

Anleitung zur Bestimmung von Niedrigwasser- Dauerkurven für ungemessene Einzugsgebiete in Mittelland, Voralpen und Alpen der Schweiz

Michael Margreth, Massimiliano Zappa, Fritz Schlunegger



Birmensdorf, 30.12.2025

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

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

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

Auftragnehmer: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Begleitung BAFU: Caroline Kan und Petra Schmocker-Fackel

Autor/Autorin: Michael Margreth, Massimiliano Zappa, Fritz Schlunegger

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

Zitiervorschlag: Margreth, M., Zappa, M., Schlunegger, F.: Anleitung zur Bestimmung von Niedrigwasser - Dauerkurven für ungemessene Einzugsgebiete in Mittelland, Voralpen und Alpen der Schweiz, 2026. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU.

Zusammenfassung

a) Ziele

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, das Entwässerungsverhalten der Fliessgewässer in der Schweiz bei Niedrigwasser besser zu verstehen. Basierend darauf wurde ein Verfahren entwickelt, um in einem beliebigen ungemessenen Einzugsgebiet den Q347-Abfluss, die Dauerkurve und die Masterrezessionskurve im Niedrigwasserbereich anhand von nur wenigen Abflusseinzelmessungen zu bestimmen.

b) Ermittlung von Dauerkurvengruppen

Auf Basis von 102 Abflussmessreihen aus den Jahren 2011 bis 2022 in Mittelland, Voralpen, Alpen und im Tessin konnten Einzugsgebiete zu Gruppen zusammengefasst werden, die bei Niedrigwasser ein ähnliches Entwässerungsverhalten aufweisen. Diese Gruppen werden als Dauerkurvengruppen bezeichnet.

Im Mittelland werden die Dauerkurvengruppen hauptsächlich durch Unterschiede im litho-stratigraphischen Aufbau, der mittleren Geländeneigung, den Flächenanteilen an mässig durchlässigem Quartär und dem mittleren Jahresniederschlag bestimmt. In den Alpen und im Tessin ist der mittlere Jahresniederschlag (1991–2020) der massgebende Faktor. Je grösser dort die Jahresniederschlagsmenge, desto steiler ist die Dauerkurvengruppe. In den nördlichen Voralpen gibt es Gebiete mit einem ähnlichen Verhalten wie im Mittelland und solche, die sich eher wie alpine Gebiete verhalten.

Aufgrund von litho-stratigraphischen und tektonischen Einzugsgebietseigenschaften sind die Volumina der langsam entwässernden Speicher, die für die Q347-Abflüsse massgebend sind, in Alpinen und Voralpinen Einzugsgebieten und in aus Oberer Meeresmolasse ausgebauten Mittelland-Einzugsgebieten grösser als in aus Süsswassermolasse aufgebauten Einzugsgebieten des Mittellands. Deshalb variieren die Dauerkurvengefälle in den erstgenannten Einzugsgebieten in wesentlich geringerem Masse als in den zweitgenannten.

Ein neu entwickeltes Verfahren ermöglicht die Zuordnung eines Einzugsgebiets zu einer Dauerkurvengruppe anhand folgender Parameter:

- Litho-stratigraphischer Aufbau des Festgesteins
- Flächenanteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen
- Mittlere Höhe
- Mittlere Geländeneigung
- Mittlerer Jahresniederschlag

Die Dauerkurvengruppen von Einzugsgebieten mit möglicher Verkarstung (z. B. Jura, Kalkalpen) können mit diesem Verfahren nicht ermittelt werden, da Grundwasserverluste in benachbarte Gebiete zu verfälschten spezifischen Q347-Werten führen können.

c) Verfahren zur Bestimmung von Q347, Dauerkurve und Rezessionskurve mit drei Abfluss-einzelmessungen

Einzugsgebiete mit ähnlichen Dauerkurven reagieren vergleichbar auf Niedrigwasser. Das bedeutet: Wenn sich die Niederschläge in der Vorperiode nicht stark unterscheiden, befinden sich die Abflussperzentile (z.B. Q290, Q310, etc.) benachbarter Gebiete in einem ähnlichen Bereich, wenn sie in der gleichen Dauerkurvengruppe sind und das Q347 ähnlich gross ist. Dies erlaubt die Ableitung des Abflussperzentils im Untersuchungsgebiet anhand eines Referenzgebiets mit bekannter Dauerkurve. Daraus lassen sich die gesuchten Dauerkurvenkennwerte bestimmen. Basierend darauf wurde ein Verfahren entwickelt, um Q347, die Dauerkurve und die Masterrezessionskurve eines Einzugsgebiets mit nur drei Einzelmessungen in einer Trockenperiode ($Q < Q290$) zu bestimmen.

d) Korrektur der Abflussdaten

Vor der Zuordnung der Dauerkurvengruppe müssen folgende anthropogene und natürliche Einflüsse in den Messdaten korrigiert werden:

- Wasserentnahmen im Einzugsgebiet und Wasserzuflüsse aus anderen Gebieten
- Unterirdische Abflüsse, die am Messstandort nicht erfasst werden
- Messunsicherheiten
- Beiträge aus Gletschern und Permafrostböden

Ohne diese Korrekturen wäre das typische Verhalten der Dauerkurven überzeichnet.

e) Test des Verfahrens

Die Methode wurde erfolgreich in 22 Einzugsgebieten im Mittelland- und 99 Einzugsgebieten in den Alpen getestet. Dabei wurde jeweils eine Einzelmessung zur Bestimmung von Q347 durchgeführt; zwei bis drei weitere Messungen wurden zur Validierung der berechneten Dauerkurve verwendet. Die Auswertung zeigt folgendes Bild:

- Im Mittelland wichen 84 % der Messwerte der Validierungsmessungen maximal 20 % und 93 % maximal 30 % von der berechneten Dauerkurve ab.
- In den Alpen betrugen die Abweichungen zur berechneten Dauerkurve bei 75 % der Validierungsmessungen unter 20 % und bei 87 % unter 30 %.

Diese Resultate zeigen, dass die spezifischen Q347-Abflüsse mit diesem Verfahren deutlich präziser bestimmt werden können als mit bisherigen Schätzverfahren – insbesondere bei niedrigen oder hohen Werten – und das mit verhältnismässig geringem Mehraufwand. Mit den Einzelmessungen lassen sich zudem wichtige Informationen ermitteln, die Q347 massgeblich beeinflussen, wie beispielsweise Versickerungstrecken und unterirdische Abflüsse.

f) Besseres Verständnis der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren

Um ein besseres Verständnis für die Faktoren und Speicher zu gewinnen, die den Q347-Abfluss massgebend beeinflussen, wurde ein umfassender Datensatz aus Einzel-, Kurzzeit- und Langzeitmessungen in 519 Einzugsgebieten erstellt. In 256 dieser Gebiete wurden Messungen im Rahmen der Dissertation von M. Margreth erhoben. Für jedes Gebiet wurde ein Q347-Wert bestimmt, wobei die Bestimmungsmethode von der verfügbaren zeitlichen Auflösung abhängig war. Wo Langzeitmessungen verfügbar waren, wurde der Wert direkt aus der Dauerkurve der Datenreihe herausgelesen. Wo nur Einzelmessungen oder Kurzzeitmessungen vorlagen, wurde die hier vorgestellte Methode eingesetzt. Anhand von Boxplots, Regressionsanalysen und einer vertieften Auseinandersetzung mit dem litho-stratigraphischen Aufbau und den tektonischen Eigenschaften der Untersuchungsgebiete wurde der Zusammenhang zwischen dem Q347 und geologischen, topographischen sowie klimatologischen Faktoren untersucht.

Im Mittelland zeigt sich, dass der litho-stratigraphische Aufbau der Molasse ein zentraler Faktor ist. Die höchsten spezifischen Q347 wurden in der Oberen Meeresmolasse (OMM) des zentralen Mittellands registriert ($4.9\text{--}12.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), während sie in der OMM des westlichen Mittellands deutlich tiefer liegen ($0.8\text{--}6.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In der Region um Bern variieren die Werte stark ($0.6\text{--}16.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), was auf Unterschiede in den Feinanteilen innerhalb der OMM zurückzuführen ist. Zusätzlich zeigt sich, dass eine Bedeckung von mässig durchlässigen Quartärablagerungen (v.a. Moränen) die Kapazitäten der für Q347 massgebenden Speicher in Mittelland-Einzugsgebieten reduzieren. Höhere Feinanteile in der Molasse und in den Moränen reduzieren die Infiltrations- und Speicherkapazität. Die Unterschiede in den Feinanteilen in der Molasse sind durch unterschiedliche Ablagerungsmilieus während der Sedimentation bedingt. Aufgrund der höheren Feinanteile in der Unteren Süsswassermolasse (USM) und in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) liegen dort die Q347 tiefer ($0.3\text{--}4.5$ bzw. $0.2\text{--}6.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) als in der OMM des Zentralen und Berner Mittellands. Lokal können grosse Schottervorkommen die Q347-Werte leicht erhöhen, was besonders bei ansonsten niedrigen Q347 eine erkennbare Wirkung entfaltet. Die erhebliche Streuung innerhalb der Molasse-Einheiten ist wahrscheinlich vor allem auf unterschiedliche Feinanteile in den Sedimentschichten und in der Moräne zurückzuführen. Da geologische Karten dies nicht ausreichend differenziert abbilden, ist eine verlässliche Vorhersage des Q347 in Mittelland-Einzugsgebieten ohne Messungen unpräzise, vor allem bei tiefen und hohen Q347.

In den alpinen Einzugsgebieten liegt das Q347 zwischen 0.5 und $29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Die starke tektonische Prägung der Alpen hat zu einer intensiven Zerklüftung des Untergrundes geführt, was die Infiltrations- und Speicherkapazität und somit auch das Q347 erhöht. Der Q347-Durchschnitt beträgt hier $7.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, abzüglich der Beiträge von Gletschern und Permafrostflächen, und liegt damit fast doppelt so hoch wie im Mittelland ($4.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Ein weiterer Grund für diesen Unterschied ist, dass die Moränen in den Alpen durchlässiger sind als im Mittelland. Dadurch werden sie für Q347-Abflüsse zu bedeutenden Speichern.

Besonders hohe Q347 treten in Gebieten mit Rauwacken, Gipsen und Dolomiten auf ($12\text{--}29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In Bündnerschiefern sind die Q347 eher tief ($4\text{--}6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), während sie in Gneisen und Graniten stark streuen ($2\text{--}15 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Die Untersuchungen zeigen, dass bei Gneisen und Graniten die tektonischen Einheiten einen stärkeren Einfluss auf das Q347 haben als bei den Sedimentgesteinen. So wurden beispielsweise im Aarmassiv

bei kristallin geprägten Einzugsgebieten höhere Q347 beobachtet als im Tessin oder in den Ostalpen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Gebirgsmassive in den Zentralalpen aufgrund ihrer stärkeren Neigung zu spröder Deformation mehr Klüfte enthalten als jene in der Ostschweiz oder im Tessin. Auch innerhalb einzelner tektonischer Einheiten ist die Streuung der Q347-Werte meist gross. Durch Regressionsanalysen konnte in 11 von 19 tektonischen Einheiten ansatzweise aufgezeigt werden, dass diese Streuung teilweise durch den Einfluss von hoch- und mässig durchlässigen Quartärablagerungen erklärt werden kann – in den übrigen jedoch nicht. Um deutliche Fortschritte bei der Kartierung der massegebenden Speicher in den alpinen Einzugsgebieten erzielen zu können, wären aufwändige Anpassungen in der geologischen Kartierung erforderlich, wie:

- eine einheitliche und widerspruchsfreie Kartierung der Quartärablagerungen mit zusätzlichen Angaben über die Ablagerungsmächtigkeiten.
- eine konsistente Kartierung der Klüfte und Deformationsgefüge

g) Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit lassen sich bisher ungemessene Einzugsgebiete einer Dauerkurvengruppe zuordnen, in der sich die Dauerkurven im Niedrigwasserbereich ($Q < Q_{290}$) nach einem ähnlichen Muster verhalten. Im Weiteren bestehen nun Hilfsmittel zur Korrektur von Abflussmessreihen im Niedrigwasserbereich, um anthropogene Einflussfaktoren, unterirdische Abflüsse unter Messstandorten und Messfehler herauszurechnen. Diese kamen in 102 Einzugsgebieten zur Anwendung. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein neues Verfahren zur Bestimmung von Q347, Dauerkurvengruppe und Masterrezessionskurve mit nur 3 Abflusseinzelmessungen in einer Trockenperiode und mit bekannter Dauerkurvengruppe in einem Handbuch. Dieses Verfahren wurde in 22 Einzugsgebieten im Mittelland und in 99 Einzugsgebieten in den Alpen erfolgreich getestet. Demgemäss lässt sich mit diesem Verfahren das Niedrigwasserabflussverhalten eines zuvor ungemessenen Einzugsgebietes, mit geringem Aufwand, detailliert charakterisieren. Auf Gewässerabschnitten, wo ein Teil des Wassers im Schotter unterhalb des Fliessgewässers fliesst, stellt der Abfluss im Bach nur der Überlauf dar. Mit etwas Zusatzaufwand lassen sich in solchen Abschnitten auch Versickerungs- und Exfiltrationsstrecken und unterirdische Abflüsse ermitteln.

Im Weiteren liegt nun dank der Analyse von Q347-Abflüssen aus 519 Einzugsgebieten ein besseres Verständnis für die Speicher und Faktoren vor, welche Q347 beeinflussen. Sie bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen. Die Ergebnisse zeigen Wege auf, wie die massgeblichen Speicher in Zukunft noch besser lokalisiert und quantifiziert werden können.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt BAFU und dem Amt für Natur und Umwelt Graubünden für die Finanzierung des Projekts und für die gute Zusammenarbeit. Insbesondere geht der Dank an Caroline Kan, Petra Schmocker-Fackel (beide BAFU) und David Schmid (ANU Graubünden).

Folgenden Firmen, öffentlichen Institutionen, Gesellschaften und Privatpersonen danken wir für die Abflussdaten, die sie zur Verfügung gestellt haben:

Kraftwerke Oberhasli (KWO), Repower, Provedimaint electric Val Müstair (PEM), Bergbahnen Disentis, Gemeinde Madulain, Klosters Madrisa Bergbahnen, Fond «Ökostrom aus Wasserkraft» (Gemeinde Scuol), Gemeinde Rossa, Bauernverein Domleschg, Gemeinde Davos, Gemeinde Surava, Markus Menn, Vereinigung Freunde von Schmitten, Cumün da Val Müstair, EW Vals, Engadiner Kraftwerke, entegra Wasserkraft AG, Flims Electric AG, Elektrizitätswerke Zürich (EWZ), Mountain Energy SA, Gemeinde Ferrera.

Wir danken der Firma AUIN AG für das Zusammenstellen der Abflussdaten im Kanton Graubünden.

Wir danken allen Gemeinden, die Informationen zu Wasserentnahmen und Wasserzugaben aufbereitet und zur Verfügung gestellt haben.

Wir danken Dr. Christoph Wanner für seine wertvollen Ratschläge zu hydrogeologischen Fragestellungen.

Wir danken Claude Lüscher für die Mitarbeit bei der Ermittlung von Wasserentnahmen und Wasserzugaben in der französischsprachigen Schweiz.

Wir danken Florian Boller für das kritische Durchlesen des Textes und für die Korrekturvorschläge.

220 Inhaltsverzeichnis

221

222

223	1	Ausgangslage	1
224	2	Aktueller Forschungsstand	3
225	2.1	Geologie	3
226	2.2	Versickerungen und Aufstösse	3
227	2.3	Gletscher und Permafrost	4
228	2.4	Unsicherheiten in den Abflussmessreihen von Pegelstationen	4
229	2.5	Abschätzung von Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten	5
230	2.6	Bestimmung von Dauerkurven in ungemessenen Gebieten	5
231	3	Ziele und Vorgehen	7
232	3.1	Teilziel 1: Ermittlung des Einflusses von Lithologie, Topographie und Klima auf Dauerkurven und	
233		Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich	7
234	3.2	Teilziel 2: Verfahren entwickeln zur Bestimmung von Dauerkurven und Rezessionskurven in	
235		ungemessenen Einzugsgebieten	7
236	3.3	Teilziel 3: Identifikation von Q347-bestimmenden Speichern und Faktoren	8
237	3.4	Teilziel 4: Untersuchung der Veränderung des Q347 in den letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels	
238			8
239	4	Verwendete Daten	9
240	4.1	Abflüsse	9
241	4.2	Niederschläge	9
242	4.3	Topographie	9
243	4.4	Einzugsgebietsflächen	10
244	4.5	Geologie	10
245	4.1	Grundwasserkarten	10
246	4.2	Gletscher und Permafrostböden	10
247	4.3	Fliessgewässer und Landnutzung	10
248	5	Gebietsauswahl	11
249	5.1	Erste Auswahl von Einzugsgebieten	11

250	5.1.1	Untersuchungszeitraum.....	11
251	5.1.2	Ausschluss von Einzugsgebieten mit starken menschlichen Einflüssen	11
252	5.1.3	Ausschluss von Einzugsgebieten mit natürlichen Störfaktoren	11
253	5.2	Ausschluss von weiteren Abflussmessreihen aus den Analysen.....	12
254	6	Korrektur der Abflussmessreihen	13
255	6.1	Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugs-gebieten	13
256	6.2	Unterirdische Abflüsse unter den Abflussmesspegelstationen	15
257	6.2.1	Abschätzung mit der Darcy-Formel	16
258	6.2.2	Hydrologisches Bestimmungsverfahren	16
259	6.3	Resultate der Ermittlung der Wasserentnahmen und -zugaben und unterirdischen Abflüsse	16
260	6.4	Beiträge aus Gletschern und Permafrostböden.....	17
261	6.4.1	Schätzung der winterlichen Abflussbeiträge von Gletschern	18
262	6.4.2	Schätzung der Niedrigwasserbeiträge aus Permafrostböden im Winter	19
263	7	Aufbereitung von weiteren Einzugsgebiets-parametern	20
264	7.1	Bestimmung der Volumina von Schottergrundwasserkörpern.....	20
265	7.1.1	Schottergrundwasserkörper im Allgemeinen	20
266	7.1.2	Schottergrundwasserkörper mit zusätzlicher Speisung durch Fliessgewässer	20
267	7.2	Anteile von undurchlässigen, mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen.	21
268	8	Untersuchung der Dauer- und Rezessionskurven bei Niedrigwasser.....	22
269	8.1	Einleitung	22
270	8.2	Untersuchung der Gefälle von Dauerkurven	24
271	8.3	Gruppierung nach geologischen, klimatologischen und topographischen Kriterien	25
272	8.3.1	Obere Süsswassermolasse (OSM) und Untere Süsswassermolasse (USM) im Mittelland	25
273	8.3.2	Obere Meeresmolasse (OMM) im Mittelland	28
274	8.3.3	Alpen.....	29
275	8.3.4	Voralpen Alpennordseite.....	30
276	8.3.5	Voralpen Tessin.....	33
277	8.3.6	Überblick über die Gefälle der Dauerkurven	34
278	8.4	Saisonale Verteilung der Niedrigwassertage	37
279	8.5	Verhalten der Rezessionskurven bei Niedrigwasser	38

280	8.5.1	Saisonale Unterschiede im Rezessionsverhalten.....	42
281	8.6	Unterschiedliches Verhalten von Niedrigwasserganglinien.....	45
282	8.6.1	Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse während Niedrig-wasserperioden.....	46
283	8.6.2	Einfluss von langsam und rasch entwässernden Grundwasser-speichern	46
284	8.6.3	Einfluss der Litho-Stratigraphie auf die langsam entwässernden Grundwasserspeicher.....	46
285	8.7	Verhalten der Differenz Q290 – Q347 in Abhängigkeit des Jahresniederschlages	50
286	8.8	Q347 bestimmende Faktoren innerhalb derselben Dauer-kurvengruppen	50
287	8.9	Interpretation.....	51
288	8.9.1	Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Niederschlag auf das Gefälle der Dauerkurven..	
289			51
290	a)	Mittelland.....	51
291	b)	Alpen	53
292	c)	Voralpen.....	55
293	8.9.2	Zusammenhang zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz Q290 – Q347	56
294	8.9.3	Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Niederschlag auf die Masterrezessionskurve.	56
295	8.9.4	Saisonale Unterschiede im Rezessionsverhalten.....	57
296	9	Bestimmung von Q347 und von Dauerkurven in ungemessenen Einzugsgebieten	59
297	9.1	Bestimmung der Dauerkurvengruppen	60
298	9.2	Bestimmung von Q347 und Q290	63
299	9.2.1	Durchführung der Abfluss-Einzelmessungen.....	64
300	9.2.2	Ermittlung der Wasserentnahmen und -rückgaben	64
301	9.2.3	Ermittlung des unterirdischen Abflusses in den Untersuchungsgebieten.....	65
302	9.2.4	Auswahl an möglichen Referenzgebieten	67
303	9.2.5	Eingrenzung der Auswahl an Referenzgebieten und Bestimmung von Q347 und Q290.....	69
304	9.2.6	Vergleich der resultierenden Dauerkurven mit den Einzelmessungen	75
305	9.3	Anwendung des Verfahrens in Alpinen Einzugsgebieten.....	76
306	9.4	Bestimmung der Dauerkurvenform zwischen Q290 und Q360	77
307	9.4.1	Periode 2011 bis 2020	77
308	9.4.2	Periode 1991 bis 2020	83

309	10	Handbuch zur Bestimmung von Q347, Niedrigwasserdauerkurven und -rezessionskurven in ungemessenen Einzugsgebieten.....	85
310			
311	10.1	Ermittlung der Einzugsgebietsgrenze.....	85
312	10.2	Erforderliche Gebietsparameter	86
313	10.2.1	Mittlere Einzugsgebietshöhe.....	86
314	10.2.2	Mittlerer Jahresniederschlag.....	86
315	10.2.3	Mittlere Geländeneigung	86
316	10.2.4	Litho-stratigraphische Zusammensetzung	87
317	10.2.5	Durchlässigkeit der Quartärablagerungen	87
318	10.2.6	Schottergrundwasservolumina	87
319	10.2.7	Subtraktion von Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden	87
320	10.3	Bestimmung der Dauerkurvengruppe.....	88
321	10.3.1	Alpine Einzugsgebiete	89
322	10.3.2	Voralpine Einzugsgebiete im Tessin	89
323	10.3.3	Spezialfall Voralpin - OMM.....	89
324	10.3.4	Voralpen der Alpennordseite	90
325	10.3.5	Mittelland-Einzugsgebiete.....	90
326	10.3.6	Flächengewichtete Mittelung der Dauerkurvengruppen im Mittelland	91
327	10.3.7	Ermittlung von potenziellen Versickerungsstrecken	91
328	10.3.8	Bestimmung der Referenzgebiete im Mittelland	91
329	10.3.9	Bestimmung der Referenzgebiete in den Alpen.....	92
330	10.3.10	Zeitpunkt der Abflusseinzelmessungen und Umgang mit Unsicherheiten im Mittelland.....	94
331	10.3.11	Zeitpunkt der Abflusseinzelmessungen in den Alpen	95
332	10.3.12	Festlegung der Standorte für Abflusseinzelmessungen	97
333	10.3.13	Methoden der Abflusseinzelmessungen	97
334	10.3.14	Bestimmung der Wasserentnahmen und -zugaben.....	97
335	10.3.15	Bestimmung des unterirdischen Abflusses	97
336	10.3.16	Bestimmung von Q347 und Q290	98
337	10.3.17	Empfehlungen für die Berechnung des Dauerkurvenverlaufs	99
338	10.3.18	Überprüfung der Dauerkurven anhand der Messwerte der Einzelmessungen.....	100

339	10.3.19	Umgang mit grossen Abweichungen.....	103
340	10.4	Ermittlung der Rezessionskurve.....	103
341	11	Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren	105
342	11.1	Vorgehen.....	107
343	11.1.1	Eigene Abflussmesskampagnen	107
344	11.1.2	Bestimmung der Messstandorte	107
345	11.1.3	Bestimmung des Messzeitpunktes.....	108
346	11.2	Bestimmung von Q347.....	108
347	11.3	Umgang mit verschachtelten Einzugsgebieten	109
348	11.4	Umgang mit Wasserentnahmen von Kraftwerken.....	109
349	11.5	Bestimmung der Einzugsgebietsparameter	110
350	11.5.1	Umgang mit Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden im Winter.....	111
351	11.5.2	Tektonische Einheiten	111
352	11.5.3	Gesteinstypen.....	111
353	11.5.4	Metamorphose-Fazies.....	111
354	11.5.5	Quartäre Ablagerungen.....	112
355	11.5.6	Brüche, Abrissrand, Abschiebungen.....	112
356	11.6	Manuelle Auswertung der massgebenden Einflussfaktoren	112
357	11.6.1	Mittelland und Voralpen	113
358	a)	Obere Meeresmolasse (OMM)	114
359	11.6.2	Untere Süsswassermolasse (USM)	117
360	11.6.3	Obere Süsswassermolasse (OSM)	118
361	c)	Q347- Überblick im Mittelland.....	122
362	11.6.4	Alpen und Tessin	125
363	a)	Zusammenhang zwischen Q347 und den tektonischen Einheiten	126
364	b)	Zusammenhang zwischen Q347 und den Gesteinstypen	128
365	c)	Zusammenhang zwischen Q347 und quartären Ablagerungen	130
366	d)	Einfluss von nicht-quartären Faktoren.....	135
367	e)	Physikalische Erklärung für die Muster der nicht-quartären Einfluss-faktoren	140
368	f)	Unsicherheiten	145

369	11.6.5	Q347-Prognose mit Random Forest	148
370	12	Einfluss des Klimawandels auf Q347	150
371	12.1	Interpretation.....	151
372	13	Schlussfolgerungen.....	152
373	13.1	Einfluss von Lithologie, Topographie und Klima auf Dauerkurven im Niedrigwasserbereich.....	152
374	13.2	Einfluss von Wasserentnahmen, unterirdischen Abflüssen und Gletschern und Permafrostböden	153
375	13.3	Bestimmung von Q347, Dauerkurven und Rezessionskurven zwischen Q290 und Q347 in ungemessenen	
376		Einzugsgebieten	154
377	13.4	Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren	155
378	13.4.1	Mittelland und Voralpen	155
379	13.4.2	Alpen	156
380	13.5	Einfluss des Klimawandels auf Q347	157
381	13.6	Ausblick	158
382		Referenzen.....	159
383		Anhang.....	164
384	A1.	Bestimmung des unterirdischen Abflusses mit der hydrologischen Methode	179
385	A1.1	Luterbach, Oberburg	179
386	A1.2	Rüderchen, Schöftland	182
387	A1.3	Luthern, Nebikon.....	184
388	A1.4	Köllikerbach, Kölliken	188
389			

1 Ausgangslage

Der Bedarf nach einer soliden Grundlage für die Bestimmung von Niedrigwasserabflüssen in ungemessenen Gebieten ist im Nachgang zu den Trockenheitsereignissen der Jahre 2003, 2011, 2015, 2018 (Zappa et al., 2019) und denjenigen in den Jahren 2019, 2020, 2022 und 2023 gestiegen.

Gemäss den Ergebnissen hydrologischer Modelle wird der prognostizierte Klimawandel in den Sommermonaten zu geringeren Abflüssen in den Fliessgewässern des Schweizer Mittellandes und zu einer Abnahme der Niedrigwassermengen führen (Brunner et al., 2019; FOEN, 2021; Muelchi et al., 2021). In den Alpenen Einzugsgebieten soll das Q347 in Zukunft hingegen eher etwas ansteigen (Muelchi et al., 2021; Wechsler et al., 2023). In Anbetracht der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgen der immer intensiveren und häufigeren Trockenperioden (Brunner und Tallaksen, 2019; Freire-González et al., 2017), würde die Arbeit der Behörden und Wassernutzer wesentlich erleichtert, wenn flächendeckende und verlässliche Informationen über die Speicherkapazität und das Niedrigwasserabflussverhalten von Einzugsgebieten vorlägen. Zudem wäre ein Niedrigwasserprognosesystem mit hoher räumlicher Auflösung hilfreich.

Das Bundesamt für Umwelt und verschiedene kantonale Behörden im Bereich der Hydrologie und des Gewässerschutzes sind auf die bevorstehenden Herausforderungen sensibilisiert und haben den Bedarf nach einem neuen Q347-Bestimmungsverfahren geäussert, in dem die relevanten Prozesse besser abgebildet sind. Ebenso ist der Kanton Graubünden mit einer Anfrage an die Auftragnehmer gelangt, das Entwässerungsverhalten auch von ungemessenen kleinen Einzugsgebieten zu untersuchen, um deren Wasserführung in einem verbesserten Abflussmodell zuverlässiger prognostizieren und besser überwachen zu können. Es besteht ein allgemeines Interesse für neue Ansätze, mit welchen das Niedrigwasserabflussverhalten auch für ungemessene Einzugsgebiete in einer hohen Genauigkeit und in einer hohen räumlichen Auflösung ermittelt werden kann.

Der Kenntnisstand zu den Speichern und Faktoren, die die Dauerkurven im Niedrigwasserbereich massgebend beeinflussen, waren zu Projektbeginn fürs Mittelland und für die Alpen unterschiedlich. Während im Mittelland schon eine Methodik zur Bestimmung von Dauerkurven im Niedrigwasserbereich für vier ungemessene Einzugsgebiete getestet worden war, waren über die für Q347 massgebenden Speicher alpiner Einzugsgebiete nur rudimentäre Kenntnisse vorhanden. Um das im Mittelland entwickelte Verfahren auf alpine Einzugsgebiete zu erweitern, waren in den alpinen Einzugsgebieten verschiedene Messkampagnen und Auswertungen notwendig. Das BAFU erachtet ein besseres Verständnis des Entwässerungsverhaltens alpiner Einzugsgebiete als wesentlich, weil ihre Beiträge wichtige Grundwasserspeicher in den tieferliegenden Gebieten speisen. Es sollte untersucht werden, wie die Klüfte und unterschiedlichen Gefüge in den Festgesteinen die Porengrössen und die Porenverteilung beeinflussen. Ursprünglich war auch vorgesehen, ein hydrogeologisches Modell anzuwenden, um die Porengrössen und -verteilungen zu evaluieren. Dieses Vorhaben konnte jedoch aufgrund der Komplexität der massgebenden Speicher im Gebirge nicht umgesetzt werden.

Das Projekt, das im Rahmen einer Dissertation durchgeführt wurde, beinhaltet im Wesentlichen vier Teilziele:

1. Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Klima auf Dauerkurven und Rezessionskurven ermitteln (Kapitel 8).
2. Verfahren entwickeln zur Bestimmung des Q347-Abflusses und der Dauerkurve und der Rezessionskurve im Niedrigwasserbereich (Kapitel 9). Beschreibung der Vorgehensweise in einem Handbuch (Kapitel 10).
3. Identifikation der Speicher und Faktoren, die das Q347 in Mittelland, Voralpen und Alpen massgebend beeinflussen (Kapitel 11).
4. Untersuchung der Veränderung des Q347 in den letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels (Kapitel 12).

2 Aktueller Forschungsstand

Anhand einer Auswertung von Dauerkurven, Rezessionskurven und Niederschlagsmessreihen und basierend auf den Ergebnissen zahlreicher Abflussmessungen im Mittelland und in den Alpen konnten in einem Vorgängerprojekt Faktoren und Speicher identifiziert werden, die die Niedrigwasserabflüsse massgeblich beeinflussen (Naef und Margreth, 2017).

2.1 Geologie

Im Wesentlichen wurden im Vorgängerprojekt Speicher in den Festgesteinen mit einer etwas erhöhten Durchlässigkeit identifiziert, die für ein überdurchschnittliches Q347 verantwortlich sind (Naef und Margreth, 2017). Dazu gehören im Mittelland die mächtigen Sandsteinbänke der Oberen Meeresmolasse (OMM), die vor allem im Zentralen Mittelland für überdurchschnittlich hohe Q347 sorgen. Die meisten Einzugsgebiete in der Unteren Süsswassermolasse (USM) und in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) weisen hingegen tiefe bis mittlere Q347-Abflüsse auf. In den alpinen Einzugsgebieten ist der Zusammenhang zwischen dem geologischen Aufbau und den Q347-Abflüssen komplexer als im Mittelland. Anhand von detaillierten Einzelmessungen in fünf alpinen Einzugsgebieten konnten ansatzweise Unterschiede zwischen verschiedenen Lithologie-Typen identifiziert werden. In den Alpen schienen jedoch tektonische Eigenschaften wie die Brüchigkeit, das Gesteinsgefüge oder die Kluftbildung einen grösseren Einfluss auf das Q347 zu haben als im Mittelland. Der Einfluss von quartären Ablagerungen wie Moränen, Schutthalden, Murgangablagerungen oder Bergsturm Massen wurde bisher sowohl im Mittelland wie in den Alpen als begrenzt eingeschätzt. Die Beiträge von quartären Ablagerungen waren vor allem dort von Bedeutung, wo in den Festgesteinen keine oder nur geringe Speicher vorhanden sind (Wirth et al., 2020).

Eine ausführlicher Überblick über die Literatur zu den wichtigen Einflussfaktoren für Niedrigwasserdauerkurven und Niedrigwasserrezessionskurven und deren Bestimmung in ungemessenen Einzugsgebieten ist in zwei wissenschaftlichen Publikationen vorgesehen, die den Zusammenhang zwischen lithologischen, topographischen und klimatologischen Faktoren und den Niedrigwasserdauerkurven und Niedrigwasserrezessionskurven beschreibt (Margreth et al., n.d., n.d.).

2.2 Versickerungen und Aufstösse

Die geologische Beschaffenheit und der Zustand des Bachbetts bezüglich der Kolmatierung kann das Q347 an einem Standort stark beeinflussen. Dies zeigte sich anhand der Ova dal Fuorn, wo oberhalb bestimmter Standorte viel Wasser versickert und mehr als 90% des Gesamtabflusses unterirdisch stattfindet (Naef und Margreth, 2017). Entlang der Töss kommen Gewässerabschnitte vor, wo bei Niedrigwasserverhältnissen das gesamte Wasser unterirdisch abfließt (AWEL ZH, n.d.). Es wurde ein Verfahren entwickelt, um anhand einer Messkampagne während einer Trockenperiode die Anteile der ober- und unterirdischen Abflüsse entlang eines Fliessgewässers abzuschätzen (Naef und Margreth, 2017).

2.3 Gletscher und Permafrost

Einzugsgebiete mit hohen Anteilen an Gletschern und Permafrostgebieten weisen im Vergleich zu gletscher- und permafrostfreien Einzugsgebieten sehr tiefe Q347 auf (Naef und Margreth, 2017). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den kältesten Monaten viele Fliesswege in den Gletschern und die Permafrostböden bis zur Oberfläche zufrieren. Die Speicher in den permafrost- und gletscherfreien Bereichen tragen in diesen Einzugsgebieten deshalb überdurchschnittlich zum Q347 bei. Um eine Übertragung des Abflussverhaltens von gemessenen auf ungemessene Gebiete – basierend auf der Kenntnis über die massgeblichen Speicher – zu ermöglichen, wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Beiträge und die Flächen der Gletscher und Permafrostböden aus den spezifischen Abflüssen herausgerechnet werden (Naef und Margreth, 2017). Dabei wurden die Beiträge der Gletscher und Permafrostböden in den Monaten der tiefsten Abflüsse im Winter pauschal auf $1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ geschätzt.

2.4 Unsicherheiten in den Abflussmessreihen von Pegelstationen

Die permanente Messung von Niedrigwasserabflüssen mit fix installierten Messstationen ist eine grosse Herausforderung und mit grossem Aufwand verbunden. In unterschiedlichen Studien wird aufgezeigt, dass die Abflussmessreihen der Pegelstationen von Bund und Kantonen im Niedrigwasserbereich fehlerhaft sein können (Margreth, M. & Naef, F., 2022; Naef, F. & Margreth, M., 2018). Dies wird auch durch die Ergebnisse einer Umfrage bei den zuständigen Fachleuten für Hydrometrie bei Kantonen und beim Bund bestätigt (Naef und Margreth, 2017). Demgemäss eignen sich 43% der 351 vorhandenen Pegelstationen für die Messungen von Niedrigwasserabflüssen, 23% werden als akzeptabel bezeichnet und 34% der Stationen bereiten grössere Probleme bei der Messung von Niedrigwasserabflüssen. Diese Unsicherheiten können die Auswertung von Niedrigwasserabflüssen, wie Q347, Dauerkurven oder Rezessionskurven, stark verfälschen (Naef, F et al., 2015). In den verschiedenen Studien konnten folgende Ursachen für die Unsicherheiten ermittelt werden:

- **Pegelkonstruktion:** Fehlende Niedrigwasserrinne, fehlender fixer Messquerschnitt, ungünstiges Verhältnis zwischen Pegeländerung und Wasserspiegelbreite bei Niedrigwasserverhältnissen, Bildung von stehenden Wellen in der Niedrigwasserrinne (Leuch, C. und Vetsch, D., 2023).
- **Eisbildung:** Gefrieren des Wassers im Messschacht, Verengung des Messquerschnitts (Leuch, C. und Vetsch, D., 2023), irrtümliche Korrektur von natürlich stattfindenden Abflussschwankungen bei Messstationen in den Alpen (Nagel et al., 2025).
- **Unsicherheiten in der PQ-Beziehung:** fehlende Eichmessungen im Niedrigwasserbereich, Nicht-Berücksichtigung der Strömungsverhältnisse am Messquerschnitt bei Niedrigwasserabflüssen (Verwendung von Polynom-Funktionen), unbegründete Nullpunktverschiebungen (Margreth und Kaderli, 2022).

In vielen Fällen lassen sich fehlerhafte Abflussmessungen identifizieren und korrigieren. Dafür wurden verschiedene Hilfsmittel entwickelt (Naef & Margreth 2017b; Margreth & Kaderli, 2022), wie beispielsweise die Korrektur von PQ-Beziehungen anhand einer hydraulischen Nachrechnung der Fliessverhältnisse an einer Messstation und nachträgliche Korrektur der Abflüsse anhand der korrigierten Pegelhöhen. Für manche Messreihen ist eine Korrektur unmöglich. Sie sollten deshalb für Nutzerinnen und Nutzer im Zusammenhang mit Niedrigwasserstudien nicht zur Verfügung stehen. Die Erfahrungen zeigen, dass eine kritische Überprüfung der Abflussmessreihen auch bei Messreihen, die als akzeptabel eingestuft wurden, unablässig ist.

2.5 Abschätzung von Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten

Statistische Verfahren wie beispielsweise multivariate Regressionsanalysen (Aschwanden und Kan, 1999; Laaha und Blöschl, 2007) oder Random Forest-Modelle (Floriantic et al., 2022) haben den Vorteil, dass sie rasch und ohne weitere Abflussmessungen für jedes beliebige Fliessgewässer an einem beliebigen Punkt einen Schätzwert für den Q347-Abfluss liefern. Massgebende Einflussfaktoren wie zum Beispiel Versickerungsstrecken, Wasserentnahmen (Naef, F. & Margreth, M., 2018; Naef, F et al., 2015), Wasserzuflüsse aus fremden Einzugsgebieten oder Unsicherheiten in den Abflussmessreihen konnten in diesen Studien nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden, weil die notwendige Datengrundlage fehlt. Es stellt sich zudem die Frage, ob der Detaillierungsgrad der relevanten geologischen Informationen zur Lithologie, Tektonik und Abgrenzung und Mächtigkeit der Quartärlagerungen in der geologischen Karte im Massstab 1:25'000 (Swisstopo, 2022) genügend hoch ist, um die Unterschiede der massgeblichen Speicher abzubilden. Mit einem Random Forest-Modell wurde das Q347 für 280 Einzugsgebiete in der Schweiz prognostiziert (Floriantic et al., 2022). Für eine Mehrheit der Einzugsgebiete liessen sich die Q347-Werte mit einer maximalen Abweichung von 30% vom beobachteten Q347 bestimmen, mit einer höheren Übereinstimmung im Mittelland als in den Alpen (Floriantic et al., 2022). Jedoch ist die Bandbreite der vorhergesagten kleiner als die der beobachteten Q347, was darauf hindeutet, dass bei der Bestimmung von hohen und tiefen Q347 grosse Fehler entstehen.

Die Verfahren, um Q347-Werte in ungemessenen Einzugsgebieten abzuschätzen, lassen sich möglicherweise verbessern, wenn die massgebenden Speicher und Prozesse der Entwässerung besser berücksichtigt werden. Diese sind in der Schweiz aber erst für einzelne Regionen gut bekannt (Kapitel 2.1). Eine detaillierte Untersuchung für das gesamte Gebiet im Mittelland und im Alpenraum fehlt jedoch.

2.6 Bestimmung von Dauerkurven in ungemessenen Gebieten

Im Rahmen einer Studie im Auftrag der Abteilung Hydrometrie des Kantons Solothurn wurde ein neues Verfahren entwickelt, um das Q347 und die Dauerkurven für Abflüsse kleiner als Q290 für ungemessene Gebiete zu bestimmen (Naef und Margreth, 2017). Zahlreiche Auswertungen im Vorfeld zeigten, dass der Verlauf der Dauerkurven im Niedrigwasserbereich (Q290 bis Q365) den geologischen Aufbau eines Einzugsgebietes widerspiegelt (Naef und Margreth, 2017). Deshalb scheint eine Übertragung von Dauerkurven von gemessenen auf ungemessene Einzugsgebiete mit einem ähnlichen geologischen Aufbau aus einer vergleichbaren Region

540 möglich. Dieses Vorgehen wurde anhand von drei Einzugsgebieten getestet. Mit Hilfe der Werte von
541 Abflusseinzelmessungen wurden die ermittelten Dauerkurven überprüft. Versickerungen, Wasserentnahmen
542 und -rückgaben wurden berücksichtigt. Die Anwendung dieses neuen Verfahrens blieb hingegen auf die Region
543 Solothurn beschränkt.
544

3 Ziele und Vorgehen

3.1 Teilziel 1: Ermittlung des Einflusses von Lithologie, Topographie und Klima auf Dauerkurven und Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich

Anhand von Abflussmessreihen der Periode 2011 bis 2022 und anhand von geologischen Karten, topographischen Daten (Swiss Alti-3D) und Niederschlagsdaten wurde das Niedrigwasserverhalten von 102 Einzugsgebieten im Mittelland, in den Voralpen, in den Alpen und im Tessin untersucht. Von speziellem Interesse war, wie der litho-stratigraphische Aufbau, die Flächenanteile der quartären Ablagerungen, die mittlere Geländeneigung und der mittlere Jahresniederschlag die Dauerkurven und die Rezessionskurven beeinflusst (Kapitel 8). Im Vorfeld dieser Auswertungen wurden aufwendige Korrekturen an den Abflussmessreihen durchgeführt, um natürliche und anthropogene Faktoren herauszufiltern, die den Zusammenhang zwischen den geologischen, topographischen und klimatologischen Einzugsgebietsparametern mit dem Niedrigwasserabflussverhalten überzeichnen (Kapitel 5).

3.2 Teilziel 2: Verfahren entwickeln zur Bestimmung von Dauerkurven und Rezessionskurven in ungemessenen Einzugsgebieten

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Kapiteln 8 wurde ein neues Verfahren entwickelt, um Dauerkurven und Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich ($Q < Q_{290}$, im Folgenden auch als Niedrigwasserdauer- und Niedrigwasserrezessionskurven bezeichnet) in bisher ungemessenen Einzugsgebieten anhand von wenigen Abflusseinzelmessungen während einer Niedrigwasserperiode zu bestimmen. Davon ausgenommen waren Einzugsgebiete mit wesentlichen Anteilen an Kalkgesteinen, die zur Verkarstung tendieren (Helvetikum und Jura). Wegen der möglichen Verkarstung kann die Abgrenzung der Einzugsgebiete in diesen Regionen sehr unsicher sein, was auch Unsicherheiten in der Bestimmung des spezifischen Q_{347} [$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$] verursacht. Als Basis sollte das im Kanton Solothurn entwickelte Verfahren dienen, mit dem die Dauerkurve eines ungemessenen Einzugsgebiets durch die Umrechnung von Dauerkurven für geologisch ähnlich aufgebaute Referenzgebiete ermittelt wird (Naef und Margreth, 2017). Die Bestimmung der Dauerkurven soll auf einer bis drei Abflusseinzelmessungen während Niedrigwasser abgestützt werden können.

Die detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung von Q_{347} , der Niedrigwasserdauerkurven und der Niedrigwasserrezessionskurven wird in Kapitel 9 anhand von Ergebnissen aus Testeinzugsgebieten beschrieben. Eine kompakte Beschreibung der Vorgehensweise befindet sich im «Handbuch zur Bestimmung von Q_{347} , Niedrigwasserdauerkurven und -rezessionskurven in ungemessenen Einzugsgebieten» (Kapitel 10).

3.3 Teilziel 3: Identifikation von Q347-bestimmenden Speichern und Faktoren

Das Ziel eines dritten Projektteils bestand darin, die Erkenntnisse über die Speicher und Faktoren, die Q347 massgeblich beeinflussen, für Einzugsgebiete im Mittelland-, in den Voralpen und in den Alpen zu verbessern und zu vertiefen (Kapitel 11). Basierend auf diesen Erkenntnissen soll das Potential abgeschätzt werden können, inwiefern die für das Q347 massgeblichen Speicher und Faktoren kartiert und das Q347 ohne Abflusseinzelmessungen bestimmt werden kann.

3.4 Teilziel 4: Untersuchung der Veränderung des Q347 in den letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels

Um den Einfluss des Klimawandels der letzten 30 Jahre auf das Q347 zu ermitteln, wurden die Q347 der Messreihe 1991 bis 2022 mit dem Q347 der Messreihe 2011 bis 2022 verglichen. Die Q347- Differenzen wurden nach Unterschieden im lithostratigraphischen Aufbau, und nach klimatischen Einzugsgebietseigenschaften ausgewertet. Dies soll erlauben, in Zukunft genauere Prognosen zu machen, welche Einzugsgebiete und Regionen in Zukunft sensibler auf den Klimawandel reagieren werden.

4 Verwendete Daten

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden insgesamt 102 Einzugsgebiete berücksichtigt. 68 Einzugsgebiete liegen im Schweizer Mittelland oder in den Voralpen der Alpennordseite, 8 in den Voralpen des Kantons Tessin und 27 Einzugsgebiete befinden sich in den Alpen. Das Auswahlverfahren ist in Kapitel 5.1 beschrieben. Eine Tabelle mit allen berücksichtigten Einzugsgebieten und den wichtigsten Einzugsgebietseigenschaften wie Fläche, Gefälle, mittlerer Jahresniederschlag, litho-stratigraphischer Aufbau etc. befindet sich in Tabelle A2 im Anhang.

4.1 Abflüsse

Für die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bestimmung der Niedrigwasser-Dauerkurven und Niedrigwasser-Rezessionskurven wurden gemessene mittlere Tagesabflusswerte verwendet. Die Daten umfassen, mit der Ausnahme von drei Einzugsgebieten, den Zeitraum vom 1.1.2011 bis 31.12.2022, wobei für jedes Einzugsgebiet mindestens 10 Jahre an Daten zur Verfügung stehen. Für die Einzugsgebiete der Triftwasser, der Steinwasser (beide Kraftwerke Oberhasli) und der Wysswasser (Kraftwerke Obergoms) wurde die Periode von 1.1.2013 bis 31.12.2022 verwendet, da für die Periode vorher keine Daten verfügbar sind.

Die Daten wurden vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) sowie von den Kantonen Aargau, Zürich, St. Gallen, Bern, Waadt und Thurgau zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden Abflusszeitreihen von den Wasserkraftwerken Oberhasli, Kraftwerke Obergoms und Elektrizitätswerke Zürich (EWZ) zur Verfügung gestellt. In Tabelle A2 sind die verwendeten Zeitreihen und deren Eigentümer aufgelistet. Die Abflusszeitreihen der Kraftwerke Oberhasli (KWO) und der EWZ dürfen aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen zwischen der WSL und der KWO bzw. der EWZ nicht weitergegeben werden. Das gilt auch für daraus abgeleitete Werte, wie z.B. das Q347.

4.2 Niederschläge

Die Niederschlagsdaten stammen aus dem Gitternetzdatensatz RhiresD v.2 der MeteoSchweiz (MeteoSwiss, 2021).

4.3 Topographie

Anhand des SwissALTI3D-Höhenmodells mit 5x5 Meter- Raster (Swisstopo, 2019a) wurde ein Höhenmodell mit 25x25-Meter Raster abgeleitet. Aus diesem wurden folgende topographische Einzugsgebietseigenschaften hergeleitet:

- mittleres topografisches Gefälle
- Mindesthöhe
- mittlere Höhe
- 19 Höhenklassen à 200 Meter pro Einzugsgebiet

621 - Flächenanteile der 8 Expositionen pro Einzugsgebiet.

622 4.4 Einzugsgebietsflächen

623 Für alle Einzugsgebiete mit Zeitreihen von BAFU-Stationen wurden die Einzugsgebietsgrenzen des BAFU
624 verwendet. Für Einzugsgebiete mit Abflusszeitreihen aus den Kantonen wurden die Grenzen mit Hilfe des GIS-
625 Datensatzes „Topographische Einzugsgebiete Schweizer Gewässer“ des BAFU abgeleitet (BAFU 2024:
626 [https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/geodaten/einzugsgebietsgliederu](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/geodaten/einzugsgebietsgliederung-schweiz.html)
627 [ng-schweiz.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/geodaten/einzugsgebietsgliederung-schweiz.html)) und manuell nachbearbeitet.

628 4.5 Geologie

629 Die geologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete wie Lithologie, Stratigraphie und Tektonik wurden aus
630 verschiedenen geologischen Karten abgeleitet. Vom Datensatz Geocover (Swisstopo, 2022), der für eine
631 Verwendung im Massstab 1:25'000 empfohlen wird, wurden die Verteilung der quartären Ablagerungen und die
632 lithologische Zusammensetzung aller Einzugsgebiete abgeleitet. Von der geotechnischen Karte der Schweiz im
633 Massstab 1:200'000 (Swisstopo, 1967) wurde die stratigraphische Zusammensetzung sowie Informationen zur
634 Tektonik und zur Neigung der Molasseschichten für die einzelnen Einzugsgebiete im Mittellandes und in den
635 Voralpen entnommen.

636 4.1 Grundwasserkarten

637 Anhand der Grundwasserkarten der verschiedenen Kantone (AFU AG, 2023; AFU AR, 2024; AFU TG, n.d.; AUE
638 SZ, 2023; AWA BE, 2024; AWE SG, 2024; AWEL ZH, 2022; uwe LU, 2023) wurden Grundwasservolumina für
639 Mittelwasserabflüsse hergeleitet.

640 4.2 Gletscher und Permafrostböden

641 Die Gletscherflächen stammen aus dem aktuellen schweizerischen Gletscherinventar des Jahres 2016 (Linsbauer
642 et al., 2021). Flächen, die von Permafrost betroffen sind, wurden aus der Permafrost- und Bodeneiskarte des
643 Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF entnommen (Kenner et al., 2019).

644 4.3 Fliessgewässer und Landnutzung

645 Die Vektordaten zu den Fliessgewässern und zur Landnutzung stammen von Swisstopo. Es wurden folgende
646 Daten verwendet:

- 647 - Wald, Fels, Feuchtgebiete, Fliessgewässer (Swisstopo, 2019b).
- 648 - Siedlungsgebiete (Bundesamt für Landestopographie, Swisstopo, 2007)

5 Gebietsauswahl

5.1 Erste Auswahl von Einzugsgebieten

Zunächst wurde aus allen in der Schweiz verfügbaren Abfluss-Zeitreihen eine erste Auswahl an 134 Einzugsgebieten vorgenommen. Dabei wurden nur diejenigen Gebiete berücksichtigt, deren Messdaten im Untersuchungszeitraum liegen. Anschliessend wurden diejenigen Gebiete ausgewählt, die nicht durch starke menschliche Einflüsse oder grössere Seen im Einzugsgebiet beeinflusst sind. Ausserdem wurden Gebiete ausgeschlossen, wo grössere Mengen an Wasser unterirdisch unter der Abfluss-Pegelstation vorbeifliesst, wobei eine Abschätzung dieses unterirdischen Abflusses sehr aufwendig oder unmöglich ist. Bei insgesamt acht Abfluss-Pegelstationen liess sich der unterirdische Abfluss abschätzen und die Abflussmessreihen korrigieren (Kapitel 6.2).

5.1.1 Untersuchungszeitraum

Als Untersuchungszeitraum wurden die Jahre 2011 bis 2022 definiert. Die Verwendung einer 30-jährigen Messreihe hätte zwar den Vorteil, dass das langjährige Niedrigwasserverhalten besser erfasst wäre. Die Verwendung einer etwas mehr als 10-jährigen Messreihe ermöglicht es hingegen, eine grössere Anzahl an Einzugsgebieten zu berücksichtigen als bei einer 30-jährigen Messreihe. Zudem repräsentieren die Messreihen zwischen 2011 und 2022 die jüngste Dynamik im Niedrigwasserverhalten besser als die Messreihe zwischen 1991 und 2022.

5.1.2 Ausschluss von Einzugsgebieten mit starken menschlichen Einflüssen

Einzugsgebiete mit grossen Siedlungsflächen oder bekannten Wasserentnahmen (BAFU, 2024) wurden von der Studie ausgeschlossen. Nicht berücksichtigt wurden Fliessgewässer in grösseren Städten, wie Zürich, Winterthur, St. Gallen, Lausanne, etc. oder grösseren zusammengewachsenen Agglomerationsräumen (z.B. Bülach, Kloten Opfikon, Uster). In solchen Einzugsgebieten ist die Herausrechnung der Wasserentnahmen schwierig und mit einem grossen Aufwand verbunden. Davon ausgenommen sind Einzugsgebiete im südlichen Tessin. Dort wurden auch Einzugsgebiete der Faloppia (Chiasso), Laveggio (Mendrisio) und des Scairolo (Barbengo), die in grossen Siedlungsgebieten liegen, berücksichtigt. Es existieren viele weitere teils erhebliche anthropogene Einflüsse, wie Wasserentnahmen oder Wasserzuflüsse aus externen Einzugsgebieten, die nicht in einer einheitlichen Datenbank erfasst sind. Diese Einflüsse wurden mit Hilfe von Telefoninterviews ermittelt (Kapitel 6.1).

5.1.3 Ausschluss von Einzugsgebieten mit natürlichen Störfaktoren

Fliessgewässer mit grösseren Seen im Einzugsgebiet wurden nicht berücksichtigt. Ebenfalls aussortiert wurden Abflusszeitreihen, bei denen die Wahrscheinlichkeit besteht, dass grosse Wassermengen unterirdisch an der

Messstation vorbeifliessen und eine Schätzung dieser unterirdischen Abflussmenge auf der Grundlage der verfügbaren Daten oder aufgrund der hydrogeologischen Bedingungen sehr unsicher oder unmöglich ist.

5.2 Ausschluss von weiteren Abflussmessreihen aus den Analysen

In weiteren Untersuchungen wurden weitere Messreihen für die weiteren Analysen ausgeschlossen. Dazu gehören Abflussmessreihen, die durch Unsicherheiten bei den Niedrigwasserabflüssen stark betroffen sind oder sein könnten. Ein Verdacht auf Unsicherheiten in P/Q-Beziehungen besteht meist dann, wenn die Dauerkurven im Niedrigwasserbereich einen unnatürlichen Verlauf aufweisen, wie beispielsweise scharfe Änderungen im Verlauf oder ein steiles Abstürzen am unteren Ende der Dauerkurve. Ein aussergewöhnlich hohes oder tiefes Dauerkurvengefälle im Vergleich zu anderen Gebieten mit einem vergleichbaren geologischen Untergrund kann auf mögliche Fehler in den Abflussmessreihen hinweisen. Lassen sich die aussergewöhnlichen Werte nicht durch Wasserentnahmen oder unterirdische Abflüsse erklären, könnten erfahrungsgemäss Unsicherheiten in den Abflussmessungen der Grund für das aussergewöhnliche Verhalten erklären. Basierend auf einer detaillierten Sichtung der Daten und der Dauerkurven im Niedrigwasserbereich, auf der Bestimmung von Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten (Kapitel 6.1), auf Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse unter den Messstationen (geologische Karte) und auf weiteren Informationen über P/Q-Beziehungen und Eichmessungen im Niedrigwasserbereich wurden nochmals 32 Abflussmessreihen aus den Untersuchungen ausgeschlossen. Schliesslich wurden 102 Messreihen für eine Auswertung der Dauerkurven, und 92 für die Auswertung der Rezessionskurven verwendet. Folgende Kriterien waren für den Ausschluss der Messreihen entscheidend:

- Die Mengen von grösseren Wasserentnahmen waren mit verhältnismässigem Aufwand nicht bestimmbar.
- Die Mengen von grösseren Wasserentnahmen konnten aus zeitlichen Gründen nicht bestimmt werden.
- Unterirdischer Abfluss unter dem Messpegel konnte wegen fehlender Daten nicht bestimmt werden
- Unterirdischer Abfluss unter dem Messpegel konnte aus zeitlichen Gründen nicht bestimmt werden
- Unsicherheiten in der Bestimmung der unterirdischen Abflüsse
- Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen vermutet
- Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen bestätigt
- Berechnung von Rezessionskurven aufgrund von methodischen Gründen nicht möglich
- Grössere Seen im Einzugsgebiet
- Pegel auf Restwasserstrecke

Bei 10 dieser 32 nicht berücksichtigten Messreihen lagen vermutete oder bestätigte Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen vor (vgl. Tabelle A11 im Anhang). Die P/Q-Beziehung der Töss (Beicher) wurde basierend auf den vorhandenen Eichmessungen neu erstellt. Entsprechend wurden auch die Abflüsse neu berechnet.

Eine Übersicht über die berücksichtigten Messreihen und der Gründe dafür ist auf Tabelle A11 und A12 im Anhang ersichtlich.

6 Korrektur der Abflussmessreihen

6.1 Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten

Während der Studie hat sich gezeigt, dass Wasserentnahmen oder Wasserrückgaben für die Wasserversorgung von Siedlungsgebieten das natürliche Niedrigwasserverhalten erheblich verzerren. Diese Informationen werden nicht von einer offiziellen Datenbank bereitgestellt. Deshalb wurden für die meisten Einzugsgebiete die Wasserentnahmen und -rückgaben detailliert erfasst und die Abflussmessreihen entsprechend korrigiert. Die notwendigen Informationen wurden bei den Wasserversorgungs- und Abwasserbehörden der Gemeinden oder bei den Wasserversorgungsgenossenschaften durch Telefoninterviews und per E-Mail angefordert. Je nach Lage der Wasserquellen und der Kläranlagen gibt es unterschiedliche Korrekturszenarien, die berücksichtigt werden müssen (Abbildung 1).

In einem ersten Schritt wurden die Standorte der Wasserentnahme innerhalb eines Einzugsgebiets und die Standorte der Kläranlagen (ARA) ermittelt. Die Standorte der Kläranlagen können einem verfügbaren GIS-Datensatz (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2014) entnommen werden. Welche Kläranlage für die Reinigung des Abwassers der jeweiligen Gemeinde zuständig ist, wurde in den Telefoninterviews erfragt. Nachdem die Standorte des Wasserbezugs und der Kläranlagen bekannt waren, konnte der Aufwand zur Ermittlung der Auswirkungen der Wasserentnahmen in einigen Fällen reduziert werden. Befindet sich die Wasserentnahmestelle innerhalb eines Einzugsgebiets, die Kläranlage aber ausserhalb, so fehlt dem Bach die abgeleitete Wassermenge. Diese muss dementsprechend zu den gemessenen Abflusswerten addiert werden. Befindet sich die Kläranlage ebenfalls innerhalb des Einzugsgebiets, sind keine weiteren Korrekturen erforderlich, da das fehlende Wasser oberhalb des Pegels dem Fluss zugeleitet wird. Eine visuelle Prüfung von Niedrigwasser-Abflussganglinien mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten zeigt, dass die durch die Wasserentnahme und Wasserrückgabe verursachten Schwankungen in den Ganglinien in den Abflusstagesmittelwerten meist ausgemittelt werden. Das gilt nicht für grosse Siedlungsgebiete mit einer komplizierten Wasserversorgung. Bei Einzugsgebieten mit grossen Mengen an zugeführtem Wasser im Verhältnis zur Einzugsgebietsgrösse lassen sich die Abflussschwankungen aber nur über eine längere Periode ausmitteln.

Erfolgt die Wasserentnahme ausserhalb eines Einzugsgebietes, die Reinigung durch die ARA und die Rückgabe des gereinigten Wassers geschieht jedoch innerhalb des Gebiets, muss die Fremdwassermenge von den gemessenen Abflusswerten abgezogen werden. Wird das Wasser von ausserhalb bezogen, sind jedoch keine weiteren Korrekturen erforderlich, wenn die Kläranlage ausserhalb der Einzugsgebietsgrenze liegt; denn in diesem Fall wird das Fremdwasser von der Abfluss-Pegelstation nicht erfasst. In der Regel gibt es mehrere Gemeinden in einem Einzugsgebiet. Diese wurden alle befragt, falls sie sich nicht zu einem Wasserversorgungsverband zusammengeschlossen haben. Die verantwortliche Person jeder Gemeinde wurde

zudem befragt, ob andere Gemeinden ausserhalb des Einzugsgebiets Wasser aus Quellen oder Grundwasserleitern innerhalb des Einzugsgebiets nutzten. Diese Frage lohnt sich; denn in einer beträchtlichen Anzahl von Fällen war dies der Fall.

Zunächst wurde in der Regel ein Telefoninterview mit der grössten Gemeinde im Einzugsgebiet geführt. Manchmal reichte dies aus, um alle benötigten Informationen zu erhalten. In Einzugsgebieten mit vielen verschiedenen Gemeinden und unterschiedlichen Bezugsquellen, z.B. aus Kluftaquiferen, aus Schottergrundwasserleitern oder aus Seen war der erforderliche Aufwand gross.

In den meisten Fällen waren die Verantwortlichen der Wasserversorgungsbehörden gerne bereit, Auskunft zu geben. Nur in vier Gemeinden wurde die Auskunft über die genauen Werte verweigert, sei es wegen des hohen Aufwands für die Datenaufbereitung oder aus politischen Gründen.

Für 47 Einzugsgebiete im Mittelland wurden die Wasserentnahmen direkt mittels Telefoninterviews abgefragt. Für jede Bezugsquelle wurde die durchschnittliche Wasserentnahme während Trockenperioden abgefragt. Ein Teil der Gemeinden stellte Monats- oder Tagesmittelwerte zur Verfügung. Aus diesen Daten wurde ein Durchschnittswert für die Wasserentnahme während Niedrigwasserperioden berechnet. Andere Gemeinden gaben bei der telefonischen Befragung nur mündlich einen Mittelwert für Niedrigwasserperioden wie 2011, 2015, 2018 oder 2022 an. Aus diesen Werten wurde ein Mittelwert berechnet. In Fällen, in denen die Bezugsquellen ausserhalb des betrachteten Einzugsgebietes liegen, wurden von den zugeführten Wasservolumina 30% subtrahiert. Damit wurde berücksichtigt, dass ein gewisser Anteil für die Gartenbewässerung verwendet und nicht über die Kläranlage zurückgeführt wird. Dieser Schätzwert stammt von Kläranlagenmitarbeitenden. Er lässt sich für diese Studie nicht genauer quantifizieren. Aus Zeitgründen wurden für weitere 14 Einzugsgebiete die Wasserentnahmemengen auf der Grundlage der Einwohnerzahl geschätzt. Der durchschnittliche Verbrauch pro Einwohner wurde basierend auf dem Verbrauch der Gemeinde Huttwil berechnet. Auch in diesen Fällen wurden die Standorte der Kläranlagen berücksichtigt. Die Wasserentnahmen des Katzbaches im Kanton Aargau wurde anhand der Angaben zu den maximal bewilligten Entnahmemengen in der Gewässerschutzkarte berechnet (Abteilung Umwelt des Kantons Aargau, 2025). In 5 Einzugsgebieten war eine Ermittlung der Wasserentnahmen nicht notwendig, weil sowohl die Entnahmen wie auch die Kläranlage innerhalb dieser Einzugsgebiete liegen. Für 37 Einzugsgebiete wurden keine Wasserentnahme- oder Zugabemengen durch die Trinkwasserversorgung ermittelt. Bei diesen wurde angenommen, dass der Einfluss der Wasserentnahmen auf das Dauerkurvengefälle nur geringfügig ist, weil entweder die Q347 hoch oder die Siedlungsgebiete in den Einzugsgebieten sehr klein sind. 35 dieser 37 Einzugsgebiete liegen in den Alpen oder im Kanton Tessin.

Viele Gemeinden um den Zürichsee oder um den Bodensee lassen einen beträchtlichen Teil ihres Trinkwassers durch grosse Wasserpumpwerke aus den Seen fördern. Zu diesem Zweck wurde ein fein verzweigtes Leitungsnetz angelegt. In ähnlicher Weise werden auch grosse Schotter-Grundwasserkörper genutzt. Nach Angaben der zuständigen Behörden hätten einige Gemeinden ohne diese grossen Pumpanlagen in Trockenperioden wahrscheinlich nicht genügend Wasser. Je nach Ergiebigkeit der Quellen müssen die Gemeinden mehr oder weniger fremde Wasserquellen nutzen, was je nach Konstellation dazu führt, dass die Menge des entnommenen oder zugeführten Wassers innerhalb einer Trockenperiode variiert. Aufgrund des

grossen Aufwandes wurden diesbezüglich jedoch keine weiteren Auswertungen durchgeführt. Die zur Bewässerung von Landwirtschaftsland genutzte Wassermenge wurde nicht berücksichtigt. Detaillierte Angaben zu den Entnahmemengen und Abflusskorrekturen sind den Tabellen A3 und A4 im Anhang zu entnehmen.

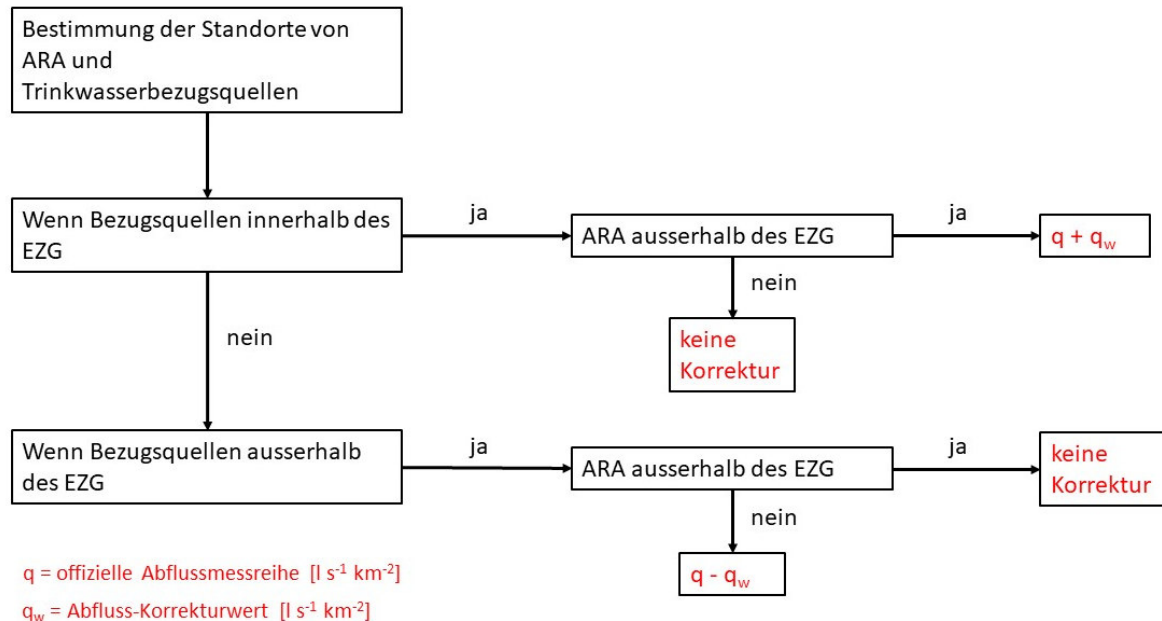


Abbildung 1: Vorgehen zur Korrektur von Abflussmessreihen eines Einzugsgebiets in Abhängigkeit der Standorte von Kläranlagen und Wasserentnahmen.

6.2 Unterirdische Abflüsse unter den Abflussmesspegelstationen

Befinden sich Pegelstationen an Flussabschnitten, an denen das Wasser flussaufwärts der Pegelstation in das Flussbett infiltriert, können erhebliche Wassermengen an der Pegelstation vorbeifliessen. Da diese Wassermengen von der Pegelstation nicht erfasst werden, kann dies zu einer verfälschten Beziehung zwischen dem aufgezeichneten Niedrigwasserverhalten und den massgeblichen Eigenschaften wie z.B. dem lithostratigraphischen Aufbau eines Einzugsgebietes führen. An Standorten in acht Einzugsgebieten wurden die unterirdischen Abflüsse geschätzt und zum gemessenen Abfluss addiert. Da diese Schätzungen mit erheblichem Aufwand verbunden sind, blieb für weitere Einzugsgebiete im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Zeit mehr. So wurden 13 Einzugsgebiete u.a. aufgrund dieser Unsicherheiten nicht berücksichtigt. Schweizweit kommen aber noch einige mehr dazu, die gar nicht in die engere Auswahl für Auswertungen kamen, weil eine Abschätzung des unterirdischen Abflusses ohne weitere Messungen unmöglich ist. Darunter sind viele kleinere Fließgewässer, die aus steilerem Gelände kommend auf grosse Schotterkörper fließen, bevor sie in grössere Flüsse münden, z.B. im Rheintal.

Um den unterirdischen Abfluss abzuschätzen, wurden zwei verschiedene Methoden verwendet:

- Abschätzung mit der Darcy-Formel
- Hydrologisches Bestimmungsverfahren

6.2.1 Abschätzung mit der Darcy-Formel

An fünf Pegelstationen wurde der unterirdische Abfluss mit dem Darcy-Gesetz bestimmt (Freeze und Cherry, 1979):

$$Q_{sub} = k_f \cdot J \cdot A \quad , \quad (1)$$

wobei k_f der hydraulischen Leitfähigkeit, J dem hydraulischen Gefälle und A der durchflossenen Querschnittsfläche entspricht. Die durchflossene Querschnittsfläche und die hydraulische Leitfähigkeit wurden anhand von Informationen aus geologischen Bohrungen abgeleitet, die in unmittelbarer Umgebung abgeteuft wurden. Falls zur Höhe des Grundwasserspiegels keine weiteren Informationen vorlagen, wurde zur Berechnung des durchflossenen Querschnitts die Höhe des Grundwasserspiegels bei Mittelwasser verwendet, der in den Grundwasserkarten der Kantone ersichtlich ist. Die Grundwasserabflusswerte bei Niedrigwasser unter dem Pegel der Ilfis in Langnau und unter dem Pegel des Luterbachs in Oberburg wurde von den Firmen Kellerhals & Haefeli AG (Gobat, 2020) bzw. Geotechnisches Institut Bern (Biaggi und Teuscher, 2018) zur Verfügung gestellt.

6.2.2 Hydrologisches Bestimmungsverfahren

Fehlen die erforderlichen geologischen Informationen, kann der unterirdische Abfluss auch anhand eines hydrologischen Verfahrens abgeschätzt werden. Dieses neue Verfahren wurde in 4 alpinen Einzugsgebieten (Naef und Margreth, 2017) und im Luterbach in Oberburg (Kt. Bern) getestet. Bei diesem Verfahren wird zunächst der Gesamtabfluss mit Hilfe von Abfluss-Einzelmessungen geschätzt. Der unterirdische Abfluss wird danach ermittelt, indem man vom Gesamtabfluss den Oberflächenabfluss subtrahiert. Der Oberflächenabfluss wird ebenfalls mit Abflusseinzelmessungen bestimmt. Die Vorgehensweise wird anhand des Luterbachs aufgezeigt. Bei der Pegelstation des Luterbachs wurde in der Trockenperiode 2018 zudem der unterirdische Abfluss anhand von hydrogeologischen Daten ermittelt (Biaggi und Teuscher, 2018), die aus geologischen Bohrungen stammten. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Wert, der anhand der hydrologischen Methode und dem, der anhand der hydrogeologischen Methode bestimmt wurde. Die hydrologische Methode zur Bestimmung des unterirdischen Abflusses wird anhand des Luterbachs (Oberburg), des Rüderchen (Schöftland) und anhand der Lutern (Nebikon) detailliert erklärt (siehe Anhang).

6.3 Resultate der Ermittlung der Wasserentnahmen und -zugaben und unterirdischen Abflüsse

Die in Kapitel 6.1 ermittelten Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten und die in Kapitel 6.2 abgeschätzten unterirdischen Abflüsse unter den Pegelstationen wurden zu den Niedrigwasserabflussmessreihen addiert. Die Korrekturen betrugen:

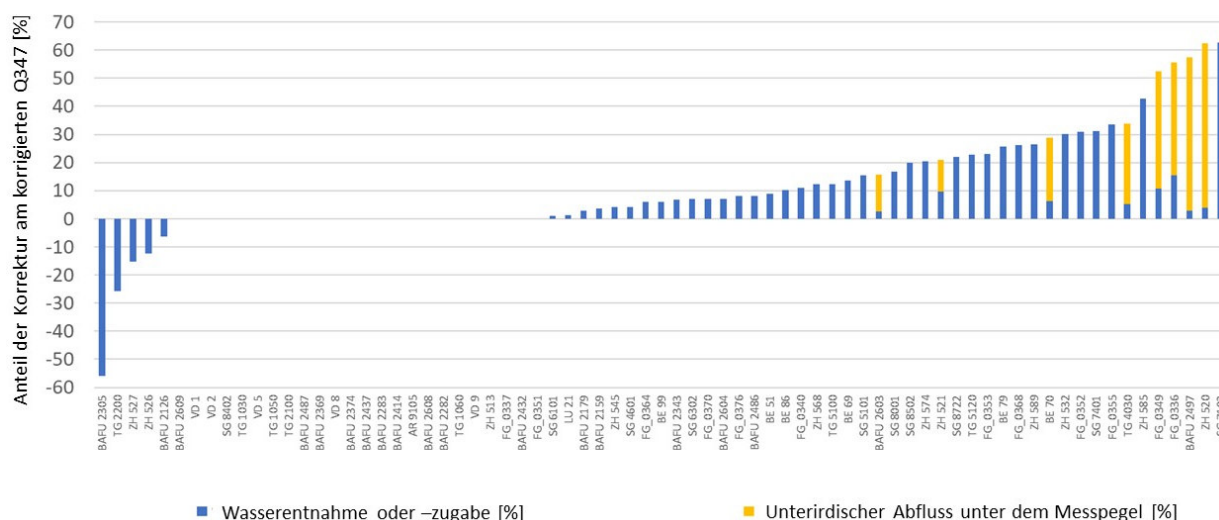
- in 16% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 30\%$,
- in 33% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 20\%$,
- in 45% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 10\%$ des korrigierten Q347.

847

848 In rund einem Drittel der Einzugsgebiete weichen die Niedrigwasserabflüsse um mehr als 20% vom
 849 «natürlichen» Q347 ab. Bei den grössten Korrekturen spielen die unterirdischen Abflüsse, die von den
 850 Messstationen nicht erfasst werden, eine wesentliche Rolle (Abbildung 2). Alle Angaben zu den korrigierten
 851 Niedrigwasserabflüssen sind den Tabellen A3 und A4 im Anhang zu entnehmen.

852

Korrekturrate der Niedrigwasser-Abflussmessreihen



853

854 *Abbildung 2: Korrekturraten der Niedrigwasser-Abflussmessreihen bezüglich der Wasserentnahmen und -Wasserzugaben aus*
 855 *fremden Einzugsgebieten und bezüglich der unterirdischen Abflüsse in % des korrigierten Q347.*

6.4 Beiträge aus Gletschern und Permafrostböden

857 Aus eigenen Auswertungen ist bekannt, dass in alpinen Einzugsgebieten Abflüsse unter Q290 vorwiegend in den
 858 Monaten November bis März auftreten. Der Niederschlag fällt in dieser Zeit meist in Form von Schnee, und die
 859 Speicher in Böden und im Grundwasser werden kaum mehr aufgefüllt (van Tiel et al., 2024). Der Winterabfluss
 860 in den alpinen Einzugsgebieten wird hauptsächlich aus Grundwasserspeichern gespeist, die dann langsam
 861 ausfliessen (Naef und Margreth, 2017; Schaepli et al., 2013). Die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden
 862 sind im Winter stark reduziert (Naef und Margreth, 2017). Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Gletschern
 863 und/oder Permafrostflächen haben markant geringere Q347-Abflüsse im Vergleich zum mittleren Q347 aller
 864 alpiner Einzugsgebiete. Eine plausible Erklärung dafür ist, dass die Gletscher und Permafrostböden im Winter
 865 nur sehr reduziert zum Abfluss beitragen. Das in den Sommermonaten aus der Gletscherschmelze stammende
 866 Wasser wird nur kurzfristig in den Gletschern gespeichert und in den Herbstmonaten entwässert. Im Winter
 867 sammelt sich nur eine sehr geringe Menge Wasser in den Gletschern an (Jansson et al., 2003).
 868 Die Permafrostschicht, die im Sommer bis in eine Tiefe von sechs Metern auftaut (Noetzli und Pellet, 2024),
 869 gefriert im Winter, so dass im Winter nur sehr geringe Abflussbeiträge aus Permafrostgebieten zu erwarten sind.

Um diese Effekte zu berücksichtigen, werden die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden abgeschätzt und von den Abflusswerten mit Abflüssen kleiner Q290 subtrahiert.

6.4.1 Schätzung der winterlichen Abflussbeiträge von Gletschern

Während die Oberflächenschmelze auf den Schweizer Gletschern im Winter minimal ist (Huss et al., 2013), findet eine begrenzte Eisschmelze an der Basis der Gletscher auch dann statt, wenn die Lufttemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt liegen, da die Alpengletscher im Allgemeinen gemässigt sind (Cuffey und Paterson, 2006). Diese relativ konstante Gletscherwasserproduktion während der Wintermonate ist die Folge eines geothermischen Wärmeflusses (Karlsson et al., 2021) und der Reibungs- und Dehnungserwärmung durch den Gletscherfluss (Joughin et al., 2003). Darüber hinaus könnten in einigen Gebieten auch langsam entwässernde subglaziale Aquifere existieren, die den proglazialen Winterabfluss verstärken (van Tiel et al., 2024).

Hier quantifizieren wir die basale Eisschmelzrate während des Winters auf der Grundlage eines einfachen Modellansatzes, der auf jeden Schweizer Gletscher angewandt wird, indem wir die Schmelze aufgrund des geothermischen Wärmeflusses und der basalen Reibung berechnen (Hösli, 2024). Gemäss der Geothermiekarte der Schweiz 1:500'000 (Medici und Rybach, 1995) variiert der geothermische Wärmefluss in den Schweizer Alpen zwischen 50 und 80mW m⁻². Wir haben einen Durchschnittswert von 70mW m⁻² gewählt, was zu einer Spezifischen Schmelzrate an der Gletscherbasis von 6.6 mm a⁻¹ führt. Durch Multiplikation mit der gesamten Gletscherfläche in jedem Einzugsgebiet rechnen wir das Ergebnis in eine Abflussrate in l s⁻¹ um.

Zusätzlich schätzen wir die Basalschmelze aufgrund von Reibungs- und Dehnungserwärmung, indem wir die Fliessgeschwindigkeit jedes Gletschers auf der Gitterskala durch Anwendung des Fliessgesetzes für Eis (Cuffey und Paterson, 2006) unter Verwendung eines durchschnittlichen Fliessgeschwindigkeitsfaktors (Zekollari et al., 2020) approximieren. Basierend auf der lokalen Eisdicke (Grab et al., 2021) und der aus einem DEM abgeleiteten Oberflächenneigung (Swisstopo, 2019b) wird die lokale Eisfliessgeschwindigkeit ermittelt. Die lokale Fliessgeschwindigkeit kann dann in eine vertikale Verschiebung der Eismasse pro Gitterzelle umgerechnet werden, die als jährlicher Verlust an potenzieller Energie betrachtet wird. Da es sich bei den Schweizer Gletschern um gemässigte Gletscher handelt, kann davon ausgegangen werden, dass diese Energiefreisetzung zum Schmelzen beiträgt, entweder durch Reibung an der Gletscherbasis oder durch interne Erwärmung. Wir nehmen an, dass die Fliessgeschwindigkeit im Laufe eines Jahres konstant bleibt. Die Beiträge aller Gitterzellen werden über die gesamte Fläche eines jeden Gletschers gemittelt und wie oben in eine Abflussrate (l s⁻¹) umgerechnet. Die Summe der basalen Eisschmelze durch geothermischen Wärmestrom und Reibungswärme wird als konstanter Gletscherabflussbeitrag im Winter betrachtet (Hösli, 2024). Der Gletscherabfluss wird dann vom Messwert des Gesamtabflusses des Einzugsgebiets subtrahiert und der resultierende Abfluss durch die Einzugsgebietsfläche ohne die Gletscherflächen dividiert. So ergibt sich der Beitrag aus dem gletscherfreien Anteil des Einzugsgebiets.

6.4.2 Schätzung der Niedrigwasserbeiträge aus Permafrostböden im Winter

Über die Abflüsse aus Permafrostböden im Winter ist bisher nur wenig bekannt. Mögliche Abflussmessstandorte an Fließgewässern, die Permafrost-reiche Flächen drainieren, sind wegen des Schnees im Winter nur schwierig oder gar nicht zugänglich. Die Beiträge von eisfreien Permafrostböden wurden deshalb mit Hilfe der Permafrost- und Bodeneiskarte des Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Kenner et al., 2019) abgeschätzt. Diese unterscheidet 6 Klassen von Permafrostböden (Tabelle 1). Generell werden keine oder nur sehr geringe Abflussbeiträge aus Permafrostböden erwartet, da in diesen die Auftauschicht in den Wintermonaten zufriert. Aus Gebieten, in denen die Untergrundtemperatur mit 0°C oder kälter definiert ist, werden keine Beiträge zum Winterabfluss angenommen. Es gibt Übergangsbereiche, in denen die Bodentemperatur zwischen 0 und +1 °C beträgt. Innerhalb dieser Gebiete sind vereinzelt Permafrostböden möglich (Kenner et al., 2019). Aus diesen wird im Winter ein Abfluss von 0.5 l s⁻¹ km⁻² geschätzt. Die winterlichen Beiträge aus eisreichen Permafrostgebieten wie Blockgletscher oder eisreiche Schutthalden sind höher. Messungen zeigen, dass aus intakten Blockgletschern auch in den Wintermonaten Wasser ausfließt (Wagner et al., 2021). Die Werte von Abflussmessungen verschiedener hochgelegener Einzugsgebiete mit grossen Flächenanteilen an Blockgletscher, die in Österreich im Winter erhoben wurden, liegen zwischen 3 und 6 l s⁻¹ km⁻². Werden die Abflüsse der permafrostfreien Restflächen dieser Gebiete herausgerechnet, resultieren Abflussbeiträge von etwa 1 bis 3 l s⁻¹ km⁻². Darauf basierend wurde ein Mittelwert 2 l s⁻¹ km⁻² als Beitrag von eisfreien Permafrostflächen festgelegt. Mit demselben Vorgehen wie bei den Gletschern werden von den Abflusswerten der alpinen Einzugsgebiete mit einem Abfluss von weniger als Q290 die Permafrostabflussbeiträge subtrahiert. Der resultierende Abflusswert wird durch die permafrostfreie Fläche des Einzugsgebiets dividiert, um den Beitrag der permafrostfreien Fläche am Abfluss des entsprechenden Einzugsgebiets zu ermitteln.

Tabelle 1: In der Permafrost- und Grundeiskarte der Schweiz differenzierte Permafrostklassen und die abgeschätzten Beiträge zu Winterabflüssen (in l s⁻¹ km⁻²).

Permafrostklassen	Beiträge zu Winterabflüssen [l s ⁻¹ km ⁻²]
Bodentemperatur < -3°C	0
Bodentemperatur -2°C bis -3°C	0
Bodentemperatur -1°C bis -2°C	0
Bodentemperatur 0°C bis -1°C	0
Bodentemperatur 1°C bis 0°C	0.5
Eisreicher Permafrost	2

7 Aufbereitung von weiteren Einzugsgebietsparametern

7.1 Bestimmung der Volumina von Schottergrundwasserkörpern

7.1.1 Schottergrundwasserkörper im Allgemeinen

Die Volumina der Schottergrundwasserkörper wurden anhand der Angaben zu den Grundwassermächtigkeiten bei Mittelwasser ermittelt, welche den kantonalen Grundwasserkarten entnommen werden können (AFU AG, 2023; AFU AR, 2024; AFU TG, n.d.; AUE SZ, 2023; AWA BE, 2024; AWE SG, 2024; AWEL ZH, 2022; uwe LU, 2023). Dafür wurde für jedes Untersuchungsgebiet das Shapefile der Grundwasserkarte ausgeschnitten und die Flächen der resultierenden Polygone neu berechnet. Das Volumen für jedes Polygon wurde ermittelt, indem die mittlere Mächtigkeit des angegebenen Mächtigkeitsbereiches mit der Fläche multipliziert wurde. Das resultierende Volumen ergab sich aus der Summe aller Volumina für jedes Einzugsgebiet. Es wurde durch die Einzugsgebietsfläche geteilt. Die resultierenden Mächtigkeiten werden in Tausend m³ pro km² angegeben. In einigen Kantonen sind noch keine Grundwasserkarten verfügbar, z.B. GR, TI, VS, UR, NE, VD, FR. Dort kann das Schottergrundwasservolumen nicht berechnet werden. Jedoch wurden in den grossen Schottergrundwasserkörpern, welche sich in den besiedelten Gebieten befinden, meistens zahlreiche geologische Bohrungen durchgeführt. Die Grundwasserverhältnisse sind deshalb häufig gut bekannt. In den Kantonen VD und FR ist die Erstellung einer Grundwasserkarte in Bearbeitung.

7.1.2 Schottergrundwasserkörper mit zusätzlicher Speisung durch Fliessgewässer

Viele der kartierten Schottergrundwasserkörper werden durch zusätzliches Wasser gespeist, das aus dem Bachbett in den Ablagerungen versickert. Um diese Volumina zu bestimmen, wurden aus den in Kapitel 7.1.1 abgegrenzten Grundwasserpolygonen nur diejenigen ausgewählt, über die ein Bach fliesst. Der Bach musste mindestens über etwa die Hälfte des Durchmessers des Polygons fliessen. Der Entscheid, welche Bereiche eines Grundwasserpolygons als bachgespeist klassifiziert wurden, geschah individuell und manuell für jedes Polygon. Die Grundwasservolumina werden im Folgenden als potenziell bachgespeiste Grundwasservolumina bezeichnet [1000 m³ pro km²].

In den Grundwasserkörpern, die zusätzlich durch versickerndes Bachwasser gespeist werden, ist grundsätzlich eine andere Sättigungs- und Entwässerungsdynamik zu erwarten. Damit eine Speisung durch Bachwasser erfolgen kann, müssen zwei weitere Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Grundwasserspiegel muss unter der Bachsohle liegen,

2. Die Sohle des Bachbetts muss durchlässig sein.

Diese Informationen sind nicht vorhanden, weshalb die ermittelten bachgespeisten Grundwasservolumina mit Vorsicht zu verwenden sind.

Die Angaben zu den Volumina der Grundwasserspeicher sind der Tabelle A2 im Anhang zu entnehmen.

7.2 Anteile von undurchlässigen, mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen

Die Quartärablagerungen können die Entwässerung der Einzugsgebiete während Niedrigwasserperioden beeinflussen. Abhängig von ihrer Durchlässigkeit können sie entweder als Speichermedium oder als Barriere für die Infiltration wirken. In der unter Kapitel 8.3 beschriebenen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Dauerkurvengefälle und verschiedenen Gebietseigenschaften wurden auch die Quartärablagerungen in drei Durchlässigkeitsklassen berücksichtigt: undurchlässig, mässig durchlässig und hoch durchlässig. In Absprache mit Prof. Dr. F. Schlunegger des geologischen Instituts der Universität Bern wurden alle untersuchten Quartärablagerungen in diese drei Durchlässigkeitsklassen eingeteilt. Bei der Klassifikation handelt es sich um ein mittleres Verhalten. In Moränen oder auch in Schotterablagerungen kann die Durchlässigkeit kleinräumig stark variieren.

Tabelle 2: Einteilung der Quartärablagerung des Geocovers in die Durchlässigkeitsklassen undurchlässig, gehemmt durchlässig und hoch durchlässig.

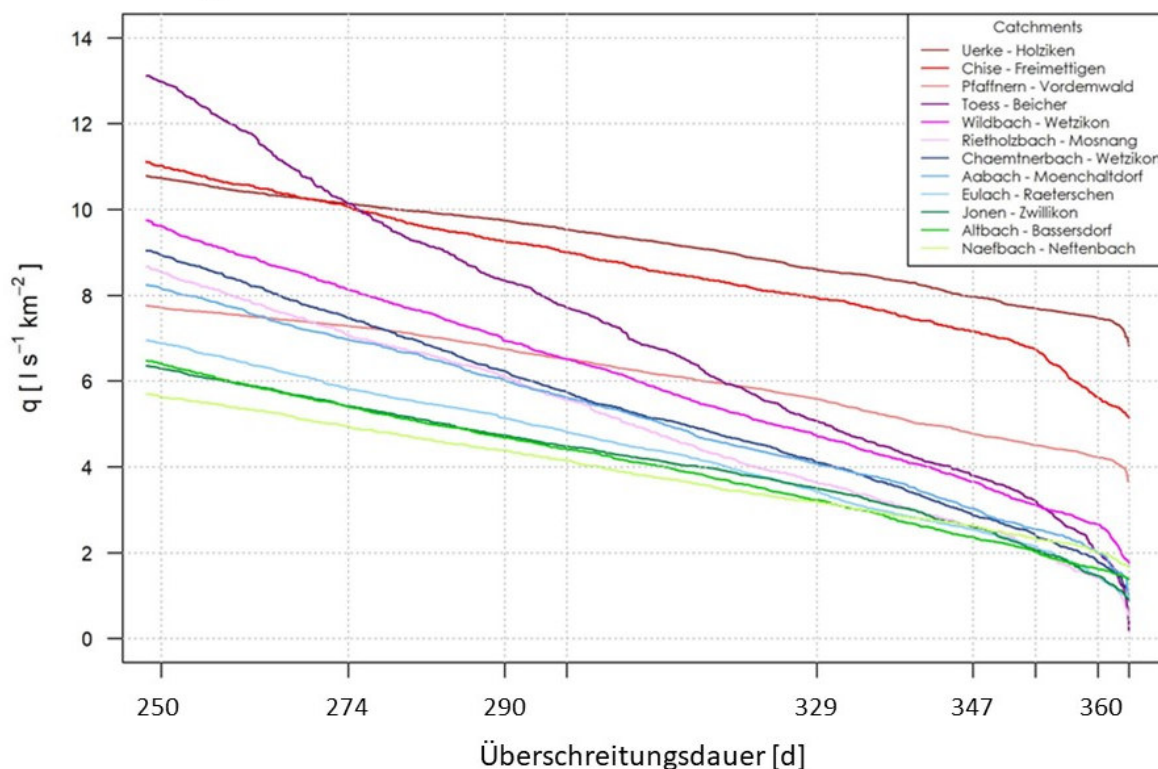
LITHO_D	Durchlässigkeitsklasse
Alluvion, undifferenziert	hoch durchlässig
anthropogene Elemente, undifferenziert	undurchlässig
Auffüllung	undurchlässig
Aufschüttung, Damm	undurchlässig
Bachschutt	hoch durchlässig
Bergsturzablagerung	hoch durchlässig
Blockgletscher	undurchlässig
Blockschutt	hoch durchlässig
detritische Verlandungsbildung	undurchlässig
Felssturzablagerung	hoch durchlässig
fluviatiler Schotter	hoch durchlässig
gemischter Schutt	hoch durchlässig
glazifluviatiler Schotter	hoch durchlässig
glazifluviatiles Sediment, undifferenziert	gehemmt durchlässig
glazigenes Sediment, undifferenziert	gehemmt durchlässig
glazilakustrisches Deltasediment	undurchlässig
glazilakustrisches Sediment, undifferenziert	undurchlässig
gravitative Sedimente und Verwitterungsbildungen, undifferenziert	hoch durchlässig
Hangschutt	hoch durchlässig
künstliche Ablagerung, undifferenziert	undurchlässig
lakustrisches Deltasediment	gehemmt durchlässig
lakustrisches Sediment, undifferenziert	undurchlässig
Lignit (palustrisches Sediment)	undurchlässig
Lockergestein	hoch durchlässig
Löss, Lösslehm	gehemmt durchlässig
Moräne (Till), undifferenziert	gehemmt durchlässig
palustrisches Sediment, undifferenziert	undurchlässig
Quelltuff (Kalksinter, Lockergestein)	gehemmt durchlässig
randglazialer Schotter	hoch durchlässig
Rückzugsschotter	hoch durchlässig
Rutschmasse	undurchlässig
Seebodensediment	undurchlässig
Seekreide	undurchlässig
Sturzablagerung, undifferenziert	hoch durchlässig
Sumpf	undurchlässig
Torfmoor, Torf	undurchlässig
Überschwemmungssediment	undurchlässig
Vorstossschotter	hoch durchlässig
zerrüttete Sackungsmasse	gehemmt durchlässig

8 Untersuchung der Dauer- und Rezessionskurven bei Niedrigwasser

8.1 Einleitung

Für Einzugsgebiete im Schweizer Mittelland konnte ein starker Einfluss der litho-stratigraphischen Zusammensetzung der Gebiete auf das Niedrigwasserverhalten beobachtet werden (Naef und Margreth, 2017). Gemäss dieser Studie variiert das Gefälle der Dauerkurven zwischen Q250 und Q365 in Einzugsgebieten der Oberen Süsswassermolasse (OSM) stark (Abbildung 3 und Tabelle 3, Abbildung und Tabelle ähnlich abgebildet wie in (Naef und Margreth, 2017)). Mit abnehmenden Abflüssen nähern sich die Dauerkurven einander an. Bei Q347 sind die Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten im Vergleich zu Q250 gering. Die steileren OSM-Dauerkurven stehen im Zusammenhang mit einem hohen durchschnittlichen topographischen Gefälle, einem geringeren Anteil an quartären Ablagerungen wie Moränen oder Schotter (Tabelle 3) und mit Böden geringerer Mächtigkeit. Dementsprechend ist die Abflussreaktion auf Niederschläge rascher als in sanft geneigten und von Moränen dominierten OSM-Einzugsgebieten, was sich auf das Gefälle der Dauerkurven auswirkt (Naef und Margreth, 2017). Die Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag könnten diesen Effekt noch verstärken. Wenn der Einfluss des Niederschlags abnimmt, nähern sich die Dauerkurven einander an. Der Abfluss wird zunehmend aus tieferen Langzeitspeichern gespeist, je niedriger die Abflüsse sind. Die mit einer steileren Topographie ausgestatteten OSM-Einzugsgebiete weisen generell höhere Anteile an Konglomerat-Mergel-Sedimenten auf, diejenigen mit einer flacheren Topographie werden stärker von Sandstein-Mergel-Sedimenten dominiert. Ein weiterer Grund für die steileren Dauerkurven in den Konglomerat-dominierten Einzugsgebieten könnte darin liegen, dass Konglomerate aufgrund der grösseren Anzahl an Klüften und Poren rascher entwässern als Wechsellagerungen zwischen Sandsteinen und Mergeln (Naef und Margreth, 2017). Die Einzugsgebiete in der Oberen Meeresmolasse (OMM) verhalten sich anders (Naef und Margreth, 2017). Die Dauerkurven haben ein flacheres Gefälle als die von OSM-Einzugsgebieten und verlaufen fast parallel. Die Q347-Werte in OMM-Einzugsgebieten des Mittellandes sind zwei- bis viermal so hoch wie die in OSM-Einzugsgebieten. Dies wurde durch zahlreiche einzelne Abflussmessungen während Niedrigwasserperioden zwischen 2015 und 2016 bestätigt (Naef und Margreth, 2017).

Dauerkurven für 12 Mittelland-Einzugsgebiete mit unterschiedlichem Niedrigwasserverhalten



1003

1004 *Abbildung 3: Dauerkurven zwischen q_{250} and q_{365} von 12 Mittelland-Einzugsgebieten mit Unterschieden im litho-*
1005 *stratigraphischen Aufbau, in der mittleren Geländeneigung und in den durchschnittlichen Jahresniederschlägen.*

1006

1007 *Tabelle 3: Einzugsgebietseigenschaften der in Abbildung 1 dargestellten Dauerkurven.*

Name	Standort Pegel	Fläche [km ²]	Flächenanteile Stratigraphie Festgestein [%]			Flächenanteile Quartärablage- rungen [%]	Durchschnitt- licher Jahresnieder- schlag [mm]	Durchschnittliche Geländeneigung [%]
			OMM	OSM	USM			
Uerke	Holziken	25.0	93	5	2	97.9	1118	23
Chise	Freimettigen	45.1	89	11	0	60.4	1271	22
Pfaffnern	Vorderwald	39.1	45	0	55	97.4	1138	12
Toess	Beicher	11.2	0	100	0	5.1	1817	61
Wildbach	Wetzikon	19.4	0	100	0	57	1385	12
Rietholzbach	Mosnang Rietholz	3.2	0	100	0	20.8	1478	25
Chämtnerbach	Wetzikon	13.3	0	100	0	67	1522	20
Aabach	Moenchaltdorf	44.2	0	100	0	41.1	1259	8
Eulach	Raeterschen	31.2	0	100	0	79	1179	16
Jonen	Zwillikon	37.5	0	100	0	95.5	1226	13
Altbach	Bassersdorf	11.8	0	100	0	98.1	1154.5	8
Näfbach	Neftenbach	36.0	0	100	0	97.5	997.9	7

1008

Um die Prozesse und die Speicher, die die Dauerkurven und Rezessionskurven zwischen Q290 und Q347 kontrollieren, besser zu verstehen, wurde das Verhalten von Dauerkurven- und Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich für zahlreiche weitere Einzugsgebiete im Mittelland, in den Voralpen und in den Alpen untersucht (Kapitel 8.2 - 8.9.4). Ein Ziel dieser Untersuchung war auch, ein solides Verständnis für die Umrechnung von Niedrigwasserdauerkurven von gemessenen in ungemessene Gebiete zu erlangen.

8.2 Untersuchung der Gefälle von Dauerkurven

Um das Verhalten der Dauerkurven im Niedrigwasserbereich zu untersuchen, wurde von 68 ausgewählten Einzugsgebieten im Mittelland und in den Nördlichen Voralpen, 27 Einzugsgebieten in den Alpen und 7 Einzugsgebieten in den Voralpen des Tessins das Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 ermittelt und dem Q347 gegenübergestellt. Das Perzentil von Q290 wurde gewählt, weil dieser Wert in wissenschaftlichen Untersuchungen häufig als oberer Grenzwert des Niedrigwasserregimes verwendet wird (Smakhtin, 2001). Da der Verlauf der Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 auch durch eine Gerade angenähert werden kann, stellt das Gefälle zwischen Q290 und Q347 ein nützlicher Proxy für diese Untersuchungen dar. Die entsprechenden Gefälle (Q_{290}/Q_{347}) der 102 untersuchten Messreihen nehmen tendenziell mit zunehmendem Q347 ab (Abbildung 4). Die höchsten Gefälle der Dauerkurven weisen die Gebiete mit den niedrigsten Q347 auf. Sie liegen alle im Mittelland. Die Abbildung zeigt, dass das Gefälle der Dauerkurven mit zunehmender Kapazität der Speicher abnehmen und dass die Einzugsgebiete im Niedrigwasserbereich langsamer entwässern, je grösser die Speicherkapazität ist. Bei Q347 von über $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ bewegen sich die Q_{290}/Q_{347} -Werte im Mittelland in einem schmalen Bereich von ± 0.1 . Die Werte in den Voralpen und Alpen liegen, bei ähnlichem Q347, höher als im Mittelland. Q347 von über $9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ weisen mit Ausnahme eines Voralpengebietes nur Alpengebiete auf. In diesem Bereich variieren die Q_{290}/Q_{347} mit maximal ± 0.15 nur geringfügig.

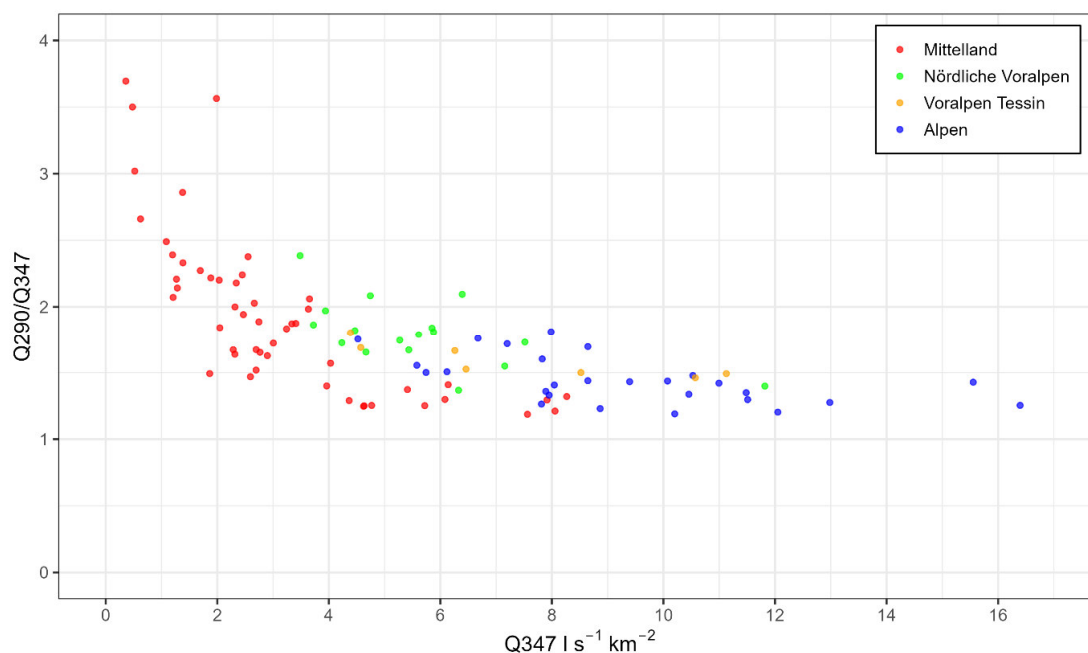


Abbildung 4: Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 für Einzugsgebiete im Mittelland, in den Voralpen und in den Alpen.

8.3 Gruppierung nach geologischen, klimatologischen und topographischen Kriterien

Die Q290/Q347-Werte wurden nach litho-stratigraphischen Kriterien, nach der mittleren Hangneigung, nach dem mittleren Jahresniederschlag und nach der Durchlässigkeit der quartären Ablagerungen gruppiert. Das Verhalten von Q290/Q347 der Einzugsgebiete innerhalb einer Gruppe wurde mit einer Potenzfunktion der Form

$$\frac{Q_{290}}{Q_{347}} = a \cdot Q_{347}^b \quad (2)$$

angenähert. Die Parameter a und b wurden anhand der Q290/Q347-Werte der zugehörigen Gruppe ermittelt.

8.3.1 Obere Süsswassermolasse (OSM) und Untere Süsswassermolasse (USM) im Mittelland

Das Gefälle der Dauerkurven von Einzugsgebieten im Mittelland, welche aus Gesteinen der Oberen Süsswassermolasse (OSM) und der Unteren Süsswassermolasse (USM) bestehen, ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Q290/Q347-Werte lassen sich litho-stratigraphisch in fünf verschiedene Gruppen unterteilen (Abbildung 5). Die Potenzgesetze, die das Verhalten von Q290/Q347 dieser fünf Gruppen beschreiben, fallen relativ steil ab, verlaufen nahezu parallel und verschieben sich mit zunehmendem Q347 auf der x-Achse.

Die niedrigsten Q347-Werte weisen die Einzugsgebiete am nordöstlichen Rand des Schweizer Mittellandes auf (Gruppe OSM 4, $0.3\text{--}1.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, Abbildung 16). Gruppe OSM 4 ist durch Einzugsgebiete mit flacher Topographie ($J = 4\text{--}6 \%$) und einer mächtigen, nahezu durchgehenden Moränenschicht über der Molasse gekennzeichnet. Die Molasse besteht aus Wechsellagerungen von Mergeln und Sandsteinen. Da diese Einzugsgebiete eher weit entfernt vom Alpenrand liegen, dominieren in der Molasse eher die feineren Bestandteile (Gander, P., 2004). Die mittleren jährlichen Niederschlagsmengen liegen mit 959 bis 1053 mm im unteren Bereich. Von der Gruppe OSM 4 über die Gruppen OSM 3, OSM 2 bis OSM 1 verschieben sich die Potenzfunktionen allmählich von einem sehr niedrigen ($0.3\text{--}1.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) zu einem niedrigen bis mittleren spezifischen Q347-Wert ($2.1\text{--}6.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ für OSM 1). Der Aufbau der Molasse ändert sich von Wechsellagerungen aus Sandstein und Mergeln mit überwiegend feinen Bestandteilen über Wechsellagerungen aus Sandstein und Mergel mit größerem Sandstein (OSM 3) zu Wechsellagerungen aus Sandstein, Konglomerat und Mergel (OSM 2) und schliesslich zu Wechsellagerungen aus Konglomerat und Mergel mit einem geringeren Anteil an Sandsteinschichten (OSM 1). Der Anteil mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen nimmt hingegen ab (Abbildung 15). Die mittlere Hangneigung und die mittleren Niederschlagsmengen steigen (Abbildung 15). Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppe OSM 1 weisen niedrige bis mittlere Q347-Werte ($2.0\text{ und }6.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) auf. Im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten im Schweizer Mittelland weisen sie steile Hangneigungen ($J = 20\text{ bis }61 \%$) auf und werden von Wechsellagerungen aus Konglomerat und Mergel dominiert, wobei Konglomerate überwiegen. Der Anteil mässig durchlässiger Ablagerungen ist generell gering und variiert zwischen 0 und 48 %.

Der mittlere Jahresniederschlag liegt zwischen 1443 und 1817 mm und ist damit mehr als 50 % höher als in der Gruppe OSM 4.

Die Zuordnung zu den litho-stratigraphischen Gruppen basiert auf Informationen aus der geotechnischen Karte (Swisstopo, 1967) und dem Geocover-Datensatz der Swisstopo (Swisstopo, 2022). Voraussetzung für die Klassifikation der Einzugsgebiete zu einer der OSM-Gruppen OSM 1 bis OSM 4 war, dass mindestens 90% des Einzugsgebiets durch OSM aufgebaut wird. Die lithologischen Daten sind im Attribut «Lithologie» des Geocovers teilweise stark generalisiert. Auch waren die Kartiermethoden der verschiedenen Kartierenden nicht konsistent. Um detaillierte Informationen zu erhalten, in welche OSM-Gruppe ein OSM-Einzugsgebiet gehört, empfehlen wir, zusätzlich die Erläuterungen der geologischen Kartenblätter zu konsultieren.

Die Punkte in Abbildung 5 mit einem schwarzen Rand wurden zur Berechnung der Potenzfunktion berücksichtigt. Die anderen wurden wegen möglicher Unsicherheiten bezüglich Wasserentnahmen, unterirdischen Abflüssen oder Abflussmessungen nicht verwendet (Tabelle A3 und A4 im Anhang).

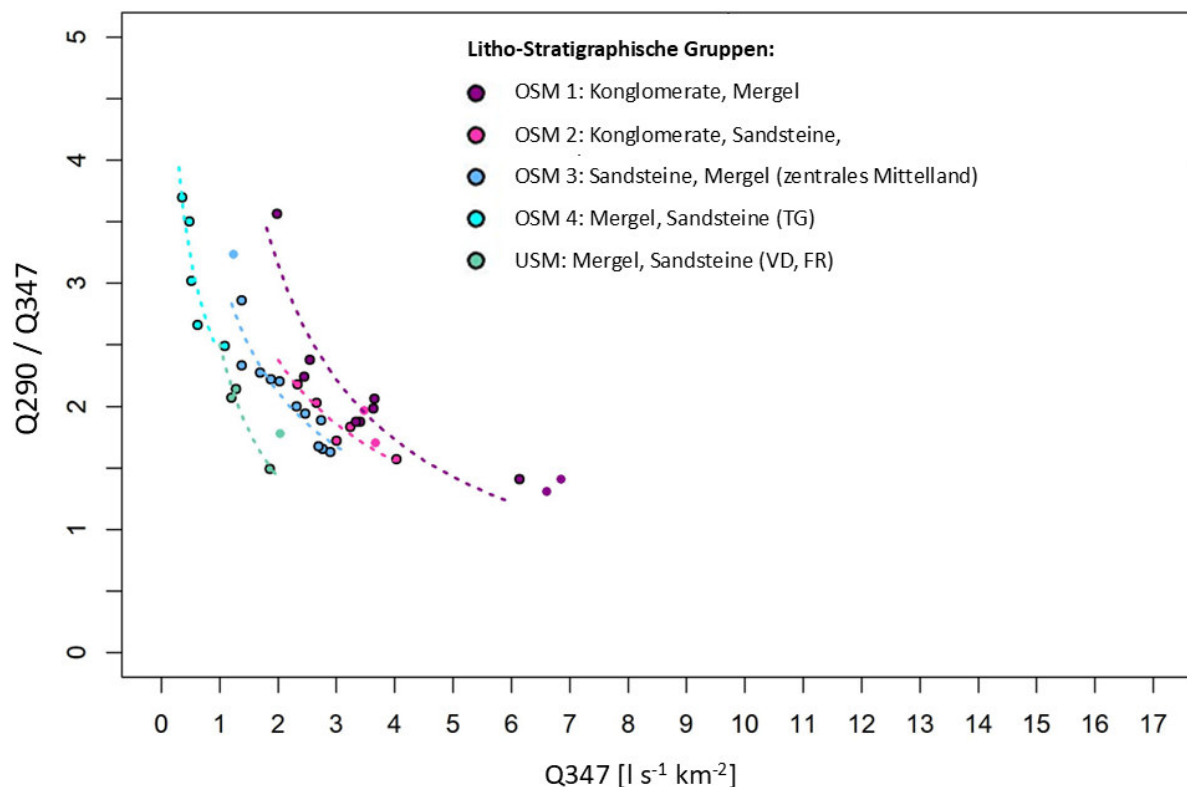


Abbildung 5: Gefälle der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) und in der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die Punkte, die Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem lithologischem Aufbau eingefärbt. Die Gefälle der Dauerkurven für Gebiete mit ähnlichem lithologischem Aufbau lassen sich durch eine Potenzfunktion annähern. Die Punkte ohne schwarze Umrandung wurden aufgrund von möglichen Unsicherheiten bezüglich Wasserentnahmen, Versickerungen oder in den Abflussmessungen nicht berücksichtigt. Die vorliegende Darstellung wurde basierend auf Zeitreihen 2011 bis 2022 erstellt

Tabelle 4: Angaben zur Streuung des mittleren Jahresniederschlages, des Anteils an undurchlässigem und gehemmt durchlässigem Quartär und der mittleren Geländeneigung für die Dauerkurvengruppen der OSM und der USM.

Dauerkurven- gruppe	Litho- Stratigraphie Festgestein	Mittlerer Jahresnieder- schlag [mm]	Anteil undurchlässiges und mässig durchlässiges Quartär [%]	Mittlere Geländeneigung [%]	Spezifisches Q347 [l s^{-1} km^{-2}]
OSM 1	OSM: Konglomerat (-Sandstein) - Mergel	1443 – 1817	0 – 55	20 – 61	2.1 – 6.9
OSM 2	OSM: Konglomerat - Sandstein - Mergel	1179 – 1440	37 – 85	8 – 16	2.0 – 4.0
OSM 3	OSM: Sandstein – Mergel	998 – 1214	55 – 91	7 – 16	1.1 – 2.9
OSM 4	OSM: Mergel Sandstein	959 – 1053	83 – 100	4 – 6	0.3 – 1.1
USM	USM: Mergel – Sandstein	1005 - 1308	46 - 98	7 - 11	1.2 – 2.0

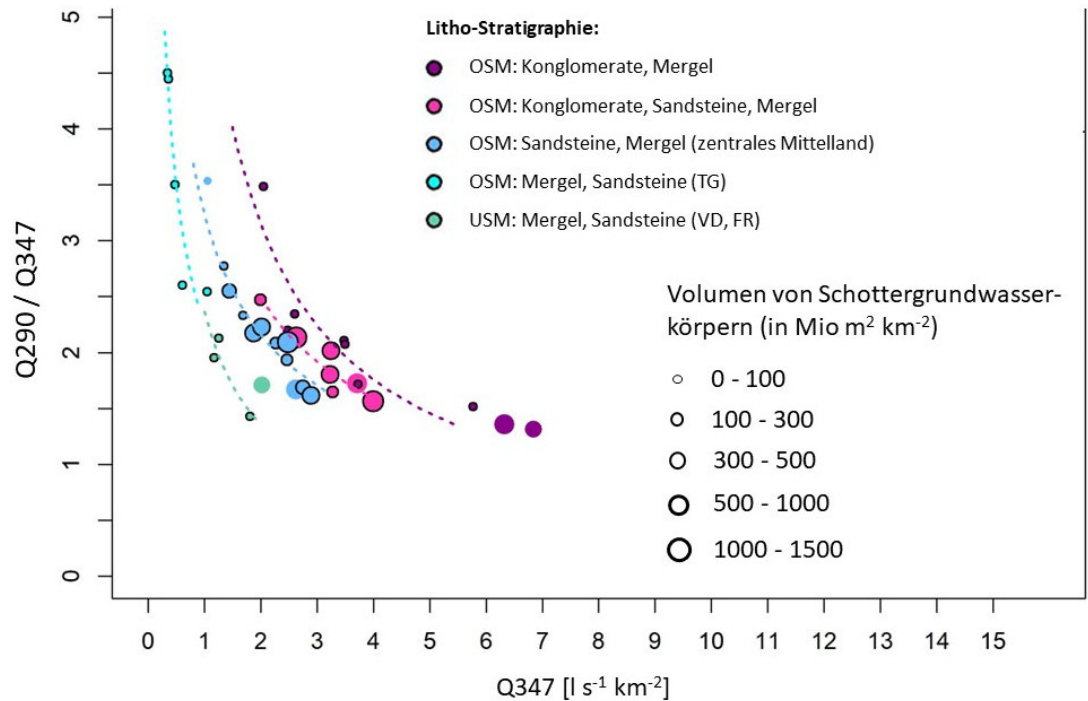


Abbildung 6: Neigungen der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) und in der Unteren Süsswassermolasse (USM), basierend auf Zeitreihen der Jahre 2011 bis 2020. Die unterschiedlich gross dargestellten Punkte repräsentieren Einzugsgebiete mit Schotteraquiferen, welche unterschiedliche Volumina aufweisen. In den meisten Fällen erhöhen grosse Schottervolumina die Q_{347} , weshalb die entsprechenden Punkte eher im unteren Bereich der entsprechenden Kurven liegen. Die vorliegende Darstellung wurde basierend auf Zeitreihen 2011 bis 2020 erstellt.

8.3.2 Obere Meeresmolasse (OMM) im Mittelland

Im Gegensatz zu den Einzugsgebieten in der Süsswassermolasse sinken die Gefälle der Dauerkurven der von OMM-Sandsteinen dominierten Einzugsgebieten mit steigendem Q347 nur geringfügig. Die Dauerkurvengefälle überschreiten selbst bei niedrigem Q347 nicht den Wert von 1.5 (rote Punkte und rote Trendlinie in Abbildung 7). Verglichen mit Süsswassermolasse weisen OMM-dominierte Einzugsgebiete deutlich geringere Feinkornanteile auf, was im Zentralen Mittelland stärker ausgeprägt ist als im Westlichen Mittelland (Garefalakis und Schlunegger, 2019). Diese Unterschiede lassen sich durch die unterschiedlichen Ablagerungsmilieus der marinen Sedimente erklären (Garefalakis und Schlunegger, 2019). Einzugsgebiete mit gemischter lithostratigraphischer Zusammensetzung, die sowohl durch USM als auch durch OMM aufgebaut sind, zeigen mit sinkendem Q347 hingegen einen stärkeren Anstieg der Dauerkurvengefälle (orange und dunkelgelbe Punkte/Linien) als Einzugsgebiete, die nur aus OMM aufgebaut sind. Der Anstieg des Gefälles ist bei Einzugsgebieten mit höherem USM-Anteil (dunkelgelbe Punkte/Linien) deutlicher ausgeprägt als bei solchen mit niedrigeren USM-Anteilen (orange Punkte/Linien). Die Dauerkurvengefälle von drei Einzugsgebieten, die aus OSM, USM und OMM bestehen und zudem einen beträchtlichen Flächenanteil an Deckschotter aufweisen, zeigen ein ähnliches Q290/Q347-Muster wie Einzugsgebiete, die ausschliesslich aus OMM bestehen, obwohl die OMM-Anteile unter 20 % liegen. Das Verhalten dieser Einzugsgebiete kann den Deckenschottern zugeschrieben werden. Diese weisen eine hohe Kapazität an Speichern auf, die nur langsam entwässern. Das Muster der Q290/Q347 von drei Einzugsgebieten, die aus OMM und OSM mit einem OMM-Anteil von über 50 % bestehen, ähnelt dem von Einzugsgebieten, die ausschliesslich aus OMM bestehen.

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in den aus OMM aufgebauten Einzugsgebieten variiert in etwa im gleichen Bereich wie in den Einzugsgebieten der Gruppen USM und OSM 2 (1000–1271 mm). Die Hangneigung der Einzugsgebiete liegt zwischen 7 und 30 %, was der Streuung der Hangneigung innerhalb der Gruppen USM, OSM2, OSM3 und Teilen von OSM1 entspricht (Abbildung 15). Der Anteil mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen ist in den Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppen USM, OSM3, OSM2, USM&OSM und OSM&USM höher als in OMM-dominierten Einzugsgebieten oder Einzugsgebieten mit einem höheren Flächenanteil an Deckschotter (Abbildung 15).

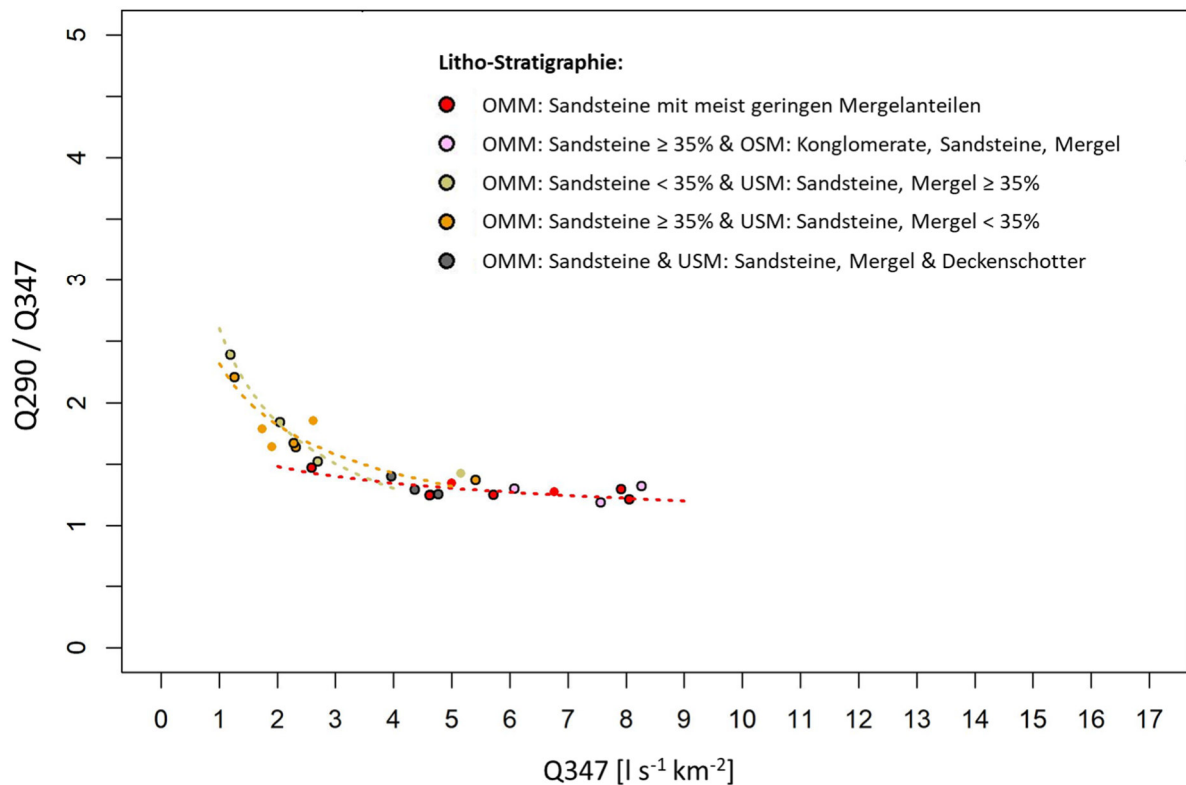
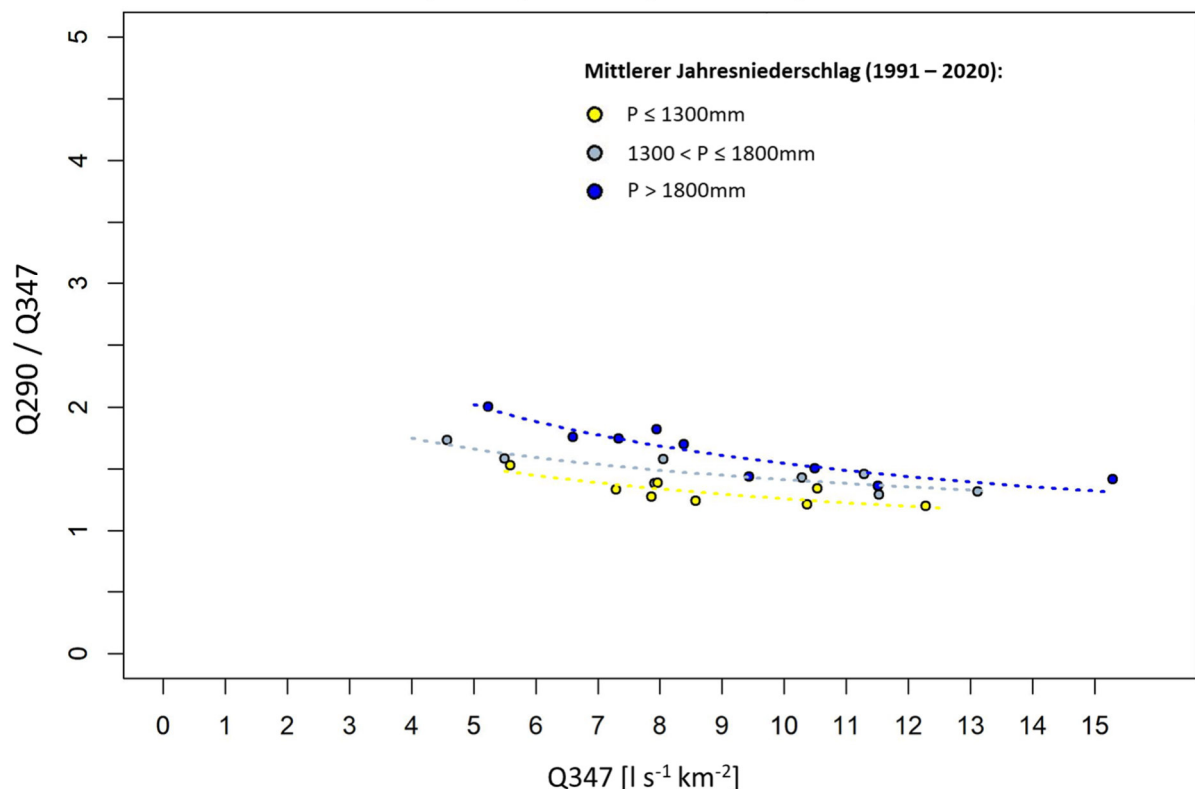


Abbildung 7: Gefälle der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in der Oberen Meeresmolasse (OMM) und für gemischt aufgebaute Einzugsgebiete mit OMM und anderen litho-stratigraphischen Einheiten. Die Punkte, die Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem lithologischem Aufbau eingefärbt. Das Verhalten der entsprechenden Gefälle mit ähnlichem lithologischem Aufbau lässt sich durch eine Potenz-Funktion beschreiben. Die Punkte ohne schwarze Umrandung wurden aufgrund von möglichen Unsicherheiten bezüglich Wasserentnahmen, Versickerungen oder Unsicherheiten in den Abflussmessungen nicht berücksichtigt.

8.3.3 Alpen

Das Verhalten von Q_{290}/Q_{347} der alpinen Einzugsgebiete zeigt keine Abhängigkeit von der litho-stratigraphischen Zusammensetzung. Allerdings ist ein leichter Anstieg der Dauerkurvengefälle mit zunehmendem mittleren Jahresniederschlag zu beobachten (Abbildung 8). Es wurden drei Gruppen mit unterschiedlichen mittleren Jahresniederschlagsbereichen identifiziert. Der mittlere Jahresniederschlag der alpinen Gruppe 1 liegt zwischen 800 und 1300 mm, der der alpinen Gruppe 2 zwischen 1300 und 1750 mm und der der alpinen Gruppe 3 über 1750 mm. Die alpinen Dauerkurvengefälle variieren weniger stark (1.2–1.8) als jene in den Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes, die aus Süßwassermolasse bestehen (1.4–3.7, Abbildung 14). Die Potenzfunktionen der Gruppen Alpin 1 bis 3 verlaufen hingegen nahezu parallel zu den Potenzfunktionen der Dauerkurvengruppen OMM (Schweizer Mittelland). Die Q_{290}/Q_{347} -Werte der alpinen Einzugsgebiete sind jedoch höher als jene der Einzugsgebiete mit dominantem OMM-Aufbau (Abbildung 14). Es ist wichtig zu beachten, dass die alpinen Dauerkurvengefälle auf Abflusszeitreihen basieren, aus denen die Beiträge von Gletschern und Permafrostgebieten vorab abgezogen wurden. Die mittlere Hangneigung der Einzugsgebiete nimmt tendenziell von der alpinen Gruppe 1 zur alpinen Gruppe 3 zu (Abbildung 15). Allerdings sind bei der mittleren Hangneigung grössere Überlappungen zwischen den Streubereichen zu erkennen. Die

1151 Flächenanteile mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen in den Einzugsgebieten der verschiedenen alpinen
 1152 Dauerkurvegefälle unterscheiden sich nicht wesentlich.

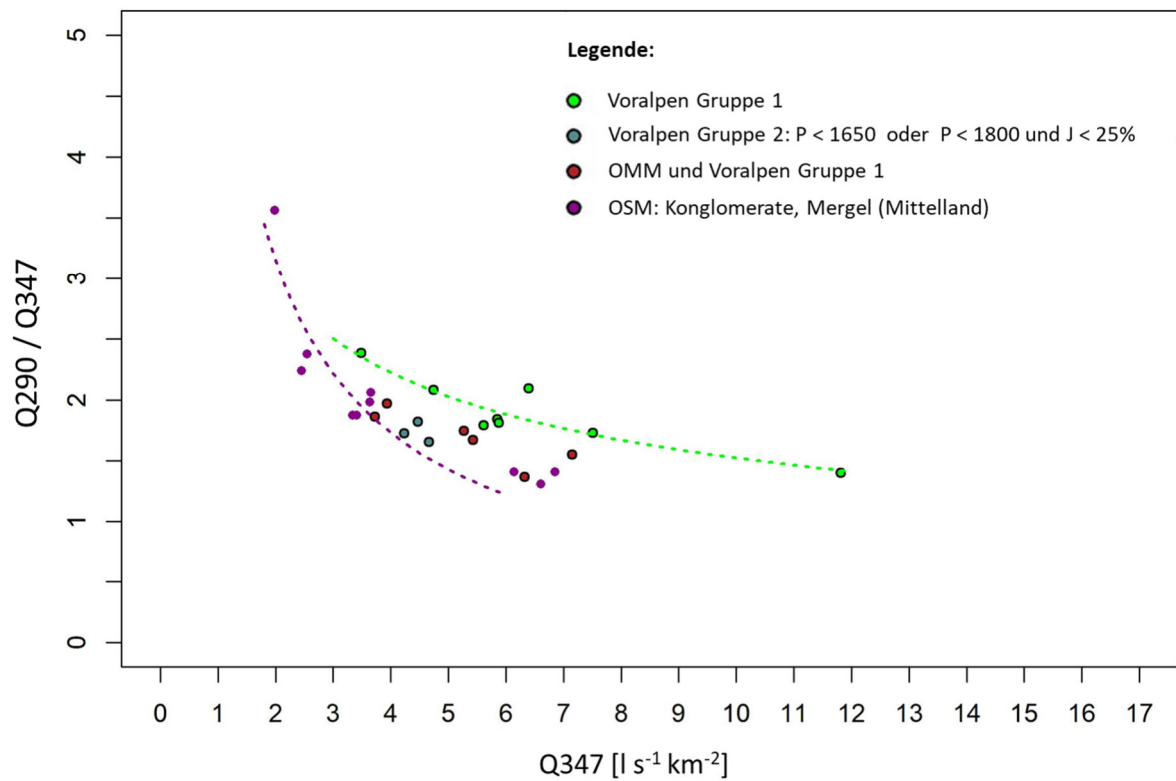


1153
 1154 *Abbildung 8: Gefälle der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in den Alpen. Die Punkte, die*
 1155 *Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem mittleren Jahresniederschlag eingefärbt. Die Kurve lässt sich durch*
 1156 *eine Potenz-Funktion beschreiben.*

1157 8.3.4 Voralpen Alpennordseite

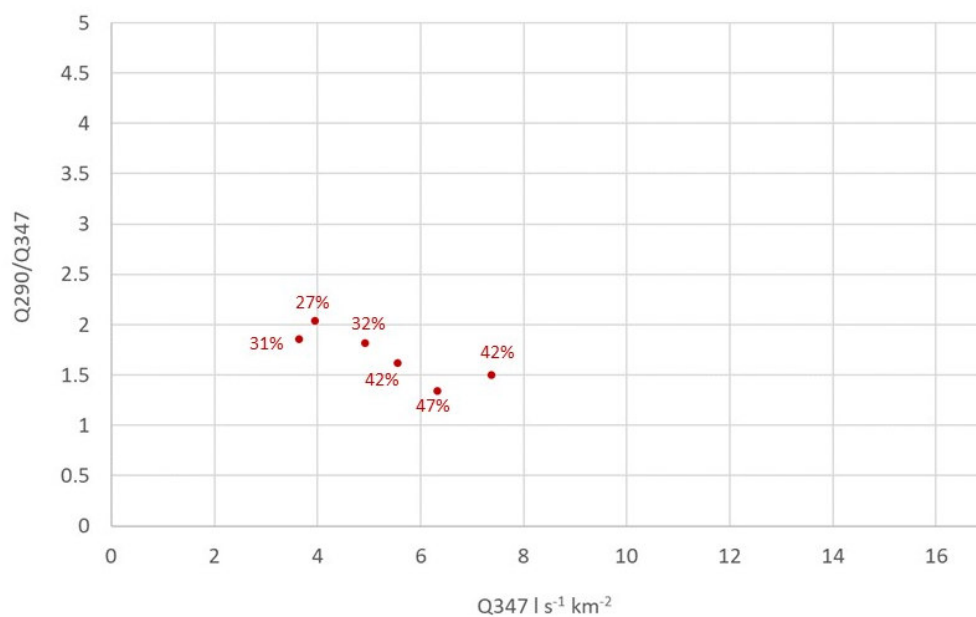
1158 Die Steigungen der Dauerkurven in den Voralpengebieten der Gruppe 1 (hellgrüne Punkte in Abbildung 9) sind
 1159 bei vergleichbarem Q_{347} um einen Wert von 0.5 bis 0.7 höher als in den mittelländischen Konglomerat-
 1160 dominierten Einzugsgebieten der OSM (violette Punkte in Abbildung 9). Drei Einzugsgebiete, die zum
 1161 Voralpenraum gehören, weisen tiefere Gefälle auf als diejenigen der Voralpen-Gruppe 1. Sie liegen im Bereich
 1162 der Konglomerat-dominierten Einzugsgebiete der OSM (dunkelgrüne Punkte in Abbildung 9). Diese Gebiete
 1163 unterscheiden sich von denjenigen der Voralpen-Gruppe 1 entweder durch wesentlich geringere Werte im
 1164 mittleren Jahresniederschlag oder in der mittleren Geländeneigung. Sie werden zur Voralpen-Gruppe 2
 1165 zusammengefasst. Typische litho-stratigraphische Einheiten in den gesamten Nördlichen Voralpen sind: USM,
 1166 sowie Flysch-, Kalkstein- und Schieferabfolgen. Die Gefälle der Dauerkurven in den Voralpen-Gebieten mit einem
 1167 gemischten geologischen Aufbau aus OMM einerseits und weiteren, für die Voralpen typischen
 1168 stratigraphischen Einheiten andererseits, liegen zwischen denjenigen der OSM (Konglomerate, Mergel) und der
 1169 Voralpen-Gruppe 1, tendenziell aber eher näher zu denjenigen der OSM (Konglomerate, Mergel). Aufgrund des
 1170 besonderen Verhaltens der OMM-Gebiete bei Niedrigwasser (vgl. Abbildung 7) müssen sie gesondert betrachtet

1171 werden. Je höher der Anteil der OMM an der Gesamtfläche der Einzugsgebiete liegt, desto geringer ist die
 1172 Steigung der Dauerkurven (Abbildung 10).



1173
 1174 *Abbildung 9: Gefälle der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in den Voralpen und für die Konglomerat-*
 1175 *dominierten Gebiete der OSM, die im Übergangsbereich zwischen dem Mittelland und den Voralpen liegen.*

1176



1177
 1178 *Abbildung 10: Q_{290}/Q_{347} vs. Q_{347} von Gebieten, deren geologischer Untergrund aus OMM-Gesteinen und anderen litho-*
 1179 *stratigraphischen Einheiten besteht. Die Abbildung zeigt zudem den Anteil der OMM (in %) an der Gesamtfläche.*

Die Potenzfunktion der Quotienten Q_{290}/Q_{347} für die Voralpen-Gruppe 1 verläuft flacher als die der Gebiete, die aus der OSM bestehen (Konglomerate, Mergel, Abbildung 9). Es wurde geprüft, ob dieses Abflachen der Potenzfunktion der Voralpen-Gruppe 1 mit der Saisonalität der Niedrigwasserabflüsse zusammenhängt. Dazu wurden für jedes Einzugsgebiet die Anteile der Tage mit $Q < Q_{290}$ berechnet, die in den Monaten November bis März auftraten. Die Prozentanteile wurden dann zu verschiedenen Klassen gruppiert und die Q_{290}/Q_{347} -Punkte nach diesen Klassen unterschiedlich eingefärbt (Abbildung 11). In sechs der acht Einzugsgebiete der Voralpen-Gruppe 1 treten Niedrigwasserabflüsse ($Q < Q_{290}$) zwischen 40% und 60% aller Fälle in den Monaten November bis März auf. Nur in zwei Gebieten dieser Gruppe beträgt dieser Anteil 30 bis 40% (Abbildung 11). In den verbleibenden Voralpen- Einzugsgebieten und in den Einzugsgebieten, welche aus der OSM aufgebaut sind, beträgt dieser Anteil weniger als 40%. Mit Ausnahme eines Einzugsgebiets weisen unter den Voralpen-Gruppe 1 diejenigen die höchsten Q_{347} auf, die die meisten Niedrigwassertage in den kalten Monaten haben. Schneeschmelze und/oder die fehlende Verdunstung könnten möglicherweise zu einem höheren Q_{347} führen (vgl. auch Kapitel 8.5.1 und 8.9.4).

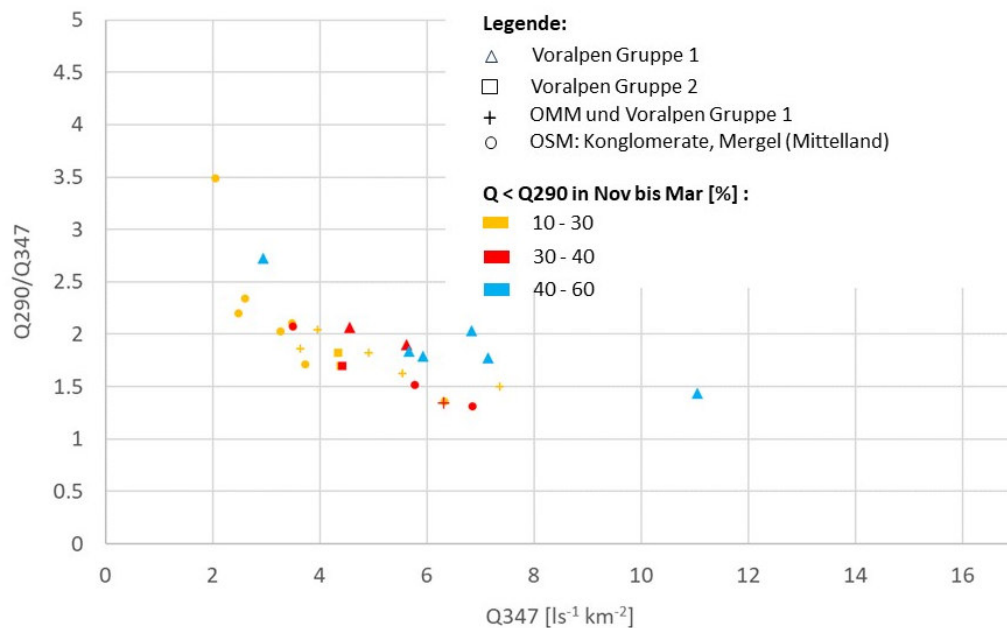


Abbildung 11: Punkte der Q_{290}/Q_{347} vs. Q_{347} für Einzugsgebiete in den Voralpen und für solche Gebiete im Mittelland, in denen der geologische Aufbau weitgehend aus Konglomeraten besteht. Die Farben der Punkte entsprechen verschiedenen Prozentanteilen der Tage mit $Q < Q_{290}$ in den Monaten November bis März an der Gesamtanzahl der Tage mit $Q < Q_{290}$.

Der Anteil der in der kalten Jahreszeit auftretenden Niedrigwasserabflüsse nimmt tendenziell mit der mittleren Einzugsgebietsgröße der Gebiete zu (Abbildung 12). Es gibt jedoch einige Ausreißer (Punkte innerhalb der Ellipsen). Sie liegen mehrheitlich in den Konglomerat-dominierten Gebieten der OSM. Die Ausreißer konnten bisher aber nicht erklärt werden.

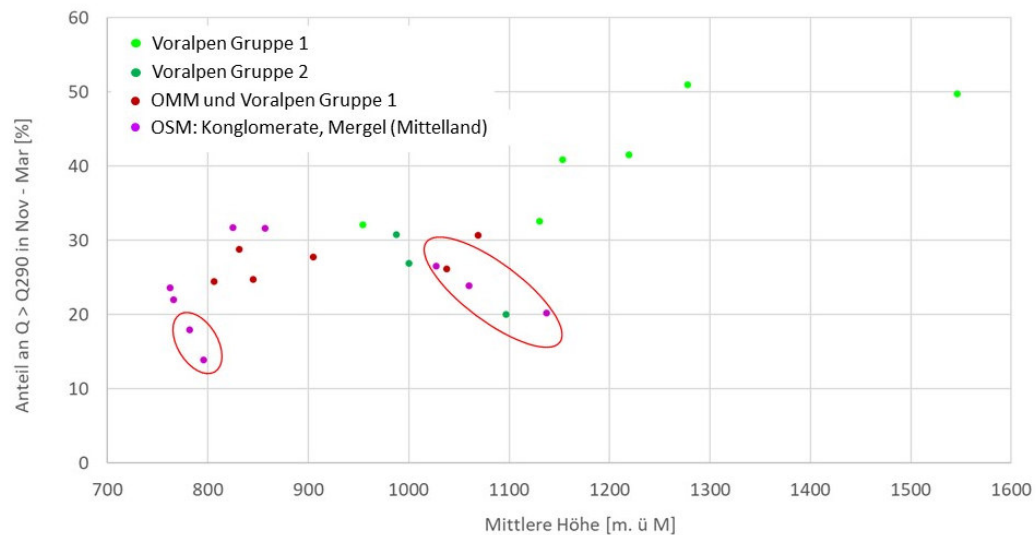


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem saisonalen Auftreten der Niedrigwasserabflüsse und der mittleren Höhe der Einzugsgebiete. Die in Ellipsen eingekreisten Einzugsgebiete weisen ein Verhalten auf, das von diesem Zusammenhang abweicht.

8.3.5 Voralpen Tessin

Die Steigungen der Dauerkurven in der Voralpengebieten des Tessins nehmen bei einem $Q_{347} > 4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ nur noch geringfügig ab (Abbildung 13). Sie verhalten sich in diesem Bereich ähnlich wie Einzugsgebiete in den Alpen mit ähnlichen mittleren Jahresniederschlägen. Bei $Q_{347} < 4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ steigt der Quotient Q_{290}/Q_{347} stark an. Allerdings ist der Verlauf des Anstiegs in diesem Bereich nur auf einen Punkt abgestützt (Breggia in Chiasso). Es ist unklar, ob im Tessin ebenfalls mehrere parallel verlaufende Trendlinien existieren wie im Mittelland der Alpennordseite. Die Voralpengebiete im Tessin sind mehrheitlich durch Gneise, schiefrige Gneise und Glimmerschiefer aufgebaut. Die im Vergleich zum Tessin grösseren Steigungen der Dauerkurven in den Voralpen-Gebieten der Alpennordseite lassen sich durch die Differenzen im durchschnittlichen Jahresniederschlag erklären, die dort über alle Einzugsgebiete mit durchschnittlich 1951 mm um 267 mm grösser sind als im Tessin (1684 mm).

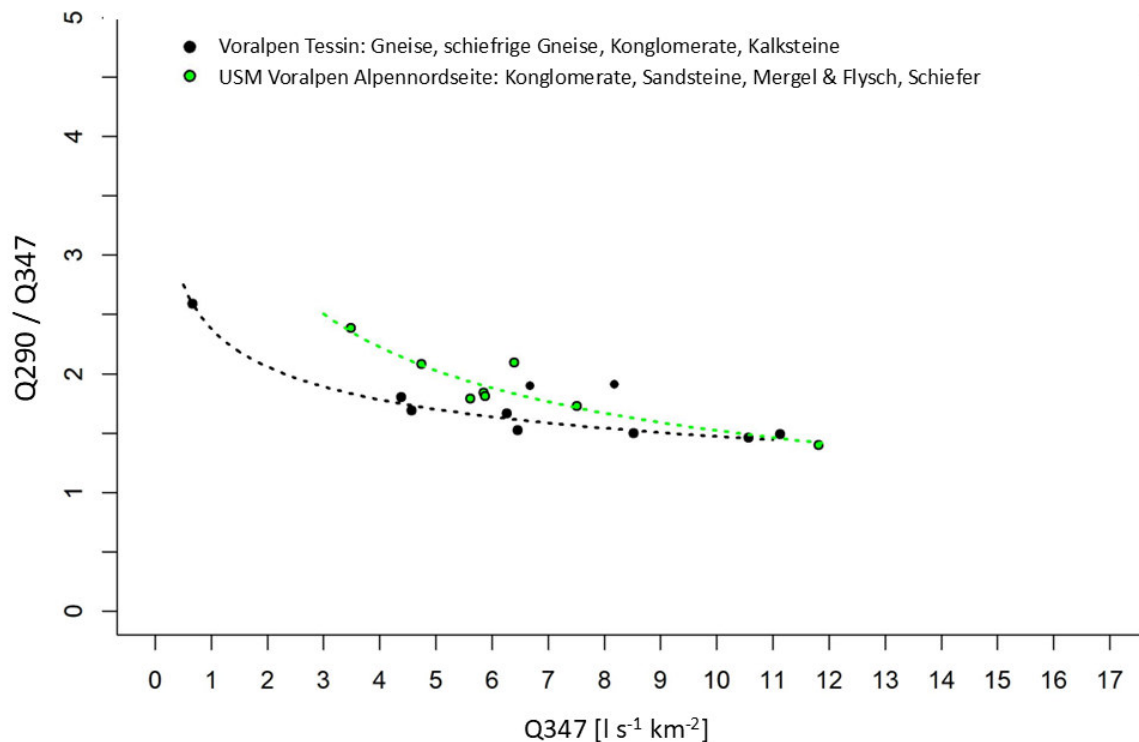


Abbildung 13: Gefälle der Dauerkurven (Q_{290}/Q_{347}) versus Q_{347} für Einzugsgebiete in den Voralpen des Tessins und der Voralpen-Gruppe 1 der Alpennordseite im Vergleich. Die Steigungen der Dauerkurven für Gebiete in den Tessiner Voralpen sind wegen des tieferen durchschnittlichen Jahresniederschlages etwas niedriger als die entsprechenden Gefälle für Einzugsgebiete in den Voralpen der Alpennordseite.

8.3.6 Überblick über die Gefälle der Dauerkurven

Die Gefälle der Dauerkurven zwischen Q_{290} und Q_{347} in Abhängigkeit von Q_{347} zeigen unterschiedliche Muster im Mittelland, in den Alpen und in den Voralpen. In der Punktwolke Q_{290}/Q_{347} vs. Q_{347} konnten Gruppen mit ähnlicher litho-stratigraphischer Struktur im Mittelland und Gruppen mit ähnlichem mittlerem Jahresniederschlag in den Alpen identifiziert werden. In den Voralpen gibt es Einzugsgebiete, die dem Muster des Mittellandes ähnlich sind (Gruppe Voralpin 2), und andere, die eher dem alpinen Muster entsprechen (Gruppe Voralpin 1 und Gruppe Voralpen Tessin mit flach abfallender Potenzfunktion). Die identifizierten Gruppen werden auch als Dauerkurvengruppen bezeichnet. Die Beziehung zwischen Q_{290}/Q_{347} und Q_{347} innerhalb der Gruppen lässt sich durch eine Potenzfunktion beschreiben. Alle Potenzfunktionen zeigen eine Tendenz zur Abnahme von Q_{290}/Q_{347} mit zunehmendem Q_{347} (Abbildung 14). Mit steigendem Q_{347} entwässern die Einzugsgebiete langsamer, weil die Kapazität langsam entwässernder Grundwasserleiter zunimmt. Das zeigt, dass die Gefälle der Dauerkurven zwischen Q_{290} und Q_{347} das Rezessionsverhalten widerspiegeln. Es zeigen sich jedoch Unterschiede im Abfallen der Potenzfunktionen. Die Potenzfunktionen fallen in den Einzugsgebieten der Oberen und Unteren Süswassermolasse des Mittellandes (Gruppen OSM 1, OSM 2, OSM 3, OSM 4, USM) steiler ab als in den Einzugsgebieten der Oberen Meeresmolasse (Gruppe OMM) des Mittellandes sowie in den Einzugsgebieten der Alpen und Voralpen. Im Mittelland ist das Gefälle der Dauerkurven geringer als 1.3, falls die Q_{347} -Werten grösser als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sind. Die Abnahme erfolgt dort nur

noch in geringen Raten. In alpinen Einzugsgebieten hängt das Gefälle der Dauerkurven nicht mehr vom litho-
stratigraphischen Aufbau eines Gebiets ab, sondern vom mittleren Jahresniederschlag. Je höher der mittlere
Jahresniederschlag ist, desto steiler sind die Dauerkurven. Die Potenzfunktionen der alpinen
Dauerkurvengruppen fallen bei einer Zunahme des Q_{347} nur noch geringfügig ab.
Der spezifische Q_{347} -Abfluss im Mittelland variiert zwischen 0.3 und $8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. In den Alpen und Voralpen liegt
er tendenziell höher, mit Streubereichen zwischen 4.5 und $16.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Alpen) und zwischen 3.7 und 11.8 l s^{-1}
 km^{-2} (Voralpen). In Abbildung 15 sind Boxplots dargestellt, die die Streuung des mittleren Jahresniederschlages,
der mittleren Geländeneigung und der mässig durchlässigen Quartärablagerungen innerhalb jeder
Dauerkurvengruppe zeigen. Die geographische Lage der verschiedenen Dauerkurvengruppen wird in Abbildung
16 auf einer Karte dargestellt.
Die physikalischen Prozesse, die das vorliegende Verhalten der Dauerkurvengefälle verursachen, werden im
Kapitel Interpretation (Kapitel 8.9) im Detail diskutiert.

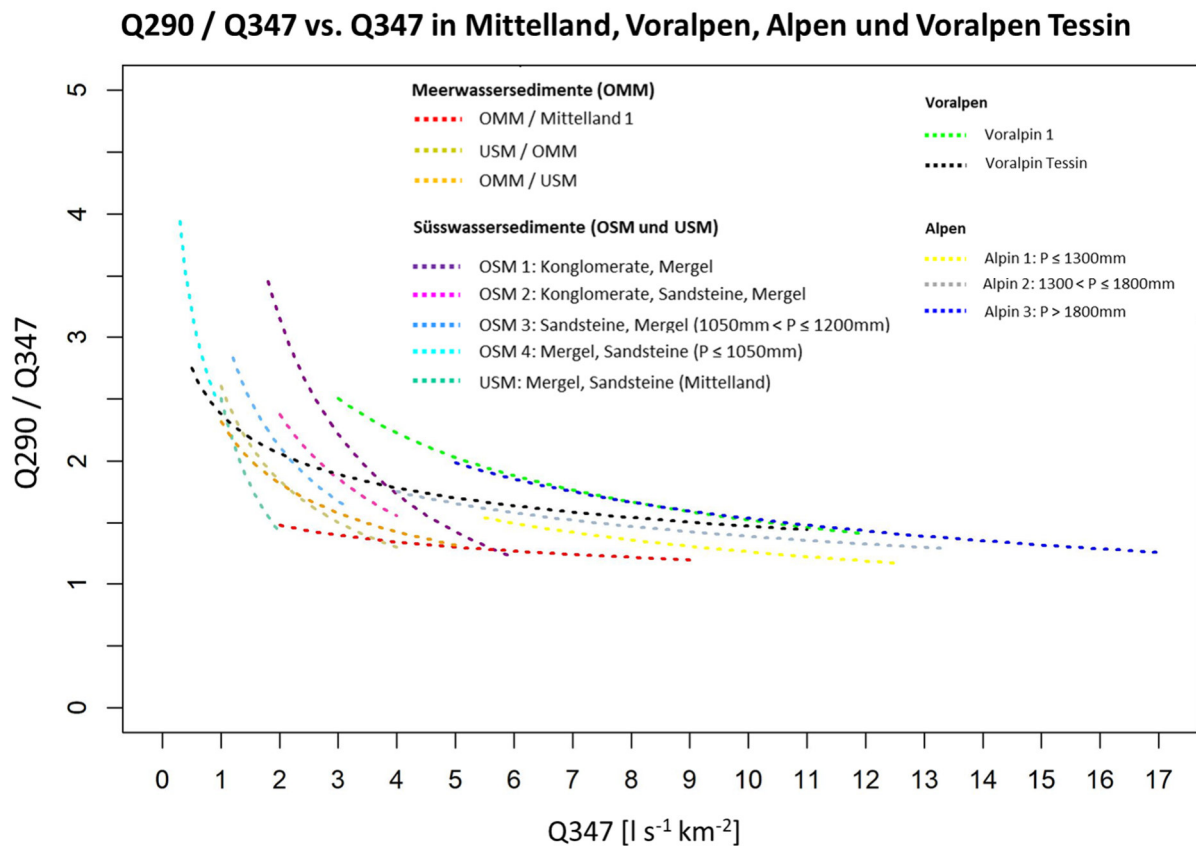


Abbildung 14: Verhalten des Dauerkurvengefälles bei Niedrigwasser (Q_{290}/Q_{347}) für Einzugsgebiete im Mittelland, Voralpen, Alpen und Voralpen im Tessin.

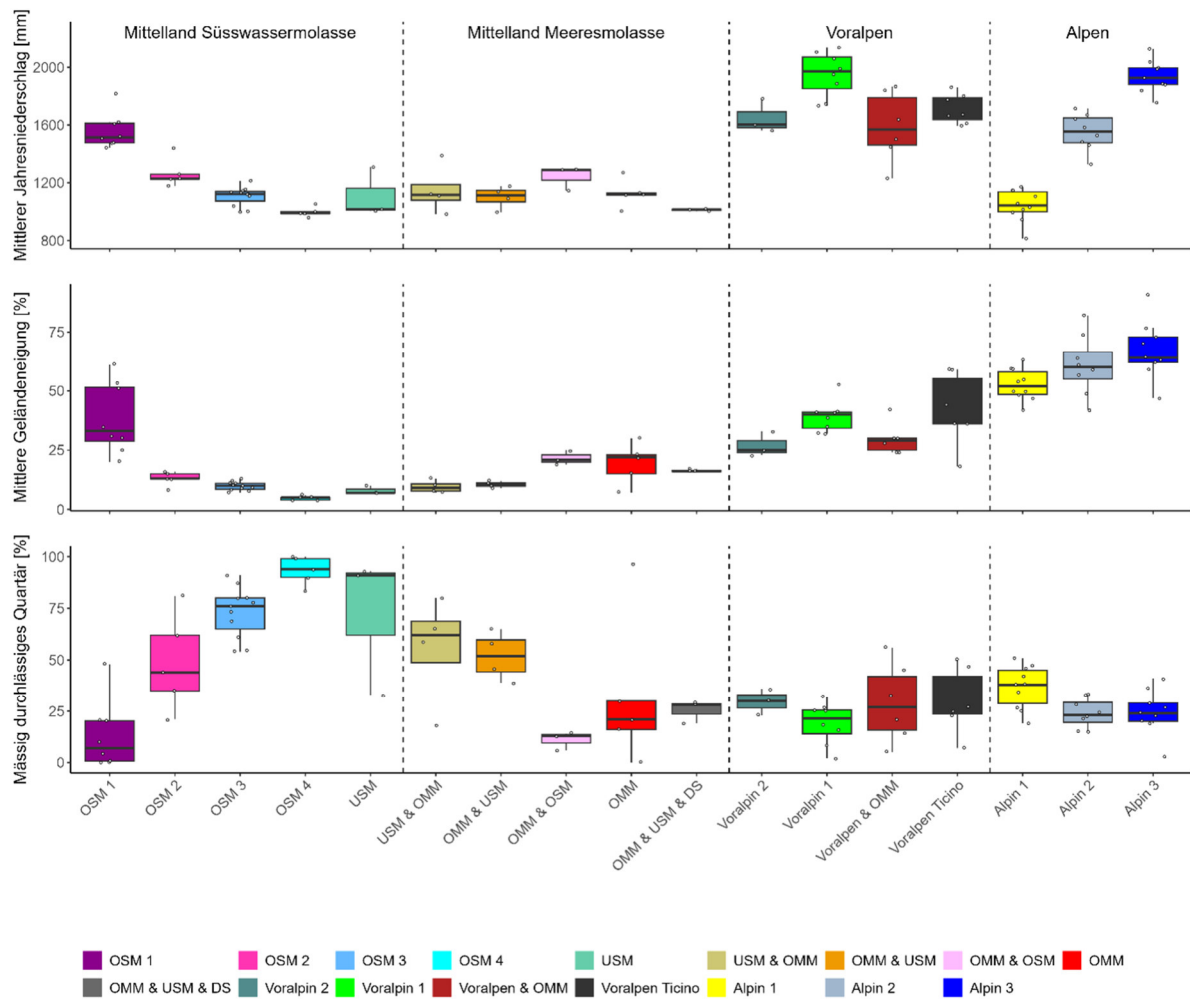


Abbildung 15: Streuung des mittleren jährlichen Jahresniederschlags, der mittleren Einzugsgebietsneigung und des Flächenanteils an den mässig durchlässigen Quartärablagerungen innerhalb der Dauerkurvengruppen.

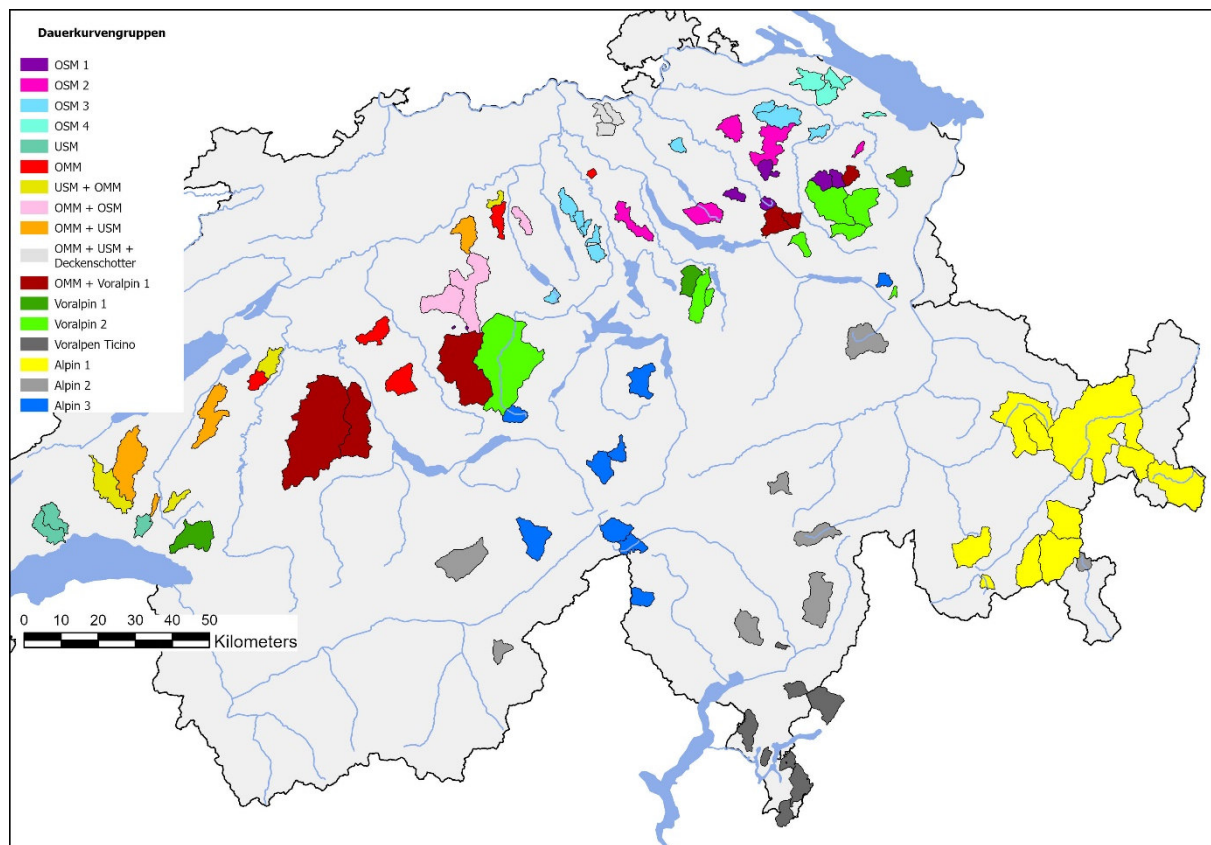


Abbildung 16: Karte der Untersuchungsgebiete, eingefärbt nach den Dauerkurvengruppen.

8.4 Saisonale Verteilung der Niedrigwassertage

Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen der mittleren Höhe des Einzugsgebiets und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Wintermonaten (November bis März, Abbildung 17 A). Bis zu einer mittleren Höhe von etwa 1000 m ü. M. liegt der Anteil der Niedrigwassertage im Winter unter 30 %. Zwischen 1000 und 1500 m ü. M. liegt er zwischen 30 % und 50 %, und oberhalb von 1500 m ü. M. treten in der kalten Jahreszeit 50 % oder mehr Niedrigwassertage auf.

Die Beziehungen zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Sommermonaten (15. Mai bis 15. September, Abbildung 17 B) sowie zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Frühlings- und Frühherbstmonaten (1. April bis 14. Mai und 16. September bis 31. Oktober, Abbildung 17 C) weisen ebenfalls ein hohes R^2 auf.

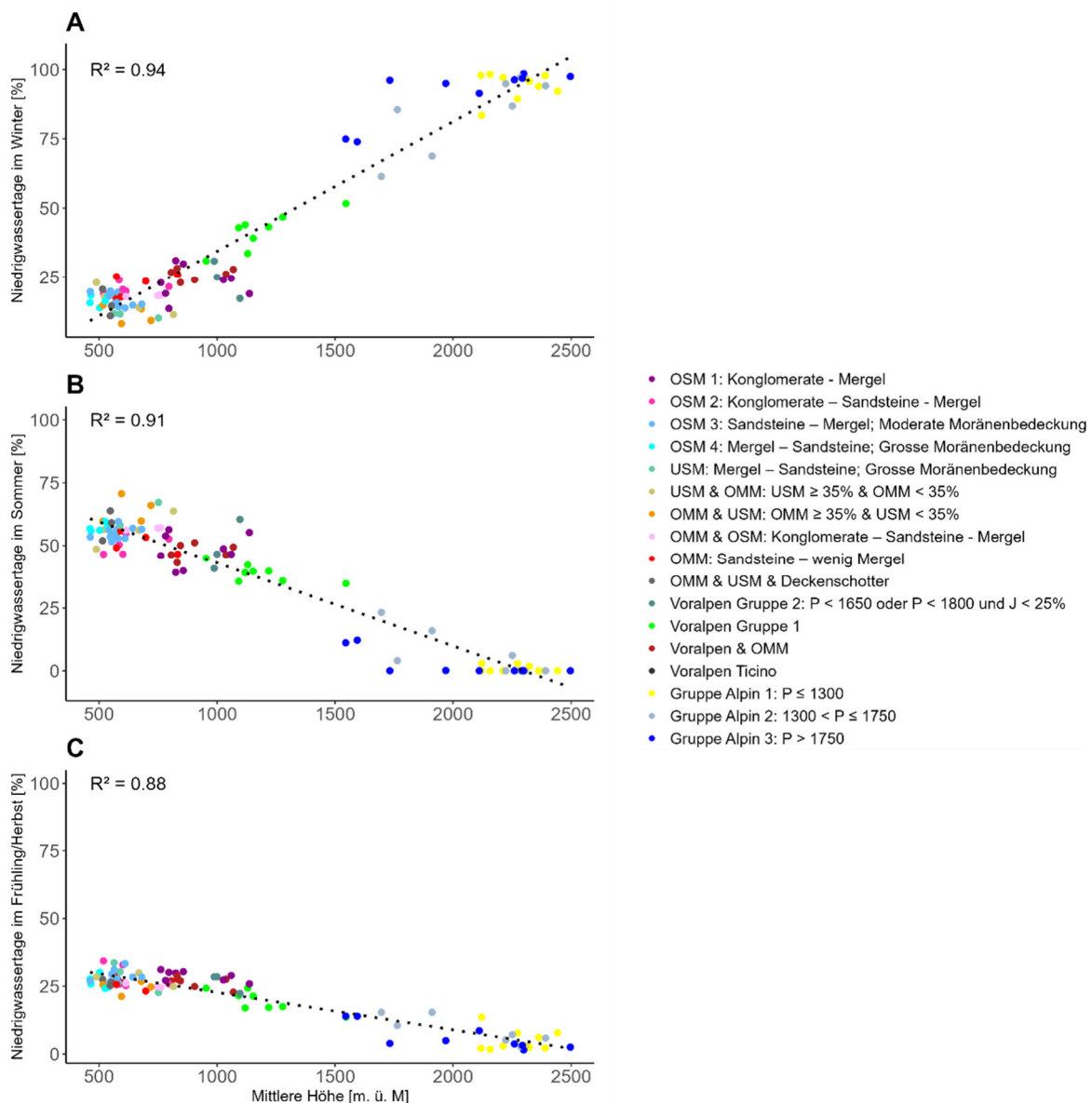


Abbildung 17: Es bestehen starke Zusammenhänge zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Wintermonaten (November bis März, A), zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Sommermonaten (15. Mai bis 15. September, B) und zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q_{80}$) in den Frühlings- und Frühherbstmonaten (1. April bis 14. Mai und 16. September bis 31. Oktober, C).

8.5 Verhalten der Rezessionskurven bei Niedrigwasser

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei neue Verfahren entwickelt, um von Messreihen aus Abfluss-Tagesmittelwerten Masterrezessionskurven im Niedrigwasserbereich zu berechnen. Masterrezessionskurven zeigen den Abflussrückgang, der ungestört ist von Niederschlägen oder Schneeschmelze. Sie repräsentieren das reine Leerlaufverhalten der Speicher eines Einzugsgebiets und liefern Hinweise über deren Kapazität. Im Vergleich zu den Rezessionskurven sind in den Dauerkurven sämtliche Abfluss-Tagesmittelwerte einer definierten Messperiode enthalten.

In der Literatur werden viele verschiedene Methoden behandelt, um Masterrezessionskurven zu berechnen (Tallaksen, 1995). Im Rahmen dieser Studie wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um die Niedrigwasserabflüsse von 33 Mittelland-Einzugsgebieten anhand von fünf verschiedenen Rezessionsmodellen für den Niedrigwasserbereich zwischen Q290 und Q360 vorherzusagen. Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Studie werden in einem separaten Artikel veröffentlicht (Margreth et al., n.d.), weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird. Das Rezessionsmodell MRC_slow, das eine der beiden Neuentwicklungen der WSL darstellt und das unter den fünf Modellen die beste Prognostizierbarkeit aufweist, wurde verwendet, um zu untersuchen, wie die verschiedenen Dauerkurvengruppen mit dem Rezessionsverhalten in 92 Einzugsgebieten in Mittelland, Voralpen und Alpen zusammenhängen.

In alpinen Einzugsgebieten können die Abflussganglinien während sehr kalter Perioden von starken täglichen Schwankungen betroffen sein (Nagel et al., 2025). Sinkt die Wassertemperatur während der Nacht auf 0°C oder darunter, bildet sich an verschiedenen Stellen im Bachbett Eis. Die Eisbildung ist stark von der morphologischen Beschaffenheit des Bachbetts abhängig (Nagel et al., 2025). Das Eis kann an flacheren Standorten Wasser aufstauen. Das aufgestaute und das im Eis festgehaltene Wasser fehlt an der Pegelstation, weshalb der Abfluss während der Nacht sinkt. Steigt die Wassertemperatur während des Tages wieder über 0°C, schmilzt das Eis und die «Eisdämme» brechen. Das aufgestaute Wasser fließt ab, was zu einem Anstieg des Abflusses am Pegel auf ein Niveau führt, das oft über dem durchschnittlichen Tagesmittelwert liegt, auch wenn die Lufttemperatur unter 0°C bleibt. Diese täglichen Abflussschwankungen beeinflussen oft auch die Abflusstagesmittelwerte über mehrere Tage, weshalb sie in der Anwendung des MRC_slow- Modells zu Verzerrungen führen. Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, um diese Schwankungen vor der Berechnung der Masterrezessionskurve aus der Ganglinie herauszufiltern. Dieses Verfahren wird in der geplanten Publikation im Detail beschrieben (Margreth et al., n.d.).

MRC_slow basiert auf einer exponentiellen Zerfallsfunktion der Form:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-bt} \quad , \quad (3)$$

wobei Q_0 dem Q290, Q_t dem gesuchten Abfluss und t dem Tag des gesuchten Abflusses während der Rezessionsperiode entspricht. Der Rezessionskoeffizient b steuert Form und Länge der Rezessionskurve maßgeblich. In Abbildung 18 sind die mit MRC_slow berechneten Rezessionskurven für die Einzugsgebiete in der «Dauerkurvengruppe OSM 3: Sandsteine, Mergel (1050mm < P < 1200mm)» zwischen Q290 und Q360 dargestellt. Mit abnehmendem Rezessionskoeffizienten werden die Rezessionskurven tendenziell kürzer, die Steigungen zwischen Q290 und Q360 steiler und die Krümmung der Kurven ausgeprägter. Aus der Reihenfolge der abnehmenden Rezessionskoeffizienten b (Rezessionskoeffizienten Abbildung 18 oben rechts) weichen nur der Näfbach (Neftenbach) und der Wissenbach (Boswil) ab. Der Grund dafür ist nicht klar. Für sämtliche Einzugsgebiete wurden die Rezessionskoeffizienten b gegen das Q347 dargestellt, klassifiziert nach den Dauerkurvengruppen (Abbildung 19). Mit Hilfe einer log-Funktion wurde das Verhalten des Rezessionskoeffizienten b in Abhängigkeit von Q347 für die Einzugsgebiete der gleichen Dauerkurvengruppen

angenähert (log-Funktionen in Abbildung 19). Innerhalb derselben Dauerkurvengruppen nehmen die Rezessionskoeffizienten mit steigendem Q347 zu. Ähnlich wie bei den Gefällen der Dauerkurven bilden die log-Funktionen des Rezessionskoeffizienten b in Gebieten, welche aus USM und OSM bestehen, steilere log-Funktionen als in denjenigen Einzugsgebieten, die aus OMM-Sedimenten aufgebaut sind (Abbildung 19). Die log-Funktion der Gruppe Alpin 1 verläuft parallel zur log-Funktion der OMM-dominierten Einzugsgebiete (Abbildung 19 B und D, Abbildung 20). Die log-Funktionen der Gruppen Alpin 2 und 3 verlaufen etwas steiler als diejenige der Gruppe Alpin 1. Die log-Funktion der Gruppe Voralpin 1 verläuft steiler als diejenige der Alpenen Einzugsgebiete, aber flacher als log-Funktionen der Einzugsgebiete im Mittelland, die aus OSM oder USM aufgebaut sind. Es gilt zu berücksichtigen, dass die tiefsten Abflüsse die Berechnung der Masterrezessionskurve massgebend beeinflussen. Unsicherheiten in den Abflussmessreihen könnten daher für die Streuung eine Rolle spielen. Auffällig ist, dass die log-Funktion der Dauerkurvengruppe OSM 1 etwas flacher verläuft als diejenige der Dauerkurvengruppen OSM 2, OSM 3, OSM 4 und USM Westschweiz. Der Grund dafür ist nicht klar.

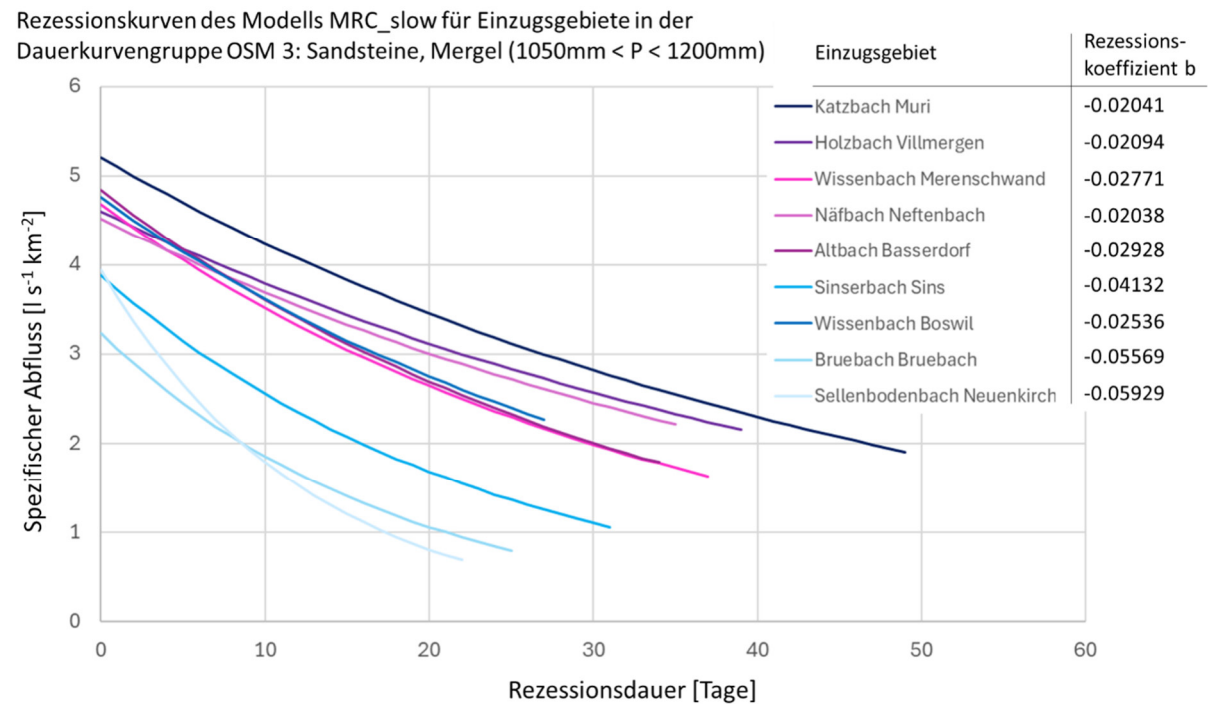


Abbildung 18: Mit dem Modell MRC_slow berechnete Rezessionskurven zwischen Q290 und Q360 für die Einzugsgebiete in der Dauerkurvengruppe OSM3: Sandsteine, Mergel (1050mm < P < 1200mm).

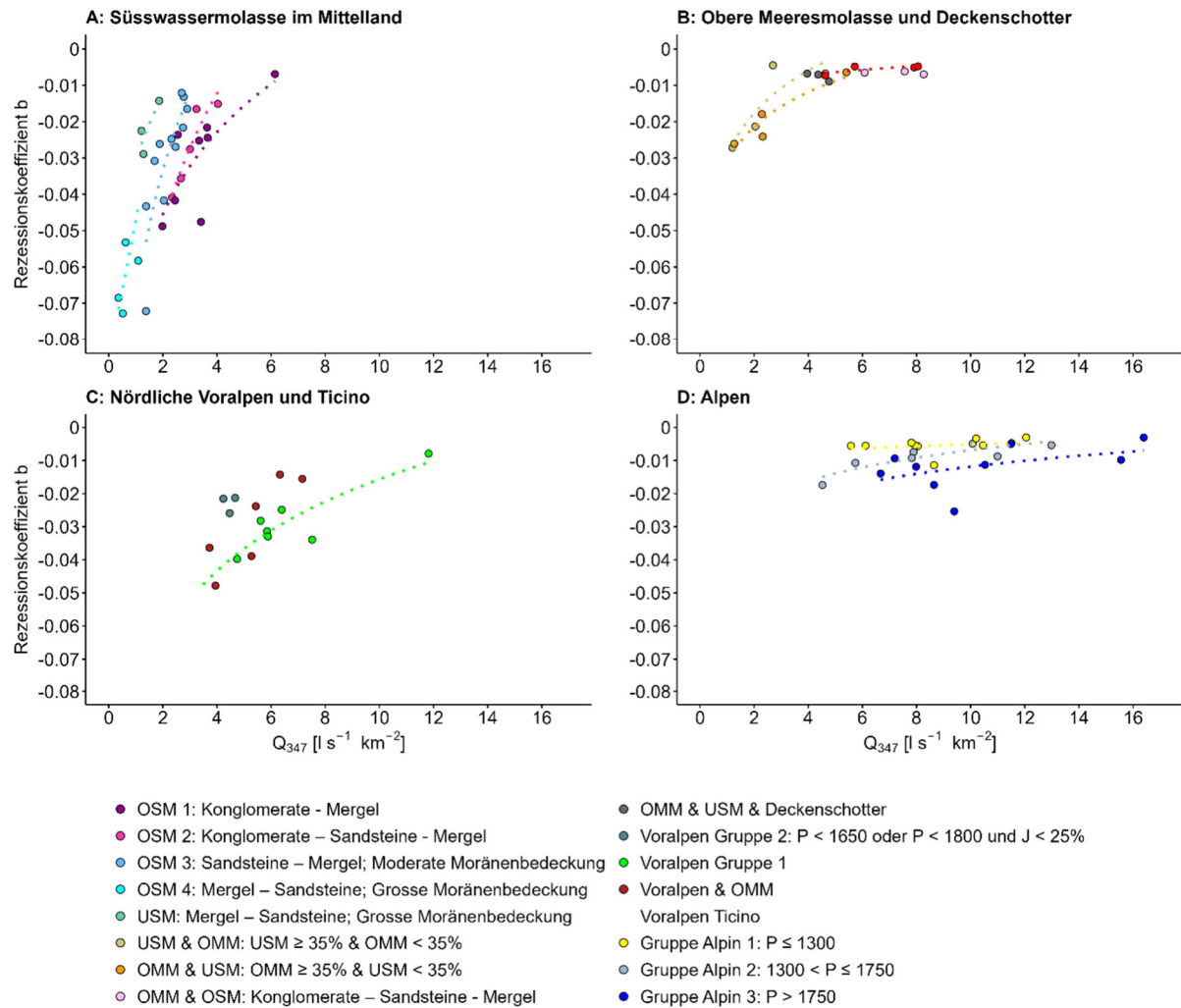


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Q_{347} und Rezessionskoeffizient b für Einzugsgebiete unterschiedlicher Dauerkurvengruppen im Mittelland, in den Voralpen der Alpennordseite und in den Alpen. Die Punkte repräsentieren einzelne Einzugsgebiete. Die Linien markieren Trendlinien, die den Zusammenhang zwischen Q_{347} und Rezessionskoeffizient b innerhalb der Dauerkurvengruppen mit einer log-Funktion beschreiben.

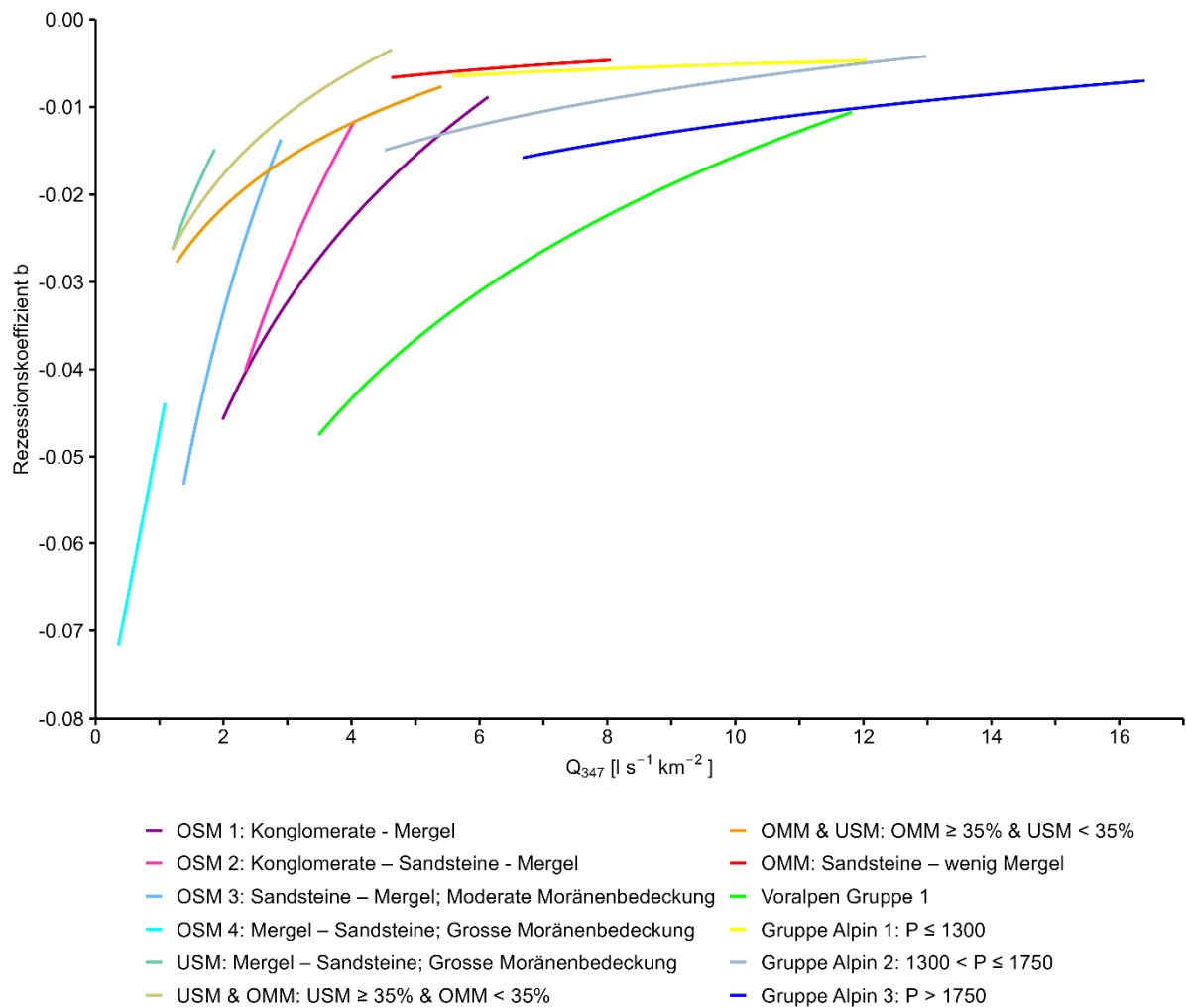


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Q_{347} und Rezessionskoeffizient b für Einzugsgebiete unterschiedlicher Dauerkurvengruppen im Mittelland, in den Voralpen der Alpennordseite und in den Alpen. Dargestellt sind nur die log-Funktionen, die das Verhalten des Rezessionskoeffizienten b innerhalb derselben Dauerkurvengruppen beschreibt.

8.5.1 Saisonale Unterschiede im Rezessionsverhalten

Mit Hilfe des Modells MRC_{slow} wurden für die Einzugsgebiete im Mittelland und in den Voralpen die Masterrezessionskurven für drei unterschiedliche saisonale Perioden berechnet:

- Masterrezessionskurven Frühling/Herbst: Verwendung der Rezessionssegmente der Monate April, Mai, September, Oktober, November.
- Masterrezessionskurven Sommer: Verwendung der Rezessionssegmente der Monate Juni, Juli, August
- Masterrezessionskurven Frühling/Sommer/Herbst: Verwendung der Rezessionssegmente der Monate April bis November.

Für die Alpinen Einzugsgebiete wurden nur die Rezessionssegmente aus den Spätherbst- und Wintermonaten verwendet (November bis März).

So resultieren für die Mittelland- und Voralpengebiete 3 saisonale Masterrezessionskurven und für die Alpen eine Masterrezessionskurve für den Winter. Aus den resultierenden Masterrezessionskurven wurde die Rezessionsdauer und Rezessionsvolumina zwischen Q290 und Q360 ermittelt. Die saisonalen Unterschiede in der Rezessionsdauer wird in Abbildung 21, die der Rezessionsvolumina in Abbildung 22 aufgeschlüsselt nach Dauerkurvengruppen dargestellt. Die Rezessionsvolumina sind auch in Tabelle 5 aufgeführt.

Rezessionsdauer:

Im Mittelland und in den Voralpen dauert die Rezession zwischen Q290 und Q360 in den Frühlings- und Herbstmonaten am längsten, und zwar in allen Dauerkurvengruppen. Die Unterschiede innerhalb der gleichen Dauerkurvengruppen sind z.T. erheblich. Die Rezessionsdauer in Frühling/Herbst variiert zwischen 25 und 140 Tagen. In den Sommermonaten ist die Rezessionsdauer hingegen am kürzesten. Sie variiert zwischen 5 und 53 Tagen (mit einer Ausnahme). Die Schwankungen der Rezessionsdauer in Frühling/Herbst sind grösser als im Sommer. Die Unterschiede der Rezessionsdauer zwischen den Sommermonaten und den Frühlings- und Herbstmonaten sind teilweise erheblich, vor allem in den Gruppen OSM 4, OSM 2, USM & OMM, OMM & USM, OMM & OSM, Voralpin 2. Weniger ausgeprägt sind die Unterschiede bei den Gruppen Voralpin 1 und Voralpen & OMM. Auffällig ist, dass dort auch die Rezessionsdauer insgesamt kürzer ist als in den Mittelland-Einzugsgebieten, vor allem in den Gruppen Voralpin 1 und Voralpin & OMM. Die Dauer der Masterrezessionskurven, die basierend auf Rezessionssegmenten aus Frühlings-, Sommer- und Herbstmonaten berechnet wurden, liegt bei allen Mittelland- und Voralpeneinzugsgebieten zwischen der Dauer der Frühlings-/Herbst- und der Sommer-Rezessionskurven. Tendenziell dauert die Rezession der OMM-dominierten Einzugsgebieten etwas länger als die von Einzugsgebieten, die aus Süswassermolasse aufgebaut sind. Aufgrund einer visuellen Einschätzung schwankt die Rezessionsdauer der Sommermonate innerhalb der Dauerkurvengruppen des Mittellands und der Voralpen weniger als die der Frühlings- und Herbstmonate. Der Median der Rezessionsdauer der alpinen Einzugsgebiete ist in den meisten Fällen höher als der von Mittelland- und Voralpen-Einzugsgebieten. Innerhalb der alpinen Einzugsgebiete ist der Median der Rezessionsdauer der Gruppe Alpin 1 höher als der der Gruppen Alpin 2 und 3.

Rezessionsvolumina:

Im Mittelland sind die Rezessionsvolumina von Einzugsgebieten in der Süswassermolasse tendenziell kleiner als die in der Meeresmolasse (Abbildung 22, Tabelle 5). Am tiefsten sind sie in der Gruppe OSM 4. Dort liegt der Median des Rezessionsvolumen zwischen Q290 und Q360 für die Rezessionskurve (Apr – Nov) bei 2.7mm. Etwas höher ist er in den Gruppen USM und OSM 3 (7.2mm bzw. 10.7 mm). Und nochmals ein wenig höher liegt dieser in den Gruppen OSM 1 und OSM 2 (13.1mm bzw. 20.2mm). Bei den Einzugsgebieten mit Anteilen an OMM im litho-stratigraphischen Aufbau steigen die Rezessionsvolumina tendenziell mit der Zunahme an OMM-Anteilen. Am höchsten sind sie bei den Dauerkurvengruppen OMM und OMM & OSM mit 33.6 bzw. 34.6mm. Ähnlich hoch sind sie in der Gruppe Voralpin 1. Nur etwa halb so hoch sind sie in den Gruppen Voralpin 2 und Voralpin & OMM. Am meisten Wasser zwischen Q290 und Q360 fließt in den Alpinen Einzugsgebieten ab. Der Median zwischen den Gruppen Alpin 1 und 3 liegt zwischen 65 und 70mm und schwankt nur gering. In den Alpen fließt

zwischen Q290 und Q360 im Durchschnitt innerhalb der Dauerkurvengruppen somit zweimal bis 25mal so viel an Wasser ab wie im Mittelland oder in den Voralpen. Jedoch sind die Unterschiede der Rezessionsvolumina für die Kurven April bis November innerhalb der gewisser Dauerkurvengruppen gross, vor allem innerhalb der Gruppen mit OMM-Anteilen und innerhalb der Alpinen Gruppen.

Zwischen den Mittelwerten der saisonalen Rezessionsvolumina liegen die grössten Unterschiede wiederum bei der Gruppe OSM 4 (Tabelle 5, Spalte: Quotient Mittelwert (Sommer) / Mittelwert (Frühling, Herbst). Dort beträgt Anteil der durchschnittlichen Rezessionsvolumina im Sommer 0.3 von dem der Volumina im Frühling und im Herbst. Am höchsten ist dieser Quotient bei der Gruppe USM (0.8). Dort sind aber nur Daten von drei Einzugsgebieten vorhanden. Bei den anderen Mittelland- und Voralpen- Gruppen liegt er zwischen 0.4 und 0.6. Somit sind die Rezessionsvolumina der Sommerrezessionskurven im Durchschnitt nur etwa halb so gross wie die der Frühlings-/Herbstrezessionskurven. Das ist bemerkenswert. In der Dauerkurvengruppe OSM 4 beträgt dieser Anteil gar nur 30%.

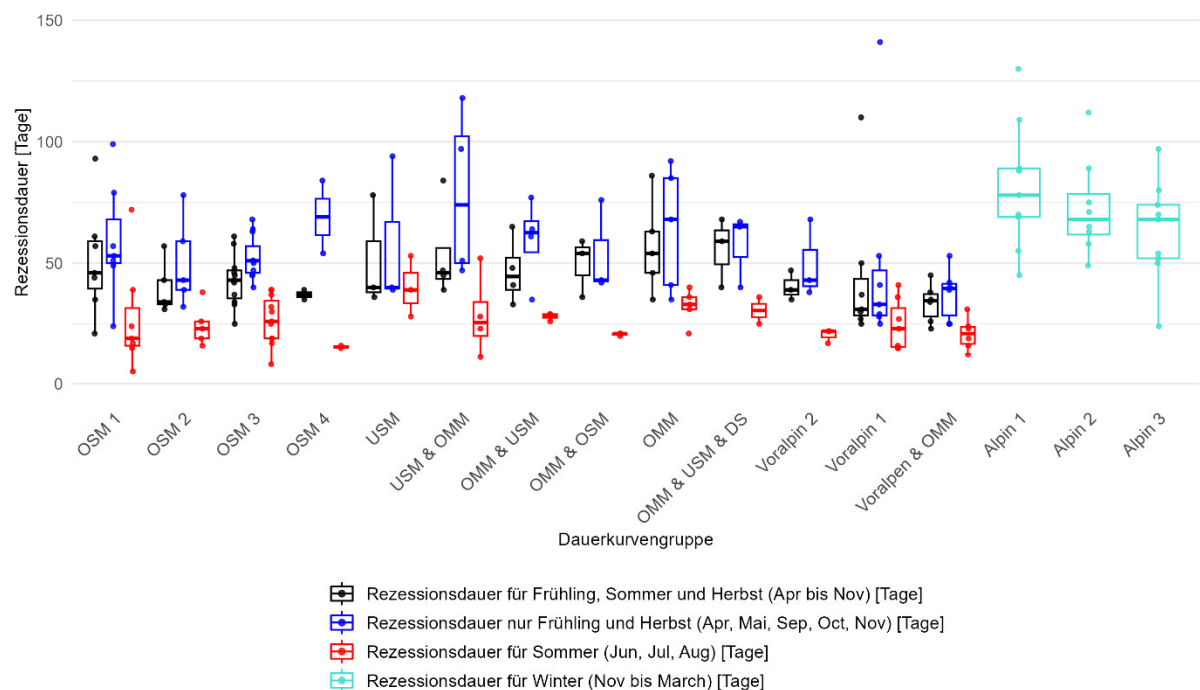


Abbildung 21: Saisonale Unterschiede in der Dauer von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem Modell *MRC_slow* ermittelt wurden.

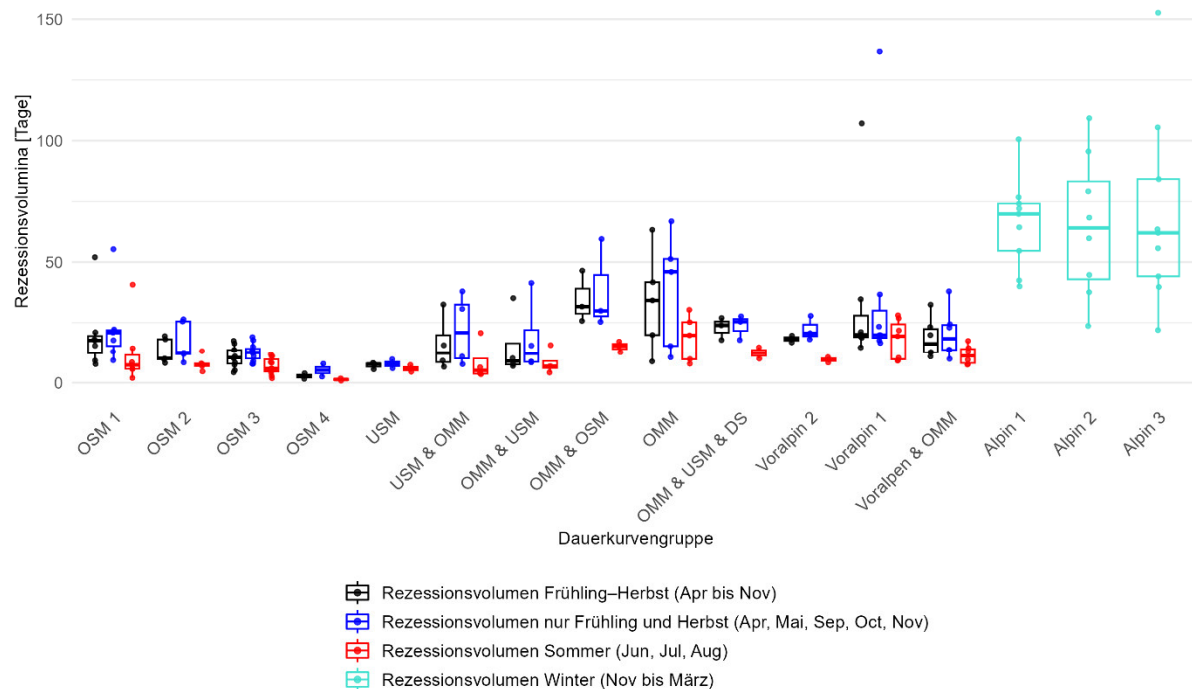


Abbildung 22: Saisonale Unterschiede in den Volumina von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem Model MRC_{slow} ermittelt wurden.

Tabelle 5: Saisonale Unterschiede in den Volumina von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem Model MRC_{slow} ermittelt wurden.

Dauerkurvengruppe	minimales Volumen - Apr bis Nov [mm]	maximales Volumen - Apr bis Nov [mm]	Mittelwert des Volumens - Apr bis Nov [mm]	minimales Volumen - Frühling/Herbst [mm]	maximales Volumen - Frühling/Herbst [mm]	Mittelwert des Volumens - Frühling/Herbst [mm]	minimales Volumen - Jun bis Aug [mm]	maximales Volumen - Jun bis Aug [mm]	Mittelwert des Volumens - Jun bis Aug [mm]	Quotient Mittelwerte(Sommer) /Mittelwert (Herbst)	minimales Volumen - (Alpin) [mm]	maximales Volumen - (Alpin) [mm]	Mittelwert des Volumens - (Alpin) [mm]
OSM 1	7.7	52.0	20.2	9.3	55.3	22.8	2.0	40.7	12.0	0.5			
OSM 2	8.2	19.5	13.1	8.4	26.4	16.9	4.7	13.2	8.0	0.5			
OSM 3	4.3	17.5	10.7	7.8	19.1	12.6	1.8	11.8	6.9	0.5			
OSM 4	1.6	3.9	2.7	2.5	7.9	5.2	0.8	1.8	1.3	0.3			
USM	5.5	8.2	7.2	6.0	9.7	7.8	4.5	7.4	5.9	0.8			
USM & OMM	6.6	32.5	16.0	7.7	38.0	21.8	3.5	20.7	8.6	0.4			
OMM & USM	6.9	35.2	15.0	8.4	41.4	18.5	4.2	15.7	8.3	0.5			
OMM & OSM	25.7	46.5	34.6	25.4	59.5	38.3	12.7	17.2	15.0	0.4			
OMM	8.8	63.3	33.6	10.6	66.9	38.0	7.9	30.3	18.6	0.5			
OMM & USM & Deckenschotter	17.8	27.0	22.9	17.8	27.6	23.6	10.0	14.8	12.4	0.5			
Voralpin 2	16.8	19.7	18.3	18.1	27.8	22.2	8.3	10.6	9.5	0.4			
Voralpin 1	14.7	107.1	33.7	16.6	136.7	38.7	9.1	28.1	17.8	0.5			
Voralpen & OMM	10.9	32.5	18.6	9.9	38.0	20.5	7.5	17.5	11.6	0.6			
Alpin 1											40.0	100.6	66.1
Alpin 2											23.7	109.3	64.8
Alpin 3											22.0	152.7	69.9

8.6 Unterschiedliches Verhalten von Niedrigwasserganglinien

Der litho-stratigraphische Aufbau, die Niederschlagsmengen während Niedrigwasserperioden und die saisonale Verteilung der Niedrigwassertage haben einen sichtbaren Einfluss auf die Niedrigwasserganglinien (Abbildung 23 und Abbildung 24).

8.6.1 Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse während Niedrigwasserperioden

In Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes und der Voralpen wurde der Abflussrückgang im Sommer 2018 (Abbildung 23 und Abbildung 24, Zeilen 1 und 2) häufiger durch Abflussanstiege unterbrochen als in alpinen Einzugsgebieten während der winterlichen Niedrigwasserperiode 2021/22 (Abbildung 24, Zeilen 3, 4 und 5). Eine Ausnahme bildeten die Einzugsgebiete der OMM-Gruppe, in denen Abflussspitzen ebenfalls seltener und weniger ausgeprägt waren (Abbildung 23, Zeile 1). Von den Einzugsgebieten der Gruppe OSM 2 bis zur Gruppe OSM 4 ist eine Tendenz zu einer Zunahme der Anzahl und des spezifischen Abflusses der Abflussspitzen zu beobachten, die die Niedrigwasserphasen unterbrechen (Abbildung 23, Zeilen 3, 4 und 5).

8.6.2 Einfluss von langsam und rasch entwässernden Grundwasserspeichern

Abbildung 23 kann auch mit einem speziellen Augenmerk auf die Signale langsam entleerender tiefer Grundwasserspeicher und rasch entleerender oberflächennaher Grundwasserspeicher interpretiert werden. Der Beitrag der tieferen Grundwasserspeicher ist besonders dann dominant, wenn die Ganglinie einen langsamen Rückgang anzeigt. Entsprechend dominiert der Beitrag der oberflächennahen Speicher bei einem schnellen Abflussrückgang. Der Abfluss unterhalb von Q290 von OMM-dominierten Einzugsgebieten (Abbildung 23, Zeile 1) wird demnach hauptsächlich von langsam entleerenden Grundwasserspeichern gespeist. Der Q347-Abfluss liegt relativ nahe beim Q290-Abfluss, was zu niedrigen Q290/Q347-Quotienten (Abbildung 7) und zu einer flach abfallenden Potenzfunktion bei den Dauerkurvengefällen führt. Im Gegensatz dazu ist der Q347-Abfluss von Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4 (Abbildung 23, Zeile 2) aussergewöhnlich niedrig. Dies lässt sich durch die sehr geringen Kapazitäten der langsam entwässernden Grundwasserspeicher erklären. Folglich wird der Abfluss unterhalb von Q290 wesentlich stärker von rasch entwässernden Grundwasserspeichern gespeist als in den Einzugsgebieten der Gruppe OMM, was zu deutlich höheren Q290/Q347-Quotienten führt (Abbildung 6).

8.6.3 Einfluss der Litho-Stratigraphie auf die langsam entwässernden Grundwasserspeicher

Es zeigt sich eine Tendenz zu einer leicht steigenden Kapazität der langsam entwässernden Grundwasserspeicher von den Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppe OSM 4 zu denen der Gruppe OSM 1. Auch ist eine Tendenz erkennbar, dass die langsam entleerenden Grundwasserspeicher von der Gruppe OSM 4 hin zur Gruppe OSM 1 rascher entwässern. Dies zeigt sich anhand einer steileren Rezession der Ganglinien bei den tiefsten Abflüssen.

1468 Die Ganglinien der Einzugsgebiete in den Voralpen zeigen ein ähnliches Verhalten wie die der Einzugsgebiete
1469 der Gruppe OSM 1, jedoch ist in den Voralpen die Kapazität der langsam entwässernden Grundwasserspeicher
1470 etwas grösser als in den Einzugsgebieten der Gruppe OSM 1.

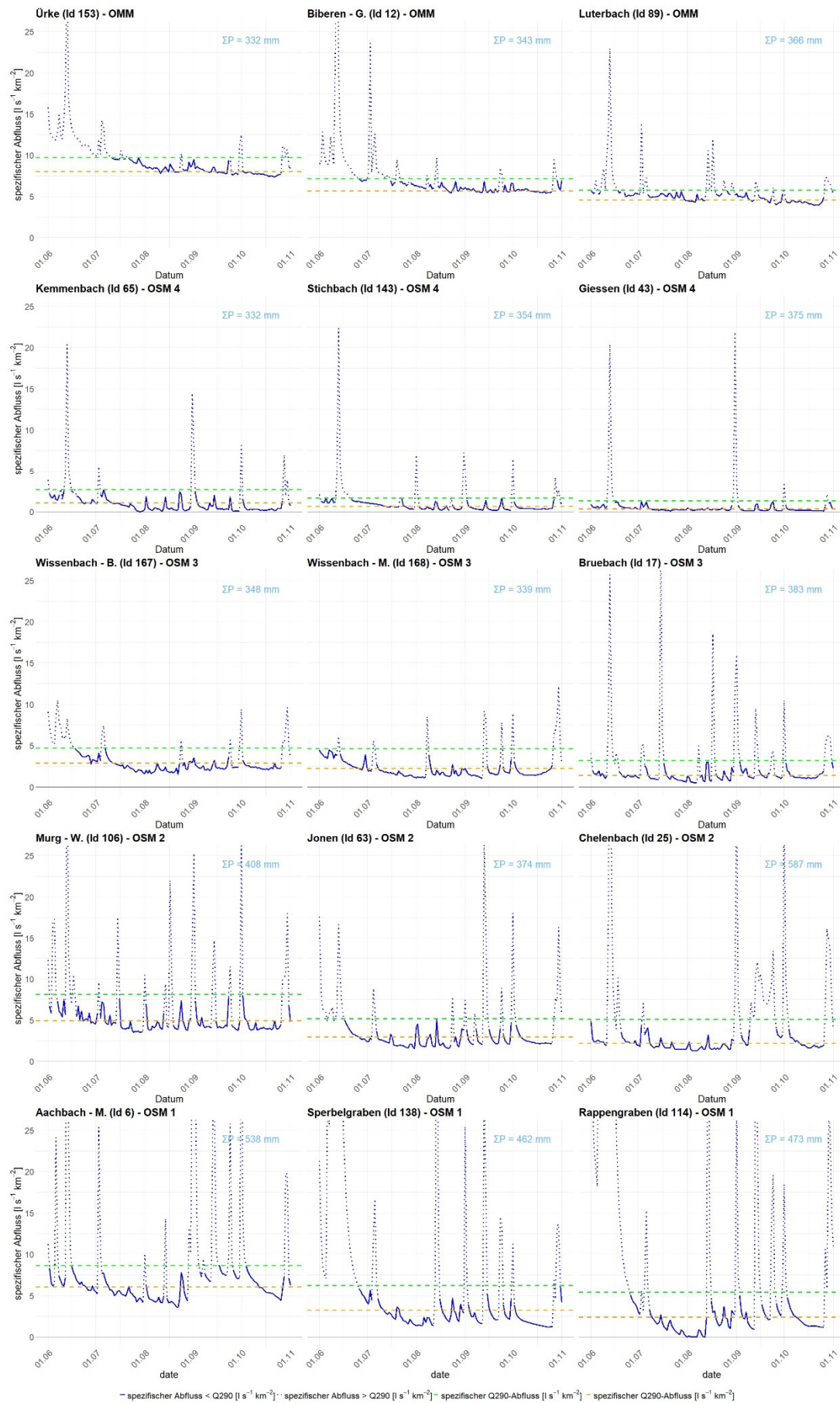


Abbildung 23: Ganglinien vom Sommer und Herbst 2018 für Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppen der OMM und OSM.

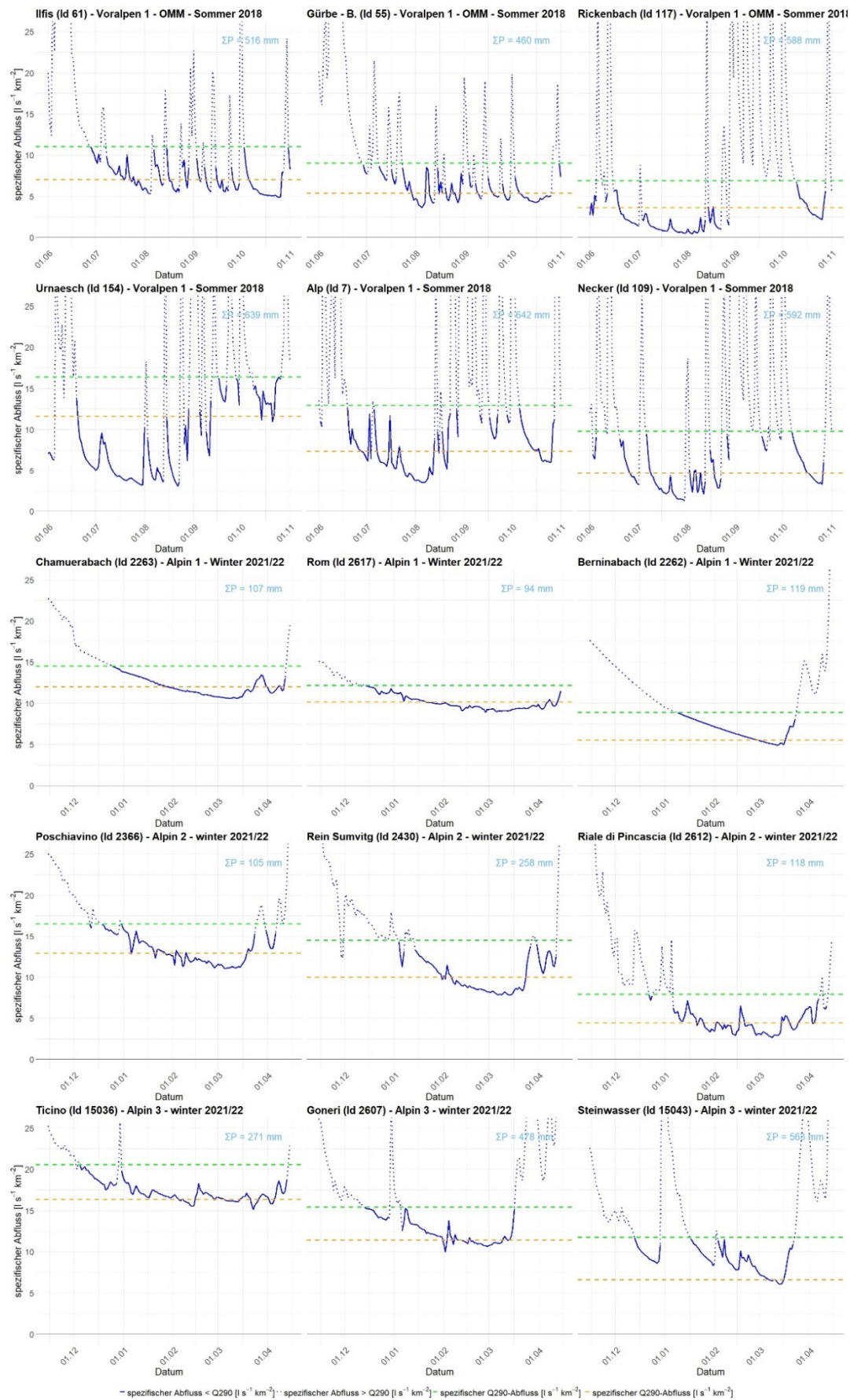


Abbildung 24: Ganglinien vom Sommer und Herbst 2018 für voralpine Einzugsgebiete und vom Winter 2021/22 für alpine Einzugsgebiete.

8.7 Verhalten der Differenz $Q_{290} - Q_{347}$ in Abhängigkeit des Jahresniederschlages

Für drei verschiedene Einzugsgebietsgruppen wurde eine lineare Regression zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz $Q_{290} - Q_{347}$ berechnet. Die Einzugsgebiete der Gruppe A besteht zu wesentlichen Anteilen aus OMM oder Deckenschottern (Gruppen USM&OMM, OMM&USM, OMM, OMM&OSM, OMM & USM & Deckenschotter, Voralpen&OMM; Abbildung 25 A), Gruppe B besteht aus alpinen Einzugsgebieten (Abbildung 25 B) und Gruppe C besteht aus Einzugsgebieten in der Unteren oder Oberen Süßwassermolasse, sowie aus Einzugsgebieten der Voralpen ohne wesentliche OMM-Anteile (Abbildung 25 C). Für Einzugsgebiete der Gruppe C besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz zwischen $Q_{290} - Q_{347}$ ($R^2 = 0,82$; Abbildung 25 C). Bei Einzugsgebieten der Gruppen A und B ist dieser Zusammenhang weniger ausgeprägt ($R^2 = 0,64$ und $R^2 = 0,49$, Abbildung 25 15 A und B).

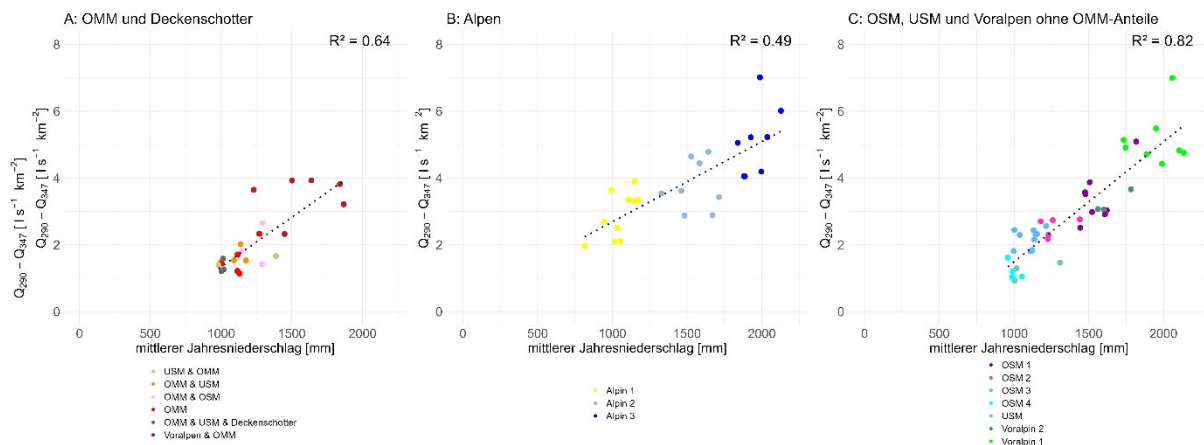


Abbildung 25: Lineare Regression zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz $Q_{290} - Q_{347}$ für drei verschiedene Gruppen von Einzugsgebieten. Gruppe A: Dauerkurvengruppen USM&OMM, OMM&USM, OMM, OMM&OSM, OMM & USM & Deckenschotter, Voralpen&OMM; Gruppe B: Dauerkurvengruppen der Alpinen Einzugsgebiete; Gruppe C: Dauerkurvengruppe OSM 1 bis 4, USM, Voralpin 1, Voralpin 2.

8.8 Q_{347} bestimmende Faktoren innerhalb derselben Dauerkurvengruppen

Mit Hilfe von linearen Regressionen wurde für die Einzugsgebiete in Mittelland und Voralpen der Zusammenhang zwischen den spezifischen Q_{347} -Abflüssen mit verschiedenen Einzugsgebietsparametern wie Flächenanteilen an undurchlässigen und mässig durchlässigen Ablagerungen, hochdurchlässigen Ablagerungen, Waldgebieten oder wie der mittleren Hangneigung, des mittleren Jahresniederschlages oder der Gerinnetichte untersucht. Dazu standen nicht nur die Q_{347} der 72 Messreihen, sondern noch zahlreiche weitere Q_{347} -Werte zur Verfügung, die aus Abflusseinzelmessungen hergeleitet wurden. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 11.6.1 c) vorgestellt und diskutiert.

8.9 Interpretation

8.9.1 Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Niederschlag auf das Gefälle der Dauerkurven

a) Mittelland

Unterschiede zwischen OMM und OSM/USM:

In Bezug auf das Verhalten des Dauerkurvengefälles (Q347/Q290) der Einzugsgebiete im Mittelland lassen sich grob zwei Klassen unterscheiden: Einzugsgebiete, die aus Unterer und Oberer Süsswassermolasse (USM und OSM) sowie Einzugsgebiete, die aus Oberer Meeresmolasse (OMM) aufgebaut sind. Einzugsgebiete mit dominanten USM- und OSM-Anteilen weisen steil abfallende Potenzfunktionen auf (Abbildung 14). Im Vergleich dazu sinkt Q290/Q347 in Einzugsgebieten mit Oberer Meeresmolasse (OMM) selbst bei kleineren Q347-Werten kaum (Abbildung 14). Dieser Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass Einzugsgebiete mit dominanten OMM-Anteilen eine höhere Kapazität an langsam auslaufenden Grundwasserspeichern aufweisen (Abbildung 23). Das Grundwasser fliesst zwar langsam ab, trägt aber wesentlich zu Q290 bei. Dies wurde bereits in anderen Studien aufgezeigt (Carlier et al., 2018; Naef, F et al., 2015; Naef und Margreth, 2017). Im Gegensatz dazu werden die Abflussganglinien zwischen Q290 und Q347 von USM- und OSM aufgebauten Einzugsgebieten wesentlich stärker von rasch entwässernden Grundwasserleitern bestimmt als die von OMM aufgebauten Einzugsgebieten (Abbildung 23). Die Volumina der langsam entwässernden Grundwasserspeicher sind in Einzugsgebieten mit dominanten USM- und OSM-Anteilen im Allgemeinen geringer als in solchen mit hohen OMM-Anteilen. Allerdings wird die Niedrigwasserabflussrezession von Einzugsgebieten, die aus USM- und OSM aufgebaut sind, oft durch Abflussanstiege unterbrochen, die durch kleinere Niederschlagsereignisse in Niedrigwasserperioden verursacht werden (Abbildung 23). In Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind, sind diese Abflussanstiege weniger häufig und weniger ausgeprägt, obwohl die Niederschläge auch dort fallen (Abbildung 23). Dies zeigt, dass die Böden und der Untergrund in USM- und OSM-dominierten Einzugsgebieten, weniger Wasser aufnehmen können als in Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind.

Das unterschiedliche Verhalten der Dauerkurvengefälle (Q290/Q347) zwischen den Einzugsgebieten der Gruppe OMM und denen der Gruppen OSM und USM lässt sich durch Unterschiede im litho-stratigraphischen Aufbau der Molasse erklären. Im Vergleich zur Süsswassermolasse enthält die Meeresmolasse im Zentralen Mittelland deutlich weniger Mergelschichten, bedingt durch die unterschiedlichen Ablagerungsbedingungen vor 30 bis 5 Millionen Jahren (Labhart, 1992). Folglich kann das Wasser in der OMM tiefer eindringen als in der USM oder OSM. Die verhältnismässig geringen Flächenanteile der mässig durchlässigen quartären Ablagerungen (Abbildung 15) und der Umstand, dass die Böden und die Moränen in den Einzugsgebieten der OMM-Gruppe überwiegend aus sandigen Komponenten bestehen, erhöht die Infiltrationskapazität zusätzlich.

Unterschiede zwischen Dauerkurvengruppen von OSM und USM:

Innerhalb der USM- und OSM- Dauerkurvengruppen konnten fünf verschiedene litho-stratigraphische Gruppen mit jeweils unterschiedlichem Muster identifiziert werden (OSM 1, OSM 2, OSM 3, OSM 4, USM, Abbildung 14). Die Potenzfunktionen, die das Verhältnis zwischen Q290/Q347 und Q347 beschreiben, fallen steil ab und verlaufen annähernd parallel. Sie verschieben sich auf der x-Achse von einem sehr niedrigen Q347-Abfluss ($0.4\text{--}1.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) für die Gruppen OSM 4 und USM zu einem niedrigen bis mittleren Q347-Abfluss ($2.0\text{--}6.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) für die Gruppe OSM 1. Aus Abbildung 15 und aus litho-stratigraphischen Informationen der geologischen Karte (Swisstopo, 2022) geht hervor, welche Einzugsgebietseigenschaften für das Verhalten der Dauerkurvengruppen OSM 1 bis OSM 4 und USM entscheidend sind, da diese für die fünf verschiedenen Gruppen unterschiedlich sind. Dazu gehören:

- der Flächenanteil mässig durchlässiger Quartärb lagerungen (Abbildung 15),
- die unterschiedliche Molassearchitektur von Wechsellagerungen aus Sandstein und Mergel (OSM 4) zu Wechsellagerungen aus Konglomerat und Mergel (OSM 1) (Swisstopo, 2022),
- die Zunahme der mittleren Einzugsgebietsneigung (Abbildung 15),
- die Zunahme der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge (Abbildung 15).

Es ist eine Kombination dieser Einflussfaktoren, welche die Entwässerungsprozesse steuern und die parallele Anordnung der Potenzfunktionen der OSM- und USM- Dauerkurvengruppen verursachen.

Auf den ersten Blick erscheint es widersprüchlich, dass ein geringerer Flächenanteil mässig durchlässiger Quartärb lagerungen zu einem höheren Q347-Abfluss führt als ein höherer Flächenanteil. Man würde erwarten, dass die betreffenden Ablagerungen, die hauptsächlich aus Moränen bestehen, als Grundwasserleiter fungieren und somit zu einem höheren Q347-Abfluss führen würden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass Moränen in gewissen Regionen im Schweizer Mittelland als Infiltrationsbarrieren wirken, wobei es diesbezüglich zwischen Moränen auf OMM und auf USM/OSM möglicherweise erhebliche Unterschiede geben könnte. Die Durchlässigkeit der Moränen in den Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4 muss gering sein, da diese Einzugsgebiete sehr geringe Kapazitäten an langsam entwässernden Grundwasserspeichern aufweisen (Abbildung 23, Zeile 2). Nach Niederschlagsereignissen fliesst das Wasser aus solchen Gebieten grösstenteils rasch ab, wobei ein Teil in den obersten Moränenschichten gespeichert werden dürfte. Da die Einzugsgebiete sehr flach sind, bewegt sich das Wasser innerhalb der Moränenschichten kaum, was bedeutet, dass grössere Wassermengen in den oberflächennahen Schichten verdunsten.

Der Anteil der mässig durchlässigen quartären Ablagerungen, die vor allem aus Moränen bestehen, ist bei Einzugsgebieten der Gruppe OSM 3 etwas geringer (55–91 %) als der bei Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4 (83–100 %, Abbildung 23). Die Feianteile in den Moränen sind möglicherweise ebenfalls etwas geringer. Das mittlere Gefälle der Einzugsgebiete der Gruppe OSM 3 ist etwas höher als in solchen der Gruppe OSM 4 (7–13 % gegenüber 4–6 %). Dadurch ist das in der Moräne gespeicherte Wasser etwas mobiler und erreicht Bereiche, in denen es tiefer in den Untergrund sickert und somit eher vor Verdunstung geschützt ist, was das etwas höhere Q347 erklären könnte.

In Gebieten mit wenig mächtigen oder eher durchlässigen Moränen oder in Gebieten, in denen Moränen fehlen, gelangt mehr Wasser an die Oberfläche der Molasse. Da sich dieses Wasser beim Durchsickern durch die Bodenschicht mit Huminsäuren und Kohlendioxid anreichert, konnte es seit dem Rückzug der Gletscher vor 18'000 Jahren (Labhart, 1992) den kalziumreichen Zement zwischen den Sandsteinkörnern auflösen. Dadurch entstand eine Verwitterungsschicht mit neuen, langsam entwässernden Speicherräumen in den Sandsteinbänken der Molasse. Dieser Prozess findet in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) (Gander, P., 2004), der Unteren Süsswassermolasse (USM) und der Oberen Meeresmolasse (OMM) (Mátyás, 1998) statt. Der Zement zwischen den Sandstein- und Konglomeratkomponenten ist in der gesamten Schweizer Molasse karbonathaltig (Platt und Keller, 1992). Da zwischen den Sandsteinbänken der OSM und USM horizontal liegende Mergelschichten häufig sind, bleibt aber die Infiltrations- und Speicherkapazität dieser Speicher im Vergleich zu den Grundwasserleitern in der OMM gering.

Da der Anteil mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen noch geringer (37 – 85 % bzw. 0 – 48 %), die Einzugsgebietsneigung noch steiler (8 – 16 % bzw. 20 – 61 %) und die durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge in den Gruppen OSM 2 und OSM 1 noch höher ist (1179 – 1440 mm bzw. 1443 – 1817 mm) als in den Gruppen OSM 4 und OSM 3 (Abbildung 15), wurde dieser Verwitterungsprozess zunehmend effektiver, was die ansteigenden Q347 von Gruppe OSM 4 zu Gruppe OSM 1 hin erklären könnte. Da die Poren in der verwitterten Molasse von einer Sandstein-dominierten zu einer Konglomerat-dominierten Matrix zunehmend grösser werden und die Anzahl der durch das Relief geöffneten Klüfte steigt (Gander, P., 2004), erhöht sich auch die Gesamtporosität. Die grösseren Poren führen dazu, dass die langsam entwässernden Grundwasserspeicher in den Konglomerat-Mergel-dominierten Einzugsgebieten (Gruppe OSM 1) etwas rascher entwässern als jene in den Sandstein-Mergel-dominierten Einzugsgebieten (Gruppe OSM 3 und OSM 4; vergleiche langsam entwässernde Gangliniensegmente bei den tiefsten Abflüssen in Abbildung 23, Zeilen 2 bis 5). Das zunehmende Einzugsgebietsgefälle könnte die raschere Entwässerung begünstigen. Da der durchschnittliche Q347-Abfluss von Gruppe OSM 4 zu OSM 1 ansteigt, wird diese raschere Entwässerung durch ein grösseres Speichervolumen in der Molasse und durch höhere Niederschlagsmengen kompensiert. Höhere Niederschlagsmengen in Niedrigwasserperioden (Abbildung 23) verzögern das Austrocknen der langsam entwässernden Speicher der Einzugsgebiete der Gruppe OSM 1 im Vergleich zu OSM 4, was Q347-erhöhend wirken könnte. Solange die rasch entwässernden Grundwasserspeicher gesättigt sind, speisen sie auch die darunter liegenden, langsam entwässernden Grundwasserspeicher.

b) Alpen

Die Dauerkurvegefälle alpiner Einzugsgebiete hängen primär vom mittleren Jahresniederschlag und nicht von der litho-stratigraphischen Zusammensetzung der Einzugsgebiete ab. Je höher der mittlere Jahresniederschlag, desto höher das Verhältnis Q290/Q347. Die Potenzfunktionen verlaufen flach, ähnlich wie bei der OMM-Gruppe (Abbildung 14). Sie verlaufen nahezu parallel und verschieben sich mit steigendem mittlerem Jahresniederschlag vertikal. Für dieses Muster gibt es verschiedene physikalische Gründe:

- 1611 - **Erhöhte Kapazität langsam entwässernder Grundwasserspeicher:** Die alpinen Einzugsgebiete weisen
1612 im Allgemeinen eine höhere Kapazität langsam entwässernder Grundwasserspeicher auf als die
1613 Einzugsgebiete des Schweizer Mittellandes, was sich in den höheren Q347-Abflüssen widerspiegelt.
1614 Ähnlich wie bei den Einzugsgebieten der Gruppe OMM im Mittelland werden die Abflussganglinien
1615 alpiner Einzugsgebiete unterhalb von Q290 von den Volumina langsam entwässernder
1616 Grundwasserspeicher dominiert (Abbildung 23, Zeilen 3 bis 5). Die im Vergleich zu den Mittelland-
1617 Einzugsgebieten erhöhten Speicherkapazitäten lassen sich durch zwei Effekte erklären. Zum einen
1618 weisen alpine Einzugsgebiete deutlich mehr Klüfte und Verwerfungen auf als Einzugsgebiete im
1619 Mittelland, da sie stärkeren tektonischen Prozessen unterworfen waren. Viele dieser Klüfte und
1620 Verwerfungen stellen effiziente Speicher dar. Zweitens sind Moränen in den Alpenregionen in der Regel
1621 durchlässiger als jene im Mittelland. Dies liegt daran, dass alpine Moränen mehr grobkörniges Material
1622 wie Kiese, Sande und Blöcke enthalten und weniger verdichtet wurden als Moränen im Mittelland. Im
1623 Vergleich zu Moränen im Mittelland tragen alpine Moränen deshalb wahrscheinlich eher stärker zu
1624 Niedrigwasserabflüssen bei (vgl. Kapitel 11.6.4 c).

- 1625
1626 - **Seltene Abflusspeaks im Winter:** In den Alpen fallen 50 bis 100 % der Tage mit einem Abfluss $Q < Q_{290}$
1627 in die Monate zwischen November und März (Abbildung 17 A). In über 80 % der alpinen Einzugsgebiete
1628 liegt dieser Anteil sogar über 75 %. Im Vergleich dazu beträgt er im Mittelland weniger als 30 %. Daher
1629 fällt in den Alpen in der winterlichen Niedrigwasserperioden ein Grossteil des Niederschlags als Schnee
1630 und fließt erst mit einer Verzögerung von mehreren Wochen oder sogar Monaten ab. Den
1631 Niedrigwasserabflussganglinien der alpinen Einzugsgebiete fehlen deshalb die durch Regen
1632 verursachten Abflussschwankungen, die in den Niedrigwasserganglinien der OSM- und USM-
1633 dominierten Einzugsgebieten des Mittellandes und in den Einzugsgebieten der Voralpen häufig
1634 auftreten (Abbildung 23 und Abbildung 24). Die Winter-Ganglinie alpiner Gebiete zeigt meist einen
1635 kontinuierlichen Rückgang des Abflusses. Sie repräsentiert die Entwässerung der langsam entleerenden
1636 Grundwasserspeicher und wird nur durch vereinzelte Niederschlagsereignisse mit hoher
1637 Schneefallgrenze unterbrochen. Dieser Aspekt trägt dazu bei, dass der Beitrag rasch entleerender
1638 Grundwasserspeicher zu Abflüssen kleiner Q_{290} und die Unterschiede im Dauerkurvengefälle
1639 Q_{290}/Q_{347} geringer ausfallen als bei Mittelland-Einzugsgebieten der Gruppen OSM und USM.

- 1640
1641 - **Fehlende Evapotranspiration in der Niedrigwasserphase:** Im Gegensatz zu Einzugsgebieten im
1642 Mittelland, ist der Einfluss der Evapotranspiration auf die Niedrigwasserganglinie alpiner
1643 Einzugsgebiete wesentlich geringer (Abbildung 21), da im Winter die Evapotranspiration fast 0 beträgt.

1644
1645 Warum die Q_{290}/Q_{347} -Quotienten mit steigenden mittleren Jahresniederschlagsmengen zunehmen, konnte
1646 mit diesen Erkenntnissen jedoch noch nicht geklärt werden. Die höchste mittlere Jahresniederschlagsmenge in
1647 alpinen Einzugsgebieten beträgt 2138 mm und ist damit fast dreimal so hoch wie die niedrigste (814 mm). In
1648 Einzugsgebieten mit hohen Jahresniederschlägen könnten die langsam entwässernden Grundwasserspeicher zu

1649 Winterbeginn generell etwas besser gefüllt sein als in solchen mit niedrigeren Jahresniederschlägen. Dieser
1650 erhöhte Speicherfüllstand könnte sich in einer steileren Rezessionskurve ausdrücken, was eine steilere
1651 Dauerkurve verursachen würde. Das ist eine mögliche Erklärung, die noch nicht belegt ist.

1652 c) Voralpen

1653 Die Einzugsgebiete der Gruppe Voralpin 2 weisen ähnliche Werte hinsichtlich Hangneigung und mittlerem
1654 Jahresniederschlag auf wie die der Gruppe OSM 1 des Mittellandes (Abbildung 9). Dies gilt auch für die Anzahl
1655 der Niedrigwassertage im Winter (Abbildung 17 A). Der Anteil mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen ist
1656 in den Einzugsgebieten der Gruppe Voralpin 2 etwas höher als in denen der Gruppe OSM 1 (Abbildung 15).
1657 Aufgrund der ähnlichen Einzugsgebietseigenschaften ist es plausibel, dass die Werte für Q290/Q347 und Q347
1658 dieser beiden Gruppen gut übereinstimmen.

1659 Im Vergleich zur Gruppe Voralpin 2 sind die Werte für Q290/Q347 und Q347 in der Gruppe Voralpin 1 höher.
1660 Die Potenzfunktion der Gruppe Voralpin 1 fällt zunächst recht steil ab und flacht mit steigendem Q347 deutlich
1661 ab. Bei höheren Q347-Abflüssen stimmt die Potenzfunktion mit der der Gruppe Alpin 3 überein. Das
1662 unterschiedliche Q290/Q347-Muster zwischen den Gruppen Voralpin 1 und Voralpin 2 lässt sich durch die
1663 Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag, in der mittleren Geländeneigung und in der Anzahl der
1664 Niedrigwassertage in den Wintermonaten (November–März) erklären (Abbildung 11 und Abbildung 17 A). Die
1665 auch in Niedrigwasserperioden vergleichsweise hohen Niederschlagsmengen dürften dazu beitragen, dass die
1666 Potenzfunktion der Gruppe Voralpin 1 nicht so steil abfällt wie die der Gruppen OSM 1 bis OSM 4. Sie sorgen für
1667 hohe Differenzwerte Q290 – Q347 (Abbildung 25).

1668

1669 Tendenziell sind die Q347-Abflüsse der Gruppe Voralpin 1 eher grösser als die der Gruppe Voralpin 2. Die Gründe
1670 dafür sind:

1671

1672 - Die Einzugsgebiete der Gruppe Voralpin 1 weisen wahrscheinlich mehr Klüfte und Verwerfungen auf
1673 als die der Voralpin 2, weil sie näher an den Alpen liegen und daher stärker von der Alpenfaltung
1674 betroffen waren.

1675

1676 - Die Niedrigwasserganglinien der Einzugsgebiete der Gruppe Voralpin 1 werden wahrscheinlich stärker
1677 durch Schneeschmelze beeinflusst als diejenigen der Gruppe Voralpin 2, weil die Einzugsgebiete der
1678 Gruppe Voralpin 1 mehr Niedrigwassertage im Winter aufweisen als diejenigen der Gruppe Voralpin 2
1679 (Abbildung 17 A).

1680

1681 - Die höheren Niederschlagsmengen in den Einzugsgebieten der Gruppe Voralpin 1 im Vergleich zu denen
1682 der Gruppe Voralpin 2 könnten die Entleerung langsam entwässernden Grundwasserleiter verzögern,
1683 was zu höheren Q347-Werten führen könnte. Da in den Einzugsgebieten der Gruppe Voralpin 1 mehr
1684 Niedrigwassertage im Herbst und im Winter auftreten, wird der Abflussrückgang der Einzugsgebiete

1685 der Gruppen Voralpin 1 weniger stark durch Evapotranspiration beeinflusst als derjenige der Gruppe
1686 Voralpin 2.

1687

1688

1689 8.9.2 Zusammenhang zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der 1690 Differenz Q290 – Q347

1691 Für Mittelland-Einzugsgebiete, die aus USM oder OSM aufgebaut sind und für Voralpen-Einzugsgebiete ohne
1692 wesentliche OMM-Anteile zeigt sich ein starker Zusammenhang zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und
1693 der Differenz Q290 - Q347 (R^2 von 0.82). Für Mittelland- Einzugsgebiete mit wesentlichen Anteilen an OMM oder
1694 an Deckenschottern und für alpine Einzugsgebiete ist dieser Zusammenhang weniger stark ($R^2 = 0.62$ bzw. $R =$
1695 0.49 ; Abbildung 25 A und B). Die Korrelation zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz Q290
1696 – Q347 ist dort höher, wo die Abflüsse zwischen Q290 und Q347 vor allem von rasch entwässernden
1697 Grundwasserspeichern gespeist werden; denn diese sind viel stärker auf die kurz- und mittelfristigen
1698 Niederschläge angewiesen. In Einzugsgebieten, wo die Abflüsse kleiner Q290 zu wesentlichen Anteilen aus
1699 langsam entwässernden Grundwasserspeichern gespeist werden, ist die Korrelation kleiner, weil die Beiträge
1700 der langsam entwässernden Grundwasserspeicher durch ihre Infiltrations- und Speicherkapazität bestimmt
1701 werden. Die jährlichen Niederschlagsmengen sind weniger bedeutend.

1702 8.9.3 Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Niederschlag auf 1703 die Masterrezessionskurve

1704 Zwischen dem Verhalten des Rezessionskoeffizienten b und dem der Dauerkurvengefälle zeigen sich Analogien
1705 (vergleiche Abbildung 20 mit Abbildung 14). Die Potenzfunktionen der Dauerkurvengefälle (Abbildung 14) und
1706 die log-Kurven des Rezessionskoeffizienten b weisen in Abhängigkeit zum spezifischen Q347 ein ähnliches
1707 Muster auf, sie sind aber spiegelverkehrt angeordnet. Das zeigt, dass sich die Rezessionskoeffizienten b und die
1708 Dauerkurvengefälle in Beziehung zu den litho-stratigraphischen, topographischen und klimatologischen
1709 Einflussfaktoren ähnlich verhalten.

1710 In den Kapiteln 8.6 und 8.9.1 wurde der Begriff der «langsam» und rasch «entwässernden»
1711 Grundwasserspeicher eingeführt. Es wurde bisher keine quantitative Definition dieser Speicher vorgenommen.
1712 Das Rezessionsmodell MRC_slow wurde zwar mit der Absicht entwickelt, die «eher langsame» Entwässerung
1713 der Niedrigwasserrezession zu beschreiben. Masterrezessionskurven der Gruppe OSM 4 werden aber wesentlich
1714 stärker durch Beiträge aus rasch entwässernden Grundwasserspeichern beeinflusst als Masterrezessionskurven
1715 der Gruppe OMM. Demnach lassen sich die Beiträge der langsam und rasch entwässernden
1716 Grundwasserspeicher anhand der mit MRC_slow berechneten Masterrezessionskurven nicht differenzieren.

8.9.4 Saisonale Unterschiede im Rezessionsverhalten

Auffallend sind die grossen Unterschiede in der Rezessionsdauer und in den Rezessionsvolumina (Q290 bis Q360) zwischen den Sommermonaten und den Frühlings- und Herbstmonaten. Hierfür sehen wir drei mögliche Gründe:

- Unterschiede in der Evapotranspirationsrate: Die Evapotranspirationsrate ist in den Frühlings- und Herbstmonaten um ein Vielfaches niedriger als in den Sommermonaten. Der Einfluss einer höheren Evapotranspirationsrate dürfte sich vor allem in zwei Situationen unmittelbar auf die Rezessionskurve im Niedrigwasserbereich auswirken.

Situation 1: Wenn in einer Niedrigwasserphase Niederschläge fallen, deren Mengen nicht so hoch sind, um die Niedrigwasserphase längerfristig zu beenden, aber genügend hoch, um einen kurzfristigen Abflussanstieg auf über Q290 zu erwirken, dann bewirkt die hohe Verdunstungsrate im Sommer eine raschere Entwässerung von oberflächennahen Speichern als in den Frühlings- oder Herbstmonaten. Das heisst die Abflussganglinie fällt dann in Sommermonaten möglicherweise rascher wieder unter Q290 als in Frühlings- oder Herbstmonaten. Dies zeigt sich dann, wenn die Niederschläge nur einen raschen Anstieg und einen raschen Rückgang verursachen. Dann speisen auch Beiträge aus den Bodenspeichern und oberflächennahen Grundwasserspeichern die Abflüsse kleiner Q290. Letztere sind durch Evapotranspiration betroffen. Im Frühling und im Herbst kann deshalb die Rezession verlangsamt werden.

Situation 2: Nahe am Fliessgewässer liegende oberflächennahe Speicher, die den Bach auch in Niedrigwasserperioden speisen, weil sie kontinuierlich durch Grundwasserspeicher der angrenzenden Hänge gespeist werden, können in den Sommermonaten mehr Wasser durch Verdunstung verlieren als in Frühlings- und Herbstmonaten. Es ist denkbar, dass z.B. Moore, die an Fliessgewässer angeschlossen sind, diesbezüglich besonders anfällig sind.

- Unterschiede im Speicherfüllstand: Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich sind flacher, wenn die tiefliegenden, langsam entwässernden Speicher gut gefüllt sind, als wenn diese weniger gut gefüllt sind. Eine bessere Sättigung der langsam entwässernden Speicher, tritt im Frühling (April, Mai) wohl häufiger auf als im Spätsommer (Juli, August).

- Unterschiede in der Niederschlagsintensität und Infiltrationskapazität im Sommer im Vergleich zu Frühling/Herbst: In den Sommermonaten treten Gewitter mit hohen Niederschlagsintensitäten wesentlich häufiger auf als im Frühling und im Herbst. Im Frühling und im Herbst sind hingegen Landregen mit geringerer Intensität häufiger. Bei geringeren Niederschlagsintensitäten kann

1754 tendenziell mehr Wasser in den Boden und in den Untergrund infiltrieren als bei höheren. Zudem
1755 können die oberen Bodenschichten aufgrund der Austrocknung in den heißen Sommermonaten eine
1756 hydrophobe Eigenschaft entwickeln, die den Oberflächenabfluss bei Gewitterereignissen fördert. Diese
1757 Aspekte könnten dazu führen, dass die oberflächennahen Grundwasserspeicher in den
1758 Sommermonaten weniger gut gefüllt werden als in den Frühlings- und Herbstmonaten, was in den
1759 Sommermonaten zu steileren Rezessionskurven führen könnte als in Frühlings- und Herbstmonaten.

1760

1761 Der Einfluss von Evapotranspirationsrate und Niederschlagsintensität auf die Masterrezessionskurven hat auch
1762 einen Q347-reduzierenden Effekt. Würden die Rezessionskurven im Sommer ähnlich flach verlaufen wie im
1763 Frühling oder im Herbst, wäre das Q347 mancherorts höher. Das dürfte vor allem bei Einzugsgebieten mit
1764 niedrigen Q347 eine Rolle spielen, wo die Abflüsse zwischen Q290 und Q347 stark durch die rasch
1765 entwässernden Grundwasserspeicher gespeist werden (Dauerkurvengruppen OSM 4, OSM 3, USM).

1766

1767

1768

9 Bestimmung von Q347 und von Dauerkurven in ungemessenen Einzugsgebieten

Die neuen Erkenntnisse zum Verhalten der Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich in Abhängigkeit von Q347, Geologie, Jahresniederschlag, Geländeneigung und Verdunstung eröffnen die Möglichkeit, Dauerkurvengefälle auch in bislang ungemessenen Einzugsgebieten zuverlässig zu bestimmen.

Ist sowohl der Q347-Abfluss als auch die Zuordnung zur Dauerkurvengruppe bekannt, lassen sich daraus das Dauerkurvengefälle sowie der Q290-Abfluss ableiten (Abbildung 26). Die Zuordnung der Dauerkurvengruppe kann mithilfe der geologischen Karte, des mittleren Jahresniederschlags und der mittleren Geländeneigung erfolgen (vgl. Kapitel 10 und Abbildung 48). Das Q347 selbst lässt sich durch eine oder mehrere Einzelmessungen des Abflusses während einer Trockenperiode ermitteln (vgl. Kapitel 9.2).

Diese Methodik wurde anhand von 22 ungemessenen Untersuchungsgebieten im Einzugsgebiet der Töss und im Altbach (Bassersdorf) getestet. Die Gebiete erstrecken sich entlang der Töss vom Rheinzufuss bis in das Quellgebiet (Abbildung 27). Mit Ausnahme eines Teilgebiets befinden sich alle Untersuchungsgebiete vollständig innerhalb der Oberen Süswassermolasse (OSM). Das nördlich gelegene Teilgebiet 48 besteht zu 90 % aus OSM, zu 10 % aus OMM und ist zu 32 % von höherliegenden Deckenschottern (über OSM) bedeckt. Die gezielte Auswahl der OSM als Testregion erfolgte aufgrund der erhöhten Komplexität bei der Ermittlung der Dauerkurvenparameter. In Einzugsgebieten der OSM und USM im Mittelland wirken sich Fehler in der Abschätzung des Q347 stärker auf die Bestimmung der Dauerkurve aus als bei der OMM oder bei alpinen Einzugsgebieten. Dies liegt daran, dass die Trendlinien der Dauerkurvengefälle in diesen geologischen Einheiten deutlich steiler verlaufen als beispielsweise in der OMM.

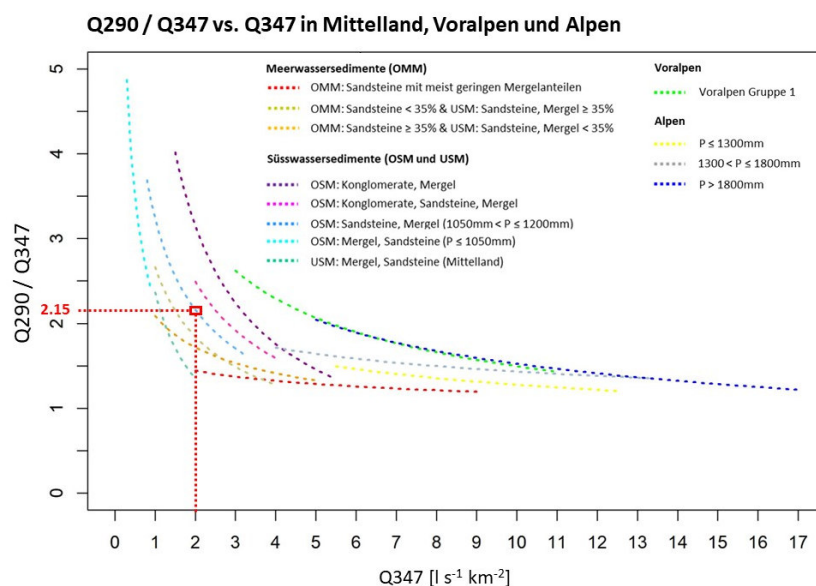


Abbildung 26: Ist das Q347 sowie die geologisch-klimatologische Dauerkurvengruppe eines Einzugsgebiets ohne Abflussmessreihe bekannt, lässt sich dessen Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich bestimmen. Ein Beispiel: Ein Einzugsgebiet der OSM-Gruppe 2 mit einem geschätzten Q347 von $2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ weist ein Dauerkurvengefälle von 2.15 und damit ein Q290 von $4.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf.

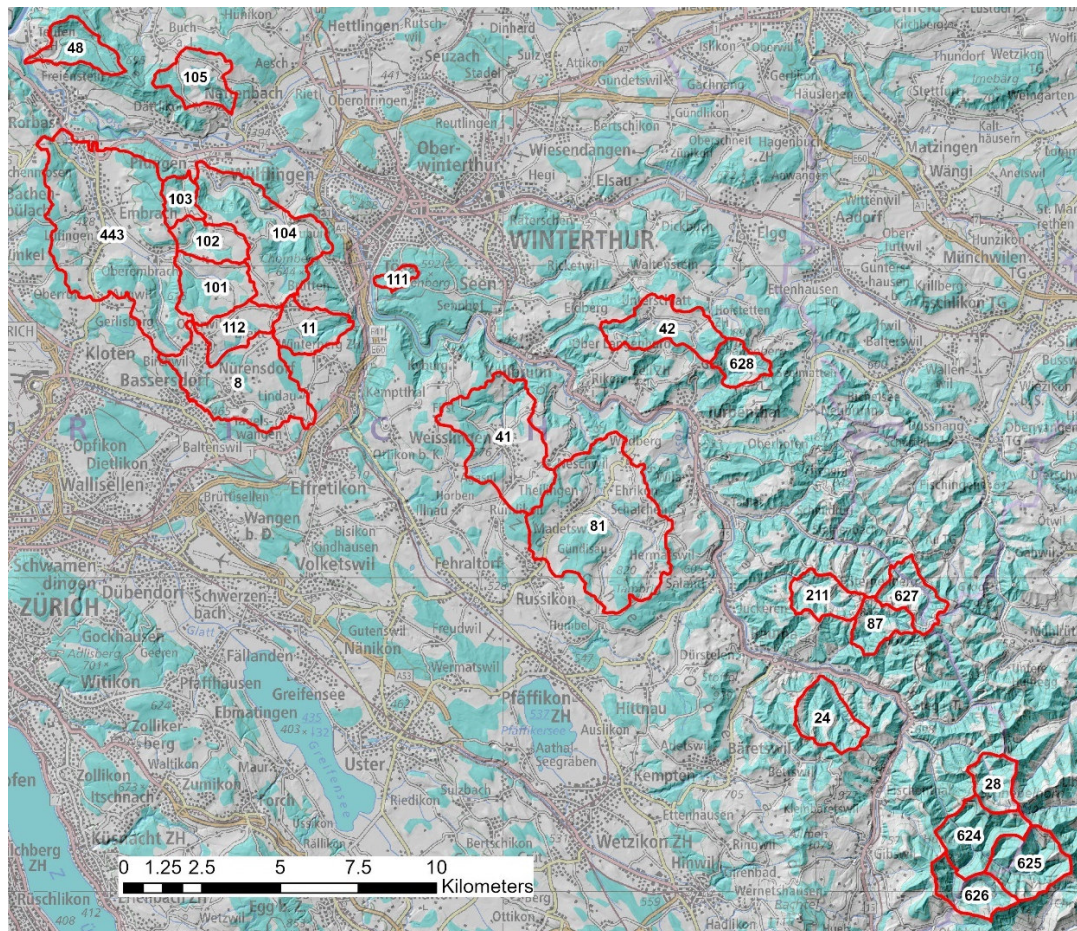


Abbildung 27: Untersuchungsgebiete an der Töss und am Altbach (Bassersdorf), in denen das neue Verfahren zur Bestimmung der Dauerkurven getestet wurde.

9.1 Bestimmung der Dauerkurvengruppen

Die Untersuchungsgebiete am Oberlauf der Töss werden von Konglomerat-Mergel- und Konglomerat-Sandstein-Mergel-Wechselagerungen dominiert, am Unterlauf dominieren Sandstein-Mergel-Wechselagerungen (Abbildung 28). Auf Basis der Festgesteinslithologie, der mittleren Geländeneigung, des mittleren Jahresniederschlags sowie des Anteils an undurchlässigen bzw. mässig durchlässigen Quartärablagerungen wurde jedem der Testgebiete vorläufig eine Dauerkurvengruppe zugewiesen (

Tabelle 6). 19 der insgesamt 23 Untersuchungsgebiete lassen sich eindeutig einer der vier OSM-Dauerkurvengruppen zuordnen. In vier Gebieten – Hutzikerbach (628), Mittlerer Chrebsbach (111), Müllibach (104) und Tüfenbach (48) – liegen jedoch eine oder mehrere der drei Kriterien in einem Überschneidungsbereich zwischen zwei Gruppen (gelb markiert in

1813
1814
1815
1816
1817

1818 Tabelle 6). In diesen Fällen erfolgte eine erste, vorläufige Gruppenzuweisung. Die Ergebnisse aus Einzel-
1819 Abflussmessungen boten die Möglichkeit, die zugewiesene Dauerkurve zu überprüfen und gegebenenfalls zu
1820 korrigieren (vgl. Kapitel 9.2.5). Auffällig ist, dass einige Teilgebiete der Gruppe 3 einen vergleichsweise geringen
1821 Anteil an undurchlässigem bzw. mässig durchlässigem Quartärmaterial aufweisen – ein eher ungewöhnliches
1822 Merkmal in ansonsten vergleichbarer Landschaft. Solche Diskrepanzen könnten auf inkonsistente
1823 Kartierungsansätze der Quartärablagerungen zwischen benachbarten geologischen Kartenblättern
1824 zurückzuführen sein, was an manchen Kartenblattgrenzen deutlich sichtbar wird (Abbildung 76, Abbildung 77,
1825 Abbildung 78). Diese Inkonsistenzen sollten bei der Verwendung quartärbezogener Angaben entsprechend
1826 berücksichtigt werden.

1827 Die Angaben zum Volumen der Schottergrundwasserkörper dienen als eine ergänzende Information für die
1828 Auswahl von geeigneten Referenzgebieten im Zusammenhang mit der Umrechnung der Abflussperzentile von
1829 Referenzgebieten auf die Untersuchungsgebiete (vgl. Kapitel 9.2.5). Die Lage und Gruppenzugehörigkeit der
1830 Untersuchungsgebiete sind in Abbildung 29 dargestellt.

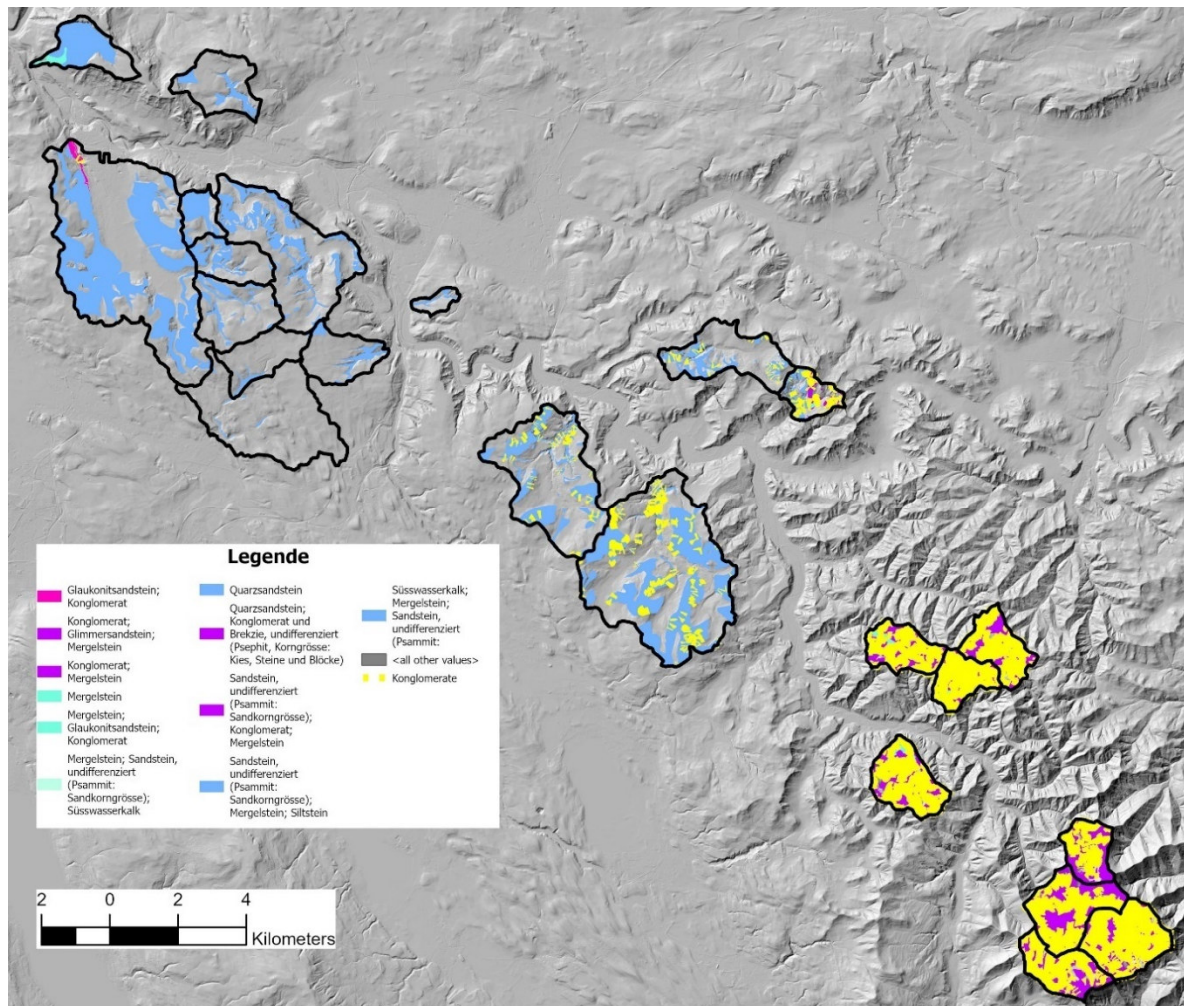


Abbildung 28: Lithologischer Aufbau der Untersuchungsgebiete. Im oberen Teil der Töss dominieren konglomeratreiche, im unteren Teil sandsteinreiche Gebiete.

Tabelle 6: Einzugsgebieteigenschaften für die Testeinzugsgebiete mit der provisorischen Klassifikation der Dauerkurvengruppe. Gelb eingefärbte Felder markieren Werte, die im Übergangsbereich zwischen zwei Dauerkurvengruppen liegen.

Id	Name Gewässer	Fläche [km ²]	Standort	Lithologie Festgestein	Anteil an undurchlässigem und gehemmt durchlässigem Quartär [%]	mittlere Geländeneigung [%]	mittlerer Jahresniederschlag [mm]	Volumen Schottergrundwasser [1000 m ³ km ⁻²]	Provisorische Dauerkurvengruppe
625	Hintertöss	4.21	Tössscheidi	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	1	62	1877	0	1
626	Vordertöss	2.86	Tössscheidi	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	4	54	1813	0	1
624	Töss	4.09	Beicher	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	1	65	1761	0	1
28	Brüttenbach	2.19	Ohrüti, Brüttental	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	3	61	1705	0	1
627	Steinenbach	2.73	Horn bei Steinenbach	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	3	44	1539	0	1
87	Tobelbach	2.2	Bauma	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	3	45	1538	0	1
211	Lochbach	2.53	Saland	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	1	38	1520	0	1
24	Walenbach	3.34	Bauma	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	4	47	1511	0	1
628	Hutzikerbach	1.84	Turbenthal	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	6	34	1433	0	2
42	Bäntalbach	4.45	Nussberg	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	40	20	1393	0	2
81	Tobelbach	16.79	Hinterrikon	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	43	16	1376	162	2
41	Wiessenbach	9.45	Brüngen	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	58	14	1288	139	2
111	Mittlerer Chrebsbach	0.64	Winterthur	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	73	15	1257	0	2
11	Hellbach	2.9	Töss	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	75	9	1168	0	3
8000	Altbach TEZG	9.06	Bassersdorf	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	73	8	1155	0	3
112	Altbach	2.75	Birchwil	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	83	6	1154	0	3
101	Moosbach	4.08	Oberembrach	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	64	12	1108	0	3
105	Tobelbach	3.3	Dättlikon	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	66	16	1105	1	3
103	Tobelbach Sued	1.53	Pfungen	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	35	15	1083	0	3
102	Wildbach	2.6	Oberembrach	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	56	16	1082	0	3
104	Müllibach	9.45	Pfungen	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	39	20	1079	571	3
48	Tüfenbach	2.76	Teufen	90% Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh + 10% OMM	32	25	1059	0	3
443	Wildbach bei Rorbas	20.42	Rorbas, Töss	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	44	13	1048	1026	3

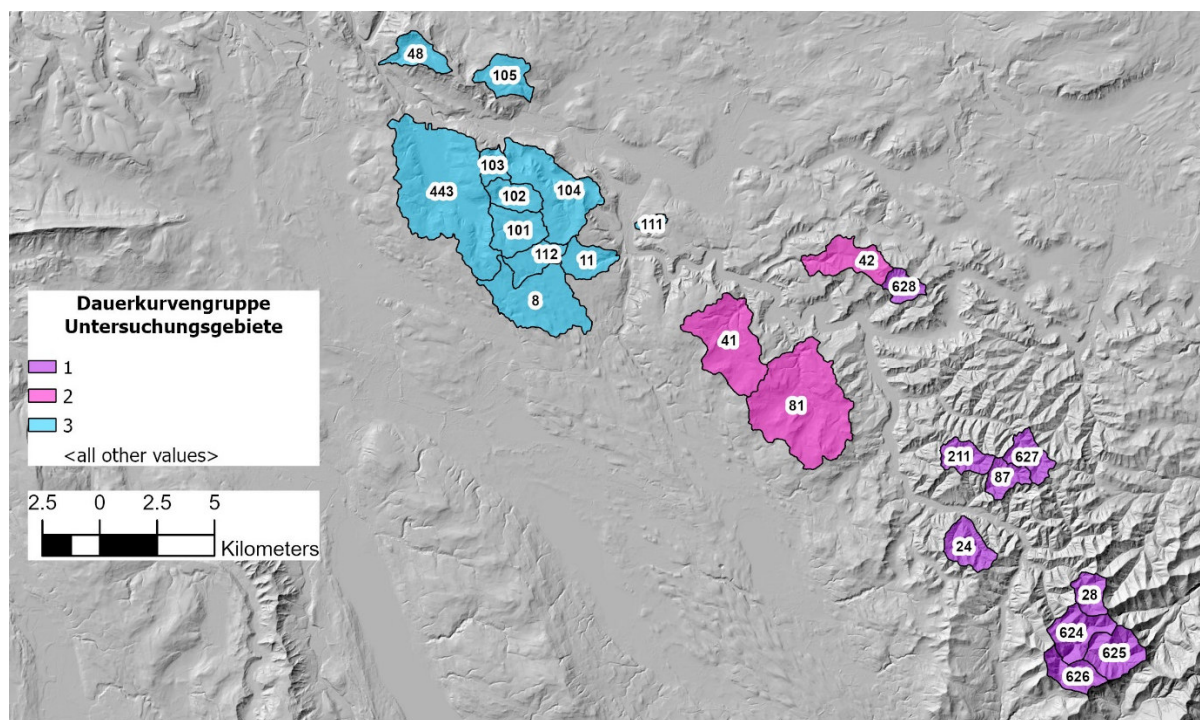


Abbildung 29: Provisorische Dauerkurvengruppen der Untersuchungsgebiete.

9.2 Bestimmung von Q347 und Q290

Einzugsgebiete mit derselben Dauerkurvengruppe und einem vergleichbaren Q347 zeigen bei Niedrigwasser ein ähnliches Abflussverhalten (Abbildung 35 und Abbildung 34). In einer Phase des Abflussrückgangs einer Niedrigwasserperiode ($Q < Q_{290}$) sollte das Abflussperzentil (z. B. Q320, Q330 oder Q347) eines ungemessenen Einzugsgebiets unter natürlichen Bedingungen in einem ähnlichen Bereich liegen, wie jenes eines benachbarten gemessenen Gebiets mit gleicher Dauerkurvengruppe und ähnlichem Q347. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Niederschlagsmengen in der vorhergehenden Periode vergleichbar waren. Grössere Unterschiede führen zu

1854 abweichenden Speicherfüllständen, was wiederum den zeitlichen Verlauf der Speicherentleerung beeinflusst.
1855 Dieses ähnliche Verhalten bei Niedrigwasser wird genutzt, um das Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten zu
1856 bestimmen. Dazu wird eine Einzelmessung des Abflusses zu einem Zeitpunkt vorgenommen, zu dem in einem
1857 benachbarten, gemessenen Referenzgebiet mit gleicher Dauerkurvengruppe der Abfluss im Bereich von Q347
1858 liegt. Das Abflussperzentil des Untersuchungsgebiets wird dann mit dem des benachbarten gemessenen Gebiets
1859 gleichgesetzt. Deshalb wird das gemessene Einzugsgebiet, das das Abflussperzentil liefert, als Referenzgebiet
1860 bezeichnet. Anhand der Dauerkurvensteigung, die sich aus den Trendlinien der Dauerkurvengefälle ermitteln
1861 lässt (Abbildung 5), kann danach ausgehend vom ermittelten Abflussperzentil das Q347 bestimmt werden. Ist
1862 das Q347 bekannt, kann das Q290 über das Verhältnis $Q290/Q347$ bestimmt werden (Abbildung 26).

1863 9.2.1 Durchführung der Abfluss-Einzelmessungen

1864 Insgesamt wurden in den 22 Untersuchungsgebieten drei Abflussmessungen während zweier
1865 Niedrigwasserperioden durchgeführt. Die erste Messkampagne fand vom 16. bis 24. September 2020 statt, die
1866 zweite und dritte vom 10. bis 21. August 2023. Die Messzeitpunkte wurden gezielt so gewählt, dass zwei der drei
1867 Einzelmessungen etwa im Bereich zwischen Q320 und Q347 lagen und eine weitere zwischen Q290 und Q320.
1868 Für die Bestimmung des Q347-Abflusses wurde jeweils derjenige der beiden Abflusswerte im tieferen
1869 Perzentilbereich herangezogen, der näher bei Q347 lag. Die beiden übrigen Messwerte dienten zur Validierung
1870 der daraus abgeleiteten Dauerkurve. Im Untersuchungsgebiet 627 wurde lediglich eine Einzelmessung im
1871 September 2020 durchgeführt.

1872 9.2.2 Ermittlung der Wasserentnahmen und -rückgaben

1873 In den Untersuchungsgebieten wurden die Wasserentnahmemengen am Tag der Abflussmessungen mittels
1874 Telefoninterviews erfragt und anschliessend zum gemessenen Abfluss addiert. In 4 der 22 Untersuchungsgebiete
1875 lag die Korrekturrate in der Periode der Messungen bei über 20 % des korrigierten Abflusswerts (Abbildung 30).
1876 In weiteren fünf Gebieten betrug sie weniger als 10 %. In den übrigen Untersuchungsgebieten konnten keine
1877 wesentlichen Entnahmen durch die öffentliche Wasserversorgung festgestellt werden.

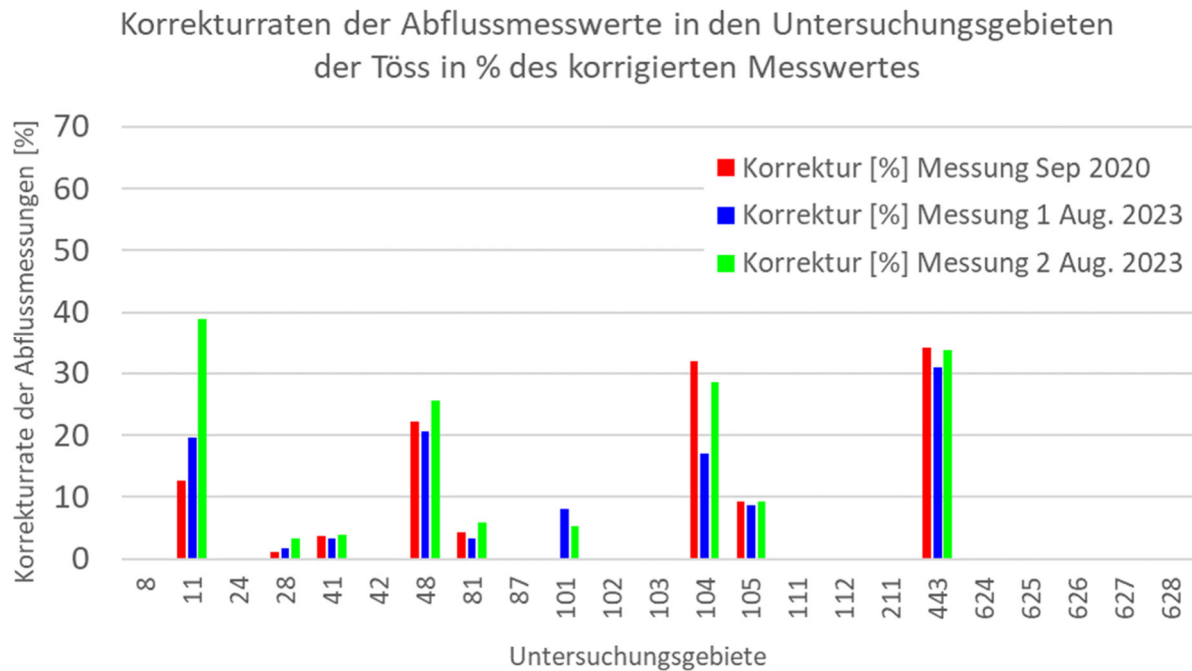


Abbildung 30: Anteil der Wasserentnahmemengen am korrigierten Abflussmesswert in den 22 Untersuchungsgebieten während der Periode der drei Abflusseinzelmessungen.

9.2.3 Ermittlung des unterirdischen Abflusses in den Untersuchungsgebieten

Nur in einem der 22 Untersuchungsgebiete fliessen am Messstandort bedeutende Abflüsse unterirdisch vorbei: am Wildbach bei Rorbas (Id 443 auf Abbildung 29). Dieses Einzugsgebiet umfasst einen grossen Schottergrundwasserkörper, der teilweise durch Versickerungen des Wildbachs gespeist wird. Ein grosser Teil dieses Grundwassers entwässert jedoch nicht in den Wildbach, sondern direkt in die Töss. Zur Abschätzung des unterirdisch vorbeifliessenden Abflusses wurden zusätzliche Abflussmessungen durchgeführt. Das Vorgehen wird im Folgenden erläutert und in Abbildung 31 dargestellt.

Im oberen Siedlungsgebiet von Embrach infiltriert Wasser vom Wildbach in den Schotterkörper (Geologie Büro Jäckli, 1980). Ab dem Zufluss des Haselbaches fliesst der durchschnittliche Grundwasserspiegel auf Höhe des Bachbetts. Bachabwärts exfiltriert das Grundwasser in den Wildbach. Weiter unten entfernt sich der Bachlauf vom Schotterkörper und verläuft entkoppelt in Richtung Rorbas. Am westlichen Rand des Grundwasserkörpers befinden sich Quellen, die in den Wildbach entwässern. Quellen am nördlichen Rand entwässern hingegen direkt in die Töss. Im Rahmen der Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Embracher und Freiensteiner Grundwasserstrom (Geologie Büro Jäckli, 1980) wurden entlang der nördlichen Abgrenzung des Embracher Grundwasserstroms alle grösseren Quellaustritte in den Jahren 1978 und 1979 alle zwei Wochen vom Brunnenmeister der Gemeinde Rorbas gemessen. Die durchschnittliche Summe der Quellschüttungen betrug über diesen Zeitraum 46 l s^{-1} . Es ist jedoch anzunehmen, dass dieser Wert zu tief ist, da diffuse Grundwasseraustritte üblicherweise ebenfalls relevante Beiträge leisten. Daher wurde die mittlere jährliche Entwässerungsmenge des Embracher Grundwasserstroms auf seiner Nordseite zusätzlich über eine

1901 hydrologische Bilanz geschätzt. Am 11.4.2021 herrschten im Raum Bassersdorf, Embrach, Freienstein,
1902 Neftenbach und Winterthur nach einer längeren niederschlagsfreien Periode relativ stabile Abflussverhältnisse.
1903 Der mittlere Tagesabfluss des Näfbachs und der Eulach (Räterschen) lag bei 48%, der des Altbachs in Bassersdorf
1904 bei 49% des langjährigen Mittels. Am gleichen Tag wurden zwei Abflussmessungen am Wildbach durchgeführt,
1905 in Rorbas und Embrach. Die Werte betrugen 165 l s^{-1} in Rorbas und 92 l s^{-1} in Embrach. Unter der Annahme
1906 ähnlicher Niederschlagsmengen und -verteilungen wie in den angrenzenden Gebieten wurde das Verhältnis
1907 $Q_{11.04.2021} / MQ$ für den Wildbach auf 0.48 geschätzt. Damit konnten an den beiden Standorten die
1908 langjährigen mittleren Abflüsse bestimmt werden: 351 l s^{-1} in Rorbas und 196 l s^{-1} in Embrach. Der langjährige
1909 mittlere Abfluss der beiden Teilgebiete wurde aus der Differenz von mittlerem Jahresniederschlag und mittlerer
1910 Verdunstung berechnet (Bundesamt für Landestopographie Swisstopo, 2002). Die Differenz zwischen
1911 Gesamtabfluss und langjährigem Mittel des oberirdischen Abflusses ergibt den langjährigen mittleren
1912 Grundwasserdurchfluss im Embracher Grundwasserstrom. In Embrach auf Höhe der AWEL-
1913 Grundwassermessstelle beträgt dieser 185 l s^{-1} (381 l s^{-1} bis 196 l s^{-1}). In Freienstein entwässert demnach etwa
1914 79 l s^{-1} ($430 \text{ l s}^{-1} - 351 \text{ l s}^{-1}$) des Grundwasserstroms in die Töss. Rund 106 l s^{-1} des Embracher Grundwasserstroms
1915 entwässern somit in den Wildbach. Der durchschnittliche unterirdische Abfluss, der nicht in das Einzugsgebiet
1916 des Wildbachs entwässert, beträgt somit 79 l s^{-1} . Es handelt sich dabei um einen Durchschnittswert, keinen
1917 Niedrigwasserwert. Ein Niedrigwasserwert könnte mit zusätzlichen Abflussmessungen und Angaben der AWEL-
1918 Grundwasserpegel ermittelt werden. Für die weitere Berechnung wurde hier mit dem Durchschnittswert
1919 weitergearbeitet. Der durchschnittliche unterirdische Abfluss wurde zu den drei Einzelmessungen addiert.
1920
1921

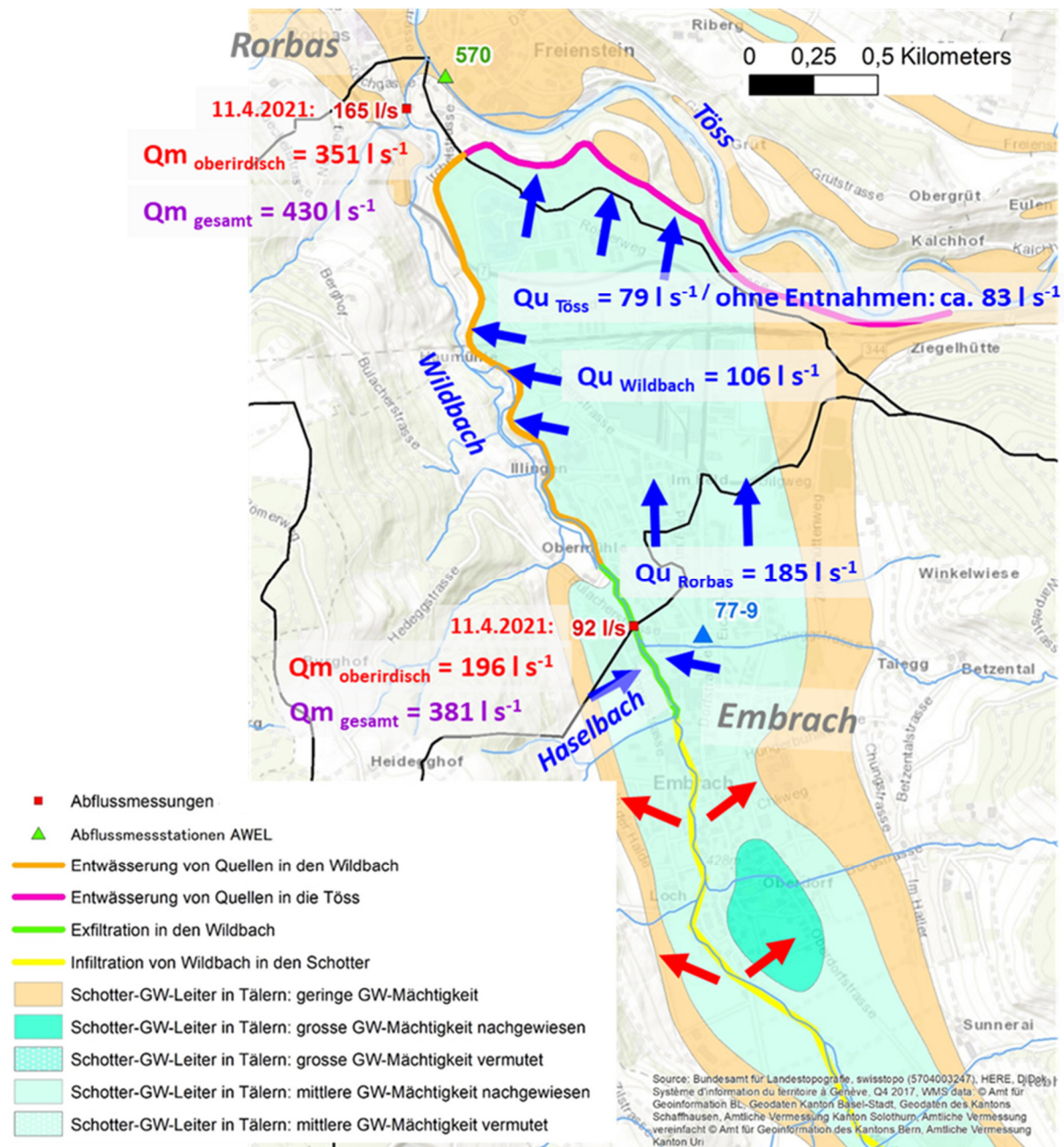
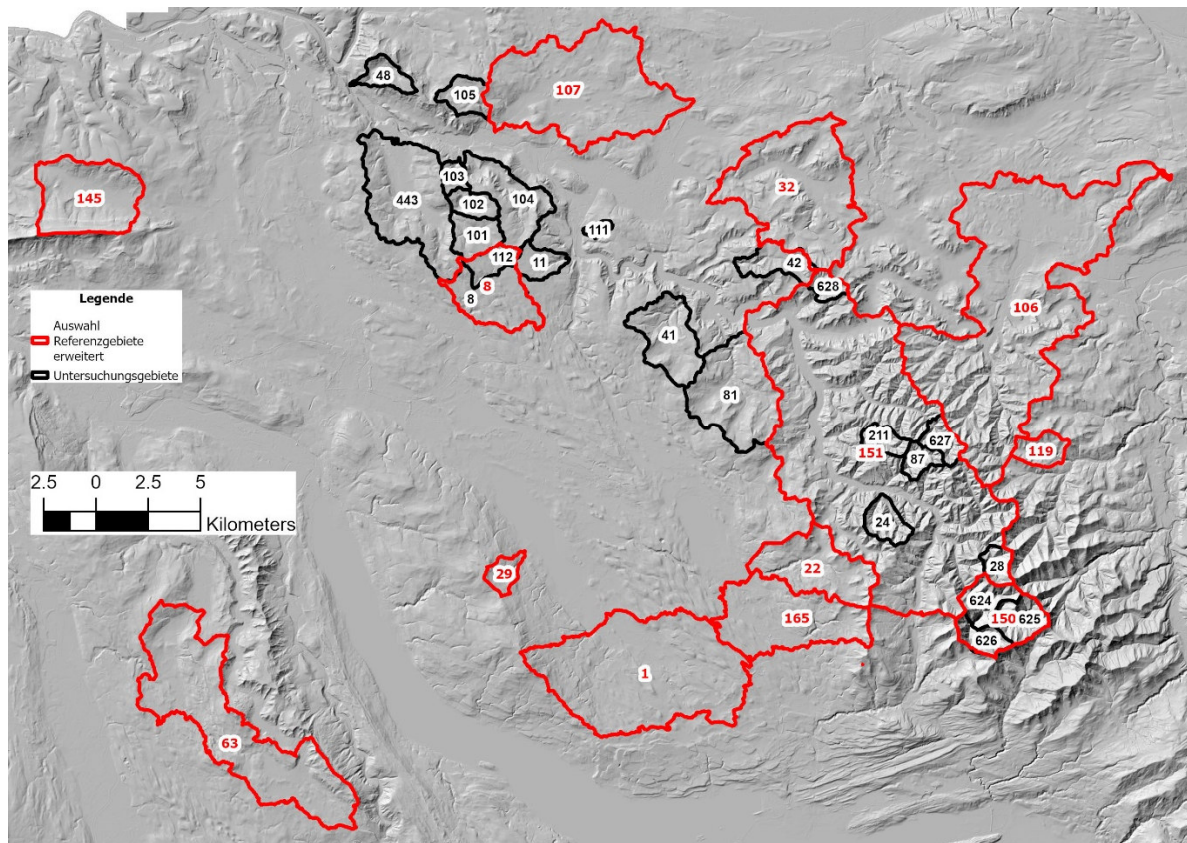


Abbildung 31: Ober- und unterirdische Abflüsse im Embrachschotter bei Mittelwasserbedingungen.

9.2.4 Auswahl an möglichen Referenzgebieten

In einem ersten Schritt wurde eine erweiterte Auswahl an Referenzgebieten bestimmt, die für eine Übertragung der Abflussperzentile in Frage kamen. Die ausgewählten Referenzgebiete sind mit den Untersuchungsgebieten in Abbildung 32 dargestellt. Die Dauerkurvengruppen sind schon aus den vorangehenden Auswertungen bekannt. Sie sind in Abbildung 33 ersichtlich.

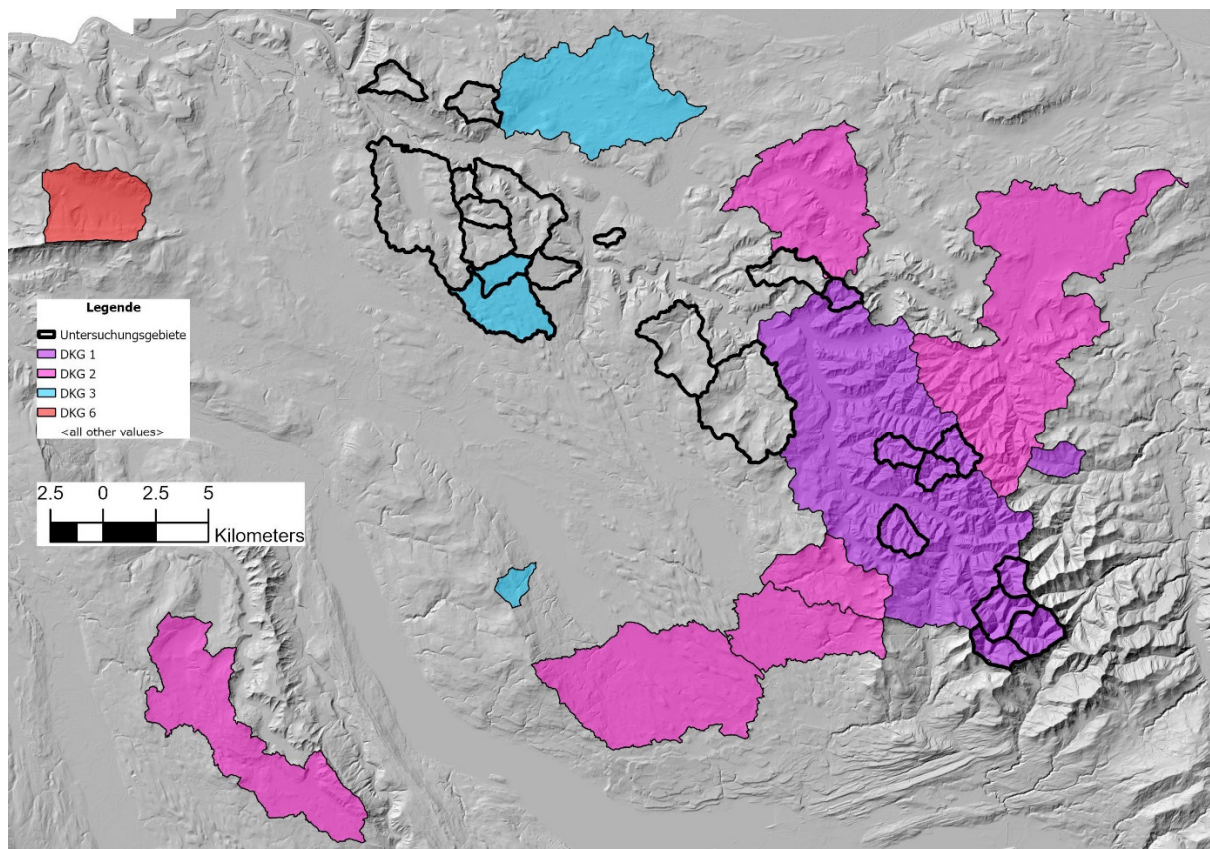


1931

1932

1933

Abbildung 32: Mögliche Referenzgebiete (rot) zur Bestimmung des Abflussperzentils der Abflussmesswerte der Untersuchungsgebiete (schwarz).



1934

1935

Abbildung 33: Dauerkurvengruppe der zur Auswahl stehenden Referenzgebiete.

9.2.5 Eingrenzung der Auswahl an Referenzgebieten und Bestimmung von Q347 und Q290

Um zu prüfen, welches Referenzgebiet oder welche Kombination von Referenzgebieten sich am besten zur Übertragung der Abflussperzentile eignet, wurden für jedes Untersuchungsgebiet verschiedene Referenzgebiete getestet. Dabei erfolgte jeder Testlauf nach dem folgenden Ablauf:

1. Übertragung der Abflussperzentile vom ausgewählten Referenzgebiet auf die drei Abflussmesswerte des Untersuchungsgebiets
2. Bestimmung des Q347 anhand des Abflusswertes mit dem Perzentil, das Q347 am nächsten liegt
3. Berechnung von Q290
4. Ermittlung der Dauerkurve
5. Vergleich der Messwerte 2 und 3 mit den Abflusswerten der ermittelten Dauerkurven

Dieser Prozess wurde manuell durchgeführt. Für die beiden Messperioden im September 2020 und August 2023 wurden für alle Gebiete jeweils dieselben Referenzgebiete oder Kombinationen ausgewählt. Die Referenzgebiete, die die beste Übereinstimmung zwischen der zweiten und dritten Messung erzielten, wurden als definitive Referenzgebiete festgelegt. Die besten Ergebnisse wurden mit Referenzgebieten erzielt, die folgende Eigenschaften aufwiesen:

1. gleiche Dauerkurvengruppe
2. ähnliche Niederschlagsmengen in der Vorperiode
3. ähnliche Volumina der Schottergrundwasserkörper
4. eine unmittelbare Nachbarschaft

In einigen Fällen ergab sich nur durch die Kombination der Perzentile von zwei Referenzgebieten mit unterschiedlichen Dauerkurvengruppen oder unterschiedlich grossen Schottergrundwasserkörpern ein sinnvolles Ergebnis. Insgesamt reduzierte sich die Zahl der verwendeten Referenzgebiete von 13 auf 5 Einzugsgebiete, die in Abbildung 38 dargestellt sind.

Die Bedeutung des Schotteraquifervolumens bei der Auswahl der Referenzgebiete wird durch Abbildung 34 verdeutlicht. Die Abflussperzentile von Wildbach und Töss (Rämismühle), deren Einzugsgebiete beide ein grosses Volumen bachgespeister Schotteraquifere aufweisen, liegen in beiden Perioden höher als die Perzentile der übrigen Gebiete. Die Niederschläge in der Vorperiode vor dem 15.8.2023 waren etwa 30 % höher als vor dem 16.9.2020. Dies könnte erklären, warum die Perzentile im August 2023 etwas höher lagen und der Kurvenverlauf steiler war als im September 2020.

Auch die Perzentile der Surb, die ebenfalls ein grosses bachgespeistes Schottervolumen besitzt, lagen im August 2023 auf dem Niveau von etwa Q270, ähnlich wie beim Wildbach (Abbildung 35). Die Perzentile des Naefbachs, der ein vergleichbares Schottervolumen aufweist, lagen dagegen niedriger, vergleichbar mit dem Altbach. Die

Niederschlagssumme in den 20 Tagen vor dem 10.8.2023 betrug im Altbach 124 mm, im Vergleich zu 99 mm in der Surb und 72 mm im Naefbach. Im September 2020 lagen die Perzentile der Surb (Niederweningen) bereits zu Beginn der Messperiode mit Q360 deutlich tiefer als im August 2023. Auch im Naefbach (Neftenbach) waren sie mit Q350 niedriger als im August 2023, allerdings war der Unterschied hier geringer als in der Surb, obwohl beide ein ähnlich grosses Schottervolumen besitzen. In den beiden Einzugsgebieten mit keinem oder nur geringem bachgespeistem Schottervolumen (Altbach und Jonen) unterschieden sich die Abflussperzentile zwischen den beiden Messperioden weniger stark. Die Niederschläge in der 20-tägigen Vorperiode waren hier vor September 2020 geringer und weniger unterschiedlich als vor August 2023 (Naefbach 65 mm, Surb 57 mm, Altbach 75 mm).

Diese Beispiele zeigen, dass das Volumen der bachgespeisten Schotteraquifere das Speicher- und Entwässerungsverhalten beeinflussen kann und daher bei der Übertragung der Abflussperzentile von Referenz- auf Untersuchungsgebiete berücksichtigt werden sollte. Der Effekt dieses Parameters darf jedoch nicht überschätzt werden, da die Einschätzung der Mächtigkeit der Grundwasserkörper mit Unsicherheiten behaftet ist und weitere Faktoren eine Rolle spielen können. So könnte beispielsweise der Naefbach durch Kolmatierung oder eine abgedichtete Bachsohle (Betonauskleidung, Eindohlung) stärker beeinträchtigt sein als die Surb, wodurch Infiltration und Exfiltration von Bachwasser gehemmt würden.

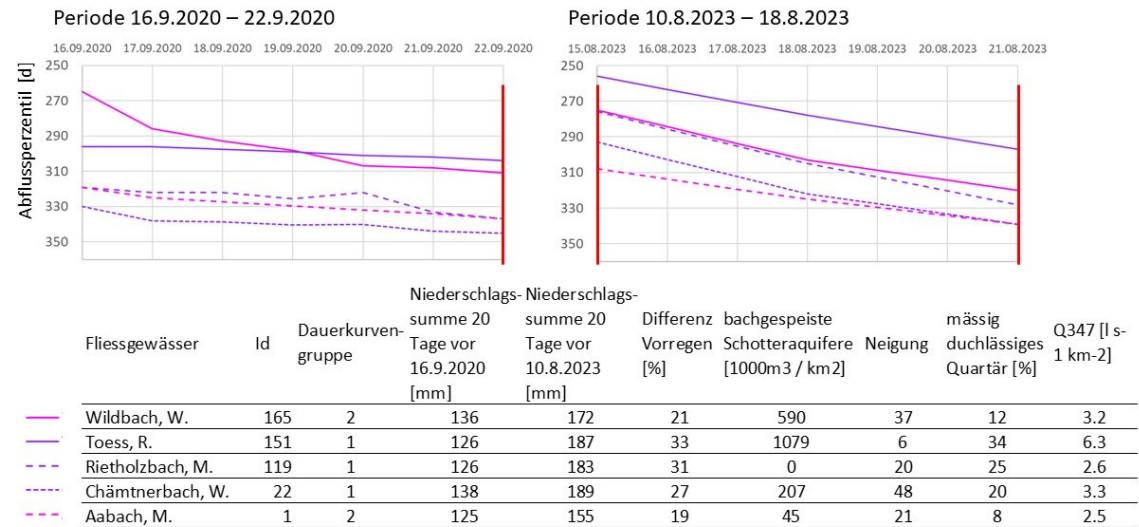


Abbildung 34: Entwicklung der Abflussperzentile von 5 möglichen Referenzgebieten für die Dauerkurvengruppe 1 und 2 mit unterschiedlichen Volumina von Schotteraquiferen in den Perioden vom 16.9.2020 bis 22.9.2020 und 15.8.2023 bis 21.8.2023. Die senkrechten roten Linien markieren Tage mit Abflussmessungen.

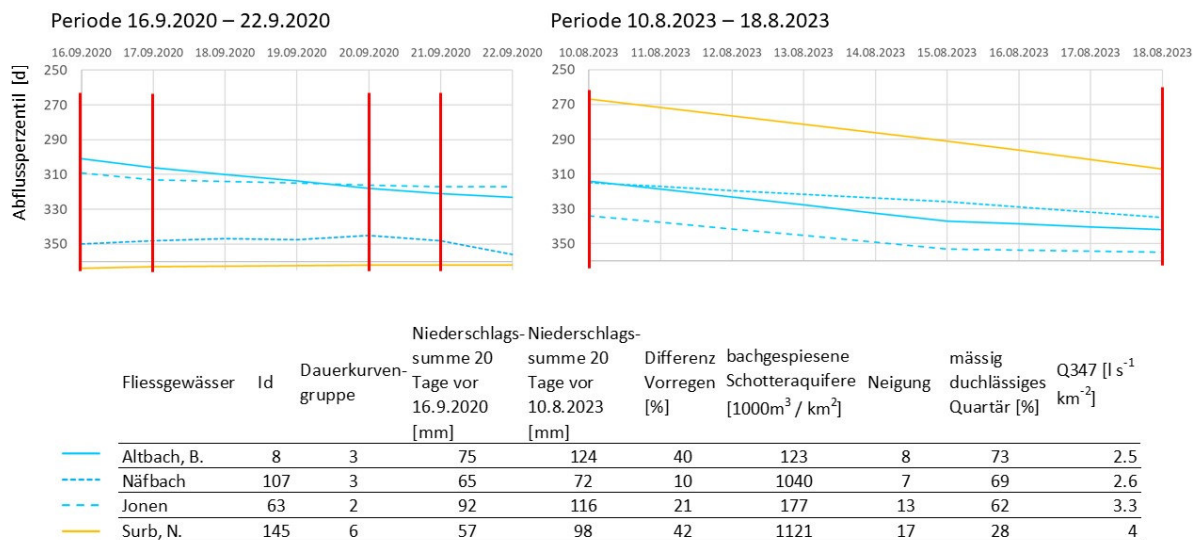


Abbildung 35: Entwicklung der Abflussperzentile von 4 möglichen Referenzgebieten für die Dauerkurvengruppe 3 mit unterschiedlichen Volumina von Schotteraquiferen in den Perioden vom 16.9.2020 bis 22.9.2020 und 10.8.2023 bis 18.8.2023. Die senkrechten roten Linien markieren Tage mit Abflussmessungen.

Abbildung 38 zeigt die Untersuchungsgebiete sowie die jeweils definitiv zugeordneten Referenzgebiete. Die Verbindungslinien stellen dar, welche Referenzgebiete welchem Untersuchungsgebiet zugewiesen wurden:

- **Türkisfarbene Linien** kennzeichnen eine Zuordnung zu einem einzigen Referenzgebiet.
- **Grüne Linien** zeigen, dass der Mittelwert der Perzentile zweier Referenzgebiete verwendet wurde.

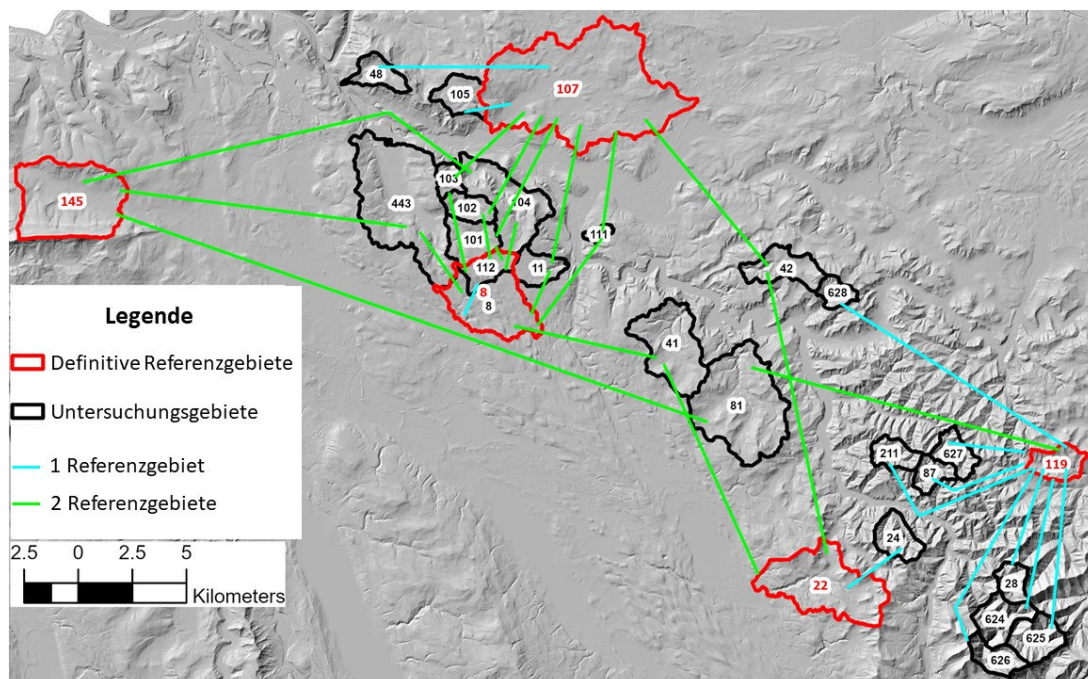


Abbildung 36: Untersuchungsgebiete in Einzugsgebiet der Töss und des Altbaches (schwarz) mit den Referenzgebieten, die sich für eine Übertragung der Abflussperzentile am besten eignen. Die Linien zeigen, welches Referenzgebiet dem Untersuchungsgebiet zugeteilt wurde. Türkis-farbige Linien zeigen an, dass nur ein Referenzgebiet verwendet wird, grüne Linien markieren, dass das Mittel zweier Referenzgebiete notwendig war.

2011 Dauerkurvengruppe OSM 1:

2012 Allen Untersuchungsgebieten dieser Gruppe (violett markierte Gebiete in Abbildung 29) wurde nur ein
2013 Referenzgebiet zugeteilt.

2014 - In acht Fällen wurde der Rietholzbach (119) gewählt,

2015 - in einem Fall der Chämtnerbach (22).

2016 Die Auswahl basierte auf der besten Übereinstimmung der Messwerte 2 und 3 mit der ermittelten Dauerkurve.

2017 Beim Untersuchungsgebiet **628** wurde die vorläufige Zuordnung zu Gruppe OSM 1 nachträglich auf **Gruppe OSM**

2018 **2** geändert, da die Einzelmessungen eine bessere Übereinstimmung mit der ermittelten Dauerkurve bei dieser

2019 Gruppe zeigten. Dieses Gebiet war bereits in

2020

2021

2022

2023

2024

2025 Tabelle 6 als potenzielles Übergangsgebiet zwischen den Gruppen OSM 1 und OSM 2 identifiziert worden.

2026

2027 Dauerkurvengruppe OSM 3:

2028 Diese Gruppe umfasst sämtliche Untersuchungsgebiete im Nordwesten, deren geologische Basis aus

2029 Sandsteinen und Mergeln besteht (vgl. Abbildung 29).

2030 - Den Gebieten **8** und **112** wurde der **Altbach (8)** zugeordnet.

2031 - Den Gebieten **48** und **105** wurde der **Naefbach (107)** zugeteilt.

2032 - Für die Gebiete **101, 102, 103, 104, 111** und **11** wurde das arithmetische Mittel der Perzentile von

2033 **Altbach (8)** und **Naefbach (107)** verwendet, da es die beste Übereinstimmung mit den Dauerkurven

2034 zeigte.

2035

2036 Die Einzugsgebiete **104** und **443** enthalten grössere Volumina an Schottergrundwasserleitern (vgl. Tabelle A10).

2037 Für diese ergab sich eine bessere Übereinstimmung, wenn das Mittel der Perzentile von Surb (145) und Altbach

2038 (8) verwendet wurde, anstelle der Kombination Naefbach–Altbach. Obwohl der Naefbach ebenfalls über einen

2039 grossen Schotteraquifer verfügt, zeigt er bei Niedrigwasser ein weniger verzögertes Entwässerungsverhalten als

2040 die Surb.

2041

2042 **Sonderfall Gebiet 443 (Wildbach, Rorbas):**

2043 Für dieses Gebiet musste die ursprüngliche Zuordnung zu Gruppe OSM 3 auf **Gruppe OMM / Mittelland 1**

2044 geändert werden. Grund dafür ist der umfangreiche Grundwasserkörper im Tal, der nicht in das

2045 Hauptfliessgewässer, sondern in eine andere Richtung entwässert (vgl. Kapitel vgl. 9.2.2). Der unterirdisch

2046 abfliessende Wasseranteil konnte abgeschätzt werden. Dieser wurde dann den Messwerten der

2047 Abflussmessungen hinzugefügt (vgl. Kapitel 9.2.3). Dadurch verdoppelte sich das Q347 des Gesamtabflusses. Da

das Q347 grösser als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ist, wird das Einzugsgebiet der Dauerkurvengruppe OMM / Mittelland 1 zugeordnet (vgl. Abbildung 48). Mit dem korrigierten Q347 ergab sich eine deutlich flachere Dauerkurve, charakteristisch für Dauerkurvengruppe OMM / Mittelland 1. Die Abflussmenge, die in ein anderes Gebiet entwässert, muss dann aber der gesamten Dauerkurve wieder abgezogen werden, weil es am Messpunkt fehlt. Erst dann stimmte die resultierende Kurve gut mit den Messwerten überein (vgl. Abbildung 37). Ohne diese Korrektur wäre die Kurve zu steil ausgefallen.

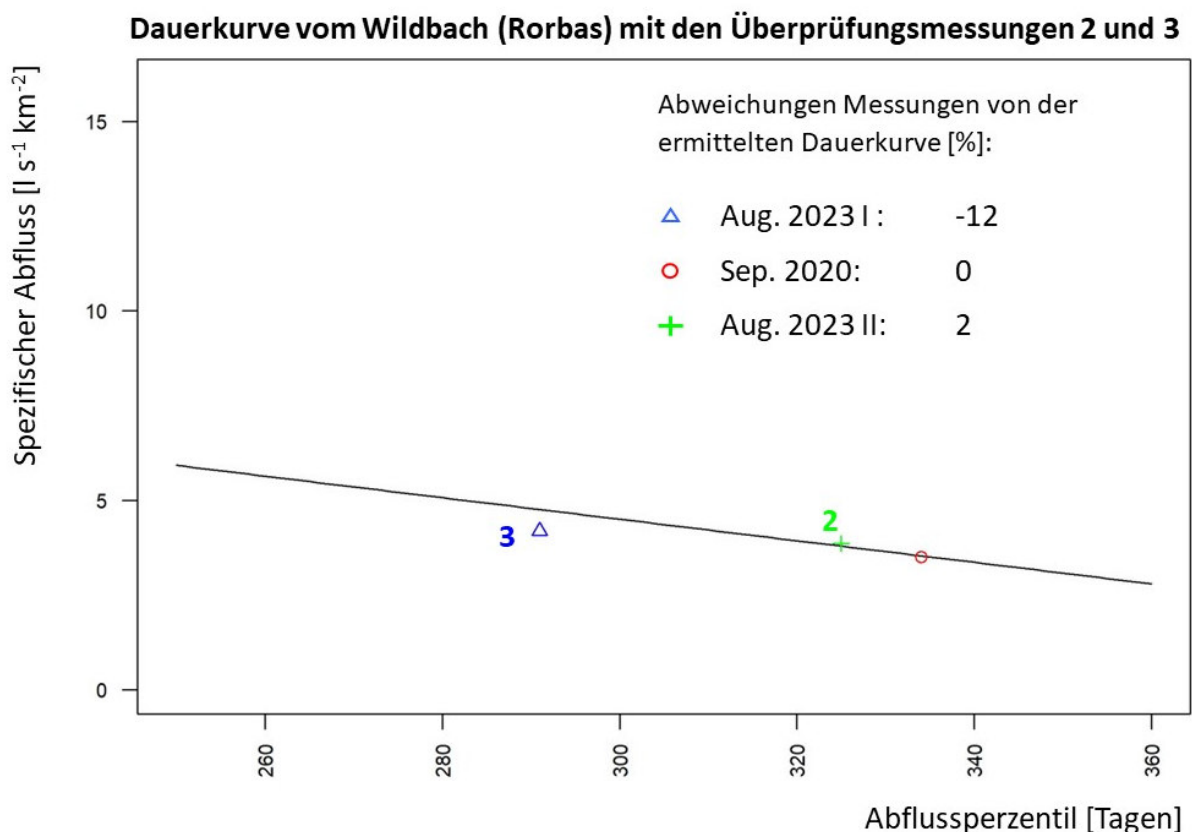


Abbildung 37: Berechnete Dauerkurve im Wildbach (Rorbas) mit den Abflussmessungen 2 und 3. Die Abflüsse der Dauerkurve liegen um 2% höher bzw. 12% tiefer als die Abflüsse der Abflussmessungen.

Die Überprüfung der Dauerkurve des Untersuchungsgebiets 104 zeigte, dass die Werte der Abflussmessungen 2 und 3 besser mit der Dauerkurve der Dauerkurvengruppe OSM 2 übereinstimmte als die der Gruppe OSM 3. Wegen der hohen Geländeneigung war Untersuchungsgebiet 104 schon zu Beginn als ein Übergangsgebiet zwischen Dauerkurvengruppe 2 und 3 eingestuft worden. Untersuchungsgebiet 48 behielt hingegen die Dauerkurvengruppe OSM 3, obwohl das Gebiet im Durchschnitt noch steiler ist als Untersuchungsgebiet 104. Das lässt sich damit erklären, dass der Anteil an OMM 10% und der von Deckenschottern 32% beträgt. OMM und Deckenschotter entwässern bei Niedrigwasser stark verzögert.

Dauerkurvengruppe OSM 2:

Die Untersuchungsgebiete 41, 81 und 42 gehören zur Dauerkurvengruppe OSM 2. Die Referenzgebiete mit Dauerkurvengruppe OSM 2 erwiesen sich allesamt als ungeeignet, entweder weil ihre Niederschläge in der Vorperiode zu hoch lagen, wie bei Aabach (1) oder Wildbach (165), weil die Abflüsse während der Rezessionsphase zwischen dem 15.8.2023 und dem 21.8.2023 anstiegen, wie bei der Murg bei Wängi (106), weil das Referenzgebiet zu weit entfernt liegt, wie beim Jonen bei Zwillikon (63), oder weil der unterirdische Abfluss unter der Messstation das Niedrigwasserverhalten verfälscht, wie bei der Eulach bei Rätterschen (32). Deshalb wurden die Perzentile der Abflussmesswerte der Untersuchungsgebiete 41, 81 und 42 aus den Mittelwerten von Referenzgebieten der Dauerkurvengruppen OSM 1 und OSM 3 bestimmt. Bei Untersuchungsgebiet 41 war es das Mittel der Perzentile der Referenzgebiete von Chämtnerbach (22) und Altbach (8), beim Untersuchungsgebiet 81 das Mittel der Perzentile von Rietholzbach (119) und Surb (145) und beim Untersuchungsgebiet 42 das von Chämtnerbach (22) und Näfbach (107). Die Auswahl dieser Referenzgebiete ergab sich durch das Austesten der verschiedenen Kombinationen.

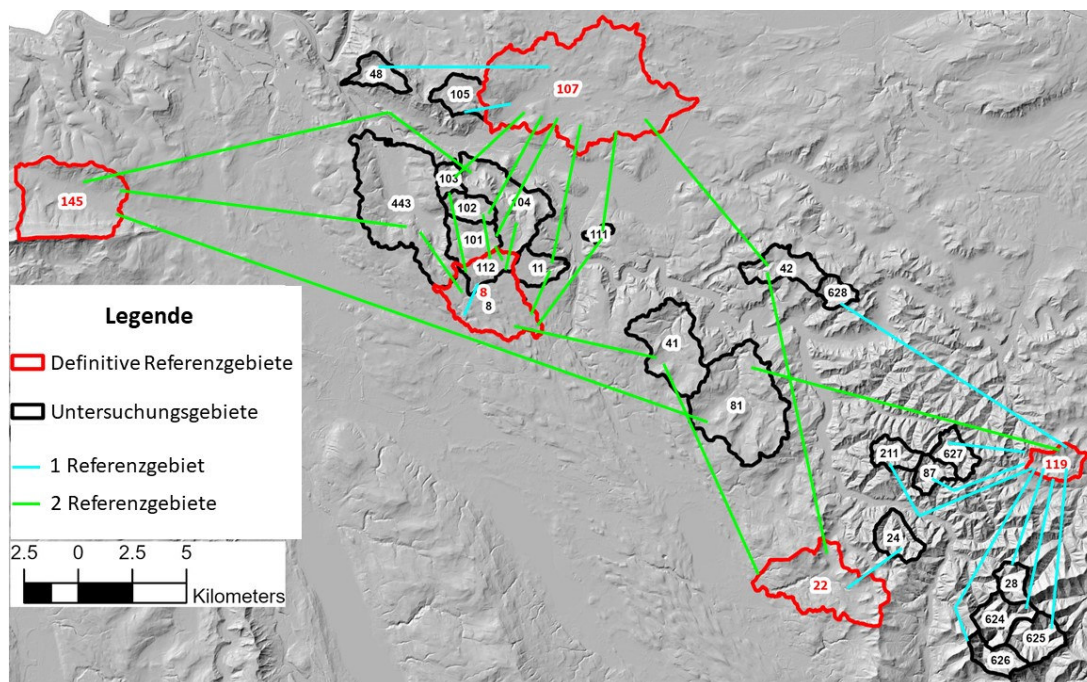


Abbildung 38: Untersuchungsgebiete in Einzugsgebiet der Töss und des Altbaches (schwarz) mit den Referenzgebieten, die sich für eine Übertragung der Abflussperzentile am besten eignen. Die Linien zeigen, welches Referenzgebiet dem Untersuchungsgebiet zugeteilt wurde. Türkis-farbige Linien zeigen an, dass nur ein Referenzgebiet verwendet wird, grüne Linien markieren, dass das Mittel zweier Referenzgebiete notwendig war.

Sind die Dauerkurvengruppe, der Abfluss und das Abflussperzentil der drei Abflussmessungen bekannt, lässt sich das Q347 und das Q290 anhand eines R-Skripts bestimmen. Anhand der Dauerkurvengruppe OSM 3 wird dieses Vorgehen erklärt:

Für alle Zehntelwerte der spezifischen Q347 zwischen $1.0 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und $5.0 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ der Dauerkurvengruppe OSM3 wurden anhand der identifizierten Potenzfunktionen die Dauerkurvengefälle ermittelt. Daraus wurden fiktive lineare Dauerkurven zwischen Q250 und Q360 berechnet. Somit existieren für OSM3 insgesamt 40 Dauerkurven, z.B. eine Dauerkurve für OSM 3 mit $Q347 = 1.0 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, eine für OSM 3 mit $Q347 = 1.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$,

2095 eine für OSM 3 mit $Q_{347} = 1.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, usw. Anhand der Abflussmessung mit dem Abflussperzentil, das am
 2096 nächsten zu 347 liegt, wird das spezifische Q_{347} bestimmt. Das Q_{347} wird bestimmt, indem unter den 40
 2097 Dauerkurven diejenige identifiziert wird, in welcher bei gleichem Abflussperzentil wie bei der Abflussmessung
 2098 die kleinste Differenz zwischen dem Abflusswert der Dauerkurve und dem der Abflussmessung liegt. Auf diese
 2099 Weise kann das Q_{347} , Q_{290} und die Dauerkurve leicht herausgelesen werden. Bei den verschiedenen Testläufen
 2100 in Kapitel 9.2.5 wurde diese Vorgehensweise angewendet.

2101 9.2.6 Vergleich der resultierenden Dauerkurven mit den Einzelmessungen

2102 45% der insgesamt 44 Überprüfungsmessungen, die in den 22 Untersuchungsgebieten durchgeführt wurden,
 2103 wichen um 10% oder weniger von der ermittelten Dauerkurve ab (Tabelle 7). Bei 39% lag die Abweichung
 2104 zwischen 10% und 20%. Bei 16% war die Abweichung grösser als 20%.

2105 In 16 der 22 Untersuchungsgebiete weichen beide Abflussmesswerte um 20% oder weniger von denen der
 2106 ermittelten Dauerkurve ab, in weiteren 4 Untersuchungsgebieten beträgt die Abweichung des einen Messwertes
 2107 weniger oder gleich 20% und des zweiten Messwertes zwischen 20% und 30% (Tabelle 8). In nur zwei
 2108 Untersuchungsgebieten beträgt die Abweichung von mindestens einem Messwert mehr als 30%.

2109

2110 *Tabelle 7: Abweichung des Abflusswertes der Überprüfungsmessungen von denen der ermittelten Dauerkurve.*

Abweichung	Anzahl Messungen	[%]
≤ 10%	20	45
10 - 20%	17	39
20 - 30%	4	9
> 30%	3	7
Total	44	100

2111

2112 *Tabelle 8: Abweichung des Abflusswertes der Überprüfungsmessungen von denen der ermittelten Dauerkurve, ausgewertet*
 2113 *nach Anzahl der Untersuchungsgebiete.*

Abweichung	Anzahl Gebiete
Abweichung beide Messungen < 10%	6
Abweichung einer Messung < 10% und einer Messung zwischen 10% und 20%	6
Abweichung beide Messungen zwischen 10% und 20%	4
Abweichung einer Messung < 20% und einer Messung zwischen 20% und 30%	4
Abweichung beide Messungen zwischen 20% und 30%	0
Abweichung einer Messung < 30% und einer Messung > 30%	1
Abweichung beider Messungen > 30%	1

2114

2115 Die Übereinstimmung zwischen den Einzelmessungen und den resultierenden Dauerkurven ist hoch, in
2116 Anbetracht:

- 2117 - der Unsicherheiten bei den Abflusseinzelmessungen
- 2118 - der Unsicherheiten bei den kontinuierlichen Abflussmessungen
- 2119 - der Unsicherheiten bei der Ermittlung der Wasserentnahmen der Untersuchungs- und Referenzgebiete
- 2120 - der Unsicherheiten bei der Ermittlung der unterirdischen Abflüsse unter den Messstandorten bei
- 2121 Untersuchungs- und Referenzgebieten
- 2122 - der Streuung der Q290/Q347-Werte um die Potenzfunktionen (Abbildungen 5 - 9).

2123

2124 Die Ergebnisse dieses ersten Versuchs, die Dauerkurve in bisher ungemessenen Einzugsgebieten anhand von
2125 drei Abflussmessungen während Niedrigwasserperioden zu bestimmen, sind vielversprechend. Durch die
2126 Wiederholung dieses Verfahrens in denselben Einzugsgebieten, jedoch in anderen Trockenjahren, liesse sich
2127 diese Vorgehensweise überprüfen.

2128 9.3 Anwendung des Verfahrens in Alpinen Einzugsgebieten

2129 In 99 alpinen Einzugsgebieten standen mindestens zwei Abflusseinzelmessungen während einer
2130 Niedrigwasserperiode zur Verfügung. In 45 dieser Einzugsgebiete waren es sogar drei Abflussmessungen. Für
2131 alle 99 Einzugsgebiete wurde eine Dauerkurve anhand der oben beschriebenen Methode berechnet. Diese
2132 konnte mit einer oder zwei Validierungsmessungen überprüft werden. Die Auswahl der Referenzgebiete
2133 unterscheidet sich wesentlich von jener in den Mittelland- und Voralpengebieten. Details dazu werden in Kapitel
2134 10 beschrieben.

Von den 144 zur Verfügung stehenden Validierungsmessungen betragen die Abweichungen zwischen den Abflusswerten der Validierungsmessungen und der Dauerkurve bei fast der Hälfte der Messungen weniger als 10 % (Tabelle 9). Bei 27 % der Messungen beträgt die Abweichung 10 bis 20 %, und bei 12 % der Messungen liegt sie zwischen 20 und 30 %. In 75 % der Messungen ist die Abweichung kleiner als 20 %, und bei 87 % der Messungen kleiner als 30 %. Bei nur 4 der 144 Messungen ist die Abweichung grösser als 50 %. Diese Zahlen liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie im Mittelland (Tabelle 7). Auch in den alpinen Einzugsgebieten lassen sich mit dem entwickelten Verfahren die Q347 und die Dauerkurvengruppen mit nur zwei bis drei Abflusseinzelmessungen mit hoher Genauigkeit ermitteln. Die erzielte Genauigkeit ist damit wesentlich höher als jene, die bisher mit rein statistischen Abschätzverfahren erreicht wurde. Dies gilt vor allem für die hohen und die tiefen Q347. Bei den aussergewöhnlich hohen Q347 ($Q347 > 20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) können die Abweichungen zwischen den Validierungsmessungen und der Dauerkurve gross sein. Die mögliche Ursache dafür wird in Kapitel 10.3.9 beschrieben.

Tabelle 9: Abweichungen der Abflusswerte der Validierungsmessungen mit den ermittelten Dauerkurven, in % der Dauerkurvenwerte.

Abweichung	Anzahl Messungen	[%]
<= 10%	68	48
10 - 20%	39	27
20 - 30%	18	12
30 - 50%	15	10
> 50%	4	3
Total	144	100

9.4 Bestimmung der Dauerkurvenform zwischen Q290 und Q360

9.4.1 Periode 2011 bis 2020

Die Dauerkurven zwischen Q290 und Q360 weisen einen Verlauf auf, der einer linearen Funktion nahekommt (Abbildung 3). Die Abweichungen zwischen einer linear approximierten Dauerkurve und der reellen Dauerkurve wurden für alle im Mittelland und in den Voralpeneinzugsgebieten verfügbaren Messreihen untersucht. Eine Gerade, die durch Q290 und Q347 verläuft und bis Q360 reicht, diene als lineare Approximation der Dauerkurve. Für jedes Einzugsgebiet wurde die Differenz der Abflussvolumina zwischen der reellen Dauerkurve und der linearen Dauerkurve ermittelt und durch die Abflussvolumina der linearen Dauerkurve dividiert. Dies ergibt ein Mass für die Abweichung des Dauerkurvenverlaufes der linearen zur reellen Dauerkurve. Diese Abflussvolumendifferenz wurde einmal für den Bereich zwischen Q290 und Q347 und einmal für den zwischen Q347 und Q360 ermittelt (Abbildung 39). Die Standard-Dauerkurve des Steinenbachs (Kaltbrunn) zeigt ein ausgeprägtes Abfallen ab ca. Q340. Ein derart starkes Abfallen ist eher die Ausnahme. In einem solchen Fall sollten die P/Q-Beziehungen im Niedrigwasserbereich unbedingt überprüft werden. In vielen Fällen stimmen die Kurven gut überein. In 70 der 80 untersuchten Einzugsgebiete beträgt der Anteil der Abweichungen der Abflussvolumina

der linear approximierten Dauerkurve von der reellen Dauerkurve in Prozent der linear approximierten Dauerkurve weniger oder gleichviel wie $\pm 3\%$ (Abbildung 40). Am grössten sind die Abweichungen bei den Gebieten der Dauerkurvengruppe OSM 1, am kleinsten bei der Dauerkurvengruppe OSM 4. Positive Abweichungswerte deuten auf eine leicht konvex verlaufende reelle Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 hin (Abbildung 39), bei negativen Werten liegt ein leicht konkaver Verlauf vor. Mit Ausnahme der Dauerkurvengruppe OSM 4 weisen die meisten Einzugsgebiete in der Oberen Süsswassermolasse (OSM 1, OSM 2, OSM 3) und der Dauerkurvengruppe Voralpin 1 einen leicht konvexen Verlauf der Standard-Dauerkurve auf. Die Standard-Dauerkurven der Einzugsgebiete in der Gruppe OSM 4 und USM zeigen hingegen eher einen leicht konkaven Verlauf. Die Standard-Dauerkurven aller anderen Einzugsgebiete (OMM-Gruppen, Voralpin 2) weisen einen linearen Verlauf auf. Fast bei jeder Gruppe gibt es einzelne Ausreisser gegen oben und unten.

Bei Abflüssen zwischen Q347 und Q360 sind die Abweichungen zwischen den Abflussvolumina der Standard-Dauerkurven und der linear approximierten Dauerkurven tendenziell grösser als zwischen Q290 und Q347. Mit Ausnahme der Gruppe OSM 4 liegt die reelle Dauerkurve bei allen Gruppen gleich hoch oder tiefer als die linear approximierte Dauerkurve (Abbildung 42). Bei Einzelwerten kann das Differenzvolumen bis zu -20% vom Volumen der approximierten Dauerkurven betragen (Abbildung 42).

Dafür kann es mehrere Gründe geben. Je häufiger in einer Niedrigwasserphase Abfluss-Rezessionsphasen durch Niederschlagsereignisse unterbrochen werden, desto häufiger kommt es zu einem Füllen und Entwässern von rasch entwässernden, oberflächennahen Grundwasserspeichern (vgl. Kapitel 8.4). Der Einfluss solcher Niederschläge auf die Dauerkurve wird mit abnehmendem Abfluss, also gegen das untere Ende der Dauerkurve hin, immer kleiner. Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Dauerkurvenverlauf und dem mittleren Jahresniederschlag und der mittleren Geländeneigung. Wegen des höheren Einflusses der Niederschläge und der höheren mittleren Geländeneigung fallen die Dauerkurven der Dauerkurvengruppe OSM 1 und Voralpin 1 rascher ab als die Dauerkurven der Gruppen OSM 4 und USM. Dank der hohen Anteile an langsam entwässernden Speichern und der sandigen Böden in OMM-dominierten Einzugsgebieten werden die in Niedrigwasserperioden fallenden Niederschläge besser abgepuffert als in Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppe OSM 1, und Voralpin 1. Das erklärt, weshalb sich in den OMM-Einzugsgebieten auch keine Tendenz zu konvexen oder konkaven Dauerkurvenverläufen zeigt.

Es ist davon auszugehen, dass weitere Faktoren eine konvexe Form der Dauerkurvengruppe begünstigen. Dazu gehören:

- eine zunehmende Versickerung von Bachwasser durch die Bachsohle in den darunterliegenden Schotteraquifer, wenn der Grundwasserspiegel bei Trockenheit unter das Niveau der Bachsohle sinkt.
- Eine Zunahme der Wasserentnahme aus Grundwasserleitern bei Trockenheit in Einzugsgebieten mit einem erheblichen Effekt durch Wasserentnahmen im Verhältnis zum Gesamtabfluss des Gebiets.

2200 - Eine Zunahme von Messartefakten oder von Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen bei
 2201 abnehmendem Abfluss. Gewisse Pegelkonstruktionen sind besonders anfällig darauf (Naef, F. &
 2202 Margreth, M., 2018).

2203

2204 Diese Faktoren dürften auch den Verlauf der Niedrigwasserrezessionskurve beeinflussen.

2205

2206 Die Volumendifferenzen zwischen Standard-Dauerkurven und linear-approximierten Dauerkurven zwischen
 2207 Q347 und Q360 zeigen an, wie die Standard-Dauerkurven gegenüber der linear approximierten Dauerkurven am
 2208 unteren Ende der Dauerkurve abfallen können (Abbildung 42). Einzugsgebiete, deren Dauerkurven am unteren
 2209 Ende stark abfallen, lassen sich durch eine tiefe Abweichungsrate erkennen. Die meisten Abweichungsraten
 2210 liegen zwischen 0 und -10%. Auffällig sind die hohen Abweichungsraten der Einzugsgebiete in den
 2211 Dauerkurvengruppen OSM 4. Sie sind auf die geringe Messauflösung der Pegelmessung zurückzuführen. Der
 2212 treppenförmige Verlauf der Dauerkurve führt zu grossen Volumendifferenzen zwischen der Standard-
 2213 Dauerkurven und den linear-approximierten Dauerkurve in Relation zum Volumen der linearen Dauerkurve
 2214 (Abbildung 43). In sämtlichen alpinen Gebieten bewegen sich die Anteile der Abweichungen der Abflussvolumina
 2215 der Standard-Dauerkurve von der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 im Bereich
 2216 zwischen -2% und +3% (Abbildung 44). Die Abweichungen von einer linearen Funktion sind also sehr gering und
 2217 es gibt keine Tendenz zu konvexen oder konkaven Dauerkurvenverläufen.

2218 Zwischen Q347 und Q360 ist tendenziell ein leichtes Abfallen der Dauerkurven erkennbar. Die Anteile der
 2219 Abweichungen der Abflussvolumina der Standard-Dauerkurve von der linear approximierten Dauerkurve
 2220 betragen bei den meisten Gebieten zwischen 3% und -5% (Abbildung 45). Für 3 Einzugsgebiete beträgt es mehr
 2221 als 5%.

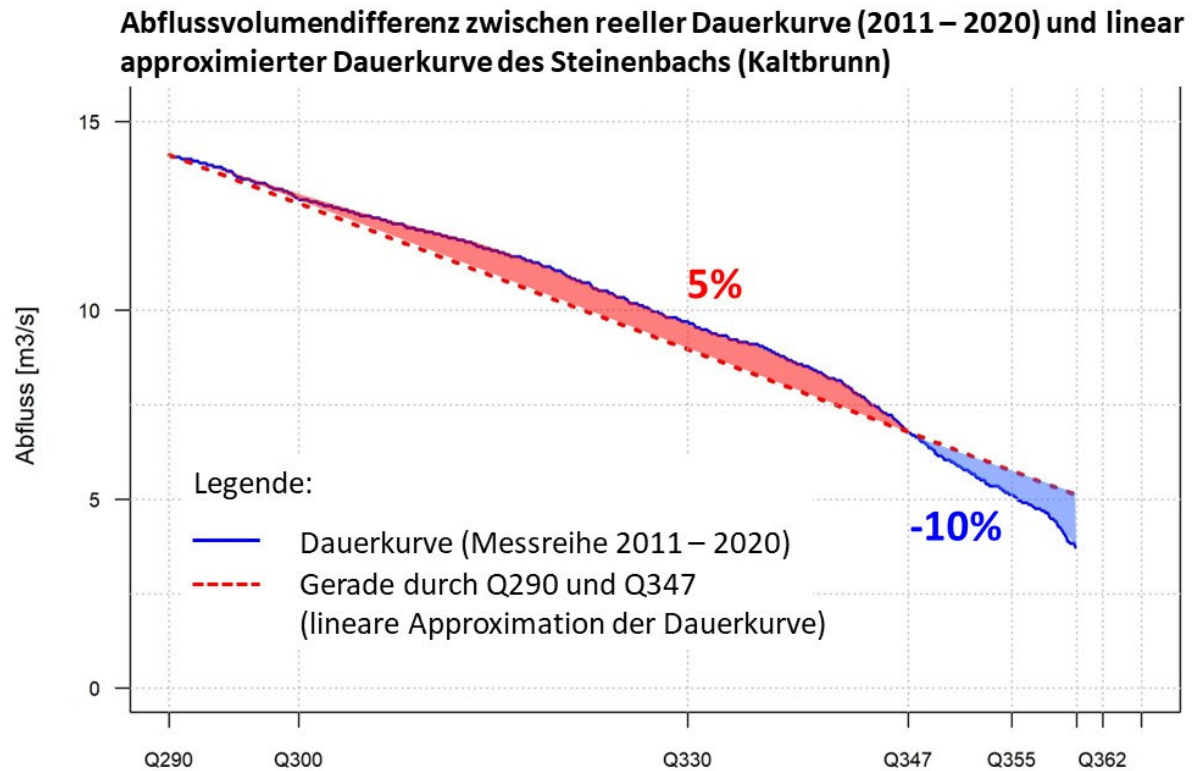


Abbildung 39: Anteil der Differenz der Abflussvolumina der reellen Dauerkurve (2011 – 2020) und der linear approximierten Dauerkurve am Abflussvolumen der linear approximierten Dauerkurve im Steinenbach (Kaltbrunn).

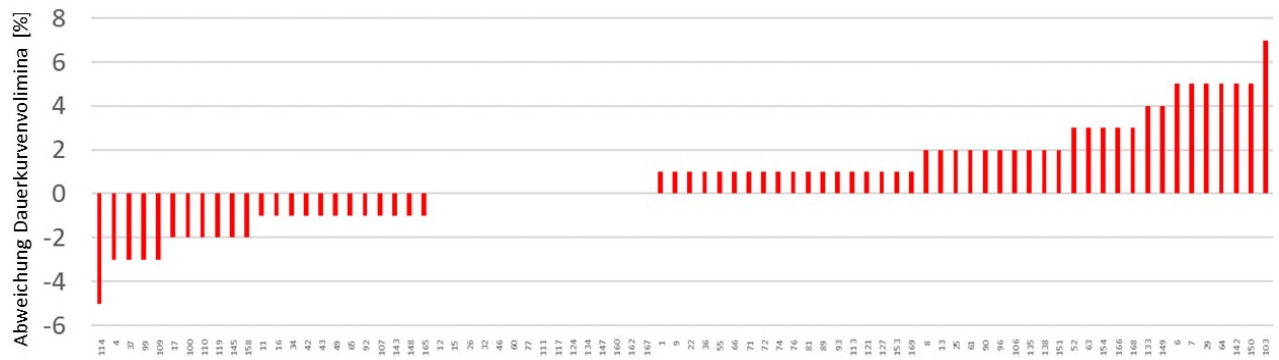
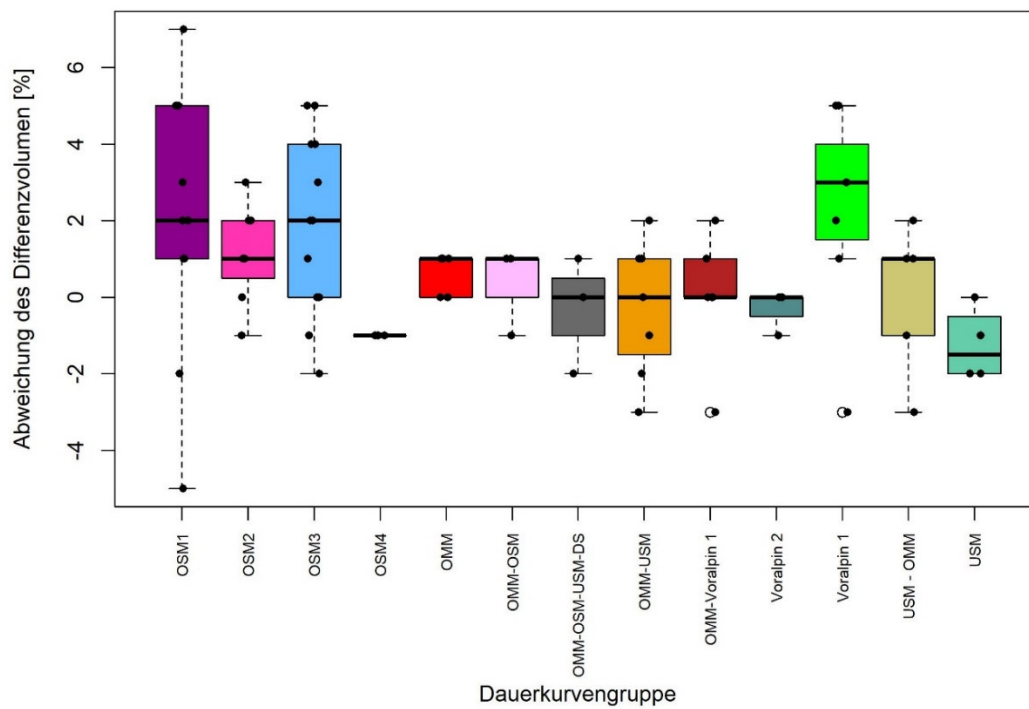


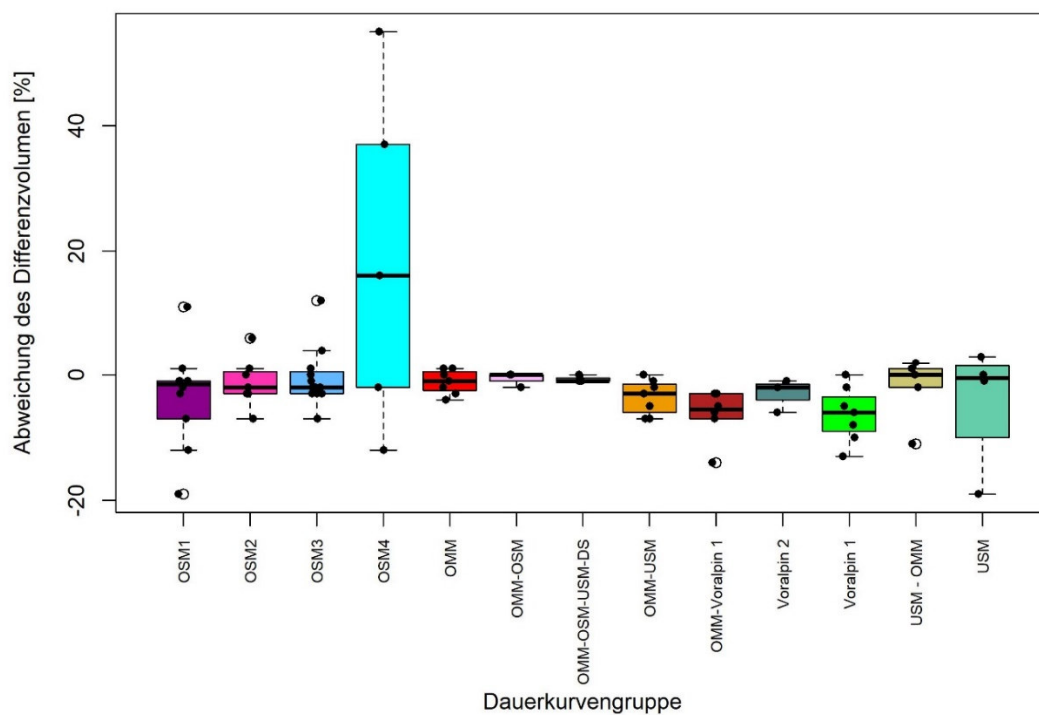
Abbildung 40: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 in %.



2229

2230 *Abbildung 41: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear*
 2231 *approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020, differenziert nach den*
 2232 *Dauerkurvengruppen.*

2233



2234

2235 *Abbildung 42: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear*
 2236 *approximierten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020, differenziert nach den*
 2237 *Dauerkurvengruppen.*

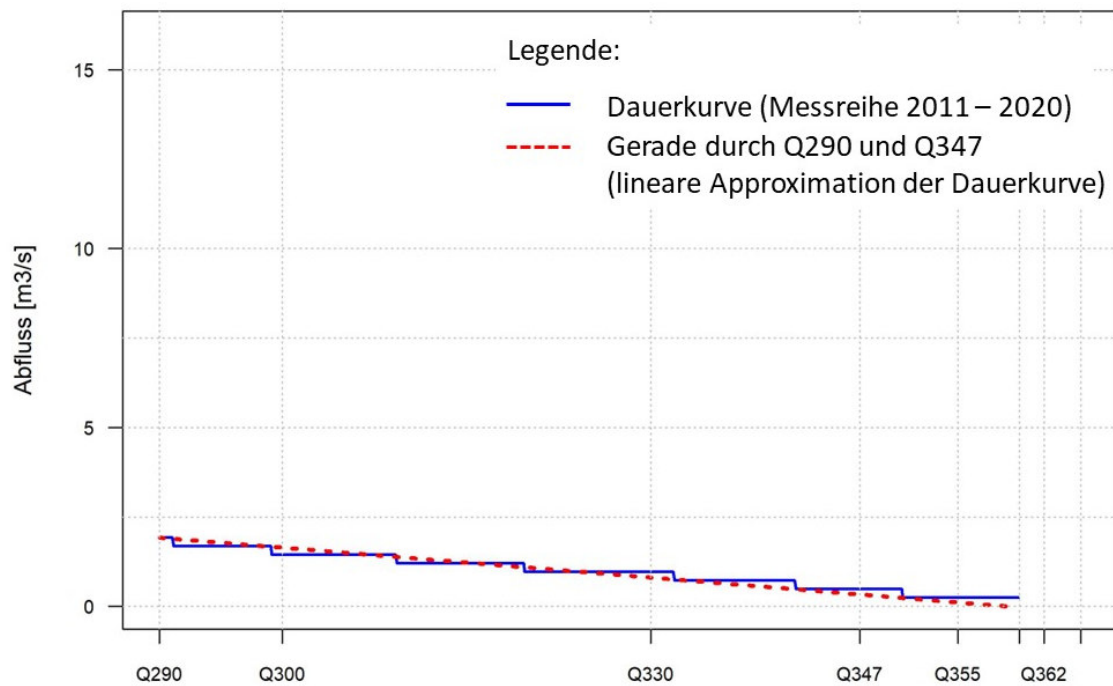


Abbildung 43: Reelle Dauerkurve (2011 – 2020) und linear approximierte Dauerkurve des Geusenbachs (Güttingen, TG). Der treppenförmige Verlauf weist darauf hin, dass die Messauflösung der Pegelhöhe etwas klein ist für die Bestimmung solcher geringer Abflussmengen.

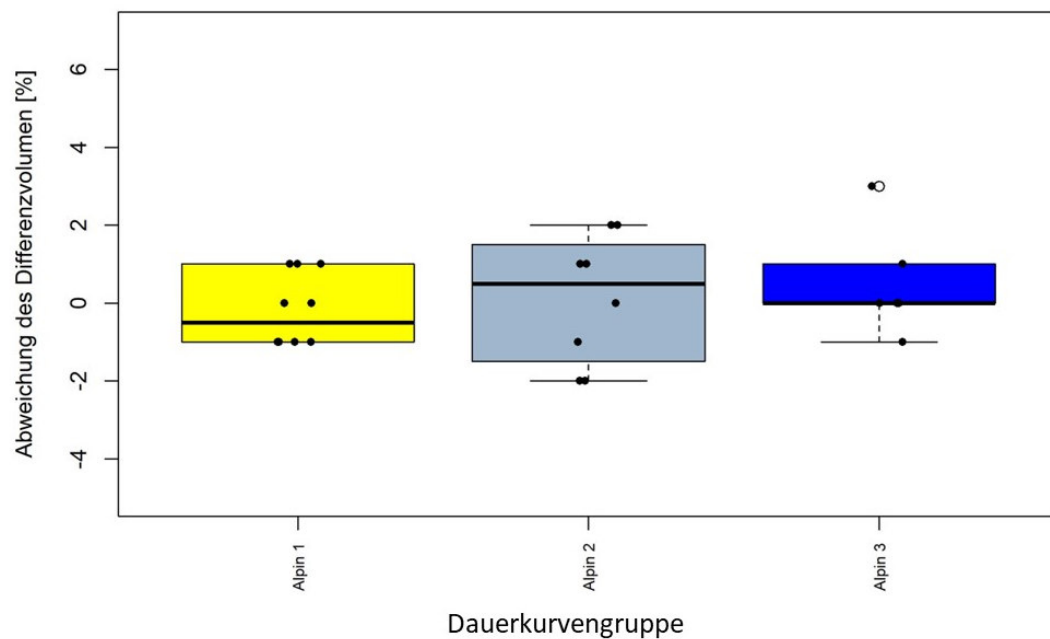


Abbildung 44: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020 für alpine Einzugsgebiete.

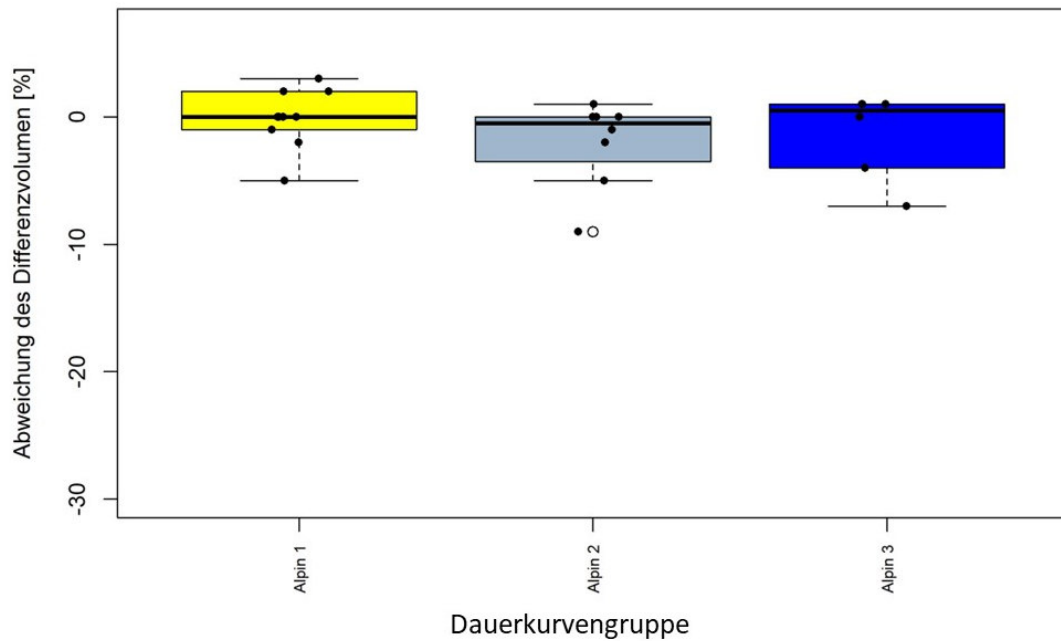
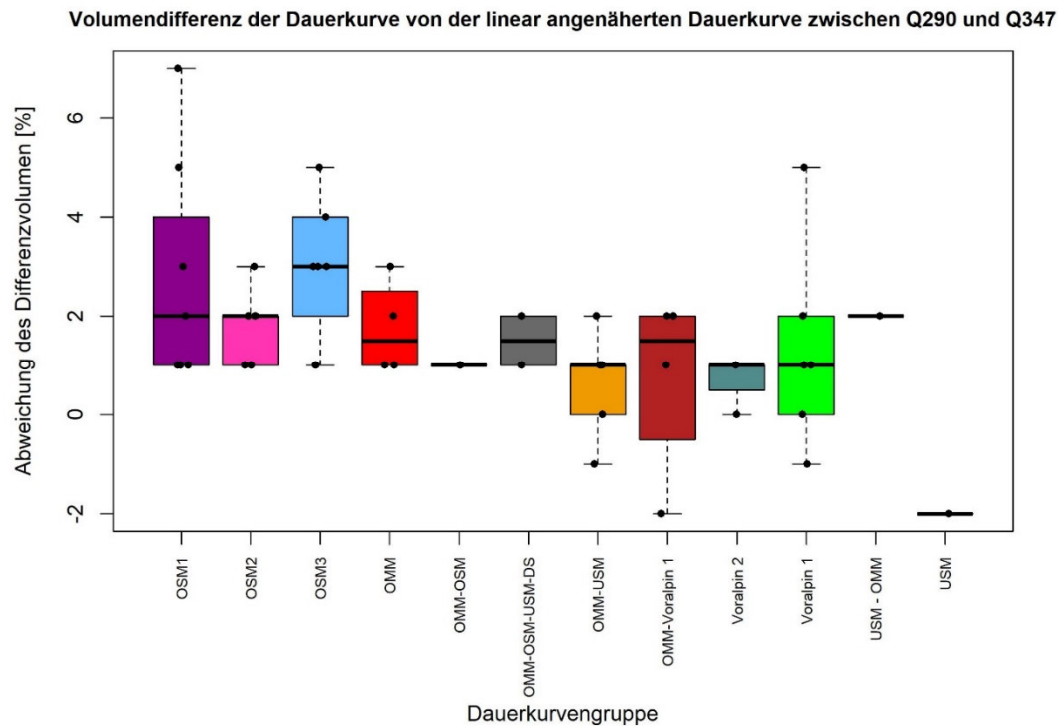


Abbildung 45: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020 für alpine Einzugsgebiete.

9.4.2 Periode 1991 bis 2020

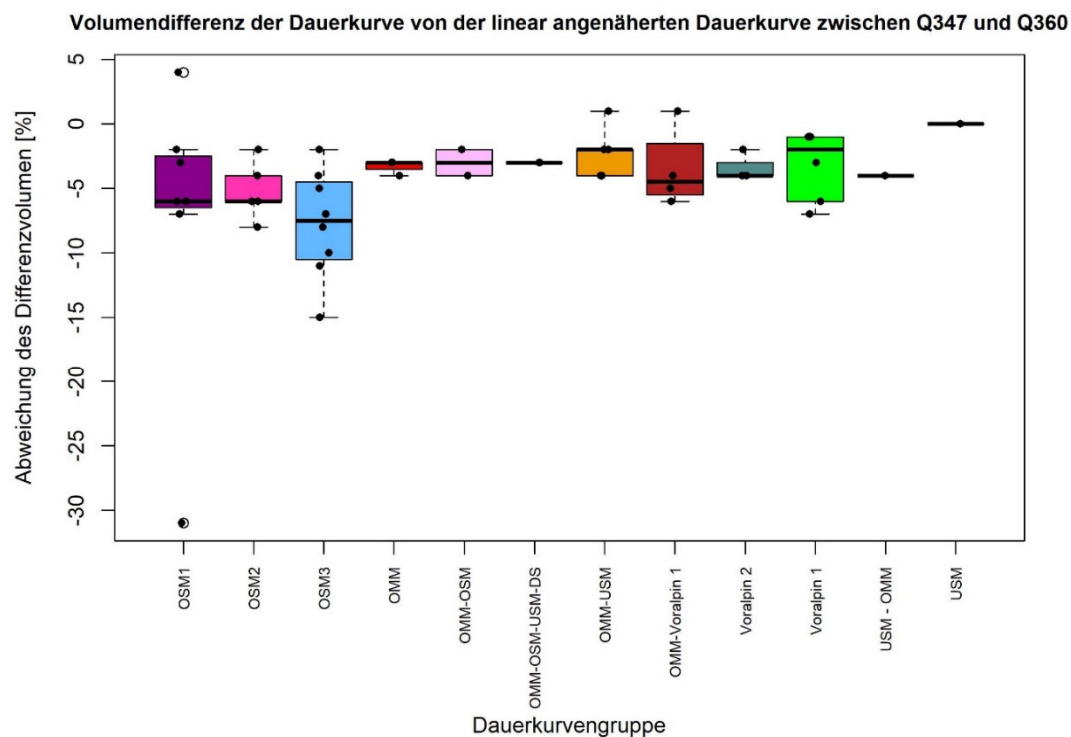
Der Prozentanteil der Differenz der Abflussvolumina zwischen der Standard-Dauerkurve und der linearen Dauerkurve an den Abflussvolumina der linearen Dauerkurve von Q290 bis Q347 liegt für die Messreihen 1991 bis 2020 höher als für die Messreihe 2011 bis 2020 (Vergleich zwischen Abbildung 46 und Abbildung 41). Bei den Dauerkurvengruppen OSM1, OSM2, OSM3, OMM, OMM-OSM und OMM-OSM-USM-DS sind nur positive Differenzvolumina zu erkennen. Allerdings ist die Anzahl an untersuchten Einzugsgebieten für die Messperiode 1991 bis 2020 geringer als für die Messperiode 2011 bis 2020, weil einige Stationen erst in der Zeit nach 1991 errichtet wurden. Der konvexe Verlauf der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 ist für die Dauerkurven OSM1, OSM2, OSM3, OMM, OMM-OSM und OMM-OSM-USM-DS für die Periode 1991 bis 2020 ausgeprägter als für die Periode 2011 bis 2020. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Niedrigwasserabflüsse wegen der zunehmenden Anzahl und Intensität der Trockenperioden zwischen 2003 und 2020 tendenziell sanken (Kapitel 12).

Die Volumendifferenzen zwischen den Standard-Dauerkurven und den linear-approximierten Dauerkurven zwischen Q347 und Q360, die das Abfallen der Dauerkurve am unteren Ende anzeigen, sind 1991 bis 2020 etwas höher im Vergleich zur Messperiode 2011 bis 2020 (Vergleich zwischen Abbildung 47 und Abbildung 42). Auch das dürfte mit der Tendenz der Abnahme der Niedrigwasserabflüsse seit 2003 zusammenhängen.



2265

2266 *Abbildung 46: Anteil der Abweichungen der Abflussvolumina der reellen Dauerkurve von der linear approximierten*
 2267 *Dauerkurve an den Abflussvolumina der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 in % für die Messreihen*
 2268 *von 1991 bis 2020.*



2269

2270 *Abbildung 47: Anteil der Abweichungen der Abflussvolumina der reellen Dauerkurve von der linear approximierten*
 2271 *Dauerkurve an den Abflussvolumina der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360 in % für die Messreihen*
 2272 *von 1991 bis 2020.*

2273 10 Handbuch zur Bestimmung von Q347, 2274 Niedrigwasserdauerkurven und -rezessionskurven 2275 in ungemessenen Einzugsgebieten

2276 Das Q347 von Einzugsgebieten im Mittelland, in den Voralpen und in den Alpen kann anhand von
2277 Abflusseinzelmessungen während einer Niedrigwasserperiode ($Q < Q_{290}$) bestimmt werden (Kapitel 9.2).
2278 Basierend auf Auswertungen von Dauerkurvengefällen zwischen Q_{290} und Q347 von 102 Einzugsgebieten
2279 (Kapitel 8.3 und Kapitel 9.2.5) lassen sich Gruppen von ähnlichen Dauerkurven in Abhängigkeit des spezifischen
2280 Q347, des litho-stratigraphischen Aufbaus (Mittelland) und des mittleren Jahresniederschlags (Alpen und
2281 Voralpen) identifizieren. Diese Gruppen werden auch als Dauerkurvengruppen bezeichnet. Einzugsgebiete der
2282 gleichen Dauerkurvengruppe im Mittelland zeigen bei vergleichbarem Q347 auch ein ähnliches Abflussverhalten
2283 bei einem Abflussrückgang während einer Niedrigwasserperiode (Kapitel 8.3.6). Zwischen alpinen
2284 Einzugsgebieten zeigt sich das ähnliche Abflussverhalten während einer Phase des Abflussrückgangs im Winter
2285 jedoch nur, wenn sie in einer vergleichbaren Klimaregion liegen und vergleichbare Werte in der mittleren Höhe,
2286 der minimalen Höhe und der Exposition aufweisen (Kapitel 10.3.9).

2287 Diese Erkenntnisse ermöglichen es, das Perzentil von Abflusseinzelmessungen (z.B. Q347, Q330, o.a.) eines
2288 Untersuchungsgebietes zu bestimmen, indem das zum Messzeitpunkt registrierte Perzentil eines benachbarten
2289 Einzugsgebietes mit einer langjährigen Abflussmessreihe und mit einem ähnlichen Abflussverhalten auf das
2290 Untersuchungsgebiet übertragen wird. Das Einzugsgebiet, das das Perzentil liefert, wird auch als Referenzgebiet
2291 bezeichnet. Aus dem ermittelten Perzentil lässt sich mit Hilfe der Dauerkurvengruppe das Q347 ermitteln
2292 (Kapitel 9.2). Ist das Q347 bekannt, kann das Q_{290} (Kapitel 9.2) und dann die Dauerkurve zwischen Q_{290} und
2293 Q360 (Kapitel 9.4) bestimmt werden. In den folgenden Unterkapiteln werden die Arbeitsschritte erklärt, um das
2294 Q347, die Niedrigwasserdauerkurve und die Niedrigwasserrezessionskurve eines ungemessenen Einzugsgebiets
2295 erfolgreich bestimmen zu können.

2296 Das Basiswissen, auf dem die ganze Methodik aufbaut, wird in den Kapiteln 4 bis 8 vermittelt. Im Kapitel 9 wird
2297 die Anwendung dieses Verfahrens anhand von 22 Untersuchungsgebieten im Einzugsgebiet der Töss detailliert
2298 beschrieben. Für eine Anwendung dieses Verfahrens wird eine vertiefte Auseinandersetzung mit diesen Kapiteln
2299 empfohlen.

2300 10.1 Ermittlung der Einzugsgebietsgrenze

2301 In einem ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der Einzugsgebietsgrenze. Es wird empfohlen, diese nicht voll
2302 automatisiert berechnen zu lassen, weil die durch Strassengräben und durch Dücker unter Strassen und
2303 Fahrwegen stark beeinflussten Fliesswege vom DTM nicht erkannt werden. In Gelände ohne ausgeprägte
2304 Konturen und mit einer geringen Neigung können Einzugsgebietsgrenzen, die mit einer vollautomatisierten
2305 Bestimmungsmethode berechnet wurden, grössere Unsicherheiten aufweisen. Deshalb wird empfohlen, die

2306 Einzugsgebietsgrenze manuell zu erstellen, basierend auf dem Geodatenatz «Topographische Einzugsgebiete
2307 Schweizer Gewässer» des BAFU (BAFU, 2024). Dieser GIS-Datenatz grenzt Einzugsgebiete aller Fliessgewässer
2308 mit einer Fläche von grösser als 1 bis 1.5 km² ab. Anhand dieses Datensatzes, des Messstandortes und anhand
2309 der Höhenlinien eines detaillierten Höhenmodells (Zellgrösse 2 Meter) lässt sich das Einzugsgebiet meist sehr
2310 rasch und zuverlässig manuell abgrenzen. Unsicherheiten in der Bestimmung der Einzugsgebietsfläche können
2311 zu erheblichen Verfälschungen in der Bestimmung des spezifischen Q347 (l s⁻¹ km⁻²) führen.

2312 **10.2 Erforderliche Gebietsparameter**

2313 In Tabelle 10 sind die Gebietsparameter mit den Abkürzungen aufgelistet, die für die Bestimmung der
2314 Dauerkurvengruppen notwendig sind.

2315
2316 *Tabelle 10: Liste der erforderlichen Gebietsparameter.*

Grossregion	Untergruppe	erforderliche Gebietsparameter
Alle Gebiete		mH
Alpine Gebiete		mP
Subalpine Gebiete		mP, mJ, LS
Mittelland-Gebiete	OMM	LS
	USM	LS
	OSM	mP, mJ, LS, mpQ

Legende:
mH = mittlere Einzugsgebietshöhe [m]
mP = mittlerer Jahresniederschlag [mm]
mJ = mittlere Geländeneigung [%]
LS = Flächenanteil an litho-stratigraphischen Einheiten (OMM, USM, OSM) [%]
mpQ = Flächenanteil an undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen [%]

2317

2318 **10.2.1 Mittlere Einzugsgebietshöhe**

2319 Die mittlere Einzugsgebietshöhe lässt sich in einem GIS-Programm anhand des DHM (25 x 25 Meter) ermitteln.

2320 **10.2.2 Mittlerer Jahresniederschlag**

2321 Mit einem GIS-Programm oder mit R werden die Raster-Daten der mittleren Jahresniederschläge zwischen 1991
2322 und 2020 der MeteoSchweiz (Meteo Schweiz, 2023) für das Untersuchungsgebiet extrahiert. Der Wert für das
2323 gesamte Untersuchungsgebiet wird durch die Mittelung der Rasterwerte berechnet.

2324 **10.2.3 Mittlere Geländeneigung**

2325 Ermittlung der mittleren Geländeneigung anhand des DHM (25 x 25 Meter) in %.

2326 10.2.4 Litho-stratigraphische Zusammensetzung

2327 Die stratigraphische Zusammensetzung eines Gebietes kann von der geotechnischen Karte der Schweiz
2328 abgeleitet werden (Swisstopo, 1967). Dabei muss das Attribut «Leg_Geol» des Datensatzes
2329 «PY_Basis_Flaechen.shp» für die abgegrenzte Einzugsgebietsfläche ausgeschnitten werden. Danach erfolgt die
2330 Ermittlung der Flächenanteile der stratigraphischen Einheiten. In Gebieten, die durch quartäre Ablagerungen
2331 bedeckt werden, muss die Abgrenzung der Festgesteinslithologie abgeschätzt werden. Die litho-stratigraphische
2332 Zusammensetzung begrenzt sich auf die Abgrenzung der Einheiten, die OMM, OSM, USM und UMM enthalten.
2333 Die UMM kommt nur sehr vereinzelt vor. Sie ist wie die USM zu behandeln.

2334 10.2.5 Durchlässigkeit der Quartärablagerungen

2335 Der Geocover-Datensatz (Swisstopo, 2022) wird auf die Fläche des Untersuchungsgebiets ausgeschnitten. Den
2336 verschiedenen quartären Ablagerungen (Attribut «Litho_D») des Untersuchungsgebiets werden die
2337 Durchlässigkeitsklassen gemäss
2338 Tabelle 2 in Kapitel 7.2 zugeordnet und dann die Flächenanteile jeder Durchlässigkeitsklasse für das gesamte
2339 Untersuchungsgebiet ermittelt. Für die Bestimmung der Dauerkurvengruppe und die Auswahl der
2340 Referenzgebiete wird die Summe der Anteile der undurchlässigen und mässig durchlässigen
2341 Quartärablagerungen benötigt.

2342 10.2.6 Schottergrundwasservolumina

2343 Bestimmung der Werte der Schottergrundwasservolumina und der potenziell bachgespeisten
2344 Schottergrundwasservolumina gemäss der Vorgehensweise in Kapitel 6.4. Die bachgespeisten
2345 Schottergrundwasservolumina werden für die Auswahl der Referenzgebiete verwendet.

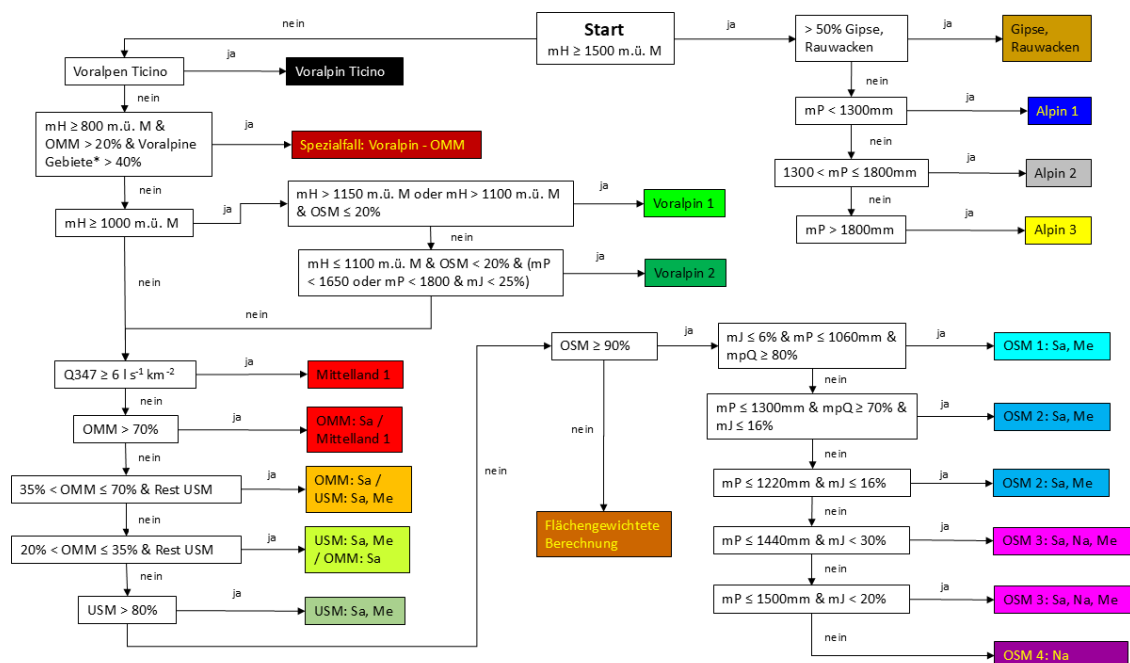
2346 10.2.7 Subtraktion von Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden

2347 Die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden zum Niedrigwasserabfluss im Winter sind sehr gering. Sie
2348 beeinflussen das Niedrigwasserverhalten von alpinen Einzugsgebieten jedoch stark. Hohe Flächenanteile an
2349 Gletschern und Permafrostböden führen zu tiefen Q347-Abflüssen (Kapitel 6.4.1 und 6.4.2). Deshalb wurde ein
2350 Verfahren entwickelt, um die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden aus den Abflussmessreihen
2351 zwischen Q290 und Q360 herauszurechnen. Um die Dauerkurvengruppe von ungemessenen alpinen
2352 Einzugsgebieten anhand des Regelwerkes (Abbildung 48) bestimmen zu können, ist vorgängig der mittlere
2353 Jahresniederschlag der gletscher- und permafrostfreien Fläche zu ermitteln. Auch sind die Beiträge der
2354 Gletscher- und Permafrostflächen vorgängig aus den Messwerten der Abflusseinzelmessungen
2355 herauszurechnen. In den Kapiteln 6.4.1 und 6.4.2 wird die dafür vorgeschlagene Vorgehensweise im Detail
2356 beschrieben.

Nach der Ermittlung der Dauerkurven von alpinen Einzugsgebieten müssen die Beiträge von Gletschern und von Permafrostböden wieder zu den Abflusswerten der Dauerkurve und der Einzelmessungen addiert werden. Dazu sind die gleichen Werte zu verwenden wie bei der Subtraktion dieser Beiträge.

10.3 Bestimmung der Dauerkurvengruppe

Basierend auf Auswertungen von Dauerkurvegefällen zwischen Q290 und Q347 von 102 Einzugsgebieten in Mittelland, Voralpen und Alpen (Kapitel 8.3 und Kapitel 9.2.5) wurde ein Regelwerk entwickelt, mit dem die Dauerkurvengruppe von Untersuchungsgebieten im Mittelland, in den Voralpen und Alpen bestimmt werden können. Die Bestimmung basiert auf geologischen, topographischen und klimatologischen Grundlagen (Abbildung 48).



Legende:

mH	mittlere Höhe [m.ü. M]
mP	mittlerer Jahresniederschlag (1991 – 2020) [mm]
mpQ	Flächenanteil an undurchlässigen bis mässig durchlässigen Quartärablagerungen
OMM	Obere Meeresmolasse
USM	Untere Süßwassermolasse
OSM	Obere Süßwassermolasse
Sa	Sandstein
Na	Nagelfluh
Me	Mergel

*Voralpine Gebiete: Schräggestellte USM, Bündnerschiefer, Flysch, Kalke

Abbildung 48: Regelwerk zur Bestimmung der Dauerkurvengruppen im Mittelland, Nördlichen und Südlichen Voralpen und in den Alpen anhand von Gebietseigenschaften wie der Litho-Stratigraphie, dem mittleren Jahresniederschlag, der mittleren Geländeneigung und der Durchlässigkeit der Quartärablagerungen eines Einzugsgebiets.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Dauerkurvengruppe unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob sich ein Untersuchungsgebiet in den Alpen, Voralpen oder im Mittelland befindet. Die Dauerkurvengruppen werden

2374 bestimmt, indem die GIS-Datensätze der erforderlichen Einzugsgebietsparameter (Kapitel 10.2) gemäss den in
2375 Abbildung 48 definierten Regeln verschnitten werden.

2376 10.3.1 Alpine Einzugsgebiete

2377 Um ein Untersuchungsgebiet den Alpen oder Voralpen zuzuordnen, ist die mittlere Einzugsgebietshöhe
2378 erforderlich. Liegt die mittlere Höhe über 1500 m.ü.M, gehört ein Einzugsgebiet bezüglich seiner
2379 Dauerkurvengruppe zu den alpinen Gebieten. In dieser nehmen Einzugsgebiete, die hauptsächlich aus Gipsen
2380 und Rauwacken aufgebaut sind, eine Sonderstellung ein. Diese Gesteine weisen eine ausserordentlich hohe
2381 Kapazität an Grundwasserspeichern mit einem langsamen Entwässerungsverhalten auf. Nur in solchen
2382 Einzugsgebieten treten spezifische Q347-Abflüsse von mehr als $20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf (Kapitel 11.6.4). Die
2383 Abflussganglinie wird wesentlich stärker durch die Beiträge dieser langsam auslaufenden Grundwasserspeicher
2384 dominiert als die Abflussganglinie von Einzugsgebieten mit einem anderen geologischen Aufbau. Deshalb
2385 erhalten die aus Gipsen und Rauwacken aufgebauten Einzugsgebiete eine eigene Dauerkurvengruppe (vgl. auch
2386 10.3.9). In allen übrigen alpinen Einzugsgebieten kann die Dauerkurvengruppe anhand des mittleren
2387 Jahresniederschlags bestimmt werden (Abbildung 48).

2388 10.3.2 Voralpine Einzugsgebiete im Tessin

2389 Das Verhalten der Q290/Q347 für Einzugsgebiete im Tessin mit einer mittleren Höhe von weniger als 1500
2390 m.ü.M. kann anhand einer Potenzfunktion charakterisiert werden (Abbildung 13). Diesen Gebieten wird die
2391 Dauerkurvengruppe Voralpin Ticino zugeteilt.

2392 10.3.3 Spezialfall Voralpin - OMM

2393 Grundsätzlich ist eine Abgrenzung zwischen Mittelland- und Voralpen-Einzugsgebieten klar durch die im
2394 Regelwerk definierten Regeln bestimmbar (Abbildung 48). Nicht abgedeckt sind Einzugsgebiete, die zu einem
2395 gewissen Anteil voralpinen Charakter aufweisen und zu einem Flächenanteil von mehr als 20% aus OMM
2396 aufgebaut sind. In einem solchen Fall empfehlen wir folgende Vorgehensweise:

2397

- 2398 1. Ermitteln aller Flächen, die nicht aus OMM und nicht aus OSM aufgebaut sind. Diese bestehen aus den
2399 lithologischen Einheiten, die für die Voralpen typisch sind, wie USM, Kalke, Bündnerschiefer oder
2400 Flysch. Wichtig: Es handelt sich dabei um die schräggestellte Untere Süsswassermolasse, die
2401 charakteristisch ist für die Voralpen. Diese Flächen lassen sich anhand der tektonischen Informationen
2402 im Geocover identifizieren.
- 2403 2. Identifikation der mittleren Höhe dieser Fläche. Liegt diese unter 1100 m ü. M, was selten vorkommt,
2404 muss der Gebietsauslass dieses «voralpinen» Einzugsgebietsteils dem Hauptgerinne entlang so weit
2405 nach oben verschoben werden, dass die mittlere Höhe grösser ist als 1100 m.ü.M. Diesem Flächenanteil
2406 des Einzugsgebiets wird dann die Dauerkurvengruppe Voralpin 1 zugewiesen.

- 2407 3. Die Zuweisung der Dauerkurvengruppen zu den übrigen Flächen des Einzugsgebiets, die nicht aus OMM
2408 aufgebaut sind, erfolgt nach den Regeln für Mittelland-Einzugsgebiete (Abbildung 48). Die
2409 Wahrscheinlichkeit, dass die Dauerkurvengruppe dieser Flächen OSM 4 oder Voralpin 2 lautet, ist
2410 ziemlich gross.
- 2411 4. Den Flächen im Einzugsgebiet, die aus OMM aufgebaut sind, wird die Dauerkurvengruppe OMM
2412 zugewiesen.
- 2413 5. Um das Verhalten der Dauerkurve eines solchen gemischt aufgebauten Einzugsgebiets möglichst genau
2414 zu charakterisieren, schlagen wir vor, die Potenzfunktionen der Dauerkurvengruppen Voralpin 1,
2415 Voralpin 2 (oder andere) und OMM flächengewichtet zu mitteln.

2416 10.3.4 Voralpen der Alpennordseite

- 2417 Untersuchungsgebieten mit einer mittleren Höhe von kleiner als 1500 m. ü. M und grösser oder gleich 1150 m.
2418 ü. M oder Untersuchungsgebieten mit einem Flächenanteil der OSM von weniger als 20% und einer mittleren
2419 Höhe von mehr als 1100 m ü. M. wird die Dauerkurvengruppe Voralpin 1 zugewiesen. Einzugsgebiete der
2420 Dauerkurvengruppe Voralpin 1 verhalten sich ähnlich wie die Dauerkurvengruppe Alpin 3, wenn das spezifische
2421 grösser als $5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ist (Abbildung 14).
- 2422 Einzugsgebieten, die die folgende Bedingung erfüllen, wird die Gruppe Voralpin 2 zugewiesen:
- 2423
- 2424 - Flächenanteil der OSM von weniger als 20% und mittlerer jährlicher Niederschlag weniger als 1650 mm
2425 und mittlere Höhe grösser als 1000 m ü. M., aber kleiner oder gleich 1100 m ü. M., oder
 - 2426 - mittlerer jährlicher Niederschlag weniger als 1800 mm und mittlere Geländeneigung weniger als 25%.
- 2427
- 2428 Die Q290/Q347 dieser Gebiete passen gut sowohl zu den Potenzfunktionen der Dauerkurvengruppe OSM 4 als
2429 auch zu denjenigen der Dauerkurvengruppe Tessin (Abbildung 9). Sie unterscheiden sich von der Gruppe
2430 Voralpin 1 durch einen geringeren Jahresniederschlag, eine geringere Geländeneigung (Abbildung 48) und durch
2431 eine geringere Anzahl an Niedrigwassertagen in den Monaten November bis März (Abbildung 11).

2432 10.3.5 Mittelland-Einzugsgebiete

- 2433 Einzugsgebieten im Mittelland, die zu mehr als 70% aus OMM bedeckt werden, wird die Dauerkurvengruppe
2434 OMM/Mittelland 1 zugeordnet. Das Dauerkurvegefälle dieser Gruppe ist konstant tief und steigt auch bei
2435 zunehmendem Q347 kaum an (Abbildung 14). Zu dieser Gruppe gehören auch alle Einzugsgebiete im Mittelland,
2436 die ein Q347 von $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ oder mehr aufweisen.
- 2437 Je höher der Flächenanteil der USM gegenüber der OMM in einem Mittelland-Einzugsgebiet ist, desto stärker
2438 nimmt das Dauerkurvegefälle mit abnehmendem Q347 zu (Abbildung 14). Untersuchungsgebieten, in denen
2439 OMM gegenüber USM dominiert, wird die Dauerkurvengruppe OMM/USM zugewiesen. In solchen, wo USM
2440 dominiert, wird die Dauerkurvengruppe USM/OMM zugeteilt.

2441 Untersuchungsgebiete mit einem Flächenanteil von mehr als 80% an USM werden in die Dauerkurvengruppe
2442 USM eingeteilt.
2443 Wie bei den USM-dominierten Einzugsgebieten steigen auch die Dauerkurvengefälle der OSM-dominierten
2444 Einzugsgebiete mit abnehmendem Q347 an (Abbildung 14). Es sind Gebietsparameter wie der mittlere
2445 Jahresniederschlag, die mittlere Geländeneigung und der Anteil an undurchlässigen und mässig durchlässigen
2446 Quartärablagerungen erforderlich, um die Dauerkurvengruppen OSM 1, OSM 2, OSM 3 und OSM 4 voneinander
2447 abzugrenzen.

2448 10.3.6 Flächengewichtete Mittelung der Dauerkurvengruppen im 2449 Mittelland

2450 In Mittelland-Einzugsgebieten mit gemischter litho-stratigraphischer Zusammensetzung wie zum Beispiel 70%
2451 OSM und 30% OMM wird vorgeschlagen, die Potenzfunktionen (vgl. Abbildung 14) nach den Flächenanteilen zu
2452 mitteln.

2453 10.3.7 Ermittlung von potenziellen Versickerungstrecken

2454 Liegt die Bachsohle am Untersuchungsstandort auf potenziell hoch durchlässigem Untergrund wie z.B. einem
2455 Schottergrundwasserspeicher, einem Bachschuttkegel, einem Hangschuttkegel, o.a., muss damit gerechnet
2456 werden, dass Wasser unterirdisch am Untersuchungsstandort vorbeifliesst. Um das passende
2457 Dauerkurvengefälle zu ermitteln, muss der Wert des unterirdischen Abflusses ermittelt und zum oberirdischen
2458 Abfluss addiert werden (Kapitel 6.2). Dafür sind, je nach Wahl der Methode, zusätzliche Abflusseinzelmessungen
2459 notwendig. Um diese planen zu können, ist es wichtig, potenzielle Versickerungstrecken oberhalb des
2460 Untersuchungsstandortes anhand der geologischen Karte (Swisstopo, 2022) frühzeitig zu identifizieren.

2461 10.3.8 Bestimmung der Referenzgebiete im Mittelland

2462 Im Mittelland eignen sich Einzugsgebiete als Referenzgebiete, wenn sie im Vergleich zu den
2463 Untersuchungsgebieten:

- 2464 a) die gleiche Dauerkurvengruppe,
- 2465 b) ähnliche Niederschlagsmengen in der Vorperiode,
- 2466 c) ähnliche Volumina der bachgespeisten Schottergrundwasserkörper,
- 2467 d) ein ähnlicher Q347-Abfluss und
- 2468 e) eine Nachbarschaft aufweisen.

2469

2470 Dies zeigte eine Anwendung des Verfahrens anhand von 22 ungemessenen Untersuchungsgebieten im
2471 Einzugsgebiet der Töss und des Altbaches (Kapitel 9.2.5). Grundsätzlich wird empfohlen, Einzugsgebiete aus der
2472 Nachbarschaft des Untersuchungsgebiets auszuwählen, weil diese ein ähnliches Niederschlagsregime aufweisen
2473 wie das Untersuchungsgebiet. Es ist empfehlenswert diese Auswahl schon zu Beginn der Studie festzulegen;

denn anhand der Abflussperzentile dieser Referenzgebiete wird der geeignete Messzeitpunkt ermittelt. Die definitive Auswahl der Referenzgebiete erfolgt, wenn die Werte der Einzelmessungen und die Niederschlagsmengen der Vorperiode im Untersuchungsgebiet und in den Referenzgebieten bekannt sind. Nach der Durchführung der Abflusseinzelmessungen werden die 20, 10, 5 und 2 Tage vor dem Messzeitpunkt gefallen aufsummierten Niederschläge ermittelt. Diese können anhand des gegitterten Produkts für den Niederschlagstagesmittelwert der MeteoSchweiz (MeteoSwiss, 2021) für das Untersuchungsgebiet und für die möglichen Referenzgebiete berechnet werden. Basierend auf den Niederschlägen in der Vorperiode vor den Abflussmessungen werden dann die definitiven Referenzgebiete festgelegt. Es wird empfohlen, die Abflussperzentile von verschiedenen Referenzgebieten zu mitteln, wenn die aufgeführten Bedingungen durch ein einzelnes Referenzgebiet überhaupt nicht erfüllt werden können. Wenn z.B. ein geeignetes Referenzgebiet mit der gleichen Dauerkurvengruppe viel höhere Niederschlagsmengen in der Vorperiode erfuhr als das Untersuchungsgebiet, können ein zusätzliches Referenzgebiet oder zwei andere Referenzgebiete verwendet werden. So ist es möglich zwei Referenzgebiete zu verwenden, deren Dauerkurvengruppen im Vergleich zur Dauerkurvengruppe des Untersuchungsgebiets um eine Klasse abweichen und die Perzentile dieser beiden Referenzgebiete zu mitteln (Kapitel 9.2.5). Wenn das Untersuchungsgebiet z.B. die Dauerkurvengruppe OSM 3 aufweist, so könnte das Perzentil der Abflussmessung bestimmt werden, indem die Perzentile von einem Referenzgebiet mit der Dauerkurvengruppe OSM 2 und einem Referenzgebiet mit der Dauerkurvengruppe OSM 1 gemittelt werden. Die detaillierte Vorgehensweise, wie Referenzgebiete und wie die Abflussperzentile der Einzelmessungen zu bestimmen sind, ist in Kapitel 9.2.5 anhand von Beispielen beschrieben.

10.3.9 Bestimmung der Referenzgebiete in den Alpen

In den alpinen Einzugsgebieten beeinflusst der mittlere Jahresniederschlag das Entwässerungsverhalten massgeblich (Abbildung 14). In den Alpen sind die Unterschiede im Dauerkurvengefälle zwischen den Einzugsgebieten jedoch klein. Hinzu kommt, dass die Entwässerung der alpinen Einzugsgebiete im Winter seltener durch Regenereignisse unterbrochen wird, und dass die Verdunstung kaum einen Einfluss auf Niedrigwasserabflüsse hat. Für eine möglichst zuverlässige Bestimmung des Q347 in alpinen Einzugsgebieten ist entscheidend, dass die Referenzgebiete bei den folgenden Kriterien Ähnlichkeiten zu den Untersuchungsgebieten aufweisen:

1. **Klimatische Region:** Die Nordseite der westlichen Alpen weist häufig eine etwas höhere Schneefallgrenze auf als die Zentralalpen. Nochmals tiefer liegt die Schneefallgrenze in den inneralpinen Tälern in den Ostalpen. Durch eine höhere Schneefallgrenze ist der Einfluss durch Schneeschmelze und Regen etwas grösser, was das Q347 eher etwas erhöht. Dadurch können die Perzentile (z.B. Q300 oder Q350) bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession in den Westalpen tendenziell etwas höher liegen als in den Zentralalpen und noch höher als in den inneralpinen Tälern der Ostschweiz. Dasselbe gilt für die alpinen Regionen des Kantons Tessin. Dort liegen die Abflussperzentile tendenziell höher als in der Westschweiz, in der Zentralschweiz und in der Ostschweiz

der Alpennordseite. Wenn möglich, sollten die Untersuchungs- und Referenzgebiete in der gleichen klimatischen Region liegen. Mit der Klassifikation wie sie in Tabelle 11 vorgeschlagen wird, konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Je höher die minimalen Höhen der Einzugsgebiete liegen, desto weniger wichtig ist dieses Kriterium, weil die Schneeschmelze viel später beginnt und deshalb die Entwässerung der Gebiete in den Monaten Dezember bis März kaum durch Regenereignisse oder Schneeschmelze unterbrochen wird.

Tabelle 11: Einteilung des Schweizer Alpengebiets in klimatische Regionen, die als ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Referenzgebiete gelten.

Grossregion	Klimaregion
Alpennordseite	Zentralalpen: Uri, westliche Surselva
	Westalpen: Berneroberrand, Wallis
	Ostalpen: östliche Surselva und alle Gebiete östlich davon, inkl. Unterengadin
Alpensüdseite	Oberengadin, Münstertal, Puschlav, Bergell
	Tessin

2. **Mittlere Höhe:** Tendenziell weisen tieferliegende Einzugsgebiete während einer Rezessionsphase im Winter bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession höhere Perzentile auf als höherliegende.
3. **Minimale Höhe:** gleicher Effekt wie bei der mittleren Höhe und der Klimaregion.
4. **Exposition:** Tendenziell weisen südexponierte Einzugsgebiete während einer Rezessionsphase im Winter bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession höhere Perzentile auf als nordexponierte. Es ist vor allem die Exposition in den tiefsten Höhenlagen im Einzugsgebiet wichtig, denn dort beginnt die Schneeschmelze zuerst und es können grosse Differenzen in den Perzentilen entstehen. Am Beispiel: Am Goneri, der etwa eine gleiche minimale Höhe aufweist wie der Rein da Sumvitg, beginnt die Schneeschmelze meist früher als im Rein da Sumvitg, weil in den tiefsten Höhenlagen mehr südexponierte Hänge auftreten als im Rein da Sumvitg.
5. **Extrem hohe Q347:** Einzugsgebiete mit ausserordentlich hohen Q347 sind separat zu behandeln. Bei Einzugsgebieten mit Q347-Abflüssen von mehr als $20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, wie beispielsweise dem Ducanbach (Sertig, Davos) oder dem Brenno (Aquacalda, Lukmanier Südseite), bestehen grosse Abweichungen zwischen den Abflüssen der Validierungsmessungen und der ermittelten Dauerkurve. Die Erklärung dafür, die bisher am plausibelsten erscheint, ist, dass diese Einzugsgebiete derart voluminöse langsam entwässernde Speicher aufweisen, dass sie erst stark verzögert auf Niederschlagsschwankungen reagieren. Die Abflussganglinie wird so stark von den langsam entwässernden Speichern dominiert, dass diese möglicherweise von den saisonalen Rhythmen abgekoppelt ist. Sie reagiert womöglich nur auf mehrjährige Schwankungen im Niederschlagsregime. Da bisher an keinem dieser Einzugsgebiete eine fixe Pegelstation installiert wurde, kann dieses Verhalten aber nicht definitiv bestätigt werden. Die starken Abweichungen der Abflüsse der Validierungsmessungen von den modellierten Dauerkurven lassen nur diese Schlussfolgerung zu. Dieses Phänomen tritt eigentlich nur bei Einzugsgebieten auf, die durch Gipse oder Rauwacken aufgebaut sind.

2544

2545 10.3.10 Zeitpunkt der Abflusseinzelmessungen und Umgang mit 2546 Unsicherheiten im Mittelland

2547 Niedrigwasserabflüsse ($Q < Q_{290}$) treten in den Alpen nur in den Wintermonaten auf, weil die Niederschläge
2548 meist in Form von Schnee fallen (Kapitel 8.4). Im Mittelland finden über 70% der Niedrigwassertage ($Q < Q_{290}$)
2549 in den Monaten April bis Oktober statt. In den Voralpen sind es, je nach Höhenlage, 30 bis 50%. Grundsätzlich
2550 wird die Durchführung von mindestens 3 Abflusseinzelmessungen am geplanten Untersuchungsstandort
2551 empfohlen. Zwei Abflussmessungen sind zu einem Zeitpunkt durchzuführen, wenn die Abflüsse von geeigneten
2552 Referenzgebieten zwischen Q_{320} und Q_{347} liegen, und eine Abflusseinzelmessung, wenn die Abflüsse zwischen
2553 Q_{290} und Q_{320} liegen. Eine Abflussmessung wird dazu verwendet, um das Q_{347} zu bestimmen. Es ist die
2554 Abflussmessung, die näher beim Q_{347} - Abfluss liegt. Anhand der beiden anderen Abflussmessungen wird die
2555 berechnete Dauerkurve validiert. Grundsätzlich ist für die Untersuchung von Mittelland-Einzugsgebieten ein
2556 Messzeitpunkt in den Monaten Mai bis September zu bevorzugen. Aufgrund der stark reduzierten
2557 Evapotranspirationsrate kann sich das Rezessionsverhalten der Abflüsse zwischen Untersuchungs- und
2558 Referenzgebieten in den Frühlings-/Herbst-/Wintermonaten gegenüber den Sommermonaten verändern. Das
2559 gilt wahrscheinlich vor allem für Einzugsgebiete in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) und in der Unteren
2560 Süsswassermolasse (USM), weil dort der Einfluss der Evapotranspiration auf die Rezessionskurven grösser ist als
2561 in der Oberen Meeresmolasse (OMM).

2562 Die Messung zur Bestimmung des Q_{347} wird im Idealfall zu einem Zeitpunkt durchgeführt, wenn die
2563 Abflussperzentile der Referenzgebiete möglichst nahe bei Q_{347} liegen. Die Entwicklung der Abflussperzentile
2564 der Referenzgebiete kann während einer Trockenphase anhand der Hydrometrie-Webseiten von Bund und
2565 Kantonen vor der Phase der Messungen genau beobachtet werden, um einen geeigneten Messzeitpunkt zu
2566 bestimmen. Die Bestimmung des Abflussperzentils wird genauer, wenn in einer Periode von 20 Tagen vor der
2567 geplanten Messkampagne möglichst wenig Niederschlag fällt.

2568 Es kann vorkommen, dass die Perzentile eines möglichen Referenzgebietes mit der gleichen Dauerkurvengruppe
2569 stark von benachbarten Referenzgebieten derselben Dauerkurvengruppe abweichen, obwohl die Niederschläge
2570 in der Vorperiode ähnlich waren. Das kann unterschiedliche Gründe haben:

2571

- 2572 - Unterschiedlicher Entwässerungsstand der massgeblichen Speicher
- 2573 - Unterschiedlicher Entwässerungsstand, der sich durch ein unterschiedliches
2574 Schottergrundwasservolumen erklären lässt.
- 2575 - Hohe Zuflüsse aus Kläranlagen und aus Seen/Grundwasserkörpern von ausserhalb des
2576 Untersuchungsgebiets, die die natürlichen Abflüsse verfälschen.
- 2577 - Hohe Entnahmemengen, die die natürlichen Abflüsse verfälschen.
- 2578 - Grosse Anteile an unterirdischen Abflüssen unter den Messstationen.

2579 - Fehlerhafte Abflussdaten bei den Referenzstationen aufgrund von messtechnischen Problemen oder
2580 Unsicherheiten in der P/Q-Beziehung.

2581

2582 Der erste erwähnte Aspekt kann nicht nachgeprüft werden. Die erwähnten Unterschiede bleiben bestehen. Alle
2583 anderen Aspekte lassen sich durch geeignete Massnahmen identifizieren oder ausschliessen:

2584

2585 - Bei unterschiedlichen Schottergrundwasservolumina, hohen Zuflüssen aus Kläranlagen, hohen
2586 Entnahmemengen oder grossen unterirdischen Abflüssen sollten andere Referenzgebiete Priorität
2587 erhalten. Einzugsgebiete mit hohen Zuflüssen aus Kläranlagen oder grossen unterirdischen Abflüssen
2588 sollten generell nicht als Referenzgebiete verwendet werden.

2589

2590 - Um fehlerhafte Pegelmessungen oder Unsicherheiten in der P/Q-Beziehung bei den Referenzgebieten
2591 ausschliessen zu können, wird empfohlen, am gleichen Tag der Messung im Untersuchungsgebiet auch
2592 eine Abflussmessung an den Pegeln von Referenzgebieten durchzuführen. Weicht der online
2593 veröffentlichte Abfluss stark vom Messwert der eigenen Messung ab, könnten Fehler in der
2594 Pegelmessung oder in der P/Q-Beziehung vorliegen, z.B. weil diese nicht aktualisiert wurde. Das sollte
2595 umgehend den Hydrometrie-Behörden mitgeteilt werden, damit diese den Fehler beheben und die
2596 Abflusswerte und somit auch die Perzentile korrigieren können. Notfalls kann anhand der vorhandenen
2597 Dauerkurve das Perzentil des eigenen am Pegel ermittelten Abflusswertes verwendet werden.

2598 10.3.11 Zeitpunkt der Abflusseinzelmessungen in den Alpen

2599 Bei einer sorgfältigen Auswahl des Messzeitpunktes in den alpinen Untersuchungsgebieten wird die Auswahl
2600 der Referenzgebiete erleichtert und die Zuverlässigkeit des ermittelten Abflussperzentils der Einzelmessung
2601 erhöht. Dafür ist es wichtig, mögliche Referenzgebiete schon frühzeitig vor der Messkampagne zu bestimmen.
2602 Für die Auswahl eines möglichst geeigneten Messzeitpunktes in Alpinen Einzugsgebieten sind folgende Regeln
2603 zu beachten:

2604

2605 - Um das Q347 zu bestimmen, sollte eine Abflussmessung möglichst zum Zeitpunkt des minimalen
2606 Abflusses im Winter vorgenommen werden. Dieser Zeitpunkt ist in einem durchschnittlichen Winter, je
2607 nach klimatischer Region unterschiedlich (Tabelle 12). In den Tessiner Alpen findet er meistens schon
2608 Ende Januar oder anfangs Februar statt, im hoch gelegenen und trockenen Oberengadin hingegen
2609 gewöhnlich erst Mitte bis Ende März oder gar noch später. Das sind Richtwerte, die in einzelnen Jahren
2610 auch verfehlt werden und die aufgrund der mittleren Höhe, der minimalen Höhe und der Exposition
2611 variieren. Für eine Abflussmessung im Oberengadin wäre der Zeitpunkt Ende Januar zu früh, weil dann
2612 die Perzentile dort eher bei Q290, anstatt bei Q347 liegen und Ende März liegt das Abflussperzentil im
2613 Tessin aufgrund der fortgeschrittenen Schneeschmelze generell eher bei Q150, anstatt bei Q347. Der
2614 optimale Messzeitpunkt ist aber immer anhand der laufenden Entwicklung der Perzentile in den

geeigneten Referenzgebieten auszuwählen. Diese sind in den hydrometrischen Webseiten des Bundes und der Kantone jederzeit einsehbar.

- Anspruchsvoller wird die Auswahl des optimalen Messzeitpunktes in einer Rezessionsphase nach einem grösseren Regenereignis mitten im Winter, in dem die Schneefallgrenze generell hoch, aber regional unterschiedlich war. Dann ist es wichtig in Erfahrung zu bringen, wie hoch die Schneefallgrenze im Untersuchungsgebiet und in den Referenzgebieten lag. Ideale Messzeitpunkte sind während einer langen winterlichen Rezessionsphase, die seit November oder Dezember nicht durch Regenereignisse unterbrochen wurden.

- In einer sehr kalten Periode können aufgrund von Eisbildung im Bachbett starke tägliche Abflussschwankungen auftreten (Nagel et al., 2025), die eine Bestimmung eines ausreichend genauen Perzentils verunmöglichen. Diese Schwankungen treten nicht in allen Fließgewässern auf, weil bestimmte morphologische Kriterien im Bachbett erfüllt sein müssen (Nagel et al., 2025). Jedoch existieren noch keine fixen Regeln, wie diese Kriterien zu bestimmen sind. Deshalb sollten während sehr kalter Tage generell keine Abflussmessungen durchgeführt werden, um das Q347 oder die Niedrigwasserdauerkurve zu bestimmen. Am Dischmabach in Davos werden diese Abflussschwankungen bei einer Temperatur von -8°C oder darunter ausgelöst (Nagel et al., 2025). Dieser Schwellenwert kann aber von Gebiet zu Gebiet variieren. Um Zeiträume mit solchen Schwankungen zu meiden, können jederzeit die aktuellen zeitlich hoch aufgelösten Abflussganglinien der Referenzgebiete in den hydrometrischen Webseiten des Bundes und der Kantone eingesehen werden.

Tabelle 12: Ungefährer Zeitraum für das Eintreten des tiefsten Abflusses in einem durchschnittlichen Winter in den verschiedenen Klimaregionen im Alpenraum.

Klimaregion	Ungefährer Zeitpunkt des tiefsten Abflusses im Winter
Zentralalpen: Uri, westliche Surselva	Ende Februar
Westalpen: Berneroberrand, Wallis	Mitte bis Ende Februar
Ostalpen: östliche Surselva und alle Gebiete östlich davon, inkl. Unterengadin	Ende Februar
Oberengadin	Mitte bis Ende März
Münstertal, Puschlav, Bergell	Ende Februar
Tessin	Ende Januar

Im Zusammenhang mit der Erstellung dieses Berichts wurden zahlreiche Einzelmessungen durchgeführt und ausgewertet, die ab dem Zeitpunkt der wissenschaftlichen Veröffentlichung der Daten zur Verfügung stehen werden. Die Q347 der meisten dieser Einzugsgebiete konnten mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden (Kapitel 9.3). Für sämtliche Einzugsgebiete mit mindestens einer Einzelmessung wurde das Q347 und eine Dauerkurve mit der hier vorgestellten Methode bestimmt. Auch diese Einzugsgebiete stellen mögliche Referenzgebiete dar; denn fehlen in der Nähe eines Untersuchungsgebiets geeignete Referenzgebiete mit einer langjährigen Messreihe oder sind die Voraussetzungen für die Bestimmung des Perzentils aufgrund eines Regenereignisses in der Vorperiode schwierig, wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Durchführung einer

zusätzlichen Abflussmessung in einem nahegelegenen und geeigneten Einzugsgebiet, in dem schon eine Einzelmessung durchgeführt und eine Dauerkurve erfolgreich bestimmt wurde. Anhand dieses Messwertes und anhand der verfügbaren Dauerkurve lässt sich ein Perzentil bestimmen, das auf das Untersuchungsgebiet übertragen wird. Durch diesen Zusatzaufwand lässt sich die Schätzung des Perzentils zusätzlich abstützen, was sehr hilfreich sein kann. Er erlaubt eine gewisse Flexibilität bei der Auswahl des Messzeitpunktes, vor allem in hoch gelegenen Einzugsgebieten, für welche Referenzgebiete rar sind.

10.3.12 Festlegung der Standorte für Abflusseinzelmessungen

Die Festlegung der Standorte der Abflusseinzelmessungen hängt davon ab, wie komplex ein Gebiet aufgebaut ist. Grundsätzlich sind die drei Abflusseinzelmessungen am Untersuchungsstandort das Minimum. Versickert ein Teil des Wassers oberhalb des Untersuchungsstandortes im Bachbett, so ist der unterirdische Abfluss zu ermitteln. Wird der unterirdische Abfluss mit dem hydrologischen Verfahren bestimmt, sind an einem oder mehreren Standorten oberhalb der Versickerungstrecke weitere Abflussmessungen notwendig (vgl. Kapitel 6.2.2 und Kapitel 10.3.15).

10.3.13 Methoden der Abflusseinzelmessungen

Für Abflüsse unter 2000 l s^{-1} wird die Salzverdünnungsmethode empfohlen, wenn am betroffenen Bachabschnitt eine gute Durchmischung des Salzes mit dem Wasser zwischen Salzeingabe- und Messstelle vorliegt. Bei zu langsamem und laminarem Fließen ist eine Flügelmessung oder eine Messung mit magnetisch-induktiven Durchflussmessern besser geeignet. Bei sehr schmalen Bächen ist die Salzverdünnungsmethode auf jeden Fall ratsamer. Beide Methoden liefern Werte mit weniger als 5% Messfehler, wenn sie bei den für sie geeigneten Fließbedingungen eingesetzt werden. Die Flügelmessung dauert drei- bis fünfmal so lange wie eine Messung mit der Salzverdünnungsmethode. Das Equipment für die Salzverdünnungsmethode ist etwas kompakter und besser geeignet für winterliche Abflussmessungen im Gebirge, wo der Zugang nur zu Fuss möglich ist.

10.3.14 Bestimmung der Wasserentnahmen und -zugaben

Für das Untersuchungsgebiet müssen Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten bestimmt werden. Die genaue Vorgehensweise ist in Kapitel 6.3 beschrieben.

10.3.15 Bestimmung des unterirdischen Abflusses

Falls ein Untersuchungsstandort unterhalb einer Versickerungstrecke liegt, muss die unterirdisch durchfliessende Wassermenge bestimmt werden. Der unterirdische Abfluss kann auf zwei Arten bestimmt werden (Kapitel 6.2):

- Abschätzung mit der Darcy-Formel (Kapitel 6.2.1)
- Abschätzung mit hydrologischem Verfahren (Kapitel 6.2.2)

Die Verwendung der Darcy-Formel eignet sich gut für Standorte, wo ausreichend hydrogeologische Daten von Bohrungen zur Verfügung stehen.

Darcy-Formel:

$$Q_{sub} = k_f \cdot J \cdot A \quad , \quad (1)$$

wobei k_f der hydraulischen Leitfähigkeit, J dem hydraulischen Gefälle und A der durchflossenen Querschnittsfläche entspricht. Die durchflossene Querschnittsfläche und die hydraulische Leitfähigkeit lassen sich anhand von Informationen aus geologischen Bohrungen ableiten, die in unmittelbarer Umgebung abgeteuft wurden. Für die Verwendung der Darcy-Formel ist die durchflossene Querschnittsfläche des Grundwasserkörpers am Messquerschnitt zu ermitteln. Falls zur Höhe des Grundwasserspiegels keine weiteren Informationen vorliegen, soll zur Berechnung des durchflossenen Querschnitts die Höhe des Grundwasserspiegels bei Mittelwasser verwendet werden, der in den Grundwasserkarten der Kantone ersichtlich ist. Es werden ausserdem Angaben zum hydraulischen Gradienten und zur gesättigten Leitfähigkeit gefordert. Das Vorgehen zur Bestimmung des unterirdischen Abflusses wird in Kapitel 6.2.1 detailliert beschrieben. Meistens sind bei Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina in Siedlungsgebieten die erforderlichen hydrogeologischen Angaben vorhanden. Bei Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina, die das Q347 massgeblich erhöhen, ist die Verwendung dieser Methode gegenüber dem hydrologischen Verfahren vorzuziehen. Beispiele dafür sind die Töss bei Rämismühle, die Murg in Wängi oder die Emme. Um an solche Daten zu gelangen, wird empfohlen, die kantonalen Behörden zu kontaktieren, die für die Grundwasservorkommen zuständig sind.

Die Verwendung des hydrologischen Verfahrens wird in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird das Q347 des Gesamtabflusses mit Hilfe von Abfluss-Einzelmessungen (vgl. Beispiel Luterbach in Kapitel 6.2.2) oder durch Übertragung des Q347 von litho-stratigraphisch ähnlich aufgebauten benachbarten Einzugsgebieten geschätzt (vgl. Bestimmung des unterirdischen Abflusses des Rüderchen in Schöftland im Anhang). Das Q347 des unterirdischen Abflusses ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Q347 des Gesamtabflusses und dem des oberirdischen Abflusses. Das Q347 des oberirdischen Abflusses wird ebenfalls anhand von Abfluss-Einzelmessungen bestimmt. Dieses Verfahren ist überall dort zu empfehlen, wo die erforderlichen Daten zur Anwendung der Darcy-Formel fehlen und wo von den Schottergrundwasserkörpern keine massgebende Q347-erhöhende Wirkung zu erwarten ist. Eine massgebende Q347-erhöhende Wirkung wurde nur bei Einzugsgebieten mit tiefen Q347 und Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina beobachtet (Kapitel 11.6.111.6.3. Deshalb sollte das hydrologische Verfahren nur bei kleineren Schottergrundwasserkörpern mit einem Volumen von weniger als 500'000 m³ km⁻² angewendet werden. Bei Anwendung auf grössere Schottervolumina steigt das Risiko, dass der unterirdische Abfluss unterschätzt wird.

10.3.16 Bestimmung von Q347 und Q290

Vom Messwert derjenigen Abflussmessung, deren Perzentil am nächsten zu Q347 liegt, wird anhand der ermittelten Dauerkurvengruppe das Q347 und das Q290 berechnet. Die detaillierte Beschreibung des Vorgehens

findet sich in Kapitel 9.2.5, vgl. ausserdem Abbildung 26. Dafür sind die Potenzfunktionen der verschiedenen Dauerkurvengruppen notwendig, mit welchen das Verhalten des Dauerkurvengefälles beschrieben wird. Die Potenzfunktion lautet:

$$\frac{Q_{290}}{Q_{347}} = a \cdot Q_{347}^b$$

Die Parameter a und b für die verschiedenen Dauerkurvengruppen sind in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Parameter a und b für die Bestimmung der Potenzfunktionen der verschiedenen Dauerkurvengruppen

Dauerkurvengruppe	Parameter a	Parameter b
OSM 1: Konglomerate, Mergel	5.729	-0.863
OSM 2: Konglomerate, Sandsteine, Mergel	3.631	-0.610
OSM 3: Sandsteine, Mergel	3.121	-0.554
OSM 4: Sandsteine, Mergel	2.425	-0.404
OMM: Sa / Mittelland 1	1.633	-0.139
Voralpin 2	2.944	-0.355
Voralpin Tessin	2.380	-0.208
Voralpin 1	3.953	-0.414
USM - Sandsteine, Mergel	2.507	-0.814
USM - OMM, USM > 65%	2.607	-0.501
USM - OMM, USM < 65%	2.318	-0.349
Alpin 1: P < 1300mm	2.696	-0.328
Alpin 2: 1300 < P < 1800mm	2.481	-0.251
Alpin 3: P > 1800mm	3.601	-0.370

10.3.17 Empfehlungen für die Berechnung des Dauerkurvenverlaufs

Aus den vorangehenden Schritten sind das Q347 und das Q290 bekannt. Daraus lässt sich das Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich bestimmen. Basierend auf den Analysen des Dauerkurvenverlaufs zwischen Q290 und Q360 (vgl. Kapitel 9.4) wurden folgende Empfehlungen zur Berechnung der Dauerkurven erarbeitet:

Grundsätzlich empfehlen wir, alle Dauerkurven im Niedrigwasserbereich (Q290 bis Q360) mit einer linearen Funktion zu berechnen. Das führt in den alpinen Einzugsgebieten nur zu sehr geringfügigen Abweichungen zur reellen Dauerkurve. Ebenfalls geringfügige Abweichungen sind in den Mittellandgebieten der Periode 2011 bis 2022 und in den Voralpen der Periode 1991 bis 2020 zu erwarten. Falls die Wiedergabe des konvexen Dauerkurvenverlaufs zwischen Q290 und Q347 und zwischen Q347 und Q360 von besonderer Bedeutung sein sollte, wird empfohlen, die Dauerkurven der Mittellandgebiete der Periode 1991 bis 2020 und die Dauerkurven der Dauerkurvengruppen Voralpin1 und OSM 1 der Periode 2011 bis 2022 anhand einer quadratischen Funktion der Form:

$$b = \frac{Q - Q_{290} - a \cdot P^2}{P} \quad (4)$$

zu berechnen. Q = Abfluss, P = Perzentil (z.B. Q347, Q330, Q300, etc.), a und b sind Faktoren, die die Krümmung der Dauerkurve beeinflussen. Faktor a variiert zwischen den Dauerkurvengruppen und kann für die Periode 1991 bis 2020 der Tabelle 15 und für die Periode 2011 bis 2022 der Tabelle 16 entnommen werden. Es handelt sich um Durchschnittswerte aller Faktoren a jeder Dauerkurvengruppen. Faktor b lässt sich bestimmen, indem für Faktor a der entsprechende Wert in den Tabelle 15 oder Tabelle 16 verwendet, für Q der Abfluss bei Q347 und für P das Perzentil 347 eingesetzt wird.

Tabelle 14: Durchschnittswerte für den Faktor a der einzelnen Dauerkurvengruppen der Periode 1991 bis 2020

Dauerkurvengruppen	Koeffizient a
OSM1	-0.00022
OSM2	-0.00032
OSM3	-0.00037
USM	0.00006
OMM	-0.00029
USM/OMM	-0.00032
OMM/USM	-0.00013
Voralpin 1	-0.00041
Voralpin 2	-0.00021
Voralpin Tessin	-0.00010

Tabelle 15: Durchschnittswerte für den Faktor a der einzelnen Dauerkurvengruppen der Periode 2011 bis 2022

Dauerkurvengruppen	Koeffizient a
OSM1	-0.00024
OSM2	-0.00011
OSM3	-0.00011
OSM4	-0.00003
USM	-0.00008
OMM	-0.00011
USM/OMM	-0.00007
OMM/USM	-0.00012
Voralpin 1	-0.00069
Voralpin 2	-0.00011
Voralpin Tessin	0.00010

10.3.18 Überprüfung der Dauerkurven anhand der Messwerte der Einzelmessungen

Die beiden Abflussmessungen, die nicht für die Bestimmung des Q347 verwendet wurden, dienen zur Überprüfung der ermittelten Dauerkurve. Zur Illustration werden hier die Ergebnisse von zwei Untersuchungsgebieten gezeigt. Für die Bestimmung der Perzentile der Einzelmessungen der Hintertöss (625) wurde z.B. das Referenzgebiet des Rietholzbachs (119) verwendet (Abbildung 49). Die Abflüsse der ermittelten Dauerkurve liegen um 11 bzw. 13% höher als die Abflüsse der Abflussmessungen 2 und 3 (Abbildung 50). Die Abflussperzentile des Müllibachs (104) wurden vom Mittelwert der Abflussperzentile von Altbach (8) und Surb (145) übernommen (Abbildung 51). Die Abflüsse der ermittelten Dauerkurve liegen um 4% bzw. 10% tiefer als die der Abflussmessungen 2 und 3 (Abbildung 52).

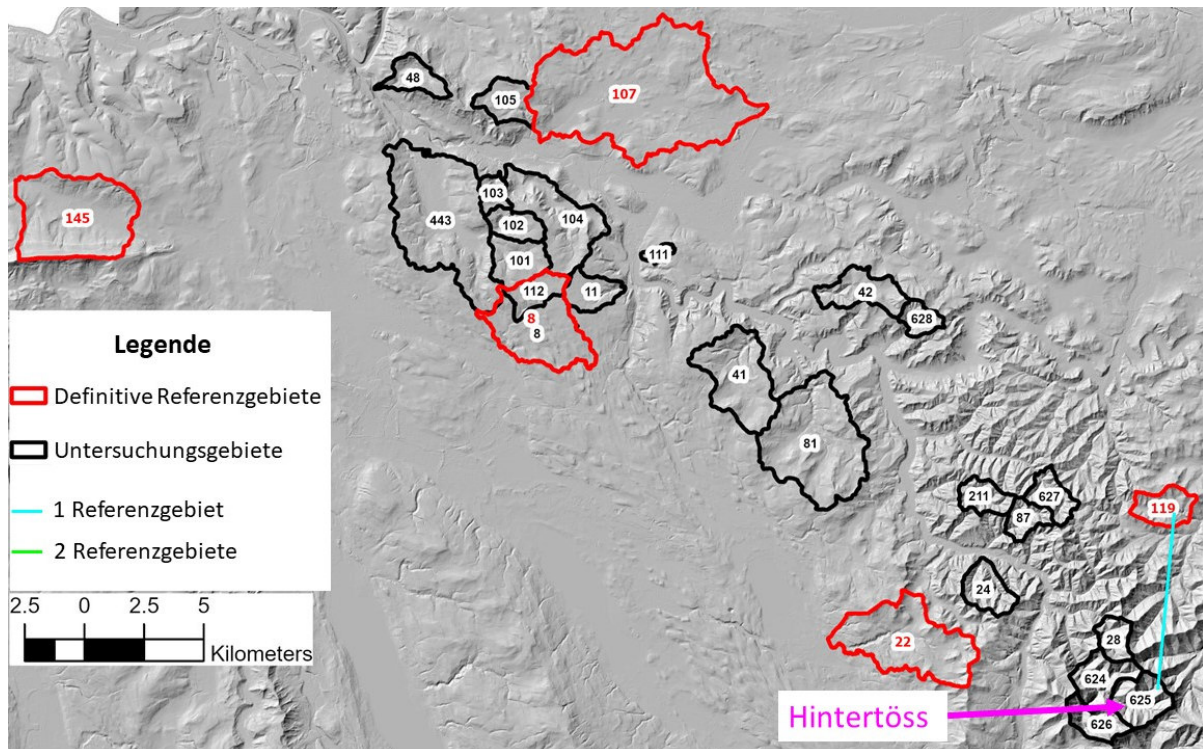


Abbildung 49: Zur Bestimmung der Perzentile der Abflussmesswerten der Hintertöss wurden die Abflussperzentile des Rietholzbachs zum Zeitpunkt der Abflussmessung auf die Hintertöss übertragen, was durch die türkisfarbige Verbindungslinie angedeutet wird.

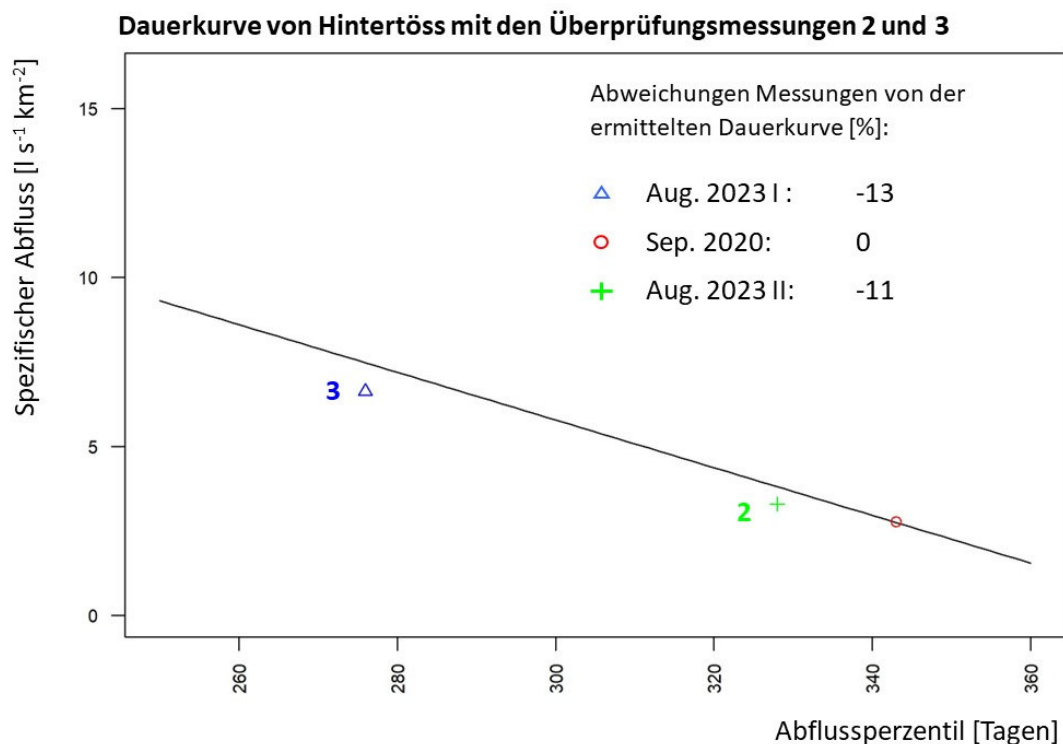


Abbildung 50: Berechnete Dauerkurve der Hintertöss mit den drei Abflussmessungen. Die Abflüsse der ermittelten Dauerkurve liegen um 11 bzw. 13% höher als die Abflüsse der Abflussmessungen.

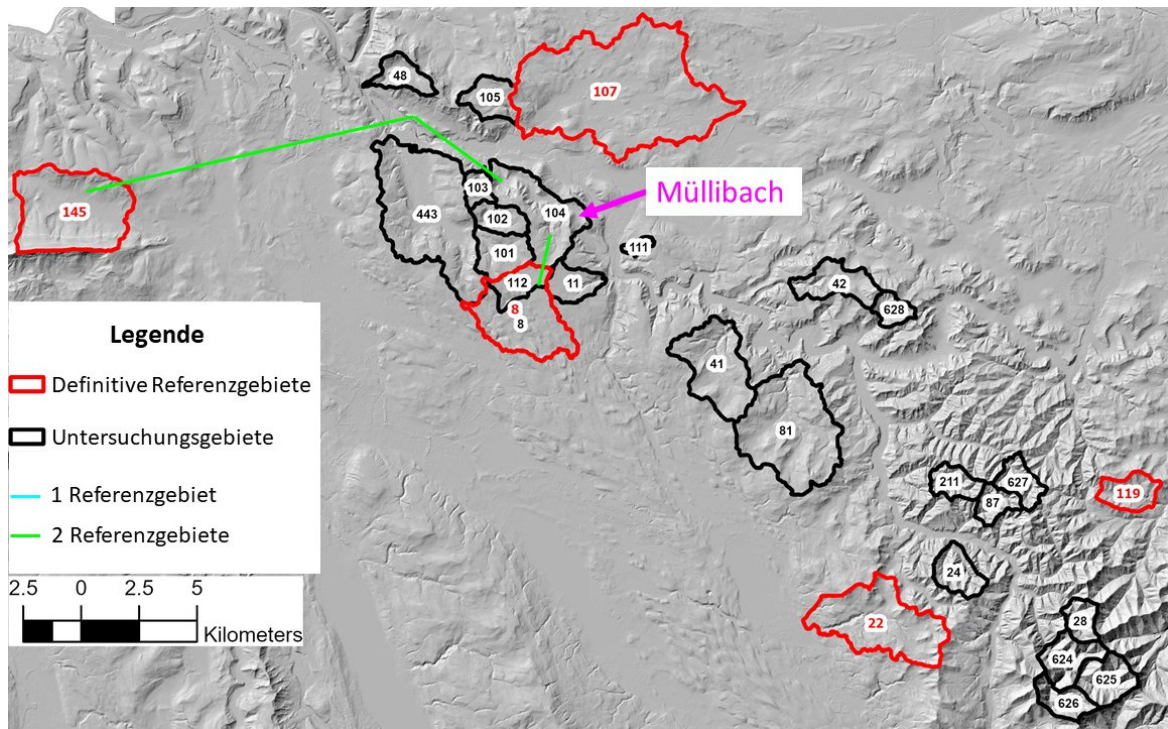


Abbildung 51: Zur Bestimmung der Perzentile der Abflussmesswerte des Müllibachs wurde das Mittel der Abflussperzentile von Altbach (8) und Surb (145) verwendet, was durch die grünen Verbindungslinien angedeutet wird.

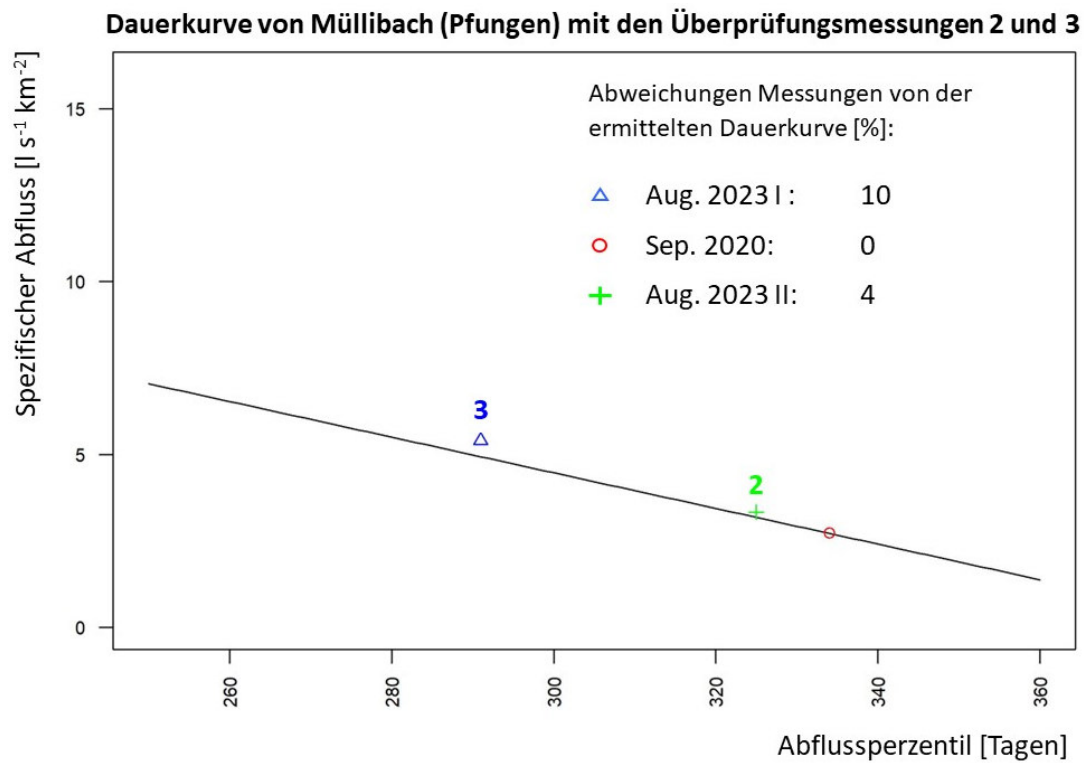


Abbildung 52: Berechnete Dauerkurve im Müllibach (Pfungen) mit den Abflussmessungen 2 und 3. Die Abflüsse der Dauerkurve liegen um 4 bzw. 10% tiefer als die Abflüsse der Abflussmessungen.

2778 10.3.19 Umgang mit grossen Abweichungen

2779 Weichen beide Abflusswerte der Einzelmessungen stark von der Dauerkurve ab (> 30% Differenz zum
2780 Dauerkurvenwert), lässt sich in den meisten Fällen eine Ursache finden. Mögliche Ursachen sind:

2781

- 2782 - Nicht berücksichtigter unterirdischer Abfluss an der Messstelle
- 2783 - Nicht berücksichtigte Wasserentnahmen oder -zugaben in den Untersuchungs- oder Referenzgebieten.
- 2784 - Hohe Wasserentnahmen durch landwirtschaftliche Bewässerung, die in der öffentlichen
2785 Wasserversorgung nicht registriert sind.
- 2786 - Falsch bestimmte Dauerkurvengruppen
- 2787 - Unsicherheiten in der Bestimmung der Referenzgebiete (Schneeschnelze, unterschiedliche
2788 Niederschlagsmengen in der Vorperiode, unterschiedliche Ausstattung an Schotteraquiferen),
- 2789 - Unsicherheiten in der Bestimmung der Einzugsgebietsgrenze (z.B. bei grossen Siedlungsgebieten),
- 2790 - Unsicherheiten in den Abflusswerten der Referenzpegel (Messprobleme, Unsicherheiten P/Q-
2791 Beziehung).
- 2792 - Starke tägliche Abflussschwankungen in alpinen Untersuchungsgebieten während einer sehr kalten
2793 Periode (Eisbildung im Bachbett).
- 2794 - Unsicherheiten in den Abflusseinzelmessungen (ungenügende Durchmischung zwischen dem Salz- und
2795 Bachwasser, fehlerhafte Dokumentation der eingebrachten Salzmenge, etc.).
- 2796 - Abweichungen des momentanen gegenüber dem durchschnittlichen Tagesabflussperzentil in
2797 Referenzgebieten im Mittelland. Das kann z.B. dann vorkommen, wenn am Abend nach einer
2798 Abflusseinzelmessung Regen einsetzt, der den Abflusstagesmittelwert signifikant erhöht.

2799

2800 Alle diese Ursachen sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit entweder bei der Bestimmung der Niedrigwasser-
2801 Dauerkurven oder bei der Identifikation von fehlerhaften Abflussmesswerten mindestens einmal aufgetreten.
2802 Wichtig ist, dass für die Identifikation dieser Ursachen genügend Zeitreserven eingeplant werden. Im Notfall
2803 müssen die Abflusseinzelmessungen in einer anderen Niedrigwasserperiode wiederholt werden.

2804 Es stellt sich die Frage, warum nicht alle drei Einzelmessungen verwendet werden, um die Dauerkurve zu
2805 bestimmen. Wir raten davon ab, weil anhand von zwei Abflusseinzelmessungen die oben erwähnten
2806 Unsicherheiten identifiziert werden können.

2807 10.4 Ermittlung der Rezessionskurve

2808 Die Dauerkurven von Einzugsgebieten innerhalb derselben Dauerkurvengruppen zeigen in Abhängigkeit des
2809 spezifischen Q347 ein ähnliches Verhalten (Kapitel 8.3.6, Abbildung 14). Auswertungen zeigen, dass die
2810 Rezessionskurven von Einzugsgebieten derselben Dauerkurvengruppe ähnlich sind (Abbildung 19 und Abbildung
2811 20 in Kapitel 8.5). Basierend auf den mit den Abflusseinzelmessungen bestimmten Q347 und auf den Trendlinien

2812 der log-Funktionen, die das Rezessionsverhalten innerhalb derselben Dauerkurvengruppe bestimmen, lässt sich
2813 der Rezessionsfaktor b in der Gleichung:

2814

2815
$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-bt}$$

2816

2817 ermitteln. So lassen sich anhand von drei in Niedrigwasserperioden erhobenen Abflusseinzelmessungen in
2818 einem bisher ungemessenen Einzugsgebiet auch die Rezessionskurven des Modells MRC_slow berechnen. Das
2819 eröffnet die Möglichkeit für zuverlässigere Niedrigwasservorhersagen in bisher ungemessenen kleinen
2820 Einzugsgebieten.

11 Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren

Mit dem Ziel, die für den Q347-Abfluss massgebenden Speicher und Faktoren zu identifizieren und allenfalls zu kartieren, wurden eine grosse Abflussmesskampagne durchgeführt, zahlreiche weitere Abflussdaten zusammengetragen und verschiedene Auswertungen vorgenommen. So konnte ein Datensatz von Abflüssen von Einzelmessungen, Kurzzeitmessungen und Langzeitmessungen ausgewertet werden. Die Daten stammen vom Bund, von verschiedenen Kantonen, Gemeinden, Kraftwerken, Privaten und aus eigenen Abflussmesskampagnen. Insgesamt standen Abflussmessungen im Niedrigwasserbereich von 575 Einzugsgebieten zur Verfügung. Für die Auswertungen wurden die Ergebnisse von 522 Einzugsgebieten verwendet. Die restlichen Gebiete wurden wegen des Einflusses von Versickerungen, Wasserentnahmen oder -zugaben oder wegen fehlender Eichmessungen bei der Bestimmung der P/Q-Beziehung verworfen. Die in den Auswertungen involvierten Einzugsgebiete sind in Abbildung 53 dargestellt. Eine detaillierte Liste der berücksichtigten Einzugsgebiete mit den Angaben wie Name des Fliessgewässers, zeitliche Auflösung der Abflussmessungen, Methode der Bestimmung des Q347 und Datenbesitzer ist im Anhang ersichtlich (vgl. Tabelle A1: Teile 1 – 5, im Anhang). Die Abflussdaten und/oder die berechneten Q347-Abflüsse einiger Datenbesitzer dürfen gemäss einer Vertraulichkeitsvereinbarung nicht veröffentlicht oder an Dritte weitergegeben werden. Die Angaben dazu sind ebenfalls dieser Tabelle zu entnehmen. Für eine Verwendung solcher nicht öffentlicher Daten können die Datenbesitzer (vgl. Tabelle A1: Teile 1 – 5, im Anhang) angefragt werden. Die Werte der Abflusseinzelmessungen oder der Q347 von manchen Einzugsgebieten wurden aus Umweltverträglichkeitsberichten oder aus hydrologischen Berichten entnommen, welche im Zusammenhang mit einem Antrag für eine Konzessionserteilung erstellt wurden. Diese Werte sind öffentlich verfügbar. Die Quellenangaben dieser Berichte sind in Tabelle A1 – Teil 6 im Anhang ersichtlich.

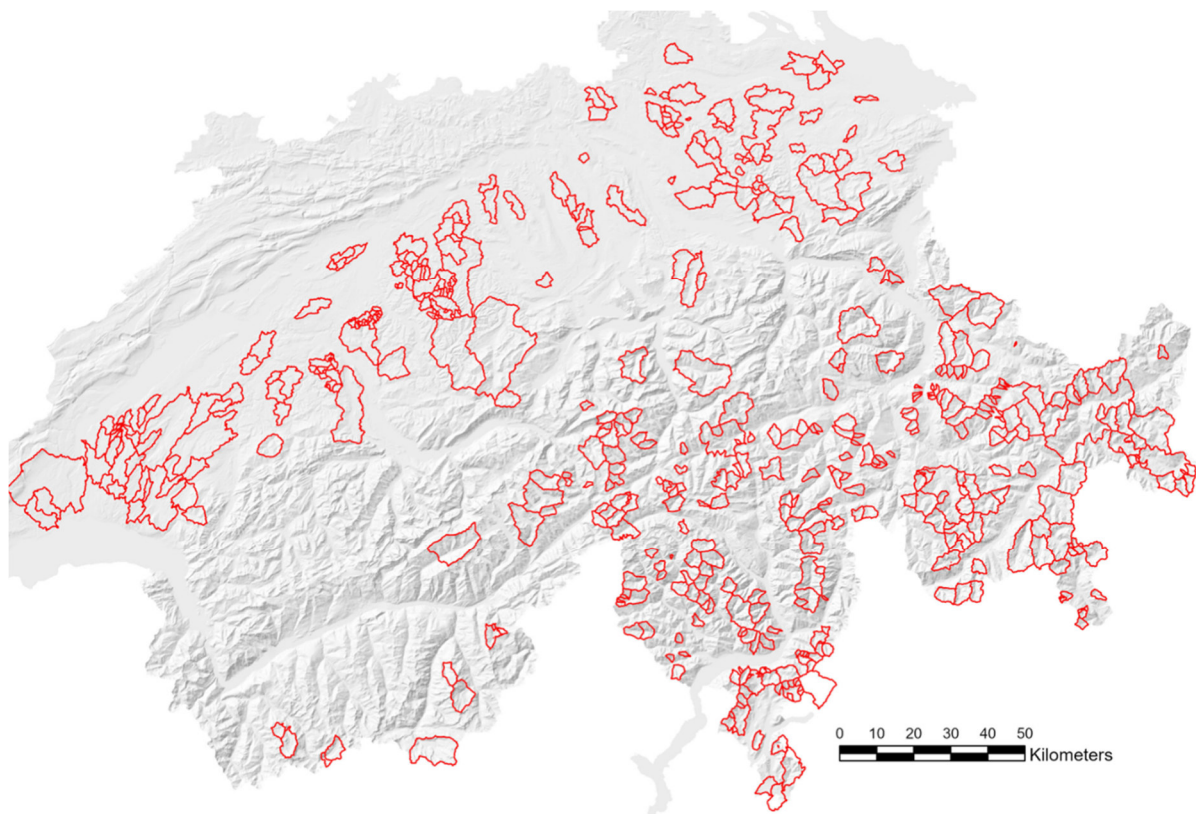


Abbildung 53: Die Abflussdaten von den 522 dargestellten Einzugsgebieten der Schweiz wurden verwendet, um den Einfluss von verschiedenen Einzugsgebietsparametern auf das Q347 zu untersuchen.

104 der 522 Einzugsgebiete weisen Abflussmessreihen von 10 Jahren oder mehr auf. In 53 Einzugsgebieten waren Daten von Kurzzeitmessreihen vorhanden. In 7 Einzugsgebieten umfassen die Kurzzeitmessreihen mindestens 7 Jahre oder mehr. In 36 Einzugsgebieten sind sie kürzer als 7 Jahre. In 4 Einzugsgebieten waren nur Q347-Werte vorhanden, die auf der Basis einer Kurzzeitmessreihe berechnet wurden, die kürzer als sieben Jahre sind. In diesen Gebieten waren die zugrundeliegenden Abflussmessreihen nicht vorhanden. Für 371 Einzugsgebiete sind Einzelabflussmessungen vorhanden, die in einer Niedrigwasserperiode erhoben wurden.

Tabelle 16: Liste der Anzahl Einzugsgebiete mit Langzeit-, Kurzzeit- und Einzelmessungen und mit zusätzlicher Angabe zum Verfahren, wie das Q347 bestimmt wurde.

Messauflösung	Daten vorhanden	Q347 vorhanden	Q347-Berechnungsmethode	Anzahl	Kürzel
Langzeitmessreihen (≥ 10 Jahre)	ja	ja	Dauerkurve	104	DK
Kurzzeitmessreihen (≥ 7 Jahre) oder Kurzzeitmessreihen (< 7 Jahre) ohne geeignete Referenzgebiete	ja	nein	Q347 von Dauerkurve * Korrekturfaktor Referenzgebiete	7	DK1
Kurzzeitmessreihen (< 7 Jahre)	ja	nein	Methode Kap. 6	36	EM
Kurzzeitmessreihen (< 7 Jahre) keine Abflusswerte vorhanden	nein	ja	Q347 von Dauerkurve * Korrekturfaktor Referenzgebiete	4	DK1
Einzelmessungen	ja	nein	Methode Kap. 6	371	EM

11.1 Vorgehen

11.1.1 Eigene Abflussmesskampagnen

In insgesamt 256 Einzugsgebieten hat M. Margreth mit Hilfe von Mitarbeitenden der Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegung des WSL während Niedrigwasserperioden mehrere Abflussmessungen durchgeführt. In 75 der 256 Einzugsgebiete wurden mindestens zwei, in 37 mindestens drei und in vier Einzugsgebieten insgesamt vier Abflussmessungen durchgeführt. Zudem wurden auch Abflussmessungen verwendet, die M. Margreth in Rahmen von früheren Projekten im Auftrag des BAFU und des Kantons Solothurn durchgeführt hat (Naef und Margreth, 2017). 139 der vom WSL gemessenen Einzugsgebiete liegen in den Alpen, 81 Einzugsgebiete im Mittelland und 36 in tiefergelegenen Einzugsgebieten des Kantons Tessin.

11.1.2 Bestimmung der Messstandorte

Die Auswahl der Messstandorte erfolgte primär nach geologischen Kriterien:

a) Mittelland

Im Mittelland lag der Fokus vor allem darauf, die Beiträge von OMM-dominierten Einzugsgebieten zum Q347 besser einordnen zu können. Aus vorangehenden Forschungsarbeiten war bekannt, dass die OMM-Sequenzen im zentralen Mittelland die höchsten Q347-Abflüsse im Mittelland liefern (Naef und Margreth, 2017). Mit den Messungen sollte überprüft werden, ob die OMM im westlichen Mittelland ähnlich hohe Beiträge liefert wie im zentralen Mittelland. Zudem waren auch die USM-dominierten Einzugsgebiete im westlichen Mittelland Teil der Untersuchungen.

b) Alpen

In den alpinen Einzugsgebieten war, vor Beginn dieser Arbeit, der Zusammenhang zwischen dem lithologischen Aufbau und den Niedrigwasserabflüssen weniger gut bekannt als im Mittelland (Naef und Margreth, 2017). Deshalb wurden zahlreiche Einzugsgebiete mit unterschiedlicher lithologischer Zusammensetzung und in unterschiedlichen tektonischen Decken in den Kantonen Graubünden, Tessin, Uri, Bern und Wallis untersucht. Im Kanton Wallis sind Einzugsgebiete mit einem natürlichen Abflussregime selten. Ausserhalb des Aarmassivs sind die Berner Alpen vor allem durch Kalksteine aufgebaut, die von Verkarstung betroffen sein können. Deshalb lag der Schwerpunkt der Untersuchungen in den Bündner, Tessiner und Urner Alpen. Von besonderem Interesse waren dabei folgende Fragestellungen:

- Zeigen sich massgebliche Unterschiede im Q347 zwischen kristallinen Gesteinen und Sedimentgesteinen?
- Welche Unterschiede im Q347 zeigen sich zwischen Graniten und Gneisen?
- Wie gross sind die Unterschiede im Q347 zwischen verschiedenen Sedimentgesteinen?

- 2891 - Zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Q347 und den tektonischen Eigenschaften?
- 2892 - Welche Rolle spielt die Brüchigkeit des Gesteins? Sind Unterschiede zwischen duktil und spröde
- 2893 deformiertem Gestein ersichtlich?
- 2894 - Wie stark ist der Einfluss von unterschiedlichen quartären Ablagerungen?

2895

2896 Die meisten Abflussmessungen wurden an Standorten vorgenommen, an denen keine wesentlichen
 2897 unterirdischen Abflüsse zu erwarten sind, also möglichst auf Festgestein. Die Standorte wurden vorher anhand
 2898 der geologischen Karte provisorisch festgelegt (Swisstopo, 2022). Im Feld wurde der Messstandort manchmal
 2899 wegen schlechter Zugänglichkeit oder wegen einer zu dicken Schneedecke über dem Bach geändert.

2900 11.1.3 Bestimmung des Messzeitpunktes

2901 Der Messzeitpunkt ist entscheidend für die Aussagekraft der Abflussmessung. Die Abflussmessungen in den
 2902 alpinen Einzugsgebieten erfolgten in den Wintermonaten der Jahre 2020, 2021 und 2022. Das Ziel war, in einem
 2903 Zeitraum zu messen, in dem die Einzugsgebiete die tiefsten Abflusswerte des Jahres aufweisen. Mit Hilfe der
 2904 online ersichtlichen Abflusswerte von BAFU und Kantonen liessen sich die aktuellen Abflussperzentile der mit
 2905 einer Messstation ausgerüsteten Fließgewässer (Referenzgebiete) verfolgen. Wichtig war, dass sich die
 2906 Abflussganglinie der Referenzgebiete in einer Rezessionsphase befand. Im Idealfall war die Abflussrezession
 2907 über mehrere Wochen stabil, ohne wesentliche Abflusszunahmen, verursacht durch Schneeschmelz- oder
 2908 Regenereignisse.

2909 11.2 Bestimmung von Q347

2910 Um die oben formulierten Fragestellungen zu untersuchen, wurde für alle Einzugsgebiete ein Q347-Wert
 2911 bestimmt. Je nach Datensatz wurden dazu unterschiedliche Verfahren verwendet:

2912

2913 a) Für Einzugsgebiete mit einer Langzeitmessreihe wurde das Q347 gemäss Standardverfahren anhand
 2914 der Dauerkurve basierend auf der Messreihe 2011 bis 2022 bestimmt (vgl. 1. Zeile in Tabelle 16, Kürzel
 2915 DK).

2916

2917 b) In 7 Einzugsgebieten waren Abflussmessreihen von sieben Jahren oder mehr vorhanden. Für diese
 2918 Untersuchungsgebiete wurde zunächst der Q347-Wert der 7-jährigen Messreihe bestimmt
 2919 ($Q347_{Unt7Jahre}$). Aus Daten von Referenzgebieten mit einer ähnlichen Stationshöhe sowie mit einer
 2920 ähnlichen mittleren Höhe und einer ähnlichen Exposition wurde das Q347 mit der Dauerkurve
 2921 bestimmt, die auf der Messreihe der gleichen sieben Jahre basiert ($Q347_{Ref7Jahre}$). Zudem wurde für die
 2922 Referenzgebiete das Q347 der Standardmessreihe (2011 bis 2022) bestimmt ($Q347_{Ref2011-2022}$). Für alle
 2923 geeigneten Referenzgebiete wurde der Quotient zwischen $Q347_{Ref2011-2022} / Q347_{Ref7Jahre}$ ermittelt.
 2924 Anhand des Mittelwerts der Quotienten, der geeigneten Referenzgebiete und dem $Q347_{Ref7Jahre}$ wurde
 2925 dann das $Q347_{Unt2011-2022}$ des Untersuchungsgebiets berechnet, das auf der Standardmessperiode

basiert. Der Quotient $Q347Ref_{2011-2022} / Q347Ref_{7Jahre}$ dient als Faktor, um das Q347, das auf einer 7-jährigen Messreihe basiert, auf das Q347 der Standardperiode umzurechnen (vgl. Zeile 2 in Tabelle 16, Kürzel DK1).

$$Q347Unt_{2011-2022} = Mittel \sum_{n=1}^n \left(\frac{Q347Ref_{2011-2022}}{Q347Ref_{7Jahre}} \right) \cdot Q347Unt_{7Jahre} \quad (5)$$

c) Dasselbe Verfahren wurde für Einzugsgebiete verwendet, in denen zwar ein Q347 einer Kurzzeitmessreihe vorhanden ist, aber Abflussdaten fehlen (Zeile 4 in Tabelle 16, Kürzel DK1).

d) Für alle Einzugsgebiete, in denen die Kurzzeitmessreihen kürzer als 7 Jahre sind oder nur vereinzelte Abflussmessungen vorhanden sind (Zeilen 3 und 5 in Tabelle 16), wurde das Q347 mit dem neu entwickelten Verfahren ermittelt, das in Kapitel 9.2 beschrieben ist (Kürzel EM für Einzelmessung). Für die Einzugsgebiete mit Kurzzeitmessreihen, die von Kraftwerksgesellschaften oder anderen Privaten stammten, wurden in diesem Zusammenhang diejenigen Abflusseinzelmessungen verwendet, die für die Eichung der P/Q-Beziehungen durchgeführt wurden.

Anhand des Kürzels kann in Tabelle A1 (Anhang) für jedes der 522 Einzugsgebiete in Erfahrung gebracht werden, welches der oben verwendeten Verfahren zur Bestimmung des Q347 angewendet wurde.

11.3 Umgang mit verschachtelten Einzugsgebieten

Viele der 522 Einzugsgebiete sind verschachtelt. Für die meisten verschachtelten Einzugsgebiete wurden Abflussmessungen am gleichen Tag durchgeführt. Der Abfluss des kleineren Einzugsgebiets wurde von dem des grösseren Einzugsgebiets abgezogen, um den Abfluss des Zwischengebiets zu ermitteln. Basierend auf dem Abfluss des Zwischengebiets wurde das Q347 des Zwischengebiets berechnet. In Fällen, in denen die Abflussmessung nicht am selben Tag stattfand oder Abflussmessreihen mit einer Dauer von mehr als sieben Jahren einbezogen wurden, wurde zunächst das Q347 des grössten Gebiets bestimmt. Anschliessend wurden die Q347 der darin verschachtelten Einzugsgebiete anhand der Einzelmessung ermittelt und vom Q347 des übergeordneten Einzugsgebiets subtrahiert.

11.4 Umgang mit Wasserentnahmen von Kraftwerken

Wird in einem Einzugsgebiet Wasser für die Stromproduktion entnommen, wurde anhand der Restwasserkarte Schweiz (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2007) abgeklärt, ob eine gewisse Menge an Restwasser vorgeschrieben ist oder nicht. Wird keine Restwassermenge vorgeschrieben, wurde angenommen, dass die zuständige Kraftwerksfirma kein Restwasser im Bach belässt. In solchen Fällen wurde zur Berechnung des spezifischen

2959 Abflusses ($\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) das oberhalb der Fassung liegende Einzugsgebiet vom Gesamteinzugsgebiet subtrahiert.
 2960 Auf diese Weise war es in vielen Einzugsgebieten trotz Entnahmen möglich, das unterhalb der Fassung liegende
 2961 Teileinzugsgebiet in den Auswertungen zu berücksichtigen. In Einzugsgebieten mit Wasserentnahmen, wo eine
 2962 Restwasserabgabe vorgeschrieben ist, wurde auf weitere Untersuchungen verzichtet, weil die
 2963 Restwassermengen zu Unsicherheiten führen.

2964 11.5 Bestimmung der Einzugsgebietsparameter

2965 Insgesamt wurden für die 522 Einzugsgebiete 22 Einzugsgebietsparameter erhoben. Sie sind in Tabelle 17
 2966 aufgeführt. Aus den für die Auswertung verwendeten Q347 sind die Beiträge der Gletscher und
 2967 Permafrostböden herausgerechnet (Kapitel 6.4). Der mittlere jährliche Abfluss wurde nicht verwendet, weil es
 2968 derzeit noch nicht möglich ist, den mittleren jährlichen Beitrag von Gletschern und Permafrostböden
 2969 abzuschätzen. Für einige Parameter werden in den folgenden Unterkapiteln weitere Erklärungen aufgeführt.

2970

2971 *Tabelle 17: Erhobene Einzugsgebietsparameter für die 522 berücksichtigten Einzugsgebiete.*

Parameterkategorie	Parameter
Klimatologie	Mittlerer Jahresniederschlag [mm]
Hydrologie	Q347 [$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$]
	Gerinnenetzdichte [%]
Gletscher	Gletscher [%]
Permafrostböden	Permafrostböden [%]
Topografie	Einzugsgebietsfläche [km^2]
	Mittlere Hangneigung [%]
	Minimale Höhe [m ü.M.]
	Anteil Süd-exponierte Flächen (Süd, Süd-West, Süd-Ost) [%]
	13 verschiedene Neigungsklassen [%]
	Mittlere Höhe [mü.M.]
Landnutzung	Siedlungsgebiete [%]
	Wald [%]
	Fels [%]
	Feuchtgebiete [%]
Geologie	Tektonische Einheiten: 94 in den Alpen und im Tessin; 15 in Mittelland/Voralpen [%]
	Gesteinstypen: 21 in den Alpen; 7 im Mittelland [%]
	14 Metamorphose-Fazies [%]
	Quartärablagerungen: 3 Klassen (hoch durchlässig, mässig durchlässig, undurchlässig) und Quartäranteil total [%]
	Dichte an geologischen Brüchen [m km^2]
	Dichte an geologischen Verwerfungen [m km^2]

2972

2973 11.5.1 Umgang mit Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden im 2974 Winter

2975 Da die Beiträge von Gletschern und von Permafrostböden im Winter den Einfluss von geologischen
2976 Gebietsparametern auf das Q347 stark verzerren können, wurden diese aus dem mit den Abflussmessungen
2977 ermittelten Q347 herausgerechnet (Kapitel 6.4). So steht für jedes Einzugsgebiet ein Q347 der gletscher- und
2978 permafrostfreien Einzugsgebietsfläche zur Verfügung.

2979 11.5.2 Tektonische Einheiten

2980 Die Gesteine der gleichen tektonischen Einheiten weisen eine ähnliche tektonische Entstehung auf, weshalb sie
2981 auch über ähnliche tektonische Eigenschaften (Klüfte, Schieferung) verfügen. Es wurde untersucht, ob die
2982 Gesteine der gleichen tektonischen Einheit auch über ein ähnliches Entwässerungsverhalten bei
2983 Niedrigwasserverhältnissen verfügen. Die tektonischen Einheiten wurden aus der geotechnischen Karte
2984 entnommen (Swisstopo, 1967). Die Tabellen der verwendeten tektonischen Einheiten mit den Codes sind in den
2985 Tabellen A6 (Alpen und Tessin) und A7 (Mittelland) im Anhang ersichtlich.

2986 11.5.3 Gesteinstypen

2987 Es wurde auch untersucht, wie stark die lithologische und mineralogische Zusammensetzung der Gesteinstypen
2988 das Q347 beeinflusst. Die im Geocover enthaltenen Gesteinstypen wurden für die 522 Einzugsgebiete
2989 ausgeschnitten. Sie wurden dann in die in Tabelle A8 aufgelisteten Festgesteinstypen kategorisiert. Innerhalb
2990 der definierten Kategorien wird ein ähnliches hydrogeologisches Verhalten angenommen. Die Definition der
2991 Kategorien und die Zuweisung der einzelnen Gesteinstypen zu diesen Kategorien erfolgten in Zusammenarbeit
2992 mit F. Schlunegger (Universität Bern). Sie basieren zudem auf den bisherigen Erkenntnissen (Naef und Margreth,
2993 2017).

2994 11.5.4 Metamorphose-Fazies

2995 Metamorphe Gesteine wie beispielsweise Gneise, Glimmerschiefer, Marmore oder Quarzite sind während der
2996 Alpenfaltung durch die Gesteinsmetamorphose aus Sediment- oder Intrusionsgesteinen entstanden. Sie wurden
2997 durch Subduktionsprozesse ins Erdinnere transportiert und wurden dort, je nach Tiefe und je nach tektonischer
2998 Spannung unterschiedlich hohen Temperaturen und Druckverhältnissen ausgesetzt, wodurch sich die
2999 Mineralienzusammensetzung und das Gefüge der Gesteine änderte (Labhart, 1992). Bei Temperaturen über
3000 250°C wurden die Klüfte, die zuvor entstanden sind, durch duktile Verformung verheilt. Vor ungefähr 20 bis 15
3001 Mio. Jahren wurden die Gesteine durch Exhumationsprozesse wieder an die Oberfläche gehoben. Dabei kühlten
3002 sie ab. Die tektonischen Spannungen führten dann zu einer spröden Deformation, wodurch wieder neue Klüfte
3003 entstanden, welche die Wasserwegsamkeit in den Gesteinen erhöhten. Anhand von bestimmten Mineralien in
3004 einem metamorphen Gestein lässt sich heutzutage rekonstruieren, bei welchen maximalen Druck- und

3005 Temperaturverhältnissen ein Gestein umgewandelt wurde. In der Karte der Metamorphose-Fazien werden
3006 solche Bedingungen in verschiedene Klassen von Druck- und Temperaturverhältnissen eingeteilt (Bousquet et
3007 al., 2008). Der Einfluss der verschiedenen Metamorphose-Fazien wurde ebenfalls in der Auswertung der Q347
3008 berücksichtigt. Es sollte geprüft werden, ob die Metamorphose-Fazien mit den Q347 einen Zusammenhang
3009 zeigt. Dazu wurde die Karte der Metamorphose-Fazies digitalisiert und die resultierenden Polygone mit den
3010 Einzugsgebieten verschnitten. So konnten die Flächenanteile der verschiedenen Metamorphose-Fazien in jedem
3011 Einzugsgebiet ermittelt werden. Die Metamorphose-Fazien sind in Tabelle A9 im Anhang ersichtlich.
3012

3013 11.5.5 Quartäre Ablagerungen

3014 Für jedes der 522 Einzugsgebiete wurden die Flächenanteile der hoch durchlässigen, mässig durchlässigen und
3015 undurchlässigen Quartärablagerungen ermittelt. Die Daten wurden dem Geocover entnommen (Swisstopo,
3016 2022). Die Einteilung in die unterschiedlichen Durchlässigkeitsklassen erfolgte nach Tabelle 2.
3017

3018 11.5.6 Brüche, Abrissrand, Abschiebungen

3019 Dem Geocover wurden auch die Liniendaten von Brüchen, Abrissrändern und Abschiebungen (Swisstopo, 2022)
3020 entnommen und mit den Einzugsgebieten verschnitten. Daraus wurde für jedes Einzugsgebiet jeweils die Dichte
3021 solcher Merkmale ermittelt (in m km^{-2}). Auch diese Angaben wurden in den Auswertungen berücksichtigt.

3022 11.6 Manuelle Auswertung der massgebenden Einflussfaktoren

3023 Um die Einflussfaktoren und Speicher, die die Q347-Werte massgeblich beeinflussen, identifizieren zu können,
3024 wurde eine manuelle Auswertung der vorhandenen Daten durchgeführt.
3025 Das durchschnittliche Q347 aller 522 Einzugsgebiete liegt bei $6.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, die Standardabweichung bei 4.3 l s^{-1}
3026 km^{-2} . In den Alpen befinden sich 262 Einzugsgebiete, also etwa die Hälfte aller Untersuchungsgebiete. Im
3027 Mittelland befinden sich 196, in den Voralpen 17 und im Tiefland und in den Voralpen des Tessin 47
3028 Einzugsgebiete (
3029 Tabelle 18). Das minimale Q347 liegt in allen Regionen unter $1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Mit fast $30 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ist das maximale
3030 Q347 in den Alpen am höchsten. Am niedrigsten ist das maximale Q347 in den Voralpen ($10.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Der
3031 Q347-Durchschnittswert ist in den Alpen mit $7.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ fast doppelt so hoch wie im Mittelland ($4.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$).
3032 Mehr als ein Viertel der im Mittelland untersuchten Einzugsgebiete weisen ein Q347 von weniger als $2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$
3033 auf. Im Tiefland und in den Voralpen des Tessins beträgt dieser Anteil 17%, in den Voralpen 6% und in den Alpen
3034 5%. Demzufolge ist im Mittelland die Anzahl der Einzugsgebiete, die in Trockenperioden anfällig auf
3035 Austrocknung sind, grösser als in den Voralpen und in den Alpen.
3036 *Tabelle 18: Q347-Statistik in den Schweizer Grossregionen. Q347 in $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.*

Region	Anzahl Einzugsgebiete	Q347min	Q347max	Q347-Durchschnitt	Q347-Standardabweichung	Prozentsatz der Gebiete mit $Q347 < 2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$
Mittelland	196	0.2	16.2	4.1	3.1	27
Voralpen	17	0.9	10.7	5.4	2	6
Alpen	262	0.5	29.5	7.7	4.5	5
Tiefland und Voralpen im Tessin	47	0.5	21.6	6.6	4.7	17

11.6.1 Mittelland und Voralpen

Die Q347-Werte im Mittelland zeigen ein auffälliges grossräumiges Muster (Abbildung 54). Die tiefsten Q347 sind im Südwesten (Kt VD, Kt FR) und im Nordosten (Kt TG, Kt SG) gemessen worden. Etwas höher sind sie im Raum Kt ZH und im östlichen Kt AG. Die höchsten Q347 wurden im zentralen Mittelland, d.h. im westlichen Kt AG und im östlichen Kt BE ermittelt. Die meisten Gebiete der Voralpen weisen ein Q347 zwischen 4 und $8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf. Dort sind nur sehr vereinzelt sehr tiefe Q347 zu beobachten.

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der Molasse-Einheiten und dem spezifischen Q347 im Detail untersucht. Die Obere Meeresmolasse (OMM) tritt vor allem im zentralen und im westlichen Mittelland auf (Abbildung 55). Die Obere Süsswassermolasse (OSM) ist im zentralen und im östlichen Mittelland verbreitet. Die Untere Süsswassermolasse (USM) tritt am südwestlichen Rand des Mittellands und in den Voralpen auf. Einzelne Vorkommnisse lassen sich auch im nördlichen zentralen Mittelland erkennen.

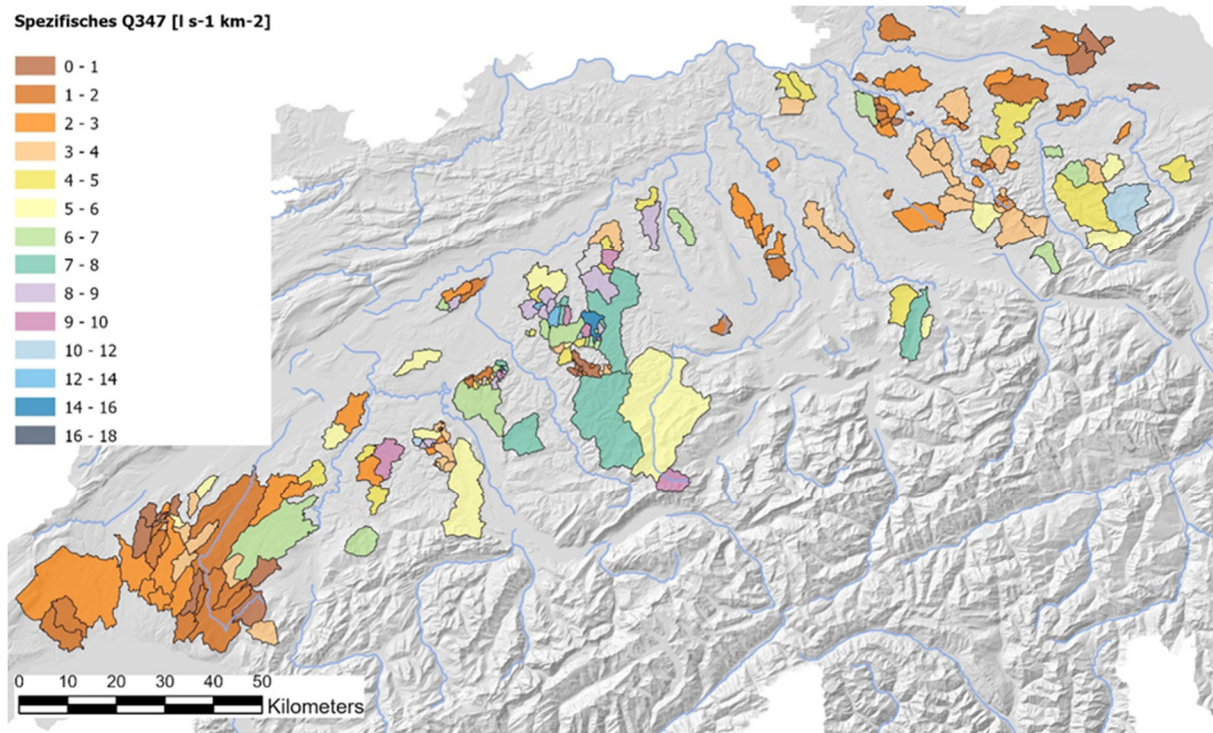


Abbildung 54: Spezifische Q347-Abflüsse im Mittelland und in den Voralpen.

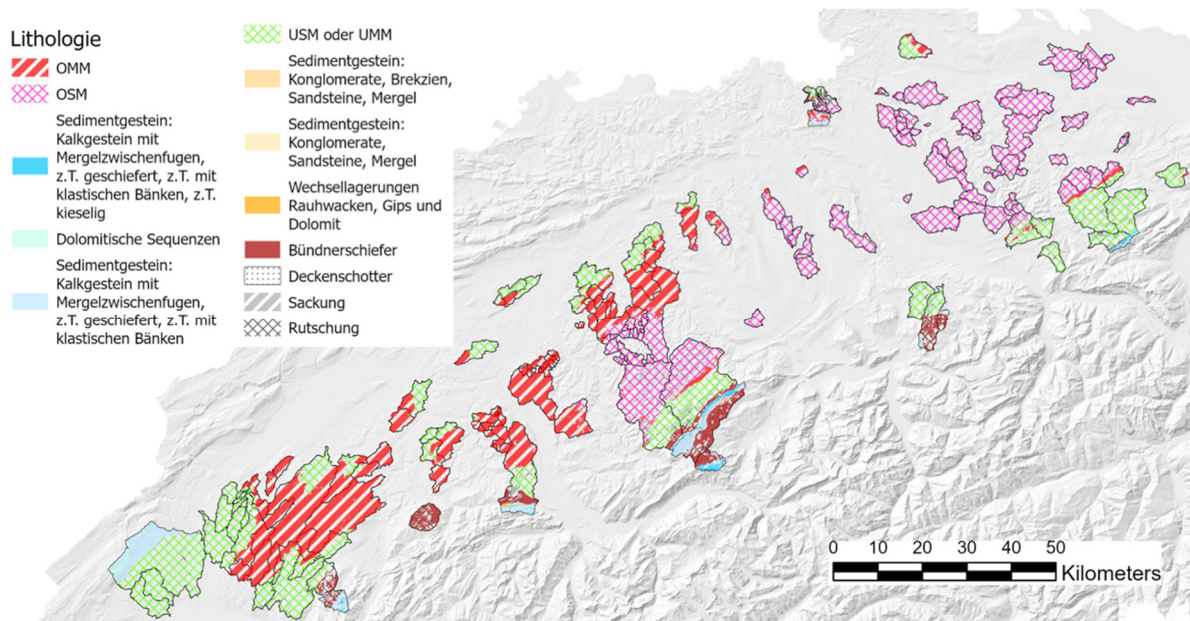


Abbildung 55: Lithologischer Aufbau des Festgesteins im Mittelland und in den Voralpen.

Um die Unterschiede zwischen den Beiträgen der OMM, USM/UMM und der OSM herauszuarbeiten, wurden drei Datensätze mit Einzugsgebieten extrahiert, die jeweils 80% oder mehr Flächenanteil der jeweiligen Molasseeinheiten enthalten. Die OMM-Gebiete weisen dabei im Durchschnitt die höchsten Q347-Werte von $6.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf (Tabelle 19). In den OSM- und USM/UMM-Gebieten sind die durchschnittlichen Q347-Werte mit $3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und respektive $2.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sehr ähnlich. Die Streuung der Q347-Werte innerhalb der drei Molasseeinheiten sind gross.

Tabelle 19: Minimales, maximales, durchschnittliches Q347 und Standardabweichung des Q347 von allen Untersuchungsgebieten mit 80% oder mehr Flächenanteil an OMM, USM/UMM oder OSM an der Gesamtfläche des Einzugsgebiets.

Molasseformation	Q347min	Q347max	Q347-Durchschnitt	Q347-Standardabweichung
OMM	0.6	16.2	6.2	4.3
USM / UMM	0.3	10.7	2.7	2.4
OSM	0.2	10	3	2.3

a) Obere Meeresmolasse (OMM)

Dass die OMM-dominierten Einzugsgebiete des zentralen Mittellands hohe Q347 aufweisen, ist bekannt (Naef und Margreth, 2017). Die Ergebnisse der Abflussmessungen zeigen, dass sich die OMM im Berner Mittelland und im Westlichen Mittelland anders verhält als im Zentralen Mittelland. Aufgrund der spezifischen Q347 lassen sich drei Gruppen erkennen (Abbildung 56). Im Zentralen Mittelland dominieren OMM-Einzugsgebiete mit hohem Q347. Das minimale Q347 beträgt dort knapp $5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, das maximale über $12 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Nur zwei von 16 Einzugsgebieten weisen Q347-Werte von weniger als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf. Eine Studie zum litho-stratigraphischen

Aufbau der OMM zeigt, dass die OMM in dieser Region aus homogenen Sandsteinbänken besteht, die nur wenige Mergelschichten enthält (Garefalakis und Schlunegger, 2019). Vor 17 – 20 Mio. Jahren herrschte im Mittelland ein Meer, was zur Ablagerung von marinen Sedimenten führte, die später durch die Diagenese zu Sandsteinen verfestigt wurden. Im Gebiet, wo sich das Meer ausbreitete, herrschten unterschiedliche Ablagerungsmilieus. Im Zentralen Mittelland dominierte ein Wellen-dominiertes Ablagerungsmilieu. Dadurch wurden mächtige Sandsteinbänke mit homogenen Korngrössen abgelagert (Garefalakis und Schlunegger, 2019). Weil sie nur wenige Mergelschichten enthalten, konnte sich bis in tiefe Schichten eine Verwitterungsschicht bilden, in der der Zement, der die Sandsteinkörner verbindet, teilweise gelöst wurde. Dies erhöht die Speicherkapazität im Vergleich zur OSM und zur USM massgeblich. Die Sandsteinbänke eignen sich daher sehr gut, um grosse Wasservolumina über mehrere Monate oder gar mehrere Jahre zu speichern.

Im Westlichen Mittelland herrschten hingegen eher Gezeiten-dominierte Ablagerungsmilieus vor (Garefalakis und Schlunegger, 2019), wo Sequenzen aus grobkörnigen Sandsteinen, siltigen Sandsteinen, Konglomeraten und Mergeln alternieren. Durch die Zunahme des Anteils feinkörniger Sedimente wird die Infiltrationskapazität verringert, was eine plausible Erklärung für die im Vergleich zur OMM des Zentralen Mittellands geringeren Q347-Abflüsse von $0.8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ bis $6.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ darstellt. Innerhalb dieser Gruppe ist eine Tendenz zur Abnahme des Q347 von Nordosten nach Südwesten ersichtlich.

Die Region rund um die Stadt Bern stellt eine Übergangszone dar, wo Wellen-dominierte und Gezeiten-dominierte Ablagerungsmilieus auftraten. Dort variieren die Q347 stark (0.6 und $16.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Das durchschnittliche Q347 liegt tiefer als im Zentralen, aber höher als im Westlichen Mittelland (Abbildung 56).

Aus OMM aufgebaute Einzugsgebiete, die in der letzten Eiszeit eisfrei waren, weisen fast nur hohe spezifische Q347-Abflüsse auf (Abbildung 57). In diesen kommen keine Moränen aus der Würmeiszeit vor. Dort, wo hingegen Gletscher lagen, liegen heute Moränen. In solchen Einzugsgebieten liegen die Q347-Abflüsse tiefer (Abbildung 57). Es sind aber einige Ausnahmen zu erkennen. Die lineare Regression zwischen Q347 und undurchlässigen und mässig durchlässigen Ablagerungen basierend auf Q347-Abflüssen von 69 Einzugsgebieten, die massgeblich durch OMM oder Deckenschotter aufgebaut werden, zeigt keinen Zusammenhang ($R^2 = -0.06$, Tabelle 22). Dies deutet daraufhin, dass die Unterschiede im Q347 zwischen Zentralem und Westlichem Mittelland durch den lithologischen Aufbau der OMM erklärt werden muss. Die undurchlässigen oder mässig durchlässigen Quartärablagerungen haben keinen wesentlichen Einfluss.

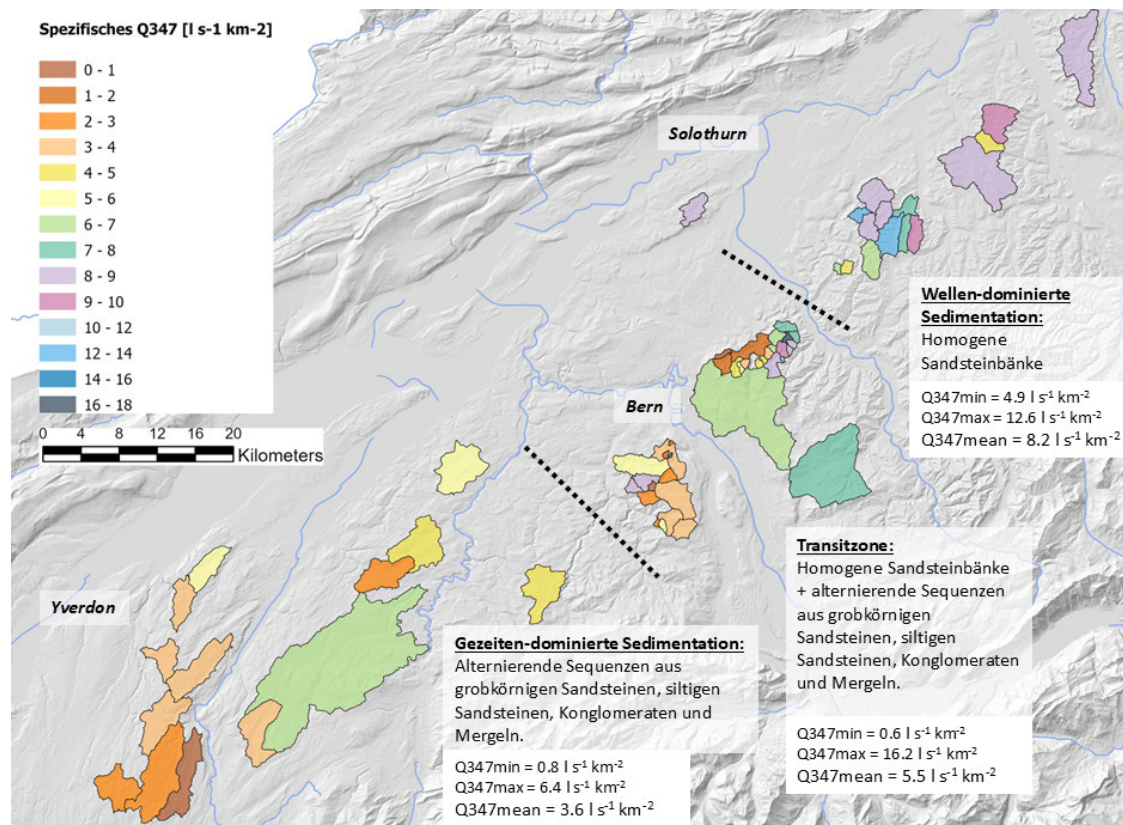


Abbildung 56: Q347-Abflüsse der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an OMM.

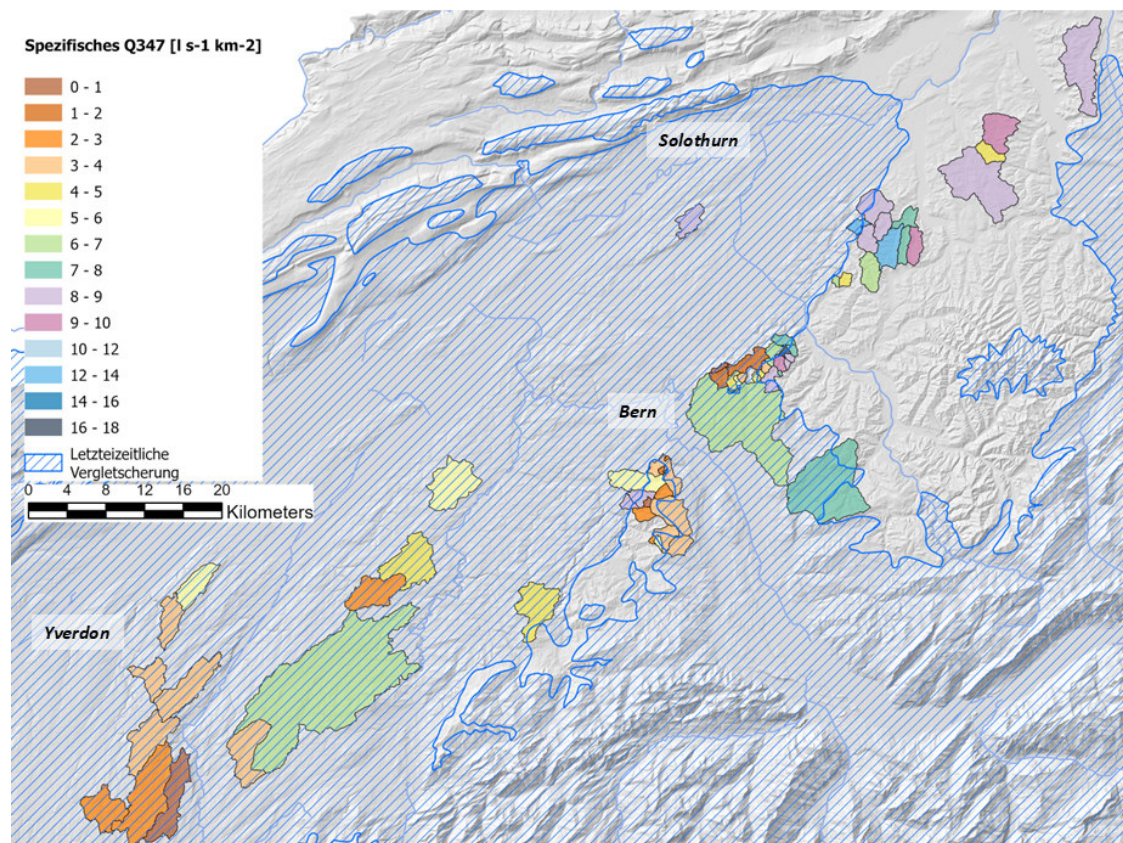


Abbildung 57: Q347-Abflüsse in Klassen der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an OMM, dargestellt mit den Grenzen der letzteiszeitlichen Vergletscherung.

3107 11.6.2 Untere Süsswassermolasse (USM)

3108 Die Q347-Abflüsse der USM-dominierten Einzugsgebiete lassen sich auch in drei Gruppen einteilen (Abbildung
3109 58). Am tiefsten sind die Q347-Werte in im Westlichen Mittelland. Diese variieren zwischen 0.3 und $3.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$
3110 und betragen im Durchschnitt $1.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Im Zentralen Mittelland und in der Region Bern sind die Q347-
3111 Abflüsse im Durchschnitt mit $3.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ doppelt so hoch wie im Westlichen Mittelland. Auch das minimale
3112 Q347 ist mit $1.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ höher als im westlichen Mittelland. Jedoch ist die Datenbasis im zentralen Mittelland
3113 recht dünn, weil die USM dort weniger oft aufgeschlossen ist. Die Q347-Abflüsse der USM in den östlichen
3114 Voralpen variiert zwischen 4.5 und $10.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Diese Werte sind doppelt so hoch wie diejenigen im Zentralen
3115 Mittelland und 4-mal so hoch wie im Westlichen Mittelland.

3116 Die Ursache für die höheren Q347-Werte der USM-dominierten Einzugsgebiete des Zentralen gegenüber dem
3117 Westlichen Mittelland ist unklar. Die Datenbasis ist zu dünn, um ein klares Muster zu erkennen. Es gibt
3118 verschiedene mögliche Erklärungen:

3119

3120 - Die USM-Schichten in den Voralpen wurden mit der Alpenfaltung schräg gestellt, d.h. die Schichten
3121 fallen schräg ein. Diese Zone wird deshalb auch Subalpine Molasse genannt. Die Schichten der
3122 Mittelländischen Molasse verlaufen jedoch fast horizontal. Auf Flächen, wo die Molasseschichten
3123 senkrecht zur Oberfläche verlaufen, kann möglicherweise mehr Wasser in die Molasse infiltrieren als
3124 bei horizontal liegenden Molasseschichten.

3125 - Durch die Hebungsprozesse ist die Subalpine Molasse wesentlich stärkeren tektonischen Kräften
3126 ausgesetzt worden als die Mittelländische Molasse. Dies führte dazu, dass die Subalpine Molasse von
3127 mehr Brüchen und Verwerfungen durchzogen ist als die Mittelländischen Molasse. Eine grössere Dichte
3128 solcher tektonischen Strukturen könnte deshalb die grössere Speicherkapazität der Subalpinen Molasse
3129 erklären.

3130 - Die Einzugsgebiete in den Voralpen liegen durchschnittlich höher als die im Mittelland. Dadurch findet
3131 in den Voralpen-Einzugsgebieten 30 bis 60% der Tage mit $Q < Q_{290}$ in den Herbst- und Wintermonaten
3132 statt (vgl. Kapitel 8.3.4). Im Mittelland sind es hingegen nur 0 bis 30%. In den Herbst- und
3133 Wintermonaten ist die Verdunstung stark reduziert. Das könnte das Q347 etwas erhöhen. Zudem kann
3134 die Schneeschmelze einen Q347-erhöhenden Effekt haben.

3135 - Die durchschnittlichen Jahresniederschläge sind in den Voralpen wesentlich höher als im Mittelland. In
3136 manchen Regionen im Mittelland (z.B. im Töss-Einzugsgebiet oder im Napfgebiet) sind die
3137 Niederschlagsmengen ähnlich hoch wie in den Voralpen. Dennoch liegen die Q347 dort wesentlich
3138 unter denjenigen in den Voralpen. Es ist deshalb unklar, ob der durchschnittliche Jahresniederschlag
3139 einen wesentlichen Q347-erhöhenden Effekt darstellt.

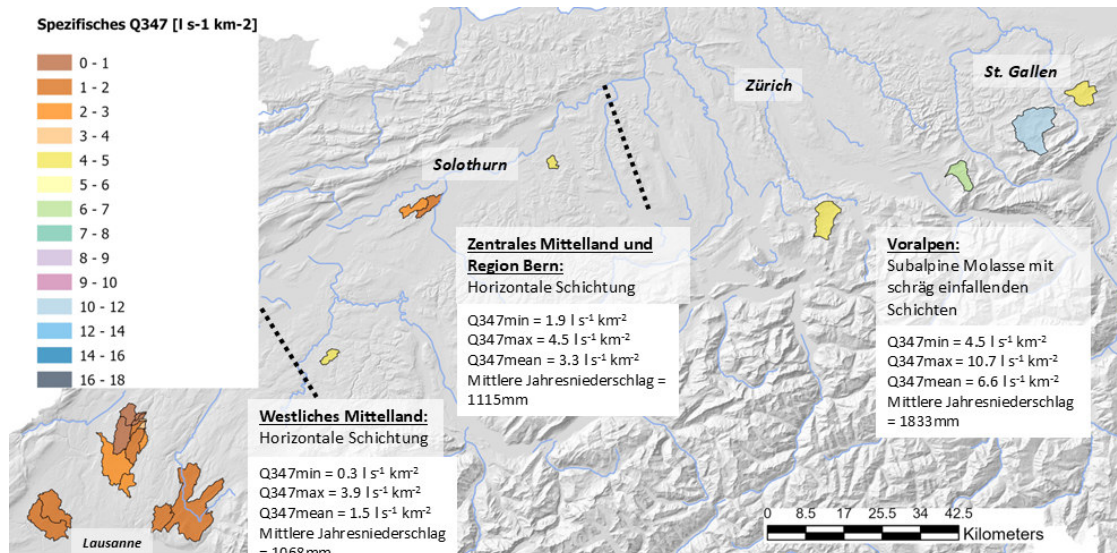


Abbildung 58: Q347-Abflüsse der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an USM oder UMM. Die Gebiete lassen sich räumlich in drei Gruppen einteilen. Im westlichen Mittelland dominieren geringe Q347 (Durchschnitt = $1.5\ l\ s^{-1}\ km^{-2}$). Im zentralen Mittelland und in der Region Bern sind sie etwas höher (Durchschnitt = $3.3\ l\ s^{-1}\ km^{-2}$). In den Voralpen liegen die Q347 im Durchschnitt doppelt so hoch wie im Zentralen Mittelland (Durchschnitt = $6.6\ l\ s^{-1}\ km^{-2}$).

11.6.3 Obere Süsswassermolasse (OSM)

Insgesamt 74 Einzugsgebiete sind zu 80% oder mehr aus Oberer Süsswassermolasse (OSM) aufgebaut. Abbildung 59 zeigt die spezifischen Abflüsse der OSM-dominierten Einzugsgebiete. Die OSM ist lithologisch sehr vielfältig. Die 74 Einzugsgebiete wurden in die vier folgenden lithologischen Klassen eingeteilt (Abbildung 43):

1. Wechsellagerungen Nagelfluh, Mergel
2. Wechsellagerungen Nagelfluh, Sandsteine, Mergel
3. Wechsellagerungen Sandsteine, Mergel
4. Wechsellagerungen Sandsteine, Mergel auf dem Seerücken (TG)

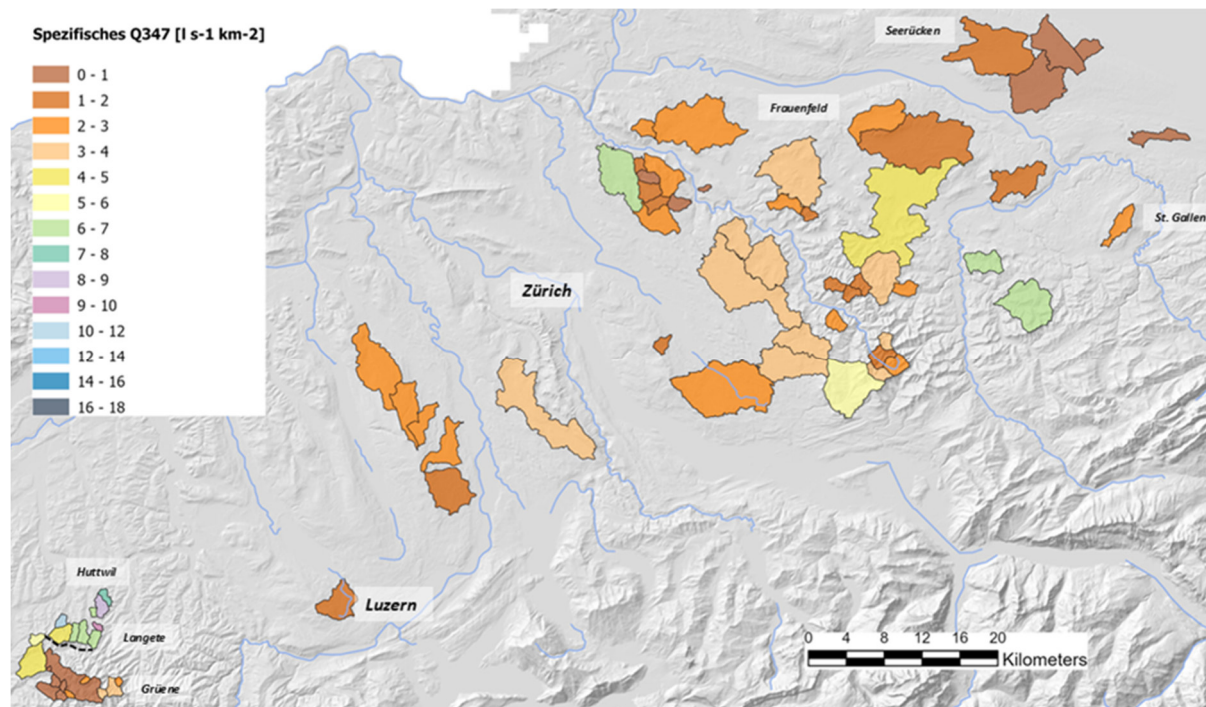


Abbildung 59: Q347-Abflüsse der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an OSM.

Die Kantone Aargau, Zürich, Thurgau und St. Gallen sind komplett durch Grundwasserkarten abgedeckt. In diesen Gebieten konnten zusätzliche Angaben zu den in Kapitel 6.4 abgeleiteten spezifischen Grundwasservolumina bei der Auswertung der Q347-Abflüsse verwendet werden. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Bern fehlen bei manchen Grundwasserkörpern Angaben zu den mittleren Mächtigkeiten, weshalb auf eine Verwendung der Grundwasserkarte im Napf-Fächer verzichtet wurde. Der lithologische Aufbau der OSM-dominierten Gebiete unterscheidet sich stark (Abbildung 60). Es existieren Einzugsgebiete, die durch Wechsellagerungen von Nagelfluh und Mergeln dominiert werden. Sie liegen v.a. in der Region des Töss-Einzugsgebiets und weiter östlich und im Napfgebiet. Einzugsgebiete, deren Untergrund aus Wechsellagerungen von Sandsteinen und Mergeln aufgebaut wird, liegen im nördlichen Kanton Zürich, im Kanton Thurgau und im Kanton Aargau. Sie liegen etwas weiter entfernt vom Alpenhauptkamm. Gebiete mit einem gemischten Aufbau aus Nagelfluh- und Sandsteinschichten liegen zwischen den Regionen, in denen Sandstein-Mergel-Sequenzen und Nagelfluh-Mergel-Abfolgen dominieren. Die Einzugsgebiete in der OSM auf dem Seerücken südlich des Bodensees werden einer separaten Kategorie zugeteilt, weil sie sehr tiefe Q347 aufweisen. Die Gebiete westlich von Luzern gehören zum Ablagerungsraum des Napf-Fächers, diejenigen östlich davon zum Hörnli-Fächer. Das sind zwei verschiedene Ablagerungssysteme, weshalb sie hier auch separat behandelt werden.

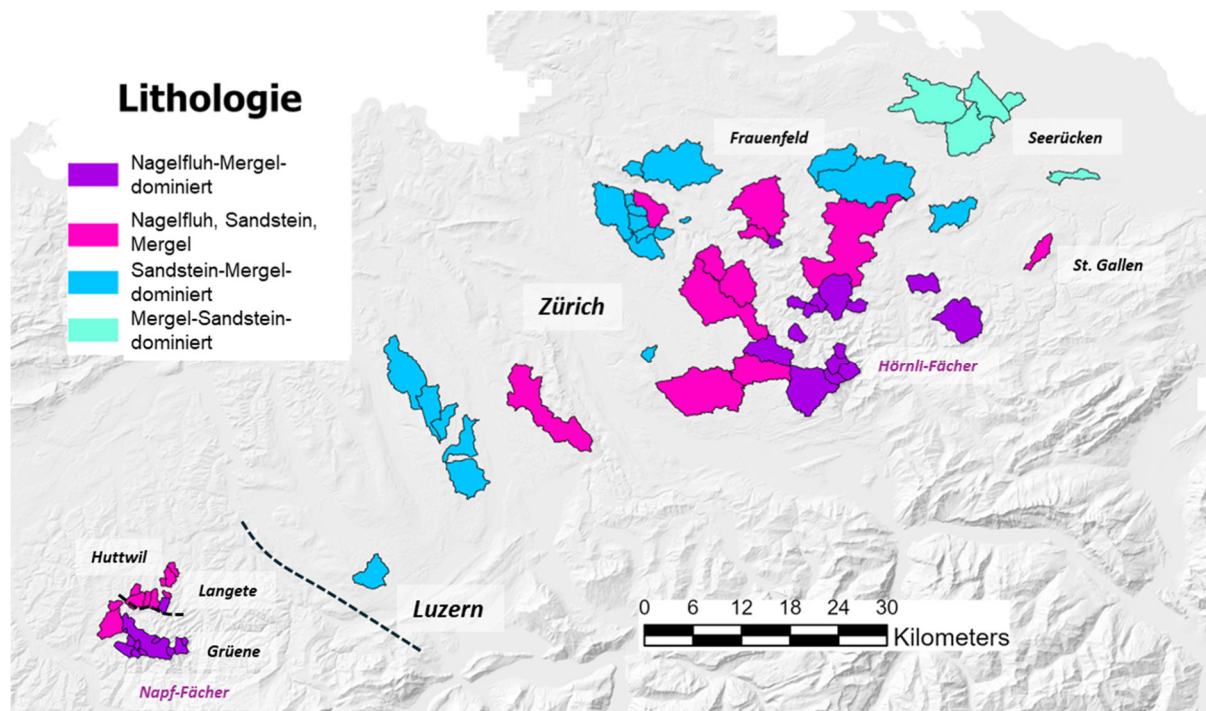


Abbildung 60: Lithologischer Aufbau der 74 OSM-Einzugsgebiete

Für die vier lithologischen Gruppen wurden die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Q347 in Tabelle 20 aufgelistet. Für die Gebiete mit Grundwasserkarten wurde jeweils eine Gruppe mit und eine ohne grössere Grundwasservolumina definiert. Als Gebiete mit relevanten Grundwasservolumina wurden alle Einzugsgebiete klassifiziert, deren gesamte Grundwasservolumina grösser als $500'000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ sind. Ebenfalls als relevante Grundwasservolumina gelten solche, die potenziell zu einem Teil vom Fliessgewässer selbst gespeist werden und grösser als $100'000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ sind (vgl. dazu auch Kapitel 6.4).

Nagelfluh-Mergel-Wechselagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 1):

In den Nagelfluh-dominierten Einzugsgebieten im Napf-Fächer variieren die Q347 zwischen 0.2 und $3.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Der Durchschnitt beträgt $1.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Tabelle 20). Das durchschnittliche Q347 der Einzugsgebiete im Hörnli-Fächer ohne Grundwasseraquifere ist mit $2.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ fast doppelt so hoch wie dasjenige im Napf-Fächer. Es sind vor allem die beiden Einzugsgebiete Jona (Pilgersteg) und Aachbach (Mogelsberg), die überdurchschnittliche Werte aufweisen. Ohne diese lägen das maximale Q347 bei $3.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und der Durchschnitt bei $2.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Die Q347 der Nagelfluh-dominierten Einzugsgebiete im Hörnli-Fächer liegen insgesamt etwas höher als die im Napf-Fächer. Die Q347 der Nagelfluh-Gebiete mit grösseren Schottergrundwasserspeichern liegen im Durchschnitt höher als diejenigen in den Gebieten ohne grössere Grundwasserkörper.

Nagelfluh-Sandstein-Mergel-Wechselagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 2):

In den Gebieten, die sowohl aus Nagelfluh-Abfolgen als auch aus Sandstein-Sequenzen des Hörnli-Fächers aufgebaut sind, liegen die minimalen Q347 in einem etwas höheren Bereich als in Regionen, in denen der

geologische Untergrund weitgehend aus Nagelfluh besteht (Tabelle 20). Das gilt auch für diejenigen Gebiete ohne grössere Grundwasserkörper. Fast alle Gebiete dieser Gruppe enthalten grössere Grundwasserkörper. Die durchschnittlichen Q347-Abflüsse liegen aber etwas tiefer als bei den Nagelfluh-Gebieten des Hörnli-Fächers. Die Nagelfluh-Sandstein-Gebiete im Napf-Fächer weisen alle ausserordentlich hohe Q347-Abflüsse auf. (Durchschnitt = $7.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Diese Gebiete liegen alle im Einzugsgebiet der Langete (Huttwil). Der Grund dafür liegt wohl darin, dass der Mergelgehalt dieser Schichten als „untergeordnet“ eingestuft wird (Swisstopo, 2022); denn Mergelschichten gelten als infiltrationshemmend.

3207

Sandstein-Mergel-Wechselagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 3):

Die Einzugsgebiete der OSM mit Sandstein-Mergel-Wechselagerungen liegen alle im Gebiet zwischen Luzern, Aargau, Zürich und St. Gallen. Die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Q347 der Gebiete ohne grössere Grundwasserkörper sind tiefer als diejenigen in den Nagelfluh-Gebieten und in denjenigen Regionen, in denen sowohl Sandstein-Sequenzen als auch Nagelfluh-Abfolgen vorkommen (Tabelle 20). Die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Q347 der Einzugsgebiete mit grösseren Grundwasserkörper sind mindestens doppelt so hoch wie die Q347 in den Einzugsgebieten ohne. Diese Angabe ist besser abgestützt als bei den Nagelfluh-dominierten und gemischt aufgebauten Gebieten, weil mehr Einzugsgebiete vorhanden sind. Es zeigt sich also, dass die Schottgrundwasservorkommen mit grossen Volumina auf tiefe Q347-Abflüsse einen Q347-erhöhenden Effekt haben können. Das zeigt auch Abbildung 6 und wird zudem von anderen Autoren bestätigt (Carlier et al., 2018; Wirth et al., 2020).

3219

Mergel-Sandstein-Wechselagerungen auf dem Seerücken (TG, Dauerkurvengruppe OSM 4):

Die tiefsten Q347 wurden auf dem Seerücken im Kanton Thurgau beobachtet. Sie werden durch die Dauerkurvengruppe 4 repräsentiert (Kapitel 8.3.1, Abbildung 5). Ähnlich tiefe Q347 wurden auch in der USM des Kantons Waadt verzeichnet, jedoch kommen sie dort nur vereinzelt vor. Auf dem Seerücken scheinen die Q347 hingegen flächendeckend sehr tief zu sein. So beträgt das minimale Q347 $0.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, das maximale Q347 $1.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und das durchschnittliche Q347 $0.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Tabelle 20). Die Aach in Salmsach wurde nicht berücksichtigt, weil deren Abfluss durch die Zuleitung von Seewasser für die Gemeinde Amriswil und weitere Gemeinden stark verfälscht wird. Die Zuleitungsmengen konnten nicht ermittelt werden, weil die Ermittlung der Zuleitungsmengen gemäss der Gemeindeverwaltung Amriswil bei Niedrigwasserabflüssen sehr aufwendig und kompliziert sei.

Folgende Faktoren könnten für die tiefen Q347 verantwortlich sein:

3231

- Undurchlässige Moräne: Die betreffenden Einzugsgebiete sind zu einem sehr hohen Flächenanteil durch eine mächtige Moräne bedeckt. Gemäss den Erfahrungen von M. Margreth aus einem Bodenkartierungsprojekt auf dem Seerücken sind die Böden tonreich. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass auch die Moränen eine geringere Durchlässigkeit aufweisen als in anderen Gebieten des Mittellands, sodass weniger Wasser bis in die Molasseschichten infiltrieren kann.

3237 - Mergelreiche Molasse: Da die Gebiete eher weit vom Alpenraum entfernt liegen, wurde in dieser
 3238 Region eher feines Material abgelagert (Gander, P., 2004).
 3239

3240 c) Q347- Überblick im Mittelland

3241 Tabelle 20 zeigt eine detaillierte Zusammenstellung der Q347-Bereiche, die in den drei Molasseformationen
 3242 OMM, USM und OSM beobachtet wurden, untergliedert nach weiteren regionalen und lithologischen
 3243 Untergruppen und nach Grundwasservorkommen. Sie bildet die Datengrundlage für die Beobachtungen, die in
 3244 den Kapiteln 11.6.1 a) bis d) beschrieben und diskutiert werden.

3245

3246 *Tabelle 20: Minimale, maximale und durchschnittliche Q347- Abflüsse der verschiedenen geologischen Einheiten im Überblick.*

Molasse-formation	Lithologie	Region	grössere Grundwasser-volumina enthalten?	Anzahl Gebiete	Q347min	Q347max	Durchschnitt Q347
OSM	Nagelfluh, Mergel	Napf-Fächer	keine Angaben	11	0.2	3.4	1.4
	Nagelfluh, Mergel	Hörnli-Fächer	nein	13	1.3	5.7	2.9
	Nagelfluh, Mergel	Hörnli-Fächer	ja	2	3.4	6.9	5.2
	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	Napf-Fächer	keine Angaben	11	4.4	10.0	7.2
	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	Hörnli-Fächer	nein	2	2.3	2.4	2.4
	Nagelfluh, Sandstein, Mergel	Hörnli-Fächer	ja	9	2.0	4.0	3.3
	Sandstein, Mergel	alle	nein	13	0.5	2.6	1.4
	Sandstein, Mergel	alle	ja	8	1.9	6.9	3.0
	Mergel, Sandstein (Seerücken)	alle	nein	5	0.4	1.1	0.6
OMM	Sandstein	Zentrales Mittelland	keine Angaben	16	4.9	12.6	8.2
	Sandstein und Sandstein, Mergel	Region Bern	keine Angaben	36	0.6	16.2	5.5
	Sandstein, Mergel	Westliches Mittelland	keine Angaben	14	0.8	6.4	3.6
USM	Sandstein, Mergel	Westliches Mittelland	keine Angaben	13	0.3	3.9	1.5
	Sandstein, Mergel	Zentrales Mittelland und Region Bern	keine Angaben	4	1.9	4.5	3.3
	Sandstein, Mergel	Östliche Voralpen	keine Angaben	4	4.5	10.7	6.6

3247

3248 Um mögliche Faktoren zu identifizieren, die die Streuung der Q347 innerhalb der Dauerkurvengruppen von
 3249 Mittelland und Voralpen erklären könnten, wurden für jede Dauerkurvengruppe lineare Regressionen zwischen
 3250 sieben Einzugsgebietsparametern und dem spezifischen Q347-Abfluss berechnet. Die 7 Einzugsgebietsfaktoren
 3251 bestehen aus:

- 3252 - Flächenanteil an mässig durchlässigen Quartärablagerungen
- 3253 - Flächenanteil an undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen
- 3254 - Flächenanteil an hochdurchlässigen Quartärablagerungen

- 3255 - Mittlere Geländeneigung
- 3256 - Mittlerer Jahresniederschlag
- 3257 - Flächenanteil Wald
- 3258 - Gerinnedichte

3259

3260 Die linearen Regressionen wurden basierend auf zwei verschiedenen Datensätzen berechnet. Der eine
 3261 Datensatz enthält nur Q347-Abflüsse, die von 72 Abflussmessreihen zwischen 2011 und 2022 ermittelt wurden
 3262 (Datensatz 1, Tabelle 20). Der andere Datensatz enthält Q347-Abflüsse, die aus 72 Abflussmessreihen und aus
 3263 Abflusseinzelmessungen von 109 weiteren Einzugsgebieten berechnet wurden (Datensatz 2, Tabelle 22). R²-
 3264 Werte zwischen 0.3 und 0.4 wurden gelb, solche zwischen 0.4 und 0.5 grün, solche zwischen 0.5 und 0.6 violett
 3265 und solche grösser 0.6 mit roter Farbe hinterlegt. Zwischen den R² der beiden verschiedenen Datengrundlagen
 3266 sind bei einigen Dauerkurvengruppen grössere Unterschiede zu erkennen.

3267

3268 *Zusammenhang zwischen Q347 und Flächenanteilen von undurchlässigem und mässig*
 3269 *durchlässigem Quartär:*

3270 Basierend auf 11 OMM-dominierten Einzugsgebieten liess sich ein moderater Zusammenhang zwischen Q347
 3271 und den Flächenanteilen an undurchlässig und mässig durchlässigen Quartärablagerungen erkennen (Tabelle
 3272 21). Die R², die auf der Berechnung von 69 Einzugsgebieten basieren, zeigen diesen Zusammenhang jedoch nicht
 3273 mehr (Tabelle 22). Die Regressionen, die auf mehr Daten basieren, sind wohl vertrauenswürdiger. Deshalb kann
 3274 daraus geschlossen werden, dass die Unterschiede im Q347 zwischen den OMM-dominierten Einzugsgebieten
 3275 vor allem durch Unterschiede im lithologischen Aufbau zu erklären sind. Der Einfluss der undurchlässigen und
 3276 mässig durchlässigen Quartärablagerungen spielen eine untergeordnete Rolle. Bei den Dauerkurvengruppen
 3277 OSM 4, OSM 2, USM & OMM, OMM & USM ist hingegen auch mit Datensatz 2 ein Zusammenhang zwischen
 3278 Q347 und den undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen zu erkennen. Steigende
 3279 Flächenanteile an undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen haben einen Q347-
 3280 reduzierenden Effekt. Dass bei gewissen OSM- und USM-Dauerkurvengruppen ein Zusammenhang zwischen
 3281 Q347 und den undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen erkennbar ist und bei der OMM-
 3282 Dauerkurvengruppe nicht, könnte folgende Gründe haben:

- 3283 - Die spezifischen Q347 in aus OSM und USM aufgebauten Einzugsgebieten sind niedriger sind als in aus
 3284 OMM aufgebauten Einzugsgebieten. In Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind, sind andere
 3285 Einflussfaktoren, wie z.B. die grosse Speicherkapazität der Sandsteine wichtiger.
- 3286 - Moränen, die Gebiete aus Süswassermolasse bedecken, enthalten möglicherweise höhere Feinanteile
 3287 als Moränen, die Gebiete aus Oberer Meeresmolasse bedecken. Geht man davon aus, dass ein Teil der
 3288 Grundmoräne aus Material besteht, das die eiszeitlichen Gletscher bei ihrem Vorstoss aus
 3289 oberflächennahen Schichten der Molasse erodiert hat, erscheint dieser Zusammenhang plausibel.

3290 Weshalb dieser Zusammenhang bei den Dauerkurvengruppen USM, OSM 3 und OSM 1 nicht ersichtlich ist,
 3291 könnte darin begründet sein, dass andere Faktoren Q347 ebenfalls massgebend oder stärker beeinflussen.

3292 Bei Auswertungen im Zusammenhang mit Quartärablagerungen gilt es immer zu berücksichtigen, dass:

3293

3294 - die Quartärlagerungen zwischen den Kartenblättern inkonsistent kartiert wurden (vgl. Abbildung 76,
3295 Abbildung 77, Abbildung 78).

3296 - Angaben über Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten der verschiedenen Quartäreinheiten fehlen. Vor
3297 allem die Durchlässigkeiten von Moränen können sehr heterogen sein.

3298 - die Angaben zu Flächenanteilen von undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärlagerungen mit
3299 abnehmenden Einzugsgebietsgrössen ungenauer werden. Die geologische Karte (Geocover) wurde für
3300 den Gebrauch im Massstab 1:25'000 erstellt.

3301

3302 *Zusammenhang zwischen Q347 und Flächenanteilen von hochdurchlässigem Quartär:*

3303 Ein nennenswerter Zusammenhang zwischen Q347 und den Flächenanteilen an hochdurchlässigen
3304 Quartärlagerungen ist nur bei der Dauerkurvengruppe USM&OMM ersichtlich (Tabelle 22). Da die Datenbasis
3305 von Datensatz 1 dünner ist, sind die mit Datensatz 1 ermittelten hohen R^2 bei weiteren Dauerkurvengruppen als
3306 weniger aussagekräftig zu betrachten (Tabelle 21). Tabelle 20 zeigt hingegen, dass hoch durchlässige
3307 Ablagerungen wie grosse Schottergrundwasserkörper Q347-erhöhend wirken. Werden nur Flächen- und keine
3308 Volumenangaben von den Schottergrundwasservorkommen verwendet, wird der Effekt auf Q347 offenbar
3309 kaum sichtbar (Tabelle 22).

3310

3311 *Zusammenhang zwischen Q347 und mittlerer Geländeneigung:*

3312 Bei den Dauerkurvengruppen OSM 4 und OMM&USM kommen R^2 von über 0.4 vor. Bei den anderen Gruppen
3313 liegen die Werte darunter. Wegen der dünnen Datenbasis müssen diese Werte mit Vorsicht interpretiert werden
3314 (Tabelle 22). Für eine Zunahme von Q347 mit steigender Geländeneigung bei Dauerkurvengruppe OSM 4 gibt es
3315 jedoch eine plausible Erklärung. Q347- Abflüsse von Einzugsgebieten, die zu Gruppe OSM 4 gehören, werden zu
3316 erheblichen Anteilen aus Grundwasserspeichern gespeist, die sich rasch entwässern (Abbildung 23 und Kapitel
3317 8.9.1). Auf die Entwässerung von oberflächennahen und rasch entwässernden Grundwasserspeicher hat die
3318 Geländeneigung einen grösseren Einfluss als auf die langsam entwässernden, tiefer liegenden
3319 Grundwasserspeicher.

3320

3321 *Zusammenhang zwischen Q347 und der Waldbedeckung:*

3322 R^2 -Werte um 0.4 und etwas darüber sind nur bei den Dauerkurvengruppen OSM 4, USM&OMM und OMM&USM
3323 ersichtlich. Auch diese R^2 -Werte basieren auf einer dünnen Datenbasis. Eine Zunahme von Q347 mit
3324 zunehmender Waldbedeckung wäre durchaus plausibel in Einzugsgebieten mit einer begrenzten
3325 Infiltrationskapazität aufgrund einer undurchlässigen Moräne oder aufgrund von hohen Anteilen an Mergeln.
3326 Werden erhebliche Anteile an Q347 aus oberflächennahen Grundwasserspeicher gespeist (z.B. Gruppe OSM 4),
3327 können Baumwurzeln möglicherweise die Infiltrationskapazität erhöhen, sodass darunterliegende Speicher
3328 besser genutzt werden können. Ein solcher Effekt ist bei anderen Dauerkurvengruppen nicht sichtbar, weil
3329 andere Faktoren mehr Einfluss haben (Lithologie, Grundwasservorkommen).

3330 *Tabelle 21: Zusammenhang zwischen Q347 und verschiedenen Einzugsgebietsparametern innerhalb der verschiedenen*
 3331 *Dauerkurvengruppen repräsentiert durch R^2 , das durch eine lineare Regression ermittelt wurde. Die R^2 -Werte basieren auf*
 3332 *Abflussmessreihen von mindestens 12 Jahren von insgesamt 72 Einzugsgebieten. R^2 - Werte zwischen 0.3 und 0.4 wurden gelb,*
 3333 *solche zwischen 0.4 und 0.5 grün, solche zwischen 0.5 und 0.6 violett und solche grösser 0.6 wurden mit roter Farbe hinterlegt.*

Gruppe	Anzahl Einzugsgebiete	Quartär mässig durchlässig	Quartär mässig durchlässig und undurchlässig	Quartär hochdurchlässig	Mittlere Neigung	Mittlerer Jahresniederschlag	Wald	Gerinnedichte
OSM 1	8	0.01	0.01	0.11	-0.20	-0.43	-0.02	-0.05
OSM 2	5	-0.11	-0.20	0.20	0.32	-0.44	0.00	-0.65
OSM 3	11	0.20	0.31	0.04	0.15	-0.06	0.43	-0.01
OSM 4	5	-0.49	-0.61	-0.12	0.56	-0.35	0.39	0.40
USM	3	0.19	0.15	-0.96	-0.16	-0.19	0.00	-0.04
USM & OMM	4	-0.92	-0.91	0.73	0.36	-0.27	0.91	0.06
OMM & USM	4	-0.73	-0.74	0.95	0.55	0.01	0.82	0.06
OMM*	11	-0.54	-0.60	-0.07	0.11	0.48	-0.02	0.16
Voralpin 1	8	0.00	0.03	0.00	-0.27	-0.03	0.00	0.00

3334

3335 *Tabelle 22: Zusammenhang zwischen Q347 und verschiedenen Einzugsgebietsparametern innerhalb der verschiedenen*
 3336 *Dauerkurvengruppen repräsentiert durch R^2 , das durch eine lineare Regression ermittelt wurde. Die R^2 -Werte basieren auf*
 3337 *Abflussmessreihen von mindestens 12 Jahren und auf Abflusseinzelmessungen von insgesamt 181 Einzugsgebieten. R^2 - Werte*
 3338 *zwischen 0.3 und 0.4 wurden gelb, solche zwischen 0.4 und 0.5 grün, solche zwischen 0.5 und 0.6 violett und solche grösser*
 3339 *0.6 wurden mit roter Farbe hinterlegt.*

Gruppe	Anzahl Einzugsgebiete	Quartär mässig durchlässig	Quartär mässig durchlässig und undurchlässig	Quartär hochdurchlässig	Mittlere Neigung	Mittlerer Jahresniederschlag	Wald	Gerinnedichte
OSM 1	29	0.12	0.12	0.18	-0.14	-0.02	-0.15	-0.24
OSM 2	21	-0.5	-0.53	-0.13	0.23	0.09	-0.36	-0.04
OSM 3	21	-0.12	-0.03	0.05	0	-0.11	-0.03	-0.02
OSM 4	5	-0.49	-0.61	0.37	0.56	-0.35	0.39	0.4
USM	15	-0.09	-0.06	0.29	0.11	0.01	-0.16	-0.39
USM & OMM	8	-0.68	-0.66	0.78	0.14	-0.5	0.43	0.03
OMM & USM	9	-0.61	-0.76	0.03	0.45	0.02	0.53	0.01
OMM*	69	-0.05	-0.06	0.05	0.02	0	0	0.02
Voralpin 1	9	-0.01	-0.09	0.02	-0.31	0.17	-0.02	0.11

* besteht aus (OMM, OMM & OSM, OMM & USM & Deckenschotter)

3340

3341 11.6.4 Alpen und Tessin

3342 In den Alpen und im Tessin sind die Faktoren, die Q347 massgebend bestimmen, weniger gut bekannt und auch
 3343 weniger offensichtlich als im Mittelland. Der Einfluss des litho-stratigraphischen Aufbaus auf das Q347 alpiner
 3344 Einzugsgebiete ist weniger stark als auf Einzugsgebiete im Mittelland. Anhand einer Karte der spezifischen Q347-
 3345 Abflüsse vom zentralen, östlichen und südlichen Alpenraum der Schweiz, in der die spezifischen Q347 zu Klassen

von jeweils drei Einheiten zusammengefasst sind, lassen sich Gruppen von Einzugsgebieten erkennen, in denen die Q347-Klassen gleich oder ähnlich sind (vgl. Abbildung 61). Die Einzugsgebiete im Raum Unterengadin, Nationalpark und Münstertal sind zum Beispiel in einer ähnlichen Q347-Klasse, ebenso diejenigen im Berninagebiet oder diejenigen in der Region Valle Verzasca, Valle Maggia, Onsernone. Im Südlichen Tessin sind drei Regionen zu erkennen. Im Westen können eher tiefe, im Osten eher hohe und im Süden mittlere Q347 beobachtet werden. In den Zentralalpen (Aletsch-, Grimsel, Gotthardgebiet) variieren die Q347 recht stark. Tendenziell dominieren jedoch die mittleren bis hohen Werte. Anhand von unterschiedlichen statistischen Auswertungen wurde versucht, die Faktoren zu identifizieren, die diese Muster verursachen. Untersucht wurde der Zusammenhang zwischen Q347 und Faktoren wie den tektonischen Einheiten, den Gesteinstypen und den quartären Ablagerungen. Im Folgenden werden Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Auswertungen beschrieben.

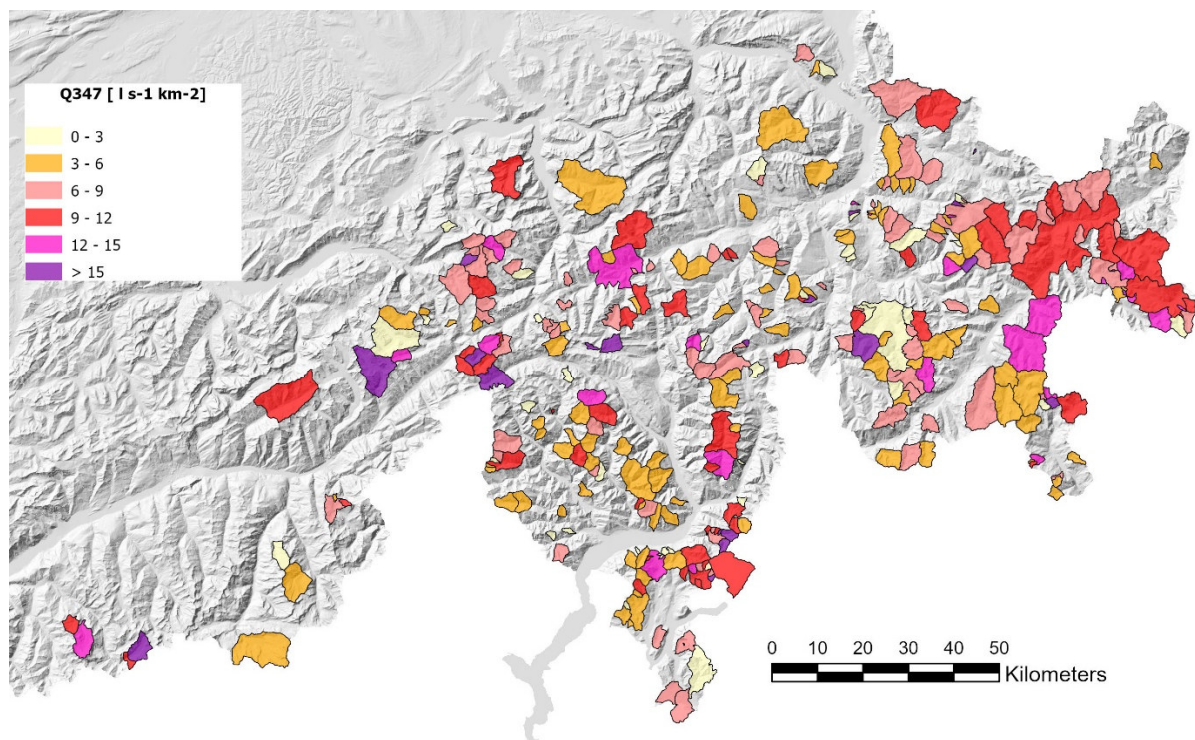


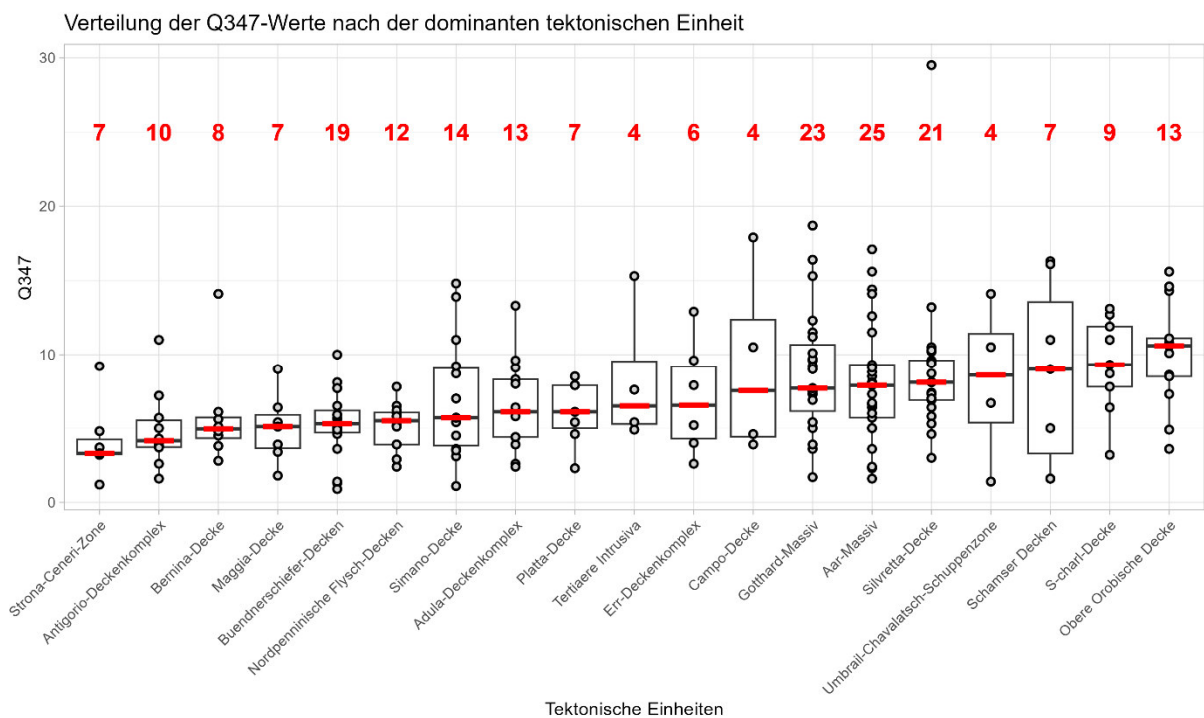
Abbildung 61: Karte der Q347-Werte für die Alpen und das südliche Tessin. Die Q347-Werte wurden mit Einzelmessungen, Kurz- und Langzeitmessreihen ermittelt.

a) Zusammenhang zwischen Q347 und den tektonischen Einheiten

Boxplots zeigen die Streuung der Q347-Werte innerhalb der tektonischen Einheiten (Abbildung 62). Es wurden nur diejenigen tektonischen Einheiten berücksichtigt, in denen mindestens drei Einzugsgebiete verfügbar sind. Rund ein Drittel der 311 in den Alpen und im Tessin verfügbaren Einzugsgebiete treten entweder einzeln oder zu zweit in derselben tektonischen Einheit auf. Daher wurden für die weiteren Auswertungen nur 213 Einzugsgebiete verwendet.

Auffallend tiefe Q347-Median-Werte treten in den tektonischen Einheiten Strona-Ceneri-Zone, Antigorio-Deckenkomplex oder Maggia-Decke auf, die im Tessin liegen (vgl. Abbildung 63). In den Bündnerschiefern, den

3369 Nordpenninischen Flyschdecken und in der Bernina-Decke sind die Q347-Mediane ebenfalls tief. Mittlere Q347-
 3370 Mediane sind im Gotthardmassiv, im Aarmassiv, im Err-Deckenkomplex, in der Platta-Decke, in der Campo-
 3371 Decke, im Adula-Deckenkomplex und in den Tertiären Intrusiva zu beobachten. Hohe Q347-Mediane weisen die
 3372 Silvretta-Decke, die Umbrail-Chavalatsch-Schuppenzone, die Schamser-Decke und die S-charl-Decke auf.
 3373 Der niedrigste Q347-Median-Wert kann in der Strona-Ceneri-Zone beobachtet werden. Diese liegt am
 3374 westlichen Rand des Südtessins. Die tektonische Einheit mit dem höchsten Q347-Median-Wert liegt in der
 3375 Oberen Orobischen Decke, interessanterweise in unmittelbarer Nachbarschaft zur Strona-Ceneri-Zone.
 3376 Die Q347-Werte innerhalb der tektonischen Einheiten streuen meist stark. Die Streuung wird von weiteren
 3377 Einflussfaktoren kontrolliert, wie Gesteinstypen und quartären Ablagerungen. Diese werden im Folgenden
 3378 untersucht.
 3379



3380
 3381 *Abbildung 62: Boxplot mit der Streuung der Q347-Werte innerhalb der verschiedenen tektonischen Einheiten. Die roten Zahlen*
 3382 *zeigen die Anzahl der in den tektonischen Einheiten vorkommenden Untersuchungsgebiete.*

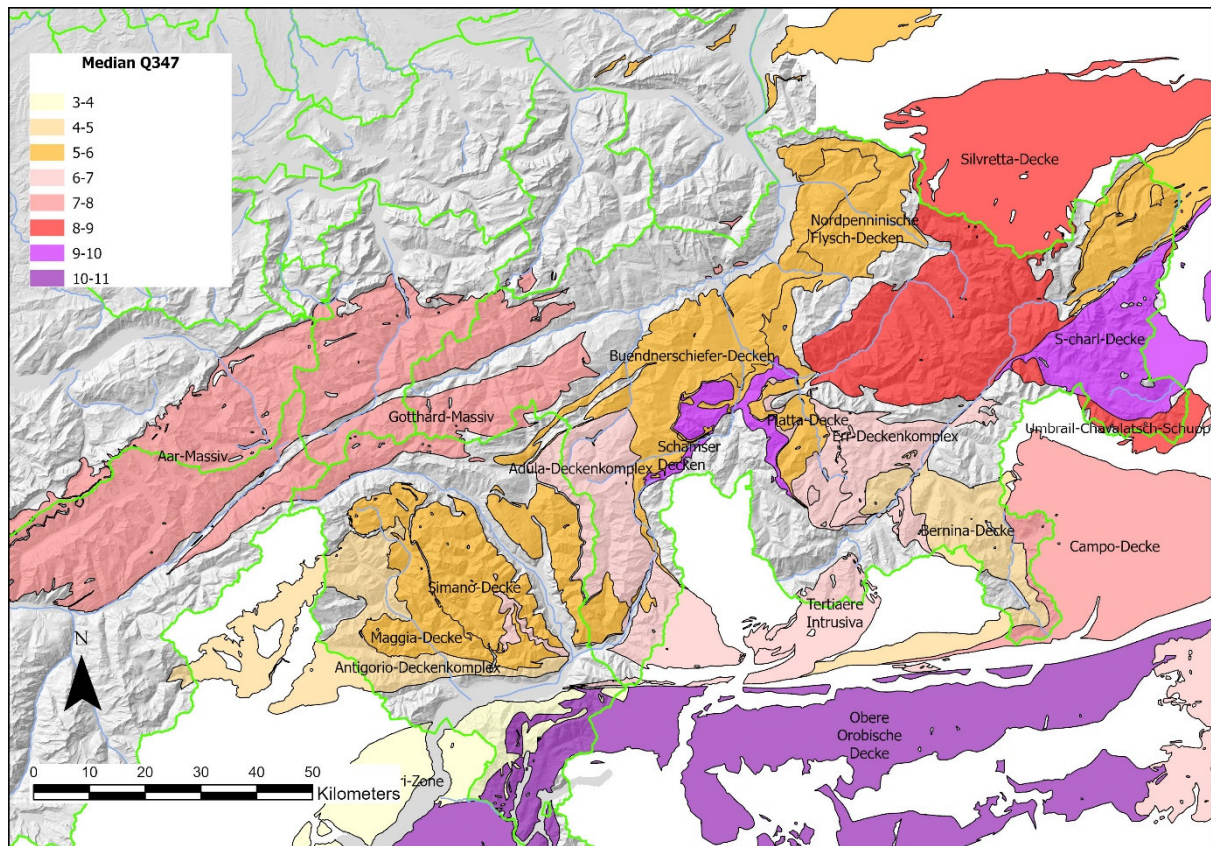
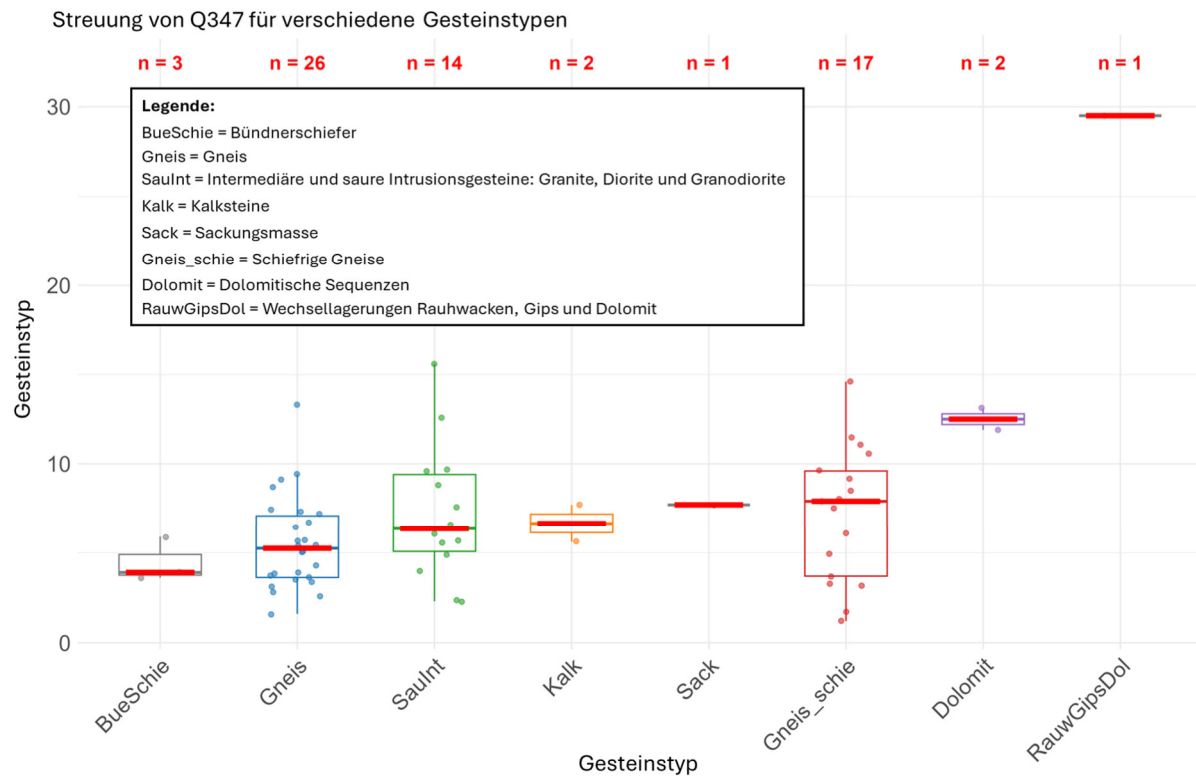


Abbildung 63: Karte der tektonischen Einheiten, eingefärbt nach den Q347-Medianen. Zur Orientierung sind mit grüner Farbe die Kantons Grenzen eingezeichnet.

b) Zusammenhang zwischen Q347 und den Gesteinstypen

Die Streuung der Q347 innerhalb der kristallinen Gesteinstypen, also innerhalb der Gneise, schiefrigen Gneise und innerhalb der intermediären und sauren Intrusionsgesteine, ist gross (Abbildung 64). In den Gneisen streuen die Q347 zwischen 2 und 13 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$, in den schiefrigen Gneisen zwischen 2 und 14.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$ und in den intermediären und sauren Intrusionsgesteinen zwischen 2.5 und 16 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. Bei den kristallinen Gesteinstypen weisen die schiefrigen Gneise den höchsten Q347-Median auf. Insgesamt weisen die Bündnerschiefer die tiefsten Median-Werte auf (Q347-Median = 4 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). In Einzugsgebieten, in denen Kalksteine dominieren, liegt der Q347-Median bei 7.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. In den Dolomit-dominierten Gebieten ist dieser Wert (Median = 12.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$) wesentlich höher. Am höchsten sind die Q347-Werte in Einzugsgebieten, die aus Wechsellagerungen zwischen Rauwacken, Gipsen und Dolomiten bestehen (Q347-Median = 29.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$, nur ein Wert vorhanden). Bei den Bündnerschiefern, Kalkgesteinen, Dolomiten und Rauwacken/Gipsen ist die Aussagekraft beschränkt, weil die Anzahl der Gebiete klein ist.



3399

3400 *Abbildung 64: Streuung der Q347 für die verschiedenen Gesteinstypen. Es wurden nur Einzugsgebiete berücksichtigt, in denen*
 3401 *der dargestellte Gesteinstyp 80% oder mehr von der Einzugsgebietsfläche einnimmt. Gletscher und Permafrostflächen*
 3402 *Flächen wurden nicht berücksichtigt.*

3403 Im Folgenden wurden die Q347 nach Gesteinstypen und zusätzlich nach den tektonischen Einheiten
 3404 aufgegliedert. Unter den Gneisen liegen die tiefsten Q347 in der Bernina-Decke. Allerdings ist nur ein Wert
 3405 vorhanden. In den Penninischen Decken des Tessins (Maggia-, Simano, Antigorio-Decke) streuen die Q347
 3406 zwischen etwa 4 und 6 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$, mit einem hohen und einem tiefen Ausreisser. In den Gneis-Gebieten des
 3407 Aarmassivs und der Silvretta Decke streuen die Q347-Werte zwischen 7 und 10 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. Im Gotthardmassiv
 3408 kommt kein Gneis-dominiertes Gebiet vor. Im Adula-Deckenkomplex variieren die Q347 der Gneis-dominierten
 3409 Gebiete stark. Unter den Gebieten, die von schiefrigen Gneisen dominiert werden, weisen die Regionen in der
 3410 Strona-Ceneri-Zone die tiefsten Q347 auf. Die Q347-Werte streuen zwischen 1 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$ und 4 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$, mit
 3411 einem Ausreisser bei 9.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. Im Gotthardmassiv, im Adula-Deckenkomplex und im Aarmassiv sind die
 3412 Median-Werte ähnlich hoch (zwischen 8 und 8.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). Jedoch streuen die Werte im Gotthardmassiv stark.
 3413 In der Oberen Orobischen Decke ist der Q347-Median mit 11 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$ am höchsten unter den schiefrigen
 3414 Gneisen. Die Werte streuen jedoch stark (5 und 15 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). Im Aarmassiv und im Adula-Deckenkomplex sind
 3415 die Q347-Mediane der beiden Gesteinstypen ähnlich hoch. Die Q347 der sauren und intermediären Gesteine
 3416 (Granite, Diorite, Granodiorite) liegen am höchsten im Gotthardmassiv (nur 2 Gebiete). Tiefere Werte sind bei
 3417 den Tertiären Intrusiva (Bergell), bei der Bernina-Decke und beim Err-Deckenkomplex zu beobachten. Auch die
 3418 Q347 in den sauren und intermediären Intrusionsgesteinen des Aaremassivs streuen stark.

3419 Es kann festgehalten werden, dass die Streuung der Q347 innerhalb der Gesteinstypen tendenziell reduziert
 3420 werden kann, wenn sie zusätzlich nach den verschiedenen tektonischen Einheiten aufgegliedert werden. Diese

Erkenntnis ist als Tendenz zu betrachten, denn die Anzahl der Beobachtungen in den einzelnen tektonischen Einheiten ist klein.

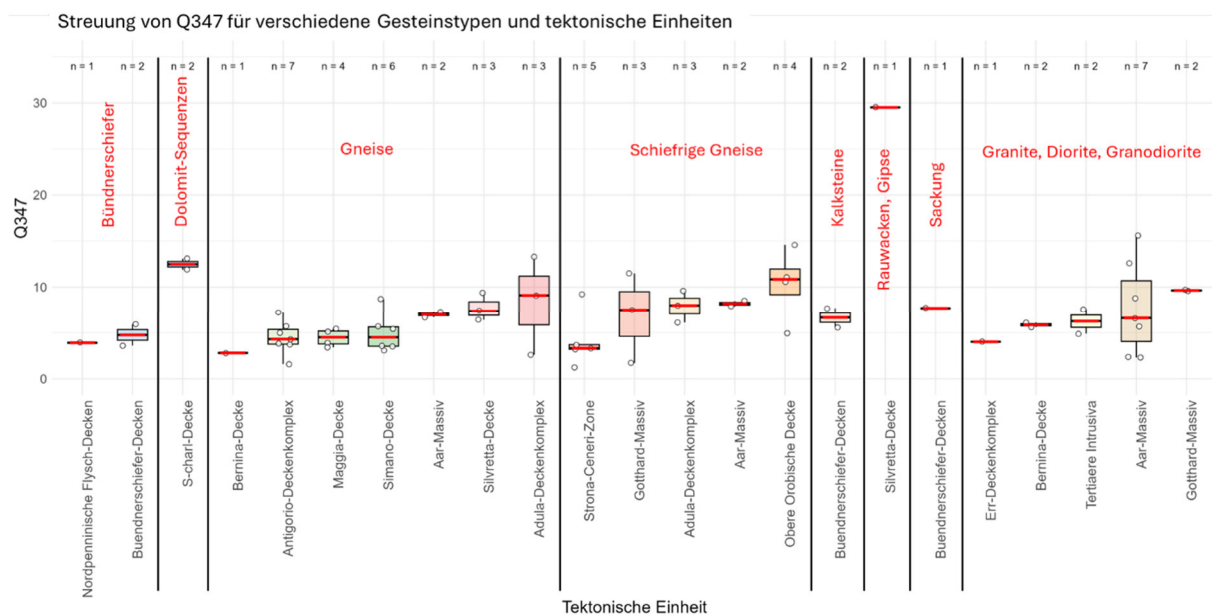


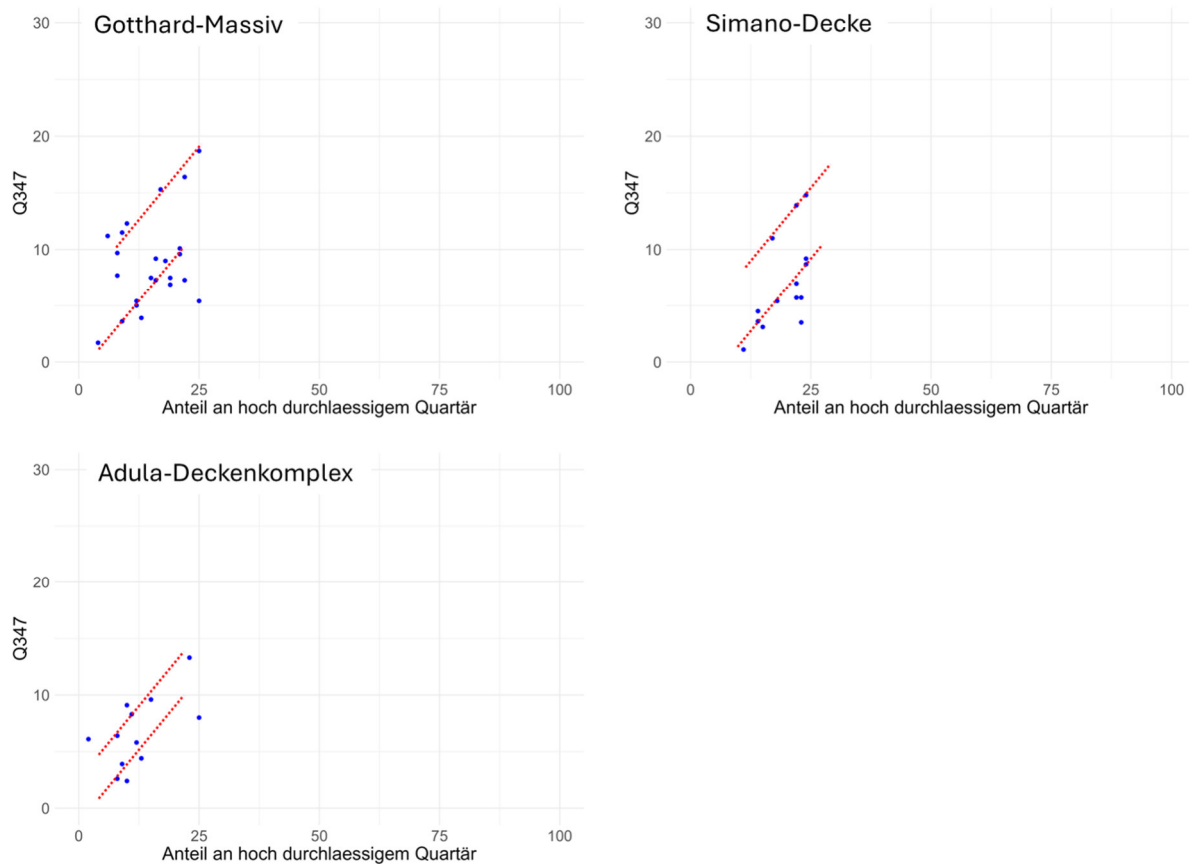
Abbildung 65: Streuung der Q347 für die verschiedenen Gesteinstypen aufgegliedert auf die verschiedenen tektonischen Einheiten. Es wurden nur Einzugsgebiete berücksichtigt, in denen der dargestellte Gesteinstyp 80% oder mehr von der Einzugsgebietsfläche einnimmt. Gletscher- und permafrostfreien Flächen wurden nicht berücksichtigt.

c) Zusammenhang zwischen Q347 und quartären Ablagerungen

Für alle tektonischen Einheiten wurden Plots erstellt, die den Zusammenhang zwischen Q347 und den hoch durchlässigen Quartärlagerungen zeigen. Bei den meisten tektonischen Einheiten wird dieser Zusammenhang vom Einfluss anderer Faktoren überprägt. Beim Gotthardmassiv, bei der Simano-Decke und beim Adula-Deckenkomplex sind die oben erwähnten Zusammenhänge jedoch ansatzweise ersichtlich. Die Punkte Q347 vs. Quartär-hoch-durchlässig sind jeweils entlang zweier Trendlinien angeordnet, die manuell platziert wurden (Abbildung 66). Die Trendlinien weisen dieselbe Neigung auf, jedoch variiert ihre Lage innerhalb des Plots. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde ein Denkmodell entwickelt, das davon ausgeht, dass die hoch durchlässigen quartären Ablagerungen in allen tektonischen Einheiten einen ähnlichen Einfluss auf die Q347-Abflüsse aufweisen könnten, dieser aber nicht in allen tektonischen Einheiten sichtbar ist, weil andere Faktoren eine übergeordnete Rolle spielen.

Dieses Denkmodell wurde für die 213 Untersuchungsgebiete in den Alpen und im Tessin angewendet. Die Einzugsgebiete wurden zu ungefähr 10 gleich grossen Gruppen zusammengefasst, die entlang von Trendlinien ähnlicher Steigung angeordnet sind (Abbildung 67), die „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ genannt werden. Die erste Gruppe weist eine etwas steilere Trendlinie auf als die anderen. Die Einzugsgebiete beispielsweise der Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 2 weisen bei gleichem Anteil an hoch durchlässigem Quartär ein wesentlich höheres Q347 auf als die Einzugsgebiete der Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 6. Zwei Einzugsgebiete, mit ausserordentlich hohen Flächenanteilen an

3445 hoch durchlässigem Quartär (grüne isolierte Punkte) konnten keiner Gruppe zugeordnet werden. Deshalb
 3446 wurden sie im weiteren Vorgehen nicht berücksichtigt.



3447
 3448 *Abbildung 66: Beim Gotthardmassiv, bei der Simano-Decke und beim Adula-Deckenkomplex sind bei jeweils zwei Gruppen*
 3449 *von Einzugsgebieten Korrelationen zwischen dem Q347 und dem Flächenanteil an hoch durchlässigem Quartär erkennbar.*
 3450 *Die manuell eingesetzte Trendlinie hat bei allen dieselbe Neigung.*

3451 Ausgehend von diesem Denkmodell existieren also noch weitere Faktoren, die das Q347 kontrollieren. Im
 3452 Folgenden wird untersucht, inwiefern die Flächenanteile an mässig durchlässigem Quartär die Zugehörigkeit zu
 3453 „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ erklären. Dazu
 3454 wurden für jede tektonische Einheit Punkte-Plots erstellt, die in der y-Achse den Anteil an mässig durchlässigem
 3455 Quartär und in der x-Achse die Zugehörigkeit zu „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-
 3456 Quartär-hochdurchlässig 10“ zeigen. In 10 von 19 tektonischen Einheiten zeigt sich ansatzweise ein
 3457 Zusammenhang zwischen dem Flächenanteil an mässig durchlässigem Quartär mit der Zugehörigkeit zur „Q347-
 3458 Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ (Abbildung 68). In jeder
 3459 Gruppe sind einige Ausreisser erkennbar. Bei den Bündnerschiefern sind zwei Gruppen ersichtlich. Bei den
 3460 Schamser Decken ist die Trendlinie flacher als in den übrigen tektonischen Einheiten. Diese Trends wären nicht
 3461 erkennbar, wenn nur der Zusammenhang zwischen dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär und dem Q347
 3462 betrachtet würde.

3463 In Abbildung 69 werden nur die oben erwähnten Trendlinien der zehn tektonischen Einheiten in einem Plot
 3464 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Trendlinien zwischen dem Anteil an mässig durchlässigen
 3465 Quartärlagerungen und der Q347-Gruppen-Quartär-hoch-durchlässig je nach tektonischer Einheit in der

Vertikalen parallel verschoben sind. Demnach wären in den Nordpenninischen Flysch-Decken und im Err-Deckenkomplex wesentlich höhere Anteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen notwendig als in der Adula-Decke oder in den Tertiären Intrusiva, um in die gleiche Q347-Gruppen-Quartär-hoch-durchlässig zu gelangen. In der Adula-Decke und in den tertiären Intrusiva sind im Vergleich zu den Nordpenninischen Flysch-Decken und zum Err-Deckenkomplex demnach mehr andere, nicht-quartäre Speicher vorhanden, die den Q347-Abfluss massgeblich erhöhen.

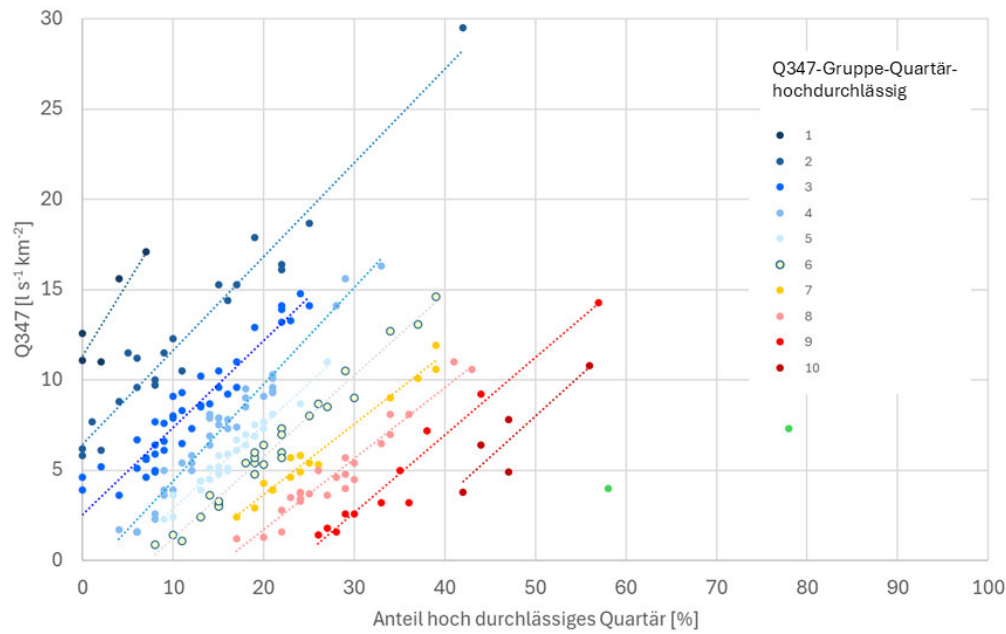
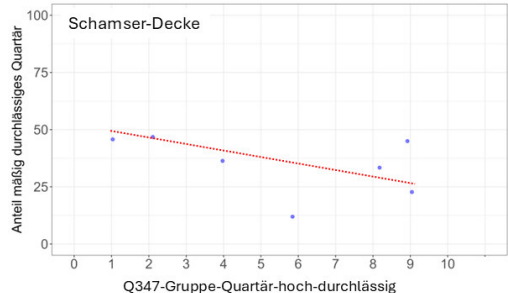
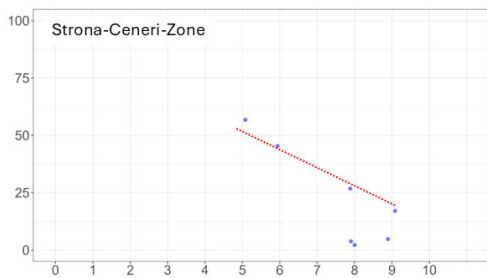
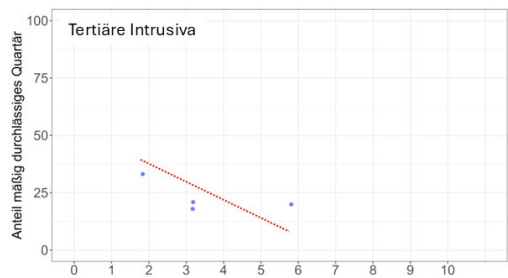
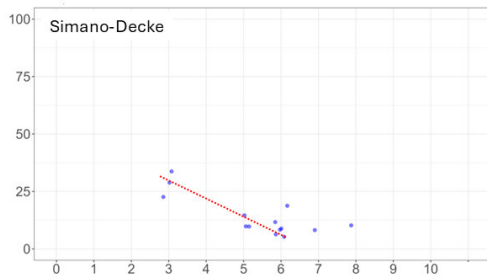
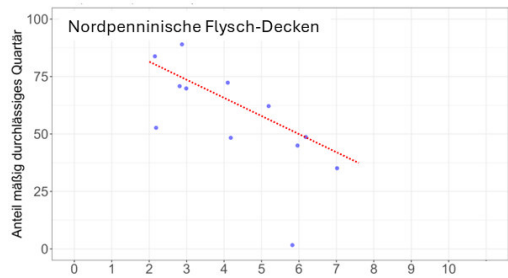
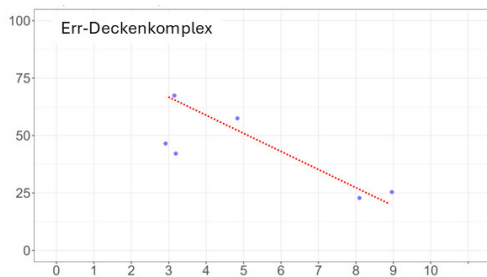
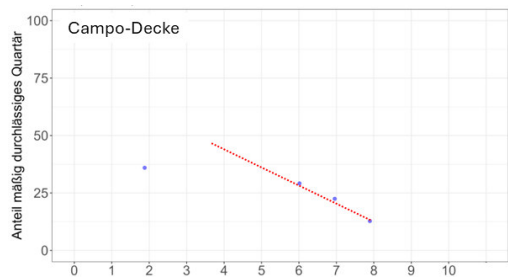
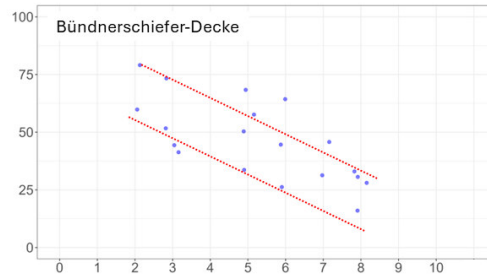
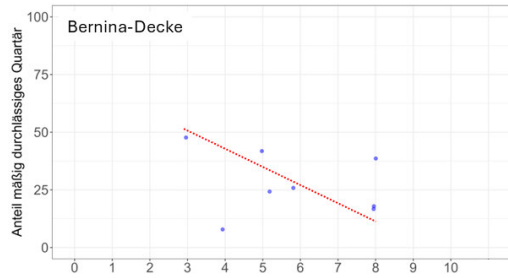
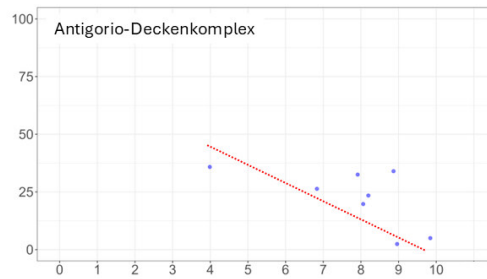
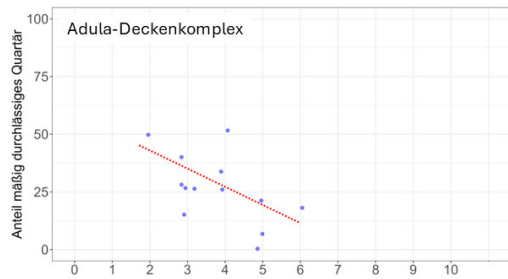


Abbildung 67: Einteilung der 213 in den Alpen und im Tessin untersuchten Einzugsgebiete in Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1 bis Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10 mit einer hohen Korrelation zwischen Q347 und Anteil an hoch durchlässigem Quartär. Die beiden grünen Punkte repräsentieren Einzugsgebiete, die keiner Gruppe zugewiesen wurden. Sie werden im weiteren Vorgehen nicht mehr berücksichtigt.

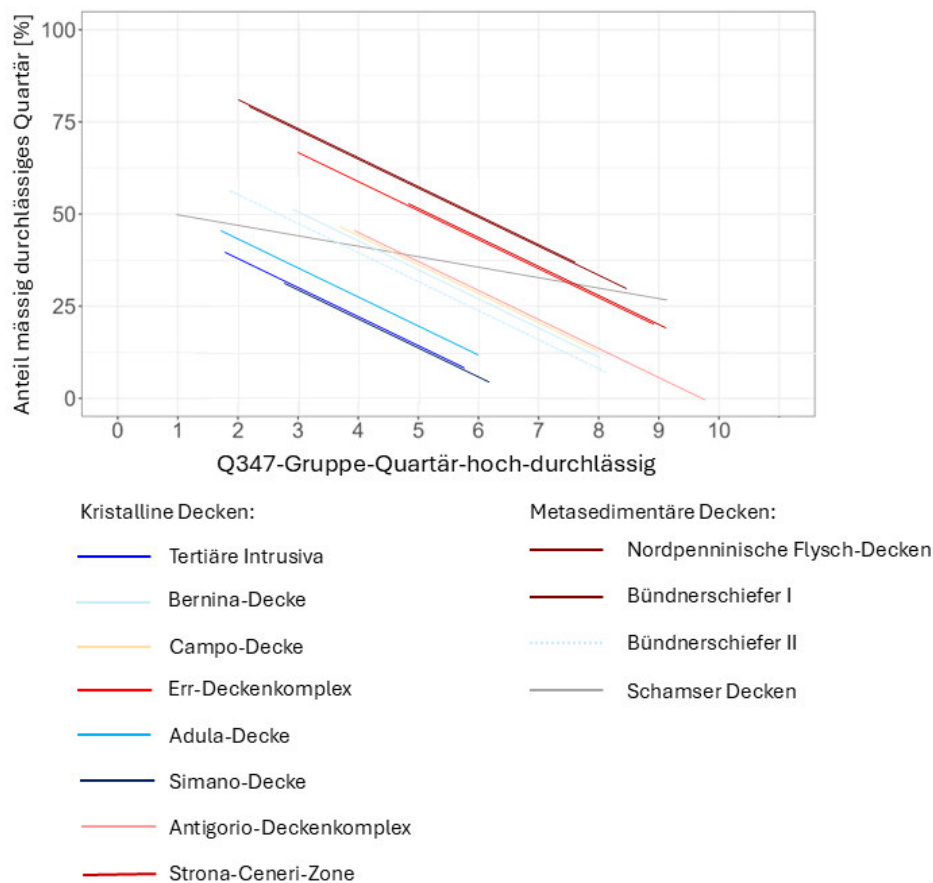


Q347-Gruppe-Quartär-hoch-durchlässig

Q347-Gruppe-Quartär-hoch-durchlässig

Abbildung 68: Zusammenhang zwischen dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär mit „Q347-Gruppen-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppen-Quartär-hochdurchlässig 10“ für 11 tektonische Einheiten. Bis auf die tektonische Einheit der Schamser Decke weisen die Trendlinien bei allen dargestellten tektonischen Einheiten dieselbe Steigung auf. Die Trendlinien wurden manuell eingesetzt.

3500



3501

3502 *Abbildung 69: Trendlinien zwischen dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär und „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 1“ bis*
 3503 *„Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 10“ für 11 tektonischen Einheiten.*

3504

3505 Für 9 weitere tektonische Einheiten, darunter das Aarmassiv, das Gotthardmassiv und die Silvretta-Decke, lässt
 3506 sich jedoch kein Zusammenhang zwischen dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär und „Q347-Gruppe-
 3507 hoch-durchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 10“ erkennen. Das wirkt auf den ersten Blick
 3508 widersprüchlich zur vorher beschriebenen Erkenntnis, kann aber durch weitere mögliche Einflussfaktoren erklärt
 3509 werden, die den oben beschriebenen Zusammenhang zwischen dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär
 3510 und „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 10“ überzeichnen. Diese
 3511 Einflussfaktoren werden in Kapitel (11.6.4 d) erklärt.

3512 Um für alle Einzugsgebiete den Effekt des mässig durchlässigen Quartärs auf „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 1“
 3513 bis „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 10“ zu ermitteln, wurde ein Plot für alle Einzugsgebiete erstellt, der den
 3514 Zusammenhang zwischen „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-hoch-durchlässig 10“ und dem
 3515 Anteil an mässig durchlässigem Quartär zeigt (Abbildung 70). Analog zu Abbildung 67 wurden die Punkte zu
 3516 ungefähr gleich grossen Gruppen zusammengefasst, die entlang von Trendlinien gleicher Steigung angeordnet
 3517 sind. Die Steigung der Trendlinien wurde aus Abbildung 68 übernommen. Nicht berücksichtigt wurden die
 3518 Schamser-Decke, die S-charl-Decke und die Platta-Decke, weil in denen Sedimente wie Kalke, Dolomite, Gipse
 3519 und Rauwacken dominieren. Das Entwässerungsverhalten scheint in diesen Decken im Vergleich zu den

kristallinen Decken weniger stark von den quartären Ablagerungen bestimmt zu werden; denn die Trendlinie der Schamser-Decke ist wesentlich flacher als die von kristallinen Gesteinen dominierten Decken (Abbildung 69). Die neu erstellten Gruppen werden als „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“ bezeichnet. Ein Einzugsgebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 2“ benötigt wesentlich mehr Anteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen als z.B. ein Gebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 9“, um in dieselbe Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig zu gelangen. In einem Einzugsgebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 9“ sind also mehr nicht-quartäre Q347-erhöhende Effekte vorhanden als in einem Einzugsgebiet der „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 2“.

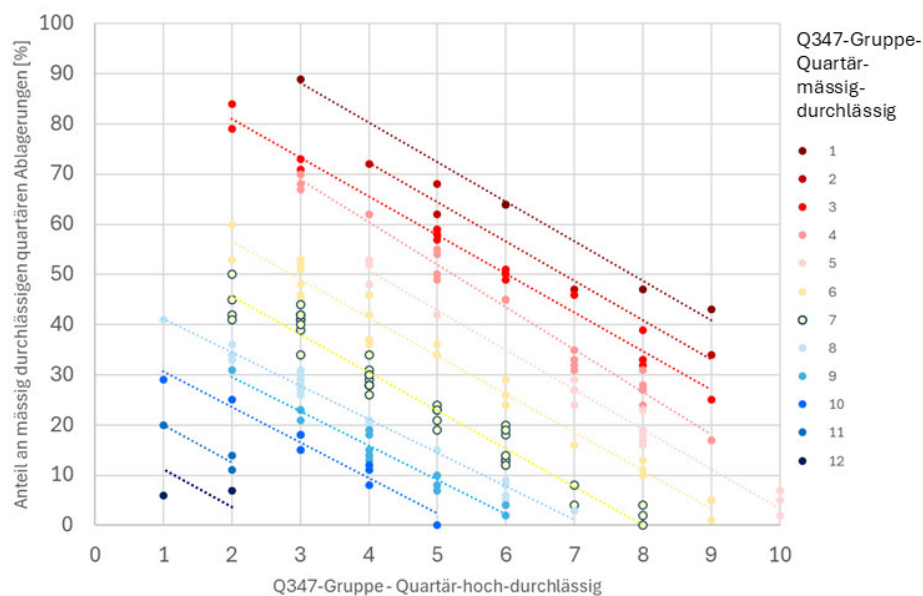


Abbildung 70: Plot, der den Zusammenhang zwischen der Zugehörigkeit zur „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ und dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär zeigt. Die Punkte wurden zu ungefähr gleich grossen Gruppen zusammengefasst, die sich entlang von Trendlinien ähnlicher Steigung anordnen. Die Steigung der Trendlinien wurde aus Abbildung 63 übernommen. Die 12 Gruppen, die so berechnet wurden, werden auch „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“ genannt.

d) Einfluss von nicht-quartären Faktoren

Mit dem angewendeten Denkmodell, das ein hybrider Auswertungsansatz darstellt, der eine manuelle Auswertung und die Verwendung von Regressionsmodellen kombiniert, wurde der Einfluss der Quartärablagerungen auf Q347 herausgefiltert. Aus dieser Auswertung resultiert die Streuung von „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 12“ innerhalb der verschiedenen tektonischen Einheiten in den Alpen und im Tessin (Abbildung 71). Eine tiefe Klasse der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig (braun oder rot) bedeutet demnach, dass neben den Quartärablagerungen wenig Q347-erhöhende Effekte vorhanden sind. Blau eingefärbte Punkte repräsentieren Einzugsgebiete, bei welchen mehr Q347-erhöhende Effekte wirken, die nicht durch Quartärablagerungen verursacht werden. Diese weiteren Faktoren werden auch als nicht-quartäre Einflussfaktoren bezeichnet. Sie werden weiter unten beschrieben.

Abgestuft in verschiedenen Farben sind im oberen Bereich der Abbildung die durchschnittlichen Jahresniederschläge jeder tektonischen Decke angegeben. Der Einfluss des mittleren Jahresniederschlags verhält sich teilweise widersprüchlich zum nicht-quartären Einfluss auf Q347. So fallen z.B. in den Einzugsgebieten der tektonischen Einheiten wie Antigorio-Deckenkomplex, Strona-Ceneri-Zone, Obere Orobische Zone vergleichsweise hohe mittlere Jahresniederschläge, der nicht-quartäre Einfluss wird aber als gering bis mittel eingestuft (Abbildung 71). Umgekehrt wurden in Gebieten der tektonischen Einheiten tertiäre Intrusiva, Silvretta-Decke, Adula-Deckenkomplex tiefe oder mittlere Jahresniederschläge registriert, der Einfluss von nicht-quartären Faktoren wird hingegen als mittel bis hoch ausgewiesen (Abbildung 71). Gemäss dieser Auswertung spielt der mittlere Jahresniederschlag somit eine untergeordnete Rolle fürs Q347. Jedoch hat der mittlere Jahresniederschlag einen Einfluss auf die Dauerkurveverläufe (Abbildung 8 in Kapitel 8.3.3).

Anhand von drei Einzugsgebieten wird im Folgenden aufgezeigt, wie die Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig bestimmt wird und wie anhand dieses Denkmodells der Einfluss der Quartärablagerungen auf Q347 herausgefiltert wird. Die drei Einzugsgebiete haben alle die gleichen Anteile an hochdurchlässigem Quartär, aber sehr unterschiedliche spezifische Q347-Abflüsse (Abbildung 72, oben links). Basierend auf dem dargestellten Klassifikationsschema werden die drei Einzugsgebiete in die drei Q347-Gruppen-Quartär-hochdurchlässig 2, 4 und 8 eingeteilt. Unten links in Abbildung 72 sind detaillierte Angaben zu den drei Einzugsgebieten aufgelistet. Basierend auf der Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig und dem Flächenanteil der mässig durchlässigen Quartärablagerungen wurden den drei Einzugsgebieten die Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3, 8 und 10 zugeteilt (Abbildung 72, oben rechts). Die Einzugsgebiete 1 und 2 weisen sehr ähnliche Flächenanteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen auf (vgl. Abbildung 72, unten links). Da sie auch gleich hohe Anteile an hochdurchlässigen Quartärablagerungen aufweisen, die Q347 aber sehr unterschiedlich sind, unterscheiden sich die Q347-Gruppen-Quartär-mässig-durchlässig dieser beiden Einzugsgebiete jedoch ziemlich stark (Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3 und Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 8, Abbildung 72, oben rechts). Die nicht-quartären Q347-erhöhenden Effekte sind demnach bei Einzugsgebiet 2 wesentlich grösser als bei Einzugsgebiet 1 (Abbildung 72, unten rechts). In Einzugsgebiet 3 ist der Flächenanteil an hochdurchlässigem Quartär ähnlich hoch wie bei den Einzugsgebieten 1 und 2 (Abbildung 72, oben links) und der Q347-Abfluss liegt ziemlich genau in der Mitte der beiden. Der Anteil an mässig durchlässigem Quartär beträgt jedoch nur ein Drittel von dem der Einzugsgebiete 1 und 2. Das bedeutet, dass der nicht-quartäre Effekt auf Q347 wesentlich höher ist als bei Einzugsgebiet 1 und auch etwas höher als bei Einzugsgebiet 2 (Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 10 im Vergleich zu Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3 und 8, Abbildung 72, oben rechts und unten rechts).

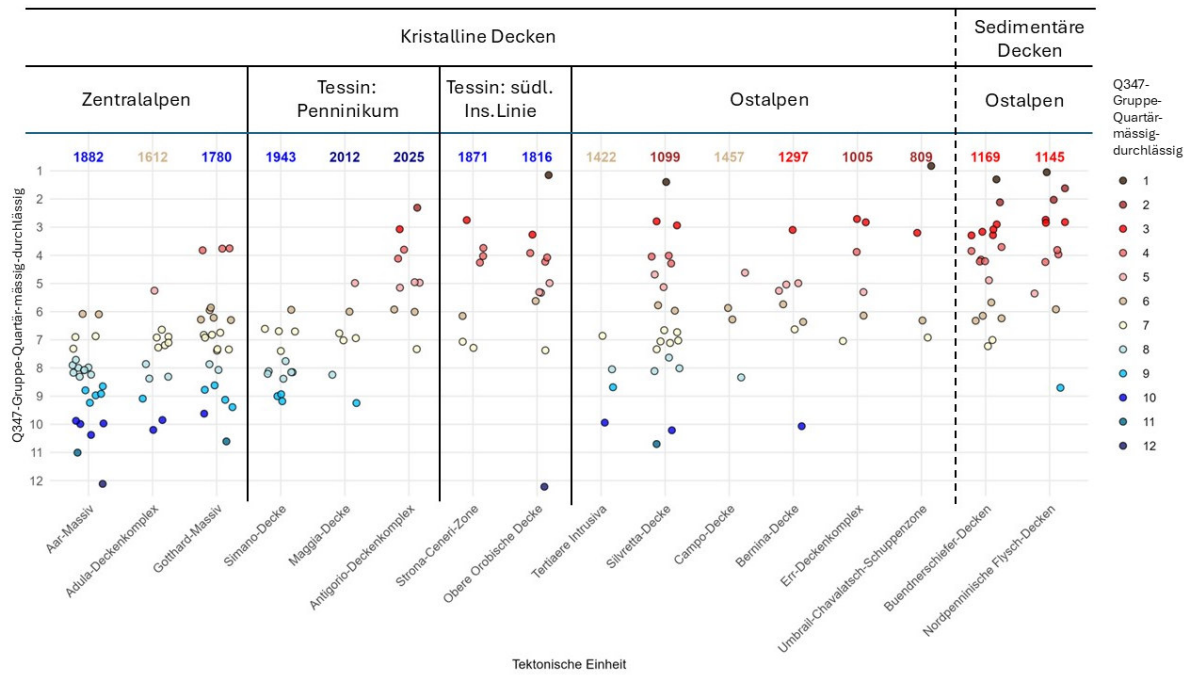
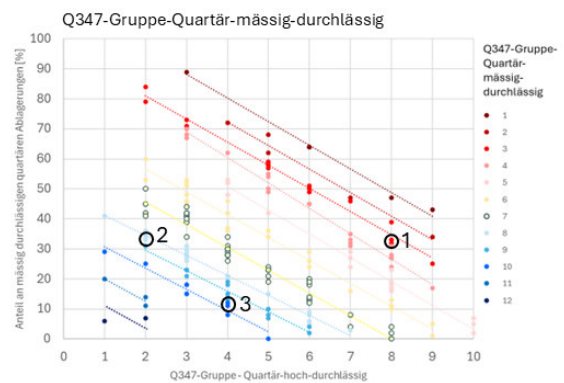
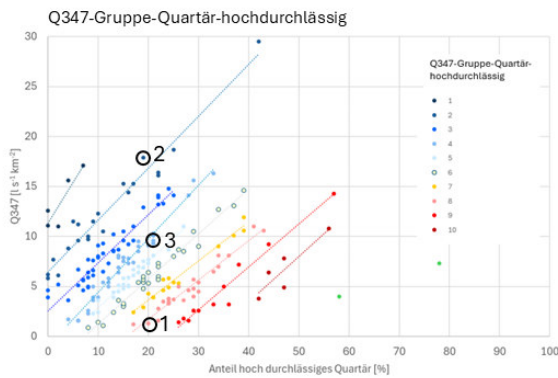


Abbildung 71: Streuung der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig innerhalb der tektonischen Einheiten für den Alpenraum und das Tessin. Die unterschiedlich eingefärbten Zahlen oberhalb der Punkte zeigen den mittleren Jahresniederschlag innerhalb der tektonischen Einheit.



Nr.	Id	Name	Q347 [l s ⁻¹ km ⁻²]	Anteil Quartär hochdurchlässig [%]	Anteil Quartär mässig durchlässig [%]	Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig
1	100	Eggatobelbach	1.3	20	33	3
2	15009	Poschiavino, Teilgebiet D	17.9	20	34	8
3	15076	Aua da Russein	9.1	20	11	10

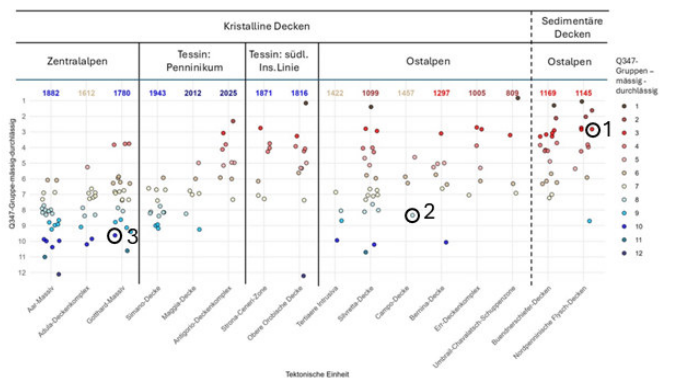


Abbildung 72: Bestimmung der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig, erklärt anhand von drei Beispielen.

Folgende nicht-quartäre Faktoren könnten die Streuung der „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“ erklären:

Speicher in den Festgesteinen:

- Einfluss der Gesteinstypen (11.6.4 b, Tabelle 23 in Kapitel 11.6.4 e)
- Einfluss von Klüften, Störungszonen und Deformationsgefügen (11.6.4 e).

Unsicherheiten in Kartierung und Klassifikation der Quartärablagerungen:

- Inkonsistente Kartierung der Quartärablagerungen zwischen den Kartenblättern des geologischen Atlas (11.6.4 e)
- Fehlende präzisere Informationen über die Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten der Quartärablagerungen (11.6.4 e)
- Heterogener Einfluss von Rutschungs- und Sackungsgebieten (11.6.4 e)

In Abbildung 73 wird eine Karte dargestellt, die die räumliche Verteilung der verschiedenen Q347-Gruppen-Quartär-mässig-durchlässig aufzeigt. Sie zeigt, wo im zentralen, östlichen und südlichen Alpenraum der Schweiz geringe, mittlere, hohe oder sehr hohe nicht-quartäre Einflussfaktoren auf Q347 wirken. In Abbildung 74 sind die tektonischen Einheiten mit den Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete dargestellt.

Gemäss Abbildung 73 ist der Einfluss der nicht-quartären Faktoren auf Q347 in den Zentralalpen als mittel bis hoch einzustufen. Im Aar-Massiv ist er tendenziell höher als im Gotthard-Massiv. Im Gotthard-Massiv variiert er stark. In den Ostalpen ist dieser Einfluss eher tief bis mittel. Tiefe Werte dominieren in Nord- und Mittelbünden (inklusive Safiental und Valsertal) und teilweise im Berninagebiet. Diese Gebiete werden vor allem durch die Nordpenninischen Flyschdecken, die Bündnerschiefer-Decken, die Err-Decke und Teile der Berninadecke repräsentiert. Mittlere Werte können im Unterengadin, im Puschlav und teilweise im Berninagebiet beobachtet werden (Silvretta-Decke, Teile der Bernina-Decke, Campodecke). Im Bergel sind die Einflüsse durch nicht-quartäre Faktoren mittel bis hoch (Tertiäre Intrusiva). Im Tessin sind mehrere Muster ersichtlich. Im Verzascatal und im östlichen Teil des Maggiatals ist der Einfluss nicht-quartärer Faktoren mittel bis hoch (Simano- und Maggia-Decke). Im östlichen Teil des Maggiatals und im Centovalli ist er eher tief (Antigorio-Deckenkomplex). Im Sotto-Ceneri ist der Einfluss nicht-quartärer Faktoren tief bis mittel (Strona-Ceneri-Zone und Obere Orobische Decke).

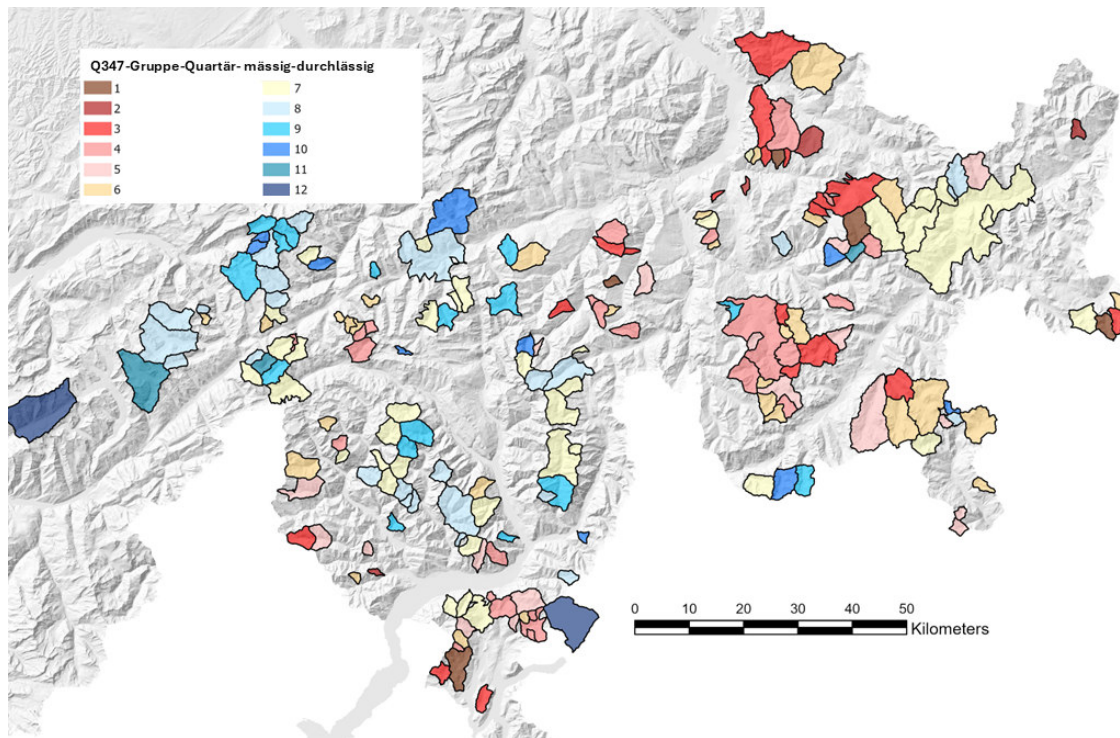


Abbildung 73: Karte der Q347-Gruppen-mässig-durchlässig für den zentralen und östlichen Alpenraum und für das Tessin. Sie stellen ein Mass für die nicht-quartären Q347-Einflussfaktoren dar.

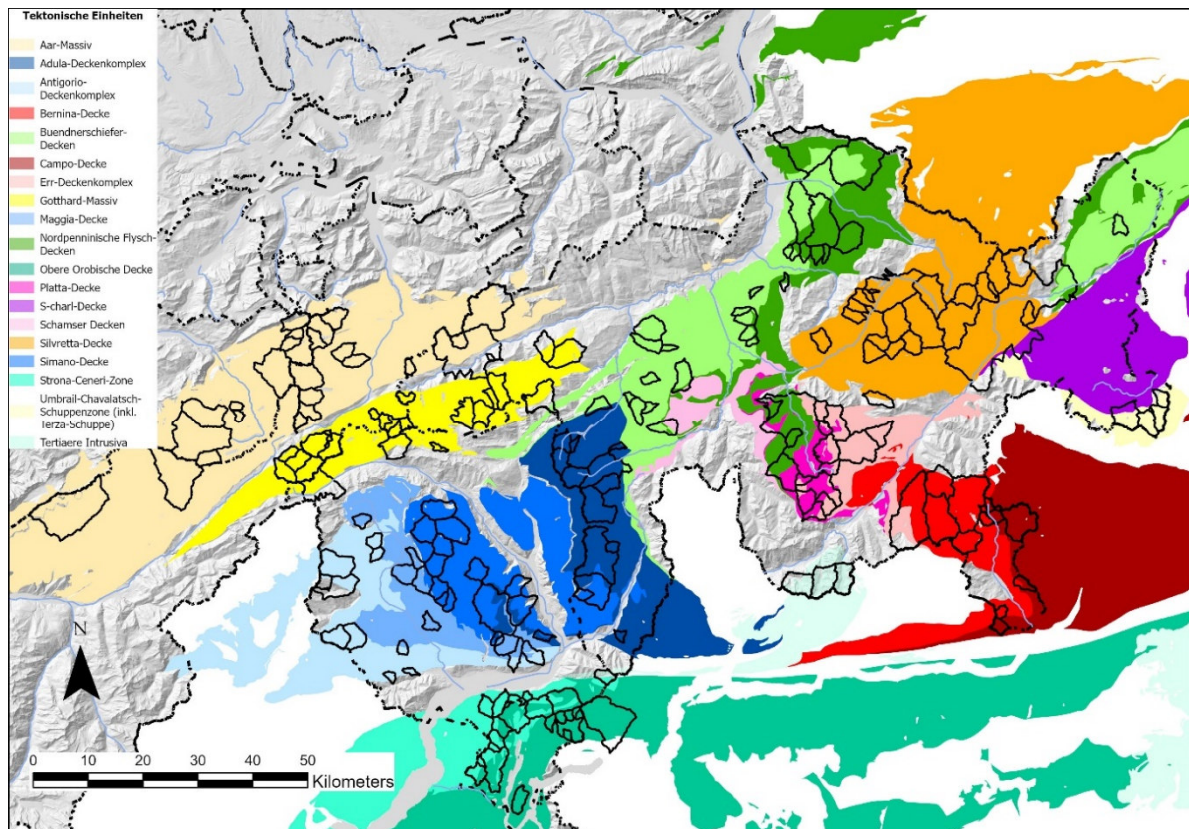


Abbildung 74: Tektonische Einheiten des zentralen, südlichen und östlichen Alpenraumes der Schweiz mit den Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete.

e) Physikalische Erklärung für die Muster der nicht-quartären Einflussfaktoren

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde eine Klassifikation der Festgesteinsspeicher erstellt, die zusammenfasst, welche Gesteinstypen und welche tektonischen Einheiten einen geringen, mittleren, grossen oder sehr grossen Einfluss auf Q347 aufweisen (Tabelle 23). Es werden Speicher unterschieden, die durch Lösungsprozesse (Verkarstung) und durch Kluftbildung entstehen.

Kalkhaltige Sedimentgesteine (Entstehung durch Lösungsprozesse):

Gemäss den Ergebnissen sind in Kalkgesteinen tendenziell mittlere, in Dolomiten hohe und in Rauwacken sehr hohe Q347 zu beobachten (Abbildung 64). Der Q347-erhöhende Einfluss lässt sich bei diesen Sedimentgesteinen durch die Gesteinstypen grob klassifizieren. Diese Unterschiede lassen sich durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung und Struktur von Kalkgesteinen, Dolomitgesteinen und Rauwacken erklären. Kalkgesteine bestehen vor allem aus Calcit und Aragonit (CaCO_3). Calcite sind stark löslich, wodurch in Kalksteinen grosse Hohlräume entstehen (Karst), die als Wasserspeicher fungieren. Diese Speicher entwässern rasch, sodass der Beitrag zum Q347-Abfluss im Vergleich zu Dolomit und Rauwacken geringer ist. Dolomite und Rauwacken bestehen aus Calcium und Magnesium $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Schlunegger und Garefalikis, 2024). Anders als beim Calcit ist Magnesium weniger gut löslich. Dadurch sind die speicherbildenden Hohlräume des Dolomits zwar kleiner als die des Kalksteins, sie entwässern aber auch weniger rasch. Das bewirkt, dass die Speicher in Dolomitgesteinen tendenziell stärker zum Q347-Abfluss beitragen als Speicher in Kalksteinen. Rauwacken haben eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie Dolomite, sie weisen aber eine porösere Struktur auf als diese (Richter, 1985). Die porösere Struktur verleiht dem Gestein ein Aussehen, das einem Schwamm ähnlich ist. Sie bewirkt eine markante Erhöhung der Kapazität an langsam entwässernden Speichern, die massgebend zum Q347 beitragen.

Kristalline Gesteine (Speicherung in Klüften):

In kristallinen Gesteinen wie zum Beispiel Graniten, Gneisen oder Glimmerschiefern wird das Wasser, das bei Q347 noch zum Abfluss beiträgt, in Klüften gespeichert. Wie die vorangehenden Kapitel gezeigt haben, sind es eher die tektonischen Eigenschaften, wie die Anzahl der Klüfte, und Störungszonen und das Gesteinsgefüge (spröde oder duktile Deformation) und nicht die Gesteinstypen, die in den kristallinen Gesteinen die Q347 massgebend beeinflussen.

Die Bildung der Klüfte hängt von der Elastizität des Gesteins und von komplexen tektonischen Prozessen während der Bildung der Alpen ab. In den Zentralalpen und im Tessin wurden während der Bildung der tektonischen Decken vor 30 Mio. Jahren die Gesteine der Penninischen Decken in die Tiefe abgesenkt. Während dieses Prozesses haben sich Schieferung und Gefüge gebildet. Unter den hohen Temperaturen und Drücken wurden Brüche und Klüfte geschlossen. Vor 20 bis 15 Mio. Jahren hat die Exhumationsphase eingesetzt. Die kristallinen Decken wurden an die Oberfläche gehoben. Während dieser Phase hat sich das Gestein abgekühlt. Bei Temperaturen unter 250°C fliessen Quarzbestandteile nicht mehr, weshalb Klüfte

nicht mehr verheilt wurden. Wie viele Klüfte gebildet wurden und wie gross diese sind, hängt von weiteren Faktoren ab, zum Beispiel wie elastisch das Gestein ist und welche tektonischen Kräfte bei der Exhumation gewirkt haben. Im Folgenden werden mögliche Erklärungen für die Verteilung der nicht-quartären Speicherkapazität beschrieben, die in Abbildung 73 beobachtet werden können.

Bündnerschiefer und Nordpenninische Flyschdecken:

Je mehr schiefrige Komponenten die Gesteine aufweisen, desto elastischer reagieren sie auf tektonische Spannung. Die Gesteine der Bündnerschiefer und Nordpenninischen Flyschdecken, die eher sedimentären Charakter aufweisen, sind so elastisch, dass die meisten Klüfte durch die tektonischen Kräfte bei der Exhumation des Gesteins an die Erdoberfläche durch Selbstabdichtung geschlossen wurden (mündliche Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Geologisches Institut der Universität Bern). Hinzu kommt, dass tonige Gesteine eine hohes Selbstabdichtungsvermögen aufweisen (mündliche Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Geologisches Institut der Universität Bern). Deshalb ist der Q347-erhöhende Einfluss in diesen Gesteinen nur gering bis mittel.

Zentralalpen (Aar-Massiv und Gotthard-Massiv):

Die hohe Kapazität an nicht-quartären Speichern in den Gesteinen des Aar-Massivs könnten auf die grosse Anzahl an vertikal verlaufenden Störungszonen zurückzuführen sein, die für das Aar-Massiv charakteristisch sind (Herwegh et al., 2017; Schlunegger und Kissling, 2022). Sie sind durch die Heraushebung des Aar-Massivs entstanden (Herwegh et al., 2017; Schlunegger und Kissling, 2022). Der Vertikale Verlauf ermöglicht eine Infiltration in grössere Tiefen, was die Speicherkapazität vergrössern dürfte. Im Gotthard-Massiv verlaufen die Störungszonen ebenfalls vertikal, ihre Anzahl ist aber geringer als im Aar-Massiv (Herwegh et al., 2017), was die geringere Kapazität der nicht-quartären Speicher im Gotthard- im Vergleich zum Aar-Massiv erklären könnte.

Nordtessin und Misox (Adula-Deckenkomplex, Simano-Decke, Maggia-Decke, Antigorio-Deckenkomplex):

Im Gegensatz zu den Zentralalpen liegen die kristallinen Decken, die die Tessiner Alpen aufbauen, waagrecht. Vertikal verlaufende Klüfte und Störungszonen sind deshalb vermutlich weniger häufig vor wie im Aar- und im Gotthard-Massiv (mündliche Mitteilung Prof. F. Schlunegger, s. auch Herwegh et al., 2017; Schlunegger und Kissling, 2022). Die Unterschiede der nicht-quartären Speicher zwischen Antigorio-Decken-Komplex (tiefe bis mittlere Speicherkapazität) und Maggia-Decke, Simano-Decke und Adula-Decke (mittlere bis hohe Speicherkapazität) lassen sich dadurch aber nicht erklären.

Auffällig ist, dass die mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen in den Kartenblätter 1271, 1272, 1273, 1292 und 1293, die grosse Teile der Maggia- und der Simano-Decke abdecken, weit weniger häufig vorkommen wie die in den Kartenblättern 1291, 1311, 1312, 1313 (Antigorio-Deckenkomplex) und in den Kartenblättern 1314, 1294 und 1274 (Adula-Decke) (vgl. auch 11.6.4 f, Abbildung 76 und Abbildung 74). Dies lässt den Verdacht aufkommen, dass die Quartärablagerungen in den

Kartenblättern unterschiedlich detailliert kartiert wurden. Das würde bedeuten, dass in der Maggia- und in der Simano-Decke die Anteile der mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen unterschätzt und dass die Speicher in den Gesteinen der Maggia- und Simano-Decke tatsächlich geringer sein dürften als in Abbildung 73 dargestellt wird.

Ein möglicher Grund für die höhere Speicherkapazität von Gesteinen des Aar- und Gotthard-Massivs gegenüber Gesteinen des Antigorio-Decken-Komplexes und Teilen der Maggia-Decke könnte die unterschiedliche Metamorphose-Fazies darstellen. Die Metamorphose-Fazies eines Gesteins zeigt an, wie tief dieses durch die Subduktion der afrikanischen Platte unter die europäische Platte abgesenkt wurde, was die Brüchigkeit der Gesteine massgeblich beeinflusste. Eine Karte der Metamorphose-Fazies (Bousquet et al., 2008) mit den Einzugsgebieten der Untersuchungsgebiete zeigt, dass sich die Einzugsgebiete im Antigorio-Deckenkomplex und in Teilen der Maggia-Decke in der Amphibolit-Fazies befinden (Abbildung 75 und Abbildung 74). Ihre Gesteine wurden bei ihrer Entstehung in Tiefen verfrachtet, wo sie Temperaturen von 500 bis 650°C ausgesetzt wurden (Bousquet et al., 2008). Die Einzugsgebiete des Aar- und Gotthard-Massivs befinden sich grösstenteils in Gesteinen, die eine obere Grünschiefer-Fazies erfahren haben. Ihre Gesteine wurden weniger tief ins Erdinnere transportiert, weshalb sie Temperaturen von maximal 400 bis 500°C erfahren haben (Bousquet et al., 2008). Aufgrund der etwas tieferen Temperaturen während der Metamorphose in Gesteinen der oberen Grünschiefer-Fazies sollen schon vor der Exhumation der Gesteine mehr Ansatzstellen für spröde Deformation vorhanden gewesen sein als in der Amphibolit-Fazies (Lützenkirchen, 2002; Merz, 1989). Deshalb sollen die Gesteine der oberen Grünschiefer-Fazies bei der Exhumation stärker spröde deformiert worden sein als Gesteine in der Amphibolit-Fazies (Lützenkirchen, 2002; Merz, 1989). Das heisst, dass sich in den Einzugsgebieten des Aar- und Gotthard-Massivs allein aufgrund der Metamorphose-Fazies mehr Klüfte gebildet haben sollen als im Antigorio- Deckenkomplex und in Teilen der Maggia-Decke. Die Gesteine der Simano-Decke und des südlichen Teils der Adula-Decke liegen im Übergangsbereich zwischen Amphibolit- und oberer Blauschiefer-Fazies, und die Gesteine des nördlichen Teils der Adula-Decke liegen im Übergangsbereich zwischen Amphibolit- und Granulit-Fazies. In beiden Fällen waren die Gesteine ebenfalls leicht niedrigeren maximalen Temperaturen ausgesetzt (500 bis 550°C) als bei der Amphibolit-Fazies. Folgt man der obigen Logik, würde das heissen, dass die Gesteine der Simano- und der Adula-Decke eine eher höhere Anfälligkeit auf spröde Deformation aufweisen würden als die Gesteinskörper im Antigorio- Deckenkomplexe und in Teilen der Maggia-Decke. Das könnte erklären, warum die nicht-quartäre Speicherkapazität der Einzugsgebiete der Simano- und der Adula-Decke etwas höher liegt als die des Antigorio- Deckenkomplexes und als die eines Teils der Maggia-Decke (Abbildung 73 und Abbildung 74). Diese Zusammenhänge müssen immer auch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die Vorkommen der Quartärablagerungen in der Maggia-Decke und in der Simano-Decke unterschätzt worden sein könnten.

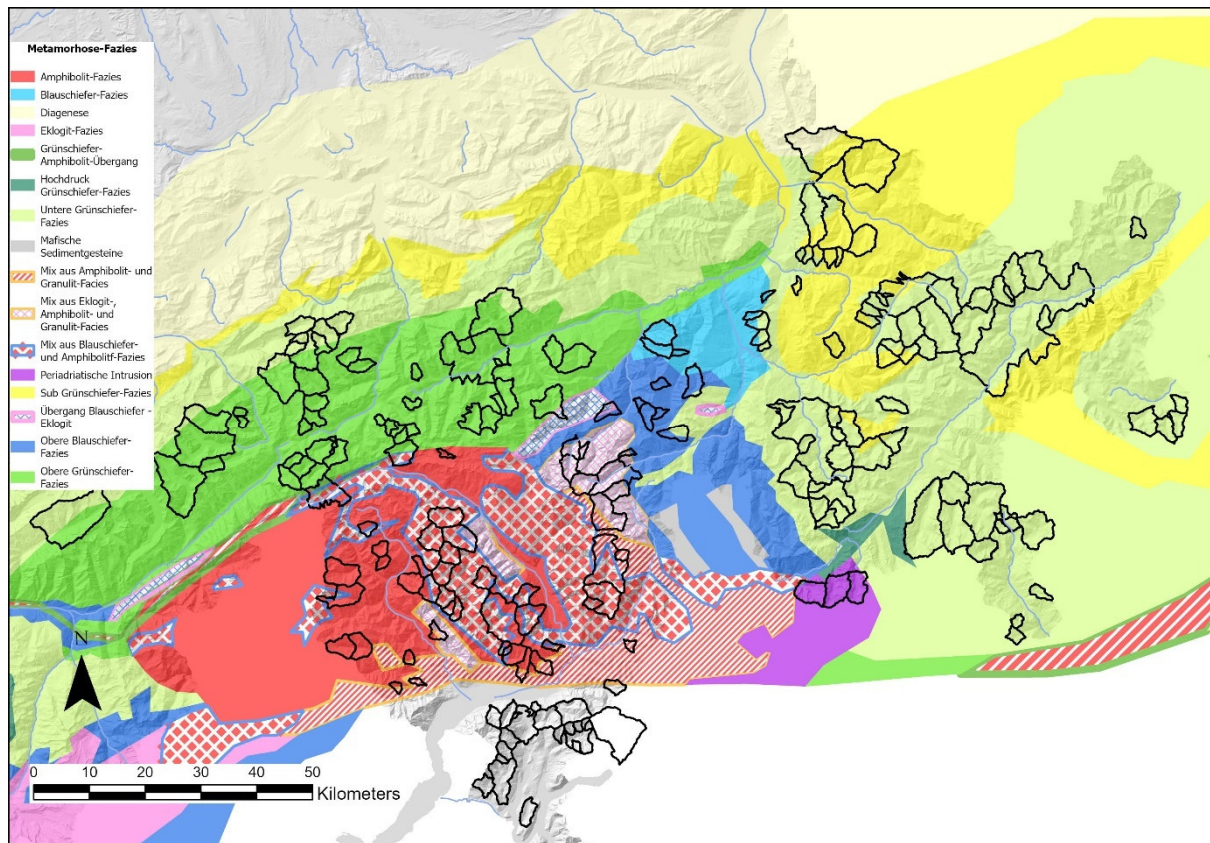


Abbildung 75: Karte der Metamorphose-Fazies des zentralen, südlichen und östlichen Alpenraumes der Schweiz mit den Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete.

Ostalpen (Err-, Bernina-, Silvretta-, Campo-Decke):

Auffallend sind die tieferen nicht-quartären Speicherkapazitäten in den Gesteinen der Ostalpen gegenüber den Zentralalpen. Dafür sind folgende Gründe denkbar:

- die Klüfte und Störungszonen in der Err-, Bernina-, Silvretta-Decke und Campo-Decke fallen weniger steil ein wie im Aar- und Gotthard-Massiv (Schmid et al., 1996).
- Klüfte und Störungszonen sind z.B. in der Bernina-Decke selten (Spillmann, 1993) und dürften im Vergleich mit dem Aar-Massiv weit weniger zahlreich auftreten. Tektonisch gehören die Err-, Bernina und die Silvretta-Decke zum Ostalpin (Schmid et al., 1996). Diese Decken wurden bei der alpinen Gebirgsbildung nicht in die Tiefe transportiert, sondern wurden über die Europäische Platte geschoben (Schmid et al., 1996). Dadurch wurde die Kollision vermieden und die die betreffenden Gesteine wurden wesentlich geringeren tektonischen Kräften ausgesetzt als z.B. im Aar-Massiv (gemäss mündlicher Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Universität Bern).

Bergeller Intrusion:

Im Bergell fallen die Klüfte und Störungszonen hingegen steil ein (Herwegh et al., 2017). Diese Einzugsgebiete liegen unmittelbar südlich der markanten Störungszone der Insubrischen Linie, wo eine starke vertikale Hebung der Gesteine erfolgte. Das könnte der Grund für die hohe Speicherkapazität dieser Gebiete sein.

3759 **Rutschungen und Sackungen:**

3760 Basierend auf den Auswertungen konnte beobachtet werden, dass manche Einzugsgebiete mit grossen
 3761 Sackungsgebieten hohe spezifische Q347-Abflüsse aufweisen (Beispiele: Calancasca, Buseno (Id = 15034);
 3762 Calancasca, Cauco (Id = 769); Frauentobelbach, Davos (Id = 660). Der Einfluss von Rutschungen dürfte jedoch
 3763 eher Q347-reduzierend sein. Das erscheint plausibel, weil oberflächennahe Rutschungen einen Hinweis dafür
 3764 liefern, dass keine Infiltration in tieferliegende Gesteinsschichten stattfindet. Versuche, den Einfluss von
 3765 Rutschungen und Sackungen auf Q347 im Rahmen der vorliegenden Arbeit detailliert zu untersuchen, wurden
 3766 abgebrochen. Der Grund dafür liegt darin, dass Rutschungen und Sackungen in den verschiedenen
 3767 Kartenblättern des geologischen Atlas inkonsistent kartiert wurden.

3768

3769 Die oben beschriebenen Gründe für die räumlichen Unterschiede der nicht-quartären Einflüsse auf den Q347-
 3770 Abfluss im Alpenraum (Abbildung 71 und Abbildung 73) liefern interessante Erklärungsansätze, die weiter
 3771 untersucht werden sollten. Um diese Einflüsse quantifizieren oder kartieren zu können, wäre eine detaillierte
 3772 und eine konsistente Kartierung der Quartärablagerungen und der Klüfte und der Deformationsgefüge
 3773 notwendig (mündliche Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Geologisches Institut der Universität Bern), was
 3774 allerdings mit einem grossen Aufwand verbunden wäre.

3775

3776 *Tabelle 23: Klassifikation der Festgesteinsspeicher mit geringem, mittlerem, hohem und sehr hohem Q347-erhöhenden Effekt.*

Klassifikation der Festgesteinsspeicher

Speicherbildung durch Lösungsprozesse		Speicherbildung durch Klüfte		
Gestein	Speicherkapazität	Tektonische Einheit	Speicherkapazität	Dominante Gesteine
Kalke	mittel	Aar-Massif	mittel - gross	Gr, Gn, schGn
Dolomite	gross	Adula-Deckenkomplex	mittel - gross	schGn, Gn
Gipse und Rauwacken	sehr gross	Gotthard-Massif	gering - gross	schGn, Gr, Gn,
		Silvretta-Decke	gering - gross	Gn, schGn, Amph, Gr
		Tertiäre Intrusiva	mittel	Gr, Gn, Amph
		Campo-Decke	mittel	Gn, schGn, Amph, Gr
		Simano-Decke	mittel	Gn, schGn, GS
		Maggia-Decke	mittel	Gn, (schGn)
		Antigorio-Deckenkomplex	gering - mittel	Gn, (schGn)
		Strona-Ceneri-Zone	gering - mittel	schGn, (Gn)
		Obere Orobische Decke	gering - mittel	schGn, (Gn)
		Bernina-Decke	gering - mittel	Gr, Gn, schGn
		Err-Deckenkomplex	gering - mittel	Gr, Gn, schGn, Do
		Umbrail-Chavalatsch-Schuppenzone	gering - mittel	schGn, Gn, Do, Ka
		Bündnerschiefer-Decke	gering - mittel	Sa, Me, TS
		Nordpenninische Flysch-Decke	gering - mittel	Sa, Me, TS

3777

Legende

Gr = Granite
 Gn = Gneise
 schGn = schiefrige Gneise
 Amph = Amphibolite
 Do = Dolomite
 Ka = Kalksteine
 TS = Tonschiefer

3778

3779 f) Unsicherheiten

3780 Das Ziel des oben beschriebenen Auswertungsansatz war, mögliche Zusammenhänge zwischen lithologischen
3781 und tektonischen Einzugsgebietsparametern mit dem Q347 zu erkennen. Es ist ein erster möglicher
3782 Erklärungsansatz, auf dem aufgebaut werden kann. Die gesamte Auswertung dazu, wie stark
3783 Quartärablagerungen das Q347 kontrollieren, ist mit Unsicherheiten verbunden. Diese erklären sich aus
3784 verschiedenen Aspekten:

3785

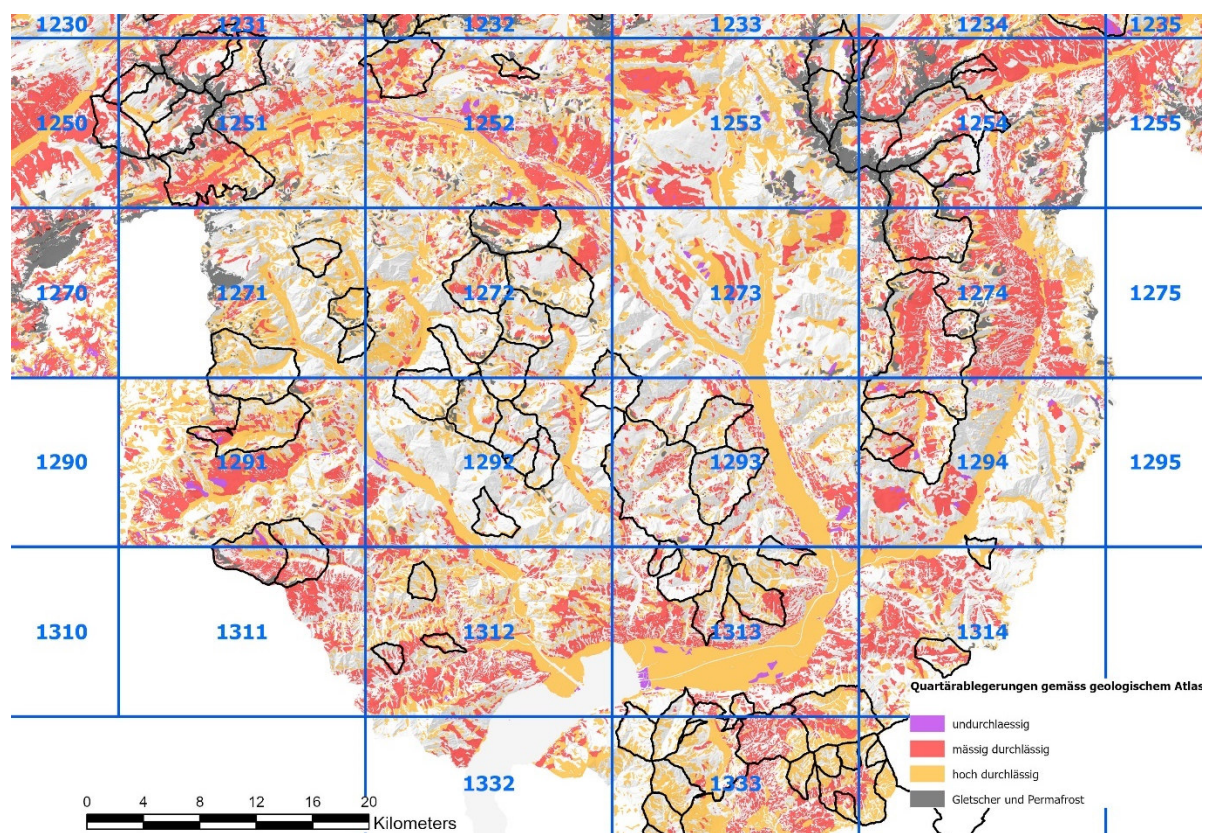
- 3786 - Inkonsistente Kartierungsmethode der quartären Ablagerungen zwischen den verschiedenen
3787 Kartenblättern
- 3788 - Fehlende Angaben über Mächtigkeit und Durchlässigkeit der verschiedenen Quartäreinheiten
- 3789 - Heterogener Einfluss von Rutschungs- und Sackungsgebieten

3790

3791 Abbildung 76 lässt vermuten, dass die quartären Ablagerungen in den Kartenblättern 1291 und 1312 der
3792 geologischen Karte der Schweiz detaillierter kartiert wurden als in den Kartenblättern 1292 oder 1271. Es
3793 scheinen auch die quartären Ablagerungen in Kartenblatt 1274 detaillierter kartiert worden zu sein als in
3794 Kartenblatt 1294 und 1273. In den Kartenblättern 1214 und 1234 wurden die quartären Ablagerungen ziemlich
3795 detailliert kartiert, in den Kartenblättern 1213 und 1233 hingegen eher nicht und in Kartenblatt 1232 eher wieder
3796 detaillierter (Abbildung 77). Beispiele wie diese sind zahlreich vorhanden, auch im Mittelland. Für Auswertungen
3797 bezüglich des Einflusses von Quartärablagerungen auf Niedrigwasserabflüsse ist die inkonsistente Kartierung
3798 des Quartärs ein grosses Problem, denn sie führen zu Verfälschungen in der Auswertung im Zusammenhang mit
3799 den für das Q347 massgebenden Speichern und könnten möglicherweise auch einige Ausreisser in Abbildung 68
3800 und die Streuung innerhalb der Klassifikation der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig in Abbildung 71
3801 erklären. Sie könnten auch der Grund dafür sein, dass bei gewissen tektonischen Einheiten der Einfluss des
3802 mässig durchlässigen Quartärs auf die Q347-Gruppe-Quartär-hoch-durchlässig nicht sichtbar wird. Es fällt zudem
3803 auf, dass dieselben Quartärablagerungen in unterschiedlichen Kartenblättern zum Teil unterschiedlich
3804 eingestuft wurden. Eine Quartäreinheit beispielsweise, die im Grenzbereich von zwei Kartenblättern liegt, wurde
3805 in einem der beiden Kartenblätter als Moräne (mässig durchlässig) und im benachbarten Kartenblatt als
3806 Hangschutt (hoch durchlässig) klassifiziert (Abbildung 78). Das Problem ist, dass der betreffende Unterschied der
3807 beiden Kartenblätter wahrscheinlich nicht nur in der einen beobachteten quartären Einheit besteht, sondern
3808 viele quartäre Einheiten zwischen den beiden Kartenblättern betreffen kann, weshalb die Inkonsistenz der
3809 Methoden ins Gewicht fällt. Die inkonsistente Kartierung der quartären Ablagerungen ist historisch bedingt. Die
3810 detaillierte Kartierung des Quartärs ist erst in den letzten Jahrzehnten aufgekommen (gemäss mündl. Aussage
3811 von Prof. F. Schlunegger, Uni Bern). Aufgrund dieser Beobachtungen wird eine Überprüfung der bestehenden
3812 und die Entwicklung einer einheitlichen Kartierungsmethode, die auch Angaben über Mächtigkeiten beinhaltet,
3813 dringend empfohlen.

3814 Es muss auch berücksichtigt werden, dass die geologische Karte Geocover (Swisstopo, 2022) für eine
3815 Verwendung im Massstab 1:25'000 gedacht ist. Es ist somit davon auszugehen, dass in kleinen Einzugsgebieten

3816 Unsicherheiten in der Kartierung der Quartärablagerungen noch stärker ins Gewicht fallen als bei mittel grossen
 3817 und grossen Einzugsgebieten.
 3818



3819
 3820 *Abbildung 76: Undurchlässige, mässig durchlässige und hoch durchlässige Quartärablagerungen im Tessin (Swisstopo, 2022).*

3821

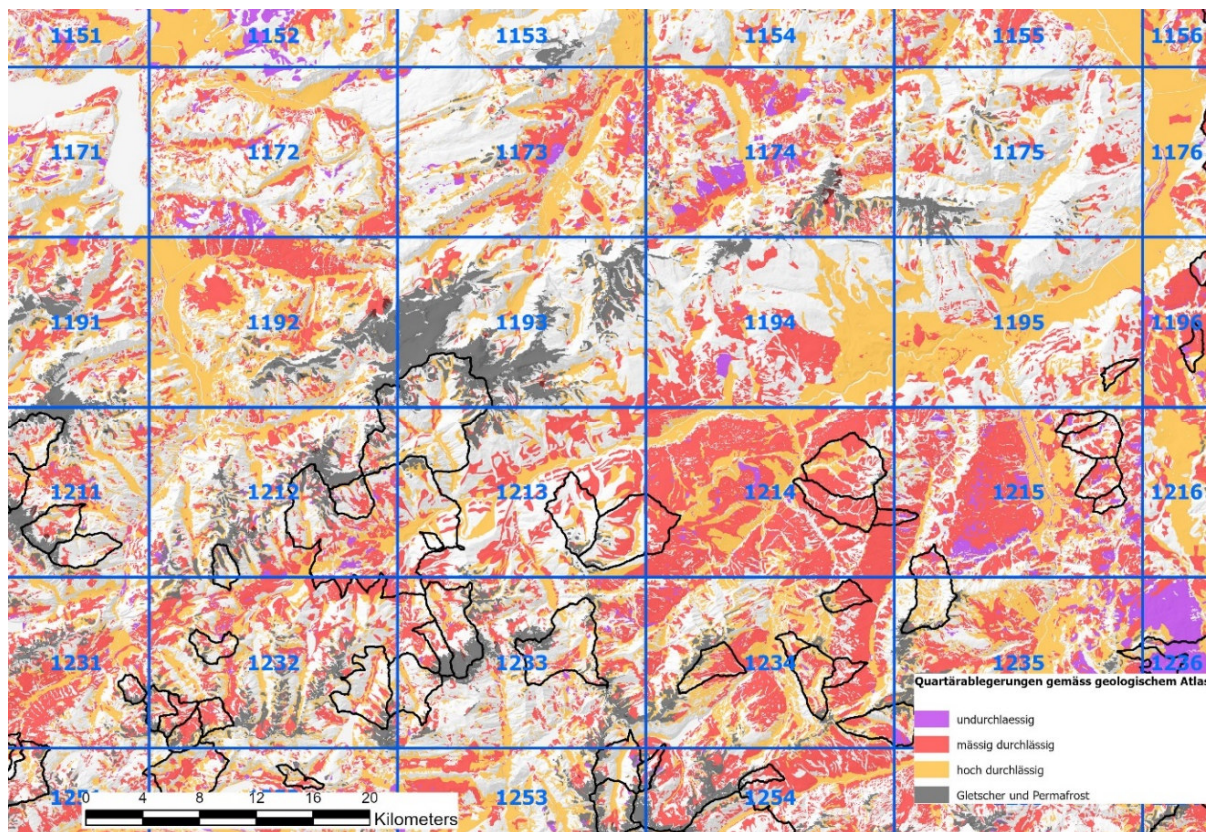


Abbildung 77: Undurchlässige, mässig durchlässige und hoch durchlässige Quartärablagerungen in der Surselva und im Gotthard-Gebiet (Swisstopo, 2022).

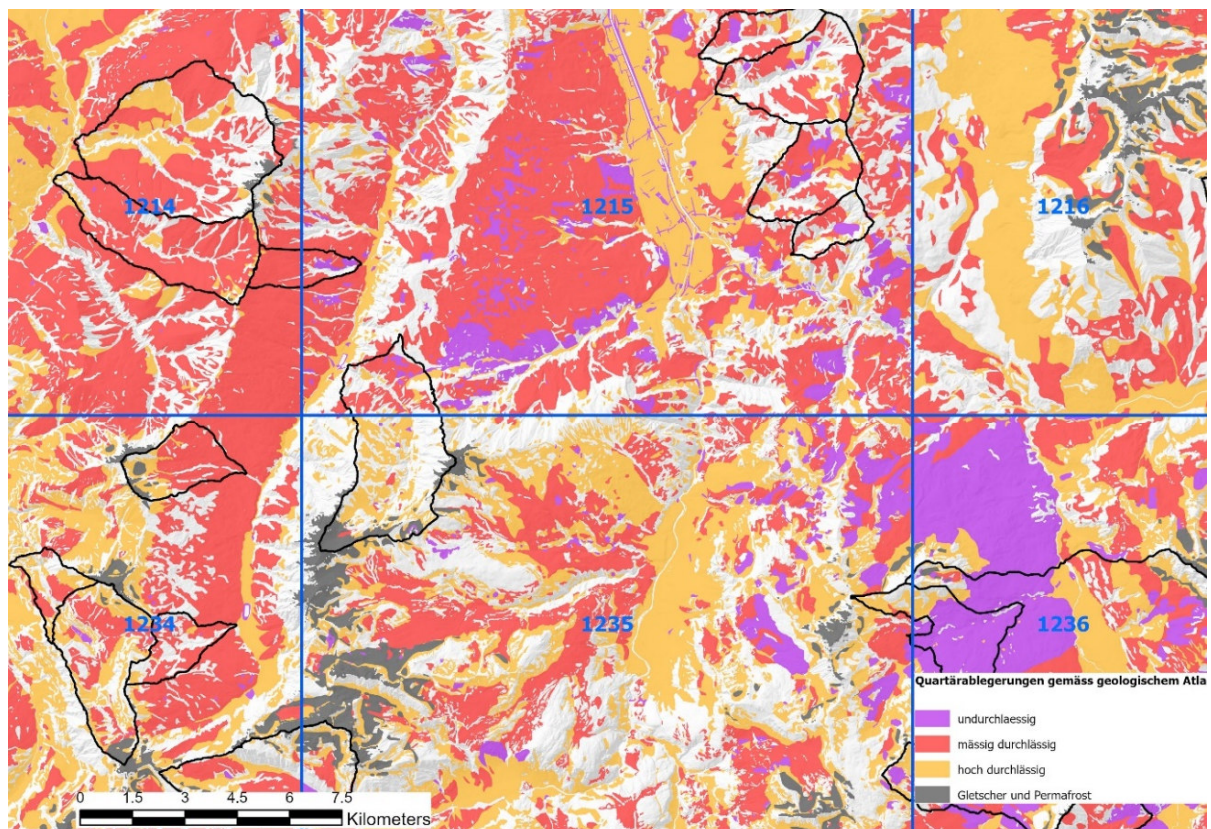


Abbildung 78: Beispiel für inkonsistente Klassifikation der Quartäreinheit im Grenzgebiet zweier Kartenblätter (Swisstopo, 2022).

11.6.5 Q347-Prognose mit Random Forest

Für alle 519 untersuchten Einzugsgebiete liegt ein Q347-Wert vor. Für die hier beschriebene Analyse wurde der spezifische Q347-Abfluss in $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ verwendet. Die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden wurden herausgerechnet, weil sie den Einfluss der unterschiedlichen lithologischen und tektonischen Eigenschaften verfälschen würden (vgl. Kapitel 6.4). Für die Einzugsgebiete Mittelland/Voralpen und Alpen/Tessin wurden unter der Mitarbeit des Machine-Learning-Spezialisten Dr. Konrad Bogner (WSL) je ein Random-Forest-Modell aufgesetzt, mit dem Ziel, das Q347 anhand der verfügbaren Inputdaten in ungemessenen Einzugsgebieten vorhersagen zu können. Random Forest ist ein Verfahren des überwachten maschinellen Lernens, das vor allem für Klassifikations- und Regressionsaufgaben eingesetzt wird. Es basiert auf dem Prinzip der Entscheidungsbäume, geht jedoch einen Schritt weiter, indem es eine Vielzahl solcher Bäume gleichzeitig verwendet, um die Genauigkeit und Robustheit der Vorhersagen zu erhöhen. Der verwendete Programmcode ist standardmässig in R verfügbar (Liaw und Wiener, 2003). Um die Test- und Validierungsgebiete zu trennen, wurde die Leave-one-out Cross-Validierung angewendet. Bei diesem Verfahren werden jeweils die Prädiktoren des prognostizierten Einzugsgebiets im Lerndatensatz weggelassen und nur die Prädiktoren der übrigen Einzugsgebiete verwendet. Insgesamt wurden 152 Prädiktoren im Gebiet Alpen/Tessin und 57 im Gebiet Mittelland/Voralpen verwendet. Die im Random-Forest-Modell verwendeten Prädiktoren sind in Tabelle 17 ersichtlich.

Im Gebiet Mittelland/Voralpen betrug die Abweichung zwischen dem prognostizierten und beobachteten Q347 in nur knapp über 50% der Einzugsgebiete weniger oder gleich viel wie 30% des beobachteten Q347. In den Alpen war dies in weniger als 50% der Einzugsgebiete der Fall. Die Abweichungen sind vor allem bei tiefen beobachteten Q347 hoch. Folgende Gründe für die tiefe Trefferquote werden vermutet:

- Im Verhältnis zu den beobachteten Werten wurden zu viele Prädiktoren verwendet. Eine Reduktion der Prädiktoren durch eine vorgängig durchgeführte Hauptkomponentenanalyse hat aber auch keine wesentliche Verbesserung gebracht. Deshalb wurde in diesem Projekt auf eine Weiterentwicklung des Modells verzichtet.
- Die quartären Ablagerungen in der geologischen Karte wurden zwischen den verschiedenen Kartenblättern inkonsistent kartiert. Es gibt Kartenblätter, in welchen die quartären Ablagerungen sehr detailliert kartiert wurden. In anderen Kartenblättern wurden diese aber nur sehr grob und rudimentär abgegrenzt (Kapitel 11.6.4 f)).
- Bei den kristallinen Decken werden die Q347-erhöhenden Effekte stark durch die Anzahl Klüfte und durch die Deformationsgefüge innerhalb der Klüfte beeinflusst (Kapitel 11.6.4 d)). Diese sind in den geologischen Karten nicht enthalten. Um eine verlässliche statistische Vorhersage von Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten durchführen zu können, fehlen entscheidende tektonische Informationen.

3865
3866
3867
3868
3869
3870
3871
3872
3873

- Die Q347 im Mittelland werden gemäss den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen durch die Feianteile in der Molasse und in der Moräne kontrolliert und können darüber hinaus durch weitere Faktoren wie Versickerungs- und Exfiltrationsstrecken sowie Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten stark beeinflusst werden. Da solche Informationen derzeit flächendeckend nicht im notwendigen Detaillierungsgrad verfügbar sind, ist mit einem solchen statistischen Prognoseverfahren eine exakte Bestimmung des Q347 ohne zusätzliche Abflusseinzelmessungen derzeit nicht möglich.

12 Einfluss des Klimawandels auf Q347

In allen Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes und der Voralpen ist der Q347-Abfluss (2011–2022) im Vergleich zum Q347-Abfluss (1991–2022) gesunken (Abbildung 79). In den Alpen hingegen ist er – mit Ausnahme von zwei Einzugsgebieten – gestiegen. Das Ausmass dieser Unterschiede variiert je nach Dauerkurvengruppe. Die stärksten Abnahmen wurden in der Dauerkurvengruppe OSM 3 beobachtet (–15 % bis –40 %). Etwas geringere Abnahmen traten bei Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppen OSM 1 (–15 % bis –25 %) und OSM 2 (–15 % bis –20 %) auf. Noch geringer waren die Abnahmen in Einzugsgebieten mit einem hohen Anteil an OMM oder Deckenschotter (typischerweise zwischen –5 % und –15 %). In Einzugsgebieten, die fast ausschliesslich aus OMM bestehen (Gruppe OMM), variieren die Abnahmen stärker (zwischen –3 % und –27 %). In den nördlichen Voralpen reichen die Q347-Abnahmen von 0 % bis –20 %, während sie in den Tessiner Voralpen zwischen +5 % und –25 % variieren. In alpinen Einzugsgebieten sind die Q347-Abflüsse hingegen leicht angestiegen. In den Einzugsgebieten der Gruppe Alpin 1 war der Anstieg etwas deutlicher (+5 % bis +15 %) als in der Gruppe Alpin 3 (–5 % bis +8 %) und Gruppe Alpin 2 (0 % bis +5 %).

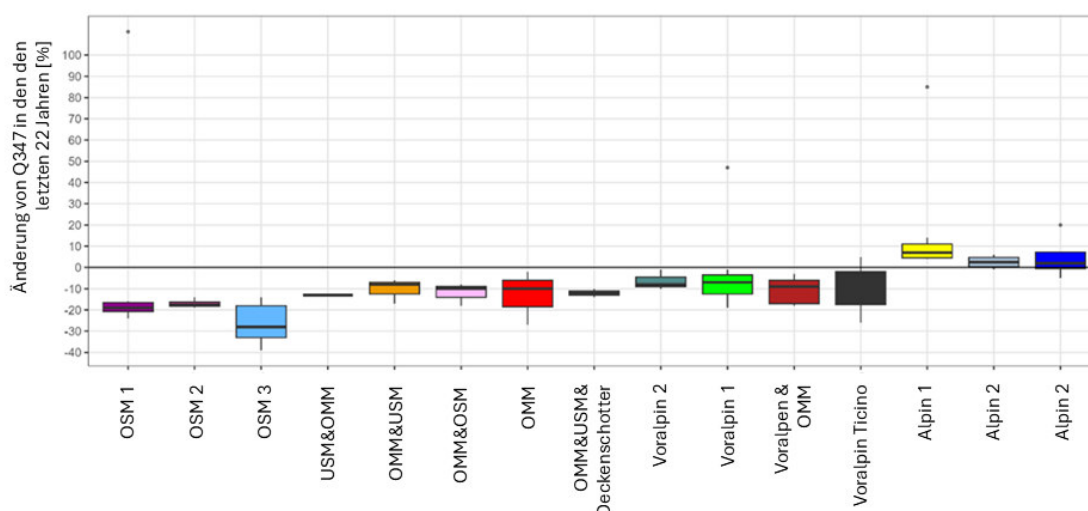


Abbildung 79: Differenz zwischen Q347 (2011 – 2022) und Q347 (1991 – 2022) in Prozent von Q347 (1991 – 2022) von verschiedenen Dauerkurvengruppen.

In 8 von 10 Dauerkurvengruppen im Mittelland und in den Voralpen zeigt sich eine Tendenz zu einer abnehmenden Q347-Differenz mit abnehmendem Q347-Abfluss (2011–2022) innerhalb derselben Dauerkurvengruppe (Abbildung 80). Innerhalb der Dauerkurvengruppe OSM 1 scheint es einen Ausreisser zu geben. In den Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppen OSM 2 und OSM 3 besteht nur ein geringer Zusammenhang. In den Voralpen und in Einzugsgebieten mit einem substantiellen Anteil an OMM ist der Zusammenhang jedoch deutlich erkennbar.

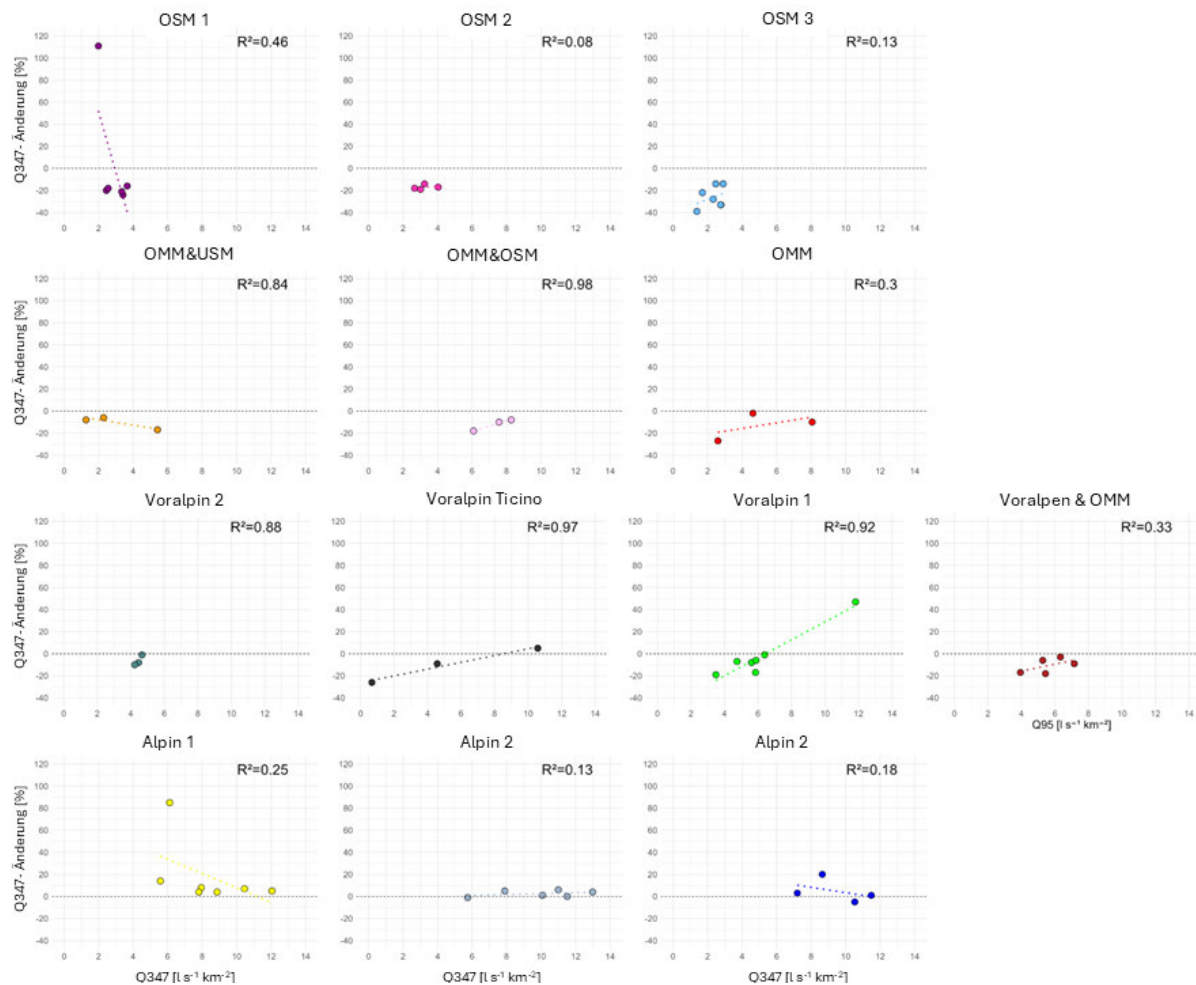


Abbildung 80: Änderung von Q347 zwischen der Periode 1991 bis 2022 und der Periode 2011 bis 2022 in Abhängigkeit von Q347 (2011 – 2022) für verschiedene Dauerkurvengruppen.

12.1 Interpretation

Die stärkste Abnahme des Q347 in den letzten 25 Jahren erfolgte in den Einzugsgebieten mit den geringsten Volumina an langsam entwässernden Speichern (Dauerkurvengruppe OSM 3, vgl. Abbildung 23, Kapitel 8.9.1 a)). Die Q347-Abnahmen in Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppe OSM 4 wären womöglich noch stärker. Für diese sind aber keine Messreihen seit 1991 verfügbar. Am anfälligsten auf ein abnehmendes Q347 ist also Einzugsgebiete mit geringen Volumina an langsam entwässernden Grundwasserspeichern. Deshalb sind Voralpengebiete und Einzugsgebiete der Gruppe OMM weniger anfällig. Da in den Voralpen 30 – 50% der Niedrigwassertage im Spätherbst und Winter stattfindet, kommt es dort möglicherweise zu mehr Einfluss von Schneeschmelze, weshalb das Q347 nicht so stark zurückgegangen ist wie in Einzugsgebieten im Mittelland. In den Alpen führten mildere Winter zu mehr Regenereignissen bis in grössere Höhenlagen und zu einer Verkürzung der Abflussrezession im Spätwinter, was in einem Anstieg des Q347 resultierte.

13 Schlussfolgerungen

13.1 Einfluss von Lithologie, Topographie und Klima auf Dauerkurven im Niedrigwasserbereich

Die Auswertung der korrigierten Abflussmessreihen für den Zeitraum 2011 bis 2022 zeigt, wie der litho-stratigraphische Aufbau, die mittlere Geländeneigung, die Flächenanteile des mässig durchlässigen Quartärs und der mittlere Jahresniederschlag die Beziehung zwischen dem Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich (Q290/Q347) in Abhängigkeit von Q347 beeinflussen (Kapitel 8). Untersucht wurden 102 Einzugsgebiete im Mittelland, in den Voralpen, den Alpen und im Tessin. Insgesamt zeigt sich bei einer Abnahme von Q347 von 17 auf $0.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ eine Zunahme des Dauerkurvengefälles (Q290/Q347) um den Faktor 3.75. Dieses Verhalten widerspiegelt das generelle Verhalten der Grundwasserspeicher. Die Entwässerung erfolgt rascher, je kleiner die Beiträge aus den tiefliegenden Grundwasserspeichern sind.

Im Mittelland nimmt das Dauerkurvengefälle in Gebieten mit Oberer Süsswassermolasse (OSM) und Unterer Süsswassermolasse (USM) deutlich stärker zu (Faktor 3) als in solchen mit Oberer Meeresmolasse (OMM, Faktor 1.15). Wie in Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind, sind die Dauerkurvengefälle von alpinen Einzugsgebieten geringer als die Dauerkurvengefälle von Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OSM oder USM aufgebaut sind. In den Alpen hängt die Beziehung zwischen Dauerkurvengefälle und Q347 nicht vom litho-stratigraphischen Aufbau, sondern vom mittleren Jahresniederschlag ab. Bei einer Reduktion von Q347 von 17 auf $4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ steigt das Gefälle der alpiner Dauerkurven bei geringen Jahresniederschlägen um den Faktor 1.2, bei hohen Jahresniederschlägen steigen die Dauerkurvengefälle nur geringfügig stärker an (Faktor 1.35). In den Voralpen der Alpennordseite steigen die Dauerkurvengefälle um den Faktor 1.65, im Tessin um den Faktor 1.8. Im Mittelland lässt sich das Verhalten des Dauerkurvengefälles in Abhängigkeit von Q347 für litho-stratigraphisch ähnlich aufgebaute Einzugsgebiete mit Potenzfunktionen beschreiben. In den Voralpen und Alpen ist dies bei Einzugsgebieten mit vergleichbarem mittlerem Jahresniederschlag der Fall. Einzugsgebiete mit ähnlichem Verhalten des Dauerkurvengefälles wurden zu Dauerkurvengruppen zusammengefasst. Basierend auf den Ergebnissen dieser Auswertungen wurde ein Regelwerk entwickelt, mit dem sich die Dauerkurvengruppen anhand von Einzugsgebietsparametern wie mittlerer Höhe, litho-stratigraphischem Aufbau, mittlerem Jahresniederschlag, mittlerer Geländeneigung und dem Anteil an mässig durchlässigen Quartärablagerungen bestimmen lassen.

Die steil abfallenden Dauerkurven von Einzugsgebieten, die aus OSM oder USM aufgebaut sind, rühren daher, dass die Abflüsse zwischen Q290 und Q347 stärker durch Beiträge von rasch entwässernden oberflächennahen Grundwasserspeichern gespeist werden als die entsprechenden Abflüsse von alpinen Einzugsgebieten oder Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind; denn die Beiträge der rasch entwässernden Grundwasserspeicher produzieren einen steileren Rückgang der Abflussganglinie als die der langsam entwässernden tief liegenden Grundwasserspeicher. Da die Niedrigwasserganglinien von OMM-dominierten

3950 Einzugsgebieten vor allem aus langsam entwässernden tief gelegenen Grundwasserspeichern gespeist werden,
3951 sind die Dauerkurvegefälle dieser Einzugsgebiete generell niedrig. Das unterschiedliche
3952 Entwässerungsverhalten lässt sich durch die höheren Anteile an feinkörnige Schichten wie Tonen und Silten in
3953 der OSM und USM gegenüber der OMM erklären. Sie reduzieren die Infiltrationskapazität der Molasse und der
3954 Moränen erheblich.

3955 Die Niedrigwasserganglinien ($Q < Q_{290}$) von alpinen Einzugsgebieten werden ebenfalls von Beiträgen aus
3956 langsam entwässernden Grundwasserspeichern dominiert. Das ist der Grund die geringen Unterschiede in den
3957 Dauerkurvegefällen. In den Alpen fallen die Niederschläge im Winter meist in Form von Schnee. Das führt zu
3958 langen Abflussrückgangphasen, in denen Beiträge aus rasch entwässernden Grundwasserspeichern selten
3959 auftreten.

3960 13.2 Einfluss von Wasserentnahmen, unterirdischen Abflüssen 3961 und Gletschern und Permafrostböden

3962 Verschiedene Faktoren können die Beziehung zwischen dem litho-stratigraphischen Aufbau und dem
3963 Niedrigwasserverhalten überzeichnen. Dazu gehören:

3964

- 3965 - Wasserentnahmen und die Wasserzufuhr aus fremden Einzugsgebieten
- 3966 - Unterirdische Abflüsse an Pegelstationen, die vom Pegel nicht aufgezeichnet werden
- 3967 - Unsicherheiten in den Messwerten der Abflussmessreihen
- 3968 - Einfluss von Gletschern und Permafrostböden

3969

3970 Mit verschiedenen zum Teil aufwendigen Verfahren wurde der Einfluss dieser vier Einflussfaktoren bestimmt
3971 und aus den Abflussmessreihen im Niedrigwasserbereich herausgerechnet (Kapitel 5). Besonders grossen
3972 Einfluss haben Wasserentnahmen und unterirdische Abflüsse. Im Verhältnis zum korrigierten Q_{347} betrug
3973 dieser:

- 3974 - in 16% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 30\%$,
- 3975 - in 33% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 20\%$,
- 3976 - in 45% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 10\%$ des korrigierten Q_{347} .

3977

3978 Hohe Flächenanteile an Gletschern und Permafrostböden reduzieren die Q_{347} gegenüber unvergletscherten
3979 und permafrostfreien Einzugsgebieten erheblich. Die Dauerkurvegefälle wären ohne die vorgängigen
3980 Korrekturen der Abflussmessreihen unterschiedlich ausgefallen.

13.3 Bestimmung von Q347, Dauerkurven und Rezessionskurven zwischen Q290 und Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde ein Verfahren entwickelt, um das Q347, die Niedrigwasserdauerkurve und die Niedrigwasserrezessionskurve von Einzugsgebieten im Mittelland, in den Voralpen, in den Alpen und im Tessin anhand von Abflusseinzelmessungen zu bestimmen (Kapitel 10). Im Mittelland zeigen Einzugsgebiete derselben Dauerkurvengruppe und mit ähnlich hohem Q347 ein vergleichbares Abflussverhalten bei Niedrigwasser (Kapitel 8.3 und 8.5). In den Alpen lässt sich ein ähnliches Niedrigwasser-Abflussverhalten zwischen Einzugsgebieten feststellen, die in vergleichbaren Klimaregionen liegen und ähnliche mittlere sowie minimale Höhen und Expositionen aufweisen.

Dies ermöglicht es, das Perzentil von Abflusseinzelmessungen in den Untersuchungsgebieten zu bestimmen, indem das zum Messzeitpunkt registrierte Perzentil eines benachbarten Referenzgebiets mit langjähriger Abflussmessreihe und ähnlichem Abflussverhalten auf das Untersuchungsgebiet übertragen wird.

Aus dem ermittelten Perzentil lässt sich mithilfe der Dauerkurvengruppe das Q347 und das Q290 ableiten (Kapitel 9.2), was die Bestimmung der Dauerkurve im Bereich zwischen Q290 und Q360 (Kapitel 9.4) ermöglicht.

Das Verfahren wurde in 22 Einzugsgebieten im Mittelland und in 99 alpinen Einzugsgebieten getestet. Von drei durchgeführten Abflusseinzelmessungen wurde jeweils eine zur Bestimmung des Q347 und die beiden anderen zur Überprüfung der ermittelten Dauerkurve verwendet. In einigen alpinen Einzugsgebieten stand nur eine Überprüfungsmessung zur Verfügung.

In den Testgebieten des Mittellands wich der gemessene Abfluss bei 84 % der Überprüfungsmessungen um 20 % oder weniger vom Abflusswert der Dauerkurve ab. Bei 93 % der Messungen betrug die Abweichung höchstens 30 %. In den alpinen Einzugsgebieten lagen 75 % der Abweichungen bei höchstens 20 % und 87 % bei höchstens 30 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich unter Verwendung dieses Verfahrens bei nur geringem Mehraufwand erhebliche Fehleinschätzungen des Q347-Abflusses vermeiden lassen.

Je besser der Messzeitpunkt gewählt wird, desto einfacher gestaltet sich die Auswahl geeigneter Referenzgebiete und desto zuverlässiger kann das Abflussperzentil der Abflusseinzelmessung bestimmt werden.

Für eine erfolgreiche Bestimmung von Q347 und der Dauerkurve sind folgende Vorarbeiten erforderlich:

- Ermittlung möglichst exakter Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete
- Zuordnung der Untersuchungsgebiete zu den entsprechenden Dauerkurvengruppen
- Auswahl von geeigneten Referenzgebieten
- Abschätzung der unterirdischen Abflüsse unterhalb der Messstandorte
- Erfassung von Wasserentnahmen oder -zugaben innerhalb der Untersuchungsgebiete.

13.4 Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren

Um die Faktoren und Speicher, die das Q347 massgeblich bestimmen, identifizieren und besser verstehen zu können, wurde ein Datensatz mit Abflusswerten aus Einzelmessungen, Kurzzeitmessungen und Langzeitmessungen aus insgesamt 519 Einzugsgebieten zusammengetragen und ausgewertet. Von diesen 519 Einzugsgebieten liegen 196 im Mittelland, 17 in den Voralpen der Alpennordseite, 47 in den Voralpen des Tessins und 259 in den Alpen. Die Daten stammen vom BAFU, von verschiedenen Kantonen, Gemeinden, Kraftwerksbetreibern, privaten Quellen sowie aus eigenen Abflussmesskampagnen. In 256 Einzugsgebieten führte M. Margreth mit Unterstützung von Mitarbeitenden der WSL eine bis drei Einzelmessungen bei Niedrigwasserverhältnissen durch. Für jedes Einzugsgebiet wurde ein Q347-Wert bestimmt. Je nach zeitlicher Auflösung der verfügbaren Messdaten kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz (Kapitel 11.2).

Der Zusammenhang zwischen Q347 und verschiedenen Einzugsgebietsparametern wie litho-stratigraphischer Aufbau, Anteile von hochdurchlässigen, mässig durchlässigen und undurchlässigen Quartärablagerungen, mittlere Geländeneigung, tektonische Einheiten (nur Alpen), Flächenanteile an Waldbedeckung, mittlerer Jahresniederschlag und Gerinnetichte wurde anhand Regressionsanalysen und Boxplots untersucht.

13.4.1 Mittelland und Voralpen

Die höchsten spezifischen Q347-Abflüsse im Mittelland wurden in der Oberen Meeresmolasse (OMM) des zentralen Mittellandes registriert ($4.9\text{--}12.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Deutlich niedriger sind die Q347 im westlichen Mittelland ($0.8\text{--}6.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In der OMM der Region um die Stadt Bern variieren die Q347 stark ($0.6\text{--}16.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$).

Diese regionalen Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Ablagerungsmilieus während der Sedimentation der Meeressedimente zurückführen: In wellendominierten Ablagerungsmilieus entstanden homogene Sandsteinschichten mit geringen Feinanteilen, die über hohe Speicherkapazitäten verfügen (zentrales Mittelland). In gezeitendominierten Ablagerungsmilieus wurden sandige, aber auch mehr feinkörnige Sedimente abgelagert, welche die Speicherkapazität reduzieren (westliches Mittelland). In der Region Bern sind beide Ablagerungsmilieus vertreten.

Die Q347 liegen mit $0.3\text{--}4.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in der Unteren Süsswassermolasse (USM) und $0.2\text{--}6.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) deutlich unter den Werten der OMM im zentralen Mittelland. Dies ist auf die höheren Feinanteile in der OSM und in der USM zurückzuführen, die die Infiltrations- und Speicherkapazität der Molasse erheblich reduzieren. In der OSM des Napfgebiets sind laut geologischer Karte die Feinanteile gering, was in höheren Q347 resultiert ($4.4\text{--}10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Auch das Vorkommen grosser Schotterablagerungen kann die Q347 geringfügig erhöhen. Gemäss den Ergebnissen von Regressionsanalysen haben auch hohe Anteile an undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen einen leicht Q347-senkenden Effekt. Diese beiden Effekte werden aber nur bei Einzugsgebieten mit geringen spezifischen Q347-Abflüssen sichtbar. Die grosse Streuung innerhalb der einzelnen Molasseformationen wird im Wesentlichen auf Unterschiede des Feinanteils innerhalb der Molasse und in den darüberliegenden Moränen verursacht. Aufgrund von

4049 Auswertungen der Unterschiede von saisonalen Masterrezessionskurven wird angenommen, dass auch die
4050 Evapotranspiration einen Q347-senkenden Effekt haben muss. Dieser Effekt konnte in den statistischen
4051 Auswertungen nicht identifiziert werden, weil die notwendigen Parameter fehlten. Er dürften aber in
4052 Einzugsgebieten mit geringen Q347 (OSM und USM) mehr ins Gewicht fallen als in solchen mit mittleren oder
4053 hohen Q347 (OMM).

4054 13.4.2 Alpen

4055 In den alpinen Einzugsgebieten liegt das durchschnittliche Q347 mit $7.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ fast doppelt so hoch wie im
4056 Mittelland ($4.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) und etwa anderthalbmal so hoch wie in den Voralpen ($5.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Ein Grund dafür
4057 ist, dass die alpinen Gebiete stärker durch die tektonischen Kräfte der Alpenfaltung beeinflusst wurden als die
4058 Gebiete im Mittelland und in den Voralpen. Durch die grössere Anzahl an Klüften wird die Wasserwegsamkeit
4059 im Festgestein erheblich erhöht. Ein weiterer Grund ist, dass Moränen in den Alpenregionen in der Regel
4060 durchlässiger sind als jene im Mittelland. Dies liegt daran, dass alpine Moränen mehr grobkörniges Material wie
4061 Kiese, Sande und Blöcke enthalten und weniger verdichtet wurden als Moränen im Mittelland.

4062 Das Q347 in den Alpen variiert zwischen 0.5 und $29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Diese Streuung ist hauptsächlich auf
4063 Unterschiede in den tektonischen Eigenschaften, den Gesteinstypen sowie den Quartärablagerungen
4064 zurückzuführen. In Einzugsgebieten, die zu mehr als 80 % aus demselben Gesteinstyp bestehen, wurde der
4065 Zusammenhang zwischen dem Gesteinstyp und dem Q347 untersucht. Die höchsten Q347-Werte wurden in
4066 porösen Sedimentgesteinen wie Rauwacken, Gipsen und Dolomiten beobachtet ($12 - 29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In diesen
4067 Gesteinen entstehen die langsam entwässernden Grundwasserspeicher durch Lösungsprozesse. Ihre
4068 Speicherkapazität ist grösser als jene der langsam entwässernden Speicher in Kalkgesteinen ($\text{Q347} = 5 -$
4069 $7.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), da die Poren in den Kalken grösser sind und deshalb schneller entwässern. In den
4070 Bündnerschiefern liegen die Q347 eher tief ($4 - 6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Diese Gesteine wurden nur geringfügig metamorph
4071 überprägt. Sie sind so weich, dass ihre Klüfte bei der Exhumation durch tektonische Kräfte verschlossen wurden,
4072 was die Speicherkapazität reduziert.

4073 Die Streuung der Q347-Werte in kristallinen Gesteinen wie Gneisen, Graniten und Glimmerschiefern ist gross (2
4074 $- 15 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Unter starker tektonischer Beanspruchung entstehen in den Graniten und Gneisen grössere
4075 Kluftsysteme, die die Wasserwegsamkeit erhöhen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei kristallinen Gesteinen
4076 die tektonischen Einheiten einen stärkeren Einfluss auf das Q347 haben als die Gesteinstypen. Anhand eines
4077 hybriden Auswertungsansatzes, in dem der Einfluss von Quartärablagerungen auf das Q347 mit Hilfe einer
4078 manuellen Auswertung und mit Hilfe von Regressionsanalysen herausgerechnet wurde, konnte der nicht-
4079 quartäre Einfluss auf Q347 ermittelt werden. Dieser besteht vor allem aus der Speicherkapazität des
4080 Festgesteins. Gross ist demnach die Speicherkapazität in den Gesteinen des Aar-Massivs. Mittel bis gross ist sie
4081 im Gotthard-Massiv, im Misox, im Verzasca- und Maggia-Tal, im Unterengadin, im Bergel und im Puschlav. Die
4082 Speicherkapazität der Gesteine in Nord- und Mittelbünden (Prättigau, Schanfigg, Domleschg, Safiental, Valsertal,
4083 Raum Davos, Oberhalbstein), in Teilen des Berninagebiets und im Südtessin ist nur gering bis mittel. In Kapitel
4084 11.6.4 e) werden mögliche Erklärungsansätze beschrieben, wie die beobachteten Muster mit den Prozessen der

Alpenfaltung zusammenhängen könnten. Es wird vermutet, dass das Muster der Festgesteinsspeicher vor allem auf Unterschiede in der tektonischen Beanspruchung, Unterschiede in der Ausrichtung und Häufigkeit von Klüften und Störungszonen und auf die Anfälligkeit auf spröde Deformation während der Heraushebung der Gesteine während der Alpenfaltung zurückgeführt werden kann.

Die Auswertungen sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden:

- Es bestehen grosse Unterschiede im Detaillierungsgrad der Kartierung der Quartärablagerungen zwischen den einzelnen Kartenblättern der geologischen Karte (GeoCover).
- Es fehlen Angaben über Mächtigkeit und Durchlässigkeit der verschiedenen Quartärablagerungen
- Der Einfluss von Rutschungs- und Sackungsgebieten kann erheblich sein. Aufgrund der inkonsistenten Kartierung war eine detaillierte Auswertung jedoch unmöglich.
- Die geologische Karte ist für die Verwendung im Massstab 1:25'000 gedacht. Deshalb wirken sich Unsicherheiten in der Kartierung der Quartärablagerungen auf die Abschätzung von Q347 in kleinen Einzugsgebieten stärker aus als in mittel grossen oder grossen Einzugsgebieten.

Die vorliegenden Ergebnisse sollen als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen. Um ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die massgeblichen Speicher und Faktoren im Alpenraum kartiert werden könnten, ist ein erheblicher Aufwand für Grundlagenforschung und für die Bereitstellung von weiteren Grundlagedaten erforderlich. Wichtige Grundlagen wären eine detaillierte und konsistente Kartierung der Quartärablagerungen mit Angaben zu Mächtigkeiten und eine konsistente Kartierung der Klüfte und Störungszonen und der Deformationsgefüge.

13.5 Einfluss des Klimawandels auf Q347

Vergleiche der Q347-Abflüsse, hergeleitet von den Messreihen 1991 bis 2011 mit solchen, hergeleitet von den Messreihen 2011 bis 2022 zeigen ein deutliches Klimasignal. Zwischen diesen Perioden sank der Q347- Abfluss der Einzugsgebiete von Mittelland und Voralpen um bis zu 40 %, wobei die stärksten Rückgänge in Mittelland-Einzugsgebieten zu verzeichnen waren, die aus OSM und USM aufgebaut sind. In diesen sind die Beiträge aus langsam entwässernden Grundwasserspeichern an die Niedrigwasserganglinie am kleinsten. Am stärksten betroffen waren die Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppe-Gruppe OSM 3. Sie weisen die niedrigsten Q347-Abflüsse unter den Untersuchungsgebieten auf. Die Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppe OMM und die Einzugsgebiete in den Voralpen waren weniger stark betroffen, weil sie eine grössere Kapazität an langsam entwässernden Grundwasserspeichern aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigte sich in alpinen Einzugsgebieten ein relativer Anstieg des Q347-Abflusses, was auf wärmere Winter, häufigere Niederschlagsereignisse mit einer Schneefallgrenze ab 2000 m. ü. M und eine frühere Schneeschmelze zurückzuführen ist, wodurch die winterlichen Trockenperioden verkürzt werden.

13.6 Ausblick

Diese Studie liefert detaillierte Einblicke in den Zusammenhang zwischen dem Niedrigwasserverhalten der Einzugsgebiete in der Schweiz und deren litho-stratigraphischen, tektonischen, topographischen und klimatologischen Eigenschaften. Diese Ergebnisse könnten die Entwicklung einer schweizweiten Karte ermöglichen, die Einzugsgebiete mit ähnlichen Q80/Q95-Mustern abgrenzt. Basierend auf einer solchen Karte liessen sich mit Hilfe von räumlich hoch aufgelösten Abflusseinzelmessungen und Abklärungen zu Wasserentnahmen und unterirdischen Abflüssen Q347-Abflüsse, Niedrigwasser-Dauerkurven und Niedrigwasser-Rezessionskurven für bisher unbekannte Einzugsgebiete mit grosser Genauigkeit ermitteln. Die Ergebnisse solcher Messkampagnen ermöglichen ein immer besseres Verständnis der Speicher und Faktoren, die die Abflüsse kleiner Q290 massgeblich kontrollieren. Dieses bessere Verständnis ermöglicht nicht nur die Entwicklung genauerer Q347-Abschätzverfahren, sondern auch die Entwicklung genauerer Niederschlags-Abfluss- und Wasserhaushaltsmodelle, was insbesondere in kleineren Einzugsgebieten deutliche Fortschritte bei der Niedrigwasservorhersage ermöglichen würde. Basierend auf solchen Messkampagnen lassen sich auch Versickerungs- und Exfiltrationsstrecken identifizieren und somit genauere Parameter für die Grundwassermodelle ermitteln. Die Ergebnisse erlauben zudem eine detaillierte Abschätzung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das zukünftige Niedrigwasserabflussverhalten kleiner Bäche und die Erstellung von detaillierten Karten zu den vorhandenen Trinkwasserreserven.

Referenzen

- 4140 Abteilung Umwelt des Kantons Aargau: Gewässerschutzkarte des Kantons Aargau, Kanton Aargau, 2025.
- 4141 AFU AG: Grundwasservorkommen Aargau, Amt für Umwelt Kanton Aargau, 2023.
- 4142 AFU AR: Grundwasserkarte Appenzell Ausserrhoden, Amt für Umwelt Appenzell Ausserrhoden, 2024.
- 4143 AFU TG: Grundwasserkarte Thurgau, Amt für Umwelt Kanton Thurgau, n.d.
- 4144 Aschwanden, H. und Kan, C.: Die Abflussmenge Q347 - Eine Standortbestimmung, Hydrol. Mitteilungen BAFU,
4145 27, 1999.
- 4146 AUE SZ: Grundwasserkarte Kanton Schwyz, Amt für Umwelt und Energie Schwyz, 2023.
- 4147 AWA BE: Grundwasservorkommen in Lockergestein Bern, Amt für Wasser und Abfall Kanton Bern, 2024.
- 4148 AWE SG: Grundwasservorkommen St. Gallen, Amt für Wasser und Energie St. Gallen, 2024.
- 4149 AWEL ZH: Grundwasservorkommen Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung
4150 Gewässerschutz, 2022.
- 4151 AWEL ZH: Das Phänomen der Tösswasserversickerung zwischen Turbenthal und Fischenthal. Informationstafel
4152 des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich AWEL., n.d.
- 4153 BAFU: Topographische Einzugsgebiete Schweizer Gewässer, 2024.
- 4154 Biaggi, D. und Teuscher, A.: Hydrogeologische Abklärung Luterbachrinne, Oberburg. Verkehrssanierung Burgdorf
4155 - Oberburg - Hasle., Geotechnisches Institut Bern, 2018.
- 4156 Bousquet, R., Oberhänsli, R., Goffé, B., Wiederkehr, M., Koller, F., Schmid, S. M., Schuster, R., Engi, M., Berger,
4157 A., and Martinotti, G.: Metamorphism of metasediments at the scale of an orogen: a key to the Tertiary
4158 geodynamic evolution of the Alps, Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 298, 393–411, <https://doi.org/10.1144/SP298.1>,
4159 2008.
- 4160 Brunner, M. I. und Tallaksen, L. M.: Proneness of European Catchments to Multiyear Streamflow Droughts,
4161 Water Resour. Res., 55, 8881–8894, <https://doi.org/10.1029/2019WR025903>, 2019.
- 4162 Brunner, M. I., Björnson Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., and Stähli, M.: Present and future
4163 water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes, Sci. Total Environ., 666,
4164 1033–1047, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>, 2019.
- 4165 Bundesamt für Landestopographie Swisstopo: Hydrologischer Atlas der Schweiz, 2002.
- 4166 Bundesamt für Landestopographie, Swisstopo: Vector25. Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz, 2007.
- 4167 Bundesamt für Umwelt BAFU: Restwasserkarte Schweiz, 2007.
- 4168 Bundesamt für Umwelt BAFU: Kläranlagendatenbank (ARA-DB) - Ausbaugrösse (EGW), 2014.
- 4169 Carlier, C., Wirth, S. B., Cochand, F., Hunkeler, D., and Brunner, P.: Geology controls streamflow dynamics, J.
4170 Hydrol., 566, 756–769, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.069>, 2018.
- 4171 Cuffey, K. M. und Paterson, W. S. B.: The Physics of Glaciers, 4th ed., Elsevier, 2006.

4172 Floriancic, M. G., Spies, D., Van Meerveld, I. H. J., and Molnar, P.: A multi-scale study of the dominant catchment
4173 characteristics impacting low-flow metrics, *Hydrol. Process.*, 36, e14462, <https://doi.org/10.1002/hyp.14462>,
4174 2022.

4175 FOEN: Effects of climate change on Swiss water bodies, Federal Office for the Environment FOEN, Bern, 2021.

4176 Freeze, R. A. und Cherry, J. A.: *Groundwater*, Prentice Hall, 1979.

4177 Freire-González, J., Decker, C., and Hall, J. W.: The Economic Impacts of Droughts: A Framework for Analysis,
4178 *Ecol. Econ.*, 132, 196–204, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.11.005>, 2017.

4179 Gander, P.: *Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süswassermolasse*, Nationale Genossenschaft für die
4180 Lagerung radioaktiver Abfälle NAGRA, 2004.

4181 Garefalakis, P. und Schlunegger, F.: Tectonic processes, variations in sediment flux, and eustatic sea level
4182 recorded by the 20 Myr old Burdigalian transgression in the Swiss Molasse basin, *Solid Earth*, 10, 2045–2072,
4183 <https://doi.org/10.5194/se-10-2045-2019>, 2019.

4184 Geologie Büro Jäckli: *Die Grundwasserverhältnisse im Embracher und Freiensteiner Grundwasserstrom.*
4185 *Untersuchung im Auftrag der Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Abteilung für*
4186 *Gewässerschutz und Wasserbau.*, 1980.

4187 Gobat, J.: *Berechnung des unterirdischen Abflusses an den HUG Messstellen – Bundesamt für Umwelt.* Firma
4188 Kellerhals & Haefeli AG, Geologen, Bern, 2020.

4189 Grab, M., Mattea, E., Bauder, A., Huss, M., Rabenstein, L., Hodel, E., Linsbauer, A., Langhammer, L., Schmid, L.,
4190 Church, G., Hellmann, S., Déléze, K., Schaer, P., Lathion, P., Farinotti, D., and Hansruedi, M.: Ice thickness
4191 distribution of all Swiss glaciers based on extended ground-penetrating radar data and glaciological modeling, *J.*
4192 *Glaciol.*, 67, <https://doi.org/10.1017/jog.2021.55>, 2021.

4193 Herwegh, M., Berger, A., Baumberger, R., Weherens, P., and Kissling, E.: Large-Scale Crustal-Block-Extrusion
4194 During Late Alpine Collision, *Sci. Rep.*, 7 : 413, <https://doi.org/DOL:10.1038/s41598-017-00440-0>, 2017.

4195 Hösli, L.: *Quantifying Basal Melt of Swiss Glaciers.*, Masterarbeit an der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH
4196 Zürich, 2024.

4197 Huss, M., Zemp, M., Joerg, P. C., and Salzmann, N.: High uncertainty in 21st century runoff projections from
4198 glacierized basins, *J. Hydrol.*, 510, 35–48, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.017>, 2013.

4199 Jansson, P., Hock, R., and Scheider, T.: The concept of glacier storage: a review, *J. Hydroogy*, 282, 116–129,
4200 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0), 2003.

4201 Joughin, I., Rignot, E., Rosanova, C. E., Lucchitta, B. K., and Bolander, J.: Timing of Recent Accelerations of Pine
4202 Island Glacier, Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 30, <https://doi.org/doi:10.1029/2003GL017609>, 2003, 2003.

4203 Karlsson, N. B., Solgaard, A. M., Mankoff, K. D., Gillet-Chaulet, F., MacGregor, J. A., Box, J. E., Citterio, M., Colgan,
4204 W. T., Larsen, S. H., Kjeldsen, K. K., Korsgaard, N. J., Benn, D. I., Hewitt, I. J., and Fausto, R. S.: A first constraint
4205 on basal melt-water production of the Greenland ice sheet, *Nat. Commun.*, 12, [https://doi.org/10.1038/s41467-](https://doi.org/10.1038/s41467-021-23739-z)
4206 [021-23739-z](https://doi.org/10.1038/s41467-021-23739-z), 2021.

4207 Kenner, R., Noetzli, J., Hölzle, M., Raetzo, H., and Phillips, M.: Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to
4208 map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps., *The Cryosphere*, 13,
4209 <https://doi.org/10.5194/tc-13-1925-2019>, 2019.

4210 Laaha, G. und Blöschl, G.: A national low flow estimation procedure for Austria, *Hydrol. Sci. J.*, 52, 625–644,
4211 <https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.625>, 2007.

- 4212 Labhart, T. P.: Geologie der Schweiz, Ott Verlag Thun, 201 pp., 1992.
- 4213 Leuch, C. und Vetsch, D.: Strömungsverhältnisse Abflussmessstation Dischmabach, Federal Office for the
4214 Environment FOEN, 2023.
- 4215 Liaw, A. und Wiener, M.: Classification and Regression by randomForest, 2003.
- 4216 Linsbauer, A., Huss, M., Hodel, E., Bauder, A., Fischer, M., Weidmann, Y., Baertschi, H., and Schassmann, E.: The
4217 New Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a Topographical to a Glaciological Dataset, Front. Earth Sci., 9,
4218 <https://doi.org/10.3389/feart.2021.704189>, 2021.
- 4219 Lützenkirchen, V. H.: Structural Geology and Hydrogeology of Brittle Fault Zones in the Central and Eastern
4220 Gotthard Massif, Switzerland. Dissertation, ETH Zürich, ETH Zürich, 245 pp., 2002.
- 4221 Margreth, M. und Kaderli, R.: Überprüfung von Winterabflüssen an alpinen Messstationen, Bundesamt für
4222 Umwelt BAFU, 2022.
- 4223 Margreth, M. and Naef, F.: Bestimmung des Q347 in ausgewählten Gebieten im zentralen Mittelland (Kt.
4224 Solothurn). Im Auftrag des Amts für Umwelt Kanton Solothurn, Amt für Umwelt Kanton Solothurn, 2017.
- 4225 Margreth, M., Lustenberger, F., Hug-Peter, D., Vetsch, D., and Schlunegger, F.: Applying recession models for
4226 low-flow prediction, n.d.
- 4227 Margreth, M., Zappa, M., Tallaksen, Lena Merete, Huss, M., Winkler, G., Vetsch, D., and Schlunegger, F.: Controls
4228 of lithology, topography, and climate on low –flow drainage patterns in Switzerland, n.d.
- 4229 Margreth, M. & Naef, F.: Überprüfung von Winterabflüssen an Alpinen Messstationen, Federal Office for the
4230 Environment FOEN, 2022.
- 4231 Mátyás, J.: Carbonate cements in the Tertiary sandstones of the Swiss Molasse basin: relevance to
4232 palaeohydrodynamic reconstruction, Spec Pubis Int Sediment, 26, 141–162, 1998.
- 4233 Medici, F. und Rybach, L.: Geothermal Map of Switzerland 1995, Geophys. Seris, 30, 1995.
- 4234 Merz, C. A.: L'intrusif Medel-Cristallina (massif du Gotthard oriental) Partie I: déformations alpines et relations
4235 socle-couverture., Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitteilungen, 69, 55–71, <https://doi.org/10.5169/seals-52776>,
4236 1989.
- 4237 Meteo Schweiz: Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products - Yearly mean of yearly sum precipitation
4238 from 1991 - 2020 (final analysis): RnormY9120, 2023.
- 4239 MeteoSwiss: Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products - Daily Precipitation (final analysis): RhiresD,
4240 2021.
- 4241 Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., and Martius, O.: River runoff in Switzerland in a
4242 changing climate – runoff regime changes and their time of emergence, Hydrol. Earth Syst. Sci., 25, 3071–3086,
4243 <https://doi.org/10.5194/hess-25-3071-2021>, 2021.
- 4244 Naef, F. und Margreth, M.: Niedrigwasser, Auswertung und Messung, Federal Office for the Environment FOEN,
4245 2017.
- 4246 Naef, F, Margreth, M., and Florianic, M. G.: Festlegung von Restwassermengen: Q347, eine entscheidende aber
4247 schwer zu fassende Grösse, Wasser Energ. Luft, 107. Jahrgang, Heft 4, 2015.
- 4248 Naef, F. & Margreth, M.: Interpretation von Dauerkurven bei Niedrigwasser, Federal Office for the Environment
4249 FOEN, 2018.

- 4250 Nagel, N., Margreth, M., Lustenberger, F., and Vetsch, D.: Winter discharge fluctuations due to ice formation in
4251 a Swiss alpine catchment, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 2025.
- 4252 Noetzli, J. und Pellet, C.: PERMOS 2024. Swiss Permafrost Bulletin 2023, Swiss Permafr. Monit. Netw. PERMOS,
4253 <https://doi.org/doi: 10.13093/permos-bull-24>, 2024.
- 4254 Platt, N. H. und Keller, B.: Distal alluvial deposits in a foreland basin setting-the Lower Freshwater Molasse (Lower
4255 Miocene), Switzerland: sedimentology, architecture and palaeosols, *Sedimentology*, 39, 545–565,
4256 <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1992.tb02136.x>, 1992.
- 4257 Richter, D.: Allgemeine Geologie, de Gruyter Verlag, Berlin- New York, 75 pp., 1985.
- 4258 Schaepli, B., Rinaldo, A., and Botter, G.: Analytic probability distributions for snow-dominated streamflow, *J.*
4259 *Hydrol.*, 49, 2701–2713, <https://doi.org/doi: 10.1002/wrcr.20234>, 2013.
- 4260 Schlunegger, F. und Garefalikis, P.: Einführung in die Sedimentologie, Schweizerbart, 2024.
- 4261 Schlunegger, F. und Kissling, E.: Slab Load Controls Beneath the Alps on the Source-to-Sink Sedimentary
4262 Pathways in the Molasse Basin, *Geosciences*, 12, <https://doi.org/10.3390/geosciences12060226>, 2022.
- 4263 Schmid, S. M., Pfiffner, O. A., Froitzheim, N., Schönborn, G., and Kissling, E.: Geophysical-geological transect and
4264 tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps, *Tectonics*, 15, 1036–1064, <https://doi.org/10.1029/96TC00433>,
4265 1996.
- 4266 Smakhtin, V. U.: Low flow hydrology: a review, *J. Hydrol.*, 240, 147–186, [https://doi.org/10.1016/S0022-](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
4267 [1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1), 2001.
- 4268 Spillmann, P.: Die Geologie des penninisch-ostalpinen Grenzbereichs im südlichen Berninagebirge. Doktorarbeit
4269 an der ETH Zürich, Eidg. technische Hochschule Zürich (ETH), 1993.
- 4270 Swisstopo: Geotechnische Karte der Schweiz, 1967.
- 4271 Swisstopo: swissALTI3D: Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz, 2019a.
- 4272 Swisstopo: Swiss-TLM3D, 2019b.
- 4273 Swisstopo: Geocover: geologische Karte der Schweiz, 2022.
- 4274 Tallaksen, L. M.: A review of baseflow recession analysis, *J. Hydrol.*, 165, 349–370, [https://doi.org/10.1016/0022-](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
4275 [1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R), 1995.
- 4276 van Tiel, M., Aubry-Wake, C., Somers, L., Andermann, C., Avanzi, F., Baraer, M., Chiogna, G., Daigre, C., Das, S.,
4277 Drenkhan, F., Farinotti, D., Catriona, L. F., de Graaf, I., Hanus, S., Immerzeel, W., Koch, F., McKenzie, J. M., Müller,
4278 T., Popp, A. L., Saidaliyeva, Z., Schaepli, B., Schilling, O. S., Teagai, K., Thornton, J. M., and Yapiyev, V.: Cryosphere–
4279 groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle, *Nat. Water*, 2, 624–636,
4280 <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8>, 2024.
- 4281 uwe LU: Grundwasserkarte Luzern, Dienststelle für Umwelt und Energie Luzern Luzern, 2023.
- 4282 Wagner, T., Kainz, S., and Winkler, G.: Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten
4283 der Ostalpen. Speicherverhalten, Abflusssdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt
4284 Schwermetallbelastungen, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus / BMNT, 2021.
- 4285 Wechsler, T., Lustenberger, F., Schaepli, B., Muelchi, R., and Zappa, M.: Verringert ein höherer Q347-Wert die
4286 Wasserkraftproduktion? Die schweizerischen Restwasserbestimmungen anhand von vier Laufkraftwerken.,
4287 *Wasser Energ. Luft*, 15, 13–18, 2023.

4288 Wirth, S., Carlier, C., Cochand, F., Hunkeler, D., and Brunner, P.: Lithological and Tectonic Control on
4289 Groundwater Contribution to Stream Discharge During Low-Flow Conditions, *Water*, 12, 821,
4290 <https://doi.org/10.3390/w12030821>, 2020.

4291 Zekollari, H., Huss, M., and Farinotti, D.: On the Imbalance and Response Time of Glaciers in the European Alps,
4292 *Geophysical Res. Lett.*, 47, [https://doi.org/ 10.1029/2019GL085578](https://doi.org/10.1029/2019GL085578), 2020.

4293

4294

Tabelle A1 – Teil 1: Liste der in der Studie betrachteten Messstandorte.

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungs- methode	Verfü- barkeit Q347	Verfü- barkeit Daten	Quelle
3	Bodorta		2701422.5	1134337.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
9	di di Sera ob Fassung		2690112.5	1140352.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
21	Bach Bosco Gurin	ob Dorf	2680757.5	1130302.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
22	Bach Bosco Gurin	Skiffl	2680597.5	1129882.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
37	Flon	Oron La Ville	2552797.5	1157762.5	Oron	Vaud	Kt VD	Langzeitmessreihe	OK	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
49	Grenet	Pigeon	2548857.5	1153002.5	Forel (Lavaux)	Vaud	Kt VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
62	bach aus Eggentobel	Pilgesteg	2709912.5	1236512.5	Ruti (ZH)	Zürich	Kt ZH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
100	Bach aus Eggentobel		2759677.5	1183982.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
101	Spinabach	Malix	2759687.5	1185912.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
103	Bach Valtischiel	unter Bruecke Strasse	2750282.5	1166477.5	Muntogna da Schons	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
105	Bach Val Larisch	vor Zufluss ob Bruecke	2750117.5	1166402.5	Muntogna da Schons	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
106	Bach Alp Nursin		2748347.5	1166382.5	Muntogna da Schons	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
107	Bach Alp Tumpriv		2748347.5	1166352.5	Muntogna da Schons	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
108	Plattler	Standort 2020	2752417.5	1168182.5	Muntogna da Schons	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
112	Tambobach	ob Fassung	2743107.5	1155072.5	Rheinwald	Graubünden	Alpiq	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Alpiq Ecopower Schweiz AG (2009)
128	Zavragia	ob Fassung Salferi Platz	2743787.5	1171307.5	Tschappina	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
129	Petersbach	Obersaxen	2740892.5	1168292.5	Salferital	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
117	Furattelbach	ob Salferi Platz	2743217.5	1171707.5	Salferital	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
121	Bach Val di Riein		2736072.5	1177907.5	Ilanz/Glion	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
122	Bach Val Pitasch		2735407.5	1176757.5	Ilanz/Glion	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
123	Bach Val Gonda	Vella	2732857.5	1175337.5	Lumnezia	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
124	Bach Val Medria	Rumein	2731842.5	1174632.5	Lumnezia	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
125	Bach Ruinatscha		2713182.5	1175222.5	Sumvitg	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
127	Bach Val Gronda		2709067.5	1173147.5	Disentis/Mustér	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
128	Zavragia	ob Zavragia	2718782.5	1177377.5	Trun	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
140	Bertigbach	ob Fassung	2782397.5	1181347.5	Davos	Graubünden	WSL	Kurzelmessung	EM	ja	nein	AXPO Surselva
142	Ducanbach	unterhalb Wasserfall	2784572.5	1179567.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
143	Schiabach	Davos Dorf	2782632.5	1186537.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
144	Aua da Saglins	Tobel ob Tunnelportal	2802502.5	1182647.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
145	Bach vom Val Glims (Aua da Linard)		2802052.5	1183302.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
146	Aua da Nuna	ob SuotCologna	2808057.5	1182752.5	Sculi	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
147	Talent	Chavornay	2532742.5	1172947.5	Chavornay	Vaud	Kt VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
148	Bach Val Zuort	Tobel ob Tarasp	2815422.5	1183807.5	Sculi	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
149	Aua da Plavina	P1520 unterhalb Bruecke	2814457.5	1182897.5	Sculi	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
150	Cartigbach	Malen Dorf	2685052.5	1175117.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
152	Meinereuss	ob Güterplatten	2678777.5	1177197.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
154	Goreztmettenbach	ob Bruecke	2681762.5	1177537.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
155	Tiefenbach	unter Brücke Passstrasse	2678037.5	1160752.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
156	Sidelenbach	Brücke Passstrasse	2676197.5	1160112.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
157	Muttereuss	Brücke 1835	2680507.5	1158207.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
159	Wittenwasserneuss	Höhenbiet	2661132.5	1158497.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
161	Moesa	Schlucht P1770	2733502.5	1148582.5	Mesocco	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
162	Reepierbach	ob Fassung	2734767.5	1155822.5	Rheinwald	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
163	Bach aus Wangibet	vor Zufluss Reepierbach	2734807.5	1155847.5	Rheinwald	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
167	Rein Cristallina	L1580	2707492.5	1164337.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
172	Rein da Fuorns	ob Fuorns	2780552.5	1166257.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
178	Rein da Tuma		2695617.5	1166172.5	Tujetsch	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
179	Ri di Fontanalba		2735422.5	1149137.5	Mesocco	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
181	Hinterrein	Zapportstafel - Hoell	2727972.5	1150912.5	Rheinwald	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
185	St. Annabach	P2040	2688327.5	1163122.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
186	Safallenwasser	P2160	2692007.5	1160357.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
188	Unterlappreuss	Brücke	2693522.5	1161232.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
190	Unterlappreuss	unter P2039	2693417.5	1160792.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
191	Murinaschia Grande	vor Zufluss Ri di Calcestri	2699477.5	1155532.5	Quinto	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
195	Valser Rhein	Brücke Lampertschalp	2724302.5	1158407.5	Vals	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
196	Valser Rhein bei Länthütte		2723032.5	1155702.5	Vals	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
198	Horabach	Brücke Weg	2726337.5	1158307.5	Vals	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
200	Crödaloc (Punkt 1570)		2803372.5	1127272.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
207	Crödaloc (Camp Martin)	Teileinzugsgebiet	2804277.5	1128232.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
209	Cancian	Cuf	2800302.5	1131087.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Repower AG
210	Cancian	Alp Cancian	2798892.5	1130277.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Repower AG
211	Cancian	Pallu Granda	2797947.5	1130347.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
215	Freispiegelstollen	Alp Flix	2768887.5	1154592.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzelmessung	EM	nein	nein	EWZ
220	Campobach	ob Fassung	2803852.5	1140682.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
231	Palubach	Palusee	2799067.5	1138832.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Langzeitmessung	OK	nein	nein	Repower AG
234	Gelgia	Stalveder	2769157.5	1150392.5	Surses	Graubünden	EWZ	Langzeitmessung	OK	nein	nein	EWZ
235	Aua da Fisch		2830527.5	1166552.5	Val Mustair	Graubünden	Providimaint Electric Mustair	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Providimaint Electric Mustair
236	Aua da Schals		2829422.5	1165072.5	Val Mustair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
240	Ova di Esche	Alp Belvoir	2790892.5	1163307.5	Medel	Graubünden	ANJ / Repower	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Repower AG
246	Tschindobach		2767042.5	1205012.5	Schweis im Prättigau	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
250	Schraubach		2772367.5	1205057.5	Schweis im Prättigau	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
252	Schrangabach	ob Mündung	2766512.5	1204852.5	Grüsch	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
260	Furnerbach	Schlucht ob Pragmartin	2772012.5	1201062.5	Jenaz	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
261	Arieschbach	ehem. Bad Fideris	2778097.5	1197282.5	Fideris	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
267	Ova da Morteratsch		2792257.5	1147522.5	Pontresina	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Repower AG
272	Ova da Bernina	ob Wasserfassung	2793622.5	1147157.5	Pontresina	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
273	Chies Alpbach		2784527.5	1196112.5	Klosters	Graubünden	Klosters Madrisa Bergbahnen AG	Kurzelmessung	EM	ja	ja	Klosters Madrisa Bergbahnen AG
282	Clozza 1 (obenhalb Fassung)		2690562.5	1185437.5	Sculi	Graubünden	Fond „Oostrom aus Wasserkraft“	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Fond „Oostrom aus Wasserkraft“, Gemeinde Scuol
285	Bia di Ri 1		2730967.5	1137442.5	Rossa	Graubünden	Gemeinde Rossa	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Gemeinde Rossa
293	Farnigi	bei Sils i. D.	2756507.5	1174582.5	Scharans	Graubünden	Bauernverein Domeschg	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domeschg
294	Crusch	ob Scharans	2755307.5	1175762.5	Scharans	Graubünden	Bauernverein Domeschg	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domeschg
295	Almensertobel	ob Almens	2754347.5	1179172.5	Domeschg	Graubünden	Bauernverein Domeschg	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domeschg
296	Duscherbach (oben)		2753887.5	1180222.5	Domeschg	Graubünden	Bauernverein Domeschg	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domeschg
299	Val Ruinas 1		2825727.5	1194737.5	Valsot	Graubünden	Ing. Büro Darmuzer Davos	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Ing. Büro Darmuzer Davos
300	Traversagna	Roveredo - Ausgang Schlucht	2730407.5	1121257.5	Roveredo (GR)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
302	Bia di Val Gron		2732542.5	1122787.5	Grono	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
312	Schmitterbach (Kantonsstrasse Schmitlen)		2770787.5	1173267.5	Schmitlen (GR)	Graubünden	Vereinigung Freunde von Schmitlen	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Vereinigung Freunde von Schmitlen
317	Ganibach	ob Vals	2732067.5	1163317.5	Vals	Graubünden	EW Vals	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Vals
318	Tomilbach	P1875	2735547.5	1164297.5	Vals	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
319	Tomilbach	P1258	2734122.5	1165682.5	Vals	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Repower AG
325	Ova da Varusch		2797127.5	1166197.5	S-charf	Graubünden	Engadiner Kraftwerke	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Engadiner Kraftwerke
328	Clemgia 1		2819092.5	1179392.5	Sculi	Graubünden	Engadiner Kraftwerke	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Engadiner Kraftwerke
339	Flem	Startgels	2738142.5	1191057.5	Films	Graubünden	Films Electric AG	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Films Electric AG
340	Flem	Segnas	2737287.5	1192472.5	Films	Graubünden	Films Electric AG	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Films Electric AG
348	Rein Aolatta	P1742	2765572.5	1174457.5	Disentis/Mustér	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
355	Val da Terman (Plan da la Val)		2805427.5	1130767.5	Poschiavo	Graubünden	EWZ	Kurzelmessung	EM	ja	nein	EWZ
361	Santi Perscia Bassa		2804052.5	1123772.5	Brusio	Graubünden	Repower	Kurzelmessung	EM	nein	nein	Repower AG
364	Bärenalerbach	Brücke vor Mündung	2778522.5	1179412.5	Davos	Graubünden	EW Davos	Einzelmessungen	EM	ja	nein	EW Davos (n.d.)
376	Fisualabach (Dörfli)		2787497.5	1186312.5	Davos	Graubünden	EW Davos	Einzelmessungen	EM	ja	nein	EW Davos (n.d.)
392	Tscharbach	Lumreinerbrücke	2744662.5	1175777.5	Obersaxen Mundaun	Graubünden	AXPO Surselva	Einzelmessungen	EM	ja	nein	AXPO AG Hydroenergie, Baden (2012)
397	Hüscherebach	ob Fassung	2744792.5	1155302.5	Rheinwald	Graubünden	Alpiq	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Alpiq Ecopower Schweiz AG (2015)
401	Stutzbach	Alp	2743772.5	1158307.5	Rheinwald	Graubünden	Alpiq	Kurzelmessung	EM	ja	nein	Alpiq Ecopower Schweiz AG (2016)
403	Ragn d'Err	Piaz la Lagna	2770862.5	1161617.5	Surses	Graubünden	BKW	Einzelmessungen	EM	ja	nein	BKW Energie AG (2013)
405	Ragn da Colm		2769342.5	1161032.5	Surses	Graubünden	BKW	Einzelmessungen	EM	ja	nein	BKW Energie AG (2013)
409	Ragn d'Err	Tgant Pensa	2769407.5	1161497.5	Surses	Graubünden	EWZ					

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungs- methode	Verfüg- barkeit Q347	Verfüg- barkeit Daten	Quelle
419	Ava da Nandro		2762542.5	1158577.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
420	Ava da Falter (Tga1)		2765202.5	1153282.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
432	Ava da Nations		2769882.5	1151767.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
433	Ragn Alva Cheda		2769107.5	1150427.5	Surses	Graubünden	BKW	Einzelmessungen	EM	ja	nein	BKW Energie AG (2013)
435	Belgia (Bögia)		2772552.5	1148342.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
440	Zulfluss Adont (unterhalb Cre d'Al)		2760552.5	1163912.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
441	Adont (Maragabücke)		2760502.5	1163327.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
444	Albigna (Stausee)		2769767.5	1134132.5	Bregaglia	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	nein	nein	EWZ
465	Bondasca (ob Fassung)		2763802.5	1132752.5	Bregaglia	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
468	Orlegna	Fornobücke	2774092.5	1134962.5	Bregaglia	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	DK1	nein	nein	EWZ
469	Maira (Dora)		2769877.5	1140607.5	Bregaglia	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
476	Orlegna	Orden	2773482.5	1140367.5	Bregaglia	Graubünden	EWZ	Langzeitmessung	DK	nein	nein	EWZ
500	Plaffnern	Vorderwald, Oberl Sagl	2634282.5	1234482.5	Vorderwald	Aargau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
503	Plaffnern	Plaffnau, Bergmatte	2634562.5	1231682.5	Plaffnau	Luzern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
507	Rot	ob Brücke Unterberghof	2631492.5	1228212.5	Langenthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
508	Stempesch		2632437.5	1228492.5	Ruggiswil	Luzern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Näf & Margreth (2017)
510	Luterbach	direkt ob Damm	2612862.5	1208662.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
511	Luterbach	unterhalb Zufluss von Vorderl	2612497.5	1207722.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
513	Chrouchtalbach	Engstelle ob Zufluss Joggelgr	2606577.5	1205222.5	Bolligen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
514	Bach Laufengrabe	200m ob Zusammenfluss mit C	2607532.5	1205067.5	Bolligen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
515	Zufluss Ost zum Laufengraben	Chlosterholz unterhalb Fels	2607732.5	1204682.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
518	Stadelbach	vor Zusammenfluss mit Luterba	2612467.5	1207452.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
520	Gummgabe	150m ob Zusammenfluss mit L	2612672.5	1207547.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
521	Bach Wyrstannewald Flueac	60m ob Zusammenfluss bei Lo	2610367.5	1206132.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
522	Feisterbach	15m vor Zusammenfluss Loch	2610302.5	1206102.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
523	Bach Tannbodenmatt Zufluss	Tannboden	2609502.5	1204962.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
524	Bach Tannbodenmatt Zufluss	Tannboden	2609597.5	1205022.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
525	Bach Juckergrabe	ob Stelstufe bei Weiher	2607332.5	1204552.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
526	Bach suedl. Lisihaus	200m ob Strasse	2612512.5	1206812.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
527	Bach Breitenwaldweid	240m ob Strasse	2612462.5	1206182.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
528	Bach Buholzwald	215m ob Teerstasse Lauterba	2611902.5	1205087.5	Lutzelh	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
529	Luterbach	unter Abzweigung Breitenwald	2612172.5	1206617.5	Oberburg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
531	Luterbach	bei letztem Haus in Seidl, Laut	2611757.5	1205362.5	Lutzelh	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
532	Sulgenbach	vor Maenderl	2609377.5	1195907.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
533	Leopoldgrabe	Buecke unter Rystoch	2600107.5	1195182.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
534	Altmirraingrabe	unter Bruecke	2600407.5	1195012.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
536	Scherlirbach	Zwischengebiet Niederscherli	2594077.5	1192502.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
537	Maengistoforbach	im Graben	2595267.5	1192937.5	Köniz	Bern	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
539	Scherlirbach	Scherliau - Niederscherli	2596197.5	1192412.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
540	Biftbach	Niederscherti, vor Zufluss links	2596102.5	1192362.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
541	Schwandgrabe	50m vor Zusammenfluss mit Sc	2598327.5	1192057.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
542	Scherlirbach	Muehle	2598942.5	1191917.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
543	Puersgrabe	Scherliau, Bushaltstelle	2599077.5	1191882.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
546	Muehleholzgrabe	Bruecke neben P725	2598837.5	1188257.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
547	Buetschelbach	Niederbuetschel - Muehle	2598857.5	1188282.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
548	Hangmadgrabe	Scherliau, Ruine Sternenber	2599392.5	1188082.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
549	Buetschelbach	Muehle	2600567.5	1187217.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
550	Truebbach	Niederbuetschel 30m unterha	2596787.5	1190432.5	Oberalm	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
551	Cholothgrabe	Kehrmühle, oberhalb Bauernh	2617787.5	1214912.5	Heimiswil	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
552	Chaenerch	direkt unter P960	2618502.5	1215002.5	Wynigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
553	Chapellenbach	Choloth bei Underfarberg	2620227.5	1215542.5	Wynigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
555	Romanino	Croglio - Punkt 290	2708492.5	1093932.5	Tresa	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
556	Lisora	Molinazzo di Moteggio	2707422.5	1094492.5	Tresa	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
557	Magliana	Mugena bei Schiessstand	2711877.5	1100982.5	Alto Malcantone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
559	Bach im Val Firinese	Bruecke bei Hof	2711767.5	1100762.5	Alto Malcantone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
560	Flume di Bavocc		2709192.5	1097952.5	Lema	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
561	Bach im Val Vira	unter Strassenbruecke	2708502.5	1110977.5	Gambiarogno	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
562	Bach Val di Frodo		2712862.5	1112027.5	Gambiarogno	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
563	Bach Monti Rotto		2710342.5	1111787.5	Gambiarogno	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
564	Flume Bello	ob Fassung	2721337.5	1104147.5	Capriasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
565	Cassarate	Al Ponte	2722197.5	1104367.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
566	Riale delle Spine	vor Zufluss Cassarate	2723277.5	1104662.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
567	Bach im Valle Scareglia		2723332.5	1105732.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
568	Bach bei Cara		2724682.5	1106207.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
569	Bach im Val de Cugno	bei Cozzo	2725667.5	1106432.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
570	Zufluss Cassarate P984		2726157.5	1105287.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
571	Cassarate	50m ob Bruecke	2726137.5	1105187.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
572	Veduggio	Engstelle bei Sigilino	2714857.5	1104037.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
573	Bach im Valle Cusella		2714107.5	1104567.5	Mezzocico-Vira	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
574	Veduggio	Schlucht Camignolo	2716247.5	1107382.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
575	Bach i Cugnò		2714227.5	1109622.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
576	Bach Valle Brughì		2714867.5	1109937.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
577	Bach im Valle Sorencina		2715262.5	1108997.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
578	Bach Cadenazzo West		2716802.5	1111657.5	Cadenazzo	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
579	Bach Cadenazzo Ost		2717227.5	1111622.5	Cadenazzo	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
607	Ruisseau des Vaux	Heine Bruecke bei Fuhren	2547922.5	1180962.5	Rorvay	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
608	Zufluss Menthue links in Le Mo	Bruecke	2544307.5	1177827.5	Cronay	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
610	Le Lembrax	unter Bauernhof Moulin du Pon	2544162.5	1177267.5	Donneloye	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
611	Le Sauture	vor Muendung in Menthue	2543862.5	1175757.5	Bioley-Magnoux	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
612	La Greyle	70m ob Zusammenfluss mit Sa	2543722.5	1175497.5	Oppens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
616	Menthue	Gossens	2543997.5	1176742.5	Donneloye	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
617	Ruisseau de Villard	Gossens 50m ob Strasse	2543762.5	1177232.5	Donneloye	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
618	Ruisseau du Lin	Gossens Rohr unter Bruecke	2543872.5	1177332.5	Cronay	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
619	Le Sauture	bei Oppens, 100m vor STEP	2543222.5	1173777.5	Oppens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
620	La Fôlause	bei Oppens, 30m ob STEP	2543292.5	1173802.5	Oppens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
621	Augne	bei Ogin - Le Moulin, unter Br	2544547.5	1174197.5	Bioley-Magnoux	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
630	Drenola		2734382.5	1129847.5	Leotalto	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
632	Bordone		2694782.5	1118212.5	Onsernone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
633	Rovana di Bosco Gurin	bei Corino	2685047.5	1129697.5	Cerentino	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
634	Rovana di Bosco Gurin	Hoehlinie 1600	2679527.5	1129127.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
635	Zufluss Larchaa ob Hoehlinie 1600		2679462.5	1129122.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
637	Bach bei Veia		2691987.5	1140777.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
638	Ri di Crosa	Brücke Tunnel	2688317.5	1142932.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
641	Falschenbach	unter Bruecke bei Cufa	2760297.5	1189282.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
642	Bach Clausauer Tobel	unter Bruecke Hauptstrasse	2760707.5	1189772.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
643	Bach Casteller Tobel	unter Bruecke alter Strasse	2764947.5	1190122.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
644	Bach Caltreiser Tobel		2764057.5	1190637.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
645	Bach Val Schluen		2736092.5	1183757.5	Schluen	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
646	Steinbach	unter Bruecke Hauptstrasse ob F	2762412.5	1188222.5	Chur	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
647	Bach Sagatobel		2763512.5	1187967.5	Chur	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
648	Alpbach	Fusspaengerbruecke hinter Ts	2765917.5	1186752.5	Chur	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
649	Ruchobellbach	Fussg. bruecke hinter Tschiers	2765967.5	1186722.5	Chur	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
650	Günertobelbach	Brücke Hauptstrasse	2744202.5	1174312.5	Saferthal	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
654	Bach Wannatobel		2740622.5	1163967.5	Saferthal	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
656	Bach am Berg	Bruecke Strasse	2761217.5	1184877.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
657	Cazitobelbach	nach Zusammenfluss am Bue	2761147.5	1185567.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
658	Spinaud											

4302

4303

Tabelle A1 – Teil 3: Liste der in der Studie betrachteten Messstandorte.

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungs- methode	Verfüg- barkeit Q347	Verfüg- barkeit Daten	Quelle
668	Calanascas	I1340	2730297.5	1142432.5	Rossa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
669	Verzasca	Vegorness	2703212.5	1137607.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
674	Medelser Rhein	ob Brücke Sogn Gion	2706607.5	1164862.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
679	Chellenreuss	vor Mündung See	2678977.5	1167152.5	Göschenen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
680	Dammareuss	vor Mündung See	2679207.5	1166397.5	Göschenen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
681	Susasca	ob Fassugg	2798997.5	1181117.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
683	Aua da Fless		2797627.5	1181332.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
686	Beverin	nach Zufluss mit Savrettabach	2779172.5	1157862.5	Samedan	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
689	Beverin	Glandia Naira - H 1940	2783057.5	1159632.5	Samedan	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
691	Aua da Val Val		2695672.5	1169062.5	Tujetsch	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
695	Welschtobelbach	Arosa - nahe P1647	2771682.5	1182082.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
696	Plessur	Arosa - nahe H 1625	2771252.5	1182877.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
697	Aua da Muliniersch	Punkt 1870	2820427.5	1167637.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
698	Aua da Vau		2827642.5	1164612.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
699	Aua da Prasura		2830037.5	1163162.5	Val Müstair	Graubünden	KI GR	Kurzzeitmessung	EM	ja	ja	WSL
700	Murazina	ob Fassugg	2830017.5	1162917.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
702	Rein da Plattas		2709742.5	1169637.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
707	Brenno del Lucmagn	Pro Natura-Zentrum	2706852.5	1155107.5	Benito	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
747	Osura	Brione - Punto scuro	2703672.5	1128167.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
748	Osura	Daghei di Fuori	2701252.5	1129167.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
749	Osura	Valdo	2699167.5	1130182.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
750	Riale Valle della Porta		2710727.5	1119792.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
752	Bach Val Pianca		2710727.5	1119802.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
753	Bach Valle di Mulino		2710182.5	1119887.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
754	Riale d'Elia		2705287.5	1132737.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
755	Riale d'Elia		2688077.5	1135077.5	Cevio	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
756	Ri da Sernel		2692312.5	1134417.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
757	Ri di Tome		2694442.5	1137377.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
759	Riale Valle di Prato		2696792.5	1138947.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
760	Morbobbia	vor Zufluss Stausee	2726157.5	1114112.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
761	Riale Conghio	Brucke Wanderweg	2725892.5	1114207.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
762	Riale de Prata	Brucke Fahrweg	2727642.5	1114357.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
763	Zufluss Meira aus Val di Fossada		2728867.5	1114187.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
764	Morbobbia	bei scharfer Kurve	2729342.5	1113527.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
765	Riale di Ruscada		2728362.5	1114222.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
766	Riale Riarena		2714172.5	1115047.5	Cugnasco-Gerra	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
767	Sementina	Madonna della Valle	2719717.5	1116492.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
768	Riale Albionasca		2732297.5	1118177.5	Roveredo (GR)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
769	Calanascas	Cauco unterhalb Brucke	2729382.5	1132977.5	Calanca	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
770	Riale di Mulit		2697112.5	1114552.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
772	Ri di Verdario		2692292.5	1113822.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
773	Riale del Pizzo Leone		2693907.5	1112447.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
779	Zufluss Oberaargletscher	Ausfluss Gletscher	2690757.5	1154337.5	Guttannen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
783	Feuri Vispa	Saas Fee	2637527.5	1105892.5	Saas-Fee	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
785	Zufluss Glacier de la Corbassière		2588812.5	1095667.5	Val de Bagnes	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
786	Dyre de Sery	Wasser aus Fassung	2587177.5	1096492.5	Val de Bagnes	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
787	Bortwasser	ob Zufluss Unterpreuss	2693407.5	1161267.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
788	Meienreuss	vor Zufluss Goretzmattenbach	2681592.5	1177122.5	Wassen	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
790	Chuealpbach	ob Zusammenfluss mit Ducant	2784807.5	1176377.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
793	Ticnette		2786072.5	1141077.5	Arde	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
794	Riale di Lodrino		2718512.5	1128447.5	Riviera	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
796	Riale d'ragna		2717462.5	1131997.5	Riviera	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
809	Buron	Epauthyres	2538737.5	1176512.5	Belmont-sur-Yverdon	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
865	Talent	Malaplaud	2539257.5	1163822.5	Assens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
867	Talent	Montheron	2539737.5	1160672.5	Bretigny-sur-Morrens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
868	Broye	Maracon	2557582.5	1156157.5	Remaufens	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
869	Broye	Vuarmans	2553502.5	1155022.5	Ursy	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
870	La Cernage	Saens	2550237.5	1156107.5	Ursy	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
871	La Bressonne	vor Zusammenfluss, L500	2549007.5	1156167.5	Saens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
872	La Mérine	Moudon	2549947.5	1168712.5	Moudon	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
873	La Cerjatte	Lucens	2553462.5	1173892.5	Lucens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
920	Urbach	Mattenalp Gummen	2660567.5	1163752.5	Innertkirchen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
925	Aare	Unterargletscher	2662747.5	1157632.5	Guttannen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
1000	Plattner	Vorderwald, Pegel	2635482.5	1237757.5	Vorderwald	Aargau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, AG
1002	Bach Jogelsgrube	100m oberhalb Strasse	2606632.5	1205417.5	Bolligen	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL	
1021	Trottebühlbach	Malle	2759777.5	1189937.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2000	Trottegrube	oberhalb Hof Trottebuel	2600142.5	1195992.5	Kont	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2002	Osura	Belastro	2702202.5	1128722.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2034	Broye	Payenne	2561687.5	1187317.5	Payenne	Vaud	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2206	Meiera	Morbobbia	2726987.5	1114677.5	Bellinzona	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2263	Chamuerabach	La Punt-Chamues-ch	2791437.5	1160602.5	La Punt Chamues-ch	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2269	Onza	Blatten	2629127.5	1140932.5	Blatten	Valais	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2327	Dischmabach	Davos - Kriegtetten	2786217.5	1183367.5	Davos	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2347	Riale di Roggiasca	Roveredo	2733542.5	1118157.5	Roveredo (GR)	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2365	Riale di Calengasca	Peset BAFU	2684977.5	1139857.5	Cevio	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2430	Rein da Summitg	Summitg, Encadens	2713727.5	1167702.5	Samikg	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
2437	Farinbot	Eclublens	2552022.5	1161727.5	Rue	Fribourg	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
2612	Riale di Pincascia	Lavertezzo	2708067.5	1123967.5	Verzasca	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
4000	Menthue	Yvonand	2545402.5	1180882.5	Yvonand	Vaud	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAFU
6401	Farbobelbach	ob Wasserfassung	2770602.5	1189602.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
8000	Altbach	Bassersdorf	2690002.5	1255662.5	Bassersdorf	Zürich	KI ZH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
9001	Ribo	Nähe Talstation Monte Chia	2687317.5	1120732.5	Onsernone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
9002	Ribo	Piano delle Cascine bei Restau	2684482.5	1121242.5	Onsernone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
11000	Hellbach		2695217.5	1258167.5	Winterthur	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
15002	Lavinuz		2803182.5	1184452.5	Zernez	Graubünden	Gemeinde Lavin	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Gemeinde Lavin (2011)
15004	Aua da Tisch		2777777.5	1165542.5	Bergün Filisur	Graubünden	Albula-Landwasser Kraftwerke AG	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Albula-Landwasser Kraftwerke AG (2016)
15005	Anvigo	Anvigo	2728837.5	1129207.5	Calanca	Graubünden	BKW Energie AG / Comune Calanca	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	BKW Energie AG e comune di Calanca (2015)
15007	Poschiavino	Plan di Gess	2800872.5	1144187.5	Poschiavio	Graubünden	ETH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Fioriancic et al. (2018)
15008	Bach Val di Gess		2800617.5	1143902.5	Poschiavio	Graubünden	ETH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Fioriancic et al. (2018)
15009	Poschiavino	Hang D	2802112.5	1142002.5	Poschiavio	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Fioriancic et al. (2018)
15010	Bach Val da Campasc		2801762.5	1142592.5	Poschiavio	Graubünden	ETH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Fioriancic et al. (2018)
15011	Zufluss zum Krummbach bei Blattu		2644132.5	1121512.5	Simplon	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15012	Krummbach	Hospiz	2644897.5	1121757.5	Simplon	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15013	Krummbach	Chlusmatten	2644517.5	1119377.5	Simplon	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15016	Gerewasser	Teilgebiet Scherlichwang Gera	2671587.5	1153512.5	Obergoms	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15017	Gerewasser	Teilgebiet Im Wyssen Gufer Sch	2672727.5	1153497.5	Obergoms	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15018	Gerewasser	Teilgebiet Im Wyssen Gufer	2674897.5	1152052.5	Obergoms	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15019	Goneri	Oberwald	2670502.5	1153852.5	Obergoms	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15020	Ova dals Tuols		2814692.5	1172417.5	Zernez	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15021	Ova Staleichod		2814637.5	1172377.5	Zernez	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15022	Ova da Nigija		2817162.5	1170337.5	Val Müstair	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15023	Ova Chavagl		2812947.5	1171072.5	Zernez	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15024	Zufluss Aua da Murtaröl		2817097.5	1168772.5	Val Müstair	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15025	Aua da Murtaröl		2817002.5	1169012.5	Val Müstair	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naeef & Margreth (2017)
15027	Ova dal Fuorn	Zernez	2810562.5	1170782.5	Zernez	Graubünden	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAF

4306

4307

4308

Tabelle A1 – Teil 4: Liste der in der Studie betrachteten Messstandorte.

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungs- methode	Verfüg- barkeit Q347	Verfüg- barkeit Daten	Quelle
15041	Salto	Maggia	2697832.5	1122997.5	Maggia	Ticino	KI TI	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15042	Triftwasser	Chempenwang	2668802.5	1172662.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Langzeitmessung	DK	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15043	Steinwasser	Brücke bei Hotel Steingletsch	2675562.5	1175947.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Langzeitmessung	DK	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15044	Giglbach	Murmeliwies	2672622.5	1176157.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15045	Steinwasser	Murmeliwies	2672582.5	1176172.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15047	Wendenbach	bei Fassung KWO	2671872.5	1177202.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15048	Gerlenbach	Fassung	2684722.5	1163922.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15049	Grubenbach	Fassung	2684867.5	1163297.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15051	Gaerstenbach	vor Zufluss See	2668207.5	1160297.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15052	Hengibach		2668172.5	1160912.5	Innetkirchen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15053	Drance de Bagnes	Ausfluss Glacier Otemma	2598517.5	1087312.5	Val de Bagnes	Valais	EPFL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Müller & Miesen (2022)
15057	Gornera	ob Fassung	2623207.5	1092452.5	Zermatt	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
15059	Wysswasser	Fassung KW Obergoms	2653772.5	1144532.5	Fieschertal	Valais	KW Obergoms	Langzeitmessung	DK	nein	nein	glwr & VAW (2022)
15061	Riedbach	ob Schlucht ob Fassung	2630457.5	1112957.5	St. Niklaus	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
15064	Drance de Bagnes	P 2454	2597657.5	1086742.5	Val de Bagnes	Valais	EPFL	Kurzzeitmessung	EM	ja	ja	Müller & Miesen (2022)
15067	Riale Secco		2695332.5	1151752.5	Quinto	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
15068	Adont	Brücke Salout	2763122.5	1164552.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
15069	Berschnerbach	Bergis	2744882.5	1219082.5	Walenstadt	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
15070	Ragnatscherbach	Mels	2748382.5	1215077.5	Mels	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
15071	Truebbach	Truebbach	2754667.5	1215382.5	Wartau	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
15072	Seez	Weistannen	2744887.5	1206292.5	Mels	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
15073	Goerbsbach	Vaettis	2752332.5	1196907.5	Pläfers	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
15074	Schächen	Burglen	2692487.5	1191792.5	Burglen (UR)	Uri	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15075	Groselalbach	Isenthal	2685172.5	1189032.5	Isenthal	Uri	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15076	Aua da Russein	Stausee mit Fassung	2711397.5	1177467.5	Disentis/Mustér	Graubünden	AXPO	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Axpo AG Hydroenergie, Baden (2011)
15077	Gelgia	Burgen	2764352.5	1165767.5	Surses	Graubünden	EWZ	Langzeitmessung	DK	nein	nein	EWZ
15078	Rosegbach	Pontresina	2788787.5	1151687.5	Pontresina	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15079	Imn-Einzugsgebiet unterhalb Cl	Tarasp	2816807.5	1158892.5	Scolet	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15080	Müstair	Müstair	2830802.5	1168702.5	Val Müstair	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15081	Vorderrein - Restwasserrest	Pardomat	2711612.5	1175317.5	Disentis/Mustér	Graubünden	AXPO	Kurzzeitmessung	DK1	nein	nein	Axpo AG Hydroenergie
15082	Buron	Grussy	2538922.5	1178487.5	Yverdon-les-Bains	Vaud	KI VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, VD
15083	Chroux Halbach bei Krauchthal	Isenthal	2689787.5	1207552.5	Krauchthal	Bern	KI BE	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, BE
15084	Veduggio	Isone	2720242.5	1110162.5	Isone	Ticino	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15085	Cuccio	Portezza	2731749.1	1100407.8	Italien	Italien	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15086	Magliasia	Magliasia	2711607.5	1093302.5	Magliaso	Ticino	BAFU	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15087	Scalio	Barbengo	2713987.5	1090017.5	Lugano	Ticino	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15088	Mara	Mareggia	2719037.5	1088202.5	Val Mara	Ticino	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15089	Laviggio	Mendrisio	2719517.5	1082137.5	Mendrisio	Ticino	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15091	Faloppa	Chiasso	2722627.5	1076982.5	Chiasso	Ticino	KI TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TI
15092	Breglia	Chiasso	2722307.5	1076327.5	Salerna	Ticino	BAFU	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15093	Gortener	Porfettumühle	2585032.5	1182117.5	Talens	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15094	Sonnaz	La Corbat	2576062.5	1187047.5	La Sonnaz	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15095	Sonnaz	Chesoppelo	2572727.5	1184087.5	Corninboeuf	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15096	Richterwillerbach	N2	2584212.5	1191002.5	Bösingen	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15097	Taverna	Flamatt	2590102.5	1192732.5	Wünnewil-Flamatt	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15098	Taverna	Bunzwil	2586477.5	1189072.5	Schmitten (FR)	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15107	Biberenbach	Biberist	2609847.5	1226207.5	Biberist	Solothurn	KI SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15108	Biberenbach	Lohn	2606442.5	1223572.5	Lohn-Ammannsegg	Solothurn	KI SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15109	Muehlebach Brugglen		2604172.5	1221862.5	Buchegg	Solothurn	KI SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15110	Biberenbach	P 528	2600822.5	1221222.5	Buchegg	Solothurn	KI SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15111	Langete	Huttwil	2629557.5	1219117.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15112	Brummbächli	Waldmatt	2632482.5	1216782.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15113	Neuligebächli	Waldmatt	2632477.5	1216752.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15114	Tharbach		2631627.5	1215202.5	Erswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15115	Wyssachen	Buehlmatte	2629752.5	1216277.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15116	Rotbach	Schwarzenbachberg	2629202.5	1217597.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15117	Zufluss Langete	Querenbühl	2629202.5	1214537.5	Wyssachen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15118	Zufluss	Schwaendibach	2631907.5	1213632.5	Erswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15119	Mannshusbach	Hohstaete	2629587.5	1213497.5	Wyssachen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15120	Zufluss Schwaendibach	Erswil	2631157.5	1214002.5	Erswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15121	Tönibach	Gersbergmatte	2629797.5	1213597.5	Wyssachen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15122	Schwaendibach - hinteres EZG	Hinten	2631907.5	1212897.5	Erswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15123	Ursebach		2626242.5	1221927.5	Ursebach	Bern	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15124	Mosbach	Oberdorf	2625472.5	1220027.5	Ursebach	Bern	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15125	Walterswilbach		2625532.5	1220032.5	Ursebach	Bern	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15126	Oeschbach	Hirsenhaid	2624722.5	1220277.5	Ursebach	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15141	Griesbach	Zeithaus	2625227.5	1211997.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15142	Griesbach	Griesbach	2623272.5	1210492.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15144	Eichler Wassergrube		2627537.5	1209067.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15146	Gruene	Ey	2623852.5	1208287.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15147	Hornbach	P 946	2623627.5	1208012.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15148	Spernelgrube	Pegel BAUF	2630717.5	1207247.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15152	Sargabe		2629637.5	1207697.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15153	Laternbach	Haemismatt	2626112.5	1207282.5	Trachselwald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15154	Golbach		2629422.5	1206517.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15155	Eselgrube		2632462.5	1206212.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15156	Laternbach		2628092.5	1206337.5	Trachselwald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15157	Hornbach	Wassen unten	2626797.5	1210447.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15161	Liechtguelbach - hinteres EZG		2627622.5	1208017.5	Trachselwald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15164	Rappegrube	Pegel BAUF	2634342.5	1207357.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAUF
15174	Genz	Heimenhausen Pegel Bern	2620052.5	1226762.5	Heimenhausen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15175	Genz	Boldingen	2620512.5	1224322.5	Bettenhausen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15176	Stouffebach	Maettenberg	2622147.5	1223712.5	Thürigen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15177	Mutzgrube	Dubeschou	2620002.5	1220742.5	Seeburg	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15178	Stouffebach		2622482.5	1221422.5	Ochlenberg	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15179	Genz	Riedwil	2619362.5	1221182.5	Seeburg	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15180	Mutzgrube		2620462.5	1219867.5	Seeburg	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15185	Arbonne	Cousset	2565047.5	1185457.5	Montagny (FR)	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15186	Yevyise	Chatel-St-Denis	2559782.5	1183392.5	Châtel-Saint-Denis	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15188	Glane	Matran	2573937.5	1181027.5	Hautrive (FR)	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15189	Gernie	Plasselb	2585217.5	1174402.5	Plasselb	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15190	Ruisseau de Bainoz		2553452.5	1185102.5	Lully (FR)	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15191	La Netrique		2562287.5	1168512.5	Vuisternens-devant-Rom	Fribourg	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
15193	Glane	Bramatan	2559292.5	1168497.5	Shiriez	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
16001	Aabach	Moenchaldorf	2696932.5	1240802.5	Mönchaltorf	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16004	Aabach	Schmerikon	2715292.5	1231602.5	Schmerikon	St. Gallen	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16006	Aachbach	Mogelsberg	2727052.5	1247402.5	Neckertal	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16007	Alp	Ensisledin	2698647.5	1223022.5	Ensisledin	Schweyz	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
16011	Biber	Biberbrugg	2697257.5	1223277.5	Ensisledin	Schweyz	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAUF
16012	Bibere	Gurnels	2580412.5	1194222.5	Gurnels	Fribourg	KI BE	Langzeitmessung	DK	ja	ja	

4311

4312

4313

Tabelle A1 – Teil 5: Liste der in der Studie betrachteten Messstandorte.

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungs- methode	Verfüg- barkeit Q347	Verfüg- barkeit Daten	Quelle
16046	Glatt	Herisau	273272.5	1251262.5	Herisau	Appenzell Ausserrhod.	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16052	Grossbach	Einsiedeln	2700712.5	1218102.5	Einsiedeln	Schwyz	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16055	Guerbe	Belp	2604802.5	1192687.5	Belp	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16060	Holzbach	Villmergen	2660862.5	1245177.5	Villmergen	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16061	Itlis	Langnau	2627327.5	1198582.5	Langnau im Emmental	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16063	Jönen	Zwilikon	2675097.5	1238202.5	Affoltern am Albis	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16064	Kaltzbach	Muri	2668272.5	1238942.5	Muri (AG)	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16065	Kemmenbach	Grusbühl	2721132.5	1273242.5	Wädwil	Thurgau	KI TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TG
16066	Kempt	Illnau	2696707.5	1252427.5	Illnau-Effretikon	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16071	kleine Emme	Werthenstein	2647857.5	1209342.5	Entlebuch	Lucern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16072	Koellikerbach	Koelliken	2644552.5	1244337.5	Kölliken	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16074	Kuentenerbach	Kuenten	2667032.5	1248732.5	Künten	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16081	Lauche	Matzingen	2712717.5	1264232.5	Matzingen	Thurgau	KI TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TG
16090	Luteren	Nesslau	2732852.5	1231932.5	Nesslau	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16092	Luthern	Nebikon	2640587.5	1238817.5	Nebikon	Lucern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16093	Lysibach	Bundkofen	2594362.5	1210577.5	Schögglen	Bern	KI BE	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, BE
16096	Mederbach	Marthalen	2690492.5	1275162.5	Marthalen	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16100	Morges	Morges	2527012.5	1151737.5	Morges	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16103	Murg	Fischingen	2715452.5	1252732.5	Fischingen	Thurgau	KI TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TG
16106	Murg	Wängi	2714087.5	1261732.5	Wängi	Thurgau	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16107	Näfäbach	Neftenbach	2691662.5	1264272.5	Neftenbach	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16109	Necker	Mogelsberg	2727117.5	1247287.5	Neckertal	St. Gallen	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16117	Pickenbach	Wattwil	2725172.5	1238522.5	Wattwil	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16118	Rietlibach	Mosnang	2718947.5	1248442.5	Mosnang	St. Gallen	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16121	Rindalbach	Lutisburg	2723897.5	1252287.5	Lütisburg	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16124	Rottbach	Buehler	2748302.5	1248932.5	Schiatt-Haslen	Appenzell Innerrhoden	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16127	Ruederchen	Schoffland	2646812.5	1239347.5	Schöffland	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16133	Sellenbodenbach	Neuenkirch	2658562.5	1218277.5	Neuenkirch	Lucern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16135	Sinslerbach	Sins	2672462.5	1227157.5	Sins	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16142	Steinbach	Kaltbrunn	2721187.5	1229727.5	Kaltbrunn	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16143	Stichbach	Bottighofen	2732842.5	1277967.5	Bottighofen	Thurgau	KI TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TG
16145	Surb	Niederweningen	2669672.5	1263647.5	Schmisingen	Aargau	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16147	Taigerbach	Wiskofen	2669382.5	1268002.5	Zurzach	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16149	Thunbach	Matzingen	2712692.5	1264282.5	Matzingen	Thurgau	KI TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, TG
16153	Uerke	Holziken	2644827.5	1241632.5	Holziken	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16154	Urnäsch	Hundwil	2740147.5	1244787.5	Urnäsch	Appenzell Ausserrhod.	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16158	Venoge	Ecublens	2532022.5	1154152.5	Ecublens (VD)	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16160	Vewey	Vewey	2554642.5	1146592.5	Vewey	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16162	Waldemme	Sornegg	2644537.5	1185637.5	Fulan	Lucern	KI LU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, LU
16165	Waldbach	Wetzikon	2702397.5	1241922.5	Wetzikon (ZH)	Zürich	KI ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, ZH
16166	Wissbach	Degersheim	2734677.5	1249987.5	Herisau	Appenzell Ausserrhod.	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, SG
16167	Wissenbach	Boswil	2666027.5	1239162.5	Boswil	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16168	Wissenbach	Merenschwand	2671112.5	1234842.5	Merenschwand	Aargau	KI AG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KI, AG
16169	Worble	Ittigen	2603007.5	1202472.5	Ittigen	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
24000	Walenbach	Bauma	2701127.5	1246852.5	Bauma	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
28000	Brüttenbach	Ohndt, Brüttental	2715282.5	1244312.5	Fischenthal	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
41000	Wiesenbach	Bruggen	2700707.5	1256397.5	Illnau-Effretikon	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
42000	Kaltbach	Narsberg	2703152.5	1257937.5	Schiatt (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
48000	Tufenbach	Teufen	2684717.5	1268477.5	Rorbas	Zürich	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
81000	Tobelbach	Hinterrikon	2702837.5	1254272.5	Zell (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
87000	Tobelbach	Bauma	2711137.5	1247912.5	Bauma	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
101000	Moosbach	Oberembrach	2689577.5	1260457.5	Oberembrach	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
102000	Wildbach	Oberembrach	2689582.5	1260457.5	Oberembrach	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
103000	Tobelbach Sued	Pfungen	2689957.5	1263012.5	Pfungen	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
104000	Müllibach	Pfungen	2689292.5	1263312.5	Pfungen	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
105000	Tobelbach	Dattikon	2691222.5	1264842.5	Wetterbach	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
111000	Mittlerer Chrebsbach	Winterthur	2695577.5	1259587.5	Winterthur	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
112000	Altbach	Birchwil	2690672.5	1256752.5	Nürensdorf	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
211000	Lochbach	Saland	2709307.5	1249952.5	Bauma	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
443000	Wildbach bei Rorbas	Rorbas	2685917.5	1264337.5	Rorbas	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
624000	Töss	Beicher	2714212.5	1242362.5	Fischenthal	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
625000	Hinterföss	Tössscheidi	2715577.5	1241047.5	Wald (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
626000	Vordentöss	Tössscheidi	2714537.5	1240667.5	Wald (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
627000	Steinbach	Horn bei Steinbach	2712402.5	1250377.5	Fischlengen	Thurgau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
628000	Hutlikerbach	Turbenthal	2707012.5	1256247.5	Turbenthal	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL

4314

4315

4316 Tabelle A1 – Teil 6: Quellenverzeichnis der in Tabelle A1 angegebenen Quellenverweise für die

4317 Abflusseinzelmessungen und Q347.

Quellenhinweise	Quellen
Albula-Landwasser Kraftwerke AG (2016)	Albula-Landwasser Kraftwerke AG, Kraftwerk Tischbach, Projektgenehmigungsgesuch - Technischer Bericht, März 2016
Alpiq Ecopower Schweiz AG (2016)	Neubau Wasserkraftwerk Stutzbach, Umweltbericht, Januar 2016, Alpiq Ecopower Schweiz AG
Alpiq Ecopower Schweiz AG (2009)	Wasserkraft am Tambobach, Splügen - Konzessions- und Projektgenehmigungsgesuch, Umweltbericht, 14. Dezember 2009, Alpiq Ecopower Schweiz AG
Alpiq Ecopower Schweiz AG (2015)	Hydrologische Abklärungen Hüscherenbach - Abschlussbericht, Februar 2015, Alpiq Ecopower Schweiz AG
Axpo AG Hydroenergie, Baden (2011)	KW RUSSEIN, Konzessionsprojekt, Bericht zur Umweltverträglichkeit, Hauptuntersuchung 1. Stufe und Pflichtenheft 2. Stufe. Studienkonsortium Russein, p.A., Februar, 2011, Axpo AG Hydroenergie, Baden
Axpo AG Hydroenergie, Baden (2012)	Optimierungsprojekt Kraftwerk Tschar (Gemeinden Obersaxen, Breil/Brigels, Vuorz/Waltensburg), Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) 1. Stufe, Februar 2012, Axpo AG Hydroenergie
Florianci et al. (2018)	Florianci, M., van Meerveld, I., Smoorenburg, M., Margreth, M., Naef, F., Kirchner J., W., Molnar, P. (2018): Spatio-temporal variability in contributions to low flows in the high Alpine Poschiavino catchment. Hydrological Processes 32 (26). https://doi.org/10.1002/hyp.13301
BKW Energie AG (2013)	Neubau Kraftwerke Ragn d'Err, Bauprojekt, Hydrologische Abklärungen, Schlussbericht, September 2013. BKW Energie AG
BKW Energie AG e comune di Calanca (2015)	Progetto di approvazione, Relazione Tecnica, Aprile 2015. BKW Energie AG e comune di Calanca
Müller, T., Miesen, F. (2022)	Müller, T., Miesen, F. (2022): Stream discharge, stage, electrical conductivity & temperature dataset from Otemma glacier forefield, Switzerland (from July 2019 to October 2021). https://doi.org/10.5281/zenodo.6202732
EW Davos (n.d.)	Neukonzessionierung Wasserkraftwerke Davos, UVB, 1. Stufe. Technischer Bericht Konzessionsprojekt. EW Davos.
EW Davos (n.d.)	Neukonzessionierung Wasserkraftwerke Davos, UVB, 1. Stufe. Technischer Bericht Konzessionsprojekt. EW Davos.
Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)	Hydrologische Untersuchungen am Adontbach, November 2009 - August 2014, Elektrizitätswerke Zürich EWZ.
Gemeinde Lavin (2011)	Konzessionsprojekt Ouvra Electrica Lavinuoz. Hydrologischer Bericht. Gemeinde Lavin, August 2011
Naef & Margreth (2017)	Naef, F. and Margreth, M.: Niedrigwasser, Auswertung und Messung. Federal Office for the Environment FOEN, 2017
gkw & VAW (2022)	Discharge in the river Wysswasser upstream of the water intake Titer (HPP Fieschertal) 01.09.2012 - 31.12.2022. Operation data provided by Gommekraftwerke (gkw). Discharge time series evaluated by D. Felix & M. Kastinger, VAW, ETH Zürich, in research projects co-funded by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) and related to the PhD thesis of Felix (2017); unpublished
Felix D. (2017)	Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines. VAW-Mitteilung 238 (R. M. Boes, ed.), and Diss. 24145 , ETH Zürich, Switzerland.

4318

4322

Name	Standort	Datenherr	Fläche Einzugs- gebiet (km ²)	Fläche Teilzugs- gebiet (km ²)	Fläche Teilzugs- gebiet ohne Gletscher und Permafrostböden (km ²)	Bestimmung Punktkontinuitätskurven- gruppen	Q390 [l s ⁻¹ km ⁻²]	Q3471 s ⁻¹ km ⁻²	Q380 [l s ⁻¹ km ⁻²]	mittlere Jahres- schlag (9981- 2020) (mm)	mittlere Gletscher- schlag (9981- 2020) (mm)	Reaktions- koeffizient b	mittlere Höhe [m.i.A.]	Flächenteil Quarz mässig undurchlässig [%]	Flächenteil Quarz hoch durchlässig [%]	1992- Volumen (in Mio m ³ km ⁻²)	spez. Grundwasser- volumen (in Mio m ³ km ⁻²)				
234 Julia	Stalveder	EWZ	69,6	69,6	59,6	A001-1	NA	NA	NA	NA	1108,1	42NA	2223	4	47	14NA	NA	NA			
478 Odenja	Orden	EWZ	11,1	11,1	9,2	A001-1	NA	NA	NA	NA	1148,2	63NA	2212	1	25	27NA	NA	NA			
2558 Resebach	Pontresina	BAFU	66,3	66,3	33,2	A001-1	NA	9,4	6,1	4,4	1,5	1147,5	59NA	2363	0	38	20NA	NA	NA		
2652 Berninabach	BAFU	2652 Berninabach	106,9	106,9	64,0	A001-1	NA	8,9	5,6	4,9	1,6	1172,2	50NA	2172	1	34	21NA	2390	NA		
2653 Chammuebach	BAFU	LaPunt-Chammuebach	73,4	73,4	14,6	A001-1	NA	14,6	12,1	11,1	1,2	1031	55NA	2443	0	38	23NA	NA	NA		
2658 Im	Tarasp	BAFU	1258,0	435,3	342,5	A001-1	NA	10,7	8,9	7,9	1,2	1015	59NA	2157	0	27	23NA	NA	NA		
2304 Ova dei Fiori	BAFU	2304 Ova dei Fiori	55,3	55,3	47,5	A001-1	NA	10,7	7,9	7,3	1,3	944,4	50NA	2273	1	19	42NA	NA	NA		
2327 Deschimbach	Davos, Krieglsteintal	BAFU	43,4	43,4	34,6	A001-1	NA	14,1	10,5	9,6	1,3	994,2	54NA	2301	1	42	15NA	NA	NA		
2355 Unterwasser	Davos, Freienlicht	BAFU	140,5	140,5	124,1	A001-1	NA	9,9	7,8	7,2	1,3	1055,8	47NA	2118	3	51	17NA	NA	NA		
2381 Riom	Müstair	BAFU	128,0	128,0	114,5	A001-1	NA	12,2	10,2	9,4	1,2	814,4	48NA	2121	2	46	25NA	NA	NA		
2444 Kuumbach	Chilmenaten	BAFU	19,4	19,4	17,5	A001-2	NA	10,8	7,9	7,0	1,4	1452,6	42NA	2223	3	33	15NA	NA	NA		
2268 Lenza	Blatten	BAFU	80,0	80,0	42,8	A001-2	NA	15,0	11,5	9,7	1,3	1328,2	59NA	2304	0	24	17NA	NA	NA		
2498 Poschiarino	La Roesa	BAFU	14,1	14,1	12,9	A001-2	NA	18,6	13,0	11,7	1,3	1461,3	49NA	2251	2	22	21NA	NA	NA		
2434 Bein da Stumig	Summit Encardiers	BAFU	21,5	21,5	18,7	A001-2	NA	14,5	10,1	8,3	1,4	1583,4	57NA	2392	1	15	21NA	NA	NA		
247 Clarcasca	Biseno	BAFU	73,8	73,8	47,8	A001-2	NA	15,6	11,0	8,8	1,4	1527,8	74NA	1764	1	33	17NA	NA	NA		
2512 Rolle di Priscella	Lazerezzo	BAFU	44,3	44,3	33,0	A001-2	NA	9,0	4,5	3,4	1,8	1724,2	82NA	1368	1	15	14NA	NA	NA		
2533 Schermin	Val Sesia	BAFU	34,3	34,3	28,3	A001-2	NA	12,8	9,3	6,2	1,8	1822,4	81NA	1822	1	28	20NA	NA	NA		
2535 Schermin	Val Sesia	BAFU	34,3	34,3	28,3	A001-2	NA	13,4	9,4	7,3	1,4	1890	67NA	1894	14	24	26NA	NA	NA		
2535 Schermin	Val Sesia	BAFU	34,3	34,3	28,3	A001-2	NA	16,6	10,5	8,5	1,5	1838,9	70NA	1723	0	23	32NA	NA	32		
2778 Grottaibach	Berthalp	BAFU	43,9	43,9	39,7	A001-3	NA	12,4	7,2	5,8	1,7	1926,4	77NA	1969	0	3	38NA	NA	NA		
2558 Rolle di Canaglia	Fongels, Puntid	BAFU	23,9	23,9	22,8	A001-3	NA	15,5	11,5	10,7	1,3	1886,4	62NA	2299	0	29	10NA	NA	NA		
2607 Gomeri	Ornavail	BAFU	38,6	38,6	32,3	A001-3	NA	14,7	8,6	5,8	1,7	2127,5	63NA	1845	3	36	17NA	NA	NA		
4002 Benschinbach	Berghs	KT	11,6	11,6	11,6	A001-3	NA	15,7	11,5	10,7	1,3	1886,4	62NA	2299	0	29	10NA	NA	NA		
2627 Ronco	Ronco	KT	26,2	26,2	24,0	A001-3	NA	20,6	16,4	15,3	1,3	1996,6	59NA	2111	0	41	22NA	NA	NA		
13036 Ticino	Chempennaw	KWVO	37,2	37,2	37,2	A001-3	NA	NA	NA	NA	NA	1967,4	2260	1	20	13NA	NA	NA			
13042 Tiroswasser	Brucke Hotel Strang/KWO	KWVO	18,5	18,5	18,5	A001-3	NA	NA	NA	NA	2037	64NA	2294	0	27	9NA	NA	NA			
13043 Steinwaser	Wasserfassung, Burgli	KWVO	57,6	57,6	13,6	A001-3	NA	NA	NA	NA	NA	2037	64NA	0	19	4NA	NA	NA			
13054 Wysswaser	Gommer Kraftwerke	KWVO	57,6	57,6	13,6	A001-3	NA	NA	NA	NA	NA	2037	64NA	0	19	4NA	NA	NA			
12 Oberre C.	Gurnels	KT	18,7	18,7	18,7	A001-3	NA	7,2	5,7	5,3	1,3	1004	7	-0,00473	573	15	30	6NA	NA	NA	
28 Ebn	Freimettigen	KT	45,1	45,1	45,1	A001-3	NA	10,2	7,9	6,6	1,3	1270,6	22	-0,01027	833	7	21	13NA	NA	NA	
74 Kuerfenerbach	Kuerten	KT	4,5	4,5	4,5	A001-3	NA	3,8	2,6	2,0	1,5	1115,3	15	-0,02037	593	0	96	2	3	NA	NA
88 Unterbach	Oberburg	KT	33,8	33,8	33,8	A001-3	NA	5,8	4,6	4,1	1,2	1130,8	30	-0,01284	698	2	16	20NA	NA	NA	
155 Uerle	Holziken	KT	25,0	25,0	25,0	A001-3	NA	9,8	8,1	7,5	1,2	1118,3	23	-0,00977	574	1	0	16	364	349	NA
78 Untere, H.	Hutwil	BAFU	59,9	59,9	59,9	A001-3	NA	10,9	8,3	7,2	1,3	1293	19	-0,01729	761	5	6	18NA	NA	NA	
92 Luthern, N.	Nebikon	BAFU	104,7	104,7	104,7	A001-3	NA	9,0	7,6	7,2	1,2	1289,7	25	-0,00984	749	5	13	16	725	725	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453	NA
127 Ruederten	Schönbrunn	KT	13,2	13,2	13,2	A001-3	NA	7,9	6,1	5,5	1,3	1145,2	21	-0,01184	614	37	14	27	614	453</	

4323

Tabelle A2: Mit korrigierten Messreihen (2011 - 2022) berechnete Q347, Q290, Q360, Q290/Q347 und andere

4324

Einzugsgebietsparameter von 102 Einzugsgebieten in Mittelland, Voralpen, Alpen und Tessin, sortiert nach

4325

Dauerkurvengruppen - Teil 2

Id	Name	Standort	Datenherr	Fläche Einzugsgebiet [km ²]	Fläche Teilzugsgebiet ohne Gletscher und Permafrostzonen [km ²]	Dauerkurvengruppe	Bestimmung Potenzialfunktion Dauerkurvengruppen	Q290 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Q347 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Q360 [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	mittlerer Jahresniederschlag (1961 - 2020) [mm]	mittlere Geländeneigung [%]	Rezessionskoeffizient b	mittlere Höhe [m u.N.]	Flächenanteil Quarz durchlässig [%]	Flächenanteil Quarz massig durchlässig [%]	Flächenanteil Quarz undurchlässig [%]	spez. Grundwasservolumen (in Mio m ³ ·km ⁻²)	spez. Grundwasservolumen nachgelesen (in Mio m ³ ·km ⁻²)
32	Elbach	Rieterschen	Kt. ZH	31,2	31,2	31,2 OSM 2; Sa, Na, Me	ja	5,9	3,2	2,3	1,8	1179	16	-0,02405	595	2	35	802	689
63	Jonen	Zwilikon	Kt. ZH	37,5	37,5	37,5 OSM 2; Sa, Na, Me	ja	5,2	3,0	2,1	1,7	1276,3	13	-0,03397	601	12	62	7	243
106	Murg, W.	Weggl	BAFU	80,1	64,1	64,1 OSM 2; Sa, Na, Me	ja	6,3	4,0	3,6	1,9	1129,9	15	-0,02734	614	4	44	15	1036
8	Altbach, B.	Bassersdorf	Kt. ZH	11,8	11,8	11,8 OSM 3; Sa, Me	ja	4,8	2,5	1,8	1,6	1154,5	8	-0,02928	548	2	73	15	221
17	Buebach	Brubach	Kt. SG	13,9	13,9	13,9 OSM 3; Sa, Me	ja	3,2	1,4	0,7	2,3	1122	8	-0,05669	578	2	78	7	457
60	Hezbach	Villmergen	Kt. AG	23,9	23,9	23,9 OSM 3; Sa, Me	ja	4,6	2,8	2,1	1,7	1109,2	11	-0,02094	580	4	76	8	444
64	krzibach	Muri	Kt. AG	6,1	6,1	6,1 OSM 3; Sa, Me	ja	5,2	2,7	1,9	1,9	1131,1	12	-0,02041	643	0	91	3	1423
81	Lauche, M.	Mudingen	Kt. TG	48,9	48,9	48,9 OSM 3; Sa, Me	ja	4,2	1,9	1,2	2,2	1038,9	9	-0,04414	543	5	61	10	666
107	Sellenbodenbach	Neumünch	Kt. ZH	36,0	36,0	36,0 OSM 3; Sa, Me	nein	4,5	2,7	2,1	1,7	997,9	7	-0,02369	610	7	69	16	1108
133	Sellenbodenbach	Neumünch	BAFU	10,4	10,4	10,4 OSM 3; Sa, Me	ja	3,9	1,4	0,6	2,9	1214,8	10	-0,05929	630	1	54	7	29
148	Sinsertbach	Sins	Kt. AG	16,3	16,3	16,3 OSM 3; Sa, Me	ja	3,9	1,7	1,0	2,3	1135,7	9	-0,04132	564	2	80	0	0
149	Thurbach	Mudingen	Kt. TG	14,1	14,1	14,1 OSM 3; Sa, Me	ja	4,5	2,0	1,1	2,2	1002,4	11	-0,03992	582	2	55	1	996
167	Wesembach, B.	Brühl	Kt. AG	11,2	11,2	11,2 OSM 3; Sa, Me	ja	4,7	2,9	2,2	1,6	1119,5	13	-0,02536	681	8	80	3	854
168	Wesembach, M.	Mermischwand	Kt. AG	10,0	10,0	10,0 OSM 3; Sa, Me	ja	4,6	2,3	1,6	2,0	1144,1	10	-0,02771	554	2	87	5	150
34	Falenbach	Roggwil	Kt. TG	5,7	5,7	5,7 OSM 4; Sa, Me	ja	1,6	0,5	0,2	3,0	1053	4	-0,13105	462	0	99	1	4
42	Gausenbach	Guttingen	Kt. TG	4,2	4,2	4,2 OSM 4; Sa, Me	ja	1,7	0,5	0,2	3,5	989	4	NA	466	0	100	0	0
43	Gessen	Burghöl	Kt. TG	24,8	24,8	24,8 OSM 4; Sa, Me	ja	1,3	0,4	0,1	3,7	999,7	5	-0,08763	503	2	99	4	93
65	Kermenbach	Grußmühle	Kt. TG	33,3	33,3	33,3 OSM 4; Sa, Me	ja	2,7	1,1	0,3	2,5	958,8	6	-0,09331	530	0	83	1	0
143	Schibach	Reitighölzen	Kt. VD	16,3	16,3	16,3 OSM 4; Sa, Me	ja	1,7	0,6	0,3	2,7	986,3	5	-0,04712	530	0	94	0	0
19	Beirat de Morges	Pignon	Kt. VD	34,0	34,0	34,0 OSM 4; Sa, Me	ja	2,5	1,2	0,4	2,1	1016,7	7	-0,02940	544	0	91	2	NA
48	Grenat	Pignon	Kt. VD	19,5	19,5	19,5 OSM 4; Sa, Me	ja	2,8	1,3	1,0	2,1	1008,1	10	-0,03453	759	13	33	3	NA
103	Leignes	Reyers	Kt. VD	31,7	31,7	31,7 OSM 4; Sa, Me	ja	2,8	1,3	1,0	1,5	1004,2	7	-0,01517	599	4	93	0	NA
23	Blare, K.	Reyers	Kt. BE	30,5	30,5	30,5 OSM 4; Sa, Me / OMM 4; Sa	ja	4,1	2,1	2,1	1,5	962,8	12	-0,07450	523	8	63	13	NA
97	Non	Port La Ville	Kt. VD	15,3	15,3	15,3 OSM 4; Sa, Me / OMM 4; Sa	ja	2,9	1,2	0,8	2,4	1086,2	10	-0,03949	610	0	90	1	NA
72	Reichenbach	Geitlen	Kt. AG	10,2	10,2	10,2 OSM 4; Sa, Me / OMM 4; Sa	ja	5,8	4,6	3,3	1,3	1120,8	13	-0,00530	688	4	18	17	740
49	Rein	Chancy	Kt. VD	46,9	46,9	46,9 OSM 4; Sa, Me / OMM 4; Sa	ja	1,3	2,0	1,6	1,9	1013,3	35	-0,02589	630	2	58	1	NA
54	Rein	Chancy	Kt. VD	46,9	46,9	46,9 OSM 4; Sa, Me / OMM 4; Sa	ja	1,3	2,0	1,6	1,9	1013,3	35	-0,02589	630	2	58	1	NA
52	Grosbach, E.	Enschingen	BAFU	6,9	6,9	6,9 Vorabp 1	ja	10,0	5,6	3,4	1,8	1999	41	-0,08797	1129	25	21	6	342
71	Kleine Erme, W.	Werthenstein	BAFU	311,4	268,4	268,4 Vorabp 1	ja	10,8	5,9	3,8	1,8	1746,4	38	-0,06088	1219	14	16	14	NA
90	Lugern, N.	Nesslau	Kt. SG	29,2	29,2	29,2 Vorabp 1	ja	10,6	5,9	3,8	1,8	2136	41	-0,02961	1219	13	25	22	NA
109	Necker	Mogelsberg	BAFU	86,1	86,1	86,1 Vorabp 1	ja	9,9	4,7	3,4	2,1	1733,4	32	-0,06496	954	3	18	5	35
142	Steinenbach, K.	Kallurum	Kt. SG	18,6	18,6	18,6 Vorabp 1	ja	13,4	6,4	3,7	2,1	2059,7	41	-0,03893	1119	9	27	8	1
154	Urnsbach	Hundwil	Kt. AR	64,6	64,6	64,6 Vorabp 1	ja	18,5	11,8	6,7	1,4	1896,8	35	-0,02896	1092	6	25	10	30
3802	Ragnatscherbach	Mels	Kt. SG	3,7	3,7	3,7 Vorabp 1	ja	8,3	3,5	1,5	2,4	2105,2	53	NA	1546	3	32	15	NA
4	Albach, Sch.	Schmerikon	Kt. SG	38,5	38,5	38,5 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	7,8	3,9	2,1	2,0	1840,2	30	-0,04525	806	5	33	6	146
48	Gelt, H.	Herisau	BAFU	16,7	16,7	16,7 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	9,2	5,3	3,7	1,7	1501,2	24	-0,04422	831	0	14	5	28
55	Gerts, Be.	Belp	BAFU	116,0	116,0	116,0 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	9,1	5,4	3,9	1,7	1230,7	24	-0,03941	845	8	45	29	NA
61	Iffs	Langnau	BAFU	187,5	187,5	187,5 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	11,1	7,2	5,4	1,5	1637,8	42	-0,02771	1038	7	5	22	NA
117	Rickenbach, W.	Wettwil	Kt. SG	16,0	16,0	16,0 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	6,9	3,7	1,9	1,9	1866,8	28	-0,05101	905	6	56	1	4
134	Sense	Thürschburg	BAFU	351,2	351,2	351,2 Vorabp 1 / OMM 4; Sa	ja	8,7	6,3	5,0	1,4	1448,8	30	-0,02170	1089	6	21	22	NA
11	Bier	Brundobach	BAFU	31,9	31,9	31,9 Vorabp 2	ja	9,1	4,3	3,3	1,8	1782	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
140	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
141	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
142	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
143	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
144	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
145	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
146	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
147	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
148	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
149	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
150	Kreuzbach, B.	Brundobach	BAFU	43,0	43,0	43,0 Vorabp 2	ja	7,7	4,2	2,3	1,7	1671,2	23	-0,03797	1090	28	23	10	243
1504	Val d'Ille, Gonca	Ille	Kt. TI	3,9	3,9	3,9 Vorabp 1	ja	7,9	4,4	3,1	1,8	1595,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15044	Val d'Ille, Gonca	Ille	Kt. TI	15,9	15,9	15,9 Vorabp 1	ja	11,4	10,6	7,0	1,5	1775,1	59	-0,02830	NA	NA	NA	NA	NA
15085	Callegio	Portezza	Italien	54,1	54,1	54,1 Vorabp 1	ja	16,6	11,1	9,6	1,5	1801	36	-0,02098	NA	NA	NA	NA	NA
15087	Scarlato	Buttrero	Kt. TI	9,4	9,4	9,4 Vorabp 1	ja	12,8	8,5	7,5	1,5	1663,7	36	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15088	Mera	Maroggia	Kt. TI	14,4	14,4	14,4 Vorabp 1	ja	10,4	6,3	5,6	1,7	1673	59	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15091	Fatoppra	Chasso	Kt. TI	23,2	23,2	23,2 Vorabp 1	ja	9,9	6,5	4,7	1,5	1611,1	18	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15092	Beggia	Chasso	BAFU	39,1	39,1	39,1 Vorabp 1	ja	1,7	0,7	0,4	2,6	1677,9	60	-0,06274	NA	NA	NA	NA	NA

4327 **Tabelle A3: Informationen zu den vorgängigen Korrekturen der Abflussmessreihen bezüglich Wasserentnahmen**
 4328 **und unterirdischen Abflüssen – Teil1**

Id	Name	Pegelstandort	Eigentümer	Verwendungszweck	Grund für Verwerfung	Information zu unterirdischem Abfluss unter dem Pegel	Datenverfügbarkeit zu Wasserentnahmen/-rückgaben	Datenverfügbarkeit zu Rückgaben durch ABA	Berechnungsmethode Wasserentnahmen/-rückgaben	AMA-Standard	Bemerkungen	Abflusskorrektur total [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur des Wassernahme-/rückgabe [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur des unterirdischen Abflusses [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur des Abflusses unterirdisch korrigiert total [%]	Korrigiertes Q _{AB} [l s ⁻¹ km ⁻²]		
4	Alsbach	Schneidlen	SG	1	10	10	4		12 aussenhalb			0.61	0.61	15.4	0.0	15.4	3.96	
3	Alsbach	Kirchsch	ZH	3	14	1	1		6 teils, teils	Komplexierte Situation		0	0	26.5	0.0	26.5	2.68	
1	Alsbach, M. (ZH)	Menschaldorf	ZH	1	10	10	1		11 innerhalb			-0.4	-0.4	-15.2	0.0	-15.2	2.63	
5	Aasch	Salmass	BAFU	3	1	1	5		3 aussenhalb			NA			0.0	0.0	2.38	
6	Aarbach	Maggelberg	SG	1	2	1						1.8	1.8	31.2	0.0	31.2	5.77	
7	Alp	Enschelen	BAFU	1		2	3					0	0	0.0	0.0	0.0	7.15	
8	Altbach	Baserdorf	ZH	1	10	10	1		10 innerhalb			0.1	0.1	4.1	0.0	4.1	2.47	
9	Altoggen	Averches	VD	1	10	10	3		6 aussenhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	2.38	
262	Berninabach	Pontresina	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
40	Berninabach	Chamunierbach	BAFU	1	6	1	2		2 aussenhalb			NA	0.332	0.332	7.2	0.0	7.2	4.34
11	Biberbach	Blanchgug	BAFU	1	6	1	2		2 aussenhalb			0.332	0.332	7.2	0.0	7.2	4.34	
12	Bibere	Gurnels	BE	1	10	10	2		2 aussenhalb			1.45	1.45	25.6	0.0	25.6	5.67	
13	Bibere	Kerzers	BE	1	10	10	5		2 aussenhalb			0.16	0.16	6.0	0.0	6.0	2.68	
15	Boron de Morges	Trochenez	VD	1	10	10	3		10 innerhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	1.17	
15092	Breglia	Chasao	BAFU	1	9	2	5		9			NA						
16	Breye	Payerne	BAFU	3	5	9	5		10 innerhalb			NA			0.0	0.0	2.65	
17	Bretsch	Bretsch	SG	1	1	2	3		6 aussenhalb			NA			0.0	0.0	1.44	
18	Bretsch	Muri	TI	3	11	10	1		11 innerhalb			NA			0.0	0.0	2.65	
20	Bretsch	Muri	TI	3	11	10	1		11 innerhalb			NA			0.0	0.0	2.65	
242	Calvina	Calvina	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
21	Chamunierbach	Wärzelen	ZH	1	10	10	1		6 aussenhalb			0.4	0.4	12.2	0.0	12.2	3.77	
2263	Chamunierbach	La Punt-Chamuesch	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
25	Chelienbach	Gossau	SG	1	6	2	1		6 aussenhalb		Annahme: Rückgabeneige der ARA entspricht der Entnahmeneige im Niedrigwasser	0.44	0.44	22.1	0.0	22.1	1.99	
26	Chise	Fremettien	BE	1	10	10	3		6 innerhalb			0.81	0.81	10.2	0.0	10.2	7.96	
277	Chrouxthalbach	Chrouxthal	BE	3	7	9	2		9 aussenhalb			NA						
15085	Gugio	Portezza	TI	1	9	2	2		9			NA						
2327	Dichmabach	Davis, Krieglatten	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
29	Dorfbach	Maur	ZH	3	11	10	1		8 aussenhalb			0.32	0.32	30.2	0.0	30.2	1.06	
32	Enschelen	Enschelen	ZH	1	7	1	1		6 teils, teils			0.7	0.31	0.37	9.6	11.4	3.23	
15091	Faloppa	Chasao	TI	2	6	9	2		9			NA						
34	Feilerbach	Rogwil	TG	1	10	10	3		6 aussenhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	0.35	
35	Feldbach	Steckorn	TG	3	2	1	5		11 aussenhalb			NA						
36	Fisbach	Fisbach	AG	1	10	10	2		2 aussenhalb			0.34	0.34	7.2	0.0	7.2	4.74	
41	Gron La Ville	Gron La Ville	VD	1	6	10	3		6 teils, teils			0	0	0.0	0.0	0.0	0.19	
42	Grossbach	Grossbach	VD	2	6	10	2		6 aussenhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	0.48	
43	Grossen	Burglen	TG	1	6	10	2		6 aussenhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	0.16	
46	Glatf. H.	Herbau	BAFU	1	6	10	2		3 innerhalb			-2.75	-2.75	-55.9	0.0	-55.9	4.92	
2607	Goneri	Oberwald	BAFU	2	6	10	2		9			NA						
49	Griefel	Pigeon	VD	1	4	2	5		9			0	0	0.0	0.0	1.26		
52	Grossbach	Enschelen	BAFU	1	4	10	5		9			NA	0	0	0.0	0.0	5.93	
2776	Grossbach	Enschelen	BAFU	2	6	2	2		2 aussenhalb			NA	0.2	0.2	3.6	0.0	3.6	5.55
15	Grossen	Bretsch	BAFU	3	8	9	2		6 teils, teils			NA						
170	Gurbe	Bretsch	BE	3	10	1	2		9			NA						
58	Haselbach	Mattenstetten	ZH	3	10	1	2		6			NA						
2631	Hinterrein	Hinterrein, Schiesplatz	BAFU	2	6	9	2		9			NA						
60	Holzbach	Villmergen	AG	1	10	1	1		13 aussenhalb			0.92	0.92	33.5	0.0	33.5	2.74	
61	Hilt	Langrau	BAFU	1	8	1	1		6 aussenhalb			1.16	0.2	0.96	2.7	13.0	15.7	
2653	Im	Langrau	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
62	Jona	Waldsiedlung	ZH	1	10	1	1		6			NA						
63	Jona	Waldsiedlung	ZH	1	10	1	1		13 teils, teils			0.67	0.67	20.5	0.0	20.5	3.27	
234	Jalla	Staveller	EWZ	2	6	10	2		9			NA						
64	Karzbach	Muri	AG	1	6	2	6		1 aussenhalb			0.77	0.77	31.0	0.0	31.0	2.48	
65	Kemmenbach	Gruhmühle	TG	1	10	10	2		4 innerhalb			-0.27	-0.27	-25.7	0.0	-25.7	1.05	
66	Kempt	Illnau	ZH	3	12	9	4		13 teils, teils			0	0	0.0	0.0	0.0	3.72	
71	Kleine Emme	Werthenstein	BAFU	1	10	2	3		10 innerhalb			0	0	0.0	0.0	0.0	5.62	
24	Korallenbach	Korallenbach	BAFU	1	6	1	2		6 aussenhalb			2.5	0.7	1.8	15.6	40.0	55.6	
244	Korallenbach	Korallenbach	BAFU	2	6	10	1		9			NA						
246	Korallenbach	Korallenbach	BAFU	2	6	10	1		2 aussenhalb			0.7	0.7	26.3	0.0	26.3	2.66	
2355	Landwasser	Davos, Frauenkirch	BAFU	2	6	10	2		9			NA						
77	Largelle	Leimiswil	BE	3	7	9	2		2 aussenhalb			0.42	0.42	9.0	0.0	9.0	4.67	
76	Largelle	Huttwil	BAFU	1	2	4	1		12 aussenhalb			0.57	0.57	6.8	0.0	6.8	8.44	
81	Lauche	Mürzigen	TI	1	10	1	1		6 aussenhalb			0.43	0.43	22.9	0.0	22.9	1.88	
80	Lauche	Affenzuzen	TI	3	9	2	2		9			NA						
15083	Laviggio	Mendrisio	TI	1	6	9	2		9			NA						
2593	Luzza	Baren	BAFU	2	6	2	2		9			NA						

4335 **Tabelle A4: Informationen zu den vorgängigen Korrekturen der Abflussmessreihen bezüglich Wasserentnahmen**
 4336 **und unterirdischen Abflüssen – Teil 2.**

Name	Pegelstandort	Eigentümer	Verwendungszweck	Grund für Verwerfung	Information zu unterirdischem Abfluss unter dem Pegel	Datenverfügbarkeit zu Wasserentnahmen/-rückgaben	Datenverfügbarkeit zu Rückgaben durch ARA	Berechnungsmethode Wasserentnahmen/-rückgaben	ARA-Standard	Bemerkungen	Abflusskorrektur total [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur Wasserentnahme/rückgabe [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur des unterirdischen Abflusses [l s ⁻¹ km ⁻²]	Korrektur des unterirdischen Abflusses [%]	Abflusskorrektur total [%]	korrigiertes Q347 [l s ⁻¹ km ⁻²]	
89 Luterbach		BE	1		6	2		2 ausserhalb			1.33	0.29	1.04	6.3	22.5	28.8	4.61
90 Lutern	Nesslau	SG	1			2		6 ausserhalb			0.054	0.054	1.0	0.0	1.0	5.66	
92 Lutern	Nebikon	BAFU	1		4	1		2 ausserhalb			4.32	0.22	4.1	2.9	54.5	57.4	7.53
93 Lysbach	Bundkofen	BE	3	11	10	2		2 ausserhalb			0.68	0.68		13.5	0.0	13.5	5.02
94 Maglissina	Maglissa	BAFU	1		10	2		9			NA						
15088 Maroggia	Maroggia	TI	2		6	9		9			NA						
96 Mederbach	Maroggia	ZH	3	5	9	5		9			NA			0.0	0.0	0.0	1.89
2206 Mettera	Morbibbia	BAFU	3	11	2	2		9			NA						
99 Mermue	Monard	BAFU	1		2	3		6 innerhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.23
100 Morges	Morges	VD	1		2	3		9 teils, teils			-0.25	-0.25		-6.3	0.0	-6.3	3.99
106 Murg	Waengi	BAFU	1		3	3		6 innerhalb			1.18	0.18	1	5.2	28.7	33.9	3.48
103 Muirg	Fichingen	TG	1		5	1		9			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.63
107 Nabach	Nefenbach	ZH	1		5	9	5	9			0	0	0	0.0	0.0	0.0	4.56
109 Necker	Mogelsberg	BAFU	1		2	8		10 innerhalb			NA						
172 Önz	Heimenhausen	BE	3	1	1	2		9			NA						
476 Orlegna	Orden	EMZ	2		2	2		9			NA						
2304 Ova dal Fuorn	Zernez, Punt la Drossa	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
110 Parimbot	Ecublens	BAFU	1		2	3		9 teils, teils			NA						
111 Petite-Glane	Bussy	VD	3	5	9	5		9			0	0	0	0.0	0.0	0.0	1.27
113 Pfaffern	Vordemwald	AG	1		10	2		2 ausserhalb			0.59	0.59	11.0	0.0	11.0	5.36	
2366 Poschiavino	La Rosa	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
114 Rappengraben	Wasen, Riedbad	BAFU	1		2	7		10 ausserhalb			NA						
2430 Rein da Sunvilg	Sumvilg, Encardens	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
2358 Riale di Calneggia	Foroglio, Puntid	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
15040 Riale di Gnosca	Lavertezzo	TI	2	6	10	2		9			NA						
2612 Riale di Pincoscia	Grosio	BAFU	2	6	2	2		9			NA						
117 Rickenbach	Watwil	SG	1		10	1		6 ausserhalb			0.26	0.26	7.1	0.0	7.1	3.64	
119 Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	BAFU	1		2	7		10 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.60
121 Rindalbach	Luettibach	SG	3	11	2	1		5 ausserhalb			4.3	4.3	62.8	0.0	62.8	6.85	
2617 Rom	Muetair	BAFU	2	6	10	2		9			NA						
2256 Rosgebach	Pontresina	BAFU	2	6	10	2		9			NA						
171 Rot	Roggwil BE	BE	3	1	1	2		9			NA						
124 Rotbach	Buehler	AR	1		2	3		6 innerhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	4.43
127 Rueterchen	Schoerftand	AG	1		4	4		12 ausserhalb			3.15	0.65	2.5	10.8	41.7	52.5	6.00
15087 Scarlolo	Barbeno	TI	2	6	9	2		9			NA						
2491 Schaecken	Buerlen	BAFU	3	11	9	2		9			NA						
3803 Seet	Weistannen	SG	2	6	9	2		9			NA						
133 Sellenbodenbach	Neuenkirch	BAFU	1		9	3		6 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	1.35
134 Sense	Thodislaus	BAFU	1		2	2		2 teils, teils			0.18	0.18	2.8	0.0	2.8	6.32	
135 Sinnerbach	Sins	AG	1		2	2		2 ausserhalb			0.1	0.1	5.9	0.0	5.9	1.69	
137 Sornbach	Niederbuehren	SG	3	13	10	1		6 ausserhalb			0.74	0.74	20.0	0.0	20.0	3.70	
138 Sperbelgraben	Kurzenealp	BAFU	1		2	7		6 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	3.73
142 Steinbach	Kalbrunn	SG	1		10	1		6 ausserhalb			0.28	0.28	4.1	0.0	4.1	6.84	
15043 Steinwasser	Bruecke Hotel Stengletscher	KW Oberhasli	2	6	2	2		9			NA						
143 Stichbach	Bottighofen	TG	1		2	3		6 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.61
145 Surb	Niederweningen	ZH	2	7	9	2		2 ausserhalb			1.7	1.7	42.9	0.0	42.9	3.97	
147 Taegerbach	Willkofen	AG	1		10	2		2 ausserhalb			0.35	0.35	8.0	0.0	8.0	4.38	
148 Talent	Chavornay	VD	1		10	3		6 teils, teils			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.00
149 Thunbach	Matzingen	TG	1		10	1		6 ausserhalb			0.25	0.25	12.4	0.0	12.4	2.02	
15036 Ticino	Ronco	SG	2	6	10	2		9			NA						
150 Toess	Becher	ZH	2	6	2	7		6 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.05
151 Töss	Balmühle	ZH	3	9	7	2		2 teils, teils			3.94	0.24	3.7	3.8	58.7	62.5	6.30
1502 Trifwasser	Chempengwang	KW Oberhasli	2	6	2	2		9			NA						
153 Uetere	Hözliden	AG	1		10	8		10 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	7.97
154 Urnaesch	Hundwil	AR	1	10	2	5		9			0	0	0	0.0	0.0	0.0	1.106
15084 Vedeggio	Isone	TI	1		2	2		9			NA						
158 Venoge	Ecublens	BAFU	3	4	10	5		9 teils, teils			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.03
160 Veveyse	Vevey	BAFU	1		9	2		2 ausserhalb			0.36	0.36	8.2	0.0	8.2	4.39	
161 Wagnerbach	Rapperswil	SG	3	3	9	5		11 ausserhalb			NA						
162 Waldemme	Soerenberg	LU	1		10	2		2 ausserhalb			0.13	0.13	1.4	0.0	1.4	9.43	
165 Wildbach	Wetzikon	ZH	3		10	1		6 teils, teils			-0.4	-0.4	-12.3	0.0	-12.3	3.25	
166 Wissbach	Degerheim	SG	2	1	10	1		6 ausserhalb			0.59	0.59	16.9	0.0	16.9	3.50	
167 Wissenbach	Boswil	BAFU	1		10	1		6 ausserhalb			0.67	0.67	23.2	0.0	23.2	2.89	
168 Wissenbach	Merschwand	AG	1		10	8		6 ausserhalb			0	0	0	0.0	0.0	0.0	2.27
169 Worble	Ittigen	BAFU	3	4	10	5		9			0	0	0	0.0	0.0	0.0	6.64
15059 Wysswasser	Wasserfassung, Burghuette	KW Obergoms	2	6	2	2		9			NA						

4338 *Tabelle A5: Bedeutung der Codes in den Tabellen A3 und A4*

4339

Code	Verwendungszweck
1	Verwendung für Dauerkurven- und Rezessionskurvenanalyse
2	Verwendung nur für Dauerkurvenanalyse
3	Verwendung weder für Dauerkurven-, noch für Rezessionskurvenanalyse

Code	Begründung für Verwerfung
1	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar
2	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar (Quelle: Hydrometrie TG)
3	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
4	Wasserentnahmen nicht bestimmt
5	Wasserentnahmen nicht bestimmt / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
6	Berechnung Rezessionskurven aus methodischen Gründen nicht möglich
7	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
8	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht bestimmbar, wegen fehlender Daten
9	Unsicherheiten in der Bestimmung des unterirdischen Abflusses
10	Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen bestätigt
11	Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen vermutet
12	Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen vermutet / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
13	Unsicherheiten in den P/Q-Beziehungen vermutet / Einfluss von Seen im EZG
14	Pegel auf Restwasserstrecke

Code	Info zum unterirdischen Abfluss
1	Abschätzung des unterirdischen Abfluss nicht durchgeführt, weil EZG wegen anderer Gründe für Auswertungen nicht berücksichtigt wurde
2	kein unterirdischer Abfluss an der Pegelstation
3	kein unterirdischer Abfluss an der Pegelstation, aber unterirdischer Abfluss an der Satation Murg Fischingen muss subtrahiert werden
4	Bestimmung mit der Übertragungsmethode
5	Bestimmung mit der Darcy-Formel: Daten vom Kanton TG
6	Bestimmung mit der Darcy-Formel: Daten vom Geotechnischen Institut AG
7	Bestimmung mit der Darcy-Formel
8	Bestimmung mit der Darcy-Formel: Daten von Kellerhals + Haefeli AG
9	Unterirdischer Abfluss nicht bestimmt
10	Unterirdischer Abfluss nicht bestimmt, aber wahrscheinlich vernachlässigbar

Code	Datenverfügbarkeit Wasserentnahmen
1	Daten vorhanden
2	Daten nicht angefragt
3	keine Daten erforderlich
4	Daten teilweise vorhanden
5	keine Daten vorhanden
6	keine verlässlichen Daten vorhanden
7	keine Entnahmen vermutet
8	Entnahmen nicht erhoben, aber wahrscheinlich vernachlässigbar

Code	Methode zur Bestimmung der Wasserentnahmen
1	maximal erlaubte Entnahme gemäss Grundwasserschutzkarte
2	Schätzung basierend auf Einwohnerzahl
3	mittlere Tagesentnahmen bei Niedrigwasser der letzten 5 Jahre
4	mittlere Tagesentnahmen bei Niedrigwasser seit 2011
5	mittlere monatliche Entnahmen
6	Mittelwert geschätzt durch die Gemeinden
7	mittlere monatliche Entnahmen seit 2004
8	mittlere monatliche Entnahmen seit 2011
9	keine Korrekturen durchgeführt
10	keine Korrekturen notwendig
11	keine Daten verfügbar
12	teils Mittelwert Gemeinde, teils Schätzung mit Einwohnerzahl
13	teils Monatsmittelwerte, teils Schätzung mit Einwohnerzahl

4340

4341

4342

4343

Tektonische Einheiten	Code
Aar-Massiv	1
Adula-Deckenkomplex	2
Allochthone Einheiten	3
Allochthone Schuppenzone	4
Antigorio-Deckenkomplex	5
Arosler Zone	6
Autochthones und Parautochthones Mesozoikum	7
Averser Decke	8
Axen-Decke	9
Bernina-Decke	10
Bombogno-Zone	11
Bosco-Zone	12
Buendnerschiefer-Decken	13
Campo-Decke	14
Canavese-Zone	15
Cimes-Blanches- und Frilhorn-Decke	16
Combin-Zone (Tsate-Decke)	17
Dent-Blanche-Decke	18
Einheiten in infrahelvetischer Stellung	19
Ela-Decke	20
Err-Deckenkomplex	21
Falknis-Decke	22
Flysch-Decken	23
Gomser Zwischenmassiv	24
Gotthard-Massiv	25
Gotthardmassives Mesozoikum (Scopi-Zone, Frodaler-Peiden-Trias, Peidener Schuppenzone)	26
Grosse Alluvialebenen	27
Gruf-Komplex	28
Interner Jura	29
Ivrea-Verbano-Zone	30
Klippen-Decke	31
Languard-Decke	32
Lebendun-Decke	33
Leventina-Decke	34
Lucomagno-Decke	35
Maechtige oberpleistozäne bis holozäne Bergsturzablagerungen	36
Maechtige Quartaerablagerungen im Allg.	37
Maggia-Decke	38
Malenco-Forno-Lizun-Decke	39
Margna-Decke	40
Mittellaendische Molasse	41
Mont-Fort-Decke	42
Monte-Rosa-Decke	43
Monte Leone-Decke	44
Morcles-Doldenhorn-Decke	45
Muertchen-Decke	46
Noerdliche Kalkalpen	47
Nordpenninische Flysch-Decken	48
Obere Orobische Decke	49
Oetzal-Decke	50
Ophiolith-Zone von Chiavenna	51
Ortler-Decke	52
Platta-Decke	53
Pontis-Decke	54
Quattervals-Decke	55
Rothorn-Decke	56
S-charl-Decke	57
Saentis-Decke	58
Sardona-Decke	59
Schamser Decken	60
Schuppenzone Gonzen-Walenstadt	61
Sedimentbedeckung	62
Sedimente, mesozoische Deckentrenner	63
See	64
Sella-Decke	65
Sesia-Zone	66
Silvretta-Decke	67
Simano-Decke	68
Siviez-Mischabel-Decke	69
Strona-Ceneri-Zone	70
Subalpine Flysch-Zone	71
Subalpine Molasse	72
Subsilvettide Linsen	73
Sulzfluh-Decke (inkl. Anteile der Falknis-Decke)	74
Surette-Decke	75
Tambo-Decke	76
Tasna-Decke	77
Tavetscher Zwischenmassiv	78
Tertiaer des Po-Beckens	79
Tertiaere Intrusiva	80
Tertiaere Sedimente und nordhelvetisches Tertiaer	81
Tonale-Zone	82
Tschep-Decke	83
Tschirpen-Decke	84
Umbrail-Chavalatsch-Schuppenzone (inkl. Terza-Schuppe)	85
Untere Orobische Decke	86
Verrucano und Trias der Ästlichen helvetischen Decken s.str. (nicht differenziert)	87
Vinschgau-Scherzone	88
Wildhorn-Decke	89
Zone Houillere	90
Zone von Bellinzona	91
Zone von Orselina	92
Zone von Sion-Courmayeur	93
Zone von Zermatt - Saas Fee	94

4346 *Tabelle A7: Verwendete tektonische Einheiten der geotechnischen Karte für das Mittelland und für die Voralpen*

Tektonische Einheit	Code
Decke der Prealpes medianes plastiques	1
Flachliegende mittellaendische Molasse	2
Gefaltete und steilgestellte mittellaendische Molasse	3
Faltenjura s.str.	4
Habkern-Decke	5
Klippen von Giswil, Stans, Buochs, Iberg und der Mythen	6
Saentis-Decke s.str. (der Ostschweiz)	7
Subalpine Molasse	8
Waegitaler Decke	9
Schuppenzonen von Einsiedeln, Wildhaus usw.	10
Östliche Wildhorn-Decke und Randkette	11
Schlieren-Decke	12
Gurnigel-Decke	13
Tertiaere Sedimente und nordhelvetisches Tertiaer	14
Ultrahelvetischer Anteil der Prealpes externes	15

4347

4348 *Tabelle A8: Klassen der Gesteinstypen, in die die lithologischen Einheiten des Geocover eingeteilt wurden*

Lithologie	Code
Amphibolit	1
Basische Gesteine: Metabasalte, Gruenschiefer, Ophiolite, Serpentinite	2
Bündnerschiefer	3
Bündnerschiefer mit Rauhwacken	4
Dolomitische Sequenzen	5
Glimmerschiefer	6
Gneise	7
Gneise: kataklastisch	8
Gneise: konglomeratisch	9
Gneise: schiefrig	10
Intermediäre und saure Intrusionsgesteine: Granite, Diorite und Granodiorite	11
Kristalline Brekzien	12
Phyllite	14
Quarzite	16
Rutschung	17
Sackung	18
Sedimentgestein: Kalkgestein mit Mergelzwischenfugen, z.T. geschiefert, z.T. mit klastischen Bänken	19
Sedimentgestein: Kalkgestein mit Mergelzwischenfugen, z.T. geschiefert, z.T. mit klastischen Bänken, z.T. kieselig	20
Sedimentgestein: Konglomerate, Brekzien, Sandsteine, Mergel	21
Sedimentgestein: Konglomerate, Sandsteine, Mergel	22
Wechsellagerungen Rauhwacken, Gips und Dolomit	23
Obere Meeresmolasse (OMM)	24
Obere Süswassermolasse (OSM)	25
Untere Süswassermolasse (USM) oder Untere Meeresmolasse (UMM)	26
Deckenschotter	27

4349

4350 *Tabelle A9: Metamorphose-Fazies in den Schweizer Alpen*

Metamorphosefazies	Kürzel
Obere Blauschieferfazies - Amphibolitfazies	UBS-AM
Amphibolitfazies	AF
Blauschieferfazies	BS
Untere Grünschieferfazies	LGS
Obere Blauschieferfazies	UBS
Obere Grünschieferfazies	UGS
Sub-Grünschieferfazies	SGS
Eclogitfazies-Amphibolitfazies-Granulitfazies	EC-AM-GR
Amphibolitfazies-Granulitfazies	AM-GR
Diagenese	DIA
Blauschieferfazies-Eclogitfazies	BS-EC
Hochdruck-Grünschieferfazies	HPGS
Periadriatische Intrusionszone	PAI
Eclogitfazies	EC
Grünschieferfazies - Amphibolitfazies	GS-AM

4351

4352

4353

4354

4355

4356

4357 *Tabelle A10 – Teil 1: Einzugsgebietseigenschaften und Informationen zum Vorregen der 23*
4358 *Untersuchungsgebiete im Mittelland, für die das Q347 und eine Dauerkurve berechnet wurden.*
4359

Id	area	Einzugsgebiet	Standort	mittlere Gelände- neigung [%]	mittlerer Jahresniederschlag (1991 - 2020) [mm]	spez. Grundwasser- volumen bachgespiesen [in Mio m ³ km ⁻²]	Q unter- irdisch	20-Tages Vorregen vor 2020-09-16	20-Tages Vorregen vor 2023-08-10	Differenz Vorregen [mm]
8000	9.06	Altbach TEZG	Bassersdorf	8	1155		0 NA	74.5	124	40
11000	2.9	Hellbach	Töss	9	1168		0 NA	76.2	119.3	36
24000	3.34	Walenbach	Bauma	47	1511		0 NA	128.7	189.3	32
28000	2.19	Brüttenbach	Ohrüti, Brüttental	61	1705		0 NA	157.2	232.6	32
41000	9.45	Wiessenbach	Brünggen	14	1288	139	NA	93.4	139	33
42000	4.45	Bäntalbach	Nussberg	20	1393		0 NA	107.3	140.7	24
48000	2.76	Tüfenbach	Teufen	25	1059		0 NA	70.4	97.9	28
81000	16.79	Tobelbach	Hinterrikon	16	1376	162	NA	107	161.2	34
87000	2.2	Tobelbach	Bauma	45	1538		0 NA	129	201.8	36
101000	4.08	Moosbach	Oberembrach	12	1108		0 NA	74.7	121.1	38
102000	2.6	Wildbach	Oberembrach	16	1082		0 NA	72.4	114.6	37
103000	1.53	Tobelbach Sued	Pfungen	15	1083		0 NA	70.5	109	35
104000	9.45	Müllbach	Pfungen	20	1079	571	NA	70.1	102.9	32
105000	3.3	Tobelbach	Dättlikon	16	1105		1 NA	72.9	94.7	23
111000	0.64	Mittlerer Chrebsbach	Winterthur	15	1257		0 NA	72.3	101.8	29
112000	2.75	Altbach	Birchwil	6	1154		0 NA	76.3	122.9	38
211000	2.53	Lochbach	Saland	38	1520		0 NA	123.7	194.4	36
443000	20.42	Wildbach bei Rorbas	Rorbas, Töss	13	1048	1026	3.87	65.1	106.6	39
624000	4.09	Töss	Beicher	65	1761		0 NA	167.1	242.3	31
625000	4.21	Hindertöss	Tössscheidi	62	1877		0 NA	183.5	259.3	29
626000	2.86	Vordertöss	Tössscheidi	54	1813		0 NA	167.9	234.7	28
627000	2.73	Steinenbach	Horn bei Steinenbach	44	1539		0 NA	127.8	200.4	36
628000	1.84	Hutzikerbach	Turbenthal	34	1433		0 NA	114.5	155.4	26

4360
4361

4362 *Tabelle A10 – Teil 2: Abflusswerte, Referenzgebiete, Wasserentnahmen, Abflussperzentile der Einzelmessungen*
4363 *der 23 Untersuchungsgebiete im Mittelland, für die das Q347 und eine Dauerkurve berechnet wurden.*

Id	area	Einzugsgebiet	Standort	Referenzgebiete	Datum Messung 1	Datum Messung 2	Datum Messung 3	Q Messung 1 [l s ⁻¹ km ⁻²]	Entnahmen Messung 1	Q Messung 1 korrigiert [l s ⁻¹ km ⁻²]	Perzentil Messung 1	Q Messung 2 [l s ⁻¹ km ⁻²]	Entnahmen Messung 2	Q Messung 2 korrigiert [l s ⁻¹ km ⁻²]	Perzentil Messung 2	Q Messung 3 [l s ⁻¹ km ⁻²]	Entnahmen Messung 3	Q Messung 3 korrigiert [l s ⁻¹ km ⁻²]	Perzentil Messung 3
8000	9.06	Altbach TE23	Bassersdorf	Altbach	21.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	3.92	0	3.92	321	4.12	0	4.12	314	2.81	0	2.81	343
11000	2.9	Heilbach	Töss	Mittel zwischen Altbach und Nafelbach	21.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	0.55	0.08	0.63	336	1.31	0.32	1.63	317	0.47	0.3	0.77	341
24000	3.34	Walenbach	Bauma	Chamterbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.66	0	2.66	346	6.52	0	6.52	290	2.66	0	2.66	341
28000	2.19	Brütenbach	Ohridi, Brüttental	Chamterbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	3.28	0.04	3.32	346	5.92	0.1	6.02	290	2.87	0.1	2.97	341
41000	9.45	Wiesenbach	Brüngen	Mittel zwischen Altbach und Chamterbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	3.32	0.13	3.45	335	5.79	0.2	5.99	314	3.78	0.15	3.93	346
42000	4.45	Bantälbach	Nussberg	Chamterbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.25	0	2.25	352	3.37	0	3.37	310	2.67	0	2.67	339
48000	2.76	Tufenbach	Teufen	Näfäbach	17.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.23	0.35	1.58	351	2.13	0.55	2.68	320	1.66	0.57	2.23	338
81000	16.79	Tobelbach	Hinterikon	Mittel zwischen Rietholzbach und Surb	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	3.63	0.16	3.79	349	7.73	0.27	8	288	5	0.31	5.31	334
87000	2.2	Tobelbach	Bauma	Rietholzbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.19	0	2.19	337	7.19	0	7.19	276	3.01	0	3.01	329
101000	4.08	Moosbach	Oberembach	Mittel zwischen Altbach und Nafelbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	2.42	0	2.42	327	3.38	0.3	3.68	317	1.61	0.1	1.91	341
102000	2.6	Wildbach	Oberembach	Mittel zwischen Altbach und Nafelbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.58	0	1.58	327	2.15	0	2.15	317	0.88	0	0.88	341
103000	1.53	Tobelbach Surd	Prunigen	Mittel zwischen Altbach und Nafelbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.7	0	1.7	327	2.29	0	2.29	317	1.64	0	1.64	341
104000	9.45	Müllbach	Prunigen	Mittel aus Surb und Altbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.86	0.87	2.73	332	4.49	0.92	5.41	296	2.38	0.95	3.33	328
105000	3.3	Tobelsbach	Dittlikon	Näfäbach, Analoge Voregen	17.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.76	0.18	1.94	351	2.64	0.25	2.69	320	2.15	0.22	2.37	338
11000	0.84	Mittlerer Chablsbach	Winterthur	Mittel zwischen Altbach und Nafelbach	20.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.1	0	1.1	333	1.62	0	1.62	317	0.71	0	0.71	341
12000	2.73	Altbach	Birchwil	Altbach	21.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	2.4	0	2.4	321	3.16	0	3.16	314	1.6	0	1.6	343
211000	2.53	Uebibach	Säland	Rietholzbach	22.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.6	0	2.6	337	9.96	0	9.96	276	5.18	0	5.18	329
443000	20.45	Widbach bei Rorbas	Rorbas, Töss	Mittel aus Surb und Altbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	2.31	1.2	3.51	332	2.89	1.3	4.19	296	2.56	1.3	3.86	328
624000	4.09	Töss	Becher	Rietholzbach	24.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	1.95	0	1.95	343	7.74	0	7.74	276	2.88	0	2.88	329
625000	4.21	Hinterfloss	Tössscheidi	Rietholzbach	24.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.78	0	2.78	343	6.63	0	6.63	276	3.3	0	3.3	329
626000	2.86	Vorderfloss	Tössscheidi	Rietholzbach	24.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	3.94	0	3.94	343	7.82	0	7.82	276	4.12	0	4.12	329
627000	2.73	Steinbach	Horn bei Steinbach	Rietholzbach	24.09.2020	NA	NA	2.02	0	2.02	343	NA	0	NA	NA	0	0	0	NA
628000	1.84	Hutzbach	Turtenthal	Rietholzbach	24.09.2020	15.08.2023	21.08.2023	2.12	0	2.12	343	5.72	0	5.72	276	2.67	0	2.67	329

4365 *Tabelle A11: Liste der Einzugsgebiete, die aus dem Set der zu Beginn festgelegten 118 Einzugsgebiete nicht für*
4366 *die Analysen der Dauerkurven und Rezessionskurven berücksichtigt wurden, mit der Begründung der Nicht-*
4367 *Berücksichtigung. Die Codierung ist in Tabelle A13 ersichtlich.*

Id	Name	Standort	Data owner	Grund für die Nicht-Berücksichtigung
3	Aabach	Käpfnach	Kanton Zürich	Pegel auf Restwasserstrecke
5	Aach	Salmsach	BAFU	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar
16	Broye	Payerne	BAFU	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
18	Buenz	Muri	Kanton Aargau	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar
27	Chrouchtalbach	Chrouchtal	Kanton Bern	Wasserentnahmen nicht bestimmt
29	Dorfbach	Maur	Kanton Zürich	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet
35	Feldbach	Steckborn	Kanton Thurgau	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar (Quelle: Kanton TG)
58	Haselbach	Mettmenstetten	Kanton Zürich	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung bestätigt
62	Jona	Pilgersteg	Kanton Zürich	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung bestätigt
66	Kempt	Illnau	Kanton Zürich	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
77	Langete	Leimiswil	Kanton Bern	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
80	Lauche	Affeltrangen	Kanton Thurgau	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
93	Lyssbach	Bundkofen	Kanton Bern	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet
96	Mederbach	Marthalen	Kanton Zürich	Wasserentnahmen nicht bestimmt / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
111	Petite-Glane	Bussy	Kanton Waadt	Wasserentnahmen nicht bestimmt / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
121	Rindalbach	Luetisburg	Kanton St. Gallen	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet
137	Sornbach	Niederbuehren	Kanton St. Gallen	Einfluss durch Seen
151	Töss	Rämismühle	Kanton Zürich	Unsicherheiten in der Bestimmung des unterirdischen Abflusses
158	Venoge	Ecublens	BAFU	Wasserentnahmen nicht bestimmt
161	Wagnerbach	Rapperswil	Kanton St. Gallen	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
165	Wildbach	Wetzikon	Kanton Zürich	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
169	Worble	Ittigen	BAFU	Wasserentnahmen nicht bestimmt
170	Guerbe	Burgistein	Kanton Bern	unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht bestimmbar
171	Rot	Roggwil BE	Kanton Bern	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar
172	Önz	Heimenhausen	Kanton Bern	grosse Wasserentnahmen nicht bestimmbar
2161	Massa	Blatten	BAFU	Keine Eichmessungen im Winter vorhanden
2206	Melera	Morobbia	BAFU	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet
2268	Rhone	Gletsch	BAFU	Keine Eichmessungen im Winter vorhanden
2319	Ova da Cluozza	Zernez	BAFU	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet
2491	Schaechen	Buerglen	BAFU	Wasserentnahmen nicht bestimmt / unterirdischer Abfluss nicht bestimmt
15089	Laveggio	Mendrisio	Kanton Tessin	Wasserentnahmen nicht bestimmt / unterirdischer Abfluss unter Pegel nicht abgeschätzt
15092	Breggia	Chiasso	BAFU	Wasserentnahmen nicht bestimmt
2347	Riale di Roggiasca	Roveredo	BAFU	Unsicherheiten in P/Q-Bestimmung vermutet

4368
4369
4370
4371
4372
4373
4374
4375
4376
4377

A1. Bestimmung des unterirdischen Abflusses mit der hydrologischen Methode

A1.1 Luterbach, Oberburg

Fehlen die notwendigen hydrogeologischen Daten für die Anwendung der Darcy-Formel, kann der Grundwasserfluss unter der Pegelstation auch mithilfe einer neuen hydrologischen Methode abgeschätzt werden. Diese wurde in vier alpinen Einzugsgebieten erprobt (Naef und Margreth, 2017) und wird nun in vier Plateau-Einzugsgebieten angewendet. Das Verfahren wird im Folgenden am Beispiel des Luterbachs in Oberburg beschrieben, für den beide Methoden – die hydrologische Methode und die Darcy-Formel – anwendbar sind. Dadurch können die Ergebnisse verglichen werden.

Der Luterbach besteht aus zwei Teileinzugsgebieten ähnlicher Grösse, dem Krauchtalbach und dem Luterbach (Abbildung 81). Während der Krauchtalbach über einen langen Abschnitt auf einem Kiesgrundwasserleiter fliesst (Abbildung 81), gibt es im Teileinzugsgebiet des Luterbachs praktisch keine Schottergrundwasserleiter.

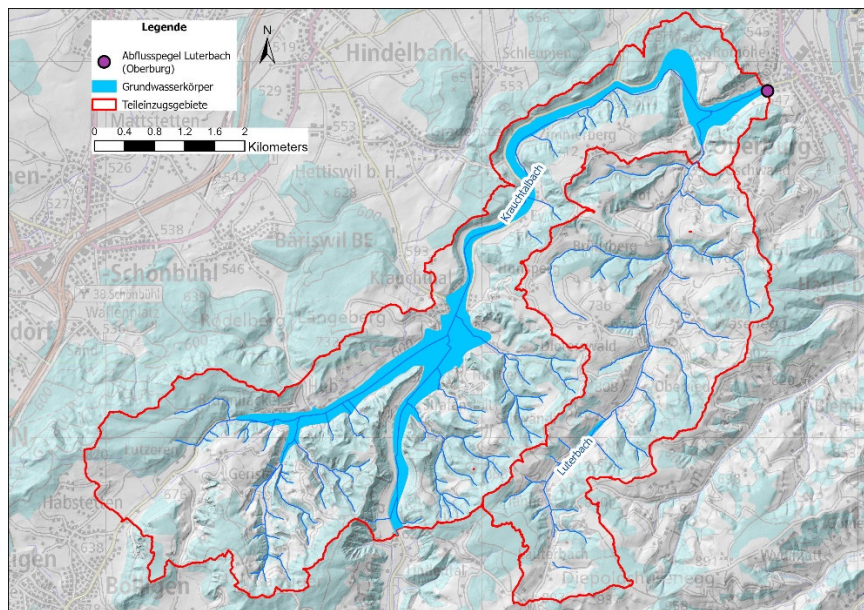


Abbildung 81: Abgrenzung der beiden Teileinzugsgebiete des Luterbachs, des Krauchtalbachs und des Luterbachs. In Oberburg wird der Abfluss des Luterbachs kontinuierlich von einer Abflussmessstation des Kantons Bern erfasst.

Beide Teileinzugsgebiete bestehen aus Sandsteinen der Oberen Marinen Molasse (OMM). Man unterscheidet jedoch zwischen der OMM 1, den sogenannten Sense-Schichten, die hauptsächlich das Teileinzugsgebiet des Krauchtalbachs bilden, und der OMM 2, den sogenannten Belpberg- und Niedermatt-Schichten, die häufig im Teileinzugsgebiet des Luterbachs vorkommen (Abbildung 82). Um den Beitrag der verwitterten und zerklüfteten Schichten der OMM 1 und OMM 2 zum Abfluss zu bestimmen, wurde der Abfluss in verschiedenen kleinen Teileinzugsgebieten gemessen, während der Niedrigwasserperiode vom 23. bis 25. April 2020, als der Abfluss nahe Q347 lag. Der spezifische Abfluss des aus OMM 2 aufgebauten Teileinzugsgebiets 529 beträgt $9.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$,

mehr als viermal so hoch wie der des aus OMM 1 gebildeten Teileinzugsgebiets 513 ($2.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Der spezifische Abfluss des Teileinzugsgebiets 510 ist ebenfalls hoch, obwohl die geologische Karte einen hohen Flächenanteil von OMM 1 ausweist. Die für den nördlichen Teil des Gebiets verfügbare geologische Karte stammt aus dem Jahr 1950, die für den südlichen Teil aus dem Jahr 2001. Die Grenze zwischen den Kartenblättern ist durch eine gerade Linie zwischen OMM 1 und OMM 2 gekennzeichnet (siehe schwarzer Pfeil in Abbildung 82). Unter der Annahme, dass 2001 deutlich bessere Informationen vorlagen als 1950, halten wir das Kartenblatt für den südlichen Teil für zuverlässiger als das für den nördlichen. Dies würde bedeuten, dass der Anteil von OMM 2 im Teileinzugsgebiet 510 deutlich unterschätzt sein könnte. Dies stünde in besserem Einklang mit dem ermittelten hohen Wert des spezifischen Abflusses von $8.8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Fließgewässer mit einer gemischten Zusammensetzung aus OMM 1 und OMM 2 (514, 517, 521, 522) wiesen mittlere spezifische Abflüsse von $5,1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ bis $5,3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf. Der Beitrag von OMM 2 zum Abfluss ist daher deutlich höher als der von OMM 1. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Sandsteine von OMM 1 durch zahlreichere Mergelschichten getrennt sind als die von OMM 2 (Swisstopo 1950, Swisstopo 2001). Die Mergelschichten hemmen die Infiltrationsfähigkeit, sodass sich im Gegensatz zu OMM 2 in den Sandsteinen von OMM 1 keine tiefen, speicherfähigen Verwitterungsschichten bilden konnten.

Messstellen, die mit einem blauen Quadrat markiert sind, befinden sich auf anstehendem Gestein. Im Gegensatz dazu liegen die mit einem roten Kreis markierten Stellen auf Kiesablagerungen. An diesen Stellen fließt Wasser unterirdisch, das von den Messungen nicht erfasst wird.

Das neue Verfahren zur Bestimmung dieses unterirdischen Abflusses geht davon aus, dass die Schottergrundwasserkörper so rasch entwässern, dass in einer länger andauernden Niedrigwasserphase der Wasserrückhalteeffekt durch den Schottergrundwasserkörper erschöpft ist. Das bedeutet auch, dass die Menge an am Pegel unterirdisch abfließenden Wasser im Gleichgewicht ist mit der Wassermenge, die oberhalb im Bachbett versickert. Zu einem solchen Zeitpunkt wird also der Gesamtabfluss des Einzugsgebiets aus den langsam entwässernden Grundwasserleitern in den verwitterten und zerklüfteten Schichten von OMM 1 und OMM 2 gespeist.

Ausgehend davon wurde für Stellen, an denen unterirdischer Abfluss vermutet wurde (rote Punkte), der Gesamtabfluss durch flächengewichtete Addition der Beiträge von OMM 1 und OMM 2 für jedes Einzugsgebiet bestimmt. Für die aus OMM 1 aufgebauten Gebiete wurde ein Beitrag von $2.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und für die aus OMM 2 aufgebauten Gebiete UMM 2 ein Beitrag von $9.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ angenommen. Durch Multiplikation des spezifischen Abflusses mit den Flächen von OMM 1 und OMM 2 ergab sich der Gesamtabfluss für jedes Teileinzugsgebiet. Der Grundwasserabfluss wurde aus der Differenz zwischen dem Gesamtabfluss und dem gemessenen Abfluss des Bachs ermittelt. Durch Aufsummierung der Grundwasserabflusswerte für jede Messstelle flussabwärts lässt sich der gesamte Grundwasserabfluss für jeden Standort bestimmen. Dies ermöglicht auch die Ermittlung der Wassermenge, die entlang des Bachabschnitts im Vergleich zur vorherigen Messstelle flussaufwärts versickert. Den Berechnungen zufolge versickerten flussaufwärts der Messstellen 514 und 516 jeweils 3.5 bzw. 4.5 l s^{-1} in den Schottergrundwasserleiter (Abbildung 82 und Abbildung 83). Von den Messstellen 514 und 516 bis zur Messstelle 1003 versickerten lediglich 0.6 l s^{-1} . Weiter flussabwärts waren die Versickerungsraten mit 7.6 bzw. 11.6 l s^{-1} wieder höher. Am tiefsten Punkt, dem Standort der Messstation, wurde ein unterirdischer Abfluss von

27.8 l s⁻¹ ermittelt. Gemäss einer Studie des Geotechnischen Instituts Bern (Biaggi und Teuscher, 2018) betrug der unterirdische Abfluss am Messpunkt Luterbach am 16. Juli 2018 l s⁻¹ und lag damit 25 % über dem hydrologisch ermittelten Wert. Der Oberflächenabfluss am Messpunkt Oberburg lag damals mit 135 l s⁻¹ fast gleich hoch wie am 24. April 2020 (134 l s⁻¹), als die Abflusseinzelmessung unweit oberhalb des Pegels in Oberburg durchgeführt wurde. Die mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführte Abflussmessung war mit 155 l s⁻¹ mehr als 20 l s⁻¹ höher als der von der Station ermittelte Wert.

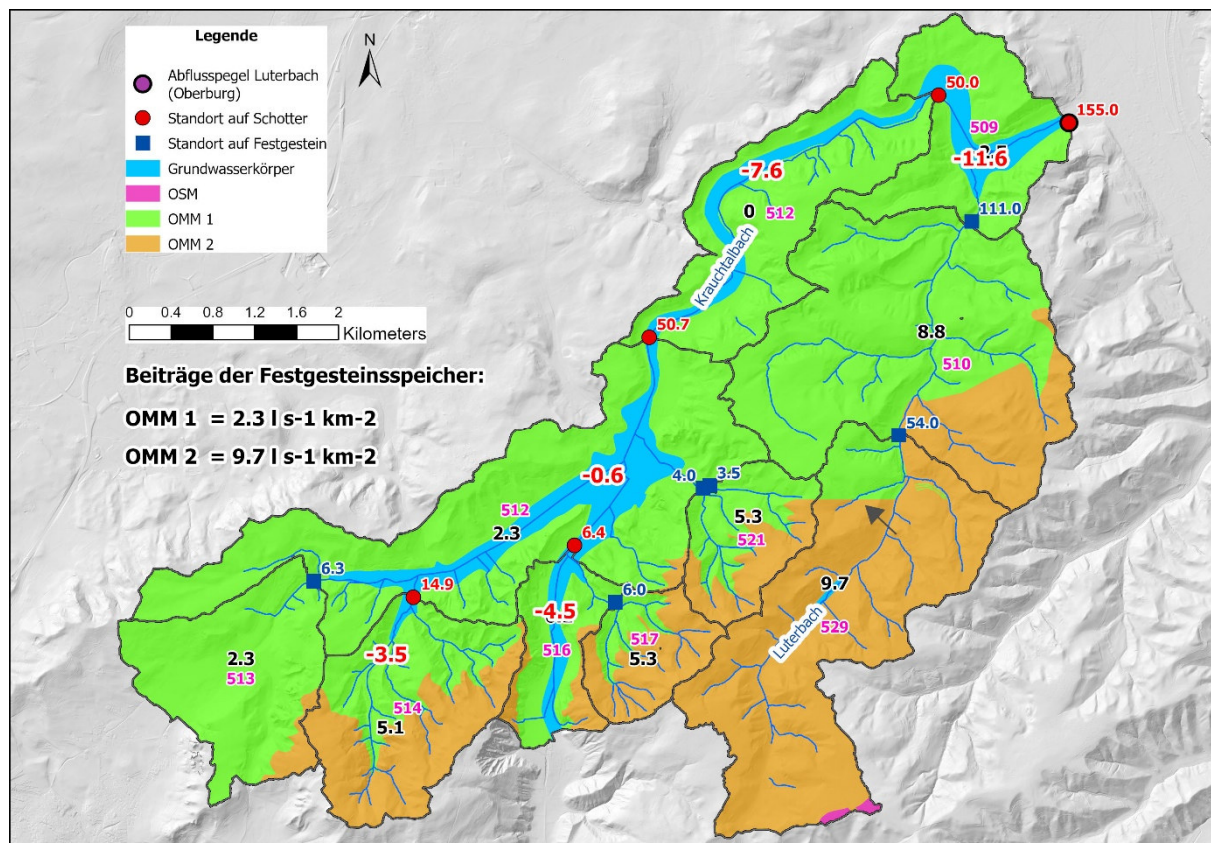


Abbildung 82: Die Einzugsgebiete Luterbach und Krauchthalbach werden von OMM aufgebaut, wobei das Gebiet Krauchthalbach hauptsächlich von OMM 1 und das Gebiet Luterbach von OMM 2 geprägt ist. Anhand von Einzelabflussmessungen um Q347 wurden die Beiträge der Festgesteinsspeicher zu Q347 abgeschätzt. Sie betragen 2.3 l s⁻¹ km⁻² für Gesteine aus UMM 1 und 9.7 l s⁻¹ km⁻² für Gesteine aus UMM 2. Die spezifischen Abflüsse der Teileinzugsgebiete sind mit schwarzen Zahlen markiert. Durch Multiplikation des jeweiligen Abflusswertes mit der Fläche der Einheit wurde der Gesamtabfluss für jeden Standort im Schottergrundwasserkörper ermittelt (rote Punkte). Der unterirdische Abfluss wurde durch Subtraktion des gemessenen Abflusswertes im Bach vom Gesamtabfluss bestimmt. Dies ermöglichte die Abschätzung der jeweiligen Infiltrationsvolumina zwischen den Standorten (grosse rote Zahlen). Der schwarze Pfeil markiert die Grenze zwischen zwei geologischen Kartenblättern. Das südliche Kartenblatt ist neueren Datums (2001) als das nördliche (1950), weshalb die Autoren den Informationsgehalt des südlichen Kartenblatts als zuverlässiger einschätzen. Demnach dürfte das von OMM 2 im Teileinzugsgebiet 510 abgedeckte Gebiet deutlich grösser sein als bisher angenommen, was besser mit dem Gesamtbild der Abflusswerte übereinstimmt.

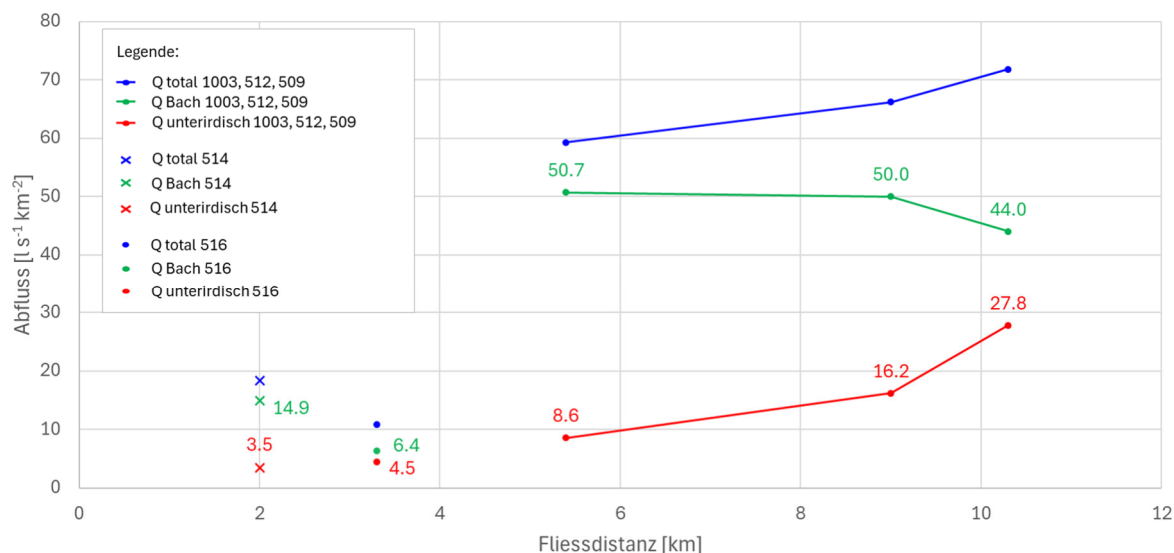


Abbildung 83: Gesamtabfluss, Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss im Bereich Q347 an den Messstellen 514, 516, 1003, 512 und 509 im Krauchtalbach. Der Grundwasserabfluss steigt stetig auf einen Wert von 27.8 l s⁻¹ am Pegel an.

Tabelle 24: Angaben zu gemessenen Abflüssen (oberirdischer Abfluss), unterirdischen Abflüssen und Gesamtabflüssen im Einzugsgebiet des Luterbachs (Oberburg).

	Fläche [km²]	Messwert Abfluss oberirdisch [l s⁻¹]	Abfluss oberirdisch von Teilgebiet [l s⁻¹]	Spezifischer Abfluss oberirdisch von Teilgebiet [l s⁻¹ km⁻²]	Fläche OMM 1 [km²]	Fläche OMM 2 [km²]	Abluss total OMM 1 [l s⁻¹]	Abluss total OMM 2 [l s⁻¹]	Abluss total Teilgebiet [l s⁻¹]	Abluss unterirdisch Teilgebiet [l s⁻¹]	Abluss unterirdisch [l s⁻¹]	Abluss total [l s⁻¹]	Bemerkungen
514 Laufengrabe	2.94	14.9	14.9	5.1	1.36	1.57	3.1	15.3	18.4	3.5	3.5	18.4	
516 Lindentalbach	1.28	6.4	0.1	0.1	1.05	0.22	2.4	2.2	4.6	4.5	4.5	10.9	
1003 Chrouchtalbach, Krauchtal	6.56	50.7	14.9	2.3	6.51	0.05	15.0	0.5	15.5	0.6	8.6	59.3	
512 Chrouchtalbach, Underberg	3.31	50.0	0	0	3.31	0.00	7.6	0.0	7.6	7.6	16.2	66.2	
509 Luterbach, Oberburg	2.44	44.0	-6	-2.5	2.44	0.00	5.6	0.0	5.6	11.6	27.8	71.8	Messwert Abfluss ohne Beitrag von 111 l s⁻¹ aus dem Luterbach
Beitrag OMM 1	2.3												
Beitrag OMM 2	9.7												

A1.2 Rüderchen, Schöftland

Im Unterlauf flie遡t das Rüderchen über einen 2 bis 10 Meter mächtigen Kiesgrundwasserkörper (Abbildung 84, (AFU AG, 2023)). Informationen zur hydraulischen Leitfähigkeit liegen am Messpunkt nicht vor. Analog zum Einzugsgebiet des Luterbachs wird auch für das Rüderchen ein Gesamtabfluss (Q347) geschätzt. Im Gegensatz zum Luterbach erfolgt dies jedoch nicht durch Einzelmessungen des Abflusses, sondern durch eine flächengewichtete Umrechnung des Q347 aus litho-stratigraphisch ähnlichen Einzugsgebieten der Umgebung. Das Rüderchen-Einzugsgebiet besteht zu 52 % aus Sandsteinschichten der Oberen Meeresmolasse (OMM) und zu 48 % aus Wechsellagerungen von Sandstein und Mergel der Oberen Süswassermolasse (OSM). Das mittlere Q347 der sechs OSM-Einzugsgebiete östlich des Rüderchen beträgt 2.5 l s⁻¹ km⁻² (SD = 0.49 l s⁻¹ km⁻², Abbildung 85). Westlich des Rüderchen-Einzugsgebiets liegt das Einzugsgebiet der Ürke, der überwiegend aus OMM besteht. Sein Q347 (8.1 l s⁻¹ km⁻²) ist mehr als dreimal so hoch wie der mittlere Q347 der Einzugsgebiete, die aus OSM bestehen. Mehrere Abflussmessungen während Niedrigwasserperioden zwischen 2015 und 2016 ergaben für OMM aufgebaute Einzugsgebiete im Zentralen Mittelland Abflüsse in ähnlicher Grössenordnung wie das Q347 des Ürke-Einzugsgebiets (Naef und Margreth, 2017). Der Gesamtabfluss des Rüderchen (Oberflächen-

und Grundwasserabfluss) bei Q347 wurde berechnet, indem $2.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ mit 48 % und $8.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ mit 52 % der Fläche des Rüderchen-Einzugsgebiets multipliziert wurden. Der Wert beträgt 102.6 l s^{-1} . Die Grundwassermenge wurde ermittelt, indem der vom Pegelstand gemessene Q347-Wert des Oberflächenabflusses vom geschätzten Gesamt-Q347-Wert abgezogen wurde ($102.6 \text{ l s}^{-1} - 55.6 \text{ l s}^{-1} = 47 \text{ l s}^{-1}$; Tabelle 25). Die unterirdisch fließende Wassermenge entspricht somit nahezu der oberirdisch fließenden. Der spezifische Grundwasserfluss beträgt 3.15 l/s/km^2 .

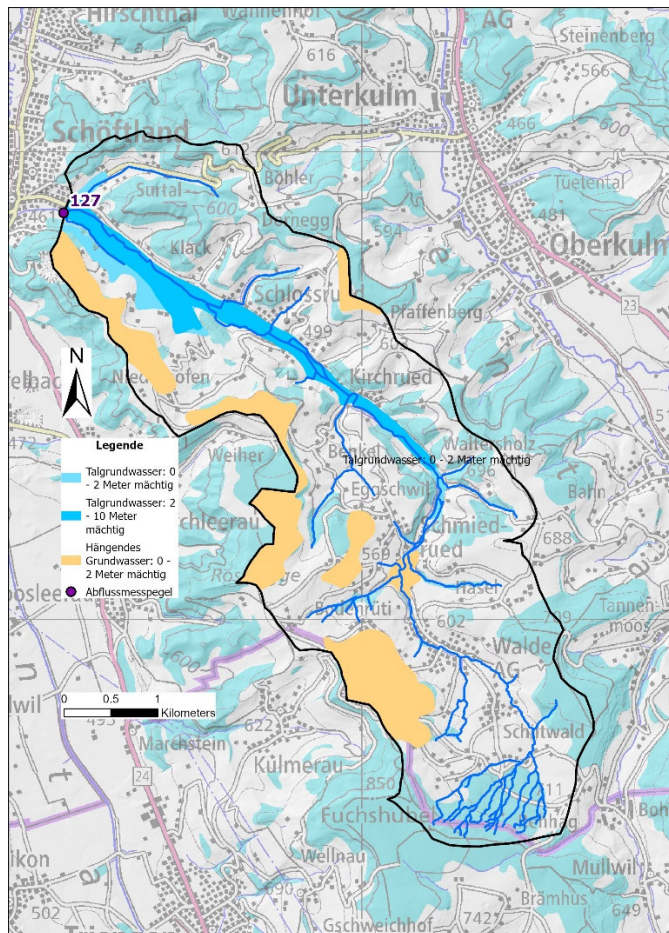


Abbildung 84: Schottergrundwasserleiter im Einzugsgebiet Rüderchen (Schöftland, Kanton Aargau). Die Messstation befindet sich an einer Stelle, an der ein Teil des Grundwassers an der Messstation vorbeifliesst (markiert durch den violetten Punkt).

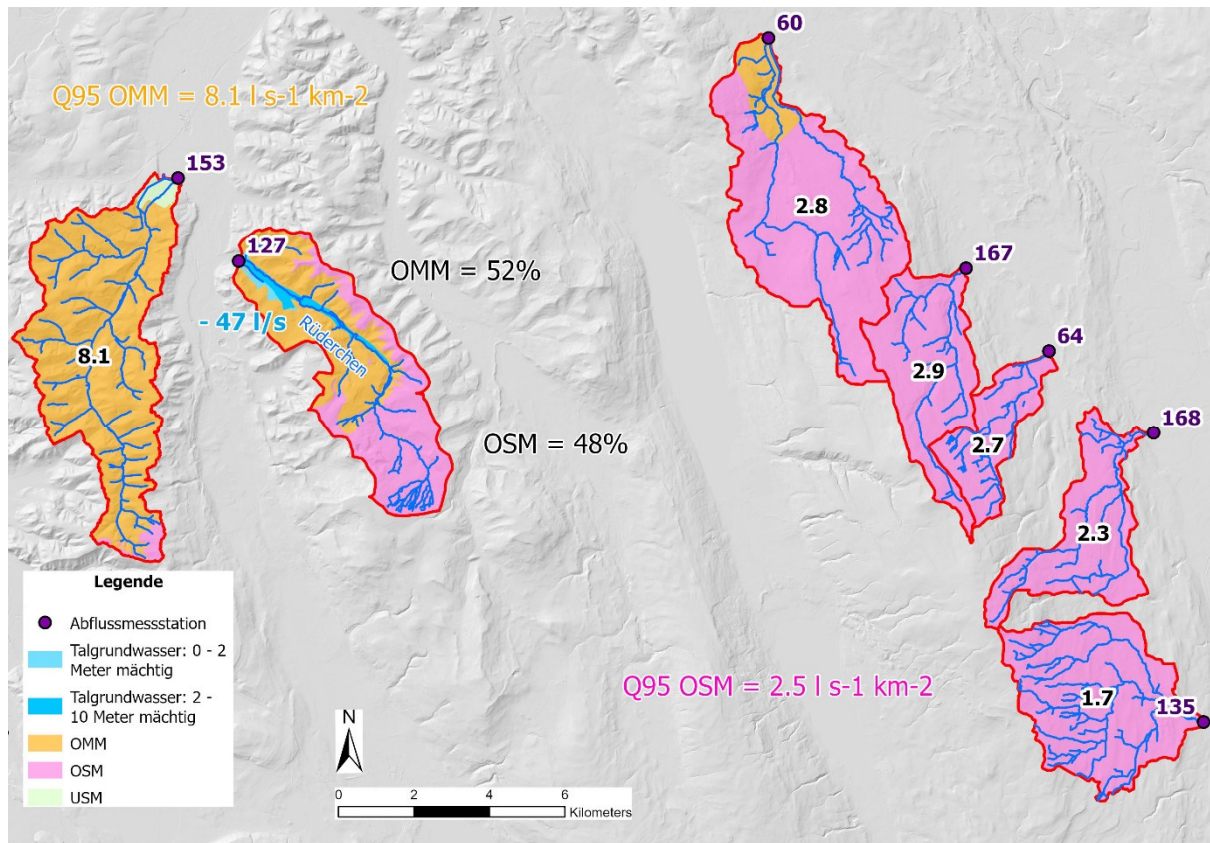


Abbildung 85: Das Einzugsgebiet des Rüderchens besteht zu 52 % aus Oberer Meeresmolasse (OMM) und zu 48 % aus Oberer Süßwassermolasse (OSM). Basierend auf dem durchschnittlichen Q347-Wert der östlich angrenzenden, aus OSM bestehenden Einzugsgebieten wird der OSM-Anteil am Q347-Wert auf $2.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ geschätzt. Der OMM-Anteil wird auf $8.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ geschätzt. Dies entspricht dem Q347-Wert des Einzugsgebiets der Urke, das fast vollständig aus OMM besteht und westlich des Rüderchen-Einzugsgebiets liegt. Durch Multiplikation des OSM-Q347-Werts mit der OSM-Fläche wird der Anteil der OSM-Flächen im Rüderchen-Einzugsgebiet am Q347-Wert ermittelt. Der Anteil der OMM-Flächen am Q347-Wert wird analog ermittelt. Der Gesamtabfluss bei Q347 (Oberflächenabfluss + Grundwasserabfluss) ergibt sich aus der Summe dieser beiden Werte.

Tabelle 25: Die Berechnung des Gesamtabflusses bei Q347 am Pegel Rüderchen bei Schöffland basiert auf den Beiträgen der lithostratigraphischen Einheiten OMM und OSM sowie deren Flächen. Der Grundwasserabfluss ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamtabfluss bei Q347 und dem Q347-Wert des Abflusses am Abflusspegel. Er beläuft sich auf 47 l s^{-1} .

Litho-Stratigraphie	Fläche [km ²]	Q347 [l s ⁻¹] ¹⁾	Fläche [%]
Obere Meeresmolasse (OMM)	9.89	80.1	52
Obere Süßwassermolasse (OSM)	9	22.5	48
Q347 total		102.6	
Q347 Bach		-55.6	
Q347 Grundwasser		47	

A1.3 Luthern, Nebikon

Im Luthertal befindet sich ein mächtiger, langgestreckter Schottergrundwasserkörper (Abbildung 86), in den ein Teil des Wassers des Luthern-Bachs versickert. Die Lithostratigraphie lässt sich in drei verschiedene Klassen unterteilen. Der untere Teil des Einzugsgebiets besteht aus Sandsteinen der OMM (Abbildung 87). Einzelne

4507 Abflussmessungen um Q347 in zwei benachbarten Einzugsgebieten ergaben Werte von 8.3 und 9.1 l s⁻¹ km⁻²,
4508 ähnlich denen in der Ürke (8.1 l s⁻¹ km⁻², Abbildung 85). Der südliche Teil des Einzugsgebiets wird von OSM
4509 dominiert. Der nördliche Teil dieses OSM-dominierten Gebiets weist eine flachere Topographie auf und besteht
4510 aus Wechsellagerungen von Konglomerat und Sandstein (OSM 1). Grosse Flächen sind von einer dünnen Schicht
4511 quartärer Ablagerungen bedeckt. Die auf Basis einzelner Abflussmessungen um Q347 geschätzten Q347-Werte
4512 variieren – mit einer Ausnahme – zwischen 6 und 10 l s⁻¹ km⁻². Der südliche Teil des Gebiets, das aus OSM
4513 aufgebaut ist (OSM 2), zeichnet sich durch steiles Relief aus und besteht aus Wechsellagerungen von
4514 Konglomerat und Sandstein, wobei Konglomerat deutlich überwiegt und Mergelzwischenlagen wesentlich
4515 häufiger auftreten. Die quartären Ablagerungen nehmen eine wesentlich kleinere Fläche ein. Die niedrigeren
4516 Q347-Werte (2.4–3.4 l s⁻¹ km⁻²) in benachbarten Einzugsgebieten, die ebenfalls anhand einzelner
4517 Abflussmessungen ermittelt wurden, sind wahrscheinlich auf den höheren Mergelanteil zurückzuführen.
4518 Der Gesamtabfluss jeder litho-stratigraphischen Einheit wurde bestimmt, indem die Flächen der litho-
4519 stratigraphischen Einheiten OMM, OSM 1 und OSM 2 mit den mittleren Q347-Werten der drei Einheiten aus
4520 den benachbarten Einzugsgebieten multipliziert wurden (Tabelle 26). Die Summe der drei Abflusswerte ergibt
4521 einen Wert von 763 l s⁻¹. Sie stellt eine Schätzung des Gesamtabflusses bei Q347 der Luthern an der Messstation
4522 dar. Die Subtraktion des aus den Pegeldaten abgeleiteten Q347-Wertes von 337 l s⁻¹ ergibt einen geschätzten
4523 Grundwasserabfluss bei Q347 von 426 l s⁻¹. Der spezifische Grundwasserabfluss beträgt somit 4.1 l s⁻¹ km⁻².
4524 Bemerkenswert ist, dass der Grundwasserabfluss fast ein Drittel höher ist als der Oberflächenabfluss im Bach.
4525 Die Einheiten OSM 1 und OSM 2 werden nicht offiziell verwendet. Sie wurden für diese Bewertung aufgrund
4526 hydrogeologischer und lithologischer Unterschiede so definiert. Es wäre interessant, den Grundwasserabfluss in
4527 Nebikon auch mit der hydrogeologischen Methode zu ermitteln, um zu überprüfen, ob der so bestimmte Wert
4528 in einem ähnlichen Bereich liegt.

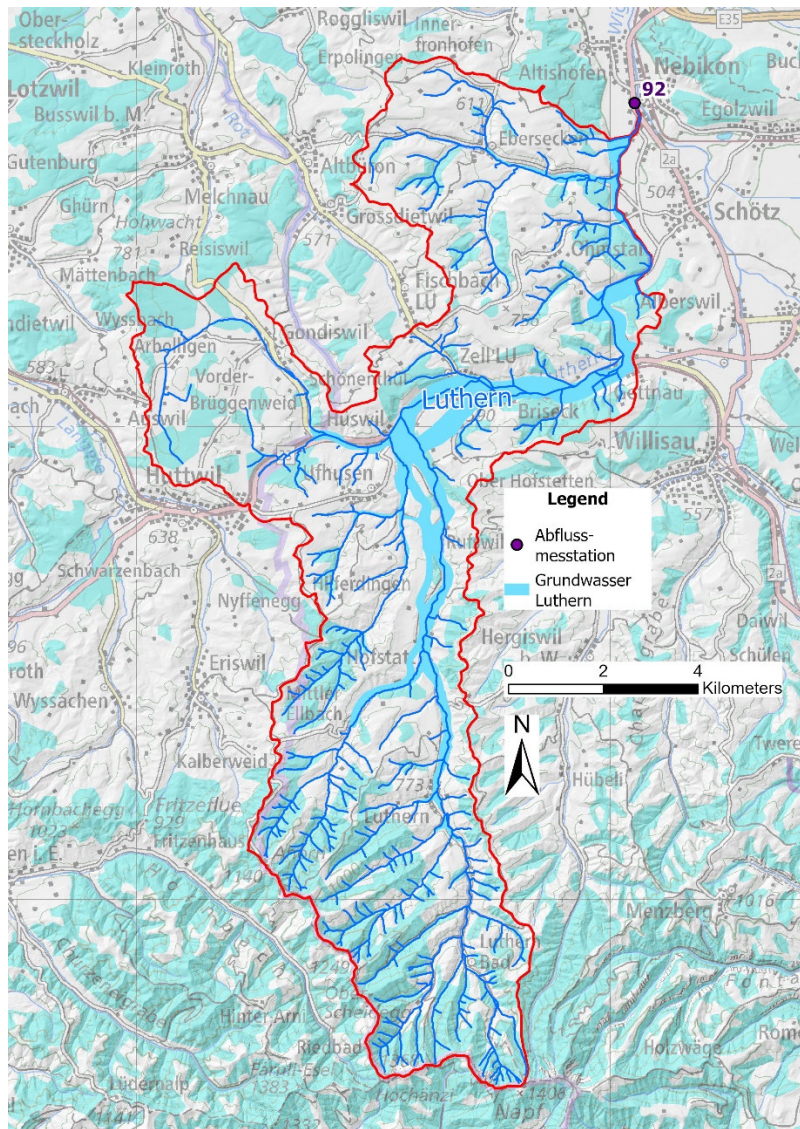
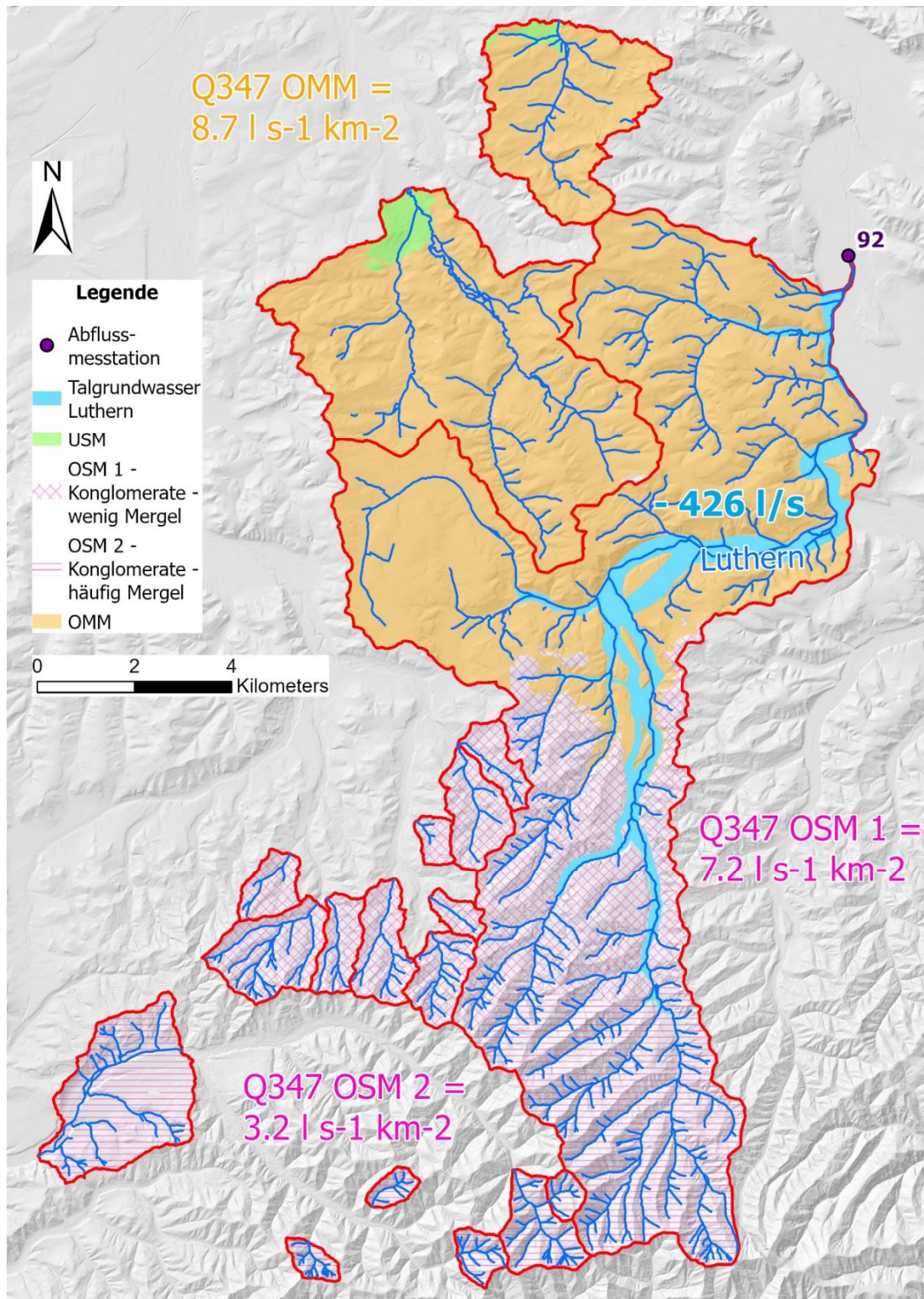


Abbildung 86: Schottergrundwasserleiter im Einzugsgebiet des Luthern (Nebikon, Kanton Luzern). Die Messstation befindet sich an einer Stelle, an der ein grosser Teil des Grundwassers an der Messstation vorbeifliesst (markiert durch den violetten Punkt).



4533

4534 *Abbildung 87: Der lithostratigraphische Aufbau des Luthern-Einzugsgebiets lässt sich in drei Einheiten unterteilen: OMM, OSM*
 4535 *1 und OSM 2. Die OMM besteht hauptsächlich aus Sandsteinen. Der Beitrag des von der OMM dominierten Gebiets zum*
 4536 *Abfluss Q347 wird auf 8.7 l s⁻¹ km⁻² geschätzt, basierend auf Einzelmessungen des Abflusses um Q347. OSM 1 ist durch mässig*
 4537 *steiles Gelände und Wechsellagerungen von Konglomeraten und Sandsteinen gekennzeichnet. Der Beitrag dieses Gebiets wird*
 4538 *auf 7.2 l s⁻¹ km⁻² geschätzt. Das Gebiet OSM 2 ist deutlich steiler als das von OSM 1 dominierte Gebiet. Es besteht ebenfalls*
 4539 *aus Wechsellagerungen von Konglomeraten und Sandsteinen, wobei Konglomerate deutlich dominieren und*
 4540 *Mergelzwischenlagen häufiger vorkommen als im von OSM 1 dominierten Gebiet. Der Beitrag zum Abfluss Q347 wird auf 3.2*
 4541 *l s⁻¹ km⁻² geschätzt und ist damit weniger als halb so gross wie der des Gebiets OSM 1. Die Einheiten OSM 1 und OSM 2*
 4542 *werden nicht offiziell verwendet. Sie wurden für diese Analyse aufgrund hydrogeologischer und lithologischer Unterschiede*
 4543 *so definiert.*

4544 *Tabelle 26: Die Berechnung des Gesamtabflusses bei Q347 am Pegel der Luthern nahe Nebikon basiert auf den Beiträgen der*
 4545 *litho-stratigraphischen Einheiten OMM, OSM 1 und OSM 2. Der Grundwasserabfluss unter dem Pegel ergibt sich aus der*
 4546 *Differenz zwischen dem Gesamtabfluss bei Q347 und dem Q347-Wert des Abflusses, der am Pegel registriert wurde.*

Litho-Stratigraphie	Fläche [km ²]	Q347 [l s ⁻¹]	Flächenanteile [%]
Obere Meeresmolasse (OMM)	61.4	534	59
OSM 1: Conglomerates with less marl layers	22.5	162	21
OSM 2: Conglomerates with many marl layers	20.8	67	20
Q347 _{total}		763	
Q347 _{Bach}		-337	
Q347 _{Grundwasser}		426	

4547 A1.4 Köllikerbach, Kölliken

4548 Die hydrologische Methode wurde auch auf den Köllikerbach angewendet. Laut einer Studie, die die Beiträge
 4549 von Teileinzugsgebieten zum Q347 untersucht (Margreth und Naef, 2017), beträgt der unterirdische Abfluss am
 4550 Q347 etwa 18 l s⁻¹ bzw. 1.8 l s⁻¹ km². Der oben angegebene Bericht kann von der BAFU-Webseite heruntergeladen
 4551 werden.