

Laboratory of Hydraulics,
Hydrology and Glaciology
of the Swiss Federal Institute
of Technology Zurich

Strömungsverhältnisse Abflussmessstation Dischmabach

Numerische Modelluntersuchungen
mit einem hydrodynamischem 3D Modell

Im Auftrag des
Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich

Autor/Autorin: Claudia Leuch, David Vetsch

Begleitung BAFU: Caroline Kan, Andreas Kohler

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage.....	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.3	Auftrag.....	4
1.4	Vorgehensweise und Modellkonzept.....	4
2	Grundlagen	5
2.1	Pegeldaten	5
2.2	Feldmessung	5
2.3	Szenarien	7
3	Modellaufbau.....	9
3.1	Simulationssoftware	9
3.2	Modellperimeter.....	10
3.3	Modellierung Messschacht und Lochblech.....	10
3.4	Gitterauflösung	11
3.5	Sohlrauhheit	11
3.6	Randbedingungen	11
4	Kalibrierung, Validierung und Plausibilisierung	13
4.1	Verwendete Szenarien	13
4.2	Kalibrierung	13
4.3	Validierung.....	14
4.4	Plausibilisierung.....	14
4.5	Fazit.....	16
5	Resultate	19
5.1	Ablagerungen im Zulaufbereich.....	19
5.2	Eisbildung in der Niedrigwasserrinne	21
5.3	Temperatureinfluss.....	22
5.4	Vergleich mit den bestehenden Schlüsselkurven	24
6	Schlussfolgerungen	33
	Literaturverzeichnis	I
	Anhang.....	III

Zusammenfassung

Eine möglichst genaue Bestimmung von kleinen Abflüssen in Fliessgewässern ist wichtig, z.B. für die Festlegung der Restwassermenge. Kleine Abflüsse, d.h. Abflüsse in der Niedrigwasserrinne, treten häufig in den Wintermonaten auf. Aktuelle Auswertungen zeigen, dass für den gleichen Pegelstand die gemessenen Abflüsse stark variieren können. Dies gilt auch für die Messstation am Dischmabach in der Nähe von Davos. Trotz des fixen Messquerschnitts in der Niedrigwasserrinne des Abflussmesspegels wurden in den letzten Jahren bei vergleichbaren Abflüssen wesentliche Unterschiede in der Pegelhöhe registriert. Die Ursachen dafür sind unklar. Daher wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, das komplexe Zusammenspiel möglicher Einflussfaktoren am Beispiel der Messstation am Dischmabach zu untersuchen.

Für die Berechnung der Strömungsverhältnisse bei der Messstation wurde ein numerisches 3D Modell unter Verwendung eines Turbulenzmodells und der Berücksichtigung der freien Oberfläche verwendet. Das numerische Modell wurde anhand von verifizierten Pegelmessdaten für Abflüsse in der Niedrigwasserrinne kalibriert und validiert. Eine Besonderheit an dieser Messstation ist, dass Pegelmessungen an zwei verschiedenen Orten, d.h. am Steg und im Messschacht, aufgezeichnet werden und diese voneinander abweichen. Im Rahmen der Plausibilisierung des Modells konnte aufgezeigt werden, dass eine mögliche Ursache dafür eine Kombination von lokalen Unebenheiten in der Sohle der Niedrigwasserrinne und der Ausprägung der beim Übergang vom Zulaufbereich zur Niedrigwasserrinne entstehenden Stosswellen ist.

Mit dem validierten Modell wurden für verschiedene Abflüsse und Szenarien unterschiedliche Einflüsse auf die Wasserspiegellage bei der Messstation und deren komplexes Zusammenspiel untersucht. Konkret wurde der Einfluss der Rauheit in der Niedrigwasserrinne, von Blöcken und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich, der Verengung des Abflussquerschnitts durch Vereisung und der Wassertemperatur analysiert. Anhand der mit dem numerischen Modell gewonnenen Erkenntnisse lässt sich festhalten, dass die Temperatur, resp. die Dichte und Viskosität des Wassers keinen Einfluss auf die Wasserspiegellage an den Pegelmessstellen beim Steg und im Messschacht hat. Einen geringen Einfluss können Blöcken und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich haben. Hingegen reagiert der Wasserspiegel bei den Pegeln direkt auf Veränderungen der Rauheit und des Abflussquerschnitts bei Vereisung in der Niedrigwasserrinne. Treten diese Veränderungen im Bereich der Pegel auf, bewirken diese je nach Ausprägung ein Anstieg der Wasserspiegellage. Die Bildung von Eiskörpern in der Niedrigwasserrinne oder der Bewuchs mit Moos kann also eine mögliche Erklärung dafür sein, wenn an unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Pegelwerte für denselben Abfluss gemessen werden.

Um eine Grundlage für die Herleitung einer Schlüsselkurve im Niedrigwasserbereich zu schaffen, wurden mit dem kalibrierten Modell weitere Abflüsse in diesem Bereich simuliert. Für einen Vergleich mit ausgewählten Schlüsselkurven der Messstation wurden zudem auch grössere Abflüsse bis zu einem HQ200 simuliert. Die resultierenden Wasserspiegellagen liegen bei Abflüssen zwischen 800 l/s und 2'000 l/s tendenziell tiefer als die Schlüsselkurven. Dabei ist zu beachten, dass die simulierten Wasserspiegellagen für alle untersuchten Abflüsse gut mit den Pegelmessungen am Messschacht übereinstimmen und beim Pegel Steg für den Bereich von 1'161 l/s bis 2'350 l/s keine Messpunkte vorliegen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Dischmabach ist ein Seitenzubringer des Landwassers. Die Messstation Dischmabach (BAFU Stationsnummer 2327) liegt ca. 4.5 km oberhalb von Davos, auf 1668 m ü.M. bei Kriegsmatte im Dischmatal. Das Einzugsgebiet hat eine Grösse von 43.9 km² und eine mittlere Höhe von 2376 m ü.M. mit einer Vergletscherung von 0.7%. Die Messstation hat eine Niedrigwasserrinne (Abbildung 1 links) mit einem seitlich angeschlossenen Messkanal. Der Zulaufbereich besteht aus einer künstlichen Schwelle mit einem kleinen Becken. Bei Niedrigwasser wird die Strömung im Becken etwas beruhigt, fliesst danach in die Niedrigwasserrinne und wird dabei beschleunigt - es kommt zur Bildung von Stosswellen (Abbildung 1 rechts).



Abbildung 1: Messstation am Dischmabach bei niedrigem Abfluss im Winter; links: Blick von oberhalb der Messstation in Fließrichtung; rechts: Blick von der Brücke aus nach stromaufwärts auf den Zulaufbereich und die Schwelle. Quelle: BAFU



Abbildung 2: Messstation am Dischmabach bei niedrigem Abfluss im Winter; Blick von unterhalb der Messstation. Quelle: M. Margreth

Bei Niedrigwasser wird davon ausgegangen, dass der Unterwasserbereich der Messstation keinen Einfluss auf die Strömung in der Niedrigwasserrinne hat, da das Unterwasser durch den

vollkommenen Überfall nach stromaufwärts entkoppelt ist (Abbildung 2). Bei Hochwasser ist die Schwelle im Zulaufbereich überdeckt.

Eine möglichst genaue Bestimmung von kleinen Abflüssen ist wichtig, z.B. für die Bestimmung des Q_{347}^1 , welches für die Festlegung der Restwassermenge in einem Fließgewässer verwendet wird. Kleine Abflüsse, d.h. Abflüsse in der Niedrigwasserrinne, treten häufig in den Wintermonaten auf. Aktuelle Auswertungen von Michael Margreth (WSL) zeigen, dass für den gleichen Pegelstand die gemessenen Abflüsse (Verdünnungsmessung) stark variieren können. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3 gezeigt: die Eichmessungen von Kurve 32 (schwarz, Periode 6.6.2004 - 31.12.2005) bei einer Pegelhöhe von 1668 m ü. M. liegen mehr als 100 l/s tiefer als die Eichmessungen der Kurven 34 und 36 (2006-2007 bzw. 2008-2009).

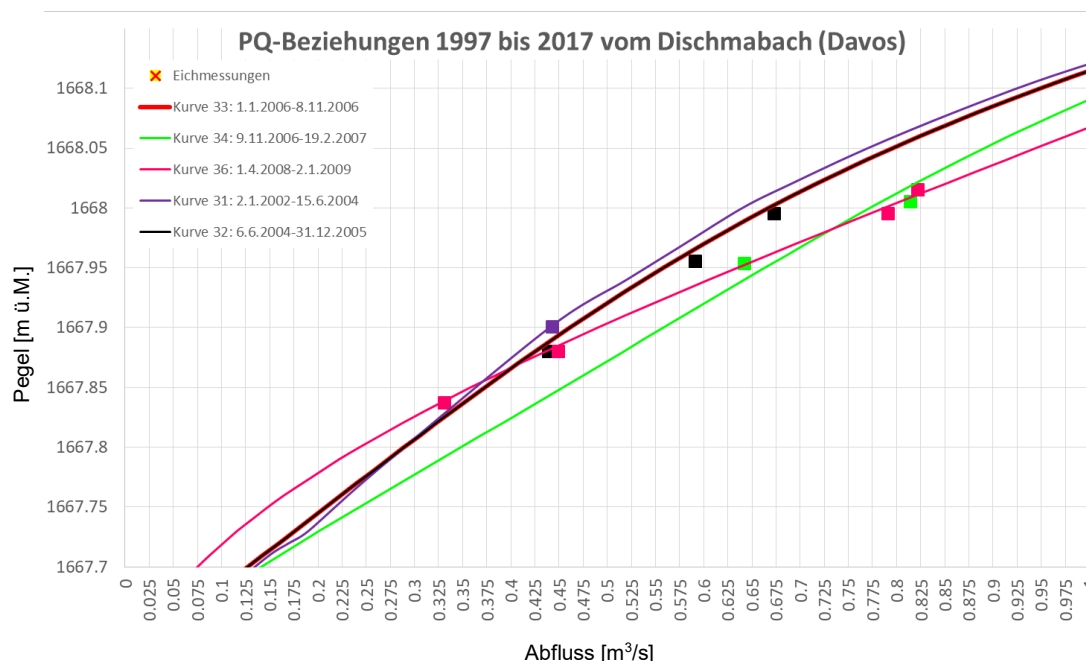


Abbildung 3: Messwerte für Abfluss und Wasserstand an der Messstation am Dischmabach und verschiedene Schlüsselkurven (PQ-Beziehungen). Quelle: M. Margreth

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz des fixen Messquerschnitts in der Niedrigwasserrinne des Abflussmesspegels am Dischmabach wurden in den letzten Jahren bei vergleichbaren Abflüssen wesentliche Unterschiede in der Pegelhöhe registriert (siehe oben). Mit der beabsichtigten 3D Modellierung der Hydraulik soll untersucht werden, welche Ursachen die unterschiedlichen Pegelhöhen haben.

Folgende Aspekte sollen untersucht werden:

- Aufgrund von Abflussmessungen am 14.03.2022 konnte festgestellt werden, dass beim Lochblech aufgrund von Moos und des darin gefrorenen Wassers der hydraulische Austausch zwischen der Niedrigwasserrinne und dem Messschacht behindert wird. Nach Entfernen des Moores erfolgte ein unmittelbarer Anstieg des Wasserspiegels um ca. 1 cm. Die hydraulische Verbindung zwischen Niedrigwasserrinne und Messschacht soll im Modell berücksichtigt werden.

¹ Abflussmenge, die gemittelt über 10 Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauungen, Entnahmen oder Zuleitungen von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist [4].

- Der Messquerschnitt liegt möglicherweise im Einflussbereich der Absenkkurve. Mit dem Modell lässt sich aufzeigen, wie sensitiv die Wasserspiegellage auf die Absenkkurve bei verschiedenen Abflüssen reagiert.
- Es wird vermutet, dass grössere Blöcke und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich die Strömungseigenschaften im Kanal massgeblich beeinflussen. Mit dem Modell lässt sich der Einfluss der Ablagerungen auf die Strömungsgeschwindigkeit und die Wellenbildung in der Niedrigwasserrinne untersuchen.
- Bei der im Januar 2022 durchgeführten Feldkampagne konnte durch das Abschlagen des Eises in und oberhalb der Niedrigwasserrinne kein wesentlicher Einfluss auf die Wasserspiegellage am Messquerschnitt festgestellt werden. Die Vereisungsfläche in und oberhalb der Niedrigwasserrinne und somit auch die Verengung des Abflussquerschnitts waren gering.
Bei lange anhaltenden ausgeprägten Kälteperioden in Kombination mit grossen Schneemengen ist eine Vereisung mit grösserer Ausdehnung, zumindest kurzfristig, bis das Wasser mit Temperaturen über dem Gefrierpunkt einen freiliegenden Wasserspiegel unter dem Eis geschaffen hat, nicht auszuschliessen. Der Einfluss einer solchen Vereisung soll als Szenario im Modell simuliert werden.
- Die Wassertemperaturen liegen zwischen Januar und März häufig zwischen 0 und 4°C. Die Wassertemperatur kann während des Tagesverlaufes bei vergleichbaren Abflüssen in diesem Bereich variieren. Mit dem Modell soll untersucht werden, ob die veränderliche Dichte des Wassers die Strömung und somit die Wasserspiegellage beeinflusst.
- Bei ganz tiefen Abflüssen ($Q < Q_{347}$) liegen in den allermeisten Jahren keine oder nur wenige Eichmessungen vor. Die PQ-Beziehungen sind in diesem Bereich meist aus Eichmessungen von höheren Abflüssen extrapoliert worden. Die Unterschiede zwischen den Pegelhöhen der vorliegenden PQ-Beziehungen sind bei vergleichbaren Abflüssen gross. In manchen Jahren liegen im Niedrigwasserbereich ($Q < Q_{250}$) keine Eichmessungen vor. Mit dem 3D Modell sollen Pegelhöhen im Niedrigwasserbereich berechnet werden und somit eine solide Grundlage für die PQ-Beziehungen im Niedrigwasserbereich erarbeitet werden. Zudem soll das Verständnis des Strömungsverhaltens am Übergang zwischen der Niedrigwasserrinne und dem breiteren Fliessquerschnitt darüber verbessert werden.

Bislang wurde das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Einflussfaktoren bei einer Messstation nicht detailliert untersucht. Daher scheint es sinnvoll, diese Arbeiten im Rahmen eines Forschungsprojekts durchzuführen.

Mit dem Modell sollen folgende Lastfälle und Aspekte untersucht werden:

- NQ: Abfluss gemäss Messungen vor Ort
 - §1. Einfluss der Durchlässigkeit des Lochblechs (Austausch Niedrigwasserrinne – Messschacht)
 - §2. Sensitivität der Rauheit in der Niedrigwasserrinne (glattere oder rauere Oberfläche)
 - §3. Beurteilung der Lage der Pegelmessung im Messkanal (Absenkkurve)
 - §4. Auswirkungen von Blöcken und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich
 - §5. Einfluss von Vereisung (Verengung des Abflussquerschnitts)
 - §6. Temperatureinfluss (Dichte des Wassers)
 - §7. Überprüfung der vorhandenen Schlüsselkurve

- MQ: Abfluss festzulegen in Absprache mit BAFU
§7. Überprüfung der vorhandenen Schlüsselkurve
- HQ: Abfluss festzulegen in Absprache mit BAFU
§7. Überprüfung der vorhandenen Schlüsselkurve

1.3 Auftrag

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, die Strömungsverhältnisse an der Messstation Dischmabach (BAFU Stationsnummer 2327) zu untersuchen. Dieser Auftrag stützt sich auf die Offerte der VAW vom 4. April 2022 und dem Forschungsvertrag zwischen der ETH Zürich und dem BAFU vom 3. Mai 2022.

1.4 Vorgehensweise und Modellkonzept

Für die vorgeschlagene Untersuchung wird ein numerisches 3D Modell mit freier Oberfläche und Turbulenzmodell erstellt. Zuerst werden die Geometrie der Messstation und die Topographie im Nahbereich (einschliesslich des Flussbetts) im numerischen Modell nachgebildet. Folglich wird das numerische Modell anhand der vor Ort gemessenen Wasserspiegellagen kalibriert (hauptsächlich durch Variation der Gerinnerrauheit) und validiert, und unter anderem mittels der Fotodokumentation plausibilisiert. Daraufgehend werden die Strömungsverhältnisse bei der Messstation für verschieden Abflüsse und Szenarien simuliert und ausgewertet.

2 Grundlagen

2.1 Pegeldaten

An der Messstation werden automatisch Pegeldaten an zwei Stellen erhoben. Eine Pegelmessung erfolgt im Schacht im unteren Teil der Niedrigwasserrinne (Abbildung 4). Dabei ist der Schacht von der Niedrigwasserrinne durch ein Lochblech abgetrennt. Die Messung bei dieser Anordnung ist wenig beeinflusst durch äussere Einflüssen und recht zuverlässig, sofern das Lochblech ungehindert durchströmt werden kann.

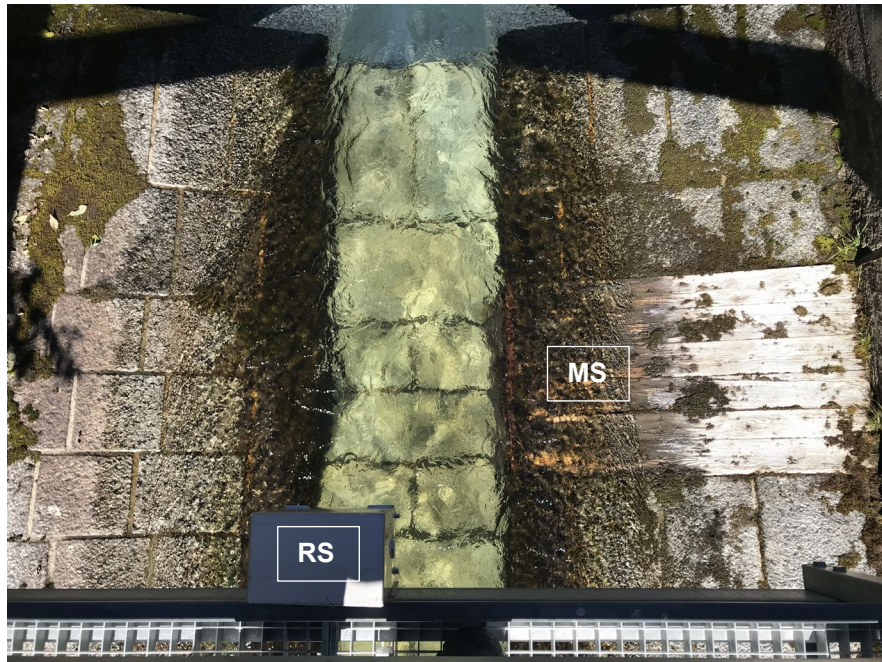


Abbildung 4: Blick vom Steg auf die Niedrigwasserrinne, Fliessrichtung von unten nach oben: Radar am Steg (RS) und Messschacht (MS). Foto: VAW

Die zweite Messung erfolgt durch einen am Steg seit 18.12.2019 angebrachten Radar. Diese Messung ist anfälliger auf äussere Einflüsse wie Schnee und Stosswellen in der Niedrigwasserrinne. Der Pegel am Steg liegt ca. 0.65 m stromaufwärts von der Mitte des Messschachts.

2.2 Feldmessung

Die Geometrie der Messstation inkl. Niedrigwasserrinne und die Topographie des Gerinnes im Zulaufbereich wurden am 14.03.2022 durch die Firmen SoilCom und wasserplan.ch im Rahmen dieser Untersuchung vermessen [1]. Im Zulaufbereich hatte sich vor allem auf der orographisch linken Seite Geröll abgelagert. Die entsprechende Sohlenlage im Zulaufbereich wurde am Vormittag vermessen. Danach wurde das Geröll entfernt und am Nachmittag wurde die Sohlenlage erneut vermessen. Für beide Zustände wurde die Wasserspiegellage entlang der Niedrigwasserrinne aufgenommen und der aktuelle Abfluss gemessen (Salzverdünnungsverfahren). Zudem wurde das Lochblech gereinigt, d.h. von Moos und Eis befreit. Der Verlauf der automatischen Pegelmessungen während der Feldmessung ist in Abbildung 5 aufgezeigt. In Abbildung 6 ist zudem die Differenz zwischen den beiden Pegelmessungen aufgezeigt, wobei die Auswirkung der Reinigung des Lochblechs deutlich ersichtlich ist (ca. 6 mm Unterschied in Wasserspiegellage bei vergleichbarem Abfluss).

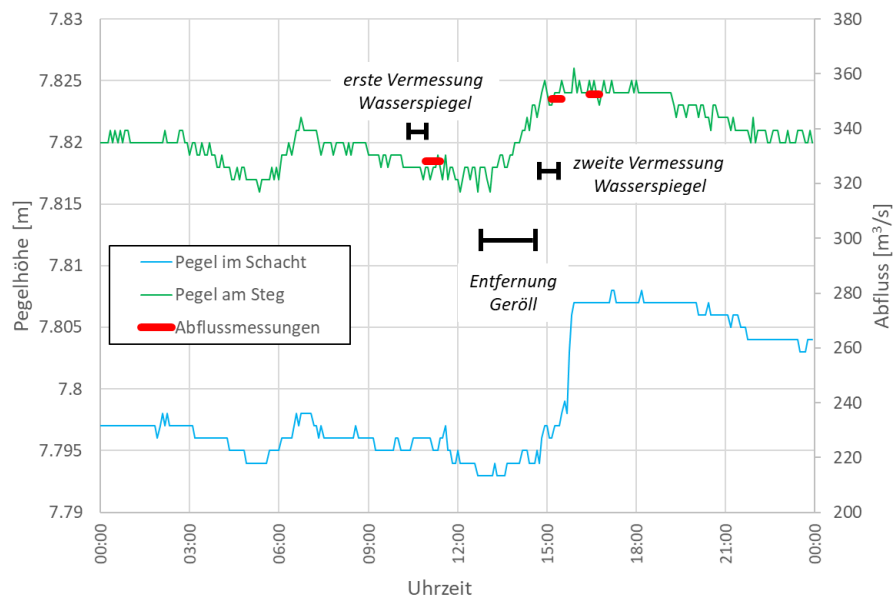


Abbildung 5: Verlauf der Pegelhöhe und Abflussmessungen an der Messstation Dischmabach am 14.03.2022.

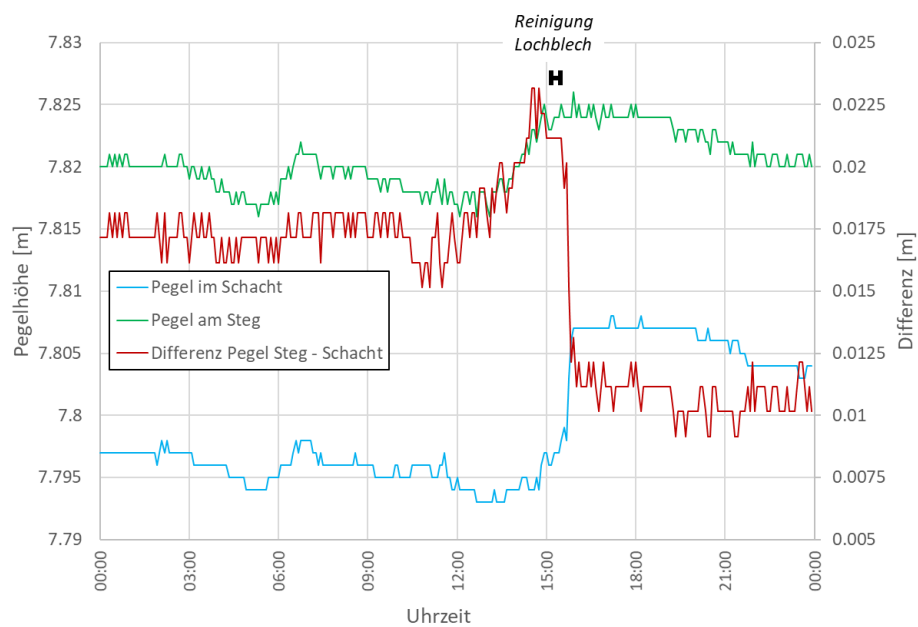


Abbildung 6: Verlauf der Pegelhöhe an der Messstation Dischmabach und Differenz (ohne topographische Differenz von 6 mm) zwischen den beiden Pegelmessungen am 14.03.2022.

2.3 Szenarien

Ausgehend von den vermessenen Sohlenlagen wurden zwei Szenarien definiert. Die Vermessungsdaten vom Vormittag des 14.03.2022 bilden das «Szenario Vormittag» und diejenigen des Nachmittags das «Szenario Nachmittag». Nachfolgend wurde für die Kalibrierung des numerischen Modells das Szenario Vormittag und für die Validierung das Szenario Nachmittag verwendet (vgl. Kapitel 4). Zudem wurden die Szenarien als Grundlage für die Untersuchung der verschiedenen, in Kapitel 1.2 aufgeführten Aspekte verwendet. Die für die Definition der Szenarien massgebenden Messwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für die vorliegende Untersuchung wird davon ausgegangen, dass die gemessenen Pegelwerte exakt sind, resp. es werden keine Messungenauigkeiten diskutiert.

Tabelle 1: Definition der Szenarien basierend auf den vorhandenen Verhältnissen während der Feldmessung vom 14.03.2022.

Datum	Uhrzeit	Abfluss (Messung)	Pegel Steg	Pegel Schacht	Differenz	Differenz korrigiert*	Bemerkung
14.03.2022	10:55	328.1	7.818	7.796	0.022	0.016	Szenario Vormittag
14.03.2022	15:10	351.0	7.824	7.797	0.027	0.021	Szenario Nachmittag Zulaufbereich Geröll entfernt
14.03.2022	16:25	352.6	7.825	7.807	0.018	0.012	nach Reinigung Lochblech

* ohne topographische Differenz von 6 mm

3 Modellaufbau

3.1 Simulationssoftware

Für die 3D Berechnungen wird die Software FLOW-3D verwendet. Diese wurde von der VAW bereits erfolgreich u.a. im Rahmen von numerischen Untersuchungen am Kraftwerk Port/Brügg [2] sowie beim Kraftwerk Wynau/Schwarzhäusern eingesetzt [3].

Mit einer Finite-Differenzen-Methode werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen auf einem strukturierten Rechengitter gelöst. Das orthogonale Rechengitter wird aus einzelnen Blöcken mit rechteckigen Zellen aufgebaut (Multi-Block-Gitter). An den Rändern dieser Blöcke werden jeweils die Randbedingungen definiert, wobei die Randbedingungen zwischen benachbarten Gitterblöcken automatisch gesetzt werden.

Weitere Randbedingungen stellen die Gerinnetopographie und die Geometrie der relevanten Bauwerksteile der Messstation dar, die als Hindernisse in das strukturierte Gitter eingefügt werden. Diese Hindernisse können als einfache geometrische Körper direkt in FLOW-3D erstellt werden oder aus beliebigen, triangulierten Oberflächen importiert werden (z.B. Datei im xyz- oder STL-Format). Das Programm FLOW-3D verwendet das FAVOR™ Verfahren (Fractional-Area-Volume-Obstacle-Representation), um diejenigen Teilbereiche der Zellen, in denen die Hindernisse liegen, für die Strömung zu blockieren. Somit wird für die Strömungsberechnung nur der durchflossene Volumenanteil einer Zelle berücksichtigt. Die freie Wasseroberfläche wird mit der VOF-Methode (Volume Of Fluid) behandelt. Für jede Zelle wird dabei der Anteil des Wasservolumens am Gesamtvolumen berechnet (Füllungsgrad der Zelle).

Die Gerinnerauheit wird in FLOW-3D über das Turbulenzmodell berücksichtigt. Dieses beinhaltet eine Wandfunktion zur Berechnung der wandnahen Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der turbulenten Grössen k (turbulente kinetische Energie) und ε (Dissipation). Dabei werden die Wandschubspannungen unter der Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit der Rauheit berechnet. Aus den Schubspannungen werden k und ε in den Randzellen abgeleitet.

Als Turbulenzmodell wurde für die Simulationen das „Renormalized Group Model“ (RNG Modell) verwendet, welches eine Weiterentwicklung des weit verbreiteten k - ε Modells darstellt, das sich in der Praxis bei vernünftigem Rechenaufwand gut bewährt hat. In FLOW-3D werden dabei die Koeffizienten nach Yakhot and Smith [4] verwendet. Die Eignung der gewählten Diskretisierung und des Turbulenzmodells wird dadurch bekräftigt, dass das Strömungsbild an der Oberfläche und die berechneten Wasserspiegellagen zufriedenstellend mit den gemessenen Pegeln übereinstimmen.

Aus der 3D Berechnung resultieren für jede Zelle des Berechnungsgebietes die Geschwindigkeiten in den drei kartesischen Raumrichtungen, der Druck, die turbulenten Grössen k und ε , der Füllungsgrad der Gitterzellen und weitere abgeleitete Grössen, wie z.B. die Wasserspiegellage.

3.2 Modellperimeter

Um die Anzahl der Gitterzellen des 3D Modells und entsprechend auch den Rechenaufwand zu begrenzen, sollten der obere und untere Modellrand möglichst nahe bei der Messstation liegen. Andererseits müssen der Zulaufbereich und das Unterwasser so gewählt werden, sodass sich die Gerinneströmung ausprägen kann und allfällige Randeinflüsse minimiert werden.

Der Modellperimeter umfasst den Zulaufbereich stromabwärts der Schwelle, die Messstation mit Niedrigwasserrinne sowie einen Teil des Unterwassers (Abbildung 7). Die Ufer im Zulaufbereich und das Unterwasser waren bei der Vermessung schlecht, resp. nicht zugänglich und werden daher vereinfacht abgebildet. Die Sohle im berücksichtigten Zulaufbereich wurde vor Ort vermessen (Kapitel 2.2).

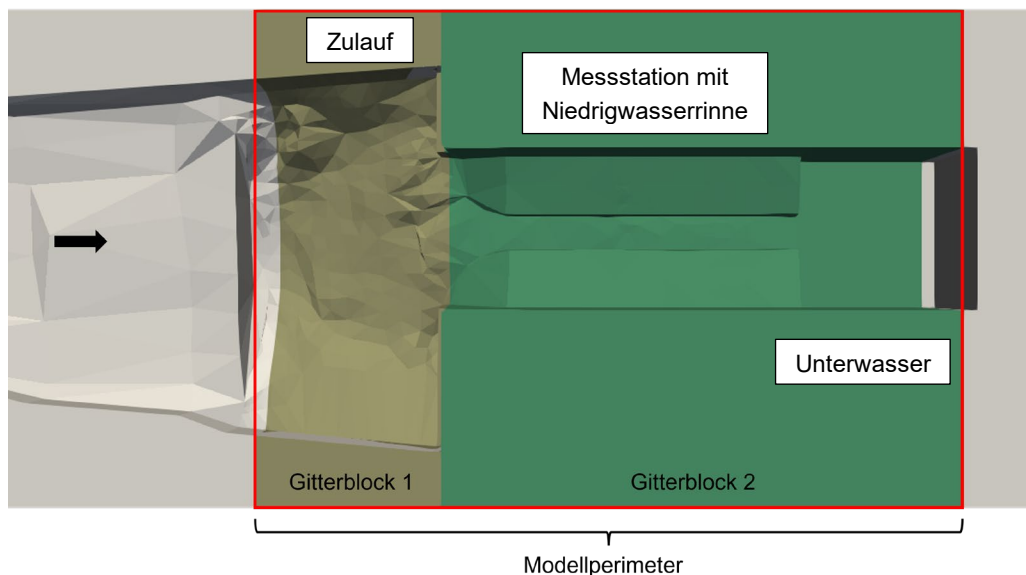


Abbildung 7: Messstation in der Draufsicht mit markiertem Modellperimeter (rot) und verschiedenen Blöcken des Berechnungsgitters; Fließrichtung von links nach rechts.

3.3 Modellierung Messschacht und Lochblech

Hinsichtlich der hydraulischen Wirkungsweise des Messschachts wird davon ausgegangen, dass der Messschacht die Strömungsverhältnisse im Abschnitt der Niedrigwasserrinne und direkt davor nicht beeinflusst. Zudem wird angenommen, dass der mittlere Wasserspiegel am Rand der Rinne entlang des Messschachts dem im Messschacht gemessenen Wert entspricht, vorausgesetzt das Lochblech kann ungehindert durchflossen werden.

Eine detaillierte Abbildung des Lochblechs im numerischen Modell war im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich, weil der erforderliche Berechnungsaufwand den zeitlichen Rahmen gesprengt hätte. Zu Testzwecken wurde das Lochblech in einem Detailmodell (Ausschnitt Rinne und Messkanal) als poröses Medium vereinfacht nachbildet. Jedoch hat sich im Detailmodell der Wasserspiegel im Messschacht immer sehr rasch demjenigen in der Rinne angleichen und ein anhaltender Unterschied in den Wasserspiegellagen aufgrund verminderter Durchlässigkeit konnte mit diesem Ansatz nicht nachgebildet werden. Die Evaluation und Entwicklung alternativer Ansätze wären im Rahmen einer separaten Untersuchung möglich.

Zur Untersuchung der weiteren Aspekte (Abschnitt 1.2) ist eine Abbildung des Lochblechs und des Messschachts im numerischen Modell nicht relevant und deshalb wurde darauf verzichtet.

3.4 Gitterauflösung

Die Gitterauflösung wird einerseits so fein gewählt, dass das Strömungsfeld entsprechend der Fragestellung abgebildet werden kann. Andererseits ergibt sich durch eine zu fein gewählte Auflösung eine enorme Anzahl von Gitterelementen, was dazu führen kann, dass ein gewünschter Simulationszustand, beispielsweise das Gleichgewicht zwischen Zufluss und Abfluss innerhalb des Simulationsperimeters, nicht in praktikabler Frist erreicht werden kann.

Das Rechengitter ist in verschiedene Blöcke mit unterschiedlicher Gitterauflösung aufgeteilt (Abbildung 7). Die mittleren Abmessungen einer Berechnungszelle im Zulaufbereich betragen $dx = 0.10 \text{ m}$, $dy = 0.10 \text{ m}$, $dz = 0.10 \text{ m}$, in der Niedrigwasserrinne und im Unterwasser $dx = 0.025 \text{ m}$, $dy = 0.025 \text{ m}$, $dz = 0.025 \text{ m}$. Letztere wurde auch im Nahbereich der Sohle und von Wänden und im Bereich der Wasseroberfläche verwendet. Aufgrund des VOF-Verfahrens ist die Wasserspiegellage auch innerhalb einer Zelle genau bekannt. Dieses Rechengitter besteht aus ca. 12 Mio. Gitterzellen.

Im unteren Bereich der Niedrigwasserrinne bis zum Übergang zum Freistrahл wurde das Rechengitter im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zusätzlich verfeinert ($dx = 0.0125 \text{ m}$, $dy = 0.0125 \text{ m}$, $dz = 0.0125 \text{ m}$). Damit wurde überprüft, ob die Krümmung der Stromlinien und somit die Senkkurve mit der gewählten Gitterauflösung korrekt abgebildet werden kann. Eine weitere Verfeinerung des Rechengitters in diesem Bereich gegenüber der oben erwähnten Gitterauflösung führt zu keiner massgebenden Veränderung des Verlaufs der Senkkurve. Die gewählte Gitterauflösung wurde somit für die weitere Untersuchung verwendet.

3.5 Sohlrauheit

Die Sohle im Zulaufbereich ist ein natürliches Bachbett mit Geschiebe für welche eine Rauheit von $k_s = 0.1 \text{ m}$ gewählt wurde. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde dieser Wert variiert und es wurde festgestellt, dass der Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in der Niedrigwasserrinne vernachlässigbar ist.

Die Niedrigwasserrinne ist gepflastert (vgl. Abbildung 36 im Anhang). Die Sohlrauheit in der Niedrigwasserrinne wurde als Kalibrierungsparameter verwendet (vgl. Kap. 4.2). Es wurden Rauheiten zwischen $k_s = 1$ und 7 mm getestet und der Wert im kalibrierten Modell auf $k_s = 2 \text{ mm}$ festgelegt.

3.6 Randbedingungen

Am oberen Modellrand beim Zulaufbereich wird ein konstanter Abfluss Q definiert, welcher je nach Szenario variieren kann. Am unteren Modellrand am Ende des Unterwasserbeckens wird die Wasserspiegellage vorgegeben, was einer Druckrandbedingung entspricht. Die Gerinnesohle und alle Wände des Bauwerks werden als undurchlässige Wand definiert.

4 Kalibrierung, Validierung und Plausibilisierung

4.1 Verwendete Szenarien

Für die Kalibrierung wurde das Szenario Vormittag verwendet, d.h. die Geometrie im Zulaufbereich weist Geröllablagerungen auf und der Abfluss beträgt 328 l/s (vgl. Kapitel 2.3). Für die Validierung wurde das Szenario Nachmittag verwendet, wobei der Abfluss 351 l/s beträgt und das Geröll im Zulaufbereich entfernt wurde. Das Modell wurde anhand des gemessenen Pegels in der Mitte der Niedrigwasserrinne beim Steg kalibriert und validiert.

4.2 Kalibrierung

Die Sohlrauheit in der Niedrigwasserrinne wurde als Kalibrierungsparameter verwendet. Dabei wurde die Rauheit so variiert, dass die Wasserspiegellage am Ort des Pegels bestmöglich mit der Simulation übereinstimmt. Folgende Werte für die Rauheit wurden getestet: $k_s = 1, 2, 3, 5$ und 7 mm. Die beste Übereinstimmung mit der Pegelmessung beim Steg konnte mit einer Rauheit von $k_s = 2$ mm erzielt werden (Abbildung 8). Dies wird im Querprofil auf Höhe Pegel Steg bestätigt (Abbildung 9). Dabei wird auch ersichtlich, dass die Wasserspiegellage über den Querschnitt der Niedrigwasserrinne nicht konstant ist.

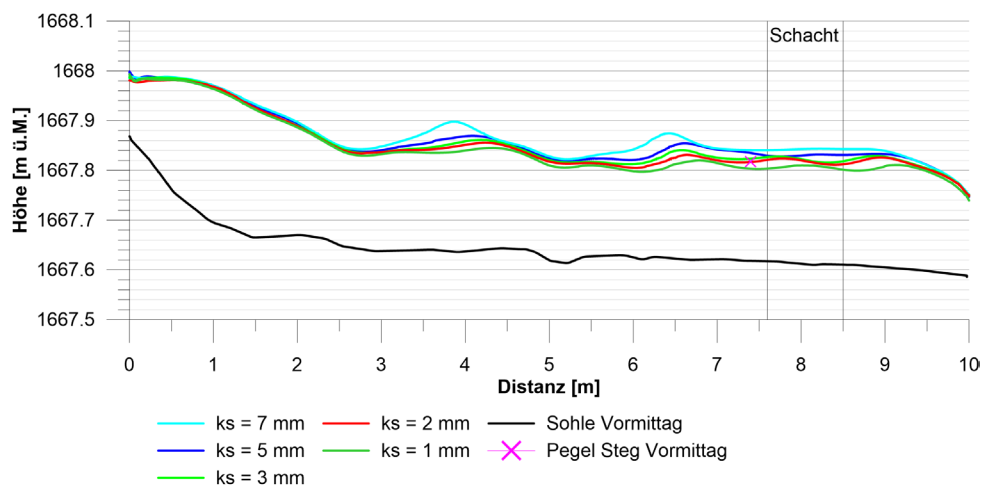


Abbildung 8: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Vormittag.

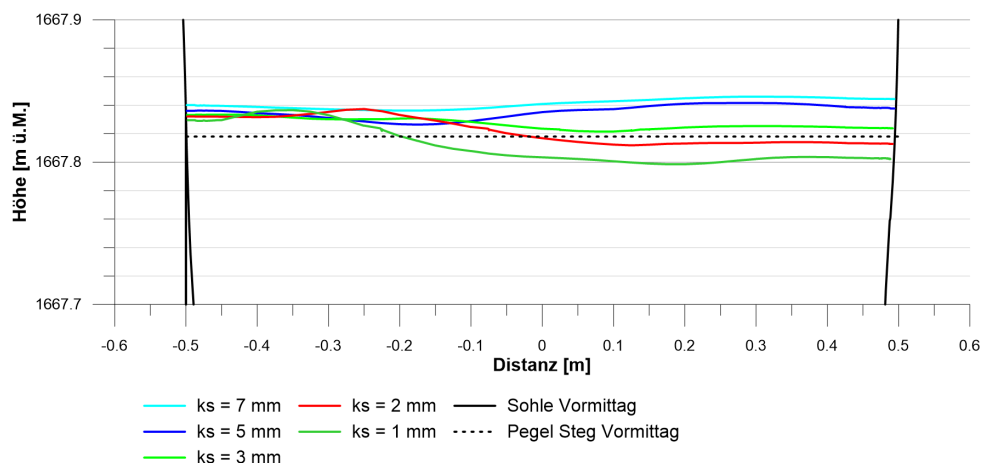


Abbildung 9: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Vormittag.

4.3 Validierung

Für die Validierung wurden folgende Werte für die Rauheit getestet: $k_s = 1, 2$ und 5 mm. Die Parameterwahl aus der Kalibrierung von $k_s = 2$ mm wird durch die Validierung bestätigt. Die beste Übereinstimmung mit der Pegelmessung beim Steg wird mit dieser Rauheit erzielt. Das Modell wird somit für Abflüsse in der Niedrigwasserrinne als robust betrachtet.

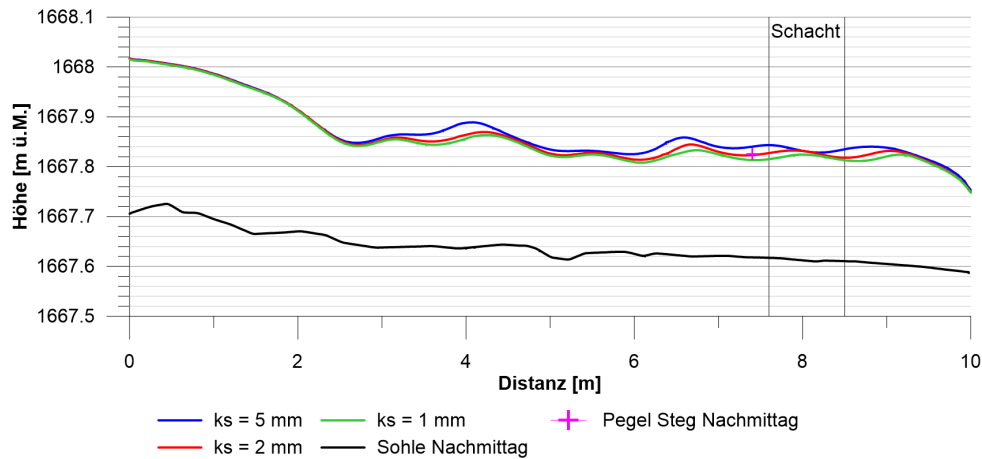


Abbildung 10: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Nachmittag.

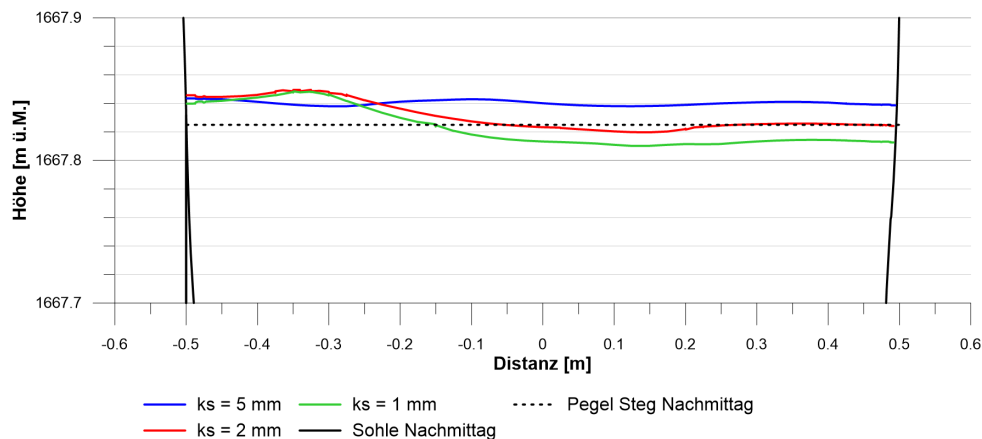


Abbildung 11: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Nachmittag.

4.4 Plausibilisierung

4.4.1 Abflusszustand

Entlang der Niedrigwasserrinne ist der Abfluss bei beiden Szenarien superkritisch (schiessender Abfluss bei Froude-Zahl $Fr > 1$), wie in Abbildung 12 für das Szenario Vormittag aufgezeigt. Dies wird auch durch eine einfache Kontrollrechnung (Tabelle 2) bestätigt. Die Normalabflusstiefe für ein prismatisches Rechteckgerinne mit Proportionen wie die Niedrigwasserrinne für das Szenario

Vormittag liegt bei $h = 0.2$ m und die kritische Abflusstiefe bei $h_{cr} = 0.23$ m, was gut mit der Simulation übereinstimmt.

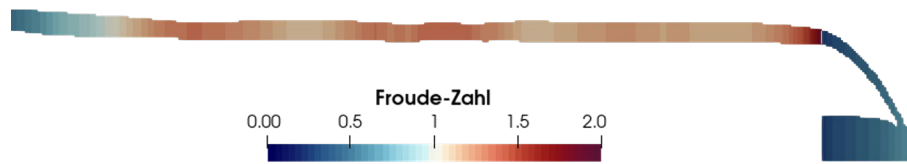


Abbildung 12: Abflusszustand entlang der Niedrigwasserrinne (Vertikalschnitt entlang Mittelachse der Niedrigwasserrinne) für das Szenario Vormittag.

Tabelle 2: Normalabfluss für das Szenario Vormittag unter Annahme eines prismatischen Rechteckgerinnes mit Proportionen wie die Niedrigwasserrinne.

Abfluss (Szenario Vormittag)	[m ³ /s]	0.328
Mittleres Gefälle Niedrigwasserrinne	[m/m]	0.009
Gerinnebreite (Rechteckgerinne, prismatisch)	[m]	1.0
Rauheit (Manning, "brick and cement mortar sewers")	[s/m ^{1/3}]	0.015
Abflusstiefe, h	[m]	0.2
Kritische Abflusstiefe, h_{cr}	[m]	0.23

4.4.2 Stosswellen

Beim Übergang vom Zulaufbereich zur Niedrigwasserrinne kommt es wegen der Querschnittveränderung zur Bildung von Stosswellen oder Störwellen (Abbildung 13), die sich aufgrund des schiessenden Abflusses ausschliesslich stromabwärts fortpflanzen. Der Störungswinkel ist kleiner als 90° und kann, z.B. für das Szenario Vormittag am Anfang der Niedrigwasserrinne, abgeschätzt werden mit:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{Fr}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1.4}\right) \cong 45^\circ$$

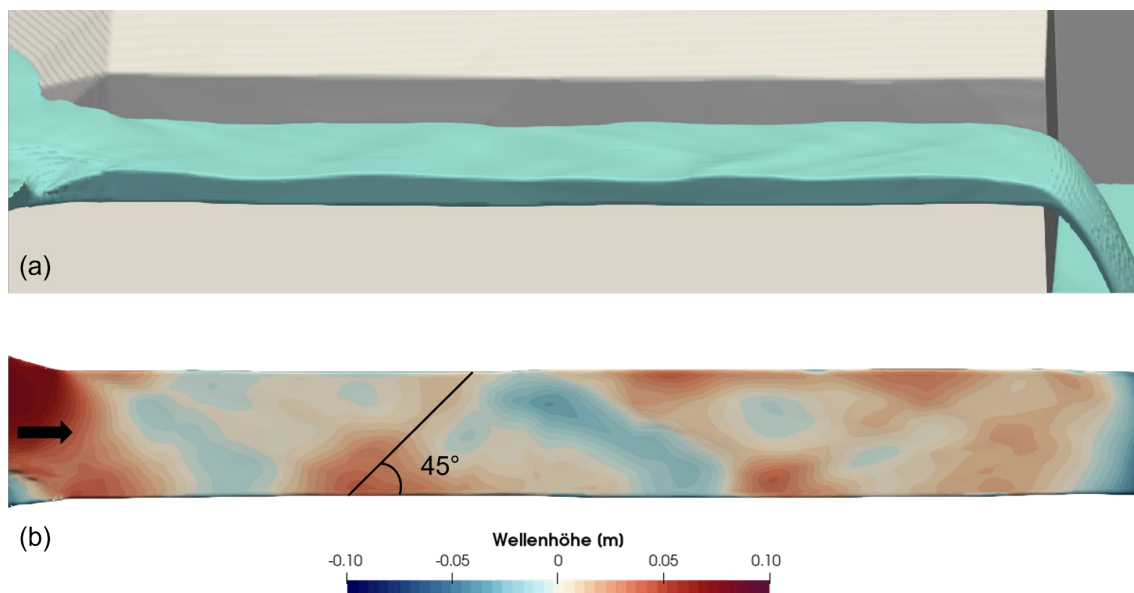


Abbildung 13: Bildung von Stosswellen beim Szenario Vormittag: a) räumliche Ansicht, b) Darstellung der Wellenhöhe (Abflusstiefe – mittlere Abflusstiefe).

4.4.3 Vergleich mit ebener Sohle

Aufgrund des schiessenden Abflusszustands gilt es zu beachten, dass sich allfällige Abweichungen in der Sohlenlage direkt auf die Wasserspiegellage übertragen, wie in Abbildung 14 veranschaulicht. Um diesen Effekt für die vorliegende Situation zu quantifizieren, wurde das Szenario Vormittag mit einer künstlich erstellten, ebenen Sohle in der Niedrigwasserrinne simuliert. Der Unterschied in der Wasserspiegellage bei künstlicher und im Feld vermessener Sohle beträgt lokal bis zu 30 mm (vgl. Abbildung 15). Dabei ist die wahre Geometrie mit den Steinen und Fugen und dem etwas vorstehenden Schlitzbleche nicht berücksichtigt.

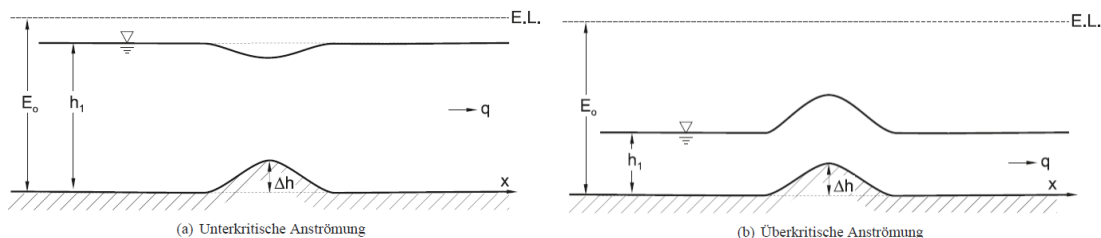


Abbildung 14: Strömungsübergang über eine Sohlenschwelle mit Höhe Δh in einem Kanal mit konstanter Breite bei a) strömendem Abfluss ($Fr < 1$) und b) schiessendem Abfluss ($Fr > 1$) [5].

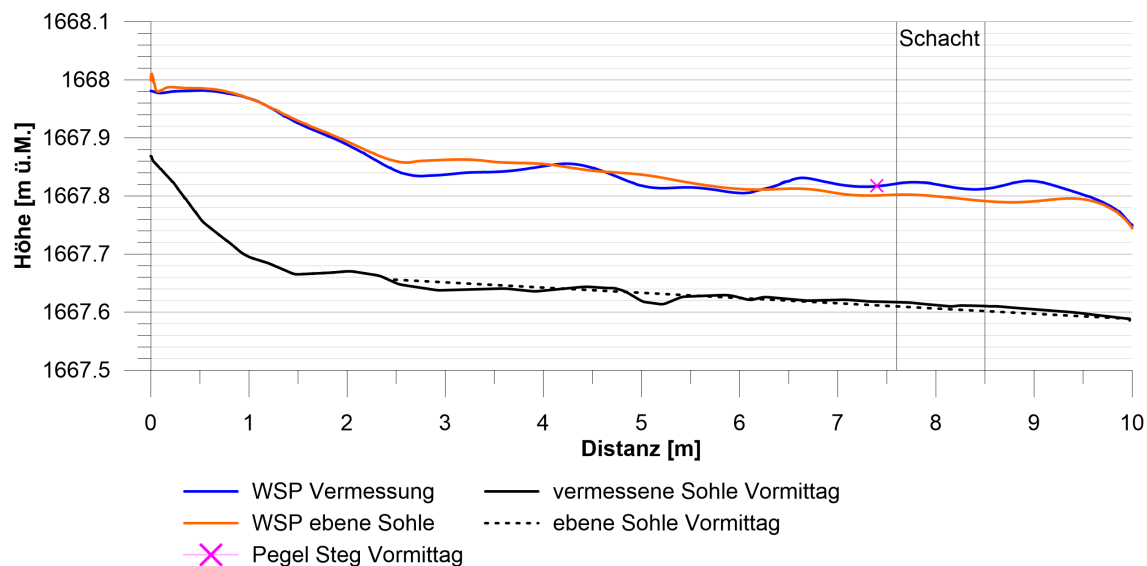


Abbildung 15: Simulierte Wasserspiegellagen bei künstlicher (ebener) und vermessener Sohle für das Szenario Vormittag.

4.5 Fazit

4.5.1 Einfluss der Rauheit

Mit einer Rauheit von $k_s = 2$ mm konnte eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Wasserspiegellage an der Stelle des Pegels am Steg (in der Mitte der Niedrigwasserrinne) erzielt werden. Dies gilt sowohl für den Kalibrierungs- wie auch für den Validierungsfall. Die resultierenden Wasserspiegellagen (Abbildung 8 und Abbildung 10) zeigen auf, dass die Senkkurve mehr als 0.5 m stromabwärts vom Ende des Messschachts beginnt und somit weder die Pegelmessung beim Messschacht noch beim Steg beeinflusst.

Jedoch gilt zu beachten, dass der Wasserspiegel über den Querschnitt nicht horizontal ist. Die Variation der Wasserspiegellage ist auf die Stosswellen zurückzuführen. Die mittleren Wasserspiegellagen vor dem Messschacht aus den Simulationen weichen deutlich von den im Messschacht aufgezeichneten ab. Die Abweichung ist am Vormittag (0.02 m) grösser als am Nachmittag (0.015 m), was auf die Auswirkungen der Reinigung des Lochblechs hinweist und gut mit den Erkenntnissen aus der Feldmessung übereinstimmt (vgl. Abschnitt 2.2, Einfluss der Reinigung ca. 6 mm). Für den Fall mit $k_s = 2$ mm sind die Abweichungen der simulierten mittleren, minimalen und maximalen Wasserspiegellage zur Pegelmessung am Steg und beim Messschacht in Tabelle 3 aufgezeigt.

Tabelle 3: Abweichungen der gemessenen zu den mit dem kalibrierten Modell simulierten Wasserspiegellagen.

alle Angaben in [m]		Vormittag			Nachmittag		
Pegel Steg	gem.	sim.	Differenz	gem.	sim.	Differenz	
Mitte NW Rinne	7.818	7.818	0.000	7.824	7.824	0.000	
Querprofil	min	7.812		min	7.820		
	avg	7.822		avg	7.831		
	max	7.837		max	7.849		

Pegel Schacht	gem.	sim.	Differenz	gem.	sim.	Differenz
im Messschacht (MS)	7.796			7.807*		
Längsprofil (vor MS)	min	7.808		min	7.813	
	avg	7.816	0.020	avg	7.822	0.015
	max	7.826		max	7.839	
Querprofil (Mitte MS)	vor MS	7.824		vor MS	7.830	
	min	7.808		min	7.813	
	avg	7.817		avg	7.823	
	max	7.824		max	7.833	
Mitte NW Rinne		7.819			7.831	

*nach Reinigung Messblech

Wie zu erwarten reagiert die Wasserspiegellage sensitiv auf die unterschiedlichen Rauheiten. Die mittlere Wasserspiegellage variiert beim Pegel Steg für das Szenario Vormittag um 30 mm (7.842 ($k_s = 7$ mm) bis 7.812 ($k_s = 1$ mm), vgl. Tabelle 6 im Anhang A3) und beim Messschacht 40 mm (7.842 bis 7.802). Ebenfalls ist die Variation der Wasserspiegellage, resp. die Ausprägung der Stosswellen, beim Pegel Steg über den Querschnitt je nach Rauheit unterschiedlich: 38 mm bei $k_s = 1$ mm (min. 7.799 und max. 7.837) und 10 mm bei $k_s = 7$ mm (min. 7.836 und max. 7.846). Hingegen sind die Stosswellen stromaufwärts des Stegs mit zunehmender Rauheit deutlich ausgeprägter, was in den Längsprofilen der Wasserspiegellagen ersichtlich ist (Abbildung 8 und Abbildung 10).

4.5.2 Modellgenauigkeit

Wie vorangehend aufgezeigt, hat die Rauheit einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserspiegellage und die Ausprägung der Stosswellen. Mangels detaillierter Grundlagendaten wurde die Rauheit entlang der Niedrigwasserrinne konstant angenommen und allfällige lokale Unterschiede

werden im Modell somit nicht berücksichtigt. Für eine bautechnisch hergestellte Niedrigwasserrinne ist diese Annahme eine gute Annäherung. Des Weiteren ist die Rauheit die massgebende Kalibrierungsgrösse und mit der Kalibrierung werden allfällige Abweichungen minimiert. Das kalibrierte Modell hat eine Rauheit von 2 mm, was einerseits ein plausibler Wert für die glatte Oberfläche der Pflastersteine und der betonierten Seitenwände ist und andererseits auch beim Validierungsszenario zur besten Übereinstimmung mit dem gemessenen Pegel führt.

Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf die Wasserspiegellage (je nach Rauheit lokal bis zu mehr als 30 mm) hat aufgrund des schiessenden Abflusses die Sohlenlage, wie im Abschnitt 4.4.3 veranschaulicht. Die Vermessung der Niedrigwasserrinne ist auf die Bruchkanten entlang der Rinne und einige wenige Punkte in der Rinne beschränkt und bildet nicht die Pflastersteine und Fugen im Detail ab. Im Feld wurden an einer Stelle exemplarisch einige Punkte von aneinandergrenzenden Pflastersteinen vermessen, wobei Unterschiede in der Höhenlage von bis zu 30 mm verzeichnet wurden. Diese Unterschiede kommen beim Modell je nach Rauheit mehr oder weniger zur Geltung (vgl. Abbildung 15).

Aufgrund der obigen Ausführungen wird der Einfluss von Unebenheiten in der Sohle der Niedrigwasserrinne, welche anhand der vorhandenen Datengrundlage nicht quantifizierbar sind, für die absolute Modellgenauigkeit als massgebend angesehen und der Einfluss der Rauheit als zweitrangig.

4.5.3 Unterschied Pegel Steg und Messschacht

Es wird angenommen, dass der mittlere Wasserspiegel am Rand der Rinne entlang des Messschachts dem im Messschacht gemessenen Wert entspricht (vgl. Abschnitt 3.2). Dabei wird vorausgesetzt, dass das Lochblech ungehindert durchflossen werden kann.

Unterschied Pegelmessung

Am Nachmittag nach der Reinigung der Lochblechs (Abfluss von 352.6 l/s) beträgt der Unterschied zwischen der Messung beim Pegel Steg und beim Pegel im Messschacht 12 mm (vgl. Tabelle 1: $7.825 - 7.807 - 0.006 = 12$ mm). Dieser Unterschied beinhaltet die Korrektur aufgrund der topographischen Differenz (6 mm). Aufgrund der Erkenntnisse aus Abschnitt 4.4 wird davon ausgegangen, dass der Unterschied aus einer Kombination von den Unebenheiten in der Sohle der Niedrigwasserrinne und der Ausprägung der Stosswellen herrührt.

Unterschied Simulation

Mit dem kalibrierten Modell beträgt für des Szenario Nachmittag mit einem Abfluss von 351 l/s der Unterschied zwischen der Wasserspiegellage Mitte Niedrigwasserrinne auf Höhe Pegel Steg und der mittleren Wasserspiegellage am Rand der Rinne entlang des Messschachts 2 mm (vgl. Tabelle 3: $7.824 - 7.822 = 2$ mm), was deutlich kleiner als der gemessene Unterschied von 12 mm ist. Unter der Annahme einer exakten Messung, wird diese Abweichung primär auf die vereinfachte Topographie der Gerinnesohle im numerischen Modell zurückgeführt, welche aber auch die Ausprägung der Stosswellen beeinflusst. Die Annahme des Einflusses der unterschiedlichen Geometrie wird durch die Ausführungen in vorangehenden Abschnitt und dadurch gestützt, dass der im Messschacht gemessene Wasserspiegel (7.807) kleiner als die minimale Wasserspiegellage (7.813) aufgrund der Stosswellen vor dem Messschacht ist. Die Unsicherheit im Wasserspiegel aufgrund der kleinräumigen Unterschiede in der Geometrie der Niedrigwasserrinne (Steine und Fugen) beträgt bei Schacht rund 15 mm.

5 Resultate

Die Strömungsverhältnisse in der Niedrigwasserrinne und somit die Pegelmessung können durch verschiedene Aspekte beeinflusst werden. Um die Auswirkung ausgewählter Aspekte und deren Sensitivität auf die Strömungsverhältnisse zu beurteilen, wurde eine Reihe verschiedener Szenarien untersucht. Diese umfassen die Geröllablagerungen im Zulaufbereich, Eisbildung in der Rinne und den Einfluss der Wassertemperatur.

Um bei diesen Simulationen die Unsicherheiten (insbesondere die vereinfachte Topographie der Gerinnesohle im numerischen Modell und das Zusammenspiel mit der Ausprägung der Stosswellen) zu reduzieren und somit die Aussagekraft zu stärken, wurde für alle Szenarien das Modell mit einer künstlich erstellten, ebenen Sohle in der Niedrigwasserrinne verwendet.

5.1 Ablagerungen im Zulaufbereich

Im Zulaufbereich vor der Niedrigwasserrinne kann sich Geschiebe ablagern, welches die Zulaufbedingungen verändert. Im vorliegenden Fall befanden sich die Ablagerungen orographisch links vor dem Übergang in die Niedrigwasserrinne und bestanden aus Geröll (mehrheitlich grössere Steine). Dieses Geröll wurde nach der Messung am Vormittag per Hand weggeräumt. Dadurch hat sich die Strömung beim Übergang in die Niedrigwasserrinne deutlich verändert, wie u.a. die beiden Vermessungen vom Vormittag und Nachmittag (vgl. Kap. 2.2) und die entsprechenden Fotos (Abbildung 16) zeigen.



Abbildung 16: Strömung beim Übergang vom Zulaufbereich zur Niedrigwasserrinne für Szenario Vormittag (links) und Szenario Nachmittag nach Räumung des Gerölls (rechts). Quelle: BAFU und M. Margreth

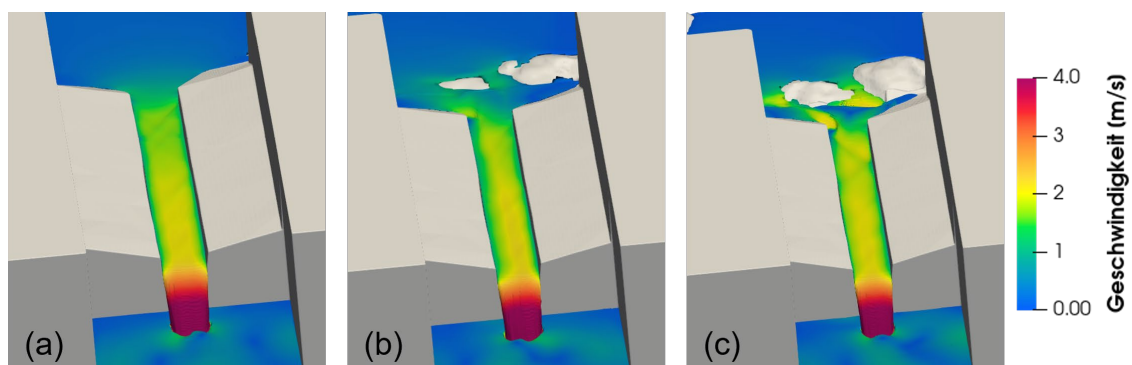


Abbildung 17: Sohle im Zulaufbereich (a) ohne Ablagerungen (Szenario Nachmittag), (b) mit etwas Geröll (Szenario Vormittag) und (c) mit viel Geröll.

Um den Einfluss dieses Gerölls auf das Abflussverhalten in der Rinne zu untersuchen, wurden drei Fälle mit unterschiedlich stark ausgeprägten Ablagerungen betrachtet, welche in Abbildung 17 dargestellt sind: Der Referenzfall ohne Ablagerungen (Szenario Nachmittag), ein Fall mit etwas Geröll (Szenario Vormittag) und ein Fall mit viel Geröll.

Die Ablagerungen führen zu einer asymmetrischen Anströmung der Niedrigwasserrinne, welche sich auf das Geschwindigkeitsfeld und die Bildung der Stosswellen auswirkt, wie ein Vergleich von Abbildung 17a) bis c) illustriert. Die Verlagerung der maximalen Geschwindigkeiten in der Rinne zur orographisch linken Seite hin ist für den Fall mit etwas Geröll (Szenario Vormittag, Abbildung 17b)) am ausgeprägtesten.

Die resultierende Auswirkung auf die Wasserspiegellage in der Mitte der Niedrigwasserrinne ist in Abbildung 18 für die drei Fälle dargestellt. Besonders in der oberen Hälfte der Niedrigwasserrinne ist der Wasserspiegel deutlich durch die Zulaufbedingungen beeinflusst. Beim Fall mit viel Geröll sind die Stosswellen am stärksten ausgeprägt. Entlang der Rinne schwächt sich der Einfluss aber ab und die Wasserspiegellagen gleichen sich einander an. Auf der Höhe des Pegels am Steg ist der Unterschied zwischen den Fällen noch erkennbar. Die Differenz der mittleren Wasserspiegellage für die Fälle mit viel und ohne Geröll beträgt bis zu 0.5 cm.

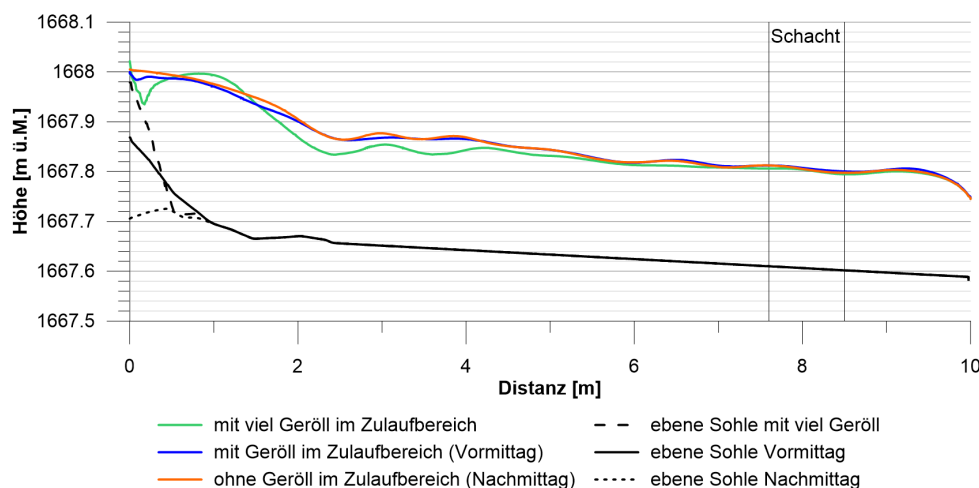


Abbildung 18: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne für die verschiedenen Szenarien ohne und mit Geröll im Zulaufbereich.

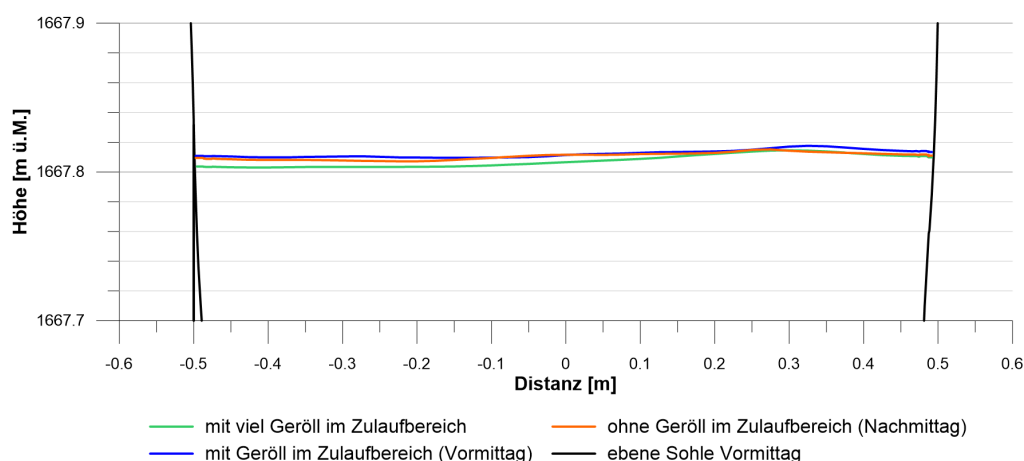


Abbildung 19: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg für die verschiedenen Szenarien ohne und mit Geröll im Zulaufbereich.

5.2 Eisbildung in der Niedrigwasserrinne

Im Winter, insbesondere bei lang anhaltenden Kälteperioden, kann es in der Niedrigwasserrinne zur Bildung von Eis kommen (vgl. Kap. 1.2 und Abbildung 2). Um die Auswirkungen einer allfälligen Eisbildung im numerischen Modell zu beurteilen, wurden beim Szenario Vormittag exemplarisch zwei halbelliptische Körper auf Höhe des Wasserspiegels eingebaut, welche die Eisbildung repräsentieren sollen (Abbildung 20).

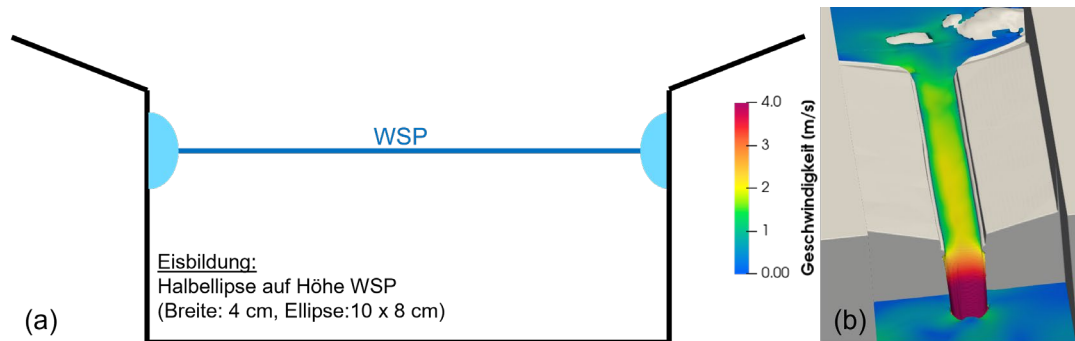


Abbildung 20: (a) Schematische Darstellung der Eisbildung im Querschnitt der Niedrigwasserrinne und (b) Niedrigwasserrinne mit Eisbildung im numerischen Modell.

In Abbildung 21 sind die Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne und in Abbildung 22 die Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe des Pegels beim Steg für die Fälle mit und ohne Eisbildung dargestellt. Die Wasserspiegel im Fall mit Eisbildung liegen im Bereich der Pegel rund 2 cm höher als im Fall ohne Eisbildung.

Die Eiskörper reduzieren den Abflussquerschnitt und verursachen so höhere Pegelstände. Dabei ist die Reduktion des Abflussquerschnitts abhängig von der Grösse, Form und Ausdehnung des Eises und kann lokal unterschiedlich sein. Die Bildung von Eiskörpern in der Niedrigwasserrinne kann also eine mögliche Erklärung dafür sein, wenn unterschiedliche Pegelwerte für denselben Abfluss gemessen werden.

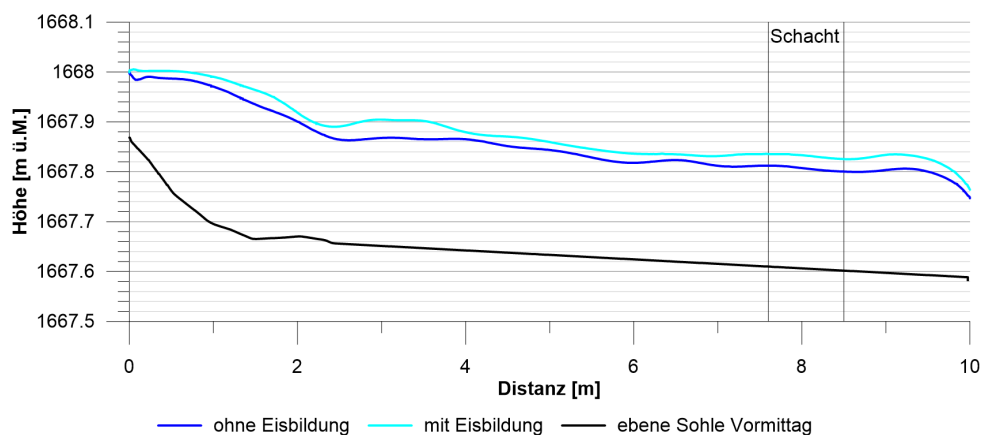


Abbildung 21: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne simuliert ohne und mit Eisbildung für das Szenario Vormittag mit ebener Sohle.

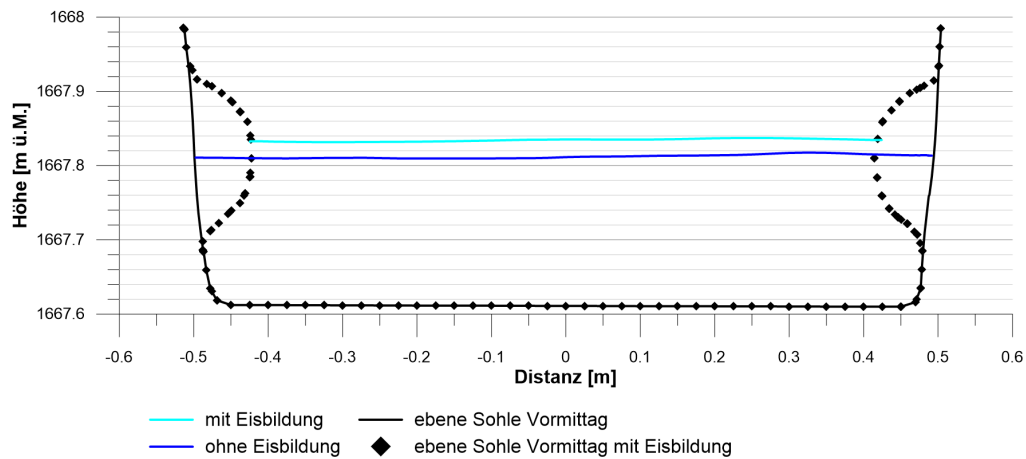


Abbildung 22: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg für das Szenario Vormittag mit ebener Sohle, ohne und mit Eisbildung.

5.3 Temperatureinfluss

In den Wintermonaten kann die Wassertemperatur im Dischmabach auf Temperaturen zwischen 0 und 4°C sinken. Je nach Wetterlage kann es zu tageszeitabhängigen Temperaturschwankungen kommen. Da die Dichte und die Viskosität temperaturabhängig sind, kann dies das fluiddynamische Verhalten beeinflussen. Um die Auswirkungen der Temperatur auf die Strömungsverhältnisse und somit den Pegelstand in der Niedrigwasserrinne bei gleichbleibendem Abfluss zu untersuchen, wurden drei Szenarien mit den Temperaturen 0°C, 4°C und 20°C simuliert. Die jeweiligen Werte für Dichte und dynamische Viskosität, welche in FLOW-3D hinterlegt sind, sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Dichte und dynamische Viskosität von Wasser bei verschiedenen Temperaturen

	Dichte [kg/m ³]	Dynamische Viskosität [kg/m/s]
0°C	999.9	0.001792
4°C	1000	0.001519
20°C	998.2	0.001005

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Längsprofile der Wasserspiegellage in der Mitte der Niedrigwasserrinne sowie die Querprofile der Wasserspiegellage auf Höhe des Pegels am Steg der Simulationen mit unterschiedlichen Wassertemperaturen dargestellt. Es kommt nur stellenweise zu sehr geringfügigen Abweichungen der Wasserspiegellage, so z.B. am Einlauf der Niedrigwasserrinne. Insgesamt ist der Einfluss der Temperatur im Modell jedoch vernachlässigbar und es stellen sich an den Pegelmessstellen identische Abflussskoten ein.

Diese Simulationen zeigen auf, dass Abflussschwankungen bei gleichem Pegelstand nicht durch tagesgangabhängige oder anderweitig verursachte Temperaturänderungen des Wassers hervorgerufen werden.

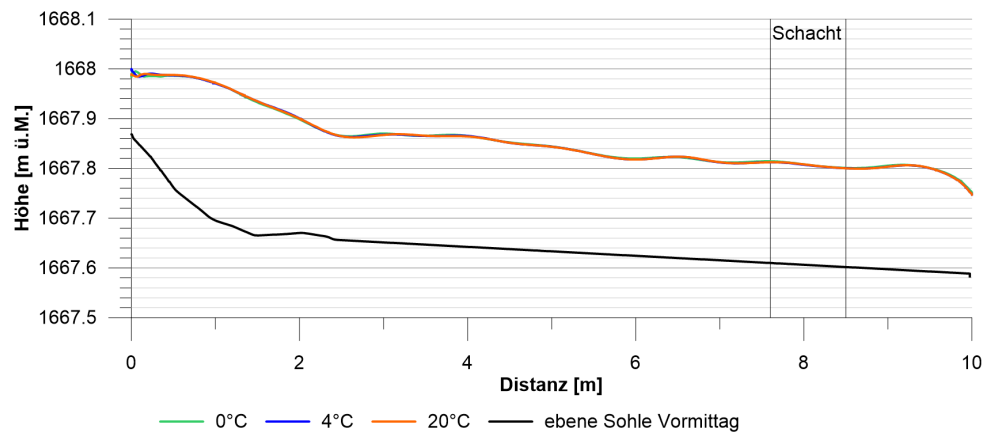


Abbildung 23: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne simuliert mit unterschiedlichen Temperaturen für das Szenario Vormittag mit ebener Sohle.

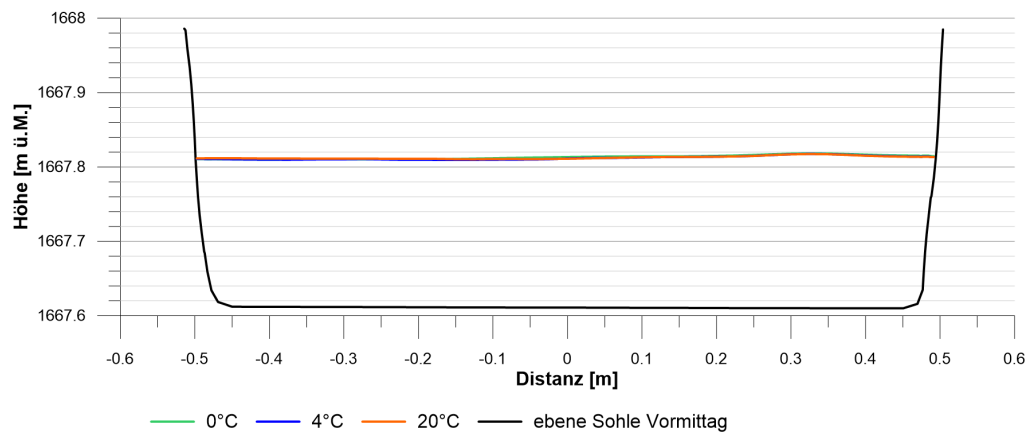


Abbildung 24: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg simuliert mit unterschiedlichen Temperaturen für das Szenario Vormittag mit ebener Sohle.

5.4 Vergleich mit den bestehenden Schlüsselkurven

Am Dischmabach liegen für Abflüsse kleiner als Q_{347} grösstenteils keine oder nur wenige Eichmessungen vor und selbst für Abflüsse im Niedrigwasserbereich (Abflüsse kleiner als Q_{250}) gibt es Jahre ohne Eichmessung. Die Werte für kleine Abflüsse müssen daher aus den Eichmessungen höherer Abflüsse extrapoliert werden.

Um eine Grundlage für eine Schlüsselkurve im Niedrigwasserbereich zu schaffen und die vorhandene Schlüsselkurven zu überprüfen, wurde eine Reihe von Abflüssen zwischen 80 und 20'000 l/s mit dem numerischen Modell für eine vereinfachte Geometrie des Zulaufbereichs und des Unterwassers (Abbildung 7) sowie mit der Sohle Nachmittag simuliert (Tabelle 5). Die Wasserspiegellagen an der Stelle des Pegels Steg (minimale, maximale und über dem Querschnitt gemittelte Wasserspiegellage) und beim Messschacht (gemittelte Wasserspiegellage aus Längsprofil vor dem Messschacht) wurden ausgewertet (vgl. Tabelle 7 im Anhang). Hier werden die simulierten Wasserspiegellagen mit zwei ausgewählten Schlüsselkurven und den Messwerten des BAFU verglichen. Die Herleitung einer neuen Schlüsselkurve war nicht Teil dieses Auftrags.

Tabelle 5: Simulierte Abflüsse zum Vergleich mit bestehenden Schlüsselkurven.

Q [l/s]	Anmerkung
80	
160	
300	Q_{347}
351	Szenario Nachmittag (Validierung)
530	Q_{250}
800	Q_{200}
1'100	knapp unter Oberkante Niedrigwasserrinne
1'200	bordvoller Abfluss Niedrigwasserrinne
1'300	knapp über Oberkante Niedrigwasserrinne
1'600	
2'000	strömender Abfluss ganze Niedrigwasserrinne
3'000	
4'600	Übergang Kanalsohle zu Kanalwänden
6'000	
10'000	HQ2
20'000	HQ200

5.4.1 Abflüsse bis Q_{250}

Für den Pegel Steg liegen die simulierten Wasserspiegellagen für Abflüsse kleiner als 350 l/s tendenziell etwas höher als die extrapolierte Schlüsselkurve des BAFU vom 01.02.2021. Hingegen liegt der Wert für Q_{250} (530 l/s) etwas tiefer (Abbildung 25). Beim Messschacht liegen die Wasserspiegellagen bei allen untersuchten Abflüssen etwas tiefer als die Schlüsselkurve des BAFU vom 13.08.2020 (Abbildung 26).

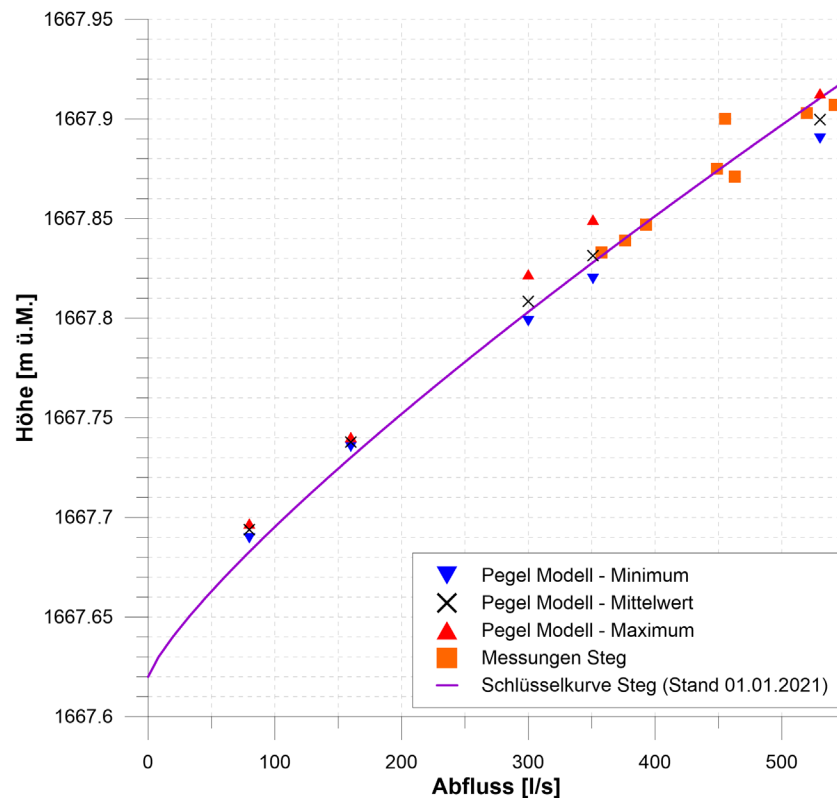


Abbildung 25: Simulierte Wasserspiegellagen (minimale, maximale und über dem Querschnitt gemittelte Wasserspiegellage) und in der Mitte der Niedrigwasserrinne gemessene Wasserspiegellagen an der Stelle Pegel Steg sowie entsprechende Schlüsselkurve des BAFU für Abflüsse kleiner als 550 l/s.

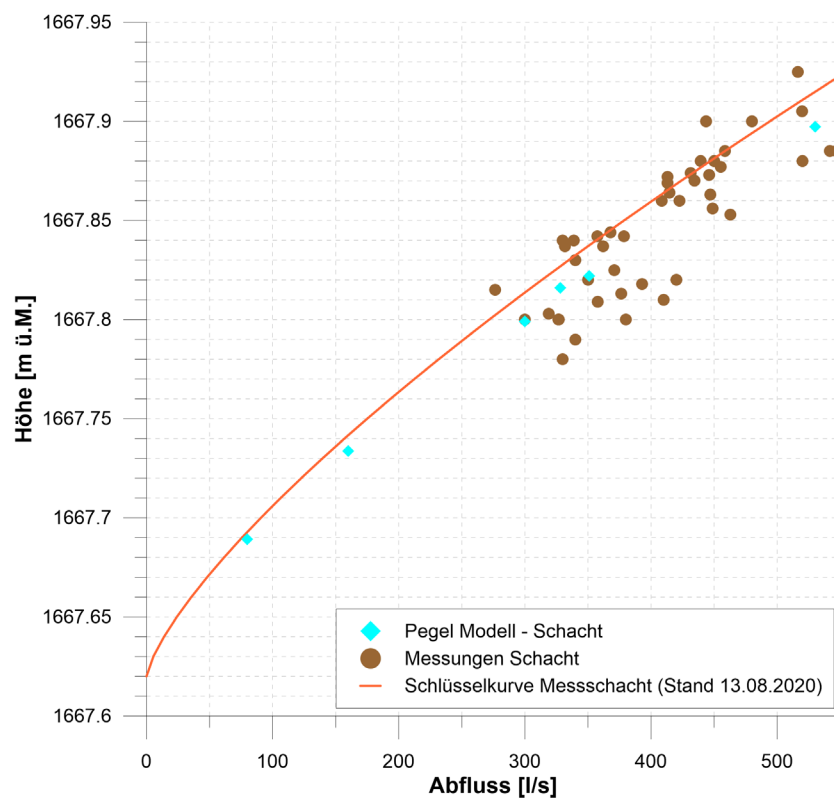


Abbildung 26: Simulierte Wasserspiegellagen (gemittelte Wasserspiegellage aus Längsprofil vor dem Messschacht) und im Messschacht gemessene Wasserspiegellagen sowie entsprechende Schlüsselkurve des BAFU für Abflüsse kleiner als 550 l/s.

5.4.2 Abflüsse bis HQ200

Das numerische Modell wurde für Abflüsse und Abflusszustände in der Niedrigwasserrinne kalibriert, validiert und plausibilisiert (vgl. Kapitel 4). Das bedeutet, dass mit dem Modell für diesen Abflussbereich unter Berücksichtigung der Modellgenauigkeit realistische Wasserspiegellagen resultieren. Dies gilt jedoch nicht zwingend für Abflüsse, bei denen der Wasserspiegel die Tiefe der Niedrigwasserrinne übersteigt. Deshalb wird hier zusätzlich auf die Abflusszustände und den Einfluss der Reibung bei Abflüssen im Messkanal eingegangen.

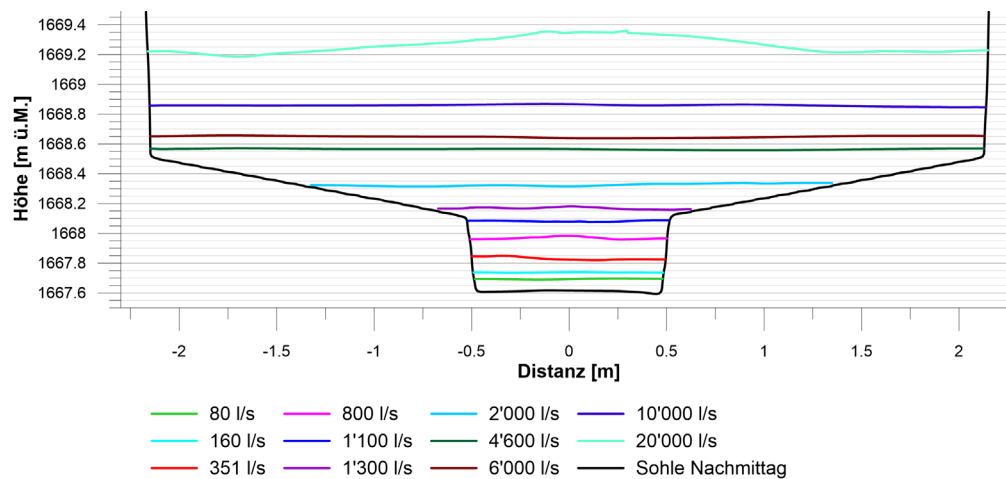


Abbildung 27: Querprofile der simulierten Wasserspiegellagen auf Höhe Pegel Steg für ausgewählte Abflüsse.

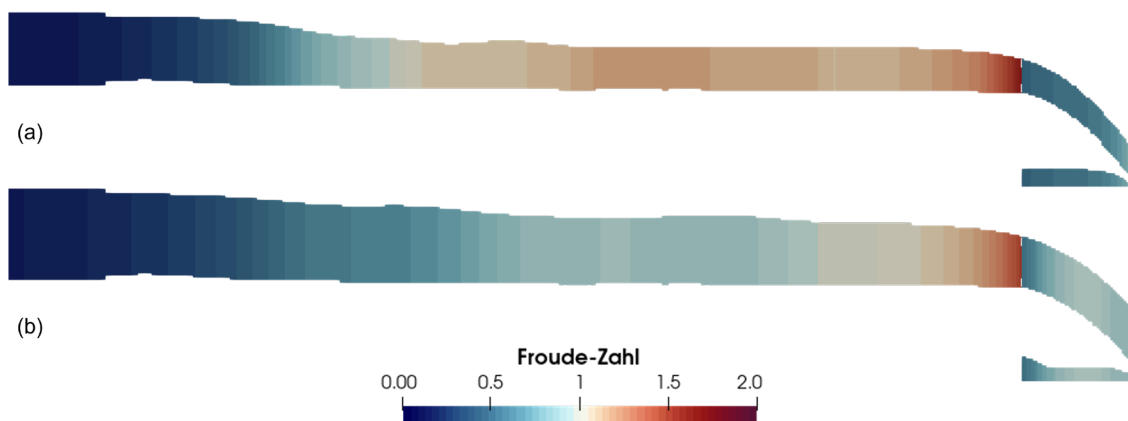


Abbildung 28: Abflusszustand entlang der Niedrigwasserrinne (Vertikalschnitt entlang Mittelachse der Niedrigwasserrinne) bei a) 1'100 l/s und b) 2'000 l/s.

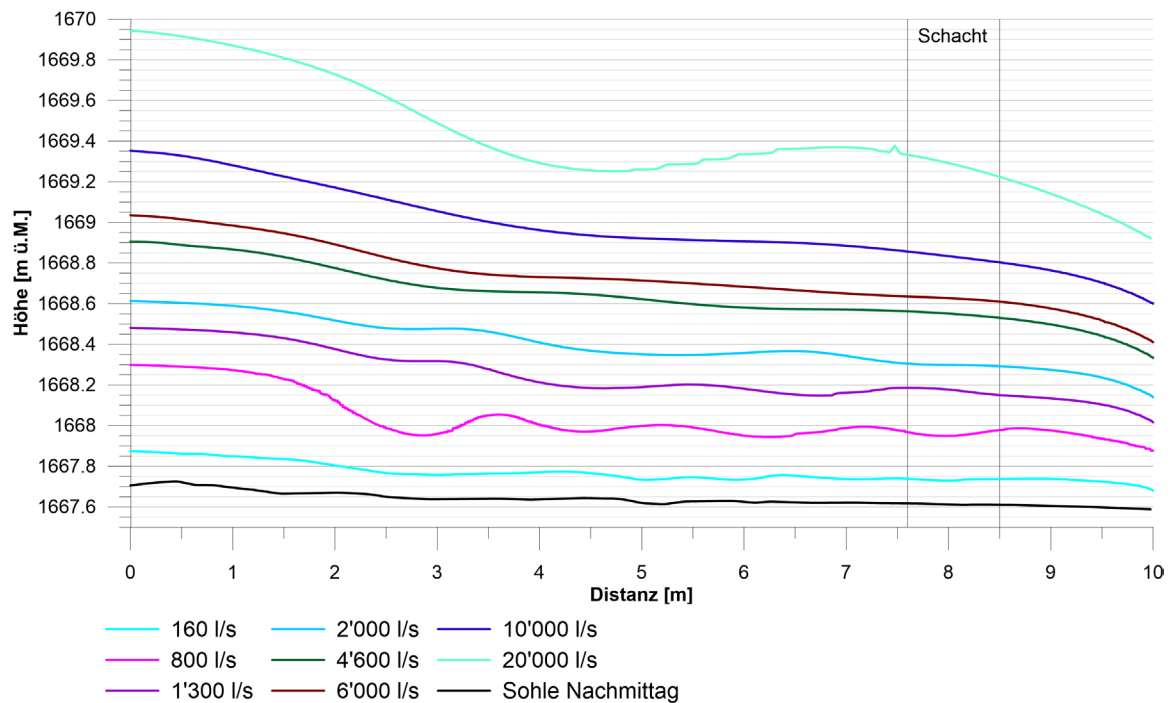


Abbildung 29: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne, resp. des Messkanals für ausgewählte Abflüsse.

Abflusszustände

Die Wasserspiegellagen im Querprofil auf der Höhe des Pegels beim Steg sind für berechnete Abflüsse bis 20'000 l/s in Abbildung 27 veranschaulicht. Die Abflusstiefe auf Höhe Steg beträgt beim kleinsten Abfluss von 80 l/s ca. 10 cm und steigt an bis ca. 50 cm bei bordvollem Abfluss von 1'200 l/s. Im Bereich des bordvollen Abflusses (bei ca. 1'100 l/s) verändert sich auch der Abflusszustand in der Niedrigwasserrinne und es kommt zunehmend zu strömendem Abfluss entlang der Rinne (Abbildung 28a). Bei einem Abfluss von 2'000 l/s ist der Abfluss entlang der Rinne bis kurz vor dem freien Überfall ins Unterwasser strömend (Abbildung 28b). Dies äussert sich auch durch den Rückgang der Stosswellen, welche bei 2'000 l/s nur noch ansatzweise erkennbar sind (Abbildung 29). Bei den Abflüssen 4'600 und 6'000 l/s kommt es aufgrund des Überfalls nur annähernd zu Normalabfluss im Messkanal. Bei 10'000 l/s wirkt sich die Senkkurve des Überfalls bis in den Bereich des Messschachts aus, was bei einem Abfluss von 20'000 l/s noch ausgeprägter ist. Bei Letzterem kommt es zur Bildung von zwei ausgeprägten Wellen, die auf die Einschnürung der Strömung beim Übergang vom Zulaufbereich zum Messkanal zurückzuführen sind (Abbildung 30). In Anhang sind ergänzend Vertikalschnitte der Froude-Zahl entlang Mittelachse der Niedrigwasserrinne für ausgewählte Abflüsse von 351 l/s bis 2'000 l/s (Abbildung 39) und Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne, resp. des Messkanals für Abflüsse von 80 l/s bis 1'300 l/s (Abbildung 40) aufgezeigt.

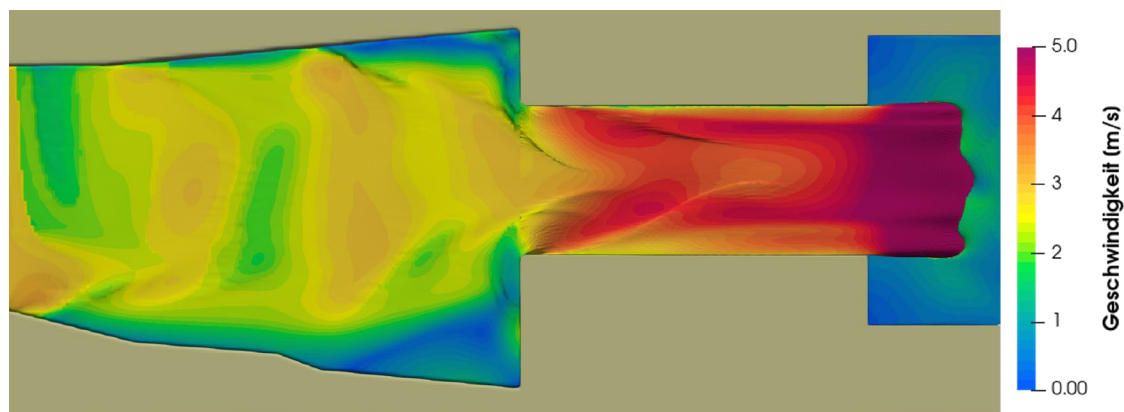


Abbildung 30: Messstation in der Draufsicht mit Zulaufbereich und Überfall ins Unterwasser (Fließrichtung von links nach rechts) bei einem Abfluss von 20'000 l/s. Dargestellt ist die Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche.

Einfluss der Rauheit

Der Einfluss einer unterschiedlichen Rauheit von der Niedrigwasserrinne ($k_s = 2$ mm) und den Berandungen der Messkanals ($k_s = 5$ mm) auf die Wasserspiegellage wurde für die Abflüsse 2'000 l/s und 4'600 l/s untersucht. Zudem wurde eine generelle Erhöhung der Rauheit auf $k_s = 10$ mm, z.B. aufgrund von Moosbewuchs, für die Abflüsse 800 l/s und 2'000 l/s untersucht. Eine erhöhte Rauheit bei den Berandungen des Messkanals führt lokal zu stellenweise höheren Wasserspiegellagen und einer Veränderung des Stosswellenmusters (Abbildung 31), was sich mit den Erkenntnissen aus der Kalibrierung deckt (vgl. Abschnitt 4.2). Jedoch ist der Einfluss auf die Stosswellen bei einem Abfluss von 2'000 l/s aufgrund deren Abschwächung nur noch gering. Mit zunehmendem Abfluss nimmt der Einfluss ab.

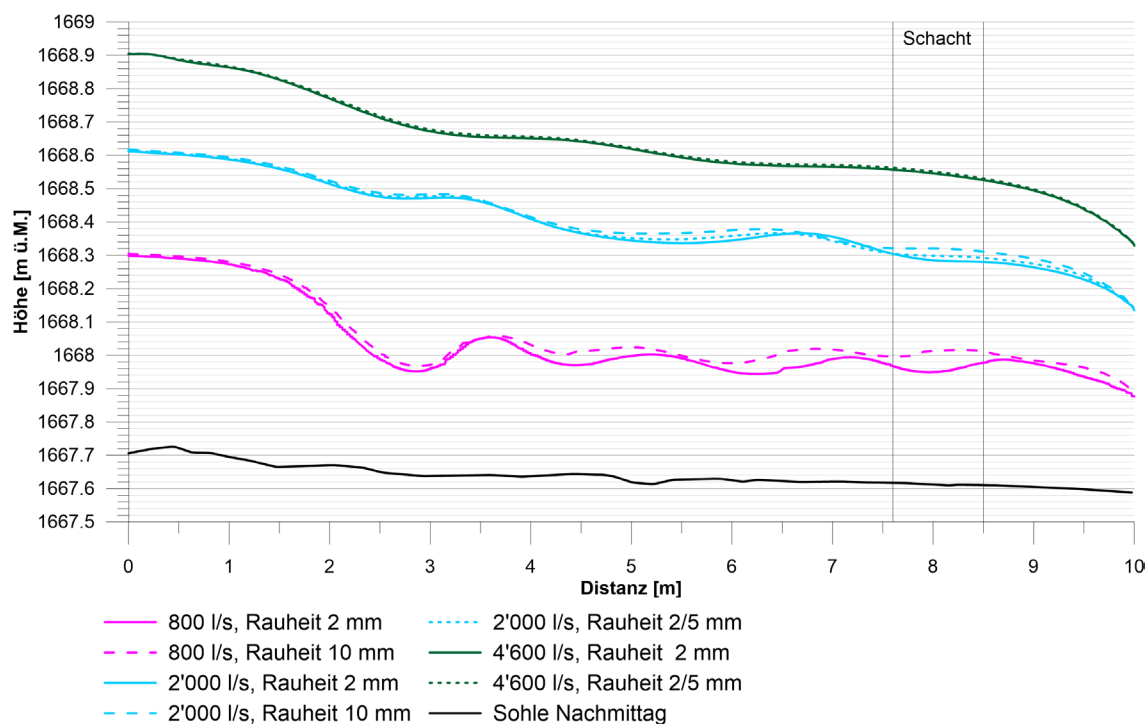


Abbildung 31: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte des Messkanals simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für zwei Abflüsse über dem bordvollen Abfluss der Niedrigwasserrinne.

Für die Simulationen der Abflüsse über dem bordvollen Abfluss der Niedrigwasserrinne wurde bei der Niedrigwasserrinne die Rauheit aus der Kalibrierung ($k_s = 2 \text{ mm}$) beibehalten und für die übrigen Berandungen der Messkanals eine Rauheit von $k_s = 5 \text{ mm}$ angesetzt.

Vergleich mit Schlüsselkurven

Für den Pegel Steg liegen die Wasserspiegellagen für die simulierten Abflüsse zwischen 800 l/s und 2'000 l/s tendenziell tiefer als die Schlüsselkurve des BAFU vom 01.02.2021 (Abbildung 32), wobei für den Bereich von 1'161 l/s bis 2'350 l/s keine Abflussmessungen vorliegen. Im diesem Bereich liegt auch der Übergang zwischen strömendem und schiessendem Abfluss sowie der Übergang vom Abfluss in der Niedrigwasserrinne zum Abfluss im Messkanal. Der Einfluss der Rauheit ist deutlich kleiner als die aufgezeigten Abweichungen zur Schlüsselkurve. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede könnten Abweichungen in der Geometrie sein, insbesondere im Zulaufbereich, was wiederum einen Einfluss auf die Bildung von Stosswellen hat. Beispielsweise kommt es aufgrund der unterschiedlichen Stosswellenmuster beim Abfluss 1'200 l/s im Bereich der Pegelmessstellen stellenweise zu einer mehr als 5 cm tieferen Wasserspiegellage oder stellenweise sogar höheren Wasserspiegellage als bei 1'300 l/s (vgl. Abbildung 40, Längsprofile für Abflüsse 1'200 l/s und 1'300 l/s). Basierend auf den vorhandenen Grundlagen (Messdaten, Geometrie) ist eine abschliessende Beurteilung nicht möglich.

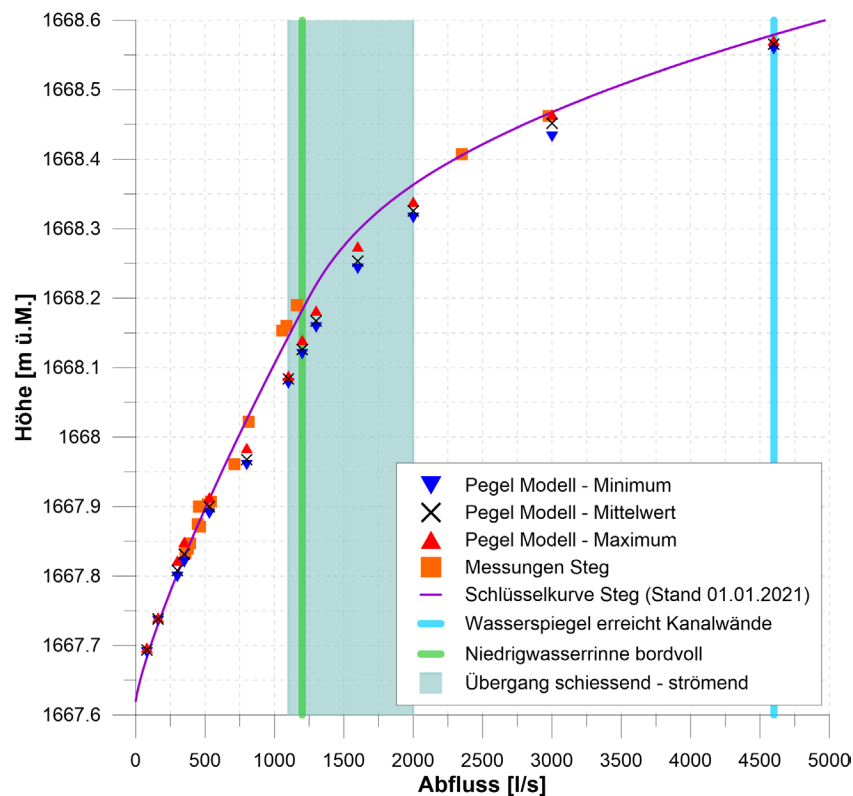


Abbildung 32: Simulierte Wasserspiegellagen (minimale, maximale und über dem Querschnitt gemittelte Wasserspiegellage) und Eichmessungen (bezogen auf gemessene Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne) an der Stelle Pegel Steg sowie entsprechende Schlüsselkurve des BAFU für Abflüsse bis 4'600 l/s.

Beim Messschacht liegen die Wasserspiegellagen für die simulierten Abflüsse zwischen 800 l/s und 2'000 l/s ebenfalls tendenziell tiefer als die Schlüsselkurve des BAFU vom 13.08.2020 (Abbildung 33). Jedoch liegen die simulierten Werte gut im Bereich der Abflussmessungen. In Anbetracht der nahezu ebenen Wasserspiegellage im Bereich des Messschachts bei diesen Abflüssen (vgl. Abbildung 29) ist dieses Resultat plausibel.

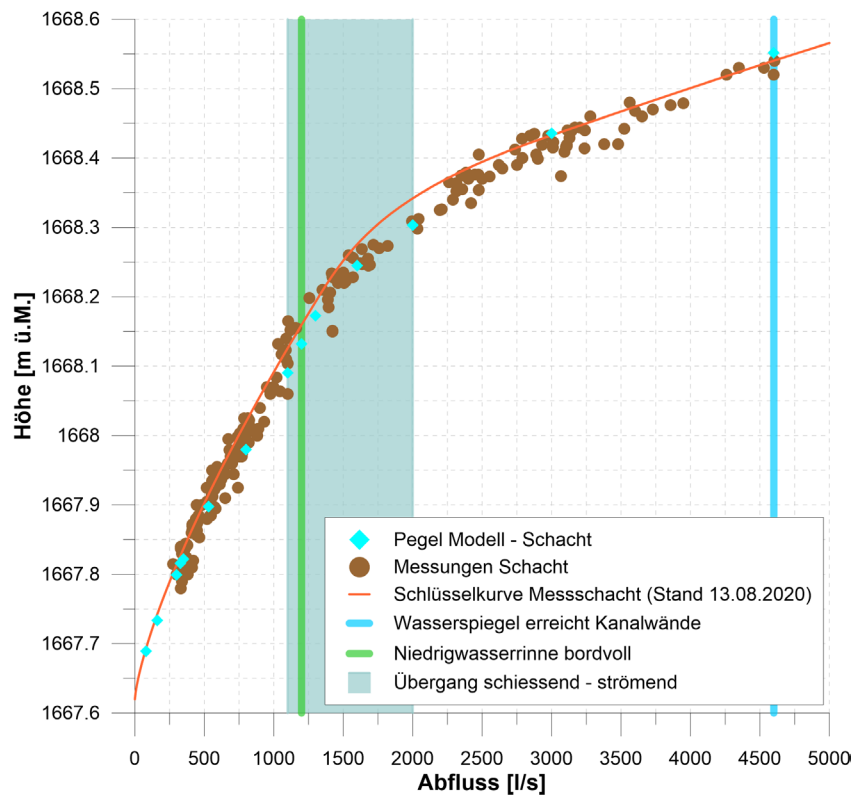


Abbildung 33: Simulierte Wasserspiegellagen (gemittelte Wasserspiegellage aus Längsprofil vor dem Messschacht) und Eichmessungen sowie entsprechende Schlüsselkurve des BAFU für Abflüsse bis 4'600 l/s.

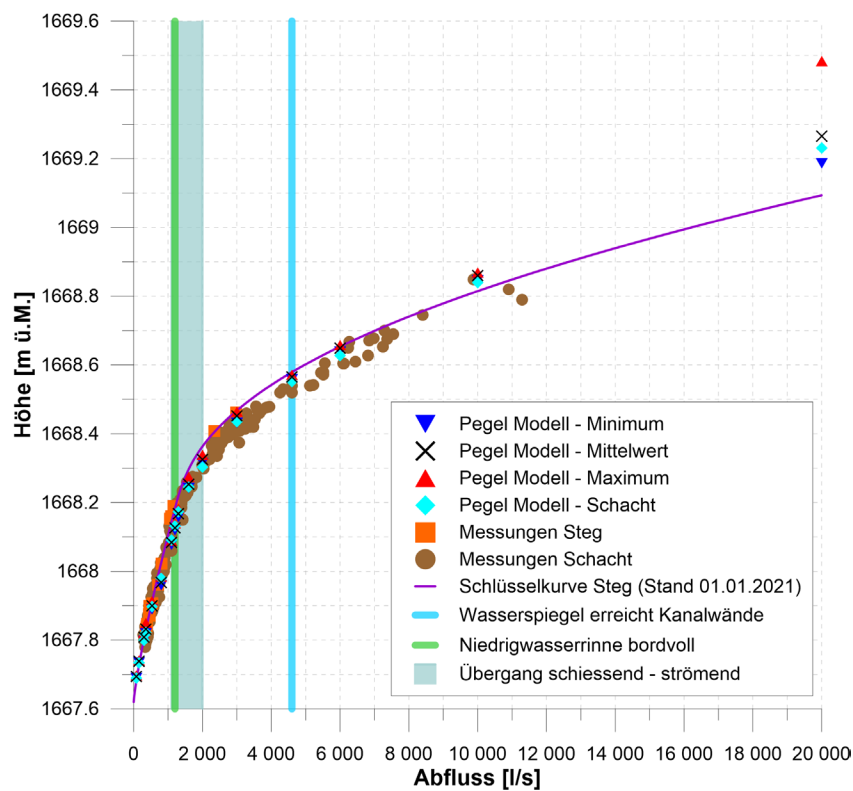


Abbildung 34: Eichmessungen bezogen auf den Pegel beim Steg und im Messschacht sowie alle simulierten Wasserspiegellagen und entsprechende Schlüsselkurve des BAFU für Abflüsse bis 20'000 l/s (HQ200) an der Messtation Dischmabach.

Für die Abflüsse grösser als 2'000 l/s liegen keine Durchflussmessungen für den Pegel Steg vor. Die simulierten Wasserspiegellagen stimmen jedoch gut mit den Abflussmessungen bezogen auf den Pegel des Messschachtes überein (Abbildung 34). Der simulierte Wasserspiegel für 10'000 l/s stimmt zudem sehr gut mit der Flügelmessung vom 13.06.2019 (Wassermessung Nr. 98583) überein: 9'870 l/s bei einem Wasserstand von 1668.85. Die Abflussverhältnisse zum Zeitpunkt der Messung sind in Abbildung 35 gezeigt.

Beim Resultat für den grössten simulierten Abfluss von 20'000 l/s gilt insbesondere zu beachten, dass die Geometrie des Zulaufbereichs sowie des Unterwassers einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserspiegellage im Messkanal und somit am Pegel Steg und Pegel Messschacht haben kann. Aufgrund der vereinfachten Geometrie ist das Ergebnis mit Vorsicht zu interpretieren.



Abbildung 35: Abflussverhältnisse an der Messtation Dischmabach am 13.06.2019 bei einem Abfluss von 9'870 l/s: links Zulaufbereich und rechts Unterwasser. Foto: A. Kohler, BAFU

6 Schlussfolgerungen

Die Strömungsverhältnisse an der Messstation Dischmabach wurden mit einem numerisches 3D Modell untersucht, wozu verschiedene Abflüsse unter Verwendung eines Turbulenzmodells und der Berücksichtigung der freien Oberfläche simuliert wurden. Das numerische Modell wurde anhand von verifizierten Pegelmessdaten kalibriert und validiert. Daraufaufgehend wurde der Einfluss verschiedener Aspekte auf die Wasserspiegellage bei der Messstation und deren komplexes Zusammenspiel untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu den einzelnen Aspekten (vgl. Abschnitt 1.2) sind untenstehend aufgeführt.

§1 *Einfluss der Durchlässigkeit des Lochblechs (Austausch Niedrigwasserrinne – Messschacht)*

Der mittlere Wasserspiegel am Rand der Niedrigwasserrinne entlang des Messschachts entspricht in etwa dem im Messschacht gemessenen Wert, vorausgesetzt das Lochblech kann ungehindert durchflossen werden. Letzteres ist für eine zuverlässige Messung entscheidend, wie die Reinigung während der Feldmessung (Entfernung von Moos und des darin gefrorenen Wassers vom Lochblech) gezeigt hat. Der gemessene Wasserspiegel war nach der Reinigung bei vergleichbarem Abfluss ca. 6 mm höher als davor. Der verbleibende Unterschied zwischen dem Pegel Steg und dem Pegel Messschacht von ca. 12 mm wird auf lokale Unebenheiten in der Sohle der Niedrigwasserrinne zurückgeführt. Es wird angenommen, dass dieser Unterschied mit zunehmendem Abfluss und bei strömenden Abflussverhältnisse kleiner, resp. nicht mehr verzeichnet wird (vgl. §7). Diese Annahme kann aber mit dem bestehenden Modell aufgrund der Qualität der topographischen Grundlagen nicht überprüft werden.

§2 *Sensitivität der Rauheit in der Niedrigwasserrinne*

Der Einfluss der Rauheit der Niedrigwasserrinne (gleichmässig über die gesamte Rinne) auf die Wasserspiegellage ist klar erkennbar. Die mittlere Wasserspiegellage variiert beim Pegel Steg für das Szenario Vormittag um bis zu 30 mm und beim Messschacht 40 mm zwischen den untersuchten Rauheiten (zwischen $k_s = 1$ mm und $k_s = 7$ mm). Wird für das Szenario Vormittag vom kalibrierten Modell ($k_s = 2$ mm) ausgegangen, dann senkt sich der Wasserspiegel bei einer glatteren Oberfläche mit $k_s = 1$ mm beim Pegel Steg im Mittel um 10 mm und bei einer rauerer Oberfläche mit $k_s = 5$ mm (z.B. bei Moosbildung) steigt der Pegel im Mittel um 14 mm. Das sind bezüglich einer Abflusstiefe von 21 cm ca. ± 6 %.

Die Ausprägung der Stosswellen beim Pegel Steg über den Querschnitt ist bei zunehmender Rauheit geringer. Hingegen sind die Stosswellen stromaufwärts des Stegs mit zunehmender Rauheit deutlich ausgeprägter.

§3 *Beurteilung der Lage des Messkanals (Absenkkurve).*

Bei Abflüssen in der Niedrigwasserrinne beginnt die Senkkurve mehr als 0.5 m stromabwärts vom Ende des Messschachts und beeinflusst somit weder die Pegelmessung beim Messschacht noch beim Steg. Bei grösseren Abflüssen muss davon ausgegangen werden, dass der Überfall ins Unterwasser nicht mehr vollkommen ist, sich ein strömender Abfluss im Messkanal einstellt und somit die Pegelmessungen durch die Bedingungen im Unterwasser beeinflusst werden können. Dies wurde jedoch aufgrund der fehlenden Daten für die Topographie im Unterwasser nicht weiter untersucht.

§4 *Auswirkungen von Blöcken und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich*

Ablagerungen im Zulaufbereich, insbesondere vor dem Übergang zur Niedrigwasserrinne, können zu einer asymmetrischen Anströmung der Niedrigwasserrinne führen, was sich auf

das Geschwindigkeitsfeld und die Bildung der Stosswellen auswirkt. Die Auswirkungen beschränken sich aber auf den oberen Teil der Niedrigwasserrinne. Weiter stromabwärts, auf der Höhe des Pegels am Steg, ist der Einfluss auf die Wasserspiegellage nur noch klein. Der Unterschied zwischen den Fällen mit viel und ohne Geröll beträgt dort noch maximal 5 mm.

§5 *Einfluss von Vereisung (Verengung des Abflussquerschnitts)*

Die Bildung von Eis entlang der Niedrigwasserrinne kann den Abflussquerschnitt reduzieren und somit höhere Pegelstände verursachen. Die Reduktion des Abflussquerschnitts und somit die quantitative Auswirkung auf die Wasserspiegellage ist abhängig von der Grösse, Form und Ausdehnung des Eises und kann lokal unterschiedlich sein.

§6 *Temperatureinfluss (Dichte des Wassers)*

Je nach Temperatur hat das Wasser eine geringfügig andere Dichte und Viskosität. Im untersuchten Temperaturbereich von 0°C bis 20°C werden an den Stellen der Pegel (Steg und Schacht) keine Abweichungen in der Wasserspiegellage verzeichnet und der Einfluss der Temperatur im Modell ist vernachlässigbar.

§7 *Überprüfung der vorhandenen Schlüsselkurve*

Für ausgewählte Abflüsse zwischen 80 l/s und 20'000 l/s wurden mit dem Modell die Wasserspiegellagen berechnet und die Resultate wurden mit zwei ausgewählten Schlüsselkurven und Messwerten der Messstation verglichen. Für Abflüsse zwischen 800 l/s und 2'000 l/s liegen die simulierten Wasserspiegellagen tendenziell tiefer als die Schlüsselkurven. Dabei gilt zu beachten, dass die simulierten Wasserspiegellagen für alle untersuchten Abflüsse gut mit den Abflussmessungen bezogen auf den Wasserstand im Messschacht übereinstimmen und beim Pegel Steg für den Bereich von 1'161 l/s bis 2'350 l/s keine Abflussmessungen vorliegen. Die Abweichungen beim Pegel Steg sind möglicherweise auf Unterschiede in der Geometrie, insbesondere im Zulaufbereich, und deren Einfluss auf die Ausprägung von Stosswellen zurückzuführen. Ferner gilt zu beachten, dass das numerische Modell für Abflüsse und Abflusszustände in der Niedrigwasserrinne kalibriert wurde und nicht für Abflüsse, bei denen der Wasserspiegel die Tiefe der Niedrigwasserrinne übersteigt.

Anhand der mit dem numerischen Modell gewonnenen Erkenntnisse lässt sich festhalten, dass die Temperatur, resp. die Dichte und Viskosität des Wassers keinen Einfluss auf die Wasserspiegellage an den Pegelmessstellen beim Steg und im Messschacht hat. Einen geringen Einfluss können Blöcken und Sedimentablagerungen im Zulaufbereich haben. Hingegen reagiert der Wasserspiegel bei den Pegeln direkt auf Veränderungen der Rauheit und des Abflussquerschnitts bei Vereisung in der Niedrigwasserrinne. Treten diese Veränderungen im Bereich der Pegel auf, bewirken diese je nach Ausprägung ein Anstieg der Wasserspiegellage. Die Bildung von Eiskörpern in der Niedrigwasserrinne oder der Bewuchs mit von Moos kann also eine mögliche Erklärung dafür sein, wenn an unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Pegelwerte für denselben Abfluss gemessen werden.

Projektbearbeitung: Claudia Leuch, MSc ETH Umwelt-Ing.

Projektleitung: Dr. David Vetsch, Dipl. Bau-Ing. ETH

Zürich, Februar 2023

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ)



Claudia Leuch
Wissenschaftliche Mitarbeiterin



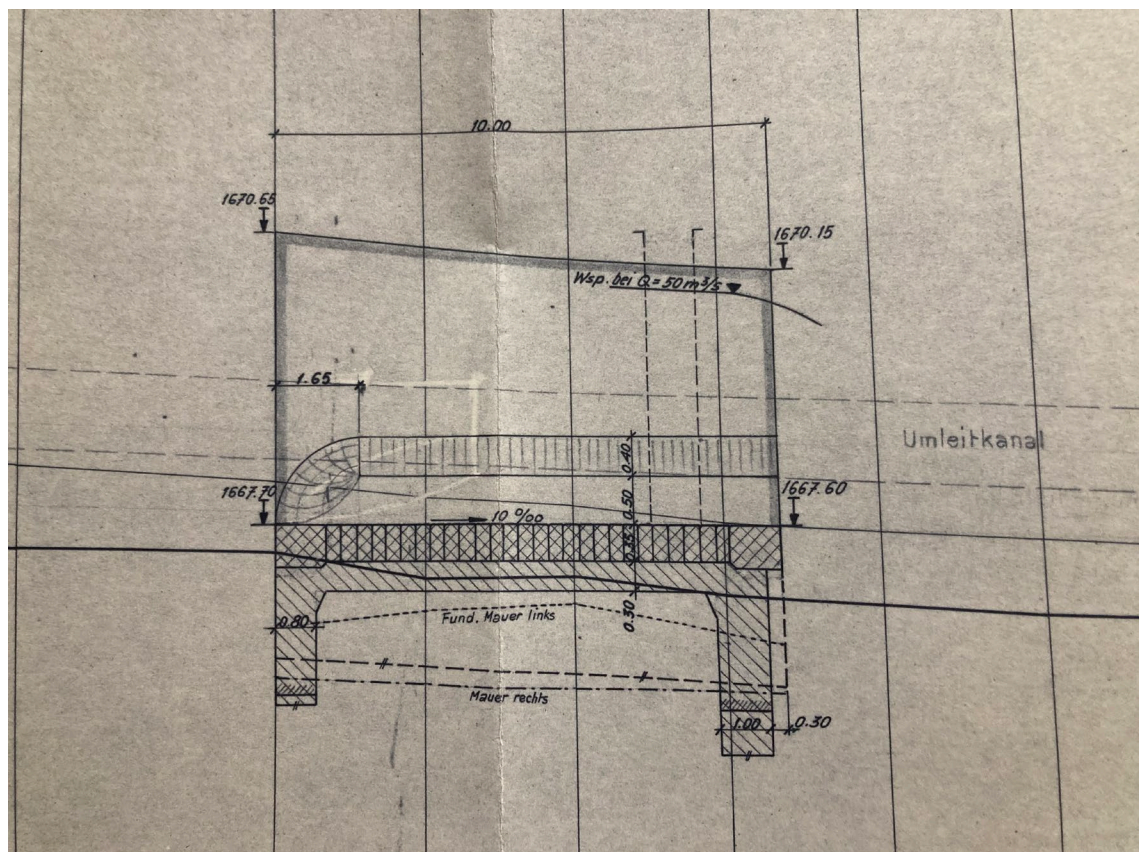
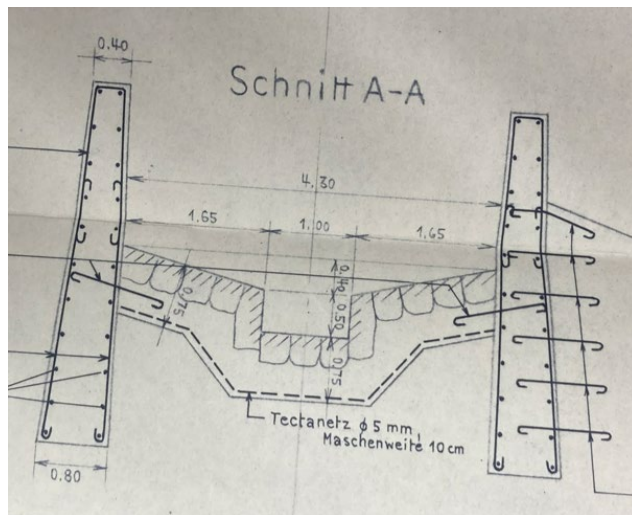
Dr. David Vetsch
Abteilungsleiter
Numerische Fluid- und Morphodynamik

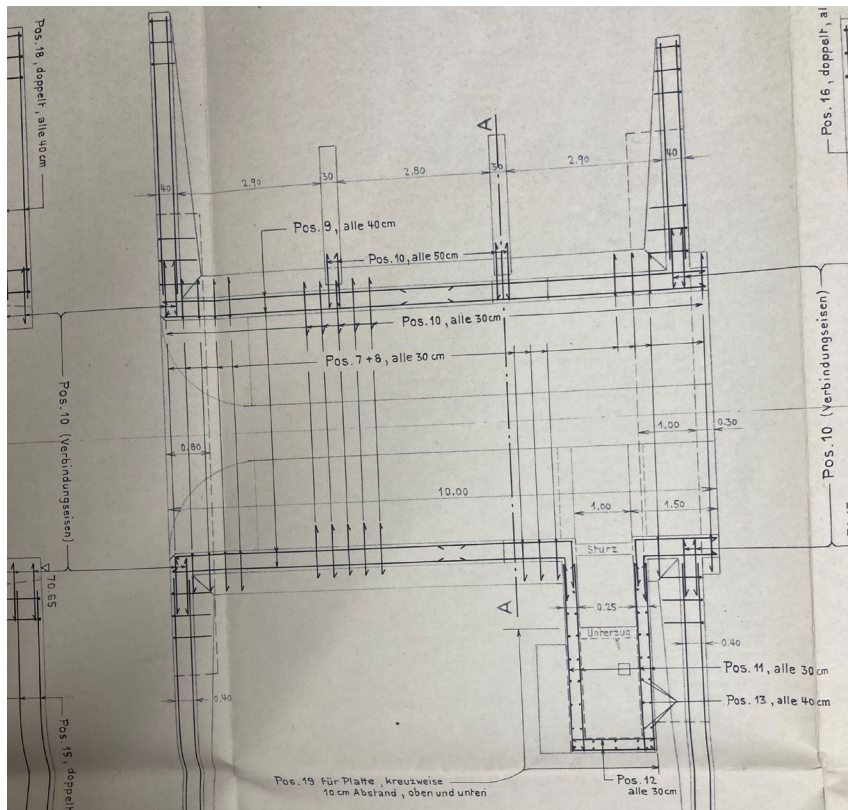
Literaturverzeichnis

- [1] M. Margreth und R. Kaderli, «BAFU Messstelle Dischmabach Kriegsmatte Digitales Geländemodell,» SoilCom & wasserplan.ch, Zürich, 2022.
- [2] VAW, «Numerische Modelluntersuchungen des Regulierwehrs Port und des Kraftwerks Brügg, Gutachten zur räumlichen Abgrenzung der Wasserbaupflicht am Kanal.,» VAW-Bericht Nr. 4360, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich, 2017.
- [3] VAW, «isichdurchgängigkeit beim Wasserkraftwerk Wynau/Schwarzhäusern. Numerische Modelluntersuchung zur Positionierung von Fischleitrechen im Oberwasser des Kraftwerks.,» VAW-Bericht Nr. 4382, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich, 2021.
- [4] V. Yakhot und L. M. Smith, «The Renormalization Group, the e-Expansion and Derivation of Turbulence Models,» *Journal of Scientific Computing*, pp. 35-61, 1992.
- [5] G. H. Jirka und C. Lang, Einführung in die Gerinnehydraulik, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [6] M. Spreafico und R. Weingartner, «Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate,» Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7, Bern, 2005.

Anhang

A1 Pläne





A2 Fotos



Abbildung 36: Gepflasterte Sohle in Niedrigwasserrinne (Foto vom 14.03.2022, M. Margreth & R. Kaderli)

A3 Weitere Resultate

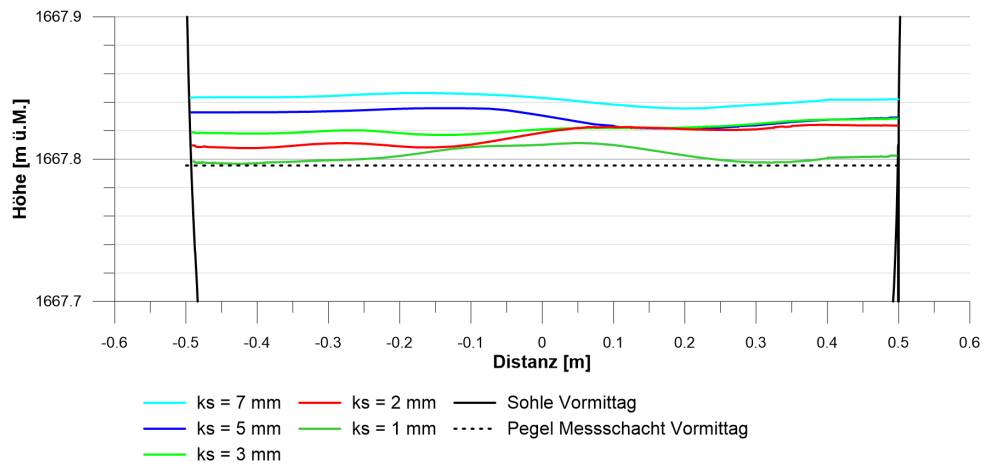


Abbildung 37: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Mitte Messschacht simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Vormittag.

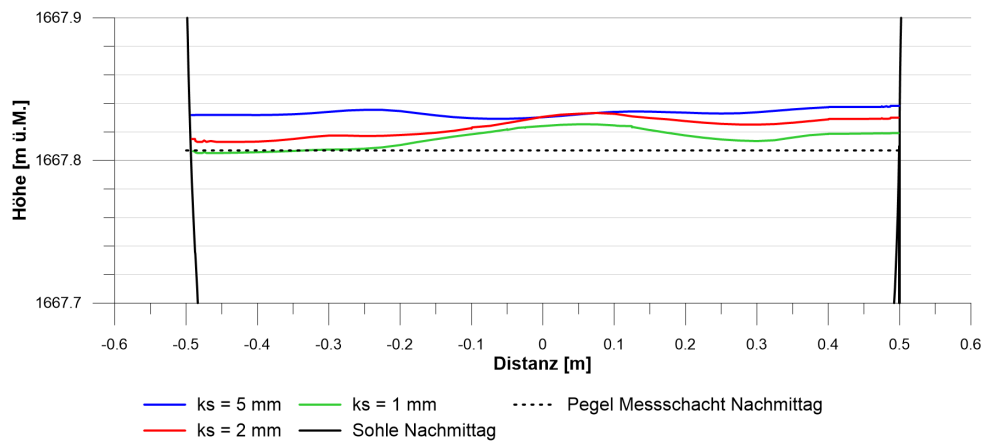


Abbildung 38: Querprofile der Wasserspiegellagen auf Höhe Mitte Messschacht simuliert mit unterschiedlichen Rauheiten für das Szenario Vormittag.

Tabelle 6: Mittlerer Wasserspiegel in den Querprofilen Pegel Steg und Mitte Messschacht für unterschiedliche Rauheiten bei den Szenarien Vormittag und Nachmittag.

	Vormittag					Nachmittag			
Querprofil Pegel Steg									
k_s [mm]	1	2	3	5	7	1	2	5	
mittlerer Wasserspiegel (WSP) [m]	7.812	7.822	7.827	7.836	7.842	7.824	7.831	7.840	
minimaler WSP [m]	7.799	7.812	7.821	7.826	7.836	7.810	7.820	7.838	
maximaler WSP [m]	7.837	7.837	7.833	7.842	7.846	7.848	7.849	7.844	

Querprofil Mitte Messschacht									
k_s [mm]	1	2	3	5	7	1	2	5	
mittlerer Wasserspiegel [m]	7.802	7.817	7.822	7.829	7.842	7.815	7.823	7.834	
minimaler WSP [m]	7.797	7.808	7.817	7.822	7.836	7.805	7.813	7.829	
maximaler WSP [m]	7.811	7.824	7.829	7.836	7.846	7.825	7.833	7.838	

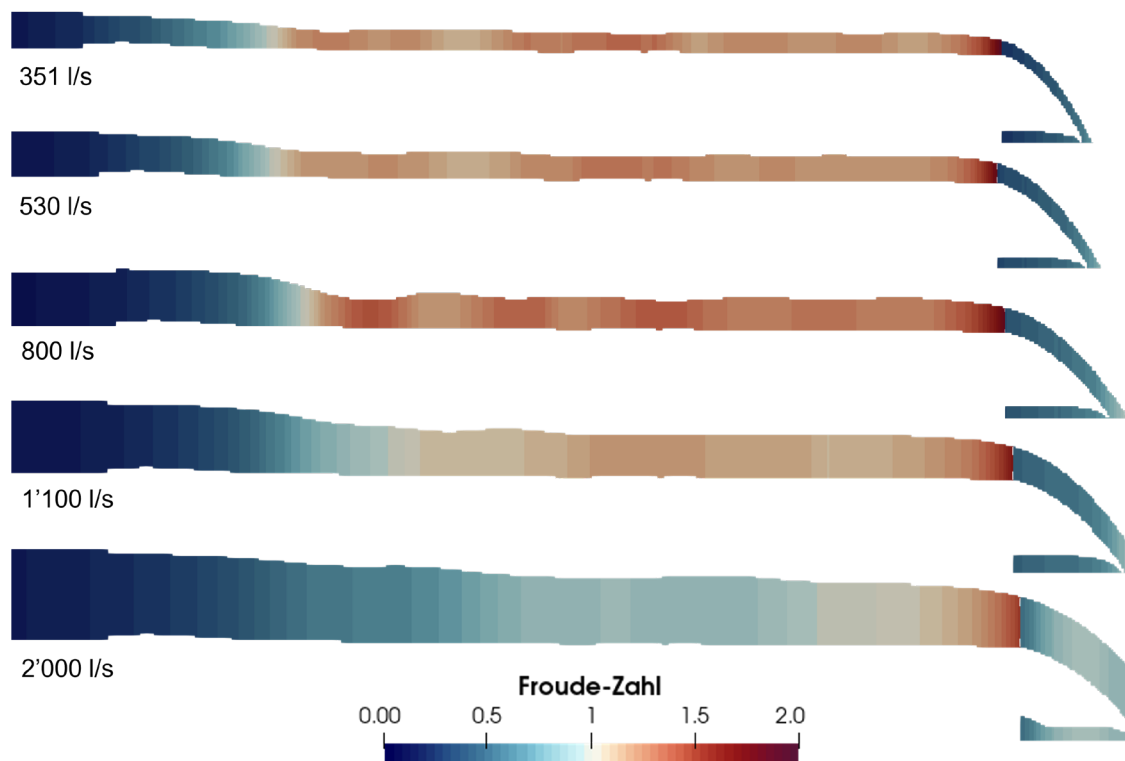


Abbildung 39: Abflusszustand entlang der Niedrigwasserrinne (Vertikalschnitt entlang Mittelachse der Niedrigwasserrinne) für ausgewählte Abflüsse bis 2'000 l/s.

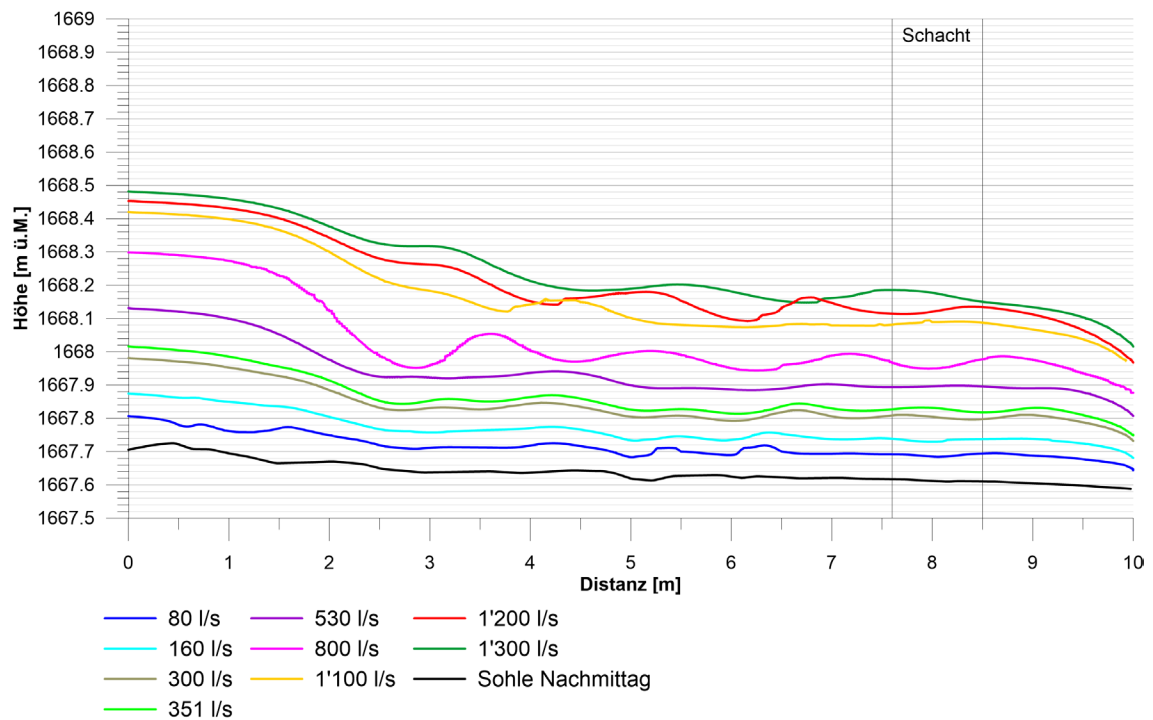


Abbildung 40: Längsprofile der Wasserspiegellagen in der Mitte der Niedrigwasserrinne, resp. des Messkanals für ausgewählte Abflüsse bis 1'300 l/s.

Tabelle 7: Übersicht der resultierenden Wasserspiegellagen in den Querprofilen (QP) Pegel Steg und Mitte Messschacht sowie im Längsprofil (LP) entlang des Messschachts für die untersuchten Abflüsse und Rauheiten (Höhenangaben in m ü.M.).

Abfluss [l/s]	Steg (QP)			Schacht (QP)			Schacht (LP)			Rauheit [mm]
	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	
80	1667.694	1667.689	1667.697	1667.687	1667.684	1667.690	1667.689	1667.688	1667.692	2
160	1667.738	1667.736	1667.740	1667.732	1667.728	1667.734	1667.734	1667.733	1667.736	2
300	1667.808	1667.798	1667.822	1667.801	1667.793	1667.808	1667.799	1667.792	1667.811	2
351	1667.831	1667.820	1667.849	1667.823	1667.813	1667.833	1667.822	1667.813	1667.839	2
530	1667.900	1667.890	1667.913	1667.894	1667.888	1667.899	1667.897	1667.885	1667.912	2
800	1667.968	1667.960	1667.984	1667.971	1667.950	1667.991	1667.980	1667.964	1667.988	2
800	1668.012	1668.000	1668.024	1668.006	1668.002	1668.014	1668.007	1667.985	1668.024	10
1100	1668.084	1668.077	1668.088	1668.085	1668.074	1668.095	1668.091	1668.078	1668.097	2
1200	1668.126	1668.119	1668.140	1668.131	1668.113	1668.140	1668.132	1668.124	1668.139	2
1300	1668.167	1668.158	1668.182	1668.168	1668.148	1668.177	1668.173	1668.166	1668.177	2
1600	1668.253	1668.242	1668.274	1668.245	1668.239	1668.252	1668.245	1668.238	1668.246	2 / 5
2000	1668.326	1668.315	1668.339	1668.311	1668.297	1668.333	1668.303	1668.294	1668.316	2 / 5
2000	1668.338	1668.325	1668.357	1668.325	1668.314	1668.344	1668.319	1668.310	1668.327	10
3000	1668.452	1668.432	1668.464	1668.435	1668.425	1668.442	1668.435	1668.409	1668.457	2 / 5
4600	1668.565	1668.558	1668.571	1668.550	1668.538	1668.556	1668.551	1668.534	1668.565	2 / 5
6000	1668.649	1668.639	1668.658	1668.631	1668.623	1668.645	1668.627	1668.607	1668.645	2 / 5
10000	1668.859	1668.846	1668.868	1668.838	1668.829	1668.850	1668.840	1668.814	1668.860	2 / 5
20000	1669.265	1669.187	1669.483	1669.230	1669.174	1669.298	1669.231	1669.175	1669.284	2 / 5