)
nach Dürrach / vor Walchen	893						750	1160	
Pegel Sylvenstein Gesamtzufluss	1130	326 380 ⁴	500	600	700	850	950	1450	LN3, Reihe 1949 – 1991 (2021) (siehe auch Erläuterungsbericht Az. LfU 86-4423.81-83540/2021)

¹ Angabe inklusive Grundwasserbegleitstrom
² Bei HQ₁₀₀ der Isar: Beitrag Kranzbach ca. 10 m³/s. Beitrag Finzbach ca. 50 m³/s
³ Angabe mit Berücksichtigung der Ausleitungen am Krüner Wehr zum Walchensee
⁴ Von Ausleitungen unbeeinflusster Wert

Stand: Februar 2022 (LfU 86-4423.81-17718/2022, WWA WM)

Bemerkungen:
 Zwischen den Stützstellen „vor Leutasch“ und „nach Seinsbach“ erfolgt bei Hochwasser ein Grundwasserbegleitstrom. Werte in Klammern geben den Abfluss inklusive des Begleitstroms an, Werte ohne Klammern nur den oberirdischen Abfluss (Details siehe Erläuterungsbericht Az. LfU 86-4423.81-83540/2021).
 Am Krüner Wehr erfolgt eine Ausleitung von max. 25 m³/s aus der Isar zum Walchensee. Außerdem werden aus Kranzbach und Finzbach jeweils max. 1,5 m³/s dem Walchensee zugeleitet. Ein Teil des Wassers wird wieder zurück in die Isar geleitet. Es wird angenommen, dass alle Ausleitungen bei großen Hochwassern (≥ HQ₅₀) nicht aktiv sind. Für häufigere Hochwasser ≤ HQ₂₀ werden Angaben mit und ohne die Ausleitungen gemacht (unter Berücksichtigung der Teiltrückleitung) (Details siehe Erläuterungsbericht Az. LfU 86-4423.81-83540/2021).
 Für Sylvenstein Gesamtzufluss wird neben dem rechnerischen MHQ auch ein um die Ausleitungen korrigiertes („natürliches“) MHQ angegeben.

© Bayerisches Landesamt für Umwelt

2.3 Grundwasser

Entlang der Oberen Isar werden an den folgenden Pegelstationen die Grundwasserstände kontinuierlich überwacht und gemessen (Tab. 4 und Abb. 5). Die Daten stehen in Form von täglichen Messwerten zur Verfügung.

Tab. 4: Überblick über die Grundwasserpegel im Projektgebiet

Stationsname	Gewässer	Flusskilometer [FKM]	Beschreibung	ID	Zeitraum	Quelle
MITTENWALD-GERBER 801	Isar	265,549	Oberhalb von Mittenwald	25135	03.05.1978 – heute	GKD
WALLGAU 2	Isar	253,512	Kurz nach Ortsbereich Wallgau	25170	29.11.1988 – heute	GKD
WALLGAU 5	Isar	251,589	Höhe Weberwiese	25173	17.11.1988 – heute	GKD
SCHROEFELN 2 830	Isar	244,285	Oberhalb der Reißbachmündung in die Isar	25142	07.05.1979 – heute	GKD
LENGGRIES-VORDERRIß.986	Isar	235,301	Kurz vor der Geschiebesperre Sylvenstein	25163	01.11.1984 – heute	GKD

2.4 Flussquerprofile

Im Untersuchungsgebiet sind zahlreiche Flussquerprofilaufnahmen verfügbar und in der Flussquerprofildatenbank HIS'3D des LfU abgelegt (Abb. 6). Vereinzelt konnten noch Daten von der UNIPER im Unterhaltungsbereich geliefert und in die Auswertung mitaufgenommen werden. Die historischen Querprofile der Isar vor 1965 müssen allerdings differenziert von den aktuelleren betrachtet werden: Diese historischen Profile wurden mit großem Aufwand digitalisiert und lagerichtig eingepasst (Schaipp 2006; Gabel et al. 2006). Fehlerquellen ergeben sich jedoch durch die Änderung der Höhensysteme, eines Wechsels des Datenbanksystems (GeoCADOP auf HIS'3D) und der unterschiedlichen Qualität der Vermessung. Zudem ist der Abstand zwischen den historischen Profilen zum Teil deutlich größer als bei aktuellen Messkampagnen. Erst seit 1965 erfolgen die Aufnahmen im jeweils gleichen Abstand, was eine einheitliche Vergleichbarkeit und verlässliche Aussagen ermöglicht (Schaipp und Zehm 2009). Somit werden in dieser Studie die historischen Daten vor 1965 nur für die Auswertung von Talweg und Mittlerer Sohle der Isar miteinbezogen. Eine Volumenbilanzierung für die gesamte Obere Isar ist jedoch erst ab 1965 möglich.

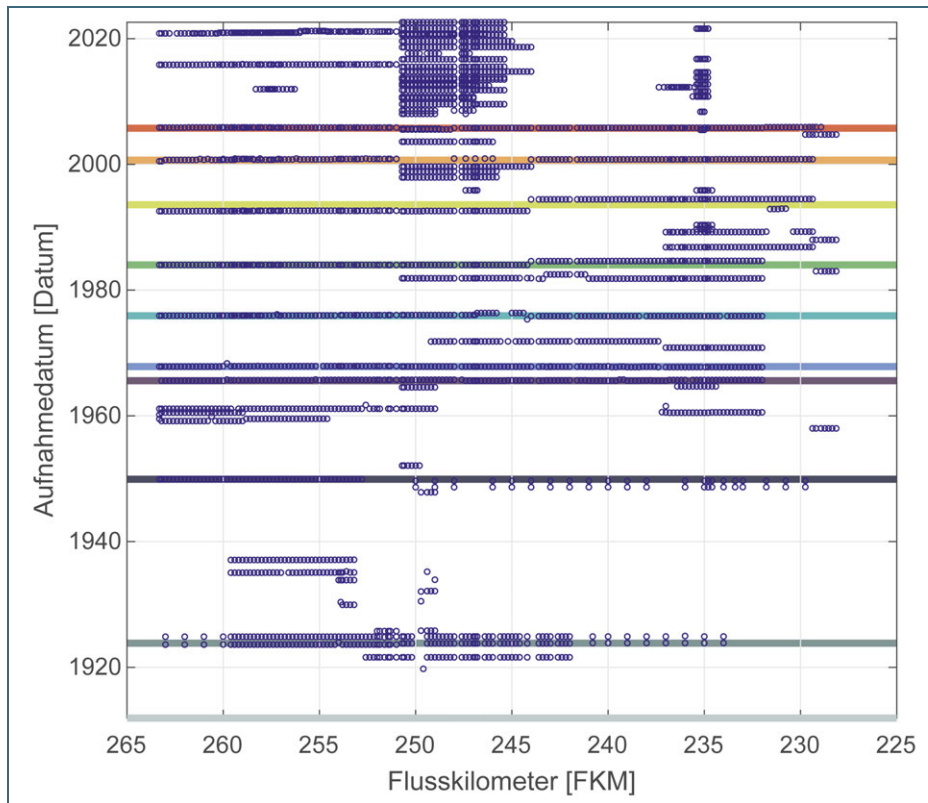


Abb. 6:
Verfügbare Flussquer-
profile an der Isar mit
farblich hervorgehobe-
nen Auswertzeitpunk-
ten

Zudem wurden nur wenige zusammenhängende Messkampagnen durchgeführt, die den kompletten Flusslauf der Oberen Isar abdecken. Für eine Auswertung der Isar von der Landesgrenze bis zum Sylvensteinspeicher wurden daher nur die Zeitpunkte betrachtet, an denen die Isar weitgehend komplett vermessen wurde (Auswertzeitpunkte). Zusätzlich zu der gesamtheitlichen Betrachtung wird der Bereich zwischen Krüner Wehr (FKM 250,769) und der Weberwiese (ca. FKM 245) genauer analysiert, da hier besonders viele Querprofilaufnahmen verfügbar sind und der Zusammenhang zwischen Stauraumpülungen, Baggerungen unterhalb des Wehrs und Anlandungen besonders deutlich wird.

Am Reißbach sind insgesamt weniger Querprofilaufnahmen vorhanden, aber die acht Messkampagnen decken jeweils den kompletten Abschnitt unterhalb der Wehranlage (ca. FKM 4,5) bis zur Mündung ab (Abb. 7).

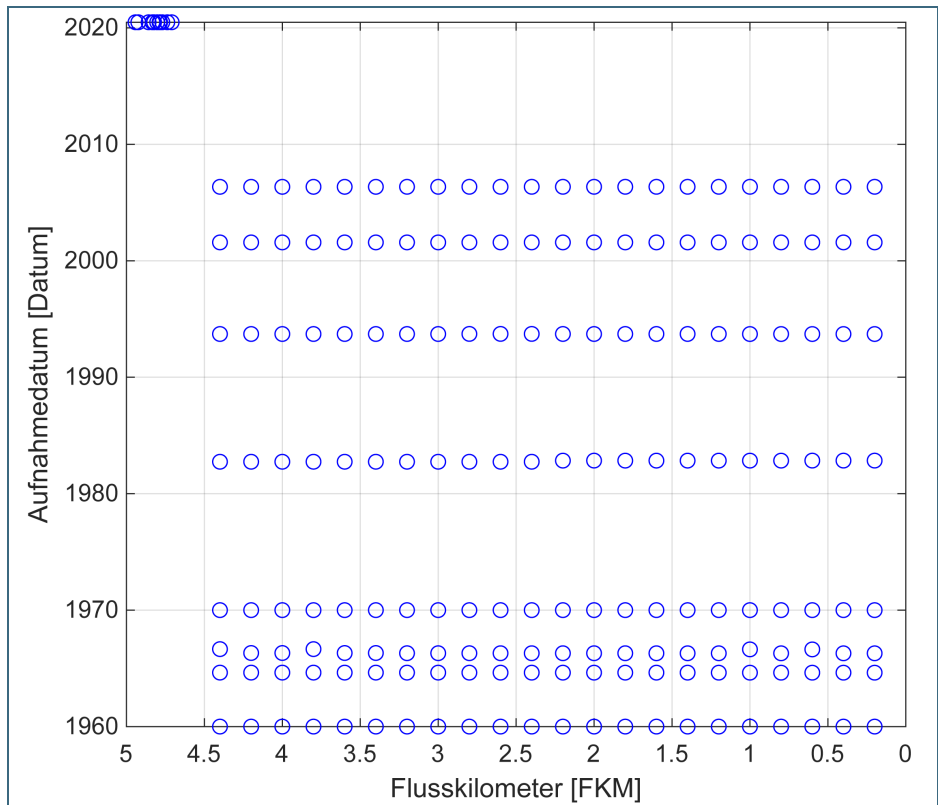


Abb. 7:
Verfügbare Flussquer-
profile am Rißbach

In Tab. 5 sind die Auswertzeitpunkte für die ganzheitliche Betrachtung von Isar und Rißbach aufgeführt. Die Zeiträume zwischen den Auswertzeitpunkten werden im Folgenden als (Auswerte-)Epoche bezeichnet.

Auswertzeitpunkte Isar	Auswertzeitpunkte Rißbach
Dez. 1911	
Nov. 1923	
Dez. 1949	Jan. 1960
Aug. 1965	Aug. 1964
Nov. 1967	Apr. 1966
Dez. 1975	Jan. 1970
Jan. 1984	Sep. 1982
Aug. 1993	Sep. 1993
Sep. 2000	Jul. 2001
Okt. 2005	Mai 2006

Tab. 5:
Auswertzeitpunkte für Isar und Riß-
bach

Neben der Prüfung und ggf. Korrektur der Querprofilaten, war es nötig, Auswertelotrechten zu definieren. Zum Teil waren solche Lotrechte aus vergangenen Projekten verfügbar bzw. in der Datenbank hinterlegt, doch ergibt sich durch Uferanrisse oder Eingriffe immer wieder der Bedarf, diese zu überprüfen und ggf. neu zu definieren. Daher wurde für die folgende Studie eine einheitliche Neudefinition der Begrenzunglotrechten gewählt, getrennt für Sohl- und Kubaturränder (vgl. Abb. 8). Die Sohlränder grenzen die bewegliche Sohle vom Rest des Gerinnes ab und definieren damit die Mittlere Sohl-lage. Entsprechend können sich die Sohlränder von einer Messkampagne zur nächsten ändern und müssen ggf. neu gesetzt werden. Kubaturränder hingegen sind einheitlich über alle Zeiträume zu setzen, sodass alle Querprofiländerungen erfasst werden.

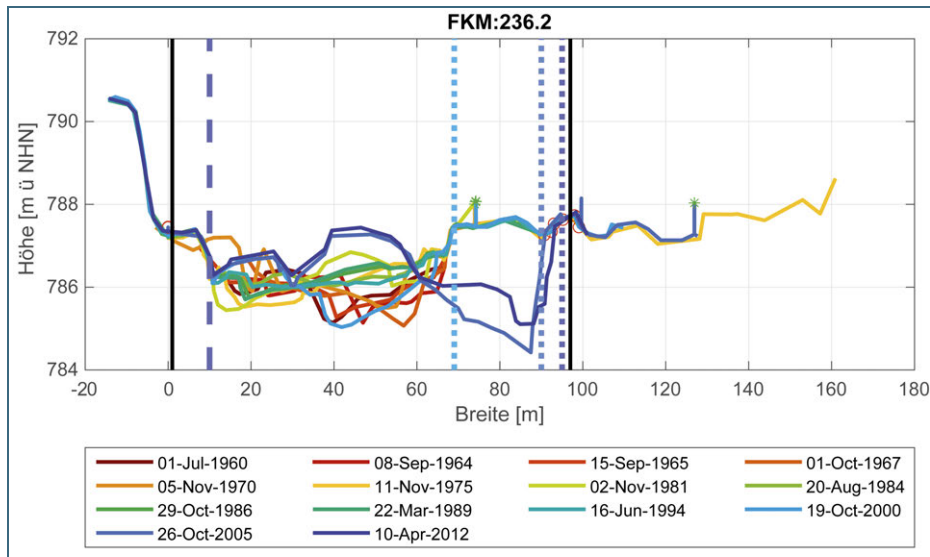


Abb. 8:
Exemplarisches Querprofil mit einheitlichen Kubaturrändern (schwarz) und mehreren Sohlrändern pro Epoche (gestrichelt (links) bzw. gepunktet (rechts)).

Mittels der Obeliskformel (Gl. 4) kann das Volumen V zwischen den Kubaturrändern nachfolgender Profile (i und $i+1$) näherungsweise ermittelt werden:

$$V = \frac{d}{6} (2z_{s,i}w_i + 2z_{s,i+1}w_{i+1} + z_{s,i}w_{i+1} + z_{s,i+1}w_i) [m^3] \quad (4)$$

mit d =Abstand zwischen den Profilen [m], z_s = flächengemittelte Sohle [m] und w = Abstand zwischen den Kubaturrändern [m] am Profil i bzw. $i+1$.

Durch Subtraktion der Volumina zweier Auswertzeitpunkte ergibt sich die Volumenänderung im betrachteten Abschnitt. Durch Aufsummierung dieser Anlandungs- und Erosionsvolumina entlang des Flusses ergeben sich die Volumensummenlinien. Anlandungen werden dabei durch eine positive Steigung der Linie dargestellt, Erosionen mit einer negativen Steigung. Verläuft die Linie waagrecht ist das System im Gleichgewicht und Erosion und Anlandung glichen sich aus. Für weitere Informationen dazu wird auf das entsprechende LfU-Merkblatt verwiesen (LfU 2020).

2.5 Korngrößenverteilung

Es stehen an der Oberen Isar insgesamt 51 Sieblinien aus drei Messkampagnen aus den Jahren 1990, 2007 und 2022 zur Verfügung (siehe Abb. 9). Die einzelnen Proben untergliedern sich dabei in Proben der Deckschicht, der Innenschicht und der Mischschicht, eine Mischung aus Deck- und Innenschicht. Aus dem Jahr 1990 stehen an zwei Stellen Daten zur Verfügung. Im Jahr 2007 wurden die meisten Proben erhoben, welche sich aber auf den Staubereich am Krüner Wehr bis zur Weberwiese beschränken (Schaipp und Zehm 2009). Im Jahr 2022 wurde angestrebt, einen größeren Bereich zu erfassen, und es wurden Proben bis hin zum Reißbach entnommen. Im Anhang 8.1 in Tab. 14 sind die charakteristischen Kennwerte der Siebanalysen aufgeführt.

Am Reißbach liegen aus den Jahren 1958 je eine Sieblinie der Deck- und Innenschicht nahe der Mündung vor und aus dem Jahr 2006 eine Analyse der Mischschicht oberhalb des Reißbachwehrs nahe der Stauwurzel (Haas 2006).

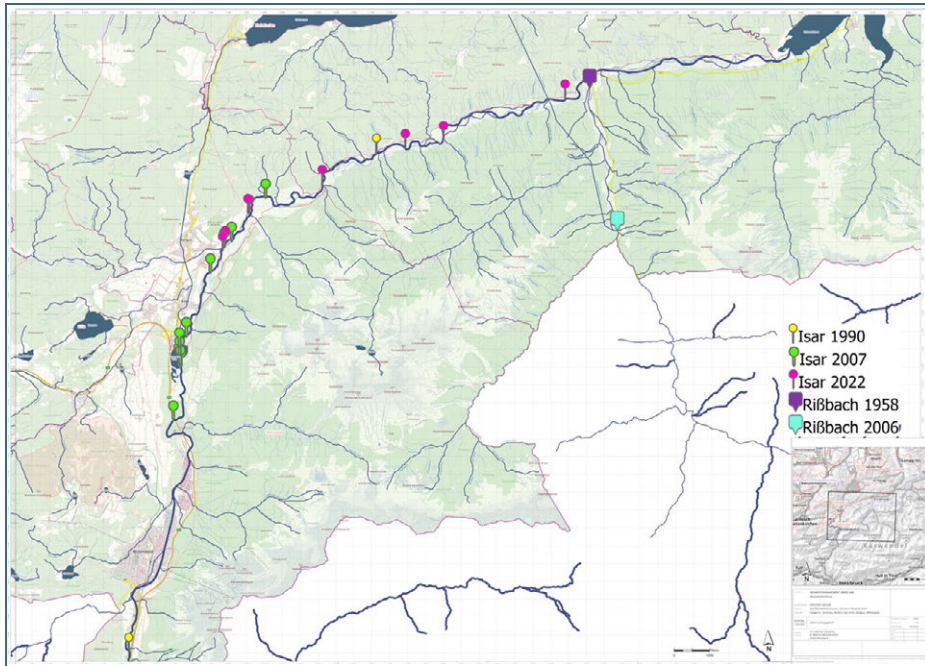


Abb. 9: Überblick über die Entnahmestellen der Messkampagnen der Isar und dem Rißbach

Neben den aufgeführten, konventionell erhobenen Sedimentproben mit entsprechender Auswertung, wurden von Reich und Rethschulte (2021) an mehreren Querschnitten entlang der Isar und des Rißbachs Untersuchungen des oberflächlich aufliegenden Feinsedimentanteils durchgeführt.

2.6 Weitere morphologische Kenngrößen

Direkte Messdaten des Geschiebetransportes stehen im Untersuchungsgebiet nicht zur Verfügung. Es gibt jedoch Messpegel für die Schwebstofffracht. Da die Messungen am Krüner Wehr jedoch als fehlerhaft eingestuft sind, könnten aus diesen Daten lediglich Tendenzen gewonnen werden, jedoch keine Informationen zu transportierten Mengen bzw. Konzentrationen. Dies liegt unter anderem daran, dass aufgrund der sehr hohen Bandbreite möglicher Trübungen – von Mindestwasser bis zu Spülungen – die Grenzen des Messintervalls mehrmals erreicht und immer wieder angepasst wurden. Daher lassen sich die Daten auch nicht zueinander vergleichen. Entsprechend wird an dieser Stelle auf eine Auswertung der Schwebstoffmessdaten verzichtet.

Im Untersuchungsgebiet wird seit dem Jahr 1934 Geschiebe entnommen. Das Wasserwirtschaftsamt Weilheim (WWA WM) nimmt hierbei eine zentrale Rolle ein. Die entnommenen und ggf. wiedereingebrachten Mengen sind in Ort (FKM von/bis) und Zeit (Start/Ende) dokumentiert und werden vom WWA WM an das LfU jährlich übermittelt.

3 Ergebnisse

3.1 Flussgeschichte

Folgendes Kapitel beschreibt möglichst chronologisch die gewässermorphologische Entwicklung der Oberen Isar. Dabei wird vor allem auf archivierte Vermerke der Wasserwirtschaftsverwaltung und vergangene Studien Bezug genommen.

3.1.1 Historischer Zustand

Im ursprünglichen Zustand war die Isar von einer großen anfallenden Geschiebefracht geprägt, die auch ohne Zäsur weiter transportiert wurde. Frühere Untersuchungen beziffern die mittlere jährliche Geschiebefracht der Isar bei Krün vor dem Bau der Ausleitung auf rund 31.000 m³/a, und unterhalb der Reißbachmündung auf 37.000 m³/a (Ertl 1948; Oswald 1984). Diese Mengen sind sicherlich mit einer gewissen Unsicherheit zu betrachten, geben jedoch einen Anhaltspunkt zur Größenordnung.

Dieser große Materialtransport hat dazu geführt, dass sich die Isar in ihrem breiten Tal immer wieder in neue Verästelungen und Rinnen aufgespaltet hat. Dazwischen waren meist vegetationslose Kiesbänke eingestreut. Aufkommende Begrünung der Kiesbänke wurde von den wiederkehrenden Hochwasserereignissen immer wieder abgeräumt (Oswald 1984). Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Isar einem dynamischen Gleichgewicht, und die ankommenden Geschiebefrachten sind auch weitertransportiert worden. Dieser Zustand wurde durch die nachfolgend beschriebenen Eingriffe jedoch beeinflusst.

3.1.2 Mittenwalder Korrektur und weitere Ufersicherungen

Im Zuge der sogenannten „Mittenwalder Korrektur“ wurde die Isar insbesondere im Ortsbereich Mittenwald in mehreren Etappen begradigt und ausgebaut (vgl. Abb. 10 und Abb. 11):

- Zum Schutz von landwirtschaftlichen Flächen, Straßen und der Ortschaft wurde die Isar zwischen den Jahren 1858/1889 bei FKM 256,60-259,00 begradigt und ausgebaut (Karl et al. 1977; Landesstelle für Gewässerkunde 1926). Aus der Begradigung ergaben sich lokal Sohleintiefungen (ca. 1,0–1,5 m (Schaipp 2006)) und die Mobilisierung von zusätzlichen Sedimenten, die im Zeitraum 1900/1915 in der unteren Strecke, dem späteren Krüner Wehr, anlandeten (Ertl 1948).
- Später, zwischen den Jahren 1929/38, wurde die Korrektur der Isar noch bei FKM 260,8 bis 259,0 und 256,6 bis 254,4 fortgesetzt. Dies hatte in der Folge im Zeitraum 1937/1947 wiederum Sohleintiefungen von 1,0 bis 1,75 m zur Folge (Schaipp 2006), sodass sich die am Krüner Wehr ankommende Geschiebefracht von ehemals 31.000 m³/a auf 56.000 m³/a erhöhte (Ertl 1948)
- Auch im folgenden Zeitraum 1959/1970 wurde eine bis ~2,5 m tiefe, fortschreitende Eintiefung zwischen FKM 257,6 und 259,4 festgehalten (Oswald 1984).

Neben der Begradigung begünstigten eine Reduzierung der Geschiebezufuhr von oberstrom durch Wildbachverbauungen sowie oberhalb von Mittenwald errichtete Sohlstützbauwerke die Eintiefungen (Oswald 1984; Ertl 1948). Den lokalen Eintiefungen wurden mit dem Bau von zunächst drei Stüttschwellen um 1960/1961 entgegengewirkt. Mit deren Bau verlagerte sich die Eintiefung zunehmend nach Unterstrom (Schaipp 2006). Weitere Schwellen kamen später noch hinzu (FKM 258,955; 258,45; 257,98; 257,49; 256,486; 255,027; 254,7). Die ursprünglichen Schwellen sind zum Teil noch vorhanden, jedoch teilweise umgebaut. Die drei „Sperren“ zwischen FKM 260,00 und 249,41 wurden in den Jahren 1992/1993 in Rampen (Gleite bei Mittenwald, Sohlstützschwelle Mittenwald und Sohlrampe Riedboden) umgebaut.

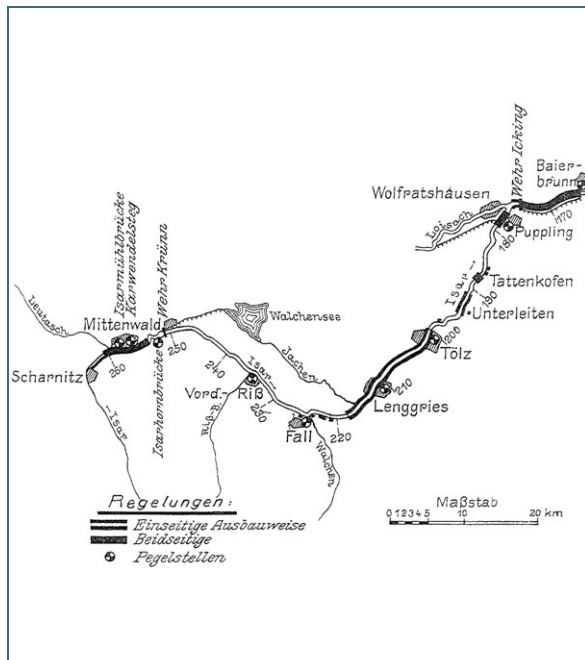


Abb. 10: Isarregelung

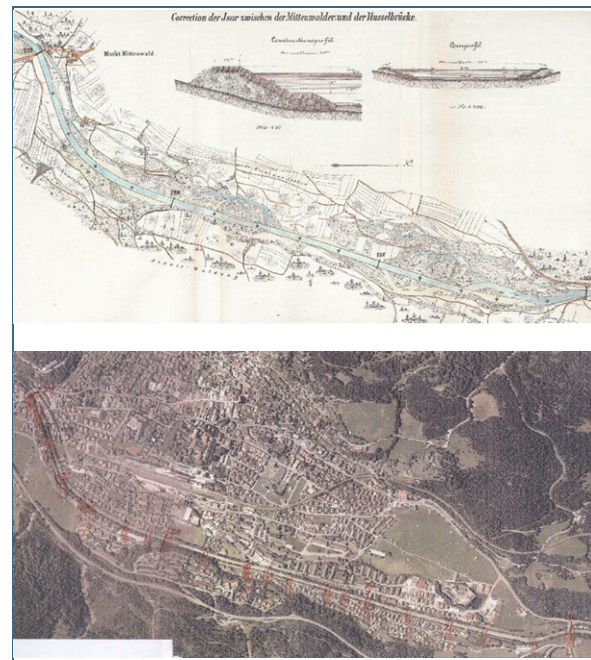


Abb. 11: Mittenwalder Korrektur um 1930 (oben) und 2003 (unten)

3.1.3 Bau der Ausleitungen an der Isar und Nebengewässern

3.1.3.1 Krüner Wehr

Das Krüner Wehr bei FKM 250,769 wurde zwischen 1918/1921 errichtet und ging 1923 in Betrieb mit dem Ziel, Wasser aus der Isar dem Walchenseekraftwerk zu überzuführen. Folgendes Luftbild (Abb. 12) und die Detailaufnahme (Abb. 13) geben einen detaillierten Überblick über die Wehranlage und die unterschiedlichen Betriebseinrichtungen. Im Normalbetrieb wird das Wasser der Isar über Einlaufschützen einem Einlaufbecken zugeführt. Von dort wird die Mindestwasserabgabe (3,0 bis 4,8 m³/s) in die Isar in einem Restwasserkraftwerk energetisch verwertet, und das restliche Wasser (bis zu 25 m³/s) wird über ein Regulierschütz dem Überleitungskanal dem Walchensee zugeführt. Um unerwünschte Feststoffe im Einlaufbecken des Kanals zu entfernen, gibt es ein Spülschütz im Einlaufbecken (im Luftbild nicht zu erkennen). Im Hochwasserfall oder bei betrieblich nötigen Spülungen bzw. Revisionen kann das Wasser über ein Grundschütz (Breite 4 m) und ein Walzenwehr (Breite 10 m) gesteuert in die Isar abgegeben werden. Ab einem Abfluss von 40 bis 45 m³/s wird der Ausleitungskanal geschlossen, um Sedimenteintrag in den Ausleitungskanal zu vermeiden (Bellinger und Antl 2023). Ergänzend gibt es ein festes Wehr (Breite 43 m) mit Wehrkrone auf 870,00 müNN, an das ein Damm anschließt und den Talraum gänzlich abschließt. Seit 1965 werden in den Wintermonaten (01.09. bis 30.04.) Holzelemente auf das feste Wehr aufgesetzt, um das Stauziel auf 871,00 müNN zu erhöhen und einen Schwellbetrieb am Kraftwerk Obernach zu ermöglichen (siehe Abb. 13 Ständer der Elemente auf dem festen Wehr und Abb. 9 in (Grohsy 2010)). Diese Erhöhung wird genutzt, um den Stausee als Tagesspeicher zu nutzen, weswegen es in dieser Zeit zu 12-h-Zyklen des Wasserstandes im Stausee kommt.



Abb. 12: Luftbild des Krüner Wehrs

Abb. 13:
Detailaufnahme am
Krüner Wehr mit Be-
triebseinrichtungen

Ursprünglich war am Krüner Wehr kein Mindestwasser vorgesehen, und die Isar unterhalb des Krüner Wehrs fiel zeitweise komplett trocken. Seit 08.1989 besteht eine Mindestwasserabgabe von $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (01.09. – 30.04.) bzw. $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (01.05. – 30.08). Dieses Wasser wird seit 1990 in dem bereits erwähnten Kraftwerk energetisch verwertet. Im Jahr 2012 wurde das Wehr um eine Fischaufstiegsanlage (FAA) in Form eines Vertical-Slot-Fish-Pass ergänzt in welchem 180 bis 220 l/s fließen.

Im ursprünglichen Wasserrechtsbescheid wurden keine Auflagen zu Spülungen bzw. eines Sedimentmanagements gemacht. Daher werden am Wehr nur aus betrieblichen Gründen Spülungen durchge-

führt. Um der Verlandung des Stausees entgegenzuwirken, wurden im Winter 1956/1957 die zwei markanten Leitwerke im Stausee errichtet, welche die ankommenden Sedimente näher zum Wehr transportieren und so Spülungen effektiver machen sollen. Dies hat zur Folge, dass Spülungen nur kurz ausgeführt werden müssen, um das unmittelbar am Wehr angelagerte Material zu mobilisieren. Erst bei Spülungen über 12 h und bei einem Abfluss von etwa 30 m³/s wird Geschiebe von der Stauwurzel mobilisiert (Bellinger und Antl 2023; Schaipp und Zehm 2009). In einem Vermerk des Wasserwirtschaftsamts von 1975 heißt es, das „in der Isar transportierte Geschiebe bleibt zwischen den Deichen und unmittelbar vor dem Wehr solange liegen, bis der Abfluss 25 m³/s überschreitet und die Grundablassschütze gezogen wird. Mit diesem Vorgang, von der BAG "Spülung" genannt, wird der Stauraum entlandet. Das gespülte Geschiebe bleibt aber unterhalb liegen, von wo es offensichtlich nur von größeren Hochwässern weitergetragen werden kann“ (Schaipp 2006).

Die Leitwerke untergliedern den Stausee zudem in drei Teilbereiche, den linksseitigen und rechtsseitigen Stausee und die Isar in der Mitte. Während der rechtsseitige See durch den Seinsraubach zusätzlich gespeist wird und dadurch Frischwasser erhält, wurde ein Düker zwischen Isar und dem sonst weitgehenden stagnierenden linken Stausee geschaffen.

Hinweis: Seit dem Bau des Krüner Wehrs hat sich das Höhensystem mehrfach geändert. Von UNIPER wird folgende Beziehung verwendet, um das Stauziel umzurechnen:

- Altes Höhensystem: 870,000 m
- DHHN12: 870,080 m
- DHHN92: 870,042 m
- DHHN2016: 870,060 m

3.1.3.2 Reißbachwehr

Um die Energieausbeute am Walchenseekraftwerk weiter zu erhöhen, wurde im Jahr 1913 eine Ausleitung am Reißbach geplant (Karl et al. 1977). Das Reißbachwehr befindet sich in unmittelbarer Nähe zur österreichischen Landesgrenze und dient der Ausleitung des wasserreichen Reißbachs und seines größten Zuflusses, des Fermersbachs. Letztlich wurde im Jahr 1949 am Reißbach bei FKM 4,6 das Reißbachwehr fertiggestellt. Bei Normalstau erreicht der Wasserspiegel ein Stauziel von 827,50 müNN. Anders als an der Isar, gibt es nach wie vor keine Mindestwasserabgabe am Reißbach, und es dürfen bis zu 12 bzw. in Ausnahmen 14 m³/s aus dem Reißbach entnommen werden. Unmittelbar nach dem Wehr führen Sickerverluste und kleinere Zuflüsse im zunächst noch felsigen engen Flussbett zu einer geringen Wasserführung, die im Übergang zum breiten Kiesbett endet.

Da das Reißbachwehr in einer Klamm errichtet wurde, mit im Vergleich zur Isar deutlich engerem Tal und steilerem Gefälle gibt es einen deutlich kleineren Stausee als am Krüner Wehr. Entsprechend liegen am Reißbachwehr auch andere Notwendigkeiten für Spülungen vor. Allein aus betrieblichen Gründen muss nach Betreiberaussage bereits ab 70 % Kiesverlandung im Stauraum gespült werden. Erfahrungsgemäß beginnt das Geschiebe sich bei etwa 20–25 m³/s zu bewegen. Daher wird am Wehr in etwa dann gespült, wenn ein Abfluss von 25 m³/s überschritten wird und der Scheitel 40 m³/s für mehr als 24 h erreicht. Dabei wird der Ausleitungsstollen geschlossen, um Sedimenteintrag in diesen auszuschließen (Bellinger und Antl 2023).

Erwähnenswert ist noch der Fischbach, als linksseitiger Zufluss in den Reißbach bei FKM 2,8. Aus diesem wird Wasser direkt in den Reißbachstollen eingeleitet. Die Menge ist auf 2 m³/s limitiert, wobei in Summe im Normalbetrieb nicht mehr als 12 m³/s aus beiden Flüssen ausgeleitet werden dürfen (vgl. Abb. 4).

3.1.3.3 Weitere Ausleitungen im Untersuchungsgebiet

- Seit 1954 werden der Finzbach, ein größerer Wildbach aus dem Estergebirge und die Jungfinz, ein nördlicher Zufluss, jeweils mit einem Wehr aufgestaut. Der Finzbach mündet im Ortsbereich Wallgau in die Isar. Laut Bescheid kann aus dem Finzbach bis zu 1,35 m³/s ausgeleitet werden, was rund 90 % des Jahresverlaufs entspricht. Zusätzlich kann auch noch aus der Jungfinz mittels des Junfinzbachwehrs weiteres Wasser entnommen werden; in Summe aus Finzbach und Jungfinzbach jedoch nicht mehr als 1,5 m³/s. Ein Mindestwasser ist nicht verbescheidet. Das nachfolgend teilweise recht breite Kiesbett des Finzbaches ist auf rund 3,7 km Länge bis zur Mündung in die Isar nur noch bei Hochwasser wasserführend. Im unmittelbaren Ortsbereich bis zur Mündung wurde der Flusslauf begradigt, mit festen Ufern versehen und gegen eine mögliche Eintiefung durch eine Kette von 14 Sohlrampen ausgebaut.
- Der Kranzbach entspringt am Hohen Kranzberg westlich von Mittenwald und fließt natürlicherweise durch die Ortschaften Klais und Krün, um nahe Wallgau in die Isar, wenige Meter flussaufwärts des Finzbachs, einzumünden. Mit dem Bau des Walchensee-Systems wurde der Bach unterirdisch mit der Isarüberleitung verbunden und das Wasser (bis zu 1,8 m³/s) dem Walchensee zugeführt (Bescheid aus dem Jahr 1960). Im Hochwasserfall wird Wasser über eine Flutmulde in den Finzbach und damit die Isar übergeleitet. Der ursprüngliche Bachlauf bis zur Einmündung in die Isar ist mittlerweile vollständig verschwunden und durch landwirtschaftliche Nutzung überformt worden.

3.1.4 Historisches Sedimentmanagement

Aus Vermerken und älteren Untersuchungen lässt sich die Historie des bisherigen Sedimentmanagements, das mit Geschiebeentnahmen um 1936 im Bereich Krün begonnen hat, nachvollziehen.

- So ist aus einem Schreiben (2377/II) des Straßen- und Flussbauamtes Weilheim vom 07.07.1937 zu entnehmen, dass *"Die Entnahme von 35 bis 50 Tsd. m³ Kies aus der Isar im Bereich und oberhalb des Stausees [...] im Hinblick auf Betriebsinteressen des Bayernwerks und durch die Kiesentnahme voraussichtlich vermerkte Flussverwilderung für unzumutbar erachtet [wird]. Flachbaggerungen werden von den Unternehmern zwar ohne weiteres zugesagt, jedoch in der Regel unsachgemäß durchgeführt, so dass mit erhöhten Räumungsarbeiten für das Bayernwerk zu rechnen ist. Ich ersuche daher dem Antrag ... nicht zu entsprechen"* (vgl. Abb. 14). Stattdessen wird die Kiesentnahme auf den Bereich unterhalb der Finzbachmündung etwa zwischen FKM 247,00 und 248,00 verlagert.



Abb. 14:
Unsachgemäße Kiesentnahme aus dem Stausee Krün (noch ohne Leitdämme) um 1937, Krüner Wehr = rote Linie

- Das Krüner Wehr wirkte nach dem Bau wie eine Geschiebefalle, welches drei Jahrzehnte, bis Mitte der 1950er-Jahre, ein Geschiebedefizit unterhalb verursachte. Mit dem Bau der Leitdämme (1956/1957) und Erreichung eines Verlandungszustandes im Stauraum änderte sich das Bild und mehr Material lagerte sich nun unterhalb des Wehres an (vgl. WWA-Vermerk L-0125 vom 05.04.1990) (Gabel et al. 2006). Im Jahr 1952 wurden diese Anlandungen unterhalb des Krüner

Wehrs erkannt und negative Folgen auf den Hochwasserschutz befürchtet. Um dem entgegenzuwirken, wurde der Flusslauf zum Teil ausgebaut und eine Kombination aus Räumungen unterhalb FKM 249,6, einer Buhne bei FKM 249,0 und eines Hochwasserschutzdamms geplant (siehe Abb. 15). Zusätzlich wurde der Abschnitt vom Krüner Wehr bis zur Finzbachmündung (FKM 250,769 – 247,5) in den 1950er und 1960er Jahren eingengt und mit einer einseitigen Ufersicherung versehen (Schaipp 2006).

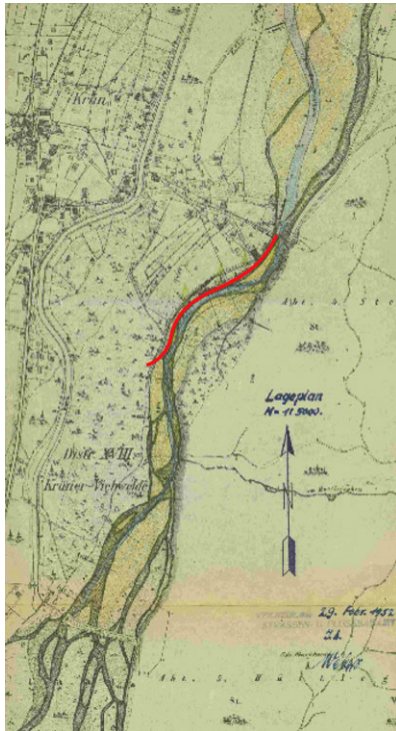


Abb. 15: Hochwasserschutz Krün um 1958

- In einem Gutachten des Landesamtes für Gewässergüte von 08.07.1964 wird die Kiesentnahme zwischen Landesgrenze und Finzbach auf 870.000 m³ im Zeitraum von 1934 bis 1963 (im Mittel 28.000 m³/a) angegeben. Im Gutachten wird ein Transportvermögen der Isar von 55.000 m³/a bei Mittenwald berechnet, sodass der Fluss in etwa nur zu 50 % gesättigt ist und der Fluss sich somit Material aus der Sohle nimmt. Dazu wird angenommen, dass sich die ankommende Geschiebefracht durch Wildbachverbauungen und Entnahmen im Oberlauf auf 20.000 m³ reduzieren wird. Dennoch wird für die nächsten fünf Jahre eine Entnahmemenge von 160.000 m³ + 15.000 m³ Reserve erlaubt (im Mittel 35.000 m³/a, vgl. Abb. 16) (Gabel et al. 2006).

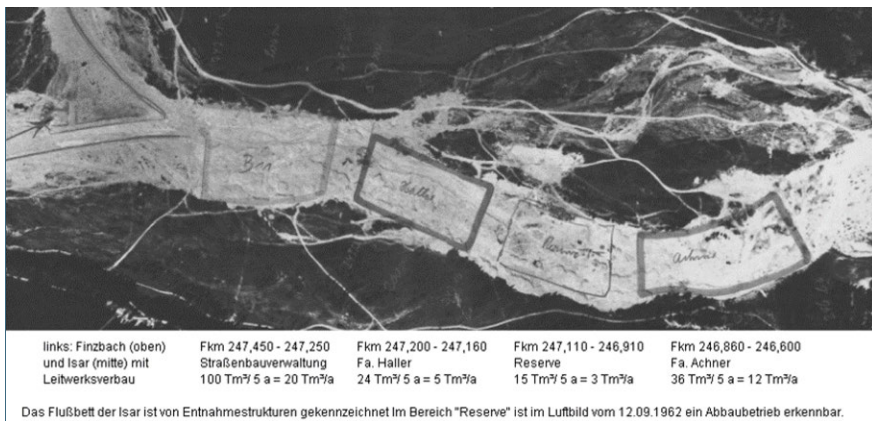


Abb. 16: Luftbild von 1962 mit umrandeten Kiesentnahmeflächen

- In einer späteren Antwort an das WWA WM zu den Entnahmen an der Finzbachmündung heißt es, dass im Jahresmittel 1961 bis 1970 rund 30.000 m³ Kies unterhalb des Krüner Wehrs entnom-

men wurden. Diese Menge schätzt das Amt erneut höher ein als es die Isar ersetzen kann. Entsprechend schränkt das Amt die Baggerungen auf maximal 20.000 m³ ein. Wenn für den Straßenbau 1973 doch auf einmal mehr benötigt werden (bis zu 100.000 m³ gefordert), muss in den folgenden Jahren eine Pause eingelegt werden (Scheurmann 1972).

- In einem weiteren Vermerk vom 27.01.1975 des WWA heißt es, dass mit jeder Spülung das Flussbett zwischen FKM 250,7 und 249,6 aufgefüllt wird. Dieses Material wird von gewerblichen Kiesunternehmern oder dem Kraftwerksbetreiber entnommen. Dennoch laufen die Räumungen nicht optimal ab, was von der Gemeinde Krün (Lärm, Staub, Fahrbetrieb) und des Kreisfischereiverbands GAP (Vernichtung von Fischlaich und Setzlingen) kritisiert wird. Diese fordern kürzere, aber intensivere Entnahmen und Änderungen am Spülbetrieb. Gleichzeitig wird aber auch eine Eintiefungstendenz unterhalb FKM 248,6 geschildert, was auf die Entnahmen in diesem Bereich und die nicht mobilisierten Ablagerungen unterhalb des Krüner Wehrs zurückgeführt wird.
- In einem darauffolgenden Vermerk vom WWA aus dem Jahr 1980 wird beschrieben, dass „... die Kiesablagerungen in der oben genannten Gewässerstrecke soweit abgetragen [sind]... wie dies wasserwirtschaftlich möglich ist. Die gewerblichen Kiesentnahmen wurden deshalb mit sofortiger Wirkung eingestellt. ... Sollte die Isar erneut auflanden, was nur nach einem größeren Hochwasser zu erwarten ist, so werden wir Sie von der neuen Sachlage unterrichten“ (Schaipp 2006). Eine Auswertung der Entnahmemengen im Bereich Krüner Wehr bis Wallgau im Zeitraum 1937/1979 ergibt in Summe 631.023 m³ und im Mittel eine Entnahme von knapp 15.000 m³/a (Oswald 1984).
- Im WWA-Vermerk L-4424.8/4441.3 TÖL Isar vom 13.03.1986 wird beschrieben, dass die Isar zwischen Reißbachdüker und Geschiebesperre Sylvenstein durch Auflandungen geprägt ist. Über die Ursachen ist man sich nicht ganz klar, ob dies natürlich ist, eine Auswirkung der geringeren Entnahmen der letzten Jahre am Krüner Wehr oder gar auf die Entnahmen unterhalb an der Vorsperre zurückzuführen ist (Gabel et al. 2006).
- Das WWA WM teilt der Gemeinde Wallgau mit Schreiben vom 28.08.1995 mit, dass an der Isar zwischen Krün und Wallgau eine Auflandungstendenz von 1 cm/a erkennbar ist trotz der mittleren Entnahme von rund 16.000 m³ Kies. (Gabel et al. 2006)

Weitere Untersuchungen aus den letzten Jahren zeigten, dass die Anlandungen im kritischen Bereich unterhalb des Wehrs bis zur Weberwiese wieder zunahm. Daher wurden im Jahr 2004 ein 26 m breiter Abschnitt für Geschiebeentnahmen für den Hochwasserschutz definiert („Räumsohle“). Die fixe Lage der Räumungen hat jedoch zu einer Segmentierung geführt, was in der LFU Studie von 2009 diskutiert wird. Da diese Entnahmen generell einen starken Eingriff ins Gewässer bedeuten, werden diese aus naturschutzfachlicher, wirtschaftlicher aber auch touristischer Sicht kritisch gesehen (Schaipp und Zehm 2009).

Mengenmäßig am größten sind die Entnahmen jedoch unmittelbar an der Vorsperre des Sylvenstein-speichers. An der Sperre lagert sich das ankommende Sediment ab, welches dann zum Schutz des Speichers vor Verlandung entnommen wird. Verschiedene Probleme (antransportiertes Material mit Schlack, Wildholz, mit Laub vermischt, entnahmetechnische Unzulänglichkeiten) führten dazu, dass bis zum Jahr 1979 bei einem seinerzeit geschätzten Zulauf von 50.000 m³/a nur 250.000 m³ entnommen wurden und rund 400.000 m³ (davon rd. 100.000 m³ nutzbarer Kies) in einer Mächtigkeit von 0,5 bis 2,0 m anlandeten (Gabel et al. 2006). Aktuell wird vor allem der Kies verwertet und abgefahren, die Feinteile (Sande und Schluffe) bleiben zurück und werden u.a. auf einem Schüttkegel neben dem Fluss aufgeschüttet bzw. verbleiben im Fluss und haben inzwischen eine etwa 9.500 m² große Insel gebildet (siehe Abb. 17 und Abb. 18).



Abb. 17: Bewachsene Feinsedimentinsel unmittelbar vor der Vorsperre am Sylvensteinspeicher. Foto aufgenommen am 9.11.2022 von der Vorsperre aus Blickrichtung flussaufwärts

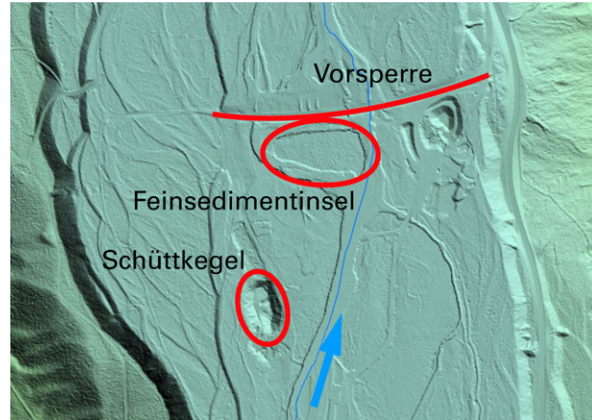


Abb. 18: Feinteileablagerungen (eingekreist) an der Geschiebevorsperre, erkennbar auf dem 1*1m DGM

3.1.5 Dynamisierungsmaßnahmen

In den letzten Jahren wurden drei aufeinander aufbauende Gutachten erstellt mit dem Ziel, die Veränderungen der Auenv egetation an der Oberen Isar zu untersuchen. Ein Fokus lag dabei auf Gegenüberstellung historischer und aktueller Luftbilder und der daraus abgeleiteten Vegetation (Reich 2005; Reich et al. 2008; Reich und Rethschulte 2021). In den Gutachten wurden auch mögliche Initialmaßnahmen für eine höhere morphologische Dynamik und damit Verbesserung der lebensraumtypischen Arten und Auenv egetation vorgestellt. An drei Standorten wurden in den Jahren 2012 (Abb. 19), 2014 (Abb. 20) und 2018 (Abb. 21) solche Maßnahmen umgesetzt.



Abb. 19: Maßnahme A1 „Weberwiese“, Jahr 2012 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)

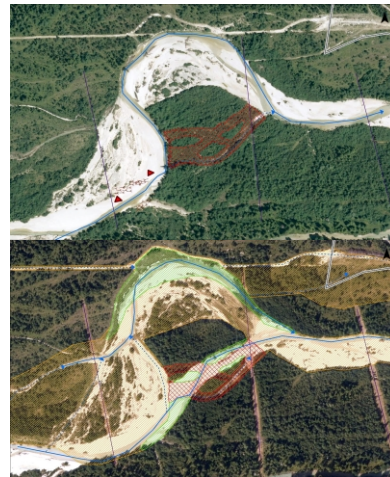


Abb. 20: Maßnahme A2, Jahr 2014 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)



Abb. 21: Maßnahme A3, Jahr 2018 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)

Die aufwändigen und kostenintensiven Maßnahmen wurden vom WWA WM umgesetzt und in einem Monitoring auf deren Wirkung bewertet. Es stellte sich trotz größerer Hochwasserereignisse heraus, dass zwar die Wirkbereiche bei Hochwasser wie geplant überschwemmt wurden und die Isar sich einen neuen Weg bahnte, es aber zu keiner wirklichen Dynamik kam. Die fixierten Gewässerrinnen wurden nur zum Teil aufgebrochen und neue Abflussrinnen nur in geringem Umfang geschaffen. Die Rodung von dichtem Weidegebüsch schuf zwar neue Standorte für Pioniervegetation, die auch von dieser und von Weidenaufwuchs angenommen wurden. Unklar ist nur wie lange diese bestehen können und nicht verdrängt werden (Huber 2022). Weitere Details zu den Maßnahmen können am WWA WM

erfragt werden. Die naturschutzfachliche Beurteilung der Kohärenzausgleichsmaßnahmen durch die höhere Naturschutzbehörde der Regierung von Oberbayern steht derzeit noch aus.

3.1.6 Weitere Einflussfaktoren

3.1.6.1 Geschiebeeintrag aus Österreich

Wie in der Stellungnahme von Gabel et al. (2006) dargelegt wurde, bezogen sich vor allem ältere Studien auf einen weitgehenden unveränderten Isaroberlauf in Österreich (vgl. dazu auch (Karl et al. 1977)), doch dies ist nicht ganz zutreffend. So führt die Landesstelle für Gewässerkunde (1926) auf, dass sich oberhalb von Scharnitz die erste Wehranlage an der Isar befindet, sowie der Fluss im Ortsbereich Scharnitz bereits „verwerkt“ ist. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich die Geschiebezufuhr aus dem Isargebiet veränderte.

3.1.6.2 Anthropogene Nutzungen an der Oberen Isar

Ein weiterer, wenn auch kleinerer Einflussfaktor im Untersuchungsgebiet ist die anthropogene Nutzung am Gewässer:

- So spielte einst die Flößerei, also der Transport von großen Mengen Holz über die Isar sowie der Bedarf an Holz für die Köhlerei eine große Rolle. Dies belegen beispielhaft die rund 10.000 erfassten Floßfahrzeuge im Jahr 1865 auf der Isar (Huber 2022). Ebenfalls sind auf einem Luftbild von 1921 große Holzlagerstätten zu erkennen (Abb. 22). Unterstellt man, dass zunächst die ufernahen Gehölze zuerst gerodet wurden, könnte dies durchaus einen Einfluss auf die Uferstabilität und damit die Morphologie gehabt haben (vgl. Widmer et al.).

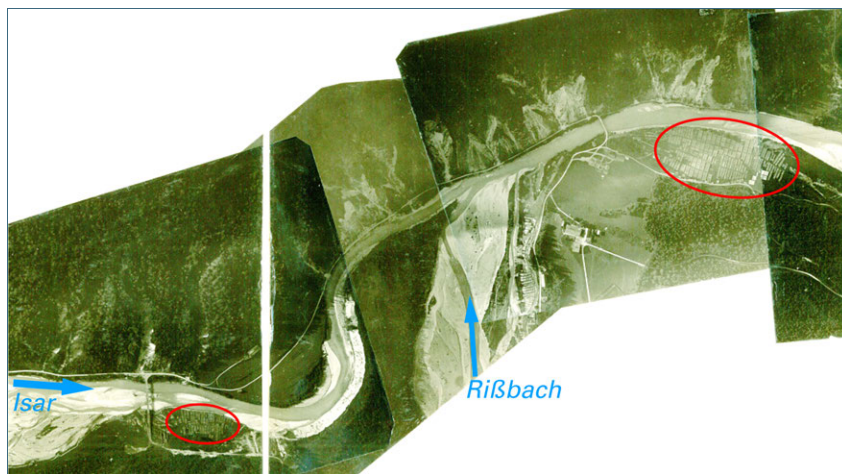


Abb. 22:
Luftbild von 1921 im
Bereich oberhalb der
Reißbachmündung;
Holzlagerstätten rot
markiert

- Ebenfalls gab es einen Rückgang der Bewirtschaftung der Weidegebiete am Fluss. So verlagerte sich die Beweidung nach dem Hochwasser im Jahr 1970 stärker in die flussfernen Waldweidegebiete. Dazu ging grundsätzlich die Bedeutung von Weidengewächse als Ressource (Futter, Einstreu, Baumaterial) zurück (Schaipp 2006). Diese frühere, historische Bewirtschaftung könnte in einem geringen Grad den Anteil der Weiden in der Vergangenheit unterdrückt haben. Aktuell wird vor allem noch die Weberwiese (~FKM 246) beweidet, was aber auch einen Konflikt darstellt, da die Wiese in der Vergangenheit immer wieder auch überschottet wurde, wie im Fachsymposium „Neue Wege an der Oberen Isar 2018“ thematisiert wurde.

3.1.6.3 Änderungen durch Klimawandel

Auch der Klimawandel wird einen Einfluss auf die Entwicklung der Oberen Isar haben. Änderungen im Niederschlagsverhalten führen zu einer Änderung des Abflusses und damit des Sedimenttransports. Zudem können Änderungen in Temperatur das Wachstum von bestimmten Pflanzen verbessern bzw.

verschlechtern. Doch gerade in den alpinen Einzugsgebieten ist eine sehr hohe Heterogenität gegeben und eine genaue Bezifferung der Änderungen sehr schwer. Aus aktuellen Untersuchungen am Klimazentrum des LFU lassen sich die folgenden Ergebnisse bezogen auf den Abflusspegel Mittenwald entnehmen (Quelle: LFU Abflussbericht Bayern – Abflussprojektionen bis 2100 für die bayerischen Flussgebiete; noch nicht veröffentlicht). Betrachtet wurden dabei die Kenngrößen MQ, MNQ und MHQ für den Jahresverlauf sowie getrennt für Sommer bzw. Winterhalbjahr. Die Modellierung basiert auf einem Ensemble von Klimaprojektionen, welche auf zwei Repräsentative Treibhausgas-Konzentrationspfaden („Representative Concentration Pathways“, RCPs) basieren. RCP2.6 ist dabei ein Klimaschutz Szenario welches anstrebt, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf 2 °C zu begrenzen. RCP8.5 hingegen ist ein Szenario ohne Klimaschutz. Eine ausführliche Beschreibung der RCP-Szenarien ist im Klimareport Bayern 2021 zu finden (StMUV 2021). In Abb. 23 bis Abb. 28 sind die Änderungssignale der jeweiligen Abflusskenngrößen (mittlerer Abfluss MQ und mittlerer Hochwasserabfluss MHQ) für das gesamte hydrologische Jahr sowie getrennt nach Winter und Sommerhalbjahr dargestellt. Die Projektionen für MNQ sind im Anhang 8.2 der Vollständigkeit halber beigefügt.

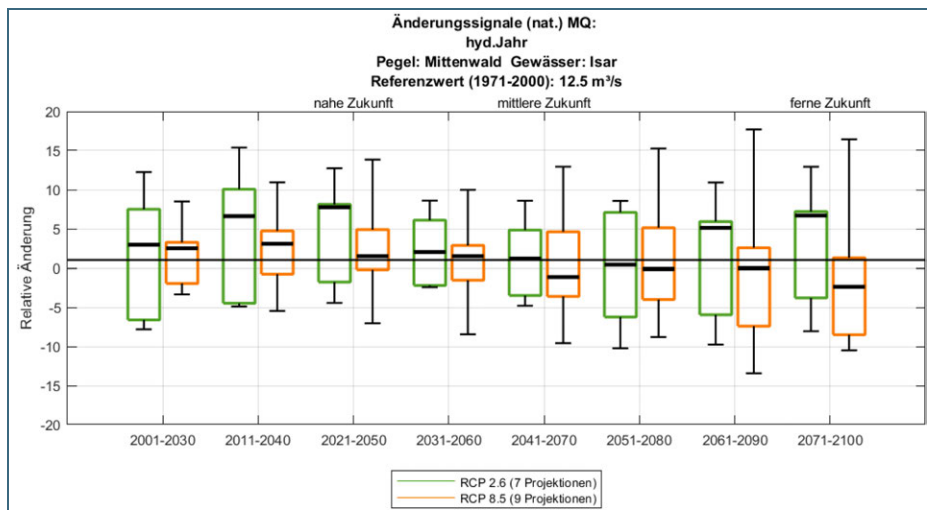


Abb. 23:
 Klimasignale am Pegel Mittenwald für das ganze hydrologische Jahr für das MQ

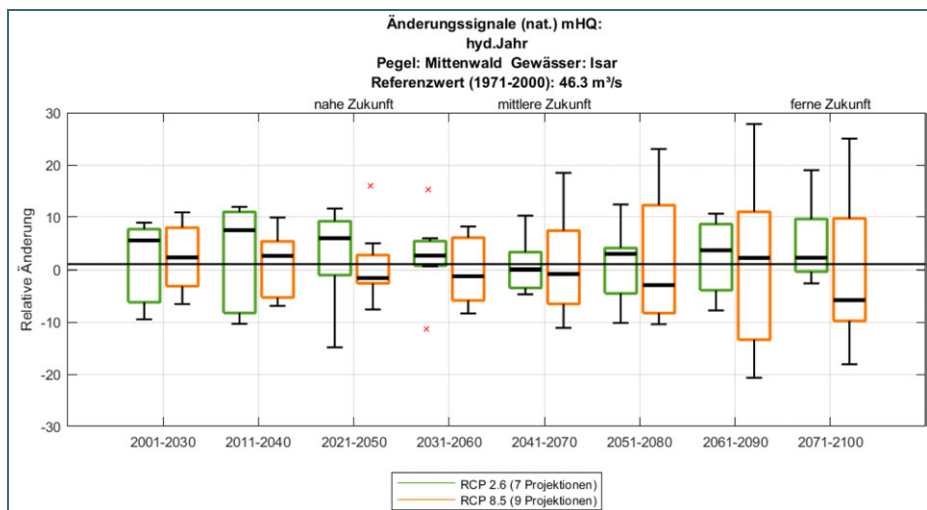


Abb. 24:
 Klimasignale am Pegel Mittenwald für das gesamte hydrologische Jahr für das MHQ

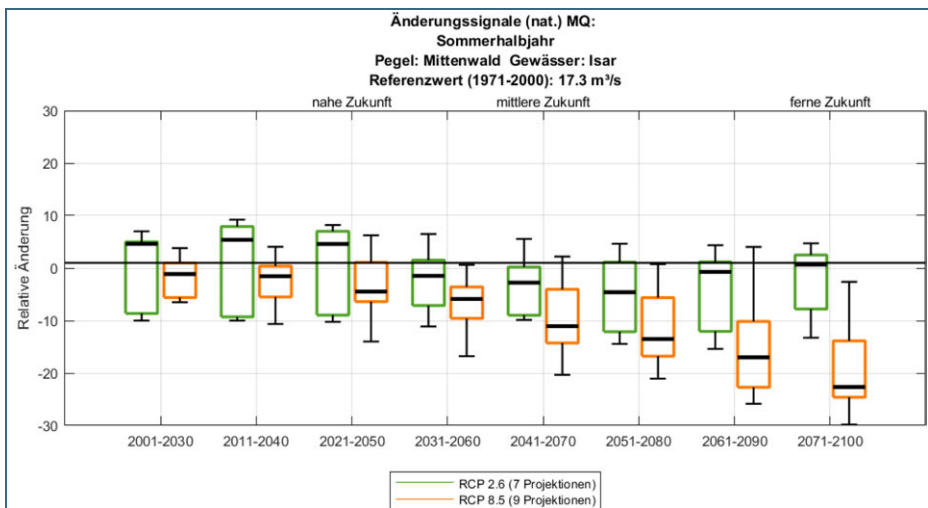


Abb. 25: Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Sommerhalbjahr für das MQ

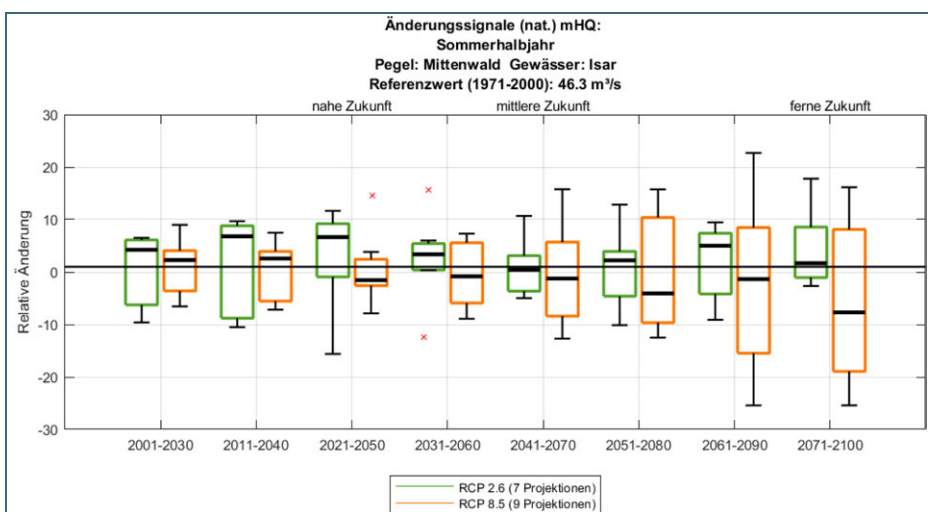


Abb. 26: Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Sommerhalbjahr für das mHQ

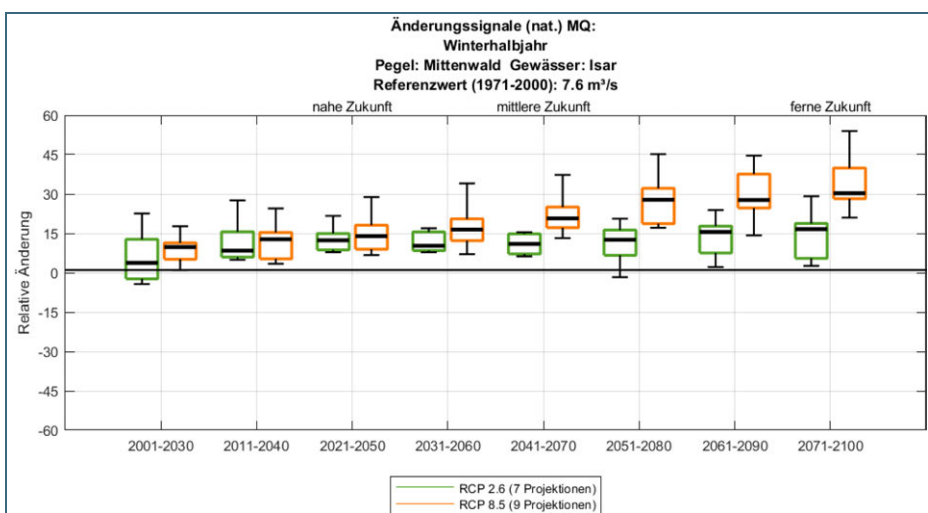


Abb. 27: Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Winterhalbjahr für das MQ

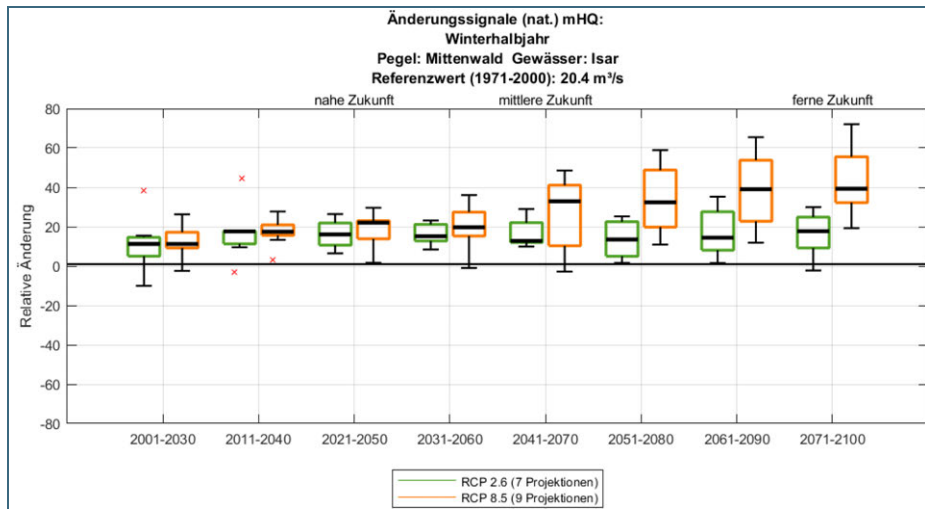


Abb. 28:
Klimasignale am Pegel
Mittenwald für das Win-
terhalbjahr für das
MHQ

Allgemein erkennbar ist, dass mit zunehmender Projektionsdauer die Bandbreite des Änderungssignals zunimmt. Der mittlere Abfluss (MQ) scheint tendenziell gleichzubleiben bzw. leicht zuzunehmen, da sich die Änderungen im Winterhalbjahr mit denen aus dem Sommerhalbjahr überlagern. Im Winter nehmen die Abflüsse aller Wahrscheinlichkeit zu (7,6 m³/s → 8,4/9,5 m³/s) was vermutlich auf den Temperaturanstieg und dem damit verbundenen Wandel von Schneefall zu direktem Niederschlag zurückzuführen ist. Entsprechend gehen Abflüsse im Sommerhalbjahr zurück (17,3 m³/s → 17,3/14,7 m³/s), da weniger Schnee verfügbar ist der abschmilzt und Verdunstungsverluste zunehmen könnten. Somit kommt es zu einer Vergleichmäßigung im Jahresverlauf. Die Entwicklung der MHQ deckt sich weitgehend mit den MQs, doch ist die Bandbreite um einiges Größer und damit auch die Unsicherheit.

3.2 Flussmorphologische Entwicklungen

Aufbauend auf dem historischen Abriss und einer eher qualitativen Beschreibung der Entwicklung der Oberen Isar und ihrer Zuflüsse, stellt folgender Abschnitt eine quantitative Auswertung der maßgebenden flussmorphologischen Kenngrößen dar. Betrachtet werden dabei Veränderungen im Abflussgeschehen und im Grundwasserhaushalt, aber insbesondere die Entwicklung der Gewässersohle mittels Talweg, mittleren Sohlen und Volumenbilanzierungen.

3.2.1 Abflussentwicklung

Aus den vorhandenen Daten wurden Abflussganglinien in einem 15-minütigen Intervall aufbereitet, für den Zeitraum ab 1967 (Rißbach am Rißbachwehr) bzw. ab 1970 (Isar am Krüner Wehr) bis Ende 2022. Eine ähnliche Auswertung basierend auf Tagesmittelwerten wurde bereits von Schaipp und Zehm (2009) durchgeführt.

Dabei wurden am Krüner Wehr folgende Kriterien berücksichtigt:

- Ab 40 m³/s wird der Ausleitungskanal geschlossen.
- Während den bekannten Spülungen wird die Überleitung geschlossen.
- Maximal können 25 m³/s übergeleitet werden.
- Mindestwasserabgabe ab 1990 mit 3 m³/s von November bis März bzw. 4,8 m³/s von April bis Oktober.
- Speicherbetrieb am Stausee Krün von Oktober bis April mit 12-h-Zyklen von 8:00 bis 20:00 Uhr (entsprechend 1 m Erhöhung des Stauziels).

Am Reißbachwehr wurden diese Bedingungen hinterlegt:

- Ab 20 m³/s wird der Ausleitungsstollen geschlossen.
- Während den bekannten Spülungen wird der Ausleitungsstollen geschlossen.
- Von April bis Juni (Schneesmelze) werden bis zu 14 m³/s ausgeleitet, sonst bis zu 12 m³/s.

3.2.1.1 Krüner Wehr

Die in Tab. 1 genannten 15-minütigen Abflüsse am Krüner Wehr wurden in Unterschreitungsdauerlinien umgewandelt (Abb. 29). Da ab dem Jahr 1990 die konstante Mindestwasserabgabe von 3,0 m³/s im Winter- bzw. 4,8 m³/s im Sommerhalbjahr etabliert wurde, wurde die Zeitreihe in zwei Epochen unterteilt und getrennte Dauerlinien erstellt. Dabei kann im Zufluss zum Krüner Wehr bereits eine leichte Erhöhung der Abflüsse kleiner Q₂₄₀ bzw. Abnahme von Abflüssen größer Q₂₄₀ identifiziert werden. Dies könnte bereits eine Auswirkung des Klimawandels sein, da diese Art der „Vergleichmäßigung“ des Jahresverlaufs in dieser Region auch in anderen Studien beschrieben ist (Poschlod et al. 2020).

Die Dauerlinien der Isar unterhalb des Wehrs unterscheiden sich deutlicher. Fiel die Isar vor dem Jahr 1990 noch an rund 300 Tagen im Jahr trocken (=Totalausleitung), tritt dieser Zustand nun gar nicht mehr ein. Stattdessen führt die Isar nun an rund 210 Tagen 3 m³/s und an weiteren 120 Tagen 4,8 m³/s. Lediglich an den verbleibenden 35 Tagen führt die Isar nennenswert mehr Wasser als die Mindestwasserabgabe. Durch die Mindestwasserabgabe reduzierte sich die Ausleitungsmenge in die Überleitung zum Walchensee entsprechend.

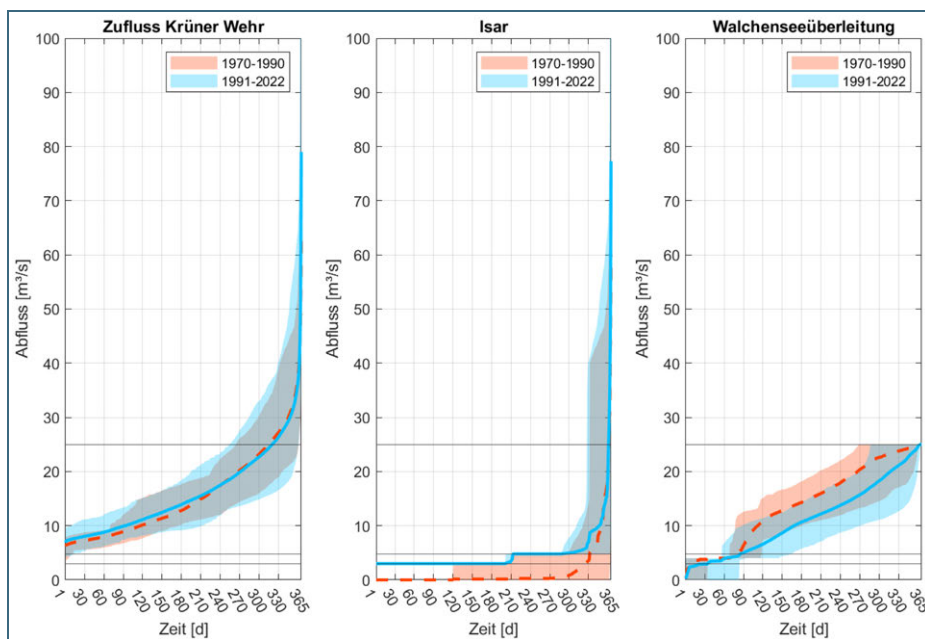


Abb. 29: Abflussdauerlinien am Krüner Wehr, für den Zufluss (links), den verbleibenden Abfluss in der Isar (mittig) und die Ausleitungsmenge in den Kanal zum Walchensee (rechts) für den Zeitraum bis 1990 (rot) und ab 1991 (blau) (Beginn Mindestwasserabgabe). Farbige hinterlegte Flächen spiegeln die Bandbreite zwischen Minimum und Maximum der jeweiligen Epoche wieder.

Eine Jahresbilanzierung der Abflussmengen am Krüner Wehr liefert noch weitere Informationen (Abb. 30). Bis zur Einführung der Mindestwasserabgabe wurde rund 92 % des ankommenden Wassers ausgeleitet und nur etwa 8 % verblieben im Mittel in der Isar. Ab dem Jahr 1990 reduziert sich die Ausleitungsmenge auf rund 71 % und der Abfluss in der restlichen Isar erhöhte sich entsprechend. Unter Berücksichtigung der tatsächlich durchgeführten Spülungen, die ab dem Jahr 1990 dokumentiert vorliegen, kann der Abfluss in der Isar noch weiter aufgeschlüsselt werden: in die weitgehend konstante Mindestwasserabgabe (23 %), den bekannten und tatsächlich durchgeführten Spülungen (3 %) und dem Abflussanteil, welcher den maximalen Ausleitungsabfluss von 25 m³/s übersteigt bzw. die Ausleitung geschlossen wird, bei dem aber keine Spülungen durchgeführt bzw. dokumentiert wur-

den (3 %). Da die letzten baulichen bzw. betrieblichen Änderungen weiter als das Jahr 1970 zurückliegen, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verhältnis auch vor dem Jahr 1990 anwendbar ist. Diese Aufschlüsselung deckt sich auch mit den Auswertungen vergangener Studien, welche auf ähnliche Aufteilungen kamen (Bellinger und Antl 2023; Schaipp und Zehm 2009).

Aus dieser Übersicht ist erkennbar, dass sich ab dem Jahr 1990 die Abflussmenge in der Isar unterhalb des Krüner Wehrs zwar deutlich erhöht hat, diese sich zu 80 % aber auf das reine Mindestwasser beschränkt, welches nicht in der Lage ist Geschiebe zu transportieren. Gleichzeitig steckt in den bisher nicht für Spülungen genutzten Abflussereignissen ungenütztes Transportpotential.

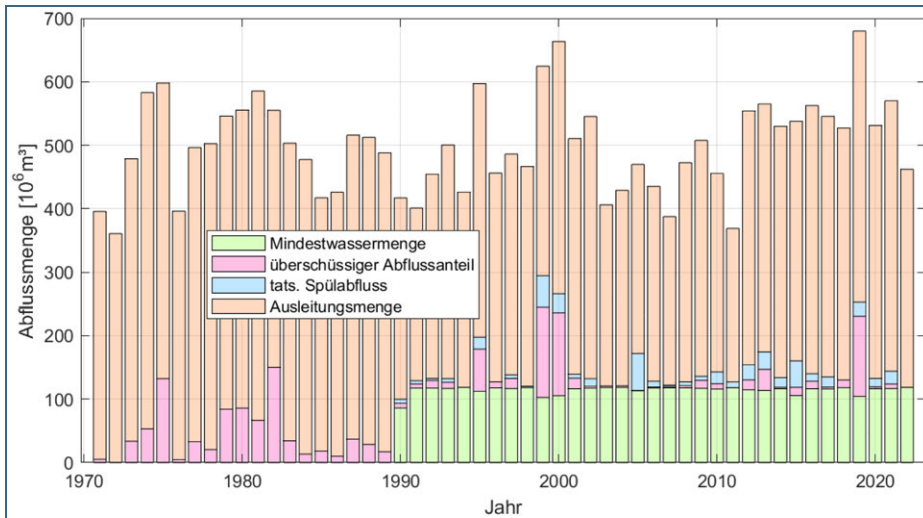


Abb. 30: Aufteilung des Jahresabflusses am Krüner Wehr

3.2.1.2 Reißbachwehr

Aus den 15-minütigen Ganglinien am Reißbachwehr wurden ebenfalls Unterschreitungsdauerlinien erstellt (Abb. 31). Daraus ist erkennbar, dass der Reißbach unterhalb des Wehrs an rund 270 Tagen im Jahr trockenfällt und kein Wasser führt. Da das Volumen des Stausees am Reißbachwehr deutlich geringer ist und kaum eine Speicherung ermöglicht, sowie das Geschiebe unmittelbar an das Wehr transportiert wird, werden geschiebetransportwirksame Abflussmengen wesentlich öfter durch das Wehr geführt und die Wehrfelder geöffnet (Spülungen).

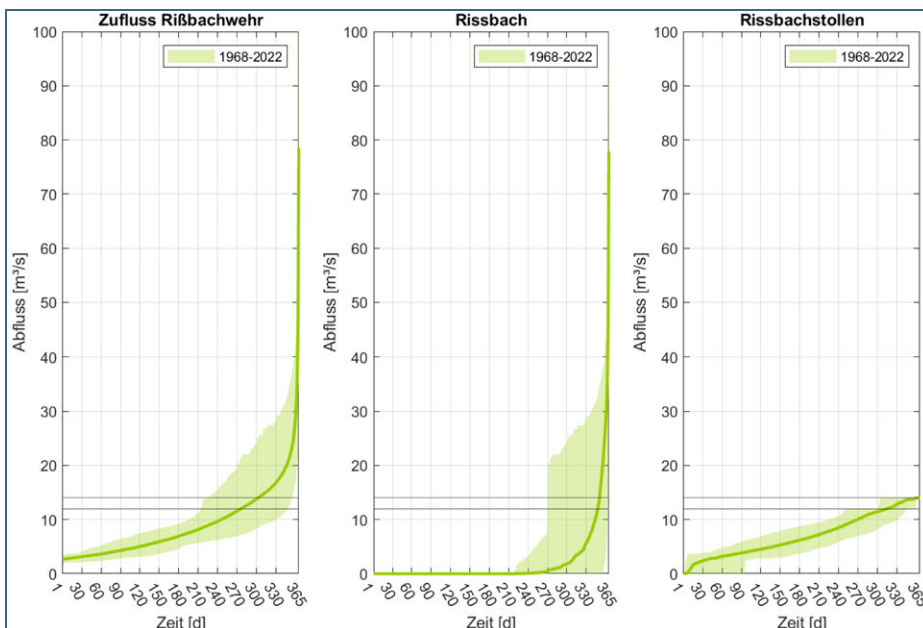


Abb. 31: Abflussdauerlinien am Reißbachwehr, für den Zufluss (links), den Reißbach unterhalb des Wehrs (mittig) und die Ausleitungsmenge in den Stollen (rechts). Die farbig hinterlegte Fläche spiegelt die Bandbreite zwischen Minimum und Maximum wieder.

Die Jahresbilanzierung der Abflussmengen in Abb. 32 zeigt, dass rund 82 % des verfügbaren Abflusses ausgeleitet wird und etwa 18 % im Reißbach verbleiben. Informationen zu tatsächlich durchgeführten Spülungen stehen nur im Zeitraum 2011 bis 2021 zur Verfügung, daher kann die Zusammensetzung des Abflusses unterhalb des Wehres nur geschätzt werden. Zwischen 2011 und 2021 teilte sich der Abfluss wie folgt auf: 87 % Ausleitung, 7 % Spülungen und 6 % überschüssiger Abfluss ohne Spülungen. Es kann auch hier davon ausgegangen werden, dass das Verhältnis von Spülungen zu überschüssigem Abfluss ohne Spülungen (7 % zu 6 %) auch in den Jahren vor 2011 ähnlich blieb, da es zu keinen baulichen bzw. betrieblichen Änderungen am Reißbachwehr kam.

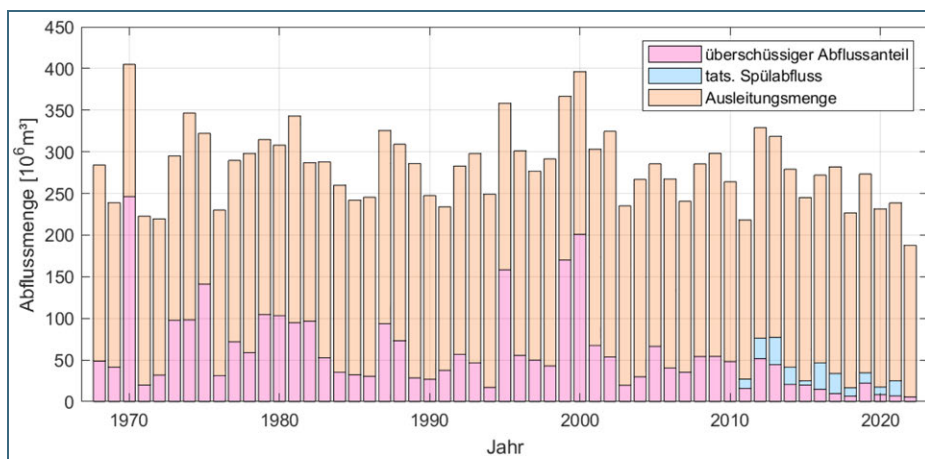


Abb. 32: Aufteilung des Jahresabflusses am Reißbachwehr

3.2.1.3 Betriebliche und konzeptionelle Spülungen

Eine eigene Untersuchung des WWA WM zu den Spülungen am Krüner Wehr und dem Reißbachwehr beschreibt zum einen die Unterschiede bei der gängigen Spülpraxis an beiden Wehren und deckt gleichzeitig Potential für ein geändertes Spülmanagement auf. Die Untersuchung zeigt, dass gerade am Krüner Wehr deutlich öfters gespült werden könnte, ohne dabei große Verluste in der Jahresüberleitungsmenge zu verursachen. Aktuell wird vor allem aus betrieblichen Gründen gespült, wenn die Gefahr besteht, dass Sediment in den Ausleitungskanal eingezogen wird. Für solche Spülungen reichen auch bereits geringe Abflussmengen kurzer Dauer aus, um das unmittelbar vor dem Wehr abgelagerte Material zu mobilisieren. Gleichzeitig traten im betrachteten Zeitraum zahlreiche größere Abflussereignisse auf, die nicht für Spülungen genutzt wurden. Am Reißbachwehr hingegen konnte nur wenig Verbesserungspotential erkannt werden, da aus betrieblichen Gründen bereits wesentlich öfter gespült werden muss.

Die Überleitungsverluste durch optimierte Spülungen werden im Vermerk beide Wehranlagen auf jeweils etwa 5 % beziffert. Essentielles Kriterium für ein verbessertes Spülmanagement wird aber in der Abflussprognose und der Steuerung am Wehr gesehen. Nur wenn geeignete Ereignisse rechtzeitig erkannt und das Wehr entsprechend gesteuert werden kann, lässt sich eine maximale Spüleffizienz erreichen und lassen sich die Verluste minimieren. Für weitere Details wird auf den Vermerk verwiesen (Bellinger und Antl 2023).

3.2.1.4 Hochwasserereignisse

Neben dem normalen Abflussgeschehen bilden Hochwasserereignisse größeres Potential für morphologische Veränderungen. Eine einfache Auswertung der Jahreshöchstwerte der Abflüsse für den Zeitraum von 1970 bis 2022 am Krüner Wehr und Reißbachwehr mittels „Plotting Positions“ zeigt, dass am Reißbachwehr Hochwasserereignisse bis zu einem Scheitelabfluss von 80 bis 100 m³/s tendenziell häufiger sind als am Krüner Wehr (siehe Abb. 33). Da laut UNIPER „*der Kies [am Krüner Wehr] ab 20-25 m³/s zu wandern anfängt*“, wird deutlich, dass diese kleineren aber häufigeren Hochwasserereignisse zu einer Dynamik in der Strecke beitragen. Seltenerere Hochwasserereignisse haben hingegen an der

Isar einen größeren Abfluss, was auch aufgrund des deutlich größeren Einzugsgebiet plausibel ist. Hervorzuheben sind jedoch die beiden „Extremereignisse“ – das Hochwasser 1999 und 2005 –, welche an der Isar und am Reißbach ähnliche Hochwasserscheitel von rund 200 m³/s hervorbrachten.

Hinweis: Die Methode „Plotting Positions“ gibt die Jährlichkeit nur vereinfacht an, da diese maßgeblich durch die Länge der Zeitreihe bestimmt wird. Jedoch haben die ermittelten Jährlichkeiten der Isar eine ähnliche Größenordnung wie die des hydrologischen Gewässerlängsschnitts in Tab. 3.

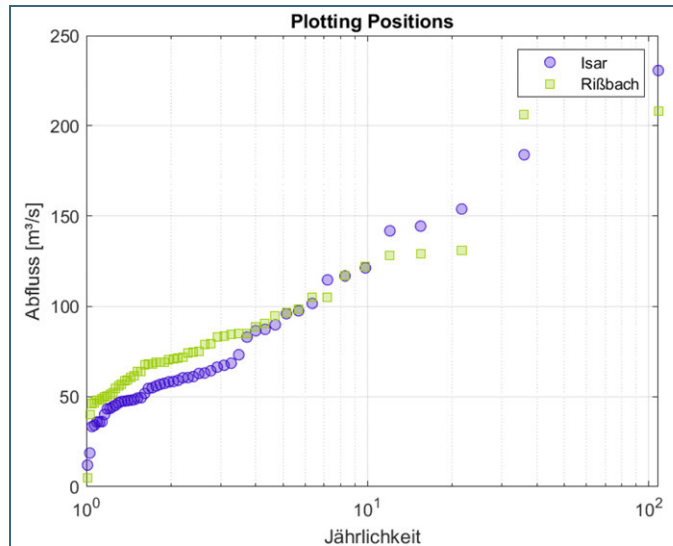


Abb. 33: Plotting Positions der jährlichen Hochwasserspitzen im Zeitraum 1970 bis 2022 der Isar am Krünerwehr bzw. des Reißbachs am Reißbachwehr

Zwischenfazit

In Tab. 6 sind die gewonnenen Erkenntnisse vergleichend zusammengefasst:

Tab. 6: Gegenüberstellung der Abflusscharakteristik am Krüner Wehr und Reißbachwehr

	Isar / Krüner Wehr		Reißbach / Reißbachwehr
	Bis 1990	Ab 1990	
Wasserführung unterhalb Wehr	<ul style="list-style-type: none"> An rund 300 Tagen kein Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> An rund 330 Tagen konstante Mindestwasserführung 	<ul style="list-style-type: none"> An rund 270 Tagen kein Wasser
Aufteilung des Abflusses am Wehr	<ul style="list-style-type: none"> 92 % Ausleitung 0 % Mindestwasser ~4 % Spülungen ~4 % Überschuss 	<ul style="list-style-type: none"> 71 % Ausleitung 23 % Mindestwasser 3 % Spülungen 3 % Überschuss 	<ul style="list-style-type: none"> 82 % Ausleitung 0 % Mindestwasser ~9 % Spülungen ~9 % Überschuss
Spülungen	<ul style="list-style-type: none"> Ungenutztes Potential, da bisher Spülungen nur aus betrieblichen Gründen und nicht unbedingt bei größeren Ereignissen erfolgen 		<ul style="list-style-type: none"> Kaum Verbesserungspotential, da betrieblich öfters gespült werden muss
Hochwasser	<ul style="list-style-type: none"> Größere Abflussspitzen bei größeren Jährlichkeiten (>HQ10) Häufige Hochwasserereignisse (<HQ10) haben einen tendenziell kleineren Hochwasserscheitel als am Reißbach. 		<ul style="list-style-type: none"> im „Extremfall“ ähnlich große Abflussspitzen wie die Isar

Der Reißbach führt nach wie vor an etwa 270 Tagen kein Wasser und etwa 82 % der verfügbaren Wassermenge werden dem Fluss entzogen. Doch die verbleibenden 18 % sind der Anteil, der morphologisch am wirksamsten ist und sich aus den Spülungen sowie Abflüssen größer der Ausleitungsmenge von 12 bzw. 14 m³/s zusammensetzt.

Der Ausleitungsanteil an der Isar hat sich mit Beginn der Mindestwasserabgabe von 92 auf 72 % reduziert. Damit hat sich zwar die Wasserführung der Isar insgesamt wieder erhöht, doch fällt der Hauptanteil auf die festgesetzte Mindestwassermenge von 3 bzw. 4,8 m³/s. Lediglich 6 bis 8 % des gesamten Abflusses bestehen aus den Spülungen bzw. Abflüssen über 25 m³/s und tragen maßgeblich zum Geschiebetransport bei.

3.2.2 Grundwasser

Eine visuelle Auswertung der Tageswerte der fünf verfügbaren Messstationen zeigt deutlich den Einfluss der Mindestwasserabgabe ab 1990 auf die Grundwasserstände entlang der Isar unterhalb des Krüner Wehrs (Abb. 34). An der Messstation in Mittenwald, ca. 15 km oberhalb des Krüner Wehrs, ist über den kompletten Zeitraum keine deutliche Veränderung im Grundwasserstand erkennbar.

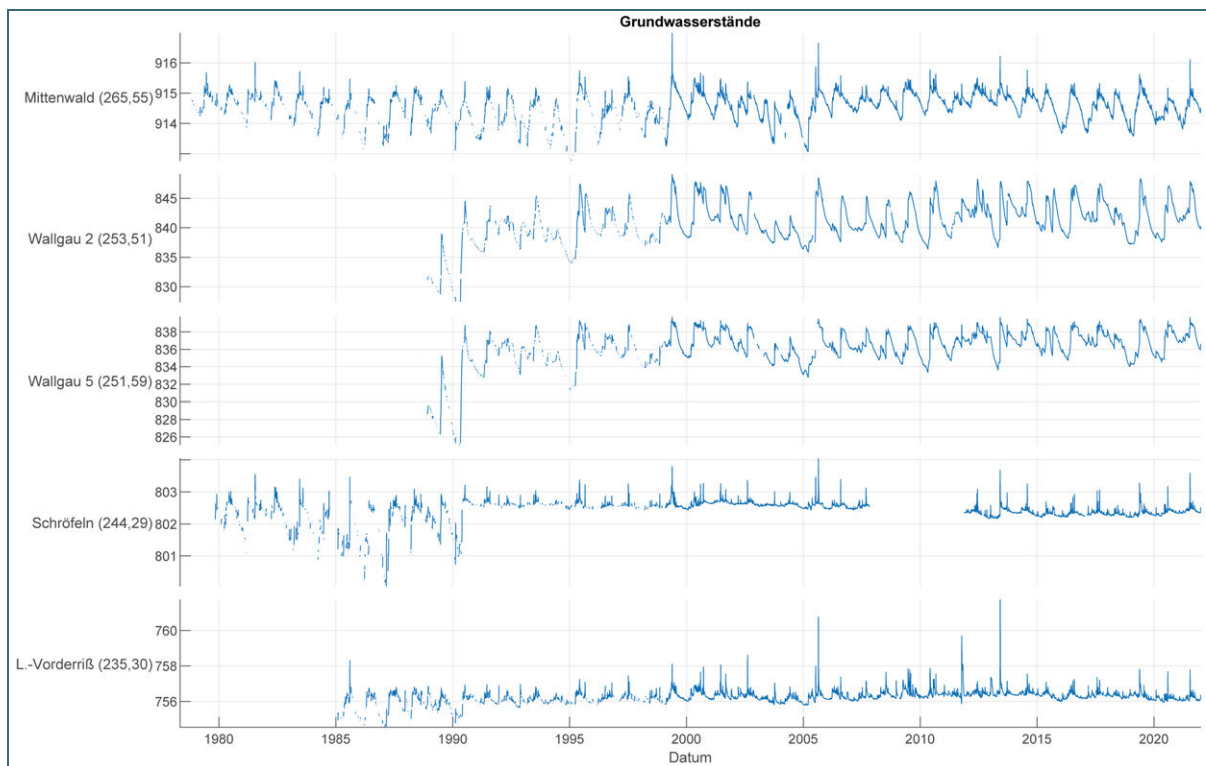


Abb. 34: Zeitreihen der Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet. (Angaben des Grundwasserstandes in [müNN])

Die Messwerte pendeln im Jahresverlauf um 1 bis 2 m mit wenigen Ausreißern, was auf Hochwasserereignisse zurückzuführen ist (z. B. 1999 und 2005). Unterhalb des Krüner Wehrs ist der Einfluss der Mindestwasserabgabe an den zwei Stationen um die Ortschaft Wallgau (Station 2 und 5) deutlich erkennbar. Vor 1990 sind die Grundwasserstände deutlich niedriger als danach. Teilweise erreichen die Grundwasserstände inzwischen sogar die Oberfläche. Dies ist ein Problem, welches von der Gemeinde Wallgau auch bereits angemerkt wurde, da es die Trinkwasserentnahme beeinträchtigt (Schürer 2019). An der weiter unterstrom gelegenen Station Schröfeln, etwa 4 km oberhalb der Reißbachmündung, ist ebenfalls ein Anstieg der Grundwasserstände erkennbar, wenngleich deutlich schwächer. Aufgrund der längeren Zeitreihe, ist zudem ein Rückgang der Dynamik und damit ein deutlich ausgeglichener Grund-

wasserhaushalt zu beobachten. Lediglich größere Hochwasser wie in den Jahren 1999 und 2005 erzeugen Dynamik und Ausreißer nach oben. An der fünften Station, Lenggries-Vorderriß, kurz oberhalb der Vorsperre, ist ebenfalls noch ein Anstieg im Zuge der Mindestwasserabgabe erkennbar, wenn auch geringer.

Zwischenfazit

An der Entwicklung der Grundwasserstände ist der Einfluss der Mindestwasserabgabe deutlich erkennbar. Wie dargelegt haben sich seit 1990 die Grundwasserstände entlang der Isar deutlich erhöht und an Dynamik verloren. Wenngleich die Grundwasserstände zwar keinen direkten Einfluss auf den Sedimenttransport haben, gibt es doch sekundäre Effekte. Der höhere Grundwasserstand begünstigt feuchteliebende Pflanzen und schafft die Grundlage für mehrjährige Beständigkeit der Vegetation. Dies führt zu dichter bewachsenen Kiesbänken, welche das Rinnensystem zunehmend verfestigen (Schaipp und Zehm 2009; Reich et al. 2008).

3.2.3 Feststoffhaushalt und Flussbettentwicklung

Wichtigste Datengrundlage für die morphologische Studie stellen die aufgenommenen Flussquerprofile in Zusammenspiel mit den dokumentierten Feststoffentnahmen dar. Da die morphologische Datengrundlage entlang der Isar und dem Reißbach unterschiedlich ist, ergeben sich die folgenden Betrachtungsabschnitte die zunächst genauer untersucht werden, bevor die Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Obere Isar, von der Landesgrenze bis zur Vorsperre am Sylvensteinspeicher
- Reißbach
- Obere Isar, zwischen Krüner Wehr und Weberwiese
- Isarzuflüsse

3.2.3.1 Isar von der Landesgrenze bis zur Vorsperre

Zunächst wird eine einheitliche Betrachtung der ganzen Oberen Isar von der Landesgrenze bis zur Vorsperre am Sylvensteinspeicher durchgeführt. Da die morphologischen Entwicklungen von einem Auswertzeitpunkt zum nächsten auch vom Abflussgeschehen abhängen, sind in folgender Abbildung die Abflusstageswerte (Minimum, Mittelwert und Maximum) am Pegel Mittenwald (Abb. 35) in den jeweiligen Auswertepochen aufgetragen.

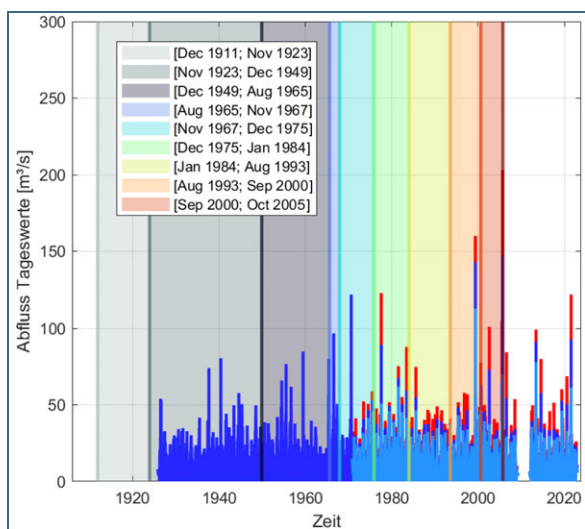


Abb. 35:
Tageswerte des Abfluss am
Krüner Wehr (Minimum:
Hellblau, Mittelwert: Blau
und Maximum: Rot) mit far-
big hinterlegten Epochen

3.2.3.1.1. Feststoffentnahmen

Bevor die Entwicklung der Querprofile betrachtet wird, werden die entnommenen Feststoffmengen dargestellt. Dabei wurde auf die Zusammenstellung der Entnahmemengen von Gabel et al. (2006) und Oswald (1984) zurückgegriffen, diese mit den Archivdaten am LfU abgeglichen und mit den aktuellen Meldungen des WWA WM ergänzt.

Zusätzlich zu den Entnahmemengen pro Kalenderjahr, wurde analog zu den zuvor beschriebenen Auswertezwischenräumen in den folgenden Grafiken die mittlere Entnahmemenge pro Epoche in m^3/a ermittelt.

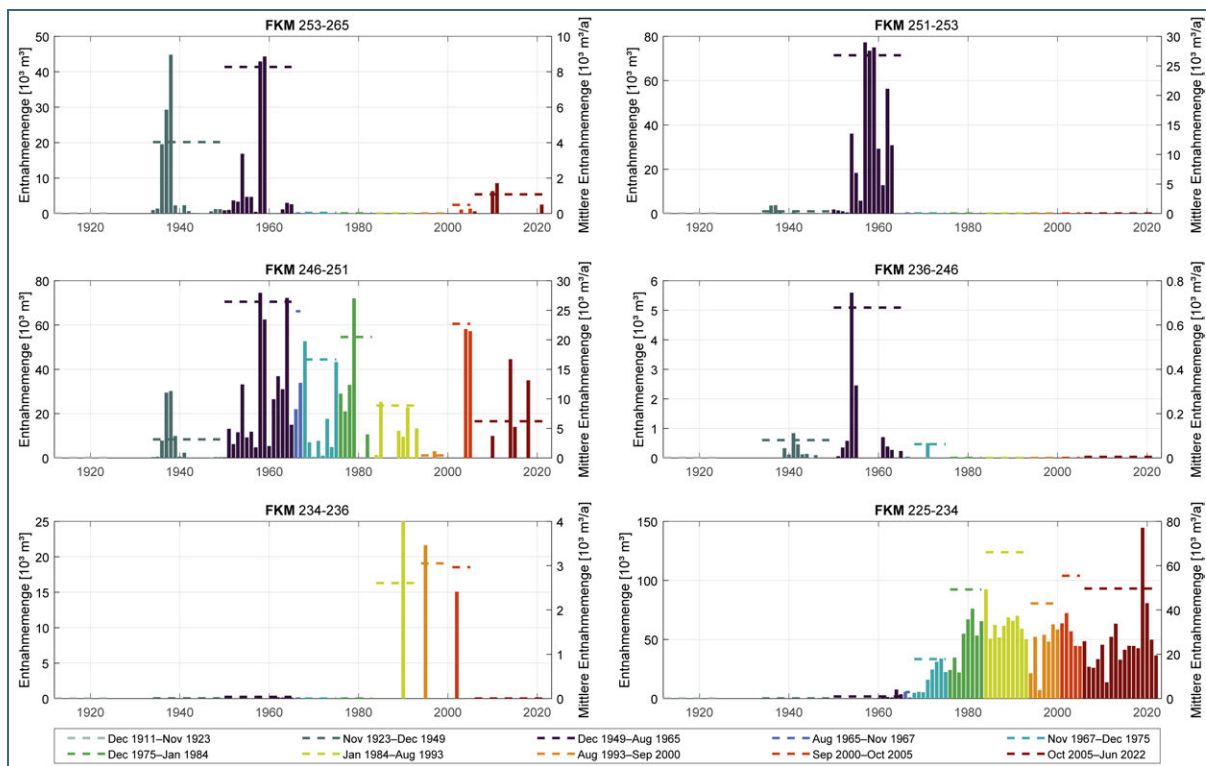


Abb. 36: Feststoffentnahmestatik entlang der Isar in verschiedenen Abschnitten.

Für die Auswertung wurde die Obere Isar in sechs charakteristische Abschnitte eingeteilt und die Entnahmen pro Kalenderjahr zusammengefasst. Die Abschnitte entsprechen den Bereichen, an denen zusammenhängend Sedimententnahmen durchgeführt werden:

- Landesgrenze bis unterhalb Mittenwald (FKM 263-253): In diesem Bereich wurde in älteren Epochen relativ viel Sediment für Baumaßnahmen wie den Straßenbau entnommen. Dies wurde jedoch gegen 1960 eingestellt. Lediglich in der neusten Epoche wurden wieder Sedimententnahmen durchgeführt, wenn auch in deutlich geringerem Umfang (etwa $1.000 \text{ m}^3/\text{a}$ in der Epoche 2005 bis 2022).
- Mittenwald bis Krüner Wehr (FKM 253-251): Ähnlich verhält es sich auch im folgenden Bereich bis zum Krüner Wehr, was sich mit den Beschreibungen aus dem historischen Abriss deckt.
- Krüner Wehr bis Mündung Finzbach (FKM 250,7-246): Die Entnahmen verlagerten sich ab ca. 1955 in den Bereich unterhalb des Krüner Wehrs bis zur Finzbachmündung. Hier wurde in den folgenden 25 Jahren in großen Mengen Kies entnommen, dann jedoch weitgehend eingestellt. Erst um 2004 wurde die Entnahme für die Sicherstellung des Hochwasserschutzes von Wallgau und Krün wieder aufgenommen, (vgl. Räumkoten in (Schaipp und Zehm 2009)).
- Finzbach bis oberhalb Rißbachmündung (FKM 246-236): In der weiteren Strecke wurde kaum Sediment entnommen und der Fluss sich weitgehend selbst überlassen.

- Rißbachmündung (FKM 236-234): Direkt an der Rißbachmündung wurde bisher dreimal Sediment entnommen, um der dortigen Verlandung entgegenzuwirken und den Hochwasserschutz von Vorderriß sicherzustellen. Auffallend ist, dass in Epochen in denen oberhalb (Krüner Wehr bis Finzbach) viel Sediment entnommen wurde, am Rißbach nichts entnommen werden musste. Als jedoch die Entnahmen oberhalb pausierten (Zeitraum 1960–2000), transportierte die Isar wohl tendenziell mehr Sediment über die Finzbachmündung hinaus, welches sich entlang der weiteren Strecke und damit an der Rißbachmündung ablagerte.
- Unterhalb Rißbachmündung bis Sylvensteinspeicher (FKM 234-225): Im letzten Bereich, an der Vorsperre Sylvensteinspeicher lagert sich am meisten Sediment ab, welches zum Verlandungsschutz des Speichers ab Mitte der 1960er-Jahre in großem Maßstab entnommen wird.

In Tab. 7 sind die mittleren Entnahmemengen pro Abschnitt und Epoche zusammengefasst:

Tab. 7: Mittlere Entnahmemengen an der Oberen Isar pro Abschnitt und Epoche [$10^3 \text{ m}^3/\text{a}$]

FKM Epoche	253-265	251-253	246-250,769	236-246	234-236	225-234
1911/1923	Keine Angaben					
1923/1949	4,03	0,37	3,15	0,08	~0,00	0,03
1949/1965	8,27	26,79	26,44	0,68	0,04	0,95
1965/1967	0	0	24,83	0	0	2,91
1967/1975	0,04	0,01	16,67	0,06	0	17,81
1975/1984	0,01	0	20,49	0	0	49,23
1984/1993	0	0	8,88	0	2,61	66,06
1993/2000	0	0	0,43	0	3,05	42,94
2000/2005	0,49	0	22,67	0	2,96	55,57
2005/2022	1,08	~0,00	6,21	0,01	0	49,66
1965/2005	0,07	~0,00	13,94	0,01	1,54	44,01

3.2.3.1.2. Talweg

In Abb. 37 und Abb. 38 ist der Talweg der Oberen Isar, im Bereich Mittenwald bis Krün und im Bereich Krün bis Sylvensteinspeicher, für die jeweiligen Epochen dargestellt. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Höhenänderung an einem Profil in Bezug auf das Gefälle und der Fließstrecke, überlagert sich der Talweg weitgehend. Daher ist im Anhang (Abb. 69) für die ganze Isar die Entwicklung des Talwegs in einzelnen, 6 km langen Abschnitten abgebildet.

Mittels einer abschnittswisen linearen Regression (Okazaki 2023) des Talwegs konnte in einigen Epochen ein Gefälleknick (GK) identifiziert werden (vgl. farbig gestrichelte, vertikale Linien in Abb. 37 und Tab. 8).

Aus dem visuellen Abgleich sowie der Betrachtung des Gefälles pro Abschnitt und Epoche ist erkennbar, dass die Isar von der Landesgrenze bis etwa FKM 259,00 ein deutlich größeres Gefälle hat als im weiteren Verlauf. Ebenfalls erkennbar ist, dass dieses steilere Gefälle kontinuierlich abnahm (von ca. 8,6 auf 8,1 ‰) und sich zudem der Gefälleknick kontinuierlich flussabwärts verlagert. Diese fortschreitende Erosion hängt vermutlich noch mit der Mittenwalder Korrektur und eines reduzierten Geschiebeeintrags von oberstrom zusammen. Das grundsätzlich höhere Gefälle deckt sich auch damit, dass die Isar bis ca. FKM 259,00 in einer engeren Schluchtstrecke fließt und sich das Tal sich erst danach weitert. Doch dieser ursprünglich weitere Bereich im Ortsbereich Mittenwald wurde ausgebaut und begradigt. Im weiteren Verlauf hielt die Isar weitgehend konstant ein Gefälle von etwa 5,4 ‰.

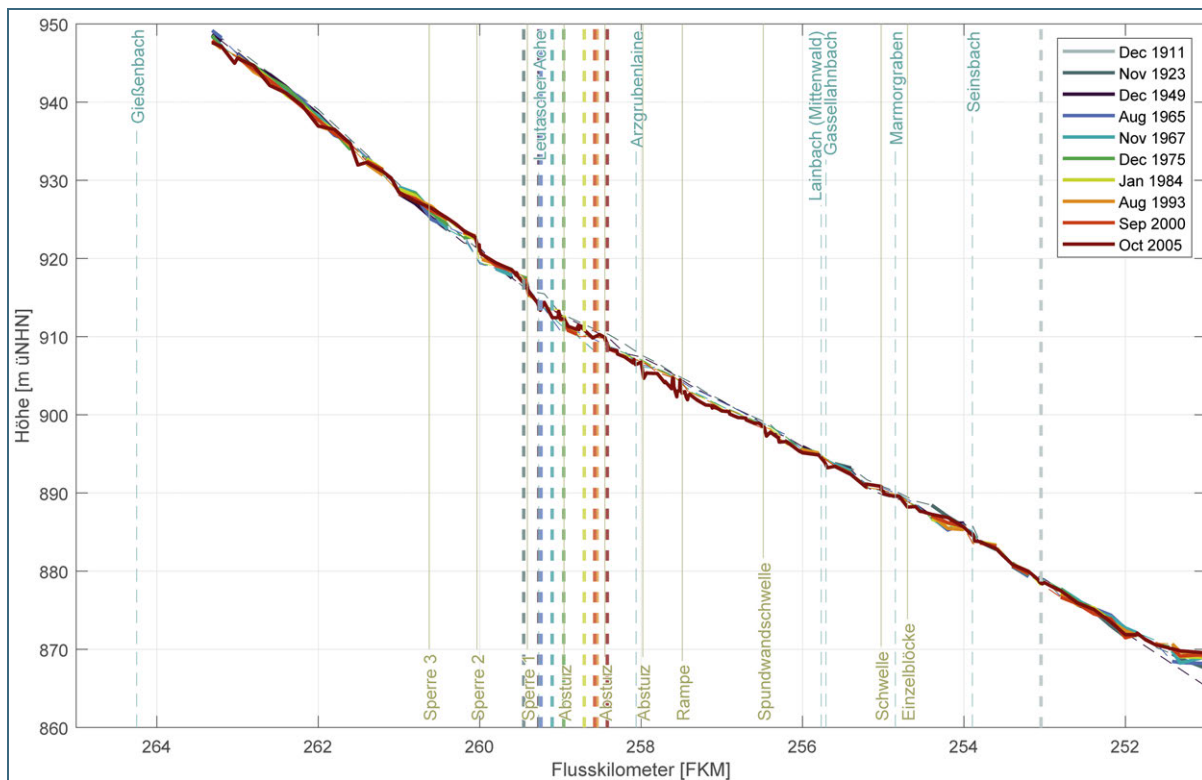


Abb. 37: Talweg der Oberen Isar von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr mit Gefälleknicken (farbig gestrichelte Linien).

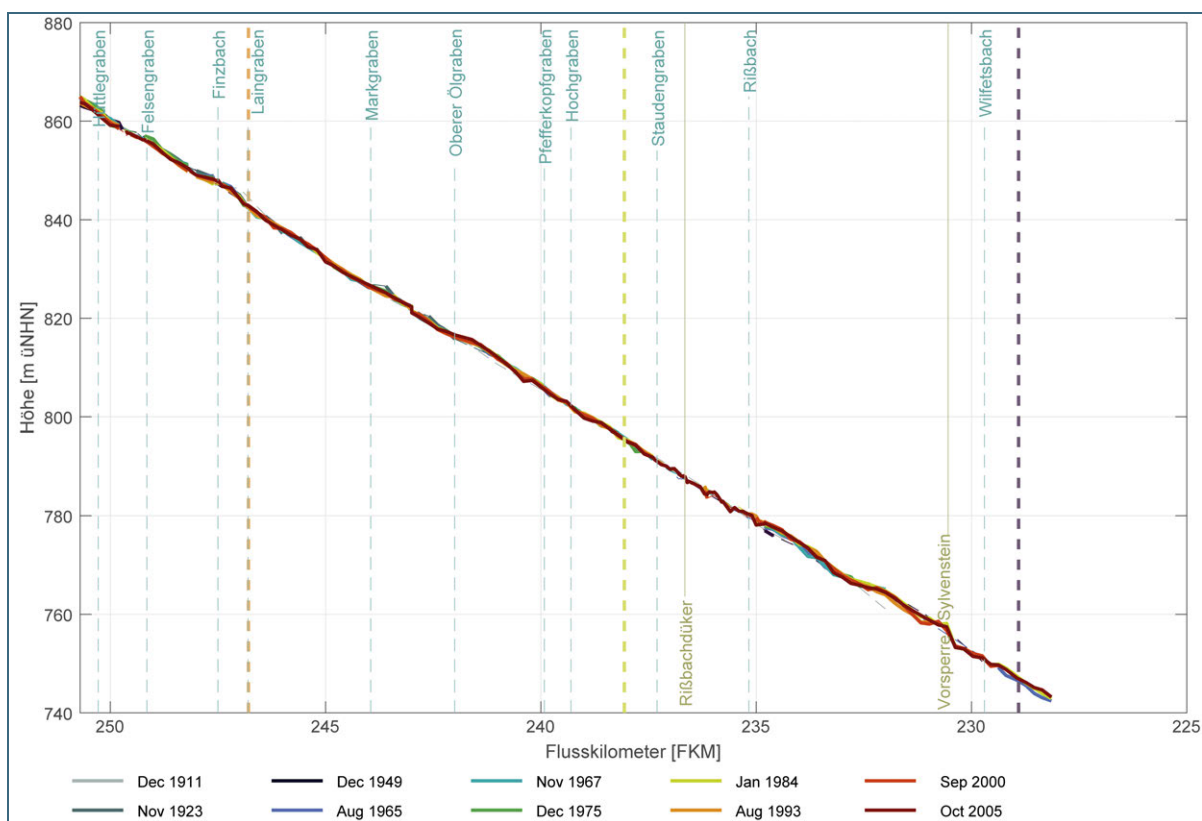


Abb. 38: Talweg der Oberen Isar von Krüner Wehr bis zur Vorsperre Sylvensteinspeicher mit Gefälleknicken (farbig gestrichelte Linien).

Tab. 8: Talwegsgefälle pro Epoche in den jeweiligen Abschnitten der Isar

Epoche [Jahr]	GK1 [FKM]	Gefälle FKM 265-GK1 [‰]	Gefälle GK1-FKM 251 [‰]	GK2 [FKM]	Gefälle 251-FKM GK2 [‰]	Gefälle GK2-FKM 225 [‰]
1911		Keine Daten		X	5,4	
1923	259,5	8,7	5,8	X	5,4	
1949	259,3	8,6	5,6	228,9	5,5	6,5
1965	259,2	8,6	5,7	X	5,4	
1967	259,1	8,4	5,6	X	5,3	
1975	259,0	8,4	5,6	X	5,3	
1984	258,7	8,2	5,6	238,1	5,4	5,3
1993	258,6	8,0	5,6	246,8	5,5	5,4
2000	258,6	8,1	5,6	X	5,3	
2005	258,4	8,0	5,5	X	5,3	

3.2.3.1.3. Mittlere Sohlen

Um Erosion und Ablagerungen in den Profilen zu beziffern, werden die Differenzen der Mittleren Sohle betrachtet, in Bezug auf das Sohlniveau der aktuellsten Epoche 2005:

$$\Delta z_s = z_{s,2005} - z_{s,j} \quad [m] \quad (5)$$

mit j = jeweilige, ältere Epoche.

In Abb. 39 bis Abb. 41 ist die Sohlentwicklung in Abschnitten entsprechend dargestellt (positive Werte = Anlandung, die Sohle im Jahr 2005 liegt höher; negative Werte = Erosion, die Sohle im Jahr 2005 liegt tiefer).

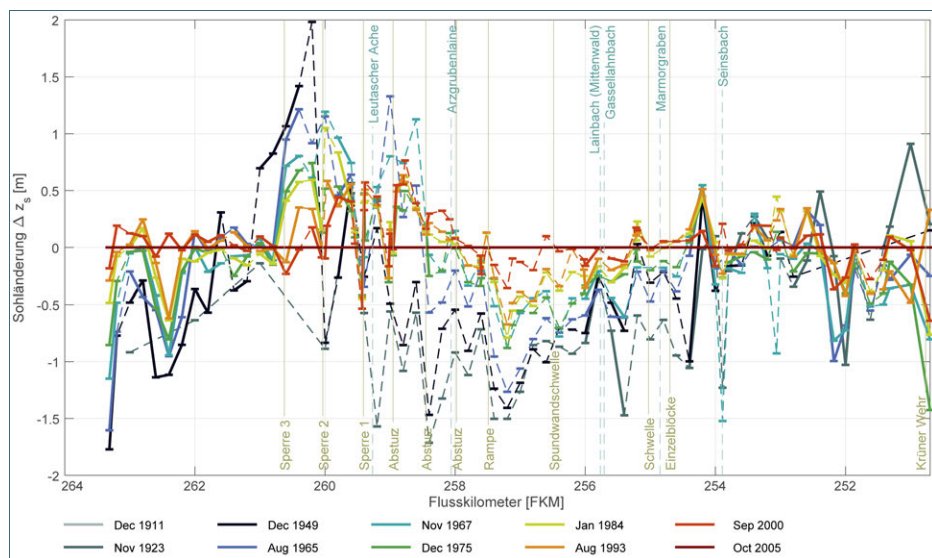


Abb. 39: Änderung der mittleren Sohlagen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar von FKM 264-250,76

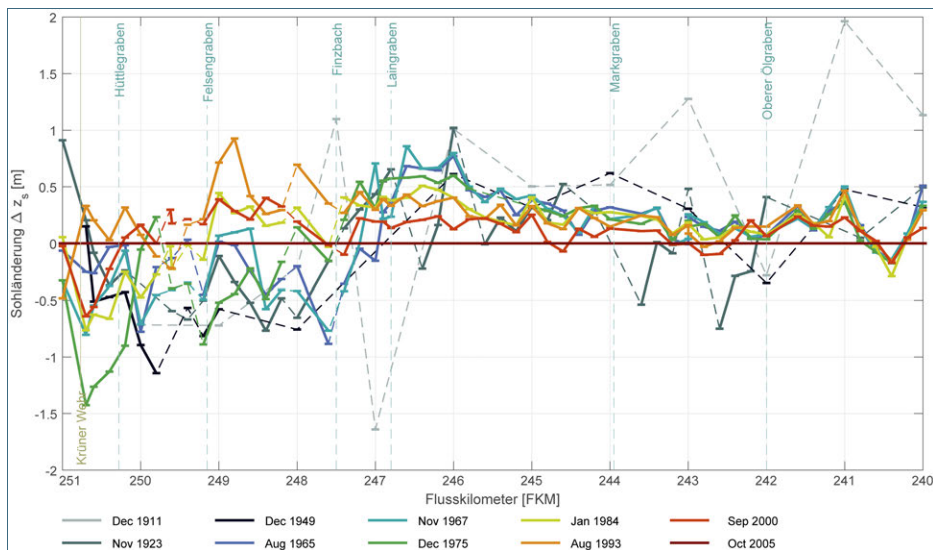


Abb. 40:
Änderung der mittleren
Sohlagen bezogen auf
die Epoche 2005 der
Isar von FKM 251-240

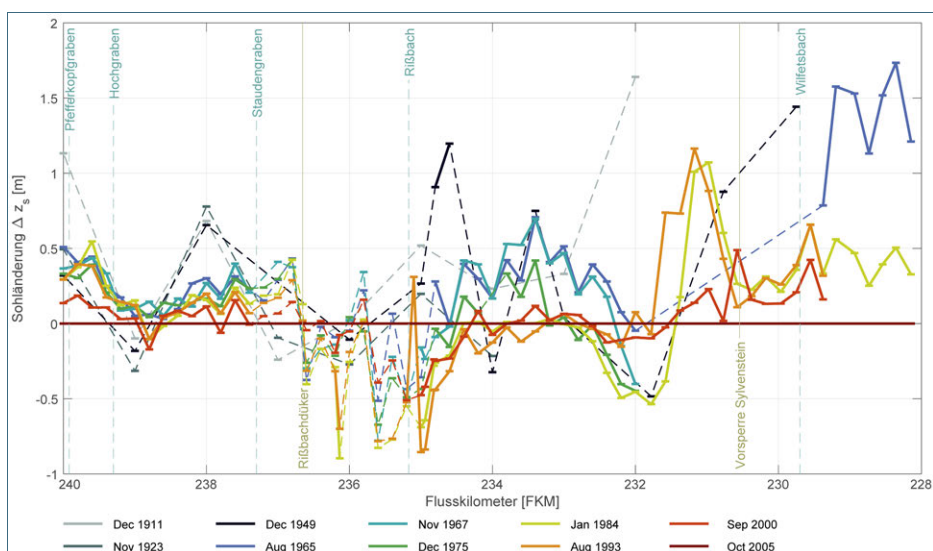


Abb. 41:
Änderung der mittleren
Sohlagen bezogen auf
die Epoche 2005 der
Isar von FKM 240-228

Im Folgenden sind die wesentlichen Erkenntnisse aus den Sohldifferenzen aufgeführt:

- Die Isar von der Landesgrenze bis zur Sperre 3 ist aktuell um bis zu 1,5 m tiefer als um 1949. Diese kontinuierliche Eintiefung hat sich aber im Zeitraum 2000 bis 2005 nicht fortgesetzt, trotz des Hochwassers 2005.
- Unmittelbar im Bereich der drei Sperren kam es, wohl wie beabsichtigt, zu einem Stopp der Eintiefung und die Sohle ist aktuell sogar höher als um das Jahr 1960. Vermutlich liegt die Isar aber immer noch tiefer als vor der Mittenwalder Korrektur, wie die ältesten historischen Profile andeuten.
- Ab Sperre 1 bis etwa zum Isarhorn bzw. Mündung Seinsbach, herrscht eine kontinuierliche Eintiefungstendenz über alle Epochen. Dies deckt sich mit den im vorherigen Kapitel beschriebenen Auswirkungen der Mittenwalder Korrektur. Der Bau der drei Sperren um 1960 führten dazu, dass sich die Sohle oberhalb nicht weiter eintiefte und eine leichte Anlandung zwischen FKM 260-261 (Zeitraum 1940–2005) erkennbar ist. Doch der Bereich unterhalb war nicht geschützt und tiefte sich weiter ein. Unterhalb der Sperre 1 war die Sohle in den historischen Epochen und auch um das Jahr 1965 konstant höher. Die Eintiefung wurde durch weitere stützende Sohlenbauwerke noch nicht gänzlich gestoppt.

- Erst unterhalb von FKM 255 bis zum Krüner Wehr ist kein Erosionstrend mehr erkennbar, vermutlich da dieser Bereich zwischen Mittenwald und dem Isarhorn nicht mehr ausgebaut ist und der Fluss mehr Platz in der Breite hat.
- Betrachtet man den Bereich unterhalb des Krüner Wehrs bis zur Weberwiese, ist erkennbar, dass die Isar oberhalb der Finzbachmündung tendenziell tiefer oder auf gleichem Niveau liegt als in den älteren Epochen. Berücksichtigt man die, in diesem Bereich regelmäßig stattfindende, Geschiebentnahmen, wird deutlich, dass sich die Isar ohne die Entnahmen massiv anlanden würde. Unterhalb der Finzbachmündung, wird kaum Kies entnommen und die Mittlere Sohle aktueller Epochen liegt über dem historischen Level. Diese Entwicklung deckt sich ebenfalls mit den Aussagen im vorherigen Kapitel.
- Im weiteren Verlauf bis zur Reißbachmündung ist eine Anlandungstendenz erkennen, die unmittelbar an der Reißbachmündung durch die Entnahmen unterbrochen wird. Doch unterhalb der Reißbachmündung sind die aktuelleren Sohllagen deutlich höher als um 1967.

Ergänzend ist im Anhang in Abb. 75 der Verlauf der Mittleren Sohle der Isar analog zum Talweg in 6 km Abschnitten dargestellt.

Überlagerung Mittlere Sohle mit Feststoffentnahmen

Um die Morphologische Entwicklung der Isar noch besser zu veranschaulichen, wurden die Entnahmen (m^3) analog zum Vorgehen von (Schaipp und Zehm 2009) auf eine Sohlhöhen Entwicklung (m) umgerechnet und mit den mittleren Sohllagen überlagert. Dabei wurde das entnommene Volumen pro Epoche durch die Fläche geteilt, die durch die Kubaturgrenzen und des Abstandes zwischen den jeweiligen Profilen, an denen Entnahmen stattfanden, aufgespannt wird.

Es ist bestätigt sich dabei, dass im oberen Bereich die Entnahmen noch keinen so deutlichen Einfluss auf die Sohlentwicklung haben, sondern hier vor allem die Mittenwalder Korrektur das maßgebende Element ist. Erst im Stausee Krün lagern sich sehr große Mengen ab, die aber vor allem in den ältesten Epochen entnommen wurden. Unterhalb des Wehrs zeichnet sich analog zu (Schaipp und Zehm 2009) ein Verlandungskeil ab, der etwa bis FKM 248 abflacht.

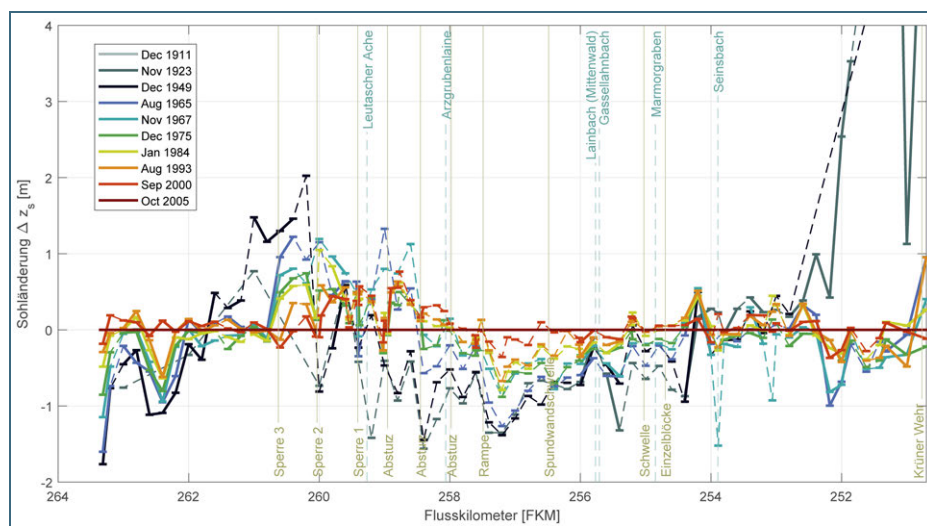


Abb. 42: Änderung der mittleren Sohllagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 264-250,76

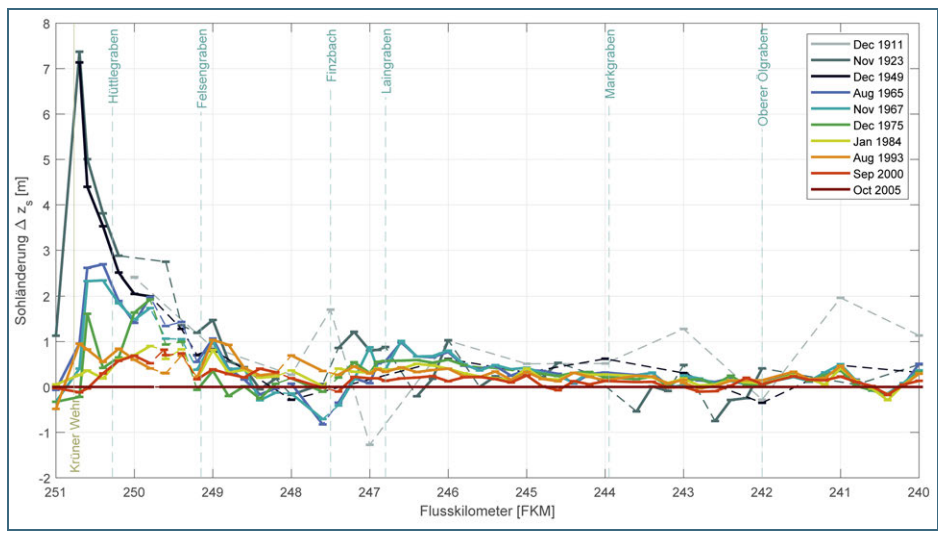


Abb. 43: Änderung der mittleren Sohlagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 251-240

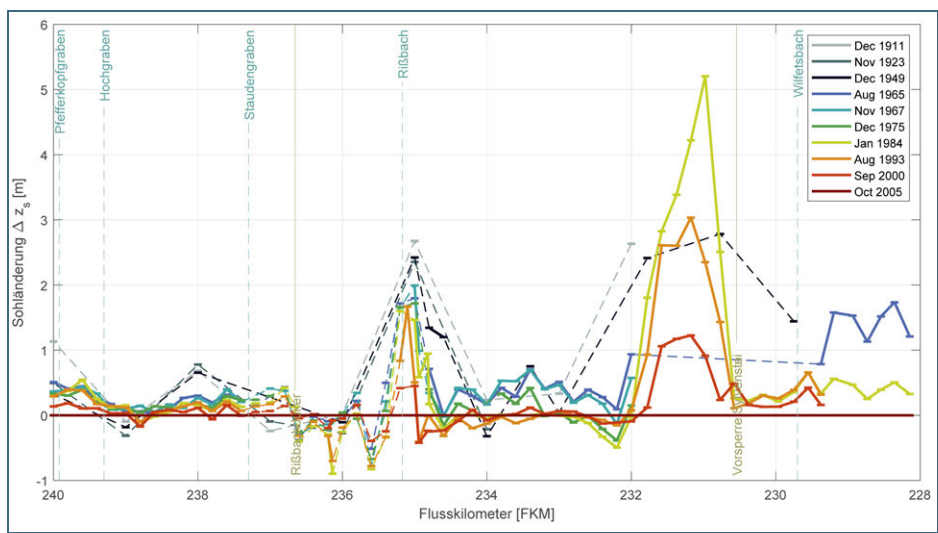


Abb. 44: Änderung der mittleren Sohlagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 240-228

3.2.3.1.4. Volumenbilanzierung

In Abb. 45 sind die Volumensummenlinien von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr abgebildet. In der frühesten Epoche 1949/1965 ist eine negative Volumenbilanz zu erkennen, was aus den Sedimententnahmen (vgl. Abb. 36) und der Begradigung in diesem Abschnitt resultiert. Im Mittel wurden im gesamten Bereich rund 35.000 m³/a entnommen. Aber auch in der nächsten Epoche 1965/1967 ist die Isar geprägt von einer Erosionstendenz, auch ohne zusätzliche Entnahme, was letztlich zu einem zusätzlichen Materialaustrag von rund 8.000 m³/a führt. Dieser erhöhte Austrag reduziert sich in der Folge und das System stabilisiert sich zunehmend, bedingt durch die sohlstützende Wirkung der Rampen und Abstürze. In den folgenden Epochen 1967/1975, 1975/1984 und 1984/1993 verändert die Isar sich nur noch geringfügig, was sich in einem nahezu horizontalen Verlauf der Volumensummenlinie widerspiegelt. Selbst Hochwasserereignisse wie HQ₁₉₇₀=122 m³/s oder HQ₁₉₇₇=123 m³/s (Tagesmittelwerte) hatten keinen größeren Effekt. Nachfolgende Epochen mit den größten Hochwasserereignissen (HQ₁₉₉₉=160 m³/s und HQ₂₀₀₅=203 m³/s) führen nun sogar zu einer positiven oder zumindest ausgeglichenen Bilanz. Dies könnte daran liegen, dass zum einen der Fluss soweit ausgebaut ist, dass die Sohle stabil ist und zum andern, dass bei diesen Extremereignissen überproportional viel Sediment von Oberstrom sowie durch Uferanrisse eingetragen wurde, und der Transport gesättigt ist. Insgesamt überwiegt aber eine leichte Erosionstendenz im langjährigen Mittel von 1965/2005.

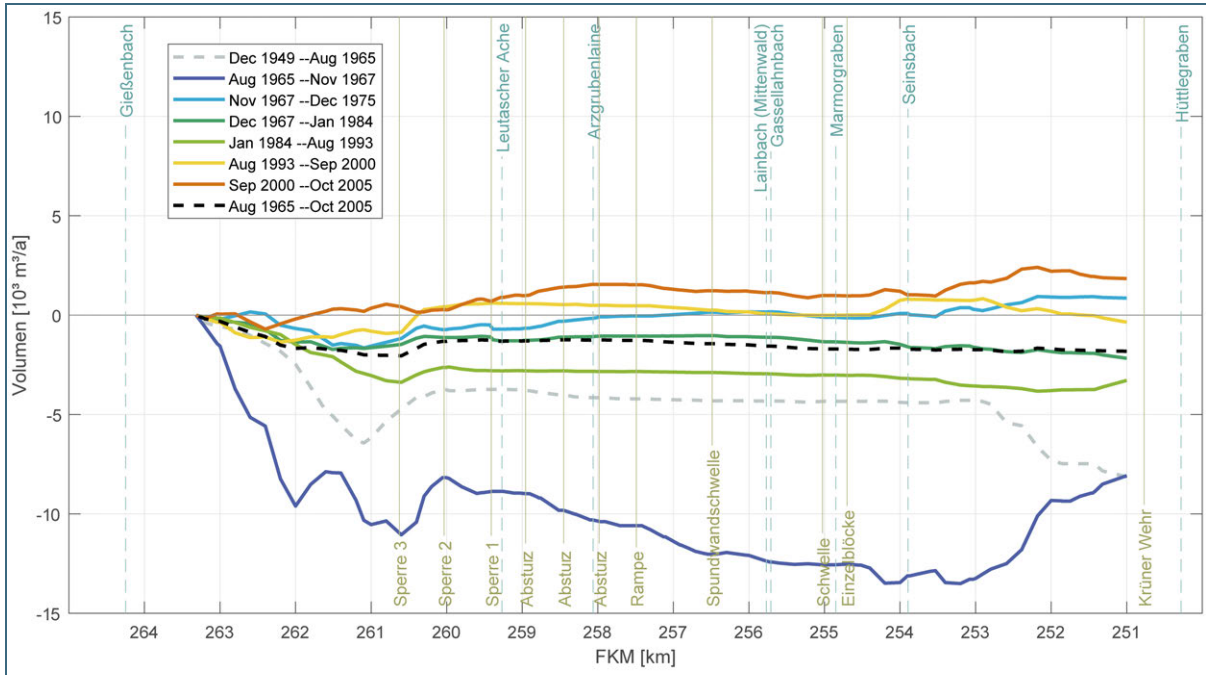


Abb. 45: Volumensummenlinien der Isar von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr

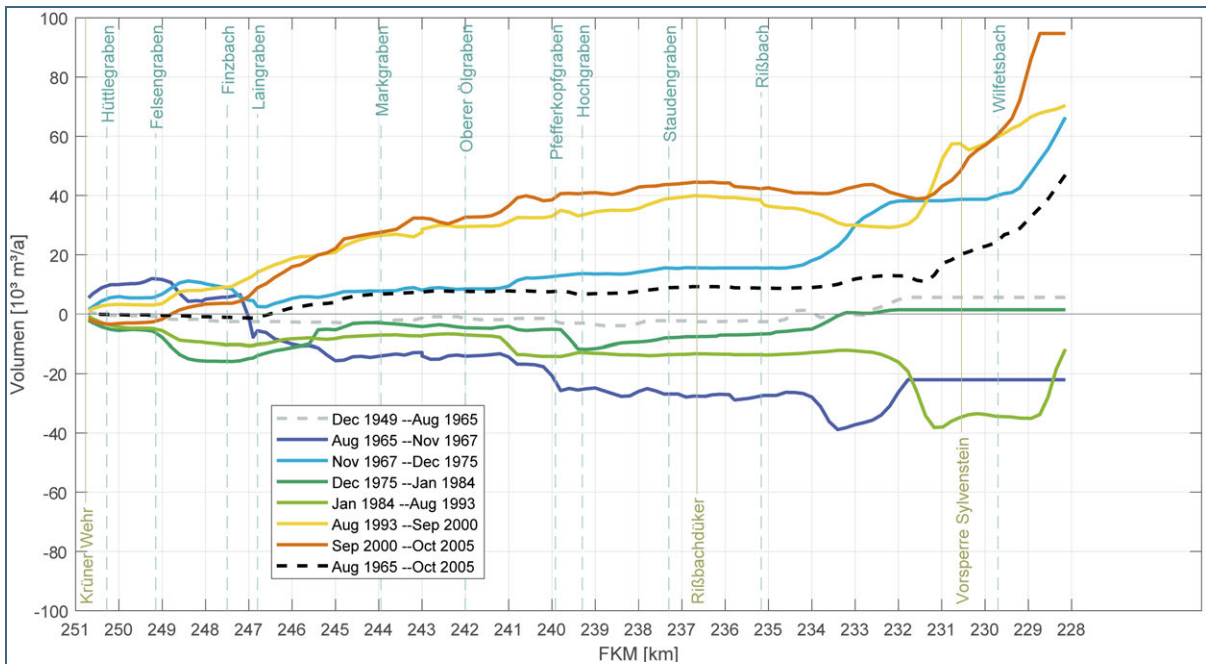


Abb. 46: Volumensummenlinien der Isar vom Krüner Wehr bis zum Sylvensteinspeicher

Anders als an der Isar oberhalb des Krüner Wehrs, überwiegt unterhalb eine Anlandungstendenz (Abb. 46). Im langjährigen Mittel 1965/2005 lagern sich bis zur Vorsperre rund 21.000 m³/a ab, bei einer gleichzeitigen Entnahme von 59.500 m³/a (vgl. Abb. 36). Lediglich im unmittelbaren Bereich unterhalb des Krüner Wehrs bis zur Finsbachmündung ist eine leicht negative Bilanz (-1.300 m³/a) zu erkennen, welche flussabwärts gleich wieder ausgeglichen wird. Diese negative Bilanz und die damit verbundene lokale Sohleintiefung ist auf die Sedimententnahmen in dem Abschnitt zurückzuführen (im Mittel 13.940 m³/a); ohne diese Entnahmen wäre die Sohle der Isar in diesem Bereich deutlich höher. Im weiteren Verlauf, ab der Finsbachmündung bis zum Rißbach, ist der Verlauf der Summenlinien weitgehend konstant, bzw. positiv. Da in diesem Abschnitt kaum Sedimententnahmen stattfanden, zeigt

sich, dass die Isar hier nicht in der Lage ist das ankommende Sediment weiter zu transportieren. Markant ist hier ebenfalls, dass in den Epochen mit den größten Hochwasserereignissen (1999 und 2005) die Anlandungstendenzen am größten sind, da vermutlich diese Ereignisse viel Sediment von Oberstrom und aus dem Stausee Krün mittransportiert haben, dieses sich aber im Verlauf der Strecke abgelagert. Entsprechend wurde für den Hochwasserschutz von Vorderriß an der Reißbachmündung im Zeitraum 1984/2005 rund 8.600 m³/a Sediment entnommen. An der Vorsperre steigt dann die Anlandungstendenz sprunghaft an, da die Sedimente sich dort verstärkt ablagern.

3.2.3.2 Reißbach

Anders als die Obere Isar wurde der Reißbach unterhalb des Reißbachwehrs auf ganzer Strecke vermessen (vgl. Abb. 7 und Tab. 5). Daher ergeben sich acht Auswertzeitpunkte bzw. sieben Epochen. In Abb. 47 sind zur Einordnung der morphologischen Änderungen die Abflusstageswerte (Minimum, Mittelwert und Maximum) in den jeweiligen Epochen dargestellt.

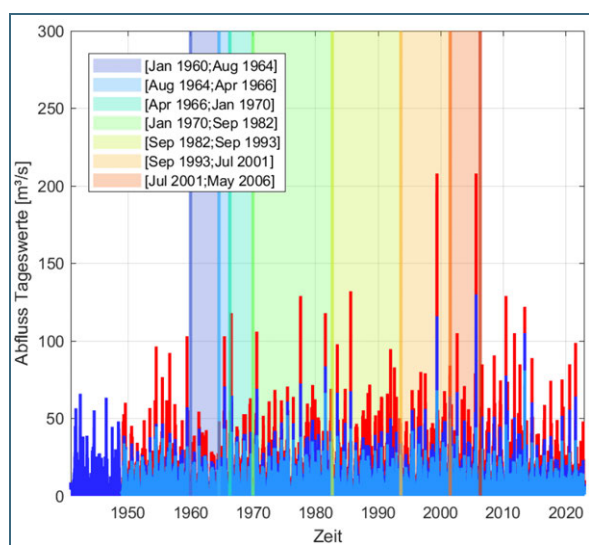


Abb. 47:
Abflusstageswerte am Pegel
Reißbachklamm (Minimum: hell-
blau, Mittelwert: blau, Maxi-
mum: rot) mit farbig hinterlegten
Auswertepochen

3.2.3.2.1. Feststoffentnahmen

Am Reißbach wurde nur in den Jahren 1979 (8.900 m³) und 2002 (8.680 m³) Sediment entnommen. Die Entnahmen fanden jeweils an der Mündung statt, um den Hochwasserschutz des Ortsteils Vorderriß sicherzustellen.

3.2.3.2.2. Talweg

Am Reißbach können aus dem Talweg die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden (siehe Abb. 48 und Tab. 9):

- Der Reißbach ist insgesamt deutlich steiler als die Isar.
- Eine abschnittsweise lineare Regression (Okazaki 2023) identifizierte ebenfalls Sprünge im Gefälle der jeweiligen Epochen. Der Gefälleknick pendelt dabei zwischen FKM 2,6-3,4 hin und her, zeigt jedoch keinen eindeutigen Trend, was auf ein dynamisches Gleichgewicht hindeutet. Die Lage des Knicks deckt sich mit der Veränderung der Topographie des Reißbachtals, da der Reißbach unterhalb des Wehrs noch in einer relativ engen Schlucht fließt und das Tal sich ab etwa FKM 2,8 deutlich verbreitert.
- Es ist zudem erkennbar, dass das Gefälle insgesamt abnimmt und der Oberlauf tendenziell erodiert wird und sich Sedimente im Unterlauf bis zur Mündung anlanden.

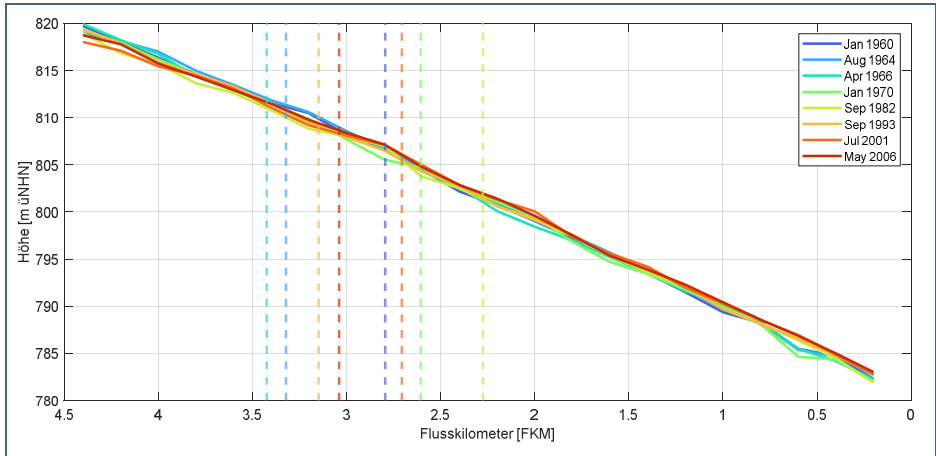


Abb. 48: Talweg des Rißbachs (Bereich 3) mit Gefälleknick

Epoche [Jahr]	GK [FKM]	FKM 4,6-GK [‰]	GK-FKM 0.2 [‰]
1960	2,8	8,3	9,3
1964	3,3	7,4	9,3
1966	3,4	8,2	9,1
1970	2,6	8,4	9,3
1982	2,3	8,1	9,1
1993	3,1	8,0	8,9
2001	2,7	7,3	9,2
2006	3,0	7,4	9,0

Tab. 9: Gefälle des Talwegs Pro Epoche in den jeweiligen Abschnitten des Rißbachs

3.2.3.2.3. Mittlere Sohlen

Analog zur Oberen Isar werden auch am Rißbach die Differenzen der Mittleren Sohle ermittelt, bezogen auf die Sohle der aktuellsten Epoche 2006:

$$\Delta z_s = z_{s,2006} - z_{s,j} \text{ [m]} \tag{6}$$

mit j = jeweilige, ältere Epoche.

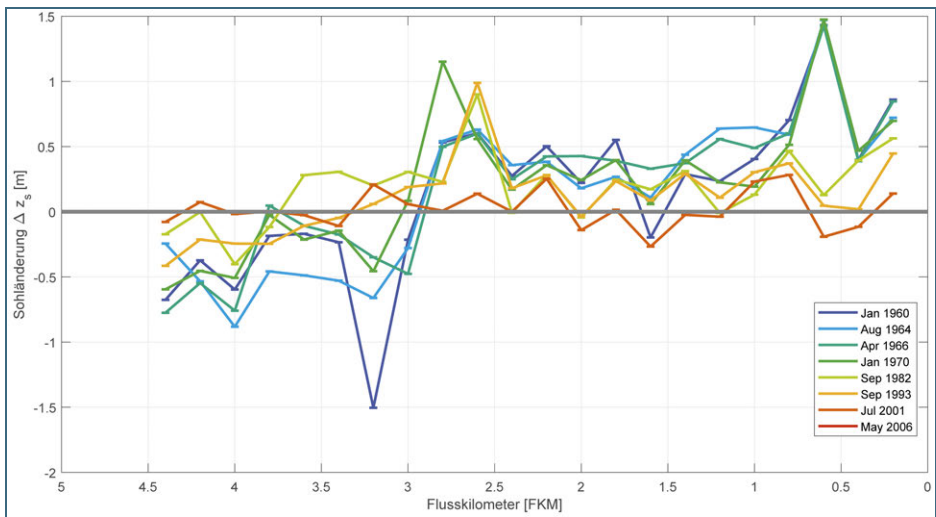


Abb. 49: Änderung der mittleren Sohlagen bezogen auf die Epoche 2006 entlang des Rißbachs

Anhand der Entwicklung der mittleren Sohlen bestätigt sich eine kontinuierliche Eintiefung im Bereich unterhalb des Reißbachwehrs. Ab FKM 3,0 überwiegt eine Anlandungstendenz (Abb. 49).

Der absolute Verlauf der mittleren Sohlen ist im Anhang in Abb. 81 abgebildet.

3.2.3.2.4. Volumenbilanzierung

In Abb. 50 sind die Volumensummenlinien am Reißbach dargestellt. In der ältesten Epoche 1960/1964 gab es keine größeren Hochwasserereignisse (vgl. Abb. 47), aber der Abfluss für Spülungen wurde dennoch mehrfach überschritten. Das dadurch mobilisierte Material lagerte sich im Verlauf der weiteren Strecke ab. In der darauffolgenden, kurzen Epoche von 1964/1966 gab es ein Hochwasserereignis mit $HQ > 100 \text{ m}^3/\text{s}$, was wohl das im Unterlauf abgelagerte Material abtransportiert hat. Ähnlich verhält es sich im Zeitraum 1966/1970, da zu Beginn der Epoche ein ähnlich großes Hochwasserereignis stattfand, und sich die Sohle in der Folge wohl noch nicht wieder auffüllen konnte. Von 1970/1982 tiefte sich der Reißbach weiter ein, doch nun lagerte sich nahe der Mündung verstärkt Material ab, trotz der Entnahme von ca. $700 \text{ m}^3/\text{a}$ in dieser Epoche. Die Isar war vermutlich nicht in der Lage dieses ankommende Material abzutransportieren. Die folgende Epoche 1982/1993 zeigt einen nahezu ausgeglichenen, leicht positiven Verlauf. In der Epoche 1993/2001 trat das Extremhochwasser 1999 auf, welches mittels Uferanrisse (z. B. bei FKM 3-4 (Haas 2006)) zusätzliches Material in den Reißbach einbrachte. Dieses zusätzliche Material lagerte sich im breiten Fächer unterhalb FKM 3 ab, was zu dem steilen Anstieg der Summenlinie führt. Um dieser Anlandung im Mündungsbereich entgegen zu wirken, wurde in der folgenden Epoche 2001/2006 auch wieder Sediment entnommen ($1.800 \text{ m}^3/\text{a}$). Zusätzlich zur Entnahme, transportierte das Hochwasser 2005 einen Großteil des zuvor abgelagerten Materials ab, da vermutlich Geschiebedepots oberstrom seit dem HW 1999 noch nicht wieder gefüllt waren. Insgesamt ergibt sich dann von 1960/2006 eine leichte Erosionstendenz im Oberlauf und eine etwas stärkere Anlandung im Unterlauf, sodass sich im Reißbach im Schnitt rund $3.000 \text{ m}^3/\text{a}$ Sediment abgelagern.

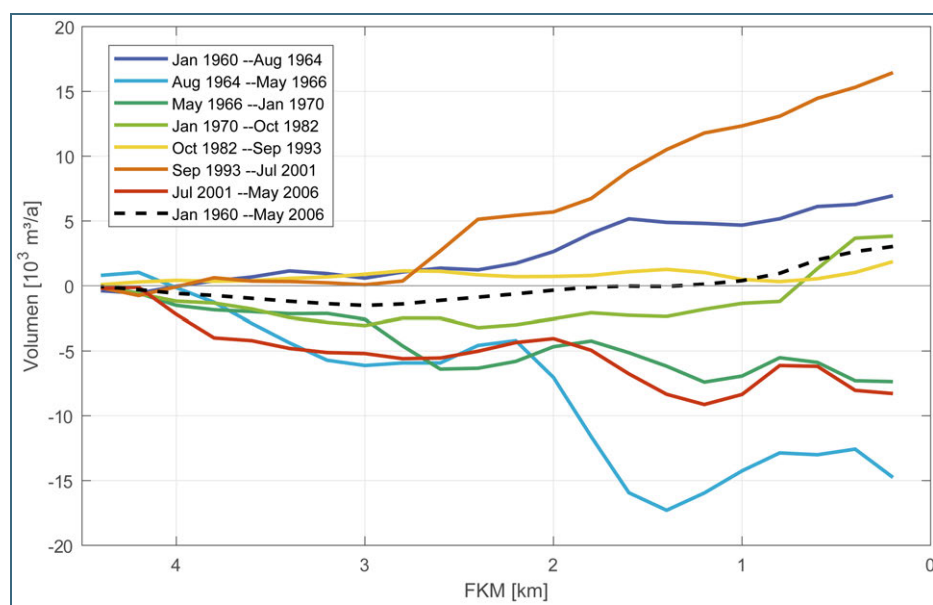


Abb. 50:
Volumensummenlinien
Reißbach

3.2.3.3 Isar Krüner Wehr bis Weberwiese

Da an der Oberen Isar im Bereich Krüner Wehr bis etwa zur Weberwiese (ca. FKM 245) deutlich häufiger Flussquerprofile erfasst wurden, kann für diesen Bereich eine detaillierte Betrachtung erfolgen (vgl. Abb. 6). Genauer ergeben sich im Zeitraum 1965/2022 22 Auswertepochen. Für jede Epoche wurden die Entwicklungen der Mittleren Sohle, die Volumensummenlinie, die Entnahmemengen und die Abflusssituation mit Spülungen zusammenfassend dargestellt.

Im Folgenden sind exemplarisch zwei Auswertepochen dargestellt, in denen Spülungen stattfanden, sowie größere Mengen Sediment entnommen wurden:

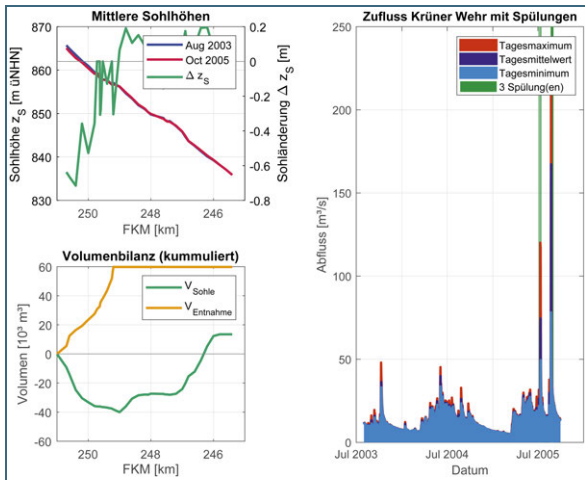


Abb. 51: Auswertung Epoche 2003/2005

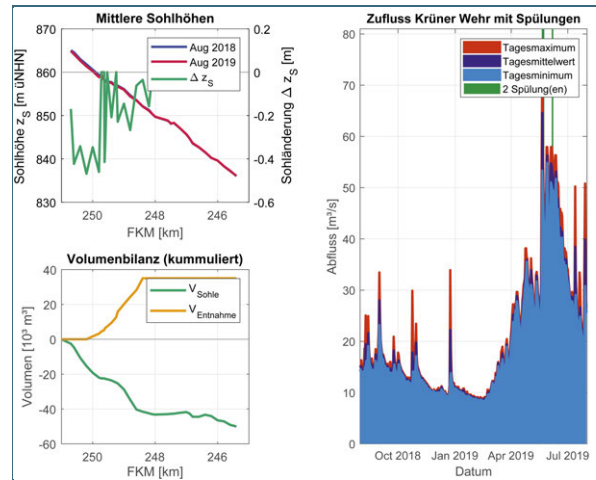


Abb. 52: Auswertung Epoche 2018/2019

- In der Epoche 2003/2005 (Abb. 51) war die ursprüngliche Sohle im August 2003 im unmittelbaren Bereich unterhalb des Wehres deutlich höher als rund zwei Jahre später. Diese Eintiefung hängt mit der Entnahme von knapp 60.000 m³ Sediment in diesem Bereich zusammen und führt zu einer entsprechend negativen Volumenbilanz. Unterhalb des Entnahmebereichs (FKM 249) steigt die Volumensummenlinie unmittelbar an, was zeigt, dass sich dort Material anlagert. Dies kann mit den Spülungen beim Hochwasser im Jahr 2005 begründet werden, die vermutlich viel Sediment aus dem Stausee Krün mobilisiert haben und in diese Strecke eingebracht haben. Dort ist die Isar aber nicht mehr in der Lage das Material weiter zu transportieren. Ohne die Entnahmen würde sich eine durchgehende positive Volumensummenlinie ergeben.
- Ähnlich verhält es sich im Zeitraum 2018/2019 (Abb. 52). In dieser Epoche wurden rund 35.000 m³ Sediment entnommen, was eine negative Volumensummenlinie in einer ähnlichen Größenordnung zur Folge hat. Da in diesem Zeitraum keine größeren Hochwasserereignisse stattfanden und auch nur zwei Mal gespült wurde, kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt weniger Sediment eingetragen wurde.

Den Epochen mit Entnahmen lassen sich Epochen gegenüberstellen an denen wenig bzw. kein Sediment entnommen wurde:

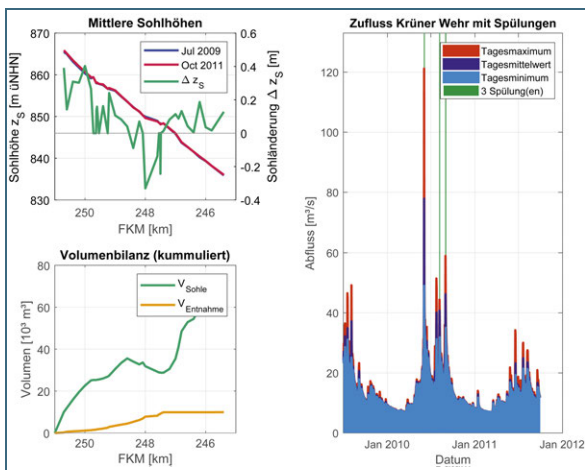


Abb. 53: Auswertung Epoche 2010/2012

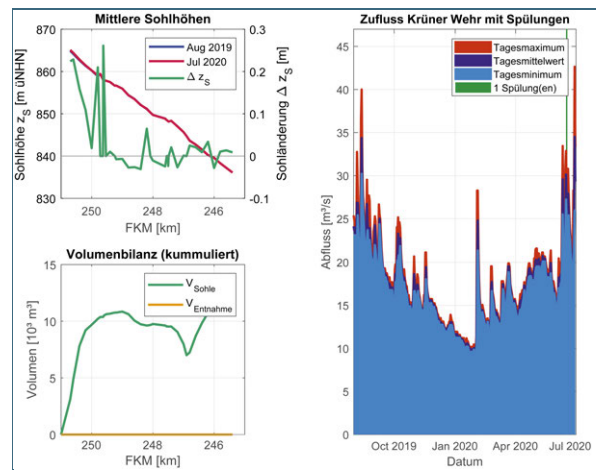


Abb. 54: Auswertung Epoche 2019/2020

- In der Epoche 2010/2012 wurde nur knapp 10.000 m³ Sediment entnommen (Abb. 53). Da in dem Zeitraum aber dreimal bei größeren Abflüssen gespült wurde, ergibt sich eine positive Sedimentbilanz. In Summe lagern sich knapp 70.000 m³ Sediment bis zu Finzbachmündung an, was zu einer höheren Mittleren Sohle führt.
- Eine geringere Anlandung ergibt sich im Zeitraum 2019/2020 (Abb. 54). In der Epoche wurde zwar einmal gespült aber bei einem verhältnismäßig geringen Abfluss. Von den eingetragenen Sedimenten lagerten sich etwa 12.000 m³ unmittelbar unterhalb des Wehres ab. Entnommen wurde in dem Zeitraum nichts.

Im Anhang 8.6 finden sich sämtliche 21 Zusammenstellungen im Bereich Krüner Wehr bis Weberwiese. Anhand dieser Abbildungen wird das Wechselspiel aus Spülung, Sedimententnahme und Sohlveränderung besonders deutlich. In Abb. 55 sind zusätzlich charakteristische Kennzahlen für jede Epoche zusammengestellt, wie die Dauer der Epoche, Abflussanteil größer 25 bzw. 40 m³/s, der maximale Scheitelabfluss pro Epoche, die Anzahl und Dauer (gemittelt pro Jahr) der Spülungen, sowie mittlere Entnahmemenge und Volumenänderung der Gewässersohle. Es ist deutlich erkennbar, dass durch die Entnahme deutlich auf den Sedimenthaushalt eingewirkt wird und die Sohle dadurch in einem Gleichgewicht gehalten wurde. Wurde nichts entnommen und findet Materialeintrag durch betriebliche Spülungen oder größere Abflussereignisse statt, kommt es zu einer deutlichen Anlandung in der betrachteten Strecke. Dies ist insbesondere im Vergleich der beiden Hochwasserereignisse 1999 und 2005 sichtbar. Interessant ist auch, dass während der Sanierung der Überleitung 2015/2016 das Krüner Wehr überdurchschnittlich lange geöffnet werden musste, aber der verfügbare Abfluss das mobilisierte Material wohl nicht über die Weberwiese hinaustransportieren konnte, weswegen es zu den deutlichen Ablagerungen kam.

Epoche		Dauer	Q25	Q50	Q75	Qmax	Anzahl Spülungen	Spüldauer	Entnahmemenge	Volumenänderung	Bemerkung	
von	bis	[Jahre]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	#	[d/a]	[10 ³ m ³ /a]	[10 ³ m ³ /a]		
08.65	- 11.67	2,25	7	13	23	97	0	-	24,75	-	11,63	Spülungen erst ab 1990 dokumentiert
11.67	- 11.81	14,00	8	13	20	142	0	-	21,16	-	2,69	
11.81	- 05.84	2,50	9	12	20	102	0	-	4,42	-	5,74	
05.84	- 08.92	8,25	9	12	20	86	5	0,6	8,58	-	8,67	
08.92	- 12.97	5,33	9	13	20	67	9	1,5	2,59	-	12,86	
12.97	- 12.98	1,00	9	16	18	36	1	0,9	3,05	-	18,47	
12.98	- 08.99	0,67	10	16	31	184	4	11,3	-	-	83,10	22.05.1999 Hochwasser
08.99	- 08.03	4,00	10	15	21	117	6	2,6	-	-	25,95	
08.03	- 10.05	2,17	8	13	18	227	3	5,7	27,57	-	6,22	23.08.2005 Hochwasser
10.05	- 07.09	3,75	8	11	18	97	4	1,8	14,82	-	5,57	
07.09	- 10.11	2,25	9	12	16	121	3	1,9	4,41	-	32,11	
10.11	- 07.13	1,75	9	14	24	154	6	8,4	-	-	19,73	
07.13	- 10.13	0,25	15	18	21	49	1	8,0	-	-	204,14	
10.13	- 10.14	1,00	11	16	19	95	1	4,3	22,60	-	19,37	
10.14	- 07.15	0,75	12	16	22	47	0	-	48,16	-	78,17	
07.15	- 09.16	1,17	11	17	21	57	4	27,7	-	-	24,68	Sanierung Überleitung
09.16	- 08.18	1,91	13	16	21	63	2	2,6	-	-	7,08	
08.18	- 08.19	1,00	11	15	26	73	2	4,8	35,02	-	50,08	
08.19	- 07.20	0,92	14	17	20	43	1	1,3	-	-	13,52	
07.20	- 08.21	1,08	11	16	23	144	2	6,0	-	-	27,80	
08.21	- 08.22	1,00	11	14	19	40	0	-	-	-	18,85	

Abb. 55: Zusammenstellung der Kennwerte der 21 Epochen

3.2.3.4 Isarzuflüsse

Von der Landesgrenze bis zum Sylvensteinspeicher münden zahlreiche Zuflüsse in die Isar. Diese wurden zum Teil ausgebaut, umgeleitet oder mit Sedimentfängen versehen. Dennoch haben diese Gewässer einen gewissen Einfluss auf den Sedimenthaushalt der Oberen Isar. Daher wird im Folgenden bewertet, wie viel Material zusätzlich in die Isar eingetragen wird. Für einige der Zuflüsse lagen bereits Abschätzungen der mittleren jährlichen Transportmenge vor, also der Menge, die natürlicherweise in die Isar eingebracht würde (Gabel et al. 2006; Schapp und Zehm 2009).

Tab. 10: Sedimenteintrag entlang der Isar von Nebengewässern, modifiziert nach (Gabel et al. 2006)

FKM	Seite	Name	EZG [km ²]	Bemerkungen zur Ermittlung des Eintrags	Eintrag [10 ³ m ³ /a]
258.062	R	Arzgrubenlaine	1,7	Eintrag ca. wie zweifache Entnahmemenge	0,3
255.769	L	Lainbach	10,3	Räumung eines neuen Geschiebefangs, Eintrag vernachlässigbar	0,0
255.710	R	Gasselahnbach	9,7	Kiesbank in der Isar unterhalb der Mündung, ausgebauter Zustand	0,8
254.851	R	Marmorgraben	0,9	kleiner Eintrag denkbar, ausgebauter Zustand	0,1
253.850	R	Seinsbach	12,8	relativ kleiner Schwemmfächer, natürliches Ausschotterungsbecken vor der Mündung Eintrag 1.000 m ³ /a.	1,0
250.280	R	Hüttlbach	1,2	kleiner Eintrag denkbar	0,1
249.150	R	Felsengraben	1,2	kleiner Eintrag denkbar	0,1
248.000	L	Finzbach	37,4	breiter Unterlauf, Fracht 4.000 bis 5.000 m ³ /a	5,0
246.800	R	Laingraben	4,7	Ablagerung im Unterlauf, sehr breiter, bewachsener Schwemmfächer, i.d.R. erreicht kein Geschiebe die Isar	0,0
246,800 / 235,170	R+L	Gräben im Zwischen-EZG	?	Eintrag bei mittleren und extremen Ereignissen möglich, vgl. 1970, 1999, 2002, 2005 Eintrag nach Ertl (1948) abzüglich Finzbach abgeschätzt	6,0
246,800 / 235,170	R+L	Seitenerosion der Uferhänge	?	Bisher noch in keiner Ausarbeitung berücksichtigt. In den Volumensummenlinien näherungsweise enthalten, soweit die Profile dies zulassen.	0
235.170	R	Rißbach	216,1	große Bandbreite bisheriger Angaben (15.000 – 30.000 m ³ /a). 25.000 m ³ /a wird in (Haas 2006) ermittelt.	25,0

Diesen Mengen muss die Menge abgezogen werden, die wiederum künstlich aus dem Gewässer entnommen wird. In Tab. 11 sind die an den Zuflüssen entnommenen Sedimentmengen aufgeführt, soweit diese bekannt sind.

Tab. 11: Entnahmemengen aus Nebengewässern bis zur Vorsperre, modifiziert nach (Gabel et al. 2006)

Mündung bei Isar FKM	Seite	Gewässername	Jahre mit Entnahmen	Gesamte Entnahmemenge [m ³]	Menge im Zeitraum 1965/2005 [m ³] (im Mittel [m ³ /a])	Bemerkungen
258,062	R	Arzgrubenlaine	1971/2002/2004/2009/2018/2022	40.486	38.773 (965)	nur 1971 große Entnahme (34.500)
255,769	L	Lainbach (GAP)	2000/2003/2007/2010/2011/2013/2015/2021	500	55 (1)	
253,850	R	Seinsbach	1972/1984/1996	7.835	7.835 (195)	
250,280	R	Ochsenlahne	1983	126	126 (3)	liegt im Einzugsgebiet des Hüttlbaches
250,280	R	Hüttlbach	1983	629	629 (16)	

Mündung bei Isar FKM	Seite	Gewässername	Jahre mit Entnahmen	Gesamte Entnahmemenge [m³]	Menge im Zeitraum 1965/2005 [m³] (im Mittel [m³/a])	Bemerkungen
249,150	R	Felsengraben	1983	1.224	1.224 (30)	
248,000	L	Finzbach	1969/1970/1971/ 1979/1983/1996/ 1998/2001/2002/ 2003/2004/2007/ 2010/2013/2015/ 2019/2021	53.131	27.218 (678)	
246,800	R	Laingraben (=Kaltwassergraben)	1983/1984/1985/ 1996/2000/2009/ 2013/2019/2021	11.403	7.976 (199)	2000 u. 2013: Räumung Schwemmsand
235,170	R	Rißbach	1979/2002	17.580	17.580 (438)	8.900 m³ (1979) 8.680 m³ (2002)
229,700	L	Wilfetsbach (=Staffelgraben)	1981/1985/1986/ 1988-1990/1992/ 1993/2000- 2009/2011-2015/ 2018/2020	59.157	32.435 (807)	Unterhalb Vorsperre Sylvenstein
Summe				197.071	133.851 (3.333)	

Im Bereich Landesgrenze bis Krüner Wehr wurde vor allem an der Arzgrubenleine Sediment entnommen. Unterhalb des Krüner Wehrs bis zur Vorsperre wurde vor allem am Finzbach und dem Rißbach Sediment entnommen. Der Wilfetsbach fließt erst unterhalb der Vorsperre in die Isar, und hat deswegen auf die morphologische Entwicklung der betrachteten Flusslandschaft keinen direkten Einfluss.

3.2.3.5 Transportlängsschnitt Obere Isar

Eine der ersten Abschätzungen der transportierten Geschiebefrachten der Oberen Isar wurde bereits 1948 geleistet (Ertl 1948). Spätere Arbeiten bezogen sich oft auf diese abschnittsweise ermittelten Frachten und deren Änderung im Zuge der Mittenwalder Korrektur, sowie der Ausleitungen am Krüner Wehr und dem Rißbachwehr (Tab. 12).

Tab. 12: Transportfrachten nach Ertl (1948) (Tafel 5) Mengen in 10³ m³/a

FKM	Ort	vor der Mittenwalder Korrektur			ab Walchenseeüberleitung bei Krün			ab Walchenseeüberleitung Rißbach		
		Zufuhr	Abfuhr	Δ	Zufuhr	Abfuhr	Δ	Zufuhr	Abfuhr	Δ
250.769	oberhalb Krüner Wehr	31	31	+/- 0	56*	15	+ 41	56*	15	+ 41
250.769	unterhalb Krüner Wehr	31	31	+/- 0	15	6	+ 9	15	6	+ 9
235.170	oberhalb Rißbachmündung	37	37	+/- 0	16	13	+ 3	16	13	+ 3
235.170	unterhalb Rißbachmündung	63	63	+/- 0	39	35	+ 4	17	18	- 1

*= 31 Tsd. m³/a + zusätzlicher anthropogener Anteil 25 Tsd. m³/a aus der Mittenwalder Korrektur

Bilanziert man die aus den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse abschnittsweise, kann ein aktualisierter Transportlängsschnitt entlang der Isar aufgestellt werden (Gl. 7):

$$QS_{\text{Austrag}} = QS_{\text{Eintrag}} - V_{\text{Entnahme}} - dV + QS_{\text{Zuflüsse}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right] \quad (7)$$

mit QS_{Austrag} = Sedimentaustrag aus der betrachteten Strecke, QS_{Eintrag} = Sedimenteintrag von Oberstrom, V_{Entnahme} = entnommene Menge, dV = Volumenänderung durch Erosion (-) und Ablagerung (+)

im bilanzierten Abschnitt und $QS_{\text{Zuflüsse}}$ = Sedimenteintrag von den seitlichen Zuflüssen abzüglich der dortigen Entnahmen.

Da die Bilanzierung an aufeinander folgenden Abschnitten erfolgt, entspricht der Austrag eines oberhalb gelegenen Abschnitts dem Eintrag in den nachfolgenden Bereich.

FKM	Ort	Eintrag (QS_{Eintrag}) bzw. Austrag (QS_{Austrag})	
265,00	Landesgrenze	41,8	
250,76	Krüner Wehr	44,5	
246,00	uh. Finzbachmündung	36,2	
236,00	oh. Reißbach	32,1	
234,00	uh. Reißbach	55,1	
FKM	Sedimententnahmen (V_{Entnahme}) (Tab. 7)	Anlandung (+) Erosion (-) (dV) (Abb. 45, Abb. 46)	Seitliche Zuflüsse abzgl. Entnahmen ($QS_{\text{Zuflüsse}}$) (Tab. 11, Tab. 10)
265,00 bis 250,76	0,1	-1,8	1,0 (=2,2-1,2)
250,76 bis 246,00	13,9	-1,1	4,5 (=5,2-0,7)
246,00 bis 236,00	0,0	9,9	5,8 (=6,0-0,2)
236,00 bis 234,00	1,5	0	24,6 (=25,0-0,4)
234,00 bis 230,00	44	11,1	0 (=0-0)

Tab. 13:
Abgeleitete Transportmengen entlang der Isar (Zeitraum 1965/2005, Mengen in $10^3 \text{ m}^3/\text{a}$)

Entsprechend ergibt sich, dass bei einem rechnerischen, bettbildenden Sedimenteintrag von rund $41.800 \text{ m}^3/\text{a}$ an der Landesgrenze diese Menge bis zur Vorsperre entweder entnommen wurde oder sich gänzlich ablagert. Die ermittelte Menge am Krüner Wehr ($44.500 \text{ m}^3/\text{a}$) liegt dabei über der von Ertl (1948) ursprünglich angesetztten $31.000 \text{ m}^3/\text{a}$, ist aber ähnlich der bei Gabel et al. (2006) diskutierten $40.000 \text{ m}^3/\text{a}$. Zudem schätzt Ertl (1948) selbst die ermittelten $31.000 \text{ m}^3/\text{a}$ als vermutlich zu gering ein. Unter Anbetracht der allgemeinen Unsicherheiten erscheint die Größenordnung der ermittelten Transportmengen realistisch. Aus diesem Längsschnitt ist erkennbar, dass die ankommende Sedimentfracht auch bis zum Krüner Wehr transportiert wird und durch die, aus Betreiber Sicht, effektiven Spülungen ins Unterwasser gelangen. Dort ist die Isar nicht in der Lage die ankommende Menge weiter zu transportieren, da dazu der Abfluss fehlt. Die transportierte Menge reduziert sich auf ca. 80 %. Im folgenden Verlauf nimmt die transportierte Fracht weiter ab, sodass an der Reißbachmündung nur noch 72 % ankommen. Mit dem Reißbach erhöht sich aber die Abflussmenge und die für den Transport verfügbare Feststoffmenge auf das 1,7fache, was Dynamik und Umlagerungsprozesse nach sich zieht. An der Vorsperre lagern sich die ankommenden Feststoffe ab und der Transport geht gegen Null.

Zwischenfazit

Die Isar von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr wurde maßgeblich durch die Mittenwalder Korrektur geändert. Die Sohle tiefte sich ein, zusätzliches Material wurde mobilisiert und in die untere Strecke eingetragen. Durch zahlreiche stützende Bauwerke wurde die Isar jedoch stabilisiert und aktuell scheint der Fluss weitgehend in einem stabilen Zustand, sodass die Volumensummenlinien neuerer Epochen weitgehend konstant sind.

Unterhalb des Krüner Wehrs hingegen kommt es zu einer deutlichen Anlandung von Sedimenten. Insbesondere die großen Hochwasser in den letzten Jahren mit hohen Sedimentfrachten trugen zu einer deutlichen Verlandung und höheren Sohllagen bei. Das aktuelle Spülkonzept am Krüner Wehr bewirkt, dass zwar Sedimente aus dem Stauraum geräumt werden und so die Sedimentkontinuität hergestellt wird, doch lagert sich das Material meist unmittelbar ab. Die Isar ist aufgrund der zu geringen Wasserführung bzw. der zu kurzen Spülungen nicht in der Lage, das Geschiebe weiter zu transportieren und damit Verzweigungen zu initiieren. Um den Hochwasserschutz angrenzender Ortschaften sicherzustellen, wird daher Sediment in großem Maßstab (ca. 1/3 der transportierten Menge) entnommen, um lokal einen ausgeglichen Sedimenthaushalt zu erreichen.

Am steileren Reißbach hingegen laufen trotz weitgehender Totalausleitung Anlandung und Erosion im ständigen Wechsel zu einander ab, was zu einer hohen Dynamik und neuen Fließwegen führt. Dennoch bestätigt die Auswertung, dass sich der Unterlauf des Reißbachs kontinuierlich verlandet, wohl auch daher, dass die Isar das ankommende Sediment nicht gänzlich weitertransportieren kann. Entsprechend wurde hier in den letzten Jahren auch Sediment zur Sicherstellung des Hochwasserschutzes entnommen.

3.2.4 Korngrößenverteilungen

Die Korngrößen wurden getrennt für die drei Messperioden untersucht (P1: 1990; P2: 2007, und P3: 2022). In Anbetracht des großen Untersuchungsgebiets und der großen Heterogenität im Sediment, können mit den vorhandenen Daten nur im begrenzten Umfang Aussagen abgeleitet werden. Die folgende Abbildung zeigt getrennt je nach Art der Probenart den d10, d50 und d90 der Sieblinien der Deck- und Unterschicht auf.

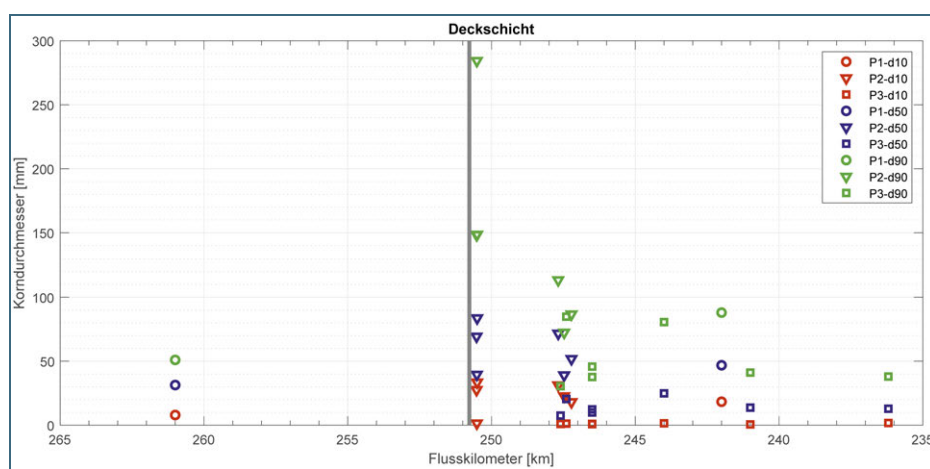


Abb. 56:
Charakteristische Korn-
durchmesser entlang
der Isar für die Deck-
schicht

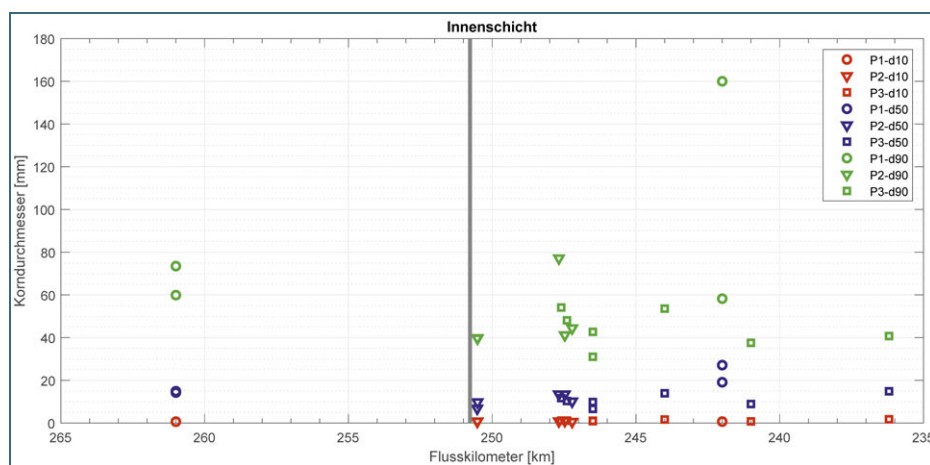


Abb. 57:
Charakteristische Korn-
durchmesser entlang
der Isar für die Inn-
schicht

Die Daten zeigen eine tendenzielle Abnahme und Verfeinerung der Deckschicht entlang der Isar. Dieser Trend ist vor allem in den Epochen P2 und P3 erkennbar, während die älteren Daten P1 (aus dem Jahr 1990) eine Vergröberung andeuten. Da aus der Epoche P1 jedoch nur zwei Messpunkte verfügbar sind und die Wahl des Entnahmeorts maßgeblich die Werte definiert, dies aber einer gewissen Subjektivität und damit Unsicherheit unterliegt, kann dies nicht gänzlich aufgelöst werden. Die Innenschicht bleibt entlang der Isar und über die Epochen weitgehend konstant.

Die Mischschichtproben aus 2007 zeigen eine kontinuierliche Abnahme der maßgebenden Korndurchmesser ab FKM 251 bis zum Wehr hin bei FKM 250,769. Diese Sortierung im Stausee Krün diskutierten auch Schaipp und Zehm (2009). Unterhalb des Wehres findet dann wieder eine Vergröberung statt. Diese Sortierung deckt sich mit der Erwartung, dass sich im Stauraum gröberes Material schneller ablagert und mehr Feinmaterial (Feinkies, Sand und Schluff) bis zum Wehr hin transportiert wird (vgl. farbige Abstufung in Abb. 12). Bei kurzen Spülungen wird entsprechend zuerst das unmittelbar am Wehr abgelagerte Material transportiert (Schaipp und Zehm 2009).

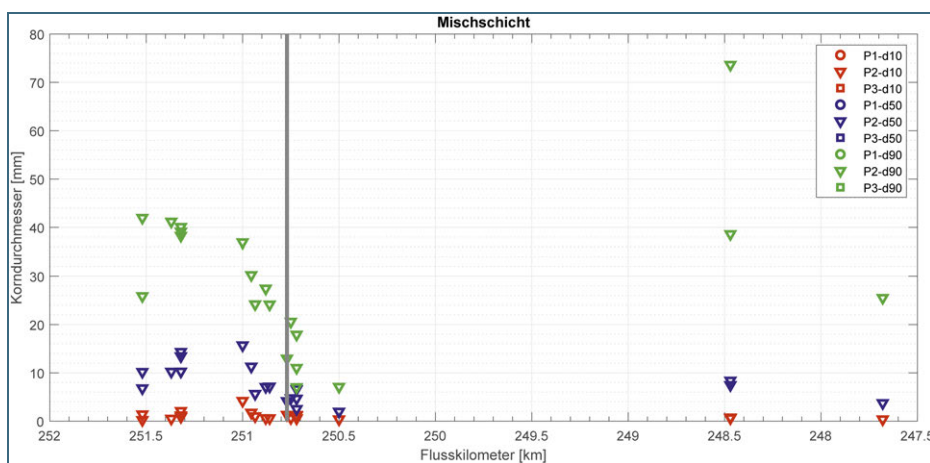


Abb. 58: Zusammensetzung der Mischschicht (es gibt nur Daten im Bereich um das Krüner Wehr)

Neben den genannten Sedimentbeprobungen wurde im Zuge des Gutachtens von Prof. Reich an fünf Meter breiten Abschnitten (Transecte) die Zusammensetzung der oberflächlichen Sedimentablagerungen entlang der Oberen Isar untersucht (Reich und Rethschulte 2021).

An der Isar vom Krüner Wehr bis zum Sylvensteinspeicher kommen hohe Schluffablagerungsschichten nicht nur in Randlage der Aue vor, sondern auch inmitten des Querprofils (siehe Abb. 59). Es wird festgestellt, dass die Ablagerungen maßgeblich zur Inselbildung beitragen, die sich durch das so geförderte rasche Wachstum des Weidengebüsches schnell festigen. Das Feinmaterial, welches auch bei geringeren Abflüssen transportiert wird, bleibt an bewachsenen Kiesbänken hängen (Auskämmung) (Box et al. 2019). Da das Feinmaterial zudem Wasser länger speichern kann als das grobe, poröse Geschiebe, finden verstärkt Weiden geeignete Habitate, welche die Kies- bzw. Sandbänke zunehmend verfestigen und damit die Auskämmung weiter forcieren. Somit ist das ein sich selbst verstärkender Prozess, der erst durch größere Abflüsse unterbrochen werden kann, der die verfestigten Strukturen entlang des Gewässers aufreißt und neue, freie Kiesflächen schafft. Die Vergangenheit hat jedoch auch gezeigt, dass die Wirkung größerer Abflussereignisse stark von deren Abfolge – wie oft nacheinander – abhängt und wie weit sich dazwischen bereits wieder verfestigte Strukturen gebildet haben.

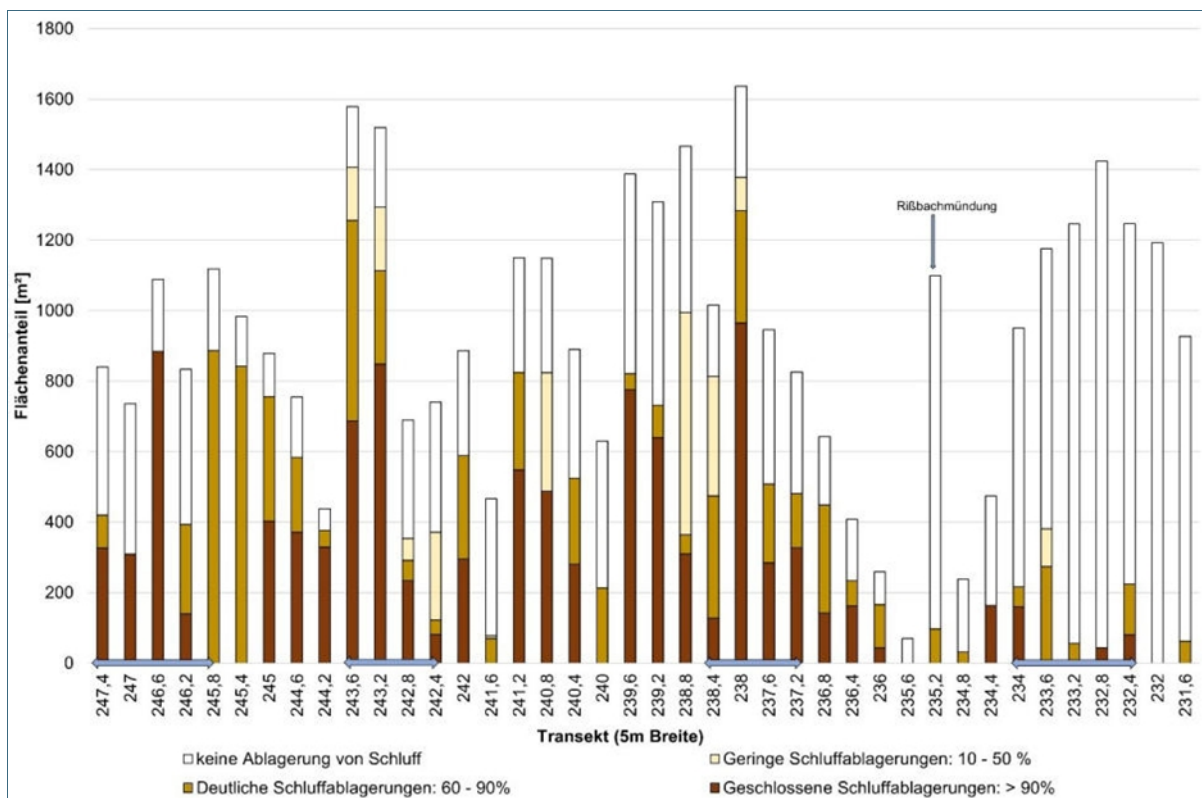


Abb. 59: Isar (Krün bis Rißbachmündung): Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf

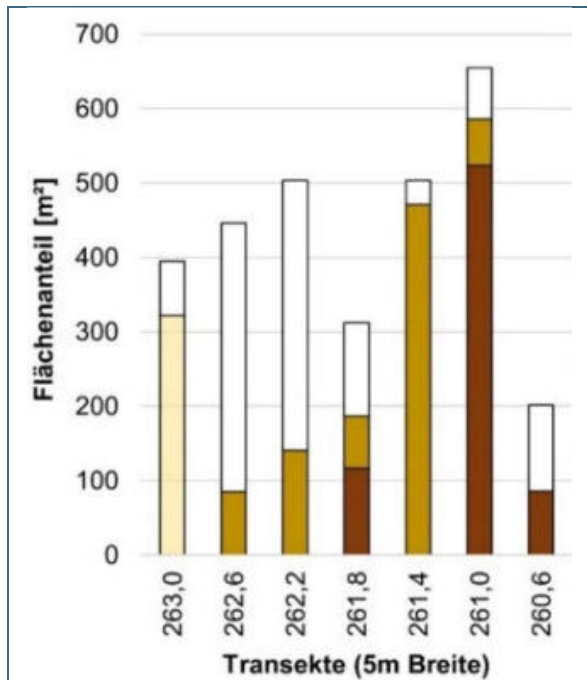


Abb. 60: Isar (Mittenwald bis Scharnitz): Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf (Legende wie Abb. 59)

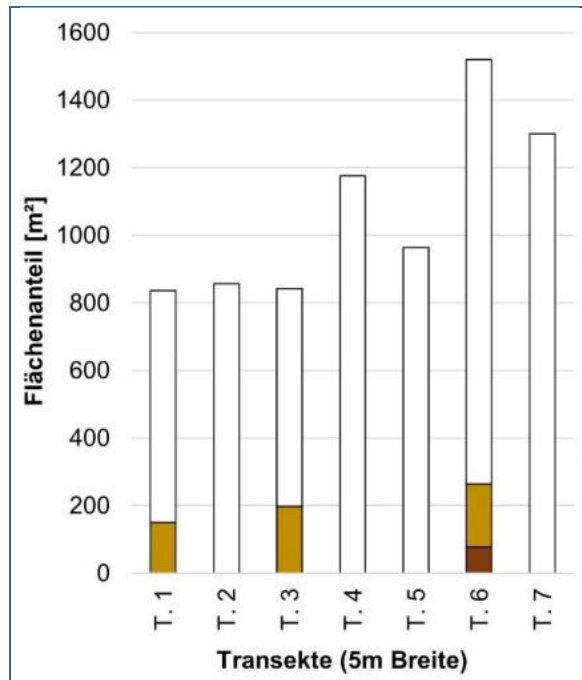


Abb. 61: Rißbach: Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf (Legende wie Abb. 59)

Zur Einordnung werden im Gutachten zwei Vergleichsgebiete herangezogen, die Isar im Bereich Scharnitz bis Mittenwald (siehe Abb. 60) und der Rißbach (siehe Abb. 61). Es kann zusammengefasst

werden, dass zwar auch oberhalb Mittenwalds schluffige Ablagerungen in der Aue beobachtet wurden, jedoch lange nicht in einem so problematischen Ausmaß wie unterhalb des Krüner Wehres. Eine mögliche Ursache scheint die Mittenwalder Korrektur zu sein, deren Einfluss weiter nach oberstrom reicht. Am Reißbach hingegen spielen schluffige Feinsedimente zurzeit nur eine sehr geringe Rolle und Umlagerungen finden nach wie vor nahezu über die komplette Bettbreite statt. Die Feststofffracht am Reißbach ist weitgehend natürlich. Für mehr Informationen zu dem Gutachten wird auf den Bericht verwiesen (Reich und Rethschulte 2021).

3.2.5 Morphologische Typisierung

Ein Ansatz für eine detailliertere, morphologische Flusstypisierung mittels Übergangs und Grenzkriterien setzt die relative Flussbettbreite $Y=b_{bf}/h$ mit der mittleren relativen Abflusstiefe $Z=h/d_m$ in Beziehung (Da Silva 1991). Die räumlich gemittelte Wassertiefe h ist dabei für den bettbildenden Abfluss zu bestimmen. Die Grenzen „gerade“ bzw. „mäandrierend“ und „alternierend“ sind dabei wie folgt definiert:

$$\frac{b_{bf}}{h} = 0,25 \left(\frac{h}{d_m} \right) \text{ für } \frac{h}{d_m} \leq 100 \text{ und } \frac{b_{bf}}{h} = 25 \text{ für } \frac{h}{d_m} \geq 100 \quad (8)$$

Der Übergang zwischen „alternierend“ und „verzweigt“ ergibt sich wie folgt:

$$\frac{b_{bf}}{h} = 25 * \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Für die Auswertung wurden die Querprofile an der Isar von 1965 und 2005 und am Reißbach von 1960 und 2006 verwendet. Diese Zeitpunkte stellen jeweils die ältesten bzw. aktuellsten einheitlichen Messkampagnen dar. Für den mittleren Korndurchmesser wird am Reißbach $d_m=30$ mm und an der Isar $d_m=22$ mm angesetzt. Die bordvolle Flussbettbreite b_{bf} wird gleich dem Abstand zwischen den gewählten Kubaturrändern gesetzt. Da die Wassertiefe für den bettbildenden Abfluss zu ermitteln ist, wurde folgendes Vorgehen gewählt: Wie bereits dargelegt, beginnt etwa ab $25 \text{ m}^3/\text{s}$ der Kies sich zu bewegen, was als untere Grenze für den bettbildenden Abfluss herangezogen wird. Typischerweise ist der bettbildende Abfluss aber höher und entspricht eher einem HQ_1 - HQ_5 (Eberstaller-Fleischanderl und Eberstaller 2014; Klasz et al. 2011; Marti 2006), weswegen die Berechnungen zusätzlich für $50 \text{ m}^3/\text{s}$, als Zwischenwert, und $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\sim HQ_5$ am Pegel Mittenwald lt. Tab. 3) durchgeführt wurden. Mittels einer 1D-Strömungsberechnung (HEC-RAS „Hydraulic Design Calculator“) wurde die Wassertiefe an den ausgewählten Profilen ermittelt.

Die Ergebnisse sind in Abb. 62 und Abb. 63 dargestellt. Die Datenpunkte wurden dabei in zwei bzw. drei charakteristische Abschnitte eingeteilt und entsprechend farbig markiert, wobei die Farbhelligkeit mit steigendem Flusskilometer (FKM) zunimmt. Zur besseren Einordnung sind die Werte im verzweigten Bereich mit ausgefüllten Markern gekennzeichnet, während Profile im alternierenden Bereich ungefüllt bzw. im geraden Bereich schwarz gefüllt sind. Die Verschiebung zwischen den Epochen ist durch eine graue Linie hervorgehoben.

An der Isar ergibt sich ein breit gestreutes Bild, mit Datenpunkten in allen Bereichen. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Daten der Profile aus 1965 und 2005 zwischen Reißbachmündung und Sylvenstein (FKM 235-228 km; rot bzw. grün) relativ eng beieinander und eindeutig im verzweigten Bereich liegen. Die Datensätze weiter flussaufwärts bis zum Krüner Wehr (FKM 251-235 km; orange bzw. blau) lassen sich auch weitestgehend dem verzweigten Bereich zuordnen, doch ist eine Verschiebung in Richtung „alternierend“ zu erkennen. Die Profile aus 2005 sind breiter gestreut, liegen aber auch noch im verzweigten Bereich, jedoch näher am Grenzbereich. Daten oberhalb des Krüner Wehres bis nach Mittenwald (gelb bzw. cyan) liegen tendenziell eher im alternierenden oder geraden Bereich. Profile zwi-

schen FKM 255 und 260 lassen sich eindeutig dem geraden Bereich zuordnen, was auf die Mittenwalder Korrektur zurückzuführen ist. Dies hat sich auch über die Zeit nicht geändert. Der Bereich Mittenwald bis zur Landesgrenze (FKM 260-263) kann wieder als verzweigter Fluss bezeichnet werden (hellgelb und hellgrün). Dieser Bereich wurde ebenfalls n (Reich und Rethschulte 2021) untersucht und ein (noch) verzweigter Charakter festgestellt.

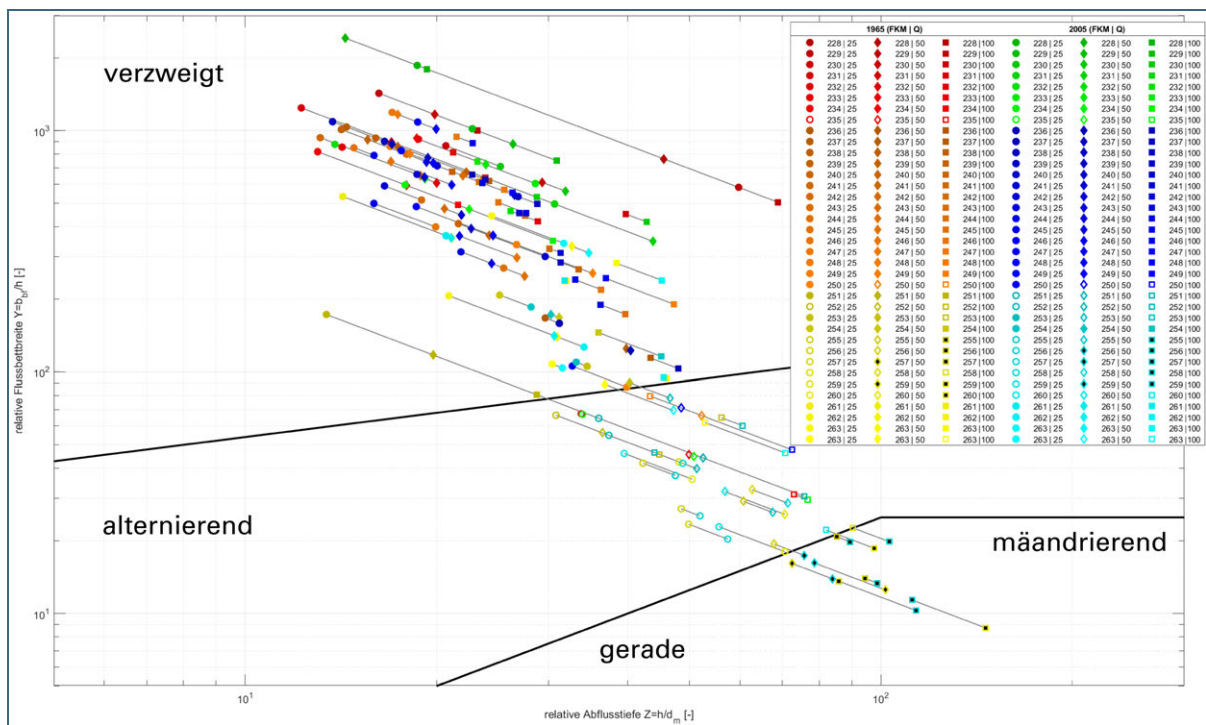


Abb. 62: Isar: Abgrenzung nach Da Silva (1991) entlang des Flusslaufs FKM 228-263 für die Profile aus dem Jahr 1965 (rot-orange-gelb) und dem Jahr 2005 (grün-blau-cyan) für je drei Abflusssituationen Q 25 m^3/s (Kreis), 50 m^3/s (Raute) und 100 m^3/s (Viereck). Datenpaare sind entsprechend nach FKM|Q benannt.

Am Reißbach ergibt sich ein eindeutigeres Bild als an der Isar (Abb. 63). Die meisten Datenpunkte liegen im verzweigten Bereich, was den Charakter des Reißbachs bestätigt und sich mit den Ergebnissen von Haas (2006) deckt. Zusätzlich lassen sich die Punkte deutlich in zwei Gruppen einteilen: oberhalb (orange bzw. blau) und unterhalb FKM 3,0 (rot bzw. grün). Datenpunkte an Querprofilen mit höherer Flusskilometrierung (also weiter flussaufwärts, näher am Reißbachwehr) liegen hauptsächlich an der Grenze zum bzw. im alternierenden Bereich, was sich mit der Topographie des Reißbachs deckt. Der Reißbach läuft bis circa FKM 3,0 km noch in einer engeren Schluchtstrecke (vgl. Abb. 3) und weitet sich erst danach auf. Im Anschluss daran bildet der Fluss seine verzweigten Fließwege aus. Der Vergleich der zwei Querprofilepochen (1960 zu 2006) bestätigt, dass sich der Charakter des Reißbachs diesbezüglich kaum verändert hat.

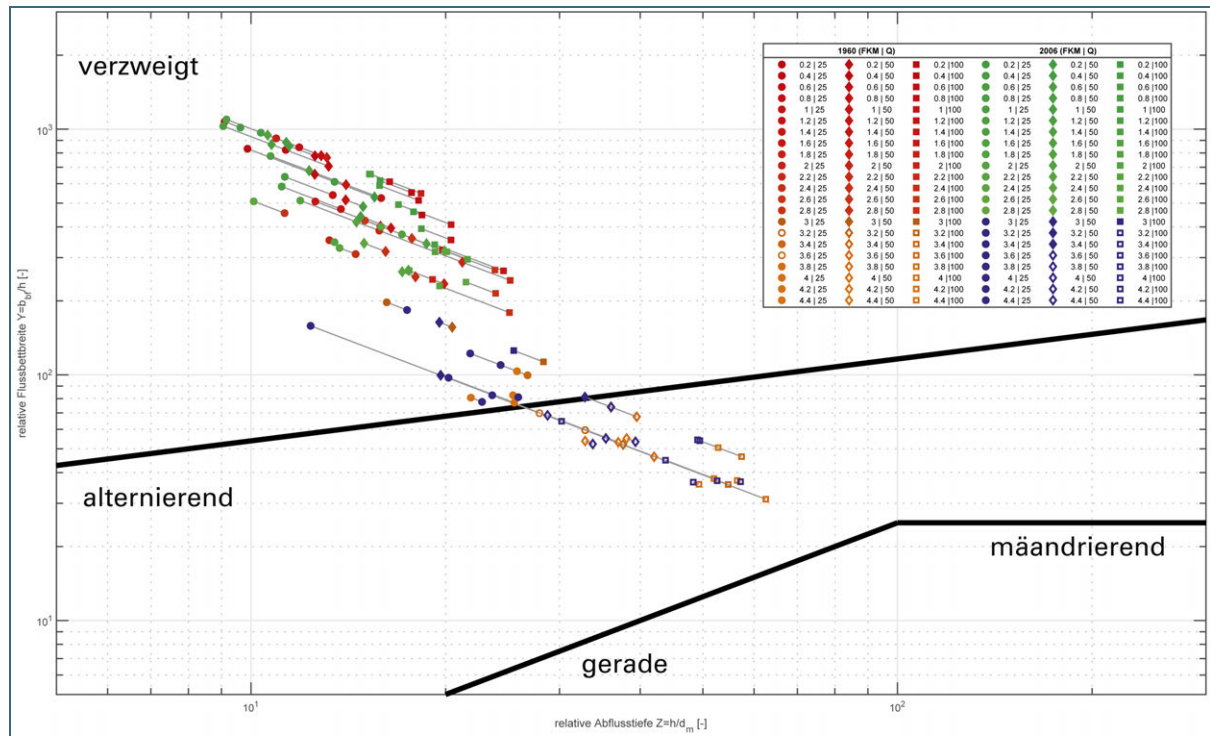


Abb. 63: Rißbach: Abgrenzung nach Da Silva (1991) entlang des Flusslaufs FKM 0,2 – 4,4 für die Profile aus dem Jahr 1960 (rot-orange) und dem Jahr 2006 (grün-blau) für je drei Abflüsse Q 25 m³/s (Kreis), 50 m³/s (Raute) und 100 m³/s (Viereck). Datenpaare sind entsprechend nach FKM|Q benannt.

3.2.6 Dynamik des Talwegs

Um die Dynamik des Gewässers noch genauer zu betrachten, wurde die räumliche und zeitliche Änderung des Talwegs untersucht. Dazu wurde die Verlagerung des Talwegs innerhalb eines Querprofils *i* von einer Aufnahme (Zeitpunkt t_1) zur nächsten (Zeitpunkt t_2) ausgewertet (Abb. 64):

$$\Delta B_{TW,i} = \frac{(B_{TW,i}^{t_2} - B_{TW,i}^{t_1})}{t_2 - t_1} \left[\frac{m}{a} \right]$$

- Es ist erkennbar, dass von der Landesgrenze bis circa FKM 260 eine gewisse Dynamik herrscht. Es sind sowohl in älteren Epochen (1950–1970) Änderungen von rund ± 50 m/a zu erkennen als auch in aktuellen Zeiträumen.
- Zwischen FKM 260 und circa FKM 254,5 hingegen lässt sich keine Dynamik erkennen, was der Mittenwalder Korrektur geschuldet ist und bereits vor 1900 begann. Der Talweg verläuft in diesem Bereich weitgehend an der gleichen Stelle.
- Im anschließenden Bereich bis zum Krüner Wehr FKM 250,697 war in den älteren Epochen (blau) eine deutliche Dynamik mit großer Variation ± 200 m/a zu erkennen, was aber in aktuellen Epochen eingegrenzt wurde, insbesondere durch die Stauhaltung und die Leitdämme im Stauraum.
- Der unmittelbare Bereich unterhalb des Krüner Wehrs bis zur Finzbachmündung ist überprägt von den regelmäßigen Entnahmen. Die Isar ist zudem durch die Ortschaften mit ihren Hochwasserschutzdeichen eingengt (vgl. Abb. 15) und erreicht nicht mehr die Dynamik älterer Epochen.
- Der Bereich zwischen Finzbachmündung bis zur Weberweise zeigt auch in neueren Epochen noch eine gewisse Dynamik, was auf Umlagerungsprozesse hindeutet. Dies deckt sich auch mit den Luftbildern, die in diesem Bereich immer noch eine verzweigte Kiesflusslandschaft darstellen.

- Im folgenden Verlauf, ab FKM 244, nimmt die Dynamik insgesamt ab. Während in den älteren Epochen noch größere Ausschläge ($\pm 50/100$ m/a) erkennbar sind, pendelt der Talweg aktuell nur noch um wenige 10 m/a bis ca. FKM 240. Vereinzelt kommt es auch noch im weiteren Verlauf noch zu Ausschlägen.
- Zwischen Rißbachtücker und Rißbachtücker fließt die Isar in einer S-förmigen Pendelstrecke mit kaum Breitenvariabilität.
- Erst unmittelbar nach der Rißbachtücker ist in aktuellen Epochen eine relativ konstante und große Dynamik erkennbar. Diese Dynamik scheint mit zunehmender Fließstrecke zuzunehmen, bis diese dann durch die Vorsperre unterbrochen wird. Dieser Prozess ist vermutlich dem zusätzlichen Sedimenteintrag des Rißbachs geschuldet, was für eine Erhöhung des Verzweigungsgrad förderlich ist.

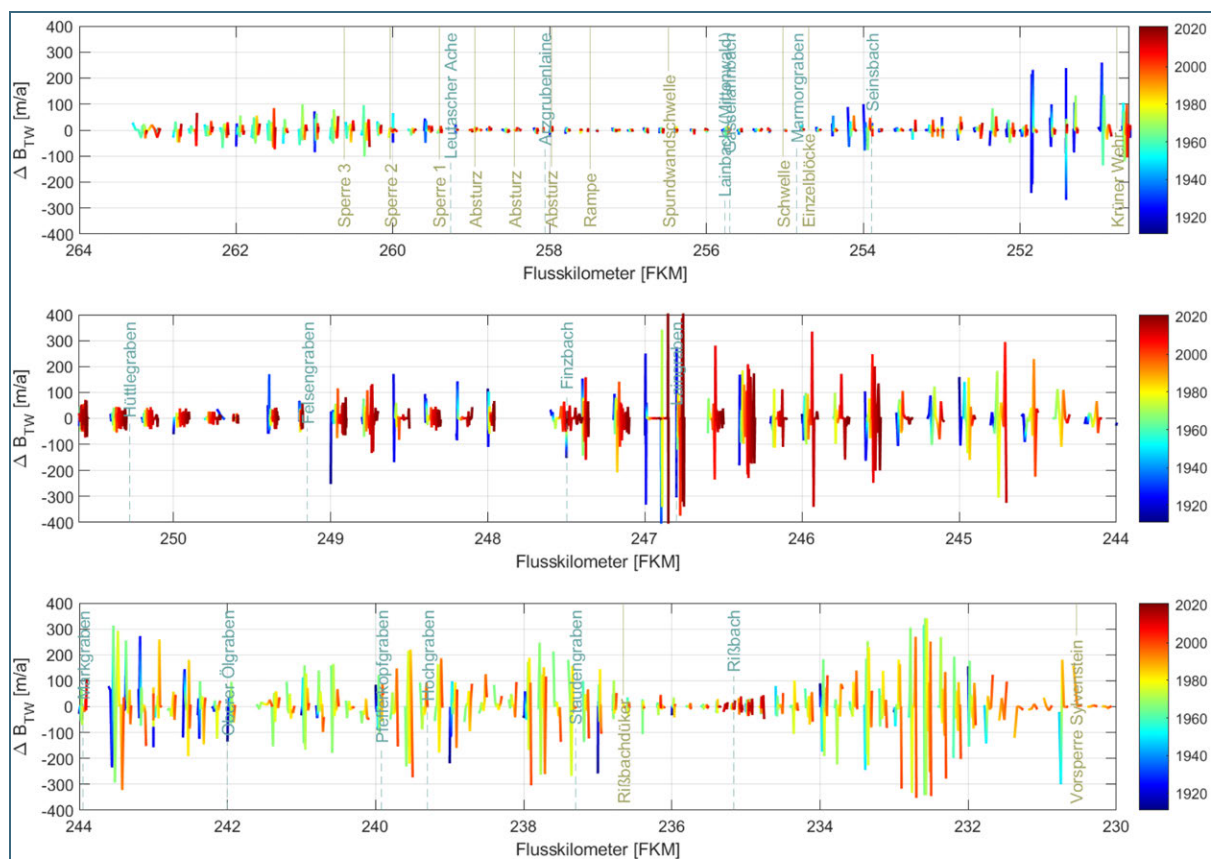


Abb. 64: . Mittlere Breitenvariation des Talwegs der Isar für die einzelnen Profile über die Zeit

Zwischenfazit

Die Charakterisierung von Isar und Rißbach anhand von empirischen Beziehungen belegen die augenscheinliche Entwicklung am Flusssystem der Oberen Isar. Mit der Klassifikation nach (Da Silva 1991) kann zum einen der grundsätzliche verzweigte Charakter von Isar und Rißbach bestätigt und der Rückgang des Verzweigungsgrades zwischen Krüner Wehr und Rißbachtücker aufgezeigt werden. Der Rißbach hingegen hat sich gewässermorphologisch kaum verändert.

Die detaillierte Analyse der räumlichen Dynamik des Talwegs der Oberen Isar bestätigt die Entwicklung. Während oberhalb der Mittenwalder Korrektur noch eine gewisse Dynamik herrscht und Umlagerungen auftreten, wird dies im Bereich Mittenwald komplett unterbunden. Der weitere Bereich bis zum Krüner Wehr ist durch die Stauhaltung beeinträchtigt und lagert sich entsprechend nur noch gering um. Unterhalb des Wehres herrscht eine sehr große Dynamik, was aber zum einem dem großen

Materialeintrag und Ablagerung aus den Spülungen geschuldet ist und zum anderen den massiven Entnahmen. Entsprechend ist dieser Bereich zwar sehr dynamisch, aber nicht natürlich. Im anschließenden Bereich, Weberwiese bis Reißbachmündung, ging die Dynamik deutlich zurück, was die bereits angesprochene Rinnenbildung bestätigt. Umlagerungen treten kaum mehr auf. Erst im unteren Bereich, durch den zusätzlichen Sedimenteintrag durch den Reißbach, erhöht sich die Dynamik und der Talweg wandert über die Gewässerbreite. Diese Dynamik führt dazu, dass dieser Bereich noch dem leitbildtypischen Charakter entspricht.

4 Weiteres Vorgehen

4.1 Wiederherstellung eines verzweigten Fließgewässersystems

Aktuell fließt die Isar in einigen Abschnitten in einer durch Vegetation eingeengten Hauptrinne mit konstanter Mindestwasserführung. Da der Anteil der transportierten Feinsedimente tendenziell gleich bleibt, der geschiebetransportwirksame Abfluss durch die Ausleitung reduziert und durch die Geschiebeentnahmen im Unterwasser auch das Geschiebedargebot beeinflusst ist, ist die Isar ab der Weberwiese bis zum Reißbach aktuell eher einem mäandrierendem Flusstyp zuzuordnen. Um wieder ein verzweigtes Gerinne zu erreichen, ist eine mengenmäßige Erhöhung aber auch eine Vergrößerung der eingebrachten Sedimentfracht erforderlich. Dadurch sollte sich nach Church (2006) eine Reduzierung der Verfestigung einstellen und ein dynamisches Gleichgewicht entstehen. Inwiefern dies an der Oberen Isar möglich ist, gilt es auszuloten. Bei physikalischen Modelluntersuchungen an verzweigten Kiesflüssen in der Schweiz wurde festgestellt, dass für die Wiederherstellung eines verzweigten Gerinnesystems zunächst die drei- bis fünffache Geschiebemenge nötig ist, von dem was ursprünglich transportiert wurde, um den Fluss im Gleichgewicht zu halten (Minor 2007; Marti 2006). Dies ist jedoch nur mit dem entsprechenden transportwirksamen Abfluss realisierbar.

4.2 Datenerhebung

Im Rahmen der Grundlagenstudie wurden die verfügbaren gewässermorphologischen Daten an der Oberen Isar zusammengetragen und einheitlich ausgewertet. Insbesondere die Flussquerprofile stellen dabei eine wichtige Informationsquelle dar, aus der die Entwicklung nachvollzogen und Maßnahmen bewertet werden können. Dabei hat sich gezeigt, dass an der Oberen Isar, gerade in neueren Epochen, ab 2005 nur abschnittsweise Flussquerprofile vermessen wurden. Dies mag zwar für bestimmte, aktuelle Fragestellungen ein kosten- und ressourceneffizientes Vorgehen sein, erschwert aber Aussagen bei großräumigeren Fragestellungen und ganzheitlicheren Betrachtungen. Daher wäre es wünschenswert, die Obere Isar und auch den Reißbach in bestimmten Zeitabständen einheitlich zu vermessen. Möglicherweise helfen in Zukunft alternative Messwerkzeuge wie unmanned-aerial-vehicles (kurz UAVs, auch Drohnen genannt), um den Aufwand zu reduzieren.

4.3 Numerische Sedimenttransportmodellierung

Aufbauend auf den hier ausgearbeiteten Grundlagen, ist der Einsatz eines numerischen Sedimenttransportmodells vorgesehen. Die mit diesem Modell berechneten Varianten haben zum Ziel, fachliche Grundlagen für die wasserwirtschaftlichen bzw. naturschutzfachlichen Anforderungen an den zukünftigen Betrieb zu erarbeiten. Dies betrifft vor allem die flussmorphologischen Randbedingungen. Dabei steht im Hintergrund immer die Frage, wie an der Isar die energetische Nutzung des Walchensee-Systems mit den oben genannten Anforderungen der Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines verzweigten Fließgewässersystems vereinbart werden kann. Mit dem Modell sollen zwei Hauptfragen beantwortet werden:

- Wie viel bettbildenden Sedimenttransport mit entsprechender Abflussdynamik benötigt die Isar mindestens für die Wiederherstellung des Verzweigungsgrads in der Gesamtstrecke und häufigere Umlagerungen im Bereich Weberwiese bis Reißbachmündung?
- Wie kann diese Menge vom Krüner Wehr bis zur Weberwiese transportiert werden, ohne den Hochwasserschutz zu gefährden und gleichzeitig Entnahmen zu minimieren?

Beide Fragen stehen immer im engen Zusammenhang mit den tatsächlichen bzw. testweise im Modell veränderten Abflussverhältnissen, sowie den vorhandenen bzw. testweise im Modell veränderten morphologischen Randbedingungen.

5 Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2020): Merkblatt Nr. 5.4/1. Grundlagen zu Flussaufnahmen und deren Dokumentation. Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hg.) (2002): Flusslandschaft Isar von der Landesgrenze bis Landshut. Leitbilder, Entwicklungsziele, Maßnahmenhinweise. München.
- Bellinger, Johannes; Antl, Bernhard (2023): Gegenüberstellung von historischen und hydrologisch-hydraulisch orientierten Stauraumpülungen am Krüner Wehr und Reißbachwehr. Interner Vermerk: Wasserwirtschaftsamt Weilheim.
- Box, Walter; Västilä, Kaisa; Järvelä, Juha (2019): The Interplay between Flow Field, Suspended Sediment Concentration, and Net Deposition in a Channel with Flexible Bank Vegetation. In: *Water* 11 (11). DOI: 10.3390/w11112250.
- Church, Michael (2006): BED MATERIAL TRANSPORT AND THE MORPHOLOGY OF ALLUVIAL RIVER CHANNELS. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34 (1), S. 325–354. DOI: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122721.
- Da Silva, A.M.A.F. (1991): Alternate Bars and Related Alluvial Processes. MSc thesis: Queen's University. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=qU1OYAAACAAJ>.
- Eberstaller-Fleischanderl, Doris; Eberstaller, Jürgen (2014): Flussbau und Ökologie. Flussbauliche Maßnahmen zur Erreichung des gewässerökologischen Zielzustandes. Wien: Amt der NÖ Landesregierung und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Ertl, Otto (1948): Der Einfluß des Walchenseewerkes und seines geplanten weiteren Ausbaues auf die Gestaltungsvorgänge im Isargebiet. München.
- Gabel, Gerhard; Grebmayer, Thomas; Gröbmaier, Wolfgang; Schaipp, Bernhard; Schlapp (2006): Gew. I.O., Isar: Hochwasserschutz Krün-Wallgau; Stellungnahme. Aktenzeichen: 63-4424-8-Isar/Krün. Stellungnahme.
- Germanoski, D.; Schumm, S. A. (1993): Changes in Braided River Morphology Resulting from Aggradation and Degradation. In: *The Journal of Geology* (101), S. 451–466.
- Grohsy, Anna (2010): Numerische Simulation des Schwebstofftransportes der Isar zwischen Krüner Wehr und Reißbachdüker. Diplomarbeit. Ludwig-Maximilians-Universität München, München. Department für Geographie.
- Haas, Patrick (2006): Flussmorphologische Untersuchungen am Reißbach. Diplomarbeit.
- Huber, Britta (2022): Monitoring Dynamisierungsmaßnahmen Obere Isar. 2012-2021. 6. Sitzung des Arbeitskreises "Geschiebemanagement". WWA-Weilheim. Online-Veranstaltung, 30.11.2022.
- Karl, Johann; Mangelsdorf, Joachim; Scheurmann, Karl (1977): Die Isar. ein Gebirgsfluß im Spannungsfeld zwischen Natur und Zivilisation. Sonderdruck. München: Verein zum Schutz der Bergwelt e.V.
- Klasz, Gerhard; Reckendorfer, Walter; Gutknecht, Dieter (2011): Der bordvolle Abfluss natürlicher Flüsse im Ursachen- und Wirkungszusammenhang mit der bordvollen Gewässergeometrie - Gewässermorphologische und ingenieurpraktische Aspekte. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 30.11, S. 221–229.
- Landesstelle für Gewässerkunde (1926): HW-Verhältnisse der bayer. Donau. Beilage 6. Die Isar. Eine Flußbeschreibung, 1926.

- Mangelsdorf, Joachim; Scheurmann, Karl; Weiss, Fritz-Heinz (1990): River morphology. A guide for geoscientists and engineers. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer series in physical environment, 7).
- Marti, Christian (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Ansätze zur Abfluss-, Geschiebe-transport- und Kolkiefenberechnung. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/20.500.11850/3507>.
- Minor, H.-E. (Hg.) (2007): Flussaufweitungen. Möglichkeiten und Grenzen. Workshop der VAW. Zürich, 2007. VAW ETH Zürich. Zürich: ETH Zürich (200).
- Okazaki, Satoshi (2023): Piecewise linear model: MATLAB Central File Exchange. Online verfügbar unter <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/124190-piecewise-linear-model>, zuletzt geprüft am 05.06.2023.
- Oswald, Mechthild (1984): Der Einfluss der Isarableitung auf die Gestaltung der Flussole der Isar im Bereich zwischen Krün und Vorderriss. (im Original verfügbar LfU Archiv Ref. 63). Diplomarbeit. Ludwig-Maximilian-Universität München, München. Geographischen Institut.
- Poschlod, Benjamin; Willkofer, Florian; Ludwig, Ralf (2020): Impact of Climate Change on the Hydrological Regimes in Bavaria. In: *Water* 12 (6). DOI: 10.3390/w12061599.
- Reich, M. (2005): Gutachten zur naturschutzfachlichen Bewertung der Auswirkungen einer Geschiebeentnahme unterhalb des Krüner Wehrs. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Hannover.
- Reich, M.; Bargiel, D.; Rühmkorf, H. (2008): Die Obere Isar zwischen Fkm 253 und Fkm 232: Veränderungen der Vegetationsverhältnisse zwischen 1858 und 2006, Auswirkungen der Hochwasser 1999 und 2005 und Situation und Perspektive ausgewählter Zielarten. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt und des Wasserwirtschaftsamtes Weilheim. Hannover.
- Reich, M.; Rethschulte, C. (2021): Beachlife an der Oberen Isar: räumliche und zeitliche Dynamik in einem Hotspot der Biodiversität. Gutachten im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Hannover.
- Schaipp, Bernhard (2006): Die Obere Isar: Früher und Heute - Perspektiven für Morgen. Kurhaus Gemeinde Krün, 11.01.2006.
- Schaipp, Bernhard; Zehm, Andreas (2009): Abschlussbericht des LfU zur Oberen Isar zum Gutachten von Prof. Dr. Reich und eigenen Untersuchungen zum Geschiebemanagement.
- Scheurmann, Karl (1972): Kiesentnahme aus der Isar im Bereich der Finzbachmündung durch das Straßenbauamt Weilheim für den Bau der Deutschen Alpenstraße zwischen Krün und Sylvensteinspeicher. Aktenzeichen: 3275-F. LfU Archiv Ref. 63 LfU: WWA Weilheim-4424.9. Wasserwirtschaftsamt Weilheim.
- Schürer, Christof (2019): Krüner versorgen Wallgauer mit Trinkwasser. In: *Merkur.de*, 16.06.2019. Online verfügbar unter <https://www.merkur.de/lokales/garmisch-partenkirchen/wallgau-ort357634/kruen-wallgau-trinkwasserbrunnen-in-wallgau-ausser-betrieb-12446214.html#id-Comments>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2021): Klima-Report Bayern 2021. München.
- Widmer, Andreas; Werdenberg, Niels; Haupt, Simon: Planungshilfe ELJ. Engineered Log Jam (ELJ).

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen von der Landesgrenze über Mittenwald bis zum Krüner Wehr	8
Abb. 2:	3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen vom Krüner Wehr über Finzbach- und Reißbachmündung zum Sylvensteinspeicher	9
Abb. 3:	3D-Visualisierung mit Querprofilaufnahmen des Reißbachs mit Einmündung in die Isar	9
Abb. 4:	Walchensee-System	10
Abb. 5:	Übersichtskarte für Pegelstationen für Abfluss und Wasserstand (blaue Raute) und Grundwasser (hellblaue Kreise), sowie Querbauwerke (rot/gelb).	11
Abb. 6:	Verfügbare Flussquerprofile an der Isar mit farblich hervorgehobenen Auswertezeitpunkten.	15
Abb. 7:	Verfügbare Flussquerprofile am Reißbach	16
Abb. 8:	Exemplarisches Querprofil mit einheitlichen Kubaturrändern (schwarz) und mehreren Sohlrändern pro Epoche (gestrichelt (links) bzw. gepunktet (rechts)).	17
Abb. 9:	Überblick über die Entnahmestellen der Messkampagnen der Isar und dem Reißbach.	18
Abb. 10:	Isarregelung	20
Abb. 11:	Mittenwalder Korrektur um 1930 (oben) und 2003 (unten) nach	20
Abb. 12:	Luftbild des Krüner Wehrs	21
Abb. 13:	Detailaufnahme am Krüner Wehr mit Betriebseinrichtungen	21
Abb. 14:	Unsachgemäße Kiesentnahme aus dem Stausee Krün (noch ohne Leitdämme) um 1937, modifiziert Krüner Wehr = rote Linie nach	23
Abb. 15:	Hochwasserschutz Krün um 1958, modifiziert nach	24
Abb. 16:	Luftbild von 1962 mit umrandeten Kiesentnahmeflächen	24
Abb. 17:	Bewachsene Feinsedimentinsel unmittelbar vor der Vorsperre am Sylvensteinspeicher. Foto aufgenommen am 9.11.2022 von der Vorsperre aus Blickrichtung Flussaufwärts	26
Abb. 18:	Feinteileablagerungen (eingekreist) an der Geschiebevorsperre, erkennbar auf dem 1*1m DGM.	26
Abb. 19:	Maßnahme A1 „Weberwiese“, Jahr 2012 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)	26
Abb. 20:	Maßnahme A2, Jahr 2014 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)	26
Abb. 21:	Maßnahme A3, Jahr 2018 (oben: Ausführung, unten: Istzustand)	26
Abb. 22:	Luftbild von 1921 im Bereich oberhalb der Reißbachmündung; Holzlagerstätten rot markiert.	27
Abb. 23:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das ganze hydrologische Jahr für das MQ.	28
Abb. 24:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das gesamte hydrologische Jahr für das mHQ.	28
Abb. 25:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Sommerhalbjahr für das MQ.	29
Abb. 26:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Sommerhalbjahr für das mHQ.	29
Abb. 27:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Winterhalbjahr für das MQ.	29
Abb. 28:	Klimasignale am Pegel Mittenwald für das Winterhalbjahr für das mHQ.	30

Abb. 29:	Abflussdauerlinien am Krüner Wehr, für den Zufluss (links), den verbleibenden Abfluss in der Isar (mittig) und die Ausleitungsmenge in den Kanal zum Walchensee (rechts) für den Zeitraum bis 1990 (rot) und ab 1991 (blau) (Beginn Mindestwasserabgabe). Farbig hinterlegte Flächen spiegeln die Bandbreite zwischen Minimum und Maximum der jeweiligen Epoche wieder.	31
Abb. 30:	Aufteilung des Jahresabflusses am Krüner Wehr	32
Abb. 31:	Abflussdauerlinien am Reißbachwehr, für den Zufluss (links), den Reißbach unterhalb des Wehrs (mittig) und die Ausleitungsmenge in den Stollen (rechts). Die farbig hinterlegte Fläche spiegelt die Bandbreite zwischen Minimum und Maximum wieder.	32
Abb. 32:	Aufteilung des Jahresabflusses am Reißbachwehr	33
Abb. 33:	Plotting Positions der jährlichen Hochwasserspitzen im Zeitraum 1970 bis 2022 der Isar am Krünerwehr bzw. des Reißbachs am Reißbachwehr.	34
Abb. 34:	Zeitreihen der Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet. (Angaben des Grundwasserstandes in [müNN])	35
Abb. 35:	Tageswerte des Abfluss am Krüner Wehr (Minimum: Hellblau, Mittelwert: Blau und Maximum: Rot) mit farbig hinterlegten Epochen	36
Abb. 36:	Feststoffentnahmest Statistik entlang der Isar in verschiedenen Abschnitten.	37
Abb. 37:	Talweg der Oberen Isar von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr mit Gefälleknicken (farbig gestrichelte Linien).	39
Abb. 38:	Talweg der Oberen Isar von Krüner Wehr bis zur Vorsperre Sylvensteinspeicher mit Gefälleknicken (farbig gestrichelte Linien).	39
Abb. 39:	Änderung der mittleren Sohllagen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar von FKM 264-250,76.	40
Abb. 40:	Änderung der mittleren Sohllagen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar von FKM 251-240.	41
Abb. 41:	Änderung der mittleren Sohllagen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar von FKM 240-228.	41
Abb. 42:	Änderung der mittleren Sohllagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 264-250.76	42
Abb. 43:	Änderung der mittleren Sohllagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 251-240.	43
Abb. 44:	Änderung der mittleren Sohllagen überlagert mit Entnahmen bezogen auf die Epoche 2005 der Isar FKM 240-228.	43
Abb. 45:	Volumensummenlinien der Isar von der Landesgrenze bis zum Krüner Wehr.	44
Abb. 46:	Volumensummenlinien der Isar vom Krüner Wehr bis zum Sylvensteinspeicher.	44
Abb. 47:	Abflusstageswerte am Pegel Reißbachklamm (Minimum: hellblau, Mittelwert: blau, Maximum: rot) mit farbig hinterlegten Auswertepochen.	45
Abb. 48:	Talweg des Reißbachs (Bereich 3) mit Gefälleknick.	46
Abb. 49:	Änderung der mittleren Sohllagen bezogen auf die Epoche 2006 entlang des Reißbachs	46
Abb. 50:	Volumensummenlinien Reißbach	47
Abb. 51:	Auswertung Epoche 2003/2005	48

Abb. 52:	Auswertung Epoche 2018/2019	48
Abb. 53:	Auswertung Epoche 2010/2012	48
Abb. 54:	Auswertung Epoche 2019/2020	48
Abb. 55:	Zusammenstellung der Kennwerte der 21 Epochen	49
Abb. 56:	Charakteristische Korndurchmesser entlang der Isar für die Deckschicht.	53
Abb. 57:	Charakteristische Korndurchmesser entlang der Isar für die Innenschicht.	53
Abb. 58:	Zusammensetzung der Mischschicht (es gibt nur Daten im Bereich um das Krüner Wehr).	54
Abb. 59:	Isar (Krün bis Reißbachmündung): Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf	55
Abb. 60:	Isar (Mittenwald bis Scharnitz): Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf (Legende wie Abb. 59)	55
Abb. 61:	Reißbach: Verteilung von Schluffablagerungen im Längsverlauf (Legende wie Abb. 59)	55
Abb. 62:	Isar: Abgrenzung nach Da Silva (1991) entlang des Flusslaufs FKM 228-263 für die Profile aus dem Jahr 1965 (rot-orange-gelb) und dem Jahr 2005 (grün-blau-cyan) für je drei Abflusssituationen $Q\ 25\ \text{m}^3/\text{s}$ (Kreis), $50\ \text{m}^3/\text{s}$ (Raute) und $100\ \text{m}^3/\text{s}$ (Viereck). Datenpaare sind entsprechend nach FKM Q benannt.	57
Abb. 63:	Reißbach: Abgrenzung nach Da Silva (1991) entlang des Flusslaufs FKM 0,2 – 4,4 für die Profile aus dem Jahr 1960 (rot-orange) und dem Jahr 2006 (grün-blau) für je drei Abflüsse $Q\ 25\ \text{m}^3/\text{s}$ (Kreis), $50\ \text{m}^3/\text{s}$ (Raute) und $100\ \text{m}^3/\text{s}$ (Viereck). Datenpaare sind entsprechend nach FKM Q benannt.	58
Abb. 64:	. Mittlere Breitenvariation des Talwegs der Isar für die einzelnen Profile über die Zeit.	59
Abb. 65:	MNQ-hydrologisches Jahr	70
Abb. 66:	MNQ-Winterhalbjahr	70
Abb. 67:	MNQ-Sommerhalbjahr	70
Abb. 68:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 264-258.	71
Abb. 69:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 258-252.	71
Abb. 70:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 252-245.	71
Abb. 71:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 245-240.	72
Abb. 72:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 240-234.	72
Abb. 73:	Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 234-228.	72
Abb. 74:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 264-258.	73
Abb. 75:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 258-252.	73
Abb. 76:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 252-245.	73
Abb. 77:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 245-240.	74
Abb. 78:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 240-234.	74
Abb. 79:	Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 234-228.	74
Abb. 80:	Längsschnitt der Mittleren Sohle des Reißbachs.	75
Abb. 81:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1965–1967.	76
Abb. 82:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1967–1981.	76

Abb. 83:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1981–1984.	77
Abb. 84:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1984–1992.	77
Abb. 85:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1992–1997.	78
Abb. 86:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1997–1998.	78
Abb. 87:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1998–1999.	79
Abb. 88:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1999–2003.	79
Abb. 89:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2003–2005.	80
Abb. 90:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2005–2009.	80
Abb. 91:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2009–2011.	81
Abb. 92:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2011–2013.	81
Abb. 93:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2013–2013.	82
Abb. 94:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2013–2014.	82
Abb. 95:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2014–2015.	83
Abb. 96:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2015–2016.	83
Abb. 97:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2016–2018.	84
Abb. 98:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2018–2019.	84
Abb. 99:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2019–2020.	85
Abb. 100:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2020–2021.	85
Abb. 101:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2021–2022.	86
Abb. 102:	Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1965–2022.	86

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Überblick über die Wasserstand-Abfluss-Pegel im Projektgebiet	11
Tab. 2:	Abflusshauptwerte an den Pegeln des Gewässerkundlichen Dienstes	12
Tab. 3:	Hydrologischer Gewässerlängsschnitt der Isar	13
Tab. 4:	Überblick über die Grundwasserpegel im Projektgebiet	14
Tab. 5:	Auswertezeitpunkte für Isar und Rißbach	16
Tab. 6:	Gegenüberstellung der Abflusscharakteristik am Krüner Wehr und Rißbachwehr	34
Tab. 7:	Mittlere Entnahmemengen an der Oberen Isar pro Abschnitt und Epoche [$10^3 \text{ m}^3/\text{a}$]	38
Tab. 8:	Talwegsgefälle pro Epoche in den jeweiligen Abschnitten der Isar	40
Tab. 9:	Gefälle des Talwegs Pro Epoche in den jeweiligen Abschnitten des Rißbachs	46
Tab. 10:	Sedimenteintrag entlang der Isar von Nebengewässern, modifiziert nach (Gabel et al. 2006)	50
Tab. 11:	Entnahmemengen aus Nebengewässern bis zur Vorsperre, modifiziert nach (Gabel et al. 2006)	50
Tab. 12:	Transportfrachten nach Ertl (1948) (Tafel 5) Mengen in $10^3 \text{ m}^3/\text{a}$	51
Tab. 13:	Abgeleitete Transportmengen entlang der Isar (Zeitraum 1965/2005, Mengen in $10^3 \text{ m}^3/\text{a}$)	52
Tab. 14:	Kennwerte der Sedimentproben entlang der Isar	69

8 Anhang

8.1 Korngrößenverteilung der Isar

Tab. 14: Kennwerte der Sedimentproben entlang der Isar

Datum	FKM	Entnahmeschicht	D10	D16	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80	D84	D90	dmax
1990	242,00	D	18,33	25,22	28,18	34,85	40,72	46,83	53,74	60,65	72,16	78,5	88	
1990	242,00	I	0,68	1,4	2,65	6,93	12,27	19,11	26,88	35,21	44,32	49,56	58,24	
1990	242,00	I	0,69	2,27	3,51	9,36	17,11	27,12	38,42	67,44	138,98	147,39	160	
1990	261,00	D	7,94	13,45	16,12	22,02	26,76	31,37	35,34	39,22	43,1	44,65	51,01	
1990	261,00	I	0,67	1,33	2,4	5,91	9,51	14,9	23,1	33,49	44,6	50,56	59,9	
1990	261,00	I	0,63	1,29	2,41	5,99	9,18	14,29	21,42	31,57	44,79	61,97	73,47	
2007	247,22	D	18,13	25,38	29,69	37,46	44,63	51,82	59	67,3	76,99	80,87	86,68	132,7
2007	247,22	I	0,64	1,35	2,07	4,06	6,74	10,17	14,55	20,46	29,57	34,85	44,38	143,3
2007	247,48	D	22,71	25,35	27,11	31,52	35,31	39,1	42,89	48,73	57,16	60,53	72,42	120,3
2007	247,48	I	1,06	2,35	3,37	6,51	9,89	13,48	17,54	22,47	29,83	33,68	41,2	93
2007	247,68	D	31,28	43,09	47,63	56,3	64,6	71,67	78,74	85,81	96,77	103,41	113,38	118
2007	247,68	I	0,91	1,78	2,46	4,95	8,55	13,47	20,13	30,77	47,52	56,56	77,17	132,7
2007	247,68	M	0,39	0,49	0,63	0,98	1,85	3,75	6,53	10,11	15,14	18,47	25,52	65,3
2007	248,47	M	0,78	1,27	1,67	3,03	5,26	8,41	13,21	20,47	37,08	48,23	73,65	170
2007	248,47	M	0,62	0,98	1,5	2,87	4,86	7,48	11,03	15,77	23,35	28,35	38,62	121,7
2007	250,5	D	33,5	40,7	45,45	56,31	68,73	83,65	97,71	111,13	124,55	129,92	148,63	193
2007	250,5	M	0,38	0,5	0,63	0,98	1,48	1,99	2,65	3,64	5,15	5,88	7,11	19,3
2007	250,51	D	1,51	2,66	4,08	10,63	21,56	39,59	64,27	89,07	121,58	147,03	284,38	287
2007	250,51	I	0,84	1,42	1,9	3,74	6,31	9,81	14,25	19,87	27,47	30,88	39,65	109,7
2007	250,52	D	27,6	33,8	37,58	47,44	58,84	69,37	79,4	89,44	117,68	129,4	148,35	181,3
2007	250,52	I	0,79	1,39	1,85	3,18	4,82	6,86	9,7	14,21	21,34	26,57	39,84	108,7
2007	250,72	M	1,12	1,41	1,6	2,04	2,29	2,54	2,79	3,51	4,55	5,22	7,05	58,3
2007	250,72	M	0,59	1,22	1,74	3,26	4,89	6,63	8,56	10,87	13,85	15,1	17,91	41,3
2007	250,72	M	1,31	1,73	2	2,76	3,66	4,67	5,78	7,11	8,76	9,67	11,04	34,3
2007	250,75	M	0,65	0,9	1,11	1,82	2,96	4,76	7,09	10,59	15,06	17,12	20,58	38
2007	250,769	M	1,34	1,81	2,1	2,74	3,42	4,16	5,15	6,5	8,32	9,84	12,97	36
2007	250,86	M	0,63	1,48	2,13	3,65	5,26	7,18	9,68	13,02	17,39	19,8	24,16	60
2007	250,88	M	0,64	0,94	1,33	2,64	4,59	7,1	10,31	14,21	19,43	21,9	27,44	53,7
2007	250,94	M	1,03	1,47	1,76	2,62	3,87	5,67	8,02	11,72	16,63	19,43	24,2	43
2007	250,96	M	1,78	2,9	3,7	6,03	8,56	11,31	14,25	17,89	22,64	25,68	30,25	56
2007	251	M	4,22	5,84	6,91	9,74	12,71	15,7	19,37	23,37	28,54	30,61	36,93	86
2007	251,32	M	2,13	3,47	4,47	7,34	10,67	14,34	18,75	23,95	29,76	32,6	39,14	79,3
2007	251,32	M	0,89	2,59	3,17	4,86	7,17	10,28	14,11	19,26	26,96	30,67	38,28	83
2007	251,32	M	1,21	2,16	3	6,02	9,54	13,44	17,82	23,23	30,14	33,67	40,11	86,7
2007	251,37	M	0,54	1,44	2	3,75	6,51	10,25	15,3	22,1	30,4	34,5	41,21	77
2007	251,52	M	1,42	1,92	2,4	4,19	6,81	10,21	14,91	21,76	30,13	34,48	41,99	75
2007	251,52	M	0,25	1,9	2,35	3,51	4,96	6,82	9,32	12,9	17,81	20,34	25,88	85,3
2022	236,2	D	1,76	3,4	4,52	7,23	9,78	12,84	16,53	20,43	27,47	30,29	37,99	83,3
2022	236,2	I	1,74	3,24	4,35	7,29	10,62	14,85	19,26	24,98	30,97	34,65	40,73	81,7
2022	241	D	0,63	1,43	1,97	5,42	9,37	13,76	18,36	24,14	30,56	34,34	41,09	70,3
2022	241	I	0,8	1,42	1,83	3,76	5,86	8,92	12,94	18,55	26,08	29,37	37,55	91,7
2022	244	D	1,45	3,02	4,31	8,55	15,66	24,91	36,11	48,04	59,96	67,31	80,56	137,7
2022	244	I	1,66	3,14	4,18	6,86	9,9	13,96	18,78	25,88	36,12	42,61	53,57	97
2022	247,4	D	1,19	2,31	3,91	8,47	14,22	20,47	28,83	40,49	54,97	60,16	84,82	134,3
2022	247,4	I	1,13	1,67	2,08	4,3	6,67	10,32	15,62	22,18	31,01	37,16	48,07	112,7
2022	247,6	D	0,92	1,37	1,66	3,09	5,07	7,49	10,63	15,71	21,89	25,32	30,47	125
2022	247,6	I	1,13	1,64	1,97	4,53	7,56	11,65	17,36	24,55	34,24	40,37	54,11	108

Datum	FKM	Entnahmeschicht	D10	D16	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80	D84	D90	dmax
2022	246,5	D	1,03	1,47	1,76	4,03	7,45	12,36	18,74	26,16	34,73	38,98	45,73	86,7
2022	246,5	D	0,75	1,47	1,96	4,28	6,76	9,95	14,66	20,42	27,36	30,13	37,63	76,3
2022	246,5	I	1,09	1,54	1,83	3,79	6,08	9,82	15,4	22,22	29,78	34	42,7	96,7
2022	246,5	I	0,9	1,37	1,69	3,03	4,75	6,62	9,85	14,77	21,44	25,28	31,03	126,3

8.2 Klimaprojektion des Niedrigwasserhaushalts am Pegel Mittenwald

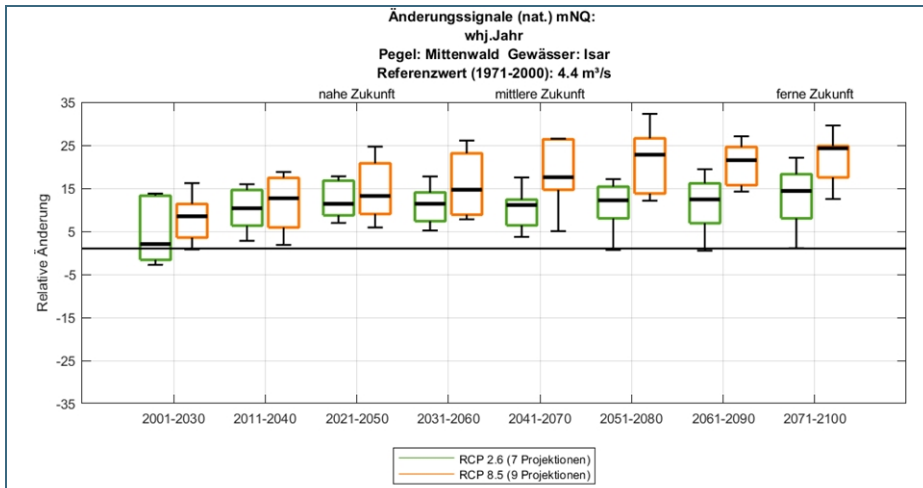


Abb. 65:
MNQ-hydrologisches
Jahr

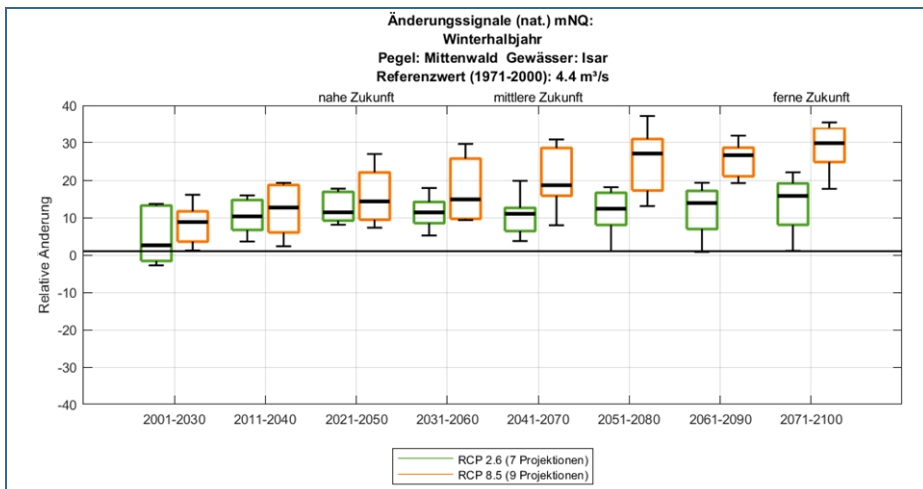


Abb. 66:
MNQ-Winterhalbjahr

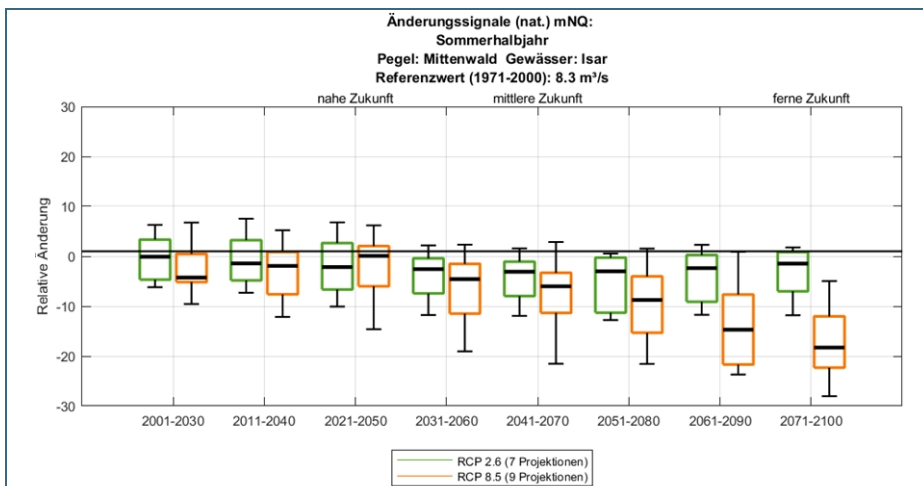


Abb. 67:
MNQ-Sommerhalbjahr

8.3 Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar

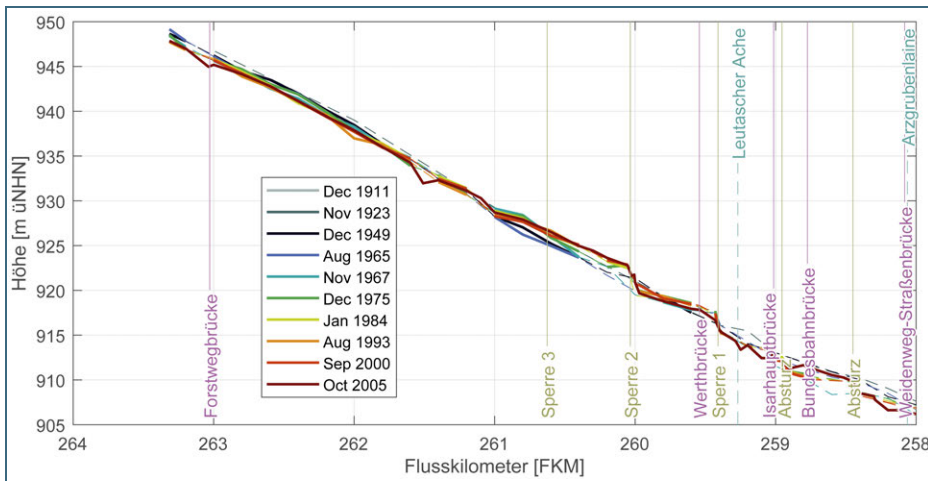


Abb. 68:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 264-258

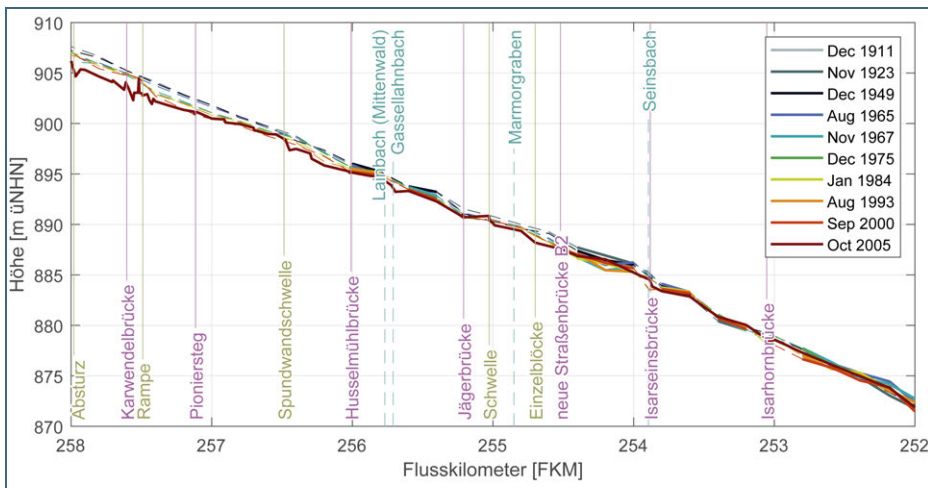


Abb. 69:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 258-252

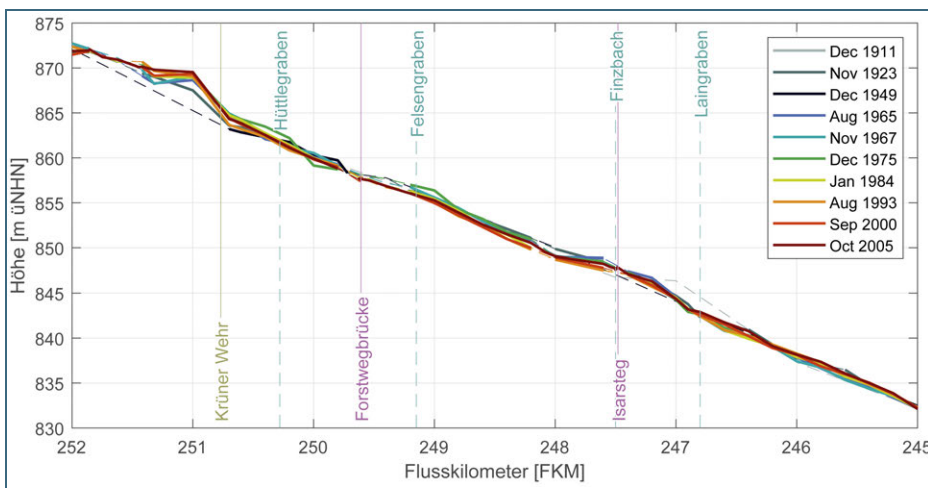


Abb. 70:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 252-245

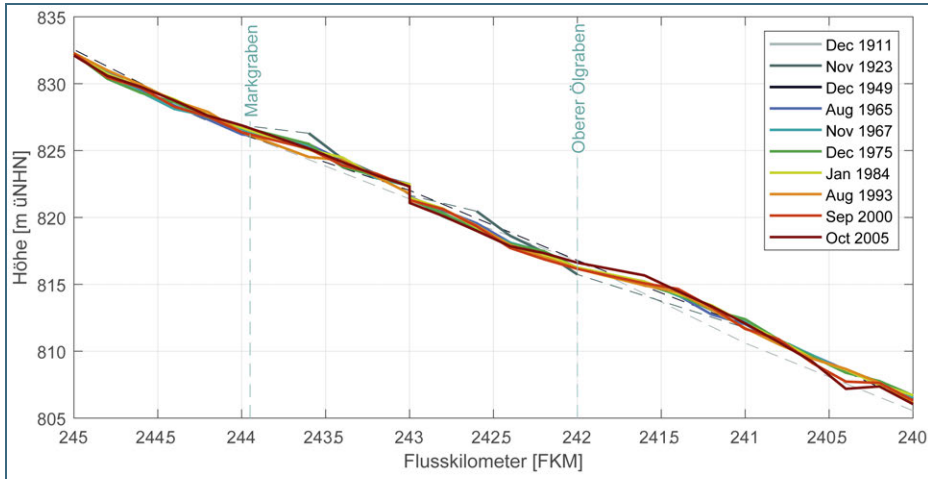


Abb. 71:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 245-240

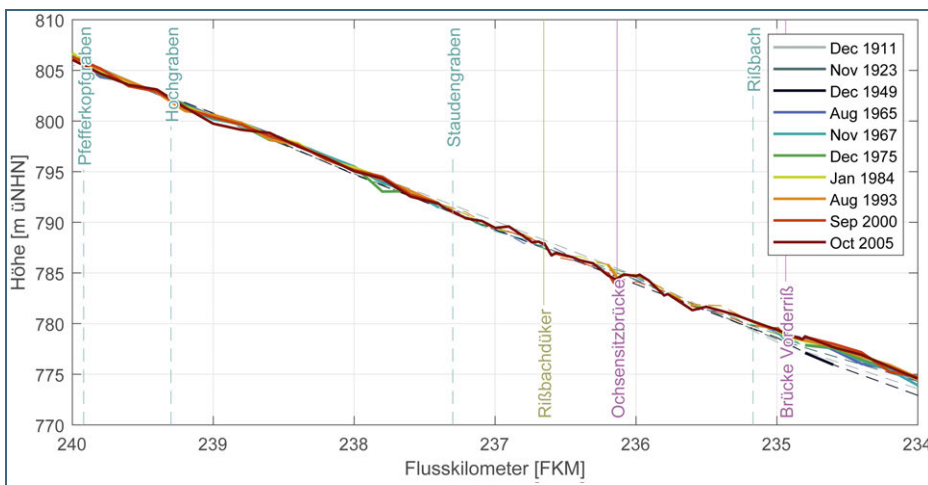


Abb. 72:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 240-234

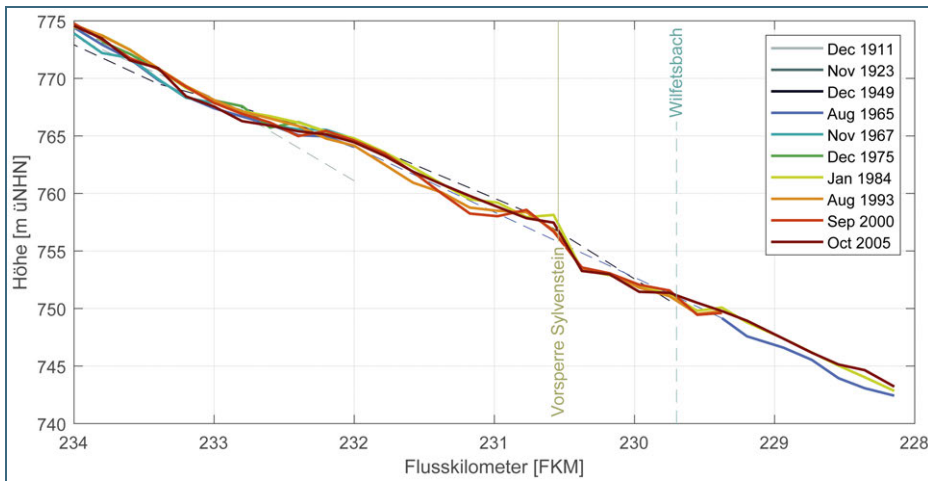


Abb. 73:
Längsschnitt des Talwegs der Oberen Isar von FKM 234-228

8.4 Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar

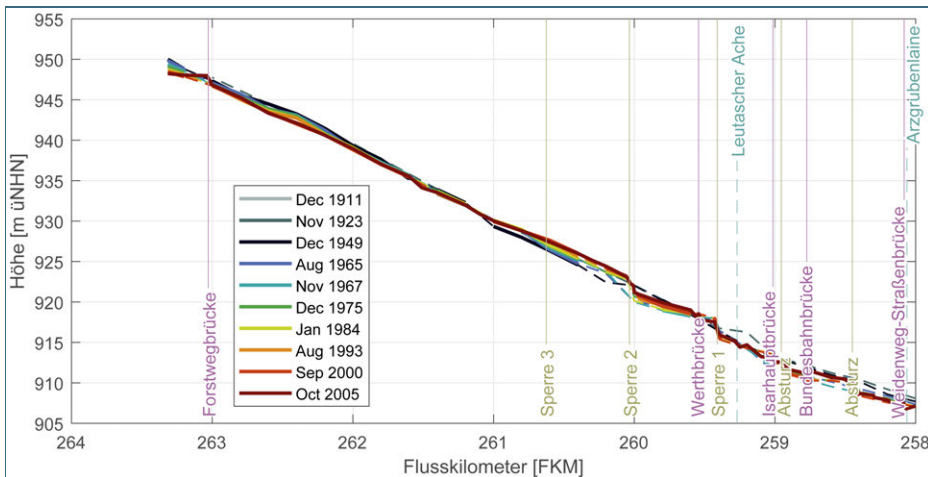


Abb. 74:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 264-258

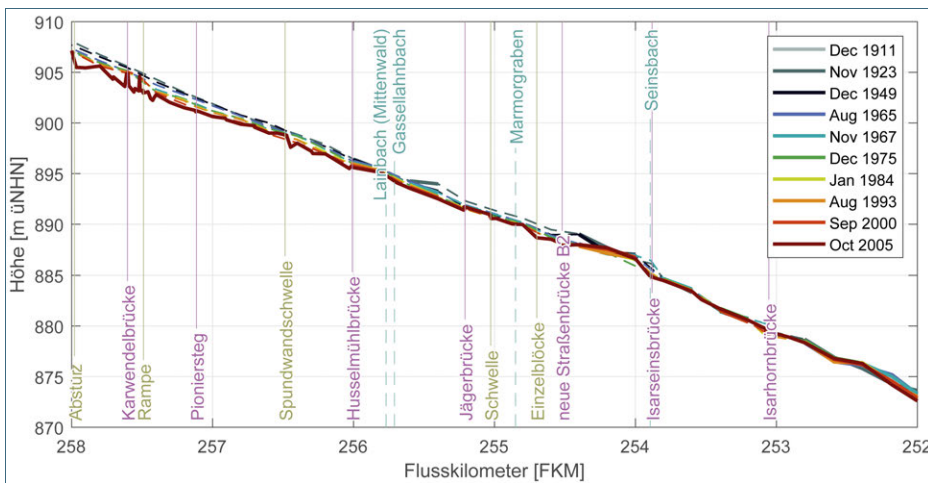


Abb. 75:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 258-252

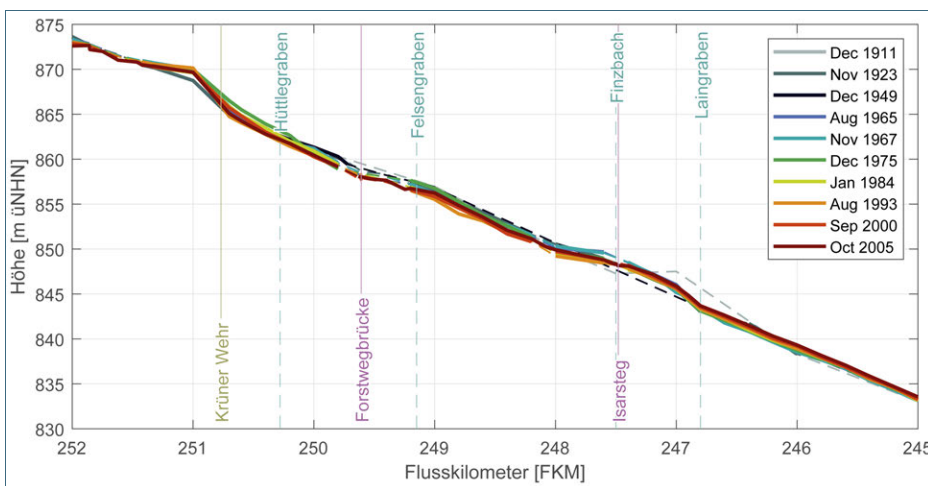


Abb. 76:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 252-245

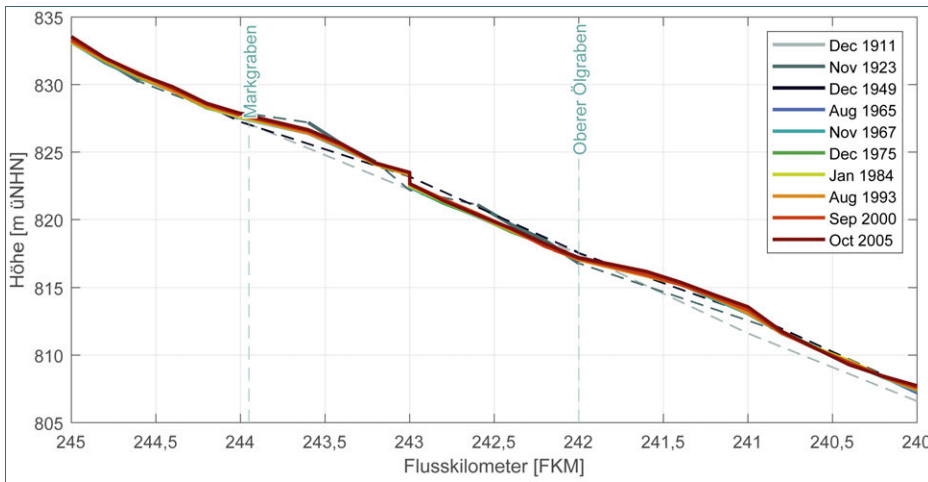


Abb. 77:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 245-240

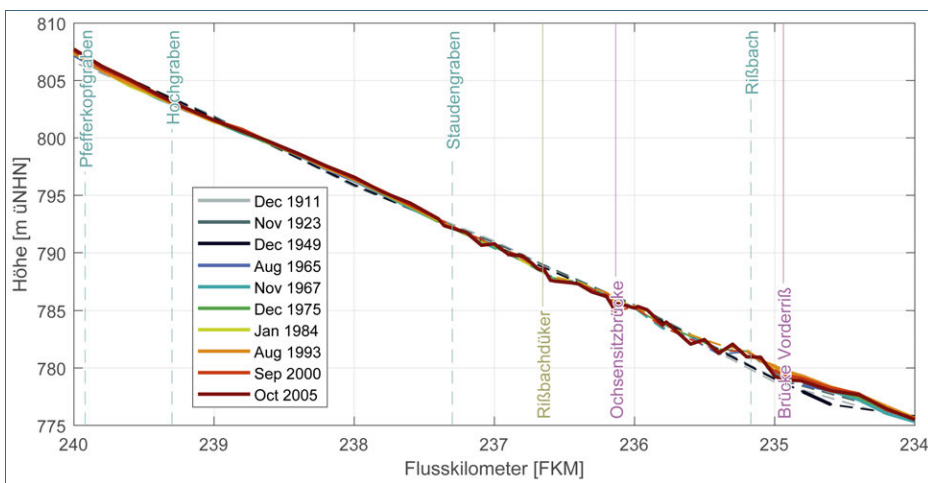


Abb. 78:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 240-234

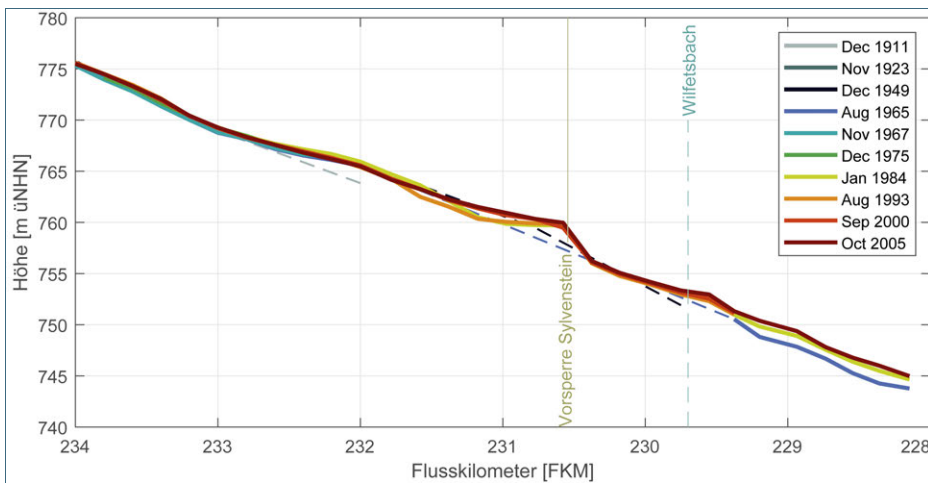


Abb. 79:
Längsschnitt der Mittleren Sohle der Oberen Isar von FKM 234-228

8.5 Längsschnitt der Mittleren Sohle des Reißbachs

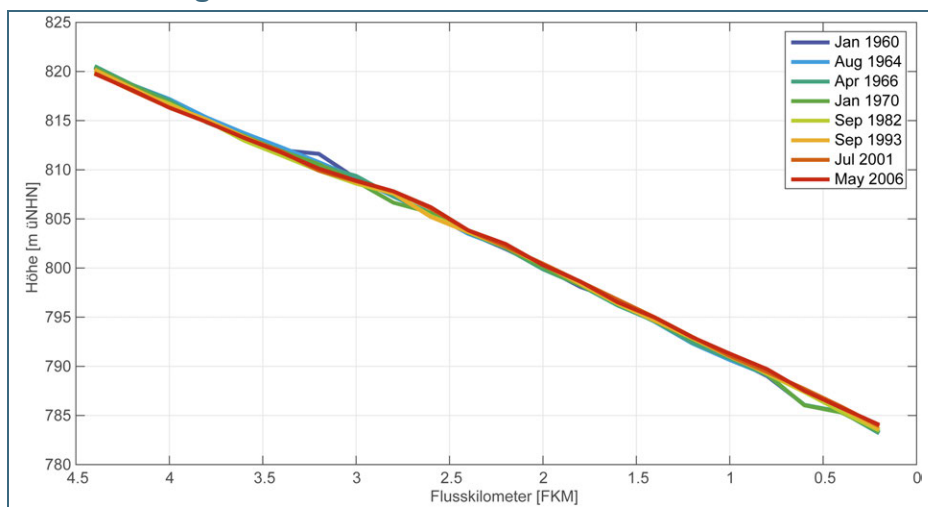


Abb. 80:
Längsschnitt der Mittleren Sohle des Reißbachs

8.6 Detaillierte Betrachtung zwischen Krüner Wehr und Weberwiese

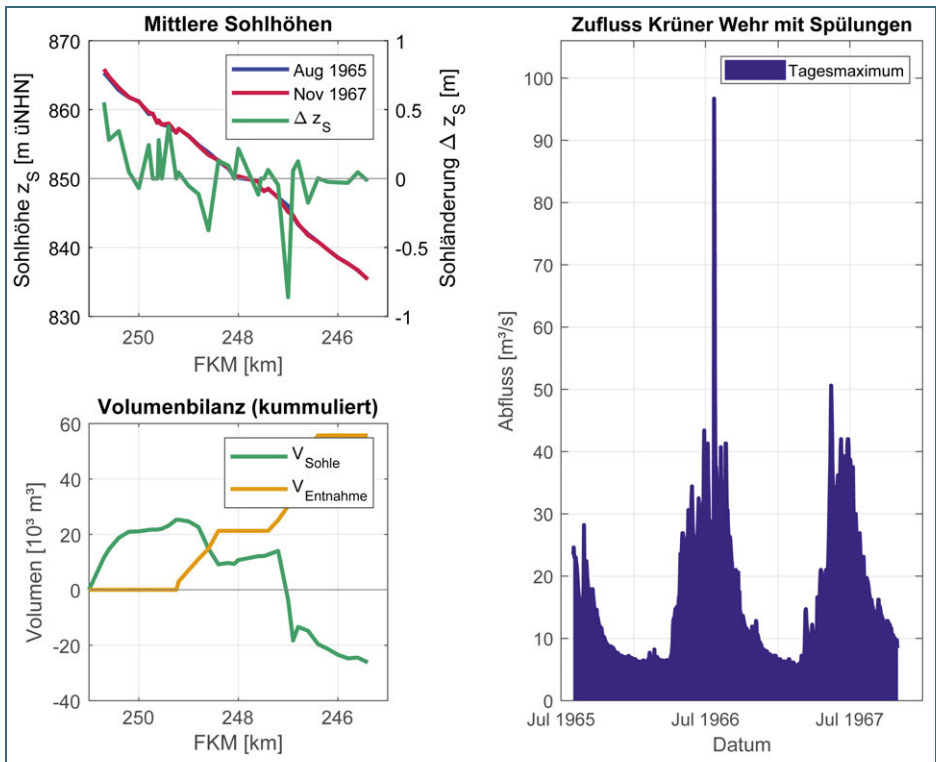


Abb. 81: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1965–1967

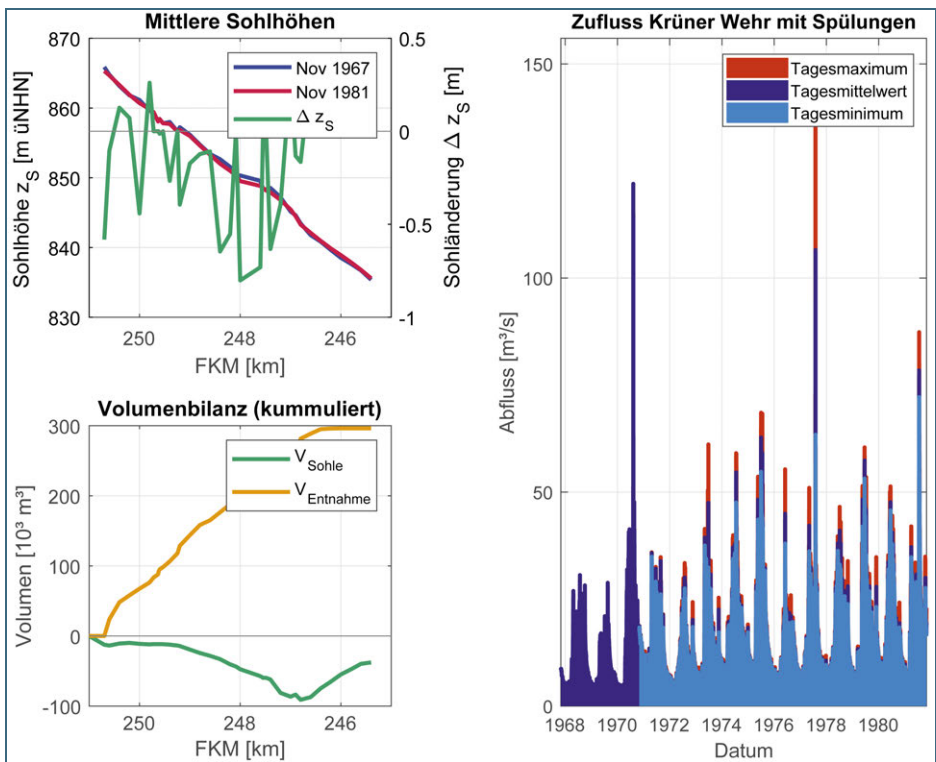


Abb. 82: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1967–1981

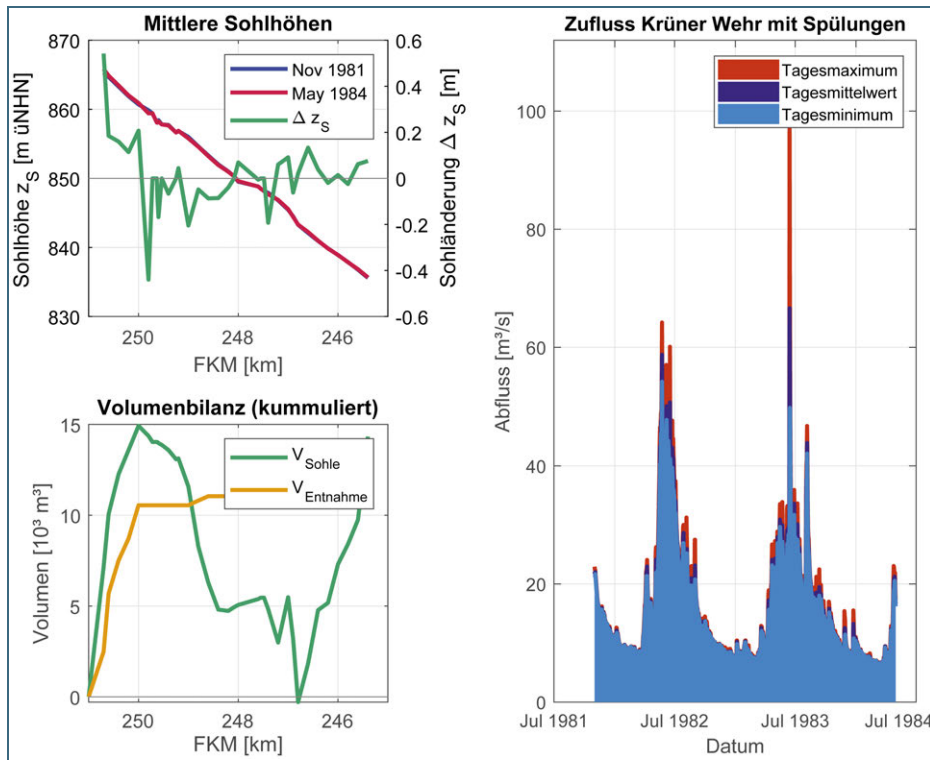


Abb. 83:
Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1981–1984

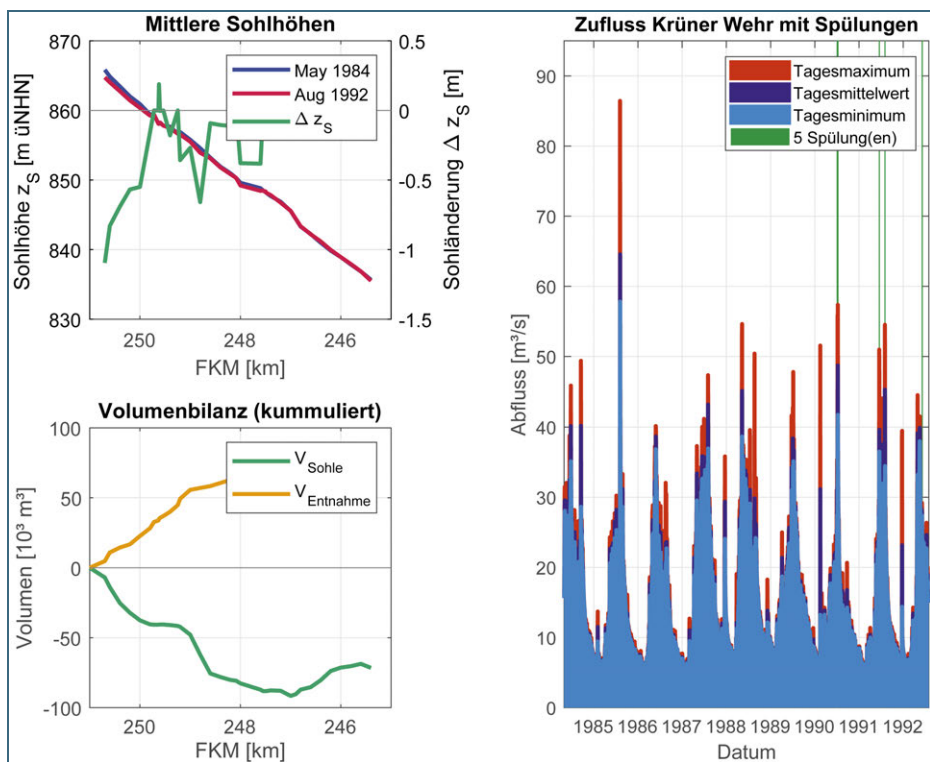


Abb. 84:
Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1984–1992

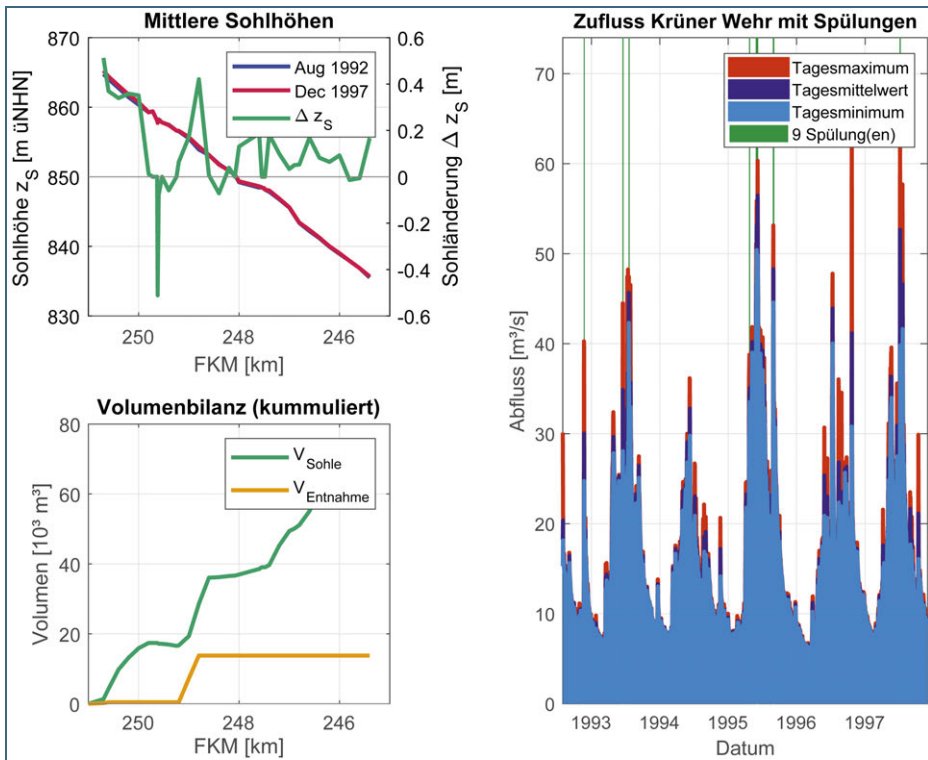


Abb. 85: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1992–1997

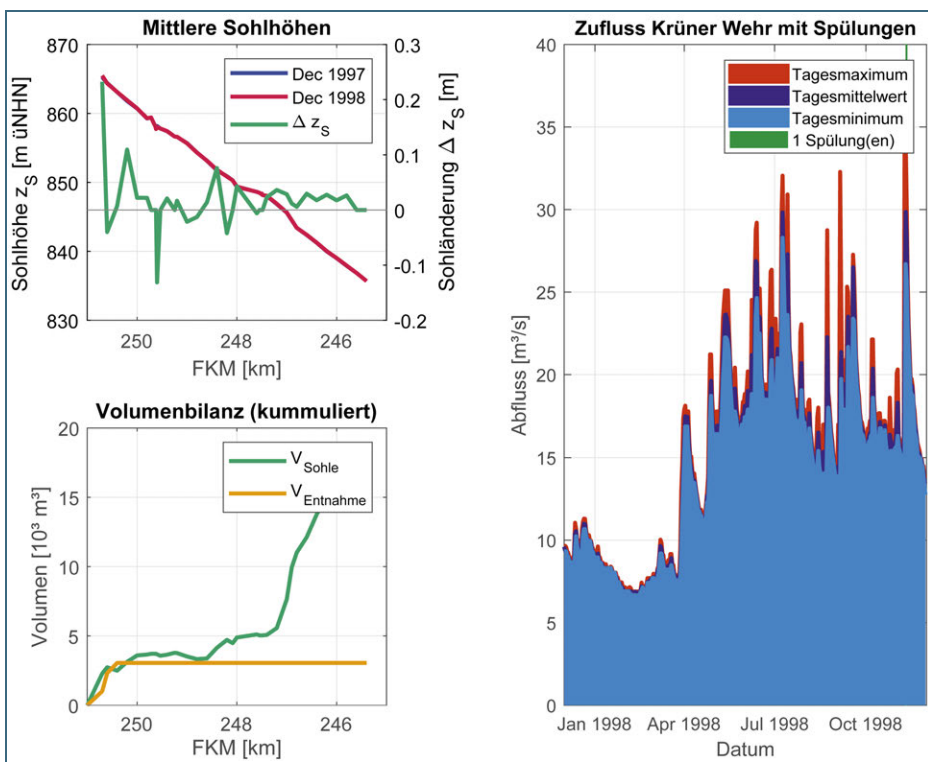


Abb. 86: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1997–1998

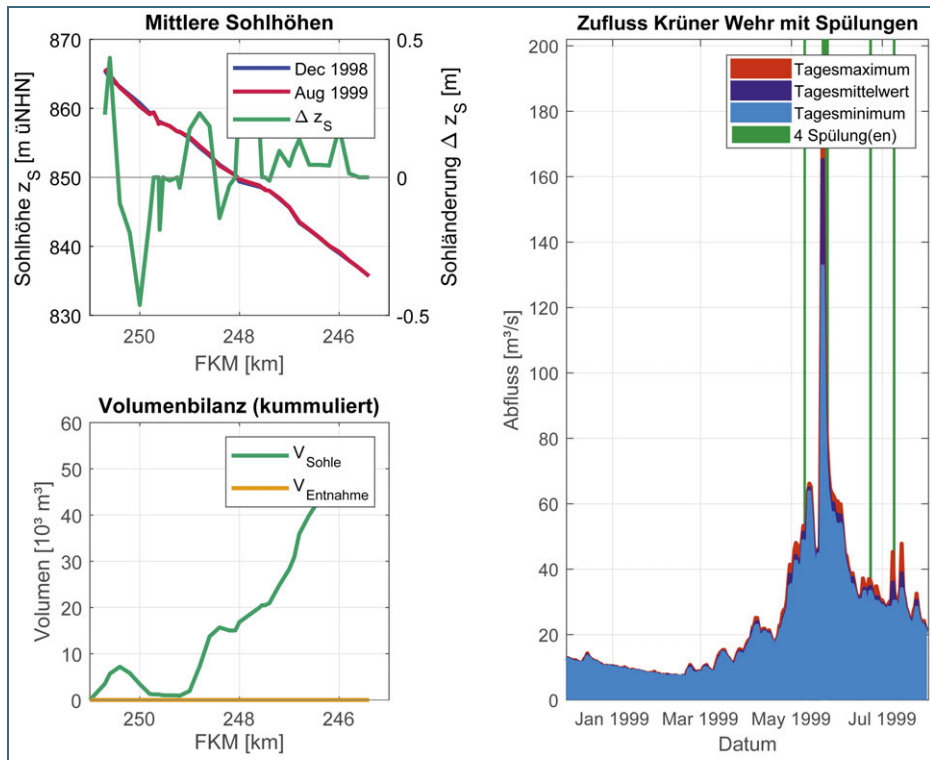


Abb. 87: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1998–1999

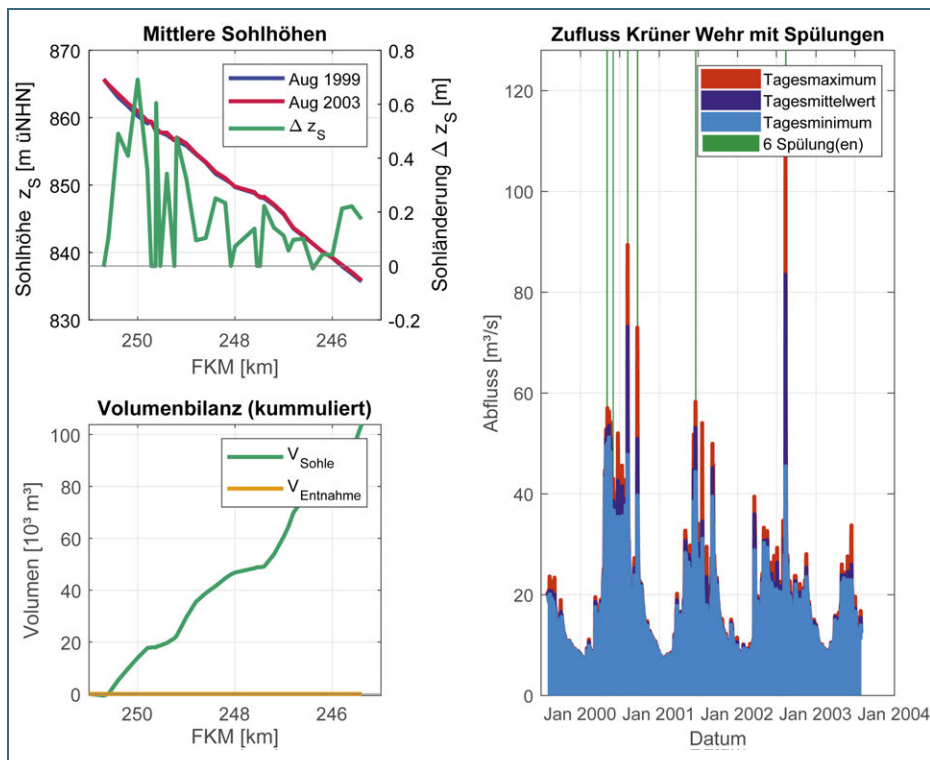


Abb. 88: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1999–2003

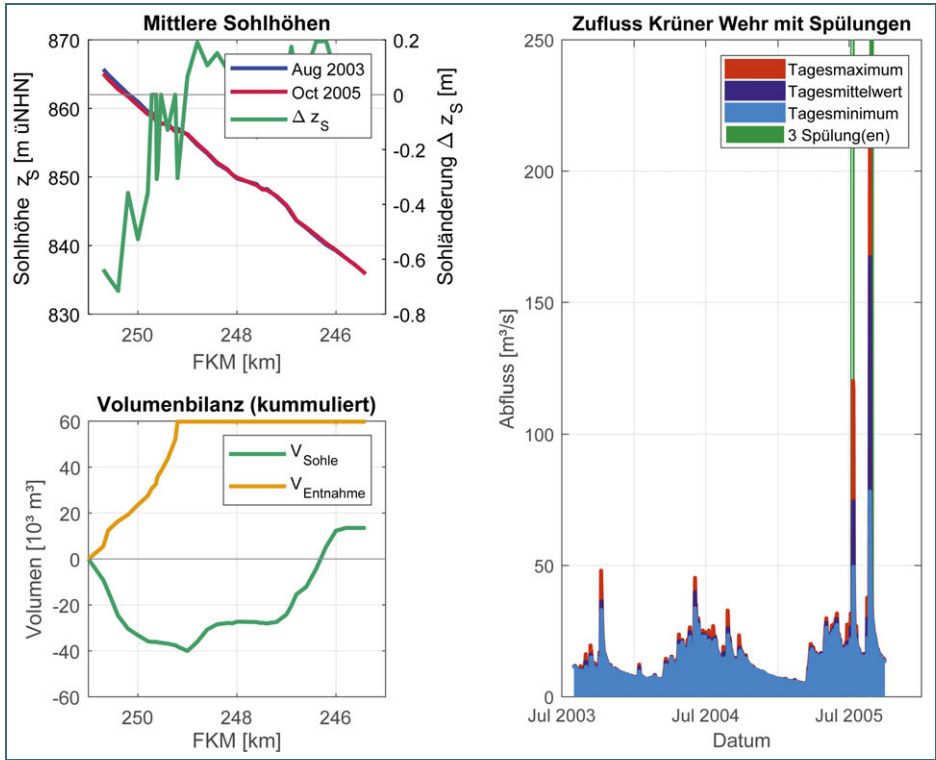


Abb. 89: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2003–2005

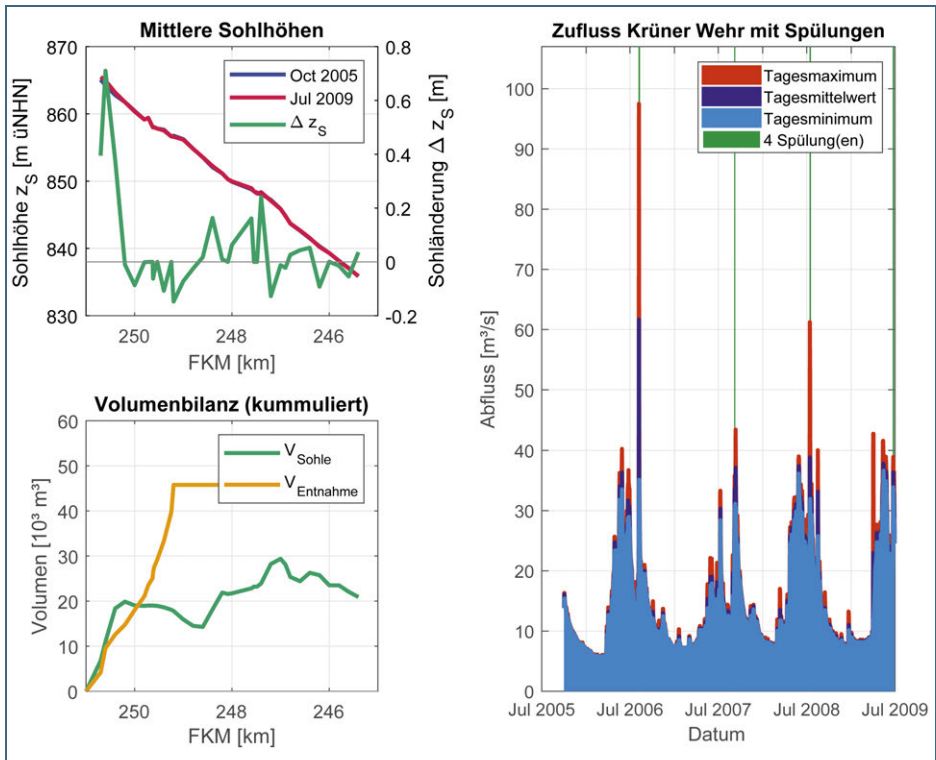


Abb. 90: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2005–2009

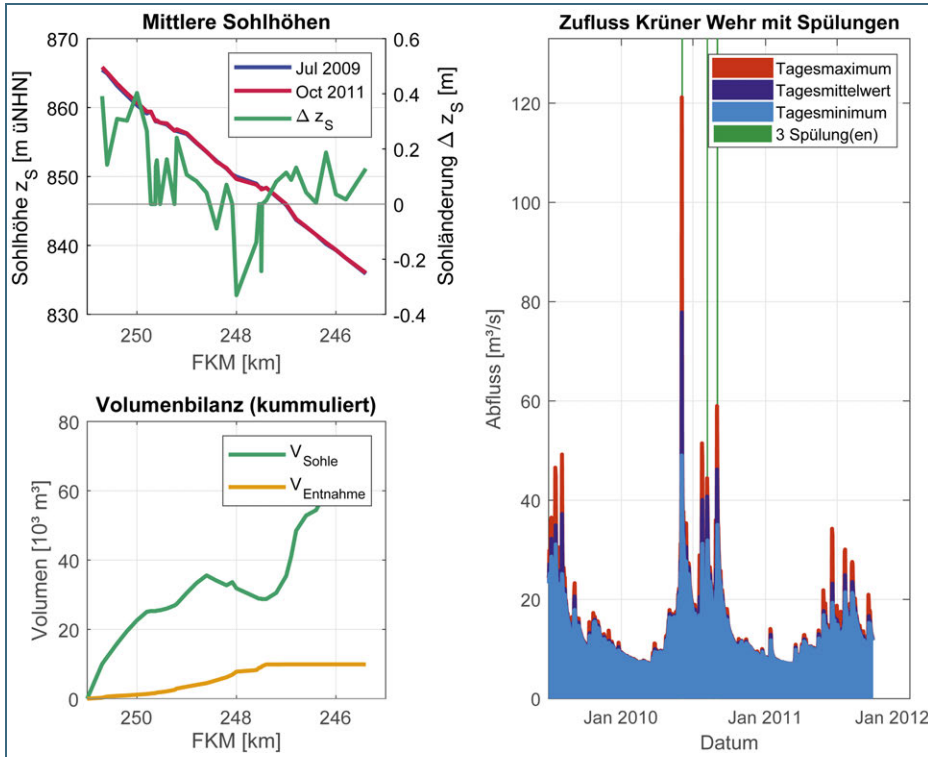


Abb. 91: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2009–2011

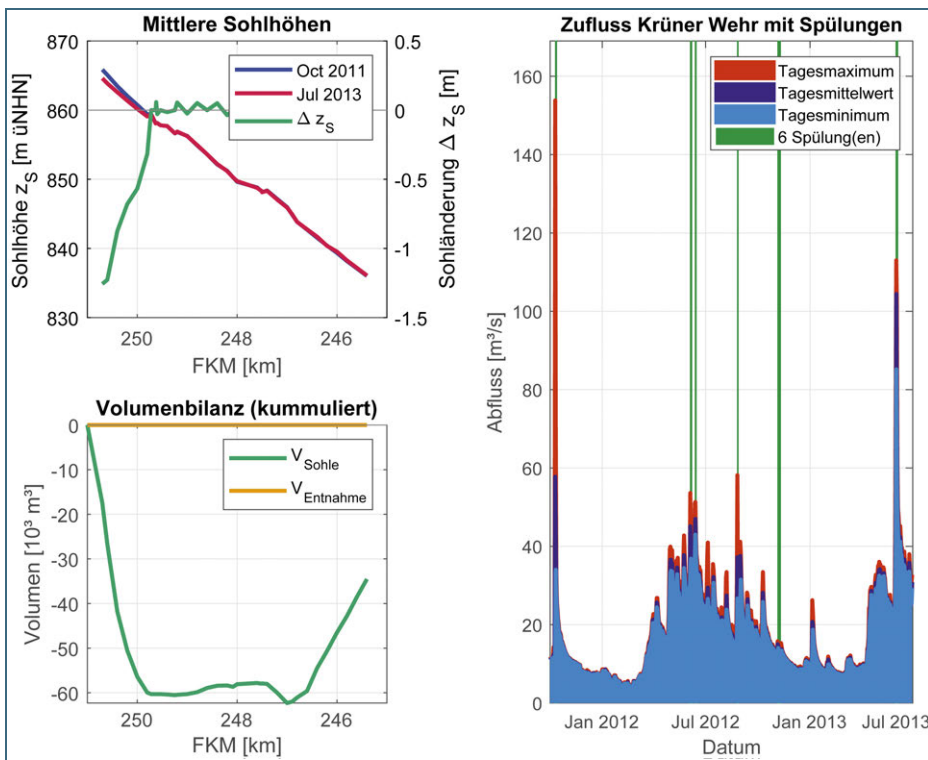


Abb. 92: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2011–2013

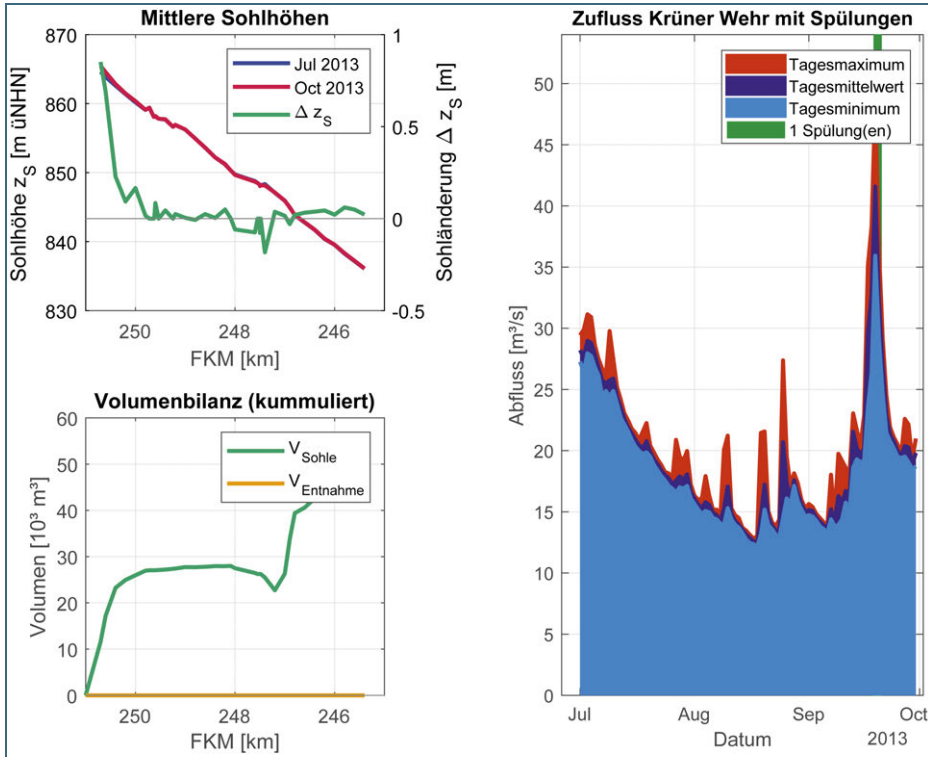


Abb. 93:
Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2013–2013

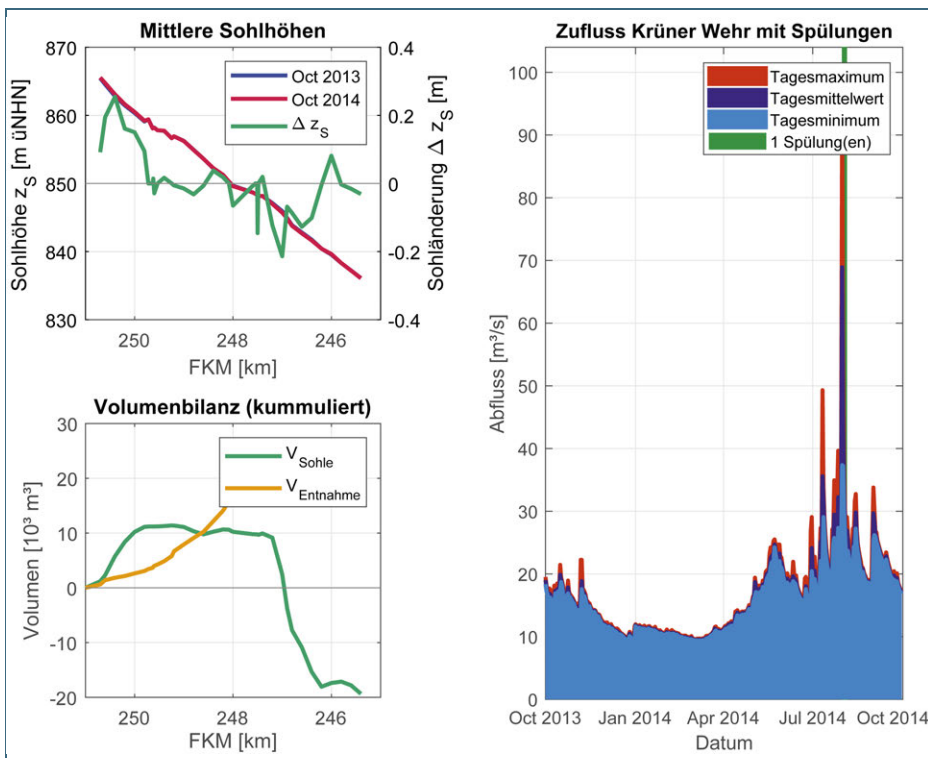


Abb. 94:
Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2013–2014

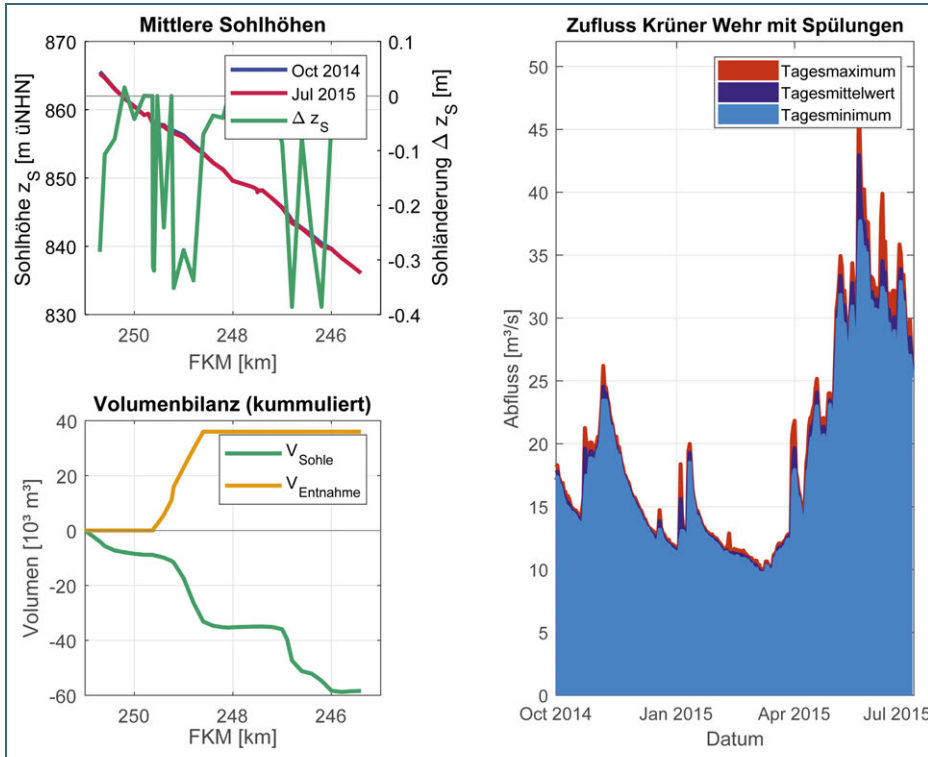


Abb. 95:
Auswertungen im Be-
reich Krüner Wehr bis
Finzbachmündung von
2014–2015

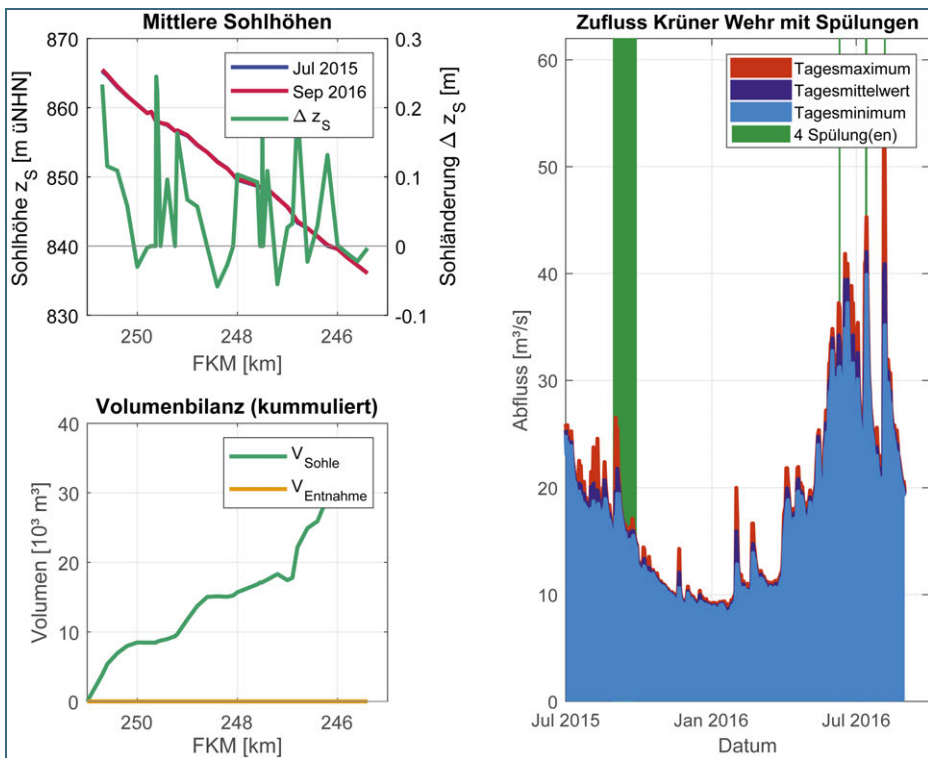


Abb. 96:
Auswertungen im Be-
reich Krüner Wehr bis
Finzbachmündung von
2015–2016

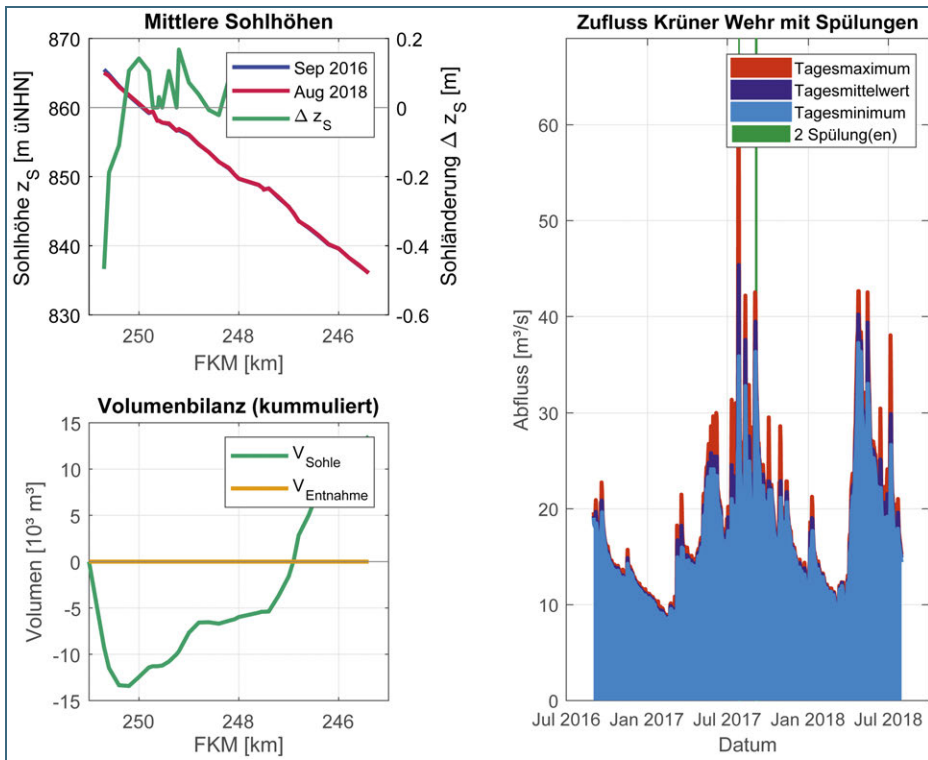


Abb. 97: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2016–2018

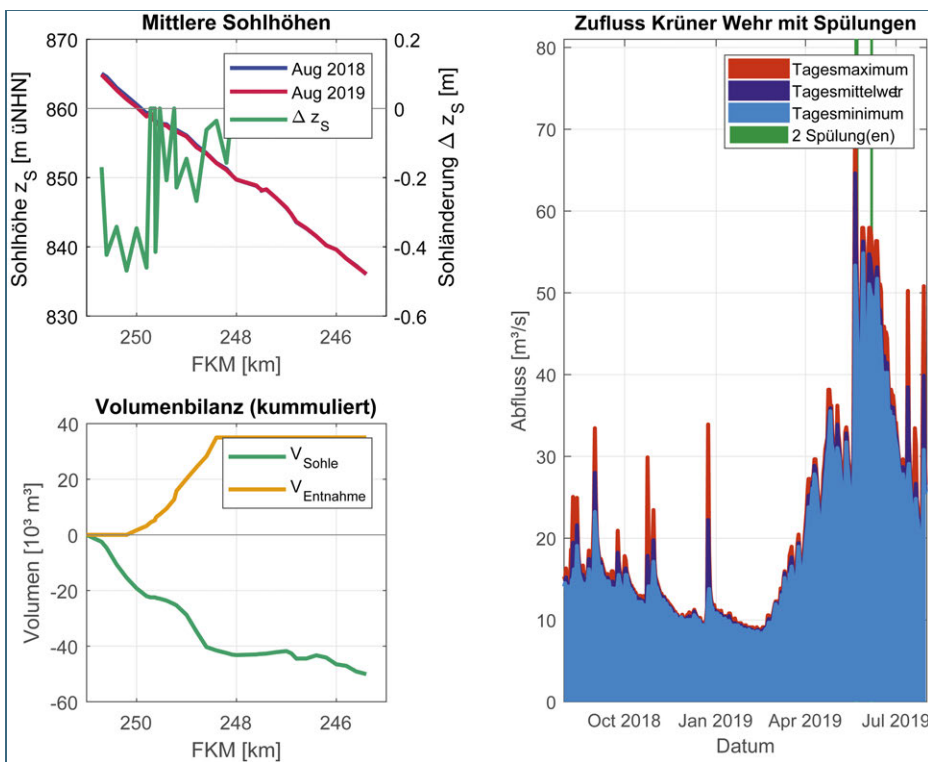


Abb. 98: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2018–2019

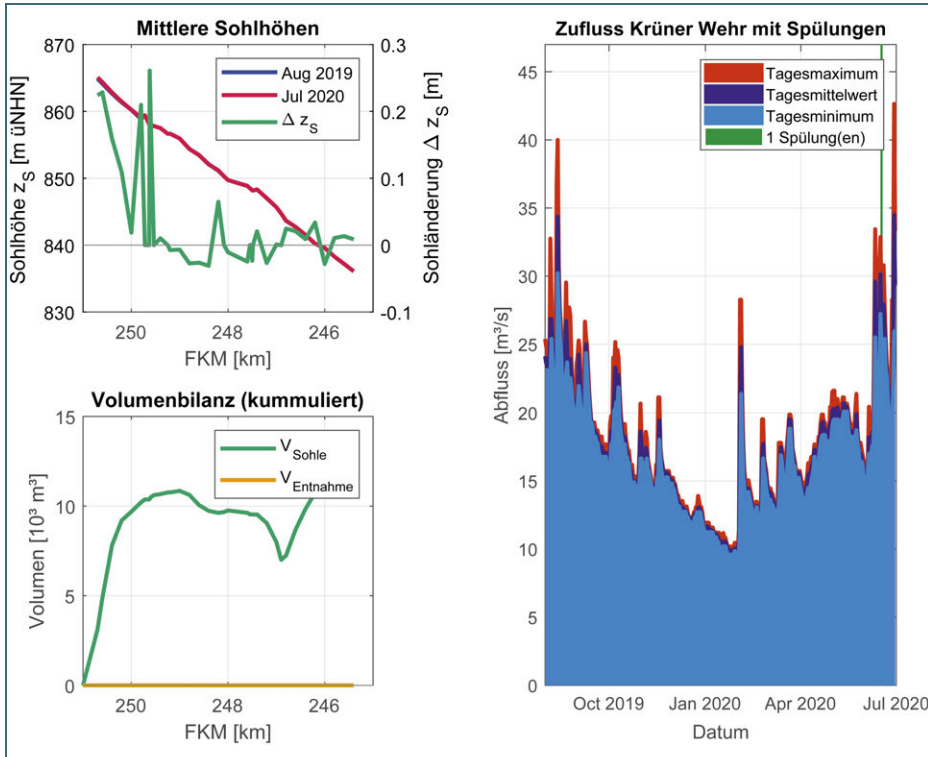


Abb. 99: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2019–2020

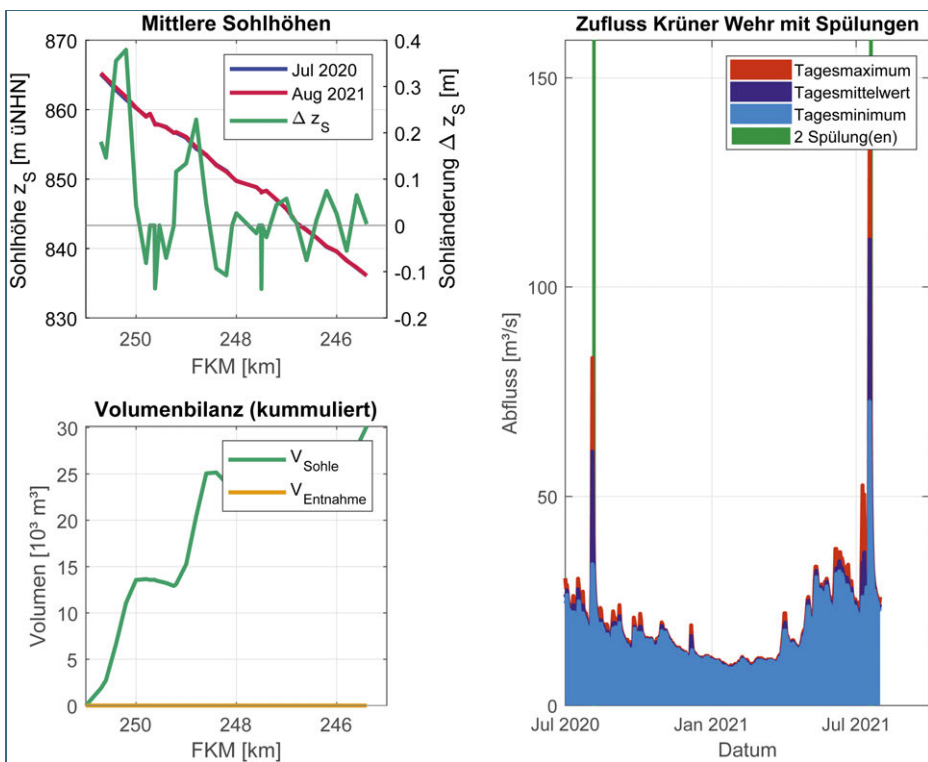


Abb. 100: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2020–2021

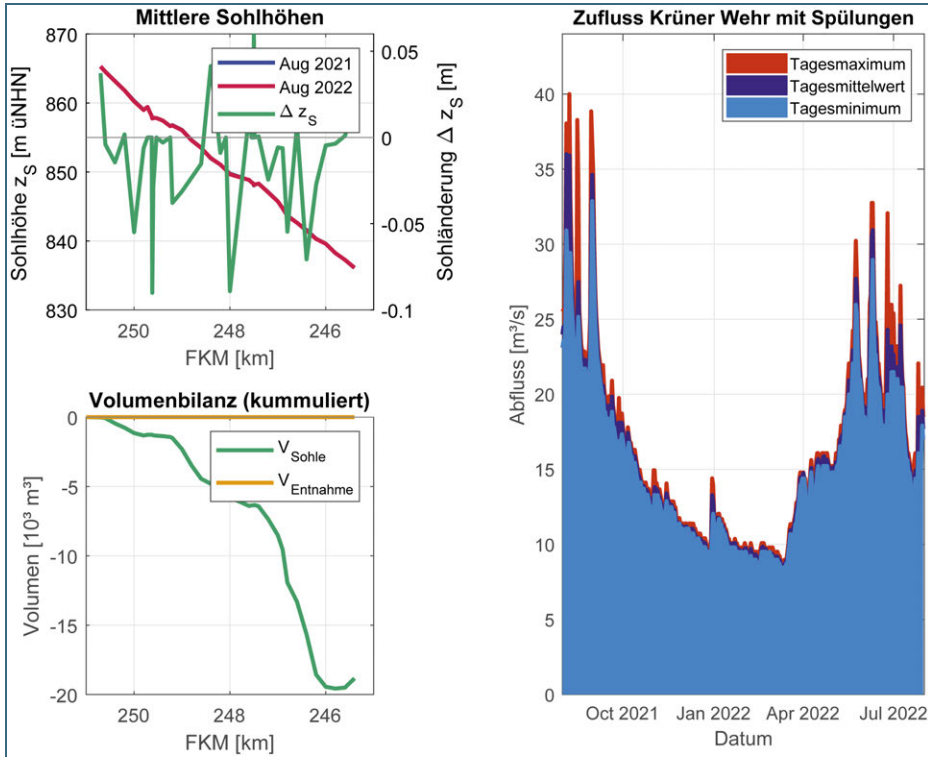


Abb. 101: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 2021–2022

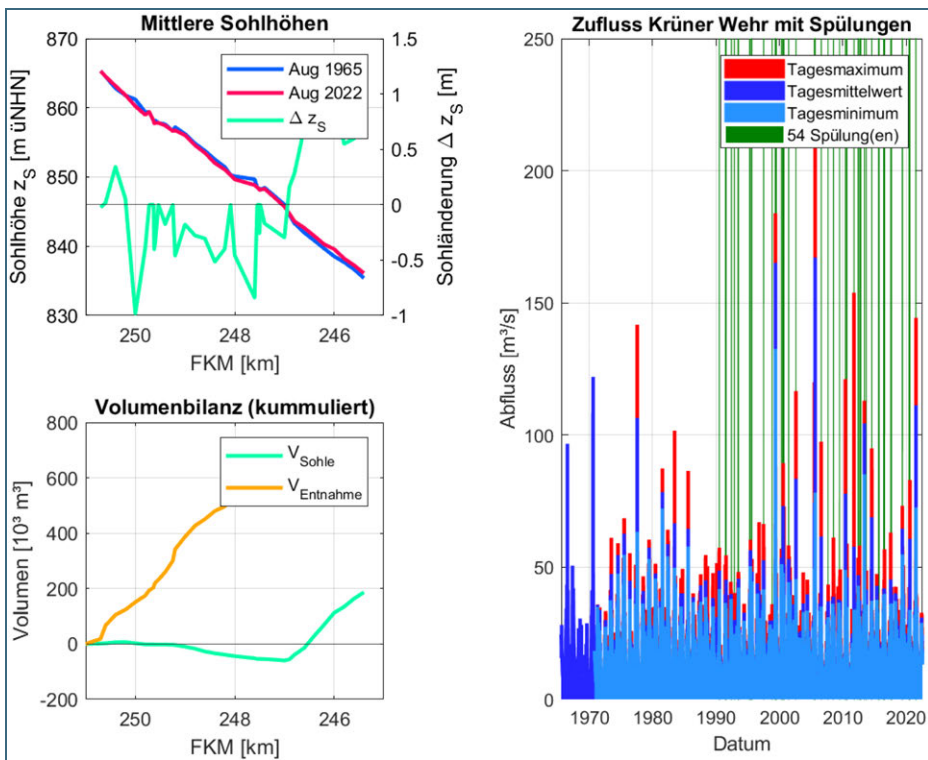


Abb. 102: Auswertungen im Bereich Krüner Wehr bis Finzbachmündung von 1965–2022



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

