

FACHBEREICH WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT

Beschreibung und Abschätzung der Abflusswerte Q_{347} , Q_{182} und MQ für Kanton und Stadt Zürich



- ABSCHLUSSBERICHT -

Auftraggeber:

Kanton Zürich

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Walcheplatz 2
8090 Zürich

Stadt Zürich

Entsorgung + Recycling Zürich (ERZ)
Hagenholzstrasse 110
8050 Zürich

Verfasser:

Yanick Dups
Dr. Ehsan Rabiei
Prof. Dr. Henning Lebreuz M.Sc.

Version: 26. Juli 2024

Zusammenfassung

Die hydrologischen Prozesse, die Treiber und Parameter und deren inhärente räumliche und zeitliche Variabilität, sind in Gänze nicht zu beschreiben. Deshalb ist ein Einzugsgebiet immer ein komplexes System, dessen Abschätzungen und Vorhersagen nicht deterministisch, sondern von Aussagen über deren Unsicherheiten begleitet sein sollten. Dies gilt auch für die Abschätzungen der Abflusswerte Q_{347} , Q_{182} und MQ.

In diesen Untersuchungen wird mit 56 beobachteten Einzugsgebieten in und um den Kanton Zürich die typische Methode zur Abschätzung des Q_{347} und des MQ-Wertes verbessert und ein neues Modell für die Abschätzung des Q_{182} vorgestellt. Nach einem Rückblick auf bestehende Definitionen und Methoden (Kap. 1) und einer Qualitätsanalyse der Daten (Kap. 2) der letzten 10 Jahre (d.h. 2013 - 2022), werden die Punktmessungen des täglichen und monatlichen Niederschlages und der Temperatur im Raum regionalisiert (Kap. 3). Die beobachteten Niedrigwasserereignisse des Q_{347} , deren zeitliche Verteilung und Veränderung, und der Zusammenhang mit Niederschlag und Temperatur werden in vorgängigen Untersuchungen beschrieben (Kap. 4).

Die Abschätzung der Abflusswerte Q_{347} , Q_{182} und MQ wird mit der multiplen linearen Regression für die Einzugsgebiete vorgenommen (Kap. 6), wobei hier die beschreibenden sieben Parameter aus einem Pool von 39 statischen und klimatischen ausgewählt werden. Die Auswahl der Parameter zur Minimierung der Kollinearität wird mit drei Methoden, der «Forward Selection», der «Backward Selektion» und dem «Random Forest» vorgenommen, an die eine Hauptkomponententransformation angeschlossen werden kann. Diese Methode der optimierten Parameterauswahl verbessert den Abschätzungsfehler um ca. 30% (Q_{347}) bzw. 8% (Q_{182}) im Vergleich zu Standardstudien. Um den Behörden ein operatives Werkzeug zur Verfügung zu stellen werden abschliessend die Abflusswerte für insgesamt 9034 unbeobachtete Einzugsgebiete der «Einzugsgebietsgliederung Kanton Zürich» und für 218 unbeobachtete Einzugsgebiete der «Einzugsgebietsgliederung Stadt Zürich» regionalisiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einleitung	1
1.1.1	Niedrigwasserabfluss	1
1.1.2	Mittelwasserabfluss	2
1.1.3	Gesetzliche Grundlage in der Schweiz	2
1.2	Status quo	3
1.2.1	Abschätzung des Q_{347}	3
1.2.2	Abschätzung des Q_{182} und MQ	4
2	Projektperimeter und Datenaufbereitung	5
2.1	Untersuchungsgebiet und Zeitraum	5
2.2	Datenaufbereitung für den Abfluss Q	6
2.2.1	Messperioden und Qualitätskontrollen	6
2.2.2	Verwendete Q -Stationen	7
2.3	Datenaufbereitung für den Niederschlag P	9
2.3.1	Messperioden und Qualitätskontrollen	9
2.3.2	Verwendete P -Stationen	10
2.4	Datenaufbereitung für die Temperatur T	11
2.4.1	Messperioden und Qualitätskontrollen	11
2.4.2	Verwendete T -Stationen	12
3	Regionalisierung von Niederschlag und Temperatur	14
3.1	Methodik der geostatistischen Interpolation	14
3.1.1	Ordinary Kriging	15
3.1.2	External Drift Kriging	15
3.2	Regionalisierung von Niederschlag und Temperatur	16
3.2.1	Niederschlag	16
3.2.2	Temperatur	17
4	Entwicklung des Q_{347}	18
4.1	Eigenschaften und Verteilungen des Abflusswertes Q_{347}	18
4.2	Zeitliche Veränderung des Q_{347}	21
5	Parametrisierung der Einzugsgebiete	24
5.1	Einzugsgebietsgliederung	24
5.2	Statische Eigenschaften der Einzugsgebiete	25
5.3	Klimatische Eigenschaften der Einzugsgebiete	29
6	Abschätzung von Q_{347}, Q_{182} und MQ	32
6.1	Multiple Lineare Regression	32

6.1.1	Methoden zur Auswahl der Regressoren	33
6.1.2	Hauptkomponentenanalyse	34
6.1.3	Kreuzvalidierung	34
6.2	Modelle M1- M3	35
6.2.1	M1: «starke» lineare Regression	35
6.2.2	M2: Übernahme der MLR vom beobachteten EZG	36
6.2.3	M3: Clustering der EZG	36
6.2.4	Vergleichsmodelle «BAFU» und «1-2-3»	37
6.3	Ergebnisse der Abschätzung des Q_{347} und Fehlerverteilung	38
6.3.1	Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für Q_{347}	38
6.3.2	Ergebnisse der Q_{347} -Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich	40
6.3.3	Ergebnisse der Q_{347} -Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich	41
6.3.4	Ausgewählte Fehlerbetrachtungen	42
6.4	Ergebnisse der Abschätzung des Q_{182} und Fehlerverteilung	43
6.4.1	Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für Q_{182}	43
6.4.2	Ergebnisse der Q_{182} -Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich	45
6.4.3	Ergebnisse der Q_{182} -Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich	45
6.4.4	Ausgewählte Fehlerbetrachtungen	46
6.5	Ergebnisse der Abschätzung des MQ und Fehlerverteilung	46
6.5.1	Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für MQ	47
6.5.2	Ergebnisse der MQ-Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich	48
6.5.3	Ergebnisse der MQ-Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich	49
6.5.4	Ausgewählte Fehlerbetrachtungen	50
6.6	Plausibilitätskontrolle und Plausibilitätsindex	51
6.6.1	Negativwerte	52
6.6.2	Hierarchie der Abflusswerte	52
6.6.3	Plausibilitätsindex	53
6.7	Schlussfolgerungen und Ausblicke	55
Anhang		57
A Details der verwendeten Messstationen		57
B Qualitätskontrolle		68
C Zusammenhänge zwischen Q_{347} / q_{347} und ausgesuchten Parametern		77
D Ergebnisse zur Parameterauswahl		78
E Abflusswerte für die EZG der Stadt Zürich		82

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Definition des Q_{347} , des Q_{182} und des MQ mit Darstellung anhand einer exemplarischen Ganglinie der Station Töss-Hornsäge	2
Abb. 2	Perimeter des Untersuchungsgebietes und Messstationen für Q, P und T	5
Abb. 3	Zeitliche Abdeckung der originalen 113 Messstationen des Abflusses Q im Zeitraum 2013 bis 2023	7
Abb. 4	Histogramm der Flächen der EZG	8
Abb. 5	Räumliche Lage der verwendeten Stationen des Abflusses Q und der dazugehörigen EZG	8
Abb. 6	Zeitliche Abdeckung der 230 Messstationen des Niederschlages P im Zeitraum 2013 bis 2023	9
Abb. 7	Visuelle Qualitätskontrolle am Beispiel der Station Birmenstorf FHNW_005	10
Abb. 8	Positionen der 188 verwendeten Stationen des Niederschlages P	11
Abb. 9	Zeitliche Abdeckung der 153 Messstationen der Temperatur T im Zeitraum 2013 bis 2023	12
Abb. 10	Räumliche Lage der 131 verwendeten Stationen der Temperatur T	13
Abb. 11	Theoretisches Variogramm	15
Abb. 12	Räumliche Verteilung des täglichen Niederschlags am 01. Januar (links) und am 30. Juni 2016 (rechts) durch OK	16
Abb. 13	Räumliche Verteilung der täglichen Lufttemperatur am 01. Januar (links) und am 30. Juni 2016 (rechts) durch EDK	17
Abb. 14	Abflusswerte Q_{347} (links) und q_{347} (rechts) im Vergleich zur Fläche des EZG	18
Abb. 15	Histogramm der Q_{347} Ereignisse über die (Ereignis-) Dauer D	19
Abb. 16	Histogramm der Anzahl Q_{347} Tage über die Dauer D	20
Abb. 17	Verteilung der Ereignistage des Q_{347} für verschiedene Dauern D und Kalendermonate	20
Abb. 18	Verteilung der Ereignistage des Q_{347} über die Kalendermonate nach räumlicher Lage der EZG	21
Abb. 19	Anteil der Q_{347} -Tage an den Gesamttagen von 1993 bis 2022 mit einem gleitenden Mittelwert über 5 Jahre	22
Abb. 20	Relative Veränderung des Q_{347} -Werts zwischen den Dekaden I und II sowie II und III	23
Abb. 21	Flächenvergleich der beobachteten und unbeobachteten EZG im Kanton ZH	24
Abb. 22	Häufigkeitsverteilung der geometrischen Parameter	25
Abb. 23	Häufigkeitsverteilung der topografischen Parameter	26
Abb. 24	Häufigkeitsverteilung der geologischen und hydrogeologischen Parameter	27
Abb. 25	Häufigkeitsverteilung der Parameter der Bodennutzung	27
Abb. 26	Berechnungsschema für den Parameter Ausrichtung	28
Abb. 27	Häufigkeitsverteilung der Parameter der Entwässerung und der Ausrichtung	29

Abb. 28	Häufigkeitsverteilung der Parameter der Bevölkerung	29
Abb. 29	Häufigkeitsverteilung der Parameter der Temperatur	30
Abb. 30	Darstellung der Parameter Amplitude und Phase	30
Abb. 31	Häufigkeitsverteilung der Parameter des Niederschlags	31
Abb. 32	Häufigkeitsverteilung der Parameter der Verdunstung	31
Abb. 33	Entwicklung des Fehlers in M1 bei verschiedenen Grössen der ensembles	36
Abb. 34	Beobachteten EZG, deren untergeordneten Teil-EZG jeweils mit dem selben Re- gressionsmodell abgeschätzt werden	37
Abb. 35	Zuordnung der unbeobachteten EZG zu den drei Cluster	38
Abb. 36	Relevanz einzelner Parameter für die Beschreibung des Q_{347} im gesamten Unter- suchungsgebiet	39
Abb. 37	Ergebnisse der Abschätzung des q_{347} der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und den Referenzmodellen 1-2-3 und BAFU in (d) bis (e) für die EZG des Kanton Zürich	41
Abb. 38	Ergebnisse der Abschätzung des q_{347} der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und den Referenzmodellen 1-2-3 und BAFU in (d) bis (e) für die EZG der Stadt Zürich	42
Abb. 39	Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten q_{347} -Werte	43
Abb. 40	Streudiagramme der modellierten q_{347} Werte der Modelle M1 bis M3 vs. die mo- dellierten BAFU-Werte	43
Abb. 41	Ergebnisse der Abschätzung des q_{182} der Modelle M1 bis M3 für die EZG des Kanton Zürich	45
Abb. 42	Ergebnisse der Abschätzung des q_{182} der Modelle M1 bis M3 für die EZG der Stadt Zürich	46
Abb. 43	Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten q_{182} -Werte	46
Abb. 44	Ergebnisse der Abschätzung des MQ der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und des Referenzmodells BAFU in (d) für die EZG des Kanton Zürich	49
Abb. 45	Ergebnisse der Abschätzung des Mq der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und des Referenzmodells BAFU in (d) für die EZG der Stadt Zürich	50
Abb. 46	Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten MQ-Werte	51
Abb. 47	Streudiagramme der modellierten MQ-Werte der Modelle M1 bis M3 vs. die mo- dellierten BAFU-Werte	51
Abb. 48	Histogramme der Fehlerverteilungen in M1 mit Fehlertoleranz	54
Abb. 49	Plausibilitätsindex für das Modell M1	55
Abb. 50	Räumliche Verteilung des Plausibilitätsindex für das Modell M1	55

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht und Gründe der eliminierten Messstationen	6
Tab. 2:	Relative Veränderung des Q_{347} -Werts	23
Tab. 3:	Geometrische Parameter	25
Tab. 4:	Topografische Parameter	26
Tab. 5:	Geologische und hydrogeologische Parameter	27
Tab. 6:	Parameter der Bodennutzung	27
Tab. 7:	Parameter der Entwässerung und Ausrichtung	28
Tab. 8:	Parameter der Bevölkerung	29
Tab. 9:	Parameter der Temperatur	30
Tab. 10:	Parameter des Niederschlags	31
Tab. 11:	Parameter der Verdunstung	31
Tab. 12:	Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für Q_{347}	39
Tab. 13:	Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 und die Referenzmodelle 1-2-3 und BAFU für q_{347}	40
Tab. 14:	Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für Q_{182}	44
Tab. 15:	Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 für q_{182}	45
Tab. 16:	Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für MQ	47
Tab. 17:	Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 und das Referenzmodell BAFU für MQ	48
Tab. 18:	Negativwerte in den Modellen M1 bis M3 für q_{347} , q_{182} und Mq	52
Tab. 19:	Validierung der hierarchischen Struktur der Abflusswerte an den unbeobachteten und beobachteten EZG	53
Tab. 20:	Details der verwendeten Q-Stationen, Teil 1	58
Tab. 21:	Details der verwendeten Q-Stationen, Teil 2	59
Tab. 22:	Details der verwendeten P-Stationen, Teil 1	60
Tab. 23:	Details der verwendeten P-Stationen, Teil 2	61
Tab. 24:	Details der verwendeten P-Stationen, Teil 3	62
Tab. 25:	Details der verwendeten P-Stationen, Teil 4	63
Tab. 26:	Details der verwendeten P-Stationen, Teil 5	64
Tab. 27:	Details der verwendeten T-Stationen, Teil 1	65
Tab. 28:	Details der verwendeten T-Stationen, Teil 2	66
Tab. 29:	Details der verwendeten T-Stationen, Teil 3	67
Tab. 30:	Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 1	82
Tab. 31:	Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 2	83
Tab. 32:	Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 3	84
Tab. 33:	Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 4	85
Tab. 34:	Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 5	86

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
API	Vorregen [<i>engl. antecedent precipitation index</i>]
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BLW	Bundesamtes für Landwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d	days (Tage, Zeiteinheit)
d.h.	das heisst
evtl.	eventuell
exkl.	exklusiv
EDK	External Drift Kriging
ERZ	Tiefbau- und Entsorgungsdepartement Zürich
EZG	Einzugsgebiet(e)
EZGG	Einzugsgebietsgliederung
FHNW	FH Nordwestschweiz
GSchG	Gewässerschutzgesetz
IBAU	Institut Bauingenieurwesen
MLR	Multiple Lineare Regression
OMM.	Obere Meeresmolasse
OK	Ordinary Kriging
PCA	Principal Component Analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PET	Potentielle Evapotranspiration
RF	Random Forest
USM	Untere Süsswassermolasse
u.U.	unter Umständen
VIF	Variance Inflation Factor
WSL	Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
ZH	Zürich

Literatur

- Ahmed, S. und G. De Marsily (1987). “Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity”. In: *Water resources research* 23.9, S. 1717–1737.
- Aschwanden, H. (1986). “Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen schweizerischen Einzugsgebieten”. In: *Publikation Gewässerkunde* 66.
- Aschwanden, H. und B. Schädler (1988). “Die Abflussmenge Q347 als Grundlage zur Bestimmung der Restwassermenge. Möglichkeiten der Berechnung in Gebieten ohne Messungen”. In: *Gas Wasser Abwasser* 68, S. 491–496.
- Aschwanden, H. und R. Weingartner (1985). “Die Abflussregimes der Schweiz”. In: *Publikation Gewässerkunde* 65.
- Aschwanden, H. (1992). “Die Niedrigwasserabflussmenge Q347 - Bestimmung und Abschätzung in alpinen schweizerischen Einzugsgebieten”. In: *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft - Landeshydrologie und -geologie* Mitteilung.18.
- Aschwanden, H. und C. Kan (1999). “Die Abflussmenge Q347 - Eine Standortbestimmung”. In: *Eidgenössisches Departement des Innern - Landeshydrologie und -geologie* Hydrologische Mitteilungen.27.
- Demuth, S. (1993). *Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa*. Professur für Hydrologie an der Universität Freiburg i. Br.
- Donges, N. (2020). URL: <https://builtin.com/data-science/random-forest-algorithm%20abgerufen>.
- Dups, Y. et al. (2023). “Neue Abschätzungsmodelle zur Bestimmung des Q347”. In: *Wasser Energie Luft* 115.2, S. 101–108.
- Estoppey, R. et al. (2000). “Angemessene Restwassermengen–Wie können sie bestimmt werden”. In: *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Schweiz*.
- Geowissenschaftliches Büro, geo7 (o. D.). *Einzugsgebietsgliederung Kanton Zürich - Kurzdokumentation*.
- Gregorutti, B., B. Michel und P. Saint-Pierre (2017). “Correlation and variable importance in random forests”. In: *Statistics and Computing* 27, S. 659–678.
- Kroll, C. et al. (2004). “Developing a watershed characteristics database to improve low streamflow prediction”. In: *Journal of Hydrologic Engineering* 9.2, S. 116–125.
- Laaha, G. (2000). “Zur Beurteilung der Genauigkeit von Niederwasserkennwerten”. In: *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich* 80, S. 61–68.
- Matheron, G. (1963). “Principles of geostatistics”. In: *Economic geology* 58.8, S. 1246–1266.
- Naef, F., M. Margreth und M. Floriancic (2015). “Festlegung von Restwassermengen: Q347, eine entscheidende, aber schwer zu fassende Größe”. In: *Wasser Energie Luft* 107.
- Nathan, R. J. und T. A. McMahon (1992). “Estimating low flow characteristics in ungauged catchments”. In: *Water Resources Management* 6, S. 85–100.

- Pavía Santolamazza, D. (2022). “Event-based flood estimation using a random forest algorithm for the regionalization in small catchments”. Diss. Dissertation, Stuttgart, Universität Stuttgart, 2022.
- Pfaundler, M. und M. Zappa (2006). “Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz”. In: *Ein optimierter Datensatz im 500*, S. 291–298.
- Smakhtin, V. U. (2001). “Low flow hydrology: a review”. In: *Journal of hydrology* 240.3-4, S. 147–186.
- Tyralis, H., G. Papacharalampous und A. Langousis (2019). “A brief review of random forests for water scientists and practitioners and their recent history in water resources”. In: *Water* 11.5, S. 910.

1. Einführung

1.1. Einleitung

Natürliche Fließgewässer sind zeitlichen Schwankungen ihres Abflusses Q unterlegen, die meist als Reaktion des Einzugsgebietes (EZG) auf natürliche Variationen im Niederschlag und Temperatur angenommen werden und manchmal auch künstlich verursacht sind. Es entstehen Zeitperioden mit relativ geringen oder gar komplett aufgehenden (intermittierenden), oberirdischen Abfluss. Diese Niedrigabflüsse können, u.U. mehrere Tage und Wochen anhalten, wobei sich Ökosysteme und die Verhaltensweisen der Menschen an variierenden Verhältnisse anpassen müssen, bzw. diese auch benötigen.

Im Allgemeinen verwendet der Mensch das vorhandene Wasser für Trink- und Haushaltszwecke, zur Bewässerung, Energieerzeugung und für die industrielle Produktion. Im Vergleich zum Wasserdargebot des Fließgewässers bleibt der menschliche Wasserbedarf über das Jahr relativ konstant, wodurch Massnahmen zur Aufrechterhaltung der Verwendungszwecke während der Niedrigwasserperioden getroffen werden müssen. Zudem belastet die, relativ konstante, Abwassereinleitung während der Niedrigwasserperiode die Fließgewässer und birgt, in Kombination mit einem klimatischen Temperaturanstieg, qualitative und ökologische Risiken für die Fließgewässer. Daher ist der effiziente Umgang mit den Wasserressourcen während der Niedrigwasserperioden ein wichtiger Bestandteil des integrierten Wasserressourcenmanagements geworden.

1.1.1. Niedrigwasserabfluss

Es gibt drei typische Definitionen, bzw. Kennwerte zur Charakterisierung des Niedrigwassers:

- Das Abflussquantil $Q(x)$, dass an $x\%$ der Tage im Jahr überschritten wird und bei beobachteten EZGs aus der Dauerlinie entnommen werden kann. Für perennierende Fließgewässer wird oft das 10%- oder 5%- Unterschreitungsquantil definiert, während bei intermittierenden Fließgewässern oft ein kleineres Quantil verwendet wird. Der Vorteil des Abflussquantils ist seine relative Robustheit gegen Messfehler und anthropogene Einflüsse (Laaha, 2000). Die grafische Darstellung des Q_{347} als 5%-Unterschreitungsquantil ist in Abb. 1 dargestellt.
- Durchschnittlicher, jährlicher Minimalabfluss NM_dQ während d aufeinanderfolgenden Tagen, der den langfristigen Mittelwert der Periode mit dem geringsten Abfluss wiedergibt. Meist wird ein gleitender Durchschnitt über 7 oder 10 Tage als Kennwert definiert, der somit Tagesschwankungen des Abflusses glättet. Die ermittelten Werte des NM_{7Q} oder NM_{10Q} sind per Definition oft quantitativ ähnlich dem Abflussquantil $Q(5\%)$ (Smakhtin, 2001).
- Durchschnittlicher, jährlicher Minimalabfluss $Q_{d,T}$ über d aufeinanderfolgenden Tagen mit einem definierten Wiederkehrintervall von T Jahren, dass den jährlichen Mindestabfluss mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit behaftet. Diese Werte werden mittels Extremwertstatistik für einen gleitenden Mittelwert von d Tagen berechnet. Der Minimalabfluss $Q_{7,10}$, der über

7 Tage alle 10 Jahre auftritt, wird insbesondere in Nordamerika zur Charakterisierung von Niedrigwasserabflüssen verwendet (Kroll et al. 2004).

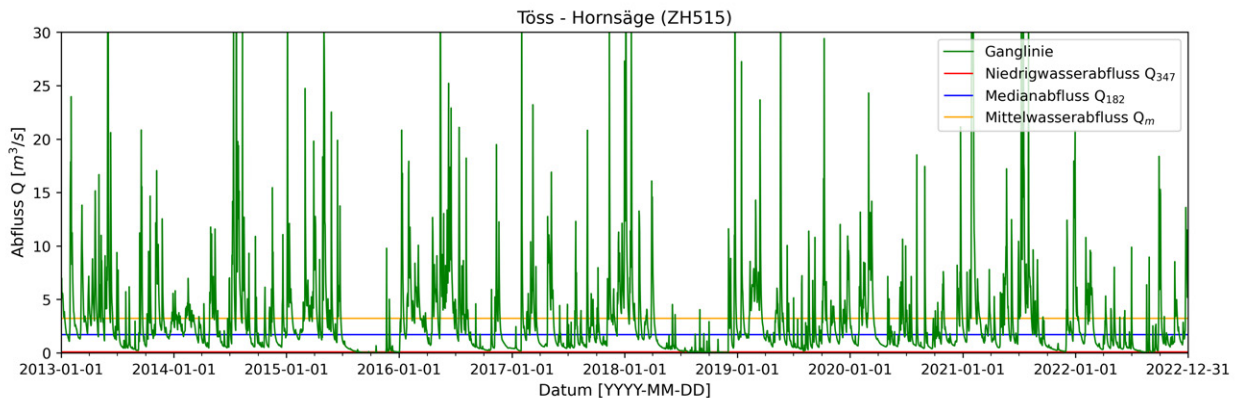


Abb. 1: Definition des Q_{347} , des Q_{182} und des MQ mit Darstellung anhand einer exemplarischen Ganglinie der Station Töss-Hornsäge

1.1.2. Mittelwasserabfluss

In der Hydrologie wird der Begriff Mittelwasserabfluss verwendet, um die durchschnittliche Wasserführung eines Flusses über einen längeren Zeitraum zu beschreiben. Dieser Durchschnitt kann auf verschiedene Weisen berechnet werden, wobei der arithmetische Mittelwert (bezeichnet als MQ) und der Median (bezeichnet als Q_{182}) zwei typische Kennwerte darstellen.

- Der arithmetische Mittelwert, MQ , berechnet sich als die Summe aller gemessenen Abflussmengen über einen bestimmten Zeitraum geteilt durch die Anzahl der Messungen im selben Zeitraum. Diese Methode ist allerdings anfällig für Ausreisser. Das bedeutet, dass sehr hohe oder sehr niedrige Abflusswerte, die vielleicht nur auf kurzfristige, extreme Ereignisse zurückzuführen sind, den Mittelwert stark beeinflussen können. Dies kann dazu führen, dass der Mittelwert nicht mehr zweckmässig für Wasserhaushaltsplanungen ist.
- Der Median Q_{182} ist ein statistisch robusterer Wert, bei dem 50% der Messwerte über und 50% unter diesem Wert liegen. Da der Median von Extremwerten weniger beeinflusst wird, kann er unter Umständen ein realistischeres Bild der mittleren Wasserabflüsse eines Fließgewässers abbilden. In der Regel ist der Mittelwert MQ höher als der Median Q_{182} , insbesondere in Systemen, die durch gelegentliche, aber sehr hohe Abflüsse gekennzeichnet sind. Diese hohen Abflüsse ziehen den Durchschnitt nach oben, auch wenn sie nur selten vorkommen. Der Median bleibt davon unberührt und spiegelt eher die durchschnittlich vorkommenden Abflussmengen wieder.

1.1.3. Gesetzliche Grundlage in der Schweiz

Das Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG, 1991) schützt die Gewässer nachhaltig vor nachteiligen, anthropogenen Einflüssen. Unter anderem definiert das

GSchG das Abflussquantil $Q(5\%)$ als Grenzwert zur Sicherung angemessener Restwassermengen, bzw. Niedrigwassermengen innerhalb eines Fliessgewässers. Diese Grösse entspricht der «Abflussmenge, die gemittelt über zehn Jahre, durchschnittlich während 347 Tagen des Jahres erreicht oder überschritten wird und die durch Stauung, Entnahme oder Zuleitung von Wasser nicht wesentlich beeinflusst ist» (Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer, 1991).

Der gemittelte Abflusswert Q_{347} der Dauerkurve erhält somit gesetzliche Bedeutung und dient als Grundlage für die Planung entsprechender Infrastruktur und definiert ebenfalls betriebliche Konsequenzen für Ein- und Ausleitungssysteme. So gelten besondere Bedingungen für die Einleitung von Abwasser während der Niedrigwasserperioden. Nachteilige Auswirkungen auf die Ökosysteme durch schlechte Verdünnungsverhältnisse des Abwassers müssen ausgeschlossen werden.

Bei einem ausreichend beobachteten EZG kann mit Hilfe der Messungen der Schwellenwert Q_{347} aus der erstellten Dauerkurve ermittelt werden. Ebenfalls ist das Unterschreiten des Q_{347} messtechnisch erfasst und entsprechende Massnahmen zum Schutz des Gewässers können verordnet werden. Leider liegen aber für die meisten Fliessgewässer keine Messwerte vor, sodass für unbeobachtete EZG eine Abschätzung für den Schwellenwert Q_{347} vorgenommen werden muss.

1.2. Status quo

1.2.1. Abschätzung des Q_{347}

Mit gemessenen Tageswerten über eine mindestens zehnjährige Messperiode kann der Wert des Q_{347} aus der Dauerkurve einfach ermittelt werden. Diese Kenngrösse muss für unbeobachteten EZG durch Regionalisierungsverfahren abgeschätzt werden. Eine Methode ist die Multiple Linearer Regression (MLR), bei der der flächenspezifische Abfluss q_{347} in $L/s \cdot km^2$ anhand von definierten Parametern abgeschätzt wird.

Die entsprechenden Gewichtungen der einzelnen Parameter werden zuvor unter Fehlerminimierung an beobachteten EZG festgelegt und dann aufs unbeobachtete EZG übertragen, d.h. regionalisiert (Aschwanden und Schädler, 1988). Dieses Verfahren wurde später auf alpine EZG (Aschwanden, 1992) und anschliessend auf die gesamte Schweiz, differenziert in die Regionen Jura, Mittelland, Alpenraum und Alpensüdseite ausgeweitet (Aschwanden und Kan, 1999). Allerdings ist diese Abschätzung des Q_{347} mit grossen Unsicherheiten verbunden (Naef, Margreth und Florianic, 2015), die aufgrund einer mangelnden Beschreibung heterogener Strukturen der EZG durch die starren Parameter und deren fehlenden Informationsgehalt erklärt werden kann.

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Abschätzungen des Q_{347} -Wertes mittels optimierter MLR durch ausgewählte Parameter durchgeführt und sind im Kapitel 6 erläutert.

1.2.2. Abschätzung des Q_{182} und MQ

Trotz seiner zentralen Rolle im Wasserhaushalt und im Abflussregime wurde der Abschätzung und der Regionalisierung der mittleren Abflüsse, besonders dem Q_{182} in der Schweiz bisher relativ wenig Aufmerksamkeit beigemessen. Bedeutende Arbeiten in diesem Bereich befassten sich mit der Klassifizierung der Abflussregime anhand von Pardé-Koeffizienten, wobei die monatlichen Abflüsse ins Verhältnis zu MQ gesetzt werden (Aschwanden und Weingartner, 1985). In einer weiteren Studie wurden regionale Regressionsmodelle zur Bestimmung von MQ entwickelt, die klimatische und geografische Parameter des Einzugsgebiets berücksichtigen (Aschwanden, 1986). Sie sind im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) in Tafel 5.2 dargestellt.

Ein aktuell noch verwendeter Datensatz der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse «MQ-CH» wurde später für die gesamte Schweiz vorgestellt (Pfaundler und Zappa, 2006). In diesem Rasterdatensatz (Auflösung von 500x500 Metern) wurden die mittleren monatlichen und jährlichen Abflüsse für die gesamte Schweiz auf Basis der Daten von 1981 bis 2000 mit einem räumlich verteilten hydrologischen Modell simuliert. Jede Rasterzelle gibt den Abflusswert an, der für diese Fläche anzusetzen ist. Zur Berechnung des mittleren Abflusswerts für ein EZG können folglich die Werte der Rasterzellen aufsummiert werden.

2. Projektperimeter und Datenaufbereitung

2.1. Untersuchungsgebiet und Zeitraum

Um eine genügend grosse Anzahl von beobachteten EZG für eine robuste Abschätzung und Vorhersage zu erhalten, musste der Untersuchungsperimeter über den Kanton Zürich hinaus auf die gesamte Nordostschweiz ausgedehnt werden (Abb. 2). Dabei wurden Punktmessungen von allen, frei erhältlichen, Stationen der folgenden hydrologischen Variablen gesammelt:

- Abfluss Q von 113 Stationen,
- Niederschlag P von 276 Stationen und
- Lufttemperatur T von 153 Stationen.

Es wurden dabei nur Stationen mit mindestens täglicher Auflösung berücksichtigt. Bei Stationen mit grösserer zeitlicher Auflösung, (z.B. 10-minütiges Messintervall) wurden die Werte über den Tag akkumuliert (Niederschlag), bzw. gemittelt (Abfluss und Temperatur). Abb. 2 erlaubt einen Überblick der räumlichen Verteilung aller originalen Messstationen.

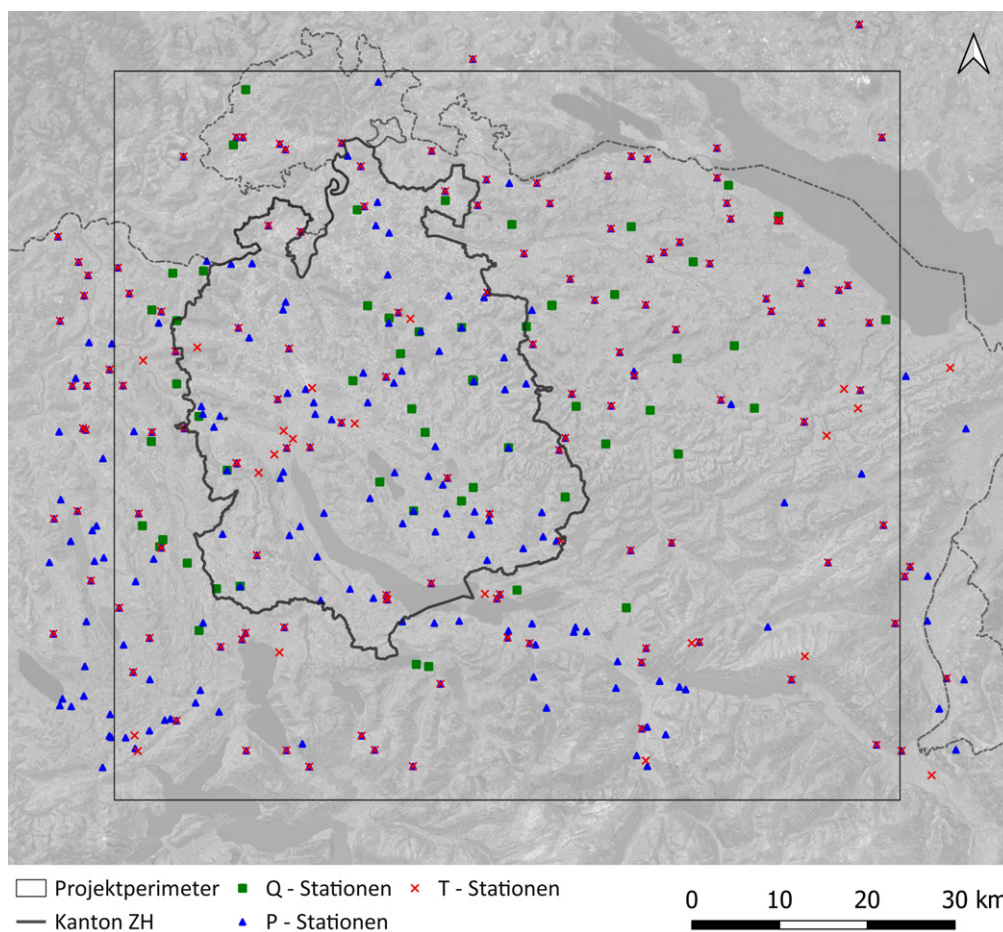


Abb. 2: Perimeter des Untersuchungsgebietes und Messstationen für Q, P und T

Die gesammelten Daten umfassen den 10-jährigen Untersuchungszeitraum vom 01.01.2013 bis 31.12.2022. Eine vollständige Messreihe enthält somit 3'652 Tageswerte und 120 Monatswerte. Die verwendeten Daten der Messstationen wurden aus den folgenden Quellen beschafft: MeteoSchweiz, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Kantone ZH, TG, SH, SG und AG. Dabei stellen die beiden Bundesämter auch Daten von Stationen anderer Organisation wie z.B. dem Bodenmessnetz Nordwestschweiz, Agroscope, MeteoCentrale oder DTN zur Verfügung.

2.2. Datenaufbereitung für den Abfluss Q

Die Daten der ursprünglichen 113 Abflussstationen wurden zunächst auf ihre allgemeine Eignung hinsichtlich der Modellierung eines naturnahen Fließgewässers überprüft. Die beobachteten EZG und daraus gewonnene Rückschlüsse müssen repräsentativ und übertragbar auf unbeobachtete EZG sein. Aufgrund verschiedener Gründe wurden 57 Messstationen als ungeeignet klassifiziert (Tab. 1) und aus dem Datensatz entfernt. Tabelle 1 liefert eine Übersicht und Gründe für eliminierte Messstationen. Eine Auflistung der ausgeschlossenen Stationen ist im Anhang A.

Grund der Elimination	Anzahl eliminierte EZG	Datenquelle
Reguliert / Wasserkraftnutzung	23	ZH, TG, SG, BAFU
EZG ausserhalb der Schweiz	4	SH
Mangelnde Datenqualität / - quantität	17	ZH, SH, SG, AG
Landwirtschaftliche Wasserentnahme	1	ZH
grosses EZG ($A_E > 500km^2$)	12	SH, TG, SG, BAFU

Tab. 1: Übersicht und Gründe der eliminierten Messstationen

Die Zeitreihen der verbliebenen 56 Messstationen wurden nun auf fehlende Messperioden innerhalb des Untersuchungszeitraumes analysiert und einer Qualitätskontrolle unterzogen.

2.2.1. Messperioden und Qualitätskontrollen

Die Messperioden (01.01.2013 bis 31.12.2022) der verbliebenen 56 Stationen sammelten 99.9% (d.h. 204'387) der theoretischen 204'512 Tageswerte. Der prozentuale Anteil der fehlenden Messwerte variierte für die einzelnen Stationen zwischen 0.0% und 2.8%. Die Anzahl der messenden Stationen über den Untersuchungszeitraum ist in Abb. 3 dargestellt.

Abb. 3 dokumentiert eine sehr konstante Anzahl der Messstationen für jeden Monat der letzten 10 Jahre. Bis auf die Monate Oktober, November und Dezember 2019 (55 Stationen) zeichneten alle 56 Stationen simultan auf.

Die Qualitätskontrolle besteht aus verschiedenen automatisierte Darstellungen und Tests für die verschiedenen Zeitreihen. Für diese Kontrollen wurden tägliche Messwerte und ggf. monatliche oder jährliche Mittelwerte verwendet. Die automatisierten Verfahren umfassen:

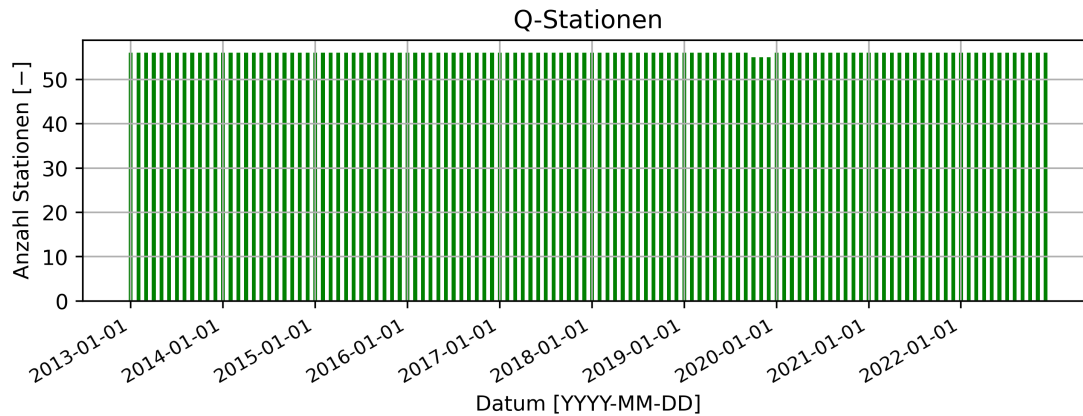


Abb. 3: Zeitliche Abdeckung der originalen 113 Messstationen des Abflusses Q im Zeitraum 2013 bis 2023

1. Anzahl Fehlwerte pro Jahr: Indikator für geringe Vertrauenswürdigkeit der Messwerte,
2. Summenanalyse: Identifikation von Inkonsistenzen und Inhomogenität,
3. Ausreissertest (max): aus Jahressumme, zur Identifikation maximaler Ausreisser,
4. Ausreissertest (min): aus Jahressumme, zur Identifikation maximaler Ausreisser,
5. Stationarität Mittelwert: mit Bootstrap-Resampling (1000x, verteilungsfrei),
6. Stationarität Varianz: mit Bootstrap-Resampling (1000x, verteilungsfrei).

Die graphischen Darstellungen der Qualitätskontrollen sind in Anhang B aufgeführt. Die Qualitätskontrollen ermöglichte die Identifikation verdächtiger Messreihen und einzelner Messwerte innerhalb der Zeitreihen, die oft in unmittelbarer zeitlicher Reihenfolge auftraten. Diese fehlerhaften Messwerte könnten durch nicht kalibrierte Wasserstandsmesser oder Fehlreflektionen des Echolots entstehen. Die identifizierten Ausreisser, inkonsistente Daten oder systematischen Fehler in Messreihen wurden, wenn identifiziert, aus dem Datensatz entfernt und durch «keine Angaben» ersetzt.

2.2.2. Verwendete Q-Stationen

Durch die oben beschriebenen Qualitätskontrollen und Eliminierungen wurden schliesslich 56 Stationen des Abflusses identifiziert, deren geprüften Zeitreihen für alle folgenden Untersuchungen verwendet werden. Diese 56 Messstationen des Abflusses repräsentieren die zugehörigen Entwässerungsflächen bis max. 500 km^2 und entsprechen EZG von «kleiner» bis «mittlerer» Grösse. Das entsprechende Histogramm (Abb. 4) zeigt, dass die Mehrheit der EZG von mittlerer Grösse eine Fläche von 5 - 50 km^2 besitzen. Die Einzugsgebiete befinden sich hauptsächlich in den Kantonen ZH, SH, TG, SG, SZ und AG. Kleinere Flächenanteile der EZG liegen in den Kantonen AR, ZG und LU. Die EZG befinden sich überwiegend südlich des Rheins und nördlich des Alpennordhangs (siehe Abb. 5).

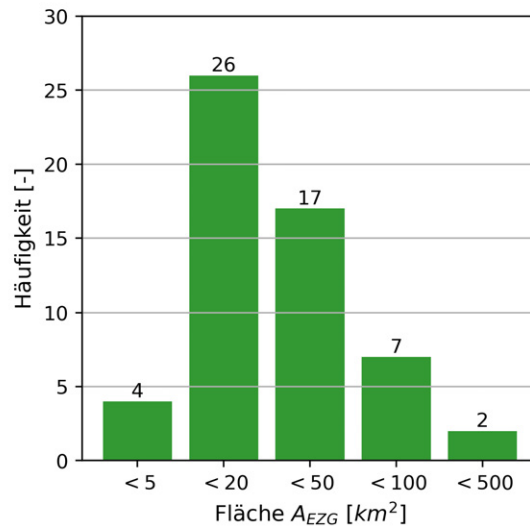


Abb. 4: Histogramm der Flächen der EZG

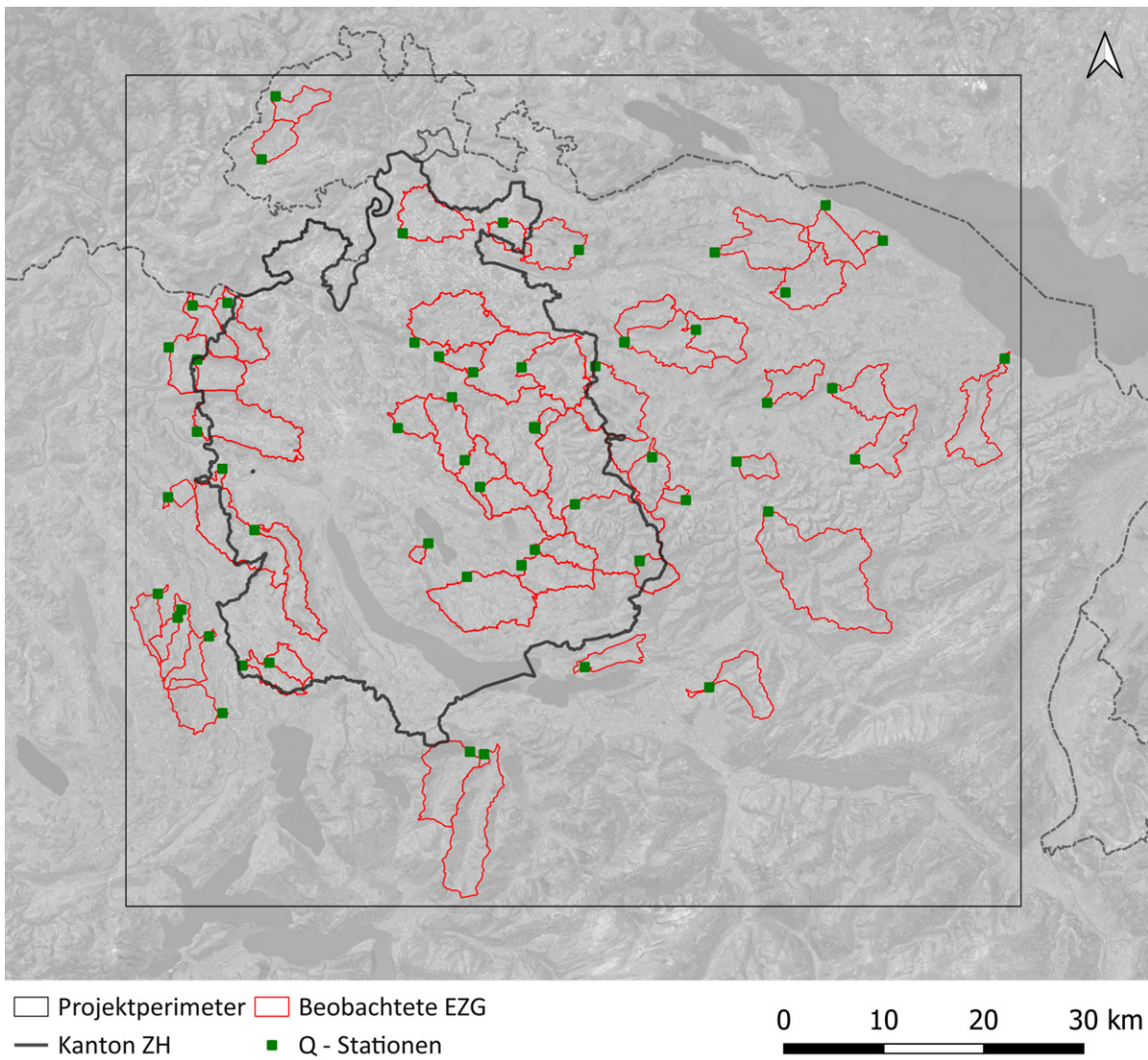


Abb. 5: Räumliche Lage der verwendeten Stationen des Abflusses Q und der dazugehörigen EZG

2.3. Datenaufbereitung für den Niederschlag P

Die Daten der 276 Niederschlagsstationen wurden zunächst auf ihren tatsächlichen Umfang, d.h. ihrer zeitlichen Abdeckung und Fehlwerte hin überprüft und einer Qualitätskontrolle unterzogen. In einem nächsten Schritt wurden die Stationen mit einer Vielzahl von Unplausibilitäten als auch die Stationen ausserhalb des Untersuchungsbereiches für die nachfolgende Regionalisierung ausgeschlossen.

2.3.1. Messperioden und Qualitätskontrollen

Die Messperioden der 276 Niederschlagsstationen sammelten tatsächlich 68.7% (d.h. 690'436) der 1'004'300 möglichen Tageswerte. Der prozentuale Anteil der fehlenden Messwerte variierte für die einzelnen Stationen zwischen 100% und 0%, mit einem Median an fehlenden Messwerten von 28%. Die tatsächliche Anzahl der messenden Stationen über den Untersuchungszeitraum ist in Abb. 6 dargestellt.

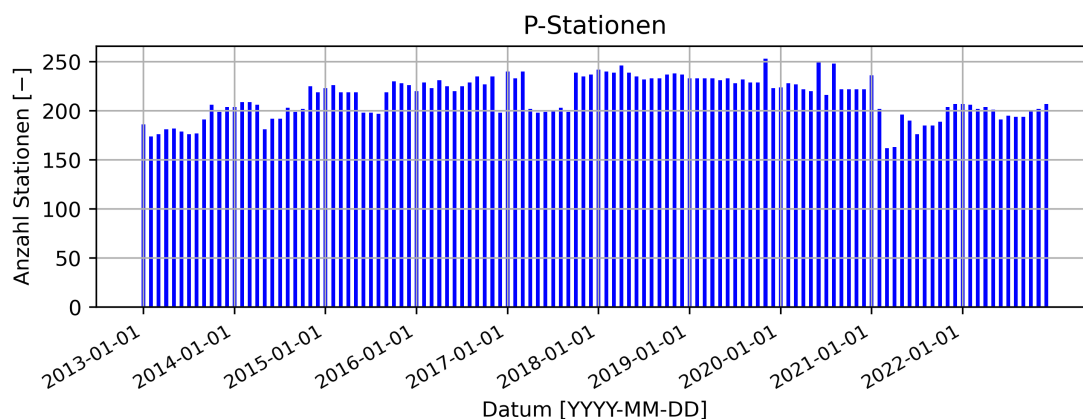


Abb. 6: Zeitliche Abdeckung der 230 Messstationen des Niederschlages P im Zeitraum 2013 bis 2023

Abb. 6 zeigt auf, dass zu keiner Zeit alle Pluviometer tatsächlich Messwerte sammelten. Die Schwankungen in der Datenverfügbarkeit der Niederschlagsstationen sind jedoch relativ stabil. Die zeitliche Stabilität der Anzahl der Stationen mit Daten führt zu robusten Ergebnissen, die eine Schlüsselrolle bei der MLR-Analyse spielen. Das Minimum mit 162 Stationen wurde im Jahr März 2021 registriert, während das Maximum im November 2019 mit 253 simultan messenden Stationen erreicht wurde.

Die Qualitätskontrolle der Niederschlagszeitreihen erfolgte durch die Analyse der Zeitreihen der jeweils drei benachbarten Stationen. Des Weiteren wurden alle Tageswerte mit einer Niederschlagshöhe über 50mm einzeln visuell überprüft, um eventuelle Unplausibilitäten zu identifizieren. Abb. 7 zeigt die Summenanalyse der Niederschlagsreihe der Station «Birmenstorf» (FHNW_005) – gegenüber den Niederschlagsreihen der drei benachbarten Stationen. Aufgrund der sehr starken Ab-

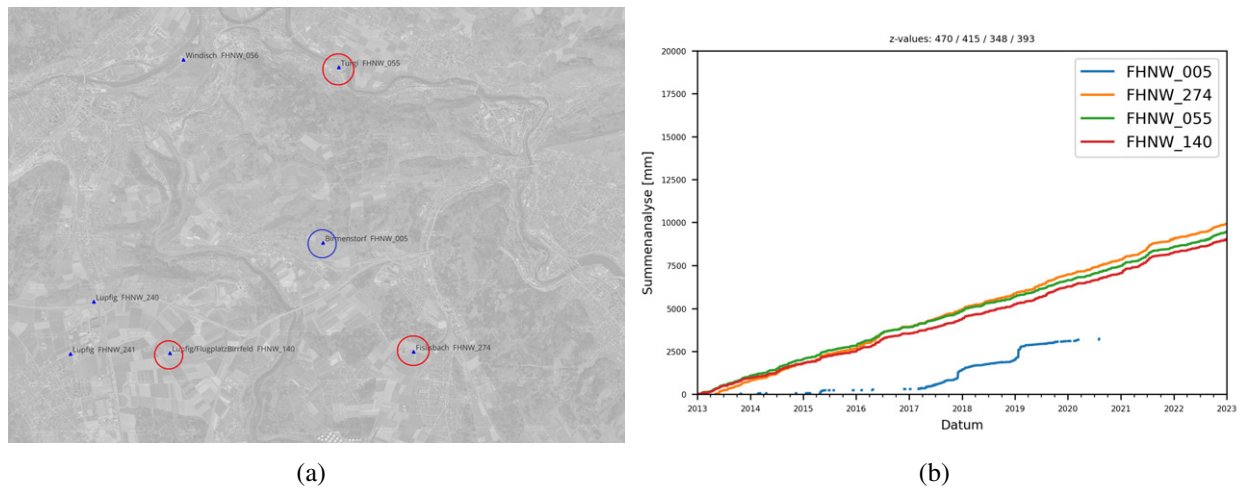


Abb. 7: Visuelle Qualitätskontrolle am Beispiel der Station Birmenstorf FHNW_005

weichung wurden die Niederschlagsdaten der Station «Birnenstorf» bei der Qualitätskontrolle als unplausibel eingestuft.

Die graphischen Darstellungen und die Ergebnisse der Qualitätskontrolle sind in Anhang B aufgeführt. Die Variable Niederschlag P besitzt relativ viele Ausreisser und Inkonsistenzen. Zusätzlich sind oft nur sehr kurze Messperioden vorhanden, sodass Rückschlüsse auf längerfristige Eigenschaften oder monatliche Aggregationen nur schwer möglich sind.

2.3.2. Verwendete P-Stationen

Durch die beschriebenen, semi-automatisierten Kontrollen wurde ein Mindestmass an Güte der verwendeten Daten sichergestellt. Messstationen mit systematischen Fehlern, Brüchen in Konsistenz und Homogenität, und sehr kurzen Messreihen wurden aus dem Datensatz entfernt. In den übrigen Zeitreihen wurden verdächtige Ausreisser mit «keine Angaben» ersetzt. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der verwendeten Niederschlagsmessungen auf 188 Stationen. Diese 188 P-Stationen liegen in den Kantonen ZH, TG, SZ, SH, AR, AI, LU, SG, ZG und in Deutschland. Sie bilden die Grundlage für die weitere Regionalisierung (siehe Kap. 3), sind in Abb. 8 dargestellt und im Anhang A aufgelistet.

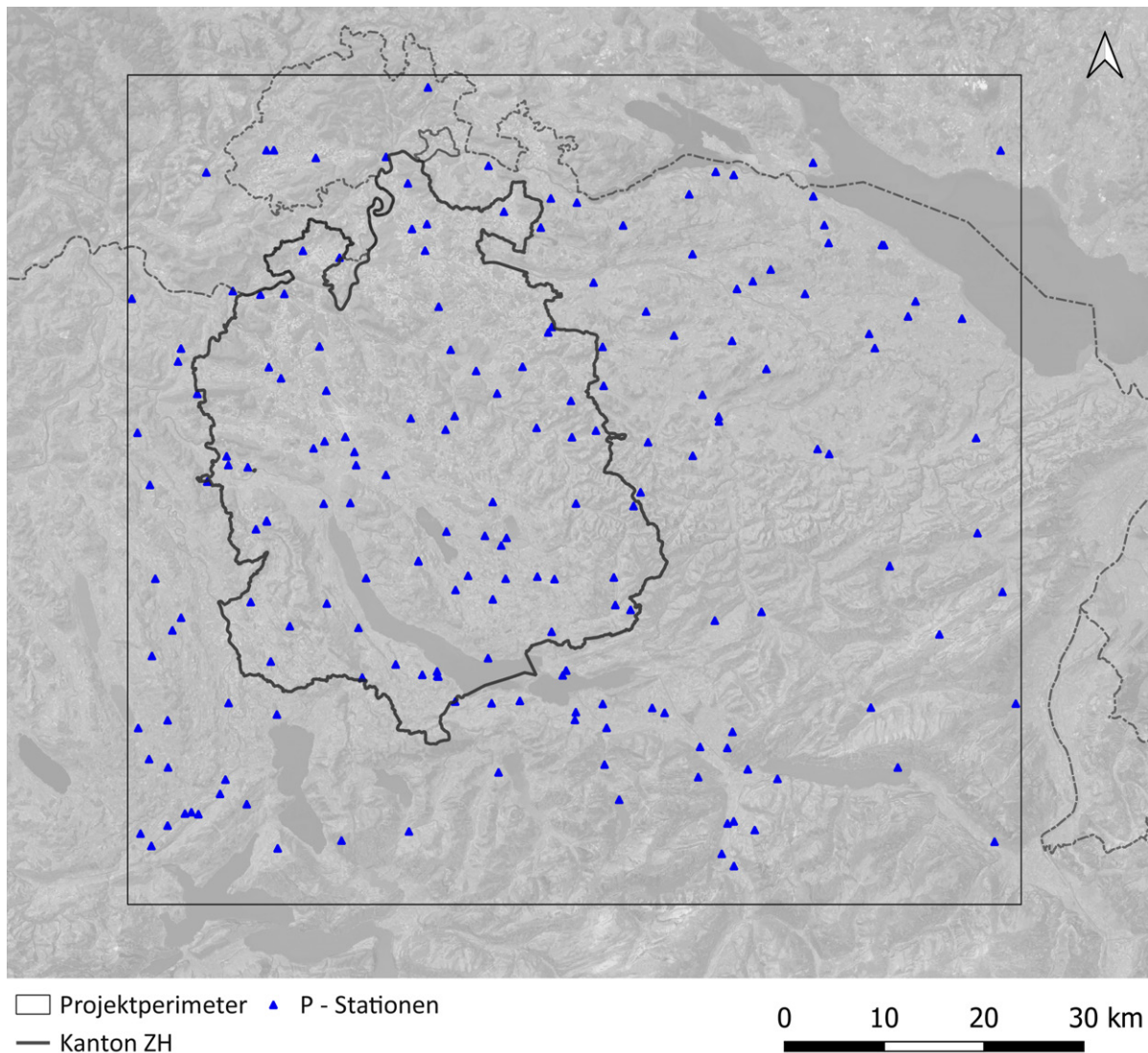


Abb. 8: Positionen der 188 verwendeten Stationen des Niederschlages P

2.4. Datenaufbereitung für die Temperatur T

Die Daten der 153 Temperaturstationen wurden auf ihre tatsächlichen Messperioden, der Datenqualität und hinsichtlich angenommener Verteilungen überprüft.

2.4.1. Messperioden und Qualitätskontrollen

Die Messperioden der 153 Stationen sammelten 67.79% (d.h. 378'807) der theoretisch möglichen 558'756 Tageswerte der Lufttemperatur. Der prozentuale Anteil der fehlenden Messwerte variierte für die einzelnen Stationen zwischen 0.0% und 98.9%, mit einem Median der Fehlerte von 28.2%. Die tatsächliche Anzahl der messenden Stationen über den Untersuchungszeitraum ist in Abb. 9 dargestellt.

Aus Abb. 9 wird ersichtlich, dass im Jahr 2013 die Messdaten von ca. 100 Stationen verfügbar waren, danach die Anzahl auf über 140 anstieg und zum Ende des Beobachtungszeitraums wieder

unter 100 fiel. An keinem Tag während des Untersuchungszeitraumes liefern alle 153 Stationen einen Wert.

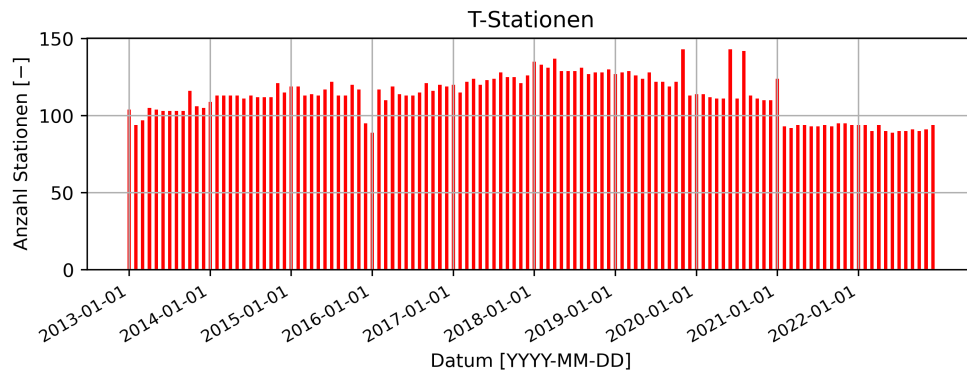


Abb. 9: Zeitliche Abdeckung der 153 Messstationen der Temperatur T im Zeitraum 2013 bis 2023

Die Qualitätskontrolle der jeweiligen Zeitreihen bestand aus den gleichen automatisierte Darstellungen und Tests (siehe 2.2.1) wie für die Variable des Niederschlags. Für diese Untersuchungen wurden die täglichen Lufttemperaturdaten verwendet. Die grafischen Darstellungen und die Ergebnisse der Qualitätskontrolle sind im Anhang B ersichtlich. Obwohl die Zeitreihen der Variable Temperatur T relativ lange Perioden von fehlenden Messungen aufweisen, besitzen die gemessenen Daten relativ wenige Ausreisser oder Inkonsistenzen.

2.4.2. Verwendete T-Stationen

Durch die Qualitätskontrollen wurde die Güte der Messdaten verbessert, wobei die Anzahl der verwendeten Stationen nur leicht reduziert wurde. Die finalen 131 Messstationen der Lufttemperatur T bilden die Grundlage für die anschliessende Regionalisierung (Kap. 3), sind in Abb. 10 dargestellt und im Anhang A aufgelistet.

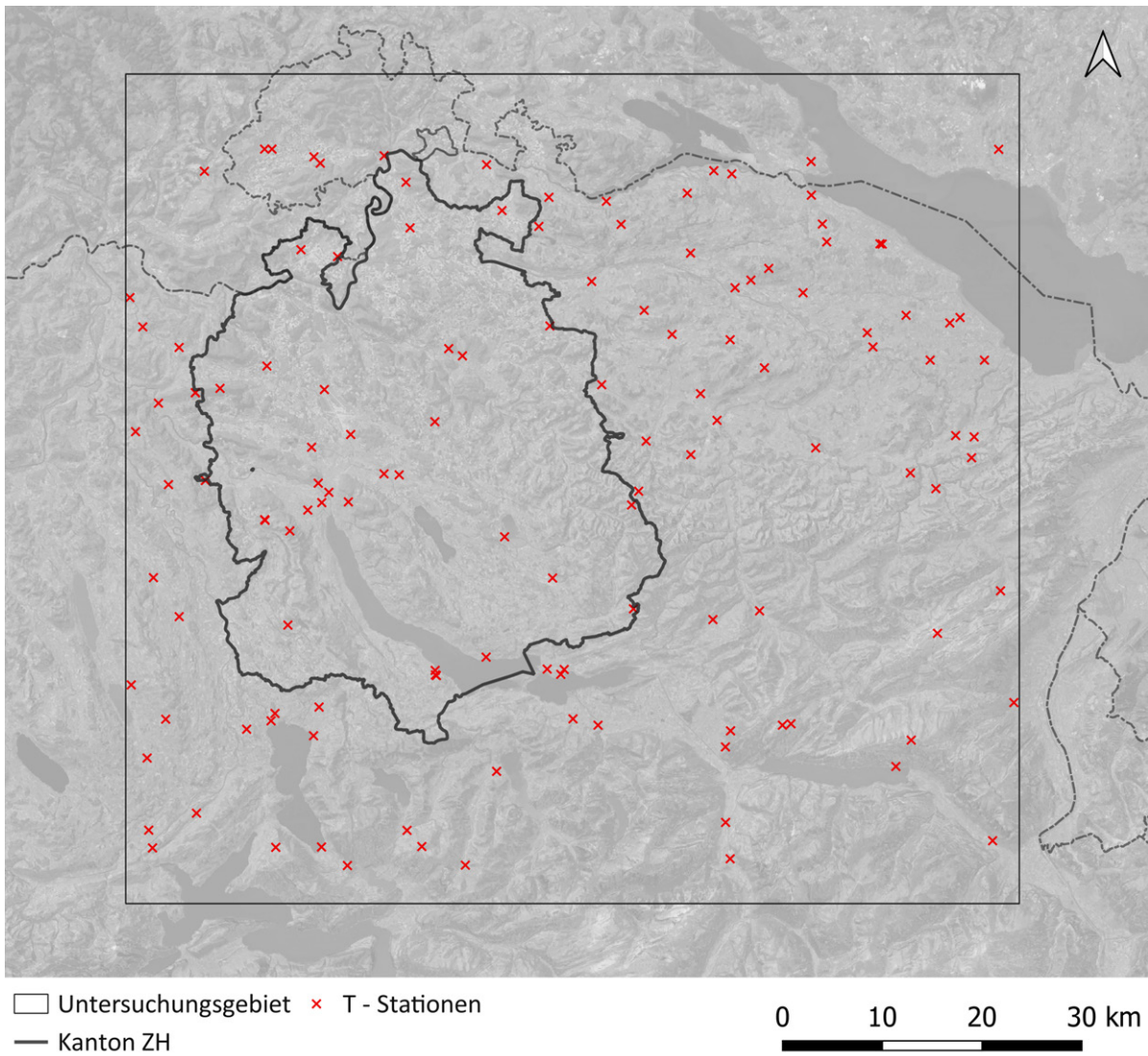


Abb. 10: Räumliche Lage der 131 verwendeten Stationen der Temperatur T

3. Regionalisierung von Niederschlag und Temperatur

Die Punktmessungen des täglich gemessenen Niederschlages und der Lufttemperatur müssen nun in die Fläche regionalisiert werden, d.h. die Messwerte müssen von bekannten Punktmessungen zu unbekanntem Orten interpoliert werden, um eine flächige Abschätzung über die jeweiligen EZG zu erhalten. Dazu wurden die zwei verschiedenen Methoden der Geostatistik «Ordinary Kriging» und «External Drift Kriging» ausgewählt, die für die zwei Variablen und deren tägliche Auflösung angewendet wurden. Im Folgenden sind in Kürze die Methodik der geostatistischen Interpolationen aufgeführt, die Regionalisierung von Niederschlag und Temperatur mit der ausgewählten Methode dokumentiert und die daraus abgeleiteten klimatischen Eigenschaften der Einzugsgebiete beschrieben.

3.1. Methodik der geostatistischen Interpolation

Die geostatistischen Interpolationsverfahren (Matheron, 1963) liefern am unbekanntem Ort x einen Schätzwert $Z^*(x)$ und dessen Fehlervarianz $\sigma_K^2(x)$ ab. Hierbei wird eine Stationarität zweiter Ordnung mit den zwei intrinsischen Bedingungen angenommen:

$$E[Z(x)] = m(x) = \text{const.} \quad (1)$$

$$\text{VAR}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2)$$

wobei h der Abstandsvektor zwischen zwei Punkten im Raum und $\gamma(h)$ das (Semi-) Variogramm ist. Somit wird angenommen, dass der Erwartungswert der Variablen über den gesamten Raum konstant ist und die Varianz der Variablen zwischen zwei Orten mit einer Funktion $\gamma(h)$ ausgedrückt werden kann, die nur vom Abstandsvektor h abhängt. Dieses (Semi-) Variogramm spielt für die räumliche Verteilung der Variablen für alle geostatistischen Interpolationsmethoden eine zentrale Rolle und muss anhand der gemessenen Daten abgeschätzt werden. Für die Erstellung des Variogramms wird erst die Kovarianz C aller gemessener Werte, die innerhalb eines maximalen Radius D_{max} [m] liegen, verwendet. Die durchschnittliche Kovarianz wird nun in Abhängigkeit des Abstandes h (siehe Abb. 11) aufgetragen und eine mathematische Funktion $\gamma(h)$ angepasst, für die gilt:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (3)$$

wobei $C(0)$ die Varianz der Messwerte bedeutet. Mit zunehmendem Abstand zwischen zwei Punkten nimmt das Variogramm $\gamma(h)$ zu, d.h. die Varianz wird grösser, bis sie nach einer Reichweite a einen Schwellenwert C erreicht. In dieser Studie wurde eine «sphärische Variogrammfunktion» an die Daten angepasst.

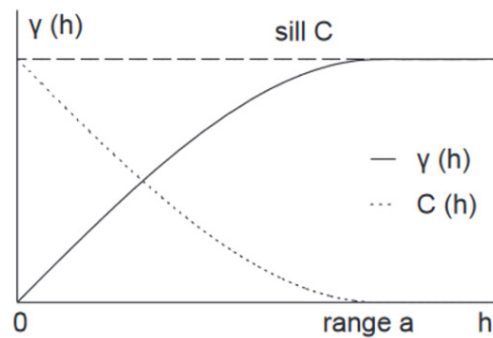


Abb. 11: Theoretisches Variogramm

3.1.1. Ordinary Kriging

Die am weitesten verbreitete geostatistische Interpolationsmethode ist «Ordinary Kriging» (OK), das in den sechziger Jahre des letzten Jahrhunderts (Matheron, 1963) eingeführt wurde. Für die Interpolation an einen unbekanntem Ort x wird hier mit dem hergeleiteten, theoretischen Variogramm unter Minimierung der Fehlerquadrate die Gewichtungsfaktoren λ_i für die einzelnen Messstationen i berechnet. Hierbei werden nur die Messstationen mit einem maximalen Abstand DL [m] zur Abschätzungsort x verwendet. Der Schätzwert $Z^*(x)$ an dem unbekanntem Ort x wird als Linearkombination der Messwerte $Z(x_i)$ und ihrer Gewichtungen λ_i errechnet:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

OK ist ein einfaches Interpolationsverfahren und setzt idealerweise eine GAUSS-Normalverteilung der Variablen voraus. Die Anwendung von OK ist weit verbreitet, doch eignet sich diese Methode am besten für räumlich zufällig verteilte Variablen ohne erkennbare Systematik.

3.1.2. External Drift Kriging

«External Drift Kriging» (EDK) wurde vor ca. 35 Jahren als Erweiterung des OK entwickelt (Ahmed und De Marsily, 1987). Es wird als «instationäres» Interpolationsverfahren angesehen, da es die angenommene Konstanz des Erwartungswertes aufweicht. EDK integriert zusätzliche Informationen aus einer externen Variablen $Y(x)$ für die Schätzung des linearen Schätzers $Z^*(x)$ und ersetzt die erste intrinsische Annahme (siehe 1) durch:

$$E[Z(x)] = a + bY(x) \neq const. \quad (5)$$

wobei a und b unbekannte Konstanten sind. Voraussetzung für die externen Variablen Y ist allerdings, dass sie vor der Interpolation an allen relevanten Orten im Raum bekannt ist und sie in Beziehung zur internen Variablen Z aufweist. In diesen Untersuchungen wird als externe Variable für die Interpolation die topografische Höhe (Quelle: swissALTI3D) verwendet, da sie bei der Lufttemperatur eine systematische Verschiebung der Variable bewirkt.

3.2. Regionalisierung von Niederschlag und Temperatur

Die Punktmessungen der Variablen des täglichen und monatlichen Niederschlags, sowie der täglichen Temperatur, wurden nun mit den jeweiligen ausgesuchten Methoden im Raum regionalisiert.

3.2.1. Niederschlag

Der gemessene tägliche Niederschlag wurde für die 3'652 Tage des Studienzeitraumes mittels OK für die gesamte Region regionalisiert. Die interpolierte Region erstreckt sich über rund 90km geographischer Länge und 85km geographischer Breite mit dem Kanton Zürich (bedingt durch die 56 beobachteten EZG) links des Zentrums. Die räumliche Auflösung der Regionalisierung beträgt hierbei 200m.

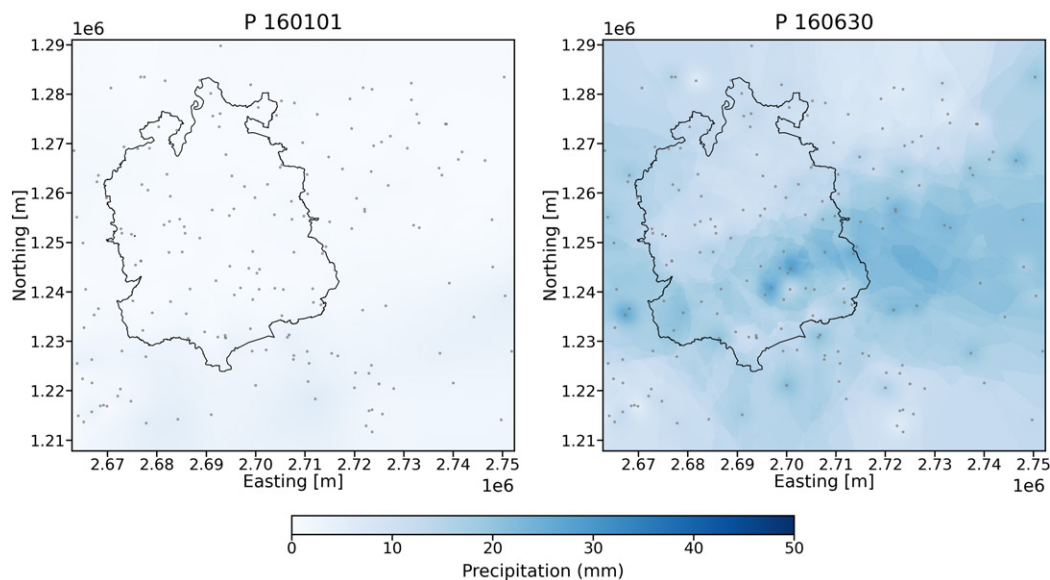


Abb. 12: Räumliche Verteilung des täglichen Niederschlags am 01. Januar (links) und am 30. Juni 2016 (rechts) durch OK

Abb. 12 zeigt exemplarisch die Verteilungen des Niederschlags am 01. Januar und am 30. Juni 2016. Gewählt wurden ein niederschlagsarmer und ein niederschlagsreicher Tag, wobei für den 30. Juni eine klare räumliche Struktur erkennbar ist.

Für die 56 beobachteten EZG, wurde nun der durchschnittliche Gebietsniederschlag für jeden Tag flächengemittelt berechnet. Dadurch entstehen 56 Zeitreihen mit jeweils 3'652 täglichen Gebietsniederschlagshöhen. Dasselbe Vorgehen wurde auch für alle unbeobachteten EZG angewendet.

3.2.2. Temperatur

Die mittleren Tagestemperaturen wurden analog zum Niederschlag für die 3'652 Tage des Studienzeitraums mit EDK interpoliert. Abb. 13 zeigt exemplarisch die räumliche Verteilung am 01. Januar und am 30. Juni 2016. Es wird ersichtlich, dass die Lufttemperatur sehr stark von der topographischen Höhe abhängig: das Mittelland, der Zürichsee und die Alpentäler sowie die höher gelegenen Gebiete wie z.B. das Tössbergland und die Voralpen sind in ihrem Aufbau, d.h. den Bergen und Tälern, gut erkennbar.

Für die weitere Verwendung der Variable Lufttemperatur wurden wiederum 56 Zeitreihen mit 3'652 täglichen, flächengemittelten Temperaturen für die beobachteten und unbeobachteten EZG berechnet.

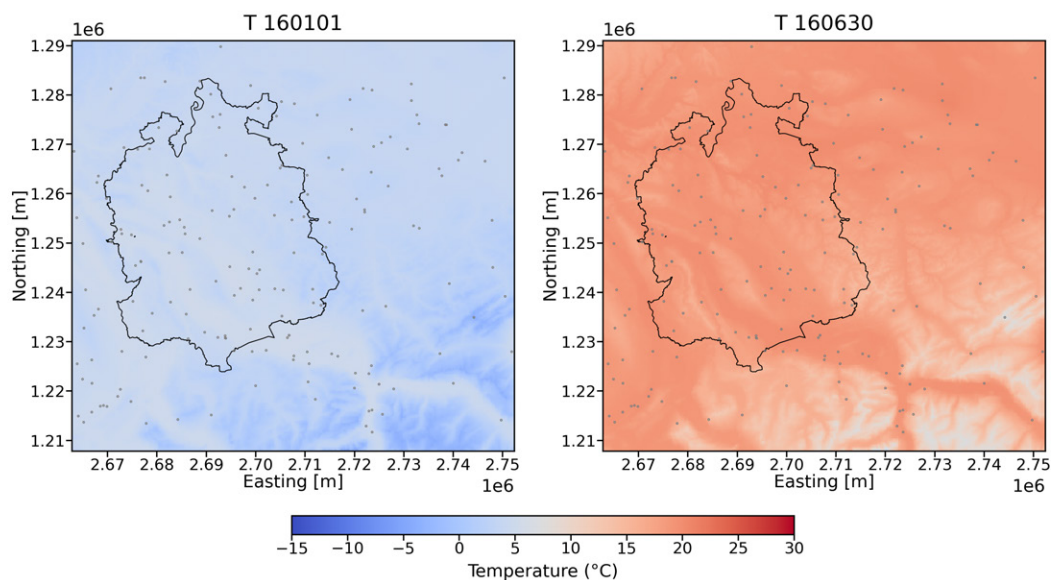


Abb. 13: Räumliche Verteilung der täglichen Lufttemperatur am 01. Januar (links) und am 30. Juni 2016 (rechts) durch EDK

4. Entwicklung des Q_{347}

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften und Verteilungen der gemessenen Q_{347} und deren zeitliche Veränderungen über die letzten drei Dekaden (1993-2022) untersucht.

4.1. Eigenschaften und Verteilungen des Abflusswertes Q_{347}

Der Niedrigwasserabflusswert Q_{347} [m^3/s] wurde für die 56 EZG zunächst aus den gemessenen Daten der letzten 30 Jahre (1993-2022) ermittelt und ist in Abb. 14 (links) in Abhängigkeit von der Fläche des EZG dargestellt: mit zunehmender Fläche wird der Abfluss des EZG, dessen Dauerlinie und das daraus ermittelte, untere 5%-Quantil grösser. Dieser Zusammenhang wird allerdings aufgelöst, wenn der Abfluss auf die Fläche bezogen wird: der flächenbezogene Abflusswert q_{347} [$L/s \cdot km^2$] ist in Abb. 14 (rechts) dargestellt. Die Varianz der beobachteten Werte für EZG mit kleineren Flächen ist ungefähr so gross wie für grössere EZG. Der flächenbezogene Abflusswert q_{347} weist keine einfache, lineare Beziehung mehr zur Fläche des EZG auf.

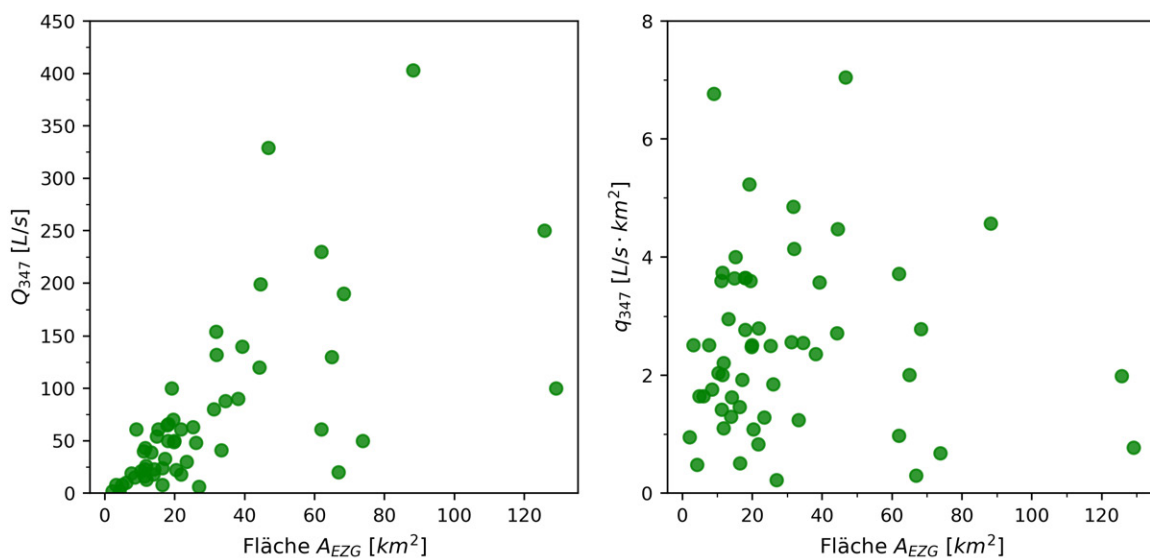


Abb. 14: Abflusswerte Q_{347} (links) und q_{347} (rechts) im Vergleich zur Fläche des EZG

In Anhang C sind die Verhältnisse der zwei Abflusswerte Q_{347} und q_{347} zu weiteren, ausgesuchten Parametern der EZG dargestellt. Auch hier sind einfache, lineare Beziehungen für einzelne Parameter, insbesondere für den flächenbezogenen Abflusswert, kaum ersichtlich. Deswegen werden typischerweise für die Regionalisierung die Methode der «Multiplen Linearen Regression» (MLR) angewendet, bei der mehrerer Parameter gleichzeitig in Bezug gesetzt werden um den Abflusswerte als «Zielvariable» zu beschreiben (siehe Kap. 6.1).

Als nächster Schritt wurde die zeitliche Dauer D eines Unterschreitungsereignisses ermittelt, d.h. die Anzahl der konsekutiven Tage, an denen der Abflusswert von Q_{347} oder niedriger gemessen

wurde. Die Anzahl der Ereignisse [engl.: *event*] mit einer bestimmten Dauer D sind in Abb. 15 abgebildet.

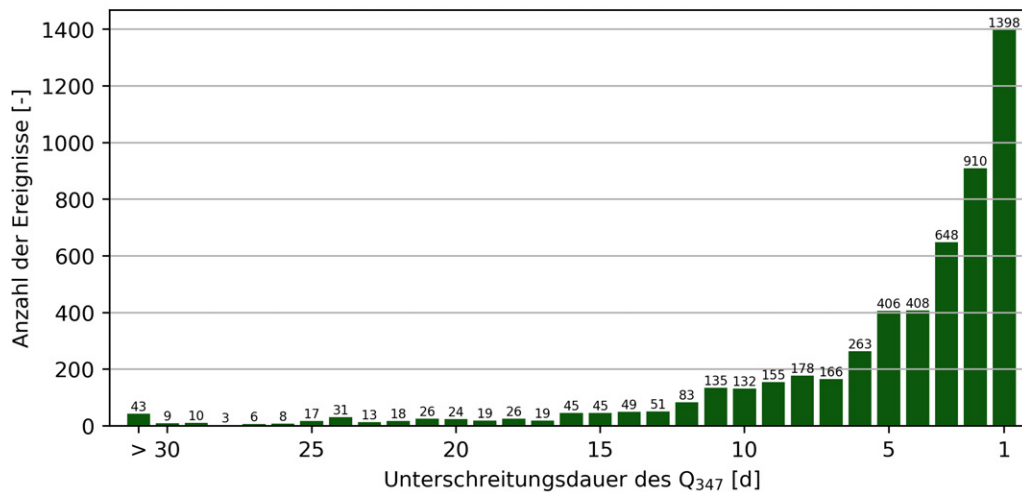


Abb. 15: Histogramm der Q_{347} Ereignisse über die (Ereignis-) Dauer D

Die meisten Unterschreitungsereignisse (1'398) haben eine Dauer von einem Tag (siehe Abb. 15), d.h. das der Abflusswert Q_{347} einem Tag nach seiner Unterschreitung wieder überschritten wurde. Ausserdem gab es 910 Ereignisse mit einer Dauer von 2 Tagen und 648 Ereignisse mit einer Dauer von 3 Tagen usw. Je länger die Dauer des Ereignisses war, desto seltener traten diese Ereignisse auf.

Diese Verteilung der Ereignisse (Abb. 15) ist teilweise wahrscheinlichkeitstheoretisch erklärbar: das 5%-Unterschreitungsquantil einer zufälligen Variablen würde immer diesen Anteil, unabhängig vom absoluten Wert, an Unterschreitungstage aus den Gesamtdaten definieren. Ebenfalls würde die zeitliche Konsekutive der Unterschreitungstage einer zufälligen Variablen mit fortschreitender Dauer theoretisch abnehmen. Dies ist ein Nachteil der gültigen Definition über einen fixen Grenzwert.

Die Multiplikation der Dauer des Ereignisses mit deren Anzahl ergibt die Gesamtanzahl der Tage mit einem Abfluss Q_{347} oder niedriger (siehe Abb. 16). Somit gehören 1'820 Tage zu einem Ereignis mit einer Dauer von 2 Tagen und 1'944 Tage zu einem Ereignis mit einer Dauer von 3 Tagen.

Als nächster Schritt wurde die zeitliche Verteilung der Unterschreitungstage des Q_{347} über den jährlichen Zyklus untersucht. Hierbei wurden die Ereignisse in fünf Kategorien der Ereignisdauer D eingeteilt und deren Auftreten in die zwölf Kalendermonate unterschieden. Abb. 17 stellt die Verteilung der Tage eines Abflusswertes Q_{347} über die zwölf Kalendermonate dar.

Abb. 17 zeigt eine deutliche saisonale Verteilung der Unterschreitungstage. Die meisten dieser Tage treten in den Sommer- und Herbstmonaten Juli, August, September und Oktober auf, während in

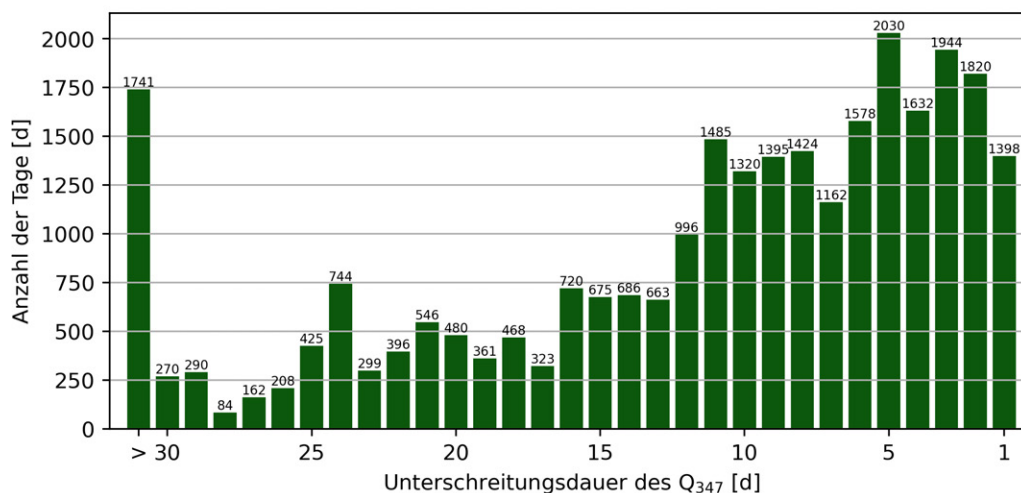


Abb. 16: Histogramm der Anzahl Q_{347} Tage über die Dauer D

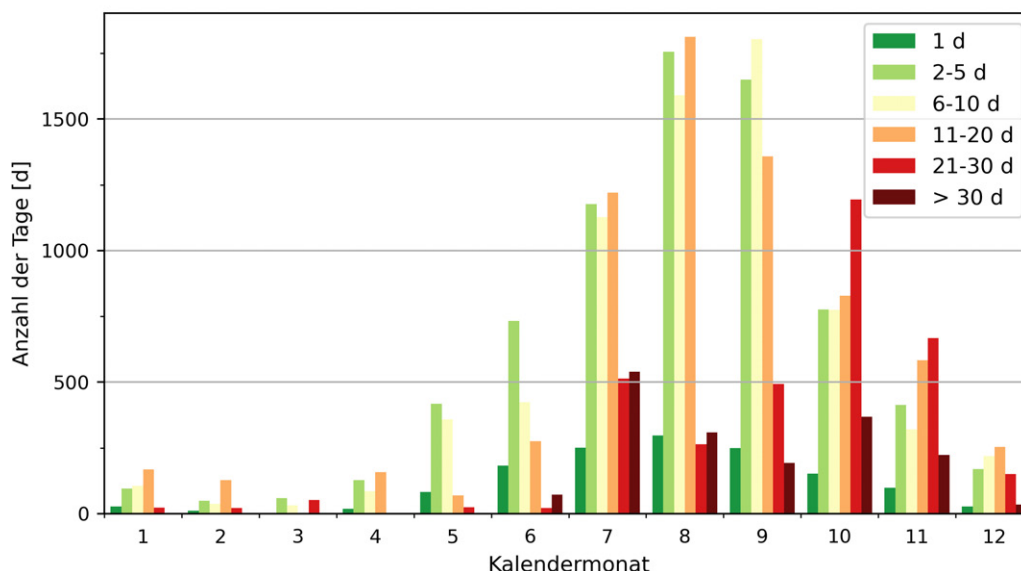


Abb. 17: Verteilung der Ereignistage des Q_{347} für verschiedene Dauern D und Kalendermonate

den Wintermonaten von Dezember bis März die Anzahl der Unterschreitungstage deutlich geringer ist. Kürzere Unterschreitungen, die zwischen 1 und 10 Tagen liegen, sind über das ganze Jahr verteilt, während sich Ereignisse mit zunehmender Unterschreitungsdauer eher in Spätsommer- und Herbstmonate verschieben. Diese Verteilung über die Kalendermonate ist charakteristisch für gletscherfreie Mittelgebirge in Zentraleuropa. In den Sommermonaten überwiegt die Evapotranspiration den Wasserhaushalt eines EZG während im Winter die kleineren Regenmengen in Kombination mit Schneeakkumulation zu niedrigen Abflüssen führen können.

Abb. 18 zeigt Histogramme mit der Anzahl der Unterschreitungstage pro Kalendermonat für die EZG Kanton ZH und Umgebung. Höher gelegene Stationen sind anfälliger für Unterschreitungstage in den Wintermonaten. In den Herbst- und Wintermonaten führen Schneefälle zu einer Akkumu-

lation des gefallenen Niederschlags in höheren Lagen, der nicht sofort zur Abflussbildung beiträgt. Im Frühjahr und Sommer hingegen führt die Schneeschmelze zu einer kontinuierlichen Abfluss-
spende und Gletscher geben gespeichertes Wasser frei. Dies erklärt die geringere Anzahl von Unterschreitungstagen in höheren Lagen in den Monaten direkt nach der Schneeschmelze (April bis Juni).

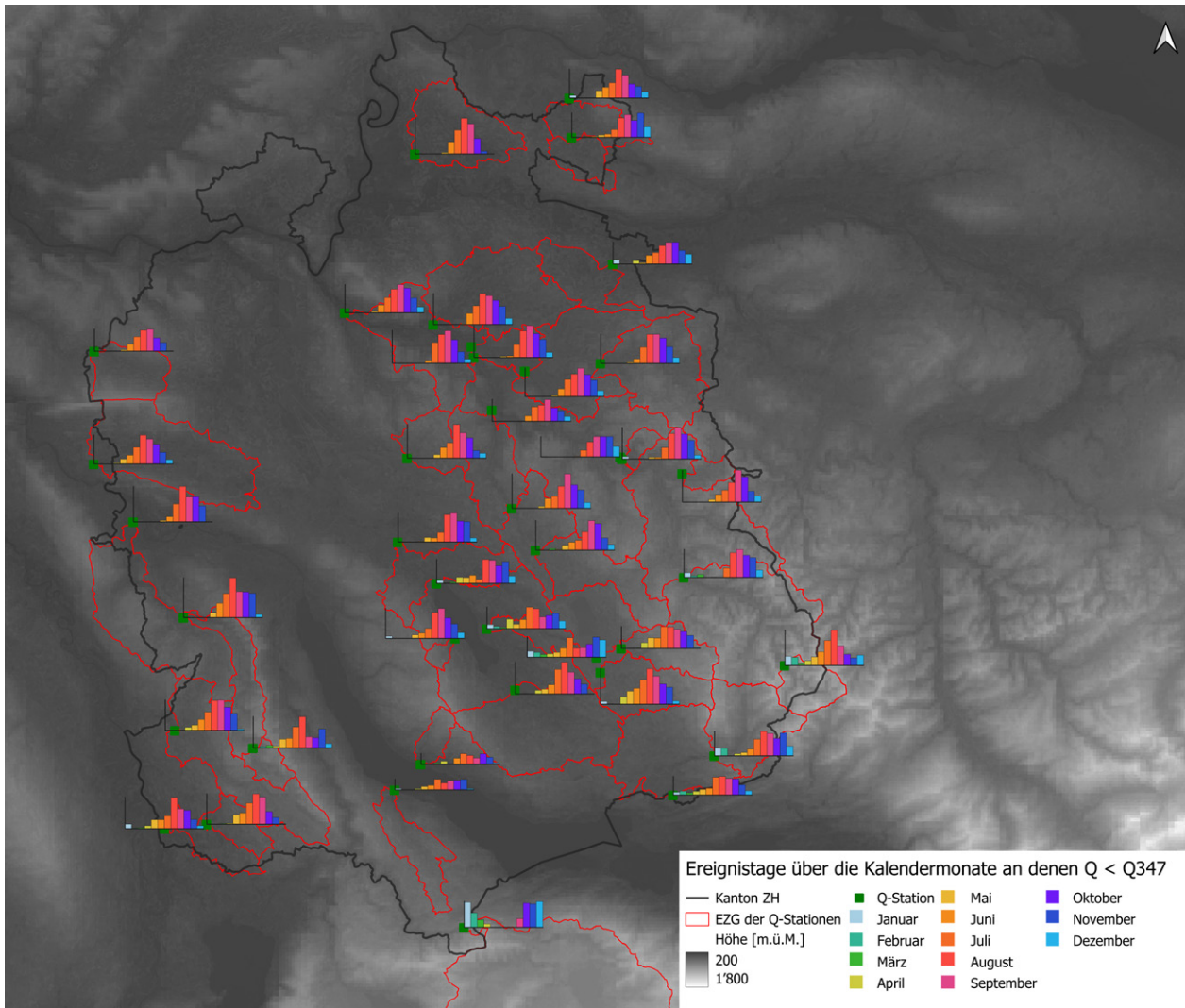


Abb. 18: Verteilung der Ereignistage des Q_{347} über die Kalendermonate nach räumlicher Lage der EZG

4.2. Zeitliche Veränderung des Q_{347}

In diesen Untersuchungen wird der Abflusswert Q_{347} eines EZG aus den Daten von 30 Jahren ermittelt. Aufgrund systematischer Veränderungen des Inputs (d.h. Niederschlag und Temperatur) und des eigentlichen Systems (EZG) können systematische Veränderungen des Outputs, d.h. Abflusses, über diese Zeitperiode erwartet werden. Deshalb wurde die zeitliche Verteilung der Q_{347} -Tage über die Periode von 1993 bis 2022 in Abb. 19 dargestellt. Der mittlere, prozentuale Anteil der Q_{347} -

Tage muss, gemäss Definition, 5% der Gesamttage über die letzten 30 Jahre betragen.

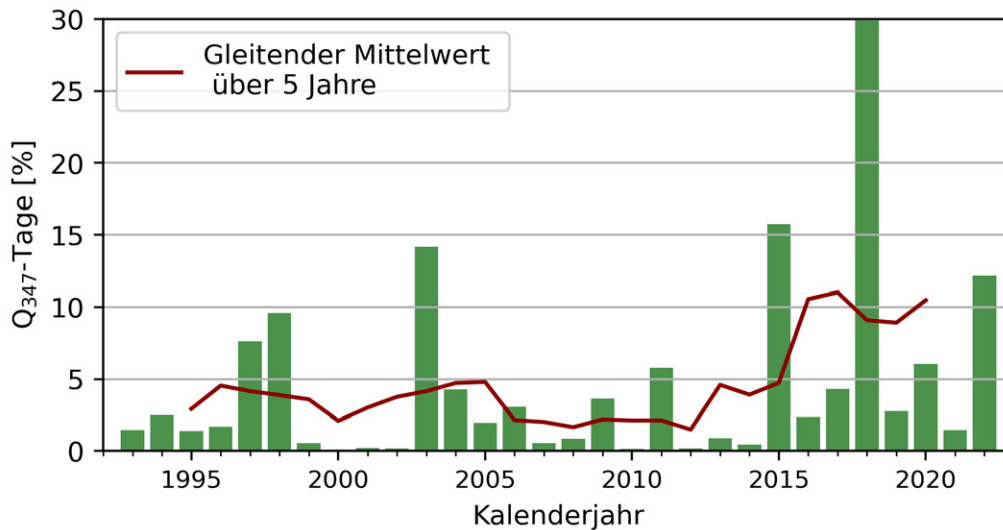


Abb. 19: Anteil der Q_{347} -Tage an den Gesamttagen von 1993 bis 2022 mit einem gleitenden Mittelwert über 5 Jahre

Aus Abb. 19 geht hervor, dass es einzelne Kalenderjahre mit relativ vielen Niedrigwassertagen (z.B. 2015, 2018) gab, während in anderen Jahren (z.B. 2000, 2010) keine Q_{347} -Tage in den 56 EZG auftraten. Das gleitende Mittel über 5 Jahre zeigt in Abb. 19 eine aufsteigende Tendenz über den betrachteten Zeitraum, was auf eine systematische Veränderung im System und ein vermehrtes Auftreten von Niedrigwässern in der Schweiz hindeutet.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) schreibt für die Ermittlung der Niedrigwassermenge Q_{347} eine Datenbasis der vorangegangenen 10 Jahre vor (Estoppey et al. 2000). Um die zeitliche Variation der Dauerlinie und insbesondere des Q_{347} -Wertes für die einzelnen EZG zu dokumentieren, wurden die Messdaten des betrachteten Zeitraums in die drei enthaltenen Dekaden, d.h. vom 01.01.1993 – 31.12.2002 (Dekade I), vom 01.01.2003 – 31.12.2012 (Dekade II) und vom 01.01.2013 – 31.12.2022 (Dekade III) eingeteilt. Für jedes EZG wurden drei verschiedene Werte für das 5%-Unterschreitungsquantil Q_{347} berechnet und miteinander verglichen (siehe Abb. 20). Die Differenz der Werte (z.B. $Q_{347,I} - Q_{347,II}$) wurden jeweils prozentual in Bezug zum älteren Wert (z.B. $Q_{347,I}$) ausgerechnet.

	$\Delta (\text{II} - \text{I}) [\%]$	$\Delta (\text{III} - \text{II}) [\%]$
Mittelwert	20.2	-25.9
Median	14.4	-25.0
Max.	152.9	26.2
Min.	-46.9	-71.7
1. Quartil	6.0	-40.5
2. Quartil	14.4	-25.0
3. Quartil	31.8	-15.5

Tab. 2: Relative Veränderung des Q_{347} -Werts

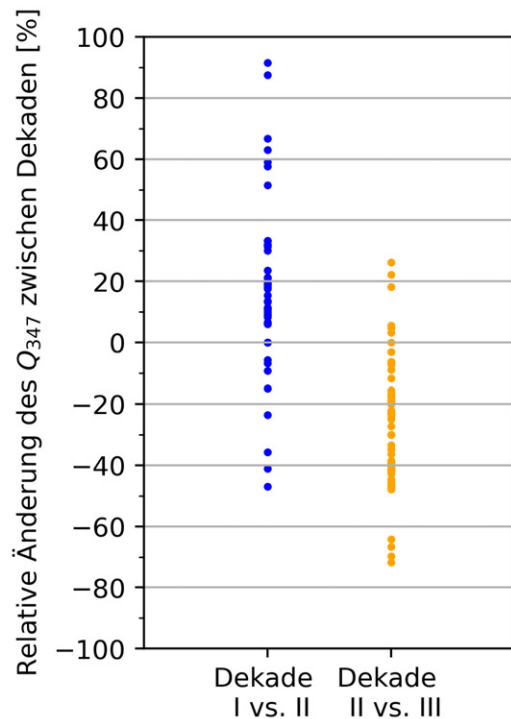


Abb. 20: Relative Veränderung des Q_{347} -Werts zwischen den Dekaden I und II sowie II und III

Aus Abb. 20 (inks) geht hervor, dass sich der Q_{347} -Wert für 15 von 40 EZG innerhalb des Kantons Zürich zwischen der Dekade I und II verkleinert hat. Insgesamt beträgt das arithmetische Mittel +20.2% und der Median +14.4% und die maximale Minderung beträgt -46.9%. Dies bedeutet, dass der neue Q_{347} -Wert für ein EZG um knapp die Hälfte des vorherigen Wertes geschrumpft ist. Die Veränderungen zwischen Dekade II und Dekade III sind extremer (Abb. 20, rechts): der Q_{347} -Wert hat sich bei 32 von 40 EZG verkleinert, das arithmetische Mittel beträgt -25.9%, der Median -25% und die maximale Verkleinerung beläuft sich auf -71.7% (!). Dies bedeutet, dass sich der Q_{347} -Wert während der betrachteten 20 Jahre des 21. Jahrhunderts um mehr als zwei Drittel verkleinert hat. Die systematische Abnahme der Q_{347} -Wert wurde im Allgemeinen beschleunigt und die Niedrigwassersituation hat sich somit verschärft.

5. Parametrisierung der Einzugsgebiete

5.1. Einzugsgebietsgliederung

Basierend auf dem Konzept der topographischen Einzugsgebiete Schweizer Gewässer des BAFU wurde für den Kanton ZH von geo7 eine Einzugsgebietsgliederung erarbeitet (Geowissenschaftliches Büro, o. D.). Für jeden Gewässerabschnitt des Gewässernetzes existiert ein topographisches Teileinzugsgebiet, die sich mit einer hierarchischen Struktur zu Gesamteinzugsgebieten für jeden Gewässerabschnitt kombinieren lassen. Insgesamt wurden so 9389 Teileinzugsgebiete in und um den Kanton gebildet. In dieser Anzahl sind Teileinzugsgebiete enthalten, die interne Senken, oder Parallelgewässer repräsentieren. Diese wurden entfernt oder zusammengefasst, so dass von der Gliederung des Kantons für die nachfolgende Abschätzung 9034 unbeobachtete Gesamteinzugsgebiete mit $A_{EZG} < 100 \text{ km}^2$ verbleiben. Die Stadt Zürich verwendet innerhalb des Städtischen Gebiets eine eigene Gliederung die besondere Gegebenheiten bei den städtischen Gewässern und Entwässerungsgräben berücksichtigt. Sie umfasst 218 unbeobachtete EZG.

Ein Vergleich der beobachteten und unbeobachteten EZG mit einer Fläche kleiner als 100 km^2 im Kanton Zürich ist in Abb. 21 dargestellt. Sie verdeutlicht, dass eine hohe Anzahl an sehr kleinen unbeobachteten Einzugsgebieten (nahezu 8000 mit einer Fläche $< 1 \text{ km}^2$) vorhanden sind, während die Verteilung der beobachteten EZG zwischen 1 und 100 km^2 liegen, wobei in den kleineren Flächenklassen ($0 - 10 \text{ km}^2$) besonders wenige beobachtet werden.

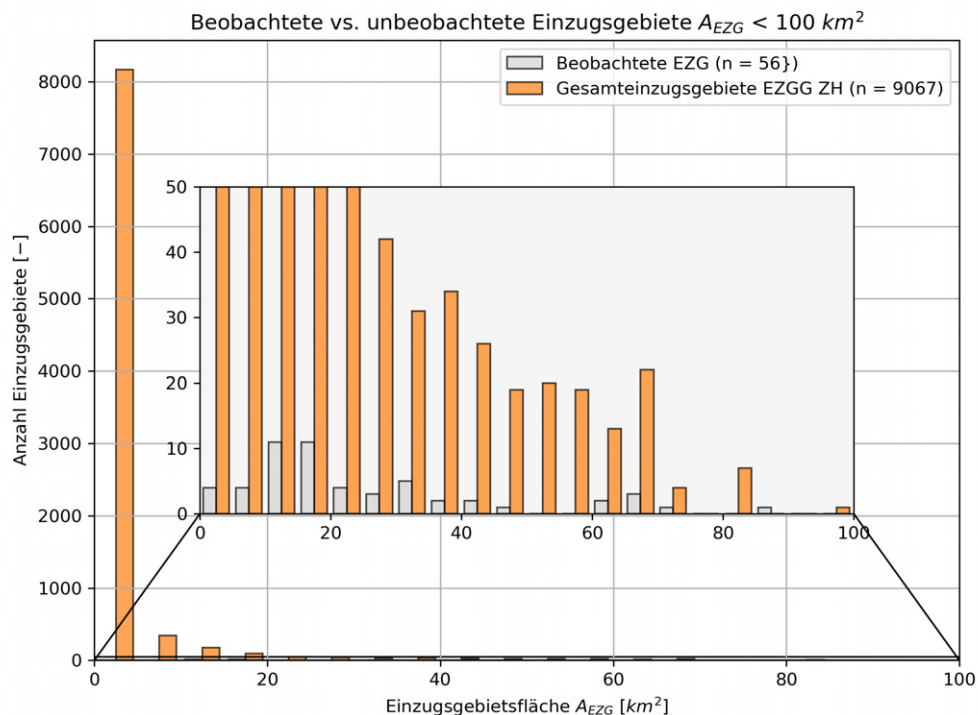


Abb. 21: Flächenvergleich der beobachteten und unbeobachteten EZG im Kanton ZH

5.2. Statische Eigenschaften der Einzugsgebiete

Die statischen Eigenschaften umfassen geometrische, topografische, geologische und «weitere» physische Eigenschaften eines EZG. Diese «weiteren» Eigenschaften umfassen die Bodennutzung, Speicher- und Entwässerungsattribute, Bevölkerungskennwerte und die Ausrichtung des EZGs. Alle diese Eigenschaften werden über die Zeit als konstant, d.h. «statisch», angenommen.

Geometrie Die Geometrie wurde für EZG innerhalb des Kantons Zürich aus der «Einzugsgebietsgliederung Kanton ZH» und für EZG im restlichen Untersuchungsgebiet aus der «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» des BAFU extrahiert, die horizontal-projizierten Flächen berechnet und daraus der Flächenschwerpunkt als Längen- und Breitengrad bestimmt. Daraus ergeben sich drei Parameter, die in Tabelle 3 aufgelistet und deren Histogramme in Abb. 22 dargestellt sind.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
1	Fläche des Einzugsgebietes	area_m2	m ²	[0, ∞]
2	Längengrad des Flächenschwerpunktes	longitude	°	[0, 180]
3	Breitengrad des Flächenschwerpunktes	latitude	°	[0, 90]

Tab. 3: Geometrische Parameter

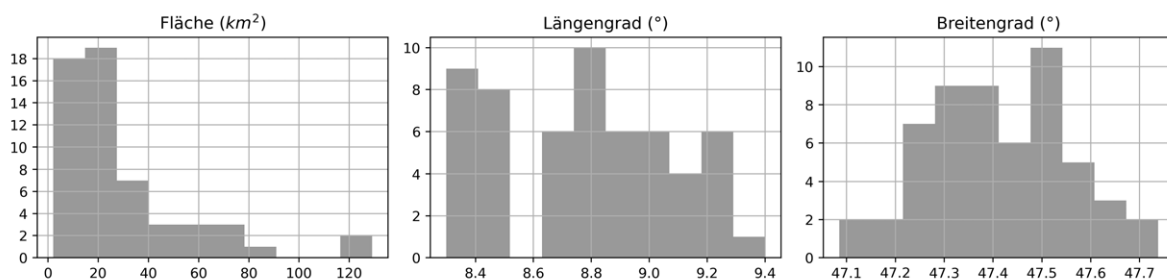


Abb. 22: Häufigkeitsverteilung der geometrischen Parameter

Topografie Die topografischen Höhen der EZG wurden aus dem Rasterprodukt swissAlti3D der Swisstopo mit einer Auflösung von 2m x 2m geschnitten. Aus den Rasterhöhen wurde anschließend die mittlere, minimale und maximale Höhe, sowie deren Standardabweichung im EZG berechnet. Ebenfalls wurde die Steigung zwischen benachbarten Pixelmittelpunkten ermittelt und daraus die mittlere, minimale, maximale Steigung und die Standardabweichung der Steigungen bestimmt. Die topographischen Eigenschaften ergaben acht weitere Parameter (siehe Tabelle 4, Abb. 23) zur Charakterisierung der EZG.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
4	Mittlere Höhe des EZG	mean_elevat_m	m ü.M	[0, ∞]
5	Minimale Höhe im EZG	min_elevat_m	m ü.M	[0, ∞]
6	Maximale Höhe im EZG	max_elevat_m	m ü.M	[0, ∞]
7	Standardabweichung der Höhen im EZG	std_elevat_m	m ü.M	[0, ∞]
8	Mittlere Neigung des EZG	mean_slope	°	[0,90]
9	Minimale Neigung im EZG	min_slope	°	[0,90]
10	Maximale Neigung im EZG	max_slope	°	[0,90]
11	Standardabweichung der Neigungen im EZG	std_slope	°	[0,90]

Tab. 4: Topografische Parameter

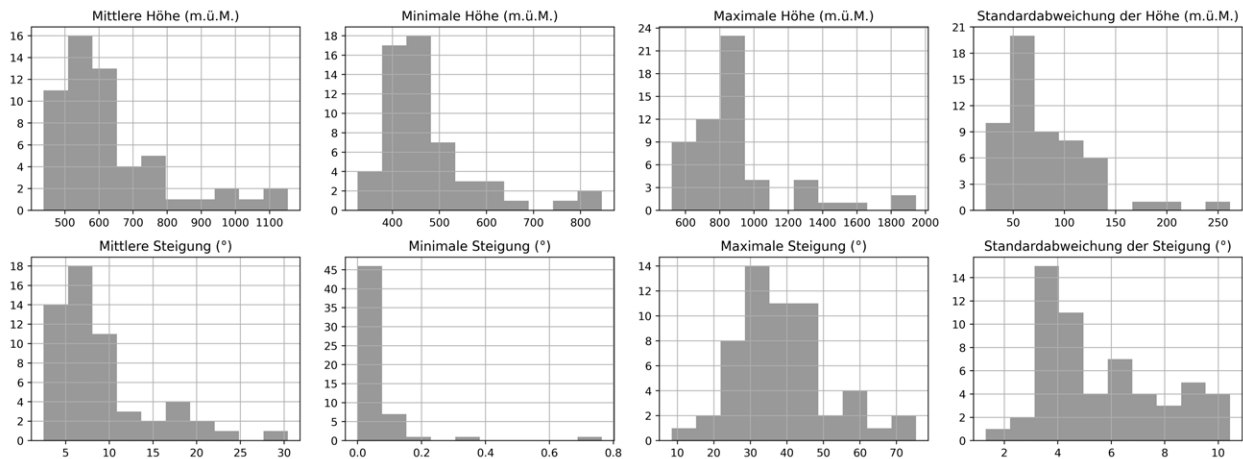


Abb. 23: Häufigkeitsverteilung der topografischen Parameter

Geologie Die Bodendurchlässigkeit für Wasser entstammt der «digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz» des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). Hierbei sind die Böden in sechs Durchlässigkeitsklassen eingeteilt, welche einem k_F -Wertebereich (in cm/s) zugeordnet werden können. Die vorkommenden Durchlässigkeitswerte eines EZG wurden daraus flächengewichtet gemittelt.

Zusätzlich wurden die Flächenanteile der oberen Meeresmolasse (OMM) und der unteren Süswassermolasse (USM) aus den «Geokarten500 (GK500)» des Bundesamtes für Landestopografie Swisstopo entnommen. Die drei hydrogeologischen Parameter für die prozentualen Flächenanteile von Karst-, Poren-Kluft- und Lockergesteinsgrundwasserleiter wurden der «hydrogeologischen Übersichtskarte der Schweiz» des Bundesamtes für Umwelt entnommen. Diese geologischen und hydrogeologischen Parameter der EZG sind in Tabelle 5 aufgelistet und deren Häufigkeitsverteilungen in Abb. 24 dargestellt.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
12	Mittlere Durchlässigkeit (k_F -Wert)	mean_durchlaessigkeit_cms-1	cm/s	[0, ∞]
13	Anteil der Oberen Meeresmolasse	omm	%	[0,1]
14	Anteil der Unteren Süßwassermolasse	usm	%	[0,1]
15	Karst Grundwasserleiter	karst_aquifer	%	[0,1]
16	Poren-Kluft Grundwasserleiter	poren-kluft_aquifer	%	[0,1]
17	Lockergestein Grundwasserleiter	pockergesteins_aquifer	%	[0,1]

Tab. 5: Geologische und hydrogeologische Parameter

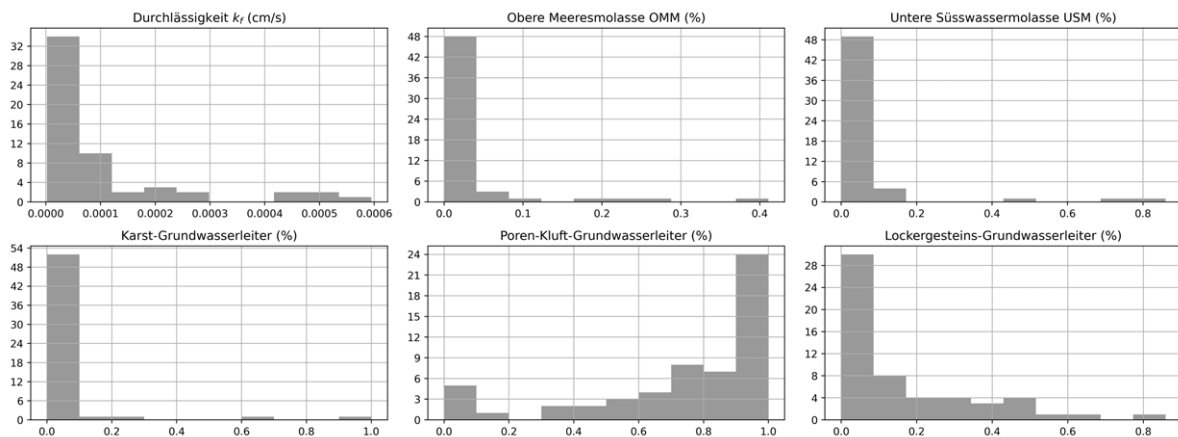


Abb. 24: Häufigkeitsverteilung der geologischen und hydrogeologischen Parameter

Bodennutzung Drei Arten der Bodennutzung (Siedlung, Landwirtschaft und Wald) wurden aus dem «CORINE Land Cover» Produkt der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entnommen und deren Flächenanteile für jedes EZG ermittelt (siehe Tabelle 6, Abb. 25).

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
18	Waldfläche	forest	%	[0,1]
19	Siedlungsfläche	settlement	%	[0,1]
20	Landwirtschaftsfläche	agriculture	%	[0,1]

Tab. 6: Parameter der Bodennutzung

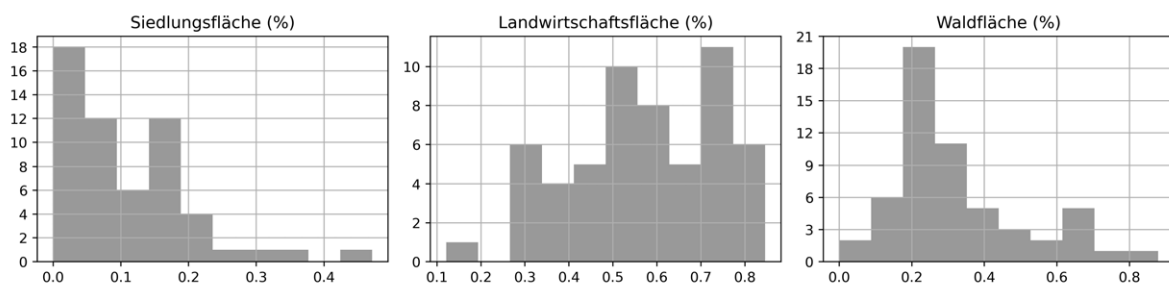


Abb. 25: Häufigkeitsverteilung der Parameter der Bodennutzung

Entwässerung und Ausrichtung Die Konzentrationszeit nach dem Ansatz von KIRPICH berechnet in einem linearen Translationsmodell die Fließzeit des gefallenen Regens vom weitesten Punkt eines EZG bis hin zu dessen Auslass. Der Parameter der Entwässerungsdichte ist definiert als Quotient der Summe aller Fließgewässerlängen und der Fläche des EZG.

Die Ausrichtung der Entwässerung eines EZG beschreibt den Komplementärwinkel des Ausrichtungswinkels eines EZG. Der Ausrichtungswinkel wird dabei durch den Vektor zwischen Auslass des EZG und dem weitest entfernten Punkt im EZG bestimmt. Hierbei wurde die Himmelsrichtung gegen den Uhrzeigersinn mit Osten als 0° und Westen als 180° definiert (siehe Abb. 26). Weiter werden die drei Klassen der oberirdischen Fließgewässerlängen, der unterirdisch bestimmten und der unterirdisch unbestimmten Fließgewässerlänge aus dem BAFU-Datensatz «Fließgewässertypisierung der Schweiz» entnommen. Diese zusätzlichen Parameter der Entwässerung und Ausrichtung sind in Tabelle 7 aufgelistet und deren Histogramme in Abb. 27 dargestellt.

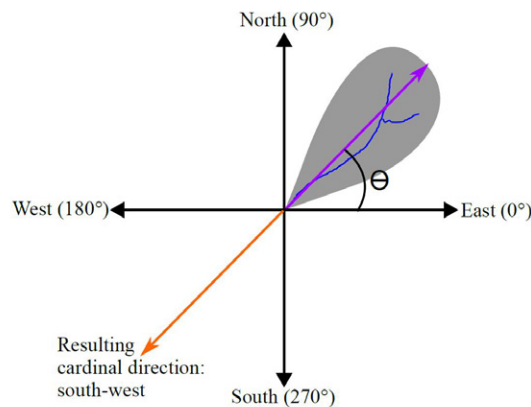


Abb. 26: Berechnungsschema für den Parameter Ausrichtung des Einzugsgebiets. Der violette Vektor entspricht dem Parameter Ausrichtung

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
21	Konzentrationszeit nach Kirpich	kirpich_min	min	[0, ∞]
22	Entwässerungsdichte	drainage_density	km ⁻¹	[0, ∞]
23	Ausrichtung des EZG	orientation	°	[0,360]
24	Fließgewässerlänge	length_rivers_m	m	[0, ∞]
25	Fließgewässerlänge oberirdisch	oberirdisch_m	m	[0, ∞]
26	Fließgewässerlänge unterirdisch bestimmt	unterirdisch_bestimmt_m	m	[0, ∞]
27	Fließgewässerlänge unterirdisch unbestimmt	unterirdisch_unbestimmt_m	m	[0, ∞]
28	Länge Seeachse	seeachse_m	m	[0, ∞]

Tab. 7: Parameter der Entwässerung und Ausrichtung

Bevölkerung Zur Beschreibung der Bevölkerung in den EZG wird einerseits die absolute Bevölkerungszahl und andererseits die Bevölkerungsdichte, definiert als Quotient aus Gesamtbevölkerung und der Fläche des EZG, ermittelt. Die Bevölkerungszahlen wurden der «Statistik der Bevölkerung

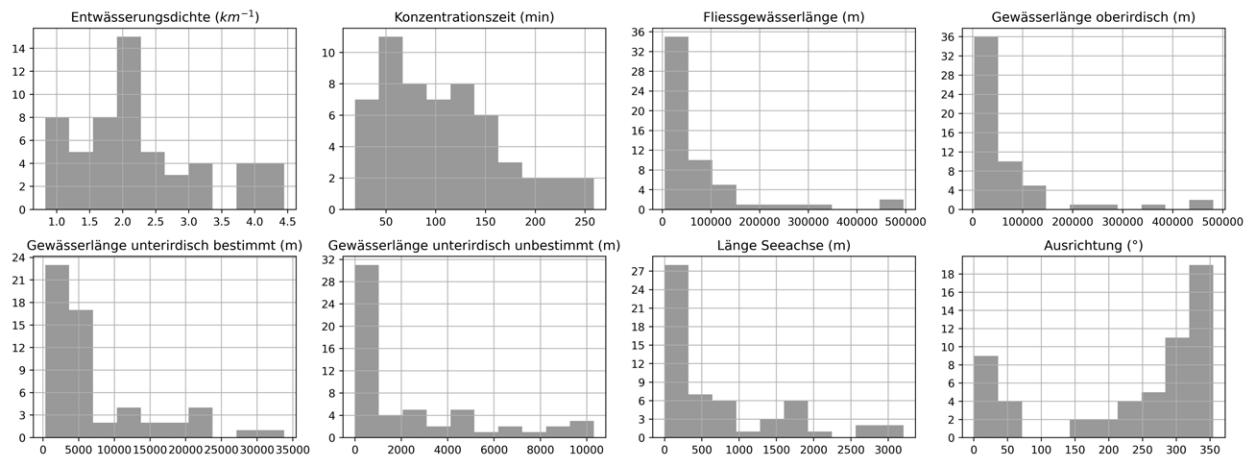


Abb. 27: Häufigkeitsverteilung der Parameter der Entwässerung und der Ausrichtung

und der Haushalte (STATPOP)» vom Bundesamt für Statistik entnommen. Die Parameter sind in Tabelle 8 aufgelistet und deren Histogramme in Abb. 28 dargestellt.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
29	Bevölkerungszahl	population	E	[0, ∞]
30	Bevölkerungsdichte	population_density	E/km ²	[0, ∞]

Tab. 8: Parameter der Bevölkerung

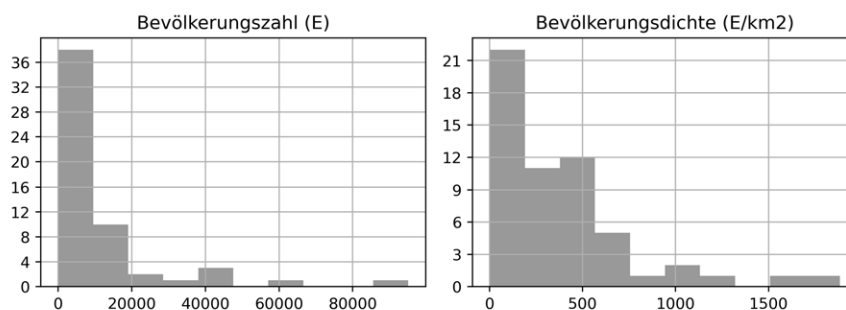


Abb. 28: Häufigkeitsverteilung der Parameter der Bevölkerung

5.3. Klimatische Eigenschaften der Einzugsgebiete

Die klimatischen Eigenschaften der EZG, die nachfolgend beschrieben sind, wurden aus den Zeitreihen des Monatsniederschlags und der Tagestemperatur für jedes EZG hergeleitet. Sie basieren somit auf den Daten der letzten 10 Jahre und charakterisieren das vorherrschende Klima jedes EZG.

Temperatur Aus den Zeitreihen der Tagestemperaturen wurden für jedes EZG die mittleren Jahres- und Halbjahrestemperaturen der letzten 10 Jahre ermittelt. Hierbei wurde zwischen den

Sommermonaten (d.h. April – September) und den Wintermonaten (d.h. Oktober – März) unterschieden. Die drei abgeleiteten Parameter sind in Tab. 9 beschrieben und in Abb. 29 dargestellt.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
31	Mittlere Jahrestemperatur	mean_temp	°C	$[-\infty, \infty]$
32	Mittlere Temperatur im Sommerhalbjahr	mean_temp_summ	°C	$[-\infty, \infty]$
33	Mittlere Temperatur im Sommerhalbjahr	mean_temp_wint	°C	$[-\infty, \infty]$

Tab. 9: Parameter der Temperatur

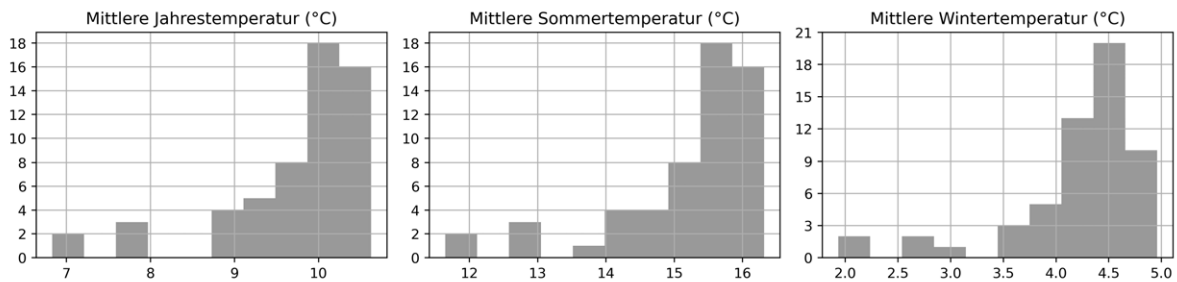


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung der Parameter der Temperatur

Niederschlag Der mittlere Jahresniederschlag wurde aus den monatlichen Zeitreihen der EZG für die letzten 10 Jahre berechnet. Die jährliche Schwankung des täglichen Niederschlags wird durch die Amplitude und die Phasenverschiebung des Niederschlagsverlaufs charakterisiert. Dazu wird eine trigonometrische Sinusfunktion mit der Periode 2π auf den mittleren täglichen Niederschlag über das Jahr erst normiert und danach angepasst. Die Amplitude entspricht der Höhe der Niederschlagsspitze und die Phase ist die Verschiebung des Minimums der Funktion durch die Anzahl der Tage nach Jahresbeginn (siehe Abb.). Die hergeleiteten Parameter sind folgend dargestellt (Tabelle 10 und Abb. 31).

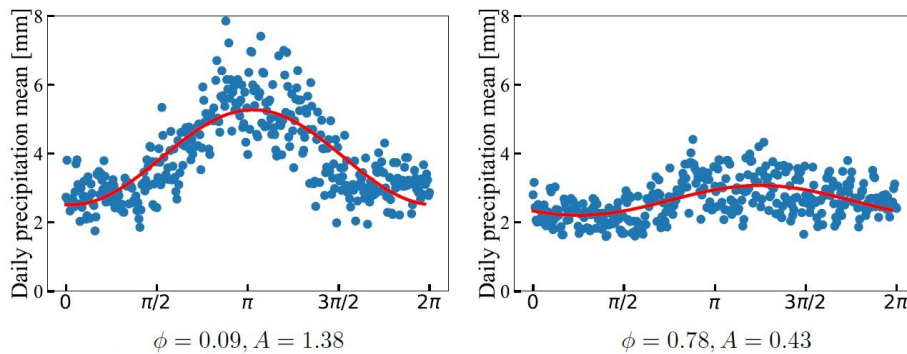


Abb. 30: Exemplarische Darstellung der Parameter Amplitude A und der Phase ϕ anhand von zwei Einzugsgebieten

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
34	Mittlere Jahresniederschlag	mean_percip_10y	mm	$[0, \infty]$
35	Amplitude des Niederschlags	amplitude	mm	$[0, \infty]$
36	Phasenverschiebung des Niederschlags	phase	$a/2\pi$	$[0, 2\pi]$

Tab. 10: Parameter des Niederschlags

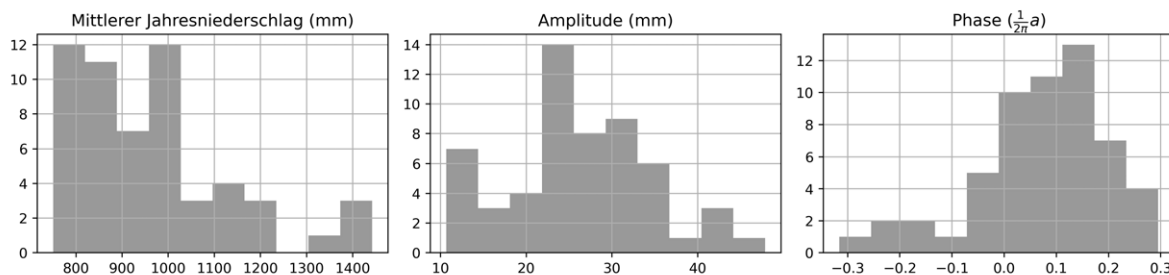


Abb. 31: Häufigkeitsverteilung der Parameter des Niederschlags

Verdunstung Auf Basis der zunächst gemittelten Monatstemperatur in einem EZG wurde die monatliche, potentielle Evapotranspiration (PET) nach dem Ansatz von THORNTWAITE (Thorntwaite, 1948) berechnet. Aus den jeweiligen Zeitreihen der PET kann somit die mittlere, jährliche potentielle Evapotranspiration, wieder unterteilt in Sommer- und Wintermonate, abgeleitet werden. Die hergeleiteten Parameter der Verdunstung sind in Tabelle 11 und Abb. 32 präsentiert.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
37	jährliche PET	mean_hvp	mm	$[0, \infty]$
38	PET in den Sommermonaten	mean_hvp_summ	mm	$[0, \infty]$
39	PET in den Wintermonaten	mean_hvp_wint	mm	$[0, \infty]$

Tab. 11: Parameter der Verdunstung

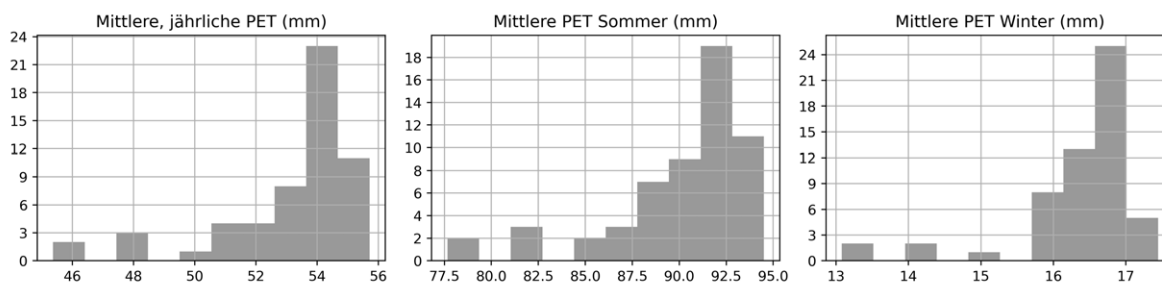


Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der Parameter der Verdunstung

6. Abschätzung von Q_{347} , Q_{182} und MQ

Es gibt verschiedene Verfahren zur Abschätzung der charakterisierenden Niedrigwasserwerten. Die multiple lineare Regression wurde in Europa (Demuth, 1993), Australien (Nathan und McMahon, 1992) und Nordamerika (Kroll et al. 2004) zur Abschätzung von jährlichen Schwellenwerten der Dauerlinie in unbeobachteten EZG etabliert und wird in der Schweiz (Estoppey et al. 2000) als Standardmethode angewendet. Hierbei wird angenommen, dass der Abflusswert Q_{347} eines EZG anhand dessen spezifischen und klimatischen Eigenschaften beschrieben werden kann. Die selbe Annahme wird für die Abschätzung der Abflusswerte Q_{182} und MQ getroffen und es wird analog vorgegangen. In diesem Kapitel werden zunächst die Methodik der MLR, die Validierung sowie mögliche Verbesserungsansätze beschrieben. Anschliessend werden diese Methoden auf die 56 EZG angewendet, optimiert und deren Ergebnisse miteinander verglichen, um danach die Regionalisierung auf die unbeobachteten EZG vorzunehmen.

6.1. Multiple Lineare Regression

Mit der Multiplen linearen Regression (MLR) wird versucht, die Zielvariable $y_i (i = 1, n)$, mit mehreren unabhängigen Variablen (Regressoren oder Parameter) $x_j (j = 1, m)$ zu beschreiben. Die Regressionsgleichung der MLR für m unabhängige Variablen lautet:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \dots + \beta_m x_{m,i} + \varepsilon_{R,i} \quad (6)$$

Die Regressionskoeffizienten $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ werden als unbekannt betrachtet und es tritt ein zufälliger Fehler $\varepsilon_{R,i}$ auf. Der Fehler $\varepsilon_{R,i}$ (Residuum) stellt die Differenz zwischen dem beobachteten Wert y_i und dem vom Modell geschätzten Wert \hat{y}_i dar. Bei der Schätzung nach dem kleinsten Quadratfehler besteht die Idee darin, die Summe der quadrierten Fehler zu minimieren. Mittels einem linearen Gleichungssystem können so die Regressionskoeffizienten berechnet werden.

Die MLR impliziert folgende Annahmen:

1. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Zielvariable y_i und den unabhängigen Variablen x_i .
2. Der Mittelwert der Fehler ist null. $\sum_{i=1}^n \varepsilon_{R,i} = 0$
3. Die Regressoren x_i sind unabhängig voneinander
4. Der Fehler $\varepsilon_{R,i}$ ist homoskedastisch (d.h. konstante Varianz), normalverteilt und nicht korreliert.

6.1.1. Methoden zur Auswahl der Regressoren

Es wurden drei verschiedene Methoden zur Auswahl von geeigneten, unabhängigen Regressoren, d.h. beschreibende Parameter, angewendet. Diese sollen dann die Zielvariable, d.h. das q_{347} , q_{182} und Mq der 56 EZG, beschreiben. Diese Methoden werden im Folgenden skizziert:

Forward Selection (Vorwärtsselektion) Die 56 Abflusswerte für q_{347} , q_{182} und Mq werden zunächst jeweils abwechselnd mit den m Parametern (= 30 statische + 9 klimatische) mit der multiplen linearen Regression beschrieben. Der Parameter mit dem besten Zielkriterium wird hierbei beibehalten. Nun wird ein zweiter Parameter aus den verbliebenen 38 Parametern hinzugefügt und die gemeinsame Regression anhand des Zielkriteriums evaluiert. Der nunmehr (zweit-)beste Parameter wird zur Beschreibung beibehalten. Dieser Auswahlsschritt wird nun so oft wiederholt, bis das Modell über eine festgelegte Anzahl an Parameter verfügt, oder sich keine weitere Verbesserung des Modells mehr ergeben.

Backward Selection (Rückwärtsselektion) Hier erfolgt die Auswahl der Parameter in umgekehrter Reihenfolge: es wird mit dem grössten Modell mit allen 39 Parametern begonnen und jeweils, alternierend, ein Parameter entfernt. Dann wird jene Variable aus dem Modell entfernt, unter deren Ausschluss die Abschätzung am besten war. Dieser Schritt wird ebenfalls so oft wiederholt, bis die festgelegte Anzahl der Parameter erreicht wurde oder sich keine weiteren Verschlechterungen ergaben.

Random Forest Regression, Feature Importance Entscheidungsbäume können für die Auswahl der Parameter einer Regression verwendet werden (Gregorutti, Michel und Saint-Pierre, 2017). Hierbei teilt ein Entscheidungsbaum den Wertebereich der erklärenden Parameter so in Regionen auf, dass jede von ihnen einer Zielvariable zugewiesen werden kann. Die Aufteilung des Raumes der erklärenden Variablen geschieht mittels binärer Entscheidungen, die seinen Wertebereich in zwei Teilräume aufteilt, sodass eine möglichst eindeutige Zuweisung zu der Zielvariablen (q_{347} , q_{182} oder Mq) erfolgt. Dieser Schritt wird mit den entstandenen Teilräumen so oft wiederholt, bis in jeder Region nur noch ein Wert, welcher einer Zielvariablen zugewiesen werden kann, vorhanden ist. Mit dem «Gini»-Index kann die Reduktion der Varianz der möglichen Ergebnisse bei jeder Entscheidung gemessen werden (Donges, 2020).

Die Ergebnisse einzelner Entscheidungsbäume variieren allerdings stark, da der Trainingsdatensatz wiederholt in zwei zufällige Hälften aufgeteilt wird, um diese zu erstellen. Deshalb werden mehrere Entscheidungsbäume [engl.: *random forest*, *RF*] und deren Ergebnisse zusammengefasst. Dafür werden mittels Bootstrap-Verfahren aus dem Trainingssatz wiederholt neue Datensätze gezogen um weitere Entscheidungsbäume herzustellen und deren Ergebnisse zu mitteln. Eine Eigenschaft der RF-Methode ist, dass bei jeder binären Entscheidung nur eine zufällig gewählte Teilmenge aller erklärenden Parameter zur Verfügung steht. Aus dieser Teilmenge wird der erklärende Parameter gewählt, mit welcher der Raum am besten geteilt werden kann. Somit wird verhindert, dass der

am besten erklärende Parameter immer für die Aufteilung verwendet wird und auch die Wirkung anderer Parameter mit eingebunden wird.

Zum Schluss werden die erklärenden Parameter identifiziert, die am wichtigsten für die Ergebnisse der Entscheidungsbäume sind. Dafür wird der «Gini»-Index für jede erklärende Variable innerhalb eines Entscheidungsbaums aufsummiert und über alle Bäume gemittelt. Dies ergibt die «Feature Importance» mit Werten zwischen 0 (unwichtig) und 1 (wichtig).

Variance Inflation Factor Bei den beiden Auswahlverfahren Forward Selection und Backward Selection bleibt die Kollinearität zweier ausgewählter Parameter zufällig, d.h. dass ihre Korrelation unter Umständen sehr gross sein kann und somit das angepasste Modell keine zusätzliche Information hinsichtlich der Abschätzung der Zielvariablen q_{347} erhält. Deshalb wird der «Variance Inflation Factor» VIF_j für die 39 Parameter als Mass der Kollinearität eingeführt. Er ist definiert als

$$VIF_j = \sum \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (7)$$

wobei R^2 das globale Bestimmtheitsmass, welches das Verhältnis der erklärten Varianz durch die unabhängigen Variablen zur gesamten Varianz der Zielvariablen angibt.

$$R^2 = Cor(y, \hat{y})^2 \quad (8)$$

Der Variance Inflation Factor VIF_j kann Werte zwischen 1 (linear) und ∞ (unendlich, nicht linear) annehmen. Werte im einstelligen und tiefen zweistelligen Bereich können als gut angenommen werden.

6.1.2. Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse [engl.: *principal component analysis, PCA*] ermittelt die beschreibenden Hauptachsen aus dem q -dimensionalen Parameterraum $x_j (j = 1, q) \mid q \subset m$. Das Koordinatensystem wird anschliessend in diese Hauptachsen gedreht und verschoben, sodass zwischen den transformierten Parametern $x'_j (j = 1, q)$ eine (lineare) Unabhängigkeit entsteht. Hierbei zeigt die erste Achse in die Richtung des transformierten Parameters x' , der die grösste Erklärung der Zielvariablen beinhaltet. Mit dieser Methode können ggf. die ausgewählten Parameter der Forward Selection, Backward Selection und des Random Forest weiter optimiert werden indem die verbliebene Kollinearität eliminiert wird.

6.1.3. Kreuzvalidierung

Die Vorhersagegenauigkeit des angepassten Modells sollte anhand von Daten, die nicht zur Anpassung verwendet wurden, validiert werden. Bei Datensätzen mit limitiertem Umfang wird meist ein Teil der Daten nicht für die Anpassung, aber für die Validierung ihrer Güte, verwendet. Ein Spezialfall dieser Kreuzvalidierung ist die «Leave-One-Out» - Methode, bei der die Daten von nur

einem EZG aus dem Datensatz herausgenommen werden. Die Daten der verbliebenen 55 EZG werden nun für die Ermittlung der Regressionskoeffizienten β_m verwendet. Mit Hilfe des angepassten Modells wird der Schätzwert \hat{y}_i von q_{347} , q_{182} oder Mq des ausgelassenen EZG ermittelt und mit dem gemessenen Wert y_i verglichen. Der daraus resultierende, relative Prozentualfehler $\varepsilon_{y,i}$ wird nun für alle 56 EZG berechnet.

$$\varepsilon_{y,i} = \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Die Mittelwert der absolute Summe aller relativen Prozentualfehler ergibt den absoluten Prozentualfehler MAPE [engl.: *mean absolute percentage error*] und wird anschliessend als Zielfunktion verwendet.

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_{y,i}| \quad (10)$$

6.2. Modelle M1- M3

Für die Abschätzung des spezifischen Abflusses wurden in einem vorherigen Projekt neue Methoden zur verbesserten Abschätzung des Q_{347} in unbeobachteten EZG hergeleitet (Dups et al. 2023). Für den Kanton und die Stadt Zürich werden die Modelle M1, M2 und M3 für die Abflusswerte Q_{347} , Q_{182} und MQ implementiert.

6.2.1. M1: «starke» lineare Regression

Bei der «starken» Regression wird ein lineares Regressionsmodell für alle beobachteten EZG mit den sieben «besten» Parameter bestimmt. Da auch dieses Modell Schätzfehler, d. h. Abweichungen der Beobachtungen von der Schätzlinie haben, können robustere Abschätzungen durch eine Simulation der linearen Regression unter Berücksichtigung der Variabilität der Beobachtungen erreicht werden (Pavía Santolamazza, 2022). Hierfür wird eine Anzahl dieser Schätzfehler zufällig ausgewählt, mit dem Schätzwert aufaddiert und ein «Ensemble» gebildet. Der Mittelwert der Aggregation der simulierten, «starken» Werte ergibt die neue Abschätzung für das EZG. Nachfolgend wird schematisch der Aufbau des Modelles aufgezeigt. Abb 33 zeigt, dass die Schätzfehler mit der starken linearen Regression, verglichen mit der herkömmlichen Regression, reduziert werden können. Der minimale Fehler wird bei einer Ensemblegrösse von sieben erreicht.

1. Anpassung des linearen Modells: $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_7 \cdot x_7$
2. Berechnung der Residuen $r_i = y_i - \hat{y}_i$
3. n zufällige Residuen wählen $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$
4. Ensemble bilden $\{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n\} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_7 \cdot x_7 + r_n$
5. Die Schätzung erfolgt durch Mittelwertbildung aus den Ergebnissen: $\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \hat{y}_n$

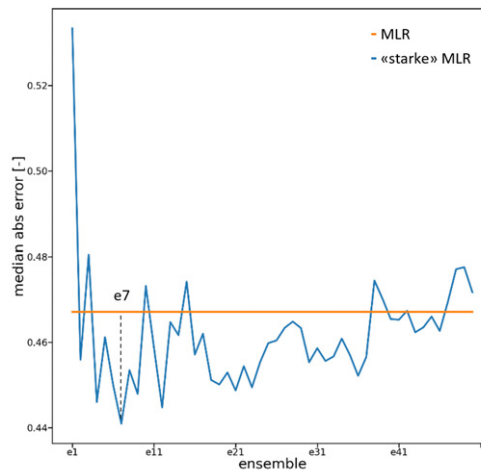


Abb. 33: Entwicklung des Fehlers in M1 bei verschiedenen Grössen der ensembles

6.2.2. M2: Übernahme der MLR vom beobachteten EZG

Das Modell mit den «besten» sieben Parametern und den hergeleiteten Regressionskoeffizienten für das nächste, unterstromige und beobachtete EZG wird für die Abschätzung des unbeobachteten (Teil-) EZG übernommen. Dieses, auf eine Abflussmessstation bezogene Modell wird folglich für die Abschätzung aller ihm untergeordneten EZG angewendet. Existiert für ein unbeobachtete EZG kein übergeordnetes, beobachtetes EZG, so erfolgt die Schätzung mit dem «besten» Regressionsmodell des gesamten Untersuchungsgebietes. Für das gesamte Untersuchungsgebiet resultieren so 57 Regressionsgleichungen wovon 56 jeweils einer Abflussmessstation zugeordnet sind und eine für die für das gesamte Untersuchungsgebiet gültig ist.

Zur Findung der «besten Parameter» wird a) die Station ausgelassen, b) die «Forward selection» mit Minimierung des Kreuzvalidierungsfehlers durchgeführt um c) die sieben «besten Parameter» für die ausgelassene Station zu finden.

Dieses Vorgehen wird für alle 56 Stationen wiederholt. Für die Abschätzung der unbeobachteten EZG innerhalb des Kanton Zürichs kommen 29 der 57 Regressionsgleichungen zur Anwendung. Abb. 34 zeigt in Farbe die beobachteten EZG, deren untergeordneten Teil-EZG jeweils mit dem selben Regressionsmodell abgeschätzt werden. In grau sind diejenigen EZG dargestellt, die keiner Abflussmessstation zugeordnet und mit dem Regressionsmodell des gesamten Untersuchungsgebietes abgeschätzt werden.

6.2.3. M3: Clustering der EZG

Dieser Ansatz identifiziert «ähnliche» EZG im gesamten Untersuchungsgebiet anhand ihrer Eigenschaften mit der «Random Forest»-Methode (Tyrallis, Papacharalampous und Langousis, 2019). Die Ähnlichkeit der EZG anhand der 39 Parameter wird mit einer Ähnlichkeitsmatrix bewertet, die an den Enden der Entscheidungsbaume erstellt wird. Sie ist eine Distanzmatrix und stellt die «räumliche» Nähe der Datenpunkte im Parameterraum dar. Dieser Parameterraum wird in drei Gruppen

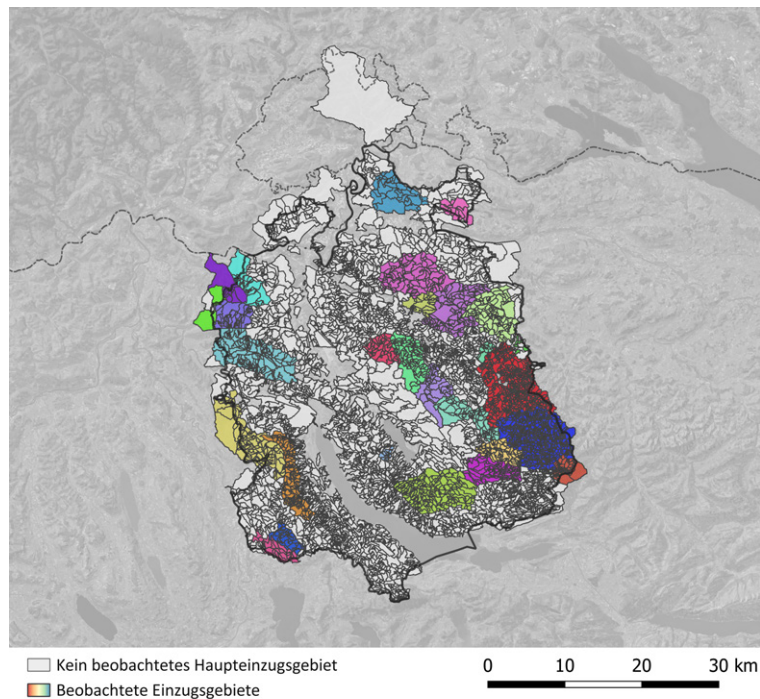


Abb. 34: Beobachteten EZG, deren untergeordneten Teil-EZG jeweils mit dem selben Regressionsmodell abgeschätzt werden

(«Cluster») eingeteilt, damit eine ausreichende Anzahl von EZG in jedem «Cluster» sind. Für jeden «Cluster» wird nun ein Regressionsmodell mit den «besten» Parametern erstellt, indem eine «Forward Selection» durchgeführt wird, so dass in jedem «Cluster» pro 7 Beobachtungen ein Parameter vorhanden ist. Die unbeobachteten EZG werden aufgrund ihrer Ähnlichkeit einem der drei «Cluster» zugeteilt (siehe Abb. 35) und das jeweilige Modell wird zur Abschätzung der Abflusswerte q_{347} , q_{182} und Mq verwendet.

6.2.4. Vergleichsmodelle «BAFU» und «1-2-3»

Zum Vergleich der vorgeschlagenen Regressionsmethoden M1 bis M3 wird für das Q_{347} das Regressionsmodell des «BAFU» (Aschwanden und Kan, 1999), mit der definierten Zonierung innerhalb der Schweiz verwendet. Für den Kanton Zürich sind die Modellregionen «zentrales Mittelland», «östliches Mittelland» und «Alpen» relevant. Als weiteres Vergleichsmodell wird das einfache «1-2-3» Modell, bei dem eine Zuordnung von $1 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ für «Siedlung», $2 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ für «Landwirtschaft» und $3 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ für «Wald» zur Abschätzung des q_{347} erfolgt, verwendet.

Der Vergleich der mittleren Abflüsse MQ wird mit dem Rasterdatensatz MQ-CH, der mit einer Auflösung von 500x500m für die ganze Schweiz zur Verfügung steht. Jede Rasterzelle gibt den Abflusswert an, der für diese Fläche anzusetzen ist. Zur Bestimmung des Abflusswerts MQ für ein Gesamteinzugsgebiet können die Abflusswerte der Rasterzellen aufsummiert werden.

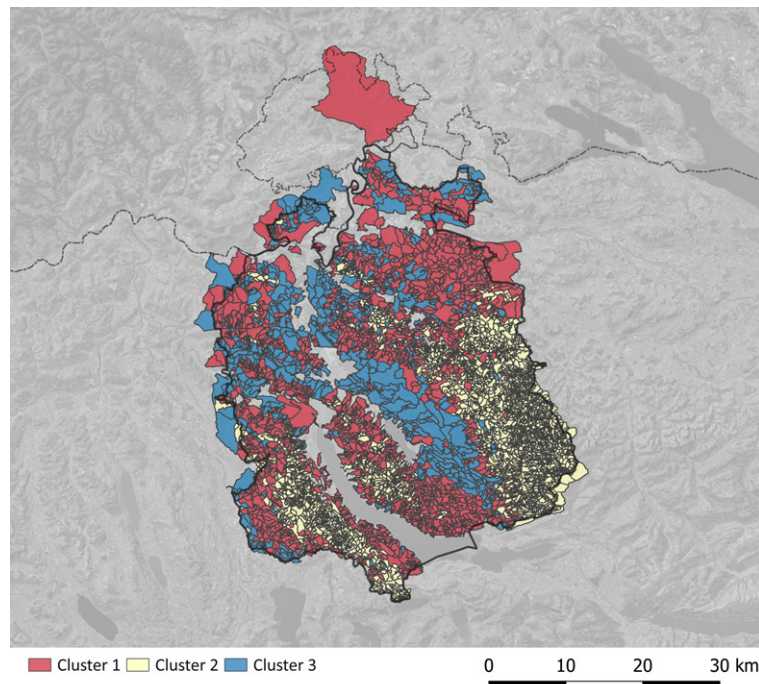


Abb. 35: Zuordnung der unbeobachteten EZG zu den drei Cluster

6.3. Ergebnisse der Abschätzung des Q_{347} und Fehlerverteilung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Parameterauswahlverfahren, zur Regression und der Regionalisierung des Q_{347} vorgestellt.

6.3.1. Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für Q_{347}

Tab. 12 zeigt die besten 3 Parametersätze für das Gesamte Untersuchungsgebiet geordnet nach MAPE. Für jedes Verfahren ist die Anzahl der ausgewählten Parameter, der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE), dessen Parameter und der Variance Inflation Factor (VIF) für jeden Parameter angegeben. Die vollständige Auflistung aller berechneten Modelle befindet sich in Anhang D.

Die Forward Selection hat mit einem MAPE von 32.7% die beste Genauigkeit, während die anderen beiden Verfahren (Backward Selction und RF Selection) leicht höhere MAPE-Werte (33.4% bzw. 33.5%) aufweisen, was auf eine geringfügig schlechtere Abschätzungsgenauigkeit hindeutet. Die meisten Parameter haben VIF-Werte unter 10 und somit nahezu keine Kollinearität untereinander. Einige Parameter in der Backward Selction zeigen sehr hohe VIF-Werte (z.B. mean_temp_summ: 3306 und mean_temp: 1187), die auf starke Multikollinearität hinweisen. Weiteren Aufschluss über die Kollinearität gibt die Korrelationsmatrix in Anhang D.1. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die Auswahl der Parameter in den Modellen M1 bis M3 für das Q_{347} dem Parameterwahlverfahren Forward Selection durchgeführt.

Für die Beschreibung des Q_{347} in einem einzelnen EZG müssen diese gefundenen Parametersätze aber nicht unbedingt im kleinsten Fehler resultieren. Deswegen wurden die sieben «besten» Para-

Auswahlverfahren	Anzahl	MAPE [%]	Parameter	VIF
1 forward_selected	7	32.7	longitude	2.29
			max_slope	2.29
			orientation	1.89
			karst_aquifer	1.89
			poren-kluft_acquifer	1.52
			oberirdisch_m	2.18
			phase	2.68
2 backward_selected	7	33.4	area_m2	1.83
			max_slope	3.75
			orientation	1.71
			lockergesteins_aquifer	1.37
			mean_temp	1187.84
			mean_temp_summ	3306.09
			mean_hvp_summ	740.64
3 RF_selected	7	33.5	usm	2.86
			poren-kluft_acquifer	1.52
			mean_precip_10y	4.55
			latitude	2.25
			mean_durchlaessigkeit_cms-1	1.2
			std_elevat_m	3.39
			max_slope	2.76

Tab. 12: Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für Q_{347}

meter für jedes einzelne der 56 EZG mit der Forward Selction bestimmt. Insgesamt ergeben sich somit 56 Parametersätze mit den sieben «besten» Parametern für die Beschreibung des Q_{347} . Die prozentuale Zugehörigkeit der 30 statischen und 9 klimatischen Parameter zu den 56 Parametersätzen ist für die Methode der Forward Selection in Abb. 36 dargestellt.

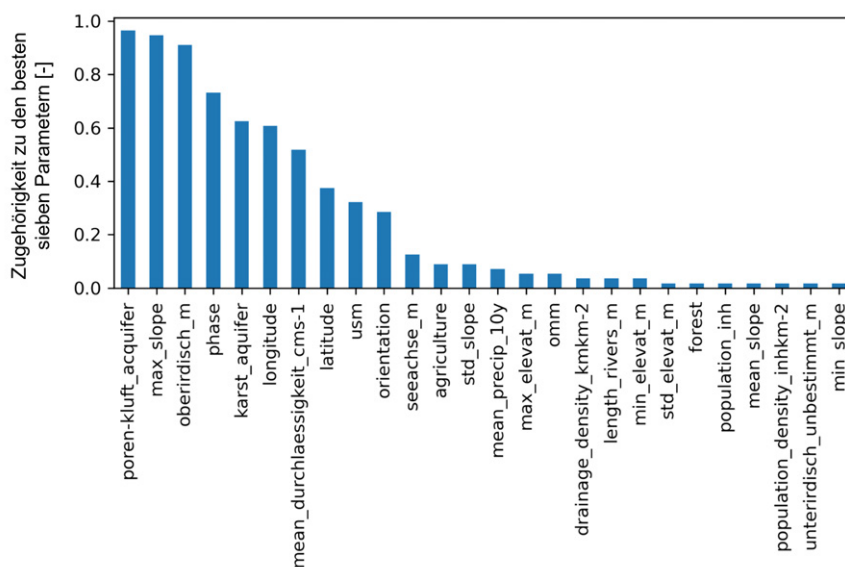


Abb. 36: Relevanz einzelner Parameter für die Beschreibung des Q_{347} im gesamten Untersuchungsgebiet

Aus Abb. 36 geht hervor, dass der Parameter «poren-kluft_aquifer» in 96%, d.h. in allen 56 Parametersätzen, unter den «besten» sieben Parameter zur Beschreibung des q_{347} mittels MLR vorkommt. Er sollte somit immer zur Abschätzung hinzugenommen werden. Des Weiteren kommen die Parameter «max_slope» und «oberirdisch_m» in über 90% der «besten» Parametersätze vor. Sechs der sieben mit der Forward Selection gewählten Parameter (siehe Tab. 12) sind für die einzelnen EZG unter den am häufigsten gewählten Parameter und tragen somit am meisten Informationsgehalt bei. Die Forward Selection wird deshalb für die folgende Anpassung der Modelle M1 bis M3 gewählt.

Tabelle 13 vergleicht die Modelle M1 bis M3 hinsichtlich ihrer Genauigkeit bei der Abschätzung des flächenspezifischen Abflusses q_{347} , gemessen an den drei Zielfunktionen mittlerer Fehler (ME), mittlerer absoluter Prozentualfehler (MAPE) und Korrelation (COR).

	Modell	ME [l/s · km²]	MAPE [%]	COR [-]
1	M1	0.35	31.2	0.73
2	M2	0.06	32.4	0.69
3	M3	0.07	46.0	0.54
4	1-2-3	-0.28	51.0	0.25
5	BAFU	0.03	65.2	0.15

Tab. 13: Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 und die Referenzmodelle 1-2-3 und BAFU für q_{347}

Modell M1 hat den niedrigsten MAPE (31.2%) und die höchste Korrelation (0.73), was auf die beste Vorhersagegenauigkeit und Übereinstimmung mit den beobachteten Werten hinweist. Obwohl der ME von M1 nicht der niedrigste ist, liefert es insgesamt die beste Performance und kann bei zwei der drei Zielfunktionen den besten Wert erreichen. Modell M2 hat den niedrigsten ME (0.06) und ebenfalls einen niedrigen MAPE (32.4%) sowie eine hohe Korrelation (0.69). Es ist somit das zweitbeste Modell. M3 erbringt eine leicht schwächere Leistung. Die Modelle «1-2-3» und «BAFU» zeigen eine deutlich schlechtere Performance mit hohen MAPE-Werten (51.0% bzw. 65.2%) und niedrigen Korrelationen (0.25 bzw. 0.15) und sind für die Abschätzung weniger geeignet. Modell M1 wird bevorzugt, da es die beste Kombination aus Genauigkeit (d.h. kleiner MAPE) und hohem Zusammenhangsmaß (d.h. hohe COR) bietet und wird deshalb für die Abschätzung der unbeobachteten EZG empfohlen.

6.3.2. Ergebnisse der Q_{347} -Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich

Die Karten in Abb. 37 stellen die räumliche Verteilungen der Abflusswerte q_{347} für die fünf Modelle über den Kanton Zürich dar. Die Modelle M1 und M2 zeigen sehr ähnliche räumliche Verteilungen mit überwiegend niedrigen Abflusswerten und einer deutlichen räumlichen Struktur. Modell M3 zeigt mehrere Gebiete mit höheren Abflusswerten im Vergleich zu M1 und M2, was auf die Kalibrierung innerhalb der Cluster hinweist. Das «1-2-3» Modell zeigt eine schwache räumliche

Variabilität mit niedrigen Abflusswerten. Das «BAFU» Modell weicht stark von den anderen ab. Klar zu erkennen ist die Grenze zwischen den Teilmodellen für das zentrale und das östliche Mittelland mit jeweils fix definierten Regressionsgleichungen.

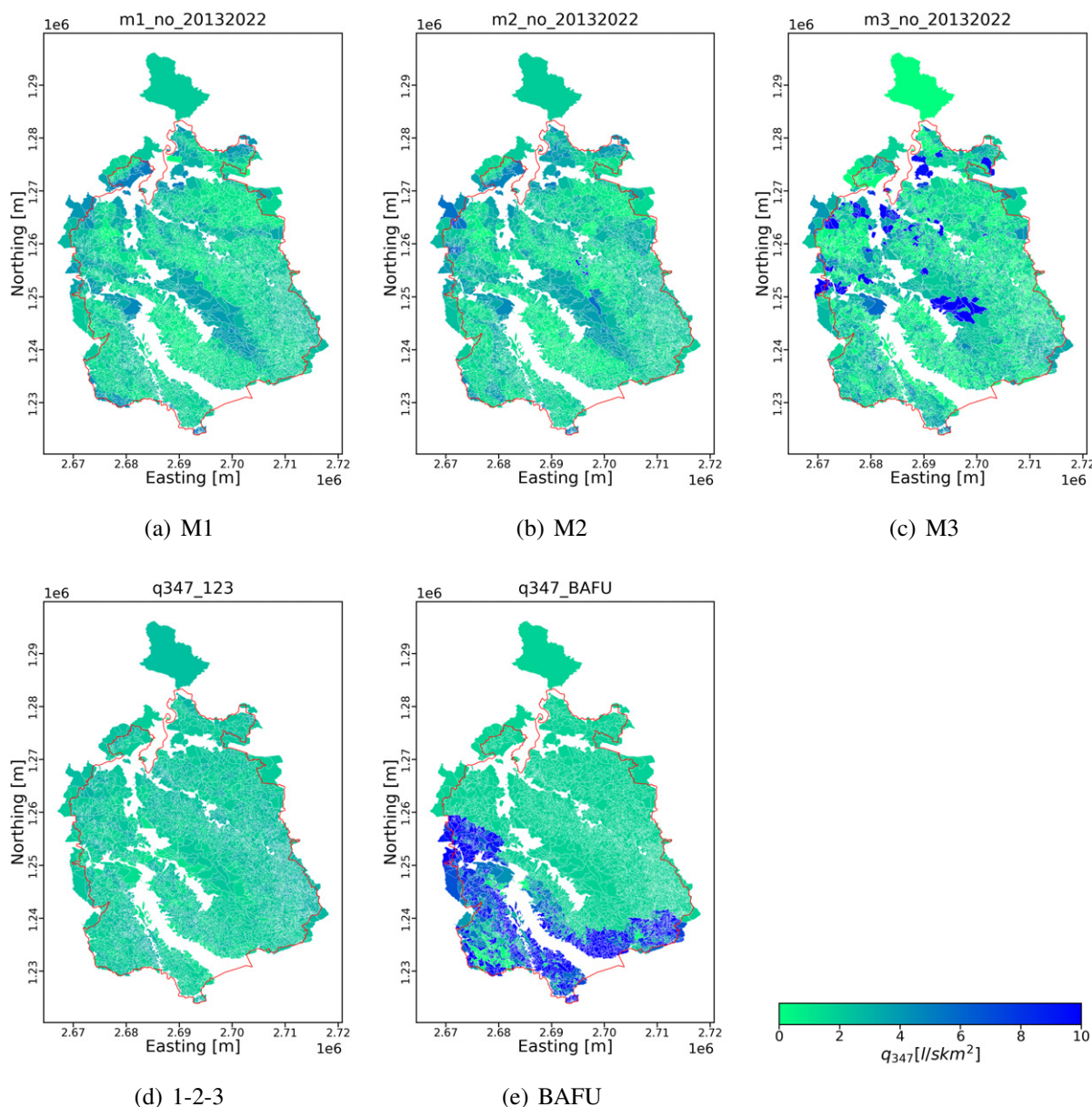


Abb. 37: Ergebnisse der Abschätzung des q_{347} der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und den Referenzmodellen 1-2-3 und BAFU in (d) bis (e) für die EZG des Kanton Zürich

6.3.3. Ergebnisse der Q_{347} -Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich

Die Ergebnisse für die Einzugsgebietsgliederung der Stadt Zürich sind in Abb. 38 dargestellt. Die Modelle M1 und M2 zeigen sehr ähnliche Verteilungen mit überwiegend niedrigen Abflusswerten und einer deutlichen räumlichen Struktur. Modell M3 zeigt wiederum Gebiete mit höheren Abflussraten im Vergleich zu M1 und M2. Das «BAFU» Modell weicht wiederum stark von den anderen ab, während das «1-2-3» Modell im städtischen Gebiet in einem ähnlichen Bereich zu den Model-

len M1 bis M3 liegt. Die Auflistung und eine grafische Darstellung der Q_{347} -Werte für alle EZG der Stadt Zürich ist in Anhang E.

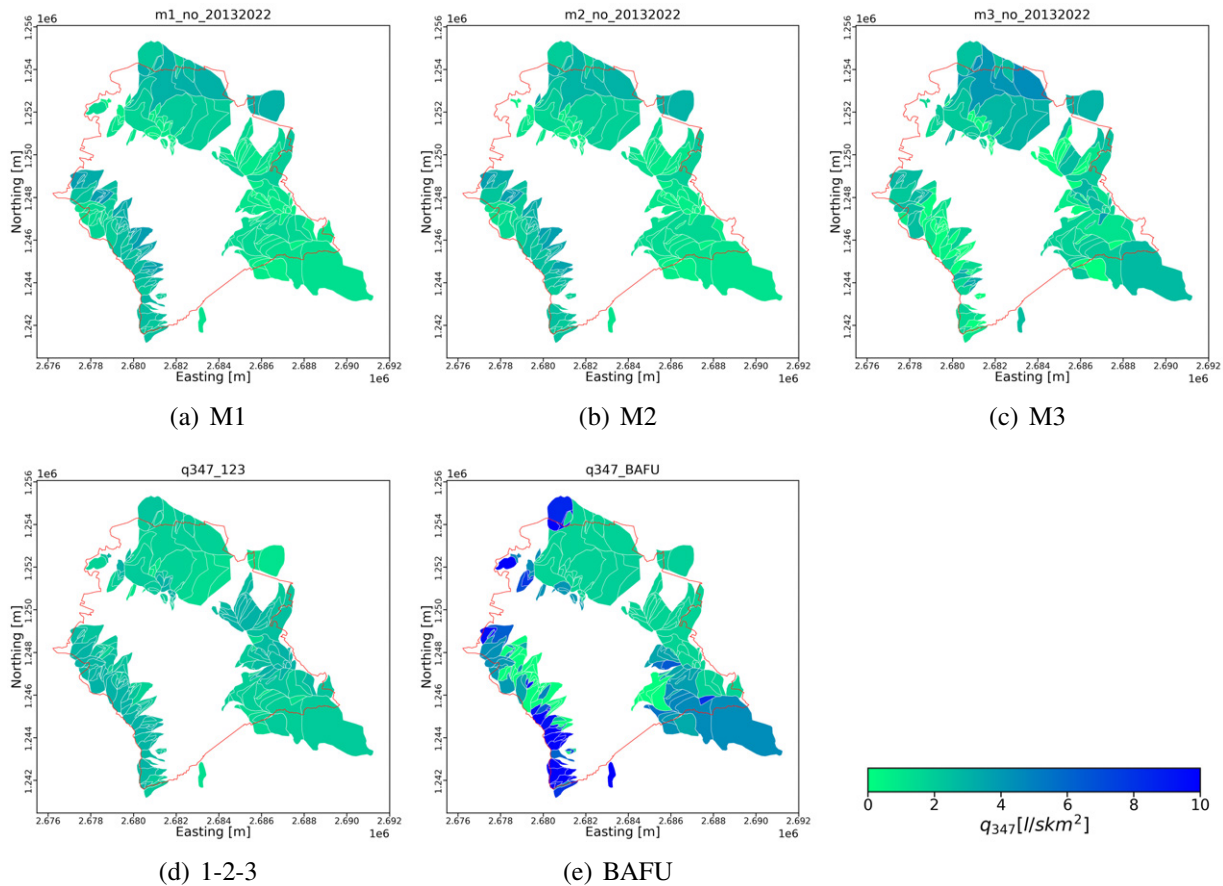


Abb. 38: Ergebnisse der Abschätzung des q_{347} der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und den Referenzmodellen 1-2-3 und BAFU in (d) bis (e) für die EZG der Stadt Zürich

6.3.4. Ausgewählte Fehlerbetrachtungen

Die Streudiagramme in Abb. 39 vergleichen die modellierten Abflusswerte mit den Beobachteten für die Modelle M1, M2, M3 und BAFU. Auf der x-Achse sind die beobachteten Werte und auf der y-Achse die modellierten Werte dargestellt. Eine ideale Übereinstimmung der Modellvorhersagen mit den Beobachtungen würde auf der Diagonalen liegen.

M1 und M2 zeigen die beste Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Abflusswerten. Die Streuung nimmt bei grösseren Werten tendenziell zu. Trotzdem liegen die Punkte relativ nahe an der 1:1-Linie, was auf eine gute Modellgenauigkeit hinweist. M3 zeigt eine deutlich grössere Streuung und Abweichungen von der 1:1-Linie. Das BAFU-Modell weist die grösste Abweichung und Streuung auf. Insbesondere werden mit dem Modell niedrige Beobachtungen z. T. stark und systematisch überschätzt.

In Abb. 40 werden die modellierten, spezifischen Abflusswerte für q_{347} der drei Modelle M1, M2

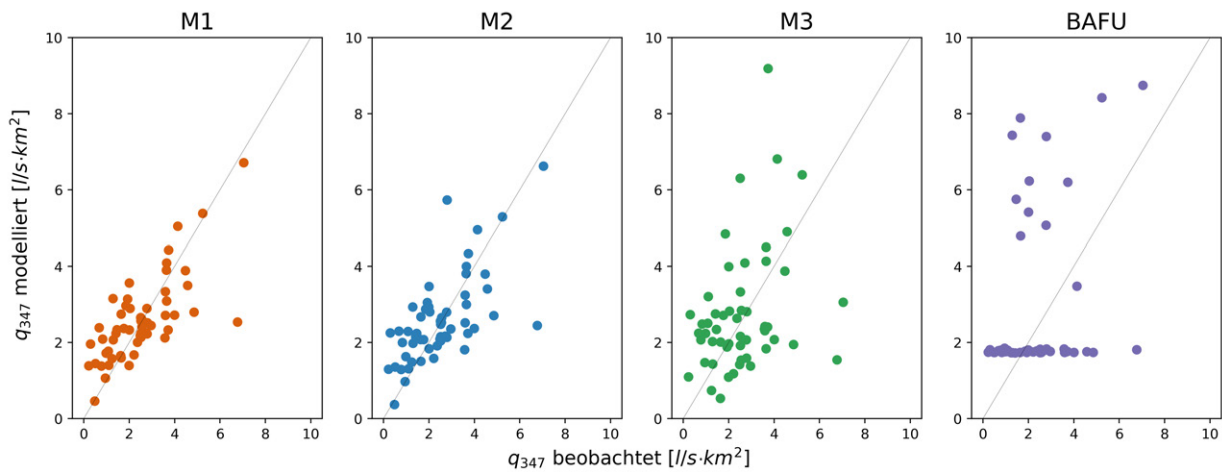


Abb. 39: Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten q_{347} -Werte

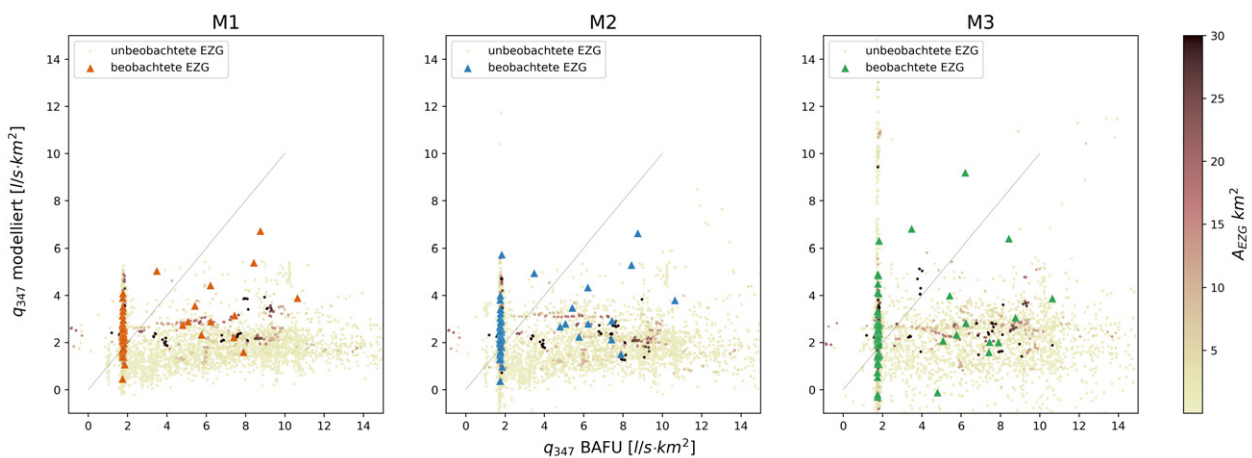


Abb. 40: Streudiagramme der modellierten q_{347} Werte der Modelle M1 bis M3 vs. die modellierten BAFU-Werte

und M3 den Werten das BAFU-Modell verglichen. M1 und M2 zeigen eine relativ kompakte Punktwolke während die Streuung bei M3 deutlich zunimmt. Alle drei Modelle liefern oft tiefere Abflusswerte als das BAFU-Modell wobei die Unterschätzung mit abnehmender EZG-Fläche grösser wird. Die Streuung der Werte nimmt mit abnehmender EZG-Fläche deutlich zu, während die mittleren und grösseren un beobachteten EZG in den Wertebereichen der beobachteten EZG liegen.

6.4. Ergebnisse der Abschätzung des Q_{182} und Fehlerverteilung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Parameterauswahlverfahren, zur Regression und der Regionalisierung des Q_{182} vorgestellt.

6.4.1. Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für Q_{182}

Die Tabelle 14 zeigt die besten drei Ergebnisse zur Bestimmung der besten Parameter für das Q_{182} über das gesamte Untersuchungsgebiet. Die vollständige Auflistung befindet sich in Anhang D.

Auffällig sind in Tabelle 14 die äusserst nahe beieinander liegenden, und verglichen mit dem Q_{347} deutlich tieferen Werte des MAPE von 17.5, 17.7 und 17.7%. Zwei der besten drei Parametersätze (1 und 3), die sich durch den zusätzlichen Parameter «lockergesteins_aquifer» unterscheiden, wurden mit der Backward Selection gefunden. Die extrem hohen VIF-Werte in diesen beiden Parametersätzen sind problematisch und deuten auf starke Kollinearität hin. Hohe Kollinearität, also eine starke Korrelation unter den Parameter, kann die Stabilität eines Modells beeinträchtigen und dazu führen, dass bei der Abschätzung der unbeobachteten EZG Änderungen der Parameterwerte grosse Schwankungen in der Modellausgabe verursachen. Trotz der besten Vorhersagegenauigkeit des im Backward Selection Verfahren gewählten Parametersatzes (1), machen die niedrigen VIF-Werte mit geringerer Kollinearität die Forward Selection (Parametersatz 2) zu einer praktikableren Wahl. Für die Anpassung der Modelle M1 bis M3 wird für das Q_{182} deshalb die Forward Selection mit Berücksichtigung von sieben Parameter gewählt.

Auswahlverfahren	Anzahl	MAPE [%]	Parameter	VIF
1 backward_selected	6.0	17.5	latitude	2.23
			mean_elevat_m	55.28
			karst_aquifer	1.97
			mean_temp_wint	1459.69
			mean_hvp	7087.71
			mean_hvp_summ	2283.25
2 forward_selected	7.0	17.7	max_elevat_m	6.24
			omm	1.24
			karst_aquifer	1.22
			population_density_inhkm-2	1.26
			length_rivers_m	2.64
			unterirdisch_unbestimmt_m	2.17
			mean_precip_10y	5.81
3 backward_selected	7.0	17.7	latitude	2.32
			mean_elevat_m	55.37
			karst_aquifer	1.97
			lockergesteins_aquifer	1.34
			mean_temp_wint	1470.77
			mean_hvp	7200.95
			mean_hvp_summ	2342.67

Tab. 14: Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für Q_{182}

Tabelle 15 zeigt die Zielfunktion drei Modellen M1, M2, M3. Für die Abschätzung des Q_{182} sind keine Referenzmodelle verfügbar. Modell M1 zeigt die beste Gesamtleistung mit dem geringsten ME und MAPE ($-0.03 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ und 17,8%) sowie dem höchsten Korrelationskoeffizienten von 0.91. M2 erbringt ebenfalls eine gute Leistung mit etwas schlechteren Zielfunktionen während M3 eine deutlich schwächere Leistung mit dem am weitesten von 0 entfernten ME von $0.29 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ zeigt. Für die Abschätzung des Q_{182} der unbeobachteten EZG wird deshalb M1 empfohlen.

	Modell	ME [$l/s \cdot km^2$]	MAPE [%]	COR [-]
1	M1	-0.03	17.8	0.91
2	M2	-0.06	19.6	0.86
3	M3	0.29	21.8	0.79

Tab. 15: Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 für q_{182}

6.4.2. Ergebnisse der Q_{182} -Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich

Die Karten in Abb. 41 zeigen die räumliche Verteilung der modellierten Abflusswerte q_{182} in $l/s \cdot km^2$ für die drei Modelle M1, M2 und M3.

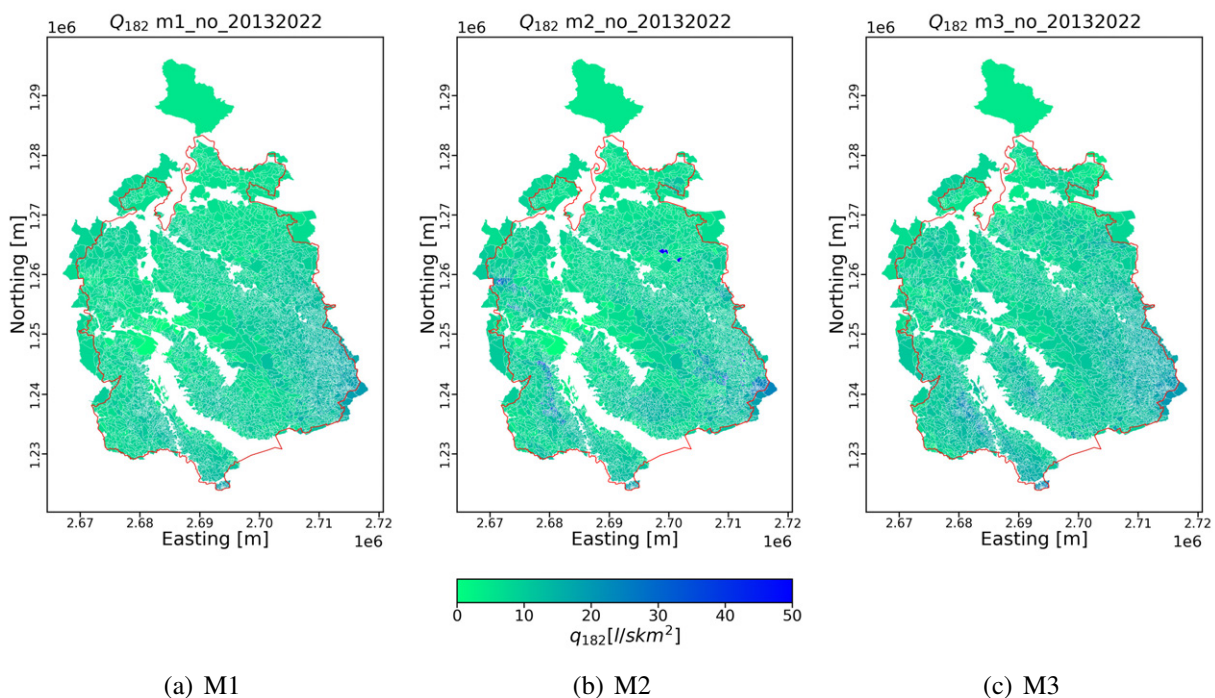


Abb. 41: Ergebnisse der Abschätzung des q_{182} der Modelle M1 bis M3 für die EZG des Kanton Zürich

Alle drei Modelle modellieren eine ähnliche räumliche Verteilung der Abflusswerte mit überwiegend niedrigen Werten in den nordwestlich gelegenen EZG mit einem zunehmenden Verlauf gegen Südosten. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind eher geringfügig, wobei M2 und M3 eine etwas stärkere Variabilität verglichen mit M1 aufweisen.

6.4.3. Ergebnisse der Q_{182} -Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich

Die Ergebnisse der abgeschätzten Q_{182} -Werte für die Einzugsgebietgliederung der Stadt Zürich sind in Abb. 42 dargestellt. Alle drei Modelle zeigen eine ähnliche Verteilung der Abflusswerte. Modell M3 weist im Vergleich zu M1 und M2 etwas höhere Abflusswerte auf, insbesondere in den nördlich gelegenen EZG. Die Auflistung und eine grafische Darstellung der Q_{182} -Werte für alle EZG der Stadt Zürich ist in Anhang E.

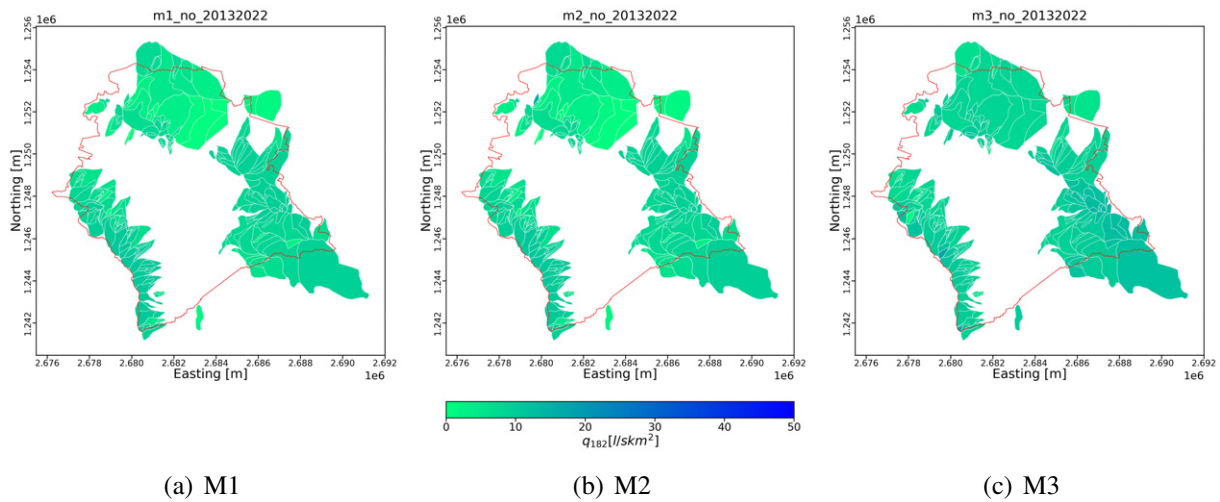


Abb. 42: Ergebnisse der Abschätzung des q_{182} der Modelle M1 bis M3 für die EZG der Stadt Zürich

6.4.4. Ausgewählte Fehlerbetrachtungen

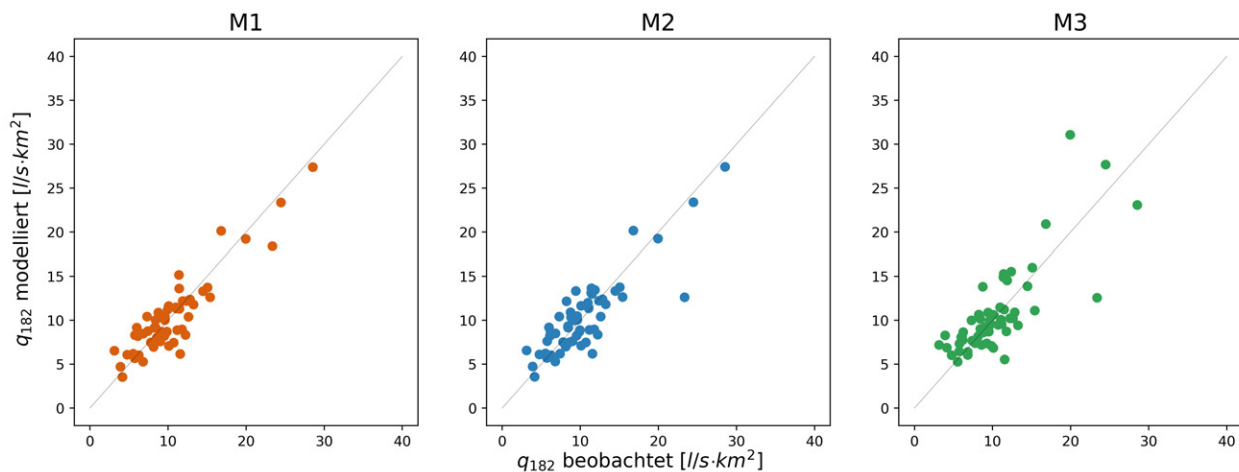


Abb. 43: Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten q_{182} -Werte

Die drei Streudiagramme in Abb. 43 vergleichen die modellierten Werte der drei Modelle M1, M2 und M3 mit den beobachteten Werten. Eine exakte Übereinstimmung der Modelle mit den Beobachtungen würde auf der Diagonalen liegen. Modell M1 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Abflusswerten. Die Punkte sind dicht um die 1:1-Linie verteilt, was auf eine hohe Modellgenauigkeit innerhalb der Beobachtungen hinweist. Von M2 zu M3 deutet die Zunahme der Streuung und die Abnahme der Übereinstimmung auf eine geringere Genauigkeit hin. Die Streuung und somit die Unsicherheit nimmt vor allem bei Modell M3 bei grösseren Abflusswerten zu.

6.5. Ergebnisse der Abschätzung des MQ und Fehlerverteilung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Parametersauswahlverfahren, zur Regression und der Regionalisierung des MQ vorgestellt.

6.5.1. Parameterwahlverfahren, Anpassung und Güte der Modelle M1-M3 für MQ

In Tabelle 17 sind die besten drei Ergebnisse zum Parameterauswahlverfahren für den mittleren Abfluss MQ dargestellt. Die vollständige Auflistung befindet sich in Anhang D. Die Parametersätze wurden wiederum mit dem mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) bewertet und die Kollinearität über den Variance Inflation Factor (VIF) jedes Parameters eingeschätzt. Parametersatz 1, der mit dem Verfahren der Backward Selection gefunden wurde, hat die beste Vorhersagegenauigkeit mit dem niedrigsten MAPE von 15.5%. Hohe VIF-Werte für einige Parameter deuten jedoch auf starke Kollinearität hin, was die Stabilität der Ergebnisse beeinträchtigen kann. Die Parametersätze 2 und 3 wurden beide mit der Forward Selection gefunden und unterscheiden sich durch den Parameter der Entwässerungsdichte (drainage_density_kmkm-2). Der MAPE beider Parametersätze ist mit 17.5% resp. 17.6% nahezu identisch und leicht erhöht im Vergleich mit dem ersten Parametersatz. Parametersatz 2 kann aufgrund der geringen Kollinearität und der leicht besseren Schätzgenauigkeit bevorzugt werden. Um die besten Parametersätze für die Modelle M1 bis M3 zu finden, wird deshalb die Forward Selection mit sieben Parameter angewendet.

	Auswahlverfahren	Anzahl	MAPE [%]	Parameter	VIF
1	backward_selected	7.0	15.5	longitude	2.02
				latitude	3.66
				mean_slope	3.98
				karst_aquifer	2.46
				mean_temp_wint	1449.76
				mean_hvp_summ	543.78
				mean_hvp_wint	262.95
2	forward_selected	7.0	17.5	mean_elevat_m	8.22
				mean_slope	8.07
				forest	3.94
				drainage_density_kmkm-2	7.32
				unterirdisch_unbestimmt_m	1.38
				mean_precip_10y	4.6
				phase	1.76
3	forward_selected	6.0	17.6	mean_elevat_m	6.8
				mean_slope	6.83
				forest	3.74
				unterirdisch_unbestimmt_m	1.26
				mean_precip_10y	4.38
				phase	1.65

Tab. 16: Ergebnisse zum Parameterwahlverfahren für MQ

Tabelle 17 vergleicht die Leistung der vier Modelle M1, M2, M3 und BAFU anhand der Zielfunktionen mittlerer Fehler (ME), mittlerer absoluter prozentualen Fehler (MAPE) und der Korrelation (COR).

Modell M1 hat die beste Gesamtleistung mit dem niedrigsten MAPE (17.6%) und der höchsten

Korrelation (0.93), was auf die genauesten Vorhersagen und die stärkste Übereinstimmung mit den beobachteten Werten hinweist. Modell M2 zeigt ebenfalls eine gute Leistung mit einem ME nahe an 0, einem MAPE von 18.7% und einer Korrelation von 0.91. Es ist etwas weniger genau als M1, kann aber immer noch als zuverlässig eingeschätzt werden. M3 hat die geringste Leistung mit dem höchsten MAPE (32.5%). Das Modell weist die grösste Unterschätzung auf. Das BAFU Modell zeigt eine deutliche Überschätzung der Abflusswerte mit einem hohen ME von $3.95 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$. Der MAPE liegt zwischen denjenigen von M2 und M3, während die Korrelation mit 0.83 am niedrigsten ist. Für die Abschätzung der unbeobachteten EZG wird M1 empfohlen.

	Modell	ME [$\text{l/s} \cdot \text{km}^2$]	MAPE [%]	COR [-]
1	M1	-0.24	17.6	0.93
2	M2	-0.04	18.7	0.91
3	M3	-0.40	32.5	0.89
4	BAFU	3.95	25.7	0.83

Tab. 17: Zielfunktionen (bester Wert in fett) für die angepassten Modelle M1 bis M3 und das Referenzmodell BAFU für MQ

6.5.2. Ergebnisse der MQ-Abschätzung für die EZG im Kanton Zürich

Die Karten in Abb. 44 zeigen die räumliche Verteilung der modellierten mittleren Abflusswerte MQ in $\text{l/s} \cdot \text{km}^2$ für drei Modelle M1 bis M3 und das Referenzmodell des BAFU.

Für alle Modelle ist ein Verlauf von niedrigen Werten im Nordwesten zu höheren Werten im Südwesten erkennbar. Die Modelle M1 und M2 zeigen sehr ähnliche räumliche Verteilungen der modellierten Abflusswerte. Lediglich im zentralen, südlichen Bereich sind EZG ersichtlich in denen sich die Werte zwischen M1 und M2 stärker unterscheiden. Modell M3 zeigt ebenfalls eine ähnliche Verteilung wie M1 und M2 mit etwas höheren Werten und grösserer Variabilität. Das BAFU Modell zeigt nahezu im gesamten Untersuchungsgebiet deutlich höhere Abflusswerte verglichen mit den Modellen M1 bis M3.

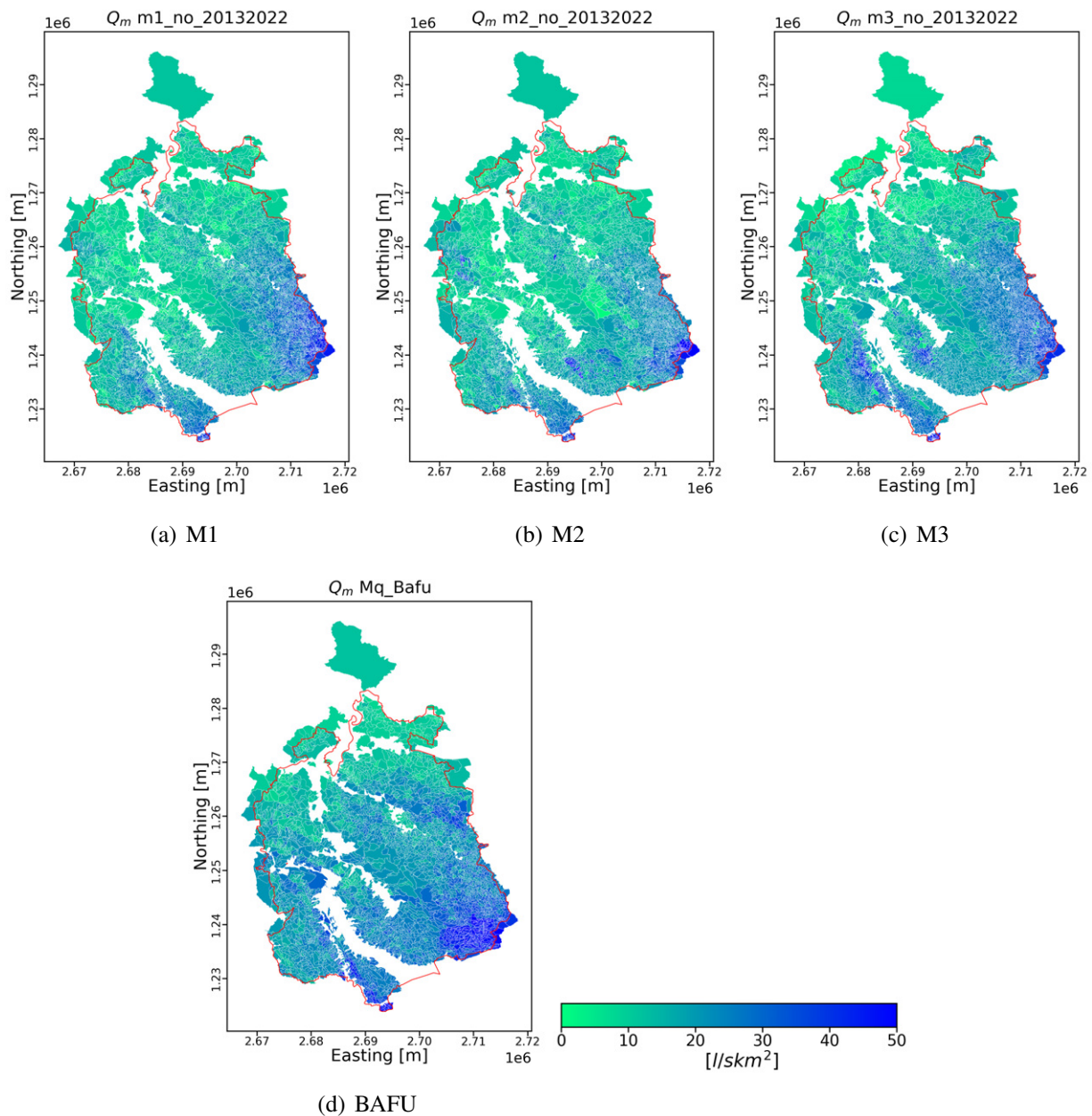


Abb. 44: Ergebnisse der Abschätzung des MQ der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und des Referenzmodells BAFU in (d) für die EZG des Kanton Zürich

6.5.3. Ergebnisse der MQ-Abschätzung für die EZG der Stadt Zürich

Abb. 45 zeigt vier Karten mit den mittleren, jährlichen Abflusswerten M_q der Modelle M1, M2, M3 und des BAFU-Modells. Während alle Modelle für die meisten EZG niedrigere Abflusswerte als das BAFU-Modell modellieren, zeigen M2 und M3 im Vergleich zu M1 tendenziell höhere Werte. Insbesondere Modell M3 weist in einigen südwestlich und östlich gelegenen EZG deutlich höhere Abflusswerte auf, die mit den Werten des BAFU-Modells vergleichbar sind. Die Auflistung und eine grafische Darstellung der MQ-Werte für alle EZG der Stadt Zürich ist in Anhang E.

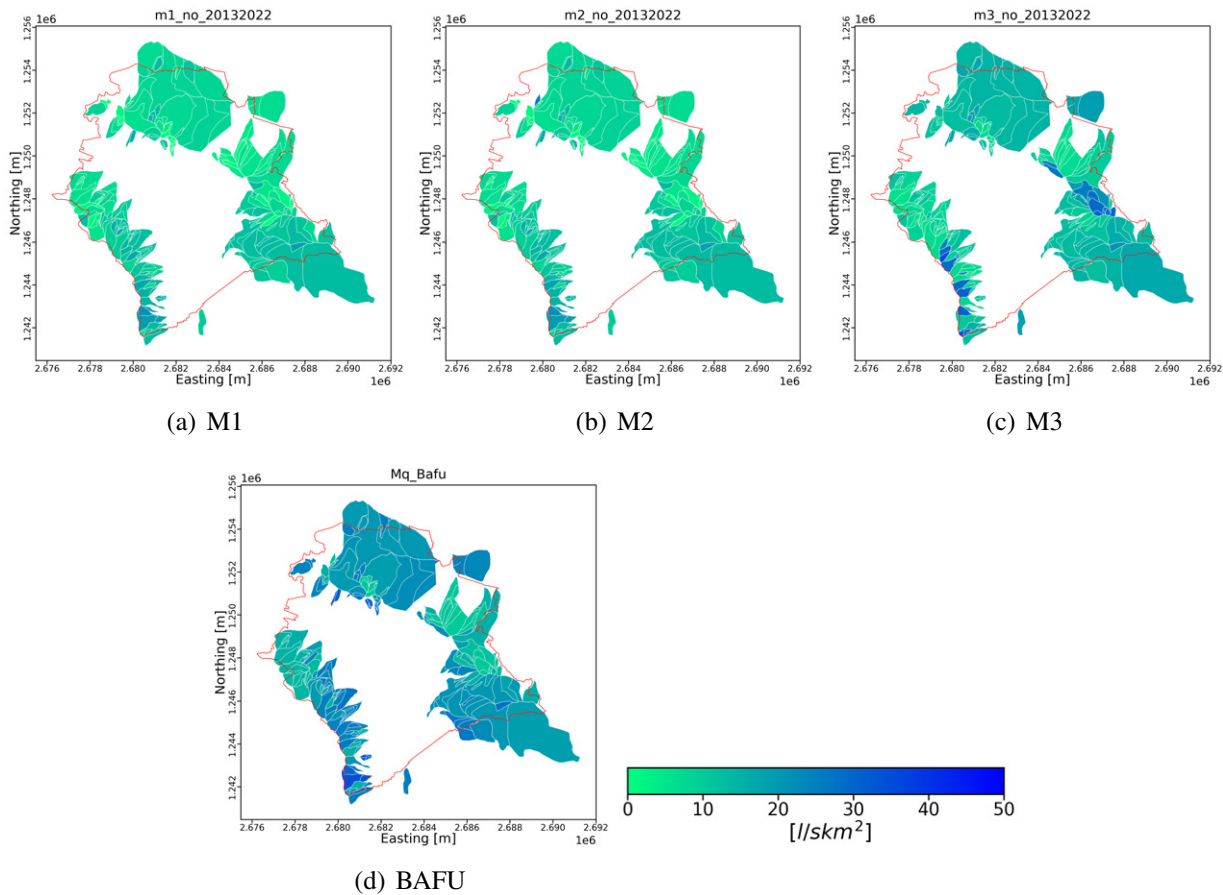


Abb. 45: Ergebnisse der Abschätzung des Mq der Modelle M1 bis M3 in (a) bis (c) und des Referenzmodells BAFU in (d) für die EZG der Stadt Zürich

6.5.4. Ausgewählte Fehlerbetrachtungen

In Abbildung 47 werden in vier Streudiagrammen, die modellierten Abflusswerte der Modelle M1, M2, M3 und BAFU mit den beobachteten Werten verglichen. Für M1 liegen die Punkte dicht um die 1:1-Linie, was auf eine gute Übereinstimmung zwischen den modellierten und beobachteten Werten hindeutet. Auch bei M2 ist eine gute Übereinstimmung entlang der 1:1-Linie zu sehen, jedoch nimmt die Streuung bei grösseren Werten zu und es besteht Tendenz zur Unterschätzung. Bei M3 nimmt die Streuung bereits bei deutlich kleineren Werten zu, es wird jedoch in ähnlichem Masse über- und unterschätzt. Beim BAFU-Modell liegen bei kleineren Abflusswerten die meisten Punkte deutlich über der 1:1-Linie, was in diesem Bereich auf eine systematische Überschätzung hindeutet.

Werden die modellierten Werte von M1 bis M3 mit den modellierten BAFU-Werten in Abb. 47 verglichen, so wird ersichtlich dass die drei Modelle M1 bis M3 für die Mehrheit der EZG deutlich geringere Werte als das BAFU Modell liefern. Die beobachteten EZG und grössere, unbeobachtete EZG sind im Allgemeinen stärker um die 1:1 Linie gebündelt. Die Streuung der Werte und die Abweichung von der 1:1 Linie nimmt mit abnehmender Fläche, vor allem bei EZG mit kleiner Fläche ($< 5 km^2$) zu. Beim Vergleich der Modelle zeigt sich, dass die Punkte in Modell M1 eher dicht beieinander liegen und eine geringere Variabilität aufweisen. Im Gegensatz dazu nimmt die

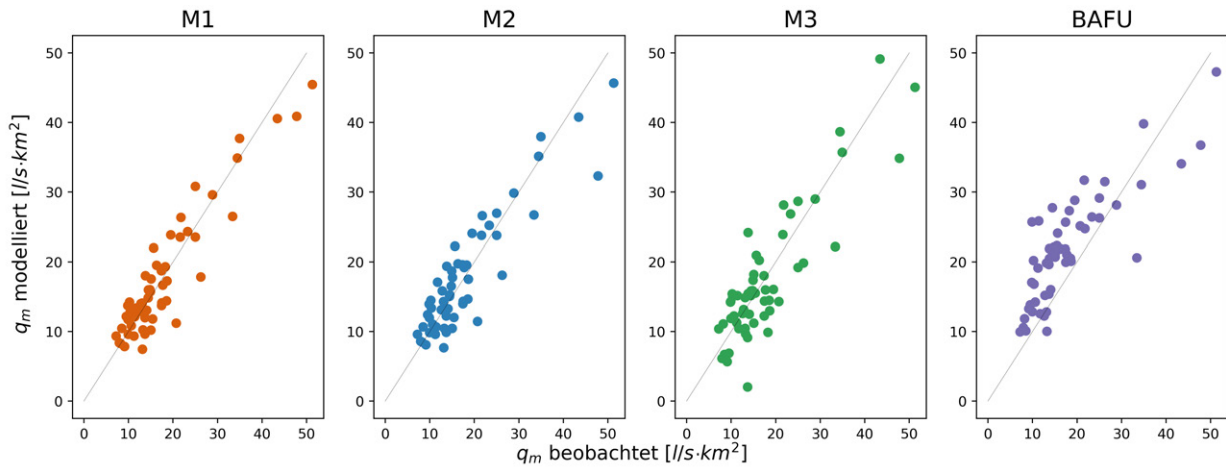


Abb. 46: Streudiagramme der modellierten vs. die beobachteten MQ-Werte

Streuung in den Modellen M2 bis M3 zu, wobei insbesondere bei Modell M3 teils sehr hohe Werte auftreten.

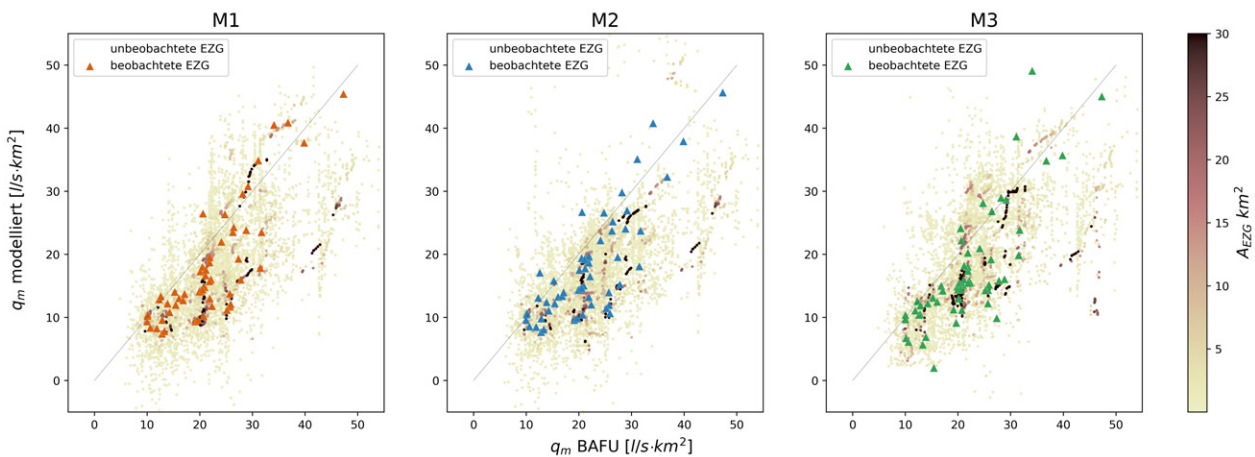


Abb. 47: Streudiagramme der modellierten MQ-Werte der Modelle M1 bis M3 vs. die modellierten BAFU-Werte

6.6. Plausibilitätskontrolle und Plausibilitätsindex

Die Plausibilitätskontrolle ist ein wichtiger Schritt nach der Modellierung, um die Zuverlässigkeit der modellierten Abflusswerte zu überprüfen. Einerseits werden die modellierten Abflusswerte auf Karten visualisiert, um sicherzustellen, dass die räumliche Verteilung keine Anomalien oder inkonsistenten Muster aufweist. Diese Karten sind in den Kapiteln 6.3 bis 6.5 dargestellt. Darüber hinaus schliesst die Methode der MLR sehr hohe und physikalisch nicht sinnvolle, negative Abflusswerte nicht aus. Es ist daher notwendig, diese Werte zu prüfen und für den operativen Betrieb gegebenenfalls zu korrigieren. Da die Abflusswerte unabhängig voneinander modelliert werden, muss auch ihre hierarchische Struktur überprüft werden. Die Bedingung $q_{347} < q_{182} < Mq$ mit ihren Teilbedingungen $q_{347} < q_{182}$ und $q_{182} < Mq$ ist unter den beobachteten Werten für alle 56 EZG

eingehalten. Beide Bedingungen sind physikalisch sinnvoll, wobei $q_{347} > q_{182}$ gemäss Definition nicht möglich ist während $q_{182} > Mq$ im Einzelfall möglich sein kann.

6.6.1. Negativwerte

In Tabelle 18 ist die Anzahl und der Prozentsatz der negativen Abflusswerte für q_{347} , q_{182} und Mq in den Modellen M1, M2 und M3 für die unbeobachtete und die beobachteten EZG dargestellt.

		Negativwerte			
		Unbeobachtete EZG		Beobachtete EZG	
		[-]	[%]	[-]	[%]
M1	q_{347}	24	0.27	0	0.00
	q_{182}	33	0.37	0	0.00
	Mq	315	3.49	0	0.00
M2	q_{347}	200	2.22	0	0.00
	q_{182}	48	0.53	0	0.00
	Mq	242	2.68	0	0.00
M3	q_{347}	1'758	20.07	3	5.36
	q_{182}	378	4.31	0	0.00
	Mq	289	3.30	0	0.00

Tab. 18: Negativwerte in den Modellen M1 bis M3 für q_{347} , q_{182} und Mq

M1 zeigt die geringste Anzahl negativer Abflusswerte und liefert bei beobachteten EZG keine negativen Werte. Modell M2 ist diesbezüglich ebenfalls zuverlässig mit etwas mehr negativen Werten bei den unbeobachteten EZG im Vergleich zu M1. Auffallend ist die vergleichsweise hohe Anzahl an Negativwerten für unbeobachtete EZG bei Modell M1 für MQ (3.49%) im Vergleich zu den anderen Abflusswerten q_{347} und q_{182} (0.27% bzw. 0.37%), ist der Anteil der negativen Werte für MQ deutlich höher (3.49%). Um die physikalische Sinnhaftigkeit der Modelle zu gewährleisten, werden negative Abflusswerte auf Null gesetzt.

6.6.2. Hierarchie der Abflusswerte

Tabelle 19 vergleicht die Einhaltung der hierarchischen Struktur der modellierten Abflusswerte mit der Bedingung $q_{347} < q_{182} < MQ$ und ihren Teilbedingungen für die unbeobachteten und beobachteten EZG. Die Werte werden in absoluten Zahlen und Prozenten angegeben, wobei zwischen WAHR (Bedingung eingehalten) und FALSCH (Bedingung nicht eingehalten) unterschieden wird.

M1 erweist sich hinsichtlich der hierarchischen Struktur $q_{347} < q_{182} < Mq$ sowohl für unbeobachtete als auch für beobachtete EZG als bestes Modell. Bei nahezu allen unbeobachteten EZG (99.3%) ist die Hierarchie $q_{347} < q_{182}$ und bei rund 85% auch $q_{182} < Mq$ sowie $q_{347} < q_{182} < Mq$ eingehalten. Bei den beobachteten EZG ist die Einhaltung der Struktur nahezu perfekt. Insgesamt bestätigt diese Analyse, dass M1 das bevorzugte Modell ist, gefolgt von M2 und M3.

		Unbeobachtete EZG				Beobachtete EZG			
		WAHR		FALSCH		WAHR		FALSCH	
		[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
M1	$q_{347} < q_{182}$	8'971	99.3	63	0.7	56	100.0	0	0.0
	$q_{182} < Mq$	7'781	86.1	1'253	13.9	55	98.2	1	1.8
	$q_{347} < q_{182} < Mq$	7'719	85.4	1'315	14.6	55	98.2	1	1.8
M2	$q_{347} < q_{182}$	8'935	98.9	99	1.1	56	100.0	0	0.0
	$q_{182} < Mq$	7'719	85.4	1'315	14.6	55	98.2	1	1.8
	$q_{347} < q_{182} < Mq$	7'621	84.4	1'413	15.6	55	98.2	1	1.8
M3	$q_{347} < q_{182}$	8'849	98.0	185	2.0	56	100.0	0	0.0
	$q_{182} < Mq$	8'072	89.4	962	10.6	51	91.1	5	8.9
	$q_{347} < q_{182} < Mq$	7'901	87.5	1'133	12.5	51	91.1	5	8.9

Tab. 19: Validierung der hierarchischen Struktur der Abflusswerte an den unbeobachteten und beobachteten EZG

6.6.3. Plausibilitätsindex

Ein einfacher und verständlicher Indikator wird für das bevorzugte Modell M1 vorgestellt um die Plausibilität und Zuverlässigkeit der Abschätzungen innerhalb des Modellraums zu bewerten. Abschätzungen, die eine höhere Anzahl von Punkten erhalten, gelten als plausibler und zuverlässiger. Der Plausibilitätsindex wird durch Abzüge von einer Basisbewertung von drei Indexpunkten ermittelt. Die Bewertung beginnt bei den maximal erreichbaren drei Punkten und wird um jeweils einen Punkt reduziert, wenn eines der folgenden Kriterien nicht erfüllt ist:

1. Kriterium: «Fehlertoleranz»

Der Mittelwert μ der absoluten Schätzfehler $|\varepsilon_i|$ ist definiert als:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|$$

wobei sich der absolute Schätzfehler $|\varepsilon_i|$ als Schätzwert \hat{y}_i multipliziert mit dem mittleren absoluten Prozentualfehler MAPE aus der Kreuzvalidierung berechnet:

$$|\varepsilon_i| = |\hat{y}_i \cdot \text{MAPE}|$$

Alle Schätzfehler, die ausserhalb des Toleranzbereichs von 2μ liegen, führen zu einem Abzug von einem Punkt:

$$\text{Reduktion des Plausibilitätsindex} = \begin{cases} -1 & \text{wenn } |\varepsilon_i| > 2 \cdot \mu \\ 0 & \text{wenn } |\varepsilon_i| \leq 2 \cdot \mu \end{cases}$$

2. Kriterium: «Hierarchie»

Der Plausibilitätsindex wird um einen Punkt reduziert, wenn die Hierarchie (siehe 6.6.2) der

modellierten Abflusswerte $q_{347} < q_{182} < Mq$ nicht eingehalten ist:

$$\text{Reduktion des Plausibilitätsindex} = \begin{cases} -1 & \text{wenn } q_{347} > q_{182} > Mq \\ 0 & \text{wenn } q_{347} < q_{182} < Mq \end{cases}$$

Der Plausibilitätsindex ermittelt sich durch die Überprüfung der beiden Hauptkriterien für jedes EZG und wird durch entsprechende Abzüge von der Basisbewertung mit 3 Indexpunkten festgelegt. Somit kann der Index maximal drei Punkte (sehr plausibel) erreichen und auf ein Minimum von einem Punkt fallen (wenig plausibel). Durch die Anwendung der Fehlertoleranz als Kriterium können Ausreisser identifiziert werden, da es sich bei deren Verteilung um eine links (d.h. bei Null) abgeschnittene [engl.: *truncated*] Verteilung mit einem schweren, rechten Rand [engl.: *heavy-tailed*] handelt (siehe Abb. 48). Mit dem Kriterium der Hierarchie wird zusätzlich die physikalische Sinnhaftigkeit berücksichtigt.

In Abb. 48 sind die Verteilungen der absolute Schätzfehler $|e_i|$ für die drei Abflusswerte q_{347} , q_{182} und Mq im Modell M1 dargestellt. Werte die das Doppelte des mittleren Fehlers μ überschreiten und somit zu einem Punkteabzug führen sind in rot dargestellt.

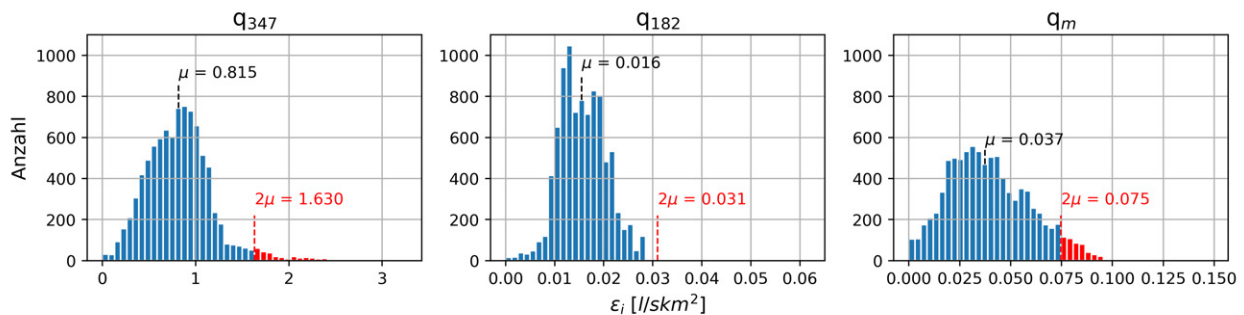


Abb. 48: Histogramme der Fehlerverteilungen in M1 mit Fehlertoleranz

Die Verteilung der vergebenen Indexpunkte ist in Abb. 49 für das Modell M1 dargestellt. Die Histogramme sind in die drei Kategorien unterteilt: 3 «sehr plausibel», 2 «plausibel» und 1 «wenig plausibel». Für die modellierten Abflusswerte q_{347} , q_{182} und Mq kann für die überwiegende Mehrheit (79.9% - 85.4%) der EZG eine hohe Plausibilität vergeben werden. Lediglich eine sehr geringe Anzahl (unter 1%) wird als wenig plausibel eingestuft.

Die drei Karten in Abb. 50, stellen die räumliche Verteilung des Plausibilitätsindex für die Abflusswerte q_{347} , q_{182} und Mq für das Modell M1 dar.

In Anlehnung zu Abb. 49 kann die überwiegende Mehrheit der EZG mit drei Indexpunkten 3 als «sehr plausibel» eingestuft werden. Gebiete mit geringerer Plausibilität liegen insbesondere in den zentralen und nördlichen Bereichen des Kantons. Im zentralen Bereich handelt es sich um urbane und sehr dicht besiedelte Gebiete wie die Städte Zürich oder Winterthur und der ebenfalls städtisch

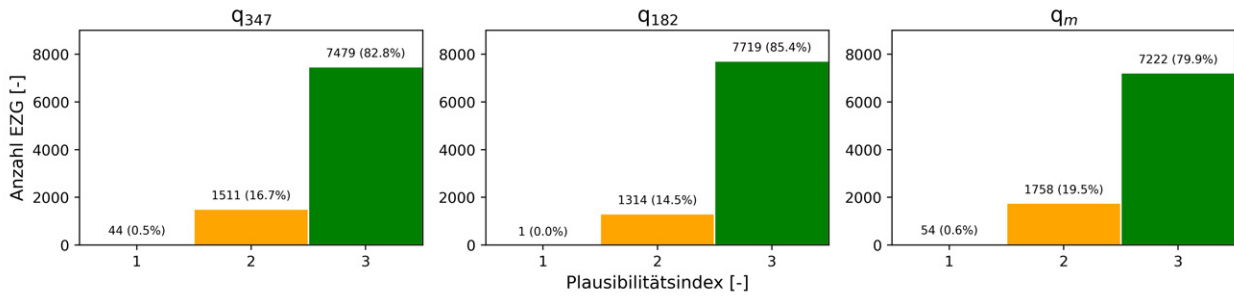


Abb. 49: Plausibilitätsindex für das Modell M1

geprägte Bezirk Uster. Die deutlich stärkere anthropogene Beeinflussung der Beschaffenheit dieser EZG, die zumeist kleiner sind als die Eichgebiete, führt zu einer Verschiebung der Parameter ins Extreme. Es ist durchaus möglich dass die Modelle, die für natürliche Einzugsgebiete entwickelt wurden, diese Komplexität nicht genügend genau erfassen.

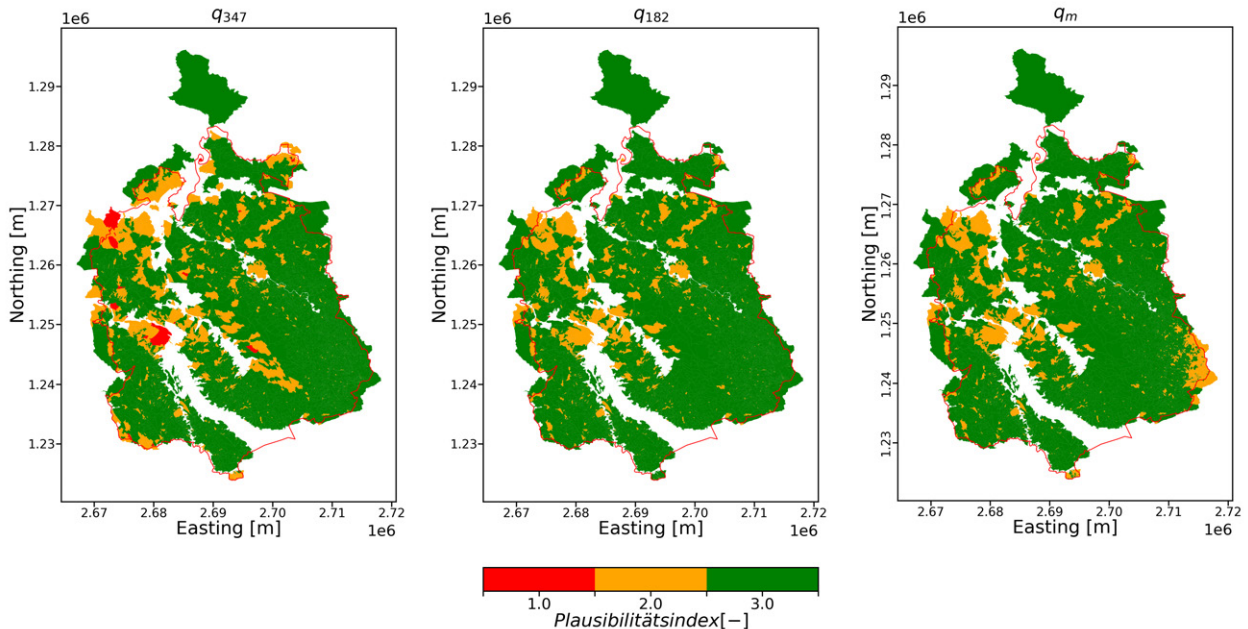


Abb. 50: Räumliche Verteilung des Plausibilitätsindex für das Modell M1

6.7. Schlussfolgerungen und Ausblicke

Die multiple lineare Regression ist die Standardmethode für die Abschätzung des Abflusswertes Q_{347} für unbeobachtete EZG. In diesen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Schätzgenauigkeit durch eine gezielte Auswahl der Parameter signifikant verbessert werden kann. Eine anschließende Hauptkomponentenanalyse (PCA) kann die Genauigkeit nicht verbessern. Bei der Auswahl der Regressoren wurde der unabhängige, zusätzliche Informationsgehalt der beschreibenden Parameter berücksichtigt und die Kollinearität minimiert.

Modell M1 erreicht einen MAPE von 31,2% und eine Korrelation von 0,73 in der Validierung der Abschätzung des Q_{347} , einen MAPE von 17,6% und eine Korrelation von 0,93 in der Validierung der Abschätzung des MQ sowie die beste Gesamtleistung über alle drei Zielfunktionen in der Validierung der Abschätzung des Q_{182} (ME von $-0,03 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$, MAPE von 17,8% und Korrelation von 0,91). Modell M1 wird deshalb für die Abschätzung der drei Abflusswerte in unbeobachteten EZG empfohlen.

Die Validierung zeigt, dass die vorgeschlagenen Modelle grundsätzlich kleinere Fehler und grössere lineare Zusammenhänge zwischen den Schätz- und Beobachtungswerten aufweisen als die Vergleichsmodelle. Gründe hierfür sind die explizite Kalibrierung der Modelle im Untersuchungsgebiet sowie die deutlich höhere räumliche Auflösung im Vergleich zu den anderen Modellen. Zudem werden in den Vergleichsmodellen häufig Einschränkungen hinsichtlich der Parameterwerte oder der minimalen Grösse der EZG gesetzt, die die Abschätzung der vorliegenden, oft sehr kleinen EZG theoretisch nicht zulassen würden.

Die Niederschlagsverhältnisse bestimmen grundsätzlich die Grösse, Dauer und Häufigkeit der Abflüsse in einem EZG. Die deutlich geringeren Fehler bei der Abschätzung der mittleren jährlichen Abflusswerte Q_{182} und MQ im Vergleich zum Q_{347} lassen sich durch die zugrunde liegenden hydrologischen Prozesse erklären. Die mittleren Abflusswerte werden stark von langfristigen Niederschlagsmustern beeinflusst. Daher enthalten die Regressionsgleichungen Grössen, die den Niederschlag direkt beeinflussen oder diesen indirekt widerspiegeln, beispielsweise die Höhenstrukturen des Geländes, die den orographischen Niederschlag indirekt abbilden. Die Modellierung der niedrigen Abflüsse Q_{347} ist komplexer. Häufig werden geologische und hydrogeologische Parameter in die Regressionsgleichungen aufgenommen, da diese die langfristige Wasserspeicherung beschreiben.

Eine Plausibilitätsüberprüfung der Ergebnisse von Modell M1 wurde durchgeführt und ergab für viele Regionen gute Werte. In urbanen Gebieten ist die Plausibilität jedoch geringer, da dort eine komplexere Hydrologie vorliegt. Der natürliche Wasserhaushalt wird in diesen Gebieten stark beeinflusst (z.B. undurchlässige Oberflächen) und Infrastrukturen (z.B. Kanalisationsnetze) verändern die natürliche Abflussbildung.

Die Abflusswerte für Q_{347} und MQ liegen oft niedriger als die Werte der Vergleichsmodelle. Durch die Einbeziehung aktueller Daten (2013-2022) im Vergleich zu den älteren Bezugsperioden (1984-1993 für Q_{347} und 1981-2000 für MQ) der Vergleichsstudien, kann die vorliegende Modellierung unter Einbezug der Erkenntnisse aus Kap. 4 als Anpassung an die aktuellen klimatischen Trends betrachtet werden. Für die Planung und den Betrieb von Infrastrukturen bedeuten insbesondere die niedrigeren Q_{347} -Werte eine restriktivere Festlegung der Grenzwerte, die zu zusätzlichem Schutz zugunsten der Gewässerökologie führen.

A. Details der verwendeten Messstationen

In den folgenden drei Anhängen werden nachfolgende Daten aufgelistet:

- **Für Q-Stationen gilt:**

Spalte «FHNW_Nr»:	laufende Nummerierung
Spalte «Quelle»:	Datenquelle der Zeitreihe
Spalte «x»:	x – Koordinate der Station (EPSG:2056, LV95)
Spalte «y»:	y – Koordinate der Station (EPSG:2056, LV95)
Spalte «Quellen_ID»:	Originale Kennzeichnung der Station
Spalte «Gewässer, Ort»:	Gewässername und Ortschaft der Station
Spalte «Ausschlussgrund»:	«-» bedeutet Station wird verwendet, sonst Grund für Ausschluss

- **Für P und T-Stationen gilt:**

Spalte «FHNW_Nr»:	laufende Nummerierung
Spalte «Quelle»:	Datenquelle der Zeitreihe
Spalte «x»:	x – Koordinate der Station (EPSG:21781, LV03)
Spalte «y»:	y – Koordinate der Station (EPSG:21781, LV03)
Spalte «z»:	z – Koordinate der Station (EPSG:21781, LV03)
Spalte «Quellen_ID»:	Originale Kennzeichnung der Station
Spalte «Name»:	Name (meistens Ortschaft) der Station
Spalte «Ausschluss»:	«-» Station wird verwendet, «x» Station wird ausgeschlossen

A.1. Q - Stationen

FHNW Nr	Quelle	x	y	Quellen ID	Gewässer, Ort	Ausschlussgrund
001	Kt. ZH	2690499	1275165	ZH511	Mederbach, Marthalen	-
002	Kt. ZH	2714211	1242375	ZH513	Töss, Beicher	-
003	Kt. ZH	2703658	1255742	ZH515	Töss, Hornsäge	-
004	Kt. ZH	2696710	1252444	ZH517	Kempt, Illnau	-
005	Kt. ZH	2694274	1262114	ZH518	Töss, Wülflingen	reguliert
006	Kt. ZH	2707744	1248015	ZH519	Töss, Altlandenberg	-
007	Kt. ZH	2703776	1255606	ZH520	Töss, Rämismühle	-
008	Kt. ZH	2702400	1261737	ZH521	Eulach, Räterschlen	-
009	Kt. ZH	2697551	1261246	ZH522	Eulach, Winterthur	-
010	Kt. ZH	2694127	1262816	ZH523	Eulach, Wülflingen	-
011	Kt. ZH	2702147	1242890	ZH525	Aa, Stegen-Wetzikon	reguliert
012	Kt. ZH	2702393	1241926	ZH526	Wildbach, Wetzikon	-
013	Kt. ZH	2696925	1240805	ZH527	Aabach, Mönchaltorf	-
014	Kt. ZH	2691879	1247629	ZH531	Glatt, Wuhrbrücke	reguliert
015	Kt. ZH	2693069	1244106	ZH532	Dorfbach, Maur	-
016	Kt. ZH	2689403	1250282	ZH533	Glatt, Dübendorf	reguliert
017	Kt. ZH	2709696	1236577	ZH540	Jona, Pilgersteg	reguliert
018	Kt. ZH	2675656	1245441	ZH541	Reppisch, Birmensdorf	-
019	Kt. ZH	2677144	1232194	ZH543	Haselbach, Mettmenstetten	-
020	Kt. ZH	2674443	1231910	ZH544	Haselbach, Maschwanden	-
021	Kt. ZH	2690004	1255660	ZH545	Altbach, Bassersdorf	-
022	Kt. ZH	2693645	1225576	ZH547	Sihl, Blattweg	reguliert
023	Kt. ZH	2669908	1255287	ZH548	Furtbach, Würenlos	-
024	Kt. ZH	2695102	1244724	ZH554	Aabach, Niederuster	reguliert
025	Kt. ZH	2680121	1237080	ZH561	Reppisch - Aeugst am Albis	reguliert
026	Kt. ZH	2707639	1254672	ZH563	Chatzenbach, Turbenthal	Datenqualität / -quantität
027	Kt. ZH	2703726	1243464	ZH568	Chämtnerbach, Wetzikon	-
028	Kt. ZH	2686002	1264987	ZH570	Töss, Freienstein	reguliert
029	Kt. ZH	2672445	1251580	ZH572	Reppisch, Dietikon	-
030	Kt. ZH	2675113	1238205	ZH574	Jonen, Zwillikon	reguliert
031	Kt. ZH	2691678	1264223	ZH575	Näfbach, Neftenbach	-
032	Kt. ZH	2700400	1278745	ZH576	Geisslibach, Furtmüli	Datenqualität / -quantität
033	Kt. ZH	2703192	1268106	ZH579	Schwarzenbach, Rickenbach	Datenqualität / -quantität
034	Kt. ZH	2698235	1249764	ZH580	Kempt, Fehraltorf	-
035	Kt. ZH	2695434	1258744	ZH581	Kempt, Winterthur	-
036	Kt. ZH	2707050	1234060	ZH582	Jona, Rüti	reguliert
037	Kt. ZH	2700546	1276224	ZH583	Mülilbach, Rietmüli	-
038	Kt. ZH	2669934	1262513	ZH585	Surb, Niederweningen	-
039	Kt. ZH	2690871	1236036	ZH587	Dorfbach, Meilen	Datenqualität / -quantität
040	Kt. ZH	2689202	1234395	ZH589	Aabach, Käpfnach	reguliert
041	Kt. TG	2738553	1274432	F1050	Geusenbach, Guettingen	-]
042	Kt. TG	2732835	1277970	F1060	Stichbach, Bottighofen	-
043	Kt. TG	2715240	1280126	F1180	Feldbach, Steckborn	reguliert
044	Kt. TG	2728812	1269230	F2100	Giessen, Buerglen	-
045	Kt. TG	2721735	1273245	F2200	Kemmenbach, Gruebmuehle	-
046	Kt. TG	2715460	1252735	F4030	Murg, Fischingen	-
047	Kt. TG	2719856	1265494	F5040	Lauche, Affeltrangen	-
048	Kt. TG	2712718	1264289	F5100	Thunbach, Matzingen	-
049	Kt. TG	2712677	1264228	F5120	Lauche, Matzingen	-
050	Kt. TG	2708129	1273499	F2380	Seebach, Huettwilten	-
051	Kt. TG	2701086	1271768	F2900	Thur, Neunforn	A > 500 km2
052	Kt. TG	2709784	1261838	F6100	Luetzelmurg, Aadorf	-

Tab. 20: Details der verwendeten Q-Stationen, Teil 1

FHNW Nr	Quelle	x	y	Quellen ID	Gewässer, Ort	Ausschlussgrund
053	Kt. SH	2701585	1285828	0010	Biber, Buch	Ausland
054	Kt. SH	2694183	1290038	0015	Biber, Thayngen	Ausland
055	Kt. SH	2692360	1286825	0020	Fulach, Morgerenweiher	A > 500 km2
056	Kt. SH	2689375	1284150	0030	Durach, Schaffhausen	Datenqualität / -quantität
057	Kt. SH	2688112	1291780	0032	Durach, Merishausen	Ausland
058	Kt. SH	2681092	1282935	0050	Wildebach, Neunkirch	Datenqualität / -quantität
059	Kt. SH	2674833	1279692	0061	Schiltebach, Trasadingen neu	Datenqualität / -quantität
060	Kt. SH	2676369	1282576	0065	Halbach, Hallau	-
061	Kt. SH	2677155	1288957	0070	Schlaatemberbach, Talmuehle	Ausland
062	Kt. SH	2677784	1288879	0075	Zwaerenbach, Schleithem	-
063	Kt. SG	2750756	1262614	HO0701	Steinach, Mattenhof	-
064	Kt. SG	2721186	1229733	HO4601	Steinenbach, Kaltbrunn	-
065	Kt. SG	2715297.52	1231585.72	HO5101	Aabach, Schmerikon	Datenqualität / -quantität
066	Kt. SG	2708723	1231762	HO5301	Wagnerbach, Rapperswil-Jona	-
067	Kt. SG	2705778.856	1232474.769	HO5302	Stadtbach, Jona	Datenqualität / -quantität
068	Kt. SG	2706980.836	1233024.593	HO5304	Aspkanal, Jona	Datenqualität / -quantität
069	Kt. SG	2712695	1232575	HO5401	Wagnerbach, Eschenbach	Datenqualität / -quantität
070	Kt. SG	2712780	1232560	HO5402	Twirrenbach, Eschenbach	Datenqualität / -quantität
071	Kt. SG	2709320	1233820	HO5403	Lattenbach, Eschenbach	Datenqualität / -quantität
072	Kt. SG	2712988	1232552	HO5404	Döltschibach, Eschenbach	Datenqualität / -quantität
073	Kt. SG	2723907	1252283	HO7102	Rindalbach, Luetisburg	-
074	Kt. SG	2727230	1247374	HO7401	Aachbach, Mogelsberg	Datenqualität / -quantität
075	Kt. SG	2726977	1258183	HO8402	Brübach, Oberbüren	-
076	Kt. SG	2732392	1259249	HO8501	Thur, Niederbüren	A > 500 km2
077	Kt. SG	2733496	1259643	HO8502	Sornbach, Niederbüren	-
078	Kt. SG	2735780	1252528	HO8716	Dorfbach Gossau, Gossau	-
079	Kt. SG	2718867	1225942	SG4503	Rechter Hintergraben, Benken	Datenqualität / -quantität
080	Kt. SG	2728887	1257068	SG7801	Uze, Uzwil	Datenqualität / -quantität
081	Kt. SG	2729244	1256475	SG8401	Glatt, Oberbüren	reguliert
082	Kt. AG	2671108	1234842	21299042 / FG_0351	Merenschwand, Wissenbach	-
083	Kt. AG	2667964	1236710	21343042 / FG_0352	Muri, Katzbach	-
084	Kt. AG	2672950	1268189	21424042 / FG_0370	Fisibach, Fisibach	-
085	Kt. AG	2665993	1239102	23155042 / FG_0353	Boswil, Wissenbach	-
086	Kt. AG	2672455	1227153	24851042 / FG_0364	Sins, Sinserbach	-
087	Kt. AG	2668332	1237511	24894042 / FG_0367	Muri, Bünz	-
088	Kt. AG	2667010	1248723	24947042 / FG_0368	Künten, Küntenerbach	-
089	Kt. AG	2669458	1267932	25437042 / FG_0376	Wislikofen, Tägerbach	-
090	Kt. AG	2667078	1263737	25516042 / FG_0380	Lengnau, Surb	-
091	Kt. AG	2665106	1242991	47761042 / FG_0381	Waltenschwil, Bünz	Datenqualität / -quantität
092	BAFU	2656959	1259353	2016	Aare, Brugg	A > 500 km2
093	BAFU	2662835	1252577	2018	Reuss, Mellingen	A > 500 km2
094	BAFU	2693500	1272506	2044	Thur, Andelfingen	A > 500 km2
095	BAFU	2682058	1249430	2099	Limmat, Zürich	A > 500 km2
096	BAFU	2672519	1230703	2110	Reuss, Mühlau	A > 500 km2
097	BAFU	2674714	1229851	2125	Lorze, Frauenthal	reguliert
098	BAFU	2714098	1261728	2126	Murg, Wängi	reguliert
099	BAFU	2691490	1263809	2132	Töss, Neftenbach	reguliert
100	BAFU	2667045	1269233	2143	Rhein, Rekingen	A > 500 km2
101	BAFU	2682137	1246891	2176	Sihl, Zürich	reguliert
102	BAFU	2659967	1263103	2205	Aare, Untersiggenthal	A > 500 km2
103	BAFU	2665650	1258684	2243	Limmat, Baden	A > 500 km2
104	BAFU	2689140	1281987	2288	Rhein, Neuhausen	A > 500 km2
105	BAFU	2723683	1252722	2303	Thur, Jonschwil	reguliert
106	BAFU	2753134	1261531	2308	Goldach, Goldach	reguliert
107	BAFU	2727103	1247295	2374	Necker, Mogelsberg	-
108	BAFU	2709540	1269680	2386	Murg, Frauenfeld	reguliert
109	BAFU	2718840	1248440	2414	Rietholzbach, Mosnang	-
110	BAFU	2678046	1269716	2415	Glatt, Rheinsfelden	reguliert
111	BAFU	2680610	1226064	2477	Lorze, Zug, Letzi	reguliert
112	BAFU	2697228	1223278	2604	Biber, Biberbrugg	-
113	BAFU	2698640	1223035	2609	Alp, Einsiedeln	-

Tab. 21: Details der verwendeten Q-Stationen, Teil 2

A.2. P - Stationen

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
001	MeteoSchweiz	692617	273392	360	AFI	Andelfingen	-
002	MeteoSchweiz	682425	213475	475	AGMART	Arth	x
003	MeteoSchweiz	682178	227520	441	AGMBAA	Baar	x
004	MeteoSchweiz	748894	262290	431	AGMBRG	Berg	x
005	MeteoSchweiz	662250	256950	470	AGMBIR	Birmenstorf	x
006	MeteoSchweiz	657815	237345	480	AGBRW	Birrwil	x
007	MeteoSchweiz	669888	216871	450	AGMBUC	Buchrain	-
008	MeteoSchweiz	677365	226138	423	AGMCHA	Cham	x
009	MeteoSchweiz	732646	275952	505	AGMDET	Dettighofen	-
010	MeteoSchweiz	664502	265629	440	AGMEND	Endingen	x
011	MeteoSchweiz	660756	239101	535	AGFAW	Fahrwangen	x
012	MeteoSchweiz	731972	253482	621	AGMFLW	Flawil	-
013	MeteoSchweiz	753536	234450	456	AGMFRU	Frümsen	x
014	MeteoSchweiz	663346	229744	541	AGMGEO	Gelfingen	x
015	MeteoSchweiz	751847	227970	469	AGMGRA	Grabs	-
016	MeteoSchweiz	738637	273941	437	AGMGTT	Güttingen	-
017	MeteoSchweiz	676714	283468	425	AGMHAL	Hallau	-
018	MeteoSchweiz	743454	262292	561	AGMHAG	Hägenschwil	x
019	MeteoSchweiz	741469	250967	783	AGMHHER	Herisau	x
020	MeteoSchweiz	666800	226300	610	AGMHOH	Hohenrain	-
021	MeteoSchweiz	674916	225296	451	AGMHUN	Hünenberg	x
022	MeteoSchweiz	706417	230805	408	AGMJON	Jona	-
023	MeteoSchweiz	667081	249798	447	AGMKUN	Künten	x
024	MeteoSchweiz	658712	269225	397	AGMLEG	Leuggern	x
025	MeteoSchweiz	705321	265726	535	AGMLIE	Liebensberg	-
026	MeteoSchweiz	693788	256110	551	AGMLIN	Lindau	x
027	MeteoSchweiz	707844	278214	414	ESZ	Eschenz	-
028	MeteoSchweiz	727955	220421	720	GLFIL	Filzbach	-
029	MeteoSchweiz	733136	252978	571	FLW	Flawil	-
030	MeteoSchweiz	750321	283450	459	DLFRH	Friedrichshafen/Unterraderach	-
031	MeteoSchweiz	723586	211665	500	GLGLA	Glarus	-
032	MeteoSchweiz	685022	211614	545	KAGOD	Goldau/Tierpark	x
033	MeteoSchweiz	738421	273962	440	GUT	Güttingen	-
034	MeteoSchweiz	677456	283471	419	HLL	Hallau	-
035	MeteoSchweiz	703874	240717	539	HIW	Hinwil	-
036	MeteoSchweiz	713516	247756	1132	HOE	Hörnli	-
037	MeteoSchweiz	712079	218326	903	INN	Innerthal	-
038	MeteoSchweiz	706760	231290	410	JON	Jona	-
039	MeteoSchweiz	673334	269333	361	KAI	Kaiserstuhl,AG	-
040	MeteoSchweiz	731514	282221	443	DLKON	Konstanz	-
041	MeteoSchweiz	686703	240572	413	KUE	Küsnacht,ZH	-
042	MeteoSchweiz	707637	226334	468	LAC	Lachen/Galgenen	-
043	MeteoSchweiz	682763	238014	535	LGA	LangnauamAlbis	-
044	MeteoSchweiz	656373	272121	341	LEI	Leibstadt	x
045	MeteoSchweiz	758768	213538	1160	FLMAI	Maienfeld/Guscha	x
046	MeteoSchweiz	723561	216146	440	GLMOL	Mollis	-
047	MeteoSchweiz	725672	215278	1209	GLMUL	Mullern	-
048	MeteoSchweiz	722361	212895	498	GLNET	Netstal	-
049	MeteoSchweiz	720000	220594	983	GLNIT	Niederurnen/Morgenholz	-
050	MeteoSchweiz	719099	279047	718	HAI	Salen-Reutenen	-
051	MeteoSchweiz	692480	213520	1217	KASMR	Sattel/Mostelrieter	x
052	MeteoSchweiz	703677	292385	445	DLSIN	Singen	x
053	MeteoSchweiz	665026	249877	355	AGSTE	Stetten	-
054	MeteoSchweiz	759702	221566	1065	FLTRB	Triesenberg	x
055	MeteoSchweiz	662517	259908	348	AGTGI	Turgi	x
056	MeteoSchweiz	659899	260036	332	AGWDS	Windisch	x
057	MeteoSchweiz	661500	246800	408	AGWOH	Wohlen	x
058	MeteoSchweiz	670681	281244	398	DLWOF	Wutöschingen-Oftringen	-
059	MeteoSchweiz	682710	259338	426	KLO	Zürich/Kloten	-

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 22: Details der verwendeten P-Stationen, Teil 1

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
060	MeteoSchweiz	759910	250202	430	ALS	Altstätten,SG	x
061	MeteoSchweiz	741796	268304	420	AMW	Amriswil	-
062	MeteoSchweiz	748012	245040	750	APP	Appenzell	-
063	MeteoSchweiz	715387	227540	408	DOB	Benken/Doggen	-
064	MeteoSchweiz	659812	267696	325	BEZ	Beznau	x
065	MeteoSchweiz	720188	223629	424	GLBIL	Bilten	-
066	MeteoSchweiz	737713	263612	507	BIZ	Bischofszell/Sitterdorf	-
067	MeteoSchweiz	682029	263775	403	BUE	Bülach	-
068	MeteoSchweiz	677758	226878	442	CHZ	Cham	-
069	MeteoSchweiz	747744	296331	708	DLDEG	Deggenhausertal	x
070	MeteoSchweiz	672890	251865	384	DIT	Dietikon	-
071	MeteoSchweiz	726347	237176	623	EBK	Ebnat-Kappel	-
072	MeteoSchweiz	753060	256197	770	EGR	Eggersriet	x
073	MeteoSchweiz	699982	221068	910	EIN	Einsiedeln	-
074	MeteoSchweiz	710517	259824	539	TAE	Aadorf/Tänikon	-
075	MeteoSchweiz	700251	243788	496	ZHAAT	Aathal	-
076	MeteoSchweiz	710415	263734	500	ZHAAD	Aawangen/Lützelburgbrücke	-
077	MeteoSchweiz	660531	235073	487	ZELUAE	Aesch	x
078	MeteoSchweiz	679053	235748	705	MMAEU	AeugstamAlbis	-
079	MeteoSchweiz	714225	249135	945	TGALL	Allenwinden	-
080	MeteoSchweiz	696848	211653	1168	WSLALB	AlpthalBestand	x
081	MeteoSchweiz	729500	225840	1610	SLFAM2	Amden/Bärenfall	x
082	MeteoSchweiz	741040	266790	485	TGAMR	Amriswil	-
083	MeteoSchweiz	721758	281302	470	TGARE	Arenenberg	-
084	MeteoSchweiz	689669	231900	557	ZHAU	Arn/Abachweiherbrücke	-
085	MeteoSchweiz	704964	265183	544	ZHATT	Attikon/Oberweiher	-
086	MeteoSchweiz	691696	253181	488	ZHBAL	Baltenswil/Süd	x
087	MeteoSchweiz	707750	248010	621	ZHBAM	Bauma	-
088	MeteoSchweiz	670776	250208	538	MMBDK	Bergdietikon	-
089	MeteoSchweiz	665175	213685	447	ZELUBD	Bermudadreeck	-
090	MeteoSchweiz	655842	226777	797	NABBRM	Beromünster	x
091	MeteoSchweiz	675660	245430	466	ZHBID	Birmensdorf	-
092	MeteoSchweiz	723396	264338	630	TGBOH	Braunau/Oberhof	-
093	MeteoSchweiz	705306	235184	493	ZHRU1	Bubikon/Barenberg	-
094	MeteoSchweiz	669187	217068	431	ZELUBR	Buchrain	-
095	MeteoSchweiz	682334	264658	438	ZHBUL	Bülach/Nord	x
096	MeteoSchweiz	698975	281905	421	TGDIE	Diessenhofen	-
097	MeteoSchweiz	674145	250391	394	ZHDIE	Dietikon/Limmatbrücke	x
098	MeteoSchweiz	688690	250880	432	NABDUE	Dübendorf	-
099	MeteoSchweiz	714972	254165	590	TGDUS	Dussnang	-
100	MeteoSchweiz	753070	256199	774	SGEGR	Eggersriet	x
101	MeteoSchweiz	746450	266570	415	TGEGN	Egnach	-
102	MeteoSchweiz	667846	262266	428	OED	Ehrendingen	-
103	MeteoSchweiz	666800	215725	426	LUEMM	Emmen	-
104	MeteoSchweiz	723562	280980	415	TGERM	Ermatingen	-
105	MeteoSchweiz	666845	221568	498	ZELUEB	Eschenbach	-
106	MeteoSchweiz	695671	239376	500	ZHESS	Esslingen/Tüfentalbrücke	-
107	MeteoSchweiz	689406	281339	464	ZHUHW	Flurlingen/RastplatzBuchhalde	x
108	MeteoSchweiz	691949	242251	680	ZHFOR	Forch	-
109	MeteoSchweiz	709512	270190	391	TGFRA	Frauenfeld	-
110	MeteoSchweiz	672718	252749	394	ZHGER	Geroldswil/Limmatbrücke	-
111	MeteoSchweiz	727233	220724	428	ZHWEE	Gäsi	x
112	MeteoSchweiz	711544	240635	762	ZHGIB	Gibswil	-
113	MeteoSchweiz	672600	220341	405	ZELUGI	Gisikon	-
114	MeteoSchweiz	678499	269050	375	ZHGLF	Glattfelden/Glattbrücke	-
115	MeteoSchweiz	700695	240509	465	ZHGOS	Gossau,ZH	-
116	MeteoSchweiz	699405	238437	461	ZHGRU	Grüningen/TägernauerHolz	-
117	MeteoSchweiz	665229	232749	823	ZELUHB	Hämikon/Berg	-
118	MeteoSchweiz	693979	267766	438	ZHHEN	Henggart	-
119	MeteoSchweiz	659609	228186	774	ZELUHE	Herlisberg	x

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 23: Details der verwendeten P-Stationen, Teil 2

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
120	MeteoSchweiz	703516	238108	535	ZHHER	Herschmettlen/Sennwald	x
121	MeteoSchweiz	659434	223061	711	ZELUHR	Hildisrieden	x
122	MeteoSchweiz	705519	239728	552	ZHHIW	Hinwil	x
123	MeteoSchweiz	663850	225520	471	LUHOC	Hochdorf	-
124	MeteoSchweiz	707240	258315	737	ZHHOF	Hofstetten/Schümburg	-
125	MeteoSchweiz	685934	235582	587	ZHHRG	Horgen/HorgenerHöhe	-
126	MeteoSchweiz	733082	274158	565	TGILL	Illighausen	-
127	MeteoSchweiz	705227	278636	456	TGKAL	Kaltenbach	-
128	MeteoSchweiz	695579	256795	460	ZHKPT	Kempthal/Hammerrühlebrücke	-
129	MeteoSchweiz	694669	255423	523	ZHEFF	Kempthal/RampeIllnau	-
130	MeteoSchweiz	719455	252803	768	MMKSB	Kirchberg/Schallenberg	-
131	MeteoSchweiz	694133	272556	392	ZHAFI	Kleinandelfingen/ThurbrückeThurbrücke	x
132	MeteoSchweiz	731538	278849	400	TGKRE	Kreuzlingen	-
133	MeteoSchweiz	707733	227115	417	ZHLAC	Lachen	-
134	MeteoSchweiz	669780	259020	688	NABLAE	Lägeren	-
135	MeteoSchweiz	712467	275918	575	TGLAN	Lanzenneunforn	-
136	MeteoSchweiz	669777	259027	689	WSLLAE	LägernTurm	-
137	MeteoSchweiz	661458	211526	458	ZELULB	Littauerboden	x
138	MeteoSchweiz	692910	289775	585	LOH	Lohn,SH	-
139	MeteoSchweiz	717573	264875	469	TGLOM	Lommis	-
140	MeteoSchweiz	659672	255089	393	MMBIR	Lupfig/FlugplatzBirrfield	x
141	MeteoSchweiz	691307	275566	411	MMMAT	Marthalen	-
142	MeteoSchweiz	674737	217873	627	ZELUMK	Meierskappel	-
143	MeteoSchweiz	749713	214107	482	MMMEL	Mels/Heiligkreuz	-
144	MeteoSchweiz	677144	232194	451	ZHMEM	Mettmenstetten	-
145	MeteoSchweiz	696925	240800	440	ZHMON	Mönchaltorf	-
147	MeteoSchweiz	667276	235323	577	MUR	Muri,AG	-
148	MeteoSchweiz	722943	215943	445	MMNAF	Näfels	-
149	MeteoSchweiz	709750	255325	608	ZHNEU	Neubrunn	-
150	MeteoSchweiz	656583	218604	513	ZELUNK	Neuenkirch	x
151	MeteoSchweiz	682301	282059	561	WSLNEB	NeunkirchBestand	x
152	MeteoSchweiz	681661	282699	463	WSLNEF	NeunkirchFreiland	-
153	MeteoSchweiz	678170	260580	410	ZHNIE	Niederglatt	-
154	MeteoSchweiz	726838	261520	733	TGNOL	Nollen	-
155	MeteoSchweiz	704218	275708	480	TGNUS	Nussbaumen	-
156	MeteoSchweiz	691180	256560	540	ZHNUR	Nürensdorf	-
157	MeteoSchweiz	700922	265371	486	ZHOWI	Oberwinterthur	x
158	MeteoSchweiz	692803	276057	417	ZHOER	Oerlingen	-
159	MeteoSchweiz	684614	254698	424	OPF	Opfikon	-
160	MeteoSchweiz	685533	253182	433	ZHOPF	Opfikon/ZürichNord	-
161	MeteoSchweiz	659515	250058	474	WSLOTB	OthmarsingenBestand	x
162	MeteoSchweiz	659217	250228	461	WSLOTF	OthmarsingenFreiland	x
163	MeteoSchweiz	727270	271500	665	TGOTT	Ottenberg	-
164	MeteoSchweiz	702121	228243	467	ZHPFA	Pfäffikon,SZ/Etzelstrasse	-
165	MeteoSchweiz	699400	248164	537	PFA	Pfäffikon,ZH	-
166	MeteoSchweiz	684040	272684	432	MMRAF	Rafz	-
167	MeteoSchweiz	706761	231289	412	SGJON	Rapperswil-Jona	-
168	MeteoSchweiz	702390	261740	470	ZHRAT	Rätterschen	-
169	MeteoSchweiz	716634	227047	412	ZHREI	Reichenburg	-
170	MeteoSchweiz	710610	221850	650	REM	Rempen	-
171	MeteoSchweiz	668541	216929	426	ZELURB	Reussbrücke	-
172	MeteoSchweiz	695632	228173	540	ZHWOL	Richterswil/Mühlebachobelbrücke	-
173	MeteoSchweiz	721669	236300	797	MMRIC	Ricken	-
174	MeteoSchweiz	722080	256250	545	TGRIC	Rickenbach	-
175	MeteoSchweiz	677835	213440	1031	NABRIG	Rigi/Seebodenalp	-
176	MeteoSchweiz	672060	218910	426	LUROO	Root	-
177	MeteoSchweiz	684238	214223	1129	ROG	Rosberg	-
178	MeteoSchweiz	662226	215127	512	ZELURK	RotbachKantonsstrasse	x
179	MeteoSchweiz	662434	214974	511	ZELURN	RotbachNationalstrasse	x

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 24: Details der verwendeten P-Stationen, Teil 3

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
180	MeteoSchweiz	662314	217586	536	ZELURO	Rothenburg	x
181	MeteoSchweiz	664082	214922	450	ZELURS	Rüeggisingerbrücke	-
182	MeteoSchweiz	709424	236524	544	ZHWD1	Rüti/Grundtal	x
183	MeteoSchweiz	755558	233374	436	SAX	Salez/Saxerriet	x
184	MeteoSchweiz	690999	215145	790	SAG	Sattel,SZ	-
185	MeteoSchweiz	744187	234920	2501	SAE	Säntis	-
186	MeteoSchweiz	752932	233330	475	MMSAX	Sax	x
187	MeteoSchweiz	755510	228260	444	SUA	Schaan	x
188	MeteoSchweiz	688702	282803	438	SHA	Schaffhausen	-
189	MeteoSchweiz	723438	225134	709	WSLSCB	SchänisBestand	-
190	MeteoSchweiz	722925	223520	626	WSLSCF	SchänisFreiland	-
191	MeteoSchweiz	715186	226987	413	ZHSHU	Schübelbach/Mülönen	x
192	MeteoSchweiz	656680	242100	445	SNG	Seengen	x
193	MeteoSchweiz	656880	219360	511	LUSEM	Sempach	x
194	MeteoSchweiz	710821	225538	452	SIE	Siebnen	-
195	MeteoSchweiz	686318	230586	549	SIH	Sihlbrugg	-
196	MeteoSchweiz	737313	227576	897	STB	Starkenbach	-
197	MeteoSchweiz	747865	254588	775	STG	St.Gallen	-
198	MeteoSchweiz	683993	239044	508	ZHTWL	Thalwil	x
199	MeteoSchweiz	659320	219681	557	ZELUTG	Truttigen	x
200	MeteoSchweiz	707340	254670	570	ZHTUR	Turbenthal	-
201	MeteoSchweiz	676731	246286	543	WSLUIB	UitikonBestand	-
202	MeteoSchweiz	676764	246211	545	WSLUIF	UitikonFreiland	-
203	MeteoSchweiz	700523	277305	422	TGUSH	Unterstammheim	-
204	MeteoSchweiz	739206	241761	825	URN	Urnäsch	-
205	MeteoSchweiz	694760	245190	438	UST	Uster	-
206	MeteoSchweiz	698612	244769	490	ZHUST	Uster/AatalHöhe	-
207	MeteoSchweiz	757722	221699	457	VAD	Vaduz	x
208	MeteoSchweiz	693847	230744	485	WAE	Wädenswil	-
209	MeteoSchweiz	692336	230860	585	ZHWAE	Wädenswil/Herrlisberg	-
210	MeteoSchweiz	711690	237864	647	ZHWD2	Wald/Brüglen	-
211	MeteoSchweiz	713218	237375	873	ZHHIT	Wald/Hittenberg	-
212	MeteoSchweiz	676761	246211	545	WAG	Waldegg	-
213	MeteoSchweiz	687576	251245	437	ZHWLS	Wallisellen/Neugut	x
214	MeteoSchweiz	710427	227937	420	ZHWAN	Wangen,SZ	-
215	MeteoSchweiz	756872	218250	468	WAR	Wartau	x
216	MeteoSchweiz	750511	239186	868	MMWAA	Wasserauen	-
217	MeteoSchweiz	724983	221383	425	WEE	Weesen	-
218	MeteoSchweiz	676110	268980	360	ZHWEA	Weiach	-
219	MeteoSchweiz	723890	269553	423	TGWEI	Weinfelden	-
220	MeteoSchweiz	674843	251648	407	ZHWEI	Weiningen/Limmatthaler-Kreuz	-
221	MeteoSchweiz	756860	218214	471	SGWAU	Weite/Wartau	x
222	MeteoSchweiz	719427	273034	420	TGWIG	Wigoltingen	-
223	MeteoSchweiz	722055	256733	535	SGWIL	Wil	-
224	MeteoSchweiz	699845	259054	506	WIN	Winterthur/Seen	-
225	MeteoSchweiz	694097	262253	432	ZHWLF	Winterthur/Wülflingen	x
226	MeteoSchweiz	699286	228007	505	ZHFRB	Wollerau/Fuchsberg	-
227	MeteoSchweiz	659355	265380	334	PSI	Würenlingen/PSI	x
228	MeteoSchweiz	703795	255605	524	ZHZEL	Zell/Rämismühle	-
229	MeteoSchweiz	681432	253548	443	REH	Zürich/Affoltern	-
230	MeteoSchweiz	685116	248065	555	SMA	Zürich/Fluntern	-
231	MeteoSchweiz	682450	247990	408	NABZUE	Zürich/Kaserne	-
232	MeteoSchweiz	682538	254250	465	ZHZSE	Zürich/Seebach	-
233	MeteoSchweiz	685699	251856	436	ZHZOE	ZürichSchwamendingen/HKW Aubrugg	-
234	MeteoSchweiz	681711	244541	430	ZHZHB	ZürichWollishofen/Höcklerbrücke	x
235	MeteoSchweiz	675138	238165	461	ZWK	Zwillikon	-
236	MeteoSchweiz	682058	245256	429	ZHZBR	ZürichWollishofen/Sihlhochstrasse	x
237	MeteoSchweiz	695179	263447	491	AGMWUL	Wülflingen	-
238	MeteoSchweiz	737142	265039	527	AGMZIH	Zihlschlacht	-
239	MeteoSchweiz	656497	249844	421	BOAGLB	Lenzburg	x

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 25: Details der verwendeten P-Stationen, Teil 4

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
240	MeteoSchweiz	658389	255955	384	AGLUP	Lupfig	x
241	MeteoSchweiz	657996	255075	390	AGMLUP	Lupfig	x
242	MeteoSchweiz	710983	278236	410	AGMMAM	Mammern	x
243	MeteoSchweiz	660128	232852	453	MOA	Mosen	x
244	MeteoSchweiz	668152	236594	460	AGMMUR	Muri	-
245	MeteoSchweiz	745421	266022	447	AGMNEU	Neukirch-Egnach	x
246	MeteoSchweiz	730708	269051	448	AGMOPF	Opfershofen	-
247	MeteoSchweiz	655394	234929	516	AGREH	Reinach	x
248	MeteoSchweiz	656600	262500	400	AGMREM	Remigen	x
249	MeteoSchweiz	752565	213412	495	AGMSAR	Sargans	x
250	MeteoSchweiz	661591	235470	655	ZELUSG	Schongau	x
251	MeteoSchweiz	700784	244561	560	AGMSEG	Seegräben	-
252	MeteoSchweiz	658600	240800	395	AGMSEN	Seengen	x
253	MeteoSchweiz	710150	225700	455	AGMSIB	Siebnen	x
254	MeteoSchweiz	672912	228032	397	AGSIN	Sins	-
255	MeteoSchweiz	676950	261700	470	AGMSTM	Steinmaur	-
256	MeteoSchweiz	698930	232532	429	AGMSTA	Stäfa	-
257	MeteoSchweiz	663210	268569	385	AGMTEG	Tegerfelden	-
258	MeteoSchweiz	714776	267282	548	AGMTHU	Thundorf	-
259	MeteoSchweiz	690895	280143	478	AGMUHW	Uhwiesen	-
260	MeteoSchweiz	664939	222403	498	AGMURS	Urswil	-
261	MeteoSchweiz	740015	221555	484	AGMWAS	Walenstadt	-
262	MeteoSchweiz	693941	230684	490	AGMWWO	Wädenswil / Obstbau	-
263	MeteoSchweiz	693819	231199	426	AGMWWW	Wädenswil / Weinbau	-
264	MeteoSchweiz	725478	270321	434	AGMWWEI	Weinfeldern	-
265	MeteoSchweiz	720429	258926	580	AGMWIS	Will SG	-
266	MeteoSchweiz	680364	273375	413	AGMWIZ	Will ZH	-
267	MeteoSchweiz	697735	261315	455	ZHWIN	Winterthur	-
268	MeteoSchweiz	657884	218492	517	ZELUSE	Sempach	x
269	MeteoSchweiz	705592	240470	569	MMHIW	Hinwil	-
270	MeteoSchweiz	724969	221377	430	SGWEE	Weesen	-
273	Bodenmessnetz NWS	665569	240507	446		Boswil	-
274	Bodenmessnetz NWS	663776	255112	415		Fislisbach	-
275	Bodenmessnetz NWS	655926	239912	608		Leutwil	x
276	Bodenmessnetz NWS	668143	263563	479		Schneisingen	-

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 26: Details der verwendeten P-Stationen, Teil 5

A.3. T - Stationen

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
001	MeteoSchweiz	666075	257972	377	AGBAD	Baden	-
002	MeteoSchweiz	682425	213475	475	AGMART	Arth	-
003	MeteoSchweiz	682178	227520	441	AGMBAA	Baar	-
004	MeteoSchweiz	662250	256950	470	AGMBIR	Birmenstorf	x
005	MeteoSchweiz	756000	210625	493	AGMBRA	BadRagaz	x
006	MeteoSchweiz	748894	262290	431	AGMBRG	Berg	-
007	MeteoSchweiz	669888	216871	450	AGMBUC	Buchrain	-
008	MeteoSchweiz	677365	226138	423	AGMCHA	Cham	-
009	MeteoSchweiz	732646	275952	505	AGMDET	Dettighofen	-
010	MeteoSchweiz	664502	265629	440	AGMEND	Endingen	-
011	MeteoSchweiz	731972	253482	621	AGMFLW	Flawil	-
012	MeteoSchweiz	753536	234450	456	AGMFRU	Frümsen	x
013	MeteoSchweiz	663346	229744	541	AGMGEO	Gelfingen	-
014	MeteoSchweiz	751847	227970	469	AGMGRA	Grabs	-
015	MeteoSchweiz	738637	273941	437	AGMGTT	Güttingen	-
016	MeteoSchweiz	743454	262292	561	AGMHAG	Hägenschwil	-
017	MeteoSchweiz	676714	283468	425	AGMHAL	Hallau	-
018	MeteoSchweiz	741469	250967	783	AGMHER	Herisau	-
019	MeteoSchweiz	666800	226300	610	AGMHOH	Hohenrain	-
020	MeteoSchweiz	674916	225296	451	AGMHUN	Hünenberg	-
021	MeteoSchweiz	706417	230805	408	AGMJON	Jona	-
022	MeteoSchweiz	667081	249798	447	AGMKUN	Künten	-
023	MeteoSchweiz	658712	269225	397	AGMLEG	Leuggern	x
024	MeteoSchweiz	705321	265726	535	AGMLIE	Liebensberg	-
025	MeteoSchweiz	693788	256110	551	AGMLIN	Lindau	-
026	MeteoSchweiz	657996	255075	390	AGMLUP	Lupfig	x
027	MeteoSchweiz	710983	278236	410	AGMMAM	Mammern	-
028	MeteoSchweiz	668152	236594	460	AGMMUR	Muri	-
029	MeteoSchweiz	745421	266022	447	AGMNEU	Neukirch-Egnach	-
030	MeteoSchweiz	730708	269051	448	AGMOPF	Opfershofen	-
031	MeteoSchweiz	656600	262500	400	AGMREM	Remigen	x
032	MeteoSchweiz	752565	213412	495	AGMSAR	Sargans	x
033	MeteoSchweiz	700784	244561	560	AGMSEG	Seegräben	-
034	MeteoSchweiz	658600	240800	395	AGMSEN	Seengen	x
035	MeteoSchweiz	710150	225700	455	AGMSIB	Siebnen	-
036	MeteoSchweiz	698930	232532	429	AGMSTA	Stäfa	-
037	MeteoSchweiz	676950	261700	470	AGMSTM	Steinmaur	-
038	MeteoSchweiz	663210	268569	385	AGMTEG	Tegerfelden	-
039	MeteoSchweiz	714776	267282	548	AGMTHU	Thundorf	-
040	MeteoSchweiz	690895	280143	478	AGMUHW	Uhwiesen	-
041	MeteoSchweiz	664939	222403	498	AGMURS	Urswil	-
042	MeteoSchweiz	740015	221555	484	AGMWAS	Walenstadt	-
043	MeteoSchweiz	725478	270321	434	AGMWEI	Weinfelden	-
044	MeteoSchweiz	720429	258926	580	AGMWIS	WillSG	-
045	MeteoSchweiz	680364	273375	413	AGMWIZ	WillZH	-
046	MeteoSchweiz	695179	263447	491	AGMWUL	Wülflingen	-
047	MeteoSchweiz	693941	230684	490	AGMWWO	Wädenswil/Obstbau	-
048	MeteoSchweiz	693819	231199	426	AGMWWW	Wädenswil/Weinbau	-
049	MeteoSchweiz	737142	265039	527	AGMZIH	Zihlschlacht	-
050	MeteoSchweiz	659812	267696	325	BEZ	Beznau	x
051	MeteoSchweiz	737713	263612	507	BIZ	Bischofszell/Sitterdorf	-
052	MeteoSchweiz	677758	226878	442	CHZ	Cham	-
053	MeteoSchweiz	747744	296331	708	DLDEG	Deggenhausertal	x
054	MeteoSchweiz	750321	283450	459	DLFRH	Friedrichshafen/Unterraderach	-
055	MeteoSchweiz	731514	282221	443	DLKON	Konstanz	-
056	MeteoSchweiz	703677	292385	445	DLSIN	Singen	x
057	MeteoSchweiz	670681	281244	398	DLWOF	Wutöschingen-Oftringen	-
058	MeteoSchweiz	690210	250775	435	DUB	Dübendorf	-
059	MeteoSchweiz	726347	237176	623	EBK	Ebnat-Kappel	-

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 27: Details der verwendeten T-Stationen, Teil 1

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
060	MeteoSchweiz	699982	221068	910	EIN	Einsiedeln	-
061	MeteoSchweiz	665102	215165	426	EMM	Emmen	-
062	MeteoSchweiz	723398	212289	493	GLFEU	Glarus/Feuerwehrstützpunkt	-
063	MeteoSchweiz	738421	273962	440	GUT	Güttingen	-
064	MeteoSchweiz	719099	279047	718	HAI	Salen-Reutenen	-
065	MeteoSchweiz	758110	257120	800	HEI	Heiden	x
066	MeteoSchweiz	677456	283471	419	HLL	Hallau	-
067	MeteoSchweiz	713516	247756	1132	HOE	Hörnli	-
068	MeteoSchweiz	665478	213381	484	INNEBI	Ebikon	-
069	MeteoSchweiz	681625	224641	420	INNZUG	Zug	-
070	MeteoSchweiz	706760	231290	410	JON	Jona	-
071	MeteoSchweiz	685022	211614	545	KAGOD	Goldau/Tierpark	-
072	MeteoSchweiz	692480	213520	1217	KASMR	Sattel/Mostelrieter	-
073	MeteoSchweiz	682710	259338	426	KLO	Zürich/Kloten	-
074	MeteoSchweiz	707637	226334	468	LAC	Lachen/Galgenen	-
075	MeteoSchweiz	672250	259460	844	LAE	Lägern	-
076	MeteoSchweiz	656373	272121	341	LEI	Leibstadt	x
077	MeteoSchweiz	679053	235748	705	MMAEU	AeugstamAlbis	-
078	MeteoSchweiz	670776	250208	538	MMBDK	Bergdietikon	-
079	MeteoSchweiz	659672	255089	393	MMBIR	Lupfig/FlugplatzBirrfeld	x
080	MeteoSchweiz	705592	240470	569	MMHIW	Hinwil	-
081	MeteoSchweiz	719455	252803	768	MMKSB	Kirchberg/Schallenberg	-
082	MeteoSchweiz	691307	275566	411	MMMAT	Marthalen	-
083	MeteoSchweiz	749713	214107	482	MMMEL	Mels/Heiligkreuz	-
084	MeteoSchweiz	722943	215943	445	MMNAF	Näfels	-
085	MeteoSchweiz	684040	272684	432	MMRAF	Rafz	-
086	MeteoSchweiz	721669	236300	797	MMRIC	Ricken	-
087	MeteoSchweiz	752932	233330	475	MMSAX	Sax	x
088	MeteoSchweiz	750511	239186	868	MMWAA	Wasserauen	-
089	MeteoSchweiz	660128	232852	453	MOA	Mosen	x
090	MeteoSchweiz	655842	226777	797	NABBRM	Beromünster	x
091	MeteoSchweiz	688690	250880	432	NABDUE	Dübendorf	-
092	MeteoSchweiz	669780	259020	688	NABLAE	Lägeren	-
093	MeteoSchweiz	677835	213440	1031	NABRIG	Rigi/Seebodenalp	-
094	MeteoSchweiz	682450	247990	408	NABZUE	Zürich/Kaserne	-
095	MeteoSchweiz	659355	265380	334	PSI	Würenlingen/PSI	x
096	MeteoSchweiz	705050	231330	409	RAP	RapperswilSG	-
097	MeteoSchweiz	681432	253548	443	REH	Zürich/Affoltern	-
098	MeteoSchweiz	744187	234920	2501	SAE	Säntis	-
099	MeteoSchweiz	690999	215145	790	SAG	Sattel,SZ	-
100	MeteoSchweiz	746011	254720	675	SGBLU	St.Gallen/Blumenbergplatz	-
101	MeteoSchweiz	747605	252495	915	SGSTU	St.Gallen/Stuelegg	-
102	MeteoSchweiz	688702	282803	438	SHA	Schaffhausen	-
103	MeteoSchweiz	729500	225840	1610	SLFAM2	Amden/Bärenfall	-
104	MeteoSchweiz	728640	225700	1936	SLFAMD	Amden/Mattstock	-
105	MeteoSchweiz	741550	224200	2306	SLFHIN	Wildhaus/Hinterrugg	-
106	MeteoSchweiz	685116	248065	555	SMA	Zürich/Fluntern	-
107	MeteoSchweiz	747865	254588	775	STG	St.Gallen	-
108	MeteoSchweiz	744025	249390	780	STI	Stein,AR	-
109	MeteoSchweiz	710517	259824	539	TAE	Aadorf/Tänikon	-
110	MeteoSchweiz	714225	249135	945	TGALL	Allenwinden	-
111	MeteoSchweiz	741040	266790	485	TGAMR	Amriswil	-
112	MeteoSchweiz	721758	281302	470	TGARE	Arenenberg	-
113	MeteoSchweiz	723396	264338	630	TGBOH	Braunau/Oberhof	-
114	MeteoSchweiz	698975	281905	421	TGDIE	Diessenhofen	-
115	MeteoSchweiz	714972	254165	590	TGDUS	Dussnang	-
116	MeteoSchweiz	746450	266570	415	TGEGN	Egnach	-
117	MeteoSchweiz	723562	280980	415	TGERM	Ermatingen	-
118	MeteoSchweiz	709512	270190	391	TGFRA	Frauenfeld	-
119	MeteoSchweiz	733082	274158	565	TGILL	Illighausen	-

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

Tab. 28: Details der verwendeten T-Stationen, Teil 2

FHNW Nr	Quelle	x	y	z	Quellen ID	Name	Ausschluss
120	MeteoSchweiz	705227	278636	456	TGKAL	Kaltenbach	-
121	MeteoSchweiz	731538	278849	400	TGKRE	Kreuzlingen	-
122	MeteoSchweiz	712467	275918	575	TGLAN	Lanzenneunforn	-
123	MeteoSchweiz	717573	264875	469	TGLOM	Lommis	-
124	MeteoSchweiz	726838	261520	733	TGNOL	Nollen	-
125	MeteoSchweiz	704218	275708	480	TGNUS	Nussbaumen	-
126	MeteoSchweiz	727270	271500	665	TGOTT	Ottenberg	-
127	MeteoSchweiz	722080	256250	545	TGRIC	Rickenbach	-
128	MeteoSchweiz	700523	277305	422	TGUSH	Unterstammheim	-
129	MeteoSchweiz	723890	269553	423	TGWEI	Weinfeld	-
130	MeteoSchweiz	719427	273034	420	TGWIG	Wigoltingen	-
131	MeteoSchweiz	679250	245150	814	UET	Zürich-Uetliberg	-
132	MeteoSchweiz	757722	221699	457	VAD	Vaduz	x
133	MeteoSchweiz	693847	230744	485	WAE	Wädenswil	-
134	MeteoSchweiz	696848	211653	1168	WSLALB	AlpthalBestand	-
135	MeteoSchweiz	669777	259027	689	WSLLAE	LägernTurm	-
136	MeteoSchweiz	682301	282059	561	WSLNEB	NeunkirchBestand	-
137	MeteoSchweiz	681661	282699	463	WSLNEF	NeunkirchFreiland	-
138	MeteoSchweiz	659515	250058	474	WSLOTB	OthmarsingenBestand	x
139	MeteoSchweiz	659217	250228	461	WSLOTF	OthmarsingenFreiland	x
140	MeteoSchweiz	723438	225134	709	WSLSCB	SchänisBestand	-
141	MeteoSchweiz	722925	223520	626	WSLSCF	SchänisFreiland	-
142	MeteoSchweiz	676731	246286	543	WSLUIB	UitikonBestand	-
143	MeteoSchweiz	676764	246211	545	WSLUIF	UitikonFreiland	-
144	MeteoSchweiz	685351	254830	430	ZHOPB	Opfikon/Balsberg	-
145	MeteoSchweiz	682099	249940	432	ZHROS	Zürich/Rosengartenstrasse	-
146	MeteoSchweiz	681044	247240	412	ZHSCH	Zürich/Schimmelstrasse	-
147	MeteoSchweiz	683159	249026	441	ZHSTA	Zürich/Stampfenbachstrasse	-
148	MeteoSchweiz	713705	237379	911	ZHWAL	Wald/Höhenklinik	-
149	MeteoSchweiz	696556	262723	437	ZHWIV	Winterthur/Veltheim	-
150	Bodenmessnetz NWS	665569	240507	446		Boswil	-
151	Bodenmessnetz NWS	663776	255112	415		Fislisbach	-
152	Bodenmessnetz NWS	655926	239912	608		Leutwil	x
153	Bodenmessnetz NWS	668143	263563	479		Schneisingen	-

x = Ausschluss aufgrund Datenqualität / -quantität

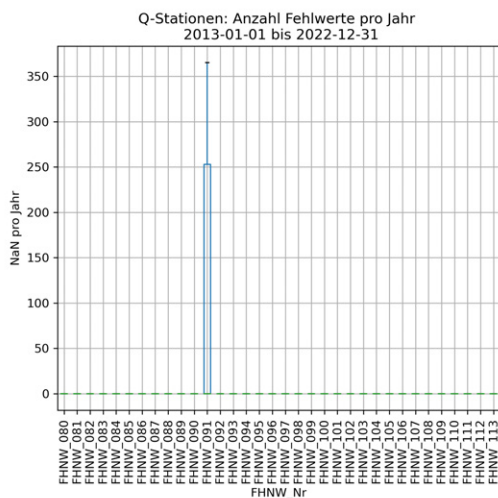
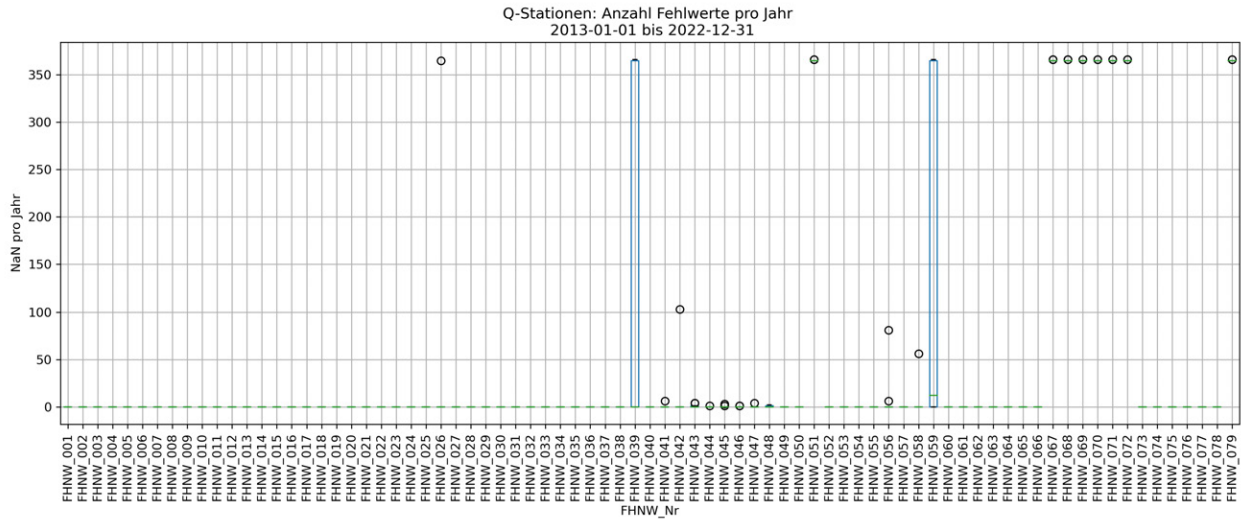
Tab. 29: Details der verwendeten T-Stationen, Teil 3

B. Qualitätskontrolle

B.1. Fehlwerte pro Jahr

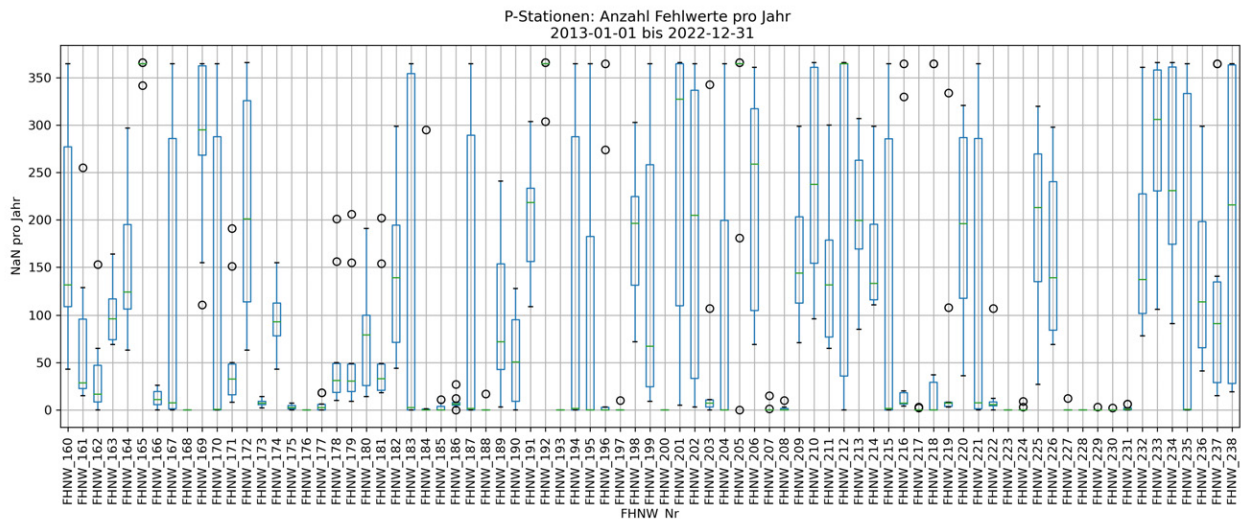
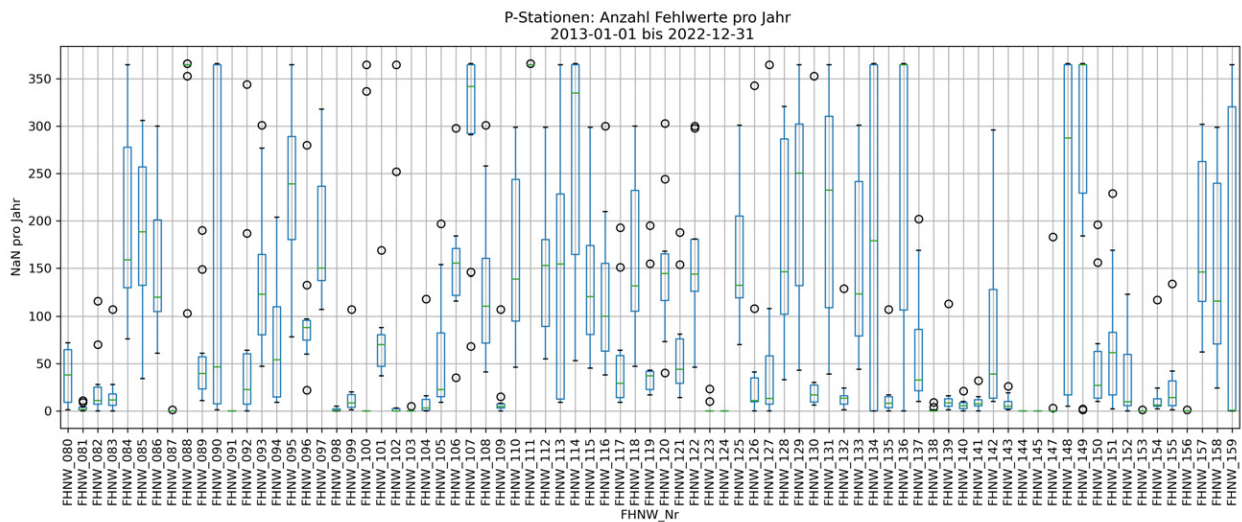
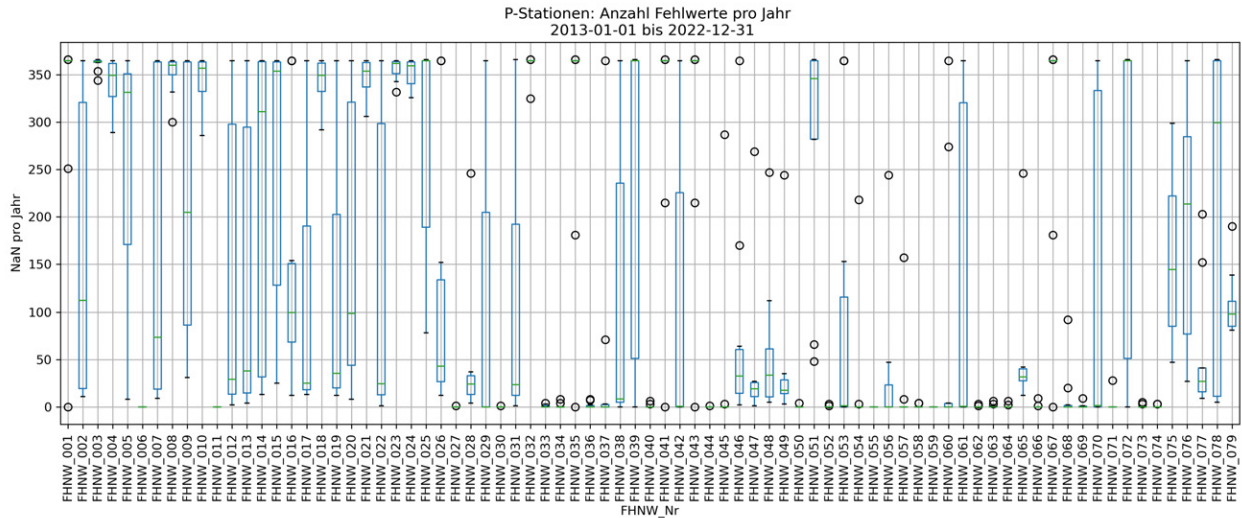
B.1.1. Kritische Stationen für Q

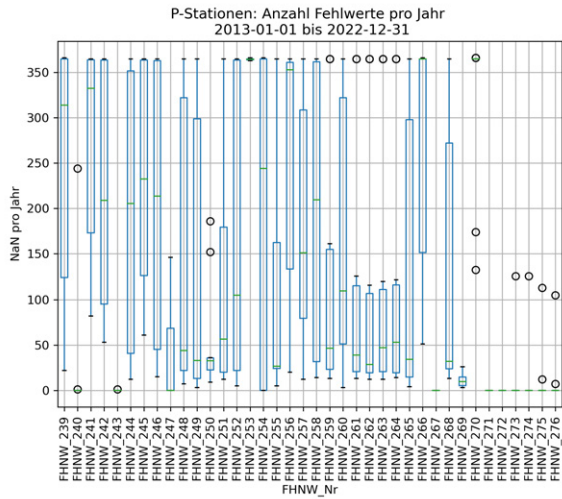
Anzahl Fehlwerte pro Jahr: Viele Fehlwerte deuten auf geringe Vertrauenswürdigkeit



B.1.2. Kritische Stationen für P

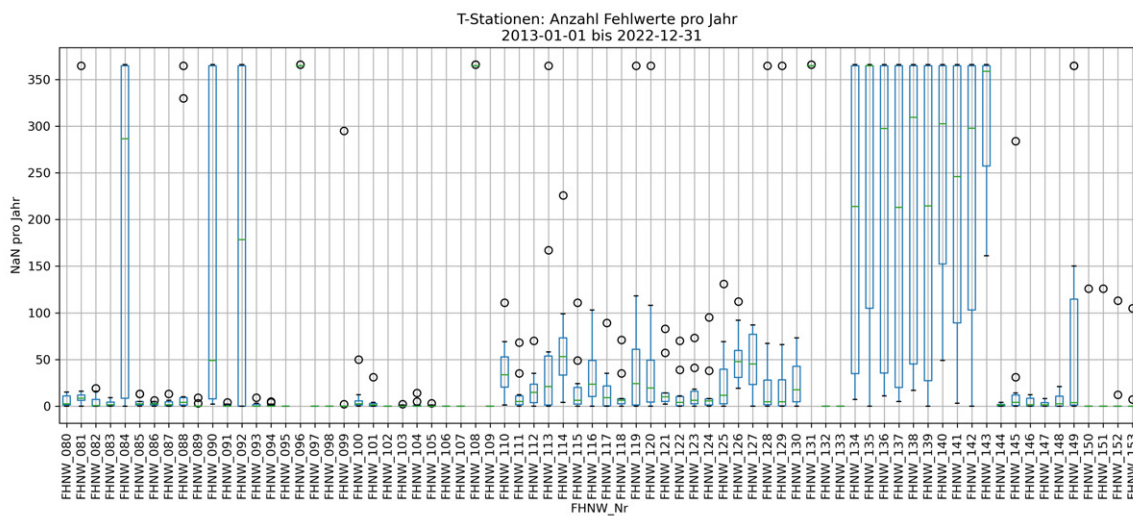
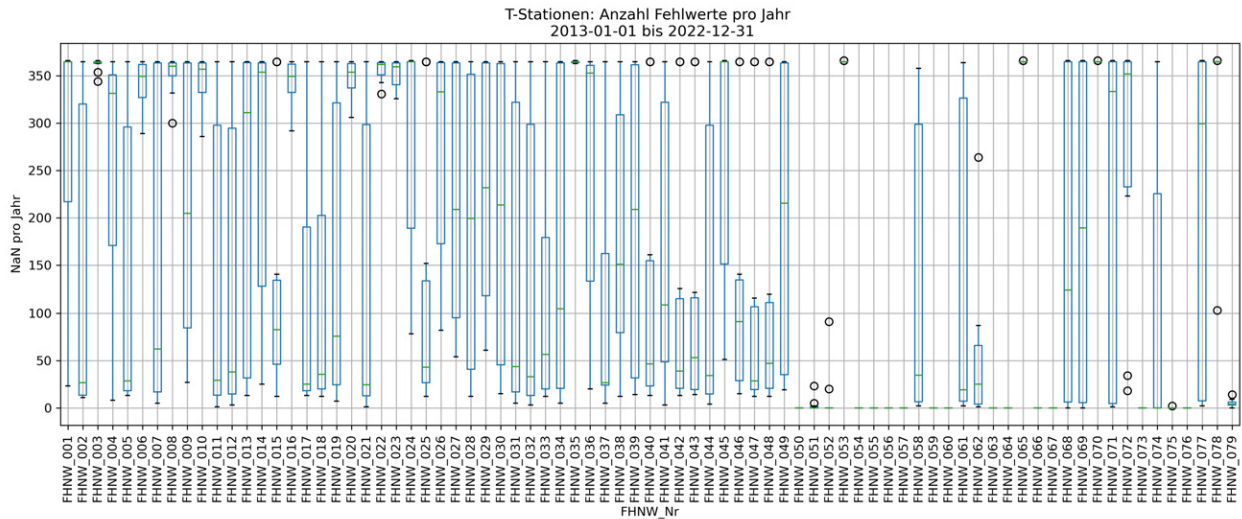
Anzahl Fehlwerte pro Jahr: Viele Fehlwerte deuten auf geringe Vertrauenswürdigkeit





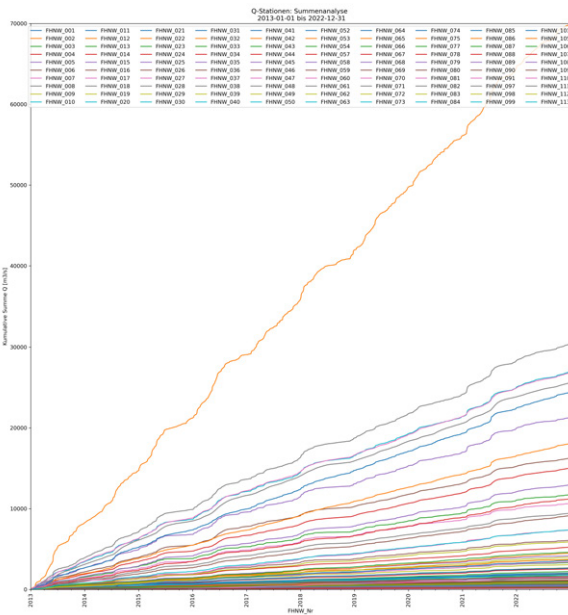
B.1.3. Kritische Stationen für T

Anzahl Fehlwerte pro Jahr: Viele Fehlwerte deuten auf geringe Vertrauenswürdigkeit

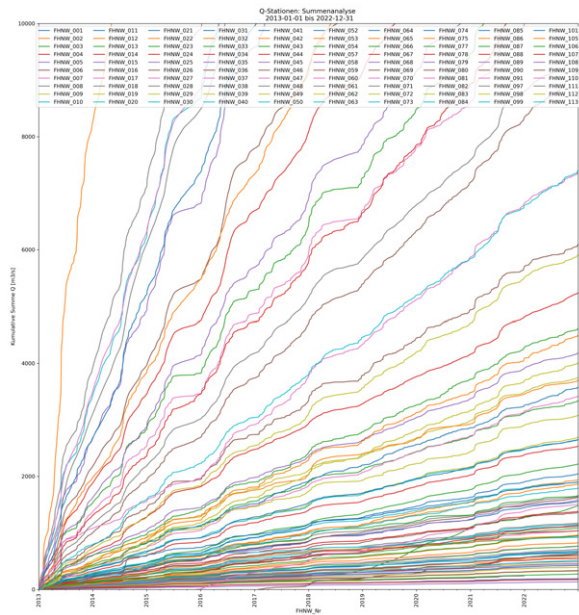


B.2. Summenanalyse

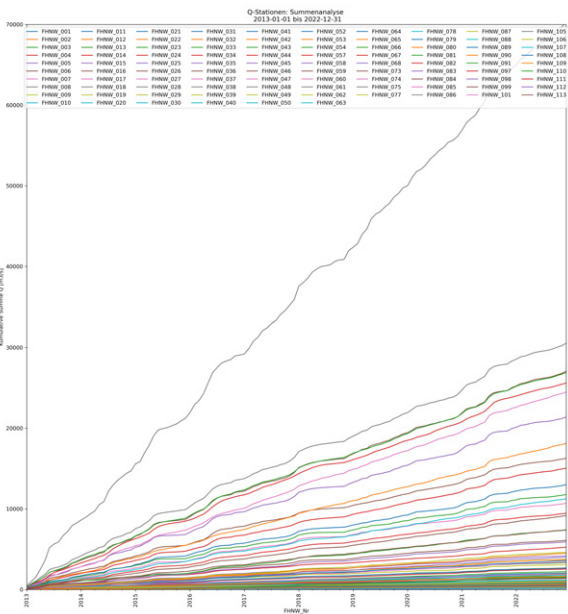
B.2.1. Summenanalyse für Q



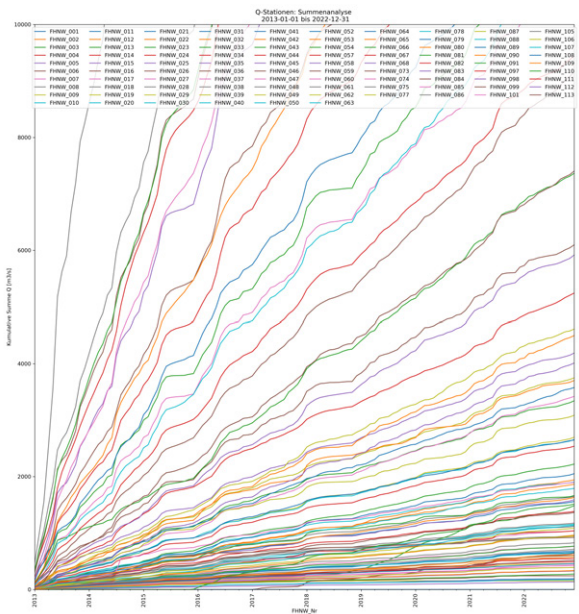
(a) Tageswerte Q (alle)



(b) Tageswerte Q (zoom)

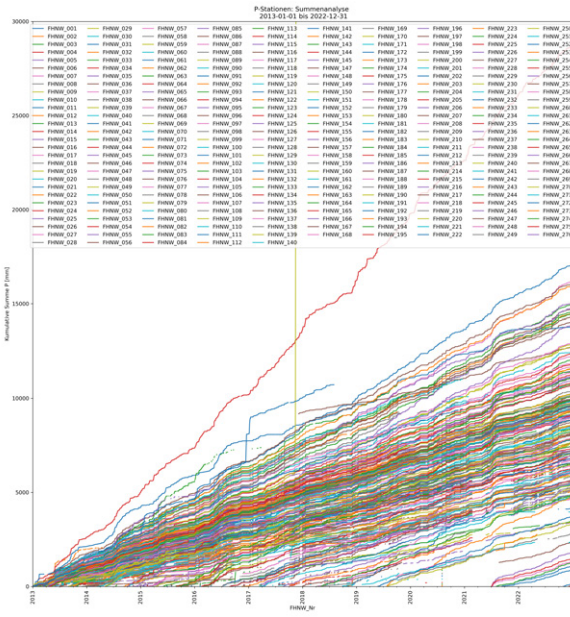


(c) Monatswerte Q (alle)

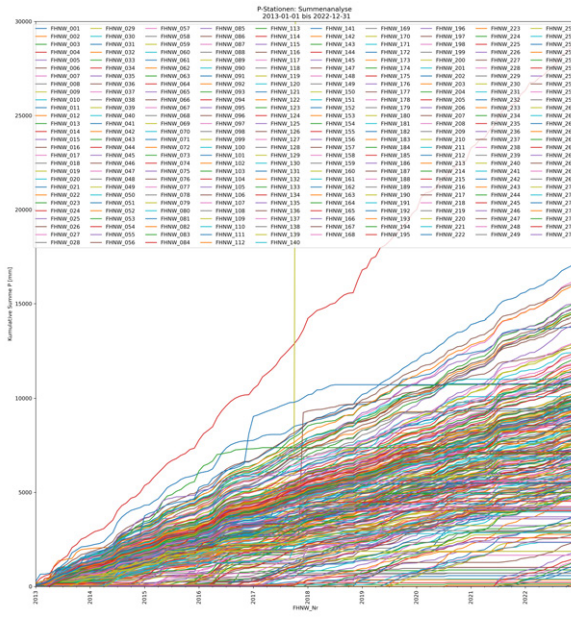


(d) Monatswerte Q (zoom)

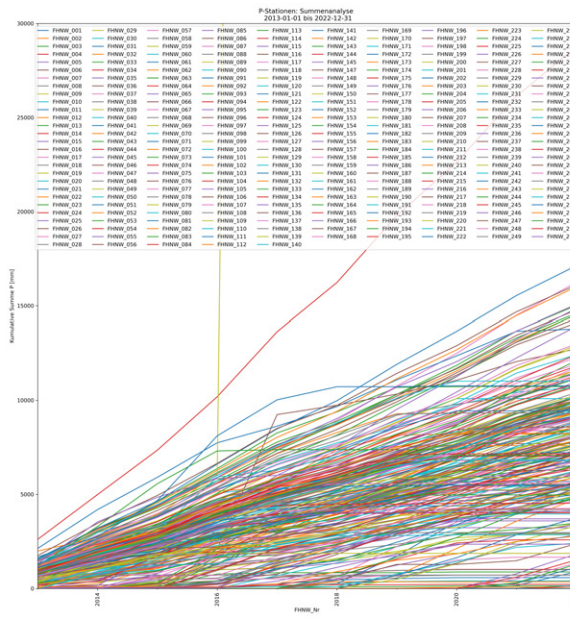
B.2.2. Summenanalyse für P



(e) Tageswerte P

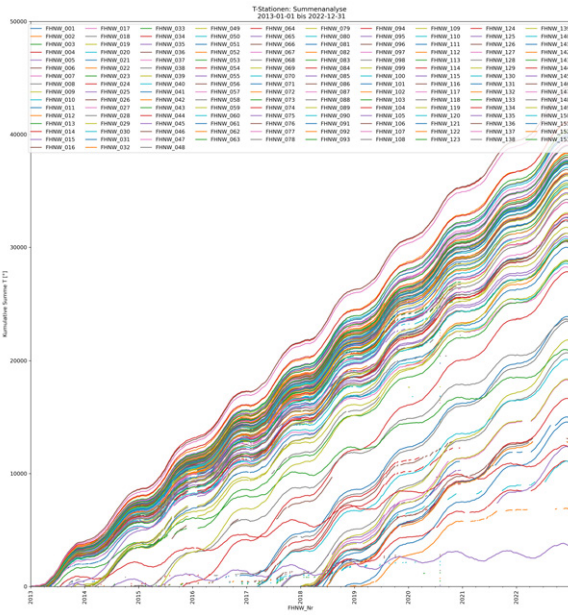


(f) Monatswerte P

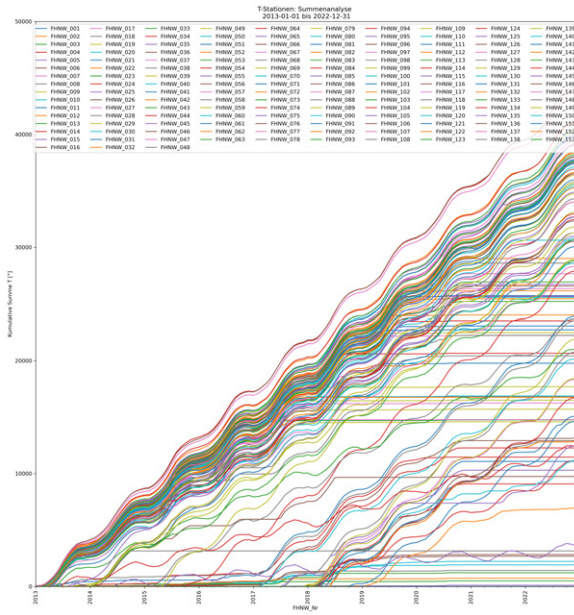


(g) Jahreswerte P

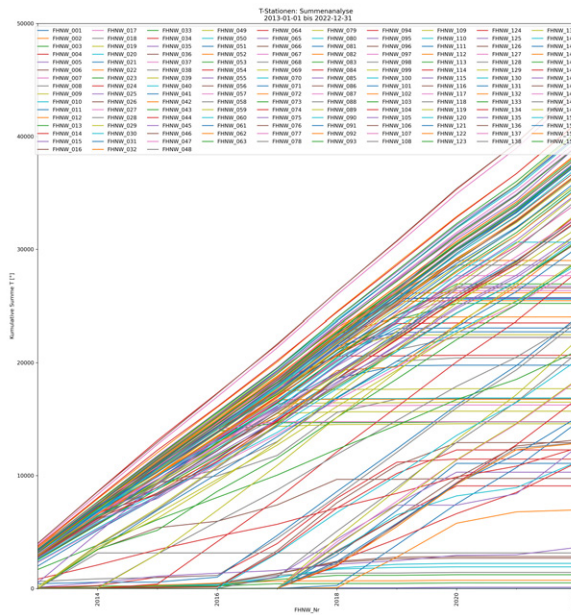
B.2.3. Summenanalyse für T



(h) Tageswerte T



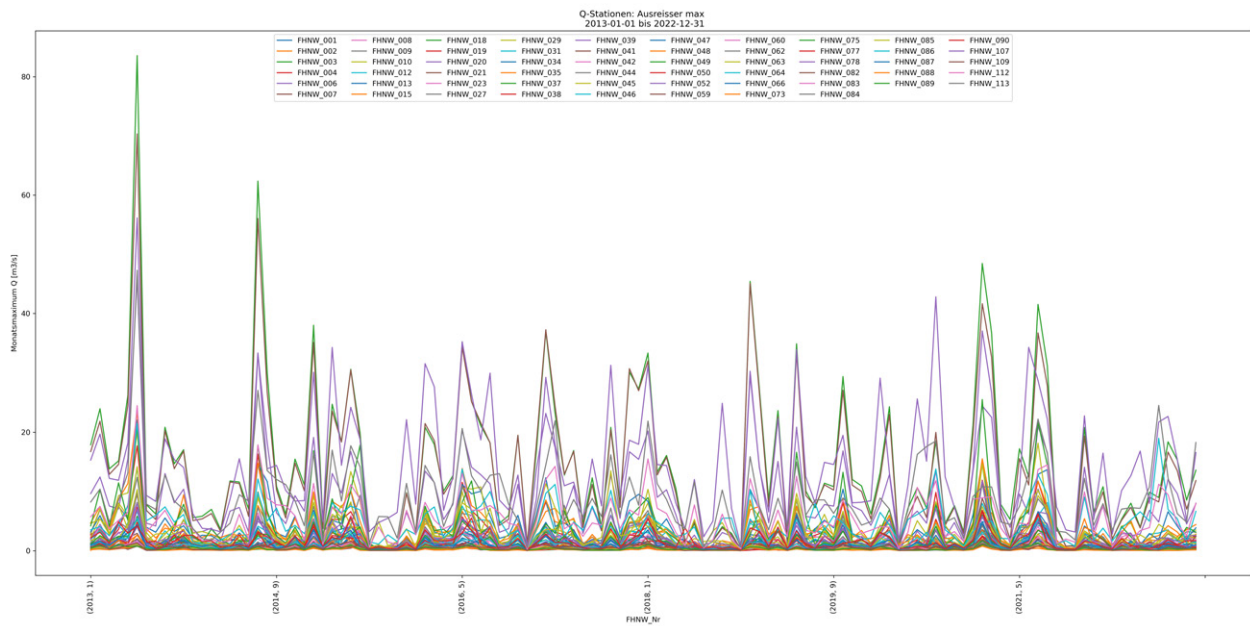
(i) Monatswerte T



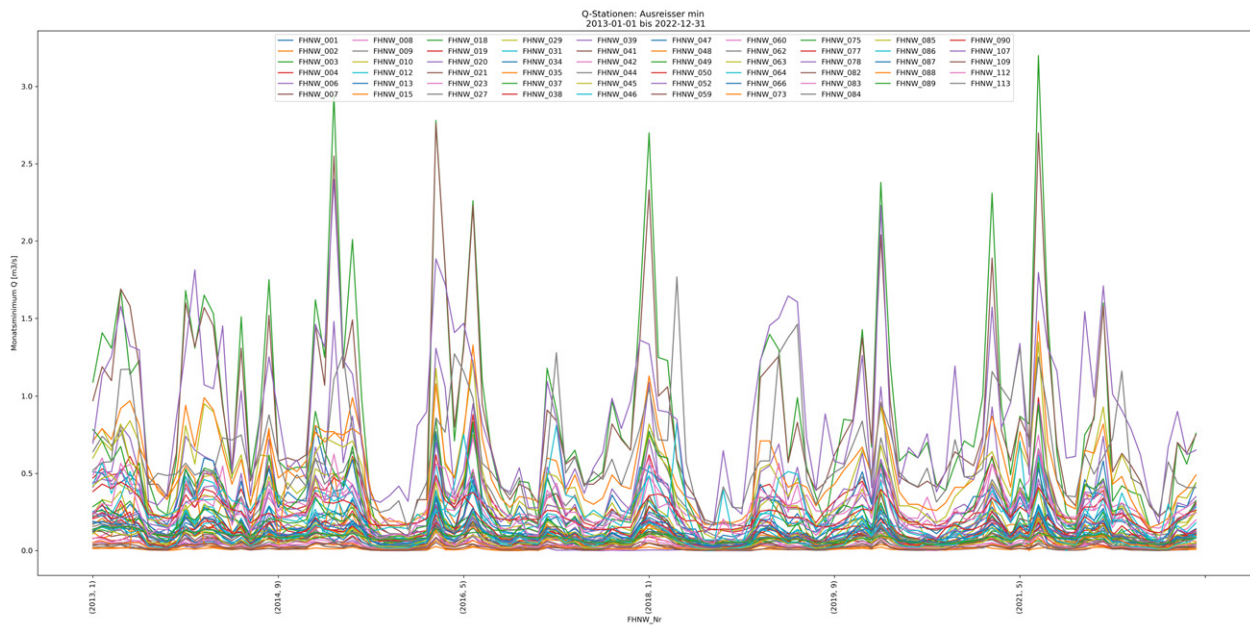
(j) Jahreswerte T

B.3. Ausreisser max und min

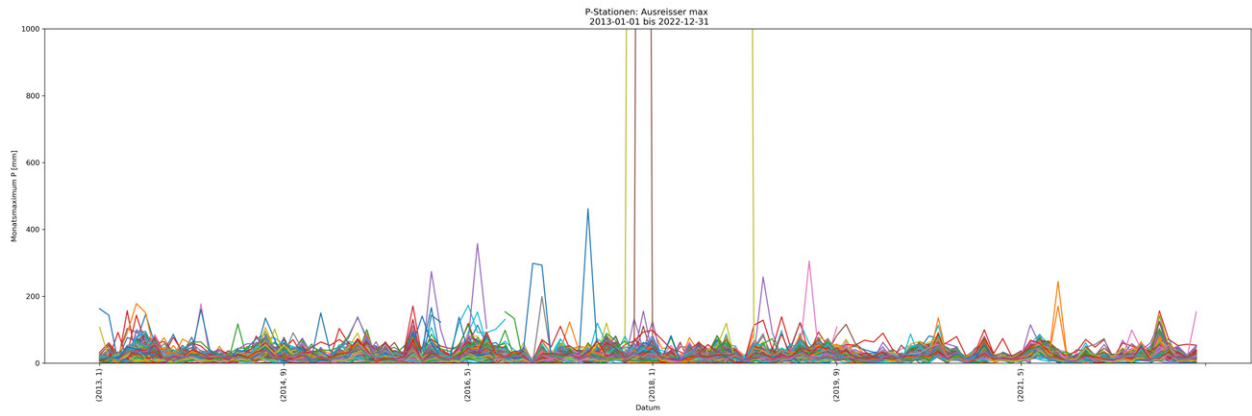
B.3.1. Ausreisser (max) für Q



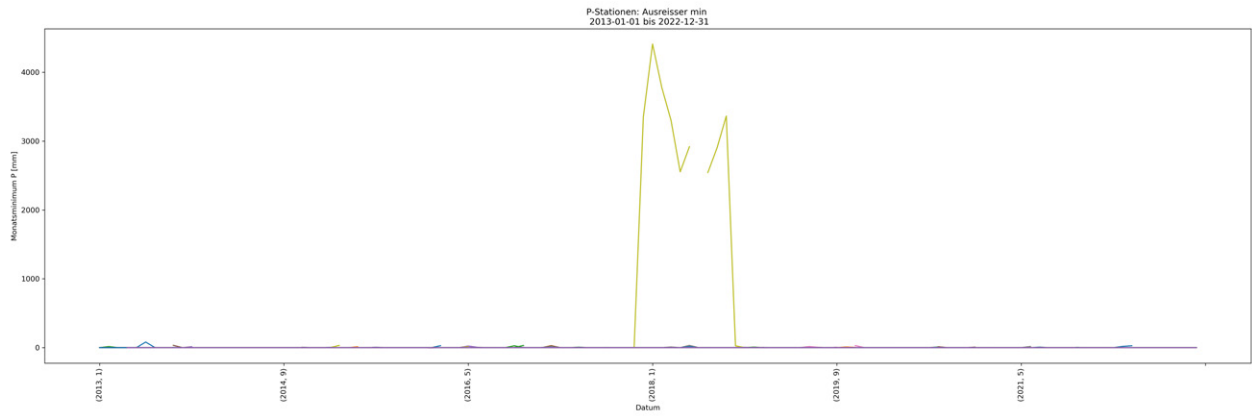
B.3.2. Ausreisser (min) für Q



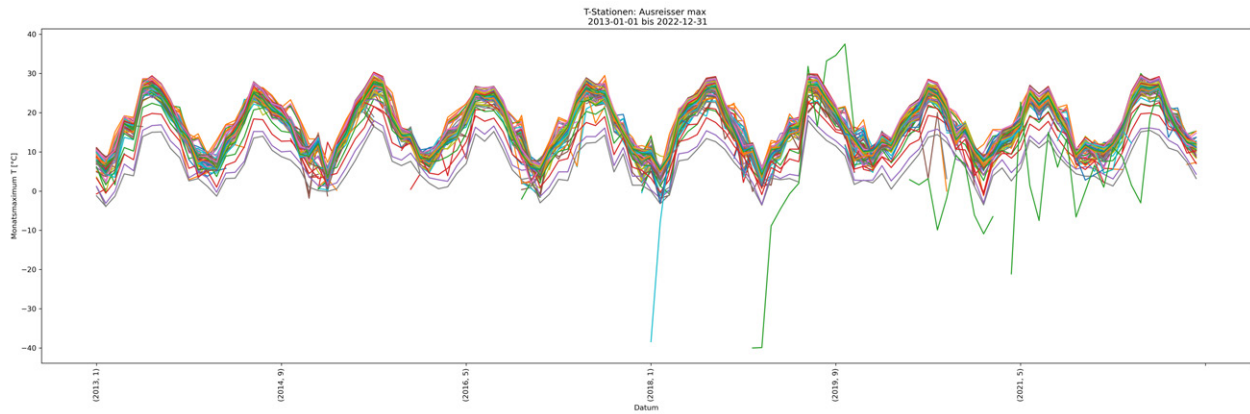
B.3.3. Ausreisser (max) für P



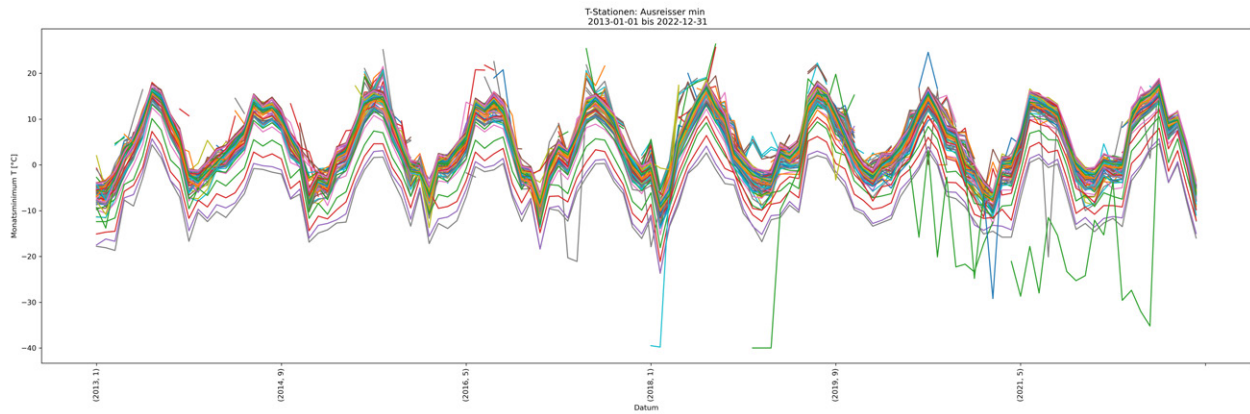
B.3.4. Ausreisser (min) für P



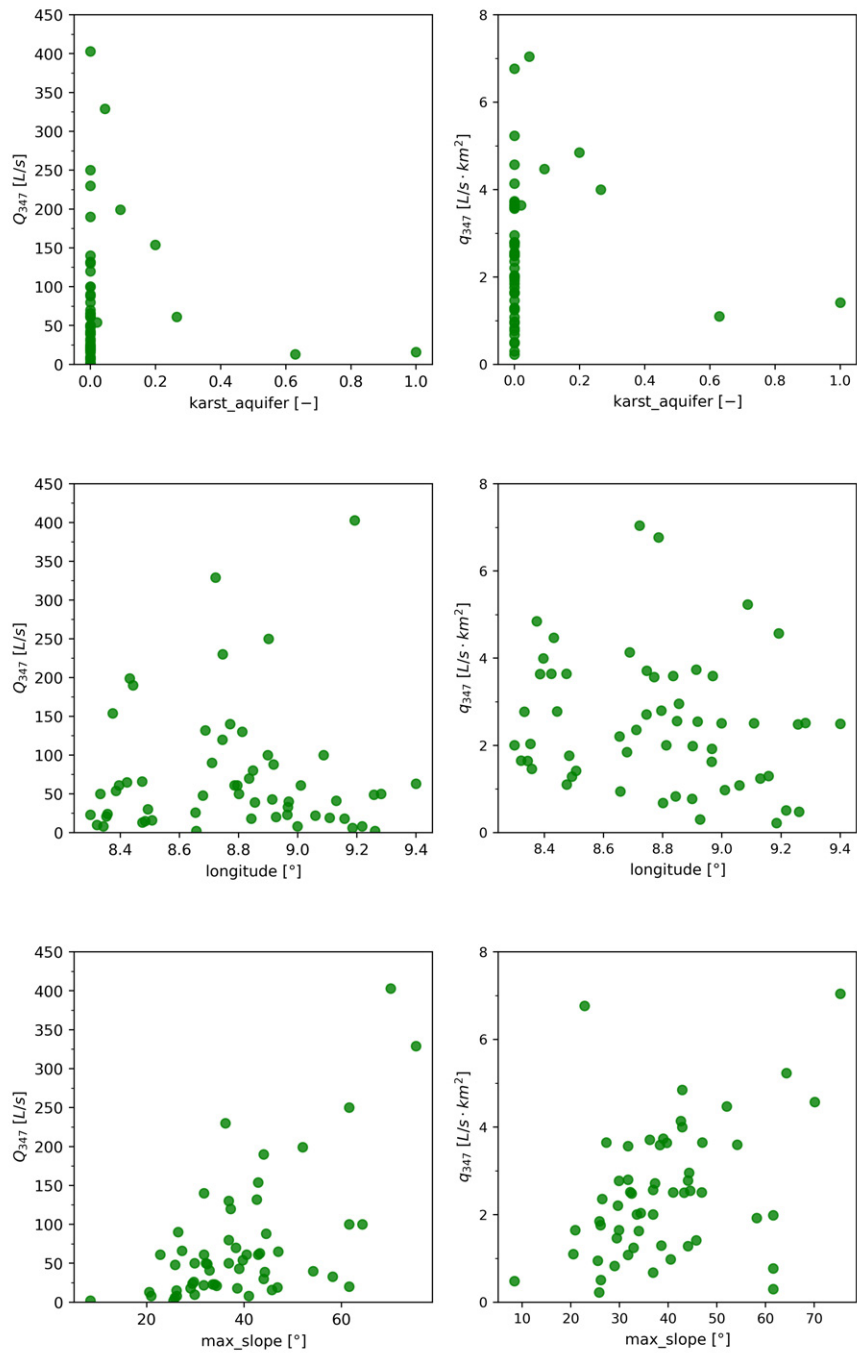
B.3.5. Ausreisser (max) für T



B.3.6. Ausreisser (min) für T

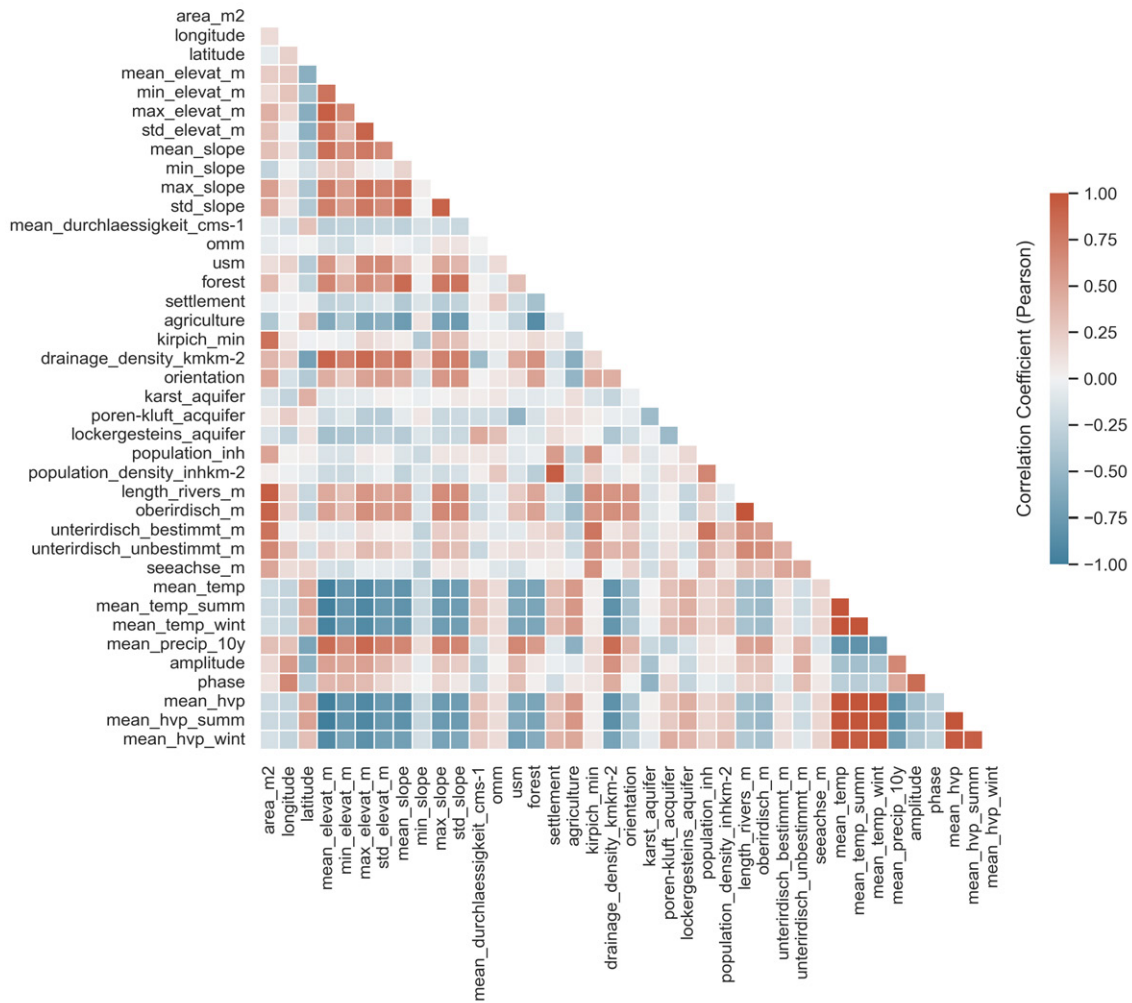


C. Zusammenhänge zwischen Q_{347} / q_{347} und ausgesuchten Parametern



D. Ergebnisse zur Parameterauswahl

D.1. Korrelationsmatrix



D.2. Parameterauswahlverfahren für Q_{347}

Nr.	Selection Method	Predictors	Nr_of_Pred	MSE	MAE	RMSE	MPE	MAPE	COR	NSE
1	backward_selected	['lockergesteins_aquifer', 'mean_temp', 'mean_temp_summ']	3	1.55	0.90	1.25	52.02	0.39	0.54	0.29
2	backward_selected_PCA	-9999	3	1.82	0.98	1.35	55.06	0.43	0.43	0.17
3	forward_selected	['max_slope', 'karst_aquifer', 'porenkluft_acquifer']	3	1.29	0.83	1.14	47.71	0.37	0.64	0.41
4	forward_selected_PCA	-9999	3	1.53	0.91	1.24	53.16	0.40	0.56	0.30
5	RF_selected	['usm', 'porenkluft_acquifer', 'mean_precip_10y']	3	1.45	0.87	1.20	49.58	0.37	0.58	0.34
6	RF_selected_PCA	-9999	3	1.53	0.91	1.24	53.16	0.40	0.56	0.30
7	PCR	-9999	3	1.78	1.04	1.34	59.17	0.43	0.43	0.19
8	backward_selected	['lockergesteins_aquifer', 'mean_temp', 'mean_temp_summ', 'mean_hvp_summ']	4	1.36	0.87	1.16	55.72	0.38	0.62	0.38
9	backward_selected_PCA	-9999	4	1.63	0.96	1.28	60.45	0.43	0.51	0.26
10	forward_selected	['max_slope', 'karst_aquifer', 'porenkluft_acquifer', 'oberirdisch_m']	4	1.16	0.78	1.08	40.09	0.35	0.69	0.47
11	forward_selected_PCA	-9999	4	1.41	0.88	1.19	45.22	0.40	0.60	0.36
12	RF_selected	['usm', 'porenkluft_acquifer', 'mean_precip_10y', 'latitude']	4	1.39	0.87	1.18	46.09	0.38	0.61	0.37
13	RF_selected_PCA	-9999	4	1.41	0.88	1.19	45.22	0.40	0.60	0.36
14	PCR	-9999	4	1.47	0.85	1.21	46.29	0.37	0.57	0.33
15	backward_selected	['area_m2', 'lockergesteins_aquifer', 'mean_temp', 'mean_temp_summ', 'mean_hvp_summ']	5	1.31	0.86	1.14	53.58	0.38	0.64	0.41
16	backward_selected_PCA	-9999	5	1.64	0.96	1.28	60.09	0.43	0.52	0.25
17	forward_selected	['longitude', 'max_slope', 'karst_aquifer', 'porenkluft_acquifer', 'oberirdisch_m']	5	1.12	0.78	1.06	36.12	0.37	0.70	0.49
18	forward_selected_PCA	-9999	5	1.38	0.89	1.17	41.25	0.44	0.62	0.37
19	RF_selected	['usm', 'porenkluft_acquifer', 'mean_precip_10y', 'latitude', 'mean_durchlaessigkeit cms-1']	5	1.13	0.79	1.06	39.67	0.35	0.70	0.49
20	RF_selected_PCA	-9999	5	1.38	0.89	1.17	41.25	0.44	0.62	0.37
21	PCR	-9999	5	1.28	0.85	1.13	45.23	0.36	0.64	0.42
22	backward_selected	['area_m2', 'max_slope', 'lockergesteins_aquifer', 'mean_temp', 'mean_temp_summ', 'mean_hvp_summ']	6	1.17	0.77	1.08	48.39	0.34	0.68	0.47
23	backward_selected_PCA	-9999	6	1.50	0.88	1.23	55.25	0.38	0.57	0.32
24	forward_selected	['longitude', 'max_slope', 'karst_aquifer', 'porenkluft_acquifer', 'oberirdisch_m', 'phase']	6	1.06	0.76	1.03	34.89	0.34	0.72	0.52
25	forward_selected_PCA	-9999	6	1.38	0.88	1.17	40.79	0.40	0.62	0.37
26	RF_selected	['usm', 'porenkluft_acquifer', 'mean_precip_10y', 'latitude', 'mean_durchlaessigkeit cms-1', 'std_elevat_m']	6	1.13	0.79	1.06	39.71	0.35	0.70	0.49
27	RF_selected_PCA	-9999	6	1.38	0.88	1.17	40.79	0.40	0.62	0.37
28	PCR	-9999	6	1.13	0.81	1.06	39.17	0.35	0.70	0.48
29	backward_selected	['area_m2', 'max_slope', 'orientation', 'lockergesteins_aquifer', 'mean_temp', 'mean_temp_summ', 'mean_hvp_summ']	7	1.08	0.76	1.04	45.24	0.33	0.71	0.51
30	backward_selected_PCA	-9999	7	1.45	0.88	1.20	53.53	0.38	0.60	0.34
31	forward_selected	['longitude', 'max_slope', 'orientation', 'karst_aquifer', 'porenkluft_acquifer', 'oberirdisch_m', 'phase']	7	1.03	0.74	1.02	33.66	0.33	0.73	0.53
32	forward_selected_PCA	-9999	7	1.40	0.88	1.18	41.10	0.38	0.62	0.36
33	RF_selected	['usm', 'porenkluft_acquifer', 'mean_precip_10y', 'latitude', 'mean_durchlaessigkeit cms-1', 'std_elevat_m', 'max_slope']	7	1.07	0.76	1.03	38.31	0.33	0.72	0.51
34	RF_selected_PCA	-9999	7	1.40	0.88	1.18	41.10	0.38	0.62	0.36
35	PCR	-9999	7	1.13	0.81	1.06	39.50	0.35	0.70	0.49

D.3. Parameterauswahlverfahren für Q_{182}

Nr.	Selection Method	Predictors	Nr_of_Pred	MSE	MAE	RMSE	MPE	MAPE	COR	NSE
1	backward_selected	['mean_temp_wint', 'mean_hvp', 'mean_hvp_summ']	3	5.98	1.94	2.44	6.91	0.21	0.86	0.75
2	backward_selected_PCA	-9999	3	7.11	2.12	2.67	6.81	0.24	0.84	0.70
3	forward_selected	['max_elevat_m', 'karst_aquifer', 'length_rivers_m']	3	5.33	1.82	2.31	5.89	0.20	0.88	0.77
4	forward_selected_PCA	-9999	3	6.10	1.97	2.47	6.58	0.22	0.86	0.74
5	RF_selected	['mean_precip_10y', 'latitude', 'max_elevat_m']	3	5.98	1.88	2.45	5.65	0.20	0.86	0.75
6	RF_selected_PCA	-9999	3	6.10	1.97	2.47	6.58	0.22	0.86	0.74
7	PCR	-9999	3	7.25	2.16	2.69	8.44	0.23	0.83	0.69
8	backward_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp', 'mean_hvp_summ']	4	5.13	1.83	2.27	6.18	0.19	0.88	0.78
9	backward_selected_PCA	-9999	4	6.18	2.01	2.49	6.27	0.21	0.86	0.74
10	forward_selected	['max_elevat_m', 'karst_aquifer', 'length_rivers_m', 'mean_precip_10y']	4	4.88	1.74	2.21	5.18	0.18	0.89	0.79
11	forward_selected_PCA	-9999	4	5.85	1.93	2.42	5.93	0.20	0.87	0.75
12	RF_selected	['mean_precip_10y', 'latitude', 'max_elevat_m', 'mean_elevat_m']	4	5.70	1.90	2.39	5.59	0.20	0.87	0.76
13	RF_selected_PCA	-9999	4	5.85	1.93	2.42	5.93	0.20	0.87	0.75
14	PCR	-9999	4	6.23	1.98	2.50	7.11	0.21	0.86	0.74
15	backward_selected	['latitude', 'mean_elevat_m', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp', 'mean_hvp_summ']	5	4.71	1.81	2.17	5.48	0.18	0.89	0.80
16	backward_selected_PCA	-9999	5	6.14	2.05	2.48	5.44	0.21	0.86	0.74
17	forward_selected	['max_elevat_m', 'karst_aquifer', 'length_rivers_m', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y']	5	4.39	1.68	2.10	4.76	0.18	0.90	0.81
18	forward_selected_PCA	-9999	5	5.54	1.90	2.35	5.38	0.21	0.87	0.76
19	RF_selected	['mean_precip_10y', 'latitude', 'max_elevat_m', 'mean_elevat_m', 'mean_temp_summ']	5	5.70	1.90	2.39	5.61	0.20	0.87	0.76
20	RF_selected_PCA	-9999	5	5.54	1.90	2.35	5.38	0.21	0.87	0.76
21	PCR	-9999	5	6.23	1.98	2.50	7.11	0.21	0.86	0.74
22	backward_selected	['latitude', 'mean_elevat_m', 'karst_aquifer', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp', 'mean_hvp_summ']	6	4.64	1.76	2.15	5.59	0.17	0.90	0.80
23	backward_selected_PCA	-9999	6	6.21	2.03	2.49	6.39	0.20	0.86	0.74
24	forward_selected	['max_elevat_m', 'karst_aquifer', 'population_density_inhkm-2', 'length_rivers_m', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y']	6	4.23	1.67	2.06	4.85	0.18	0.91	0.82
25	forward_selected_PCA	-9999	6	5.46	1.92	2.34	5.69	0.21	0.88	0.77
26	RF_selected	['mean_precip_10y', 'latitude', 'max_elevat_m', 'mean_elevat_m', 'mean_temp_summ', 'mean_temp_wint']	6	5.68	1.90	2.38	5.73	0.20	0.87	0.76
27	RF_selected_PCA	-9999	6	5.46	1.92	2.34	5.69	0.21	0.88	0.77
28	PCR	-9999	6	5.39	1.89	2.32	5.48	0.20	0.88	0.77
29	backward_selected	['latitude', 'mean_elevat_m', 'karst_aquifer', 'lockergesteins_aquifer', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp', 'mean_hvp_summ']	7	4.54	1.77	2.13	5.51	0.18	0.90	0.81
30	backward_selected_PCA	-9999	7	6.39	2.08	2.53	6.30	0.21	0.85	0.73
31	forward_selected	['max_elevat_m', 'omm', 'karst_aquifer', 'population_density_inhkm-2', 'length_rivers_m', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y']	7	4.21	1.64	2.05	4.77	0.18	0.91	0.82
32	forward_selected_PCA	-9999	7	5.52	1.92	2.35	5.46	0.21	0.88	0.77
33	RF_selected	['mean_precip_10y', 'latitude', 'max_elevat_m', 'mean_elevat_m', 'mean_temp_summ', 'mean_temp_wint', 'mean_durchlaessigkeit_cms-1']	7	5.61	1.93	2.37	5.67	0.20	0.87	0.76
34	RF_selected_PCA	-9999	7	5.52	1.92	2.35	5.46	0.21	0.88	0.77
35	PCR	-9999	7	5.39	1.89	2.32	5.47	0.20	0.88	0.77

D.4. Parameterauswahlverfahren für MQ

	Selection Method	Predictors	Nr_of_Pred	MSE	MAE	RMSE	MPE	MAPE	COR	NSE
1	backward_selected	['longitude', 'latitude', 'mean_hvp_wint']	3	17.28	3.15	4.16	4.54	0.19	0.90	0.81
2	backward_selected_PCA	-9999	3	20.30	3.42	4.51	4.87	0.21	0.88	0.78
3	forward_selected	['mean_elevat_m', 'un-terirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y']	3	15.31	3.05	3.91	4.11	0.19	0.91	0.83
4	forward_selected_PCA	-9999	3	18.63	3.31	4.32	4.01	0.21	0.89	0.80
5	RF_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp', 'mean_temp_wint']	3	19.40	3.36	4.40	5.14	0.21	0.89	0.79
6	RF_selected_PCA	-9999	3	18.63	3.31	4.32	4.01	0.21	0.89	0.80
7	PCR	-9999	3	17.65	3.32	4.20	4.80	0.20	0.90	0.81
8	backward_selected	['longitude', 'latitude', 'mean_slope', 'mean_hvp_wint']	4	13.04	2.91	3.61	3.18	0.19	0.93	0.86
9	backward_selected_PCA	-9999	4	16.71	3.23	4.09	3.30	0.21	0.90	0.82
10	forward_selected	['mean_elevat_m', 'un-terirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y', 'phase']	4	14.37	2.97	3.79	3.64	0.19	0.92	0.84
11	forward_selected_PCA	-9999	4	18.24	3.30	4.27	3.58	0.21	0.90	0.80
12	RF_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp', 'mean_temp_wint', 'mean_slope']	4	19.12	3.36	4.37	5.16	0.21	0.89	0.79
13	RF_selected_PCA	-9999	4	18.24	3.30	4.27	3.58	0.21	0.90	0.80
14	PCR	-9999	4	16.27	3.15	4.03	4.28	0.19	0.91	0.82
15	backward_selected	['longitude', 'latitude', 'mean_slope', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp_wint']	5	12.38	2.91	3.52	3.37	0.19	0.93	0.86
16	backward_selected_PCA	-9999	5	16.07	3.28	4.01	3.55	0.21	0.91	0.82
17	forward_selected	['mean_elevat_m', 'mean_slope', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y', 'phase']	5	13.02	2.90	3.61	3.28	0.19	0.93	0.86
18	forward_selected_PCA	-9999	5	18.09	3.35	4.25	3.25	0.22	0.90	0.80
19	RF_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp', 'mean_temp_wint', 'mean_slope', 'mean_durchlaessigkeit_cms-1']	5	19.02	3.37	4.36	5.04	0.21	0.89	0.79
20	RF_selected_PCA	-9999	5	18.09	3.35	4.25	3.25	0.22	0.90	0.80
21	PCR	-9999	5	16.15	3.19	4.02	4.10	0.20	0.91	0.82
22	backward_selected	['longitude', 'latitude', 'mean_slope', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp_summ', 'mean_hvp_wint']	6	11.61	2.82	3.41	3.29	0.19	0.93	0.87
23	backward_selected_PCA	-9999	6	15.95	3.28	3.99	2.94	0.26	0.91	0.83
24	forward_selected	['mean_elevat_m', 'mean_slope', 'forest', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y', 'phase']	6	12.39	2.81	3.52	2.79	0.17	0.93	0.86
25	forward_selected_PCA	-9999	6	17.66	3.29	4.20	2.89	0.21	0.90	0.81
26	RF_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp', 'mean_temp_wint', 'mean_slope', 'mean_durchlaessigkeit_cms-1', 'max_elevat_m']	6	18.78	3.38	4.33	4.98	0.21	0.89	0.80
27	RF_selected_PCA	-9999	6	17.66	3.29	4.20	2.89	0.21	0.90	0.81
28	PCR	-9999	6	15.64	3.16	3.95	4.00	0.20	0.91	0.83
29	backward_selected	['longitude', 'latitude', 'mean_slope', 'karst_aquifer', 'mean_temp_wint', 'mean_hvp_summ', 'mean_hvp_wint']	7	10.03	2.55	3.17	2.62	0.16	0.94	0.89
30	backward_selected_PCA	-9999	7	13.79	2.99	3.71	3.35	0.18	0.92	0.85
31	forward_selected	['mean_elevat_m', 'mean_slope', 'forest', 'drainage_density_kmkm-2', 'unterirdisch_unbestimmt_m', 'mean_precip_10y', 'phase']	7	12.09	2.77	3.48	3.01	0.17	0.93	0.87
32	forward_selected_PCA	-9999	7	17.70	3.30	4.21	3.33	0.21	0.90	0.81
33	RF_selected	['mean_elevat_m', 'mean_temp', 'mean_temp_wint', 'mean_slope', 'mean_durchlaessigkeit_cms-1', 'max_elevat_m', 'mean_temp_summ']	7	18.77	3.38	4.33	4.99	0.21	0.89	0.80
34	RF_selected_PCA	-9999	7	17.70	3.30	4.21	3.33	0.21	0.90	0.81
35	PCR	-9999	7	15.45	3.15	3.93	4.09	0.20	0.91	0.83

E. Abflusswerte für die EZG der Stadt Zürich

E.1. Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich

Gerinne	SST_Nr	M1		
		Q_{347} [L/s]	Q_{182} [L/s]	MQ [L/s]
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-03	0.0	0.1	0.2
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-01	0.0	0.5	0.5
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-05	0.0	0.7	0.4
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-04	0.1	1.0	0.9
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-10	0.4	4.8	4.2
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-11	0.7	6.6	4.2
Adlisbergbach / Sagentobelbach	97Zu529-14	7.7	27.5	24.0
Albisgüetlibach	97Zu307-02	0.1	0.5	0.6
Albisgüetlibach	97Zu307-04	0.2	0.7	0.6
Albisgüetlibach	97Zu307-06	2.3	6.6	5.9
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-01	0.3	1.9	2.6
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-04	0.4	2.5	3.2
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-05	1.9	11.7	9.1
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-10	4.3	15.5	13.9
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-15	4.4	15.4	14.3
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-18	6.7	17.3	18.9
Albisrieder Dorfbach	97Zu104-21	7.6	16.4	20.5
Algierbächli	97Zu108-04	0.1	0.3	0.1
Algierbächli	97Zu108-07	0.3	0.5	0.2
Algierbächli	97Zu108-08	1.1	1.9	2.3
Algierbächli	97Zu108-14	1.4	2.1	2.9
Algierbächli	97Zu108-20	2.0	1.8	4.4
Althoosbächli	97Zu516-03	0.1	1.0	0.1
Althoosbächli	97Zu516-05	0.3	1.8	0.6
Altstetter Unterdorfbach		5.9	9.4	13.0
Altstetter Unterdorfbach / Gyrhaldenbächli	97Zu105-04	0.9	3.2	2.3
Altstetter Unterdorfbach / Gyrhaldenbächli	97Zu105-09	1.8	6.4	4.9
Bannholzbach	97Zu521-04	0.1	1.1	0.5
Banzwiesenbach	97Zu304-02	0.2	1.1	1.5
Banzwiesenbach	97Zu304-05	0.4	1.4	1.6
Banzwiesenbach	97Zu304-08	0.6	1.6	1.7
Bombach	97Zu114-01	0.1	1.3	0.3
Bombach	97Zu114-03	0.2	1.7	0.3
Bombach	97Zu114-08	0.3	2.1	0.8
Bombach	97Zu114-11	0.5	2.8	3.2
Bombach	97Zu114-13	0.8	2.0	5.9
Brandbach / Schwamendinger Dorfbach	97Zu524-01	0.5	5.6	3.4
Brandbach / Schwamendinger Dorfbach	97Zu524-03	1.1	8.0	4.3
Brandbach / Schwamendinger Dorfbach	97Zu524-04	1.9	13.6	7.0
Brandbach / Schwamendinger Dorfbach	97Zu524-15	2.3	13.3	7.0
Brandbach / Schwamendinger Dorfbach	97Zu524-20	3.1	13.6	8.8

Tab. 30: Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 1

Gerinne	SST_Nr	M1		
		Q_{347} [L/s]	Q_{182} [L/s]	MQ [L/s]
Breitloobach	97Zu117-03	0.2	0.9	1.8
Breitloobach	97Zu117-06	0.6	1.3	2.8
Brüelbach	97Wa3.0-02	4.4	2.0	9.6
Brüelbach	97Wa3.0-05	5.4	3.9	11.5
Brüggelerbach	97Ru544-01	0.5	1.2	2.2
Brühlbach	97Zu523-01	5.9	4.9	11.7
Chatzenhaldenbach	97Zu540-02	0.1	0.9	0.8
Chlihölzlibach	97Zu538-02	0.0	0.2	0.2
Chüeweidbach	97Zu113-02	0.2	1.3	0.2
Degenriedbächli	97Zu402-01	0.3	1.5	0.0
Dienerhölzlibach	97Zu209-03	0.0	0.4	0.5
Dreiwiesenbächli	97Zu537-01	0.0	0.2	0.1
Döltschibach	97Zu115-03	1.2	4.9	4.5
Döltschibach	97Zu115-05	1.3	5.2	5.3
Döltschibach	97Zu115-06	1.5	5.4	5.6
Döltschibach	97Zu115-08	1.9	5.7	7.3
Döltschibach	97Zu115-13	2.4	5.6	8.4
Döltschibach	97Zu115-14	4.5	13.3	16.5
Döltschibach	97Zu115-25	5.1	12.9	17.1
Döltschibach	97Zu115-39	5.9	12.0	18.2
Döltschibach	97Zu115-45	7.0	11.2	20.3
Emmetbach	97Zu111-01	0.3	2.2	0.7
Emmetbach	97Zu111-06	0.4	2.5	0.5
Enzenbühlbächli	97Zu2081-1	0.0	0.0	0.1
Eschenhaldenbächli	97Zu405-01	0.0	0.4	0.4
Flunternerallemdbächli	97Zu531-01	0.1	1.5	2.3
Friedhofbach	97Zu5161-5	0.1	0.5	0.5
Friesenbergbach	97Zu303-01	0.3	1.3	1.3
Friesenbergbach	97Zu303-02	0.6	2.8	3.7
Friesenbergbach	97Zu303-06	1.4	4.2	5.6
Friesenbergbach	97Zu303-09	4.3	7.1	13.8
Föhreneggbach	97Zu308-04	0.7	2.8	3.0
Föhreneggbach	97Zu308-05	1.2	3.9	4.1
Fürtlibach		0.8	1.7	4.3
Gockhuserbach	97Du9.0-01	0.0	0.5	0.0
Grütholzbächli	97Zu205-01	0.0	0.2	0.0
Grütholzbächli	97Zu205-05	0.1	1.5	0.6
Gubelbach	97Zu110-03	0.1	0.6	0.9
Gubelbach	97Zu110-06	0.2	1.1	1.6
Hagenbuchrainbächli	97Zu109-04	0.0	0.1	0.4
Hagenbuchrainbächli	97Zu109-10	0.1	0.0	0.8
Hegibach	97Zu207-01	0.2	1.8	1.4
Hegibach	97Zu207-04	0.3	2.2	1.4
Holderbach / Dorfbach Affoltern	97Zu507-02	2.3	9.3	8.6
Holderbach / Dorfbach Affoltern	97Zu507-09	4.4	7.4	16.1
Holderbach / Dorfbach Affoltern	97Zu507-13	6.5	7.3	20.4
Hornhaldenbach	97Zu201-01	0.4	0.6	3.2

Tab. 31: Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 2

Gerinne	SST_Nr	M1		
		Q_{347} [L/s]	Q_{182} [L/s]	MQ [L/s]
Hubbach	97Zu112-02	0.7	4.1	2.4
Hubbach	97Zu112-03	1.1	6.7	3.2
Hungerbach / HWE Hungerbach	97Zu509-01	0.0	0.2	0.1
Hungerbach / HWE Hungerbach	97Zu509-06	0.0	0.3	0.0
Hungerberggraben		0.1	0.5	0.5
Höcklerbach	97Zu311-01	0.5	2.4	3.4
Höcklerbach	97Zu311-02	2.0	7.7	10.1
Höcklereggbach	97Zu322-01	0.2	0.8	0.6
Hüslibach	97Zu316-01	1.7	6.9	12.3
Hüslibach	97Zu316-02	2.0	7.5	14.0
Hüttenrainbach	97Zu543-02	0.1	0.8	0.4
Katzenbach	97Zu502-01	2.3	7.9	7.7
Katzenbach	97Zu502-02	4.0	11.8	13.5
Katzenbach	97Zu502-07	21.1	32.0	59.4
Katzenbach	97Zu502-09	26.5	41.0	71.8
Katzenbach	97Zu502-21	31.6	36.2	86.6
Klosbach	97Zu206-03	0.3	2.3	2.9
Klosbach	97Zu206-06	0.5	3.3	4.6
Kolbenhofbach	97Zu302-03	0.7	2.9	2.2
Kolbenhofbach	97Zu302-04	0.8	3.2	2.5
Kolbenhofbach	97Zu302-05	1.3	5.1	5.2
Kolbenhofbach	97Zu302-07	1.7	6.0	6.2
Kolbenhofbach	97Zu302-11	2.1	6.3	7.4
Kolbenhofbach	97Zu302-14	3.0	7.2	9.9
Käshaldengraben	97Zu504-03	1.1	2.5	4.6
Leimbach / Hirzenbach	97Zu528-01	0.1	0.9	0.8
Leimbach / Hirzenbach	97Zu528-04	0.3	2.9	1.6
Leimbach / Hirzenbach	97Zu528-05	0.8	4.8	3.1
Leimbach / Hirzenbach	97Zu528-09	0.9	6.6	5.9
Leimbach / Hirzenbach	97Zu528-13	2.0	5.7	8.0
Leiterlibergbach	97Zu317-02	0.5	2.2	4.3
Loorenbach	97Zu406-03	0.1	1.3	1.4
Läufebach	97Zu116-03	0.9	4.6	4.2
Läufebach	97Zu116-06	1.1	5.8	5.4
Maasbächli	97Zu121-05	0.0	0.1	0.2
Maneggbach	97Zu313-03	0.1	0.3	0.4
Maneggbach	97Zu313-06	0.2	0.4	1.2
Maneggbach	97Zu313-09	0.2	0.4	1.4
Medikerbodenbach	97Zu312-01	0.6	2.6	4.2
Mittelgraben	97Zu514-01	0.7	1.5	2.0
Mühlehaldenbach	97Zu120-03	0.1	0.0	1.7
Mühlehaldenbach	97Zu120-09	0.2	0.0	2.2
Müserenbach		0.6	3.5	5.9
Nebelbach	97Zu208-01	0.6	5.8	8.2
Nebelbach	97Zu208-07	0.7	7.0	10.7
Nebelbach	97Zu208-10	1.3	9.3	18.2
Nebelbach	97Zu208-16	2.3	10.7	20.4
Nebelbach	97Zu208-18	2.4	10.8	20.6

Tab. 32: Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 3

Gerinne	SST_Nr	M1		
		Q_{347} [L/s]	Q_{182} [L/s]	MQ [L/s]
Neugutbach	97Zu519-01	0.0	0.2	0.8
Neugutbach	97Zu519-05	0.1	0.3	1.8
Neugutbach	97Zu519-10	0.2	0.0	3.1
Oerisbach	97Zu122-04	0.0	0.3	0.3
Oerisbach	97Zu122-06	0.1	0.5	0.8
Oerisbach	97Zu122-09	0.1	1.0	1.4
Peterstobelbach	97Zu522-01	0.4	2.0	0.9
Pilgerholzbächli	97Zu2051-4	0.0	0.3	0.5
Raintobelbach	97Zu408-02	0.1	0.3	1.1
Rebrainbach	97Zu534-01	0.4	3.3	0.8
Riedenhholzgraben	97Zu505-02	0.1	0.2	0.0
Riedenhholzgraben	97Zu505-03	0.6	2.1	2.3
Riedgraben / Leutschenbach	97Zu501-05	13.5	0.0	57.5
Risbach	97Zu319-01	0.1	0.5	0.4
Risbach	97Zu319-03	0.3	1.2	1.3
Risbach	97Zu319-07	0.7	1.7	3.9
Risbach	97Zu319-08	0.8	1.5	4.5
Rohrgraben	97Zu513-01	0.0	0.4	0.5
Rohrgraben	97Zu513-02	0.1	0.5	0.7
Rohrgraben	97Zu513-04	0.3	2.8	3.3
Rotstapfenbächli	97Zu1081-1	0.7	1.2	1.8
Rütenebächli	97Zu119-02	0.1	0.5	0.9
Rütenebächli	97Zu119-04	0.2	0.5	0.9
Rütschlibach	97Zu314-02	0.7	2.5	3.6
Sagentobelbach		2.2	15.1	8.1
Sagentobelbach	97Du2.0-02	5.9	26.3	22.1
Salzwegbächli	97Zu107-02	0.3	0.6	0.4
Sarbentalbach	97Zu309-02	0.5	1.9	2.5
Sarbentalbach	97Zu309-04	0.7	2.4	2.6
Sarbentalbach		1.1	3.2	2.7
Schafmattbächli	97Zu517-03	0.1	0.7	0.4
Schwarzbach	97Zu320-03	0.2	1.0	1.4
Schwarzbach	97Zu320-04	1.0	3.5	5.2
Schwesternbungertbach	97Zu525-03	0.2	1.6	0.5
Schwesternbungertbach	97Zu525-01	0.2	1.8	1.3
Schwesternbungertbach	97Zu525-02	0.6	3.5	1.6
Segetenbach	97Zu411-01	0.1	0.5	3.3
Spitalerbach	97Zu520-01	0.2	1.0	0.1
Spitalerbach	97Zu520-02	0.5	3.3	1.1
Spitalerbach	97Zu520-04	0.6	3.7	1.4
Spitalerbach	97Zu520-05	0.8	5.3	2.3
Spitalerbach	97Zu520-06	1.0	6.2	3.5
Steinwiesbächli	97Zu101-03	0.0	0.3	0.0
Steinwiesbächli	97Zu101-06	0.1	0.8	0.1

Tab. 33: Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ-Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 4

Gerinne	SST_Nr	M1		
		Q_{347} [L/s]	Q_{182} [L/s]	MQ [L/s]
Strickhofbach	97Zu5201-4	0.6	4.0	1.3
Stöckentobelbach	97Zu401-04	0.3	3.0	2.5
Stöckentobelbach	97Zu401-06	1.2	7.1	8.6
Stöckentobelbach	97Zu401-07	2.3	11.0	19.1
Stöckentobelbach	97Zu401-08	4.4	21.4	29.6
Sädlenbach	97Zu118-03	0.1	0.3	0.4
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-01	0.1	1.0	0.7
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-09	0.2	1.2	1.4
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-12	0.3	1.6	2.0
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-20	5.2	8.1	19.6
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-22	8.0	5.7	33.1
Sägertenbach / Binzmühlebach	97Zu515-28	10.8	2.0	50.2
Talwiesenbach	97Zu306-06	0.4	1.6	2.5
Thalbächli	97Zu106-03	0.1	0.2	0.3
Thalbächli	97Zu106-02	0.1	0.3	0.0
Thalbächli	97Zu106-07	1.3	2.3	2.6
Tuschgenbach	97Zu315-01	0.2	0.8	1.3
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-01	0.0	0.3	0.0
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-04	0.0	0.5	0.0
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-05	0.1	0.7	0.0
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-08	0.1	0.8	0.0
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-11	0.1	1.0	0.2
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-15	0.1	1.1	0.4
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-17	0.1	1.2	0.4
Waidbach / Wolfgrimmbach	97Zu123-26	0.2	1.1	0.8
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-01	7.4	53.8	76.3
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-03	10.2	65.1	101.9
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-04	10.8	66.6	108.0
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-07	11.3	67.7	113.1
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-08	17.7	91.0	144.4
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-14	19.0	93.0	153.3
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-16	18.8	92.5	155.3
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-19	20.2	98.4	167.0
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-27	20.3	98.2	167.3
Wehrenbach / Wildbach / Hornbach	97Zu400-32	20.5	97.3	167.6
Wolfbach	97Zu203-01	0.5	4.2	3.4
Wolfbach	97Zu203-04	0.9	6.4	8.3
Wolfbach	97Zu203-06	0.9	6.6	9.0

Tab. 34: Auflistung der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ -Werte für die EZG der Stadt Zürich, Teil 5

E.2. Grafiken der Q_{347} -, Q_{182} - und MQ -Werte für die EZG der Stadt Zürich

