

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.

50 Zusammenfassung

51 a) Ziele

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

56

57 b) Ermittlung von Dauerkurvengruppen

58

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

62 Im Mittelland werden die Dauerkurvengruppen hauptsächlich durch Unterschiede im litho-stratigraphischen
63 Aufbau, der mittleren Geländeneigung, den Flächenanteilen an mässig durchlässigem Quartär und dem
64 mittleren Jahresniederschlag bestimmt. In den Alpen und im Tessin ist der mittlere Jahresniederschlag (1991–
65 2020) der massgebende Faktor. Je grösser dort die Jahresniederschlagsmenge, desto steiler ist die
66 Dauerkurvengruppe. In den nördlichen Voralpen gibt es Gebiete mit einem ähnlichen Verhalten wie im
67 Mittelland und solche, die sich eher wie alpine Gebiete verhalten.

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

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

75

- 76 - Litho-stratigraphischer Aufbau des Festgestein
- 77 - Flächenanteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen
- 78 - Mittlere Höhe
- 79 - Mittlere Geländeneigung
- 80 - Mittlerer Jahresniederschlag

81

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

85

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

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

96
97 **d) Korrektur der Abflussdaten**

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

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

104 Ohne diese Korrekturen wäre das typische Verhalten der Dauerkurven überzeichnet.

105
106 **e) Test des Verfahrens**

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

- 112
113 - Im Mittelland wichen 84 % der Messwerte der Validierungsmessungen maximal 20 % und 93 %
114 maximal 30 % von der berechneten Dauerkurve ab.
115 - In den Alpen betragen die Abweichungen zur berechneten Dauerkurve bei 75 % der
116 Validierungsmessungen unter 20 % und bei 87 % unter 30 %.

117
118 Diese Resultate zeigen, dass die spezifischen Q347-Abflüsse mit diesem Verfahren deutlich präziser bestimmt
119 werden können als mit bisherigen Schätzverfahren – insbesondere bei niedrigen oder hohen Werten – und das
120 mit verhältnismässig geringem Mehraufwand. Mit den Einzelmessungen lassen sich zudem wichtige
121 Informationen ermitteln, die Q347 massgeblich beeinflussen, wie beispielsweise Versickerungsstrecken und
122 unterirdische Abflüsse.

124 f) Besseres Verständnis der Q347-bestimmenden Speicher und Faktoren

125
126 Um ein besseres Verständnis für die Faktoren und Speicher zu gewinnen, die den Q347-Abfluss massgebend
127 beeinflussen, wurde ein umfassender Datensatz aus Einzel-, Kurzzeit- und Langzeitmessungen in 519
128 Einzugsgebieten erstellt. In 256 dieser Gebiete wurden Messungen im Rahmen der Dissertation von M. Margreth
129 erhoben. Für jedes Gebiet wurde ein Q347-Wert bestimmt, wobei die Bestimmungsmethode von der
130 verfügbaren zeitlichen Auflösung abhängig war. Wo Langzeitmessungen verfügbar waren, wurde der Wert direkt
131 aus der Dauerkurve der Datenreihe herausgelesen. Wo nur Einzelmessungen oder Kurzzeitmessungen vorlagen,
132 wurde die hier vorgestellte Methode eingesetzt. Anhand von Boxplots, Regressionsanalysen und einer vertieften
133 Auseinandersetzung mit dem litho-stratigraphischen Aufbau und den tektonischen Eigenschaften der
134 Untersuchungsgebiete wurde der Zusammenhang zwischen dem Q347 und geologischen, topographischen
135 sowie klimatologischen Faktoren untersucht.

136 Im Mittelland zeigt sich, dass der litho-stratigraphische Aufbau der Molasse ein zentraler Faktor ist. Die höchsten
137 spezifischen Q347 wurden in der Oberen Meeresmolasse (OMM) des zentralen Mittellands registriert (4.9–
138 $12.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), während sie in der OMM des westlichen Mittellands deutlich tiefer liegen (0.8–6.4 $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In
139 der Region um Bern variieren die Werte stark (0.6–16.2 $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), was auf Unterschiede in den Feinanteilen
140 innerhalb der OMM zurückzuführen ist. Zusätzlich zeigt sich, dass eine Bedeckung von mässig durchlässigen
141 Quartärlagerungen (v.a. Moränen) die Kapazitäten der für Q347 massgebenden Speicher in Mittelland-
142 Einzugsgebieten reduzieren. Höhere Feinanteile in der Molasse und in den Moränen reduzieren die Infiltrations-
143 und Speicherkapazität. Die Unterschiede in den Feinanteilen in der Molasse sind durch unterschiedliche
144 Ablagerungsmilieus während der Sedimentation bedingt. Aufgrund der höheren Feinanteile in der Untereren
145 Süßwassermolasse (USM) und in der Oberen Süßwassermolasse (OSM) liegen dort die Q347 tiefer (0.3–4.5
146 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
147 Schottervorkommen die Q347- Werte leicht erhöhen, was besonders bei ansonsten niedrigen Q347 eine
148 erkennbare Wirkung entfaltet. Die erhebliche Streuung innerhalb der Molasse-Einheiten ist wahrscheinlich vor
149 allem auf unterschiedliche Feinanteile in den Sedimentschichten und in der Moräne zurückzuführen. Da
150 geologische Karten dies nicht ausreichend differenziert abbilden, ist eine verlässliche Vorhersage des Q347 in
151 Mittelland-Einzugsgebieten ohne Messungen unpräzis, vor allem bei tiefen und hohen Q347.

152 In den alpinen Einzugsgebieten liegt das Q347 zwischen 0.5 und $29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Die starke tektonische Prägung
153 der Alpen hat zu einer intensiven Zerklüftung des Untergrundes geführt, was die Infiltrations- und
154 Speicherkapazität und somit auch das Q347 erhöht. Der Q347-Durchschnitt beträgt hier $7.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, abzüglich
155 der Beiträge von Gletschern und Permafrostflächen, und liegt damit fast doppelt so hoch wie im Mittelland
156 ($4.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Ein weiterer Grund für diesen Unterschied ist, dass die Moränen in den Alpen durchlässiger sind
157 als im Mittelland. Dadurch werden sie für Q347-Abflüsse zu bedeutenden Speichern.

158 Besonders hohe Q347 treten in Gebieten mit Rauwacken, Gipsen und Dolomiten auf ($12\text{--}29.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In
159 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–
160 $15 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Die Untersuchungen zeigen, dass bei Gneisen und Graniten die tektonischen Einheiten einen
161 stärkeren Einfluss auf das Q347 haben als bei den Sedimentgesteinen. So wurden beispielsweise im Aarmassiv

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

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

173

174 g) Fazit

175

176 Mit der vorliegenden Arbeit lassen sich bisher ungemessene Einzugsgebiete einer Dauerkurvengruppe
177 zuordnen, in der sich die Dauerkurven im Niedrigwasserbereich ($Q < Q290$) nach einem ähnlichen Muster
178 verhalten. Im Weiteren bestehen nun Hilfsmittel zur Korrektur von Abflussmessreihen im Niedrigwasserbereich,
179 um anthropogene Einflussfaktoren, unterirdische Abflüsse unter Messtandorten und Messfehler
180 herauszurechnen. Diese kamen in 102 Einzugsgebieten zur Anwendung. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein
181 neues Verfahren zur Bestimmung von Q347, Dauerkurvengruppe und Masterrezzessionskurve mit nur 3
182 Abflusseinzelmessungen in einer Trockenperiode und mit bekannter Dauerkurvengruppe in einem Handbuch.
183 Dieses Verfahren wurde in 22 Einzugsgebieten im Mittelland und in 99 Einzugsgebieten in den Alpen erfolgreich
184 getestet. Demgemäß lässt sich mit diesem Verfahren das Niedrigwasserabflussverhalten eines zuvor
185 ungemessenen Einzugsgebietes, mit geringem Aufwand, detailliert charakterisieren. Auf Gewässerabschnitten,
186 wo ein Teil des Wassers im Schotter unterhalb des Fliessgewässers fliesst, stellt der Abfluss im Bach nur der
187 Überlauf dar. Mit etwas Zusatzaufwand lassen sich in solchen Abschnitten auch Versickerungs- und
188 Exfiltrationsstrecken und unterirdische Abflüsse ermitteln.

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

193

194 Danksagung

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

198

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

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

206

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

208

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

211

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

213

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

216

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

218

219

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 Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich	7
233	3.2 Teilziel 2: Verfahren entwickeln zur Bestimmung von Dauerkurven und Rezessionskurven in ungemessenen Einzugsgebieten	7
234	3.3 Teilziel 3: Identifikation von Q347-bestimmenden Speichern und Faktoren	8
235	3.4 Teilziel 4: Untersuchung der Veränderung des Q347 in den letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels	8
236	4 Verwendete Daten	9
237	4.1 Abflüsse	9
238	4.2 Niederschläge	9
239	4.3 Topographie	9
240	4.4 Einzugsgebietsflächen	10
241	4.5 Geologie	10
242	4.1 Grundwasserkarten	10
243	4.2 Gletscher und Permafrostböden	10
244	4.3 Fließgewässer und Landnutzung	10
245	5 Gebietsauswahl	11
246	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 -rezeptionskurven in ungemessenen	
310		Einzugsgebieten.....	85
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			

390 1 Ausgangslage

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

394 Gemäss den Ergebnissen hydrologischer Modelle wird der prognostizierte Klimawandel in den Sommermonaten
395 zu geringeren Abflüssen in den Fliessgewässern des Schweizer Mittellandes und zu einer Abnahme der
396 Niedrigwassermengen führen (Brunner et al., 2019; FOEN, 2021; Muelchi et al., 2021). In den Alpinen
397 Einzugsgebieten soll das Q347 in Zukunft hingegen eher etwas ansteigen (Muelchi et al., 2021; Wechsler et al.,
398 2023). In Anbetracht der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgen der immer intensiveren und
399 häufigeren Trockenperioden (Brunner und Tallaksen, 2019; Freire-González et al., 2017), würde die Arbeit der
400 Behörden und Wassernutzer wesentlich erleichtert, wenn flächendeckende und verlässliche Informationen über
401 die Speicherkapazität und das Niedrigwasserabflussverhalten von Einzugsgebieten vorlägen. Zudem wäre ein
402 Niedrigwasserprognosesystem mit hoher räumlicher Auflösung hilfreich.

403 Das Bundesamt für Umwelt und verschiedene kantonale Behörden im Bereich der Hydrologie und des
404 Gewässerschutzes sind auf die bevorstehenden Herausforderungen sensibilisiert und haben den Bedarf nach
405 einem neuen Q347-Bestimmungsverfahren geäussert, in dem die relevanten Prozesse besser abgebildet sind.

406 Ebenso ist der Kanton Graubünden mit einer Anfrage an die Auftragnehmer gelangt, das
407 Entwässerungsverhalten auch von ungemessenen kleinen Einzugsgebieten zu untersuchen, um deren
408 Wasserführung in einem verbesserten Abflussmodell zuverlässiger prognostizieren und besser überwachen zu
409 können. Es besteht ein allgemeines Interesse für neue Ansätze, mit welchen das Niedrigwasserabflussverhalten
410 auch für ungemessene Einzugsgebiete in einer hohen Genauigkeit und in einer hohen räumlichen Auflösung
411 ermittelt werden kann.

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

424

425

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

427

428 1. Einfluss von Litho-Stratigraphie, Topographie und Klima auf Dauerkurven und Rezessionskurven
429 ermitteln (Kapitel 8).

430 2. Verfahren entwickeln zur Bestimmung des Q347-Abflusses und der Dauerkurve und der
431 Rezessionskurve im Niedrigwasserbereich (Kapitel 9). Beschreibung der Vorgehensweise in einem
432 Handbuch (Kapitel 10).

433 3. Identifikation der Speicher und Faktoren, die das Q347 in Mittelland, Voralpen und Alpen massgebend
434 beeinflussen (Kapitel 11).

435 4. Untersuchung der Veränderung des Q347 in den letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels (Kapitel
436 12).

437

438

439 2 Aktueller Forschungsstand

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

444 2.1 Geologie

445 Im Wesentlichen wurden im Vorgängerprojekt Speicher in den Festgesteinen mit einer etwas erhöhten
446 Durchlässigkeit identifiziert, die für ein überdurchschnittliches Q347 verantwortlich sind (Naef und Margreth,
447 2017). Dazu gehören im Mittelland die mächtigen Sandsteinbänke der Oberen Meeresmolasse (OMM), die vor
448 allem im Zentralen Mittelland für überdurchschnittlich hohe Q347 sorgen. Die meisten Einzugsgebiete in der
449 Unteren Süßwassermolasse (USM) und in der Oberen Süßwassermolasse (OSM) weisen hingegen tiefe bis
450 mittlere Q347-Abflüsse auf. In den alpinen Einzugsgebieten ist der Zusammenhang zwischen dem geologischen
451 Aufbau und den Q347-Abflüssen komplexer als im Mittelland. Anhand von detaillierten Einzelmessungen in fünf
452 alpinen Einzugsgebieten konnten ansatzweise Unterschiede zwischen verschiedenen Lithologie-Typen
453 identifiziert werden. In den Alpen schienen jedoch tektonische Eigenschaften wie die Brüchigkeit, das
454 Gesteinsgefüge oder die Kluftbildung einen grösseren Einfluss auf das Q347 zu haben als im Mittelland. Der
455 Einfluss von quartären Ablagerungen wie Moränen, Schutthalden, Murgangablagerungen oder Bergsturzmassen
456 wurde bisher sowohl im Mittelland wie in den Alpen als begrenzt eingeschätzt. Die Beiträge von quartären
457 Ablagerungen waren vor allem dort von Bedeutung, wo in den Festgesteinen keine oder nur geringe Speicher
458 vorhanden sind (Wirth et al., 2020).

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

464 2.2 Versickerungen und Aufstösse

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

472 2.3 Gletscher und Permafrost

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

483 2.4 Unsicherheiten in den Abflussmessreihen von Pegelstationen

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

- 494
- 495 - **Pegelkonstruktion:** Fehlende Niedrigwasserrinne, fehlender fixer Messquerschnitt, ungünstiges
496 Verhältnis zwischen Pegeländerung und Wasserspiegelbreite bei Niedrigwasserverhältnissen, Bildung
497 von stehenden Wellen in der Niedrigwasserrinne (Leuch, C. und Vetsch, D., 2023).
 - 498 - **Eisbildung:** Gefrieren des Wassers im Messschacht, Verengung des Messquerschnitts (Leuch, C. und
499 Vetsch, D., 2023), irrtümliche Korrektur von natürlich stattfindenden Abflussschwankungen bei
500 Messstationen in den Alpen (Nagel et al., 2025).
 - 501 - **Unsicherheiten in der PQ-Beziehung:** fehlende Eichmessungen im Niedrigwasserbereich, Nicht-
502 Berücksichtigung der Strömungsverhältnisse am Messquerschnitt bei Niedrigwasserabflüssen
503 (Verwendung von Polynom-Funktionen), unbegründete Nullpunktverschiebungen (Margreth und
504 Kaderli, 2022).

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

513 2.5 Abschätzung von Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten

514 Statistische Verfahren wie beispielsweise multivariate Regressionsanalysen (Aschwanden und Kan, 1999; Laaha
515 und Blöschl, 2007) oder Random Forest-Modelle (Floriancic et al., 2022) haben den Vorteil, dass sie rasch und
516 ohne weitere Abflussmessungen für jedes beliebige Fließgewässer an einem beliebigen Punkt einen Schätzwert
517 für den Q347-Abfluss liefern. Massgebende Einflussfaktoren wie zum Beispiel Versickerungsstrecken,
518 Wasserentnahmen (Naef, F. & Margreth, M., 2018; Naef, F et al., 2015), Wasserzuflüsse aus fremden
519 Einzugsgebieten oder Unsicherheiten in den Abflussmessreihen konnten in diesen Studien nicht oder nur
520 unzureichend berücksichtigt werden, weil die notwendige Datengrundlage fehlt. Es stellt sich zudem die Frage,
521 ob der Detaillierungsgrad der relevanten geologischen Informationen zur Lithologie, Tektonik und Abgrenzung
522 und Mächtigkeit der Quartärablagerungen in der geologischen Karte im Massstab 1:25'000 (Swisstopo, 2022)
523 genügend hoch ist, um die Unterschiede der massgeblichen Speicher abzubilden. Mit einem Random Forest-
524 Modell wurde das Q347 für 280 Einzugsgebiete in der Schweiz prognostiziert (Floriancic et al., 2022). Für eine
525 Mehrheit der Einzugsgebiete ließen sich die Q347-Werte mit einer maximalen Abweichung von 30% vom
526 beobachteten Q347 bestimmen, mit einer höheren Übereinstimmung im Mittelland als in den Alpen (Floriancic
527 et al., 2022). Jedoch ist die Bandbreite der vorhergesagten kleiner als die der beobachteten Q347, was darauf
528 hindeutet, dass bei der Bestimmung von hohen und tiefen Q347 grosse Fehler entstehen.
529 Die Verfahren, um Q347-Werte in ungemessenen Einzugsgebieten abzuschätzen, lassen sich möglicherweise
530 verbessern, wenn die massgebenden Speicher und Prozesse der Entwässerung besser berücksichtigt werden.
531 Diese sind in der Schweiz aber erst für einzelne Regionen gut bekannt (Kapitel 2.1). Eine detaillierte
532 Untersuchung für das gesamte Gebiet im Mittelland und im Alpenraum fehlt jedoch.

533 2.6 Bestimmung von Dauerkurven in ungemessenen Gebieten

534 Im Rahmen einer Studie im Auftrag der Abteilung Hydrometrie des Kantons Solothurn wurde ein neues
535 Verfahren entwickelt, um das Q347 und die Dauerkurven für Abflüsse kleiner als Q290 für ungemessene Gebiete
536 zu bestimmen (Naef und Margreth, 2017). Zahlreiche Auswertungen im Vorfeld zeigten, dass der Verlauf der
537 Dauerkurven im Niedrigwasserbereich (Q290 bis Q365) den geologischen Aufbau eines Einzugsgebietes
538 widerspiegelt (Naef und Margreth, 2017). Deshalb scheint eine Übertragung von Dauerkurven von gemessenen
539 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

545 3 Ziele und Vorgehen

546 3.1 Teilziel 1: Ermittlung des Einflusses von Lithologie, 547 Topographie und Klima auf Dauerkurven und 548 Rezessionskurven im Niedrigwasserbereich

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

558 3.2 Teilziel 2: Verfahren entwickeln zur Bestimmung von 559 Dauerkurven und Rezessionskurven in ungemessenen 560 Einzugsgebieten

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

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

576 3.3 Teilziel 3: Identifikation von Q347-bestimmenden Speichern
577 und Faktoren

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

583 3.4 Teilziel 4: Untersuchung der Veränderung des Q347 in den
584 letzten 30 Jahren als Folge des Klimawandels

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

590 4 Verwendete Daten

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

597 4.1 Abflüsse

598 Für die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bestimmung der Niedrigwasser-Dauerkurven und
599 Niedrigwasser-Rezessionskurven wurden gemessene mittlere Tagesabflusswerte verwendet. Die Daten
600 umfassen, mit der Ausnahme von drei Einzugsgebieten, den Zeitraum vom 1.1.2011 bis 31.12.2022, wobei für
601 jedes Einzugsgebiet mindestens 10 Jahre an Daten zur Verfügung stehen. Für die Einzugsgebiete der Triftwasser,
602 der Steinwasser (beide Kraftwerke Oberhasli) und der Wysswasser (Kraftwerke Obergoms) wurde die Periode
603 von 1.1.2013 bis 31.12.2022 verwendet, da für die Periode vorher keine Daten verfügbar sind.
604 Die Daten wurden vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) sowie von den Kantonen Aargau, Zürich, St. Gallen, Bern,
605 Waadt und Thurgau zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden Abflusszeitreihen von den Wasserkraftwerken
606 Oberhasli, Kraftwerke Obergoms und Elektrizitätswerke Zürich (EWZ) zur Verfügung gestellt. In Tabelle A2 sind
607 die verwendeten Zeitreihen und deren Eigentümer aufgelistet. Die Abflusszeitreihen der Kraftwerke Oberhasli
608 (KWO) und der EWZ dürfen aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen zwischen der WSL und der KWO bzw.
609 der EWZ nicht weitergegeben werden. Das gilt auch für daraus abgeleitete Werte, wie z.B. das Q347.

610 4.2 Niederschläge

611 Die Niederschlagsdaten stammen aus dem Gitternetzdatensatz RhiresD v.2 der MeteoSchweiz (MeteoSwiss,
612 2021).

613 4.3 Topographie

614 Anhand des SwissALTI3D-Höhenmodells mit 5x5 Meter- Raster (Swisstopo, 2019a) wurde ein Höhenmodell mit
615 25x25-Meter Raster abgeleitet. Aus diesem wurden folgende topographische Einzugsgebietseigenschaften
616 hergeleitet:

- 617 - mittleres topografisches Gefälle
- 618 - Mindesthöhe
- 619 - mittlere Höhe
- 620 - 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/einzugsgebietsgliederung-schweiz.html>) und manuell nachbearbeitet.
627

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 Mittelland 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)

649 5 Gebietsauswahl

650 5.1 Erste Auswahl von Einzugsgebieten

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

659 5.1.1 Untersuchungszeitraum

660 Als Untersuchungszeitraum wurden die Jahre 2011 bis 2022 definiert. Die Verwendung einer 30-jährigen
661 Messreihe hätte zwar den Vorteil, dass das langjährige Niedrigwasserverhalten besser erfasst wäre. Die
662 Verwendung einer etwas mehr als 10-jährigen Messreihe ermöglicht es hingegen, eine grössere Anzahl an
663 Einzugsgebieten zu berücksichtigen als bei einer 30-jährigen Messreihe. Zudem repräsentieren die Messreihen
664 zwischen 2011 und 2022 die jüngste Dynamik im Niedrigwasserverhalten besser als die Messreihe zwischen
665 1991 und 2022.

666 5.1.2 Ausschluss von Einzugsgebieten mit starken menschlichen Einflüssen

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

676 5.1.3 Ausschluss von Einzugsgebieten mit natürlichen Störfaktoren

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

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

681 5.2 Ausschluss von weiteren Abflussmessreihen aus den Analysen

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

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

709
710 Bei 10 dieser 32 nicht berücksichtigten Messreihen lagen vermutete oder bestätigte Unsicherheiten in den P/Q-
711 Beziehungen vor (vgl. Tabelle A11 im Anhang). Die P/Q-Beziehung der Töss (Beicher) wurde basierend auf den
712 vorhandenen Eichmessungen neu erstellt. Entsprechend wurden auch die Abflüsse neu berechnet.
713 Eine Übersicht über die berücksichtigten Messreihen und der Gründe dafür ist auf Tabelle A11 und A12 im
714 Anhang ersichtlich.

715 6 Korrektur der Abflussmessreihen

716 6.1 Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugs- 717 gebieten

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

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

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

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

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

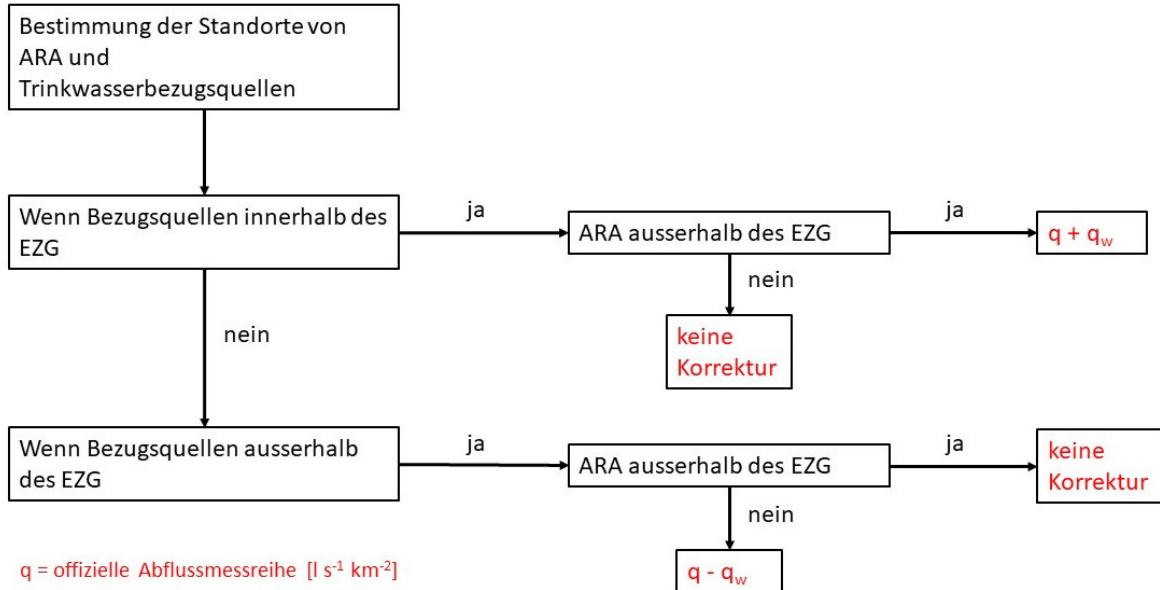
756 In den meisten Fällen waren die Verantwortlichen der Wasserversorgungsbehörden gerne bereit, Auskunft zu
757 geben. Nur in vier Gemeinden wurde die Auskunft über die genauen Werte verweigert, sei es wegen des hohen
758 Aufwands für die Datenaufbereitung oder aus politischen Gründen.

759 Für 47 Einzugsgebiete im Mittelland wurden die Wasserentnahmen direkt mittels Telefoninterviews abgefragt.
760 Für jede Bezugsquelle wurde die durchschnittliche Wasserentnahme während Trockenperioden abgefragt. Ein
761 Teil der Gemeinden stellte Monats- oder Tagesmittelwerte zur Verfügung. Aus diesen Daten wurde ein
762 Durchschnittswert für die Wasserentnahme während Niedrigwasserperioden berechnet. Andere Gemeinden
763 gaben bei der telefonischen Befragung nur mündlich einen Mittelwert für Niedrigwasserperioden wie 2011,
764 2015, 2018 oder 2022 an. Aus diesen Werten wurde ein Mittelwert berechnet. In Fällen, in denen die
765 Bezugsquellen ausserhalb des betrachteten Einzugsgebietes liegen, wurden von den zugeführten
766 Wasservolumina 30% subtrahiert. Damit wurde berücksichtigt, dass ein gewisser Anteil für die
767 Gartenbewässerung verwendet und nicht über die Kläranlage zurückgeführt wird. Dieser Schätzwert stammt
768 von Kläranlagenmitarbeitenden. Er lässt sich für diese Studie nicht genauer quantifizieren. Aus Zeitgründen
769 wurden für weitere 14 Einzugsgebiete die Wasserentnahmemengen auf der Grundlage der Einwohnerzahl
770 geschätzt. Der durchschnittliche Verbrauch pro Einwohner wurde basierend auf dem Verbrauch der Gemeinde
771 Huttwil berechnet. Auch in diesen Fällen wurden die Standorte der Kläranlagen berücksichtigt. Die
772 Wasserentnahmen des Katzbaches im Kanton Aargau wurde anhand der Angaben zu den maximal bewilligten
773 Entnahmemengen in der Gewässerschutzkarte berechnet (Abteilung Umwelt des Kantons Aargau, 2025). In 5
774 Einzugsgebieten war eine Ermittlung der Wasserentnahmen nicht notwendig, weil sowohl die Entnahmen wie
775 auch die Kläranlage innerhalb dieser Einzugsgebiete liegen. Für 37 Einzugsgebiete wurden keine
776 Wasserentnahme- oder Zugabemengen durch die Trinkwasserversorgung ermittelt. Bei diesen wurde
777 angenommen, dass der Einfluss der Wasserentnahmen auf das Dauerkurvengefälle nur geringfügig ist, weil
778 entweder die Q347 hoch oder die Siedlungsgebiete in den Einzugsgebieten sehr klein sind. 35 dieser 37
779 Einzugsgebiete liegen in den Alpen oder im Kanton Tessin.

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

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

790



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

794 6.2 Unterirdische Abflüsse unter den Abflussmesspegelstationen

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

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

808

- 809 - Abschätzung mit der Darcy-Formel
810 - 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

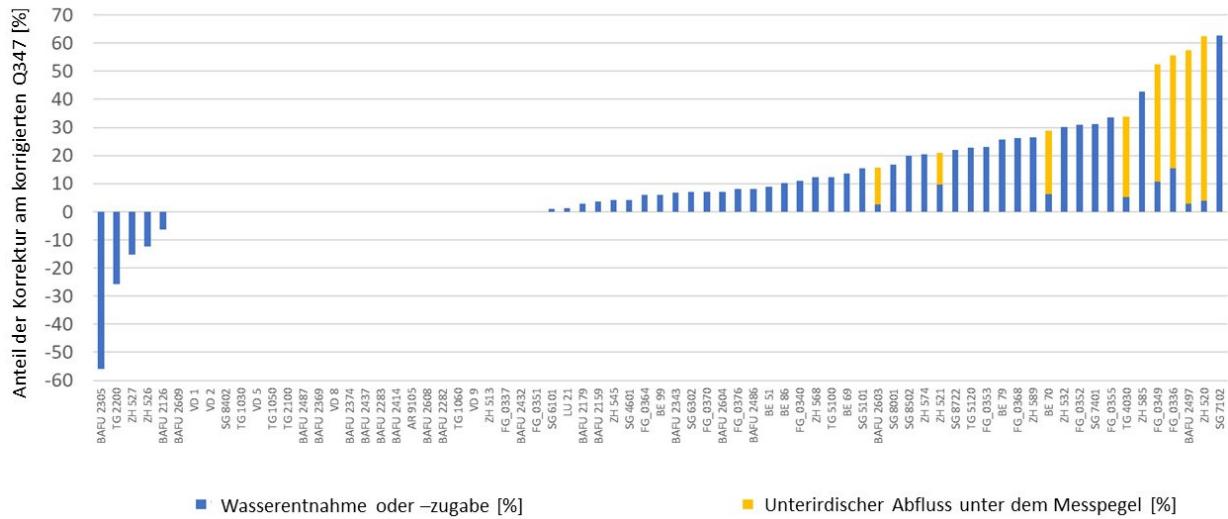
Fehlen die erforderlichen geologischen Informationen, kann der unterirdische Abfluss auch anhand eines hydrologischen Verfahrens abgeschätzt werden. Dieses neue Verfahren wurde in 4 alpinen Einzugsgebieten (Naef und Margreth, 2017) und im Luterbach in Oberburg (Kt. Bern) getestet. Bei diesem Verfahren 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 betragen:

- 844 - in 16% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 30\%$,
 845 - in 33% der Einzugsgebiete mehr oder gleich $\pm 20\%$,
 846 - 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 **Abbildung 2: Korrekturraten der Niedrigwasser-Abflussmessreihen bezüglich der Wasserentnahmen und -Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten und bezüglich der unterirdischen Abflüsse in % des korrigierten Q347.**

856 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; Schaefler 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.

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

872 6.4.1 Schätzung der winterlichen Abflussbeiträge von Gletschern

873 Während die Oberflächenschmelze auf den Schweizer Gletschern im Winter minimal ist (Huss et al., 2013), findet
874 eine begrenzte Eisschmelze an der Basis der Gletscher auch dann statt, wenn die Lufttemperaturen deutlich
875 unter dem Gefrierpunkt liegen, da die Alpengletscher im Allgemeinen gemässigt sind (Cuffey und Paterson,
876 2006). Diese relativ konstante Gletscherwasserproduktion während der Wintermonate ist die Folge eines
877 geothermischen Wärmeflusses (Karlsson et al., 2021) und der Reibungs- und Dehnungserwärmung durch den
878 Gletscherfluss (Joughin et al., 2003). Darüber hinaus könnten in einigen Gebieten auch langsam entwässernde
879 subglaziale Aquifere existieren, die den proglazialen Winterabfluss verstärken (van Tiel et al., 2024).

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

887 Zusätzlich schätzen wir die Basalschmelze aufgrund von Reibungs- und Dehnungserwärmung, indem wir die
888 Fliessgeschwindigkeit jedes Gletschers auf der Gitterskala durch Anwendung des Fliessgesetzes für Eis (Cuffey
889 und Paterson, 2006) unter Verwendung eines durchschnittlichen Fliessgeschwindigkeitsfaktors (Zekollari et al.,
890 2020) approximieren. Basierend auf der lokalen Eisdicke (Grab et al., 2021) und der aus einem DEM abgeleiteten
891 Oberflächenneigung (Swisstopo, 2019b) wird die lokale Eisfliessgeschwindigkeit ermittelt. Die lokale
892 Fliessgeschwindigkeit kann dann in eine vertikale Verschiebung der Eismasse pro Gitterzelle umgerechnet
893 werden, die als jährlicher Verlust an potenzieller Energie betrachtet wird. Da es sich bei den Schweizer
894 Gletschern um gemässigte Gletscher handelt, kann davon ausgegangen werden, dass diese Energiefreisetzung
895 zum Schmelzen beiträgt, entweder durch Reibung an der Gletscherbasis oder durch interne Erwärmung. Wir
896 nehmen an, dass die Fliessgeschwindigkeit im Laufe eines Jahres konstant bleibt. Die Beiträge aller Gitterzellen
897 werden über die gesamte Fläche eines jeden Gletschers gemittelt und wie oben in eine Abflussrate (l s⁻¹)
898 umgerechnet. Die Summe der basalen Eisschmelze durch geothermischen Wärmestrom und Reibungswärme
899 wird als konstanter Gletscherabflussbeitrag im Winter betrachtet (Hösli, 2024). Der Gletscherabfluss wird dann
900 vom Messwert des Gesamtabflusses des Einzugsgebiets subtrahiert und der resultierende Abfluss durch die
901 Einzugsgebietsfläche ohne die Gletscherflächen dividiert. So ergibt sich der Beitrag aus dem gletscherfreien
902 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 $0.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 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 ausfliest (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 $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Werden die Abflüsse der permafrostfreien Restflächen dieser Gebiete herausgerechnet, resultieren Abflussbeiträge von etwa 1 bis $3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Darauf basierend wurde ein Mittelwert $2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 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 1 s-1 km-2).

Permafrostklassen	Beiträge zu Winterabflüssen [I s^{-1} km^{-2}]
Bodentemperatur $< -3^\circ\text{C}$	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

927 7 Aufbereitung von weiteren Einzugsgebiets- 928 parametern

929 7.1 Bestimmung der Volumina von Schottergrundwasserkörpern

930 7.1.1 Schottergrundwasserkörper im Allgemeinen

931 Die Volumina der Schottergrundwasserkörper wurden anhand der Angaben zu den Grundwassermächtigkeiten
932 bei Mittelwasser ermittelt, welche den kantonalen Grundwasserkarten entnommen werden können (AFU AG,
933 2023; AFU AR, 2024; AFU TG, n.d.; AUE SZ, 2023; AWA BE, 2024; AWE SG, 2024; AWEL ZH, 2022; uwe LU, 2023).
934 Dafür wurde für jedes Untersuchungsgebiet das Shapefile der Grundwasserkarte ausgeschnitten und die Flächen
935 der resultierenden Polygone neu berechnet. Das Volumen für jedes Polygon wurde ermittelt, indem die mittlere
936 Mächtigkeit des angegebenen Mächtigkeitsbereiches mit der Fläche multipliziert wurde. Das resultierende
937 Volumen ergab sich aus der Summe aller Volumina für jedes Einzugsgebiet. Es wurde durch die
938 Einzugsgebietsfläche geteilt. Die resultierenden Mächtigkeiten werden in Tausend m³ pro km² angegeben. In
939 einigen Kantonen sind noch keine Grundwasserkarten verfügbar, z.B. GR, TI, VS, UR, NE, VD, FR. Dort kann das
940 Schottergrundwasservolumen nicht berechnet werden. Jedoch wurden in den grossen
941 Schottergrundwasserkörpern, welche sich in den besiedelten Gebieten befinden, meistens zahlreiche
942 geologische Bohrungen durchgeführt. Die Grundwasserverhältnisse sind deshalb häufig gut bekannt. In den
943 Kantonen VD und FR ist die Erstellung einer Grundwasserkarte in Bearbeitung.

944 7.1.2 Schottergrundwasserkörper mit zusätzlicher Speisung durch 945 Fliessgewässer

946 Viele der kartierten Schottergrundwasserkörper werden durch zusätzliches Wasser gespeist, das aus dem
947 Bachbett in den Ablagerungen versickert. Um diese Volumina zu bestimmen, wurden aus den in Kapitel 7.1.1
948 abgegrenzten Grundwasserpolygone nur diejenigen ausgewählt, über die ein Bach fliessst. Der Bach musste
949 mindestens über etwa die Hälfte des Durchmessers des Polygons fliessen. Der Entscheid, welche Bereiche eines
950 Grundwasserpolygons als bachgespeist klassifiziert wurden, geschah individuell und manuell für jedes Polygon.
951 Die Grundwasservolumina werden im Folgenden als potenziell bachgespeiste Grundwasservolumina bezeichnet
952 [1000 m³ pro km²].

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

- 956
- 957 1. Der Grundwasserspiegel muss unter der Bachsohle liegen,

958 2. Die Sohle des Bachbetts muss durchlässig sein.
959
960 Diese Informationen sind nicht vorhanden, weshalb die ermittelten bachgespeisten Grundwasservolumina mit
961 Vorsicht zu verwenden sind.
962 Die Angaben zu den Volumina der Grundwasserspeicher sind der Tabelle A2 im Anhang zu entnehmen.

963 **7.2 Anteile von undurchlässigen, mässig durchlässigen und hoch**
964 **durchlässigen Quartärablagerungen**

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

974 *Tabelle 2: Einteilung der Quartärablagerung des Geocovers in die Durchlässigkeitsklassen undurchlässig, gehemmt*
975 *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
detritative Verlandungsbildung	undurchlässig
Felssturzablagerung	hoch durchlässig
fluvialer Schotter	hoch durchlässig
gemischter Schutt	hoch durchlässig
glazifluvialer Schotter	hoch durchlässig
glazifluviatisches Sediment, undifferenziert	gehemmt durchlässig
glazigenes Sediment, undifferenziert	gehemmt durchlässig
glaziklastisches Deltasediment	undurchlässig
glaziklastisches 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

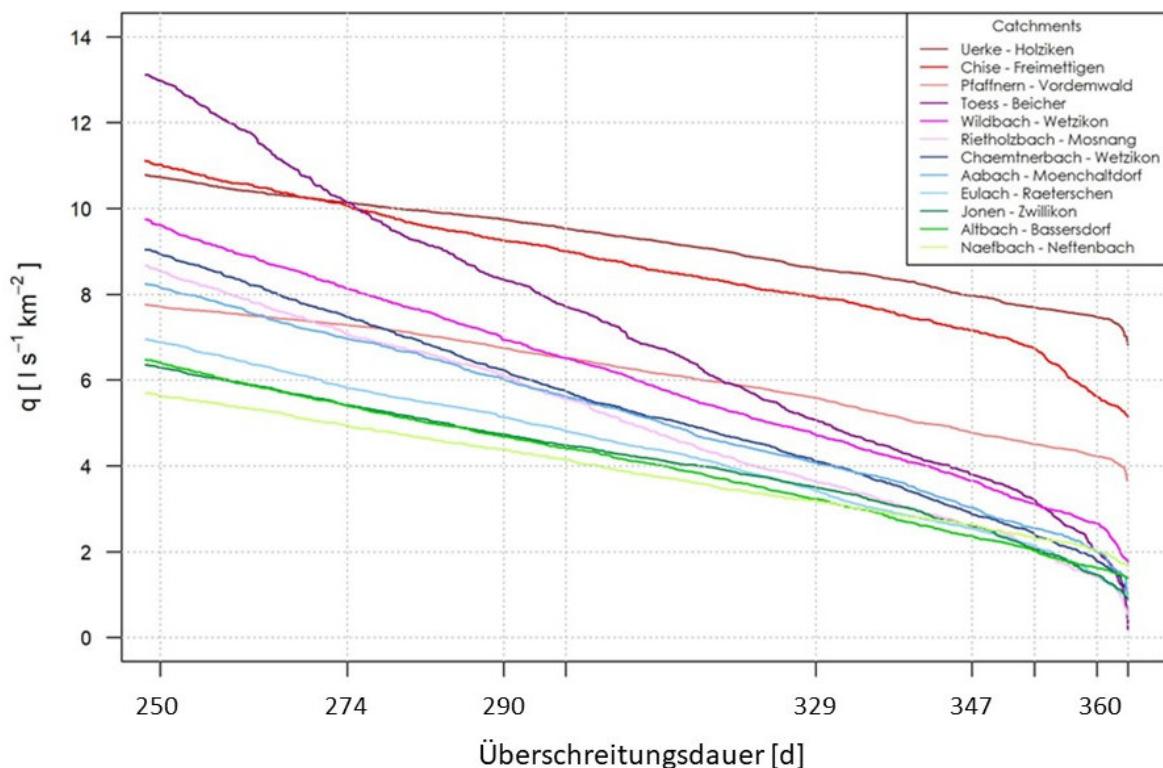
976

977 8 Untersuchung der Dauer- und Rezessionskurven 978 bei Niedrigwasser

979 8.1 Einleitung

980 Für Einzugsgebiete im Schweizer Mittelland konnte ein starker Einfluss der litho-stratigraphischen
981 Zusammensetzung der Gebiete auf das Niedrigwasserverhalten beobachtet werden (Naef und Margreth, 2017).
982 Gemäss dieser Studie variiert das Gefälle der Dauerkurven zwischen Q250 und Q365 in Einzugsgebieten der
983 Oberen Süsswassermolasse (OSM) stark (Abbildung 3 und Tabelle 3, Abbildung und Tabelle ähnlich abgebildet
984 wie in (Naef und Margreth, 2017)). Mit abnehmenden Abflüssen nähern sich die Dauerkurven einander an. Bei
985 Q347 sind die Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten im Vergleich zu Q250 gering. Die steileren OSM-
986 Dauerkurven stehen im Zusammenhang mit einem hohen durchschnittlichen topographischen Gefälle, einem
987 geringeren Anteil an quartären Ablagerungen wie Moränen oder Schotter (Tabelle 3) und mit Böden geringerer
988 Mächtigkeit. Dementsprechend ist die Abflussreaktion auf Niederschläge rascher als in sanft geneigten und von
989 Moränen dominierten OSM-Einzugsgebieten, was sich auf das Gefälle der Dauerkurven auswirkt (Naef und
990 Margreth, 2017). Die Unterschiede im mittleren Jahresniederschlag könnten diesen Effekt noch verstärken.
991 Wenn der Einfluss des Niederschlags abnimmt, nähern sich die Dauerkurven einander an. Der Abfluss wird
992 zunehmend aus tieferen Langzeitspeichern gespeist, je niedriger die Abflüsse sind. Die mit einer steileren
993 Topographie ausgestatteten OSM-Einzugsgebiete weisen generell höhere Anteile an Konglomerat-Mergel-
994 Sedimenten auf, diejenigen mit einer flacheren Topographie werden stärker von Sandstein-Mergel-Sedimenten
995 dominiert. Ein weiterer Grund für die steileren Dauerkurven in den Konglomerat-dominierten Einzugsgebieten
996 könnte darin liegen, dass Konglomerate aufgrund der grösseren Anzahl an Klüften und Poren rascher entwässern
997 als Wechsellegerungen zwischen Sandsteinen und Mergeln (Naef und Margreth, 2017). Die Einzugsgebiete in
998 der Oberen Meeresmolasse (OMM) verhalten sich anders (Naef und Margreth, 2017). Die Dauerkurven haben
999 ein flacheres Gefälle als die von OSM-Einzugsgebieten und verlaufen fast parallel. Die Q347-Werte in OMM-
1000 Einzugsgebieten des Mittellandes sind zwei- bis viermal so hoch wie die in OSM-Einzugsgebieten. Dies wurde
1001 durch zahlreiche einzelne Abflussmessungen während Niedrigwasserperioden zwischen 2015 und 2016
1002 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-stratigraphischen Aufbau, in der mittleren Geländeneigung und in den durchschnittlichen Jahresniederschlägen.*

1006

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

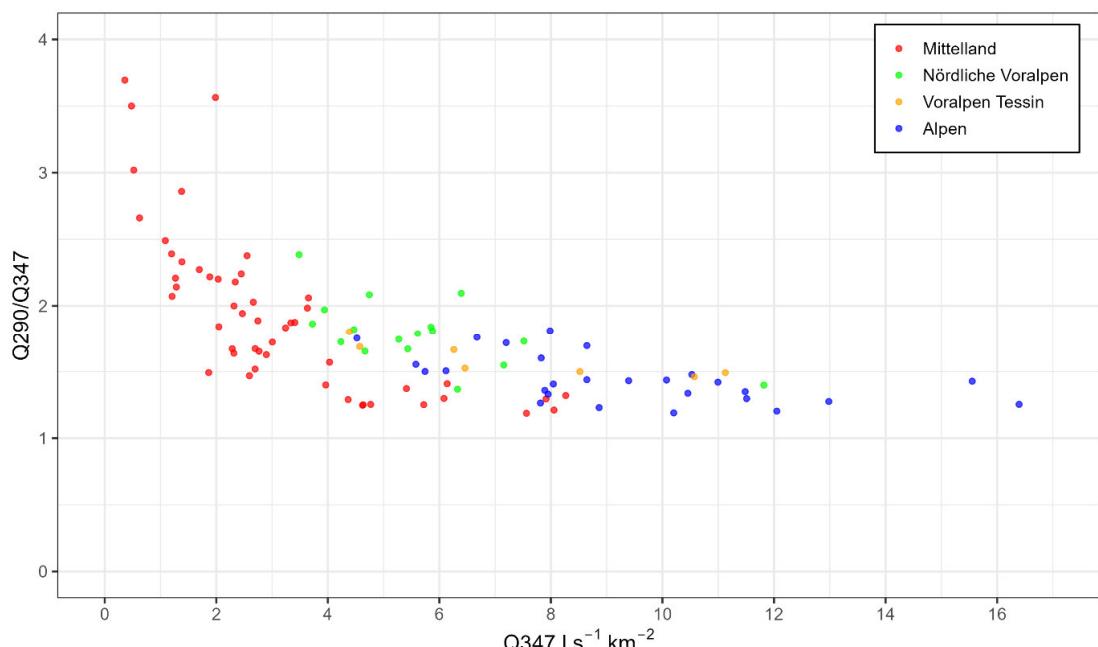
Name	Standort Pegel	Fläche [km²]	Flächenanteile Stratigraphie Festgestein [%]			Flächenanteile Quartärablagerungen [%]	Durchschnittlicher Jahresniederschlag [mm]	Durchschnittliche Geländeneigung [%]
			OMM	OSM	USM			
Uerke	Holziken	25.0	93	5	2	97.9	1118	23
Chise	Freimettigen	45.1	89	11	0	60.4	1271	22
Pfaffnern	Vordemwald	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
Rieholzbach	Mosnang Rieholz	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	Raetterschen	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

1009 Um die Prozesse und die Speicher, die die Dauerkurven und Rezessionskurven zwischen Q290 und Q347
1010 kontrollieren, besser zu verstehen, wurde das Verhalten von Dauerkurven- und Rezessionskurven im
1011 Niedrigwasserbereich für zahlreiche weitere Einzugsgebiete im Mittelland, in den Voralpen und in den Alpen
1012 untersucht (Kapitel 8.2 - 8.9.4). Ein Ziel dieser Untersuchung war auch, ein solides Verständnis für die
1013 Umrechnung von Niedrigwasserdauerkurven von gemessenen in ungemessene Gebiete zu erlangen.

1014 8.2 Untersuchung der Gefälle von Dauerkurven

1015 Um das Verhalten der Dauerkurven im Niedrigwasserbereich zu untersuchen, wurde von 68 ausgewählten
1016 Einzugsgebieten im Mittelland und in den Nördlichen Voralpen, 27 Einzugsgebieten in den Alpen und 7
1017 Einzugsgebieten in den Voralpen des Tessins das Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 ermittelt
1018 und dem Q347 gegenübergestellt. Das Perzentil von Q290 wurde gewählt, weil dieser Wert in wissenschaftlichen
1019 Untersuchungen häufig als oberer Grenzwert des Niedrigwasserregimes verwendet wird (Smakhtin, 2001). Da
1020 der Verlauf der Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 auch durch eine Gerade angenähert werden kann, stellt
1021 das Gefälle zwischen Q290 und Q347 ein nützlicher Proxy für diese Untersuchungen dar. Die entsprechenden
1022 Gefälle (Q290/Q347) der 102 untersuchten Messreihen nehmen tendenziell mit zunehmendem Q347 ab
1023 (Abbildung 4). Die höchsten Gefälle der Dauerkurven weisen die Gebiete mit den niedrigsten Q347 auf. Sie liegen
1024 alle im Mittelland. Die Abbildung zeigt, dass das Gefälle der Dauerkurven mit zunehmender Kapazität der
1025 Speicher abnehmen und dass die Einzugsgebiete im Niedrigwasserbereich langsamer entwässern, je grösser die
1026 Speicherkapazität ist. Bei Q347 von über $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ bewegen sich die Q290/Q347-Werte im Mittelland in einem
1027 schmalen Bereich von ± 0.1 . Die Werte in den Voralpen und Alpen liegen, bei ähnlichem Q347, höher als im
1028 Mittelland. Q347 von über $9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ weisen mit Ausnahme eines Voralpengebietes nur Alpengebiete auf. In
1029 diesem Bereich variieren die Q290/Q347 mit maximal ± 0.15 nur geringfügig.



1030
1031 *Abbildung 4: Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 für Einzugsgebiete im Mittelland, in den Voralpen und in den*
1032 *Alpen.*

8.3 Gruppierung nach geologischen, klimatologischen und topographischen Kriterien

1035 Die Q290/Q347-Werte wurden nach litho-stratigraphischen Kriterien, nach der mittleren Hangneigung, nach
1036 dem mittleren Jahresniederschlag und nach der Durchlässigkeit der quartären Ablagerungen gruppiert. Das
1037 Verhalten von Q290/Q347 der Einzugsgebiete innerhalb einer Gruppe wurde mit einer Potenzfunktion der Form

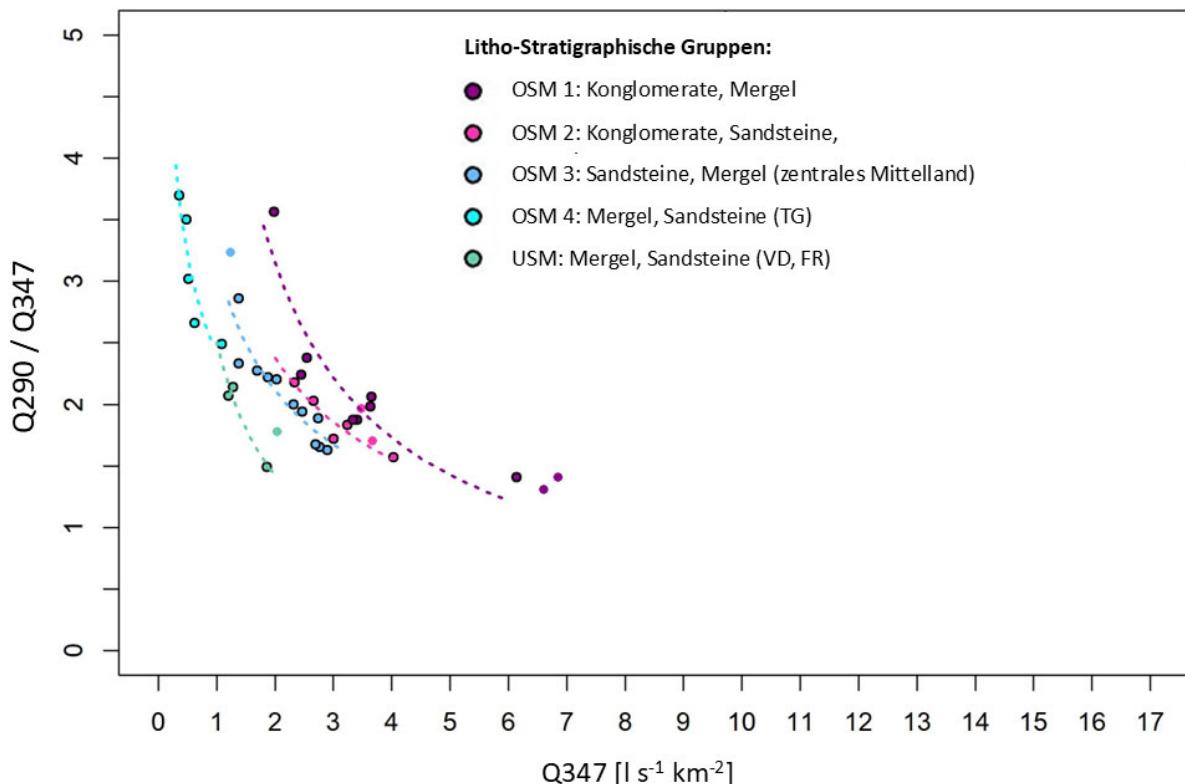
$$1039 \quad \frac{Q^{290}}{0347} = a \cdot Q347^b \quad (2)$$

1040
1041 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 gröberem 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 ($2.0\text{--}6.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) auf. Im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten im Schweizer Mittelland weisen sie steile Hangneigungen ($J = 20\text{--}61\%$) 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 %.

1067 Der mittlere Jahresniederschlag liegt zwischen 1443 und 1817 mm und ist damit mehr als 50 % höher als in der
 1068 Gruppe OSM 4.
 1069 Die Zuordnung zu den litho-stratigraphischen Gruppen basiert auf Informationen aus der geotechnischen Karte
 1070 (Swisstopo, 1967) und dem Geocover-Datensatz der Swisstopo (Swisstopo, 2022). Voraussetzung für die
 1071 Klassifikation der Einzugsgebiete zu einer der OSM-Gruppen OSM 1 bis OSM 4 war, dass mindestens 90% des
 1072 Einzugsgebiets durch OSM aufgebaut wird. Die lithologischen Daten sind im Attribut «Lithologie» des Geocovers
 1073 teilweise stark generalisiert. Auch waren die Kartiermethoden der verschiedenen Kartierenden nicht konsistent.
 1074 Um detaillierte Informationen zu erhalten, in welche OSM-Gruppe ein OSM-Einzugsgebiet gehört, empfehlen
 1075 wir, zusätzlich die Erläuterungen der geologischen Kartenblätter zu konsultieren.
 1076 Die Punkte in Abbildung 5 mit einem schwarzen Rand wurden zur Berechnung der Potenzfunktion berücksichtigt.
 1077 Die anderen wurden wegen möglicher Unsicherheiten bezüglich Wasserentnahmen, unterirdischen Abflüssen
 1078 oder Abflussmessungen nicht verwendet (Tabelle A3 und A4 im Anhang).



1079
 1080 *Abbildung 5: Gefälle der Dauerkurven ($Q290/Q347$) versus $Q347$ für Einzugsgebiete in der Oberen Süßwassermolasse (OSM)
 1081 und in der Unteren Süßwassermolasse (USM). Die Punkte, die Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem
 1082 lithologischem Aufbau eingefärbt. Die Gefälle der Dauerkurven für Gebiete mit ähnlichem lithologischem Aufbau lassen sich
 1083 durch eine Potenzfunktion annähern. Die Punkte ohne schwarze Umrandung wurden aufgrund von möglichen Unsicherheiten
 1084 bezüglich Wasserentnahmen, Versickerungen oder in den Abflussmessungen nicht berücksichtigt. Die vorliegende Darstellung
 1085 wurde basierend auf Zeitreihen 2011 bis 2022 erstellt*

1086
 1087
 1088
 1089

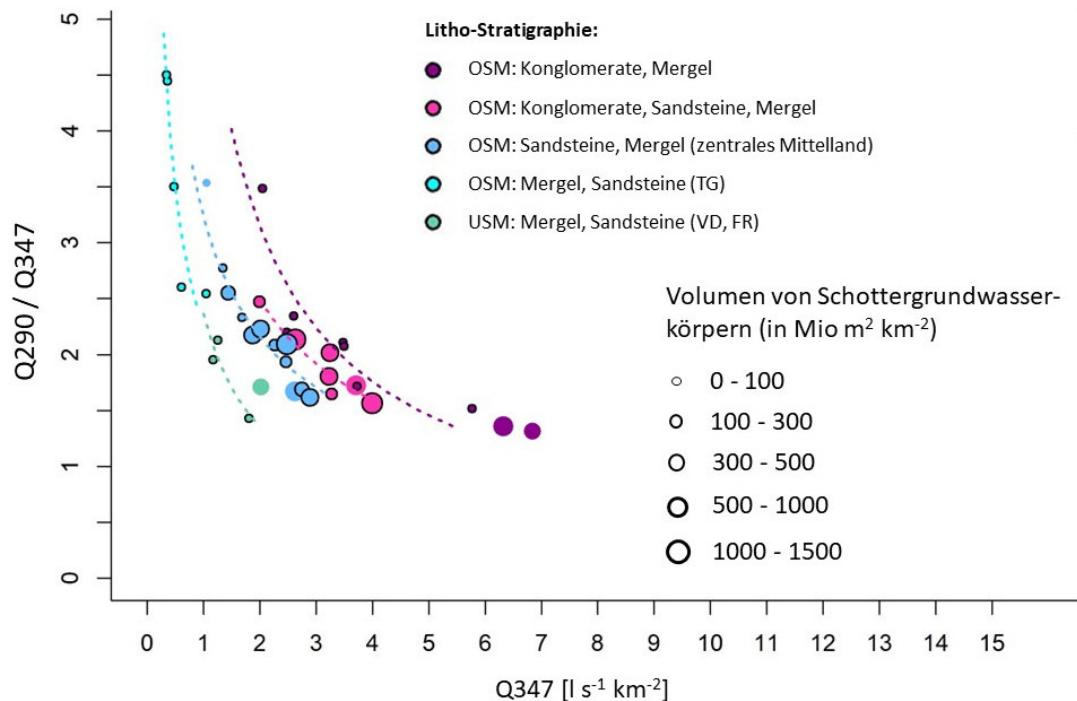
1090 *Tabelle 4: Angaben zur Streuung des mittleren Jahresniederschlages, des Anteils an undurchlässigem und gehemmt*
 1091 *durchlässigem Quartär und der mittleren Geländeneigung für die Dauerkurvengruppen der OSM und der USM.*

1092

Dauerkurven- gruppe	Litho- Stratigraphie Festgestein	Mittlerer Jahresnieder- schlag [mm]	Anteil undurchlässiges und mässig durchlässiges Quartär [%]	Mittlere Geländeneigung [%]	Spezifisches Q347 [$\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$]
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

1093

1094



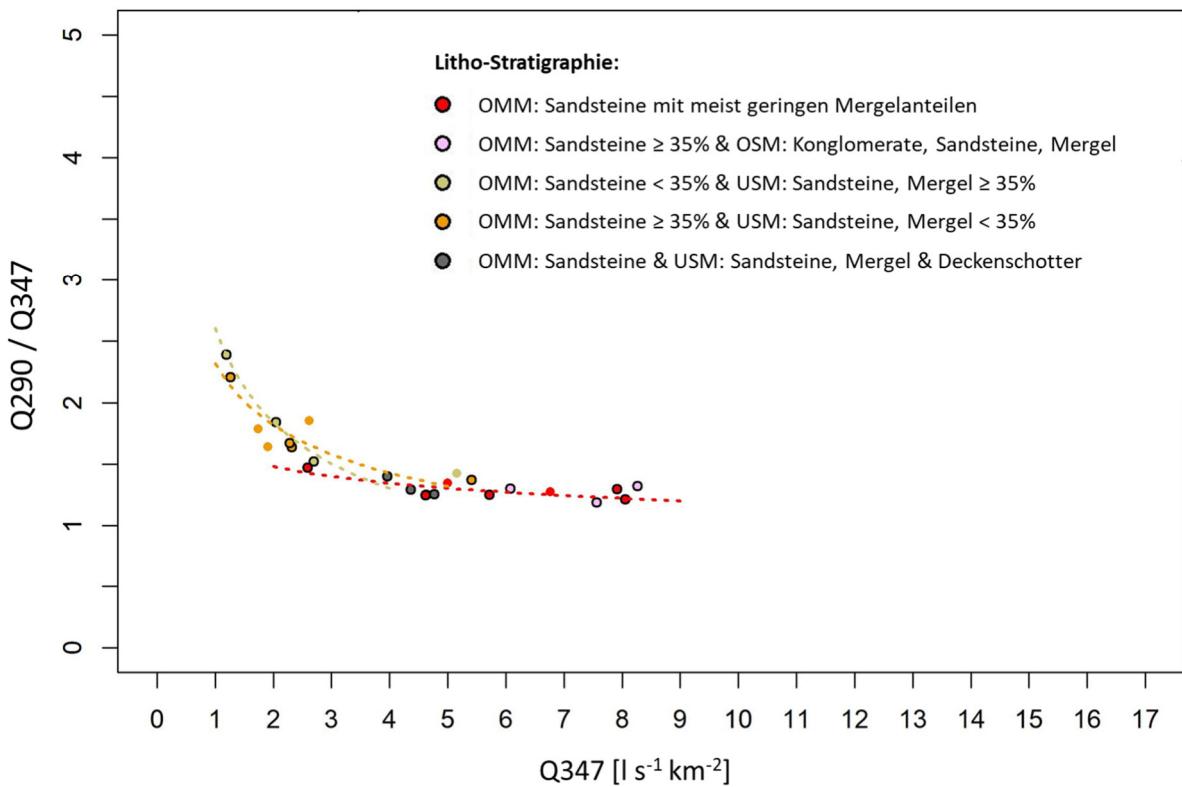
1095

1096 *Abbildung 6: Neigungen der Dauerkurven (Q290/Q347) versus Q347 für Einzugsgebiete in der Oberen Süßwassermolasse*
 1097 *(OSM) und in der Unteren Süßwassermolasse (USM), basierend auf Zeitreihen der Jahre 2011 bis 2020. Die unterschiedlich*
 1098 *gross dargestellten Punkte repräsentieren Einzugsgebiete mit Schotterquaternären, welche unterschiedliche Volumina*
 1099 *aufweisen. In den meisten Fällen erhöhen grosse Schottervolumina die Q347, weshalb die entsprechenden Punkte eher im*
 1100 *unteren Bereich der entsprechenden Kurven liegen. Die vorliegende Darstellung wurde basierend auf Zeitreihen 2011 bis 2020*
 1101 *erstellt.*

8.3.2 Obere Meeressmolasse (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).



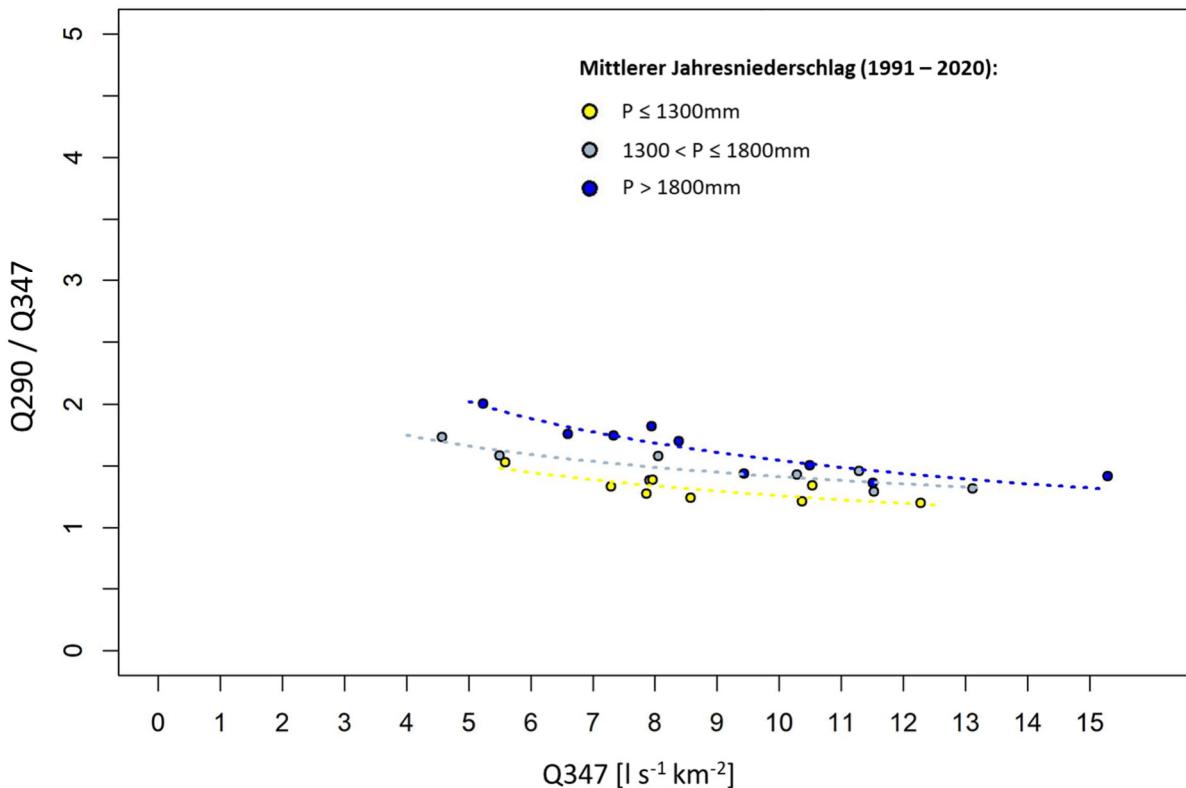
1129

1130 *Abbildung 7: Gefälle der Dauerkurven (Q290/Q347) versus Q347 für Einzugsgebiete in der Oberen Meeresmolasse (OMM)*
 1131 *und für gemischt aufgebaute Einzugsgebiete mit OMM und anderen litho-stratigraphischen Einheiten. Die Punkte, die*
 1132 *Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem lithologischem Aufbau eingefärbt. Das Verhalten der entsprechenden*
 1133 *Gefälle mit ähnlichem lithologischem Aufbau lässt sich durch eine Potenz-Funktion beschreiben. Die Punkte ohne schwarze*
 1134 *Umrundung wurden aufgrund von möglichen Unsicherheiten bezüglich Wasserentnahmen, Versickerungen oder*
 1135 *Unsicherheiten in den Abflussmessungen nicht berücksichtigt.*

1136 8.3.3 Alpen

1137 Das Verhalten von Q290/Q347 der alpinen Einzugsgebiete zeigt keine Abhängigkeit von der litho-
 1138 stratigraphischen Zusammensetzung. Allerdings ist ein leichter Anstieg der Dauerkurvengefälle mit
 1139 zunehmendem mittleren Jahresniederschlag zu beobachten (Abbildung 8). Es wurden drei Gruppen mit
 1140 unterschiedlichen mittleren Jahresniederschlagsbereichen identifiziert. Der mittlere Jahresniederschlag der
 1141 alpinen Gruppe 1 liegt zwischen 800 und 1300 mm, der der alpinen Gruppe 2 zwischen 1300 und 1750 mm und
 1142 der der alpinen Gruppe 3 über 1750 mm. Die alpinen Dauerkurvengefälle variieren weniger stark (1.2–1.8) als
 1143 jene in den Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes, die aus Süßwassermolasse bestehen (1.4–3.7,
 1144 Abbildung 14). Die Potenzfunktionen der Gruppen Alpin 1 bis 3 verlaufen hingegen nahezu parallel zu den
 1145 Potenzfunktionen der Dauerkurvengruppen OMM (Schweizer Mittelland). Die Q290/Q347-Werte der alpinen
 1146 Einzugsgebiete sind jedoch höher als jene der Einzugsgebiete mit dominanter OMM-Aufbau (Abbildung 14). Es
 1147 ist wichtig zu beachten, dass die alpinen Dauerkurvengefälle auf Abflusszeitreihen basieren, aus denen die
 1148 Beiträge von Gletschern und Permafrostgebieten vorab abgezogen wurden. Die mittlere Hangneigung der
 1149 Einzugsgebiete nimmt tendenziell von der alpinen Gruppe 1 zur alpinen Gruppe 3 zu (Abbildung 15). Allerdings
 1150 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 Dauerkurvengefälle unterscheiden sich nicht wesentlich.

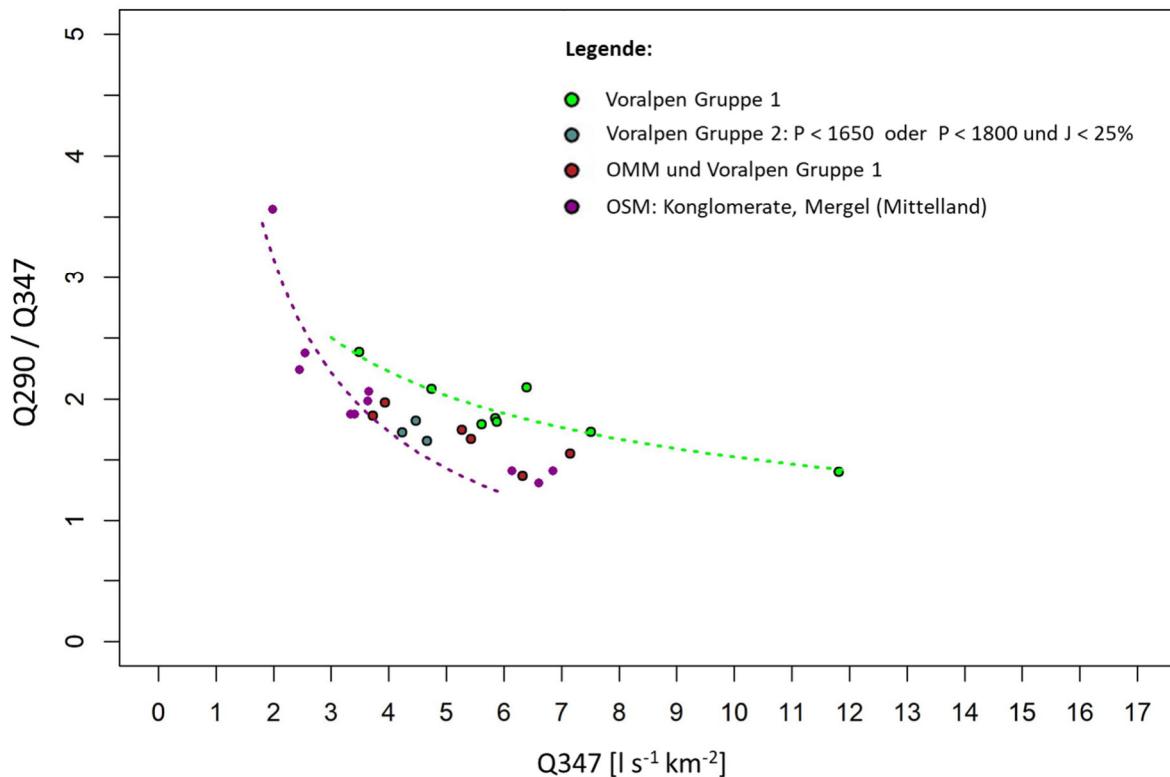


1153
 1154 Abbildung 8: Gefälle der Dauerkurven ($Q290/Q347$) versus $Q347$ für Einzugsgebiete in den Alpen. Die Punkte, die
 1155 Einzugsgebiete repräsentieren, wurden nach ähnlichem mittleren Jahresniederschlag eingefärbt. Die Kurve lässt sich durch
 1156 eine Potenz-Funktion beschreiben.

1157 8.3.4 Voralpen Alpennordseite

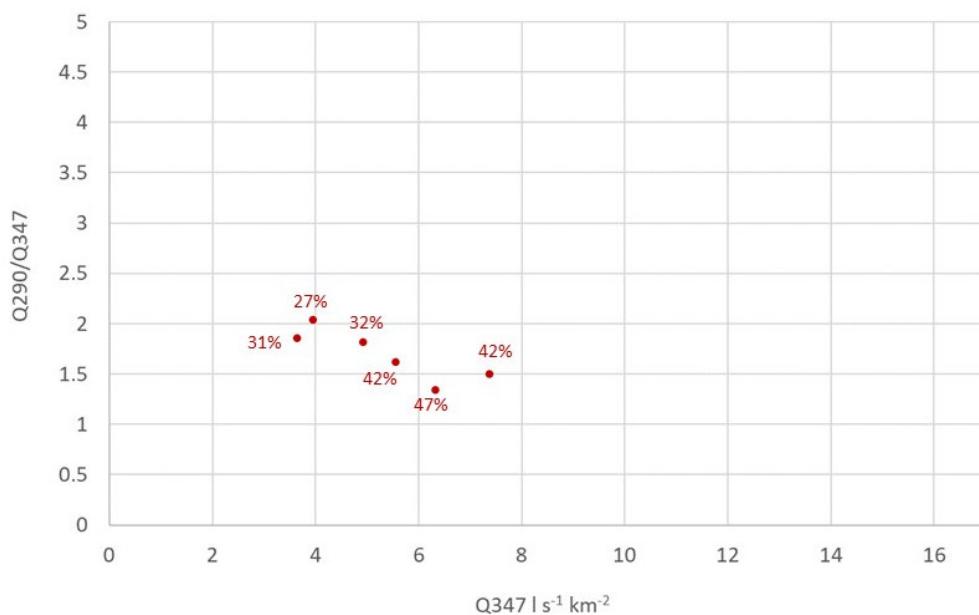
1158 Die Steigungen der Dauerkurven in den Voralpengebiete der Gruppe 1 (hellgrüne Punkte in Abbildung 9) sind
 1159 bei vergleichbarem $Q347$ um einen Wert von 0.5 bis 0.7 höher als in den mittelländischen Konglomerat-
 1160 dominierten Einzugsgebieten der OSM (violette Punkte in Abbildung 9). Drei 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 ($Q290/Q347$) versus $Q347$ für Einzugsgebiete in den Voralpen und für die Konglomerat-*
 1175 *dominierten Gebiete der OSM, die im Übergangsbereich zwischen dem Mittelland und den Voralpen liegen.*

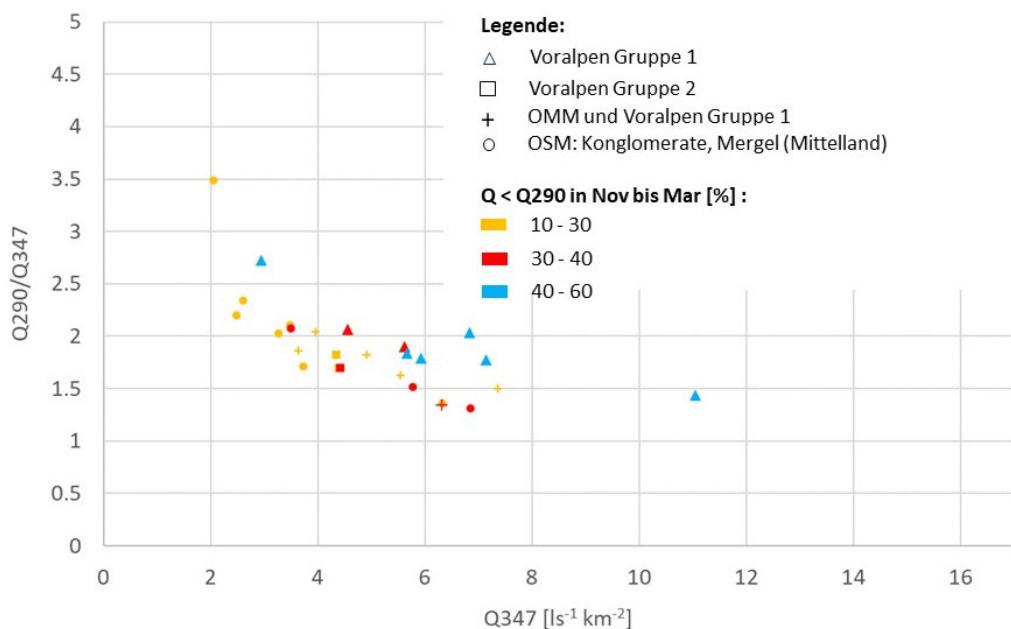
1176



1177
 1178 *Abbildung 10: $Q290/Q347$ vs. $Q347$ 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.*

1180 Die Potenzfunktion der Quotienten Q290/Q347 für die Voralpen-Gruppe 1 verläuft flacher als die der Gebiete,
 1181 die aus der OSM bestehen (Konglomerate, Mergel, Abbildung 9). Es wurde geprüft, ob dieses Abflachen der
 1182 Potenzfunktion der Voralpen-Gruppe 1 mit der Saisonalität der Niedrigwasserabflüsse zusammenhängt. Dazu
 1183 wurden für jedes Einzugsgebiet die Anteile der Tage mit $Q < Q290$ berechnet, die in den Monaten November bis
 1184 März auftraten. Die Prozentanteile wurden dann zu verschiedenen Klassen gruppiert und die Q290/Q347-Punkte
 1185 nach diesen Klassen unterschiedlich eingefärbt (Abbildung 11). In sechs der acht Einzugsgebiete der Voralpen-
 1186 Gruppe 1 treten Niedrigwasserabflüsse ($Q < Q290$) zwischen 40% und 60% aller Fälle in den Monaten November
 1187 bis März auf. Nur in zwei Gebieten dieser Gruppe beträgt dieser Anteil 30 bis 40% (Abbildung 11). In den
 1188 verbleibenden Voralpen- Einzugsgebieten und in den Einzugsgebieten, welche aus der OSM aufgebaut sind,
 1189 beträgt dieser Anteil weniger als 40%. Mit Ausnahme eines Einzugsgebiets weisen unter den Voralpen-Gruppe
 1190 1 diejenigen die höchsten Q347 auf, die die meisten Niedrigwassertage in den kalten Monaten haben.
 1191 Schneeschmelze und/oder die fehlende Verdunstung könnten möglicherweise zu einem höheren Q347 führen
 1192 (vgl. auch Kapitel 8.5.1 und 8.9.4).

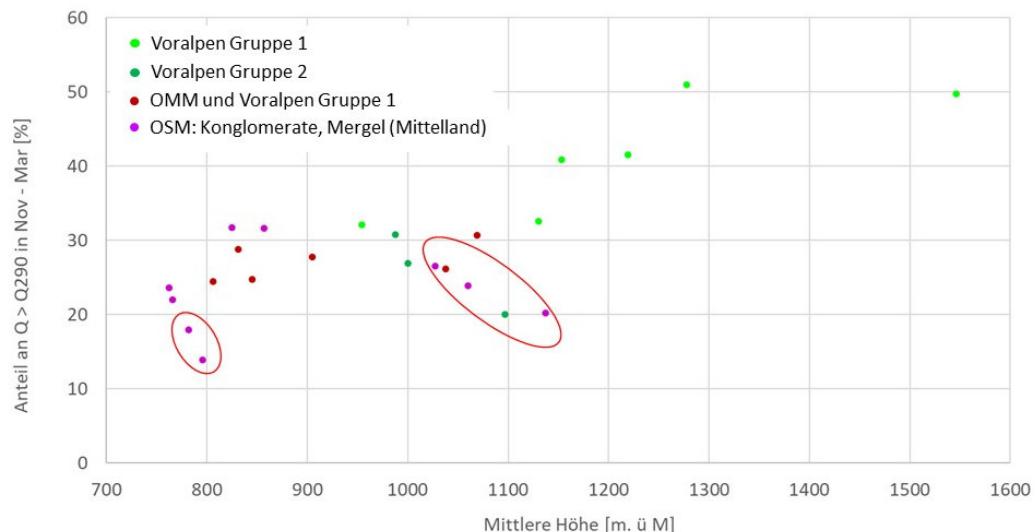
1193



1194

1195 *Abbildung 11: Punkte der Q290/Q347 vs. Q347 für Einzugsgebiete in den Voralpen und für solche Gebiete im Mittelland, in*
 1196 *denen der geologische Aufbau weitgehend aus Konglomeraten besteht. Die Farben der Punkte entsprechen verschiedenen*
 1197 *Prozentanteilen der Tage mit $Q < Q290$ in den Monaten November bis März an der Gesamtanzahl der Tage mit $Q < Q290$.*

1198 Der Anteil der in der kalten Jahreszeit auftretenden Niedrigwasserabflüsse nimmt tendenziell mit der mittleren
 1199 Einzugsgebietshöhe der Gebiete zu (Abbildung 12). Es gibt jedoch einige Ausreisser (Punkte innerhalb der
 1200 Ellipsen). Sie liegen mehrheitlich in den Konglomerat-dominierten Gebieten der OSM. Die Ausreisser konnten
 1201 bisher aber nicht erklärt werden.



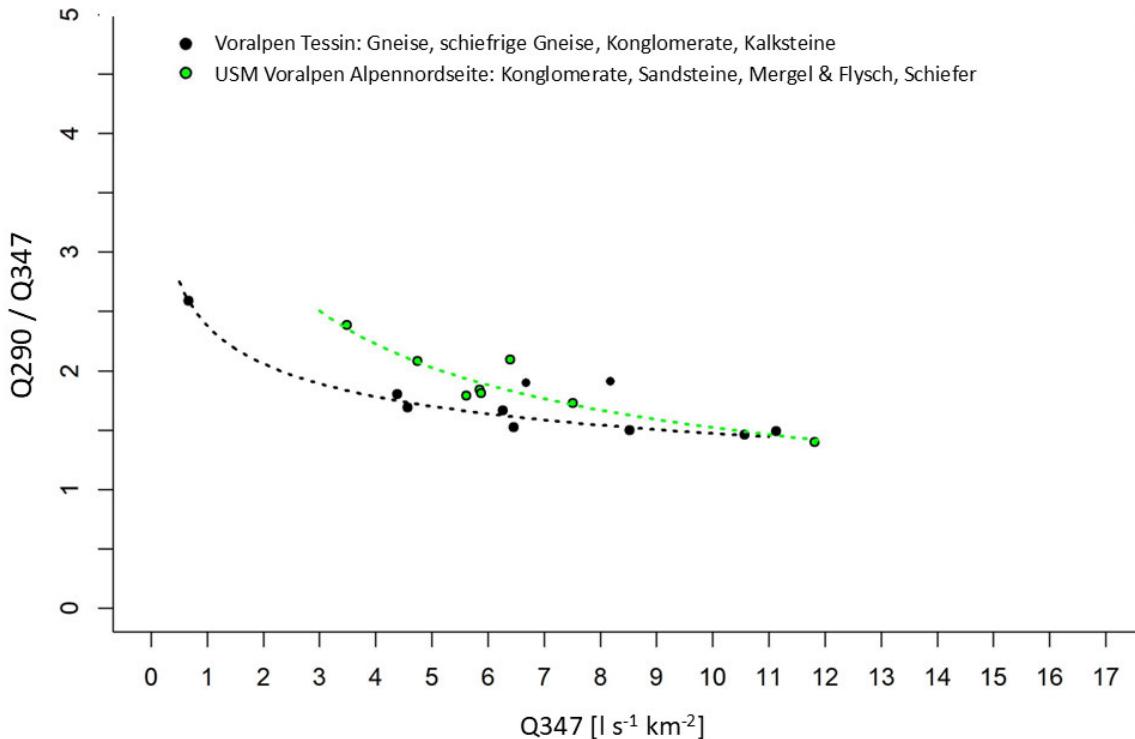
1202

1203 *Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem saisonalen Auftreten der Niedrigwasserabflüsse und der mittleren Höhe der*
 1204 *Einzugsgebiete. Die in Ellipsen eingekreisten Einzugsgebiete weisen ein Verhalten auf, das von diesem Zusammenhang*
 1205 *abweicht.*

1206

1207 8.3.5 Voralpen Tessin

1208 Die Steigungen der Dauerkurven in der Voralpengebieten des Tessins nehmen bei einem $Q_{347} > 4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ nur
 1209 noch geringfügig ab (Abbildung 13). Sie verhalten sich in diesem Bereich ähnlich wie Einzugsgebiete in den Alpen
 1210 mit ähnlichen mittleren Jahresniederschlägen. Bei $Q_{347} < 4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ steigt der Quotient Q_{290}/Q_{347} stark an.
 1211 Allerdings ist der Verlauf des Anstiegs in diesem Bereich nur auf einen Punkt abgestützt (Breggia in Chiasso). Es
 1212 ist unklar, ob im Tessin ebenfalls mehrere parallel verlaufende Trendlinien existieren wie im Mittelland der
 1213 Alpennordseite. Die Voralpengebiete im Tessin sind mehrheitlich durch Gneise, schiefrige Gneise und
 1214 Glimmerschiefer aufgebaut. Die im Vergleich zum Tessin grösseren Steigungen der Dauerkurven in den
 1215 Voralpen-Gebieten der Alpennordseite lassen sich durch die Differenzen im durchschnittlichen
 1216 Jahresniederschlag erklären, die dort über alle Einzugsgebiete mit durchschnittlich 1951 mm um 267 mm
 1217 grösser sind als im Tessin (1684 mm).



1218

1219

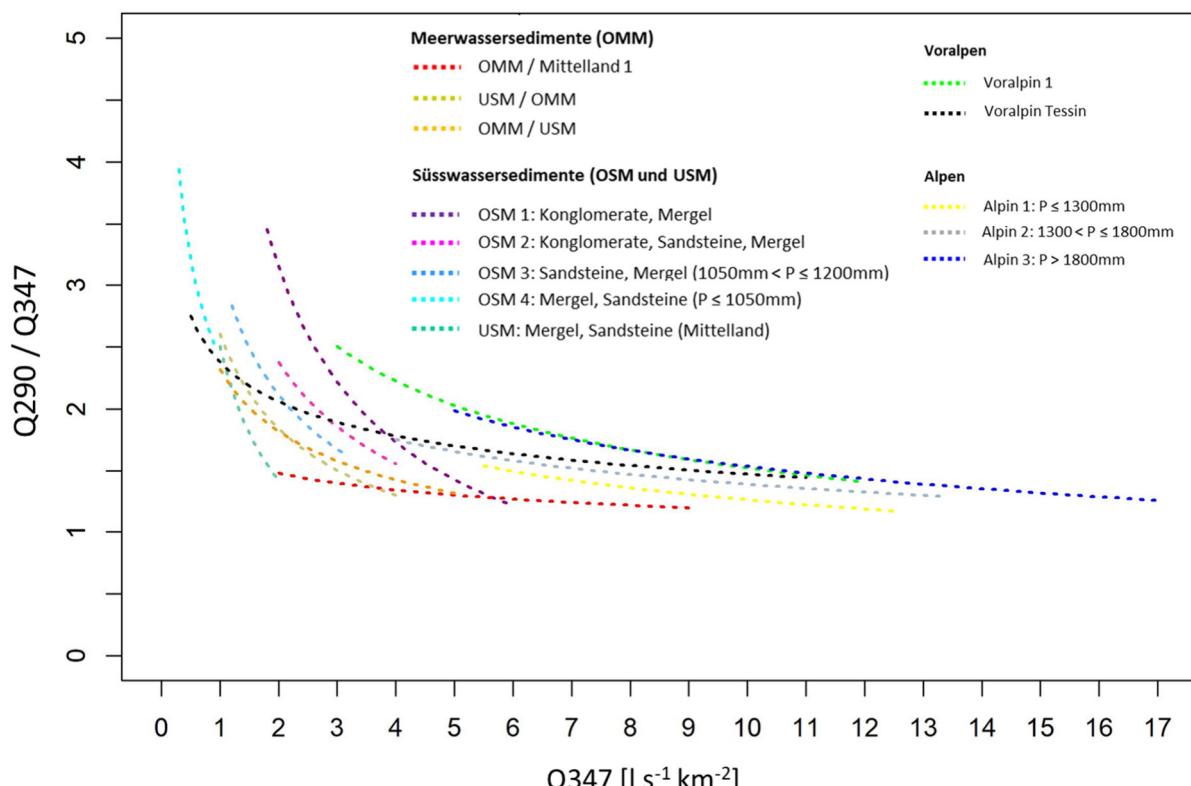
1220 *Abbildung 13: Gefälle der Dauerkurven (Q290/Q347) versus Q347 für Einzugsgebiete in den Voralpen des Tessins und der*
 1221 *Voralpen-Gruppe 1 der Alpennordseite im Vergleich. Die Steigungen der Dauerkurven für Gebiete in den Tessiner Voralpen*
 1222 *sind wegen des tieferen durchschnittlichen Jahresniederschlags etwas niedriger als die entsprechenden Gefälle für*
 1223 *Einzugsgebiete in den Voralpen der Alpennordseite.*

1224 8.3.6 Überblick über die Gefälle der Dauerkurven

1225 Die Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 in Abhängigkeit von Q347 zeigen unterschiedliche Muster
 1226 im Mittelland, in den Alpen und in den Voralpen. In der Punktfolke Q290/Q347 vs. Q347 konnten Gruppen mit
 1227 ähnlicher litho-stratigraphischer Struktur im Mittelland und Gruppen mit ähnlichem mittlerem
 1228 Jahresniederschlag in den Alpen identifiziert werden. In den Voralpen gibt es Einzugsgebiete, die dem Muster
 1229 des Mittellandes ähnlich sind (Gruppe Voralpin 2), und andere, die eher dem alpinen Muster entsprechen
 1230 (Gruppe Voralpin 1 und Gruppe Voralpen Tessin mit flach abfallender Potenzfunktion). Die identifizierten
 1231 Gruppen werden auch als Dauerkurvengruppen bezeichnet. Die Beziehung zwischen Q290/Q347 und Q347
 1232 innerhalb der Gruppen lässt sich durch eine Potenzfunktion beschreiben. Alle Potenzfunktionen zeigen eine
 1233 Tendenz zur Abnahme von Q290/Q347 mit zunehmendem Q347 (Abbildung 14). Mit steigendem Q347
 1234 entwässern die Einzugsgebiete langsamer, weil die Kapazität langsam entwässernder Grundwasserleiter
 1235 zunimmt. Das zeigt, dass die Gefälle der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 das Rezessionsverhalten
 1236 widerspiegeln. Es zeigen sich jedoch Unterschiede im Abfallen der Potenzfunktionen. Die Potenzfunktionen
 1237 fallen in den Einzugsgebieten der Oberen und Unteren Süßwassermolasse des Mittellandes (Gruppen OSM 1,
 1238 OSM 2, OSM 3, OSM 4, USM) steiler ab als in den Einzugsgebieten der Oberen Meeressmolasse (Gruppe OMM)
 1239 des Mittellandes sowie in den Einzugsgebieten der Alpen und Voralpen. Im Mittelland ist das Gefälle der
 1240 Dauerkurven geringer als 1.3, falls die Q347-Werten grösser als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sind. Die Abnahme erfolgt dort nur

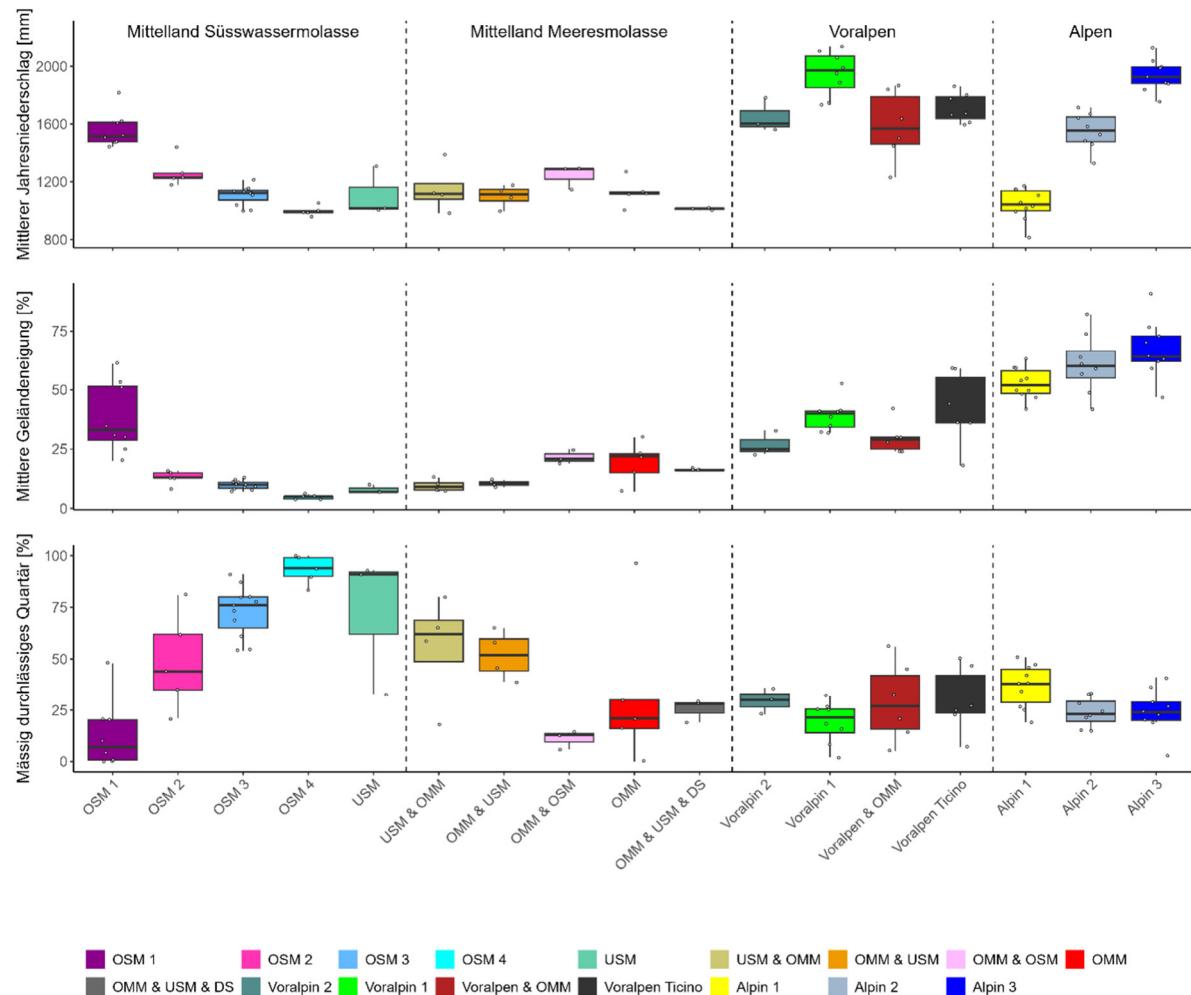
1241 noch in geringen Raten. In alpinen Einzugsgebieten hängt das Gefälle der Dauerkurven nicht mehr vom litho-
 1242 stratigraphischen Aufbau eines Gebiets ab, sondern vom mittleren Jahresniederschlag. Je höher der mittlere
 1243 Jahresniederschlag ist, desto steiler sind die Dauerkurven. Die Potenzfunktionen der alpinen
 1244 Dauerkurvengruppen fallen bei einer Zunahme des Q347 nur noch geringfügig ab.
 1245 Der spezifische Q347-Abfluss im Mittelland variiert zwischen 0.3 und $8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. In den Alpen und Voralpen liegt
 1246 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}
 1247 km^{-2} (Voralpen). In Abbildung 15 sind Boxplots dargestellt, die die Streuung des mittleren Jahresniederschlages,
 1248 der mittleren Geländeneigung und der mässig durchlässigen Quartärlagerungen innerhalb jeder
 1249 Dauerkurvengruppe zeigen. Die geographische Lage der verschiedenen Dauerkurvengruppen wird in Abbildung
 1250 16 auf einer Karte dargestellt.
 1251 Die physikalischen Prozesse, die das vorliegende Verhalten der Dauerkurvengefälle verursachen, werden im
 1252 Kapitel Interpretation (Kapitel 8.9) im Detail diskutiert.
 1253

Q290 / Q347 vs. Q347 in Mittelland, Voralpen, Alpen und Voralpen Tessin



1254
 1255 Abbildung 14: Verhalten des Dauerkurvengefälles bei Niedrigwasser (Q290/Q347) für Einzugsgebiete im Mittelland,
 1256 Voralpen, Alpen und Voralpen im Tessin.

1257

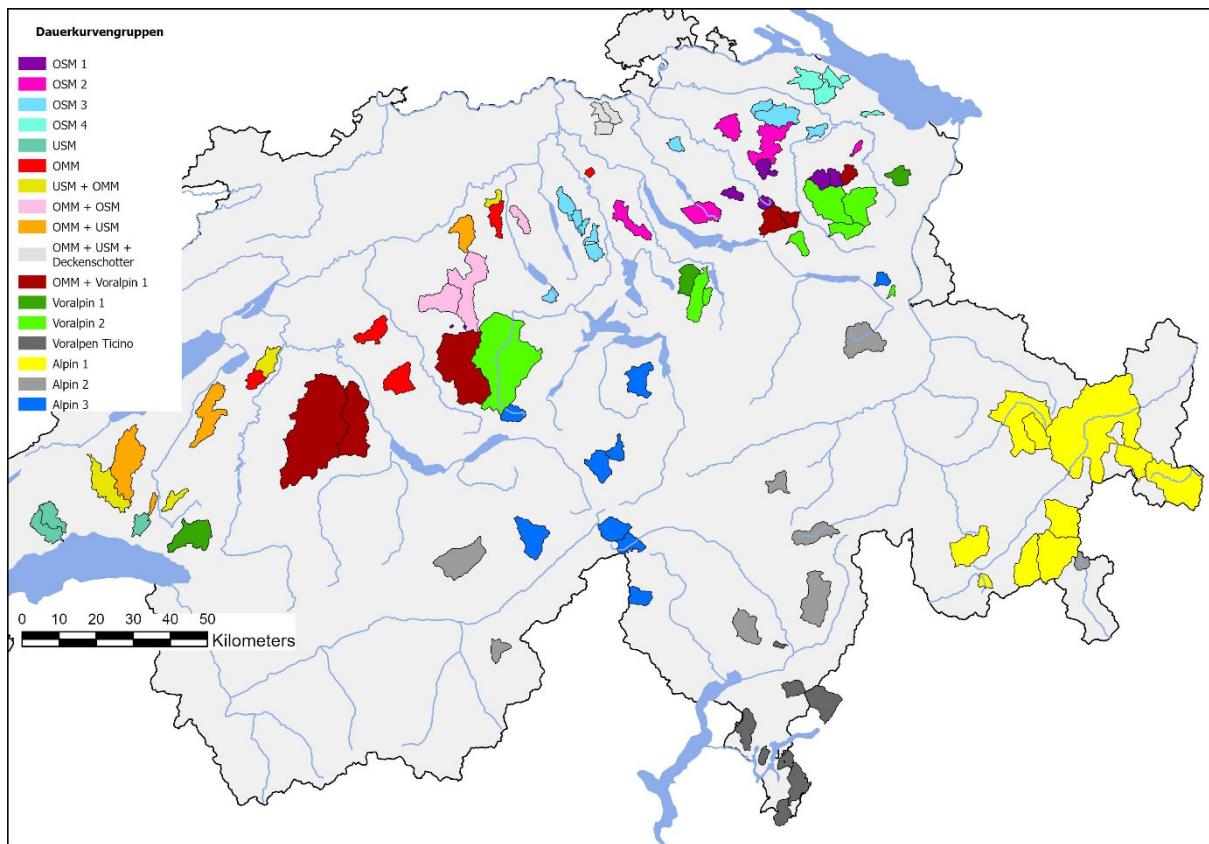


1258

1259 Abbildung 15: Streuung des mittleren jährlichen Jahresniederschlags, der mittleren Einzugsgebietsneigung und des
1260 Flächenanteils an den mässig durchlässigen Quartärablagerungen innerhalb der Dauerkurvengruppen.

1261

1262



1263

1264

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

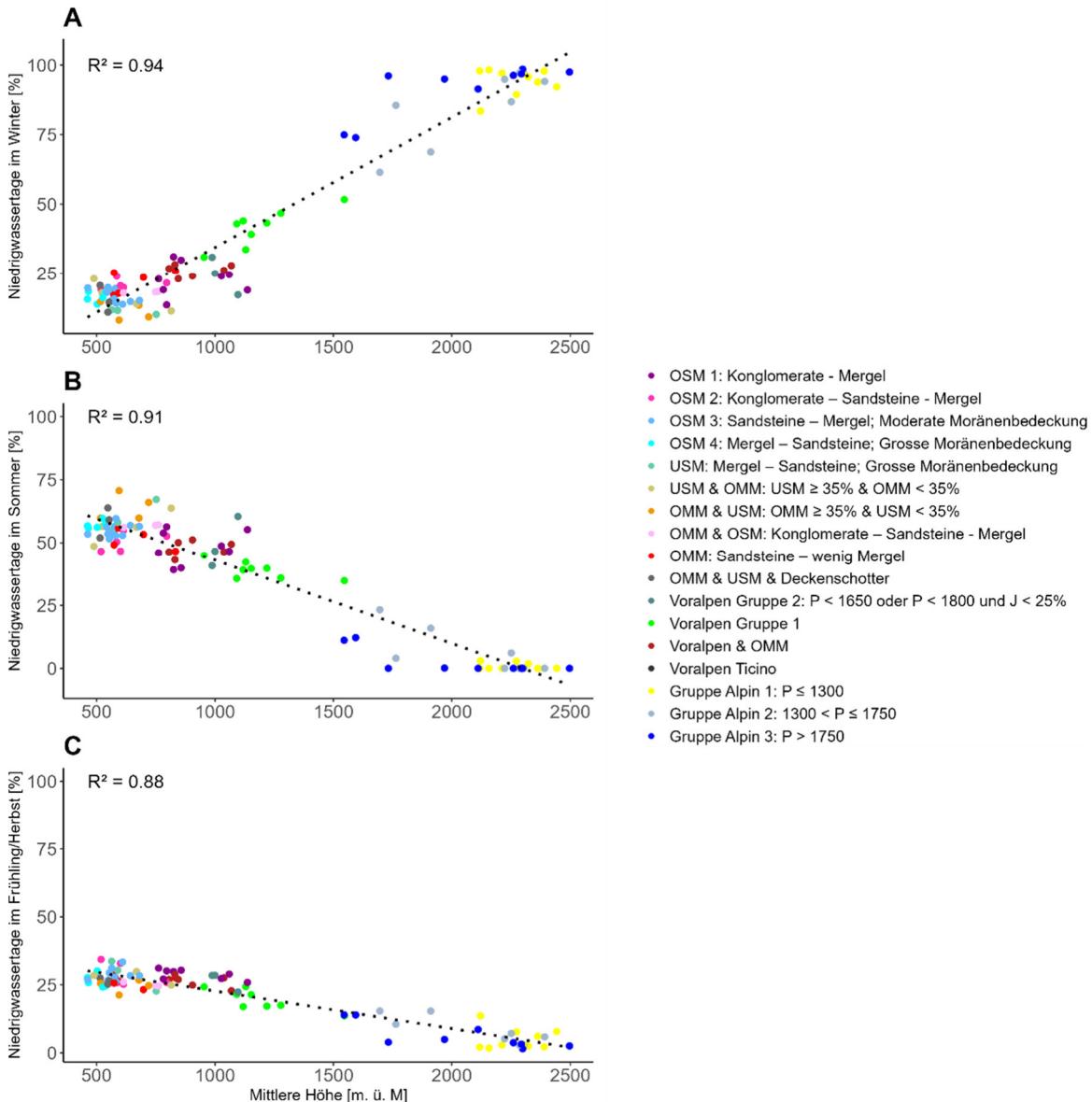
1265

8.4 Saisonale Verteilung der Niedrigwassertage

1266 Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen der mittleren Höhe des Einzugsgebiets und der Anzahl der
 1267 Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in den Wintermonaten (November bis März, Abbildung 17 A). Bis zu einer mittleren
 1268 Höhe von etwa 1000 m ü. M. liegt der Anteil der Niedrigwassertage im Winter unter 30 %. Zwischen 1000 und
 1269 1500 m ü. M. liegt er zwischen 30 % und 50 %, und oberhalb von 1500 m ü. M. treten in der kalten Jahreszeit 50
 1270 % oder mehr Niedrigwassertage auf.

1271 Die Beziehungen zwischen der mittleren Einzugsgebiets Höhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in
 1272 den Sommermonaten (15. Mai bis 15. September, Abbildung 17 B) sowie zwischen der mittleren
 1273 Einzugsgebiets Höhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in den Frühlings- und Frühherbstmonaten
 1274 (1. April bis 14. Mai und 16. September bis 31. Oktober, Abbildung 17 C) weisen ebenfalls ein hohes R^2 auf.

1275



1276

1277 *Abbildung 17: Es bestehen starke Zusammenhänge zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der*
 1278 *Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in den Wintermonaten (November bis März, A), zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und*
 1279 *der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in den Sommermonaten (15. Mai bis 15. September, B) und zwischen der*
 1280 *mittleren Einzugsgebietshöhe und der Anzahl der Niedrigwassertage ($Q < Q80$) in den Frühlings- und Frühherbstmonaten (1.*
 1281 *April bis 14. Mai und 16. September bis 31. Oktober, C).*

1282

1283 8.5 Verhalten der Rezessionskurven bei Niedrigwasser

1284 Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei neue Verfahren entwickelt, um von Messreihen aus Abfluss-
 1285 Tagesmittelwerten Masterrezessionskurven im Niedrigwasserbereich zu berechnen. Masterrezessionskurven
 1286 zeigen den Abflussrückgang, der ungestört ist von Niederschlägen oder Schneeschmelze. Sie repräsentieren das
 1287 reine Leerlaufverhalten der Speicher eines Einzugsgebiets und liefern Hinweise über deren Kapazität. Im
 1288 Vergleich zu den Rezessionskurven sind in den Dauerkurven sämtliche Abfluss-Tagesmittelwerte einer
 1289 definierten Messperiode enthalten.

1290 In der Literatur werden viele verschiedene Methoden behandelt, um Masterrezeptionskurven zu berechnen
1291 (Tallaksen, 1995). Im Rahmen dieser Studie wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um die Niedrigwasserabflüsse
1292 von 33 Mittelland-Einzugsgebieten anhand von fünf verschiedenen Rezeptionsmodellen für den
1293 Niedrigwasserbereich zwischen Q290 und Q360 vorherzusagen. Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Studie
1294 werden in einem separaten Artikel veröffentlicht (Margreth et al., n.d.), weshalb hier nicht weiter darauf
1295 eingegangen wird. Das Rezeptionsmodell MRC_slow, das eine der beiden Neuentwicklungen der WSL darstellt
1296 und das unter den fünf Modellen die beste Prognostizierbarkeit aufweist, wurde verwendet, um zu untersuchen,
1297 wie die verschiedenen Dauerkurvengruppen mit dem Rezeptionsverhalten in 92 Einzugsgebieten in Mittelland,
1298 Voralpen und Alpen zusammenhängen.

1299 In alpinen Einzugsgebieten können die Abflussganglinien während sehr kalter Perioden von starken täglichen
1300 Schwankungen betroffen sein (Nagel et al., 2025). Sinkt die Wassertemperatur während der Nacht auf 0°C oder
1301 darunter, bildet sich an verschiedenen Stellen im Bachbett Eis. Die Eisbildung ist stark von der morphologischen
1302 Beschaffenheit des Bachbetts abhängig (Nagel et al., 2025). Das Eis kann an flacheren Standorten Wasser
1303 aufstauen. Das aufgestaute und das im Eis festgehaltene Wasser fehlt an der Pegelstation, weshalb der Abfluss
1304 während der Nacht sinkt. Steigt die Wassertemperatur während des Tages wieder über 0°C, schmilzt das Eis und
1305 die «Eisdämme» brechen. Das aufgestaute Wasser fliesst ab, was zu einem Anstieg des Abflusses am Pegel auf
1306 ein Niveau führt, das oft über dem durchschnittlichen Tagesmittelwert liegt, auch wenn die Lufttemperatur
1307 unter 0°C bleibt. Diese täglichen Abflusschwankungen beeinflussen oft auch die Abflusstagesmittelwerte über
1308 mehrere Tage, weshalb sie in der Anwendung des MRC_slow- Modells zu Verzerrungen führen. Deshalb wurde
1309 ein Algorhythmus entwickelt, um diese Schwankungen vor der Berechnung der Masterrezeptionskurve aus der
1310 Ganglinie herauszufiltern. Dieses Verfahren wird in der geplanten Publikation im Detail beschrieben (Margreth
1311 et al., n.d.).

1312

1313 MRC_slow basiert auf einer exponentiellen Zerfallsfunktion der Form:

1314

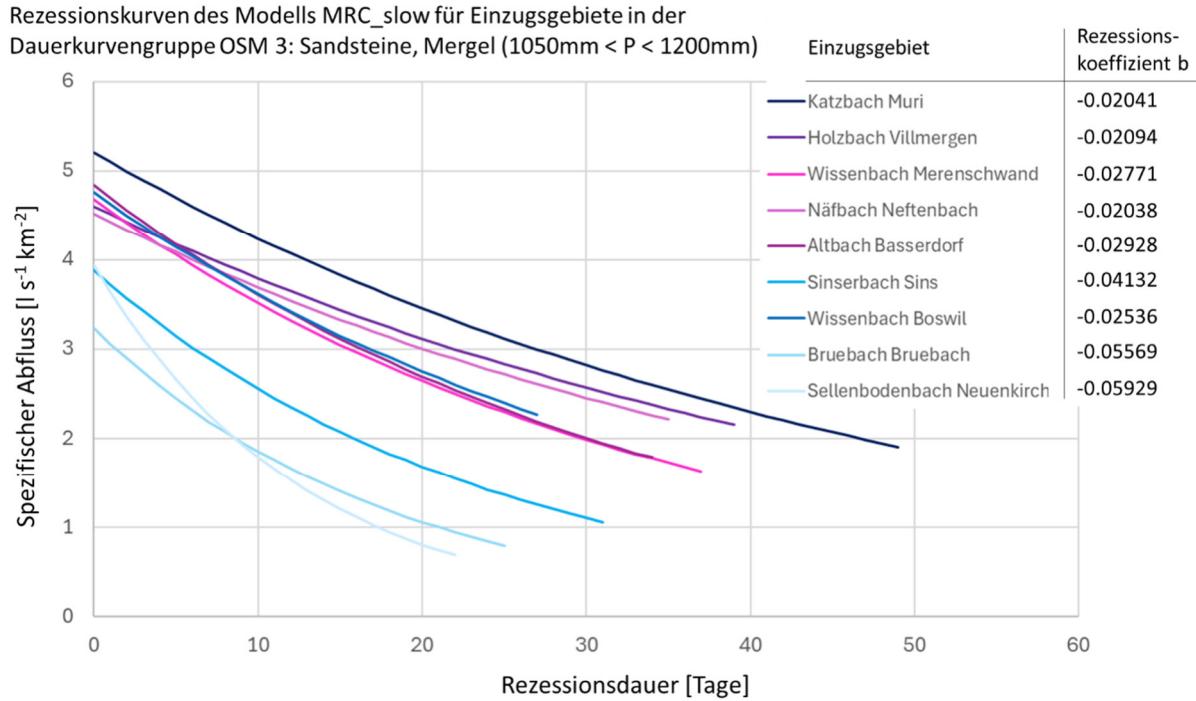
$$1315 Q_t = Q_0 \cdot e^{-bt} \quad , \quad (3)$$

1316

1317 wobei Q_0 dem Q290, Q_t dem gesuchten Abfluss und t dem Tag des gesuchten Abflusses während der
1318 Rezeptionsperiode entspricht. Der Rezeptionskoeffizient b steuert Form und Länge der Rezeptionskurve
1319 massgeblich. In Abbildung 18 sind die mit MRC_slow berechneten Rezeptionskurven für die Einzugsgebiete in
1320 der «Dauerkurvengruppe OSM 3: Sandsteine, Mergel (1050mm < P < 1200mm)» zwischen Q290 und Q360
1321 dargestellt. Mit abnehmendem Rezeptionskoeffizienten werden die Rezeptionskurven tendenziell kürzer, die
1322 Steigungen zwischen Q290 und Q360 steiler und die Krümmung der Kurven ausgeprägter. Aus der Reihenfolge
1323 der abnehmenden Rezeptionskoeffizienten b (Rezeptionskoeffizienten Abbildung 18 oben rechts) weichen nur
1324 der Näfbach (Neftenbach) und der Wissenbach (Boswil) ab. Der Grund dafür ist nicht klar. Für sämtliche
1325 Einzugsgebiete wurden die Rezeptionskoeffizienten b gegen das Q347 dargestellt, klassifiziert nach den
1326 Dauerkurvengruppen (Abbildung 19). Mit Hilfe einer log-Funktion wurde das Verhalten des
1327 Rezeptionskoeffizienten b in Abhängigkeit von Q347 für die Einzugsgebiete der gleichen Dauerkurvengruppen

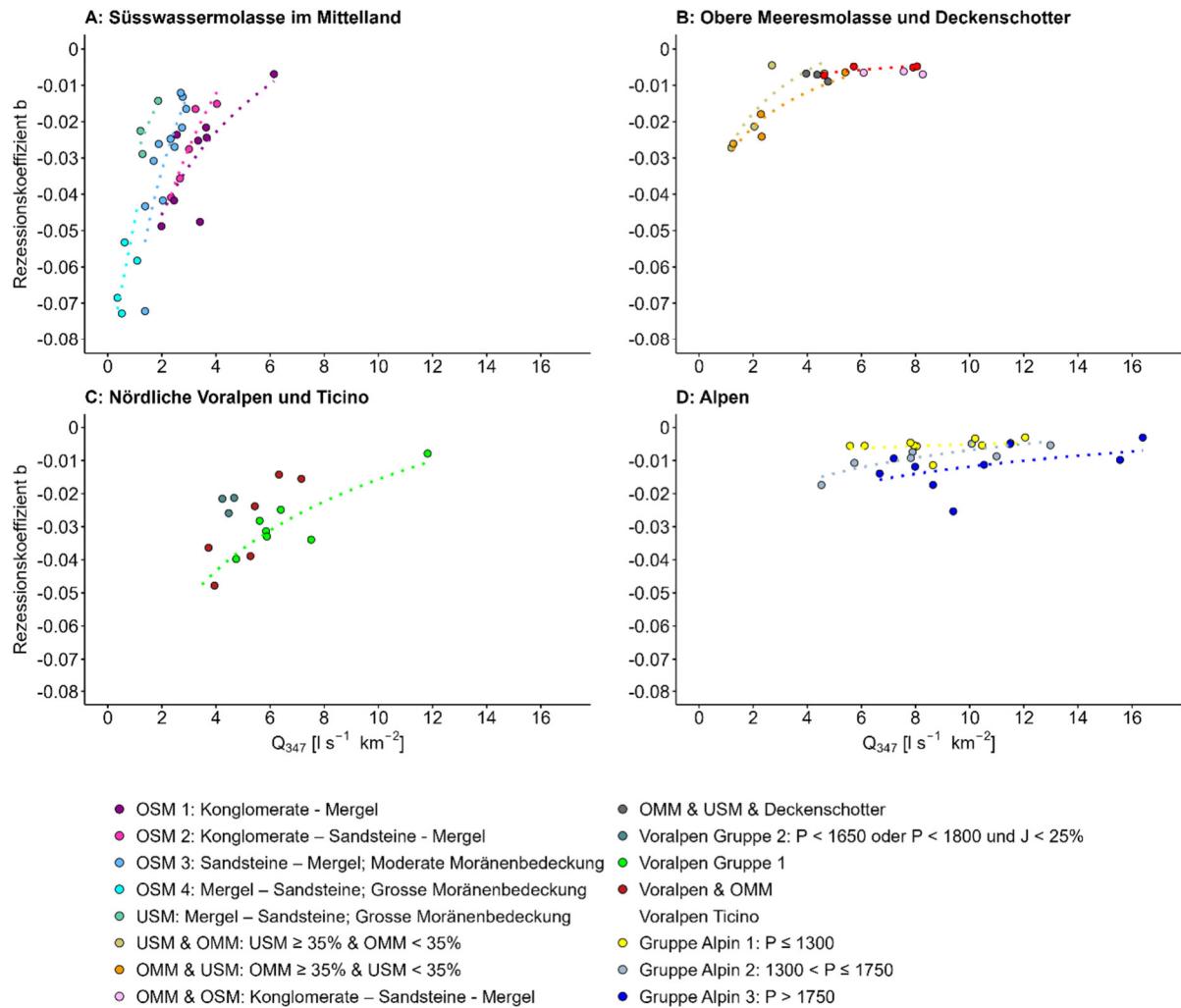
1328 angenähert (log-Funktionen in Abbildung 19). Innerhalb derselben Dauerkurvengruppen nehmen die
 1329 Rezessionskoeffizienten mit steigendem Q347 zu. Ähnlich wie bei den Gefällen der Dauerkurven bilden die log-
 1330 Funktionen des Rezessionskoeffizienten b in Gebieten, welche aus USM und OSM bestehen, steilere log-
 1331 Funktionen als in denjenigen Einzugsgebieten, die aus OMM-Sedimenten aufgebaut sind (Abbildung 19). Die log-
 1332 Funktion der Gruppe Alpin 1 verläuft parallel zur log-Funktion der OMM-dominierten Einzugsgebiete (Abbildung
 1333 19 B und D, Abbildung 20). Die log-Funktionen der Gruppen Alpin 2 und 3 verlaufen etwas steiler als diejenige
 1334 der Gruppe Alpin 1. Die log-Funktion der Gruppe Voralpin 1 verläuft steiler als diejenige der Alpinen
 1335 Einzugsgebiete, aber flacher als log-Funktionen der Einzugsgebiete im Mittelland, die aus OSM oder USM
 1336 aufgebaut sind. Es gilt zu berücksichtigen, dass die tiefsten Abflüsse die Berechnung der Masterrezessionskurve
 1337 massgebend beeinflussen. Unsicherheiten in den Abflussmessreihen könnten daher für die Streuung eine Rolle
 1338 spielen. Auffällig ist, dass die log-Funktion der Dauerkurvengruppe OSM 1 etwas flacher verläuft als diejenige
 1339 der Dauerkurvengruppen OSM 2, OSM 3, OSM 4 und USM Westschweiz. Der Grund dafür ist nicht klar.

1340



1341

1342 *Abbildung 18: Mit dem Modell MRC_slow berechnete Rezessionskurven zwischen Q290 und Q360 für die Einzugsgebiete in*
 1343 *der Dauerkurvengruppe OSM3: Sandsteine, Mergel (1050mm < P < 1200mm).*



1344

1345

1346 *Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Q347 und Rezessionskoeffizient b für Einzugsgebiete unterschiedlicher*
 1347 *Dauerkurvengruppen im Mittelland, in den Voralpen der Alpennordseite und in den Alpen. Die Punkte repräsentieren einzelne*
 1348 *Einzugsgebiete. Die Linien markieren Trendlinien, die den Zusammenhang zwischen Q347 und Rezessionskoeffizient b*
 1349 *innerhalb der Dauerkurvengruppen mit einer log-Funktion beschreiben.*

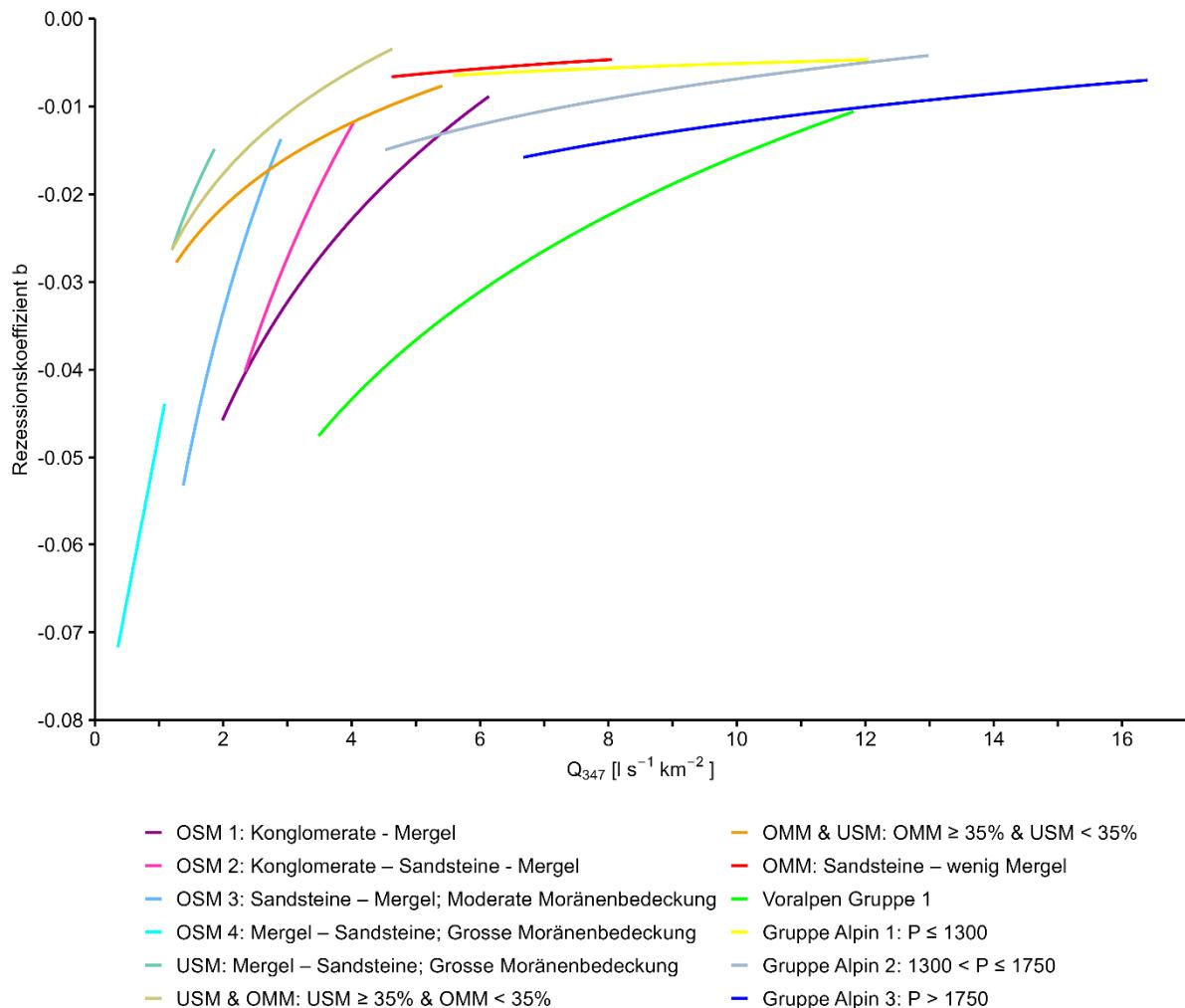


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Q347 und Rezessionskoeffizient b für Einzugsgebiete unterschiedlicher Dauerkurvengruppen im Mittelland, in den Voralpen der Alpennordseite und in den Alpen. Dargestellt sind nur die log-Funktionen, die das Verhalten des Rezessionskoeffizienten b innerhalb derselben 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:

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

1367 So resultieren für die Mittelland- und Voralpengebiete 3 saisonale Masterrezessionskurven und für die Alpen
1368 eine Masterrezessionskurve für den Winter. Aus den resultierenden Masterrezessionskurven wurde die
1369 Rezessionsdauer und Rezessionsvolumina zwischen Q290 und Q360 ermittelt. Die saisonalen Unterschiede in
1370 der Rezessionsdauer wird in Abbildung 21, die der Rezessionsvolumina in Abbildung 22 aufgeschlüsselt nach
1371 Dauerkurvengruppen dargestellt. Die Rezessionsvolumina sind auch in Tabelle 5 aufgeführt.

1372

1373 Rezessionsdauer:

1374 Im Mittelland und in den Voralpen dauert die Rezession zwischen Q290 und Q360 in den Frühlings- und
1375 Herbstmonaten am längsten, und zwar in allen Dauerkurvengruppen. Die Unterschiede innerhalb der gleichen
1376 Dauerkurvengruppen sind z.T. erheblich. Die Rezessionsdauer in Frühling/Herbst variiert zwischen 25 und 140
1377 Tagen. In den Sommermonaten ist die Rezessionsdauer hingegen am kürzesten. Sie variiert zwischen 5 und 53
1378 Tagen (mit einer Ausnahme). Die Schwankungen der Rezessionsdauer in Frühling/Herbst sind grösser als im
1379 Sommer. Die Unterschiede der Rezessionsdauer zwischen den Sommermonaten und den Frühlings- und
1380 Herbstmonaten sind teilweise erheblich, vor allem in den Gruppen OSM 4, OSM 2, USM & OMM, OMM & USM,
1381 OMM & OSM, Voralpin 2. Weniger ausgeprägt sind die Unterschiede bei den Gruppen Voralpin 1 und Voralpen
1382 & OMM. Auffällig ist, dass dort auch die Rezessionsdauer insgesamt kürzer ist als in den Mittelland-
1383 Einzugsgebieten, vor allem in den Gruppen Voralpin 1 und Voralpin & OMM. Die Dauer der
1384 Masterrezessionskurven, die basierend auf Rezessionssegmenten aus Frühlings-, Sommer- und Herbstmonaten
1385 berechnet wurden, liegt bei allen Mittelland- und Voralpeneinzugsgebieten zwischen der Dauer der Frühlings-
1386 /Herbst- und der Sommer-Rezessionskurven. Tendenziell dauert die Rezession der OMM-dominierten
1387 Einzugsgebieten etwas länger als die von Einzugsgebieten, die aus Süßwassermolasse aufgebaut sind. Aufgrund
1388 einer visuellen Einschätzung schwankt die Rezessionsdauer der Sommermonate innerhalb der
1389 Dauerkurvengruppen des Mittellands und der Voralpen weniger als die der Frühlings- und Herbstmonate.
1390 Der Median der Rezessionsdauer der alpinen Einzugsgebiete ist in den meisten Fällen höher als der von
1391 Mittelland- und Voralpen-Einzugsgebieten. Innerhalb der alpinen Einzugsgebiete ist der Median der
1392 Rezessionsdauer der Gruppe Alpin 1 höher als der der Gruppen Alpin 2 und 3.

1393

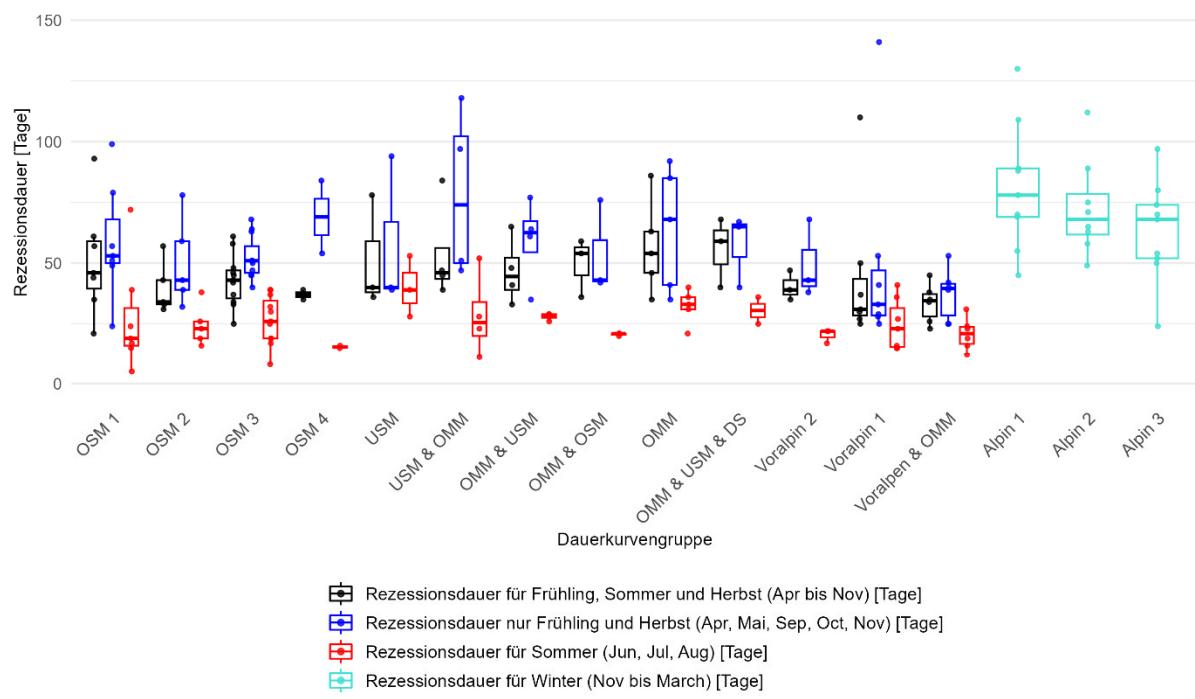
1394 Rezessionsvolumina:

1395 Im Mittelland sind die Rezessionsvolumina von Einzugsgebieten in der Süßwassermolasse tendenziell kleiner als
1396 die in der Meeressmolasse (Abbildung 22, Tabelle 5). Am tiefsten sind sie in der Gruppe OSM 4. Dort liegt der
1397 Median des Rezessionsvolumen zwischen Q290 und Q360 für die Rezessionskurve (Apr – Nov) bei 2.7mm. Etwas
1398 höher ist er in den Gruppen USM und OSM 3 (7.2mm bzw. 10.7 mm). Und nochmals ein wenig höher liegt dieser
1399 in den Gruppen OSM 1 und OSM 2 (13.1mm bzw. 20.2mm). Bei den Einzugsgebieten mit Anteilen an OMM im
1400 litho-stratigraphischen Aufbau steigen die Rezessionsvolumina tendenziell mit der Zunahme an OMM-Anteilen.
1401 Am höchsten sind sie bei den Dauerkurvengruppen OMM und OMM & OSM mit 33.6 bzw. 34.6mm. Ähnlich hoch
1402 sind sie in der Gruppe Voralpin 1. Nur etwa halb so hoch sind sie in den Gruppen Voralpin 2 und Voralpin &
1403 OMM. Am meisten Wasser zwischen Q290 und Q360 fliesst in den Alpinen Einzugsgebieten ab. Der Median
1404 zwischen den Gruppen Alpin 1 und 3 liegt zwischen 65 und 70mm und schwankt nur gering. In den Alpen fliesst

1405 zwischen Q290 und Q360 im Durchschnitt innerhalb der Dauerkurvengruppen somit zweimal bis 25mal so viel
1406 an Wasser ab wie im Mittelland oder in den Voralpen. Jedoch sind die Unterschiede der Rezessionsvolumina für
1407 die Kurven April bis November innerhalb der gewisser Dauerkurvengruppen gross, vor allem innerhalb der
1408 Gruppen mit OMM-Anteilen und innerhalb der Alpinen Gruppen.

1409 Zwischen den Mittelwerten der saisonalen Rezessionsvolumina liegen die grössten Unterschiede wiederum bei
1410 der Gruppe OSM 4 (Tabelle 5, Spalte: Quotient Mittelwert (Sommer) / Mittelwert (Frühling, Herbst). Dort beträgt
1411 Anteil der durchschnittlichen Rezessionsvolumina im Sommer 0.3 von dem der Volumina im Frühling und im
1412 Herbst. Am höchsten ist dieser Quotient bei der Gruppe USM (0.8). Dort sind aber nur Daten von drei
1413 Einzugsgebieten vorhanden. Bei den anderen Mittelland- und Voralpen- Gruppen liegt er zwischen 0.4 und 0.6.
1414 Somit sind die Rezessionsvolumina der Sommerrezessionskurven im Durchschnitt nur etwa halb so gross wie die
1415 der Frühlings-/Herbstrezessionskurven. Das ist bemerkenswert. In der Dauerkurvengruppe OSM 4 beträgt dieser
1416 Anteil gar nur 30%.

1417



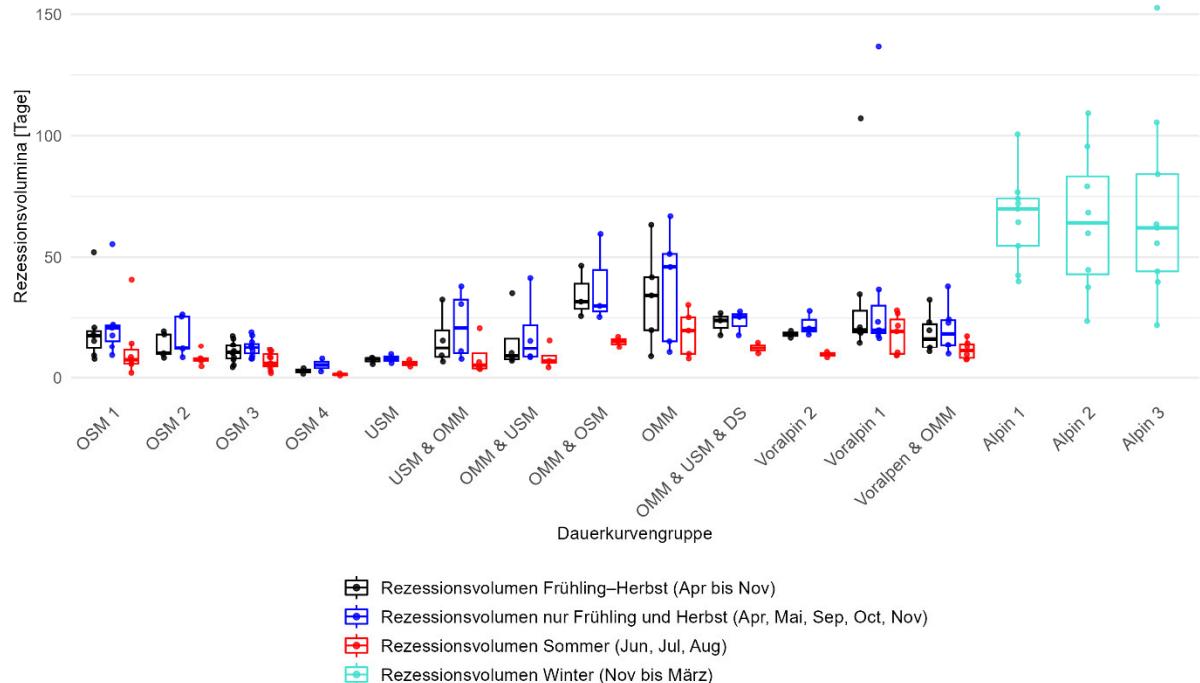
1418

1419 *Abbildung 21: Saisonale Unterschiede in der Dauer von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem Modell
1420 MRC_slow ermittelt wurden.*

1421

1422

1423



1424

1425

1426

1427 Abbildung 22: Saisonale Unterschiede in den Volumina von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem
1428 Modell MRC_slow ermittelt wurden.

1429 Tabelle 5: Saisonale Unterschiede in den Volumina von Masterrezessionskurven zwischen Q290 und Q360, die mit dem Modell
1430 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	13.3	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	10.9	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	17.9	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

1431

1432

1433 8.6 Unterschiedliches Verhalten von Niedrigwasserganglinien

1434 Der litho-stratigraphische Aufbau, die Niederschlagsmengen während Niedrigwasserperioden und die saisonale

1435 Verteilung der Niedrigwassertage haben einen sichtbaren Einfluss auf die Niedrigwasserganglinien (Abbildung

1436 23 und Abbildung 24).

8.6.1 Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse während Niedrigwasserperioden

1439 In Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes und der Voralpen wurde der Abflussrückgang im Sommer 2018
1440 (Abbildung 23 und Abbildung 24, Zeilen 1 und 2) häufiger durch Abflussanstiege unterbrochen als in alpinen
1441 Einzugsgebieten während der winterlichen Niedrigwasserperiode 2021/22 (Abbildung 24, Zeilen 3, 4 und 5). Eine
1442 Ausnahme bildeten die Einzugsgebiete der OMM-Gruppe, in denen Abflussspitzen ebenfalls seltener und
1443 weniger ausgeprägt waren (Abbildung 23, Zeile 1).
1444 Von den Einzugsgebieten der Gruppe OSM 2 bis zur Gruppe OSM 4 ist eine Tendenz zu einer Zunahme der Anzahl
1445 und des spezifischen Abflusses der Abflussspitzen zu beobachten, die die Niedrigwasserphasen unterbrechen
1446 (Abbildung 23, Zeilen 3, 4 und 5).

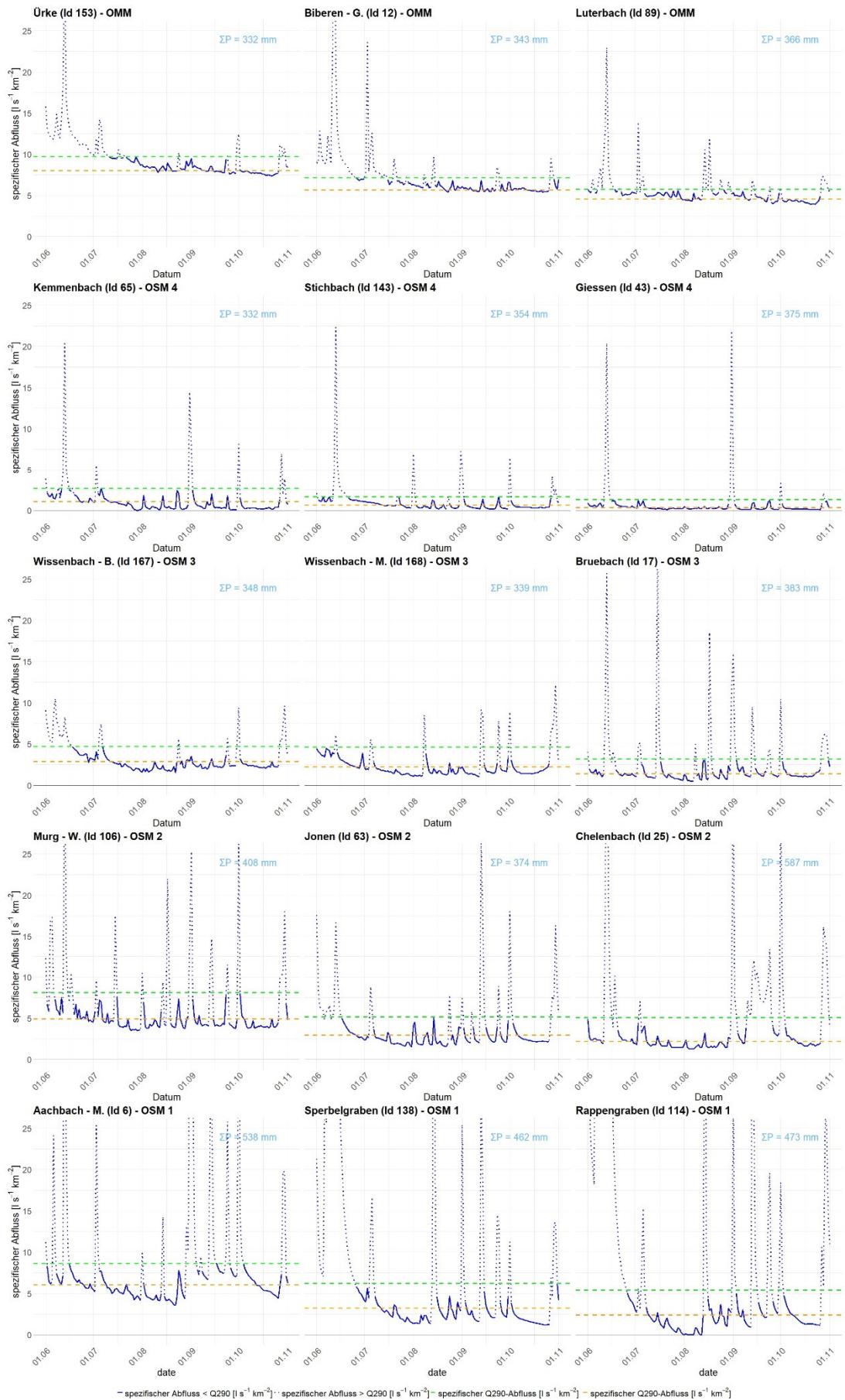
1447 8.6.2 Einfluss von langsam und rasch entwässernden Grundwasser-
1448 speichern

1449 Abbildung 23 kann auch mit einem speziellen Augenmerk auf die Signale langsam entleerender tiefer
1450 Grundwasserspeicher und rasch entleerender oberflächennaher Grundwasserspeicher interpretiert werden.
1451 Der Beitrag der tieferen Grundwasserspeicher ist besonders dann dominant, wenn die Ganglinie einen
1452 langsamen Rückgang anzeigt. Entsprechend dominiert der Beitrag der oberflächennahen Speicher bei einem
1453 schnellen Abflussrückgang. Der Abfluss unterhalb von Q290 von OMM-dominierten Einzugsgebieten (Abbildung
1454 23, Zeile 1) wird demnach hauptsächlich von langsam entleerenden Grundwasserspeichern gespeist. Der Q347-
1455 Abfluss liegt relativ nahe beim Q290-Abfluss, was zu niedrigen Q290/Q347-Quotienten (Abbildung 7) und zu
1456 einer flach abfallenden Potenzfunktion bei den Dauerkurvengefällen führt. Im Gegensatz dazu ist der Q347-
1457 Abfluss von Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4 (Abbildung 23, Zeile 2) aussergewöhnlich niedrig. Dies lässt sich
1458 durch die sehr geringen Kapazitäten der langsam entwässernden Grundwasserspeicher erklären. Folglich wird
1459 der Abfluss unterhalb von Q290 wesentlich stärker von rasch entwässernden Grundwasserspeichern gespeist
1460 als in den Einzugsgebieten der Gruppe OMM, was zu deutlich höheren Q290/Q347-Quotienten führt (Abbildung
1461 6).

1462 8.6.3 Einfluss der Litho-Stratigraphie auf die langsam entwässernden 1463 Grundwasserspeicher

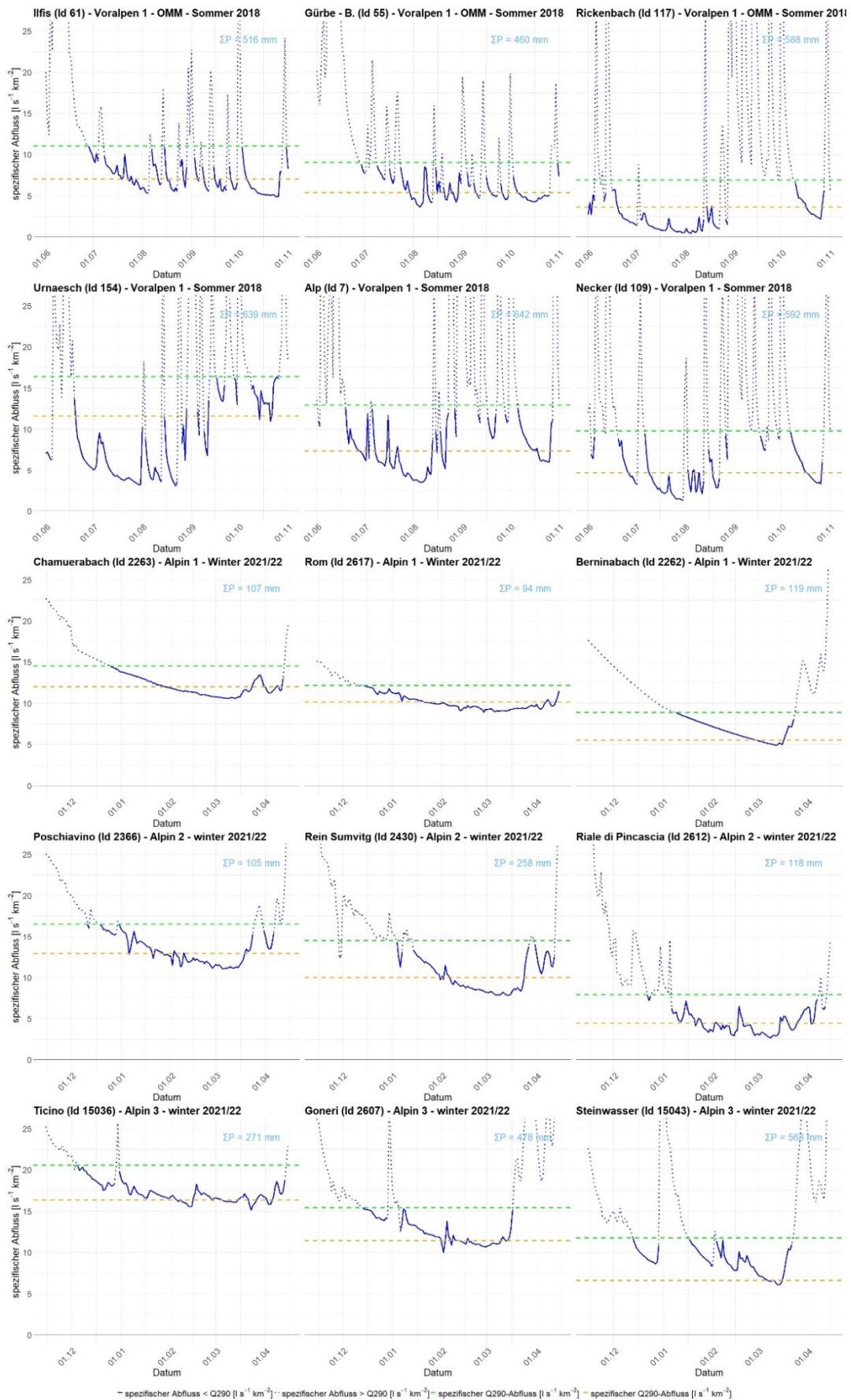
1464 Es zeigt sich eine Tendenz zu einer leicht steigenden Kapazität der langsam entwässernden Grundwasserspeicher
1465 von den Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppe OSM 4 zu denen der Gruppe OSM 1. Auch ist eine Tendenz
1466 erkennbar, dass die langsam entleerenden Grundwasserspeicher von der Gruppe OSM 4 hin zur Gruppe OSM 1
1467 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.



1471

1472 Abbildung 23: Ganglinien vom Sommer und Herbst 2018 für Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppen der OMM und OSM.



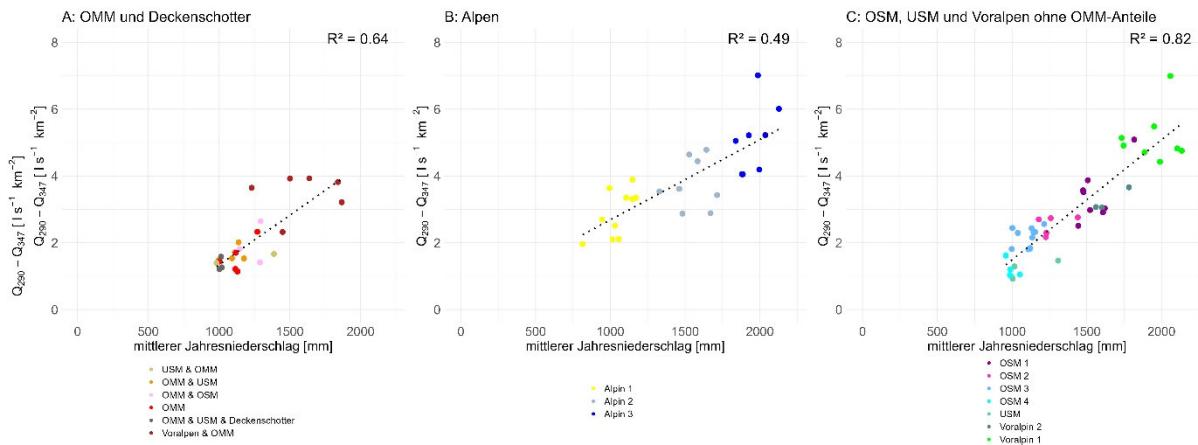
1473

1474 *Abbildung 24: Ganglinien vom Sommer und Herbst 2018 für voralpine Einzugsgebiete und vom Winter 2021/22 für alpine Einzugsgebiete.*

8.7 Verhalten der Differenz Q290 – Q347 in Abhängigkeit des Jahresniederschlages

Für drei verschiedene Einzugsgebietsgruppen wurde eine lineare Regression zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz Q290 – Q347 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 Q290 – Q347 ($R^2 = 0,82$; 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).

1487



1488

Abbildung 25: Lineare Regression zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und der Differenz Q290 – Q347 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.

1493

8.8 Q347 bestimmende Faktoren innerhalb derselben Dauerkurvengruppen

Mit Hilfe von linearen Regressionen wurde für die Einzugsgebiete in Mittelland und Voralpen der Zusammenhang zwischen den spezifischen Q347-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 Gerinnendichte untersucht. Dazu standen nicht nur die Q347 der 72 Messreihen, sondern noch zahlreiche weitere Q347-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 Meeressmolasse (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 Meeressmolasse (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.

1537 *Unterschiede zwischen Dauerkurvengruppen von OSM und USM:*

1538 Innerhalb der USM- und OSM- Dauerkurvengruppen konnten fünf verschiedene litho-stratigraphische Gruppen
1539 mit jeweils unterschiedlichem Muster identifiziert werden (OSM 1, OSM 2, OSM 3, OSM 4, USM, Abbildung 14).
1540 Die Potenzfunktionen, die das Verhältnis zwischen Q290/Q347 und Q347 beschreiben, fallen steil ab und
1541 verlaufen annähernd parallel. Sie verschieben sich auf der x-Achse von einem sehr niedrigen Q347-Abfluss (0.4–
1542 1.9 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$) für die Gruppen OSM 4 und USM zu einem niedrigen bis mittleren Q347-Abfluss (2.0–6.1 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$)
1543 für die Gruppe OSM 1. Aus Abbildung 15 und aus litho-stratigraphischen Informationen der geologischen Karte
1544 (Swisstopo, 2022) geht hervor, welche Einzugsgebietseigenschaften für das Verhalten der Dauerkurvengruppen
1545 OSM 1 bis OSM 4 und USM entscheidend sind, da diese für die fünf verschiedenen Gruppen unterschiedlich sind.

1546 Dazu gehören:

1547

- 1548 - der Flächenanteil mässig durchlässiger Quartärablagerungen (Abbildung 15),
1549 - die unterschiedliche Molasearchitektur von Wechsellagerungen aus Sandstein und Mergel (OSM 4) zu
1550 Wechsellagerungen aus Konglomerat und Mergel (OSM 1) (Swisstopo, 2022),
1551 - die Zunahme der mittleren Einzugsgebietsneigung (Abbildung 15),
1552 - die Zunahme der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge (Abbildung 15).

1553

1554 Es ist eine Kombination dieser Einflussfaktoren, welche die Entwässerungsprozesse steuern und die parallele
1555 Anordnung der Potenzfunktionen der OSM- und USM- Dauerkurvengruppen verursachen.

1556 Auf den ersten Blick erscheint es widersprüchlich, dass ein geringerer Flächenanteil mässig durchlässiger
1557 Quartärablagerungen zu einem höheren Q347-Abfluss führt als ein höherer Flächenanteil. Man würde erwarten,
1558 dass die betreffenden Ablagerungen, die hauptsächlich aus Moränen bestehen, als Grundwasserleiter fungieren
1559 und somit zu einem höheren Q347-Abfluss führen würden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass Moränen in
1560 gewissen Regionen im Schweizer Mittelland als Infiltrationsbarrieren wirken, wobei es diesbezüglich zwischen
1561 Moränen auf OMM und auf USM/OSM möglicherweise erhebliche Unterschiede geben könnte. Die
1562 Durchlässigkeit der Moränen in den Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4 muss gering sein, da diese
1563 Einzugsgebiete sehr geringe Kapazitäten an langsam entwässernden Grundwasserspeichern aufweisen
1564 (Abbildung 23, Zeile 2). Nach Niederschlagsereignissen fliesst das Wasser aus solchen Gebieten grösstenteils
1565 rasch ab, wobei ein Teil in den obersten Moränenschichten gespeichert werden darf. Da die Einzugsgebiete
1566 sehr flach sind, bewegt sich das Wasser innerhalb der Moränenschichten kaum, was bedeutet, dass grössere
1567 Wassermengen in den oberflächennahen Schichten verdunsten.

1568 Der Anteil der mässig durchlässigen quartären Ablagerungen, die vor allem aus Moränen bestehen, ist bei
1569 Einzugsgebieten der Gruppe OSM 3 etwas geringer (55–91 %) als der bei Einzugsgebieten der Gruppe OSM 4
1570 (83–100 %, Abbildung 23). Die Feinanteile in den Moränen sind möglicherweise ebenfalls etwas geringer. Das
1571 mittlere Gefälle der Einzugsgebiete der Gruppe OSM 3 ist etwas höher als in solchen der Gruppe OSM 4 (7–13
1572 % gegenüber 4–6 %). Dadurch ist das in der Moräne gespeicherte Wasser etwas mobiler und erreicht Bereiche,
1573 in denen es tiefer in den Untergrund sickert und somit eher vor Verdunstung geschützt ist, was das etwas höhere
1574 Q347 erklären könnte.

1575 In Gebieten mit wenig mächtigen oder eher durchlässigen Moränen oder in Gebieten, in denen Moränen fehlen,
1576 gelangt mehr Wasser an die Oberfläche der Molasse. Da sich dieses Wasser beim Durchsickern durch die
1577 Bodenschicht mit Huminsäuren und Kohlendioxid anreichert, konnte es seit dem Rückzug der Gletscher vor
1578 18'000 Jahren (Labhart, 1992) den kalziumreichen Zement zwischen den Sandsteinkörnern auflösen. Dadurch
1579 entstand eine Verwitterungsschicht mit neuen, langsam entwässernden Speicherräumen in den
1580 Sandsteinbänken der Molasse. Dieser Prozess findet in der Oberen Süsswassermolasse (OSM) (Gander, P., 2004),
1581 der Unterer Süsswassermolasse (USM) und der Oberen Meeresmolasse (OMM) (Mátyás, 1998) statt. Der
1582 Zement zwischen den Sandstein- und Konglomeratkomponenten ist in der gesamten Schweizer Molasse
1583 karbonathaltig (Platt und Keller, 1992). Da zwischen den Sandsteinbänken der OSM und USM horizontal liegende
1584 Mergelschichten häufig sind, bleibt aber die Infiltrations- und Speicherkapazität dieser Speicher im Vergleich zu
1585 den Grundwasserleitern in der OMM gering.

1586 Da der Anteil mässig durchlässiger quartärer Ablagerungen noch geringer (37 – 85 % bzw. 0 – 48 %), die
1587 Einzugsgebietsneigung noch steiler (8 – 16 % bzw. 20 – 61 %) und die durchschnittliche jährliche
1588 Niederschlagsmenge in den Gruppen OSM 2 und OSM 1 noch höher ist (1179 – 1440 mm bzw. 1443 – 1817 mm)
1589 als in den Gruppen OSM 4 und OSM 3 (Abbildung 15), wurde dieser Verwitterungsprozess zunehmend effektiver,
1590 was die ansteigenden Q347 von Gruppe OSM 4 zu Gruppe OSM 1 hin erklären könnte. Da die Poren in der
1591 verwitterten Molasse von einer Sandstein-dominierten zu einer Konglomerat-dominierten Matrix zunehmend
1592 grösser werden und die Anzahl der durch das Relief geöffneten Klüfte steigt (Gander, P., 2004), erhöht sich auch
1593 die Gesamtporosität. Die grösseren Poren führen dazu, dass die langsam entwässernden Grundwasserspeicher
1594 in den Konglomerat-Mergel-dominierten Einzugsgebieten (Gruppe OSM 1) etwas rascher entwässern als jene in
1595 den Sandstein-Mergel-dominierten Einzugsgebieten (Gruppe OSM 3 und OSM 4; vergleiche langsam
1596 entwässernde Gangliniensegmente bei den tiefsten Abflüssen in Abbildung 23, Zeilen 2 bis 5). Das zunehmende
1597 Einzugsgebietsgefälle könnte die raschere Entwässerung begünstigen. Da der durchschnittliche Q347-Abfluss
1598 von Gruppe OSM 4 zu OSM 1 ansteigt, wird diese raschere Entwässerung durch ein grösseres Speichervolumen
1599 in der Molasse und durch höhere Niederschlagsmengen kompensiert. Höhere Niederschlagsmengen in
1600 Niedrigwasserperioden (Abbildung 23) verzögern das Austrocknen der langsam entwässernden Speicher der
1601 Einzugsgebiete der Gruppe OSM 1 im Vergleich zu OSM 4, was Q347-erhöhend wirken könnte. Solange die rasch
1602 entwässernden Grundwasserspeicher gesättigt sind, speisen sie auch die darunter liegenden, langsam
1603 entwässernden Grundwasserspeicher.

1604 b) Alpen

1605 Die Dauerkurvengefälle alpiner Einzugsgebiete hängen primär vom mittleren Jahresniederschlag und nicht von
1606 der litho-stratigraphischen Zusammensetzung der Einzugsgebiete ab. Je höher der mittlere Jahresniederschlag,
1607 desto höher das Verhältnis Q290/Q347. Die Potenzfunktionen verlaufen flach, ähnlich wie bei der OMM-Gruppe
1608 (Abbildung 14). Sie verlaufen nahezu parallel und verschieben sich mit steigendem mittlerem Jahresniederschlag
1609 vertikal. Für dieses Muster gibt es verschiedene physikalische Gründe:

1610

- 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 $Q < Q290$
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 Q290 und die Unterschiede im Dauerkurvengefälle
1639 Q290/Q347 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 Q290/Q347-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 Masterrecessionskurve

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. Masterrecessionskurven der Gruppe OSM 4 werden aber wesentlich
1714 stärker durch Beiträge aus rasch entwässernden Grundwasserspeichern beeinflusst als Masterrecessionskurven
1715 der Gruppe OMM. Demnach lassen sich die Beiträge der langsam und rasch entwässernden
1716 Grundwasserspeicher anhand der mit MRC_slow berechneten Masterrecessionskurven 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

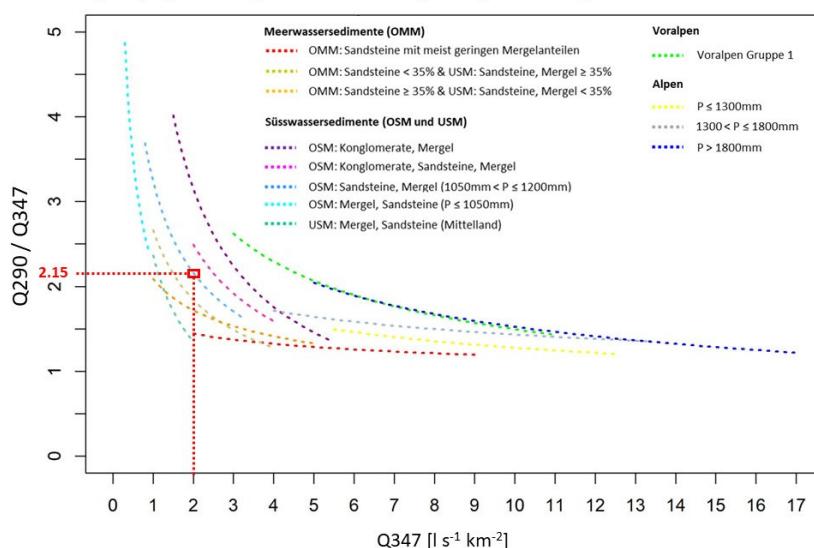
1768

9 Bestimmung von Q347 und von Dauerkurven in ungemessenen Einzugsgebieten

1771 Die neuen Erkenntnisse zum Verhalten der Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich in Abhängigkeit von
 1772 Q347, Geologie, Jahresniederschlag, Geländeneigung und Verdunstung eröffnen die Möglichkeit,
 1773 Dauerkurvengefälle auch in bislang ungemessenen Einzugsgebieten zuverlässig zu bestimmen.
 1774 Ist sowohl der Q347-Abfluss als auch die Zuordnung zur Dauerkurvengruppe bekannt, lassen sich daraus das
 1775 Dauerkurvengefälle sowie der Q290-Abfluss ableiten (Abbildung 26). Die Zuordnung der Dauerkurvengruppe
 1776 kann mithilfe der geologischen Karte, des mittleren Jahresniederschlags und der mittleren Geländeneigung
 1777 erfolgen (vgl. Kapitel 10 und Abbildung 48). Das Q347 selbst lässt sich durch eine oder mehrere Einzelmessungen
 1778 des Abflusses während einer Trockenperiode ermitteln (vgl. Kapitel 9.2).
 1779 Diese Methodik wurde anhand von 22 ungemessenen Untersuchungsgebieten im Einzugsgebiet der Töss und im
 1780 Altbach (Bassersdorf) getestet. Die Gebiete erstrecken sich entlang der Töss vom Rheinzufluss bis in das
 1781 Quellgebiet (Abbildung 27). Mit Ausnahme eines Teilgebiets befinden sich alle Untersuchungsgebiete vollständig
 1782 innerhalb der Oberen Süsswassermolasse (OSM). Das nördlich gelegene Teilgebiet 48 besteht zu 90 % aus OSM,
 1783 zu 10 % aus OMM und ist zu 32 % von höherliegenden Deckenschottern (über OSM) bedeckt. Die gezielte
 1784 Auswahl der OSM als Testregion erfolgte aufgrund der erhöhten Komplexität bei der Ermittlung der
 1785 Dauerkurvenparameter. In Einzugsgebieten der OSM und USM im Mittelland wirken sich Fehler in der
 1786 Abschätzung des Q347 stärker auf die Bestimmung der Dauerkurve aus als bei der OMM oder bei alpinen
 1787 Einzugsgebieten. Dies liegt daran, dass die Trendlinien der Dauerkurvengefälle in diesen geologischen Einheiten
 1788 deutlich steiler verlaufen als beispielsweise in der OMM.

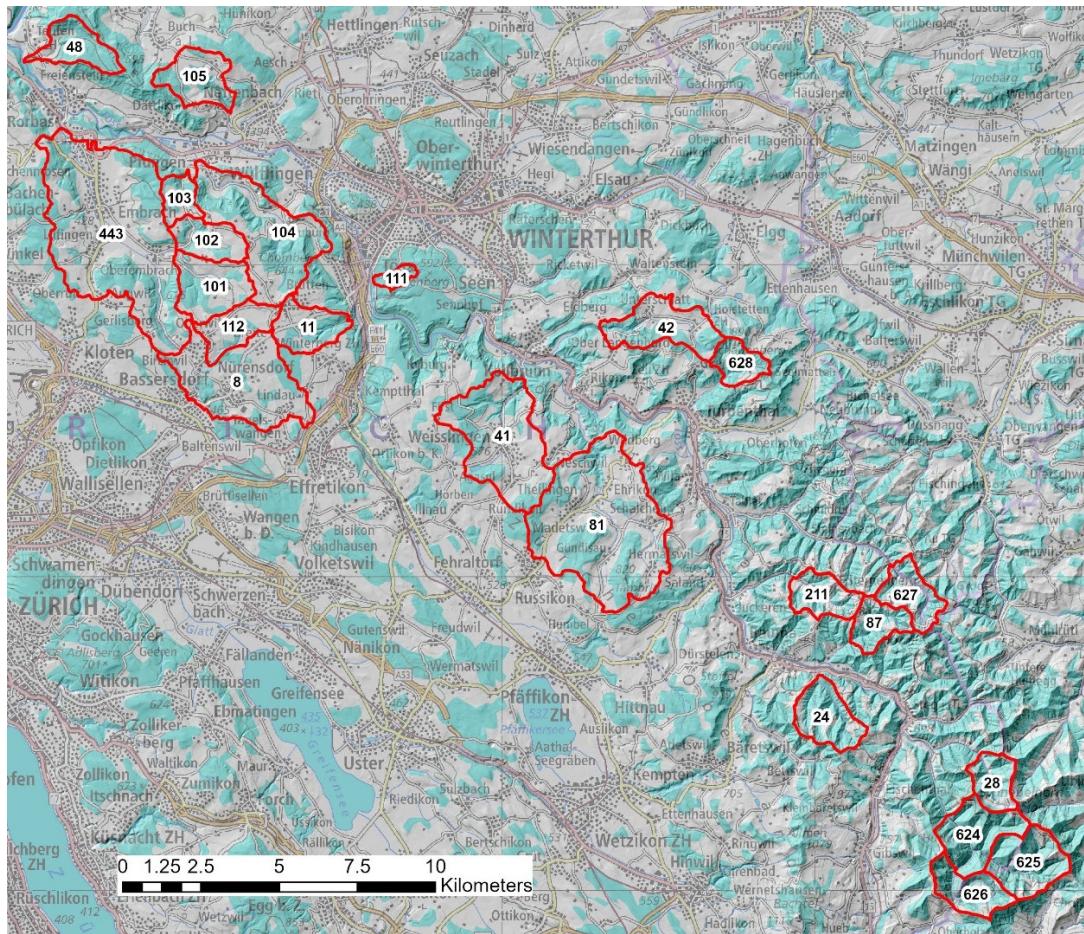
1789

Q290 / Q347 vs. Q347 in Mittelland, Voralpen und Alpen



1790

1791 Abbildung 26: Ist das Q347 sowie die geologisch-klimatologische Dauerkurvengruppe eines Einzugsgebiets ohne
 1792 Abflussmessreihe bekannt, lässt sich dessen Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich bestimmen. Ein Beispiel: Ein
 1793 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
 1794 damit ein Q290 von $4.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf.



1795

1796 Abbildung 27: Untersuchungsgebiete an der Töss und am Altbach (Bassersdorf), in denen das neue Verfahren zur Bestimmung
1797 der Dauerkurven getestet wurde.

1798

9.1 Bestimmung der Dauerkurvengruppen

1799 Die Untersuchungsgebiete am Oberlauf der Töss werden von Konglomerat-Mergel- und Konglomerat-Sandstein-
1800 Mergel-Wechsellagerungen dominiert, am Unterlauf dominieren Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen
1801 (Abbildung 28). Auf Basis der Festgesteinslithologie, der mittleren Geländeneigung, des mittleren
1802 Jahresniederschlags sowie des Anteils an undurchlässigen bzw. mässig durchlässigen Quartärablagerungen
1803 wurde jedem der Testgebiete vorläufig eine Dauerkurvengruppe zugewiesen (

1804

1805

1806

1807

1808

1809 Tabelle 6). 19 der insgesamt 23 Untersuchungsgebiete lassen sich eindeutig einer der vier OSM-
1810 Dauerkurvengruppen zuordnen. In vier Gebieten – Hutzikerbach (628), Mittlerer Chrebsbach (111), Müllibach
1811 (104) und Tüfenbach (48) – liegen jedoch eine oder mehrere der drei Kriterien in einem Überschneidungsbereich
1812 zwischen zwei Gruppen (gelb markiert in

1813

1814

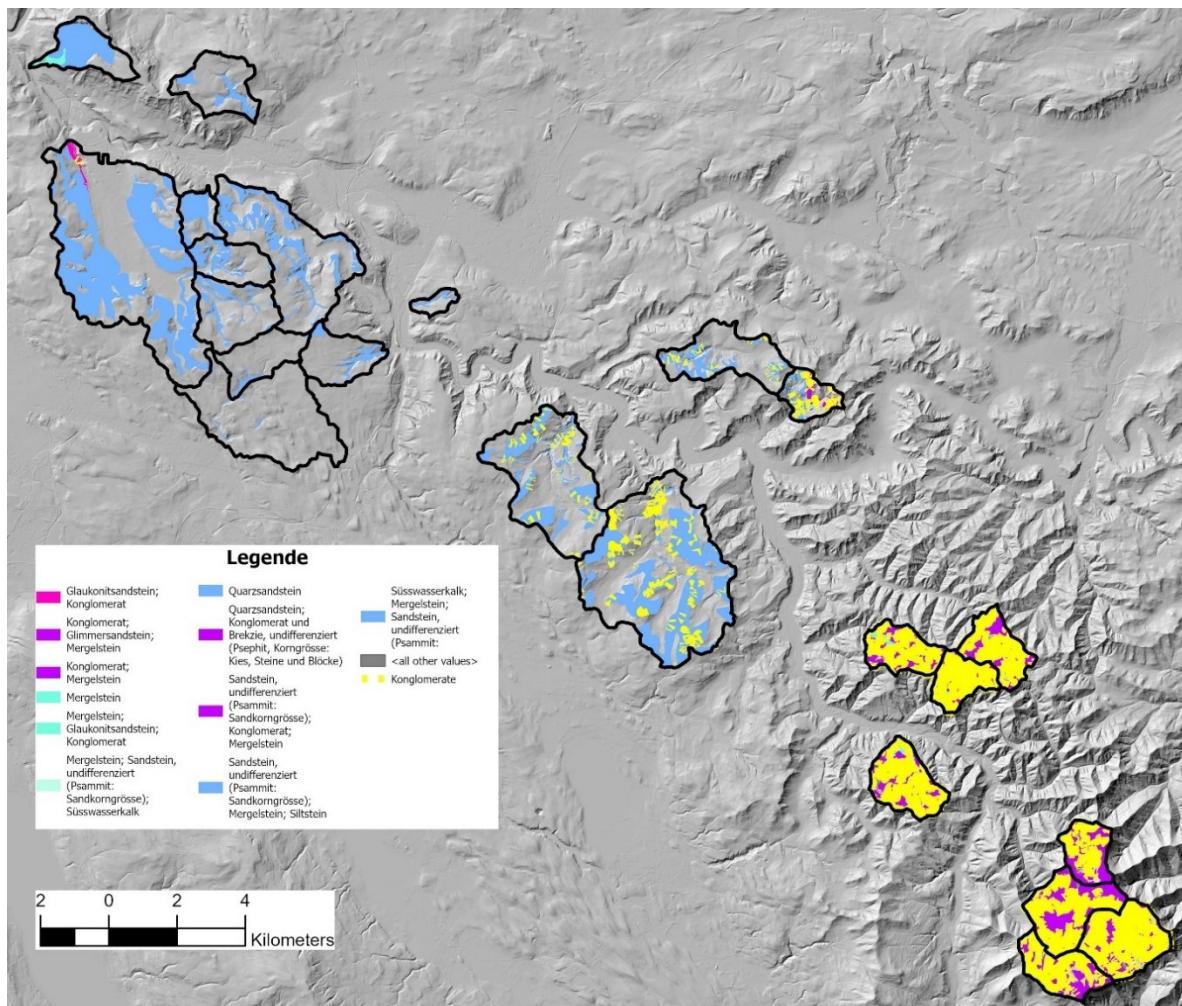
1815

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 vergleichsweisen 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 Quartärlagerungen 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.



1831

1832 Abbildung 28: Lithologischer Aufbau der Untersuchungsgebiete. Im oberen Teil der Töss dominieren konglomeratreiche, im
1833 unteren Teil sandsteinreiche Gebiete.

1834

1835

1836

1837

1838

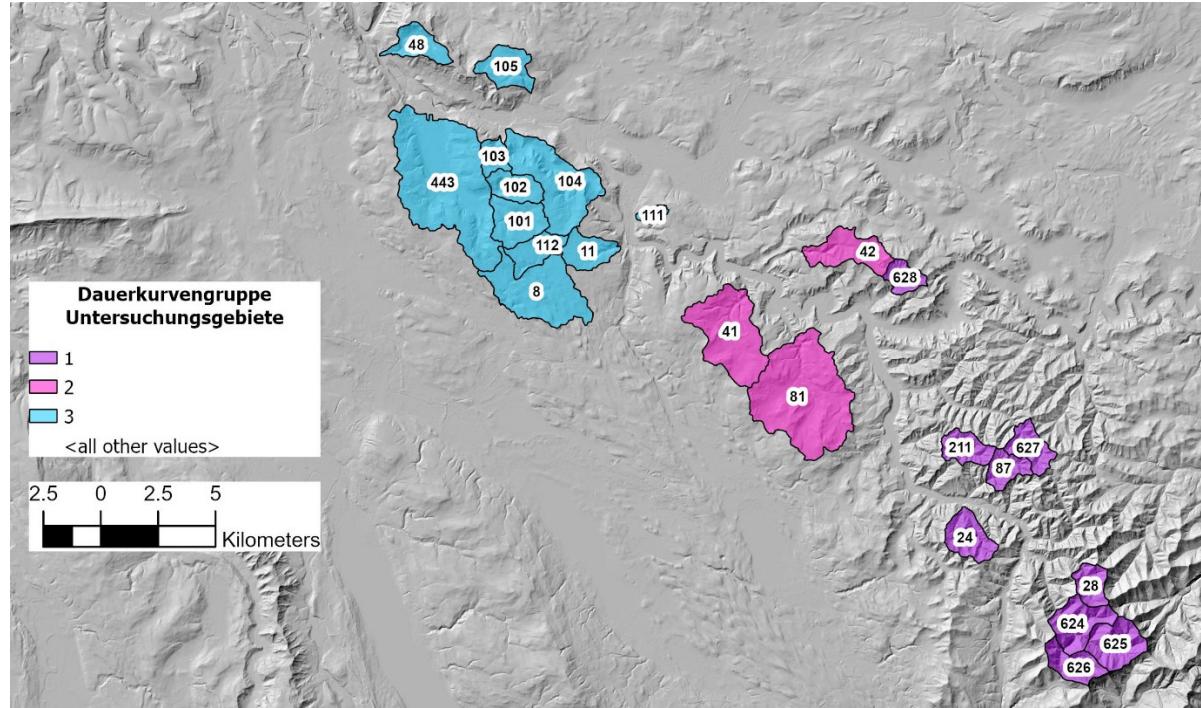
1839

1840 Tabelle 6: Einzugsgebietseigenschaften für die Testeinzugsgebiete mit der provisorischen Klassifikation der
1841 Dauerkurvengruppe. Gelb eingefärbte Felder markieren Werte, die im Übergangsbereich zwischen zwei Dauerkurvengruppen
1842 liegen.

Id	Name Gewässer	Fläche [km ²]	Standort	Lithologie Festgestein	Anteil an undurchlässigem und gehemmt durchlässigem Quartär [%]	mittlere Gelände-neigung [%]	mittlerer Jahresniederschlag [mm]	Volumen Schottergrundwasser [1000 m ³ km ⁻²]	Provisorische Dauerkurvengruppe
625	Hintertöss	4.21	Tössscheidei	Nagelfluh, Mergel, wenig Sandstein	1	62	1877	0	1
626	Vordertöss	2.86	Tössscheidei	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	Brüggen	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	Mülibach	9.45	Pfungen	Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh	39	20	1079	571	3
				90% Sandstein, Mergel, wenig Nagelfluh + 10% OMM					
48	Tüfenbach	2.76	Teufen	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

1843

1844



1845

1846 [Abbildung 29: Provisorische Dauerkurvengruppen der Untersuchungsgebiete.](#)

9.2 Bestimmung von Q347 und Q290

1848 Einzugsgebiete mit derselben Dauerkurvengruppe und einem vergleichbaren Q347 zeigen bei Niedrigwasser ein
1849 ähnliches Abflussverhalten (Abbildung 35 und Abbildung 34). In einer Phase des Abflussrückgangs einer
1850 Niedrigwasserperiode ($Q < Q290$) sollte das Abflussperzentil (z. B. Q320, Q330 oder Q347) eines ungemessenen
1851 Einzugsgebiets unter natürlichen Bedingungen in einem ähnlichen Bereich liegen, wie jenes eines benachbarten
1852 gemessenen Gebiets mit gleicher Dauerkurvengruppe und ähnlichem Q347. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass
1853 die Niederschlagsmengen in der vorhergehenden Periode vergleichbar waren. Größere Unterschiede führen zu

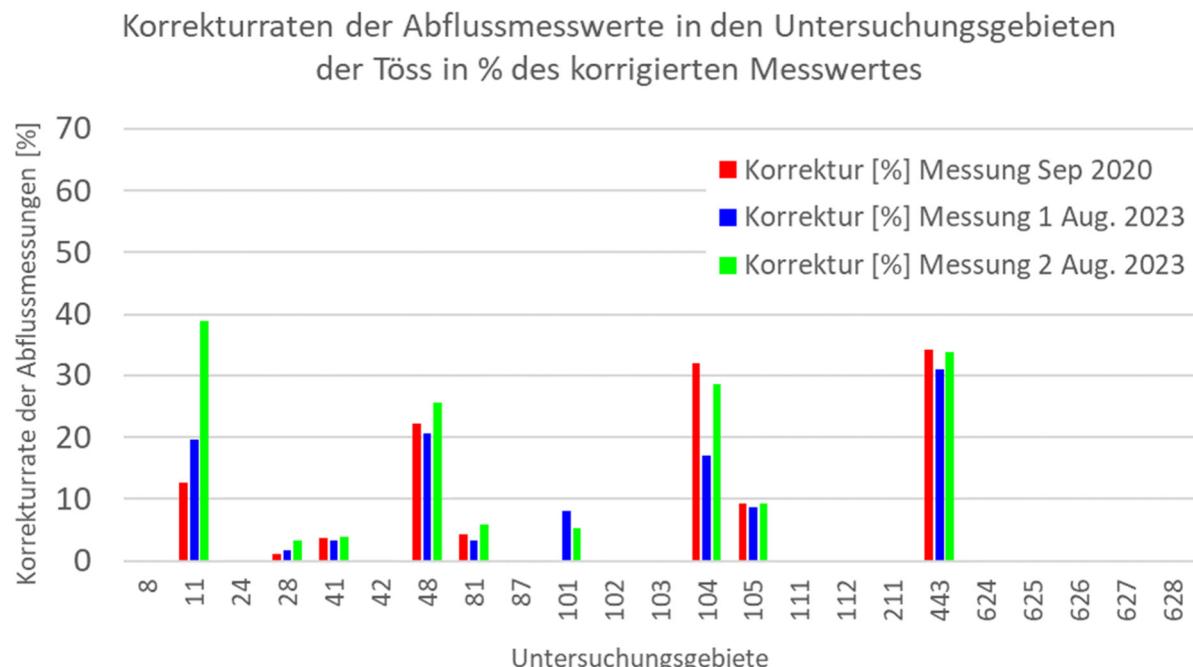
1854 abweichenden Speicherfüllständen, was wiederum den zeitlichen Verlauf der Speicherentleerung beeinflusst.
1855 Dieses ähnliche Verhalten bei Niedrigwasser wird genutzt, um das Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten zu
1856 bestimmen. Dazu wird eine Einzelmessung des Abflusses zu einem Zeitpunkt vorgenommen, 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.



1878

1879 *Abbildung 30: Anteil der Wasserentnahmemengen am korrigierten Abflussmesswert in den 22 Untersuchungsgebieten*

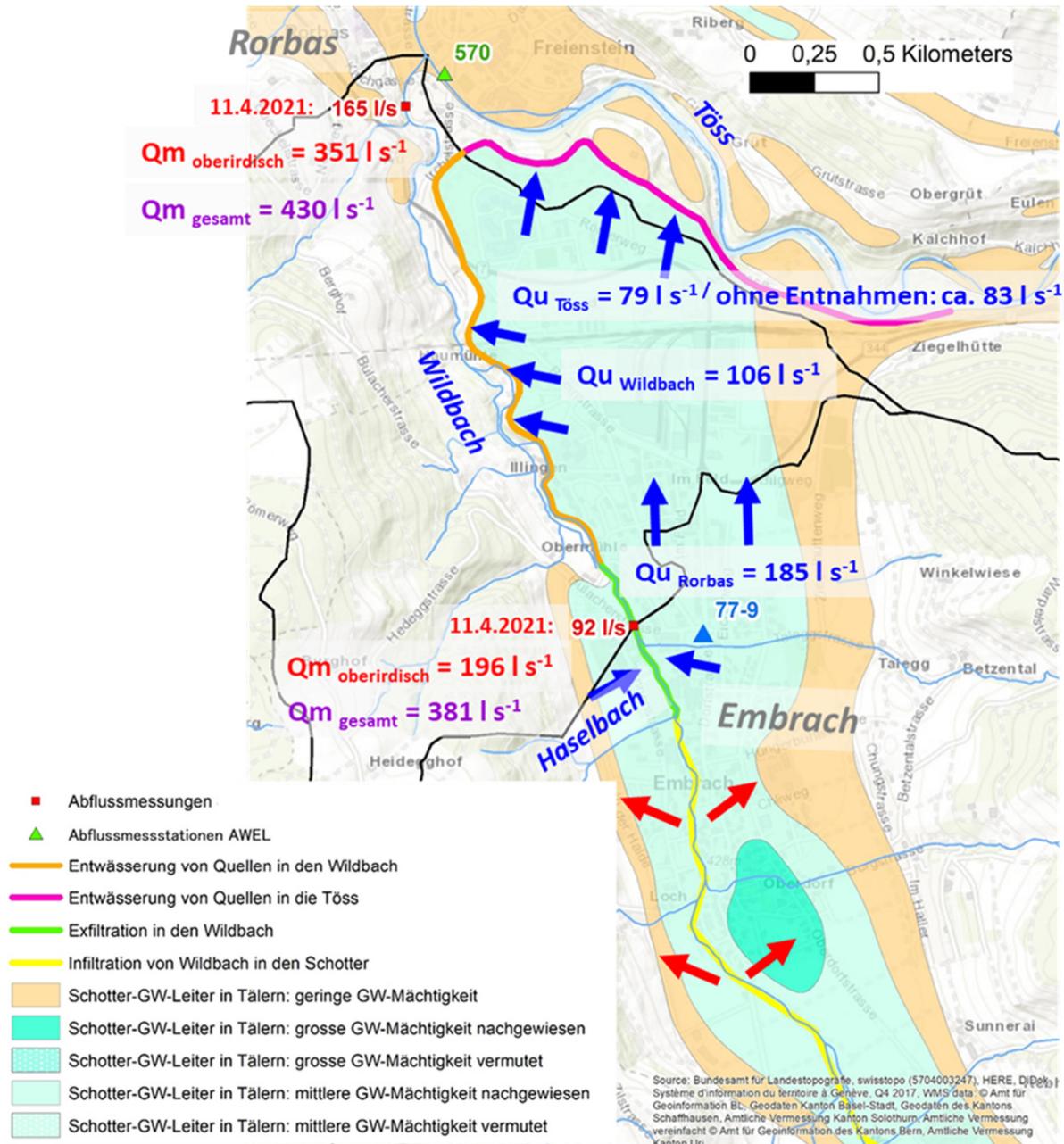
1880 *während der Periode der drei Abflusseinzelmessungen.*

1881 9.2.3 Ermittlung des unterirdischen Abflusses in den 1882 Untersuchungsgebieten

1883 Nur in einem der 22 Untersuchungsgebiete fliessen am Messstandort bedeutende Abflüsse unterirdisch vorbei:
1884 am Wildbach bei Rorbas (Id 443 auf Abbildung 29). Dieses Einzugsgebiet umfasst einen grossen
1885 Schottergrundwasserkörper, der teilweise durch Versickerungen des Wildbachs gespeist wird. Ein grosser Teil
1886 dieses Grundwassers entwässert jedoch nicht in den Wildbach, sondern direkt in die Töss. Zur Abschätzung des
1887 unterirdisch vorbei fliessenden Abflusses wurden zusätzliche Abflussmessungen durchgeführt. Das Vorgehen
1888 wird im Folgenden erläutert und in Abbildung 31 dargestellt.

1889 Im oberen Siedlungsgebiet von Embrach infiltriert Wasser vom Wildbach in den Schotterkörper (Geologie Büro
1890 Jäckli, 1980). Ab dem Zufluss des Haselbaches fliesst der durchschnittliche Grundwasserspiegel auf Höhe des
1891 Bachbetts. Bachabwärts exfiltriert das Grundwasser in den Wildbach. Weiter unten entfernt sich der Bachlauf
1892 vom Schotterkörper und verläuft entkoppelt in Richtung Rorbas. Am westlichen Rand des Grundwasserkörpers
1893 befinden sich Quellen, die in den Wildbach entwässern. Quellen am nördlichen Rand entwässern hingegen direkt
1894 in die Töss. Im Rahmen der Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Embracher und Freiensteiner
1895 Grundwasserstrom (Geologie Büro Jäckli, 1980) wurden entlang der nördlichen Abgrenzung des Embracher
1896 Grundwasserstroms alle grösseren Quellaustritte in den Jahren 1978 und 1979 alle zwei Wochen vom
1897 Brunnenmeister der Gemeinde Rorbas gemessen. Die durchschnittliche Summe der Quellschüttungen betrug
1898 über diesen Zeitraum 46 l s^{-1} . Es ist jedoch anzunehmen, dass dieser Wert zu tief ist, da diffuse
1899 Grundwasseraustritte üblicherweise ebenfalls relevante Beiträge leisten. Daher wurde die mittlere jährliche
1900 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 $Q_{11.04.2021} / \text{MQ}$ 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 l s^{-1} – 351 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 Grundwassерpegel 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



1922

1923 Abbildung 31: Ober- und unterirdische Abflüsse im Embrachschotter bei Mittelwasserbedingungen.

1924

1925 9.2.4 Auswahl an möglichen Referenzgebieten

1926 In einem ersten Schritt wurde eine erweiterte Auswahl an Referenzgebieten bestimmt, die für eine Übertragung
 1927 der Abflussperzentile in Frage kamen. Die ausgewählten Referenzgebiete sind mit den Untersuchungsgebieten
 1928 in Abbildung 32 dargestellt. Die Dauerkurvengruppen sind schon aus den vorangehenden Auswertungen
 1929 bekannt. Sie sind in Abbildung 33 ersichtlich.

1930

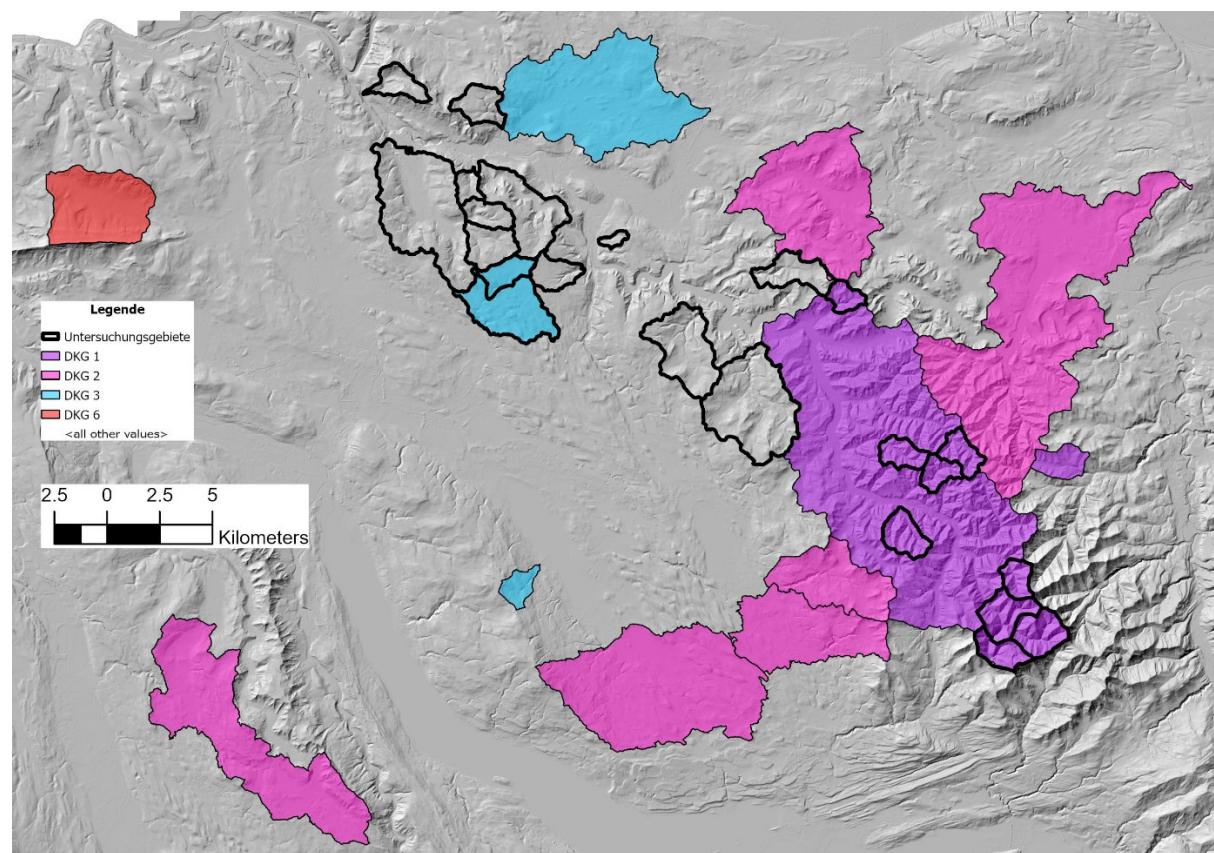
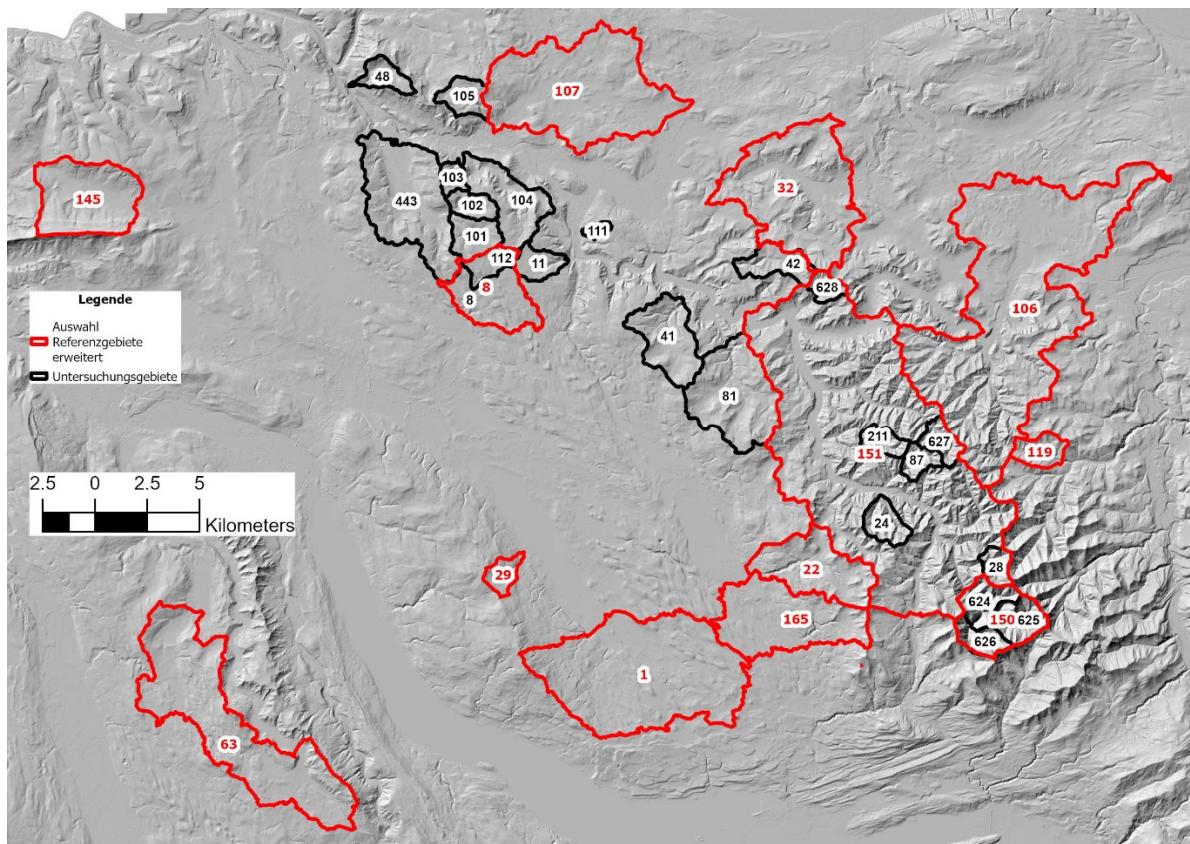


Abbildung 33: Dauerkurvengruppe der zur Auswahl stehenden Referenzgebiete.

1936 9.2.5 Eingrenzung der Auswahl an Referenzgebieten und Bestimmung von
1937 Q347 und Q290

1938 Um zu prüfen, welches Referenzgebiet oder welche Kombination von Referenzgebieten sich am besten zur
1939 Übertragung der Abflussperzentile eignet, wurden für jedes Untersuchungsgebiet verschiedene Referenzgebiete
1940 getestet. Dabei erfolgte jeder Testlauf nach dem folgenden Ablauf:

- 1941 1. Übertragung der Abflussperzentile vom ausgewählten Referenzgebiet auf die drei Abflussmesswerte
1942 des Untersuchungsgebiets
- 1943 2. Bestimmung des Q347 anhand des Abflusswertes mit dem Perzentil, das Q347 am nächsten liegt
- 1944 3. Berechnung von Q290
- 1945 4. Ermittlung der Dauerkurve
- 1946 5. Vergleich der Messwerte 2 und 3 mit den Abflusswerten der ermittelten Dauerkurven

1948
1949 Dieser Prozess wurde manuell durchgeführt. Für die beiden Messperioden im September 2020 und August 2023
1950 wurden für alle Gebiete jeweils dieselben Referenzgebiete oder Kombinationen ausgewählt. Die
1951 Referenzgebiete, die die beste Übereinstimmung zwischen der zweiten und dritten Messung erzielten, wurden
1952 als definitive Referenzgebiete festgelegt. Die besten Ergebnisse wurden mit Referenzgebieten erzielt, die
1953 folgende Eigenschaften aufwiesen:

- 1954 1. gleiche Dauerkurvengruppe
- 1955 2. ähnliche Niederschlagsmengen in der Vorperiode
- 1956 3. ähnliche Volumina der Schottergrundwasserkörper
- 1957 4. eine unmittelbare Nachbarschaft

1959
1960 In einigen Fällen ergab sich nur durch die Kombination der Perzentile von zwei Referenzgebieten mit
1961 unterschiedlichen Dauerkurvengruppen oder unterschiedlich grossen Schottergrundwasserkörpern ein
1962 sinnvolles Ergebnis. Insgesamt reduzierte sich die Zahl der verwendeten Referenzgebiete von 13 auf 5
1963 Einzugsgebiete, die in Abbildung 38 dargestellt sind.

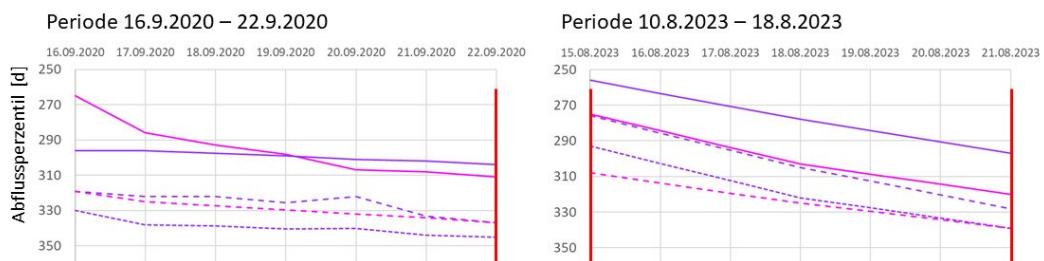
1964 Die Bedeutung des Schotteraquifervolumens bei der Auswahl der Referenzgebiete wird durch Abbildung 34
1965 verdeutlicht. Die Abflussperzentile von Wildbach und Töss (Rämismühle), deren Einzugsgebiete beide ein
1966 grosses Volumen bachgespeister Schotteraquifere aufweisen, liegen in beiden Perioden höher als die Perzentile
1967 der übrigen Gebiete. Die Niederschläge in der Vorperiode vor dem 15.8.2023 waren etwa 30 % höher als vor
1968 dem 16.9.2020. Dies könnte erklären, warum die Perzentile im August 2023 etwas höher lagen und der
1969 Kurvenverlauf steiler war als im September 2020.

1970 Auch die Perzentile der Surb, die ebenfalls ein grosses bachgespeistes Schottervolumen besitzt, lagen im August
1971 2023 auf dem Niveau von etwa Q270, ähnlich wie beim Wildbach (Abbildung 35). Die Perzentile des Naefbachs,
1972 der ein vergleichbares Schottervolumen aufweist, lagen dagegen niedriger, vergleichbar mit dem Altbach. Die

1973 Niederschlagssumme in den 20 Tagen vor dem 10.8.2023 betrug im Altbach 124 mm, im Vergleich zu 99 mm in
 1974 der Surb und 72 mm im Naefbach. Im September 2020 lagen die Perzentile der Surb (Niederweningen) bereits
 1975 zu Beginn der Messperiode mit Q360 deutlich tiefer als im August 2023. Auch im Naefbach (Neftenbach) waren
 1976 sie mit Q350 niedriger als im August 2023, allerdings war der Unterschied hier geringer als in der Surb, obwohl
 1977 beide ein ähnlich grosses Schottervolumen besitzen. In den beiden Einzugsgebieten mit keinem oder nur
 1978 geringem bachgespeistem Schottervolumen (Altbach und Jonen) unterschieden sich die Abflussperzentile
 1979 zwischen den beiden Messperioden weniger stark. Die Niederschläge in der 20-tägigen Vorperiode waren hier
 1980 vor September 2020 geringer und weniger unterschiedlich als vor August 2023 (Naefbach 65 mm, Surb 57 mm,
 1981 Altbach 75 mm).

1982 Diese Beispiele zeigen, dass das Volumen der bachgespeisten Schotteraquifere das Speicher- und
 1983 Entwässerungsverhalten beeinflussen kann und daher bei der Übertragung der Abflussperzentile von Referenz-
 1984 auf Untersuchungsgebiete berücksichtigt werden sollte. Der Effekt dieses Parameters darf jedoch nicht
 1985 überschätzt werden, da die Einschätzung der Mächtigkeit der Grundwasserkörper mit Unsicherheiten behaftet
 1986 ist und weitere Faktoren eine Rolle spielen können. So könnte beispielsweise der Naefbach durch Kolmatierung
 1987 oder eine abgedichtete Bachsohle (Betonauskleidung, Eindohlung) stärker beeinträchtigt sein als die Surb,
 1988 wodurch Infiltration und Exfiltration von Bachwasser gehemmt würden.

1989

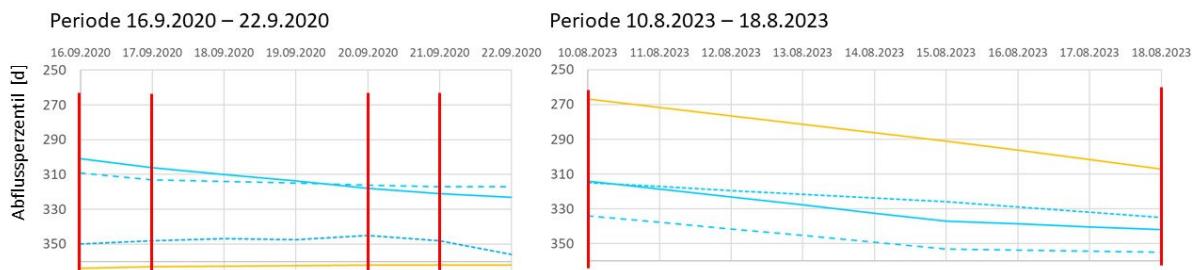


Fließgewässer	Id	Dauerkurven- gruppe	Niederschlags- summe 20 Tage vor 16.9.2020 [mm]		Differenz Vorregen [%]	bachgespeiste Schotteraquifere [1000m³ / km²]	mässig duchlässiges Quartär [%]	Q347 [l s- 1 km-2]	
			summe 20 Tage vor 10.8.2023 [mm]	Neigung					
Wildbach, W.	165	2	136	172	21	590	37	12	3.2
Toess, R.	151	1	126	187	33	1079	6	34	6.3
Rietholzbach, M.	119	1	126	183	31	0	20	25	2.6
Chämtnerbach, W.	22	1	138	189	27	207	48	20	3.3
Aabach, M.	1	2	125	155	19	45	21	8	2.5

1990

1991 Abbildung 34: Entwicklung der Abflussperzentile von 5 möglichen Referenzgebieten für die Dauerkurvengruppe 1 und 2 mit
 1992 unterschiedlichen Volumina von Schotteraquiferen in den Perioden vom 16.9.2020 bis 22.9.2020 und 15.8.2023 bis 21.8.2023.
 1993 Die senkrechten roten Linien markieren Tage mit Abflussmessungen.

1994



Fließgewässer	Id	Dauerkurven- gruppe	Niederschlags- Niederschlags- summe 20 Tage vor 16.9.2020						Differenz Vorregen [%]	bachgespiesene Schotteraquifere [1000m ³ / km ²]	Neigung	mässig duchlässiges Quartär [%]	Q347 [l s ⁻¹ km ⁻²]
			summe 20 Tage vor 10.8.2023	bachgespiesene Schotteraquifere [1000m ³ / km ²]	Neigung								
Altbach, B.	8	3	75	124	40	123	8	73					2.5
Näfbach	107	3	65	72	10	1040	7	69					2.6
Jonen	63	2	92	116	21	177	13	62					3.3
Surb, N.	145	6	57	98	42	1121	17	28					4

1995

1996 Abbildung 35: Entwicklung der Abflussperzentile von 4 möglichen Referenzgebieten für die Dauerkurvengruppe 3 mit
1997 unterschiedlichen Volumina von Schotteraquiferen in den Perioden vom 16.9.2020 bis 22.9.2020 und 10.8.2023 bis 18.8.2023.
1998 Die senkrechten roten Linien markieren Tage mit Abflussmessungen.

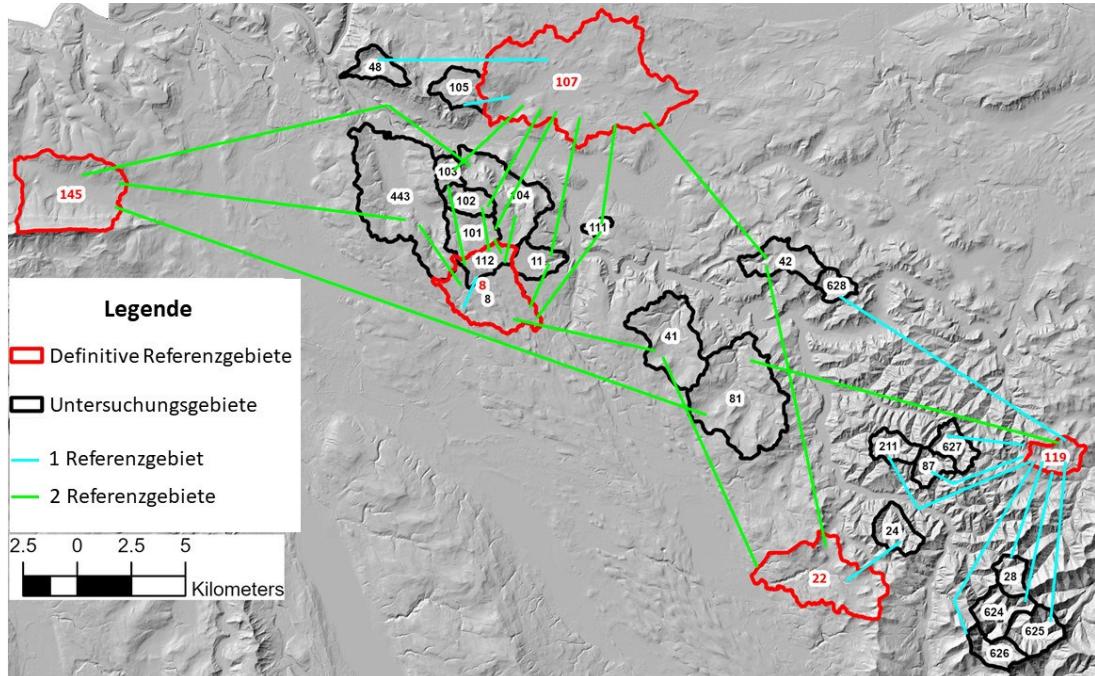
1999

2000 Abbildung 38 zeigt die Untersuchungsgebiete sowie die jeweils definitiv zugeordneten Referenzgebiete. Die
2001 Verbindungslien stellen dar, welche Referenzgebiete welchem Untersuchungsgebiet zugewiesen wurden:

2002

2003 - **Grüne Linien** zeigen, dass der Mittelwert der Perzentile zweier Referenzgebiete verwendet wurde.

2004



2005

2006 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.

2010

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

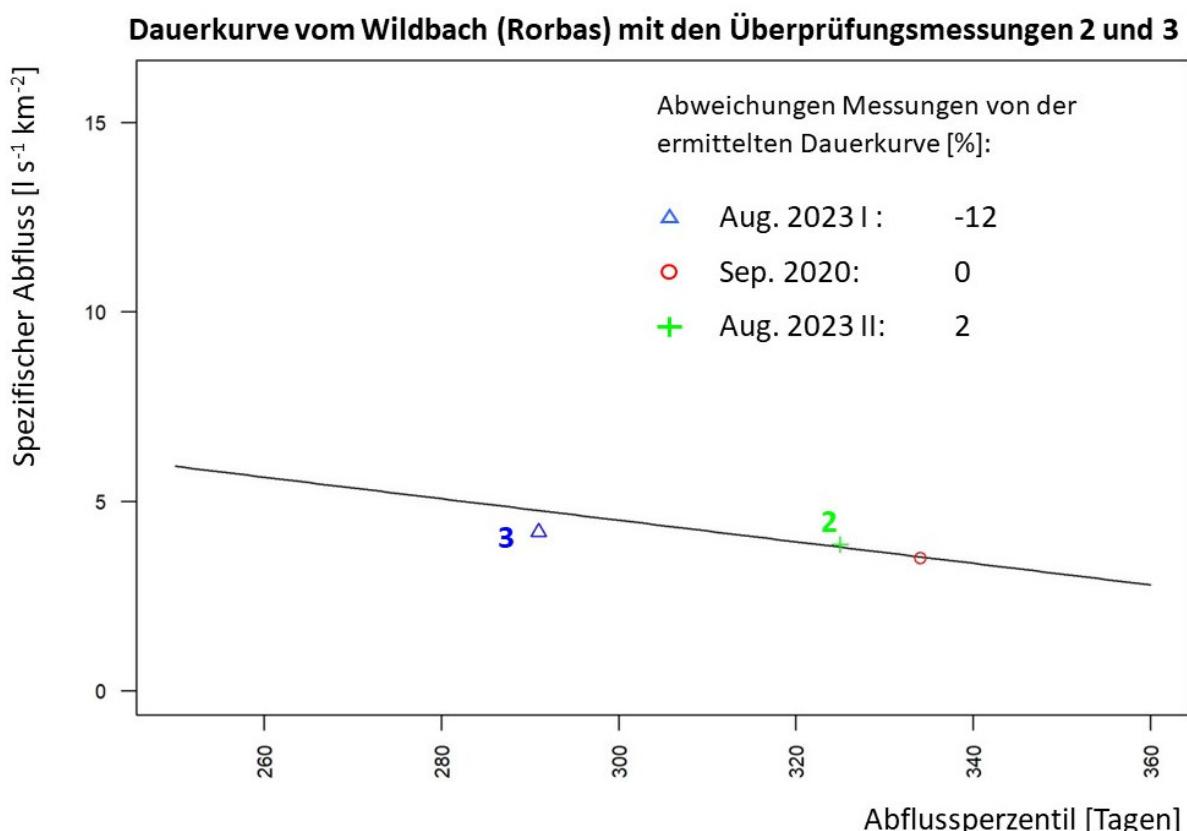
2044 geändert werden. Grund dafür ist der umfangreiche Grundwasserkörper im Tal, der nicht in das

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

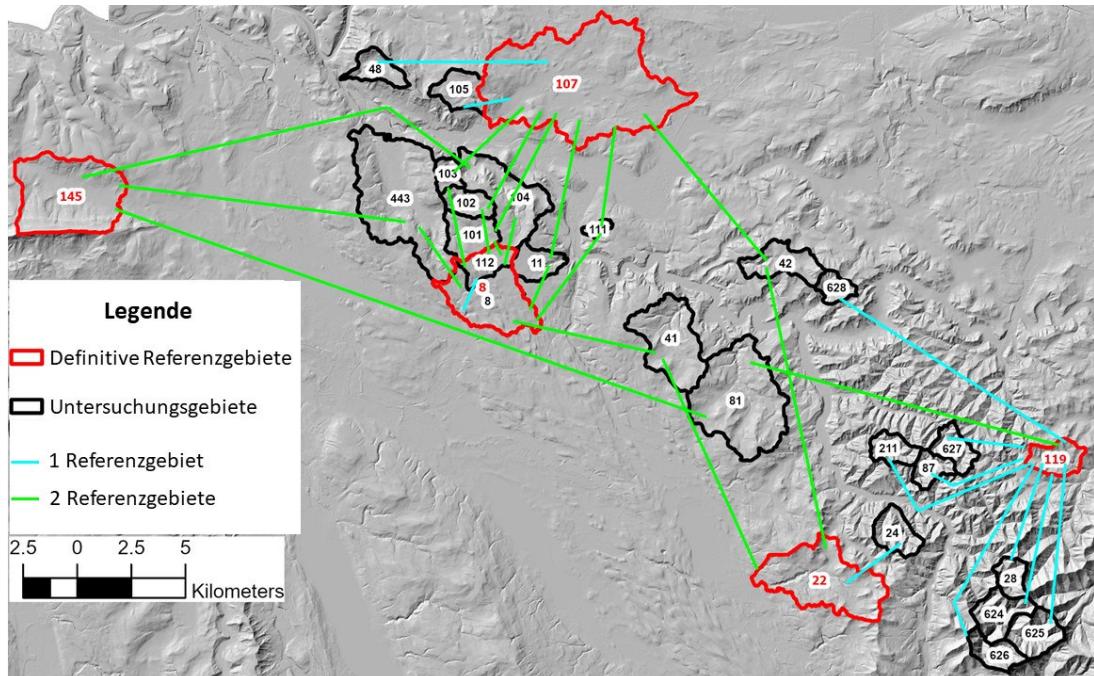
2048 das Q347 grösser als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ist, wird das Einzugsgebiet der Dauerkurvengruppe OMM / Mittelland 1
 2049 zugeordnet (vgl. Abbildung 48).
 2050 Mit dem korrigierten Q347 ergab sich eine deutlich flachere Dauerkurve, charakteristisch für
 2051 Dauerkurvengruppe OMM / Mittelland 1. Die Abflussmenge, die in ein anderes Gebiet entwässert, muss dann
 2052 aber der gesamten Dauerkurve wieder abgezogen werden, weil es am Messpunkt fehlt. Erst dann stimmte die
 2053 resultierende Kurve gut mit den Messwerten überein (vgl. Abbildung 37). Ohne diese Korrektur wäre die Kurve
 2054 zu steil ausgefallen.
 2055
 2056



2057
 2058 *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.*
 2059
 2060 Die Überprüfung der Dauerkurve des Untersuchungsgebiets 104 zeigte, dass die Werte der Abflussmessungen 2
 2061 und 3 besser mit der Dauerkurve der Dauerkurvengruppe OSM 2 übereinstimmte als die der Gruppe OSM 3.
 2062 Wegen der hohen Geländeneigung war Untersuchungsgebiet 104 schon zu Beginn als ein Übergangsgebiet
 2063 zwischen Dauerkurvengruppe 2 und 3 eingestuft worden. Untersuchungsgebiet 48 behielt hingegen die
 2064 Dauerkurvengruppe OSM 3, obwohl das Gebiet im Durchschnitt noch steiler ist als Untersuchungsgebiet 104.
 2065 Das lässt sich damit erklären, dass der Anteil an OMM 10% und der von Deckenschottern 32% beträgt. OMM
 2066 und Deckenschotter entwässern bei Niedrigwasser stark verzögert.
 2067
 2068 Dauerkurvengruppe OSM 2:

2069 Die Untersuchungsgebiete 41, 81 und 42 gehören zur Dauerkurvengruppe OSM 2. Die Referenzgebiete mit
2070 Dauerkurvengruppe OSM 2 erwiesen sich allesamt als ungeeignet, entweder weil ihre Niederschläge in der
2071 Vorperiode zu hoch lagen, wie bei Aabach (1) oder Wildbach (165), weil die Abflüsse während der
2072 Rezessionsphase zwischen dem 15.8.2023 und dem 21.8.2023 anstiegen, wie bei der Murg bei Wängi (106), weil
2073 das Referenzgebiet zu weit entfernt liegt, wie beim Jonen bei Zwillikon (63), oder weil der unterirdische Abfluss
2074 unter der Messstation das Niedrigwasserverhalten verfälscht, wie bei der Eulach bei Räterschen (32). Deshalb
2075 wurden die Perzentile der Abflussmesswerte der Untersuchungsgebiete 41, 81 und 42 aus den Mittelwerten von
2076 Referenzgebieten der Dauerkurvengruppen OSM 1 und OSM 3 bestimmt. Bei Untersuchungsgebiet 41 war es
2077 das Mittel der Perzentile der Referenzgebiete von Chämtnerbach (22) und Altbach (8), beim
2078 Untersuchungsgebiet 81 das Mittel der Perzentile von Rietholzbach (119) und Surb (145) und beim
2079 Untersuchungsgebiet 42 das von Chämtnerbach (22) und Näfbach (107). Die Auswahl dieser Referenzgebiete
2080 ergab sich durch das Austesten der verschiedenen Kombinationen.

2081



2083 *Abbildung 38: Untersuchungsgebiete in Einzugsgebiet der Töss und des Altbaches (schwarz) mit den Referenzgebieten, die*
2084 *sich für eine Übertragung der Abflussperzentile am besten eignen. Die Linien zeigen, welches Referenzgebiet dem*
2085 *Untersuchungsgebiet zugeteilt wurde. Türkis-farbige Linien zeigen an, dass nur ein Referenzgebiet verwendet wird, grüne*
2086 *Linien markieren, dass das Mittel zweier Referenzgebiete notwendig war.*

2087

2088 Sind die Dauerkurvengruppe, der Abfluss und das Abflussperzentil der drei Abflussmessungen bekannt, lässt sich
2089 das Q347 und das Q290 anhand eines R-Skripts bestimmen. Anhand der Dauerkurvengruppe OSM 3 wird dieses
2090 Vorgehen erklärt:
2091 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
2092 OSM3 wurden anhand der identifizierten Potenzfunktionen die Dauerkurvengefälle ermittelt. Daraus wurden
2093 fiktive lineare Dauerkurven zwischen Q250 und Q360 berechnet. Somit existieren für OSM3 insgesamt 40
2094 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.

2135 Von den 144 zur Verfügung stehenden Validierungsmessungen betragen die Abweichungen zwischen den
 2136 Abflusswerten der Validierungsmessungen und der Dauerkurve bei fast der Hälfte der Messungen weniger als
 2137 10 % (Tabelle 9). Bei 27 % der Messungen beträgt die Abweichung 10 bis 20 %, und bei 12 % der Messungen liegt
 2138 sie zwischen 20 und 30 %. In 75 % der Messungen ist die Abweichung kleiner als 20 %, und bei 87 % der
 2139 Messungen kleiner als 30 %. Bei nur 4 der 144 Messungen ist die Abweichung grösser als 50 %. Diese Zahlen
 2140 liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie im Mittelland (Tabelle 7). Auch in den alpinen Einzugsgebieten
 2141 lassen sich mit dem entwickelten Verfahren die Q347 und die Dauerkurvengruppen mit nur zwei bis drei
 2142 Abflusseinzelmessungen mit hoher Genauigkeit ermitteln. Die erzielte Genauigkeit ist damit wesentlich höher
 2143 als jene, die bisher mit rein statistischen Abschätzverfahren erreicht wurde. Dies gilt vor allem für die hohen und
 2144 die tiefen Q347. Bei den aussergewöhnlich hohen Q347 ($Q347 > 20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) können die Abweichungen
 2145 zwischen den Validierungsmessungen und der Dauerkurve gross sein. Die mögliche Ursache dafür wird in Kapitel
 2146 10.3.9 beschrieben.

2147 *Tabelle 9: Abweichungen der Abflusswerte der Validierungsmessungen mit den ermittelten Dauerkurven, in % der
 2148 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

2149

2150 9.4 Bestimmung der Dauerkurvenform zwischen Q290 und Q360

2151 9.4.1 Periode 2011 bis 2020

2152 Die Dauerkurven zwischen Q290 und Q360 weisen einen Verlauf auf, der einer linearen Funktion nahekommt
 2153 (Abbildung 3). Die Abweichungen zwischen einer linear approximierten Dauerkurve und der reellen Dauerkurve
 2154 wurden für alle im Mittelland und in den Voralpeneinzugsgebieten verfügbaren Messreihen untersucht. Eine
 2155 Gerade, die durch Q290 und Q347 verläuft und bis Q360 reicht, diente als lineare Approximation der
 2156 Dauerkurve. Für jedes Einzugsgebiet wurde die Differenz der Abflussvolumina zwischen der reellen Dauerkurve
 2157 und der linearen Dauerkurve ermittelt und durch die Abflussvolumina der linearen Dauerkurve dividiert. Dies
 2158 ergibt ein Mass für die Abweichung des Dauerkurvenverlaufes der linearen zur reellen Dauerkurve. Diese
 2159 Abflussvolumendifferenz wurde einmal für den Bereich zwischen Q290 und Q347 und einmal für den zwischen
 2160 Q347 und Q360 ermittelt (Abbildung 39). Die Standard-Dauerkurve des Steinenbachs (Kaltbrunn) zeigt ein
 2161 ausprägtes Abfallen ab ca. Q340. Ein derart starkes Abfallen ist eher die Ausnahme. In einem sollichen Fall sollten
 2162 die P/Q-Beziehungen im Niedrigwasserbereich unbedingt überprüft werden. In vielen Fällen stimmen die Kurven
 2163 gut überein. In 70 der 80 untersuchten Einzugsgebiete beträgt der Anteil der Abweichungen der Abflussvolumina

2164 der linear approximierten Dauerkurve von der reellen Dauerkurve in Prozent der linear approximierten
2165 Dauerkurve weniger oder gleichviel wie $\pm 3\%$ (Abbildung 40). Am grössten sind die Abweichungen bei den
2166 Gebieten der Dauerkurvengruppe OSM 1, am kleinsten bei der Dauerkurvengruppe OSM 4. Positive
2167 Abweichungswerte deuten auf eine leicht konvex verlaufende reelle Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 hin
2168 (Abbildung 39), bei negativen Werten liegt ein leicht konkaver Verlauf vor. Mit Ausnahme der
2169 Dauerkurvengruppe OSM 4 weisen die meisten Einzugsgebiete in der Oberen Süsswassermolasse (OSM 1, OSM
2170 2, OSM 3) und der Dauerkurvengruppe Voralpin 1 einen leicht konvexen Verlauf der Standard-Dauerkurve auf.
2171 Die Standard-Dauerkurven der Einzugsgebiete in der Gruppe OSM 4 und USM zeigen hingegen eher einen leicht
2172 konkaven Verlauf. Die Standard-Dauerkurven aller anderen Einzugsgebiete (OMM-Gruppen, Voralpin 2) weisen
2173 einen linearen Verlauf auf. Fast bei jeder Gruppe gibt es einzelne Ausreisser gegen oben und unten.
2174 Bei Abflüssen zwischen Q347 und Q360 sind die Abweichungen zwischen den Abflussvolumina der Standard-
2175 Dauerkurven und der linear approximierten Dauerkurven tendenziell grösser als zwischen Q290 und Q347. Mit
2176 Ausnahme der Gruppe OSM 4 liegt die reelle Dauerkurve bei allen Gruppen gleich hoch oder tiefer als die linear
2177 approximierte Dauerkurve (Abbildung 42). Bei Einzelwerten kann das Differenzvolumen bis zu -20% vom
2178 Volumen der approximierten Dauerkurven betragen (Abbildung 42).
2179 Dafür kann es mehrere Gründe geben. Je häufiger in einer Niedrigwasserphase Abfluss-Rezessionsphasen durch
2180 Niederschlagsereignisse unterbrochen werden, desto häufiger kommt es zu einem Füllen und Entwässern von
2181 rasch entwässernden, oberflächennahen Grundwasserspeichern (vgl. Kapitel 8.4). Der Einfluss solcher
2182 Niederschläge auf die Dauerkurve wird mit abnehmendem Abfluss, also gegen das untere Ende der Dauerkurve
2183 hin, immer kleiner. Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Dauerkurvenverlauf und dem mittleren
2184 Jahresniederschlag und der mittleren Geländeneigung. Wegen des höheren Einflusses der Niederschläge und
2185 der höheren mittleren Geländeneigung fallen die Dauerkurven der Dauerkurvengruppe OSM 1 und Voralpin 1
2186 rascher ab als die Dauerkurven der Gruppen OSM 4 und USM. Dank der hohen Anteile an langsam
2187 entwässernden Speichern und der sandigen Böden in OMM-dominierten Einzugsgebieten werden die in
2188 Niedrigwasserperioden fallenden Niederschläge besser abgepuffert als in Einzugsgebieten der
2189 Dauerkurvengruppe OSM 1, und Voralpin 1. Das erklärt, weshalb sich in den OMM-Einzugsgebieten auch keine
2190 Tendenz zu konvexen oder konkaven Dauerkurvenverläufen zeigt.
2191 Es ist davon auszugehen, dass weitere Faktoren eine konvexe Form der Dauerkurvengruppe begünstigen. Dazu
2192 gehören:
2193
2194 - eine zunehmende Versickerung von Bachwasser durch die Bachsohle in den darunterliegenden
2195 Schotteraquifer, wenn der Grundwasserspiegel bei Trockenheit unter das Niveau der Bachsohle sinkt.
2196
2197 - Eine Zunahme der Wasserentnahme aus Grundwasserleitern bei Trockenheit in Einzugsgebieten mit
2198 einem erheblichen Effekt durch Wasserentnahmen im Verhältnis zum Gesamtabfluss des Gebiets.
2199

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

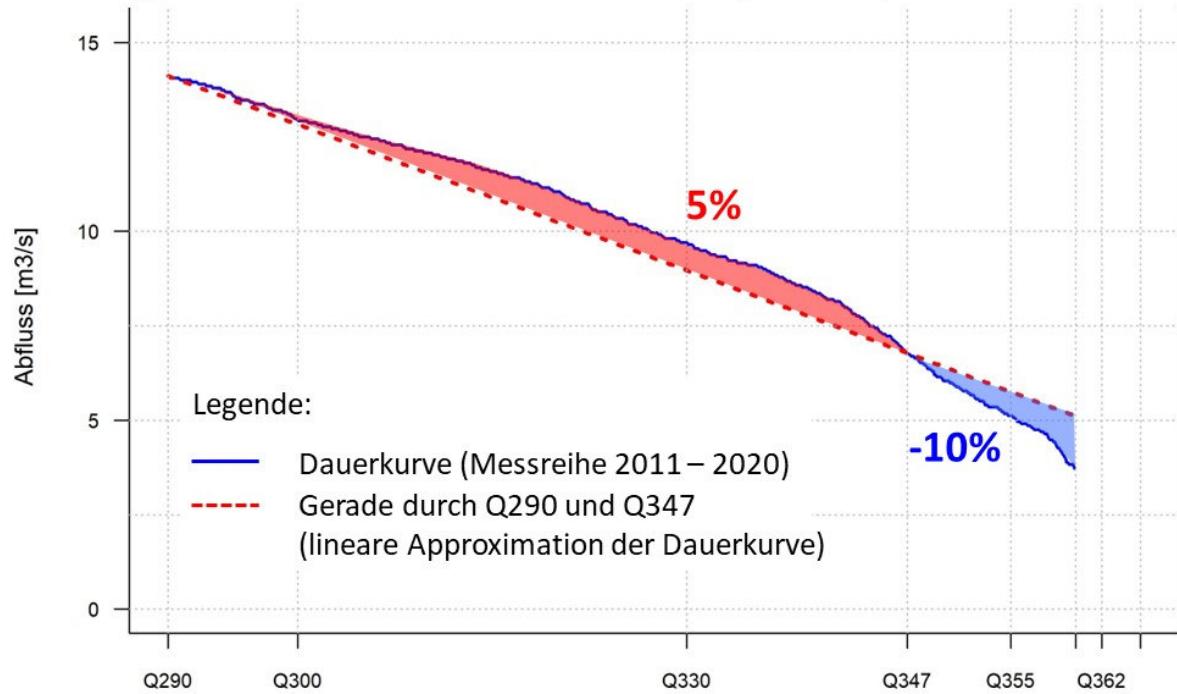
2204 Diese Faktoren dürften auch den Verlauf der Niedrigwasserrezessionskurve beeinflussen.

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%.

Abflussvolumendifferenz zwischen reeller Dauerkurve (2011 – 2020) und linear approximierter Dauerkurve des Steinenbachs (Kaltbrunn)



2222

2223
2224

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).

2225

2226

2227
2228

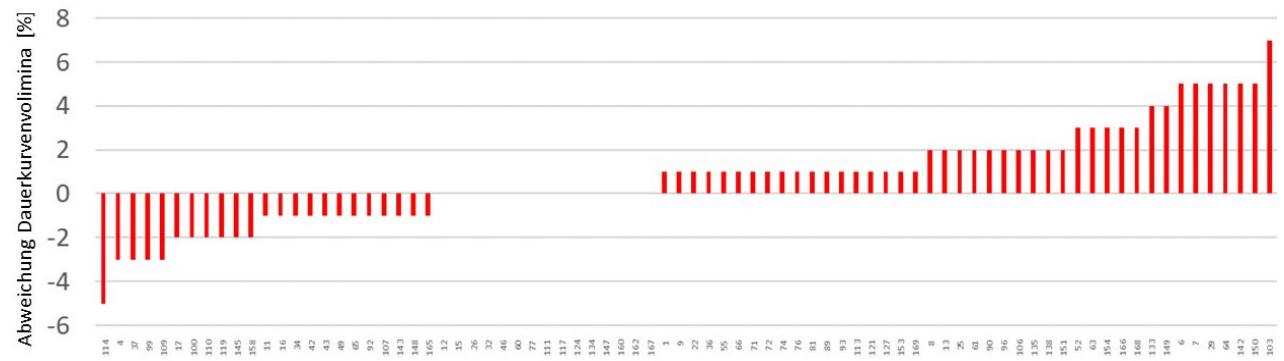
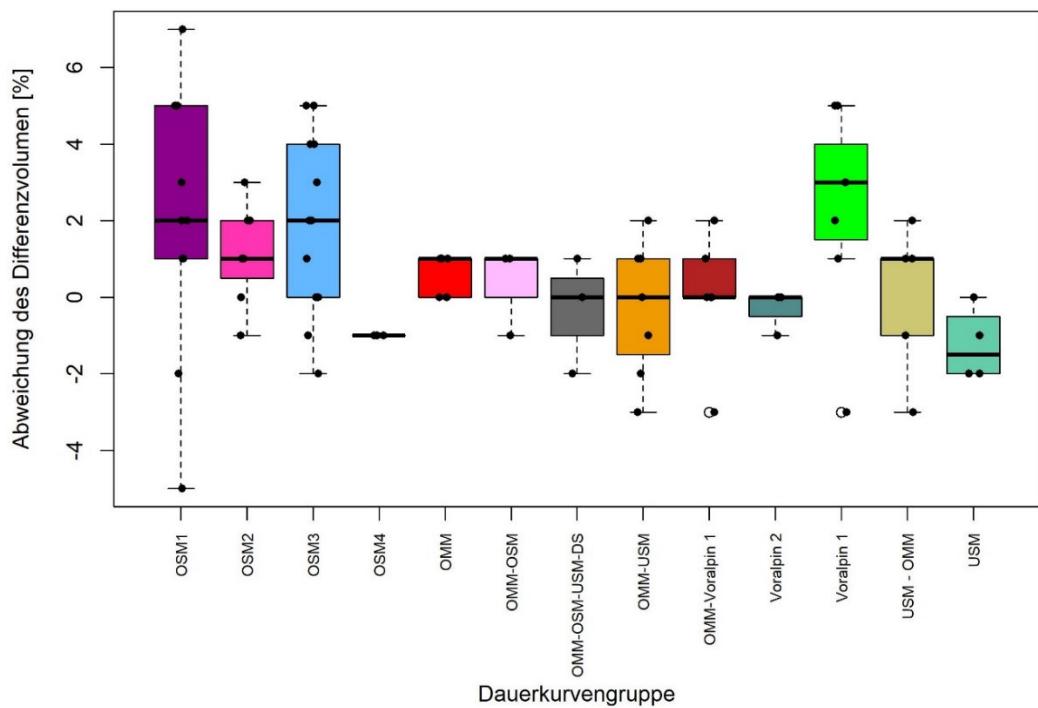


Abbildung 40: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347 in %.

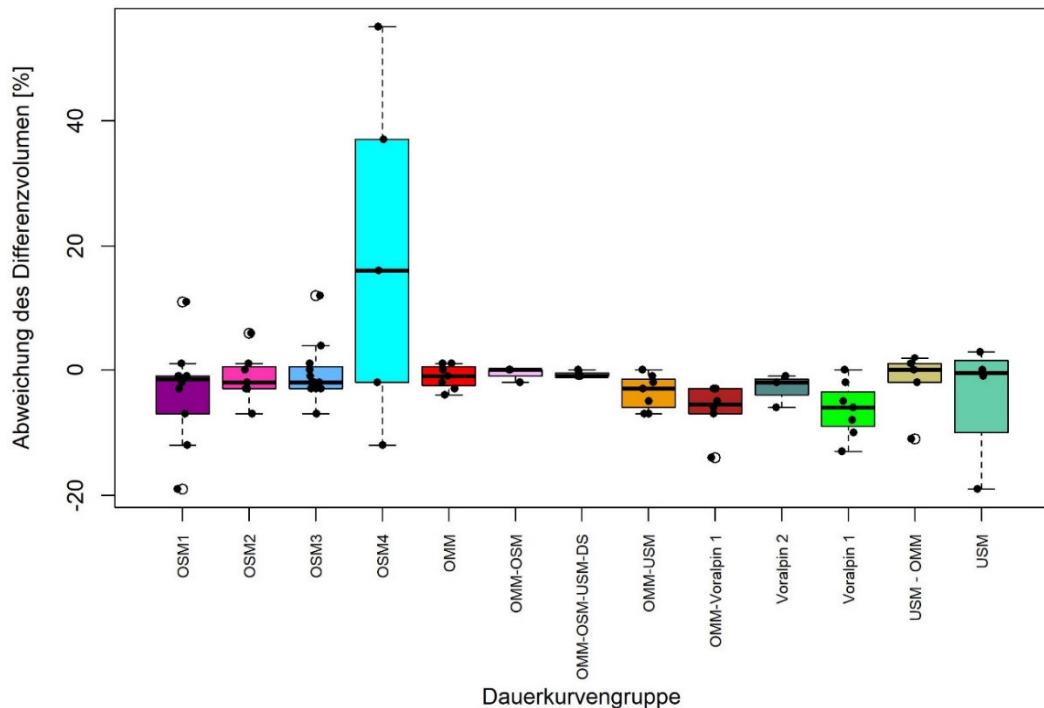


2229

2230
2231
2232

Abbildung 41: 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, differenziert nach den Dauerkurvengruppen.

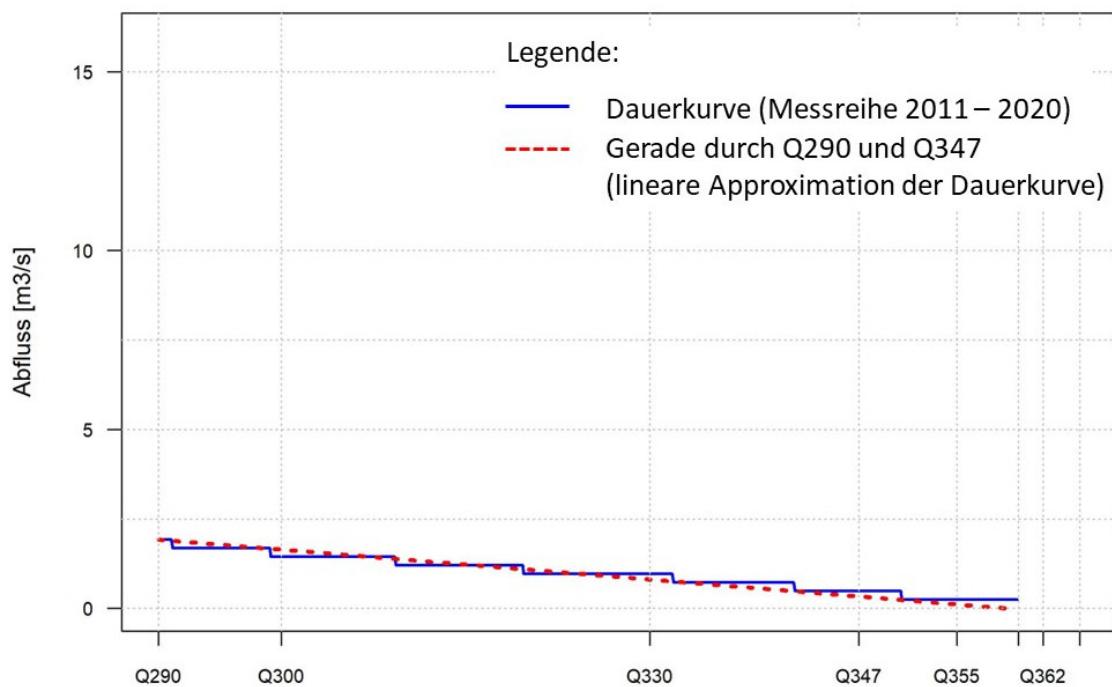
2233



2234

2235
2236
2237

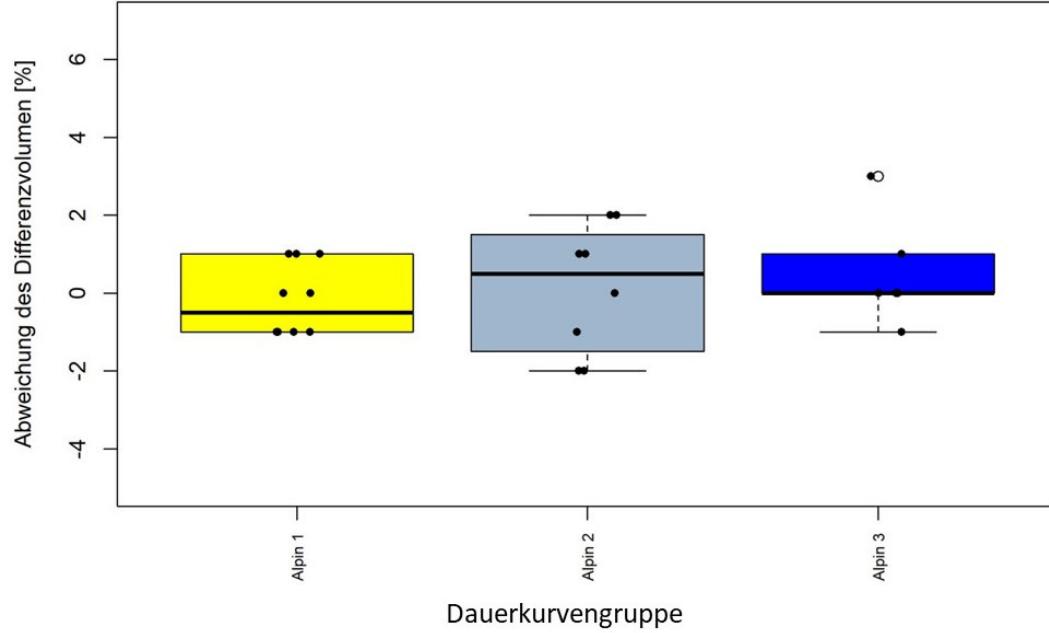
Abbildung 42: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear approximierten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020, differenziert nach den Dauerkurvengruppen.



2238
2239
2240
2241

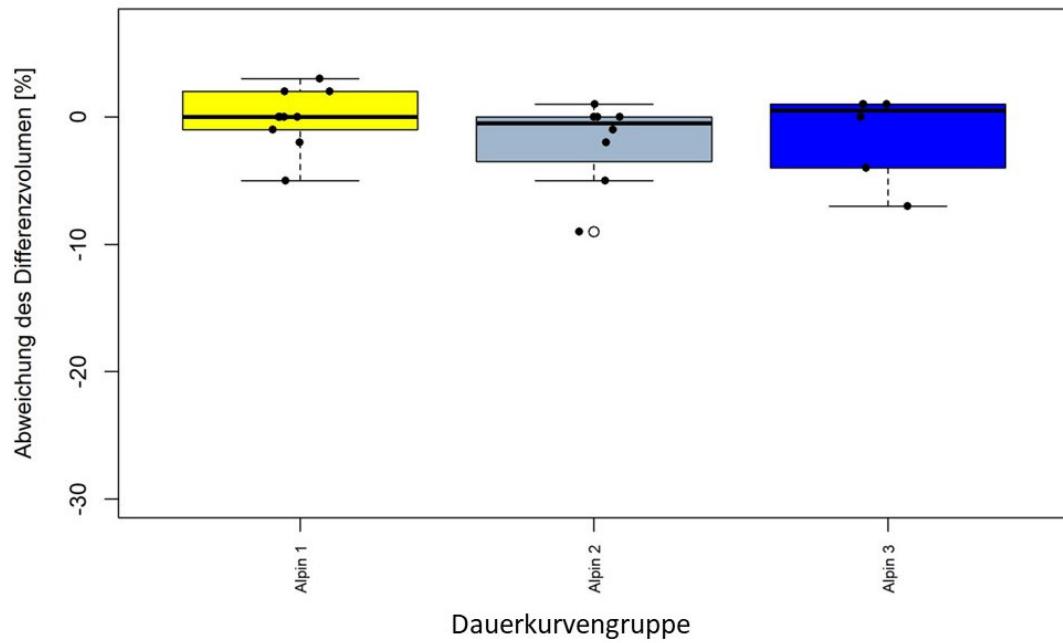
Abbildung 43: Reelle Dauerkurve (2011 – 2020) und linear approximierte Dauerkurve des Geusenbachs (Güttingen, TG). Der treppenförmige Verlauf weist darauf hin, dass die Messauflösung der Pegelhöhe etwas klein ist für die Bestimmung solch geringer Abflussmengen.

2242
2243



2244
2245
2246

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.



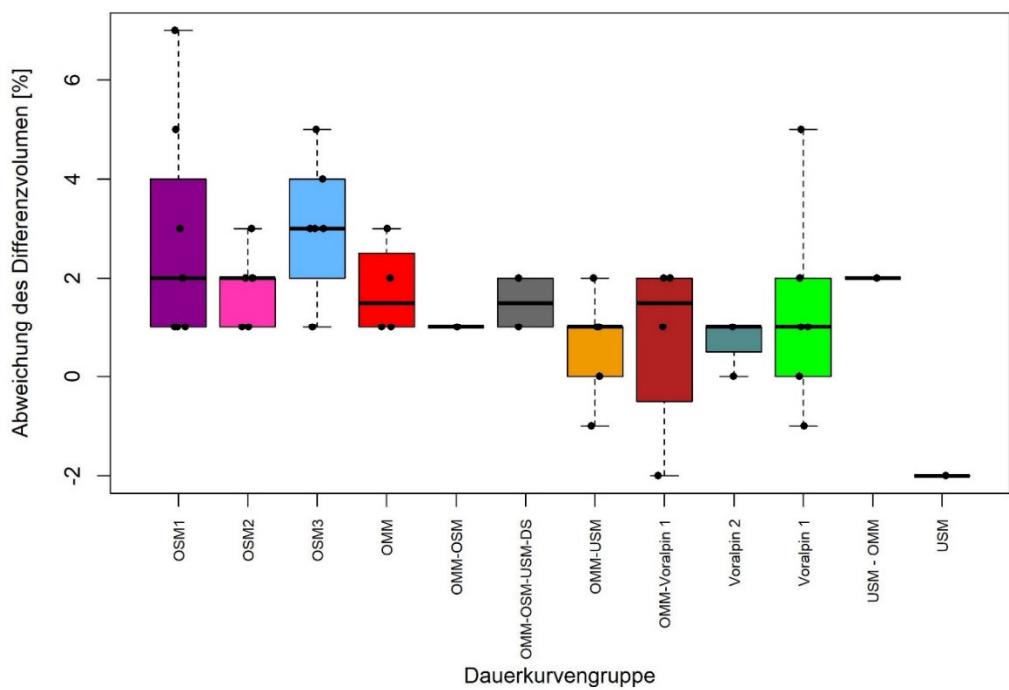
2247

2248 *Abbildung 45: Anteil des Differenzvolumens zwischen reeller und linear approximierter Dauerkurve am Volumen der linear*
 2249 *approximierten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360 in % für die Messreihen von 2011 bis 2020 für alpine Einzugsgebiete.*

2250 9.4.2 Periode 1991 bis 2020

2251 Der Prozentanteil der Differenz der Abflussvolumina zwischen der Standard-Dauerkurve und der linearen
 2252 Dauerkurve an den Abflussvolumina der linearen Dauerkurve von Q290 bis Q347 liegt für die Messreihen 1991
 2253 bis 2020 höher als für die Messreihe 2011 bis 2020 (Vergleich zwischen Abbildung 46 und Abbildung 41). Bei den
 2254 Dauerkurvengruppen OSM1, OSM2, OSM3, OMM, OMM-OSM und OMM-OSM-USM-DS sind nur positive
 2255 Differenzvolumina zu erkennen. Allerdings ist die Anzahl an untersuchten Einzugsgebieten für die Messperiode
 2256 1991 bis 2020 geringer als für die Messperiode 2011 bis 2020, weil einige Stationen erst in der Zeit nach 1991
 2257 errichtet wurden. Der konvexe Verlauf der Dauerkurven zwischen Q290 und Q347 ist für die Dauerkurven OSM1,
 2258 OSM2, OSM3, OMM, OMM-OSM und OMM-OSM-USM-DS für die Periode 1991 bis 2020 ausgeprägter als für
 2259 die Periode 2011 bis 2020. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Niedrigwasserabflüsse wegen der zunehmenden
 2260 Anzahl und Intensität der Trockenperioden zwischen 2003 und 2020 tendenziell sanken (Kapitel 12).
 2261 Die Volumendifferenzen zwischen den Standard-Dauerkurven und den linear-approximierten Dauerkurven
 2262 zwischen Q347 und Q360, die das Abfallen der Dauerkurve am unteren Ende anzeigen, sind 1991 bis 2020 etwas
 2263 höher im Vergleich zur Messperiode 2011 bis 2020 (Vergleich zwischen Abbildung 47 und Abbildung 42). Auch
 2264 das dürfte mit der Tendenz der Abnahme der Niedrigwasserabflüsse seit 2003 zusammenhängen.

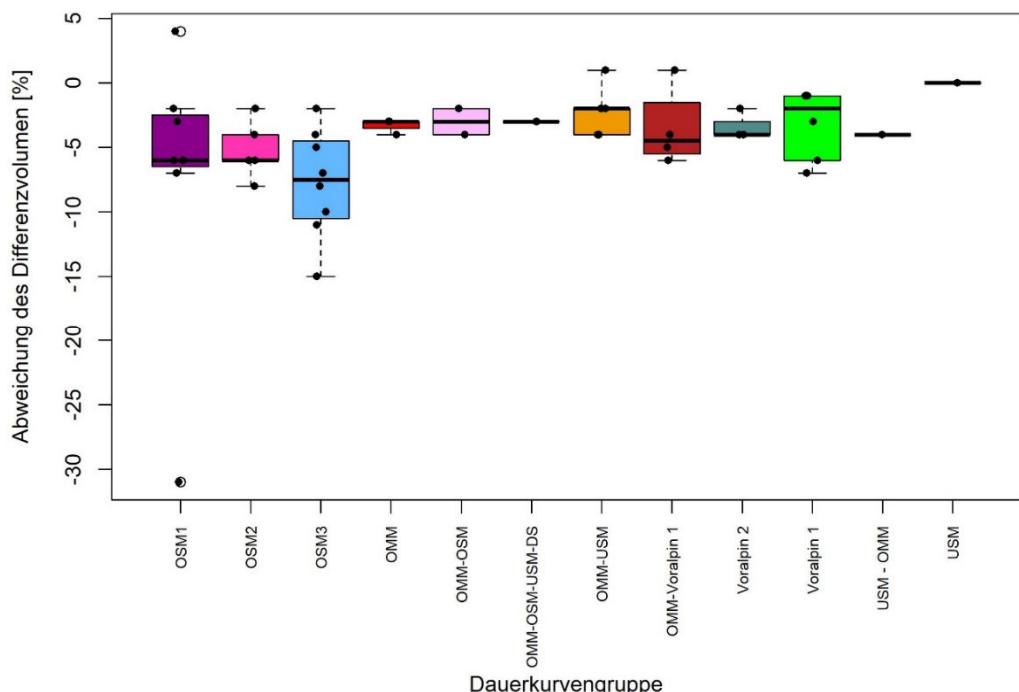
Volumendifferenz der Dauerkurve von der linear angenäherten Dauerkurve zwischen Q290 und Q347



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.

Volumendifferenz der Dauerkurve von der linear angenäherten Dauerkurve zwischen Q347 und Q360



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 ($Q < Q290$) bestimmt werden (Kapitel 9.2).
2278 Basierend auf Auswertungen von Dauerkurvengefällen zwischen Q290 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 Q290 (Kapitel 9.2) und dann die Dauerkurve zwischen Q290 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 Dächer 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 Geodatensatz «Topographische Einzugsgebiete
2307 Schweizer Gewässer» des BAFU (BAFU, 2024). Dieser GIS-Datensatz 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.

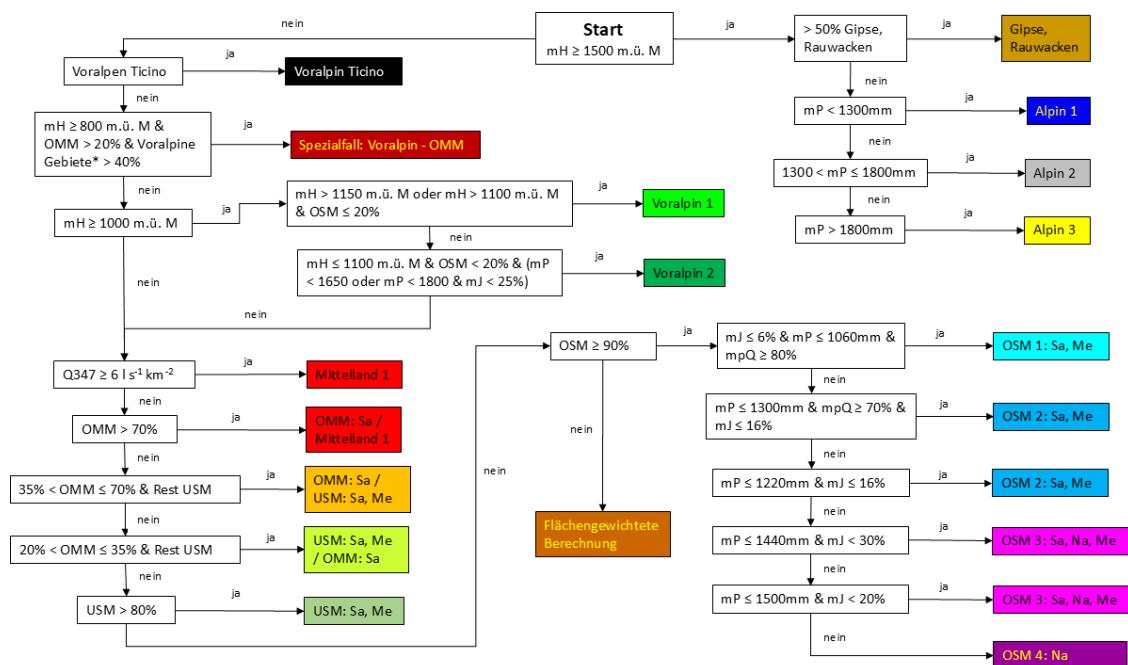
2346 10.2.7 Subtraktion von Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden

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.

2357 Nach der Ermittlung der Dauerkurven von alpinen Einzugsgebieten müssen die Beiträge von Gletschern und von
 2358 Permafrostböden wieder zu den Abflusswerten der Dauerkurve und der Einzelmessungen addiert werden. Dazu
 2359 sind die gleichen Werte zu verwenden wie bei der Subtraktion dieser Beiträge.

2360 10.3 Bestimmung der Dauerkurvengruppe

2361 Basierend auf Auswertungen von Dauerkurvengefällen zwischen Q290 und Q347 von 102 Einzugsgebieten in
 2362 Mittelland, Voralpen und Alpen (Kapitel 8.3 und Kapitel 9.2.5) wurde ein Regelwerk entwickelt, mit dem die
 2363 Dauerkurvengruppe von Untersuchungsgebieten im Mittelland, in den Voralpen und Alpen bestimmt werden
 2364 können. Die Bestimmung basiert auf geologischen, topographischen und klimatologischen Grundlagen
 2365 (Abbildung 48).



2366
 2367

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

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

2368
 2369
 2370
 2371

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 Quartäralablagerungen eines Einzugsgebiets.

2372 Das Vorgehen zur Bestimmung der Dauerkurvengruppe unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob sich ein
 2373 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 langsamem 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 zugewieilt.

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 Dauerkurvengefälle 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 Dauerkurvengefälle 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 Versickerungsstrecken

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 vorbeifliest. 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 Versickerungsstrecken 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;

2474 denn anhand der Abflusspercentile dieser Referenzgebiete wird der geeignete Messzeitpunkt ermittelt. Die
2475 definitive Auswahl der Referenzgebiete erfolgt, wenn die Werte der Einzelmessungen und die
2476 Niederschlagsmengen der Vorperiode im Untersuchungsgebiet und in den Referenzgebieten bekannt sind.
2477 Nach der Durchführung der Abflusseinzelmessungen werden die 20, 10, 5 und 2 Tage vor dem Messzeitpunkt
2478 gefallenen aufsummierten Niederschläge ermittelt. Diese können anhand des gegitterten Produkts für den
2479 Niederschlagstagesmittelwert der MeteoSchweiz (MeteoSwiss, 2021) für das Untersuchungsgebiet und für die
2480 möglichen Referenzgebiete berechnet werden. Basierend auf den Niederschlägen in der Vorperiode vor den
2481 Abflussmessungen werden dann die definitiven Referenzgebiete festgelegt. Es wird empfohlen, die
2482 Abflusspercentile von verschiedenen Referenzgebieten zu mitteln, wenn die aufgeführten Bedingungen durch
2483 ein einzelnes Referenzgebiet überhaupt nicht erfüllt werden können. Wenn z.B. ein geeignetes Referenzgebiet
2484 mit der gleichen Dauerkurvengruppe viel höhere Niederschlagsmengen in der Vorperiode erfuhr als das
2485 Untersuchungsgebiet, können ein zusätzliches Referenzgebiet oder zwei andere Referenzgebiete verwendet
2486 werden. So ist es möglich zwei Referenzgebiete zu verwenden, deren Dauerkurvengruppen im Vergleich zur
2487 Dauerkurvengruppe des Untersuchungsgebiets um eine Klasse abweichen und die Percentile dieser beiden
2488 Referenzgebiete zu mitteln (Kapitel 9.2.5). Wenn das Untersuchungsgebiet z.B. die Dauerkurvengruppe OSM 3
2489 aufweist, so könnte das Perzentil der Abflussmessung bestimmt werden, indem die Percentile von einem
2490 Referenzgebiet mit der Dauerkurvengruppe OSM 2 und einem Referenzgebiet mit der Dauerkurvengruppe OSM
2491 1 gemittelt werden. Die detaillierte Vorgehensweise, wie Referenzgebiete und wie die Abflusspercentile der
2492 Einzelmessungen zu bestimmen sind, ist in Kapitel 9.2.5 anhand von Beispielen beschrieben.

2493 10.3.9 Bestimmung der Referenzgebiete in den Alpen

2494 In den alpinen Einzugsgebieten beeinflusst der mittlere Jahresniederschlag das Entwässerungsverhalten
2495 massgeblich (Abbildung 14). In den Alpen sind die Unterschiede im Dauerkurvengefälle zwischen den
2496 Einzugsgebieten jedoch klein. Hinzu kommt, dass die Entwässerung der alpinen Einzugsgebiete im Winter
2497 seltener durch Regenereignisse unterbrochen wird, und dass die Verdunstung kaum einen Einfluss auf
2498 Niedrigwasserabflüsse hat. Für eine möglichst zuverlässige Bestimmung des Q347 in alpinen Einzugsgebieten ist
2499 entscheidend, dass die Referenzgebiete bei den folgenden Kriterien Ähnlichkeiten zu den
2500 Untersuchungsgebieten aufweisen:

2501

- 2502 1. **Klimatische Region:** Die Nordseite der westlichen Alpen weist häufig eine etwas höhere
2503 Schneefallgrenze auf als die Zentralalpen. Nochmals tiefer liegt die Schneefallgrenze in den
2504 inneralpinen Tälern in den Ostalpen. Durch eine höhere Schneefallgrenze ist der Einfluss durch
2505 Schneeschmelze und Regen etwas grösser, was das Q347 eher etwas erhöht. Dadurch können die
2506 Percentile (z.B. Q300 oder Q350) bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession in den Westalpen
2507 tendenziell etwas höher liegen als in den Zentralalpen und noch höher als in den inneralpinen Tälern
2508 der Ostschweiz. Dasselbe gilt für die alpinen Regionen des Kantons Tessin. Dort liegen die
2509 Abflusspercentile tendenziell höher als in der Westschweiz, in der Zentralschweiz und in der Ostschweiz

2510 der Alpennordseite. Wenn möglich, sollten die Untersuchungs- und Referenzgebiete in der gleichen
2511 klimatischen Region liegen. Mit der Klassifikation wie sie in Tabelle 11 vorgeschlagen wird, konnten
2512 gute Ergebnisse erzielt werden. Je höher die minimalen Höhen der Einzugsgebiete liegen, desto
2513 weniger wichtig ist dieses Kriterium, weil die Schneeschmelze viel später beginnt und deshalb die
2514 Entwässerung der Gebiete in den Monaten Dezember bis März kaum durch Regenereignisse oder
2515 Schneeschmelze unterbrochen wird.

2516

2517 *Tabelle 11: Einteilung des Schweizer Alpengebiets in klimatische Regionen, die als ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der*
2518 *Referenzgebiete gelten.*

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

2519

2520

- 2521 2. **Mittlere Höhe:** Tendenziell weisen tieferliegende Einzugsgebiete während einer Rezessionsphase im
2522 Winter bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession höhere Perzentile auf als höherliegende.
- 2523 3. **Minimale Höhe:** gleicher Effekt wie bei der mittleren Höhe und der Klimaregion.
- 2524 4. **Exposition:** Tendenziell weisen südexponierte Einzugsgebiete während einer Rezessionsphase im
2525 Winter bei vergleichbarem Fortschritt in der Rezession höhere Perzentile auf als nordexponierte. Es ist
2526 vor allem die Exposition in den tiefsten Höhenlagen im Einzugsgebiet wichtig, denn dort beginnt die
2527 Schneeschmelze zuerst und es können grosse Differenzen in den Perzentilen entstehen. Am Beispiel:
2528 Am Goneri, der etwa eine gleiche minimale Höhe aufweist wie der Rein da Sumvitg, beginnt die
2529 Schneeschmelze meist früher als im Rein da Sumvitg, weil in den tiefsten Höhenlagen mehr
2530 südexponierte Hänge auftreten als im Rein da Sumvitg.
- 2531 5. **Extrem hohe Q347:** Einzugsgebiete mit ausserordentlich hohen Q347 sind separat zu behandeln. Bei
2532 Einzugsgebieten mit Q347-Abflüssen von mehr als $20 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, wie beispielsweise dem Ducanbach
2533 (Sertig, Davos) oder dem Brenno (Aquacalda, Lukmanier Südseite), bestehen grosse Abweichungen
2534 zwischen den Abflüssen der Validierungsmessungen und der ermittelten Dauerkurve. Die Erklärung
2535 dafür, die bisher am plausibelsten erscheint, ist, dass diese Einzugsgebiete derart voluminöse langsam
2536 entwässernde Speicher aufweisen, dass sie erst stark verzögert auf Niederschlagsschwankungen
2537 reagieren. Die Abflussganglinie wird so stark von den langsam entwässernden Speichern dominiert,
2538 dass diese möglicherweise von den saisonalen Rhythmen abgekoppelt ist. Sie reagiert womöglich nur
2539 auf mehrjährige Schwankungen im Niederschlagsregime. Da bisher an keinem dieser Einzugsgebiete
2540 eine fixe Pegelstation installiert wurde, kann dieses Verhalten aber nicht definitiv bestätigt werden. Die
2541 starken Abweichungen der Abflüsse der Validierungsmessungen von den modellierten Dauerkurven
2542 lassen nur diese Schlussfolgerung zu. Dieses Phänomen tritt eigentlich nur bei Einzugsgebieten auf, die
2543 durch Gipse oder Rauwacken aufgebaut sind.

2544

10.3.10 Zeitpunkt der Abflusseinzelmessungen und Umgang mit Unsicherheiten im Mittelland

2547 Niedrigwasserabflüsse ($Q < Q290$) 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 ($Q < Q290$)
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 Q320 und Q347 liegen, und eine Abflusseinzelmessung, wenn die Abflüsse zwischen
2553 Q290 und Q320 liegen. Eine Abflussmessung wird dazu verwendet, um das Q347 zu bestimmen. Es ist die
2554 Abflussmessung, die näher beim Q347- 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 Meeressmolasse (OMM).

2562 Die Messung zur Bestimmung des Q347 wird im Idealfall zu einem Zeitpunkt durchgeführt, wenn die
2563 Abflussperzentile der Referenzgebiete möglichst nahe bei Q347 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

2615 geeigneten Referenzgebieten auszuwählen. Diese sind in den hydrometrischen Webseiten des Bundes
2616 und der Kantone jederzeit einsehbar.

2617
2618 - Anspruchsvoller wird die Auswahl des optimalen Messzeitpunktes in einer Rezessionsphase nach einem
2619 grösseren Regenereignis mitten im Winter, in dem die Schneefallgrenze generell hoch, aber regional
2620 unterschiedlich war. Dann ist es wichtig in Erfahrung zu bringen, wie hoch die Schneefallgrenze im
2621 Untersuchungsgebiet und in den Referenzgebieten lag. Ideale Messzeitpunkte sind während einer
2622 langen winterlichen Rezessionsphase, die seit November oder Dezember nicht durch Regenereignisse
2623 unterbrochen wurden.

2624
2625 - In einer sehr kalten Periode können aufgrund von Eisbildung im Bachbett starke tägliche
2626 Abflussschwankungen auftreten (Nagel et al., 2025), die eine Bestimmung eines ausreichend genauen
2627 Perzentils verunmöglichen. Diese Schwankungen treten nicht in allen Fliessgewässern auf, weil
2628 bestimmte morphologische Kriterien im Bachbett erfüllt sein müssen (Nagel et al., 2025). Jedoch
2629 existieren noch keine fixen Regeln, wie diese Kriterien zu bestimmen sind. Deshalb sollten während
2630 sehr kalter Tage generell keine Abflussmessungen durchgeführt werden, um das Q347 oder die
2631 Niedrigwasserdauerkurve zu bestimmen. Am Dischmabach in Davos werden diese
2632 Abflussschwankungen bei einer Temperatur von -8°C oder darunter ausgelöst (Nagel et al., 2025).
2633 Dieser Schwellenwert kann aber von Gebiet zu Gebiet variieren. Um Zeiträume mit solchen
2634 Schwankungen zu meiden, können jederzeit die aktuellen zeitlich hoch aufgelösten Abflussganglinien
2635 der Referenzgebiete in den hydrometrischen Webseiten des Bundes und der Kantone eingesehen
2636 werden.

2637
2638 *Tabelle 12: Ungefährer Zeitraum für das Eintreten des tiefsten Abflusses in einem durchschnittlichen Winter in den
2639 verschiedenen Klimaregionen im Alpenraum.*

Klimaregion	Ungefährer Zeitpunkt des tiefsten Abflusses im Winter
Zentralalpen: Uri, westliche Surselva	Ende Februar
Westalpen: Berner Oberland, 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

2640
2641 Im Zusammenhang mit der Erstellung dieses Berichts wurden zahlreiche Einzelmessungen durchgeführt und
2642 ausgewertet, die ab dem Zeitpunkt der wissenschaftlichen Veröffentlichung der Daten zur Verfügung stehen
2643 werden. Die Q347 der meisten dieser Einzugsgebiete konnten mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden
2644 (Kapitel 9.3). Für sämtliche Einzugsgebiete mit mindestens einer Einzelmessung wurde das Q347 und eine
2645 Dauerkurve mit der hier vorgestellten Methode bestimmt. Auch diese Einzugsgebiete stellen mögliche
2646 Referenzgebiete dar; denn fehlen in der Nähe eines Untersuchungsgebietes geeignete Referenzgebiete mit einer
2647 langjährigen Messreihe oder sind die Voraussetzungen für die Bestimmung des Perzentils aufgrund eines
2648 Regenereignisses in der Vorperiode schwierig, wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Durchführung einer

2649 zusätzlichen Abflussmessung in einem nahegelegenen und geeigneten Einzugsgebiet, in dem schon eine
2650 Einzelmessung durchgeführt und eine Dauerkurve erfolgreich bestimmt wurde. Anhand dieses Messwertes und
2651 anhand der verfügbaren Dauerkurve lässt sich ein Perzentil bestimmen, das auf das Untersuchungsgebiet
2652 übertragen wird. Durch diesen Zusatzaufwand lässt sich die Schätzung des Perzentils zusätzlich abstützen, was
2653 sehr hilfreich sein kann. Er erlaubt eine gewisse Flexibilität bei der Auswahl des Messzeitpunktes, vor allem in
2654 hoch gelegenen Einzugsgebieten, für welche Referenzgebiete rar sind.

2655 10.3.12 Festlegung der Standorte für Abflusseinzelmessungen

2656 Die Festlegung der Standorte der Abflusseinzelmessungen hängt davon ab, wie komplex ein Gebiet aufgebaut
2657 ist. Grundsätzlich sind die drei Abflusseinzelmessungen am Untersuchungsstandort das Minimum. Versickert ein
2658 Teil des Wassers oberhalb des Untersuchungsstandortes im Bachbett, so ist der unterirdische Abfluss zu
2659 ermitteln. Wird der unterirdische Abfluss mit dem hydrologischen Verfahren bestimmt, sind an einem oder
2660 mehreren Standorten oberhalb der Versickerungsstrecke weitere Abflussmessungen notwendig (vgl. Kapitel
2661 6.2.2 und Kapitel 10.3.15).

2662 10.3.13 Methoden der Abflusseinzelmessungen

2663 Für Abflüsse unter 2000 l s^{-1} wird die Salzverdünnungsmethode empfohlen, wenn am betroffenen Bachabschnitt
2664 eine gute Durchmischung des Salzes mit dem Wasser zwischen Salzeingabe- und Messstelle vorliegt. Bei zu
2665 langsamem und laminarem Fliessen ist eine Flügelmessung oder eine Messung mit magnetisch-induktiven
2666 Durchflussmessern besser geeignet. Bei sehr schmalen Bächen ist die Salzverdünnungsmethode auf jeden Fall
2667 ratsamer. Beide Methoden liefern Werte mit weniger als 5% Messfehler, wenn sie bei den für sie geeigneten
2668 Fliessbedingungen eingesetzt werden. Die Flügelmessung dauert drei- bis fünfmal so lange wie eine Messung
2669 mit der Salzverdünnungsmethode. Das Equipment für die Salzverdünnungsmethode ist etwas kompakter und
2670 besser geeignet für winterliche Abflussmessungen im Gebirge, wo der Zugang nur zu Fuss möglich ist.

2671 10.3.14 Bestimmung der Wasserentnahmen und -zugaben

2672 Für das Untersuchungsgebiet müssen Wasserentnahmen und Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten
2673 bestimmt werden. Die genaue Vorgehensweise ist in Kapitel 6.3 beschrieben.

2674 10.3.15 Bestimmung des unterirdischen Abflusses

2675 Falls ein Untersuchungsstandort unterhalb einer Versickerungsstrecke liegt, muss die unterirdisch
2676 durchfliessende Wassermenge bestimmt werden. Der unterirdische Abfluss kann auf zwei Arten bestimmt
2677 werden (Kapitel 6.2):

- 2678
- 2679 - Abschätzung mit der Darcy-Formel (Kapitel 6.2.1)
 - 2680 - Abschätzung mit hydrologischem Verfahren (Kapitel 6.2.2)

2681 Die Verwendung der Darcy-Formel eignet sich gut für Standorte, wo ausreichend hydrogeologische Daten von
2682 Bohrungen zur Verfügung stehen.

2683 Darcy-Formel:

2684
$$Q_{sub} = k_f \cdot J \cdot A , \quad (1)$$

2685

2686 wobei k_f der hydraulischen Leitfähigkeit, J dem hydraulischen Gefälle und A der durchflossenen
2687 Querschnittsfläche entspricht. Die durchflossene Querschnittsfläche und die hydraulische Leitfähigkeit lassen
2688 sich anhand von Informationen aus geologischen Bohrungen ableiten, die in unmittelbarer Umgebung abgeteuft
2689 wurden. Für die Verwendung der Darcy-Formel ist die durchflossene Querschnittsfläche des
2690 Grundwasserkörpers am Messquerschnitt zu ermitteln. Falls zur Höhe des Grundwasserspiegels keine weiteren
2691 Informationen vorliegen, soll zur Berechnung des durchflossenen Querschnitts die Höhe des
2692 Grundwasserspiegels bei Mittelwasser verwendet werden, der in den Grundwasserkarten der Kantone
2693 ersichtlich ist. Es werden ausserdem Angaben zum hydraulischen Gradienten und zur gesättigten Leitfähigkeit
2694 gefordert. Das Vorgehen zur Bestimmung des unterirdischen Abflusses wird in Kapitel 6.2.1 detailliert
2695 beschrieben. Meistens sind bei Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina in Siedlungsgebieten die
2696 erforderlichen hydrogeologischen Angaben vorhanden. Bei Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina,
2697 die das Q347 massgeblich erhöhen, ist die Verwendung dieser Methode gegenüber dem hydrologischen
2698 Verfahren vorzuziehen. Beispiele dafür sind die Töss bei Rämismühle, die Murg in Wängi oder die Emme. Um an
2699 solche Daten zu gelangen, wird empfohlen, die kantonalen Behörden zu kontaktieren, die für die
2700 Grundwasservorkommen zuständig sind.

2701 Die Verwendung des hydrologischen Verfahrens wird in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird
2702 das Q347 des Gesamtabflusses mit Hilfe von Abfluss-Einzelmessungen (vgl. Beispiel Luterbach in Kapitel 6.2.2)
2703 oder durch Übertragung des Q347 von litho-stratigraphisch ähnlich aufgebauten benachbarten Einzugsgebieten
2704 geschätzt (vgl. Bestimmung des unterirdischen Abflusses des Rüderchen in Schöftland im Anhang). Das Q347 des
2705 unterirdischen Abflusses ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Q347 des Gesamtabflusses und dem des
2706 oberirdischen Abflusses. Das Q347 des oberirdischen Abflusses wird ebenfalls anhand von Abfluss-
2707 Einzelmessungen bestimmt. Dieses Verfahren ist überall dort zu empfehlen, wo die erforderlichen Daten zur
2708 Anwendung der Darcy-Formel fehlen und wo von den Schottergrundwasserkörpern keine massgebende Q347-
2709 erhöhende Wirkung zu erwarten ist. Eine massgebende Q347-erhöhende Wirkung wurde nur bei
2710 Einzugsgebieten mit tiefen Q347 und Schottergrundwasserkörpern mit grossen Volumina beobachtet (Kapitel
2711 11.6.111.6.3. Deshalb sollte das hydrologische Verfahren nur bei kleineren Schottergrundwasserkörpern mit
2712 einem Volumen von weniger als 500'000 m³ km⁻² angewendet werden. Bei Anwendung auf grössere
2713 Schottervolumina steigt das Risiko, dass der unterirdische Abfluss unterschätzt wird.

2714 10.3.16 Bestimmung von Q347 und Q290

2715 Vom Messwert derjenigen Abflussmessung, deren Perzentil am nächsten zu Q347 liegt, wird anhand der
2716 ermittelten Dauerkurvengruppe das Q347 und das Q290 berechnet. Die detaillierte Beschreibung des Vorgehens

2717 findet sich in Kapitel 9.2.5, vgl. ausserdem Abbildung 26. Dafür sind die Potenzfunktionen der verschiedenen
2718 Dauerkurvengruppen notwendig, mit welchen das Verhalten des Dauerkurvengefälles beschrieben wird. Die
2719 Potenzfunktion lautet:

2720

2721
$$\frac{Q290}{Q347} = a \cdot Q347^b$$

2722

2723 Die Parameter a und b für die verschiedenen Dauerkurvengruppen sind in Tabelle 13 ersichtlich.

2724

2725 *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

2726

2727 10.3.17 Empfehlungen für die Berechnung des Dauerkurvenverlaufs

2728 Aus den vorangehenden Schritten sind das Q347 und das Q290 bekannt. Daraus lässt sich das
2729 Dauerkurvengefälle im Niedrigwasserbereich bestimmen. Basierend auf den Analysen des Dauerkurvenverlaufs
2730 zwischen Q290 und Q360 (vgl. Kapitel 9.4) wurden folgende Empfehlungen zur Berechnung der Dauerkurven
2731 erarbeitet:

2732 Grundsätzlich empfehlen wir, alle Dauerkurven im Niedrigwasserbereich (Q290 bis Q360) mit einer linearen
2733 Funktion zu berechnen. Das führt in den alpinen Einzugsgebieten nur zu sehr geringfügigen Abweichungen zur
2734 reellen Dauerkurve. Ebenfalls geringfügige Abweichungen sind in den Mittellandgebieten der Periode 2011 bis
2735 2022 und in den Voralpen der Periode 1991 bis 2020 zu erwarten. Falls die Wiedergabe des konvexen
2736 Dauerkurvenverlaufs zwischen Q290 und Q347 und zwischen Q347 und Q360 von besonderer Bedeutung sein
2737 sollte, wird empfohlen, die Dauerkurven der Mittellandgebiete der Periode 1991 bis 2020 und die Dauerkurven
2738 der Dauerkurvengruppen Voralpin1 und OSM 1 der Periode 2011 bis 2022 anhand einer quadratischen Funktion
2739 der Form:

2740

2741
$$b = \frac{Q - Q290 - a \cdot P^2}{P} \quad (4)$$

2742

2743 zu berechnen. Q = Abfluss, P = Perzentil (z.B. Q347, Q330, Q300, etc.), a und b sind Faktoren, die die Krümmung
2744 der Dauerkurve beeinflussen. Faktor a variiert zwischen den Dauerkurvengruppen und kann für die Periode 1991
2745 bis 2020 der Tabelle 15 und für die Periode 2011 bis 2022 der Tabelle 16 entnommen werden. Es handelt sich
2746 um Durchschnittswerte aller Faktoren a jeder Dauerkurvengruppen. Faktor b lässt sich bestimmen, indem für
2747 Faktor a der entsprechende Wert in den Tabelle 15 oder Tabelle 16 verwendet, für Q der Abfluss bei Q347 und
2748 für P das Perzentil 347 eingesetzt wird.

2749 *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

2750

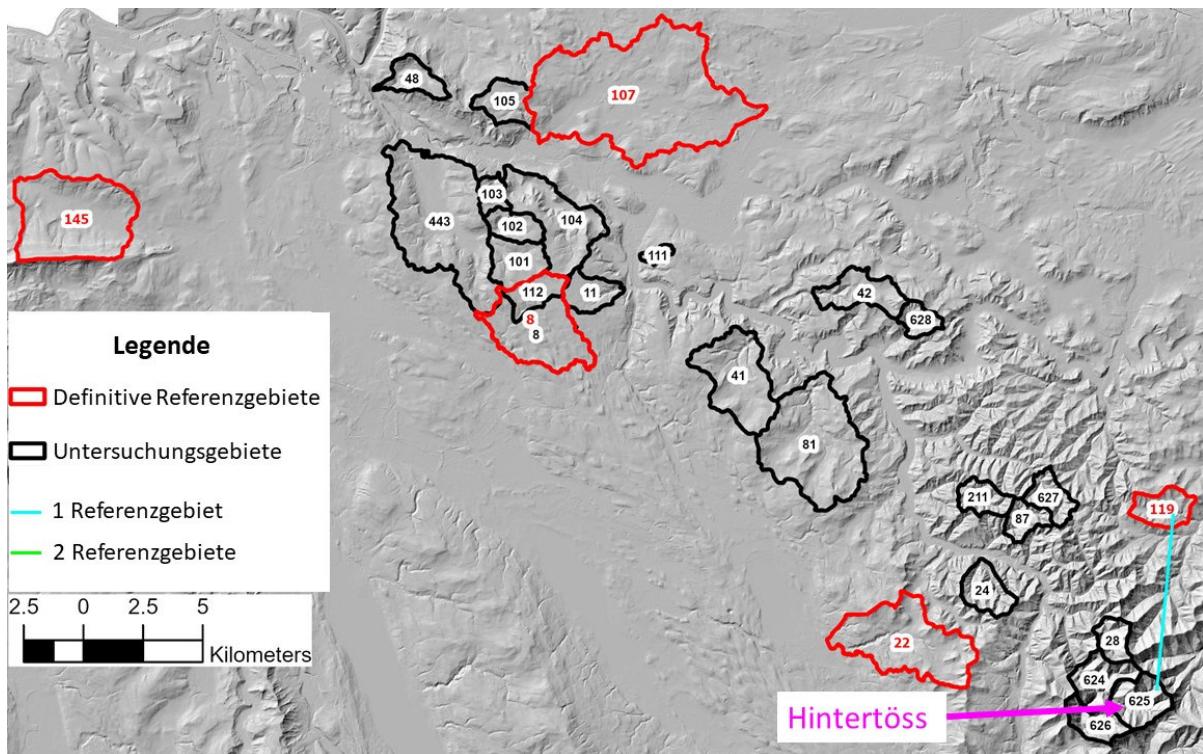
2751 *Tabelle 15: Durchschnittswerte für den Faktor a der einzelnen Dauerkurvengruppen der Periode 2011 bis 2022*

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

2752

2753 10.3.18 Überprüfung der Dauerkurven anhand der Messwerte der 2754 Einzelmessungen

2755 Die beiden Abflussmessungen, die nicht für die Bestimmung des Q347 verwendet wurden, dienen zur
2756 Überprüfung der ermittelten Dauerkurve. Zur Illustration werden hier die Ergebnisse von zwei
2757 Untersuchungsgebieten gezeigt. Für die Bestimmung der Perzentile der Einzelmessungen der Hintertöss (625)
2758 wurde z.B. das Referenzgebiet des Rietholzbachs (119) verwendet (Abbildung 49). Die Abflüsse der ermittelten
2759 Dauerkurve liegen um 11 bzw. 13% höher als die Abflüsse der Abflussmessungen 2 und 3 (Abbildung 50). Die
2760 Abflussperzentile des Müllibachs (104) wurden vom Mittelwert der Abflussperzentile von Altbach (8) und Surb
2761 (145) übernommen (Abbildung 51). Die Abflüsse der ermittelten Dauerkurve liegen um 4% bzw. 10% tiefer als
2762 die der Abflussmessungen 2 und 3 (Abbildung 52).



2764
2765
2766

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

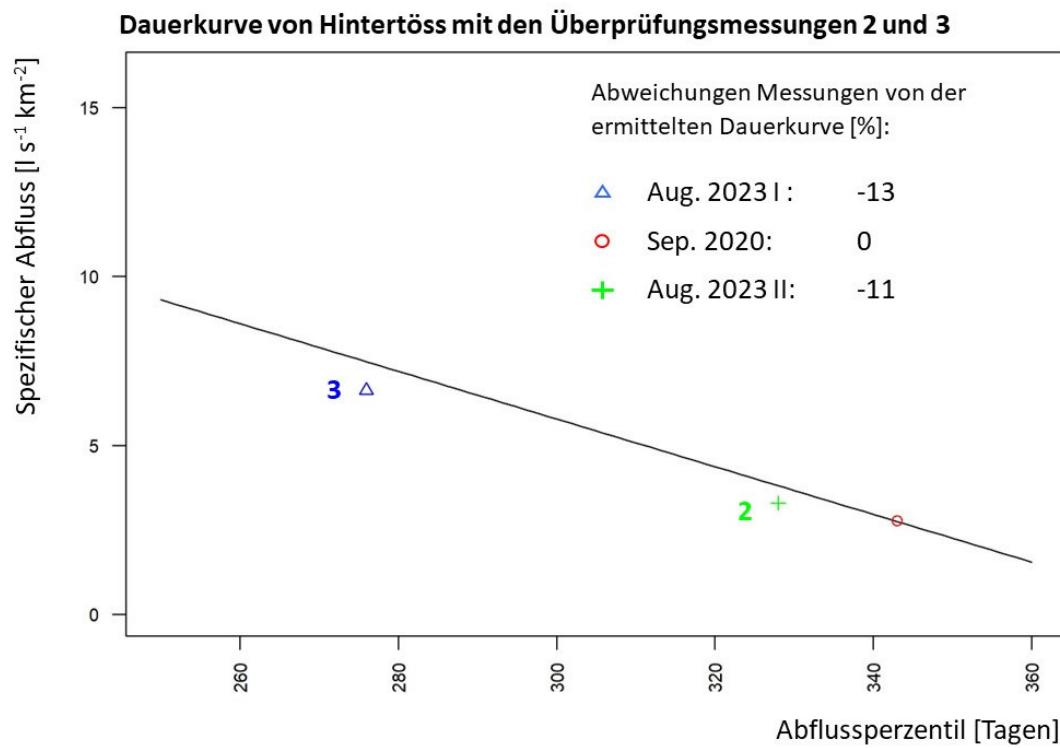
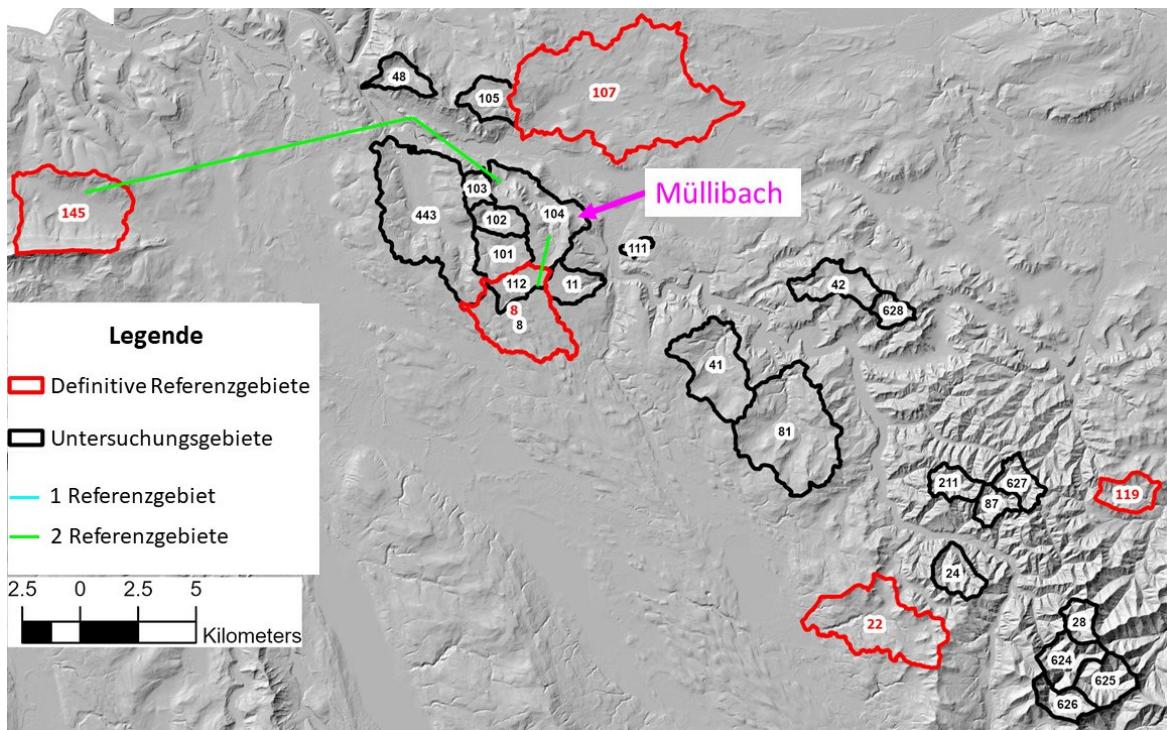


Abbildung 50: Berechnete Dauerkurve der Hintertöss mit den drei Abflussmessungen. Die Abflüsse der ermittelten Dauerkurve liegen um 11 bzw. 13% höher als die Abflüsse der Abflussmessungen.

2770

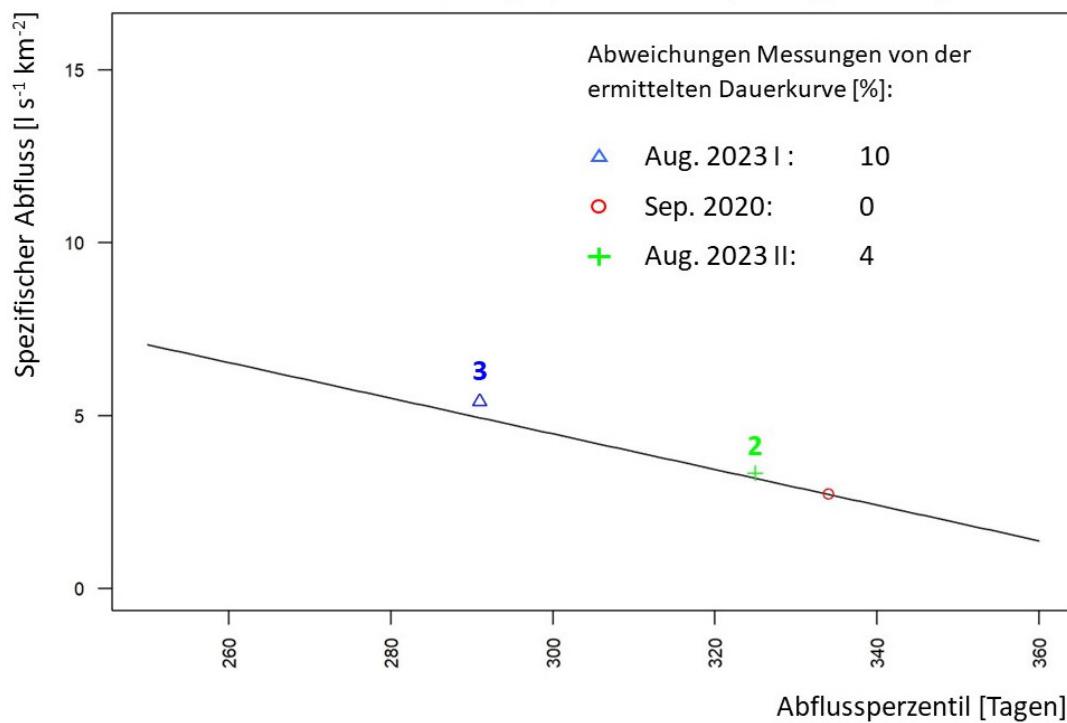


2771

2772 *Abbildung 51: Zur Bestimmung der Perzentile der Abflussmesswerte des Müllibachs wurde das Mittel der Abflussperzentile*

2773 *von Altbach (8) und Surb (145) verwendet, was durch die grünen Verbindungslinien angedeutet wird.*

Dauerkurve von Müllibach (Pfungen) mit den Überprüfungsmessungen 2 und 3



2774

2775 *Abbildung 52: Berechnete Dauerkurve im Müllibach (Pfungen) mit den Abflussmessungen 2 und 3. Die Abflüsse der*

2776 *Dauerkurve liegen um 4 bzw. 10% tiefer als die Abflüsse der Abflussmessungen.*

2777

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 (Schneeschmelze, 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 Tagesabflusspercentil 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
$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-bt}$$

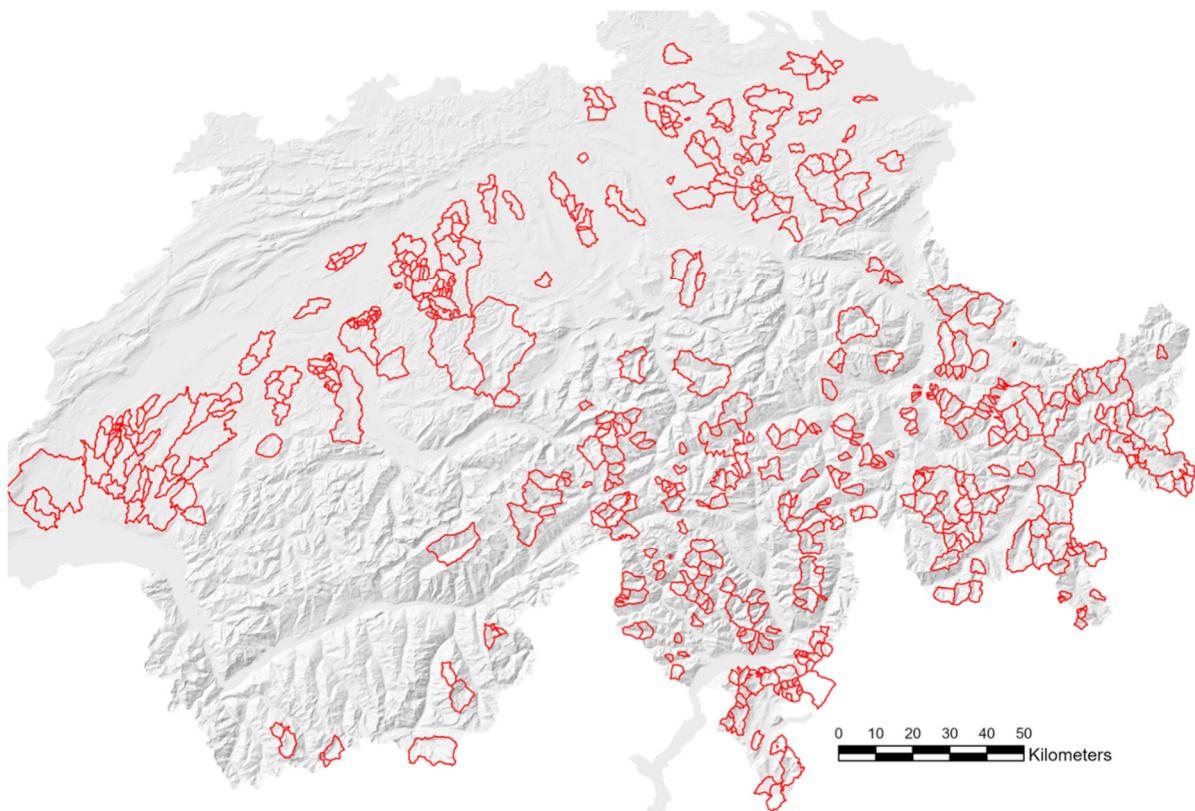
2816

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.

2821 11 Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher

2822 und Faktoren

2823 Mit dem Ziel, die für den Q347-Abfluss massgebenden Speicher und Faktoren zu identifizieren und allenfalls zu
2824 kartieren, wurden eine grosse Abflussmesskampagne durchgeführt, zahlreiche weitere Abflussdaten
2825 zusammengetragen und verschiedene Auswertungen vorgenommen. So konnte ein Datensatz von Abflüssen
2826 von Einzelmessungen, Kurzzeitmessungen und Langzeitmessungen ausgewertet werden. Die Daten stammen
2827 vom Bund, von verschiedenen Kantonen, Gemeinden, Kraftwerken, Privaten und aus eigenen
2828 Abflussmesskampagnen. Insgesamt standen Abflussmessungen im Niedrigwasserbereich von 575
2829 Einzugsgebieten zur Verfügung. Für die Auswertungen wurden die Ergebnisse von 522 Einzugsgebieten
2830 verwendet. Die restlichen Gebiete wurden wegen des Einflusses von Versickerungen, Wasserentnahmen oder -
2831 zugaben oder wegen fehlender Eichmessungen bei der Bestimmung der P/Q-Beziehung verworfen. Die in den
2832 Auswertungen involvierten Einzugsgebiete sind in Abbildung 53 dargestellt. Eine detaillierte Liste der
2833 berücksichtigten Einzugsgebiete mit den Angaben wie Name des Fließgewässers, zeitliche Auflösung der
2834 Abflussmessungen, Methode der Bestimmung des Q347 und Datenbesitzer ist im Anhang ersichtlich (vgl. Tabelle
2835 A1: Teile 1 – 5, im Anhang). Die Abflussdaten und/oder die berechneten Q347-Abflüsse einiger Datenbesitzer
2836 dürfen gemäss einer Vertraulichkeitsvereinbarung nicht veröffentlicht oder an Dritte weitergegeben werden.
2837 Die Angaben dazu sind ebenfalls dieser Tabelle zu entnehmen. Für eine Verwendung solcher nicht öffentlicher
2838 Daten können die Datenbesitzer (vgl. Tabelle A1: Teile 1 – 5, im Anhang) angefragt werden. Die Werte der
2839 Abflusseinzelmessungen oder der Q347 von manchen Einzugsgebieten wurden aus
2840 Umweltverträglichkeitsberichten oder aus hydrologischen Berichten entnommen, welche im Zusammenhang
2841 mit einem Antrag für eine Konzessionerteilung erstellt wurden. Diese Werte sind öffentlich verfügbar. Die
2842 Quellenangaben dieser Berichte sind in Tabelle A1 – Teil 6 im Anhang ersichtlich.
2843



2844

2845 Abbildung 53: Die Abflussdaten von den 522 dargestellten Einzugsgebieten der Schweiz wurden verwendet, um den Einfluss
 2846 von verschiedenen Einzugsgebietsparametern auf das Q347 zu untersuchen.

2847 104 der 522 Einzugsgebiete weisen Abflussmessreihen von 10 Jahren oder mehr auf. In 53 Einzugsgebieten
 2848 waren Daten von Kurzzeitmessreihen vorhanden. In 7 Einzugsgebieten umfassen die Kurzzeitmessreihen
 2849 mindestens 7 Jahre oder mehr. In 36 Einzugsgebieten sind sie kürzer als 7 Jahre. In 4 Einzugsgebieten waren nur
 2850 Q347-Werte vorhanden, die auf der Basis einer Kurzzeitmessreihe berechnet wurden, die kürzer als sieben Jahre
 2851 sind. In diesen Gebieten waren die zugrundeliegenden Abflussmessreihen nicht vorhanden. Für 371
 2852 Einzugsgebiete sind Einzelabflussmessungen vorhanden, die in einer Niedrigwasserperiode erhoben wurden.

2853

2854 Tabelle 16: Liste der Anzahl Einzugsgebiete mit Langzeit-, Kurzzeit- und Einzelmessungen und mit zusätzlicher Angabe zum
 2855 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

2856

2857 **11.1 Vorgehen**

2858 **11.1.1 Eigene Abflussmesskampagnen**

2859 In insgesamt 256 Einzugsgebieten hat M. Margreth mit Hilfe von Mitarbeitenden der Forschungseinheit
2860 Gebirgshydrologie und Massenbewegung des WSL während Niedrigwasserperioden mehrere Abflussmessungen
2861 durchgeführt. In 75 der 256 Einzugsgebiete wurden mindestens zwei, in 37 mindestens drei und in vier
2862 Einzugsgebieten insgesamt vier Abflussmessungen durchgeführt. Zudem wurden auch Abflussmessungen
2863 verwendet, die M. Margreth in Rahmen von früheren Projekten im Auftrag des BAFU und des Kantons Solothurn
2864 durchgeführt hat (Naef und Margreth, 2017). 139 der vom WSL gemessenen Einzugsgebiete liegen in den Alpen,
2865 81 Einzugsgebiete im Mittelland und 36 in tiefergelegenen Einzugsgebieten des Kantons Tessin.

2866 **11.1.2 Bestimmung der Messstandorte**

2867 Die Auswahl der Messstandorte erfolgte primär nach geologischen Kriterien:

2868

2869 a) Mittelland

2870 Im Mittelland lag der Fokus vor allem darauf, die Beiträge von OMM-dominiereten Einzugsgebieten zum Q347
2871 besser einordnen zu können. Aus vorangehenden Forschungsarbeiten war bekannt, dass die OMM-Sequenzen
2872 im zentralen Mittelland die höchsten Q347-Abflüsse im Mittelland liefern (Naef und Margreth, 2017). Mit den
2873 Messungen sollte überprüft werden, ob die OMM im westlichen Mittelland ähnlich hohe Beiträge liefert wie im
2874 zentralen Mittelland. Zudem waren auch die USM-dominiereten Einzugsgebiete im westlichen Mittelland Teil der
2875 Untersuchungen.

2876

2877 b) Alpen

2878 In den alpinen Einzugsgebieten war, vor Beginn dieser Arbeit, der Zusammenhang zwischen dem lithologischen
2879 Aufbau und den Niedrigwasserabflüssen weniger gut bekannt als im Mittelland (Naef und Margreth, 2017).
2880 Deshalb wurden zahlreiche Einzugsgebiete mit unterschiedlicher lithologischer Zusammensetzung und in
2881 unterschiedlichen tektonischen Decken in den Kantonen Graubünden, Tessin, Uri, Bern und Wallis untersucht.
2882 Im Kanton Wallis sind Einzugsgebiete mit einem natürlichen Abflussregime selten. Ausserhalb des Aarmassivs
2883 sind die Berner Alpen vor allem durch Kalksteine aufgebaut, die von Verkarstung betroffen sein können. Deshalb
2884 lag der Schwerpunkt der Untersuchungen in den Bündner, Tessiner und Urner Alpen. Von besonderem Interesse
2885 waren dabei folgende Fragestellungen:

2886

- 2887 - Zeigen sich massgebliche Unterschiede im Q347 zwischen kristallinen Gesteinen und
2888 Sedimentgesteinen?
- 2889 - Welche Unterschiede im Q347 zeigen sich zwischen Graniten und Gneisen?
- 2890 - 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 spröd
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

2926 basiert. Der Quotient $Q347\text{Ref}_{2011-2022} / Q347\text{Ref}_{7\text{Jahre}}$ dient als Faktor, um das Q347, das auf einer 7-
2927 jährigen Messreihe basiert, auf das Q347 der Standardperiode umzurechnen (vgl. Zeile 2 in Tabelle 16,
2928 Kürzel DK1).

2929

$$2930 Q347\text{Unt}_{2011-2022} = \text{Mittel} \sum_{n=1}^n \left(\frac{Q347\text{Ref}_{2011-2022}}{Q347\text{Ref}_{7\text{Jahre}}} \right) \cdot Q347\text{Unt}_{7\text{Jahre}} \quad (5)$$

2931

2932 c) Dasselbe Verfahren wurde für Einzugsgebiete verwendet, in denen zwar ein Q347 einer
2933 Kurzzeitmessreihe vorhanden ist, aber Abflussdaten fehlen (Zeile 4 in Tabelle 16, Kürzel DK1).

2934

2935 d) Für alle Einzugsgebiete, in denen die Kurzzeitmessreihen kürzer als 7 Jahre sind oder nur vereinzelte
2936 Abflussmessungen vorhanden sind (Zeilen 3 und 5 in Tabelle 16), wurde das Q347 mit dem neu
2937 entwickelten Verfahren ermittelt, das in Kapitel 9.2 beschrieben ist (Kürzel EM für Einzelmessung). Für
2938 die Einzugsgebiete mit Kurzzeitmessreihen, die von Kraftwerksgesellschaften oder anderen Privaten
2939 stammten, wurden in diesem Zusammenhang diejenigen Abflusseinzelmessungen verwendet, die für
2940 die Eichung der P/Q-Beziehungen durchgeführt wurden.

2941

2942 Anhand des Kürzels kann in Tabelle A1 (Anhang) für jedes der 522 Einzugsgebiete in Erfahrung gebracht
2943 werden, welches der oben verwendeten Verfahren zur Bestimmung des Q347 angewendet wurde.

2945 11.3 Umgang mit verschachtelten Einzugsgebieten

2946 Viele der 522 Einzugsgebiete sind verschachtelt. Für die meisten verschachtelten Einzugsgebiete wurden
2947 Abflussmessungen am gleichen Tag durchgeführt. Der Abfluss des kleineren Einzugsgebiets wurde von dem des
2948 grösseren Einzugsgebiets abgezogen, um den Abfluss des Zwischengebiets zu ermitteln. Basierend auf dem
2949 Abfluss des Zwischengebiets wurde das Q347 des Zwischengebiets berechnet. In Fällen, in denen die
2950 Abflussmessung nicht am selben Tag stattfand oder Abflussmessreihen mit einer Dauer von mehr als sieben
2951 Jahren einbezogen wurden, wurde zunächst das Q347 des grössten Gebiets bestimmt. Anschliessend wurden
2952 die Q347 der darin verschachtelten Einzugsgebiete anhand der Einzelmessung ermittelt und vom Q347 des
2953 übergeordneten Einzugsgebiets subtrahiert.

2954 11.4 Umgang mit Wasserentnahmen von Kraftwerken

2955 Wird in einem Einzugsgebiet Wasser für die Stromproduktion entnommen, wurde anhand der Restwasserkarte
2956 Schweiz (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2007) abgeklärt, ob eine gewisse Menge an Restwasser vorgeschrieben
2957 ist oder nicht. Wird keine Restwassermenge vorgeschrieben, wurde angenommen, dass die zuständige
2958 Kraftwerksfirma kein Restwasser im Bach belässt. In solchen Fällen wurde zur Berechnung des spezifischen

2959 Abflusses ($\text{I s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) 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 [$\text{I s}^{-1} \text{ km}^{-2}$]
	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 [m ü.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

11.5.1 Umgang mit Beiträgen von Gletschern und Permafrostböden im Winter

2975 Da die Beiträge von Gletschern und von Permafrostböden im Winter den Einfluss von geologischen
2976 Gebietsparametern auf das Q347 stark verzerrn 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.

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 Festgesteinssysteme 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 Durchlässigkeitssklassen 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 $6.2 l s^{-1} km^{-2}$, 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 $1 l s^{-1} km^{-2}$. Mit fast $30 l s^{-1} km^{-2}$ ist das maximale
3030 Q347 in den Alpen am höchsten. Am niedrigsten ist das maximale Q347 in den Voralpen ($10.7 l s^{-1} km^{-2}$). Der
3031 Q347-Durchschnittswert ist in den Alpen mit $7.7 l s^{-1} km^{-2}$ fast doppelt so hoch wie im Mittelland ($4.1 l s^{-1} km^{-2}$).
3032 Mehr als ein Viertel der im Mittelland untersuchten Einzugsgebiete weisen ein Q347 von weniger als $2 l s^{-1} km^{-2}$
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.

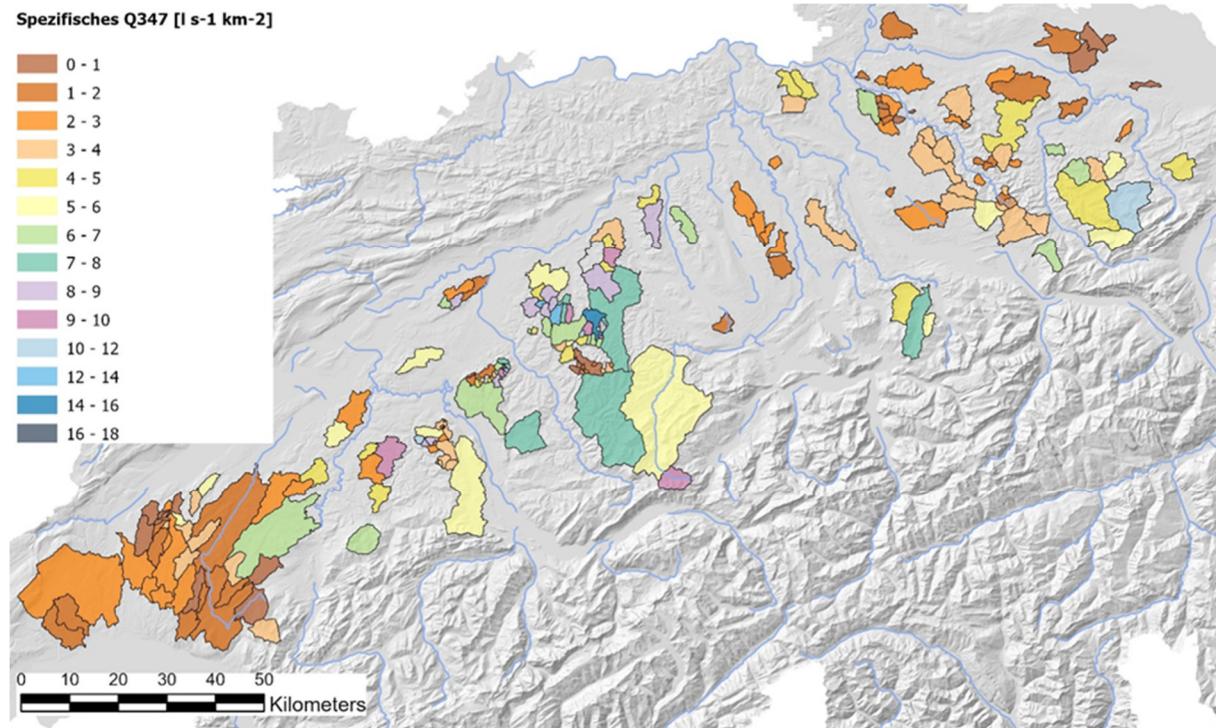
3036 *Tabelle 18: Q347-Statistik in den Schweizer Grossregionen. Q347 in $l^1 km^{-2}$.*

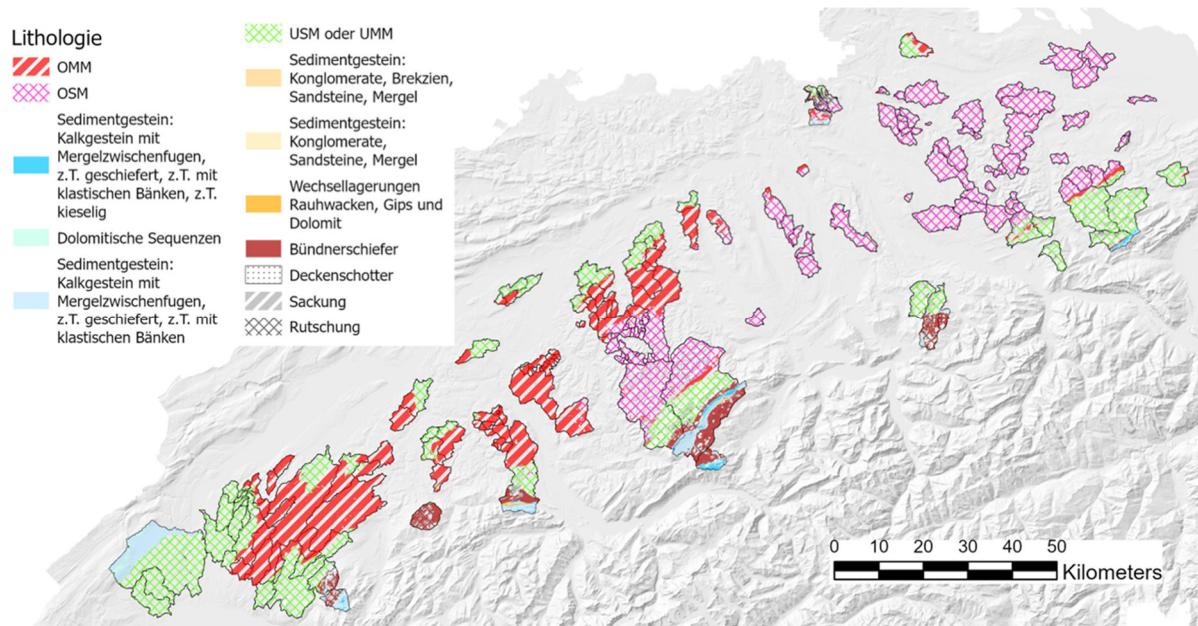
Region	Anzahl Einzugsgebiete	Q347min	Q347max	Q347-Durchschnitt	Q347-Standardabweichung	Prozentsatz der Gebiete mit $Q347 < 2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$
Mittelland	196	0.2	16.2	4.1	3.1	27
Voralpen	17	0.9	10.7	5.4	2	6
Alpen	262	0.5	29.5	7.7	4.5	5
Tiefland und Voralpen im Tessin	47	0.5	21.6	6.6	4.7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

3037

3038 11.6.1 Mittelland und Voralpen

3039 Die Q347-Werte im Mittelland zeigen ein auffälliges grossräumiges Muster (Abbildung 54). Die tiefsten Q347
 3040 sind im Südwesten (Kt VD, Kt FR) und im Nordosten (Kt TG, Kt SG) gemessen worden. Etwas höher sind sie im
 3041 Raum Kt ZH und im östlichen Kt AG. Die höchsten Q347 wurden im zentralen Mittelland, d.h. im westlichen Kt
 3042 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.
 3043 Dort sind nur sehr vereinzelt sehr tiefe Q347 zu beobachten.
 3044 Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der Molasse-Einheiten und dem spezifischen Q347 im Detail
 3045 untersucht. Die Obere Meeressmolasse (OMM) tritt vor allem im zentralen und im westlichen Mittelland auf
 3046 (Abbildung 55). Die Obere Süßwassermolasse (OSM) ist im zentralen und im östlichen Mittelland verbreitet. Die
 3047 Untere Süßwassermolasse (USM) tritt am südwestlichen Rand des Mittellands und in den Voralpen auf. Einzelne
 3048 Vorkommnisse lassen sich auch im nördlichen zentralen Mittelland erkennen.





3052

3053 *Abbildung 55: Lithologischer Aufbau des Festgestein im Mittelland und in den Voralpen.*

3054 Um die Unterschiede zwischen den Beiträgen der OMM, USM/UMM und der OSM herauszuarbeiten, wurden
 3055 drei Datensätze mit Einzugsgebieten extrahiert, die jeweils 80% oder mehr Flächenanteil der jeweiligen
 3056 Molasseeinheiten enthalten. Die OMM-Gebiete weisen dabei im Durchschnitt die höchsten Q347-Werte von
 3057 $6.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf (Tabelle 19). In den OSM- und USM/UMM-Gebieten sind die durchschnittlichen Q347-Werte
 3058 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
 3059 Molasseeinheiten sind gross.

3060

3061 *Tabelle 19: Minimales, maximales, durchschnittliches Q347 und Standardabweichung des Q347 von allen
 3062 Untersuchungsgebieten mit 80% oder mehr Flächenanteil an OMM, USM/UMM oder OSM an der Gesamtfläche des
 3063 Einzugsgebiets.*

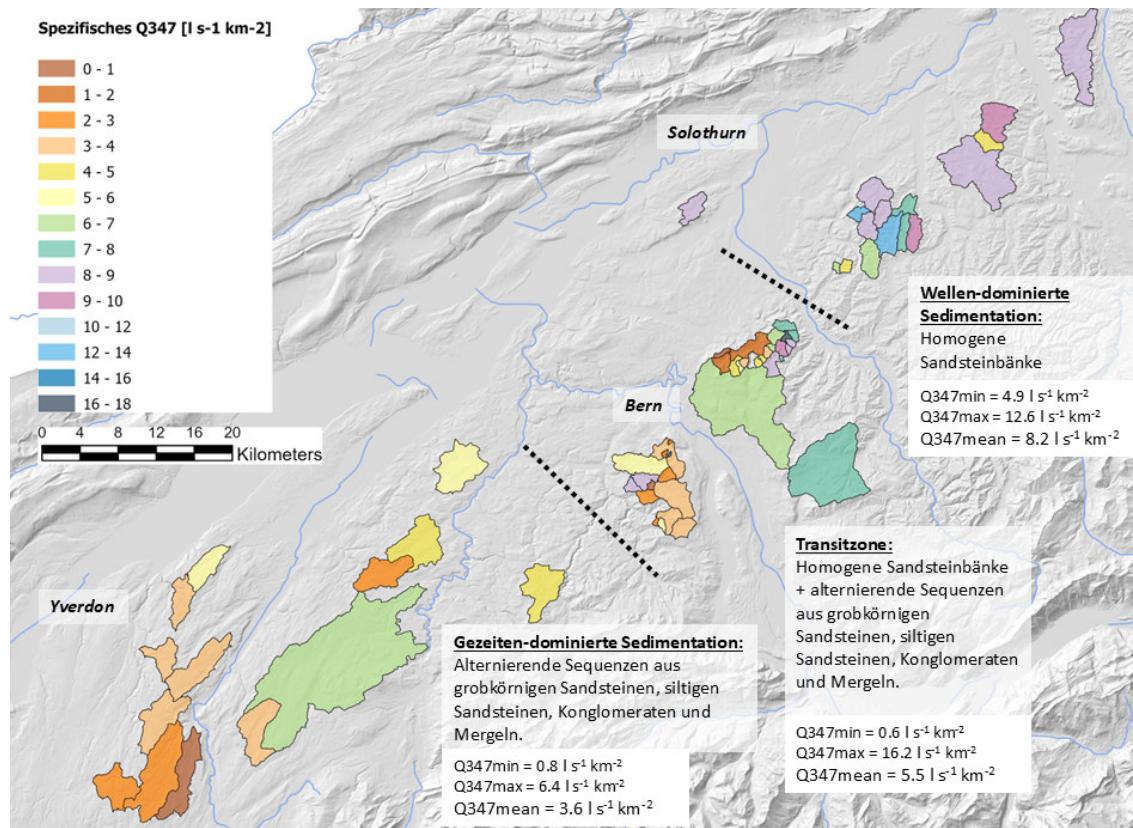
Molasseformation	Q347min	Q347max	Q347-Durchschnitt	Q347-Standardabweichung
OMM	0.6	16.2	6.2	4.3
USM / UMM	0.3	10.7	2.7	2.4
OSM	0.2	10	3	2.3

3064

a) Obere Meeresmolasse (OMM)

3065 Dass die OMM-dominierten Einzugsgebiete des zentralen Mittellands hohe Q347 aufweisen, ist bekannt (Naef
 3066 und Margreth, 2017). Die Ergebnisse der Abflussmessungen zeigen, dass sich die OMM im Berner Mittelland und
 3067 im Westlichen Mittelland anders verhält als im Zentralen Mittelland. Aufgrund der spezifischen Q347 lassen sich
 3068 drei Gruppen erkennen (Abbildung 56). Im Zentralen Mittelland dominieren OMM-Einzugsgebiete mit hohem
 3069 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
 3070 Einzugsgebieten weisen Q347-Werte von weniger als $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ auf. Eine Studie zum litho-stratigraphischen
 3071

3072 Aufbau der OMM zeigt, dass die OMM in dieser Region aus homogenen Sandsteinbänken besteht, die nur
3073 wenige Mergelschichten enthält (Garefalakis und Schlunegger, 2019). Vor 17 – 20 Mio. Jahren herrschte im
3074 Mittelland ein Meer, was zur Ablagerung von marinen Sedimenten führte, die später durch die Diagenese zu
3075 Sandsteinen verfestigt wurden. Im Gebiet, wo sich das Meer ausbreitete, herrschten unterschiedliche
3076 Ablagerungsmilieus. Im Zentralen Mittelland dominierte ein Wellen-dominiertes Ablagerungsmilieu. Dadurch
3077 wurden mächtige Sandsteinbänke mit homogenen Korngrößen abgelagert (Garefalakis und Schlunegger, 2019).
3078 Weil sie nur wenige Mergelschichten enthalten, konnte sich bis in tiefe Schichten eine Verwitterungsschicht
3079 bilden, in der der Zement, der die Sandsteinkörner verbindet, teilweise gelöst wurde. Dies erhöht die
3080 Speicherkapazität im Vergleich zur OSM und zur USM massgeblich. Die Sandsteinbänke eignen sich daher sehr
3081 gut, um grosse Wasservolumina über mehrere Monate oder gar mehrere Jahre zu speichern.
3082 Im Westlichen Mittelland herrschten hingegen eher Gezeiten-dominierte Ablagerungsmilieus vor (Garefalakis
3083 und Schlunegger, 2019), wo Sequenzen aus grobkörnigen Sandsteinen, siltigen Sandsteinen, Konglomeraten und
3084 Mergeln alternieren. Durch die Zunahme des Anteils feinkörniger Sedimente wird die Infiltrationskapazität
3085 verringert, was eine plausible Erklärung für die im Vergleich zur OMM des Zentralen Mittellands geringeren
3086 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
3087 des Q347 von Nordosten nach Südwesten ersichtlich.
3088 Die Region rund um die Stadt Bern stellt eine Übergangszone dar, wo Wellen-dominierte und Gezeiten-
3089 dominierte Ablagerungsmilieus auftraten. Dort variieren die Q347 stark (0.6 und $16.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Das
3090 durchschnittliche Q347 liegt tiefer als im Zentralen, aber höher als im Westlichen Mittelland (Abbildung 56).
3091 Aus OMM aufgebaute Einzugsgebiete, die in der letzten Eiszeit eisfrei waren, weisen fast nur hohe spezifische
3092 Q347-Abflüsse auf (Abbildung 57). In diesen kommen keine Moränen aus der Würmeiszeit vor. Dort, wo
3093 hingegen Gletscher lagen, liegen heute Moränen. In solchen Einzugsgebieten liegen die Q347-Abflüsse tiefer
3094 (Abbildung 57). Es sind aber einige Ausnahmen zu erkennen. Die lineare Regression zwischen Q347 und
3095 undurchlässigen und mässig durchlässigen Ablagerungen basierend auf Q347-Abflüssen von 69 Einzugsgebieten,
3096 die massgeblich durch OMM oder Deckenschotter aufgebaut werden, zeigt keinen Zusammenhang ($R^2 = -0.06$,
3097 Tabelle 22). Dies deutet darauf hin, dass die Unterschiede im Q347 zwischen Zentralem und Westlichem
3098 Mittelland durch den lithologischen Aufbau der OMM erklärt werden muss. Die undurchlässigen oder mässig
3099 durchlässigen Quartärablagerungen haben keinen wesentlichen Einfluss.
3100

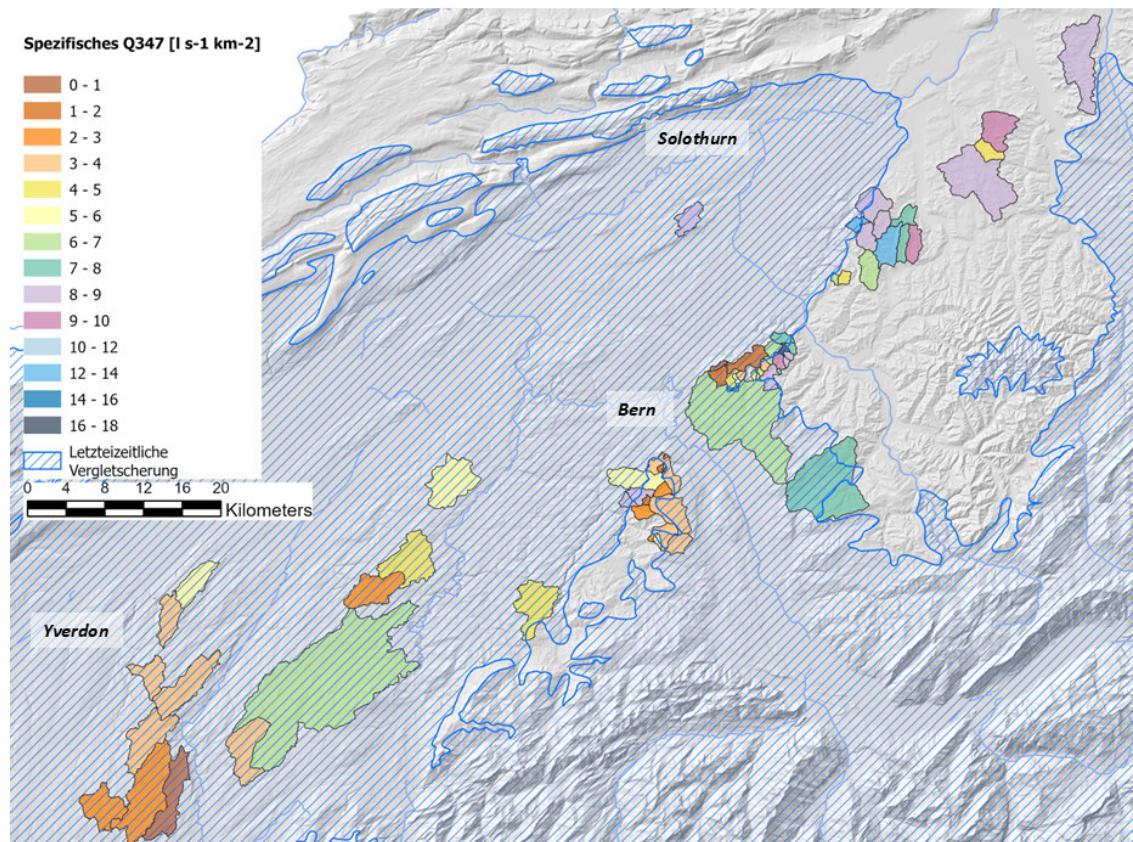


3101

3102

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

3103



3104

3105
3106

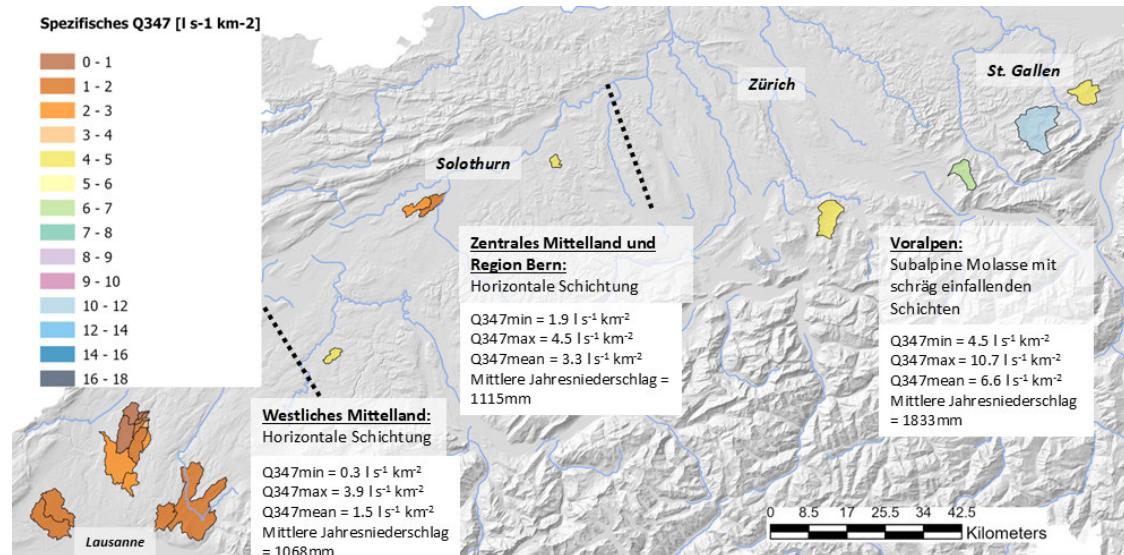
Abbildung 57: Q347-Abflüsse in Klassen der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an OMM, dargestellt mit den Grenzen der letztezeitlichen Vergletscherung.

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 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 variieren 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 $Q < Q290$ 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.



3140

3141 Abbildung 58: Q347-Abflüsse der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an USM oder UMM. Die Gebiete lassen sich
3142 räumlich in drei Gruppen einteilen. Im westlichen Mittelland dominieren geringe Q347 (Durchschnitt = 1.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). Im
3143 zentralen Mittelland und in der Region Bern sind sie etwas höher (Durchschnitt = 3.3 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). In den Voralpen liegen die
3144 Q347 im Durchschnitt doppelt so hoch wie im Zentralen Mittelland (Durchschnitt = 6.6 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$).

3145

3146 11.6.3 Obere Süsswassermolasse (OSM)

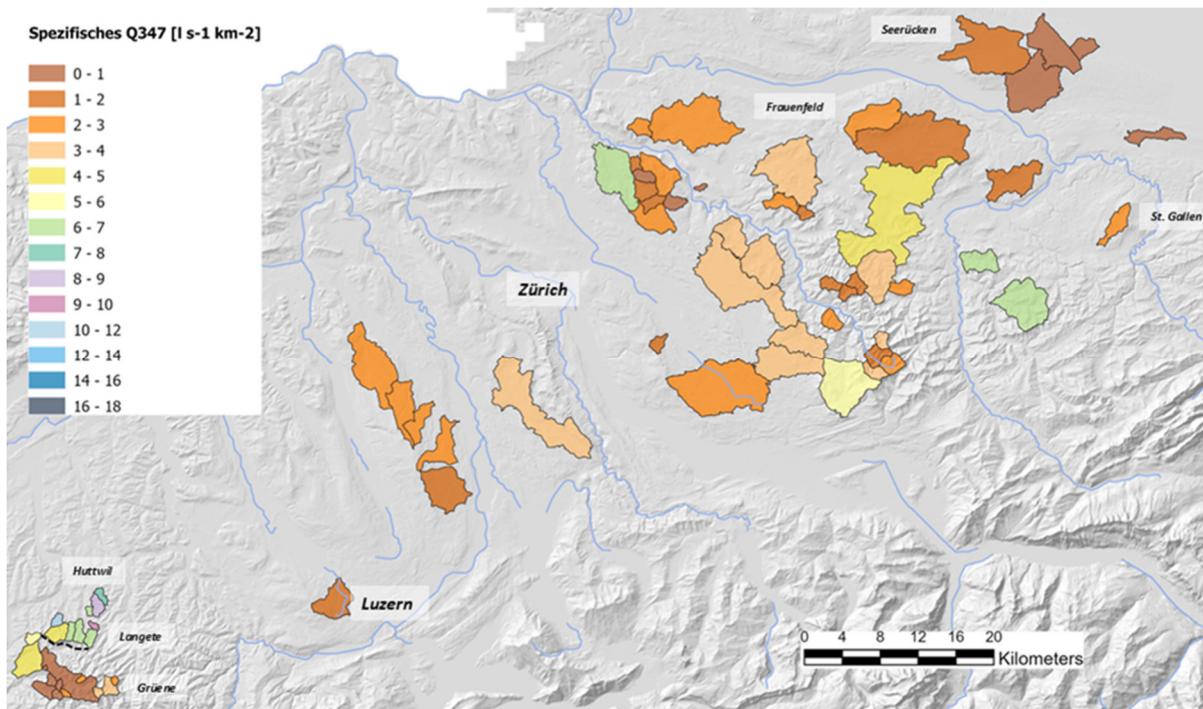
3147 Insgesamt 74 Einzugsgebiete sind zu 80% oder mehr aus Oberer Süsswassermolasse (OSM) aufgebaut. Abbildung
3148 59 zeigt die spezifischen Abflüsse der OSM-dominierten Einzugsgebiete. Die OSM ist lithologisch sehr vielfältig.
3149 Die 74 Einzugsgebiete wurden in die vier folgenden lithologischen Klassen eingeteilt (Abbildung 43):

3150

- 3151 1. Wechsellagerungen Nagelfluh, Mergel
- 3152 2. Wechsellagerungen Nagelfluh, Sandsteine, Mergel
- 3153 3. Wechsellagerungen Sandsteine, Mergel
- 3154 4. Wechsellagerungen Sandsteine, Mergel auf dem Seerücken (TG)

3155

3156



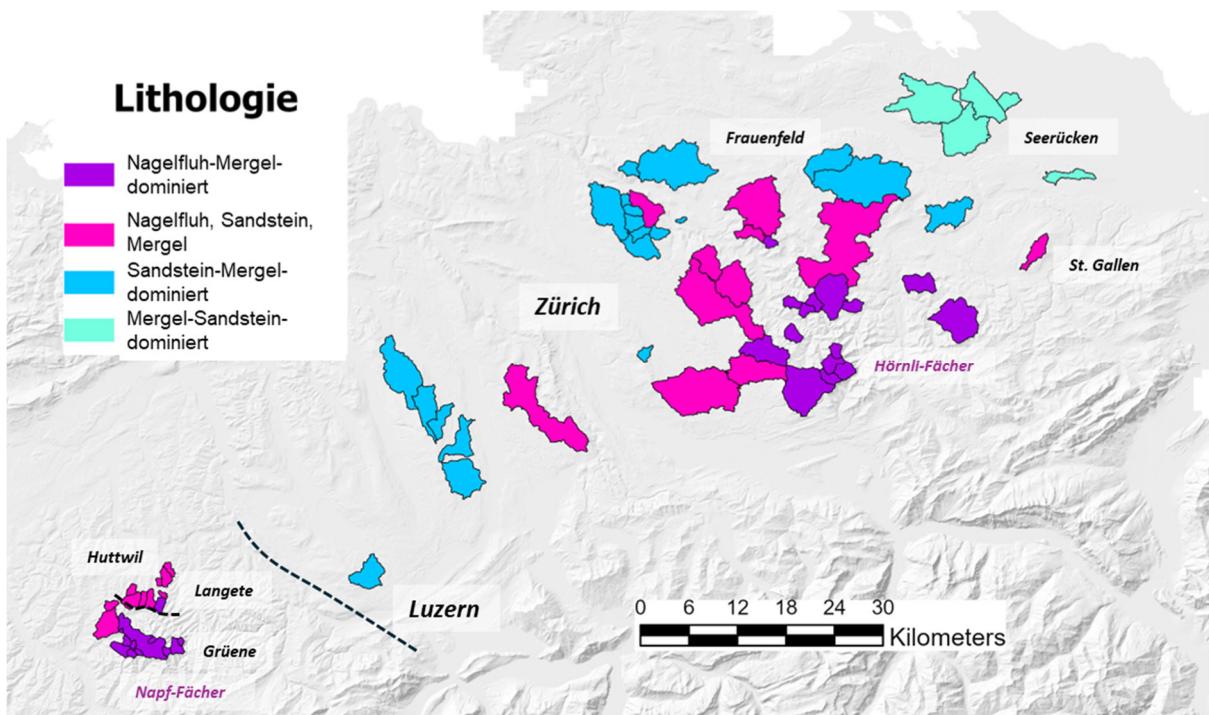
3157

3158 *Abbildung 59: Q347-Abflüsse der Einzugsgebiete mit 80%-Anteil oder mehr an OSM.*

3159

3160 Die Kantone Aargau, Zürich, Thurgau und St. Gallen sind komplett durch Grundwasserkarten abgedeckt. In
 3161 diesen Gebieten konnten zusätzliche Angaben zu den in Kapitel 6.4 abgeleiteten spezifischen
 3162 Grundwasservolumina bei der Auswertung der Q347-Abflüsse verwendet werden. Auf der Grundwasserkarte
 3163 des Kantons Bern fehlen bei manchen Grundwasserkörpern Angaben zu den mittleren Mächtigkeiten, weshalb
 3164 auf eine Verwendung der Grundwasserkarte im Napf-Fächer verzichtet wurde. Der lithologische Aufbau der
 3165 OSM-dominierten Gebiete unterscheidet sich stark (Abbildung 60). Es existieren Einzugsgebiete, die durch
 3166 Wechsellagerungen von Nagelfluh und Mergeln dominiert werden. Sie liegen v.a. in der Region des Töss-
 3167 Einzugsgebiets und weiter östlich und im Napfgebiet. Einzugsgebiete, deren Untergrund aus Wechsellagerungen
 3168 von Sandsteinen und Mergeln aufgebaut wird, liegen im nördlichen Kanton Zürich, im Kanton Thurgau und im
 3169 Kanton Aargau. Sie liegen etwas weiter entfernt vom Alpenhauptkamm. Gebiete mit einem gemischten Aufbau
 3170 aus Nagelfluh- und Sandsteinschichten liegen zwischen den Regionen, in denen Sandstein-Mergel-Sequenzen
 3171 und Nagelfluh-Mergel-Abfolgen dominieren. Die Einzugsgebiete in der OSM auf dem Seerücken südlich des
 3172 Bodensees werden einer separaten Kategorie zugeteilt, weil sie sehr tiefe Q347 aufweisen. Die Gebiete westlich
 3173 von Luzern gehören zum Ablagerungsraum des Napf-Fächers, diejenigen östlich davon zum Hörnli-Fächer. Das
 3174 sind zwei verschiedene Ablagerungssysteme, weshalb sie hier auch separat behandelt werden.

3175



3176

3177 Abbildung 60: Lithologischer Aufbau der 74 OSM-Einzugsgebiete

3178

3179 Für die vier lithologischen Gruppen wurden die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Q347 in Tabelle
 3180 20 aufgelistet. Für die Gebiete mit Grundwasserkarten wurde jeweils eine Gruppe mit und eine ohne grössere
 3181 Grundwasservolumina definiert. Als Gebiete mit relevanten Grundwasservolumina wurden alle Einzugsgebiete
 3182 klassifiziert, deren gesamte Grundwasservolumina grösser als $500'000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ sind. Ebenfalls als relevante
 3183 Grundwasservolumina gelten solche, die potenziell zu einem Teil vom Fließgewässer selbst gespeist werden
 3184 und grösser als $100'000 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ sind (vgl. dazu auch Kapitel 6.4).

3185

3186 *Nagelfluh-Mergel-Wechsellagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 1):*

3187 In den Nagelfluh-dominierten Einzugsgebieten im Napf-Fächer variieren die Q347 zwischen 0.2 und $3.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.
 3188 Der Durchschnitt beträgt $1.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Tabelle 20). Das durchschnittliche Q347 der Einzugsgebiete im Hörnli-
 3189 Fächer ohne Grundwasseraquifere ist mit $2.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ fast doppelt so hoch wie dasjenige im Napf-Fächer. Es
 3190 sind vor allem die beiden Einzugsgebiete Jona (Pilgersteg) und Aachbach (Mogelsberg), die
 3191 überdurchschnittliche Werte aufweisen. Ohne diese liegen das maximale Q347 bei $3.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und der
 3192 Durchschnitt bei $2.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Die Q347 der Nagelfluh-dominierten Einzugsgebiete im Hörnli-Fächer liegen
 3193 insgesamt etwas höher als die im Napf-Fächer. Die Q347 der Nagelfluh-Gebiete mit grösseren
 3194 Schottergrundwasserspeichern liegen im Durchschnitt höher als diejenigen in den Gebieten ohne grössere
 3195 Grundwasserkörper.

3196

3197 *Nagelfluh-Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 2):*

3198 In den Gebieten, die sowohl aus Nagelfluh-Abfolgen als auch aus Sandstein-Sequenzen des Hörnli-Fächers
 3199 aufgebaut sind, liegen die minimalen Q347 in einem etwas höheren Bereich als in Regionen, in denen der

3200 geologische Untergrund weitgehend aus Nagelfluh besteht (Tabelle 20). Das gilt auch für diejenigen Gebiete
3201 ohne grössere Grundwasserkörper. Fast alle Gebiete dieser Gruppe enthalten grössere Grundwasserkörper. Die
3202 durchschnittlichen Q347-Abflüsse liegen aber etwas tiefer als bei den Nagelfluh-Gebieten des Hörnli-Fächers.
3203 Die Nagelfluh-Sandstein-Gebiete im Napf-Fächer weisen alle ausserordentlich hohe Q347-Abflüsse auf.
3204 (Durchschnitt = $7.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Diese Gebiete liegen alle im Einzugsgebiet der Langen (Huttwil). Der Grund dafür
3205 liegt wohl darin, dass der Mergelgehalt dieser Schichten als „untergeordnet“ eingestuft wird (Swisstopo, 2022);
3206 denn Mergelschichten gelten als infiltrationshemmend.

3207

3208 *Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen (Dauerkurvengruppe OSM 3):*

3209 Die Einzugsgebiete der OSM mit Sandstein-Mergel-Wechsellagerungen liegen alle im Gebiet zwischen Luzern,
3210 Aargau, Zürich und St. Gallen. Die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Q347 der Gebiete ohne
3211 grössere Grundwasserkörper sind tiefer als diejenigen in den Nagelfluh-Gebieten und in denjenigen Regionen,
3212 in denen sowohl Sandstein-Sequenzen als auch Nagelfluh-Abfolgen vorkommen (Tabelle 20). Die minimalen,
3213 maximalen und durchschnittlichen Q347 der Einzugsgebiete mit grösseren Grundwasserkörper sind mindestens
3214 doppelt so hoch wie die Q347 in den Einzugsgebieten ohne. Diese Angabe ist besser abgestützt als bei den
3215 Nagelfluh-dominierten und gemischt aufgebauten Gebieten, weil mehr Einzugsgebiete vorhanden sind. Es zeigt
3216 sich also, dass die Schottgrundwasservorkommen mit grossen Volumina auf tiefe Q347-Abflüsse einen Q347-
3217 erhöhenden Effekt haben können. Das zeigt auch Abbildung 6 und wird zudem von anderen Autoren bestätigt
3218 (Carlier et al., 2018; Wirth et al., 2020).

3219

3220 *Mergel-Sandstein-Wechsellagerungen auf dem Seerücken (TG, Dauerkurvengruppe OSM 4):*

3221 Die tiefsten Q347 wurden auf dem Seerücken im Kanton Thurgau beobachtet. Sie werden durch die
3222 Dauerkurvengruppe 4 repräsentiert (Kapitel 8.3.1, Abbildung 5). Ähnlich tiefe Q347 wurden auch in der USM des
3223 Kantons Waadt verzeichnet, jedoch kommen sie dort nur vereinzelt vor. Auf dem Seerücken scheinen die Q347
3224 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
3225 $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ und das durchschnittliche Q347 $0.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (Tabelle 20). Die Aach in Salmsach wurde nicht
3226 berücksichtigt, weil deren Abfluss durch die Zuleitung von Seewasser für die Gemeinde Amriswil und weitere
3227 Gemeinden stark verfälscht wird. Die Zuleitungsmengen konnten nicht ermittelt werden, weil die Ermittlung der
3228 Zuleitungsmengen gemäss der Gemeindeverwaltung Amriswil bei Niedrigwasserabflüssen sehr aufwendig und
3229 kompliziert sei.

3230 Folgende Faktoren könnten für die tiefen Q347 verantwortlich sein:

3231

- 3232 - Undurchlässige Moräne: Die betreffenden Einzugsgebiete sind zu einem sehr hohen Flächenanteil
3233 durch eine mächtige Moräne bedeckt. Gemäss den Erfahrungen von M. Margreth aus einem
3234 Bodenkartierungsprojekt auf dem Seerücken sind die Böden tonreich. Das könnte ein Hinweis darauf
3235 sein, dass auch die Moränen eine geringere Durchlässigkeit aufweisen als in anderen Gebieten des
3236 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	Durch-schnitt 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). R^2 -
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 R^2 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 R^2 , 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 Süßwassermolasse 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 Quartärablagerungen 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 Quartäralablagerungen 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 Quartärablagerungen 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 Einzugs-gebiete	Quartär mässig durchlässig	Quartär mässig durchlässig und undurchlässig	Quartär hochdurch-lässig	Mittlere Neigung	Mittlerer Jahres-nieder-schlag	Wald	Gerinne-dichte
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	0.99	-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

334

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 Einzugs-gebiete	Quartär mässig durchlässig	Quartär mässig durchlässig und undurchlässig	Quartär hochdurch-lässig	Mittlere Neigung	Mittlerer Jahres-nieder-schlag	Wald	Gerinne-dichte
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)

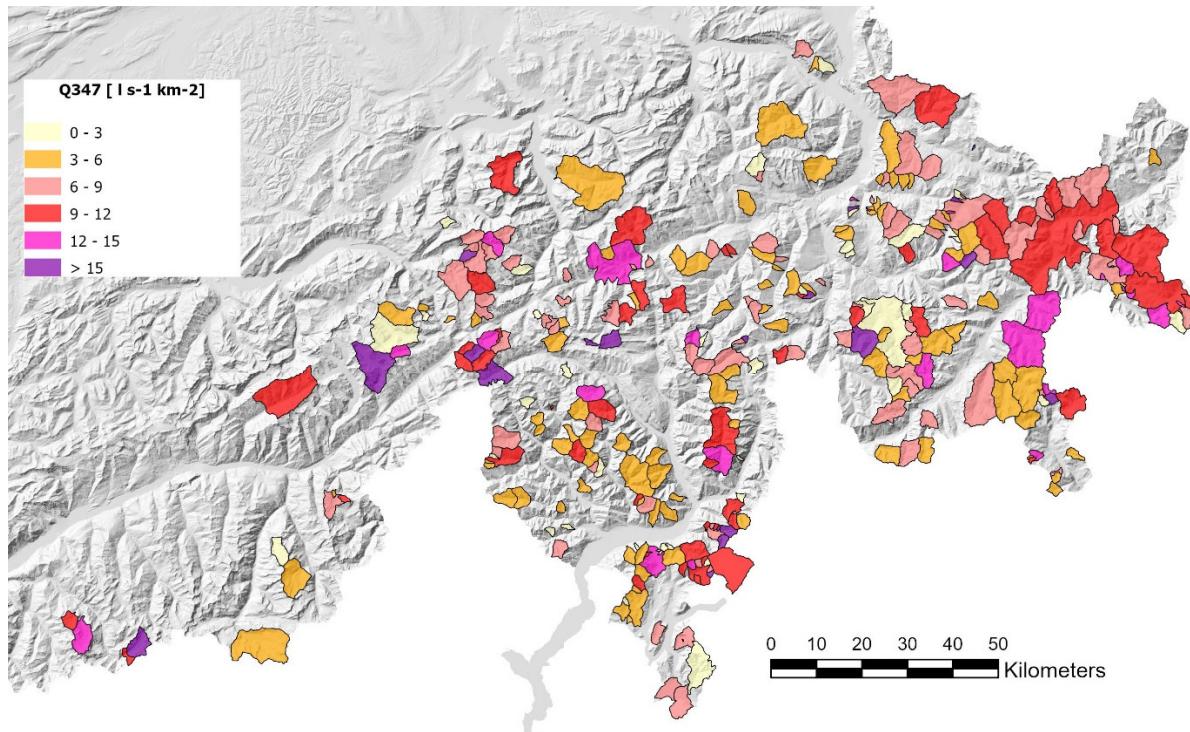
3340

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

3346 von jeweils drei Einheiten zusammengefasst sind, lassen sich Gruppen von Einzugsgebieten erkennen, in denen
3347 die Q347-Klassen gleich oder ähnlich sind (vgl. Abbildung 61). Die Einzugsgebiete im Raum Unterengadin,
3348 Nationalpark und Münstertal sind zum Beispiel in einer ähnlichen Q347-Klasse, ebenso diejenigen im
3349 Berninagebiet oder diejenigen in der Region Valle Verzasca, Valle Maggia, Onsernone. Im Südlichen Tessin sind
3350 drei Regionen zu erkennen. Im Westen können eher tiefe, im Osten eher hohe und im Süden mittlere Q347
3351 beobachtet werden. In den Zentralalpen (Aletsch-, Grimsel, Gotthardgebiet) variieren die Q347 recht stark.
3352 Tendenziell dominieren jedoch die mittleren bis hohen Werte. Anhand von unterschiedlichen statistischen
3353 Auswertungen wurde versucht, die Faktoren zu identifizieren, die diese Muster verursachen. Untersucht wurde
3354 der Zusammenhang zwischen Q347 und Faktoren wie den tektonischen Einheiten, den Gesteinstypen und den
3355 quartären Ablagerungen. Im Folgenden werden Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Auswertungen
3356 beschrieben.

3357



3358

3359 *Abbildung 61: Karte der Q347-Werte für die Alpen und das südliche Tessin. Die Q347-Werte wurden mit Einzelmessungen,*
3360 *Kurz- und Langzeitmessreihen ermittelt.*

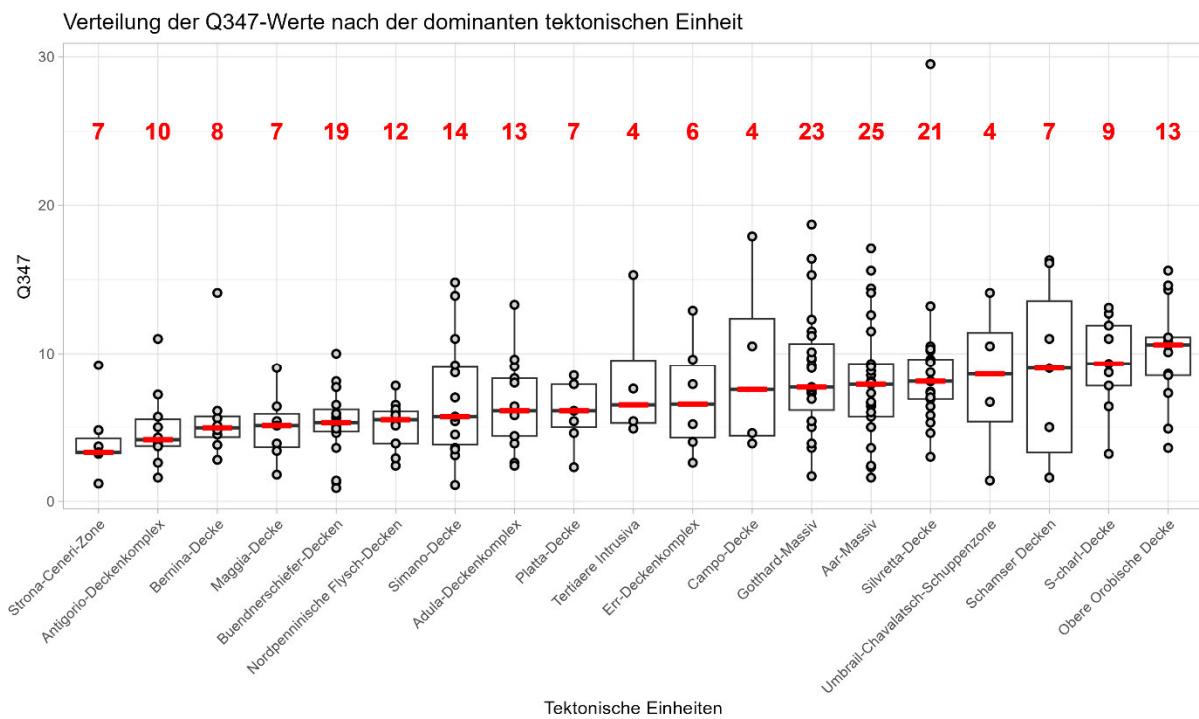
3361 a) Zusammenhang zwischen Q347 und den tektonischen Einheiten

3362 Boxplots zeigen die Streuung der Q347-Werte innerhalb der tektonischen Einheiten (Abbildung 62). Es wurden
3363 nur diejenigen tektonischen Einheiten berücksichtigt, in denen mindestens drei Einzugsgebiete verfügbar sind.
3364 Rund ein Drittel der 311 in den Alpen und im Tessin verfügbaren Einzugsgebiete treten entweder einzeln oder
3365 zu zweit in derselben tektonischen Einheit auf. Daher wurden für die weiteren Auswertungen nur 213
3366 Einzugsgebiete verwendet.

3367 Auffallend tiefe Q347-Median-Werte treten in den tektonischen Einheiten Strona-Ceneri-Zone, Antigorio-
3368 Deckenkomplex oder Maggia-Decke auf, die im Tessin liegen (vgl. Abbildung 63). In den Bündnerschiefern, den

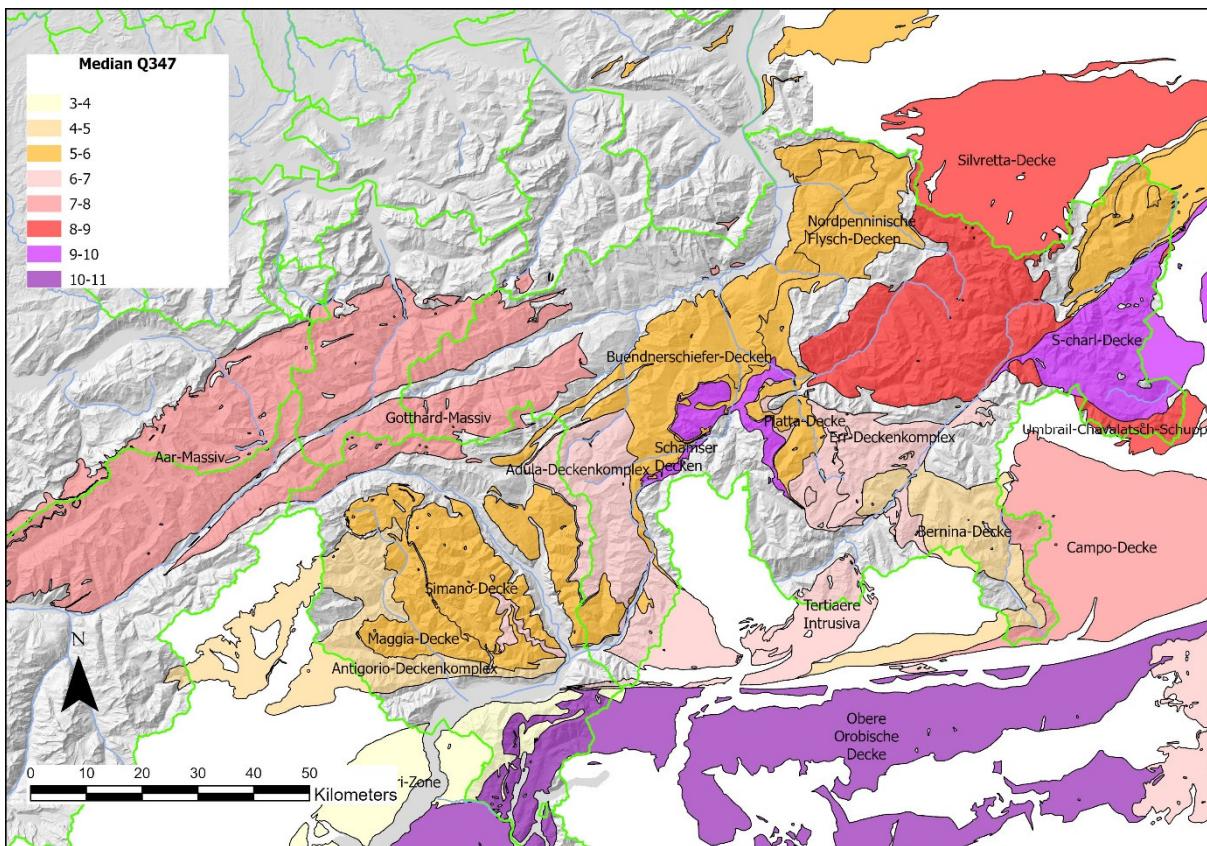
3369 Nordpenninischen Flyschdecken und in der Bernina-Decke sind die Q347-Mediane ebenfalls tief. Mittlere Q347-
 3370 Mediane sind im Gotthardmassiv, im Aarmassiv, im Err-Deckenkomplex, in der Platta-Decke, in der Campo-
 3371 Decke, im Adula-Deckenkomplex und in den Tertiären Intrusiva zu beobachten. 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.



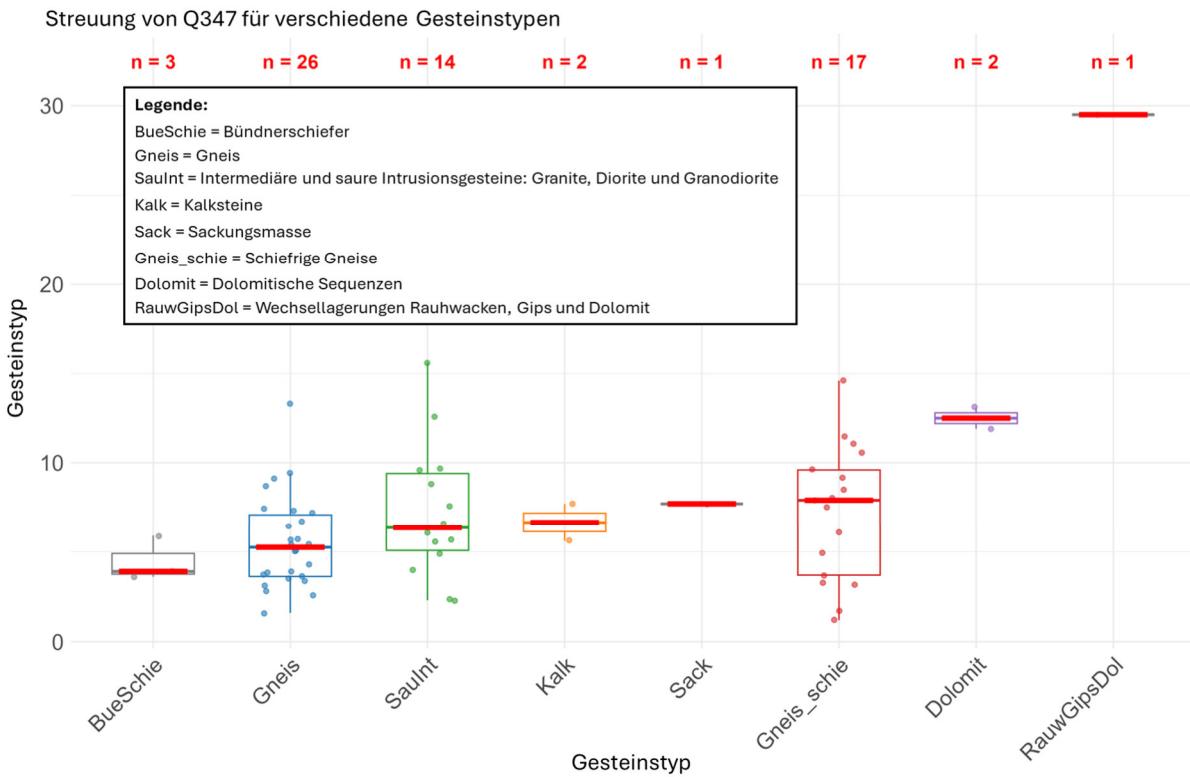
3383

3384 Abbildung 63: Karte der tektonischen Einheiten, eingefärbt nach den Q347-Medianen. Zur Orientierung sind mit grüner Farbe
3385 die Kantonsgrenzen eingezeichnet.

3386 b) Zusammenhang zwischen Q347 und den Gesteinstypen

3387 Die Streuung der Q347 innerhalb der kristallinen Gesteinstypen, also innerhalb der Gneise, schiefrigen Gneise
3388 und innerhalb der intermediären und sauren Intrusionsgesteine, ist gross (Abbildung 64). In den Gneisen streuen
3389 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
3390 intermediären und sauren Intrusionsgesteinen zwischen 2.5 und 16 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. Bei den kristallinen Gesteinstypen
3391 weisen die schiefrigen Gneise den höchsten Q347-Median auf. Insgesamt weisen die Bündnerschiefer die
3392 tiefsten Median-Werte auf (Q347-Median = 4 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$). In Einzugsgebieten, in denen Kalksteine dominieren,
3393 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
3394 zwischen Rauwacken, Gipsen und Dolomiten bestehen (Q347-Median = 29.5 $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$, nur ein Wert vorhanden).
3395 Bei den Bündnerschiefern, Kalkgesteinen, Dolomiten und Rauwacken/Gipsen ist die Aussagekraft beschränkt,
3396 weil die Anzahl der Gebiete klein ist.
3397

3398

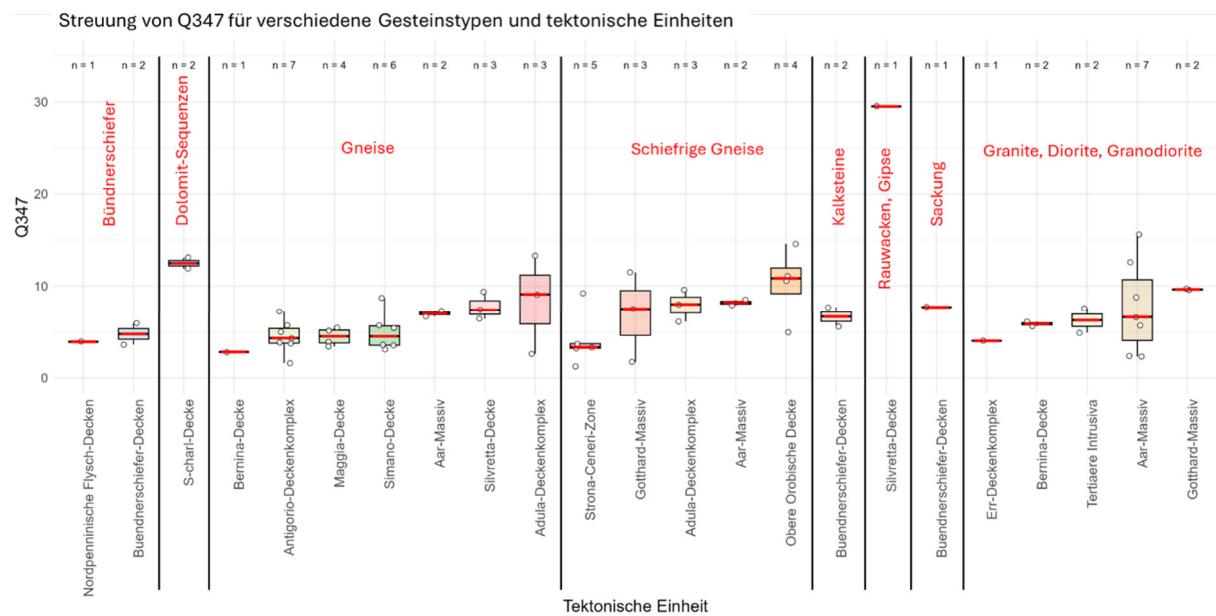


3399

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 Aarmassivs 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

- 3421 Erkenntnis ist als Tendenz zu betrachten, denn die Anzahl der Beobachtungen in den einzelnen tektonischen
 3422 Einheiten ist klein.



3423

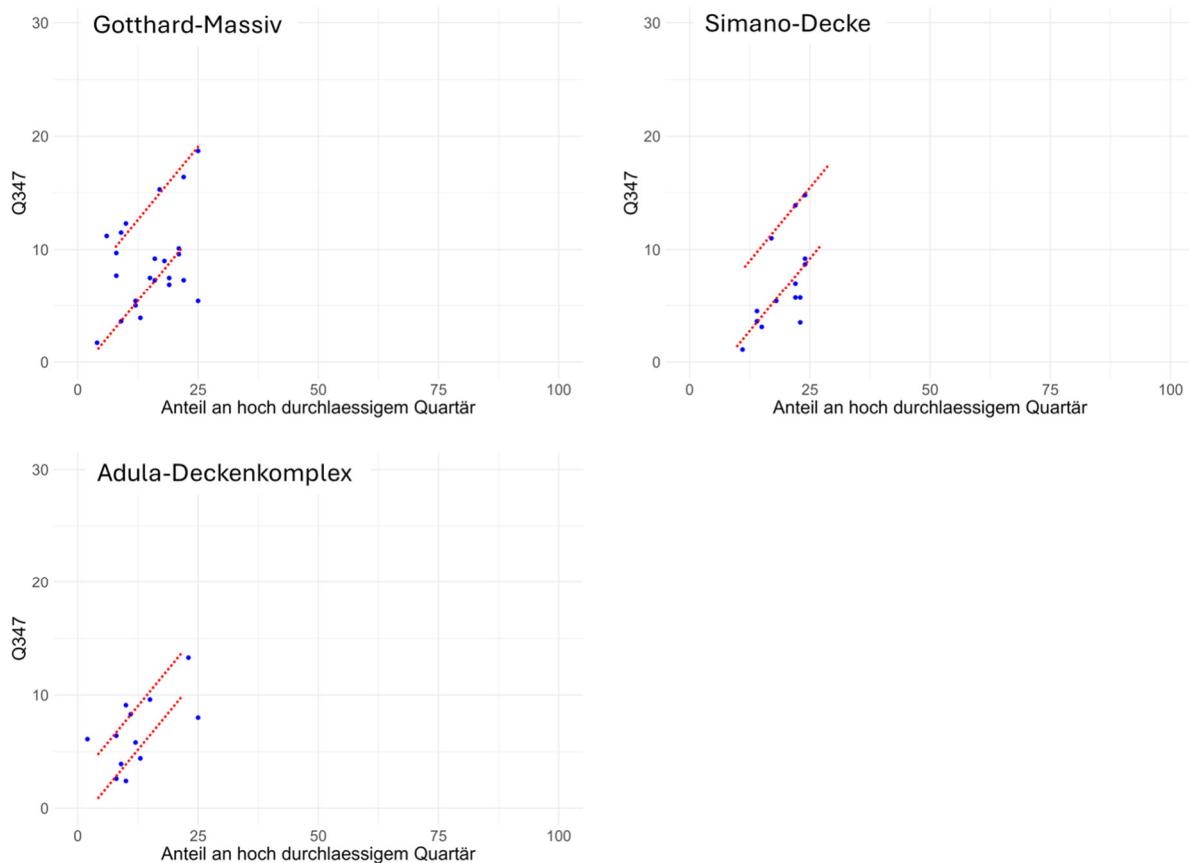
3424 *Abbildung 65: Streuung der Q347 für die verschiedenen Gesteinstypen aufgegliedert auf die verschiedenen tektonischen*
 3425 *Einheiten. Es wurden nur Einzugsgebiete berücksichtigt, in denen der dargestellte Gesteinstyp 80% oder mehr von der*
 3426 *Einzugsgebietsfläche einnimmt. Gletscher- und permafrostfreien Flächen wurden nicht berücksichtigt.*

3427 c) Zusammenhang zwischen Q347 und quartären Ablagerungen

3428 Für alle tektonischen Einheiten wurden Plots erstellt, die den Zusammenhang zwischen Q347 und den hoch
 3429 durchlässigen Quartärablagerungen zeigen. Bei den meisten tektonischen Einheiten wird dieser Zusammenhang
 3430 vom Einfluss anderer Faktoren überprägt. Beim Gotthardmassiv, bei der Simano-Decke und beim Adula-Decken-
 3431 Komplex sind die oben erwähnten Zusammenhänge jedoch ansatzweise ersichtlich. Die Punkte Q347 vs.
 3432 Quartär-hoch-durchlässig sind jeweils entlang zweier Trendlinien angeordnet, die manuell platziert wurden
 3433 (Abbildung 66). Die Trendlinien weisen dieselbe Neigung auf, jedoch variiert ihre Lage innerhalb des Plots.
 3434 Basierend auf dieser Erkenntnis wurde ein Denkmodell entwickelt, das davon ausgeht, dass die hoch
 3435 durchlässigen quartären Ablagerungen in allen tektonischen Einheiten einen ähnlichen Einfluss auf die Q347-
 3436 Abflüsse aufweisen könnten, dieser aber nicht in allen tektonischen Einheiten sichtbar ist, weil andere Faktoren
 3437 eine übergeordnete Rolle spielen.

3438 Dieses Denkmodell wurde für die 213 Untersuchungsgebiete in den Alpen und im Tessin angewendet. Die
 3439 Einzugsgebiete wurden zu ungefähr 10 gleich grossen Gruppen zusammengefasst, die entlang von Trendlinien
 3440 ähnlicher Steigung angeordnet sind (Abbildung 67), die „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis „Q347-
 3441 Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ genannt werden. Die erste Gruppe weist eine etwas steilere Trendlinie auf
 3442 als die anderen. Die Einzugsgebiete beispielsweise der Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 2 weisen bei
 3443 gleichem Anteil an hoch durchlässigem Quartär ein wesentlich höheres Q347 auf als die Einzugsgebiete der
 3444 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.

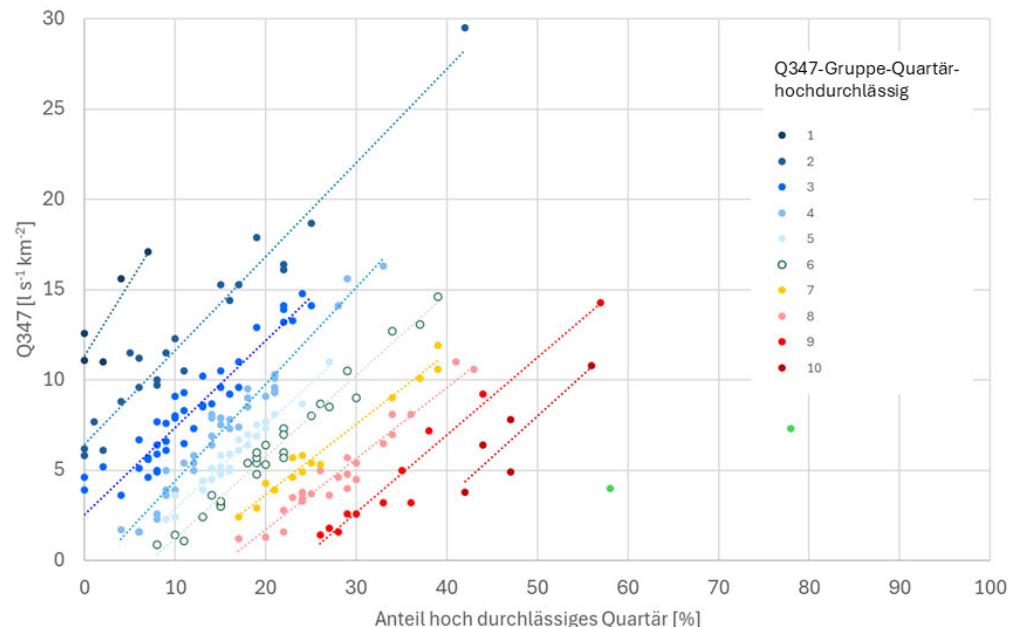


3447
3448 *Abbildung 66: Beim Gotthardmassiv, bei der Simano-Decke und beim Adula-Deckenkomplex sind bei jeweils zwei Gruppen*
3449 *von Einzugsgebieten Korrelationen zwischen dem Q347 und dem Flächenanteil an hoch durchlässigem Quartär erkennbar.*
3450 *Die manuell eingesetzte Trendlinie hat bei allen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

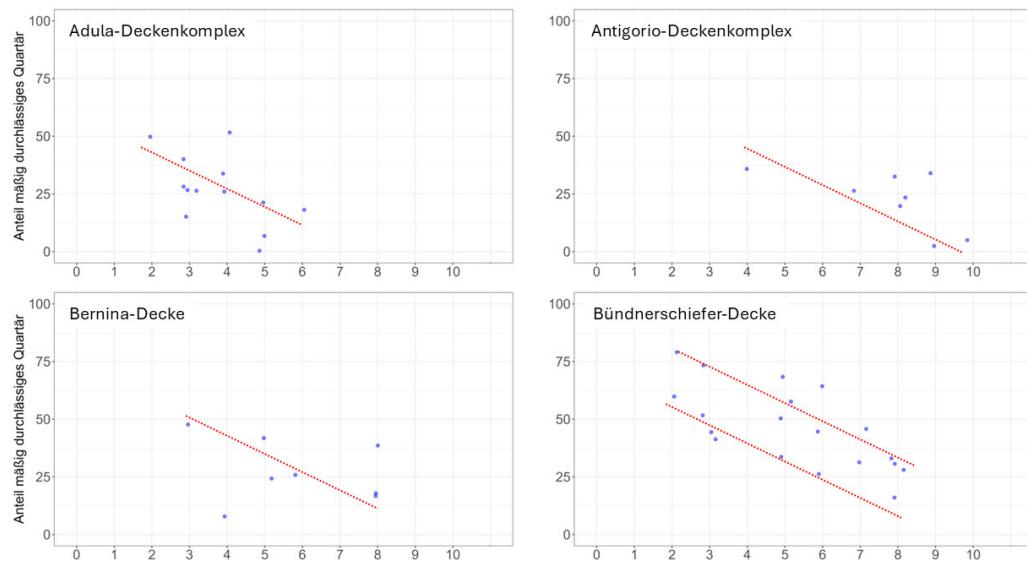
3466 Vertikalen parallel verschoben sind. Demnach wären in den Nordpenninischen Flysch-Decken und im Err-
 3467 Deckenkomplex wesentlich höhere Anteile an mässig durchlässigen Quartärablagerungen notwendig als in der
 3468 Adula-Decke oder in den Tertiären Intrusiva, um in die gleiche Q347-Gruppen-Quartär-hoch-durchlässig zu
 3469 gelangen. In der Adula-Decke und in den tertiären Intrusiva sind im Vergleich zu den Nordpenninischen Flysch-
 3470 Decken und zum Err-Deckenkomplex demnach mehr andere, nicht-quartäre Speicher vorhanden, die den Q347-
 3471 Abfluss massgeblich erhöhen.



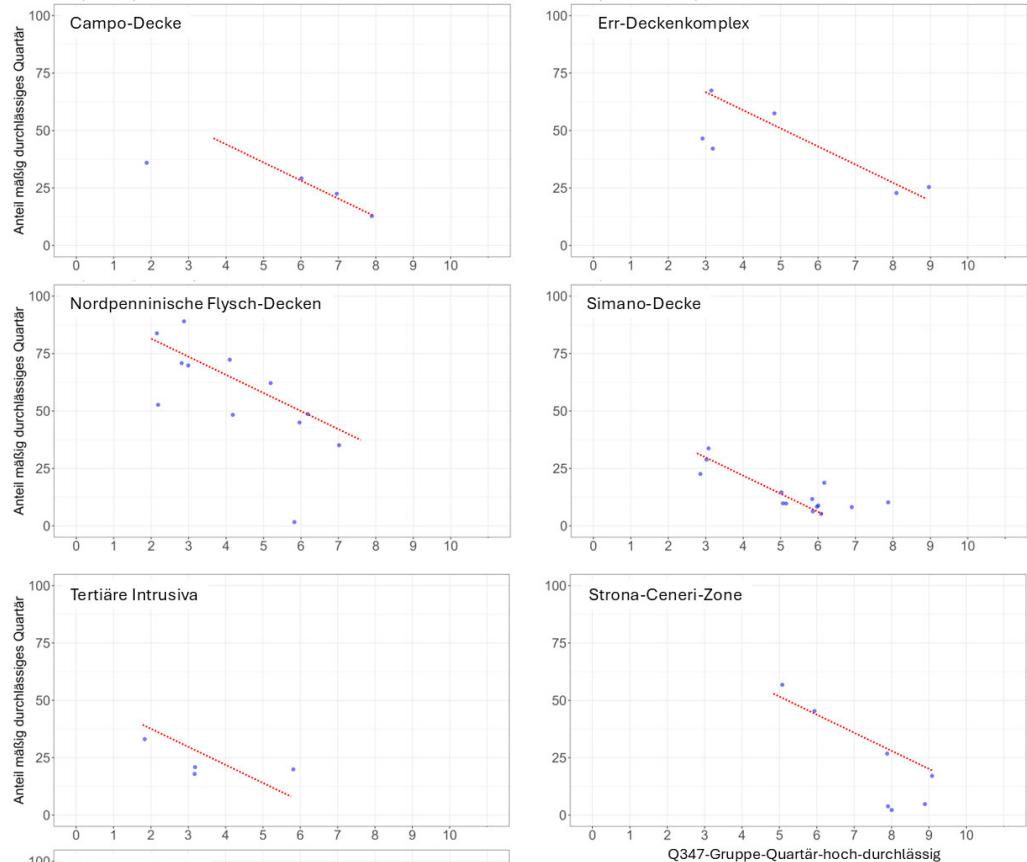
3472
 3473 *Abbildung 67: Einteilung der 213 in den Alpen und im Tessin untersuchten Einzugsgebiete in Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1 bis Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10 mit einer hohen Korrelation zwischen Q347 und Anteil an hoch durchlässigem Quartär. Die beiden grünen Punkte repräsentieren Einzugsgebiete, die keiner Gruppe zugewiesen wurden. Sie werden im weiteren Vorgehen nicht mehr berücksichtigt.*
 3474
 3475
 3476

3477
 3478
 3479
 3480
 3481
 3482
 3483
 3484
 3485
 3486
 3487
 3488
 3489
 3490
 3491
 3492

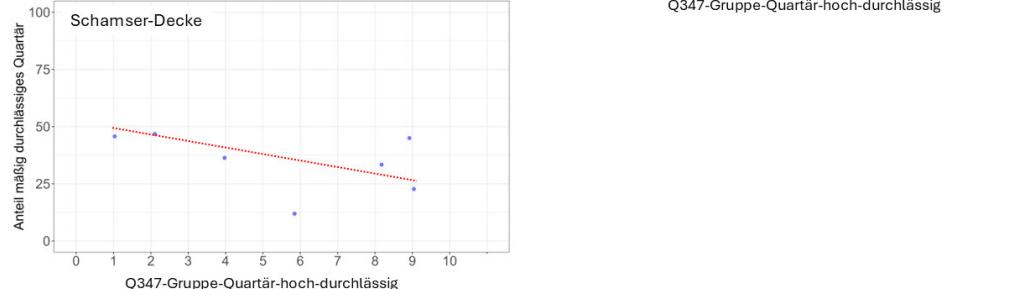
3493



3494



3495



3496

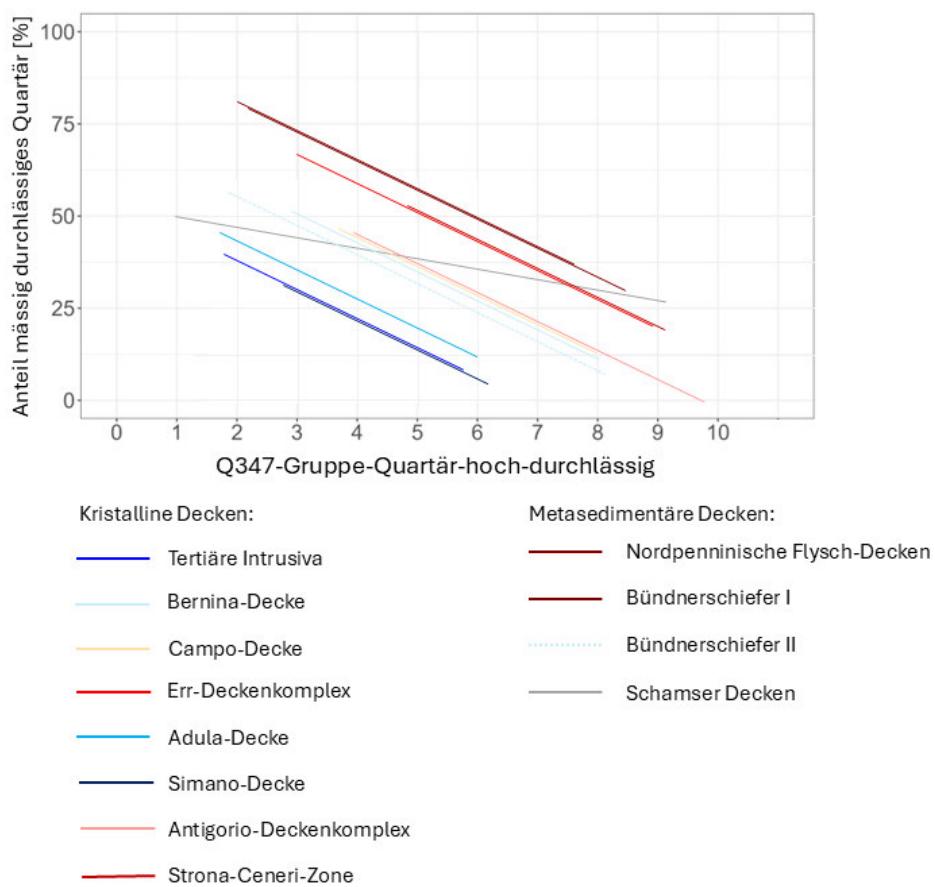
3497

3498

3499

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.*

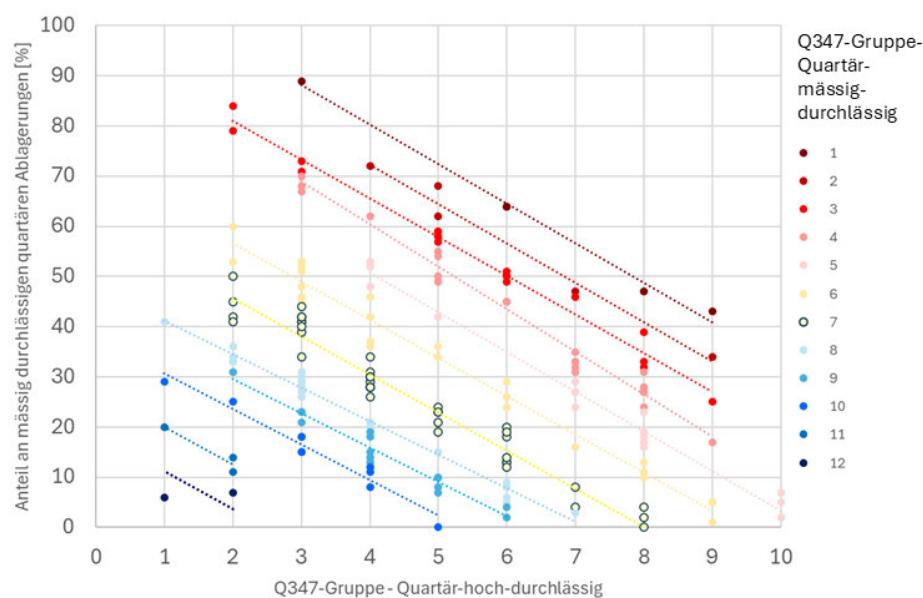
3504

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

3520 kristallinen Decken weniger stark von den quartären Ablagerungen bestimmt zu werden; denn die Trendlinie
 3521 der Schamser-Decke ist wesentlich flacher als die von kristallinen Gesteinen dominierten Decken (Abbildung 69).
 3522 Die neu erstellten Gruppen werden als „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“ bezeichnet. Ein
 3523 Einzugsgebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 2“ benötigt wesentlich mehr Anteile an mässig
 3524 durchlässigen Quartärablagerungen als z.B. ein Gebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 9“, um in
 3525 dieselbe Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig zu gelangen. In einem Einzugsgebiet in „Q347-Gruppe-Quartär-
 3526 mässig-durchlässig 9“ sind also mehr nicht-quartäre Q347-erhöhende Effekte vorhanden als in einem
 3527 Einzugsgebiet der „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 2“.

3528



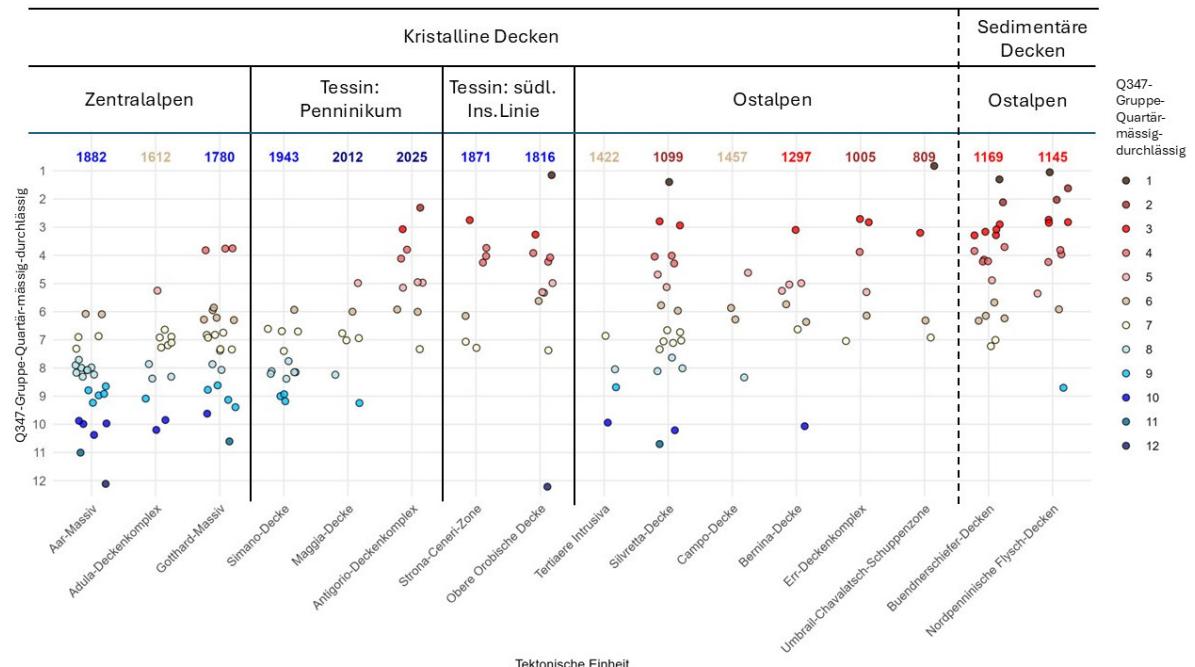
3529

3530 *Abbildung 70: Plot, der den Zusammenhang zwischen der Zugehörigkeit zur „Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 1“ bis*
 3531 *„Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig 10“ und dem Anteil an mässig durchlässigem Quartär zeigt. Die Punkte wurden zu*
 3532 *ungefähr gleich grossen Gruppen zusammengefasst, die sich entlang von Trendlinien ähnlicher Steigung anordnen. Die*
 3533 *Steigung der Trendlinien wurde aus Abbildung 63 übernommen. Die 12 Gruppen, die so berechnet wurden, werden auch*
 3534 *„Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“ genannt.*

3535 d) Einfluss von nicht-quartären Faktoren

3536 Mit dem angewendeten Denkmodell, das ein hybrider Auswertungsansatz darstellt, der eine manuelle
 3537 Auswertung und die Verwendung von Regressionsmodellen kombiniert, wurde der Einfluss der
 3538 Quartärablagerungen auf Q347 herausgefiltert. Aus dieser Auswertung resultiert die Streuung von „Q347-
 3539 Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 1“ bis „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 12“ innerhalb der
 3540 verschiedenen tektonischen Einheiten in den Alpen und im Tessin (Abbildung 71). Eine tiefe Klasse der Q347-
 3541 Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig (braun oder rot) bedeutet demnach, dass neben den Quartärablagerungen
 3542 wenig Q347-erhöhende Effekte vorhanden sind. Blau eingefärbte Punkte repräsentieren Einzugsgebiete, bei
 3543 welchen mehr Q347-erhöhende Effekte wirken, die nicht durch Quartärablagerungen verursacht werden. Diese
 3544 weiteren Faktoren werden auch als nicht-quartäre Einflussfaktoren bezeichnet. Sie werden weiter unten
 3545 beschrieben.

3546 Abgestuft in verschiedenen Farben sind im oberen Bereich der Abbildung die durchschnittlichen
3547 Jahresniederschläge jeder tektonischen Decke angegeben. Der Einfluss des mittleren Jahresniederschlags
3548 verhält sich teilweise widersprüchlich zum nicht-quartären Einfluss auf Q347. So fallen z.B. in den
3549 Einzugsgebieten der tektonischen Einheiten wie Antigorio-Deckenkomplex, Strona-Ceneri-Zone, Obere
3550 Orobische Zone vergleichsweise hohe mittlere Jahresniederschläge, der nicht-quartäre Einfluss wird aber als
3551 gering bis mittel eingestuft (Abbildung 71). Umgekehrt wurden in Gebieten der tektonischen Einheiten tertiäre
3552 Intrusiva, Silvretta-Decke, Adula-Deckenkomplex tiefe oder mittlere Jahresniederschläge registriert, der Einfluss
3553 von nicht-quartären Faktoren wird hingegen als mittel bis hoch ausgewiesen (Abbildung 71). Gemäss dieser
3554 Auswertung spielt der mittlere Jahresniederschlag somit eine untergeordnete Rolle fürs Q347. Jedoch hat der
3555 mittlere Jahresniederschlag einen Einfluss auf die Dauerkurvengefälle (Abbildung 8 in Kapitel 8.3.3).
3556 Anhand von drei Einzugsgebieten wird im Folgenden aufgezeigt, wie die Q347-Gruppe-Quartär-mässig-
3557 durchlässig bestimmt wird und wie anhand dieses Denkmodells der Einfluss der Quartärablagerungen auf Q347
3558 herausgefiltert wird. Die drei Einzugsgebiete haben alle die gleichen Anteile an hochdurchlässigem Quartär, aber
3559 sehr unterschiedliche spezifische Q347-Abflüsse (Abbildung 72, oben links). Basierend auf dem dargestellten
3560 Klassifikationsschema werden die drei Einzugsgebiete in die drei Q347-Gruppen-Quartär-hochdurchlässig 2, 4
3561 und 8 eingeteilt. Unten links in Abbildung 72 sind detaillierte Angaben zu den drei Einzugsgebieten aufgelistet.
3562 Basierend auf der Q347-Gruppe-Quartär-hochdurchlässig und dem Flächenanteil der mässig durchlässigen
3563 Quartärablagerungen wurden den drei Einzugsgebieten die Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3, 8 und
3564 10 zugeteilt (Abbildung 72, oben rechts). Die Einzugsgebiete 1 und 2 weisen sehr ähnliche Flächenanteile an
3565 mässig durchlässigen Quartärablagerungen auf (vgl. Abbildung 72, unten links). Da sie auch gleich hohe Anteile
3566 an hochdurchlässigen Quartärablagerungen aufweisen, die Q347 aber sehr unterschiedlich sind, unterscheiden
3567 sich die Q347-Gruppen-Quartär-mässig-durchlässig dieser beiden Einzugsgebiete jedoch ziemlich stark (Q347-
3568 Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3 und Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 8, Abbildung 72, oben
3569 rechts). Die nicht-quartären Q347-erhöhenden Effekte sind demnach bei Einzugsgebiet 2 wesentlich grösser als
3570 bei Einzugsgebiet 1 (Abbildung 72, unten rechts). In Einzugsgebiet 3 ist der Flächenanteil an hochdurchlässigem
3571 Quartär ähnlich hoch wie bei den Einzugsgebieten 1 und 2 (Abbildung 72, oben links) und der Q347-Abfluss liegt
3572 ziemlich genau in der Mitte der beiden. Der Anteil an mässig durchlässigem Quartär beträgt jedoch nur ein Drittel
3573 von dem der Einzugsgebiete 1 und 2. Das bedeutet, dass der nicht-quartäre Effekt auf Q347 wesentlich höher
3574 ist als bei Einzugsgebiet 1 und auch etwas höher als bei Einzugsgebiet 2 (Q347-Gruppe-Quartär-mässig-
3575 durchlässig 10 im Vergleich zu Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig 3 und 8, Abbildung 72, oben rechts und
3576 unten rechts).
3577

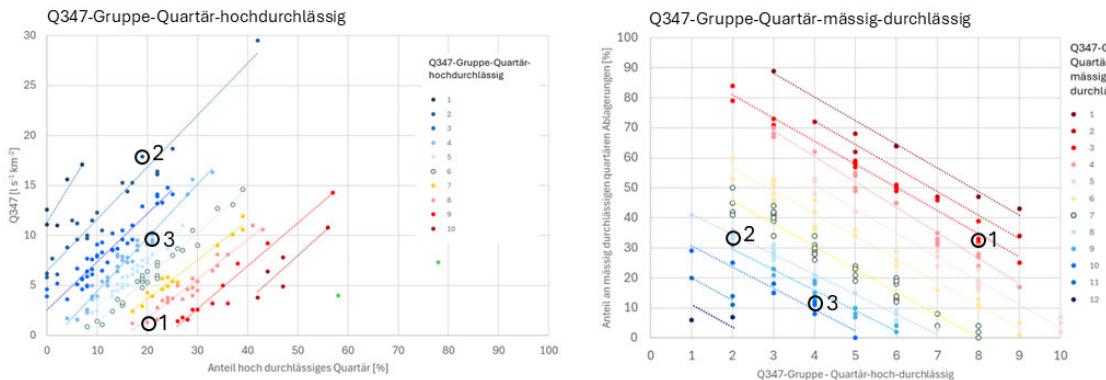


3578

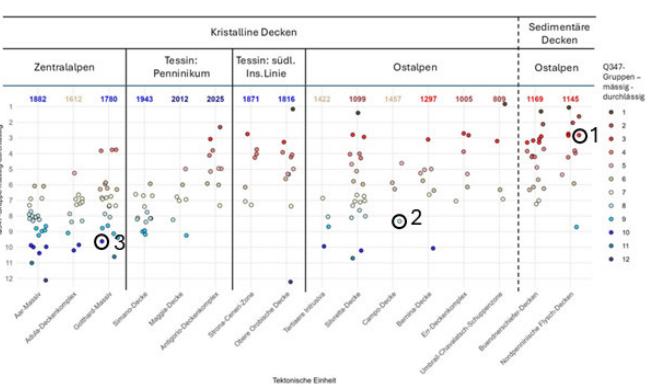
3579 Abbildung 71: Streuung der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig innerhalb der tektonischen Einheiten für den
3580 Alpenraum und das Tessin. Die unterschiedlich eingefärbten Zahlen oberhalb der Punkte zeigen den mittleren
3581 Jahresniederschlag innerhalb der tektonischen Einheit.

3582

3583



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



3584

3585 Abbildung 72: Bestimmung der Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig, erklärt anhand von drei Beispielen.

3586

3587 Folgende nicht-quartäre Faktoren könnten die Streuung der „Q347-Gruppe-Quartär-mässig-durchlässig“
3588 erklären:

3589

3590 *Speicher in den Festgesteinen:*

- 3591 - Einfluss der Gesteinstypen (11.6.4 b, Tabelle 23 in Kapitel 11.6.4 e)
3592 - Einfluss von Klüften, Störungszonen und Deformationsgefügen (11.6.4 e).

3593

3594 *Unsicherheiten in Kartierung und Klassifikation der Quartärablagerungen:*

- 3595 - Inkonsistente Kartierung der Quartärablagerungen zwischen den Kartenblättern des geologischen Atlas
3596 (11.6.4 e)
3597 - Fehlende präzisere Informationen über die Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten der
3598 Quartärablagerungen (11.6.4 e)
3599 - Heterogener Einfluss von Rutschungs- und Sackungsgebieten (11.6.4 e)

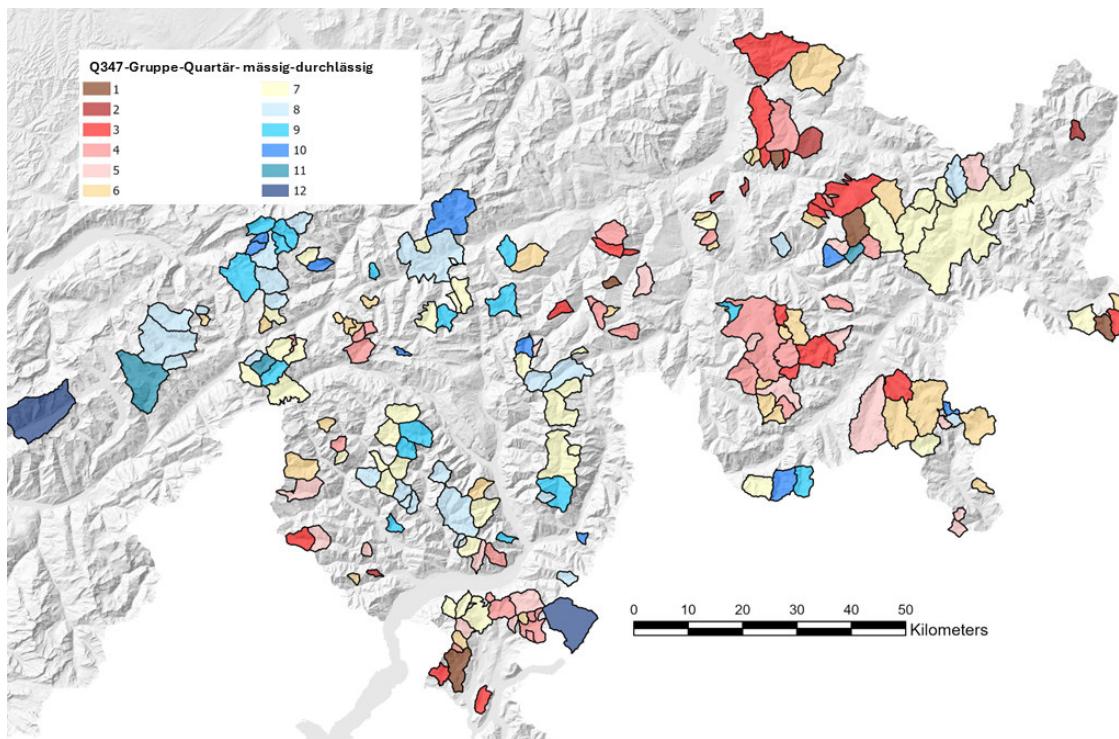
3600

3601 In Abbildung 73 wird eine Karte dargestellt, die die räumliche Verteilung der verschiedenen Q347-Gruppen-
3602 Quartär-mässig-durchlässig aufzeigt. Sie zeigt, wo im zentralen, östlichen und südlichen Alpenraum der Schweiz
3603 geringe, mittlere, hohe oder sehr hohe nicht-quartäre Einflussfaktoren auf Q347 wirken. In Abbildung 74 sind
3604 die tektonischen Einheiten mit den Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete dargestellt.

3605 Gemäss Abbildung 73 ist der Einfluss der nicht-quartären Faktoren auf Q347 in den Zentralalpen als mittel bis
3606 hoch einzustufen. Im Aar-Massiv ist er tendenziell höher als im Gotthard-Massiv. Im Gotthard-Massiv variiert er
3607 stark. In den Ostalpen ist dieser Einfluss eher tief bis mittel. Tiefe Werte dominieren in Nord- und Mittelbünden
3608 (inklusive Safiental und Valsertal) und teilweise im Berninagebiet. Diese Gebiete werden vor allem durch die
3609 Nordpenninischen Flyschdecken, die Bündnerschiefer-Decken, die Err-Decke und Teile der Berninadecke
3610 repräsentiert. Mittlere Werte können im Unterengadin, im Puschlav und teilweise im Berninagebiet beobachtet
3611 werden (Silvretta-Decke, Teile der Bernina-Decke, Campodecke). Im Bergel sind die Einflüsse durch nicht-
3612 quartäre Faktoren mittel bis hoch (Tertiäre Intrusiva). Im Tessin sind mehrere Muster ersichtlich. Im Verzascatal
3613 und im östlichen Teil des Maggiatals ist der Einfluss nicht-quartärer Faktoren mittel bis hoch (Simano- und
3614 Maggia-Decke). Im östlichen Teil des Maggiatals und im Centovalli ist er eher tief (Antigorio-Deckenkomplex).
3615 Im Sotto-Ceneri ist der Einfluss nicht-quartärer Faktoren tief bis mittel (Strona-Ceneri-Zone und Obere Orobie-
3616 Decke).

3617

3618

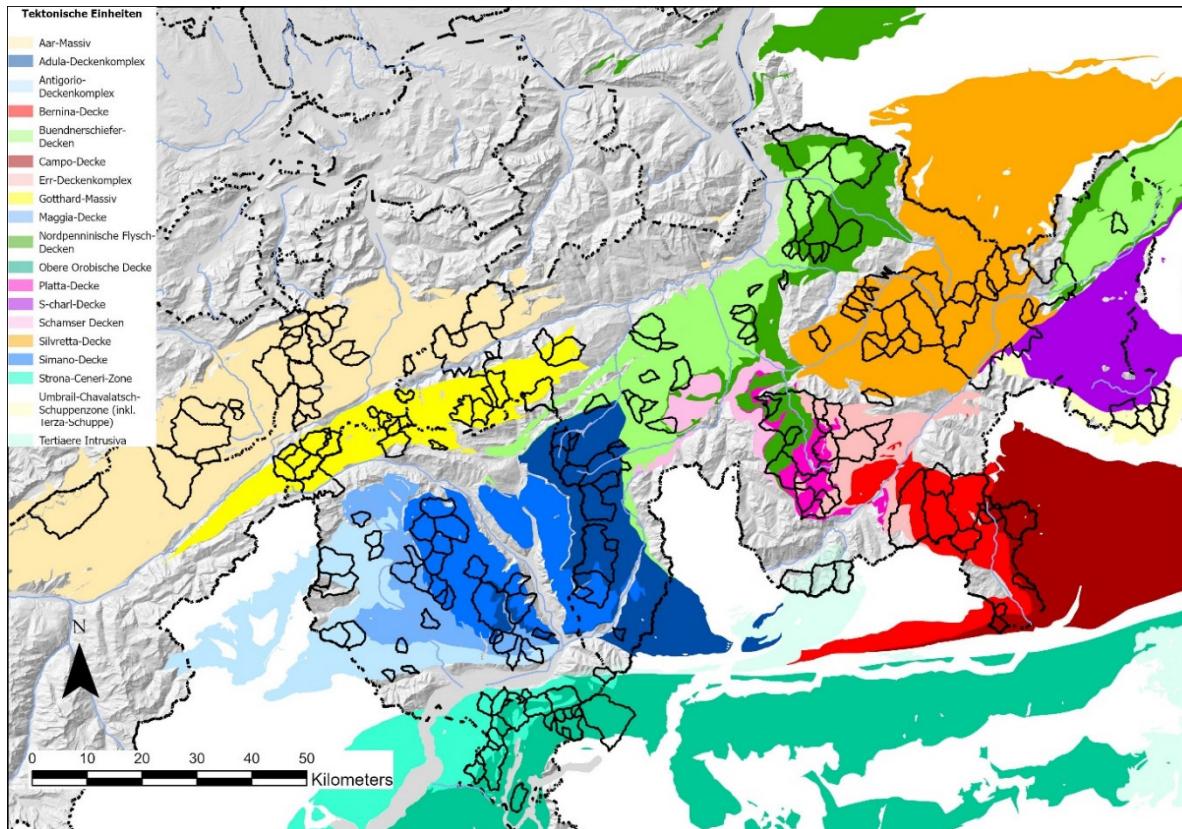


3619

3620

3621 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.

3622



3623

3624
3625 Abbildung 74: Tektonische Einheiten des zentralen, südlichen und östlichen Alpenraumes der Schweiz mit den Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete.

3627 e) Physikalische Erklärung für die Muster der nicht-quartären Einfluss-
3628 faktoren

3629 Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde eine Klassifikation der Festgesteinsspeicher erstellt, die
3630 zusammenfasst, welche Gesteinstypen und welche tektonischen Einheiten einen geringen, mittleren,
3631 grossen oder sehr grossen Einfluss auf Q347 aufweisen (Tabelle 23). Es werden Speicher unterschieden, die
3632 durch Lösungsprozesse (Verkarstung) und durch Kluftbildung entstehen.

3633

3634 *Kalkhaltige Sedimentgesteine (Entstehung durch Lösungsprozesse):*

3635 Gemäss den Ergebnissen sind in Kalkgesteinen tendenziell mittlere, in Dolomiten hohe und in Rauwacken
3636 sehr hohe Q347 zu beobachten (Abbildung 64). Der Q347-erhöhende Einfluss lässt sich bei diesen
3637 Sedimentgesteinen durch die Gesteinstypen grob klassifizieren. Diese Unterschiede lassen sich durch die
3638 unterschiedliche chemische Zusammensetzung und Struktur von Kalkgesteinen, Dolomitgesteinen und
3639 Rauwacken erklären. Kalkgesteine bestehen vor allem aus Calcit und Aragonit (CaCO_3). Calcite sind stark
3640 löslich, wodurch in Kalksteinen grosse Hohlräume entstehen (Karst), die als Wasserspeicher fungieren. Diese
3641 Speicher entwässern rasch, sodass der Beitrag zum Q347-Abfluss im Vergleich zu Dolomit und Rauwacken
3642 geringer ist. Dolomite und Rauwacken bestehen aus Calcium und Magnesium $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Schlunegger und
3643 Garefalikis, 2024). Anders als beim Calcit ist Magnesium weniger gut löslich. Dadurch sind die
3644 speicherbildenden Hohlräume des Dolomits zwar kleiner als die des Kalksteins, sie entwässern aber auch
3645 weniger rasch. Das bewirkt, dass die Speicher in Dolomitgesteinen tendenziell stärker zum Q347-Abfluss
3646 beitragen als Speicher in Kalksteinen. Rauwacken haben eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie
3647 Dolomite, sie weisen aber eine porösere Struktur auf als diese (Richter, 1985). Die porösere Struktur verleiht
3648 dem Gestein ein Aussehen, das einem Schwamm ähnlich ist. Sie bewirkt eine markante Erhöhung der
3649 Kapazität an langsam entwässernden Speichern, die massgebend zum Q347 beitragen.

3650

3651 *Kristalline Gesteine (Speicherung in Klüften):*

3652 In kristallinen Gesteinen wie zum Beispiel Graniten, Gneisen oder Glimmerschiefern wird das Wasser, das
3653 bei Q347 noch zum Abfluss beiträgt, in Klüften gespeichert. Wie die vorangehenden Kapitel gezeigt haben,
3654 sind es eher die tektonischen Eigenschaften, wie die Anzahl der Klüfte, und Störungszonen und das
3655 Gesteinsgefüge (spröde oder duktile Deformation) und nicht die Gesteinstypen, die in den kristallinen
3656 Gesteinen die Q347 massgebend beeinflussen.

3657 Die Bildung der Klüfte hängt von der Elastizität des Gesteins und von komplexen tektonischen Prozessen
3658 während der Bildung der Alpen ab. In den Zentralalpen und im Tessin wurden während der Bildung der
3659 tektonischen Decken vor 30 Mio. Jahren die Gesteine der Penninischen Decken in die Tiefe abgesenkt.
3660 Während dieses Prozesses haben sich Schieferung und Gefüge gebildet. Unter den hohen Temperaturen
3661 und Drücken wurden Brüche und Klüfte geschlossen. Vor 20 bis 15 Mio. Jahren hat die Exhumationsphase
3662 eingesetzt. Die kristallinen Decken wurden an die Oberfläche gehoben. Während dieser Phase hat sich das
3663 Gestein abgekühlt. Bei Temperaturen unter 250°C fliessen Quarzbestandteile nicht mehr, weshalb Klüfte

3664 nicht mehr verheilt wurden. Wie viele Klüfte gebildet wurden und wie gross diese sind, hängt von weiteren
3665 Faktoren ab, zum Beispiel wie elastisch das Gestein ist und welche tektonischen Kräfte bei der Exhumation
3666 gewirkt haben. Im Folgenden werden mögliche Erklärungen für die Verteilung der nicht-quartären
3667 Speicherkapazität beschrieben, die in Abbildung 73 beobachtet werden können.

3668

3669 *Bündnerschiefer und Nordpenninische Flyschdecken:*

3670 Je mehr schiefrige Komponenten die Gesteine aufweisen, desto elastischer reagieren sie auf tektonische
3671 Spannung. Die Gesteine der Bündnerschiefer und Nordpenninischen Flyschdecken, die eher sedimentären
3672 Charakter aufweisen, sind so elastisch, dass die meisten Klüfte durch die tektonischen Kräfte bei der
3673 Exhumation des Gesteins an die Erdoberfläche durch Selbstabdichtung geschlossen wurden (mündliche
3674 Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Geologisches Institut der Universität Bern). Hinzu kommt, dass
3675 tonige Gesteine eine hohes Selbstabdichtungsvermögen aufweisen (mündliche Mitteilung von Prof. Dr. F.
3676 Schlunegger, Geologisches Institut der Universität Bern). Deshalb ist der Q347-erhöhende Einfuss in diesen
3677 Gesteinen nur gering bis mittel.

3678

3679 *Zentralalpen (Aar-Massiv und Gotthard-Massiv):*

3680 Die hohe Kapazität an nicht-quartären Speichern in den Gesteinen des Aar-Massivs könnten auf die grosse
3681 Anzahl an vertikal verlaufenden Störungszonen zurückzuführen sein, die für das Aar-Massiv charakteristisch
3682 sind (Herwegh et al., 2017; Schlunegger und Kissling, 2022). Sie sind durch die Heraushebung des Aar-
3683 Massivs entstanden (Herwegh et al., 2017; Schlunegger und Kissling, 2022). Der Vertikale Verlauf ermöglicht
3684 eine Infiltration in grössere Tiefen, was die Speicherkapazität vergrössern dürfte. Im Gotthard-Massiv
3685 verlaufen die Störungszonen ebenfalls vertikal, ihre Anzahl ist aber geringer als im Aar-Massiv (Herwegh et
3686 al., 2017), was die geringere Kapazität der nicht-quartären Speicher im Gotthard- im Vergleich zum Aar-
3687 Massiv erklären könnte.

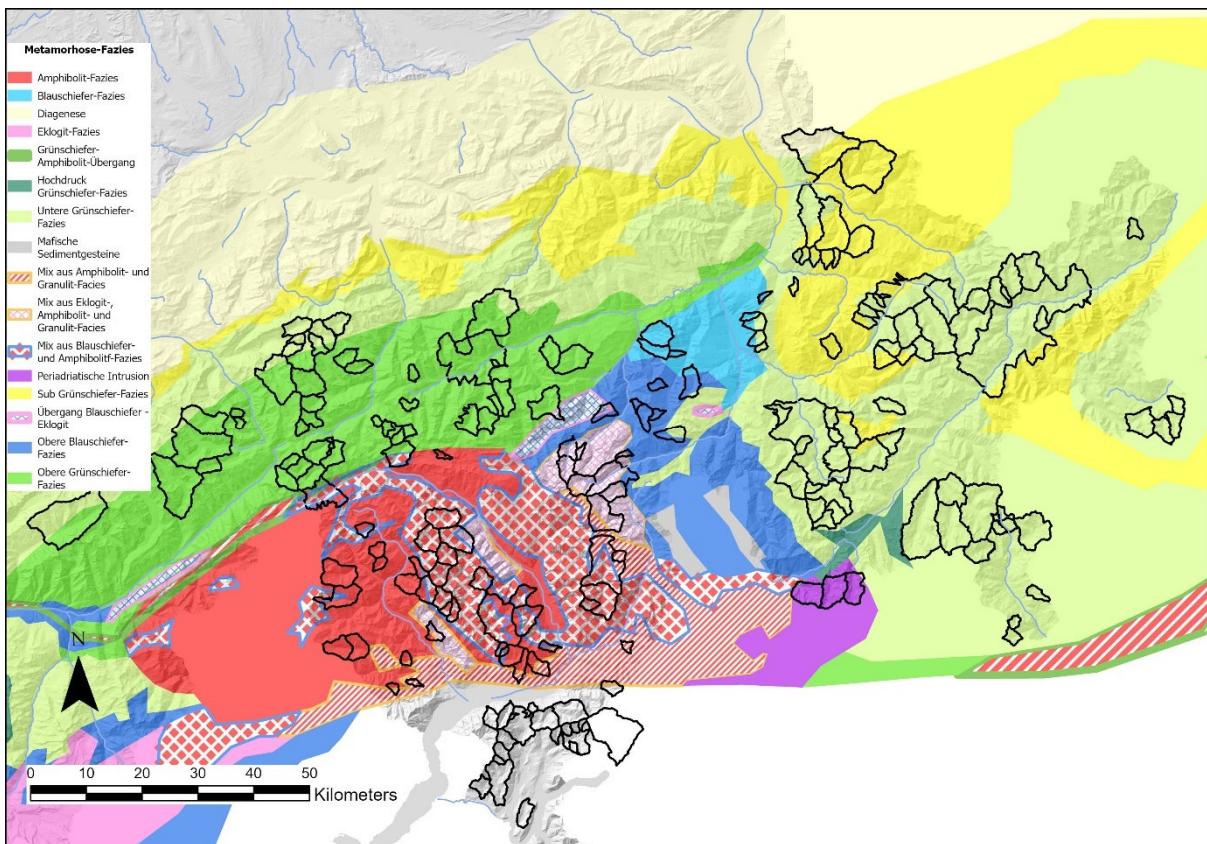
3688

3689 *Nordtessin und Misox (Adula-Deckenkomplex, Simano-Decke, Maggia-Decke, Antigorio-
3690 Deckenkomplex):*

3691 Im Gegensatz zu den Zentralalpen liegen die kristallinen Decken, die die Tessiner Alpen aufbauen,
3692 waagrecht. Vertikal verlaufende Klüfte und Störungszonen sind deshalb vermutlich weniger häufig vor wie
3693 im Aar- und im Gotthard-Massiv (mündliche Mitteilung Prof. F. Schlunegger, s. auch Herwegh et al., 2017;
3694 Schlunegger und Kissling, 2022). Die Unterschiede der nicht-quartären Speicher zwischen Antigorio-Decken-
3695 Komplex (tiefe bis mittlere Speicherkapazität) und Maggia-Decke, Simano-Decke und Adula-Decke (mittlere
3696 bis hohe Speicherkapazität) lassen sich dadurch aber nicht erklären.

3697 Auffällig ist, dass die mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen in den
3698 Kartenblätter 1271, 1272, 1273, 1292 und 1293, die grosse Teile der Maggia- und der Simano-Decke
3699 abdecken, weit weniger häufig vorkommen wie die in den Kartenblättern 1291, 1311, 1312, 1313 (Antigorio-
3700 Deckenkomplex) und in den Kartenblättern 1314, 1294 und 1274 (Adula-Decke) (vgl. auch 11.6.4 f,
3701 Abbildung 76 und Abbildung 74). Dies lässt den Verdacht aufkommen, dass die Quartärablagerungen in den

3702 Kartenblättern unterschiedlich detailliert kartiert wurden. Das würde bedeuten, dass in der Maggia- und in
3703 der Simano-Decke die Anteile der mässig durchlässigen und hoch durchlässigen Quartärablagerungen
3704 unterschätzt und dass die Speicher in den Gesteinen der Maggia- und Simano-Decke tatsächlich geringer
3705 sein dürften als in Abbildung 73 dargestellt wird.
3706 Ein möglicher Grund für die höhere Speicherkapazität von Gesteinen des Aar- und Gotthard-Massivs
3707 gegenüber Gesteinen des Antigorio-Decken-Komplexes und Teilen der Maggia-Decke könnte die
3708 unterschiedliche Metamorphose-Fazies darstellen. Die Metamorphose-Fazies eines Gesteins zeigt an, wie
3709 tief dieses durch die Subduktion der afrikanischen Platte unter die europäische Platte abgesenkt wurde, was
3710 die Brüchigkeit der Gesteine massgeblich beeinflusste. Eine Karte der Metamorphose-Fazien (Bousquet et
3711 al., 2008) mit den Einzugsgebieten der Untersuchungsgebiete zeigt, dass sich die Einzugsgebiete im
3712 Antigorio-Deckenkomplex und in Teilen der Maggia-Decke in der Amphibolit-Fazies befinden (Abbildung 75
3713 und Abbildung 74). Ihre Gesteine wurden bei ihrer Entstehung in Tiefen verfrachtet, wo sie Temperaturen
3714 von 500 bis 650°C ausgesetzt wurden (Bousquet et al., 2008). Die Einzugsgebiete des Aar- und Gotthard-
3715 Massivs befinden sich grösstenteils in Gesteinen, die eine obere Grünschiefer-Fazies erfahren haben. Ihre
3716 Gesteine wurden weniger tief ins Erdinnere transportiert, weshalb sie Temperaturen von maximal 400 bis
3717 500°C erfahren haben (Bousquet et al., 2008). Aufgrund der etwas tieferen Temperaturen während der
3718 Metamorphose in Gesteinen der oberen Grünschiefer-Fazies sollen schon vor der Exhumation der Gesteine
3719 mehr Ansatzstellen für spröde Deformation vorhanden gewesen sein als in der Amphibolit-Fazies
3720 (Lützenkirchen, 2002; Merz, 1989). Deshalb sollen die Gesteine der oberen Grünschiefer-Fazies bei der
3721 Exhumation stärker spröde deformiert worden sein als Gesteine in der Amphibolit-Fazies (Lützenkirchen,
3722 2002; Merz, 1989). Das heisst, dass sich in den Einzugsgebieten des Aar- und Gotthard-Massivs allein
3723 aufgrund der Metamorphose-Fazies mehr Klüfte gebildet haben sollen als im Antigorio- Deckenkomplex und
3724 in Teilen der Maggia-Decke. Die Gesteine der Simano-Decke und des südlichen Teils der Adula-Decke liegen
3725 im Übergangsbereich zwischen Amphibolit- und oberer Blauschiefer-Fazies, und die Gesteine des nördlichen
3726 Teils der Adula-Decke liegen im Übergangsbereich zwischen Amphibolit- und Granulit-Fazies. In beiden Fällen
3727 waren die Gesteine ebenfalls leicht niedrigeren maximalen Temperaturen ausgesetzt (500 bis 550°C) als bei
3728 der Amphibolit-Fazies. Folgt man der obigen Logik, würde das heissen, dass die Gesteine der Simano- und
3729 der Adula-Decke eine eher höhere Anfälligkeit auf spröde Deformation aufweisen würden als die
3730 Gesteinskörper im Antogorio- Deckenkomplexe und in Teilen der Maggia-Decke. Das könnte erklären,
3731 warum die nicht-quartäre Speicherkapazität der Einzugsgebiete der Simano- und der Adula-Decke etwas
3732 höher liegt als die des Antogorio- Deckenkomplexes und als die eines Teils der Maggia-Decke (Abbildung 73
3733 und Abbildung 74). Diese Zusammenhänge müssen immer auch vor dem Hintergrund betrachtet werden,
3734 dass die Vorkommen der Quartärablagerungen in der Maggia-Decke und in der Simano-Decke unterschätzt
3735 worden sein könnten.
3736
3737



3738

3739 Abbildung 75: Karte der Metamorphe-Fazies des zentralen, südlichen und östlichen Alpenraumes der Schweiz mit den
3740 Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete.

3741

3742 *Ostalpen (Err-, Bernina-, Silvretta-, Campo-Decke):*

3743 Auffallend sind die tieferen nicht-quartären Speicherkapazitäten in den Gesteinen der Ostalpen gegenüber den
3744 Zentralalpen. Dafür sind folgende Gründe denkbar:

- 3745 - die Klüfte und Störungszonen in der Err-, Bernina-, Silvretta-Decke und Campo-Decke fallen weniger
3746 steil ein wie im Aar- und Gotthard-Massiv (Schmid et al., 1996).
- 3747 - Klüfte und Störungszonen sind z.B. in der Bernina-Decke selten (Spillmann, 1993) und dürften im
3748 Vergleich mit dem Aar-Massiv weit weniger zahlreich auftreten. Tektonisch gehören die Err-, Bernina
3749 und die Silvretta-Decke zum Ostalpin (Schmid et al., 1996). Diese Decken wurden bei der alpinen
3750 Gebirgsbildung nicht in die Tiefe transportiert, sondern wurden über die Europäische Platte geschoben
3751 (Schmid et al., 1996). Dadurch wurde die Kollision vermieden und die betreffenden Gesteine
3752 wurden wesentlich geringeren tektonischen Kräften ausgesetzt als z.B. im Aar-Massiv (gemäß
3753 mündlicher Mitteilung von Prof. Dr. F. Schlunegger, Universität Bern).

3754

3755 *Bergeller Intrusion:*

3756 Im Bergell fallen die Klüfte und Störungszonen hingegen steil ein (Herwegh et al., 2017). Diese Einzugsgebiete
3757 liegen unmittelbar südlich der markanten Störungszone der Insubrischen Linie, wo eine starke vertikale Hebung
3758 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 Quartäralablagerungen 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 Dolomite Gipse und Rauwacken	mittel gross sehr gross	Aar-Massif	mittel - gross	Gr, Gn, schGn
		Adula-Deckenkomplex	mittel - gross	schGn, Gn
		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
3777		Bündnerschiefer-Decke	gering - mittel	Sa, Me, TS
		Nordpenninische Flysch-Decke	gering - mittel	Sa, Me, TS

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

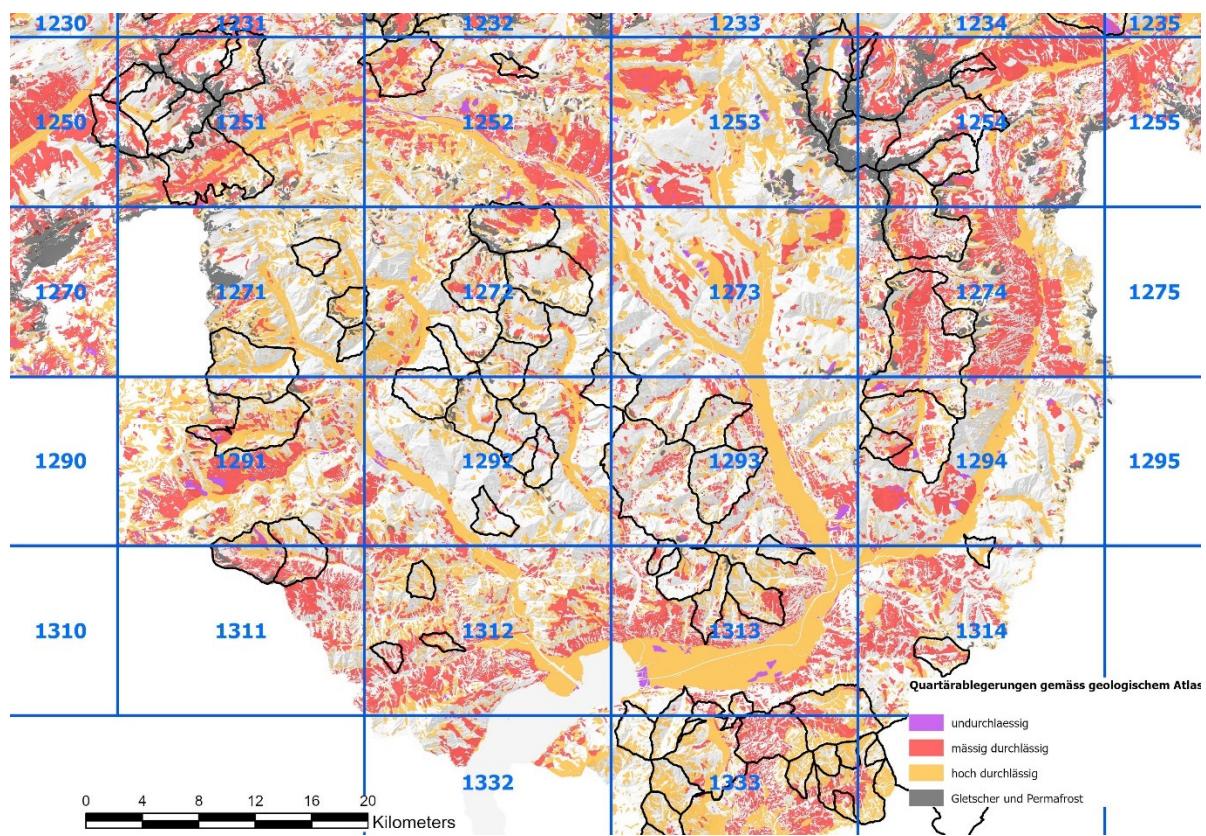
3790

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

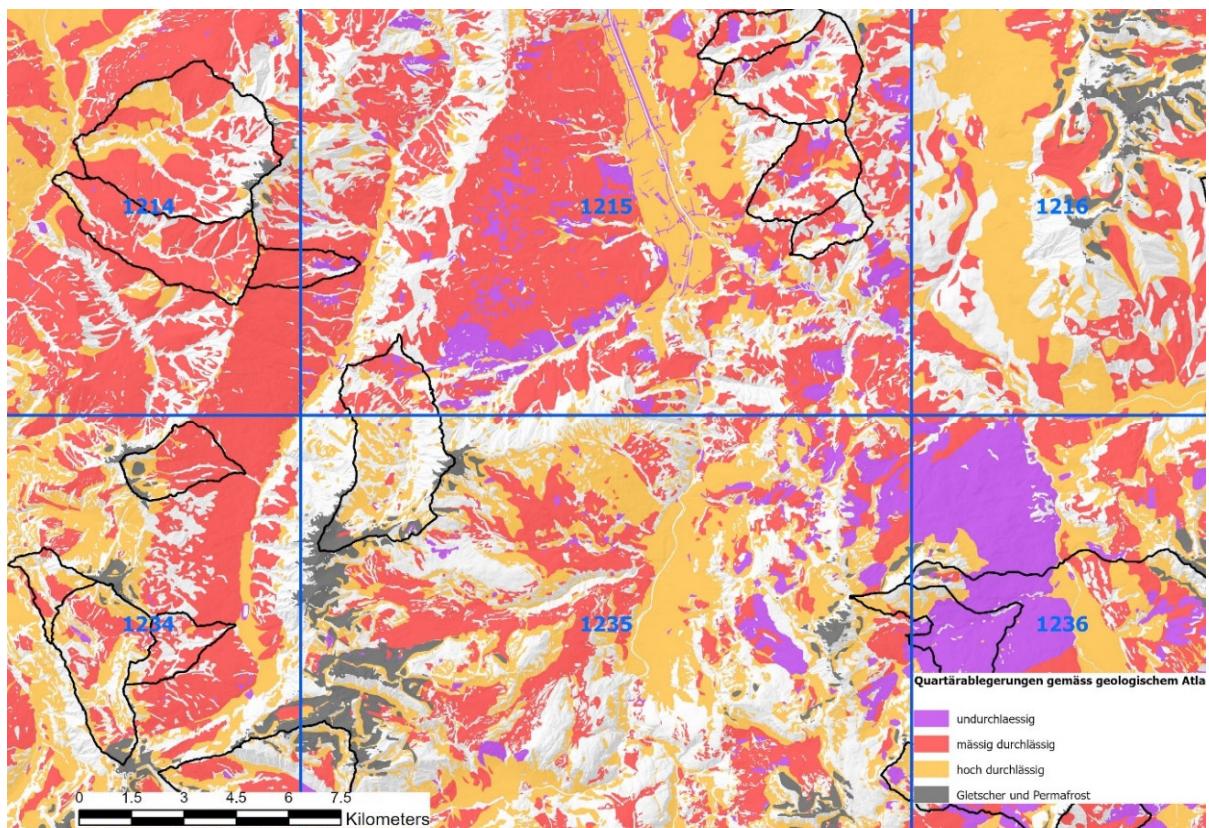
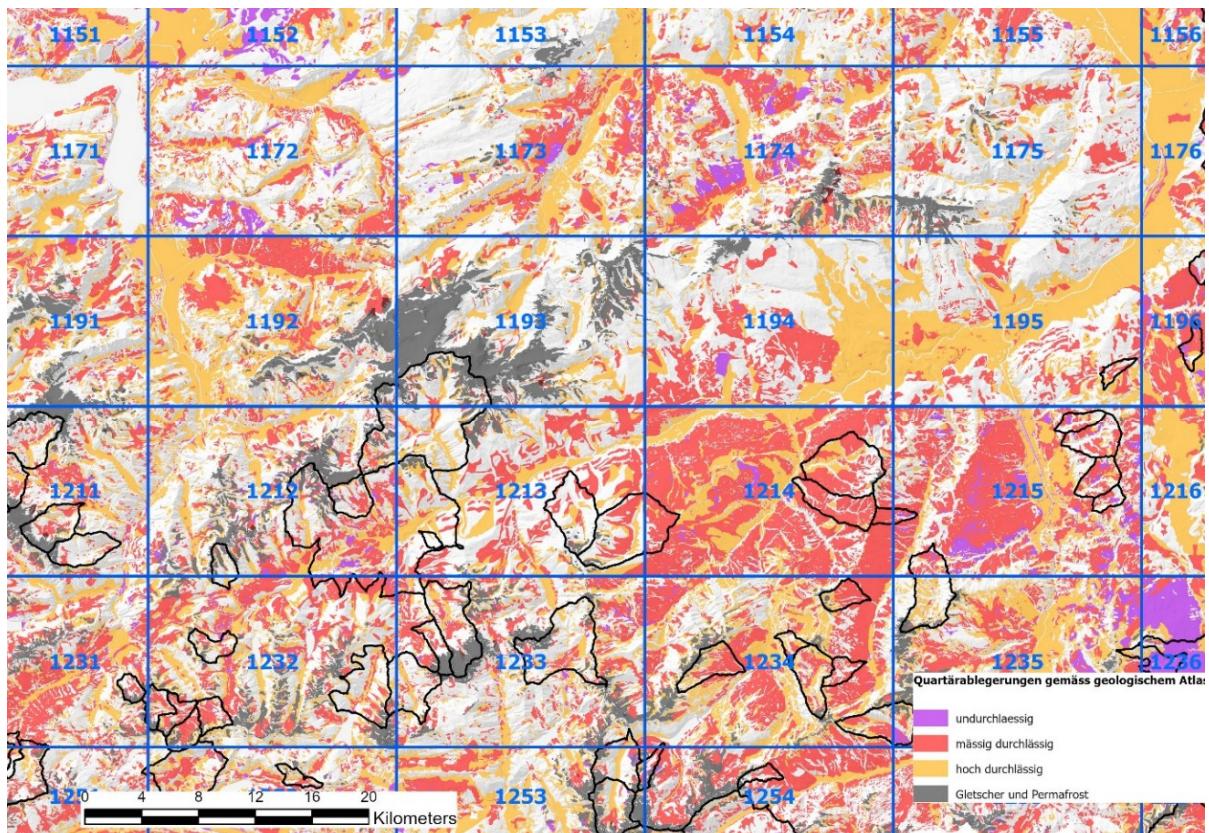
3816 Unsicherheiten in der Kartierung der Quartärlagerungen noch stärker ins Gewicht fallen als bei mittel grossen
3817 und grossen Einzugsgebieten.

3818



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

3821



3828 11.6.5 Q347-Prognose mit Random Forest

3829 Für alle 519 untersuchten Einzugsgebiete liegt ein Q347-Wert vor. Für die hier beschriebene Analyse wurde der
3830 spezifische Q347-Abfluss in $l\ s^{-1}\ km^{-2}$ verwendet. Die Beiträge von Gletschern und Permafrostböden wurden
3831 herausgerechnet, weil sie den Einfluss der unterschiedlichen lithologischen und tektonischen Eigenschaften
3832 verfälschen würden (vgl. Kapitel 6.4). Für die Einzugsgebiete Mittelland/Voralpen und Alpen/Tessin wurden
3833 unter der Mitarbeit des Machine-Learning-Spezialisten Dr. Konrad Bogner (WSL) je ein Random-Forest-Modell
3834 aufgesetzt, mit dem Ziel, das Q347 anhand der verfügbaren Inputdaten in ungemessenen Einzugsgebieten
3835 vorhersagen zu können. Random Forest ist ein Verfahren des überwachten maschinellen Lernens, das vor allem
3836 für Klassifikations- und Regressionsaufgaben eingesetzt wird. Es basiert auf dem Prinzip der
3837 Entscheidungsbäume, geht jedoch einen Schritt weiter, indem es eine Vielzahl solcher Bäume gleichzeitig
3838 verwendet, um die Genauigkeit und Robustheit der Vorhersagen zu erhöhen. Der verwendete Programmcode
3839 ist standardmäßig in R verfügbar (Liaw und Wiener, 2003). Um die Test- und Validierungsgebiete zu trennen,
3840 wurde die Leave-one-out Cross-Validierung angewendet. Bei diesem Verfahren werden jeweils die Prädiktoren
3841 des prognostizierten Einzugsgebiets im Lerndatensatz weggelassen und nur die Prädiktoren der übrigen
3842 Einzugsgebiete verwendet. Insgesamt wurden 152 Prädiktoren im Gebiet Alpen/Tessin und 57 im Gebiet
3843 Mittelland/Voralpen verwendet. Die im Random-Forest-Modell verwendeten Prädiktoren sind in Tabelle 17
3844 ersichtlich.

3845 Im Gebiet Mittelland/Voralpen betrug die Abweichung zwischen dem prognostizierten und beobachteten Q347
3846 in nur knapp über 50% der Einzugsgebiete weniger oder gleich viel wie 30% des beobachteten Q347. In den
3847 Alpen war dies in weniger als 50% der Einzugsgebiete der Fall. Die Abweichungen sind vor allem bei tiefen
3848 beobachteten Q347 hoch. Folgende Gründe für die tiefe Trefferquote werden vermutet:

- 3849
- 3850 - Im Verhältnis zu den beobachteten Werten wurden zu viele Prädiktoren verwendet. Eine Reduktion der
3851 Prädiktoren durch eine vorgängig durchgeführte Hauptkomponentenanalyse hat aber auch keine
3852 wesentliche Verbesserung gebracht. Deshalb wurde in diesem Projekt auf eine Weiterentwicklung des
3853 Modells verzichtet.
- 3854
- 3855 - Die quartären Ablagerungen in der geologischen Karte wurden zwischen den verschiedenen
3856 Kartenblättern inkonsistent kartiert. Es gibt Kartenblätter, in welchen die quartären Ablagerungen sehr
3857 detailliert kartiert wurden. In anderen Kartenblättern wurden diese aber nur sehr grob und rudimentär
3858 abgegrenzt (Kapitel 11.6.4 f.).
- 3859
- 3860 - Bei den kristallinen Decken werden die Q347-erhöhenden Effekte stark durch die Anzahl Klüfte und
3861 durch die Deformationsgefüge innerhalb der Klüfte beeinflusst (Kapitel 11.6.4 d)). Diese sind in den
3862 geologischen Karten nicht enthalten. Um eine verlässliche statistische Vorhersage von Q347 in
3863 ungemessenen Einzugsgebieten durchführen zu können, fehlen entscheidende tektonische
3864 Informationen.

3865

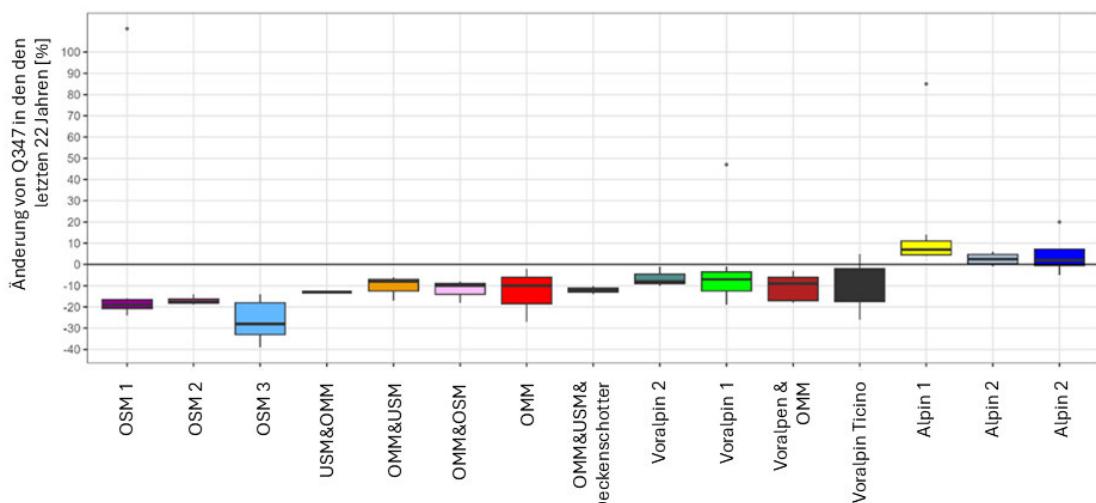
3866 - Die Q347 im Mittelland werden gemäss den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit im Wesentlichen
3867 durch die Feinanteile in der Molasse und in der Moräne kontrolliert und können darüber hinaus durch
3868 weitere Faktoren wie Versickerungs- und Exfiltrationsstrecken sowie Wasserentnahmen und
3869 Wasserzugaben aus fremden Einzugsgebieten stark beeinflusst werden. Da solche Informationen
3870 derzeit flächendeckend nicht im notwendigen Detaillierungsgrad verfügbar sind, ist mit einem solchen
3871 statistischen Prognoseverfahren eine exakte Bestimmung des Q347 ohne zusätzliche
3872 Abflusseinzelmessungen derzeit nicht möglich.

3873

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 %).

3887



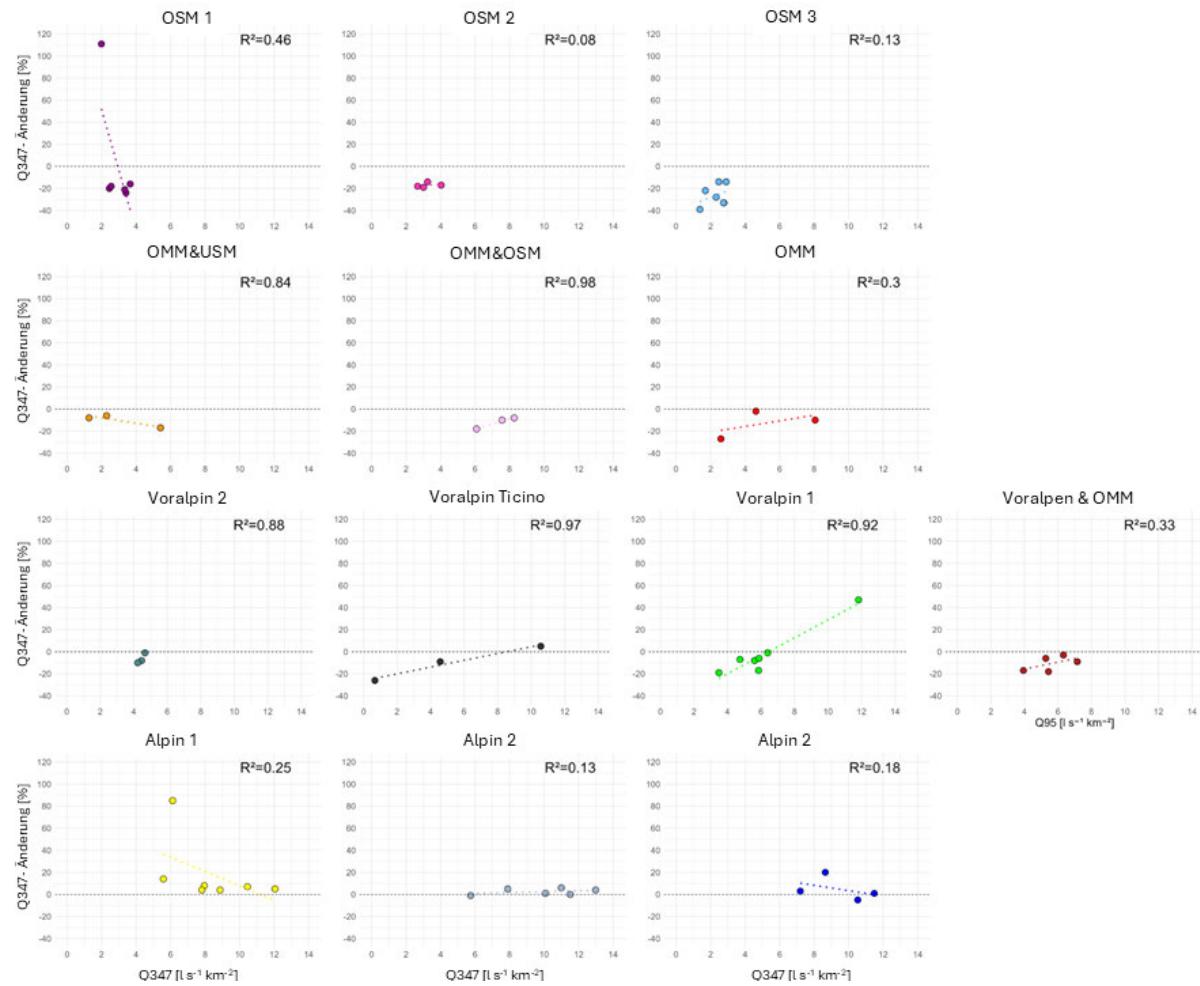
3888

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 substanziellem Anteil an OMM ist der Zusammenhang jedoch deutlich erkennbar.

3897

3898



3899

3900 *Abbildung 80: Änderung von Q347 zwischen der Periode 1991 bis 2022 und der Periode 2011 bis 2022 in Abhängigkeit von*
 3901 *Q347 (2011 – 2022) für verschiedene Dauerkurvengruppen.*

3902

3903

12.1 Interpretation

3904 Die stärkste Abnahme des Q347 in den letzten 25 Jahren erfolgte in den Einzugsgebieten mit den geringsten
 3905 Volumina an langsam entwässernden Speichern (Dauerkurvengruppe OSM 3, vgl. Abbildung 23, Kapitel 8.9.1 a)).
 3906 Die Q347-Abnahmen in Einzugsgebieten der Dauerkurvengruppe OSM 4 wären womöglich noch stärker. Für
 3907 diese sind aber keine Messreihen seit 1991 verfügbar. Am anfälligsten auf ein abnehmendes Q347 ist also
 3908 Einzugsgebiete mit geringen Volumina an langsam entwässernden Grundwasserspeichern. Deshalb sind
 3909 Voralpengebiete und Einzugsgebiete der Gruppe OMM weniger anfällig. Da in den Voralpen 30 – 50% der
 3910 Niedrigwassertage im Spätherbst und Winter stattfindet, kommt es dort möglicherweise zu mehr Einfluss von
 3911 Schneeschmelze, weshalb das Q347 nicht so stark zurückgegangen ist wie in Einzugsgebieten im Mittelland. In
 3912 den Alpen führten milder Winter zu mehr Regenereignissen bis in grössere Höhenlagen und zu einer
 3913 Verkürzung der Abflussrezession im Spätwinter, was in einem Anstieg des Q347 resultierte.

3914

3915

3916 13 Schlussfolgerungen

3917 13.1 Einfluss von Lithologie, Topographie und Klima auf 3918 Dauerkurven im Niedrigwasserbereich

3919 Die Auswertung der korrigierten Abflussmessreihen für den Zeitraum 2011 bis 2022 zeigt, wie der litho-
3920 stratigraphische Aufbau, die mittlere Geländeneigung, die Flächenanteile des mässig durchlässigen Quartärs und
3921 der mittlere Jahresniederschlag die Beziehung zwischen dem Dauercurvengefälle im Niedrigwasserbereich
3922 (Q290/Q347) in Abhängigkeit von Q347 beeinflussen (Kapitel 8). Untersucht wurden 102 Einzugsgebiete im
3923 Mittelland, in den Voralpen, den Alpen und im Tessin. Insgesamt zeigt sich bei einer Abnahme von Q347 von 17
3924 auf $0.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ eine Zunahme des Dauercurvengefälles (Q290/Q347) um den Faktor 3.75. Dieses Verhalten
3925 widerspiegelt das generelle Verhalten der Grundwasserspeicher. Die Entwässerung erfolgt rascher, je kleiner die
3926 Beiträge aus den tiefliegenden Grundwasserspeichern sind.

3927 Im Mittelland nimmt das Dauercurvengefälle in Gebieten mit Oberer Süßwassermolasse (OSM) und Unterer
3928 Süßwassermolasse (USM) deutlich stärker zu (Faktor 3) als in solchen mit Oberer Meeresmolasse (OMM, Faktor
3929 1.15). Wie in Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind, sind die Dauercurvengefälle von alpinen
3930 Einzugsgebieten geringer als die Dauercurvengefälle von Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OSM oder USM
3931 aufgebaut sind. In den Alpen hängt die Beziehung zwischen Dauercurvengefälle und Q347 nicht vom litho-
3932 stratigraphischen Aufbau, sondern vom mittleren Jahresniederschlag ab. Bei einer Reduktion von Q347 von 17
3933 auf $4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ steigt das Gefälle der alpinen Dauercurven bei geringen Jahresniederschlägen um den Faktor 1.2,
3934 bei hohen Jahresniederschlägen steigen die Dauercurvengefälle nur geringfügig stärker an (Faktor 1.35). In den
3935 Voralpen der Alpennordseite steigen die Dauercurvengefälle um den Faktor 1.65, im Tessin um den Faktor 1.8.
3936 Im Mittelland lässt sich das Verhalten des Dauercurvengefälles in Abhängigkeit von Q347 für litho-
3937 stratigraphisch ähnlich aufgebaute Einzugsgebiete mit Potenzfunktionen beschreiben. In den Voralpen und
3938 Alpen ist dies bei Einzugsgebieten mit vergleichbarem mittlerem Jahresniederschlag der Fall. Einzugsgebiete mit
3939 ähnlichem Verhalten des Dauercurvengefälles wurden zu Dauercurvengruppen zusammengefasst. Basierend
3940 auf den Ergebnissen dieser Auswertungen wurde ein Regelwerk entwickelt, mit dem sich die
3941 Dauercurvengruppen anhand von Einzugsgebietsparametern wie mittlerer Höhe, litho-stratigraphischem
3942 Aufbau, mittlerem Jahresniederschlag, mittlerer Geländeneigung und dem Anteil an mässig durchlässigen
3943 Quartärlagerungen bestimmen lassen.

3944 Die steil abfallenden Dauercurven von Einzugsgebieten, die aus OSM oder USM aufgebaut sind, röhren daher,
3945 dass die Abflüsse zwischen Q290 und Q347 stärker durch Beiträge von rasch entwässernden oberflächennahen
3946 Grundwasserspeichern gespeist werden als die entsprechenden Abflüsse von alpinen Einzugsgebieten oder
3947 Mittelland-Einzugsgebieten, die aus OMM aufgebaut sind; denn die Beiträge der rasch entwässernden
3948 Grundwasserspeicher produzieren einen steileren Rückgang der Abflussganglinie als die der langsam
3949 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 Dauerkurvengefälle 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 ($Q < Q290$) von alpinen Einzugsgebieten werden ebenfalls von Beiträgen aus
3956 langsam entwässernden Grundwasserspeichern dominiert. Das ist der Grund die geringen Unterschiede in den
3957 Dauerkurvengefällen. In den Alpen fallen die Niederschläge im Winter meist in Form von Schnee. Das führt zu
3958 langen Abflussrückgangsphasen, 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 Q347 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 Q347.

3977

3978 Hohe Flächenanteile an Gletschern und Permafrostböden reduzieren die Q347 gegenüber unvergletscherten
3979 und permafrostfreien Einzugsgebieten erheblich. Die Dauerkurvengefälle wären ohne die vorgängigen
3980 Korrekturen der Abflussmessreihen unterschiedlich ausgefallen.

3981 13.3 Bestimmung von Q347, Dauerkurven und Rezessionskurven 3982 zwischen Q290 und Q347 in ungemessenen Einzugsgebieten

3983 Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde ein Verfahren entwickelt, um das Q347, die
3984 Niedrigwasserdauerkurve und die Niedrigwasserrezessionskurve von Einzugsgebieten im Mittelland, in den
3985 Voralpen, in den Alpen und im Tessin anhand von Abflusseinzelmessungen zu bestimmen (Kapitel 10). Im
3986 Mittelland zeigen Einzugsgebiete derselben Dauerkurvengruppe und mit ähnlich hohem Q347 ein vergleichbares
3987 Abflussverhalten bei Niedrigwasser (Kapitel 8.3 und 8.5). In den Alpen lässt sich ein ähnliches Niedrigwasser-
3988 Abflussverhalten zwischen Einzugsgebieten feststellen, die in vergleichbaren Klimaregionen liegen und ähnliche
3989 mittlere sowie minimale Höhen und Expositionen aufweisen.
3990 Dies ermöglicht es, das Perzentil von Abflusseinzelmessungen in den Untersuchungsgebieten zu bestimmen,
3991 indem das zum Messzeitpunkt registrierte Perzentil eines benachbarten Referenzgebiets mit langjähriger
3992 Abflussmessreihe und ähnlichem Abflussverhalten auf das Untersuchungsgebiet übertragen wird.
3993 Aus dem ermittelten Perzentil lässt sich mithilfe der Dauerkurvengruppe das Q347 und das Q290 ableiten
3994 (Kapitel 9.2), was die Bestimmung der Dauerkurve im Bereich zwischen Q290 und Q360 (Kapitel 9.4) ermöglicht.
3995 Das Verfahren wurde in 22 Einzugsgebieten im Mittelland und in 99 alpinen Einzugsgebieten getestet. Von drei
3996 durchgeführten Abflusseinzelmessungen wurde jeweils eine zur Bestimmung des Q347 und die beiden anderen
3997 zur Überprüfung der ermittelten Dauerkurve verwendet. In einigen alpinen Einzugsgebieten stand nur eine
3998 Überprüfungsmessung zur Verfügung.
3999 In den Testgebieten des Mittellands wichen der gemessene Abfluss bei 84 % der Überprüfungsmessungen um 20 %
4000 oder weniger vom Abflusswert der Dauerkurve ab. Bei 93 % der Messungen betrug die Abweichung höchstens
4001 30 %. In den alpinen Einzugsgebieten lagen 75 % der Abweichungen bei höchstens 20 % und 87 % bei höchstens
4002 30 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich unter Verwendung dieses Verfahrens bei nur geringem Mehraufwand
4003 erhebliche Fehleinschätzungen des Q347-Abflusses vermeiden lassen.
4004 Je besser der Messzeitpunkt gewählt wird, desto einfacher gestaltet sich die Auswahl geeigneter
4005 Referenzgebiete und desto zuverlässiger kann das Abflussperzentil der Abflusseinzelmessung bestimmt werden.
4006 Für eine erfolgreiche Bestimmung von Q347 und der Dauerkurve sind folgende Vorarbeiten erforderlich:
4007
4008 - Ermittlung möglichst exakter Einzugsgebietsgrenzen der Untersuchungsgebiete
4009 - Zuordnung der Untersuchungsgebiete zu den entsprechenden Dauerkurvengruppen
4010 - Auswahl von geeigneten Referenzgebieten
4011 - Abschätzung der unterirdischen Abflüsse unterhalb der Messstandorte
4012 - Erfassung von Wasserentnahmen oder -zugaben innerhalb der Untersuchungsgebiete.
4013

4014 13.4 Untersuchung der Q347-bestimmenden Speicher und 4015 Faktoren

4016 Um die Faktoren und Speicher, die das Q347 massgeblich bestimmen, identifizieren und besser verstehen zu
4017 können, wurde ein Datensatz mit Abflusswerten aus Einzelmessungen, Kurzzeitmessungen und
4018 Langzeitmessungen aus insgesamt 519 Einzugsgebieten zusammengetragen und ausgewertet. Von diesen 519
4019 Einzugsgebieten liegen 196 im Mittelland, 17 in den Voralpen der Alpennordseite, 47 in den Voralpen des Tessins
4020 und 259 in den Alpen. Die Daten stammen vom BAFU, von verschiedenen Kantonen, Gemeinden,
4021 Kraftwerksbetreibern, privaten Quellen sowie aus eigenen Abflussmesskampagnen. In 256 Einzugsgebieten
4022 führte M. Margreth mit Unterstützung von Mitarbeitenden der WSL eine bis drei Einzelmessungen bei
4023 Niedrigwasserverhältnissen durch. Für jedes Einzugsgebiet wurde ein Q347-Wert bestimmt. Je nach zeitlicher
4024 Auflösung der verfügbaren Messdaten kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz (Kapitel 11.2).
4025 Der Zusammenhang zwischen Q347 und verschiedenen Einzugsgebietsparametern wie litho-stratigraphischer
4026 Aufbau, Anteile von hochdurchlässigen, mässig durchlässigen und undurchlässigen Quartärablagerungen,
4027 mittlere Geländeneigung, tektonische Einheiten (nur Alpen), Flächenanteile an Waldbedeckung, mittlerer
4028 Jahresniederschlag und Gerinnendichte wurde anhand Regressionsanalysen und Boxplots untersucht.

4029 13.4.1 Mittelland und Voralpen

4030 Die höchsten spezifischen Q347-Abflüsse im Mittelland wurden in der Oberen Meeressmolasse (OMM) des
4031 zentralen Mittellandes registriert ($4.9\text{--}12.6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Deutlich niedriger sind die Q347 im westlichen Mittelland
4032 ($0.8\text{--}6.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). In der OMM der Region um die Stadt Bern variieren die Q347 stark ($0.6\text{--}16.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$).
4033 Diese regionalen Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Ablagerungsmilieus während der
4034 Sedimentation der Meeressedimente zurückführen: In wellendominierten Ablagerungsmilieus entstanden
4035 homogene Sandsteinschichten mit geringen Feinanteilen, die über hohe Speicherkapazitäten verfügen
4036 (zentrales Mittelland). In gezeitendominierten Ablagerungsmilieus wurden sandige, aber auch mehr feinkörnige
4037 Sedimente abgelagert, welche die Speicherkapazität reduzieren (westliches Mittelland). In der Region Bern sind
4038 beide Ablagerungsmilieus vertreten.
4039 Die Q347 liegen mit $0.3\text{--}4.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in der Unterer Süsswassermolasse (USM) und $0.2\text{--}6.9 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ in der
4040 Oberen Süsswassermolasse (OSM) deutlich unter den Werten der OMM im zentralen Mittelland. Dies ist auf die
4041 höheren Feinanteile in der OSM und in der USM zurückzuführen, die die Infiltrations- und Speicherkapazität der
4042 Molasse erheblich reduzieren. In der OSM des Napfgebiets sind laut geologischer Karte die Feinanteile gering,
4043 was in höheren Q347 resultiert ($4.4\text{--}10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Auch das Vorkommen grosser Schotterablagerungen kann die
4044 Q347 geringfügig erhöhen. Gemäss den Ergebnissen von Regressionsanalysen haben auch hohe Anteile an
4045 undurchlässigen und mässig durchlässigen Quartärablagerungen einen leicht Q347-senkenden Effekt. Diese
4046 beiden Effekte werden aber nur bei Einzugsgebieten mit geringen spezifischen Q347-Abflüssen sichtbar. Die
4047 grosse Streuung innerhalb der einzelnen Molasseformationen wird im Wesentlichen auf Unterschiede des
4048 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 ($Q347 = 5 -$
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 ($2 - 15 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Unter starker tektonischer Beanspruchung entstehen in den Graniten und Gneisen grössere
4075 Klufsysteme, 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

4085 Alpenfaltung zusammenhängen könnten. Es wird vermutet, dass das Muster der Festgesteinsspeicher vor allem
4086 auf Unterschiede in der tektonischen Beanspruchung, Unterschiede in der Ausrichtung und Häufigkeit von
4087 Klüften und Störungszonen und auf die Anfälligkeit auf spröde Deformation während der Heraushebung der
4088 Gesteine während der Alpenfaltung zurückgeführt werden kann.

4089 Die Auswertungen sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden:

4090

- 4091 - Es bestehen grosse Unterschiede im Detaillierungsgrad der Kartierung der Quartärablagerungen
4092 zwischen den einzelnen Kartenblättern der geologischen Karte (GeoCover).
- 4093 - Es fehlen Angaben über Mächtigkeit und Durchlässigkeit der verschiedenen Quartärablagerungen
- 4094 - Der Einfluss von Rutschungs- und Sackungsgebieten kann erheblich sein. Aufgrund der inkonsistenten
4095 Kartierung war eine detaillierte Auswertung jedoch unmöglich.
- 4096 - Die geologische Karte ist für die Verwendung im Massstab 1:25'000 gedacht. Deshalb wirken sich
4097 Unsicherheiten in der Kartierung der Quartärablagerungen auf die Abschätzung von Q347 in kleinen
4098 Einzugsgebieten stärker aus als in mittel grossen oder grossen Einzugsgebieten.

4099

4100 Die vorliegenden Ergebnisse sollen als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen. Um ein Verfahren zu
4101 entwickeln, mit dem die massgeblichen Speicher und Faktoren im Alpenraum kartiert werden könnten, ist ein
4102 erheblicher Aufwand für Grundlagenforschung und für die Bereitstellung von weiteren Grundlagendaten
4103 erforderlich. Wichtige Grundlagen wären eine detaillierte und konsistente Kartierung der Quartärablagerungen
4104 mit Angaben zu Mächtigkeiten und eine konsistente Kartierung der Klüfte und Störungszonen und der
4105 Deformationsgefüge.

4106 13.5 Einfluss des Klimawandels auf Q347

4107 Vergleiche der Q347-Abflüsse, hergeleitet von den Messreihen 1991 bis 2011 mit solchen, hergeleitet von den
4108 Messreihen 2011 bis 2022 zeigen ein deutliches Klimasignal. Zwischen diesen Perioden sank der Q347- Abfluss
4109 der Einzugsgebiete von Mittelland und Voralpen um bis zu 40 %, wobei die stärksten Rückgänge in Mittelland-
4110 Einzugsgebieten zu verzeichnen waren, die aus OSM und USM aufgebaut sind. In diesen sind die Beiträge aus
4111 langsam entwässernden Grundwasserspeichern an die Niedrigwasserganglinie am kleinsten. Am stärksten
4112 betroffen waren die Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppe-Gruppe OSM 3. Sie weisen die niedrigsten Q347-
4113 Abflüsse unter den Untersuchungsgebieten auf. Die Einzugsgebiete der Dauerkurvengruppe OMM und die
4114 Einzugsgebiete in den Voralpen waren weniger stark betroffen, weil sie eine grössere Kapazität an langsam
4115 entwässernden Grundwasserspeichern aufweisen. Im Gegensatz dazu zeigte sich in alpinen Einzugsgebieten ein
4116 relativer Anstieg des Q347-Abflusses, was auf wärmere Winter, häufigere Niederschlagsereignisse mit einer
4117 Schneefallgrenze ab 2000 m. ü. M und eine frühere Schneeschmelze zurückzuführen ist, wodurch die
4118 winterlichen Trockenperioden verkürzt werden.

4119

4120 **13.6 Ausblick**

4121 Diese Studie liefert detaillierte Einblicke in den Zusammenhang zwischen dem Niedrigwasserverhalten der
4122 Einzugsgebiete in der Schweiz und deren litho-stratigraphischen, tektonischen, topographischen und
4123 klimatologischen Eigenschaften. Diese Ergebnisse könnten die Entwicklung einer schweizweiten Karte
4124 ermöglichen, die Einzugsgebiete mit ähnlichen Q80/Q95-Mustern abgrenzt. Basierend auf einer solchen Karte
4125 liessen sich mit Hilfe von räumlich hoch aufgelösten Abflusseinzelmessungen und Abklärungen zu
4126 Wasserentnahmen und unterirdischen Abflüssen Q347-Abflüsse, Niedrigwasser-Dauerkurven und
4127 Niedrigwasser-Rezessionskurven für bisher unbekannte Einzugsgebiete mit grosser Genauigkeit ermitteln.
4128 Die Ergebnisse solcher Messkampagnen ermöglichen ein immer besseres Verständnis der Speicher und
4129 Faktoren, die die Abflüsse kleiner Q290 massgeblich kontrollieren. Dieses bessere Verständnis ermöglicht nicht
4130 nur die Entwicklung genauerer Q347-Abschätzverfahren, sondern auch die Entwicklung genauerer
4131 Niederschlags-Abfluss- und Wasserhaushaltsmodelle, was insbesondere in kleineren Einzugsgebieten deutliche
4132 Fortschritte bei der Niedrigwasservorhersage ermöglichen würde. Basierend auf solchen Messkampagnen
4133 lassen sich auch Versickerungs- und Exfiltrationsstrecken identifizieren und somit genauere Parameter für die
4134 Grundwassermodelle ermitteln. Die Ergebnisse erlauben zudem eine detaillierte Abschätzung der möglichen
4135 Auswirkungen des Klimawandels auf das zukünftige Niedrigwasserabflussverhalten kleiner Bäche und die
4136 Erstellung von detaillierten Karten zu den vorhandenen Trinkwasserreserven.
4137
4138

4139 **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 Amts 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., Björnsen 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 Süsswassermolasse*, 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., Délèze, 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. 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/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/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/s41467-021-23739-z>, 2021.
- 4207 Kenner, R., Noetzli, J., Hözle, 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 Publis 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 Floriancic, 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 Permafrof. 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 Schaeffli, 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/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-
4267 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/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-
4275 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., Schaeffli, 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, 2023.
- 4282 Wagner, T., Kainz, S., and Winkler, G.: Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten
4283 der Ostalpen. Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt
4284 Schwermetallbelastungen, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus / BMNT, 2021.
- 4285 Wechsler, T., Lustenberger, F., Schaeffli, 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>, 2020.

4293
4294

Anhang

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	Verfüg-barkeit Q347	Verfüg-barkeit Daten	Quelle
3	Redorta		2701422.5	1134337.5	Verzasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
5	Ri di Sera ob Fassung		2690112.5	1140325.5	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	Skiflirt	2680597.5	1129882.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
37	Flon	Oron La Ville	2552797.5	1157762.5	Oron	Vaud	K1VD	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
49	Grenet	Pigeon	2548857.5	1153002.5	Forel (Lavaux)	Vaud	K1VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
62	Iona	Pilgsteig	2709912.5	1236512.5	Ruhi (ZH)	Zürich	K1ZH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
100	Bach aus Eggentobel		2759677.5	1185382.5	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 Val Valtisch	unter Bruecke Strasse	2705282.5	1166477.5	Montagna da Schone	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
105	Bach Val Larisch	vor Zufluss ob Bruecke	2750117.5	1166402.5	Montagna da Schone	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
106	Bach Alp Nusrin		27482417.5	1166382.5	Montagna da Schone	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
107	Bach Alp Tumpir	Standort 2020	2748347.5	1166352.5	Montagna da Schone	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
112	Tambobach	ob Fassung	2752417.5	1168182.5	Montagna da Schone	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
115	Cannusabach	ob Fassung Saifen Platz	2743787.5	1171073.5	Tschappina	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
116	Bach Camaaertobel	Brücke Strasse	2740892.5	1168292.5	Safiental	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
117	Furratobelbach	ob Saifen Platz	2743217.5	1171073.5	Safiental	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
121	Bach Val d'Ring		2736072.5	1177907.5	Ilanz/Glion	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
122	Bach Val Flasch		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 Miedra	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	Zavrajia	ob Zavrajia	2719782.5	1177377.5	Trüe	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
129	Petersbach	Obersaxen	2726782.5	1178457.5	Obersaxen Mundau	Graubünden	APO Surseva	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Argo AG Hydroenergie, Baden (2012)
130	Eva da Sett	Bruecke Biuro	2770882.5	1147907.5	Surses	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
131	Eva da Sett	Kopfgebiet	2770422.5	1146092.5	Surses	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
132	Eva della Valletta		2769032.5	1147822.5	Surses	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
135	Bach Lava da Livzung		2766852.5	1158507.5	Surses	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
136	Immeralpbach	Davos Monstein	2778307.5	1175722.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
137	Oberalpbach	Davos Monstein	2778322.5	1175727.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
138	Riebenbach	Wissigenboden	2779402.5	1179107.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
139	Bach Grabetobel		2780097.5	1180892.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
140	Sertigbach	ob Fassung	2782397.5	1181347.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
142	Ducinbach	unterhalb Wasserfall	2784572.5	1175967.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
143	Schibach	Davos Dorf	2782632.5	1186537.5	Davos	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
144	Aua da Saglians	Tobel ob Tunnelportal	2802602.5	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 Sut/Caloegna	2808057.5	1178252.5	Schol	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
147	Talent	Chavoney	2532742.5	1172947.5	Chavoney	Vaud	K1VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie Kt. VD
148	Bach Val Zuort	Tobel ob Tarasp	2815422.5	1183807.5	Schol	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
149	Kar da Plevna	P1520 unterhalb Bruecke	2814457.5	1182997.5	Schol	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
150	Karigebach	Maien Dorf	2685502.5	1175117.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
151	Heinekreus	ob Gruerpäten	2678777.5	1171973.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
154	Görtzmettobelbach	Brücke	2681762.5	1177537.5	Wassen	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
155	Tiefenbach	unter Brücke Passstrasse	2678037.5	1160792.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
156	Siedlenbach	Brücke Passstrasse	2676197.5	1160112.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
157	Muttreuss	ob Brücke 1835	2680507.5	1158207.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
159	Witenwasserenreuss	Hohenbet	2681132.5	1158497.5	Realp	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
161	Moesa	Schnucht P17/0	2733802.5	1148592.5	Mesocco	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
162	Raepperbach	ob Fassung	2734767.5	1158322.5	Rheinwald	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
163	Bach aus Wangtobel	vor Zufluss Raepperbach	2734807.5	1158477.5	Rheinwald	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
167	Rein Cristalina	L1580	2707492.5	1164337.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
172	Rein da Fuorns	ob Fuorns	2708552.5	1169257.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
178	Rein da Tuma		2695617.5	1169172.5	Tujetsch	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
179	Rid di Fontanabba		2735422.5	1149137.5	Mesocco	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
181	Hinterhein	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	Gaffelwasser	P2160	2692007.5	1160357.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
188	Unteralpreuss	Brücke	2693522.5	1161232.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
189	Unteralpreuss	unter P2039	2802052.5	1160792.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
191	Muninacia Grande	vor Zufluss di Calcesti	2699477.5	1155322.5	Quinto	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
195	Valser Rhein	Brücke Lampertsch	2724302.5	1158407.5	Val	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
196	Valser Rhein bei Läntahtüte		2723032.5	1155702.5	Val	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
198	Horabach	Brücke Weg	2726337.5	1158307.5	Val	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
206	Cridoläc (Kump 1570)		2803732.5	1172727.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
207	Cridoläc (Camp Martin)	Teileinzugsgebiet	2804277.5	1128232.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
209	Ciancan	Clef	2800302.5	1131087.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
210	Ciancan	Alp Ciancan	2798682.5	1163307.5	Madulain	Graubünden	ANU / Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
211	Ciancan	Palu Granda	2797947.5	1130347.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
215	Freispielpoststollen	Alp Flix	2768887.5	1154592.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
220	Campobach	ob Fassung	2803852.5	1140682.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
231	Palübach	Palüsee	2799067.5	1138832.5	Poschiavo	Graubünden	Repower	Kurzzeitmessung	DK	nein	nein	Repower AG
234	Gelgia	Stalveder	2769157.5	1150392.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	DK	nein	nein	EWZ
235	Aua da Pisch		2803027.5	1166552.5	Val Müstair	Graubünden	Providemaint Electric Müstair	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Providemaint Electric Müstair
236	Aua da Schais		2829422.5	1165052.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
248	Ova d'Esch	Alp Belvair	2790082.5	1163307.5	Madulain	Graubünden	ANU / Repower	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
249	Taschinabach		2767042.5	1205012.5	Seewis im Prättigau	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
250	Schraubach		2772367.5	1205057.5	Schiers	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
252	Schrangabach	ob Mündung	2766812.5	1204852.5	Grusch	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
260	Furnerbach	Schlucht ob Pragmarin	2772012.5	1201062.5	Jenaz	Graubünden	Repower	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Repower AG
261	Ariesbach	ehem. Bad Fidris	2767097.5	1197282.5	Fidris	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	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Repower AG
273	Ciötti Alpbach		2784527.5	1198112.5	Klostres	Graubünden	Klostres Madrisa Bergbahnen AG	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Ciötti Madrisa Bergbahnen AG
282	Clözza 1 (oberhalb Fassung)		2806562.5	1185437.5	Schol	Graubünden	Fond „Oikostrom aus Wasserkraft“	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Fond „Oikostrom aus Wasserkraft“, Gemeinde Schol
285	Ria di Ri 1		2730967.5	1137442.5	Rosla	Graubünden	Gemeinde Rosla	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Gemeinde Rosla
293	Parnegl	bei Sils I. D.	2756075.5	1174852.5	Scharans	Graubünden	Bauernverein Domleschg	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domleschg
294	Crusch	ob Scharsan	2755307.5	1175622.5	Scharans	Graubünden	Bauernverein Domleschg	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domleschg
295	Almensesertobel	ob Almens	2754274.5	1179472.5	Domleschg	Graubünden	Bauernverein Domleschg	Kurzzeitmessung	EM	ja	nein	Bauernverein Domleschg
296	Duscherbach (oben)		275									

Tabelle A1 – Teil 2: 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
419	Ava da Nandro		2762542.5	1158577.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
430	Ava da Fallér (Tga1)		2765202.5	1153282.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
432	Ava da Natons		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	Gelga (Böglia)		2772552.5	1148342.5	Surses	Graubünden	EWZ	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	EWZ
440	Zufuss Adont (unterhalb Cre dig Lai)		2760525.5	1163327.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
441	Adont (Marangabrücke)		2760502.5	1163327.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
464	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	Fornobrücke	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	Pfaffnern	Vordemwald, Oberi Sagl	2634282.5	1234482.5	Vordemwald	Aargau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
503	Pfaffnern	Pfaffnau, Bergmatte	2634562.5	1231682.5	Pfaffnau	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	Stempach		2632437.5	1228492.5	Roggiswil	Luzern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Nael & Margreth (2017)
510	Luterbach	direkt ob Damm	2612862.5	1208662.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
511	Luterbach	unterhalb Zufuss von Vordere S	2612497.5	1207722.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
513	Chrouchtalbach	Engstelle ob Zufuss Joggelisgru	2606577.5	1205222.5	Blöigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
514	Bach Laufengrabe	200m ob Zusammensetzung mit C	2607532.5	1205067.5	Blöigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
515	Zufuss Ost zum Laufengrabe	Chlosterholzli unterhalb Fels	2607732.5	1204682.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
518	Stadebach	vor Zusammensetzung mit Luterbi	2612467.5	1207452.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
520	Gummigrab	150m ob Zusammensetzung mit L	2612672.5	1207547.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
521	Bach Wyssstammel	Fluebad 60m ob Zusammensetzung bei Lof	2610367.5	1206132.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
522	Feisterbach	10m vor Zusammensetzung Lochn	2610302.5	1206102.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
523	Bach Tannbodenmatt	Zufuss 4 Tannboden	2609602.5	1204962.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
524	Bach Tannbodenmatt	Zufuss 4 Tannboden	2609597.5	1205022.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
525	Bach Juckergrabe	ob Steilstufe bei Weiler	2607332.5	1204552.5	Krauchthal	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
526	Bach südli. Lüthaus	200m ob Strasse	2612512.5	1206812.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
527	Bach Breitenwald	240m ob Strasse	2612462.5	1206182.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
528	Bach Buhlwald	215m ob Teerstrasse Lauterba	2611902.5	1205087.5	Lützelhüfli	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
529	Luterbach	bei Abzweigung Breitenwald	2612172.5	1206171.5	Oberrüti	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
531	Luterbach	bei letztem Bach in Sied. Lauter	2611757.5	1205362.5	Lützelhüfli	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
532	Sülenbach	vor Maander	2599377.5	1195807.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
533	nenelisgrabe	Brücke unter Ryloch	2600107.5	1195182.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
534	Almtrüebgrabe	unter Brücke	2600407.5	1195151.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
536	Scherlach	Zwischengebiet Niederscherli	2594077.5	1192502.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
537	Maengstorfbach	im Graben	2595267.5	1192393.5	Köniz	Bern	KI FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KI, FR
539	Scherlach	Scherlach - Niederscherli	2596197.5	1192412.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
540	Bitfbach	Niederscherli, vor Zufuss links	2596102.5	1192362.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
541	Schwandgrabe	50m vor Zusammensetzung mit Sc	2598327.5	1192057.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
542	Scherlach	Muehle	2598942.5	1191917.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
543	Übersgrabe	Scherlach, Bushaltestelle	2599077.5	1191882.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
546	Muehleholzgrabe	Brücke neben P275	2598877.5	1188257.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
547	Buetschelbach	Niederbuetsch - Muehlehatt	2598857.5	1188282.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
548	Handmagdgrabe	Scherlau, Ruine Sternenberg	2599392.5	1188082.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
549	Buetschelbach	Muehlehatt	2600657.5	1187217.5	Rueggisberg	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
550	Truebach	Niederbuetsch 30m unterhalb	2607877.5	1190432.5	Oberralp	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
551	Choholzgrabe	Kehrmühle, oberhalb Bauernh	2617787.5	1214912.5	Heimiswil	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
552	Chasenare	direkt unter P660	2618022.5	1215022.5	Wynigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
553	Chapellenbach	Obholz bei Unterforstberg	2620237.5	1219642.5	Wynigen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
555	Romannino	Orolio - Punkt 290	2708492.5	1093932.5	Tresa	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
556	Liora	Molinozzi di Motteggio	2707422.5	1094492.5	Tresa	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
557	Magliajina	Mugena bei Schiesslstand	2711787.5	1100982.5	Alto Malcantone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
559	Bach im Val Frisco	Brücke bei Hof	2711767.5	1100762.5	Alto Malcantone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
560	Come de Bevico		2709129.5	1097952.5	Lemme	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
561	Bach im Val Viria	unter Strassenbrücke	2708802.5	1109377.5	Gombergo	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
562	Bach Val di Trodo		2712823.5	1109327.5	Gombergo	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
563	Bach Manti Rotto		2710342.5	1113797.5	Gombergo	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
564	Fiume Belto	ob Fassung	2712337.5	1104147.5	Caprisca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
565	Cassarate		2722197.5	1104367.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
566	Rale delle Spine	vor Zufuss 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 Carà		2724682.5	1106207.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
569	Bach im Val de Cugno	bei Cozzo	2725967.5	1105432.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
570	Zufuss Cassarate P984		2726157.5	1105287.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
571	Cassarate	50m ob Brücke	2726137.5	1105187.5	Lugano	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
572	Vedeggio	Engstelle bei Sigirino	2714857.5	1104037.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
573	Bach im Valle Cusella		2714107.5	1104567.5	Mezzovico-Vira	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
574	Vedeggio	Schlucht Camignolo	2716247.5	1107382.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
575	Bach Cugnò		2714227.5	1109622.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
576	Bach Valle Brugh		2714967.5	1109397.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
577	Bach im Valle Sorecina		2715262.5	1109975.5	Monteceneri	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
578	Bach Cadenazzo West		2716802.5	1110657.5	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	kleine Brücke bei Fuhren	2547922.5	1180962.5	Rovray	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
609	Zufuss Menthue links in Le Mod	Brücke	2544307.5	1177827.5	Cronay	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
610	Le Lembrax	unter Bauernhof Moulin du Pon	2544162.5	1177267.5	Donnelye	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
611	Le Sauteru	vor Mündung in Menthue	2543862.5	117575.5	Boley-Magnoux	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
612	La Greyle	70m ob Zusammensetzung mit Sal	2543722.5	1175497.5	Oppeno	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
616	Menthue	Gossens	2543977.5	1176474.5	Oppeno	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
617	Ruisseau du Villard	Gossens 50m ob Strasse	2543762.5	1177232.5	Donnelye	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
618	Ruisseau du Lin	Gossens unter Brücke	2543872.5	1177332.5	Cronay	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
619	Le Sauteru	bei Oppens, 100m vor STEP	2543222.5	1173777.5	Oppeno	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
620	La Forlause	bei Oppens, 30m ob STEP	2543922.5	1173802.5	Oppeno	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
621	Augine	bei Ogin - Le Moulin, unter Brücke	2545447.5	1174197.5	Boley-Magnoux	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
630	Orendola		2734823.5	1129487.5	Lostallo	Graubünden	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	Hoehenlinie 1600	2679527.5	1129127.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
635	Zufuss Larchaa ob Hoehenlinie 1600		2679462.5	1129122.5	Bosco/Gurin	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
637	Bach bei Vela		2691987.5	1140777.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
638	Rid di Crosa	Brücke Tunnel</td										

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

Id	Name	Messstandort	X_KOORD	Y_KOORD	Gemeinde	Kanton	Besitzer	Zeitliche Messauflösung	Berechnungsmethode	Verfügbarkeit Q347	Verfügbarkeit Daten	Quelle
668	Calancasca	L1340	2730297.5	1142432.5	Rossa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
669	Verasca	Vegorress	2703212.5	1137607.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
674	Medelser Rhein	ob Brücke Sogn Glon	2706067.5	1164662.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
679	Cheloneuss	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 Fassung	2789997.5	1181117.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
683	Aua da Fless		2767627.5	1181332.5	Zernez	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
686	Beverin	nach Zufuhr mit Savrettabach	2779172.5	1157962.5	Samaden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
689	Beverin	Gianda Naira - H 1940	2783057.5	1159832.5	Samaden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
691	Aua da Vst Val		2695672.5	1169062.5	Tujetsch	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
695	Weltschöbelbach	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	1167837.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
698	Aua da Vau		2878642.5	1184612.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
699	Aua da Prasuera		2830037.5	1153162.5	Val Müstair	Graubünden	K1 GR	Kurzzeitmessung	EM	ja	ja	WSL
700	Munzana	ob Fassung	2830917.5	1156212.5	Val Müstair	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
702	Rein da Püttas		2799742.5	1169875.5	Medel (Lucmagn)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
707	Bremmo del Lucmagn	Pro Natura-Zentrum	2706852.5	1155107.5	Blenio	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
747	Osura	Bilione - Punto scuro	2703672.5	1128167.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
748	Osura	Daghe di Fuori	2701252.5	1129187.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
749	Osura	Valdo	2699167.5	1130182.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
750	Riale Valle della Porta		2710722.5	1117972.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
752	Bach Val Flanca		2710722.5	1118902.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
753	Bach Valle di Muino		2710182.5	1119897.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
754	Riale d'Efa		2705267.5	1132737.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
755	Riale da Carechia		2688077.5	1135975.5	Cevio	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
756	Riale da Semet		2692312.5	1134417.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
757	Riale di Tome		2694442.5	1137377.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
759	Riale Valle di Prato		2696792.5	1138347.5	Lavizzara	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
760	Morobbia	vor Zufuss Stausee	2726157.5	1114112.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
761	Riale Cengholo	Bruecke Wanderweg	2725892.5	1114207.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
762	Riale da Prada	Bruecke Fahrweg	2727642.5	1114478.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
763	Zufuss Melera aus Val di Fossada		2728967.5	1114187.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
764	Morobbia	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 Sermirena		2714172.5	1115047.5	Cugnasco-Gerra	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
767	Riale Albionasca	Madonna della Valle	2719717.5	1116492.5	Bellinzona	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
768	Riale Cauco	ob Zufuss	2723297.5	1118177.5	Roveredo (GR)	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
769	Calancasca	Cauco unterhalb Bruecke	2729382.5	1132977.5	Calancasca	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
770	Riale di Muttli		2697112.5	1114552.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
772	Rid di Verdasio		2692292.5	1113032.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
773	Riale del Piz Leone		2693007.5	1112427.5	Centovalli	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
779	Austfuss Oberaargletscher	Austfuss Gletscher	2660757.5	1154337.5	Guttannen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
783	Feira Vspal	Saas Fee	2637527.5	1105892.5	Saas-Fee	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
785	Austfuss Glacier de la Corbassière		2588812.5	1095667.5	Valde Bagnes	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
786	Dyare da Fassung		2587177.5	1094942.5	Valde Bagnes	Valais	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
787	Bottwasser	ob Zufuss Unterapareuss	2693407.5	1161267.5	Andermatt	Uri	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
788	Meleneurus	vor Zufuss Goretzmettenbach	2681592.5	1177122.5	Wassen	Uri	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	Cicinetto		2706702.5	1141077.5	Faido	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
794	Riale di Lodrino		2718512.5	1128847.5	Rivera	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
795	Riale d'Ifraga		2717462.5	1131997.5	Rivera	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
859	Buron	Epauleyres	2538737.5	1176512.5	Belmont-sur-Yverdon	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
865	Talent	Malpalud	2539257.5	1163822.5	Assens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
867	Talent	Montheron	2539737.5	1160672.5	Breigny-sur-Morens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
868	Broye	Maracon	2575782.5	1156157.5	Reinmau	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
869	Broye	Vuamarens	2518102.5	1165022.5	Ursy	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
870	Le Carrouge	Syens	2502507.5	1166107.5	Syens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
871	La Bressonne	vor Zusammenfluss, L500	2549007.5	1112247.5	Roveredo (GR)	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
872	La Mérine	Moudon	2549947.5	1168712.5	Moudon	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
873	La Cérulae	Lucens	2553462.5	1173892.5	Lucens	Vaud	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
920	Urbach	Mattenalp Gummern	2606567.5	1163752.5	Innertkirchen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
925	Aare	Unteraargletscher	2662747.5	1157632.5	Guttannen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
1000	Plaffnern	Vordemwald, Pegel	2635482.5	1237757.5	Vordemwald	Aargau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie K1, AG
1002	Bach Joggelisgrabe	160m oberhalb Strasse	2606632.5	1205417.5	Bolligen	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
1021	Trutzbottelbach	Malix	2759777.5	1188997.5	Churwalden	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2000	Trottegrabe	oberhalb Hof Trottebuehl	2600142.5	1159692.5	Köniz	Bern	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2002	Osura	Bolastro	2702022.5	1128722.5	Verasca	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
2034	Broye	Payerne	2561687.5	1187317.5	Payerne	Vaud	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAU
2206	Melera	Morobbia	2726987.5	1167117.5	Bellinzona	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2263	Chamerabach	La Punt-Chamues-ch	2791437.5	1160602.5	La Punt-Chamues-ch	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2269	Lonza	Blatten	2629127.5	1140932.5	Blatten	Valais	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2327	Dischmabach	Davos - Kriegstetten	2768217.5	1183367.5	Davos	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2347	Riale di Roggiasca	Roveredo	2735342.5	1118157.5	Roveredo (GR)	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2356	Riale di Calneggia	Pegel BAU	2684977.5	1135957.5	Cevio	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2430	Rein da Sumvitg	Sumvitg: Encardens	2718797.5	1167702.5	Sumvitg	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
2437	Parimont	Eublens	2552022.5	1161727.5	Rue	Fribourg	BAFU	Langzeitmessung	EM	ja	ja	Hydrometrie BAU
2612	Riale di Pincasia	Lavertezzo	2708067.5	1123957.5	Verasca	Ticino	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU
4000	Menthue	Yonand	2545402.5	1180882.5	Yonand	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	EM	ja	ja	Hydrometrie BAU
6401	Farbottelbach	ob Wasserfassung	2770602.5	1189602.5	Arosa	Graubünden	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
8000	Altbach	Bassersdorf	2699002.5	1156562.5	Bassersdorf	Zürich	K1 ZH	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie K1, ZH
9001	Ribo	Nähe Talstation Monte Chia	2667317.5	1120732.5	Onsernone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
9002	Ribo	Piano delle Cascine bei Restau	2664482.5	1121242.5	Onsernone	Ticino	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
1100	Hellbach		2695217.5	1158167.5	Winterthur	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
1502	Lavinuz		2803192.5	1184452.5	Zernez	Graubünden	Gemeinde Lavin	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Gemeinde Lavin (2011)
1504	Ava da Tisch		2777777.5	1165542.5	Bergün Filisur	Graubünden	Albtua-Landwasser Kraftwerke AG	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Albtua-Landwasser Kraftwerke AG (2016)
1505	Avigo	Arvigo	2728837.5	1129207.5	Calanca	Graubünden	BKW Energie AG / Comune Calanca	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	BKW Energie AG e comune di Calanca (2015)
1507	Pischlavino	Plan di Gess	2800872.5	1144147.5	Pischlavino	ETH	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Florianic et al. (2018)	
1508	Bach Val di Gess		2800617.5	1143902.5	Pischlavino	ETH	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Florianic et al. (2018)	
1509	Pischlavino	Hang D	2802112.5	1142002.5	Pischlavino	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Florianic et al. (2018)	
15010	Bach Val da Campasc		2801762.5	1142992.5	Pischlavino	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Florianic et al. (2018)	
15011	Zufuss zum Krummbach bei Bettlu		2644132.5	1121512.5	Simpol	Valais	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	nein	Nael & Marg

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	Verfügbarkeit Q347	Verfügbarkeit Daten	Quelle
15041	Salto	Maggia	2697832.5	1122997.5	Maggia	Ticino	KT TI	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15042	Trifflwasser	Chempenwang	2668802.5	1172662.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Langzeitmessung	DK	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15043	Steinwasser	Bruecke bei Hotel Steingletsch	2675662.5	1175947.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Langzeitmessung	DK	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15044	Gigibach	Murnetwies	2672622.5	1176157.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15045	Steinwasser	Murnetwies	2672582.5	1176172.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15047	Wendelnbach	bei Fassung KWO	2671872.5	1177202.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Kurzzeitmessung	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15048	Aerlenbach	Fassung	2664797.5	1163022.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15049	Grubenbach	Fassung	2664867.5	1162397.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15051	Gaertenbach	vor Zufluss See	2668207.5	1160297.5	Guttannen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15052	Henglbach		2668172.5	1180912.5	Innertkirchen	Bern	KWO	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Kraftwerke Oberhasli, KWO
15053	Drance de Bagnes	Aufstuss Glacier Otemma	2598517.5	1087312.5	Valde 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	Wyswasser	Fassung KW Obengoms	2653772.5	1144532.5	Fieschertal	Valais	KW Obengoms	Langzeitmessung	DK	nein	nein	gw& VAW (2022)
15061	Riedbach	ob Schlucht ob Fassung	2630457.5	112957.5	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	Adon	Bruecke Salouf	2763122.5	1164552.5	Surses	Graubünden	EWZ	Einzelmessungen	EM	nein	nein	Elektrizitätswerke Zürich EWZ (2014)
15069	Berscherbach	Bergis	2744882.5	1219082.5	Walenstadt	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
15070	Ragnatscherbach	Mels	2748382.5	1215077.5	Mels	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
15071	Truebbach	Truebbach	2754667.5	1215382.5	Wartau	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
15072	Seest	Weisstannen	2744887.5	1206292.5	Mels	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
15073	Goerbsbach	Vaetts	2752332.5	1199607.5	Pläfers	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
15074	Schächen	Buerjen	2692467.5	1191792.5	Bürglen (UR)	Uri	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15075	Grostalbach	Isenthal	2685572.5	1199632.5	Isenthal	Uri	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15076	Aua da Russelen	Stausee mit Fassung	2711397.5	1177465.5	Disentis/Mustér	Graubünden	AXPO	Kurzzeitmessung	DK1	ja	nein	Axpo AG Hydroenergie, Baden (2011)
15077	Gelgia	Burvagn	2764352.5	1165767.5	Surses	Graubünden	EWZ	Langzeitmessung	DK	nein	nein	EWZ
15078	Rosebach	Pontresina	2788782.5	1151687.5	Pontresina	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15079	Inn-Einzugsgebiet unterhalb Crastas		2816807.5	1085892.5	Scuol	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15080	Rom	Muestair	2830802.5	1168707.5	Val Müstair	Graubünden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15081	Vorderherin - Restwasserried	Pardomat	2711612.5	1175317.5	Disentis/Mustér	Graubünden	AXPO	Kurzzeitmessung	DK1	nein	nein	Axpo AG Hydroenergie
15082	Buron	Gressy	2538922.5	1178487.5	Verdon-les-Bains	Vaud	KT VD	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, VD
15083	Chrouchtalbach bei Krauchthal	Pegel Krauchthal	2609787.5	1207552.5	Krauchthal	Bern	KT BE	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, BE
15084	Vedeggio	Isone	2720242.5	1110162.5	Isone	Ticino	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15085	Cuccio	Porteizza	2731749.1	1100407.8	Italien	Italien	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15086	Magliasina	Magliaso	2711607.5	1093302.5	Magliaso	Ticino	BAFU	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15087	Sciarolo	Barbengo	2731387.5	1090017.5	Lugano	Ticino	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15088	Mara	Mareggia	2719037.5	1088202.5	Val Mara	Ticino	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15089	Laveggio	Mendrisio	2719517.5	1082137.5	Mendrisio	Ticino	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15091	Faloppa	Chiasso	2722627.5	1076862.5	Chiasso	Ticino	KT TI	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, TI
15092	Breggia	Chiasso	2723307.5	1078327.5	Balerna	Ticino	BAFU	Langzeitmessreihe	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
15093	Gottern	Poffetsmühle	2585032.5	1182113.5	Tafers	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15094	Sonnaz	La Corbat	2576062.5	1187047.5	La Sonnaz	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15095	Sonnaz	Chesopelloz	2572727.5	1184087.5	Comminboeuf	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15096	Richterwillerbach	N2	2584212.5	1191002.5	Bösingen	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15097	Taverna	Flamatt	2590102.5	1192732.5	Wünnewil-Flamatt	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15098	Taverna	Bunzwil	2586477.5	1189072.5	Schmittent (FR)	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15101	Biberenbach	Biberist	2609847.5	1226027.5	Biberist	Solothurn	KT SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15102	Biberenbach	Lohn	2606442.5	1233572.5	Lohn-Ammannsegg	Solothurn	KT SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15103	Muehlebach Brueggelen		2604172.5	1218282.5	Buchegg	Solothurn	KT SO	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15110	Biberenbach	P 528	2600822.5	1212222.5	Buchegg	Solothurn	KT 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	Brunnenbach	Waldmatt	2632482.5	1216782.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15113	Neuligbaechli	Waldmatt	2632477.5	1216752.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15114	Thanbach		2631627.5	1215202.5	Eriswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15115	Wysachsen	Buehmatte	2629752.5	1216277.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15116	Rottbach	Schwarzenbachberg	2629202.5	1217597.5	Huttwil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15117	Zufuss Langete	Duerrenbuehl	2629027.5	1214537.5	Wysachsen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15118	Zufuss	Schwaendiabach	2631907.5	1213632.5	Eriswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15119	Mannishusbach	Hohstaegge	2629587.5	1213497.5	Wysachsen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15120	Zufuss Schwendibach	Eriswil	2631157.5	1214002.5	Eriswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15121	Tönibach	Gersbergmatte	2629797.5	1213597.5	Wysachsen	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15122	Schwendibach - hinteres EZG	hinten	2631907.5	1212897.5	Eriswil	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15123	Ersebach		2626242.5	1221927.5	Ursenbach	Bern	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15124	Moosbach	Oberdorf	2625472.5	1220027.5	Ursenbach	Bern	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15125	Walterswilbach		2625532.5	1220032.5	Ursenbach	Bern	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15126	Oeschbach	Hirsensbad	2624772.5	1220277.5	Ursenbach	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15127	Griesbach	Zelthaus	2625227.5	1211997.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15128	Echelbach	Griesbach	2623612.5	1210625.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15129	Echelbach	Trachselwald	2627537.5	1209637.5	Trachselwald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15130	Griesbach	Eriswil	2623852.5	1208287.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15131	Hornbach	P 946	2633627.5	1208102.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
15132	Sperbelgrabe	Pegel BAFU	2630717.5	1207247.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAU
15133	Surgrabe	Pegel BAFU	2629037.5	1206977.5	Sumiswald	Bern	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie BAU
15134	Gebre	Cousset	2565047.5	1185457.5	Montagny (FR)	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15135	Veveyse	Chatel-Saint-Denis	2559782.5	1153193.5	Chatel-Saint-Denis	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15136	Glane	Matran	2573937.5	1181027.5	Hauterive (FR)	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15137	Gerine	Plasseb	2585217.5	1174402.5	Plasseb	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	DK1	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15138	Ruisseau de Bainoz		2553452.5	1185102.5	Lully (FR)	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15139	La Neirigue		2562287.5	1168512.5	Vulsternens-devant-Rom	Fribourg	KT FR	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Hydrometrie KT, FR
15140	Gramaflan	Bramafan	2559292.5	1168497.5	Siviez	Fribourg	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
16001	Aabach	Moenchaltorf	2669332.5	1240826.5	Monchaltorf	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, ZH
16004	Aabach	Schmerikon	2715292.5	1231602.5	Schmerikon	St. Gallen	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, ZH
16006	Aachbach	Mogelsberg	2727052.5	1247402.5	Neckertal	St. Gallen	KT SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie KT, SG
16007	Alp	Einsiedeln	2698647.5	1229022.5	Einsiedeln	Schwyz	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAU

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	Berechnungsmethode	Verfügbarkeit Q347	Verfügbarkeit Daten	Quelle
16046	Glatt	Herisau	2737272.5	1251262.5	Herisau	Appenzell Ausserrhoden	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16052	Grossbach	Einsiedeln	2700712.5	1218102.5	Einsiedeln	Schwy	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16055	Guerbe	Belp	2604802.5	119287.5	Belp	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16060	Holzbach	Villmergen	2660862.5	1245177.5	Villmergen	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16061	Iffis	Langhau	2627327.5	1198582.5	Langhau im Emmental	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16063	Jonen	Zwillikon	2675097.5	128202.5	Affoltern am Albis	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16064	Katzbach	Muri	2668272.5	1236942.5	Muri (AG)	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16065	Kemmenbach	Gruebmuehle	2721732.5	1273242.5	Wigoltingen	Thurgau	KT TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. TG
16066	Kempt	Illnau	2696707.5	1252427.5	Illnau-Effretikon	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16071	kleine Emme	Werthenstein	2647857.5	1209342.5	Entlebuch	Luzern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16072	Koellikerbach	Koelliken	2644552.5	1244337.5	Kölliken	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16074	Kuentenerbach	Kuenten	2667032.5	1248732.5	Künten	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16081	Lauche	Matzingen	2712171.5	1264232.5	Matzingen	Thurgau	KT TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. TG
16090	Luteren	Nestlau	2732652.5	1219312.5	Nestlau	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16092	Luthern	Nebikon	2640587.5	1226817.5	Nebikon	Luzern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16093	Lysbach	Bundkofen	2594362.5	1210577.5	Schupfen	Bern	KI BE	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. BE
16096	Mederbach	Marthalen	2690492.5	1275162.5	Marthalen	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16100	Morges	Morges	2572012.5	1151737.5	Morges	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16103	Mung	Fischingen	2715452.5	1252732.5	Fischingen	Thurgau	KT TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. TG
16106	Mung	Waengi	2714087.5	1261732.5	Wängi	Thurgau	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16107	Näffbach	Neftenbach	2691962.5	1264272.5	Neftenbach	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16109	Necker	Möglisberg	2727117.5	1247287.5	Neckertal	St. Gallen	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16117	Rickenbach	Wattwil	2735172.5	1238522.5	Wattwil	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16119	Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2718847.5	1248442.5	Mosnang	St. Gallen	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16121	Rindalbach	Lütsburg	2723897.5	1252287.5	Lütsburg	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16124	Rotbach	Buehler	2748302.5	1248932.5	Schätti-Haslen	Appenzell Innerrhoden	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16127	Ruederchen	Schoeflatt	2646812.5	1239347.5	Schoeflatt	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16133	Sellenbodenbach	Neuenkirch	2658562.5	1218277.5	Neuenkirch	Luzern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16135	Sinserbach	Sins	2672462.5	1227157.5	Sins	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16142	Stenbachtal	Kaltbrunn	2721187.5	1229727.5	Kaltbrunn	St. Gallen	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16143	Stichbach	Bottighofen	2732842.5	1277967.5	Bottighofen	Thurgau	KT TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. TG
16145	Surb	Niederweningen	2669672.5	1262647.5	Schneisingen	Aargau	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16147	Taegerbach	Wislisbach	2669382.5	1268002.5	Zurach	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16149	Thunbach	Matzingen	2712962.5	1264282.5	Matzingen	Thurgau	KT TG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. TG
16153	Uerke	Holziken	2644827.5	1241632.5	Holziken	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16154	Urmesch	Hundwil	2704147.5	1244787.5	Urmesch	Appenzell Ausserrhoden	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16158	Venoge	Ecublens	2532022.5	1154152.5	Ecublens (VD)	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16160	Weyeye	Vevey	2554642.5	1146592.5	Vevey	Vaud	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
16162	Waldemme	Soerenberg	2645537.5	1185637.5	Fühli	Luzern	KI LU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. LU
16165	Wildbach	Wetzikon	2702397.5	1241922.5	Wetzikon (ZH)	Zürich	KT ZH	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. ZH
16166	Wissbach	Degersheim	2734767.5	1249987.5	Herisau	Appenzell Ausserrhoden	KI SG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. SG
16167	Wissenbach	Boswil	2666027.5	1239162.5	Boswil	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16168	Wissenbach	Merenschwand	2671112.5	1234842.5	Merenschwand	Aargau	KTAG	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie Kt. AG
16169	Worble	Ittigen	2603007.5	1204272.5	Ittigen	Bern	BAFU	Langzeitmessung	DK	ja	ja	Hydrometrie BAFU
24000	Walenbach	Bauma	2701027.5	1246852.5	Bauma	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
28000	Brütenbach	Ohrl, Brüttenthal	2715282.5	1244312.5	Fischenthal	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
41000	Wiesenbach	Brünnen	2700707.5	1253037.5	Illnau-Effretikon	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
42000	Bantallbach	Nussberg	2703152.5	1257937.5	Schätti (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
48000	Tüfenbach	Teufen	2684717.5	1266472.5	Rorbas	Zürich	BAFU	Einzelmessungen	EM	ja	ja	Naef & Margreth (2017)
81000	Tobelbach	Hinterikon	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	Bauma	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
103000	Tobelbach Sued	Pfungen	2689967.5	1263012.5	Pfungen	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
104000	Wildbach	Pfungen	2690297.5	1263132.5	Pfungen	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
105000	Tobelbach	Dättlikon	2691322.5	1264842.5	Nettenbach	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
111000	Mittlerer Chrebsbach	Winterthur	2695877.5	1259887.5	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	Hintertöss	Tösschedli	2715577.5	1241047.5	Wald (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
626000	Vordertöss	Tösschedli	2714537.5	1240687.5	Wald (ZH)	Zürich	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
627000	Steinenbach	Horn bei Steinenbach	2712402.5	1250377.5	Fischingen	Thurgau	WSL	Einzelmessungen	EM	ja	ja	WSL
628000	Hutzikerbach	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 Abflusseinzelmessungen und Q347.*

Quellenhinweise	Quellen
Albula-Landwasser Kraftwerke AG (2016)	Albula-Landwasser Kraftwerke AG, Kraftwerk Tischbach, Projektgenehmigungsgesuch - Technischer Bericht, März 2016
Alpik Ecopower Schweiz AG (2016)	Neubau Wasserkraftwerk Stuzbach, Umweltbericht, Januar 2016, Alpik Ecopower Schweiz AG
Alpik Ecopower Schweiz AG (2009)	Wasserkraft am Tambobach, Splügen - Konzessions- und Projektgenehmigungsgesuch, Umweltbericht, 14. Dezember 2009, Alpik Ecopower Schweiz AG
Alpik Ecopower Schweiz AG (2015)	Hydrologische Abklärungen Hüscherenbach - Abschlussbericht, Februar 2015, Alpik Ecopower Schweiz AG
Axpo AG Hydroenergie, Baden (2011)	KW RUSSEN, 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
Floriancic et al. (2018)	Floriancic, 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. <i>Hydrological Processes</i> 32 (26). https://doi.org/10.1002/hyp.13301
BKW Energie AG (2013)	Neubau Kraftwerk 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 & Miesen (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 Lavinuz. 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 Gommerkraftwerke (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

Tabelle A2: Mit korrigierten Messreihen (2011 - 2022) berechnete Q347, Q290, Q360, Q290/Q347 und andere Einzugsgebietsparameter von 102 Einzugsgebieten in Mittelland, Voralpen, Alpen und Tessin, sortiert nach Dauerkurvengruppen - Teil 1.

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	Datenehr	Fläche Einzugsgebiet [km ²]	Fläche Teilereignisgebiet [km ²]	Fläche ohne Gletscher und Permafrostboden	Dauerkurvengruppe	Bestimmung Dauerkurvengruppen			mittlere Reaktionszeit [min]	mittlere Geländehöhe [m]	mittlere Geländeeinigung [%]	mittlere Flächenanteil Quartal undurchlässig [%]	mittlere Flächenanteil Quartalsmäßig durchlässig [%]	spez. Grundwasservolumen [in 100 m ³ km ⁻¹]	spez. Grundwasservolumen [in 100 m ³ km ⁻¹]		
								Q290 [1 s ⁻¹ km ⁻²]	Q347 [1 s ⁻¹ km ⁻²]	Q290/2020 [mm]									
32	Flüel	Flüel	Kf.ZH	31.2	31.2	31.2	CSM 2: Sa; Na; Me	ja	5.9	3.2	2.3	1.8	1179	16	-0.02405	195	19	802	889
63	Flüelen	Flüelen	Kf.ZH	37.5	37.5	37.5	CSM 2: Sa; Na; Me	ja	6.3	4.0	2.1	1.7	1228.9	13	-0.023207	610	12	62	7
108	Mur.W.	Wängi	BafU	80.1	64.1	64.1	CSM 2: Sa; Na; Me	ja	6.3	4.0	3.6	1.6	1228.9	15	-0.022734	614	4	44	15
17	Abtach, B.	Bassersdorf	Kf.ZH	11.8	11.8	11.8	OSM 3: Sa; Me	ja	4.8	2.5	1.8	1.5	1154.5	8	-0.02926	548	2	73	15
60	Abtach, B.	Brünnbach	Kf.ZG	13.9	13.9	13.9	OSM 3: Sa; Me	ja	3.2	1.4	0.7	2.3	1122	8	-0.05509	576	2	78	7
62	Abtach, B.	Völlmogen	Kf.AG	23.9	23.9	23.9	OSM 3: Sa; Me	ja	4.6	2.6	2.1	1.7	1085.2	11	-0.02034	180	4	76	8
63	Abtach, B.	Muri	Kf.AG	6.1	6.1	6.1	OSM 3: Sa; Me	ja	5.2	1.9	1.9	1.5	1131.1	12	-0.02041	643	0	91	3
61	Heitigen	Heitigen	Kf.ZG	46.9	43.9	43.9	OSM 3: Sa; Me	ja	4.2	1.9	1.2	2.2	1038.9	9	-0.04634	643	5	61	10
107	Neftenbach	Neftenbach	BafU	36.0	36.0	36.0	OSM 3: Sa; Me	nein	4.5	2.1	2.1	1.7	997.9	7	-0.02038	463	69	16	1108
133	Selketalbachtal	Selketalbachtal	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	610	1	54	7
135	Sins	Sins	Kf.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	0	80	0
148	Urnenschach	Urnenschach	Kf.ZG	14.1	14.1	14.1	OSM 3: Sa; Me	ja	4.5	2.0	1.1	2.2	1026.4	11	-0.03932	582	2	55	1
167	Wiesenschen, B.	Boswil	Kf.AG	11.0	11.2	11.2	OSM 3: Sa; Me	ja	4.7	2.6	2.2	1.6	1119.5	13	-0.02536	681	8	80	3
168	Wiesenschen, M.	Wiesenschen, M.	Kf.ZG	10.0	10.0	10.0	OSM 3: Sa; Me	ja	4.6	2.1	2.1	1.6	1164.1	10	-0.02771	554	2	97	5
33	St. Leodegar	Reggiswil	Kf.ZG	5.7	5.7	5.7	CSM 3: Sa; Me	ja	1.6	0.5	0.2	3.0	1093	10	-0.13116	492	0	100	0
42	Gessnau	Gessnau	Kf.ZG	4.2	4.2	4.2	CSM 3: Sa; Me	ja	1.7	0.5	0.2	3.5	989	4	-0.06521	466	0	90	4
43	Bürglen	Bürglen	Kf.ZG	24.8	24.8	24.8	CSM 3: Sa; Me	ja	1.3	0.4	0.1	3.7	995.7	5	-0.08753	103	2	90	4
65	Urnenschach	Urnenschach	Kf.ZG	33.3	33.3	33.3	CSM 3: Sa; Me	ja	2.7	1.1	0.3	2.5	958.8	6	-0.06331	538	0	83	1
149	Griesmühle	Griesmühle	Kf.ZG	16.3	16.3	16.3	CSM 3: Sa; Me	ja	1.7	0.6	0.3	2.7	998.3	5	-0.04712	526	0	94	0
150	Buttisholz	Buttisholz	Kf.ZG	34.0	34.0	34.0	CSM 3: Sa; Me	ja	2.5	1.2	0.4	2.1	1016.7	7	-0.02940	564	2	21	0
151	Töschnitz	Töschnitz	Kf.ZD	19.5	19.5	19.5	CSM 3: Sa; Me	ja	2.8	1.3	1.0	2.1	1098.1	10	-0.02433	752	13	33	2NA
46	Cluon	Cluon	Kf.ZD	31.7	31.7	31.7	CSM 3: Sa; Me	ja	2.8	1.5	1.6	1.5	982.8	7	-0.01617	538	4	93	NA
109	Morges	Morges	Kf.BE	30.7	30.5	30.5	CSM 3: Sa; Me / OMW: Sa	ja	4.1	2.7	2.1	1.5	1004.7	8	-0.02432	523	8	65	1NA
110	Bière, K.	Bière, K.	Kf.ZD	15.8	15.8	15.8	CSM 3: Sa; Me / OMW: Sa	ja	2.9	1.2	0.8	2.4	1388.2	10	-0.03849	615	6	80	NA
37	Fion	Fion	Kf.ZD	10.2	10.2	10.2	CSM 3: Sa; Me / OMW: Sa	ja	5.9	4.6	3.2	1.3	1120.8	12	-0.06322	480	1	1	NA
72	Kolliken	Kolliken	Kf.ZG	33.3	33.3	33.3	CSM 3: Sa; Me	ja	3.3	1.7	1.0	2.3	1111	8	-0.03616	589	0	83	0
148	Urnenschach	Urnenschach	Kf.ZD	67.0	67.0	67.0	CSM 3: Sa; Me / OMW: Sa	ja	13.0	7.1	5.5	1.7	1158.8	32	-0.06368	1153	7	16	1NA
149	Urnenschach	Urnenschach	BafU	46.7	46.7	46.7	Vorabin 1	ja	10.0	5.5	3.4	1.8	1190	41	-0.06739	1178	2	6	1NA
52	Urnenschach, E.	Urnenschach, E.	BafU	8.9	8.9	8.9	Vorabin 1	ja	10.8	5.6	3.8	1.8	1146.4	39	-0.06059	1130	14	16	1NA
46	Urnenschach, E.	Urnenschach, E.	BafU	311.4	288.4	288.4	Vorabin 1	ja	10.6	5.5	3.8	1.8	2136	41	-0.02941	1139	13	25	2NA
96	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	29.2	29.2	29.2	Vorabin 1	ja	9.9	4.7	3.4	2.1	1123.4	32	-0.06438	594	3	18	5
109	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	88.1	88.1	88.1	Vorabin 1	ja	13.4	6.4	3.7	2.1	2059.7	41	-0.06383	1119	9	27	8
149	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	Kf.ZG	18.6	18.6	18.6	Vorabin 1	ja	16.5	11.8	6.7	1.4	1898.8	6	-0.02858	1192	6	25	10
150	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	Kf.ZG	64.6	64.6	64.6	Vorabin 1	ja	8.3	3.5	1.5	2.4	2105.2	53	-0.04525	1146	3	32	1NA
380	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	Kf.ZG	3.7	3.7	3.7	Vorabin 1	ja	7.8	3.9	2.1	2.0	1840.2	30	-0.04422	1031	5	33	NA
46	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	38.5	38.5	38.5	Vorabin 1	ja	9.2	5.3	3.7	1.7	1501.2	24	-0.04422	1031	5	28	NA
55	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	16.7	16.7	16.7	Vorabin 1	ja	9.1	5.4	3.9	1.7	1206.7	14	-0.03941	1045	8	21	NA
61	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	116.0	116.0	116.0	Vorabin 1	ja	11.1	7.2	5.4	1.5	1632.8	22	-0.02271	1138	7	5	NA
112	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	Kf.ZG	187.5	187.5	187.5	Vorabin 1	ja	6.9	3.1	1.9	1.5	1668.8	22	-0.05161	1065	6	56	1
151	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	16.0	16.0	16.0	Vorabin 1	ja	6.5	3.0	1.4	1495.9	39	-0.02120	1109	21	22	NA	
152	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	351.2	351.2	351.2	Vorabin 1	ja	6.2	3.0	1.4	1495.9	39	-0.02858	1192	21	22	NA	
113	Urnenschach, W.	Urnenschach, W.	BafU	311.9	311.9	311.9	Vorabin 2	ja	6.1	4.5	3.5	1.8	1702	23	-0.03639	1100	2	10	2NA
124	Urnenschach, B.	Urnenschach, B.	Kf.ZR	23.0	23.0	23.0	Vorabin 2	ja	4.7	3.3	1.7	1.7	1801.7	25	-0.03634	1098	6	30	NA
160	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	BafU	64.5	64.5	64.5	Vorabin 2	ja	7.3	4.2	2.6	1.7	1651.5	33	-0.04538	1097	19	36	1NA
94	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	BafU	34.0	34.0	34.0	Vorabin 2	ja	7.7	4.6	3.4	1.7	1661.7	44	-0.02900	1104	NA	NA	NA
154	Grotta di Grotta	Grotta di Grotta	Kf.TI	3.9	3.9	3.9	Vorabin 2	ja	7.9	4.4	3.1	1.8	1598.3	NA	-0.02830	NA	NA	NA	NA
1508	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	Porteza	54.1	54.1	54.1	Vorabin 2	ja	16.6	11.6	9.6	1.5	1801	36	-0.02038	NA	NA	NA	NA
1509	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	Büren	9.4	9.4	9.4	Vorabin 2	ja	12.8	8.1	7.5	1.5	1663.7	36	-0.02038	NA	NA	NA	NA
1510	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	Porteza	14.4	14.4	14.4	Vorabin 2	ja	10.4	6.3	5.6	1.7	1673	59	-0.02038	NA	NA	NA	NA
1511	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	Porteza	23.2	23.2	23.2	Vorabin 2	ja	11.1	7.1	5.4	1.5	1611.1	181	-0.02038	NA	NA	NA	NA
1512	Urnenschach, V.	Urnenschach, V.	Porteza	39.1	39.1	39.1	Vorabin 2	ja	1.7	0.7	0.4	2.6	1677.9	60	-0.02646	NA	NA	NA	NA

4326

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

id	Name	Pegelstandort	Eigentümer	Verwendungs-/Grund für unterirdische Verwerfung	Information zu Abflussunter dem Pegel	Datenverfügbarkeit zu Wasserentnahmen durch ARA	Berechnungs-methode Wasserentnahmen /rückgaben durch ARA	ARA-Standort: Bemerkungen	Korrektur des Wasseraufkommens [1s, km ⁻²]	Korrektur unterirdischer Abflüsse [1s, km ⁻²]	Korrektur des Abflusses unterirdischer Abflüsse [%]	Korrektur des Abflusses unterirdischer Abflüsse [%]			
									Wasserentnahme/rückgabe [1s, km ⁻²]	Wasserentnahme/rückgabe [1s, km ⁻²]	Wasserentnahme/rückgabe [1s, km ⁻²]	Wasserentnahme/rückgabe [1s, km ⁻²]	Wasserentnahme/rückgabe [1s, km ⁻²]		
4	Aesch	Schmerikon	SG	1	10	4	12 ausserhalb	0.63	0.61	15.4	0.0	15.4	3.96		
3	Aesch	Käfneich	ZH	3	14	1	6 teils teils	0.71	0.71	2.68	0.0	0.0	2.63		
1	Aesch, M. (ZH)	Menzhalden	AG	10	1	5	kompliziert	-0.4	-0.4	-15.2	0.0	-15.2	5.77		
5	Aesch	Salmisch	BaTu	3	1	2	3 ausserhalb	NA	-	-	NA	NA	NA		
6	Aeschbach	Meilenburg	SG	1	2	1	3 ausserhalb	NA	1.8	NA	NA	NA	NA		
7	Adp	Einiedel	BaTu	1	2	3	10 innerhalb	0	0	0.0	0.0	0.0	7.15		
8	Aeschbach	Bassersdorf	ZH	1	10	1	6 ausserhalb	0.1	0.1	4.1	0.0	4.1	2.47		
9	Arbonie	Arbonie	VD	10	10	3	10 innerhalb	0	0	0.0	0.0	0.0	2.36		
262	Bernbach	Pontresina	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
402	Berschnersbach	Berschnersbach	SG	2	6	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA		
11	Biber	Bibertrügg	BaTu	1	2	2	2	2	2	NA	NA	NA	NA		
12	Biber	Gürmels	BE	1	10	5	2	2	2	NA	NA	NA	NA		
13	Biber	Kemers	BE	1	10	5	2	2	2	NA	NA	NA	NA		
15	Borrono/Mores	Tollienz	VD	1	10	3	10 innerhalb	0	0	0.0	0.0	0.0	2.68		
1509	Breggia	Chasso	BaTu	1	9	5	9	9	NA	NA	NA	NA	NA		
16	Broye	Payenne	VD	3	5	2	6 ausserhalb	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
17	Buechbach	Buechbach	SG	1	2	1	1 innerhalb	NA	0	0.0	0.0	0.0	1.44		
18	Buenz	Muri	AG	3	1	5	2	2	9	NA	NA	NA	NA		
2074	Calanques	Buonno	BaTu	2	6	2	11 innerhalb	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
22	Chammbach	Waldbronn	ZH	1	10	1	6 ausserhalb	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
23	Chammbach	La Junc-Chammbach	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
25	Chelmarsh	Grossau	SG	1	2	1	6 ausserhalb	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
26	Chise	Freudenthal	BE	1	10	3	6 ausserhalb	0.44	0.44	22.1	0.0	22.1	1.99		
27	Chrauchthalbach	Chrauchthal	BE	1	7	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
15085	Cuglio	Porto	TG	1	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
2327	Dichmabach	Dorf, Krägsteinen	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
29	Dorfbach	Maur	ZH	3	11	10	1	6 ausserhalb	0.32	0.32	30.2	0.0	30.2	1.06	
32	Dulach	Ratberchen	ZH	1	7	1	6 teils	0.7	0.31	0.37	9.6	11.4	21.6	3.23	
15091	Feldpfa	Chasso	TG	2	6	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA		
34	Fellebach	Ropouli	TG	1	10	3	6 ausserhalb	0	0.81	10.2	0.0	10.2	7.96		
35	Feldbach	Stettern	SG	3	2	1	5	11 ausserhalb	NA	NA	NA	NA	NA		
36	Fischbach	Fischbach	AG	1	10	2	2	2	0.34	0.34	7.2	0.0	7.2	4.74	
37	Fren	Ortsteile	VD	1	2	3	6 teils	0	0	0.0	0.0	0.0	1.59		
42	Geusenbach	Güttigen	TG	2	6	10	7	6 ausserhalb	0	0	0.0	0.0	0.0	0.48	
43	Gessen	Burgligen	TG	1	10	7	2	2	6 ausserhalb	0	0	0.0	0.0	0.0	0.36
46	Glaett, H.	Heissau	BaTu	1	2	1	1 innerhalb	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
2607	Gonewald	Obenwald	BaTu	2	6	10	2	2	2	NA	NA	NA	NA		
49	Grent	Pfleg	VD	1	4	2	5	9	0	0	0.0	0.0	0.0	0.35	
52	Grossbach	Enselech	BaTu	1	4	10	5	9	0	0	0.0	0.0	0.0	1.26	
2276	Grossbach	Ententhal	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
53	Guerde	Pflegberg	BaTu	2	8	9	1	6 teils	0.2	0.2	3.6	0.0	3.6	5.55	
370	Guerde	Burgligen	BE	3	8	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA		
58	Häselbach	Mattentierstein	ZH	3	10	1	2	6	NA	NA	NA	NA	NA		
2631	Hinterhein	Hinterhein, Schlespietz	BaTu	2	6	9	2	2	3 innerhalb	NA	NA	NA	NA		
60	Heubach	Villmergen	AG	1	10	1	13 ausserhalb	0.92	0.92	33.5	0.0	33.5	2.74		
61	Hilfis	Längnau	BaTu	1	8	1	6 ausserhalb	1.16	0.2	0.96	2.7	13.0	15.7		
2265	Hilfis	Tafers	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
62	Jona	Zwieriberg	ZH	3	10	2	1	6 teils	NA	NA	NA	NA	NA		
63	Jona	Zwieriberg	ZH	1	2	1	13 teils	0.67	0.67	20.5	0.0	20.5	3.27		
234	Jura	St. Neider	EVZ	2	6	10	1	9	NA	NA	NA	NA	NA		
64	Käfneich	Muri	AG	1	2	6	1	13 ausserhalb	0.77	0.77	31.0	0.0	31.0	2.48	
65	Kemmebach	Griebmühle	TG	1	10	1	4 innerhalb	-0.27	-0.27	0.0	0.0	0.0	0.05		
66	Kempt	Ullau	ZH	3	12	9	3 teile teils	0	0	2.7	0.0	2.7	3.77		
71	Keine Ennme	Wertenstein	BaTu	1	2	3	10 innerhalb	2.5	0.7	1.8	0.0	0.0	5.62		
72	Köllerbach	Köllerbach	AG	1	4	2	2	2	0.42	0.42	4.0	0.0	4.50		
2244	Krammbach	Chlumatte	BaTu	2	6	2	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
74	Kuentenbach	Kuentenbach	AG	1	10	1	7 ausserhalb	0.42	0.42	9.0	0.0	9.0	4.67		
2355	Landwasser	Diets, Fraumünster	BE	3	7	2	9	12 ausserhalb	0.57	0.57	22.9	0.0	22.9	8.34	
76	Langte	Lentwili	BaTu	1	10	1	6 ausserhalb	0.43	0.43	0.0	0.0	0.0	1.88		
81	Lauche	Matznau	TG	3	7	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA		
80	Lauche	Altdorf	TG	3	6	9	2	9	NA	NA	NA	NA	NA		
15089	Lavergio	Madrisio	TG	2	6	2	2	2	NA	NA	NA	NA	NA		
2269	Lontz	Bilten	BaTu	2	6	2	2	2	NA	NA	NA	NA	NA		

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

Id	Name	Pegelstandort	Eigentümer	Verwendungs- zweck	Grund für Verwertung	Information zu unterirdischen Wasser- abflüssen unter dem Pegel	Datenverfüg- barkeit zu Wasser- entnahmen/ -rückgaben	Berechnungs- methode Wasserentnahmen/-rückgaben durch ARA	ARA-Standort	Bemerkungen	Abfluss- korrektur total [$1\text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$]	Korrektur Wasserent- nahme/rückgabe [1 s \cdot 1 km $^{-2}$]	Korrektur des unterirdischen Abflusses [1 s \cdot 1 km $^{-2}$]	Korrektur Wasser- entnahmen/ -rückgabe [%]	Korrektur des unterirdischen Abflusses [%]	Abfluss- korrektur total [%]	korrigiertes Q37 (s \cdot 1 km $^{-2}$)	
83	Uuterbach	Obertburg	BE	NE	1	2	1	2	6	2	2	0.054	0.054	1.04	6.3	22.5	28.8	4.61
90	Uuteren	Nestbau	SG	Barfu	1	4	2	2	6	2	6	0.133	0.29	1.04	1.0	0.0	1.0	5.66
92	Uuthern	Nebikon	BE	Barfu	3	11	10	2	2	2	2	0.432	0.22	4.1	2.9	54.5	57.4	7.53
93	Uussbach	Bundofen	Barfu	1	10	2	2	2	2	2	2	0.688	0.688	-	13.5	0.0	13.5	5.02
94	Uussina	Magliaso	SG	Barfu	2	6	9	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
1508	Mara	Maroggia	ZH	Barfu	3	5	9	5	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
96	Uederbach	Marthalen	Barfu	3	11	2	2	2	2	2	2	0.133	0.29	1.04	1.0	0.0	1.0	5.66
2206	Meiera	Morobbia	Barfu	1	2	2	2	2	2	2	2	0.054	0.054	1.04	6.3	22.5	28.8	4.61
99	Uentue	Xonord	Barfu	1	2	2	2	2	2	2	2	0.432	0.22	4.1	2.9	54.5	57.4	7.53
100	Morges	Morges	VD	Barfu	1	2	2	2	3	3	3	0.688	0.688	-	-	-	-	-
106	Murg	Waengi	Barfu	1	3	3	3	3	3	3	3	N/A	N/A	-	-	-	-	-
103	Murg	Fischingen	TG	Barfu	1	5	1	1	10	2	2	0.133	0.18	1	5.2	28.7	33.9	3.48
107	Nafthach	Netterbach	ZH	Barfu	1	5	9	9	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
109	Nedder	Mogenburg	Barfu	1	2	2	2	2	2	2	2	0.133	0.29	1.04	1.0	0.0	1.0	5.66
172	Onz	Heimethausen	BE	Barfu	3	1	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
476	Olegna	Orden	EWZ	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
230	Ova da Fuorn	Nemez, Bunt la Drossa	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
110	Parimbot	Ecublens	Barfu	1	2	2	2	3	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
111	Pette-Ghane	Bussy	VD	Barfu	3	5	5	5	10	2	2	0.25	0.25	0.0	0.0	0.0	0.0	1.81
112	Präfner	Vordenwald	AG	Barfu	1	1	1	1	10	2	2	0.133	0.18	1	5.2	28.7	33.9	3.48
236	Poschiavino	La Roëa	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
114	Ranengraben	Wasen Bielbad	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
248	Rent da Sunwig	Sunwig, Erhardtens	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
252	Riale di Canegea	Zoroglio Planta	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
1504	Riale di Gnosca	Gnosca	TG	Barfu	2	6	10	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
117	Rickenbach	Lavertezzo	SG	Barfu	1	10	1	1	7	7	7	0.26	0.26	7.1	7.1	0.0	0.0	1.81
119	Rietzibach	Mostang, Netholz	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	10	10	0	0	0.0	0.0	1.81	
261	Rinalbach	Luetsburg	SG	Barfu	3	11	2	1	1	1	1	0.26	0.26	7.1	7.1	0.0	0.0	1.81
225	Rosebach	Muestair	Barfu	2	6	10	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
171	Rot	Pontresina	Barfu	2	6	10	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
124	Rothach	Bütschwil	BE	Barfu	3	1	2	3	9	9	9	0.26	0.26	7.1	7.1	0.0	0.0	1.81
127	Ruedelach	Schoettland	AG	Barfu	1	4	4	4	10	2	2	0.133	0.65	2.5	10.8	41.7	52.5	6.00
1508	Scarolo	Banbengo	TG	Barfu	2	6	9	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
249	Schueben	Bürgen	Barfu	3	11	9	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-	
380	Seez	Wettsteinen	SG	Barfu	2	6	9	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-
133	Seelbodibach	Neukirch	Barfu	1	9	3	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	1.81	
134	Sense	Thorenshaus	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	2	2	0.18	0.18	2.8	2.8	6.32	
135	Sinzbach	Sins	AG	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	0.1	0.1	0.1	0.1	5.9	5.9	1.69
137	Sinzbach	Niederbühren	SG	Barfu	3	13	10	1	7	7	7	0.74	0.74	0.74	0.74	20.0	20.0	3.70
138	Sperenberg	Kurzenalp	SG	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	3.73
141	Steinbach	Kalbunn	SG	Barfu	1	10	1	1	9	9	9	0.28	0.28	4.1	4.1	0.0	0.0	6.84
1504	Steinwaser	Brücke Hotel Steinberg	TG	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	1.81
144	Süchbach	Bonigen	ZH	Barfu	2	7	9	2	9	9	9	2	2	0.18	0.18	2.8	2.8	6.32
145	Surb	Niederebenen	ZH	Barfu	1	10	1	1	10	2	2	0.35	0.35	8.0	8.0	4.38	4.38	3.07
147	Teufenbach	Waldköfen	AG	Barfu	1	10	3	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	2.00
148	Talent	Chavornay	VD	Barfu	1	10	1	1	10	1	1	0.25	0.25	12.4	12.4	0.0	0.0	2.02
1508	Ticino	Matzingen	TG	Barfu	2	6	10	1	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	2.03
150	Toss	Beicher	ZH	Barfu	2	6	7	2	7	9	9	6	6	0.36	0.36	8.2	8.2	4.39
151	Toss	Ramisihüli	ZH	Barfu	3	9	5	2	10	2	2	0.34	0.24	3.7	3.8	5.87	6.25	6.30
1504	Trittawasser	Chempewang	KW Oberhasli	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	11	11	0	0	0.0	0.0	2.05
151	Uerle	Holziken	AG	Barfu	1	10	8	2	10	8	8	6	6	0	0	0.0	0.0	2.05
1508	Uersch	Kundwil	AG	Barfu	1	10	2	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	2.05
1508	Uetiglio	Isonne	TG	Barfu	1	2	2	2	9	9	9	6	6	0	0	0.0	0.0	2.05
151	Venoge	Ecublens	VE	Barfu	3	4	10	5	9	9	9	2	2	0.36	0.36	8.2	8.2	4.39
160	Weyense	Vevey	VE	Barfu	1	9	2	2	9	9	9	11	11	0	0	0.0	0.0	2.05
161	Wagenerbach	Rapperswil	SG	Barfu	3	1	9	5	10	2	2	0	0	0	0	0.0	0.0	2.05
162	Waldemme	Sörenberg	LU	Barfu	1	10	2	2	10	2	2	0.13	0.13	1.4	1.4	0.0	0.0	9.13
163	Waldemme	Wetzikon	ZH	Barfu	3	1	2	2	10	2	2	0.42	0.42	-12.3	-12.3	0.0	0.0	3.25
164	Wabisbach	Dierishausen	SG	Barfu	1	2	1	1	10	1	1	0.59	0.59	16.9	16.9	0.0	0.0	3.50
165	Wiesenbach	Bowil	AG	Barfu	1	10	1	1	10	8	8	6	6	0.67	0.67	23.2	23.2	0.0
166	Wiesenbach	Merenschwand	AG	Barfu	1	10	5	4	10	5	5	6	6	0	0	0.0	0.0	2.27
167	Worble	Ittigen	Barfu	3	4	10	5	6	2	2	2	0	0	0	0	0.0	0.0	6.64
1509	Wyswaser	Wasserfassung, Burghuette	KW Obergiess	Barfu	2	6	2	2	9	9	9	N/A	N/A	-	-	-	-	-

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	Pegelauf Restwasserstrecke

Code	Info zum unterirdischen Abfluss
1	Abschätzung des unterirdischen Abflusses 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

Tabelle A6: Verwendete tektonische Einheiten der geotechnischen Karte für die Alpen und das Tessin

Tektonische Einheiten	Code
Aar-Massiv	1
Adula-Deckenkomplex	2
Allochthone Einheiten	3
Allochthone Schuppenzone	4
Antigorio-Deckenkomplex	5
Arosa Zone	6
Autochthones und Parautochthones Mesozoikum	7
Averser Decke	8
Axen-Decke	9
Bernina-Decke	10
Bombogno-Zone	11
Bosco-Zone	12
Buendnierschifer-Decken	13
Campo-Decke	14
Canavese-Zone	15
Cimes-Blanches- und Frillhorn-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
Goms-Zwischenmassiv	24
Gotthard-Massiv	25
Gotthardmassivisches Mesozoikum (Scopi-Zone, Frodalera-Peiden-Trias, Peidener Schuppenzone)	26
Grosse Alluvialebenen	27
Gruf-Komplex	28
Interner Jura	29
Ivrea-Verbano-Zone	30
Klippen-Decke	31
Languard-Decke	32
Lebendum-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
Mittelalpändische Molasse	41
Mont-Fort-Decke	42
Monte-Rosa-Decke	43
Monte Leone-Decke	44
Morcles-Doldenhorn-Decke	45
Muertschen-Decke	46
Noerdliche Kalkalpen	47
Nordpenninische Flysch-Decken	48
Obere Orobiische Decke	49
Oetztal-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, mesozoisiche 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
Subsilvrettdie Linsen	73
Sulzfluh-Decke (inkl. Anteile der Falknis-Decke)	74
Suretta-Decke	75
Tambo-Decke	76
Tasna-Decke	77
Tavetscher Zwischenmassiv	78
Tertiär des Po-Beckens	79
Tertiäre Intrusiva	80
Tertiäre Sedimente und nordhelvetisches Tertiär	81
Tonale-Zone	82
Tschepp-Decke	83
Tschrüpen-Decke	84
Umbrail-Chavalatsch-Schuppenzone (inkl. Terza-Schuppe)	85
Untere Orobiische Decke	86
Verrucano und Trias der Jästlichen 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
Waagitaler Decke	9
Schuppenzonen von Einsiedeln, Wildhaus usw.	10
Östliche Wildhorn-Decke und Randkette	11
Schlieren-Decke	12
Gurnigel-Decke	13
Tertiäre Sedimente und nordhelvetisches Tertiär	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. geschiefer, z.T. mit klastischen Bänken	19
Sedimentgestein: Kalkgestein mit Mergelzwischenfugen, z.T. geschiefer, z.T. mit klastischen Bänken, z.T. kieselig	20
Sedimentgestein: Konglomerate, Brekzien, Sandsteine, Mergel	21
Sedimentgestein: Konglomerate, Sandsteine, Mergel	22
Wechseltagerungen Rauhwacken, Gips und Dolomit	23
Obere Meeressolasse (OMM)	24
Obere Süßwassermolasse (OSM)	25
Untere Süßwassermolasse (USM) oder Untere Meeressolasse (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 m³ 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	Heilbach	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	Müllibach	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	Hintertöss	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

nr	area	Entzugsgebiet	Standort	Referenzgebiete	Datum	Datum	Datum	Q Messung 1 [s ⁻¹ km ⁻¹]	Entnahmen	Q Messung 1 korrigiert [s ⁻¹ km ⁻¹]	Perzentil	Q Messung 2 [s ⁻¹ km ⁻¹]	Entnahmen	Q Messung 2 korrigiert [s ⁻¹ km ⁻¹]	Perzentil	Q Messung 3 [s ⁻¹ km ⁻¹]	Entnahmen	Q Messung 3 korrigiert [s ⁻¹ km ⁻¹]	Perzentil	
8000	9.06	Altbach TEZG	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	Hellbach	Toss	Mittel zwischen Altbach und Naefbach	21.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	0.55	0.08	0.63	336	1.31	0.32	1.53	317	0.47	0.3	0.77	341	
24000	3.34	Walebach	Bauma	Chammerbach	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	Buttenbach	Ortstr. Buttenthal	Chammerbach	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	2.87	341	
411000	9.45	Wiesembach	Bürgigen	Mittel zwischen Altbach und Chaemmerbach	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	
422000	2.45	Wildbach	Chammerbach	Chammerbach	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	
481000	2.76	Tiefenbach	Taufen	Naefbach	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	
811000	16.79	Toebach	Hinterikon	Mittel zwischen Rietholzbach und Stuif	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	
871000	2.2	Toebach	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	
1011000	4.08	Moosbach	Obereimbach	Mittel zwischen Altbach und Naefbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	2.42	0	2.42	327	3.38	0.3	3.38	317	1.81	0.1	1.91	341	
1022000	2.61	Wildbach	Oberembach	Mittel zwischen Altbach und Naefbach	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	
1033000	1.53	Toebach Sied	Püntgen	Mittel zwischen Altbach und Naefbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.7	0	1.7	327	2.29	0	2.29	312	1.64	0	1.64	341	
1044000	9.45	Mühlbach	Püntgen	Mittel aus Surfb und Altbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.95	0.87	2.73	332	4.49	0.92	5.11	296	2.38	0.95	3.33	339	
1055000	3.3	Toebach	Dättlikon	Naefbach, Anstieg der Vorebene	17.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	1.76	1.18	1.94	351	2.64	0.25	2.69	320	2.15	0.22	2.37	338	
1111000	0.64	Mittlerer Chrebsbach	Winterthur	Mittel zwischen Altbach und Naefbach	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	
1122000	2.75	Altbach	Büchiwil	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	
2111000	2.53	Lochbach	Säland	Bieholtbach	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	
4433000	20.42	Mitteldösch bei Rothis	Rothis, Toss	Mittel aus Surfb und Altbach	16.09.2020	10.08.2023	18.08.2023	2.31	1.2	3.51	332	2.59	1.3	4.19	296	2.16	1.3	3.95	329	
6244000	4.09	Toss	Beinwil	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	
6555000	4.21	Hintertoss	Tosschedeli	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	
6626000	2.86	Vordertoss	Tosschedeli	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	
6727000	2.73	Steinenbach	Horn bei Steinenbach	Rietholzbach	24.09.2020	NA	NA	2.02	0	2.02	343	NA	0	NA	NA	0	0	0	0	329
6738000	1.84	Hutz	Netbach	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	Chrouchatalbach	Chrouchatal	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-Glare	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	Wetlikon	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

4378 A1. Bestimmung des unterirdischen Abflusses mit der

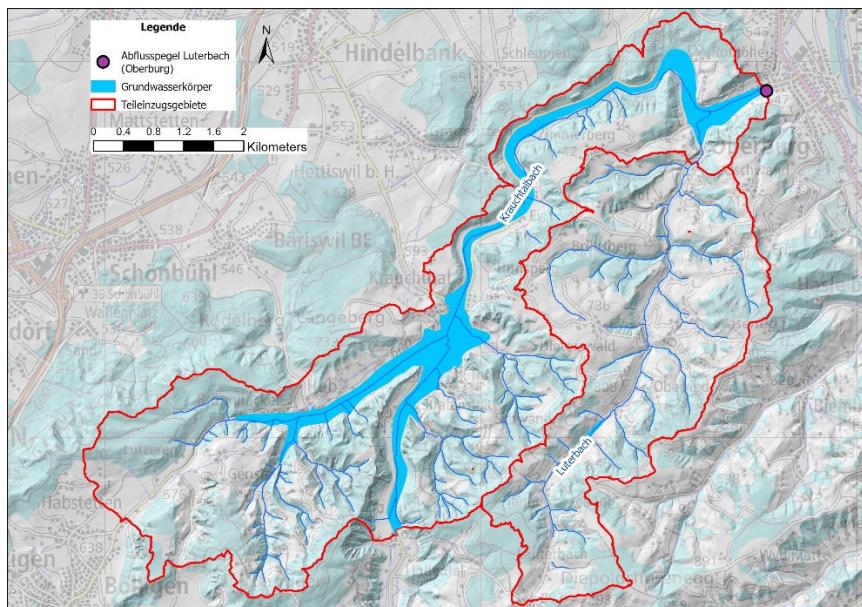
4379 hydrologischen Methode

4380 A1.1 Luterbach, Oberburg

4381 Fehlen die notwendigen hydrogeologischen Daten für die Anwendung der Darcy-Formel, kann der
4382 Grundwasserfluss unter der Pegelstation auch mithilfe einer neuen hydrologischen Methode abgeschätzt
4383 werden. Diese wurde in vier alpinen Einzugsgebieten erprobt (Naef und Margreth, 2017) und wird nun in vier
4384 Plateau-Einzugsgebieten angewendet. Das Verfahren wird im Folgenden am Beispiel des Luterbachs in Oberburg
4385 beschrieben, für den beide Methoden – die hydrologische Methode und die Darcy-Formel – anwendbar sind.
4386 Dadurch können die Ergebnisse verglichen werden.

4387 Der Luterbach besteht aus zwei Teileinzugsgebieten ähnlicher Grösse, dem Krauchtalbach und dem Luterbach
4388 (Abbildung 81). Während der Krauchtalbach über einen langen Abschnitt auf einem Kiesgrundwasserleiter fliest
4389 (Abbildung 81), gibt es im Teileinzugsgebiet des Luterbachs praktisch keine Schottergrundwasserleiter.

4390



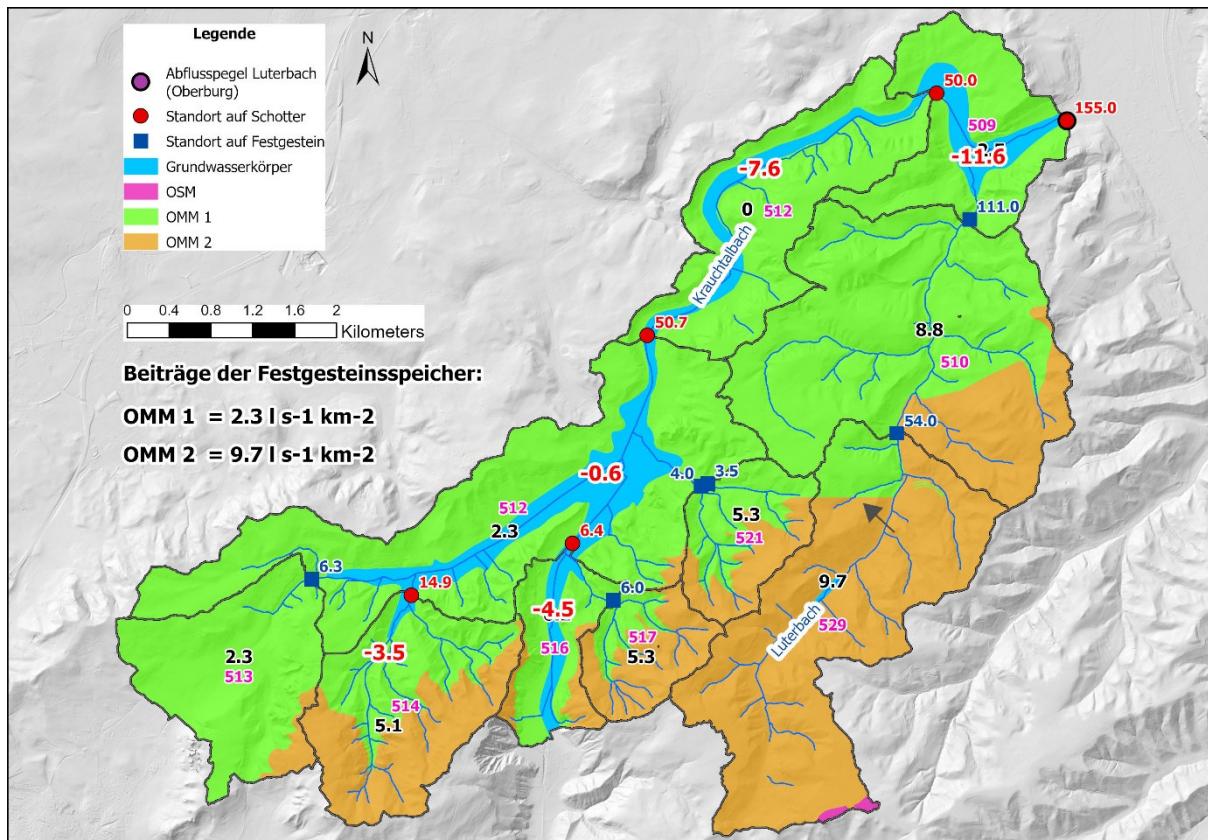
4391 *Abbildung 81: Abgrenzung der beiden Teileinzugsgebiete des Luterbachs, des Krauchtalbachs und des Luterbachs. In Oberburg wird der Abfluss des Luterbachs kontinuierlich von einer Abflussmessstation des Kantons Bern erfasst.*

4392 Beide Teileinzugsgebiete bestehen aus Sandsteinen der Oberen Marinen Molasse (OMM). Man unterscheidet
4393 jedoch zwischen der OMM 1, den sogenannten Sense-Schichten, die hauptsächlich das Teileinzugsgebiet des
4394 Krauchtalbachs bilden, und der OMM 2, den sogenannten Belpberg- und Niedermatt-Schichten, die häufig im
4395 Teileinzugsgebiet des Luterbachs vorkommen (Abbildung 82). Um den Beitrag der verwitterten und zerklüfteten
4396 Schichten der OMM 1 und OMM 2 zum Abfluss zu bestimmen, wurde der Abfluss in verschiedenen kleinen
4397 Teileinzugsgebieten gemessen, während der Niedrigwasserperiode vom 23. bis 25. April 2020, als der Abfluss
4398 nahe Q347 lag. Der spezifische Abfluss des aus OMM 2 aufgebauten Teileinzugsgebiets 529 beträgt $9.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$,

4401 mehr als viermal so hoch wie der des aus OMM 1 gebildeten Teileinzugsgebiets 513 ($2.3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Der
4402 spezifische Abfluss des Teileinzugsgebiets 510 ist ebenfalls hoch, obwohl die geologische Karte einen hohen
4403 Flächenanteil von OMM 1 ausweist. Die für den nördlichen Teil des Gebiets verfügbare geologische Karte stammt
4404 aus dem Jahr 1950, die für den südlichen Teil aus dem Jahr 2001. Die Grenze zwischen den Kartenblättern ist
4405 durch eine gerade Linie zwischen OMM 1 und OMM 2 gekennzeichnet (siehe schwarzer Pfeil in Abbildung 82).
4406 Unter der Annahme, dass 2001 deutlich bessere Informationen vorlagen als 1950, halten wir das Kartenblatt für
4407 den südlichen Teil für zuverlässiger als das für den nördlichen. Dies würde bedeuten, dass der Anteil von OMM
4408 2 im Teileinzugsgebiet 510 deutlich unterschätzt sein könnte. Dies stünde in besserem Einklang mit dem
4409 ermittelten hohen Wert des spezifischen Abflusses von $8.8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Fliessgewässer mit einer gemischten
4410 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.
4411 Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Sandsteine von OMM 1 durch zahlreichere
4412 Mergelschichten getrennt sind als die von OMM 2 (Swisstopo 1950, Swisstopo 2001). Die Mergelschichten
4413 hemmen die Infiltrationsfähigkeit, sodass sich im Gegensatz zu OMM 2 in den Sandsteinen von OMM 1 keine
4414 tiefen, speicherfähigen Verwitterungsschichten bilden konnten.
4415
4416 Messstellen, die mit einem blauen Quadrat markiert sind, befinden sich auf anstehendem Gestein. Im Gegensatz
4417 dazu liegen die mit einem roten Kreis markierten Stellen auf Kiesablagerungen. An diesen Stellen fliest Wasser
4418 unterirdisch, das von den Messungen nicht erfasst wird.
4419
4420 Das neue Verfahren zur Bestimmung dieses unterirdischen Abflusses geht davon aus, dass die
4421 Schottergrundwasserkörper so rasch entwässern, dass in einer länger andauernden Niedrigwasserphase der
4422 Wasserrückhalteeffekt durch den Schottergrundwasserkörper erschöpft ist. Das bedeutet auch, dass die Menge
4423 an am Pegel unterirdisch abfliessenden Wasser im Gleichgewicht ist mit der Wassermenge, die oberhalb im
4424 Bachbett versickert. Zu einem solchen Zeitpunkt wird also der Gesamtabfluss des Einzugsgebiets aus den
4425 langsam entwässernden Grundwasserleitern in den verwitterten und zerklüfteten Schichten von OMM 1 und
4426 OMM 2 gespeist.
4427 Ausgehend davon wurde für Stellen, an denen unterirdischer Abfluss vermutet wurde (rote Punkte), der
4428 Gesamtabfluss durch flächengewichtete Addition der Beiträge von OMM 1 und OMM 2 für jedes Einzugsgebiet
4429 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
4430 aufgebauten Gebiete UMM 2 ein Beitrag von $9.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ angenommen. Durch Multiplikation des spezifischen
4431 Abflusses mit den Flächen von OMM 1 und OMM 2 ergab sich der Gesamtabfluss für jedes Teileinzugsgebiet.
4432 Der Grundwasserabfluss wurde aus der Differenz zwischen dem Gesamtabfluss und dem gemessenen Abfluss
4433 des Bachs ermittelt. Durch Aufsummierung der Grundwasserabflusswerte für jede Messstelle flussabwärts lässt
4434 sich der gesamte Grundwasserabfluss für jeden Standort bestimmen. Dies ermöglicht auch die Ermittlung der
4435 Wassermenge, die entlang des Bachabschnitts im Vergleich zur vorherigen Messstelle flussaufwärts versickert.
4436 Den Berechnungen zufolge versickerten flussaufwärts der Messstellen 514 und 516 jeweils 3.5 bzw. 4.5 l s^{-1} in
4437 den Schottergrundwasserleiter (Abbildung 82 und Abbildung 83). Von den Messstellen 514 und 516 bis zur
4438 Messstelle 1003 versickerten lediglich 0.6 l s^{-1} . Weiter flussabwärts waren die Versickerungsraten mit 7.6 bzw.
4439 11.6 l s^{-1} wieder höher. Am tiefsten Punkt, dem Standort der Messstation, wurde ein unterirdischer Abfluss von

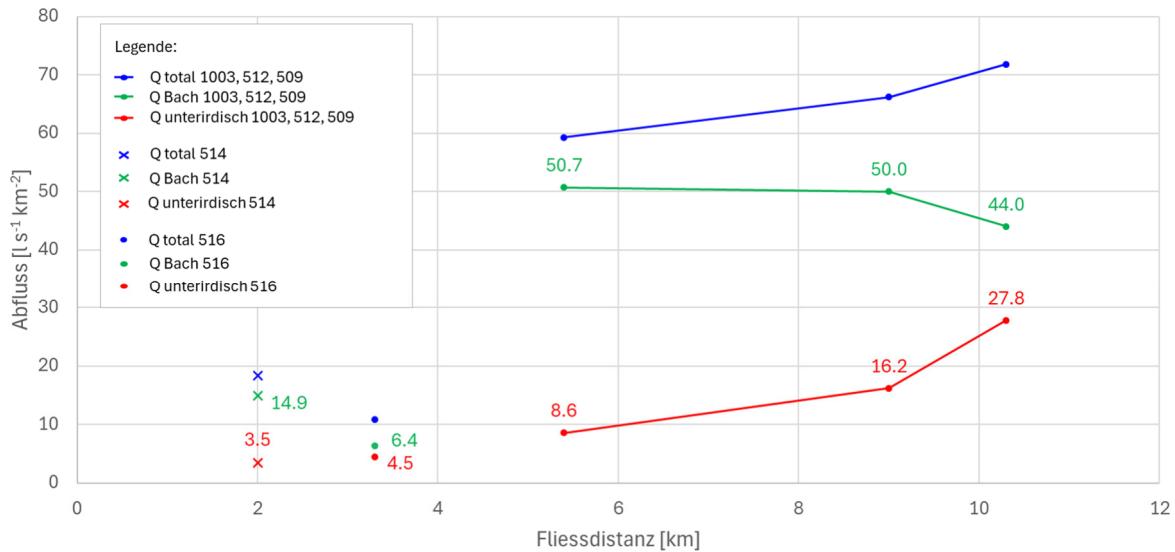
4439 27.8 l s⁻¹ ermittelt. Gemäss einer Studie des Geotechnischen Instituts Bern (Biaggi und Teuscher, 2018) betrug
4440 der unterirdische Abfluss am Messpunkt Luterbach am 16. Juli 2018 l s⁻¹ und lag damit 25 % über dem
4441 hydrologisch ermittelten Wert. Der Oberflächenabfluss am Messpunkt Oberburg lag damals mit 135 l s⁻¹ fast
4442 gleich hoch wie am 24. April 2020 (134 l s⁻¹), als die Abflusseinzelmessung unweit oberhalb des Pegels in
4443 Oberburg durchgeführt wurde. Die mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführte Abflussmessung war mit
4444 155 l s⁻¹ mehr als 20 l s⁻¹ höher als der von der Station ermittelte Wert.

4445



4446

4447 Abbildung 82: Die Einzugsgebiete Luterbach und Krauchtalbach werden von OMM aufgebaut, wobei das Gebiet
 4448 Krauchtalbach hauptsächlich von OMM 1 und das Gebiet Luterbach von OMM 2 geprägt ist. Anhand von
 4449 Einzelabflussmessungen um Q347 wurden die Beiträge der Festgesteinsspeicher zu Q347 abgeschätzt. Sie betragen 2.3 l s^{-1}
 4450 km^{-2} für Gesteine aus UMM 1 und $9.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ für Gesteine aus UMM 2. Die spezifischen Abflüsse der Teileinzugsgebiete
 4451 sind mit schwarzen Zahlen markiert. Durch Multiplikation des jeweiligen Abflusswertes mit der Fläche der Einheit wurde der
 4452 Gesamtabfluss für jeden Standort im Schottergrundwasserkörper ermittelt (rote Punkte). Der unterirdische Abfluss wurde
 4453 durch Subtraktion des gemessenen Abflusswertes im Bach vom Gesamtabfluss bestimmt. Dies ermöglichte die Abschätzung
 4454 der jeweiligen Infiltrationsvolumina zwischen den Standorten (große rote Zahlen). Der schwarze Pfeil markiert die Grenze
 4455 zwischen zwei geologischen Kartenblättern. Das südliche Kartenblatt ist neueren Datums (2001) als das nördliche (1950),
 4456 weshalb die Autoren den Informationsgehalt des südlichen Kartenblatts als zuverlässiger einschätzen. Demnach dürfte das
 4457 von OMM 2 im Teileinzugsgebiet 510 abgedeckte Gebiet deutlich grösser sein als bisher angenommen, was besser mit dem
 4458 Gesamtbild der Abflusswerte übereinstimmt.



4459

4460 *Abbildung 83: Gesamtabfluss, Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss im Bereich Q347 an den Messstellen 514, 516,*
 4461 *1003, 512 und 509 im Krauchtalbach. Der Grundwasserabfluss steigt stetig auf einen Wert von 27.8 l s^{-1} am Pegel an.*

4462

4463 *Tabelle 24: Angaben zu gemessenen Abflüssen (oberirdischer Abfluss), unterirdischen Abflüssen und Gesamtabflüssen im*
 4464 *Einzugsgebiet des Luterbachs (Oberburg).*

		Fläche [km^2]	Messwert Abfluss oberirdisch [l s^{-1}]	Abfluss oberirdisch von Teilgebiet [l s^{-1}]	Spezifischer Abfluss oberirdisch von Teilgebiet [$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$]	Fläche OMM 1 [km^2]	Fläche OMM 2 [km^2]	Afluss total OMM 1 [l s^{-1}]	Afluss total OMM 2 [l s^{-1}]	Afluss total Teilgebiet [l s^{-1}]	Afluss unterirdisch Teilgebiet [l s^{-1}]	Afluss unterirdisch [l s^{-1}]	Afluss total [l s^{-1}]	Bemerkungen
514	Laufengrabe	2.94	14.9	5.3	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, Unterberg	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										

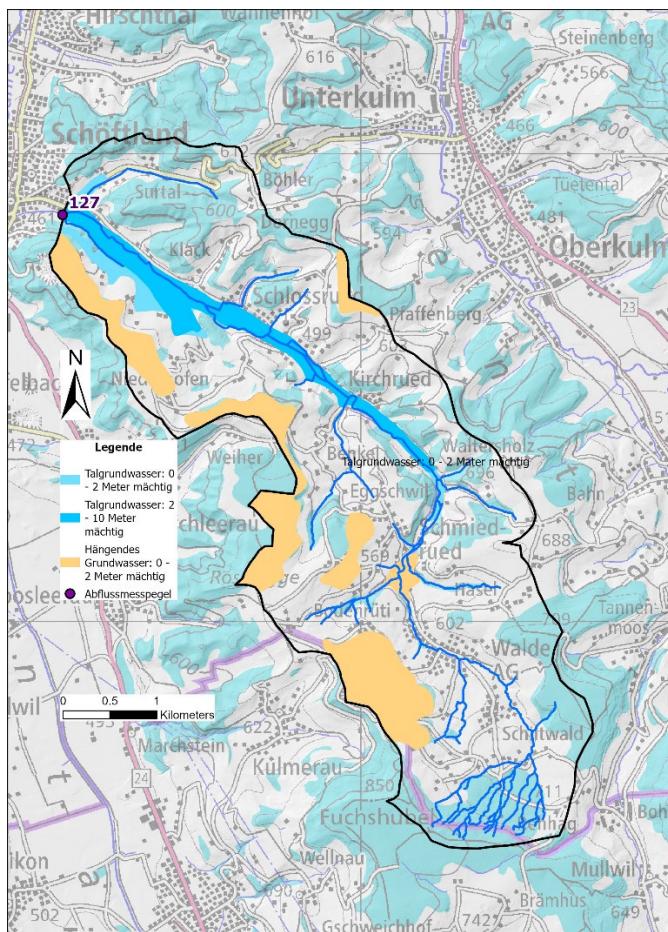
4465

A1.2 Rüderchen, Schöftland

4466 Im Unterlauf fliesst 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 Meeressmolasse (OMM) und zu 48 % aus Wechsellsagerungen von Sandstein und Mergel der Oberen Süßwassermolasse (OSM). Das mittlere Q347 der sechs OSM-Einzugsgebiete östlich des Rüderchen beträgt $2.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ($SD = 0.49 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, Abbildung 85). Westlich des Rüderchen-Einzugsgebiets liegt das Einzugsgebiet der Ürke, der überwiegend aus OMM besteht. Sein Q347 ($8.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) 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-

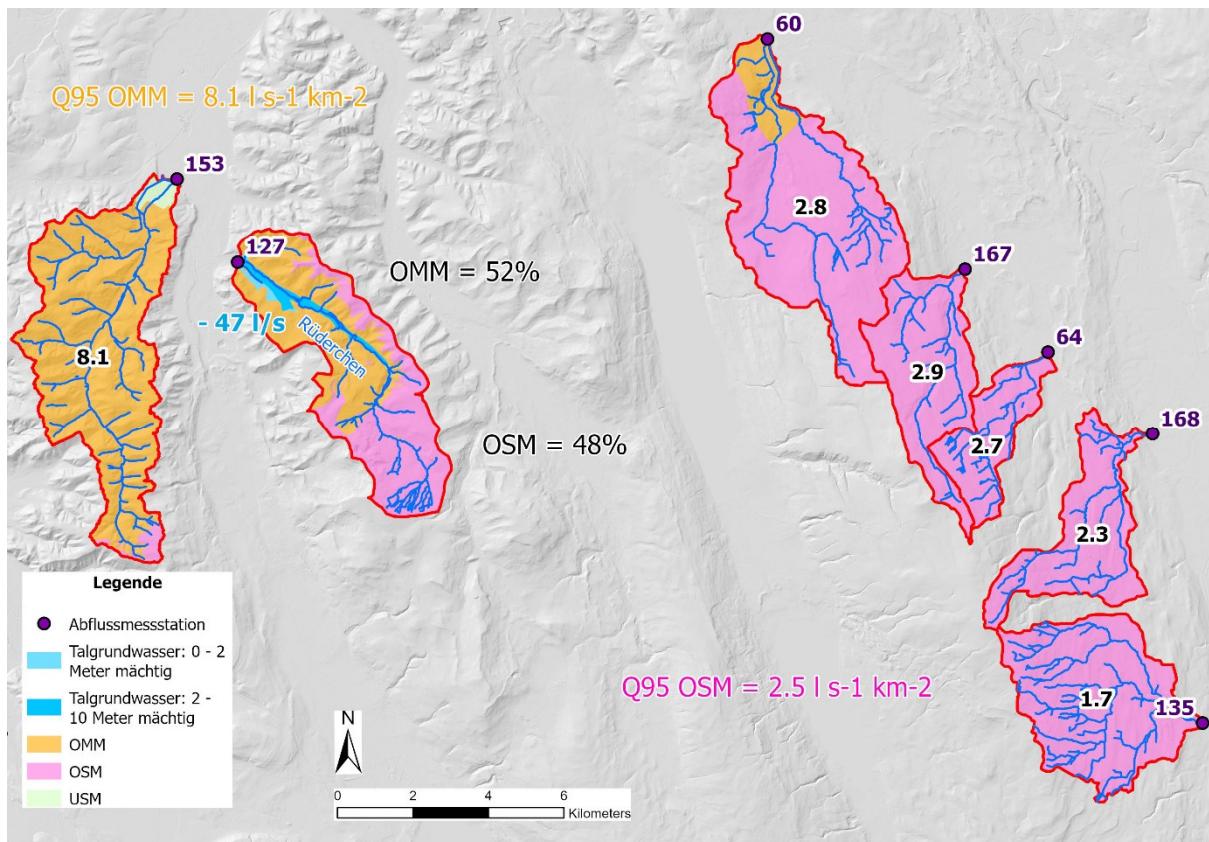
4480 und Grundwasserabfluss) bei Q347 wurde berechnet, indem $2.5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ mit 48 % und $8.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ mit 52 %
4481 der Fläche des Rüderchen-Einzugsgebiets multipliziert wurden. Der Wert beträgt 102.6 l s^{-1} . Die
4482 Grundwassermenge wurde ermittelt, indem der vom Pegelstand gemessene Q347-Wert des
4483 Oberflächenabflusses vom geschätzten Gesamt-Q347-Wert abgezogen wurde ($102.6 \text{ l s}^{-1} - 55.6 \text{ l s}^{-1} = 47 \text{ l s}^{-1}$;
4484 Tabelle 25). Die unterirdisch fliessende Wassermenge entspricht somit nahezu der oberirdisch fliessenden. Der
4485 spezifische Grundwasserfluss beträgt 3.15 l/s/km^2 .

4486



4487

4488 Abbildung 84: Schottergrundwasserleiter im Einzugsgebiet Rüderchen (Schöftland, Kanton Aargau). Die Messstation befindet
4489 sich an einer Stelle, an der ein Teil des Grundwassers an der Messstation vorbeifliest (markiert durch den violetten Punkt).



4490

4491 Abbildung 85: Das Einzugsgebiet des Rüderchens besteht zu 52 % aus Oberer Meeressmolasse (OMM) und zu 48 % aus Oberer
 4492 Süsswassermolasse (OSM). Basierend auf dem durchschnittlichen Q347-Wert der östlich angrenzenden, aus OSM
 4493 bestehenden Einzugsgebieten wird der OSM-Anteil am Q347-Wert auf 2.5 l s⁻¹ km⁻² geschätzt. Der OMM-Anteil wird auf 8.1
 4494 l s⁻¹ km⁻² geschätzt. Dies entspricht dem Q347-Wert des Einzugsgebiets der Urke, das fast vollständig aus OMM besteht und
 4495 westlich des Rüderchen-Einzugsgebiets liegt. Durch Multiplikation des OSM-Q347-Werts mit der OSM-Fläche wird der Anteil
 4496 der OSM-Flächen im Rüderchen-Einzugsgebiet am Q347-Wert ermittelt. Der Anteil der OMM-Flächen am Q347-Wert wird
 4497 analog ermittelt. Der Gesamtabfluss bei Q347 (Oberflächenabfluss + Grundwasserabfluss) ergibt sich aus der Summe dieser
 4498 beiden Werte.

4499 Tabelle 25: Die Berechnung des Gesamtabflusses bei Q347 am Pegel Rüderchen bei Schöftland basiert auf den Beiträgen der
 4500 lithostratigraphischen Einheiten OMM und OSM sowie deren Flächen. Der Grundwasserabfluss ergibt sich aus der Differenz
 4501 zwischen dem Gesamtabfluss bei Q347 und dem Q347-Wert des Abflusses am Abflusspegel. Er beläuft sich auf 47 l s⁻¹.

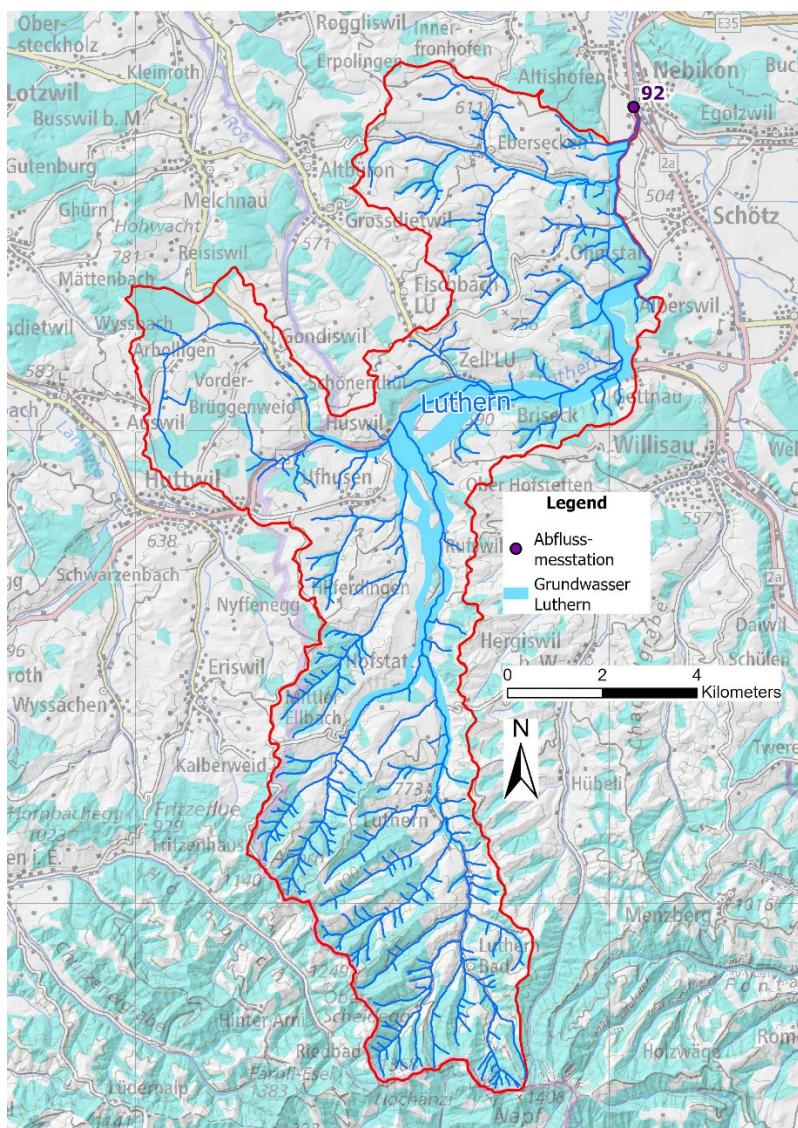
Litho-Stratigraphie	Fläche [km ²]	Q347 [l s ⁻¹]	Fläche [%]
Obere Meeressmolasse (OMM)	9.89	80.1	52
Obere Süsswassermolasse (OSM)	9	22.5	48
Q347 total		102.6	
Q347 Bach		-55.6	
Q347 Grundwasser		47	

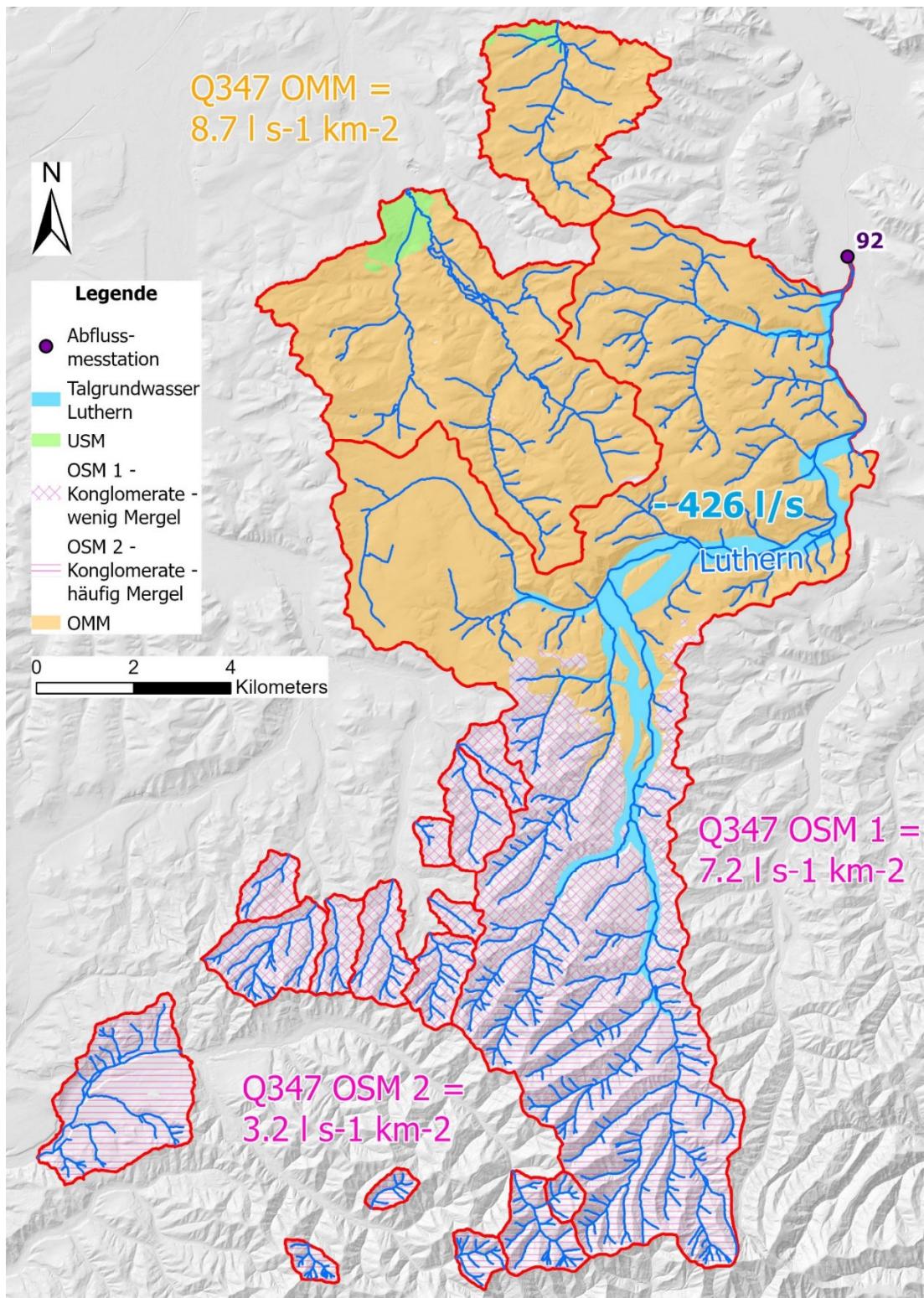
4502

4503 A1.3 Luthern, Nebikon

4504 Im Luthertal befindet sich ein mächtiger, langgestreckter Schottergrundwasserkörper (Abbildung 86), in den ein
 4505 Teil des Wassers des Luthern-Bachs versickert. Die Lithostratigraphie lässt sich in drei verschiedene Klassen
 4506 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 $9.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$,
4508 ähnlich denen in der Ürke ($8.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, 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 $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. 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 ($2.4\text{--}3.4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) 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 $4.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.
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.





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 $8.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 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 $7.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 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 *$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ 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.