

Diplomarbeit

Untersuchung zur Variabilität von Schwebstoffkornverteilungen am Beispiel alpiner Flüsse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Investigation of the variability of the particle size distributions of suspended sediments in alpine rivers

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Thomas Bittmann, BSc

Matr.Nr.: 12209508

Betreuung: Univ.Prof. ir. PhD **Koen Blanckaert**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Jakob Höllrigl**
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich Wasserbau und Umwelthydraulik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2025



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht die Variabilität der Schwebstoffkorngrößenverteilung und -konzentration sowie deren Beziehungen zu Abfluss und Trübung in drei Schweizer Flüssen. Die Aare bei Brienzwiler, den Rhein bei Diepoldsau und die Rhône bei Porte du Scex. Die Analyse zeigt, dass zwischen den drei Stationen deutliche Unterschiede in der Korngrößenverteilung (PSD) und den mittleren Korndurchmessern (D_{50}) der jeweiligen Proben herrschen und auch die Bodenanteile (Ton, Schluff, Sand, Kies) und Bodenarten variieren.

Die Untersuchung der Beziehungen zwischen Abfluss (Q), Schwebstoffkonzentration (SSC) und Trübung zeigt, dass die SSC-Trübungskorrelation durch lineare Funktionen beschrieben werden kann, während die Beziehung zwischen Abfluss und SSC häufig durch eine hohe Streuung gekennzeichnet ist und durch Exponentialfunktionen zu beschreiben ist. Die Steigung der SSC-Trübungsregression variiert zwischen den Messstandorten und ist in Gebieten mit feinkörnigerem Material geringer. Allgemein kann gesagt werden, dass die Korngröße bei der Korrelation SSC-Trübung insofern eine Rolle spielt, als dass größere Korngrößenverteilungen zu höheren Konzentrationen führen, während kleinere Korngrößenverteilungen zu höheren Trübungswerten führen. Eine Analyse der saisonalen Variation zeigte, dass hohe SSC-, Trübungs- und Korngrößen hauptsächlich in der ersten Hälfte des hydrologischen Sommerhalbjahres (Mai-Juli) auftreten, was auf nival-glaziale Abflussregime zurückzuführen ist.

Basierend auf diesen Erkenntnissen können bessere Modelle zur Überwachung der Wasserqualität entwickelt werden. Darüber hinaus könnte die Reduzierung manueller Probenahmen zu effizienteren und kostengünstigeren Messverfahren führen. In weiterführenden Studien könnten alternative Methoden zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen derselben Sensitivitätsstudie unterzogen, die saisonalen, hydrologischen und lithologischen Zusammenhängen in den betrachteten Einzugsgebieten genauer betrachtet und die Bedeutung von Peak-Events untersucht werden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This study investigates the variability of the particle size distribution and concentration of suspended sediment and their relationship to discharge and turbidity in three Swiss rivers. The Aare at Brienzwiler, the Rhine at Diepoldsau and the Rhône at Porte du Scex. The analysis shows that there are clear differences between the three stations in the particle size distribution (PSD) and the mean grain diameters (D_{50}) of the respective samples and that the soil proportions (clay, silt, sand, gravel) and soil types also vary.

The investigation of the relationships between discharge (Q), suspended sediment concentration (SSC) and turbidity shows that the SSC-turbidity correlation can be described by linear functions, while the relationship between discharge and SSC is often characterized by a high scatter and can be described by exponential functions. The slope of the SSC turbidity regression varies between the measurement sites and is lower in areas with finer grained material. In general, it can be said that grain size plays a major role in the SSC-turbidity correlation where larger grain size distributions lead to higher concentrations, while smaller grain size distributions lead to higher turbidity values. An analysis of the seasonal variation showed that high SSC, turbidity and grain sizes mainly occur in the first half of the hydrological summer half-year (May-July), which can be attributed to nival-glacial runoff regimes.

Based on these findings, better models for monitoring water quality can be developed. In addition, the reduction of manual sampling could lead to more efficient and cost-effective measurement methods. In further studies, alternative methods for determining suspended matter concentrations could be subjected to the same sensitivity study, the seasonal, hydrological and lithological relationships in the catchment areas under consideration could be examined in more detail and the significance of peak events could be investigated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Definition, Herkunft und Veränderung von Schwebstoffen	11
1.2	Bedeutung der Korngrößenverteilung von Schwebstoffen	12
1.3	Methoden zur Bestimmung von PSD und Schwebstoffkonzentration	15
2	Prinzipien	20
2.1	Laserbeugungs-Partikelgrößenanalyse	20
2.2	Nephelometer, Trübheitsanalysen, Schwebstoffkonzentrationen	21
3	Methodik	23
3.1	Herkunft der Proben	23
3.2	Messparameter und Probenahme	25
3.3	Korngrößenanalyse mit dem Malvern Mastersizer 3000	27
3.3.1	Aufbau	27
3.3.2	Messung	31
4	Analyse	35
4.1	Mastersizer	35
5	Ergebnisse	40
5.1	Variabilität von Schwebstoffkornverteilung	40
5.1.1	Statistische Verteilungsparameter	40
5.1.2	Korndurchmesser D_{50}	41
5.1.3	Kornzusammensetzung	41
5.2	Korrelation zwischen Q, SSC, Trübung und Korndurchmesser	45
5.2.1	Brienzwiler	45
5.2.2	Diepoldsau	51
5.2.3	Porte du Scex	57
5.3	Zeitlicher Verlauf von Q, SSC, Trübung und Korndurchmesser	63
5.3.1	Allgemeines	63
5.3.2	Brienzwiler	64
5.3.3	Diepoldsau	67
5.3.4	Porte du Scex	70
6	Zusammenfassung	74
6.1	Eckpunkte	74
6.2	Ausblick	75

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bimodale Verteilungskurve (PND und PSD) mit Schluff- und Sandfraktion und kumulative PND und PSD exemplarisch von der Probe 70 von der Messstation 2019 Aare - Brienzwiler (eigene Darstellung)	13
1.2	Absetzgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von Partikelgröße und Modell 1-9 bestimmt (Graf et al., 1966 in [28])	14
1.3	Oberfläche wird mit abnehmender Korngröße bei gleichbleibender Sedimentmasse größer [27]. Links Partikel mit Radius = r ($V = \frac{4}{3}r^3\pi, O = 4r^2\pi$, 27 Kugeln) und rechts Partikel mit Radius = $3r$ ($V = 36r^3\pi, O = 36r^2\pi$, 1 Kugel)	15
1.4	a) Schematische Darstellung der Aräometermethode zum Zeitpunkt t_1 und t_2 b) Schematische Darstellung der Pipettenmethode zum Zeitpunkt t_1 und t_2 zur Bestimmung von PSDs (eigene Darstellung)	16
1.5	Prinzip der Röntgen-Sedigraphie zur Bestimmung von PSDs [12]	17
1.6	Verschiedene Trübungen mit zugehörige NTU [62]	18
1.7	Die Trübung beispielhaft in Abhängigkeit von Konzentration. Zentrale Fragestellung: Können unterschiedliche Konzentrationen (SSC) bei ähnlicher Trübung durch die Verteilungskurven begründet werden (eigene Darstellung)	19
2.1	(a) Licht wird von kleinem Partikel in größerem Winkel gebeugt, (b) Licht wird von großem Partikel in kleinerem Winkel gebeugt [44], [43]	20
2.2	Schematische Darstellung der turbidimetrischen (rechts) und nephelometrischen Methode (unten) (eigene Darstellung aus [23])	22
3.1	mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2473	23
3.2	mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2019	24
3.3	mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2009	24
3.4	Lage der Messstationen 2009, 2019 und 2473 in der Schweiz (google.maps.com)	25
3.5	(a) Zweimal wöchentlich durchgeführte Probeentnahme von einer Brücke aus [22], (b) Entnahmegerät an Stange [56], (c) Isokinetische Schwebstoffprobenahme mit kleinstmöglichem Einfluss auf die Strömung im Messpunkt [21]	26
3.6	Repräsentativität der gemessenen punktuellen Konzentration bezogen auf die Konzentration im gesamten Profil [21]. Es zeigt sich, dass Proben am Ufer und an der Oberfläche die SSC unterschätzen, während Proben an der Sohle die SSC überschätzen. Die Probenahme bzw. Messung sollte im repräsentativsten Punkt stattfinden	26
3.7	(a) Messoptik des Hach Solitax sc [18], (b) Hach Solitax sc [18]	27
3.8	Schematischer Aufbau des Arbeitsplatzes [40]	28
3.9	Schematischer Aufbau der Optical Unit [40]	29
3.10	Schematischer Aufbau der Zelle [40]	30
3.11	Schematischer Aufbau der Hydro EV Nassdispergiereinheit [40]	31

3.12	(a) Proben werden via Bücherwarensendung versendet (b) die einzelnen Proben sind in Tüten, welche mit der Probennummer versehen sind (c) in der Tüte sind die Filter doppelt in Alufolie eingewickelt (d) auf den Filter befinden sich die Partikel; die Filter kommen danach mit Partikeln die in Lose in den Alufolien sind in ein Zentrifugenröhrchen (alles eigene Aufnahmen)	32
4.1	a) PSD und PND von Probe 349; deutlich zu sehen ist, dass die PND gegenüber der PSD nach links verschoben ist, was daran liegt, dass wenige große Partikel einen großen Anteil der PSD aufgrund ihres Volumens ausmachen, jedoch bezüglich PND nicht ins Gewicht fallen, weil es um mehrere Größenordnungen weniger Partikel sind b) kumulative Kurve der PSD	37
4.2	PSD von zwei verschiedenen Partikelsystemen mit identischem D_{50} . Blau: breite PSD (Span), grün: schmale PSD (Span)	37
4.3	Positive und Negative Skewness und Kurtosis [51]	38
5.1	Durchschnittliche Verteilungskurven aller Proben der Messstationen über den Zeitraum Jänner bis November 2024	40
5.2	Min., Max. und Mittelwerte des D_{50} aller Proben	41
5.3	minimale, maximale und mittlere Tonanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)	42
5.4	minimale, maximale und mittlere Schluffanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)	43
5.5	minimale, maximale und mittlere Sandanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)	43
5.6	Bodenarten des Feinbodens [57]	44
5.7	SSC-Q (Messstation 2019)	46
5.8	SSC-Trübung (Messstation 2019)	47
5.9	Verteilungskurven der Proben 53 ($D_{50} = 7,49 \mu m$) und 399 ($D_{50} = 17,2 \mu m$)	48
5.10	Verteilungskurven der Proben 634 ($D_{50} = 8,31 \mu m$) und 608 ($D_{50} = 29,6 \mu m$)	48
5.11	Verteilungskurven der Proben 467 ($D_{50} = 28,5 \mu m$) und 409 ($D_{50} = 21,3 \mu m$)	48
5.12	Verteilungskurven der Proben 278 ($D_{50} = 17,4 \mu m$) und 387 ($D_{50} = 32,0 \mu m$)	49
5.13	PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < NTU < 50$	49
5.14	PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $50 < NTU < 100$	49
5.15	PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $NTU > 100$	50
5.16	SSC-Trübung bezogen auf den D_{50}	50
5.17	SSC-Trübung bezogen auf die Bodenart (2019)	51
5.18	SSC-Q (Messstation 2473)	52
5.19	SSC-Trübung (Messstation 2473)	53
5.20	Verteilungskurven der Proben 503 ($D_{50} = 12,6 \mu m$) und 68 ($D_{50} = 22,4 \mu m$)	54
5.21	Verteilungskurven der Proben 1709 ($D_{50} = 10,1 \mu m$), 200 ($D_{50} = 15,5 \mu m$), 1110 ($D_{50} = 15,3 \mu m$), 423 ($D_{50} = 20,0 \mu m$), 268 ($D_{50} = 29,1 \mu m$), 271 ($D_{50} = 23,9 \mu m$) und 615 ($D_{50} = 25,9 \mu m$)	54
5.22	Verteilungskurven der Proben 0110 ($D_{50} = 9,66 \mu m$), 162 ($D_{50} = 28,6 \mu m$), 674 ($D_{50} = 22,0 \mu m$) und 146 ($D_{50} = 16,2 \mu m$)	54
5.23	Verteilungskurven der Proben 133 ($D_{50} = 14,2 \mu m$), 250 ($D_{50} = 18,9 \mu m$) und 166 ($D_{50} = 27,3 \mu m$)	55

5.24 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < \text{NTU} < 400$	55
5.25 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $400 < \text{NTU} < 800$	55
5.26 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $\text{NTU} > 800$	56
5.27 SSC-Trübung bezogen auf den (D_{50}) (2473)	56
5.28 SSC-Trübung bezogen auf die Bodenart (2473)	57
5.29 SSC-Q (Messstation 2009)	58
5.30 SSC-Trübung (Messstation 2009)	59
5.31 Verteilungskurven der Proben 1010 ($D_{50} = 16,4 \mu\text{m}$) und 516 ($D_{50} = 26,8 \mu\text{m}$) .	60
5.32 Verteilungskurven der Proben 128 ($D_{50} = 20,9 \mu\text{m}$) und 245 ($D_{50} = 30,0 \mu\text{m}$) .	60
5.33 Verteilungskurven der Proben 74 ($D_{50} = 29,3 \mu\text{m}$) und 408 ($D_{50} = 18,4 \mu\text{m}$) . .	60
5.34 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < \text{NTU} < 250$	61
5.35 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $250 < \text{NTU} < 600$	61
5.36 PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $\text{NTU} > 600$	61
5.37 SSC-Trübung bezogen auf den (D_{50}) (2009)	62
5.38 SSC-Trübung bezogen auf Bodenart (2009)	63
5.39 Q, D_{50} , SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2019)	65
5.40 Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2019	67
5.41 Q, D_{50} , SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2473)	68
5.42 Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2473	70
5.43 Q, D_{50} , SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2009)	71
5.44 Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2009	73

Tabellenverzeichnis

1.1	Korngrößenklassifikation nach ISO 14688-1:2017 zur Beschreibung von Bodenpartikel für ingenieurtechnische Zwecke [29]	11
4.1	Größenklassen und Volumendichte von Malvern Mastersizer 3000 exemplarisch für Probe 349	36
4.2	Kornverteilungs- und -größenparameter exemplarisch für Probe 349	39
5.1	Durchschnittliche Span aller Proben an den jeweiligen Messstationen, über den Messzeitraum Jänner bis November 2024	40
5.2	Klassenanteile aller Proben nach Messstelle	42
5.3	Bodenarten der Proben nach Messstelle	45
5.4	Schwellen- und Grenzwerte der Messstellen [60]	63
5.5	Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2019)	66
5.6	Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2473)	69
5.7	Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2009)	72

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Definition, Herkunft und Veränderung von Schwebstoffen

Geschiebe, Schwebstoffe und Schwimmstoffe sind Feststoffe, die bei Vorhandensein von entsprechender Transportenergie in Fließgewässern transportiert werden [24]. Abhängig von einigen hydraulischen Parametern wie Abfluss, Fließgeschwindigkeit und Sohlschubspannung, aber auch Parametern der Partikel (Korndurchmesser, Dichte, Form) der Flusssohle, werden bestimmte Kornfraktionen zum einen als Schwebstoff und zum anderen als Geschiebe transportiert [24]. Schwebstoffe haben einen Grenzkorndurchmesser von 0,2 bis 0,7 mm, in alpinen Flüsse sogar bis zu 1 mm [24]. In Tabelle 1.1 ist die Korngrößenklassifizierung nach ISO 14688-1:2017 zu sehen.

Kornfraktion	Unterteilungen	Korngrößenbereich [mm]
Sehr grobkörniger Bereich	Große Blöcke (lBo)	> 630
	Blöcke (Bo)	200 - 630
	Steine (co)	63 - 200
Grobkornbereich (Siebkorn)	Grobkies (cGr)	20 - 63
	Mittelkies (mGr)	6.3 - 20
	Feinkies (fGr)	2.0 - 6.3
	Grobsand (cSa)	0.63 - 2.0
	Mittelsand (mSa)	0.2 - 0.63
Feinkornbereich (Schlammkorn)	Feinsand (fSa)	0.063 - 0.2
	Grobschluff (cSi)	0.02 - 0.063
	Mittelschluff (mSi)	0.0063 - 0.02
	Feinschluff (fSi)	0.002 - 0.0063
	Ton (Cl)	< 0.002

Tab. 1.1: Korngrößenklassifikation nach ISO 14688-1:2017 zur Beschreibung von Bodenpartikel für ingenieurtechnische Zwecke [29]

Grundsätzlich entstehen Schwebstoffe durch Erosion, indem unter dem Einfluss der Verwitterung Festgesteine aufgelockert und zersetzt werden und anschließend durch Rutschprozesse und Oberflächenabfluss den Gewässern zugeführt werden [24]. Mit Beginn des Holozäns haben menschliche Aktivitäten auf einer Ebene vom ganzen Flusseinzugsgebiet bis hin zu einzelnen Flusskanälen kontinuierlich zugenommen und immer stärker die Flusssysteme beeinflusst. Damit haben sich auch die Eigenschaften und Menge des eingetragenen und transportierten Sediments durch anthropogene Einflüsse verändert [41]. Die menschlichen Einflüsse, die zu diesen Veränderungen führen, lassen sich vor allem in zwei unterschiedliche Klassen einteilen. Zum einen gibt es die Landnutzungsänderungen wie z.B. Landwirtschaft, Entwaldung, Urbanisierung und zum anderen direkte Einflüsse auf das Fließgewässer wie beispielsweise Flussregulierungen, Staueisen oder Dämme [41].

Land-, Forst- und Weidewirtschaft führen beispielsweise zur Erhöhung der Erosion, des Sedimenteintrags und des Oberflächenabflusses aufgrund reduzierter Infiltration in den Boden [41]. Auch die Urbanisierung bzw. der Bau von menschlicher Infrastruktur führt während der Bauphase zu einer Erhöhung von Erosion, Sedimenteintrag und Oberflächenabfluss, wobei diese Parameter nach der Fertigstellung, aufgrund von Versiegelung sowie Abfluss in der Kanalisation verringert werden [41]. Auf alluviale Einzugsgebiete, Gebiete, in denen Sedimente durch Fließgewässer transportiert und abgelagert werden, haben regionale Landnutzungsänderungen größere Auswirkung, da der Sedimenttransport vor allem großflächig über Flusssysteme erfolgt [41]. Auf kolluviale Einzugsgebiete, Gebiete, in denen Sedimente durch Schwerkraftbewegungen (Hangrutschungen, Massenbewegung) transportiert und abgelagert werden haben lokale Landnutzungsänderungen hingegen einen größeren Einfluss, weil diese Prozesse begrenzt sind [41]. Das Begradigen von Flüssen führt zu höheren Fließgeschwindigkeiten und dadurch zu höheren Scherspannungen, was nicht nur zu einer größeren Menge an Sediment führt, sondern höchstwahrscheinlich auch dazu, dass sich die Korngrößenverteilung der Flussschwebstoffe, nachfolgend mit PSD (Particle Size Distribution) abgekürzt, verändert (Verteilung wird breiter). Die PSD bezieht sich auf die Verteilung der Volumen von Partikeln einer bestimmten Probe [26]. Außerdem gibt es noch die Particle Number Distribution (PND), welche sich auf die Verteilung der Anzahl der Partikel in Abhängigkeit von ihrer Größe einer Probe bezieht [26]. In dieser Arbeit wird stets davon ausgegangen, dass die Partikel kugelförmig sind und Korngrößen sind immer als Durchmesser zu verstehen. Auf der anderen Seite verhindert das Sichern von Ufern, beispielsweise durch Blockwurf oder Buhnen, die Ufererosion [41]. Zuletzt können noch Dämme oder Staumauern aufgeführt werden, welche die Passierbarkeit für Sediment beeinträchtigen und somit die Sedimentkontinuität hemmen [41]. Hierbei werden verschieden große Partikel unterschiedlich zurückgehalten. Während Kies fast zu 100% zurückgehalten wird, ist dies bei Sand nur der Fall, wenn die Dämme oder Mauern mit Stauseen verbunden sind und Schluff und Ton können fast immer solche Querbauwerke passieren, weil sie in Suspension gehalten werden können [41]. In Kapitel 1.2 wird genauer darauf eingegangen welche Kriterien bezüglich Fließgeschwindigkeit sowie Dichte und Durchmesser der Partikel erfüllt sein müssen, damit Partikel als Schwebstoffe klassifiziert werden können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Veränderungen im Fließgerinne oft mit Landnutzungsänderungen einhergehen, da z.B. engere, gerade Flussgerinne mehr Platz für Landwirtschaft bieten und es somit mehrere Gründe für andere Erosions- und Sedimenttransportverhalten gibt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass diverse menschliche Eingriffe in Fluss und Einzugsgebiet die Menge und PSD des Sediments verändert hat.

1.2 Bedeutung der Korngrößenverteilung von Schwebstoffen

Bedeutung von Schwebstoffen

Wie Laible et al. (2023) beschreiben sind Schwebstoffe in Flüssen oft durch bimodale Verteilungen gekennzeichnet, das heißt es wird eine feine Fraktion aus Schluff und Ton sowie eine sandgroße Fraktion erwartet [33]. Eine Solche Korngrößenverteilung ist beispielhaft in Abbildung 1.1 zu sehen.

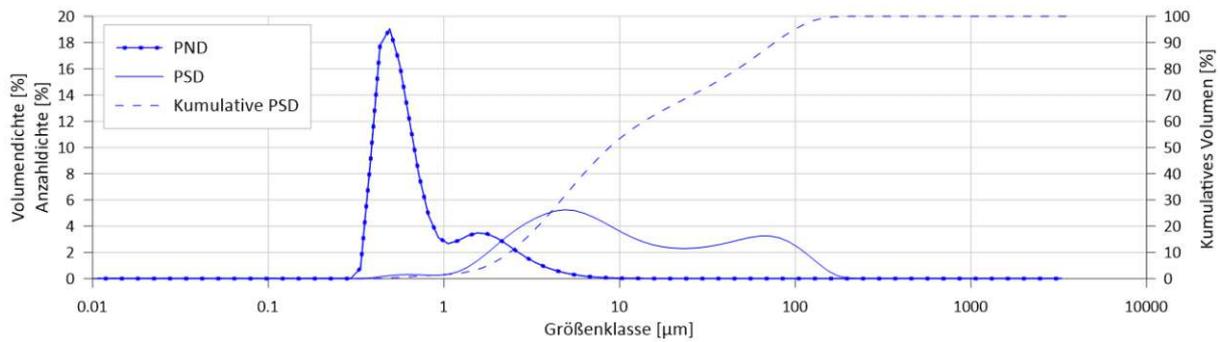


Abb. 1.1: Bimodale Verteilungskurve (PND und PSD) mit Schluff- und Sandfraktion und kumulative PND und PSD exemplarisch von der Probe 70 von der Messstation 2019 Aare - Brienzwiler (eigene Darstellung)

Gründe, warum es wichtig ist über PSD, PND oder Konzentration Bescheid zu wissen sind zum Beispiel, dass Informationen über den Schwebstofftransport sowie die PSD aus Gründen des Wasserressourcenmanagement benötigt werden, um die Nutzungsdauer von Reservoiren zu schätzen, Landnutzungsbedingungen zu ermitteln, den Transport von Schadstoffen an Sedimenten abzuschätzen [47] und Verlandungsprozesse von Flussprofilen und Seen zu erörtern, um Hochwasserschutz und sichere Schifffahrt zu garantieren [24].

Rolle der Korngrößen

Für hydraulische Anwendungen verhalten sich feine Sedimente anders als grobe Sedimente, da sie länger in Suspension bleiben und somit eine zeitlich längere Gefahr für Organe und Kiemen der Fische darstellen [5]. Zudem erhöhen sie die Verdriftung von wirbellosen Tieren und trüben das Wasser mehr als gröbere Partikel, was dazu führt, dass weniger Lichtpenetration stattfinden kann, wodurch Plankton und Algen weniger Energie zur Verfügung steht [5].

Kriterien für Inschwebebleiben

Ob Sedimente in Schwebel bleiben oder sich absetzen hängt von der Absetzgeschwindigkeit eines Partikels v_{ss} [9] und der Schubspannungsgeschwindigkeit v_0 [42] ab. Das entscheidende Kriterium ist, dass die Schubspannungsgeschwindigkeit größer als die Absetzgeschwindigkeit (vgl. 1.5) ist und sich somit das Partikel in Schwebel befindet. v_0 berechnet sich, wie in 1.1 gezeigt, aus der Erdbeschleunigungskonstante g , der hydraulischen Wassertiefe R und dem Sohlgefälle J [42]. v_{ss} wird, wie durch 1.2 beschrieben, über die dimensionslose Schergeschwindigkeit u_* (1.3), welche wiederum von dem dimensionslosen Korndurchmesser d_* stammt und dieser durch die Parametern ρ_F (Dichte von Wasser), ρ_S (Dichte der Partikel), μ (dynamische Viskosität) und d_p (Partikeldurchmesser) ausgerechnet wird, wie 1.4 verdeutlicht [9]. Wenn $v_0 > v_{ss}$ ist, sinken Partikel nicht auf den Boden. Die Absetzgeschwindigkeit v_{ss} kann auch graphisch bestimmt werden (siehe Abbildung 1.2. Voraussetzung dafür ist eine Wassertemperatur von 20°C und die Annahme, dass die Partikel die Dichte von Quarz besitzen).

$$v_0 = \sqrt{gRJ} \quad (1.1)$$

$$v_{ss} = \frac{u_*^3 \sqrt{g\mu(\rho_S - \rho_F)}}{\sqrt[3]{\rho_F^2}} \quad (1.2)$$

$$u_* = \frac{d_*^2(22.5 + d_*^{2.046})}{0.0258d_*^{4.046} + 2.81d_*^{3.046} + 18d_*^{2.046}} + 405 \quad (1.3)$$

$$d_* = d_p \left[\frac{g \rho \mu (\rho_S - \rho_F)}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.4)$$

$$\frac{v_0}{v_{ss}} > 1 \quad (1.5)$$

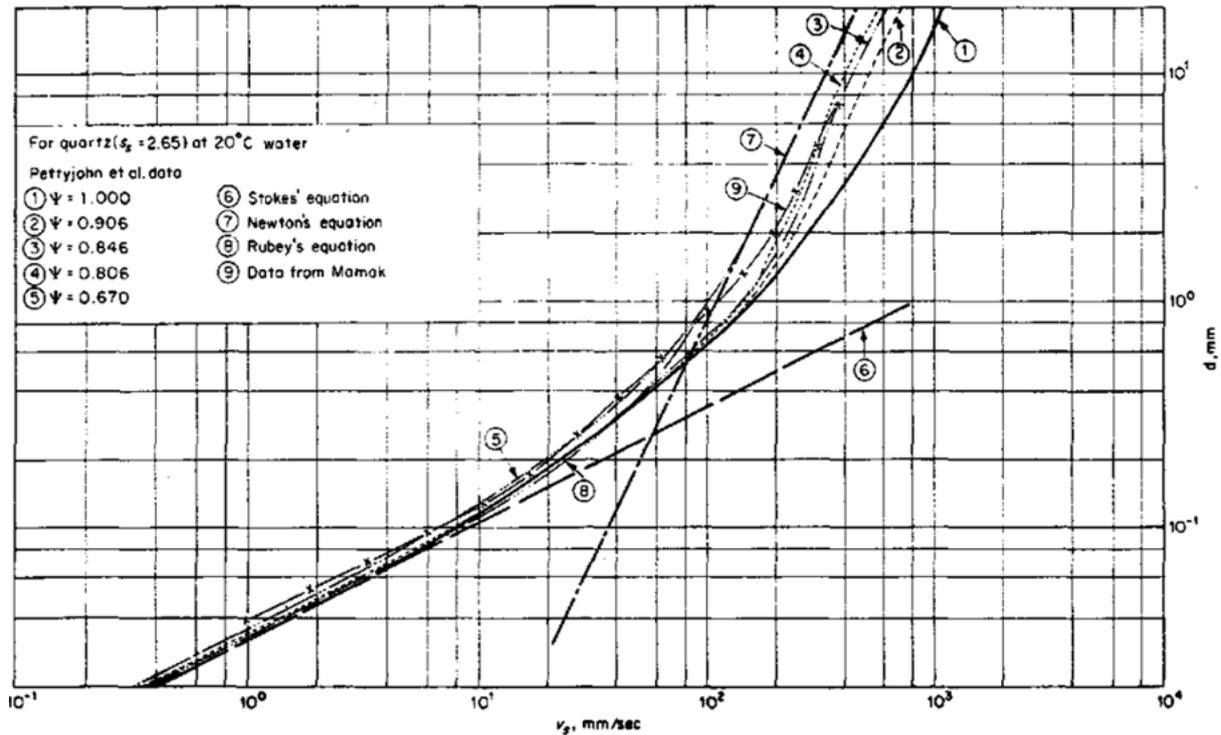


Abb. 1.2: Absetzgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von Partikelgröße und Modell 1-9 bestimmt (Graf et al., 1966 in [28])

Horowitz stellte zudem fest, dass die Partikeloberfläche positiv mit abnehmender Korngröße korreliert, das heißt, dass die spezifische Oberfläche, also die Fläche pro Masseinheit (m^2/g) zunimmt, je kleiner der Durchmesser des Kornes ist [27]. Dies liegt daran, dass bei der Formel zur Berechnung des Volumens einer Kugel der Radius kubiert wird, während er beim Berechnen der Oberfläche lediglich quadriert wird, was von Abbildung 1.3 dargestellt werden soll. Das bedeutet, dass bei doppeltem Radius das Volumen achtmal größer ist, während die Oberfläche nur viermal größer ist, was bei gleichem Volumen dazu führt, dass die Partikel mit dem halben Radius eine doppelt so große Oberfläche vorweisen. Beispielsweise ist die spezifische Oberfläche von grobem Sand circa 2000 mal kleiner als von feinem Ton [27]. Durch diese Eigenschaft werden Schadstoffe von feinem Sediment einfacher adsorbiert und transportiert [27]. (Überschüssiges) Feinsediment hat also vor allem Auswirkungen auf die Wasserqualität und kann ebenso ökologische Verschlechterungen zur Folge haben [61].

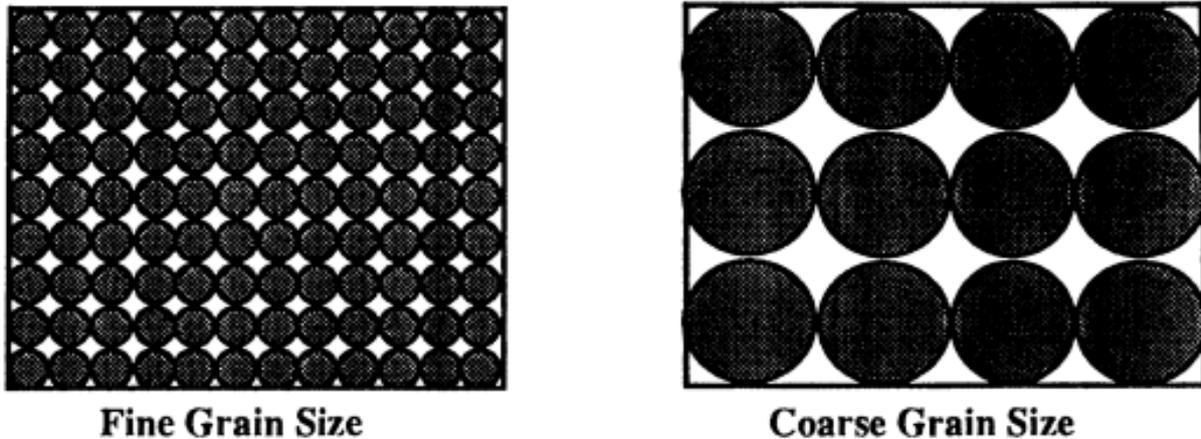


Abb. 1.3: Oberfläche wird mit abnehmender Korngröße bei gleichbleibender Sedimentmasse größer [27]. Links Partikel mit Radius = r ($V = \frac{4}{3}r^3\pi, O = 4r^2\pi$, 27 Kugeln) und rechts Partikel mit Radius = $3r$ ($V = 36r^3\pi, O = 36r^2\pi$, 1 Kugel)

Grobe Sedimente haben die Eigenschaft, durch ihr höheres Gewicht schneller zu Boden zu sinken und sich dort zu aggradieren. Dies hat zur Folge, dass die Poren der Kiesstruktur des Bodens geblockt werden und so Laichgebiete behindert werden können [27]. Außerdem können Grobsedimente infrastrukturelle Schäden anrichten und werden von Staudämmen, wie in Kapitel 1.1 erwähnt, oft aufgehalten, was dazu führt, dass ein Sedimentmanagement notwendig ist. Aus genannten Gründen ist es wichtig, sowohl die PSD als auch die Masse bzw. Konzentration von Schwebstoffen in Fließgewässern zu kennen.

1.3 Methoden zur Bestimmung von PSD und Schwebstoffkonzentration

PSD-Ermittlung

Im Folgenden werden einige Methoden zur Bestimmung der PSD und Schwebstoffkonzentration, nachfolgend mit SSC (Suspended Sediment Concentration) abgekürzt, vorgestellt. Es gibt in der Wissenschaft diverse Methoden, um die PSD zu ermitteln. Die einfachste Methode ist das Sieben. Beim Sieben werden die Proben nach DIN 17892-4 zunächst bei 105°C für 24 Stunden getrocknet [49] und im Anschluss mit einer H_2O_2 – Lösung gereinigt um organische Partikel zu entfernen [13]. Danach werden die Proben erneut getrocknet und gewogen, um dann wieder mit Wasser versetzt und mit Ultraschall behandelt zu werden [13]. Laut DIN EN ISO 17892-4 werden Siebe mit Maschenweiten von 63, 32,16, 8 und 4 mm verwendet um grobkörnige Fraktionen (Co, cGr, mGr, fGr) sowie Maschenweiten von 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 mm um feinkörnigere Sandfraktionen (cSa, mSa, fSa) zu bestimmen [49]. Als nächstes gibt es die sogenannten Sedimentationsmethoden, welche auf dem Gesetz von Stokes basieren, was beschreibt wie die Sinkgeschwindigkeit von der Größe und Dichte der Partikel abhängt [32]. Dabei gibt es vor allem zwei Methoden. Das erste Verfahren ist das Aräometerverfahren, bei dem die zu untersuchende Suspension in einen Zylinder gefüllt wird. In diesen wird das Aräometer, ein langes, schmales Glasröhrchen mit gewichteter Spitze, eingeführt und misst die Dichte der Suspension in einer Tiefe z zu einem Zeitpunkt t indem abgelesen wird wie weit das Aräometer bereits abgesunken ist [32]. Über die Dichteänderung pro Zeit kann dann via Gesetz von Stokes die PSD ermittelt werden [32]. Eine weitere Sedimentationsmethode ist die Pipetten Methode. Ähnlich wie bei der Aräometermethode (vgl. Abbildung 1.4) wird eine Suspension in einen Zylinder gefüllt. Zu Zeitpunkten t wird dann

eine Pipette in eine Tiefe z eingeführt und entnimmt jeweils Proben, welche getrocknet und gewogen werden, um den Feststoffgehalt zu ermitteln [32]. Anschließend kann eine kumulative Kurve aus den Gewichten der sukzessiven langsamen absetzenden Fraktionen gezeichnet werden. Diese Techniken haben den Nachteil, dass sie sehr arbeits- und zeitintensiv sind [45].

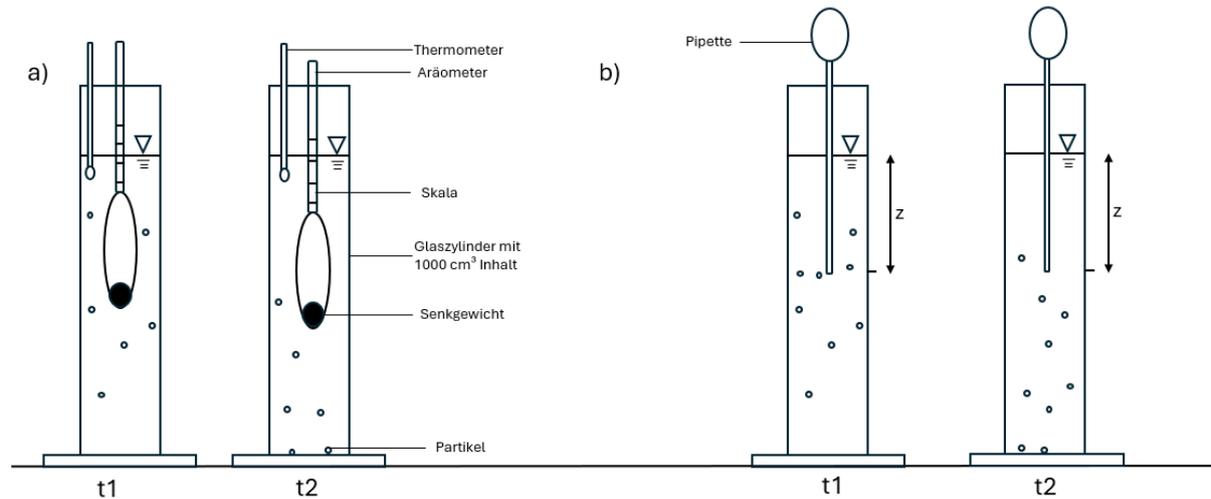


Abb. 1.4: a) Schematische Darstellung der Aräometermethode zum Zeitpunkt t_1 und t_2 b) Schematische Darstellung der Pipettenmethode zum Zeitpunkt t_1 und t_2 zur Bestimmung von PSDs (eigene Darstellung)

Zudem gibt es Imaging Analysis Methods, welche auf der Analyse von Daten basieren, die in einem Bild erhalten werden [30]. Mit einem Bildanalyse-System kann mehr als ein Größenaspekt analysiert werden: Die Länge einer oder zwei Achsen sowie die Länge des Partikelumfangs oder der Partikelprojektionsfläche [30].

Außerdem gibt es die Röntgen-Sedigraphie, die auf demselben Prinzip wie die Pipetten- als auch die Aräometermethode basiert [11]. Anders jedoch als bei den bereits erklärten Methoden wird bei dieser Methode ein Röntgenstrahl verwendet, um die Transmissivität und dadurch die sich ändernde Konzentration von feinen Sedimenten, die sich mit der Zeit in einer Suspension absetzen, und damit die Größenverteilung der absetzenden Partikel zu erfassen [11]. Vorteil hierbei ist, dass dies automatisiert abläuft und es somit weniger arbeits- und zeitintensiv ist. Außerdem ist das Verfahren nicht invasiv und die Beprobung kann wiederholt werden [11]. Da diese Technik oft nur in einem Größenbereich von 0,1 – 300 μm funktioniert, wird für größere Fraktionen unter Umständen eine zusätzliche Analyseverfahren (z.B. Sieben) kombiniert [11]. Folgende Abbildung 1.5 stellt das Prinzip dar.

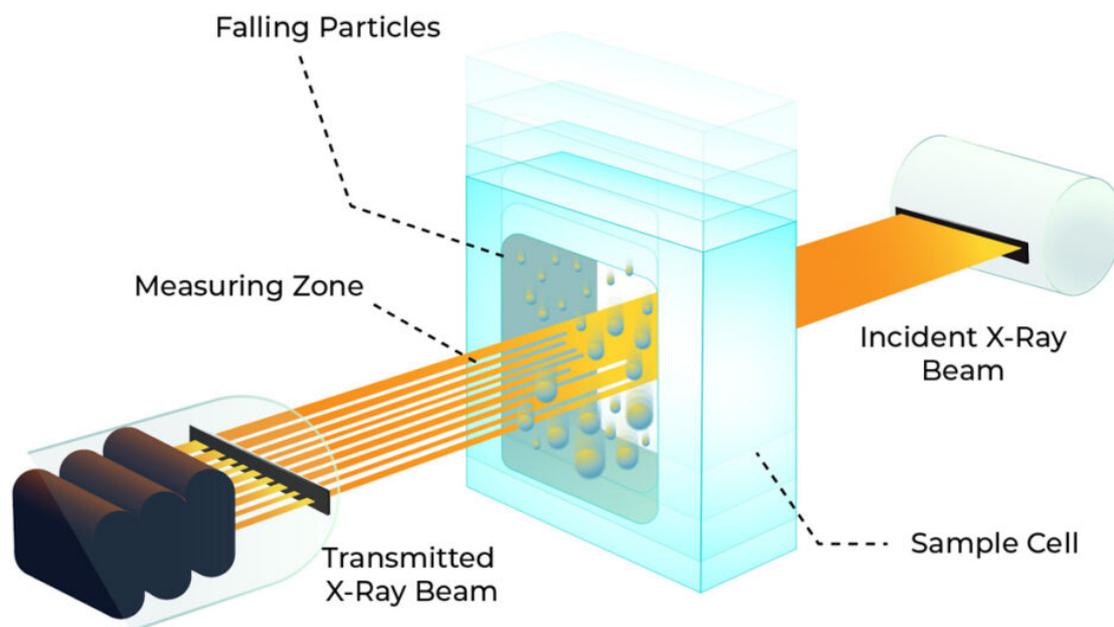


Abb. 1.5: Prinzip der Röntgen-Sedigraphie zur Bestimmung von PSDs [12]

Konzentrationsermittlung

Eine Methode, um die Schwebstoffkonzentration in einem Fließgewässer zu erörtern, ist die gravimetrische Bestimmung (Filterieren und Wiegen). Dabei wird eine Stichprobe des Gewässers in einer Laborflasche genommen und anschließend wird durch einen Filter und eine Vakuumpumpe der Feststoffanteil vom Wasser getrennt [24]. Anschließend werden die filtrierte Partikel bei 107,5 °C für 2 Stunden getrocknet und direkt danach gewogen. Aus der ermittelten Masse wird mit dem im Voraus gemessenen Volumen der Gesamtprobe die Schwebstoffkonzentration berechnet [24].

Da jede der vorgestellten Methoden einige Nachteile hat [7, 8, 9, 10, 11], werden im folgenden zweiten Kapitel eine weitere Methode zur Bestimmung der PSD genauer erläutert, sowie eine Methodik zur in-situ-Bestimmung der Trübung/Schwebstoffkonzentration des Fließgewässers vorgestellt.

Die vorliegende Arbeit wird sich vor allen Dingen auf folgendes konzentrieren. Die Konzentration von Schwebstoffen bzw. die suspended sediment concentration (SSC) wird an Messstellen in Flüssen zwar kontinuierlich im Gegensatz zur gravimetrischen Bestimmung, jedoch lediglich indirekt über die optische Trübung, meist in der Einheit der sogenannten Nephelometric Turbidity Unit (NTU) gemessen. Dies erfolgt an Messstellen in der Regel optisch durch ein Nephelometer (vgl. Kapitel 2.2), Turbidimeter oder Photometer. Abbildung 1.6 zeigt beispielhaft unterschiedliche Trübungen und die dazugehörige NTU.

Dadurch, dass die SSC nur indirekt berechnet wird, kann nicht immer sicher davon ausgegangen werden, dass die Korrelation zwischen Trübung und SSC stimmt [36] und außerdem keinerlei Auskunft sowohl über die PSD als auch die Kornform der Schwebstoffe gegeben werden. Es ist davon auszugehen, dass die Korrelation zwischen Trübung und SSC vorhanden und fast linear ist [36], jedoch wahrscheinlich vor allem bei größer werdenden Werten von Trübung bzw. SSC zunehmend von der PSD abhängig wird (vgl. Abbildung 1.7). In dieser Arbeit wird untersucht ob



Abb. 1.6: Verschiedene Trübungen mit zugehörige NTU [62]

unterschiedliche SSCs in Proben mit ähnlicher Trübung auf unterschiedliche Kornverteilungskurven bzw. Korngrößen zurückgeführt werden können.

Zusätzlich wird untersucht, ob sich die Kornzusammensetzung, -verteilung und -größe bei den drei zu untersuchenden Messstellen unterscheidet und ob es saisonale Unterschiede bezüglich des Korndurchmessers, der SSC sowie der Trübung gibt.

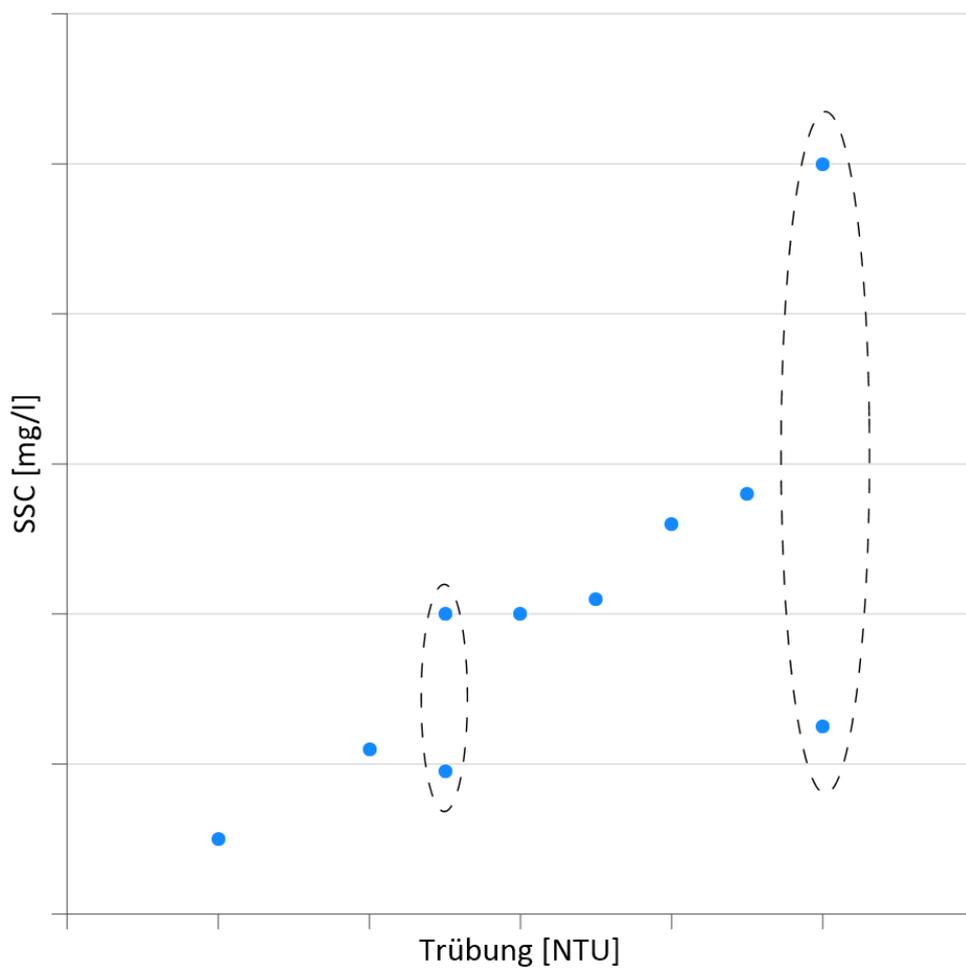


Abb. 1.7: Die Trübung beispielhaft in Abhängigkeit von Konzentration. Zentrale Fragestellung: Können unterschiedliche Konzentrationen (SSC) bei ähnlicher Trübung durch die Verteilungskurven begründet werden (eigene Darstellung)

Kapitel 2

Prinzipien

2.1 Laserbeugungs-Partikelgrößenanalyse

Die in Kapitel 1.3 vorgestellten Methoden zur Bestimmung der PSD haben alle gewisse Nachteile, wie z.B. einen sehr hohen Zeitaufwand bei Siebungen und Sedimentanalysen [13, 32, 45] und benötigen große Probenmengen [14], haben ein kleines Analysefenster bezüglich der PSD (nur Korngrößen $< 300 \mu\text{m}$) bei der Röntgensedigraphie [11] oder Probleme bei der Partikelidentifikation bei der Bildanalyse [30].

Als Alternative gibt es die Laserbeugungs-Partikelgrößenanalyse, im weiteren mit LDS (Laser Diffraction Spectrometry) abgekürzt, welche in der Regel den Vorteil hat, dass sie einen breiten Bereich von Korngrößen abdecken und kleine Proben schnell analysieren kann [14]. Diese wird nachfolgend genauer erläutert.

Ein LDS-System basiert grundsätzlich auf folgendem Prinzip: Ein paralleler Strahl monochromatischen Lichts durchstrahlt eine Suspension mit den zu bemessenden Partikeln. LDS-Systeme kombinieren in der Regel Messungen bei roten (600-700 nm) und blauen (400-500 nm) Wellenlängen [4], die sich in einer Probenzelle befinden, und das gebeugte Licht wird auf Detektoren fokussiert [14]. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, ist der Beugungswinkel umgekehrt proportional zur Partikelgröße, und die Intensität des gebeugten Strahls ist in jedem Winkel ein Maß für die Anzahl der Partikel mit einer bestimmten Querschnittsfläche bzw. Durchmesser [14].

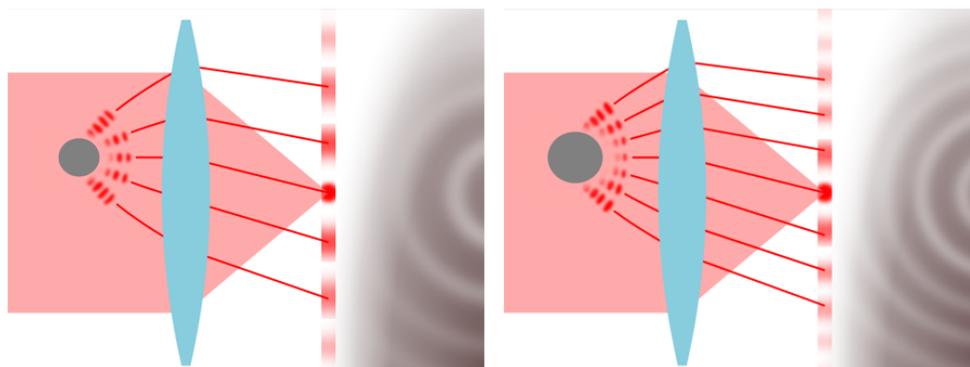


Abb. 2.1: (a) Licht wird von kleinem Partikel in größerem Winkel gebeugt, (b) Licht wird von großem Partikel in kleinerem Winkel gebeugt [44], [43]

Da Licht, das in gleichen Winkeln gestreut wird, ebenfalls parallel ist und daher durch eine Linse auf einen bestimmten Punkt in der Detektionsebene fokussiert wird [6], ist das Beugungsmuster weder durch die Position der Teilchen im Strahl noch durch ihren Bewegungszustand beeinflusst [6], einzig durch ihre Größe.

Durch diese Beziehung können LDS-Instrumente Informationen über die Partikelgröße herausfinden, indem sie die Winkelabhängigkeit der Intensität des Lichts messen, das von Partikeln gebeugt wird, die von einem Laserstrahl beleuchtet werden [6].

Ein optisches Modell wird anschließend verwendet, um diese Daten zu interpretieren und somit eine Partikelgrößenverteilung zu berechnen [4]. Die Beugung von Licht wurde früher als Fraunhofer-Beugung modelliert [8], da die Rechenressourcen begrenzt waren und dies weniger Rechenaufwand benötigt [58], heute wird die Mie-Theorie verwendet [1].

Die Mie-Theorie wird mittlerweile durch eine internationale Norm für Laserbeugung (ISO13320-1) empfohlen, insbesondere wenn Partikel mit einem Radius von weniger als $50 \mu\text{m}$ gemessen werden [4].

Die Mie-Theorie verlangt jedoch von den Benutzer*innen, dass der Brechungsindex, nachfolgend als RI (Refractive Index) abgekürzt, der zu untersuchenden Partikel und des Dispergiermittels angenommen wird [3]. Der RI spielt eine entscheidende Rolle, weil er die Lichtstreuereigenschaften der zu untersuchenden Partikel bestimmt [3].

Die Mie-Theorie ist eine Theorie, um die Streuung von Strahlung durch homogene, kugelförmige Teilchen bei allen Teilchendurchmesser-zu-Wellenlängen-Verhältnissen zu erklären [48] und ist eine allgemeine Lösung der Maxwell-Gleichungen für die Wechselwirkung von Licht mit Materie [4].

Sie gibt die vollständige Winkelverteilung der Streulichtintensität eines homogenen kugelförmigen Teilchens in Abhängigkeit von seinem RI, seiner Größe und der Wellenlänge des Lichts an [16].

Die Theorie basiert auf verschiedenen Annahmen. Dass die zu messenden Teilchen kugelförmig sind, zudem das Streulicht von einem einzigen Streuereignis gemessen wird, der RI sowohl des Partikels als auch des Dispergiermittels bekannt ist und die Partikel homogen sind [48].

Der RI ist eine komplexe Zahl, welche sich aus einem realen und einem imaginären Teil zusammensetzt. Der reale Teil des RI wird benötigt, um die Beugung von der Partikeloberfläche vorherzusagen (Beugungsindex), und kann durch Refraktometermessungen, Mikroskopbeobachtungen oder mit empirischen Methoden bestimmt werden [4]. Der imaginäre Teil des Brechungsindex erklärt die Dämpfung des Lichts beim Durchgang durch das Partikel, welche durch Absorption des Materials auftritt (Absorptionsindex) [4].

Der RI für viele anorganische Verbindungen und einfache organische Stoffe ist in Standard-Referenztexten wie z.B. dem „Sample dispersion and refractive index guide“ von Malvern Instruments verfügbar [3].

Sollte der RI nicht bekannt sein wird es als besser angesehen die Fraunhofer-Approximation zu verwenden, als einen möglicherweise falschen RI zu erraten [3].

2.2 Nephelometer, Trübheitsanalysen, Schwebstoffkonzentrationen

Da die Trübheit eines Fließgewässers eine wichtige Messgröße zur Bestimmung der Schwebstoffkonzentration (SSC) und dieser Indikator für die Gesundheit der Umwelt [55], Wasserqualität und Nährstoffverfügbarkeit in ganzen Einzugsgebieten ist [15], ist die kontinuierliche und zuverlässige Messung dieser von großer Bedeutung.

Die Standardmethode zur Bestimmung des SSC ist die gravimetrische Analyse von Flaschenproben, die in zeitlichen Abständen an Flussquerschnitten entnommen werden [15]. Da diese Methode zwar zuverlässig ist, jedoch mit vielen Nachteilen verbunden ist, wie z.B. Diskontinuität, Ineffizienz und hohen Kosten durch hohen Arbeits- und Zeitaufwand [15], gibt es Möglichkeiten in-situ, automatische Trübheitsmessungen durchzuführen, welche anschließend mit der SSC [15] bzw. Total Suspended Sediment (TSS) [53] korreliert werden können.

Eine Methode zur in-situ Messung der Trübheit ist die Nephelometrie. Nach ISO 7027 sendet eine Infrarot LED Licht bei 860 nm mit einer spektralen Bandbreite kleiner 60 nm aus [53].

Partikel interagieren mit dem einfallenden Licht, indem sie dieses omnidirektional streuen [53]. Die räumliche Verteilung des gestreuten Lichts hängt vom Verhältnis der Teilchengröße zur Wellenlänge des einfallenden Lichts, Partikelform und Brechungsindex ab [53]. Die Streuung des Lichts wird intensiver, je höher die Trübheit bzw. Partikelkonzentration ist [53].

Das gestreute Licht muss anschließend durch Detektoren erfasst werden. Aktuell gibt es vor allem vier Arten von Detektoren, die in Nephelometern verwendet werden: die Photomultiplier-Röhre, die Vakuum-Photodiode, die Silizium-Photodiode und der Cadmiumsulfid-Photoleiter [53].

Was die Geometrie betrifft, gilt ein Detektionswinkel von 90° als sehr empfindlich gegenüber Partikelstreuung, weshalb fast alle Nephelometer einen Erfassungswinkel von 90° verwenden [53] und laut ISO wird eine Weglänge von LED bis Detektor von weniger als 10 cm verlangt [53]. Abbildung 2.2 stellt das Prinzip schematisch dar.

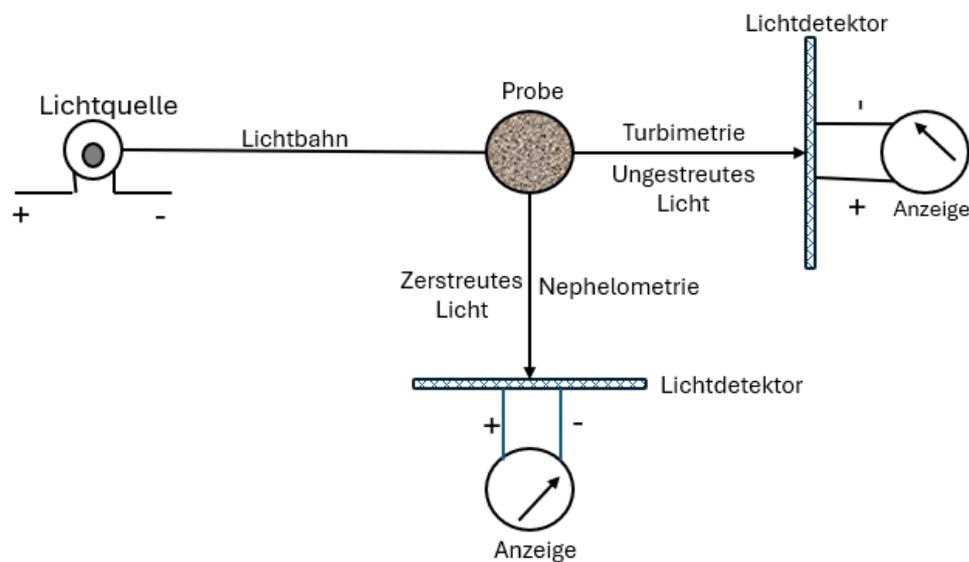


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der turbidimetrischen (rechts) und nephelometrischen Methode (unten) (eigene Darstellung aus [23])

Um quantifizierbare Ergebnisse zu erhalten, muss das Nephelometer zuvor noch kalibriert werden, indem es mit Formazin referenziert wird. Formazin ist eine nahezu ideale Suspension für Trübungsstandards, die aus nachverfolgbaren Rohstoffen reproduzierbar und mit geringen Abweichungen hergestellt werden kann [53]. Zur Kalibrierung wird meist eine 4000 NTU Formazin-Lösung vorbereitet und anschließend zu verschiedenen Konzentrationen verdünnt, um eine Reihe von Trübungskalibratoren zu erstellen (meistens 0, 3, 6, 10, 40, 70, 100, 400, 700, 1000, 2000 und 4000 NTU), mit welchen das Gerät kalibriert werden kann [15]. Des Weiteren muss noch eine Korrelation zwischen Trübung und TSS bzw. SSC hergestellt werden. Dazu müssen mehrere Verdünnungen einer Probe hergestellt werden, um den möglichen TSS bzw. SSC-Bereich für die gegebene Probe abzudecken [53]. Im Anschluss muss sowohl eine gravimetrische Bestimmung jeder Verdünnung einer Probe bestimmt werden, als auch eine Messung der Trübung jeder Verdünnung und ein Diagramm erstellt werden, in dem die SSC in mg/L auf der x-Achse und die jeweilige Trübung auf der y-Achse dargestellt werden [53].

Kapitel 3

Methodik

3.1 Herkunft der Proben

Die in dieser Arbeit analysierten Messproben stammen von drei Messstellen in der Schweiz, die vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) betrieben werden. Diese Messstellen werden im Folgenden beschrieben.

Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke (2473)

Die erste Messstation ist Rhein – Diepoldsau, Rietbrücke (2473). Sie liegt auf 412 m ü. M. Das Einzugsgebiet erstreckt sich durchschnittlich auf 1771 m ü. M, umfasst 6299 km² und ist zu 0,60 % vergletschert [60]. Der mittlere Abfluss (MQ) beträgt 233 m³/s [56], und die Flussbreite an der Station beträgt etwa 70 Meter (Schätzung). Abbildung 3.1 zeigt den mittleren Tagesabfluss und die mittlere Trübe über das Jahr 2024.

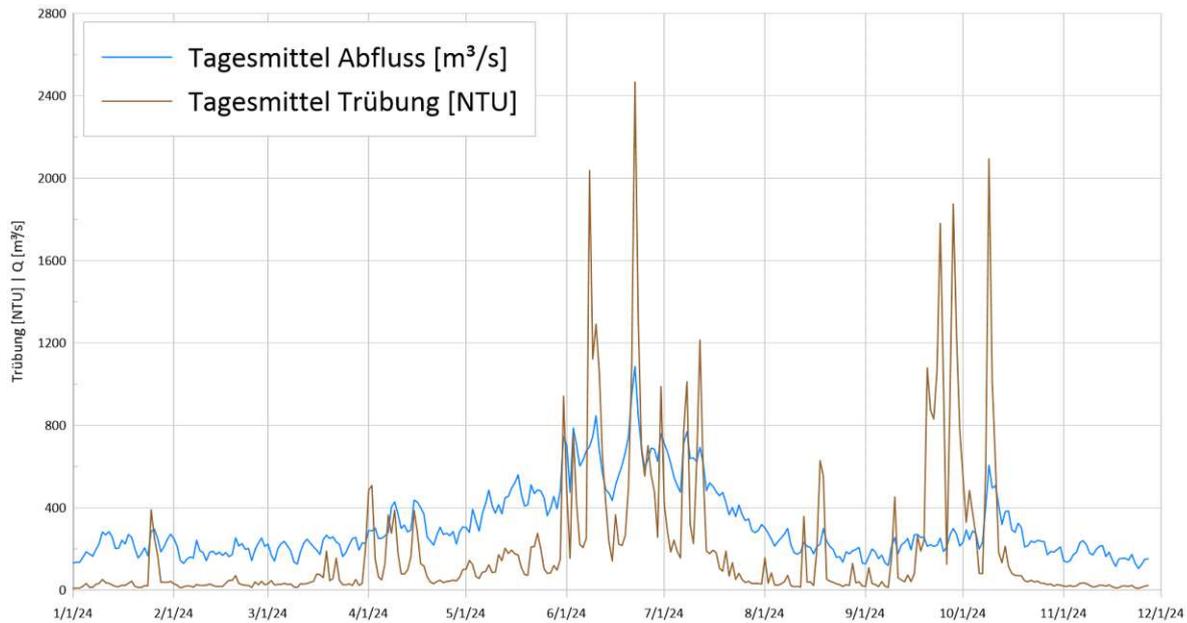


Abb. 3.1: mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2473

Aare – Brienzwiler (2019)

Die zweite Messstation, Aare – Brienzwiler (2019), befindet sich auf 574 m ü. M. Das Einzugsgebiet liegt im Durchschnitt auf 2135 m ü. M, ist zu 15,50 % vergletschert und umfasst 555 km² [60]. Der mittlere Abfluss beträgt 35 m³/s [56], und die Flussbreite beträgt rund 20 Meter (Schätzung). Abbildung 3.2 zeigt den mittleren Tagesabfluss und die mittlere Trübe über das Jahr 2024.

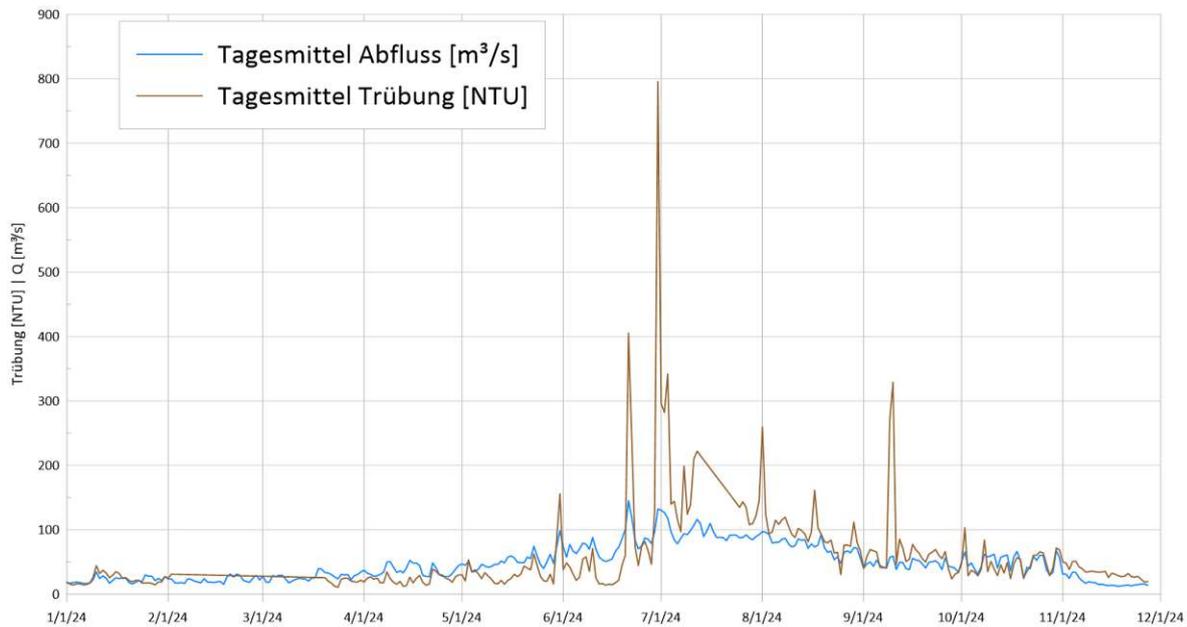


Abb. 3.2: mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2019

Rhône – Porte du Scex (2009)

Die dritte Messstation, Rhône – Porte du Scex (2009), liegt auf 377 m ü. M. Ihr Einzugsgebiet erstreckt sich durchschnittlich auf 2130 m ü. M, ist zu 11,00 % vergletschert und hat eine Fläche von 5220 km^2 [60]. Der mittlere Abfluss beträgt $182 \text{ m}^3/\text{s}$ [56], und die Flussbreite beträgt ca. 60 Meter (Schätzung). Abbildung 3.3 zeigt den mittleren Tagesabfluss und die mittlere Trübe über das Jahr 2024.

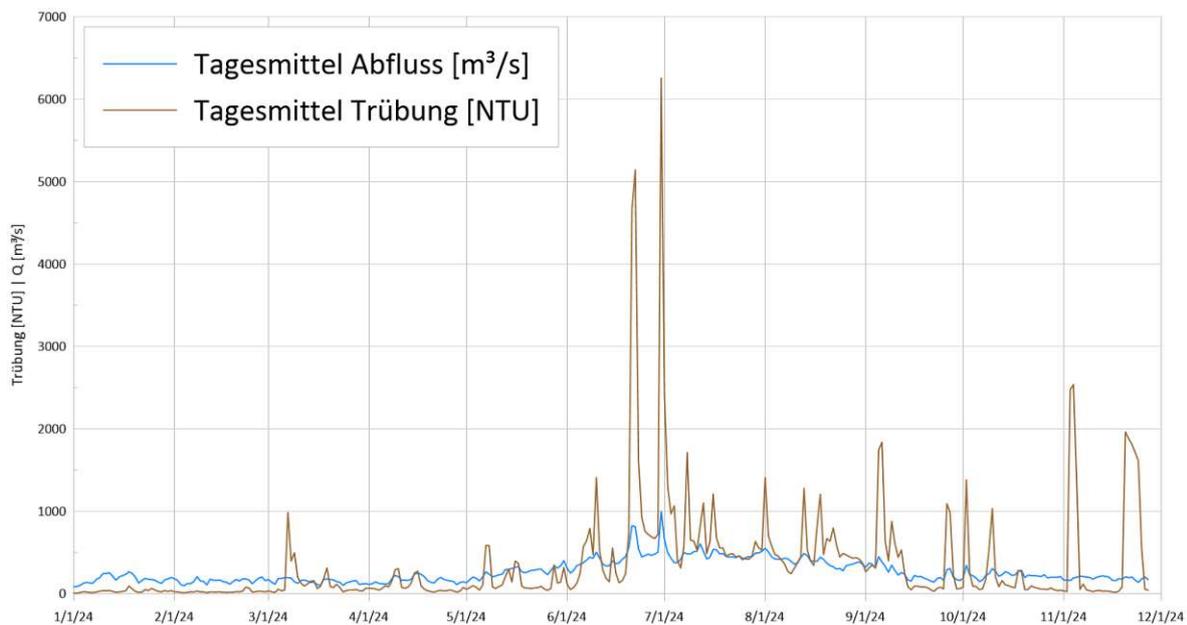


Abb. 3.3: mittlerer Tagesabfluss (blau) und mittlere Trübe (braun) über das Jahr 2024 an Messstation 2009

Für extreme Peaks bei der Trübung sind wahrscheinliche lokale Starkregenereignisse oder Rutschungen verantwortlich. Abbildung 3.4 zeigt die Lage der drei Messstationen in der Schweiz.

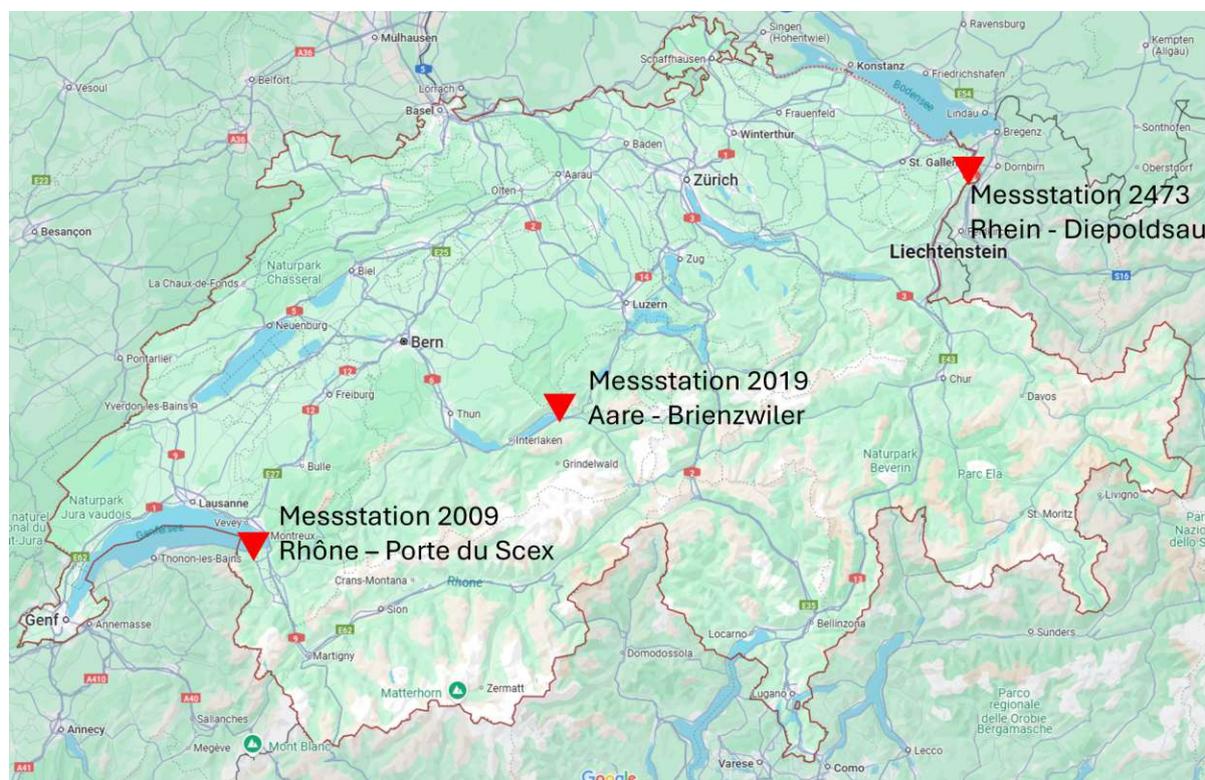


Abb. 3.4: Lage der Messstationen 2009, 2019 und 2473 in der Schweiz (google.maps.com)

3.2 Messparameter und Probenahme

An den Messstationen werden verschiedene Parameter gemessen. In Porte du Scex und Diepoldsau werden Abfluss (in m^3/s), Wasserstand (in m ü.M), Temperatur (in $^{\circ}C$), Leitfähigkeit (in $\mu S/cm$), Sauerstoffkonzentration (in mg/l) und Trübung (NTU) kontinuierlich sowie mehrmals täglich bzw. stündlich gemessen [60]. In Brienzwiler wird auf die Messung der Leitfähigkeit und der Sauerstoffkonzentration verzichtet[60].

Zusätzlich werden vom BAFU, wie in Kapitel 3.1 erwähnt, Flaschenproben (isokinetische Probenahme) entnommen, die anschließend gefiltert, getrocknet und gewogen werden, um die SSC zu bestimmen und den Versand der Schwebstoffproben zu erleichtern. Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Probenahme, Filtration, Trocknung und Wägung kurz beschrieben.

Im Standardmessnetz der Landeshydrologie werden an den Stationen von vertraglich gebundenen Beobachtern zweimal wöchentlich zu festgelegten Zeiten Proben entnommen [56] (für diese Arbeit wurden nicht alle Proben, sondern nur 2-8 Proben pro Monat von Jänner bis November 2024 analysiert). Für diesen Zeitraum wurden für die Messstation 2019 Aare - Brienzwiler 35 Proben, die Messstation 2473 Rhein - Diepoldsau 47 Proben und die Messstation 2009 Rhône - Porte du Scex 38 Proben analysiert. Die Probenahme erfolgt, wie in Abbildung 3.5 zu sehen, mittels Hand-Schöpfgerät oder Messwagen [56].

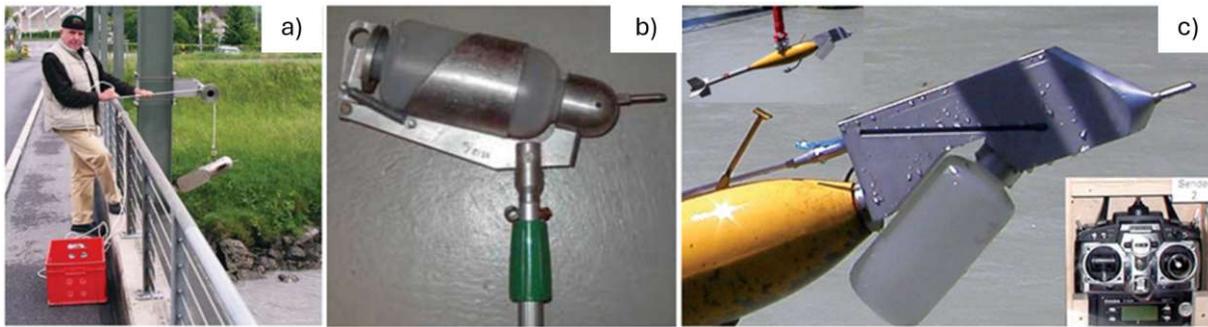


Abb. 3.5: (a) Zweimal wöchentlich durchgeführte Probeentnahme von einer Brücke aus [22], (b) Entnahmegesetz an Stange [56], (c) Isokinetische Schwebstoffprobenahme mit kleinstmöglichem Einfluss auf die Strömung im Messpunkt [21]

Seit 2010 wird an den BAFU-Messstellen die Wahl der Probenahmestelle durch die Erstellung von Schwebstoffkonzentrationsprofilen bestimmt [21]. Anhand dieser Profile kann die repräsentativste Stelle für die Probenahme bestimmt werden [21], da z.B. Probenahmen am Gewässerufer oft zu tiefe SSC-Schätzwerte ergeben, während Probenahmen zu nahe am Gewässergrund zu hohe Werte liefern (vgl. Abbildung 3.6).

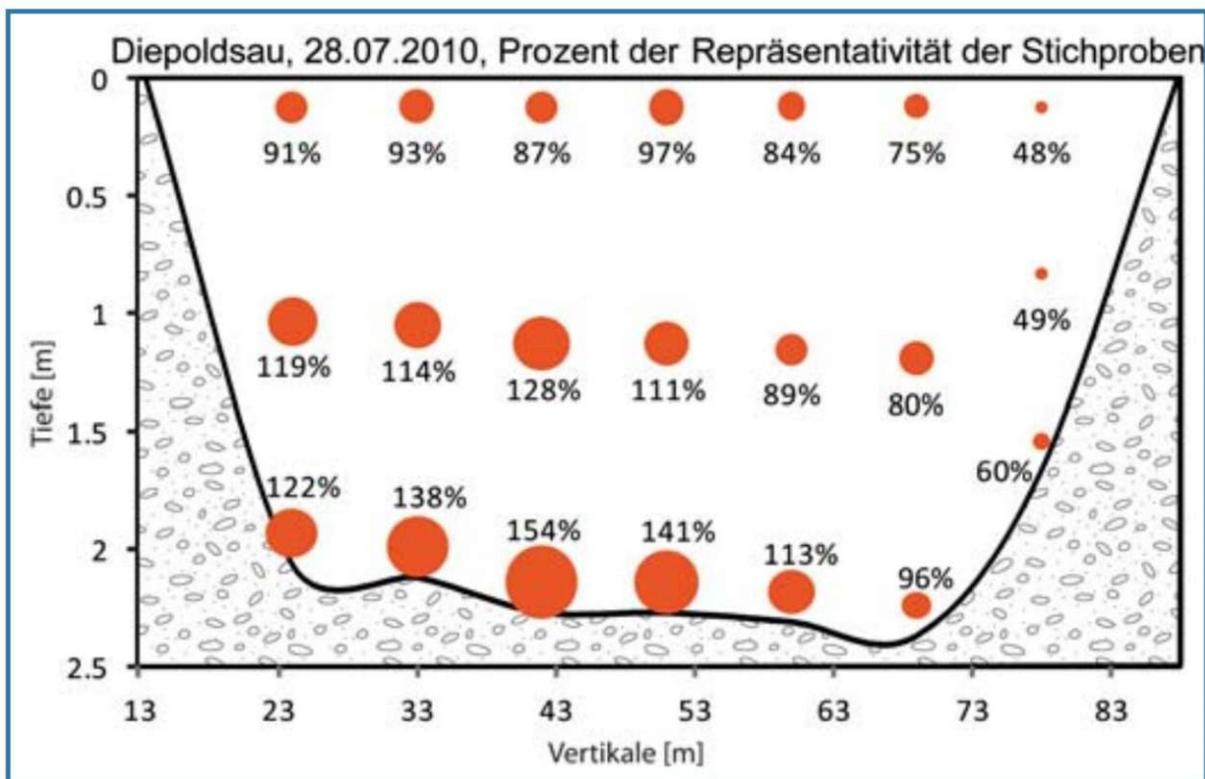


Abb. 3.6: Repräsentativität der gemessenen punktuellen Konzentration bezogen auf die Konzentration im gesamten Profil [21]. Es zeigt sich, dass Proben am Ufer und an der Oberfläche die SSC unterschätzen, während Proben an der Sohle die SSC überschätzen. Die Probenahme bzw. Messung sollte im repräsentativsten Punkt stattfinden

Im Labor der Landeshydrologie wird die Schwebstoffkonzentration der entnommenen Wasserproben bestimmt [56]. Dazu wird das Probenwasser durch einen Membranfilter mit einer Porengröße von $0,45\ \mu\text{m}$ filtriert, wodurch auf jeden Fall der Grobton ($> 0,63\ \mu\text{m}$ [17]) und ein Teil des Mitteltons ($0,02\ \mu\text{m} - 0,63\ \mu\text{m}$ [17]) erfasst wird. Anschließend werden die gesammelten Schwebstoffe im Trockenschrank bei $105\ ^\circ\text{C}$ für zwei Stunden getrocknet, im Exsikkator abgekühlt, um ein erneutes Feuchtwerden der Probe zu verhindern, und anschließend mit einer Präzisionswaage gewogen und die SSC berechnet [56].

Da die Probenahme nicht täglich erfolgt, können wichtige Ereignisse verpasst werden [23] und um eine kontinuierliche Erfassung der Schwebstoffe zu erhalten, ist es notwendig, die Messstelle mit einem Trübungssensor auszurüsten [24]. Das BAFU verwendet dazu den Feststoffgehaltssensor Solitax sc der Firma Hach, der nach dem nephelometrischen Messprinzip (siehe Kapitel 2.3) gemäß DIN EN 27027/TS arbeitet [19]. Nachstehende Abbildung 3.7 zeigt die Sonde.

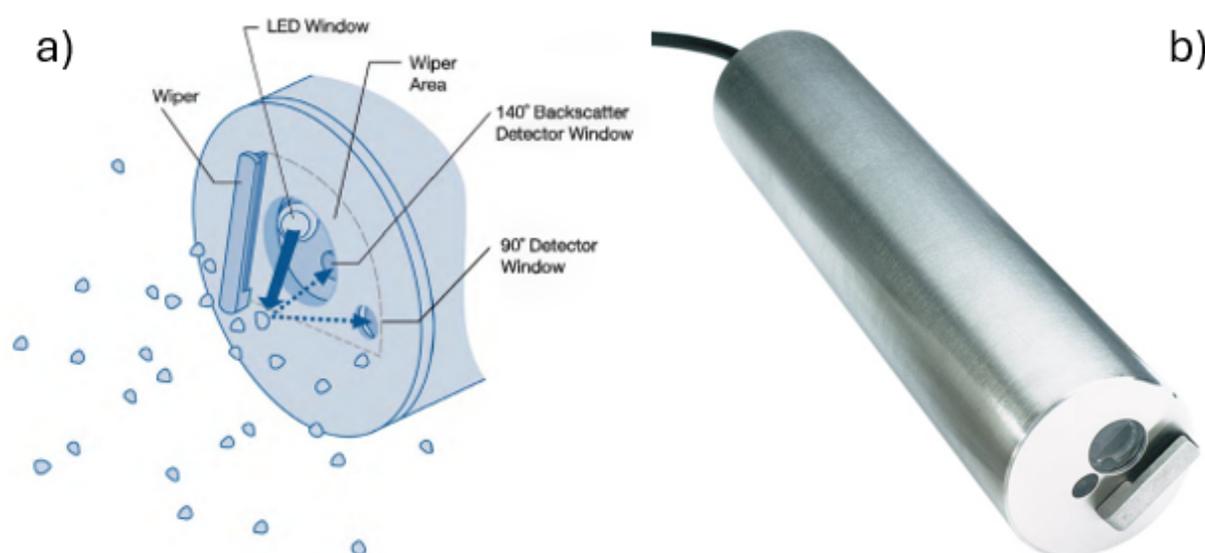


Abb. 3.7: (a) Messoptik des Hach Solitax sc [18], (b) Hach Solitax sc [18]

Die Messoptik sollte entweder in Fließrichtung oder orthogonal dazu im Gewässer positioniert werden. Die Höhe über der Sohle ist so zu wählen, dass ein Trockenfallen möglichst vermieden wird und bei höheren Abflüssen Geschiebe weder die Trübungsmessung verfälscht noch die Messeinrichtung beschädigt [24].

3.3 Korngrößenanalyse mit dem Malvern Mastersizer 3000

3.3.1 Aufbau

Um die entnommenen Proben auf ihre PSD untersuchen zu können, wird in dieser Arbeit, wie in Kapitel 2.1 und 2.2 dargestellt, die LDS verwendet. Am Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie der TU Wien wird als LDS der Mastersizer 3000 der Firma Malvern Panalytical verwendet. Dieses Gerät ist in der Lage eine PSD für Partikel im Größenbereich von $0,01 - 3500\ \mu\text{m}$ zu erzeugen [40]. Zusätzlich stehen als (Nass-) Dispergiereinheit die Hydro LV sowie die Hydro EV zur Verfügung, wobei für diese Arbeit ausschließlich mit der Hydro EV gearbeitet wurde, da hier Laborgläser eingestellt werden können, in denen die Proben nach den Messungen wieder aufgefangen und weiterverwendet werden können [40]. Der komplette Aufbau

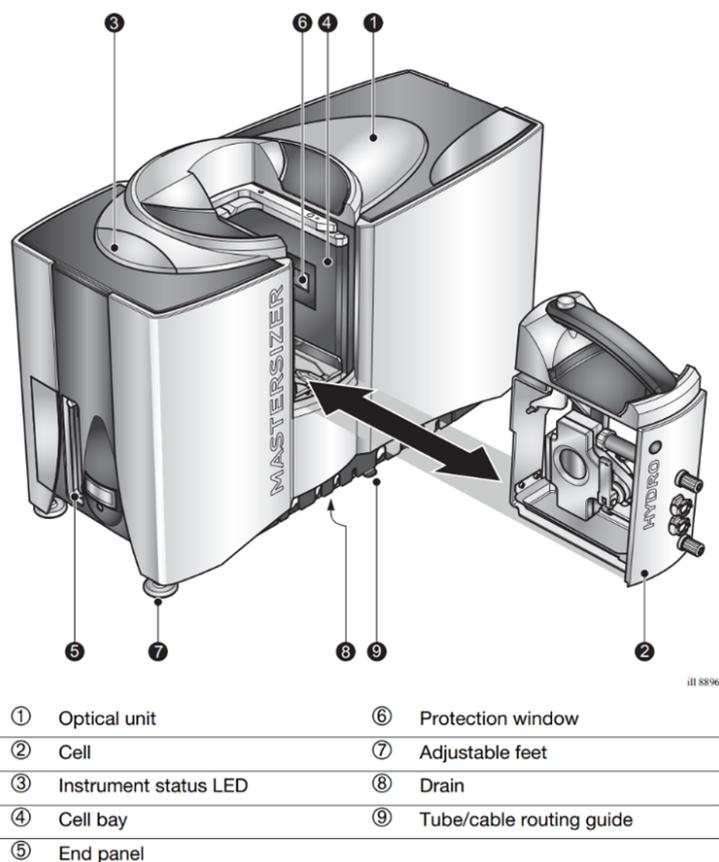


Abb. 3.9: Schematischer Aufbau der Optical Unit [40]

Der wichtigste Teil der OU ist die Zelle, da sie die Schnittstelle zwischen der OU und der Dispergiereinheit darstellt [40]. Im verwendeten Mastersizer 3000 befindet sich eine Nasszelle, die für Nassdispergiereinheiten geeignet ist und wie in Abbildung 3.10 dargestellt aufgebaut ist.

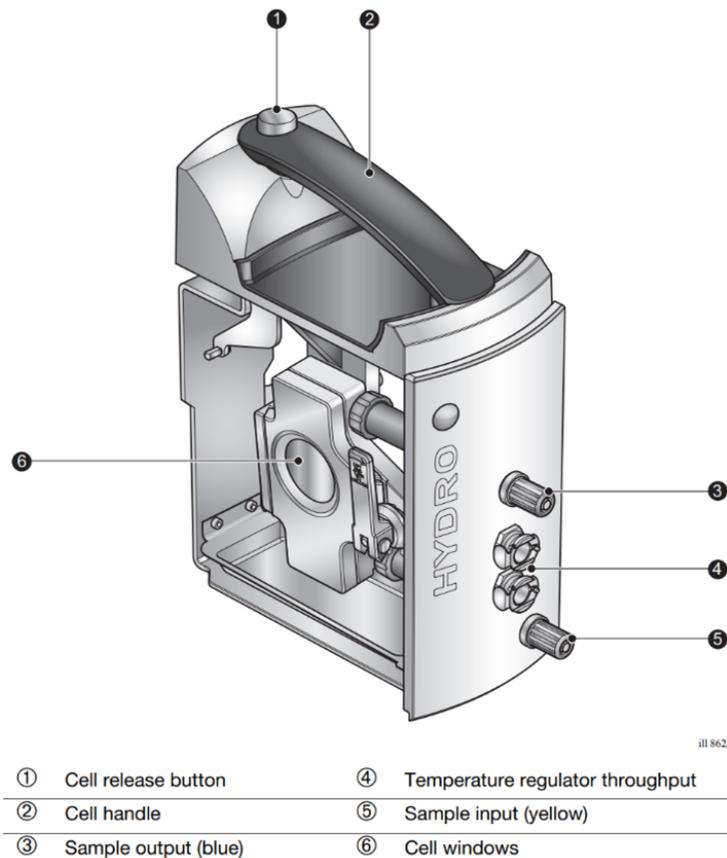


Abb. 3.10: Schematischer Aufbau der Zelle [40]

Abbildung 3.10 zeigt den Probeneinlass ("sample input") und den Probenauslass ("sample output"), die mit der Dispergiereinheit verbunden sind. Die verwendete Hydro EV ist eine halbautomatische Nassdispergiereinheit, in die Standard-Laborgläser (250, 600 und 1000 ml) eingesetzt werden können [39]. Die Hydro EV ist mit einer Pumpe, einem Rührer und einem Ultraschallwandler ausgestattet, die helfen, die Probe sauber zu dispergieren [39]. Abbildung 3.11 zeigt die Hydro EV.

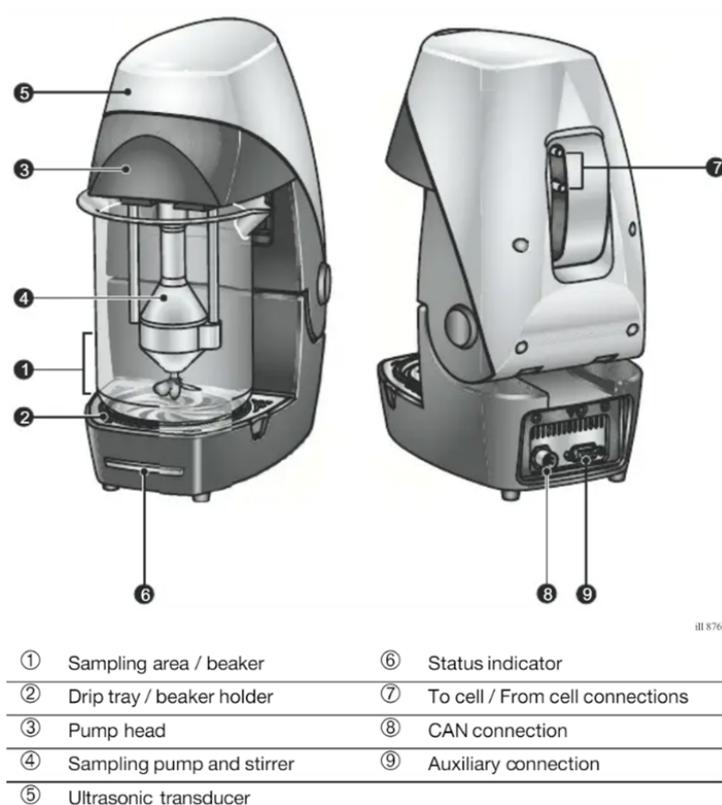


Abb. 3.11: Schematischer Aufbau der Hydro EV Nassdispergiereinheit [40]

3.3.2 Messung

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, wurden für diese Arbeit bereits gefilterte und getrocknete Schwebstoffproben des BAFU verwendet. Diese Proben werden samt Filtern vorsichtig mit einer Pinzette aus einer kleinen Plastiktüte in ein mit der Probennummer beschriftetes Zentrifugenröhrchen gegeben und anschließend mit destilliertem Wasser versetzt, um die Partikel vom Filter zu lösen.



Abb. 3.12: (a) Proben werden via Bücherwarensendung versendet (b) die einzelnen Proben sind in Tüten, welche mit der Probennummer versehen sind (c) in der Tüte sind die Filter doppelt in Alufolie eingewickelt (d) auf den Filter befinden sich die Partikel; die Filter kommen danach mit Partikeln die in Lose in den Alufolien sind in ein Zentrifugenröhrchen (alles eigene Aufnahmen)

In der zum Malvern Mastersizer 3000 zugehörigen Software kann eine Standard Operation Procedure (SOP) erstellt oder eine manuelle Messung durchgeführt werden [40]. Sowohl für SOPs als auch für manuelle Messungen sind spezifische Einstellungen erforderlich, bevor die Messung gestartet werden kann [40]. Diese umfassen:

- Identifizierung
- Partikelart
- Material
- Dispergiermedium
- Anweisungen, Dauer, Sequenz, Lichtabschattung, Alarme
- Zubehör, Reinigung, Analyse, Ergebnisse, Benutzergrößenklassen, Datenexport, Mittelung und Druck

Identifizierung

Jede Messung muss zunächst eindeutig benannt werden.

Partikelart

Die Partikelart kann aus den Optionen „Kugelförmig“, „Nicht-Kugelförmig“ und „Fraunhofer Approximation“ gewählt werden. Da „Kugelförmig“ nur für perfekt kugelförmige Partikel in Frage kommt und „Fraunhofer Approximation“ zu ungenauen Resultaten führen kann, wurde für diese Einstellung „Nicht-Kugelförmig“ gewählt [40].

Material

Die physikalischen Eigenschaften des Materials werden entweder manuell eingegeben oder aus einer integrierten Datenbank ausgewählt [40]. Da Flussschwebstoffe aus einer Mischung von Ton, Schluff, Sand und organischen Bestandteilen bestehen [35], wurde als Kompromiss „Quarz“ verwendet. Der Refraktionsindex (RI) von Quarz (1,53) ähnelt den RIs anderer typischer Bestandteile wie Feldspat und Tonmineralien [54]. Der Absorptionsindex (AI) wurde mit einem automatischen Wert von 0,01 festgelegt, wie es auch in ähnlichen Studien [14] empfohlen wird.

Dispergiermedium

Das Dispergiermedium wurde in der Software-Datenbank als Wasser mit einem Brechungsindex von 1,33 ausgewählt [40].

Dauer

Die Mess- und Hintergrundmessdauer wurden auf 15 Sekunden festgelegt, um eine breite Partikelgrößenverteilung (PSD) abzudecken. Da größere Partikel mehr Zeit für eine repräsentative Messung benötigen, wurde sichergestellt, dass die Hintergrundmessungen mindestens so lange dauern wie die eigentliche Messung. Der blaue Laser, der hauptsächlich Partikel $<1 \mu\text{m}$ misst, könnte deaktiviert werden, da die erwartete PSD hauptsächlich größere Partikel umfasst, jedoch wurden für diese Arbeit ebenfalls 15 Sekunden Messdauer ausgewählt, um alle Möglichkeiten abzudecken.

Sequenz

Für jede Probe wurden fünf Messungen pro Durchlauf durchgeführt, wobei zwischen den Messungen eine Verzögerung von acht Sekunden eingestellt wurde. Bei schwer zu dispergierenden Materialien ist eine höhere Anzahl an Messungen sinnvoll.

Abschattung

Die Abschattung spielt eine wichtige Rolle. Sie beträgt nach der Initialisierung und den Hintergrundmessungen 0 % und steigt, je mehr Partikel der Dispergiereinheit hinzugefügt werden. Weil eine zu niedrige Abschattung aufgrund eines schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann, jedoch eine zu hohe Abschattung zu Mehrfachstreuungsfehlern führen kann [59], muss dieser Wert eingegrenzt werden. Die Abschattung wurde vorerst auf 10–20%, wie von Malvern empfohlen, eingestellt, jedoch wurde der Bereich nach Trial-and-Error auf 1–30% erweitert, da die Datenqualität überprüft und als akzeptabel bewertet wurde [59].

Zubehör

Für natürliche Boden- und Flussschwebstoffe wurde der Einsatz von Ultraschall und Rührern gewählt. Di Stefano et al. schreiben in einem Artikel von 2010, dass für natürliche Boden- oder Flussproben der Einsatz von Ultraschall für 3 Minuten geeignet ist und der Rührer eine Geschwindigkeit von 3600 – 4200 U/min aufbringen sollte [14]. Die Rührergeschwindigkeit wurde letztlich mit 2900 U/min gewählt, da Luftblasenbildung und Verschütten bei höheren Geschwindigkeiten auftrat. Ultraschall wurde für 150 Sekunden vor der Messung eingesetzt.

Analyse

Das Analysemodell wurde auf den „Universal-Modus“ eingestellt, da dieser für die meisten natürlichen Materialien geeignet ist [40].

Ergebnisse

Der Ergebnistyp wurde auf Volumen- und Anzahlverteilung festgelegt, um die Partikelgrößenverteilung im Probenvolumen widerzuspiegeln. Standardgrößenbereiche wurden beibehalten [40].

Nach dem Einstellen der Parameter kann anschließend mit der Geräteinitialisierung sowie der Messung des Hintergrunds fortgefahren werden. Sobald dies abgeschlossen ist wird die gelöste Probe aus dem Zentrifugenröhrchen so lange zu dem bereits in die Dispergiereinheit gestellten Laborglas mit destilliertem Wasser gegeben, bis sich der gewünschte Abschattungsgrad eingestellt hat. Sobald der Abschattungswert einen zufriedenstellenden Wert angenommen hat, kann mit der Messung begonnen werden.

Nach einer Messung ist es von großer Wichtigkeit die Qualität der Daten zu überprüfen, wofür das „Data Quality Tab“ herangezogen wird [40]. In diesem kann überprüft werden, ob die

Abschattung für diese Partikelgröße in Ordnung ist, die Justierung stimmt, die Abweichungswerte zu hoch sind ($< 1\%$), die gewichtete Abweichung in einer Größenordnung mit der ungewichteten Abweichung ist, die Hintergrunddaten möglicherweise durch kontaminierte Zellenfenster oder Dispergiermedien schlecht sind oder ob negative Daten vorhanden sind [40]. Bei Erfüllung aller Kriterien wird die grundsätzliche Datenqualität von der Software als gut gekennzeichnet. Zusätzlich kann mit dem „ISO variability check“ nach ISO 13320 überprüft werden, ob die Variabilität der fünf Messungen einer Messreihe innerhalb der ISO-Limits liegt [40].

Falls die Abweichungswerte zu hoch sind, sollte man im Reiter „Fit“ die Abweichungskurven der Rohdaten und angepassten Rohdaten überprüfen. Bei großen Abweichungen der beiden Kurven bei Detektornummer < 40 sollte der Brechungsindex verändert werden, sind die Abweichungen bei Detektornummer 51 oder 63 muss der Absorptionsindex verändert werden [38].

Kapitel 4

Analyse

4.1 Mastersizer

Die Messdatensätze werden vom Mastersizer lokal in Ergebnisdateien (.mmes-files) gespeichert. Hier wurden pro Probe fünf Messungen durchgeführt und jede Messung wird in einem eigenen Messdatensatz gespeichert, der wiederum in den Ergebnisdateien zu finden ist. Diese fünf Messdatensätze werden auf ihre Datenqualität überprüft und anschließend zu einem gemittelten Datensatz zusammengefasst. Dafür muss kein eigener Code geschrieben werden, sondern kann das von der Software im Reiter „Datensatzanzeige“ übernommen werden. Wird anschließend in das Register „Berichte“ gewechselt, so kann in der Auswertung die sowohl Volumendichte- als auch die Partikelanzahlverteilung angezeigt und die Rohdaten als .txt- oder .csv-Datei exportiert werden. Tabelle 4.1 zeigt tabellarisch die Volumendichteverteilung einer Probe (Probe 349, Messstation Rhône - Porte du Scex), während Abbildung 4.1 graphisch die PSD, PND sowie deren kumulierte Kurven zeigt.

Größenklassen (μm)	Volumendichte (%)	Größenklassen (μm)	Volumendichte (%)
0.011	0.0000	2.932	0.8277
0.012	0.0000	3.331	0.9684
0.014	0.0000	3.784	1.1473
0.016	0.0000	4.300	1.3673
0.018	0.0000	4.885	1.6138
0.020	0.0000	5.550	1.8701
0.023	0.0000	6.306	2.1298
0.026	0.0000	7.165	2.3939
0.030	0.0000	8.140	2.6625
0.034	0.0000	9.249	2.9358
0.038	0.0000	10.508	3.2142
0.043	0.0000	11.939	3.4957
0.049	0.0000	13.564	3.7755
0.056	0.0000	15.411	4.0464
0.064	0.0000	17.510	4.2996
0.072	0.0000	19.894	4.5253
0.082	0.0000	22.603	4.7147
0.093	0.0000	25.680	4.8605
0.106	0.0000	29.177	4.9585
0.121	0.0000	33.150	5.0081
0.137	0.0000	37.664	5.0122
0.156	0.0000	42.792	4.9762
0.177	0.0000	48.619	4.9052
0.201	0.0000	55.239	4.8008
0.228	0.0000	62.761	4.6594
0.259	0.0000	71.306	4.4721
0.295	0.0000	81.015	4.2297
0.335	0.0000	92.047	3.9283
0.380	0.0000	104.580	3.5738
0.432	0.0000	118.820	3.1834
0.491	0.0000	134.999	2.7810
0.558	0.0000	153.381	2.3899
0.634	0.0000	174.266	2.0255
0.720	0.0000	197.994	1.6935
0.818	0.0000	224.954	1.3910
0.929	0.0000	255.584	1.1104
1.056	0.0000	290.385	0.8428
1.200	0.0001	329.925	0.5859
1.363	0.0114	374.849	0.3424
1.548	0.1233	425.889	0.1196
1.759	0.2643	483.880	0.0109
1.999	0.4225	549.766	0.0002
2.271	0.5728	624.624	0.0000
2.580	0.7042	709.675	0.0000

Tab. 4.1: Größenklassen und Volumendichte von Malvern Mastersizer 3000 exemplarisch für Probe 349

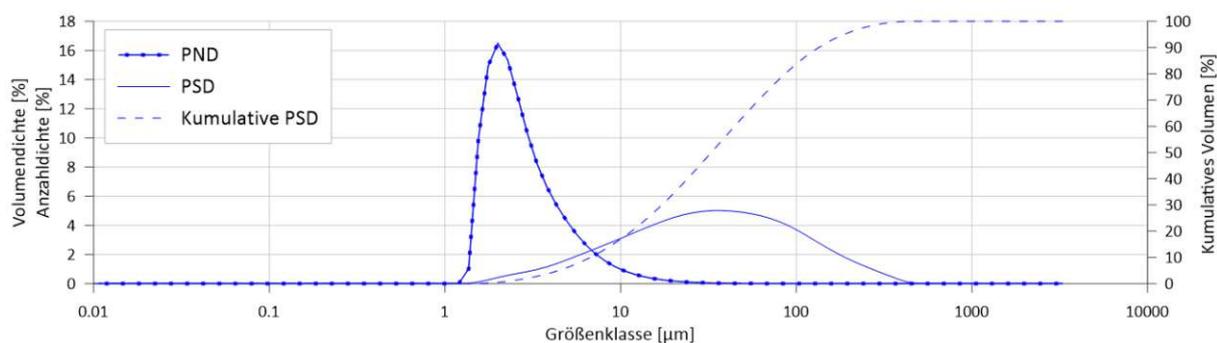


Abb. 4.1: a) PSD und PND von Probe 349; deutlich zu sehen ist, dass die PND gegenüber der PSD nach links verschoben ist, was daran liegt, dass wenige große Partikel einen großen Anteil der PSD aufgrund ihres Volumens ausmachen, jedoch bezüglich PND nicht ins Gewicht fallen, weil es um mehrere Größenordnungen weniger Partikel sind
b) kumulative Kurve der PSD

In den folgenden Abbildungen mit Verteilungskurven wird die PSD immer durchgezogen, die PND durchgezogen mit Punkten und die kumulative PSD gestrichelt dargestellt. Zusätzlich können die relevantesten Parameter der Partikelgrößenanalyse exportiert werden. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wurden folgende Parameter der jeweiligen gemittelten Messdatensätze gewählt: D-Werte (D_{10} , D_{50} , D_{90}), Span, Gleichförmigkeit, volumenbasierter mittlerer Durchmesser $D[4,3]$, oberflächenbasierter mittlerer Durchmesser $D[3,2]$, Skewness und Kurtosis.

Die sogenannten d-Werte (D_{10} , D_{50} , D_{90}) der Probe, werden häufig zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung verwendet [63]. Die d-Werte sind die Partikelgrößen, unterhalb derer 10, 50 bzw. 90% der Partikel (hier vom Volumen abhängig berechnet) liegen. Sie repräsentieren die feinen (D_{10}), mittleren (D_{50}) sowie groben Partikelgrößen [63].

Die Span, welche die Verteilungsbreite beschreibt, wird mit der Formel aus [20] berechnet. Abbildung 4.2 stellt zwei Verteilungskurven und die D-Werte bildlich dar.

$$Span = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}} \quad (4.1)$$

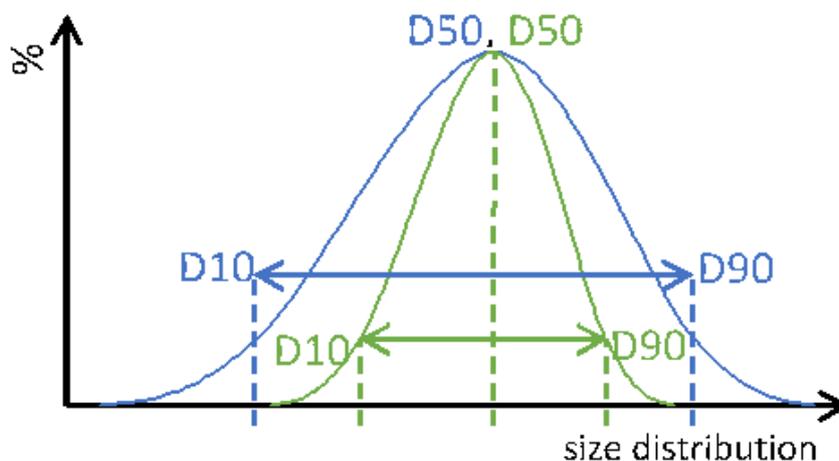


Abb. 4.2: PSD von zwei verschiedenen Partikelsystemen mit identischem D_{50} . Blau: breite PSD (Span), grün: schmale PSD (Span)

Ein kleiner Wert der Span deutet auf eine enge, homogene Verteilung hin, während ein großer Wert auf eine breite, möglicherweise heterogene Verteilung hinweist [20]. Der Gleichmäßigkeitskoeffizient C_u ist ein Formparameter, der die Gleichmäßigkeit der Partikelgrößenverteilung innerhalb einer Probe beschreibt und wie folgt berechnet wird [25].

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4.2)$$

Ein kleiner Wert ($C_u = 1$ wäre z.B. ein Boden mit nur einer Korngröße) deutet auf eine gleichmäßigere, engere Verteilung hin, während ein großer Wert auf eine breitere, evtl. weniger gleichmäßige Verteilung der Partikelgrößen hinweist [25]. Die Skewness, auch drittes zentrales Moment genannt, stellt die Asymmetrie einer Verteilung dar [46]. Eine negative Skewness bedeutet, dass die Verteilung nach links geneigt ist (mit negativem Schwanz), eine positive Skewness bedeutet, dass die Verteilung nach rechts geneigt ist (mit positivem Schwanz) [46]. Sie wird wie folgt berechnet [51].

$$Skew = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad (4.3)$$

Die Kurtosis bezeichnet die Flachheit oder Steilheit einer Verteilung im Vergleich zur Normalverteilung [46]. Im Vergleich zu einer Normalverteilung, die dem Wert 0 entspricht, haben steilere (leptokurtische) Verteilungen positive Werte, während flachere (platykurtische) Verteilungen negative Werte haben [46]. Die übliche Definition lautet [51].

$$Kurt = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \right\} \quad (4.4)$$

Abbildung 4.3 stellt dar, wie sich Verteilungskurven bei negativen bzw. positiven Werten für Skewness und Kurtosis verschieben.

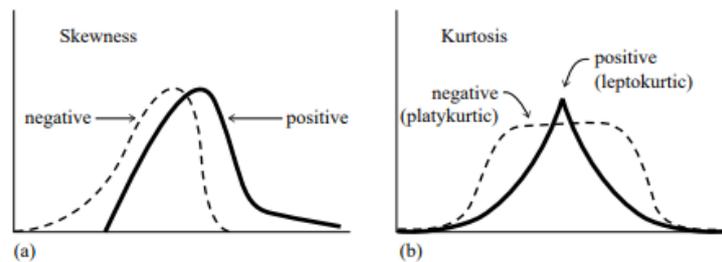


Abb. 4.3: Positive und Negative Skewness und Kurtosis [51]

Der volumen- und oberflächenbasierte mittlere Durchmesser gewichtet das Volumen respektive die Oberfläche der Partikel stärker, was von Vorteil ist, wenn bei der Betrachtung vor allem die Oberfläche bzw. das Volumen ausschlaggebend ist [2].

$$D[4, 3] = \frac{\sum_i N_i d_i^4}{\sum_i N_i d_i^3} \quad (4.5)$$

$$D[3, 2] = \frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2} \quad (4.6)$$

Zusätzlich werden, um eine ausreichende Datenqualität zu gewährleisten, Abschattungs- und Abweichungswerte extrahiert, um aus allen oben genannten Daten eine Tabelle zu erstellen, die wie Tabelle 4.2 exemplarisch für Probe 349 zeigt, aussieht:

Probe	Versanddatum	Gewichtete Abweichung	Abweichung	Laserabschattung [%]
349	18.07.2024	0.6	0.54	29.33
D₁₀	D₅₀	D₉₀	Span	Gleichförmigkeit
6.72	32.8	134	3.889	1.219
Kurtosis	Skew	D[4,3]	D[3,2]	
6.034	2.239	55.3	16.5	

Tab. 4.2: Kornverteilungs- und -größenparameter exemplarisch für Probe 349

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Variabilität von Schwebstoffkornverteilung

5.1.1 Statistische Verteilungsparameter

In Kapitel 4 wurden einige statistische Verteilungsparameter wie Skew, Kurtosis, Breite und Gleichförmigkeit vorgestellt, um mögliche Korrelationen zwischen Trübung und SSC zu untersuchen und potenzielle Ausreißer mit diesen zu erklären. Es zeigte sich jedoch, dass keine signifikanten Korrelationen zwischen Trübung und SSC zu einem der vier in Betracht gezogenen Verteilungsparameter festgestellt wurden. Zudem wurde versucht einige Ausreißer durch diese vier statistischen Verteilungsparameter zu erklären, wozu sie jedoch ebenfalls nicht geeignet waren. Ein auffälliges Ergebnis war jedoch der deutliche Unterschied in den durchschnittlichen Verteilungsbreiten der Proben zwischen den drei Messstellen. Die Proben der Messstelle Brienzwiler wiesen im Durchschnitt eine um 60 % höhere Verteilungsbreite auf als die Proben der Messstelle Porte du Scex und eine um 38,5 % höhere als die der Messstelle Diepoldsau.

Brienzwiler	Diepoldsau	Porte du Scex
7.35	5.31	4.59

Tab. 5.1: Durchschnittliche Span aller Proben an den jeweiligen Messstationen, über den Messzeitraum Jänner bis November 2024

Diese Werte weisen darauf hin, dass die Verteilungskurve der Proben aus Brienzwiler am breitesten ist und somit die inhomogenste Kornverteilung aufweist. Betrachtet man die durchschnittliche Verteilungskurve der drei Messstationen in Abbildung 5.1, wird auch visuell deutlich, dass die Proben aus Brienzwiler eine breitere Verteilung zeigen als jene aus Diepoldsau und Porte du Scex.

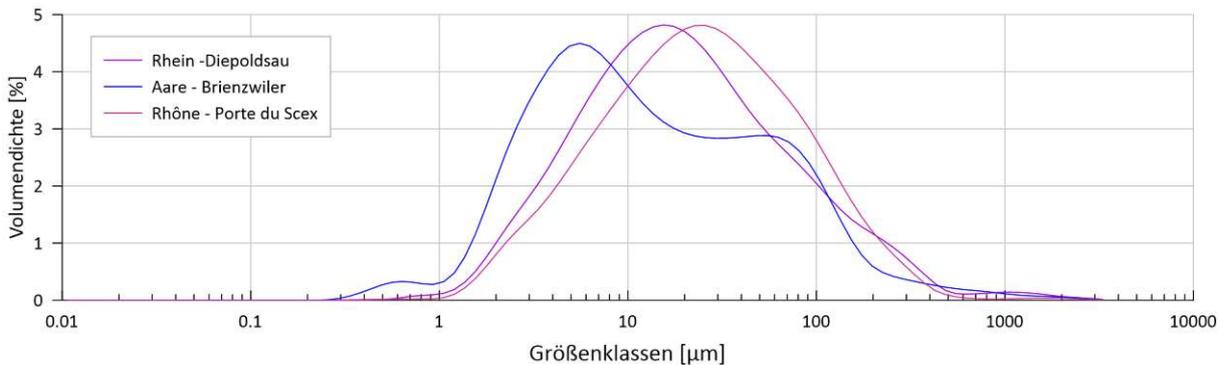


Abb. 5.1: Durchschnittliche Verteilungskurven aller Proben der Messstationen über den Zeitraum Jänner bis November 2024

5.1.2 Korndurchmesser D_{50}

Betrachtet man als nächstes den D_{50} der Proben, wird deutlich, dass auch dieser zwischen den verschiedenen Messstellen variiert. Die folgende Abbildung 5.2 zeigt die Spannweite sowie den Durchschnitt des D_{50} für jede Messstelle.

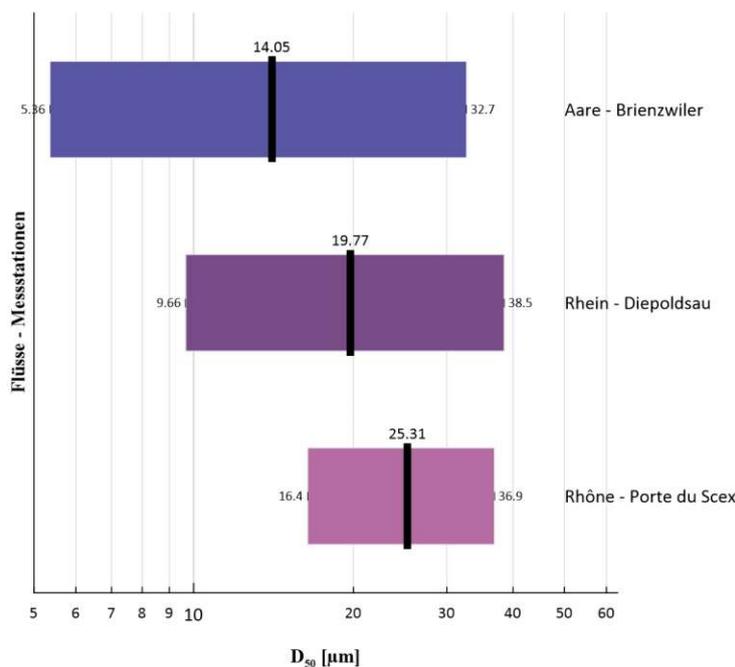


Abb. 5.2: Min., Max. und Mittelwerte des D_{50} aller Proben

Wie in der Grafik zu erkennen ist, weist der D_{50} einer Probe aus Brienzwiler mit 5,36 μm den insgesamt kleinsten Wert auf. Auch der durchschnittliche D_{50} ist an dieser Messstelle mit 14,05 μm am geringsten. Im Gegensatz dazu erreicht der D_{50} einer Probe aus Diepoldsau mit 38,50 μm den höchsten Wert, während die Proben aus Porte du Scex den höchsten durchschnittlichen D_{50} mit 25,31 μm aufweisen.

5.1.3 Kornzusammensetzung

Auch die Kornzusammensetzung der einzelnen Schwebstoffproben, also die Verteilung in Ton, Schluff, Sand und Kies, spielt eine bedeutende Rolle. Wie bereits in Kapitel 1 erläutert, gelten Partikel mit einer Größe von:

- $< 2 \mu\text{m}$ als Ton,
- $2 - 63 \mu\text{m}$ als Schluff,
- $63 - 2000 \mu\text{m}$ als Sand und
- $> 2000 \mu\text{m}$ als Kies.

Die insgesamt 36 Proben aus Brienzwiler, 47 Proben aus Diepoldsau und 38 Proben aus Porte du Scex haben die in folgender Tabelle 5.2 gelisteten minimalen und maximalen Anteile von Ton, Schluff, Sand und Kies. Zudem stellen Abbildung 5.3, Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 die minimalen, maximalen und mittleren Tonanteile der Proben grafisch dar. Auf den zeitlichen Verlauf der Bodenanteile wird in Kapitel 5.3 genauer eingegangen.

	Brienzwiler	Diepoldsau	Porte du Scex
Tonanteil	0.85-13.32%	1.21-4.93%	0.74-3.02%
Schluffanteil	64.56-87.27%	60.23-92.28%	64.62-87.59%
Sandanteil	7.47-33.79%	1.50-37.95%	11.66-34.45%
Kiesanteil	-	-	0-0.12%

Tab. 5.2: Klassenanteile aller Proben nach Messstelle

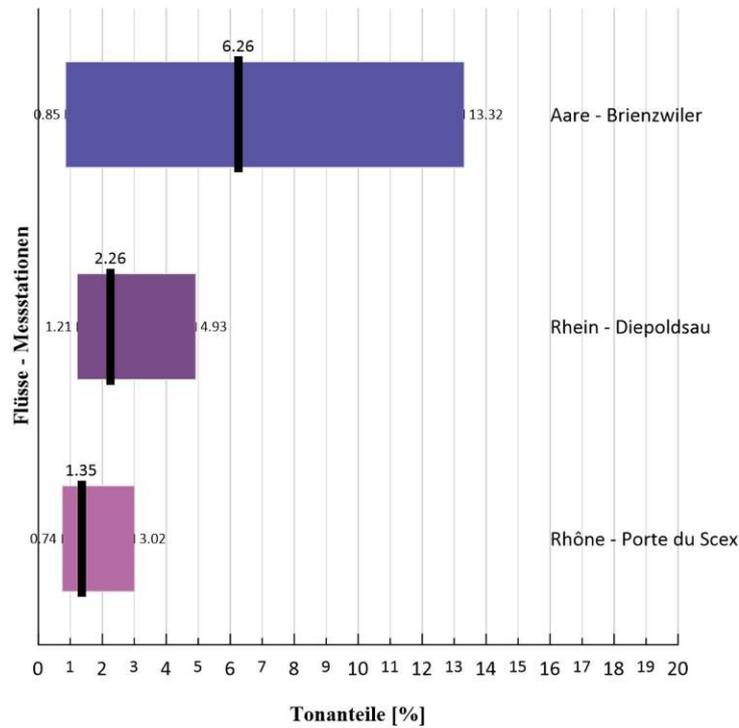


Abb. 5.3: minimale, maximale und mittlere Tonanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)

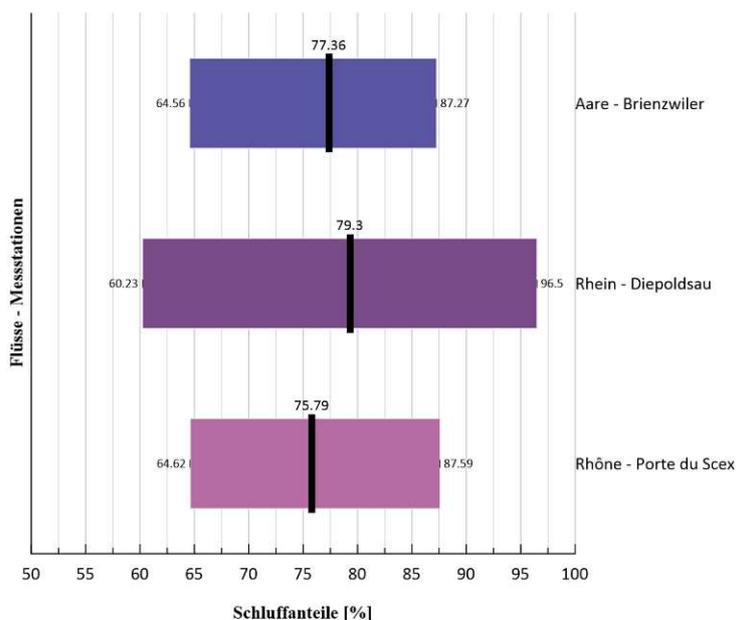


Abb. 5.4: minimale, maximale und mittlere Schluffanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)

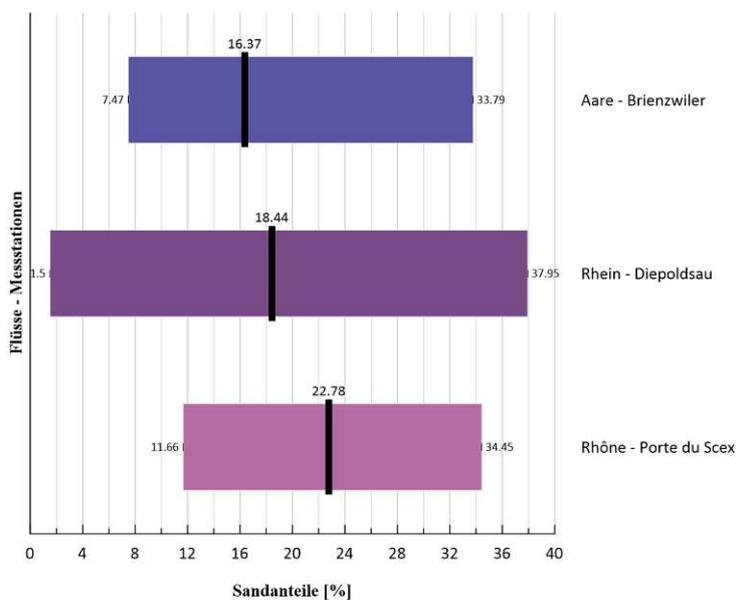


Abb. 5.5: minimale, maximale und mittlere Sandanteile aller Proben an den drei Messstationen (eigene Darstellung)

Aus den prozentualen Anteilen von Ton, Sand und Schluff lässt sich mithilfe eines Körnungsdreiecks (Abbildung 5.6) die Bodenart der Schwebstoffproben bestimmen [57]. Basierend auf der obenstehenden Tabelle, die die maximalen Anteile auflistet, sowie dem untenstehenden Körnungsdreieck, das die Zusammensetzung der unterschiedlichen Bodenarten veranschaulicht, wird deutlich, dass die beprobten Schwebstoffe den Bodenarten Schluff (U), lehmiger Schluff (Ul), sandiger Schluff (Us) oder lehmig-sandiger Schluff (Uls) zugeordnet werden müssen.

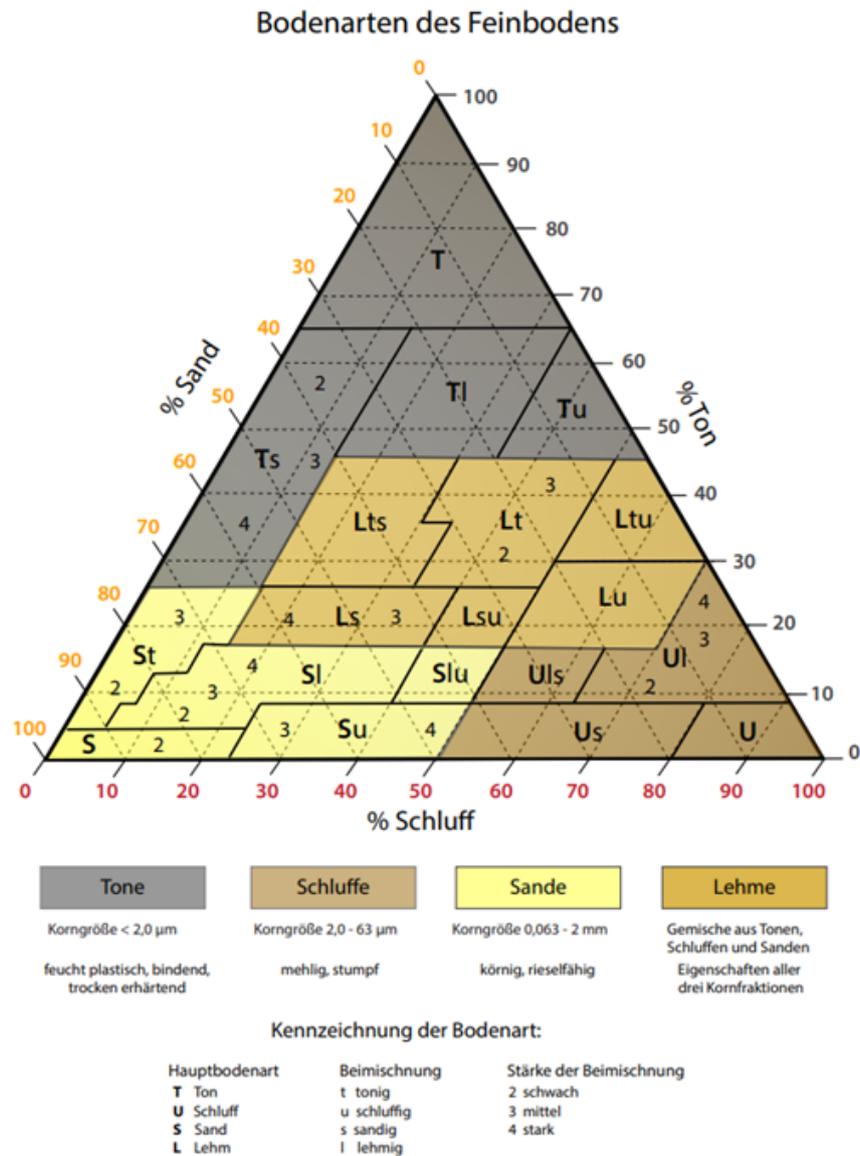


Abb. 5.6: Bodenarten des Feinbodens [57]

Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, wird eine Probe als U klassifiziert, wenn der Schluffanteil über 80 % liegt und der Tonanteil unter 9 %. Sie wird als Us eingestuft, wenn der Schluffanteil zwischen 50 % und 80 % und der Tonanteil unter 9 % liegt. Eine Probe gilt als Ul, wenn der Schluffanteil zwischen 64 % und 70 % bei einem Tonanteil von 9–16 % liegt oder wenn der Schluffanteil zwischen 70 % und 91 % und der Tonanteil zwischen 9 % und 30 % beträgt. Eine Probe wird als Uls klassifiziert, wenn der Schluffanteil zwischen 50 % und 64 % und der Tonanteil zwischen 9 % und 16 % liegt. Wird nun die Häufigkeit der vorkommenden Bodenarten betrachtet, ergibt sich folgendes Bild:

	Brienzwiler	Diepoldsau	Porte du Scex
U	9(25%)	24(51.1%)	10(26.3%)
Ul	10(27.8%)	-	-
Us	17(47.2%)	23(48.9%)	28(73.7%)
Uls	-	-	-

Tab. 5.3: Bodenarten der Proben nach Messstelle

Diese Werte bestätigen die beiden Hypothesen aus den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2.. Einerseits ist Brienzwiler der einzige Standort, an dem die Bodenart Ul festgestellt wurde, was einen hohen Tonanteil erfordert. Ein hoher Tonanteil wiederum ist ein Indikator für kleinere Partikelgrößen/Korngrößenverteilungen, wie in 5.1.2 beschrieben. Andererseits zeigt sich durch das gleichzeitig höhere Tonaufkommen und das noch beachtliche Sandaufkommen, dass an diesem Standort drei Bodenarten vertreten sind. Dies deutet darauf hin, dass die Verteilungsbreite, wie in 5.1.1 beschrieben, hier am größten ist. Dass sowohl in Diepoldsau als auch in Porte du Scex kein Ul klassifiziert werden konnte, weist ebenfalls darauf hin, dass hier weniger kleine Partikel vorhanden sind. Die Tatsache, dass in Porte du Scex 73,7 % der Proben als Us klassifiziert wurden, spricht zudem dafür, dass dort die größten Korngrößenverteilungen vorliegen. Das Fehlen von Ul verstärkt die Annahme, dass die Verteilungsbreiten hier, wie bereits in 5.1.1 erläutert, kleiner sind. In Kapitel 6.1 wird weiters erläutert wie es zu dem unterschiedlichen Aufkommen der Bodenarten kommen kann.

5.2 Korrelation zwischen Q, SSC, Trübung und Korndurchmesser

5.2.1 Brienzwiler

In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen Abfluss (Q) und SSC sowie zwischen Trübung und SSC untersucht und deren mögliche Beziehung zum Korndurchmesser analysiert. Die Güte der Korrelation wird dabei durch das Bestimmtheitsmaß R^2 bewertet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beurteilt die Anpassung von Regressionsfunktion zu einem zugehörigen Datensatz und ist wie in Funktion 5.1 definiert [52]. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei die Anpassung durch hohe Werte als besser beurteilt wird [52].

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residuenquadratsumme}}{\text{Gesamtquadratsumme}} \quad (5.1)$$

In Abschnitt 5.2.1 wird dabei die Messstelle **2019 Aare – Brienzwiler** in Betracht gezogen.

Zunächst wird in Abbildung 5.7 die Korrelation zwischen Abfluss und SSC untersucht. Die entsprechenden Daten wurden, wie bereits erwähnt, vom Schweizer BAFU bereitgestellt. Ziel dieser Untersuchung ist es, zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen dem kontinuierlich gemessenen Abfluss und der stichprobenartig erfassten SSC hergestellt werden kann. In Abbildung 5.7 stellt jeder Punkt den Abfluss sowie die SSC einer Messprobe dar.

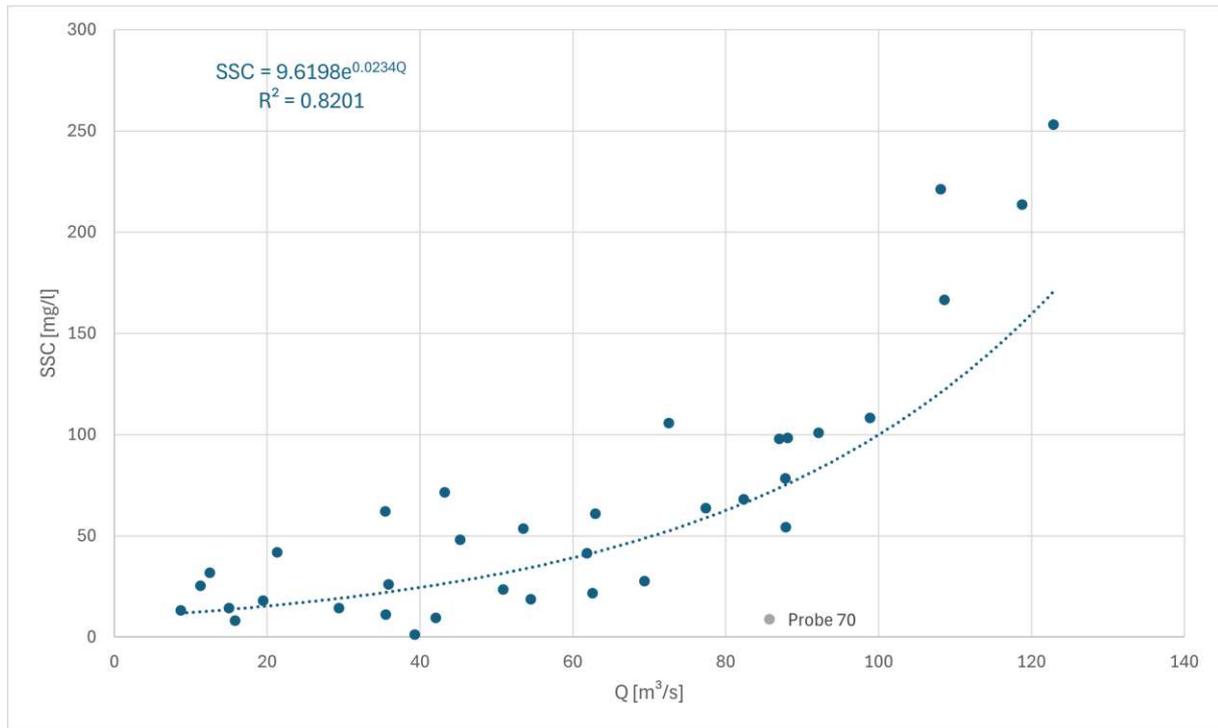


Abb. 5.7: SSC-Q (Messstation 2019)

Es ist zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen SSC und Abfluss am besten durch eine Exponentialfunktion beschrieben wird. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt 0,8201, was als zufriedenstellend angesehen werden kann. Zusätzlich wird in Abbildung 5.8 die SSC mit der Trübung gegenübergestellt wird. Jeder Punkt stellt hierbei den Wert für Trübung sowie SSC dar.

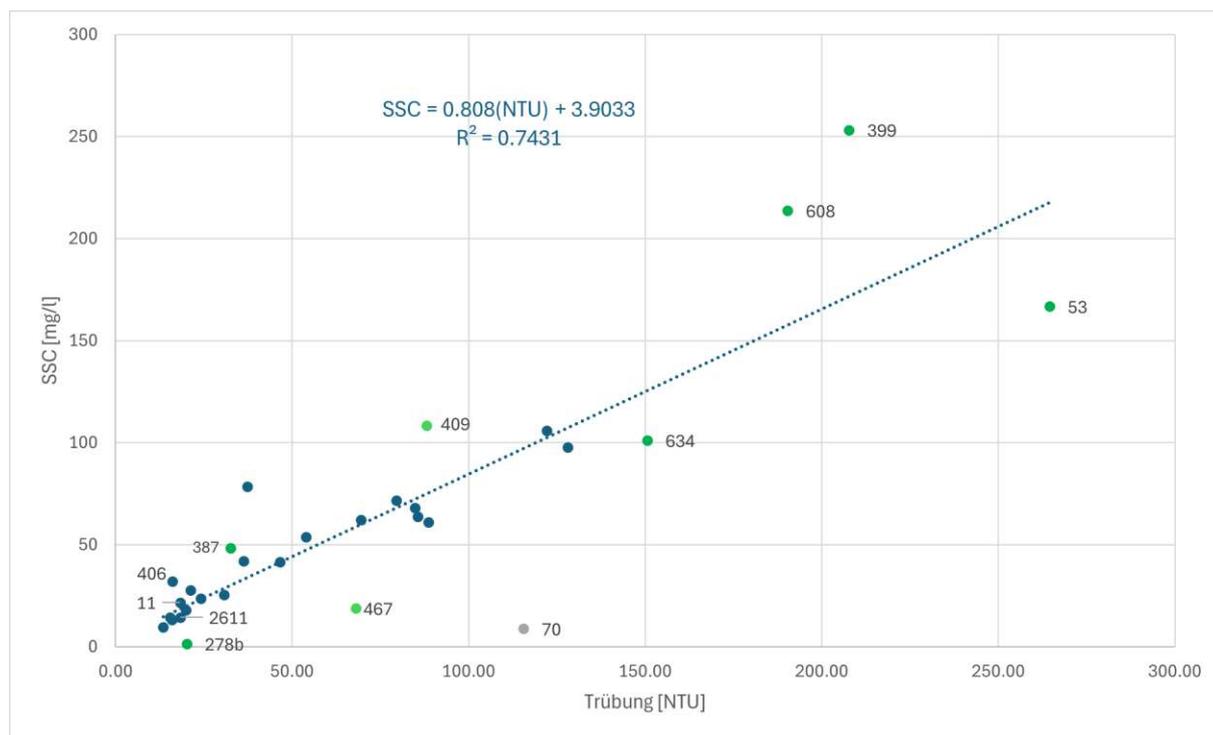


Abb. 5.8: SSC-Trübung (Messstation 2019)

Es ist erkennbar, dass der Zusammenhang zwischen SSC und Trübung durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt mit 0,7451 ebenfalls einen zufriedenstellenden Wert. Auffällig in beiden Diagrammen ist ein klarer Ausreißer. Der Punkt mit einer SSC von 8,75 mg/l (Probenummer 70, im Diagrammen grau und durch die Probenummer markiert) weicht jeweils deutlich ab (zu geringe SSC), was auf einen möglichen Probenahme- oder Messfehler hinweist. Dieses Argument wird zusätzlich dadurch gestützt, dass der kritische Pegel zum Messzeitpunkt um 2 cm überschritten wurde, was ebenfalls auf eine höhere SSC hindeutet. Aus diesem Grund wurde diese Probe in der weiteren Analyse nicht mehr berücksichtigt. In grün sind die Proben markiert, deren Kornverteilungskurven im Folgenden genauer miteinander verglichen werden.

Wenn die Verteilungskurven der beiden Proben mit den höchsten Trübungswerten bei ca. 250 NTU (Probe 53 und 399), der Proben mit einer Trübung von ca. 175 NTU (Probe 634 und 608) bzw. einer Trübung von 25 NTU (Probe 278 und 387) in Abbildung 5.9, Abbildung 5.10 und Abbildung 5.12 verglichen werden, um zu klären, warum die SSC so stark voneinander abweichen, zeigt sich eindeutig, dass die Verteilungskurven der Proben mit einer höheren SSC (399, 387 und 608) im Vergleich zu den Verteilungskurven der Proben mit einer niedrigeren SSC (53, 278 und 634) nach rechts verschoben sind, was bedeutet, dass mehr grobkörnige Partikel in diesen Probe zu finden sind. Zudem weisen die Proben 53, 278 und 634 im feinkörnigen Bereich höhere Volumendichten auf, was die Diskrepanz zwischen den SSC-Werten weiter erklären kann. Die Proben mit Trübungswerten von ca. 75 NTU (Probe 409 und 467) weichen davon ab, denn wie Abbildung 5.11 zeigt, besitzt die Probe 467 mit einer kleineren SSC größere Partikel. Diese Aussagen über den Vergleich der Verteilungskurven beziehen sich vor allem auf die PSD und werden durch die PND verdeutlicht, die sensitiver für Unterschiede im feinkörnigen Bereich ist.

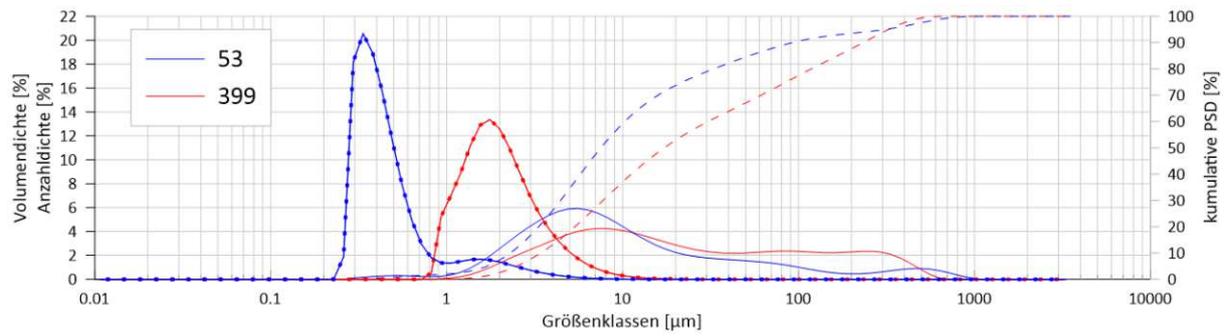


Abb. 5.9: Verteilungskurven der Proben 53 ($D_{50} = 7,49 \mu m$) und 399 ($D_{50} = 17,2 \mu m$)

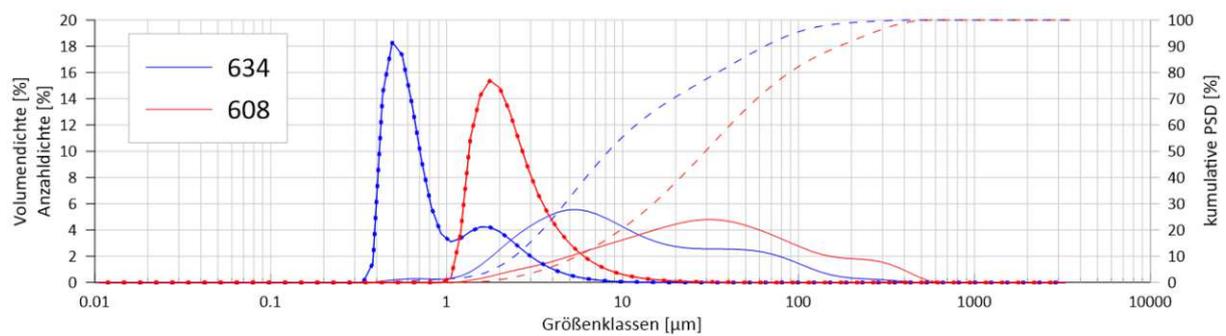


Abb. 5.10: Verteilungskurven der Proben 634 ($D_{50} = 8,31 \mu m$) und 608 ($D_{50} = 29,6 \mu m$)

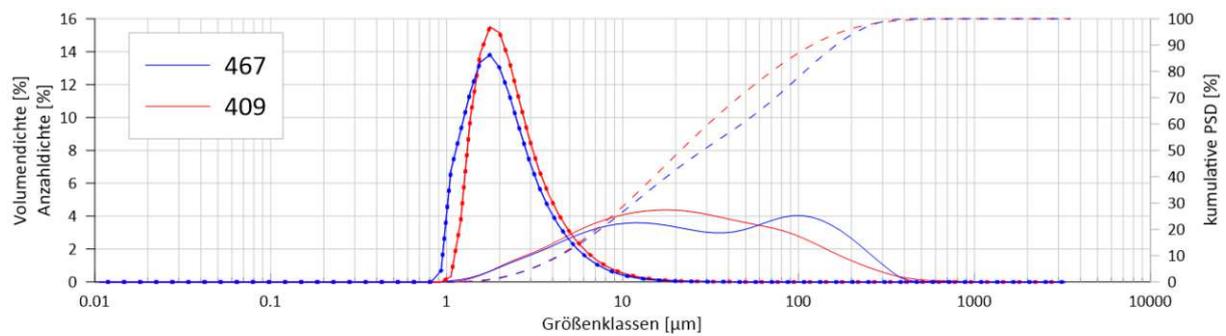


Abb. 5.11: Verteilungskurven der Proben 467 ($D_{50} = 28,5 \mu m$) und 409 ($D_{50} = 21,3 \mu m$)

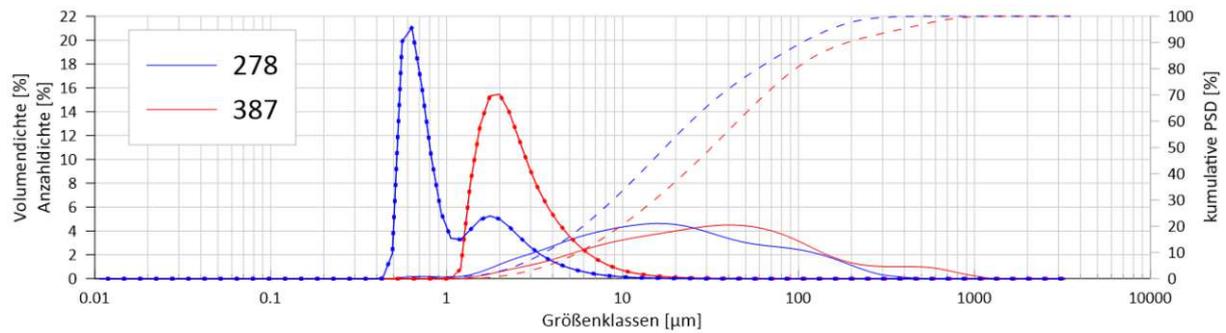


Abb. 5.12: Verteilungskurven der Proben 278 ($D_{50} = 17,4 \mu m$) und 387 ($D_{50} = 32,0 \mu m$)

Die restlichen Proben wurden, aufgrund ähnlicher Trübungen und SSCs, in drei Gruppen aufgeteilt, da damit gerechnet wird, dass die Verteilungskurven einen ähnlichen Verlauf haben werden. Proben mit Trübungswerten zwischen 0 und 50 NTU (Abbildung 5.13), zwischen 50 und 100 NTU (Abbildung 5.14) und Proben mit Trübungswerten über 100 NTU (Abbildung 5.15). Zudem wird die kumulative PSD dargestellt. (Aus Anschaulichkeitsgründen wurde auf die Darstellung der PND verzichtet.)

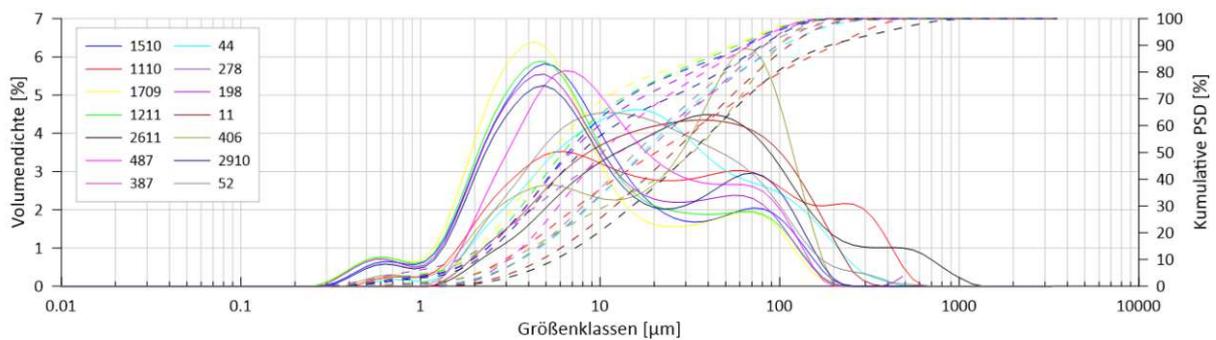


Abb. 5.13: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < NTU < 50$

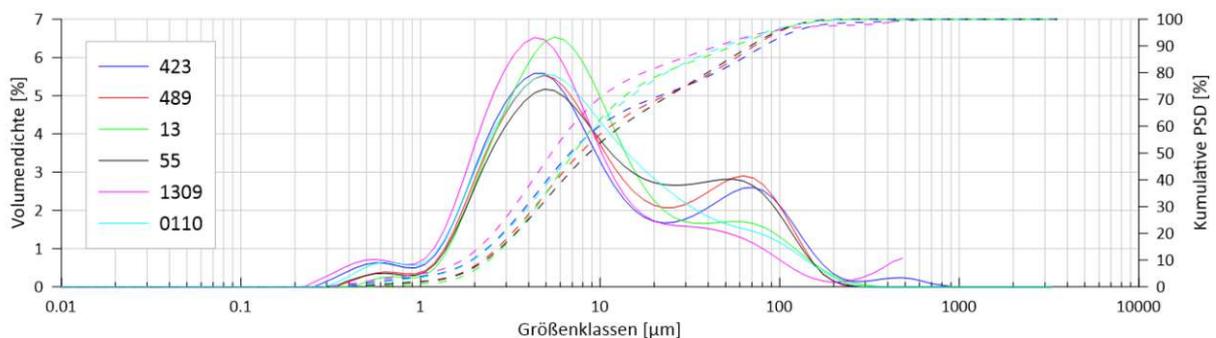


Abb. 5.14: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $50 < NTU < 100$

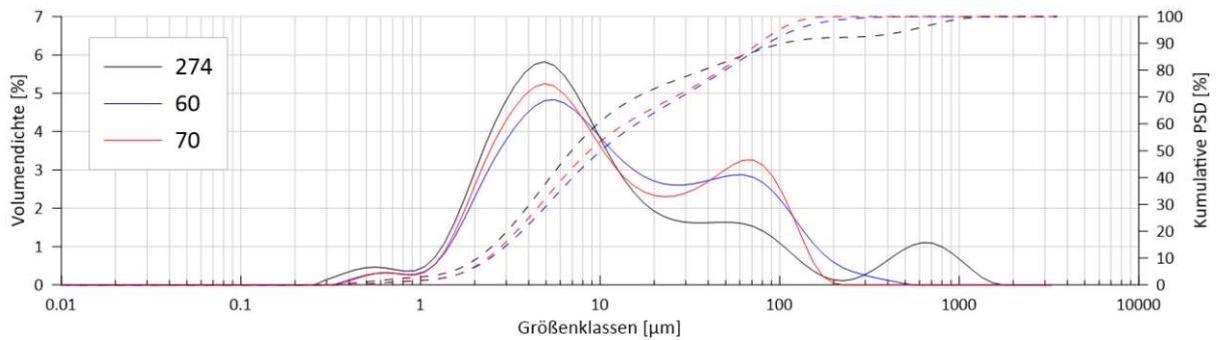


Abb. 5.15: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $NTU > 100$

In der nächsten Abbildung 5.16 werden die Proben in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe für Proben mit einem größerem D_{50} als der Median ($D_{50} > Median$) für diese Messstelle und eine für Proben mit einem kleineren ($D_{50} < Median$). Für jede Gruppe wird eine separate Trendlinie erstellt, um zu veranschaulichen, wie sich das Verhältnis zwischen SSC und Trübung in Abhängigkeit vom Korndurchmesser verändert.

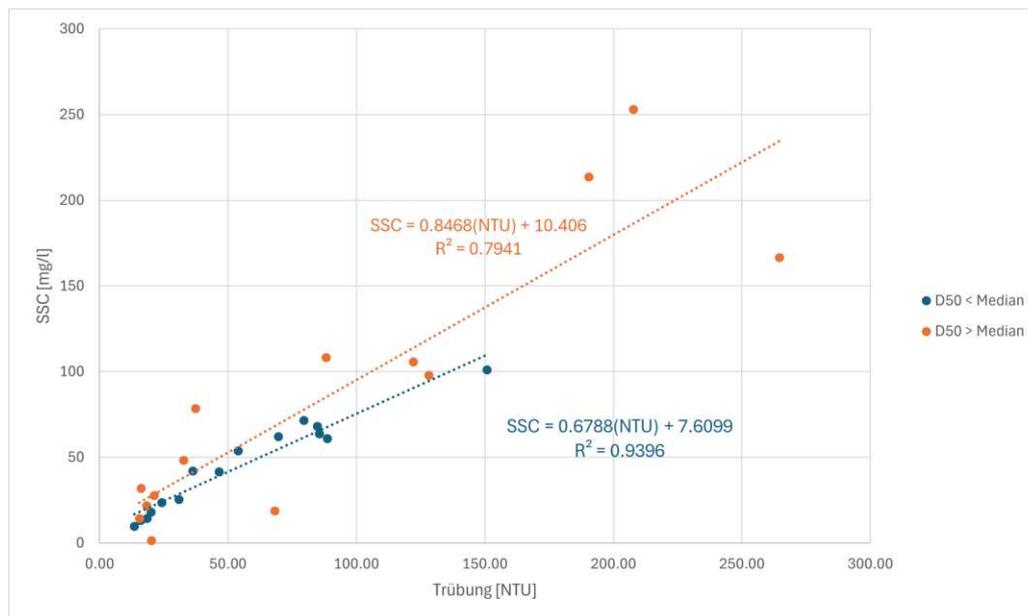


Abb. 5.16: SSC-Trübung bezogen auf den D_{50}

In Abbildung 5.16 ist deutlich zu erkennen, dass sich die These aus Kapitel 1.3 für diese Messstelle bestätigt. Die Regressionsgerade für die Proben mit dem über dem Median liegenden D_{50} verläuft deutlich steiler als diejenige für die Proben mit dem unter dem Median liegenden D_{50} . Zudem sind die Bestimmtheitsmaße der beiden Regressionsgeraden mit $R^2 = 0,7941$ beziehungsweise $R^2 = 0,9396$ signifikant höher, was auf eine bessere Anpassung hinweist. Dies bedeutet, dass bei einer gemessenen Trübung eine höhere SSC erwartet werden kann, wenn die Partikel einen größeren Korndurchmesser aufweisen. Umgekehrt könnte anhand dieser Informationen, bei bekannter SSC und Trübung, auch eine Vermutung über die Korngrößenklasse angestellt werden.

Zusätzlich wird die Unterscheidung nicht nur anhand des gewichteten mittleren Korndurchmessers vorgenommen, sondern auch anhand der Bodenarten. Dabei wird die Bodenart Us (sandiger Schluff) als "Sand" klassifiziert, während die Bodenarten U (Schluff) und Ul (lehmiger Schluff) als "Schluff" gewertet werden. Abbildung 5.17 zeigt ein ähnliches Bild: Proben mit größeren Anteilen an gröberen Körnern (Us) weisen eine steilere Regressionsgerade auf als Proben mit höheren Anteilen an feineren Körnern (U, Ul). Dieses Ergebnis stützt die oben dargestellten Erkenntnisse.

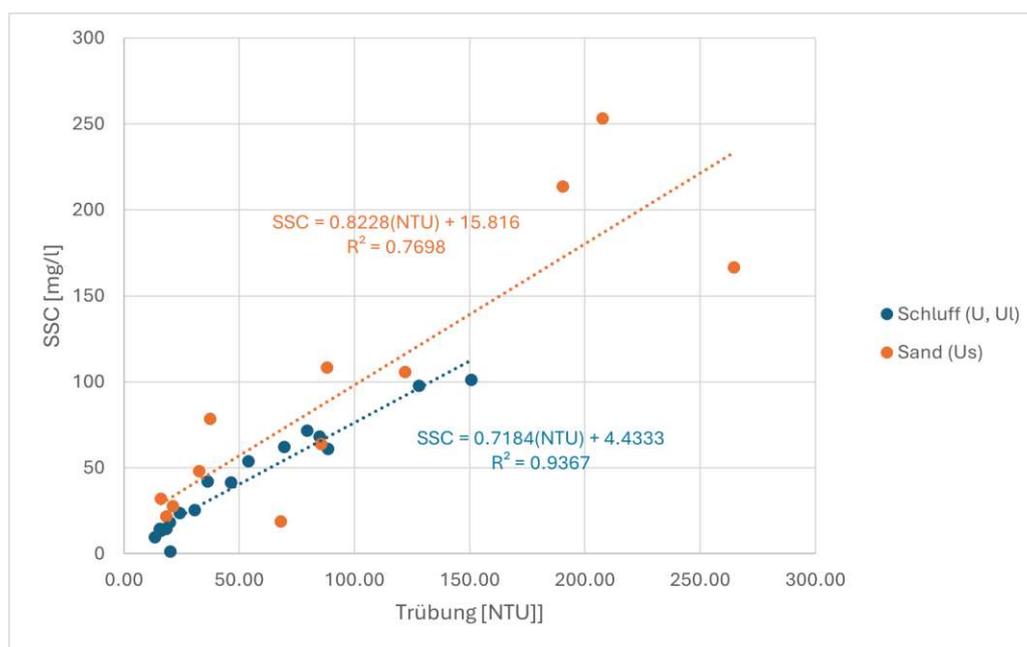


Abb. 5.17: SSC-Trübung bezogen auf die Bodenart (2019)

5.2.2 Diepoldsau

In Abschnitt 5.2.2 wird die Messstelle **2473 Rhein – Diepoldsau** untersucht. Zunächst wird erneut die Korrelation zwischen Abfluss und SSC analysiert. Auch hier werden die Daten des Schweizer BAFU genutzt, um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen dem kontinuierlich gemessenen Abfluss und der stichprobenartig erfassten SSC hergestellt werden kann. Folgende Abbildung 5.18 zeigt die Gegenüberstellung von SSC und Abfluss. In Abbildung 5.18 stellt jeder Punkt den Abfluss sowie die SSC einer Messprobe dar.

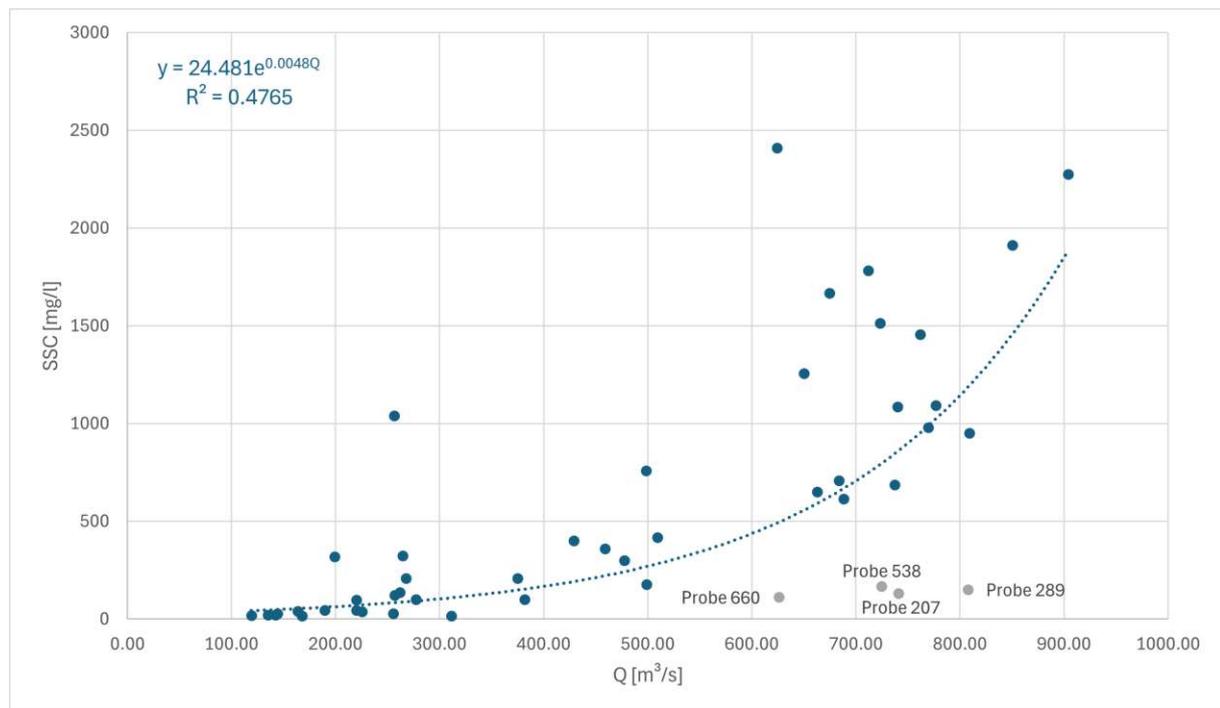


Abb. 5.18: SSC-Q (Messstation 2473)

Auch hier zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen SSC und Abfluss am besten durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt jedoch nur 0,4765, was für diese Messstelle nicht ausreicht, um eine aussagekräftige Aussage zu treffen. In der nächsten Abbildung 5.19 wird die Beziehung zwischen SSC und Trübung untersucht. Jeder Punkt stellt hierbei den Wert für Trübung sowie SSC dar.

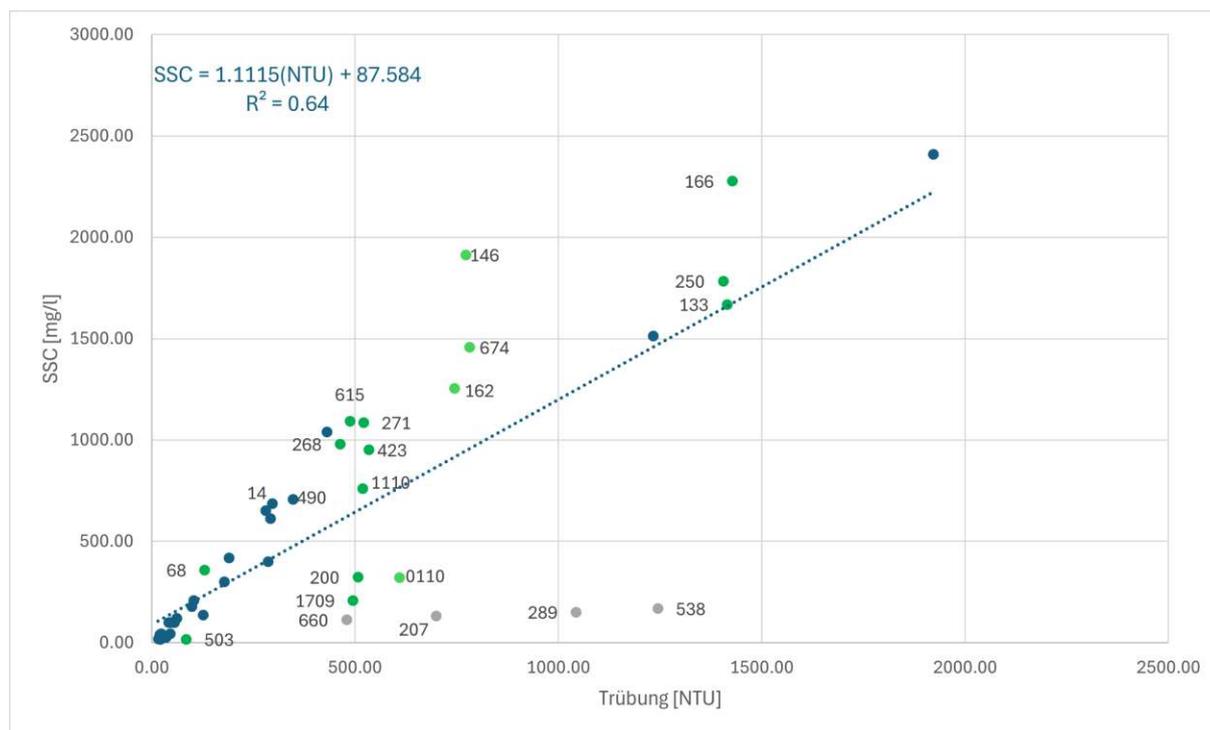


Abb. 5.19: SSC-Trübung (Messstation 2473)

Wie bereits zuvor kann auch dieser Zusammenhang durch eine lineare Funktion beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt jedoch nur 0,64 und ist somit etwas schlechter als bei der Messstation Brienzwiler. Auffällig ist, dass in beiden Diagrammen von Abschnitt 5.2.2 mindestens vier deutliche (gemeinsame) Ausreißer erkennbar sind. Die Punkte mit einer SSC von 112,42 mg/l, 131,24 mg/l, 150,75 mg/l und 167,95 mg/l (Probennummern 660, 207, 289 und 538, im Diagramm grau und durch die Probennummer hervorgehoben) weisen jeweils eine auffällig zu niedrige SSC auf. Da bei allen Proben der kritische Pegel überschritten wurde, ist von einem Probenahme- oder Messfehler auszugehen. Diese Proben werden daher in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt.

Betrachtet man in Abbildung 5.20, Abbildung 5.21, Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23 exemplarisch die Verteilungskurven von zwei Proben mit Trübungswerten von ungefähr 100 NTU (Proben 503 und 68), sieben Proben mit Trübungswerten um circa 500 NTU (Proben 1709r, 200, 615, 271, 268, 423, 1110), vier Proben mit Trübungswerten um 700 NTU (Proben 0110, 162, 674 und 146) und drei Proben mit Trübungswerten um 1500 NTU (Proben 133, 166 und 250) wird deutlich, warum sich die SSC-Werte unterscheiden. Die Verteilungskurven der Proben 615, 271 und 268d sind im Vergleich zu den Proben 1709r und 200 nach rechts verschoben, was bedeutet, dass sie im grobkörnigeren Bereich höhere Volumendichten aufweisen. Das gleiche kann in den anderen Plots für diese Verteilungskurven ebenfalls festgestellt werden. Diese Verschiebung erklärt die Diskrepanz der SSC-Werte, da größere Körner in der Regel zu höheren SSC-Werten führen. Diese Aussagen über den Vergleich der Verteilungskurven beziehen sich vor allem auf die PSD und werden durch die PND verdeutlicht, die sensitiver für Unterschiede im feinkörnigen Bereich ist.

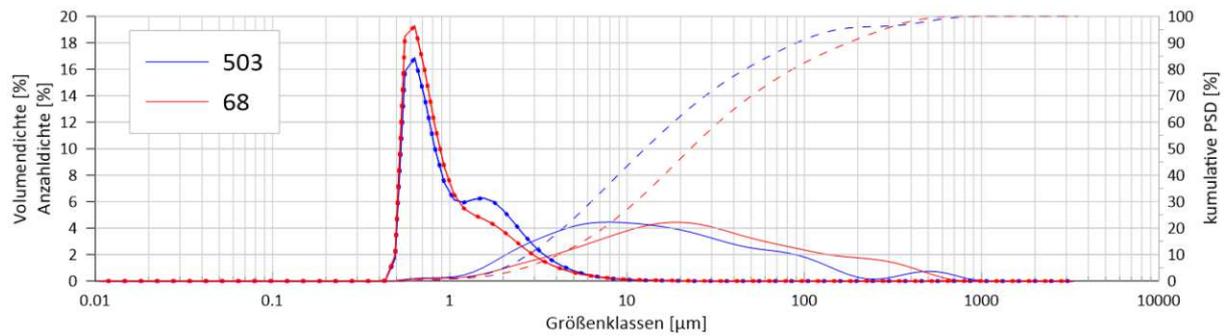


Abb. 5.20: Verteilungskurven der Proben 503 ($D_{50} = 12,6 \mu m$) und 68 ($D_{50} = 22,4 \mu m$)

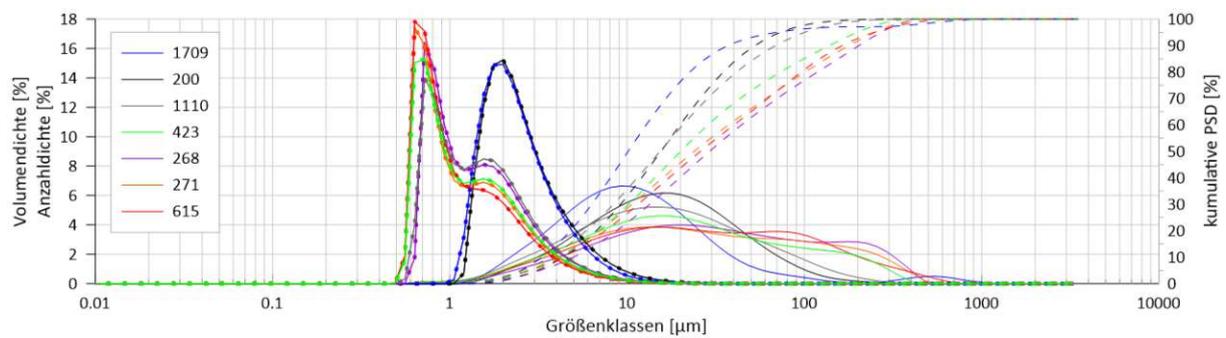


Abb. 5.21: Verteilungskurven der Proben 1709 ($D_{50} = 10,1 \mu m$), 200 ($D_{50} = 15,5 \mu m$), 1110 ($D_{50} = 15,3 \mu m$), 423 ($D_{50} = 20,0 \mu m$), 268 ($D_{50} = 29,1 \mu m$), 271 ($D_{50} = 23,9 \mu m$) und 615 ($D_{50} = 25,9 \mu m$)

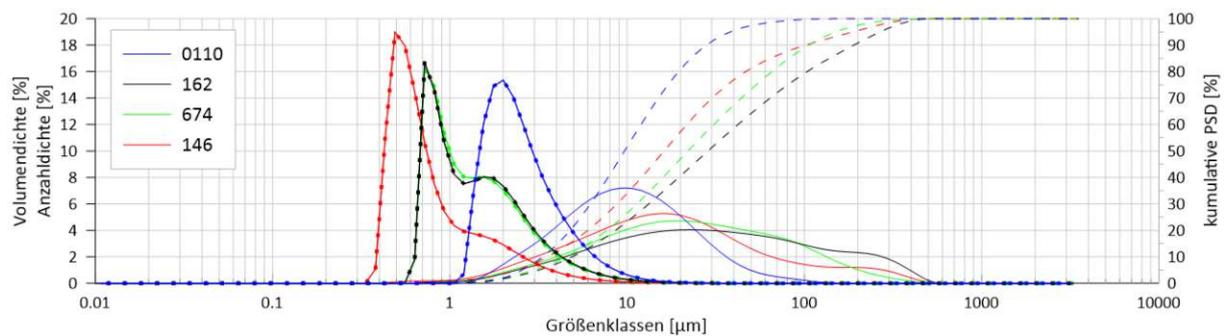


Abb. 5.22: Verteilungskurven der Proben 0110 ($D_{50} = 9,66 \mu m$), 162 ($D_{50} = 28,6 \mu m$), 674 ($D_{50} = 22,0 \mu m$) und 146 ($D_{50} = 16,2 \mu m$)

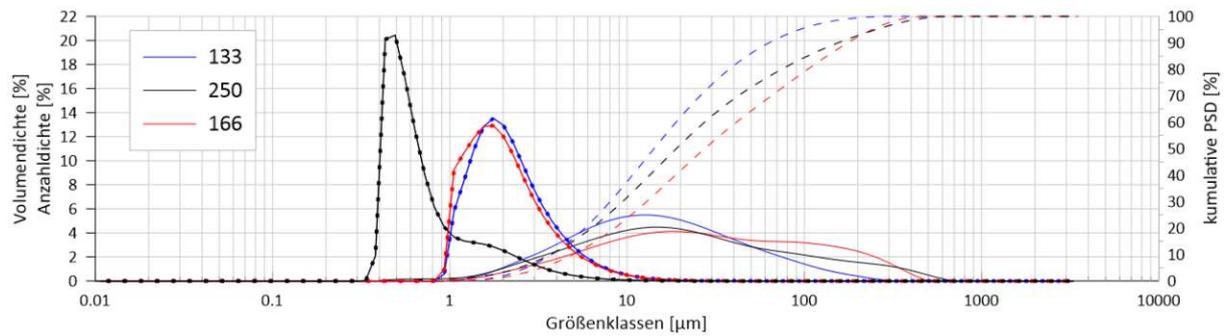


Abb. 5.23: Verteilungskurven der Proben 133 ($D_{50} = 14,2 \mu m$), 250 ($D_{50} = 18,9 \mu m$) und 166 ($D_{50} = 27,3 \mu m$)

Die restlichen Proben wurden, aufgrund ähnlicher Trübungen und SSCs, in drei Gruppen aufgeteilt, da damit gerechnet wird, dass die Verteilungskurven einen ähnlichen Verlauf haben werden. Proben mit Trübungswerten zwischen 0 und 50 NTU (Abbildung 5.13), zwischen 50 und 100 NTU (Abbildung 5.14) und Proben mit Trübungswerten über 100 NTU (Abbildung 5.15). Zudem wird die kumulative PSD dargestellt. (Aus Anschaulichkeitsgründen wurde auf die Darstellung der PND verzichtet.)

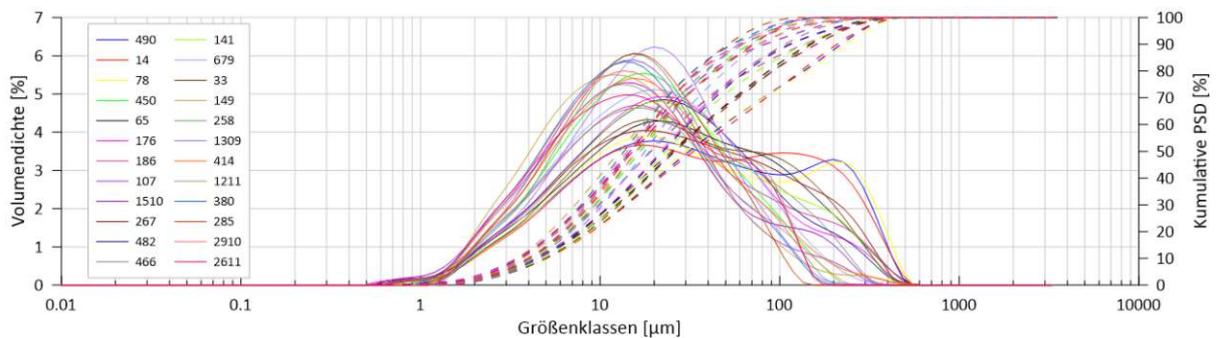


Abb. 5.24: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < NTU < 400$

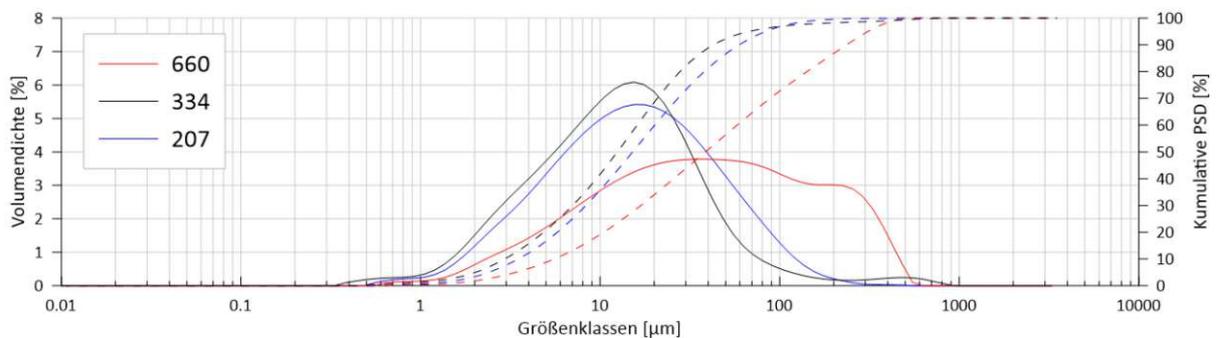


Abb. 5.25: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $400 < NTU < 800$

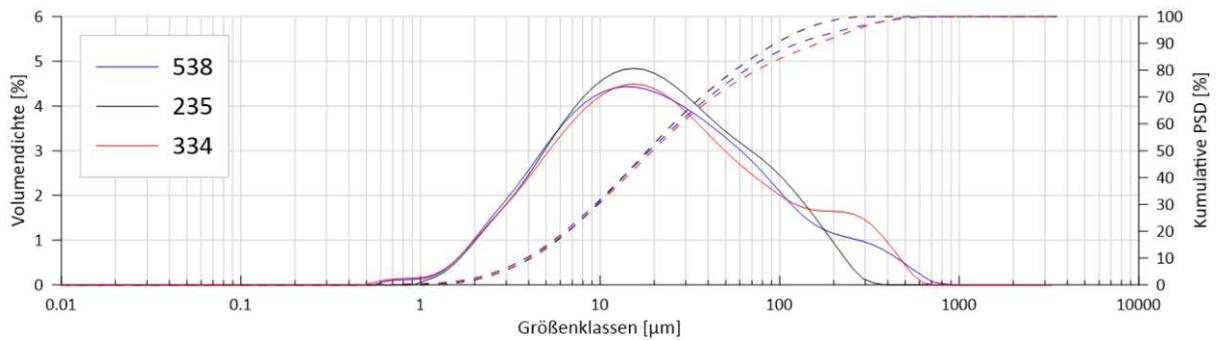


Abb. 5.26: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $NTU > 800$

In der nächsten Abbildung 5.27 werden zusätzlich zwei Trendlinien erstellt: eine für Proben mit einem $D_{50} > \text{Median}$ und eine für Proben mit einem $D_{50} < \text{Median}$. Ziel ist es, darzustellen, wie sich das Verhältnis zwischen SSC und Trübung in Abhängigkeit vom Korndurchmesser verändert.

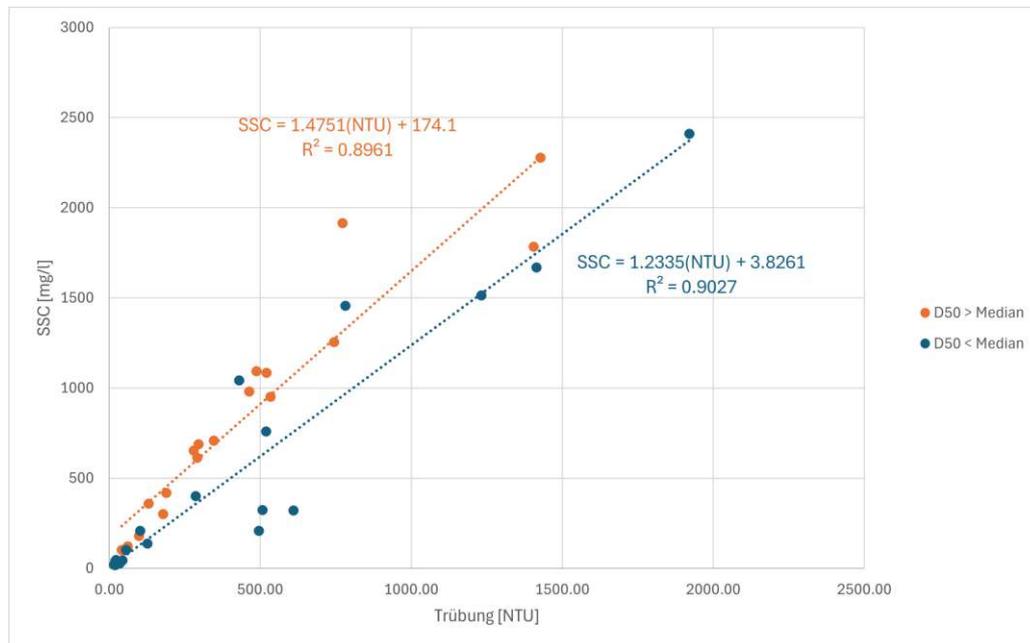


Abb. 5.27: SSC-Trübung bezogen auf den (D_{50}) (2473)

Die Abbildung 5.27 zeigt, dass sich die These aus Kapitel 1.3 auch für diese Messstelle bestätigt. Die Regressionsgerade der Proben, mit einem $D_{50} > \text{Median}$, ist deutlich steiler als diejenige, die Proben repräsentiert, die einen $D_{50} < \text{Median}$ besitzen. Die Bestimmtheitsmaße der beiden Regressionsgeraden sind mit $R^2 = 0,8961$ und $R^2 = 0,9027$ ebenfalls deutlich größer, was auf eine bessere Anpassung hinweist. Dies bedeutet, dass bei einer gemessenen Trübung eine höhere SSC erwartet werden kann, wenn die Partikel einen größeren Korndurchmesser aufweisen. Umgekehrt können diese Informationen genutzt werden, um bei bekannter SSC und Trübung Rückschlüsse auf die zugehörige Korngrößenklasse zu ziehen. Auch hier untermauert die Unterscheidung nach Bodenarten in Abbildung 5.28 das Ergebnis: Proben mit größeren Anteilen an größeren Körnern (Us) weisen eine steilere Regressionsgerade auf als Proben mit größeren Anteilen an kleineren Körnern (U, Ul).

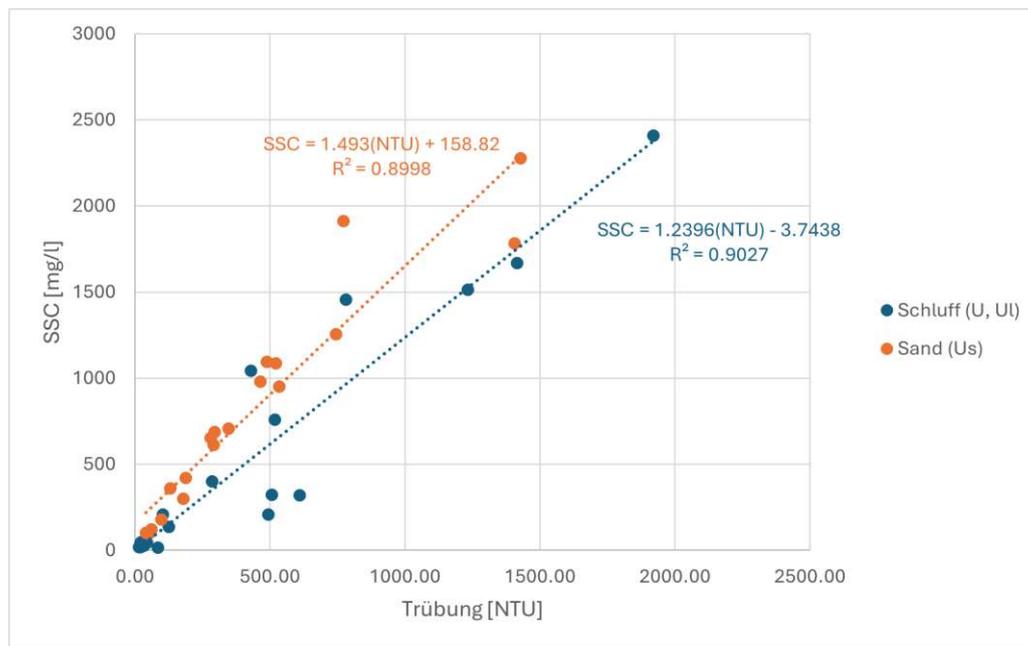


Abb. 5.28: SSC-Trübung bezogen auf die Bodenart (2473)

5.2.3 Porte du Scex

In Kapitel 5.2.3 wird die Messstelle **2009 Rhône – Porte du Scex** untersucht. Ziel ist es, die Korrelation zwischen Abfluss und SSC zu analysieren. Dabei sollen die Daten des Schweizer BAFU Aufschluss darüber geben, ob ein Zusammenhang zwischen dem kontinuierlich gemessenen Abfluss und der stichprobenartig gemessenen SSC hergestellt werden kann. In der untenstehenden Abbildung 5.29 werden SSC und Abfluss gegenübergestellt, wobei jeder Punkt eine Messprobe darstellt.

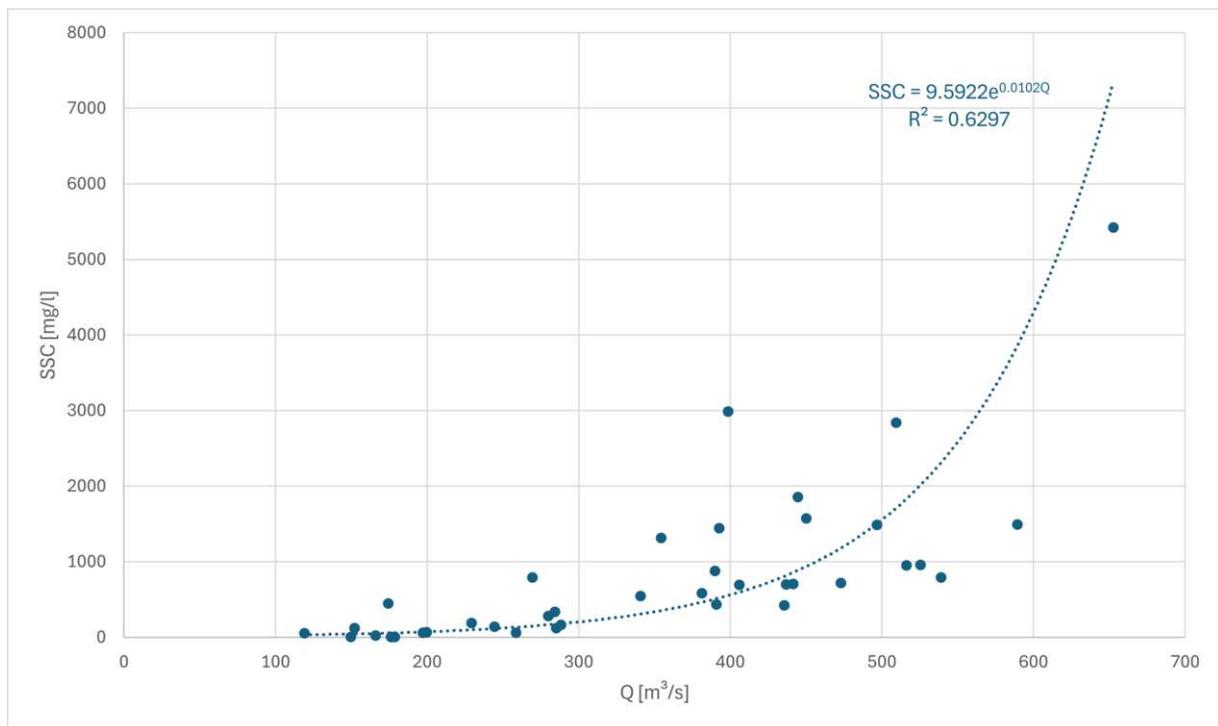


Abb. 5.29: SSC-Q (Messstation 2009)

Zu erkennen ist, dass der Zusammenhang zwischen SSC und Abfluss am besten mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion beträgt 0,6297 und ist für diese Messstelle besser als der Wert in 5.2.2. In der nächsten Abbildung 5.30 wird erneut die Beziehung zwischen SSC und Trübung analysiert wird. Jeder Punkt stellt hierbei den Wert für Trübung sowie SSC dar.

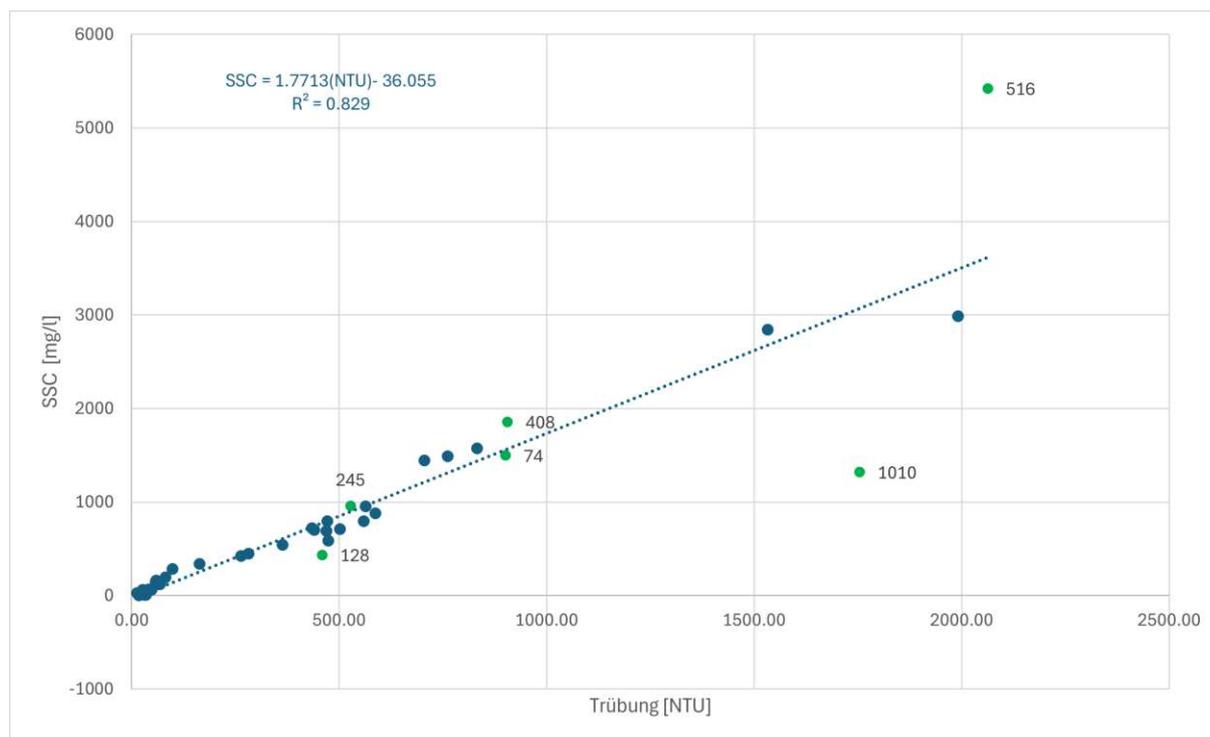


Abb. 5.30: SSC-Trübung (Messstation 2009)

Nach wie vor kann dieser Zusammenhang auch durch eine lineare Funktion beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dieser Funktion ist jedoch mit 0,829 etwas schlechter als bei der Messstation Brienzwiler. Im Datensatz dieser Messstation sind zunächst keine gemeinsamen Ausreißer erkennbar.

Die Verteilungskurven der einzigen abweichenden Proben dieser Messstelle (Probe 516 und 1010), zweier Proben bei ca. 500 NTU (Probe 128 und 245) sowie zweier Proben bei ca. 900 NTU (Probe 74 und 408) in Abbildung 5.31, Abbildung 5.32 und Abbildung 5.33 zeigen, dass die Verteilungskurve der Probe 516 im Vergleich zur Verteilungskurve der Probe 1010 nach rechts verschoben ist und im grobkörnigeren Bereich höhere Volumendichten aufweist, was die Unterschiede zwischen den SSC-Werten erklären kann. Insbesondere weist die Verteilungskurve von Probe 1010 einen größeren Anteil an feinkörnigem Material auf ($Cl=3.02\%$) als die der Probe 516 ($Cl=1.43\%$), was ebenfalls darauf hindeutet, dass bei ähnlicher Trübung so unterschiedliche SSC-Werte gemessen werden. Auch der Vergleich der Verteilungskurven der Proben 128 und 245 zeigen, wenn auch nicht ganz so deutlich, ein ähnliches Bild. Der Vergleich der Verteilungskurven der Proben 74 und 408 widersprechen der These, denn die Probe mit der höheren SSC (408) besitzt eine Verteilungskurve, welche auf etwas größere Korndurchmesser hinweist. Diese Aussagen über den Vergleich der Verteilungskurven beziehen sich vor allem auf die PSD und werden durch die PND verdeutlicht, die sensitiver für Unterschiede im feinkörnigen Bereich ist.

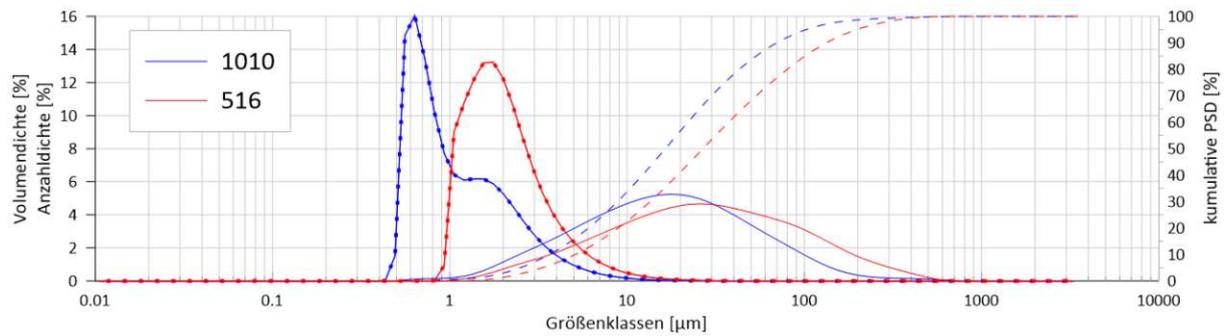


Abb. 5.31: Verteilungskurven der Proben 1010 ($D_{50} = 16,4 \mu m$) und 516 ($D_{50} = 26,8 \mu m$)

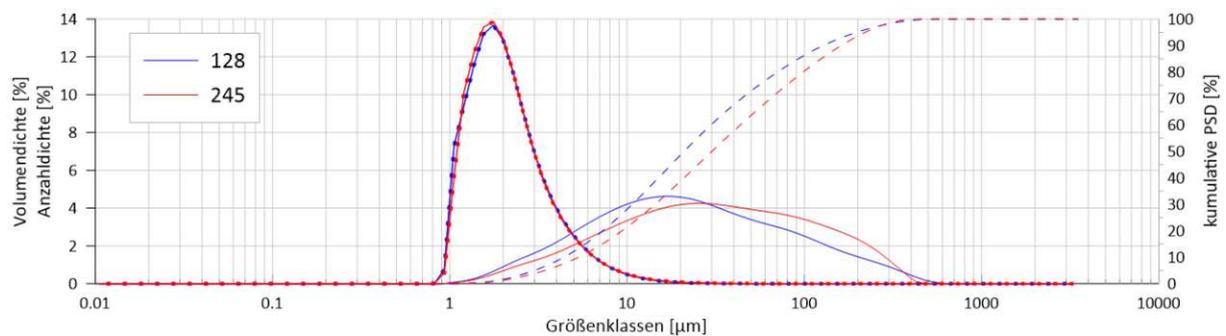


Abb. 5.32: Verteilungskurven der Proben 128 ($D_{50} = 20,9 \mu m$) und 245 ($D_{50} = 30,0 \mu m$)

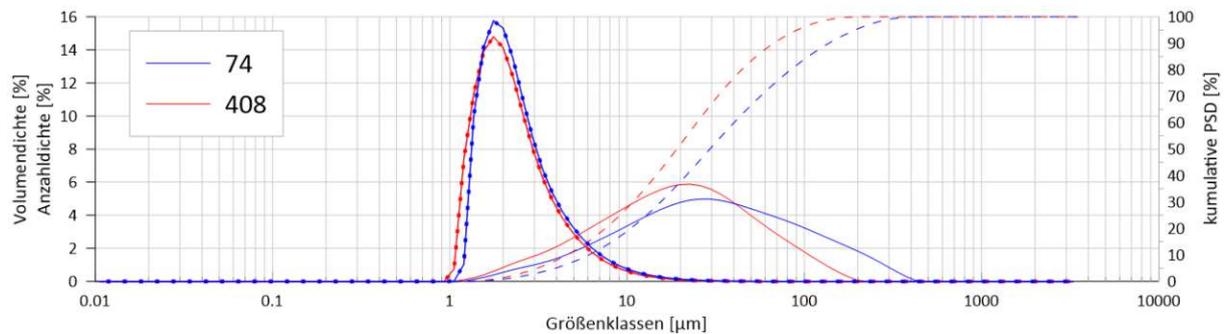


Abb. 5.33: Verteilungskurven der Proben 74 ($D_{50} = 29,3 \mu m$) und 408 ($D_{50} = 18,4 \mu m$)

Die restlichen Proben wurden, aufgrund ähnlicher Trübungen und SSCs, in drei Gruppen aufgeteilt, da damit gerechnet wird, dass die Verteilungskurven einen ähnlichen Verlauf haben werden. Proben mit Trübungswerten zwischen 0 und 50 NTU (Abbildung 5.34), zwischen 50 und 100 NTU (Abbildung 5.35) und Proben mit Trübungswerten über 100 NTU (Abbildung 5.36). Zudem wird die kumulative PSD dargestellt. (Aus Anschaulichkeitsgründen wurde auf die Darstellung der PND verzichtet.)

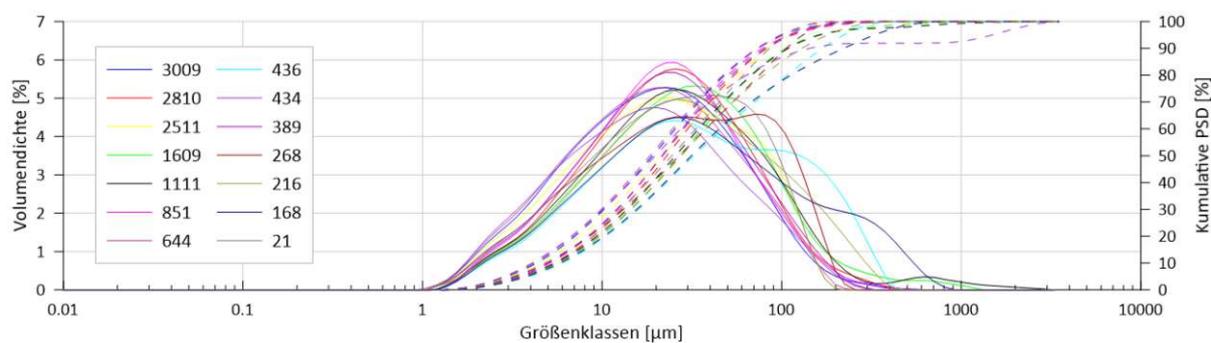


Abb. 5.34: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $0 < \text{NTU} < 250$

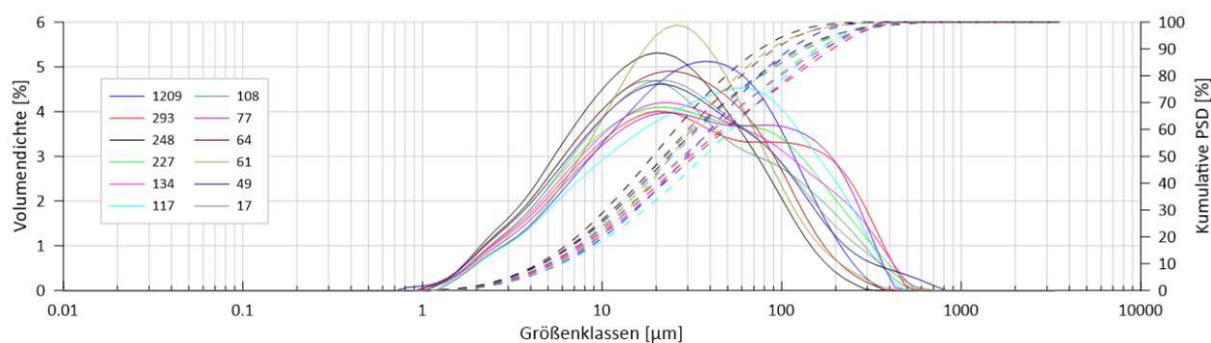


Abb. 5.35: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $250 < \text{NTU} < 600$

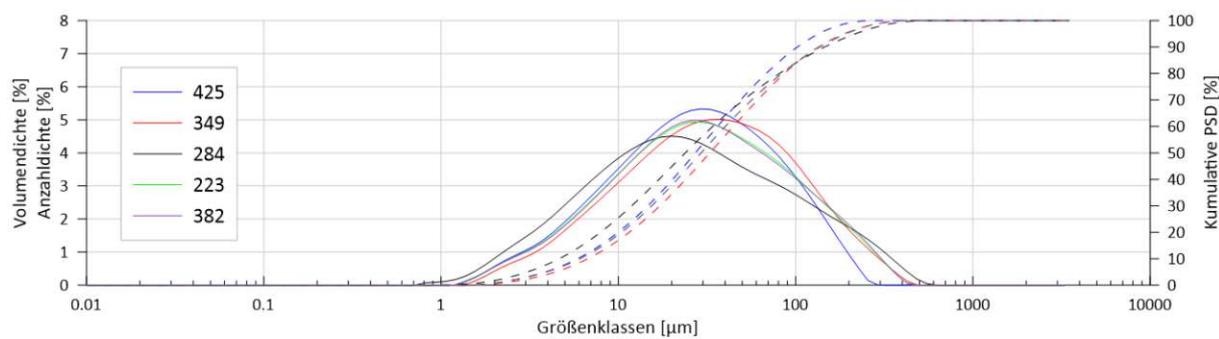


Abb. 5.36: PSD (durchgezogen), PND (gepunktet) und kumulative PSD (strichliert) für Proben mit $\text{NTU} > 600$

Trotz der guten Anpassung (vgl. Abbildung 5.30) werden in der nächsten Abbildung 5.37 zwei Trendlinien erstellt, eine für $D_{50} > \text{Median}$ und eine für $D_{50} < \text{Median}$, um zu zeigen, wie sich das Verhältnis zwischen SSC und Trübung mit dem Korndurchmesser ändert.

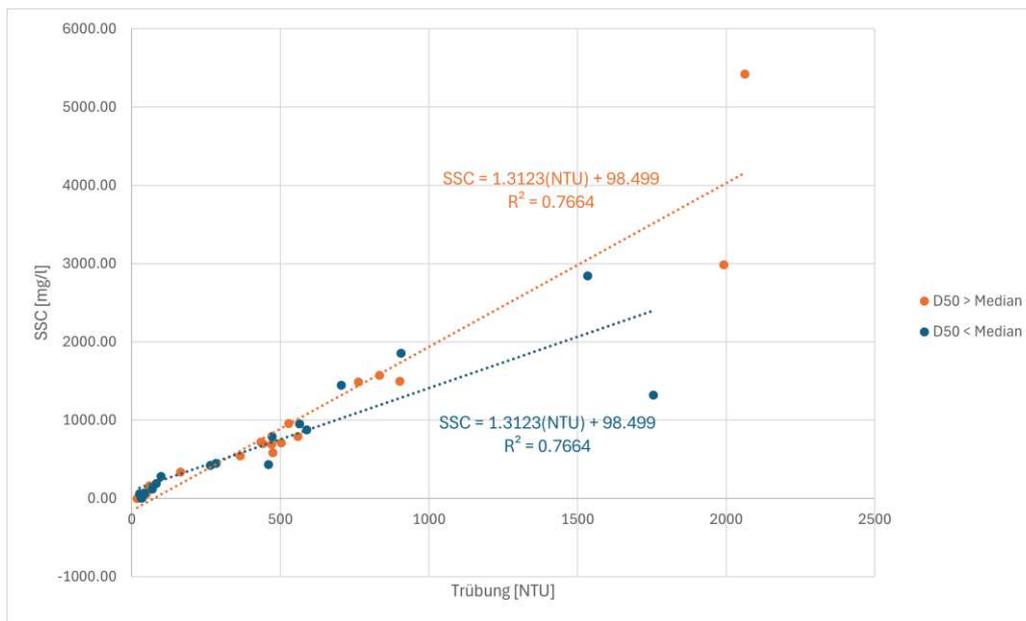


Abb. 5.37: SSC-Trübung bezogen auf den (D_{50}) (2009)

In Abbildung 5.37 ist dieses Mal erneut zu sehen, dass sich die in Kapitel 1.3 aufgestellte These für diese Messstelle bewahrheitet. Die Regressionsgerade der Proben mit einem D_{50} , welcher kleiner als der Median ist, ist steiler als jene der Proben mit einem D_{50} größer als der Median. Die Bestimmtheitsmaße der beiden Regressionsgeraden sind mit $R^2 = 0,9823$ und $R^2 = 0,8464$ zudem deutlich größer, was auf eine gute Anpassung hinweist.

Betrachtet man auch hier die Unterscheidung zwischen den Bodenarten in Abbildung 5.38, wie bereits in den beiden vorangegangenen Kapiteln, zeigt sich zusätzlich eine steilere Regressionsgerade für Proben mit größerer Korngrößenverteilung, was die in Kapitel 1.3 formulierte These bestätigt.

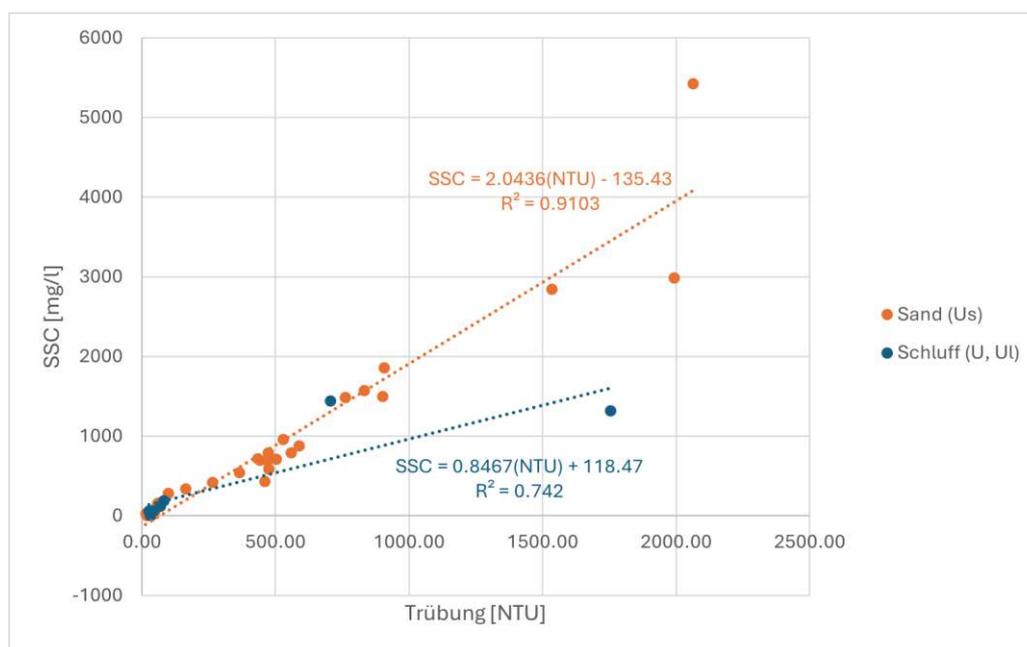


Abb. 5.38: SSC-Trübung bezogen auf Bodenart (2009)

5.3 Zeitlicher Verlauf von Q, SSC, Trübung und Korndurchmesser

5.3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird der zeitliche Verlauf von Abfluss, SSC, Trübung und Korndurchmesser derselben Proben über ein Jahr untersucht. Zeitlich wird sich dabei am hydrologischen Jahr orientiert, das am 1. November beginnt und am 31. Oktober endet [50]. Von besonderem Interesse ist dabei das Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis 31. Oktober, das zunächst von der Schnee- und Gletscherschmelze und erst später von den Niederschlägen dominiert wird [50]. Um die Werte der Parameter besser einordnen zu können, wurden in dieser Arbeit verschiedene (Grenz-)Werte zugrunde gelegt. Für den Abfluss wird der mittlere Abfluss MQ herangezogen. Bei der SSC gibt es für jede Messstelle einen vorgegebenen Schwellenwert, der nach Umrechnung mit den Regressionsgeraden aus Kapitel 6 auch als Schwellenwert für die Trübung dienen kann. Der Korndurchmesser orientiert sich wiederum am Median des D_{50} der jeweiligen Messstation. In folgender Tabelle 5.4 sind die Orientierungswerte für die einzelnen Messstellen aufgeführt.

	Brienzwiler	Diepoldsau	Porte du Scex
Mittlerer Abfluss MQ [m^3/s]	35	233	182
Schwellenwert SSC [mg/l]	95	1012	854
Schwellenwert Trübung [NTU]	112	832	502
Median D_{50} [μm]	10.20	18.80	24.45
spezifische Abflussrate q_m (geschätzt) [m^3/ms]	1.75	3.33	3.03
Setzgeschwindigkeit v_{ss} für Median D_{50} (graphisch) [m/s]	0.0002	0.0003	0.0004
Schubspannungsgeschwindigkeit v_0 (geschätzt) für MQ [m/s]	0.19	0.13	0.15
Sohlschubspannung τ_b (geschätzt) für MQ [N/m^2]	43.67	25.23	36.00

Tab. 5.4: Schwellen- und Grenzwerte der Messstellen [60]

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Absetzgeschwindigkeiten v_{ss} für die Mediane von D_{50} wesentlich kleiner sind als die Schubspannungsgeschwindigkeiten v_0 für den mittleren Abfluss MQ. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das in Kapitel 1.2 genannte Schwebstoffkriterium ($v_0 > V_{ss}$) erfüllt ist und somit das Auftreten dieser Korngrößen als Schwebstoffe bestätigt wird.

5.3.2 Brienzwiler

In folgendem Diagramm in Abbildung 5.39 werden der Abfluss, der Korndurchmesser, die SSC sowie die Trübung im Jahresverlauf dargestellt. Die Schwellenwerte bzw. Grenzen sind durch die waagrechten Linien gekennzeichnet, während der Beginn des hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahrs in Grün markiert ist. In Brienzwiler wurden im Jahresverlauf insgesamt 35 Proben entnommen, davon 10 im hydrologischen Winterhalbjahr und 25 im hydrologischen Sommerhalbjahr.

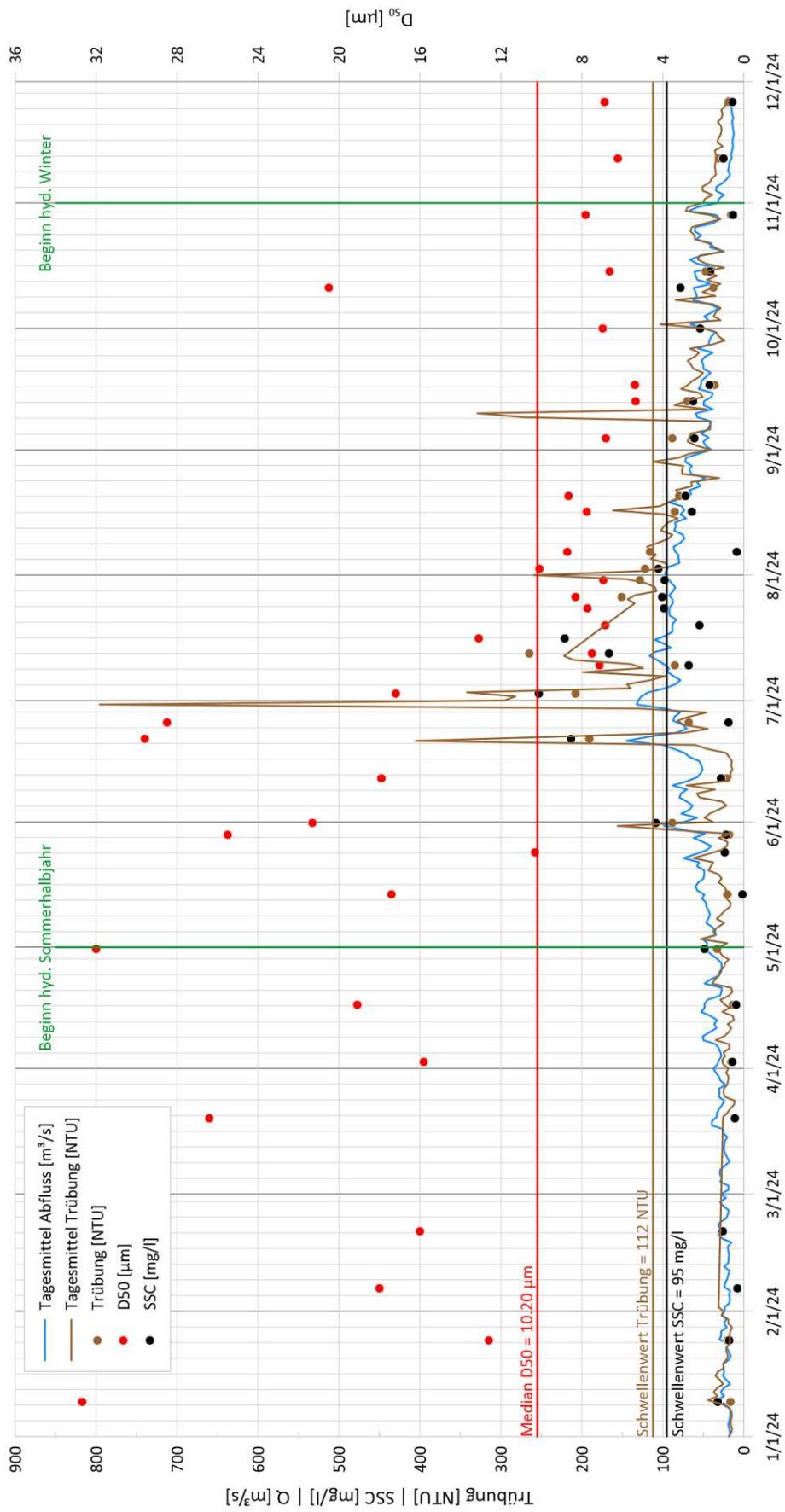


Abb. 5.39: Q, D₅₀, SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2019)

Bereits auf den ersten Blick wird deutlich, dass Abfluss, Korndurchmesser, SSC und Trübung in den Sommermonaten, insbesondere in der ersten Hälfte (Mai-Juni), höhere Werte aufweisen als in den Wintermonaten. Von den 18 Proben, deren D_{50} größer als $10,2 \mu\text{m}$ ist, wurden 9 (50 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres, eine (5,6 %) in der zweiten Hälfte und eine (44,4 %) im Winterhalbjahr entnommen. Es ist jedoch zu beachten, dass eine der Proben, die dem Winterhalbjahr zugeordnet wurde, am 30. April 2024 genommen wurde – also einen Tag vor Beginn des Sommerhalbjahres. Die Probe aus der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahres stammt vom 11. Oktober 2024, zu welchem Zeitpunkt der Abfluss bei $87,83 \text{ m}^3/\text{s}$ lag, was dem zweieinhalbfachen mittleren Abfluss entspricht. Diese Faktoren können die beobachteten Anomalien erklären. Darüber hinaus ist festzustellen, dass von 16 Proben aus dem Zeitraum Mai bis Juli zehn einen Korndurchmesser über dem Median aufweisen (62,5 %), während es in den anderen 9 Monaten nur 42,1 % sind.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der SSC. Von den neun Proben, deren SSC den Schwellenwert überschreitet, befinden sich acht (88,9 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres und eine (11,1 %) früh in der zweiten Hälfte (am 02.08.2024). Auch die Trübung überschritt an sieben Probenahmezeitpunkten den Schwellenwert. Davon fanden fünf (71,4 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres statt, während zwei (28,6 %) früh in der zweiten Hälfte (am 02.08.2024 und 06.08.2024) lagen.

Im Weiteren werden die Mittelwerte der vier Parameter während der drei verschiedenen Zeitperioden ermittelt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 5.5 dargestellt.

	Q [m^3/s]	D_{50} [μm]	SSC [mg/l]	Trübung [NTU]
Nov - Apr	25.16	17.70	21.82	20.98
Mai - Jul	84.74	15.02	98.41	105.55
Aug - Okt	55.48	8.61	54.74	68.27

Tab. 5.5: Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2019)

Auch hier zeigt sich, dass alle vier Parameter, außer der D_{50} , in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres die höchsten Werte und im Winterhalbjahr mit Ausnahme des Korndurchmessers die niedrigsten Werte aufweisen.

Als letztes wird der Bodenartenanteil (Cl, Si, Sa) über das Jahr untersucht und analysiert, ob auch hier festgestellt werden kann, dass gröbere Bodenpartikel zu größeren Teilen im Sommer festgestellt werden und feinere zu größeren Teilen im Winter. Abbildung 5.40 stellt die Bodenartanteile über das Jahr verteilt dar.

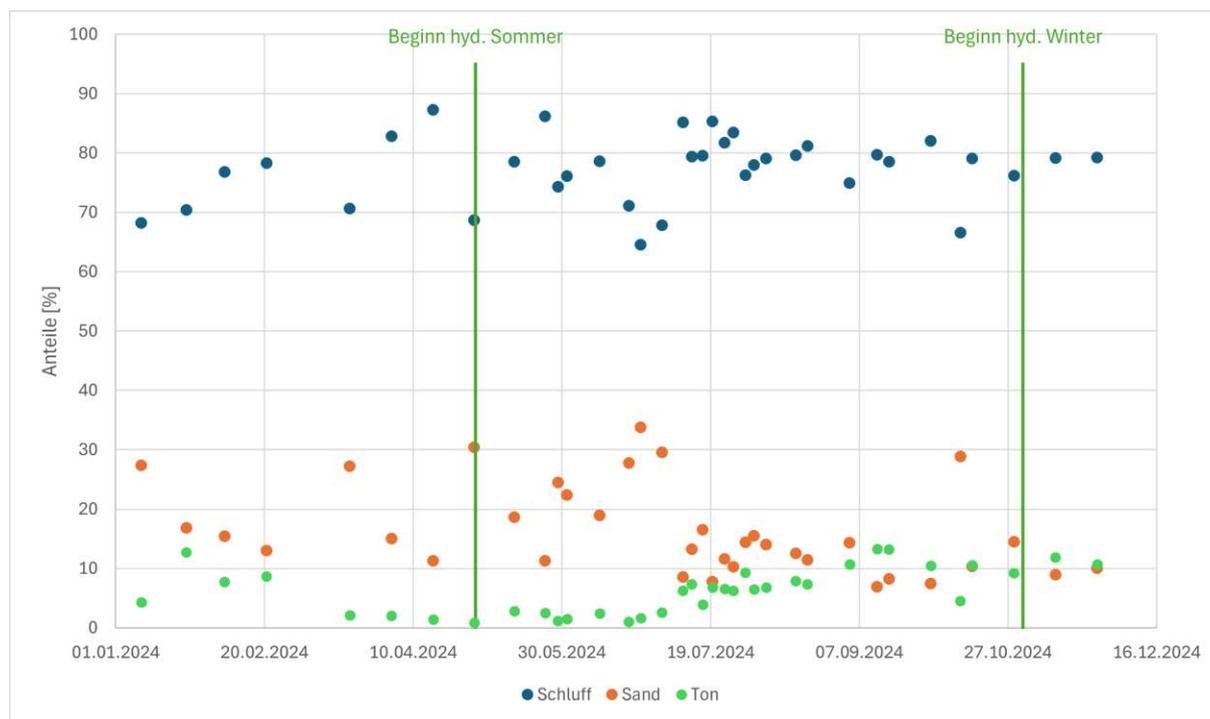


Abb. 5.40: Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2019

Für diese Messstation ist diese Analyse nicht ganz eindeutig. Der Mittelwert der Tonanteile ist zwar in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres mit 4,16 % am kleinsten und der Mittelwert der Sandanteile mit 17,96 % am größten, jedoch sind diese Anteile nicht wie erwartet im Winter gegenteilig, sondern in der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahres ($Cl = 9,14$ %, $Sa = 13,13$ %).

5.3.3 Diepoldsau

Im Diagramm in Abbildung 5.41 werden, wie bereits ausführlich in Kapitel 5.3.1 beschrieben, der Abfluss, der Korndurchmesser, die SSC sowie die Trübung im Jahresverlauf dargestellt. An der Messstelle Diepoldsau wurden im Laufe des Jahres 47 Proben entnommen, davon 11 im hydrologischen Winterhalbjahr und 36 im hydrologischen Sommerhalbjahr.

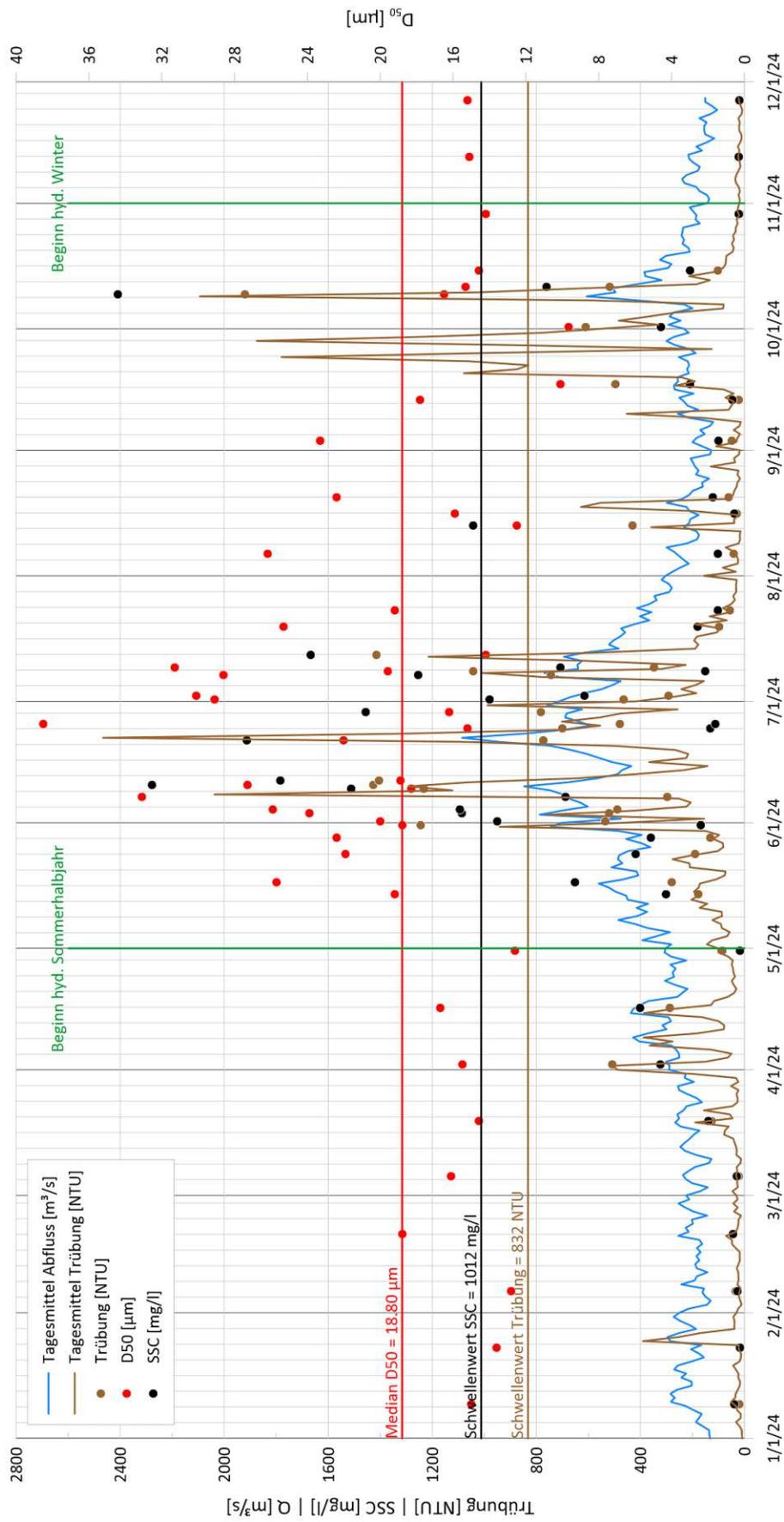


Abb. 5.41: Q, D₅₀, SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2473)

Es wird auf den ersten Blick noch deutlicher, was bereits im vorherigen Kapitel festgestellt wurde: Sowohl der Abfluss, der Korndurchmesser, die SSC als auch die Trübung weisen in den Sommermonaten, insbesondere in der ersten Hälfte (Mai–Juni), deutlich höhere Werte auf als in den Wintermonaten. Von den 23 Proben, deren D_{50} größer als $18,8 \mu\text{m}$ ist, wurden 19 (82,6 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres, drei (13,0 %) in der zweiten Hälfte und eine (4,3%) im Winterhalbjahr entnommen. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass von den 24 Proben, die zwischen Mai und Juli entnommen wurden, 19 Proben einen Korndurchmesser über dem Median aufweisen (79,1 %), während es in den anderen 9 Monaten nur vier von 23 (17,3 %) sind.

Die SSC zeigt ein ähnliches Muster. Es wurden 11 Proben mit einer SSC über dem Schwellenwert registriert, von denen 9 (81,8 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres liegen. Eine Probe (9,1 %) wurde früh in der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahres am 13.08.2024 entnommen, und eine weitere (9,1 %) spät in der zweiten Hälfte am 09.10.2024. Auffällig ist, dass die erstgenannte Probe aus der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahres sehr früh entnommen wurde, während die spätere Probe an einem Tag mit einem außergewöhnlich hohen Abfluss von $624,3 \text{ m}^3/\text{s}$, was dem 2,68-fachen des mittleren Abflusses entspricht, aufgenommen wurde. Dies könnte die beobachteten Unregelmäßigkeiten erklären.

Die Trübung überschritt an 7 Probenahmezeitpunkten den Schwellenwert, wobei dies in 6 Fällen (85,7 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres geschah. Ein weiterer Fall (14,3 %) trat am 09.10.2024 auf, an dem der Abfluss mit $624,3 \text{ m}^3/\text{s}$ dem 2,68-fachen des mittleren Abflusses entsprach. Im nächsten Schritt werden die Mittelwerte der vier Parameter für die drei verschiedenen Perioden berechnet. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 5.6 dargestellt.

	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$D_{50} \text{ [}\mu\text{m]}$	SSC [mg/l]	Trübung [NTU]
Nov - Apr	224.69	15,09	97.95	107.55
Mai - Jul	682.07	23,53	856.60	630.05
Aug - Okt	294.35	16,54	448.12	358.03

Tab. 5.6: Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2473)

Noch deutlicher ist zu erkennen, dass alle vier Parameter in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres die höchsten und im Winterhalbjahr die niedrigsten Werte aufweisen.

Zuletzt wird der Bodenartenanteil (Cl, Si, Sa) über das Jahr untersucht und analysiert, ob auch hier festgestellt werden kann, dass gröbere Bodenpartikel zu größeren Teilen im Sommer festgestellt werden und feinere zu größeren Teilen im Winter. Abbildung 5.42 stellt die Bodenartanteile über das Jahr verteilt dar.

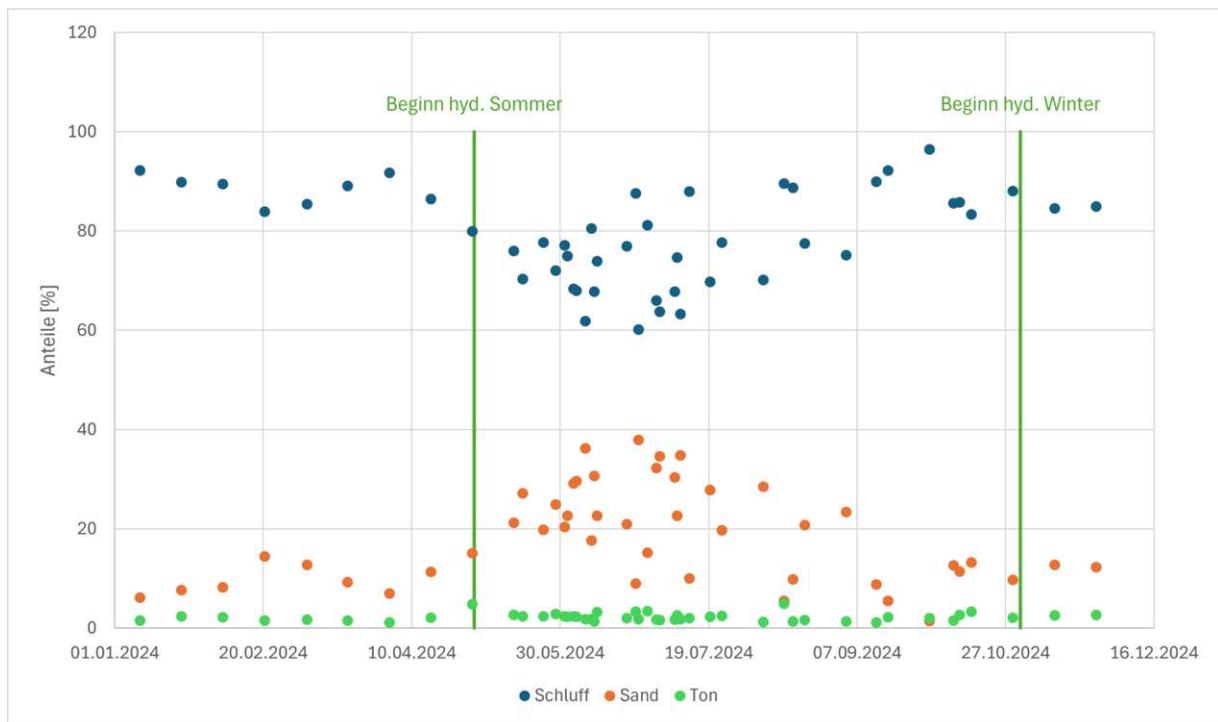


Abb. 5.42: Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2473

Für diese Messstation ist diese Analyse eindeutig. Der Mittelwert der Schluffanteile ist in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres mit 72,76 % am kleinsten und der Mittelwert der Sandanteile mit 24,93 % am größten. Zudem sind die Schluffanteile mit 87,08 % im Winter am größten und die Sandanteile mit 10,68 % am geringsten. Die Mittelwerte für die zweite Hälfte des Sommerhalbjahres sind weils dazwischen ($S_i = 85,25 \%$, $S_a = 12,60 \%$).

5.3.4 Porte du Scex

In den vier Diagrammen in Abbildung 5.43 sind wiederum Abfluss, Korndurchmesser, SSC und Trübung im Jahresverlauf dargestellt. In Porte du Scex wurden über das Jahr 39 Proben genommen, davon 9 im hydrologischen Winterhalbjahr und 30 im hydrologischen Sommerhalbjahr.

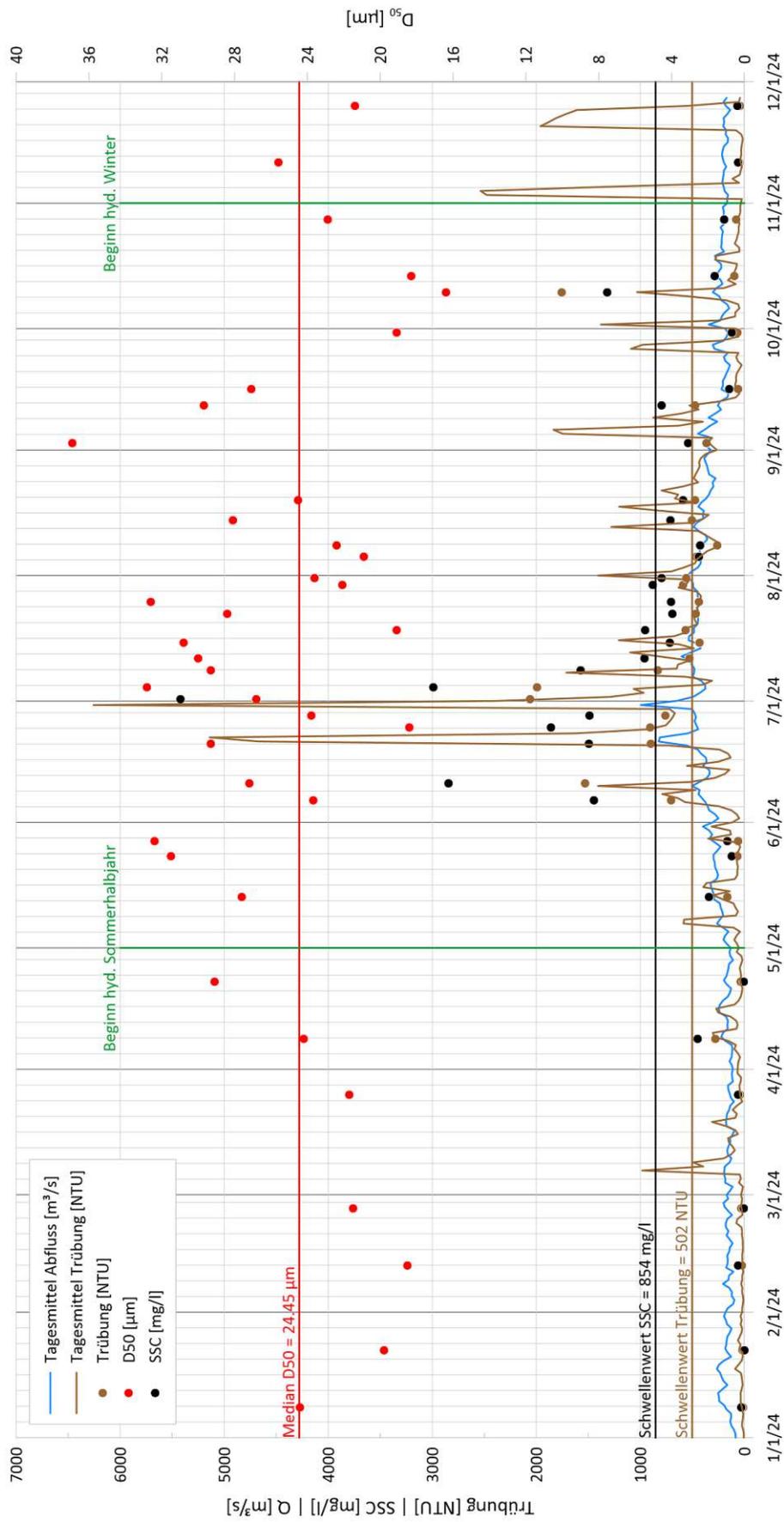


Abb. 5.43: Q, D_{50} , SSC und Trübung über das Jahr (Messstelle 2009)

Auch an dieser Messstelle zeigt sich, dass alle vier Parameter (Abfluss, Korndurchmesser, SSC und Trübung) in den Sommermonaten, insbesondere in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres (Mai–Juni), höhere Werte aufweisen als in den Wintermonaten. Von den insgesamt 20 Proben mit einem Korndurchmesser größer oder gleich des Medians des D_{50} wurden 13 (65 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres, fünf (25 %) in der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahres und zwei (10 %) im Winterhalbjahr entnommen. Darüber hinaus wird festgestellt, dass von 19 Proben, die im Zeitraum Mai bis Juli entnommen wurden, 13 einen Korndurchmesser $D_{50} > 24,45 \mu\text{m}$ aufwiesen (68,4 %), während es in den anderen 9 Monaten nur 35 % sind.

Die SSC bestätigt dieses Muster. Von den insgesamt 12 Proben, deren SSC den Schwellenwert überschreitet, wurden 10 (83,3 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres sowie eine in der zweiten Hälfte (am 10.10.24) entnommen. Die hohe SSC der Probe vom 10.10.24 lässt sich dadurch erklären, dass an diesem Tag ein erhöhter Abfluss von $354,19 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurde, was dem 1,95-fachen des mittleren Abflusses entspricht.

An insgesamt 13 Probenahmezeitpunkten überschreitet die Trübung den Schwellenwert, davon 12-mal (92,3 %) in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres. Ein weiterer Wert über dem Schwellenwert wurde am 10.10.24 gemessen, demselben Tag, an dem die SSC erhöht war. Der an diesem Datum gemessene Abfluss entsprach dem 1,95-fachen des mittleren Abflusses. Im Folgenden werden die Mittelwerte der vier Parameter während der drei verschiedenen Perioden ermittelt. Diese sind in der nachstehenden Tabelle 5.7 zusammengefasst.

	Q [m^3/s]	D_{gm} [μm]	SSC [mg/l]	Trübung [NTU]
Nov - Apr	220.11	23.33	170.39	119.61
Mai - Jul	443.33	27.40	1449.91	764.89
Aug - Okt	319.83	24.21	505.27	417.79

Tab. 5.7: Durchschnittliche Parameterwerte (Messstelle 2009)

Auch an dieser Messstelle ist deutlich zu erkennen, dass alle vier Parameter in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres die höchsten und im Winterhalbjahr die niedrigsten Werte aufweisen.

Erneut wird der Bodenartenanteil (Cl, Si, Sa) über das Jahr untersucht und analysiert, ob auch hier festgestellt werden kann, dass gröbere Bodenpartikel zu größeren Teilen im Sommer festgestellt werden und feinere zu größeren Teilen im Winter. Abbildung 5.44 stellt die Bodenartanteile über das Jahr verteilt dar.

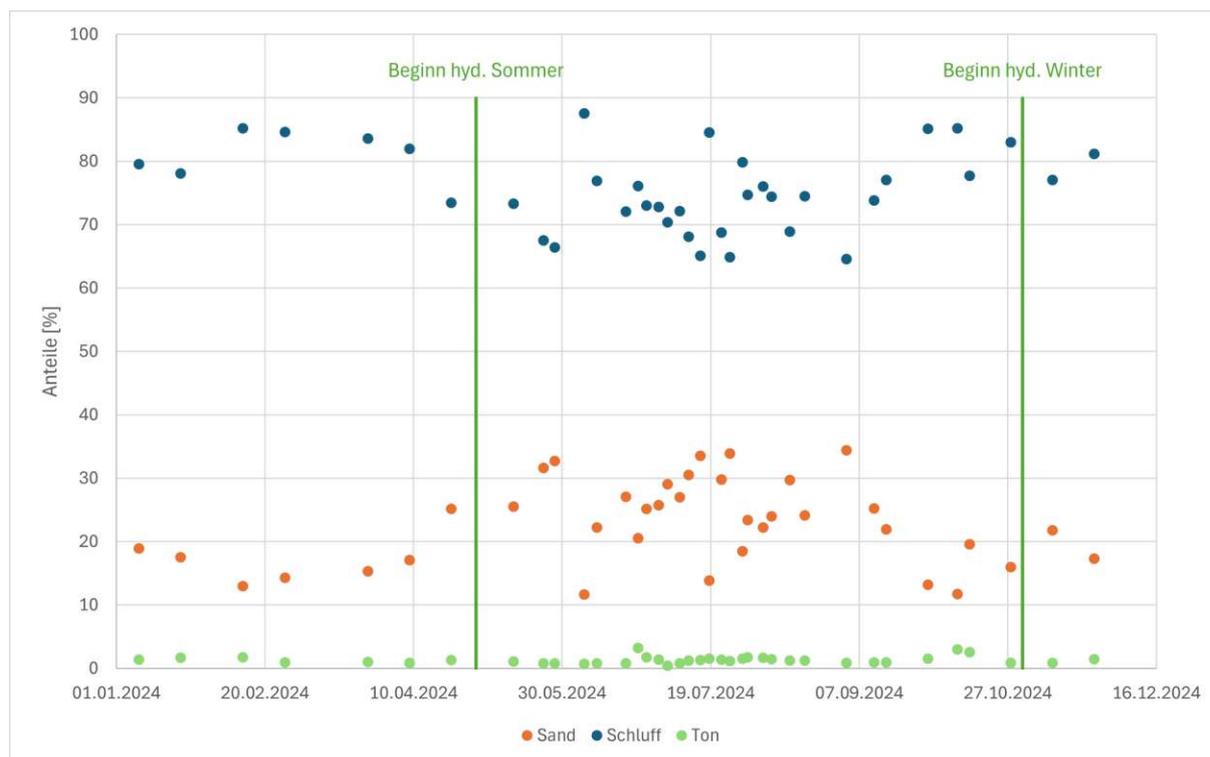


Abb. 5.44: Schluff- sowie Sandanteile der Proben über das Jahr 2024 für die Messstation 2009

Für diese Messstation ist diese Analyse eindeutig. Der Mittelwert der Schluffanteile ist in der ersten Hälfte des Sommerhalbjahres mit 72,93 % am kleinsten und der Mittelwert der Sandanteile mit 25,81 % am größten. Zudem sind die Schluffanteile mit 80,18 % im Winter am größten und die Sandanteile mit 18,51 % am geringsten. Die Mittelwerte für die zweite Hälfte des Sommerhalbjahres sind weils dazwischen ($S_i = 76,42$ %, $S_a = 18,51$ %).

Kapitel 6

Zusammenfassung

6.1 Eckpunkte

Drei Kernerkenntnisse lassen sich aus dieser Arbeit ziehen:

Die erste Erkenntnis, die die Untersuchung zeigt, ist, dass die Verteilungsbreite und die Korndurchmesser (D_{50}) (vgl. Kapitel 5.1) der beprobten Schwebstoffe in den drei Messstationen (vgl. Kapitel 3.1) variieren.

Die Proben aus der Aare bei Brienzwiler weisen die breiteste Verteilung und die kleinsten mittleren Korndurchmesser ($D_{50} = 14,05 \mu\text{m}$) sowie die geringsten Werte bei SSC und Trübung auf, wobei die Proben aus der Rhône bei Porte du Scex die größten Partikel ($D_{50} = 25,31 \mu\text{m}$), die homogenste Verteilung sowie höhere SSC- und Trübungswerte aufweisen. Der D_{50} der Proben aus dem Rhein bei Diepoldsau liegt bei $19,77 \mu\text{m}$. Bedingt ist das möglicherweise durch lithologische Unterschiede der Einzugsgebiete. Während das Einzugsgebiet der Aare Oberstrom hauptsächlich Gneis, Granit und Kalkstein aufweist [10], welche chemisch oder physikalisch meist zu feineren Partikeln erodieren [7], zeigen sich für den Rhein und die Rhône hauptsächlich Sand, Kies und Geröll [10], wodurch eher größere Partikel erodiert werden [7]. Die Kornzusammensetzung aller untersuchten Schwebstoffproben wird durch Schluff dominiert, wobei Proben aus Brienzwiler vor allem als „lehmiger Schluff“ (U1), Proben aus Porte du Scex als „sandiger Schluff“ (Us) und Proben aus Diepoldsau als „Schluff“ (U) oder „sandiger Schluff“ (Us) zu klassifizieren sind (vgl. Kapitel 5.1.1).

Zweitens zeigen die Untersuchungen der Messstellen, dass die Beziehung zwischen Abfluss und SSC durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann, wobei das Bestimmtheitsmaß R^2 meist zu gering ist. Ein direkter Zusammenhang zwischen Korndurchmesser (D_{50}) und SSC konnte nicht festgestellt werden. Bei der Gegenüberstellung von SSC und Trübung ergeben sich lineare Funktionen mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 > 0,74$, $R^2 > 0,64$ und $R^2 > 0,83$ wobei Ausreißer vermutlich auf Probenahmefehler zurückzuführen sind. Zudem von Interesse ist, dass sich die Steigung der Regressionsgeraden im SSC-NTU-Bezug unterscheiden. In Brienzwiler ist diese mit $m = 0,81$ kleiner als in Diepoldsau ($m = 1,11$) und Porte du Scex ($m = 1,77$). Eine Erklärung dafür könnte sein, dass durch die kleineren maßgebenden Korndurchmesser bzw. größeren Anteile an feinkörnigen Partikeln in Brienzwiler bei gleicher Trübung kleinere SSC gemessen werden. Weiterführend zeigt ein Vergleich von Verteilungskurven, dass grobkörnigere Verteilungen (bei jeder der drei Messstellen) tendenziell höhere SSC-Werte für ähnliche optische Trübungen aufweisen als feinkörnigere Verteilungen. In Kapitel 5.2 bestätigen Trendlinien für $D_{50} > \text{Median}$ und $D_{50} < \text{Median}$ im SSC-NTU-Bezug, dass größere Verteilungsanteile von grobkörnigeren Partikeln zu einer tendenziell höheren Schwebstoffkonzentration führen. Dieselbe Folgerung zeigt sich nach Trendanalyse nach der Bodenart mit gröberen Bodenarten (Us) durch eine steilere Regressionsgerade im SSC-NTU-Bezug als mit feineren Bodenarten (U, U1). Dies indiziert zusammengefasst, dass die SSC trotz ähnlicher bzw. gleicher gemessener optischer Trübung variieren kann sowie, dass diese SSC-Abweichung tendenziell von der Korngrößenverteilung

abhängen, welche im Regelfall nicht durch konventionelle optische Trübungsmessungen berücksichtigt werden.

Der dritte Punkt ist, dass hohe Werte (bzgl. Grenz- und Schwellenwerte) für Abfluss, Korndurchmesser, SSC und Trübung vor allem in der ersten Sommerhälfte (Mai-Juli) des hydrologischen Jahres auftreten und auch die Mittelwerte der Proben bestätigen diesen Trend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in alpinen Regionen vor allem Schnee- und Gletscherschmelze das Abflussregime beeinflussen [34]. Man spricht auch von einem nivalen bzw. glazialen Abflussregime, welche zu hohen Abflüssen im Früh- und Hochsommer (v.a. Mai-Juli) [34] führen. Durch höhere Abflüsse sind analog die Fließgeschwindigkeiten höher [31], was zu größeren Schubspannungen und damit größeren SSC, Trübungen und Korndurchmessern führt (vgl. Kapitel 1). Insgesamt unterstreicht die Analyse die saisonale Dynamik der untersuchten Parameter, geprägt durch hydrologische und klimatische Bedingungen.

6.2 Ausblick

Im Bezug auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen ist anzudenken, Trübungsmessungen von Schwebstoffen unter Laborbedingungen mit a priori bekannten und zu variierenden Kornverteilungen bei gleichbleibender Konzentration durchzuführen.

In weiterer Folge ist anzudenken alternative Methoden zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen derselben Sensitivitätsstudie zu unterziehen, etwa hydro-akustische Technik.

Im Bezug auf die untersuchten Messstationen zeigen sich über den Zeitraum der Beprobung (ca. 11 Monate mit 2-8 Proben/Monat/Station) gewisse Konsistenzen betreffend die Verteilungsbreiten und mittleren Korndurchmesser, welche ebenso als Grundlage für Berechnung basierend auf hydro-akustischer Daten dienen können.

Eine weitergehende Analyse betreffend die Einzugsgebiete der betrachteten Messgebiete, deren Geologie, speziell deren Oberflächeneintrag von Partikeln in saisonalen, hydrologischen und lithologischen Zusammenhängen ist ebenso von Interesse. Vor allem die Bedeutung von Peak-Events (Hochwasserereignisse, Starkgewitter, Murengänge, etc.) ist weitergehend zu untersuchen, jedoch ist die Probenahme zu diesen Zeitpunkten generell mit Schwierigkeiten verbunden.

Obwohl zwar Zusammenhänge mit der Korngröße in der Korrelation zwischen SSC und Trübung festgestellt werden konnten, könnten auch Kornform oder organische Anteile eine entscheidende Rolle spielen. Um die Zusammenhänge besser verstehen zu können, sollten sich zukünftige Arbeiten auch auf diese beiden Parameter konzentrieren.

In der Praxis können die Erkenntnisse dieser Arbeit vor allem dazu genutzt werden, um bessere Modelle zur Echtzeitüberwachung der Wasserqualität zu entwickeln und genauere Vorhersagen zur Schwebstoffbelastung in Gewässern zu treffen. Das könnte wichtig sein, um Umweltprobleme frühzeitig erkennen zu können. Zudem werden indirekte Trübungsmessungen zuverlässiger und manuelle Probenahmen könnten dadurch verringert werden. Außerdem könnte es dazu beitragen bessere Wassermanagement-Entscheidungen (für z.B. Wasserkraftwerke oder Trinkwasserfilter) zu treffen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch diese und weitere Arbeiten, Analysen und Studien Messungen zur Umweltüberwachung genauer, kostengünstiger und effizienter werden. Gleichzeitig können die Wasserqualität und das Wassermanagement besser kontrolliert und wertvolle Informationen im Bezug auf den Klimawandel gewonnen werden.

Literatur

- [1] Y. Agrawal, A. Whitmire, O. A. Mikkelsen und H. Pottsmith. „Light scattering by random shaped particles and consequences on measuring suspended sediments by laser diffraction“. In: *Journal of Geophysical Research* 113 (2008). DOI: 10.1029/2007JC004403.
- [2] T. Allen. *Particle Size Measurement*. 3rd, illustrated. Powder Technology Series. Springer, 2013, S. 678. ISBN: 978-1-4899-3063-7.
- [3] *Application Note: Determination of the particle absorption for laser diffraction size calculations*. Online verfügbar unter <https://www.malvernpanalytical.com/>. Abgerufen am 15. Januar 2025, Dokumentnummer MRK1308-01. 2009.
- [4] *Application Note: Empirical methods for estimating Refractive Index Values*. Online verfügbar unter <https://www.malvernpanalytical.com/>. Abgerufen am 15. Januar 2025, Dokumentnummer MRK843-01. 2007.
- [5] G. Bilotta und R. Brazier. „Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota“. In: *Water Research* 42 (2008), S. 2849–2861. DOI: 10.1016/j.watres.2008.03.018.
- [6] G. B. de Boer, C. de Weerd, D. Thoenes und H. W. Goossens. „Laser Diffraction Spectrometry: Fraunhofer Diffraction Versus Mie Scattering“. In: *Particle Particle Systems Characterization* 4 (1987), S. 14–19. DOI: 10.1002/ppsc.19870040104.
- [7] S. Boggs. *Principles of sedimentology and stratigraphy*. 4th edition. Pearson Prentice Hall, 2006. ISBN: 0-13-154728-3.
- [8] M. Born und E. Wolf. *Principles of Optics “Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light”*. Pergamon Press, 1975.
- [9] P. Brown und D. Lawler. „Sphere Drag and Settling Velocity“. In: *Journal of Environmental Engineering* 129 (3) (2003), S. 222–231. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(222).
- [10] Bundesamt für Landestopografie der Schweiz. *Karten der Schweiz*. Zuletzt abgerufen am 24. Januar 2025. 2025. URL: <https://map.geo.admin.ch>.
- [11] J. Coakley und J. P. M. Syvitski. „SediGraph technique“. In: *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Hrsg. von J. P. M. Syvitski. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, S. 129–142.
- [12] M. I. Corporation. *What is Particle Size?* Zuletzt abgerufen am 24. Februar 2025. URL: <https://micromeritics.com/particle-size/>.
- [13] K. Dalsgaard, J. L. Jensen und M. Sorensen. „Methodology of sieving small samples and calibration of sieve set“. In: *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Hrsg. von J. P. M. Syvitski. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, S. 64–75.
- [14] C. Di Stefano, V. Ferro und S. Mirabile. „Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods“. In: *Biosystems Engineering* 106 (2010), S. 205–215. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.03.013.

- [15] J. Droujko und P. Molnar. „Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring“. In: *Scientific reports* 12 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-14228-4.
- [16] M. Elimelch, J. Gregory, X. Jia und R. Williams. „Particle deposition and aggregation - measurement, modelling and simulation“. In: *Experimental techniques for aggregation studies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995, S. 261–289. ISBN: 0-7506-0743-2.
- [17] R. L. Folk. „Spectral Subdivisions of Limestone Types“. In: *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. Hrsg. von W. E. Ham. Bd. 38. American Association of Petroleum Engineers, 1962, S. 62–84.
- [18] H. C. L. GmbH. *Datasheet - Solitax sc Trübungs- Feststoff-Sonden (DOC053.72.35118)*. Hach Company/Hach Lange GmbH. 2017.
- [19] H. C. L. GmbH. *Handbuch (DOC023.72.03232)*. Hach Company/Hach Lange GmbH. 2022.
- [20] R. Govoreanu, H. Saveyn, P. van der Meeren und I. Nopens. „A Methodological Approach for Direct Quantification of the Activated Sludge Floc Size Distribution by Using Different Techniques“. In: *Water Science Technology* 60 (7) (2016), S. 1857–1867. DOI: 10.2166/wst.2009.535.
- [21] D. Grasso, D. Berod und H. Hodel. „Messung und Analyse der Verteilung von Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil von Fließgewässern“. In: *Wasser Energie Luft* 104 (1) (2012), S. 61–65.
- [22] D. Grasso, D. Berod und H. Hodel. „Repräsentativität von Stichproben bezüglich Schwebstoffkonzentration“. In: *Wasser Energie Luft* 106 (3) (2014), S. 224–230.
- [23] D. Grasso, A. Jakob und M. Spreafico. „Abschätzung der Schwebstofffrachten mittels zweier Methoden“. In: *Wasser Energie Luft* 99 (3) (2007), S. 273–280.
- [24] H. Habersack, M. Haimann, W. Kerschbaumsteiner und P. Lalk. *Schwebstoffe im Fließgewässer - Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, Österreich, 2008.
- [25] R. D. Holtz und W. D. Kovacs. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981.
- [26] L. HORIBA. *Particle Size Result Interpretation: Number vs. Volume Distributions*. Zuletzt abgerufen am 04. März 2025. URL: <https://www.horiba.com/int/scientific/products/particle-characterization/particle-education/particle-size-result-interpretation-number-vs-volume-distributions/>.
- [27] A. J. Horowitz. *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*. Forschungsber. United States Geological Survey, 1991. 142 S.
- [28] H. van Ieperen. *The fall velocity of grain particles*. Forschungsber. Dept. of Hydraulics und Catchment Hydrology Agricultural University Wageningen, 1987. 17 S.
- [29] *ISO 14688-1:2017: Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and classification*. English. Aug. 2017.
- [30] S. Kennedy und J. Mazzullo. „Image analysis method of grain size measurement“. In: *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Hrsg. von J. P. M. Syvitski. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, S. 76–87.
- [31] D. Knighton. *Fluvial Forms and Processes - A new perspective*. Routledge, 2014. ISBN: 978-0-340-66313-4.
- [32] W. Krumbein und F. Pettjohn. *Manual of Sedimentary Petrography*. New York City: Appleton-Century-Crofts, 1938.

- [33] J. Laible, B. Camenen, J. Le Coz, G. Pierrefeu, B. Mourier, F. Lauters und G. Dramais. „Comparison of grain size distribution measurements of sand-silt mixtures using laser diffraction systems“. In: *Journal of Soils and Sediments* 23 (2023), S. 2310–2325. DOI: 10.1007/s11368-023-03470-6.
- [34] K. Lebedzinski und J. Fürst. „Entwicklung der alpinen Abflussregime in Österreich im Zeitraum 1961-2010“. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (2018), S. 474–484. DOI: 10.1007/s00506-018-0499-z.
- [35] L. B. Leopold, M. G. Wolman und J. P. Miller. *Fluvial processes in geomorphology*. New York City: Dover Publications, Inc., 1964. ISBN: 0486685888.
- [36] J. Lewis. *Turbidity-controlled sampling for suspended sediment load estimation*. Forschungsber. USDA Forest Service, 2003. 8 S.
- [37] M. I. Ltd. *Mastersizer 3000 Basic Guide (MAN0474-05-EN-00)*. Malvern Instruments Ltd. 2015.
- [38] M. I. Ltd. *Mastersizer 3000 customer training course: Part 1 – Basic principles and data quality*. PowerPoint slides. 2016.
- [39] M. I. Ltd. *Mastersizer 3000 Hydro Series Wet Dispersion Units (MAN0479-05-EN-00)*. Malvern Instruments Ltd. 2015.
- [40] M. I. Ltd. *Mastersizer 3000 User Manual (MAN0474-06-EN-00)*. Malvern Instruments Ltd. 2015.
- [41] A.-L. Maass, H. Schüttrumpf und F. Lehmkuhl. „Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today’s river restorations“. In: *Environmental Sciences Europe* 33 (119) (2021). DOI: 10.1186/s12302-021-00561-4.
- [42] U. Maniak. *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. 7., Auflage. Berlin: Springer Vieweg Berlin, 2016. ISBN: 978-3-662-49086-0.
- [43] F. Marquardt. *Laser diffraction analysis big particle*. Zuletzt abgerufen am 05. März 2025. 2014. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Laserbeugungs-Partikelgr%C3%B6%C3%9Fenanalyse#/media/Datei:Laser_diffraction_analysis_big_particle.svg.
- [44] F. Marquardt. *Laser diffraction analysis small particle*. Zuletzt abgerufen am 05. März 2025. 2014. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Laserbeugungs-Partikelgr%C3%B6%C3%9Fenanalyse#/media/Datei:Laser_diffraction_analysis_small_particle.svg.
- [45] I. N. McCave und J. P. M. Syvitski. „Principles and methods of geological particle size analysis“. In: *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Hrsg. von J. P. M. Syvitski. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, S. 3–21.
- [46] H. Merkus. „Particle Size, Size Distributions and Shape“. In: *Particle Size Measurements*. Hrsg. von H. Merkus. Bd. 17. Dodrecht: Springer, 2009, S. 13–42. ISBN: 978-1-4020-9015-8.
- [47] G. H. Merten, P. D. Capel und J. P. G. Minella. „Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors“. In: *Journal of Soils and Sediments* 14 (2014), S. 1235–1241. DOI: 10.1007/s11368-013-0813-0.
- [48] J. Moore und E. Cerasoli. „Particle Light Scattering Methods and Applications“. In: *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Hrsg. von J. C. Linden. Oxford: Academic Press, 2010, S. 2077–2088. ISBN: 978-0-12-803224-4.
- [49] D. I. für Normung. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung*. DIN EN ISO 17892-4 | 2017-04. Berlin, 2017. DOI: 10.31030/2362539.

- [50] D. I. für Normung. *Hydrologie; Grundbegriffe*. DIN 4049, Teil 1: 1992-12. Berlin, 1992.
- [51] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge, UK: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
- [52] H. Rottmann, B. R. Auer und U. Kamps. *Bestimmtheitsmaß*. Zuletzt abgerufen am 24. Februar 2025. 2018. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/bestimmtheitsmass-31758/version-255309>.
- [53] M. J. Sadar. *Turbidity Science-Technical Information Service*. 1998.
- [54] *Sample Dispersion and Refractive Index Guide*. Online verfügbar unter <https://www.malvernpanalytical.com/>. Abgerufen am 15. Januar 2025, Dokumentnummer MAN0396. 2007.
- [55] T. T. Snazelle. *Field Comparison of Five In Situ Turbidity Sensors*. Forschungsber. United States Geological Survey, 2020. 24 S.
- [56] M. Spreafico, C. Lehmann, A. Jakob und A. Grasso. *Feststoffbeobachtung in der Schweiz*. Forschungsber. Bundesamt für Wasser und Geologie, 2005. 101 S.
- [57] K. Stahr, E. Kandeler, L. Herrmann und T. Streck. *Bodenkunde und Standortlehre*. 4. vollst. überarb. Aufl. Ulmer, 2020, S. 327. ISBN: 9783825253455. DOI: 10.36198/9783838553450.
- [58] J. Swithenbank, J. M. Beer, D. S. Taylor, D. Abbot und G. C. McCreath. „A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution“. In: AIAA 14th Aerospace Sciences Meeting (26.–28. Jan. 1976). Washington D.C., USA, 1976.
- [59] *Technical Note: Effect of Concentration on Laser Diffraction Measurement*. Online verfügbar unter <https://www.horiba.com/>. Abgerufen am 15. Januar 2025, Dokumentnummer TN162. 2010.
- [60] B. für Umwelt (BAFU). *Seen und Flüsse: Stationen und Daten*. Zugriff am 20. Januar 2025. 2025. URL: <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/>.
- [61] K. Vercautse, R. C. Grabowski, T. Hess und I. Lexartza-Artza. „Linking temporal scales of suspended sediment transport in rivers: towards improving transferability of prediction“. In: *Journal of soils and sediments* 20 (2020), S. 4144–4159. DOI: 10.1007/s11368-020-02673-5.
- [62] J. Whinney und B. Calvert. *Nephelometer*. Zuletzt abgerufen am 05. März 2025. URL: <https://www.marinegeophysics.com.au/nephelometer/>.
- [63] S. Yenwiset und T. Yenwiset. „Effect of the Molten Metal Stream’s Shape on Particle Size Distribution of Water Atomized Metal Powder“. In: *Engineering Journal* 20 (1) (2016), S. 187–196. DOI: 10.4186/ej.2016.20.1.187.