

Überprüfung von Winterabflüssen an alpi- nen Messstationen



Zürich und Münsingen, 17. April 2023

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3063 Ittigen. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer und Autoren:

Michael Margreth, SoilCom GmbH, Probusweg 22, CH 8057 Zürich

Mobil: +41 78 807 29 73, E-Mail: michael.margreth@soilcom.ch

Roland Kaderli, wasserplan.ch gmbh, Erlenuweg 20, CH 3110 Münsingen

Mobil: +41 76 315 57 83, E-Mail: kad@wasserplan.ch

Berechnungen Zeitreihen und Dauerabflüsse: Florian Lustenberger, WSL, Zürcherstrasse 111, CH 8903 Birmensdorf

Begleitung BAFU: Caroline Kan, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Titelbild: Station Dischmabach Davos Kriegsmatte. 13. März 2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage	8
1.1 Starke Schwankungen der PQ-Beziehungen.....	8
1.2 Fehlende Eichmessungen bei Niedrigwasserabflüssen	8
1.3 Unsicherheiten bei den Niedrigwasser-Eichmessungen:.....	8
1.4 Berechnung der PQ-Beziehungen auf Basis der Eichmessungen:	9
1.5 Artefakte aufgrund von technischen Problemen.....	9
2 Auftrag	10
2.1 Untersuchung der Eichmessungen und PQ-Beziehungen am Dischmabach ..	10
2.2 Abflussmessungen im Winter 2022 am Pegel des Dischmabaches	10
2.3 Hydraulische Berechnung der PQ-Beziehung am Dischmabach-Pegel	11
2.4 Detaillierte Untersuchung der PQ-Beziehungen von 6 ausgewählten Pegelstationen	11
3 Untersuchung der PQ-Beziehungen von 6 Pegelstationen	13
3.1 Beschreibung Vorgehen.....	13
3.2 Dischmabach Davos	17
3.3 Chamuerabach - La Punt Chamues-ch.....	50
3.4 Goneri – Oberwald	71
3.5 Krummbach - Klusmatten.....	102
3.6 Calancasca – Buseno.....	126
3.7 Riale di Calneggia - Caveragno, Pontit	146
4 Abflussmessungen im Winter 2022 am Pegel Dischmabach.....	161
4.1 Messkampagne vom 11.1. bis 12.1.2022.....	163
4.2 Messkampagne vom 14.3.2022.....	167
4.3 Messkampagne vom 25.3.2022.....	171
4.4 Vergleich der Pegelstände der verschiedenen Sensoren	175
4.5 Schlussfolgerungen.....	180
5 Datenaufnahme für die hydraulische 3D-Modellierung.....	182
6 Vergleich und Beurteilung der Stationen.....	183
6.1 Abflussänderung pro 1cm Pegeländerung	183
6.2 Schwankungsbereich der Eichmessungen	183
6.3 Anzahl der verwendeten P/Q-Beziehungen.....	185

6.4	Unbegründete Nullpunktverschiebungen	185
6.5	Abstützung der P/Q-Kurven auf Eichmessungen bei Niedrigwasser	185
6.6	Schwankungsbereich der P/Q-Beziehungen.....	185
6.7	Messartefakte in den Messreihen	187
6.8	Rangierung bezüglich «Eignung Pegelkonstruktion für Niedrigwassermessung»	188
7	Generelle Schlussfolgerungen	194
7.1	Unsicherheiten bei P/Q-Beziehungen, Pegelmessungen, Eichmessungen ..	194
7.2	Eignung der 6 Messstationen für die Messung von Niedrigwasserabflüssen 197	
7.3	Differenzierung zwischen realen Tagesgängen und Messartefakten	198
7.4	Neues Verfahren zur Bestimmung von P/Q-Beziehungen	198
7.5	Erkenntnisse und Konsequenzen aus den Ergebnissen der hydraulischen 3D- Modellierung	199
8	Generelle Empfehlungen	203
8.1	Konstruktion Messstationen	203
8.2	Messstationen Betrieb.....	204
8.3	Eichmessungen	205
8.4	P-Q-Kurven Erstellung.....	206
8.5	P-Q-Kurven Handling	206
8.6	Umgang mit Messartefakten und Veröffentlichung von Daten	206
8.7	Weitere Untersuchungen, Forschungslücken	207
8.8	Anwendung der 3D-Modellierung an weiteren Stationen.....	208
9	Quellenverzeichnis.....	209
10	Anhang	210
10.1	Allgemeines, P-Q-Tool Apprimus	210
10.2	Dischmabach	212
10.3	Chamuerabach	222
10.4	Goneri.....	225
10.5	Krummbach	233
10.6	Calancasca.....	240
10.7	Riale di Calneggia	245

Zusammenfassung

Die permanente Messung von Niedrigwasserabflüssen mit fix installierten Messstationen ist eine grosse Herausforderung und mit grossem Aufwand verbunden. Besonders bei höher gelegenen Stationen, wo im Winterhalbjahr Schnee und Eis die Messstationen bedeckt und die Pegelmessungen beeinflussen und die Zugänglichkeit zu den Messstandorten erschwert, sind die Herausforderungen nochmals grösser. Bisherige Auswertungen und Studien zeigen, dass vor allem die Messwerte im Niedrigwasserbereich, die in den Bergen immer im Winter stattfinden, sehr anfällig sind auf Fehler und Artefakte.

Im vorliegenden Projekt wurden die P/Q-Beziehungen, Eichmessungen und Messreihen im Niedrigwasserbereich der sechs Stationen des Dischmabaches, Chamuerabaches, des Krumbaches, des Riale di Calneggia, der Calancasca und der Goneri untersucht. Es wurden Faktoren identifiziert, die Fehler und Artefakte verursachen und Strategien erarbeitet, um diese Fehler und Messreihen zu korrigieren und in Zukunft Abweichungen minimieren zu können.

Folgende Aspekte können zu Unsicherheiten in den Abflussmessreihen führen:

- **Einfluss von Schnee und Eis:** In kalten Perioden mit viel Schnee kann der Wasserspiegel von hoch gelegenen Stationen von Schnee bedeckt und die Wasserspiegelhöhe durch Eis beeinflusst werden. Wird die Station während Eichmessungen nicht von Schnee und Eis befreit, entstehen Fehler bei der H-Bestimmung der Eichmessungen und somit Fehler in den P/Q-Beziehungen. Der Einfluss von Eis führt zudem zu Messlücken und Artefakten in der Messreihe (Peaks durch Staueffekte in der Messrinne), von denen die Messreihen der sechs Stationen unterschiedlich stark betroffen sind. Neben diesen Artefakten, die durch Eisbildung in der Messrinne verursacht werden, gibt es die realen Tagesschwankungen des Abflusses, von denen viele Fließgewässer an kalten Wintertagen betroffen sind. Die in der Station verursachten Artefakte müssten korrigiert, die realen Tagesschwankungen aber belassen werden. Verständlicherweise existiert noch kein einheitliches Verfahren, mit welchem diese Differenzierung in der ordentlichen manuellen Korrektur der Pegelganglinie durchgeführt werden kann.
- **Unbegründete Nullpunktverschiebungen:** Die Auswertungen zeigen, dass am Riale di Calneggia und am Krumbach häufig die Nullpunkte der P/Q-Beziehungen verschoben wurden, anstatt den Nullpunkt des möglicherweise fehlerhaften Sensors zu korrigieren. Dies wirkt sich negativ auf die Qualität der Abfluss-Zeitreihen aus.
- **Bestimmung P/Q-Kurven:** Das heute angewendete Verfahren zur Bestimmung von

P/Q-Beziehungen verwendet Polynomfunktionen unterschiedlichen Grades, um den Verlauf der P/Q-Beziehung bestmöglich in die Eichmessungen einzupassen. Dieses Verfahren berücksichtigt die Hydraulik am Messquerschnitt nur unzureichend. Gangliniensegmente, deren P/Q-Beziehungen schlecht auf Eichmessungen abgestützt sind, können dadurch grosse Fehler aufweisen. Häufig sind Abflüsse unter dem Q347, in vielen Jahren auch solche bis zum Q250 betroffen.

- **Unterhalt der Stationen im Winter:** Folgendes Beispiel zeigt, dass beim Unterhalt der Stationen Details eine wichtige Rolle spielen können. Z.B. war die hydraulische Verbindung zwischen Niedrigwasserrinne und Messschacht an der Station Dischmabach über Jahre hinweg verstopft. Die gehemmte hydraulische Durchlässigkeit verursachte Fehler in der Messreihe und in der H-Bestimmung der Eichmessungen, die sich im Nachhinein nicht rekonstruieren lassen.

Aufgrund der Auswertungen wurden Kriterien bestimmt, um die Eignung der sechs untersuchten Stationen für die Messung der Niedrigwasserabflüsse zu bestimmen. Das wichtigste Kriterium ist das Verhältnis der Abflussänderung, die am Messquerschnitt bei einer Veränderung der Pegelhöhe um einen Zentimeter stattfindet ($\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$). Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto besser eignet sich eine Station für die Messung von Niedrigwasserabflüssen. Alle oben erwähnten Fehlerquellen wirken sich bei grossem « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » gravierender auf die Qualität der Niedrigwassermessreihe aus als bei kleinem. Das « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »-Verhältnis kann direkt über die Pegelkonstruktion verbessert werden, denn es wird durch die Wasserspiegelbreite, Rauigkeit, das Gefälle und den Abfluss am Messort definiert. Eine Unterscheidung der Eignung nach Höhenlage ist von Bedeutung; denn im Umgang mit Schnee und Eis ist in grösserer Höhe eine andere Pegelkonstruktion gefordert als für Stationen unter 1000 m. ü M. Neben eines günstigeren « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »-Verhältnisses weist der Chamuerabach dank des gut isolierten Messschachtes im hydraulisch stabilen Vorbecken, mit geheiztem Schwimmer und mit einer immer mit Wasser bedeckten hydraulischen Verbindung zwischen Vorbecken und Schacht eine bessere Konstruktion auf als die Station Goneri oder Dischmabach. Die schlechtesten Voraussetzungen bringt die Station des Krummbaches mit. Bei den tiefergelegenen Stationen ist die Messung direkt im Gerinne sinnvoller und kostengünstiger. Die Station Calancasca weist eine gute Konstruktion zur Messung der Niedrigwasserabflüsse auf, diejenige des Riale di Calneggia ist aufgrund des ungünstigen « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »-Verhältnisses weniger geeignet.

Im Rahmen dieses Projektes wird zudem ein neues Verfahren vorgeschlagen, um die P/Q-Beziehung zu berechnen, mit dem die Hydraulik am Messquerschnitt unter Verwendung der Strickler-Formel besser berücksichtigt wird. Mit diesem wurden versuchsweise die P/Q-Beziehungen der

sechs untersuchten Stationen für eine Messreihe von 1991 bis 2021 berechnet. Anhand der neuen P/Q-Beziehungen wurden danach die Abflüsse neu berechnet und diese mit den offiziellen BAFU-Ganglinien verglichen. Bei den Stationen von Krumbach und Dischmabach betragen die maximalen Abweichungen beim Q347 zwischen den neu berechneten und den BAFU-Messreihen über 50%, bei den Stationen von Riale di Calneggia und von Calancasca mehr als 20% und bei denjenigen von Chamuerabach und Calancasca zwischen 10 und 15%. Die grössten Unterschiede zeigen sich vor allem in Perioden, in denen die P/Q-Beziehungen schlecht oder gar nicht auf Eichmessungen abgestützt sind, wie z.B. beim Dischmabach zwischen 1991 und 2002. In einigen Jahren ist erkennbar, dass die neu berechneten Ganglinien die minimalen Abflüsse und den Abflussrückgang im Winter deutlich besser repräsentieren als die offiziellen Ganglinien. Dies gilt vor allem für die Stationen Dischmabach, Krumbach und Goneri.

In einem Begleitprojekt wurde die P-Q-Beziehung am Pegel des Dischmabaches für den 14.03.2022 mit einem hydrodynamischen 3D-Modell nachgerechnet (VAW, 2023). Der Verlauf der resultierenden P-Q-Beziehung stimmt gut mit der mit der Strickler-Berechnung ermittelten P-Q-Beziehung überein. Die BAFU-Kurve zeigt einen steileren Verlauf als die Strickler- und die VAW-Kurve.

Die Ergebnisse der VAW-Studie zeigen, dass die Verengung des Querschnitts zu Beginn der Niederwasserrinne Stosswellen verursachen, die sich in der Rinne ausbreiten. Die Lage und das Ausmass der Stosswellen verändern sich mit dem Abfluss. Bei Abflüssen kleiner 530 l s^{-1} (Q251) sind die Amplituden der Stosswellen verhältnismässig moderat. Die Unterschiede in der Pegelhöhe zwischen einem «Wellental» und einer «Wellenkuppe» beträgt maximal 2cm (44 l s^{-1} oder 15% des Q347). Bei Abflüssen über 530 l s^{-1} kann dieser Unterschied aber mehr als 4cm betragen, weil sich Wellen mit grösseren Amplituden ausbilden. Die Effekte der Stosswellen können mit der Strickler-Formel nicht berücksichtigt werden.

Die Resultate der VAW-Studie zeigen auch, dass die Bildung von Eis an den Seitenwänden der Rinne zu einer Erhöhung des Pegelstandes führt. Das Ausmass kann, je nach Dicke der Eisschichten, mehrere Zentimeter betragen. Zudem kann eine Eisschicht am Rand der Rinne die Stosswellen beeinflussen. Der Einfluss der Geröllansammlungen oberhalb des Einlaufes in die Niederwasserrinne verursacht aber nur Pegelunterschiede von etwa 0.5cm am Messquerschnitt des Schachtes und ist somit gering.

1 Ausgangslage

Bei der Untersuchung von Niedrigwasserabflüssen im Rahmen des Projekts «Erarbeitung von hydrologischen Grundlagen zur Bestimmung von Niedrigwasserdauerkurven und deren Übertragung auf ungemessene Gebiete» im Auftrag des BAFU konnten in den Abflussmessreihen Artefakte und Widersprüche festgestellt werden, die in einem natürlichen Verhalten der Fließgewässer unrealistisch erscheinen. Die permanente Messung von Niedrigwasserabflüssen mit fix installierten Messstationen ist eine grosse Herausforderung und mit grossem Aufwand verbunden. Um die im Rahmen des oben beschriebenen Projekts durchzuführenden Untersuchungen mit verlässlichen und belastbaren Abflussmessreihen durchführen zu können, sollen mögliche Fehlerquellen identifiziert und die Möglichkeiten und die Machbarkeit von Korrekturen der vorliegenden Abflussmessreihen geprüft werden. Vorarbeiten zu dieser Studie und die Studie von Naef & Margreth (2017) haben folgende Ursachen und Fehlerquellen identifiziert:

1.1 Starke Schwankungen der PQ-Beziehungen

Die Lage der PQ-Beziehungen und damit die Wasserstände, denen ein gewisser Abfluss wie z.B. das Q347 zugeordnet wird, schwanken zwischen den verschiedenen Winterhalbjahren bei der Mehrheit der alpinen Messstationen unerwartet stark. Bei einem natürlichen Gerinne mit Geschiebetrieb kommt dies nicht überraschend. In einer betonierten Niedrigwasserrinne mit fixem Messquerschnitt ist der beobachtete Schwankungsbereich unerwartet hoch. Was sind die Gründe für diese starken Schwankungen? Sind es veränderte Fließverhältnisse aufgrund der Anströmung, aufgrund von Einflüssen durch Eis oder Moosbewuchs? Oder sind allenfalls Unsicherheiten in den Eichmessungen für die Schwankungen verantwortlich?

1.2 Fehlende Eichmessungen bei Niedrigwasserabflüssen

Aufgrund der oben beschriebenen starken Schwankungen wären in jedem Winter mehrere Eichmessungen notwendig, um eine zuverlässige PQ-Beziehung zu bestimmen. Fehlen die Eichmessungen, können die entsprechenden Abflusswerte mit grösseren Unsicherheiten behaftet sein.

1.3 Unsicherheiten bei den Niedrigwasser-Eichmessungen:

Auch kleine Abweichungen in Wasserstand oder Abfluss fallen bei den kleinen Niedrigwassergrößen stark ins Gewicht. Seien es Abweichungen der Wassertiefe bei einer Messung mit dem Mess-

flügel, Abweichungen in Temperatur oder Konzentration bei der Salzverdünnung, veränderte Geometrien durch Geschiebe, Schnee oder Eis oder ein durch eine verminderte Durchlässigkeit der Verbindung zwischen Rinne und Messschacht verfälschter Referenz-Pegelstand während des Messzeitraumes.

1.4 Berechnung der PQ-Beziehungen auf Basis der Eichmessungen:

Die Berechnung der PQ-Beziehungen auf der Basis der Eichmessungen erfolgt anhand von Polynom-Funktionen, also aufgrund von rein mathematischen Näherungsfunktionen. Diese Vorgehensweise kann zu Fehlern im Niedrigwasserbereich führen. Davon betroffen sind vor allem folgende Perioden:

- a) Perioden mit $Q < Q_{347}$, wo nur selten oder in vielen Jahren gar keine Eichmessungen vorliegen.
- b) In Winterhalbjahren, in denen im Niedrigwasserbereich Eichmessungen gänzlich fehlen, werden die Polynom-Funktionen anhand von Eichmessungen im Mittelwasserbereich bestimmt und in den Niedrigwasserbereich extrapoliert.

1.5 Artefakte aufgrund von technischen Problemen

Die Abflussmessungen in alpinen Gebieten im Winter sind schwierig und bezüglich Wartung und Technik mit grossem Aufwand verbunden. So gilt es, unter anderem folgende Herausforderungen zu meistern:

- Bei sehr kalten Temperaturen kann beispielsweise der Messschacht einfrieren, wodurch ein Messausfall entsteht.
- Das Schlitzblech an der hydraulischen Verbindung zum Messschacht kann zufrieren, vor allem wenn es durch Kies, Sand oder Moos bereits verstopft ist.
- Der Wasserstand kann durch lokale Strömungen am Pegel andere Werte annehmen als im für den Abfluss wirksamen Querschnitt.
- Bei der Umrechnung der physikalischen Grössen Wasserstand oder Druck in einen digitalen Messwert können Abweichungen durch Eis oder Schnee (Radar) sowie durch Drift, Probleme bei der Luftdruckkompensation (Tauchsonde) und Abweichungen bei den Umwandlungen in die elektrischen Signale und wiederum deren Digitalisierung (Radar und Tauchsonde) entstehen.

Aus diesem Grund werden Abflussegmente, die durch solche Effekte betroffen sind oder sein könnten nachträglich vor der definitiven Publikation manuell kontrolliert und korrigiert. Dieser Korrekturprozess kann mit Unsicherheiten verbunden sein.

2 Auftrag

2.1 Untersuchung der Eichmessungen und PQ-Beziehungen am Dischmabach

Um die Ursache identifizieren zu können, warum die PQ-Beziehungen, trotz fixer Niderigwasserrinne am Dischmabach einen so grossen Schwankungsbereich aufweisen, sollen Unsicherheiten der Eichmessungen untersucht werden. Dies geschieht im Dialog mit dem Stationsverantwortlichen Andreas Kohler anhand von zwei Feldkampagnen (vgl. 2.3.) und unterschiedlichen Auswertungen.

Bei den Auswertungen sollen folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Ist es denkbar, dass Eisbildung beim Messpegel, oberhalb im Beruhigungsbecken oder im Messschacht die Pegelhöhe beeinflusst? Weist die zeitlich hoch aufgelöste Pegelganglinie zum Messzeitpunkt einen unnatürlichen Verlauf auf, könnte dies auf ein Problem mit Vereisung hinweisen. Auch die Wassertemperatur gibt Hinweise über Gefrierprozesse in der Niderigwasserrinne. Unnatürliche Pegelverläufe können aber auch durch Probleme in der Sensorik verursacht werden. Eine Studie der Stationshistorie könnte Hinweise geben.
- Der Einfluss der Eisbildung müsste sich bei den mit dem Flügel erhobenen anders auswirken als bei den anhand der Salzverdünnungsmethode erhobenen Eichmessungen. Zeigen sich da unterschiedliche Muster?
- Welche Pegelhöhe ist massgeblich für die Eichmessung, die des Sensors oder die der Handablesung an der Pegellatte? Wie stark unterscheiden sich diese beiden Werte über alle Werte hinweggesehen?
- An Tagen mit einem starken Tagesgang können Unsicherheiten bei einer Flügelmessung entstehen, wenn sich der Abfluss während der Messdauer stark ändert. Es stellt sich die Frage, wie diese Pegeländerung die Abflussmessung beeinflusst. Um dies abschätzen zu können, müssen die Messprotokolle analysiert werden.

2.2 Abflussmessungen im Winter 2022 am Pegel des Dischmabaches

Die Ursache der teils ausgeprägten Tagesgänge der Abflussganglinien im Winter wurden mit insgesamt drei Messkampagnen untersucht. Eine Messkampagne wurde während einer Kälteperiode durchgeführt, bei der während der Nacht und während des Tages konstant tiefe Temperaturen möglichst weit unter 0°C herrschen. Eine weitere Messkampagne fand während einer Periode

statt mit knapp positiven Lufttemperaturen während des Tages und negativen Lufttemperaturen in der Nacht. Mit diesen wurde untersucht, ob der starke Tagesgang der bis fast die Hälfte des durchschnittlichen Tagesabflusses ausmacht, realistisch ist. Bei der dritten Messkampagne wurden zwei Messungen mit der Salzverdünnungsmethode parallel zu einer Flügelmessung durchgeführt, um Unterschiede der beiden Messmethoden zu evaluieren.

2.3 Hydraulische Berechnung der PQ-Beziehung am Dischmabach-Pegel

Anhand eines 3D-Modelles wurde durch die VAW in einem separaten Auftrag die PQ-Beziehung des Dischmabaches am Messquerschnitt nachgerechnet. David Vetsch der VAW schlug dazu die Verwendung eines 3D-, anstatt eines 2D-Modell vor, um die Effekte der Absenkkurve und der Bildung von Wellen in der Niedrigwasserrinne besser abzubilden. Um das 3D-Modell aufsetzen und eichen zu können, wurden im Rahmen zweier Feldtage mit unterschiedlichem Abfluss die Wasserspiegelhöhen entlang von mehreren Punkten in der Niedrigwasserrinne vermessen. Am zweiten Feldtag wurde zudem die Niedrigwasserrinne und die Bereiche darum herum detailliert vermessen. Mit dem 3D-Modell sollen verschiedene Effekte untersucht werden, die die Schwankungen der Eichmessungen erklären könnten, wie z.B. Vereisung, Vermoosung, Geschiebeablagerungen im Beruhigungsbecken, hydraulische Durchgängigkeit zwischen Niedrigwasserrinne und Messschacht.

2.4 Detaillierte Untersuchung der PQ-Beziehungen von 6 ausgewählten Pegelstationen

Teil dieses Auftrages ist es, die PQ-Beziehungen von sechs Einzugsgebieten genauer zu untersuchen. Zunächst werden Schwankungsbereiche von PQ-Beziehungen und Eichmessungen erfasst. Welche PQ-Beziehungen weisen ausserordentlich hohe, welche tiefe Pegelhöhen auf? Welche PQ-Beziehungen liegen ausserhalb des Schwankungsbereiches der Eichmessungen und wie wurden diese berechnet? Für jede PQ-Beziehung soll untersucht werden, wie gut sie im Niedrigwasserbereich auf Eichmessungen abgestützt ist und wie stark die Eichmessungen im Mittelwasser die Berechnung der PQ-Beziehungen im Niedrigwasserbereich beeinflussen. Ein besonderer Fokus wird auf den ganz tiefen Bereich gelegt, wo keine Eichmessungen vorhanden sind. Ist dort der Schwankungsbereich der PQ-Beziehungen aufgrund von Eichmessungen erklärbar? Welche PQ-Beziehungen sind «nur» auf Eichmessungen im Mittelwasserbereich abgestützt? Ist die Berechnungsmethode der PQ-Beziehung anhand der Polynomfunktionen durch die Eichmessungen für die ganz tiefen Abflüsse adäquat? Die Unsicherheiten dort könnten Quellen für Fehler in den Messwerten darstellen. Aufgrund der Ergebnisse sollen Vorschläge für Korrekturen unterbreitet und mit den Stationsverantwortlichen besprochen werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die in Tabelle 1 aufgeführten sechs Messstationen detailliert untersucht. Die Auswahl der Gebiete erfolgte auf folgenden Kriterien:

- Konstruktion der Station
- Relevanz für das Projekt «Niedrigwasserdauerkurven»
- Anzahl Eichmessungen bei Niedrigwasserabflüssen
- Häufigkeit der visuell erkennbaren Artefakte bei Winterabflüssen

Für alle sechs untersuchten Gebiete wurde an den Messquerschnitten ein 1-D-Modell angewendet, um die PQ-Beziehungen anhand der Geometrie und der Eichmessungen für die verschiedenen Perioden im Niedrigwasserbereich auf der Basis der Strickler-Formel neu zu berechnen. Die resultierenden Abflüsse wurden mit den offiziellen Abflüssen verglichen. Die Abweichungen werden aufgezeigt und bewertet.

Tabelle 1: Liste der Messstationen, deren PQ-Beziehungen detailliert untersucht wurde.

Nummer	Messstation	Standort	Stationsverantwortlicher
2327	Dischmabach (mit NW-Rinne)	Davos, Kriegsmatte GR	Andreas Kohler andreas.kohler@bafu.admin.ch +41 58 464 76 32
2263	Chamuerabach (mit NW-Rinne)	La Punt-Chamues-ch GR	Andrea Crose FR Büro, MO DI Bern andrea.crose@bafu.admin.ch +41 58 469 77 81
2607	Goneri (mit NW-Rinne)	Oberwald VS	Nicolas Plumey, früher Eugène Lehmann eugen.lehmann@hotmail.de eugene.lehmann@bafu.ad- min.ch +41 58 464 76 75
2244	Krummbach	Klusmatten VS	Nicolas Plumey, früher Eugène Lehmann
2474	Calancasca (unbeeinflusstes Gebiet)	Buseno TI	Andrea Crose
2356	Riale di Calneggia	Cavergno, Pontit TI	Andrea Crose

3 Untersuchung der PQ-Beziehungen von 6 Pegelstationen

Die ausgewählten Messstationen wurden anhand von öffentlich zugänglichen Informationen, Eichmessungen, P-Q-Beziehungen, einzelner Protokolle von Eichmessungen, Plänen, Bildern und Beobachtungen untersucht. Weitere wichtige Informationen erlangten wir in verschiedenen Online-Besprechungen mit den Stationsverantwortlichen und ihrem Leiter zwischen November 2021 und September 2022. Der untersuchte Zeitraum umfasst die Jahre 1991 bis 2021, er beträgt 30 Jahre.

3.1 Beschreibung Vorgehen

3.1.1 Beschreibung der Methode und der Daten

Die Eichmessungen und die daraus generierten P-Q-Beziehungen werden in einem ersten Schritt im Tool «BAFU/Apprimus V3.3.0.0» gesichtet. Es werden Abbildungen erstellt, die die Schwankungen der Pegelhöhen der Eichmessungen bei vergleichbaren Abflüssen aufzeigen. Die Lage der Eichmessungen werden zu verschiedenen Grössen in Bezug gesetzt und es wird untersucht, welche Eichmessungen wie in welchen Niedrigwasser-Segmenten der P-Q-Kurven einfließen. Ausgewählte Eichmessungen werden auf Grund der Protokolle aus dem Tool «HyM» untersucht. Mit Hilfe von verschiedenen Abflussberechnungen werden alternative P-Q-Beziehungen gefunden und mit den verwendeten P-Q-Kurven verglichen.

3.1.2 Morphologie

Die betrachteten Messstellen befinden sich durchwegs an kleinen, relativ steilen Gebirgsbächen welche meistens von sich abwechselnden Becken und Abstürzen geprägt sind.

3.1.3 Hydraulik

Die Stationen Dischmabach, Chamuerabach und Goneri verfügen über eine Niedrigwasserrinne mit einem fixen Messquerschnitt. Die Niedrigwasserrinnen sind in ihrer Länge, Gefälle und Rauigkeit unterschiedlich konstruiert. Die Station der Calancasca besteht aus einem Gerinne mit fixen Seitenwänden, wobei sich die Seitenwände flussabwärts annähern, sodass das Gerinne schmaler wird. Die Stationen Krumbach und Riale die Calneggia messen in einem Flussbett mit natürlicher Sohle vor Felsriegeln, welche natürliche Überfallkanten darstellen.

3.1.4 Messorte und Messtechnik

Am Ende des Untersuchungszeitraumes verfügen alle Stationen mit Ausnahme des Chamuerabaches auch über Sensoren, welche den Wasserstand direkt im Gerinne messen. Der Pegelstand des Chamuerabaches und des Dischmabaches werden in einem mit dem Gerinne verbundenen Messschacht erfasst. Es werden Tauchsonden, welche den Wasserstand als Druck auf einer Membrane im Wasser erfassen und Radare, welche von oben die Distanz zur Wasseroberfläche erfassen, eingesetzt.

3.1.5 Eichmessungen

Eichmessungen werden mit Flügelmessungen an der Stange, Salzverdünnung oder Uranin durchgeführt. Im Tool werden zudem Hilfspunkte definiert und verwendet, die als «vituell» bezeichnete werden.

3.1.6 P-Q-Beziehung

Neben der Hydraulik und der Messtechnik spielt die P-Q-Beziehung eine zentrale Rolle in der Abflussmessung. Diese Beziehung wird durch Vermoosung, Vereisung und bei natürlichen Messquerschnitten durch die sich bei grossen Abflüssen umformende Sohle verändert.

Entsprechend werden die P-Q-Beziehungen nach Hochwasserereignissen oder aber nach einem gewissen Zeitraum aktualisiert. Zu Beginn der Abflussmessungen wurden solche Kurven mit Kurvenlinealen in die auf Millimeterpapier eingetragenen Eichpunkte gelegt. Seit ca. 2001 wird für die Erstellung neuer P-Q-Beziehungen das Tool «P/Q-Kurven» von Apprimus eingesetzt.

Die P-Q-Kurven werden nach den folgenden Gesichtspunkten definiert (Kohler 2021):

Auf Grund der Geometrie der Messstelle wird festgelegt, ob die P-Q-Kurve durch den Nullpunkt (Abfluss=0) führt. Ebenfalls aufgrund der Geometrie wird der ganze Pegelbereich in mehrere Segmente eingeteilt, z.B. ein Segment für die Niedrigwasserrinne, eines im Übergangsbereich und ein Segment für den Hochwasserbereich. Diese Segmente werden mit einer individuellen Fit-Funktion an die Lage der Eichmessungen angenähert. Es wird darauf geachtet, dass die Segmente nahe beim Übergang zum angrenzenden Segment auch zum nächsten Segment passen und dass der automatische Übergang in Form eines Splines eine plausible Form annimmt. Zu diesem Zweck werden auch Eichpunkte aus dem Pegelbereich dieses angrenzenden Segmentes verwendet. Die gewählte Fit-Funktion und ihre Ordnung werden so gewählt, dass die P-Q-Kurve möglichst nahe bei den ausgewählten Eichmessungen liegt.

Bei sehr tiefen und sehr hohen Wasserständen liegen meist nur wenige Eichmessungen vor. Naturgemäss haben solche alleinstehenden Punkte beim automatischen Einpassen von Polynomen

ein hohes Gewicht. Die Kurven werden so gefittet, dass sie diese Punkte möglichst treffen. Im Falle eines physikalisch klar definierten Nullpunktes, bei dem der Abfluss = 0 ist, ist dieses Verhalten hilfreich. Wenn Eichmessungen am oberen Rand des Niedrigwasserbereiches die Kurve im unteren Niedrigwasserbereich dominieren, kann dieses hohe Gewicht alleine stehender Punkte die Kurve im unteren Niedrigwasserbereich verfälschen.

In gewissen Zeiträumen existieren wenig NW-Eichmessungen. Es kann nur auf ältere oder bei höheren Pegelständen durchgeführte EM zurückgegriffen werden. Bei Messstellen mit Niedrigwasserrinnen müssen sich aber Veränderungen in der Hydraulik bei Pegelständen oberhalb der Niedrigwasserrinne (z.B. durch Vereisung) nicht unbedingt auf das Abflussgeschehen in der Niedrigwasserrinne auswirken.

3.1.7 Neue P-Q-Beziehungen und Berechnung der Abflüsse daraus

Die Form und Lage der P-Q-Beziehung im Niedrigwasserbereich ist in einigen Perioden verschiedener Messstationen auf nur wenige oder gar keine Eichmessungen abgestützt. Es wurde deshalb nach anderen Möglichkeiten gesucht, diese Beziehung herzuleiten. Für alle Abfluss-Messstationen kann die Geometrie (Form und Abmessung des Querschnittes, lokales Gefälle) und die Rauheit der Oberflächen erhoben werden. Bei Stationen mit einer gebauten Niedrigwasser-Rinne sind diese Werte sogar über längere Zeiträume weitgehend konstant. Damit wird die P-Q-Beziehung im Niedrigwasser aus einer Abflussberechnung mit einer empirischen Formel wie nach Strickler berechnet. Neben der Geometrie fließen in diese Berechnung Abflussbeiwerte k_{ST} ein, welche die verschiedenen Oberflächenrauigkeiten berücksichtigen. Die berechneten Kurven werden, gleich wie die herkömmlichen BAFU-Kurven, in die Eichmessungen eingepasst werden (*Abbildung 1*), indem die Oberflächenrauigkeit variiert wird. Gegenüber den rein mathematisch berechneten P-Q-Beziehungen haben die mit Strickler berechneten PQ-Beziehungen den Vorteil, dass sie die Hydraulik der Niedrigwasserrinne mit ein bis zwei Parametern (Abflussbeiwerte) berücksichtigen. Ein höherer Abflussbereich könnte ebenfalls einbezogen werden. Allerdings verändert sich dann die Geometrie, und das Gerinne vor und je nach Situation nach der Messstelle gewinnt an Einfluss. In der Messtelle selbst liessen sich die Kurven nach Strickler (gelb) besser an die Eichmessungen und in den Schwankungsbereich der P-Q-Kurven BAFU (grün) legen, als eine Abflussberechnung mit einer logarithmischen Formel (blau).

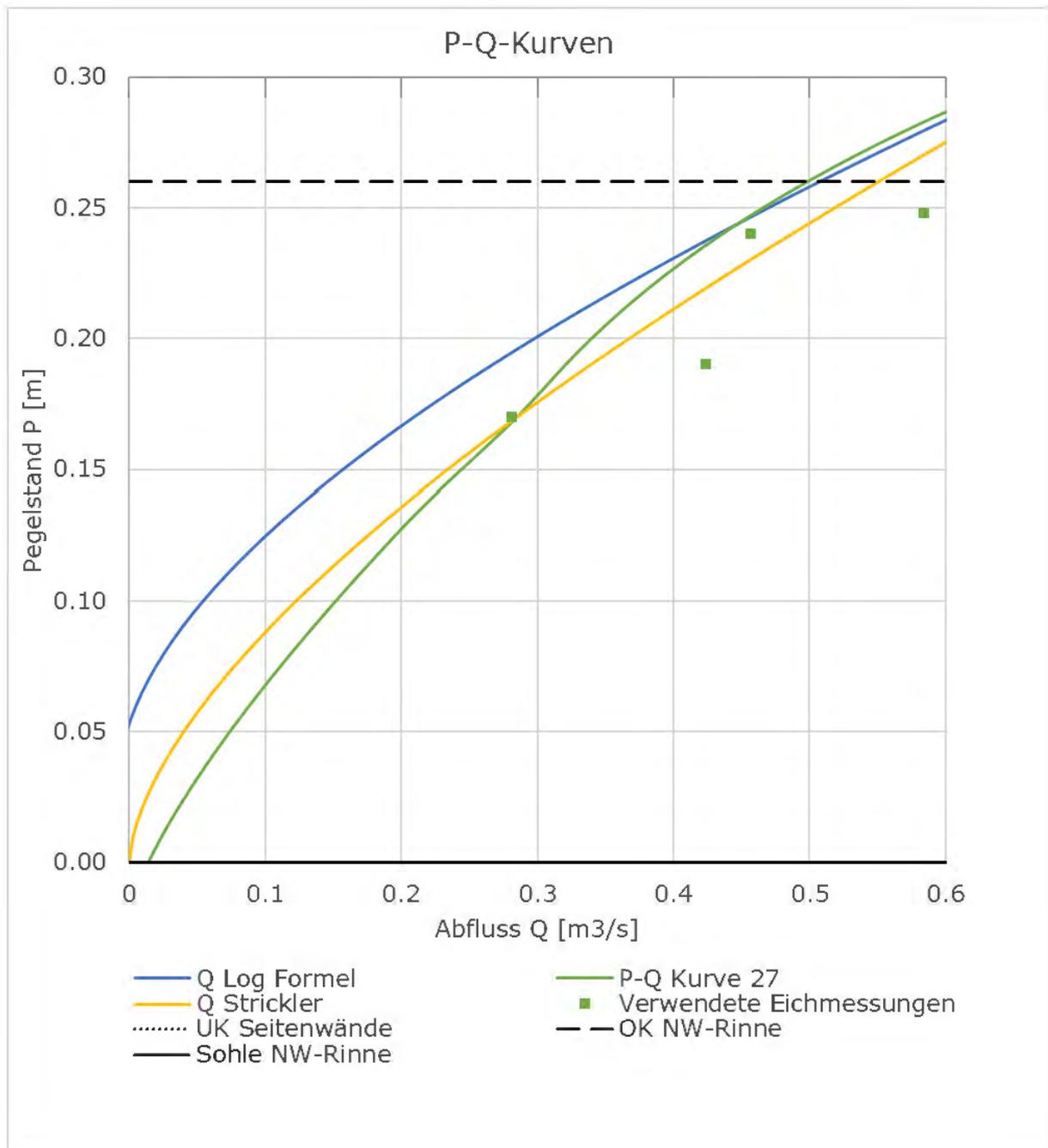


Abbildung 1: P-Q-Kurven aus verschiedenen Herleitungen, Beispiel Goneri

Aufgrund der neuen PQ-Beziehungen wurden die Abflüsse der sechs untersuchten Pegelstationen für die Perioden 1991 bis 2021 neu berechnet. Die Ergebnisse werden in den jeweiligen Kapiteln der einzelnen Messstellen vorgestellt und bewertet. Für jedes Gebiet wird eine Darstellung präsentiert, in welcher die Dauerkurven der beiden Abflüsse (Q BAFU und Q Strickler) abgebildet sind. Von einzelnen Jahren werden zudem die beiden Ganglinien im Winter gezeigt (Q BAFU und Q Strickler) mit Temperatur und Niederschlagsverläufen.

3.2 Dischmabach Davos

3.2.1 Morphologie und Hydraulik

Der Dischmabach ist ein kleiner, weitgehend natürlicher Alpenfluss mit charakteristischen, sich abwechselnden Abstürzen und Becken. Sein mittleres Längsgefälle im Bereich 250 m oberhalb bis 50 m unterhalb der Messtelle Dischmabach Davos Kriegsmatte (*Abbildung 2*) beträgt 5.76 %.

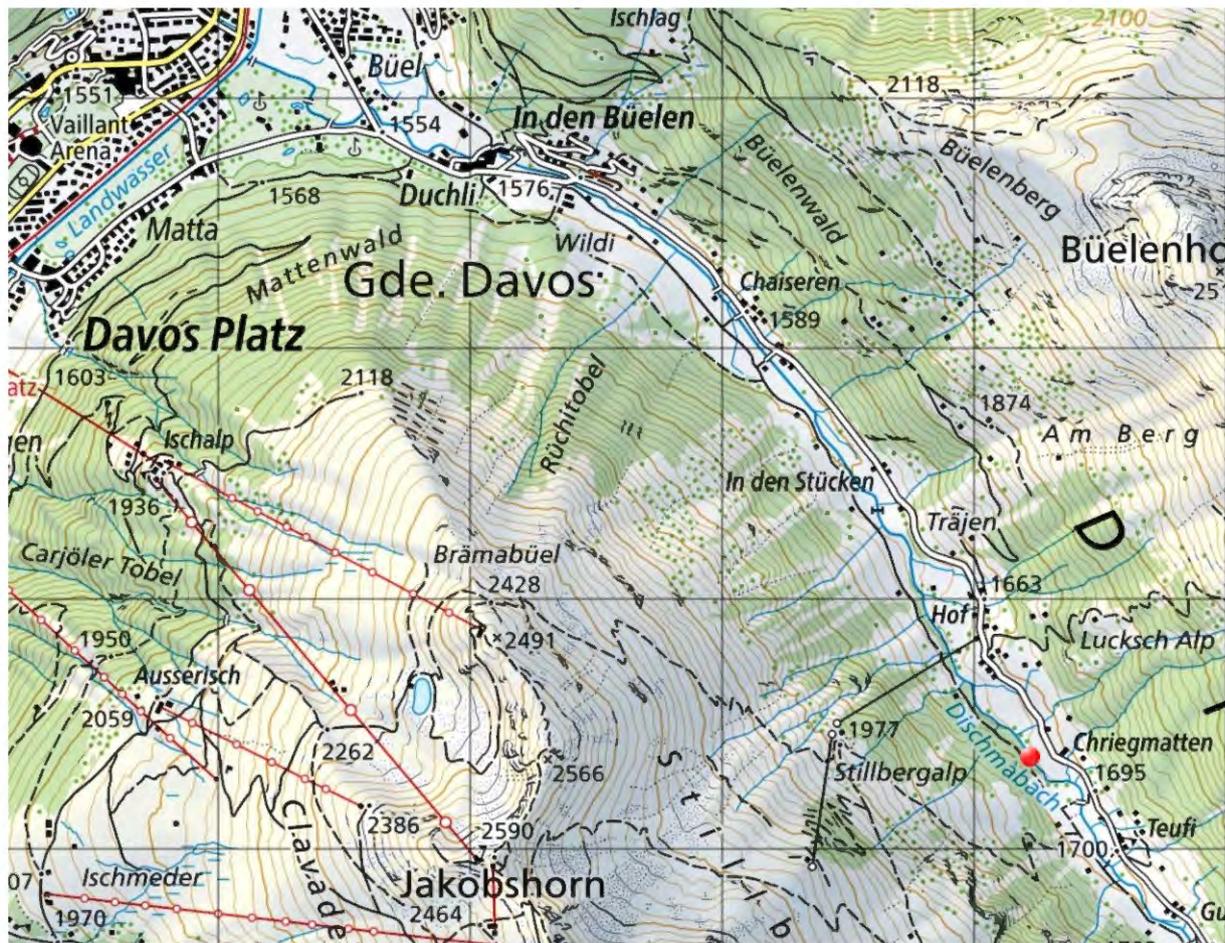


Abbildung 2 Dischmabach Davos, Messstation Kriegsmatte (roter Punkt)

Die Messstation Kriegsmatte besteht aus einem vorgelagerten Überfall in das Vorbecken, welcher die Hydraulik des Messquerschnittes von derjenigen des Flussbettes entkoppelt (*Abbildung 3*). Der Messquerschnitt ist rechteckig (*Abbildung 4*), wobei die Sohle gegen die Mitte in eine rechteckige Niedrigwasserrinne abfällt.

3.2.2 Messstation

Bezeichnung 2327 Dischmabach Davos, Kriegsmatte

Kennzahlen der Station (BAFU, 2021):

Stationshöhe 1'668 m ü. M

Grösse des Einzugsgebietes (EZG) 42.9 km²

Mittlere Höhe des EZG 2'376 m ü. M

Vergletscherung 0.7 %

Koordinaten LV95 2'786'224 / 1'183'370



Abbildung 3: Bild Messtation BAFU 2327 Dischmabach – Davos, Kriegsmatte (BAFU 2021)

Tabelle 2: Die Tageswerte von 1964-2017 befinden sich in folgenden Bereichen (Hydromaps 2021):

	Bereich [m ³ s ⁻¹]	Charakteristische Werte
Jeden Tag erreichter Abfluss		Q ₃₆₅ = 0.199 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 5%	0.08 ... 0.3	Q ₃₄₇ = 0.300 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 8.2 %		Q ₃₀₀ = 0.394 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 31.5%		Q ₂₅₀ = 0.525 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1964		NM7Q = 0.1 m ³ s ⁻¹
Mittlere 90% der Abflüsse	0.3 ... 5.1	Mittlerer Abfluss 1981 ... 2010 = 1.69 m ³ s ⁻¹
Höchste 5% der Abflüsse	5.1 ... 13.3	

Beim Q₃₄₇ = 0.30 m³ s⁻¹ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von 0.022 m³ s⁻¹.

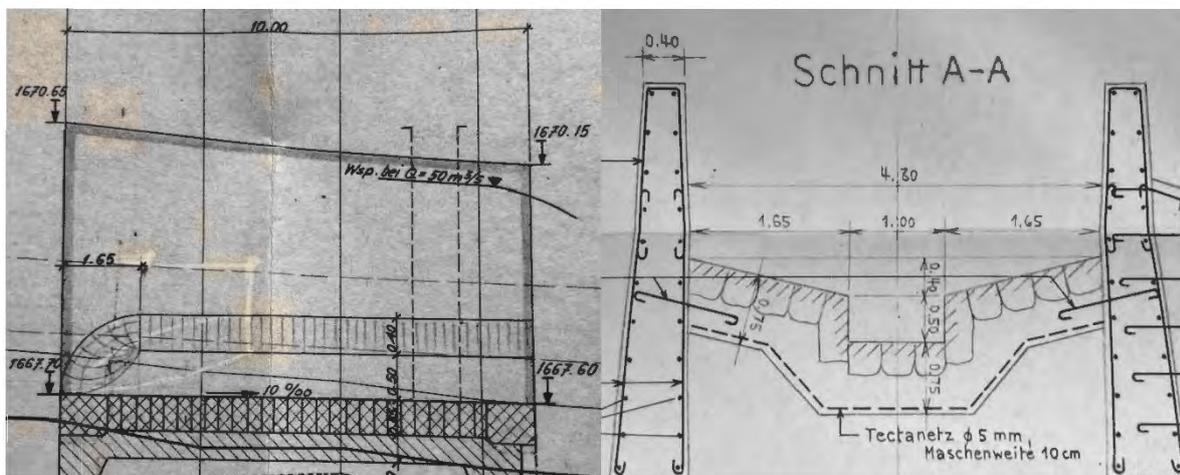


Abbildung 4: Messstation Dischmabach, Baupläne, links Längsschnitt, rechts Querschnitt (Kohler 2021).

Die Niedrigwasserrinne und die schräge Sohle sind aus grossen Steinblöcken zusammengesetzt, die Seitenmauern bestehen aus glattem Beton. Vom oberwasserseitigen Anfang des Bauwerkes gesehen folgt nach 6 m die Oberwasserseite des Messsteges mit dem Schlitten für die Eichmessungen, und nach 7.75 m die Achse des Messschachts (Abbildung 4, links) gestrichelte Linien. Der Schacht ist über eine horizontale Öffnung mit derselben Breite wie der Messschacht und der

Höhe der Niedrigwasserrinne (0.5 m) mit dieser verbunden. Ein Blech mit vertikalen Schlitzten verhindert das Eindringen von Fremdkörpern. In Flussrichtung links existieren zwei verschlossene Rohre als Bypass um die Messrinne. Bei Bauarbeiten kann die Messrinne abgesperrt und das Wasser durch diese Rohre geleitet werden. Am Ende des Bauwerks stürzt das Wasser in einem freien Überfall in das Auslaufbecken.

Entsprechend dem Gefälle in der Messrinne ergeben sich die folgenden Koten auf der Achse des Messschachtes:

1669.93 m ü. M	Auf Bauplan vermerkter Wasserstand bei $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$
1668.52 m ü. M	Kante zwischen der schrägen Sohle und den Seitenwänden
1668.12 m ü. M	Kante zwischen der Niedrigwasserrinne und der schrägen Sohle
1667.62 m ü. M	Sohle der Niedrigwasserrinne auf der Messschacht- Achse, Nullpunkt
1660.00 m ü. M	Pegelnulppunkt seit 1.1.1974 (J. Hammer 2022)

Seit 1991 sind folgende Ereignisse bekannt, welche sich möglicherweise auf den Bezug zwischen Pegelstand P und Abfluss Q auswirkten (Kohler 2021):

- 2002 Sommer grosses HW (Einzige Eichmessungen mit hohen Abflüssen)
- 2010 März, Niedrigwasserrinne mit Moos bewachsen, wurde vor der Eichmessung entfernt
- 2015, Bei Hochwässern gibt es Geschiebetrieb, dessen Einsetzen wird bei Abflüssen über $8 \text{ m}^3/\text{s}$ vermutet. Dieses Geschiebe setzt sich im Einlaufbecken bis direkt vor den Einlauf der NW-Rinne ab. Ob dieses das Fliessgeschehen und auch die PQ-Beziehung am Messquerschnitt entscheidend beeinflusst, wird anhand der hydraulischen 3D-Modellierung untersucht. Auf Fotos ist ein dreieckiges Strömungsmuster mit seitlichen Zuflüssen über die schrägen Seitenwände der Sohle beidseitig der Rinne sichtbar. In der Messrinne selbst wurde selten Geschiebe angetroffen, dies scheint entweder im Einlaufbecken liegen zu bleiben oder über die relativ glatte Messrinne abzufließen.
- 2020 März-April, Ersatz der baulich maroden Schwelle oberhalb des Einlaufbeckens durch eine neue, leicht höhere Holzschwelle, Entfernung von Sedimenten aus dem Einlaufbecken.
- In den Wintermonaten kann die Messrinne vereisen und mit Schnee bedeckt sein. In einigen Jahren floss das Wasser in der NW-Rinne unter einer geschlossenen Eisdecke, welche von Schnee bedeckt war. In der NW-Rinne kann sich Eis direkt auf der Wasseroberfläche bilden und das Abflussgeschehen beeinflussen. Die Sensitivität von Pegelhöhen auf verschiedene Vereisungsdicken in der Rinne wird mit dem 3D-Modell berechnet. Es gab einzelne Tage mit eingefrorenem Messschacht. Sehr tiefe Wassertemperaturen ($< 1 \text{ }^\circ\text{C}$) können auf solche Vereisungssituationen hinweisen. In den Monaten November bis März ist kein Geschiebetrieb

zu erwarten.

- Nach Hochwässern kann sich Holz im Bereich der Messstation ablagern und die P/Q-Beziehung beeinflussen.
- Kommt es bei Mittelwasser im Einlaufbereich beidseitig der NW-Rinne zum Überströmen der Rampen, kann es am Messquerschnitt zu Turbulenzen kommen, die durch das in die NW-Rinne zurückfliessende Wasser verursacht werden.

3.2.3 Messtechnik

Der Wasserstand wird mit einer Tauchsonde im Messschacht gemessen. Seit 9.11.2020 wird dafür eine Sonde vom Typ LPN Keller eingesetzt. Messbereich: 0...3 m Wassersäule, Genauigkeit Typ 36XW 0.1% Full-Scale (Keller-Druck 2021), also +/- 0.003 m.

Seit 06.04.2021 wird der offiziell publizierte Messwert von einem Radar (Vegapuls von Vega) im Messschacht generiert und von einem Logger erfasst, gespeichert und übertragen. Die nach wie vor im Schacht messende Tauchsonde stellt ihre Messwerte via Webdienst (Decentlab) zur Verfügung. Ein zweiter Radar (Vegapuls von Vega) erfasst den Pegel in der Messrinne auf der UW-Seite des Messsteges.

3.2.4 Eichmessungen

Eichmessungen mit dem Flügel werden immer auf der OW-Seite des Messsteges durchgeführt. In der 1 m breiten NW-Rinne werden 13 Achsen auf je drei Wassertiefen gemessen. Bei beginnender Überströmung der Kante zwischen der NW-Rinne und der schrägen Sohle wird die räumlich nächste lokale Fliessgeschwindigkeit auf die durchströmte Fliessfläche unter Berücksichtigung einer 20% höheren Reibung extrapoliert. Die Messflügel werden regelmässig geeicht. Massgebend für den durchflossenen Querschnitt der Eichmessung ist die Wassertiefe am Ort des Messflügels. Die Pegelmessung ist fest im Messschacht installiert und wird jeweils vor der Eichmessung mit der Pegellatte, ebenfalls im Messschacht, verglichen.

Im Untersuchungszeitraum Januar 1991 bis Oktober 2021 wurden von total 165 Eichmessungen deren 55 im Bereich der Niedrigwasserrinne vorgenommen (*Abbildung 5*). Von 1991 bis 1995 gibt es einige NW-Eichmessungen mit unbekannter Methode (grau), anschliessend folgt eine Lücke bis 2002. Ab 2003 gibt es eine gute Abdeckung mit Eichmessungen für Pegelstände über 1667.80 m, allerdings nur eine Messung unter diesem Pegel, der dem Q347 von ca. 0.3 m³/s entspricht. Ab 2014 werden die Flügel-NW- Eichmessungen immer mehr durch Messungen mit der Salzverdünnungsmethode abgelöst. Seit 2016 werden im Bereich der Niedrigwasserrinne, abgesehen von einer Ausnahme, ausschliesslich Salzmessungen durchgeführt. Der Zugabeort befindet sich ca. 170 m flussaufwärts auf der offenen und gut zugänglichen Kriegalp. Anschliessend fliesst der Dischmabach durch ein schluchtartiges Tal durch zahlreiche Abstürze und Pools, welche für eine

gute Durchmischung sorgen. Die Leitfähigkeitsmessung wird direkt oberhalb des Überfalls ins Einlaufbecken mit 2-4 Sonden durchgeführt. Die Messzeit beträgt ca. 20 min.

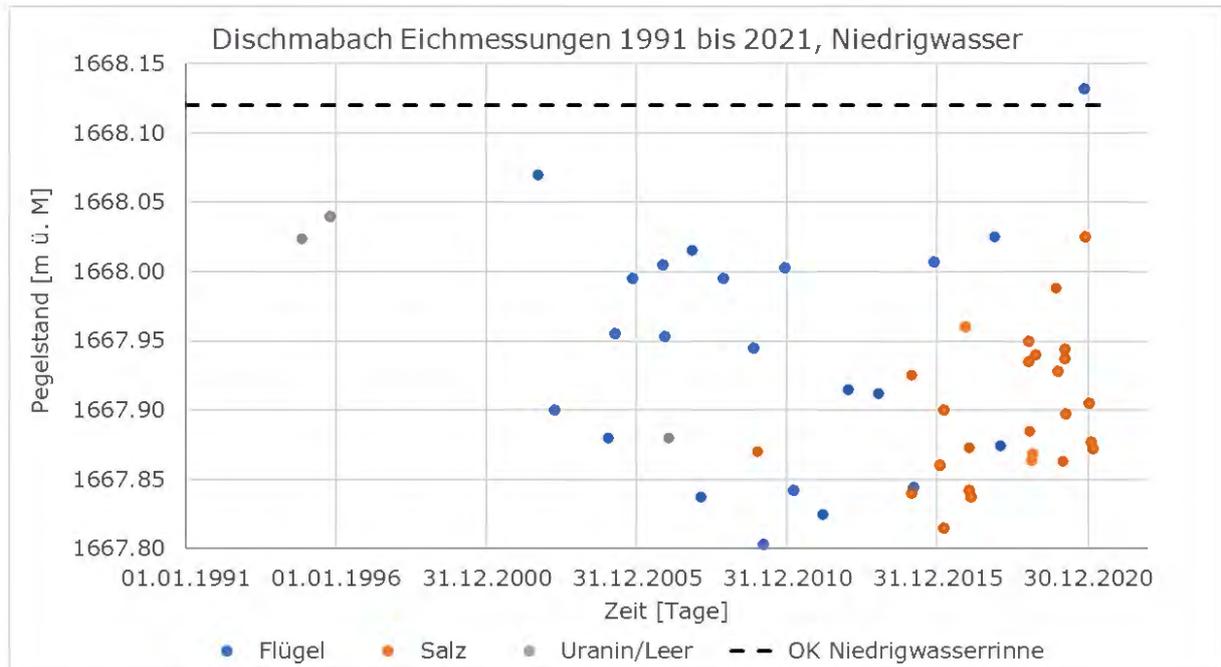


Abbildung 5: Dischmabach, Eichmessungen mit ihren Pegelständen im Bereich der Niedrigwasserrinne, aufgetragen über die Zeit.

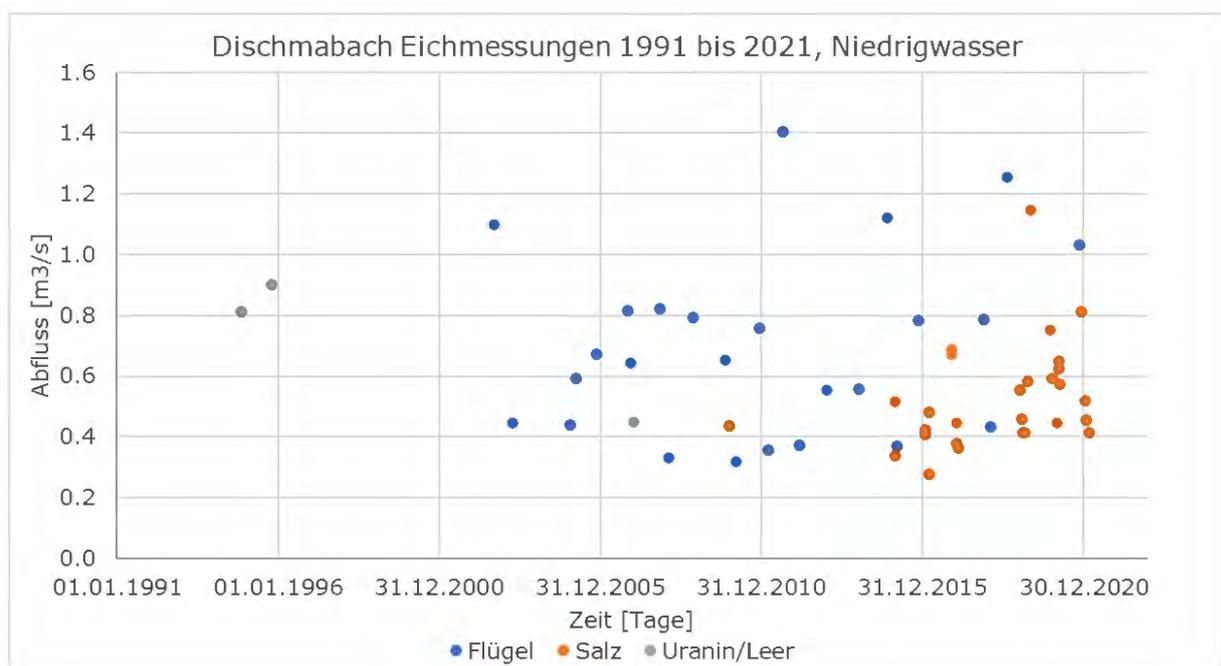


Abbildung 6: Dischmabach, Abflüsse der NW-Eichmessungen über die Zeit

3.2.4.1 Streuung der Eichmessungen

Unter der Voraussetzung, dass die betonierte Niedrigwasserrinne während den Eichmessungen der letzten 20 Jahre stabil war, d.h. ohne Sedimente, ohne Eis und ohne Vermoosung, würde man erwarten, dass bei ähnlich hohen Pegelständen im Niedrigwasserbereich über die gesamte Zeit ungefähr dieselben Abflüsse aufgetreten sein müssten. Die Lage (Pegelhöhen der Eichmessungen bei vergleichbaren Abflüssen) dürfte sich in der Theorie demnach über die Zeit kaum ändern. Legt man eine Mittellinie in die Niedrigwasser-Eichmessungen, lassen sich die Abweichungen von dieser Linie analysieren (*Abbildung 7*).

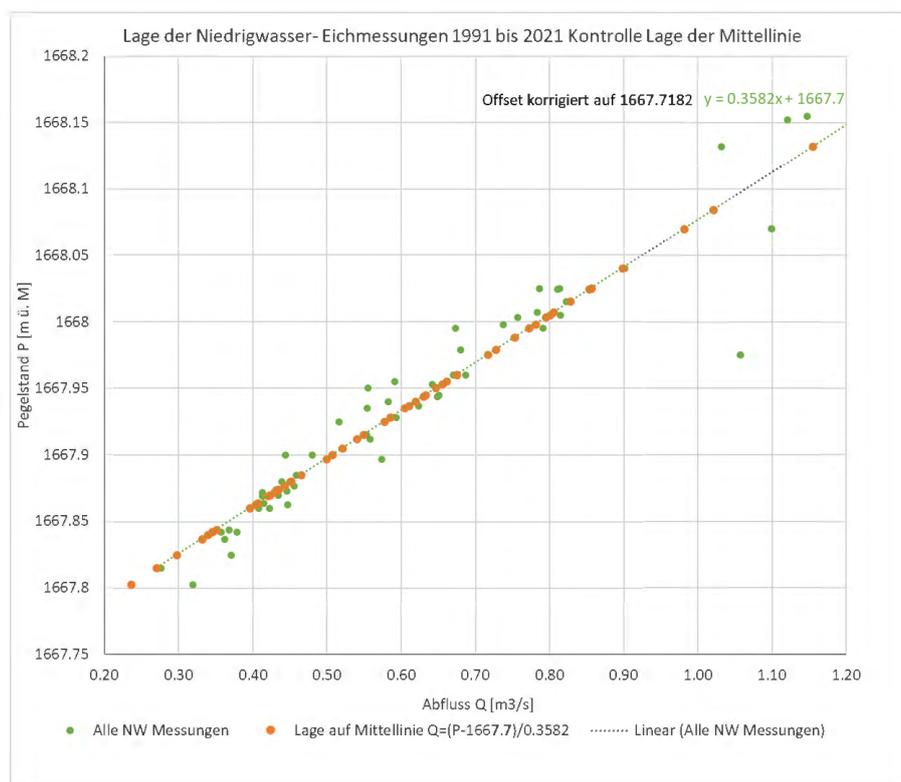


Abbildung 7: Dischmabach, Niedrigwasser-Eichmessungen und die hineingelegte Mittellinie

Abbildung 8 zeigt aber, dass die Pegelhöhen der Eichmessungen bei vergleichbaren Abflüssen bis zu 8.8 cm streuen (maximale positive + maximale negative Abweichung von der Mittellinie, vgl. Messungen 1 und 2), was einer möglichen Abweichung im Abfluss von mehr als 200 l s^{-1} entspricht. Die Gründe für die Schwankungen der Pegelhöhen sind unklar. Sind es sich ändernde Fließverhältnisse in der Niedrigwasserrinne, sind es Unsicherheiten in der Bestimmung des Abflusses der Eichmessungen oder Unsicherheiten in der Bestimmung der Pegelhöhe der Eichmessungen? Die hydraulischen Verhältnisse im Messschacht und in der Niedrigwasserrinne sind unterschiedlich. Massgeblich für die Pegelhöhe der Eichmessung war bis am 21.4.2021 die mit der Tauchsonde registrierte Pegelhöhe. Aufgrund von Unsicherheiten der mit der der Tauchsonde

registrierten Messwerte, wurde ein Radar im Schacht und einer über der Niedrigwasserrinne installiert. Seither ist der Pegelwert des Radars im Schacht für die Pegelhöhe der Eichmessung massgebend.

Die Pegelhöhen der mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführten Eichmessungen schwanken bei Abflüssen kleiner Q260 um maximal 2.4 cm um die Mittellinie. Der Schwankungsbereich der Pegelhöhen der mit dem Flügel durchgeführten Eichmessungen liegt bei Abflüssen kleiner Q260 mit 4.6 cm fast doppelt so hoch. Bei Abflüssen über Q260 schwanken auch die Pegelhöhen der mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführten Eichmessungen bei vergleichbaren Abflüssen stärker. Es stellt sich die Frage, ob die geringere Streuung der Pegelhöhen der mit Salz durchgeführten Eichmessungen gegenüber der mit dem Flügel durchgeführten Eichmessungen bei Abflüssen kleiner Q260 zufällig ist oder ob sie mit der Messmethode zusammenhängt.

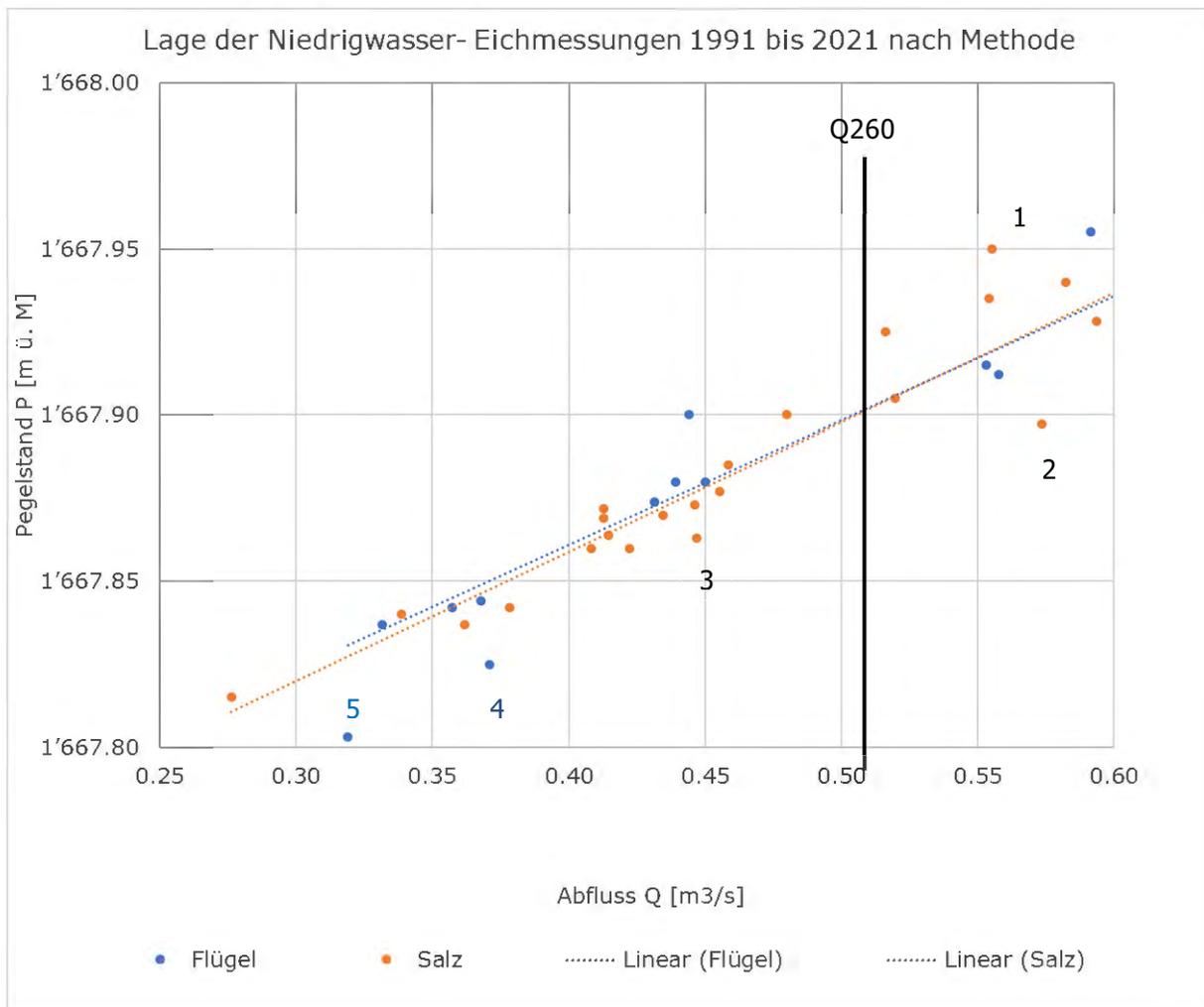


Abbildung 8: Dischmabach, Abflüsse und Pegelhöhen der Niedrigwasser-Eichmessungen nach Messmethode

Abbildung 9 zeigt die Lage der Eichmessungen nach unterschiedlichen Perioden gruppiert. Die Pegelhöhen können sich auch innerhalb der definierten PQ-Perioden stark unterscheiden, wie zum Beispiel innerhalb der Perioden 2019 bis 2021 oder 2011 bis 2015.

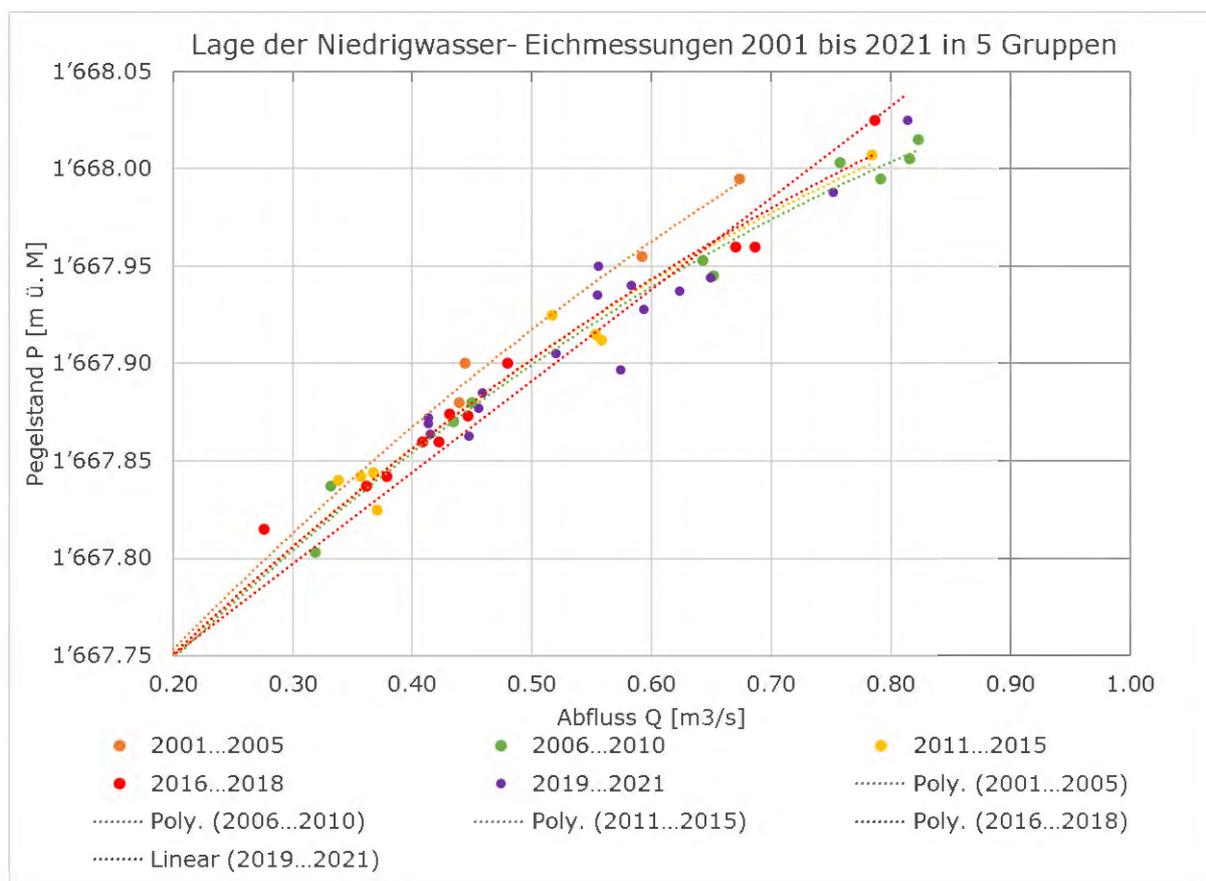


Abbildung 9: Dischmabach, Pegelstände und Abflüsse aller NW-Eichmessungen 2001 bis 2021 in fünf Gruppen mit je einem Polynom durch den Nullpunkt interpoliert

Im Zeitraum zwischen 2006 und 2010 streuen die Pegelhöhen um maximal 3.4 cm um die Mittellinie (Abbildung 10, grüne Punkte), (Schwankung zwischen den Eichmessungen vom 18.3.2010 und 21.2.2008). Denkt man sich die Eichmessung vom 18.3.2010, die mit dem Flügel durchgeführt wurde, weg, beträgt die maximale Schwankung um die Mittellinie nur noch 2.4cm. Auch während der Periode 2001 bis 2005 liegen die Eichmessungen mit Ausnahme der zwei Messungen von 2002 praktisch auf einer Linie (orange Punkte). Der Schwankungsbereich liegt bei 2.1cm um die Mittellinie. Die Pegelhöhen der Eichmessungen vom 18.9.2002 und 10.10.2002 liegen ausserordentlich tief. Folgende Ausführungen zeigen auf, dass in diesem Zeitraum am Pegel ein Problem aufgetreten sein muss, das die Pegelmessung stark verfälscht hat und diese deshalb unplausibel sind:

Abbildung 11 zeigt die Anteile der Anzahl Tage mit Abflüssen kleiner Q347 für jedes Jahr der Messperiode 1996 bis 2021 für repräsentative Messpegel der Alpennordseite (100% = 1). Auffällig

ist, dass der Anteil der Abflüsse mit $Q < Q_{347}$ am Dischmabach der Jahre 2000 bis 2002 fast 60% aller Abflüsse mit $Q < Q_{347}$ der Periode 1996 bis 2022 ausmacht. In den übrigen Gebieten der Alpennordseite liegen die Anteile der $Q < Q_{347}$ in denselben Jahren im einstelligen Bereich. Dass im Dischmabach ein derart aussergewöhnliches Niedrigwasserjahr stattgefunden haben soll und bei den anderen beobachteten Fließgewässern nicht, ist unplausibel. Diese Werte sind in Frage zu stellen. Angelehnt an diese Beobachtungen in *Abbildung 11* dürfte die Periode mit den fehlerhaften Pegelmessungen am Dischmabach über die drei Jahre von 2000 bis 2002 angedauert haben. In Absprache mit Andreas Kohler empfehlen wir, die Pegelhöhen des Dischmabaches dieser drei Jahre anhand der Abflussperzentlie des Pegels der Landwasser zu korrigieren.

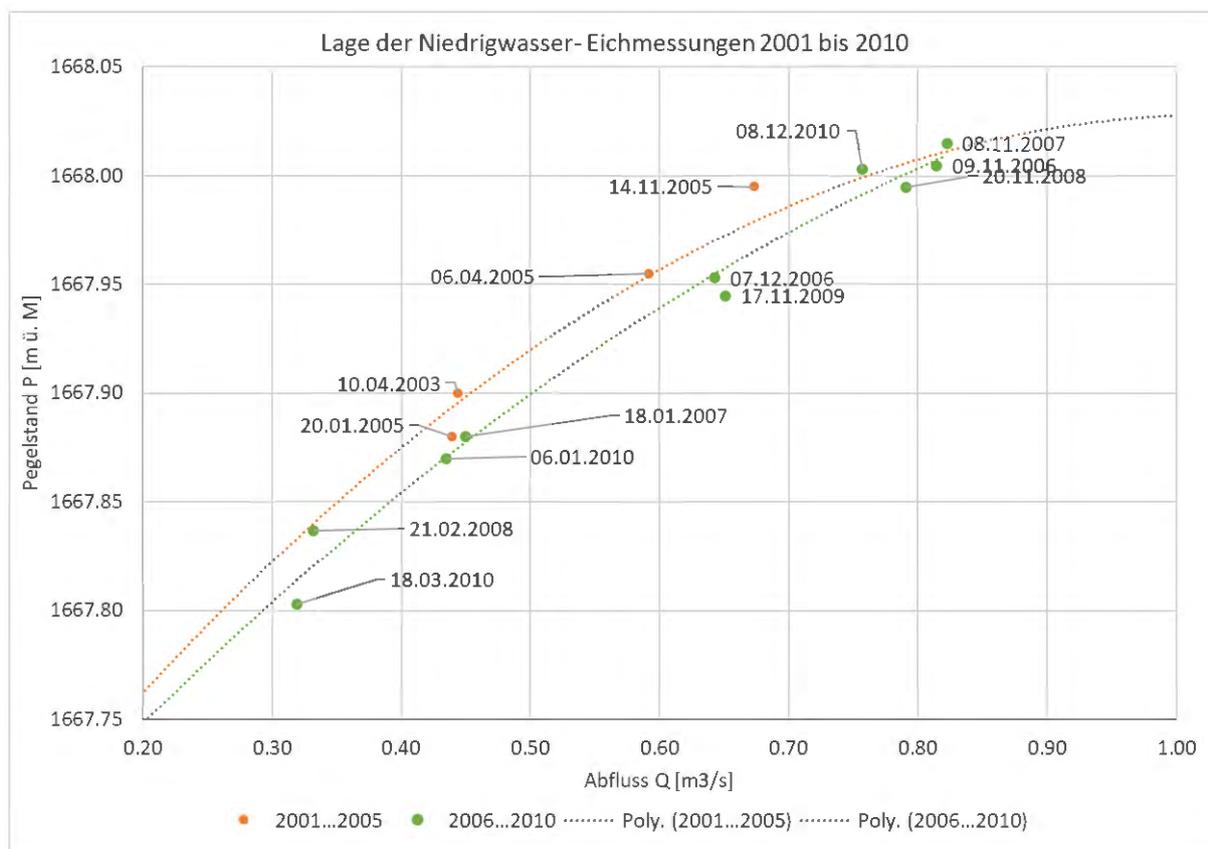


Abbildung 10: Dischmabach, Pegelstände und Abflüsse der NW-Eichmessungen 2001 bis 2005 und 2006 bis 2010

Anteile an Tagen mit $Q < Q_{347}$ zwischen 1996 und 2021 [100% = 1] - Alpennordseite



Abbildung 11: Repräsentative Auswahl an Einzugsgebieten der Alpennordseite, Anteile der Tage mit $Q < Q_{347}$ für jedes Jahr der Messreihe zwischen 1996 und 2021

Die Pegelhöhen der Eichmessungen der Periode 2011 bis 2015 schwanken um 3.6cm um die Mittellinie (Abbildung 12, gelb). Bei den Abflüssen kleiner $0.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sind zwei Gruppen erkennbar. Die Pegelhöhen der Messungen der Jahre 2011 und 2015 liegen über der Mittellinie, diejenigen aus der Jahre 2012 bis 2014 unter der Mittellinie. Bei den beiden Abflüssen über $0.75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ist es umgekehrt. Dort liegt die Pegelhöhe der Messung von 2014 über, diejenige vom Jahre 2015 unter der Mittellinie. Erstere liegt ausserhalb der Niedrigwasserrinne, die zweite innerhalb.

In der Periode 2016 bis 2018 weichen die Pegelhöhen der Eichmessungen vom 21.2.2008 und diejenige vom 2.12.2016 um mehr als 1cm von der Mittellinie ab und verursachen einen maximalen Schwankungsbereich von fast 5cm um die Mittellinie (Abbildung 12, rot). Ohne die Messungen aus dem Jahr 2016 wäre der maximale Schwankungsbereich wesentlich tiefer. Interessant ist, dass vor allem die Pegelhöhen der Messungen vom 2.12.2016 relativ weit unter der Mittellinie und somit konträr zu den Messungen vom 18.03.2016 liegen.

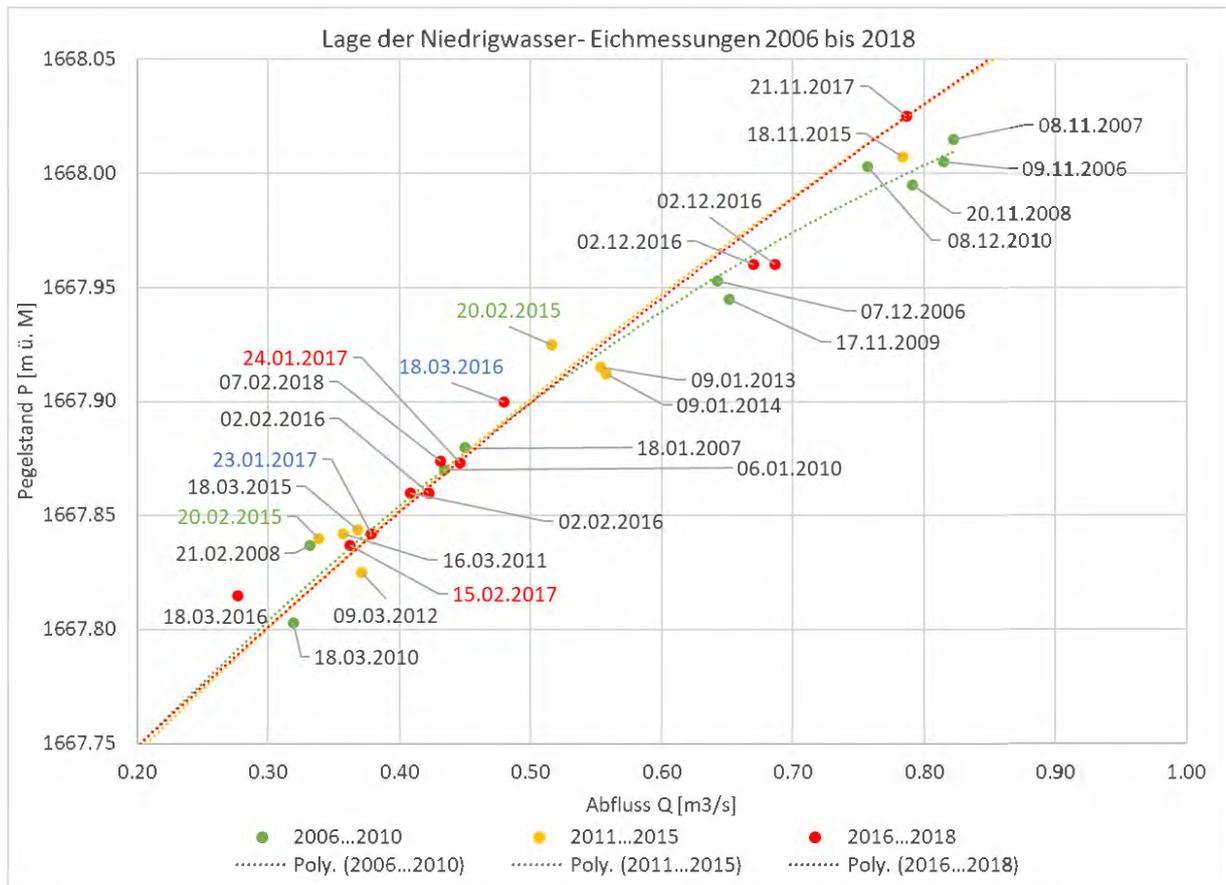


Abbildung 12: Pegelstände und Abflüsse der NW-Eichmessungen 2006 bis 2018 in drei ähnlich grossen Gruppe mit je einem Polynom durch den Nullpunkt.

Die Pegelhöhen der Eichmessungen des Jahres 2019 zeigen einen geringen Schwankungsbereich um die Mittellinie. Davon ausgenommen ist die zweite Messung vom 11.1.2019. Sie weicht stark von der Mittellinie ab (*Abbildung 13, violett*). Innerhalb der Gruppierung der Eichmessungen zwischen 2020 und 2021 lassen sich nochmals zwei Gruppen unterscheiden. Die Pegelhöhen der Abflüsse aus dem Jahr 2021 liegen bei vergleichbaren Abflüssen noch etwas höher als die aus dem Jahr 2020. Eine Ausnahme bildet die Messung vom 17.11.2020. Die Pegelhöhe dieser Messung liegt aber schon knapp über der Oberkante der Niedrigwasserrinne.

Es gibt auffällige Serien von Messungen, die zeitlich und in ihrer Lage ausgezeichnet übereinstimmen, wie z.B. die braunen Punkte vom 09.01.2020, 30.03.2020 und 26.03.2020 oder die roten Punkte vom 15.02.2017, 23.01.2017, 02.02.2016 (zwei Messungen) und 24.01.2017.

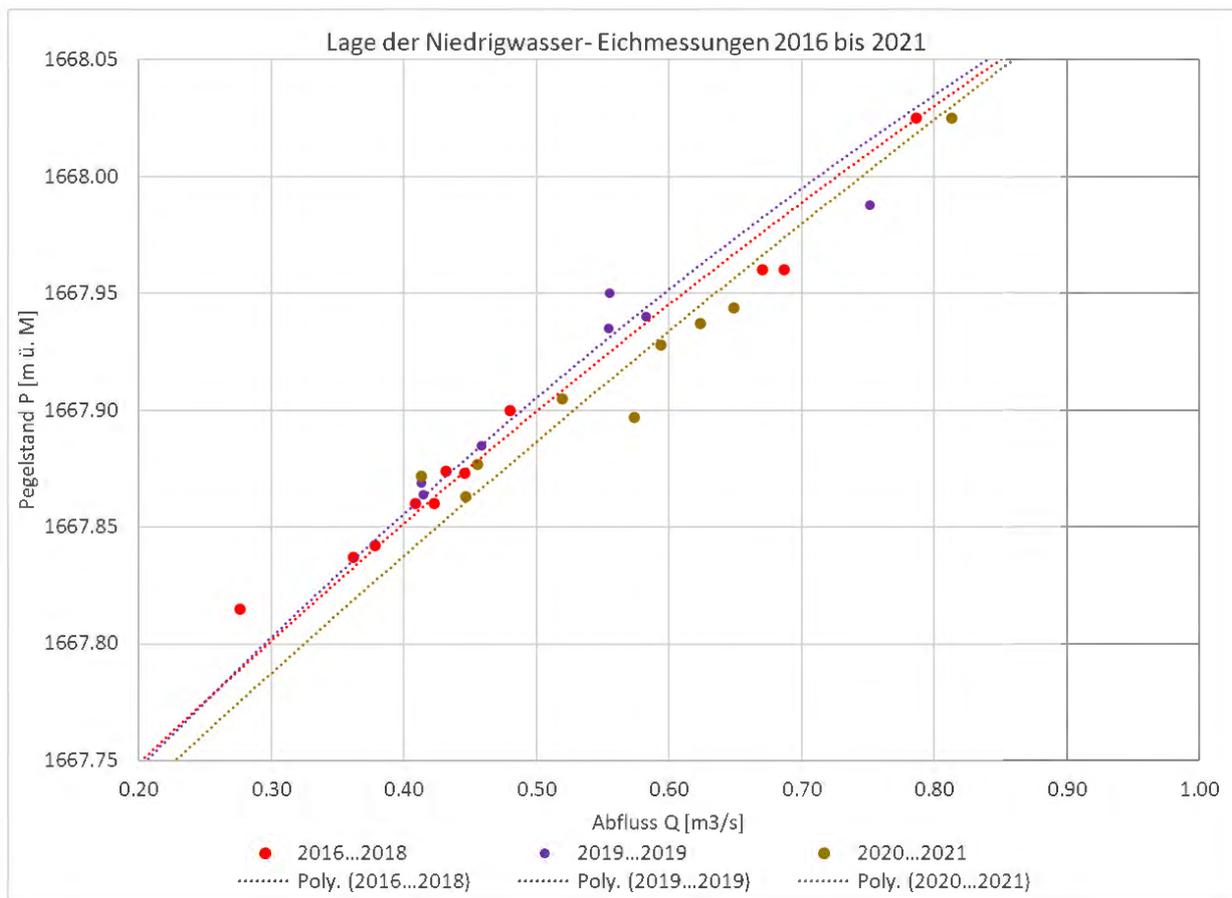


Abbildung 13: Eichmessungen 2016 bis 2021 in drei ähnlich grossen Gruppen mit je einem Polynom durch den Nullpunkt 1667.62 m ü. M / 0.0 m³/s

3.2.4.2 Lage der Niedrigwasser-Eichmessungen über die Zeit

Jede Eichmessung definiert den Abfluss bei einem bestimmten Pegelstand. Im NW-Bereich, in dem viele Eichmessungen vorhanden sind, liegen diese verstreut entlang einer umhüllenden Geraden. Noch besser würde diese Mitte durch eine mittlere P-Q-Kurve abgebildet. Weil dies aber bereits einer Interpretation entspräche, wird bewusst darauf verzichtet. Die Lage der Eichmessungen kann als Abfluss-Abweichung von dieser Geraden, hier Mittellinie genannt, dargestellt werden. Betrachtet man die Abweichung der Eichmessungen von dieser Mittellinie über die Zeit, zeigt sich, dass diese Abweichung mindestens in den letzten Jahren sichtbare Gruppen bilden (Abbildung 14). Entsprechend liegen die Mediane pro Jahr (rote Balken) bis 0.04 m³/s im positiven oder negativen Bereich. In den Jahren 2019 bis 2021 wurde mit einer Ausnahme nur mit Salz gemessen. Die Abweichung des Abflusses der Eichmessungen von der Mittellinie war im 2019 fast durchwegs negativ, im Jahr 2020 positiv und im Jahr 2021 wieder eher negativ. Die Flügelmessungen zeigen seit 2015 eine Tendenz zu steigenden negativen Abweichungen.

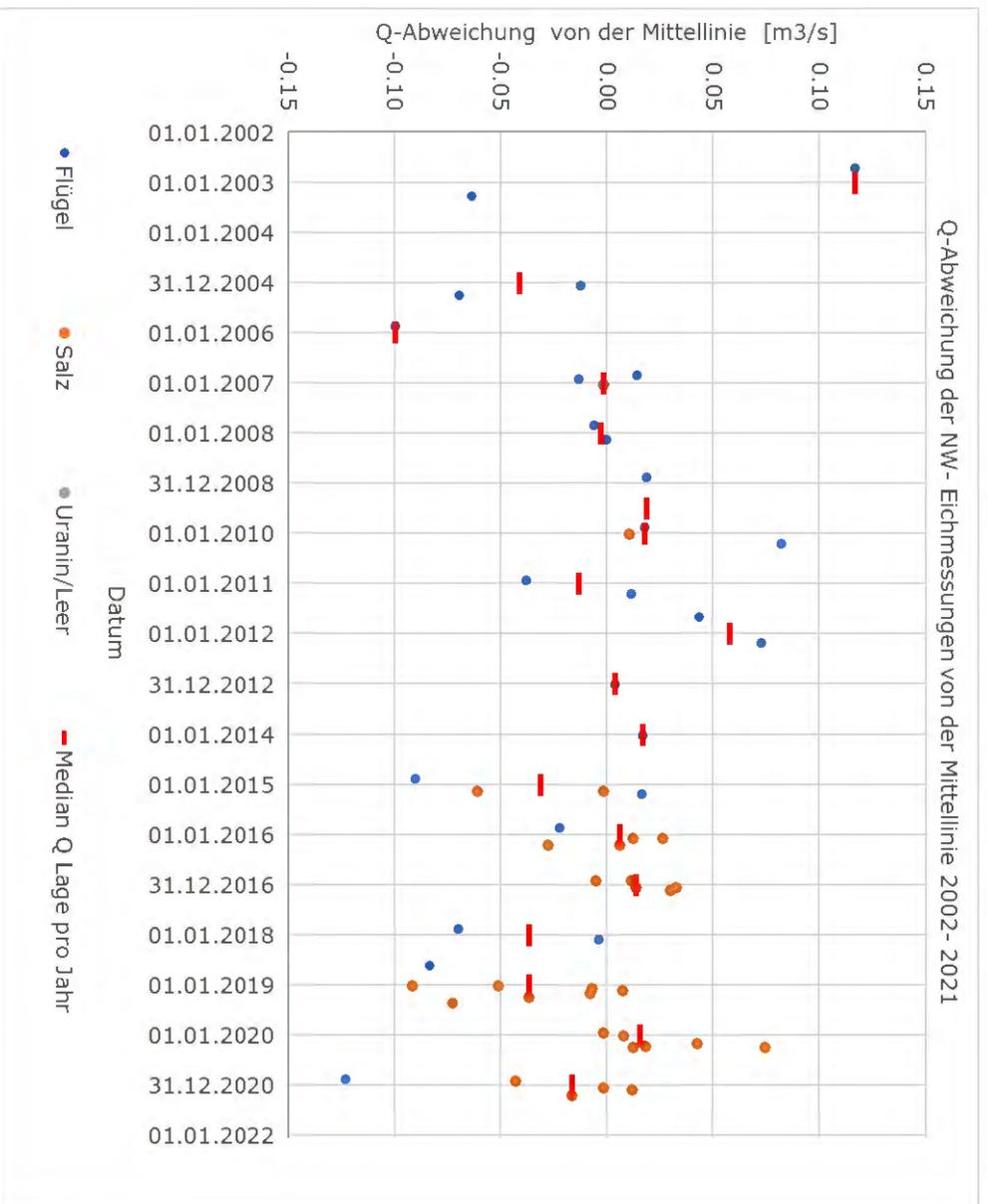


Abbildung 14: Abfluss-Abweichungen der Niedrigwasser-Eichmessungen von der Mittellinie und deren jährliche Mediane, Entwicklung ab 2002. Von 1991 bis 2001 gab es lediglich zwei Uranin-Messungen im Jahr 1995.

Die Streuung der Eichmessungen um die Mittellinie wird mit steigendem Abfluss grösser (Abbildung 15). Die Abweichungen zeigen aber keine Tendenzen in eine bestimmte Richtung. Im Abflussbereich unter dem Q260 fallen die Abweichungen der Salzmessungen geringer aus als diejenigen der Flügelmessungen.

Zwischen den Abweichungen von der Mittellinie und der Wassertemperatur, welche ein Mass für Vereisungstendenzen darstellt, besteht kein klarer Zusammenhang (Abbildung 16). Dies bedeutet selbstverständlich nicht, dass Vereisungsprobleme bei den Eichmessungen ausgeschlossen werden können. Etwas auffällig erscheint, dass die Abweichungen der Salzmessungen von der Mittellinie zwischen 1 und 2 °C im Vergleich zu Wassertemperaturen < 1°C und grösser 2°C sehr gering sind.

Bei Temperaturen unter 0.6 Grad wurden ausschliesslich Eichmessungen mit der Salzverdünnungsmethode gemacht.

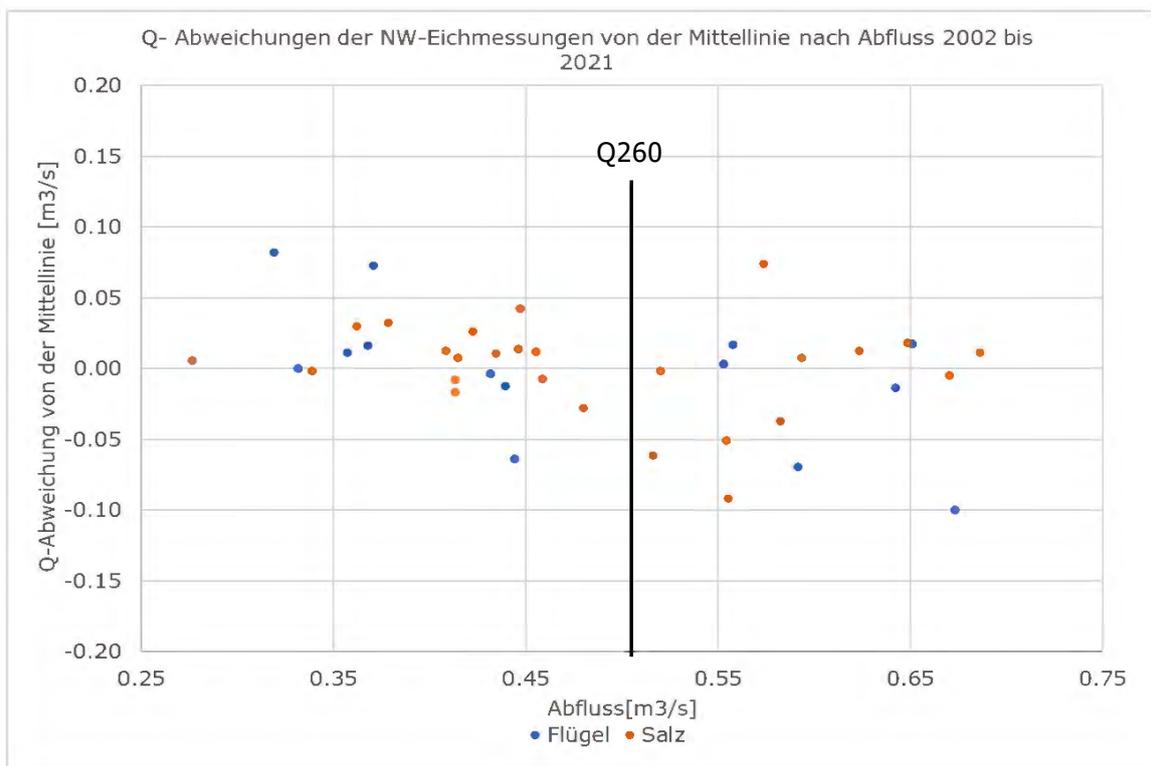


Abbildung 15: Abflussabweichungen der Niedrigwasser-Eichmessungen von der Mittellinie nach Abfluss und Methode

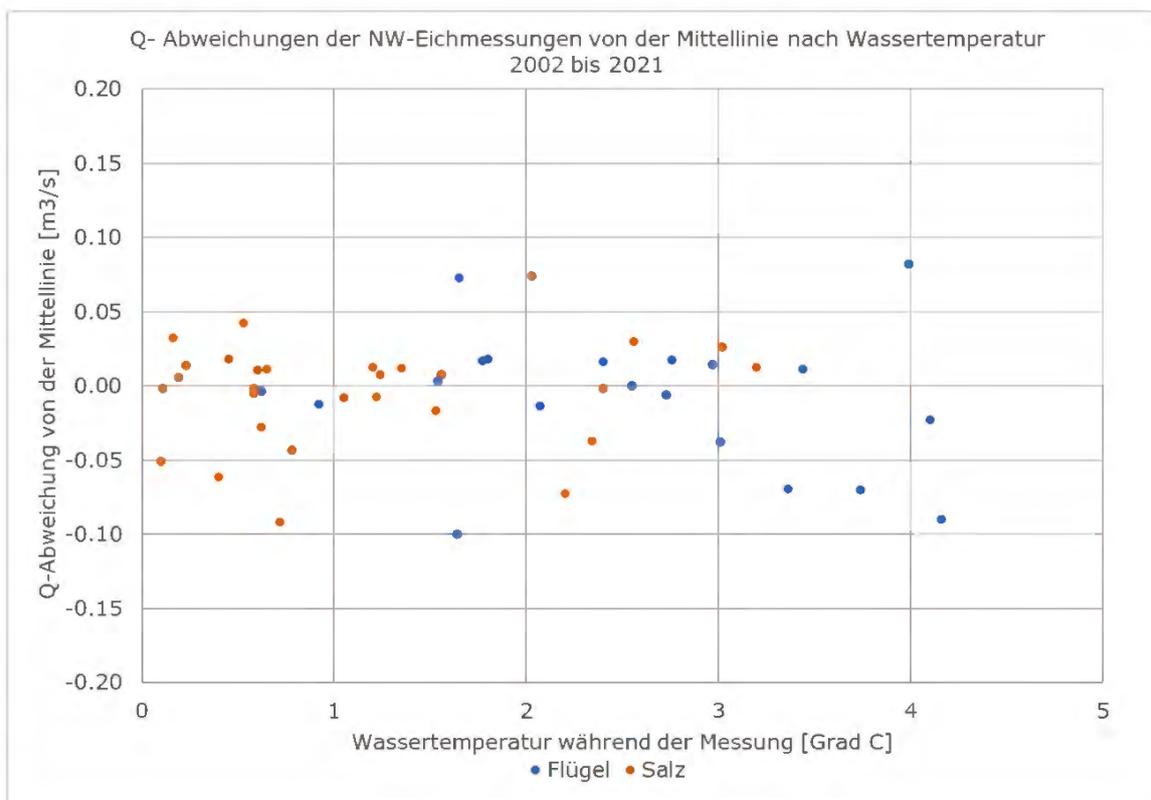


Abbildung 16: Abflussabweichungen der Niedrigwasser-Eichmessungen von der Mittellinie nach Wassertemperatur und Methode

3.2.5 P-Q-Beziehungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 20 P-Q-Beziehung in Form der Kurven Nr. 26 bis 45 definiert und verwendet. Wie vorne beschrieben gab es erst ab 2002 Niedrigwasser-Eichmessungen, welche die Kurven 31 bis 45 im Bereich zwischen dem Q374 und dem Q250 abstützten (Abbildung 17). Die Kurven 26 bis 30, 33, 36, 39 40 und 44 wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit verwendet. Die lange gültige Kurve 41 verfügt über die beste Abstützung im Niedrigwasser.

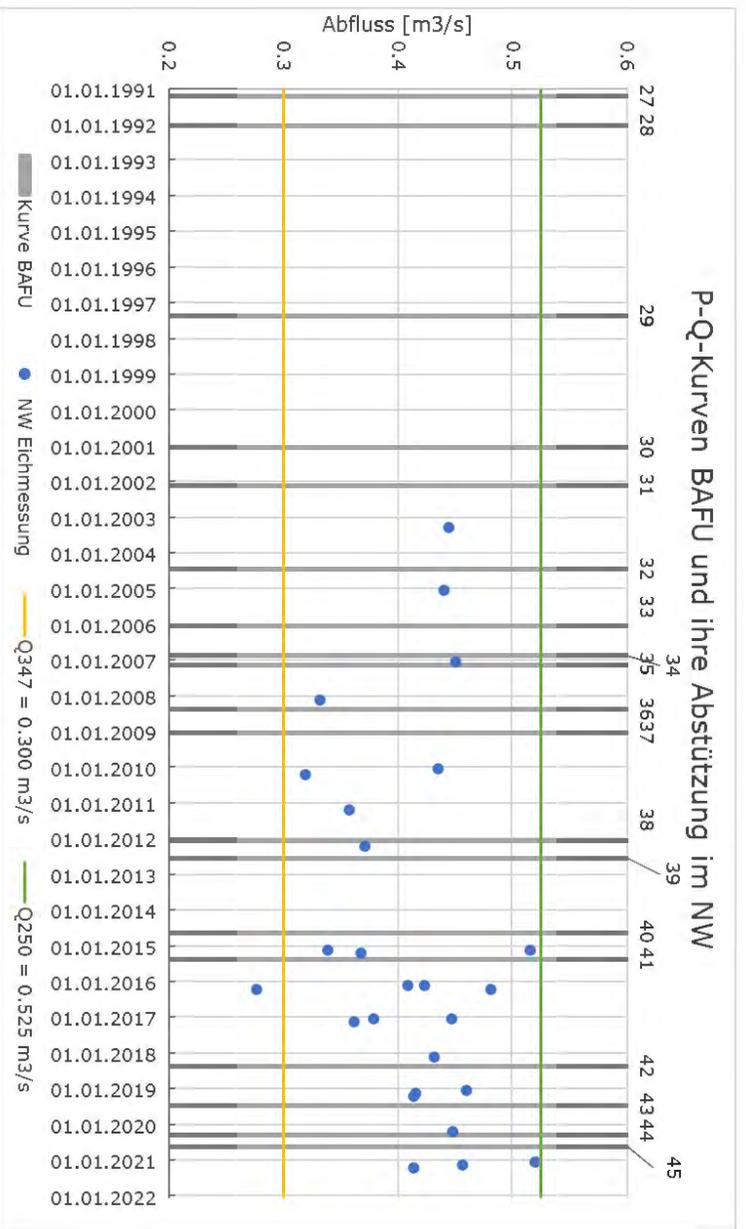


Abbildung 17: Dirschmabach, P-Q-Kurven und ihre Abstützung mit Eichmessungen über die Zeit

3.2.5.1 Aktuell gültige P-Q-Kurve Nr. 045

Abbildung 18 zeigt die P-Q-Beziehung 39 bis 45 mit ihren Eichmessungen. Seit dem 13.08.2020 ist die Kurve 45 gültig. Gut sichtbar ist der Schwankungsbereich, in dem sich die Eichmessungen befinden. Dieser Bereich wird von den in der Abbildung dargestellten P-Q-Kurven 039 (gültig ab 10.07.2012) bis 045 im Niedrigwasserbereich fast vollständig umfasst.

Die Kurve 45 umfasst das Niedrigwassersegment 1 bis P = 1668.16 m ü. M (rot dick), ein Übergangsegment (orange, dick) und das Mittel- bis Hochwassersegment ab P = 1668.38 m ü. M (rot

dick). Die Kurven wurden durch Exponential- oder Polynomfunktionen an die Lage der Eichmessungen angenähert. Die rot eingefärbten Punkte stellen Eichmessungen dar, die für die Herleitung der PQ-Beziehung verwendet wurden. Die blau eingefärbten Eichmessungen wurden nicht verwendet. Das Mittel- bis Hochwassersegment der Kurve 45 wurde im Gegensatz zu anderen nur anhand eines Hilfspunktes und ohne Eichmessungen definiert.

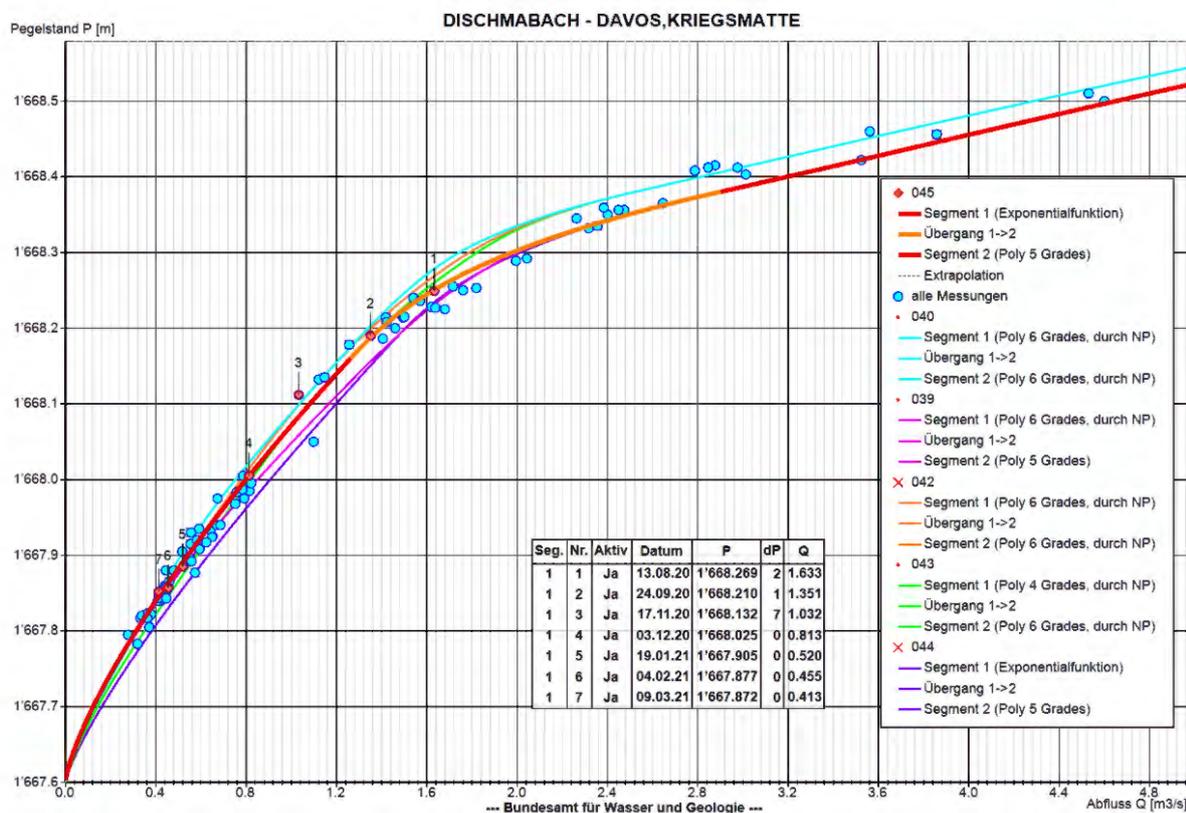


Abbildung 18: Ganzer Definitionsbereich der P-Q-Beziehung Nr.45 in rot/orange, dafür verwendete Eichmessungen rot, nummeriert von 1-8. Aktuell nicht verwendete Eichmessungen als hellblaue Punkte

Der Niedrigwasserbereich derselben Darstellung (Abbildung 19) zeigt den Schwankungsbereich der Eichmessungen und der Kurven der letzten knapp 10 Jahre. Beim Q_{347} beträgt der Schwankungsbereich des Pegelstandes zwischen der äussersten Kurve 044, gültig ab 2.4.2020 (violett) und der seit 13.08.2020 gültigen Kurve 045 (rot fett) 3 cm. Ein Pegelstand von 1'667.8 m ü. M wurde nach dem 13.08.2020 um $0.075 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ weniger gewertet als vor dem 02.04.2020 ¹. Diese Variation entspricht 25% des Q_{347} .

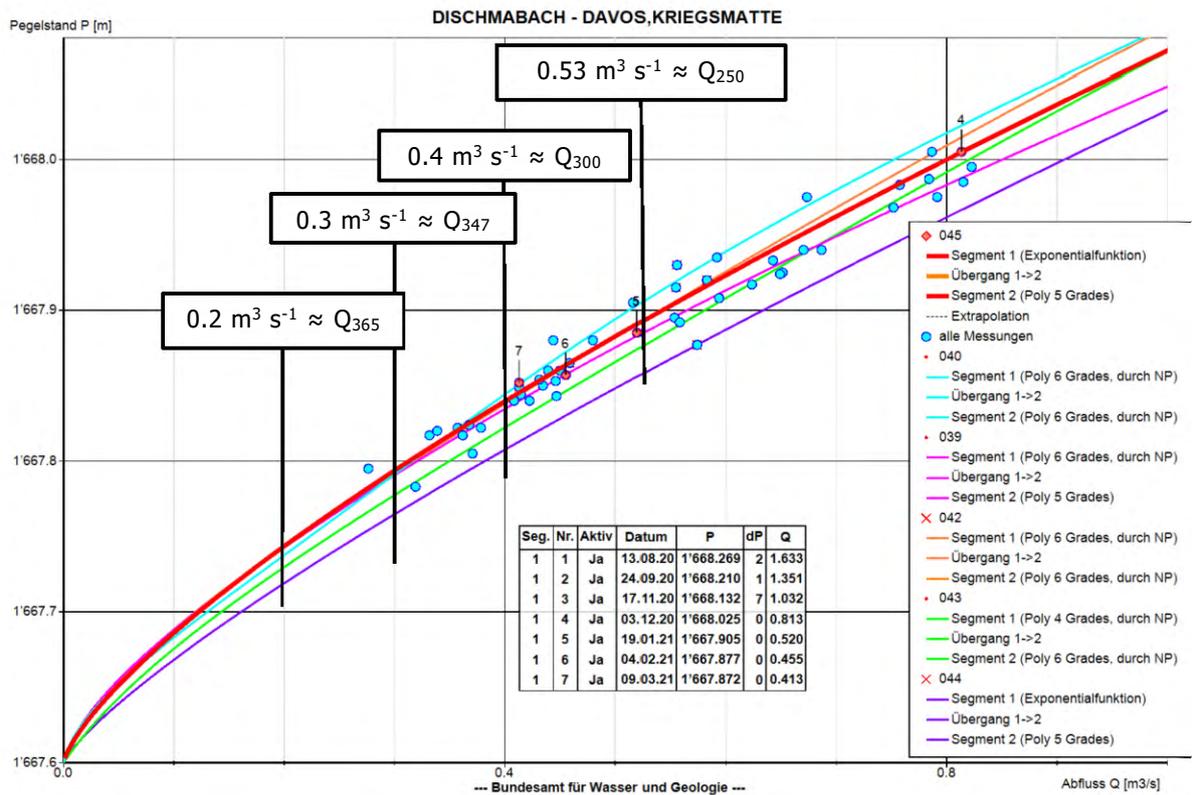


Abbildung 19: Niedrigwasser-Bereich der PQ-Beziehung Nr. 45 mit den charakteristischen Abflüssen.

3.2.5.2 P-Q-Kurven seit 1991, Verlauf Niedrigwasser

In *Abbildung 20* sind seit 1991 alle Pegelstände am Dischmabach durch eine Linie miteinander verbunden, welche mit der jeweiligen P-Q-Kurve die Abflüsse Q250, Q300, Q347 und Q365 ergeben haben. Auffällig tiefe Pegelstände für diese charakteristischen Abflüsse waren bei den Kurven 30, 34 und 44 erforderlich, auffällig hohe dagegen bei den Kurven 26, 31 und 40, bei Letzterer insbesondere für das Q250. Bei den tieferen Abflüssen Q300 bis Q365 waren auch bei den Kurven 35 und 36 relativ hohe Pegelstände nötig, um die definierten Abflüsse auszugeben. Über die Jahre gibt es unterhalb des Q347 eine Tendenz zu leicht höheren Pegelständen (*gelb gestrichelt*) und über dem Q347 eine Tendenz zu leicht sinkenden Pegelständen (*orange und blau gestrichelt*) für einen bestimmten Abfluss. Über die Zeit „bauchen“ die P-Q-Kurven also bei tiefen NW-Abflüssen mehr und bei höheren NW-Abflüssen weniger aus. Sie bewegen sich damit in Richtung der berechneten Strickler-Kurven.

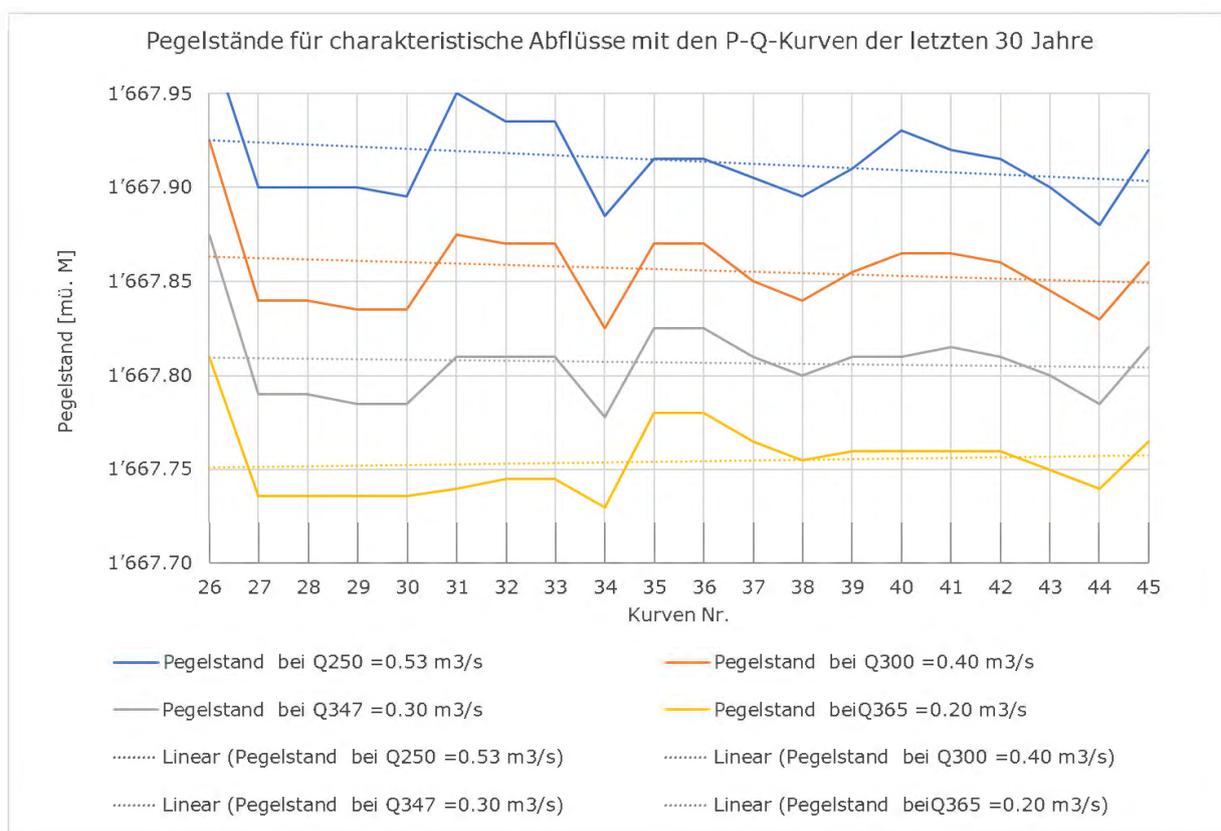


Abbildung 20: Pegelstände, welche mit den jeweiligen P-Q-Kurven zu den Abflüssen Q250, Q300, Q347 und Q365 führten.

Im folgenden Kapitel wird untersucht, wie gut die einzelnen Kurven mit Eichmessungen abgestützt sind. Von grossem Interesse ist dabei, ob sich die über das ganze Niedrigwasser auffälligen Kurven 30, 34, 38 und 44 und die in bestimmten Niedrigwasserbereichen auffälligen Kurven Nr. 31, 40, 35 und 36 von den übrigen, unauffälligen Kurven unterscheiden.

3.2.5.3 P-Q-Kurven seit 2001, Abstützung Niedrigwasser

Die Niedrigwassersegmente der Kurven wurden mit unterschiedlich vielen Eichpunkten abgestützt (*Abbildung 21*). Die Anzahl der verwendeten Messungen (blau) schwanken zwischen 1 und 18 pro Kurve, total waren es 96 Messungen. Im Bereich der Niedrigwasserrinne (hellblau) waren davon zwischen 1 und 15 pro Kurve, total waren es 55 Messungen. Im Bereich unterhalb P = 1667.805 m ü. M (\approx Q347) gab es zwischen 2001 und Oktober 2021 nur eine Messung (orange). Entsprechend unterschiedlich präsentiert sich die Abstützung der Kurven im folgenden Hauptkapitel.

Mit weniger als drei Eichmessungen sind die Segmente 1 der Kurven Nr. 30, 33, 34, 38 und 44 abgestützt. Auffallend breit abgestützt, nämlich mit mehr als 8 Eichmessungen sind die Kurven 37, 41 und 42.

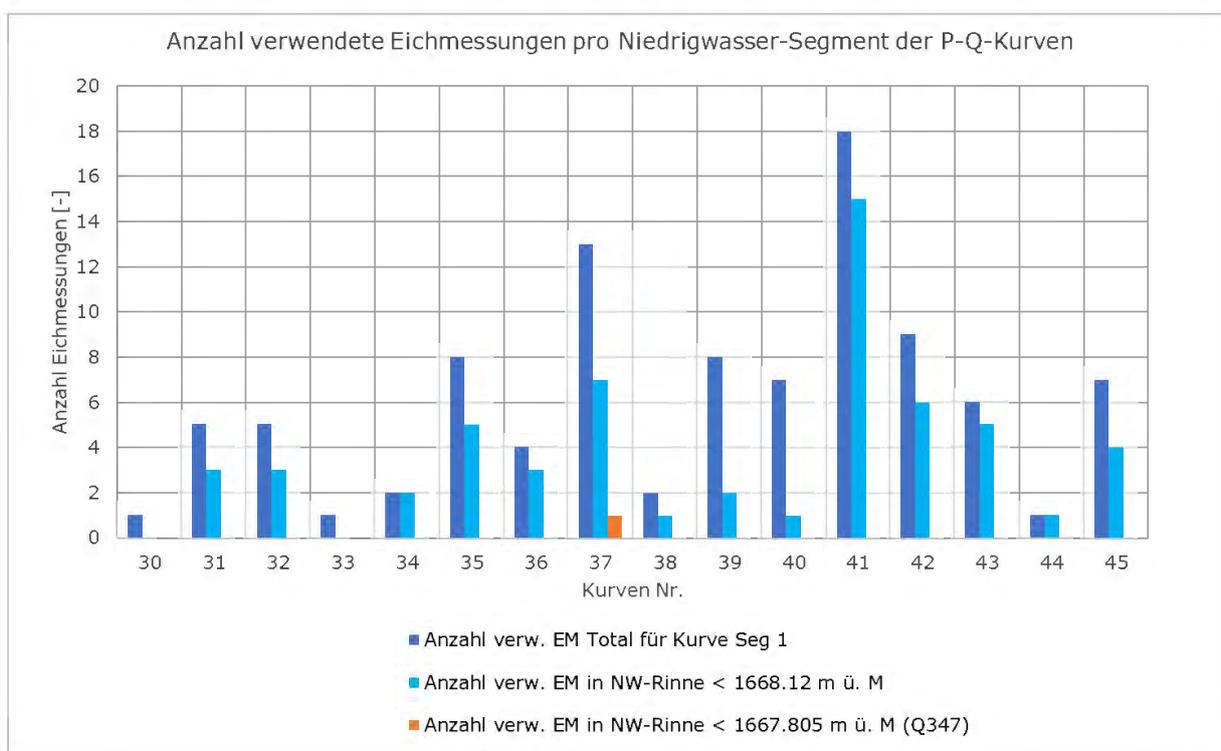


Abbildung 21: Anzahl verwendeter Eichmessungen pro Niedrigwasser-Segment der P-Q-Kurve

Neben der Anzahl haben auch die Lage und die Qualität der verwendeten Eichmessungen einen Einfluss auf die P-Q-Kurven. Die P-Q-Kurven werden meistens mit aktuellen Eichmessungen definiert, welche kurz vor und oder während dem Gültigkeitsbereich der betreffenden Kurve durchgeführt werden (*Abbildung 22*). Vor 2007, als weniger Eichmessungen durchgeführt wurden, wurden dieselben Eichmessungen manchmal für mehrere aufeinanderfolgende P-Q-Kurven verwendet. Der Pegelbereich des Niedrigwasser-Segmentes 1 wurde mit der Kurve 35 erstmals bis hinunter zum Nullpunkt von 1667.62 m ü. M geführt. Das obere Ende des Segmentes wurde mit der

Kurve 44 vom bisherigen Wert 1668.30 m ü. M auf 1668.18 m ü. M reduziert. Dieser Wert liegt 6 cm über der bordvollen Niedrigwasserrinne.

Im Bereich vom Nullpunkt 1667.62 bis 1667.80 m ü. M ($\approx Q_{347}$) stehen keine Eichmessungen zur Verfügung. Im Bereich von 1667.80 m ü. M ($\approx Q_{347}$) bis 1668.12 m ü. M (= Niedrigwasserrinne bordvoll) gibt es seit 2002 eine tendenziell zunehmende Anzahl von Eichmessungen. Die Kurven Nr. 30, 31, 33, 34, 36, 38, 39, 40 und 44 basieren auf weniger als drei Eichmessungen im Pegelbereich der Niedrigwasserrinne. Im Bereich zwischen 1668.00 m ü. M und 1668.20 m ü. M gibt es kaum Eichmessungen, darüber nimmt die Anzahl zu. Einzig für die P-Q-Kurven Nr. 34, 36 und 44 wurden keine Eichmessungen aus diesem Pegelbereich rund um die Oberkante der Niedrigwasserrinne verwendet.

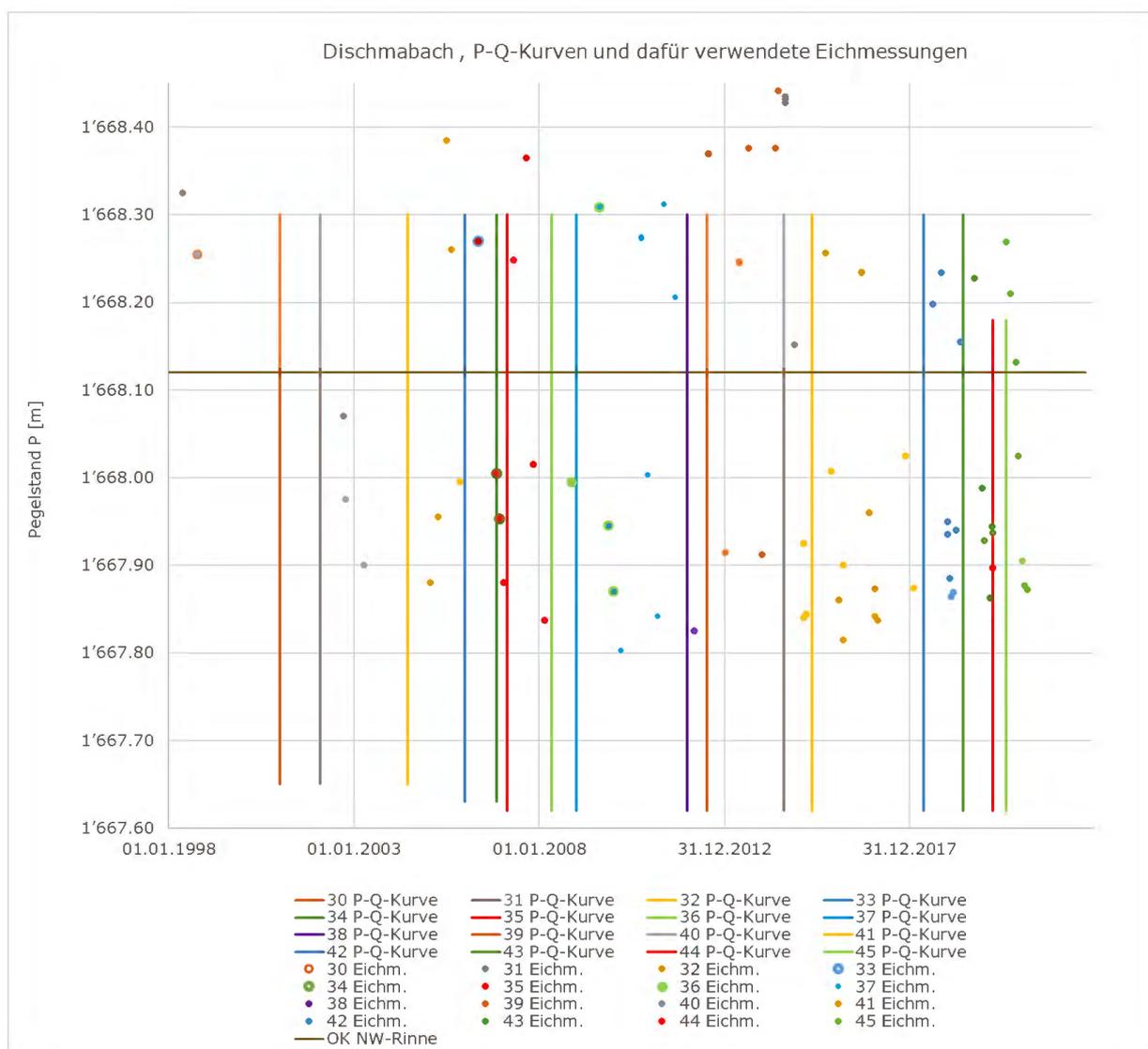


Abbildung 22: PQ-Kurven (Linien) und die dafür verwendeten Niedrigwasser-Eichmessungen (Punkte) je in derselben Farbe. Punkte mit mehreren Farben wurden für mehrere Kurven verwendet. Vor 2002 gab es keine Eichmessungen im Niedrigwasserbereich.

In den Jahren 2000 und 2001 gab es auffällig tiefe Niedrigwasserabflüsse. Die Detailansicht dieser Jahre (*Abbildung 23*) zeigt, dass die erste neue P-Q-Kurve Nr. 30 in dieser Zeit erst Anfangs 2001 eingesetzt wurde. Diese basierte auf einer Eichmessung aus dem Jahr 1998.

Von 1991 bis 1997 wurden am Dischmabach im Niedrigwasserbereich keine Eichmessungen durchgeführt.

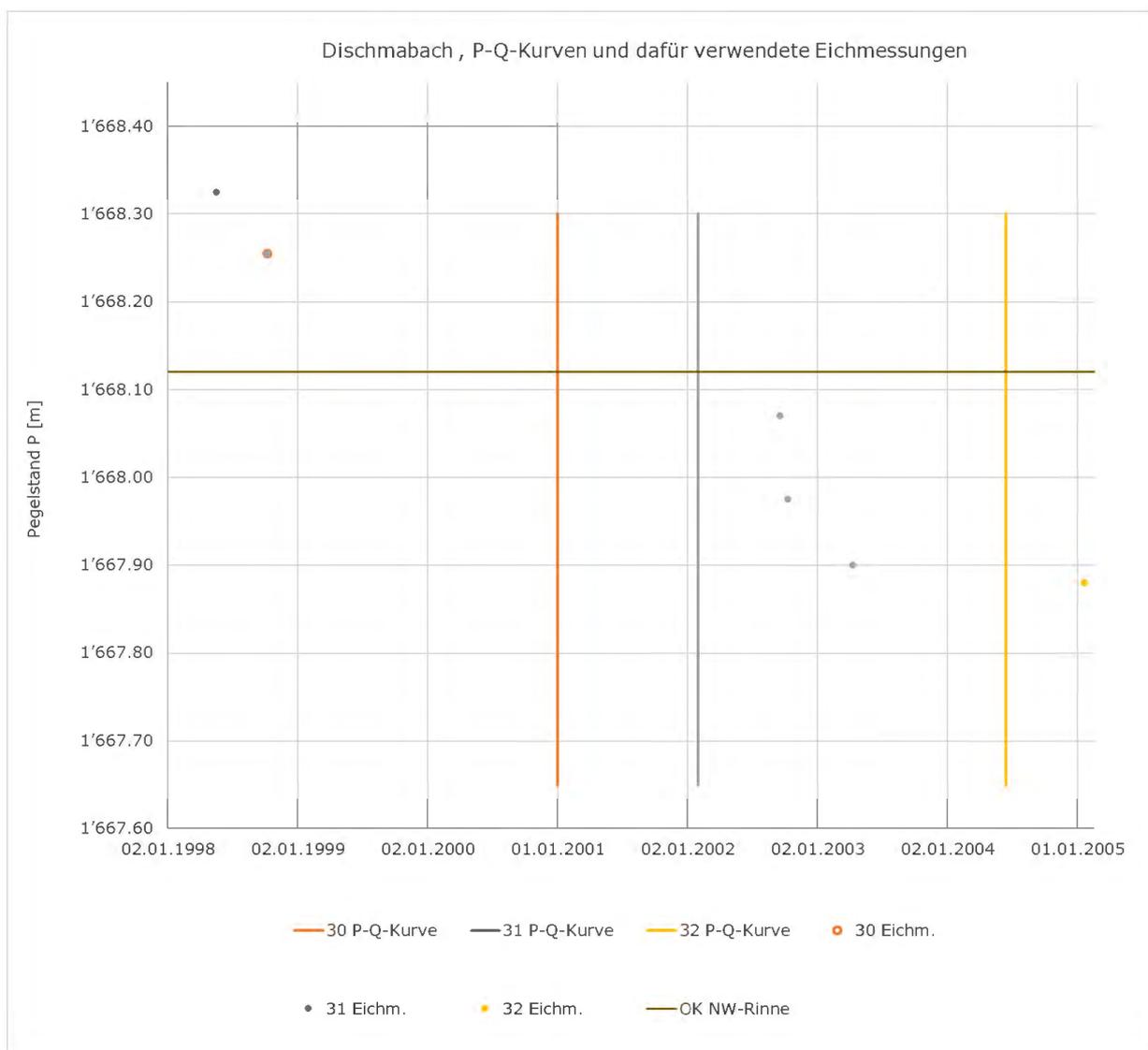


Abbildung 23: PQ-Kurven und die dafür verwendeten Niedrigwasser-Eichmessungen für die Jahre 2000 und 2001 mit auffällig tiefen Niedrigwasser-Abflüssen

3.2.5.4 P-Q-Kurven, Formen und Lagen

Die NW-Rinne erstreckt sich über die Pegelstände 1667.62 bis 1668.12 m ü. M. Darüber folgt der Übergangsbereich der schrägen Sohle, welche bei 1668.52 m ü. M auf die Seitenwände übergeht. In gewissen Zeiträumen existieren wenig Eichmessungen im Bereich der NW-Rinne. In diesen wurde zum Teil auf ältere Kurven oder Kurvensegmente zurückgegriffen oder von Eichmessungen mit höheren Pegelständen in den Niedrigwasserbereich extrapoliert. Nach Ansicht der Autoren sind Veränderungen von Eichmessungen über der NW-Rinne für das Niedrigwasser nur relevant, wenn die Veränderung auch den Niedrigwasserabfluss betreffen. Im Folgenden werden Eichmessungen dem Bereich Niedrigwasser zugeordnet, wenn sie im Abflussbereich der Niedrigwasser-rinne liegen.

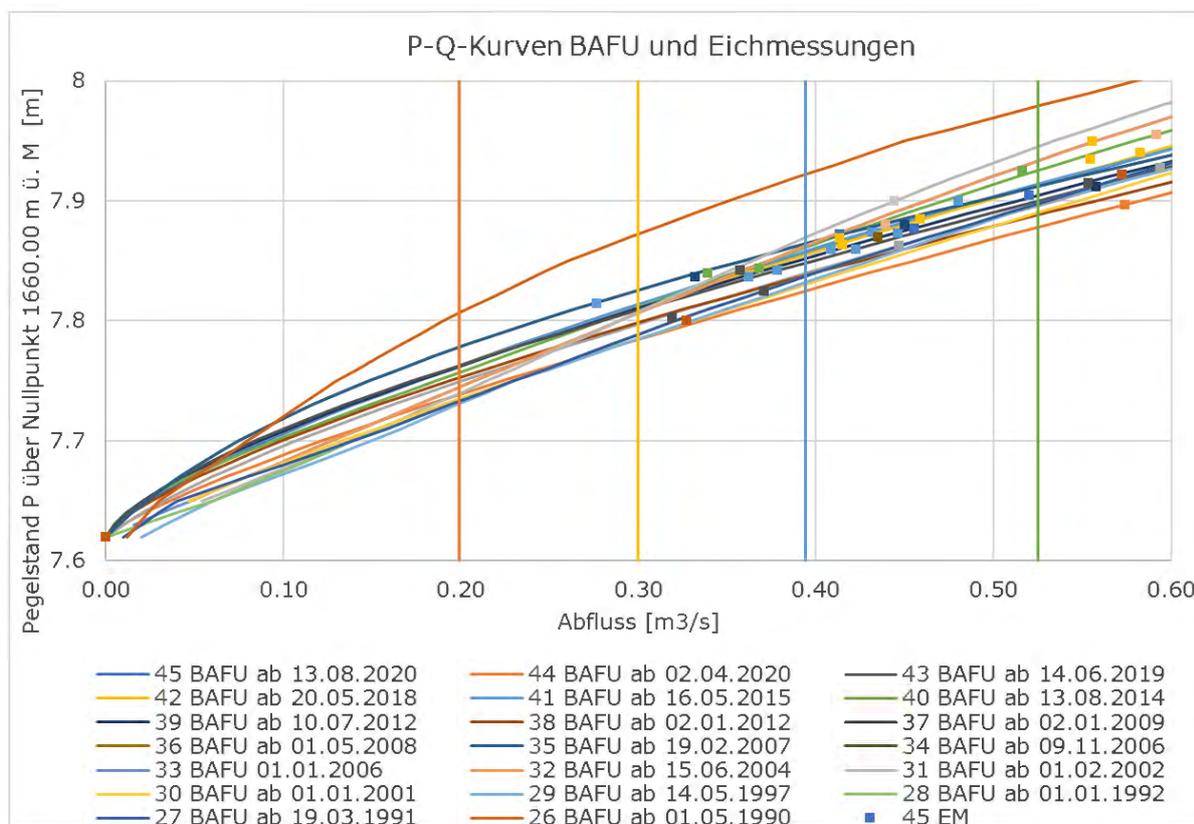


Abbildung 24: Über den Untersuchungszeitraum verwendete P-Q-Beziehungen und ihre Eichmessungen im Niedrigwasserbereich

Die Entwicklung der P-Q-Kurven über die Zeit ist im Anhang (Kapitel 10.2.2) ersichtlich. In den Jahren 2000 und 2001 (und 2002), in denen die Dauerkurven (vgl. Kapitel 3.2.6), auffällig tief lagen, galten die Kurven 29 BAFU und 30 BAFU. Diese beiden Kurven und die Eichmessungen aus dieser Zeit liegen sehr nahe bei den vorausgehenden Kurven 28 BAFU und 27 BAFU. Es wird deshalb vermutet, dass nicht eine Abweichung in der P-Q-Beziehung, sondern eine Abweichung in der Pegelmessung zu diesen Auffälligkeiten führte.

Bildet man eine Hüllkurve um alle P-Q-Kurven von BAFU (Abbildung 25, blaue Linien) und denjenigen, welche mit Strickler generiert wurden (orange Linien) ist ersichtlich, dass Letztere die Eichmessungen (grüne Quadrate) klarer und enger repräsentieren als die bisher von BAFU verwendeten P-Q-Kurven.

Die neu berechneten Kurven passen sehr gut in die Eichmessungen und lassen sich mit wenigen Parametern einfach bestimmen. Sie repräsentieren die Hydraulik besser als die Polynomfunktionen. Die an der Oberkante der NW-Rinne entstehenden Knicke (hier nicht sichtbar) betrachten wir als reale Abbildung des hier ändernden durchflossenen Querschnittes. Eine mit einem Spline abgerundete PQ-Beziehung würde nicht dem realen Verlauf der PQ-Kurve entsprechen, weil dort die Fläche des durchflossenen Querschnitts abrupt zunimmt.

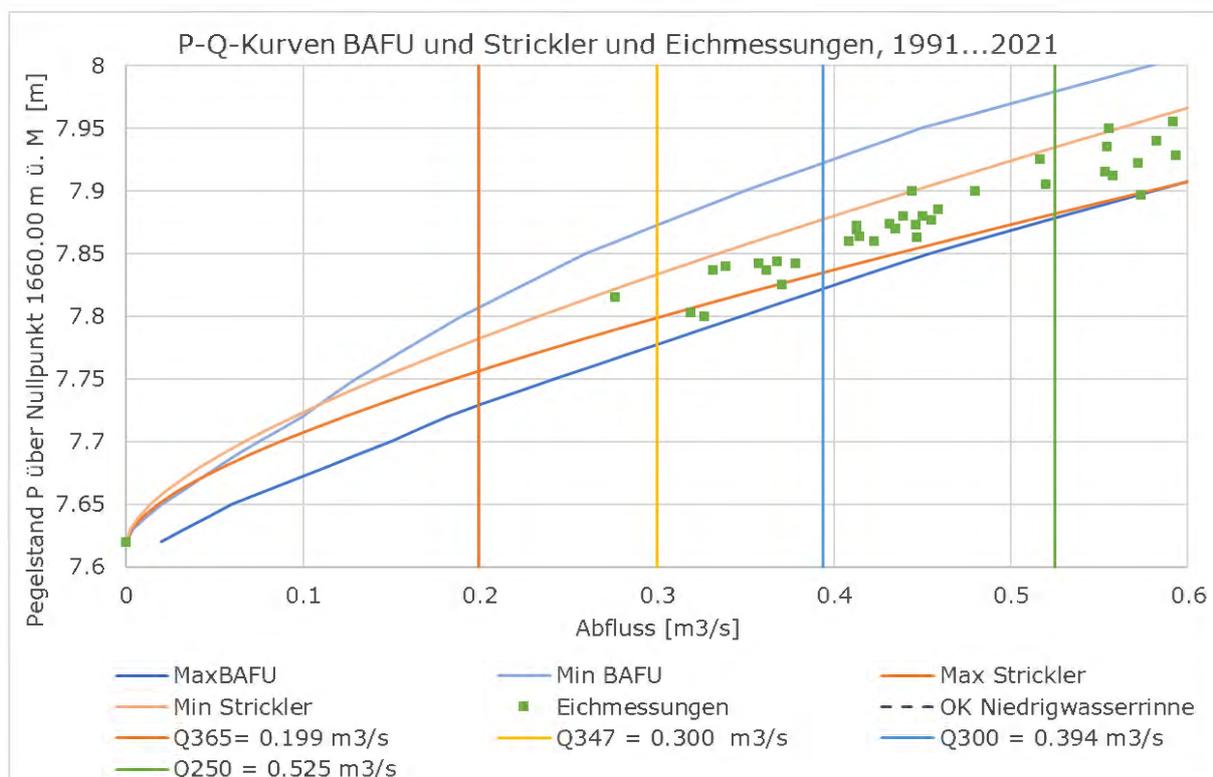


Abbildung 25: Dischmabach Niedrigwasser, Hüllkurven gebildet aus den Minimal- und Maximalwerten der P-Q-Beziehungen nach BAFU und Strickler mit den Eichmessungen

3.2.6 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Dauerkurve aus den neu berechneten Abflüssen liegt im Bereich zwischen Q310 bis Q347 maximal um etwa 20 l s⁻¹ tiefer, zwischen Q360 bis Q365 liegt sie um etwa den gleichen Wert höher als die Dauerkurve BAFU (Abbildung 26). Auf den ersten Blick scheinen die Differenzen klein.

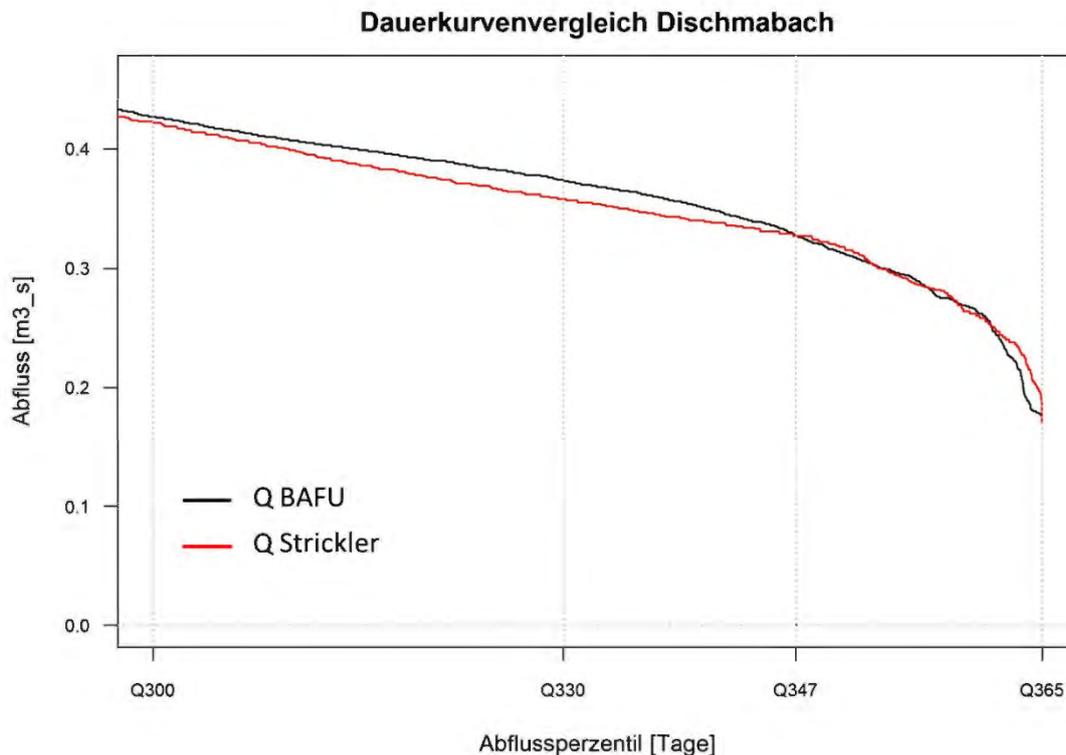


Abbildung 26: Vergleich der Dauerkurve (Q BAFU) mit Dauerkurve (Q Strickler) für den Dischmabach.

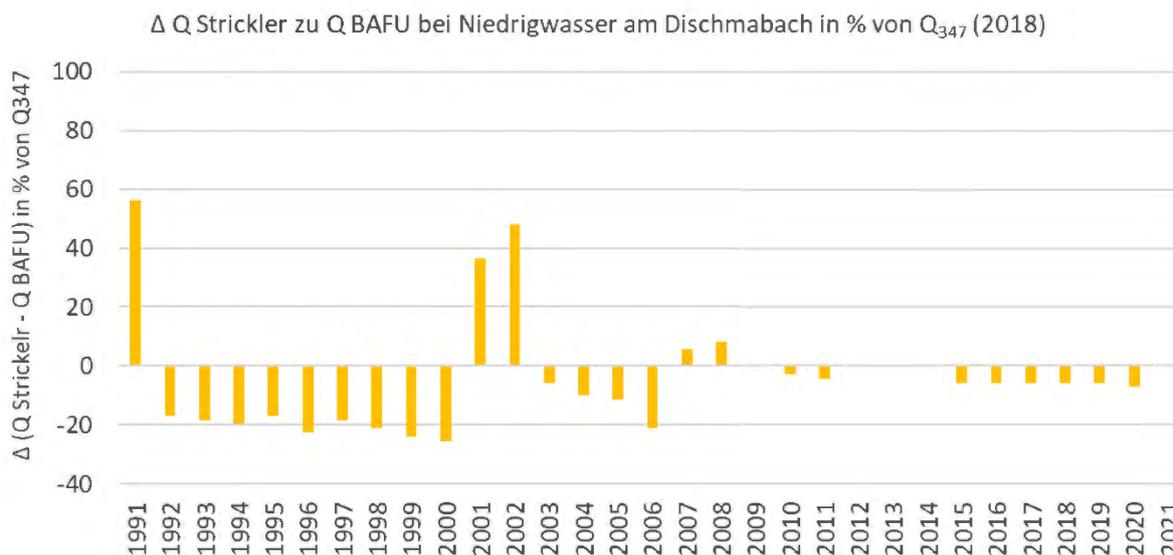


Abbildung 27: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q347 (2018) am Pegel des Dischmabaches.

In der Periode zwischen 1991 und 2007 kommen aber Jahre mit erheblichen Differenzen zwischen den BAFU- und Strickler- Ganglinien vor (*Abbildung 27*). In den Jahren 1991, 2001 und 2002 betragen sie +40 bis +60%, in den Jahren 1992 bis 2000 und 2006 etwa -20% des Q347. Ab 2007 liegen die Differenzen tiefer oder gleich 8%.

Die positiven und negativen Abweichen der einzelnen Jahre kompensieren sich so, dass die Dauerkurve Strickler und Dauerkurve BAFU sehr nahe beieinander liegen, wodurch der Dauerkurvenvergleich ein besseres Ergebnis vortäuscht, als es sich beim Betrachten der einzelnen Jahre präsentiert.

In Abbildung 28 bis Abbildung 35 sind die Ganglinien von Q Strickler und Q BAFU von ausgewählten Jahren mit den Temperatur- und Niederschlagsverläufen dargestellt. Die unterschiedlichen Verläufe der Ganglinien, wie z.B. die Rezession im Winter 1996 (*Abbildung 31*) wird durch unterschiedliche Verläufe zwischen den PQ-Kurven Strickler und BAFU verursacht. Sie beeinflussen die Rezessionskurve. Etwas schwächer ist ein solcher Unterschied auch im Winter 1999 ersichtlich (*Abbildung 32*).

Der Einbruch des Abflusses Ende Februar 1999 (*Abbildung 32*) stellt ein interessantes Phänomen dar. Solche Einbrüche, die über eine oder gar zwei Wochen andauern, beeinflussen das Q347 wesentlich. Es stellt sich die Frage, welche Prozesse diese verursachen, ob sie real sind und wenn ja, ob sie ebenfalls mit Vereisungen entlang des Bachlaufes zusammenhängen oder eher durch das Einfrieren von Quellen verursacht werden. Von Anfang Januar bis Ende Februar 2003 steigt der Abfluss um etwa 100 l s^{-1} an, obwohl die Lufttemperatur meist unter 0 °C liegt (*Abbildung 34*). Dieses Phänomen zeigt sich unabhängig von den PQ-Beziehungen. Es dürfte sich um ein Artefakt handeln. In Absprache mit den Auftragnehmenden wird Andreas Kohler den Pegel dieser Periode korrigieren.

Im Jahr 2006 liegt der Strickler-Abfluss im März etwa 50 l s^{-1} tiefer als der BAFU-Abfluss (*Abbildung 35*). Auch der Verlauf der Rezession des Strickler-Abflusses unterscheidet sich erheblich von dem des BAFU Abflusses. Ähnlich sieht es im Jahr 2007 aus (*Abbildung im Anhang*). Ab 2008 unterscheiden sich BAFU- und Strickler-Abflüsse nicht mehr wesentlich. Der Grund dafür dürfte sein, dass ab dann wesentlich mehr Eichmessungen im Winter durchgeführt wurden, auch mehrere pro Winter, wodurch der Verlauf der PQ-Beziehungen besser bestimmt werden konnte. Sobald mehrere Eichmessungen pro Winter vorkommen, unterscheiden sich die BAFU- und Strickler-PQ-Kurven nicht mehr wesentlich, denn die PQ-Kurven werden dann im Wesentlichen durch die Eichmessungen bestimmt.

Zwischen 1991 und 2002 wurden am Pegel des Dischmabaches im Niedrigwasserbereich keine Eichmessungen durchgeführt. In den Jahren 2000 bis 2002 sind auch die mit Strickler bestimmten PQ-Kurven mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Es lag ein grösseres Problem am Pegel vor, das die Pegelmessungen stark gestört hat.

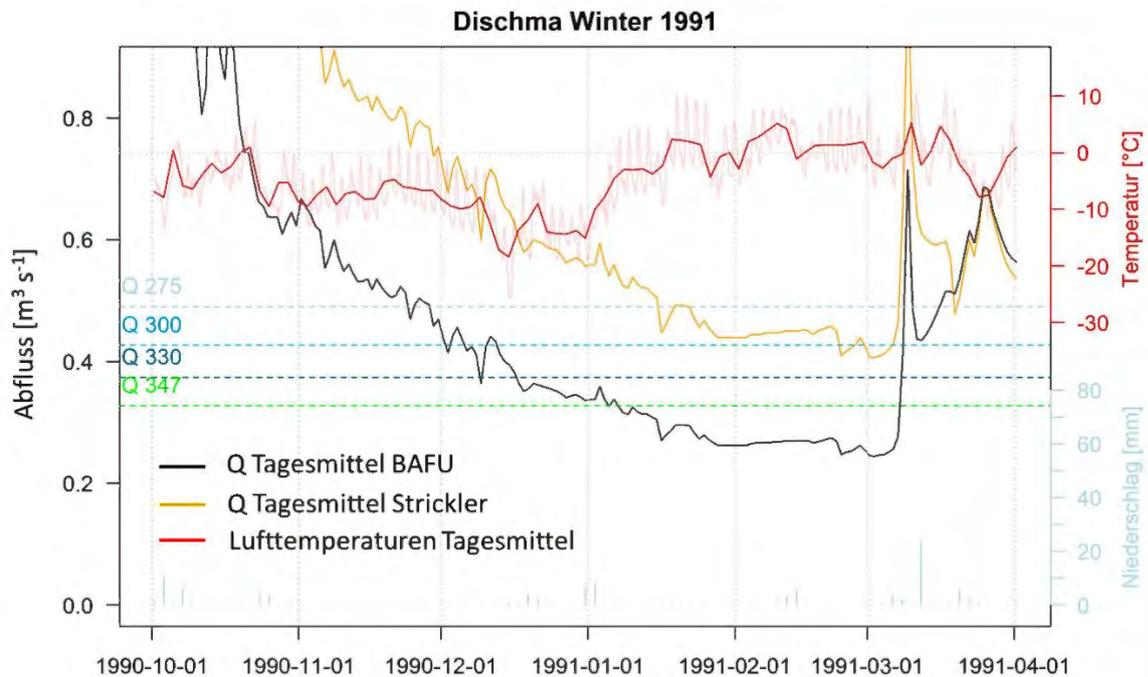


Abbildung 28: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 1991.

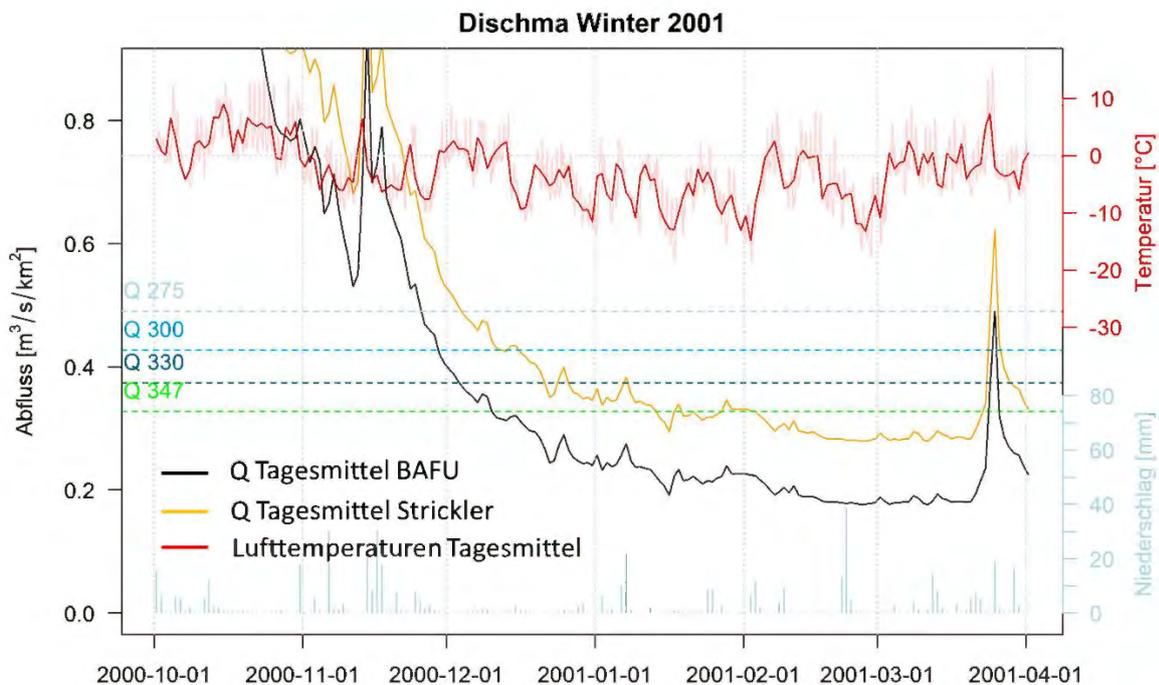


Abbildung 29: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach

im Winter 2001.

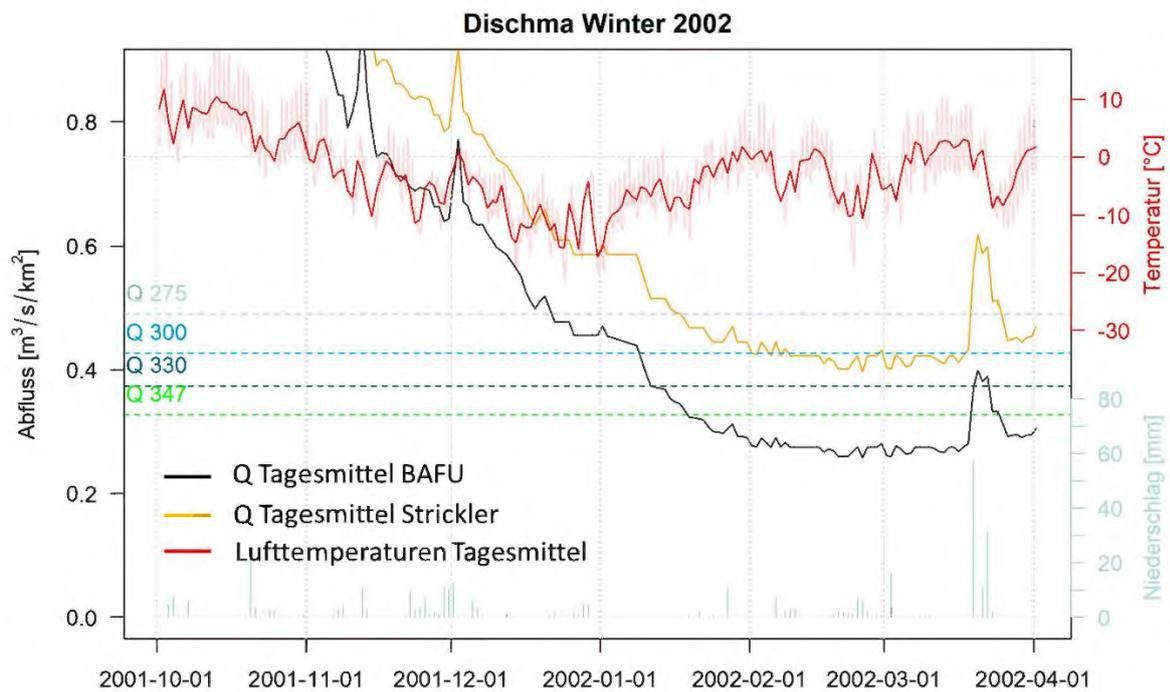


Abbildung 30: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 2002.

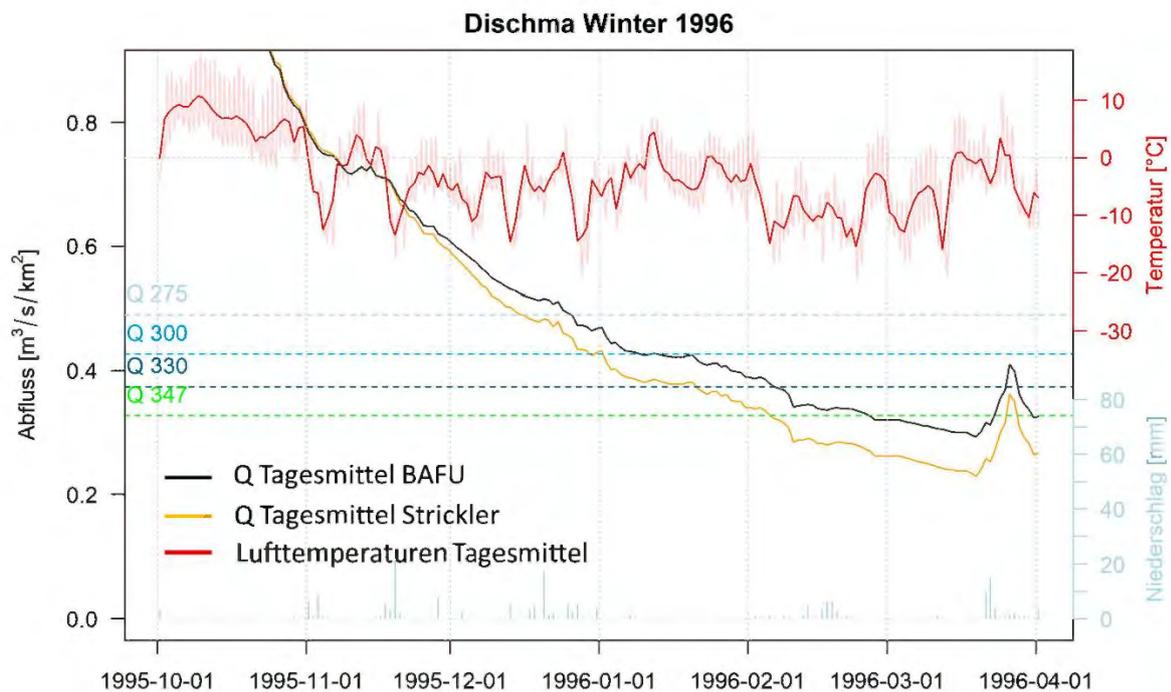


Abbildung 31: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 1996.

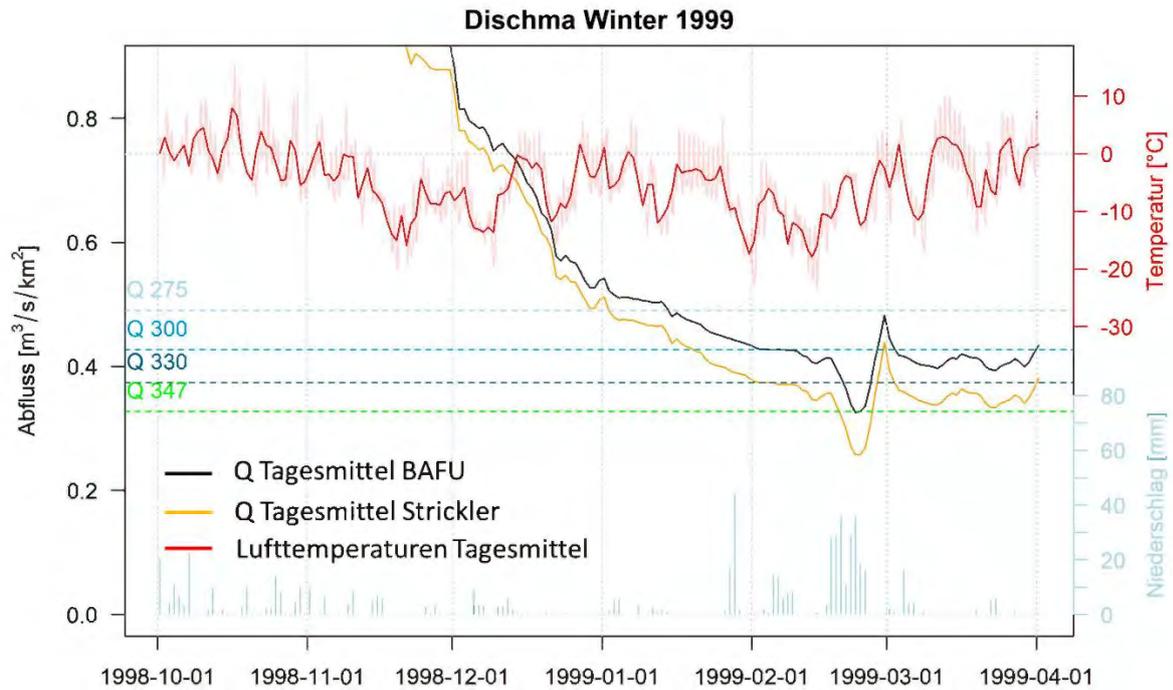


Abbildung 32: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 1999.

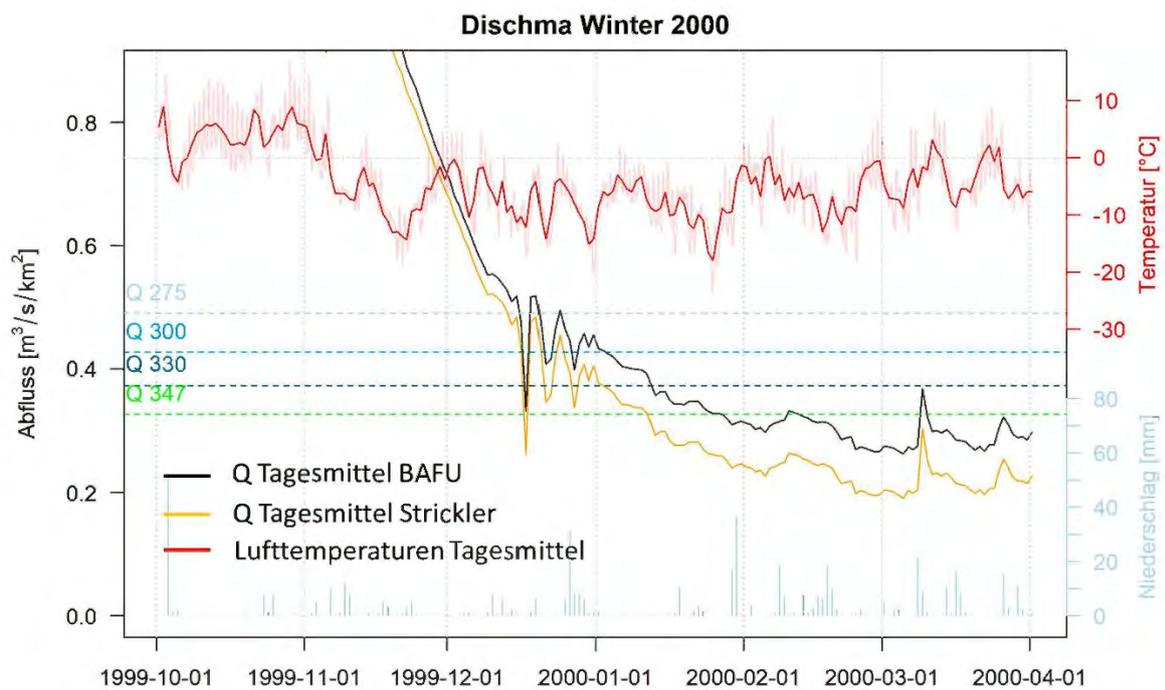


Abbildung 33: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 2000.

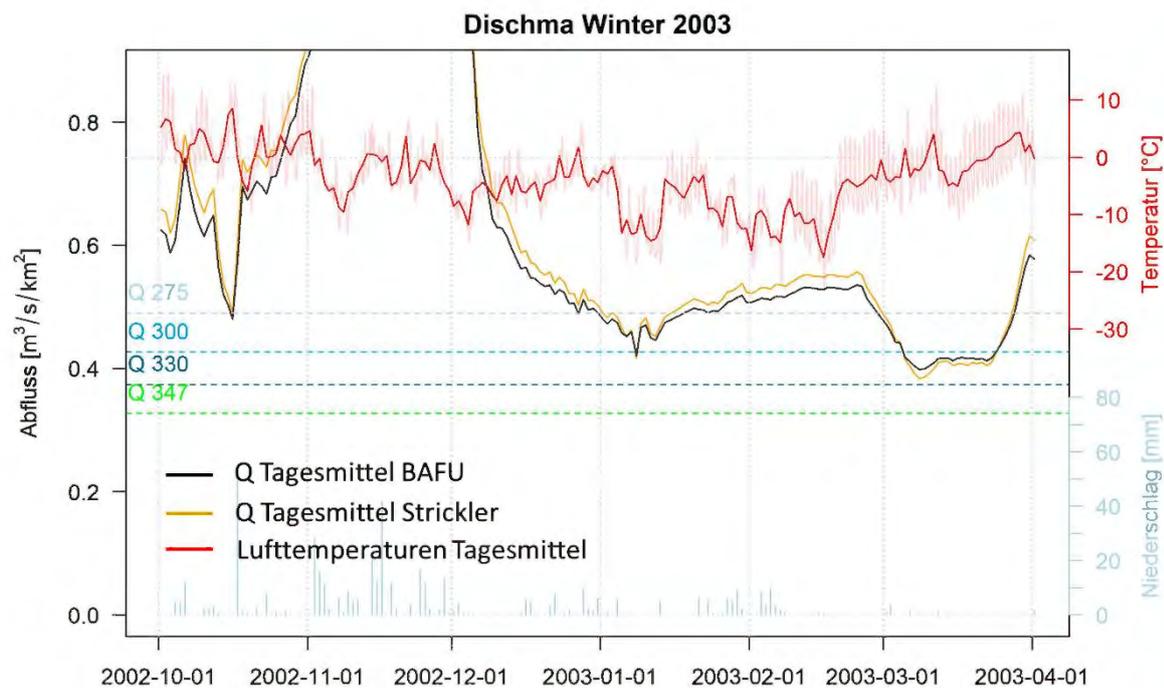


Abbildung 34: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 2003.

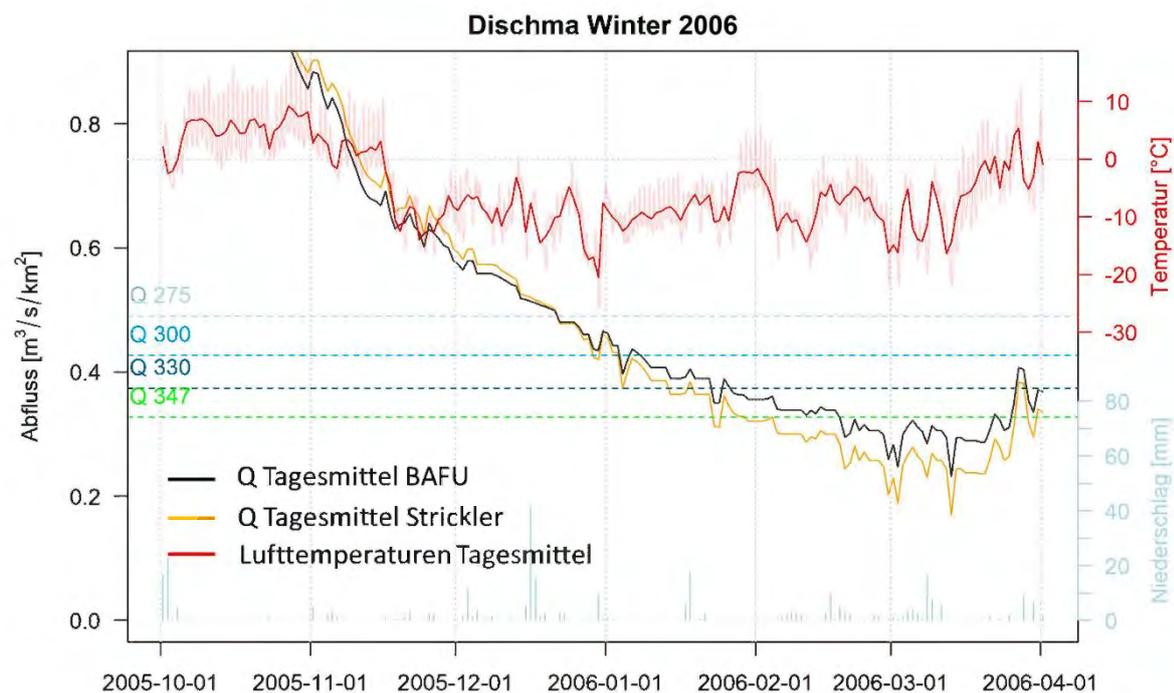


Abbildung 35: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Dischmabach im Winter 2006.

3.2.7 Schlussfolgerungen

3.2.7.1 Messstation

Die Messrinne der Station Dischmabach ist eigentlich gut geeignet für Niedrigwasser. Beim Q347 beträgt die Wassertiefe in der Rinne ca. 0.18 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von nur 7.3 % des Q347.

Zwischen den Pegelmessungen im Kanal und im Schacht besteht häufig ein Gefälle (Vergleiche Kapitel 4.4) Diese Differenz kann nur knapp zur Hälfte durch das bestehende Sohlgefälle erklärt werden. Es wurden Situationen beobachtet, in denen Sedimente, Moos und Eis das Schlitzblech belegten, und der Pegelstand im Schacht deutlich unter demjenigen der Niedrigwasserrinne lag.

Die Wasserstandsmessung einerseits mit Tauchsonde und andererseits mit Radar weist je ihre Vor- und Nachteile auf (Vergleiche Kapitel 7.1). Die in den letzten Jahren an der Station realisierte Kombination beider Messmethoden hilft, mögliche Artefakte zu identifizieren und zu korrigieren.

3.2.7.2 Eichmessungen

Während des Beobachtungszeitraumes gab es bei Abflüssen innerhalb der Niedrigwasserrinne 55 Eichmessungen, im Zeitraum zwischen 1995 und 2002 fehlten solche gänzlich. Unterhalb des Q347 liegt nur eine Eichmessung vor. Weil die Niedrigwasser-Rinne fix ist, wurden die Eichmessungen in einem engen Schwankungsbereich erwartet. Die gesamte Messperiode lässt sich in Perioden von einem bis zu mehreren Jahren einteilen, in denen die Pegelhöhen der Eichmessungen bei vergleichbarem Abfluss nur geringe Schwankungen zur Mittellinie aufzeigen. Zwischen diesen Perioden können die Pegelhöhen stark schwanken. Es liess sich kein zeitlicher Zusammenhang zu Hochwässern mit möglichem Geschiebetrieb herstellen. Die Umstellung der Eichmessungen auf die Salzverdünnungsmethode wirkte sich tendenziell positiv auf den Schwankungsbereich der Eichmessungen aus. Vor allem bei Abflüssen kleiner Q260 hat mit Verwendung der Salzverdünnungsmethode der Schwankungsbereich der Pegelhöhen der Eichmessungen um die Mittellinie bei vergleichbarem Abfluss stark abgenommen.

3.2.7.3 P-Q-Kurven

Weil im Niedrigwasser zeitweise wenige oder gar keine Eichmessungen durchgeführt wurden, sind die entsprechenden P-Q-Kurven oft schlecht abgestützt. Vor 2007 wurden dieselben Eichmessungen manchmal für mehrere aufeinanderfolgende P-Q-Kurven verwendet. Die Lagen der P-Q-Kurven unterhalb des Q347 sind fast ausschliesslich durch Eichmessungen darüber und durch den Nullpunkt bestimmt. Die heutigen P-Q-Kurven bestehen mehrheitlich aus mehreren Polynomen, welche durch Spline-Funktionen verbunden sind. Wenn zur kompletten Definition des jeweiligen

Niedrigwasser-Polynoms Niedrigwasser-Eichmessungen fehlten, wurden Eichmessungen oberhalb der Niedrigwasserrinne verwendet.

Bei der Analyse der P-Q-Kurven (*Anhang, 10.2.2*) ist aufgefallen,

- dass die Kurven Nr. 30, 31, 33, 34, 36, 38, 39, 40 und 44 auf weniger als drei Eichmessungen im Pegelbereich der Niedrigwasserrinne basieren.
- dass die Kurven 30, 34, 38 und 44 im Vergleich zu einer mittleren PQ-Kurve auffällig tiefe, die Kurven 31, 40, 35 und 36 auffällig hohe Pegelstände aufweisen.
- dass die Kurve 26 extrem tiefe Niedrigwasserabflüsse generiert. Die Eichmessungen während ihrer Gültigkeit wurden dabei ignoriert. Der Grund dafür ist uns unbekannt. Interessanterweise zeigt auch der Abfluss der Landwasser zu dieser Zeit einen sehr tiefen Abfluss. Wurde die PQ-Beziehung des Dischmabaches evt. basierend auf den Abflüssen der Landwasser bestimmt?
- dass die Kurven 38 und 45 im Niedrigwasserbereich aus dem Rahmen ihrer Vor- und Folgekurven fallen und gleichzeitig schlecht abgestützt sind.

3.2.8 Empfehlungen

Messstation

Wir empfehlen, die Station während eines Winters ohne das Lochblech vor dem Einlauf zum Messschacht zu betreiben. Die Auswertung dieses Winters kann aufzeigen, welchen Anteil der bisherigen Pegeldifferenzen auf das Lochblech zurückzuführen sind, und ob ein Winterbetrieb ohne dieses Blech vorteilhaft ist. Auf Grund der lange anhaltenden Pegeldifferenzen zwischen Rinne und Schacht empfehlen wir zudem zu überprüfen, ob der Messschachtes dicht ist.

Eichmessungen

Wir empfehlen, Eichmessungen bei Abflüssen unter dem Q347 durchzuführen.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, die Kurven 26, 38 und 45 im Niedrigwasserbereich nicht zu verwenden. Die Niedrigwassersegmente der verwendeten P-Q-Kurven sollten konsequent auf die Geometrie der Rinne ausgerichtet werden.

Weitere Informationen zu passenden P-Q-Kurven werden die hydrodynamischen Simulationen liefern. Insbesondere sollten dann auch belastbare Aussagen gemacht werden können, wie stark die Niedrigwasser-P-Q-Kurven durch Depositionen im Vorbecken beeinflusst werden oder ob diese Segmente der Kurven über lange Jahre eher konstant bleiben. Die Erfahrungen in den letzten

Jahren, in denen auch im Winter bei Niedrigwasser mehrere Eichmessungen pro Winter durchgeführt wurden, zeigt, dass die PQ-Beziehung jeden Winter wechseln kann, und zwar um Pegelhöhen von mehr als zwei Zentimetern ($= 50 \text{ l s}^{-1}$). Das zeigt, dass in Jahren, wo Eichmessungen fehlen, grössere Unsicherheiten vorliegen können. Davon betroffen sind u.a. sämtliche PQ-Beziehungen zwischen 1991 und 2002.

Korrektur der Messreihe zwischen 1991 bis 2002

Mit einer Empfehlung für den Umgang mit den Jahren 1991 bis 2002 in einer längerfristigen Perspektive, möchten die Auftragnehmenden die Ergebnisse der 3D-Modellierung abwarten.

In den Jahren 2000 bis 2002 sind die Pegelwerte offensichtlich stark fehlerhaft (vgl. Abbildung 11). Um eine kurzfristige Verwendung der Pegeldaten zu ermöglichen, empfehlen die Auftragnehmenden, die Pegelhöhen des Dischmabaches durch eine Übertragung der Abflussperzentile der in der Nähe liegenden Station der Landwasser zu korrigieren. Die genaue Vorgehensweise wird mit Andreas Kohler diskutiert.

3.3 Chamuerabach - La Punt Chamues-ch

3.3.1 Morphologie und Hydraulik

Der Chamuerabach durchfließt ca. 750 m oberhalb der Messstation eine Wasserfassung (*Abbildung 36, Beginn blaue Linie mit Querstrichen*). Anschliessend beträgt das Fließgefälle zur Station ca. 3.3%. Etwa 150 m oberhalb der Station wird das gefasste Wasser in den Fluss zurückgegeben (Ende blaue Linie mit Querstrichen).

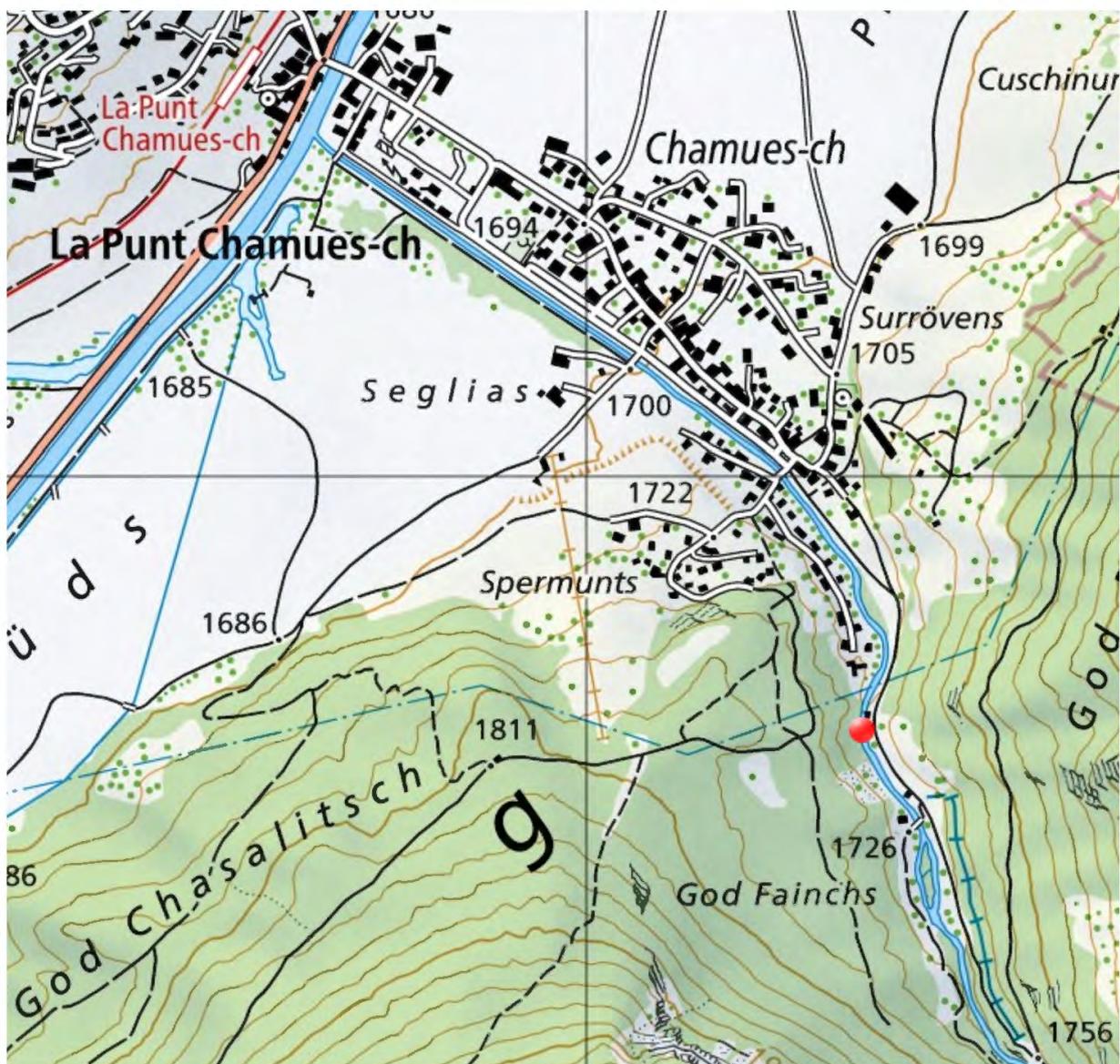


Abbildung 36: Messstation Chamuerabach (roter Punkt), Fließrichtung von unten nach oben (<https://map.geo.admin.ch/> abgerufen Oktober 2021)

3.3.2 Messstation

Bezeichnung 2263 Chamuerabach - La Punt-Chamues-ch

Kennzahlen der Station (BAFU, 2021):

Stationshöhe	1'720 m ü. M
Grösse des Einzugsgebietes (EZG)	73.4 km ²
Mittlere Höhe des EZG	2'548 m ü. M
Vergletscherung	0.1 %
Koordinaten LV95	2'791'429 / 1'160'625



Abbildung 37: Messstation BAFU 2263 Chamuerabach - La Punt Chamues-ch (BAFU 2021)

Tabelle 3: Chamuerabach, Tageswerte von 1955-2017 (Hydromaps 2021):

	Bereich [m ³ s ⁻¹]	Charakteristische Werte
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1964		NM7Q = 0.35 m ³ s ⁻¹
Jeden Tag erreichter Abfluss		Q ₃₆₅ = 0.32 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 5%		Q ₃₄₇ = 0.58 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 8.2 %		Q ₃₀₀ = 0.70 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 31.5%		Q ₂₅₀ = 0.83 m ³ s ⁻¹
Mittlere 90% der Abflüsse	0.6 ... 6.9	Median Abfluss 1955...2017: 1.34 m ³ s ⁻¹
Höchste 5% der Abflüsse	6.9 ... 36.4	

Beim Q₃₄₇ = 0.58 m³ s⁻¹ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von ca. 0.025 m³ s⁻¹.

Der Querschnitt durch die Messrinne (

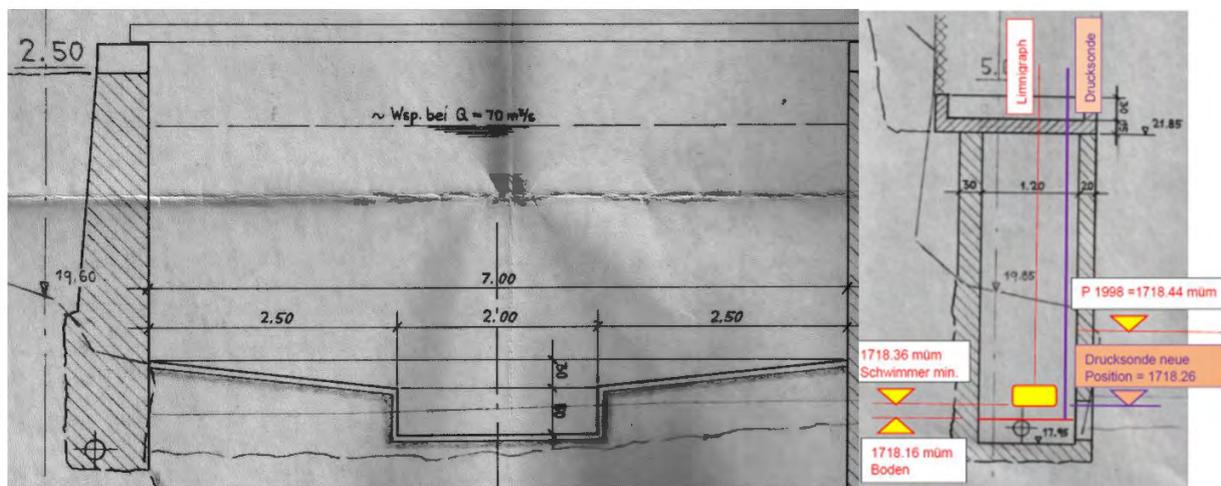


Abbildung 38) ist vergleichbar mit der Station Goneri. Eine 2 m breite Niedrigwasserrinne befindet sich in der Mitte zweier Schrägen, welche die Sohle der total 7 m breiten Mittel- und Hochwasserrinne bilden.

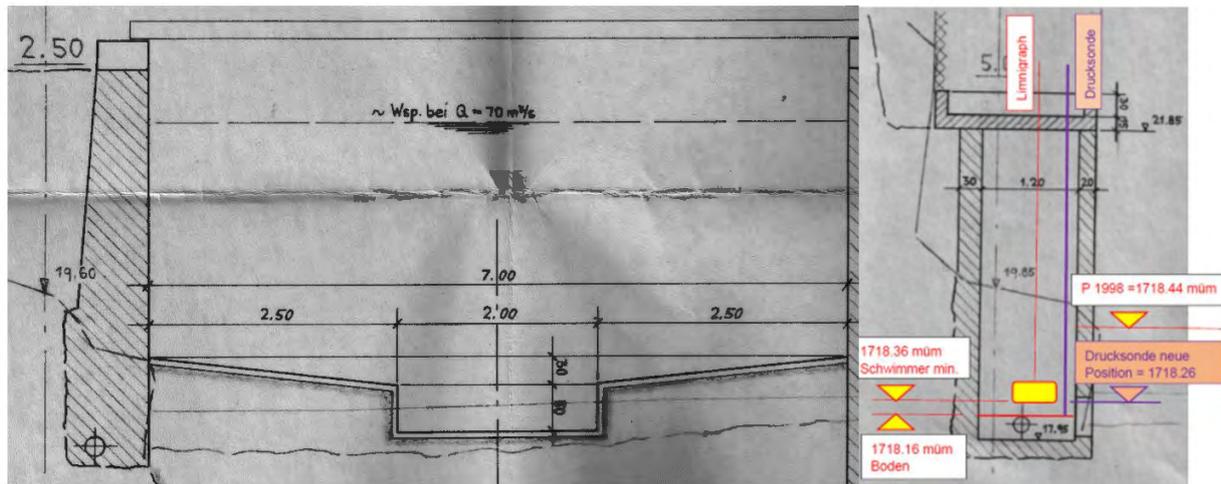


Abbildung 38: Station Chamuerabach, Bauplan, links Querschnitt und rechts Messschacht.

Die Länge des Bauwerks beträgt 8 m, darin integriert ist der Überfall und das Vorbecken mit dem Messschacht in dessen Mitte (Abbildung 39). Der 0.5 * 0.5 m grosse Einlauf in den Messschacht ist mit zwei Lochblechen abgedeckt. Eines liegt am äusseren Rand der Schachtmauer und eines am inneren Rand. Die etwa 30 Löcher haben einen Durchmesser von ca. 3cm (A. Crose). Die Oberkante des Blechs ist auch bei Niedrigwasserabflüssen komplett unterhalb des Wasserspiegels. Eine wasserbauliche Besonderheit stellt die 2.5 m lange Messrinne mit einem Gegengefälle von 3 % dar. Weil der Wasserstand im Vorbecken und nicht in der Messrinne gemessen wird, entspricht die Beziehung zwischen Abfluss und Wasserstand bei Niedrigwasser eher einem Überfall über die Austrittskante (markiert mit 18.25) als einer klassischen Messrinne. Bei grösseren Abflüssen dürfte dann die Messrinne mit ihrer Oberfläche und ihrem Gegengefälle abflussbestimmend sein.

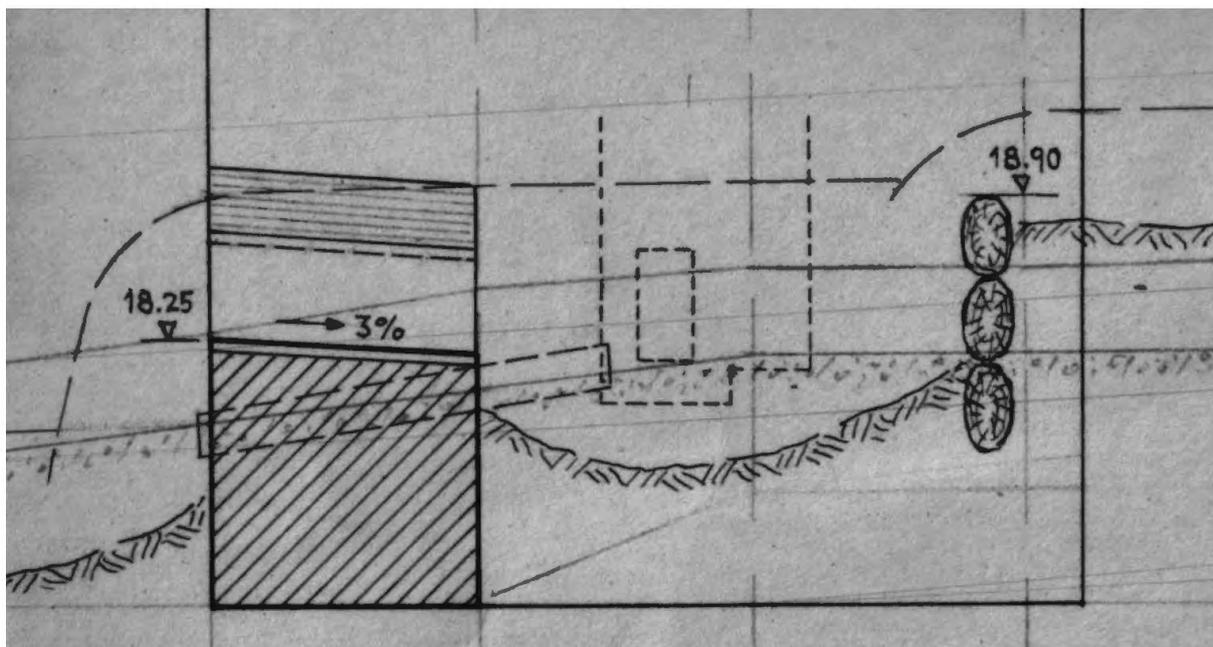


Abbildung 39: Station Chamuerabach, Bauplan Längsschnitt

Koten aus den Bauplänen:

1721.85 m ü. M	Oberkante Messrinne und Bauwerk
1719.05 m ü. M	Unterkante der Seitenwände am Ende des Bauwerkes
1718.75 m ü. M	Oberkante der NW-Rinne am Ende des Bauwerkes
1718.25 m ü. M	Sohle NW-Rinne am Ende des Bauwerkes, Abfluss = 0 m ³ /s
1710.00 m ü. M	Pegelnulppunkt seit 1.1.1974 (J. Hammer 2022)

Seit 1991 sind folgende Ereignisse und Einflüsse bekannt, welche sich möglicherweise auf den Bezug zwischen Pegelstand P und Abfluss Q auswirkten (Croese 2022):

- Sand und Kies verstopft regelmässig den Einlauf zum Messschacht und dringt in diesen ein. Becken, Einlauf und Schacht müssen durch den Messstellenbeobachter regelmässig von Geschiebe befreit werden (ca. alle 2 Jahre mit dem Bagger).
- Der Schacht kann im Winter einfrieren, der beheizte Schwimmer misst dann aber weiter. Gemäss A. Croese gefriert das Wasser aber nur oberflächlich.
- Die NW-Rinne kann von der Seite her zufrieren
- Im Winter kommt es zu Pegelspitzen.

- Am 27.04.2017 wurde das Rollout der Station durchgeführt, die Logger wurden durch Automatisierungsgeräte mit redundanten VPN- Verbindungen ersetzt.
- 2020 wurde das Vorbecken, das mit dem Messschacht verbunden ist, komplett mit Geschiebe gefüllt. Darauf wurde der Einlauf zum Messschacht von Hand wieder freigelegt und das Becken später mit einem Bagger geleert.
- Am 23.08.2021 wurde die Drucksonde im Schacht tiefer montiert
- 2022 wird ein neues Spülsystem eingebaut

3.3.3 Messtechnik

Der Wasserstand wurde zu Beginn des Untersuchungszeitraums mit einem Schwimmer im Messschacht gemessen. Mit dem Rollout der neuen Station wurde am 27.4.2017 zusätzlich eine Tauchsonde (Messbereich: 0...3 m Wassersäule) im Messschacht ergänzt.

Radarmessungen von der Brücke wurden ausschliesslich zu Testzwecken ab 10.07.2019 durchgeführt. Stehende Wellen in der Messrinne verfälschten diese Wasserstandsmessung.

Am 23.08.2021 wurde die Drucksonde im Schacht tiefer montiert.

Die Pegelkontrollen werden im Messschacht mit der Pegellatte und einem Abstich durchgeführt.

3.3.4 Eichmessungen

Seit 1991 wurden total 72 Eichmessungen durchgeführt, sie decken den Pegelbereich von 1718.56...1719.53 m ü. M (*Abbildung 40*) respektive den Abflussbereich 0.53...13.3 m³/s ab. Rund die Hälfte, nämlich 34 dieser Messungen lagen im Pegelbereich der NW-Rinne (*Abbildung 41*). Vier davon lagen auf oder unter dem Q347 von 0.58 m³/s, die letzte davon 2013.

Eichmessungen mit dem Flügel werden immer auf der OW-Seite des Messsteges, die sich 2 m flussabwärts der Pegelmessung befindet, durchgeführt. In der 2 m breiten NW-Rinne werden zehn Achsen auf je drei bis fünf Wassertiefen gemessen. Diese Flügelmessungen reagieren empfindlich auf die Lufteinträge durch den vorgelagerten Überfall.

Seit 2013 wurden für das Niedrigwasser fast ausschliesslich Salz- und für höhere Abflüsse fast ausschliesslich Uraninmessungen durchgeführt. Diese Messungen werden normalerweise unterstrom zwischen zwei Brücken mit einem Abstand von ca. 400 m vorgenommen.

Salzmessungen werden durch Einträge von der Strasse und der Landwirtschaft beeinträchtigt. Um diesen Einfluss der Umgebung auf die Leitfähigkeit zu minimieren, wird jeweils morgens gemessen, wenn die Oberflächen gefroren sind, oder der Messort wird angepasst.

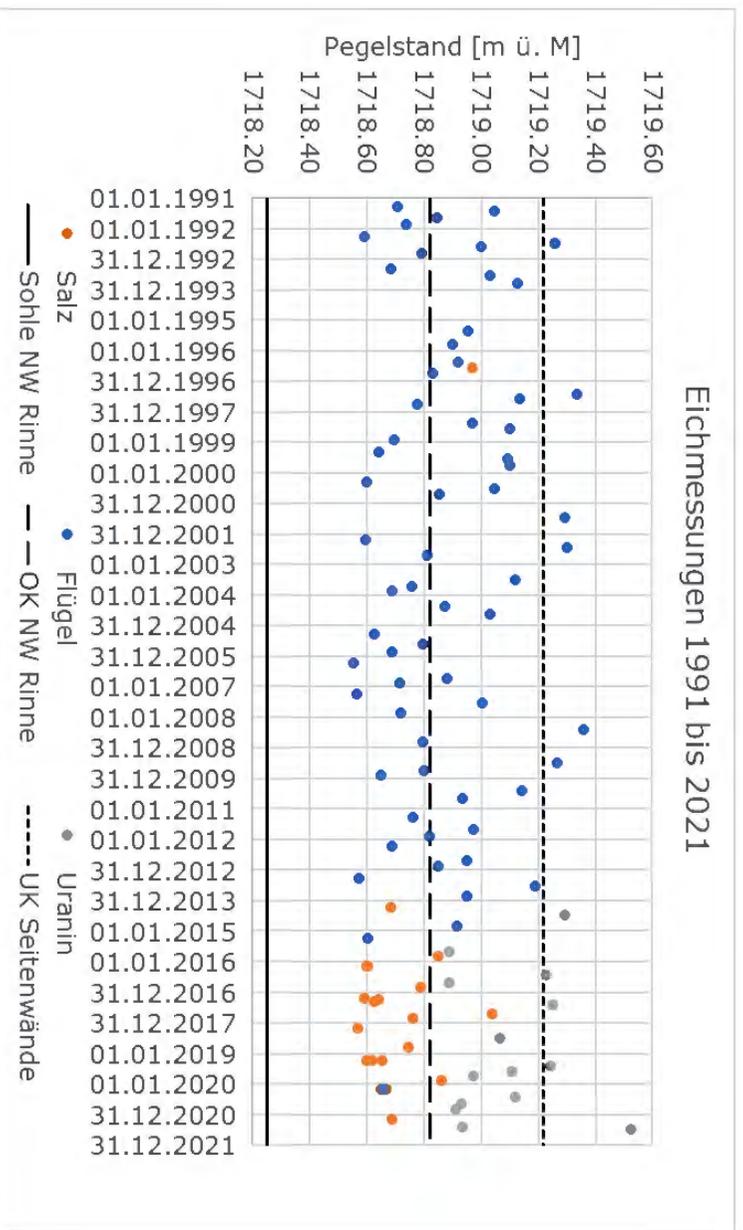


Abbildung 40: Pegelstände der Eichmessungen und Höhen der Kanten der Messrinne

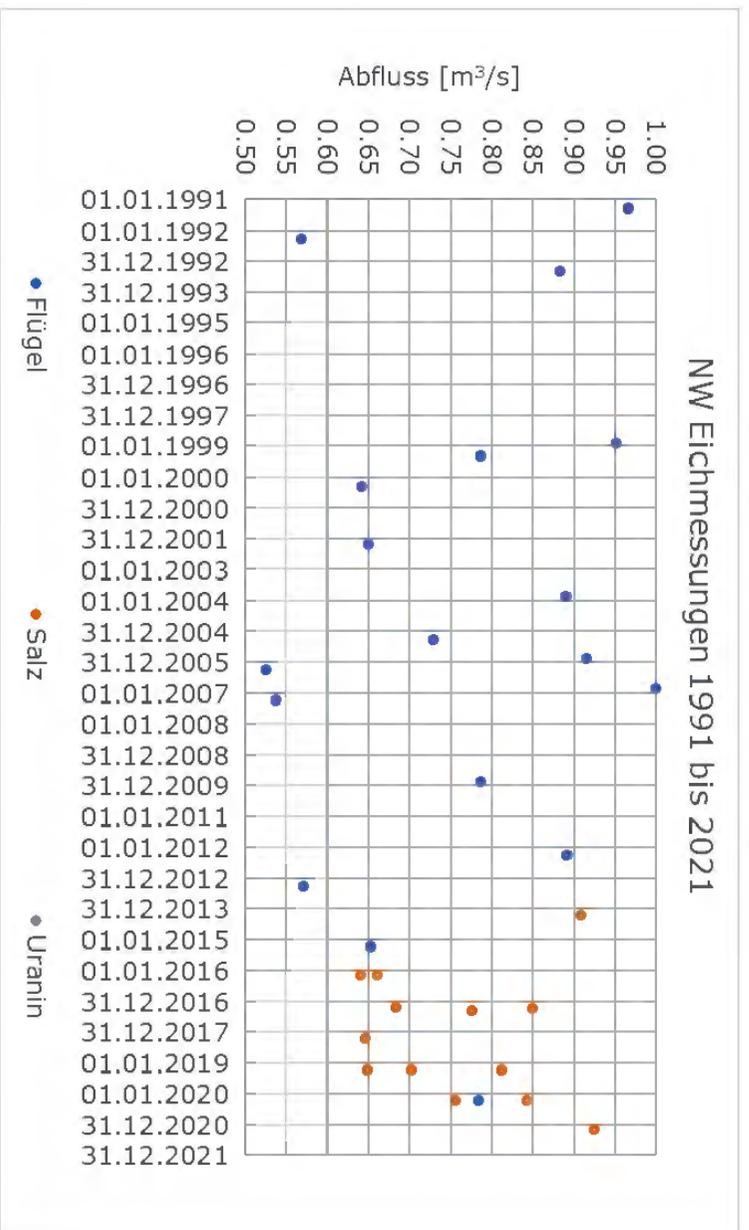


Abbildung 41: Abflüsse der Niedrigwasser- Eichmessungen nach Methode und Zeit

Die seit 2014 durchgeführte Eichmessung mit dem tiefsten Abfluss liegt bei 0,64 m³/s. Obwohl das $Q_{347} = 0,58 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt, wurden in den letzten Jahren kaum Winterabflüsse beobachtet,

bei denen weniger als 0.6 m³/s floss, und entsprechend auch nicht gemessen (Croese 2022). Niedrigwasser-Eichmessungen von 2016 bis 2017 wurden im P-Q-Tool zeitweise auf «Aktiv = Nein» geschaltet, wenn sie für neuere Kurven nicht mehr verwendet wurden.

Betrachtet man die Lage der Eichmessungen im P-Q-Feld (*Abbildung 42*), so fällt auf, dass die Eichmessungen mit Flügel und Salz gut übereinstimmen, hingegen die Uranin-Messungen (graue Punkte) durchwegs höhere Abflüsse bei gleichen Pegelständen implizieren als die beiden anderen Verfahren. Für die Betrachtung der NW-Abflüsse ist dies aber nicht von Bedeutung.

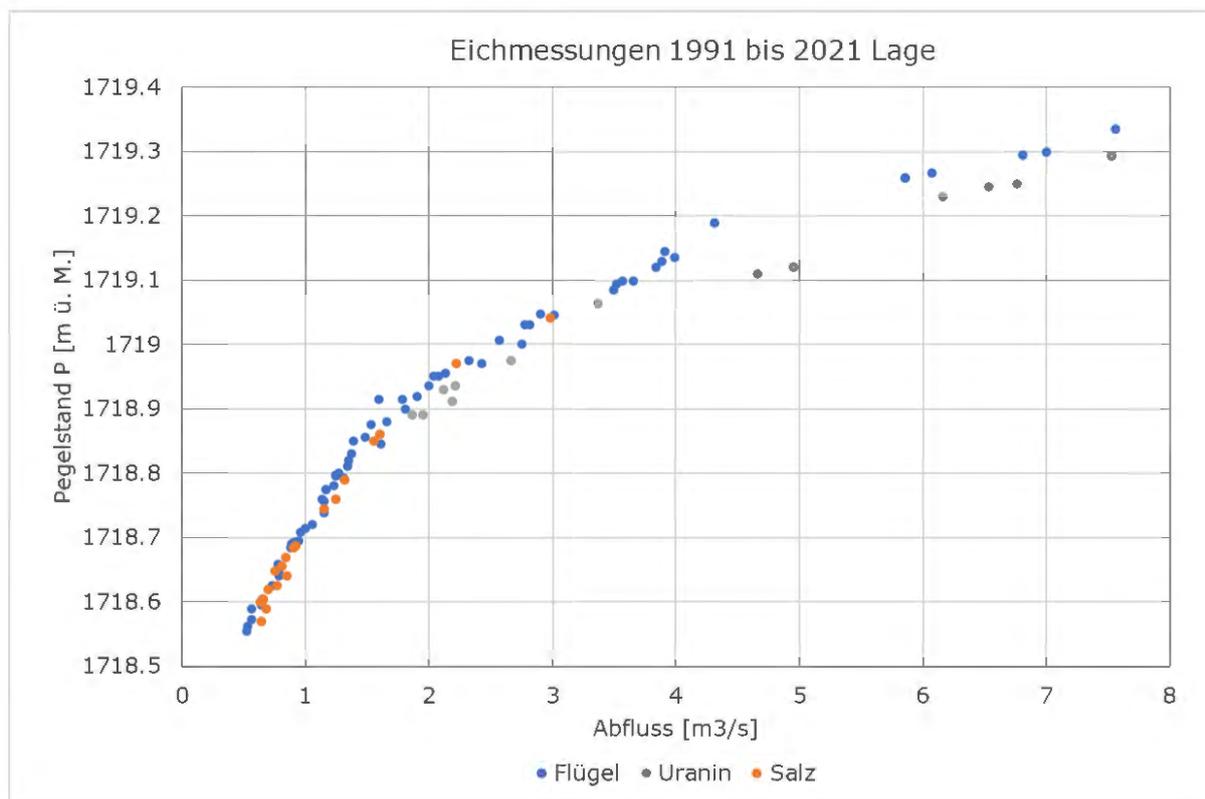


Abbildung 42: Chamuerabach, Lage und Methode der Eichmessungen im Untersuchungszeitraum

Legt man eine Mittellinie in die NW-Eichmessungen (*Abbildung 43*), erkennt man eine Gruppe von vier Eichmessungen mit auffällig hohen negativen Abweichungen der Pegelhöhe von der Mittellinie (Salzmessungen vom 14.03.2018, 17.03.2017, 20.04.2017 und 29.03.2017, rotes Oval). Der Grund dafür ist nicht klar. Am 14.8.2017 musste der Einlauf in den Schacht gereinigt werden, weil er vollkommen verstopft war (Croese 2022). Zwischen der Messung vom 20.04.2017 und der vom 14.02.2018 zeigt sich aber keine wesentliche Änderung in der Pegelhöhe. Beide Messungen gehören zu dieser «Ausreisser-Vierergruppe». Es muss also eine andere Ursache geben.

Abgesehen von dieser Vierergruppe, zeigt sich eine Tendenz der Salzmessungen zu etwas tieferen Pegelständen bei Abflüssen von grösser 1 m³ s⁻¹ gegenüber den Flügelmessungen bei vergleichbaren Abflüssen. Die Salzmessungen werden wegen fehlender geeigneter Messstelle am Pegel 400 unterhalb des Pegelstandortes durchgeführt. Das Einzugsgebiet ist dort gerade mal 0.4%

grösser als am Pegel. Ausgehend von einer zur Flächenzunahme proportionalen Zunahme des Abflusses wäre der Abfluss am Messpunkt der Salzverdünnungsmessung bei 1600 l s^{-1} am Messpunkt 6 s^{-1} höher als am Pegel. Das vermag die auf *Abbildung 43* beobachtete Differenz zur Mittellinie von etwa 60 l s^{-1} nicht zu erklären.

Abgesehen von diesen vier abweichenden Eichmessungen beträgt die maximale Schwankungsbreite bei Niedrigwasserverhältnissen über die Messperiode 1991 bis 2021 etwa 2cm bei vergleichbaren Abflüssen. Das führt zu einer Schwankungsbreite von 50 l s^{-1} , was ein sehr geringer und entsprechend guter Wert darstellt.

Abbildung 45 zeigt die Abweichungen der Abflüsse (nicht der Pegelhöhe) der Eichmessungen von der Mittellinie. Im zeitlichen Verlauf lässt sich eine Art Wellenbewegung der Abweichungen erkennen. Die Maxima liegen bei 2001 und 2002, 2006 und bei 2017 und 2018. Was der Grund für dieses Verhalten ist, ist unklar.

Mit zunehmendem Abfluss steigt das Gefälle zwischen der Pegelmessung im Vorbecken und der Wassertiefe bei den Flügelmessungen in der Niedrigwasserrinne (*Abbildung 46*). Das Vorbecken wurde regelmässig von Geschiebe befreit, entsprechend ist die Sohle dort tendenziell tiefer als in der Niedrigwasserrinne. Es wird bei Niedrigwasser kaum ein Fließgefälle generieren. Vielmehr scheint dieses Wasserspiegelgefälle nur durch eine starke Beschleunigung des Durchflusses und die damit verbundene Absenkung des Wasserspiegels im Niedrigwasserkanal erklärbar. Die Hydraulik der Messstelle am Chamuerabach unterscheidet sich damit stark von derjenigen beim Dischmabach und der Goneri, in deren Niedrigwasserrinnen nahezu Normalabfluss herrscht. Ein weiterer grosser Unterschied ist wie erwähnt die Pegelmessung im Vorbecken, welche bei den beiden anderen Stationen in der Messrinne selbst stattfindet.

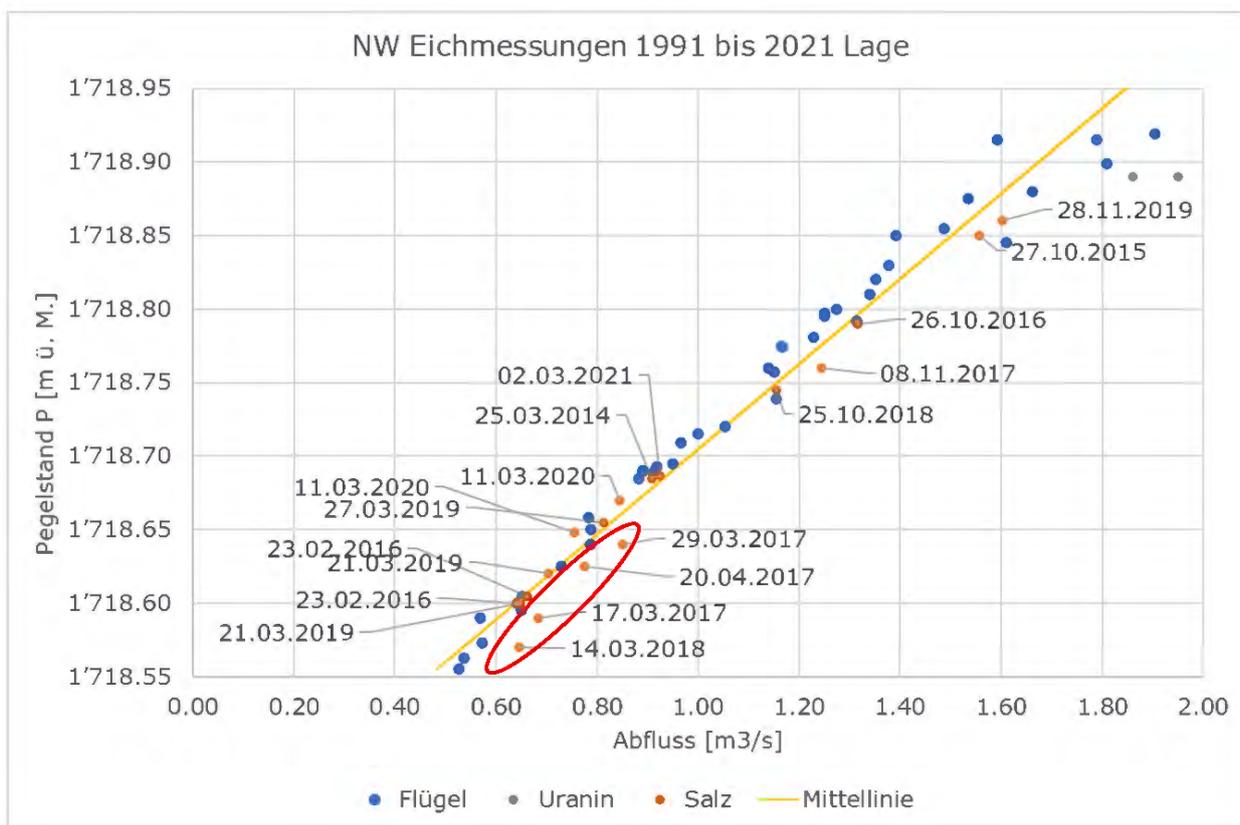


Abbildung 43: Abflüsse und Pegelstände der Niedrigwasser-Eichmessungen, mit eingezeichneter Mittellinie

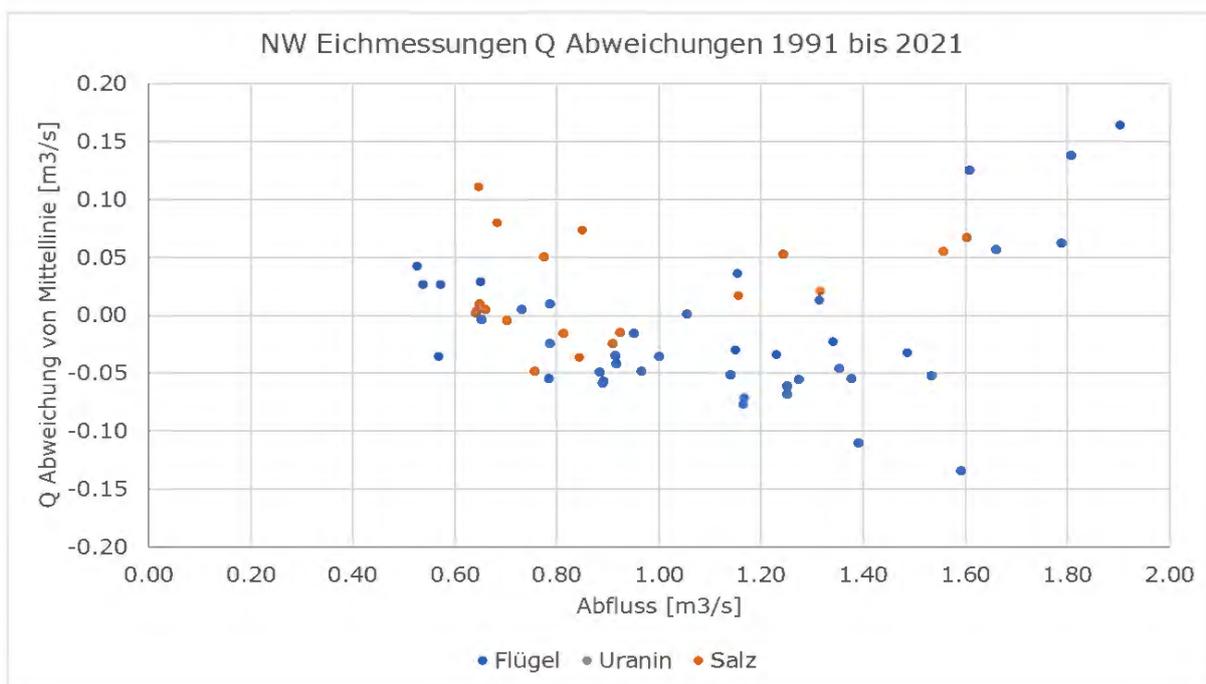


Abbildung 44: Abfluss-Abweichungen der Eichmessungen von der Mittellinie nach Abfluss

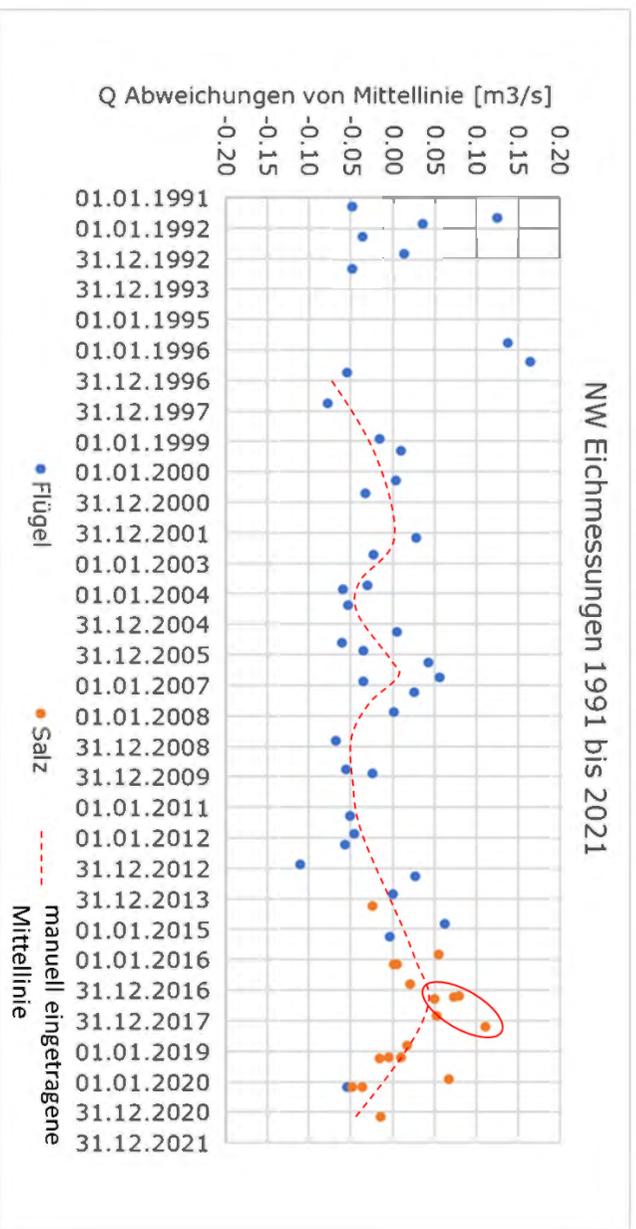


Abbildung 45: Abfluss-Abweichungen der Eichmessungen von der Mittellinie über die Zeit. Im roten Oval sind die vier auffälligen Salzmessungen von 2017 und 2018 erkennbar.

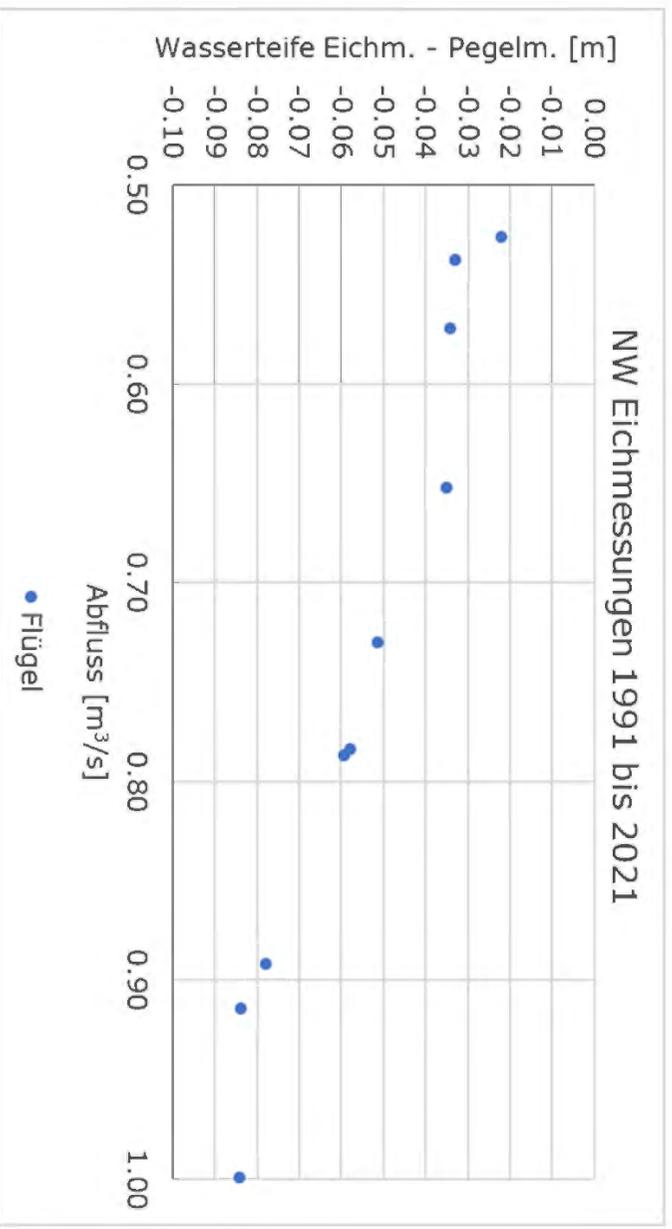


Abbildung 46: Differenzen zwischen den Wassertiefen der Flügelmessungen und dem Pegelstand am Sensor. Von den NW-Eichmessungen 2001...2003 sind keine Wassertiefen aufgezeichnet.

3.3.5 P-Q-Beziehungen

In den letzten 30 Jahren wurden die elf P-Q-Beziehungen Nr. 18 bis 28 definiert und verwendet (*Abbildung 47*). Ihr Bereich unterhalb des Q250 (*grüne Linie*) ist durch 21 Eichmessungen abgestützt, vier davon unterhalb des Q347 (*gelbe Linie*). Die Kurven 18 und 19 wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit verwendet.

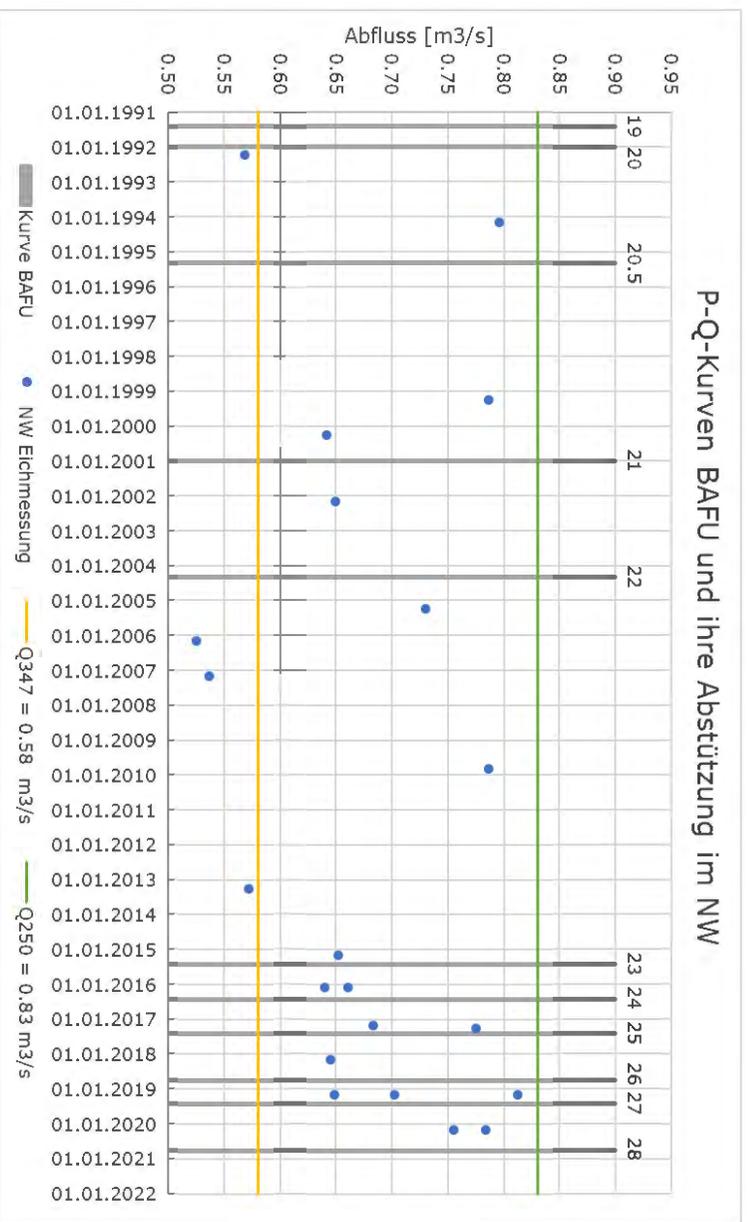


Abbildung 47: Chamuerabach, P-Q-Kurven und ihre Abstützung mit Eichmessungen über die Zeit

Alle verwendeten P-Q-Kurven haben denselben Nullpunkt, dies bildet den festen, betonierten Messquerschnitt gut ab (*Abbildung 48*). Der Niedrigwasserbereich über die 30 Jahre konnte mit 8 Kurven abgebildet werden. Im Niedrigwasserbereich bewegten sich die P-Q-Kurven in zwei Gruppen (*Abbildung 49*). Praktisch einen linearen Verlauf und höhere Abflüsse bei gleichen Pegelständen bewirken die Kurven 19 (dunkelblau), 24 (hellblau) und 25 (gelb).

Die übrigen Kurven liegen nahe zusammen. Die charakteristischen NW-Abflüsse Q 365 (orange), Q 347 (gelb), Q 300 (blau) und Q 250 (grün) liegen alle in der NW-Rinne (nicht sichtbar). Oberhalb des Q 347 gibt es einige Eichmessungen von unterschiedlichen Jahren. Beim Q 347 (= 0.58 m³/s) variieren die Pegelstände der verschiedenen Kurven zwischen 0.25 (dunkelblaue Kurve 19) und 0.30 m (goldbraune Kurve 20) um 5 cm. Lässt man die drei Kurven 19, 24 und 25 weg, so beträgt die Variation nur noch 2 cm.

Die Entwicklung der P-Q-Kurven über die Zeit ist im Anhang (Anhang, 10.3.2) ersichtlich.

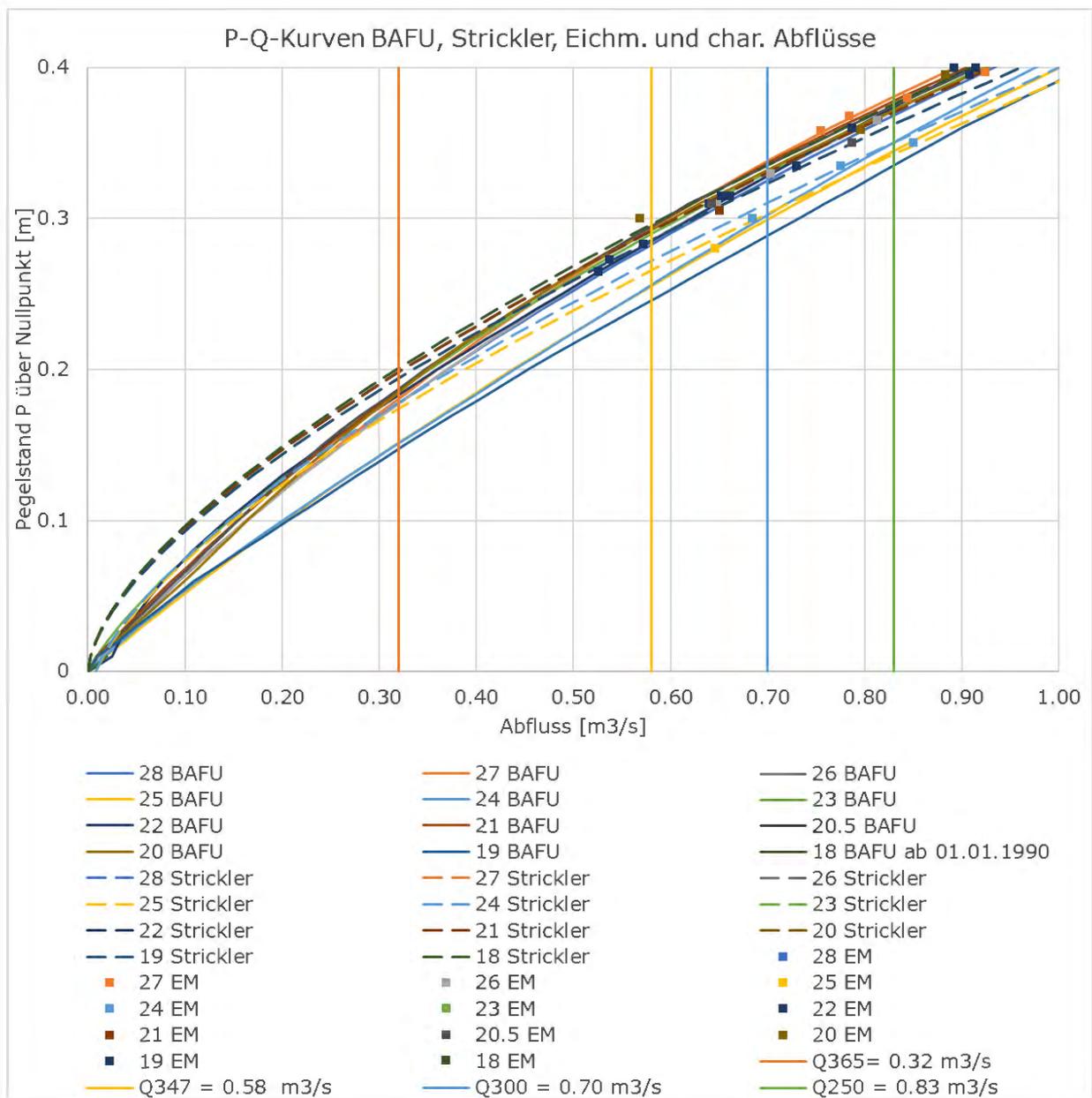


Abbildung 48: P-Q-Kurven BAFU und die dafür verwendeten Eichmessungen im Niedrigwasser über den ganzen Untersuchungszeitraum

Durch die Berechnung der P-Q-Beziehungen mit Strickler konnte der Schwankungsbereich der P-Q-Beziehungen im Niedrigwasserbereich gegenüber den Kurven BAFU wesentlich reduziert werden (*Abbildung 49, orange gegenüber blauen Linien*). Dies gilt v.a. für den Bereich um Q347 und darunter. Mit Ausnahme einer Eichmessung konnten dabei alle Eichmessungen berücksichtigt werden, die auch zur Berechnung der Kurven BAFU verwendet wurden. Würden an Stelle der verwendeten 12 BAFU-NW-Kurven die 8 Strickler NW-Kurven eingesetzt, so würden die NW-Eichmessungen besser repräsentiert. Unklar bleibt der Grund für die auffällige Lage der Eichmessungen von 2017 und 2018 (rotes Oval), welche die Kurven 19, 24 und 25 in diesem Bereich definieren.

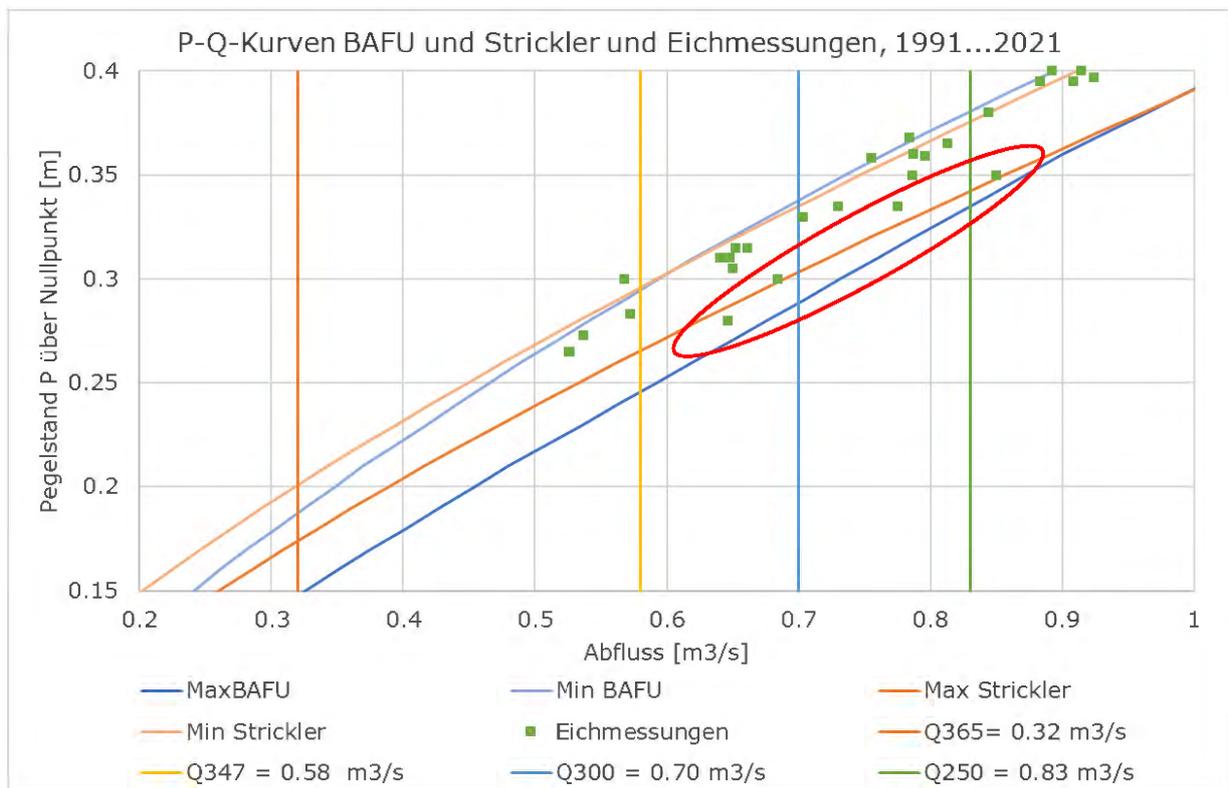


Abbildung 49: Umhüllende der P-Q-Kurven BAFU und Strickler und Eichmessungen mit den charakteristischen Abflüssen.

3.3.6 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Dauerkurve Strickler und die Dauerkurve BAFU unterscheiden sich nur unwesentlich, ähnlich wie beim Dischmabach (*Abbildung 50*).

Die Abweichungen sind, mit Ausnahme des Jahres 1991, zwischen den Strickler- und den BAFU-Abflüssen am Chamuerabach sehr gering (*Abbildung 51*). Im Jahr 1991 beträgt die Differenz zwischen Q Strickler und Q BAFU mit -13% des Q347, in den anderen Jahren liegt sie bei weniger als $\pm 6\%$.

Die abweichenden Ganglinien sind für den Winter 1991, 1998, 2009, 2011, 2012, und 1996 in den *Abbildung 52 bis Abbildung 57* dargestellt. Das Q347 wird vor allem in den Jahren 1996, 1998, 1999, 2004, 2006, 2009, 2010, 2011 und 2012 unterschritten. Nach 2012 wurden keine Abflüsse kleiner Q347 mehr registriert. Der steile Absturz der Dauerkurve wird mit grosser Wahrscheinlichkeit durch Artefakte verursacht, die in den Jahren 1998, 2009, 2011 und 2012 auftraten (*Abbildung 52 bis Abbildung 57*).

Viele der Perioden mit Q kleiner Q347 scheinen von Artefakten betroffen zu sein. Die «Treppentufen» Mitte Januar und Mitte Februar des Jahres 1996 sehen eher nach einem unnatürlichen Verlauf der Ganglinie aus (*Abbildung 52*). Solche Phänomene sollten genauer überprüft werden. Das gilt vor allem für das Jahr 1998, das für das Q347 einflussreichste Jahr darstellt (*Abbildung 53*). Der Abflusseinbruch um fast 130 l s^{-1} trotz positiver Tagestemperaturen Ende Februar scheint unplausibel zu sein und sollte deshalb überprüft werden. Auch der Abflussanstieg Ende Januar lässt sich nicht erklären.

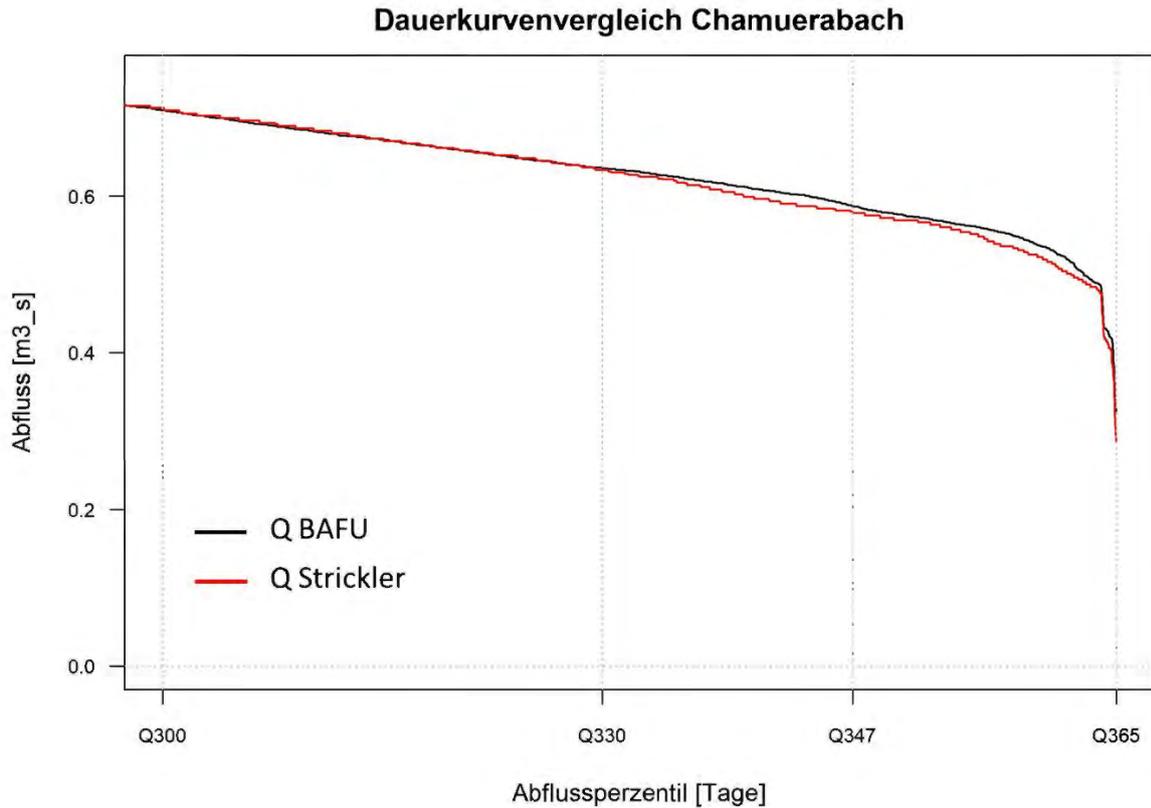


Abbildung 50: Vergleich der Dauerkurve (Q BAFU) mit Dauerkurve (Q Strickler) für den Chamuerabach.

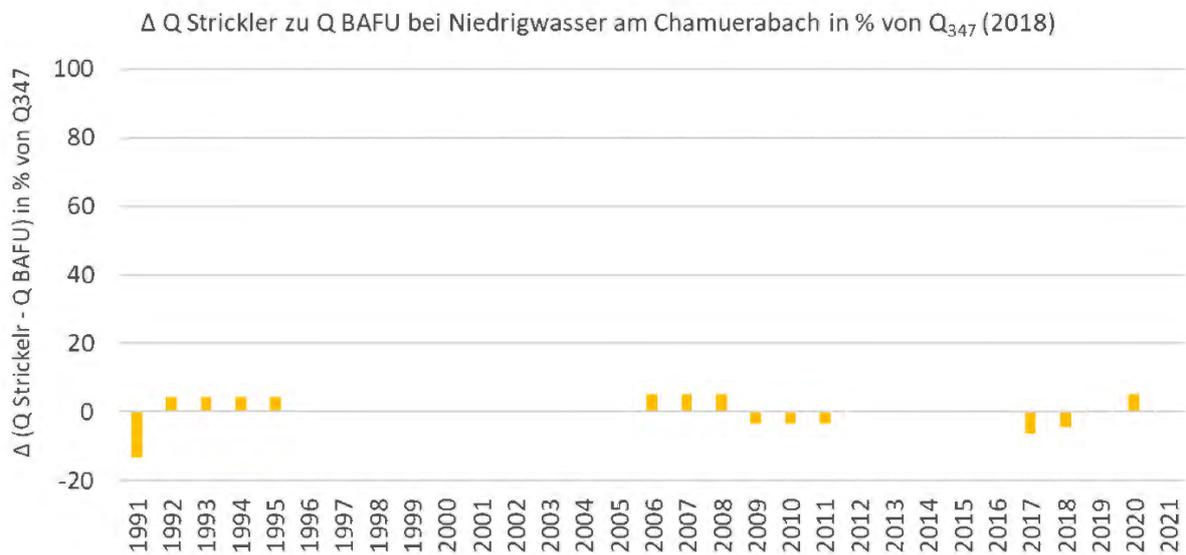


Abbildung 51: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q₃₄₇ (2018) am Pegel des Chamuerabaches.

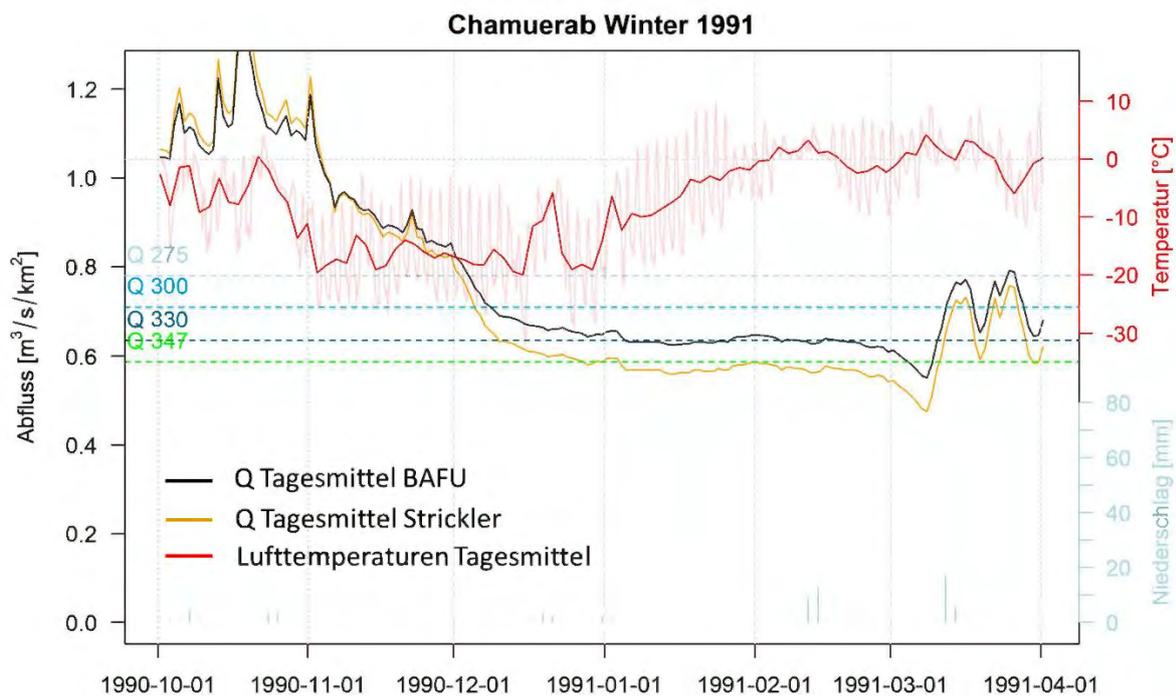


Abbildung 52: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 1991.

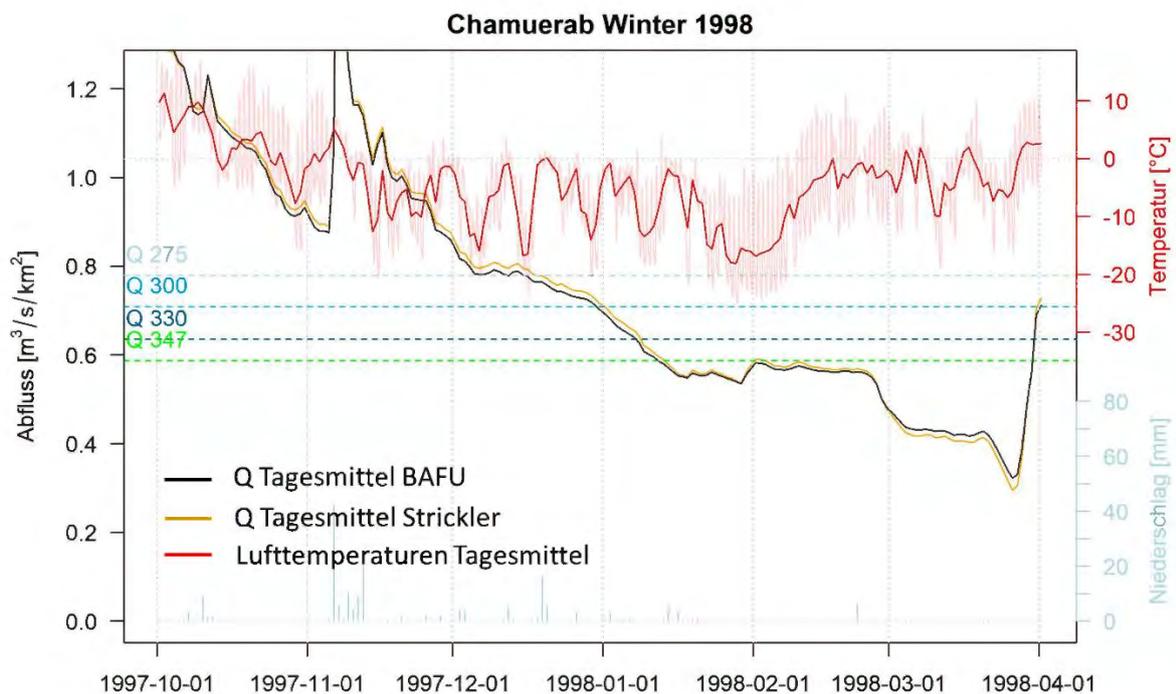


Abbildung 53: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 1998.

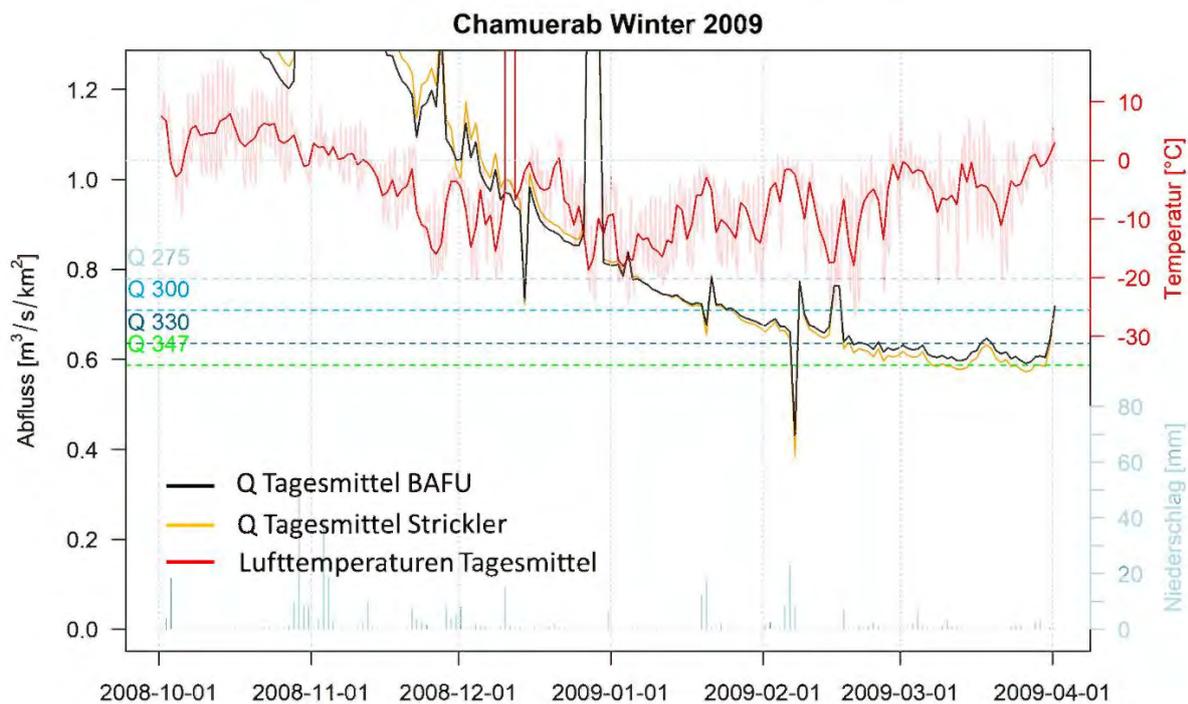


Abbildung 54: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 2009.

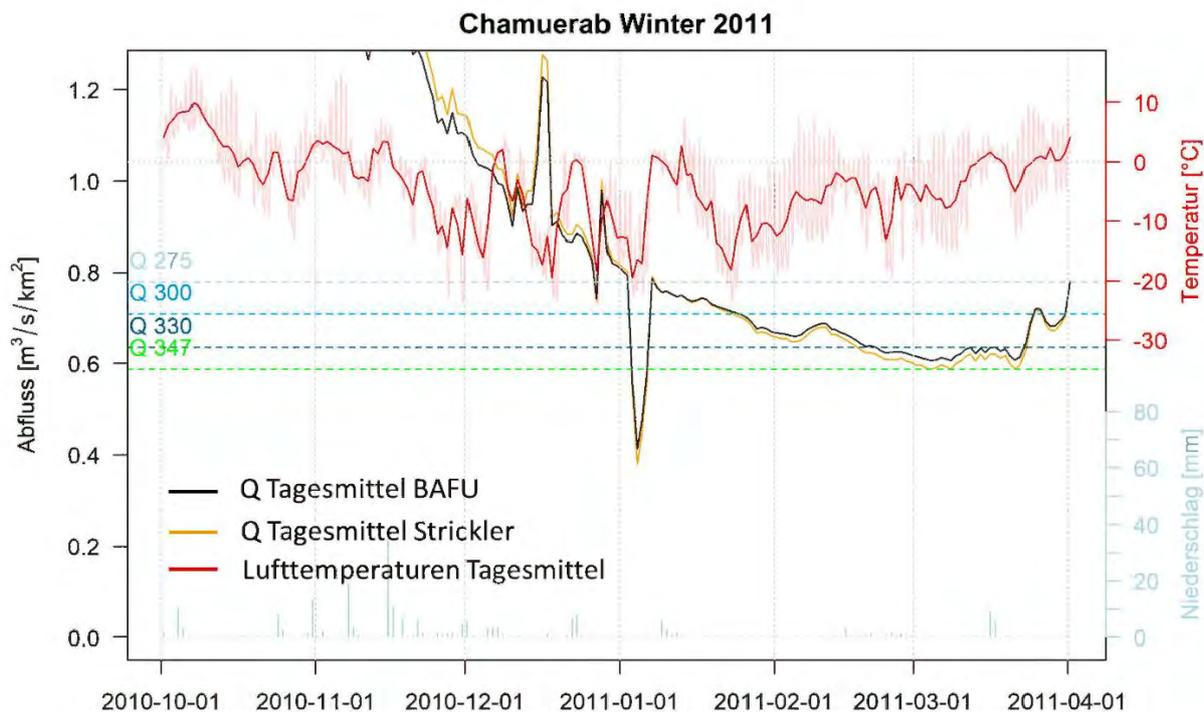


Abbildung 55: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 2011.

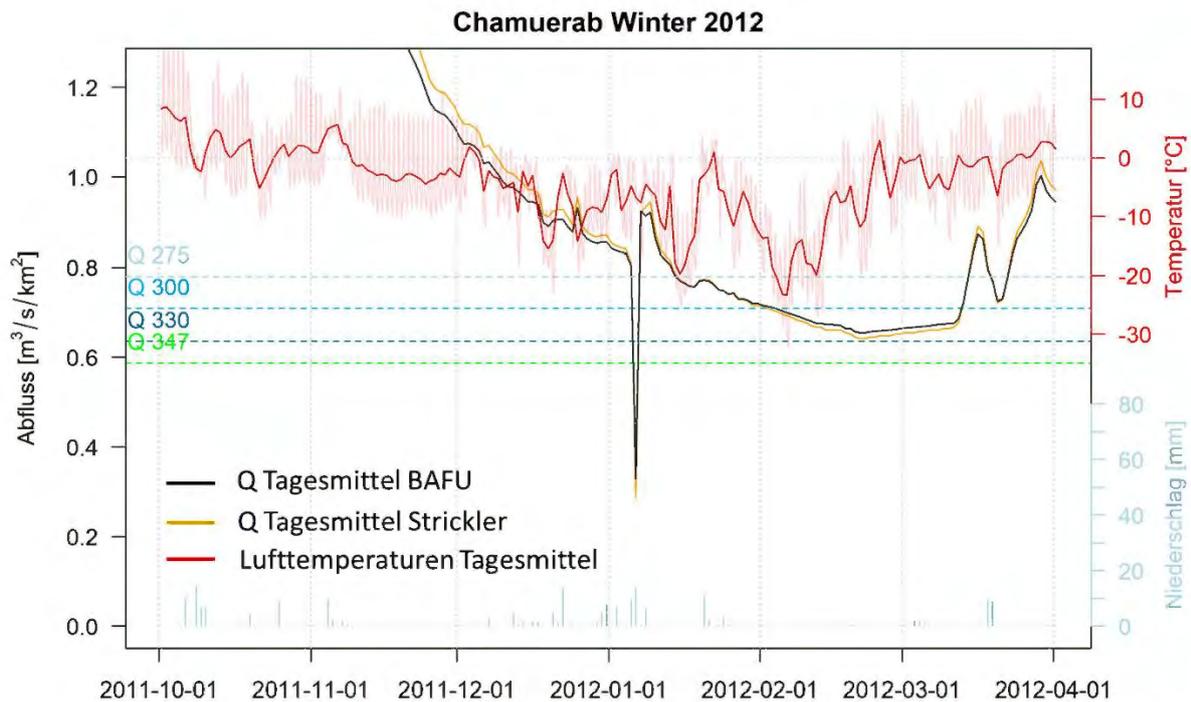


Abbildung 56: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 2012.

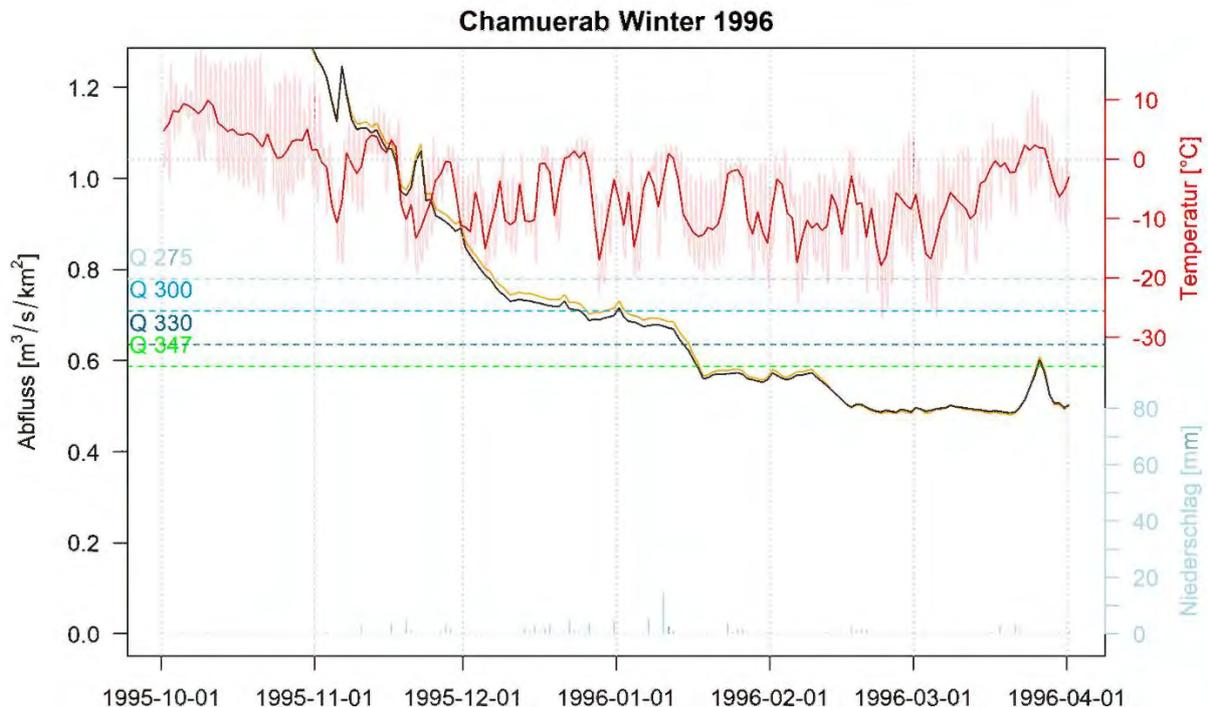


Abbildung 57: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Chamuerabach im Winter 1996.

3.3.7 Schlussfolgerungen

3.3.7.1 Messstation

Die Messrinne der Station Chamuerabach ist gut geeignet für die Messung von Niedrigwasserabflüssen. Beim Q347 beträgt die Wassertiefe in der Rinne ca. 0.25 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von nur 4.3 % des Q347.

Im Vergleich zum Dischmabach streuen die Eichmessungen des Chamerabaches in einer wesentlich geringeren Bandbreite im Niedrigwasserbereich (vgl Kap. 3.3.7.2). Dafür sind verschiedene Ursachen möglich. Die Konstruktion unterscheidet sich von derjenigen am Dischmabach in mehreren Punkten, welche vermutlich alle einen positiven Einfluss auf die Messqualität haben. Am Chamuerabach wird am Vorbecken, wo die Fließverhältnisse wesentlich stabiler und ruhiger sind, und nicht an der Rinne gemessen. Der Messschacht am Chamuerabach liegt so tief, dass die Verbindung zum Vorbecken immer komplett von Wasser überdeckt ist. Das Lochblech auf der Öffnung ist damit kaum von Bewuchs und Eis betroffen, und es kann hier keine kalte Luft in den Messschacht eindringen und dort die Eisbildung unterstützen. Die Tatsache, dass der im Messschacht installierte Schwimmer mit einer Heizung ausgestattet ist, scheint die Unsicherheiten der Niedrigwassermessungen zusätzlich zu reduzieren. Gemäss A. Crose kommt es manchmal zur Bildung einer dünnen Eisschicht an der Wasseroberfläche. Ein Durchfrieren über die ganze Wassertiefe, wie dies z.B. bei der Station der Ova da Cluozza häufig, und selten auch beim Dischmabach vorkommen, kommt am Chamuerabach nicht vor.

Es wurden Situationen geschildert, in denen Sedimente dieses Verbindungsloch verstopften. Würde der Wasserstand direkt in der Messrinne gemessen, so würden diese Probleme entfallen. Allerdings würde eine Radarmessung im Freien an diesem Standort auch neue Probleme mit Eis und Schnee generieren. An der Station der Goneri, wo direkt im Messschacht gemessen wurde, gab es zudem eine grössere Schwankung der Eichmessung im Niedrigwasserbereich und auch grössere Probleme mit Artefakten bei der Messung der Winterabflüsse. (Siehe auch Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Eine Kombination beider Messorte und Messmethoden würde helfen, mögliche Artefakte zu identifizieren und zu korrigieren.

3.3.7.2 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 34 Eichmessungen in der Niedrigwasserrinne durchgeführt, allerdings lagen davon nur vier auf oder unter dem Q347 und die letzte davon stammt aus dem Jahr 2013. Dies lag auch daran, dass die vergangenen Winter eher hohe Abflüsse zeigten.

Die Ursache für die auffällig hohen Abflüsse der vier Salzverdünnungsmessungen von 2017 und 2018 konnte nicht erklärt werden. Eichmessungen mit tieferen Abflüssen vor und nach 2017 und

2018 lassen vermuten, dass es sich um Artefakte handeln könnte.

Abgesehen von den abweichenden Pegelhöhen der vier erwähnten „Ausreissermessungen“ streuen die Pegelhöhen der Eichmessungen über die Periode 1991 bis 2021 um nur ca. 2cm, was im Vergleich zu den Stationen des Dischmabaches und des Goneri ein sehr niedriger und guter Wert darstellt.

Seit 2013 wurden für das Niedrigwasser fast ausschliesslich Salzverdünnungsmessungen mit einem tendenziell sinkenden Schwankungsbereich bei den Abflussabweichungen durchgeführt.

3.3.7.3 P-Q-Kurven

Die P-Q-Kurven wurden auf Basis relativ weniger Niedrigwasser-Eichmessungen erstellt, es gelten grundsätzlich die Aussagen vom Dischmabach (3.2.7.1).

Bei der Analyse der P-Q-Kurven (*Anhang 10.3.2*) wurden die folgenden Auffälligkeiten entdeckt:

- Die Kurve 19 ist im Niedrigwasser schlecht abgestützt und führt in einer unplausiblen Geraden zum Nullpunkt.
- Die beiden Kurven 24 und 25 basieren im Niedrigwasser auf den oben erwähnten Abflüssen mit auffällig hohen Abflüssen der Jahre 2017 und 2018. Zudem sind sie als Geraden zum Nullpunkt gezogen, was nicht plausibel ist.

3.3.8 Empfehlungen

Messstation

Die Station sollte zusätzlich mit einem Radar über dem Vorbecken ausgerüstet werden. Dies würde helfen, mögliche Artefakte zu identifizieren und zu korrigieren. Es müsste aber eine Stelle sein, die im Winter eisfrei bleibt. Das würde den Aufwand für die Unterhaltsarbeiten reduzieren.

Eichmessungen

Wir empfehlen, bei nächster Gelegenheit weitere Eichmessungen bei Abflüssen unter dem Q347 durchzuführen.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, die Kurven 19, 24 und 26 im Niedrigwasserbereich nicht zu verwenden. Das würde den Schwankungsbereich der Eichmessungen und P-Q-Kurven deutlich reduzieren. Auch für diese Station wird empfohlen, die P-Q-Kurven näher an der Hydraulik der Messstation zu orientieren. Bei dieser Station ist bei Niedrigwasser wohl primär die Überfallkante am Ende der Messrinne abflussbestimmend. Wir empfehlen, die Verwendung der Überfallformel von Poleni zu prüfen. Bei kleinen Abflüssen unterscheidet sich allerdings die Kurvenform nur wenig von den mit Strickler berechneten Kurven (vgl. *Abbildung 187* im Anhang).

3.4 Goneri – Oberwald

3.4.1 Morphologie und Hydraulik

Die Goneri entspringt in einem steilen Seitental des Rhonetals als weitgehend natürlicher Wildbach. Von Norden fließt der sehr ähnliche Gerewasser zu, an welchem sich auf einer Höhe von ca. 1647 m ü. M die Wasserfassung des Kraftwerks Gere befindet (6.25 MW, 22 GWh, IBS 2020). Vor dem Ausgang ins Haupttal auf ca. 1400 m ü. M fließt die Goneri gut 120 m durch eine Schwemmebene mit Geschiebesammler. Anschliessend führt ihr Verlauf über mehrere Querbauwerke mit einem Längsgefälle von ca. 3.3% bis zur Messstation (*Abbildung 58*). Bis im Herbst 2018 lag diese Station 280 m flussaufwärts am Ende der Schwemmebene. Diese Ebene/Geschiebesammler und die Querverbauungen lassen heutzutage einen eher geringen Geschiebetrieb erwarten. Die Vorschwelle vor der Station weist eine Fischtreppe auf.

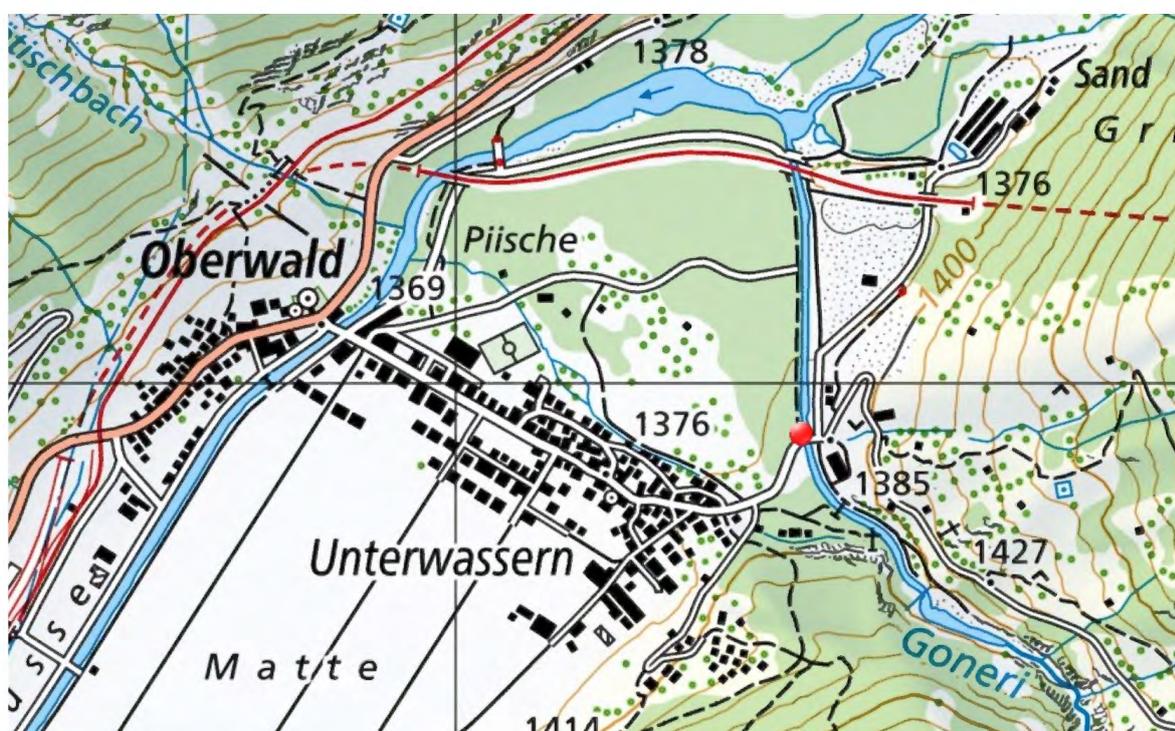


Abbildung 58: Messstation BAFU 2607 Goneri – Oberwald, Landeskarte (BAFU 2021)

Der Übergang vom Gerinne in die Messstation ist flacher als bei den Stationen am Dischmabach und am Chamuerabach. Bei Niedrigwasser stellt sich an der vorgelagerten Schwelle und nach der Messrinne trotzdem ein weitgehend freier Überfall ein, so dass die Hydraulik der Messstation praktisch vollständig von derjenigen des natürlichen Gerinnes entkoppelt ist. Veränderungen im Flussblett oberhalb des Überfalles und unterhalb des Absturzes haben also kaum einen Einfluss auf die Niedrigwasser-P-Q-Beziehung der Messstation.

3.4.2 Messstation

Tabelle 4: Goneri, Tageswerte von 1991-2017 (Hydromaps 2021):

	Bereich [m ³ s ⁻¹]	Charakteristische Werte
Jeden Tag erreichter Abfluss		Q ₃₆₅ = 0.274 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 5%		Q ₃₄₇ = 0.380 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 8.2 %		Q ₃₀₀ = 0.452 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 31.5%		Q ₂₅₀ = 0.622 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1991		NM7Q = 0.285 m ³ s ⁻¹
Mittlere 90% der Abflüsse	0.38 ... 7.8	Median Abfluss 1991 ... 2017 = 1.23 m ³ s ⁻¹
Höchste 5% der Abflüsse	7.8 ... 35.2	

Beim Q₃₄₇ = 0.38 m³ s⁻¹ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von ca. 0.026 m³ s⁻¹.

Seit 1991 sind folgende Ereignisse und Einflüsse bekannt, welche sich möglicherweise auf den Bezug zwischen Pegelstand P und Abfluss Q auswirkten (Lehmann 2022):

- 1991 war eine pneumatisch/mechanische Druckwaage im Einsatz.
- 1999 Umstellung der Wasserstandsmessung auf Radar, welcher von der Messbrücke ins Gerinne misst.
- 2000 Oktober, nach einem grossen Hochwasser floss die Goneri um die Messstation herum. Das Gerinne wurde anschliessend wiederhergestellt und die Ufer mit Blockwurf stabilisiert.
- Seit dem Hochwasser 2000 wird der Geschiebesammler oberstrom der Messstelle regelmässig geleert, der vorher ausgeprägte Geschiebetrieb durch die Messstelle nahm ab. Trotzdem können nach Hochwasser Steine oder Holz vor und in der Niedrigwasserrinne liegen bleiben und stehende Wellen verursachen, welche die Wasserstandsmessung beeinflussen können.
- Im Winter war die Station oft mit Schnee zugedeckt. Dann sind keine direkten und kontinuierlichen Radar- Messungen möglich. In solchen Wintern wurde ausgehend von den letzten verlässlichen Pegelmessungen vor Wintereinbruch und anhand von Abfluss-Einzelmessungen (Flügel) der Pegelstand für einzelne Zeitpunkte in der schneereichen Periode rekonstruiert. Diese Punkte werden dann miteinander zu einer Pegel-Ganglinie verbunden.

- 2018 Herbst, die Station Goneri-Oberwald wurde um 280 m flussabwärts unterhalb des Standortes der Wasserrückgabe des neu erstellten Kraftwerkes Gere verschoben (Michel 2021). Der Messsteg und die Stahlpanzerung der Messrinne werden am neuen Standort weiterverwendet (Imoberdorf 2021). Die Abflüsse der Station sind seit der Inbetriebnahme dieses Kraftwerkes im Jahr 2020 stark von Schwall und Sunk betroffen, allerdings ist dies in den Ganglinien wenig sichtbar. Die Kontinuität der gemessenen Daten ist nicht gewährleistet. Die Schlüsselkurve sind noch nicht genügend durch Eichmessungen abgesichert.

3.4.2.1 Neue Station seit Oktober 2019

Bezeichnung 2607 Goneri - Oberwald

Kennzahlen der Station (BAFU, 2021):

Stationshöhe 1'384.6 m ü. M

Grösse des Einzugsgebietes (EZG) 38.5 km²

Mittlere Höhe des EZG 2'383 m ü. M

Vergletscherung 4 %

Koordinaten LV95 2'670'520 / 1'153'830



Abbildung 59: Seit Oktober 2019 befindet sich die Station Goneri am heutigen Standort (BAFU 2021),

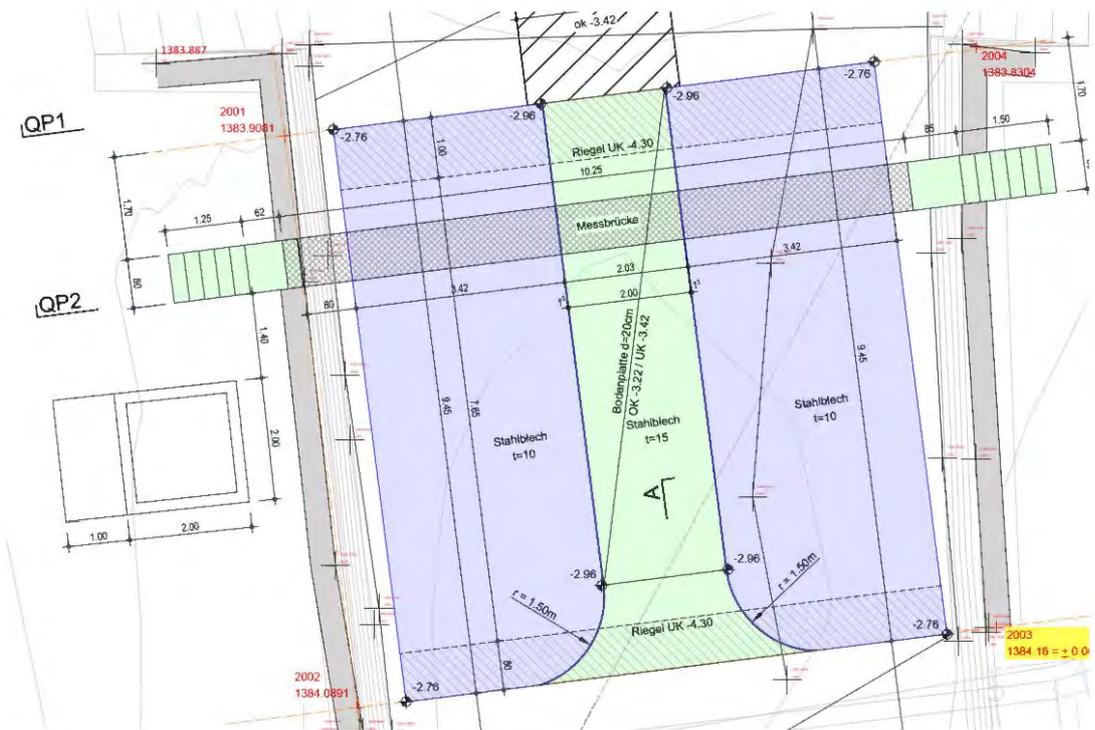


Abbildung 60: Aktuelle Messtation BAFU 2607 Goneri - Oberwald, Situationsplan, 0.00 = 1384.16 m ü. M (VWI Ingenieure Naters 2018)

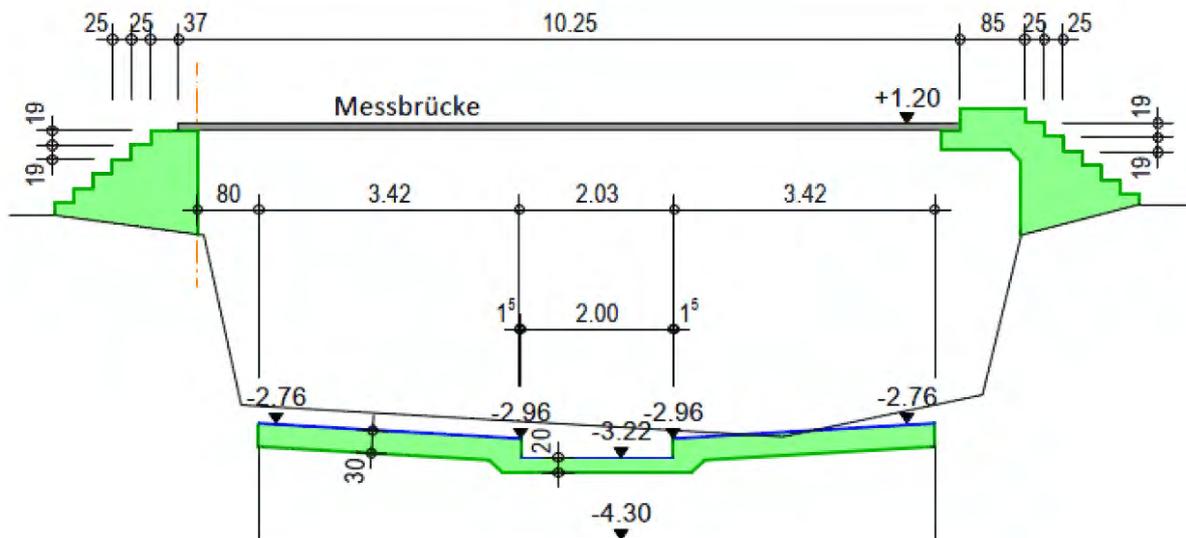


Abbildung 61: Aktuelle Messtation Goneri, Querprofil der Messrinne ohne Gefälle (VWI Ingenieure Naters 2018)

3.4.2.3 Frühere Station vor Oktober 2019

Die frühere Station befand sich rund 8 km oberhalb der aktuellen Station, direkt unterhalb eines Geschiebesammlers. Der Pegelstand wurde zuerst mit einer Pneumatik (*Abbildung 64*) und ab 1999 mit einem Radar am Messsteg gemessen (



Abbildung 63).



Abbildung 63: Frühere Messtation Goneri, Foto in Fließrichtung (Imoberdorf 2021)

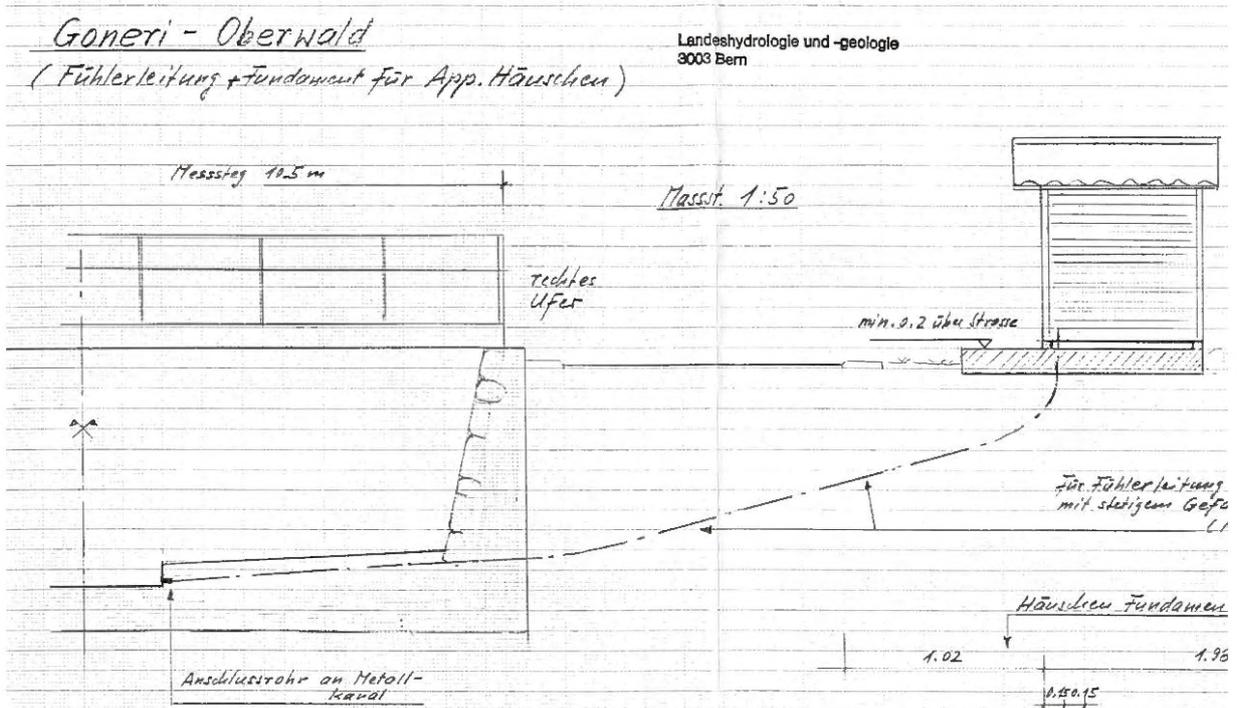


Abbildung 64: Frühere Messtation Goneri, Querschnitt mit Fühlerleitung (Imoberdorf 2021)

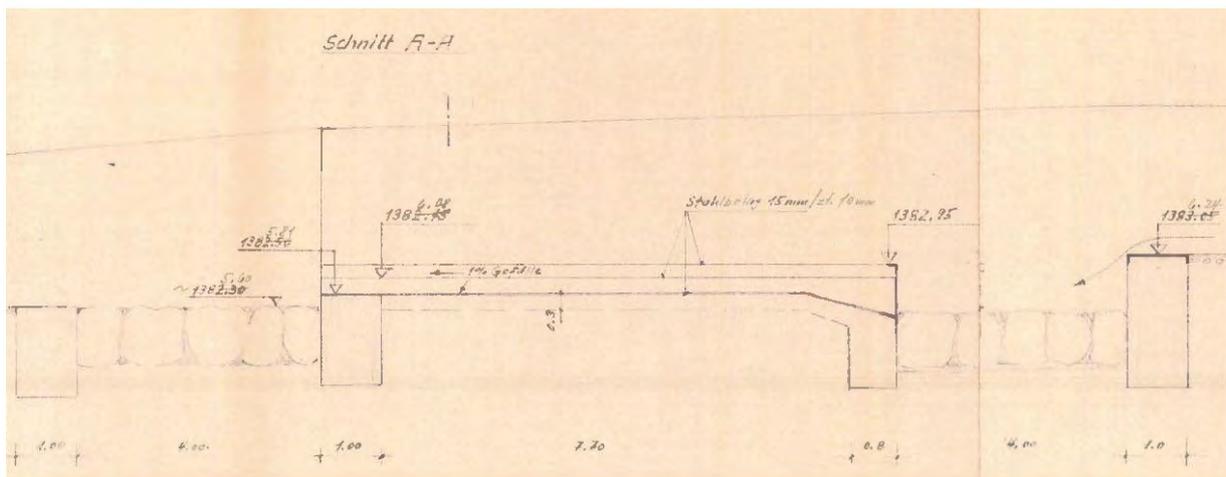


Abbildung 65: Frühere Messtation Goneri, Längsschnitt durch die NW-Rinne, Fließrichtung rechts nach links, Gefälle = 1 % (Imoberdorf 2021)

Aus den alten Bauplänen und den Eichmessungen ergeben sich folgende Koten und Höhen:

- 1386.33 m ü. M. +0.52 m Mittlere UK Seitenwänden
- 1386.17 m ü. M. P-Q-Kurven, Ende des NW-Segmentes (Besser wäre OK NW-Rinne)
- 1386.08 m ü. M. +0.27 m Mittlere OK NW-Rinne
- 1385.82 m ü. M. +0.01 m Nullpunkt. Bei den Kurven ab 1991 1385.77...1385.80 m ü. M.
- 1385.81 m ü. M. +0.00 m Sohle der NW-Rinne auf der Axe

Im Winter war die Pegelmessung durch Schnee, Schneeräumung und Eis stark beeinträchtigt

(Abbildung 66).



Abbildung 66: Frühere Station Goneri, Freilegung zur Eichmessung am 15.03.2006 (Lehmann 2022)

3.4.3 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 51 Eichmessungen auf oder unter dem Q250 durchgeführt, 8 davon lagen auf oder unter dem Q347. Diese lagen alle in der Niedrigwasserrinne (*Abbildung 67, lang gestrichelte Linie*).

Die Eichmessungen werden immer mit dem Flügel auf der OW-Seite des Messsteiges durchgeführt. In der 2 m breiten Niedrigwasserrinne werden 13 Achsen auf je drei Wassertiefen gemessen. Zur Abflussbestimmung wird die lokal ermittelte Wassertiefe verwendet.

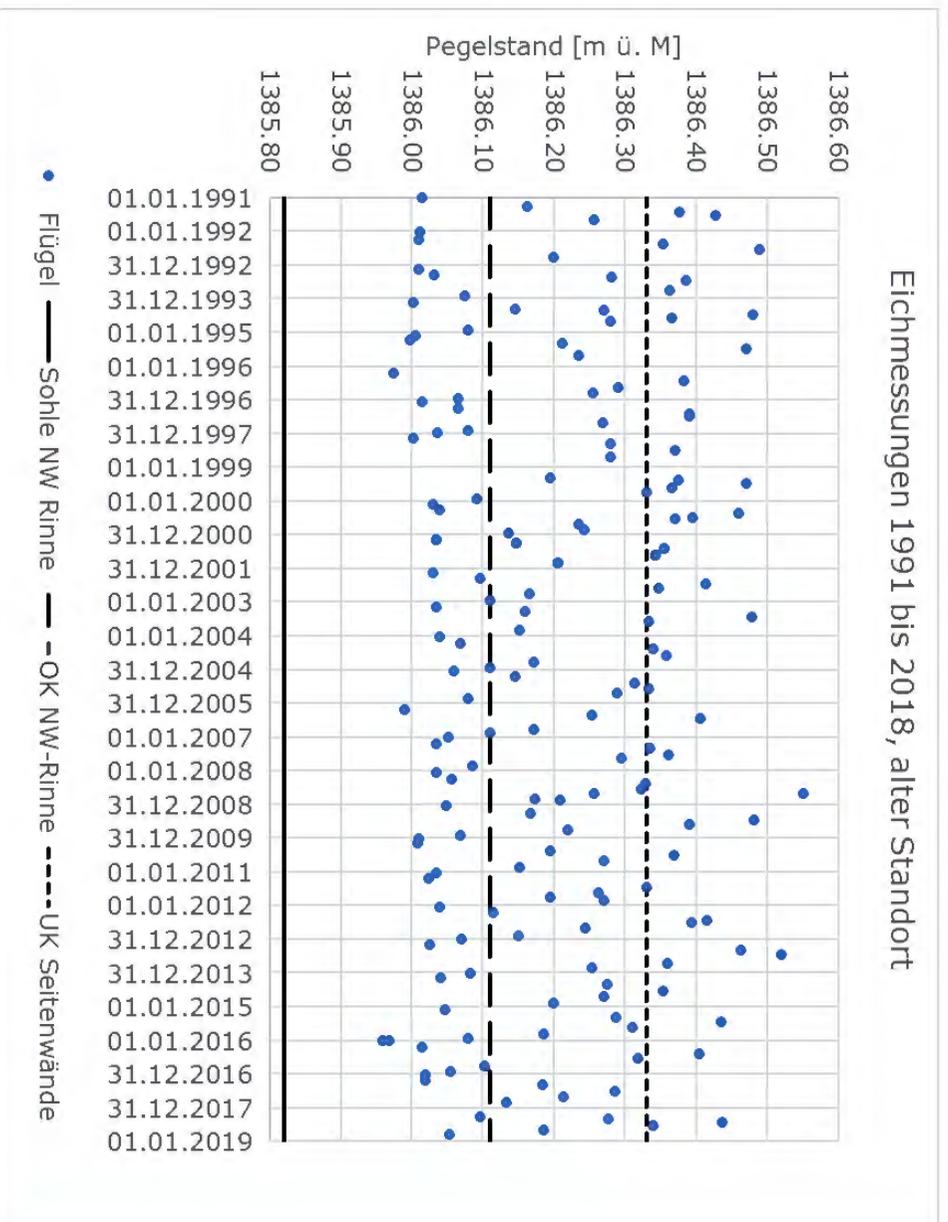


Abbildung 67: Pegel der Eichmessungen der früheren Messstation am Goneri. Eingezeichnet sind zudem Niveau von Sohle und Oberkante der Niedrigwasserrinne und die Unterkante der Seitenwände

Bei der früheren Station wurden regelmässig Eichmessungen in der Niedrigwasserrinne vorgenommen. Einzig von Mitte 1997 bis Ende 1999 fehlen solche Messungen. Die beiden tiefsten Eichmessungen vom 12.01.2016 liegen mit 0.21 resp. 0.24 m³/s in

einem bislang unerklärlichen Sunk (Abbildung 68). Der Grund dafür und die Verlässlichkeit der Messungen ist nicht klar. An der neuen Station sind erst wenige Eichmessungen im Niedrigwasser vorhanden (Abbildung 68, grüne Punkte unterhalb der gestrichelten Linie). Die Eichmessung mit dem tiefsten Abfluss liegt hier beim Q347 = 0.38 m³/s.

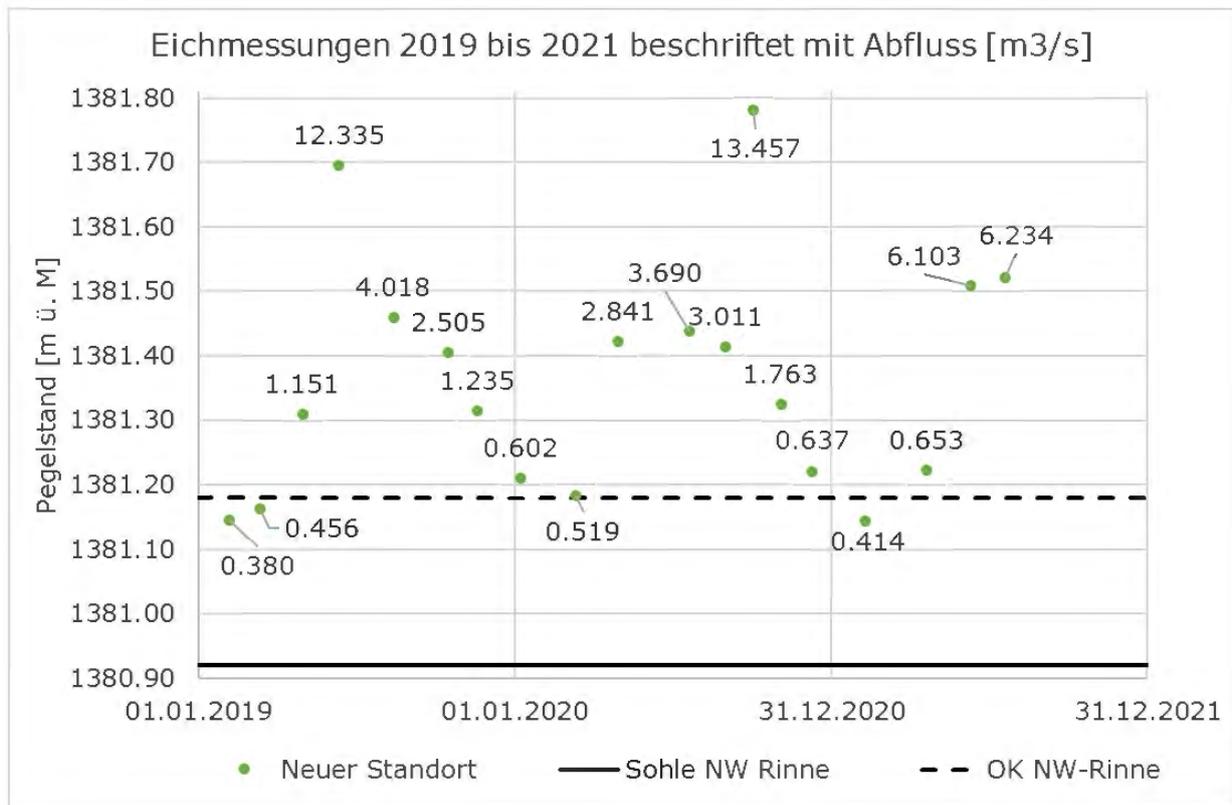


Abbildung 68: Neue Messstation Goneri, Koten der Messrinne und der Eichmessungen, versehen mit den Abflüssen in m³s⁻¹

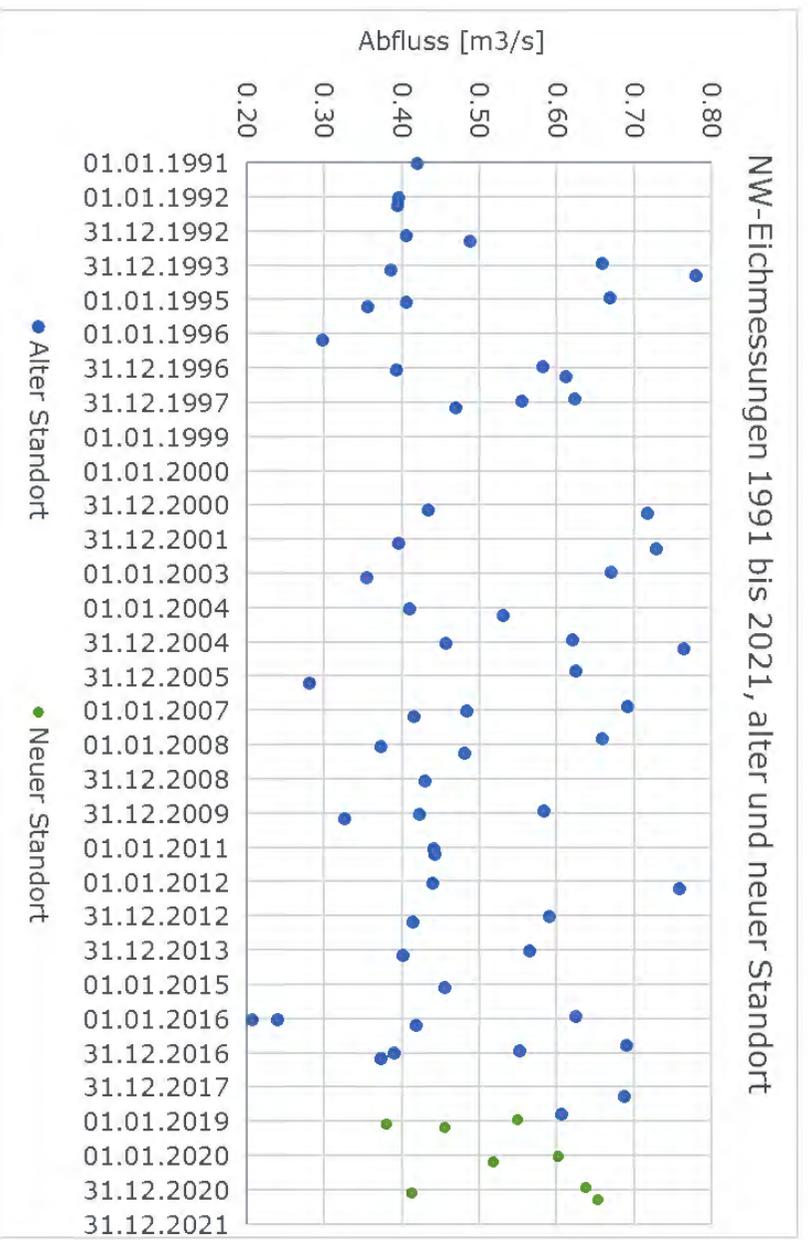


Abbildung 69: Frühere und neue Messstation Goneri, Abfluss der Niedrigwasser-Eichmessungen über die Zeit

3.4.3.1 Lage der Eichmessungen

Die Eichmessungen schwanken in verschiedenen Bereichen unterschiedlich stark (Abbildung 70). Der Schwankungsbereich um die Mittellinie beträgt unter 0.8 m³s⁻¹ ca. 7.5 cm, darüber gut 1 cm und über 1 m³s⁻¹ dann mehr als 5 cm. Der Wasserstand wurde am früheren Standort von 1991 bis 1998 mit einer pneumatischen Druckwaage („Bläterlimessung“) gemessen (hellblau). Ab 1999 folgte die Radarmessung am Steg (dunkelblau). Seit 2019 ist die neue Station mit Radarmessung in Betrieb. Es wurden ausschliesslich Eichmessungen mit dem Messflügel durchgeführt. Legt man in jede Messperiode eine logarithmisch interpolierte Linie hinein, zeigen sich weitgehend parallel verlaufende Linien.

Im Niedrigwasser (Abbildung 70) beträgt der Abstand der Linien von der früheren Pneumatik (hellblau) zum früheren Radar (dunkelblau) 2 cm. Die Linie des neuen Radars (hellgrün) liegt gleich wie der frühere Radar.

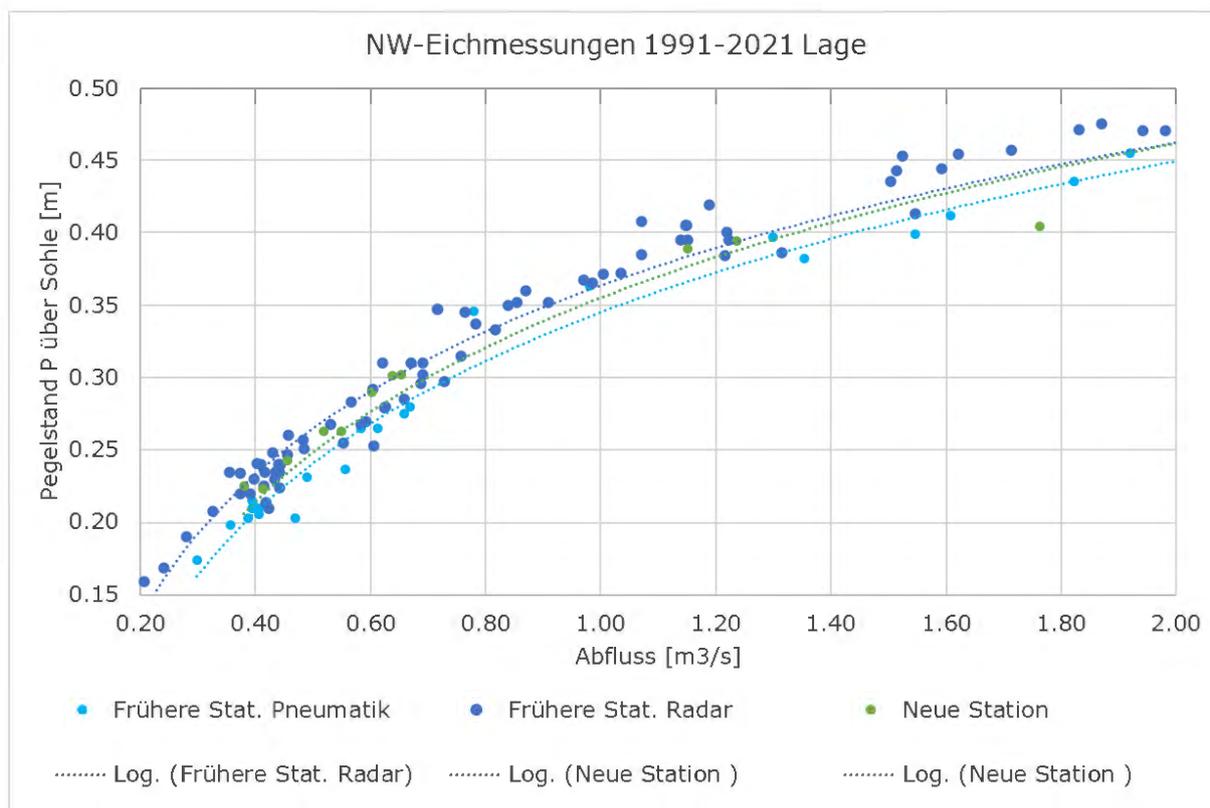


Abbildung 70: Messstation Goneri, Lage der Eichmessungen nach Messperioden. Es wurden ausschliesslich Eichmessungen mit dem Messflügel durchgeführt.

Der maximale Schwankungsbereich der Eichmessungen unterhalb des $Q_{251} = 0.61 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt (Abbildung 71):

- Frühere Station Pneumatik (1991 bis 1998): 3 cm
- Frühere Station Radar (1999 bis 2018): 4 cm (ohne Messung während dem Umzug)
- Neue Station Radar (2019 bis 2021): 2 cm

Die Eichmessungen der verschiedenen Messperioden zeigen also unterschiedliche Pegel-Niveaus mit unterschiedlich breiten Schwankungsbereichen. Die Niveaudifferenz innerhalb der früheren Station könnten vom Längsgefälle zwischen der Pneumatik und dem Radar entstanden sein. Die Schwankungsbereiche sind wohl den oben geschilderten Umständen geschuldet. Positiv zu werten ist die bislang kleine Schwankung an der neuen Station.

Abbildung 72 zeigt die Messstelle Goneri in einer Situation mit auffällig hoher Abweichung zwischen dem aus dem Pegelstand und der P-Q-Beziehung generierten Abfluss von 690 l s^{-1} und einer gleichzeitig durchgeführten Salzverdünnungsmessung von 433 l s^{-1} . Möglicherweise beengten die hereinragenden Schnee- und Eisbänder die NW-Messrinne so stark, dass der Pegelstand dadurch erhöht und damit der Abfluss um 60% überschätzt wurde.

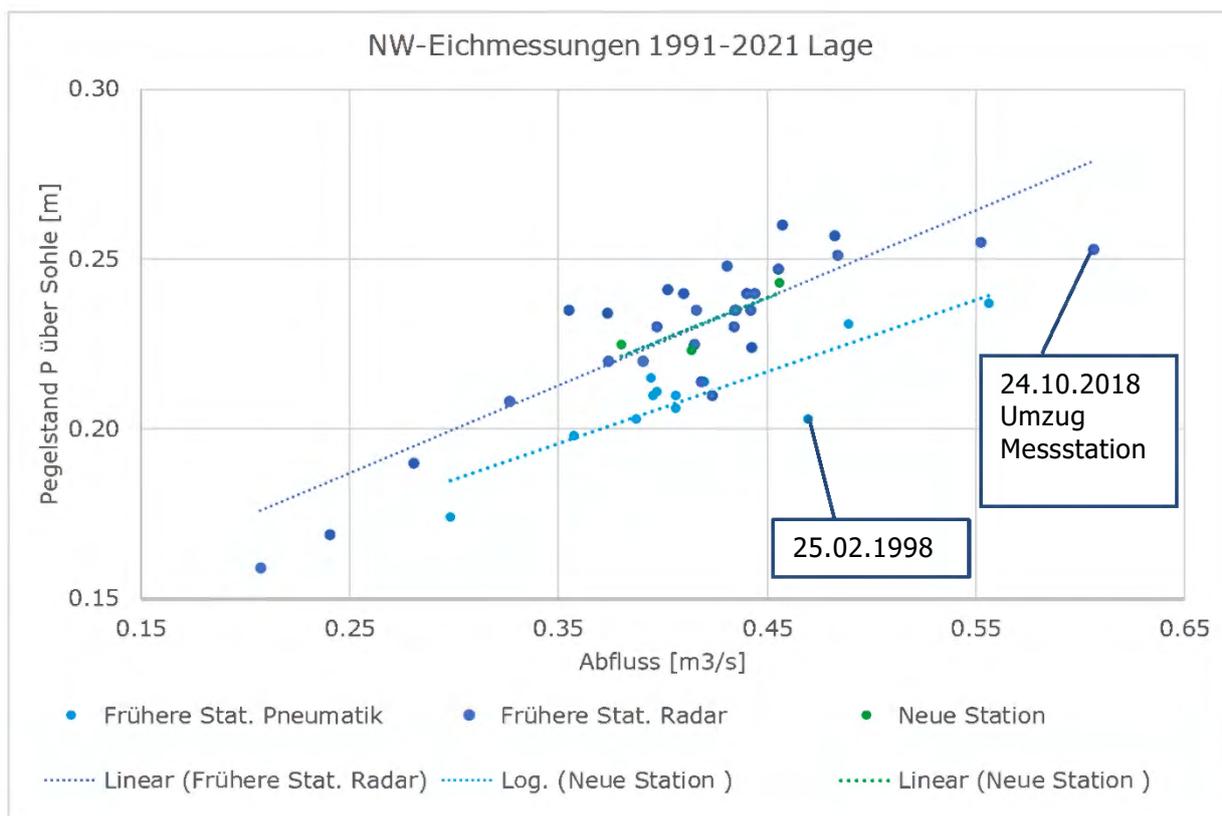


Abbildung 71: Messstation Goneri, Lage der Niedrigwasser-Eichmessungen nach Messperioden mit linear interpolierten Linien



Abbildung 72: Aktuelle Messstation Goneri am 21. Februar 2019 um 08:30 Uhr. Abfluss ab Pegelmessung 690 l s⁻¹, Abfluss nach Salzverdünnungsmessung 433 l s⁻¹

3.4.3.2 Auffälligkeit in der Wassertiefe

Die von der Station gemessenen Pegelstände liegen im Mittel 2,5 cm tiefer als die mittleren Wassertiefen der Flügel-Eichmessungen (*Abbildung 73*), welche seit 2001 verfügbar sind. Die Differenz wird tendenziell kleiner, diesen Trend setzen auch die Flügel-Eichmessungen an der neuen Station (grüne Punkte) fort. Sowohl die Flügel-Eichmessungen wie auch die Pegelmessungen werden vom gleichen Messsteg aus unternommen. Das Gefälle der Messrinne betrug am alten Standort 1%, am neuen Standort ist es 0 %. Aus diesen Gründen wird vermutet, dass die Differenz von einer sinkenden Nullpunktverschiebung und nicht von einem hydraulischen Effekt herrührt.

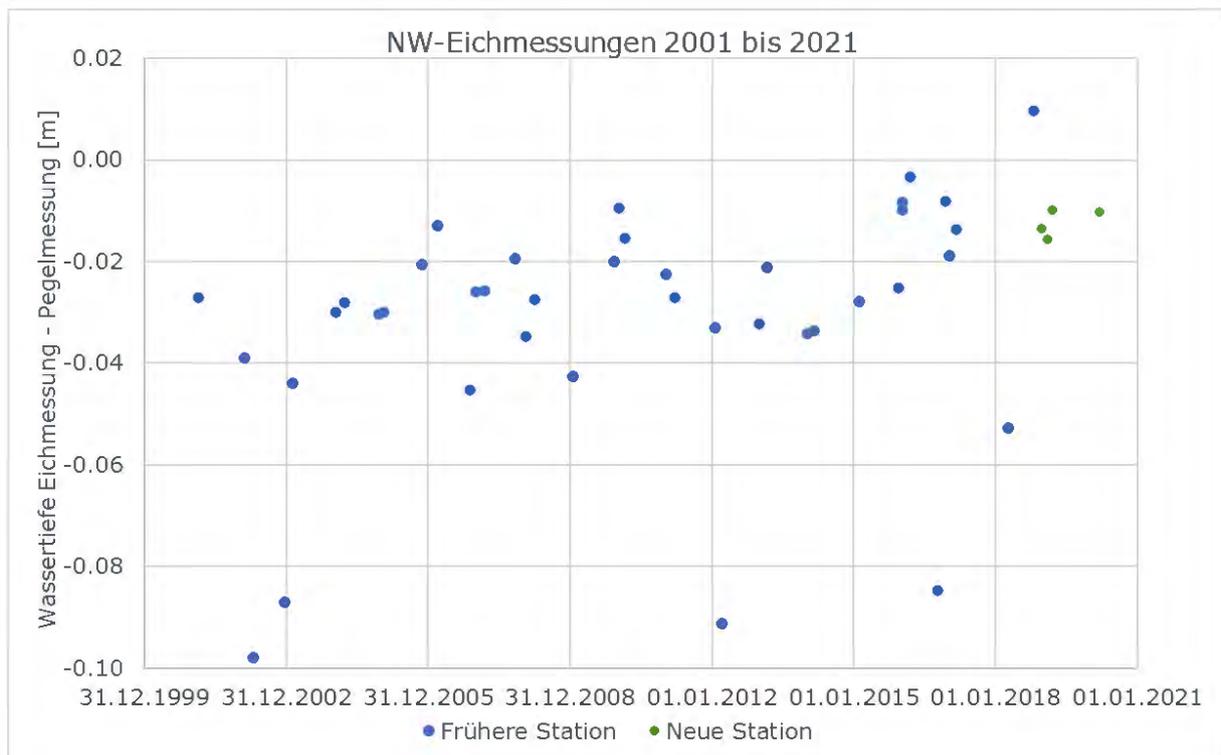


Abbildung 73: Frühere und neue Messstation Goneri, Differenz zwischen der Wassertiefe der Flügel-Eichmessungen und dem Pegelstand über die Zeit.

3.4.3.3 Abweichungen der Eichmessungen von der Mittellinie

Zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufes der Lage der Eichmessungen wird im Niedrigwasser eine Mittellinie in die Punkte gelegt (*Abbildung 74*). Die Eichmessungen schwanken von 1991 bis 1997 in einem Band von ca. 0.15 m³/s (*Abbildung 75*). In den Jahren 2000 bis 2018 beträgt dieser Schwankungsbereich ca. 0.30 m³/s mit sinkender Tendenz ab 2009. Mit der neuen Station ab 2019 beträgt dieses Band nur noch ca. 0.05 m³/s. Die Mittelwerte der Eichmessungen liegen von 1991 bis 1997 um + 0.05, 2000 bis 2019 um ca. 0.00 und ab 2019 um -0.025 m³/s. Die

Niedrigwasser-Eichmessungen zeigen also über die Zeit eine Tendenz zu leicht sinkenden Abflüssen bei gleichen Pegelständen. Allerdings ist der Schwankungsbereich deutlich grösser als diese Tendenz.

An der neuen Station liegen die Niedrigwasser-Eichmessungen deutlich näher an der Mittellinie. Dazu beitragen könnte der leicht tiefere und etwas sonnigere Standort, die in den letzten Jahren wärmeren Winter und des Zuflusses warmer Flüssigkeit eines nahe gelegenen Misthaufens (Lehmann 2022).

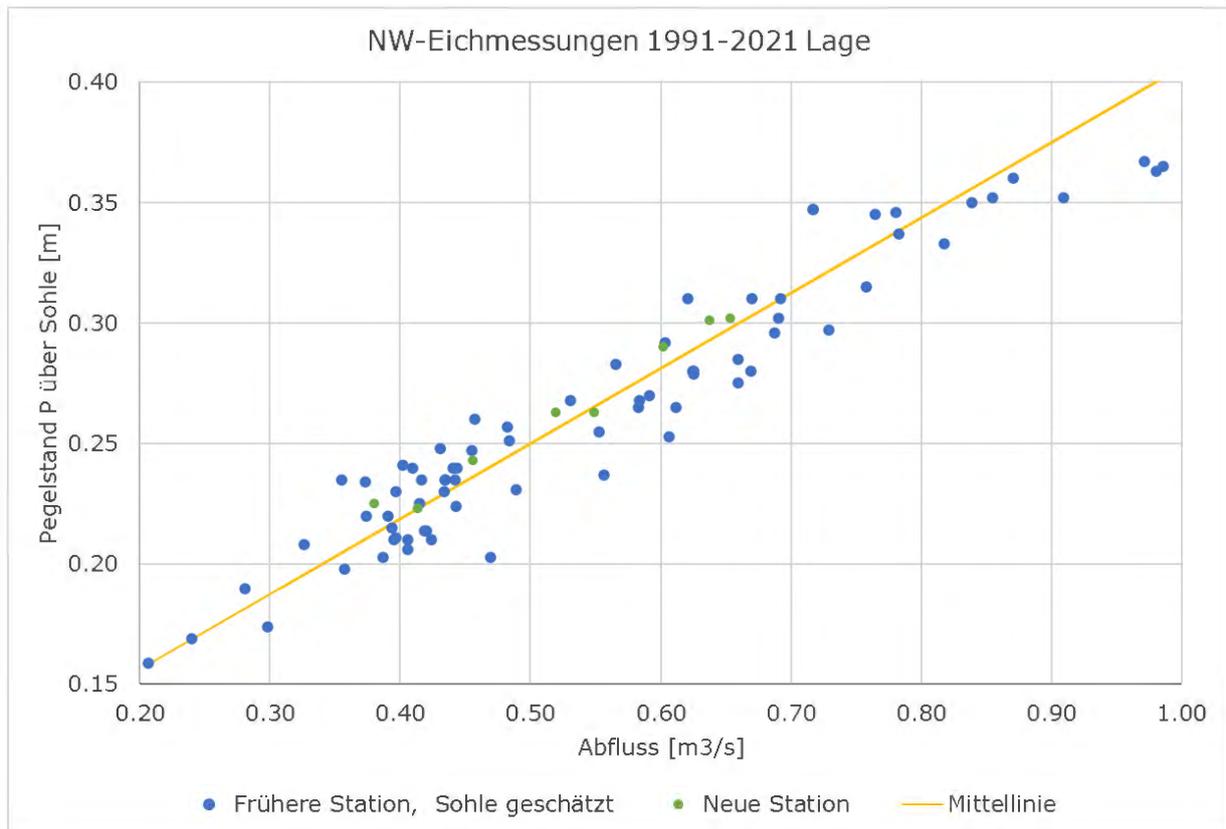


Abbildung 74: Frühere und neue Messstation Goneri, Lage der Niedrigwasser-Eichmessungen mit Mittellinie.

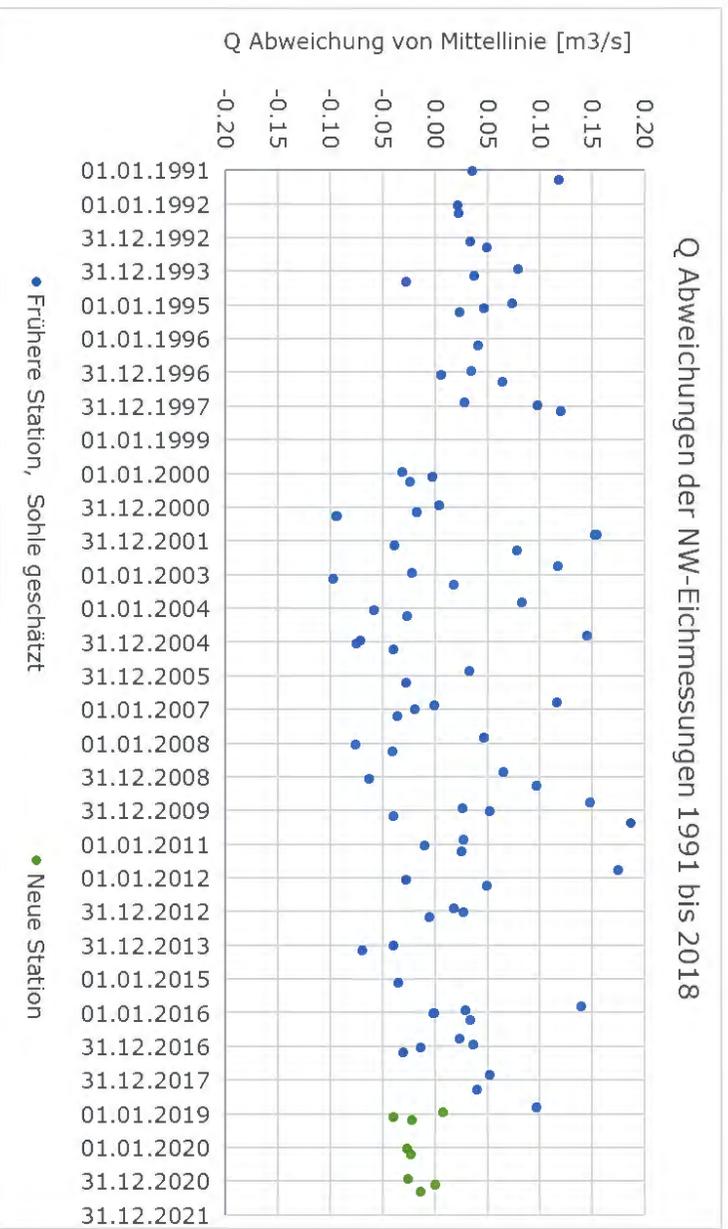


Abbildung 75: Frühere und neue Messstation Goneri, Abweichungen der Niedrigwasser-Eichmessungen von der Mittellinie über die Zeit
Die Abflüsse der Eichmessungen streuen bis weit über den bei voller Niedrigwasserrinne herrschenden Abfluss von ca. 0.55 m³/s um die Mittellinie von 0.00 m³/s (Abbildung 76). Erst bei Abflüssen über 0.8 m³/s weichen sie systematisch von der Mittellinie ab.

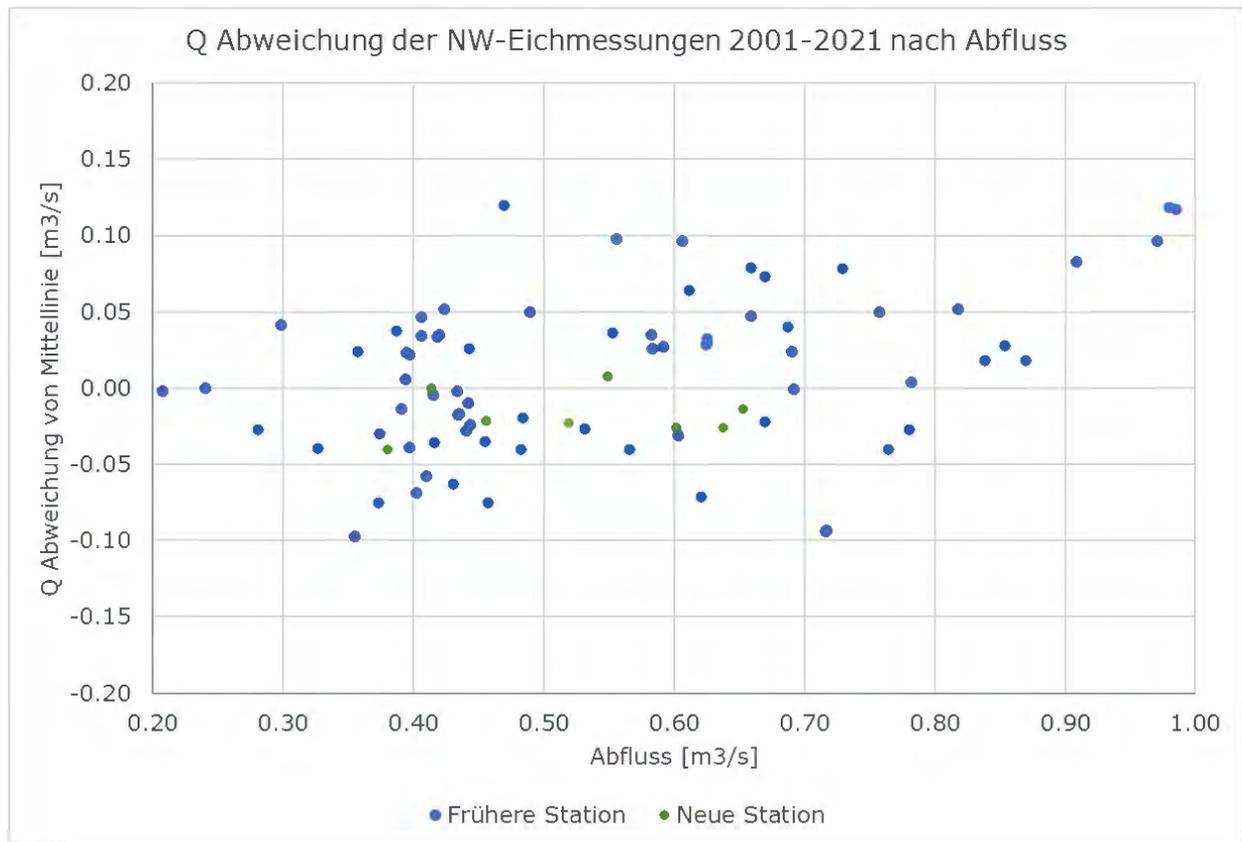


Abbildung 76: Frühere und neue Messstation Goneri, Abweichungen der Niedrigwasser-Eichmessungen von der Mittellinie über deren Abfluss

3.4.4 P-Q-Beziehungen

In den letzten 30 Jahren wurden die 45 P-Q-Beziehungen Nr. 01 bis 45 definiert und verwendet (*Abbildung 77*). Die grosse Anzahl von Kurven, ganz besonders in den Jahren 1992, 1994, 1997, 1999 und 2011, lässt auf viele Veränderungen und Unsicherheiten schliessen. Eine mögliche Erklärung ist, dass aus dem bis 2000 nicht geleerten Geschiebesammler direkt oberhalb der Station oft Steine in den Niedrigwasserkanal der Messstelle gelangten (Lehmann 2022). Allerdings existieren in den Jahren mit mehreren P-Q-Kurven nur zweimal mehr als eine Niedrigwasser-Eichmessung. Die Kurven 2, 3, 5, 7, 8, 12 bis 14, 18 bis 21, 34, 35, 37 und 41 wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit definiert.

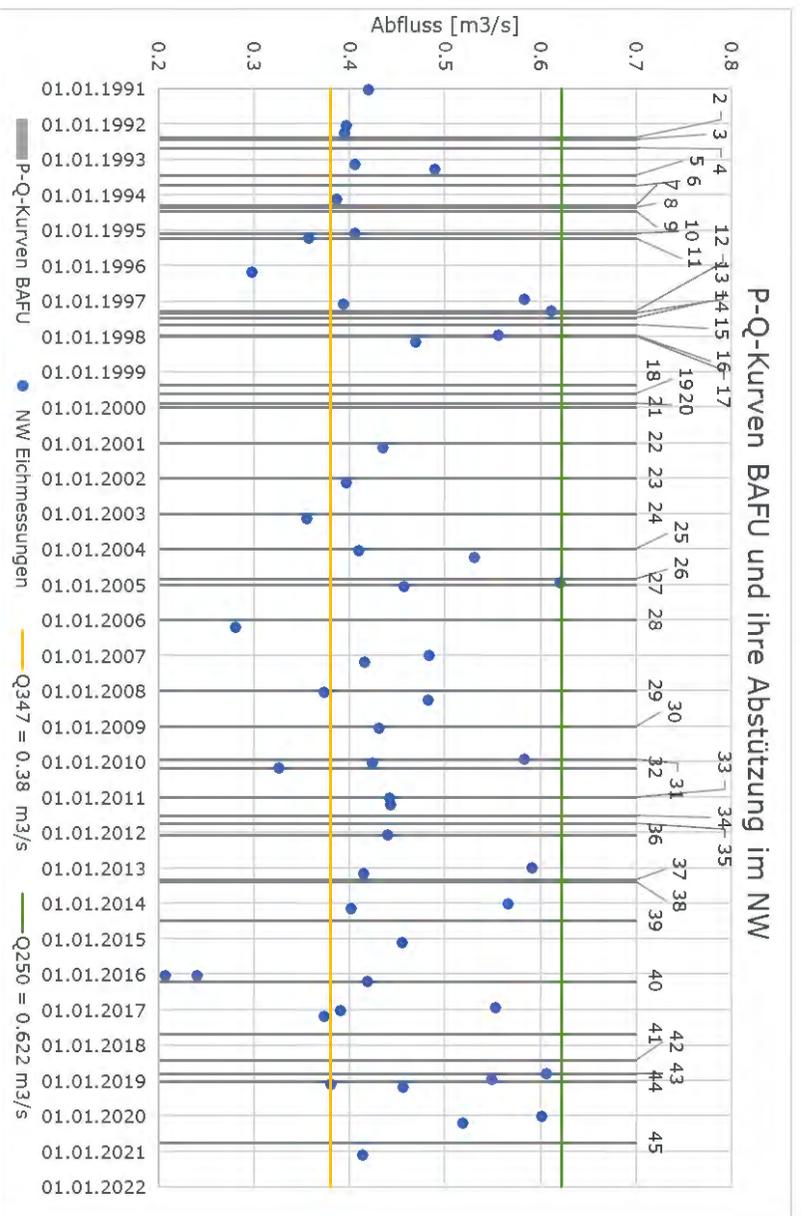


Abbildung 77: Frühere und aktuelle Station Goneri, P-Q-Kurven BAFU und ihre NW-Eichmessungen über die Zeit

Die charakteristischen NW-Abflüsse (*Abbildung 78, vertikale farbige Linien*), liegen alle knapp in der NW-Rinne (schwarz gestrichelt). Die P-Q-Kurven seit 1991 bewegen sich darin in einem weiten Feld. Auffällig hohe Abflüsse und keine Berührung des Nullpunktes lieferten die Kurven 16 (braun), 17 (dunkelblau) und 18 (hellgrün), sie sind deshalb wenig plausibel. Weil nicht klar ist, aus welchem Grund die Kurven so gelegt wurden, wurden diese Verschiebungen nicht in die Nachrechnungen mit Strickler übernommen. Auf der Seite mit niedrigen Abflüssen fallen die Kurven 23 (*grün*), 43 (*grau*) und 44 (*orange*) auf. Die beiden Letztgenannten gehören zu den drei Kurven am neuen Stationsstandort, wobei Kurve 45 (*blau*) wieder deutlich näher beim Gros der

Kurven liegt. Die effektiven Nullpunkte mit $Q=0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ der P-Q-Kurven 01 bis 30 (09.08.1990 bis 09.12.2009) liegen ca. 5 cm unter dem Nullpunkt der Pegelmessung von 1385.82 m ü. M. (*unterer Rand des Diagrammes*). Ab der Kurve 31 (ab 10.12.2009) liegt der effektive Nullpunkt der P-Q-Kurve auf dem Nullpunkt der Pegelmessung. Die Entwicklung der P-Q-Kurven über die Zeit ist im Anhang (*Anhang, 10.4.2*) ersichtlich.

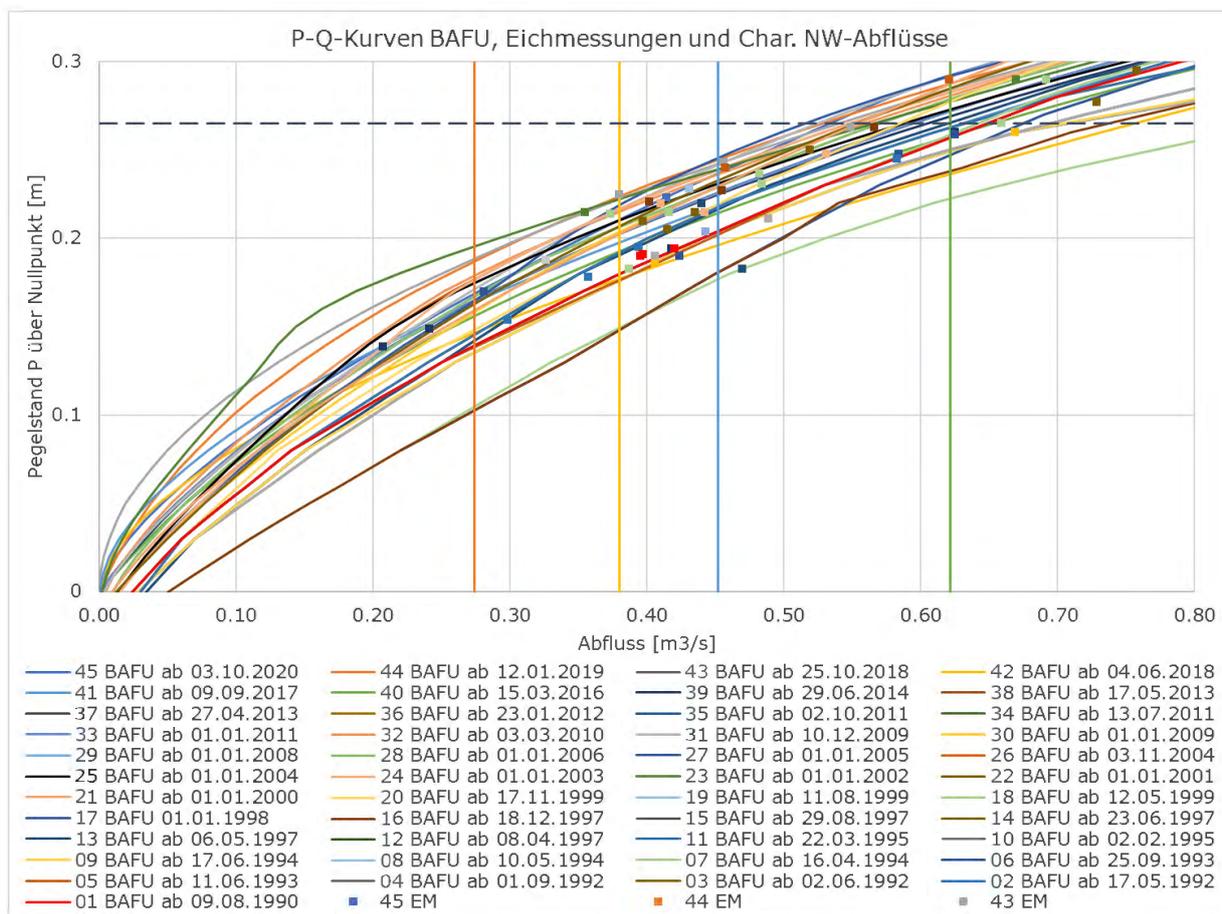


Abbildung 78: Frühere und aktuelle Station Goneri, P-Q-Kurven BAFU im NW-Bereich mit den charakteristischen NW-Abflüssen, den Eichmessungen und der Oberkante der NW-Rinne

Betrachtet man die Flächen um die Kurven BAFU (*Abbildung 79, blau*) so fällt auf, dass diese im Bereich unterhalb des Q347 deutlich grösser sind als der Bereich der dortigen Eichmessungen (*grün*). Die durch die Kurven Strickler bestrichene Fläche (*orange*) umfasst alle Eichmessungen und ist deutlich kleiner als diejenige der BAFU-Kurven. Würden an Stelle der BAFU-Kurven die Strickler Kurven eingesetzt, so würden die NW-Eichmessungen besser repräsentiert. Dies gilt ganz besonders für die schlecht an den Eichmessungen angepassten Kurven BAFU Nr. 16, 17, 18, 23, 42, 43 und 44. Ebenfalls einen starken Einfluss auf die Grösse der Fläche hat der Einsatz von Pneumatik und Radar. Wie bei den Eichmessungen dargestellt (*Abbildung 71*), können die mit dem pneumatischen Messsystem vor 1999 erstellten Eichmessungen umrandet werden (*Abbildung*

79, rotes Oval). Im Niedrigwasserbereich umfasst die Fläche der P-Q-Kurven, welche auf Grund der Eichmessungen mit Pneumatik und mit Radar erstellt wurden je ungefähr 50%.

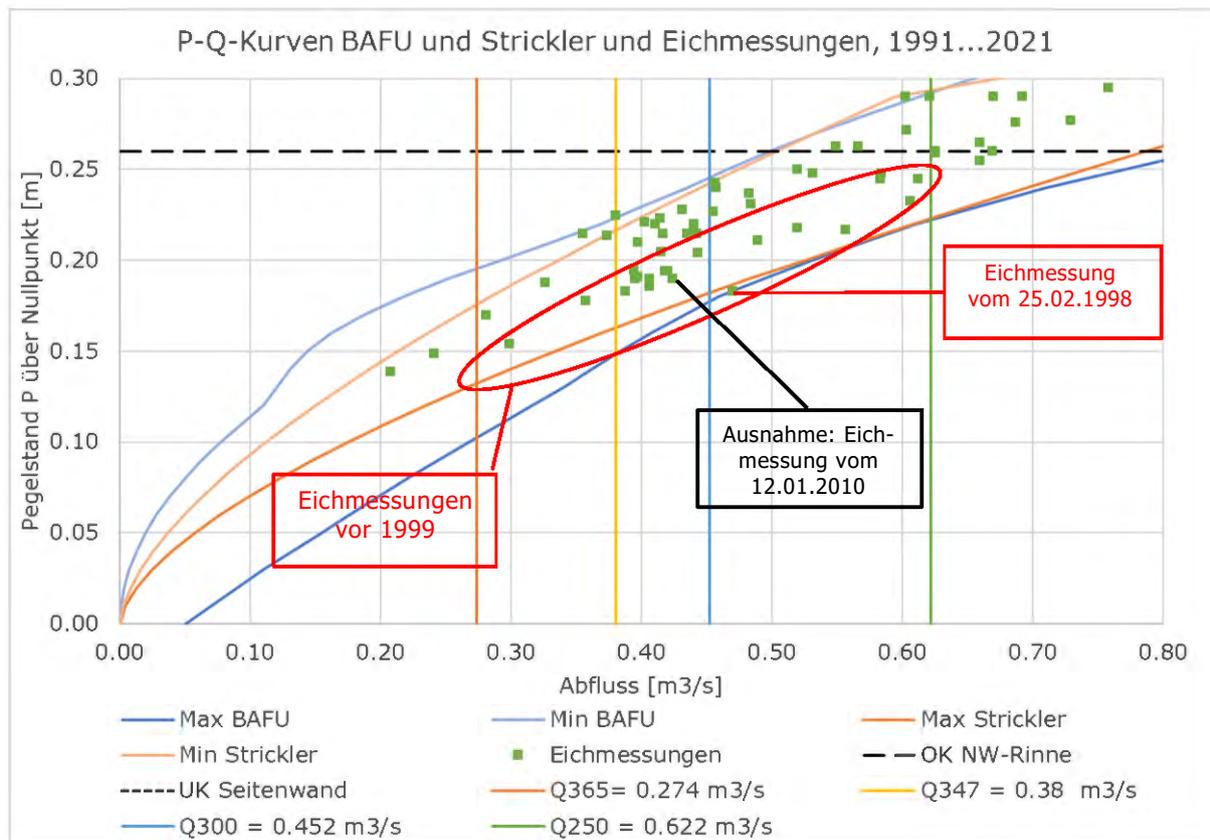


Abbildung 79: Umhüllende der P-Q-Kurven BAFU und Strickler und Eichmessungen mit den charakteristischen Abflüssen. Das rote Oval umfasst mit Ausnahme der bezeichneten Messung die Eichmessungen vor 1999.

3.4.5 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Dauerkurven von Q Strickler und Q BAFU unterscheiden sich bis etwa Q357 nicht wesentlich, danach fällt die Dauerkurve Strickler etwas steiler ab als die Dauerkurve BAFU (*Abbildung 80*). Massgebend sind aber die Abweichungen zwischen Q Strickler und Q BAFU in den einzelnen Winter. In fünf der 31 Jahre beträgt die Abweichung zwischen Q Strickler und Q BAFU mehr als $\pm 7\%$ des Q347 (2018) (*Abbildung 81*). Es sind dies die Jahre 1998 (-15%), 1999 (-23%), 2000 (-10%), 2002 (-11%) und 2010 (-11%). Mit Ausnahme der Jahre 2005, 2017, 2018, 2019 und 2021 lag Q Strickler tiefer als Q BAFU.

Dieses Ergebnis sieht auf den ersten Blick gut aus. Ein erhebliches Problem im Goneri stellen die im Winter sehr oft auftretenden Messartefakte dar. Diese sind aufgrund einer ersten Einschätzung im Goneri wesentlich zahlreicher als am Dischmabach und am Chamuerabach. Dafür sinnbildlich sind die Abflüsse in den Jahren 1995, 1997, 1999, 2000, 2002, 2006, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 in *Abbildung 82* bis *Abbildung 93*. Besonders häufig sind Peaks und Einbrüche während kalter Perioden. Dass während kalter Perioden Peaks und Einbrüche in der Ganglinie real auftreten können, wird in Kapitel 4 aufgezeigt und ist Gegenstand einer laufenden Untersuchung. Viele dieser Peaks und Ganglinienverläufe im Goneri sind aber nicht vergleichbar mit denjenigen im Dischmabach und Chamuerabach und deuten aufgrund ihrer sehr unnatürlichen Formen auf Artefakte hin. Entsprechend sind auch die Q347-Abflüsse stark, wenn nicht sogar ausschliesslich von Artefakten betroffen. Ein grosser Anteil der Abflüsse kleiner Q347 stammt aus den Jahren 1998, 1999, 2000 und 2006. Alle diese Ganglinien sind erheblich durch Artefakte geprägt (*Abbildung 84*, *Abbildung 85*, *Abbildung 86* und *Abbildung 88*).

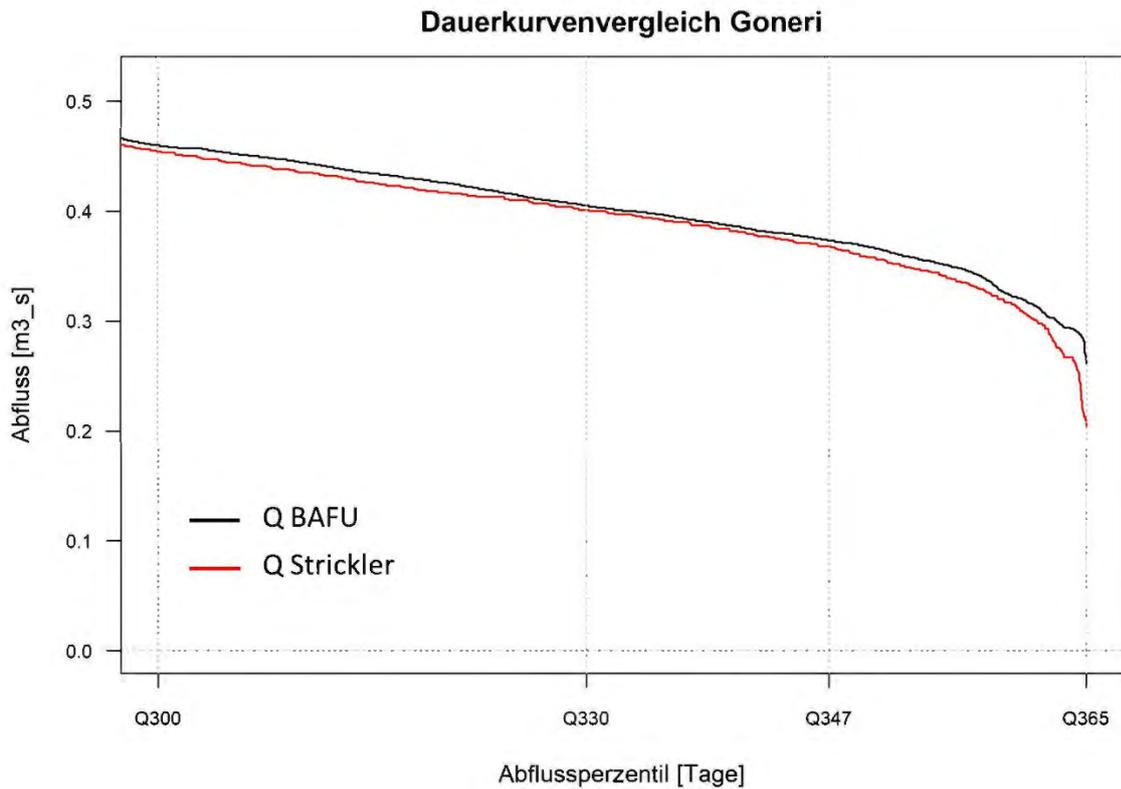


Abbildung 80: Vergleich der Dauerkurve (Q BAFU) mit Dauerkurve (Q Strickler) für den Goneri.

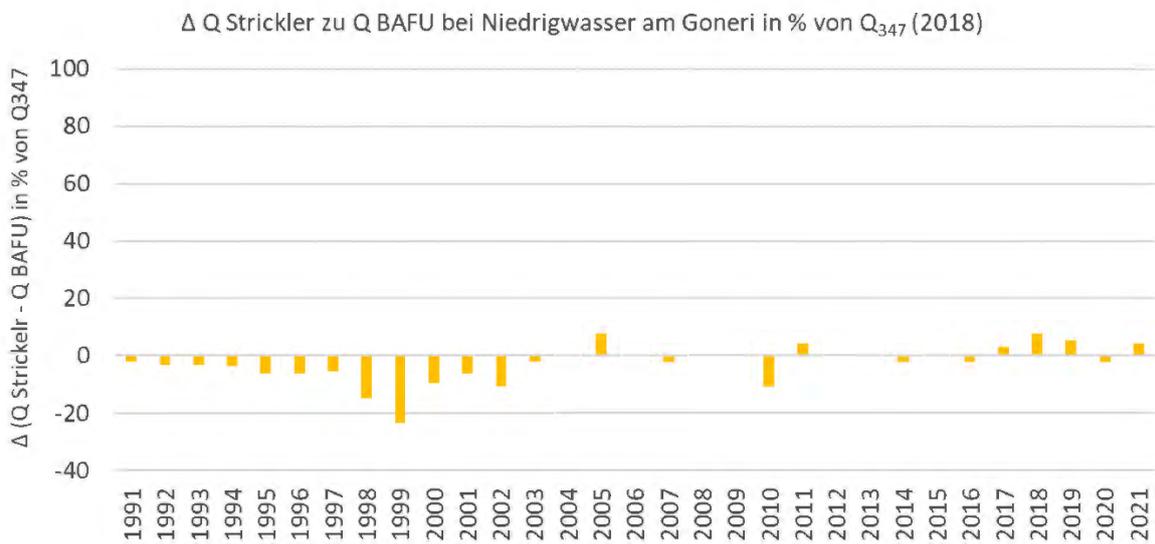


Abbildung 81: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q₃₄₇ (2018) am Pegel des Goneri.

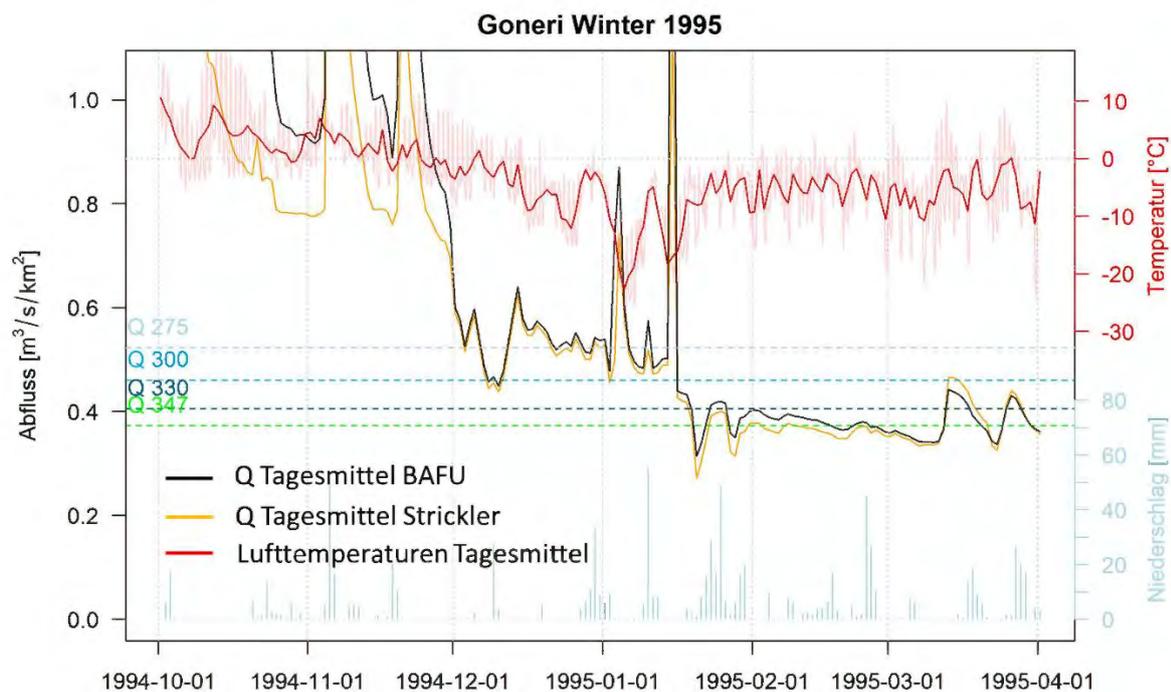


Abbildung 82: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 1995.

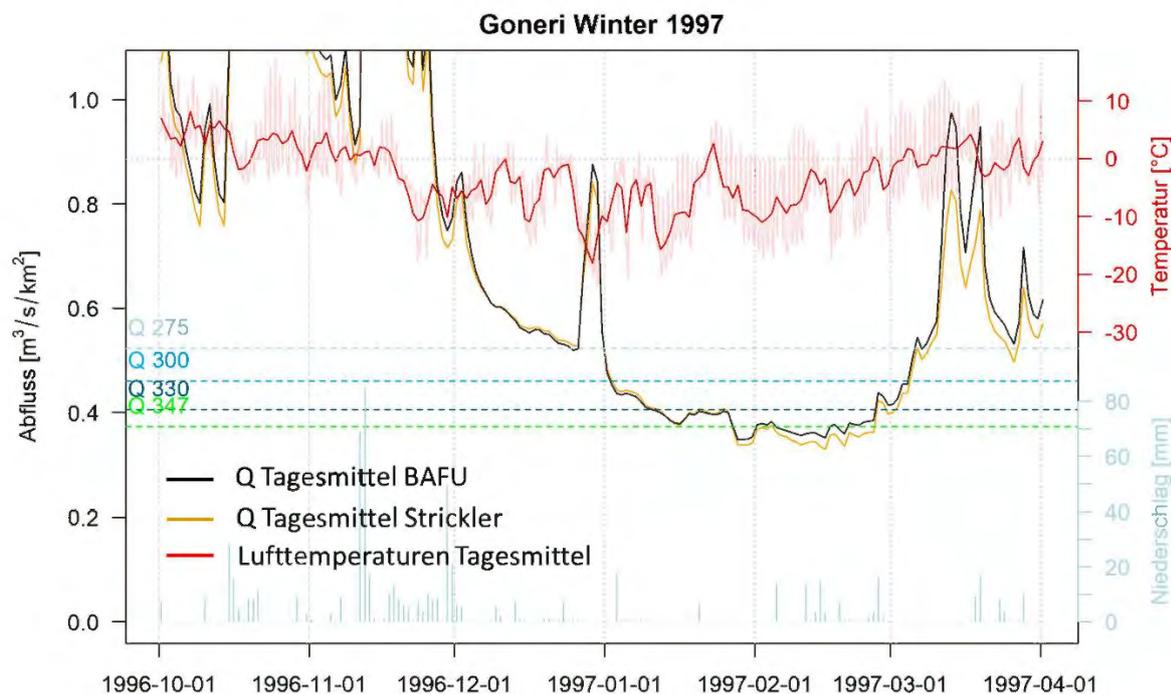


Abbildung 83: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 1997.

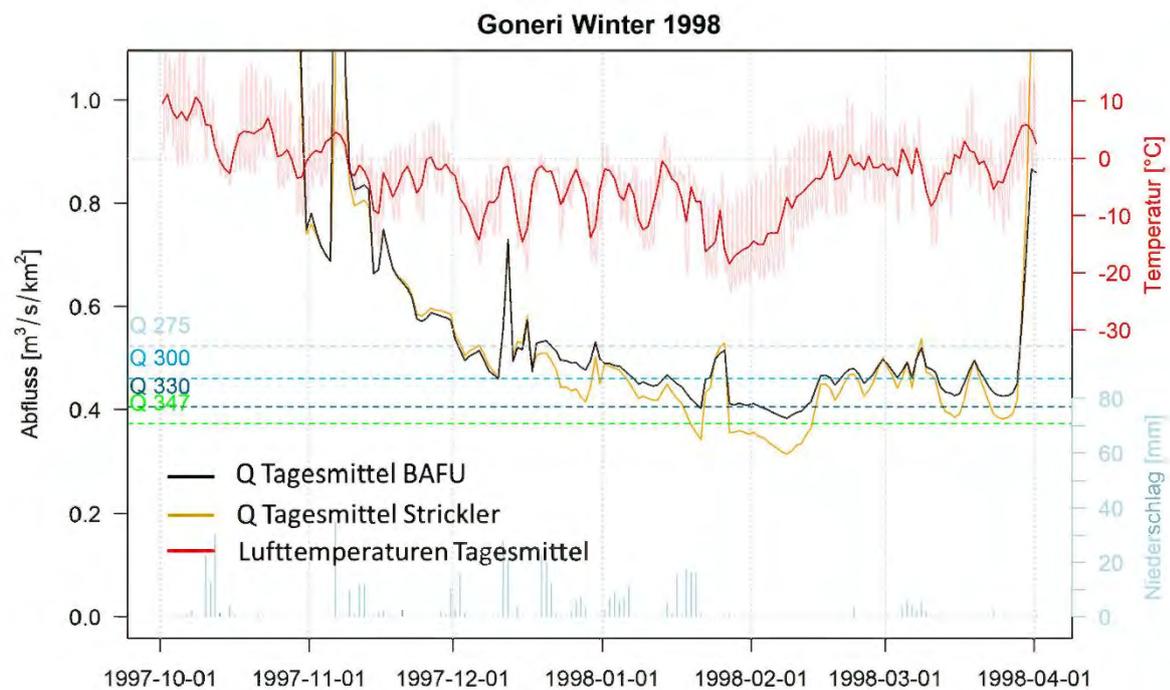


Abbildung 84: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 1998.

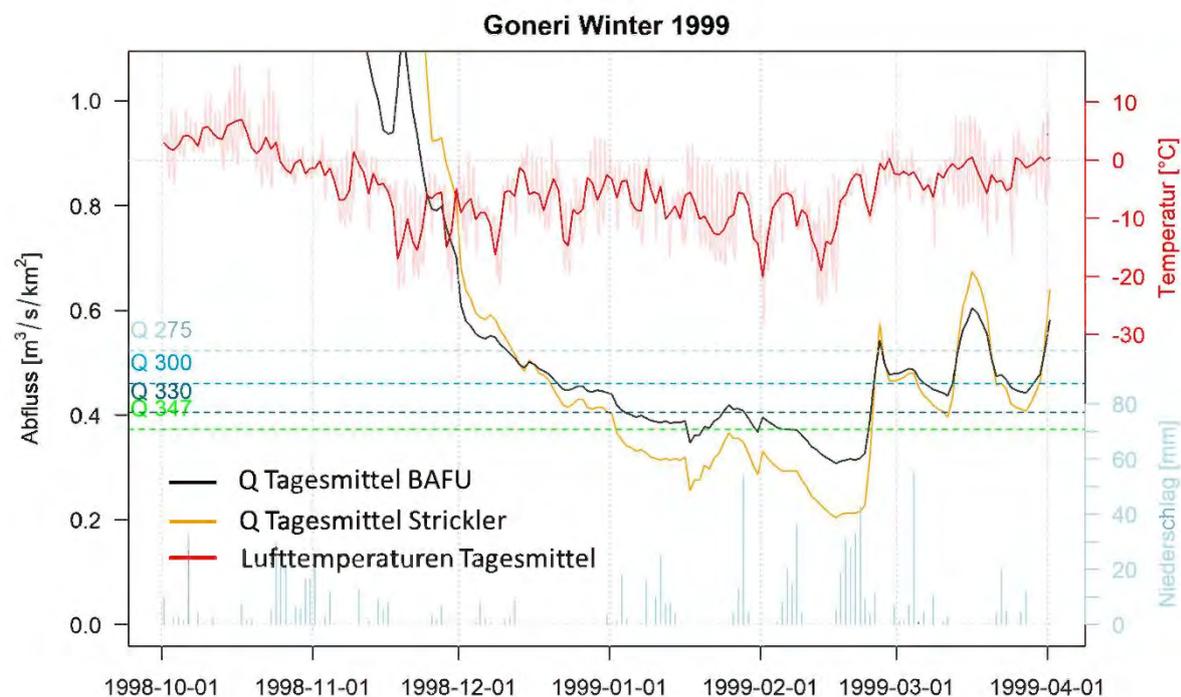


Abbildung 85: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 1999.

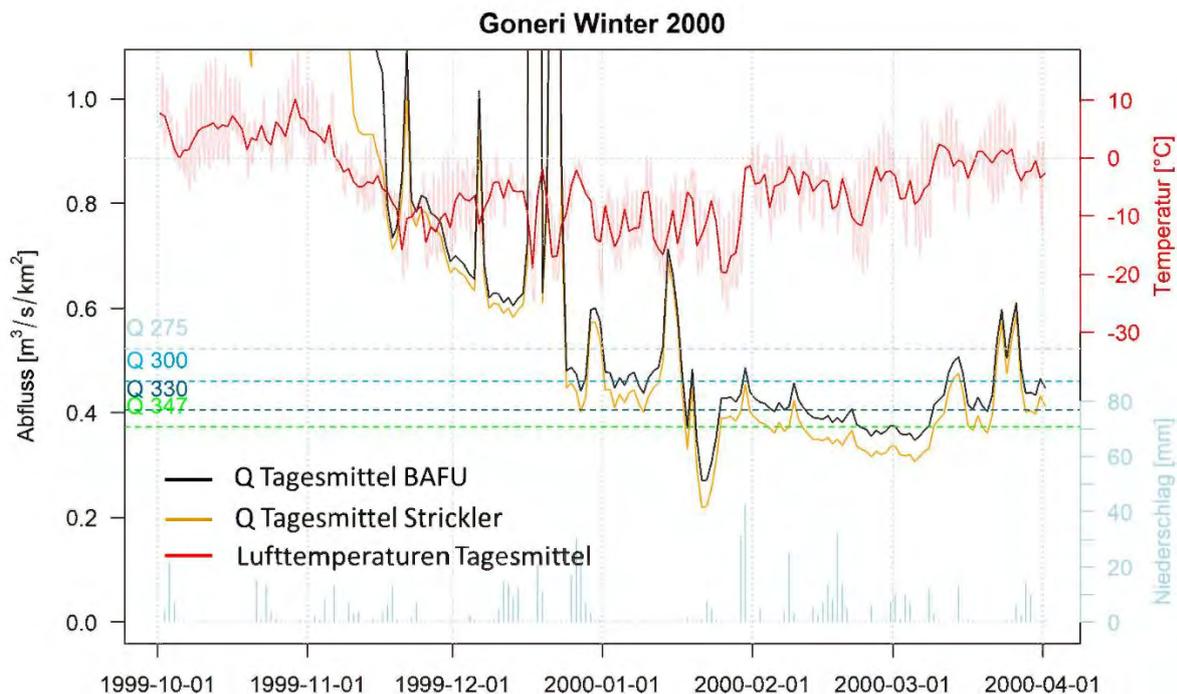


Abbildung 86: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2000.

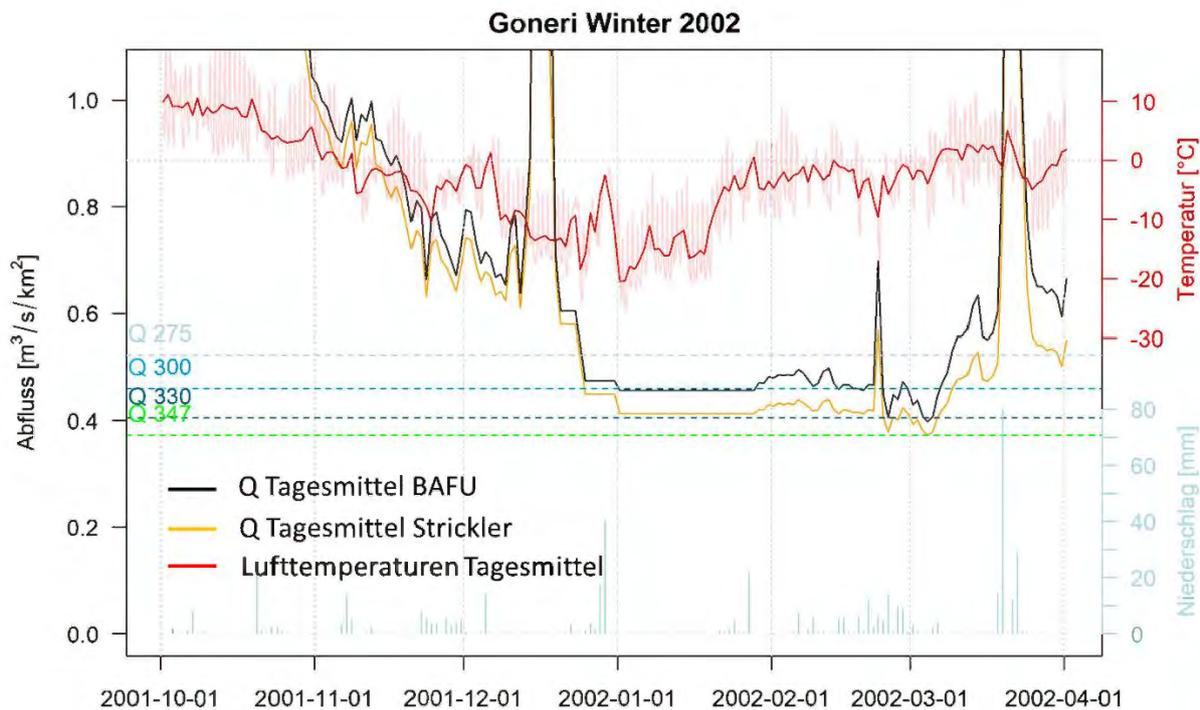


Abbildung 87: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2002.

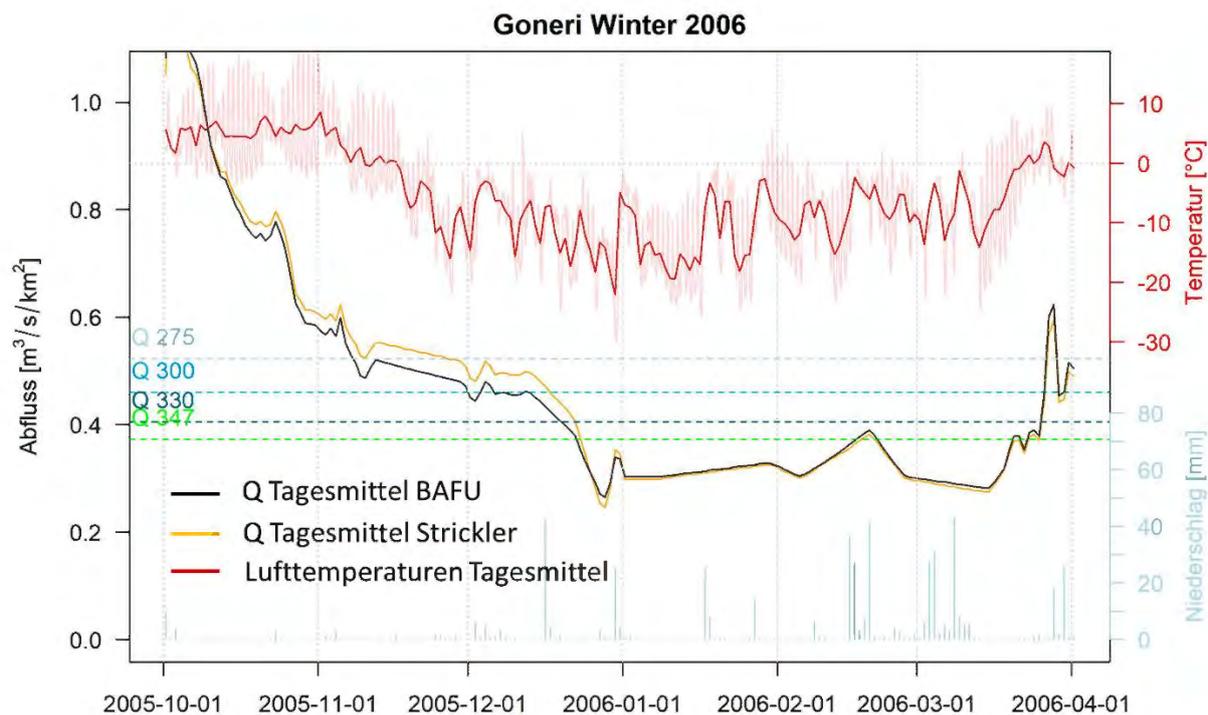


Abbildung 88: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2006.

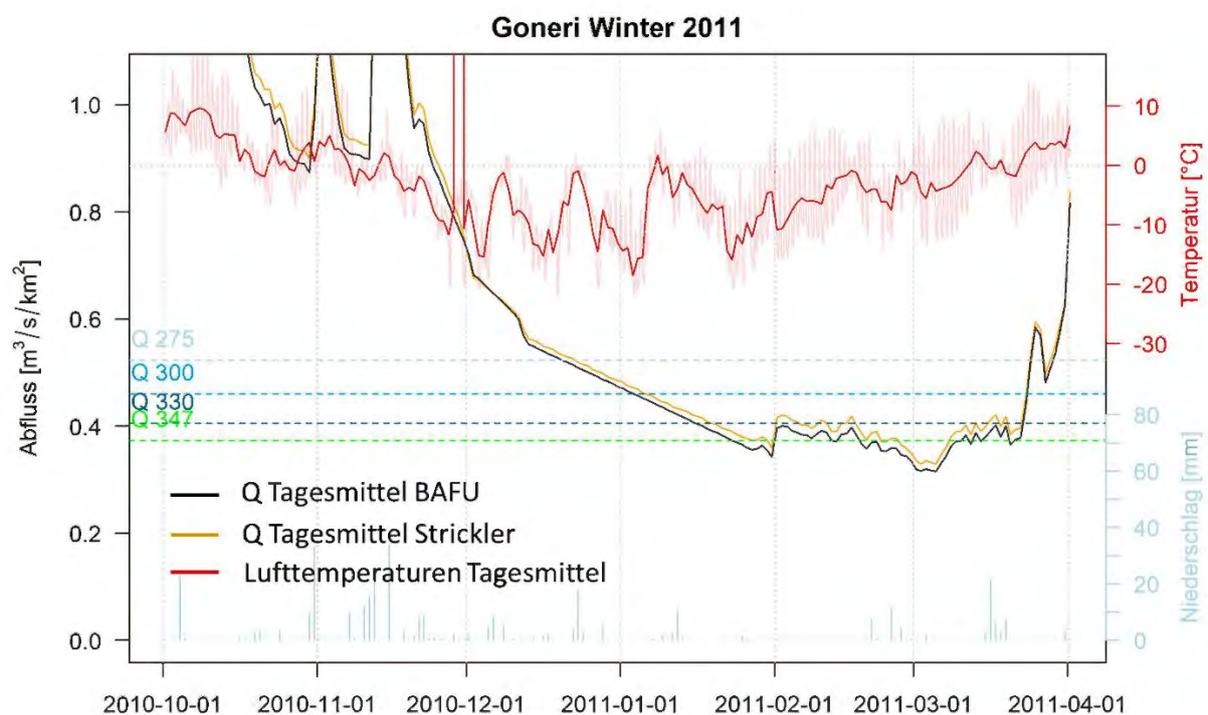


Abbildung 89: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2011.

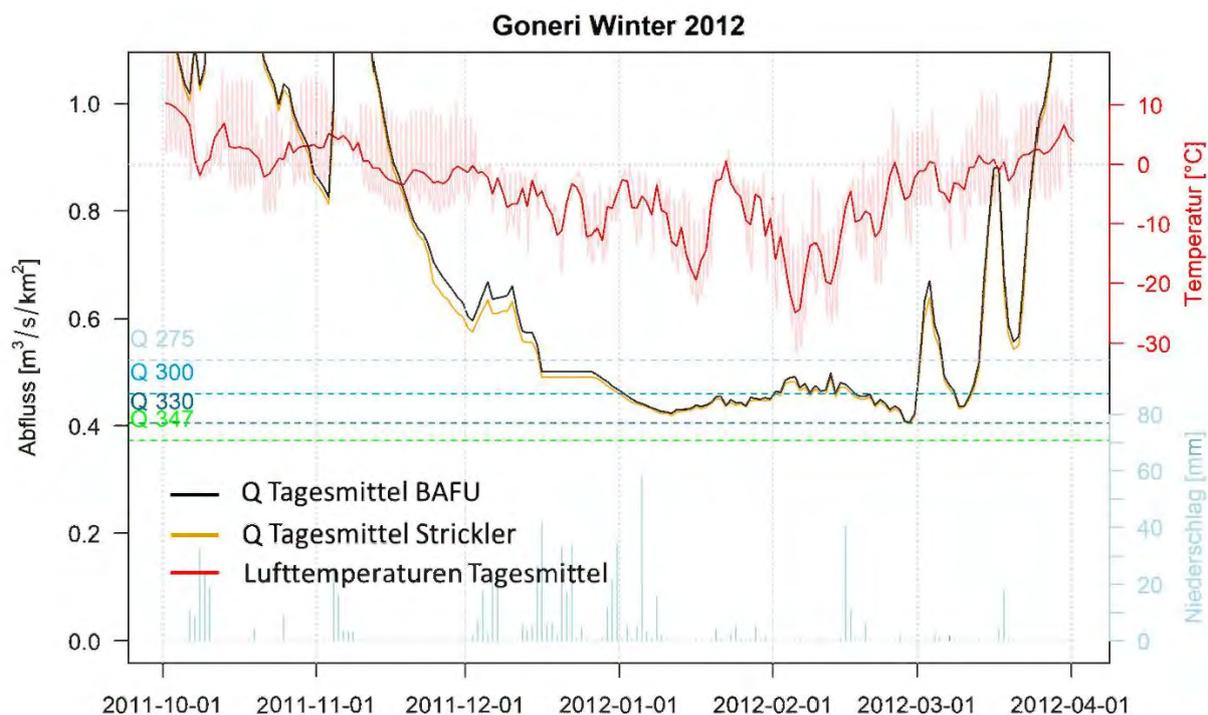


Abbildung 90: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2012.

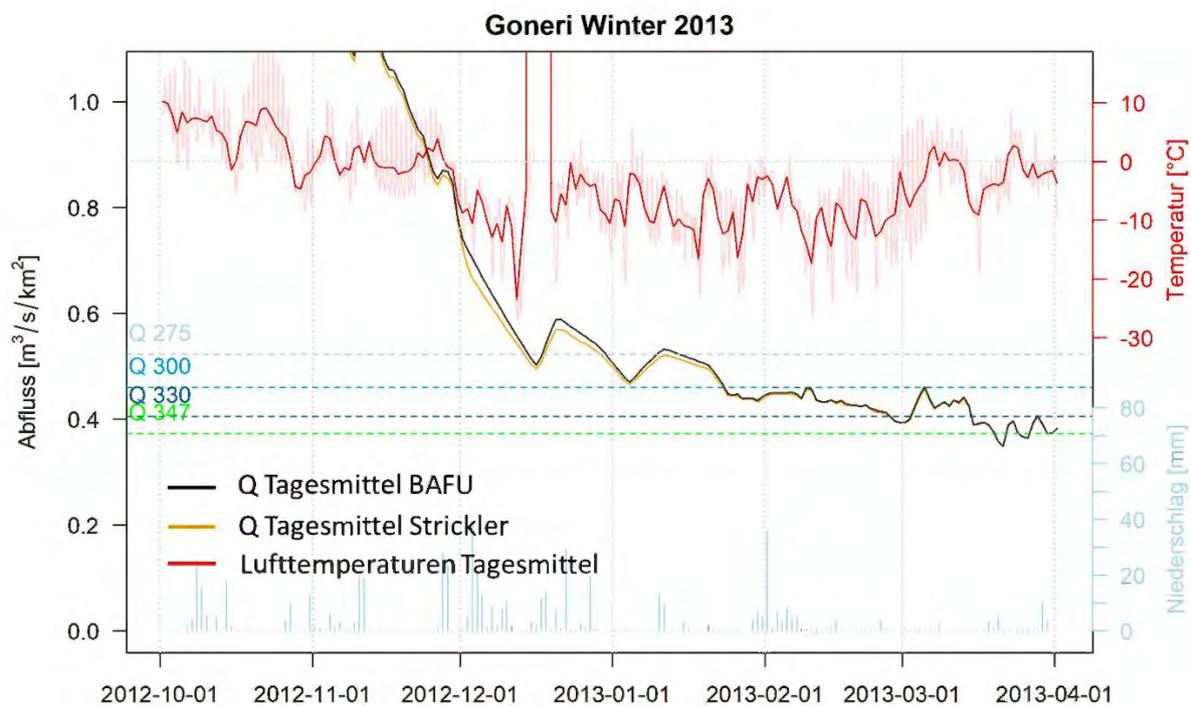


Abbildung 91: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2013.

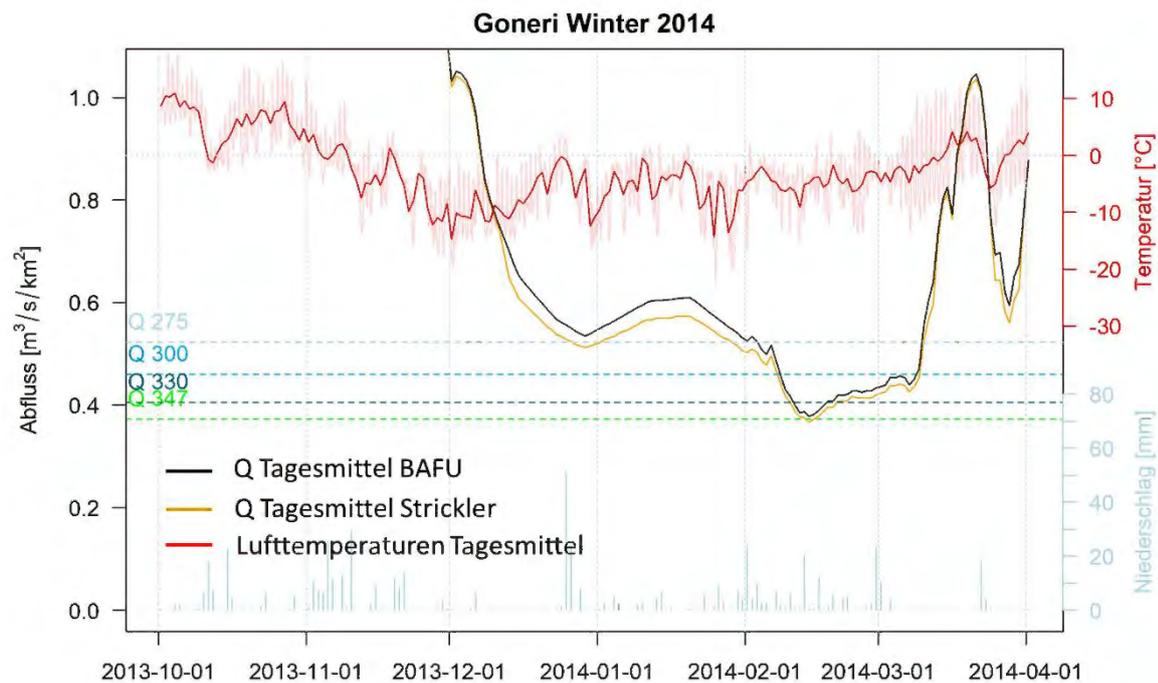


Abbildung 92: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2014.

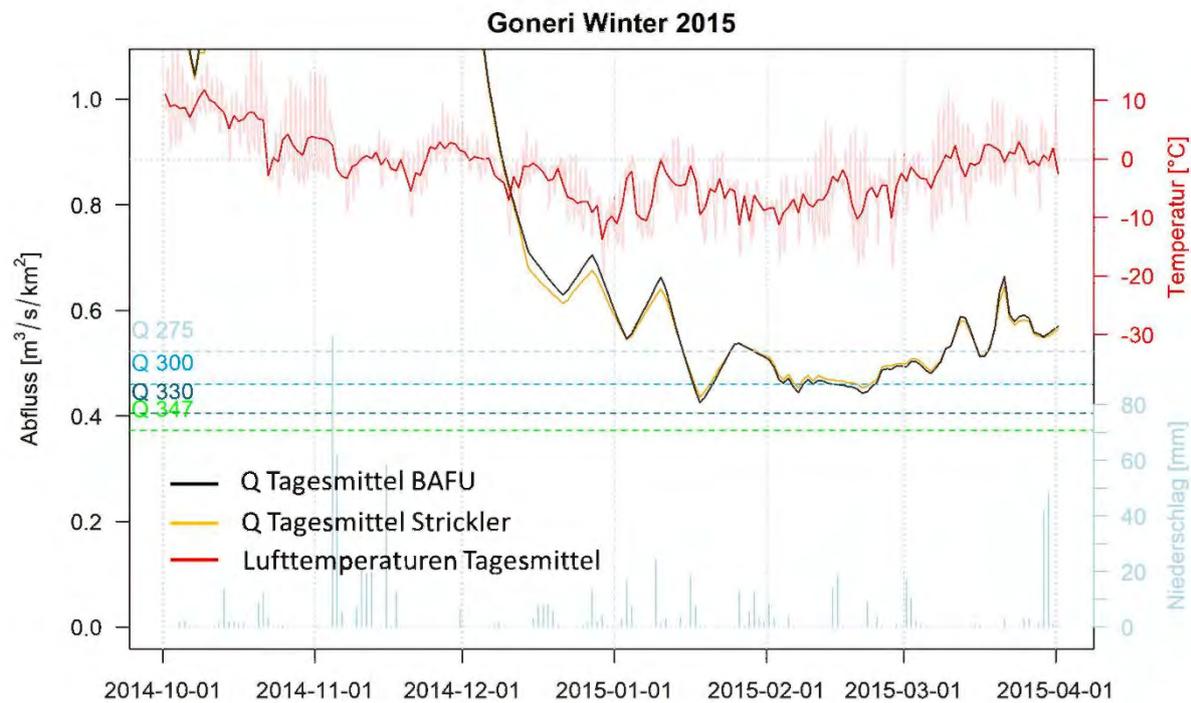


Abbildung 93: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Goneri im Winter 2015.

3.4.6 Schlussfolgerungen

3.4.6.1 Messstation

Die Messrinne der neuen Station Goneri ist gut geeignet für Niedrigwasser. Einzig die Tiefe dieser Rinne ist etwas knapp, Abflüsse um das Q250 füllen diese praktisch bordvoll. Beim Q347 beträgt die Wassertiefe in der Rinne ca. 0.21 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von nur 6.8 % des Q347.

Die Pegelmessung mit einem Radar direkt in der Messrinne hat normalerweise gegenüber einer Schachtmessung den Vorteil, dass keine Differenzen durch Fliessgefälle auftreten. Problematisch ist der Einfluss von Schnee und Eis auf diese Messung (Siehe auch Kapitel 7.1). Diese verursacht ausserordentlich viele Messwertausfälle im Niedrigwasserbereich. Viele der Tagesmittelwerte des Abflusses um und unter dem Q347 sind stark durch solche Artefakte beeinflusst. Die Daten sind so nicht verlässlich.

Es wird zudem vermutet, dass die zeitweise in die NW-Messrinne ragenden Schnee- und Eisbänder den Pegelstand erhöhen und damit für zu hohe Abflusswerte sorgen.

3.4.6.2 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 52 Eichmessungen in der Niedrigwasserrinne durchgeführt, davon lagen 51 unter dem Q250 und 9 unter dem Q347. Alle Eichmessungen wurden mit dem Messflügel am Messsteg ausgeführt.

Unklar ist die Lage der Eichmessung vom 25.02.1998 welche einen auffällig hohen Abfluss aufweist. Ebenfalls aussgewöhnlich ist die Lage von zwei Eichmessungen Anfangs 2016. Die resultierenden Pegelstände und Abflüsse dieser beiden Messungen sind deutlich tiefer als das Tagesmittel. Denkbar wäre, dass die Messungen während eines Sunkes durchgeführt wurden, in dem starke Abflussvariationen die Messqualität negativ beeinflusst haben könnten.

Die Eichmessungen in den Perioden „frühere Station Pneumatik“, „frühere Station Radar“ und „neue Station Radar“ unterscheiden sich in ihrer Lage. Die Eichmessungen in der Periode „frühere Station Radar“ streuen stärker als in den beiden anderen Perioden. Unklar ist, in welcher Periode die Eichmessungen am besten stimmen.

Frühere Versuche mit der Salzverdünnungsmethode zeigten keine befriedigenden Resultate, es wurden Einträge aus Landwirtschaft und Strasse vermutet (Lehmann 2022).

3.4.6.3 P-Q-Kurven

Die P-Q-Kurven wurden auf Basis relativ weniger Niedrigwasser-Eichmessungen erstellt, es gelten grundsätzlich die Aussagen vom Dischmabach (*vgl. Kptl.3.2.7.3*).

Bei der Analyse der P-Q-Kurven wurden die folgenden Auffälligkeiten entdeckt:

- Die Kurven 01 bis 30 weisen einen Nullpunkt auf, welcher 5 cm unterhalb demjenigen der Pegelmessung liegen.
- Die Kurven 16, 17 und 18, und 19 generieren deutlich höhere Abflüsse als ihre vorangehenden und nachfolgenden Kurven und weisen unplausibel gerade Verläufe auf.
- Die Kurve 21 wurde ohne neue Eichmessungen eingeführt.
- Die Kurve 23 weist einen unplausiblen Bogen zu tiefen Abflüssen auf. Grund dafür ist die Verwendung eines virtuellen Punktes mit dieser Lage.
- Die Kurve 27 liegt mit einer auffälligen Schwingung höher als ihre Vor- und Nachgänger
- Die Kurven 5, 8, 10, 12, 13, 14, 16 und 37 wurden auf Grund einer einzelnen neuen Eichmessung eingeführt.
- Die Kurven 35 bis 38 sind entgegen ihren Eichmessungen im Niedrigwasserbereich identisch, und sie reduzieren den Niedrigwasserabfluss bedeutend.
- Die Kurve 42 liegt auf Grund einer einzelnen Eichmessung bei deutlich höheren Abflüssen als ihre Vor- und Nachgängerinnen.

3.4.7 Empfehlungen

Messstation

In den Wintermessreihen der Station Goneri sind wesentlich mehr Messartefakte zu erkennen als in denen der Stationen Dischmabach und Chamuerabach. Diese Artefakte werden durch Probleme mit der Wasserstandsmessung (Radar misst auf Schnee/Eis) und einen durch Schnee und Eis verursachten Einstau des Pegelstandes verursacht. Um diese Effekte besser differenzieren zu können, wird empfohlen, direkt in der NW-Messrinne eine zusätzliche Tauchsonde einzurichten. Die so erfassten Pegelstände eines Winters lassen sich mit denjenigen des Radars zu vergleichen. Aufschlussreich wäre das zusätzliche ständige Freihalten der Rinne von Eis und Schnee z.B. während der zweiten Hälfte des Winters. Damit könnten die beiden Einflüsse quantifiziert werden.

Wenn sich zeigen würde, dass die Artefakte von Problemen mit der Wasserstandsmessung herühren, wird die definitive Ausrüstung mit einem zusätzlichen Sensor empfohlen. Eine pneumatische Pegelmessung in der NW-Messrinne scheint bei den vorliegenden Verhältnissen suboptimal zu sein; denn eine solche Messeinrichtung führte am früheren Standort der Station Goneri ebenfalls zu mehr Messartefakten als am Dischmabach und Chamuerabach. Die Anzahl der Messlücken

scheint aber vor 1999 (Pneumatik) kleiner gewesen zu sein als zwischen 1999 und 2020 (Radar über der Rinne).

Wenn sich dagegen zeigen würde, dass die Artefakte primär aus der Beeinflussung des Pegelstandes selbst durch Schnee und Eis herrühren, müsste überlegt werden, wie die Messrinne über den Winter freigehalten werden könnte, oder wie mit der Veränderung des Rinnenquerschnittes umgegangen werden könnte.

Wegen der alpinen und schattigen Lage wäre vermutlich eine Konstruktion mit einem tief eingebauten Schacht im Vorbecken, ähnlich dem Chamuerabach, sinnvoll und im Unterhalt und Korrekturaufwand vermutlich mit geringerem Aufwand verbunden.

Eichmessungen

Weil Salzmessungen bei Niedrigwasser in der Regel rasch, genau und unkompliziert sind, empfehlen wir, solche in der Goneri durchzuführen. Seitdem die Station unterhalb der Einleitung des Kraftwerkes Gehre steht, könnten die gegenüber der Flügelmessung kurzen Messzeiten einen grossen Vorteil darstellen.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, die Kurven 23, 27, und 35 bis 38 im Niedrigwasserbereich nicht zu verwenden.

Korrektur der Messartefakte

Ohne eine zusätzliche Korrektur der Messartefakte oder eine Isolation der Messperioden mit verlässlichen Pegelwerten ist von einer Verwendung der Werte für Betrachtungen im Niedrigwasserbereich abzuraten.

3.5 Krummbach - Klusmatten

3.5.1 Morphologie und Hydraulik

Das Einzugsgebiet dieses Bergbaches besteht vor allem aus steilen Bergflanken am Simplonpass (*Abbildung 94*). Das Wasser sammelt sich oberhalb der Messstation in einem relativ flachen Tal-kessel, der Krummbach weist dort ein Gefälle von 3.7% auf. Unterhalb der Messstation stürzt der Bach mit 7.3% Gefälle Simplon Dorf entgegen.



Abbildung 94: Messstation Krummbach-Klusmatten, markiert mit rotem Punkt, Einzugsgebiet nördlich davon, Fliessrichtung gegen unten im Bild (BAFU 2021)

Die Messkabine befindet sich auf einer Felsplatte am linken Ufer des Krummbaches (*Abbildung 95*). Der Pegelstand wird südlich davon im felsigen Bachbett gemessen, kurz bevor der Bach über eine natürliche Felskante fällt.



Abbildung 95: *Messstation Krumbach-Klusmatten, Bild mit rot markierter Messkabine, Fliessrichtung gegen unten im Bild. (BAFU 2021)*

Die Station ist oft Schnee und Eis ausgesetzt. Geschiebe wird zum Teil im Talkessel abgelagert, kann aber auch im Messquerschnitt zu Veränderungen führen.

3.5.2 Messstation

Bezeichnung	2244 Krumbach - Klusmatten	
Kennzahlen der Station (BAFU 2021)		
Stationshöhe	1'795 m ü. M	
Grösse des Einzugsgebietes (EZG)	19.4 km ²	
Mittlere Höhe des EZG	2'271 m ü. M	
Vergletscherung	0.4 %	
Koordinaten LV95	2'644'504	1'119'422 (aus WISKI)



Abbildung 96: Messstation BAFU 2244 Krumbach - Klusmatten Blick auf die Felsplatte mit der Messkabine und dem Bach davor. Die Pegelmessung befindet sich senkrecht unterhalb der Kabine (BAFU 2021).

Tabelle 5: Tageswerte von 1952-2017 (Hydromaps 2021)

	Bereich [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	Charakteristische Werte
Jeden Tag erreichter Abfluss		$Q_{365} = 0.08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Niedrigste 5%	0.08 ... 0.13	$Q_{347} = 0.13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Niedrigste 8.2 %		$Q_{300} = 0.17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Niedrigste 31.5%		$Q_{250} = 0.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1952		$NM7Q = 0.09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Mittlere 90% der Abflüsse	0.13 ... 2.63	$Q_{183} = 0.38 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Höchste 5% der Abflüsse	2.63 ... 23.4	

Beim $Q_{347} = 0.13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von ca. $0.018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Das linke Ufer besteht aus der erwähnten Felsplatte, das rechte Ufer aus Feldblöcken und die Sohle aus grobem Kies (*Abbildung 97*). Eine natürliche Felskante staut den Krumbach in diesem Bereich auf. Die Pneumatik misst ca. 2m oberhalb dieses Überfalles am linken Ufer, die Pegellatte befindet sich auf demselben Querschnitt am rechten Ufer.



Abbildung 97: Station Krumbach, natürliche Felskante mit rechtsufriger Pegellatte (BAFU 2021).

Der abflussbestimmende Querschnitt ist die erwähnte Felskante, deren Geometrie der Landeskarte entnommen wurde (*Abbildung 98*).

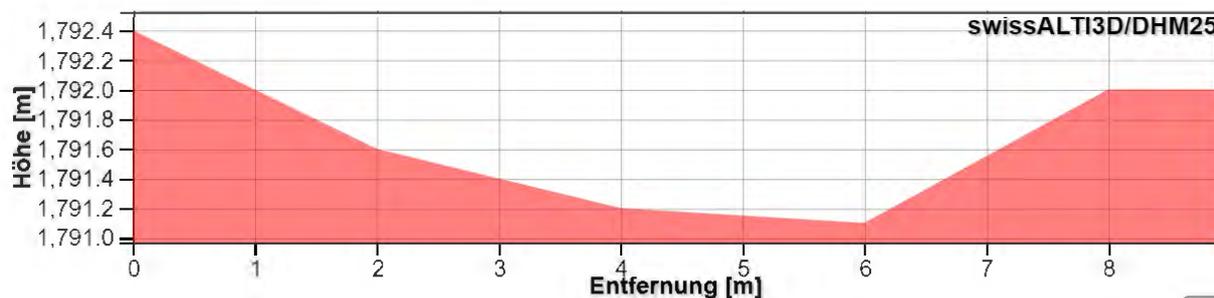


Abbildung 98: Grobe Abschätzung des Messquerschnittes aus der Karte in Flussrichtung, Linie über den felsigen Überfall unterhalb der Station senkrecht zum Bach.

Seit 1991 sind folgende Ereignisse bekannt, welche sich möglicherweise auf den Bezug zwischen Pegelstand P und Abfluss Q auswirkten (Lehmann 2022):

- 1.1.1974 Pegelnullpunkt 1795.00 m ü. M (Hammer BAFU 20222)
- 1.1.1982 Pegelnullpunkt 1790.00 m ü. M (Hammer BAFU 20222)
- 1991 war die Station mit der Pegelmessstelle ca. 8 m Meter oberstrom der heutigen Pneumatik in Betrieb.
- Am 24.09.1993 ereignete sich ein grosses Hochwasser mit dem Ausbruch eines Bergsees. Die Station wurde komplett zerstört und anschliessend provisorisch mit einem Schwimmerlimniographen (Ott R-16) am rechten Ufer, auf der Höhe der heutige Messstelle, wieder aufgebaut. Die anschliessend aufgenommenen Eichmessungen und die ab 01.01.1995 gültige P-Q-Kurve BAFU weisen Koten auf, welche ca. 1.8 m tiefer liegen als vorher. Der Nullpunkt wurde um einen nicht genau bekannten Betrag verschoben.
- Ungefähr im Herbst 1996 wurde das Provisorium durch eine mechanische Druckwaage (Neyrpic) am heutigen Messort am linken Ufer abgelöst.
- Am 14.10.2000 ereignete sich ein grosses Hochwasser in der Region, bekannt durch den Murgang in Gondo. Das Bachbett wurde stark verändert. Im Bereich der Messstelle war vor allem das rechte Ufer unterhalb der natürlichen Überfallkante betroffen.
- Ungefähr im Herbst 2002 wurde die Station am heutigen Standort ans Stromnetz angeschlossen und ein neues pneumatisches Messsystem (Rittmeyer Mini) in Betrieb genommen.

Der Wasserstand ist an diesem Standort generell schwierig zu messen. Vom November bis März gibt es viel Schnee und Eis, aber kein Grundeis. Die Standorte von Pegellatte und Pneumatik an den entgegengesetzten Ufern kann in Kombination mit der leichten Kurve bei grösseren Abflüssen ein Quergefälle verursachen. Wenn in einer solchen Situation der Nullpunkt korrigiert wird, kann dies zu Nullpunktfehlern bei Niedrigwasser führen.

Bei den Eichmessungen mit der Salzverdünnungs-Methode wurde der Abfluss tendenziell überschätzt, die Gründe dafür sind nicht bekannt.

3.5.3 Messtechnik

Der Wasserstand wird mit einer pneumatischen Messeinrichtung mit einem Messschlauch ins Flussbett gemessen. Messbereich ca. 0...5 m Wassersäule, ca. +/- 0.01m. Die Pegelmessung wird kontrolliert, indem deren Messwert mit der Pegellatte verglichen wird.

3.5.4 Eichmessungen

Die Eichmessungen am früheren Standort wurden mit dem Messflügel durchgeführt. Auf *Abbildung 99* sind die Pegelhöhen der Eichmessungen im Niedrigwasserbereich im zeitlichen Verlauf dargestellt. Zwischen Herbst 1993 (zerstörerisches Hochwasser) und Herbst 1994 gibt es keine Eichmessungen. Die Eichmessungen am neuen Standort werden unter Abflüssen von 0.5 m³/s mit Salz und darüber mit Uranin durchgeführt. Die Zugabe erfolgt bei beiden Verfahren an unterschiedlichen Orten. Die Leifähigkeitsmessung erfolgt im Sommer ca. 10 m flussaufwärts der Messstelle oder bei sehr tiefen Abflüssen 1 m flussabwärts, im Winter bei der Strassenbrücke ca. 150 m flussaufwärts. Die Uranin-Proben werden bei der natürlichen Überfallkante ca. 2m flussabwärts der Station entnommen. Flügelmessungen werden zum Vergleich bei der Strassenbrücke 150m flussaufwärts durchgeführt, der dort ermittelte Abfluss wird in Bezug zum Pegel der Messstelle gesetzt. Zu Beginn des Untersuchungszeitraums wurden noch wenige Messungen mit einem optischen Tracer und einem Fluorimeter (FLH) durchgeführt (Lehmann 2022).

Im Untersuchungszeitraum wurden 283 Eichmessungen durchgeführt (*Abbildung 100*). Davon liegen 62 Messungen unterhalb des Q250 von 0,22 m³/s und 7 unterhalb des Q347 von 0.13 m³/s. Es wurden häufig zwei Eichmessungen am gleichen Tag durchgeführt, welche zum Teil deckungsgleich waren.

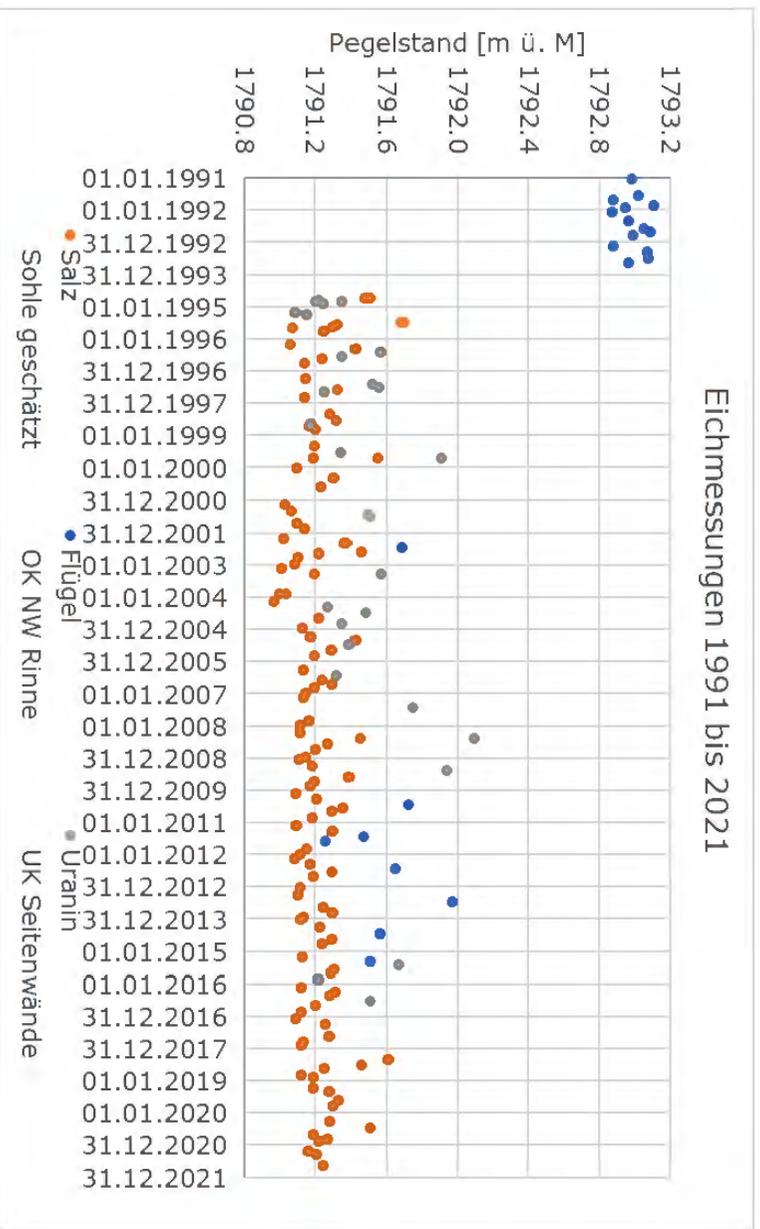


Abbildung 99: Krummbach, Pegelstand der Eichmessungen nach Methode über die Zeit. Gut sichtbar sind die Flügelmessungen am früheren Standort von 1991 bis zum Hochwasser im September 1993.

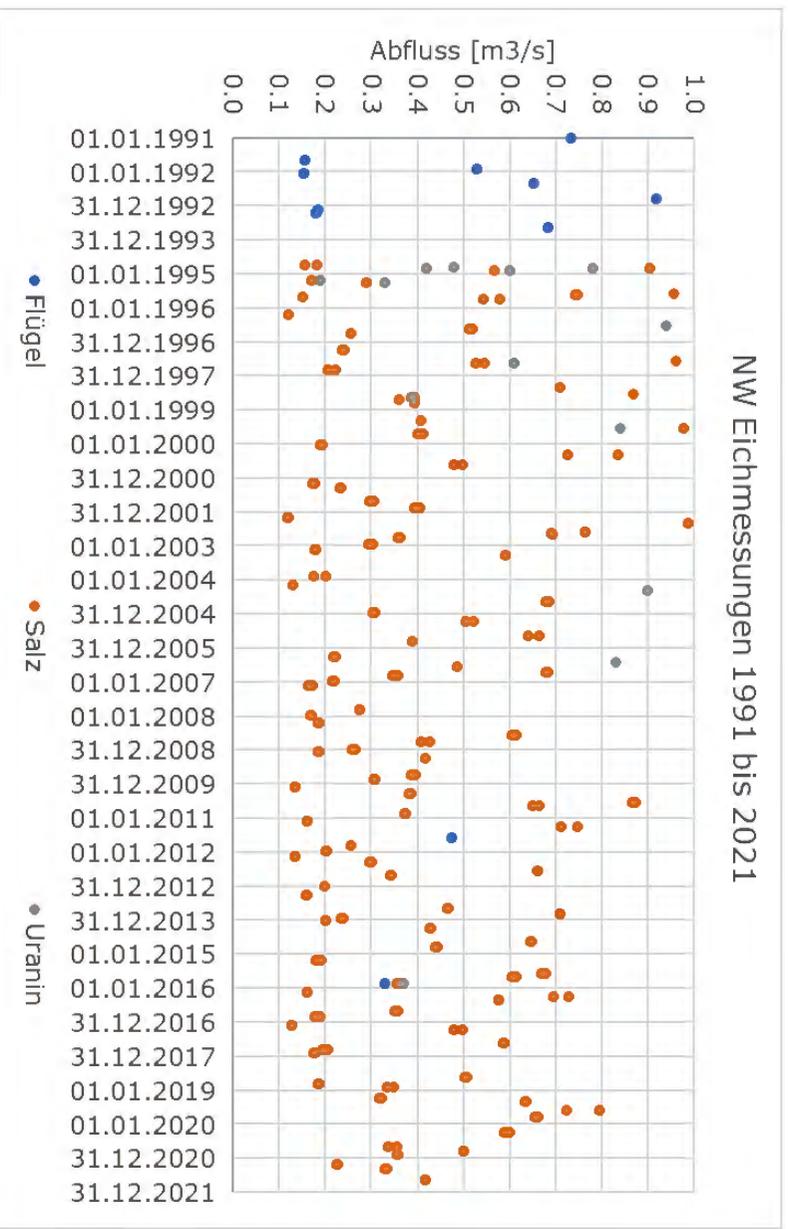


Abbildung 100: Krummbach, Abfluss der Eichmessungen nach Methode über die Zeit

3.5.4.1 Lage der Eichmessungen

Die Eichmessungen am früheren Standort bilden unter dem Q250 von 0.3 m³/s und über 0.5 m³/s eine gut sichtbare P-Q-Kurve (*Abbildung 101*), dazwischen gibt es keine Messungen. Die sechs Messungen unter dem Q250 bilden zwei Gruppen, durch die man je eine P-Q-Linie ziehen könnte. Sie stammen alle aus dem Zeitraum von April 1990 bis März 1993, die Mitglieder der beiden Gruppen liegen zeitlich durcheinander.

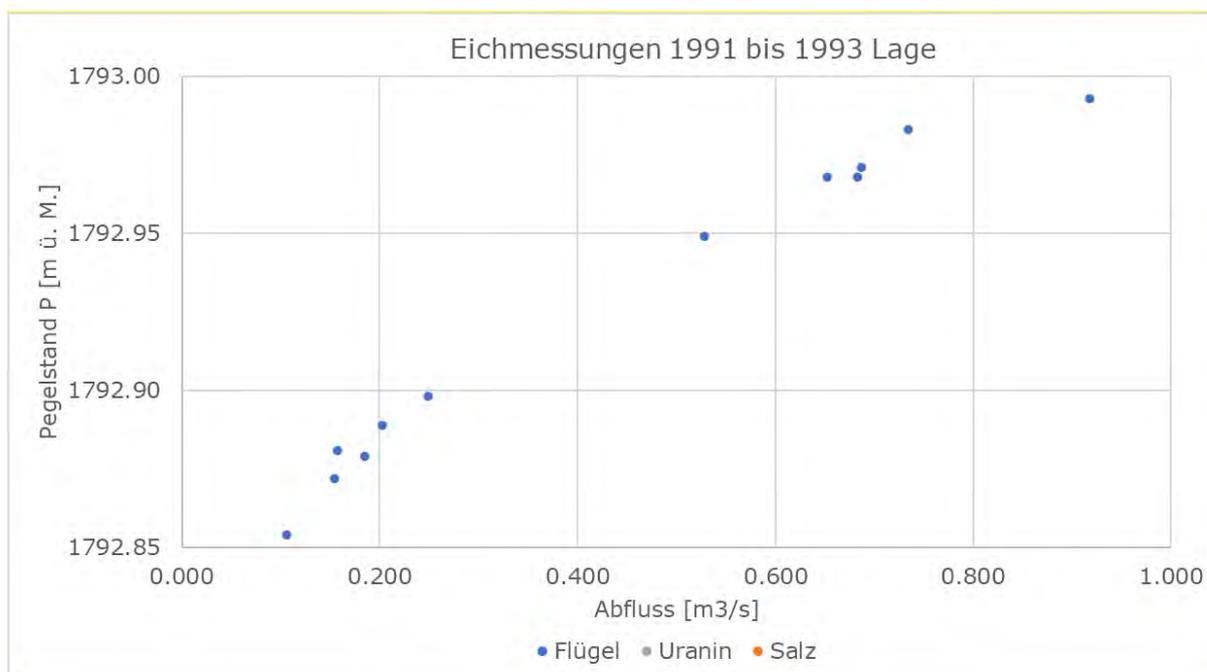


Abbildung 101: Frühere Station Krummbach, Lage der Eichmessungen im Niedrigwasser

Die Eichmessungen am aktuellen Standort bilden zwei übereinanderliegende P-Q-Kurven (*Abbildung 102*). Die Eichmessungen der unteren P-Q-Kurve (rotes Oval) stammen ausschliesslich vom März 2001 bis Mai 2005. Im Herbst 2000 ereignete sich ein grosses Hochwasser in der Region. Die auffälligen Eichmessungen könnten damit einen Zusammenhang haben. Allerdings war lokal vor allem das rechte Ufer unterhalb des Felsriegels betroffen, was die mittlere Verschiebung der Eichmessungen um ca. 8 cm und auch die Rückverschiebung auf die ursprüngliche Lage nach dem Mai 2005 nicht erklärt.

3.5.4.2 Abweichungen der Eichmessungen von der Mittellinie

Legt man analog zu den obigen Messstationen eine Mittellinie in die Eichmessungen und bestimmt die Abflussdifferenz aller Eichmessungen zu dieser Linie, ergibt sich folgendes Bild (*Abbildung 103*). Die Niedrigwasser-Eichmessungen liegen meist etwas unter der Mittellinie, dies gilt auch für die drei Flügel-Messungen am alten Standort. Vom Frühling 2000 bis zum Frühling 2004 sind

dagegen Abweichungen um 0.2 m³/s zu höheren Abflüssen sichtbar. Dieser Zeitraum entspricht den in *Abbildung 102* sichtbaren unteren Gruppe von Eichmessungen.

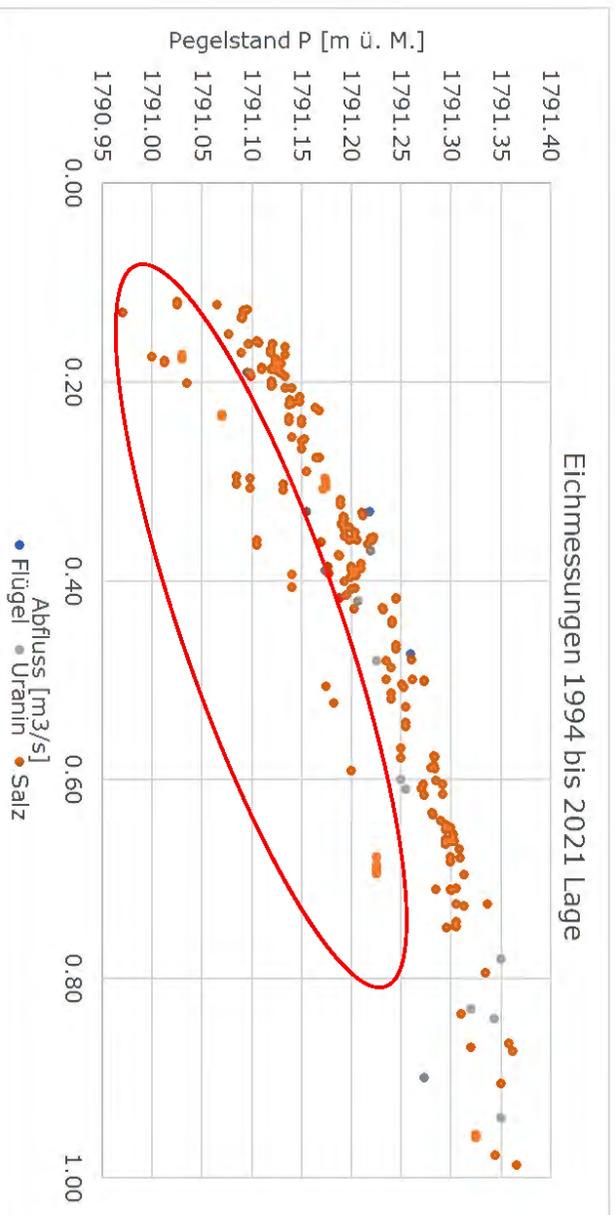


Abbildung 102: Aktuelle Station Krummbach, Lage der Eichmessungen nach Methode. Das rote Oval umfasst Eichmessungen vom März 2001 bis Mai 2005.

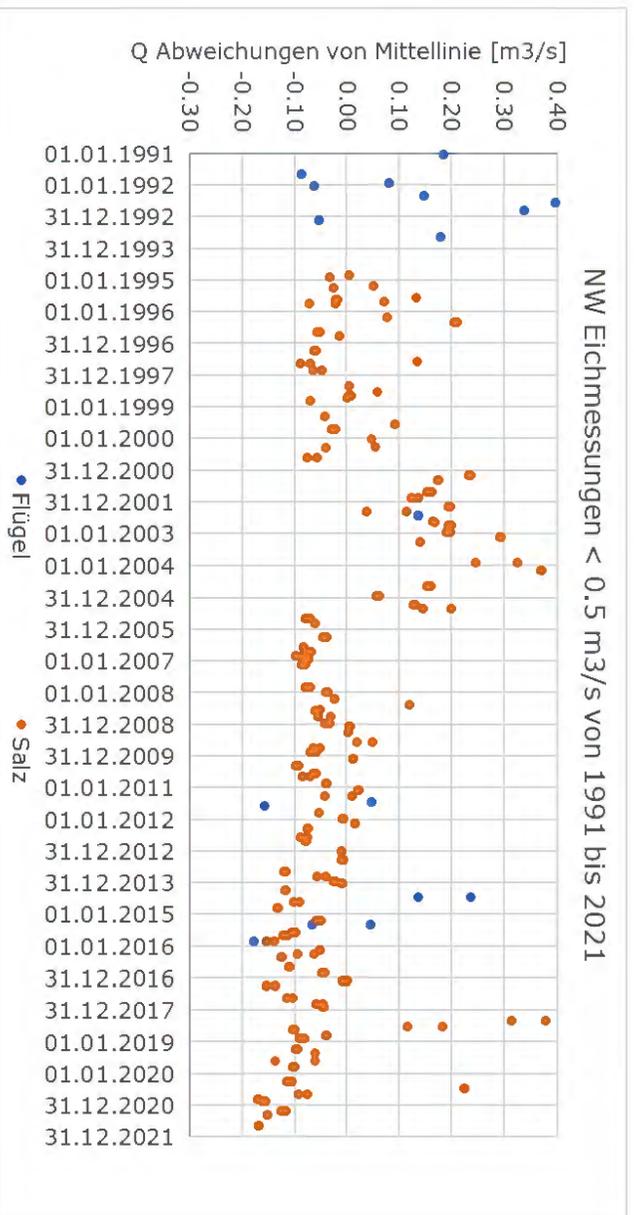


Abbildung 103: Krummbach, Abflussabweichung der Eichmessungen von der Mittellinie. Deutlich sichtbar sind auch hier die erhöhten Abflüsse in den Jahren 2001 bis 2005.

3.5.5 P-Q-Beziehungen

In den letzten 30 Jahren wurden 42 P-Q-Beziehungen definiert und verwendet (Kurven Nr. 85 bis 126), (*Abbildung 104*). Die Kurven 85, 86, 89 bis 93, 96, bis 98, 100, 101, 103, 105, 106, 109 bis 111 und 118 wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit erstellt. Häufig wurden zwei Eichmessungen am gleichen Tag durchgeführt. Die Kurve 124 ist gut mit NW-Eichmessungen abgestützt. Vom März 2001 bis Mai 2005 lagen die Eichmessungen rund 8 cm tiefer als vorher und nachher (vergleiche *Kapitel 3.5.4.1*). In diesem Zeitraum waren die Kurven 104 bis 110 gültig. Diese berücksichtigen aber alle durchgeführten Werte der Eichmessungen (vergleiche *Anhang Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.*). Am 25.10.2018 wurden letztmals Eichmessungen mit einem Abfluss unter dem Q250 (*grüne Linie*) durchgeführt.

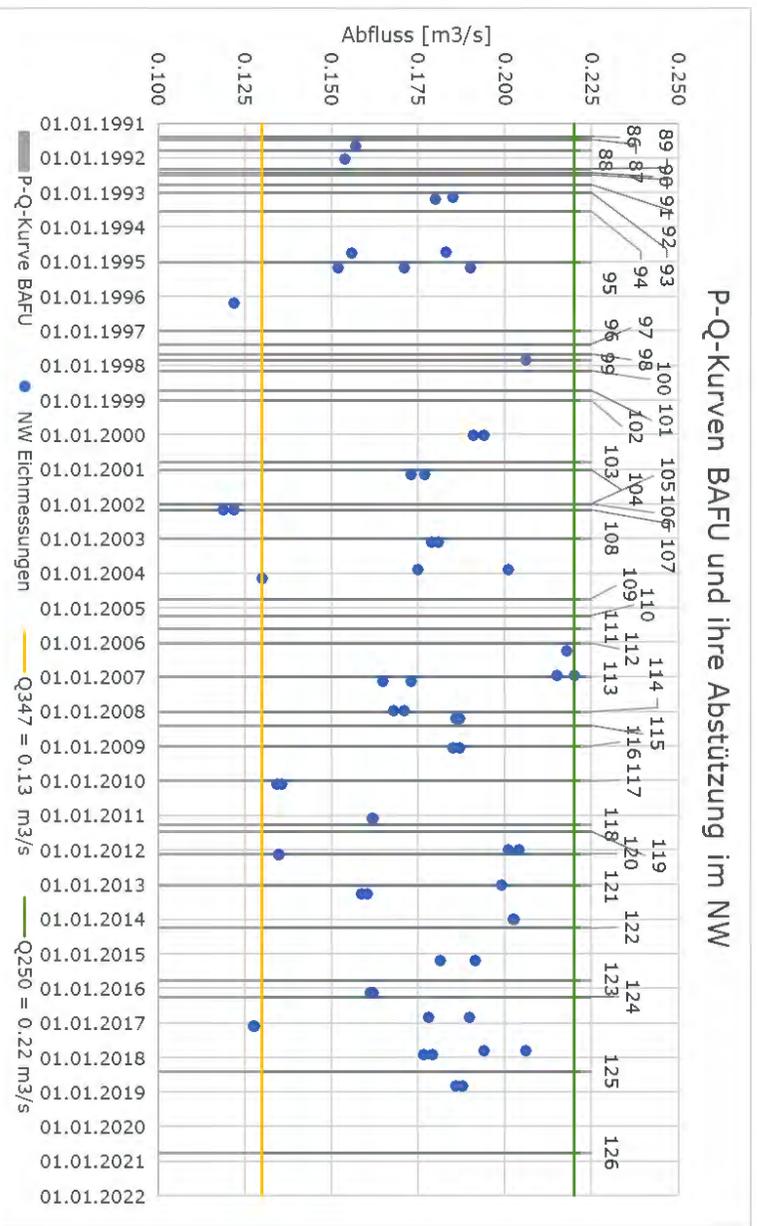


Abbildung 104 Krummbach, P-Q-Kurven BAFU und ihre NW-Eichmessungen über die Zeit

Die P-Q-Kurven an der heutigen Station streuen im Niedrigwasserbereich um ein breites Band von Pegelhöhen. Beim Q347 (*Abbildung 105, gelbe vertikale Linie*) beträgt dieses 15 cm. Ein grosser Teil dieser Streuung wird durch die Eichmessungen von 2001 bis 2005 (*rotes Oval*) verursacht. Ohne diese Gruppe an Eichmessungen beträgt die Pegelstreuung beim Q347 7.5 cm.

Die Entwicklung der P-Q-Beziehungen über die Zeit ist aus dem Anhang (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ersichtlich.

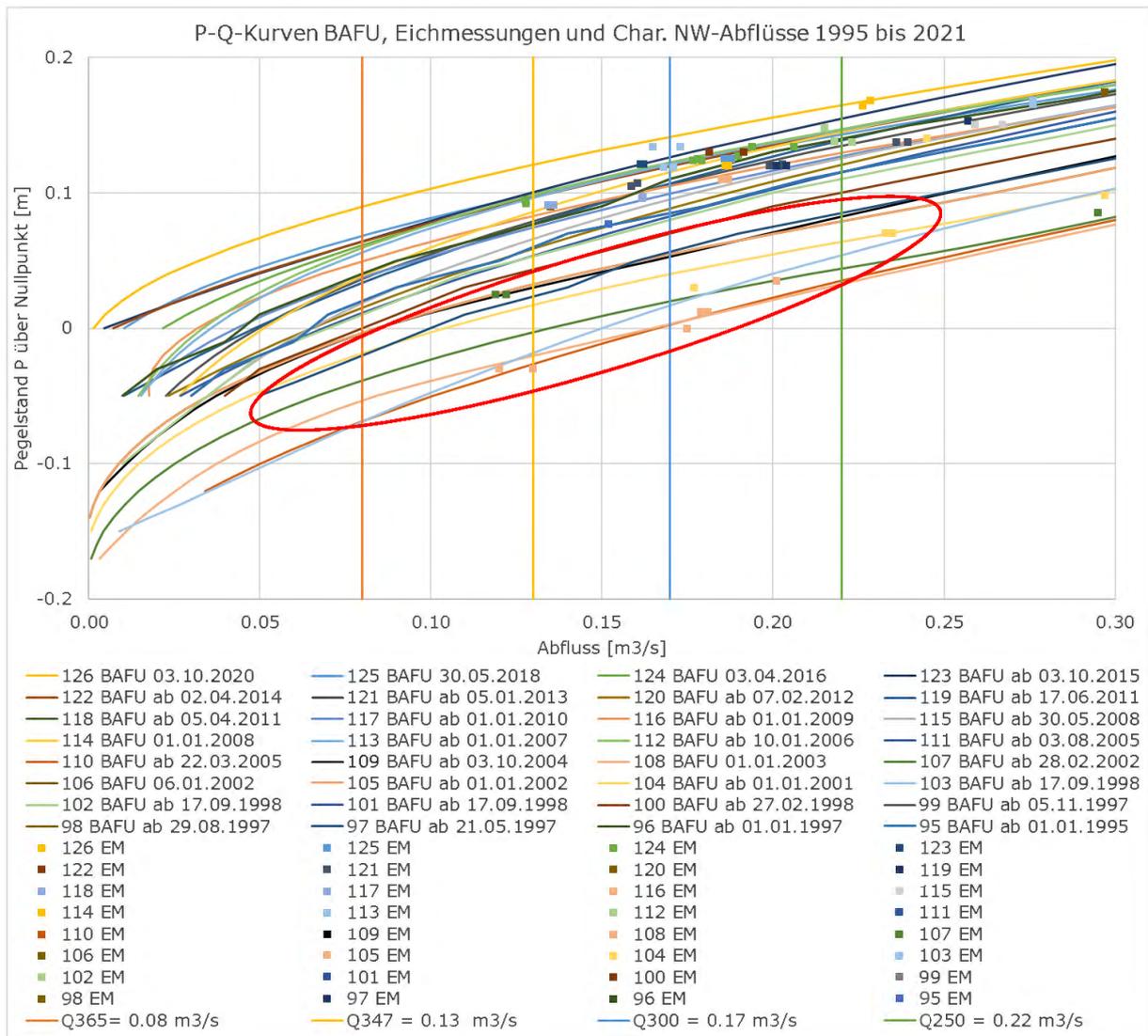


Abbildung 105: Aktuelle Station Krummbach, Lage der P-Q-Kurven BAFU, welche im Untersuchungszeitraum verwendet wurden. Im roten Oval die oben kommentierten Eichmessungen

Aus den mit Strickler berechneten PQ-Beziehungen zeigt sich, dass einige der durchgeführten Kurvenanpassungen im Niedrigwasser nicht notwendig sind. Für den ganzen Zeitraum resultieren 22 NW-Strickler-Kurven.

Betrachtet man die von den P-Q-Kurven umhüllte Fläche (Abbildung 106), so zeigt sich, dass diese für die BAFU-Kurven (blau) und die Strickler-Kurven (orange) praktisch identisch sind. Bei anderen Stationen wie z.B. am Dischmabach beschreiben die Strickler-Kurven die Niedrigwasser-Eichmessungen viel enger und klarer als die BAFU-Kurven. Dies ist am Krummbach nicht der Fall, weil die Nullpunkte der Eichmessungen und P-Q-Kurven häufig und in einem weiten Band verschoben wurden. Massgeblich beteiligt an diesen Verschiebungen sind die Eichmessungen zwischen März 2001 bis Mai 2005 (rotes Oval).

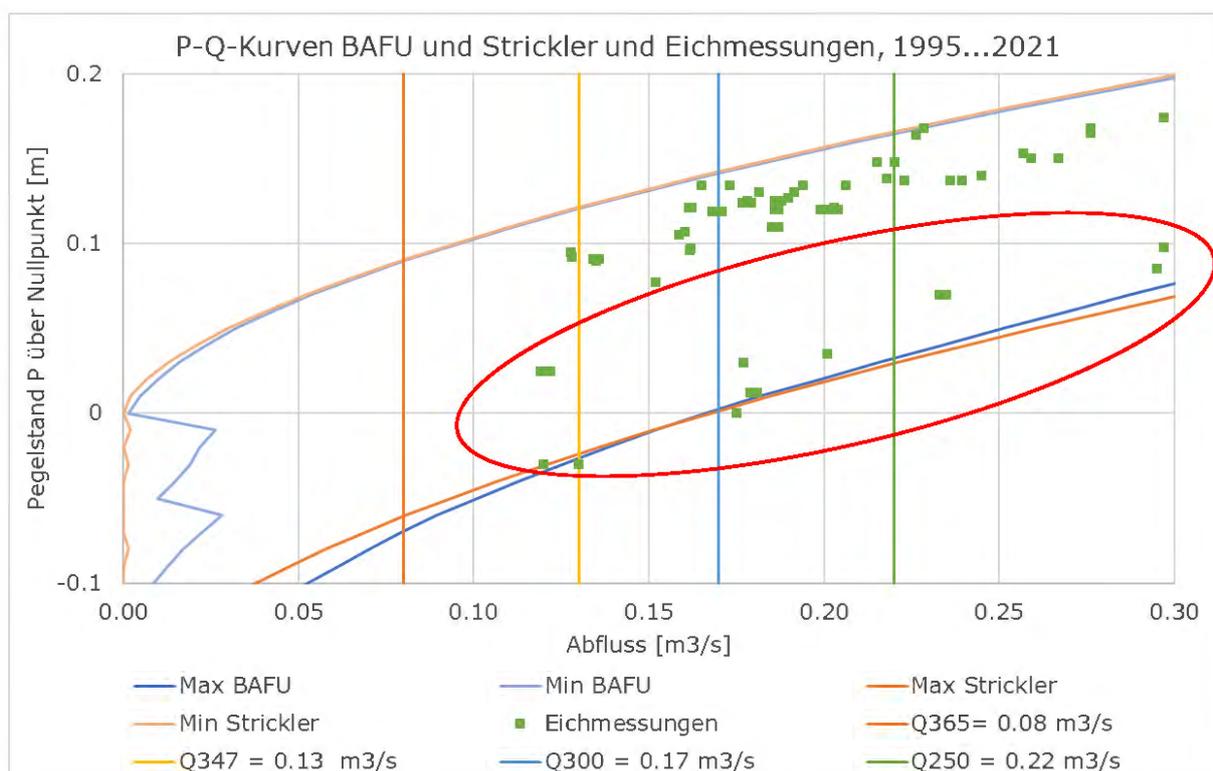


Abbildung 106: Aktuelle Station Krumbach von 1995 bis 2021, Eichmessungen und maximale und minimale Umhüllende der PQ-Kurven BAFU und Strickler. Im roten Oval die auffälligen Eichmessungen von März 2001 bis Mai 2005.

Betrachtet man die frühere Station mit ihren Eichmessungen (*Abbildung 107*, grüne Quadrate), so fallen wieder die bereits vorne (*Abbildung 101*) erwähnten zwei Gruppen auf. Entlang der oberen Gruppe verlaufen die zusammenliegenden minimalen und maximalen Umhüllenden der P-Q-Linien Strickler (orange). Weil Eichmessungen fehlten oder verstreut lagen, wurde für den gesamten Zeitraum dieselbe Strickler-Kurve angenommen. Entlang der unteren Gruppe verläuft die maximale Umhüllende der PQ-Kurven BAFU (dunkelblau). Die BAFU-Kurven bestreichen die Fläche zwischen der hellblauen und der dunkelblauen Linie, von den Eichmessungen am unteren Rand bis deutlich über die Eichmessungen in der Mitte der Fläche.

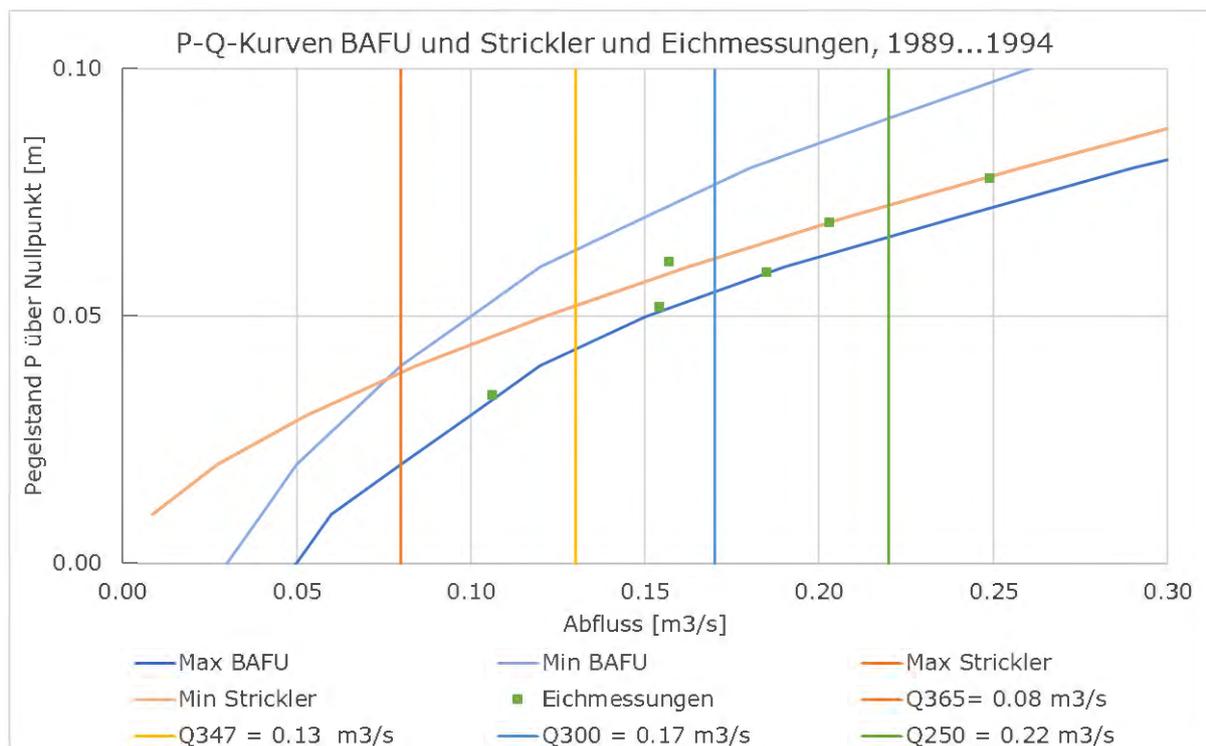


Abbildung 107: Frühere Station Krummbach von 1989 bis 1994, Eichmessungen und maximale und minimale Umhüllende der P-Q-Kurven BAFU und Strickler

3.5.6 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Dauerkurve Strickler und die Dauerkurve BAFU verlaufen sehr ähnlich (Abbildung 108). Die Dauerkurve Strickler fällt gegen Q365 etwas stärker ab als die Dauerkurve BAFU.

In 12 der 31 untersuchten Jahren betragen die Abweichungen zwischen Q Strickler und Q BAFU im Verhältnis zum Q347 (2018) $\pm 7\%$ oder mehr. Sehr gross waren die Abweichungen mit -56% , -26% und -41% in den Jahren 2005, 2011, 2021. 2021 darf eigentlich nicht berücksichtigt werden, da die PQ-Beziehung wohl noch nicht definitiv angepasst wurde. In den Jahren 1992, 1997, 1998, 2001, 2010, 2011 und 2014 betragen die Abweichungen mindestens $\pm 10\%$. In den Jahren 1997, 2005, 2006 und 2013 zeigen die Q-Ganglinien Strickler einen plausibleren Verlauf als die BAFU-Ganglinie (Abbildung 110 bis

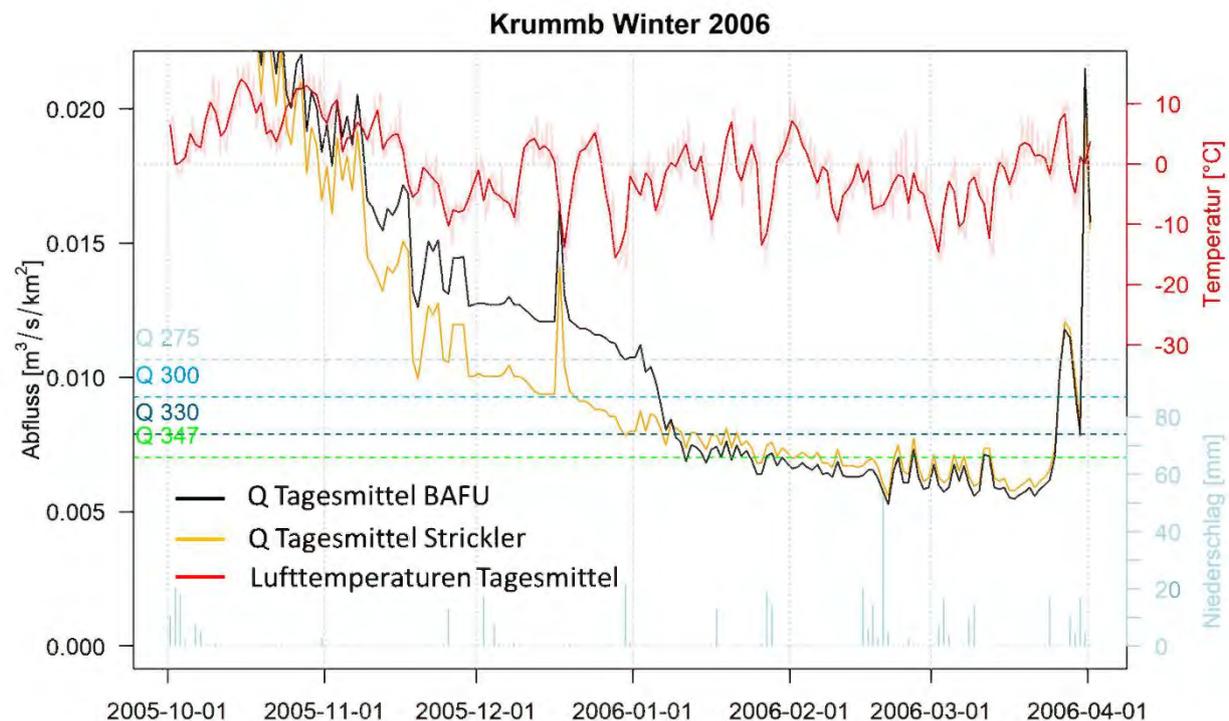
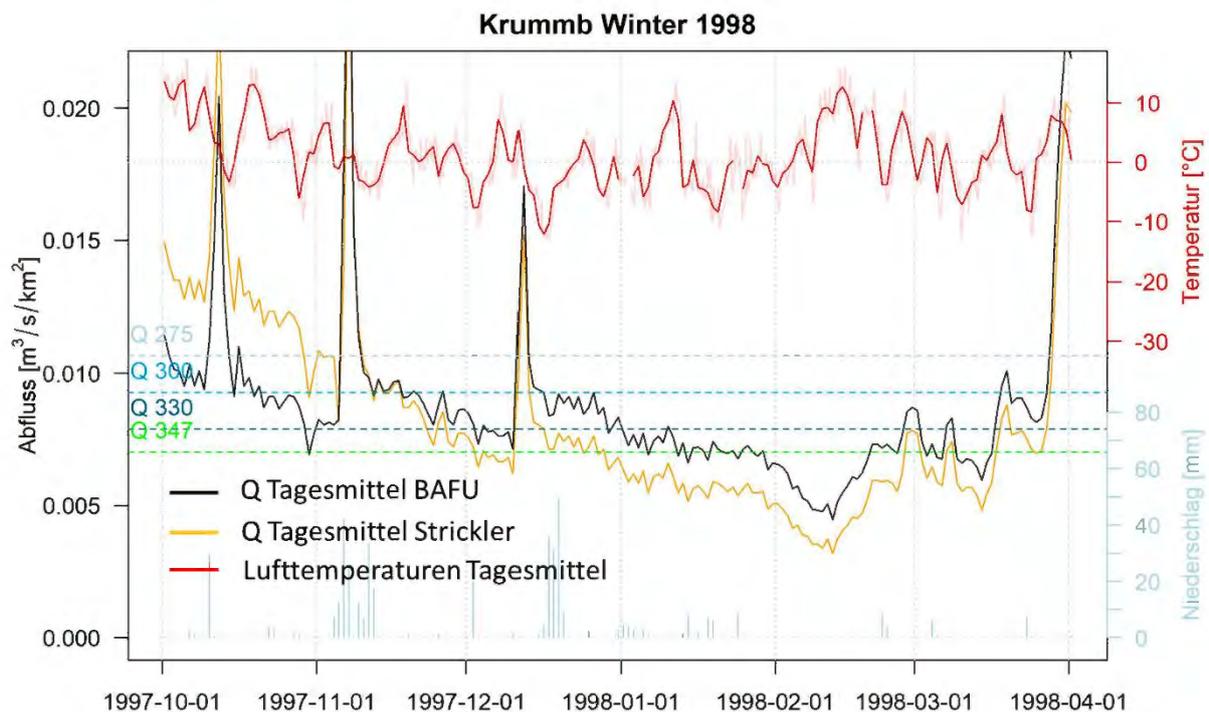


Abbildung 112). Starke Änderungen im Abfluss, die das Q347 betreffen, sind in den Jahren 1997, 1998 und 2005 zu beobachten. Mit den neuen Werten wird das Q347 im 1997 nur noch während knapp eines Monats unterschritten, während dies mit den BAFU-Daten während mehr als zwei Monaten der Fall war. Im Winter 2005 wurde gemäss den neu berechneten Abflüssen fast Q347 beinahe erreicht, während die BAFU-Daten implizieren, dass der Abfluss nicht einmal das Q275 unterschritten haben soll. Mit den neu ermittelten Abflusswerten soll hingegen der Winter 1998 ein sehr ausgeprägtes Niedrigwasserjahr gewesen sein, in dem das Q347 von Ende Dezember bis Mitte März unterschritten worden sein soll.

Das Q347 wurde vor allem in den folgenden Jahren unterschritten: 1998, 2001, 2004, 2006 und 2017 (



Abbildung

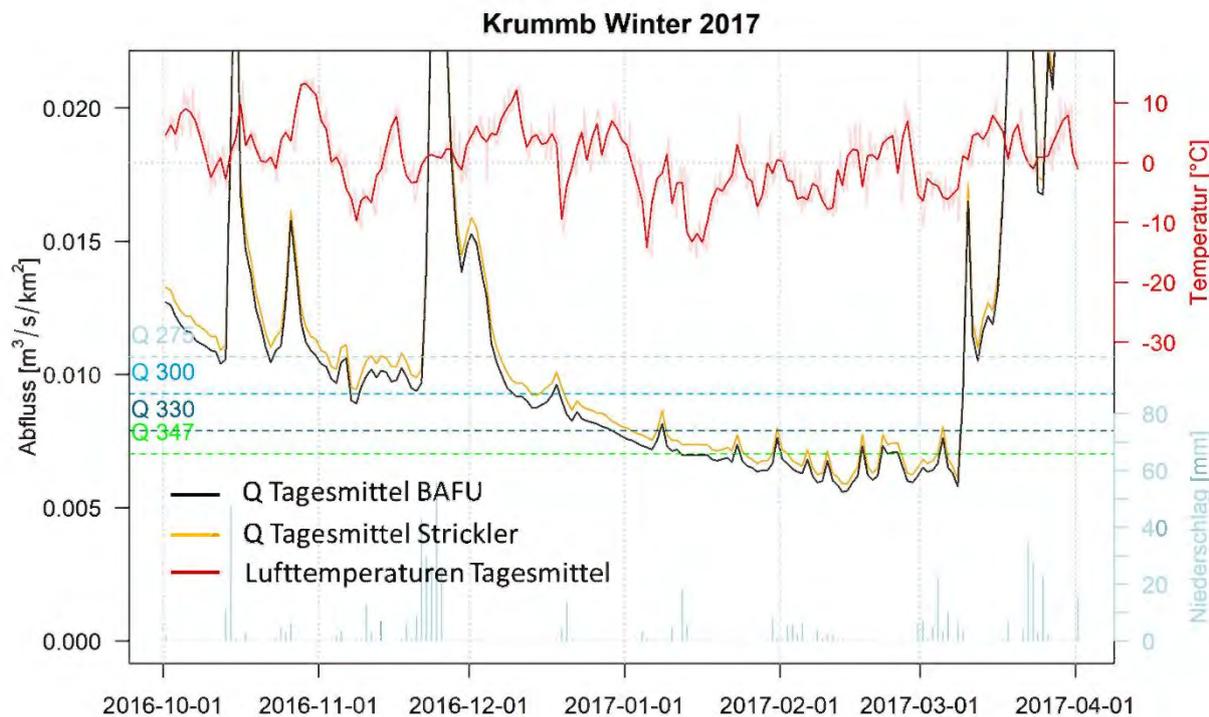


Abbildung 117). Viele der Tage mit $Q_{\text{Strickler}} < Q_{347}$ Strickler stammen aus dem Winter 1998 (

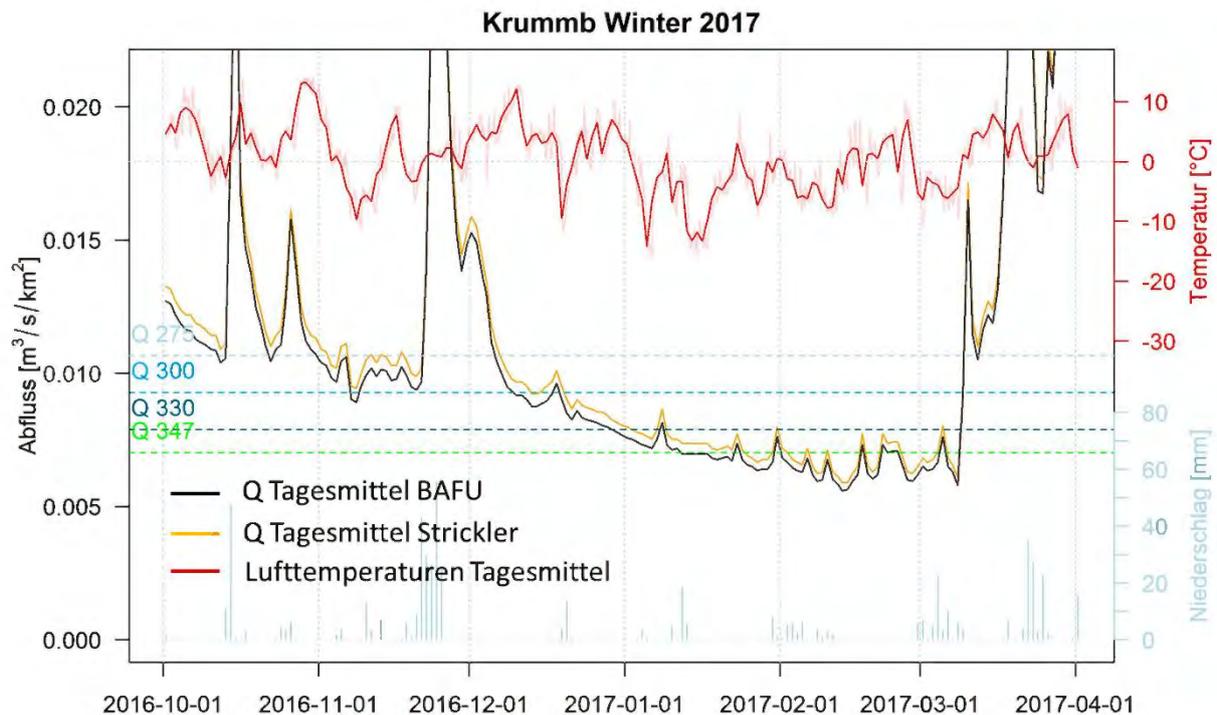


Abbildung 117), darunter auch die Abflüsse der stark abfallenden Dauerkurve Q-Strickler (1.2.98 bis 20.2.98). Was die Ursachen für diesen Abflusseinbruch war, ist unklar. Es dürfte sich um ein Artefakt handeln. Auch der unnatürliche Verlauf der Ganglinie zwischen Ende Dezember 2000 und anfangs Februar 2001 dürfte durch einen Messartefakt verursacht worden sein (

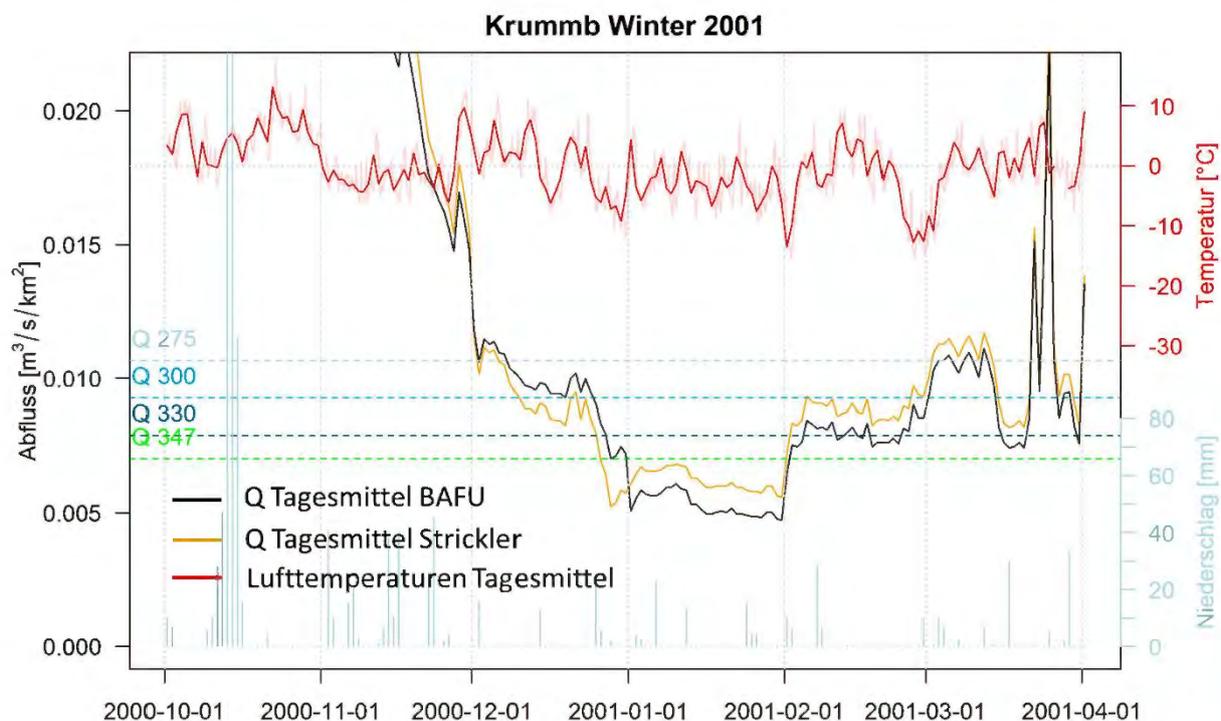


Abbildung 115).

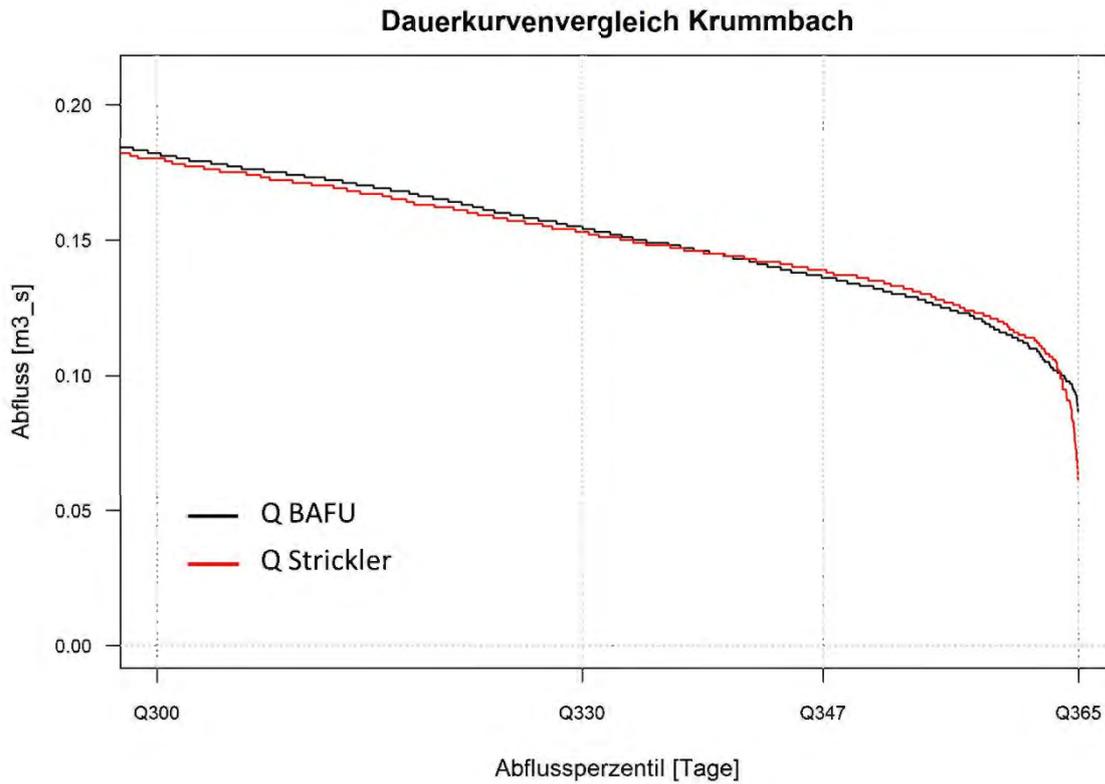


Abbildung 108: Vergleich der Dauerkurve (Q BAFU) mit Dauerkurve (Q Strickler) für den Krummbach.

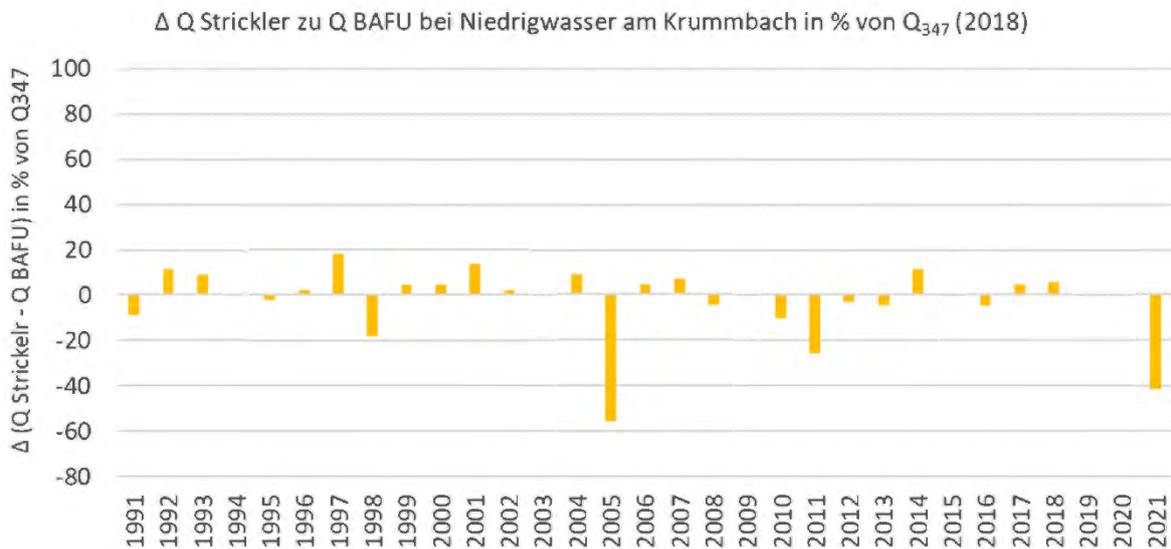


Abbildung 109: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q₃₄₇ (2018) am Pegel des Krummbach.

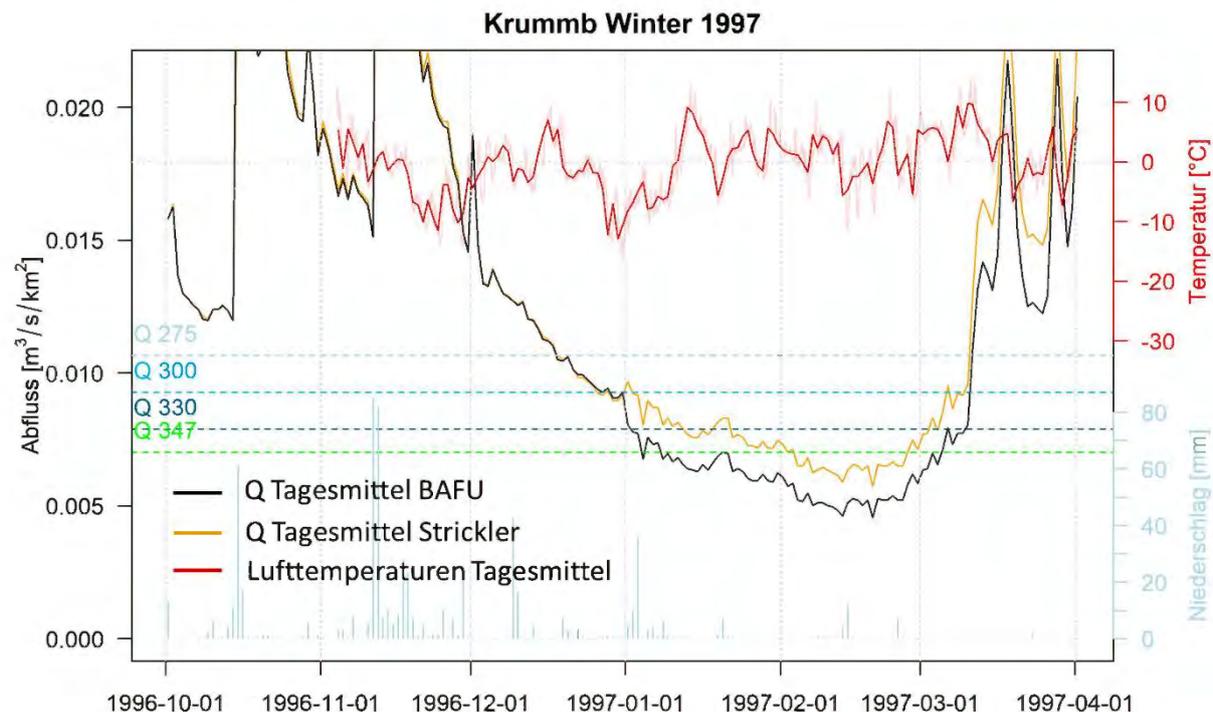


Abbildung 110: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 1997.

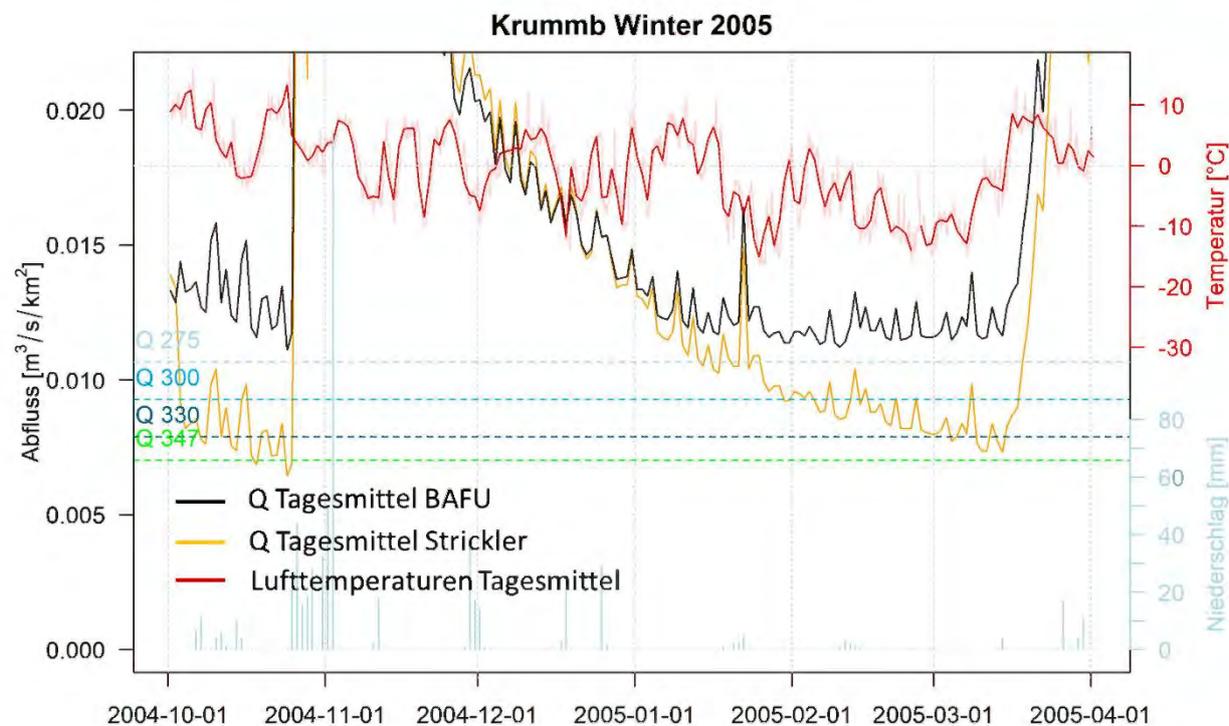


Abbildung 111: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2005.

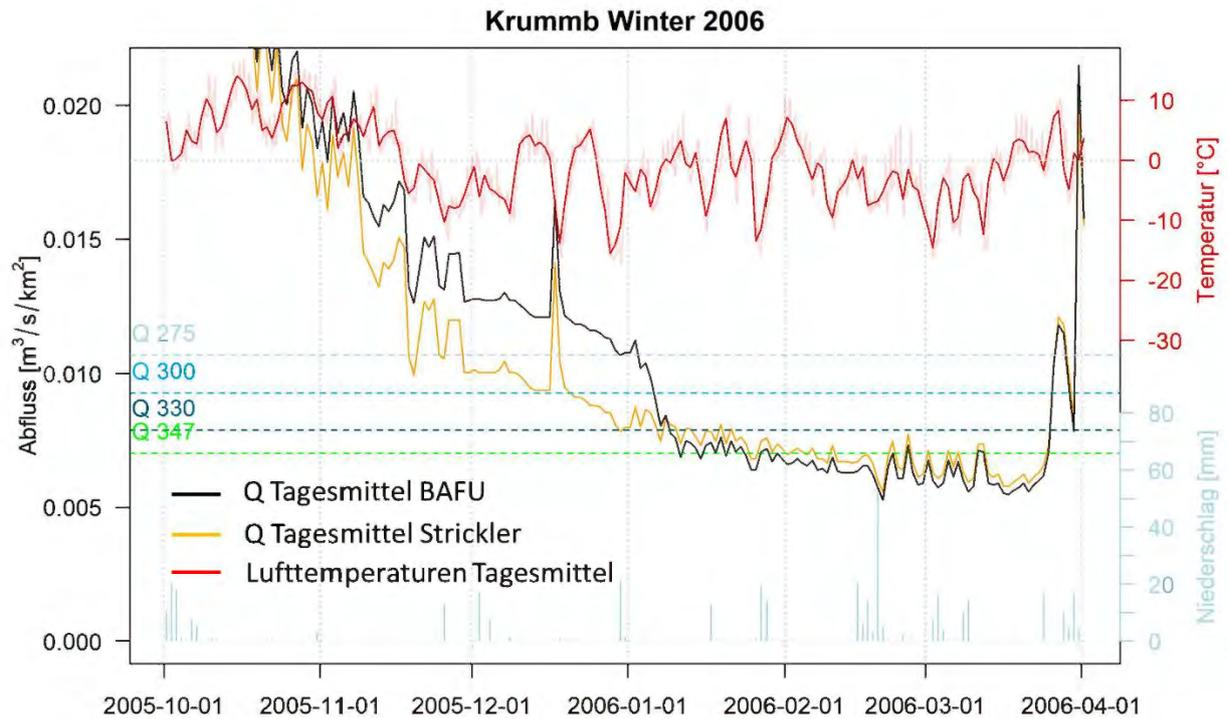


Abbildung 112: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2006.

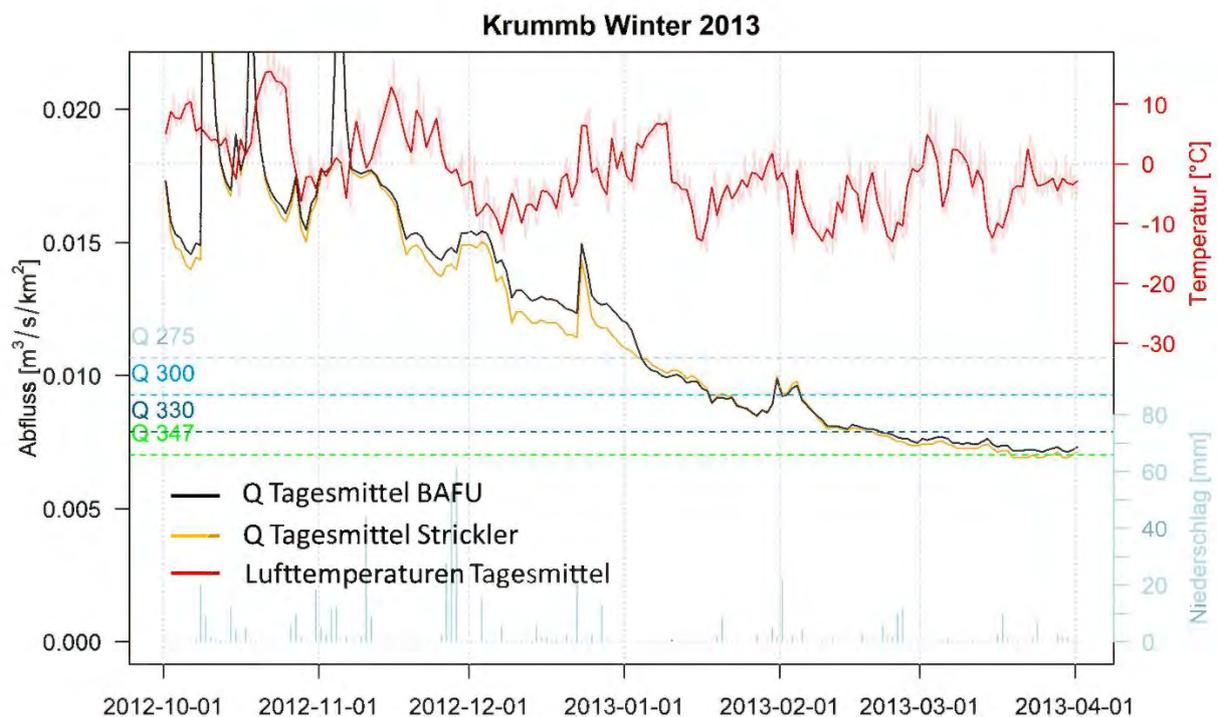


Abbildung 113: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2013.

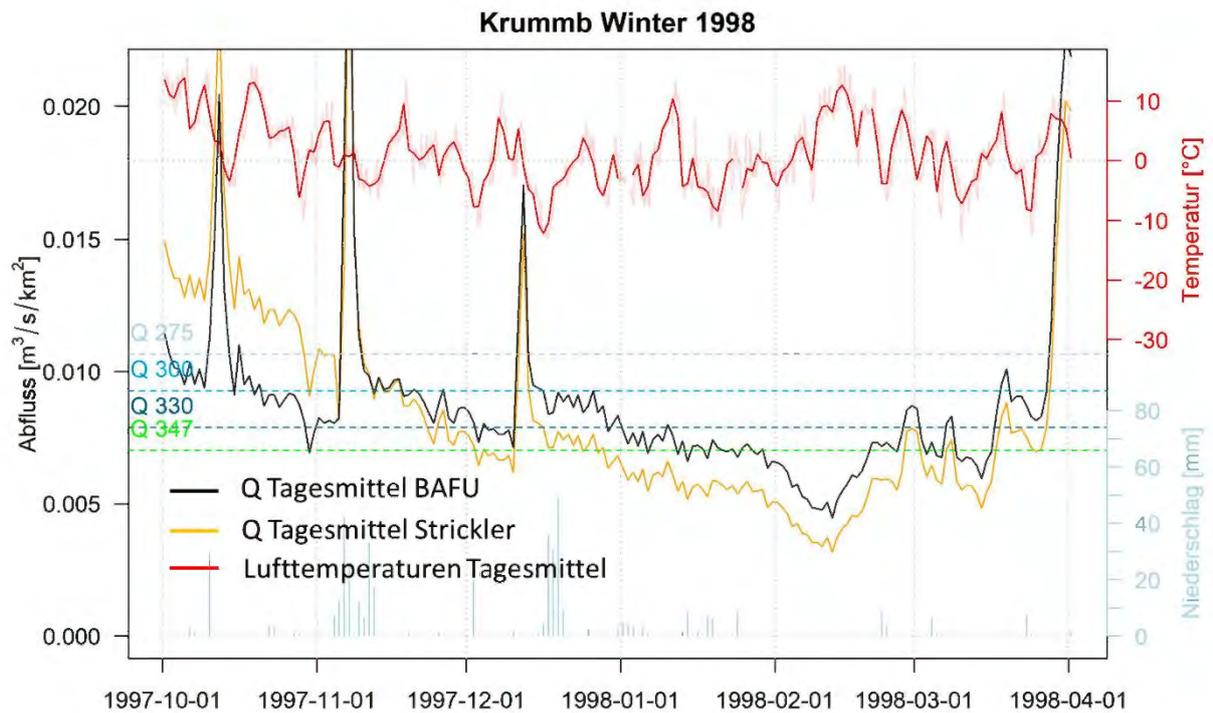


Abbildung 114: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 1998.

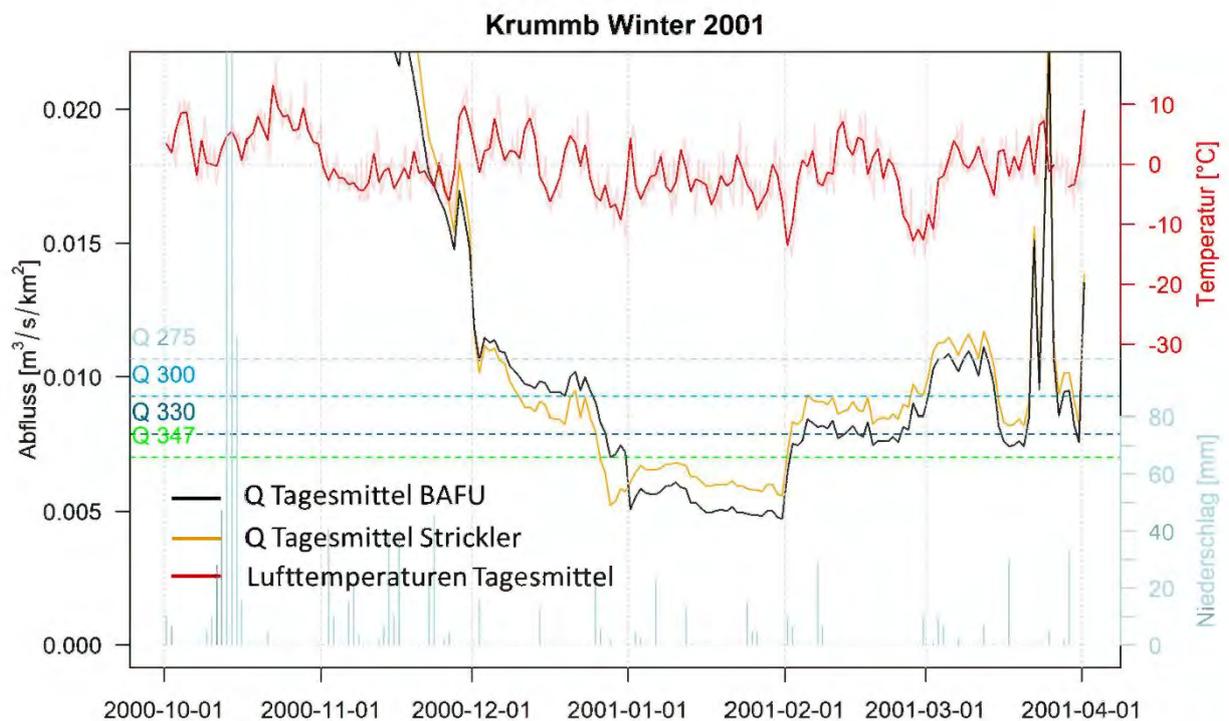


Abbildung 115: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2001.

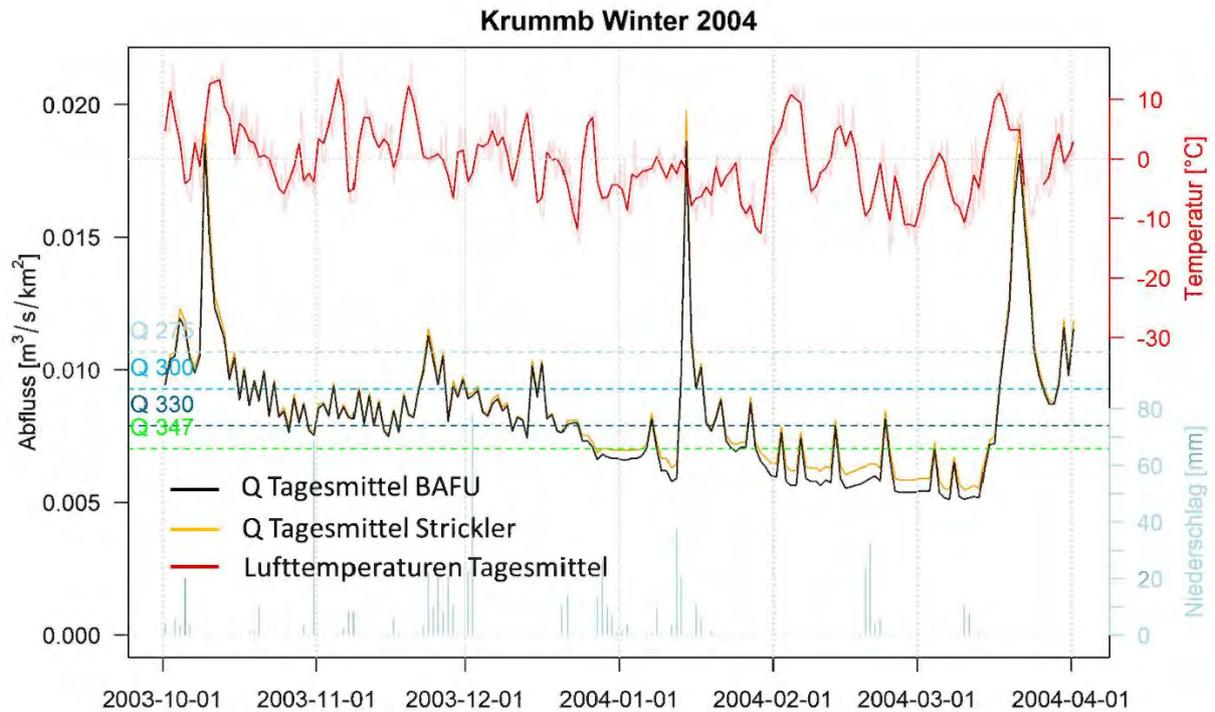


Abbildung 116: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2004.

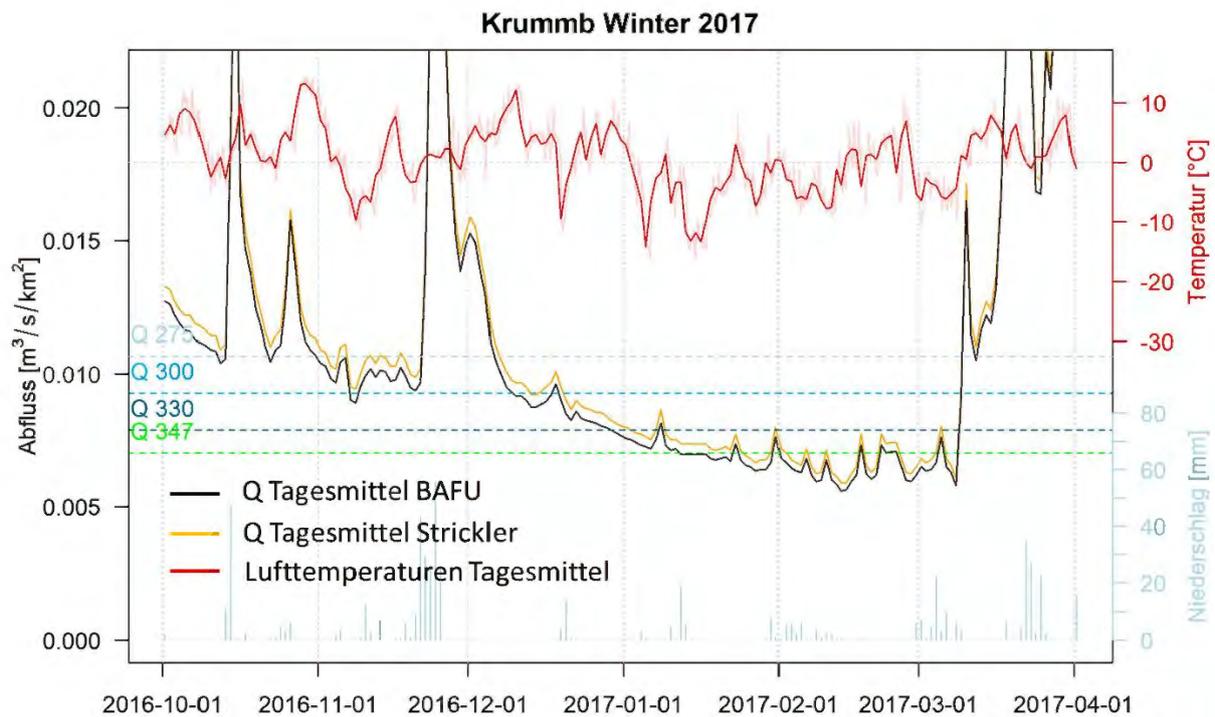


Abbildung 117: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Krummbach im Winter 2017.

3.5.7 Schlussfolgerungen

3.5.7.1 Messstation

Die aktuelle Messstation Krumbach ist mit ihrem Überfall über eine natürliche Felskante recht gut geeignet für Niedrigwasser. Beim Q347 beträgt die Überfallhöhe ca. 0.12 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von 14 % des Q347.

Die pneumatische Pegelmessung misst den Druck, den das Wasser auf die eingeperrte Luft ausübt. Die Messung funktioniert grundsätzlich auch bei Schnee und Eis, falls die Durchgängigkeit des Messschlauches und der Ausgleich mit dem Aussendruck nicht beeinträchtigt werden. (*Vor- und Nachteile der verschiedenen Messmethoden siehe auch Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.***).

Die zahlreichen und starken Nullpunktverschiebungen der P-Q-Kurven deuten auf Schwierigkeiten mit dem Nullpunkt der Pegelmessung hin. Dass der Messschlauch und die Pegellatten nicht am gleichen Ufer installiert wurden, ist nicht optimal.

3.5.7.2 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 62 Messungen unterhalb des Q250 und 7 unterhalb des Q347 durchgeführt. Im Abflussbereich zwischen 0.3 und 0.5 m³/s und im Zeitraum von Herbst 1993 bis Herbst 1994 fehlen Eichmessungen.

Der Wechsel von Flügelmessungen am alten Standort hin zu Salz- und Uranin-Messungen am aktuellen Standort ist im Hinblick auf das natürliche Flussbett und die alpinen Verhältnisse zu begrüßen. Die Konsistenz und Kontinuität der Messwerte würde sich verbessern, wenn beide Messmethoden immer am selben Standort durchgeführt und die Durchmischungsstrecke der Salzmessung immer konstant gehalten werden würde.

Die Eichmessungen von März 2001 bis Mai 2005 weisen auffällig hohe Abflüsse auf. Es ist denkbar, dass Verschiebungen am Nullpunkt der Pegelmessung zu dieser Verschiebung führten, z.B. eine Verschiebung der Höhe des Pneumatik-Sensors.

3.5.7.3 P-Q-Kurven

Im Untersuchungszeitraum wurden 42 P-Q-Beziehungen eingesetzt, welche auch im Niedrigwasser starke Veränderungen bewirkten. 19 dieser Kurven (85, 86, 89 bis 93, 96, bis 98, 100, 101, 103, 105, 106, 109 bis 111 und 118) wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit hergeleitet und verwendet.

Bei der Analyse der P-Q-Kurven wurden folgenden Auffälligkeiten festgestellt:

- Neben der Nullpunktverschiebung durch den Umzug der Station fanden später weitere Verschiebungen statt, deren Gründe nicht nachvollziehbar sind (1999, 2000, 2002 zweimal, 2004, 2005, 2014 und 2020). Beim Hochwasser 2000 hat sich möglicherweise der Querschnitt verändert, 2004 und 2005 könnten weitere Veränderungen durch den Flussbau erfolgt sein. Spätere Nullpunktverschiebungen dürften eher eine Konsequenz von angeschwemmtem Material am Block am rechten Ende der Überfallkante oder von den oben erwähnten messtechnischen Probleme sein. Für die Nachrechnungen mit Strickler wurden deshalb hauptsächlich auf die Eichmessungen verwendet.
- Kurve 96 liegt bei deutlich höheren Abflüssen als ihre Vorgänger- und Nachfolgekurven, obwohl sie über keine Eichmessungen in diesem Abflussbereich verfügt.
- Die Kurven 104, 107, 108 und 110 berücksichtigen die Eichmessungen mit auffällig hohen Abflüssen von 2001 bis 2005 und liegen deshalb bei vergleichsweise hohen Abflüssen.
- Die Kurve 115 hat ihren Nullpunkt gegenüber ihren Vorgänger- und Nachfolgekurven auffällig tief. Sie basiert aber nicht auf Eichmessungen.
- Die aktuelle Kurve 126 liegt deutlich höher als ihre Vorgängerkurve. Auch diese basiert in diesem Bereich nicht auf Eichmessungen.

3.5.8 Empfehlungen

Wir empfehlen folgende Aktionen:

Messstation

Falls für die Pegelmessung und die P-Q-Kurven ein konstruktionsbedingter, gemeinsamer Nullpunkt fehlt, sollte dieser unbedingt definiert und verwendet werden.

Damit Artefakte besser identifiziert und korrigiert werden können, sollte ein zweites Messsystem eingebaut und betrieben werden. Am ehesten sehen wir an diesem Standort eine mechanisch gut geschützte Tauchsonde direkt im Gerinne.

Eichmessungen

Die Station misst eher kleine Abflüsse und weist eine relativ komplizierte Geometrie auf. Deshalb empfehlen wir, die Niedrigwasser-Eichmessungen mit der Salzverdünnungsmethode durchzuführen.

Es sollten dringend weitere Eichmessungen bei Abflüssen kleiner Q_{250} ausgeführt werden, um die Lage der aktuellen Kurve 126 abzusichern oder bei Bedarf zu korrigieren.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, die Kurven 96 und 115 im Niedrigwasserbereich nicht

zu verwenden.

Die Kurven 104, 107, 108 und 110 und damit auch die Zeitreihen der Abflüsse während ihrer Gültigkeitsbereiche sind unsicher. Unsicherheiten im Niedrigwasserbereich gibt es auch bei Kurven die nicht auf Eichmessungen im Niedrigwasserbereich abgestützt sind.

3.6 Calancasca – Buseno

3.6.1 Morphologie und Hydraulik

Die Calancasca fließt aus dem Calancatal Richtung Süden (*Abbildung 118*). Vor der Station durchfließt sie den flachen Talboden mit einem Gefälle von 3.2% und bildet dort Kiesbänke. Bei der Messstelle selbst ist das Flussbett mit 2.6% Gefälle sehr flach. Nach der Messstation steigt das Gefälle auf 5% und das Bachbett wird deutlich schmäler.

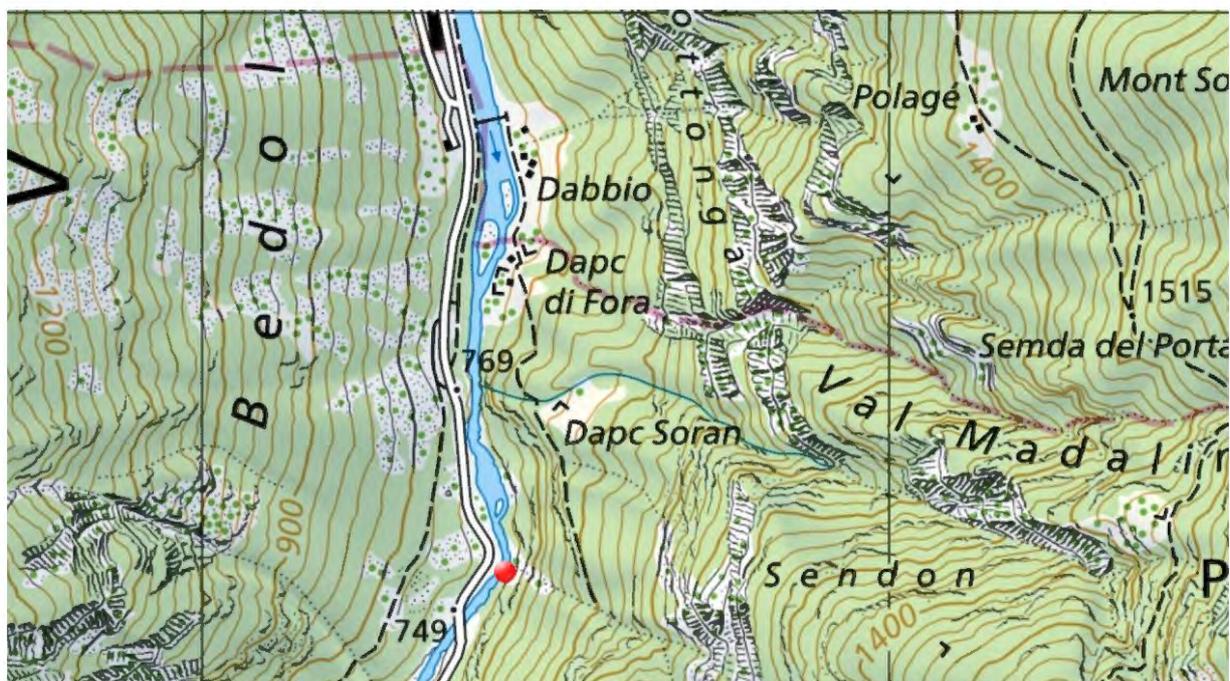


Abbildung 118 Messstation BAFU 2474 Calancasca - Buseno, Fließrichtung Richtung Süden von oben nach unten, (BAFU 2021)

3.6.2 Messstation

Die Messstation liegt am äusseren Ufer einer Rechtskurve, also an einem Prallhang (*Abbildung 119*). Der Messquerschnitt ist links durch das steile, mit Blöcken befestigte Ufer und rechts durch einen betonierten Absatz auf eine Rinne eingengt (*Abbildung 120*). Diese Rinne verengt sich vom Messquerschnitt bis zum Überfall schätzungsweise von 4 auf 2 m.

Bezeichnung	2474 Calancasca - Buseno
Kennzahlen der Station (BAFU 2021)	
Stationshöhe	746 m ü. M
Grösse des Einzugsgebietes (EZG)	121 km ²
Mittlere Höhe des EZG	1'931 m ü. M
Vergletscherung	0.2 %
Koordinaten LV95	2'729'437 / 1'127'177



Abbildung 119: Messstation BAFU 2474 Calancasca - Buseno (BAFU 2021)

Tabelle 6: Tageswerte von 1952-2017 (Hydromaps 2021)

	Bereich [m ³ s ⁻¹]	Charakteristische Werte
Jeden Tag erreichter Abfluss		Q ₃₆₅ = 0.4 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 5%	0.4 ... 0.744	Q ₃₄₇ = 0.744 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 8.2 %		Q ₃₀₀ = 1.04 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 31.5%		Q ₂₅₀ = 1.34 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1964		NM7Q = 0.49 m ³ s ⁻¹
Mittlere 90% der Abflüsse	0.744 ... 16.0	Median der Tagesabflüsse 1952 ... 2017 = 2.21 m ³ s ⁻¹
Höchste 5% der Abflüsse	16 ... 165	

Beim Q₃₄₇ = 0.744 m³ s⁻¹ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von ca. 0.044 m³ s⁻¹.

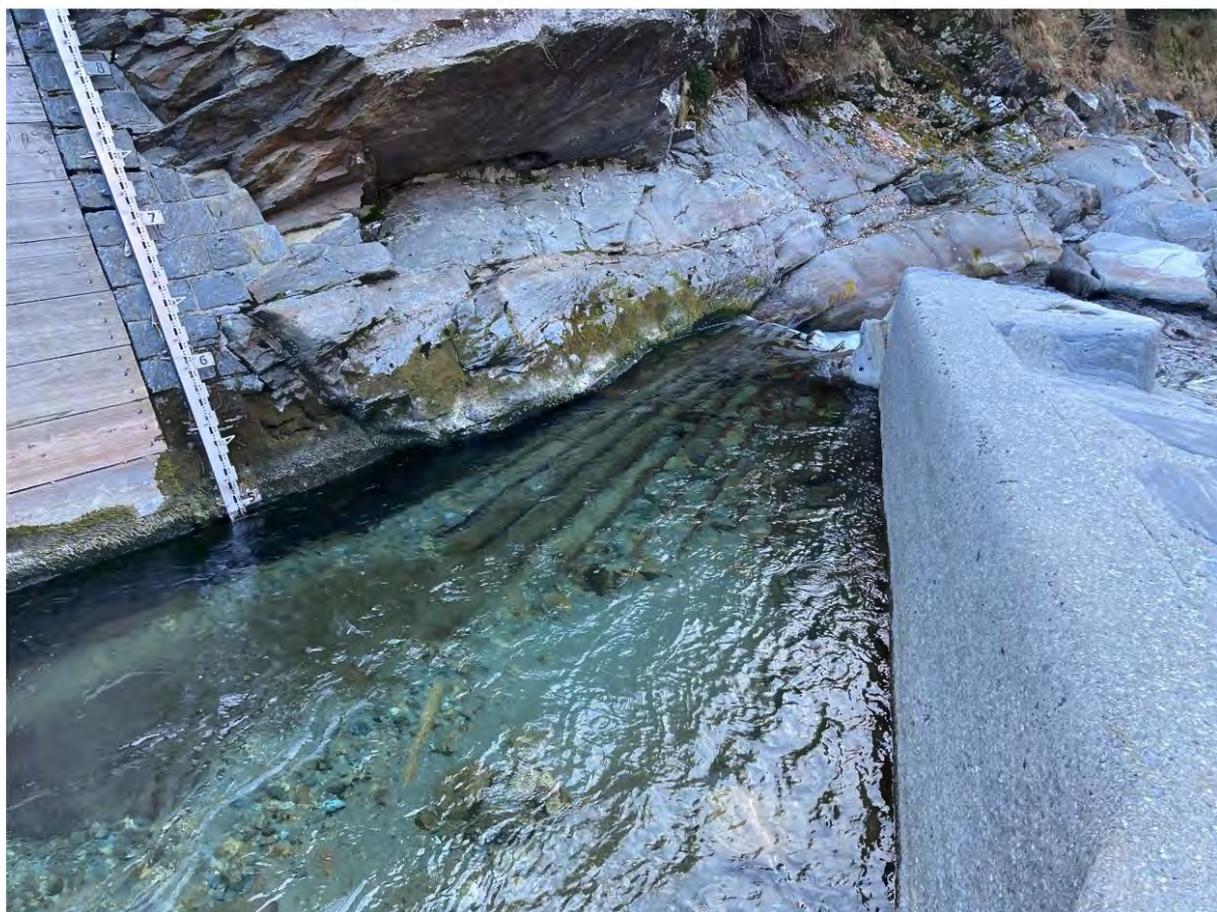


Abbildung 120: Calancasca, Linkes Ufer mit stillgelegtem Messschacht und Pegellatte im Gerinne, Sohle mit frei erodierten Eisenbahnschienen, rechtes Ufer mit zeitweise überfluteter Betonmauer (Margreth 2021).

Seit 1991 sind folgende Ereignisse bekannt, welche sich möglicherweise auf die P-Q-Beziehungen auswirkten (Crose 2022):

- 1.1.1982 Pegelnullpunkt 740.00 m ü. M (Hammer 2022)
- Vor 1991 wurde einige Meter oberstrom der heutigen Messstelle gemessen
- Ab 1991 wird am heutigen Standort im Messschacht gemessen, Bezugspegel ist die Pegellatte im Messschacht.
- Infolge eines Bergsturzes war die Messstation ab dem 10.05.1999 ausser Betrieb, eine (rekonstruierte?) Pegelganglinie liegt jedoch vor (Hammer 2022).
- Am 15.02.2005 werden Radar und Tauchsonde im Gerinne in Betrieb genommen, der Bezugspegel ist neu die Pegellatte im Gerinne, der Schacht wird ausser Betrieb genommen.
- Am 23.03.2015 wird der Nullpunkt des Bandpegels im Gerinne nachgemessen und um 4 cm nach unten korrigiert (BAFU 2022).
- 2006 findet ein ca. 100-jährliches Hochwasser statt. Die Lage der Eichmessungen und P-Q-Kurven wird durch dieses Ereignis nicht beeinflusst. Eventuell wurde damals der grosse Felsblock (*Abbildung 125*) in die Rinne eingetragen.

- Evtl. krümmte sich der unterste Teil der Pegellatte ab 2013 leicht (bis 10 mm), Korrektur des Bandpegels/Abstich im Jahr 2015. (BAFU 2022)
- 3.12.2014 Neue Pegellatte montiert (BAFU 2022)
- 2014 findet ein deutliches Absinken der NW-Eichmessungen (-10 cm) und der P-Q-Kurven (-5 cm) statt, verursacht durch die Vergrößerung des Durchflussquerschnittes nach dem Herausspülen des Felsblocks (Croese 2022).
- 29.09.2016 wird Pegellatte ersetzt (BAFU 2022)

3.6.3 Messtechnik

Der Wasserstand wird mit einem Radar auf einem langen Ausleger (*Abbildung 119*) und einer Drucksonde in der Betonmauer rechts der Rinne gemessen. Der Messschacht, der mit Holzbohlen abgedeckt ist, ist heute ausser Betrieb.

Bei Niedrigwasser stimmen Radar und Tauchsonde gut überein, bei Hochwasser überschätzt der Radar tendenziell den Wasserstand, weil er auf die Wellenrücken misst. Die Pegelkontrollen werden mit der Pegellatte am linken Ufer des Gerinnes durchgeführt (Croese 2022).

3.6.4 Eichmessungen

Einzelne Eichmessungen bei hohen Abflüssen wurden 1979, 1987 und 1991 mit einer chemischen Verdünnungsmessung (HIP DBLH) erstellt. Die Pegelhöhen der Eichmessungen sind in *Abbildung 121* dargestellt. Bei Mittel- bis Hochwasserabflüssen werden die Eichmessungen mehrheitlich mit Uranin durchgeführt. Bei Niedrigwasser wird seit 2016 vor allem mit der Salzverdünnungs-Methode gemessen (*Abbildung 122*). Aus dem Untersuchungszeitraum von 1991 bis 2021 gibt es total 42 Eichmessungen unterhalb des Q250 und davon 7 unterhalb des Q347.

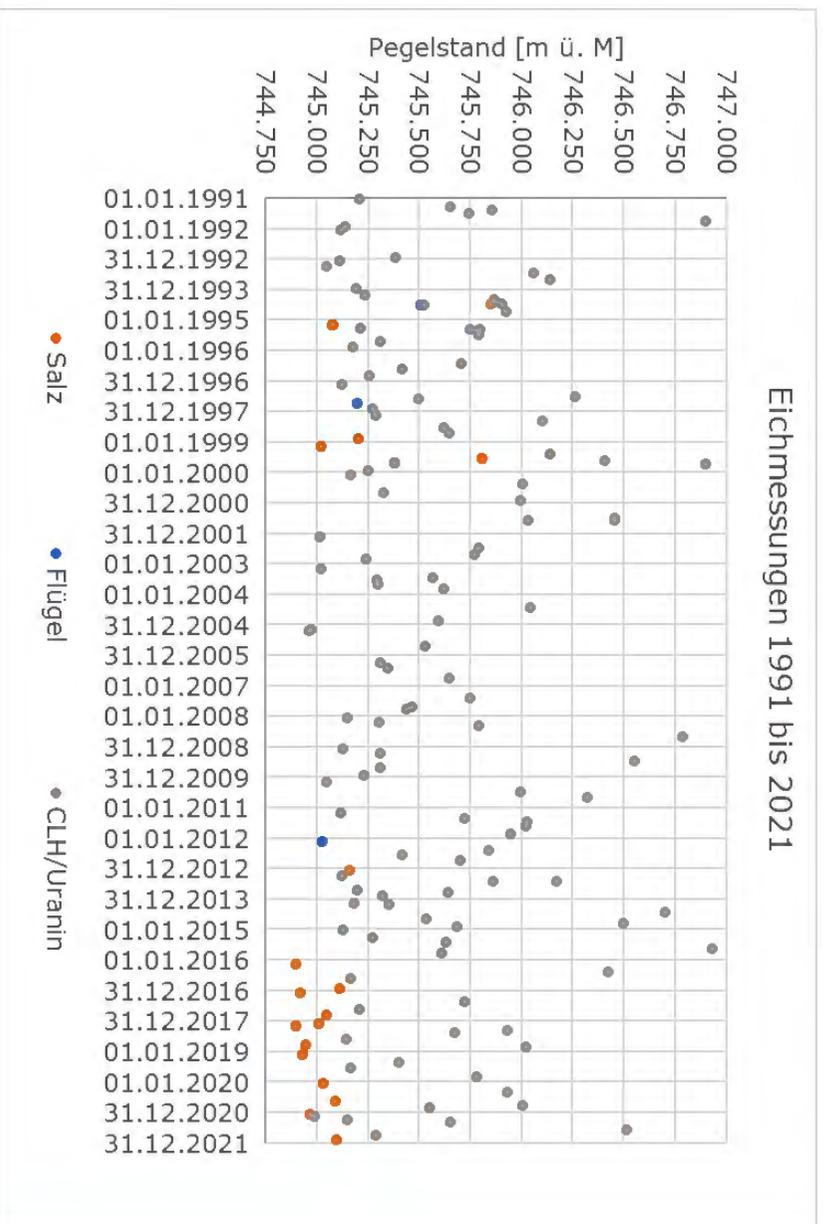


Abbildung 121: Pegelstand der Eichmessungen nach Methode über die Zeit

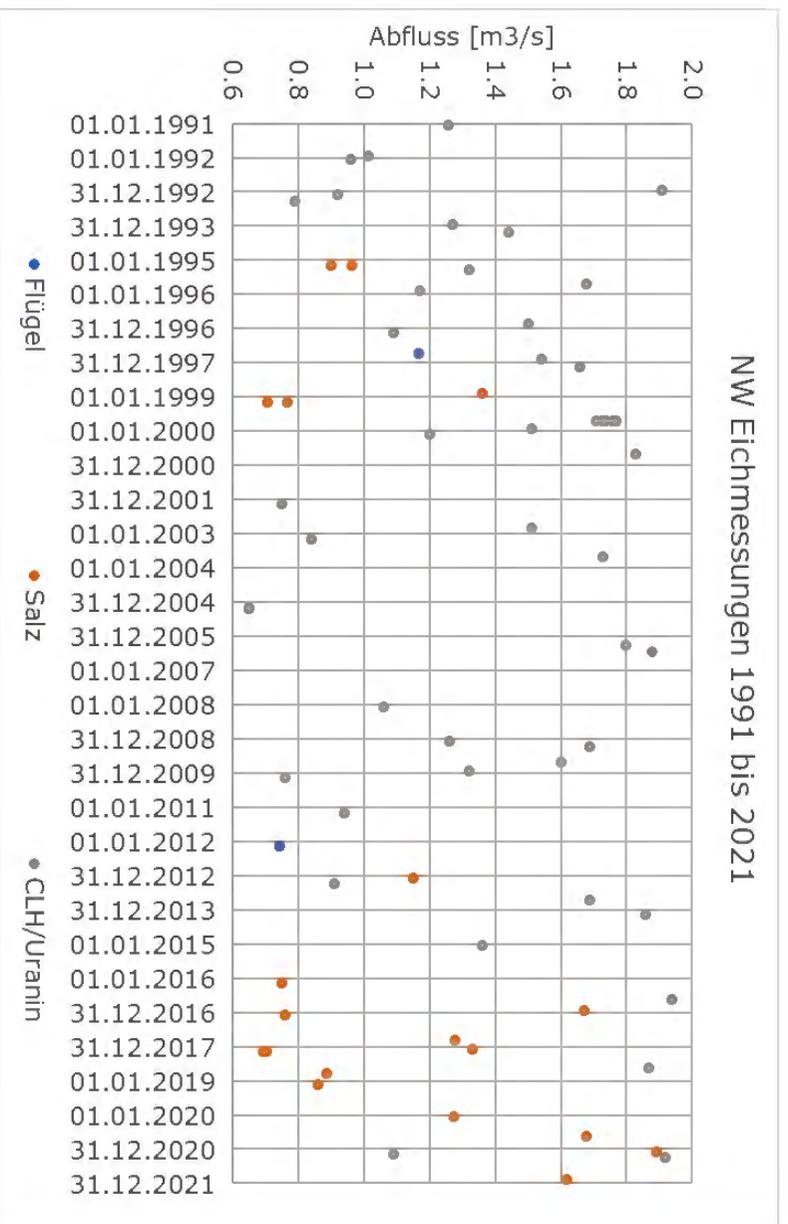


Abbildung 122: Abflüsse der Niedrigwasser-Eichmessungen nach Methode über die Zeit.

3.6.4.1 Lage der Eichmessungen

Betrachtet man die Lage der NW-Eichmessungen, so fallen zwei ausgeprägte Linien übereinander auf (*Abbildung 123*). Die Gruppen bildeten sich nicht durch die Verwendung einer bestimmten Messmethode, sondern in verschiedenen Zeiträumen. Versieht man die Eichmessungen mit ihrem Datum, lassen sich die Gruppen folgenden Zeiträumen zuordnen (*Abbildung 124*):

- Gruppe mit den höchsten Pegelständen, bis und mit 2013
- Gruppe mit mittleren Pegelständen (orange Oval): 2009 bis 2015, inklusive nicht beschriftete Uraninmessungen (grau)
- Gruppe mit den tiefsten Pegelständen (rotes Oval): Ab 2014, inklusive nicht beschriftete Uraninmessungen (grau)

Die Verschiebung zu den tiefsten Pegelständen stimmt zeitlich mit dem Herausspülen des Felsblockes (*Abbildung 125*), vermutlich durch ein damaliges 5-jährliches Hochwasser, überein.

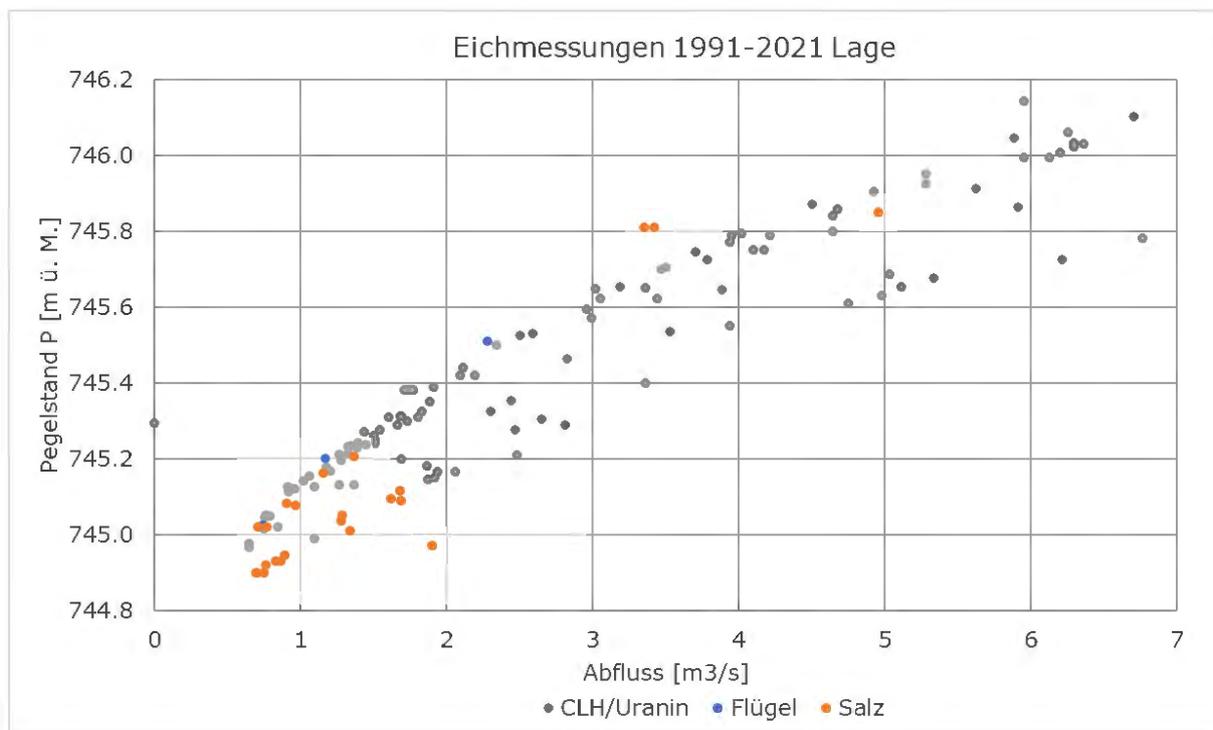


Abbildung 123: Lage der Eichmessungen nach Methode

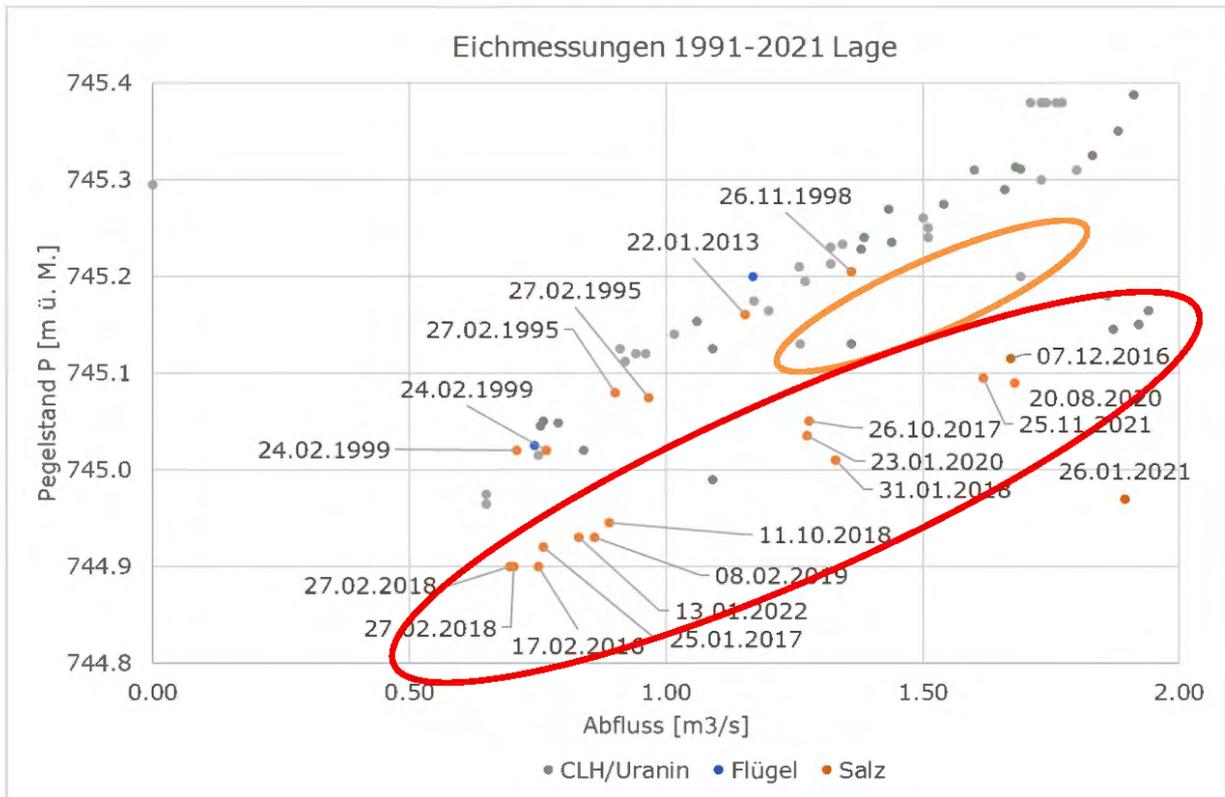


Abbildung 124: Lage der Eichmessungen, Salzmessungen mit Datumseintrag, zwischen 2013 und 2016 gab es keine Salzmessungen.



Abbildung 125: Grosser Steinblock am rechten Ufer der Messrinne (Croise vor 2014)

3.6.4.2 Abweichungen der Eichmessungen von der Mittellinie

Zur vertieften Betrachtung der Lage der Eichmessungen über die Zeit wurde eine Mittellinie in die Eichmessungen gelegt (Abbildung 126). 1991 bis 2004 verschieben sich die NW-Eichmessungen tendenziell von -0.3 auf -0.1 m³/s zur Mittellinie, allerdings gibt es auch immer wieder Ausreisser zu grossen positiven Abweichungen (Abbildung 127). Ab 2005 sinkt die Lage (roter Pfeil), um dann im Zeitraum zwischen 2008 und 2012 auf einem Niveau von ca. -0.35 m³/s zu bleiben. Mitte 2013 ist ein Sprung auf eine mittlere Lage von +0.2 m³/s festzustellen (roter Pfeil), welche bis Ende 2021 mit einigen Messungen um +0.3 m³/s bestehen bleibt.

Diese Analyse legt nahe, dass der Felsblock zwischen 2005 und 2008 in die Messrinne eingetragen wurde und damit zu deutlich tieferen Abflüssen bei gleichem Wasserstand führte. Diese Veränderung verlief eher schleichend, was darauf hindeuten könnte, dass der Block mehrmals verschoben, oder dass zusätzliches, weniger gut sichtbares Geschiebe eingetragen wurde. Der Sprung Mitte 2013 zu deutlich höheren Abflüssen bei gleichem Wasserstand lässt vermuten, dass der Felsblock dann herausgespült wurde.

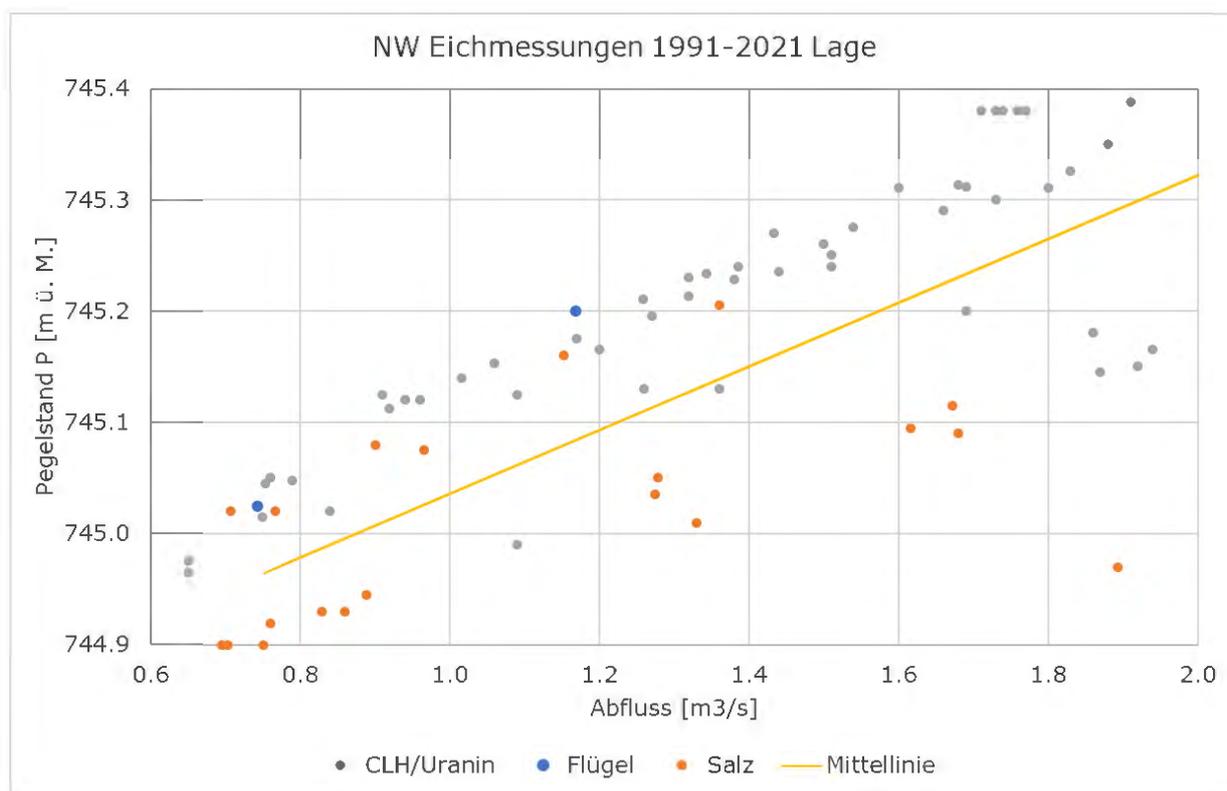


Abbildung 126: Lage der Eichmessungen 1991 bis 2021 mit ihrer Mittellinie, welche zwischen die beiden Gruppen gelegt wurde.

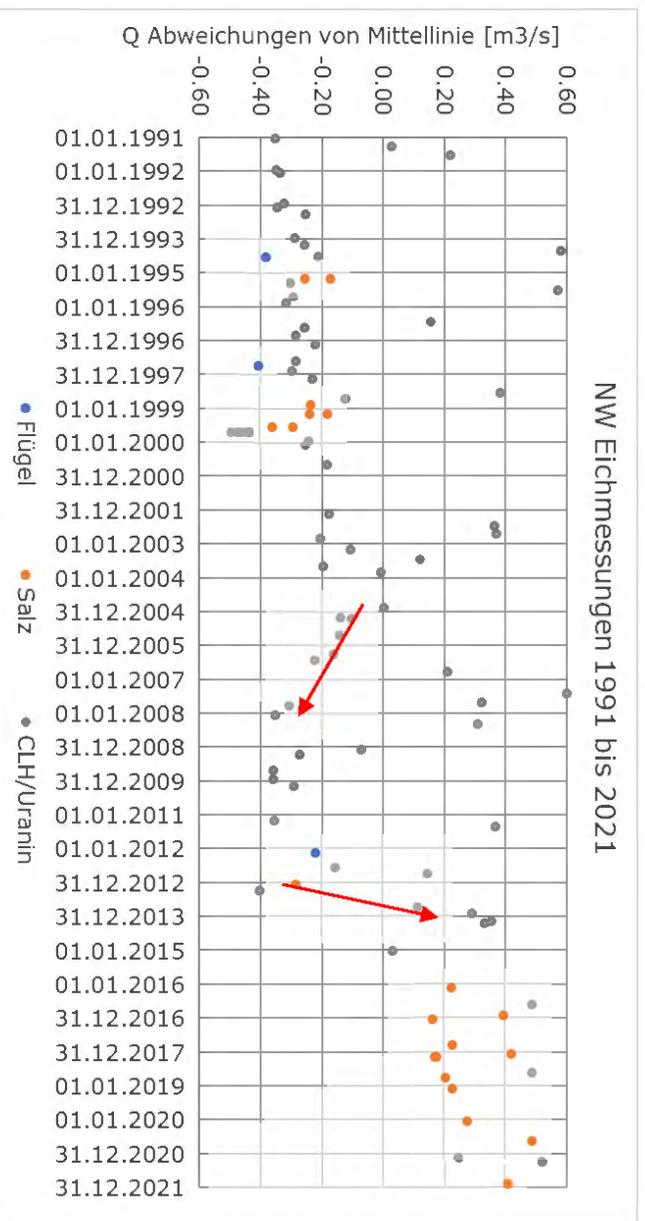


Abbildung 127: Q-Abweichungen von ihrer Mittellinie, die roten Pfeile markieren den vermuteten Ein- und Austrag des Felsblockes in die Messrinne.

Die Darstellung der Abweichung von der Mittellinie nach dem Abfluss und der Messmethode wurde auf zwei separate Mittellinien bis und nach 2013 bezogen (*Abbildung 128*). Damit wird sichergestellt, dass sich die zeitlichen Veränderungen der Abweichungen nicht in scheinbare Abhängigkeiten von Abfluss oder Methode manifestieren. Es zeigt sich, dass die Messungen mit der Salzverdünnung (orange) tendenziell näher bei der Mittellinie liegen als diejenigen mit Uranin (grau). Eine der beiden Flügelmessungen (blau) liegt 0.15 m³/s unter der Mittellinie, die andere direkt darauf. Eine auffällige Linie bilden die Uranin-Messungen bei 1.75 m³/s (rotes Oval). Diese Serie ist auch über der Mittellinie (*Abbildung 126*) und Ende 1999 (*Abbildung 127*) sichtbar, sie wurde vom Feldbeamten verworfen.

Zwischen der Abweichung von der Mittellinie und dem Abfluss ist ein Zusammenhang zu erkennen. Mit steigendem Abfluss sinkt die Abweichung zuerst von ca. +0.05 m³/s bis -0.1m³/s um ab einem Abfluss von 1.2 m³/s wieder bis ca. +0.05 m³/s zu steigen. Dieser Umstand reduziert die Aussagekraft der Darstellung der Abweichungen über die Zeit (*Abbildung 127*). Weil die Eichmessungen über die Zeit stets in einem breiten Abflussbereich stattfanden (*Abbildung 122*) verringert sich der beobachtete systematische Einfluss. Wir erachten deshalb die obige Aussagen zu den grossen Veränderungen durch den Steinblock als zulässig.

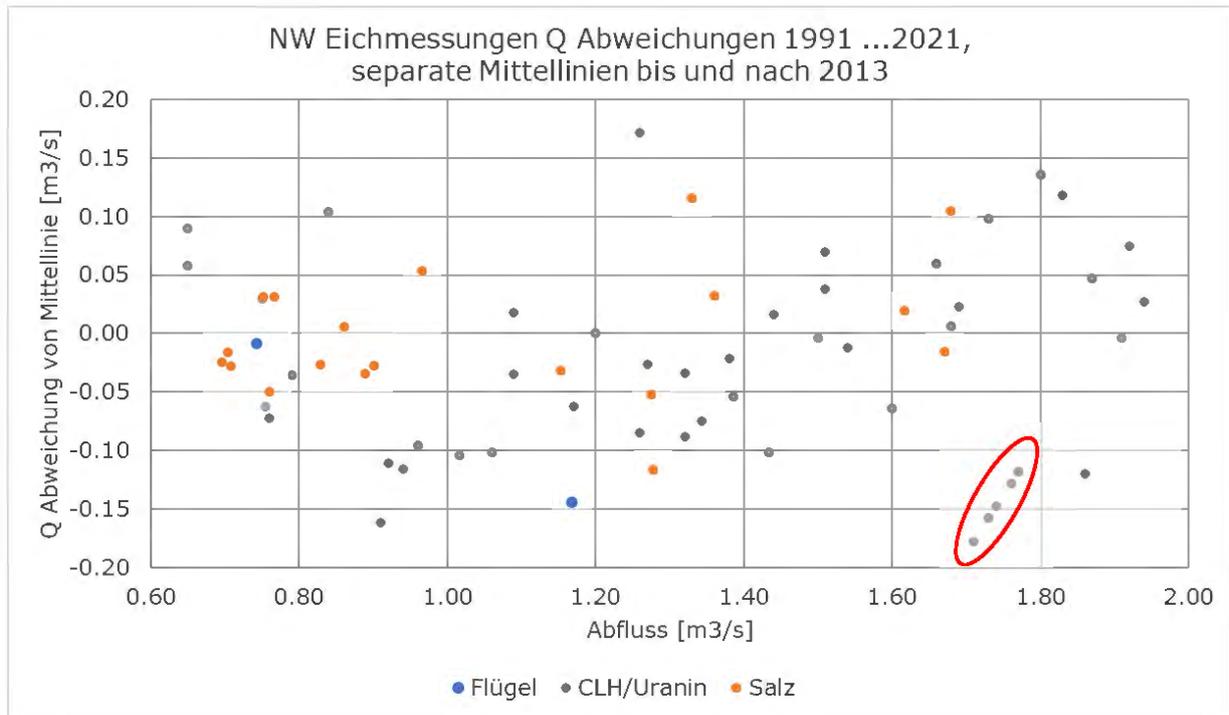


Abbildung 128: Q Abweichungen der EM von der Mittellinie nach Abfluss und Methode

3.6.5 P-Q-Beziehungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 29 P-Q-Beziehungen in Form der Kurven Nr. 10 bis 38 definiert und verwendet (Abbildung 129). Die Kurven 15, 16, 18, 22, 23 und 29 bis 32 wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit eingesetzt.

Im Zeitraum 2005 bis 2008, in dem vermutlich der Felsblock in die Messrinne eingetragen wurde, waren die Kurven 21 bis 25 wirksam. Sie sind mit total vier NW-Eichmessungen abgestützt, darunter auch die beiden tiefsten Messungen bei 0.65m³/s vom 1.3.2005 und 14.3.2005. Nach Mitte 2013, als der Felsblock wahrscheinlich weg war, gibt es eine auffällig Dichte der Kurven 29 bis 32, alle ohne NW-Eichmessungen.

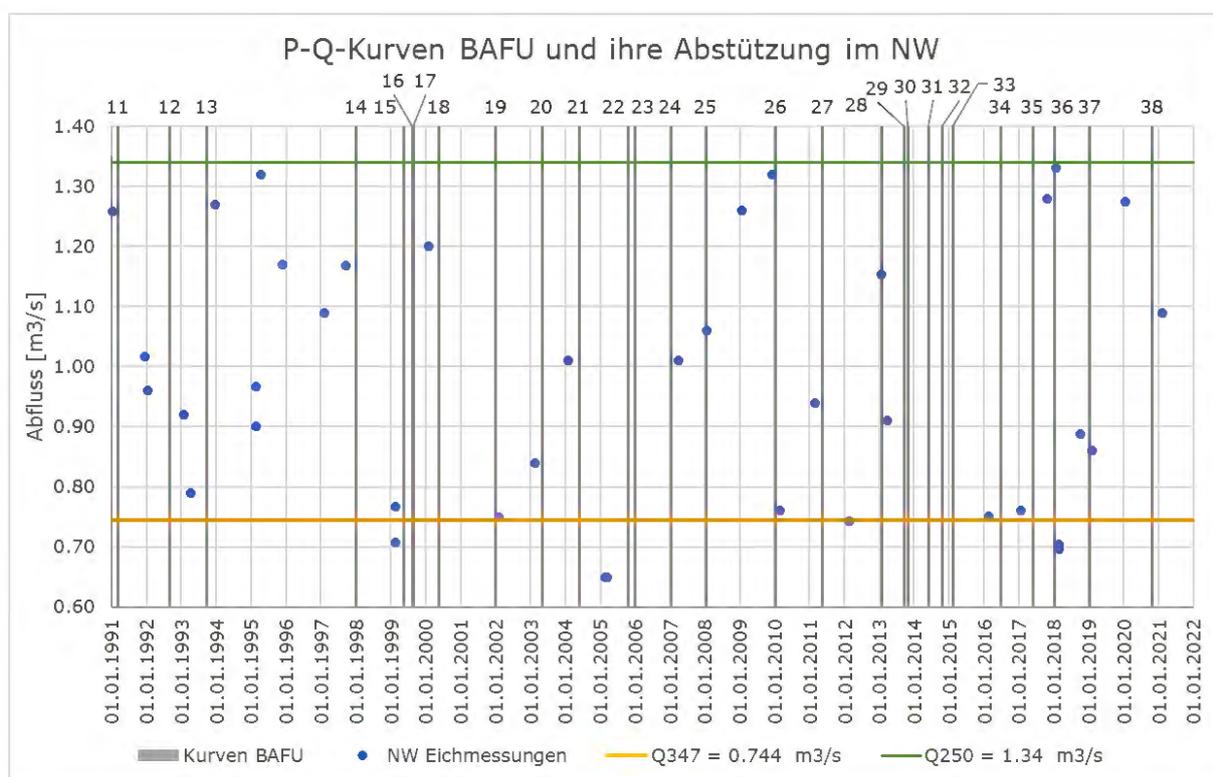


Abbildung 129: Calancasca, P-Q-Kurven BAFU und ihre NW-Eichmessungen

Die P-Q-Kurven gliedern sich, analog zu den Eichmessungen, in drei Gruppen, deren Gültigkeitsbereiche allerdings nicht komplett mit den Daten der Eichmessungen übereinstimmen (*Abbildung 130*):

- Die Kurven mit den höchsten Pegelständen schwanken in einer Bandbreite von rund 10cm. Diese Gruppe alle Kurven, mit Ausnahme derjenigen, welche in den folgenden Gruppen aufgeführt werden.
- Mittlere Pegelstände (oranges Oval) weisen die Kurven 29 (ab 15.09.2013), 31 und 32 (bis 03.02.2015) auf. Auch in dieser Gruppe liegt die Kurve 16 (10.08.1999 bis 26.08.1999).
- Tiefste Pegelstände (rotes Oval) zeigen die Kurven 33-37 (4.2.2015 bis 26.10.2020). Nach den Eichmessungen wurde der Felsblock 2014 aus der Rinne gespült. Bei noch tieferen Pegelständen liegt die Kurve 30 (dunkelblau, ab 27.10.2013 bis 02.06.2014), welche über keine Eichmessungen in diesem Bereich verfügt.

Verfolgt man auf einer fixen Kote, wie z.B. beim Nullpunkt von 4.80 m, den Abfluss der P-Q-Kurven, so resultieren folgende Abflüsse (*Anhang Abbildung 206 bis Abbildung 212*):

- Kurven 10 bis 27, gültig 1989 bis 2012, Abfluss konstant um 0.2 m³/s
- Kurve 28 (ab 21.01.2013) der Abfluss sinkt auf 0.071 m³/s
- Kurve 30 (ab 27.10.2013) der Abfluss steigt auf 0.750 m³/s
- Kurven 31 bis 38 (ab 3.6.2014 bis heute) der Abfluss pendelt sich um 0.3 m³/s ein.

Die Kurven sollten im Niedrigwasser dem zeitlichen Verlauf der Niedrigwasser-Eichmessungen folgen (*Abbildung 127*). Sie müssten also von 2005 bis 2008 sinkende Abflüsse und Mitte 2013 einen Sprung zu bleibend höheren Abflüssen aufweisen. Diese nicht plausiblen Veränderungen der Niedrigwasser P-Q-Kurven im Winter 2013 stammen vermutlich von Anpassungen der Kurven im Mittel- oder Hochwasserbereich.

Detaillierte Auskunft über die Entwicklung der P-Q-Kurven über die Zeit gibt der Anhang (Kapitel 10.6.2). Einige Kurven führen gegenüber ihren Vor- und Nachgängerinnenkurven zu auffälligen Veränderungen im Niedrigwasser. Einige davon sind im Niedrigwasser-Bereich schlecht mit Eichmessungen abgestützt (vergleiche Schlussfolgerungen, 3.6.7).

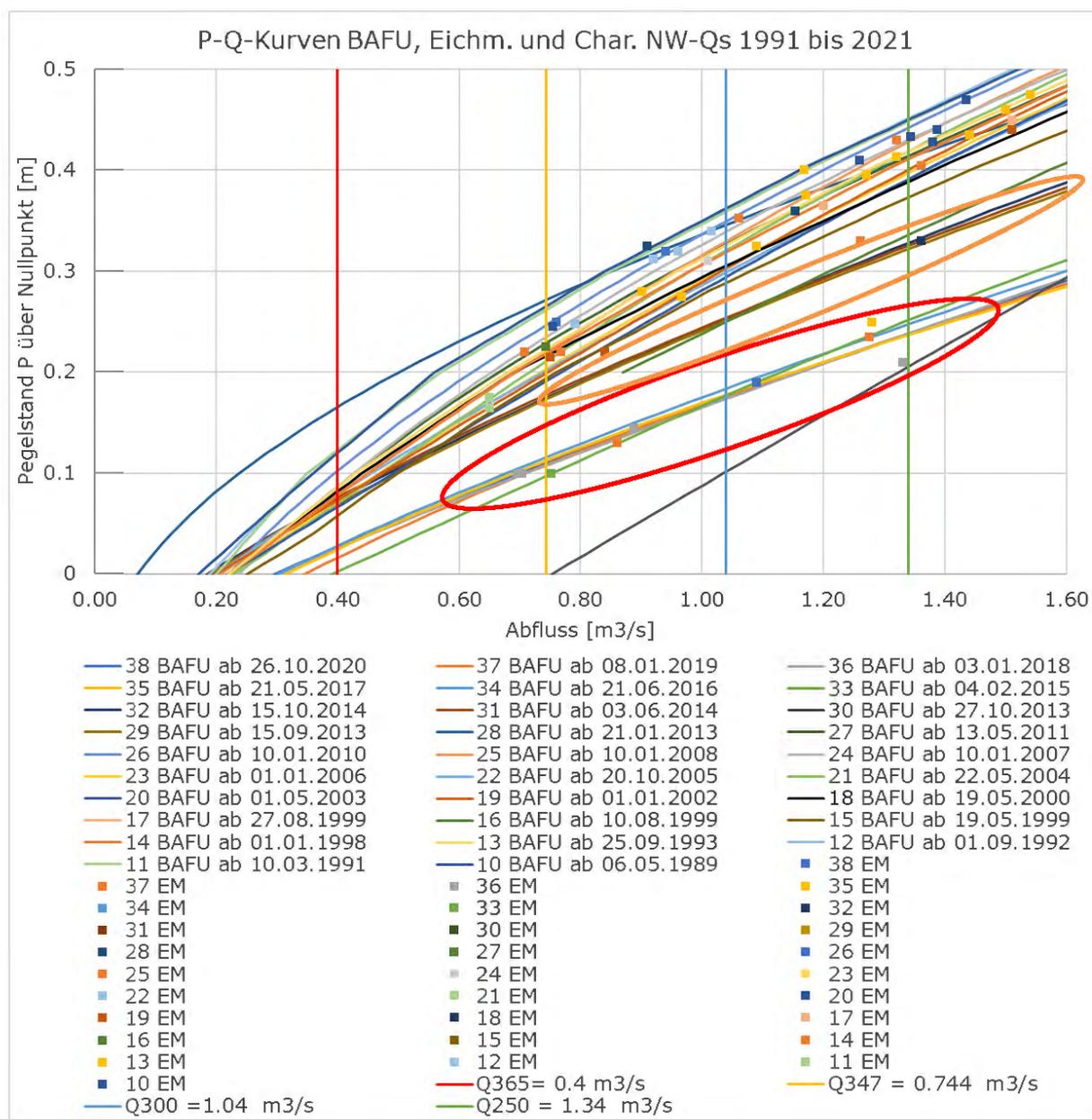


Abbildung 130: Calancasca, Lage der P-Q-Kurven BAFU, welche im Untersuchungszeitraum verwendet wurden. Im orangen und roten Oval Kurven mit auffällig tiefen Pegelständen.

Die mit Strickler nachgerechneten PQ-Beziehungen zeigen auf, dass einige der Kurvenanpassungen im Niedrigwasser nicht zwingend sind. Für den ganzen Zeitraum resultieren 15 NW-Strickler-Kurven (Anhang Kapitel 10.6.2).

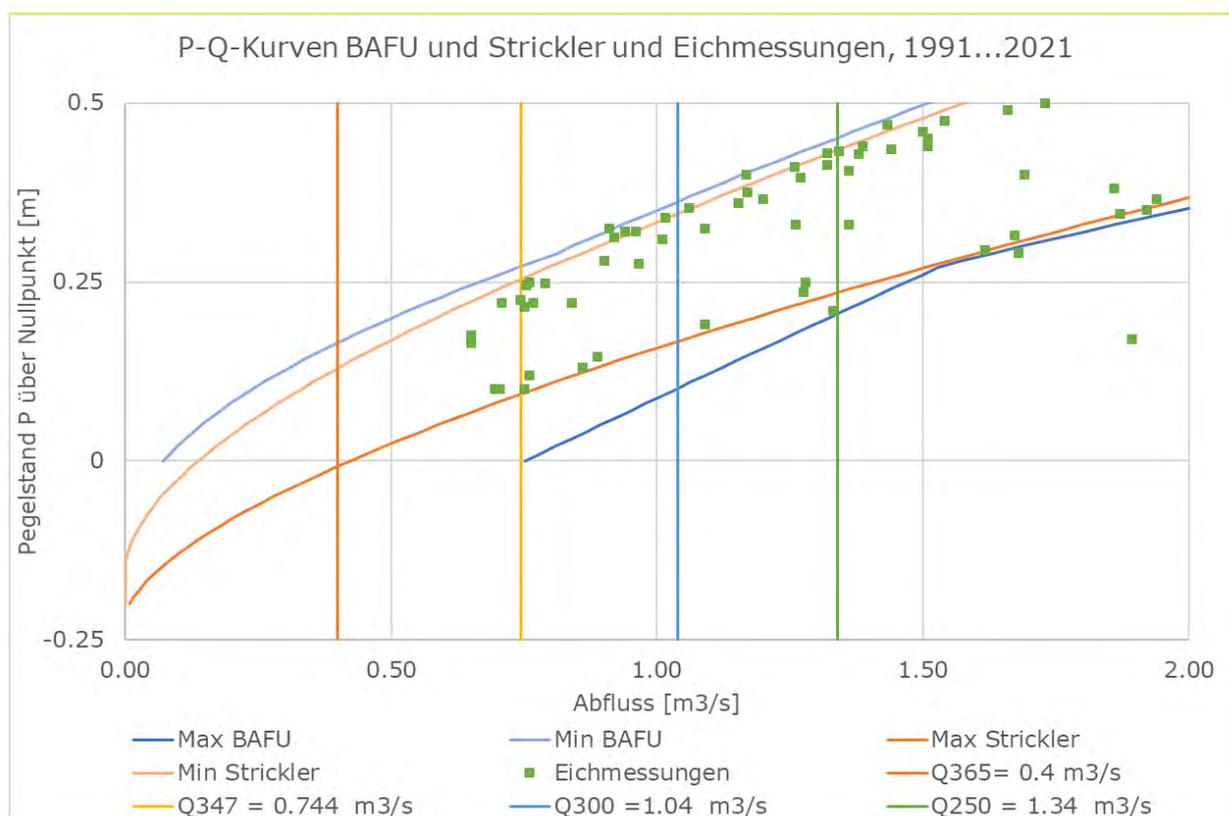


Abbildung 131: Hüllkurven der P-Q-Kurven, Eichmessungen und der charakteristischen Abflüsse

3.6.6 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Abweichungen der Dauerkurve Strickler weicht nur geringfügig von der Dauerkurve BAFU ab (Abbildung 132).

Auch während der einzelnen Winter unterscheiden sich die Ganglinien Strickler und BAFU nicht in grossem Ausmass. Während 8 Jahren unterschieden sich die Strickler- und BAFU- Abflüsse bei Niedrigwasser um mehr als 7%, nur bei 4 Jahren um 10% oder mehr, aber bei keinem über 14% (Abbildung 133).

Der Q347-Abfluss wird in folgenden Winterhalbjahren unterschritten: 1992, 1993, 1996, 1999, 2002, 2004, 2005, 2006, 2010, 2012, 2017, 2018. Besonders viele Tage mit $Q < Q_{347}$ kommen im Winter 2006 vor (Abbildung 134). Abbildung 135 zeigt, dass in allen gemessenen Gebieten der Alpensüdseite die Anteile der Abflüsse kleiner Q347 im Winter 2006 über 10% aller Tagesmittelwerte mit Q kleiner Q347 ausmachten. Der Winterabfluss war in allen gemessenen Gebieten der Alpensüdseite vergleichsweise tief. Die Calancasca bildete diesbezüglich keine Ausnahme. Es gibt keinen Grund, diese Werte anzuzweifeln.

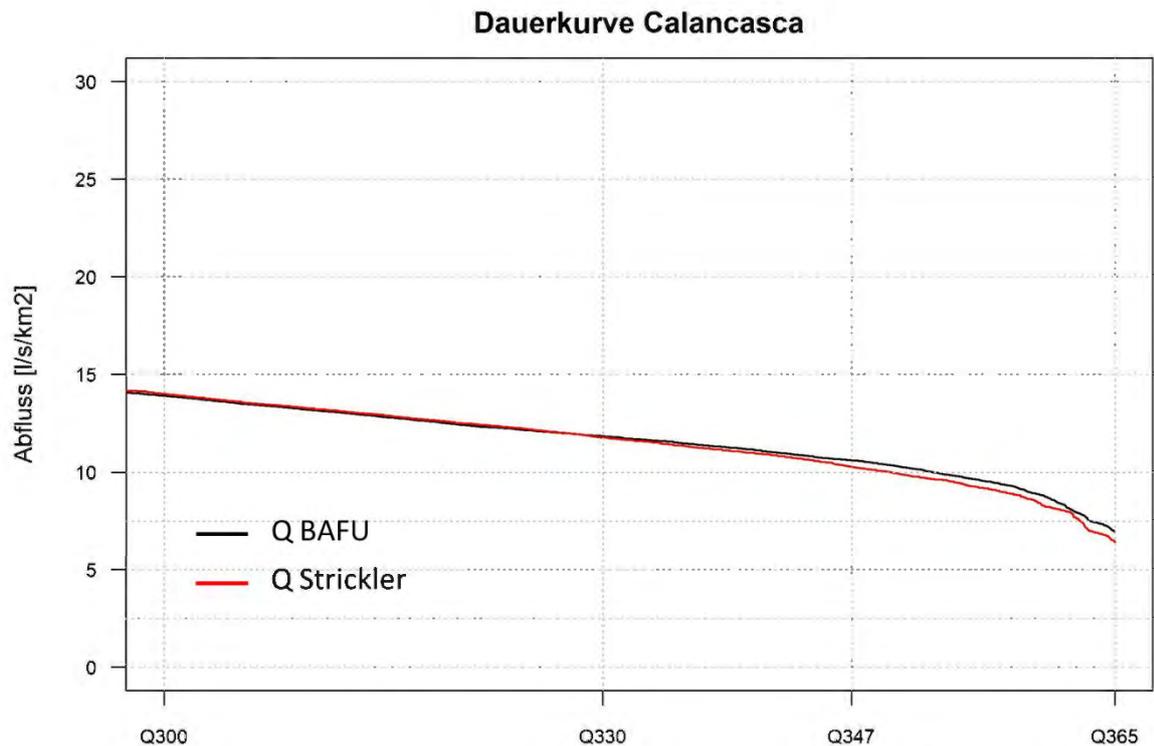


Abbildung 132: Vergleich der Dauerkurve (Q BAFU) mit Dauerkurve (Q Strickler) für die Calancasca für die Messperiode 1991 bis 2021.

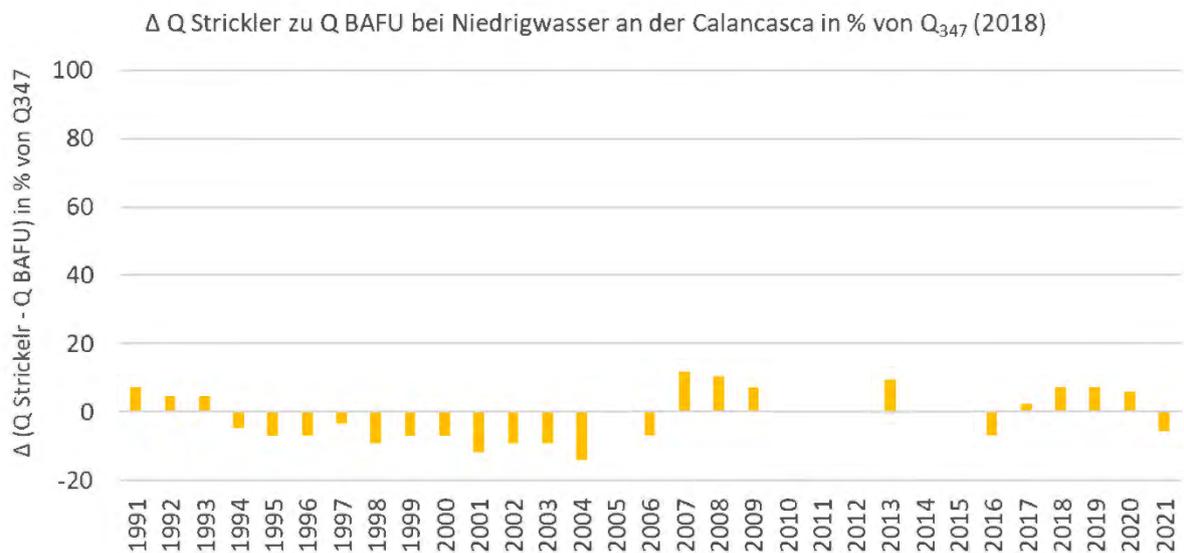


Abbildung 133: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q₃₄₇ (2018) am Pegel der Calancasca.

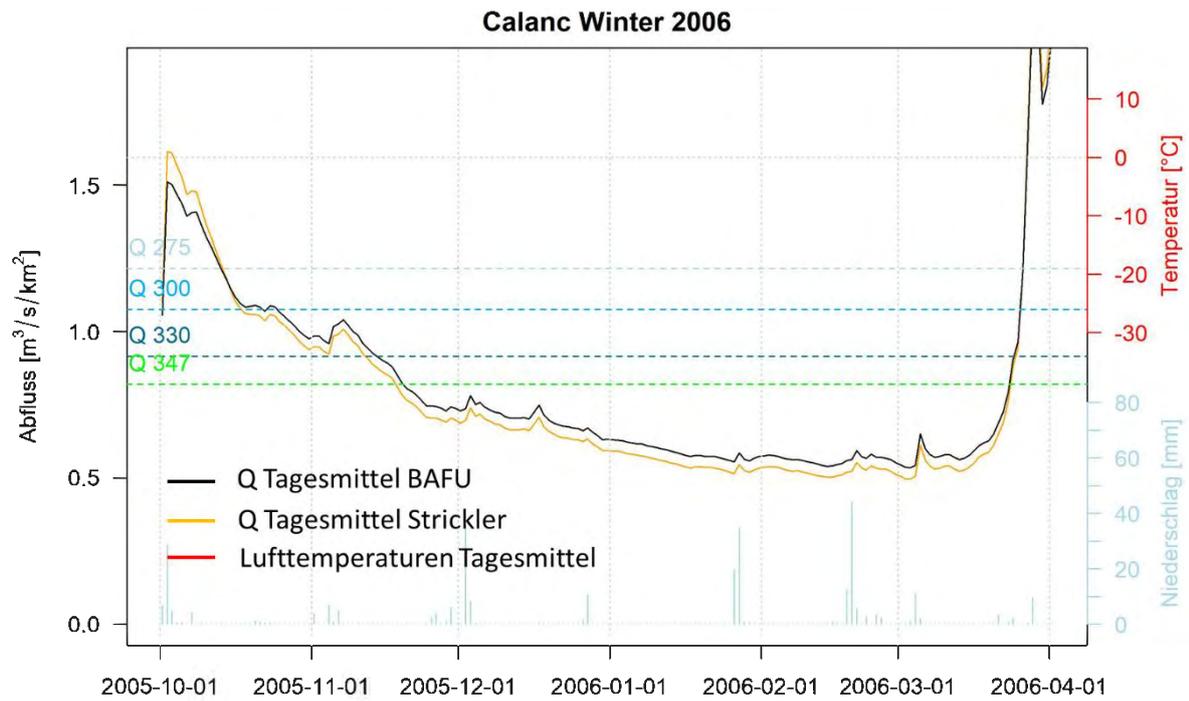


Abbildung 134: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für die Calancasca im Winter 2006.

Anteile an Tagen mit $Q < Q_{347}$ zwischen 1996 und 2021 [100% = 1] - Alpensüdseite

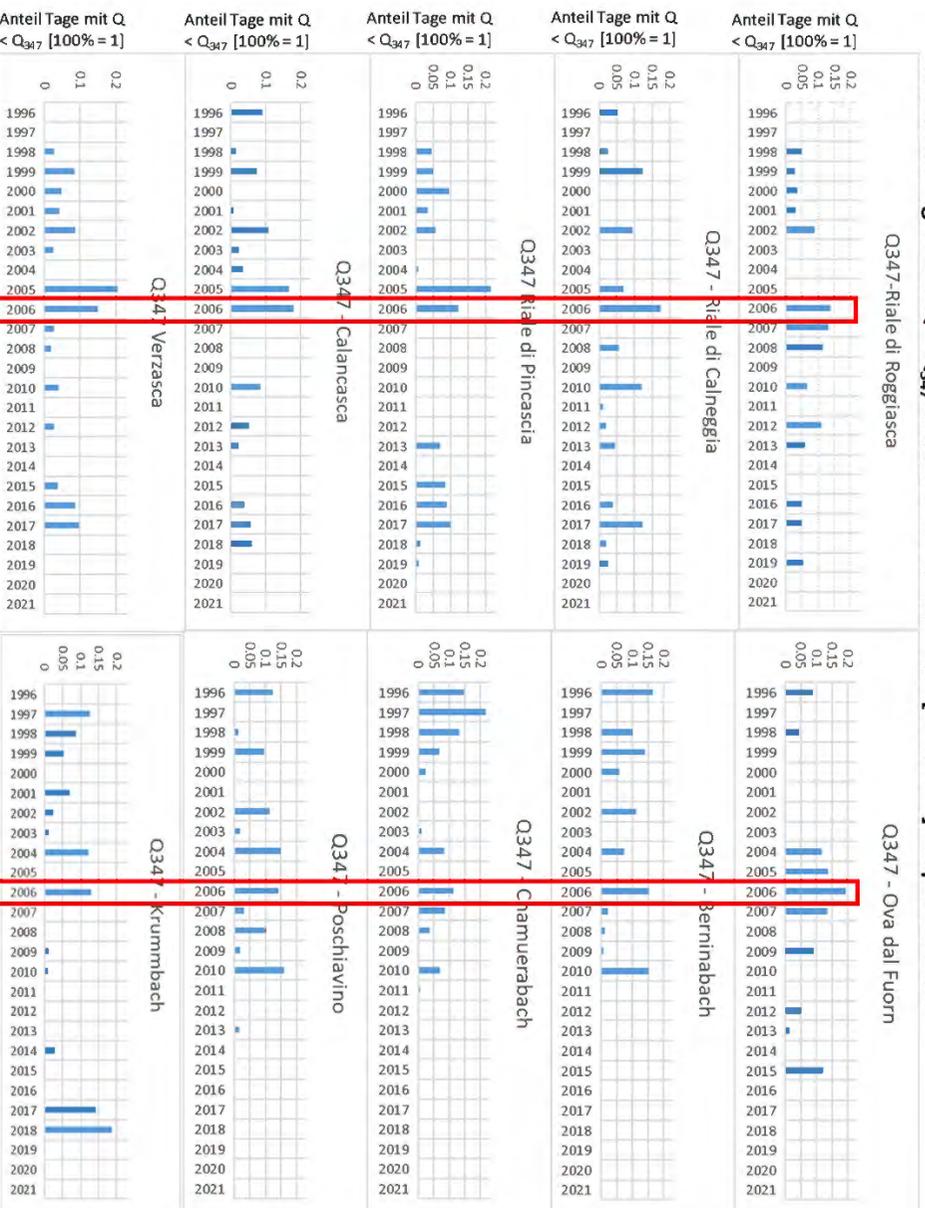


Abbildung 135: Repräsentative Auswahl an Einzugsgebieten der Alpennordseite, Anteile der Tage mit $Q < Q_{347}$ für jedes Jahr der Messreihe zwischen 1996 und 2021. Im Winter 2006 waren die Winterabflüsse in allen gemessenen Gebieten der Alpensüdseite vergleichsweise tief. Die Calancaasca bildete somit keine Ausnahme.

3.6.7 Schlussfolgerungen

3.6.7.1 Messstation

Die Messstation Calancaasca Buseno ist mit ihrer Messrinne recht gut geeignet für Niedrigwasser. Beim Q347 beträgt die Wassertiefe ca. 0.11 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von nur 5.9 % des Q347.

Die Anordnung der Messrinne am Prallhang führt bei Hochwasser zu einem starken Geschiebe-eintrag und entsprechend starker Sohlenerosion. Ein eindrückliches Beispiel dafür ist der in die Messrinne eingetragene Felsblock, welcher vermutlich beim Hochwasser im Oktober 2006 hinein und beim Hochwasser im April 2013 wieder hinausgespült wurde.

Die Pegelmessung mit Radar und Tauchsonde direkt in der Messrinne hat gegenüber einer Schachtmessung den Vorteil, dass keine Differenzen durch Fließgefälle auftreten. An dieser Messstelle sind keine relevanten Beeinträchtigungen durch Schnee und Eis zu erwarten.

3.6.7.2 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum wurden 42 Eichmessungen bei Abflüssen kleiner Q250 durchgeführt, 7 davon lagen unter dem Q347.

Die Sohle in der Messrinne ist mindestens unterhalb des Messquerschnittes zwischen den Eisenbahnschwellen sichtbar erodiert. Diese Veränderung ist im zeitlichen Verlauf der Lage der Eichmessungen nicht klar erkennbar. Vermutlich wurde dieser Effekt vom Geschiebeeintrag mindestens zeitweise kompensiert.

Das Eintragen des Felsblockes in die Messrinne ab 2006 ist in den Eichmessungen weniger klar sichtbar als das Austragen im Jahr 2013.

3.6.7.3 P-Q-Kurven

Im Untersuchungszeitraum wurden 29 P-Q-Beziehungen in Form der Kurven Nr. 10 bis 38 definiert und verwendet (Abbildung 129). 41% davon wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit eingesetzt.

Bei der Analyse der P-Q-Kurven wurden die folgenden Auffälligkeiten entdeckt:

- Im Niedrigwasser-Bereich gibt es verschiedene Veränderungen der P-Q-Kurven ohne entsprechende Eichmessungen (Z.B. Kurve 12 nach 13, Kurve 26 zu Kurve 27 und 28)
- Die Kurven 15 bis 16 liegen im Niedrigwasser bei auffällig tiefen Pegelständen, ohne dass sie dort mit Eichmessungen abgestützt wären. Kurve 17 ist eine Kopie von Kurve 14.
- Die Pegelstände der BAFU-Kurven 22 bis 26 weisen steigende Pegelstände auf. Diese Veränderung stimmt zeitlich ungefähr mit dem vermuteten Eintrag des Felsblockes 2005 überein.
- Von der Kurve 28 zur Kurve 29 (gültig ab 15.9.2013) sinkt der Pegelstand stark, diese Veränderung stimmt mit dem vermuteten Zeitpunkt des Herausspülens des Felsblockes im April 2013 überein.
- Für die grosse Verschiebung des Pegelstandes im Niedrigwasser von Kurve 29 zu 30 und zurück zu 31 gibt es keine plausible Erklärung und auch keine Eichmessungen.

3.6.8 Empfehlungen

Messstation

Um wieder einen klaren Nullpunkt zu erhalten, wird empfohlen, die zwischen den Bahnschwellen erodierte Sohle zu reparieren. Möglicherweise wäre eine Panzerung mit Stahl oder Basalt sinnvoll.

Der Überschätzung der Pegelstände des Radars bei Hochwasser könnte begegnet werden, indem ein Radar mit einem grösseren Messwinkel eingesetzt wird, und die Störechos der beiden Ufer ausgeblendet werden.

Eichmessungen

Wir empfehlen weiterhin regelmässig Eichmessungen bei Niedrigwasser durchzuführen.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, im Niedrigwasserbereich folgende Veränderungen vorzunehmen:

- Während dem Zeitraum der Kurven 15 und 16 die Kurve 14 weiterverwenden.
- Während dem Zeitraum der Kurve 30 die Kurve 29 weiterverwenden

3.7 Riale di Calneggia - Caveragno, Pontit

3.7.1 Morphologie und Hydraulik

Der Riale di Calneggia fliesst mit 8.0% Gefälle in einem natürlichen Kiesbett durch das abgeschiedene Calneggia-Tal. Im Bereich der Station hat sich der Bergbach tief in eine Felsformation eingearbeitet (*Abbildung 136, Abbildung 137*). In dieser fliesst er ca. 300 m weiter, wo er in einem imposanten Wasserfall ins Bavonatal stürzt.



Abbildung 136 Messstation 2356 Riale di Calneggia, Fliessrichtung von unten links nach oben rechts, (<https://map.geo.admin.ch/> abgerufen November 2021)

3.7.2 Messstation

Die Messstation misst in einem Felsbecken, welches in Flussrichtung von einer unebenen Felskante abgeschlossen wird (*Abbildung 138*). Die Geometrie dieser Kante dürfte, mit Ausnahme eines gewissen Geschiebetriebes, zeitlich sehr stabil sein. Das Profil kann grob als Trapez mit einer Sohlenbreite von 2.5 m und einer Breite von 3.5m auf einer Höhe von 2m angenähert werden.

Bezeichnung	2356 Riale di Calneggia - Caveragno, Pontit
Kennzahlen der Station (BAFU 2021)	
Stationshöhe	890 m ü. M
Grösse des Einzugsgebietes (EZG)	23.9 km ²
Mittlere Höhe des EZG	2'003 m ü. M
Vergletscherung	0.0 %
Koordinaten LV95	2'684'982 / 1'135'954



Abbildung 137: Messstation BAFU 2356 Riale di Calneggia - Caveragno, Pontit (BAFU 2021), Blick gegen die Fliessrichtung.

Tabelle 7: Tageswerte von 1967-2017 (Hydromaps 2021):

	Bereich [m ³ s ⁻¹]	Charakteristische Werte
Jeden Tag erreichter Abfluss		Q ₃₆₅ = 0.062 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 5%	0.062 ... 0.159	Q ₃₄₇ = 0.159 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 8.2 %		Q ₃₀₀ = 0.262 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 31.5%		Q ₂₅₀ = 0.370 m ³ s ⁻¹
Niedrigste 7-Tages-Mittel seit Messbeginn 1964		NM7Q = 0.065 m ³ s ⁻¹
Mittlere 90% der Abflüsse	0.159 ... 4.6	Median des Tagesabflusses = 0.673 m ³ s ⁻¹
Höchste 5% der Abflüsse	4.6 ... 48.0	

Beim Q₃₄₇ = 0.159 m³ s⁻¹ führt eine Pegeländerung von 0.01 m über die aktuelle P-Q-Beziehung zu einer Abflussänderung von ca. 0.023 m³ s⁻¹.



Abbildung 138: Messtation BAFU 2356 Riale di Calneggia - Caveragno, Pontit (Kaderli 2021)

Seit 1991 sind folgende Ereignisse bekannt, welche sich möglicherweise auf den Bezug zwischen Pegelstand P und Abfluss Q auswirkten:

- 1.1.1974 Pegelnullpunkt 890.00 m ü. M (Hammer BAFU 2022)
- 4.12.1991 Die Station wurde um wenige Meter versetzt
- 14.10.2013 Wechsel der Höhen auf Koten, der Höhenfixpunkt auf dem Fels hinter der Messstelle weist eine Höhe von 2.823 m und eine Kote von 884.19 m auf.
- 1.1.2014 Umstellung Relativ-/Absolutpegel 2.6 m Relativpegel = 883.97 m ü. M. -> Pegelanstieg um ca. +0.37 m (horizontbereinigt). (Hammer BAFU 2022)
- 21.10.2014 Pegelnullpunkt 881.00 m ü. M (Hammer BAFU 2022)

3.7.3 Messtechnik

Der Wasserstand wird mit einer Tauchsonde im Schutzrohr direkt im Gewässer gemessen. Mit dieser Sonde wird auch die Wassertemperatur erfasst.

Die Pegelkontrolle erfolgt durch den Vergleich mit der ebenfalls direkt im Gerinne stehenden Pegellatte.

3.7.4 Eichmessungen

Eichmessungen werden mit Salz oder Uranin durchgeführt. Die Einspeisestelle für die Salzmes- sungen befindet sich 40 m oberstrom, die Leitfähigkeits-Messtelle 10 m unterstrom der Pegel- Messtelle. Die Einspeisestelle für die Uraninmessungen befindet sich 10m oberstrom, die Ent- nahmestelle 100 m unterstrom der Messtelle. Drei widersprüchlich bezeichnete Eichmessungen (virtuell=wahr, WM-Nummer trotzdem vorhanden) wurden in die Untersuchungen einbezogen. Als Bezug für die Eichmessungen gilt immer der Pegel der Pegelmessung.

Im Untersuchungszeitraum sind Eichmessungen ab Mitte 1993 dokumentiert (*Abbildung 139*). Bis 2006 gab es neben Salz- und Uranin- auch wenige Flügelmessungen. Von 2007 bis Mitte 2012 gab es ausschliesslich Uranin-Messungen, ab dann wurde das Mittel- und Niedrigwasser mit Salz gemessen.

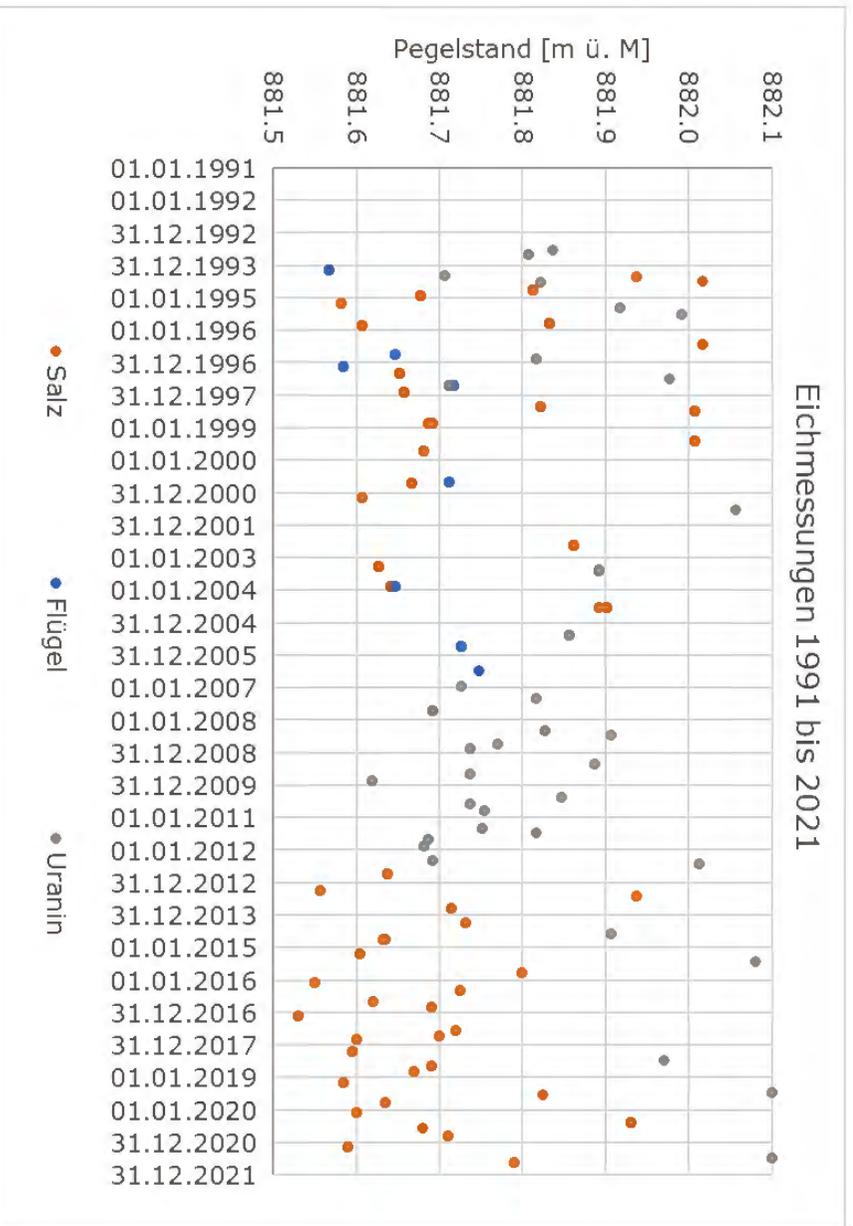


Abbildung 139: Pegelstand der Eichmessungen nach Methode über die Zeit

Im Untersuchungszeitraum wurden 17 Niedrigwassermessungen bei Abflüssen kleiner oder gleich dem Q250 = 0.370 m³/s durchgeführt, wobei es von 2001 bis 2012 eine Lücke gab (*Abbildung 140*). Eine der NW-Eichmessungen lag unterhalb des Q347 = 0.159 m³/s.

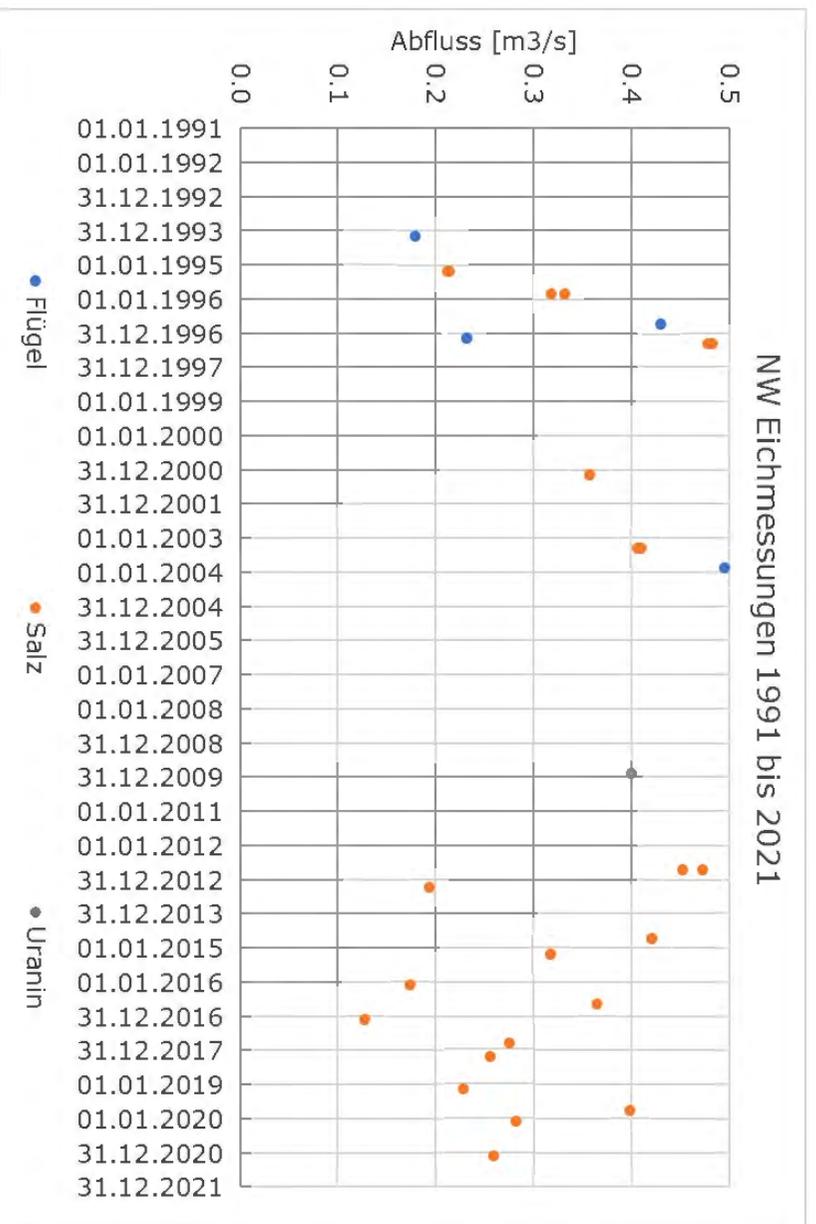


Abbildung 140: Abfluss der Niedrigwasser-Eichmessungen nach Methode über die Zeit.

3.7.4.1 Lage der Eichmessungen

Die Eichmessungen bilden eine klar erkennbare P-Q-Beziehung (Abbildung 141). Die wenigen auffälligen Ausreisser sind Uranin-Messungen. Legt man in die Niedrigwasser-Eichmessungen eine Mittellinie (Abbildung 142), so können die Abweichungen von dieser Linie analysiert werden.

Analysiert man die Abweichungen der NW-Eichmessungen welche kleiner als 0.5 m³/s sind von ihrer Mittellinie über die Zeit (Abbildung 143) zeigt sich wieder die obige Messlücke. Es ist auch ersichtlich, dass sich die Eichmessungen mit Ausnahme eines Ausreissers in einem engen Band von +/- 50 l/s befinden. Es gibt eine Tendenz zur Gruppenbildung, abwechselungsweise über und unter der Mittellinie.

Bei Betrachtung der Abweichung zur Mittellinie über den gemessenen Abfluss (Abbildung 144) zeigt sich ein ähnliches leichtes Wellenmuster um den Nullpunkt.

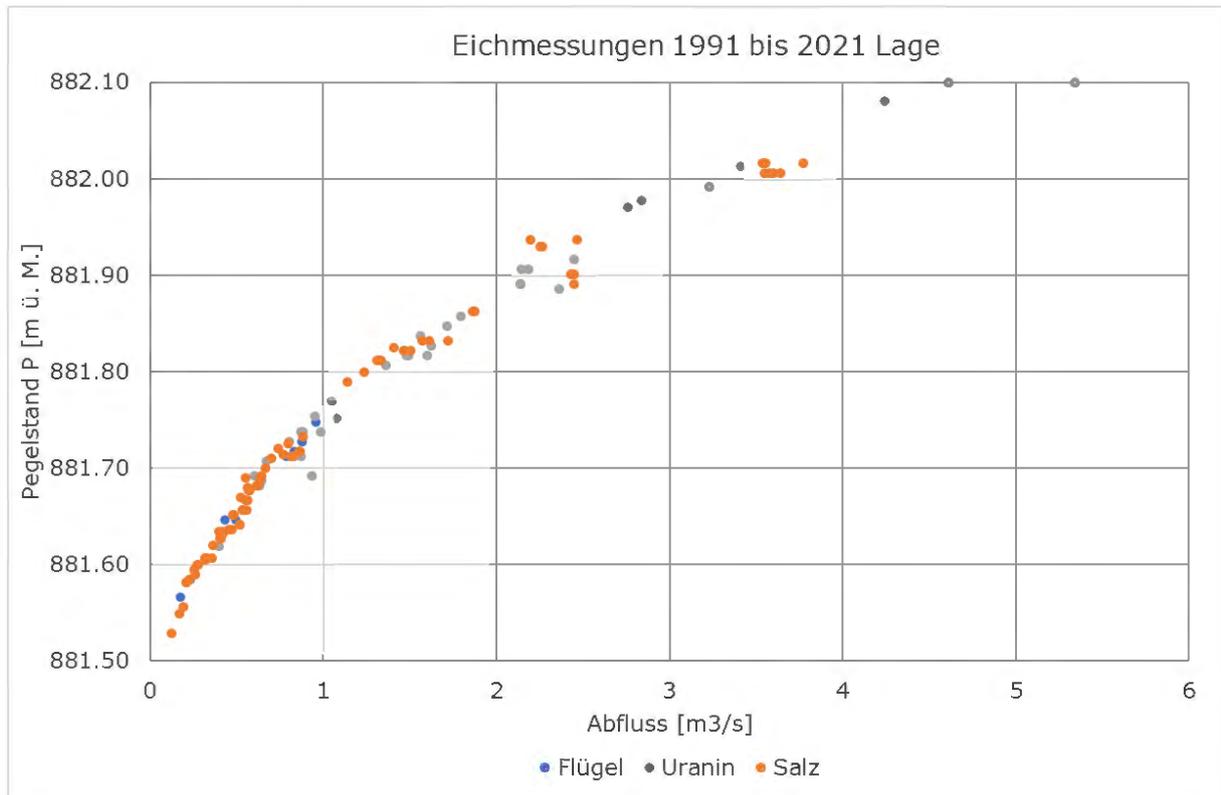


Abbildung 141: Riale di Calneggia, Lage der Eichmessungen nach ihrer Methode

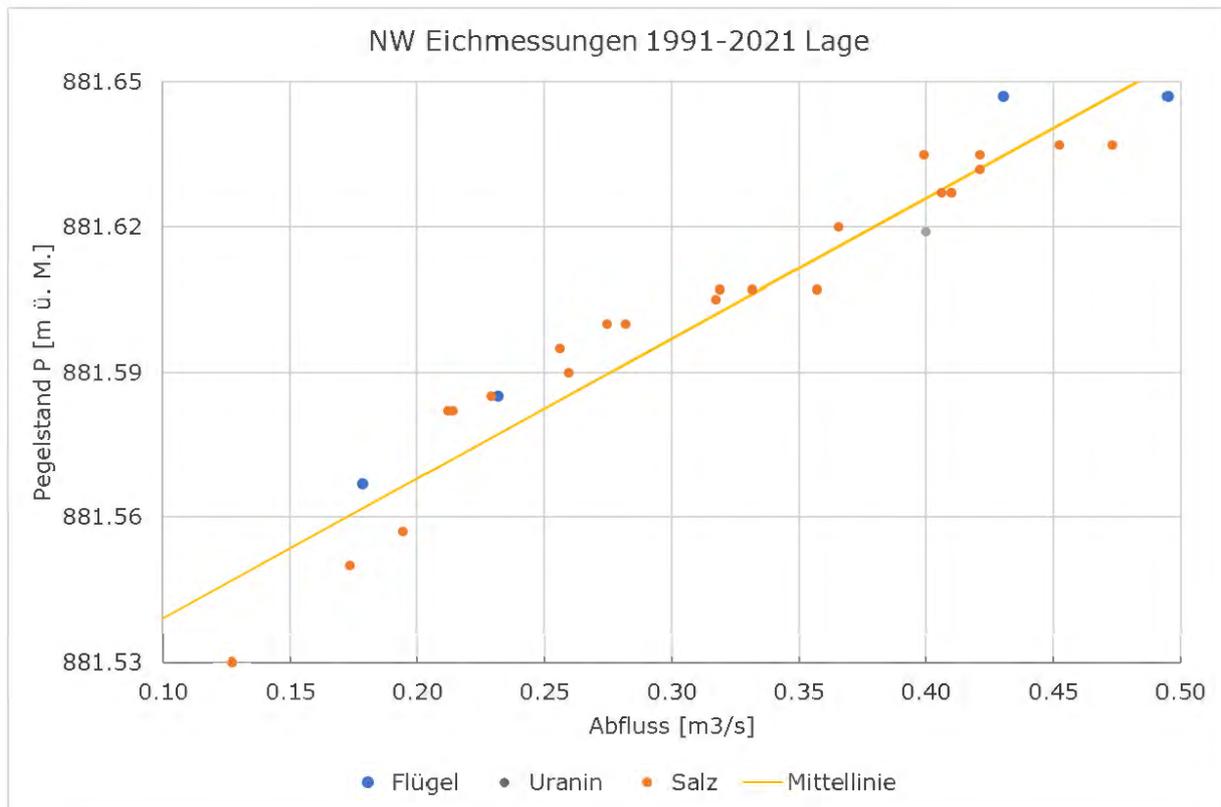


Abbildung 142: Riale di Calneggia, Niedrigwasser-Eichmessungen und ihre Mittellinie

3.7.5 P-Q-Beziehungen

Seit 1991 wurden 18 P-Q-Beziehungen in Form der Kurven Nr. 18 bis 35 definiert und verwendet (*Abbildung 146*). Die Hälfte der Kurven (18 bis 20, 24 bis 26, 28, 29 und 31) wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit verwendet. Einzig die Kurven 21 bis 23 (1993 bis 1997) und 32 bis 35 (2015 bis 2021) sind im Niedrigwasser mehrheitlich besser abgestützt.

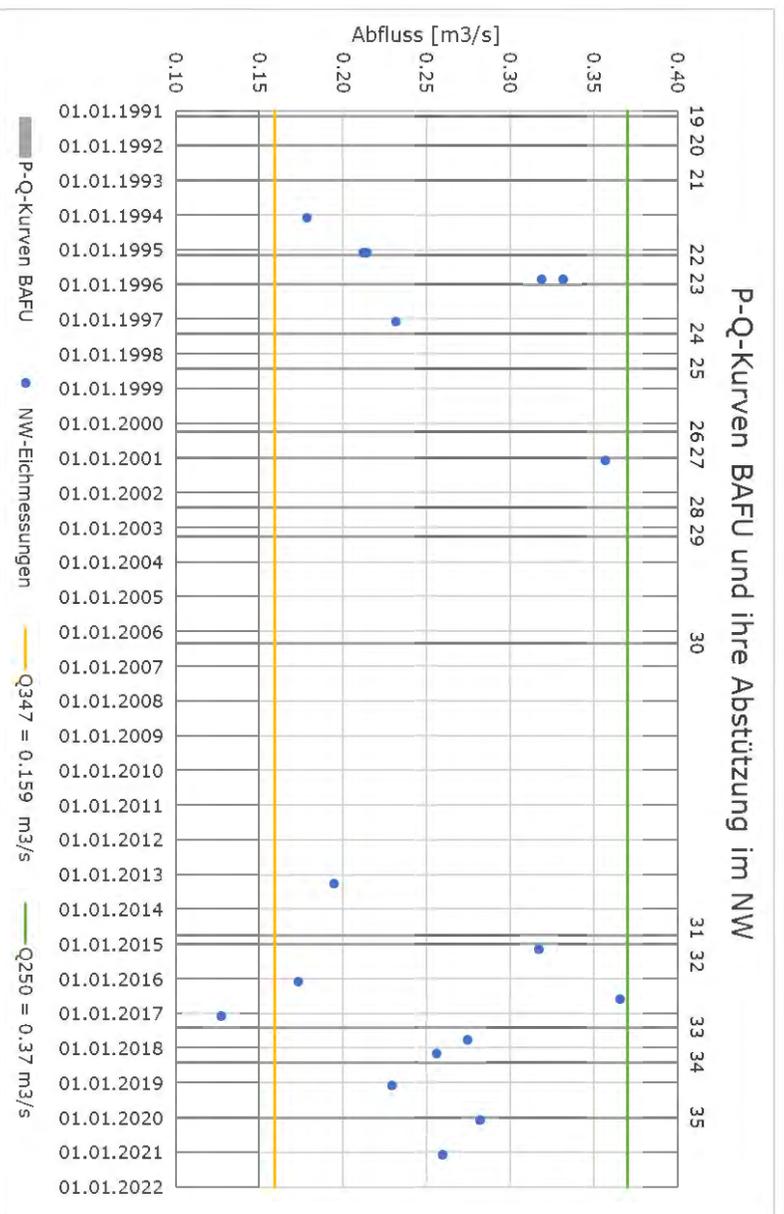


Abbildung 145: *Riale di Calneggia, P-Q-Beziehungen und ihre Abstützung im Niedrigwasser*

Die Kurven 18 und 19 (*Abbildung 146*, gelb und grau) weisen eine komplett andere Form und einen anderen Nullpunkt als ihre Nachfolgekurven auf. Sie sind von 1988 bis 1991 am früheren Standort gültig.

Die Kurven 20 bis 35 streuen beim Q 347 (*gelbe vertikale Linie*) um 2,5 cm Pegelhöhe, wobei der Bereich ohne die beiden auffällig tief liegenden Kurven 28 und 29 (*dunkelblau und gold*) sogar unter 2 cm betragen. Auch die Eichmessungen liegen in einem engen Schwankungsbereich liegen (*Abbildung 143*).

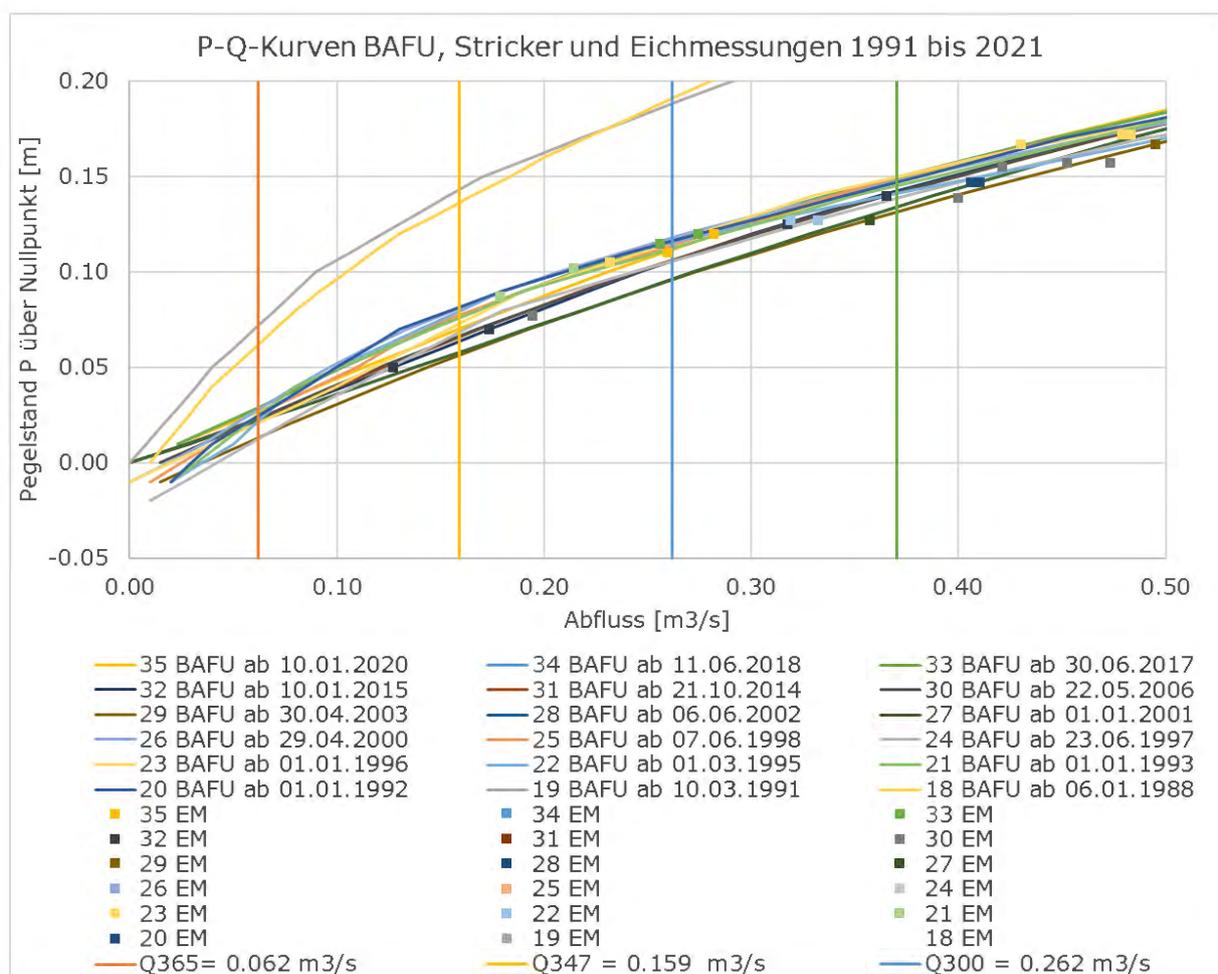


Abbildung 146 Lage der verwendeten P-Q-Kurven BAFU und ihre Eichmessungen

Detaillierte Auskunft über die Entwicklung der P-Q-Kurven über die Zeit gibt der Anhang (Anhang 10.7.2). Einige Kurven führen gegenüber ihren Vorgänger- und Nachfolgekurven zu auffälligen Veränderungen im Niedrigwasser. Einige davon sind im Niedrigwasser-Bereich schlecht mit Eichmessungen abgestützt (Schlussfolgerungen 3.7.7).

Die Niedrigwasser-Eichmessungen im Untersuchungszeitraum konnten mit 10 Strickler-Kurven anstatt der 18 BAFU-Kurven abgebildet werden. Die Darstellung der Umhüllenden um diese Kurven (Abbildung 147) zeigt, dass die maximalen und minimalen Strickler-Kurven (*hell- und dunkelorange*) eine ähnliche Spannweite aufweisen wie diejenige der BAFU-Kurven (*hell- und dunkelblau*). Dies liegt vor allem daran, dass bei beiden Kurven der Nullpunkt über die Zeit verschoben wurde, gut ersichtlich an der Differenz der orangen Kurven bei Abfluss = 0 m³/s. Die Strickler-Kurven umhüllen die Eichmessungen am oberen Rand weiter und am unteren Rand enger als die BAFU-Kurven. Im Bereich des Q365 (rote vertikale Linie) ist die Umhüllung durch die Strickler-Kurven plausibler als diejenige der BAFU-Kurven.

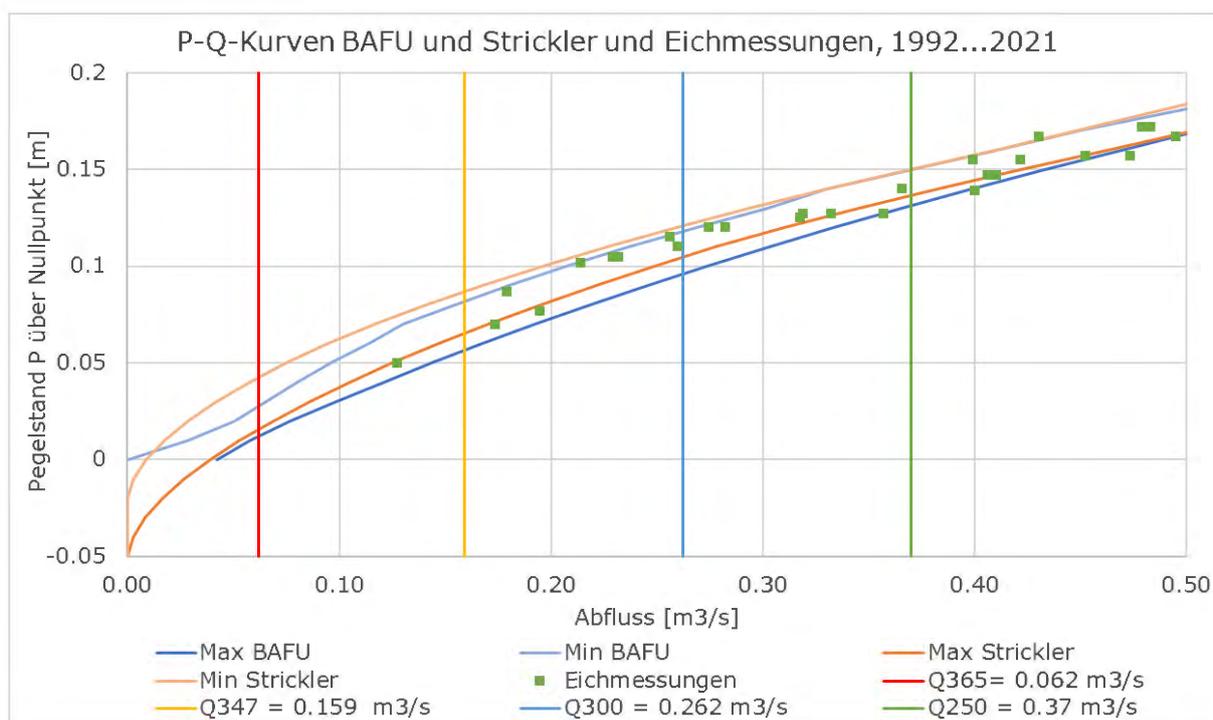


Abbildung 147: Riale di Calneggia am aktuellen Standort, Hüllkurven um die P-Q-Kurven BAFU und Strickler und Eichmessungen.

3.7.6 Berechnung der Abflüsse mit den neuen P-Q-Beziehungen

Die Dauerkurven von Q Strickler und Q BAFU sind sich ob Q347 recht ähnlich. Darunter liegen die Abflüsse von Q Strickler eher etwas tiefer als die Q BAFU (Abbildung 148). Unter Q358 beträgt die Differenz -17 l s^{-1} . Die Abweichungen in den einzelnen Jahren sind, wie bei der Calancasca, eher gering (Abbildung 149). Sie betragen in 8 der untersuchten Jahre mehr als $\pm 8\%$ des Q347 BAFU (2018). In 6 Jahren beträgt sie $\pm 10\%$ oder mehr, in einem Jahr beträgt sie weniger als -20% .

Das Q347 wurde in folgenden Jahren unterschritten: 1992, 1993, 1999, 2002, 2005, 2006, 2008, 2010, 2013, 2016, 2017, 2018. Wie in der Calancasca lag der Abfluss im Winter 2006 besonders tief hatte bei weitem die meisten Tage mit $Q < Q347$.

Probleme mit Vereisung und andere Artefakte scheinen nicht so oft aufzutreten wie bei höher liegenden Stationen.

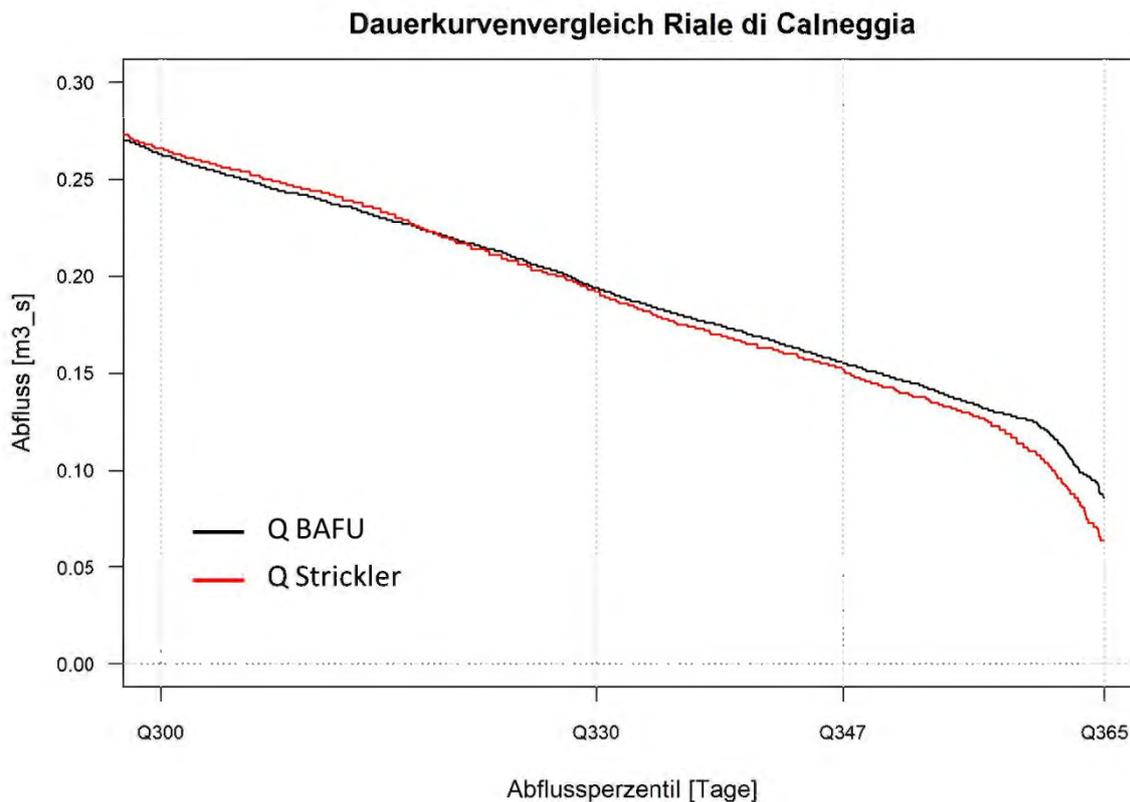


Abbildung 148: Vergleich der Dauercurve (Q BAFU) mit Dauercurve (Q Strickler) für den Riale di Calneggia.

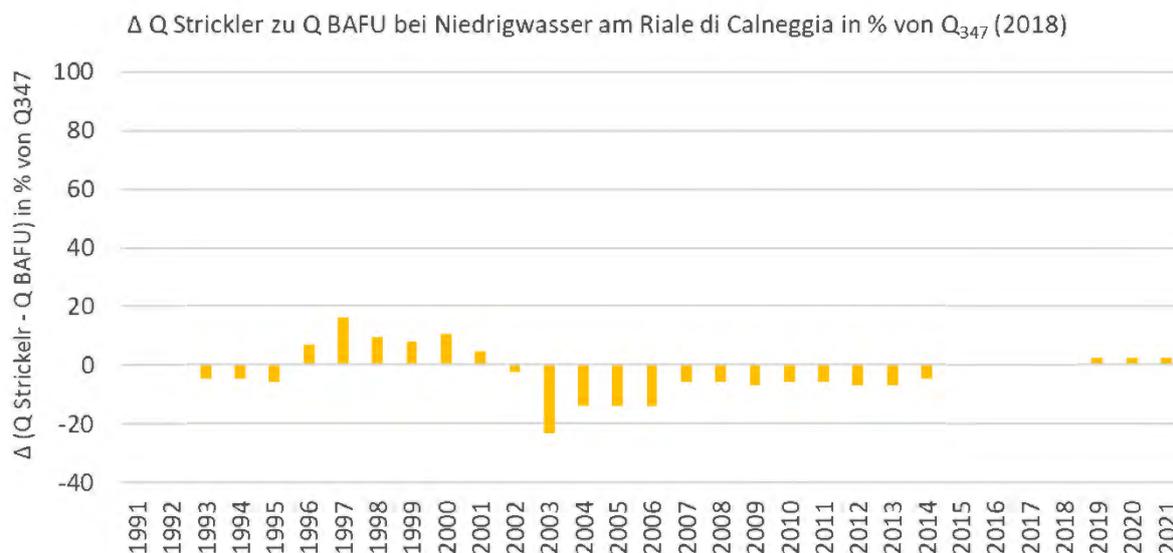


Abbildung 149: Differenzen zwischen Q Strickler und Q BAFU bei Niedrigwasser in % des Q₃₄₇ (2018) am Pegel des Riale di Calneggia.

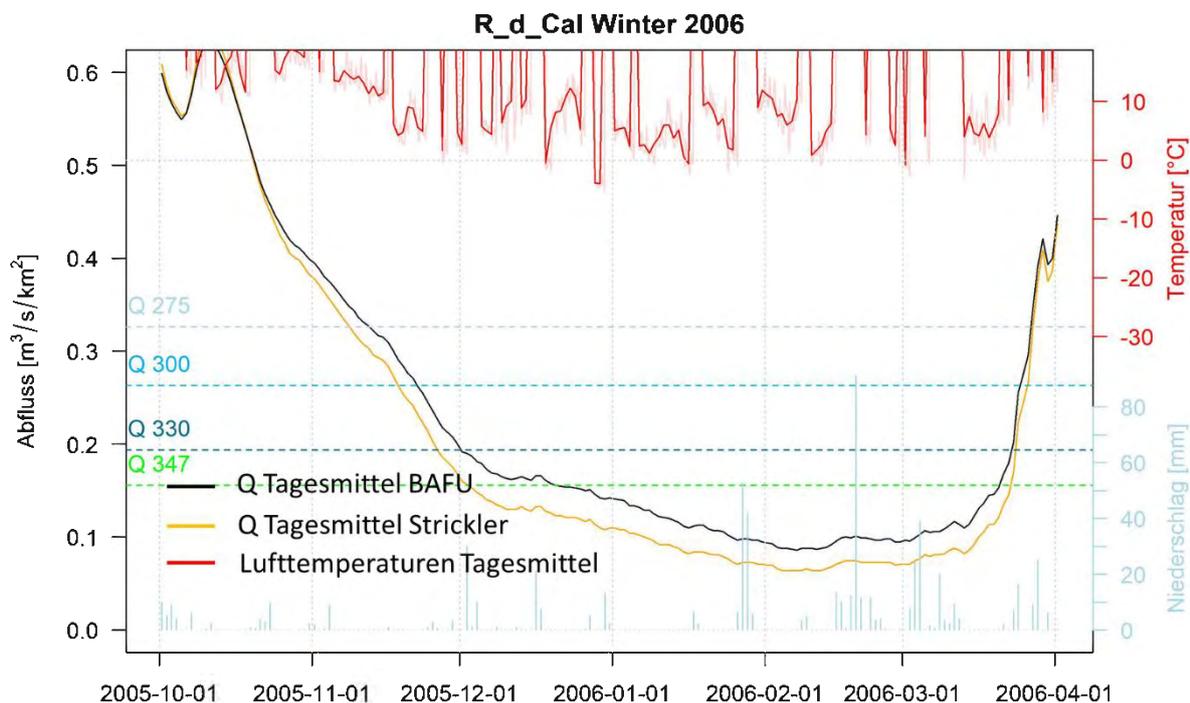


Abbildung 150: Vergleich der Ganglinien (Q BAFU) mit Ganglinie (Q Strickler) für den Riale di Calneggia im Winter 2006.

3.7.7 Schlussfolgerungen

Die Messstation des Riale del Calneggia wurde am 14.10.2013 von relativen Höhen auf absolute Koten umgestellt. Vor diesem Datum gibt es Widersprüche zwischen den Nullpunkten der P-Q-Kurven und der Eichmessungen. Nur wenn die Eichmessungen auf einen Nullpunkt von 881.43 m ü. M bezogen wurden, konnten die P-Q-Kurven mit wenigen cm Offset in die Punkte gelegt werden. Andererseits mussten die P-Q-Kurven auf einen Nullpunkt von 890.05 m ü. M eingepasst werden, damit sie die erwarteten Abflüsse lieferten.

3.7.7.1 Messstation

Die Messstation des Riale di Calneggia ist mit ihrer breiten Felskanne nur mässig geeignet für Niedrigwasser. Beim Q347 beträgt die Wassertiefe nur ca. 0.07 m und eine Pegelabweichung von 0.01 m generiert eine Abflussänderung von 14.5 % des Q347. Am früheren Standort, an welchem die Station bis Ende 1991 lag, betrug dieser Wert 10 % des Q347, also bezüglich Messgenauigkeit etwas besser.

An der aktuellen Messstelle sind mässige Beeinträchtigungen durch Schnee und Eis zu erwarten. Das liegt auch daran, dass die Wassertemperaturen nie auf 0°C sinkt. Die Pegelmessung mit einer Tauchsonde direkt im Becken vor der natürlichen Überfallkante scheint deshalb die optimale Lösung zu sein. Die Ausrüstung mit einem zusätzlichen Sensor mit einem anderen Messprinzip würde die Verfügbarkeit und Sicherheit der Pegelmessung verbessern.

3.7.7.2 Eichmessungen

Im Untersuchungszeitraum sind Eichmessungen ab Mitte 1993 dokumentiert. Bei Abflüssen kleiner oder gleich Q250 wurden insgesamt 17 Eichmessungen durchgeführt, eine davon lag unter dem Q347. Im Zeitraum von 2001 bis 2012 gab es keine solchen Niedrigwassermessungen; besser abgestützt ist der Bereich ab 2013.

Die Niedrigwasser- Eichmessungen bewegen sich mit Ausnahme eines Ausreissers in einem sehr engen Band von +/- 50 l/s. Dies weist auf konstante Verhältnisse und konsistente Messungen hin.

3.7.7.3 P-Q-Kurven

Seit 1991 wurden 18 P-Q-Beziehungen definiert. Die Hälfte der Kurven wurden ohne Niedrigwasser-Eichmessungen während ihrer Gültigkeit verwendet. Vor 2013 sind die P-Q-Kurven im Niedrigwasser schlecht abgestützt.

Bei der Analyse der P-Q-Kurven wurden die folgenden Auffälligkeiten entdeckt:

- Die Kurve 24 liegt ohne ersichtlichen Grund und mit einem Knick im Niedrigwasser tiefer als ihre Vorgänger- und Nachfolgekurven.
- Die Kurven 27 bis 29 basieren auf einer Eichmessung unter dem Q250 und weisen einen unplausiblen geraden Verlauf auf. Bei einem leicht bauchigen Verlauf würden sie die Eichmessung ebenfalls berühren, lägen aber deutlich näher bei den Vorgänger- und Nachfolgekurven.

3.7.8 Empfehlungen

Messstation

Es sollte ein zweites Messsystem eingebaut und betrieben werden, um einerseits Artefakte besser zu erkennen und zu korrigieren, und andererseits die Verfügbarkeit der abgelegenen Station zu erhöhen. Am ehesten sehen wir an diesem Standort einen Radar über dem Gerinne.

Eichmessungen

Es sollten auch bei Abflüssen unter dem Q347 regelmässig Eichmessungen durchgeführt werden.

P-Q-Kurven

Aus den obigen Gründen wird empfohlen, die Kurven 24 im Niedrigwasserbereich nicht zu verwenden und die Kurven 27 bis 29 bauchiger und damit näher bei den übrigen Kurven zu definieren.

4 Abflussmessungen im Winter 2022 am Pegel Dischmabach

Am Pegel des Dischmabaches wurden während des Winters 2022 in drei unterschiedlichen Perioden mit unterschiedlichen Abflüssen und unterschiedlichen Temperaturbedingungen drei Messkampagnen durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Tagesschwankungen des Abflusses während kalter Wintertage real sind oder durch Messartefakte verursacht werden. Die Ergebnisse der Abflussmessungen sind in *Tabelle 1* dargestellt. Die Abflussmessungen wurden mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführt. Am Dischmabach sind insgesamt drei Sonden installiert, die die Pegelhöhe permanent registrieren:

- Radar an der Messbrücke, der die Pegelhöhe in der Rinne misst (Radar Rinne)
- Radar im Schacht
- Drucksonde im Schacht

Derzeit massgeblich für die Pegelhöhe der Eichmessungen ist der Radar im Schacht. Bis am 6.4.2021 war die Drucksonde massgeblich. Die Messwerte im Schacht können durch verschiedene Unsicherheiten beeinflusst sein, wie beispielsweise durch Vereisung im Schacht oder durch die Verstopfung des Schlitzblechs zwischen Rinne und Schacht (vgl. *Abbildung 158*). Deshalb müsste nach Einschätzung der Autoren der Radar in der Rinne als Referenzwert, als der vertrauenswürdigste Wert, betrachtet werden. Bis Ende 2019 wurde nur mit einer Drucksonde im Schacht gemessen. Die geringste Abweichung von der in der Rinne registrierten Pegelhöhe zeigt bei den im Winter 2022 durchgeführten Abflussmessungen die Pegelhöhe der Drucksonde im Schacht. Gemäss *Tabelle 1* betragen die Abweichungen an den Messtagen zwischen -0.2cm und 0.8cm (-4.5 bis 18 l s⁻¹). Zwischen der Pegelhöhe in der Rinne und der vom Radar im Schacht registrierten Pegelhöhe konnten Differenzen von 0.9 und 2.1cm (20 – 46 l s⁻¹) beobachtet werden.

Tabelle 8: Ergebnisse der Abflussmessungen am Pegel des Dischmabaches.

Datum	Startzeit	Endzeit	Abfluss [l s ⁻¹]	Pegel Radar Schacht [m]	Pegel Drucksonde Schacht [m]	Pegel Radar Steg, korrigiert auf Querschnitt Schacht (-1.5cm) [m]	Pegel Radar Schacht - Pegel Drucksonde Schacht	Pegel Rinne - Pegel Radar Schacht	Pegel Rinne - Pegel Drucksonde Schacht
11.01.2022	16:21	16:48	427	7.839	7.85	7.858	-0.011	0.019	0.008
12.01.2022	08:56	09:21	373	7.811	7.824	7.832	-0.013	0.021	0.008
12.01.2022	09:38	10:13	382	7.819	7.831	7.839	-0.012	0.020	0.008
12.01.2022	14:09	14:34	502	7.876	7.893	7.893	-0.017	0.017	0.000
12.01.2022	14:41	14:58	513	7.876	7.893	7.893	-0.017	0.017	0.000
14.03.2022	10:55	11:25	328	7.796	7.806	7.812	-0.010	0.015	0.005
14.03.2022	15:10	15:30	351	7.797	7.811	7.818	-0.014	0.021	0.006
14.03.2022	15:25	15:45	353	7.807	7.819	7.818	-0.012	0.010	-0.002
25.03.2022	10:22	11:02	443	7.859	7.869	7.868	-0.010	0.009	-0.001
25.03.2022	11:02	12:08	448	7.854	7.866	7.865	-0.012	0.011	-0.001

Abbildung 151 zeigt die Pegelhöhen der 10 durchgeführten Abflussmessungen. Die Pegelhöhen

wurden von den Werten des Radars im Schacht übernommen wurden. Die erste Messkampagne fand am 11. und 12. Januar, die zweite am 14. März und die dritte am 25. März statt. *Abbildung 151* zeigt die Rezession des am Steg installierten Radars während des gesamten Winters. Es sind Perioden mit auffälligen Tagesschwankungen erkennbar. Auffällig ausgeprägte Amplituden im Tagesgang sind in der Periode zwischen Ende Februar und Anfang März ersichtlich. Die Tagesschwankung treten auf, wenn die Lufttemperaturen in der Nacht auf -10°C oder tiefer fallen. Es handelt sich um die Lufttemperaturen in Davos Dorf. Am Pegel dürften sie nochmals ein bis zwei Grad, auf der durchschnittlichen Einzugsgebietshöhe um mehrere Grad unter diesem Wert liegen. Die Tagesschwankungen treten dann auf, wenn die Wassertemperatur gegen 0°C fällt (*Abbildung 152*).

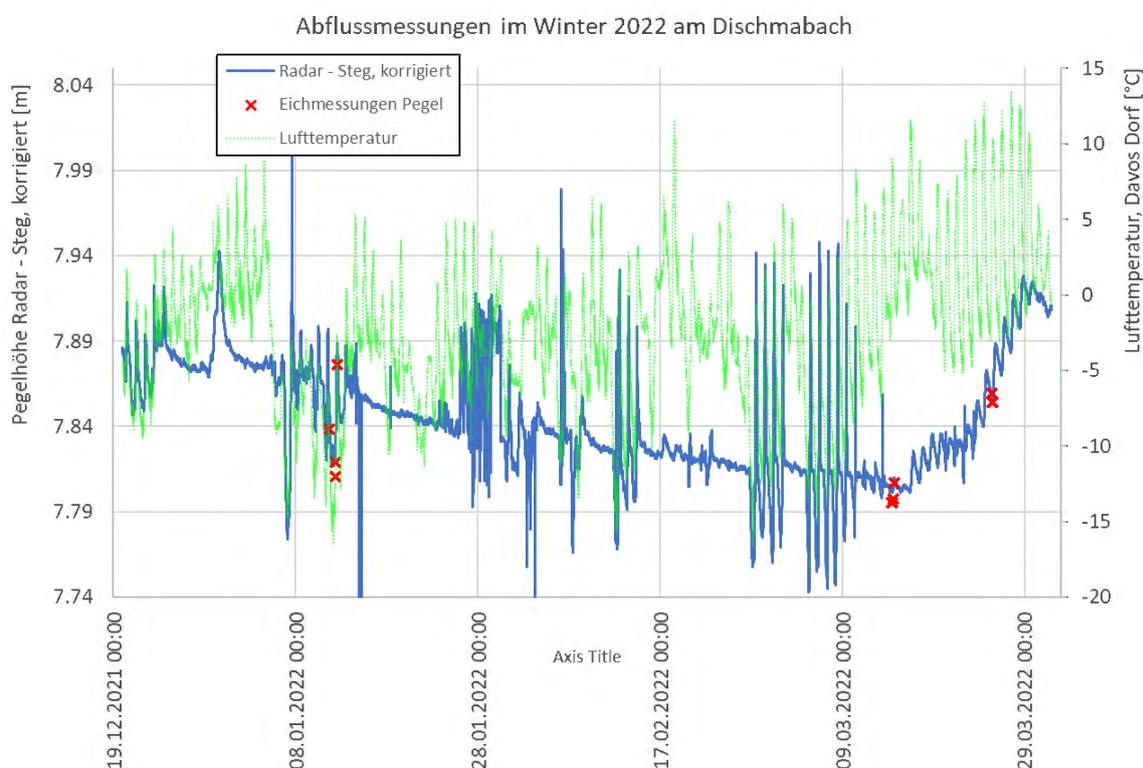


Abbildung 151: Pegelhöhen (Radar), Lufttemperaturen (Davos Dorf) und Pegelhöhen von 9 an der Station durchgeführten Abflussmessungen im Winter 2022.

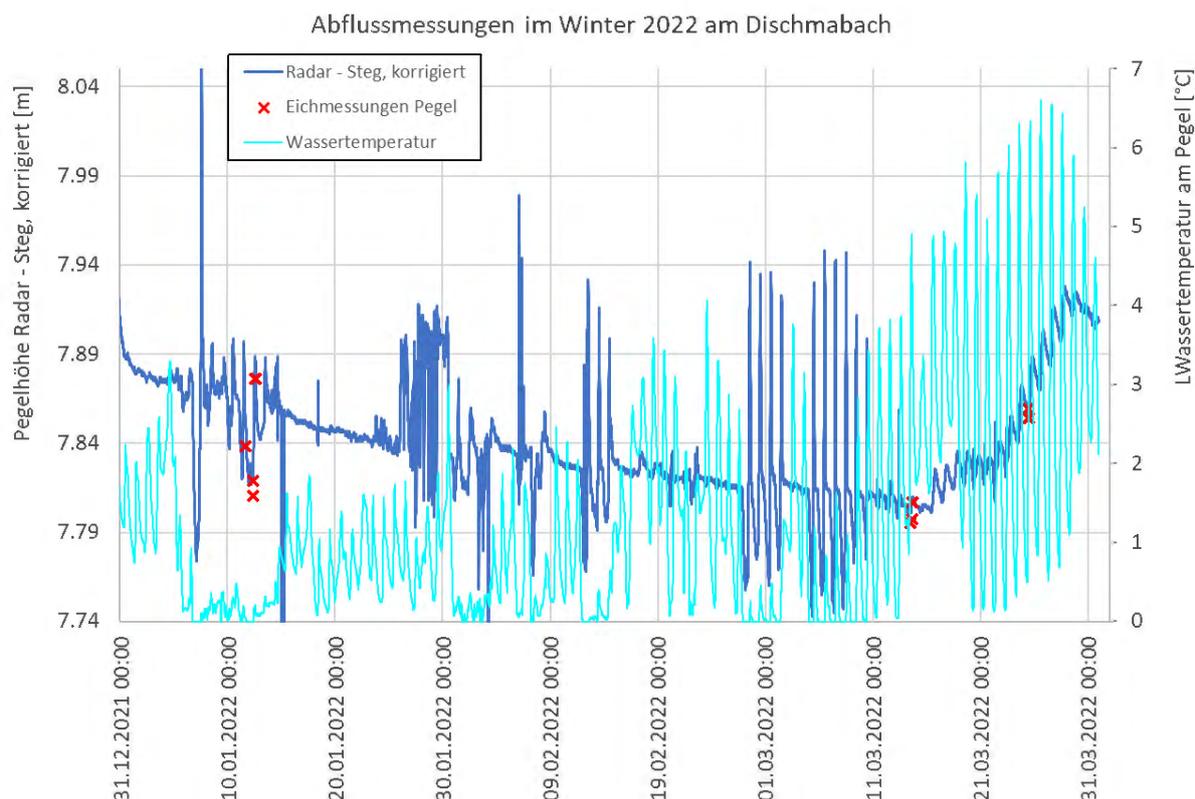


Abbildung 152: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach 11.01.2022-12.01.2022

4.1 Messkampagne vom 11.1. bis 12.1.2022

Die Ergebnisse der am 11.1.22 und 12.1.22 durchgeführten Abflussmessungen zeigen, dass sich die Abflüsse synchron zu den damals beobachteten Schwankungen des Pegels verhalten (vgl. rote Querbalken in *Abbildung 153*). Die Pegelschwankungen sind also real und keine Messartefakte. Die Abflussmessung wurde mit der Salzverdünnungsmethode und somit unabhängig von der Pegelhöhe bestimmt. Diese Beobachtung ist von grosser Bedeutung. Trotz permanent unter 0°C liegenden Lufttemperaturen auf Stationshöhe (vgl. *Abbildung 154*) schwanken die Abflüsse zwischen Tag und Nacht um mehr als 130 l s^{-1} , was in der beobachteten Periode etwa 40% des Tagesmittels ausmacht. Auf die möglichen Ursachen dieser Tagesschwankungen wird in den Schlussfolgerungen von Kapitel 4 näher eingegangen.

Der Massstab der in *Abbildung 153* ersichtlichen y-Achse rechts (Abfluss) wurde so eingepasst, dass die Abflusswerte möglichst genau auf der Pegelhöhe zu liegen kamen, die vom Radar im Schacht aufgezeichnet wurden. Auffällig ist, dass die Pegelschwankungen am 12.1.22 weitgehend den Lufttemperaturen folgen (*Abbildung 154*), am 11.1. ist dieser Zusammenhang weniger stark. In manchen Zeitabschnitten reagiert der Pegelverlauf noch präziser auf den Verlauf der Wassertemperaturen als auf den der Lufttemperatur, allerdings mit leichter Verzögerung (vgl. *Abbildung 155*). Bei Wassertemperaturen um den Gefrierpunkt bildet sich Eis um die Temperatursonde, der

Wert stagniert bei knapp unter null Grad °C. Um 11 Uhr des 12.1.2022 wurde das Eis, das sich an der Wand der Niedrigwasserrinne auf und unter der Höhe des Wasserspiegels gebildet hatte, mit Bickel und Schaufel entfernt. Weil parallel dazu der Zufluss stieg, ist die Wirkung auf die Pegel hier nicht sichtbar (*Abbildung 153*).

Auf den *Abbildung 154* und *Abbildung 155* werden die Pegelhöhen in der Rinne (Radar, Steg) und im Messschacht (Radar, Schacht und Drucksonde Schacht) anhand von zwei Zeitpunkten, einer für den 11.1.22 am Tag (Abb. 155) und einer für den 12.1. in der Nacht (Abb. *Abbildung 155*), schematisch dargestellt. Die Werte des Radars wurden um die Differenzhöhe von 0.65cm zwischen Sohlenhöhe Messquerschnitt Radar Steg und Sohlenhöhe Messquerschnitt Tauchsonde nach unten korrigiert. Die Lage des Radars am Steg liegt etwas flussaufwärts vom Querschnitt des Drucksensors bzw. Radars im Schacht.

Es ist eine Tendenz erkennbar, dass in den Nächten mit sinkendem Wasserspiegel die Differenz zwischen Radar Steg und Radar Schacht zunehmen und 2.4cm betragen. Am Tag bei zunehmendem Wasserspiegel nehmen sie ab und betragen noch 1.8cm.

Die Differenz zwischen der Pegelhöhe in der Rinne (Radar) und der mit der Drucksonde gemessenen Pegelhöhe im Schacht bleibt in etwa gleich. Um etwa 10 Uhr morgens, am 12.01.2022, gleichen sich die Pegelhöhen in der Rinne und die mit der Drucksonde im Schacht gemessene Pegelhöhe an und stimmen danach während des gesamten Tages überein (*Abbildung 153*).

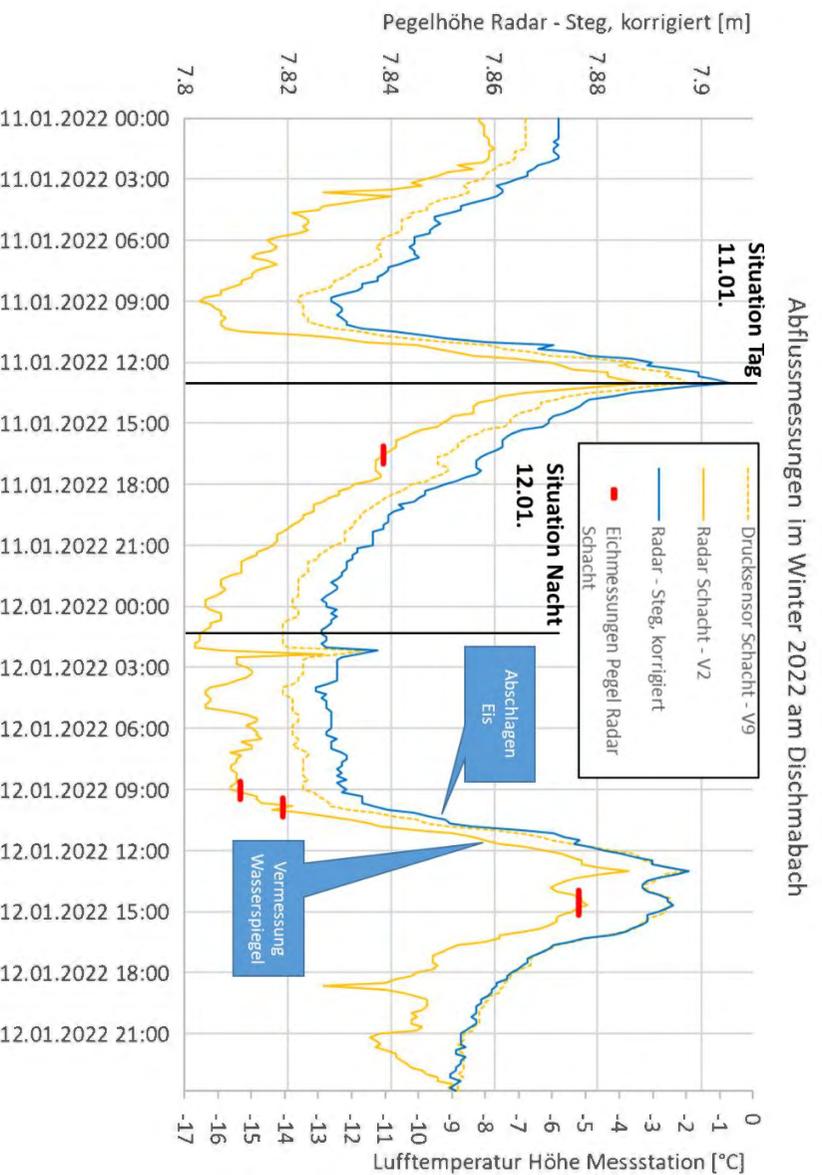


Abbildung 153: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach 11.01.2022-12.01.2022

Abflussmessungen im Winter 2022 am Dischmabach

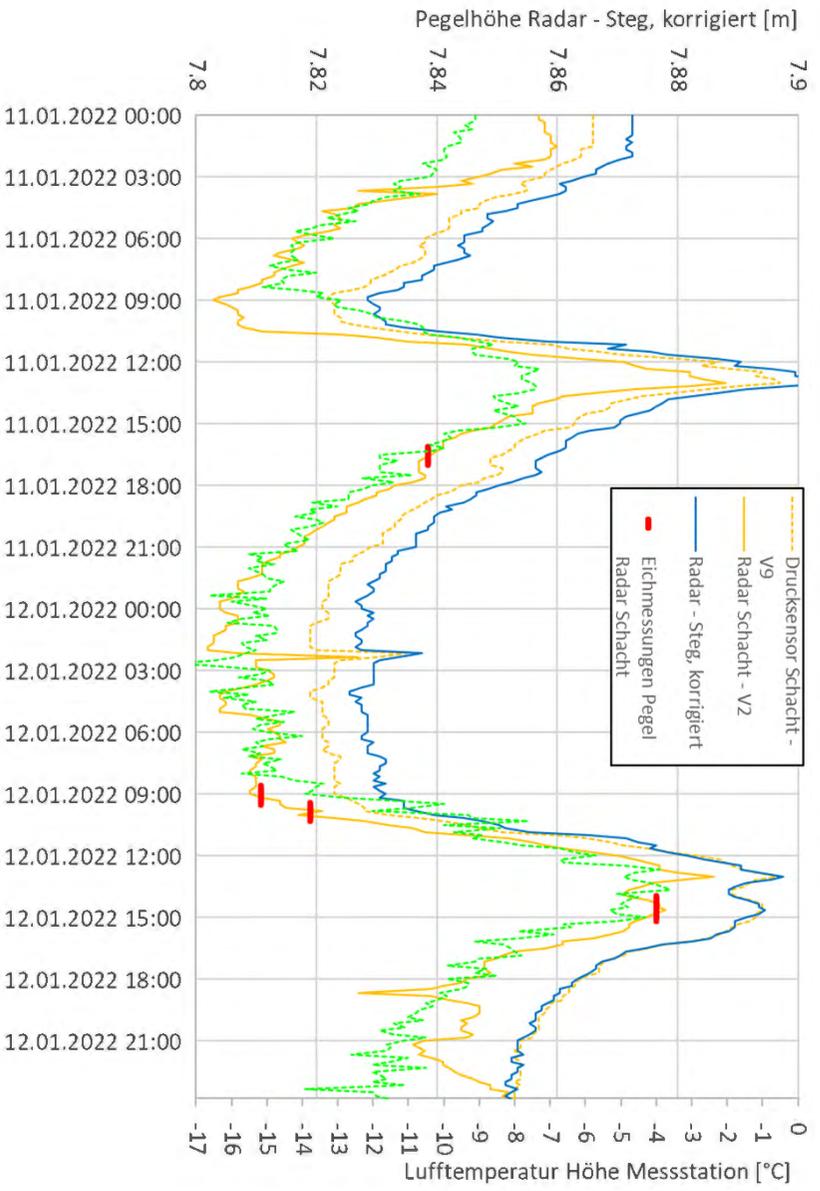


Abbildung 154: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach 11.01.2022-12.01.2022

Abflussmessungen im Winter 2022 am Dischmabach

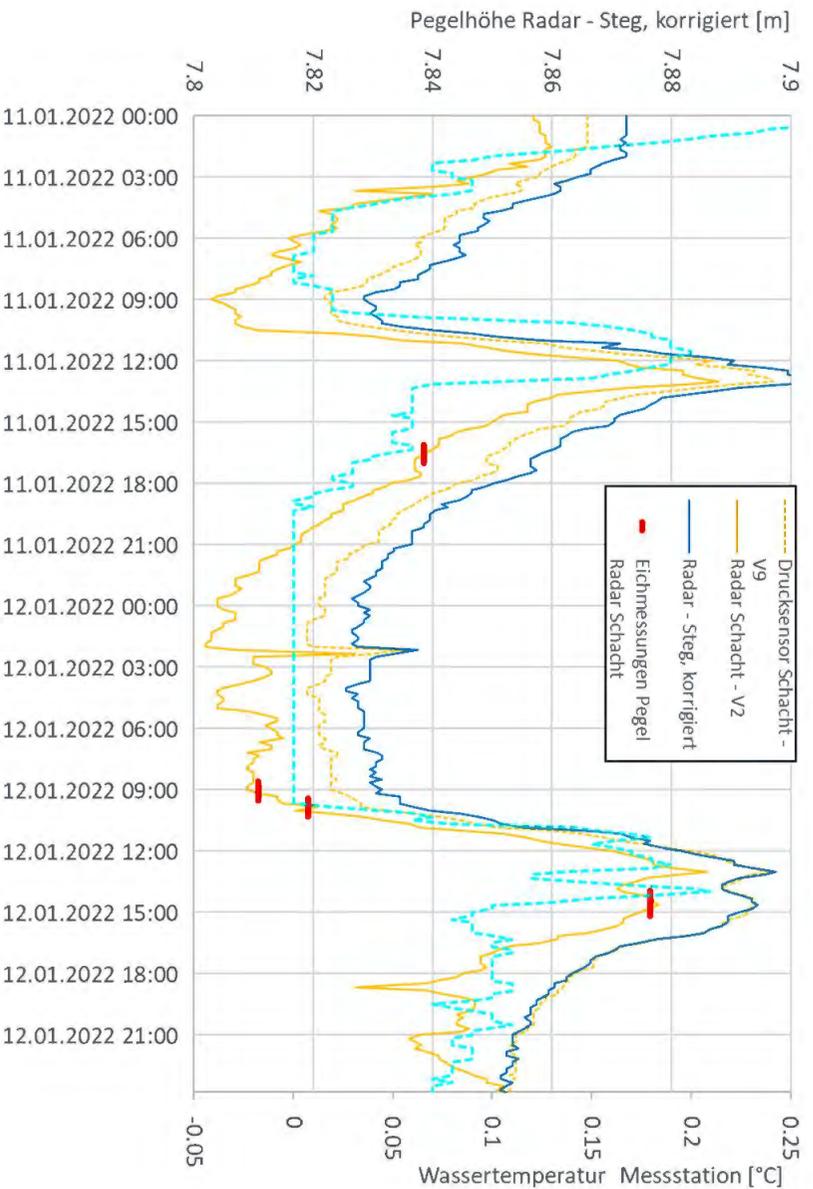


Abbildung 155: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach 11.01.2022-12.01.2022

Situation Tag 11.01.

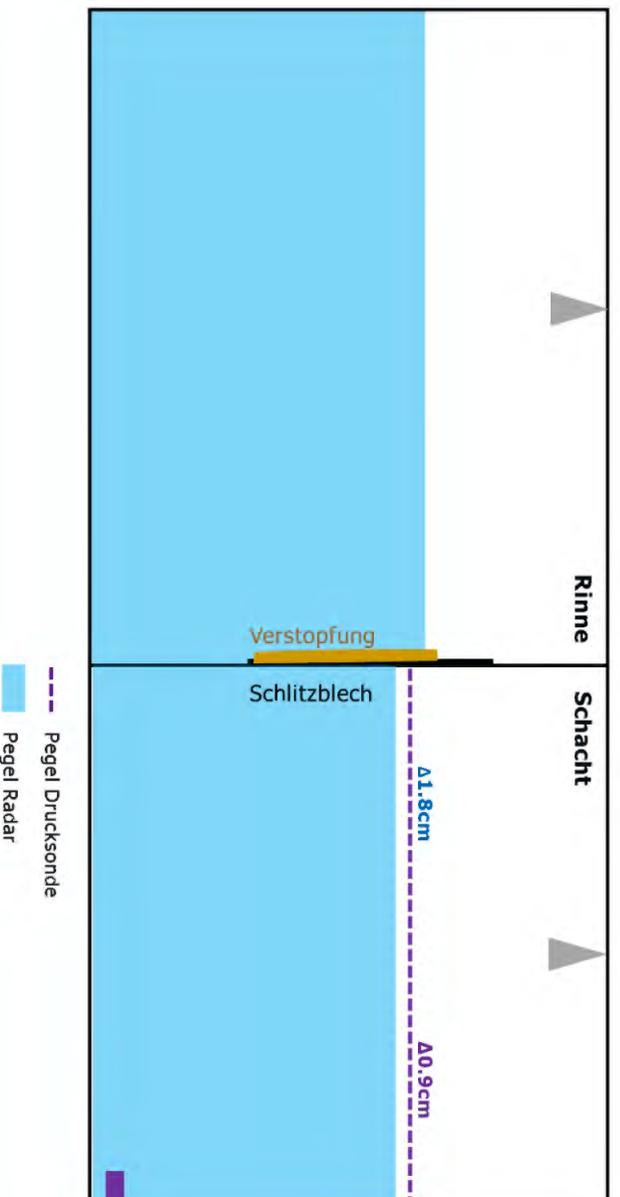


Abbildung 156: Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 11.1.2022, Tag

Situation Nacht 12.01.

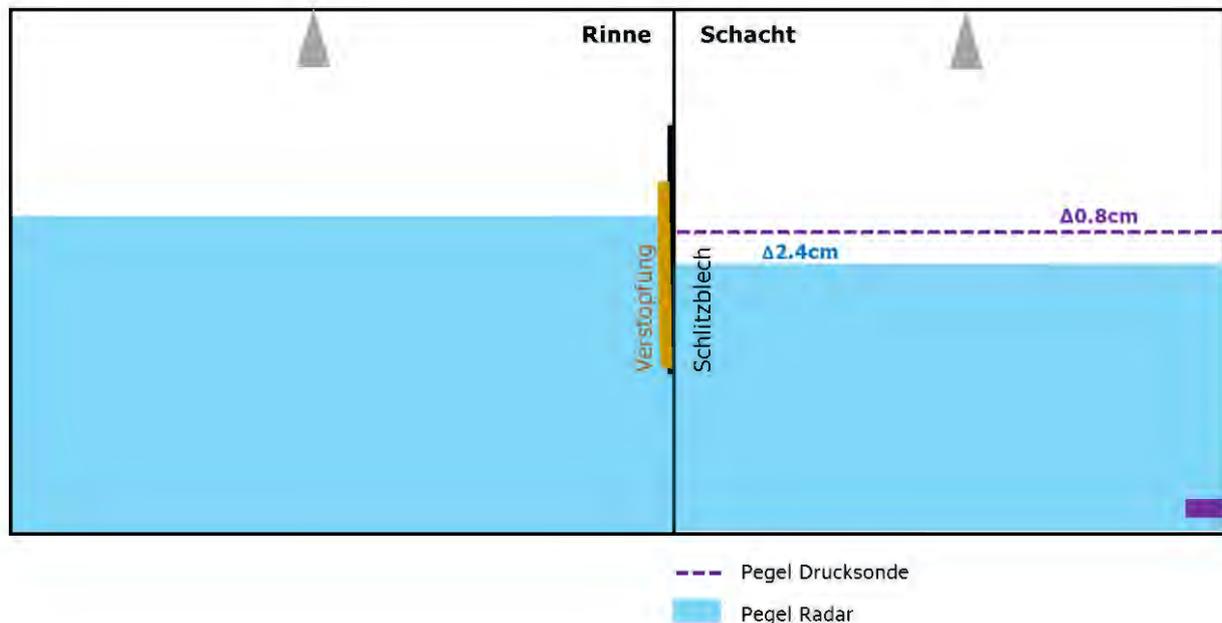


Abbildung 157 Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 12.1.2022, Nacht

4.2 Messkampagne vom 14.3.2022

Während der zweiten Abflussmesskampagne am 14.3.2022 waren die Lufttemperaturen wesentlich höher als am 11.1. und 12.1.2022 (Abbildung 158). Die tiefste Lufttemperatur wurde um 6 Uhr mit -4°C registriert. Während des Tages stieg sie auf fast 8°C an. Interessanterweise stieg der Abfluss des Dischmabaches, trotz der relativ hohen Temperatur am Tag von 328 l s^{-1} auf 353 l s^{-1} nur um 25 l s^{-1} an (Abbildung 158). Die Abflussschwankungen sind also überraschenderweise während sehr kalten Bedingungen weitaus ausgeprägter als bei wärmeren Bedingungen mit Lufttemperaturen nur knapp unter null in der Nacht. Diese waren nicht genügend tief, um die Wassertemperaturen bis auf 0°C abzukühlen, was aber eine Voraussetzung für das Auslösen der stärkeren Abflussschwankungen zu sein scheint (vgl. auch Abbildung 152). Die Beobachtungen während der Abflussmesskampagne vom 14.3.2022 zeigen, dass auch für die Jahreszeit relativ warme Lufttemperaturen am Tag nicht zu einem starken Ansteigen des Abflusses führen muss. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass im Einzugsgebiet noch eine geschlossene, mächtige intakte Schneedecke lag. Diese verhinderte, dass das durch die Schneeschmelze mobilisierte Wasser durch die Schneedecke sickern, in den Boden und dann ins Gerinne gelangen konnte. Am 14.3.2022 wurde während oder kurz nach den beiden ersten Abflussmessungen die Wasserspiegel an 10 Punkten entlang der Niederwasserrinne (an beiden Rändern und in der Mitte der Rinne je

einmal) und im Grund des Beruhigungsbeckens vermessen. Dazwischen wurden erhebliche Volumen an Geröll direkt oberhalb des Einlaufes in die Niedrigwasserrinne entfernt. Dadurch wurden die stehenden Wellen beim Einfließen in die Niedrigwasserrinne entfernt. Die Sohle wurde nach diesen Räumarbeiten im Beruhigungsbecken nochmals vermessen. Anhand der 3D-Modellierung sollte untersucht werden, ob die durch das Geröll verursachten stehenden Wellen am Zufluss zur Niedrigwasserrinne die Pegelhöhe am Messquerschnitt beeinflussen. *Abbildung 158* zeigt die Zeiträume der beiden Vermessungskampagnen und den Zeitraum des Entfernens des Gerölls aus dem Beruhigungsbecken. Nach dem Entfernen des Gerölls stieg zwar der Pegel um etwa 7mm leicht an (Radar Steg, blau), der Anstieg des Abflusses um 23 l s^{-1} (gemessen mit der Salzverdünnungsmethode) belegt aber, dass der Anstieg des Pegels nicht durch das Entfernen des Gerölls, sondern durch die zuvor stattgefundenene Erwärmung der Luft und des Wassers verursacht wurde.

Um 08:00 Uhr lag der mit der Drucksonde ermittelte Pegel im Schacht um 0.7cm tiefer als der in der Rinne registrierte Pegel (Radar, *Abbildung 158*). Um 15:20 Uhr betrug diese Differenz 0.8cm (Radar, *Abbildung 158*). Der mit dem Radar registrierte Pegel lag zu diesen beiden Zeitpunkten um 1.3 bis 1.1cm tiefer als der mit der Drucksonde registrierte Pegel im Schacht. Um etwa 15.30 Uhr, nach der zweiten Vermessungskampagne, wurde das Schlitzblech, die hydraulische Verbindung zwischen Niedrigwasserrinne und Messschacht, von Moos und kleinen Geröllpartikeln, die vereist waren, gereinigt. Kurz darauf stiegen die beiden Pegelwerte, die im Schacht gemessen werden, um 1cm (Radar) bzw. 0.9cm (Drucksonde) an, während der Pegel in der Rinne (*Abbildung 158*) und der Abfluss (Salzverdünnungsmethode, Tabelle 1) praktisch gleich hoch blieben. Der mit der Drucksonde registrierte Pegel im Schacht lag danach praktisch gleich hoch wie der in der Rinne registrierte Pegel (Radar). Da der Radar im Schacht derzeit als Referenzpegelhöhe für Eichmessungen verwendet wird, fließen die Unsicherheiten solcher Effekte in die Eichmessungen. Der Radar im Schacht zeigte nach der Reinigung einen um 1.5cm tieferen Wert wie der Radar in der Rinne (*Abbildung 158*), vor der Reinigung lag er nochmals um 1.2cm tiefer. Die Reinigung des Schlitzschachtes bewirkte also eine Korrektur des Pegels im Schacht um +1.2cm. Bei der Messkampagne am 11.1. und 12.1.22 lag die Pegelhöhe des Radars im Schacht 1.7 bis 2.3 Zentimeter tiefer als die des Radars in der Rinne (vgl. *Abbildung 155*). Die Pegelhöhe der Drucksonde liegt am 14.3.2022 etwas mehr als 1cm höher als der Radar im Schacht. Am 11.1. und 12.1.22 betrug diese Differenz 1.6 bis 2cm. Es ist davon auszugehen, dass es noch einen weiteren Faktor gibt, der, neben der Verstopfung des Schlitzbleches, die Pegelhöhe der Drucksonde beeinflusst. Diesen zu identifizieren wäre wichtig, weil als Referenzpegelhöhen sämtlicher Eichmessungen vor dem 6.4.2021 die Pegelhöhen der Drucksonde galten. Ist diese mit Unsicherheiten behaftet, verursachen sie Unsicherheiten in der Pegelhöhe der Eichmessungen und somit Unsicherheiten in den PQ-Beziehungen. Diese Beobachtungen zeigen, dass die Verstopfung des Schlitzbleches eine

Ursache für die Streuung der Pegelhöhen der Eichmessungen darstellen. Beim beobachteten Beispiel kann dieser Effekt einen Unterschied von mehr als 1cm verursachen.

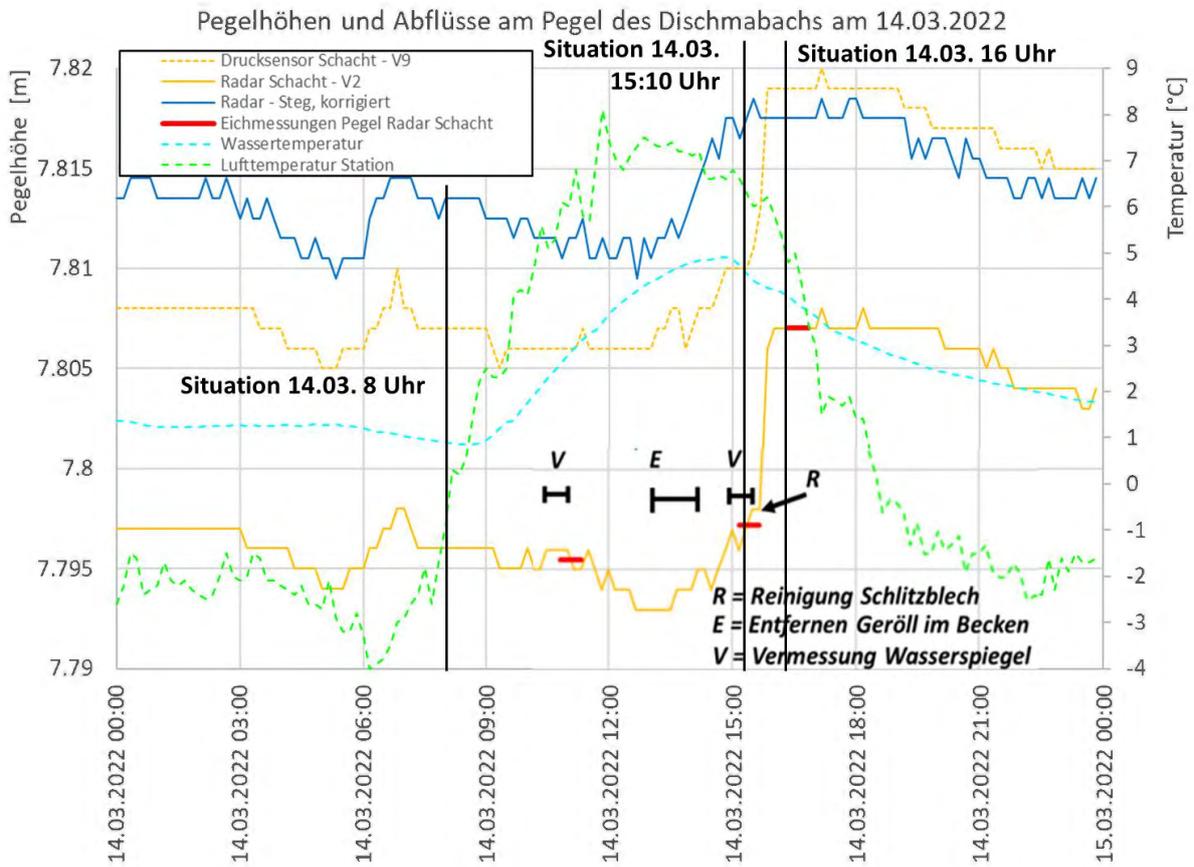


Abbildung 158: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach 14.03.2022

Situation 14.03 08:00 Uhr

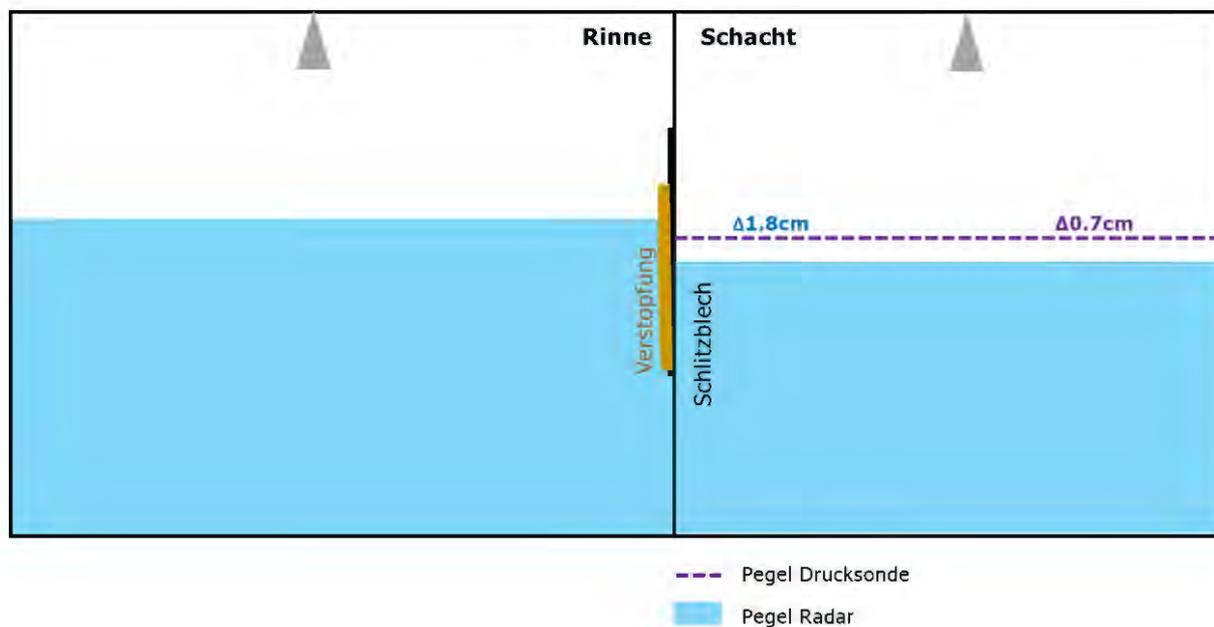


Abbildung 159: Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 14.3.2022, vor der Reinigung des Schlitzbleches mit einer Schaufel

Situation 14.03 15:20 Uhr

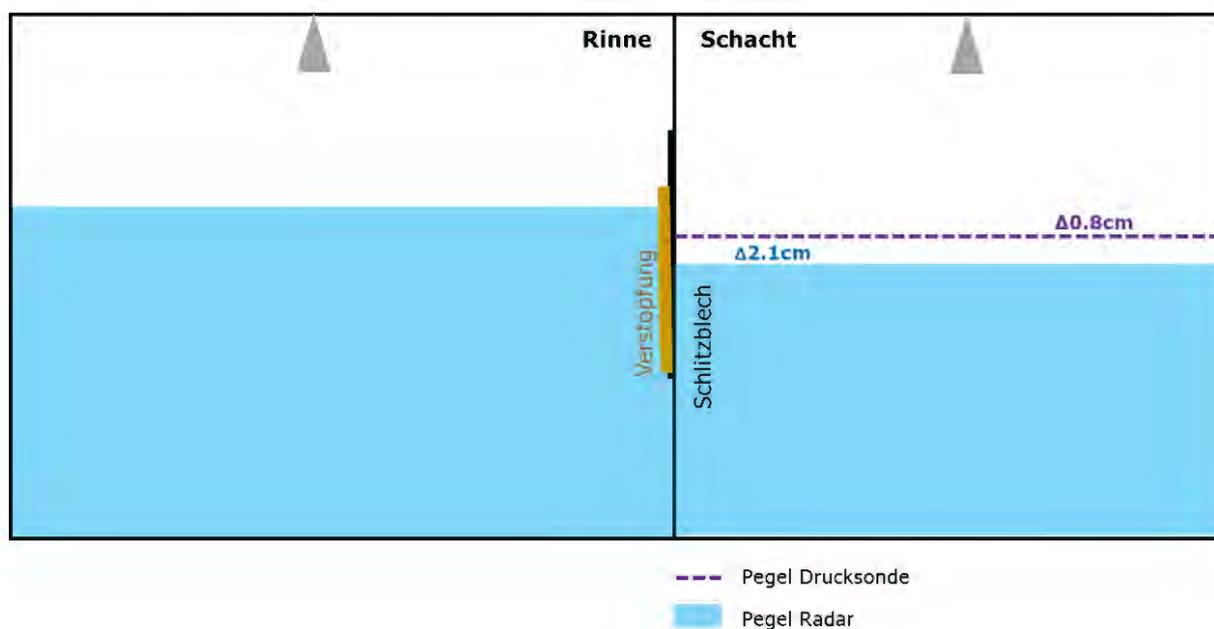


Abbildung 160 Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 14.3.2022, nach der Reinigung des Schlitzbleches mit einer Schaufel

Situation 14.03 16 Uhr

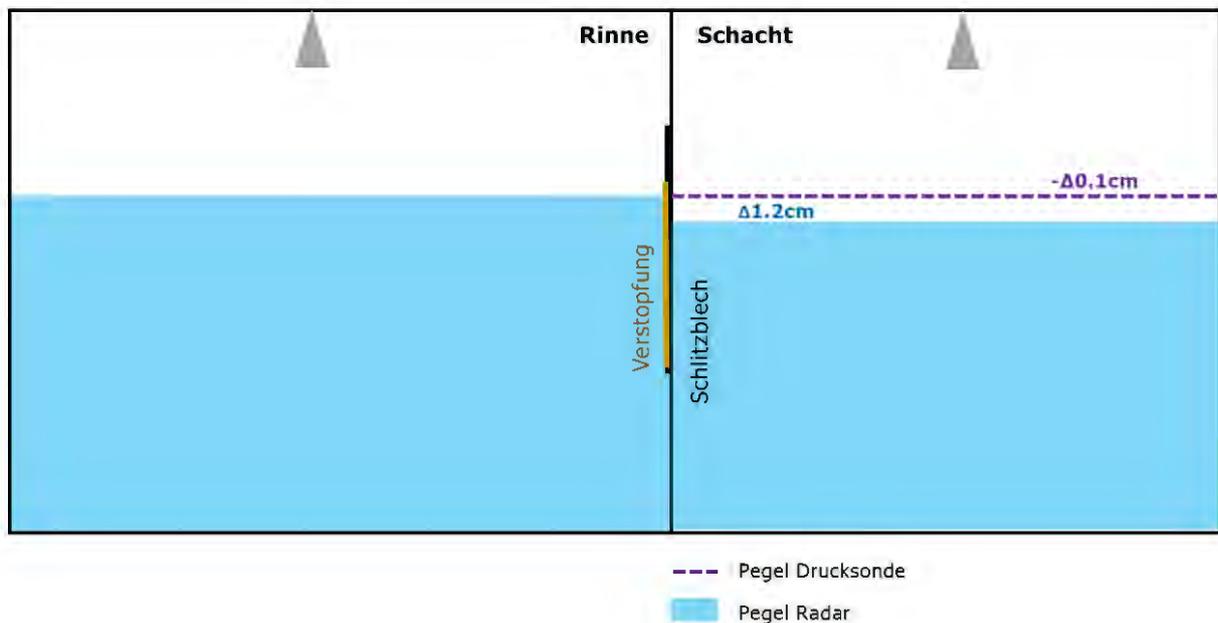


Abbildung 161 Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 14.3.2022, nach der Reinigung des Schlitzbleches mit einer Schaufel

Es gilt noch zu erwähnen, dass nach der ersten Vermessung die ganze Anlage der Pegelstation an zahlreichen Punkten mit hoher räumlicher Auflösung vermessen wurde, z.B. Sohle Niedrigwasserrinne, schräge Fläche ob der Rinne, Oberkante Hochwasserrinne, Sohle Beruhigungsbecken 2X, Oberkante Überfall ob Beruhigungsbecken, Bachbett oberhalb dieses Überfalles an mehreren Standorten. Anhand dieser Daten wurde durch Florian Kaderli ein Höhenmodell berechnet, das als Input für die 3D-Modellierung der Hydraulik in der Niedrigwasserrinne erforderlich war.

4.3 Messkampagne vom 25.3.2022

Am 25.3.2022 wurden zwei weitere Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführt. Das Minimum der Lufttemperatur lag morgens gegen 06:00 Uhr um -4°C und am Tag stieg die Lufttemperatur bis auf 9°C (Abbildung 163). Die Wassertemperatur sank bis auf etwa $0,3^{\circ}\text{C}$ um 07:30 Uhr. Gleichzeitig zu den beiden Eichmessungen mit der Salzverdünnungsmethode wurde durch A. Kohler eine Messung mit dem Flügel durchgeführt. Die Autoren wollten mit dieser Parallelmessung evaluieren, ob die beiden Messmethoden die gleichen Ergebnisse liefern würden. Die beiden Salzmessungen, die unmittelbar nacheinander durchgeführt wurden, ergaben Abflüsse von 443 und 448 l s^{-1} (Abbildung 162). Die Flügelmessung ergab einen Abfluss von 448 l s^{-1} . Etwas irritierend ist, dass der Abfluss der zweiten Salzmessung grösser ist

als der der ersten, obwohl der Pegel des Radars am Steg um 0.22cm gesunken ist. Auf *Abbildung 162* ist ersichtlich, dass der Referenzpegel (Pegel Radar Schacht) bei der zweiten Eichmessung tiefer liegt als bei der ersten Eichmessung. Gemäss Pegelhöhe wäre der Abfluss eher um etwa 4.5 l s^{-1} gesunken und nicht um 6 l s^{-1} angestiegen. Während der Flügelmessung sind die Pegelhöhen aller drei Sensoren leicht angestiegen und danach wieder gesunken. Beim Radar im Schacht betrug der Anstieg bis zu 4mm (vgl. *Abbildung 162*). Es scheint der Einfluss des Flügels auf die Strömung in der Rinne zu sein, die eine Pegelerhöhung verursachte. Das würde erklären, warum die Pegelhöhen bei der zweiten Eichmessung sanken, während der Abfluss leicht anstieg. Um ca. 13.15 Uhr am 25.3.2022 wurde die Schlitzle des Schlitzblechs nochmals mit einem Schraubenzieher gereinigt. Auf den *Abbildung 164* und *Abbildung 165* erkennt man keinen sofortigen Einfluss dieser Reinigung auf die Pegelhöhen im Schacht. Auffallend ist, dass sich nach der Flügelmessung eine Differenz zwischen dem mit dem Drucksensor im Schacht erhobenen und der mit dem Radar in der Rinne erhobenen Pegelhöhe ergibt, während sie vor der Flügelmessung gleich hoch lagen.

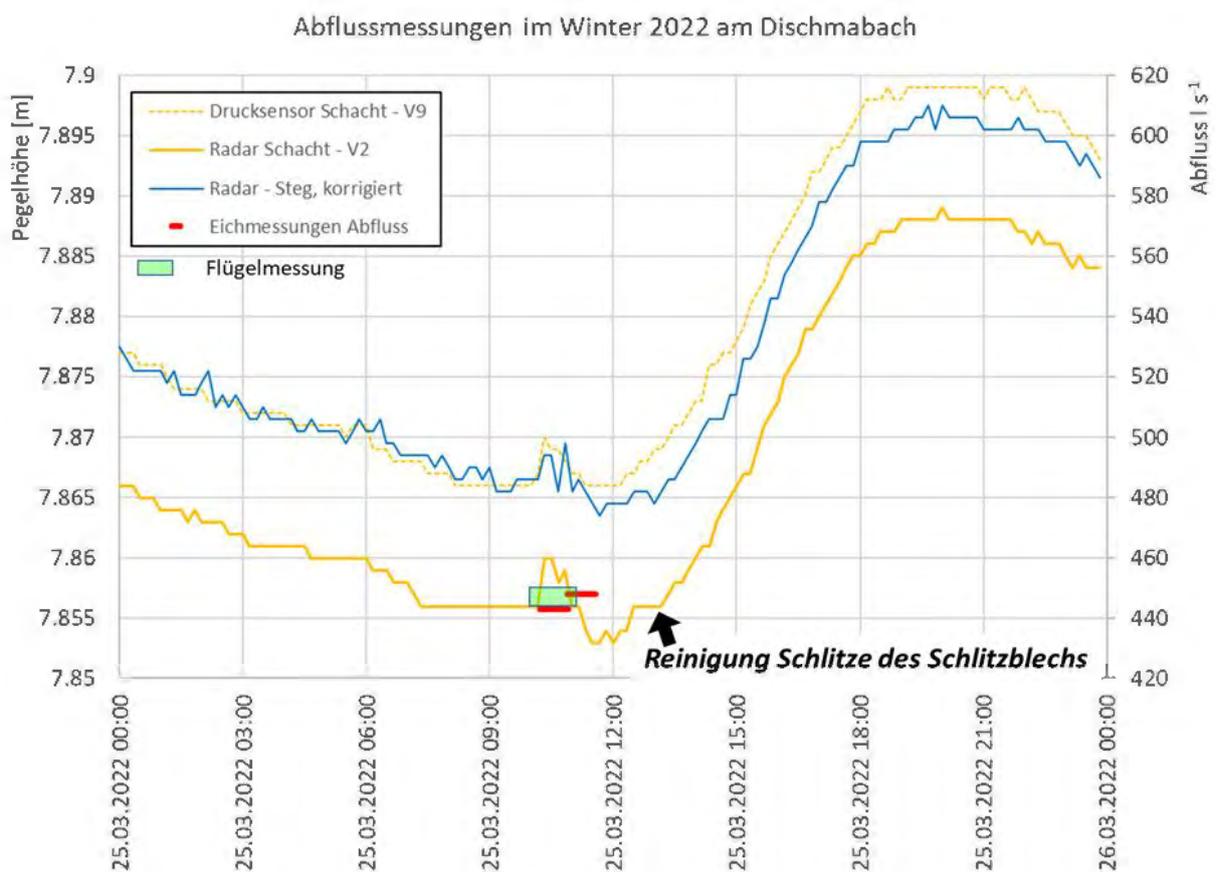


Abbildung 162: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach am 25.03.2022

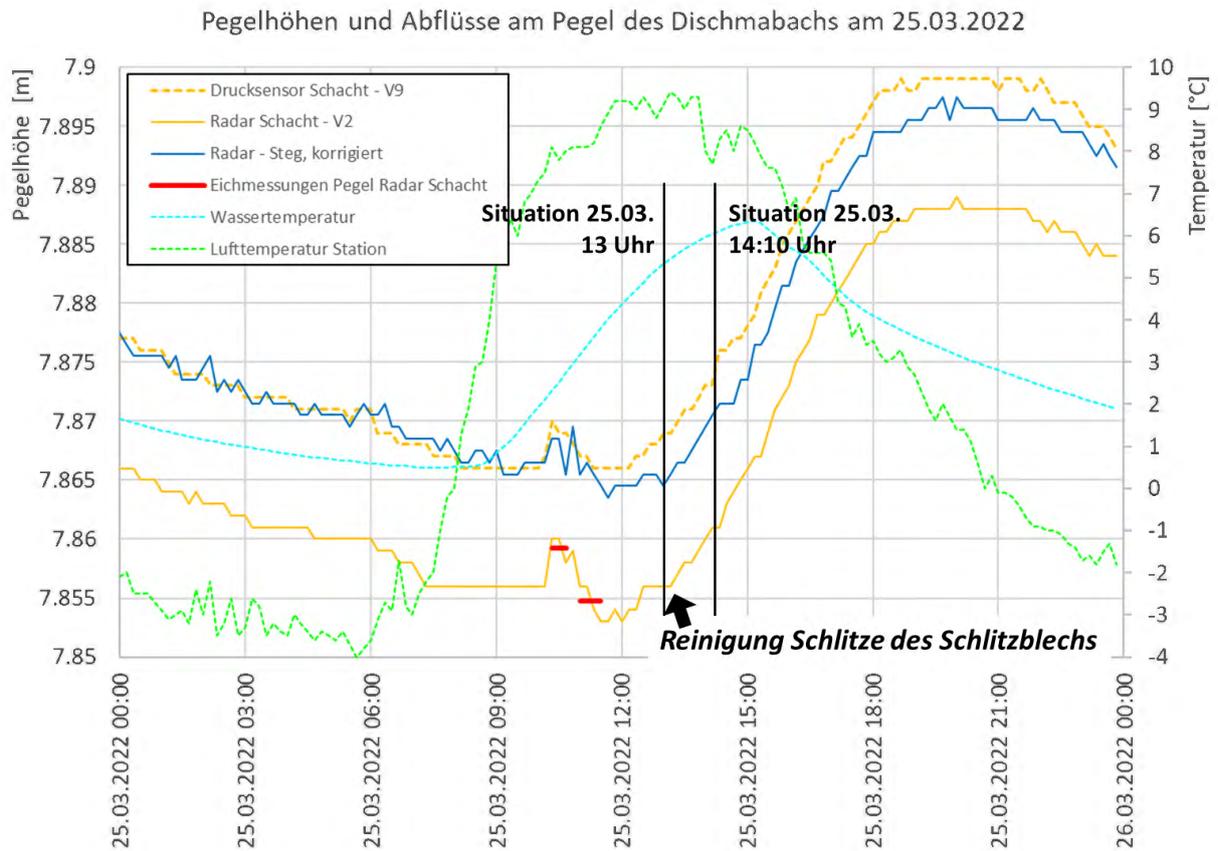


Abbildung 163: Pegel- und Abflussmessungen am Dischmabach am 25.03.2022

Situation am 25.02.2022 um 13 Uhr, vor Reinigung Schlitze mit Schraubenzieher

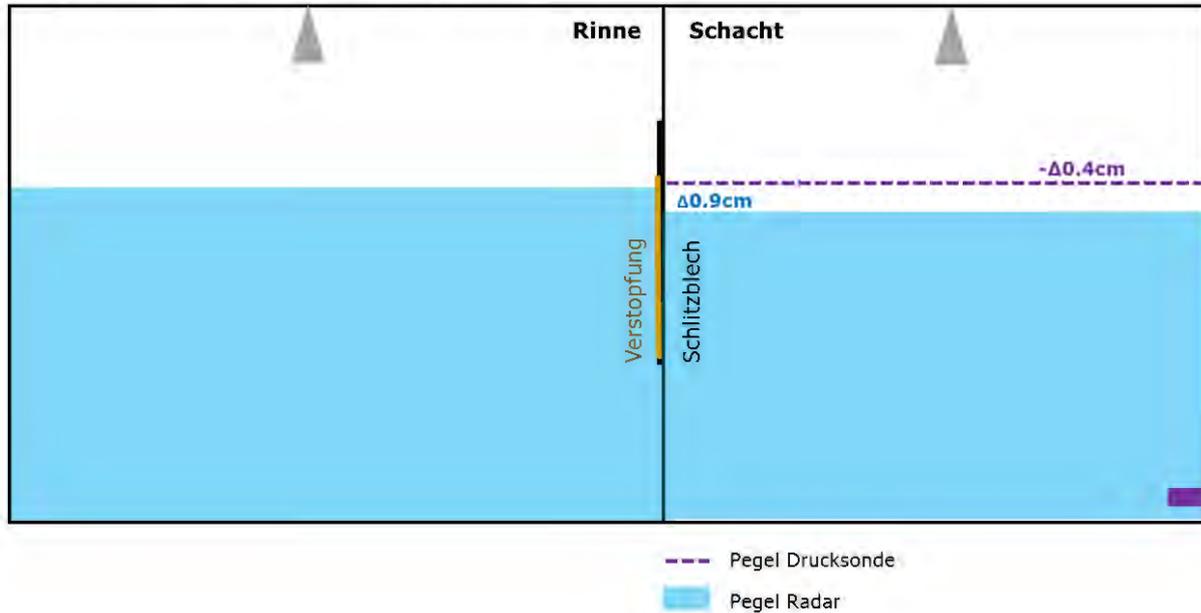


Abbildung 164: Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 25.3.2022, vor der Reinigung des Schlitzbleches

Situation am 25.02.2022 um 15:10 Uhr, nach Reinigung Schlitze mit Schraubenzieher

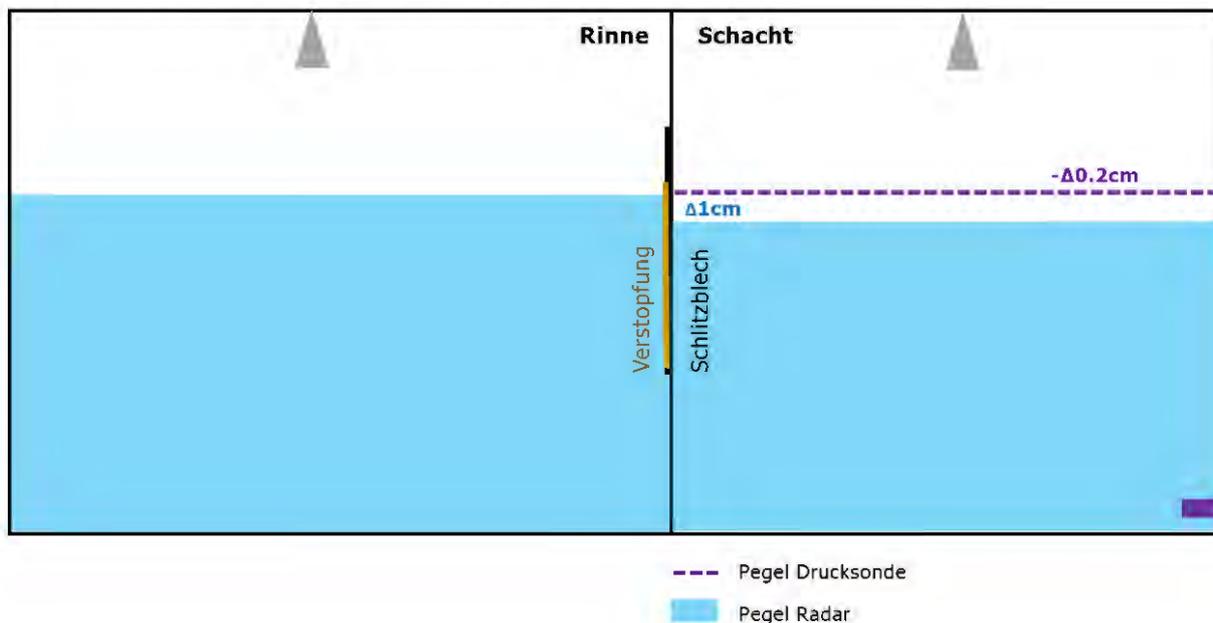


Abbildung 165: Dischmabach, Situation Messrinne und Messschacht am 25.3.2022, vor der Reinigung der einzelnen Schlitze des Schlitzbleches mit einem Schraubenzieher

4.4 Vergleich der Pegelstände der verschiedenen Sensoren

Die Differenz zwischen der Drucksonde im Schacht und der Pegelhöhe in der Rinne war bei sämtlichen Messungen geringer als die Differenz zwischen dem Radar im Schacht und dem Radar in der Rinne. Offensichtlich repräsentiert die mit dem Drucksensor erhobene Pegelhöhe im Schacht während der Dauer der drei Messkampagnen die reelle Pegelhöhe exakter als die mit dem Radar im Schacht erhobene Pegelhöhe. Es stellt sich die Frage, was der Grund dafür ist. Diese Erkenntnis ist deshalb von Bedeutung, weil die mit dem Radar im Schacht erhobene Pegelhöhe die Referenzpegelhöhe für die Eichmessungen darstellt. Es stellt sich die Frage, ob der Radar im Schacht neu eingestellt werden sollte.

Die Verwendung beider Sensoren im Schacht, den des Radars und der Drucksonde, macht absolut Sinn; denn falls sich eine Eisschicht im Schacht bildet, wird ein Rückgang des Pegels vom Drucksensor registriert, vom Radar möglicherweise nicht. An den insgesamt über 500 Tagen mit einer gemeinsamen Messreihe seit dem 21.4. 2022 reichte die Pegeldifferenz der beiden Sensoren von 43cm bis -17cm (*Abbildung 166*). An ungefähr 5760 Zehnminderwerten, also aufsummiert rund 40 Tagen der insgesamt über 500 Tagen (8%) betrug die Differenz der beiden Pegelhöhen mehr als 2cm.

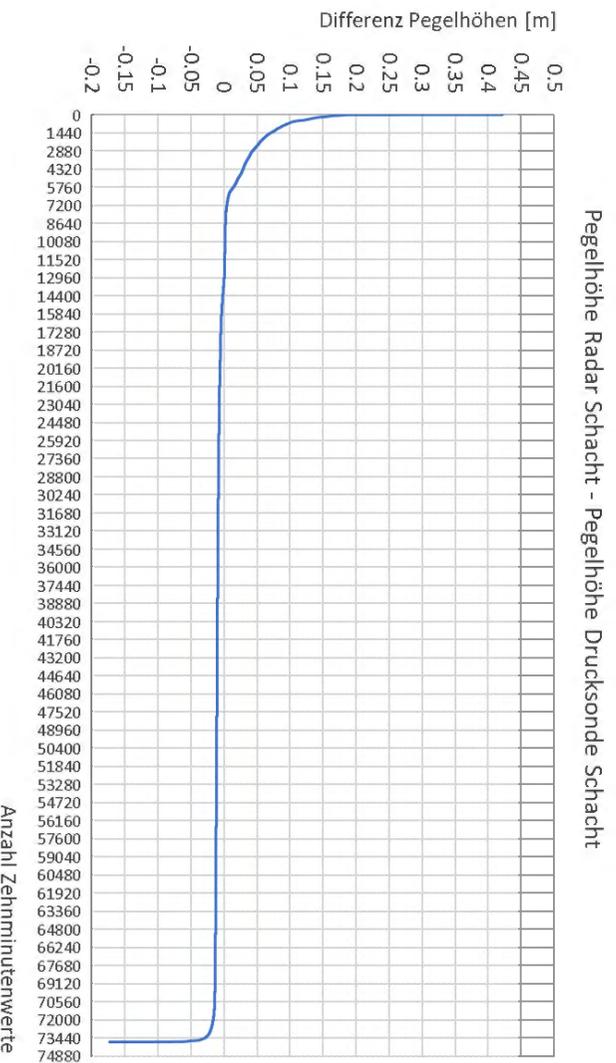


Abbildung 166: Differenz zwischen der Pegelhöhe von Radar Schacht und Pegelhöhe Drucksonde Schacht für alle 10-Minutenwerte der über 500 Tage andauernden Messreihe mit gemeinsamen Werten seit dem 21.4.2021

Spannende Einblicke in das Geschehen an der Messstelle im Winter liefern die Betrachtungen des Pegelstandes in der Messrinne und der Gefällewerte zu den beiden Sensoren im Schacht (Abbildung 167, Abbildung 168, Abbildung: 169). Der Pegelstand in der Messrinne auf der Höhe des Schlitzbleches wird repräsentiert durch den Radar am Steg, korrigiert um das Sohlgefälle (= Radar Steg korrigiert (gelb)).

Das Gefälle vom Radar Steg zum Drucksensor Schacht (blau) reduziert sich beim Abschlagen des Eises am 12.1.2022 von 0.85 auf 0.05cm und bei der Reinigung der Schlitzle vom 14.3.2022 von 0.55 auf -0.15cm, um dann mit zunehmendem Pegel in der Rinne Ende März auf -0.42cm zu sinken.

Das Gefälle vom Radar Steg zum Radar Schacht (grün) reduziert sich beim Abschlagen des Eises am 12.1.2022 von 1.95 auf 0.95cm und bei der Reinigung der Schlitzle vom 14.3.2022 von 1.75 auf 0.85cm, um dann mit zunehmendem Pegel in der Rinne Ende März auf 0.55cm zu sinken.

Vom 26.1. bis 30.1.2022 bewegen sich beide Gefälle (blau und grün) parallel zum Pegelstand in der Messrinne (gelb). Der Pegelstand im Schacht ist fixiert, mit grosser Wahrscheinlichkeit ist das Wasser im Schacht durchgefroren.

Vom 31.1. bis 12.2.2022 bewegt sich das Gefälle zum Radar Schacht (grün) parallel zum Pegelstand in der Rinne (gelb), dasjenige zum Drucksensor (blau) ist konstant. Vermutlich gibt es eine Eisschicht auf dem Wasser im Schacht, welche den Messwert des Radar Schacht fixiert, und die Drucksonde misst darunter den richtigen Wasserdruck.

Vom 12.2. bis 14.2.2022 steigt das Gefälle zum Radar Schacht (grün) in der Nacht, wenn der Pegel Rinne (gelb) sinkt. Das Gefälle zum Drucksensor (blau) ist weitgehend konstant. Der Grund für dieses Muster ist nicht bekannt.

Am 27.2. und vom 4.3. bis 10.3.2022 steigt das Gefälle zum Radar Schacht (grün) und zum Drucksensor Schacht (blau) bei sinkendem Pegel Rinne (gelb) in der Nacht. Vermutlich friert die Verbindung von der Rinne zum Schacht (Schlitzblech) über Nacht zu, es fliesst kein Wasser mehr in den Schacht und dieser verliert Wasser über ein Leck. Mit einem Anstieg des Pegelstandes in der Rinne am Mittag wird der Schacht über das kurzzeitig enteiste Schlitzblech wieder gefüllt und der Zyklus beginnt von Neuem.

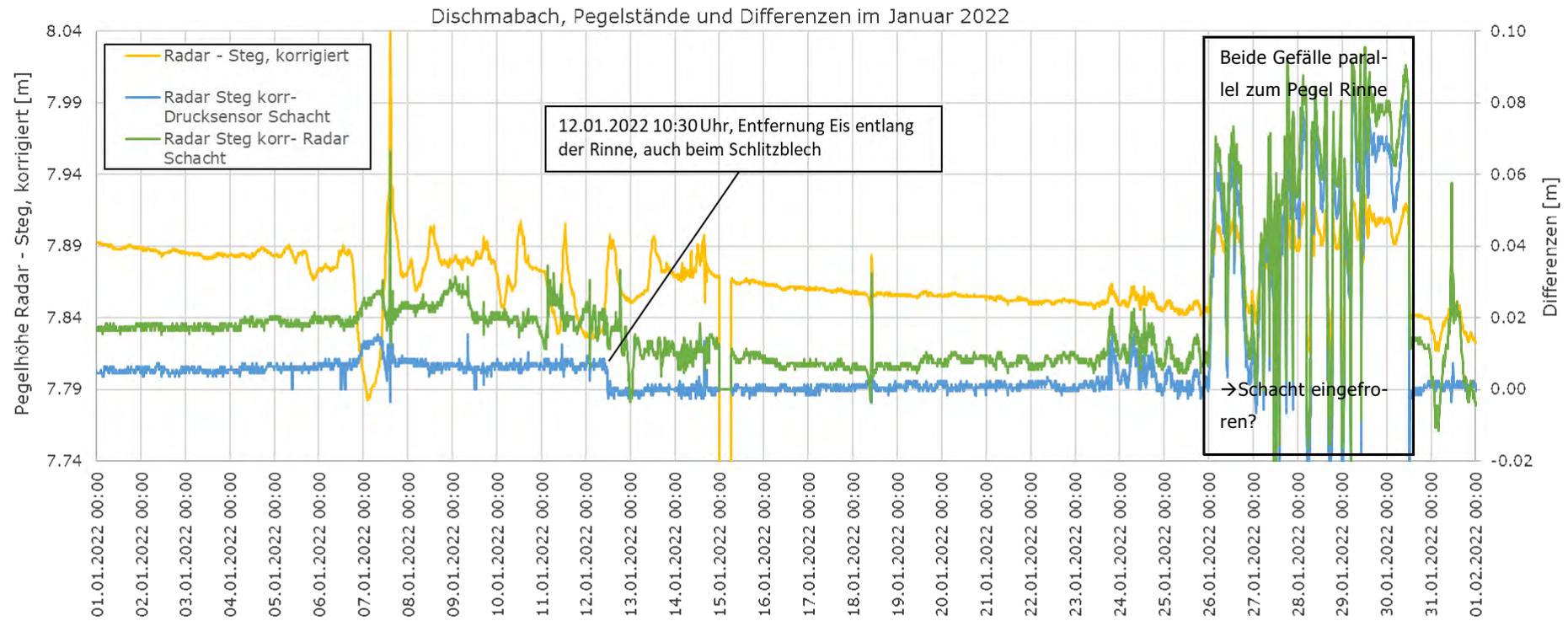


Abbildung 167: Dischmabach, Pegelstände und Differenzen im Januar 2022

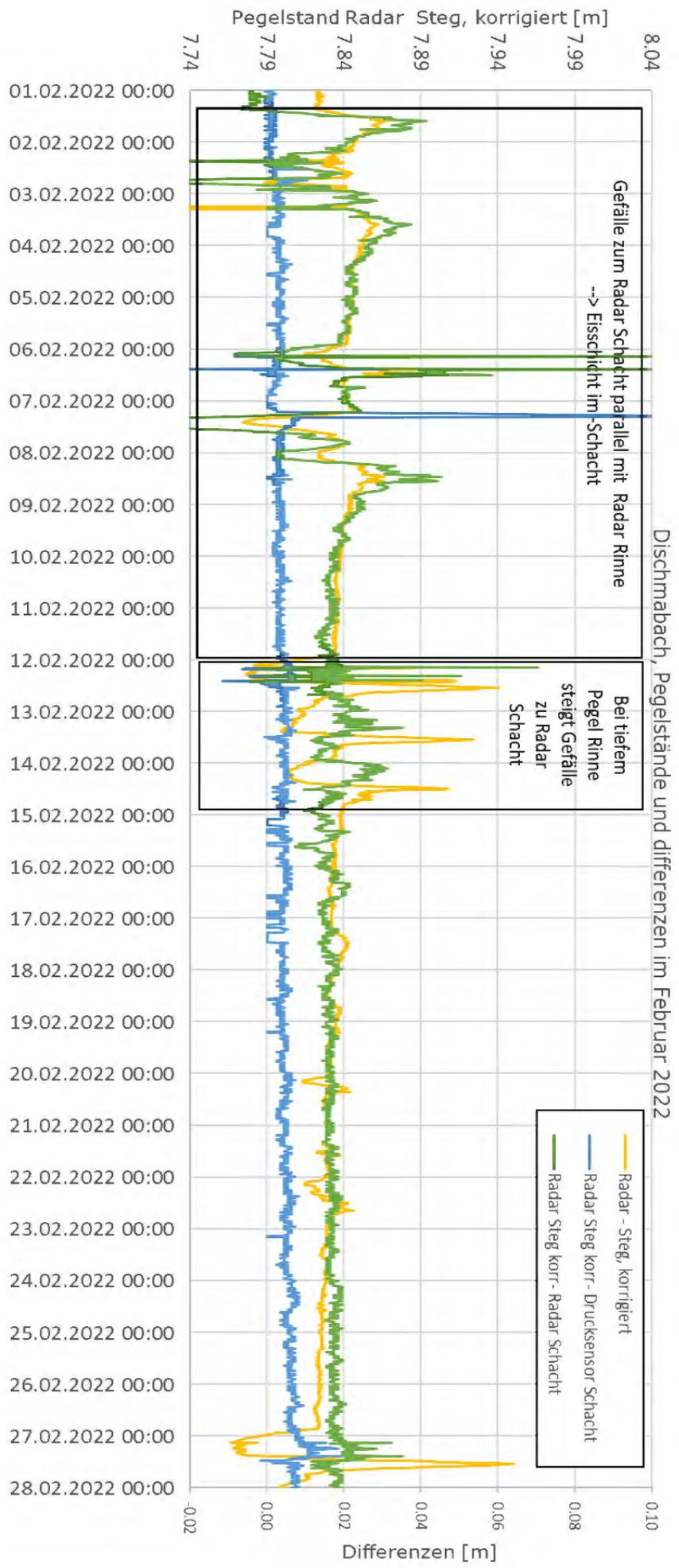


Abbildung 168: Dirschmabach, Pegelstände und Differenzen im Februar 2022

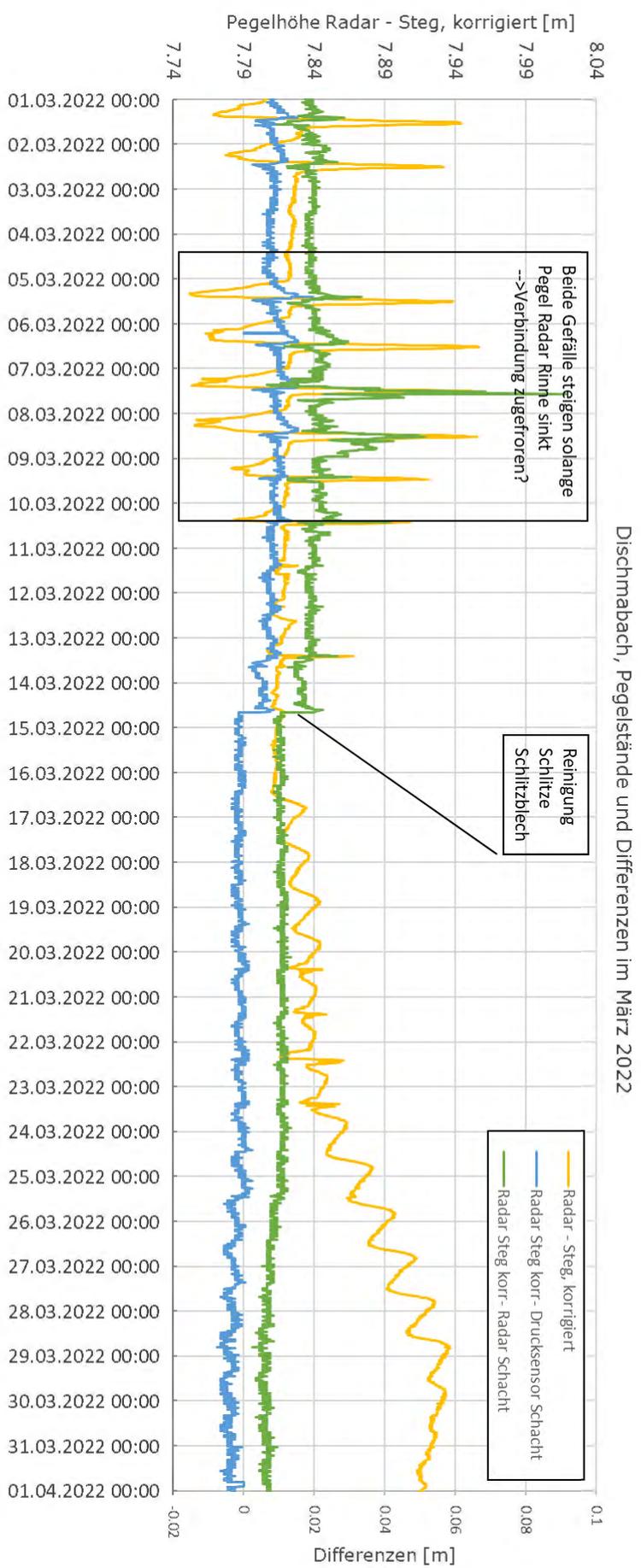


Abbildung: 169 Dischmabach, Pegelstände und Differenzen im März 2022

4.5 Schlussfolgerungen

4.5.1 Ursachen für die Tagesschwankungen des Pegels im Winter

Die im Winter 2022 durchgeführten Abflussmesskampagnen am Pegel des Dischmabaches haben die interessante Erkenntnis ermöglicht, dass die Tagesschwankungen des Pegels während kalter Tage real sind. Abflüsse zeigten am 11. und 12. Januar 2022 Schwankungen von bis 130 l s^{-1} , was bis zu 40% des beobachteten mittleren Tagesabfluss ausmacht, obwohl die Lufttemperatur zu keiner Zeit über -3°C stieg. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwankungen nur dann auftreten, wenn die Lufttemperatur (Stationshöhe) in der Nacht tiefer als -10°C fällt. Auf einer mittleren Einzugsgebietshöhe dürfte dieser «Grenzwert» noch tiefer liegen. Die Schwankungsmechanismen treten nur dann auf, wenn die am Pegel gemessene Wassertemperatur gegen 0°C fällt. In Perioden mit eher warmen Tagestemperaturen ($>5^\circ\text{C}$) und Nachttemperaturen nur knapp unter 0°C schwanken die Abflüsse nur geringfügig oder gar nicht, solange noch eine mächtige Schneedecke liegt und die eigentliche Schneeschmelzeperiode noch nicht begonnen hat.

Als Ursache für die Tagesschwankungen werden folgende Mechanismen vermutet:

Bei sehr kühlen Bedingungen in der Nacht bildet sich Eis an verschiedenen etwas ruhigeren Gewässerabschnitten. Dies hat folgende Konsequenzen:

- Das Eis bindet Wasser, das dem Fließgewässer fehlt. Der Abfluss sinkt. Wenn das Eis bei Sonneneinstrahlung am Tag wieder schmilzt, steigt der Abfluss wieder an.
- Das am Abend sich bildende Eis staut Wasser in den ruhigen Gewässerabschnitten auf. Das Wasser wird kurzfristig gespeichert. Mit der Sonneneinstrahlung am Tag und den steigenden Wassertemperaturen schmilzt ein Teil des Eises wieder, trotz negativer Lufttemperaturen. Durch das schmelzende Eis wird das gestaute Wasser wieder freigegeben und trägt zum Abfluss bei, wodurch dieser wieder ansteigt.
- Bei sehr kühlen Lufttemperaturen gefrieren möglicherweise oberflächliche Bereiche in Quellgebieten zu. Dadurch wird evtl. Wasser kurzfristig zurückgehalten, das bei Tag, nach Abschmelzen des Eises, abfließt.

Wahrscheinlich tragen alle drei Faktoren zur Ausbildung des Tagesganges bei, wobei die Effekte der drei Faktoren nicht gleichermassen relevant sein dürften.

Im Rahmen eines Praktikums und einer Masterarbeit werden diese Mechanismen in den kommenden 12 Monaten am Dischmabach und auch an anderen Fließgewässern genauer untersucht. Diese Arbeit wird durch das BAFU finanziell unterstützt.

4.5.2 Unterschiede der Pegelmesswerte der verschiedenen Sensoren

Die Messkampagnen am Dischmabach diesen Winter haben aufgezeigt, dass die mit dem Drucksensor im Schacht erhobenen Pegelhöhen während der Dauer der Messkampagnen mit den in der Rinne erhobenen Pegelhöhen besser übereinstimmen, als die mit dem Radar im Schacht erhobenen Pegelhöhen. Es gilt zu berücksichtigen, dass die in der Rinne gemessene Pegelhöhe aufgrund des Abstandes von 0.65 m zwischen dem Radar Rinne und der Mitte des Messschachtes um 0.65 cm nach unten korrigiert wurde.

Weitere Schlussfolgerungen lassen die Betrachtung der Gefälle vom Pegelstand in der Messrinne zu Radar und Drucksonde im Schacht zu:

- Alle drei Sensoren bilden mit Ausnahme der Perioden mit Messproblemen den Pegelstand gut ab.
- Der Nullpunkt des Radars im Schacht liegt ca. 1cm unter demjenigen des Drucksensors.
- Die vermutlich durch Eis ausgelösten Messprobleme betrafen häufig den Radar im Schacht, manchmal zusätzlich den Drucksensor im Schacht und kaum den Radar am Steg.
- Das Gefälle zwischen der Messrinne und dem Schacht wurde durch die Entfernung des Eises und die Reinigung der Schlitzle deutlich und bleibend reduziert. Daraus kann geschlossen werden, dass dauernd Wasser von der Rinne in den Schacht und von dort über eine Leckage abfließt.
- Denselben Schluss kann man daraus ziehen, dass in mehreren Nächten mit tiefen Pegelständen in der Messrinne der Pegelstand im Schacht absank. Die Wasserzufuhr war vermutlich durch ein Zufrieren des Schlitzbleches unterbunden.
- Wenn das Wasser im Schacht komplett gefriert, besteht das Risiko, dass es, analog zu gefrorenen Bassins, Druckkräfte auf die Schachtwände ausübt. Dies könnte der Grund dafür sein, dass der Schacht trotz erfolgter Abdichtung Leckagen aufweist.

5 Datenaufnahme für die hydraulische 3D-Modellierung

Als Basis für das numerische hydrodynamische 3D-Modell wurde die Geometrie der Messstation Dischmabach Davos Kriegsmatte am 14.3.2022 (Vergleiche Kapitel 4.2) mit einem Tachymeter detailliert vermessen (*Abbildung 170*). Um neben einer P-Q-Beziehung auch den Einfluss des Geschiebes im Einlaufbecken vor der Messrinne modellieren zu können, wurde dieser Bereich einmal im angetroffenen Zustand und ein zweites Mal nach dem Entfernen der Steine (*Abbildung 171*) vermessen.



Abbildung 170: Dischmabach, Vermessung der Geometrie mit einem Tachymeter von einem festen Standort oberhalb des Überfalles ins Vorbecken am 14.03.2022 (Bild R.Kaderli)



Abbildung 171: Dischmabach, Entfernung der Steine aus dem Vorbecken vor der Messrinne am 14.03.2022 (Bild R. Kaderli).

6 Vergleich und Beurteilung der Stationen

Anhand von verschiedenen neuen Kriterien lassen sich Rückschlüsse ziehen, wie gut sich die verschiedenen Pegelkonstruktionen zur Messung von Niedrigwasserabflüssen eignen. Der Erfüllungsgrad der Kriterien der verschiedenen Stationen wird verglichen, um die Eignung der Stationen für die Messung von Niedrigwasserabflussmessungen und um die Qualität der ermittelten Niedrigwasser-Abfluss-Messreihen zu vergleichen und einzuordnen. Je nach Pegelkonstruktion ist der Aufwand für die Korrekturen der Messreihen niedriger oder höher oder eine Korrektur gar nur eingeschränkt möglich.

6.1 Abflussänderung pro 1cm Pegeländerung

Mit einer Messstation können Niedrigwasserabflüsse besonders gut gemessen werden, wenn die Wasserstandsänderung bei kleinen Abflussänderungen verhältnismässig gross ist. Oder umgekehrt ausgedrückt, wenn die Abflussänderungen bei 1 cm Wasserstandsänderung im Verhältnis zum Q347 möglichst klein sind. Vergleicht man dieses Verhältnis, welches durch die Breite, Rauigkeit, das Gefälle und den Abfluss am Messort definiert wird, unter den untersuchten Stationen (*Tabelle 9*), so ergibt sich folgende Reihenfolge, beginnend mit der Station mit den besten Voraussetzungen: Chamuerabach, Calancasca, Goneri, Dischmabach, Krumbach und Riale di Calneggia.

Die Stationen Krumbach und Riale di Calneggia messen beide ohne betonierte, fixe Messrinne, und weisen gleichzeitig die ungünstigsten Verhältnisse von $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ auf.

6.2 Schwankungsbereich der Eichmessungen

Wenn man die Eichmessungen in einem Abfluss-Pegelstands-Diagramm abbildet, zeigt sich, dass sie im Niedrigwasserbereich praktisch entlang einer Geraden liegen. Berechnet man die Q-Abweichung der NW-Eichmessung von dieser Mittellinie, erhält man ein Mass für den Schwankungsbereich der Eichmessungen. Der Schwankungsbereich des Abflusses der Eichmessungen bei vergleichbarem Pegelstand ist ein Mass dafür wie stabil die P/Q-Beziehung am Messquerschnitt ist. Unsicherheiten in den Eichmessungen können natürlich auch einen Schwankungsbereich verursachen. Für Pegelstationen mit fixem Messquerschnitt wird impliziert: Je geringer der Schwankungsbereich der Eichmessungen ist, desto zuverlässiger wird die Abflussmessreihe im Niedrigwasserbereich eingeschätzt.

Wenn man pro Station jeweils alle Eichmessungen berücksichtigt, weist die Station Chamuerabach den geringsten Schwankungsbereich auf, gefolgt von Goneri, Calancasca, Dischmabach, Riale di Calneggia und Krumbach (*Tabelle 10, 3. Zeile, 1. Zahl*). Bei der Calancasca und bei der Goneri können jeweils gewisse Teile der Streubereiche erklärt werden. Deshalb macht es Sinn, bei diesen

Stationen die Streubereiche der Eichmessungen nach diesen Perioden zu differenzieren (*Tabelle 10, jeweils gelb hinterlegte Zahl*).

Bei der Calancasca hat die Präsenz eines grossen Felsblocks, während einiger Jahre den Messquerschnitt verringert und dadurch den Streubereich der gesamten Periode massgeblich vergrössert. Vor der Einschwemmung des Felsblockes lag der Streubereich mit 33.3% des Q347 ähnlich hoch wie während der Periode nach der Ausschwemmung des Felsblockes vergleicht (31.2%). Während der Präsenz des Felsblocks betrug der Streubereich 44.9%.

Die Station an der Goneri weist für die Periode der Pneumatik-Messungen (1991 – 1999) mit knapp 30% des Q347 den geringsten Streubereich aller Eichmessungen auf. Der Schwankungsbereich der Eichmessungen seit dem Umbau der Station 2020 liegt zwar noch tiefer, die Anzahl der Eichmessungen im Niedrigwasserbereich jedoch noch sehr gering und die Zahl ist deshalb noch nicht aussagekräftig. Zwischen 1999 und 2020 wurde der Pegelstand an der früheren Station Goneri mit Radar gemessen, und der Schwankungsbereich ist mit 39% höher. Dies dürfte mit Schwierigkeiten in der Bestimmung der Referenzpegelhöhe der Eichmessung zu tun haben. Die grosse Anzahl an Messartefakten und Messlücken deutet auf erhebliche Schwierigkeiten in der Messung der Wasserspiegelhöhe mit dem Radar bei Schnee- und Eiseinfluss hin.

Der Q-Schwankungsbereich der Eichmessungen der Station Dischmabach liegt mit 48% noch höher als an der Station Goneri.

Am grössten ist der Schwankungsbereich am Krummbach mit 351% des Q347. Da scheint es mit der Festlegung der Pegelhöhe der Eichmessungen grössere Schwierigkeiten gegeben zu haben. Das ist nicht nur auf die bewegliche Sohle zurückzuführen.

Ordnet man die Stationen von den kleinsten zu den grössten Schwankungsbereichen mit den differenzierten Zahlen, zeigt sich folgende Reihenfolge: Chamuerabach, Goneri (Pneumatik), Calancasca, Dischmabach, Riale di Calneggia und Krummbach (vergleiche Rangliste, *Tabelle 12, 2. Zeile*).

Calancasca, Goneri und Krummbach weisen deutlich mehr Niedrigwasser-Eichmessungen auf als die anderen drei Messstellen. Dieser Umstand kommt einerseits den NW-P/Q-Beziehungen zugute, erhöht andererseits tendenziell aber den Streubereich der Eichmessungen.

6.3 Anzahl der verwendeten P/Q-Beziehungen

Vergleicht man die Anzahl der im Untersuchungszeitraum verwendeten Kurven (*Tabelle 11*) fallen die Stationen Goneri und Krumbach mit deutlich über einer Kurve pro Jahr auf. Vermutlich führten Unsicherheiten bei der Bestimmung des Nullpunkts und bei der Ermittlung von Pegel oder Abfluss zu dieser auffällig hohen Anzahl an P/Q-Beziehungen.

6.4 Unbegründete Nullpunktverschiebungen

Auffällig viele Nullpunktverschiebungen wurden beim Riale di Calneggia und beim Krumbach vorgenommen. An beiden Orten bestimmt eine massive Felskante den Querschnitt und somit auch den Nullpunkt der P/Q-Beziehung. Der Nullpunkt der P/Q-Beziehung ändert sich nur, wenn sich der abflussbestimmende Querschnitt ändert (Querschnitt der Felskante oder grosser Blöcke vor der Felskante). Treten bei der Pegelkontrolle Differenzen zwischen Pegelhöhe des Tauchsensors und der Pegelhöhe der Messlatte auf, kann das auf fehlerhafte Messungen des Sensors zurückzuführen sein. Die Differenzen müssen also über den Nullpunkt des Sensors korrigiert werden und nicht über den Nullpunkt der P/Q-Beziehung. Die häufigen Verschiebungen des Nullpunktes der P/Q-Beziehungen lassen aber vermuten, dass dies geschah. Die Nullpunktverschiebungen der P/Q-Beziehungen wirken sich sehr negativ auf die Qualität der Abfluss-Zeitreihen aus. Wenn die Nullpunktverschiebung der PQ-Beziehung nicht gleichzeitig mit der Veränderung des Nullpunktes der Pegelmessung erfolgte, entstehen Fehler in der Bestimmung der Pegelhöhe der Eichmessung und der Pegel- und Abflussmessreihe. Diese lassen sich ohne exakte Informationen über Pegelkontrollen, Verschiebungen der P/Q- und Sensornullpunkte nicht rekonstruieren.

6.5 Abstützung der PQ-Kurven auf Eichmessungen bei Niedrigwasser

Die Abstützung der verwendeten P/Q-Kurven im Niedrigwasserbereich ist sehr unterschiedlich. Weisen beim Riale di Calneggia 50% der Kurven keine Eichmessungen im NW-Bereich auf, ist dies beim Chamuerabach nur bei 17% der Fall. NW-P/Q-Kurven ohne NW-Eichmessungen können mit grossen Unsicherheiten behaftet sein. Wenn neue Eichmessungen in mittleren und hohen Abflussbereichen grössere Verschiebungen der P/Q-Kurven erfordern, kann dies wegen des rein mathematischen, hydraulisch schlecht abgestützten, P/Q-Berechnungsverfahrens, das beim BAFU verwendet wird, unbeabsichtigt zu grösseren Fehlern bei den Niedrigwasser-Segmente führen. Die NW-P/Q-Kurven können damit unplausible Veränderungen erfahren.

6.6 Schwankungsbereich der P/Q-Beziehungen

Für alle untersuchten Stationen wurde der Schwankungsbereich des Abflusses bei konstantem H (bezogen auf das Q347 der aktuellen P/Q-Beziehung) über alle P/Q- Kurven identifiziert.

Bei Stationen, wo sich die Schwankungsbereiche der Eichmessungen erklären liessen, wurden auch die Schwankungsbereiche der P/Q-Beziehungen differenziert betrachtet. Massgebend für die Beurteilung der Stationen sind die gelb hinterlegten Zahlen (*Tabelle 11, Zeile 3*). Der Schwankungsbereich der P/Q-Beziehungen der Calancasca ist mit 6.2% des Q347 am geringsten gefolgt von Chamuerabach, Goneri, Riale di Calneggia, Dischmabach und Krumbach. Beim Krumbach ist er mit 174% am grössten.

6.7 Messartefakte in den Messreihen

Aufgrund einer visuellen, eher qualitativen Beurteilung der Winterabflussganglinien wurden die sechs Messreihen in vier Qualitätsstufen unterschiedlicher Beeinflussung durch Messartefakte oder Messausfälle eingeordnet. Messartefakte werden beim BAFU mit einem manuellen Verfahren vor der Veröffentlichung der Messreihen herausgefiltert. Perioden mit Messlücken werden durch eine lineare Verbindung zwischen dem Ende der artefaktfreien Periode vor und dem Start der artefaktfreien Periode nach der Messlücke ersetzt. Bei durch Eis beeinflussten Gangliniensegmenten wird eine Korrektur nach bestem Wissen und Gewissen angebracht. Viele dieser korrigierten Abflusssegmente lassen sich anhand von unplausiblen und unnatürlichen Ganglinien erkennen. Die Klassen reichen von klein, mittel, mittel-gross bis gross. Die eher tief gelegenen Stationen Calancasca und Riale di Calneggia sind von Artefakten weniger stark betroffen als die höher gelegenen Stationen (*Abbildung 9*). Unter den höher gelegenen Stationen schneidet der Chamuerabach am besten ab. Die Station Goneri ist bezüglich der Messartefakte und Messausfälle eine sehr problematische Station, viele Winterganglinien sind von Artefakten betroffen. Bei den tiefsten Abflüssen sind nur wenige Gangliniensegmente ersichtlich, die artefaktfrei sein könnten.

Das Verfahren zur Identifikation und Korrektur der Messartefakte ist nicht einheitlich geregelt. Gemäss A. Kohler kann es sein, dass die Stationsverantwortlichen da durchaus unterschiedliche Regeln und Vorgehensweisen anwenden. Ein wichtiger Aspekt in diesem Korrekturprozedere dürfte der Umgang mit den z.T. sehr ausgeprägten Tagesgängen des Abflusses im Winter sein, die in Kapitel 4 beschrieben werden. Aus Plots, in welchen die unkorrigierten Originalpegeldaten mit den korrigierten Pegeldaten gemeinsam dargestellt werden, zeigt sich, dass die Tagesschwankungen z.T. als real anerkannt und belassen wurden. In anderen Fällen wurden sie aber als Artefakte klassifiziert und mit einer Geraden auskorrigiert. Da wäre es empfehlenswert, das Verfahren genauer zu definieren und zu vereinheitlichen. Da der Pegelwert des Sensors auch als Referenzpegelhöhe der Eichmessungen verwendet wird, wäre es zudem prüfenswert, ob in solchen Perioden, in denen reale Tagesschwankungen auskorrigiert wurden, auch Eichmessungen durchgeführt wurden. Sollte dies der Fall sein, so wäre es entscheidend zu prüfen, ob die Referenzhöhe der Eichmessung vom auskorrigierten oder vom ursprünglichen Pegelwert übernommen wurde.

6.8 Rangierung bezüglich «Eignung Pegelkonstruktion für Niedrigwassermessung»

Aufgrund der Kriterien « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ », «Schwankungsbereich Eichmessungen» und «Schwankungsbereich P/Q- Beziehungen», «Messartefakte» wurde die Eignung der Pegelkonstruktion für die kontinuierliche Messung von Niedrigwasserabflüssen bestimmt. Dazu wurde jede Station für die vier Kriterien rangiert (*Tabelle 12*). Für das Gesamtranking wurden danach für jede Station die Rangierungen der vier Kriterien summiert. Aufgrund des Einflusses von Schnee und Eis ist es sinnvoll, die höher gelegenen Stationen Chamuerabach, Krummbach, Dischmabach und Goneri (gelb) von den tieferliegenden Stationen Calancasca und Riale di Calneggia (grün) getrennt zu betrachten.

Gemäss der resultierenden Rangierung eignet sich unter den höher gelegenen Stationen die Pegelkonstruktion des Chamuerabaches am besten für kontinuierliche Niedrigwassermessungen, gefolgt von der Station Goneri, Dischmabach und Krummbach.

Die Kombination von relativ kurzer Niedrigwasserrinne mit etwas Gegengefälle, Lage des Messschachtes im vorgelagerten Beruhigungsbecken, geschlossen betoniertem Messschacht mit Heizung im Schwimmer und ständig unter Wasser liegendem Schlitzblech stellt sich als die beste Konstruktion zur Messung der Niedrigwasserabflüsse heraus. Die Anzahl der Messartefakte ist geringer als bei den anderen Stationen mit Niedrigwasserrinne Goneri und Dischmabach.

Die Station der Goneri würde sich eigentlich auch ganz gut eignen (Platz 2). Aufgrund des fehlenden Messschachtes scheint sich die durch Schnee und Eis beeinflusste Hydraulik stärker auf die Pegelmessreihen auszuwirken als bei vergleichbaren Stationen mit Messschacht (Chamuerabach, Dischmabach); denn die Station Goneri liefert die Messreihe mit den meisten Artefakten im Niedrigwasserbereich aller untersuchten Stationen, was die Verwendung der Messreihe für Anwendungen im Niedrigwasserbereich sehr problematisch macht. Die Radarmessung in der Rinne ist sehr anfällig auf Schnee- und Eiseinflüsse, wenn die Station nicht konstant von Schnee und Eis freigehalten wird. Würde sie das, wäre die Radarmessung die wohl zuverlässigste Messmethode.

Die Konstruktion des Dischmabaches ist aufgrund des etwas ungünstigeren Verhältnisses « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » nicht so gut geeignet für Niedrigwassermessungen wie die Stationen Chamuerabach und Goneri. Die Messung im Messschacht scheint sich gegenüber der Station Goneri als Vorteil zu erweisen, weil Artefakte von Schnee- und Eiseinflüssen weniger häufig auftreten in den Messreihen. Im Vergleich zur Station Chamuerabach scheinen vor allem zwei Aspekte qualitätsmin-

dernd zu wirken: Einerseits scheint die Lage des Messschachtes in der Rinne aufgrund der instabileren Strömung ein Nachteil zu sein und andererseits ist das Schlitzblech zwischen Niedrigwasserrinne und Messschacht bei Niedrigwasser teilweise über dem Wasserspiegel. Dadurch kann kalte Luft in den Messschacht gelangen und das Wasser gefriert rascher. Durch das Freilegen des Schlitzbleches gefriert das Material, das die Schlitze des Blechs verstopft, sodass die Durchlässigkeit zwischen Rinne und Schacht reduziert wird. Der Messschacht ist zudem schlechter isoliert als bei der Station Chamuerabach und auch ein geheizter Schwimmer fehlt.

Die Station des Krumbach weist wegen der natürlichen Sohle im Messquerschnitt und wegen des ungünstigen Verhältnisses « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » die für die Niedrigwassermessung weitaus schlechteste Pegelkonstruktion unter den höher gelegenen Stationen auf. Erstaunlicherweise sind aber die Abflussganglinien weniger stark von schnee- und eisbedingten Artefakten betroffen wie die Messreihe der Station Goneri. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Messstation im Winter wegen der südlichen Exposition generell einer längeren Sonnenscheindauer ausgesetzt ist als die nordexponierte und etwas im Bergschatten liegende Station der Goneri.

Die Stationen der Calancasca und des Riale die Calneggia liegen unter 1000 m. ü M und sind weit seltener durch Schnee und Eis beeinflusst wie die höher liegenden Stationen. Dafür scheint bei diesen das Geschiebe die Pegelmessung negativ zu beeinflussen. Deshalb ist die Pegelmessung mit Radar oder die Drucksonden direkt in der Rinne besser geeignet als ein Messschacht.

Die Konstruktion der Calancasca weist günstigere Voraussetzungen zur Messung von Niedrigwasserabflüssen auf als die des Riale di Calneggia.

Auffällig ist, dass die erwähnte Rangliste der Eignung der Stationen zur Messung von Niedrigwasserabflüssen genau dem Ranking der Stationen des Verhältnisses « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » entspricht. Die grundlegenden Konstruktionskriterien wie Breite/Wasserspiegelhöhe, Rauigkeit und Gefälle scheinen entscheidend für den Erfolg im Messen der Niedrigwasserabflüsse zu sein. Weitere Kriterien wie z.B. der Standort der Sensoren oder Verwendung eines Messschachtes und Standort desselben sind weitere wichtige Kriterien, die einen Einfluss haben, ob sich eher viele oder wenige Messartefakte bilden. Ergeben sich bei den Eichmessungen oder in der Bestimmung der P/Q-Beziehungen Unsicherheiten, wirken sich diese bei einem günstigen Verhältnis « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » weniger gravierend auf die Messreihe aus als bei ungünstigem « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ ».

.

Tabelle 9: Vergleich der Messstationen in der Reihenfolge nach ihrer Eignung für die Niedrigwassermessung. Massstab ist die Abflussänderung bei 1cm Pegeländerung. Ideal ist, wenn diese wie im Chamuerabach weniger als 5% des Q347 beträgt.

Kriterium	Chamuerabach	Calancasca	Goneri	Dischmabach	Krummbach	Riale di Calneggia	Bemerkungen
ΔQ pro 1cm ΔH , bezogen auf das Q347	4.3%	5.9%	6.8%	7.3%	13.8%	14.5%	Voraussetzungen Geometrie und Rauigkeit
Konstruktion	Vorbecken + kurze NW-Rinne	Natürliches Vorbecken, lange breite Messrinne	Vorbecken + lange NW-Rinne	Vorbecken + lange NW-Rinne	Natürlicher Überfall	Natürlicher Überfall	
Pegelmessung	Schacht am Vorbecken		In der NW-Rinne	Schacht an Rinne	Im nat. Gerinne		
Messtechnik	*Drucksonde Schwimmer, beide im Schacht	*Radar und Drucksonde, beide in Rinne	Pneumatik bis 1999, dann *Radar, beide in Rinne	Radar Rinne *Radar Schacht Drucksonde Schacht	*Pneumatik im Gerinne	*Drucksonde im Gerinne	* = aktuelle Standardmessung
Höhe [m ü. M]	1'720	746	1'385	1'668	1'795	890	
Anzahl der Artefakte	mittel	klein	gross	mittel-gross	mittel-gross	mittel	Häufung von Messlücken oder unplausiblen Verläufen

Tabelle 10: Vergleich der Eichmessungen, aufgelistet in der obigen Reihenfolge. Die Schwankungen bezogen auf das Q347 sind beim Chamuerabach und Dischmabach relativ klein (grün), bei Calancasca und Goneri mittel (gelb) bei Riale di Calneggia gross und beim Krummbach sehr gross (rot).

Kriterium	Chamuerabach	Calancasca	Goneri	Dischmabach	Krummbach	Riale di Calneggia	Bemerkungen
Anzahl NW-Eichmessungen	21/4	42/7	51/9	26/1	62/7	17/1	<Q250/<Q347
Überwiegende Methode NW-Eichmessungen	Bis 2012 Flügel, dann Salz	Bis 2013 Uranin, dann Salz	Flügel	Bis 2012 Flügel, dann Salz	Bis 1993 Flügel, dann Salz	Bis 2011 Uranin, dann Salz	
Schwankungsbereich der NW-Eichmessungen um die Mittellinie < Q250, bezogen auf das Q347	28.5%	44.9/33.3%/44.9%/31.2% 1991-2021/ 1991-2005 (Uranin), Zeit mit Felsblock 2005-2014, Zeit ohne Felsblock	57%/29.9/39.2/12.4% Alter Standort 1991 bis 2018/Pneumatik 1991 bis 1998/Radar alt 1999 bis 2018/Radar neu ab 2019, noch wenig EM	48.6%	351 Aktueller Standort, alle EM	59.9%	

Tabelle 11: Vergleich der P-Q-Kurven, aufgelistet in der obigen Reihenfolge.

Kriterium	Chamuerab- ach	Calancasca	Goneri	Dischmab- ach	Krummbach	Riale di Cal- neggia	Bemerkun- gen
Anzahl P-Q- Kurven	11	20	45	20	42	18	
Anzahl der Nullpunktver- schiebungen der P-Q-Kur- ven	2	2	1	0	15	7	
Schwankungs- bereich des Abflusses bei konstanten H über alle Kur- ven, bezogen auf Pegel bei Q347 bei aktu- eller P-Q- Kurve	23.2%	111/25.9/73,9%/6.2% 1991-2021/ ohne Zeit mit Felsblock 2005- 2014/2014 - 2021	63.7/26.3/63.7/12.8% 1991 bis 2021/Pneuma- tik 1991 bis 1998/Radar alt 1999 bis 2018/Radar neu ab 2019, noch we- nig EM	55.0%	174% Aktueller Standort 1995 bis 2021	39.4%	

Tabelle 12: Vergleich der «Ranglisten» der Messstellen, Eichmessungen und P-Q-Kurven

Kriterium	Chamuerabach	Calancasca	Goneri	Dischmabach	Krummbach	Riale di Calneggia	Bemerkungen
ΔQ pro 1cm ΔH , bezogen auf das Q347	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Eignung der Geometrie für Niedrigwasser
Schwankungsbereich der Eichmessungen < Q250 / Q347	1.	3.	2.	4.	6.	5.	Qualitätsmerkmal der Eichmessungen
Schwankungsbereich der P/Q- Kurven beim Q347/Q347	2.	1.	3.	5.	6.	4.	Qualitätsmerkmal der P-Q-Kurven
Anzahl Artefakte	2.	1.	4.	3.	3.	2.	Qualitätsmerkmal der Abflusszeitreihen
Summen	6	7	12	16	20	17	Eignung der Messstelle

Hochgelegene Rang	1.		2.	3.	4.		Rangierung der Messstelle
Niedriggelegene Rang		1.				2.	Rangierung der Messstelle

7 Generelle Schlussfolgerungen

7.1 Unsicherheiten bei P/Q-Beziehungen, Pegelmessungen, Eichmessungen

Trotz eines fixen Messquerschnitts in Form einer Niedrigwasserrinne zeigen die P/Q-Beziehungen von alpinen Pegelmessstationen im Niedrigwasserbereich über die letzten 30 Jahre teils erhebliche Schwankungen des Abflusses bei vergleichbaren Pegelhöhen. Die maximalen Schwankungsbereiche reichen von 6% bei der Station Calancasca bis zu 55% des Q347 beim Dischmabach. Beim Krumbach liegt er gar bei 174% des Q347. Die Station Krumbach weist am Messquerschnitt aber eine natürliche Sohle auf. Sind diese Schwankungen wirklich auf reale hydraulische Unterschiede in oder oberhalb der Niedrigwasserrinne zwischen den verschiedenen P/Q-Perioden zurückzuführen oder sind sie eine Folge von Artefakten oder Fehlern in der Bestimmung der P/Q-Beziehung oder Eichmessungen?

Die Abflüsse der Eichmessungen, die die Grundlage für die Bestimmung der P/Q-Beziehungen bilden, schwankten in den letzten 30 Jahren bei gleicher Pegelhöhe zwischen 28% (Chamuerabach) und 49% des Q347 (Dischmabach). Ein Grossteil des P/Q-Schwankungsbereiches ist also auf die Schwankungen der Abflüsse der Eichmessungen zurückzuführen. Bei der Calancasca und beim Goneri liegen die maximalen Schwankungsbereiche eigentlich höher, ein Teil lässt sich jedoch durch Stationsumbau, Verschiebung von Sensoren oder durch einen grossen Felsblock, der in die Station eingeschwemmt wurde, erklären (Calancasca). Für die verbleibenden Schwankungsbereiche in den Eichmessungen und P/Q-Beziehungen liessen sich im Laufe der Untersuchungen verschiedene Ursachen identifizieren.:

- **Einfluss von Stosswellen bei der Pegelmessung in der Niedrigwasserrinne:** Die Ergebnisse der VAW-Studie am Dischmabach zeigen, dass die Querschnittsveränderung vom Vorbecken in die Messrinne Stosswellen in der Messrinne generiert. Diese Wellen weisen bei unterschiedlichen Abflüssen unterschiedliche Amplituden und Wellenlängen auf und beeinflussen die P/Q-Beziehung (vgl. Kap. 7.5 und Bericht VAW Abbildung 29).
- **Unsicherheiten in der Pegelmessung:** Die Pegelmessungen wurden zuerst mit Schwimmern, dann mit Pneumatischen Druckwaagen und aktuell vor allem mit Tauchsonden und Radaren gemessen. Tauchsonden weisen konstruktionsbedingt Alterungs- und Temperaturdrifts auf, und die notwendige Zuführung des Luftdruckes auf die Membrane

stellt besonders bei kaltem und nassem Wetter eine Herausforderung dar. Der Radar kennt diese Probleme nicht. Mit diesem stellen sich hingegen andere Herausforderungen wie stehende Wellen oder die Überdeckung des Messquerschnittes mit Schnee oder Eis. Die in den letzten Jahren an mehreren Stationen realisierte Kombination beider Messmethoden hilft, mögliche Artefakte zu identifizieren und zu korrigieren. Damit können auch Differenzen zwischen verschiedenen Standorten erfasst und Ausfälle einzelner Sensoren überbrückt werden. Kleine Messfehler scheinen oft unbedeutend, sie können sich aber im ungünstigen Fall zu grösseren Abweichungen aufaddieren. So entstehen Abweichungen durch lokale Fliessgefälle, durch Temperatur- und Altersdrift der Sensoren und durch Abweichungen bei der Signalverarbeitung. Bei Annahme von 1cm Fliessgefälle und je 1 cm Sensorabweichung und Signalverarbeitung (entspricht 0.3% des üblichen Messbereiches von 3m) entsteht über diese drei Stufen im ungünstigsten Fall eine aufsummierte Abweichung von 3 cm. Bei der Durchführung von Eichmessungen und Pegelkontrollen, sollten die Pegelhöhen der Sensoren mit den Handablesungen der Pegelhöhe an der Pegellatte oder mit dem Senklot verglichen und die Nullpunkte der Sensoren entsprechend korrigiert werden. Die Autoren gehen davon aus, dass dies jedoch nicht immer konsequent durchgeführt wurde (vgl. nächster Punkt).

- **Verstopftes Schlitzblech:** Ein verstopftes Schlitzblech an der Station des Dischmabaches sorgte wahrscheinlich über viele Jahre für Unsicherheiten der massgeblichen Pegelhöhe von bis zu 1.5cm. Da aber der im Schacht installierte Radar die für die Eichmessung massgebliche Pegelhöhe liefert, betrug die Differenz zur Pegelhöhe in der Rinne gar 2.5cm (ca. 60 l s^{-1}). Der Radar war wohl nicht gut eingestellt. Diese 60 l s^{-1} machen 40% des im Dischmabach beobachteten Q-Schwankungsbereich der Eichmessungen vom Q347 aus. Der gesamte Schwankungsbereich von 147 l s^{-1} macht ca. 50% des offiziellen Q347 aus (Q347 von 2018 = 290 l s^{-1}).
- **Einfluss von Schnee und Eis auf die Pegelhöhe am Messquerschnitt:** In kalten Perioden mit viel Schnee kann die Niedrigwasserrinne von hoch gelegenen Stationen von Schnee bedeckt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich bei 0°C -kaltem Wasser Eis am Schnee bildet und möglicherweise Wasser im Bereich des Messquerschnitts aufgestaut wird. Gemäss A. Kohler soll das v.a. am Überfall vorkommen. Wenn zu einem solchen Zeitpunkt eine Eichmessung durchgeführt wird, ohne die Station komplett von Schnee und Eis zu befreien, kommt es zu einer Überschätzung des H-Wertes der Eichmessung, wie die Berechnungen der VAW bestätigen (vgl. Kap. 7.5).

- **Unbegründete Nullpunktverschiebungen:** Treten bei der Pegelkontrolle Differenzen zwischen Pegelhöhe des Tauchsensors und der Pegelhöhe der Messlatte auf, kann das auf fehlerhafte Messungen des Sensors zurückzuführen sein (altersbedingte oder temperaturbedingte Drift). Die Differenzen müssen also über den Nullpunkt des Sensors korrigiert werden und nicht über den Nullpunkt der P/Q-Beziehung. Die Verschiebungen des Nullpunktes der P/Q-Beziehungen lassen aber vermuten, dass dies beim Riale di Calneggia häufig und beim Krummbach sehr häufig geschah, obwohl an beiden Orten eine massive Felskante den abflussbestimmenden Querschnitt bestimmt und Nullpunktverschiebungen der P/Q-Beziehung nur dann geschehen, wenn sich an diesem Querschnitt was ändert. Die Nullpunktverschiebungen der P/Q-Beziehungen erhöhen den Streubereich der P/Q-Beziehungen und wirken sich stark negativ auf die Qualität der Abfluss-Zeitreihen aus.
- **Bestimmung P/Q-Kurven:** Das heute angewendete Verfahren zur Bestimmung von P/Q-Beziehungen verwendet Polynomfunktionen unterschiedlichen Grades, um den Verlauf der P/Q-Beziehung bestmöglich in die Eichmessungen einzupassen. Dieses Verfahren berücksichtigt die Hydraulik am Messquerschnitt nur unzureichend. In Perioden, in denen Eichmessungen im Niedrigwasserbereich fehlen, kann die Extrapolation der P/Q-Beziehung vom Mittel- in den Niedrigwasserbereich so zu erheblichen Fehlern in den erhobenen Abflussmessreihen im Niedrigwasserbereich führen. Auch sehr tiefe Abflüsse ($Q < Q_{347}$), wo nur wenige Eichmessungen vorliegen, können dadurch mit grösseren Fehlern behaftet sein. Diese fehlerhaften P/Q-Beziehungen tragen zum hohen Streubereich der P/Q-Beziehungen im Niedrigwasserbereich bei.
- **Toleranzwert von kleiner 1cm Pegeldifferenz:** Bei Durchführung einer Eichmessung erfolgt eine Handablesung der Pegelhöhe anhand der Pegellatte oder mit einem Senklot. Treten bei einem Vergleich zwischen handabgelesenem Wert und Sensorwert Differenzen von weniger als einem Zentimeter auf, werden gemäss A. Crose keine weiteren Massnahmen wie z.B. eine Änderung der P/Q-Beziehung oder eine Korrektur des Nullpunktes des Sensorwerts vorgenommen. Es bleibt ein Restwert von weniger als einem Zentimeter, der als Quelle für Messfehler in Betracht gezogen werden muss.

7.2 Eignung der 6 Messstationen für die Messung von Niedrigwasserabflüssen

Aufgrund der Kriterien « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ », «Schwankungsbereich Eichmessungen» und «Schwankungsbereich P/Q- Beziehungen», «Messartefakte» wurde die Eignung der verschiedenen Pegelstationen zur Messung der Niedrigwasserabflüsse bestimmt. Hierbei zeigte sich, dass unter den hoch gelegenen Stationen diejenige des Chamuerabaches die beste Konstruktion aufweist, um Niedrigwasserabflüsse zu messen, gefolgt von den Stationen der Goneri, des Dischmabaches und des Krummbaches. Bei den tiefer gelegenen eignet sich die Station der Calancasca besser als diejenige des Riale di Calneggia. Es zeigte sich, dass das Kriterium « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » dabei einen sehr grossen Einfluss hat. Je kleiner die Abflussänderung bei einer Zunahme der Pegelhöhe um einen Zentimeter ist, desto besser eignet sich eine Station für die Messung von Niedrigwasserabflüssen. Alle oben erwähnten Faktoren wirken sich bei grossem « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ » gravierender auf die Qualität der Niedrigwassermessreihe aus als bei kleinem.

Eine Unterscheidung der Eignung nach Höhenlage ist von Bedeutung; denn im Umgang mit Schnee und Eis ist in grösserer Höhe eine andere Pegelkonstruktion gefordert als für Stationen unter 1000 m. ü M. Neben eines günstigeren « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »- Verhältnisses weist der Chamuerabach dank des gut isolierten Messschachtes im hydraulisch stabilen Vorbecken, mit geheiztem Schwimmer und mit einer immer mit Wasser bedeckten hydraulischen Verbindung zwischen Vorbecken und Schacht eine bessere Konstruktion auf als die Station Goneri oder Dischmabach. Die Station Goneri produziert Messreihen mit vielen Messlücken und Artefakten, weil die H-Messungen nicht in einem Messschacht, sondern direkt in der Rinne stattfinden. Bei ständig eis- und schneefreier Rinne wäre das kein Problem. Die Station des Dischmabaches weist den Nachteil auf, dass der Messschacht schlecht gegen Kälte isoliert ist und dass Verstopfungen des Schlitzbleches und vermutlich ein Leck des Messschachtes Fehler bei der H-Messung produzieren. Zudem können die im Messkanal entstehenden Wellen (VAW-Studie, Abb. 29) den Wasserstand am Messort beeinflussen (vgl. Kapitel 7.5). Dieser Nachteil scheint bei einer Überfall- Konstruktion wie am Chamuerabach nicht zu bestehen. Der Krummbach eignet sich weniger gut für die Messung von Niedrigwasserabflüssen, weil er ein ungünstiges « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »- Verhältnis aufweist.

Die Station an der Calancasca eignet sich gut für die Niedrigwassermessung. Die Station des Riale di Calneggia ist diesbezüglich wegen des ungünstigen « $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ »- Verhältnisses weniger gut geeignet.

7.3 Differenzierung zwischen realen Tagesgängen und Messartefakten

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass viele alpine Pegelstationen an kalten Wintertagen starke Tagesschwankungen messen. Die neuesten Untersuchungen bestätigen, dass diese durch erhebliche Stauvolumen entlang des Bachbetts verursacht werden. Die Stauprozesse sind eine Folge von Eisbildung, die den Querschnitt des Bachbetts einengen. Diese Prozesse werden in einem separaten Projekt an der WSL untersucht. Vielen Stationsverantwortlichen dürften diese Schwankungen bisher ein Rätsel gewesen sein. Gespräche und Analysen von Originalpegeldaten deuten darauf hin, dass die Stationsverantwortlichen mit diesen Schwankungen unterschiedlich umgingen und dass es bisher kein einheitliches Verfahren gibt. Diesbezüglich besteht Handlungsbedarf, damit diese realen Schwankungen nicht aus den Messreihen herauskorrigiert werden. Aufgrund der neuesten Ergebnisse besteht die Möglichkeit, diese realen Schwankungen von «Pegel-Peaks» zu differenzieren, die durch Eisbildung an der Station verursacht werden.

7.4 Neues Verfahren zur Bestimmung von P/Q-Beziehungen

Im Rahmen dieses Projektes wird ein neues Verfahren vorgeschlagen, mit welchem die Hydraulik am Messquerschnitt unter Verwendung der Strickler-Formel besser berücksichtigt wird. Mit diesem wurden versuchsweise die P/Q-Beziehungen der sechs untersuchten Stationen für eine Messreihe von 1991 bis 2021 berechnet. Anhand der neuen P/Q-Beziehungen wurden danach die Abflüsse neu berechnet und diese mit den offiziellen BAFU-Ganglinien verglichen. Bei den Stationen von Krummbach und Dischmabach betragen die maximalen Abweichungen beim Q347 zwischen den neu berechneten und den BAFU-Messreihen über 50%, bei den Stationen von Riale di Calneggia und von Calancasca mehr als 20% und bei denjenigen von Chamuerabach und Calancasca zwischen 10 und 15%. Die grössten Unterschiede zeigen sich vor allem in Perioden, in denen die P/Q-Beziehungen schlecht oder gar nicht auf Eichmessungen abgestützt sind, wie z.B. beim Dischmabach zwischen 1991 und 2002. In einigen Jahren ist erkennbar, dass die neu berechneten Ganglinien die minimalen Abflüsse und den Abflussrückgang im Winter deutlich besser repräsentieren als die offiziellen Ganglinien. Dies gilt vor allem für die Stationen Dischmabach, Krummbach und Goneri.

7.5 Erkenntnisse und Konsequenzen aus den Ergebnissen der hydraulischen 3D-Modellierung

7.5.1 Faktoren, die die Pegelhöhe beeinflussen

Die Ergebnisse der hydrodynamischen 3D-Modellierung des Wasserstandes der VAW am Pegel des Dischmabaches (VAW, 2023) zeigen verschiedene hydraulische Effekte auf, die die Pegelhöhen und die P/Q-Beziehungen beeinflussen:

- Eis oder Moos entlang der Rinnenseitenwände verengen den durchflossenen Querschnitt und können die Wasserspiegellage je nach Dicke der Eis- und Moosschicht um mehrere Zentimeter erhöhen. Eine je 4cm breite Eislinse an beiden Seitenwänden führt zu einer Erhöhung des Wasserspiegels um 2cm. Bei über mehrere Wochen anhaltenden kalten Temperaturen können solche Eislinen über einen längeren Zeitraum immer wieder auftreten und immer wieder zu einer konstanten Überschätzung des Wasserspiegels führen, vor allem in der Nacht, wenn die Wassertemperaturen auf 0°C sinken. Falls in einem solchen Zustand das Eis vor einer Eichmessung nicht abgeschlagen wurde, wurde für die Eichmessung ein überhöhter Pegelstand registriert. Die starken Schwankungen der Pegelstände der Eichmessungen z.B. am Pegel der Goneri in der Periode 1999 bis 2020 könnten u.a. auf Effekte durch Eis zurückzuführen sein. Diese Effekte dürfen nicht verwechselt werden mit den Peaks, die aufgrund von Stauwirkungen entlang des gesamten Baches durch Vereisungen verursacht werden (vgl. Kapitel 4).
 - Die Querschnittsveränderung vom Vorbecken in die Messrinne generiert Stosswellen in der Messrinne. Diese Wellen weisen bei unterschiedlichen Abflüssen unterschiedliche Amplituden und Wellenlängen auf (vgl. *Abbildung 172*, entnommen aus Bericht VAW *Abbildung 29*). Es zeigt sich ein interessantes Verhalten, bei dem sich die Wellen bei steigendem Abfluss alternierend bilden und dann wieder verschwinden. Bei Niedrigwasserabflüssen ($Q < 530 \text{ l s}^{-1}$ oder Q_{251}) sind die Amplituden mit bis zu 2cm Unterschied zwischen Wellental und Wellenspitze verhältnismässig moderat. 2cm Pegelunterschied entsprechen bei Niedrigwasser einer Differenz von etwa 44 bis 55 l s^{-1} , je nach Abfluss. Darüber nehmen die Amplituden stark zu. So erreicht z.B. bei einem Abfluss von 800 l s^{-1} die Wasseroberfläche kurz vor dem Radar ein Maximum und in der Mitte des Messschachtes ein Minimum, die eine Differenz von 4 cm aufweisen. Bei einem Abfluss von 1300 l s^{-1} liegt dagegen das lokale Maximum des Wasserspiegels beim Radar, und fällt zur Mitte des Messschachtes
- | | | |
|-----|--------|-----|
| nur | leicht | ab. |
|-----|--------|-----|

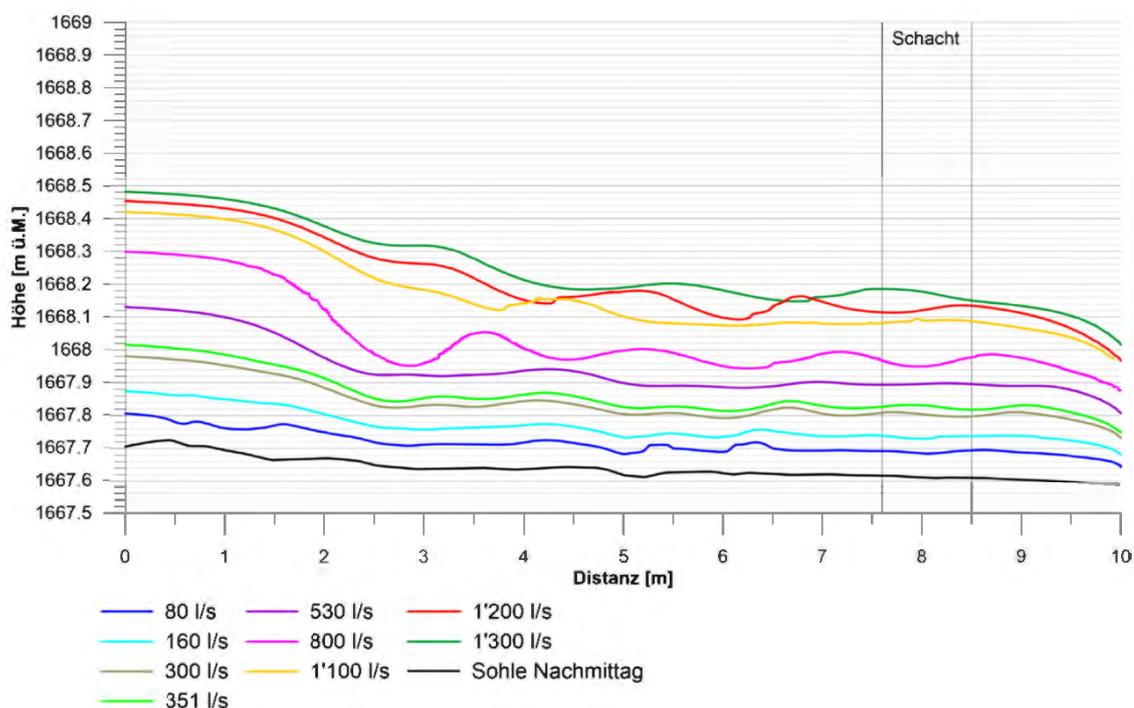


Abbildung 172: Mit 3D-Flow modellierte Wasseroberfläche in der Niedrigwasserrinne des Pegel des Dischmabaches für verschiedene Abflüsse (aus VAW, 2023).

- Der Effekt der Stosswellen auf die P/Q-Beziehung widerspiegelt sich in der Streuung der Pegelhöhen der Eichmessungen *Abbildung 173*). Zwischen 200 l s^{-1} und 530 l s^{-1} , also bei geringen Wellenamplituden (die grün eingekreisten Eichmessungen ausgenommen), schwanken die Pegelhöhen der Eichmessungen um eine manuell gesetzte Mittellinie weniger stark als bei Abflüssen grösser 530 l s^{-1} (grössere Wellenamplituden). Die rot eingefärbte Fläche stellt eine Umhüllende der Lage der Eichmessungen dar. Sie wurde manuell erstellt. Interessant ist auch die Beobachtung, dass die Pegelhöhen der Eichmessungen zwischen 800 l s^{-1} und 1100 l s^{-1} wesentlich tiefer liegen als die der Mittellinie. Möglicherweise wird die P/Q-Beziehung in diesem Bereich durch eine ausgeprägte Stosswelle beeinflusst, die bei diesen Abflüssen ihr Wellental genau im Bereich des Schachtes hat. Denkbar wäre, dass die Amplitude der Stosswelle, die sich bei 800 l s^{-1} zeigt, mit steigendem Abfluss noch grösser wird. Das würde bedeuten, dass die abflussabhängigen Wellen zu Dellen in der P-Q-Beziehung führen und zur Folge haben, dass sich die P-Q-Beziehung von Steg und Schacht annähern und distanzieren, was in der Praxis schwierig zu handhaben ist. Diese Hypothese sollte weiterverfolgt werden. Die Lagen der mit einem grünen Kreis umrandeten Eichmessungen im Niedrigwasserbereich unterscheiden sich wesentlich

von denjenigen der übrigen Eichmessungen. Möglicherweise wurde bei diesen Eichmessungen die Pegelhöhe zum Messzeitpunkt durch Effekte des verstopften Schlitzblechs beeinflusst. Der Abstich zur Ermittlung der Pegelhöhe der Eichmessung wird im Messschacht durchgeführt. Bei verstopftem Schlitzblech wird der Pegelstand im Messschacht unterschätzt (vgl. Kap. 4).

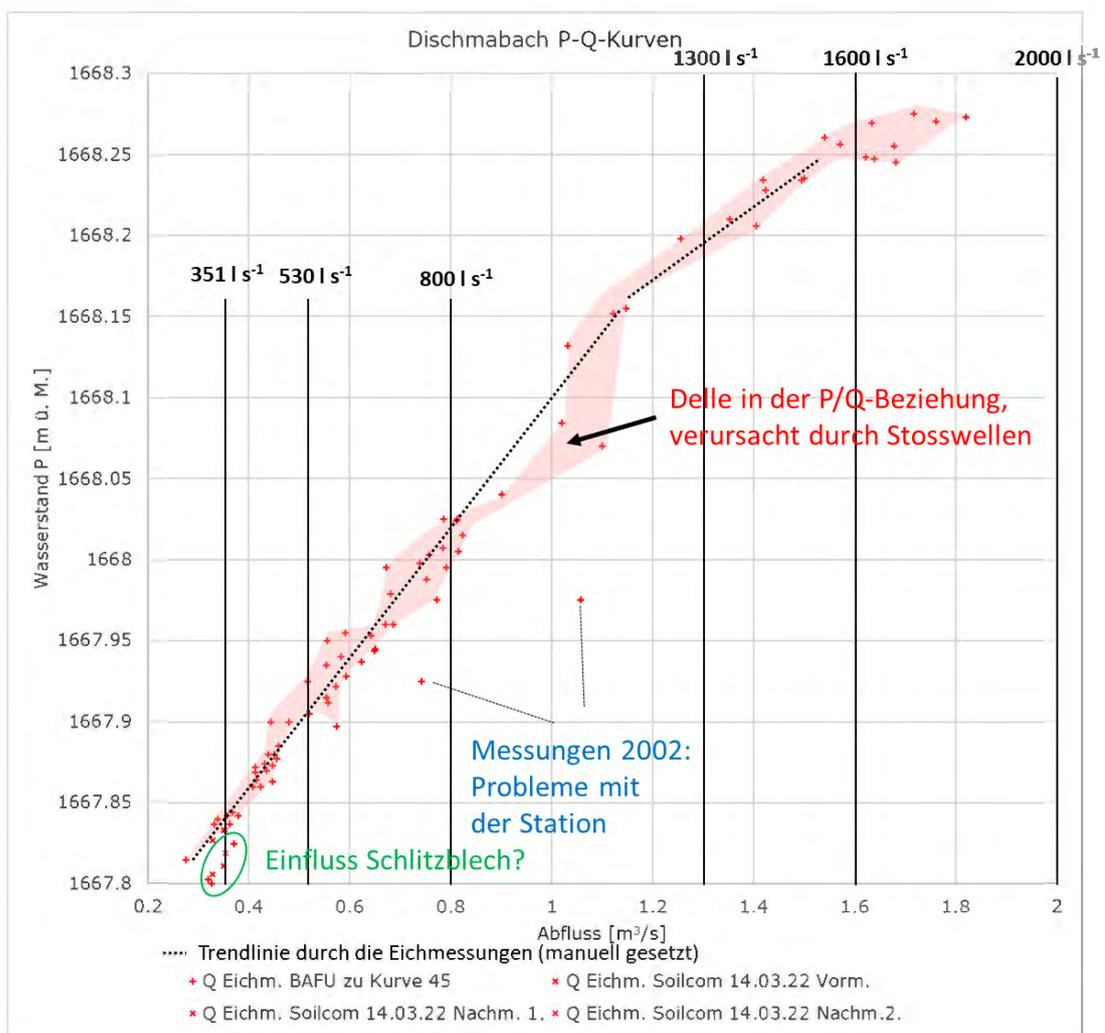


Abbildung 173: Lage der Eichmessungen des Dischmabaches zwischen 200 und 2000 l s⁻¹.

- Es ist zu erwarten, dass Eis am Rand der Messrinne über die Veränderung der Geometrie auch die Amplitude und die Länge der Wellen in der Messrinne verändert. Damit würden bei gleichem Abfluss am gleichen Ort unterschiedliche Wasserstände mit und ohne Eis

gemessen. Dieser Effekt würde sich dem obigen Stau effekt überlagern (Bericht VAW Abbildung 21, S. 21).

- Unterschiede im Geröllvorkommen direkt oberhalb des Einlaufes zur Niedrigwasserrinne beeinflussen die Fließgeschwindigkeit in der Messrinne vor allem oberhalb des Stegs. Am Querschnitt des Messschachtes kann der Einfluss der Unterschiede in den Stosswellen, die durch diese Geröllvorkommen verursacht werden, noch zu Pegelschwankungen von 0.5cm führen (Bericht VAW Abbildung 18, S. 20).

7.5.2 Vergleich der P-Q-Beziehungen BAFU, Strickler, VAW

Zur Validierung der mit der Strickler-Berechnung ermittelten P-Q-Beziehung und der BAFU-P-Q-Beziehung wurden diese mit der von der VAW mit dem 3D-Modell berechneten P-Q-Beziehung für Abflüsse zwischen Q260 und Q365 abgebildet (Periode 13.8.2020 bis heute, *Abbildung 174*).

Die beiden P-Q-Beziehungen VAW und Strickler verlaufen ungefähr parallel. Mit steigendem Abfluss driften sie auseinander (Delle in der P/Q- Beziehung, vgl. *Abbildung 173*). Bei Q365 (199 l s^{-1}) berechnet die VAW-Kurve bei gleicher Pegelhöhe einen um 25 l s^{-1} höheren Abfluss als die Strickler-Kurve. Bei Q260 (490 l s^{-1}) beträgt der Unterschied etwa 50 l s^{-1} . Die Unterschiede im Abfluss von 25 bis 50 l s^{-1} sind darauf zurückzuführen, dass zur Eichung der 3D-Modellierung andere Eichmessungen verwendet wurden (Vormittag und Nachmittag vom 14.03.2023), als für die mit Strickler berechneten P-Q-Beziehungen. Für die Berechnung der BAFU-Kurven und der Strickler-Kurve wurden dieselben Eichmessungen verwendet. Der beinahe parallele Verlauf der VAW- und der Strickler-Kurve zeigt, dass die mit der Strickler-Rechnung hergeleitete P-Q-Beziehung das hydraulische Verhalten besser repräsentiert als die BAFU- P-Q-Beziehung, die steiler abfällt als die VAW-Kurve.

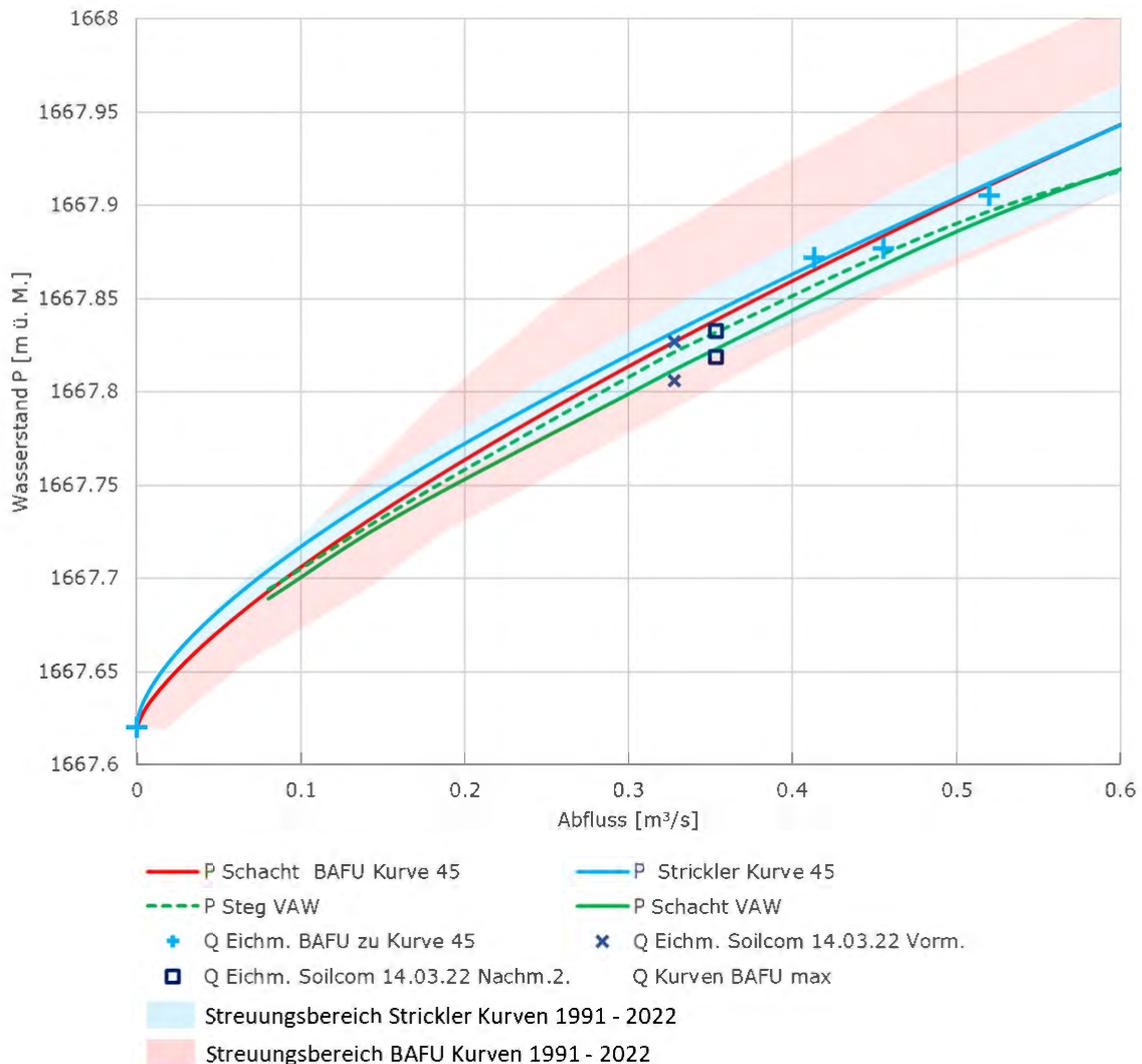


Abbildung 174: Vergleich der P-Q-Beziehungen Strickler, BAFU und VAW zwischen Q260 und Q365. Dargestellt sind zudem die Flächen der Streubereiche aller Strickler- und BAFU- P-Q-Beziehungen seit 1991.

8 Generelle Empfehlungen

8.1 Konstruktion Messstationen

Der Niedrigwasser-Abfluss-Querschnitt sollte so geplant werden, dass eine möglichst kleine Abflussänderung notwendig ist, um eine Pegeländerung von 1 cm zu erreichen. Beim Chamuerabach bewirkt eine Abflussänderung von 5% des Q347 bereits eine Pegelstandsänderung von 1 cm. Aus Sicht der Autoren wäre ein solch tiefer Wert von $\Delta Q / 1\text{cm } \Delta H$ erstrebenswert für alle Stationen;

denn weitere mögliche Unsicherheiten und Fehlerquellen in der Messung der Niedrigwasserabflüsse wirken sich weniger gravierend aus, wenn dieser Quotient tiefliegt.

Um diesen Quotienten zu reduzieren, bräuchte es Anpassungen in der Geometrie der Messrinne. Eine lange Niedrigwasser-Rinne scheint aufgrund der Ausbildung der Stosswellen kaum von Vorteil zu sein. Dies impliziert der Vergleich der Ergebnisse des Dischmabaches mit langer Rinne gegenüber dem Chamuerabaches mit kurzer Rinne und Überfall-Situation.

Bei alpinen Stationen mit viel Schnee und Eis scheint die Pegelmessung in einem beheizten Schacht mit einer komplett vom Wasser überdeckten Verbindung in den Staubereich einer Messstelle am besten zu funktionieren. Die Messung mit Radar über der Rinne ist dann die beste Variante, wenn die Rinne konstant von Schnee und Eis gereinigt werden kann. Bei tief gelegenen Stationen wird die Pegelmessung direkt in der Messrinne empfohlen.

8.2 Messstationen Betrieb

Für die ordentliche manuelle Korrektur der Pegelmessreihen oder auch für Korrekturen der Messreihen zu einem späteren Zeitpunkt sind alle Informationen zu Ereignissen, welche die Pegelmessung oder die P/Q-Beziehung beeinflussen können, sehr wichtig. Es wird empfohlen, alle diese Informationen zu allen Stationen, auch rückwirkend, zentral in einer Datenbank abzulegen.

Ebenfalls sehr hilfreich sind regelmässige Fotos der Stationen, z.B. im Stunden (im Winter oder bei Hochwasserereignissen) oder Tagesintervallen, auf denen Veränderungen im Messquerschnitt oder in der Hydraulik nachverfolgt werden könnten. Wären z.B. beim Pegel des Dischmabaches regelmässig Photos der Eisausbildung in der Rinne gemacht worden, wäre es evtl. möglich, den Einfluss des Eises auf die Pegelhöhe herauszurechnen. Wir empfehlen zudem, für die Zeitdauer eines Winters an der Station des Dischmabaches eine Unterwasserkamera im Schacht und vielleicht auch an einer Seitenwand der Rinne zu installieren. So liesse sich aufzeichnen, wie sich das Eis bildet und wieder schmilzt, in Abhängigkeit der Luft- und Wassertemperatur und es liesse sich nachvollziehen, wie stark das Eis die Pegelhöhe beeinflusst.

Bei Messstationen mit Messschächten sollte darauf geachtet werden, dass das Wasser zwischen Gerinne und Messschacht jederzeit frei fließen kann. Hindernisse wie Schlitzbleche sollten gereinigt werden, sobald die Pegelmessungen im Schacht von denjenigen im Gerinne abweichen, und vor jeder Pegelkontrolle oder Eichmessung.

8.3 Eichmessungen

Kleine Abflüsse sollten tendenziell mit der Salzverdünnungs-Methode gemessen werden, diese bringt mindestens bei den untersuchten Stationen die kleinsten Schwankungen.

Grosse Abflüsse sollten, wo möglich, mit der Flügelmessung erfolgen. Messunsicherheiten sind geringer als bei den Uranin-Messungen.

Es wird empfohlen, Eichmessungen im ganzen Niedrigwasserbereich konsequent durchzuführen, v.a. bei den tiefsten Abflüssen. Die tiefsten Abflüsse kommen sehr selten vor. Deshalb bedingt das eine sehr flexible Planung (mit Ersatzleuten bei Ferienabwesenheit), wann und bei welcher Witterung an welchen Messstellen Eichmessungen durchgeführt werden.

8.4 P-Q-Kurven Erstellung für die Periode 1991 bis 2003 am Pegel des Dischmabaches

In den Winter 1991 bis 2003 wurden am Pegel des Dischmabaches keine Eichmessungen durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse aus der 3D-Modellierung der Hydraulik in der Niedrigwasser- rinne zeigt sich, dass drei Faktoren die Streuung der Eichmessungen und damit die P/Q-Beziehungen beeinflussen:

- Stosswellen
- Schlitzblech
- Vereisung in der Rinne

Die Ergebnisse aus der 3D-Modellierung erlauben es, für die Jahre 1991 bis 1999 eine «mittlere» P/Q-Beziehung zu berechnen. Allerdings muss vorher abgeklärt werden, weshalb die Pegelhöhen der in Abbildung 173 grün eingekreisten Eichmessungen von der mittleren Pegelhöhe der übrigen Eichmessung abweichen. Die P/Q-Beziehungen von 2000 bis 2002, wo offensichtlich eine gravierende Störung die Pegelmessung beeinflusste, kann nur durch eine Umrechnung der P/Q-Beziehung des Pegels Landwasser auf den Pegel des Dischmabaches basierend auf den spezifischen Abflüssen abgeschätzt werden.

Zudem empfehlen wir, für die einzelnen Eichmessungen im Winter anhand der Originalpegelgang- linie abzuklären, ob der Pegel zum Messzeitpunkt vielleicht durch kurzfristige Eisbildung in der Rinne beeinflusst wurde.

8.5 P-Q-Kurven Erstellung

Wir empfehlen Die P/Q-Kurven insbesondere im Niedrigwasser-Bereich auf die Hydraulik der Messstation abzustützen. Dies umfasst folgende Massnahmen:

- Erhebung der Geometrie und der Oberflächenrauigkeit der Stationen
- Durchführung von mehr Eichmessungen im Niedrigwasserbereich und bei Wasserspiegel-lagen im Übergangsbereich von der Niedrigwasserrinne in die breite Rinne, damit in die-
sem Bereich die 3D-Modellierung genauer geeicht werden kann
- Dies ermöglicht eine bessere Berücksichtigung von Stosswellen (wo relevant) in der Ext-
rapolation der P-Q-Beziehung vom Mittelwasser- in den Niedrigwasserbereich, in Perio-
den, in denen Eichmessungen im Winter fehlen. Im Dischmabach betrifft dies ab 1991 die
Perioden 1991 bis 2003.
- Konsequente Ausrichtung der P/Q-Segmente auf die massgebenden Kanten der Messrinne
- Als Alternative zur 3D-Modellierung: Berechnung der Niedrigwasser-P/Q-Beziehungen mit
einer einfachen Abflussformel wie Strickler an allen Stationen, am besten eingebettet in
WISKI. Übergangsbereiche an Kanten und Effekte von Stosswellen können damit weniger
genau erfasst werden als mit einer 3D-Modellierung. An Stationen, wo solche Übergang-
bereiche wichtig sind, empfehlen wir die Berechnung einer P-Q-Beziehung mit einer 3D-
Simulation.

Zusätzlich bei Messstellen mit fixer Niedrigwasserrinne:

- Erhebung der Kote mit Abfluss = 0 m³/s, das ist der fixe Nullpunkt der P/Q-Kurve
- Langfristige Verwendung von fixen Niedrigwasser-P/Q-Kurven, die gut auf Eichmessungen
abgestützt sind. Änderungen der P/Q-Beziehungen nur durchführen, wenn sie durch Än-
derungen bei der Hydraulik an der Station ersichtlich ist (z.B. durch regelmässig durch-
geführte Photos).

8.6 P-Q-Kurven Handling

Die Termine der Wechsel der P-Q-Kurven sollten auf die Zeitpunkte gelegt werden, an denen die
Veränderung im Flussbett stattfand, also typischerweise in die Zeitpunkte der Hochwasser.

8.7 Umgang mit Messartefakten und Veröffentlichung von Daten

Die manuelle Korrektur der Pegeldaten sollte harmonisiert und aufgrund von Regeln festgelegt

werden. So sollte verhindert werden, dass reale Tagesschwankungen bei sehr kalten Temperaturen als Messartefakte klassifiziert und auskorrigiert werden.

Der derzeitige Zustand von gewissen Messreihen (z.B. Goneri), die sehr stark von Messartefakten betroffen sind und deren Q347 praktisch nur auf Messartefakten aufbaut, ist für Nutzerinnen und Nutzer unbefriedigend. Aus den Daten lassen sich keine verlässlichen Dauerkurven und Rezessionskurven für den Niedrigwasserbereich herleiten. Eine nachträgliche manuelle Korrektur der Messreihen durch eine gerade Verbindung zwischen den Kontrollpunkten ist dazu nicht in allen Situationen zielführend.

Die Autoren empfehlen, für Perioden mit Messlücken und Artefakten die Abflüsse anhand eines Niederschlags-/Abflussmodells nachzurechnen. Die betroffenen Perioden sollten in einem solchen Fall für die Nutzerinnen und Nutzer entsprechend sichtbar klassifiziert werden. Auch sollten Segmente von Messreihen, deren P/Q-Beziehungen gar nicht oder nur schlecht auf Eichmessungen abgestützt sind, sichtbar als Messreihen mit eingeschränkter Genauigkeit markiert werden.

8.8 Weitere Untersuchungen, Forschungslücken

Wir empfehlen, folgende Themen weiter zu untersuchen:

- Die Thematik der Tages-Schwankungen der Winterabflüsse alpiner Stationen wird am WSL in einem Projekt untersucht. Sie liefert die Grundlagen, um reale Tagesschwankungen von Messartefakten in Messreihen differenzieren und die Messartefakte quantifizieren zu können. Diese wurden bisher nur qualitativ abgeschätzt. Sie könnte helfen, das manuelle Korrekturverfahren der Pegelmessreihen zu harmonisieren und zu standardisieren.
- Es wäre hilfreich, wenn zu Zeitpunkten von vermuteten Nullpunktverschiebungen der P/Q-Beziehungen noch genauere Angaben zu den Handablesungen, zur Pegelhöhe des Sensors während der Handablesung der Pegellatte und zur Nullpunktverschiebung der P/Q-Beziehung ausfindig gemacht werden könnten. Gibt es Informationen, warum Nullpunkte der P/Q-Beziehung verschoben wurden, anstatt die des Sensors?
- Sinnvoll wäre es, die in diesem Projekt beschriebene Art der Überprüfung und Korrektur der Messreihen auf weitere Pegelstationen anzuwenden und das beschriebene Verfahren in einem Handbuch zusammenzufassen.

8.9 Anwendung der 3D-Modellierung an weiteren Stationen

Allgemein: Wir empfehlen, den Effekt der Stosswellen auf die P/Q-Beziehung in Niedrigwasserrinnen im Allgemeinen besser zu untersuchen. Viele Stationen verfügen über eine längere Niedrigwasserrinne, das betrifft auch solche in den Voralpen oder im Mittelland. Die Veränderung von Amplitude und Lage der Stosswellen kann an anderen Stationen anders aussehen wie an der Station des Dischmabaches. Vielleicht bilden sich an manchen Stationen schon Stosswellen mit grösserer Amplitude im Niedrigwasserbereich, bei anderen vielleicht erst im Mittelwasserbereich.

Chamuerabach: Hinsichtlich der Ermittlung der idealen Pegelkonstruktion wäre es sinnvoll, eine 3D-Modellierung an der Station des Chamuerabaches durchzuführen. Mit dieser könnte überprüft werden, ob die hydraulischen Verhältnisse an einer «Überfall-Station» mit kurzer Messrinne, wie am Chamuerabach, tatsächlich konstanter sind als bei einer Messkonstruktion mit einer längeren Rinne und einer Messung in der Niedrigwasserrinne und nicht im Vorbecken wie z.B. an der Goneri oder am Dischmabach.

Goneri: Um die Daten der Winterabflüsse der Goneri von 1999 bis 2020 korrigieren zu können, wäre auch an diesem Pegel eine mit dem 3D-Modell ermittelte PQ-Beziehung sehr hilfreich. In dieser Periode schwanken die Wasserspiegellagen der Eichmessungen sehr stark, was grosse Unsicherheiten verursacht. Das Einzugsgebiet der Goneri ist hydrologisch sehr interessant und in seinem Verhalten auch repräsentativ für eine ganze Gruppe von Einzugsgebieten im Gotthardmassiv.

Weitere Pegelstationen: Wir empfehlen zudem, 3D-Simulationen an Pegeln durchzuführen, wo während längerer Perioden Eichmessungen im Niedrigwasserbereich fehlen und wo eine Extrapolation der P-Q-Beziehung vom Mittelwasser- in den Niedrigwasserbereich mit der Strickler-Formel aufgrund der Effekte durch Stosswellen heikel ist.

9 Quellenverzeichnis

BAFU 2021 und 2022: Informationen zu den Messstationen, abgerufen Oktober 2021 und März 2022
<https://www.hydrodaten.admin.ch/de/tabelle-der-aktuellen-situation-der-abflusse-und-wasserstande.html>

BAFU 2022: Nivellementverzeichnisse BAFU März 2022

Cröse 2022: Informationen von Andrea Cröse, Mitarbeiter BAFU

Hammer 2021, 2022: Informationen von Jürg Hammer, Mitarbeiter BAFU

Hydromaps 2021: Hydrologischer Atlas der Schweiz.
https://hydromaps.ch/#de/7/46.830/8.193/bl_hds/NULL

Imoberdorf 2022: Pläne und Informationen von H. Imoberdorf, ehemaliger Ingenieur bei VWI

Kaderli 2021: Foto von R. Kaderli, wasserplan.ch gmbh

Keller-Druck 2021: Lieferant Sensoren
<https://download.keller-druck.com/api/download/B3VXmL2rvMDqwgdwkRQYHX/de/2021-07.pdf>

Köhler 2021, 2022: Informationen von Andreas Köhler, Mitarbeiter BAFU

Margreth 2021: Informationen von Michael Margreth, Soilcom und WSL

Lehmann 2022: Informationen von Eugène Lehmann, ehemaliger Mitarbeiter BAFU

Michel 2022: Informationen von Karim Michel, Mitarbeiter BAFU

VWI Ingenieure Naters 2018: Pläne der neuen Messstelle Goneri

10 Anhang

10.1 Allgemeines, P-Q-Tool Apprimus

Die P-Q-Kurven werden nach den folgenden Gesichtspunkten definiert (Kohler 2021):

Auf Grund der Geometrie der Messstelle wird einerseits entschieden, ob die P-Q-Kurve durch den Nullpunkt (Abfluss=0) geht, und andererseits der ganze Pegelbereich in mehrere Segmente eingeteilt, z.B. ein Segment für die Niedrigwasserrinne, eines im Übergangsbereich und ein Segment für den Hochwasserbereich. Diese Segmente können je mit einer individuellen Fit-Funktion in die Eichmessungen gelegt werden. Allerdings muss auch darauf geachtet werden, dass die Segmente nahe beim Übergang zum angrenzenden Segment passen, und der automatische Übergang in Form eines Splines eine plausible Form annimmt. Zu diesem Zweck werden auch Eichpunkte aus dem Pegelbereich dieses angrenzenden Segmentes verwendet. Die gewählte Fit-Funktion und ihre Ordnung werden so gewählt, dass sich die P-Q-Kurve schön in die gewählten Punkte einpasst.

Bei sehr tiefen und sehr hohen Wasserständen gibt es wenige Eichmessungen. Die in diesen Bereichen der P-Q-Fläche durch Eichmessungen definierten Punkte stehen dann weitgehend alleine da. Naturgemäss haben solche alleinstehenden Punkte beim automatischen Einpassen von Polynomen ein hohes Gewicht. Die Kurven werden so gefittet, dass sie diese Punkte praktisch treffen. Im Falle eines physikalisch klar definierten Nullpunktes, bei dem der Abfluss = 0 ist, ist dieses Verhalten hilfreich. Störend kann sich dieses hohe Gewicht alleine stehender Punkte auswirken, wenn Eichpunkte am oberen Rand der Niedrigwasser-Bereiche die Kurve im Niedrigwasser-Segment dominieren.

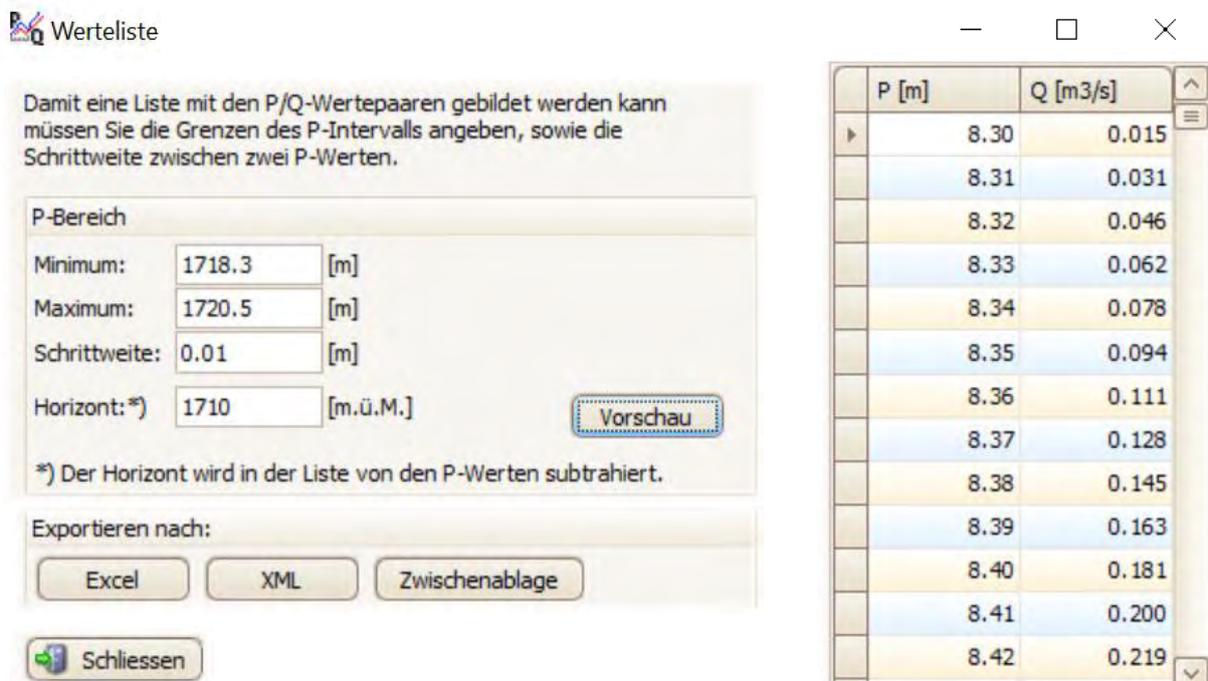
In gewissen Zeiträumen existieren wenig NW-Eichmessungen. Es kann nur auf ältere oder bei höheren Pegelständen durchgeführte EM zurückgegriffen werden. Bei Messstellen mit Niedrigwasserrinnen müssen sich aber Veränderungen der Hydraulik bei Pegelständen über dieser Rinne (z.B. durch Verkrautung) nicht unbedingt auf das Abflussgeschehen bei Niedrigwasser auswirken.

Im Tool Apprimus P/Q-Kurven V3.3.0.0 wird jeder Eichmessung eine Qualität zwischen 0 und 3 zugeschrieben (Kohler 2021): Diese Einteilung richtet sich bei den Flügelmessungen nach Unterschieden zwischen den einzelnen Profilen oder ganzen Durchgängen mit verschiedenen Flügeln und allfälligen Schwierigkeiten mit Geschiebe, Laub usw. Bei Salzmessungen sind die Unterschiede zwischen den Sonden und der zeitliche Verlauf der Konzentration massgebend. Für alle sind zusätzlich Veränderungen des Pegelstandes P über die Messdauer ein wichtiges Kriterium. Die Qualität wird bezeichnet mit 0= storniert (roter Punkt), 1=genügend (blauer Pfeil waagrecht),

2=gut (grüner Pfeil schräg nach oben) und 3=sehr gut (grüner Pfeil senkrecht nach oben) bezeichnet. Das P-Q-Tool gewichtet Eichmessungen mit schlechter Qualität leicht weniger stark als solche guter Qualität.

Mehr als drei Punkte/ Segment sind nur möglich, wenn Polynome > 2 . Grades verwendet werden. Diese Abhängigkeit führt zu einem Dilemma wenn entweder viele Punkte vorhanden sind und man trotzdem möglichst glatte Kurven mit Polynomen tiefen Grades möchte, oder wenn weniger als vier Punkte (inkl. Nullpunkt) vorhanden sind und man trotzdem ein Polynom und keine Potenzfunktion verwenden möchte. An Messstellen mit fixer Geometrie könnte theoretisch lange dieselben Kurven verwendet werden, allerdings zeigen die Eichmessungen trotzdem eine Variabilität.

Beim Export aus dem P-Q-Tool kann der Bereich und der Horizont definiert werden (*Abbildung 175*).



Damit eine Liste mit den P/Q-Wertepaaren gebildet werden kann müssen Sie die Grenzen des P-Intervalls angeben, sowie die Schrittweite zwischen zwei P-Werten.

P-Bereich

Minimum: 1718.3 [m]
Maximum: 1720.5 [m]
Schrittweite: 0.01 [m]
Horizont:*) 1710 [m.ü.M.] Vorschau

*) Der Horizont wird in der Liste von den P-Werten subtrahiert.

Exportieren nach:

Excel XML Zwischenablage

Schliessen

P [m]	Q [m ³ /s]
8.30	0.015
8.31	0.031
8.32	0.046
8.33	0.062
8.34	0.078
8.35	0.094
8.36	0.111
8.37	0.128
8.38	0.145
8.39	0.163
8.40	0.181
8.41	0.200
8.42	0.219

Abbildung 175: Screenshot aus dem P-Q-Tool von Apprimus (Kaderli 2022)

Etwas irritierend ist, dass der in den Kurven definierte Nullpunkt (1718.29 m ü. M/ 0.0 m³/s) auch dann nicht in der exportierten Liste erscheint, wenn der Wert «Minimum» auf diesen Wert oder darunter gestellt wird. Zudem scheinen «Minimum» und «Maximum» auf den Export gar keinen Einfluss zu haben. Vorsicht also mit den exportieren P-Q-Kurven, immer den darin angegebenen P-Bereich verwenden, und keinesfalls den in der Datenbank definierten Nullpunkt

Je nach Einstellung der Chart-Eigenschaften stimmen die Achsbeschriftungen nicht. Beim Krumbach kann zB ein Pegelbereich von 1790.95 bis 1791.45 eingestellt werden, worauf sich Kurve und Eichmessungen so darstellen (inkl Cursorwert), die Achsbeschriftung aber nicht.

10.2 Dischmabach

10.2.1 Eichmessungen

In *Tabelle 13* sind diejenigen Eichmessungen aufgelistet, deren Abfluss um mehr als $0.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ von der Mittellinie abweicht.

Tabelle 13: Eichmessungen welche mehr als $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$ von der Mittellinie abweichen

WM Nr.	Datum	Q	P	dP	Qualität	Messart	Verwendet für Kurven
81226	18.09.2002	1.10	1668.07	0.01	3	FSt	31
81281	10.10.2002	1.06	1667.975	0.01	3	FSt	31
81629	10.04.2003	0.44	1667.9	0	3	FSt	31
83236	06.04.2005	0.5915402	1667.955	0.005	3	FSt	32
83729	14.11.2005	0.67	1667.995	0.005	3	FSt	32
87842	18.03.2010	0.32	1667.803	0.005	3	FSt	37
89898	09.03.2012	0.37	1667.825	0.002	3	FSt	37, 38
93029	26.11.2014	1.12	1668.152	0.001	2	FSt	40
93390	20.02.2015	0.52	1667.925	0.015	1	SALZ	40, 41
97200	21.11.2017	0.79	1668.025	0.007	2	FSt	41
97341	17.08.2018	1.26	1668.198	0.001	3	FSt	42
98374	11.01.2019	0.56	1667.95	0		SALZ	42
98384	15.05.2019	1.15	1668.155	0.002	1	SALZ	42
99654	03.04.2020	0.57	1667.897	0.001	2	SM	44
100554	17.11.2020	1.03	1668.132	0.007	2	FSt	45

Vergleicht man die jährlichen Mediane der Eichmessungen und die für die P-Q-Kurven im NW-Bereich verwendeten Abflussbeiwerte (*Abbildung 176*), so ist eine gewisse Übereinstimmung der beiden Verläufe feststellbar. Bei den Abflussbeiwerten gibt es Auffälligkeiten am 02.01.2012 und am 02.04.2020. Diese beiden Ausreisser zu unplausibel hohen Abflussbeiwerten entsprechen den beiden schlecht abgestützten Kurven 39 und 44, welche nach unserer Empfehlung nicht verwendet werden sollten.

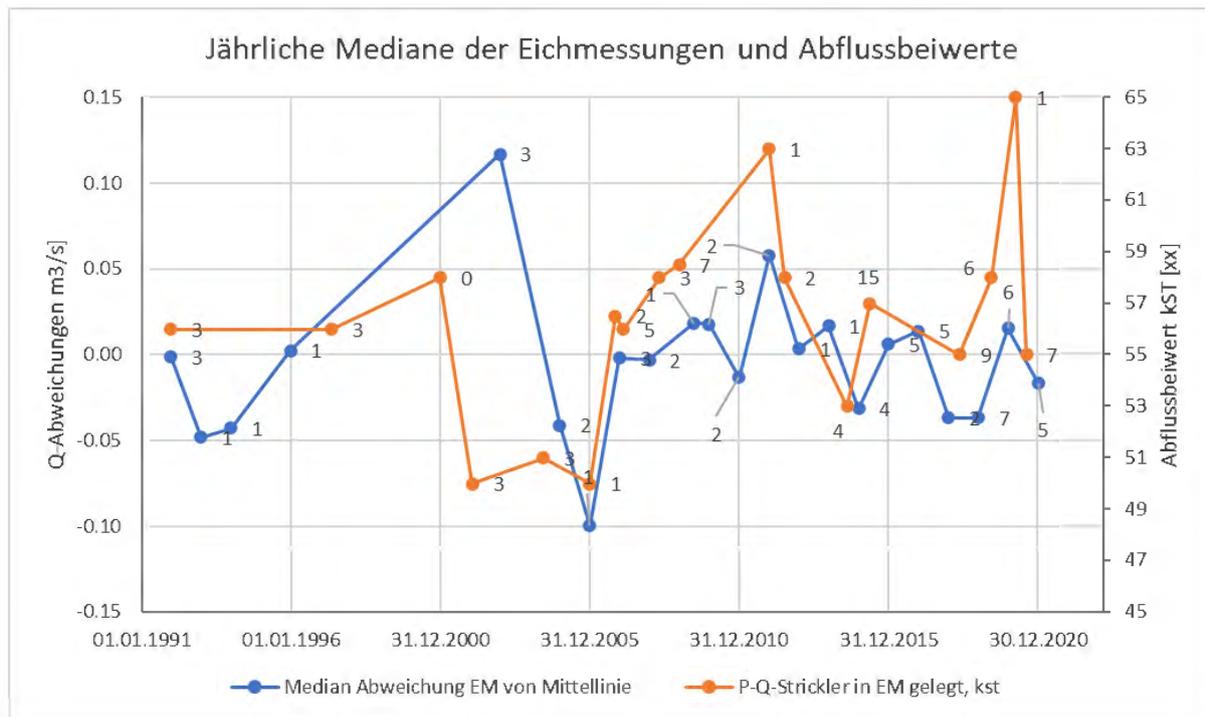


Abbildung 176: Abfluss-Abweichungen der jährlichen Mediane der Eichmessungen von der Mittellinie, verglichen mit den für die Strickler-Kurven eingesetzten Abflussbeiwerte über die Zeit. Die Ziffern bezeichnen die Anzahl der Niedrigwasser-Eichmessungen

10.2.1.1 Wassertiefen während den Flügel-NW-Eichmessungen

Bei den Eichmessungen mit dem Flügel werden einerseits Wassertiefen direkt beim Flügel und andererseits die Pegel der Pegelmessung abgelesen. Bei einer Station mit einer festen und langen Niedrigwasserrinne würde man erwarten, dass sich bei Niedrigwasser-Eichmessungen ein geringes, über die Zeit konstantes Gefälle zwischen der Wassertiefe beim Flügel und der Pegelmessung zeigt (Abbildung 177). Bei der Station Dischmabach beträgt die Distanz zwischen Flügelmessung und Pegelmessung ca. 1.5 m und das Sohlgefälle 1 %, entsprechend wurde ein Gefälle von ca. 1.5 cm erwartet. Aus den Flügelmessungen der letzten 20 Jahre geht jedoch ein sich zwischen 0 bis 5 cm variierendes, tendenziell steigendes Gefälle hervor.

Das Gefälle scheint unabhängig vom gemessenen Abfluss zu sein (

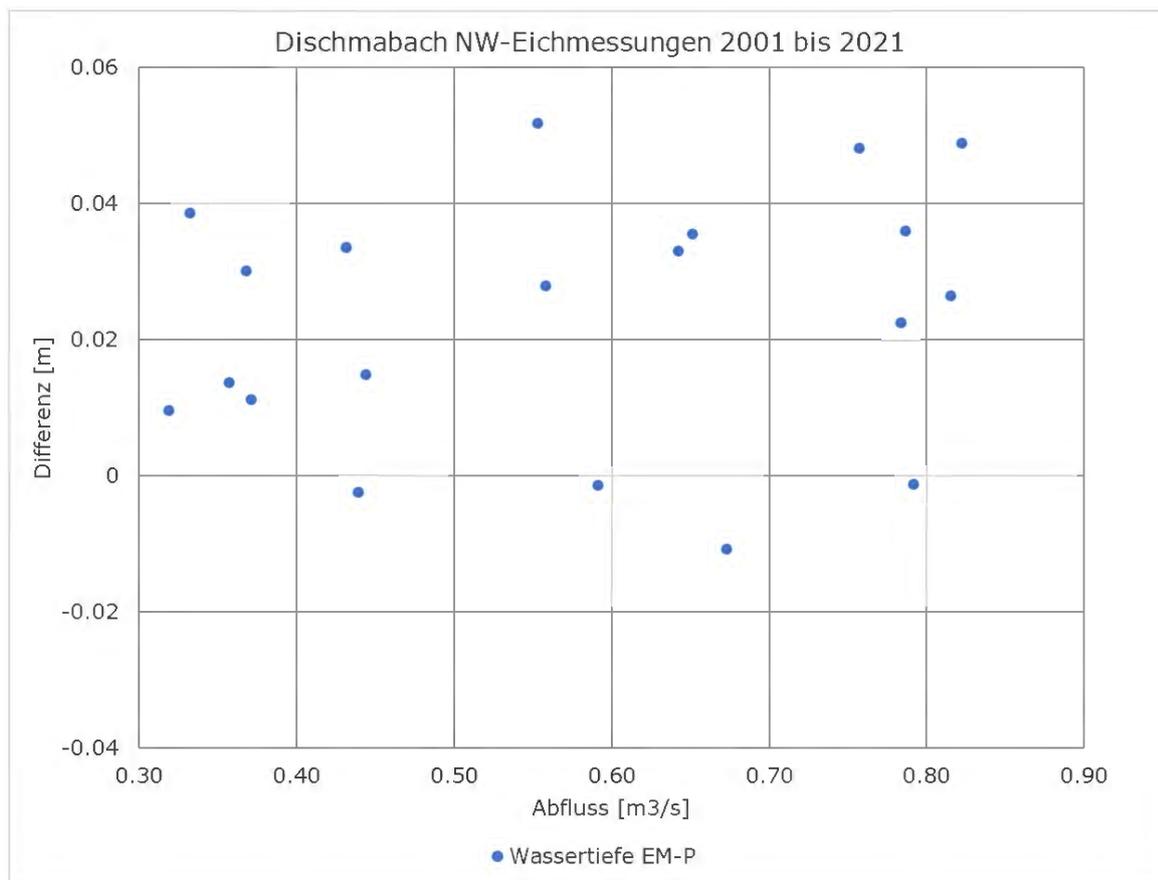


Abbildung 178). Es kann von einem veränderten Sohlgefälle, Abweichungen bei den Eichmessungen im Pegelstand, Abweichungen bei den Pegelmessungen, oder von einem veränderlichen Fließgefälle zwischen Eichmessung und Pegelmessung herrühren.

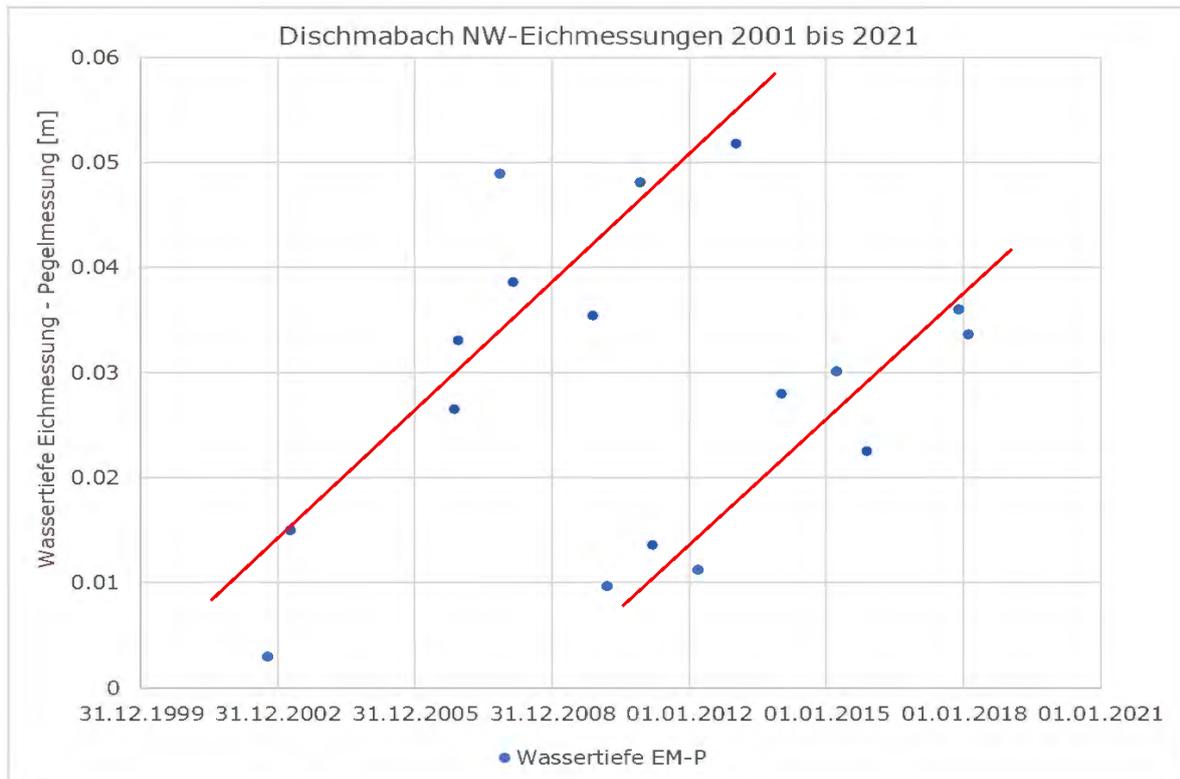


Abbildung 177: Dischmabach, Gefälle zwischen den Wasseroberflächen bei der Flügelmessung und der Pegelmessung über die Zeit

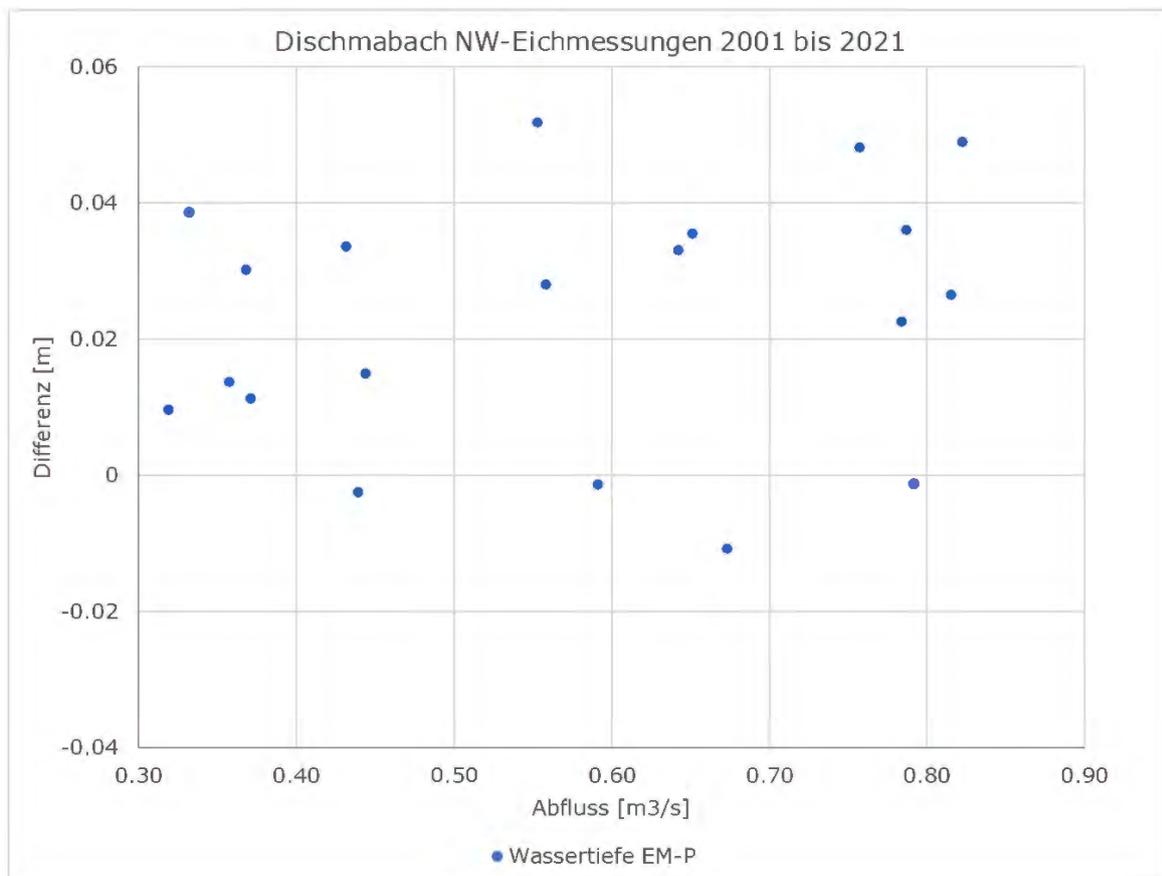


Abbildung 178: Dischmabach, Gefälle zwischen den Wasseroberflächen bei der Flügelmessung

und der Pegelmessung, aufgetragen über den Abfluss

10.2.2 P-Q-Kurven, Entwicklung über die Zeit

Im Folgenden werden die mit Strickler berechneten Kurven gemeinsam mit den vom BAFU eingesetzten P-Q-Kurven und ihren Eichpunkten dargestellt. Die Kurven 26 BAFU bis 29 BAFU (*Abbildung 179*), letztere gültig ab 14.05.1997, wurden vermutlich auf Grund der in diesen Zeiträumen ausgeführten Eichmessungen definiert. Unklar bleiben die Gründe für der Verlauf der Kurve 26 (rot), welche die Eichmessungen aus derselben Periode ignoriert und weit tiefere Abflüsse produziert als alle anderen Kurven. Vielleicht gab es dafür einen plausiblen Grund. Falls dieser irgendwo notiert wurde, wäre das sehr wertvoll zu wissen. Die Kurven 27 bis 30 liegen sehr nahe beieinander, wobei der Kurve 30 BAFU (gelb, gültig ab 1.1.2001) keine NW-Eichmessungen zu Grunde liegen. Die Kurven 26 Strickler bis 30 Strickler umfassen alle Eichmessungen inklusive derjenigen, die oben ignoriert wurde. Bei Pegelständen unter 7.8 m, bei denen die Kurven 26 BAFU bis 29 BAFU praktisch als Geraden verlaufen, zeigen die Kurven 26 Strickler bis 30 Strickler den erwarteten runderen Verlauf.

Die Dauerkurve des Jahres 2000 liegt leicht und diejenige des Jahres 2001 deutlich tiefer als die übrigen betrachteten Jahre (*vgl. Kapitel 3.2.6*) Während diesen Jahren gilt zuerst Kurve 29 BAFU (*Abbildung 179*, hellblau) und dann 30 BAFU (gelb). Diese beiden Kurven und die Eichmessungen aus dieser Zeit liegen sehr nahe bei den vorausgehenden Kurven 28 BAFU (hellgrün) und 27 BAFU (dunkelblau). Es wird deshalb vermutet, dass nicht eine Abweichung in der P-Q-Beziehung, sondern eine Abweichung in der Pegelmessung zu diesen Änderungen führte.

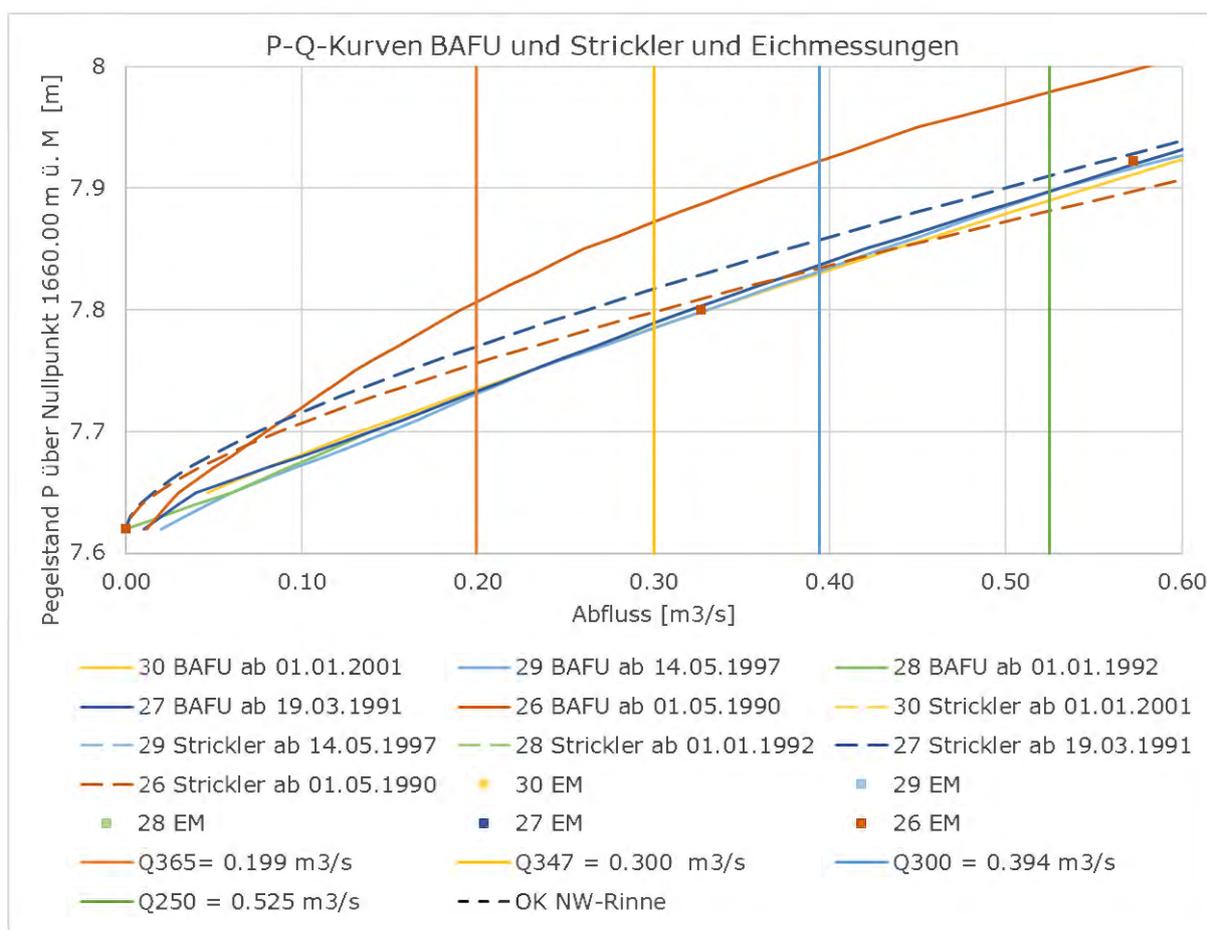


Abbildung 179: PQ-Kurven BAFU und Strickler Nummern 26 bis 30 mit den dazu verwendeten Eichmessungen

Kurve 31 BAFU (gültig ab 01.02.2002) (Abbildung 180, grau) ist im NW-Bereich theoretisch mit 4 Eichmessungen abgestützt. Eine davon stammt aus der Periode der Kurve 30, zwei Eichmessungen zeigen deutlich höhere Abflüsse als die anderen und eine wurde aus diesem Grund wohl auf «virtuell» geschaltet. Der Verlauf von Kurve 31 bei 8.05 m weicht deutlich von der Vorgängerkurve 30 BAFU (gelb) ab, er ist wohl eine Folge der Extrapolation von Abflüssen über der Niedrigwasserrinne. Die Kurve 32 BAFU (orange) ist mit 3 EM im NW- Bereich gut abgestützt. Obwohl eine andere EM referenziert wird, ist Kurve 33 BAFU eine Kopie von Kurve 32 BAFU und liegt unter dieser. Die Kurve 34 liegt in den beiden Eichmessungen mit kleinen Abweichungen zur Mittellinie wieder sehr nahe der früheren Kurve 30 BAFU. Allerdings ist ihr praktisch gerader Verlauf zum Nullpunkt unplausibel und sie galt nur drei Wintermonate lang, war also kaum von Veränderungen des Flussbettes betroffen. Im Mittel- und Hochwasser ist die Kurve identisch mit ihren Vorgängerkurven 32 und 33. Die mit Strickler berechneten und in die referenzierte EM interpolierten Kurven umfassen die verwendeten Eichmessungen exakter als die BAFU-Kurven und weisen eine plausiblere Form auf.

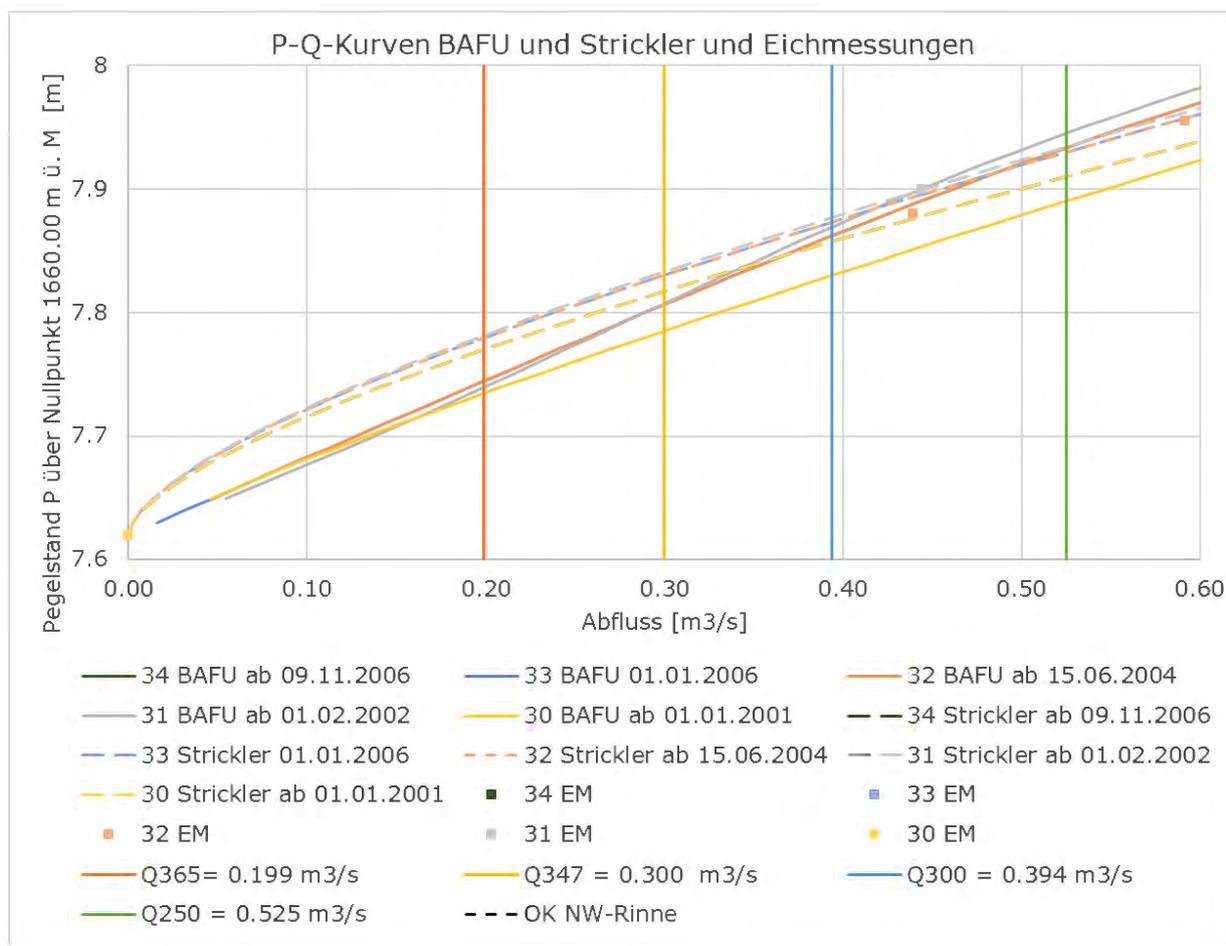


Abbildung 180: PQ-Kurven BAFU und Strickler Nummern 30 bis 34 mit den dazu verwendeten Eichmessungen

Die Kurve 35 BAFU (Abbildung 181, blau) liegt wieder näher bei den Kurven vor der «Ausreisser»-Kurve 34 BAFU. Die für Kurve 35 BAFU verwendeten NW-EM weisen kleine Abweichungen zur Mittellinie auf. Im Übergangsbereich liegt die Kurve wegen einer EM bei 2.3 m³/s bei 0.2 m³/s tieferen Abflüssen als ihre Vorgängerkurven, darüber gleicht sie sich diesen an. Die Kurve 35 Strickler liegt nahe der Kurve 35 BAFU und past gut in die referenzierten NW-EM. Die Kurve 36 BAFU (hellbraun) ist innerhalb des NW-Bereiches identisch mit der Kurve 35, obwohl drei neuere gut passende NW-EM referenziert werden. Die Kurve 36 Strickler liegt besser in den Eichpunkten als Kurve 36 BAFU und ist dieser aber sehr nahe. Die Kurve 37 BAFU (grau) weist eine ähnliche Form wie die Kurven 35 und 36 auf, allerdings unterscheidet sie sich von dieser etwas im Verlauf. Sie ist durch sieben NW-EM sehr gut abgestützt. Abgestützt auf drei dieser EM wurde auch Kurve 36 referenziert. Die zwei Messungen mit den tiefsten Pegelständen (18.03.2010 und 09.03.2012) weisen relativ grosse Abweichungen von der Mittellinie ab (+ 0.08 m³/s). Die Kurve 37 Strickler liegt schön in den Eichpunkten und sehr nahe bei der Kurve 37 BAFU. Die Kurve 38 BAFU (dunkelbraun) ist nur mit einer NW-EM von der Vorgängerkurve abgestützt, welche eine relativ grosse

Abweichung von der Mittellinie aufweist. Im Mittel- und Hochwasserbereich gleicht sie sich den vorherigen Kurven an. Die Kurve 38 Strickler liegt sehr nahe bei der Kurve 38 BAFU, allerdings ist der dafür erforderliche Strickler-Beiwert mit $k_{st} = 63$ auffallend hoch. Wir empfehlen deshalb und auch wegen der Lage der nächsten Kurve 39, die Kurve 38 nicht zu verwenden.

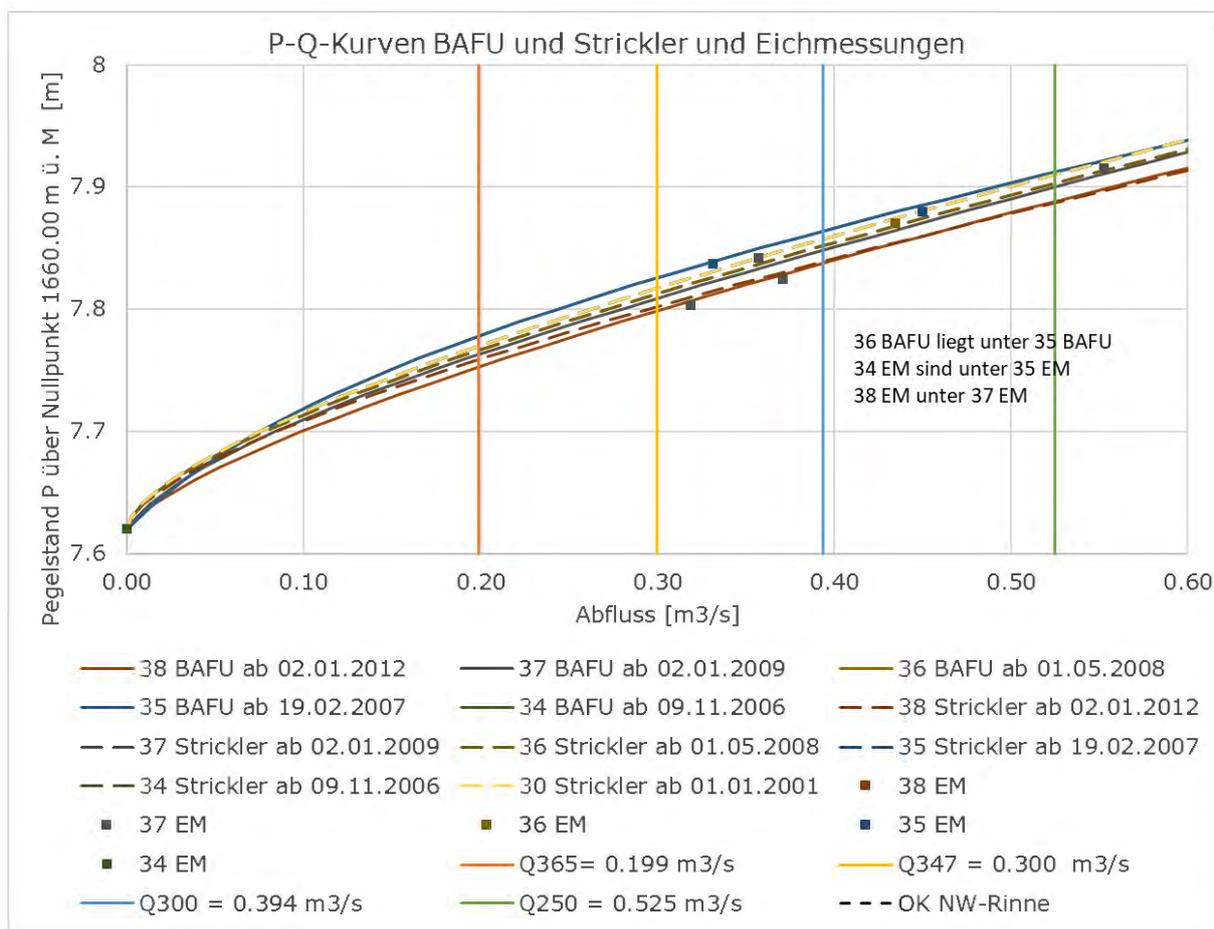


Abbildung 181: PQ-Kurven BAFU und Strickler Nummern 34 bis 38 mit den dazu verwendeten Eichmessungen

Die Kurve 39 BAFU (Abbildung 182, dunkelblau) liegt mit zwei fast identischen, plausiblen Eichmessungen im NW-Bereich praktisch auf der Kurve 37 BAFU (hier nicht dargestellt). Dieser Umstand stützt die Empfehlung, die dazwischen liegende Kurve 38 BAFU nicht zu verwenden. Die Kurve 39 Strickler liegt sehr nahe bei der Kurve 38 Strickler.

Die Kurve 40 BAFU (hellgrün) liegt im Bereich über 7.8 m bei deutlich tieferen Abflüssen als die Vorgängerkurve. Diese Veränderung ist auch mit Eichmessungen im Niedrigwasser abgestützt, welche teilweise bei etwas tiefen Abflüssen liegen. Die Kurve 40 Strickler liegt im NW-Bereich sehr gut in den EM und auch näher bei den Vor- und Folgekurven. Die Kurve 41 (hellblau) ist mit 14 NW-EM abgestützt. Diese 2015 bis Anfangs 2018 aufgenommenen EM liegen grösstenteils

nahe an der Mittellinie und liefern in den Pegelbereichen zwischen 1667.80 bis 1668.05 m ü. M eine stabile Basis. Die Kurve 41 Strickler liegt im NW-Bereich sehr gut in den zahlreichen EM und sehr nahe bei der Kurve 41.

Die Kurve 42 BAFU (gelb) liegt in der oberen Hälfte dieser Rinne bei ähnlich tiefen Abflüssen wie die Kurve 40 BAFU. Dieser Verlauf ist hauptsächlich drei Eichmessungen abgestützt, deren Pegelhöhen über der Niedrigwasserrinne liegen.

Wie Kurve 42 BAFU ist auch die Kurve 42 Strickler im NW-Bereich gut in die zahlreichen EM wie die Kurve 42 BAFU eingepasst. Vorgängerkurve

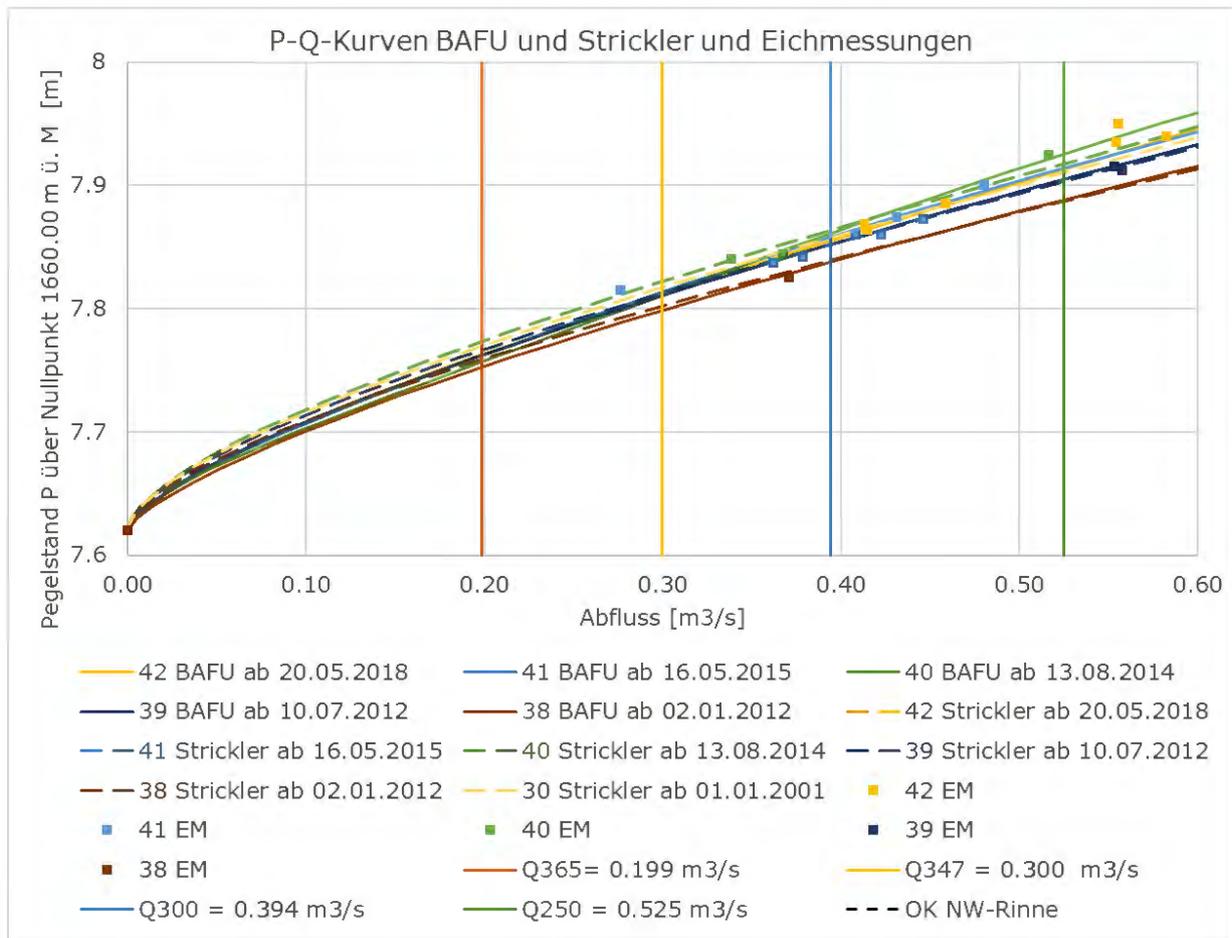


Abbildung 182: PQ-Kurven BAFU und Strickler Nummern 39 bis 42 mit den dazu verwendeten Eichmessungen

Die Kurve 43 (Abbildung 183, grau) liegt im NW-Bereich bei höheren Abflüssen als die Vorgängerkurve. Sie ist mit 5 NW-Eichmessungen, die eine kleine Abweichungen von der Mittellinie aufweisen, gut abgestützt. Die Kurve 43 Strickler liegt sehr gut in den zahlreichen Eichmessungen, bei sehr tiefen Pegelständen ergeben sich leicht tiefere Abflüsse als bei Kurve 43 BAFU. Die Kurve 44 BAFU wurde nach dem Umbau des Überfalles ins Einlaufbecken definiert. Sie basiert auf einer

Eichmessung, die eine relativ grosse Abweichung von der Mittellinie aufweist. Sie ist deshalb im NW-Bereich relativ schwach abgestützt. Damit die Kurve 44 Strickler diesen Eichpunkt trifft, musste ein unplausibel hoher $k_{st}=65$ eingesetzt werden. Wir empfehlen deshalb und auch wegen der Lage der nächsten Kurve 45, die Kurve 44 nicht zu verwenden. Die Kurve 45 BAFU liegt oberhalb und in der oberen Hälfte der NW-Rinne sehr nahe der Kurve 43 BAFU und darunter sehr nahe der Kurve 42 BAFU. Sie ist mit vier Eichmessungen im NW-Bereich, welche nahe der Mittellinie liegen, gut abgestützt. Die Kurve 45 Strickler liegt gleich wie die Kurve 42 Strickler und repräsentiert die Eichmessungen dieser beiden Kurven sehr gut.

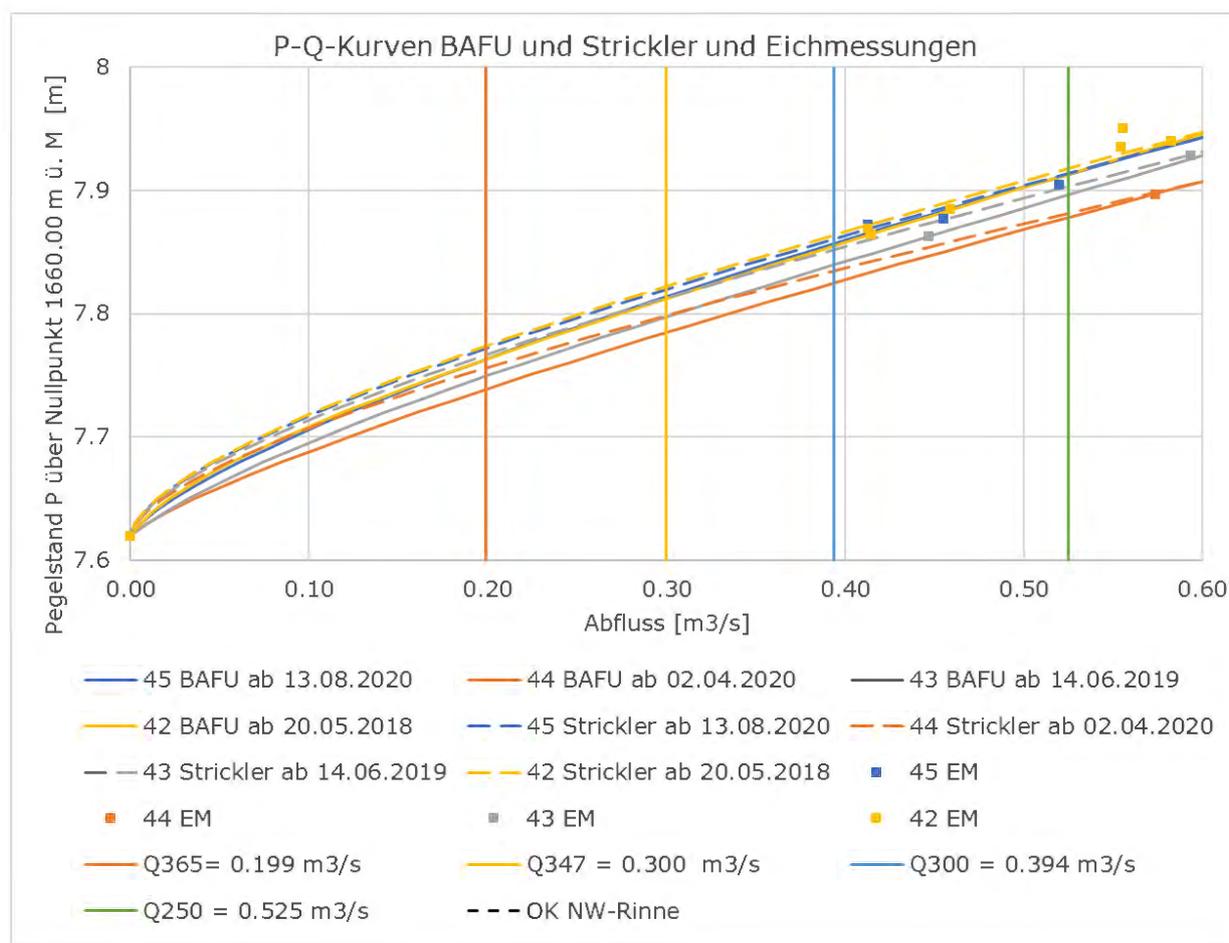


Abbildung 183: PQ-Kurven BAFU und Strickler Nummern 42 bis 45 mit den dazu verwendeten Eichmessungen

10.3 Chamuerabach

10.3.1 Eichessungen

10.3.2 P-Q-Kurven, Entwicklung über die Zeit

Alternativ zu den verwendeten P-Q-Kurven BAFU (ausgezogene Linien) wurden P-Q-Kurven mit der Abflussformel nach Strickler (gestrichelte Linien) berechnet. Gruppiert über die Zeit ergeben sich folgende Bilder.

Die erste Kurve 18 (Abbildung 184, dunkelgrün) im Untersuchungszeitraum liegt nahe an den Eichmessungen und weist gemeinsam mit den Kurven 20 bis 21 eine plausible Form auf. Dagegen ist die Kurve 19 (dunkelblau) schlecht abgestützt und führt in einer unplausiblen Geraden zum Nullpunkt.

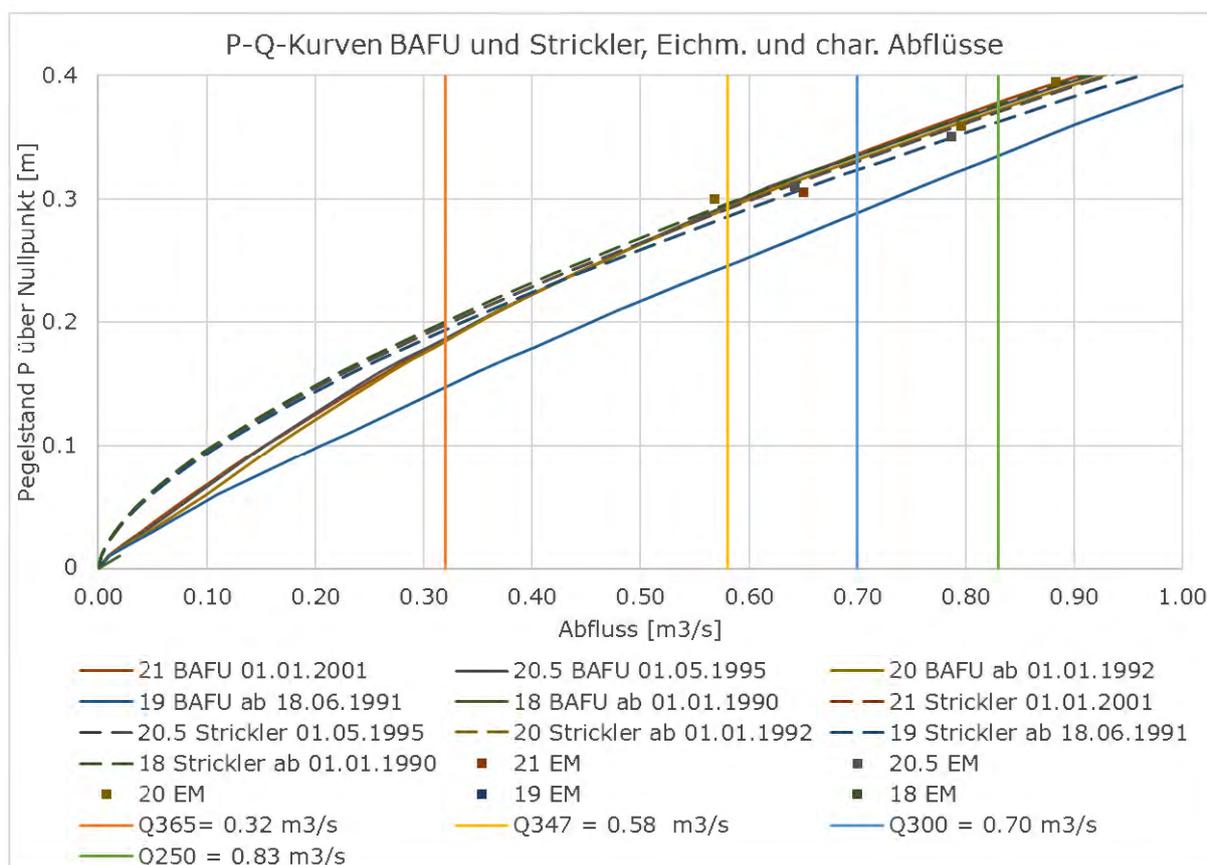


Abbildung 184: P-Q-Kurven 18 bis 21 und die dafür verwendeten Eichmessungen im Niedrigwasser

Die Kurven 21, 22 und 23 (Abbildung 185, braun, dunkelblau und hellgrün) liegen sehr nahe beieinander. Dagegen generieren die Kurven 24 und 25 Abflüsse, welche bei gleichem Pegelstand ca 0.06 m³/s höher liegen. Von den Eichmessungen der Kurve 25 (gelb) stammt lediglich die tiefste Messung aus dem Zeitraum ihrer Gültigkeit, die übrigen EM wurden schon für die Vorgängerkurve verwendet.

Die beiden Kurven 24 und 25 sind mit vier Eichmessungen (rotes Oval) von 2017 (hellblau) und 2018 (gelb) abgestützt, sie könnten darunter aber auch in einem Bogen zu tieferen Abflüssen verlaufen, wie dies die Strickler-Kurven tun. Diese vier Eichmessungen (rotes Oval) liegen bei deutlich höheren Abflüssen als die übrigen NW-Eichmessungen (Abbildung 43, rotes Oval).

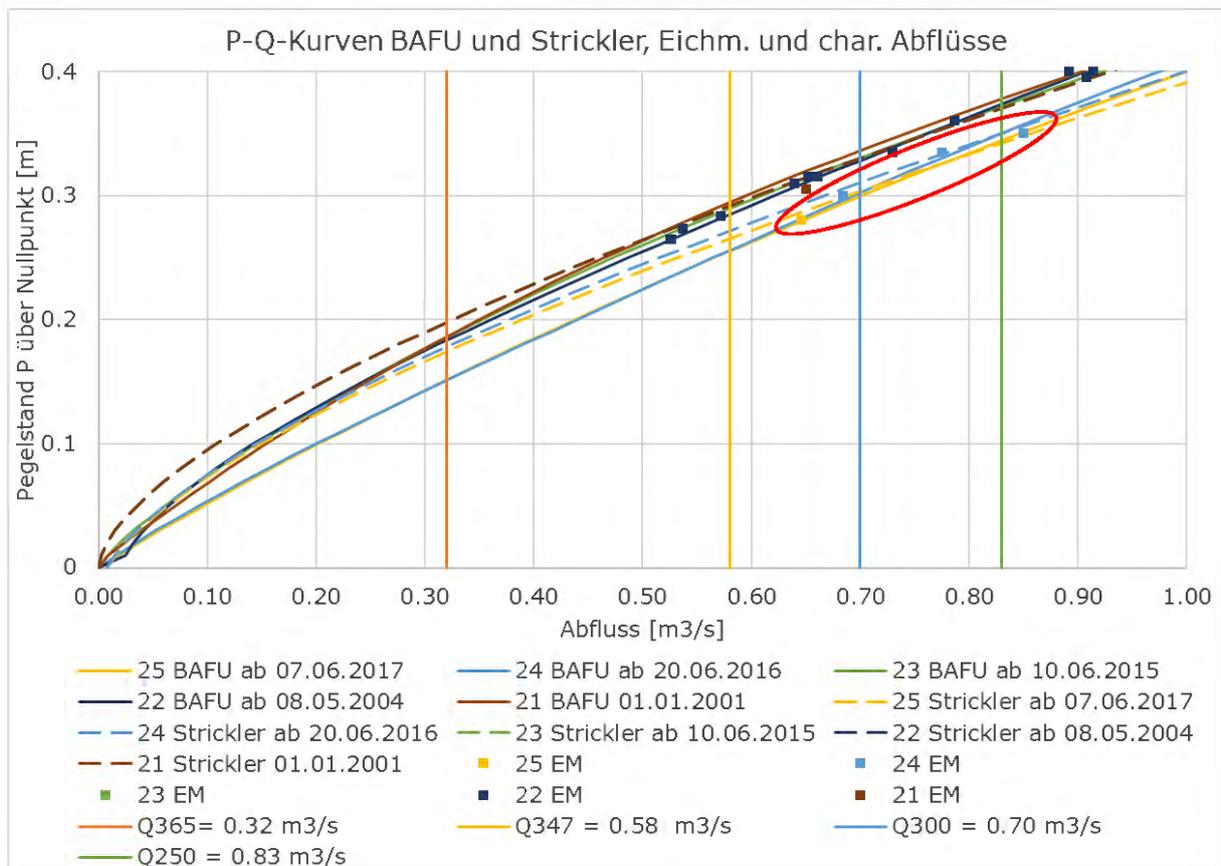


Abbildung 185: P-Q-Kurven 21 bis 25 und die dafür verwendeten Eichmessungen im Niedrigwasser

Nach der oben besprochenen auffälligen Kurve 25 (*Abbildung 186, gelb*) liegen die Kurven 26 (grau), 27 (orange) und 28 (blau) gut in ihren Eichmessungen und nahe beieinander. Zudem liegen sie wieder nahe bei den Kurven 20 bis 23, was den Eindruck verstärkt, dass es sich bei den Kurven 24 und 25 um Ausreisser handelt.

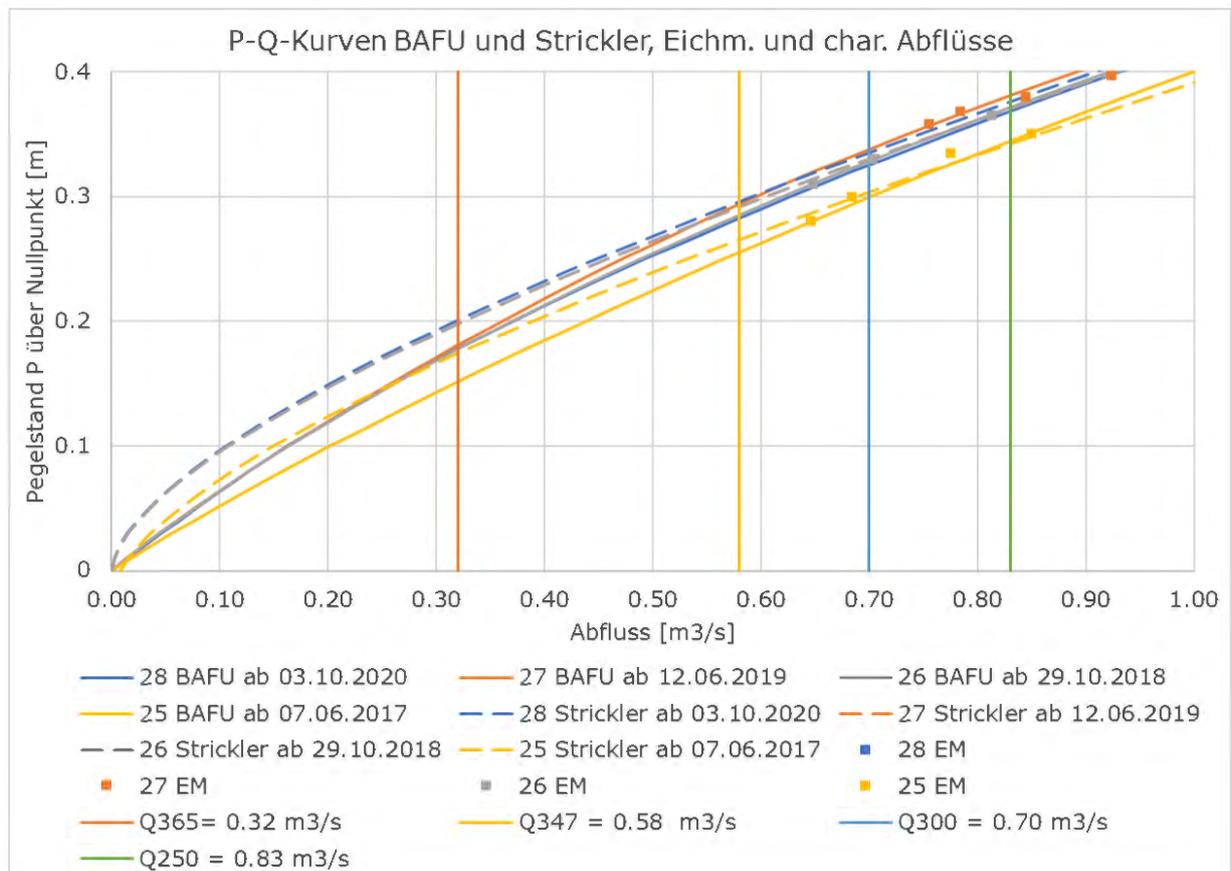


Abbildung 186: P-Q-Kurven 25 bis 28 und die dafür verwendeten Eichmessungen im Niedrigwasser

An der Messstelle Chamuerabach bestimmt bei Niedrigwasser vor allem die Überfallkante am Ende der kurzen Messrinne den Abfluss. Diese Hydraulik kann mit der Abflussberechnung nach Poleni abgebildet werden (*Abbildung 187*). Die P-Q-Beziehungen nach Poleni (blau) und Stricker (gelb) weisen allerdings bei entsprechenden Parametern praktisch dieselbe Form auf.

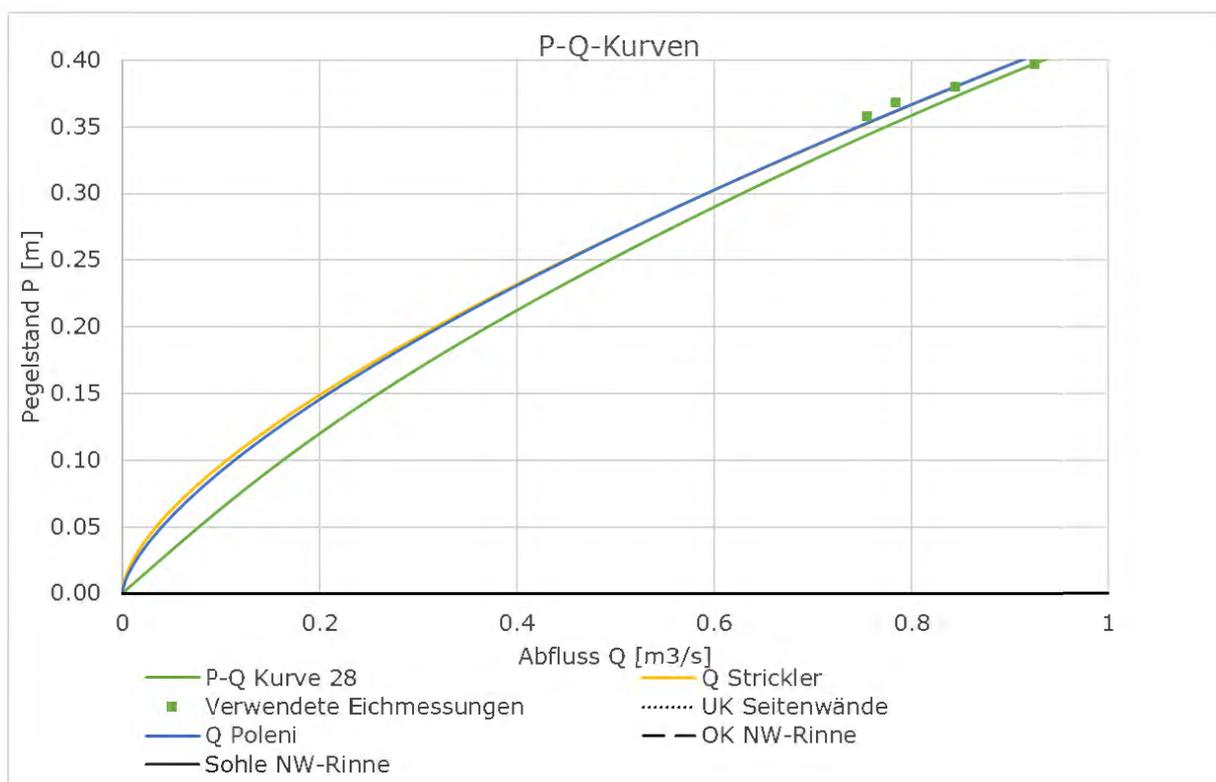


Abbildung 187: Chamuerabach, Abbildung der Hydraulik mit Polynom BAFU, Strickler und zusätzlich Poleni

10.4 Goneri

10.4.1 Eichessungen

10.4.2 P-Q-Kurven, Entwicklung über die Zeit

In den Jahren 1990 bis 1997 wurden die P-Q-Kurven Nr. 01 bis 14 (*Abbildung 188*) verwendet. Die Kurven 01 bis 10 bilden zusammen die Gruppe mit den höchsten Abflüssen (unterer Randbereich der Kurven). Ab der Kurve 11, ab dem 22.03.1995, verschieben sich die Kurven über dem Q_{365} (orange vertikale Linie) zu tieferen Abflüssen. Diese Lage bleibt erhalten bis und mit der

Kurve 15 (Abbildung 189).

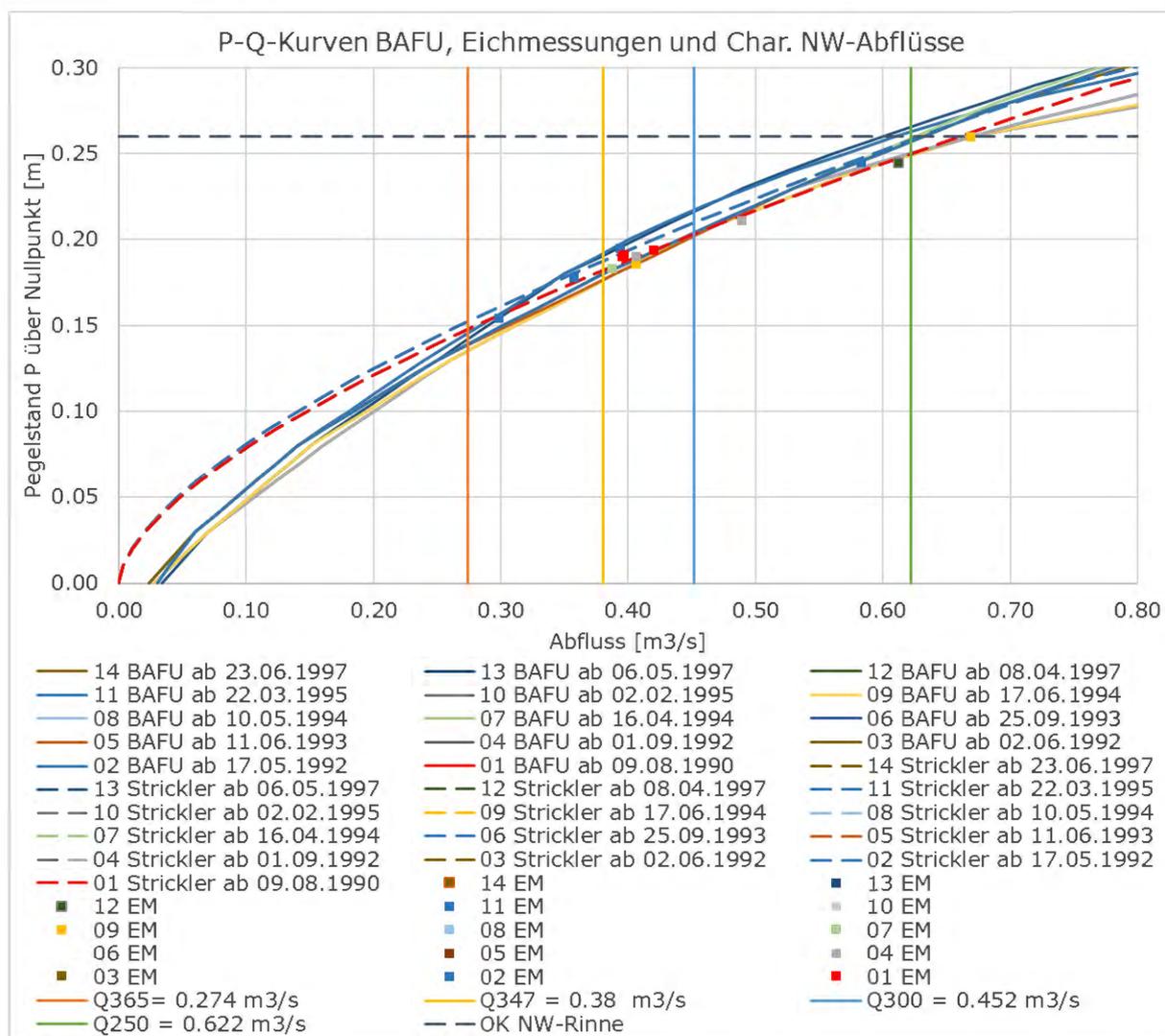


Abbildung 188: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven BAFU und Strickler 01 bis 14

Die Kurven 16 bis 18 (*Abbildung 189, braun, dunkelblau und hellgrün*) weichen deutlich von ihren Vorgängerinnen ab, indem sie bei Abflüssen unterhalb dem Q300 (blaue vertikale Linie) in einer unplausiblen Geraden dem Nullpunkt zustreben. Massgebend dafür ist auch die Eichmessung (dunkelblau) vom 25.02.1998.

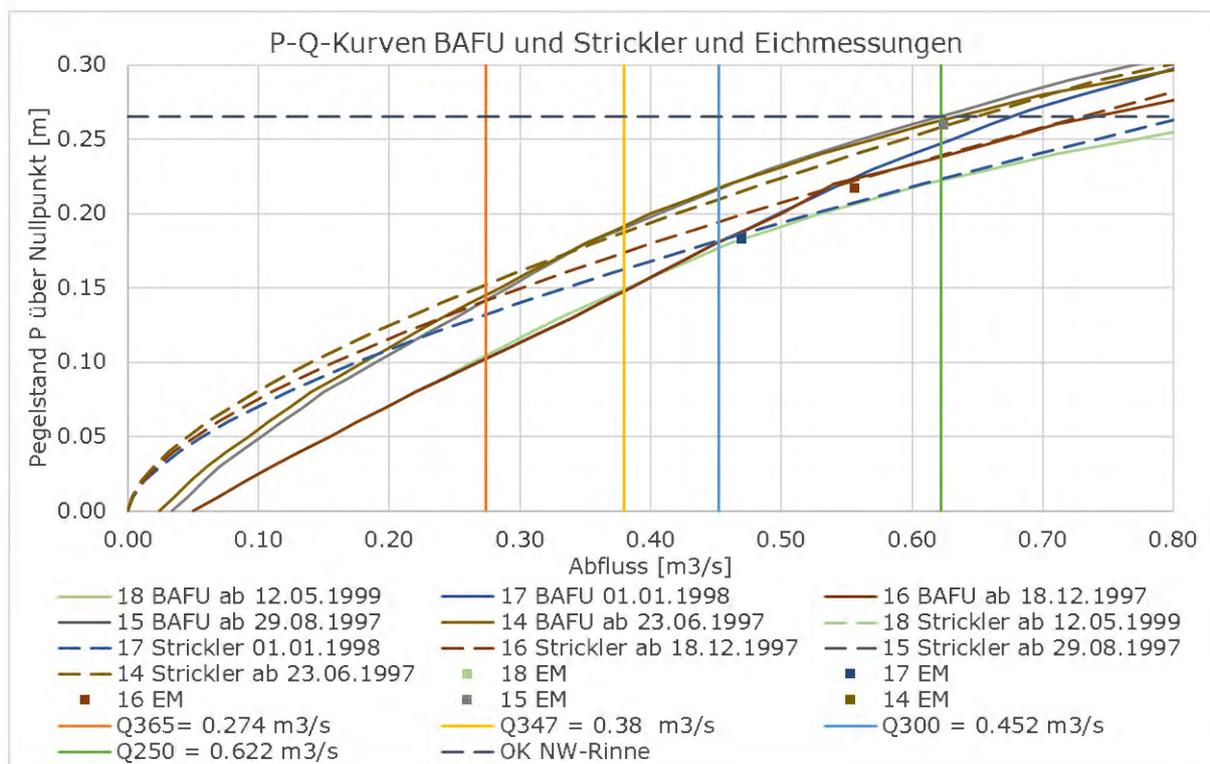


Abbildung 189 Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 14 bis 18

Die Kurve 19 (*Abbildung 190, hellblau*) folgt der unplausiblen geraden der Kurve 18 (hellgrün). Im Jahr 1999 wurde die Station auf Radarmessung umgestellt. Die ab dann gültigen Kurven 20 bis 22 liegen mit ihren Eichmessungen höher im Diagramm, generieren also bei gleichen Pegelständen tiefere Abflüsse als ihre Vorgängerinnen.

Die Kurve 23 (*Abbildung 191, grün*) weist einen auffälligen Bogen zu tiefen Abflüssen auf. Diese Abweichung ist auf den virtuellen Punkt vom 07.04.2003 zurückzuführen. Die anschließenden Kurven 24 bis 26 liegen mit ihren Eichmessungen wiederum nahe bei ihren Vorgängerinnen 20 bis 22.

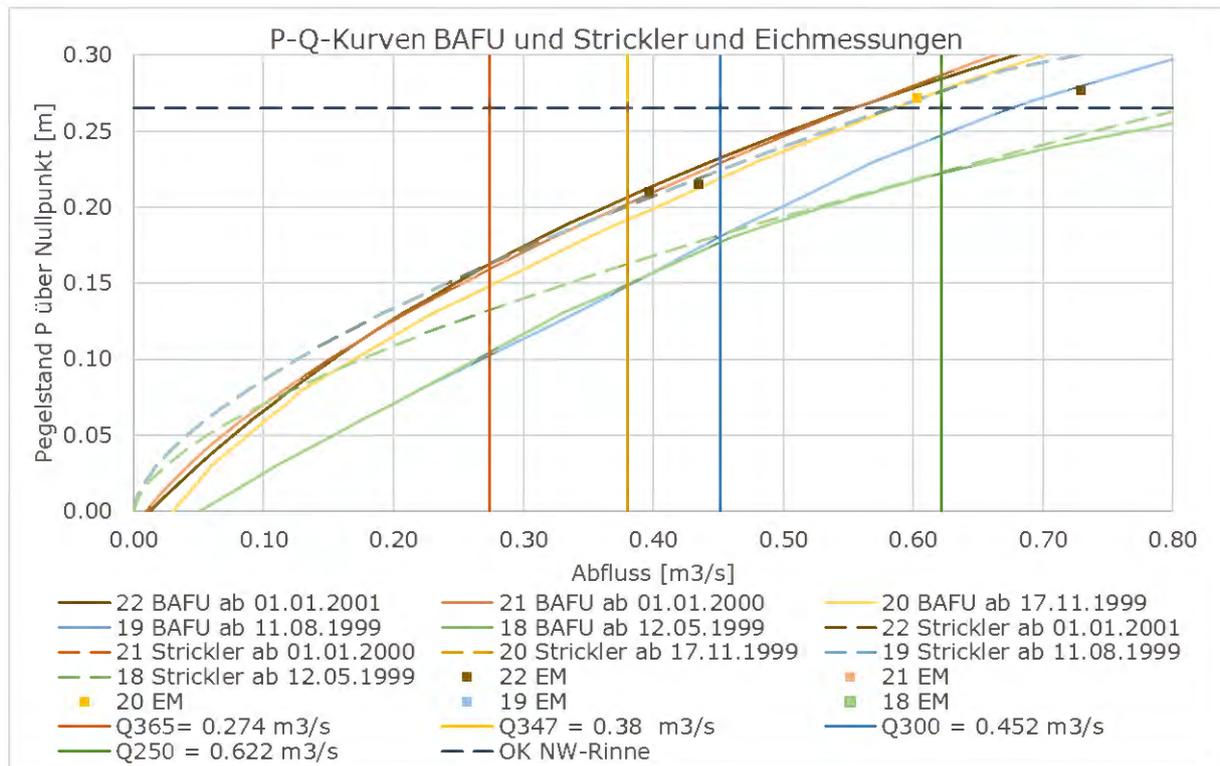


Abbildung 190: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 18 bis 22

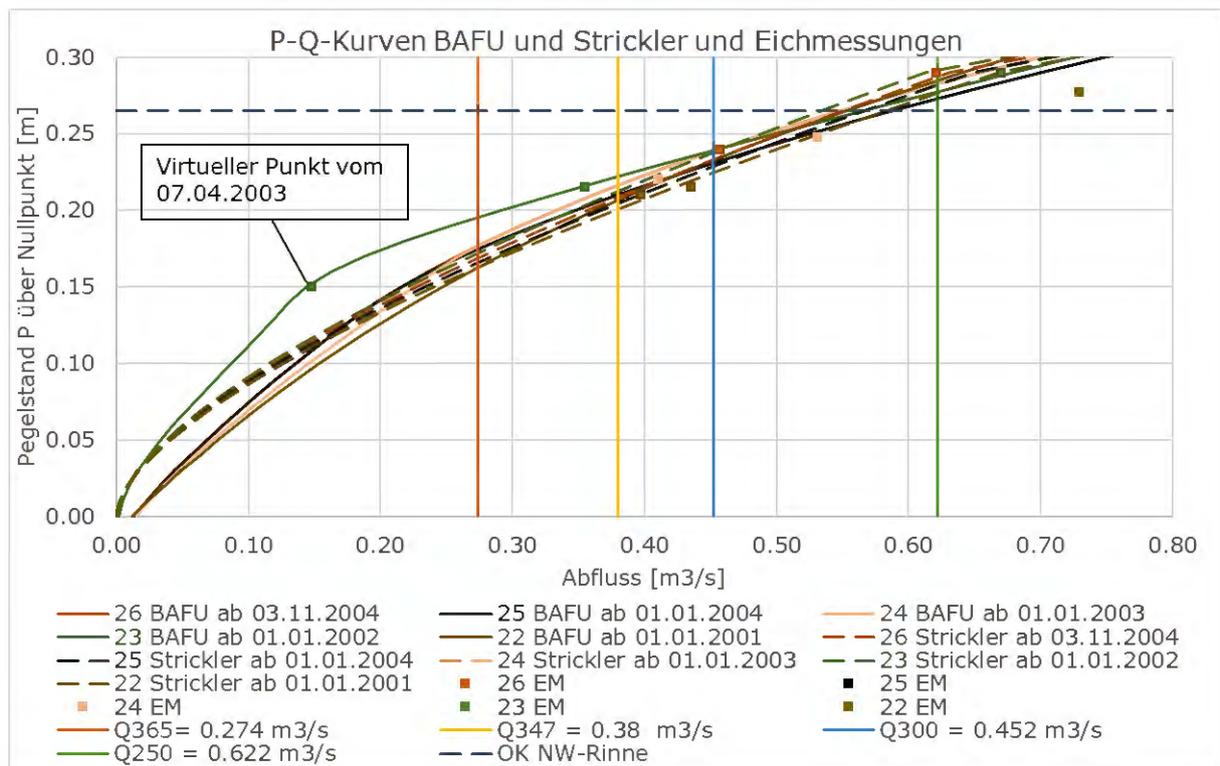


Abbildung 191: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 22 bis 26

Kurve 27 (Abbildung 192, dunkelblau) schwingt sich deutlich über ihren Eichmessungen und über den übrigen Kurven im Bereich tieferer Abflüsse. Weil die Eichmessungen und die Kurven vorher und nachher nahe zusammenliegen, ist es unwahrscheinlich, dass die auffällige Kurve 27 mit ihren auffälligen Eichmessungen realistisch sind.

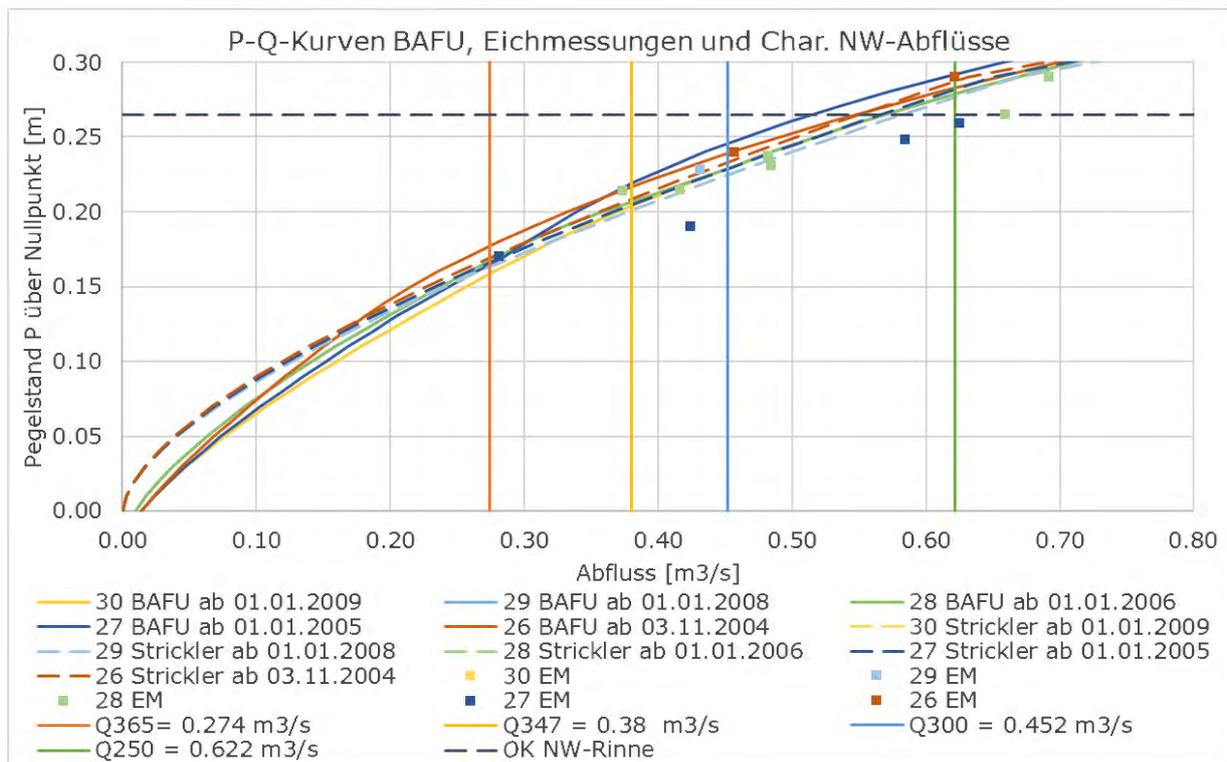


Abbildung 192: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 26 bis 30

Die Kurve 30 (Abbildung 193, gelb) verläuft zwischen zwei sehr unterschiedlichen Eichmessungen unterhalb des Q300, welche vorher schon für Kurve 27 und 29 (Abbildung 192, dunkelblau und hellblau) verwendet wurden. Die Kurven 31 und 32 (grau und orange) schwingen sich über ihre Vor- und Nachgängerinnen, obwohl es hier im Niedrigwasser keine Eichmessungen gibt, die diesen Verlauf bestimmen. Die übrigen Kurven liegen nahe beieinander.

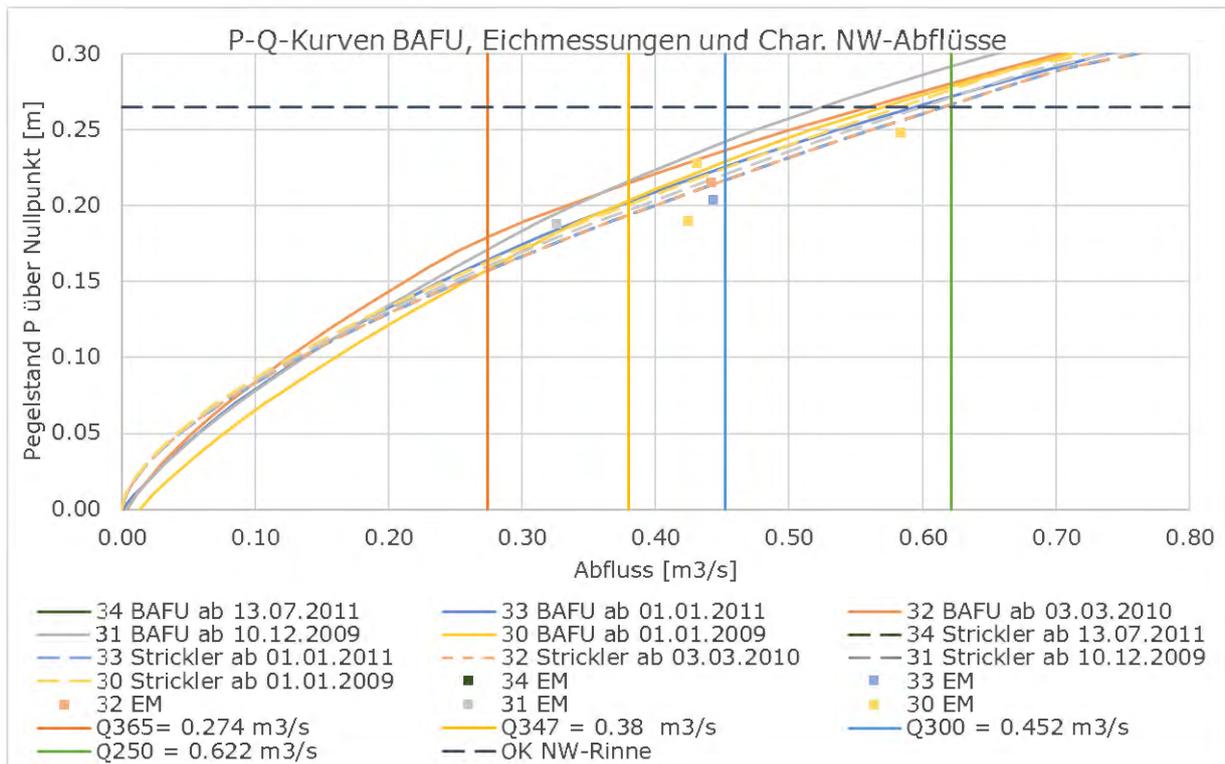


Abbildung 193: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 30 bis 34

Die Kurven 35 bis 38 (Abbildung 194) sind im Niedrigwasserbereich identisch, obwohl ihre Eichmessungen über und unter dieser gemeinsamen Lage liegen. Diese Kurven liegen so, dass sie ab 2.10.2011 die Niedrigwasserabflüsse gegenüber ihren Vorgängerinnen beim Q347 um etwa 0.084 m³/s oder 22% reduzieren.

Die Kurven 39 bis 41 (Abbildung 195) liegen bei wiederum etwas höheren Abflüssen als die vorhergehenden Kurven. Die Kurve 42 liegt auf Grund einer Eichmessung mit auffällig hohem Abfluss bei nochmals deutlich höheren Abflüssen.

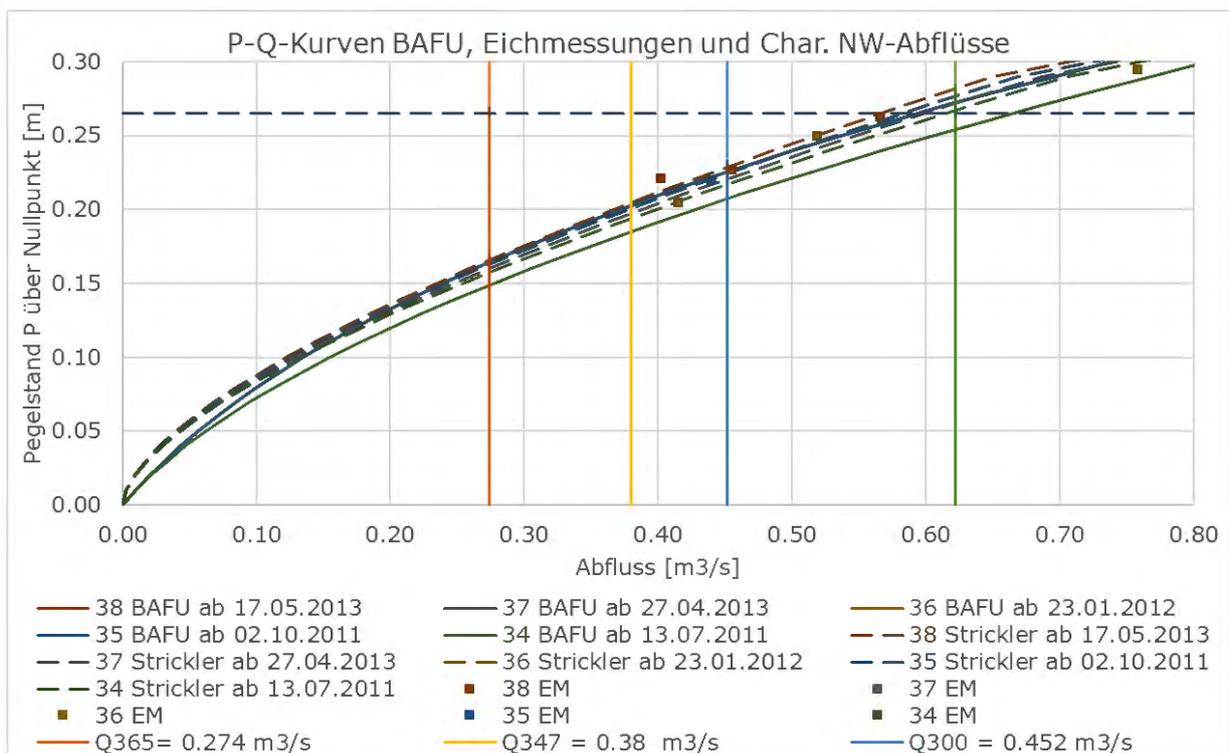


Abbildung 194: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 34 bis 38

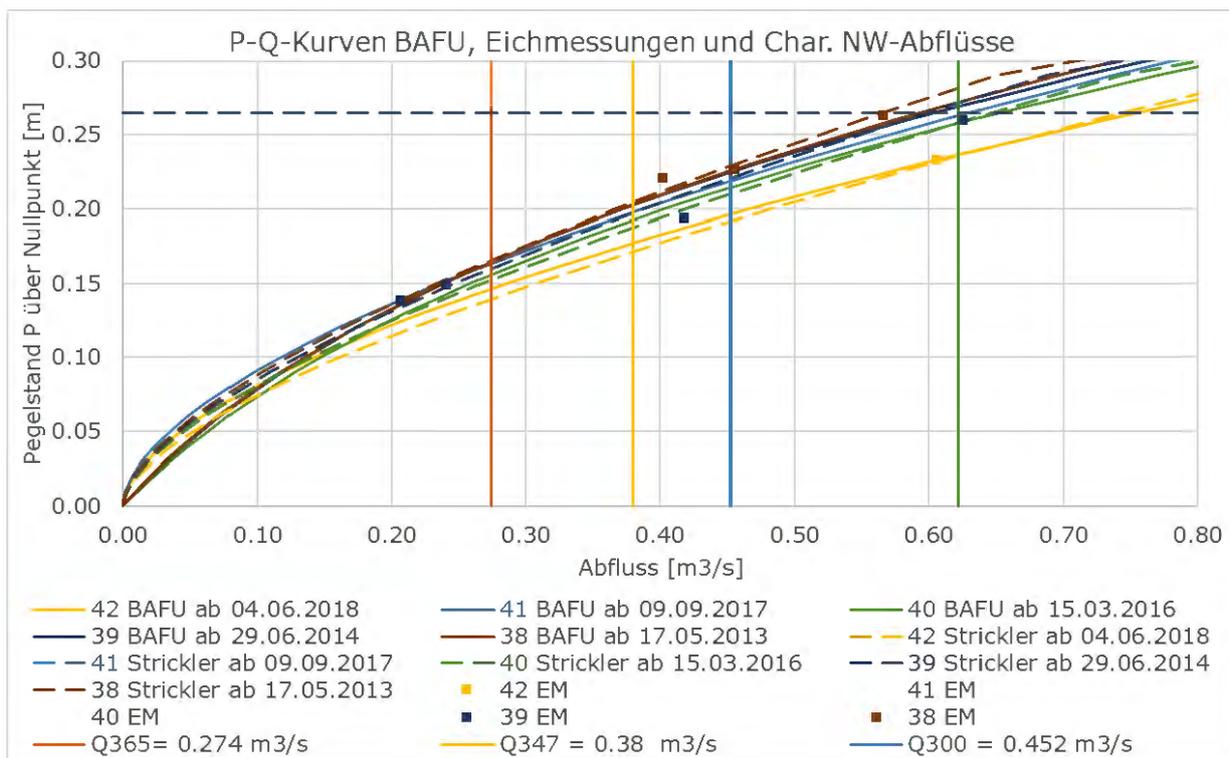


Abbildung 195: Frühere Station Goneri, P-Q-Kurven 38 bis 42

Am neuen Standort gab es von Oktober 2018 bis Oktober 2021 die drei Kurven 43, 44 und 45 (Abbildung 196). Diese drei P-Q-Kurven haben denselben Nullpunkt. Sie weisen bei gleichem Abfluss einen deutlich höheren Pegelstand auf als die letzte Kurve 42. Beim Q347 beträgt diese Pegelstandserhöhung rund 4 cm. Ein Grund dafür ist das gegenüber der früheren Station von 1 auf 0 % reduzierte Gefälle. Diese Veränderung hilft der Abflussmessung im Niedrigwasser.

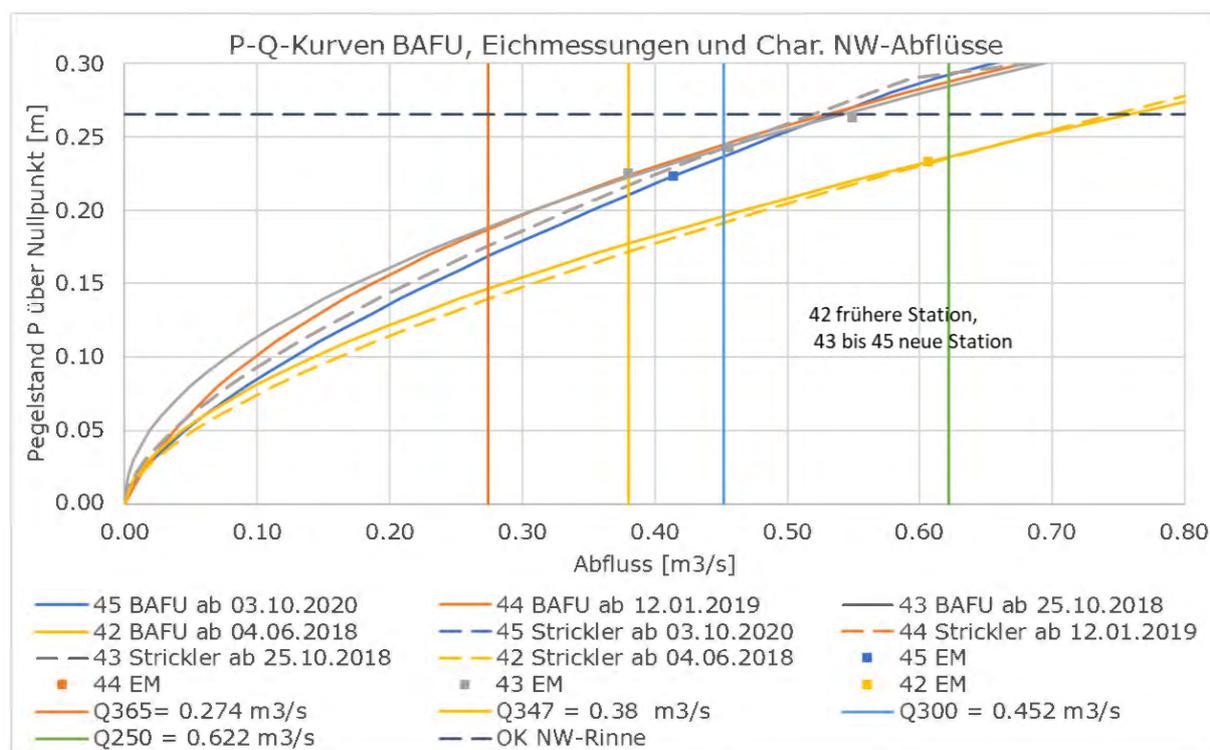


Abbildung 196: Frühere und neue Station Goneri, P-Q-Kurven 42 bis 45, zwischen den Kurve 42 (gelb) und 43 (grau) wurde der Wechsel an den neuen Standort vollzogen.

Bei der Nachrechnung mit Strickler zeigt sich, dass einige der Kurvenanpassungen im Niedrigwasser nicht zwingend waren. Es wurden dieselben Eichmessungen verwendet, welche auch bei den BAFU-P-Q-Kurven zum Einsatz kamen. So kann zum Beispiel für die P-Q-Kurven BAFU 01 bis 10 dieselbe Strickler-Kurve verwendet werden. Für den ganzen Zeitraum resultieren alternativ zu den 45 BAFU-NW-Kurven 20 NW-Strickler-Kurven.

Nullpunktverschiebungen hängen zum Teil auch mit «technischen Schönheitsfehlern» des P-Q-Tools zusammen (vgl. Kapitel 10.1). Wurden neue P-Q-Kurven eingesetzt, ohne dass eine deutliche Veränderung des Flussbettes bekannt war, so wurde dies mit langen Übergängen gemacht (Michel 2022). Seit ca. 2001 sind die P-Q-Kurven im P-Q-Tool dokumentiert.

10.5 Krummbach

10.5.1 Eichmessungen

10.5.2 P-Q-Kurven, Entwicklung über die Zeit

Die P-Q-Kurven 85 bis 93 der Jahre 1989 bis 1994 verfügen über einen gemeinsamen Nullpunkt (*Abbildung 197*). Dieser stimmt allerdings nicht mit den in den P-Q-Files angegebenen Nullpunkt überein. Dieselben Kurven wechseln sich zuerst ab, später gibt es weitere Kopien davon (92 ist Kopie von 85, 93 von 86). Kurve 94 (grau) liegt ähnlich, weist aber einen neuen, 8 cm tieferen Nullpunkt auf.

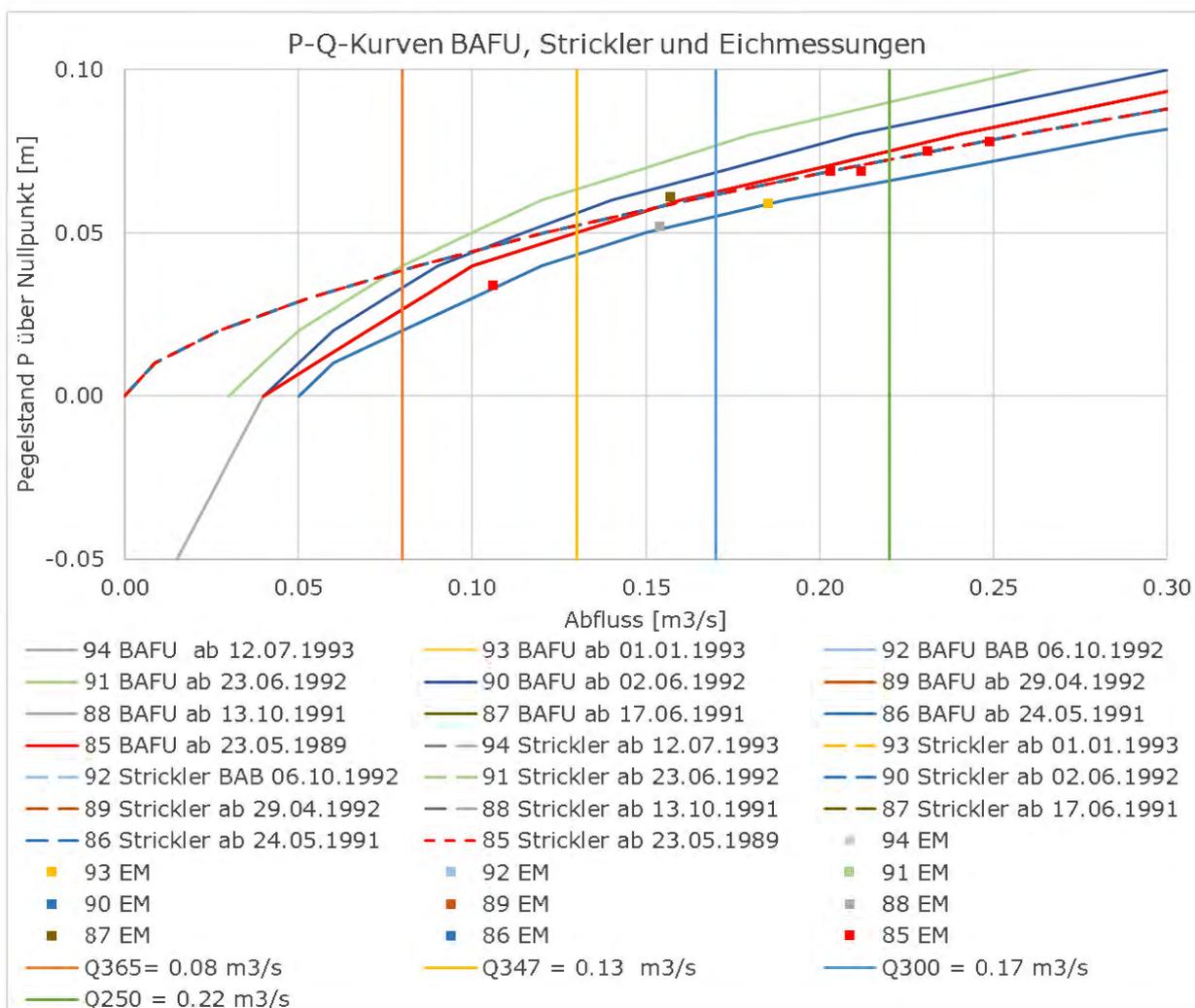


Abbildung 197: Früherer Standort Station Krummbach, P-Q- Kurven 85 bis 94

Am heutigen Standort gilt ein neuer Nullpunkt (*Abbildung 198*). Der Vergleich mit Kurve 94 (grau) vom früheren Standort zeigt, dass die Pegelvariation am neuen Standort deutlich grösser und damit besser ist. Kurve 95 (hellblau) ist die erste Kurve am neuen Standort, noch mit provisorischer Messeinrichtung. Kurve 96 liegt bei deutlich höheren Abflüssen als ihre Vor- und Nachfolgerinnen, obwohl sie über keine Eichmessungen in diesem Abflussbereich verfügt.

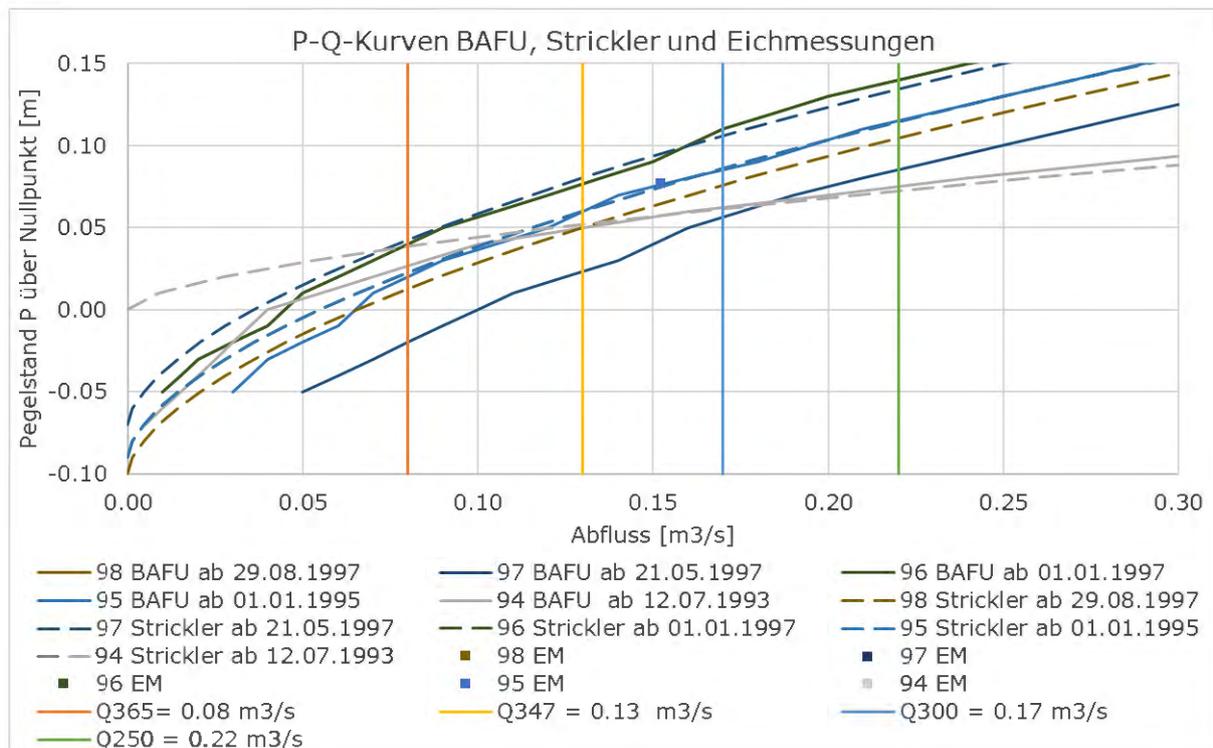


Abbildung 198: Heutiger Standort Station Krummbach, P-Q-Kurven 94 (alter Standort zum Vergleich) bis 103.

Die Kurven 99 bis 102 (*Abbildung 199*) liegen bei tieferen Abflüssen als Kurve 98. Kurven 99 und 101 sind identisch. Im Gültigkeitszeitraum dieser Kurven gibt es keine Niedrigwassereichmessungen.

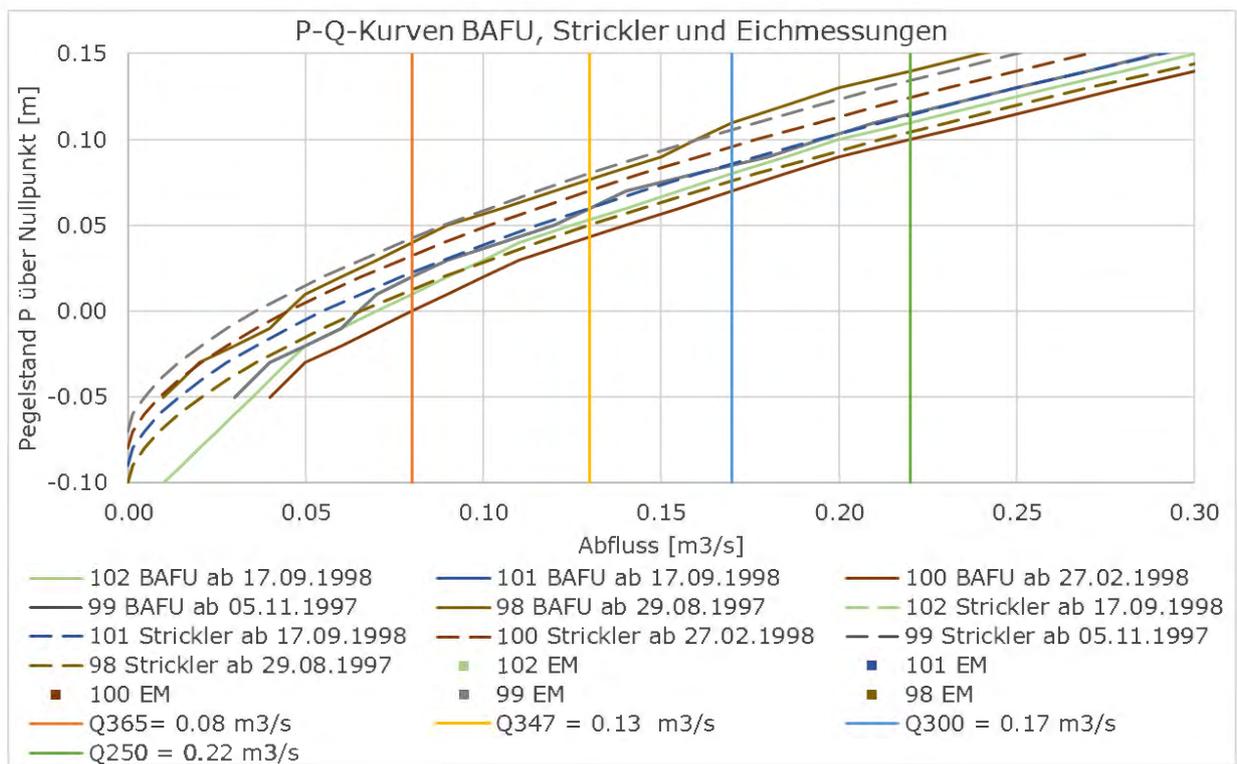


Abbildung 199: Heutiger Standort Station Krummbach, P-Q-Kurven 98 bis 102

Die Kurve 103 strebt vom oberen Band der hier sichtbaren Kurven in einem Zug von Geraden Strecken dem Nullpunkt am unteren Ende des Bandes zu (Abbildung 200, hellblau). Ab dieser Kurve stimmen die Nullpunkte im P-Q-Tool nicht mehr mit den in den Files notierten überein. Die Kurve 104 (gelb), gültig ab 1.1.2001 berücksichtigt die Eichmessungen mit auffällig hohen Abflüssen aus dem Jahr 2001. Die folgenden Kurven 105 und 106 tun das nicht mehr, sind identisch und liegen wieder bei tieferen Abflüssen.

Die Kurven 107, 108, und 110 liegen wiederum bei den Eichmessungen mit auffällig hohen Abflüssen (Abbildung 201), wogegen Kurve 109 nahe bei 106, der Vorgängerin dieser Gruppe liegt.

Die Kurven 104 bis 110 umfassen den Zeitraum 1.1.2001 bis 3.8.2005, in denen Eichmessungen mit auffällig hohen Abflüssen / tiefen Pegelständen liegen. Die Kurven 104, 107, 108 und 110 liegen entsprechend diesen Eichmessungen bei hohen Abflüssen, die übrigen Kurven 105, 106, und 109 nicht. Diese Verteilung lässt sich nicht mit einer Veränderung der Sohle erklären. Viel eher werden Abweichungen in der Pegelmessung und deren Nullpunkt als Grund für diese Sprünge vermutet.

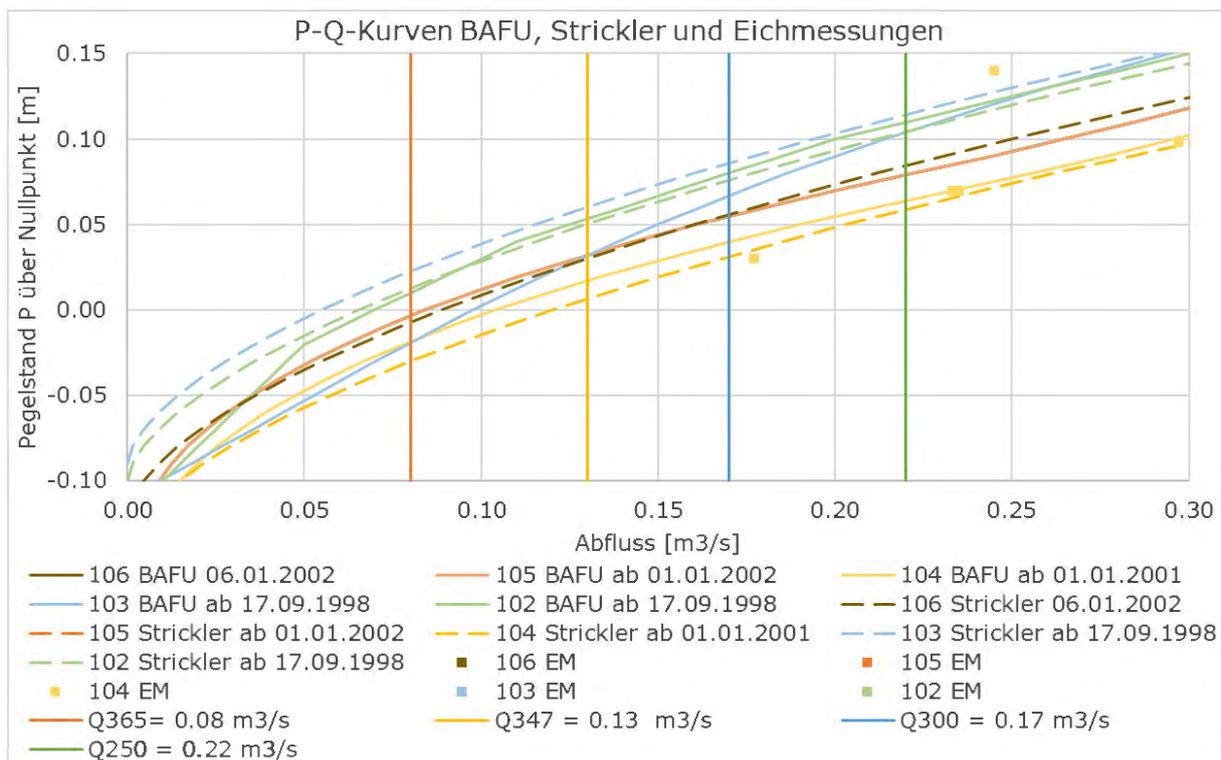


Abbildung 200: Krumbach, P-Q-Kurven 103 bis 106. Die Kurve 104 ist berücksichtigt als erste die Eichmessungen mit auffällig hohen Abflüssen zwischen 2001 und 2005

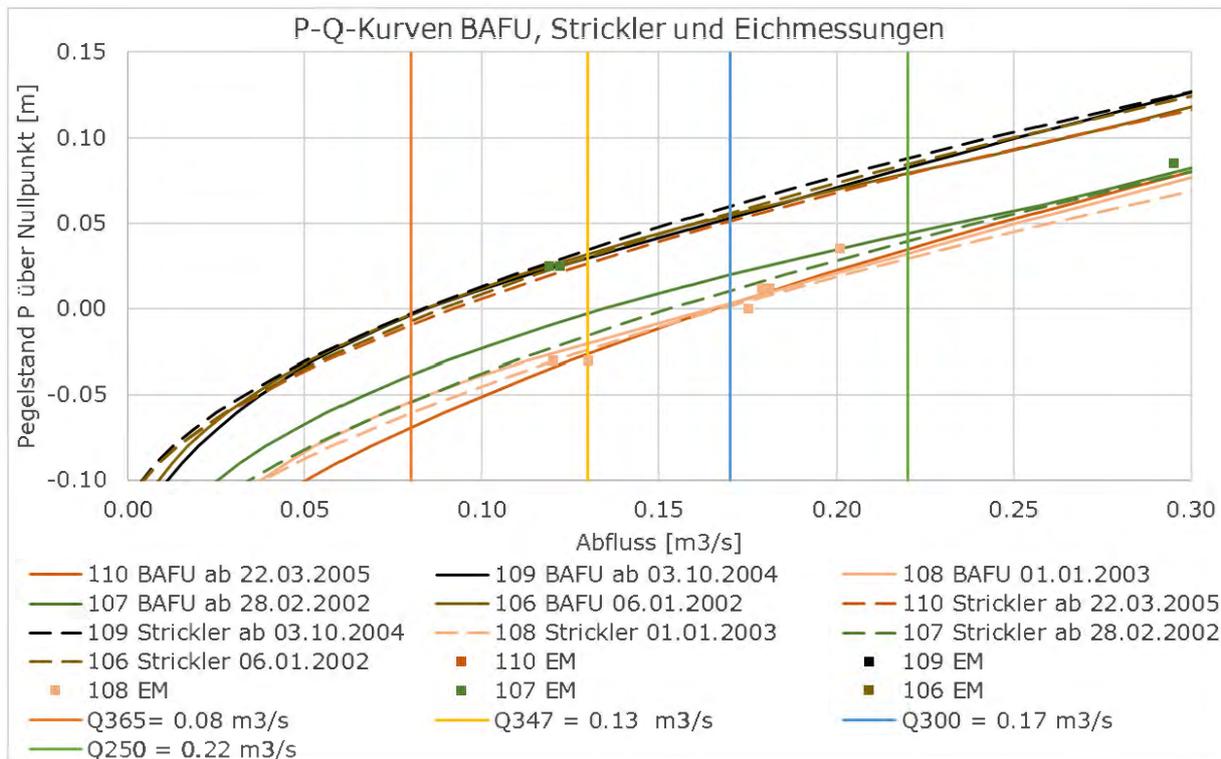


Abbildung 201: Krumbach, P-Q-Kurven 106 bis 110

Die Kurven 111 bis 114 liegen bei 0.1 m höheren Pegelständen als die Kurve 110 (*Abbildung 202*). Aus den oben erwähnten Gründen wird vermutet, dass die Kurven 111 bis 114 das Bachbett wieder deutlich besser abbilden.

Die Kurve 115 hat ihren Nullpunkt auffällig tief (*Abbildung 203*, hellgrau) ohne dass es entsprechende Eichmessungen gibt. Die darauffolgenden Kurven 116 (orange) und 117 (blau) liegen wieder auf der Höhe der Vorgängerin 114 (gelb). Worauf die Kurve 118 ca. 5 cm tiefer liegt als diese.

Die Kurven 119 bis 122 liegen wiederum höher als die Kurve 118. Wobei die Kurve 120 (*Abbildung 204*). Einzig die Kurve 120 liegt ähnlich wie die Kurve 115 und erreicht unterhalb des Q365 ähnlich hohe Abflüsse wie die Kurve 118.

Die letzten Kurven des Untersuchungszeitraumes, die Nummern 123 bis 125, liegen mit mehreren Eichmessungen nahe zusammen in der Lage der Vorgängerin 122 (*Abbildung 205*). Einzig die aktuelle Kurve 126 liegt deutlich höher, allerdings ohne Eichmessungen in diesem Bereich aufzuweisen.

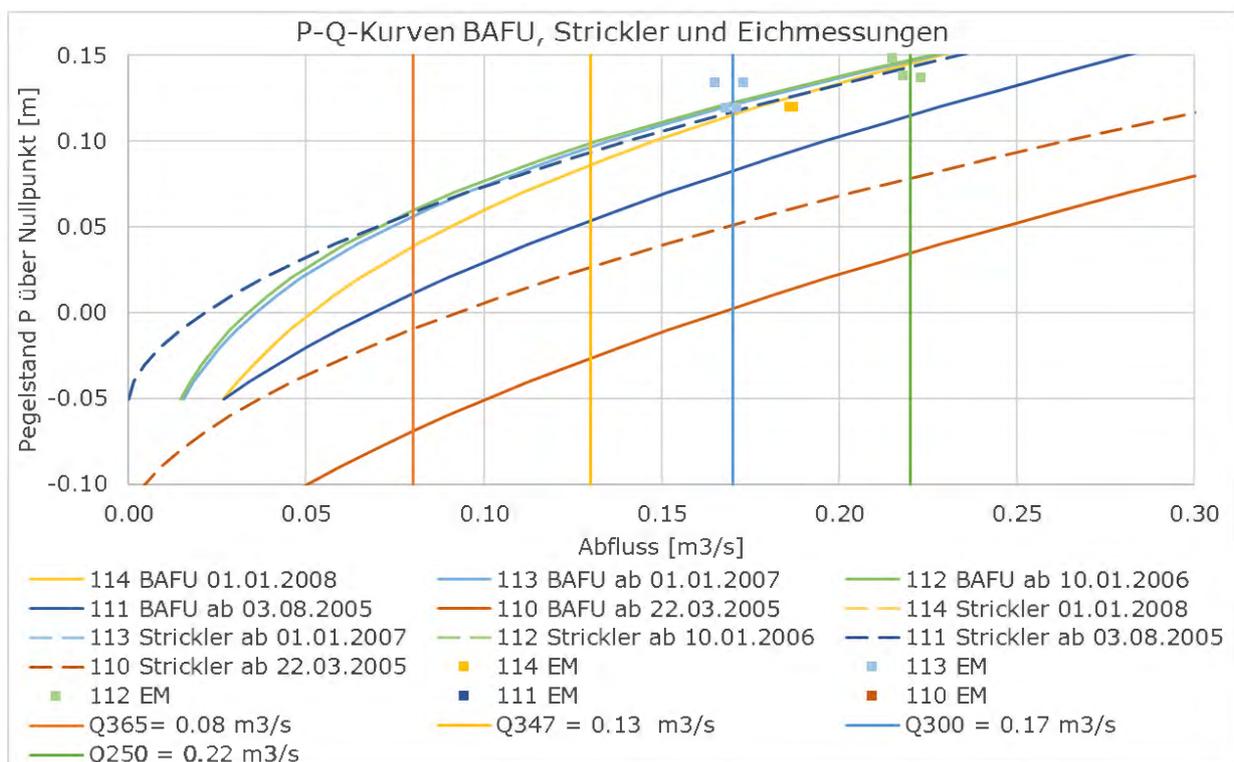


Abbildung 202: Krummbach, P-Q-Kurven 110 bis 114

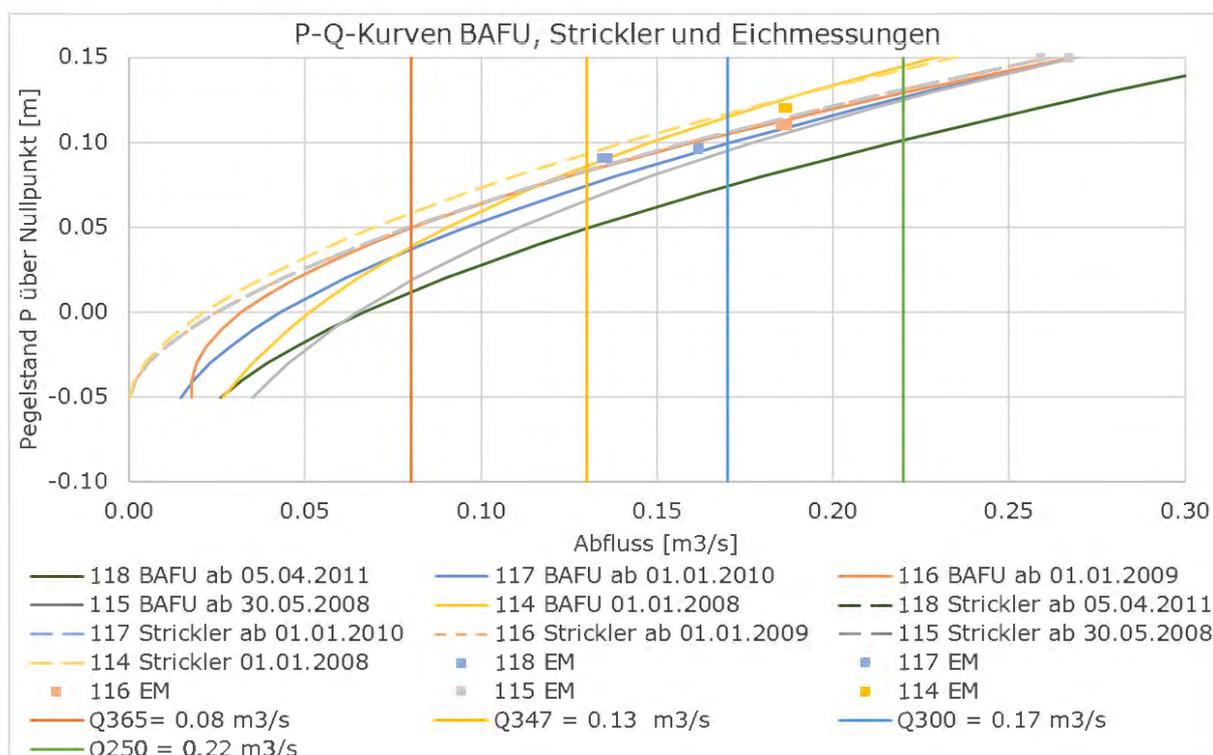


Abbildung 203: Krumbach, P-Q-Kurven 114 bis 118

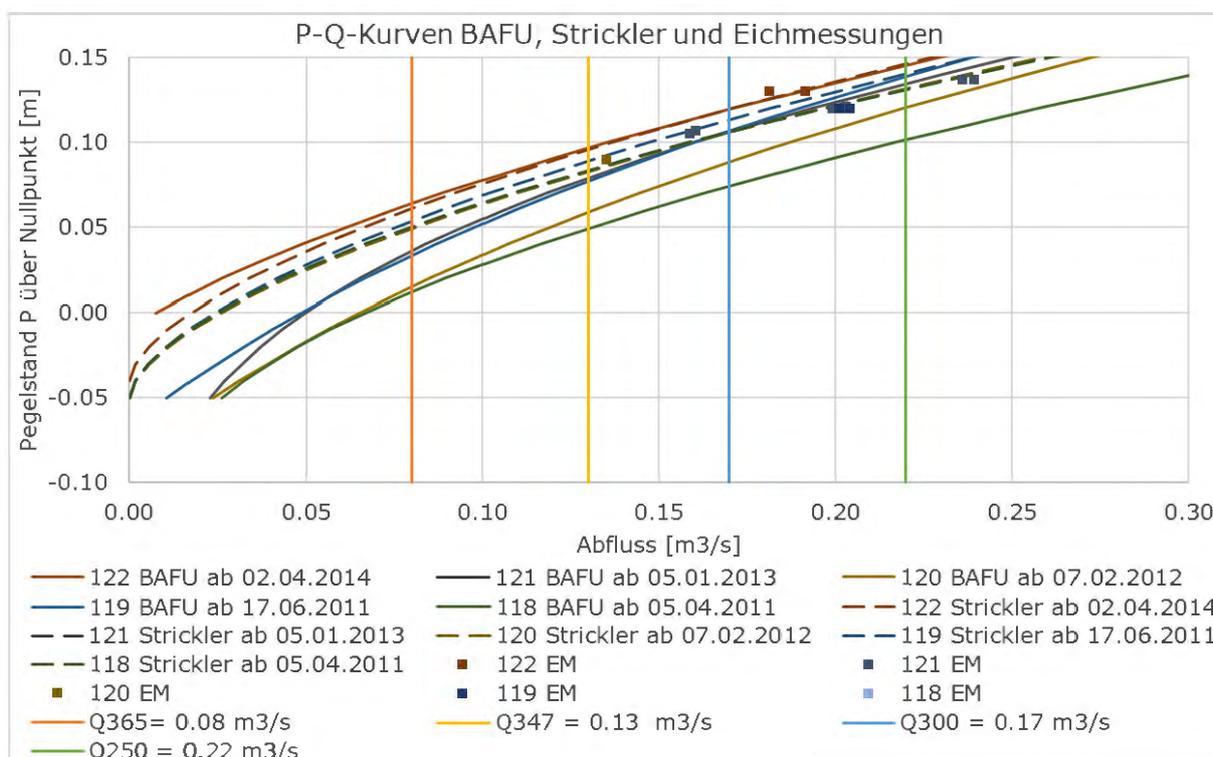


Abbildung 204: Krumbach P-Q-Kurven 118 bis 122

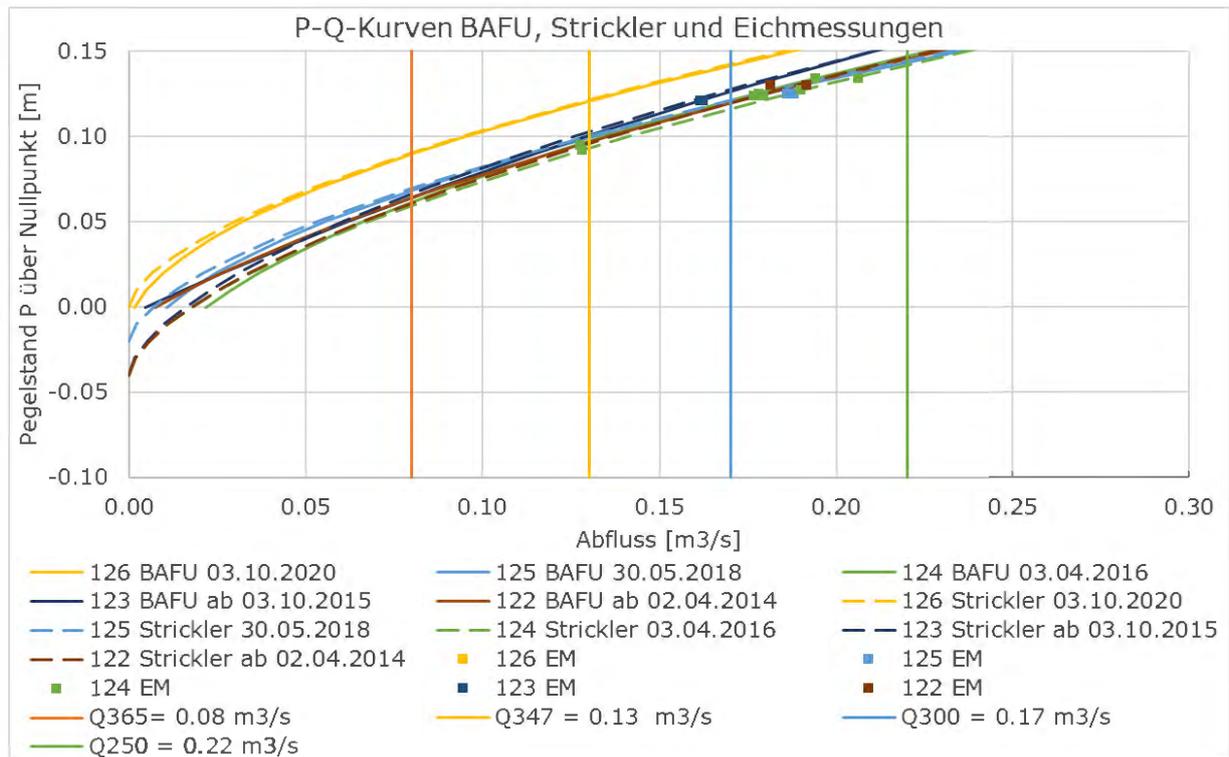


Abbildung 205: Krumbach P-Q-Kurven 122 bis 126

10.6 Calancasca

10.6.1 Eichmessungen

10.6.2 P-Q-Kurven Entwicklung über die Zeit

Die BAFU Kurven 10 (ab 6.5.1989) bis 14 (ab 1.1.1998) sind gut mit Eichmessungen abgestützt (Abbildung 206). Der Pegelstand sinkt von der Kurve 12 zur Kurve 13 um auffällige 4 cm. Mit den Strickler-Kurven kann diese Verschiebung mit denselben Eichmessungen etwa halbiert werden.

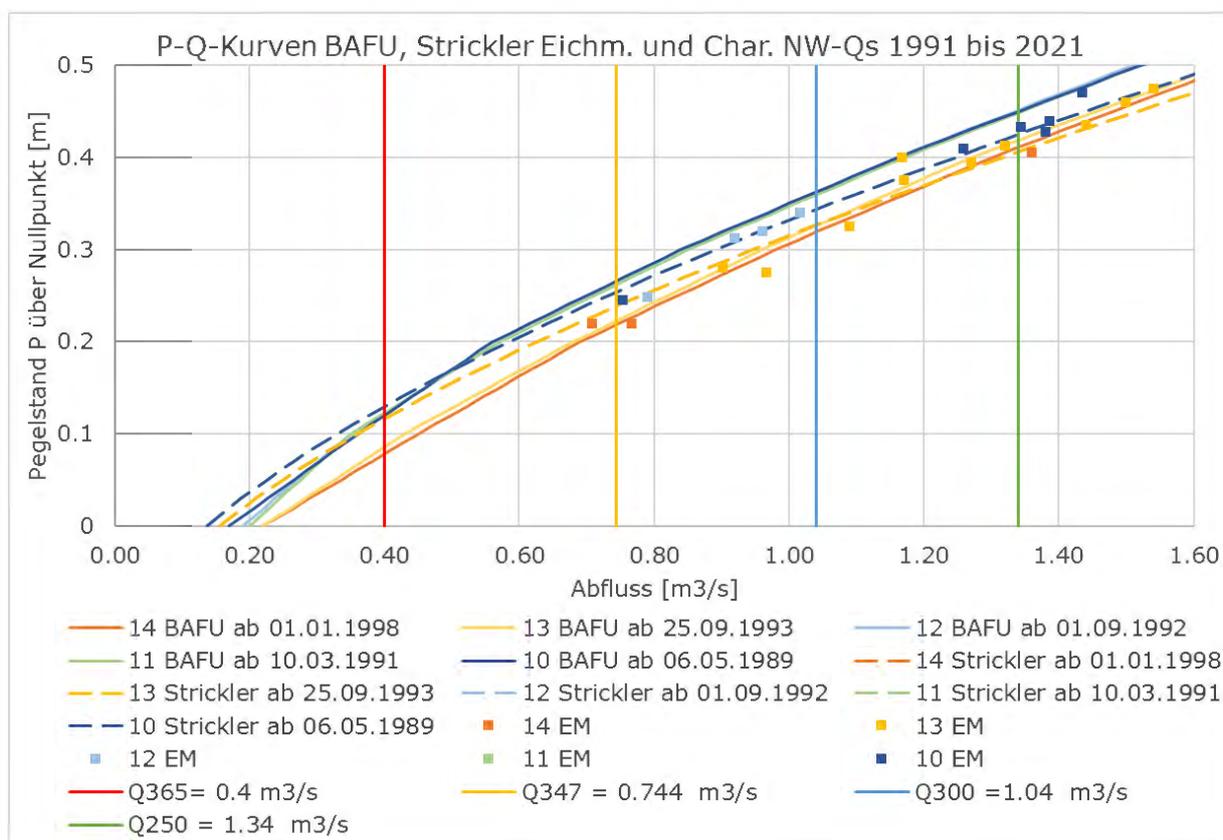


Abbildung 206: Calancasca, P-Q-Kurven BAFU und Strickler 10 bis 14

Die BAFU-Kurven 15 und 16 liegen bei deutlich tieferen Pegelständen als die Kurve 14, obwohl es keine Eichmessungen in diesem Bereich gibt (Abbildung 207). Die Kurve 17 ist eine Kopie von Kurve 14. Kurve 18 liegt dann wieder nahe bei Kurve 14. An Stelle der Kurven 15 und 16 würde im Niedrigwasser besser Kurve 14 weiterverwendet.

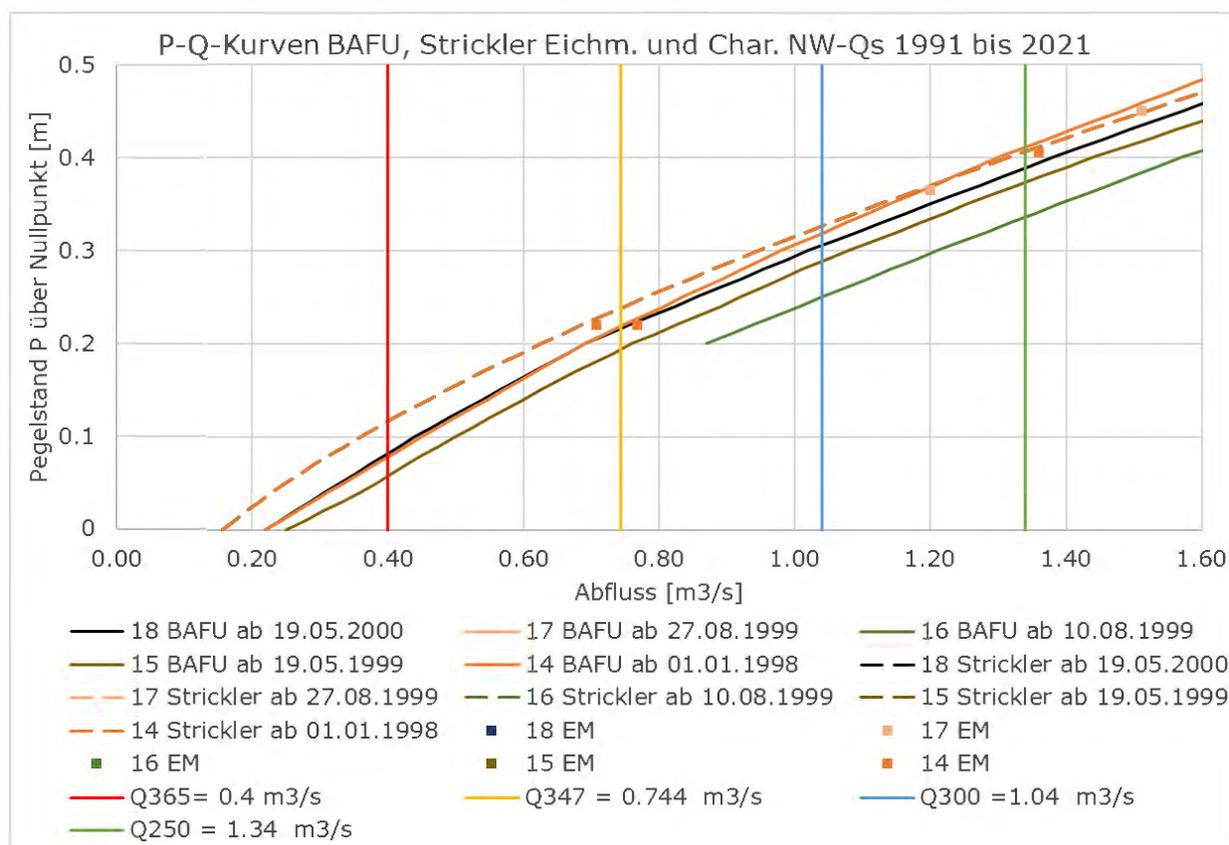


Abbildung 207: Calancasca P-Q-Kurven BAFU und Strickler 14 bis 18

Die BAFU-Kurven 18 bis 22 liegen, zwar mit relativ wenigen Eichmessungen, nahe beieinander (Abbildung 208). Die zugehörigen Strickler Kurven unterscheiden sich von diesen durch die bauchigere Form.

Die Pegelstände der BAFU-Kurven 22 bis 26 weisen steigende Pegelstände auf (Abbildung 209). Niedrigwasser-Eichmessungen gibt es ab der Kurve 24 (ab 10.01.2007). Diese Steigerung stimmt zeitlich mit dem vermuteten Eintrag des Felsblockes 2005 überein.

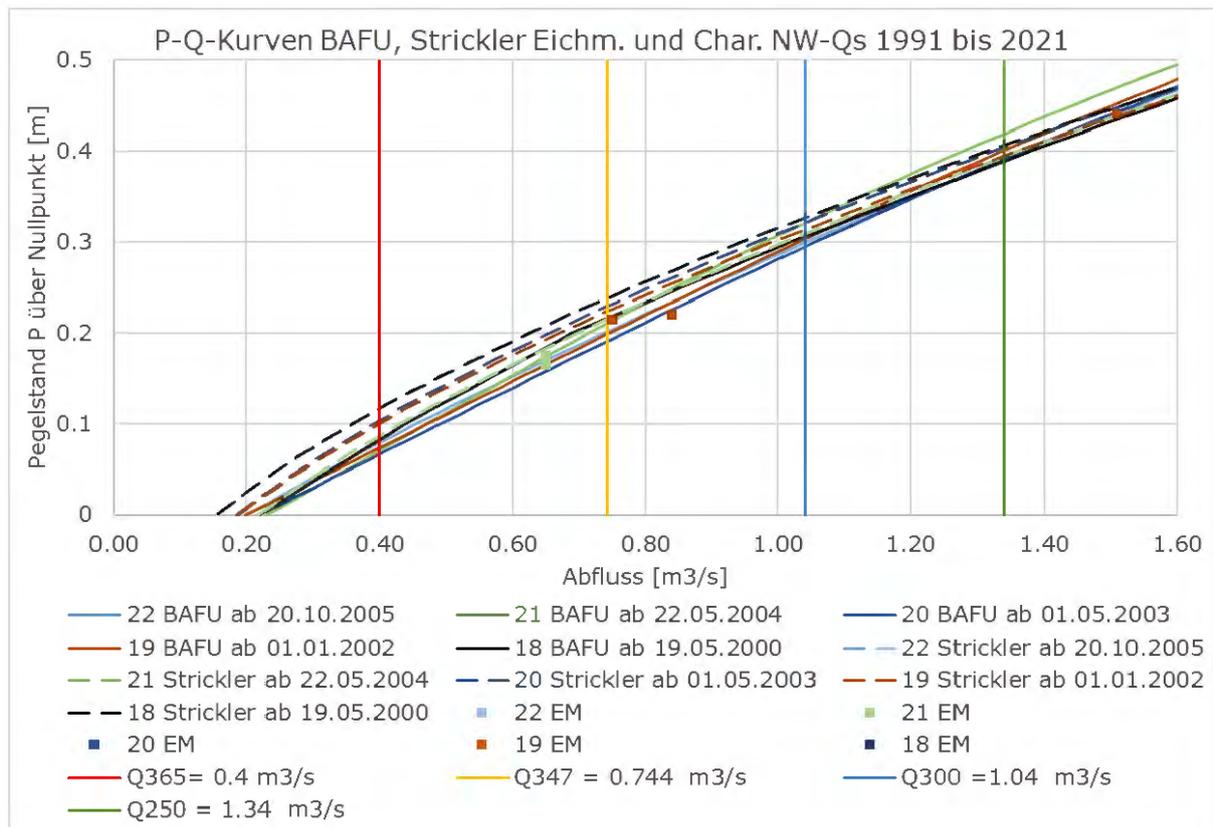


Abbildung 208: Calancasca P-Q-Kurven BAFU und Strickler 18 bis 22

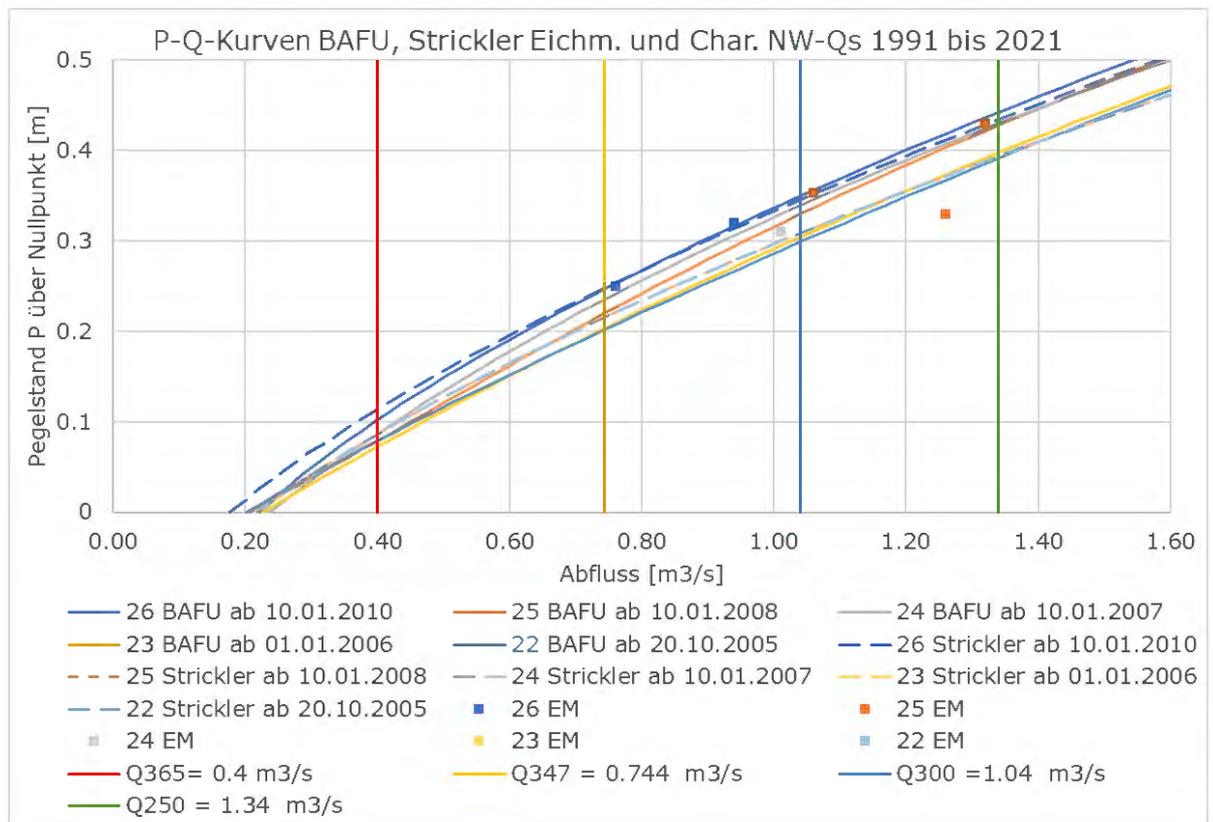


Abbildung 209: Calancasca P-Q-Kurven BAFU und Strickler 22 bis 26

Von Kurve 26 (Abbildung 210, blau) zu Kurve 28 (dunkelblau) verändert sich die Form im tiefen Niedrigwasser deutlich, obwohl die zugehörigen Eichmessungen sehr nahe liegen. Von der Kurve 28 (dunkelblau) zur Kurve 29 (gültig ab 15.9.2013) und vor allem zu 30 (dunkelgrau, gültig ab 27.10.2013) sinkt der Pegelstand drastisch um über 20 cm ab, obwohl dafür keine NW-Eichmessung vorliegt. Der Zeitpunkt der Änderung von Kurve 28 (ab 21.1.2013) zu Kurve 29 (ab 15.9.2013) stimmt mit dem vermuteten Zeitpunkt des Herausspülens des Felsblockes im April 2013 überein. Dagegen gibt es für die grosse Verschiebung zu Kurve 30 im Niedrigwasser keine plausible Erklärung und auch keine Eichmessungen.

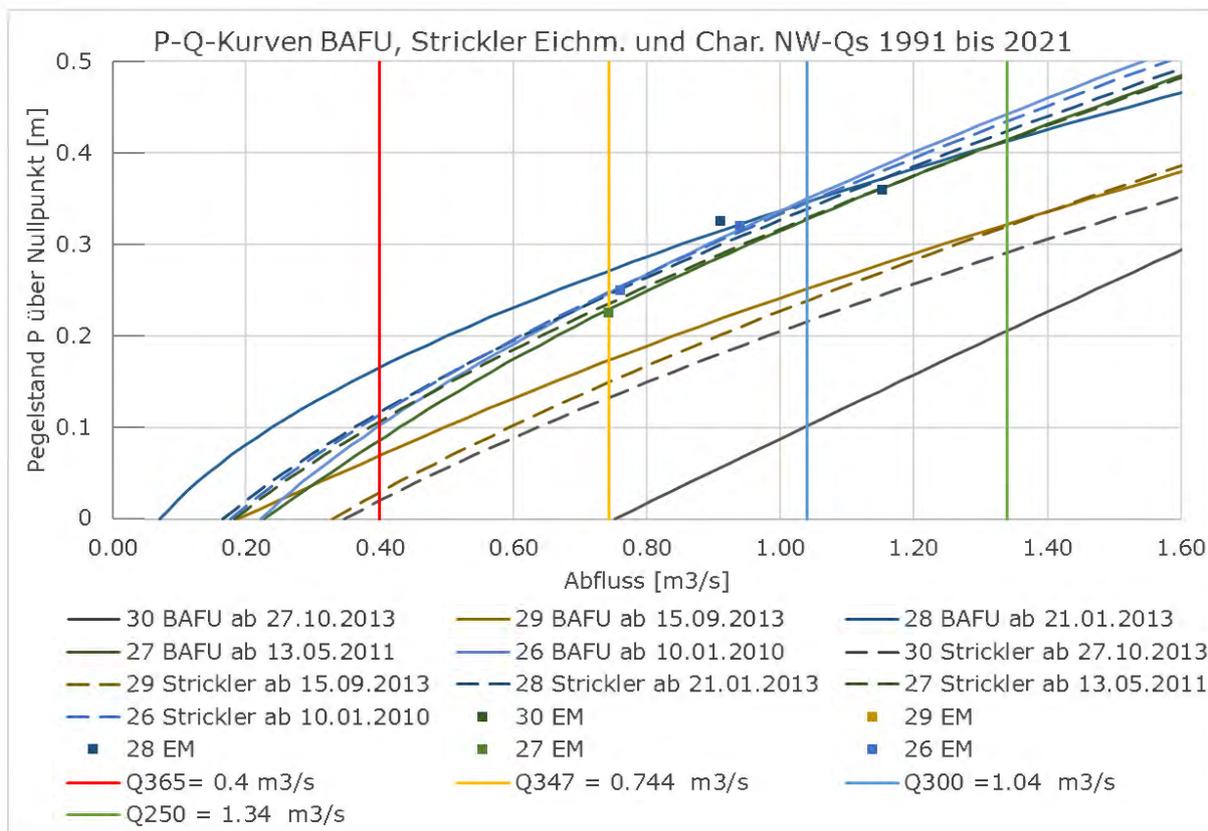


Abbildung 210: Calancasca P-Q-Kurven BAFU und Strickler 26 bis 30

Von Kurve 30 (Abbildung 211, dunkelgrau) steigt der Pegelstand zu Kurve 31 (braun) deutlich an, Kurve 32 (dunkelblau) ist praktisch identisch wie Kurve 31. Die Kurven 33 (grün, ab 4.2.2015) und 34 (hellblau) liegen auf Grund einer Eichmessung zwischen den vorherigen Kurven 30 bis 32.

Die folgenden Kurven 35 bis 38 verfügen über NW-Eichmessungen und bestätigen die Lage der Kurve 34 (Abbildung 212).

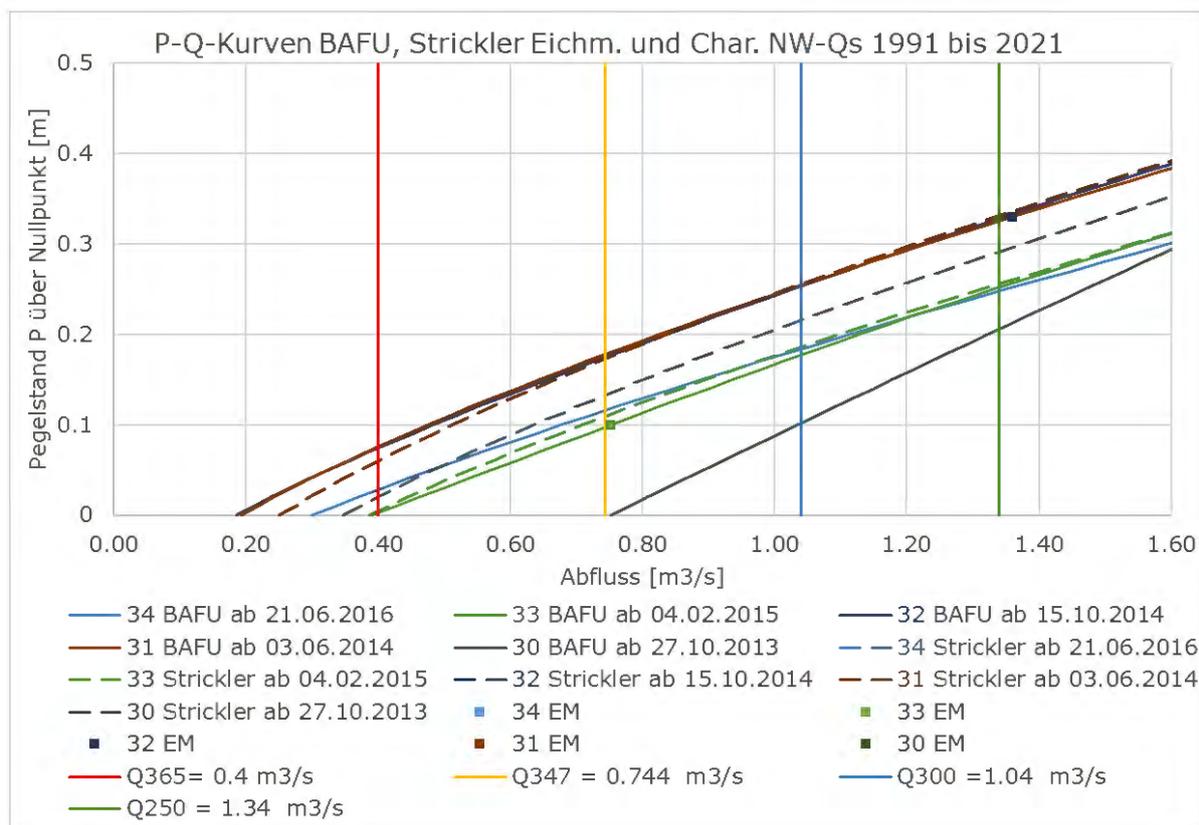


Abbildung 211: Calancasca, P-Q-Kurven BAFU und Strickler 30 bis 34

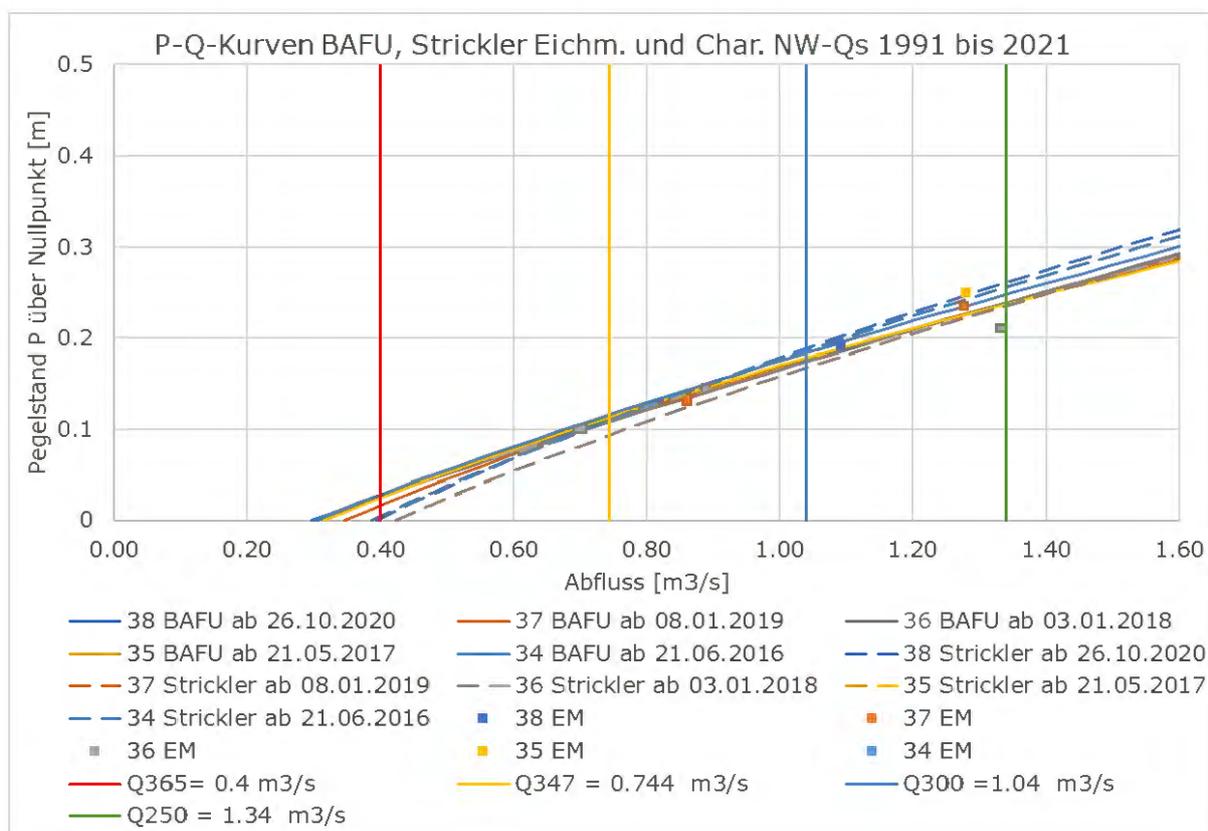


Abbildung 212: Calancasca, P-Q-Kurven BAFU und Strickler 34 bis 38

10.7 Riale di Calneggia

10.7.1 Eichessungen

10.7.2 P-Q-Kurven, Entwicklung über die Zeit

Die Kurven 18 und 19 am früheren Standort verfügen über keine Eichmessungen dokumentierten Eichmessungen (*Abbildung 214*). Zwischen den Kurven 19 und 20 (*grau und dunkelblau*) ist der Wechsel vom früheren zum aktuellen Standort deutlich sichtbar. Die Kurven liegen am aktuellen Standort deutlich flacher, was für die Messung der Niedrigwasser-Abflüsse nachteilig ist. Die Kurven 20 bis 22 liegen nahe beieinander und gut in den Niedrigwasser-Eichmessungen der Kurve 21 (ab 1.1.1993). Allerdings liegt Kurve 22 (hellblau) leicht über ihren eigenen Eichmessungen.

Die Kurven 23 (*Abbildung 214*, gelb) liegt gut abgestützt über ihrer Vorgängerin, Kurve 24 (grau) ohne ersichtlichen Grund mit einem Knick darunter. Die anschließenden Kurven 25 und 26 (orange und hellblau) decken sich mit Ausnahme weniger Knicke mit Kurve 23 (gelb).

Die Kurven 27 und 28 (*Abbildung 215*, dunkelgrün und dunkelblau, letztere nicht sichtbar) sind im Niedrigwasser identisch. Sie liegen gemeinsam mit Kurve 29 (braun), mit nur einer Eichmessung unter dem Q250, als fast gerade Strecken im Niedrigwasserbereich. Kurve 30 (dunkelgrau) nähert sich mit mehreren NW-Eichmessungen wieder der Kurve 26 (hellblau).

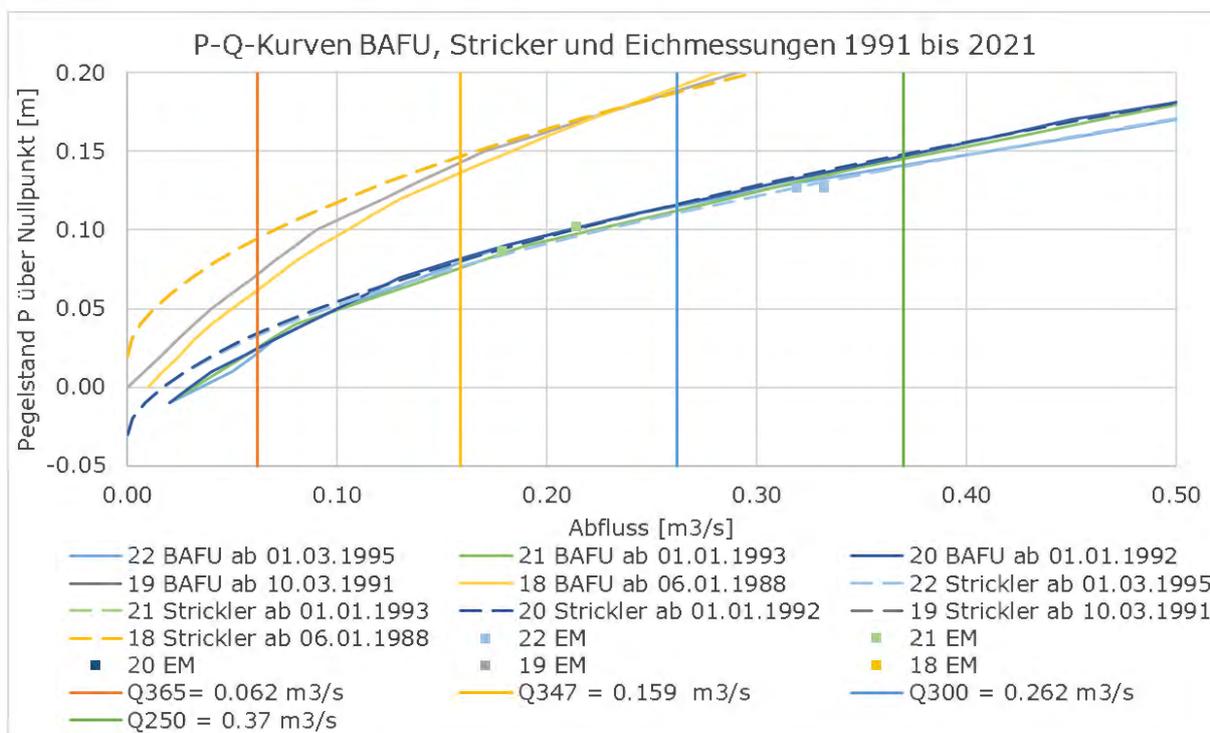


Abbildung 213: Riale di Calneggia, P-Q-Kurven 18 und 19 am früheren und 20 bis 22 am aktuellen Standort

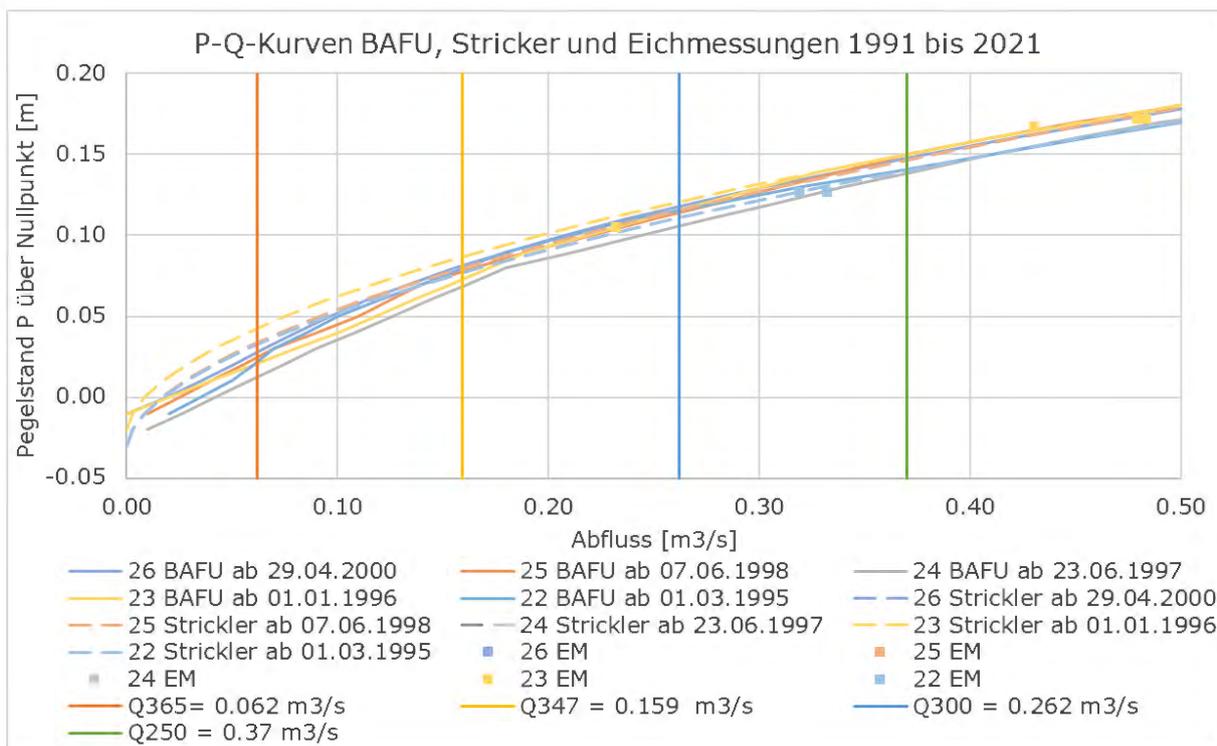


Abbildung 214: Riale di Calneggia, P-Q-Kurven 22 bis 26 am aktuellen Standort

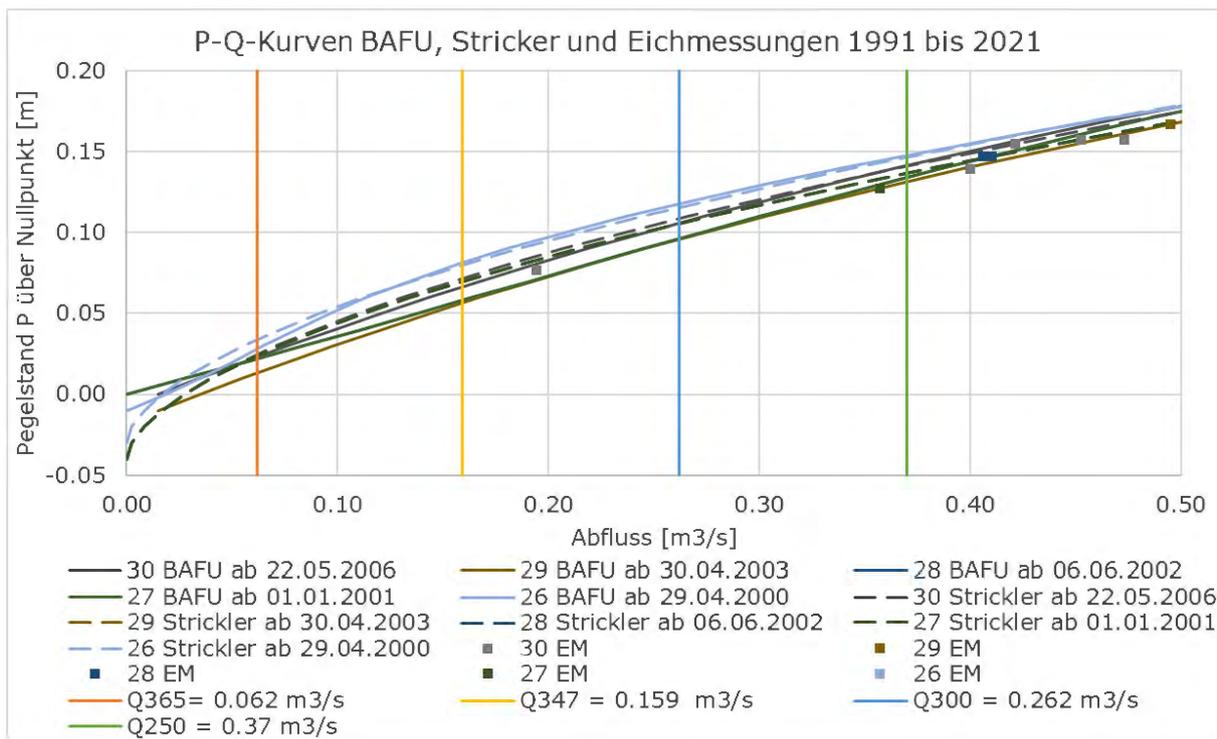


Abbildung 215: Riale di Calneggia, P-Q-Kurven 26 bis 30 am aktuellen Standort

Die Kurven 31 und 32 (Abbildung 216, braun und dunkelblau, Letztere nicht sichtbar) sind identisch und auch fast deckungsgleich mit Kurve 30 (dunkelgrau). Die identischen Kurven 33 und 34 (hellblau und hellgrün, Erstere nicht sichtbar) liegen mit zwei Eichmessungen etwas höher.

Die aktuell gültige Kurve 34 befindet sich mit zwei Eichmessungen zwischen den anderen Kurven dieser Darstellung.

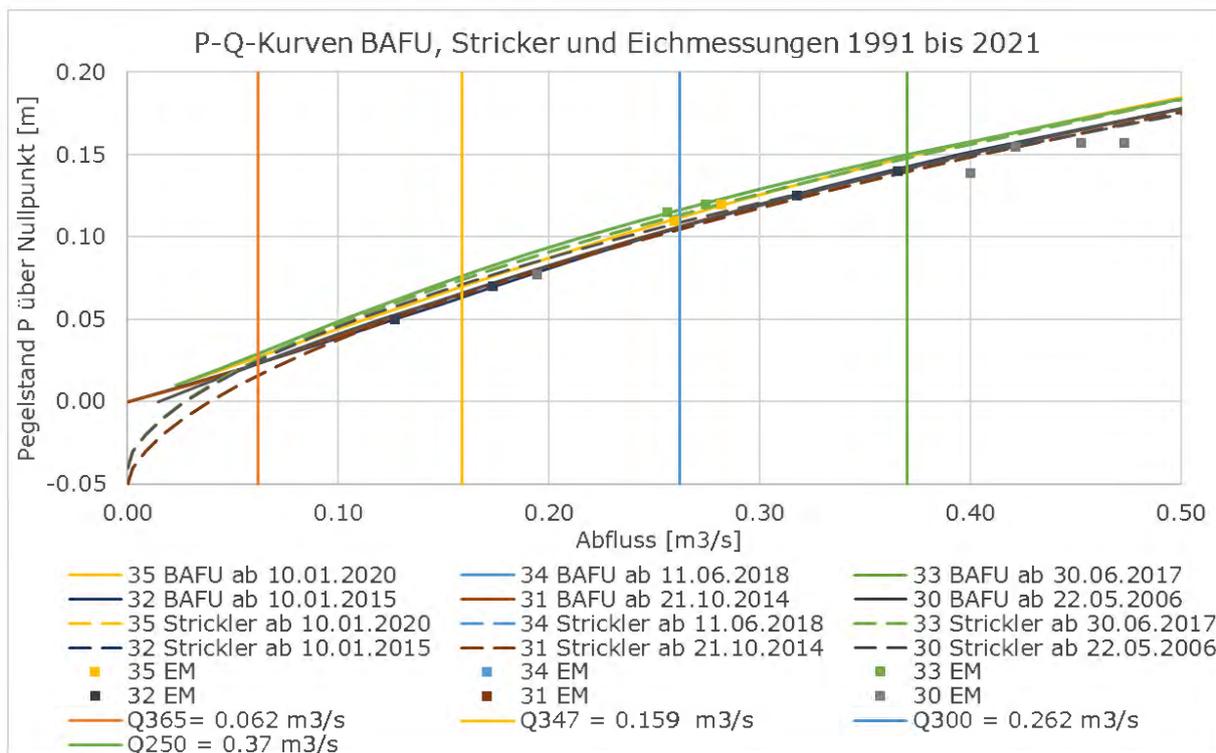


Abbildung 216: Riale di Calneggia, P-Q-Kurven 30 bis 35 am aktuellen Standort