



Einzugsgebietscharakterisierung von Quellen als Grundlage für wasserwirtschaftliche Überlegungen in Bezug auf Klimawandel - EZGQklim

Bericht

Simon Kainz¹, Thomas Wagner¹, Heike Brielmann², Albrecht Leis³, Jennifer Brandstätter¹, Matthias Hausleber¹, Maria Obwegs¹, Michael Avian⁴, Klaus Haslinger⁴, Gerfried Winkler¹

¹Institut für Erdwissenschaften, NAWI-Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz,
Heinrichstraße 26, A-8010 Graz

²Umweltbundesamt GmbH, Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien

³JR-AquaConSol, Steyrergasse 21, A-8010 Graz

⁴Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Hohe Warte 38, A-1190 Wien

Auftrag

Das Land Steiermark, vertreten durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14, Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, Wartingergasse 43, 8010 Graz, sowie Abteilung 15, Energie, Wohnbau, Technik, Landhausgasse 7, 8010 Graz, beauftragte die Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, Heinrichstraße 26, 8010 Graz mit der Durchführung des Forschungsprojektes

„Einzugsgebietscharakterisierung von Quellen als Grundlage für wasserwirtschaftliche Überlegungen in Bezug auf Klimawandel – EZGQklim“

Die Finanzierung erfolgte durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 und Abteilung 15. Die Auftraggeber wurden vertreten durch Dipl. Ing. Dr. Robert Schatzl (Abteilung 14) und Dr. Michael Hochreiter (Abteilung 15).

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
1. Einleitung	6
2. Methodik	8
2.1. Datengrundlage.....	8
2.2. Niederschlags-Abfluss-Modellierung	11
2.2.1. Modellstruktur	11
2.2.2. Bewertung.....	18
2.3. Isotopenanalyse	23
2.3.1. Probenahme	23
2.3.2. Laboranalytik.....	23
2.3.3. Auswertung der Isotopendaten.....	23
2.3.3.1. Mittlere Einzugsgebietshöhe	24
2.3.3.2. Mittlere Verweilzeit	26
2.4. Trendanalyse	27
3. Ergebnisse	29
3.1. Niederschlags-Abfluss-Modellierung	29
3.1.1. Ergebnisse der einzelnen Quellen.....	32
3.1.1.1. Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913).....	32
3.1.1.2. Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970)	39
3.1.1.3. Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796)	45
3.1.1.4. Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788).....	55
3.1.1.5. Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754).....	63
3.1.1.6. Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855)	69
3.1.1.7. Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905)	76
3.1.1.8. Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770)	86
3.1.1.9. Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897).....	94
3.1.1.10. Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848)	103
3.1.1.11. Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996).....	111

3.1.1.12.	Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822)	121
3.1.1.13.	Sagtümpel (HZB-Nr. 395863).....	131
3.1.1.14.	Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762)	143
3.1.1.15.	Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939)	148
3.1.1.16.	Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871).....	157
3.2.	Isotopenanalyse	166
3.2.1.	Höhenabhängigkeit von $\delta^{18}\text{O}$ im Niederschlag	166
3.2.2.	Kennwerte und Dynamik von $\delta^{18}\text{O}$ in den Quellen.....	169
3.2.3.	Mittlere Verweilzeiten der Quellschüttungskomponente	174
3.2.4.	Mittlere Höhenlage der Quelleinzugsgebiete	174
3.3.	Trendanalyse	178
4.	Interpretation und Diskussion	182
4.1.	N-A- Modellierung	182
4.2.	Synthese	185
4.2.1.	Mittlere Einzugsgebietshöhe	185
4.2.2.	Mittlere Verweilzeit	189
5.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	191
	Literatur	194
	Anhang: Messwerte.....	203

Danksagung

An dieser Stelle sei Dr. Ralf Benischke für aufschlussreiche Diskussion und Erläuterung der lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten herzlich gedankt. Des Weiteren bedanken sich die Autoren bei Dipl.-Ing. Mag. Jutta Eybl, Mag. Dr. Michael Ferstl, Mag. Peter Rauch und Mag. Barbara Stromberger für die konstruktive Diskussion und hilfreiche Stellungnahmen. Dem Hydrografischen Dienst Steiermark wird für die Bereitstellung der Quellschüttungs- und Leitfähigkeits-Aufzeichnungen, der GIS-Abteilung des Landes Steiermark für die Bereitstellung der ALS-Datensätze sowie der digitalen geologischen Karte gedankt.

1. Einleitung

Seitens des BMLRT ist es geplant österreichweit die Quellen, die im Monitoring-Netz des Hydrographischen Zentralbüros (HZB) sind, in Bezug auf ihre Einzugsgebiete detaillierter zu charakterisieren. Für die Steiermark wurden daher die Einzugsgebiete der Quellen, die dem Monitoring des hydrographischen Dienstes zugeordnet sind, mit Hilfe eines multidisziplinären Ansatzes qualitativ wie auch quantitativ erfasst.

Quellwässer sind eine unverzichtbare Ressource für die Wasserversorgung Österreichs und im Speziellen der Steiermark. 67% der für die zentrale Wasserversorgung in Österreich genutzten Wasserspender sind Quellen (ÖWAV-205, 2015; Berka et al., 2014). Österreich ist basierend auf dem Wasserrechtsgesetz (WRG) und der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) verpflichtet, Grundwasser und im Speziellen auch Quellwasservorkommen sowohl quantitativ als auch qualitativ zu überwachen. Dies erfolgt im Wesentlichen über das Messnetz des HZB und der entsprechenden hydrographischen Dienste der Bundesländer und dem Messnetz gemäß Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV).

Bis dato wurde jedoch keine systematische hydrogeologische Charakterisierung der Quellwässer unter Einbindung der vorliegenden Langzeitdaten durchgeführt. Es liegt lediglich eine erste Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse der potenziellen Einzugsgebiete der Quellen in Form von Stammdatenblättern basierend auf Literaturstudien und in 2017/2018 erhobenen Isotopendaten ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) vor (Umweltbundesamt 2019, HyDaMS¹). An den Messstellen des Landes Steiermark wurde nun als Pilotstudie eine hydrogeologische Charakterisierung der Quellwässer selbst sowie der dahinterliegenden Einzugsgebiete erarbeitet. Die Untersuchungen basieren sowohl auf hydrologischen, hydrochemischen als auch isotopenhydrologischen Daten. Die Charakterisierung der Quellen und ihrer Einzugsgebiete erfolgte nach dem aktuellen Stand der Forschung und unter Anwendung eines multidisziplinären Ansatzes, welcher eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung einschließt, der in weiterer Folge mit den Ergebnissen isotopenhydrologischer Analysen verglichen und ergänzt wurde. Durch die gemeinsame Interpretation konnten die Unsicherheiten beider methodischer Ansätze minimiert werden.

Die Ergebnisse sind als wesentliche Grundlagen für künftige wasserwirtschaftliche Fragestellungen in Zusammenhang mit Quellwässern und ihrer Einzugsgebiete sowohl in

¹ [HyDaMS - das Hydrographische Datenmanagement System](#)

quantitativer als auch qualitativer Hinsicht zu sehen. Dies gewinnt vor allem unter Berücksichtigung des fortschreitenden Klimawandels und der damit verbundenen Auswirkungen und Herausforderungen durch die sich ändernde Grundwasserneubildung an Bedeutung. Die Kenntnis über Verweilzeit, Speichervolumina und Einzugsgebietsdimension ermöglicht eine planbare, nachhaltige Nutzung dieser Quellwässer und stellt somit einen bedeutenden Mehrwert zur Studie „Wasserschatz 2050“ dar.

Im Zuge des Projekts wurden die bereits beim HZB zur Verfügung stehenden Langzeitdaten der Messstellen herangezogen und in Bezug auf Trends in Abhängigkeit klimatischer Änderungen ausgewertet. Die Auswertungen ermöglichten eine Charakterisierung der Quellen in Bezug auf Schüttungsdynamik, Speichervolumen und Verweilzeiten. Somit dienen die Ergebnisse auch der Charakterisierung der Grundwasserkörper, denen die Quellen zugeordnet werden können.

2. Methodik

Im Zuge der vorliegenden Pilotstudie wurden Entwässerungsdynamik und Speicherverhalten der steirischen Quellmessstellen des HZB durch Kombination zweier unabhängiger Untersuchungsansätze analysiert. Für jede Quelle wurden mehrere mögliche Einzugsgebiete ausgewiesen, ihre hydrologische Plausibilität mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung bewertet und die Ergebnisse durch Analyse der Isotopensignatur (^2H , ^{18}O) der Quellwässer ergänzt. Des Weiteren wurden die Langzeitdaten genutzt, um die Quellen in ihrer Entwässerungsdynamik und ihrem Speicherverhalten zu charakterisieren und Trends mit Hilfe statistischer Methoden zu erfassen.

2.1. Datengrundlage

Grundlage für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung und Trendanalysen bilden die vom hydrographischen Dienst Steiermark an 17 Quellen aufgezeichneten Quellschüttungsganglinien (Abbildung 1, Tabelle 1). Aufgrund der nicht ausreichenden Datengrundlage bei der Quelle Totes Weib (HZB-Nr. 396812) wurde für diese Quelle kein Einzugsgebiet mit Hilfe der Niederschlags-Abfluss-Modellierung ermittelt. Die Zeitreihen

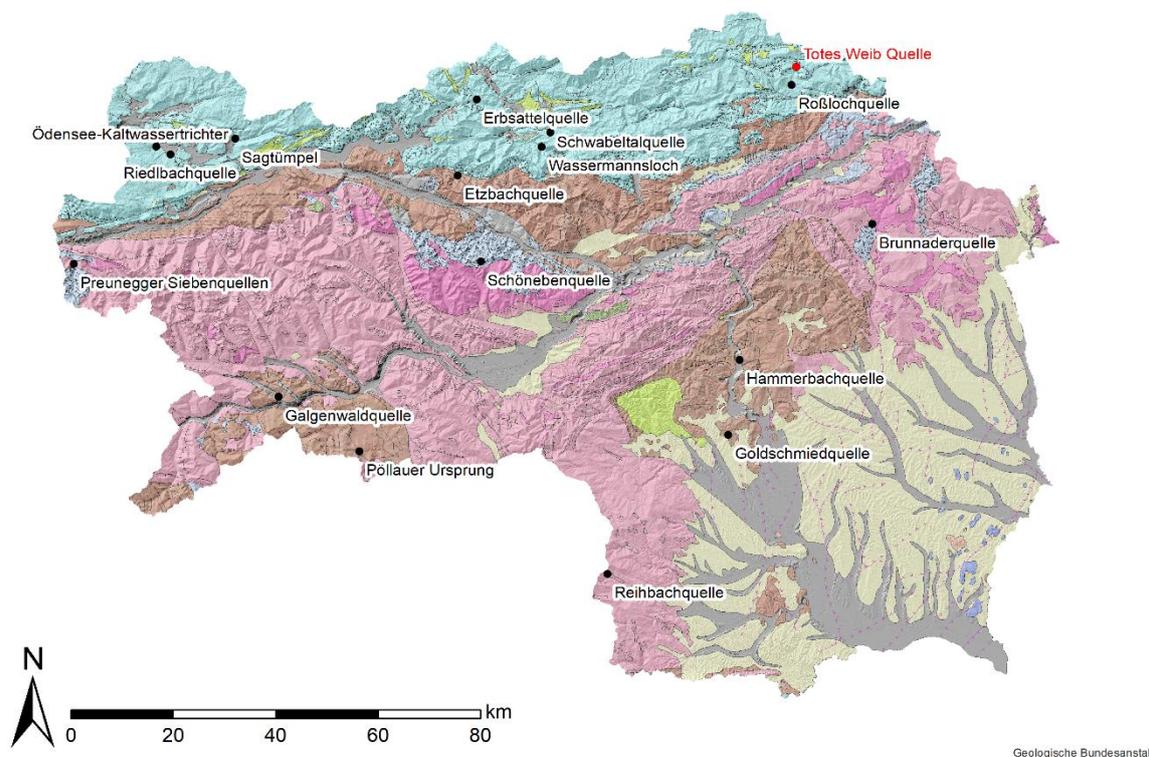


Abbildung 1: Quellenmessstellen des Hydrografischen Dienstes Steiermark. Im Fall der Totes Weib Quelle (rot dargestellt) wurde aufgrund der kurzen Datenreihe von einer N-A Modellierung und Trendanalyse abgesehen. Geologische Kartengrundlage: Geologische Bundesanstalt (www.geologie.ac.at)

umfassen Beobachtungszeiträume zwischen 4 und 22 Jahren und liegen auf Stundenbasis vor. Ergänzend wurden Aufzeichnungen der elektrischen Leitfähigkeit zur regionalen hydrogeologischen Interpretation herangezogen, die ebenfalls mit stündlicher Auflösung vorliegen. Diese Daten wurden auf Tagesbasis gemittelt, wobei lediglich Tage miteinbezogen wurden, an denen zumindest 80 % von stündlichen Messwerten abgedeckt werden. Alle Zeitreihen wurden anschließend einer visuellen Plausibilitäts- und Homogenitätskontrolle unterzogen.

Als Grundlage für die Ausweisung potenzieller Quelleinzugsgebiete diente ein Höhenmodell des Landes Steiermark (horizontale Auflösung 1 m), erstellt auf Basis hochauflösender Airborne Laserscanning Daten, ergänzt durch Heranziehen der entsprechenden geologischen Karten im Maßstab 1:50 000 sowie Ergebnissen von Markierungsversuchen. Anhand des Höhenmodells wurde für jedes potenzielle Quelleinzugsgebiet die Verteilung der Seehöhe ermittelt. Als Eingangsdaten für das verwendete Niederschlags-Abfluss-Modell dienten Rasterdaten (1 x 1 km) mit Tagesauflösung von Lufttemperatur, Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration des SPARTACUS (Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria; Hiebl und Frei, 2016, 2018) bzw. ARET (Austrian Reference Evapotranspiration Dataset; Haslinger und Bartsch, 2016) Datensatzes. Beide Datensätze wurden für den Zeitraum 1.1.1976 bis 31.12.2017 mit den potenziellen Einzugsgebieten der Quellen verschnitten und auf Tagesbasis flächengewichtet gemittelt.

Tabelle 1: Untersuchte Quellen. Die jeweilige Lage ist in Abbildung 1 dargestellt.

Messstelle	HZB-Nr.	Zeitreihe Quellschüttung
Brunnaderquelle	395913	24.07.1998 – 31.12.2017
Erbsattelquelle	395970	27.07.2006 – 31.12.2017
Etzbachquelle	396796	01.01.2014 – 31.12.2017
Galgenwaldquelle	396788	12.07.2010 – 31.12.2017
Goldschmiedquelle	396754	26.03.2009 – 31.12.2017
Hammerbachquelle	395855	06.12.1995 – 31.12.2017
Ödensee-Kaltwassertrichter	395905	24.06.1998 – 31.12.2017
Pöllauer Ursprung	396770	14.07.2011 – 31.12.2017
Preunegger Siebenquellen	395897	01.01.1998 – 31.12.2017
Reihbachquelle	395848	01.01.1997 – 31.12.2017
Riedlbachquelle	395996	01.01.2008 – 31.12.2017
Roßlochquelle	395822	01.07.1997 – 13.01.2014
Sagtümpel	395863	30.06.1998 – 31.12.2017
Schönebenquelle	396762	01.06.2002 – 31.12.2017
Schwabeltalquelle	395939	18.04.1999 – 31.12.2017
Totes Weib Quelle*	396812	15.11.2016 – 31.12.2017
Wassermannsloch	395871	01.01.1997 – 31.12.2017

*keine N-A Modellierung und Trendanalyse aufgrund der kurzen Datenreihe

2.2. Niederschlags-Abfluss-Modellierung

2.2.1. Modellstruktur

Für jede Quelle wurde eine Reihe potenzieller Quelleinzugsgebiete ausgewiesen, die Verteilung der Seehöhe im Einzugsgebiet berechnet sowie tägliche, flächengewichtete Mittelwerte für Niederschlag, Lufttemperatur und potenzielle Evapotranspiration berechnet. Anschließend wurde für jedes dieser potenziellen Einzugsgebiete eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden das Niederschlags-Abfluss Modell GR4J (Perrin et al., 2003) und das Tag-Grad Schneemodell CemaNeige (Valéry et al., 2014b) gekoppelt (Abbildung 2). Bei beiden Modellen handelt es sich um parameterarme, globale Modelle, deren Berechnungsschritte nicht unmittelbar mit physikalischen Prozessen identifiziert werden können. Die Modellparameter können jedoch indirekt, d. h. in Form „effektiver Parameter“, mit physikalischen Prozessen in Zusammenhang gebracht werden (vgl. Edijatno et al., 1999; Mouelhi et al., 2006; Perrin et al., 2003; Valéry et al., 2014a, b, Wagner et al., 2013, 2016, 2021). Im Sinne der Veranschaulichung werden diese im Folgenden mit den effektiv zugehörigen physikalischen Prozess- und Zustandsgrößen bezeichnet. Jede dieser Größen wird für jeden Tag berechnet, wobei die einzelnen Tage mit der Variablen i indiziert werden.

Die jeweilige Modellstruktur (Abb. 2) wurde anhand einer großen Anzahl von Einzugsgebieten (Abbildung 3a; GR4J: 429 Einzugsgebiete; CemaNeige: 380 Einzugsgebiete) dahingehend optimiert, dass sie bei möglichst geringer Modellkomplexität (Anzahl an Freiheitsgraden) in der Lage ist, ein möglichst großes Spektrum hydrologischer Bedingungen abzubilden. Aufgrund dieser Eigenschaft haben sich die Modelle insbesondere im alpinen Raum (begrenzte Datenverfügbarkeit) bewährt.

Das jeweilige Einzugsgebiet wird in fünf Höhenstufen gleicher Fläche geteilt. Anhand von Höhenlage und Lufttemperatur T [°C] wird zwischen flüssigem (Regen P_R [mm]) und festem (Schneefall P_S [mm]) Niederschlag unterschieden (Valéry et al., 2014b): Für hochalpine Einzugsgebiete (mittlere Seehöhe > 1500 m ü. A.) wird dafür zwischen -1°C und +3°C ein stetiger Übergang von Schnee zu Regen angenommen (Abbildung 3b; US Army Corps of Engineers, 1956; L'Hôte et al., 2005):

$$\frac{P_{S,i}}{P_i} = \begin{cases} 1 & \text{für } T < -1^\circ\text{C} \\ 1 - \frac{T + 1}{4} & \text{für } -1 \leq T \leq 3^\circ\text{C} \\ 0 & \text{für } T > 3^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Gl. 1}$$

Der flüssige Niederschlag (P_R) ergibt sich aus der Differenz von Gesamtniederschlag P [mm] und P_S .

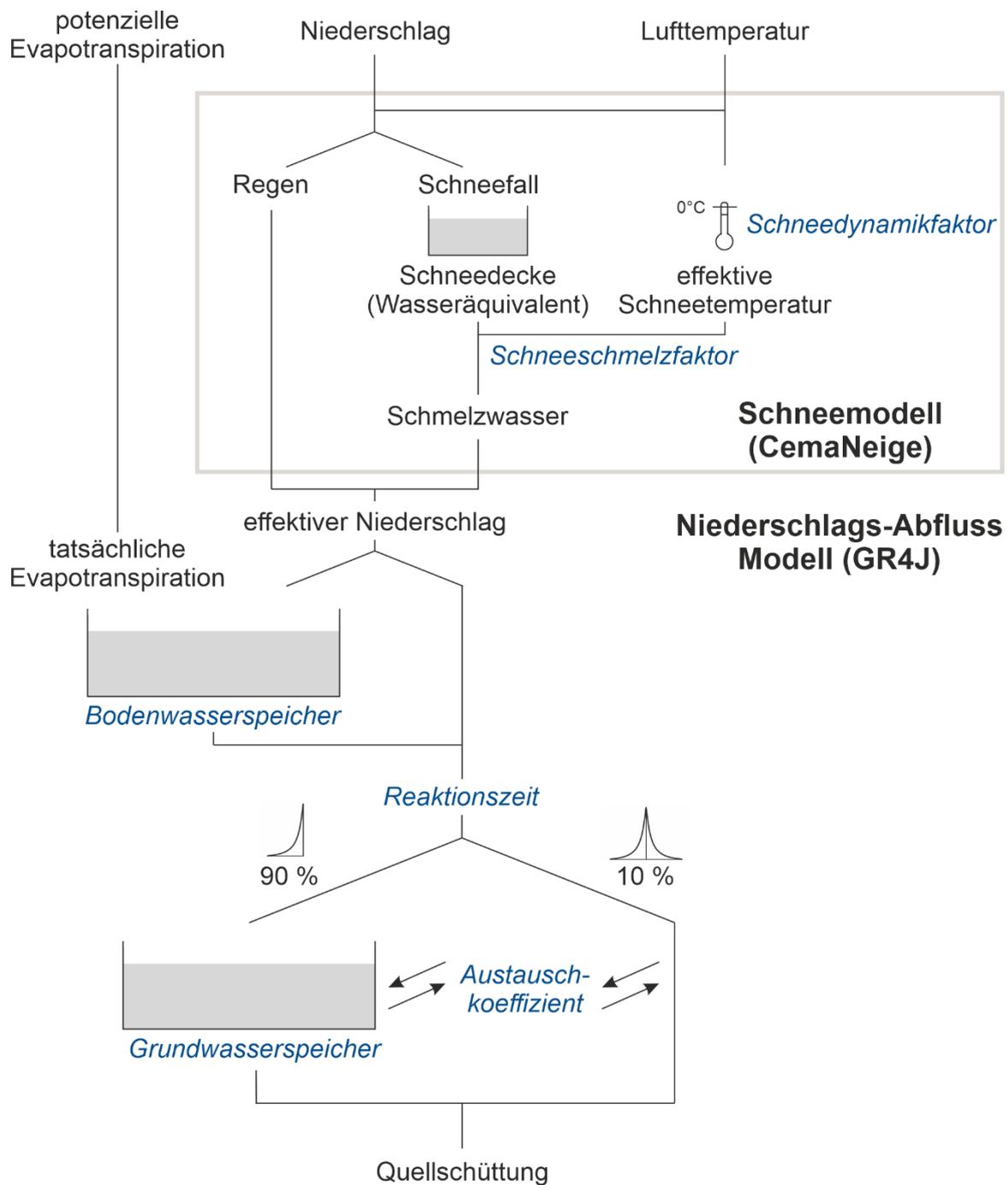


Abbildung 2: Modellstruktur des Schneemodells CemaNeige (Valéry et al., 2014b) und Niederschlags-Abfluss Modells GR4J (Perrin et al., 2003). Im Zuge der Kalibration jeweils angepasste Parameter sind blau und *kursiv* dargestellt.

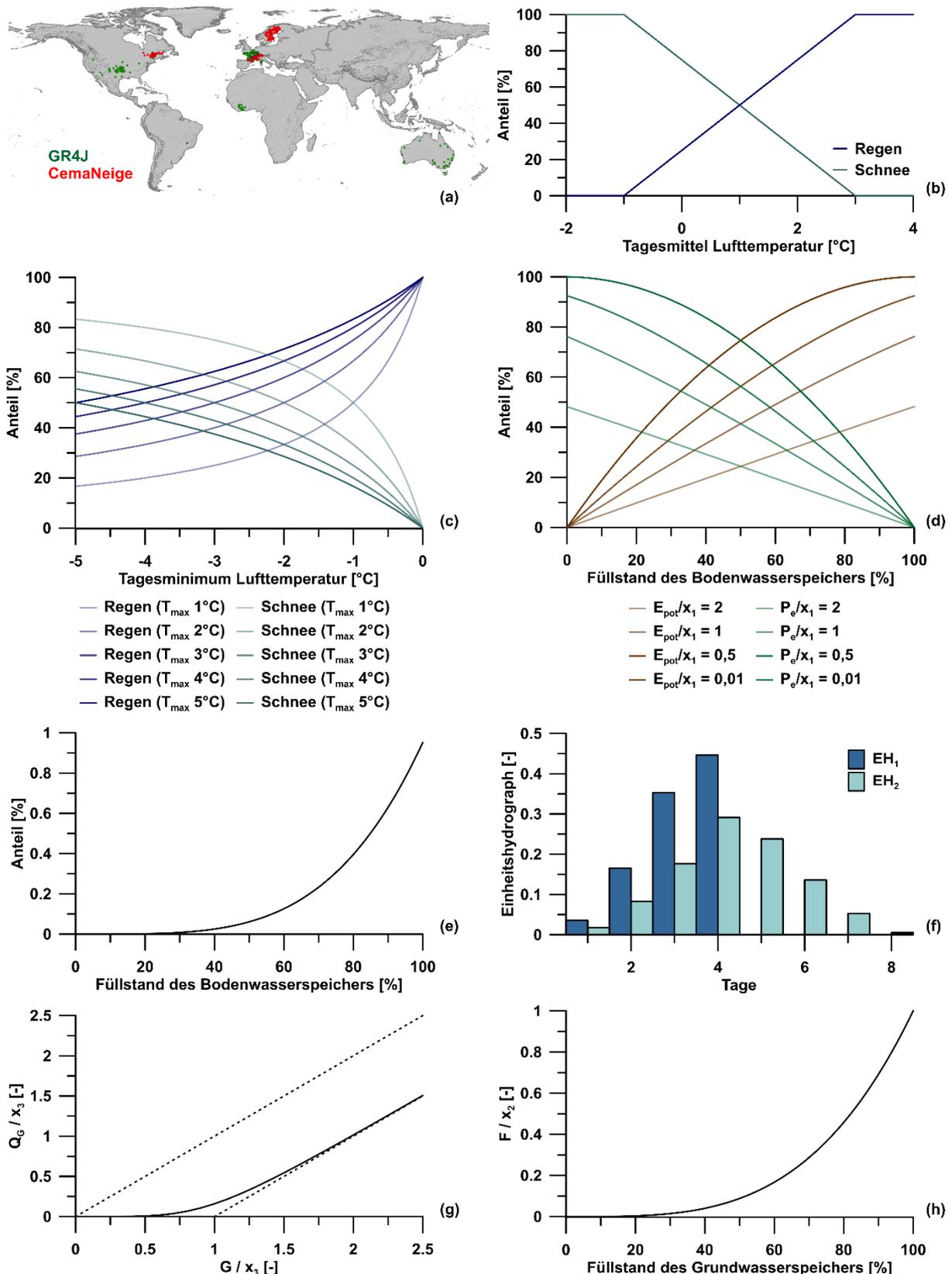


Abbildung 3: (a) Referenzeinzugsgebiete des Schneedmodells (CemaNeige, rot) sowie des Niederschlags-Abfluss-Modells (GR4J, grün) (b) Aufteilung des Niederschlags in Regen und Schneefall in hochalpinen Einzugsgebieten (Mittlere Seehöhe > 1500 m ü. A.) (c) Aufteilung des Niederschlags in voralpinen Einzugsgebieten (Mittlere Seehöhe < 1500 m ü. A.) (d) Infiltration in und Verdunstung aus dem Bodenwasserspeicher bei unterschiedlichen Füllständen (e) Versickerung aus dem A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Bodenwasserspeicher in Abhängigkeit des Füllstands (f) Verzögerung durch Einheitshydrographen für eine Reaktionszeit von 3,8 Tagen (g) Beitrag des Grundwasserspeichers zur Quellschüttung in Abhängigkeit vom Füllstand (h) Austauschterm in Abhängigkeit vom Füllstand des Grundwasserspeichers. (E_{pot} = potenzielle Evapotranspiration, F = Austauschterm, G = im Grundwasserspeicher vorhandene Wassermenge, P_e = effektiver Niederschlag, Q_G = Wasserabgabe des Grundwasserspeichers, T_{max} = Tageshöchsttemperatur, T_{min} = Tagestiefsttemperatur, x_1 = Bodenwasserspeicherkapazität, x_2 = Austauschkoeffizient, x_3 = Grundwasserspeicherkapazität)

Für tiefer gelegene Einzugsgebiete wird die Form des Niederschlags anhand der täglichen Höchst- und Tiefsttemperatur (Tageshöchsttemperatur T_{max} [°C], Tagestiefsttemperatur T_{min} [°C]; Lufttemperatur gemäß SPARTACUS Datensatz) bestimmt (Abbildung 3c; Leavesley und Stannard, 1995; Turcotte et al., 2007):

$$\frac{P_{S,i}}{P_i} = \begin{cases} 1 & \text{für } T_{max} \leq 0^\circ C \\ 1 - \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} & \\ 0 & \text{für } T_{min} \geq 0^\circ C \end{cases} \quad \text{Gl. 2}$$

Mittelwerte für Niederschlag und Lufttemperatur werden für jede Höhenstufe anhand eines multiplikativen Höhengradienten (Niederschlag) bzw. monatlich additiver Höhengradienten (Lufttemperatur) getrennt berechnet (Valéry et al., 2010, 2014b). Anschließend werden die Anteile festen und flüssigen Niederschlags für jede Höhenstufe anhand von Gl. 1 bzw. Gl. 2 bestimmt.

Der feste Niederschlag trägt zum Aufbau der Schneedecke bei, deren Wasseräquivalent und Kälteinhalt für jede der fünf Höhenstufen getrennt ermittelt werden (Valéry et al., 2014b). Die Schneedecke, ausgedrückt als Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent) S [mm], gewinnt an Volumen durch Schneefall und verliert daran durch Schneeschmelze (Abbildung 2, Abbildung 3b,c). Ihr Kälteinhalt hängt vom Schneedynamikfaktor c_1 [-] (zwischen 0 und 1) sowie der mittleren Lufttemperatur ab und entspricht in etwa einer effektiven Schneetemperatur $T_S \leq 0^\circ C$ (Valéry et al., 2014b)

$$T_{S,i} = c_1 T_{S,i-1} + (1 - c_1)T_i \quad \text{Gl. 3}$$

Bei hohem Schneedynamikfaktor reagiert die Schneedecke entsprechend träge auf Änderungen der Lufttemperatur. Bei ausreichend hoher Lufttemperatur und einer effektiven Schneetemperatur von $0^\circ C$ wird anhand des Schneeschmelzfaktors c_2 [mm/(°C Tag)] die anfallende Schmelzwassermenge SW [mm] ermittelt (Valéry et al., 2014b)

$$SW_i = (0,9A_{S,i} + 0,1)c_2 T_i \quad \text{Gl. 4}$$

(Schneedeckenanteil A_s [-]). Insbesondere in alpinen Einzugsgebieten ist die Schneedeckenhöhe ungleichmäßig verteilt. Während die Verteilung in Abhängigkeit der Seehöhe durch die separate Berechnung der Schneedecke für fünf Höhenstufen berücksichtigt wird, besteht in der Regel auch innerhalb jeder Höhenstufe eine ungleichmäßig ausgebildete Schneedecke infolge lokal variierender Hangausrichtung, Vegetationsbedeckung, Bodenbeschaffenheit, dominierender Windmuster sowie kleinräumiger Reliefformen. Diese ungleichmäßige Verteilung verringert die Schneeschmelzrate (WMO, 1986; Blöschl et al., 1991). Gl. 4 berücksichtigt diesen Einfluss durch Einbeziehung des Schneedeckenanteils A_s , der bei Fehlen entsprechender Beobachtungsdaten geschätzt wird gemäß (Valéry et al., 2014b)

$$A_{S,i} = \frac{S_i}{c_3} \quad \text{Gl. 5}$$

(empirischer Schwellenwert c_3 [mm]). Eine detaillierte Erläuterung des empirischen Schwellenwerts sowie der zu Grunde liegenden Beobachtungen geben Valéry (2010), Valéry et al. (2014a,b) sowie Riboust et al. (2019).

Anhand von potenzieller Evapotranspiration, Schmelz- und Regenwassermenge wird der effektive Niederschlag $P_e \geq 0$ mm berechnet (Perrin et al., 2003)

$$P_{e,i} = P_i - ET_{pot,i} \quad \text{Gl. 6}$$

(potenzielle Evapotranspiration ET_{pot} [mm], Niederschlag P [mm]). Für $ET_{pot,i} > P_i$ gilt $P_{e,i} = 0$ und $ET_{pot,i}$ wird durch $ET_{pot,i} - P_i$ ersetzt. Ein Anteil P_B [mm] des effektiven Niederschlags füllt den Bodenwasserspeicher (Füllstand B [mm], Kapazität x_1 [mm]), der seinerseits Wasser durch (tatsächliche) Evapotranspiration ET [mm] und Versickerung V [mm] verliert (Abbildung 3d,e; Perrin et al., 2003):

$$P_{B,i} = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{B_i}{x_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_{e,i}}{x_1}\right)}{1 + \frac{B_i}{x_1} \tanh\left(\frac{P_{e,i}}{x_1}\right)} \quad \text{Gl. 7}$$

$$ET_i = \frac{B_i \left(2 - \frac{B_i}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{ET_{pot,i}}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{B_i}{x_1}\right) \tanh\left(\frac{ET_{pot,i}}{x_1}\right)} \quad \text{Gl. 8}$$

$$V_i = B_i \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4 B_i}{9 x_1}\right)^4\right)^{-1/4}\right) \quad \text{Gl. 9}$$

Bei niedrigem Füllstand weist der Bodenwasserspeicher demnach eine hohe Infiltrationskapazität auf (Abbildung 3d), während die tatsächliche Evapotranspiration und Versickerung asymptotisch gegen null gehen (Abbildung 3d,e). Bei hohem Füllstand nimmt

die Infiltrationskapazität entsprechend ab, während tatsächliche Evapotranspiration und Versickerung zunehmen (Abbildung 3d,e). Insgesamt trägt die Versickerung aus dem Bodenwasserspeicher nur untergeordnet zu Quellschüttung und Grundwasserneubildung bei (Abbildung 3e), ihr kommt im Wesentlichen bei geringer Quellschüttung Bedeutung zu.

Das verbleibende (nicht in den Bodenwasserspeicher infiltrierende) Wasser ($P - P_B$) erreicht zusammen mit der Versickerung des Bodenwassers die Quelle über zwei konzeptionelle Fließpfade, die einer verzögerten (90 %) und einer schnellen (10 %) Komponente entsprechen (Abbildung 2). Beide Komponenten werden durch (unterschiedliche) Einheitshydrographen modifiziert (Abbildung 3f), deren Dauer von der hydraulischen Reaktionszeit x_4 [Tage] abhängt. Erstere füllt außerdem sukzessive den Grundwasserspeicher (Füllstand G [mm], Kapazität x_3 [mm]), zweitere erreicht die Quelle unter Umgehung dieses Speichers (Abbildung 2). Die Einheitshydrographen sind für $0 < t < 2x_4$ (Zeit t [Tage]) definiert durch (Abbildung 3f):

$$EH_1 = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad \text{Gl. 10}$$

$$EH_2 = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} & \text{für } t \leq x_4 \\ 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{5/2} & \text{für } x_4 < t < 2x_4 \end{cases} \quad \text{Gl. 11}$$

Die täglich transportierte Wassermenge ergibt sich durch lineare Überlagerung des aktuellen Einheitshydrographen mit den Einheitshydrographen der vergangenen Tage. Gl. 10 und 11 verteilen das im Zuge eines Niederschlagsereignisses anfallende Wasser über mehrere Tage, der Höhepunkt der Grundwasserneubildung bzw. Quellschüttung tritt dabei jeweils nach x_4 Tagen auf (Abbildung 3f).

Die Quellschüttung ergibt sich aus dem Leerlaufen des Grundwasserspeichers sowie der schnellen Komponente nach Durchlaufen des zugehörigen Einheitshydrographen (EH_2). Das Leerlaufen des Grundwasserspeichers (Q_G [mm]) wird täglich berechnet gemäß (Abbildung 3g)

$$Q_G = G \left(1 - \left(1 + \left(\frac{G_i}{x_3} \right)^4 \right)^{-1/4} \right) \quad \text{Gl. 12}$$

Während die Grundwasserneubildung am Beginn jedes Zeitschritts das Sättigungsdefizit $x_3 - G$ überschreiten kann, liegt der Füllstand am Ende jedes Zeitschritts stets unter der Kapazität des Grundwasserspeichers (Abbildung 3g). Gl. 12 gestattet die Abbildung lange andauernder Quellschüttungsrückgänge ohne vollständiges Leerlaufen des Speichers (Perrin et al., 2003).

Grundwasserspeicher und schnelle Komponente können im Austausch mit benachbarten Einzugsgebieten stehen, wobei die maximal mögliche Wassermenge durch den

Austauschkoeffizienten x_2 [mm/Tag] festgelegt wird. Die Austauschrate F ergibt sich gemäß (Perrin et al., 2003) (Abbildung 3h)

$$F_i = x_2 \left(\frac{G_i}{x_3} \right)^{7/2} \quad \text{Gl. 13}$$

Positive Werte für F und x_2 entsprechen einem Zufluss von Wasser ins Quelleinzugsgebiet, während negative Werte einem Abfluss unter Umgehung der Quelle entsprechen. Die Austauschrate nimmt mit dem Füllstand des Grundwasserspeichers zu und nähert sich asymptotisch ihrem Maximalwert x_2 an (Abbildung 3h).

Das vorgestellte Modell wurde mittels airGR 1.6.12 (Coron et al., 2021) in R 4.1.0 (R Core Development Team, 2021) umgesetzt. Die Periode zwischen 1.1.1976 (Beginn vorliegender SPARTACUS-Daten) und Beginn der Quellschüttungsaufzeichnung wurde jeweils als Aufwärmphase des Modells genutzt.

Zur Plausibilitätsprüfung wurde das in diesem Bericht verwendete, kombinierte Schnee- und Niederschlags-Abfluss-Modell (GR4J-CemaNeige) für eine Referenzquelle (Schönebenquelle) mit den Ergebnissen einer bereits bestehenden Modellierung verglichen (GR4J+ in Wagner et al., 2016). Das GR4J+ Modell umfasst dasselbe Niederschlags-Abfluss-Modell (GR4J) sowie ein strukturell ähnliches Schneemodell (Majone et al., 2010). Letzteres enthält drei freie Parameter (diskrete Lufttemperatur-Schwellenwerte für Schneefall und -schmelze, Schneeschmelzfaktor), wobei die Definition des Schneeschmelzfaktors mit jener im vorliegenden Bericht übereinstimmt (c_2 des kombinierten GR4J-CemaNeige-Modells; Abb. 2, Gl. 4). Für den Schneedynamikfaktor c_1 (Abb. 2, Gl. 3) gibt es keine Entsprechung im GR4J+ Modell. Insgesamt wurde die Anzahl der freien Parameter gegenüber dem GR4J+ Modell um 1 reduziert (von 7 auf 6).

Tabelle 2 stellt die für die Schönebenquelle optimierten Parameterwerte beider Modelle gegenüber. Für das GR4J+ Modell liegen zwei Parametersätze vor, die anhand verschiedener Eingangsdaten (Rasterdaten, Aufzeichnungen einer Wetterstation im Quelleinzugsgebiet) ermittelt wurden und die Streuung innerhalb der GR4J+ Ergebnisse veranschaulichen (Wagner et al., 2016). Der Vergleich mit den im Zuge des vorliegenden Berichts berechneten Parameterwerten zeigt gute Übereinstimmung, in vier von fünf Fällen liegen die Parameter innerhalb der Streuung der von Wagner et al. (2016) ermittelten GR4J+ Ergebnisse.

Tabelle 2: Vergleich der optimierten Modellparameter des GR4J+ Modells (Wagner et al., 2016) und des im Zuge des vorliegenden Berichts kalibrierten GR4J-CemaNeige Modells für das Einzugsgebiet der Schönebenquelle (S-AWS ... GR4J+ Ergebnisse auf Basis von Aufzeichnungen der automatischen Wetterstation Schöneben; RASTER ... GR4J+ Ergebnisse auf Basis von Rasterdaten)

Parameter	GR4J-CemaNeige (vorliegender Bericht)	GR4J+ S-AWS (Wagner et al., 2016)	GR4J+ RASTER (Wagner et al., 2016)
Bodenwasserspeicher [mm]	32	90	15
Grundwasserspeicher [mm]	333	303	488
Hydraulische Reaktionszeit [Tage]	1,3	1,2	1,3
Austauschterm [mm/Tag]	7,9	9,4	2,3
Schneeschnmelzfaktor [mm/(°C Tag)]	4,3	3,7	3,3

2.2.2. Bewertung

Im Zuge der Modellkalibrierung wurden insgesamt sechs Parameter variiert (Bodenwasserspeicher, Grundwasserspeicher, Austauschkoefizient, Reaktionszeit, Schneedynamikfaktor, Schneeschnmelzfaktor). Als Zielfunktion der Kalibrierung wurde auf das Kling-Gupta-Effizienzkriterium (KGE) zurückgegriffen (Gupta et al., 2009; Gupta und Kling, 2011), das insbesondere in Einzugsgebieten mit deutlicher Saisonalität des Abflussregimes (z. B. von Schneeschnmelze geprägt) eine optimierte Ableitung des Nash-Sutcliffe Effizienzkriteriums (Nash und Sutcliffe, 1970) darstellt. Das KGE erlaubt eine getrennte Bewertung des systematischen Fehlers, der Erfassung der Streuung sowie der Form der aufgezeichneten Abflussganglinie. Gegenüber dem NSE gestattet es eine unverzerrte Schätzung der Abflussvariabilität und eine unabhängige Minimierung des systematischen Fehlers.

Zur Bewertung der Modellergebnisse werden beobachtete und berechnete Quellschüttung gegenübergestellt. Dies ist beispielhaft für die Schönebenquelle in Abbildung 4 dargestellt. Als quantitatives Maß der Modellgüte werden das KGE, sowie die zugehörigen Subkriterien

Korrelationskoeffizient r [-], systematischer Fehler β [-] und relative Variabilität α [-] ausgewiesen:

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Gl. 14}$$

Der Korrelationskoeffizient erfasst die Übereinstimmung der Form der berechneten und jener der beobachteten Quellschüttungsganglinie, welche ebenfalls beispielhaft für die Schönebenquelle in Abbildung 4 und Abbildung 5a gezeigt wird. Der systematische Fehler entspricht dem Quotienten der jeweiligen Mittelwerte und damit im Wesentlichen einer Wasserbilanz. Durch Vergleich der Standardabweichung von berechneter und beobachteter Quellschüttung informiert die relative Variabilität darüber, inwieweit die gesamte Schwankung der Quellschüttungsganglinie adäquat vom Modell abgebildet wird. Das KGE selbst kombiniert diese drei Gütemaße und dient der Gesamtbeurteilung (Gl. 14). Für das KGE und seine drei Subkriterien entspricht jeweils ein Wert möglichst nahe bei 1 einem zufriedenstellenden Modellergebnis. Deutlich abweichende (niedrigere) Werte weisen auf eine unzureichende Abbildung des hydrologischen Systems hin. In Anlehnung an Moriasi et al. (2007) und Wagner et al. (2017) wird die Güte der Modellergebnisse als „sehr gut“ ($0,75 < \text{KGE} \leq 1,00$), „gut“ ($0,65 < \text{KGE} \leq 0,75$), „zufriedenstellend“ ($0,50 < \text{KGE} \leq 0,65$) bzw. „nicht zufriedenstellend“ ($\text{KGE} \leq 0,50$) bewertet.

Schönebenquelle

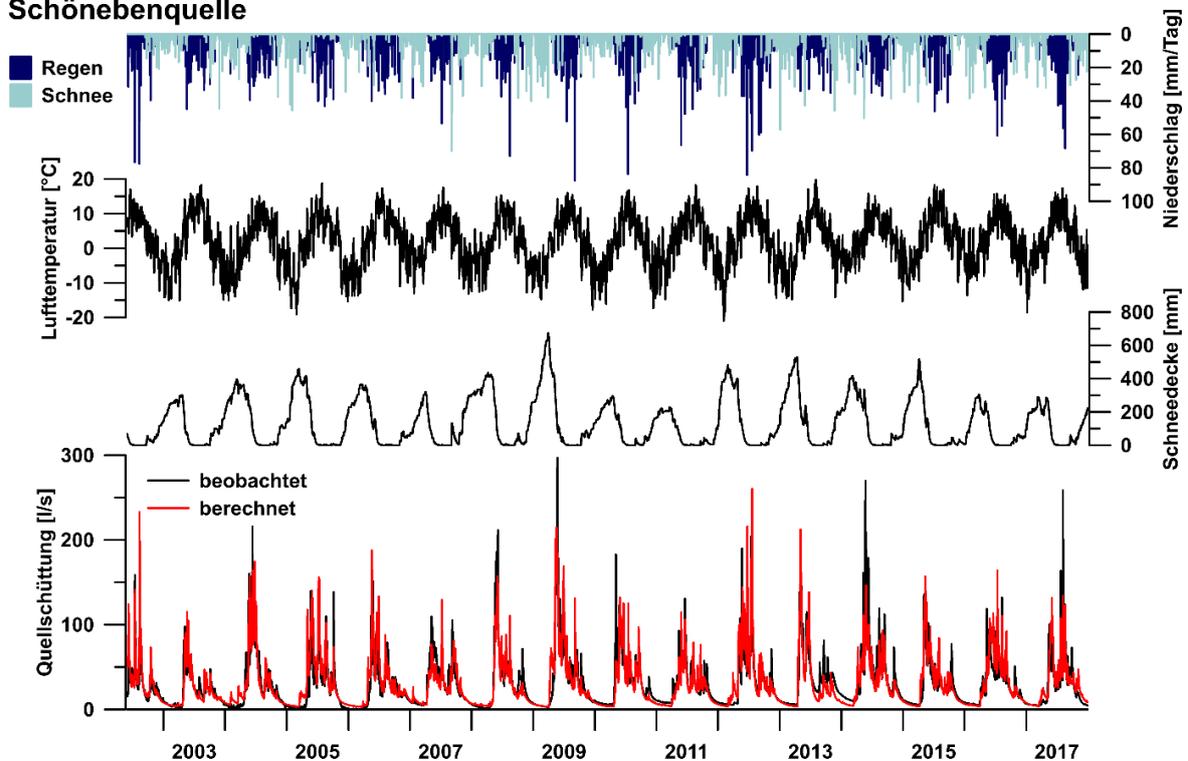


Abbildung 4: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762) als Beispiel.

Schönebenquelle

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,88
Korrelationskoeffizient [-]	0,88
systematischer Fehler [-]	1,00
relative Variabilität [-]	1,00

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
■ Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert			
■ Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich			

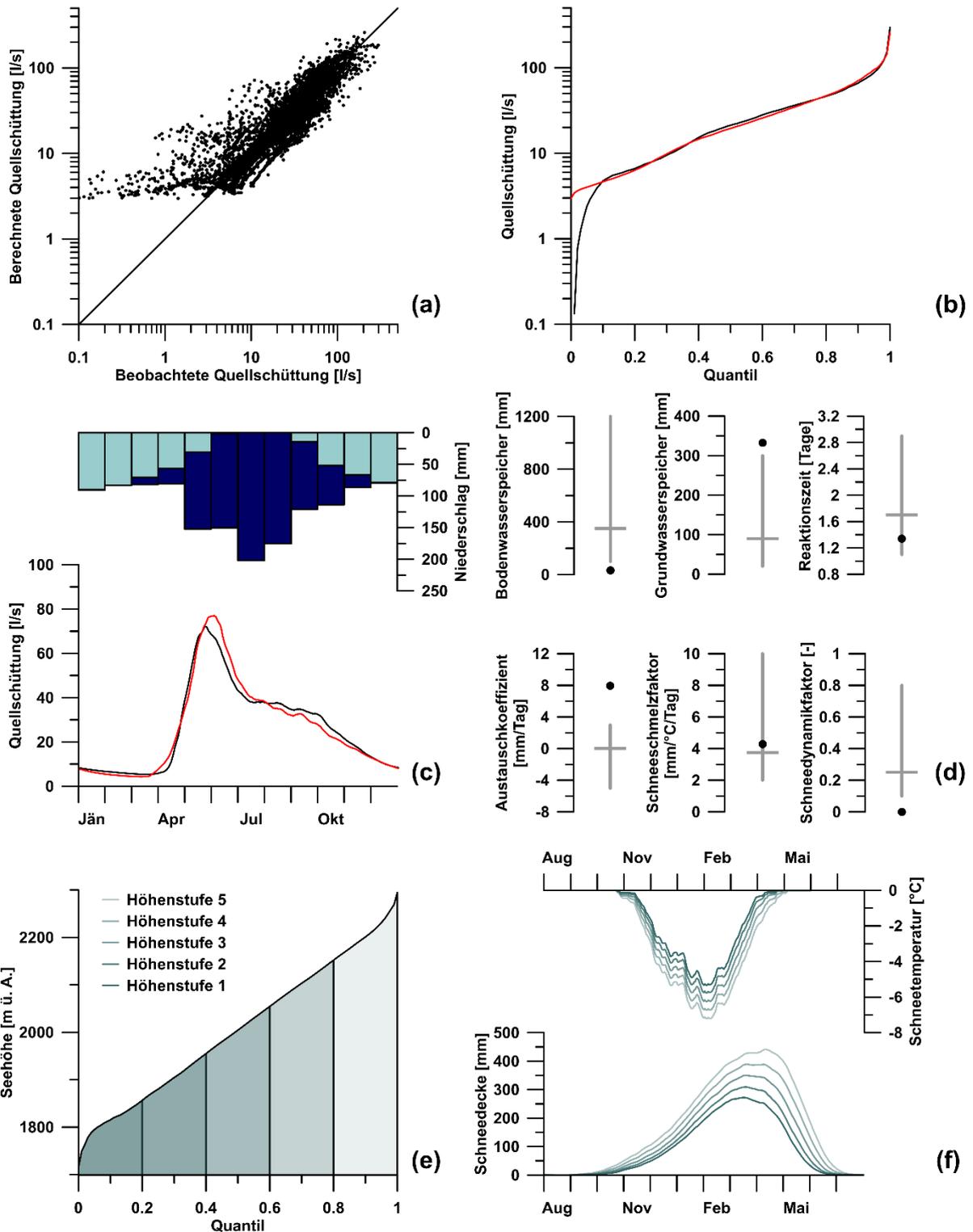


Abbildung 5: Bewertung der Modellierungsergebnisse am Beispiel der Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762). (a) Korrelation (b) Dauerlinie (c) Saisonalität (d) Optimierte Parameterwerte (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

A28165002047 Steiermark HZB-Quellen 20

Die adäquate Erfassung der Schüttungsvariabilität wird durch die Dauerlinie (Verteilungsfunktion der Quellschüttung) dargestellt und gestattet ein direktes Ablesen systematischer Abweichungen (Abbildung 5b). Die Saisonalität der berechneten wie der beobachteten Quellschüttung sind in Abbildung 5c gegenübergestellt. Beide Ganglinien sind als geglätteter (Filterlänge 30 Tage) Median der Tageswerte dargestellt und werden mit dem Median der monatlichen Regen- und Schneefallsumme verglichen (Abbildung 5c). Die zugehörige statistische Kennzahl entspricht der relativen Variabilität α . Eine unausgeglichene Wasserbilanz drückt sich durch ein systematisches Abweichen der berechneten und beobachteten Quellschüttungsganglinie (Abbildung 4), des Streudiagrammes von der Ideallinie (Abbildung 5a), der Dauerlinie (Abbildung 5b) sowie der langjährigen Saisonalität (Abbildung 5c) aus. Die zugehörige statistische Kennzahl entspricht dem systematischen Fehler β .

Neben der Modellgüte geht die Plausibilität der kalibrierten Modellparameter für Bodenwasserspeicher, Grundwasserspeicher, Austauschkoefizient, Reaktionszeit, Schneedynamikfaktor und Schneeschmelzfaktor in die Gesamtbewertung mit ein. Die jeweils optimierten Werte sind für jedes Modell zusammengefasst und dem typischen Wertebereich gegenübergestellt (Abbildung 5d): Der graue, vertikale Balken entspricht dem 80 % Konfidenzintervall des jeweiligen Modellparameters, der horizontale Balken dem entsprechenden Median, beide ermittelt anhand einer großen Stichprobe unterschiedlicher Einzugsgebiete (429 Einzugsgebiete für die Parameter des Niederschlags-Abfluss Modells (Bodenwasserspeicher, Grundwasserspeicher, Austauschkoefizient und Reaktionszeit; Perrin et al., 2001, 2003); 380 Einzugsgebiete für die Parameter des Schneemodells (Schneedynamikfaktor und Schneeschmelzfaktor; Valéry, 2010; Valéry et al., 2014)).

Für jedes Szenario ist die Höhenverteilung des Einzugsgebiets und die Einteilung in diskrete Höhenstufen dargestellt (Abbildung 5e). Für jede dieser fünf Höhenstufen ist zusätzlich die Saisonalität (in Form des langjährigen Medians, geglättet mit einer Filterlänge von 30 Tagen) der effektiven Schneetemperatur sowie der Schneedeckenhöhe (ausgedrückt als Wasseräquivalent) dargestellt (Abbildung 5f). Die gemeinsame Kalibrierung von Schnee- und Niederschlags-Abfluss Modell auf die Quellschüttung stellt insbesondere für die Robustheit des ersteren eine Herausforderung dar (Parajka et al., 2007; Parajka und Blöschl, 2008; Riboust et al., 2019). Vor diesem Hintergrund erlauben diese beiden Graphen eine unabhängige Bewertung des Schneemodells.

Die potenziellen Einzugsgebiete sowie die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss Modellierung werden für jede Quelle und jedes Szenario zusammengefasst, untereinander verglichen und den Ergebnissen der Isotopenanalyse gegenübergestellt. Dabei werden einerseits das KGE und die drei zugehörigen Subkriterien für jedes Szenario ausgewiesen,

andererseits die kalibrierten Modellparameter für jedes Szenario zusammengestellt. Zur raschen Bewertung der Parameterwerte sind die Ergebnisse nach dem in Tabelle 3 dargestellten Schema farblich hinterlegt. Grüne Werte entsprechen aus der Literatur bekannten Erwartungswerten (80 % Konfidenzintervall). Da diese Werte im Zusammenhang mit der Modellierung von Oberflächengewässern ermittelt wurden, können die Parameter für Grundwassersysteme abweichende, plausible Werte annehmen, die gelb hinterlegt sind. Rot hinterlegte Werte werden als unplausibel eingestuft.

Tabelle 3: Plausibilitätsprüfung optimierter Modellparameter (\vee = oder; \wedge = und; *hydrogeologisch plausibel; **hydrogeologisch unplausibel).

Parameter	Plausibel (Literatur)	Plausibel für Grundwasser-Systeme	Unplausibel	Anmerkung
Bodenwasserspeicher [mm]	$>100 \wedge <1200$	$>10 \wedge <100$	$<10 \vee >1200$	niedrig in alpinen Einzugsgebieten
Austauschkoeffizient [mm/Tag]	$>-5 \wedge <3$	$<-5^* \vee >20^*$	$<-5^{**} \vee >3^{**}$	individuelle Bewertung erforderlich
Grundwasserspeicher [mm]	$>20 \wedge <300$	$>300 \wedge <3000$	$<20 \vee >3000$	hoch in Karstsystemen und grobem Blockwerk
Hydraulische Reaktionszeit [Tage]	$>1,1 \wedge <2,9$	$(>0,7 \wedge <1,1) \vee (>2,9 \wedge <7)$	$<0,7 \vee >7$	kurz bei intensiver Verkarstung; lange in Kluft- und Porengrundwasserleitern
Schneedynamikfaktor [-]	$>0,1 \wedge <0,8$	$>0,1 \wedge <0,8$	$<0,1 \vee >0,8$	für Oberflächengewässer und Grundwassersysteme ident
Schneeschnmelzfaktor [mm/°C/Tag]	$>2 \wedge <10$	$>2 \wedge <10$	$<2 \vee >10$	für Oberflächengewässer und Grundwassersysteme ident

2.3. Isotopenanalyse

2.3.1. Probenahme

Im Zuge der monatlichen Probenahme wurden nachstehende Vorortparameter im Gelände gemessen:

- Die Messungen der Vor-Ort-Parameter elektrische Leitfähigkeit (LF), pH-Wert, gelöster Sauerstoff (O_2 , absolute Konzentration und prozentuelle Sättigung SI O_2) und Wassertemperatur (WT) erfolgten mit einem Messgerät Multi 3420 der Firma WTW.
- Als Probengefäße wurden 100 ml HDPE-Flaschen für Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopie ($\delta^{18}O$ bzw. δ^2H) herangezogen.

2.3.2. Laboranalytik

Die Untersuchung der Wasserproben erfolgte mittels Cavity-Ring Down Laserspektroskopie (CRDS) mit einem CRDS System der Fa. Picarro. Die einzelnen Messungen erfolgen in einem vordefinierten und automatisierten Messzyklus, bei dem nach mehrmaligem Spülen des Verdampfermoduls mit trockenem Stickstoff als Arbeitsgas, zunächst mit Hilfe eines Probenwechslers ein aliquoter Teil der Wasserprobe von ca. 1,8 μl in eine vorgeheizte Verdampfereinheit injiziert wird. Das entstehende Arbeitsgas / Wasserdampf Gemisch wird anschließend über eine Ventilsteuerung in die optische Messzelle (Cavity) überführt und dort mehrfach gemessen. Nach Beendigung der Messungen werden die Mittelwerte der gemessenen Isotopengehalte gespeichert, die Messzelle und die Verdampfereinheit evakuiert und erneut mit dem Arbeitsgas gespült. Danach erfolgt die nächste Probeninjektion. Von jeder zu untersuchenden Wasserprobe wurden mehrere aufeinanderfolgende Injektionen durchgeführt, von denen aufgrund gelegentlich beobachteter Memory-Effekte meist die ersten 1-3 Messungen nicht in die Mittelwertberechnung einbezogen wurden. Die Normalisierung der Rohdaten auf die internationale Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) Skala erfolgte auf der Grundlage hauseigener Wasserstandards der JR-AquaConSol, die gegen die internationale Referenzmaterialien V-SMOW und Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP) kalibriert wurden.

2.3.3. Auswertung der Isotopendaten

Für das Projekt wurden monatlich Proben zur Analytik auf die Isotopenverhältnisse $\delta^{18}O$ und δ^2H gezogen. Das Sauerstoffisotop ^{18}O und das Wasserstoffisotop 2H sind Bestandteile des natürlichen Wasserkreislaufs. Analysewerte von Deuterium und Sauerstoff-18 werden in

Delta-Notation (δ) als Abweichung zu einem standardisierten Wert, dem V-SMOW2 (Vienna Standard Mean Ocean Water ²) angegeben, der von der IAEA (Internationale Atomenergiebehörde) 2006 als Standard definiert wurde und den bis dato verwendeten V-SMOW abgelöst hat. Der V-SMOW/V-SMOW2 entspricht dem mittleren Isotopenverhältnis des Wassers im Ozean.

Die Darstellung der Isotopenverhältnisse erfolgt üblicherweise in einem bivariaten Diagramm ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ -Dual-Isotope-Plot), in dem die starke Beziehung zwischen den beiden Isotopenverhältnissen angenähert durch die Globale Meteorologische Wasserlinie (Global Meteoric Water Line, GMWL) beschrieben wird (Dansgaard, 1964). Die GMWL wird durch eine Regressionsgerade mit der Gleichung

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10 \quad \text{Gl. 15}$$

widergegeben, die Abweichung von dieser Geraden als Deuteriumexzess (d-Exzess)

$$d_D = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O} \quad \text{Gl. 16}$$

Der d-Exzess wird maßgeblich durch die im Herkunftsgebiet des Niederschlags herrschenden physikalischen Bedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Meeresoberflächentemperatur bestimmt (Merlivat und Jouzel, 1979). Höhere d-Werte, die teilweise deutlich über 10 liegen können, finden sich besonders in Gebieten mit niedrigerer Luftfeuchtigkeit und höherer Meerwassertemperatur wie beispielsweise im Mittelmeerraum. Atlantische Luftmassen, die aus Gebieten mit kühlen Meerestemperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit stammen, weisen hingegen einen deutlich niedrigeren d-Exzess auf. Zusätzlich können auch Mischungsprozesse auf dem Weg der feuchten Luftmassen zum Niederschlagsort und partielle Verdunstungsprozesse während eines Niederschlagsereignisses den d-Exzess beeinflussen (Froehlich et al., 2008).

2.3.3.1. Mittlere Einzugsgebietshöhe

Für die Abschätzung der mittleren Höhenlage von Quellwassereinzugsgebieten im Rahmen des Grund- und Trinkwasserschutzes können isotopenhydrologische Methoden genutzt werden.

² [IAEA, V-SMOW2-Referenz](#)

Die Isotopenhydrologie greift auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Wassermoleküls zurück, die einem Fingerabdruck gleich, Aussagen zur Herkunft und Verweilzeit des Wassers im Untergrund ermöglichen. Die Isotopenverhältnisse der Elemente Wasserstoff und Sauerstoff, welche das Wassermolekül bilden, verändern sich im Wasserkreislauf in Folge physikalisch/chemischer Prozesse wie beispielsweise in Folge von Verdunstung und Kondensation. Diese *Isotopenfraktionierungen* sind temperaturabhängig.

In alpinen, gebirgigen Gebieten kann man sich zur Abgrenzung von hydrographischen Einzugsgebietslagen den „Höheneffekt“ zu nutzen machen. Treffen feuchte Luftmassen auf einen Höhen- oder Gebirgszug, steigen die Luftmassen entlang dieses Höhengradienten auf.

Aufsteigende Luft vergrößert aufgrund des abnehmenden Umgebungsdrucks ihr Volumen und kühlt sich ab. Der Sättigungsdampfdruck der Luft sinkt und der in den Wolken enthaltene Wasserdampf verflüssigt sich zu Tropfen, die Wolken regnen ab. Im Niederschlag sind dabei zunächst vor allem Wassermoleküle mit schweren Isotopen enthalten, je weiter die Luft aufsteigt und in je größeren Höhenlagen der Niederschlag abregnet, desto leichter sind die in den Wassermolekülen verbliebenen Isotope. Das heißt im Gipfelbereich abregnende Niederschläge sind isotopisch „leichter“ als in Talnähe versickernde Niederschläge.

Für Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$) liegt der Höhengradient häufig im Bereich von -0,15 bis -0,5 ‰ pro 100 m Höhe, für Deuterium bei -1,5 bis -4,0 ‰ $\delta^2\text{H}$ pro 100 m Höhe. Humer (1995) bestimmte anhand von ungewichteten Mittelwerten einen Gradienten von -0,16 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 Höhenmeter für Österreich. Kralik et al. (2003) ermittelten einen Höhengradienten von -0,21 ‰ Sauerstoff-18 pro 100 Höhenmeter und wiesen auf deutliche Abweichungen im vom mediterranen Klima beeinflussten südlichen Teil Österreichs hin. Ausgehend von mengengewichteten Isotopenwerten des österreichischen Isotopenmessnetzes bestimmten Hager und Foelsche (2015) einen durchschnittlichen Höheneffekt von -0,19 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m für Österreich, Kern et al. (2014) ermittelten für den alpinen Bereich mit Schwerpunkt Schweiz im Zeitraum 1995-2000 einen Höhengradienten von -0,34 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m Höhe. Für den adriatisch-pannonischen Bereich ermittelten Kern et al. (2020) eine Abnahme von -0,12 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m Höhe.

Werden die Isotopenverhältnisse des Wassers auch im Grund- oder Quellwasser gemessen und ist gleichzeitig der höhenabhängige Isotopengradient des Niederschlags in einer Region bekannt, können Rückschlüsse auf die Höhenlage der Einzugsgebiete von Grund- und Quellwässern getroffen werden.

Die Methode birgt allerdings Unsicherheiten. Der Höheneffekt kann infolge unterschiedlicher Niederschlagsbedingungen lokal variieren oder durch andere Einflüsse beispielsweise die unterschiedliche Herkunft von Luftmassen, sekundäre Verdunstung oder Schneeschmelze überlagert werden.

Neben dem Höheneffekt prägen auch der Mengen- und Breiten- sowie saisonale Effekt die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags. Deswegen sollte der durchschnittliche Höheneffekt in der Isotopenzusammensetzung jeweils mit regionalen Daten und hydrogeologischen Kenntnissen des Untersuchungsgebietes abgeglichen werden.

Bei der Abschätzung von mittleren Einzugsgebieten für Quellen ist zudem zu berücksichtigen, dass die Isotopengehalte einer Quelle über die Zeit in Abhängigkeit von den vorherrschenden hydrogeologischen Gegebenheiten und mittleren Verweilzeiten des Quellwassers variieren können. Insbesondere in durch Schneeschmelze geprägten Karstgebieten mit Doppelporositäten, in denen saisonal stark unterschiedliche Fließsysteme dominieren, kann auch die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes saisonal variieren.

Eine notwendige Voraussetzung für die Abschätzung der mittleren Höhen der Quelleinzugsgebiete ist jedenfalls das Vorliegen repräsentativer Jahresmittelwerte.

2.3.3.2. Mittlere Verweilzeit

Eine vereinfachte Abschätzung der mittleren Verweilzeiten MVZ [Jahre] einer schnellen Schüttungskomponente (im Zusammenhang mit Abschätzungen der MVZ auf Basis von $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnissen häufig als „junge“ Schüttungskomponente bezeichnet) erfolgte basierend auf den $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnissen der monatlich gezogenen Quellproben und der nachfolgenden vereinfachten Schätzformel, in der b die maximale Amplitude der Quellisotopendaten und a die maximale Amplitude der Niederschlagsisotopendaten darstellt,

$$MVZ = \left(\frac{1}{2}\pi\right) * \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1} \quad \text{Gl. 17}$$

Ereigniskomponenten mit Verweilzeiten von wenigen Stunden oder Tagen wurden dabei aufgrund des zugrundeliegenden monatlichen Probenahme-Intervalls für die Isotopenuntersuchungen nicht erfasst. Die Methode erlaubt in der Regel eine einigermaßen zuverlässige Abschätzung für Mittlere Verweilzeiten < 3 Jahre. Errechnete MVZ > 3 Jahre sind deshalb mit „[> 3]“ angegeben.

2.4. Trendanalyse

Für die untersuchten Quellen wurde eine Trendanalyse zur Erfassung der langfristigen Entwicklung von Quellschüttung, Leitfähigkeit und Wassertemperatur durchgeführt. Hierfür wurden bei jeder Quelle alle zur Verfügung stehenden Daten verwendet, wobei diese vorwiegend im 15 Minuten Intervall, teils aber auch als Tagesmittel vorlagen (speziell ältere Messwerte). Um in solchen Fällen ältere Daten mit jüngeren zu kombinieren, wurden alle erhaltenen Messreihen in Tagesmittelwerte umgewandelt. Um systematische Fehler bei der Umwandlung auszuschließen, wurden nur Tage verwendet an denen mehr als 80 % der Messungen vorlagen. In einem weiteren Schritt wurden alle Daten visuell auf ihre Plausibilität überprüft, einige (meist kurze) Perioden als Lücken ausgewiesen und nicht analysiert. Einige Quellen nehmen während bestimmter Perioden Quellschüttungen mit einem Wert von 0 l/s an. In einigen Fällen sind trotz einer gemessenen Quellschüttung von 0 l/s Leitfähigkeits- und Temperaturmesswerte vorhanden. Um möglicherweise dadurch entstehende systematische Fehler auszuschließen, wurden diese Perioden bei der Analyse nicht berücksichtigt. Traten bei einer Quelle innerhalb der Zeitreihe eines Parameters unplausible Sprünge, Inhomogenitäten oder sehr große Datenlücken auf, so wurden auch diese Perioden von den Analysen ausgeschlossen.

Statistisch aussagekräftige Trends und ihre Richtung wurden anhand des saisonalen Mann Kendall Tests erfasst (Hirsch et al., 1982; Hirsch und Slack, 1984). Mithilfe dieses nichtparametrischen Tests konnten langfristige Tendenzen nach Monaten getrennt bewertet und zu einer Teststatistik kombiniert werden. Die Ergebnisse wurden in drei Gruppen zusammengefasst (positiver Trend (Zunahme), negativer Trend (Abnahme), kein Trend nachweisbar) und auf Basis eines Signifikanzniveaus von 99 % berichtet. Die zugehörige Rate der Änderung wurde mittels Theil-Sen Schätzwert (Theil, 1950; Sen, 1968) erfasst, wobei die Saisonalität in der oben beschriebenen Weise berücksichtigt wurde (Helsel et al., 2020). Als Voraussetzung für die Trendanalyse wurde das Vorliegen einer weitgehend kontinuierlichen Datenreihe ($\geq 80\%$) im analysierten Zeitraum festgelegt.

Die Saisonalität der Quellschüttung wurde mittels Pardé Koeffizient quantifiziert (Pardé, 1947). Dieser Wert wurde durch Vergleich der monatlichen Mittelwerte mit dem jeweiligen Jahresmittelwert gewonnen. Für jede Quelle wurde der Pardé Koeffizient sowohl für die gesamte Zeitreihe als auch für jedes einzelne Jahr berechnet, um langfristige Veränderungen der Regime zu erfassen (Bormann, 2010).

Parallel zum gegenständlichen Projekt werden für alle österreichischen Quellen im Monitoringprogramm des HZB, eine detaillierte Analyse der Trends und eine Charakterisierung der Quellen durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassen auch alle Messstellen der Steiermark, weshalb für die detaillierte Beschreibung auf den Bericht "Zeitreihen- und A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreich“ (Hausleber et al., in Bearbeitung) verwiesen wird.

3. Ergebnisse

3.1. Niederschlags-Abfluss-Modellierung

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung für jede der 16 Quellen zusammen. Neben Eigenschaften der Quellschüttungsganglinie werden die geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten – soweit im Zusammenhang mit Modellierung und Plausibilitätskontrolle relevant – knapp umrissen. Kenngrößen und Lage der modellierten Szenarien sind zusammen dargestellt, die Ergebnisse der Modellierung (Effizienzkriterien und Modellparameter) tabellarisch zusammengefasst. Ein zentrales Ergebnis stellt die Auswahl eines plausiblen Einzugsgebietes (Szenarios) auf Basis der Niederschlags-Abfluss-Modellierung dar, die im Einzelnen begründet wird.

Die Quelle Totes Weib wird aufgrund der kurzen vorliegenden Quellschüttungsganglinie nicht in die Modellierung mit einbezogen.

Tabelle 4 stellt die Ergebnisse der Modellierung zusammenfassend dar, Tabelle 5 fasst die Kenngrößen der zugehörigen Quelleinzugsgebiete zusammen. Pro Quelle wurden zwischen 3 und 22 Szenarien modelliert. Die einzige Ausnahme stellt die Schönebenquelle dar: Für diese Quelle liegen bereits Ergebnisse eines strukturell eng verwandten Modelles vor (Wagner et al., 2016), weshalb das bereits bekannte Einzugsgebiet herangezogen und zur Plausibilitätsprüfung des hier verwendeten Modells verwendet wurde (Kapitel 2.2.1). Für die verbleibenden 15 Quellen sind jeweils Effizienzkriterien und optimierte Parameterwerte des gewählten Szenarios ausgewiesen.

Tabelle 4: Zusammenfassende Darstellung der Anzahl modellierter Szenarien, gewählter (plausibler) Szenarien und Kenngrößen derselben je Quelle (c_1 = Schneedynamikfaktor, c_2 = Schneeschmelzfaktor, KGE = Kling-Gupta-Effizienzkriterium, r = Korrelationskoeffizient, x_1 = Bodenwasserspeicherkapazität, x_2 = Austauschkoeffizient, x_3 = Grundwasserspeicherkapazität, x_4 = hydraulische Reaktionszeit, α = relative Variabilität, β = systematischer Fehler).

Messstelle	Modellierte Szenarien	Gewähltes Szenario	KGE [-]	r [-]	α [-]	β [-]	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
Brunnaderquelle	4	4	0,70	0,71	1,02	1,02	70	-85,9	10915	16,3	0,87	4,2
Erbsattelquelle	4	2	0,82	0,82	0,99	1,00	441	-2,1	116	1,2	0,00	7,0
Etzbachquelle	15	9	0,80	0,81	1,04	1,01	69	-5,4	490	2,0	0,28	4,3
Galgenwaldquelle	7	4	0,81	0,81	1,00	1,00	149	2,5	176	5,4	1,00	22,8
Goldschmiedquelle	4	3	0,81	0,82	0,96	0,99	443	-0,4	2630	20,0	0,95	35,6
Hammerbachquelle	3	3	0,72	0,72	1,02	1,02	59	-19,4	2670	2,0	0,96	50,8
Ödensee Kaltwassertrichter	10	8	0,60	0,60	1,05	0,99	21807	-297,7	464	0,5	0,98	66,3
Pöllauer Ursprung	7	7	0,78	0,78	1,01	1,01	93	0,0	1773	6,4	0,96	6,9
Preunegger Siebenquellen	10	6	0,79	0,80	1,05	1,03	126	49,2	838	1,5	0,87	5,2
Reihbachquelle	7	5	0,79	0,79	1,03	1,02	744	12,3	12394	20,0	0,51	2,1
Riedlbachquelle	15	7	0,79	0,79	1,02	1,01	12	-9,5	462	1,5	0,94	3,2
Roßlochquelle	12	7	0,83	0,83	0,98	1,02	55	-12,2	2154	2,0	0,85	4,3
Sagtümpel	22	13	0,69	0,69	1,02	1,02	15	-0,2	130	1,2	0,94	3,2
Schönebenquelle	1	1	0,88	0,88	1,00	1,00	32	7,9	333	1,3	0,00	4,3
Schwabeltalquelle	11	3	0,82	0,82	1,03	1,01	21	-2,5	867	1,6	0,54	7,2
Wassermannsloch	10	7	0,81	0,81	1,00	1,00	155	-6,5	134	1,4	0,97	6,1

Tabelle 5: Kenngrößen der ausgewiesenen Einzugsgebiete (gewähltes Szenario gemäß Tabelle 4). Alle Seehöhe werden in [m ü. A.] angegeben. EZG = Einzugsgebiet.

Messstelle	Gewähltes Szenario	EZG-Fläche [km ²]	Seehöhe Quelle	Mittlere EZG-Seehöhe	Maximale EZG-Seehöhe	Reliefunterschied [m]	Mittlerer Jahresniederschlag [mm]	Mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration [mm]
Brunnaderquelle	4	5,43	788	963	1264	476	1025	688
Erbsattelquelle	2	0,02	691	846	938	247	1369	738
Etzbachquelle	9	7,18	856	1567	2023	1166	1469	735
Galgenwaldquelle	4	0,03	852	946	1061	209	872	823
Goldschmiedquelle	3	0,10	472	554	607	134	878	811
Hammerbachquelle	3	23,22	410	791	1099	689	887	739
Ödensee Kaltwassertrichter	8	17,32	773	1435	1851	1078	1799	726
Pöllauer Ursprung	7	7,58	1147	1562	1892	745	1036	793
Preunegger Siebenquellen	6	0,71	1099	1699	2125	1027	1247	773
Reihbachquelle	5	0,90	1501	1680	1873	372	1268	702
Riedlbachquelle	7	13,50	820	1455	1737	918	1552	730
Roßlochquelle	7	16,64	820	1265	1699	879	1407	702
Sagtümpel	13	10,36	983	1546	1980	997	1706	726
Schönebenquelle	1	0,67	1710	2006	2295	585	1421	715
Schwabeltalquelle	3	3,21	814	1518	1929	1115	1670	710
Wassermannsloch	7	32,38	595	1367	1977	1382	1724	710

3.1.1. Ergebnisse der einzelnen Quellen

3.1.1.1. Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913)

Die Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913) liegt auf 788 m ü. A. in den Fischbacher Alpen im Gemeindegebiet Fischbach (Bezirk Weiz) (Abbildung 1, Abbildung 6a). Zwischen 24.7.1998 und 31.12.2017 liegt eine nahezu kontinuierliche Zeitreihe der Quellschüttung vor, Datenlücken nehmen lediglich 0,6 % der Zeitspanne ein. Die Quellschüttung schwankt zwischen 28 und 81 l/s um einen Mittelwert von 51 l/s. Sie steht einem sehr kleinen oberirdischen Einzugsgebiet von lediglich 0,16 km² gegenüber.

Hohe Leitfähigkeitswerte (zwischen 407 und 640 µS/cm, Mittelwert 585 µS/cm) zeigen das Auftreten von Gesteinen mit hohem Lösungspotential im Einzugsgebiet an (Stromberger, 2005). Westlich der Quelle stehen verkarstungsfähige, karbonatische Gesteine der zentralalpiner Trias an (Abbildung 6b). Dabei handelt es sich um Kalkmarmore und Dolomite der Vorau-Decke (Silvretta-Seckau-Deckensystem; Schmid et al., 2004; Matura und Schuster, 2014). Eine Reihe von Oberflächengerinnen, einschließlich des Sulzaubaches sowie mehrerer Zubringer des Dissaubaches, quert die triassischen Karbonatgesteine. Anhand systematischer Schüttungsmessungen im August und September 2005 wurde entlang dieser Gesteine ein Wasserverlust des Sulzbaches von über 40 l/s festgestellt, während am Dissaubach und dessen Zubringern ein Gesamtverlust von über 50 l/s nachgewiesen wurde (Stromberger, 2005).

Tabelle 6 fasst die wichtigsten Kenngrößen der vier modellierten Szenarien zusammen, Abbildung 7 stellt die Lage der jeweiligen Einzugsgebiete dar.

Tabelle 6: Modellierte Szenarien für die Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,16	828	124	953	706
2	0,40	840	124	964	696
3	3,94	946	434	1008	690
4	5,43	963	476	1025	688

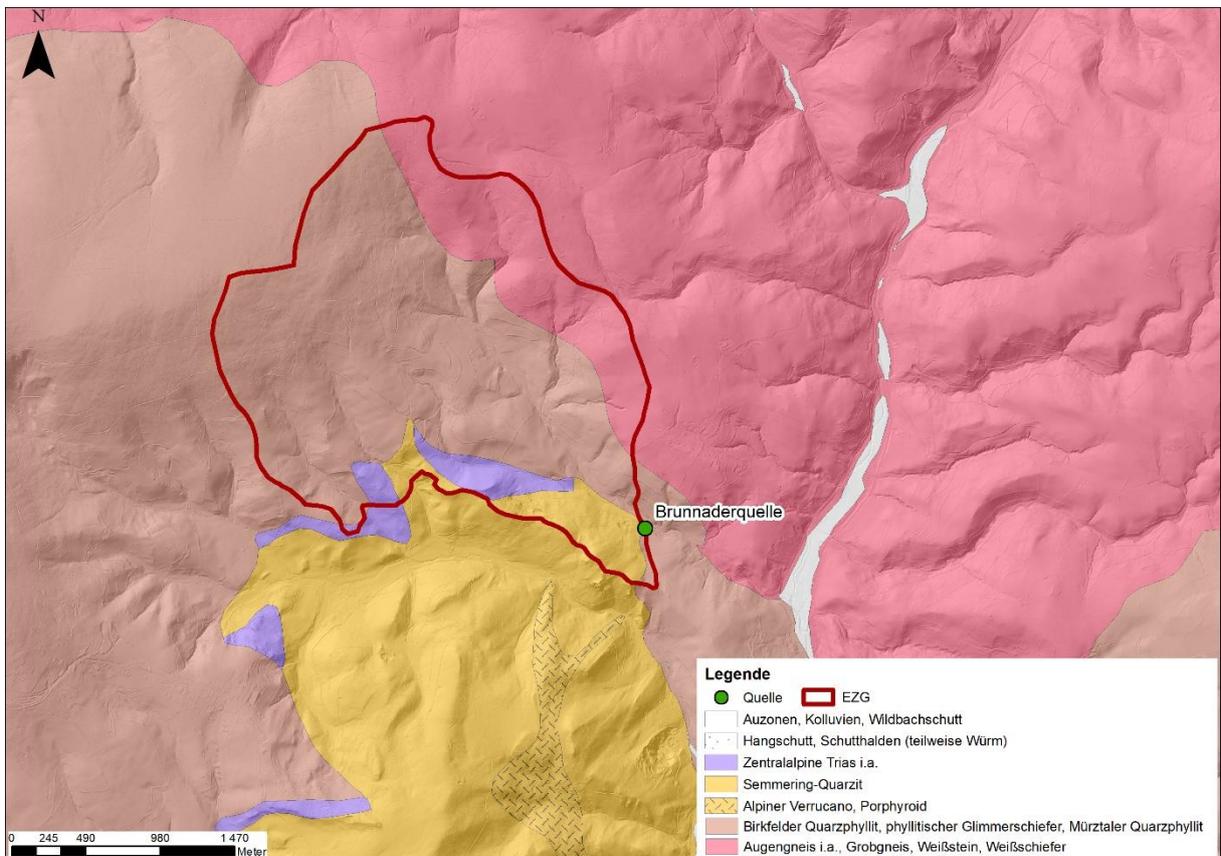
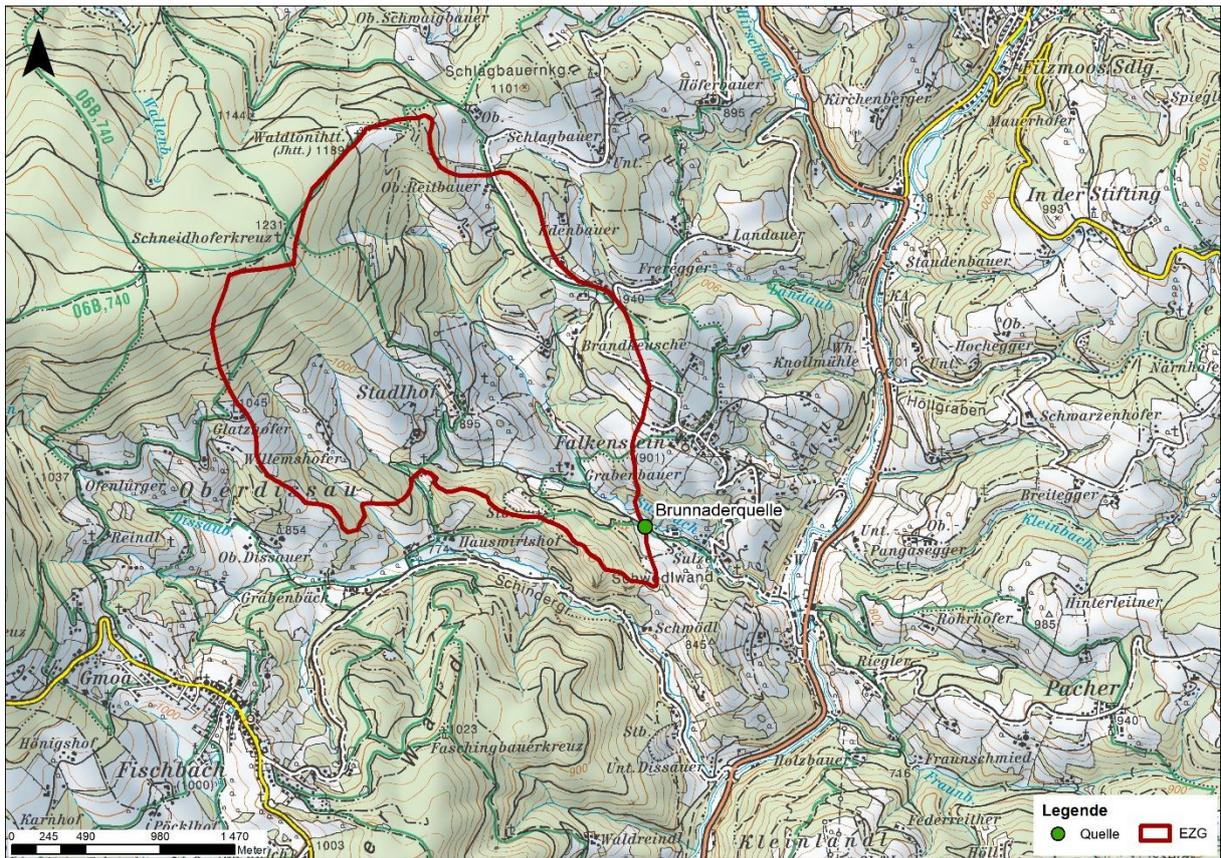


Abbildung 6: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Brunnerquelle (HZB-Nr. 395913). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 4 dargestellt.

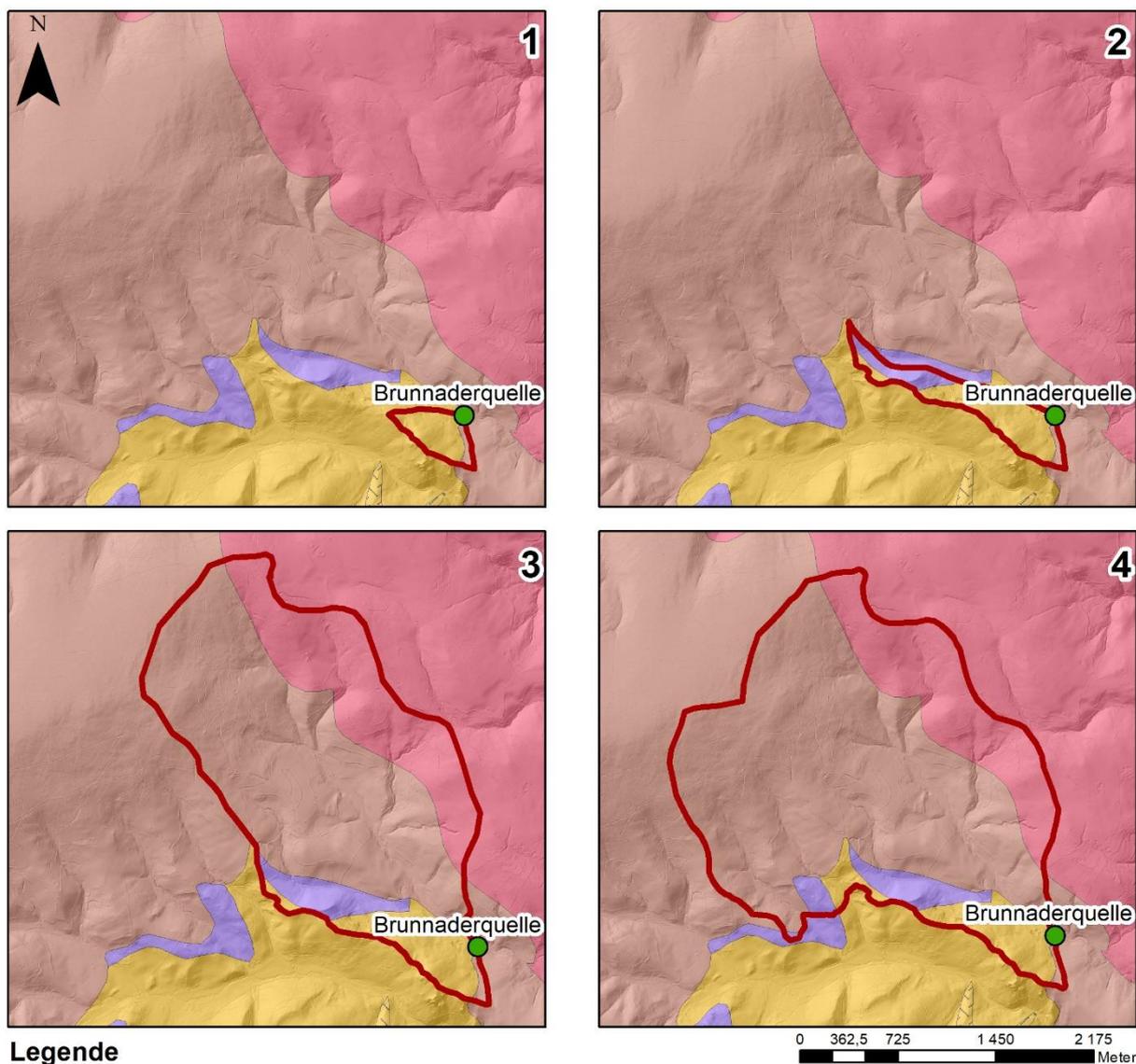


Abbildung 7: Modellierte Szenarien für die Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913).

Szenario 1 entspricht dem orographischen Einzugsgebiet der Brunnaderquelle. Szenario 2 bezieht darüber hinaus Teile des oberflächlichen Verbreitungsgebiets der verkarstungsfähigen Karbonatgesteine sowie der Nordflanke der Schwödlwand mit ein. Szenario 3 und 4 weisen die Einzugsgebiete der entlang dieser Gesteine ins Grundwasser infiltrierenden Bäche ebenfalls der Brunnaderquelle zu.

Tabelle 7 und Tabelle 8 fassen die Effizienzkriterien und optimierten Modellparameter der vier Niederschlags-Abfluss-Modellierungen zusammen. Die Szenarien 3 und 4 weisen ein gutes KGE auf (0,72 bzw. 0,70). Beide Modelle sind in der Lage, die Form der Quellschüttungsganglinie hinreichend abzubilden und erfassen die Schwankungsbreite der Quellschüttung sehr gut. Geringe systematische Fehler zeigen eine ausgeglichene Wasserbilanz an. Die Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) weisen tendenziell niedrige Werte aus. Ihrer stark unterschiedlichen Fläche (Tabelle 6) entsprechend zeigen Szenario 1 und 2 einen Zustrom von Wasser ins Einzugsgebiet an ($x_2 > 0$). Die beiden Szenarien mit größeren Einzugsgebieten weisen dagegen einen zusätzlichen Abfluss aus, der das Einzugsgebiet verlässt, ohne die Quelle zu passieren ($x_2 < 0$). Szenario 3 und 4 zeigen plausible Schneeschmelzfaktoren (c_2), aber unplausibel hohe Werte für Grundwasserspeicherkapazität (x_3), Reaktionszeit (x_4) und Schneedynamikfaktor (c_1).

Tabelle 7: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,38	0,48	0,74	0,78
2	0,58	0,61	0,86	0,93
3	0,72	0,72	1,01	1,00
4	0,70	0,71	1,02	1,02

Tabelle 8: Optimierte Modellparameter für die Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	33	89,1	939	20,0	0,93	48,9
2	93	114,1	2132	7,8	0,97	25,5
3	161	-1,6	12026	19,4	0,87	3,7
4	70	-85,9	10915	16,3	0,87	4,2

Brunnaderquelle (Szenario 4)

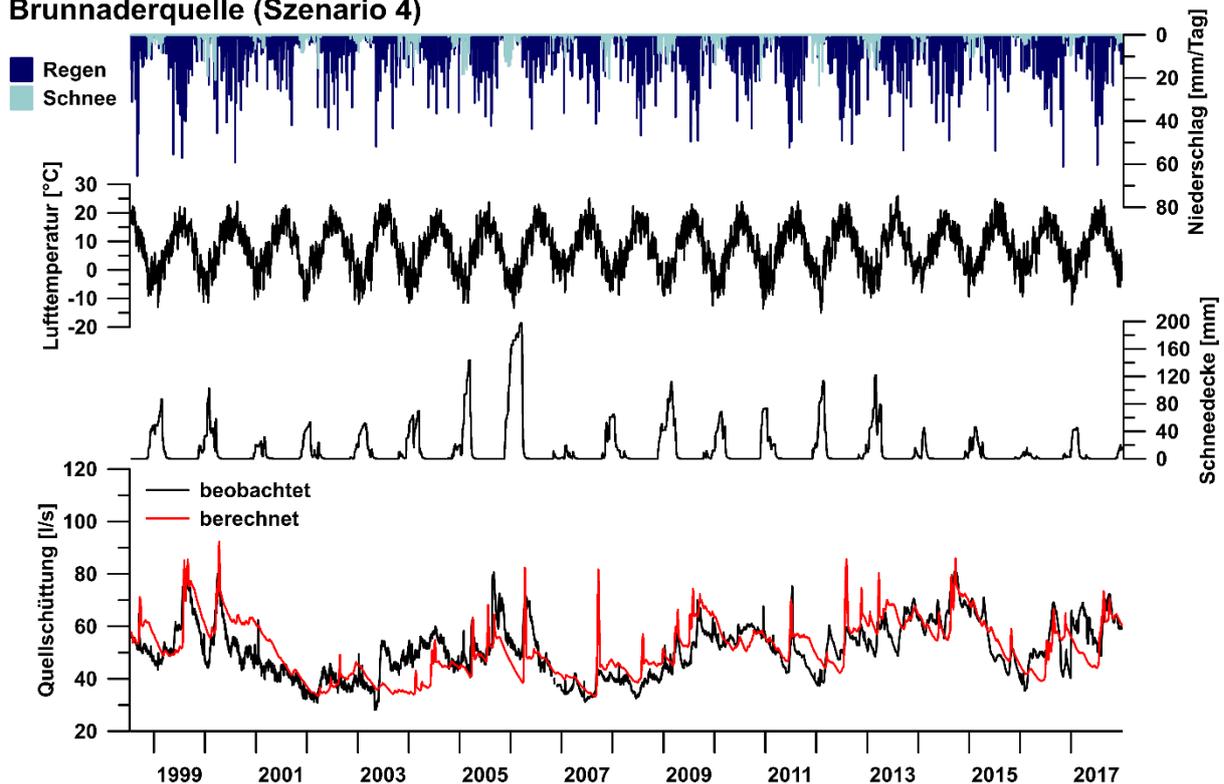


Abbildung 8: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913), Szenario 4.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Modellergebnisse für Szenario 4, das gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und modellierter Ganglinie zeigt (KGE 0,70). Im Wesentlichen werden damit die Schlussfolgerungen von Stromberger (2005) bestätigt. Das Modell ist in der Lage, Gestalt und Schwankungsbreite des beobachteten Hydrographen abzubilden (Abbildung 8, Abbildung 9a,b; Korrelationskoeffizient 0,71; relative Variabilität 1,02) und weist einen geringen systematischen Fehler (1,02) auf. Die Saisonalität der Schüttungsganglinie wird dagegen nicht zufriedenstellend abgebildet (Abbildung 9c): Das Modell reagiert zu träge und ist daher weder in der Lage, die hohen Abflüsse während der Schneeschmelze abzubilden, noch die niedrigen Abflüsse in den Wintermonaten darzustellen. Die Bodenwasserspeicherkapazität von 70 mm ist eher niedrig, der Schneeschmelzfaktor von 4,2 mm/(°C Tag) liegt im erwarteten Bereich (Abbildung 9d). Die hohen Parameterwerte für Grundwasserspeicherkapazität (10915 mm) und Reaktionszeit (16,3 Tage) müssen dagegen mit Vorsicht betrachtet werden (Abbildung 9d). Diese Werte erklären die aus Abbildung 9c hervorgehende, zu träge Reaktion des modellierten Systems. Der sehr hohe Schneedynamikfaktor (0,87) zeigt eine ebenfalls träge reagierende effektive Schneetemperatur an. Er liegt außerhalb des typischen Wertebereiches (Abbildung 9d) und sollte – insbesondere vor dem Hintergrund der nur ungenügend abgebildeten Saisonalität der A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Quellschüttung (Abbildung 9c) ebenfalls mit Vorsicht betrachtet werden. Abbildung 9e stellt die Höhenverteilung im Einzugsgebiet und Einteilung desselben in Höhenstufen dar, Abbildung 9f zeigt den Jahresgang der Schneedecke und effektiven Schneetemperatur in jeder der 5 Höhenstufen. Der stark negative Austauschkoefizient ist in Anbetracht der Tatsache, dass zwei größere Bäche (Sulzbach und Dissaubach) das Einzugsgebiet verlassen, plausibel und ausschlaggebend dafür, Szenario 4 den Vorrang gegenüber dem formal besser übereinstimmenden Szenario 3 einzuräumen.

Brunnaderquelle (Szenario 4)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-] 0,70
 Korrelationskoeffizient [-] 0,71
 systematischer Fehler [-] 1,02
 relative Variabilität [-] 1,02

Niederschlag Schneefeld Regen
Quellschüttung — beobachtet — berechnet
Modellparameter ● Optimierter Wert — Typischer Wertebereich

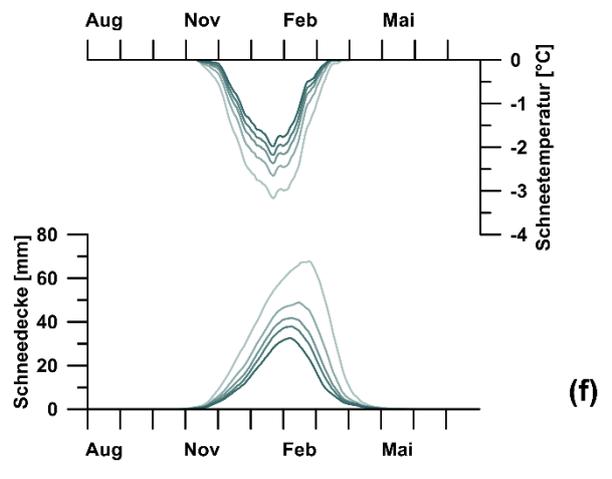
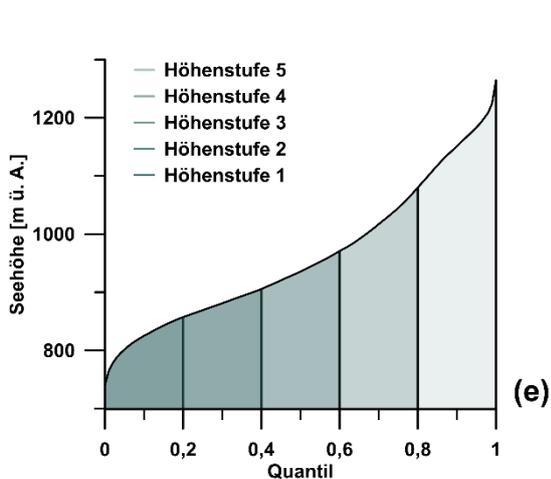
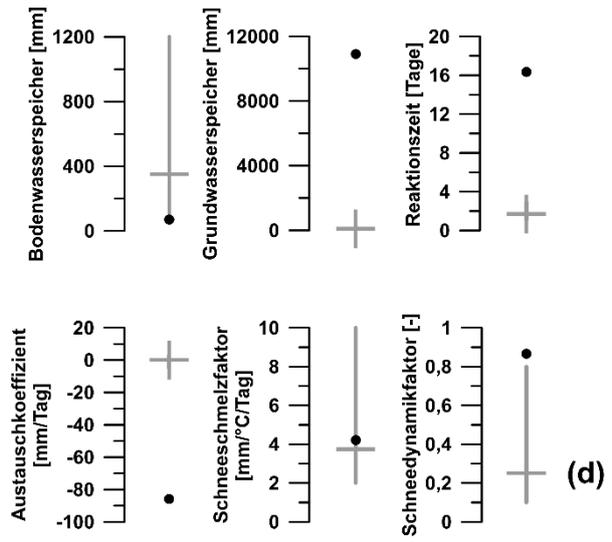
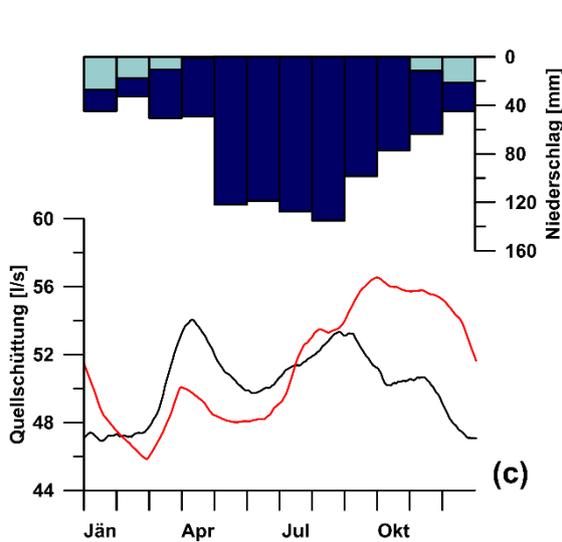
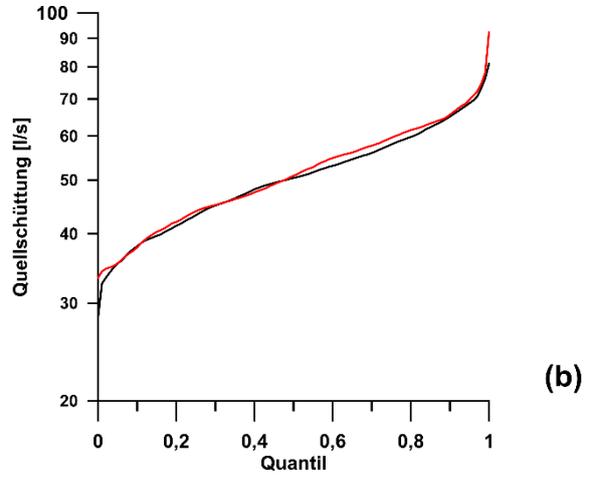
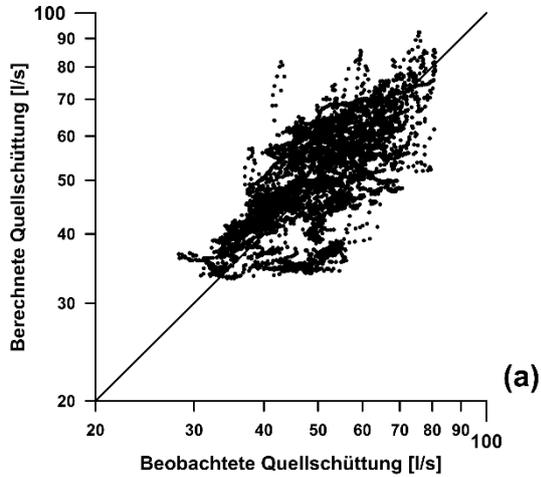


Abbildung 9: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Brunnaderquelle (HZB-Nr. 395913), Szenario 4. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.2. Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970)

Die Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970) liegt auf 691 m ü. A. in den Gesäusebergen (Ennstaler Alpen) im Gemeindegebiet Sankt Gallen (Bezirk Liezen) (Abbildung 1, Abbildung 10a). Von 27.7.2006 bis 31.12.2017 liegt eine nahezu kontinuierlich aufgezeichnete Schüttungsganglinie vor, Datenlücken nehmen 0,8 % der Beobachtungsperiode ein. Die Schüttung der Hangschuttquelle liegt stets unter 5 l/s, zeitweise fällt sie nahezu trocken (< 0,1 l/s). Die mittlere Quellschüttung liegt bei 0,5 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 263 und 412 $\mu\text{S/cm}$, ihr Mittelwert liegt bei 379 $\mu\text{S/cm}$.

Die Quelle entspringt in der bewaldeten, schroffen Südflanke des Sittlingerkogels (1110 m) nordwestlich des Erbsattels (671 m). Geologisch dominiert Hauptdolomit der Reifling-Scholle (Tirolisch-Norisches Deckensystem) das potenzielle Einzugsgebiet der Quelle (Abbildung 10b; Schmid et al., 2004; Kreuss, 2014).

Insgesamt wurden vier potenzielle Einzugsgebiete ausgewiesen, welche die Bergflanke oberhalb der Erbsattelquelle zu unterschiedlichen Anteilen erfassen. Tabelle 9 fasst die wichtigsten Kenngrößen der vier modellierten Szenarien zusammen, Abbildung 11 stellt die Lage der jeweiligen Einzugsgebiete dar.

Tabelle 9: Modellierte Szenarien für die Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche (in m^2). Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [m^2]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	8500	846	178	1369	738
2	23219	830	247	1369	738
3	31789	787	247	1369	738
4	42546	829	246	1369	738

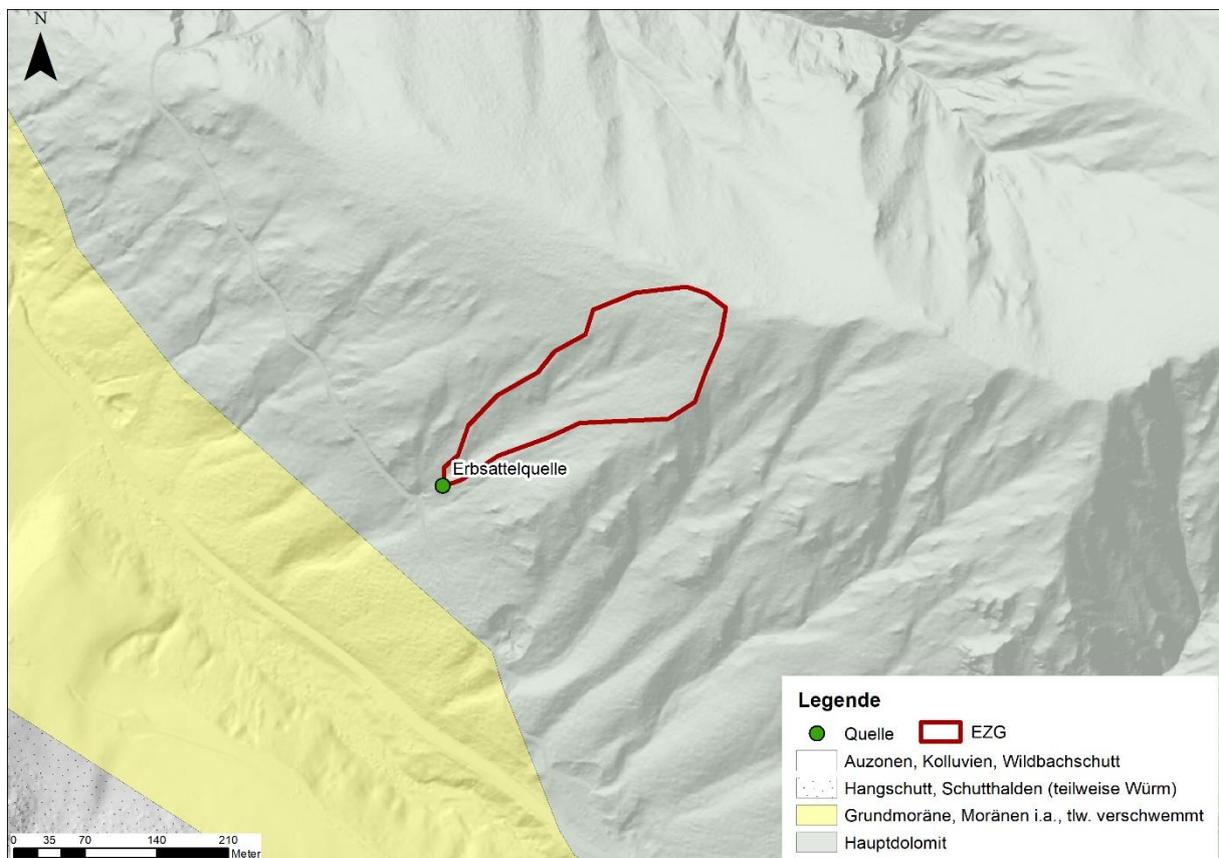
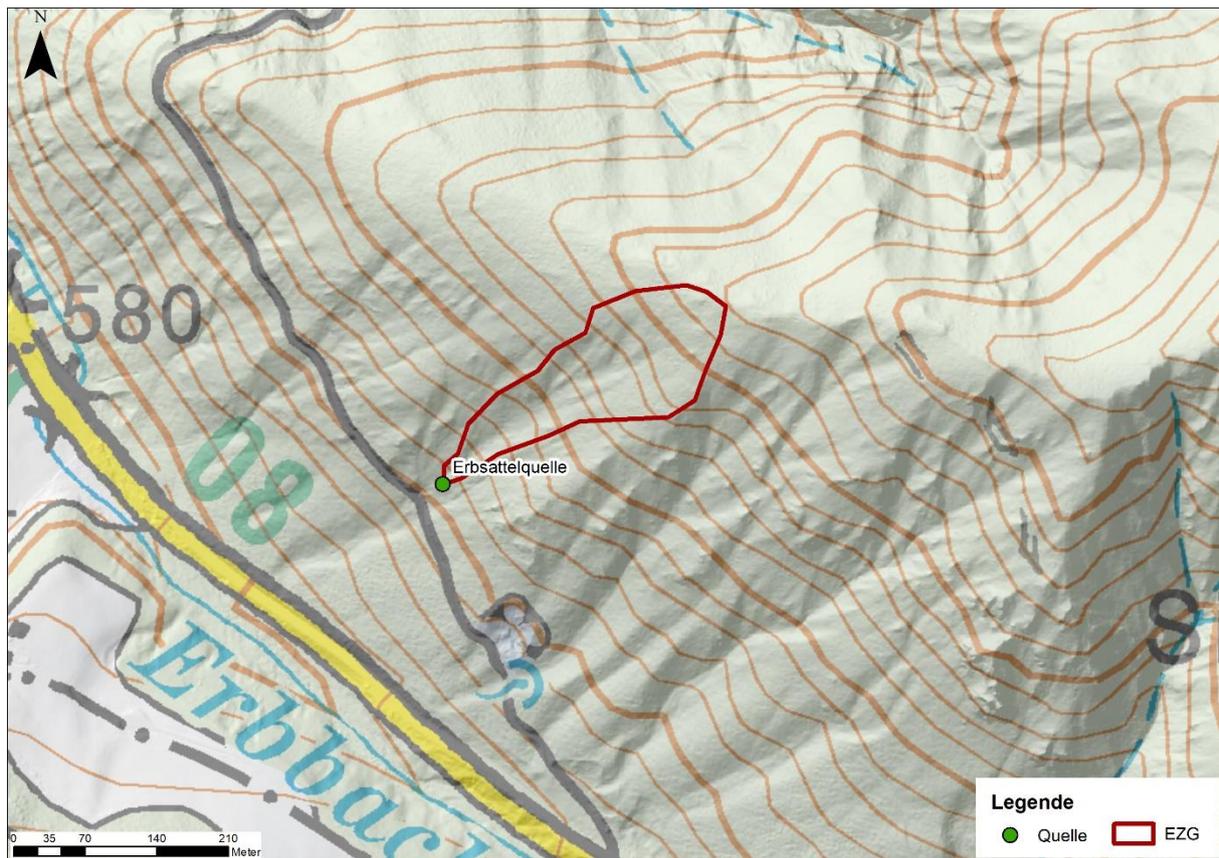


Abbildung 10: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 2 dargestellt.

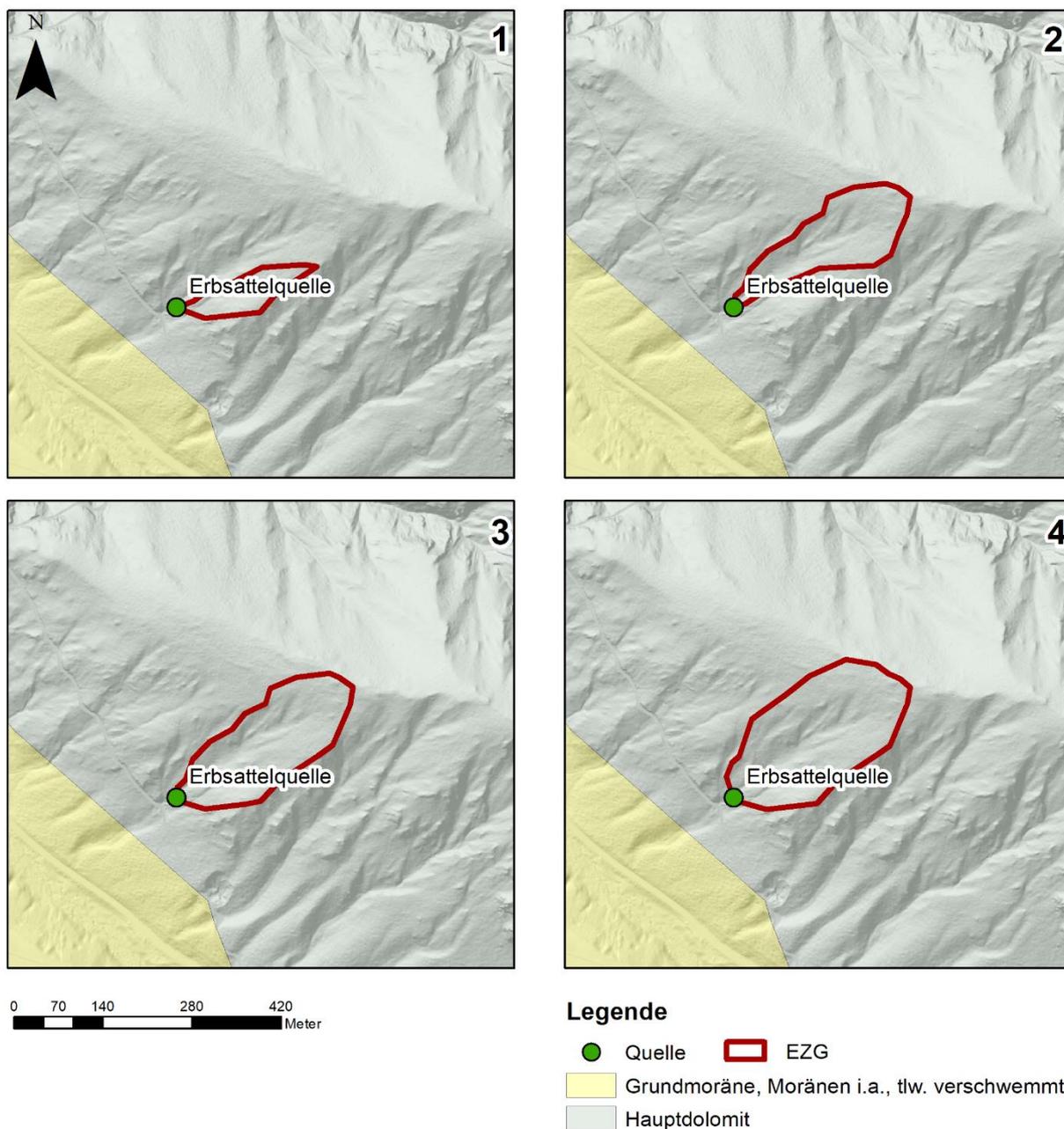


Abbildung 11: Modellierte Szenarien für die Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970).

Tabelle 10 zeigt die Effizienzkriterien und optimierten Modellparameter für alle Szenarien. Alle Szenarien zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und modellierter Quellschüttungsganglinie ($KGE > 0,75$). Sie sind durchwegs in der Lage, ihre Form und Schwankungsbreite zufriedenstellend abzubilden (hohe Korrelationskoeffizienten) und weisen geringe systematische Fehler auf.

Tabelle 10: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,78	0,78	0,96	0,98
2	0,82	0,82	0,99	1,00
3	0,80	0,80	0,99	1,00
4	0,79	0,79	0,99	1,00

Tabelle 11 fasst die optimierten Modellparameter der vier Szenarien zusammen. Reaktionszeit (x_4), Bodenwasser- (x_1) und Grundwasserspeicherkapazität (x_3) weisen stets plausible Werte auf. Der Schneeschmelzfaktor (c_2) liegt in zwei Fällen tendenziell hoch, der Schneedynamikfaktor (c_1) liegt dagegen in drei von vier Fällen sehr niedrig. Der Austauschkoefizient (x_2) zeigt je nach Fläche der ausgewiesenen Szenarien (Tabelle 9) zusätzlichen Grundwasserzustrom (> 0) oder -abstrom (< 0) an.

Tabelle 11: Optimierte Modellparameter für die Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	93	5,4	84	1,3	0,07	6,9
2	441	-2,1	116	1,2	0,00	7,0
3	42	-21,4	471	1,1	0,12	11,7
4	37	-41,4	564	1,2	0,47	15,8

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Modellergebnisse für Szenario 2, das sehr gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Modellierung zeigt (KGE 0,82). Das Modell ist in der Lage, den beobachteten Hydrographen gut abzubilden (Abbildung 12, Abbildung 13a,b; Korrelationskoeffizient 0,82; relative Variabilität 0,99). Die Wasserbilanz stimmt gut überein und bildet die autogene Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet ab (geringer systematischer Fehler (1,00) und niedriger Austauschkoeffizient (-2,1 mm/Tag)). Die eher niedrige Reaktionszeit von 1,2 Tagen steht mit dem steilen, von Dolomit dominierten Einzugsgebiet in Einklang, in dem keine tiefgreifende Verkarstung erwartet wird. Mit Ausnahme des Schneedynamikfaktors zeigen alle weiteren optimierten Modellparameter plausible Werte (Abbildung 13d; Bodenwasserspeicher 441 mm; Grundwasserspeicher 116 mm; Schneeschmelzfaktor 7,0 mm/(°C Tag)).

Erbsattelquelle (Szenario 2)

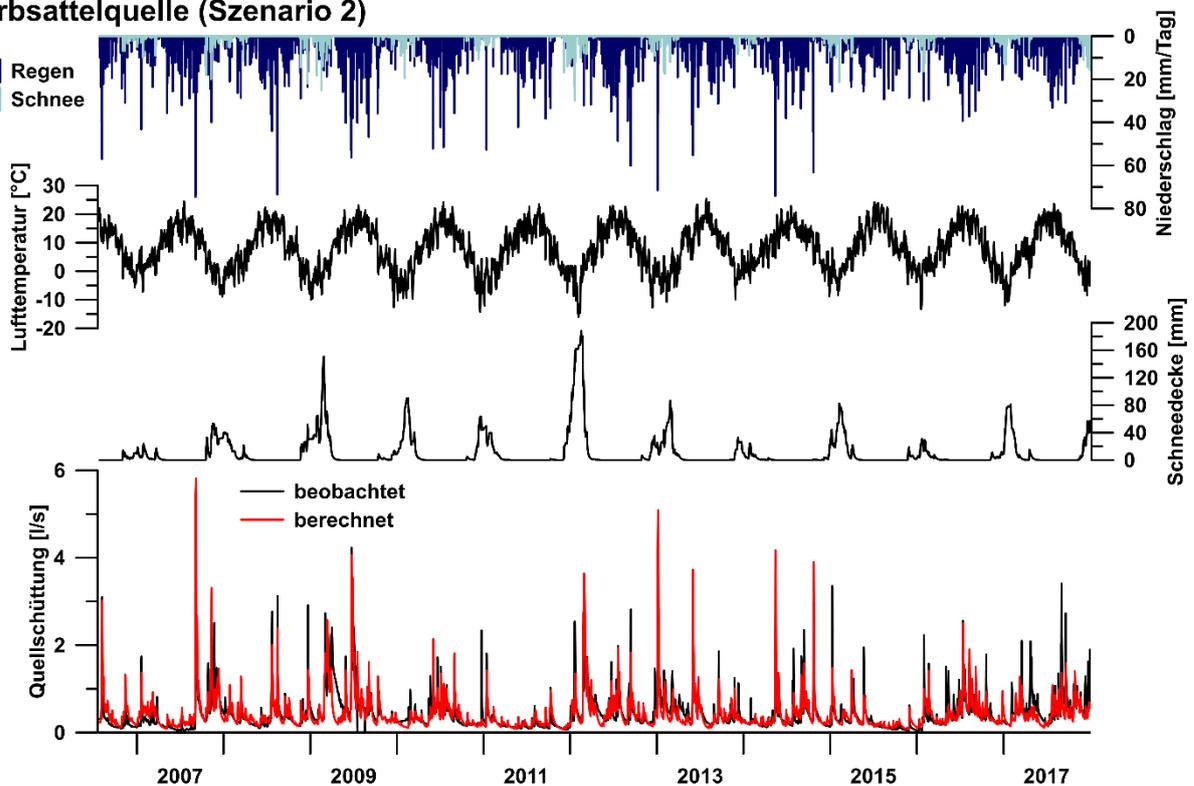


Abbildung 12: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970), Szenario 2.

Erbsattelquelle (Szenario 2)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0.82	Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Korrelationskoeffizient [-]	0.82	■ Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
systematischer Fehler [-]	1.00	■ Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich
relative Variabilität [-]	0.99			

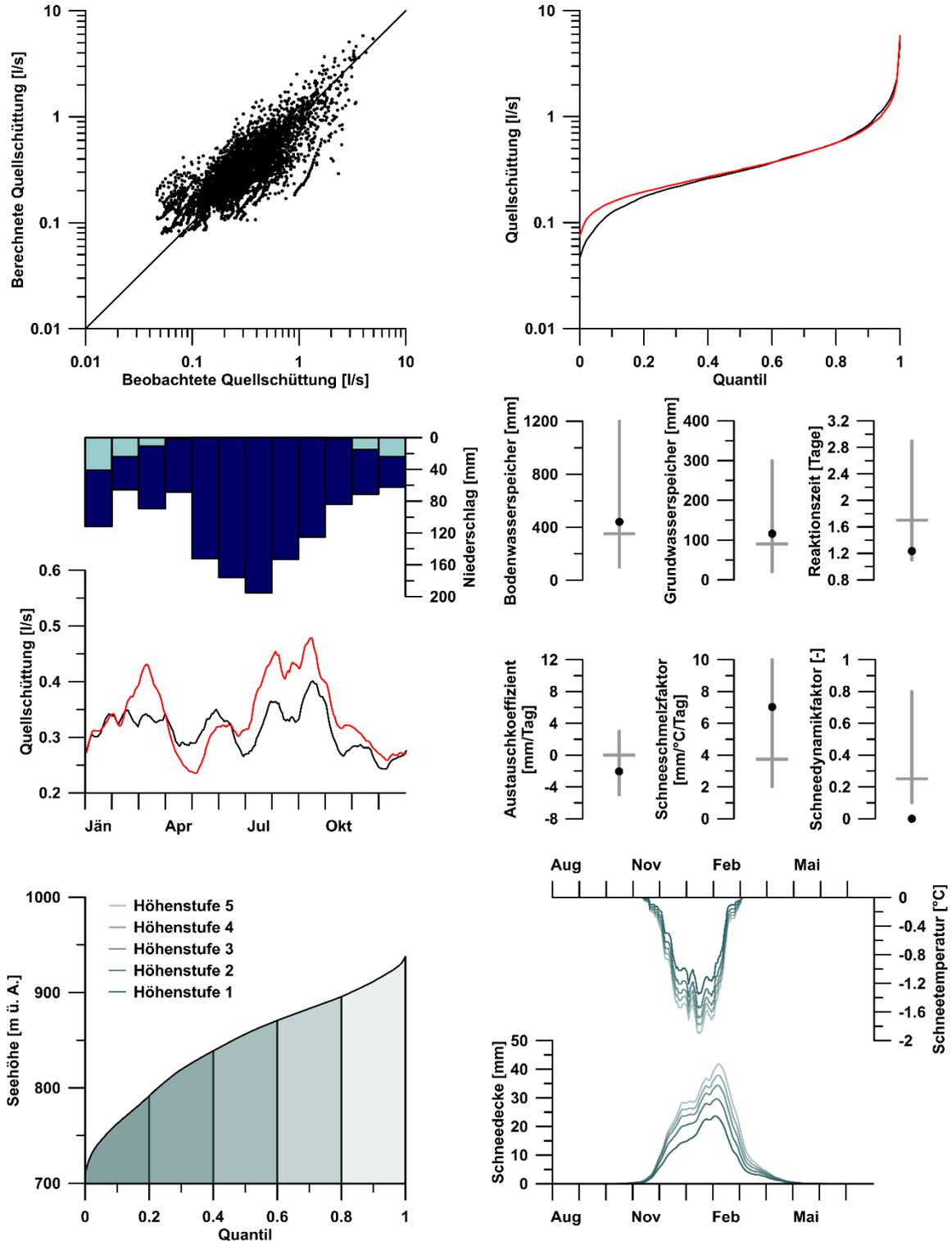


Abbildung 13: Bewertung der Modellierungsergebnisse für Erbsattelquelle (HZB-Nr. 395970), Szenario 2. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.3. Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796)

Die Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796) liegt auf 856 m ü. A. in den Eisenerzer Alpen im Gemeindegebiet Admont (Bezirk Liezen) (Abbildung 1, Abbildung 14a). Von 1.1.2014 bis 31.12.2017 liegt eine kontinuierliche Zeitreihe der Quellschüttung vor. Mit einer Quellschüttung zwischen 36 und 810 l/s (Mittelwert 163 l/s) stellt sie die bedeutendste Quelle der Eisenerzer Alpen dar (Probst, 1993).

Die Quelle entspringt am Hangfuß des Grieskogels (1495 m ü. A.), einem Vorgipfel des Blasenecks (1969 m). Die Quellnische weist mehrere Quellaustritte auf einer Breite von etwa 20 m auf. Die genaue Position der Austritte variiert in Abhängigkeit von den herrschenden hydrologischen Bedingungen. Dieses Verhalten weist darauf hin, dass es sich bei der Etzbachquelle um eine Überlaufquelle handelt (Spitz, 2016). Im Umfeld der Quelle ist der Talboden von einer Moorlandschaft geprägt (hoher Grundwasserstand). Unmittelbar unterhalb der Quelle liegt ein Quelltümpel mit einer Ausdehnung von ca. 100 m². Spitz (2016) schätzt, dass lediglich 10-20 % des Abflusses aus den definierten Austritten stammen, der überwiegende Teil des Abflusses dagegen als diffuser Grundwasserzutritt zu diesem Quelltümpel erfolgt. Die HZB-Messstelle liegt unterhalb des Quelltümpels und erfasst somit den gesamten Abfluss. Die dort gemessene elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen 154 und 251 µS/cm (Mittelwert 212 µS/cm), wobei die einzelnen Austritte teils erheblich unterschiedliche Leitfähigkeit, Hydrochemie und Isotopensignaturen aufweisen (Spitz, 2016).

Die Nordflanke des Grieskogels sowie des Hauptkamms der Eisenerzer Alpen im potenziellen Einzugsgebiet der Quelle wird von Devonkalken der Norischen Decke aufgebaut (Tirolisch-Norisches Deckensystem), die im Mittel mit 50° nach NNE einfallen und Verkarstungserscheinungen wie Bachschwinden und befahrbare Höhlen aufweisen. Die höheren Anteile werden von nicht verkarstungsfähigen Polsterquarziten und Blaseneck-Porphyroiden, mitunter auch von Tonschiefern und Phylliten der Rad-Formation gebildet (Abbildung 14b; Hießleitner, 1935, 1958; Tollmann, 1977; Schönlaub, 1979, 1980; Loeschke et al., 1990; Schmid et al., 2004; Kreuss, 2014).

Die hohe Quellschüttung steht einem kleinen orographischen Einzugsgebiet (0,53 km², Szenario 1) gegenüber. Eine Reihe von Markierungsversuchen belegt eine direkte hydraulische Verbindung zwischen einer Bachschwinde unterhalb des Bärenkars und der Etzbachquelle (Abbildung 14; Spitz, 2016), sodass das Bärenkar als allogenes Grundwasserneubildungsgebiet des Karstaquifers in Szenario 2 – 15 einbezogen wird. Diese Szenarien kombinieren unterschiedliche, von Devonkalken aufgebaute Bereiche und nicht verkarstete Bereiche (Abbildung 15). Insbesondere nach starken Niederschlägen versickern die Bäche, die den Sebringgraben, das Bärenkar und die Ploden entwässern, nur teilweise in den verkarsteten Karbonatgesteinen, während ein mitunter beträchtlicher Teil als

Oberflächengerinne direkt dem Johnsbach zuströmt. Tabelle 12 fasst die wichtigsten Kenngrößen der 15 modellierten Einzugsgebietsszenarien zusammen, Abbildung 15 stellt die Lage der jeweiligen Einzugsgebiete dar.

Tabelle 12: Modellierete Szenarien für die Eitzbachquelle (HZB-Nr. 396796), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,53	1174	618	1421	756
2	2,32	1505	1076	1435	741
3	2,92	1502	1076	1437	740
4	3,38	1462	1076	1437	740
5	3,38	1514	1076	1444	739
6	3,85	1478	1076	1443	739
7	5,14	1443	1077	1444	742
8	6,55	1556	1167	1464	736
9	7,18	1567	1166	1469	735
10	7,89	1521	1167	1461	738
11	8,03	1489	1113	1427	739
12	8,54	1533	1167	1465	738
13	9,55	1480	1113	1432	739
14	12,29	1521	1167	1445	737
15	12,94	1529	1167	1449	737

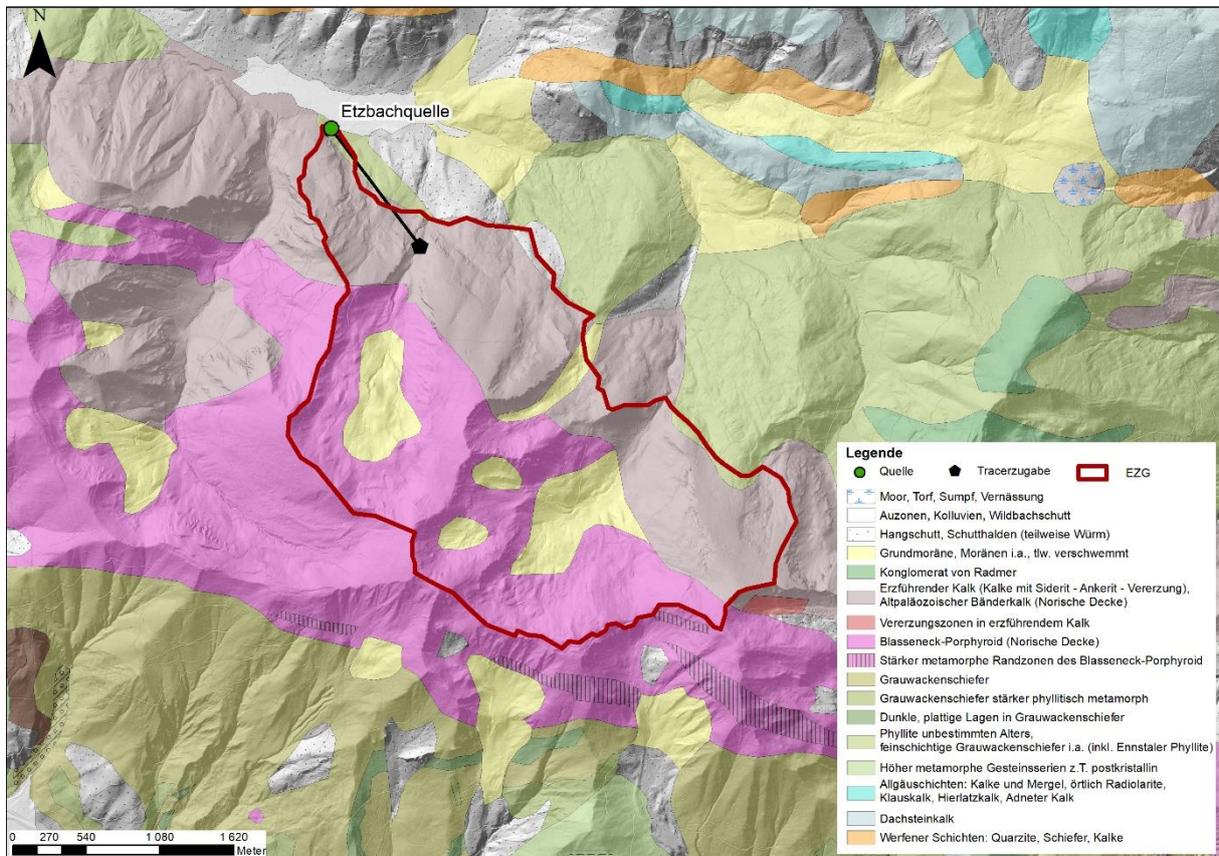
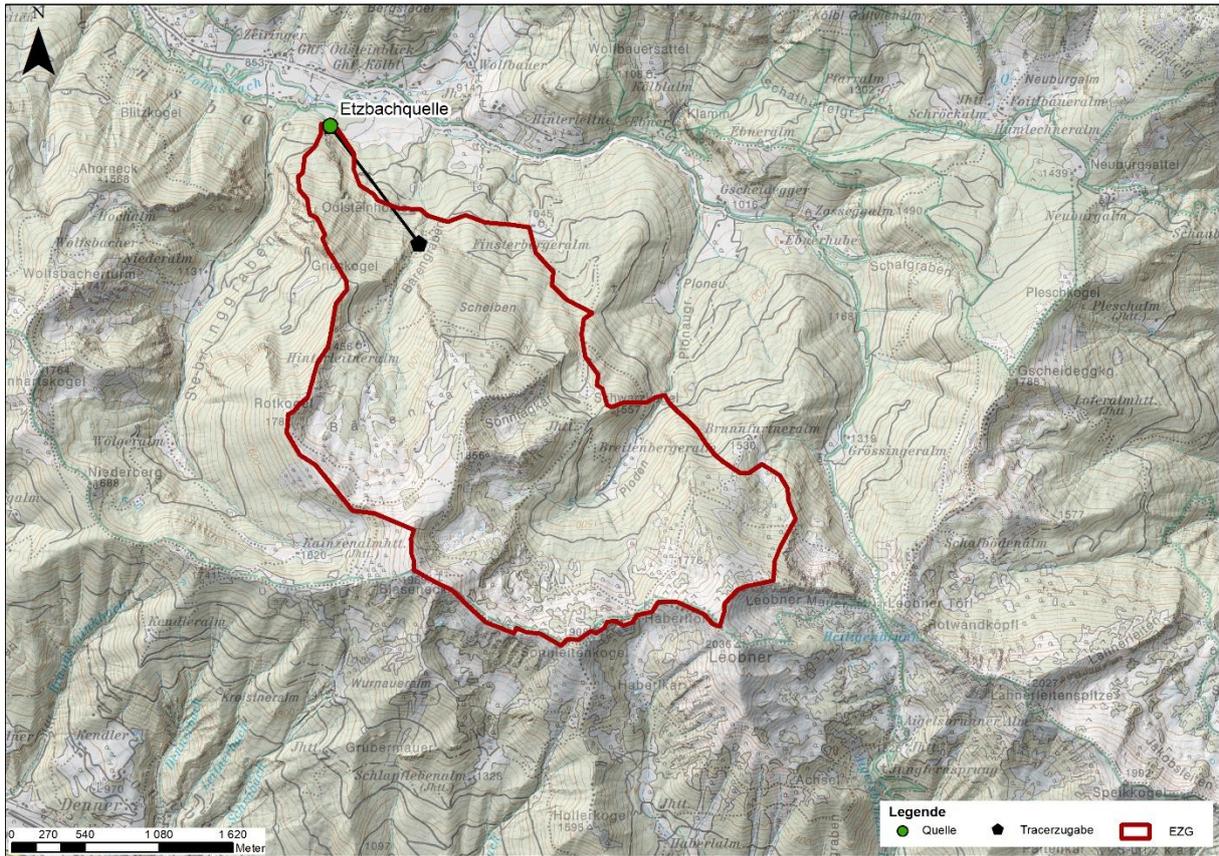


Abbildung 14: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Etschbachquelle (HZB-Nr. 396796). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 9 dargestellt.

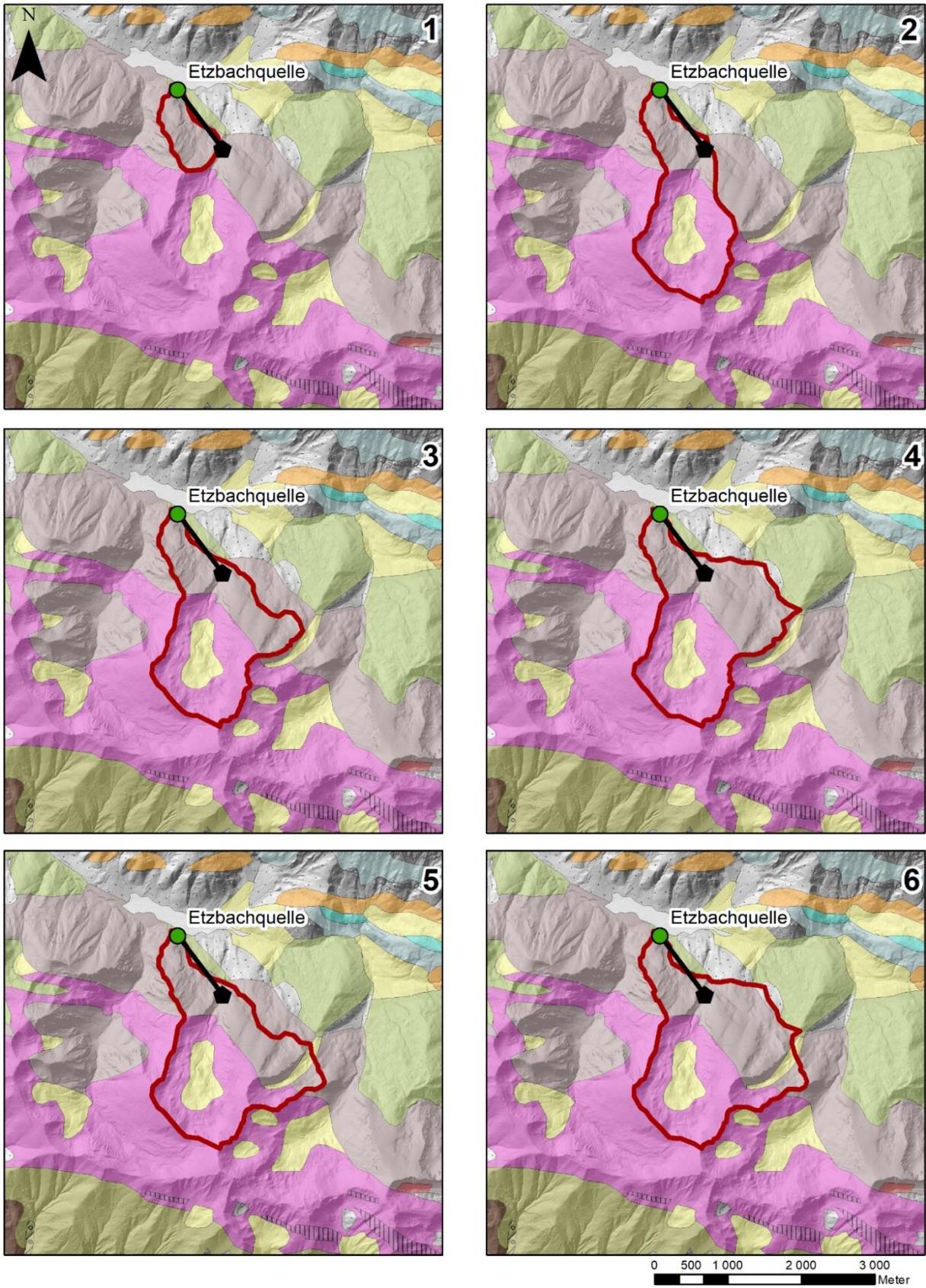


Abbildung 15: Modellierte Szenarien für die Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796).

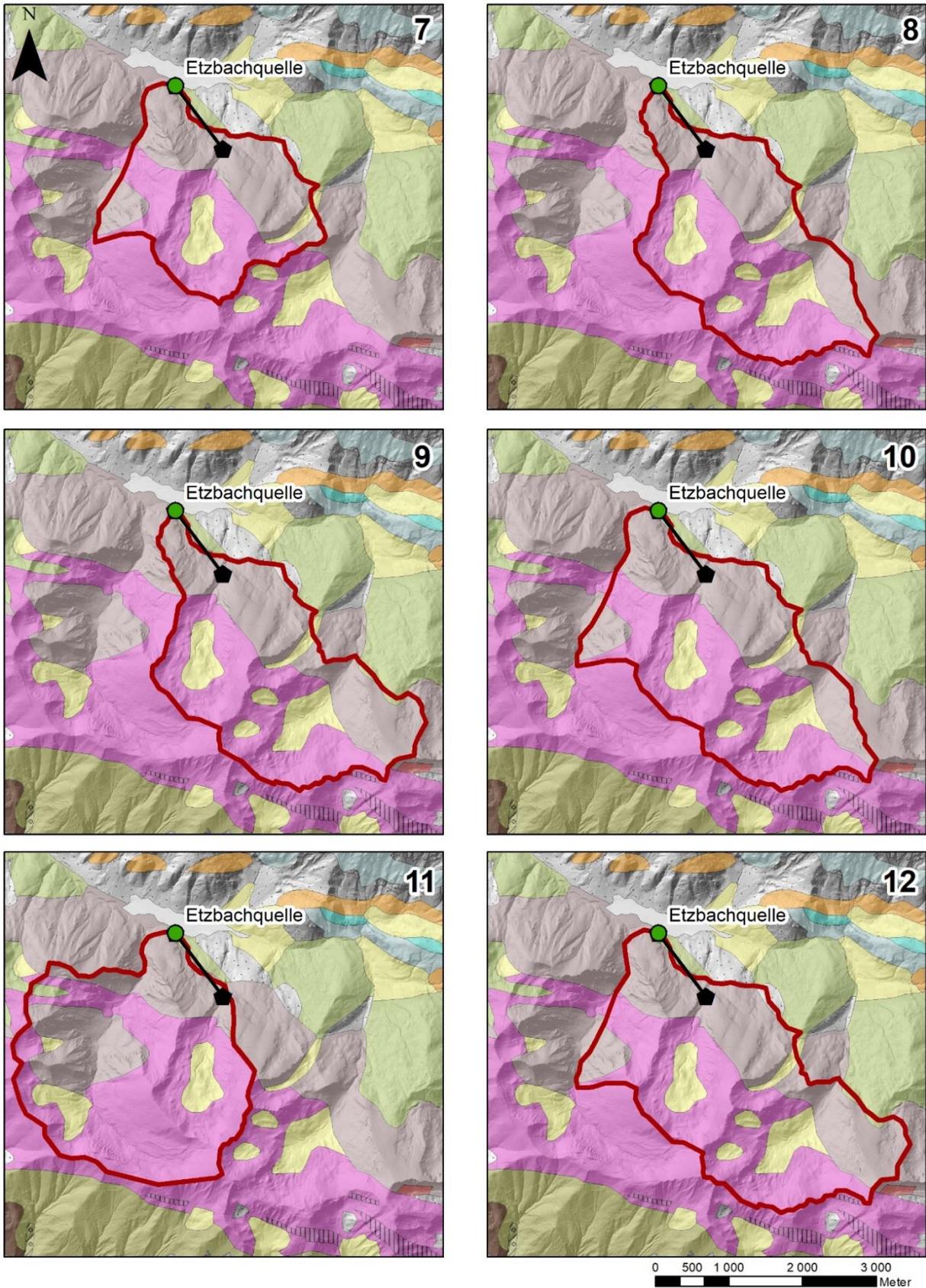


Abbildung 15 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796).

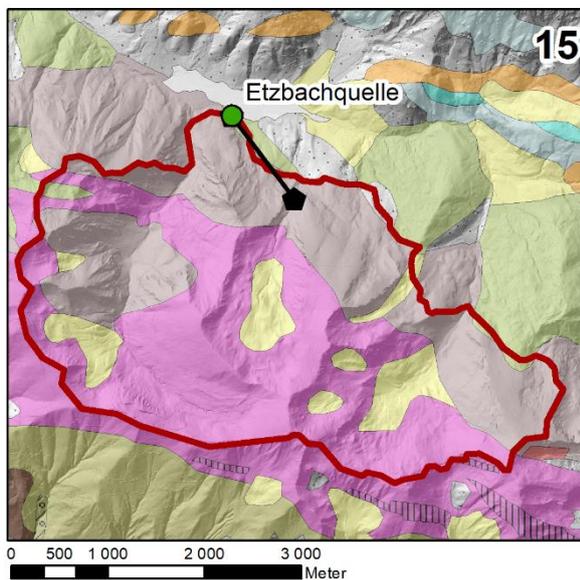
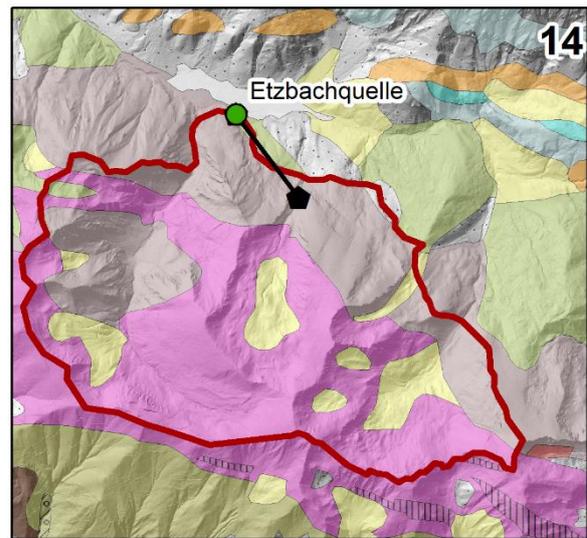
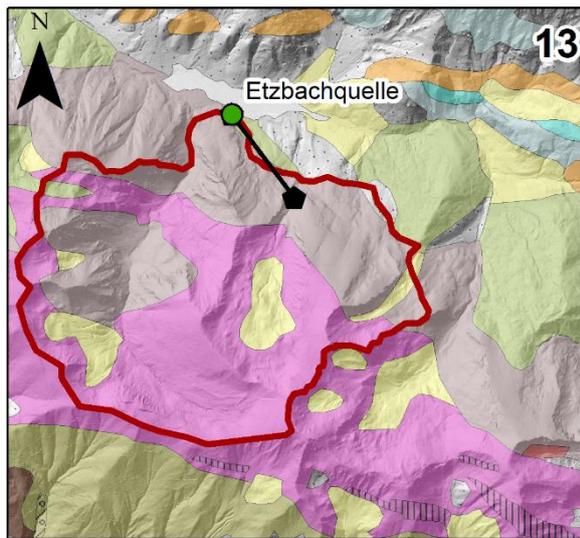


Abbildung 15 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Eitzbachquelle (HZB-Nr. 396796).

Tabelle 13 und Tabelle 14 stellen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Mit Ausnahme von Szenario 1 zeigen alle Szenarien sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Schüttungsganglinie (KGE zwischen 0,75 und 0,83; Korrelationskoeffizienten zwischen 0,76 und 0,83; relative Variabilitäten zwischen 0,97 und 1,08; systematische Fehler zwischen 0,97 und 1,02). Die Auswahl eines plausiblen Szenarios orientiert sich dementsprechend in erster Linie an plausiblen Kombinationen optimierter Modellparameter (Tabelle 14).

Tabelle 13: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Eitzbachquelle (HZB-Nr. 396796).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,35	0,67	0,51	0,72
2	0,83	0,83	0,97	0,99
3	0,83	0,83	1,00	1,00
4	0,82	0,82	0,99	1,00
5	0,83	0,83	1,01	1,00
6	0,83	0,83	1,01	1,00
7	0,81	0,81	1,02	1,01
8	0,81	0,81	1,03	1,01
9	0,80	0,81	1,04	1,01
10	0,80	0,80	1,04	1,01
11	0,79	0,79	1,04	1,01
12	0,81	0,81	1,04	1,01
13	0,79	0,79	1,05	1,01
14	0,78	0,79	1,06	1,01
15	0,75	0,76	1,08	1,02

Der Großteil der Szenarien weist plausible Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) auf (zwischen 26 und 118 mm, mit Ausnahme von Szenario 1), wobei die tendenziell eher niedrigen Werte das hochalpine Einzugsgebiet widerspiegeln (vgl. Wagner et al., 2016). Die hohen Werte der Grundwasserspeicherkapazität (x_3) entsprechen dem von der Eitzbachquelle entwässerten, weit verzweigten Karstsystem, das nach Spitz (2016) neben den bevorzugten Fließwegen entlang von Karsthohlräumen eine hohe Speicherkapazität im feinen Kluft- und Porensystem aufweist. Schneeschmelzfaktor (c_2) und Reaktionszeit (x_4) nehmen durchwegs plausible Werte an, wobei tendenziell kurze Reaktionszeiten die schnelle Komponente des Karstsystems (bevorzugte Fließwege) abbilden. Der Schneedynamikfaktor (c_1) nimmt für die Szenarien 1 – 7 und 11 – 14 ungewöhnlich hohe Werte ($> 0,91$) an.

Tabelle 14: Optimierte Modellparameter für die Eitzbachquelle (HZB-Nr. 396796). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoeffizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	1	26,0	179	2,0	1,00	2,2
2	35	12,6	210	1,5	0,96	2,9
3	118	8,9	181	1,6	0,95	3,4
4	51	9,6	295	1,5	0,95	3,3
5	38	10,0	335	1,5	0,94	3,5
6	110	7,2	277	1,6	0,91	3,8
7	49	3,6	471	1,7	0,96	4,0
8	54	-2,7	529	1,9	0,68	4,3
9	69	-5,4	490	2,0	0,28	4,3
10	43	-9,9	577	2,0	0,79	4,6
11	34	-9,6	618	2,0	0,93	4,6
12	34	-16,7	680	1,9	0,93	5,4
13	30	-20,0	682	1,9	0,95	5,2
14	26	-40,3	764	2,0	0,94	5,7
15	114	-27,8	490	2,0	0,34	4,6

Der Austauschkoeffizient (x_2) zeigt für Szenarien 1 – 7 positive Werte. Dies steht im Widerspruch zur beschriebenen hydrologischen Situation, die sich durch teils erheblichen Oberflächenabfluss aus dem Einzugsgebiet der Eitzbachquelle direkt in den Johnsbach, d. h. unter Umgehung der Quelle, auszeichnet. Dementsprechend weist Tabelle 14 positive Austauschkoeffizient als unplausibel aus.

Etzbachquelle (Szenario 9)

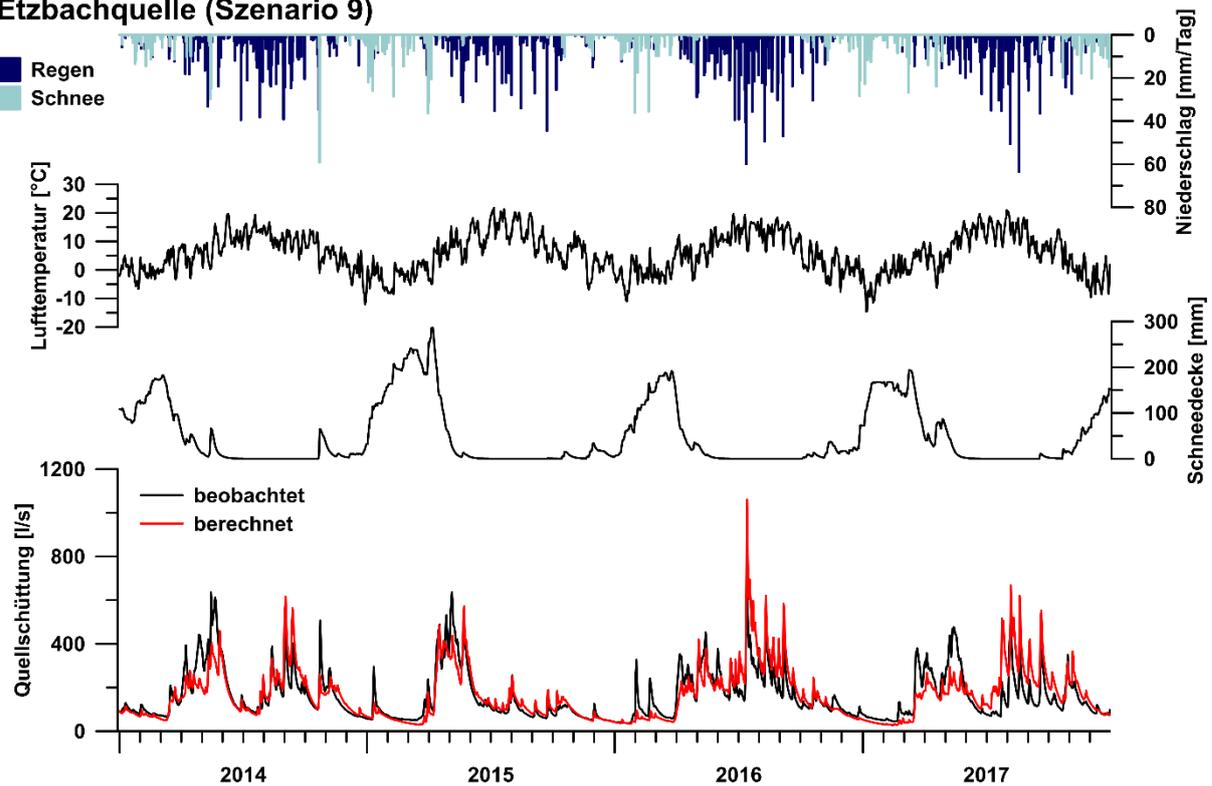


Abbildung 16: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796), Szenario 9.

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Modellergebnisse für Szenario 9, das gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Modellierung zeigt (KGE 0,80; Korrelationskoeffizient 0,81; relative Variabilität 1,04; systematischer Fehler 1,01). Die optimierten Modellparameter fallen in die oben ausgeführten, plausiblen Bereiche (Abbildung 17d): Eine Bodenwasserspeicherkapazität von 69 mm (alpines Einzugsgebiet), Grundwasserspeicherkapazität von 490 mm (Karstsystem mit hoher Speicherfähigkeit im Feinkluft- und Porensystem), Reaktionszeit von 2 Tagen, sowie ein Schneedynamikfaktor von 0,28 und ein Schneeschmelzfaktor von 4,3 mm/(°C Tag) liegen alle im erwarteten Bereich. Der negative Austauschkoefizient (-5,4 mm/Tag) weist auf einen (im langjährigen Mittel) eher moderaten Oberflächenabfluss direkt zum Johnsbach hin. Abbildung 17a und Abbildung 17b verdeutlichen die grundsätzlich gute Übereinstimmung unter einem breiten Spektrum hydrologischer Bedingungen, wobei die ausgeprägte Saisonalität der Schüttungsganglinie vom Modell nicht vollumfänglich abgebildet wird (Abbildung 17c).

Etzbachquelle (Szenario 9)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-] 0,80
 Korrelationskoeffizient [-] 0,81
 systematischer Fehler [-] 1,01
 relative Variabilität [-] 1,04

Niederschlag Schneefeld Regen
Quellschüttung — beobachtet — berechnet
Modellparameter ● Optimierter Wert — Typischer Wertebereich

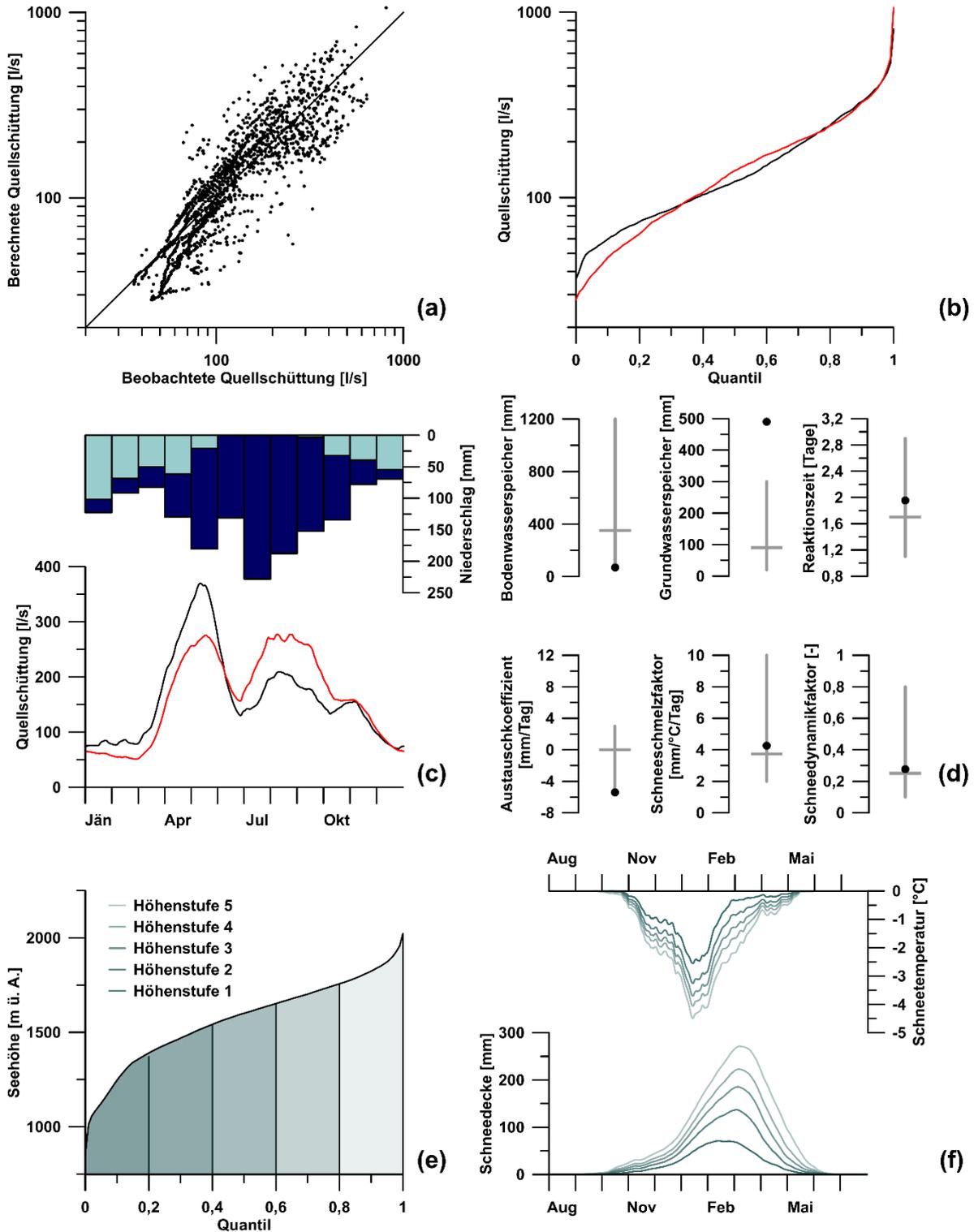


Abbildung 17: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Etzbachquelle (HZB-Nr. 396796), Szenario 9. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.4. Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788)

Die Galgenwaldquelle (HZB-NR. 396799) befindet sich nördlich von Murau auf 852 m ü. A am Fuß der Lärchberg Nordostflanke (Abbildung 1, Abbildung 18a). Politisch liegt sie im Gebiet der Gemeinde sowie des Bezirks Murau. Von 12.7.2010 bis 31.12.2017 liegen Aufzeichnungen der Quellschüttung vor, die durch eine Reihe von Datenlücken (38,1 %) unterbrochen werden. Die Schüttung liegt stets unter 3,7 l/s (Mittelwert 0,34 l/s), die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 466 und 593 $\mu\text{S/cm}$ (Mittelwert 526 $\mu\text{S/cm}$).

Die Basis des Lärchberges wird von feinblättrigen Phylliten und Grünschiefern gebildet. Darüber lagern bis zu 300 m mächtige, gebankte bis plattige Murauer Kalke, die ebenso wie die Phyllite der Murauer Decke zugerechnet werden (Drauzug-Gurktal-Deckensystem; Flügel und Neubauer, 1984; Schmid et al., 2004). Insbesondere in den höheren Anteilen dieser Einheit treten geschieferte und sandige Kalkmarmore sowie Einschaltungen sandiger Phyllite auf. Die Schieferung beider Einheiten fällt tendenziell nach Nordwesten ein. Innerhalb der Kalkmarmore ist ein steil stehendes, konjugiertes Bruchsystem ausgebildet, mit einer tendenziell ENE-WSW und einer NNO-SSE streichenden Bruchschar. Dieses Bruchsystem ist ansatzweise in den unterlagernden Phylliten verfolgbar, zeigt dort aber grundsätzlich flacheres Einfallen und breiter gestreute Orientierung der Klufflächen (Turner, 1958a,b; Flügel und Neubauer, 1984; Poisel et al., 2003; Hausegger, 2006).

Das Gebiet ist überwiegend bewaldet und durch zahlreiche Gräben und Bachläufe gegliedert. Die Quelle befindet sich im Einflussbereich der Großhangbewegung Lärchberg-Galgenwald, die einen Teil der Nordostflanke des Lärchberges erfasst. Ein Großteil der Bergflanke ist von einer älteren, derzeit ruhenden Massenbewegung beeinflusst, während die weitere Umgebung der Quelle von einer aktiven Hangkriechbewegung betroffen ist und der unmittelbare Nahbereich von einem aktiven Rotationsrutschkörper gebildet wird (Poisel et al., 2003, 2009; Hausegger, 2006; Lindbichler, 2021). Die Quelle tritt an der Basis einer Kalkeinheit aus, die (Kalk-)Phyllite überlagert (Abbildung 18b).

Insgesamt wurden sieben potenzielle Quelleinzugsgebiete ausgewiesen und modelliert, die unterschiedlich große Anteile der Bergflanke erfassen. Tabelle 15 fasst die wichtigsten Kenngrößen der sieben Szenarien zusammen, Abbildung 19 zeigt die Lage der in Betracht gezogenen Einzugsgebiete.

Tabelle 15: Modellierte Szenarien für die Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,01	885	583	898	817
2	0,01	981	413	859	827
3	0,02	946	72	878	822
4	0,03	946	315	872	823
5	0,14	1030	209	875	822
6	0,24	1101	197	876	822
7	0,59	1270	238	871	826

Tabelle 16 und Tabelle 17 fassen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Szenarien 3 – 6 zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Schüttungsganglinie (KGE zwischen 0,77 und 0,81; Korrelationskoeffizient zwischen 0,79 und 0,81). Szenario 4 – 6 weisen darüber hinaus eine sehr gute relative Variabilität (zwischen 1,00 und 1,02) sowie geringe systematischer Fehler (jeweils 1,00) auf. Alle Szenarien weisen plausible Werte für Bodenwasser- (x_1) und Grundwasserspeicherkapazität (x_3) sowie eine tendenziell langsame Reaktionszeit (x_4) auf. Die optimierten Parameter des Schneemodells (c_1, c_2) ergeben in Summe für kein Szenario ein zufriedenstellendes Bild. Da der systematische Fehler stets nahe 1,00 liegt und keine Anhaltspunkte für stark allogene Grundwasserneubildung vorliegen, wird die Wasserbilanz anhand des Austauschkoefizienten (x_2) bewertet (möglichst nahe bei 0 mm/Tag).

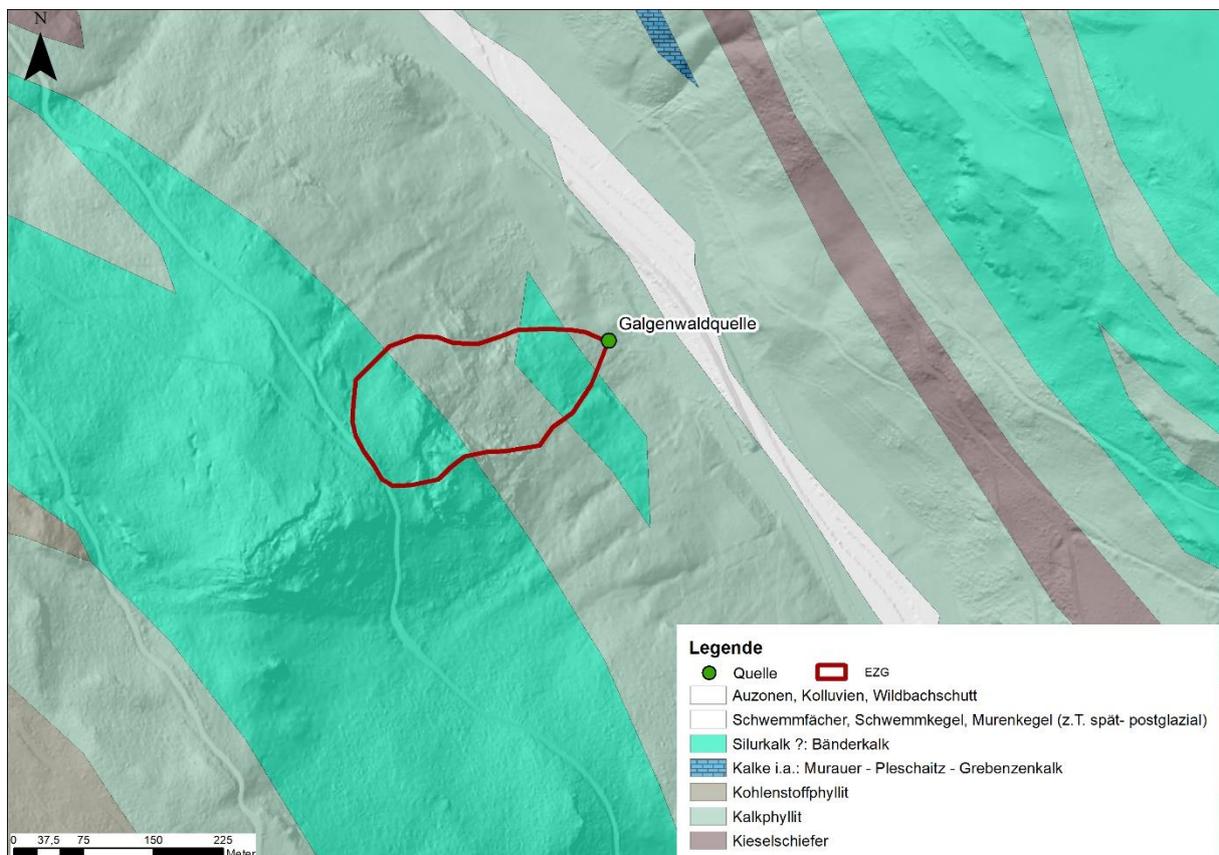
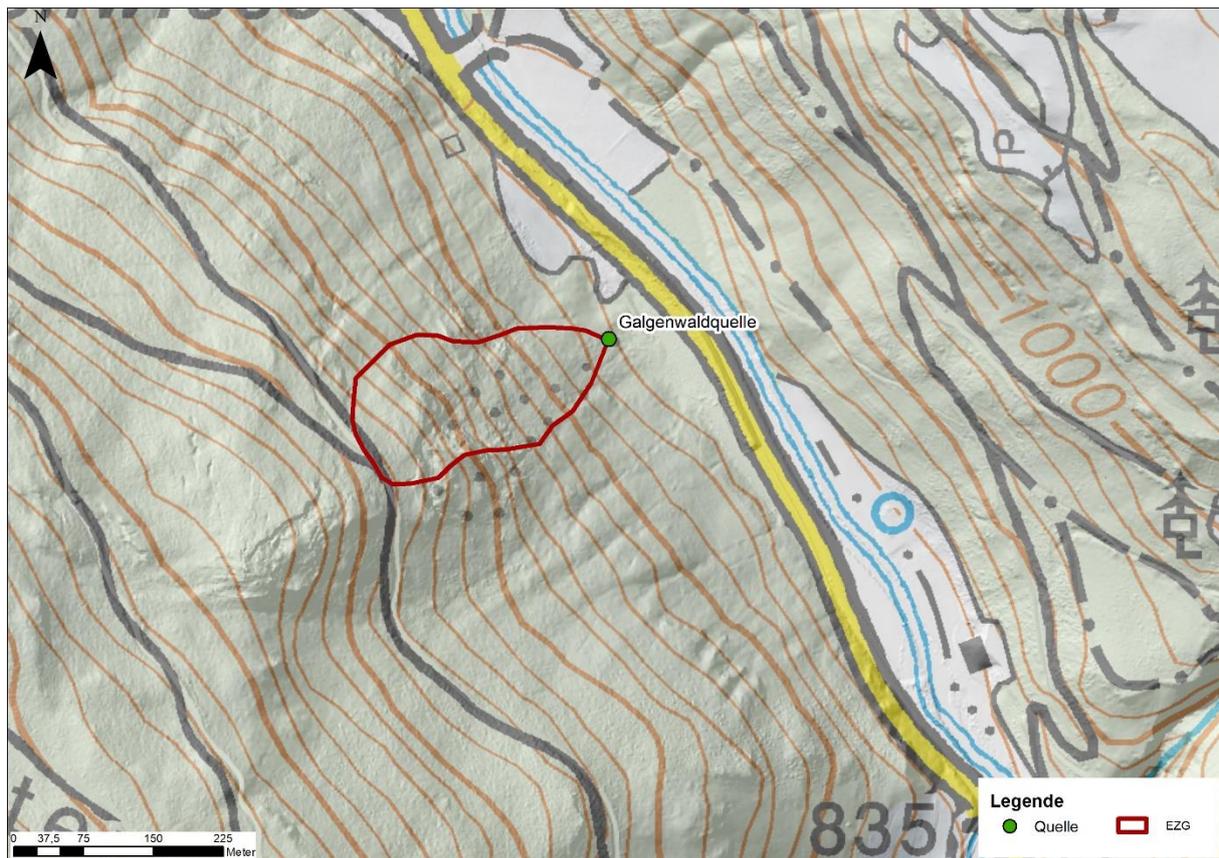


Abbildung 18: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Galgenwaldquelle (HZB-NR. 396799). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 4 dargestellt.

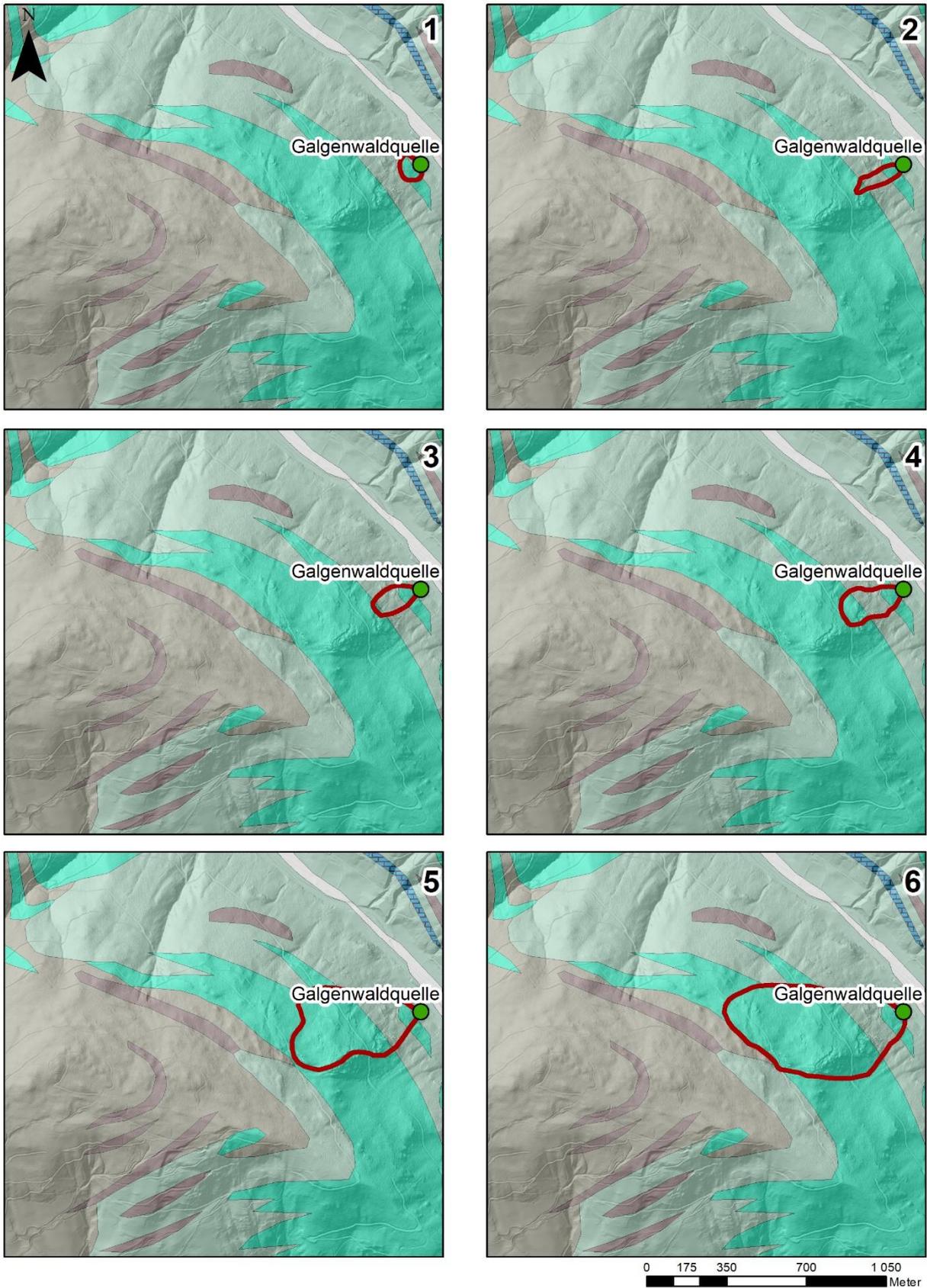


Abbildung 19: Modellierte Szenarien für die Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788).

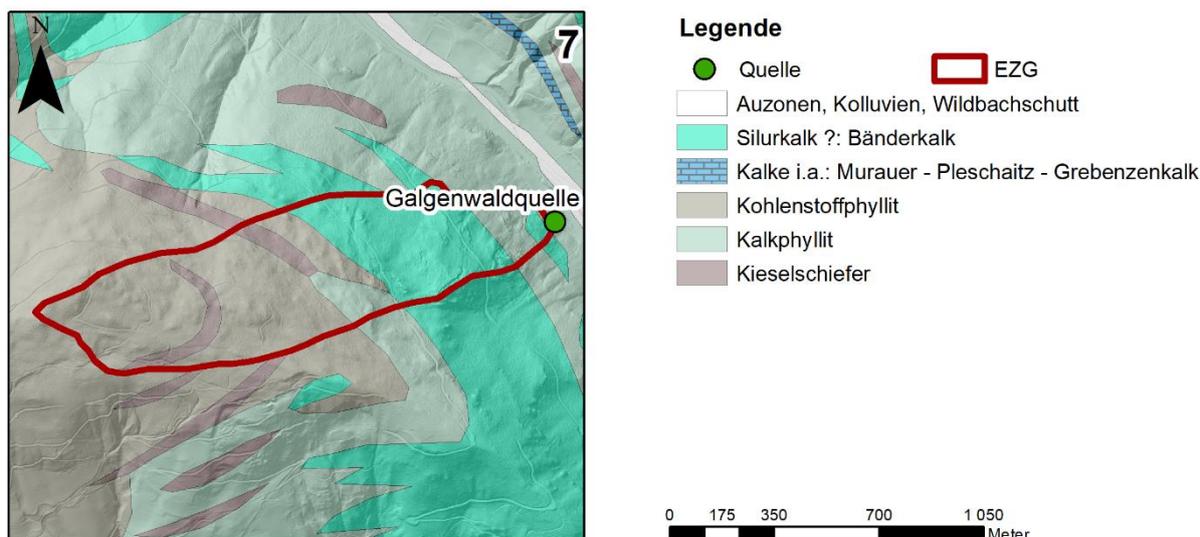


Abbildung 19 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788).

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Ergebnisse der Modellierung von Szenario 4, das aufgrund der ausgeglichenen Wasserbilanz (Austauschkoeffizient 2,5 mm/Tag) als am plausibelsten erachtet wird. Die statistischen Kennzahlen zeigen gute Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung, die optimierten Werte für Bodenwasser- (x_1) und Grundwasserspeicherkapazität (x_3) liegen im erwarteten Bereich. Die etwas lange Reaktionszeit (x_4) deutet auf ein tendenziell (zu) träges Verhalten der berechneten Ganglinie hin.

Ein visueller Vergleich der beobachteten und berechneten Schüttungsganglinie (Abbildung 20) verdeutlicht die erheblichen Datenlücken und teils deutlichen Abweichungen zwischen beiden Ganglinien. Abbildung 21a und Abbildung 21b zeigen ein systematisches Überschätzen der modellierten Quellschüttung bei niedrigem Abfluss an. Abbildung 21c verdeutlicht, dass das Modell nur unzureichend in der Lage ist, die Saisonalität der Quellschüttung abzubilden: Ähnlich wie im Fall der Brunnaderquelle (siehe oben) unterschätzt das Modell die Quellschüttung während der Schneeschmelze im Frühjahr, während es den Abfluss während der Herbst- und Wintermonate überschätzt. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichung stellen die unplausibel hohen Werte für Schneedynamik- und Schneeschmelzfaktor dar (Abbildung 21d), welche eine zu träge Reaktion der berechneten effektiven Schneetemperatur und einen zu starken berechneten Schmelzwasserandrang nahelegen (vgl. Abbildung 21c mit Abbildung 21f: Die effektive Schneetemperatur liegt ganzjährig und in allen Höhenstufen (Abbildung 21e) über $-0,6^{\circ}\text{C}$; während der mittlere Jahresgang der beobachteten Quellschüttung ein deutliches Maximum im April und Mai aufweist (Abbildung 21c), ist die berechnete Schneedecke (Abbildung 21f) zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschmolzen).

Tabelle 16: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,60	0,73	0,74	0,87
2	0,67	0,74	0,82	0,91
3	0,77	0,79	0,91	0,96
4	0,81	0,81	1,00	1,00
5	0,79	0,79	1,02	1,00
6	0,79	0,79	1,02	1,00
7	0,71	0,73	1,09	1,00

Tabelle 17: Optimierte Modellparameter für die Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	52	9,6	148	6,0	1,00	0,0
2	61	7,4	114	5,9	0,38	0,5
3	86	5,7	136	5,6	1,00	5,1
4	149	2,5	176	5,4	1,00	22,8
5	483	-13,2	133	4,6	0,98	37,4
6	576	-24,7	138	5,3	0,99	33,8
7	253	-134,8	462	4,4	0,23	62,3

Galgenwaldquelle (Szenario 4)

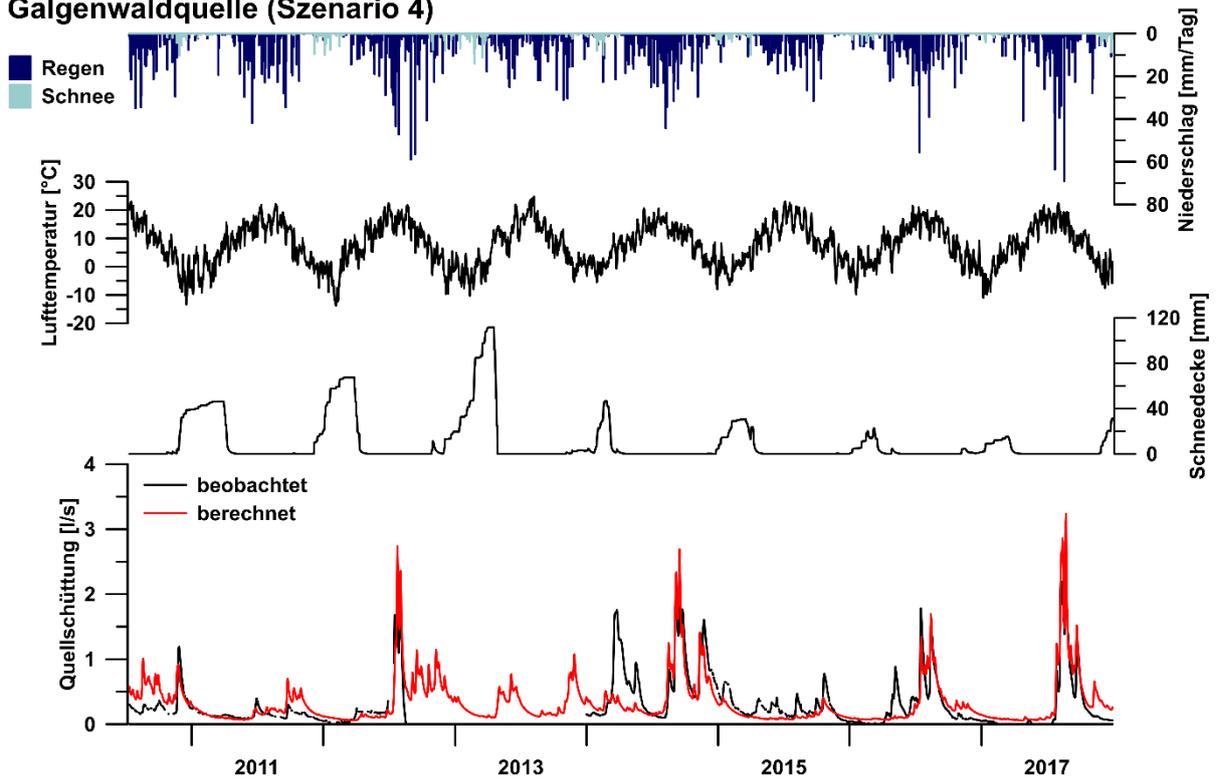


Abbildung 20: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788), Szenario 4.

Insgesamt betrachtet gestattet die Niederschlags-Abfluss-Modellierung im Fall der Galgenwaldquelle daher eine realistische Abschätzung der Einzugsgebietsgröße unter Annahme überwiegend autogener Grundwasserneubildung. Trotz guter statistischer Kennwerte der Modellgüte sollten die Modellergebnisse im Einzelnen mit Vorsicht betrachtet werden – dies gilt in besonderem Maße für die berechnete Schneedeckendynamik.

Galgenwaldquelle (Szenario 4)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,81
Korrelationskoeffizient [-]	0,81
systematischer Fehler [-]	1,00
relative Variabilität [-]	1,00

Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich

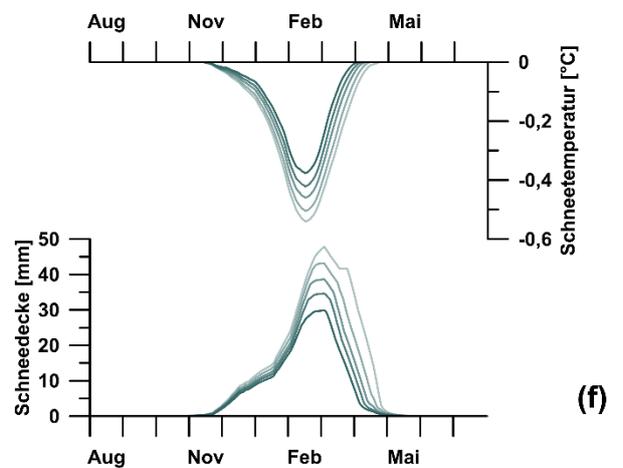
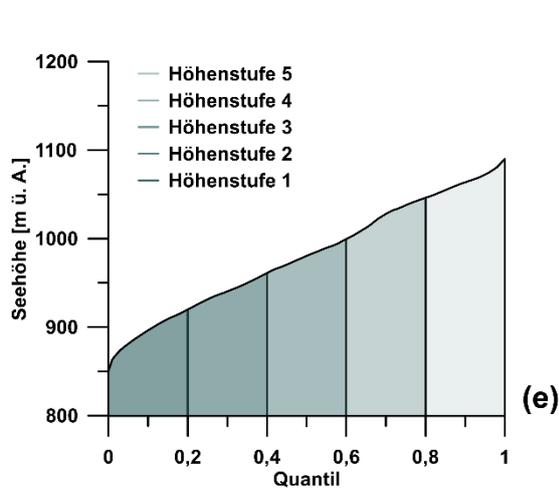
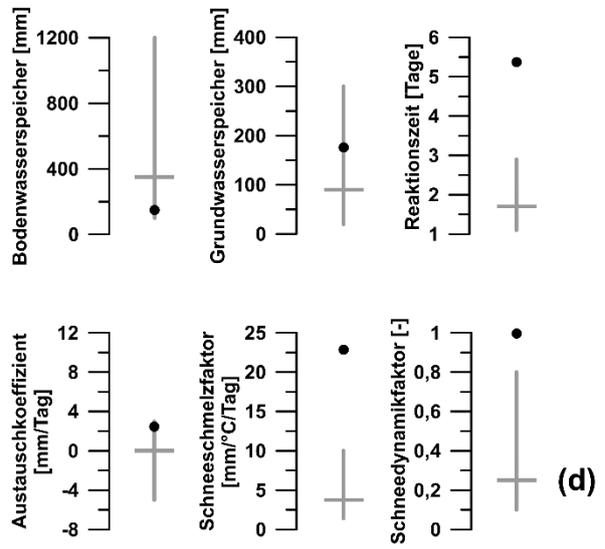
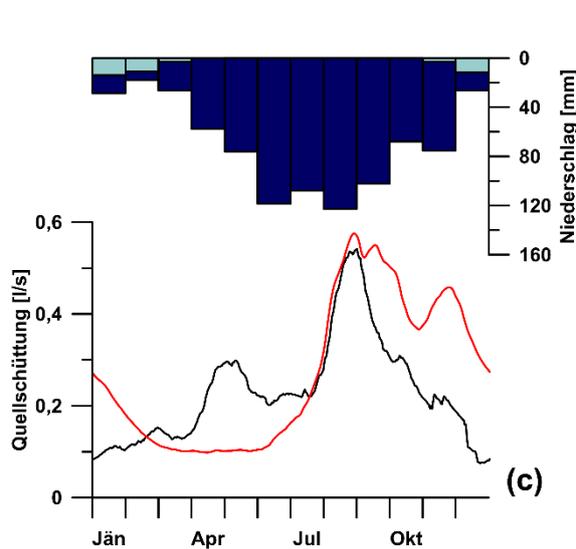
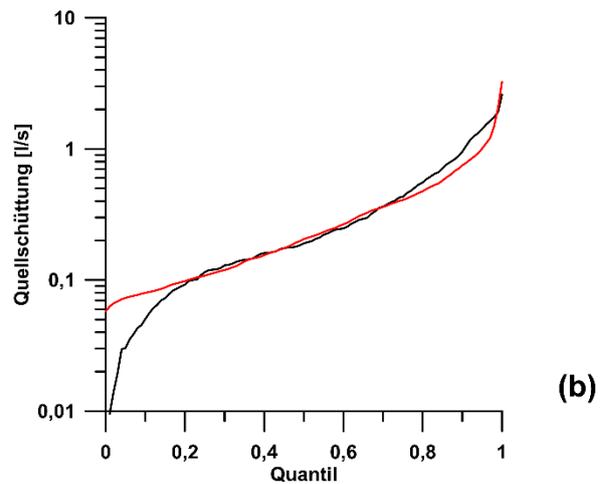
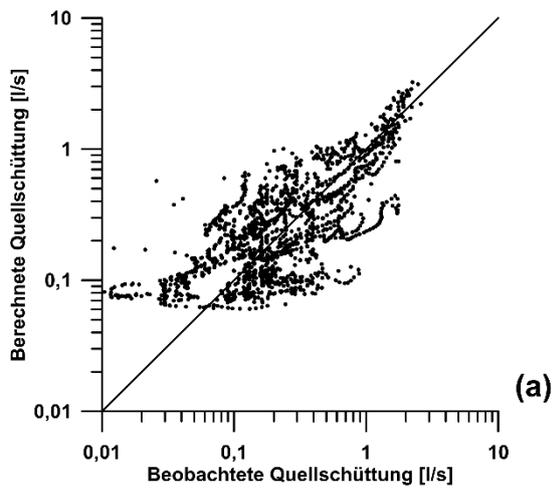


Abbildung 21: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Galgenwaldquelle (HZB-Nr. 396788), Szenario 4. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.5. Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754)

Die Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754) liegt auf 472 m ü. A. im Grazer Bergland im Gemeindegebiet Sankt Oswald bei Plankenwarth (Bezirk Graz Umgebung) (Abbildung 1, Abbildung 22a). Von 26.3.2009 bis 31.12.2017 liegt eine kontinuierlich aufgezeichnete Quellschüttungsganglinie vor. Sie schwankt zwischen 0,4 und 2,0 l/s um einen Mittelwert von 0,9 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit liegt mit 627 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Mittel hoch (Schwankungsbreite 552 bis 638 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Die Quelle entwässert die Bergflanke nördlich des Rohrbaches, deren unterer Abschnitt mit Wald bestanden ist, während im oberen Teil Wiesen dominieren. Geologisch wird die Flanke über weite Strecken von Dolomiten der Flösserkogel-Formation des Grazer Paläozoikums (Rannach-Decke, Drauzug-Gurktal-Deckensystem) aufgebaut (Abbildung 22b; Schmid et al., 2004; Piller et al., 2014; Ebner et al., 2017). Etwa auf Höhe des Quellaustritts schließen zunächst Rotlehme und Roterden der Eggenberg-Formation an, die als relative Wasserstauer wirken, etwas unterhalb fluviatile, siliziklastische Ablagerungen der Stallhofen-Formation (Neogen des Steirischen Beckens; Ebner et al., 1985, 2017; Ebner und Stingl, 1998; Gross, 2015; Brielmann, 2020).

Insgesamt wurden vier potenzielle Einzugsgebiete entlang der Bergflanke ausgewiesen. Tabelle 18 fasst die wichtigsten Kenngrößen der vier modellierten Szenarien zusammen, Abbildung 23 stellt die Lage der jeweiligen Einzugsgebiete dar.

Tabelle 18: Modellierte Szenarien für die Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km ²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Reliefunterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,02	509	80	872	819
2	0,05	546	134	877	814
3	0,10	554	134	878	811
4	0,13	559	134	878	811

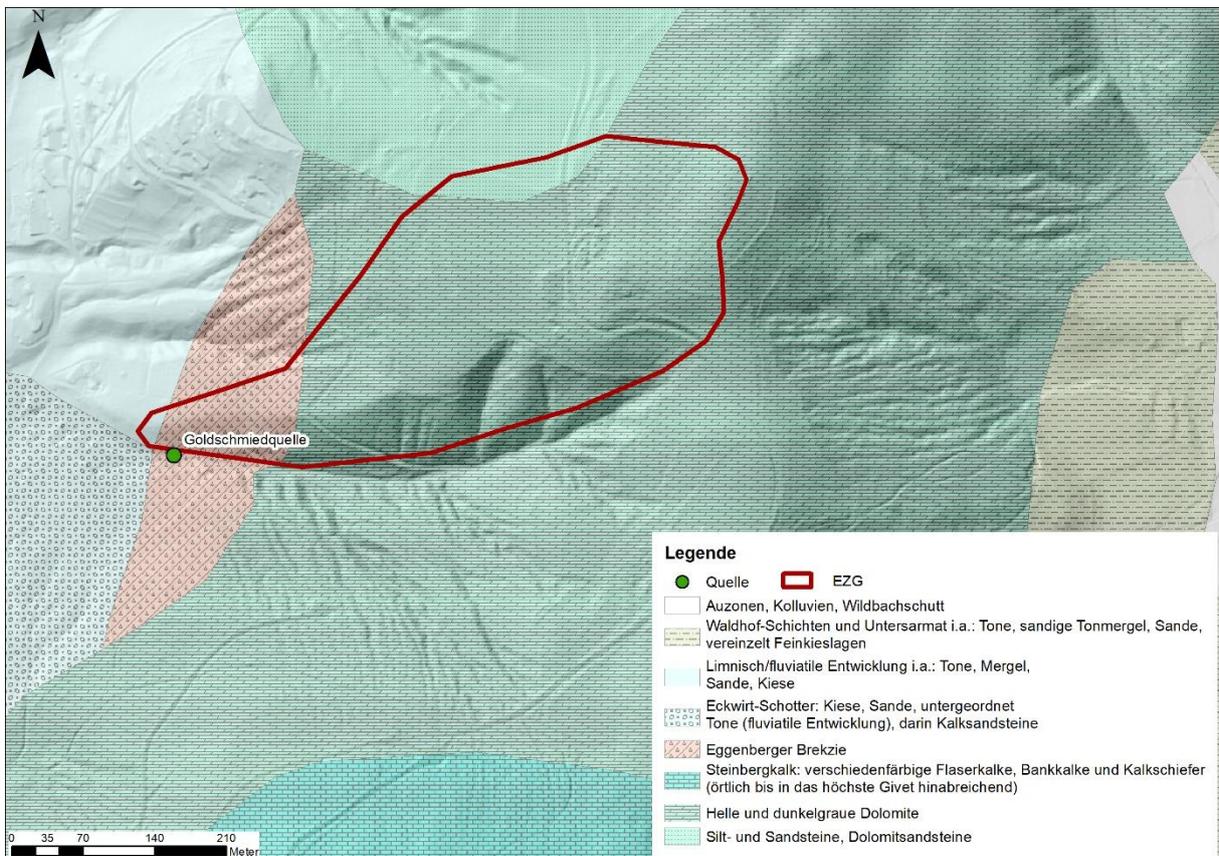
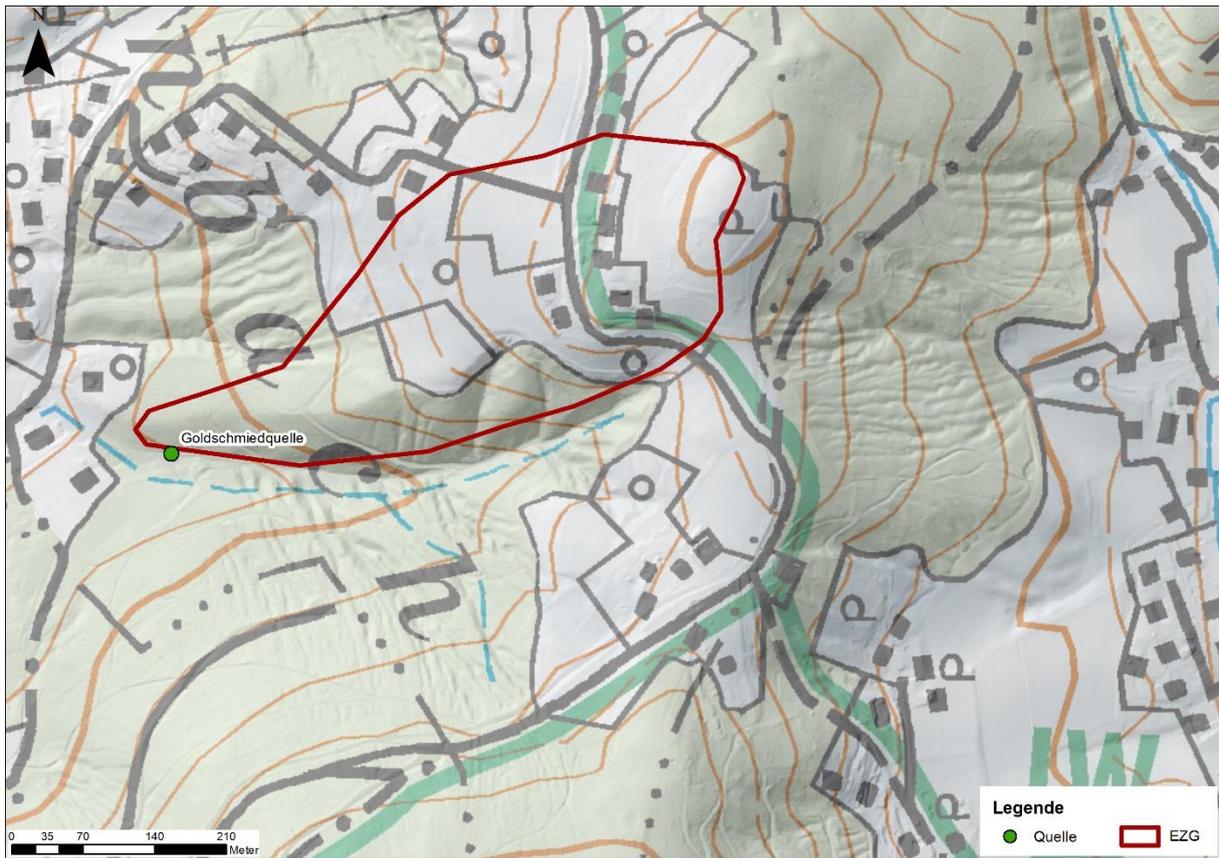


Abbildung 22: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 3 dargestellt.

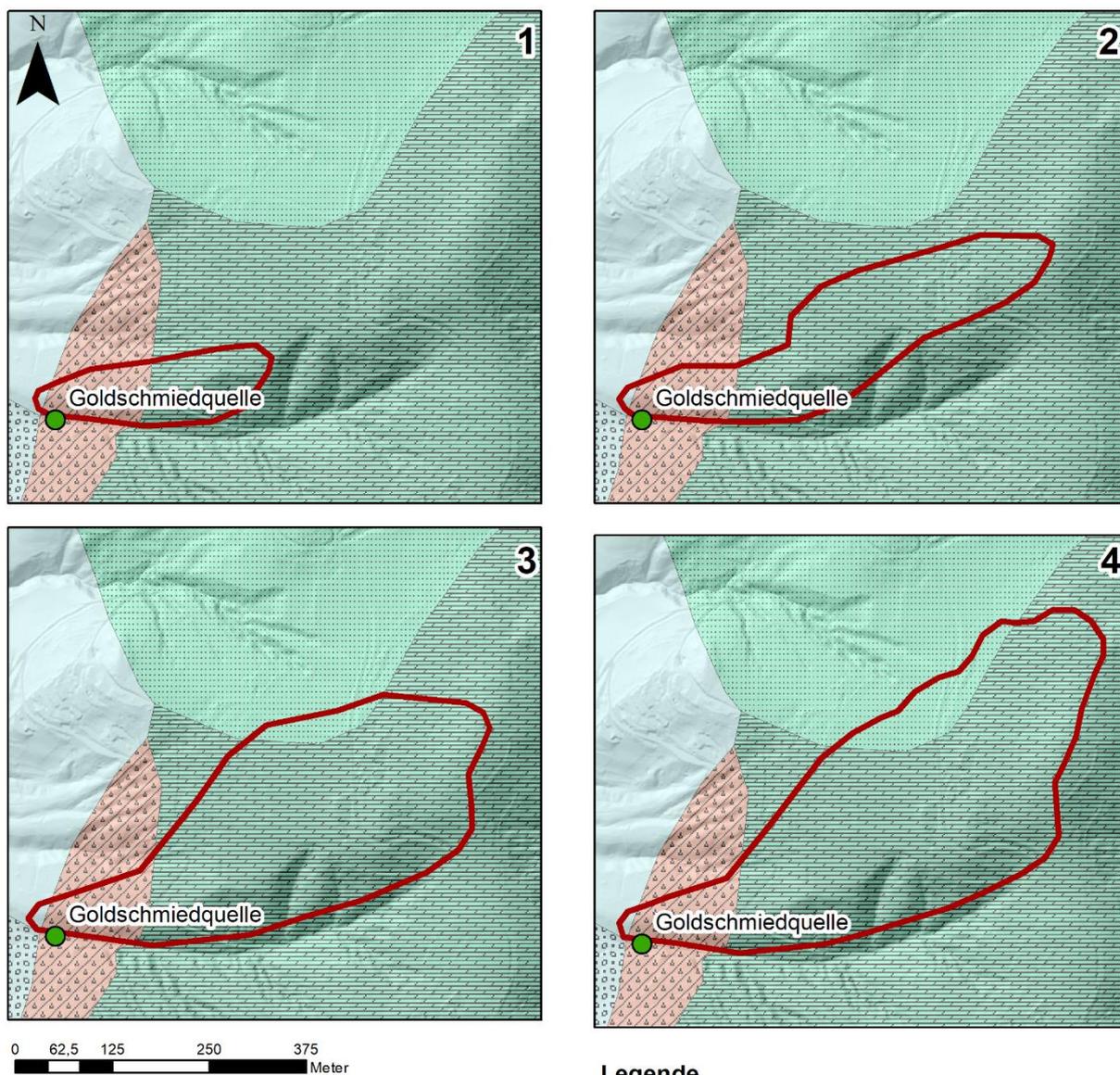


Abbildung 23: Modellierte Szenarien für die Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754).

Tabelle 19: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,62	0,67	0,83	0,91
2	0,77	0,78	0,93	0,98
3	0,81	0,82	0,96	0,99
4	0,82	0,82	0,97	0,99

Tabelle 20: Optimierte Modellparameter für die Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	427	31,3	705	20,0	0,43	31,6
2	456	23,2	1658	20,0	0,49	30,0
3	443	-0,4	2630	20,0	0,95	35,6
4	348	-13,0	2966	20,0	0,95	22,5

Tabelle 19 und Tabelle 20 fassen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Szenario 3 und 4 zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und modellierter Quellschüttungsganglinie (KGE 0,81 bzw. 0,82; Korrelationskoeffizient jeweils 0,82; relative Variabilität 0,96 bzw. 0,97; systematischer Fehler jeweils 0,99). Die optimierten Modellparameter fallen dagegen nicht vollumfänglich zufriedenstellend aus. Insbesondere die lange Reaktionszeit (x_4) und hohen Schneeschmelzfaktoren (c_2) müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Szenario 3 und 4 zeichnen sich darüber hinaus durch hohe Schneedynamikfaktoren ($c_1 = 0,95$) aus. Die Bodenwasserspeicherkapazität (x_1) liegt für alle modellierten Szenarien im plausiblen Bereich, die Grundwasserspeicherkapazität (x_3) zeigt tendenziell hohe Werte an. Der Austauschkoefizient (x_2) von -0,4 mm/Tag weist unter Annahme überwiegend autogener Grundwasserneubildung für Szenario 3 eine ausgeglichene Wasserbilanz aus. Insgesamt betrachtet spiegeln die hohen Speicherkapazitäten und Reaktionszeiten das träge Verhalten der Goldschmiedquelle, ohne ausgeprägte Saisonalität, wider (Abbildung 24, Abbildung 25c).

Goldschmiedquelle (Szenario 3)

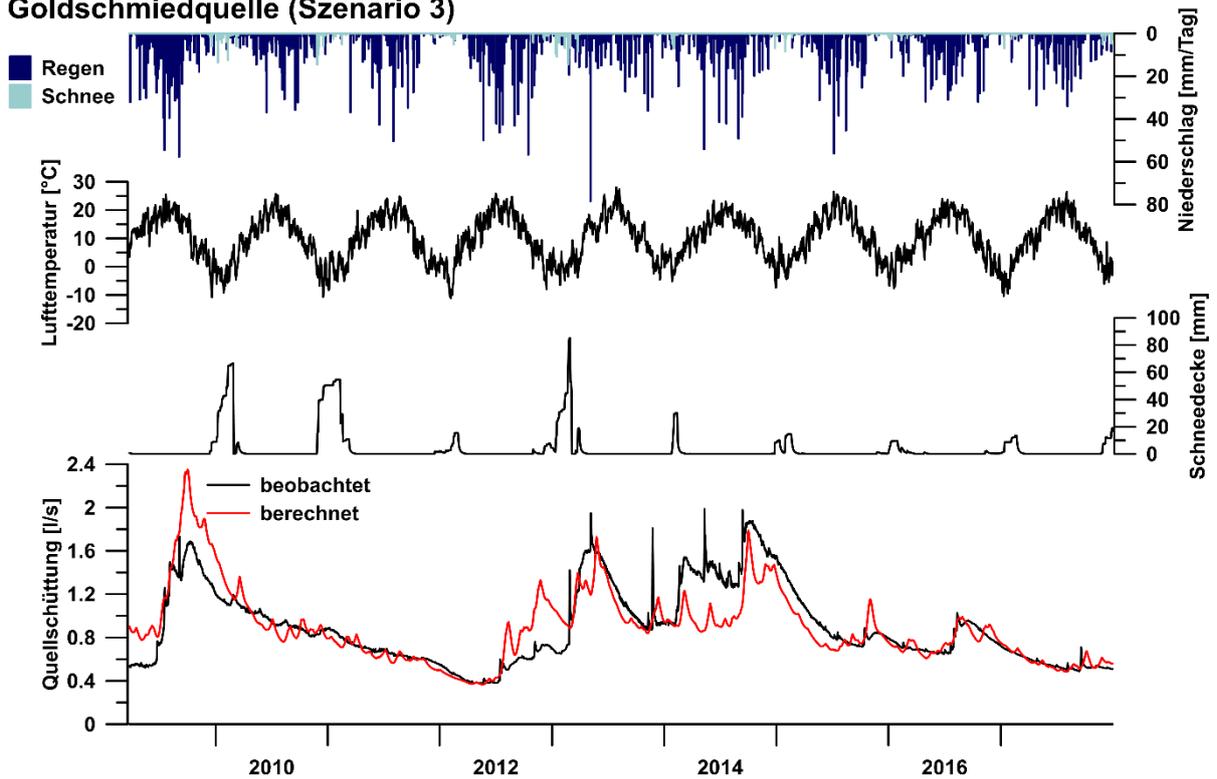


Abbildung 24: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754), Szenario 3.

Abbildung 24 und Abbildung 25 stellen die Ergebnisse des aufgrund der ausgeglichenen Wasserbilanz als am plausibelsten erachteten Szenario 3 dar. Durch hohe Boden- und Grundwasserspeicherkapazität und hohe Reaktionszeit gelingt es dem Modell, die kaum vorhandene Saisonalität des trägen Grundwassersystems abzubilden (Abbildung 25c). Die kaum ausgebildete Schneedecke (sowie die damit verbundenen, hohen effektiven Schneetemperaturen; Abbildung 25f) entsprechen der niedrigen Seehöhe des Einzugsgebiets (Abbildung 25e). Die ungewöhnlichen optimierten Parameterwerte (Abbildung 25d) geben die träge Reaktion des Grundwassersystems, insbesondere das offensichtliche Fehlen einer ausgeprägten schnellen Komponente, wieder: Da die Modellstruktur eine Aufteilung des Wassers in verzögerte und schnelle Komponente erzwingt (Abbildung 2), werden im Zuge der Modellkalibrierung die vorhandene Speicher sowie die Verzögerung des Wasserflusses (Einheitshydrographen) durch entsprechend hohe Werte der Kapazitäten und Reaktionszeit adaptiert.

Goldschmiedquelle (Szenario 3)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,81
Korrelationskoeffizient [-]	0,82
systematischer Fehler [-]	0,99
relative Variabilität [-]	0,96

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
 Schnee	— beobachtet	— beobachtet	● Optimierter Wert	— Typischer Wertebereich	
 Regen	— berechnet	— berechnet			

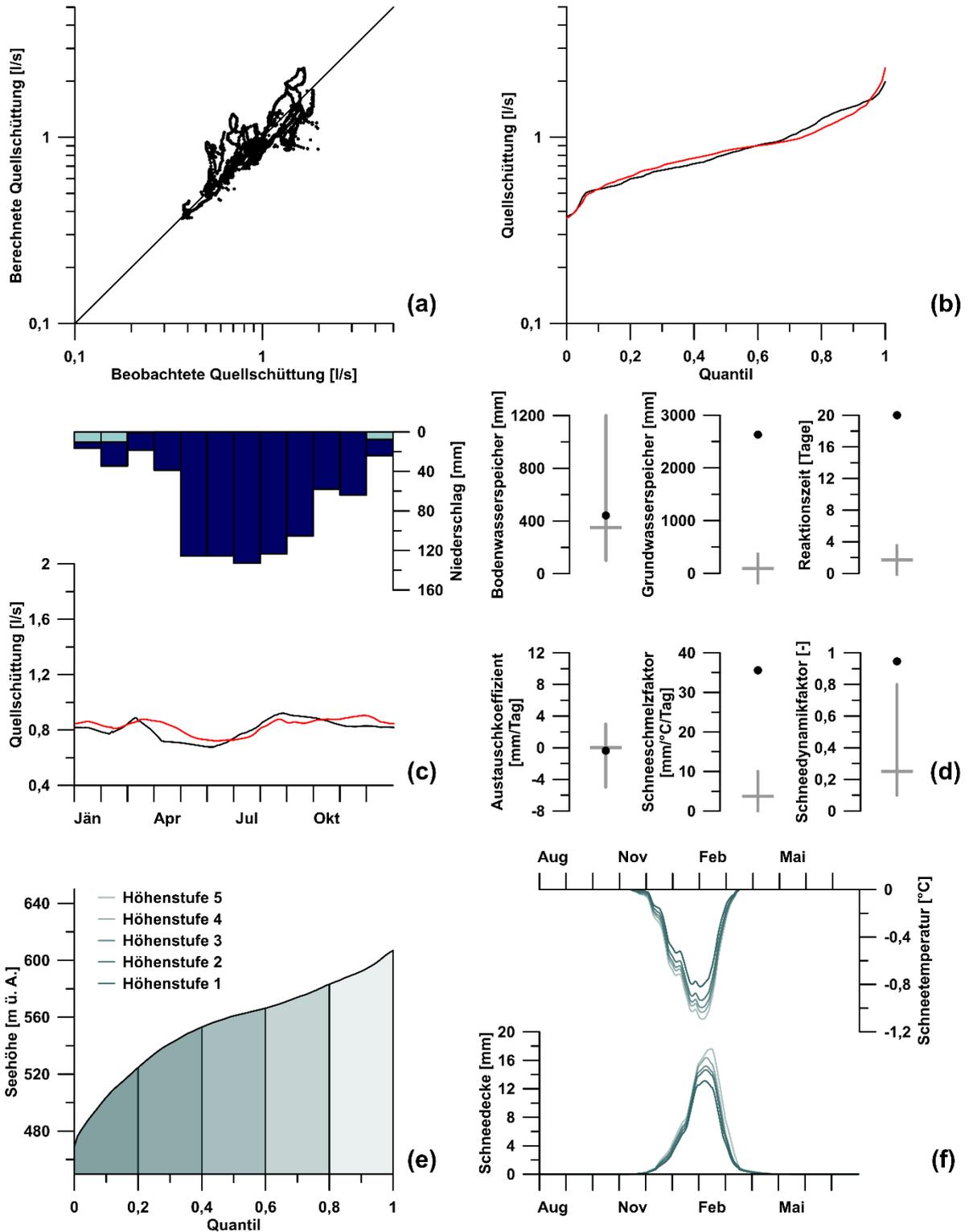


Abbildung 25: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Goldschmiedquelle (HZB-Nr. 396754), Szenario 3. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.6. Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855)

Die Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855) liegt auf 410 m ü. A. im Grazer Bergland im Gemeindegebiet Peggau (Bezirk Graz Umgebung) (Abbildung 1, Abbildung 26a). Von 6.12.1995 bis 31.12.2017 liegen Aufzeichnungen der Quellschüttung vor, die lediglich von kurzen Datenlücken (1,2 %) unterbrochen werden. Sie schwankt zwischen 46 und 1182 l/s um einen Mittelwert von 192 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen 289 und 451 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und beträgt im Mittel 353 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Hammerbach- und Schmelzbachquelle entwässern das binäre Lurbach-System, dessen Einzugsgebiet das intensiv verkarstete Tannebenmassiv (~8 km²) sowie das dahinter liegende, aus gering durchlässigen Gesteinen aufgebaute Semriacher Becken (15 km²) umfasst. Während ersteres im Wesentlichen von Kalkmarmoren der Schöckel-Formation (Peggau Gruppe) aufgebaut wird, besteht letzteres überwiegend aus Phylliten und Schiefen der Semriach-Phyllit-Formation (Passail Gruppe) (Abbildung 26b; Flügel und Hubmann, 2000; Flügel et al., 2011; Piller et al., 2014). Beide werden der Schöckel-Decke zugerechnet, die das Einzugsgebiet über weite Strecken aufbaut (Grazer Paläozoikum, Drauzug-Gurktal-Deckensystem; Schmid et al., 2004; Flügel et al., 2011). Das Semriacher Becken wird vom Lurbach nach Westen entwässert, der nach Passieren der Schiefer-Kalk-Grenze Wasser in den Untergrund verliert und schließlich zur Gänze in das Höhlensystem der Lurgrotte eintritt. Eine Reihe von Markierungsversuchen (durchgeführt mit unterschiedlichen Markierungsstoffen) bestätigt die Verbindung zwischen der Lurbachschwinde und den Quellaustritten des Hammer- und Schmelzbaches am Fuß der Badl- und Peggauer Wand, mit welchen das Tannebenmassiv im Westen zur Mur hin abfällt (Abbildung 26; Behrens et al., 1992; Wagner et al., 2011, 2013; Kübeck et al., 2013).

Die Entwässerungsstruktur im Untergrund des verkarsteten Tannebenmassivs hängt stark von den herrschenden hydrologischen Bedingungen ab: Während bei niedriger Wasserführung des Lurbaches (erreicht mitunter eine Schüttung von wenigen l/s) die Grundwassersysteme des Hammer- und Schmelzbaches hydraulisch getrennt und deutlich von autogener Grundwasserneubildung geprägt sind, erreicht das Wasser des Lurbaches bei normaler Wasserführung überwiegend die Hammerbachquelle. Bei starker Wasserführung wird ein Überlauf dieses Wassers zur Schmelzbachquelle beobachtet, bei Starkniederschlägen stellt zeitweise das Höhlensystem der Lurgrotte Fließwege bereit (Behrens et al., 1992; Kübeck et al., 2013; Mayaud et al., 2013; Wagner et al., 2013).

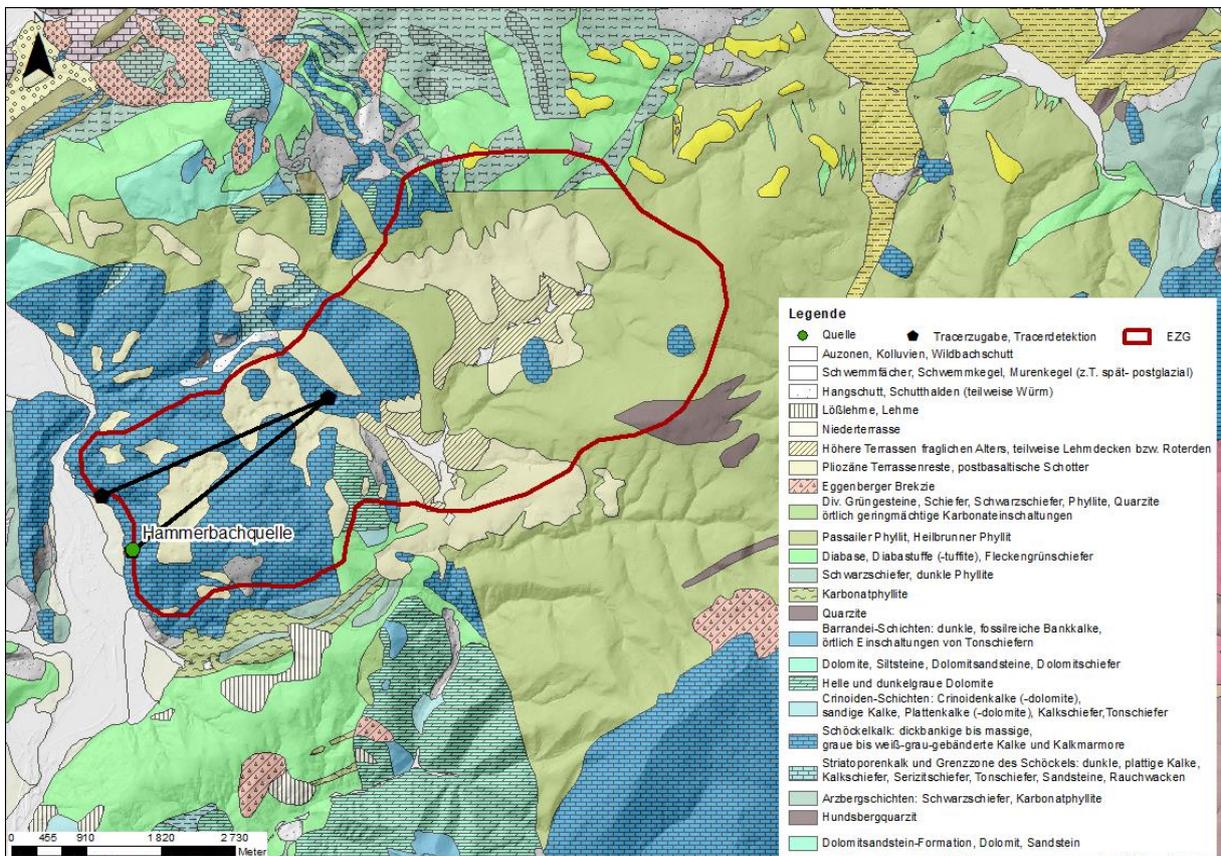
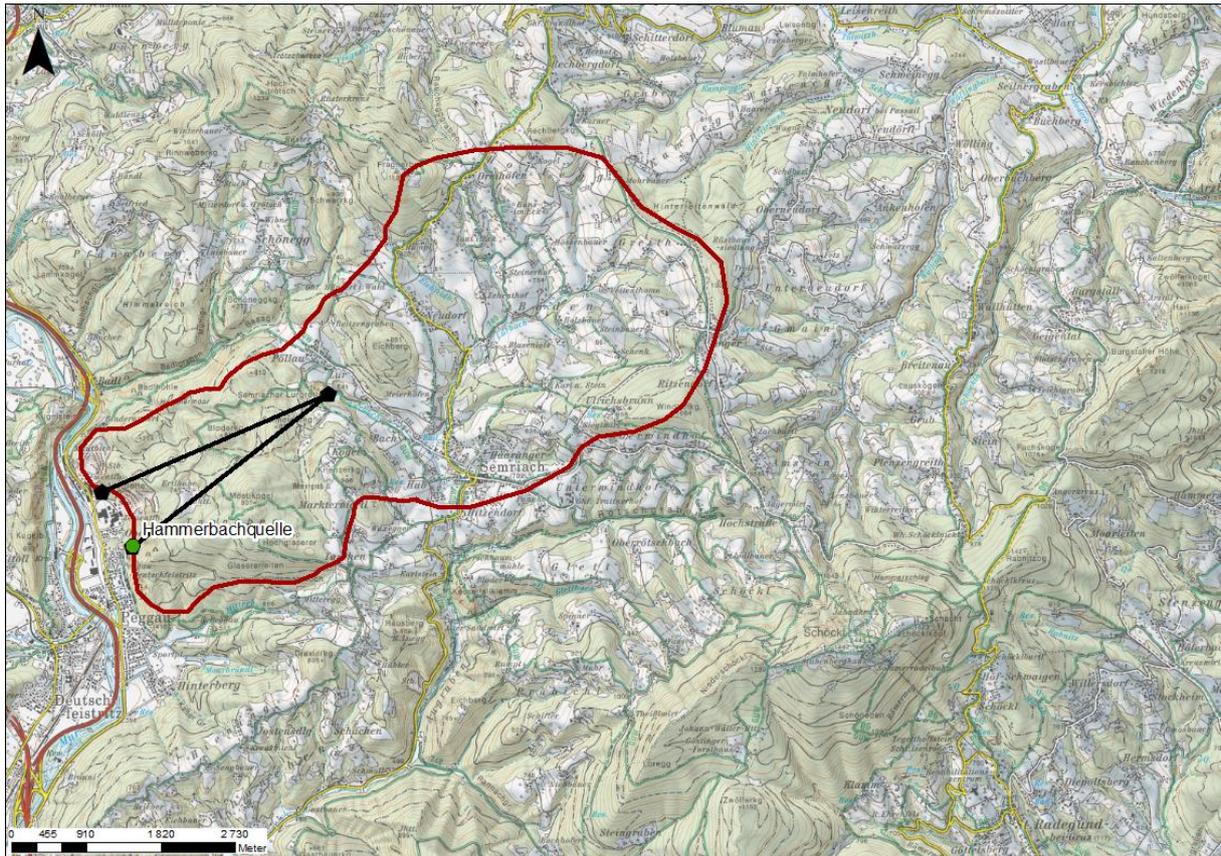


Abbildung 26: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 3 dargestellt.

In Anlehnung an Wagner et al. (2013) werden drei potenzielle Einzugsgebiete der Hammerbachquelle ausgewiesen. Szenario 1 weist lediglich das Semriacher Becken als Einzugsgebiet aus, unter Vernachlässigung der autogenen Grundwasserneubildung im Bereich des Tannebenmassivs. Szenario 2 bezieht zusätzlich die Grundwasserneubildung im südlichen Anteil des Tannebenmassivs mit ein, während Szenario 3 das gesamte Semriacher Becken und Tannebenmassiv der Hammerbachquelle zuweist. Tabelle 21 und Abbildung 27 fassen die Kenngrößen und Lage der modellierten Szenarien zusammen.

Tabelle 22 und Tabelle 23 stellen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Alle Szenarien zeigen ähnlich gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Schüttungsganglinie (KGE zwischen 0,72 und 0,74). Die Form der Schüttungsganglinie wird zufriedenstellend abgebildet (Korrelationskoeffizient zwischen 0,72 und 0,74). Die Schwankungsbreite der Quellschüttung wird vom Modell sehr gut erfasst (relative Variabilität zwischen 1,01 und 1,02), die Wasserbilanz ist ausgeglichen (systematischer Fehler zwischen 1,00 und 1,02).

Tabelle 21: Modellierte Szenarien für die Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	13,17	827	689	916	725
2	19,91	804	689	894	735
3	23,22	791	689	887	739

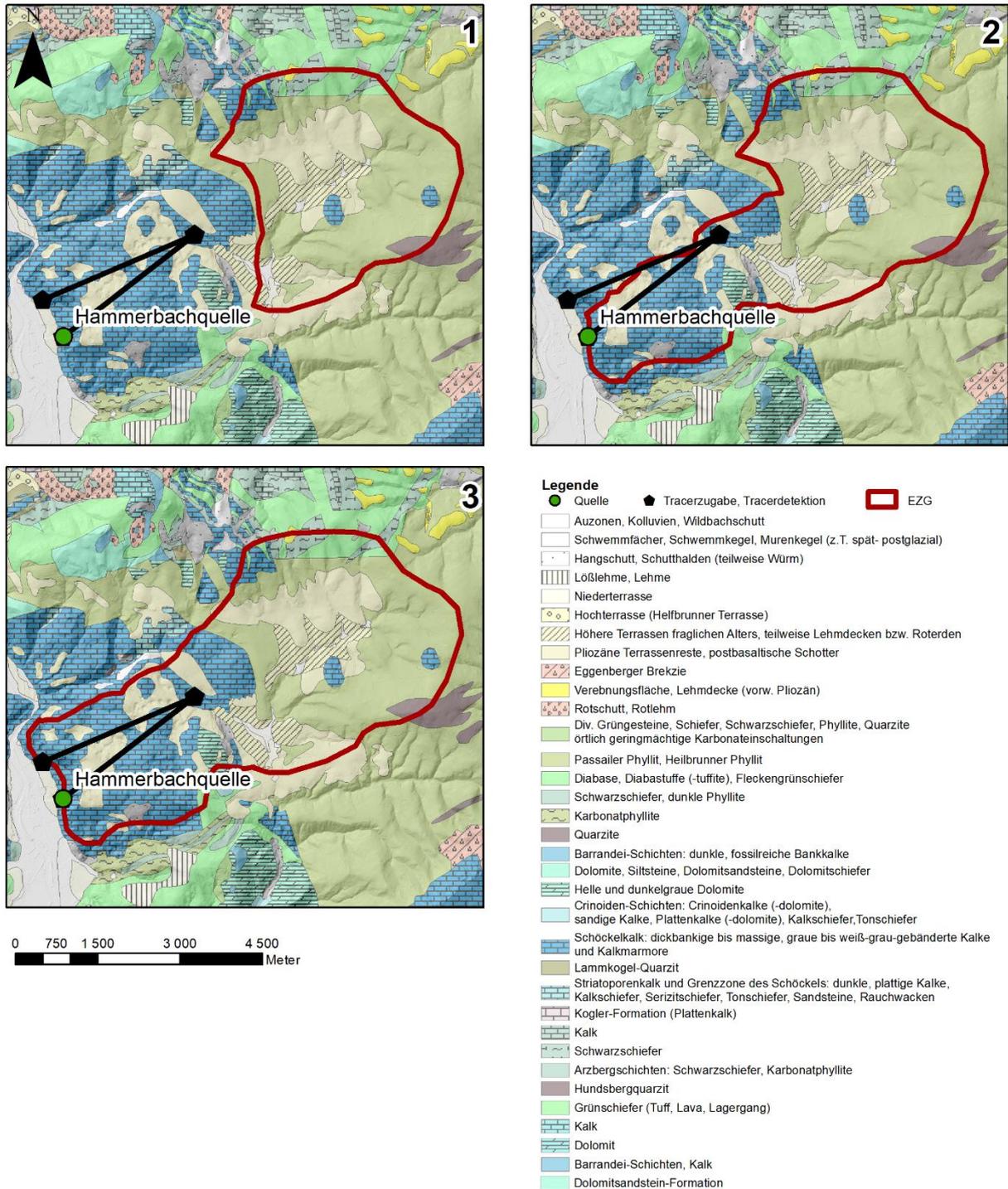


Abbildung 27: Modellierte Szenarien für die Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855).

Alle Szenarien zeigen plausible Werte für Reaktionszeit (x_4) und Bodenwasserspeicher (x_1), wobei die tendenziell niedrigen Werte den Einfluss des verkarsteten Tannebenmassives abbilden. Die durchwegs hohen Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) zeigen das hohe Speichervermögen des Karstsystems an und stehen im Einklang mit Wagner et al. (2013), die für ein strukturell eng verwandtes Niederschlags-Abfluss Modell ähnliche Kapazitäten für diesen Speicher errechneten (dort als „Gebietsspeicher“ bezeichnet). Schneedynamik- (c_1)

und -schmelzfaktoren (c_2) liegen tendenziell zu hoch. Aufgrund der bekannten Verbindung zwischen Lurbach und Schmelzbachursprung wird ein negativer Austauschkoefizient (x_2) erwartet (erfüllt für Szenario 2 und 3), ein positiver Austauschkoefizient (Szenario 1) dagegen als unplausibel bewertet.

Tabelle 22: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,74	0,74	1,01	1,00
2	0,73	0,73	1,01	1,01
3	0,72	0,72	1,02	1,02

Tabelle 23: Optimierte Modellparameter für die Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	44	8,4	1891	1,9	0,85	8,0
2	58	-7,6	2545	2,0	0,95	11,1
3	59	-19,4	2670	2,0	0,96	50,8

Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Modellergebnisse für Szenario 3. Die Übereinstimmung zwischen berechneter und beobachteter Quellschüttungsganglinie ist unter verschiedensten hydrologischen Bedingungen sehr gut (Abbildung 29a ,b). Der negative Austauschkoefizient (-19,4 mm/Tag) bildet die (von der Messstelle nicht erfassten) Quellaustritte ab. Eine einfache Wasserbilanzrechnung bestätigt die Plausibilität dieses Austauschkoefizienten und schätzt zugleich dessen Unsicherheit grob ab: Das von Szenario 3 ausgewiesene Einzugsgebiet wird überwiegend von Hammerbach- und Schmelzbachquelle entwässert (Behrens et al., 1992). Für letztere liegen keine aktuellen Aufzeichnungen vor, für den Zeitraum 1983 – 1989 wird jedoch eine mittlere Schüttung von 79 l/s berichtet, während an der Hammerbachquelle im gleichen Zeitraum eine mittlere Schüttung von 193 l/s beobachtet wurde (Verhältnis 1 : 2,4; Behrens et al., 1992). Vergleich mit dem entsprechenden Verhältnis der vom Modell errechneten, langjährigen Mittelwerte (Quellschüttung A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Hammerbachquelle 194 l/s; zusätzlicher Abfluss aus dem Einzugsgebiet 52,3 l/s; Zeitraum 1995 – 2017) ergibt ein Verhältnis von 1 : 3,7. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem gewählten, einfachen Modellansatz und dokumentiert zugleich die grundsätzliche Plausibilität des gewählten Ansatzes zur groben Abgrenzung von Einzugsgebieten im alpinen Raum. Die übrigen Modellparameter sind mit Ausnahme des hohen Schneedynamik- (0,96) und Schneeschmelzfaktors (50,7 mm/(°C Tag)) plausibel. Die etwas zu stark ausgeprägte Saisonalität der berechneten Quellschüttung (Abbildung 29c) und die in allen Höhenstufen (Abbildung 29e) überraschend akzentuierte berechnete Schneedeckendynamik (Abbildung 29f) sollte daher vorsichtig betrachtet werden.

Hammerbachquelle (Szenario 3)

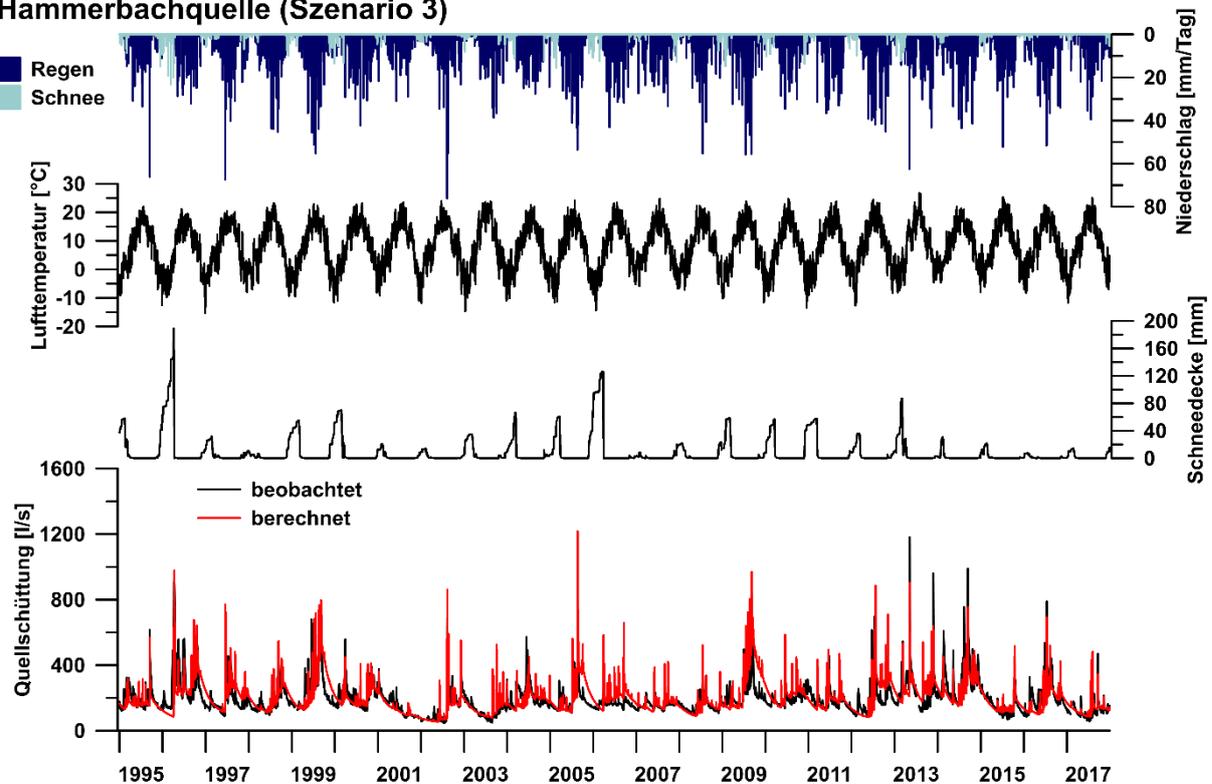


Abbildung 28: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855), Szenario 3.

Hammerbachquelle (Szenario 3)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,72	Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Korrelationskoeffizient [-]	0,72	 Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
systematischer Fehler [-]	1,02	 Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich
relative Variabilität [-]	1,02			

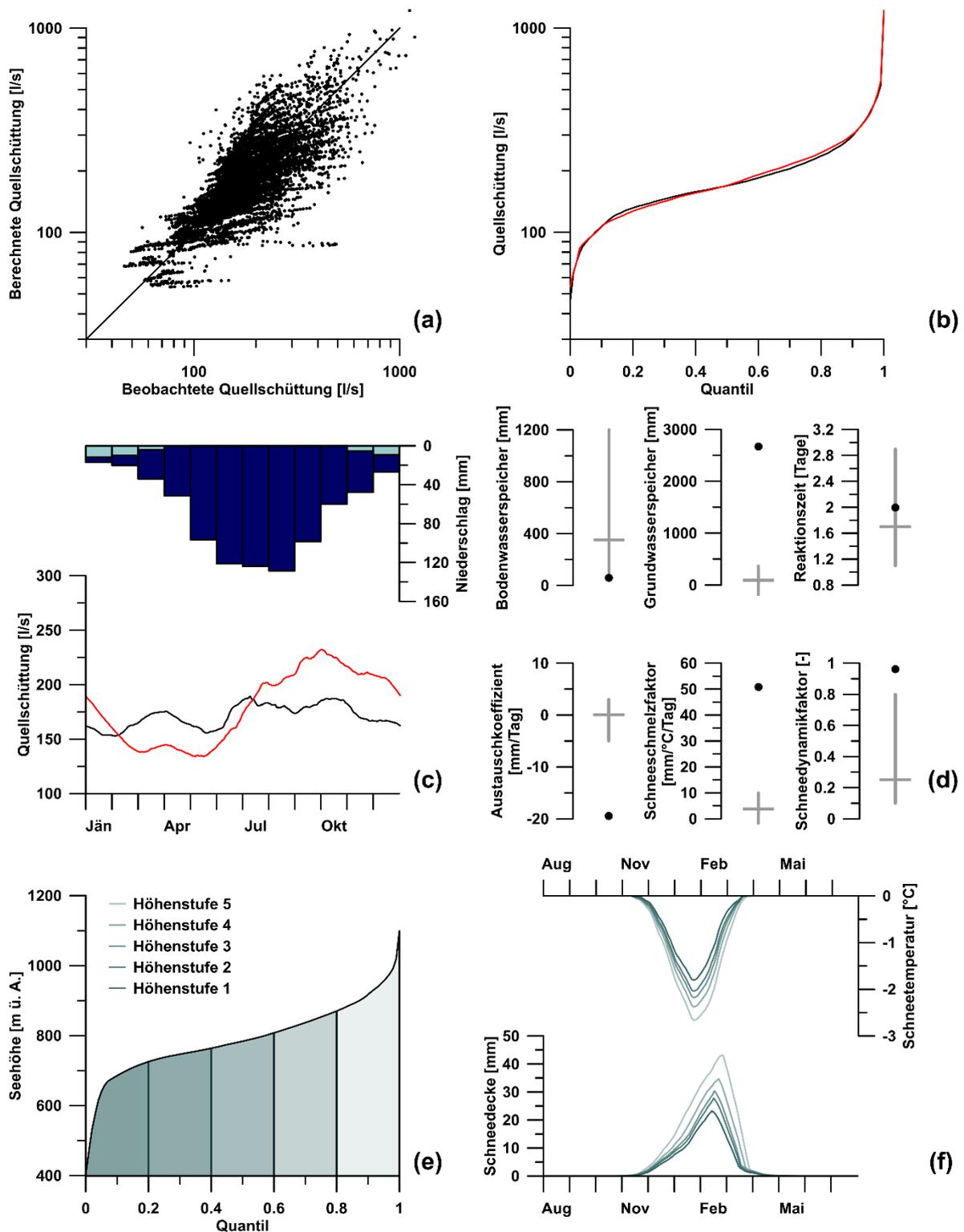


Abbildung 29: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Hammerbachquelle (HZB-Nr. 395855), Szenario 3. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.7. Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905)

Der Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905) liegt auf 773 m ü. A. am Fuß des Dachsteingebirges im Gemeindegebiet Bad Mitterndorf (Bezirk Liezen) (Abbildung 1, Abbildung 30a). Von 24.6.1998 bis 31.12.2017 liegt eine nahezu kontinuierlich aufgezeichnete Zeitreihe der Quellschüttung vor, die gelegentlich von Datenlücken unterbrochen wird (1,9 %). In diesem Zeitraum schwankt die Schüttung zwischen 17 und 97 l/s um einen Mittelwert von 31 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen 119 und 288 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert 209 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Der Ödensee (776 m) wird nordostseitig durch mehrere, gestaffelt angeordnete Moränenwälle abgedämmt, zwischen denen zwei weitere Seen eingelagert sind. Während der näher am Ödensee gelegene, warme See mit dem durch unterirdische Karstquellen gespeisten Ödensee in hydraulischem Kontakt steht, wird der kalte See (dessen Abfluss die Messstelle Ödensee Kaltwassertrichter aufzeichnet) durch aus dem Untergrund aufwallende Karstwässer gespeist. Die tieferen Temperaturen deuten auf ein hochgelegenes Einzugsgebiet und ein weitgehend isoliertes hydraulisches System hin, die andauernde Wasserbewegung verhindert ein Zufrieren des kalten Sees im Winter (Lobitzer, 2012).

Südwestlich des Ödensees ist das Dachsteinplateau von einer hohen Dichte NE-SW streichender Lineamente geprägt (Holzer, 1964). Während am Ödensee gebankter Dachsteinkalk wandbildend in Erscheinung tritt, ist er im unmittelbaren Quellbereich von Moränen und Seetonen überlagert (Scheidleder et al., 2001). Die Quellen zeigen starke Schüttungsschwankungen, ein hohes Ca/Mg-Verhältnis und stark wechselnde ^{18}O Isotopengehalte (Scheidleder et al., 2001).

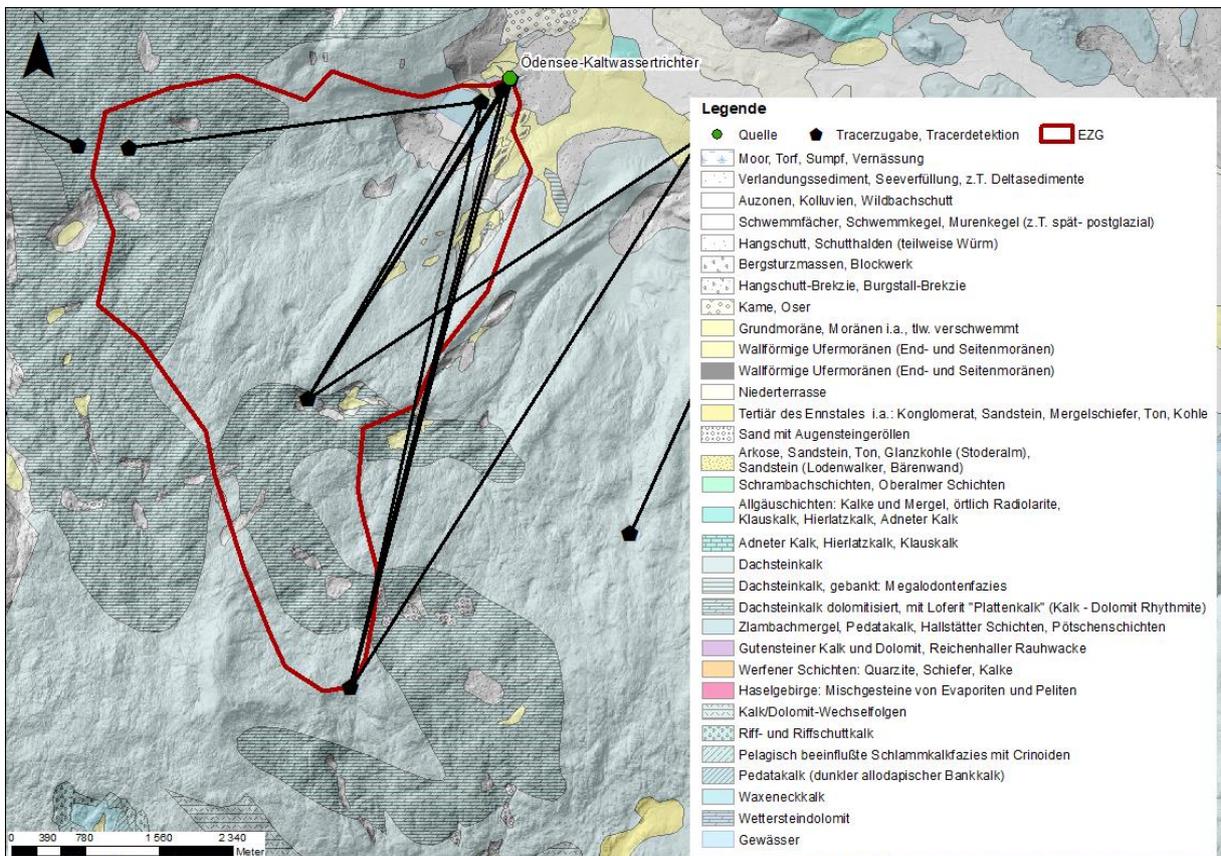
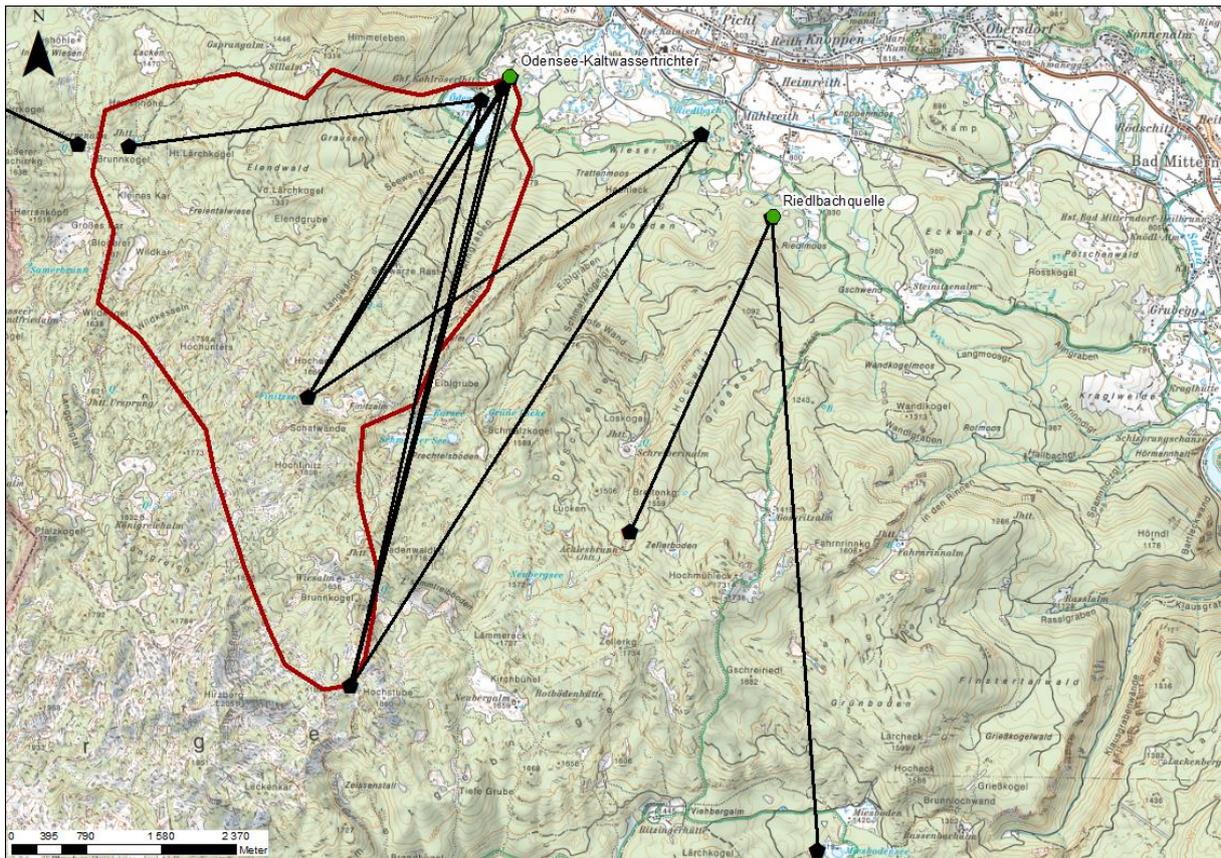


Abbildung 30 (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich des Ödensee Kaltwassertrichters (HZB-Nr. 395905). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 8 dargestellt.

Trotz der hohen Niederschläge infolge der Nordstaulage ist das Plateau von Wasserarmut geprägt, während am Nordrand des Gebirges zahlreiche große Karstquellen entspringen. Die starke Verkarstung drückt sich in zahlreichen weit verzweigten Höhlensystemen, Dolinen, Schächten, Trockentälern und starken Schüttungsschwankungen der großen Karstquellen am Nordrand des Massivs aus (Bauer, 1989; Henne et al., 1994; Scheidleder et al., 2001; Schubert, 2017). Anhand einer groß angelegten Kampagne von Markierungsversuchen mit Fluoreszenzfarbstoffen konnte ein rascher, nordgerichteter unterirdischer Abfluss im Verbreitungsgebiet der Dachsteinkalke zu den Quellen am Nordrand des Plateaus nachgewiesen werden (Abbildung 30; Bauer, 1989). Dabei zeigt sich im Wesentlichen ein zentripetaler Abfluss von mehreren Einspeisungsstellen zu jeweils einer oder einigen wenigen Quell(grupp)en (Abbildung 30; Bauer, 1989). Diese Beobachtung stimmt überein mit niedrigen Wassertemperaturen, meist >4 liegenden Ca/Mg Verhältnissen der Quellwässer (Hinweis auf Kalkstein-dominiertes Einzugsgebiet) und erheblichen Schwankungen im ^{18}O -Gehalt der Wässer (geringe mittlere Verweilzeit; Herlicska et al., 1994; Scheidleder et al., 2001).

Während die am 2.8.1985 im Bereich Lahnfriedtal und Herrenalm eingespeisten Markierungsstoffe (2 kg Eosin bzw. 15 kg Natriumnaphtionat) nur im Bereich der Koppenbrüller-Höhle wieder austraten, wurden die im Bereich Finetsee und Hochstube eingespeisten Stoffe (Basonyl Rot und Amidorhodamin G extra) bereits nach 2 – 4 Tagen in den Quellbezirken Ödensee (Ödensee, warmer See, kalter See) und Strummern nachgewiesen (Abbildung 30). Dadurch werden einerseits die hohe Fließgeschwindigkeit des unterirdischen Abflusses im stark verkarsteten Dachsteinkalk dokumentiert, andererseits grob die Grenzen des Einzugsgebietes des Quellbezirks Ödensee festgelegt. Da beide Markierungsstoffe in allen Quellen des Bezirks austraten, ist von einem hydraulischen Kontakt bzw. sich teilweise überschneidenden Einzugsgebieten dieser Quellen auszugehen (Abbildung 30). Übereinstimmend mit Bauer (1989) wird außerdem ein älterer Sporentriftversuch (Zötl, 1957) aufgrund des deutlichen Sporendurchgangs und einer hohen Sporenkonzentration (Maximum 120 Sporen/Probe) als plausibel bewertet (vgl. Benischke, 2021). Die Einspeisung von 5 kg ungefärbter Sporen im Bereich der Herrenalm erfolgte 1956 etwa 700 m östlich (nahe der Herrenalm-Jagdhütte) der Einspeisung von Natriumnaphtionat 1985 (nahe der Herrenalm-Almhütten). Insgesamt wurden für zehn potenzielle Einzugsgebiete des Ödensee Kaltwassertrichters ausgewiesen. Ihre wichtigsten Kenngrößen sind in Tabelle 24 zusammengefasst, ihre jeweilige Lage ist in Abbildung 31 dargestellt.

Tabelle 24: Modellierete Szenarien für den Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	3,29	1065	653	1695	748
2	6,06	1279	1033	1716	734
3	7,67	1273	1030	1728	734
4	9,88	1435	1073	1766	727
5	11,39	1515	1273	1771	726
6	12,45	1428	1073	1775	727
7	13,45	1456	1243	1779	726
8	17,32	1435	1078	1799	726
9	19,09	1460	1243	1802	725
10	20,01	1486	1278	1800	725

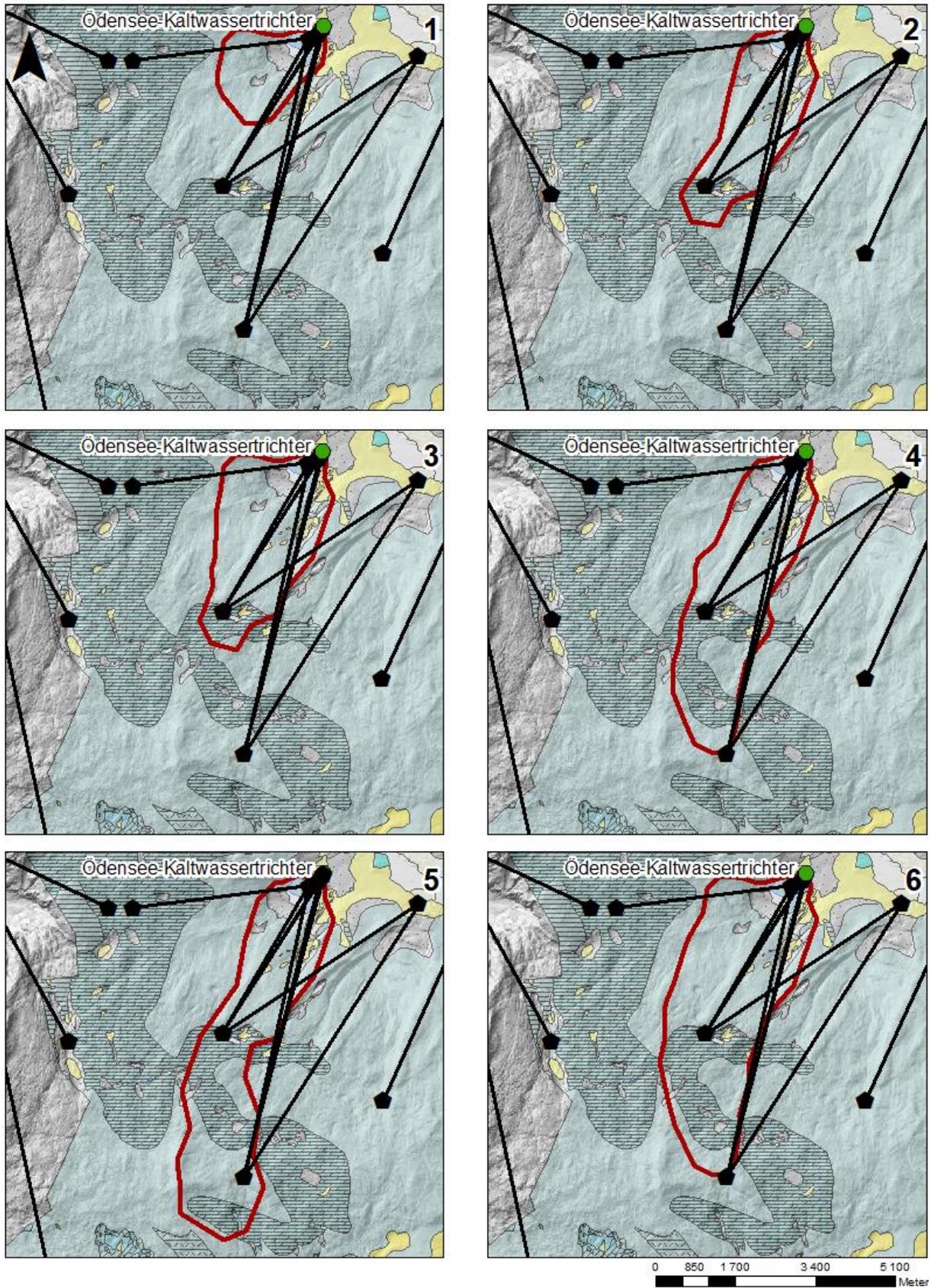


Abbildung 31: Modellierte Szenarien für den Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905).

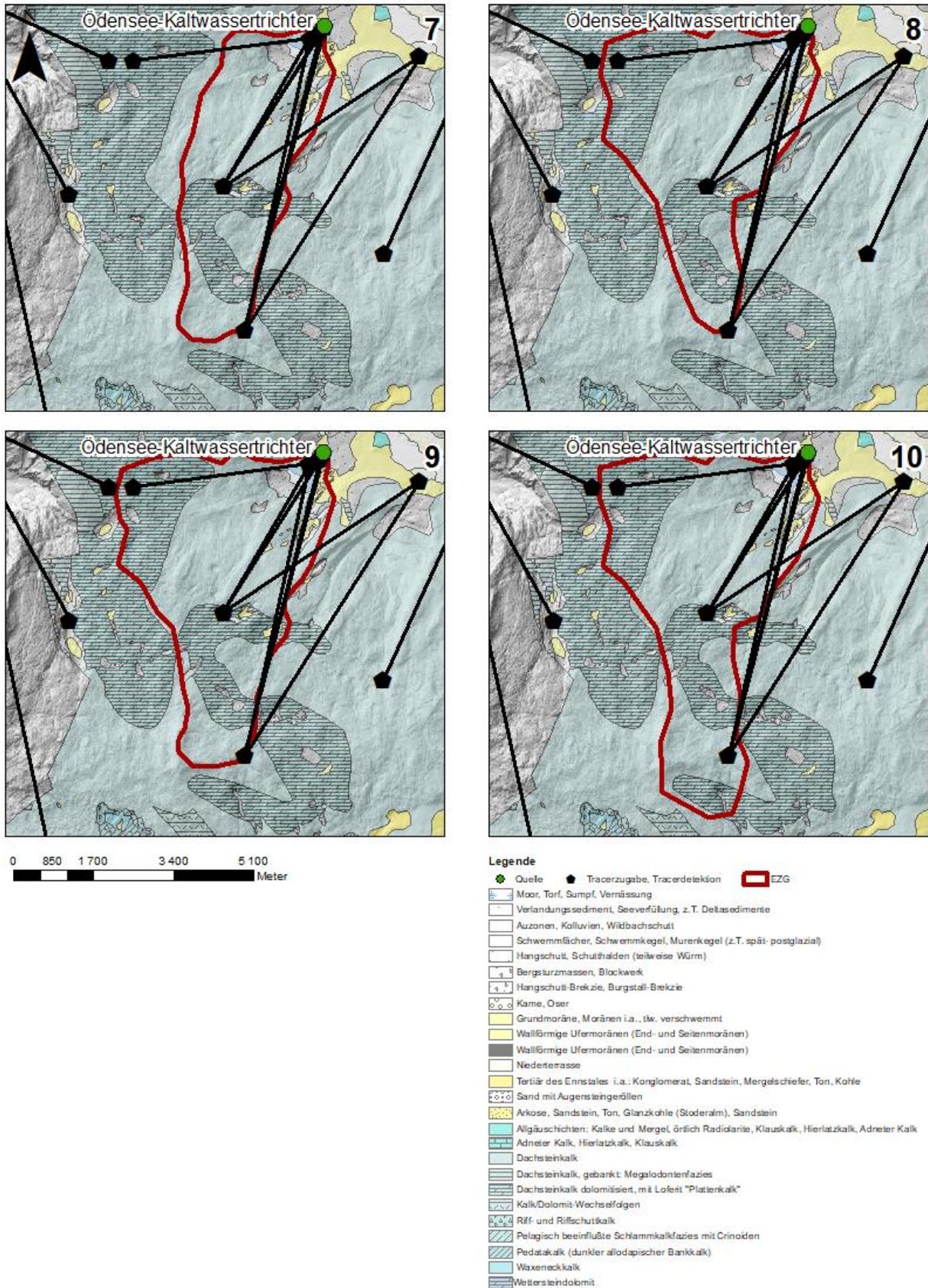


Abbildung 31 (Forts.): Modellierte Szenarien für den Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905).

Tabelle 25 fasst die Effizienzkriterien der zehn Szenarien zusammen. Lediglich drei Szenarien (Szenario 4 – 6) zeigen gute Übereinstimmung zwischen berechneter und modellierter Schüttungsganglinie (KGE 0,65 bzw. 0,66), vier weitere Szenarien zeigen zumindest zufriedenstellende Übereinstimmung (KGE zwischen 0,58 und 0,63). Tendenziell niedrige Korrelationskoeffizienten ($\leq 0,66$) und teils hohe relative Variabilitäten (bis zu 1,22) weisen auf die Schwierigkeiten hin, das komplexe Grundwassersystem des Ödensee Kaltwassertrichters mit dem gewählten, einfachen Modellansatz abzubilden. Die systematischen Fehler liegen zwischen 0,99 und 1,06.

Tabelle 25: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Ödensee Kaltwassertrichters (HZB-Nr. 395905).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,34	0,36	1,16	1,06
2	0,60	0,60	1,03	1,00
3	0,63	0,64	1,06	1,00
4	0,66	0,66	1,07	1,00
5	0,65	0,66	1,06	1,00
6	0,65	0,66	1,06	1,00
7	0,58	0,59	1,06	1,00
8	0,60	0,60	1,05	0,99
9	0,26	0,29	1,21	1,00
10	0,26	0,29	1,22	1,02

Tabelle 26 gibt die im Zuge der Kalibration jeweils optimierten Modellparameter wieder. Die tendenziell hohen Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) und außergewöhnlich kurzen Reaktionszeiten (x_4) stehen größtenteils mit dem ausgeprägten Karstsystem im Einzugsgebiet des Ödensee Kaltwassertrichters in Einklang. Die Schneeschmelzfaktoren (c_2) zeigen überwiegend plausible Werte, die Schneedynamikfaktoren (c_1) liegen überwiegend sehr hoch. Die Bodenwasserspeicherkapazität (x_1) nimmt in den meisten Fällen deutlich zu hohe Werte an. Der Austauschkoefizient zeigt in allen Szenarien einen Abfluss aus dem Einzugsgebiet unter Umgehung der Quelle an ($x_2 < 0$), im Einklang mit den Ergebnissen der Markierungsversuche (Abbildung 30; die am Ödensee Kaltwassertrichter aufgezeichneten

Markierungsstoffe wurden zugleich am Ödensee selbst, am warmen See sowie im Quellbezirk Strummern festgestellt; Bauer et al., 1989).

Tabelle 26: Optimierte Modellparameter für den Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoeffizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	214	-299,7	6024	1,5	0,90	4,9
2	21807	-75,2	243	0,5	0,99	53,5
3	21807	-78,1	193	0,8	0,99	10,1
4	21807	-103,6	206	0,5	0,96	3,8
5	21807	-127,3	231	0,5	0,97	4,1
6	21807	-141,1	242	0,5	0,97	4,2
7	21807	-249,9	489	1,0	0,98	68,3
8	21807	-297,7	464	0,5	0,98	66,3
9	823	-1709,9	5738	1,9	0,52	10,0
10	683	-1942,2	6673	1,9	0,32	9,9

Die Ergebnisse der Modellierung verdeutlichen die Grenzen der gewählten Methode für komplexe Aquifersysteme. Anhand dieser Ergebnisse ist es nicht möglich, aus den in Frage kommenden Szenaren 2 – 8 ein begründet plausibles Einzugsgebiet zu wählen. Die Ergebnisse für Szenario 8 stehen jedoch in gutem Einklang mit den Markierungsversuchen und sind daher in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Beobachtete und berechnete Quellschüttungsganglinie stimmen zufriedenstellend überein (Abbildung 32; KGE und Korrelationskoeffizient liegen bei 0,60), die Schwankungsbreite der Quellschüttung wird gut abgebildet (Abbildung 33b; relative Variabilität 1,05). Das Modell ist in der Lage, die Saisonalität der Quellschüttung grob abzubilden, wobei die beobachtete starke Schüttung im Frühjahr systematisch etwas zu spät abgebildet und tendenziell unterschätzt wird (Abbildung 33c). Während der Sommermonate wird der Abfluss dagegen überschätzt (Abbildung 33c).

Ödensee Kaltwassertrichter (Szenario 8)

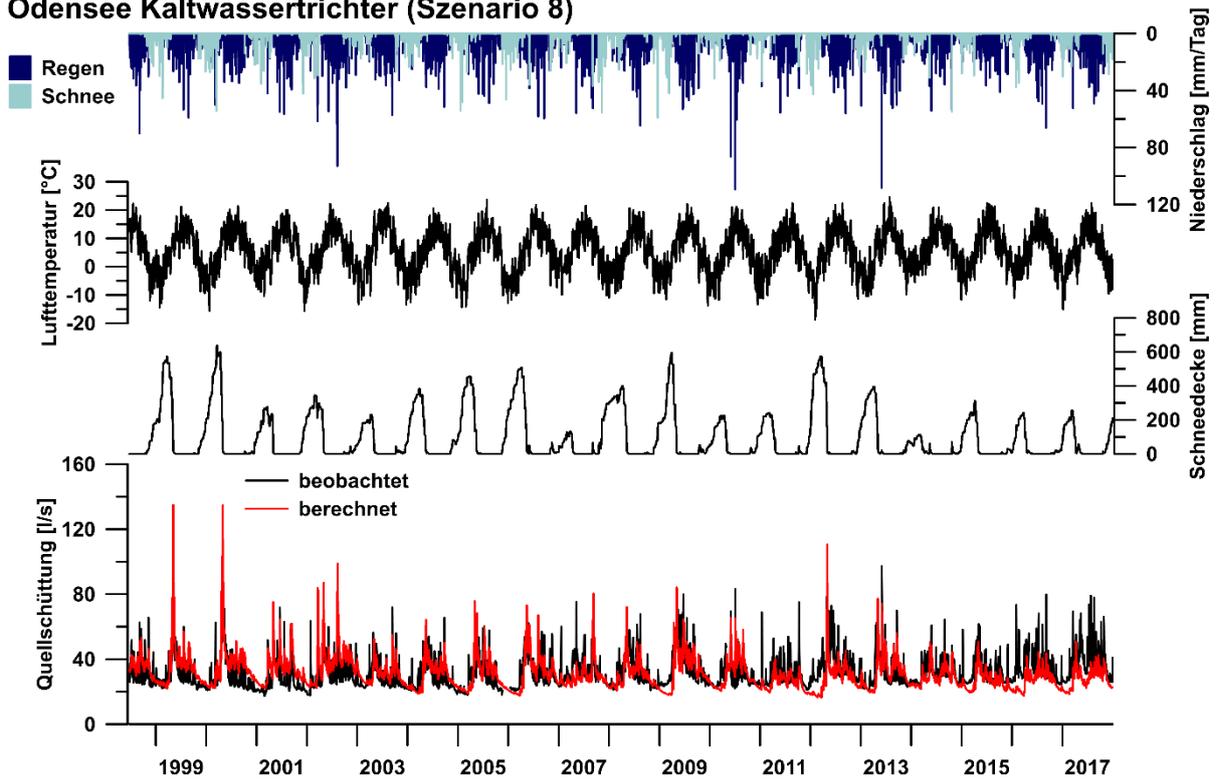


Abbildung 32: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet des Ödensee Kaltwassertrichters (HZB-Nr. 395905). Szenario 8.

Die ermittelte Bodenwasserspeicherkapazität liegt mit 21807 mm deutlich zu hoch, Schneedynamik- (0,98) und Schneeschmelzfaktor (66,3 mm/(°C Tag)) erscheinen ebenfalls sehr hoch (Abbildung 33d). Die sehr kurze Reaktionszeit (0,5 Tage) ist dagegen sehr kurz (Abbildung 33d), steht aber grundsätzlich mit der intensiven Verkarstung des Dachsteinkalks im Einklang. Die Grundwasserspeicherkapazität (464 mm) ist plausibel. Die Verteilung der Seehöhe im Einzugsgebiet ist in Abbildung 33e dargestellt, die berechnete Schneedeckendynamik in Abbildung 33f. Der stark negative Austauschkoeffizient (-297,7 mm/Tag) zeigt an, dass sich das Einzugsgebiet des Ödensee Kaltwassertrichters mit dem weiterer Quellen überschneidet, im Einklang mit den oben berichteten Ergebnissen der Markierungsversuche (hierfür kommen demnach in erster Linie Ödensee, warmer See, sowie der Quellbezirk Strummern in Frage).

Ödensee Kaltwassertrichter (Szenario 8)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,60	Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Korrelationskoeffizient [-]	0,60	Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
systematischer Fehler [-]	1,05	Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich
relative Variabilität [-]	0,99			

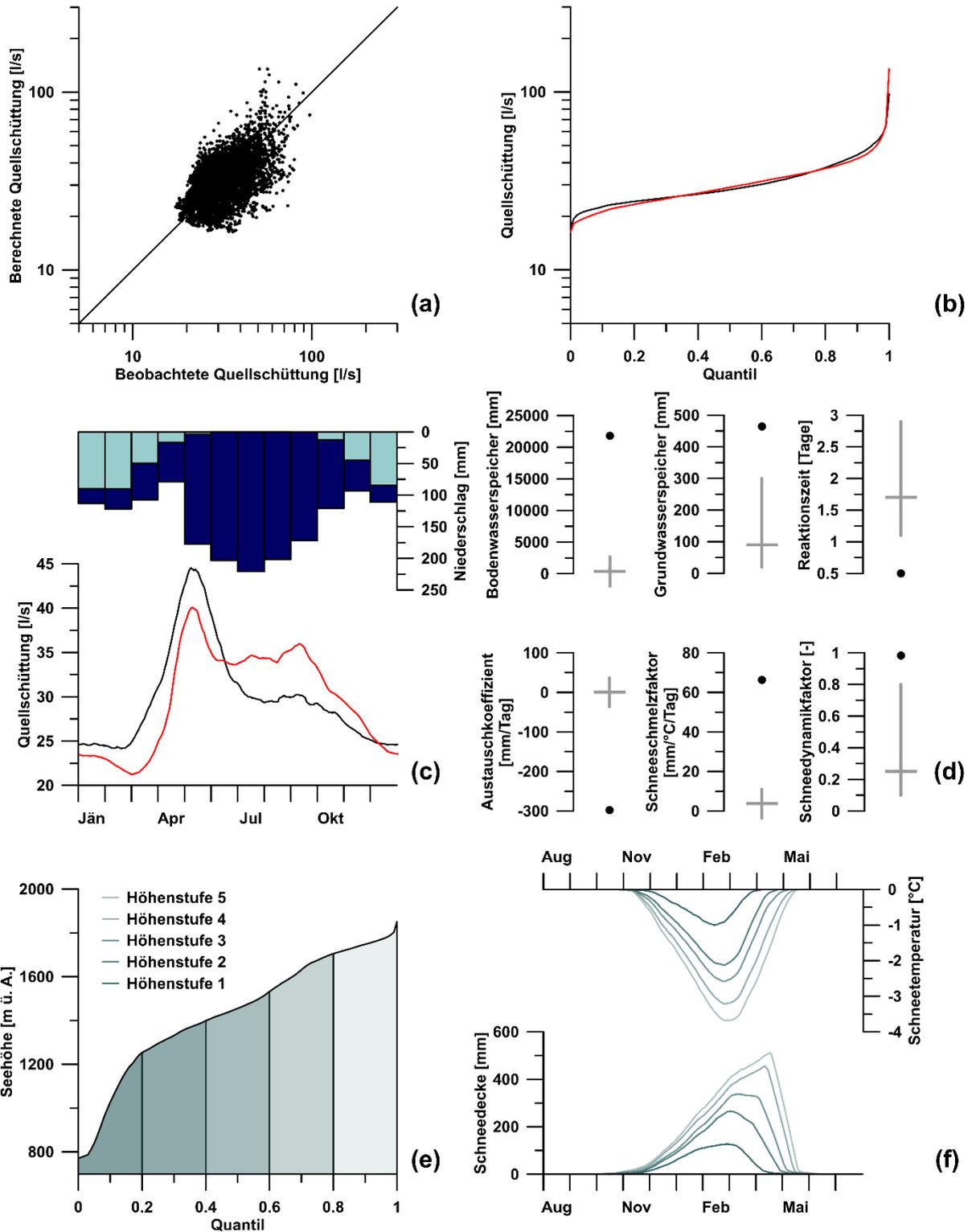


Abbildung 33: Bewertung der Modellierungsergebnisse für den Ödensee Kaltwassertrichter (HZB-Nr. 395905), Szenario 8. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.8. Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770)

Der Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770) befindet sich am Fuße der Grebenzen auf 1147 m ü. A. im Gebiet der Gemeinde Neumarkt in der Steiermark, Bezirk Murau (Abbildung 1, Abbildung 34a). Von 14.7.2011 bis 31.12.2017 liegt eine kontinuierliche aufgezeichnete Zeitreihe der Quellschüttung vor. Diese liegt zwischen 10 und 224 l/s (Mittelwert 105 l/s), während die elektrische Leitfähigkeit zwischen 297 und 332 $\mu\text{S}/\text{cm}$ schwankt (Mittelwert 307 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Die Grebenzen umfasst ein etwa 30 km² großes Kalkmassiv (Drauzug-Gurktal Deckensystem; Schmid et al., 2004), deren tiefere Lagen von quartären Ablagerungen bedeckt werden. Während orographisch ein großer Teil des Massivs zur Drau hin entwässern sollte, ist die tatsächliche Entwässerung hauptsächlich nach Osten – zur Mur hin – gerichtet (Eicher, 1976). Die verkarsteten Murauer Kalke und Grebenzenkalke überlagern gering durchlässige Phyllite und Schiefer (Abbildung 34b; Thurner und van Husen, 1980), wobei Eicher (1976) eine Verkarstung der Kalksteine bis zur wasserstauenden Unterlage annimmt (seichter Karst). Die Morphologie dieser Unterlage bestimmt demnach die Richtung des unterirdischen Abflusses. In diesem Zusammenhang kommt einer Phyllitschwelle südlich des Pöllauer Trockentales besondere Bedeutung zu, welche den Karstkörper grob in zwei Bereiche teilt (Eicher, 1976). Demnach entwässern Pöllauer und Zeuschacher Ursprung den nördlichen Teil des Karstsystems (in etwa nördlich von Bachleralm und Kaiserinalm, vgl. Abbildung 34a).

Die Quelle tritt an der Grenze von Kalkstein und Moränenablagerungen zu Tage (Thurner und van Husen, 1978). Abbildung 35 und Tabelle 27 fassen die sieben modellierten Szenarien zusammen, die im Wesentlichen den oben beschriebenen, nördlichen Teil des Karstsystems zu unterschiedlichen Anteilen einbeziehen.

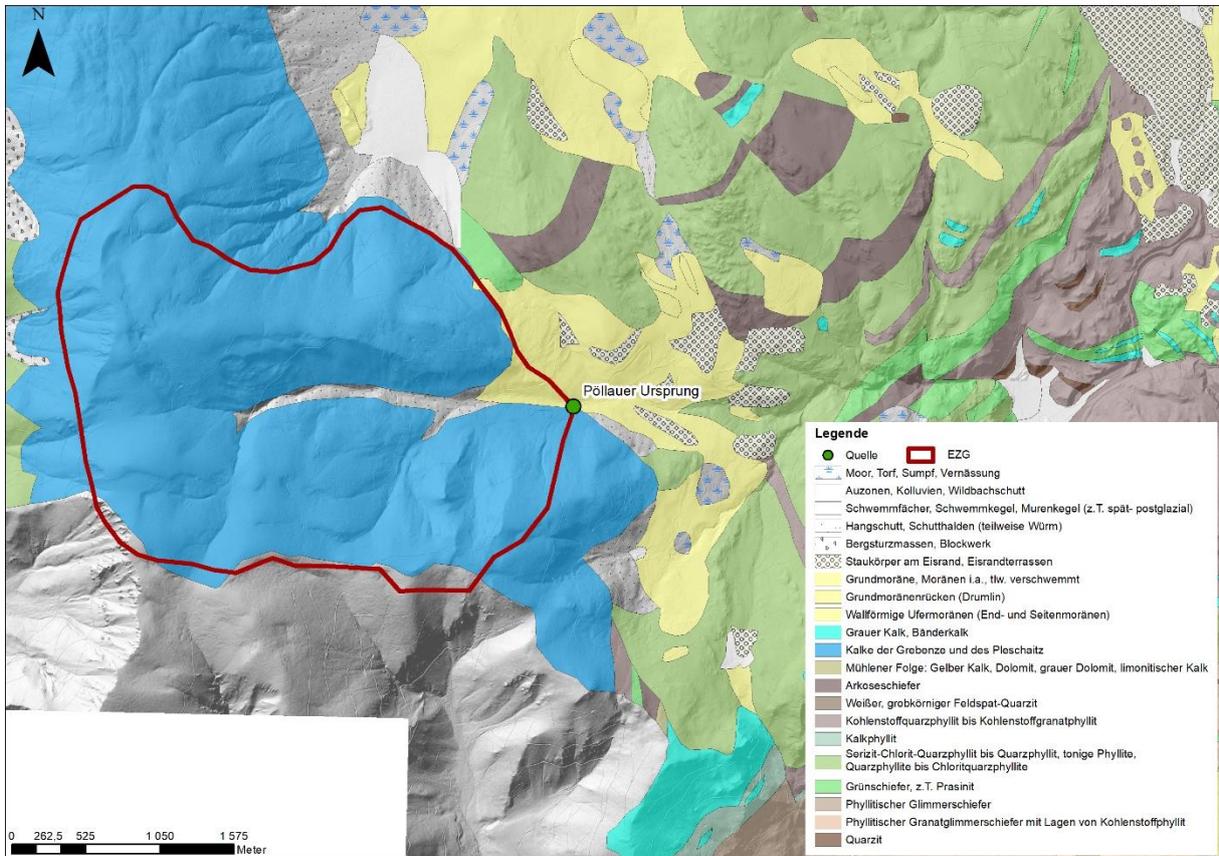
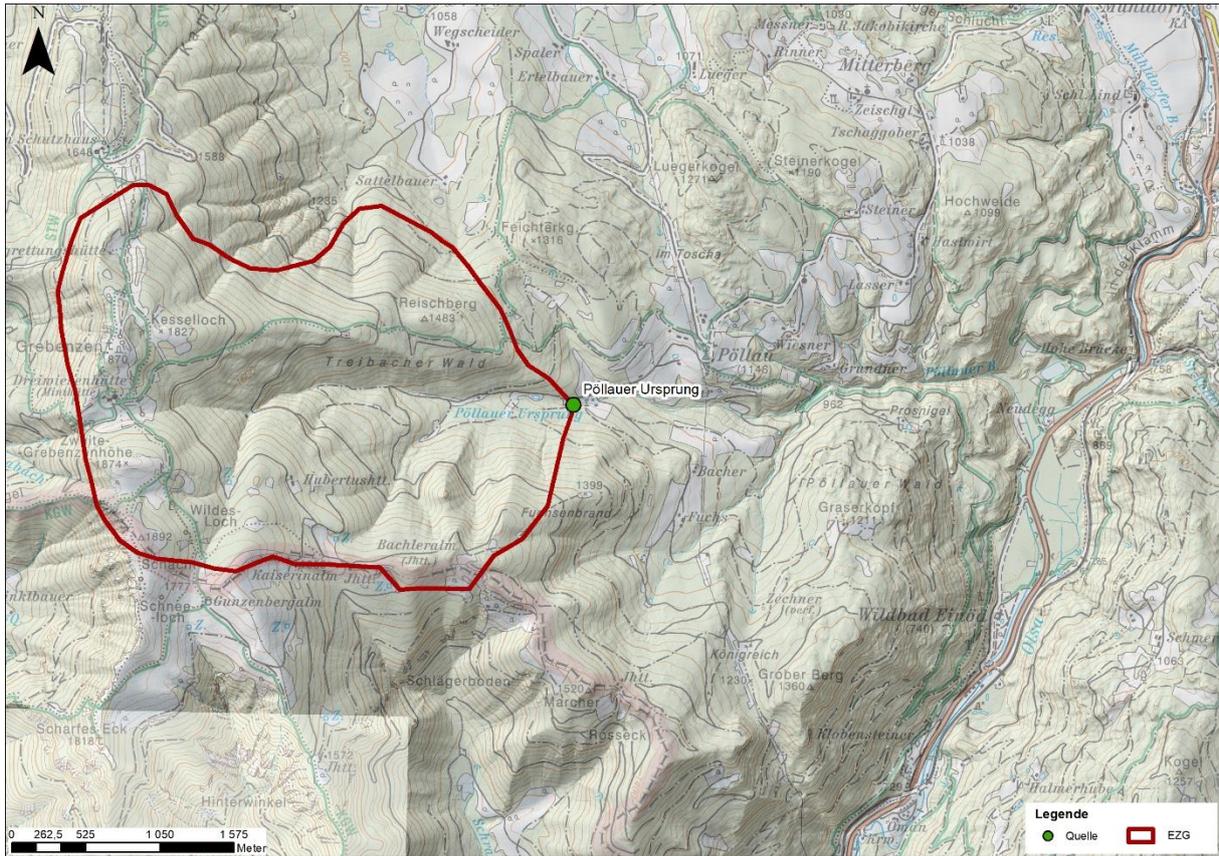


Abbildung 34: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich des Pöllauer Ursprungs (HZB-Nr. 396770). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 7 dargestellt.

Tabelle 27: Modellerte Szenarien für den Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	2,79	1469	660	1049	795
2	4,14	1506	724	1042	794
3	4,64	1544	741	1041	793
4	4,70	1535	745	1041	793
5	5,73	1517	727	1038	795
6	7,51	1579	745	1032	793
7	7,58	1562	745	1036	793

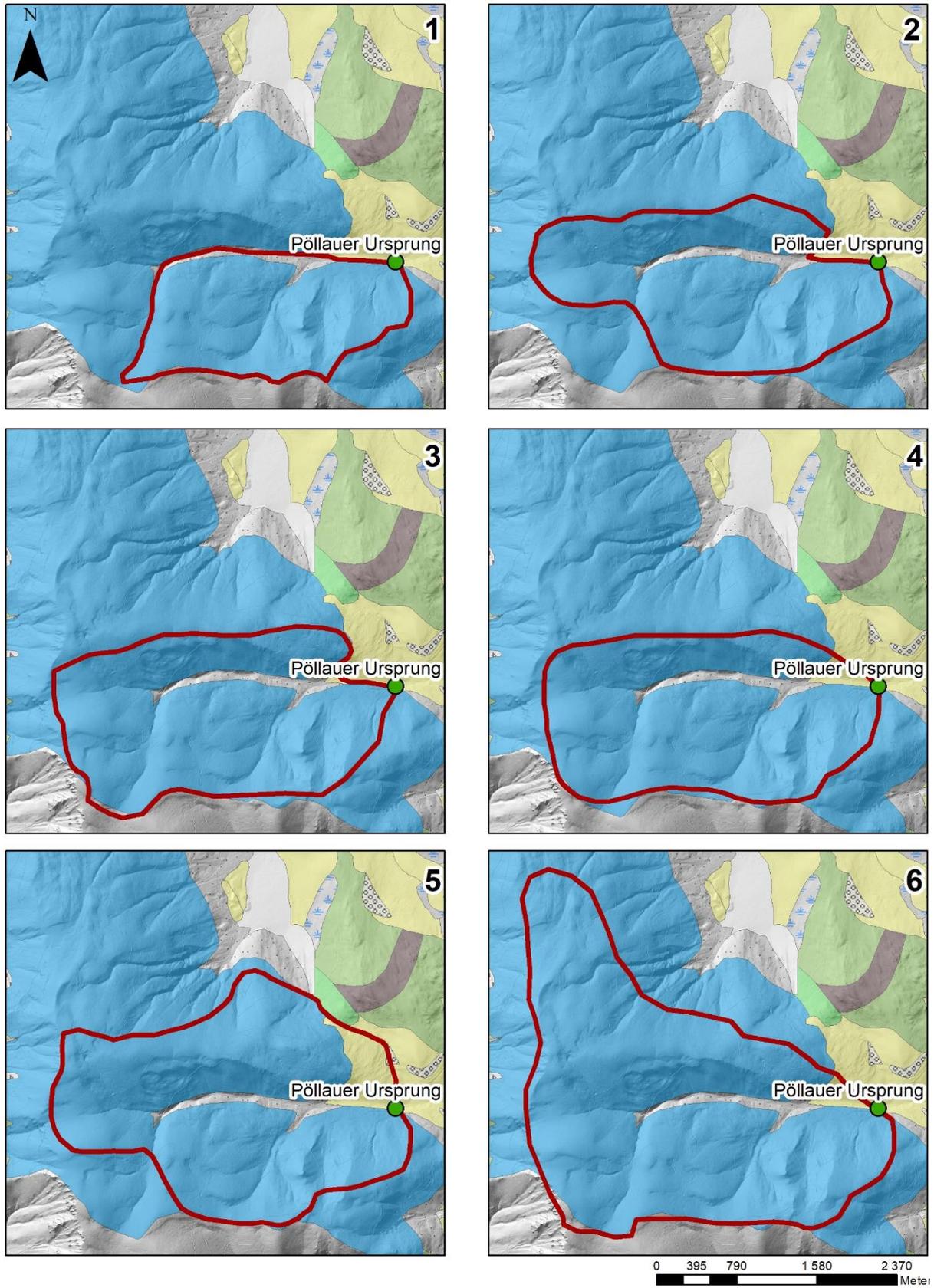


Abbildung 35: Modellierte Szenarien den Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770).

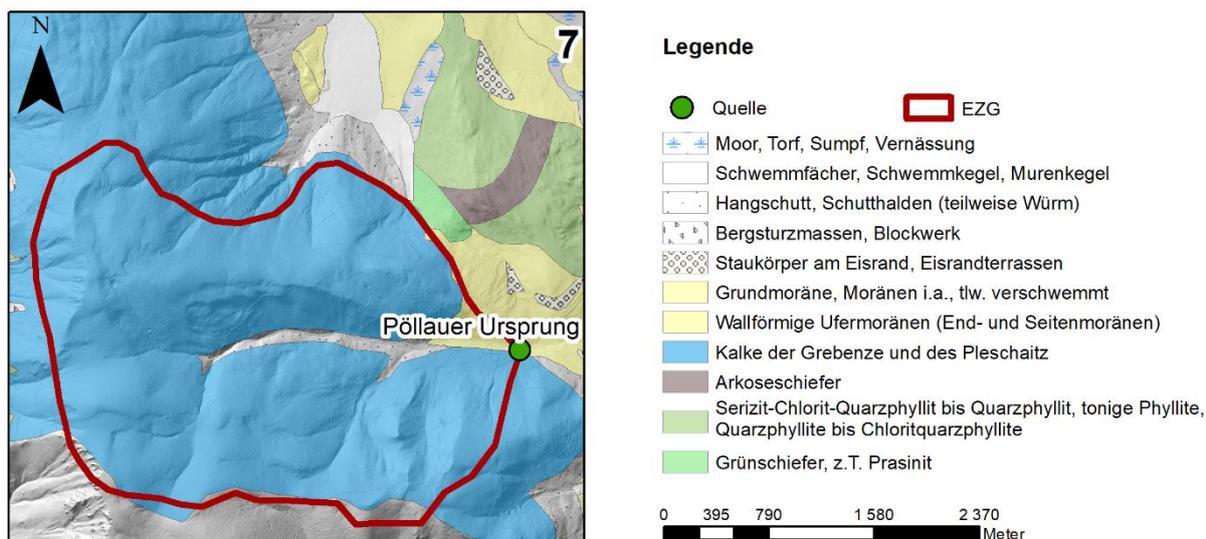


Abbildung 35 (Forts.): Modellierte Szenarien den Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770).

Tabelle 28 und Tabelle 29 fassen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Alle Szenarien zeigen sehr gute, ähnliche KGE (zwischen 0,78 und 0,81), Korrelationskoeffizienten (ebenfalls zwischen 0,78 und 0,81), relative Variabilitäten (zwischen 0,98 und 1,01) und systematische Fehler (zwischen 1,00 und 1,01). Niedrige Bodenwasser- (x_1) und hohe Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) stehen im Einklang mit der alpinen Lage (erstere) und hohen Speicherfähigkeit des Karstsystems im Untergrund (letzttere). Aufgrund der isolierten Lage des Kalkstocks Grebenzen wird überwiegend autogene Grundwasserneubildung angenommen und dementsprechend ein Austauschkoefizient (x_2) nahe 0 mm/Tag erwartet. Das trifft auf die Szenarien 6 und 7 zu. Szenario 7 zeigt darüber hinaus einen plausiblen Schneeschmelzfaktor (c_2) und stimmt mit der oben beschriebenen, lokalen hydrogeologischen Situation überein. Auf die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem durchwegs hohen Schneedynamikfaktor (c_1) wurde bereits eingegangen.

Die Modellergebnisse für Szenario 7 sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie (Abbildung 36, Abbildung 37a) schlägt sich in entsprechend hohem KGE und Korrelationskoeffizienten nieder (jeweils 0,78). Während die relative Variabilität (1,01) eine vergleichbar abgebildete Schwankungsbreite ausweist, zeigt Abbildung 37b dass das Modell dazu neigt, extrem hohe und niedrige Quellschüttungen zu über-, mittlere Schüttungen dagegen zu unterschätzen. Dies drückt sich in Abbildung 36 in zu hohen berechneten Schüttungsspitzen und zu starkem Basisabfluss während der Wintermonate aus.

Tabelle 28: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Pöllauer Ursprungs (HZB-Nr. 396770).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,79	0,80	0,98	1,00
2	0,81	0,81	0,98	1,00
3	0,80	0,80	1,00	1,00
4	0,79	0,79	1,00	1,00
5	0,79	0,79	1,01	1,00
6	0,79	0,79	1,01	1,01
7	0,78	0,78	1,01	1,01

Tabelle 29: Optimierte Modellparameter für den Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	309	20,8	567	3,3	0,98	20,1
2	625	10,5	429	4,3	0,97	109,0
3	80	16,1	1367	5,2	0,97	46,4
4	78	16,1	1385	5,2	0,96	7,7
5	92	9,6	1486	5,4	0,97	47,7
6	93	0,0	1753	6,5	0,97	50,1
7	93	0,0	1773	6,4	0,96	6,9

Pöllauer Ursprung (Szenario 7)

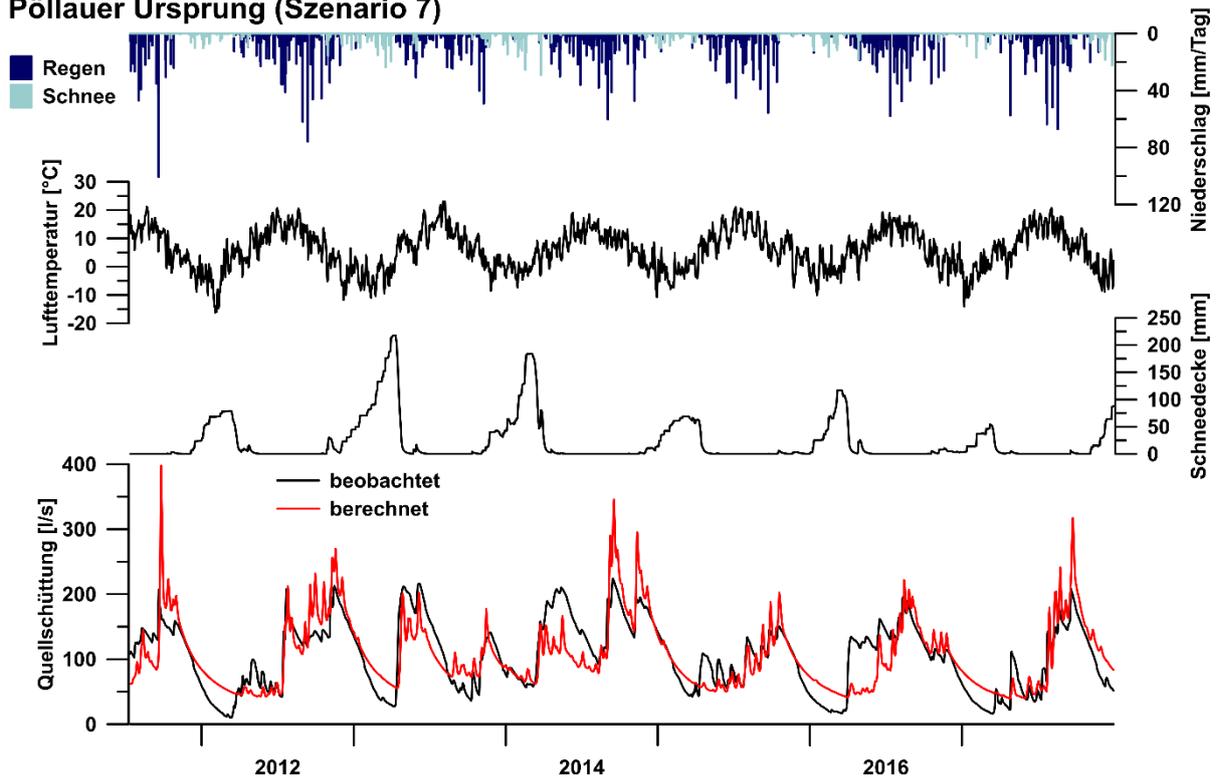


Abbildung 36: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet des Pöllauer Ursprungs (HZB-Nr. 396770), Szenario 7.

Die Saisonalität der Quellschüttung wird vom Modell nur grob getroffen, insbesondere der rasche Anstieg während der Schneeschmelze im Frühjahr ist nicht korrekt abgebildet (Abbildung 37c). Der geringe systematische Fehler (1,01) zeigt, zusammen mit dem Austauschkoefizienten von 0 mm/Tag eine ausgeglichene Wasserbilanz bei autogener Grundwasserneubildung an (Abbildung 37d), im Einklang mit den (hydro-)geologischen Gegebenheiten vor Ort. Die tendenziell niedrige Bodenspeicherkapazität (93 mm) spiegelt das alpine Einzugsgebiet wieder, die hohe Grundwasserspeicherkapazität (1773 mm) die hohe Speicherkapazität des Karstsystems (Abbildung 37d). Der Schneeschmelzfaktor liegt im erwarteten Bereich (6,9 mm/(°C Tag)). Der hohe Schneedynamikfaktor (0,96) und die lange Reaktionszeit (6,4 Tage) zeigen ein (zu) träges modelliertes Schnee- und Abflusssystem an und werden mit der verzögert abgebildeten Saisonalität des Abflusses (Abbildung 37c) in Verbindung gebracht. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die Einschätzung von Eicher (1976), sowohl hinsichtlich der hydraulischen Aquifereigenschaften wie auch hinsichtlich der Abgrenzung des Einzugsgebietes.

Pöllauer Ursprung (Szenario 7)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,78
Korrelationskoeffizient [-]	0,78
systematischer Fehler [-]	1,01
relative Variabilität [-]	1,01

Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich

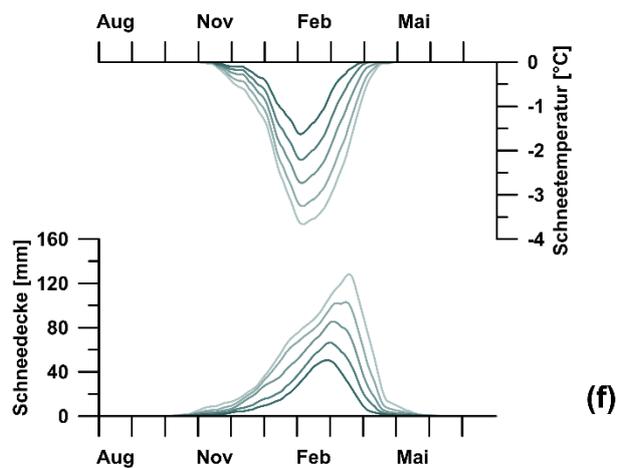
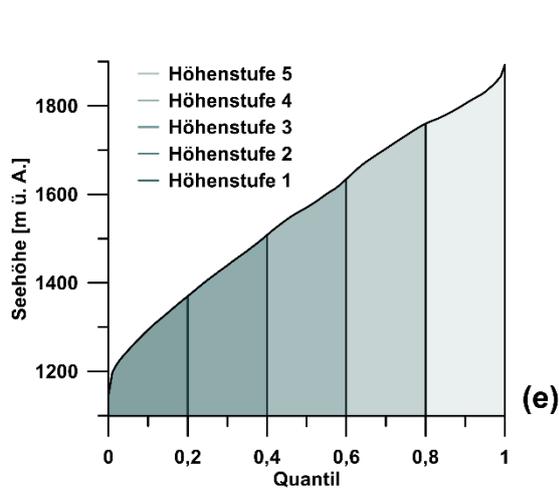
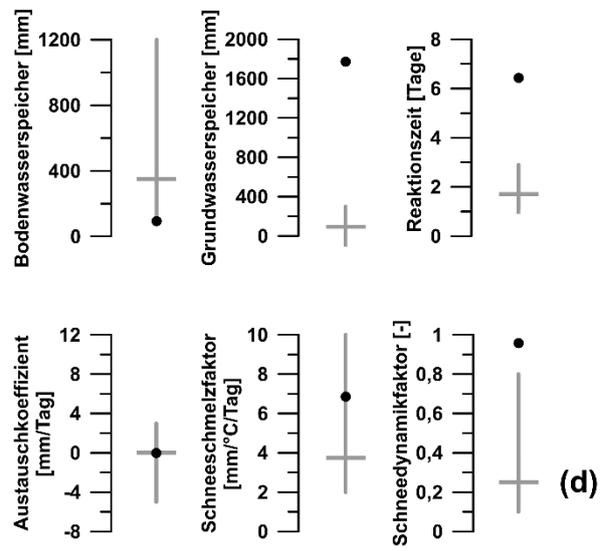
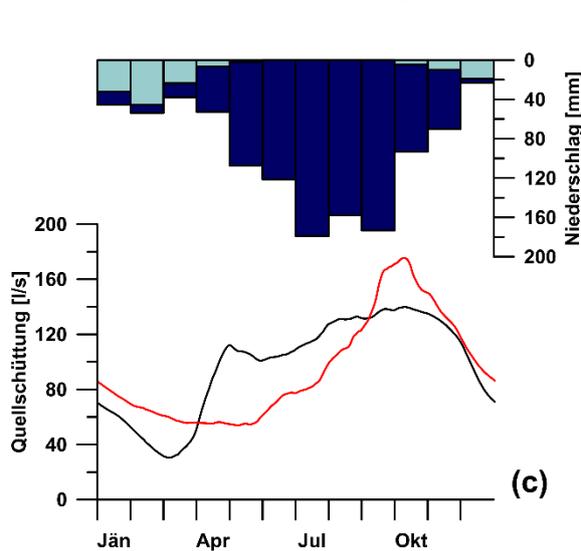
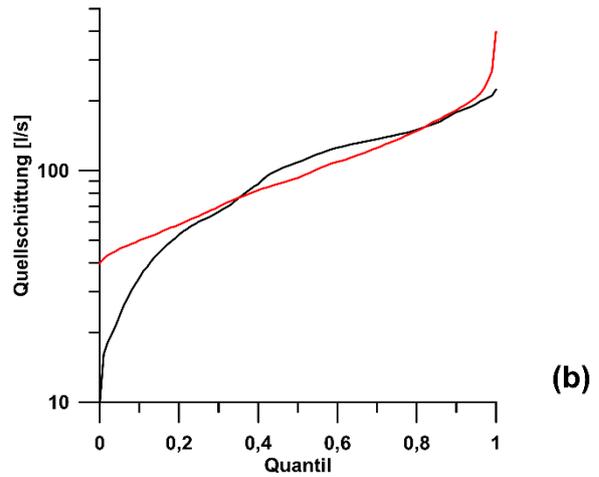
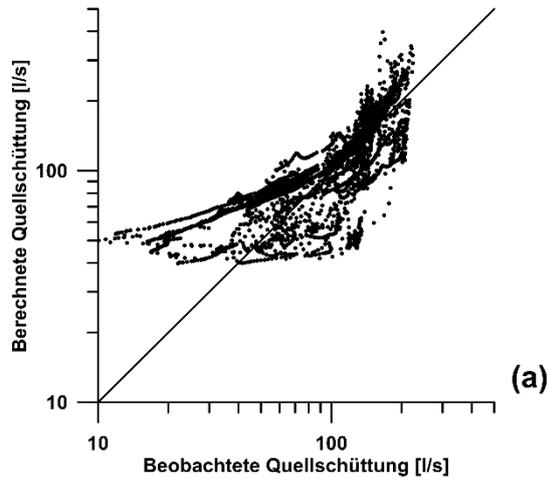


Abbildung 37 Bewertung der Modellierungsergebnisse für den Pöllauer Ursprung (HZB-Nr. 396770), Szenario 7. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.9. Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897)

Die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897) liegen im Preuneggatal (Schladminger Tauern) auf 1099 m ü. A. in der Gemeinde Schladming im Bezirk Liezen (Abbildung 1, Abbildung 38a). Zwischen 1.1.1998 und 31.12.2017 liegt eine nahezu kontinuierliche Zeitreihe der Quellschüttung vor, Datenlücken machen lediglich 0,2 % aus. Sie schwankt zwischen 25 und 184 l/s bei einer mittleren Schüttung von 64 l/s. Die mittlere elektrische Leitfähigkeit beträgt 186 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Schwankungsbreite 144 – 223 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Die Quelle befindet sich im nordwestlichen Bereich des Schladminger Kristallinkomplexes (Silvretta-Seckau-Deckensystem; Schmid et al., 2004), am Fuße des Schobers (2133 m) im unmittelbaren Übergang zu den Verlandungs- bzw. Seesedimenten des Talbodens (Abbildung 38b; Mandl und Matura, 1995). Die Nordwest-Flanke des Schobers wird von migmatischen Paragneisen und Lagen von Bänderamphiboliten aufgebaut, wobei die unteren Bereiche von Hangschutt und teilweise grobem Blockwerk bedeckt sind. Südlich davon liegen Schobersee und Schoberalm, sowie ein 14820 m² großer, reliktscher Blockgletscher (Wagner et al., 2020). Aufgrund der geologischen Beschaffenheit wird kein wesentlicher unterirdischer Zufluss im Festgestein erwartet (Mandl et al., 2014).

Das Ennstal und seine Seitentäler sind glazial stark übertieft und von z. T. mächtigen Lockergesteinskörpern gefüllt (van Husen, 1979; Becker, 1987; Mandl et al., 2014). Die übersteilten Talflanken sind von tiefgreifenden Massenbewegungen betroffen. Insbesondere gilt das für die Westflanke des Hochwurzen (1849 m), an dem das Auftreten von Chlorit-Serizitphylliten eine besonders große Massenbewegung begünstigte, die den Talboden im Bereich der Preunegger Siebenquellen sperrte und bis zur Berglalm (etwa 1 km südlich der Preunegger Siebenquellen) staute (Mandl et al., 2014). Die feinschuppigen Quarzphyllite des Talzuschubes unterbrechen den Grundwasserfluss in der Talfüllung des Preuneggats, der infolgedessen zur Schüttung der Preunegger Siebenquellen beiträgt (Mandl et al., 2014). Der Jahresgang der Siebenquellen zeigt eine sehr ähnliche Charakteristik wie der Untertalbach am Pegel Tetter, erscheint aber gegenüber diesem etwas gedämpft (Mandl et al., 2014).

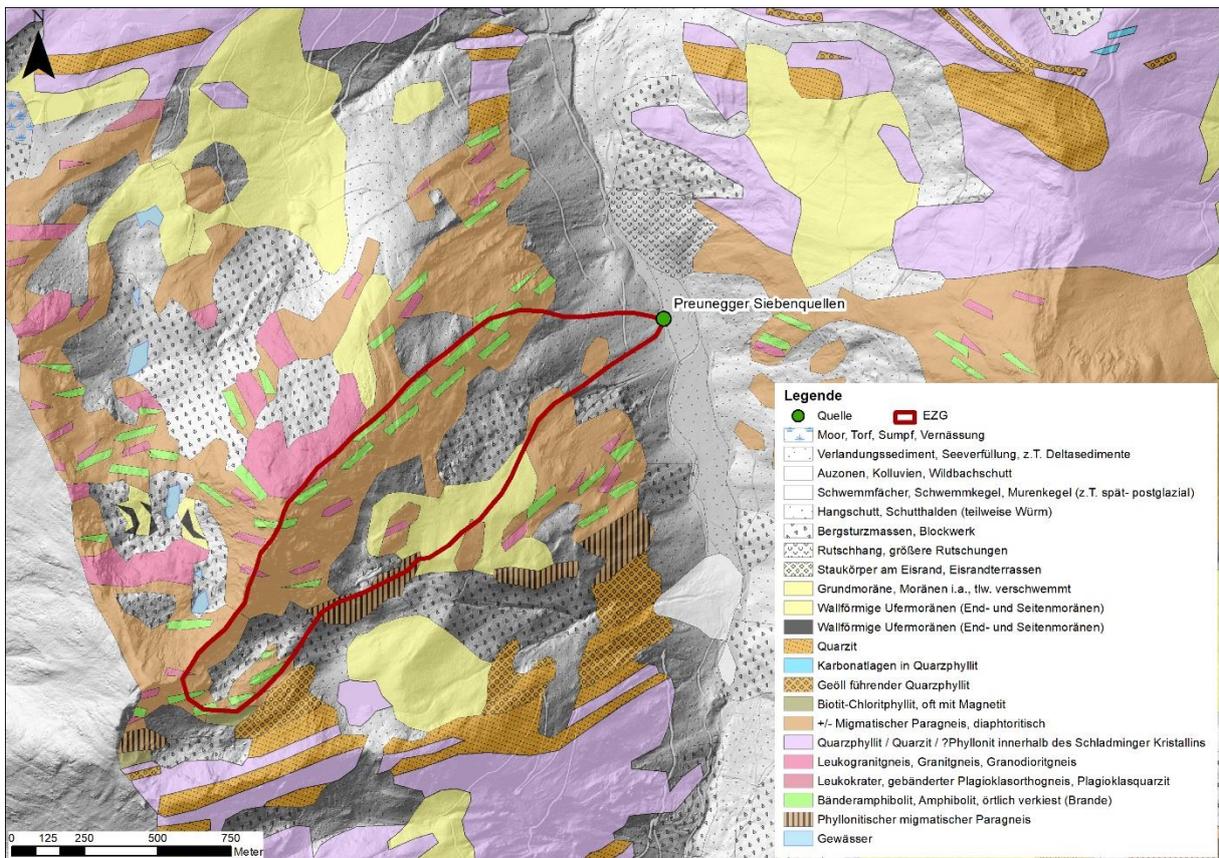
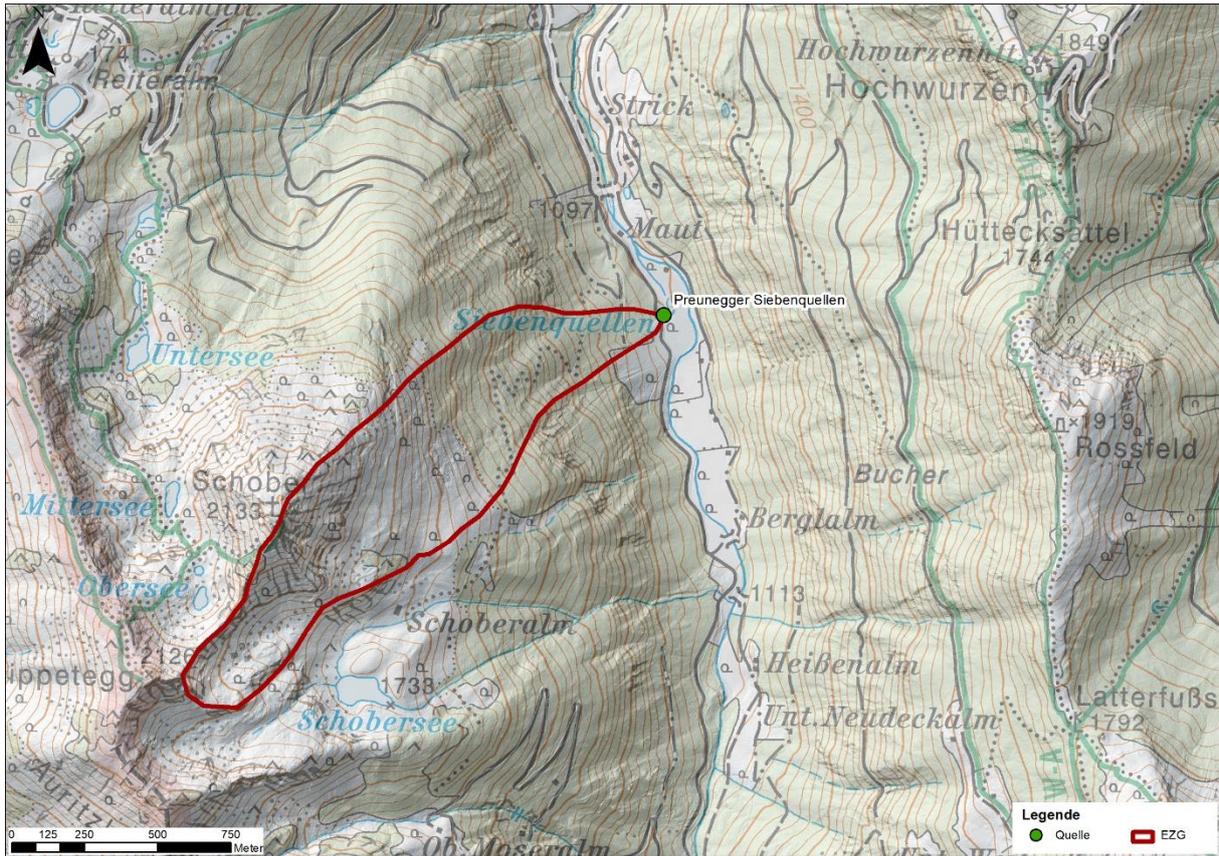


Abbildung 38: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 6 dargestellt.

Die sieben modellierten Szenarien (Abbildung 39, Tabelle 30) weisen unterschiedliche Anteil der Flanken von Schober (2133 m) und Rippetegg (2126 m) als potenzielles Einzugsgebiet aus. Die Szenarien 1 – 4 ziehen den unmittelbaren Nahbereich der Quelle in Betracht. In Anbetracht der hohen Quellschüttung nehmen die Szenarien 5 – 7 ein Einzugsgebiet im Bereich der Südflanken dieser Berge (teils einschließlich Schobersee und Schoberalm) an, während Szenarien 8 – 10 zusätzlich einen Grundwasserzutritt aus dem Kar nördlich davon (teils einschließlich Obersee, Mittersee und Untersee) durch das (grobe) Blockwerk der unteren Ostflanken erwägen. Der vermutete (massive) Zutritt von Grundwasser aus dem Talkörper des Preuneggbaches wird durch den Austauschterm berücksichtigt.

Tabelle 30: Modellierte Szenarien für die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,03	1143	91	1261	793
2	0,07	1239	327	1261	793
3	0,16	1392	598	1261	793
4	0,34	1442	757	1261	790
5	0,56	1586	979	1262	782
6	0,71	1699	1027	1247	773
7	0,85	1679	1028	1251	775
8	1,19	1702	985	1256	770
9	1,75	1787	1034	1246	766
10	1,94	1750	1034	1247	768

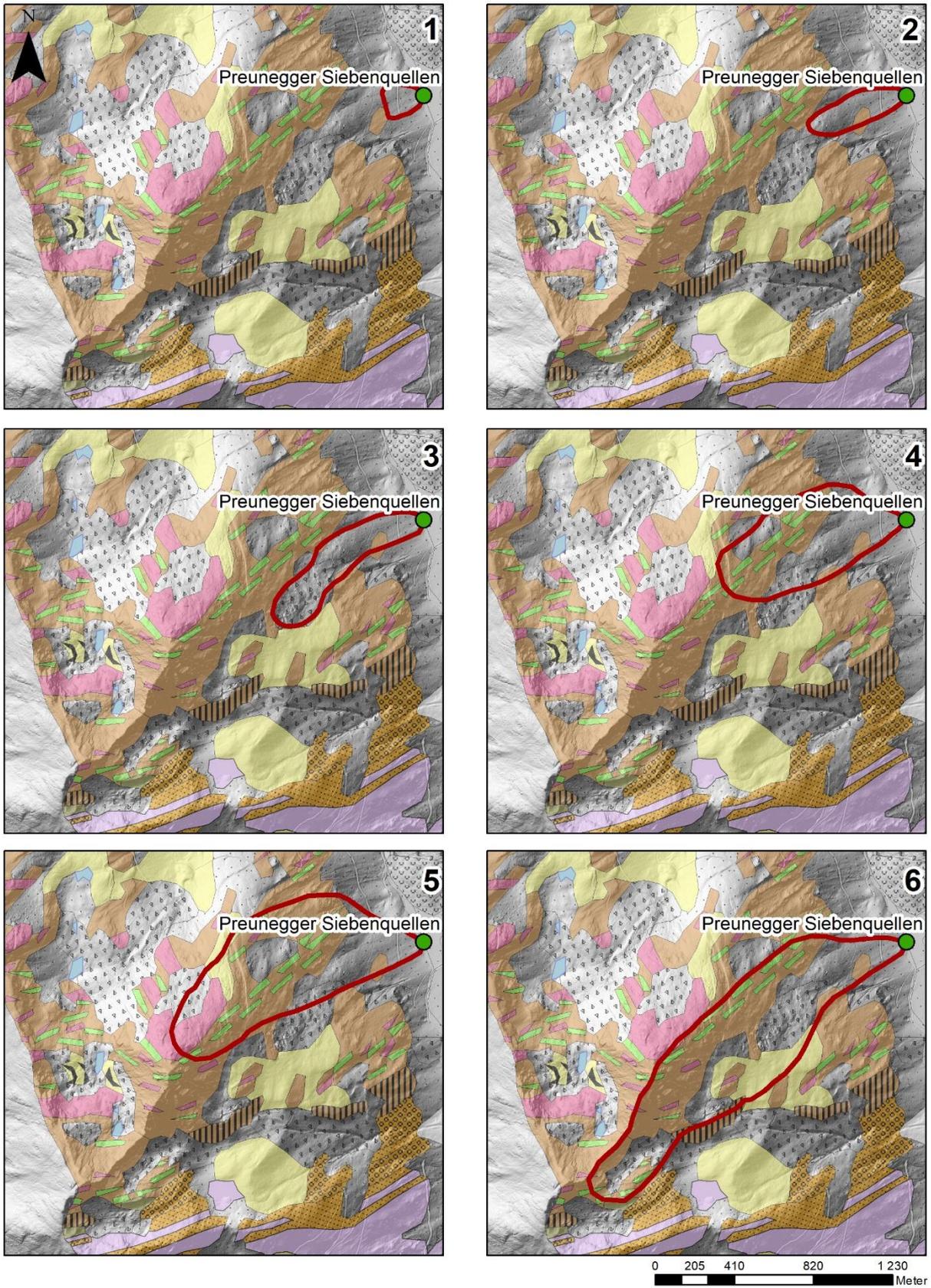
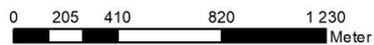
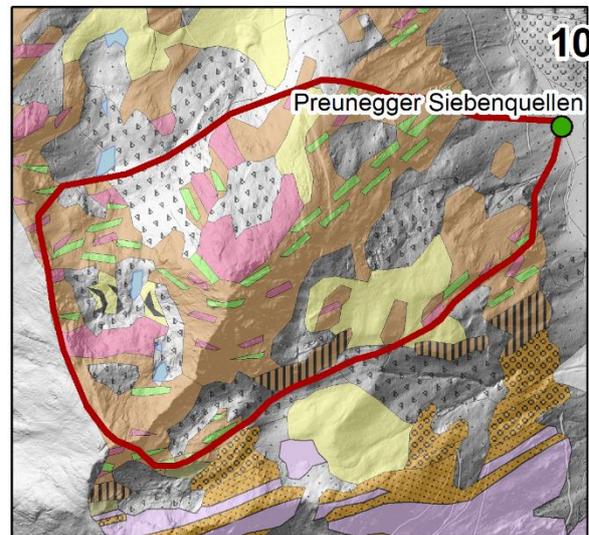
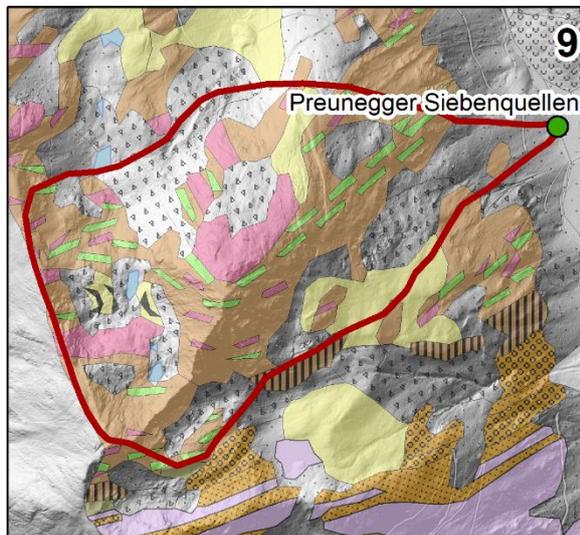
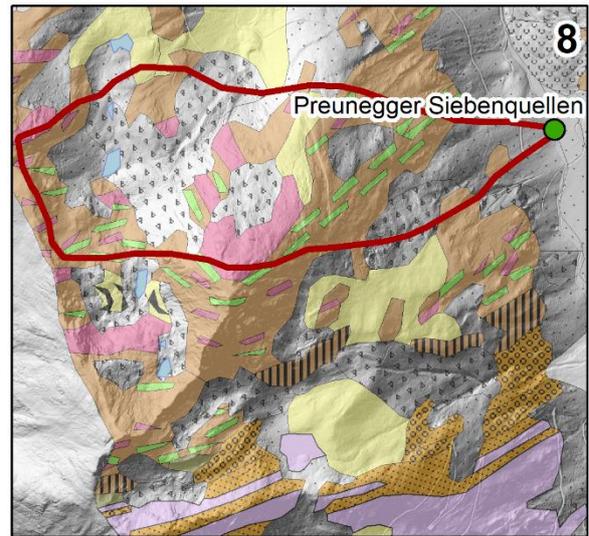
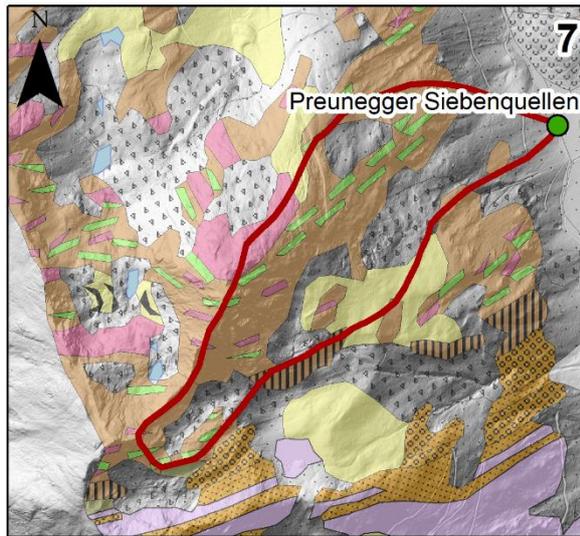


Abbildung 39: Modellierte Szenarien für die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897).



Legende

- Quelle
- EZG
- Verlandungssediment, Seeverfüllung, z.T. Deltasedimente
- Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)
- Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
- Bergsturzmassen, Blockwerk
- Rutschhang, größere Rutschungen
- Grundmoräne, Moränen i.a., tlw. verschwemmt
- Wallförmige Ufermoränen (End- und Seitenmoränen)
- Wallförmige Ufermoränen (End- und Seitenmoränen)
- Quarzit
- Geröll führender Quarzphyllit
- Biotit-Chloritphyllit, oft mit Magnetit
- +/- Migmatischer Paragneis, diaphtoritisch
- Quarzphyllit / Quarzit / ?Phyllonit innerhalb des Schladminger Kristallins
- Leukogranitgneis, Granitgneis, Granodioritgneis
- Bänderamphibolit, Amphibolit, örtlich verkiest (Brande)
- Phyllonitischer migmatischer Paragneis
- Gewässer

Abbildung 39 (Forts.): Modellierete Szenarien für die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897).

Tabelle 31: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,07	0,74	0,85	0,11
2	0,31	0,71	0,47	0,67
3	0,59	0,77	0,70	0,83
4	0,79	0,79	0,95	0,99
5	0,81	0,81	1,01	1,01
6	0,79	0,80	1,05	1,03
7	0,73	0,74	1,07	1,03
8	0,74	0,75	1,06	1,03
9	0,70	0,70	1,07	1,03
10	0,68	0,70	1,08	1,03

Tabelle 31 und Tabelle 32 stellen die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung zusammen. Die Szenarien 4 – 6 zeigen mit einem KGE $> 0,75$ sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneter und beobachteter Schüttungsganglinie (vgl. auch hohe Korrelationskoeffizienten, gute relative Variabilitäten und geringe systematische Fehler dieser Szenarien). Die Kapazität des Bodenwasserspeichers (x_1) wird von Szenarien 1 – 4 und 7 als unplausibel gering (0 mm) bewertet, Szenarien 5 und 8 – 10 weisen eine für alpine Gebiete nicht untypische, eher geringe Kapazität (< 100 mm) aus. Szenario 6 bildet mit 126 mm die Bedeckung der Talflanken ab. Durchgehend positive Austauschkoeffizienten ($x_2 > 0$) stehen in guter Übereinstimmung mit der Alimentierung der Preunegger Siebenquellen aus dem Talgrundwasserleiter. Der flache Staubereich zwischen Berglalm und Preunegger Siebenquelle und die folgende Steilstufe im Bereich letzterer begünstigen außerdem eine Infiltration des Preuneggbaches in diesem Bereich, diesbezügliche Messungen liegen jedoch nicht vor. Alle Szenarien zeigen unter Berücksichtigung des teils groben Blockwerks eine plausible Grundwasserspeicherkapazität (x_3), Szenarien 1, 6 und 8 zeigen außerdem plausible Schneeschmelzfaktoren (c_2). Auf die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem durchwegs hohen Schneedynamikfaktor (c_1) wurde bereits eingegangen.

Tabelle 32: Optimierte Modellparameter für die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	0	59,2	549	2,6	0,98	2,4
2	0	126,2	967	2,0	0,99	67,2
3	0	89,4	863	2,0	0,99	102,7
4	0	77,5	1105	2,3	0,99	92,9
5	28	74,3	1344	2,3	0,97	60,6
6	126	49,2	838	1,5	0,87	5,2
7	0	64,4	2241	3,4	0,96	109,0
8	31	56,9	2079	2,5	0,93	9,7
9	29	42,1	2801	4,3	0,95	55,4
10	31	36,5	2875	3,9	0,95	52,2

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die Modellergebnisse für das am plausibelsten erachtete Szenario 6. Ausschlaggebend sind das hohe KGE (0,79) sowie die guten Werte der Subkriterien Korrelationskoeffizient (0,80), relative Variabilität (1,05) und systematischer Fehler (1,03). Zwar wird das hohe KGE durch Szenario 5 noch übertroffen (0,81), die Kombination der kalibrierten Modellparameter spricht jedoch für Szenario 6. Der hohe positive Austauschkoefizient (49,2 mm/Tag) bestätigt den vermuteten Grundwasserzustrom aus dem Talboden des Preuneggtals. Die hohe Kapazität des Grundwasserspeichers (838 mm) stimmt einerseits mit der teils groben Sedimentbedeckung der Talflanken überein, andererseits bildet sie die gedämpfte Hydraulik des Preuneggbach-Begleitgrundwasserstroms ab – insbesondere mit Blick auf die teils feinkörnige Talfüllung oberhalb des Talzuschubes der Hochwurzten (1849 m) Westflanke. Möglicherweise tragen die mächtigen Dolomit- und Kalkmarmorvorkommen der Steirischen Kalkspitze (2459 m) im Einzugsgebiet des Preuneggbaches zur hohen elektrischen Leitfähigkeit der Preunegger Siebenquellen bei, diesbezügliche Analysen liegen jedoch nach Kenntnis der Autoren nicht vor.

Preunegger Siebenquellen (Szenario 6)

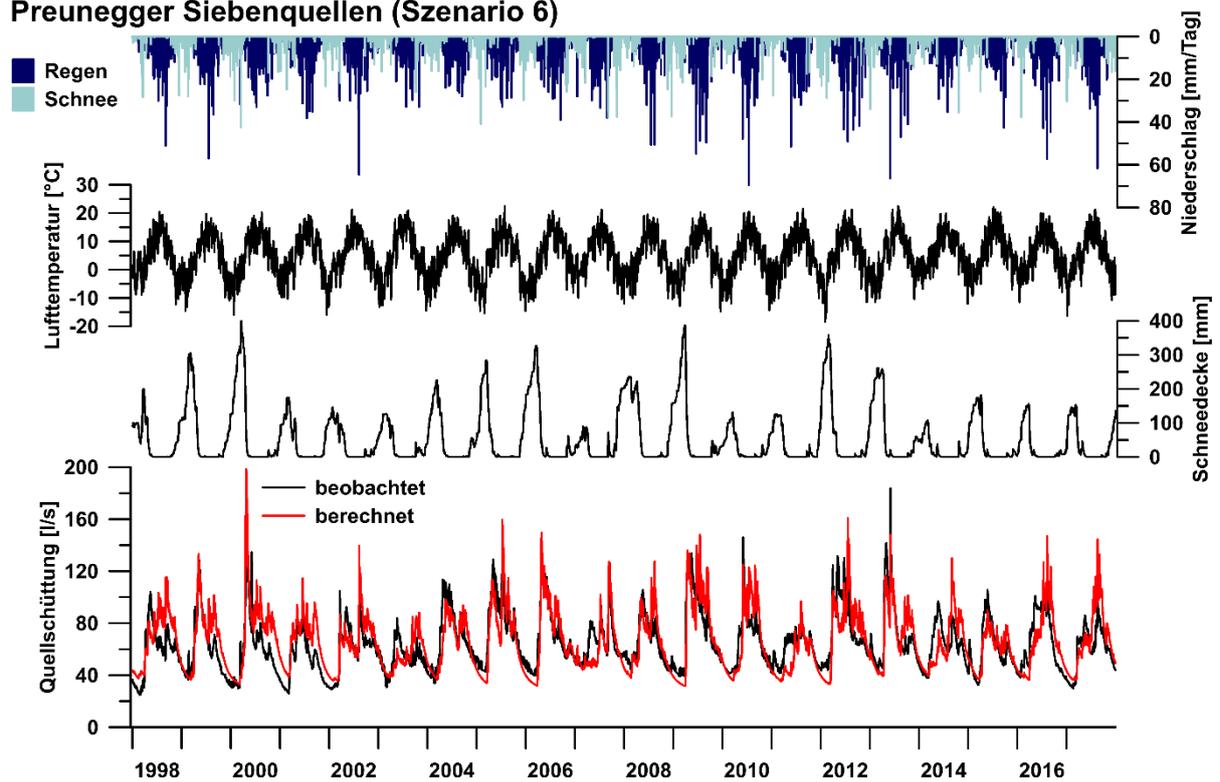


Abbildung 40: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 95897), Szenario 6.

Preunegger Siebenquellen (Szenario 6)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,79
Korrelationskoeffizient [-]	0,80
systematischer Fehler [-]	1,03
relative Variabilität [-]	1,05

Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich

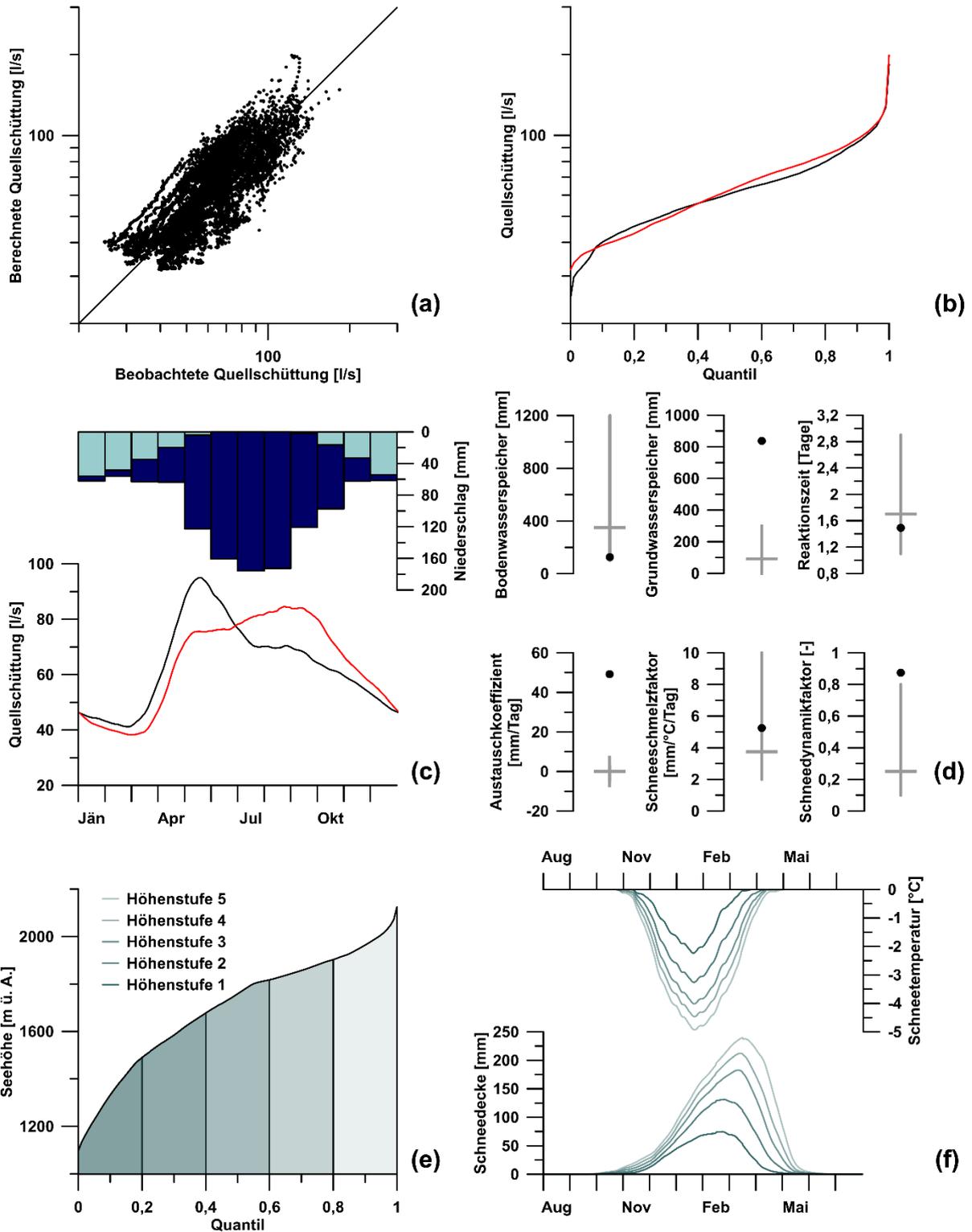


Abbildung 41: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Preunegger Siebenquellen (HZB-Nr. 395897), Szenario 6. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.10. Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848)

Die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848) liegt auf 1501 m ü. A. auf der Koralpe, südwestlich der Weinebene, im Gemeindegebiet Bad Schwanberg (Bezirk Deutschlandsberg) (Abbildung 1, Abbildung 42a). Von 1.1.1997 bis 31.12.2017 liegt eine kontinuierliche Zeitreihe vor. Die mittlere Quellschüttung liegt bei 19 l/s (Schwankungsbreite 12 – 33 l/s), die mittlere elektrische Leitfähigkeit beträgt 123 $\mu\text{S/cm}$ (106 – 144 $\mu\text{S/cm}$).

Der Höhenzug der Koralpe wird oberhalb der Quelle von (Eklogit-) Amphiboliten, Schiefen und Gneisquarziten des Koralpe-Wölz-Deckensystems aufgebaut (Abbildung 42b, Beck-Mannagetta, 1980; Schmid et al., 2004). Moränenablagerungen im Nahbereich der Quelle gehen auf kleinere, lokale begrenzte Kargletscher der pleistozänen Kaltzeiten zurück, während der Großteil der Koralpe eisfrei blieb und damit den Erhalt einer älteren Reliktlandschaft entlang der Höhenzüge gestattete (van Husen, 1997; Legrain et al., 2014, 2015). Regional betrachtet sind – von eingeschalteten Marmorzügen abgesehen – größere Quellen an die mächtigen Verwitterungsdecken in den flachen Hochlagen der Koralpe gebunden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2015).

Insgesamt wurden sieben potenzielle Einzugsgebiete für die Reihbachquelle ausgewiesen, welche die Ostflanke des Höhenzuges oberhalb der Quelle zu unterschiedlichen Anteilen erfassen. Tabelle 33 fasst ihre wichtigsten Kenngrößen zusammen, Abbildung 43 stellt ihre jeweilige Lage dar.

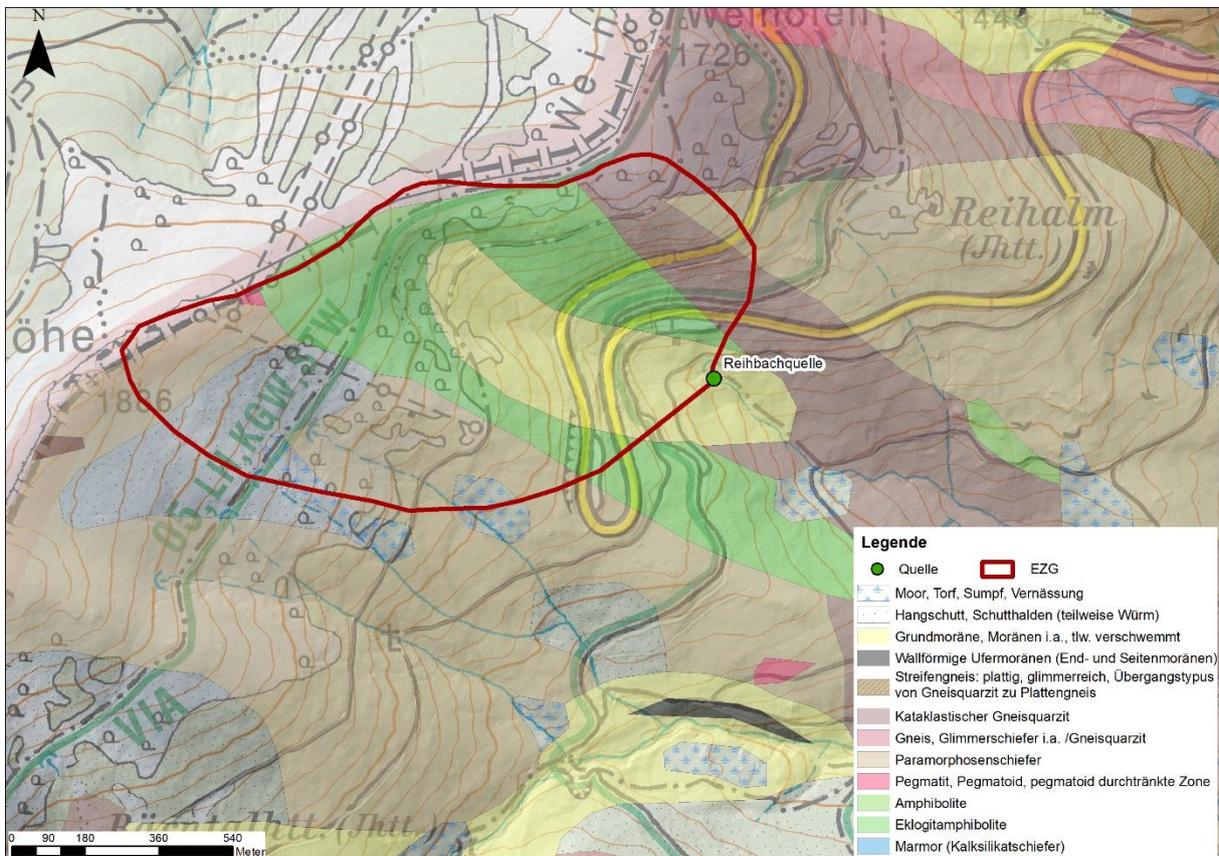
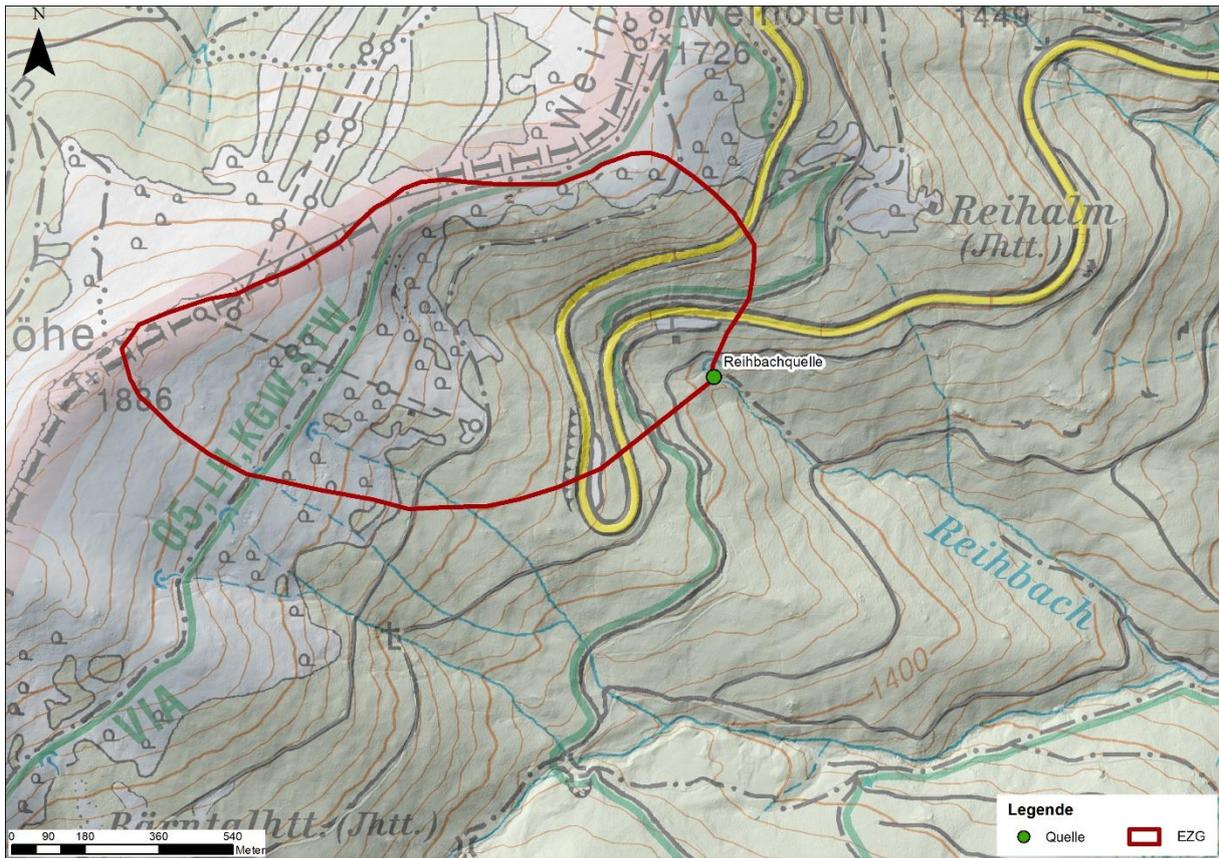


Abbildung 42: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 5 dargestellt.

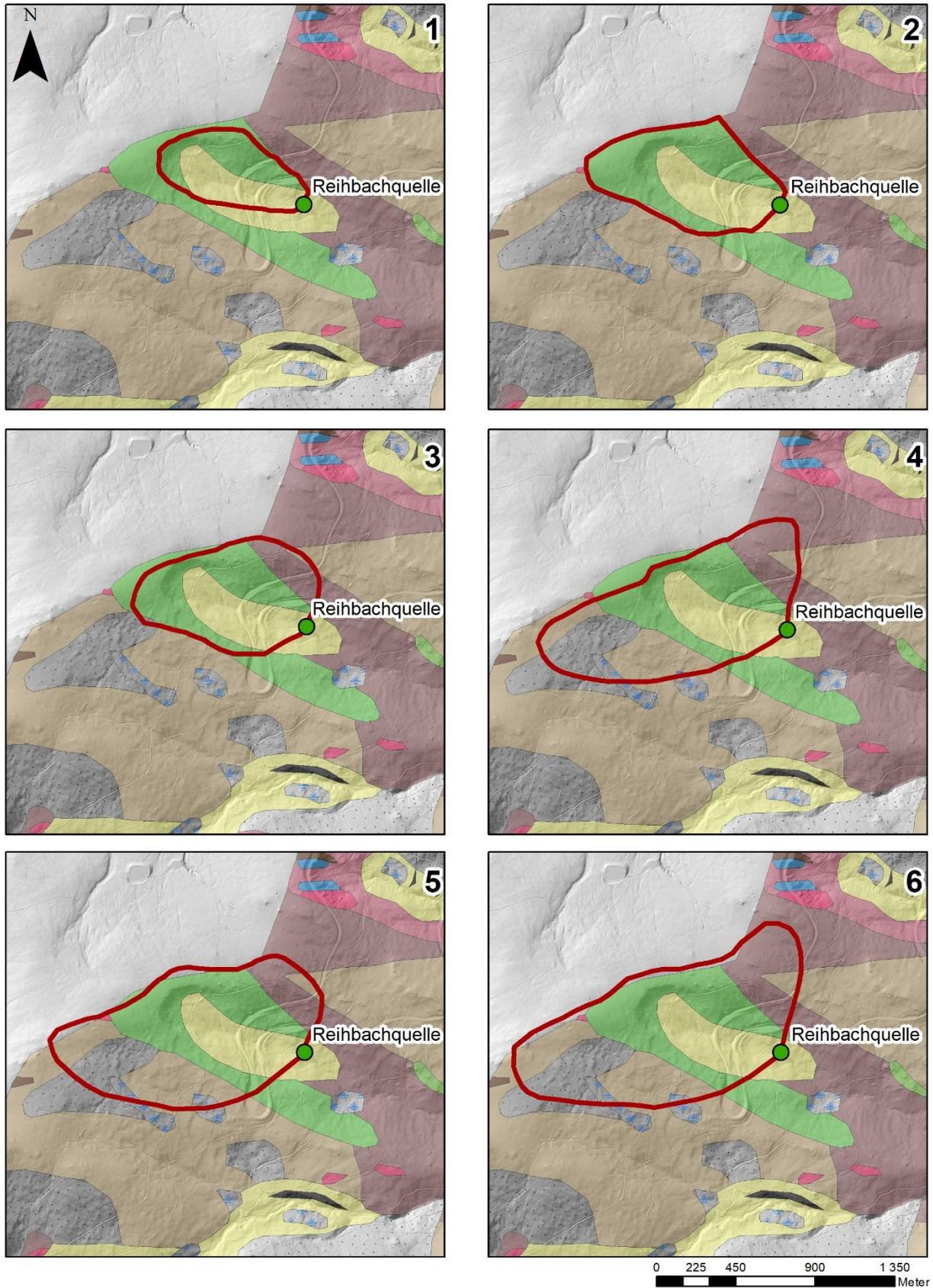


Abbildung 43: Modellierte Szenarien für die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848).

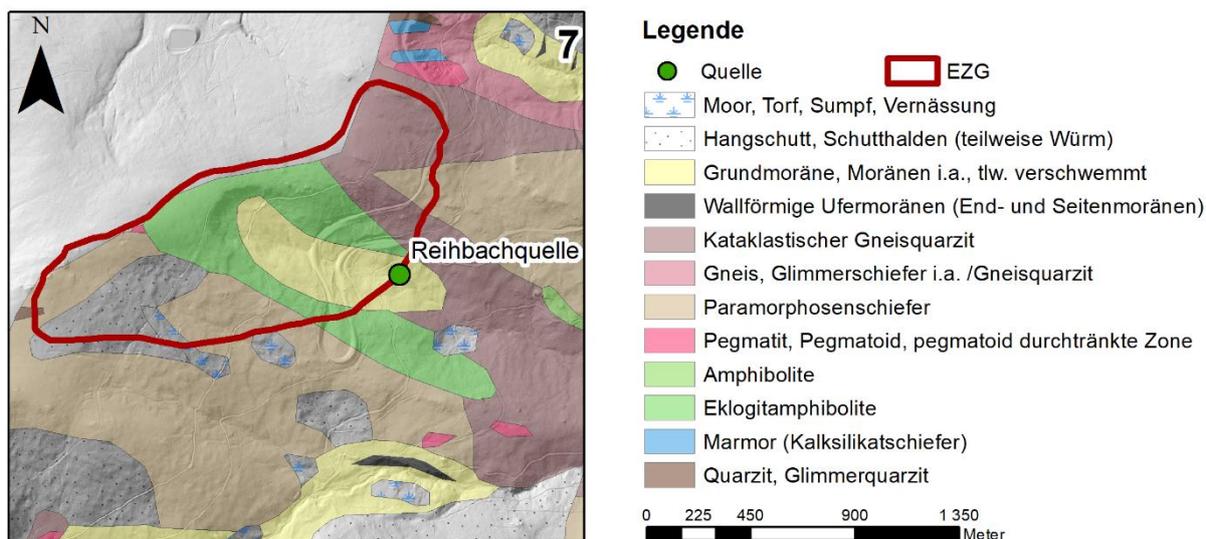


Abbildung 43 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848).

Tabelle 33: Modellierte Szenarien für die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km ²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Reliefunterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	0,27	1624	264	1278	702
2	0,49	1655	332	1272	702
3	0,50	1640	299	1279	702
4	0,83	1677	350	1269	702
5	0,90	1680	372	1268	702
6	1,04	1693	382	1268	702
7	1,12	1696	384	1269	702

Tabelle 34: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,74	0,74	0,97	1,00
2	0,84	0,84	1,01	1,01
3	0,83	0,84	1,02	1,01
4	0,80	0,80	1,03	1,02
5	0,79	0,79	1,03	1,02
6	0,78	0,78	1,04	0,99
7	0,78	0,79	1,04	0,99

Tabelle 35: Optimierte Modellparameter für die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	0	151,6	9820	20,0	1,00	1,8
2	479	105,0	9363	20,0	0,04	2,1
3	562	96,9	9158	20,0	0,61	2,3
4	736	25,0	12017	20,0	0,83	2,1
5	744	12,3	12394	20,0	0,51	2,1
6	865	-26,2	13585	20,0	0,97	2,5
7	786	-48,8	14042	20,0	0,99	5,4

Tabelle 34 fasst die Effizienzkriterien der modellierten Szenarien zusammen. Szenarien 2 – 7 weisen sehr gute, Szenario 1 gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie auf (KGE zwischen 0,74 und 0,84; Korrelationskoeffizient zwischen 0,74 und 0,84). Der Schwankungsbereich der Quellschüttung wird von allen Modellen gut erfasst (relative Variabilität zwischen 0,97 und 1,04), der systematische Fehler ist gering (zwischen 0,99 und 1,02).

Tabelle 35 stellt die Werte der kalibrierten Modellparameter zusammen. Alle Szenarien zeigen plausible Schneeschmelzfaktoren (c_2) und – mit Ausnahme von Szenario 1 – plausible Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1). Reaktionszeit (x_4) und Grundwasserspeicherkapazität (x_3) nehmen sehr lange bzw. hohe Werte an, wodurch ein ausgesprochen träges System simuliert wird (vgl. in diesem Zusammenhang die Anmerkungen zu den Modellergebnissen für die Goldschmiedquelle). Mit Ausnahme von Szenario 3 und 5 nimmt der Schneedynamikfaktor (c_1) sehr hohe oder sehr niedrige Werte an. Je nach Fläche des ausgewiesenen Einzugsgebietes liegt der Austauschkoefizient (x_2) sehr hoch oder sehr niedrig – tatsächlich wird im Einzugsgebiet überwiegend autogene Grundwasserneubildung und damit ein Koeffizient nahe 0 mm/Tag erwartet.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung für Szenario 5. Beobachtete und berechnete Quellschüttungsganglinie zeigen sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 44, Abbildung 45a; KGE 0,79; Korrelationskoeffizient 0,79). Die Schwankungsbreite wird ebenfalls sehr gut abgebildet (Abbildung 45b; relative Variabilität 1,03). Der systematische Fehler ist gering (1,02), der Austauschkoefizient (12,3 mm/Tag) für die beschriebene hydrogeologische Situation jedoch deutlich zu hoch – die Wasserbilanz kann daher nicht als vollständig ausgeglichen betrachtet werden, das tatsächliche Einzugsgebiet fällt somit womöglich etwas größer aus. Da der Austauschkoefizient für das um 0,14 km² größere Szenario 6 (Tabelle 33) jedoch bereits negative Werte annimmt (Tabelle 35), liegt die tatsächliche Einzugsgebietsgröße mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen 0,90 und 1,04 km² (näher bei 0,90 km²). Schneedynamik- und -schmelzfaktor liegen im erwarteten Bereich (0,51 bzw. 2,1 mm/(°C Tag)), die Bodenwasserspeicherkapazität ebenfalls (744 mm). Die sehr hohe Grundwasserspeicherkapazität (12394 mm) und lange Reaktionszeit (20 Tage) deuten darauf hin, dass das Grundwassersystem der Reihbachquelle keine schnelle Strömungskomponente aufweist – das Modell aufgrund seiner Struktur (Abbildung 2) jedoch gezwungen ist, eine solche zu simulieren und die Trägheit des Systems daher durch hohe Grundwasserspeicherkapazität und Reaktionszeit abzubilden versucht (vgl. Anmerkungen zu den Modellergebnissen für die Goldschmiedquelle).

Reihbachquelle (Szenario 5)

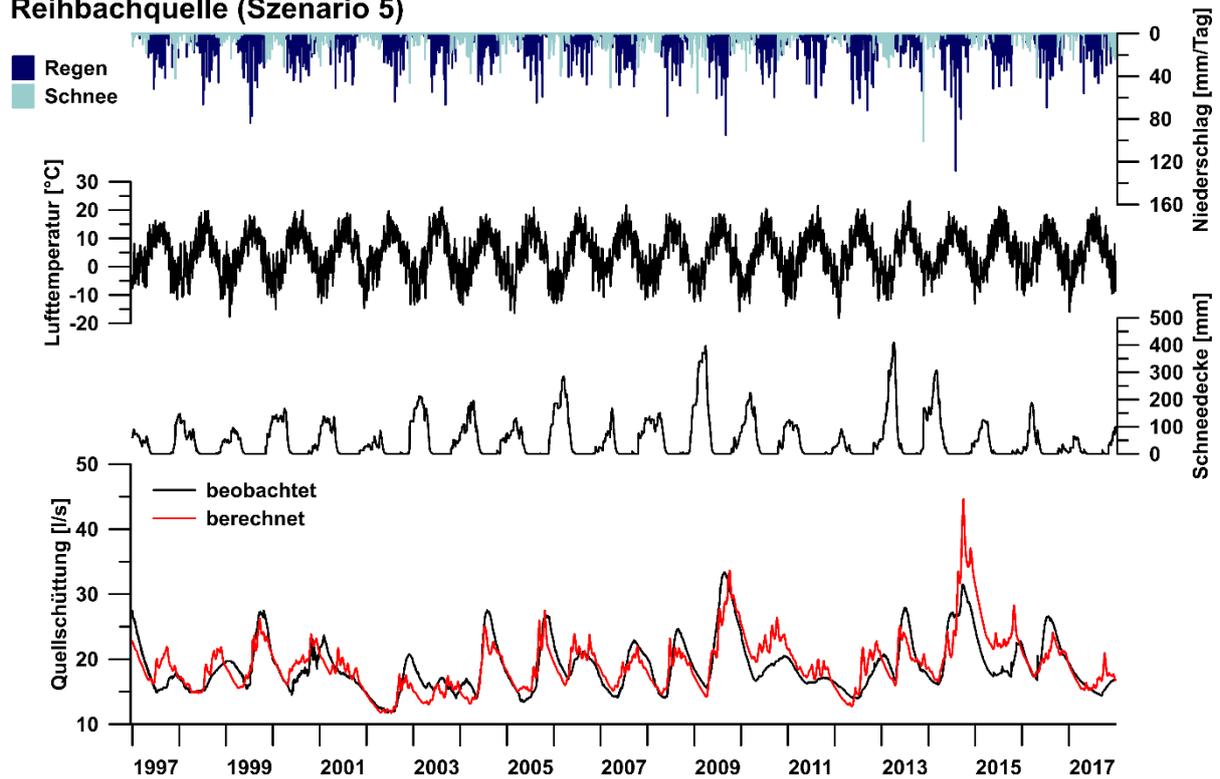


Abbildung 44: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848), Szenario 5.

Reihbachquelle (Szenario 5)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,79
Korrelationskoeffizient [-]	0,79
systematischer Fehler [-]	1,02
relative Variabilität [-]	1,03

Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich

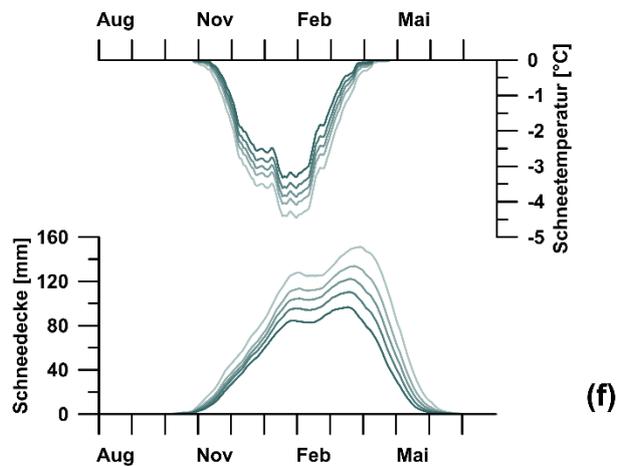
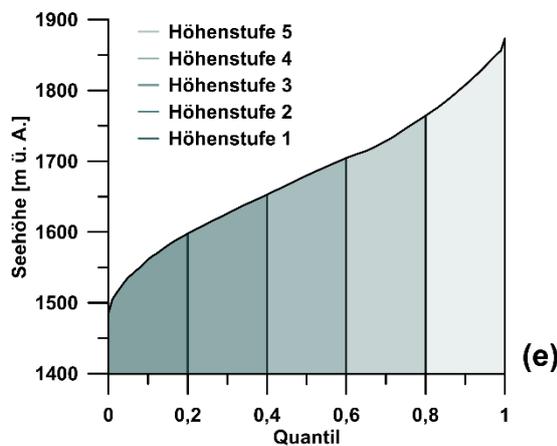
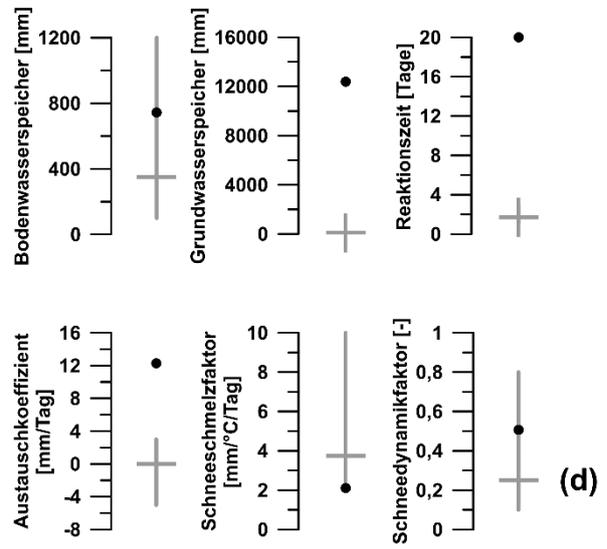
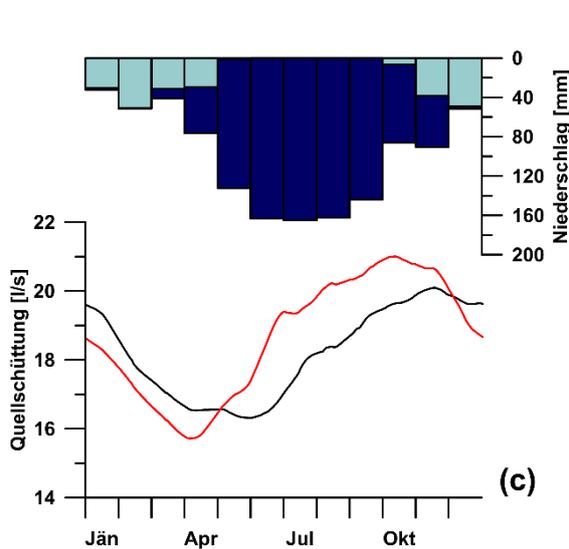
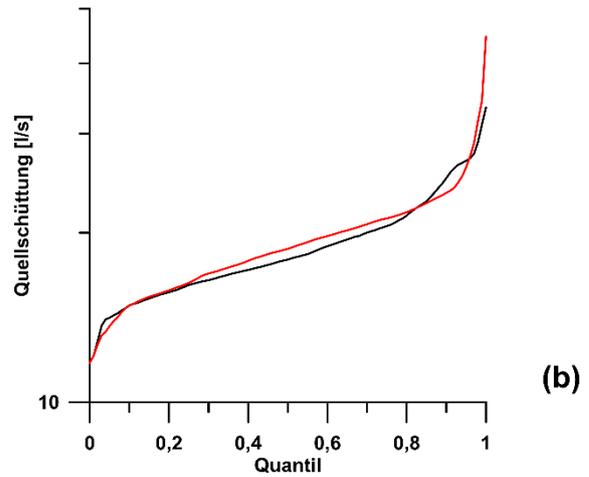
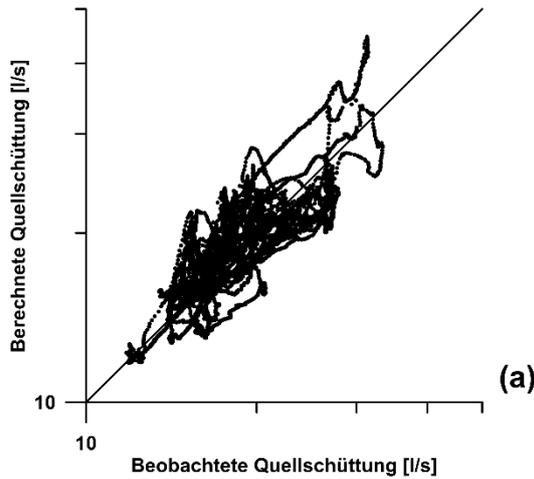


Abbildung 45: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848), Szenario 5. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.11. Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996)

Die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996) liegt auf 820 m ü. A. am Fuß des Dachsteingebirges im Gemeindegebiet Bad Mitterndorf (Bezirk Liezen) (Abbildung 1, Abbildung 46). Von 1.1.2008 bis 31.12.2017 ist eine kontinuierliche Zeitreihe der Quellschüttung vorhanden, die starken Schwankungen unterliegt, Spitzenwerte bis 1425 l/s erreicht, zeitweise aber auch trocken fällt. Die mittlere Schüttung liegt bei 315 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 163 und 271 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Die (hydro-)geologischen Gegebenheiten am östlichen Dachsteinmassiv sind im Abschnitt Ödensee Kaltwassertrichter bereits erläutert. Während die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung für den Ödensee Kaltwassertrichter teilweise mit den hydrogeologischen Eigenschaften des Einzugsgebiets identifiziert werden können, bilden die Ergebnisse für die Riedlbachquelle die dort beschriebenen hydrogeologischen Eigenschaften sehr genau ab. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die erläuterten hohen Fließgeschwindigkeiten und kurzen Verweilzeiten hingewiesen (Bauer, 1989; Scheidleder et al., 2001; Schubert, 2017). Die Einspeisung von Eosin im Bereich Achlesbrunn und Natriumnaphthionat im Bereich Miesbodensee führten ausschließlich zum Wiederaustritt an der Riedlbachquelle, 7 Tage nach Einspeisung am 13.8.1985 (Abbildung 46b). Die gegenüber dem Ödensee Kaltwassertrichter (2 – 4 Tage) etwas höheren Verweilzeiten sind auf die unterschiedlichen hydrologischen Gegebenheiten während der Markierungsversuche zurückzuführen (Bauer, 1989).

Für die Riedlbachquelle wurden fünfzehn potenzielle Einzugsgebiete ausgewiesen. Ihre wichtigsten Kenngrößen sind in Tabelle 36 zusammengefasst, ihre Lage in Abbildung 47 dargestellt.

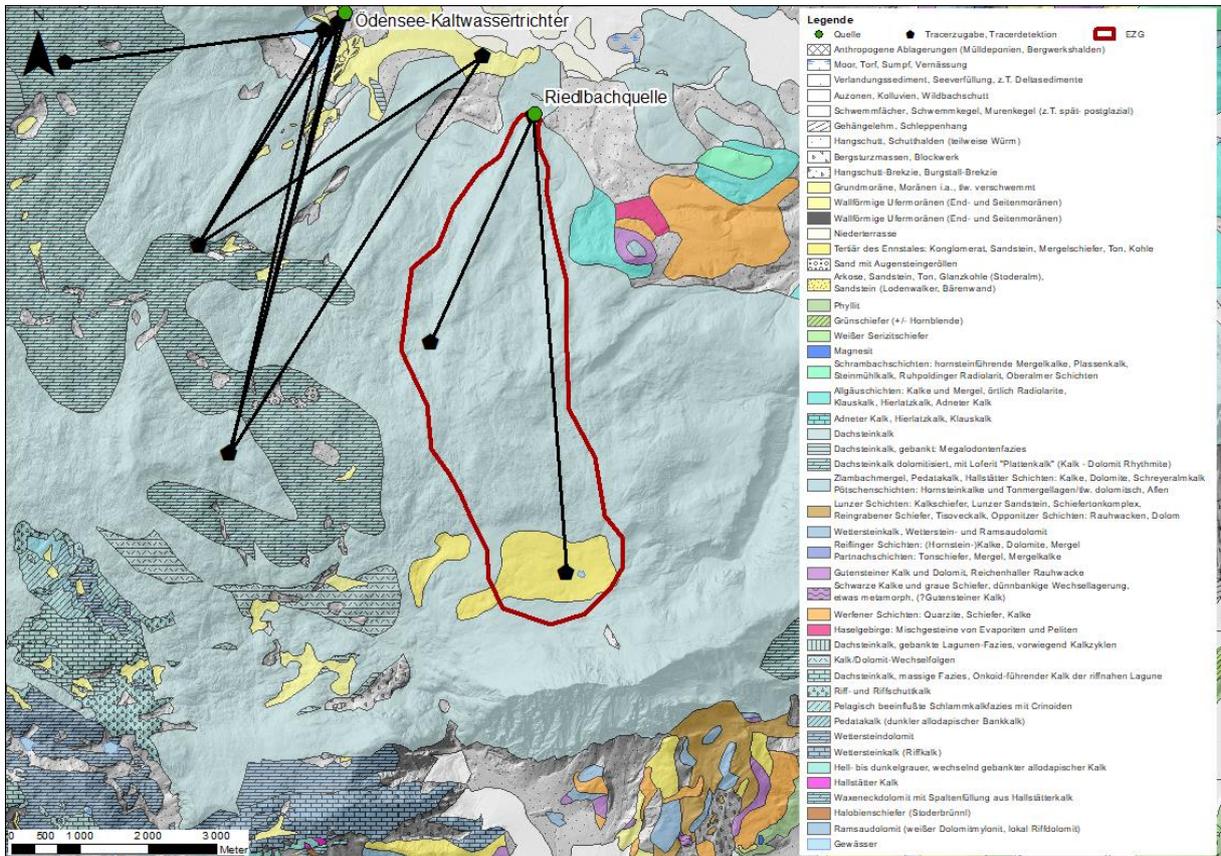
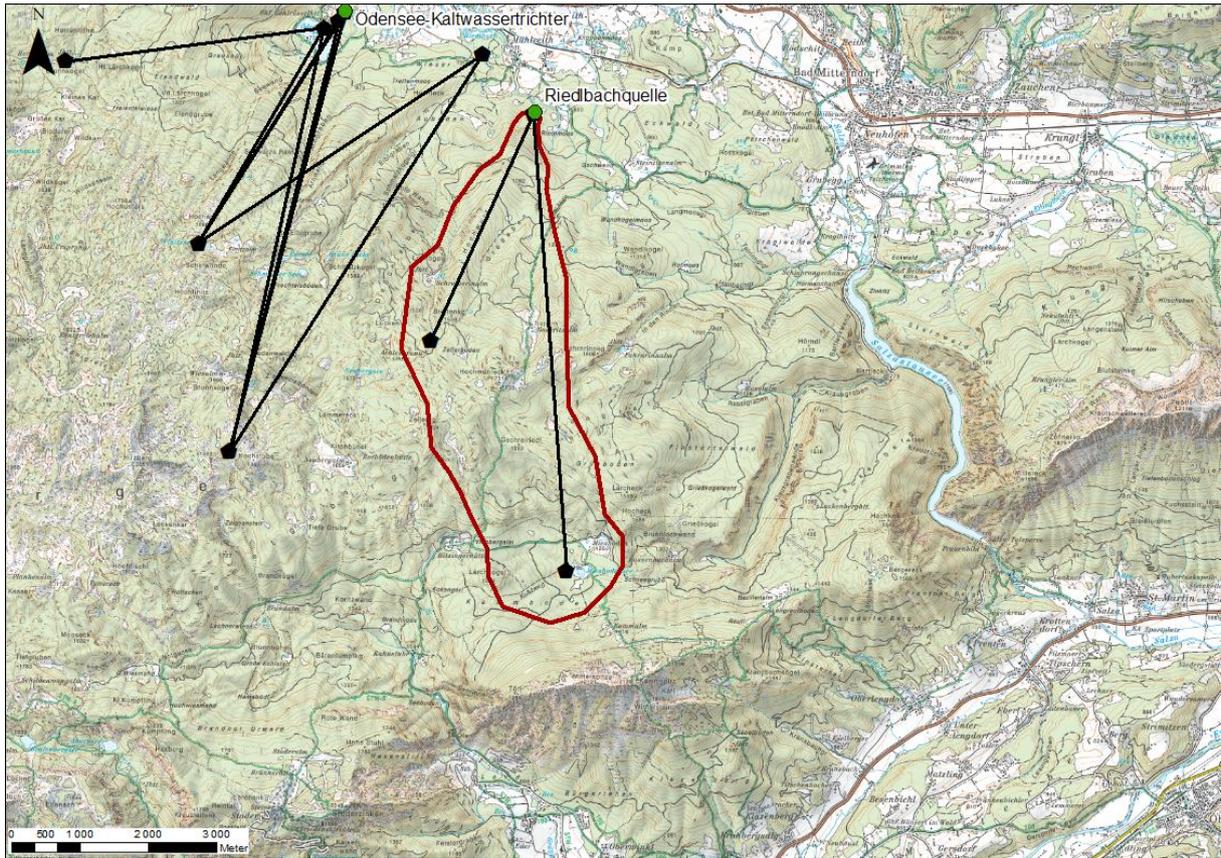


Abbildung 46: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Riedbachquelle (HZB-Nr. 395996). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 7 dargestellt.

Tabelle 36: Modellierete Szenarien für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	2,84	1260	748	1543	742
2	5,78	1337	888	1553	736
3	7,19	1411	918	1566	732
4	8,13	1406	918	1570	732
5	10,64	1448	918	1555	730
6	12,23	1444	918	1543	731
7	13,50	1455	918	1552	730
8	13,95	1494	1037	1639	725
9	17,86	1489	1310	1520	730
10	19,01	1531	1037	1630	724
11	21,20	1507	1313	1534	729
12	27,18	1533	1313	1578	726
13	28,64	1478	1313	1521	734
14	34,44	1498	1305	1525	733
15	40,22	1517	1312	1555	731

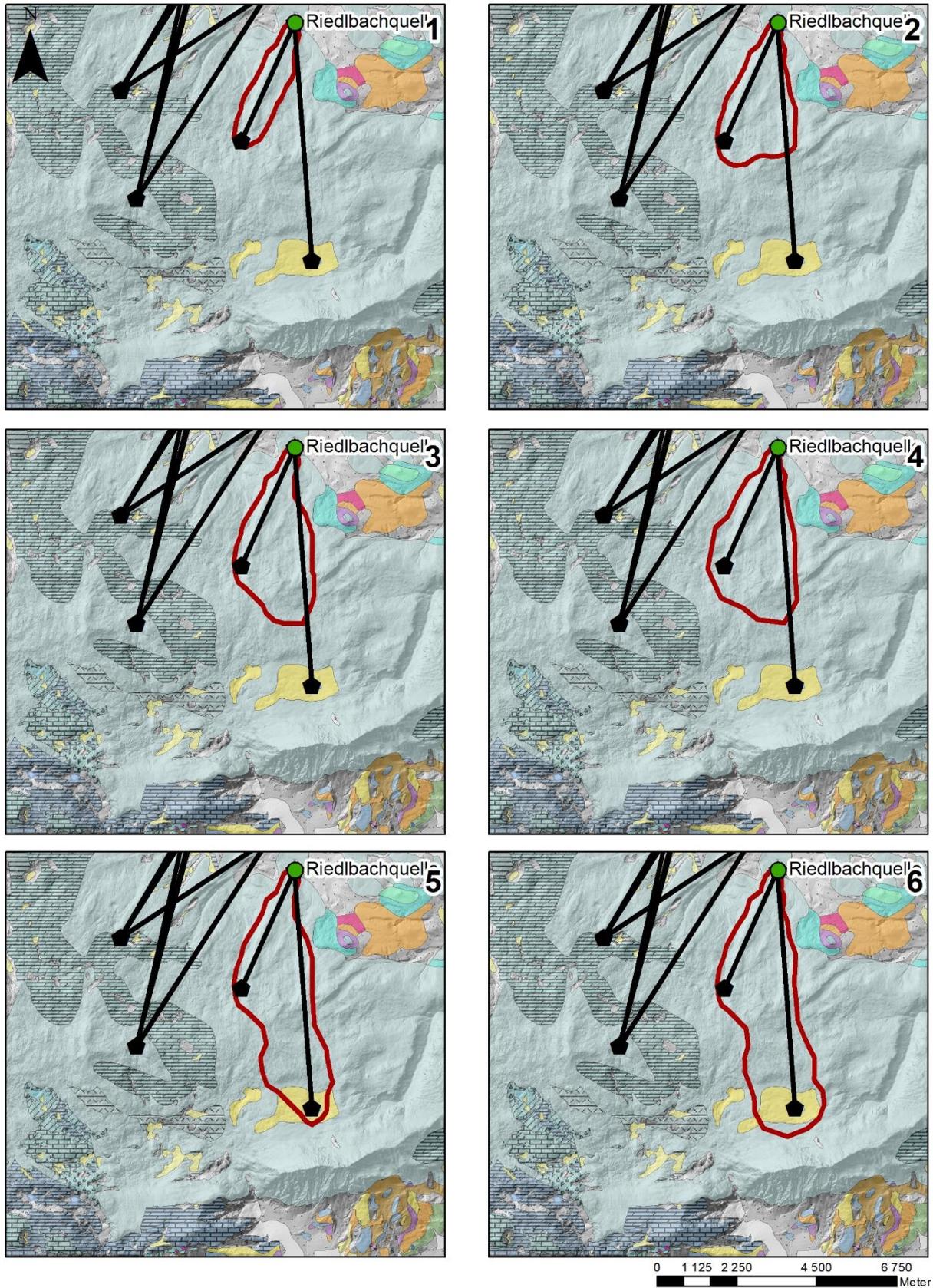


Abbildung 47: Modellierte Szenarien für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996).

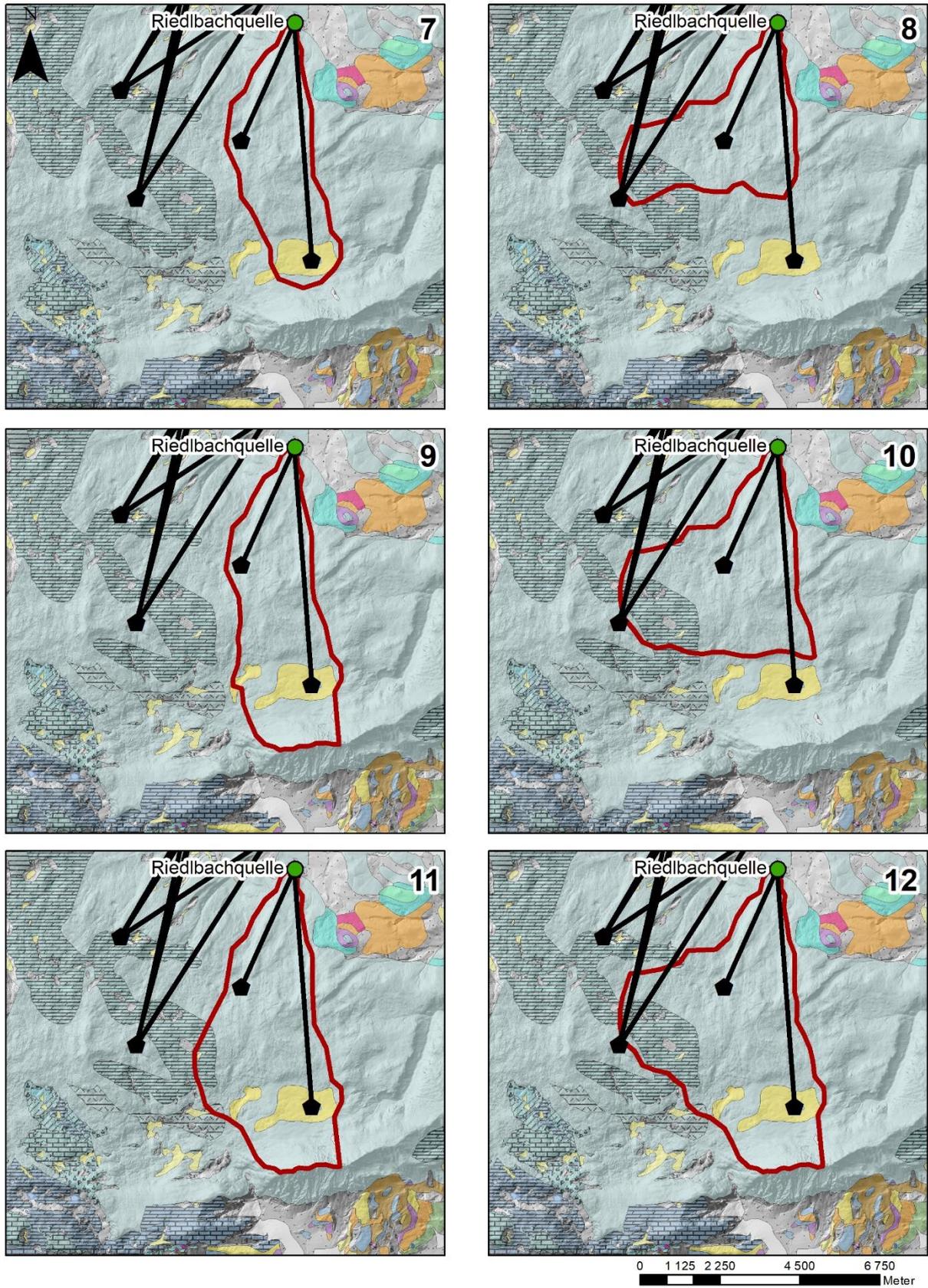
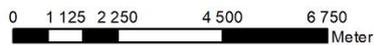
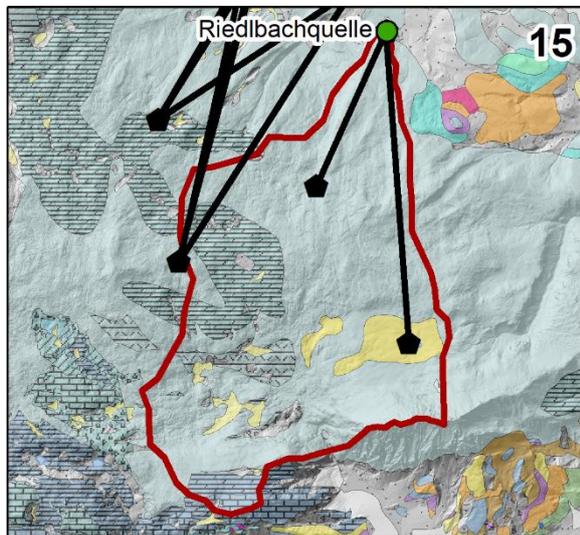
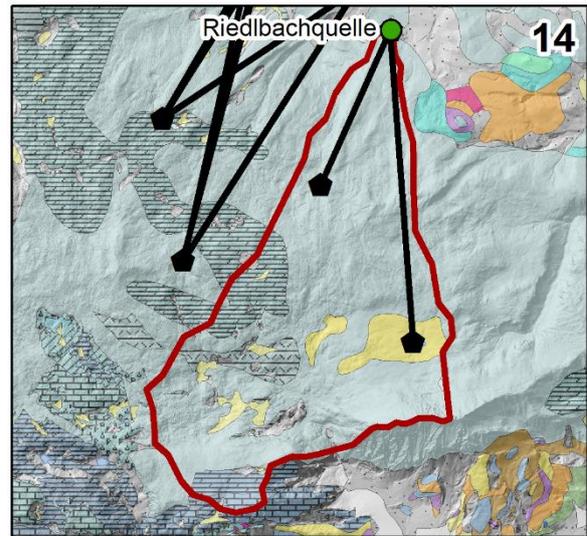
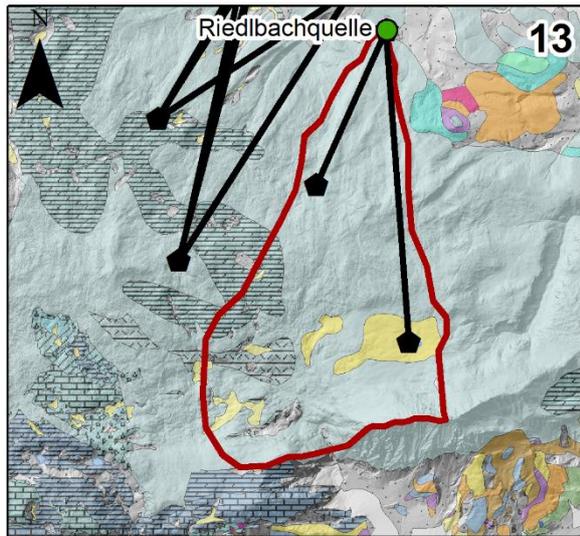


Abbildung 47 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996).



- Legende**
- Quelle
 - ▲ Tracerzugabe
 - EZG
 - Anthropogene Ablagerungen (Mülldeponien, Bergwerkshalden, Klarteiche)
 - Moor, Torf, Sumpf, Vernässung
 - Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt
 - Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät- postglazial)
 - Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
 - Bergsturmassen, Blockwerk
 - Hangschutt-Brekzie, Burgstall-Brekzie
 - Grundmoräne, Moränen i.a., tlw. verschwemmt
 - Wallförmige Ufermoränen (End- und Seitenmoränen)
 - Wallförmige Ufermoränen (End- und Seitenmoränen)
 - Niederterrasse
 - Tertiär des Ennstales i.a.: Konglomerat, Sandstein, Mergelschiefer, Ton, Kohle
 - Sand mit Augensteingeröllen
 - Arkose, Sandstein, Ton, Glanzkohle (Stoderalm), Sandstein (Lodenwalker, Bärenwand)
 - Phyllit
 - Magnesit
 - Schrambachschichten, Oberalmer Schichten
 - Allgäuschichten: Kalke und Mergel, Klauskalk, Hierlatzkalk, Adneter Kalk
 - Adneter Kalk, Hierlatzkalk, Klauskalk
 - Dachsteinkalk
 - Dachsteinkalk, gebankt: Megalodontenfazies
 - Dachsteinkalk dolomitisiert, mit Loferit "Plattenskalk" (Kalk - Dolomit Rhythmitie)
 - Zlambachmergel, Pedatakalk, Hallstätter Schichten, Pötschenschichten
 - Lunzer Schichten, Reingrabener Schiefer, Tisoveckalk, Opponitzer Schichten
 - Wettersteinkalk, Wetterstein- und Ramsaudolomit
 - Gutensteiner Kalk und Dolomit, Reichenhaller Rauhwacke
 - Schwarze Kalke und graue Schiefer, dünnbankige Wechsellagerung, etwas metamorph, (?Gutensteiner Kalk)
 - Werfener Schichten: Quarzite, Schiefer, Kalke
 - Haselgebirge: Mischgesteine von Evaporiten und Peliten
 - Dachsteinkalk, gebankte Lagunen-Fazies, vorwiegend Kalkzyklen
 - Kalk/Dolomit-Wechselfolgen
 - Dachsteinkalk, massige Fazies, Onkoid-führender Kalk der riffnahen Lagune
 - Riff- und Riffschuttkalk
 - Pelagisch beeinflusste Schlammkalkfazies mit Crinoiden
 - Pedatakalk (dunkler allodapischer Bankkalk)
 - Waxeneckkalk
 - Wettersteindolomit
 - Wettersteinkalk (Riffkalk)
 - Hell- bis dunkelgrauer, wechselnd gebankter allodapischer Kalk
 - Hallstätter Kalk
 - Waxeneckdolomit mit Spaltenfüllung aus Hallstätterkalk
 - Halobien-schiefer (Stoderbrünnl)
 - Ramsaudolomit (weißer Dolomitmylonit, lokal Riffdolomit)
 - Gewässer

Abbildung 47 (Forts.): Modellerte Szenarien für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996).

Tabelle 37: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelations- koeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,70	0,77	0,84	0,91
2	0,81	0,81	0,99	1,00
3	0,81	0,81	0,99	1,00
4	0,81	0,81	1,00	1,00
5	0,81	0,81	1,01	1,01
6	0,79	0,79	1,01	1,01
7	0,79	0,79	1,02	1,01
8	0,81	0,81	1,02	1,01
9	0,77	0,77	1,03	1,01
10	0,80	0,80	1,03	1,01
11	0,78	0,78	1,04	1,01
12	0,78	0,78	1,04	1,00
13	0,75	0,75	1,05	1,01
14	0,72	0,73	1,03	1,01
15	0,76	0,77	1,05	1,01

Tabelle 37 und Tabelle 38 fassen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Die Szenarien zeigen überwiegend sehr gute – in zwei Fällen gute – Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie (KGE zwischen 0,70 und 0,81). Sie sind in der Lage, die Form des Hydrographen in geeigneter Weise abzubilden (Korrelationskoeffizienten zwischen 0,72 und 0,81), erfassen mit Ausnahme von Szenario 1 die Schwankungsbreite zuverlässig (relative Variabilitäten zwischen 0,99 und 1,05) und weisen – ebenfalls mit Ausnahme von Szenario 1 – eine ausgeglichene Wasserbilanz auf (systematische Fehler zwischen 1,00 und 1,01).

Tabelle 38: Optimierte Modellparameter für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoeffizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	4	10,0	92	2,0	0,99	5,8
2	14	7,9	196	1,4	0,97	2,4
3	13	5,8	269	1,4	0,96	2,7
4	12	4,0	313	1,4	0,96	2,8
5	15	-0,8	429	1,5	0,95	3,0
6	15	-4,9	448	1,5	0,95	3,0
7	12	-9,5	462	1,5	0,94	3,2
8	8	-15,3	500	1,4	0,90	3,4
9	10	-23,2	510	1,3	0,93	3,3
10	2	-39,1	546	1,3	0,87	3,6
11	3	-44,1	602	1,3	0,92	3,7
12	0	-75,6	616	1,2	0,91	3,6
13	6	-63,0	625	1,2	0,94	3,6
14	685	-28,7	215	1,3	0,86	4,2
15	0	-124,0	708	1,2	0,92	3,8

Die modellierten Szenarien weisen durchwegs plausible Schneeschmelzfaktoren (c_2 zwischen 2,4 und 5,8 mm/(°C Tag)) aber unplausibel hohe Schneedynamikfaktoren ($c_1 > 0,86$) auf. Die tendenziell kurze Reaktionszeit (mit Ausnahme von Szenario 1 $\leq 1,5$ Tage) stimmt ausgezeichnet mit den kurzen Verweilzeiten der Markierungsstoffe (Bauer, 1989) und kurzen mittleren Verweilzeiten auf Basis der ^{18}O Analyse (Scheidleder et al., 2001) überein und unterstreicht die Bedeutung des stark verkarsteten Dachsteinkalks als entscheidender Grundwasserleiter (vgl. Erläuterungen zum Ödensee Kaltwassertrichter). Die hohen Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) passen ebenfalls in dieses Bild, sie spiegeln die hohe Speicherkapazität des ausgedehnten Karstsystems wider. Die niedrigen Kapazitäten des Bodenwasserspeichers (x_1) entsprechen der alpinen, verkarsteten Dachsteinfläche, wobei die besonders niedrigen Werte < 10 mm angesichts des großteils bewaldeten Einzugsgebietes vorsichtig bewertet werden müssen. Die Austauschkoeffizienten (x_2) gleichen die A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Wasserbilanz aus, da keine Informationen zu allogener Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Riedlbachquelle (keine Oberflächengerinne am verkarsteten Dachsteinplateau) bekannt sind, werden Austauschkoefizienten nahe 0 mm/Tag als plausibel bewertet.

Abbildung 48 und Abbildung 49 stellen die Modellergebnisse für das am plausibelsten erachtete Szenario 7 zusammen. Die niedrige Bodenwasserspeicherkapazität (12 mm) und hohe Grundwasserspeicherkapazität (462 mm) entsprechen der oben beschriebenen hydrogeologischen Situation im Einzugsgebiet, ebenso die tendenziell niedrige Reaktionszeit von 1,5 Tagen. Der Schneeschmelzfaktor (3,2 mm/(°C Tag)) liegt im Erwartungsbereich. Auf die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem (mit 0,94 sehr hohen) Schneedynamikfaktor wurde bereits eingegangen. Das Modell ist in der Lage, die Abflussverhältnisse über ein breites Spektrum an hydrologischen Bedingungen gut abzubilden, lediglich besonders niedrige Quellschüttungen werden nur ungenügend erfasst (Abbildung 49a,b). Die ausgeprägte Saisonalität der Riedlbachquelle wird zufriedenstellend abgebildet (Abbildung 49c).

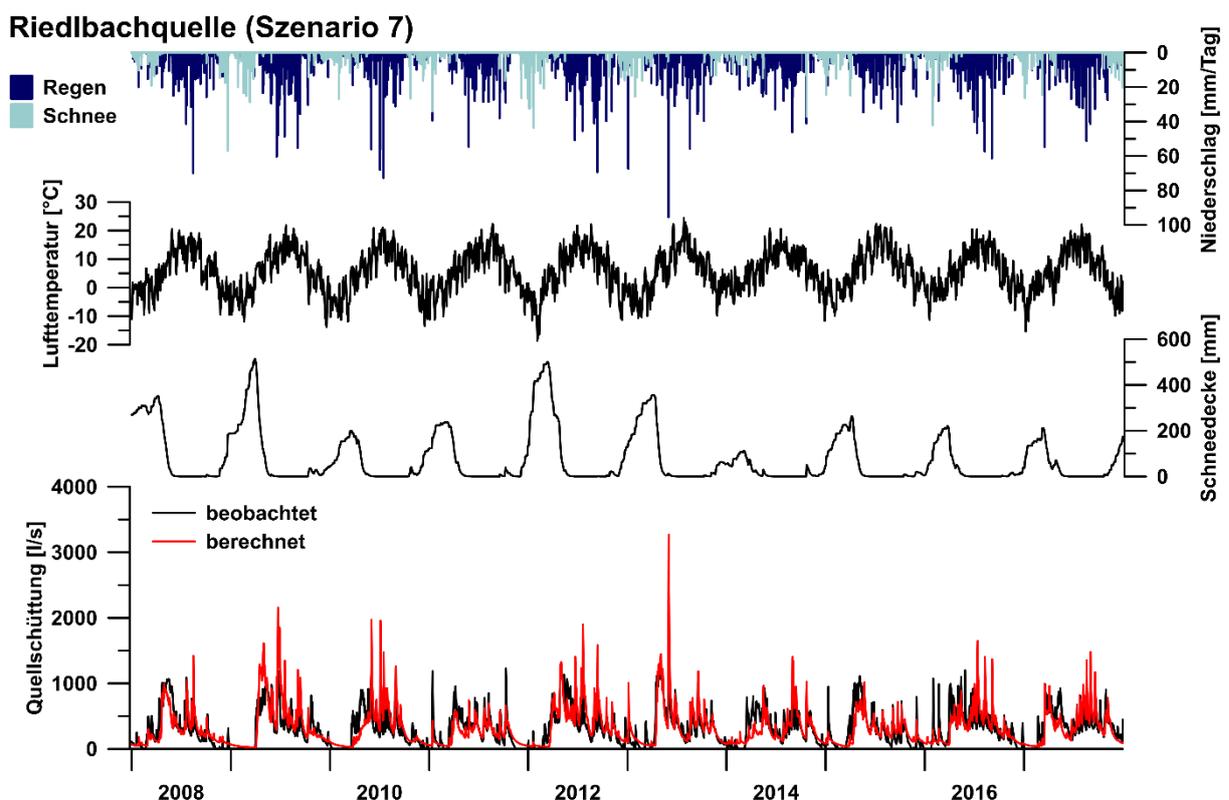


Abbildung 48: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996), Szenario 7.

Riedlbachquelle (Szenario 7)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,79	Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Korrelationskoeffizient [-]	0,79	 Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
systematischer Fehler [-]	1,01	 Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich
relative Variabilität [-]	1,02			

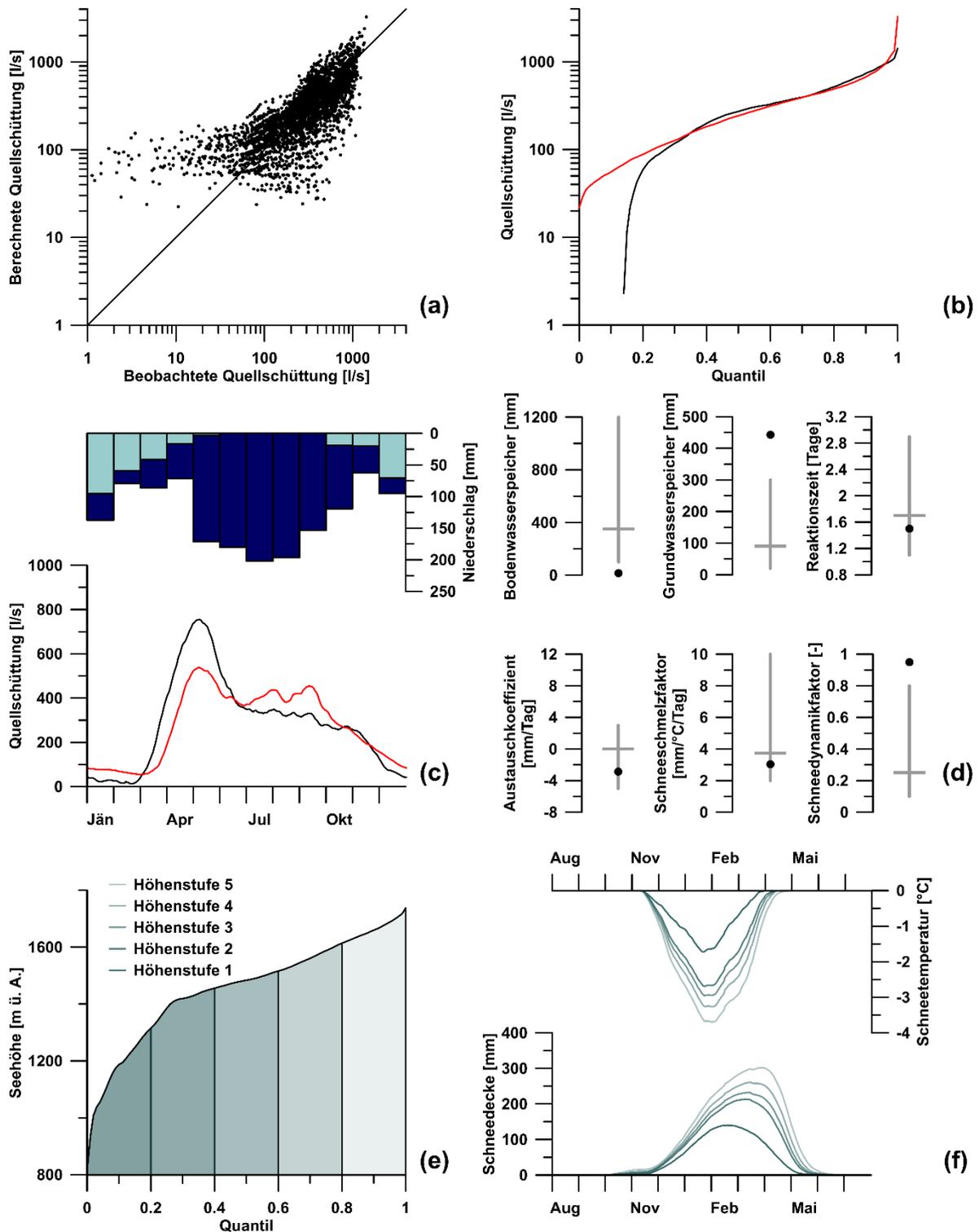


Abbildung 49: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Riedlbachquelle (HZB-Nr. 395996), Szenario 7. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.12. Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822)

Die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822) liegt am Fuß der Ostflanke des Großen Königkogels (1574 m) in den Mürzsteiger Alpen, auf einer Höhe von 820 m ü. A. (Abbildung 1, Abbildung 50a). Politisch befindet sie sich im Gebiet der Gemeinde Neuberg an der Mürz (Bezirk Bruck-Mürzzuschlag). Von 1.7.1997 bis 13.1.2014 liegt eine weitgehend kontinuierliche Zeitreihe vor, gelegentlich unterbrochen von kürzeren Datenlücken (3,7 %). Die Quellschüttung schwankt zwischen 103 und 1164 l/s (Mittelwert 381 l/s), die elektrische Leitfähigkeit zwischen 180 und 334 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei einem Mittelwert von 285 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Die kleinräumig gegliederte Landschaft wird von bewaldeten, durch tief eingeschnittene Täler gegeneinander abgegrenzten Gebirgsstöcken dominiert und spiegelt damit die stark variable Geologie des Untergrundes wider. Der Königkogel wird ebenso wie die Tonion und die Südflanken des Proles von der Mürzalpendecke aufgebaut (Juvavisches Deckensystem; Schmid et al., 2004; Mandl, 2016). Lithologisch besteht seine Ostflanke überwiegend aus Wettersteinkalk und -dolomit, dessen Hangendgrenze durch ein deutliches Erosionsrelief gezeichnet ist. Darüber folgen gebankte Aflenzer und Hallstätter Kalke, die gegen das Hangende graduell von Mergeln der Zlambachschichten abgelöst werden. Die geologische Bearbeitung ist jedoch lückenhaft und infolge der unübersichtlichen geologischen Struktur mit einiger Unsicherheit behaftet (Kristan-Tollmann und Tollmann, 1962; Tollmann, 1976; Joanneum Research, 1999; Mandl, 2001a,b, 2016). Die intensive Verkarstung des Gebirgsstockes ist durch das ausgedehnte, 580 m tief reichende Tonion-Höhlensystem (Fledermausschacht und Teufelskessel) gut dokumentiert (Koppenwallner, 1964; Repis, 1964; Verband Österreichischer Höhlenforscher, 2021). Ein mit Uranin durchgeführter Markierungsversuch bestätigt die Verbindung zwischen Herrenboden und Roßlochquelle (Einspeisung in eine Schwinde am Herrenboden am 5.6.1969; Assadian, 1970).

Tabelle 39 und Abbildung 51 stellen die zwölf modellierten Szenarien und ihre wichtigsten Kenngrößen zusammen.

Tabelle 39: Modellierete Szenarien für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	4,44	1066	682	1356	710
2	5,98	1095	754	1350	708
3	10,36	1124	754	1354	709
4	13,64	1214	815	1402	704
5	13,75	1275	879	1406	702
6	15,14	1151	754	1376	706
7	16,64	1265	879	1407	702
8	18,86	1167	759	1364	707
9	19,75	1235	879	1393	703
10	31,91	1228	879	1381	704
11	35,91	1224	879	1383	704
12	45,97	1201	879	1379	706

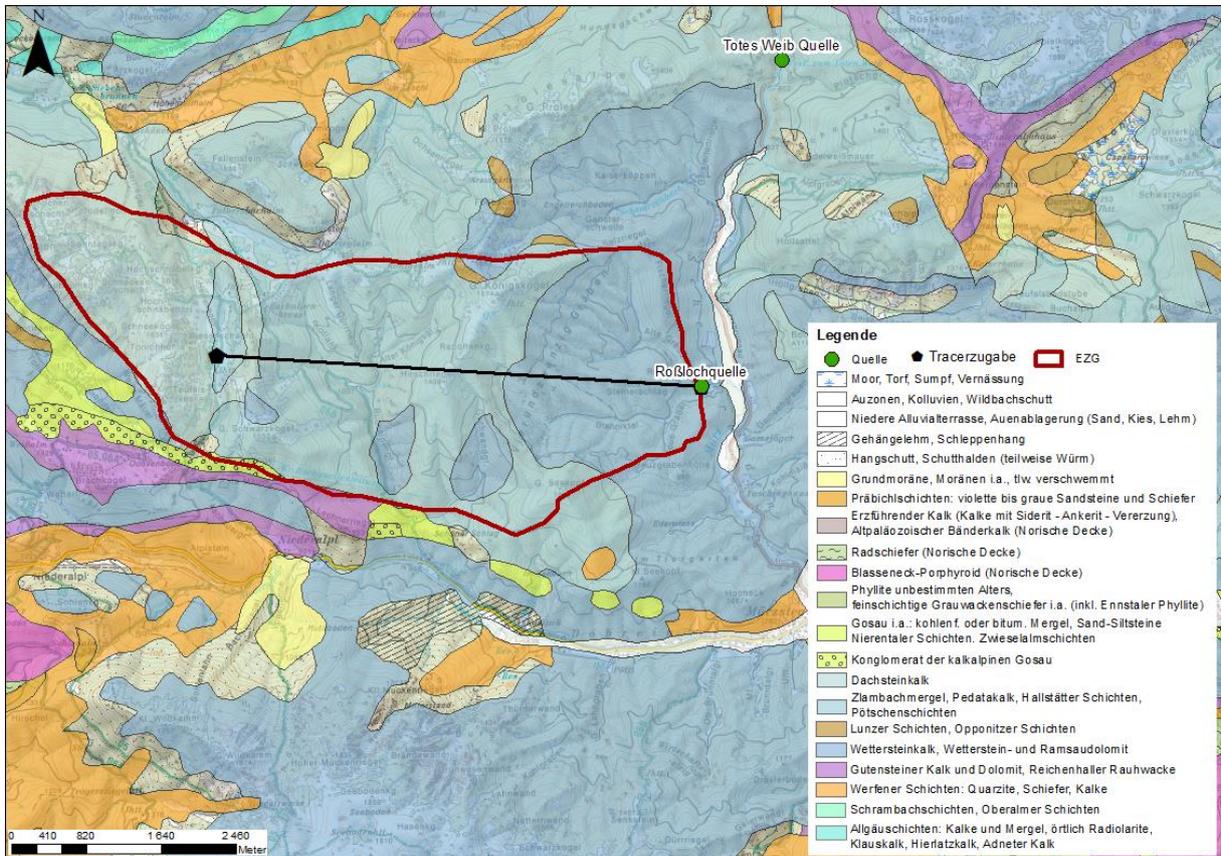
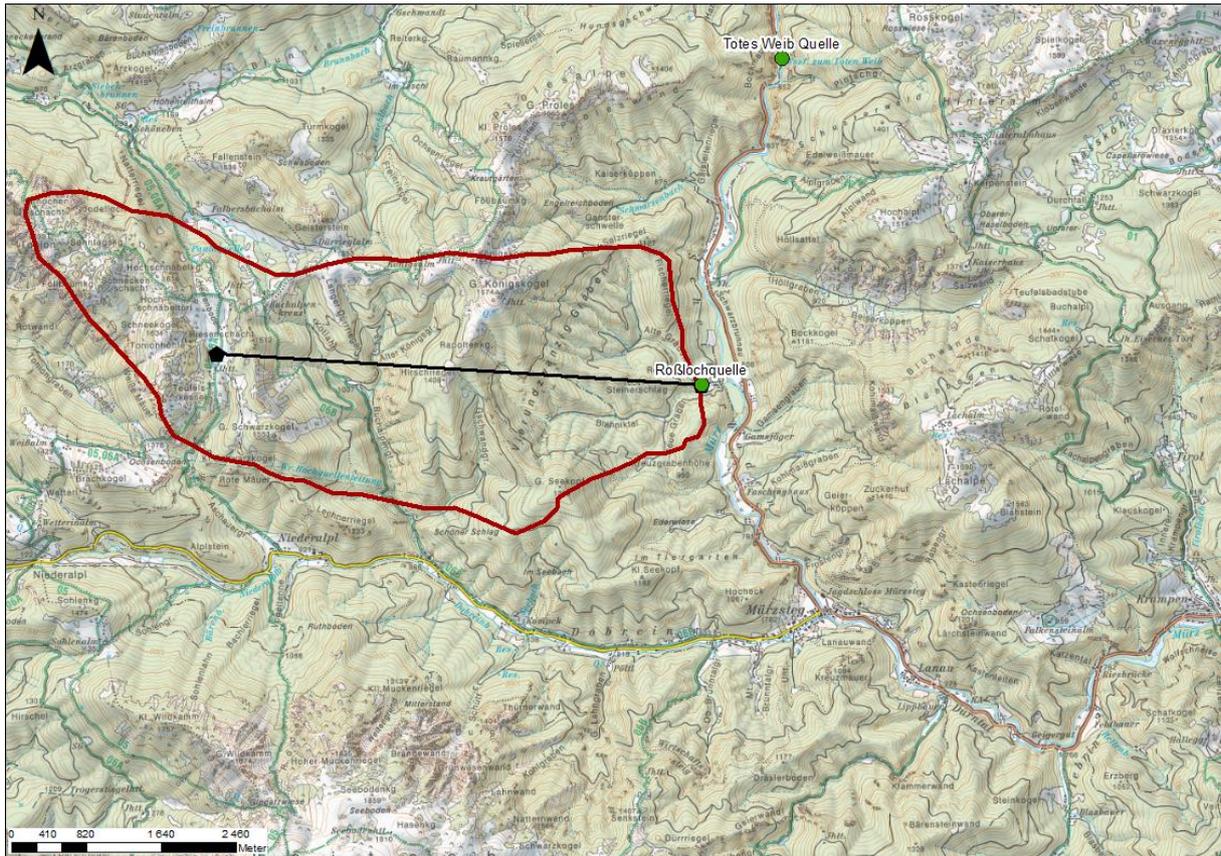


Abbildung 50: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 7 dargestellt.

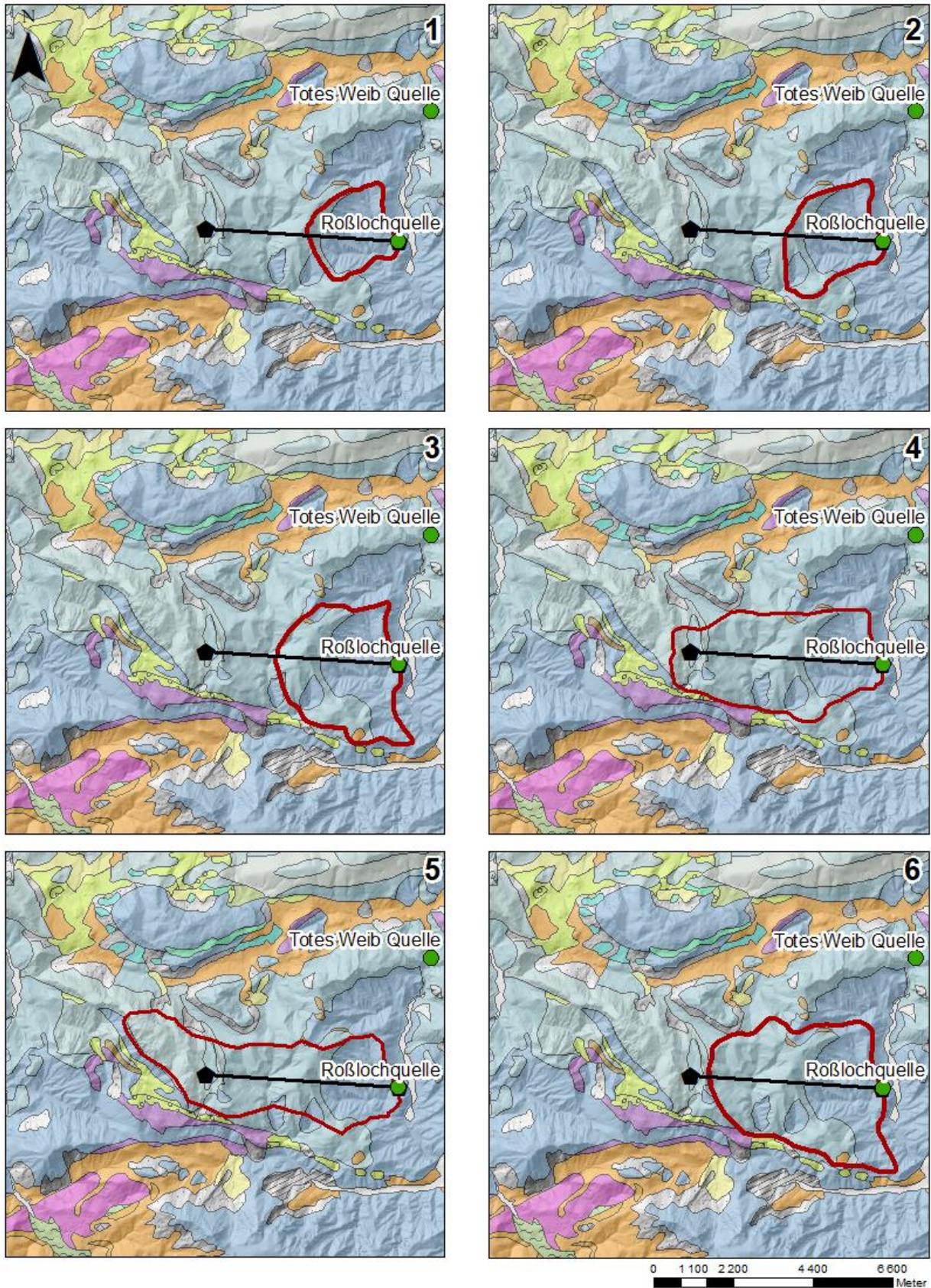


Abbildung 51: Modellierte Szenarien für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822).

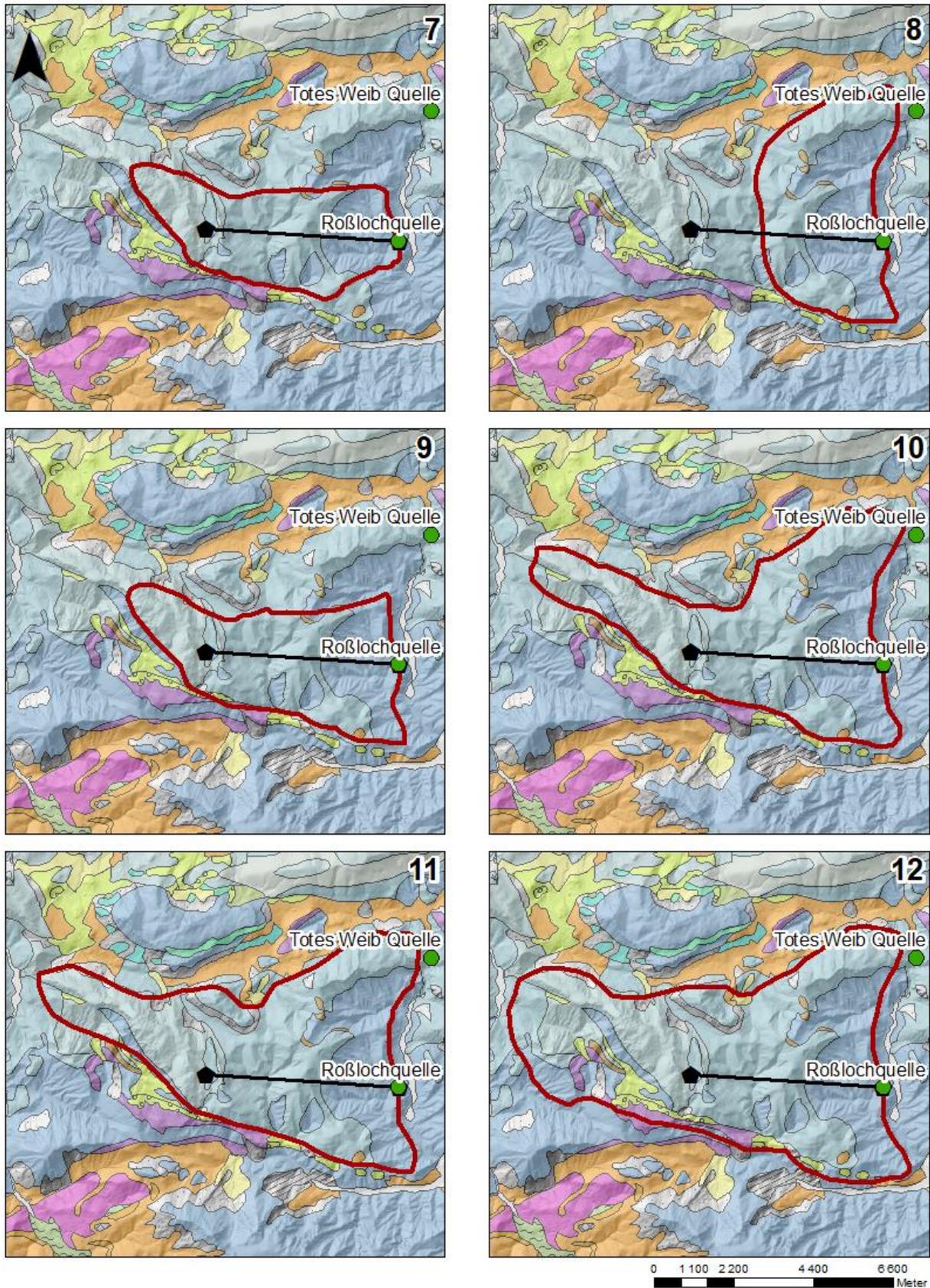


Abbildung 51 (Forts.): Modellierte Szenarien für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822).

Legende

-  Quelle
-  Tracerzugabe
-  EZG
-  Moor, Torf, Sumpf, Vernässung
-  Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt
-  Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel
-  Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
-  Hangschutt-Brekzie, Burgstall-Brekzie
-  Grundmoräne, Moränen i.a., tlw. verschwemmt
-  Präbichlschichten: violette bis graue Sandsteine und Schiefer
-  Sandstein, Phyllit (mit Graphit, Veitscher Decke)
-  Helle, gebänderte, marmorisierte Kalke
-  Helle Kalke mit grünen Schiefen
-  Konglomerat von Radmer
-  Erzführender Kalk (Kalke mit Siderit - Ankerit - Vererzung),
-  Altpaläozoischer Bänderkalk (Norische Decke)
-  Vererzungszonen in erzführendem Kalk
-  Blasseneck-Porphyr (Norische Decke)
-  Stärker metamorphe Randzonen des Blasseneck-Porphyr
-  Grauwackenschiefer
-  Grauwackenschiefer stärker phyllitisch metamorph
-  Lagen von Konglomerat in Grauwackenschiefer
-  Lagen von Quarzit in Grauwackenschiefer
-  Graphitische Lagen in Grauwackenschiefer
-  Dunkle, plattige Lagen in Grauwackenschiefer
-  Phyllite unbestimmten Alters,
-  feinschichtige Grauwackenschiefer i.a. (inkl. Ennstaler Phyllite)
-  Grünschiefer
-  Diabas-Amphibolit bei Gaishorn
-  Grünschiefer der Albit-Epidot-Amphibolit-Fazies, bzw. Hornblende-Garbenschiefer,
-  Grobkristalline Marmore, höher metamorph
-  Grünschiefer in Verbindung mit grobkristallinen Marmoren
-  Schrambachschichten, Oberalmer Schichten
-  Allgäuschichten: Kalke und Mergel, örtlich Radiolarite,
-  Klauskalk, Hierlatzkalk, Adneter Kalk
-  Dachsteinkalk
-  Hauptdolomit
-  Lunzer Schichten, Opponitzer Schichten
-  Wettersteinkalk, Wetterstein- und Ramsaudolomit
-  Reiflinger Schichten, Partnachschiefer
-  Werfener Schichten: Quarzite, Schiefer, Kalke
-  Semmeringquarzit, Plattquarzit, Alpiner Veruccano

Abbildung 51 (Forts.): Modellerte Szenarien für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822).

Tabelle 40: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,78	0,79	1,06	0,99
2	0,79	0,80	1,05	1,00
3	0,83	0,83	1,01	1,00
4	0,84	0,84	0,99	1,00
5	0,85	0,85	0,98	1,00
6	0,83	0,83	0,99	1,02
7	0,83	0,83	0,98	1,02
8	0,81	0,81	0,99	1,02
9	0,81	0,81	0,99	1,02
10	0,81	0,81	1,02	0,98
11	0,81	0,81	1,02	0,98
12	0,80	0,81	1,02	0,98

Tabelle 40 und Tabelle 41 fassen die Ergebnisse der zwölf modellierten Szenarien zusammen. Alle Szenarien zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie (KGE zwischen 0,78 und 0,83; Korrelationskoeffizienten zwischen 0,79 und 0,83), bilden ihre Schwankungsbreite relativ gut ab (relative Variabilität zwischen 0,99 und 1,06) und weisen geringe systematische Fehler auf (zwischen 0,98 und 1,02). Die tendenziell hohen Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) und kurzen Reaktionszeiten (x_4) stehen im Einklang mit dem intensiv verkarsteten, ausgedehnten Massiv (kurze Verweilzeiten aufgrund des raschen Abflusses in gut entwickelten Karströhren; hohe Speicherfähigkeit in einem ausgedehnten Feinkluftsystem). Die Szenarien 1 – 6 und 10 weisen die für alpine Einzugsgebiete erwarteten niedrigen Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) auf. Die Schneeschmelzfaktoren (c_2) liegen durchwegs im erwarteten Bereich, die Schneedynamikfaktoren (c_1) sind sehr hoch. Da keine Angaben zu allogener Grundwasserneubildung vorliegen wird ein Austauschkoefizient (x_2) nahe bei 0 mm/Tag als plausibel erachtet.

Tabelle 41: Optimierte Modellparameter für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoeffizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	21	30,4	595	1,3	0,98	2,1
2	18	29,3	911	1,5	0,98	2,6
3	522	8,9	510	1,7	0,83	2,0
4	41	1,5	2031	2,0	0,89	3,4
5	42	0,9	2009	2,0	0,83	4,0
6	58	-1,2	2019	2,1	0,90	2,9
7	55	-12,2	2154	2,0	0,85	4,3
8	62	-17,9	2041	2,1	0,87	3,2
9	49	-27,8	2138	2,1	0,83	4,4
10	2065	-23,3	327	1,3	0,86	3,1
11	2435	-28,0	318	1,4	0,92	3,5
12	2554	-39,2	329	1,3	0,91	3,2

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Ergebnisse für Szenario 7, das infolge des niedrigen Austauschkoeffizienten als zutreffend betrachtet wird. Beobachtete und berechnete Quellschüttungsganglinie stimmen sehr gut überein (Abbildung 52, Abbildung 53a; KGE 0,83; Korrelationskoeffizient 0,83). Die Schwankungsbreite der Quellschüttung wird gut abgebildet (relative Variabilität 0,98), das Modell weist lediglich für die höchsten Abflussspitzen eine systematische Überschätzung auf (Abbildung 53b), die sich in einzelnen, deutlich zu stark berechneten Abflussspitzen äußert (Abbildung 52). Der negative Austauschkoeffizient entspricht der hydrologischen Situation, mit mehreren das Einzugsgebiet entwässernden Bächen (Abbildung 50). Die Saisonalität der Schüttungsganglinie wird insbesondere während der Schneeschmelze im Frühjahr deutlich unterschätzt, während der Herbst- und Wintermonate dagegen systematisch überschätzt (Abbildung 53c).

Roßlochquelle (Szenario 7)

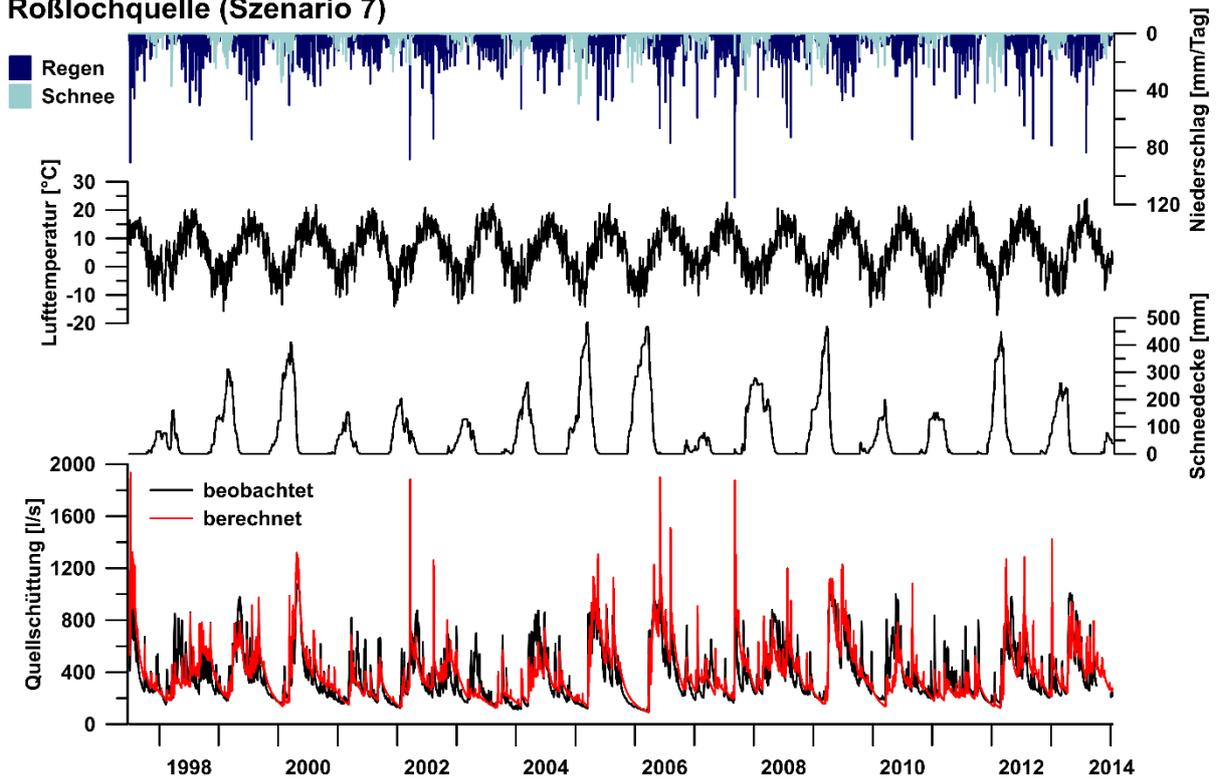


Abbildung 52: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822), Szenario 7.

Bodenwasser- und Grundwasserspeicherkapazität entsprechen mit 55 bzw. 2154 mm den oben ausgeführten Erwartungen für alpine, intensiv verkarstete Einzugsgebiete (Abbildung 53d). Reaktionszeit (2,0 Tage) und Schneeschmelzfaktor (4,3 mm/(°C Tag)) liegen innerhalb des erwarteten Bereiches (Abbildung 53d). Der Schneedynamikfaktor liegt mit 0,85 dagegen sehr hoch (Abbildung 53d). Trotz der insgesamt zufriedenstellenden Ergebnisse wird festgehalten, dass die Auswahl aufgrund der geringen hydrogeologischen Datenlage zum Einzugsgebiet mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist.

Roßlochquelle (Szenario 7)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,83
Korrelationskoeffizient [-]	0,83
systematischer Fehler [-]	1,02
relative Variabilität [-]	0,98

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
■ Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert	— Typischer Wertebereich		
■ Regen	— berechnet	●			

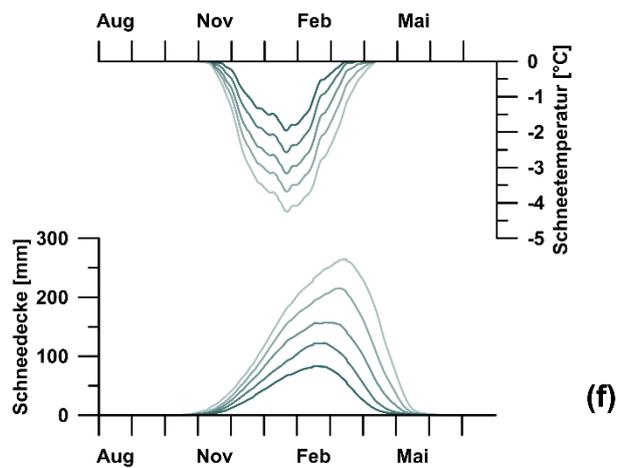
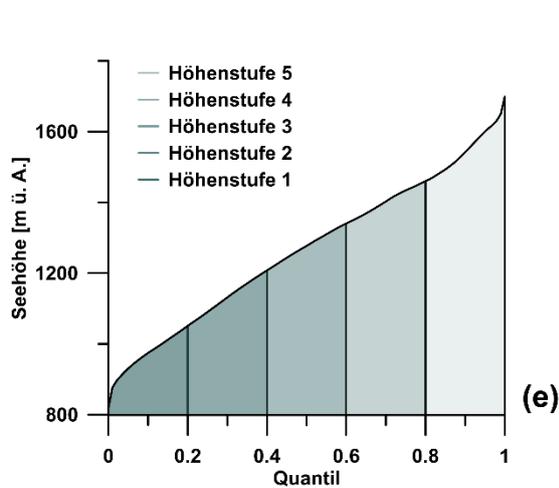
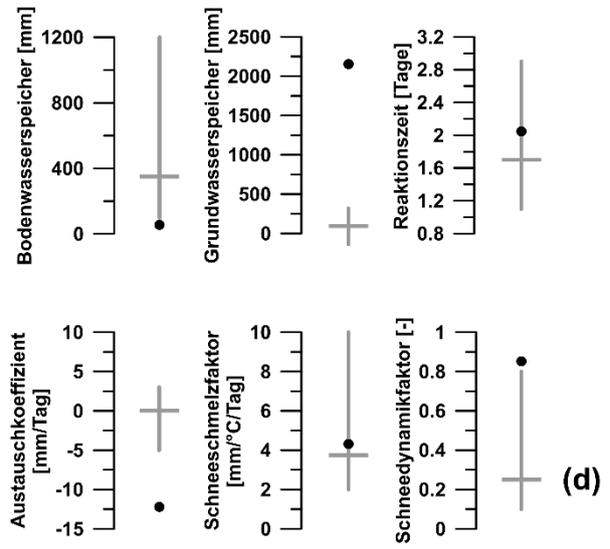
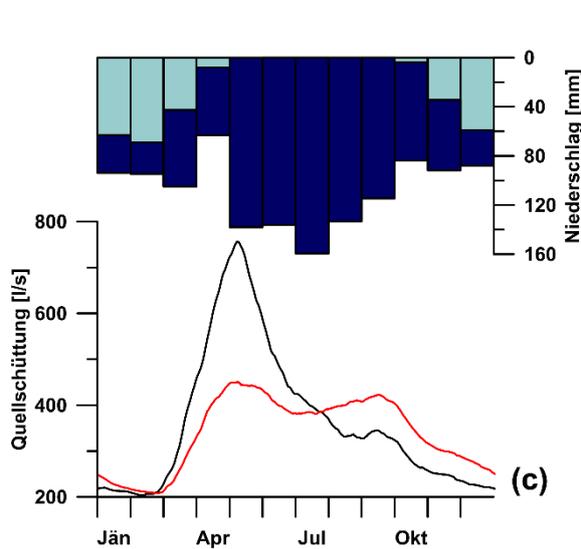
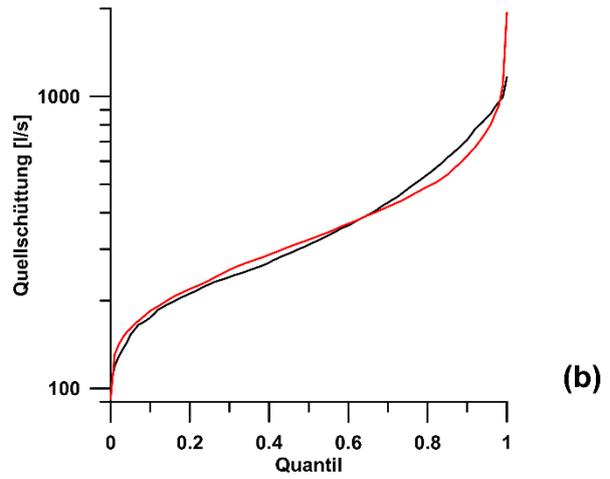
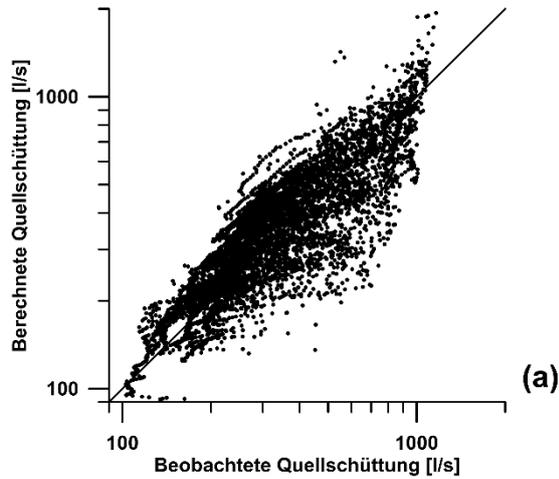


Abbildung 53: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Roßlochquelle (HZB-Nr. 395822), Szenario 7. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.13. Sagtümpel (HZB-Nr. 395863)

Der Sagtümpel (HZB-Nr. 395863) liegt auf 983 m ü. A. am Fuß des Toten Gebirges im Gemeindegebiet Bad Mitterndorf (Bezirk Liezen) (Abbildung 1, Abbildung 54a). Von 30.6.1998 bis 31.12.2017 liegt eine weitgehend kontinuierliche Zeitreihe vor (Datenlücken 3,2 %). Die Quellschüttung schwankt stark, zwischen 8 und 6305 l/s, bei einem Mittelwert von 339 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen 146 und 301 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Die Karstquelle wird von einem Quelltopf gebildet, der in der quartären Bedeckung des darunter anstehenden Dachsteinkalkes ausgebildet ist (Abbildung 54b). Der Dachsteinkalk ist im unmittelbaren Quellbereich lediglich geringmächtig ausgeprägt und überlagert eine wasserstauende Einheit. Die ursprüngliche Tiefe des 27 m langen und 14 m breiten Quelltopfes betrug zwischen 8 und 10 m, wurde 1975 gefasst und 2017 renaturiert (in Form eines 27 m langen, 15 m breiten und 10 m tiefen Quelltümpels). Das Wasser wird im Quelltopf nach oben gedrückt (vauculische Karstquelle; Ford und Williams, 2007; Seebacher, 2016).

Am Südrand des Toten Gebirges taucht die Totengebirgsdecke (Tirolisches Deckensystem) unter die überlagernde Dachsteindecke (Juvavisches Deckensystem) ab (Tollmann, 1960, 1976; Schmid et al., 2004; Moser und Pavlik, 2014). Erstere wird im Wesentlichen von einem mächtigen Stapel überwiegend gebankten Dachsteinkalks gebildet, der tief greifend verkarstet ist und das infiltrierende Wasser bei hoher Fließgeschwindigkeit und kurzer Verweilzeit den Karstquellen der umgebenden Tallagen zuführt (Dinçer et al., 1972; Harlacher et al., 2003; Laimer, 2010). Nördlich des Steirersees liegt eine besonders intensiv verkarstete Zone (Tauplitzer Schachtzone) zwischen etwa 1700 m und 2100 m ü. A. am Fuß des Höhenzugs der Tragln vor (Herrmann, 1993). Der intensiv untersuchte Höhlenballungsraum zeigt fließendes Grundwasser in einer Tiefe von 910 m ü. A., d. h. unter der Höhe des Sagtümpels an und entwässert folglich nicht zu diesem hin (Plan et al., 2009).

Das Plateau der Tauplitzalm liegt deutlich abgesetzt, etwa 300 m tiefer als das zentrale Hochplateau des Toten Gebirges. Den Großteil dieses Bereichs bauen Hauptdolomit und gebankter Dachsteinkalk auf, untergeordnet treten entlang des Tauplitz-Lineaments die Gutenstein-Formation (Kalk und Dolomit) sowie Lunzer Schichten auf.

Den Empfehlungen von Bauer (1989) und Benischke (2021) folgend wird ein Sporentriftversuch aufgrund seiner gut dokumentierten, deutlich ausgeprägten Durchbruchskurve in die Analyse mit einbezogen (Maurin und Zötl, 1964). Von einer Auswertung der übrigen von Maurin und Zötl (1964) Sporentrift- und Fluoreszenztracerversuche wird Abstand genommen. Die Einspeisung erfolgte beim Schnittlermoos im zentralen Plateaubereich der Tauplitz, unweit des Kraller Sees (Abbildung 54)

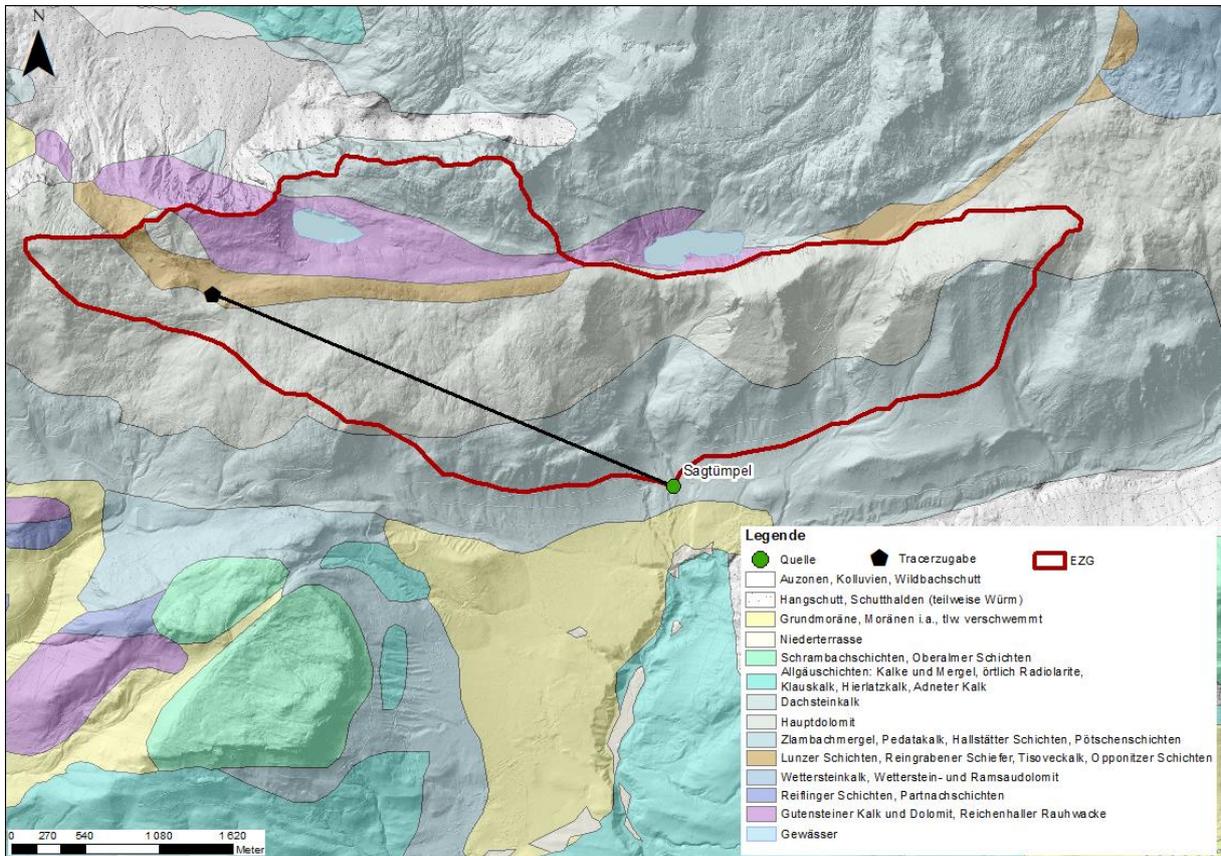
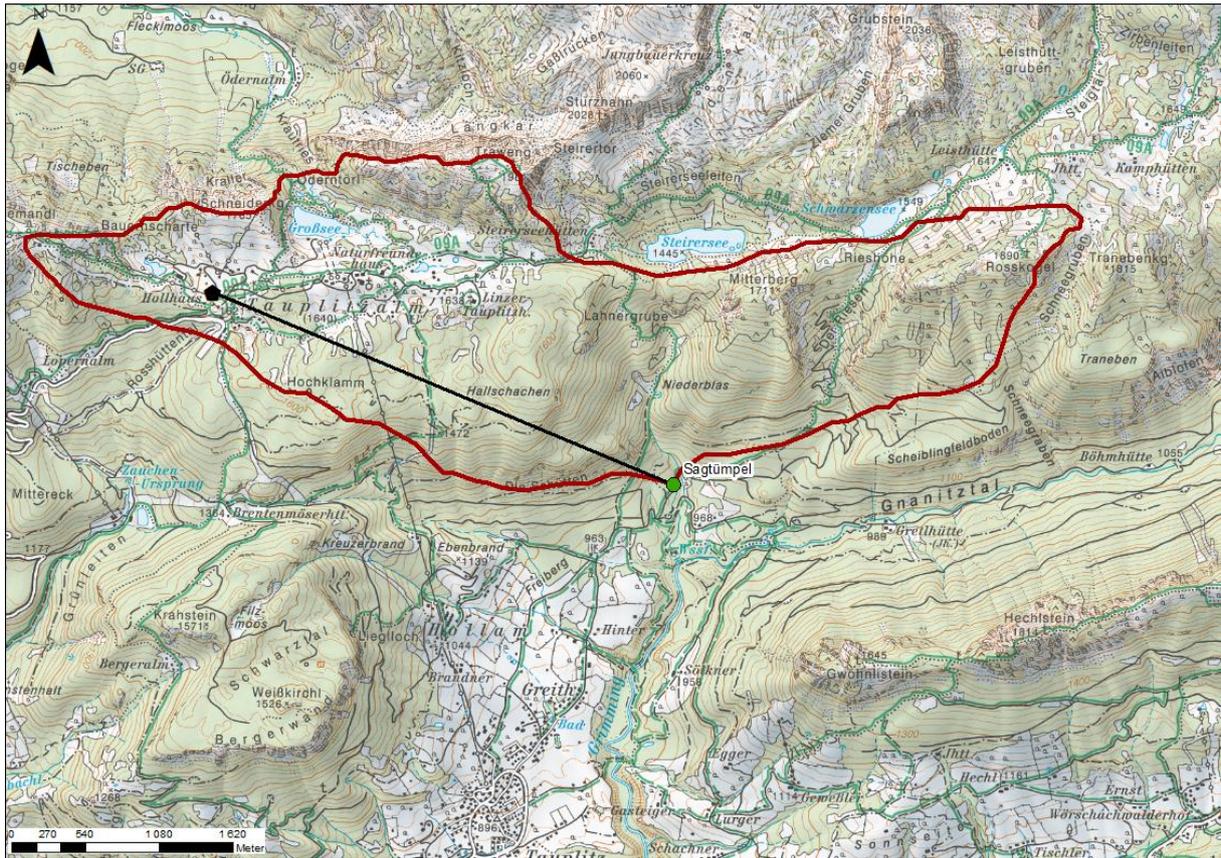


Abbildung 54: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich des Sagtumpels (HZB-Nr. 395863). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 13 dargestellt.

Tabelle 42: Modellerte Szenarien für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü, A,]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	4,12	1578	996	1734	721
2	4,32	1474	1044	1722	731
3	5,67	1580	997	1734	720
4	6,07	1558	1072	1761	728
5	6,54	1576	997	1737	720
6	7,46	1538	1046	1735	725
7	7,85	1593	1073	1759	726
8	8,36	1552	998	1721	723
9	8,91	1536	997	1718	725
10	9,02	1546	1045	1735	724
11	9,20	1581	1073	1758	724
12	9,52	1572	1073	1737	728
13	10,36	1546	997	1706	726
14	10,49	1526	997	1704	727
15	10,75	1581	1072	1754	723
16	10,83	1550	998	1706	725
17	10,94	1534	998	1705	726
18	10,98	1602	1071	1757	724
19	11,35	1540	998	1705	726
20	12,55	1600	1072	1754	723
21	12,69	1585	1072	1740	725
22	14,26	1585	1073	1739	724

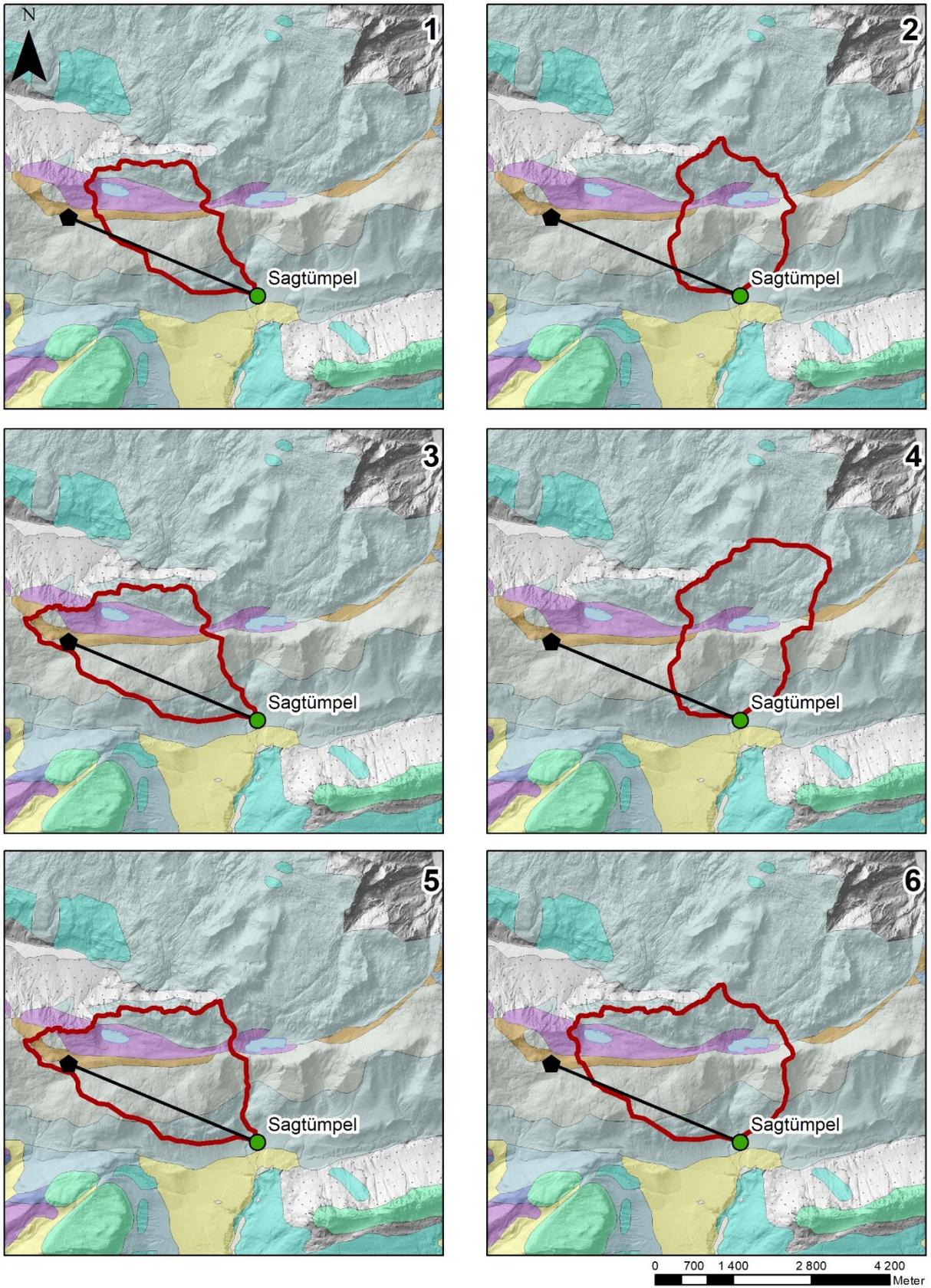


Abbildung 55: Modellierte Szenarien für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863).

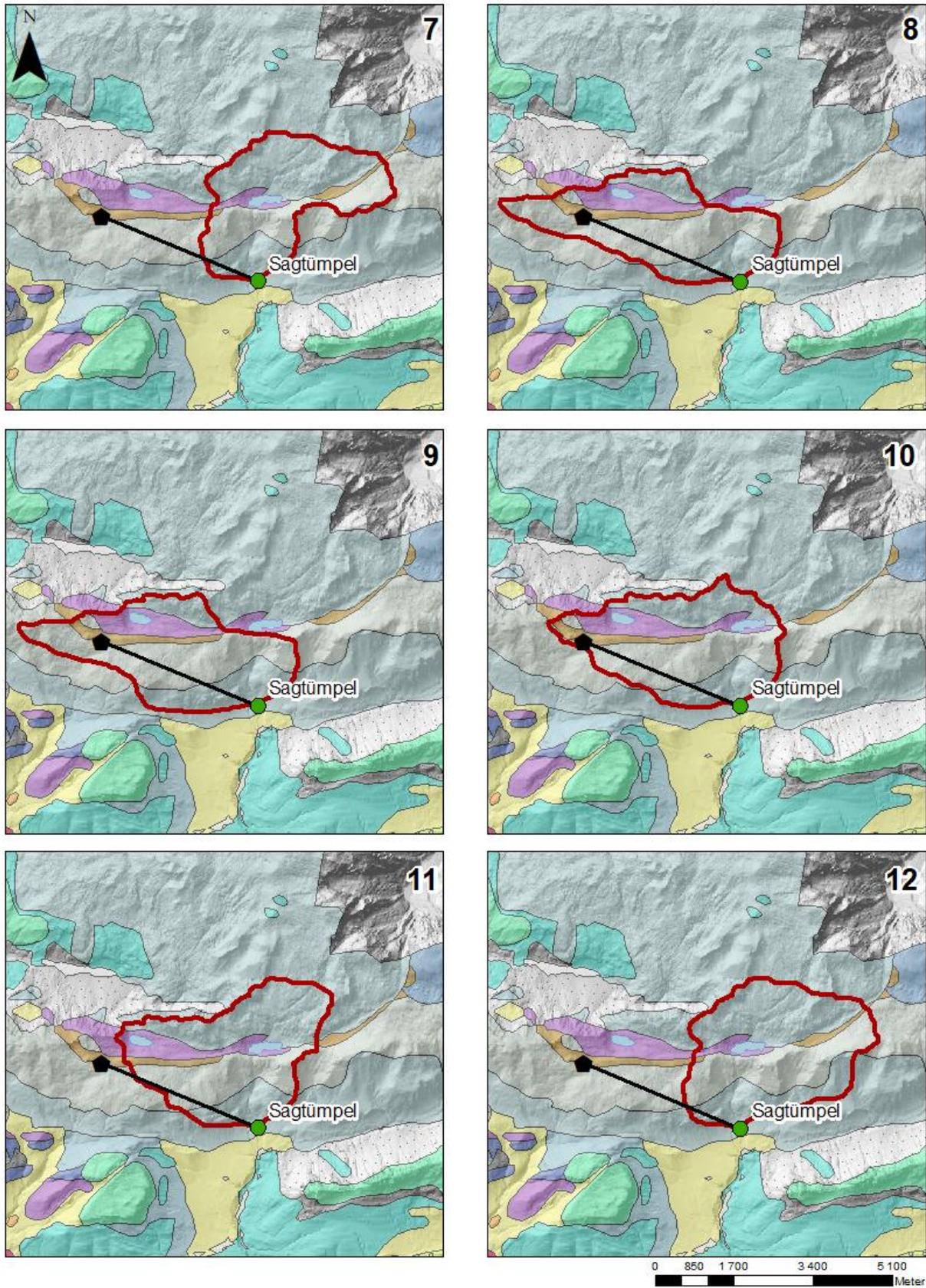


Abbildung 55 (Forts.): Modellierte Szenarien für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863).

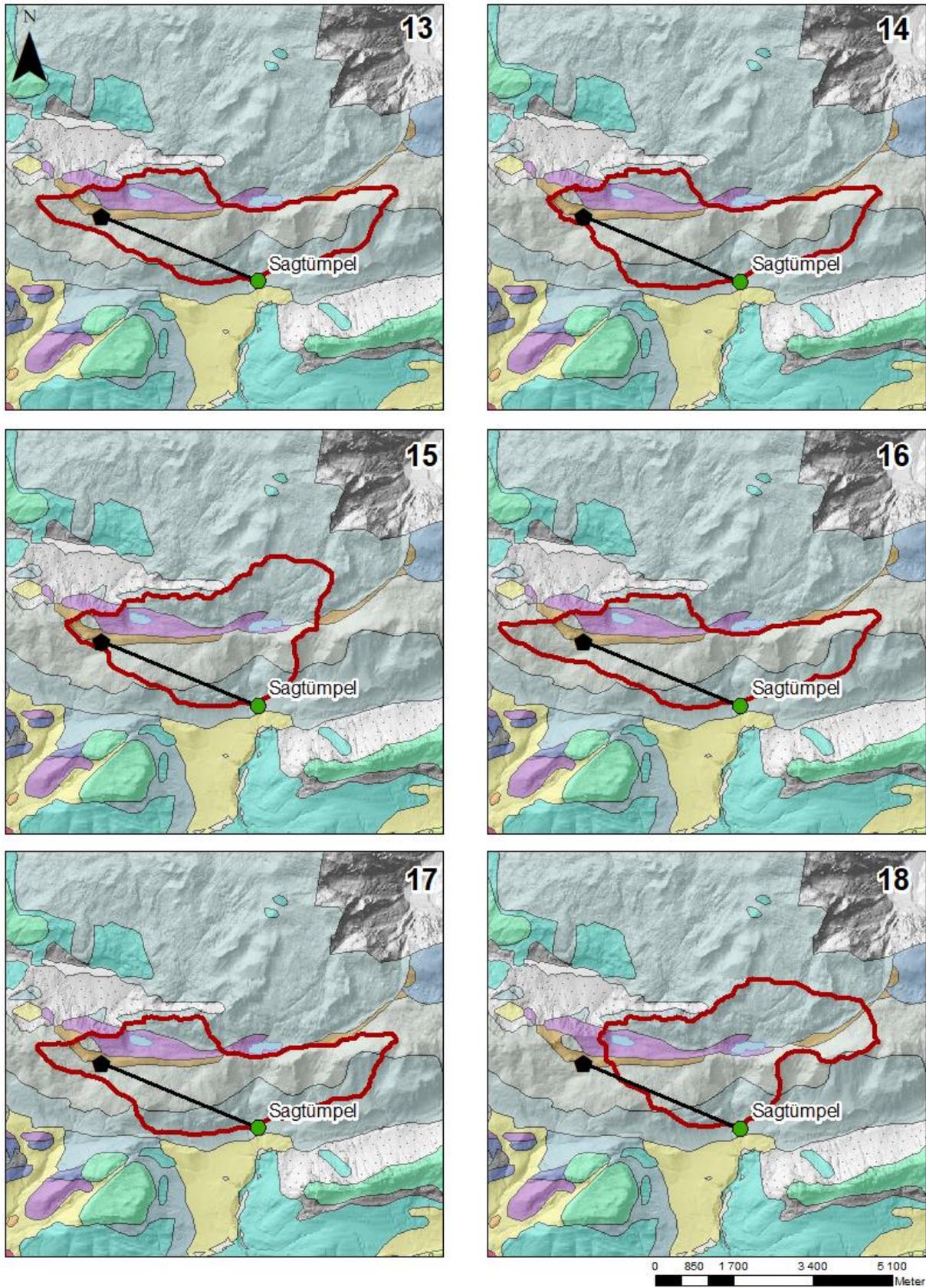


Abbildung 55 (Forts.): Modellierte Szenarien für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863).

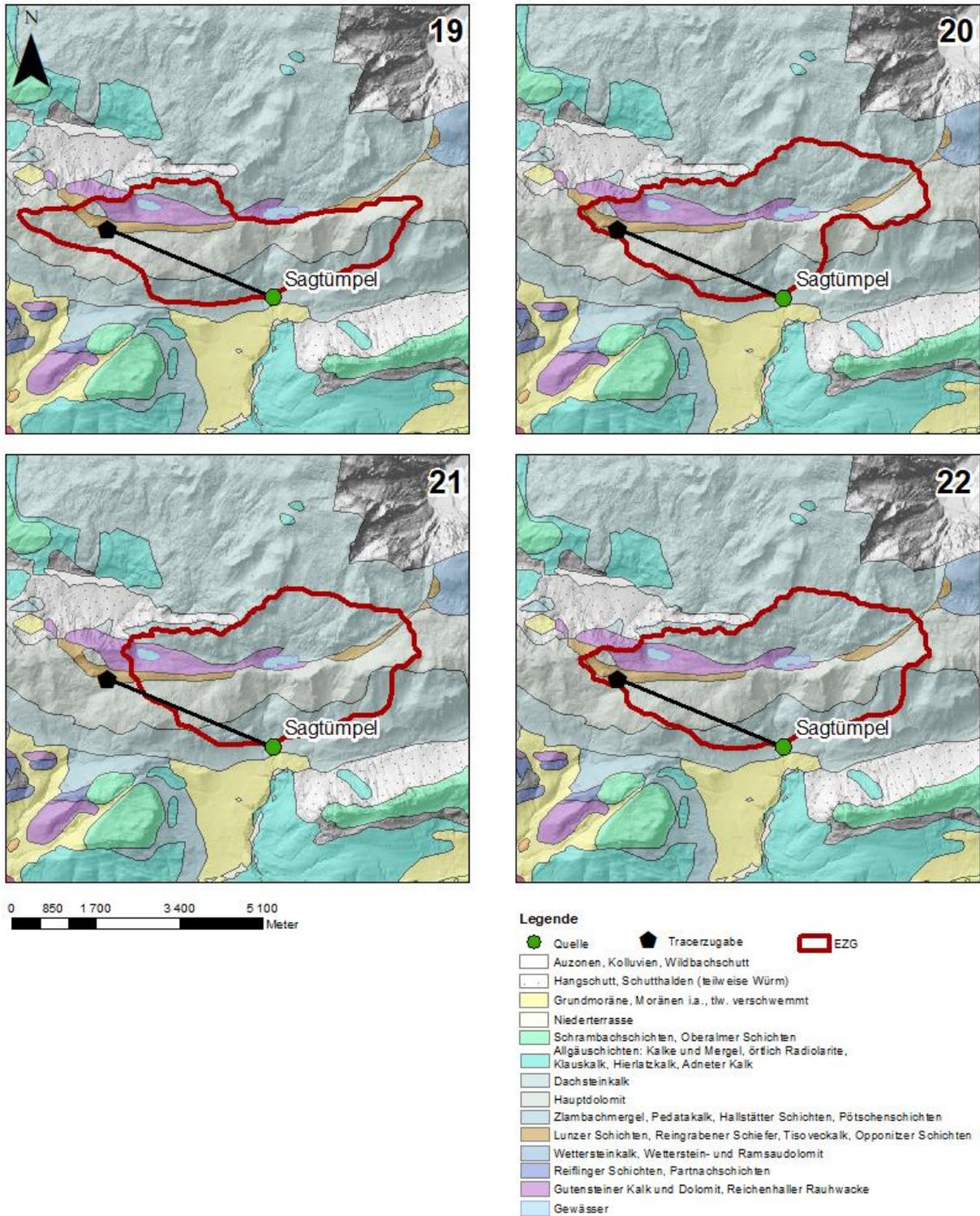


Abbildung 55 (Forts.): Modellierte Szenarien für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863).

Tabelle 42 fasst die wichtigsten Kenngrößen der 22 modellierten Szenarien zusammen, Abbildung 55 stellt ihre jeweilige Lage dar.

Tabelle 43 fasst die Effizienzkriterien zusammen. Die Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie wird überwiegend mit gut beurteilt (KGE zwischen 0,65 und 0,73), für Szenario 2 mit zufriedenstellend (0,64). Die Korrelationskoeffizienten liegen ebenfalls in einem guten Bereich (0,67 – 0,73). Szenario 3 – 15 bilden darüber hinaus die Schwankungsbreite der Quellschüttung gut ab (relative Variabilität zwischen 0,97 und 1,02) und weisen geringe systematische Fehler auf (0,99 – 1,03).

Tabelle 44 stellt die optimierten Modellparameter für alle fünfzehn Szenarien zusammen. Grundwasserspeicherkapazität (x_3) und Schneeschmelzfaktoren (c_2) liegen durchwegs innerhalb des erwarteten Bereiches, die Schneedynamikfaktoren (c_1) durchwegs zu hoch. Die Reaktionszeit (x_4) ist tendenziell eher kurz, in guter Übereinstimmung mit der intensiven Verkarstung und den kurzen Verweilzeiten im Einzugsgebiet. Die eher niedrigen Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) spiegeln das hochalpine Einzugsgebiet wider. Unter der Annahme autogener Grundwasserneubildung werden Austauschkoefizienten (x_2) nahe 0 mm/Tag als plausibel bewertet.

Abbildung 56 und Abbildung 57 stellen die Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung für Szenario 13 dar, das aufgrund der plausiblen Parameterkombination und der oben beschriebenen hydrogeologischen Situation als plausibelstes Einzugsgebiet betrachtet wird. Das Modell ist in der Lage, die beobachtete Quellschüttungsganglinie gut abzubilden, tendenziell werden niedrige Schüttungen unter- und mittlere Schüttungen überschätzt (Abbildung 56, Abbildung 57a,b). Die Saisonalität der Quellschüttungsganglinie wird grob getroffen, die hohe Schüttung während der Schneeschmelze im Frühjahr jedoch systematisch unter-, die Schüttung während der Sommer- und Herbstmonate dagegen überschätzt (Abbildung 57c). Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen berechneter und beobachteter Ganglinie und der plausiblen Parameterkombination in der überwiegenden Anzahl der modellierten Szenarien ist diese Auswahl jedoch mit deutlicher Unsicherheit behaftet. Die niedrige Bodenwasserspeicherkapazität (15 mm) spiegelt das alpine Einzugsgebiet wider, die eher kurze Reaktionszeit (1,2 Tage) die gut dokumentierte, intensive Verkarstung (Abbildung 57d). Schneeschmelzfaktor (3,2 mm/(°C Tag)) und Grundwasserspeicherkapazität (130 mm) liegen innerhalb des erwarteten Bereiches (Abbildung 57d). Der Schneedynamikfaktor liegt sehr hoch (0,94; Abbildung 57d). Der niedrige Austauschkoefizient (-0,2 mm/Tag) steht mit der angenommenen autogenen Grundwasserneubildung in Einklang.

Tabelle 43: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Sagtümpels (HZB-Nr. 395863).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelations- koeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,65	0,69	0,87	0,91
2	0,64	0,67	0,87	0,91
3	0,71	0,71	0,97	0,99
4	0,73	0,73	0,99	1,00
5	0,71	0,71	1,00	1,01
6	0,70	0,70	1,01	1,01
7	0,72	0,72	1,01	1,01
8	0,70	0,70	1,01	1,01
9	0,69	0,69	1,01	1,01
10	0,70	0,70	1,01	1,01
11	0,71	0,71	1,01	1,01
12	0,72	0,72	1,01	1,01
13	0,69	0,69	1,02	1,02
14	0,68	0,69	1,02	1,02
15	0,70	0,70	1,02	1,02
16	0,69	0,69	1,02	1,02
17	0,68	0,69	1,02	1,03
18	0,70	0,71	1,02	1,02
19	0,68	0,69	1,02	1,03
20	0,70	0,70	1,02	1,01
21	0,69	0,69	1,02	1,01
22	0,69	0,69	1,02	1,01

Tabelle 44: Optimierte Modellparameter für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoeffizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	8	3,9	30	1,6	0,97	4,9
2	9	3,7	29	1,6	0,98	6,0
3	21	2,9	30	1,4	0,95	3,8
4	26	2,5	28	1,4	0,95	4,4
5	36	2,5	36	1,4	0,93	3,7
6	20	2,3	70	1,3	0,94	3,4
7	21	1,8	73	1,3	0,88	3,9
8	19	1,6	89	1,3	0,93	3,3
9	14	1,0	106	1,3	0,95	3,2
10	193	0,9	35	1,4	0,93	3,7
11	185	0,7	40	1,4	0,89	4,3
12	212	0,6	34	1,4	0,90	4,3
13	15	-0,2	130	1,2	0,94	3,2
14	16	-0,3	134	1,2	0,95	3,1
15	16	-1,2	136	1,3	0,90	3,7
16	17	-0,7	135	1,2	0,93	3,3
17	17	-0,8	138	1,2	0,94	3,2
18	15	-1,7	136	1,2	0,88	3,9
19	17	-1,3	142	1,2	0,94	3,3
20	10	-4,9	151	1,2	0,90	3,9
21	11	-4,7	150	1,2	0,90	3,8
22	10	-7,8	161	1,2	0,90	3,7

Sagtümpel (Szenario 13)

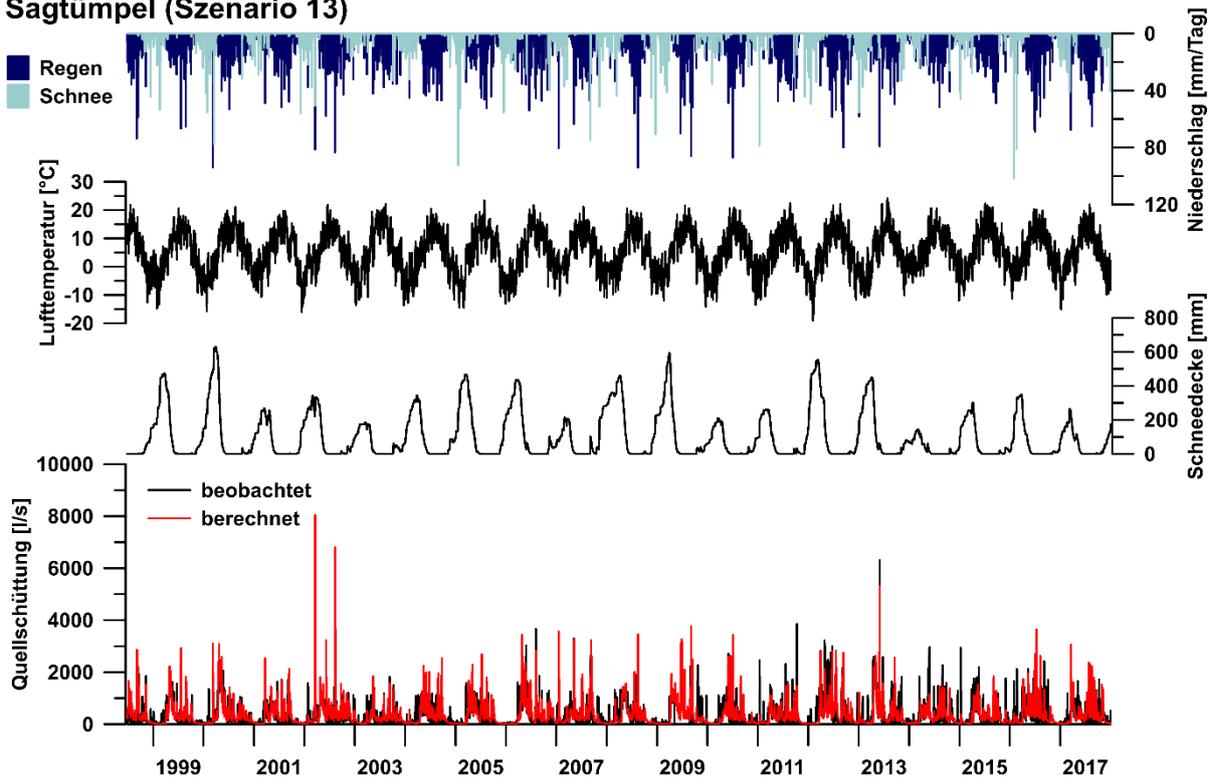


Abbildung 56: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet des Sagtümpels (HZB-Nr. 395863), Szenario 13.

Sagtümpel (Szenario 13)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,69
Korrelationskoeffizient [-]	0,69
systematischer Fehler [-]	1,02
relative Variabilität [-]	1,02

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
■ Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert	— Typischer Wertebereich		
■ Regen	— berechnet				

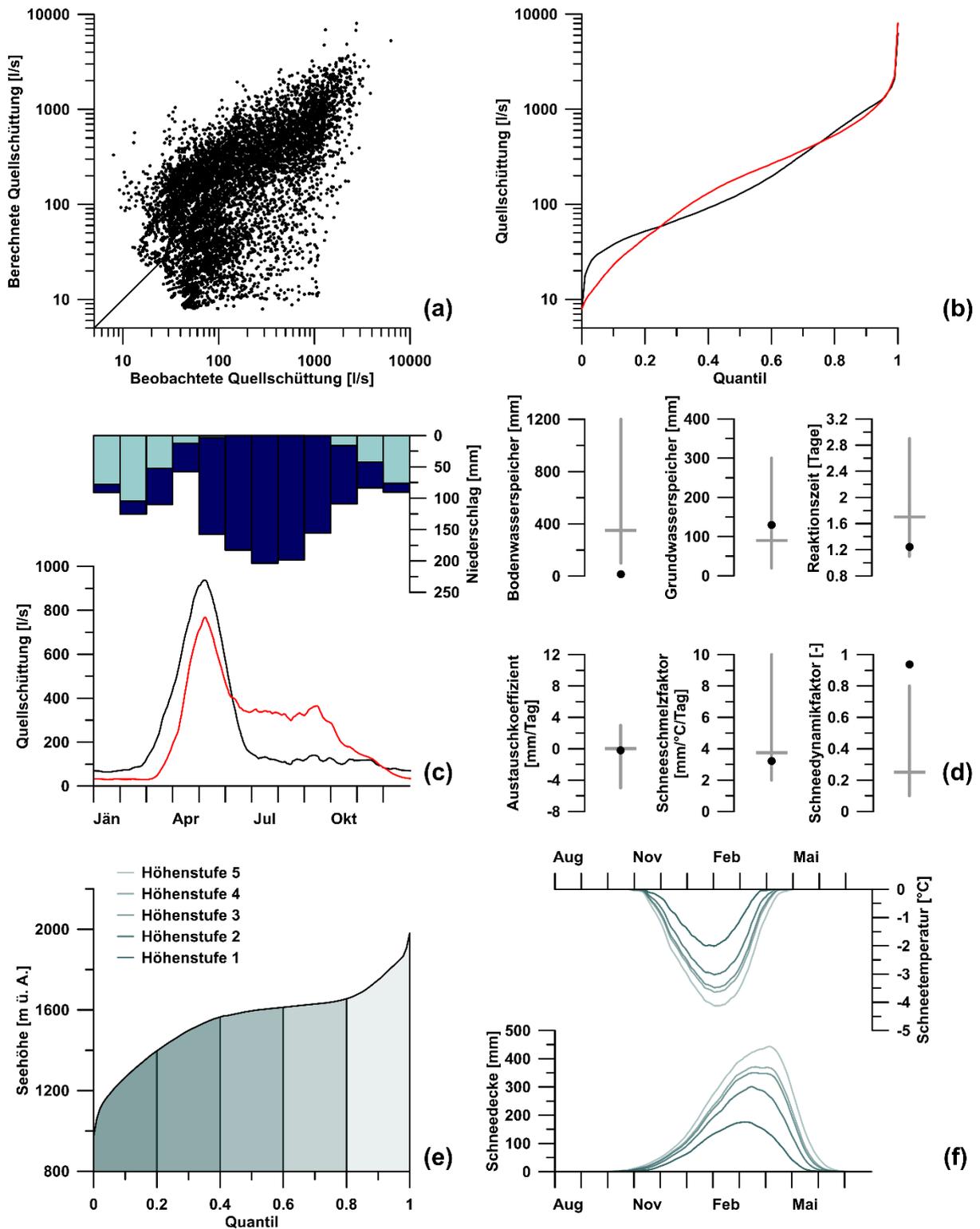


Abbildung 57: Bewertung der Modellierungsergebnisse für den Sagtümpel (HZB-Nr. 395863), Szenario 13. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.14. Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762)

Die Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762) liegt auf 1710 m ü. A. in den Seckauer Tauern im Gemeindegebiet Wald am Schoberpaß (Bezirk Leoben) (Abbildung 1, Abbildung 58a). Von 1.6.2002 bis 31.12.2017 liegt eine kontinuierliche Ganglinie der Quellschüttung vor. Die Quellschüttung schwankt zwischen 0,1 und 297 l/s um einen Mittelwert von 30 l/s. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt im Mittel 61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Schwankungsbreite 36 – 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Das Einzugsgebiet der Quelle ist aufgrund intensiver Bearbeitung gut bekannt (Abbildung 58; Winkler et al., 2016; Wagner et al., 2016; Pauritsch et al., 2017). Es umfasst eine Fläche von 0,67 km², die mittlere Seehöhe liegt bei 2006 m ü. A. Überwiegend wird es von Gneisen aufgebaut, untergeordnet treten Marmorlinsen hinzu (Abbildung 58b; Silvretta-Seckau-Deckensystem; Schmid et al., 2004; Winkler et al., 2016). Große Teile des Gebietes werden von einem reliktschen Blockgletscher mit komplexer interner Struktur eingenommen (Winkler et al., 2016). Darüber hinaus dominieren schroffe Festgesteinsflanken und Schuttfächer das Einzugsgebiet.

Der Blockgletscher weist ein komplexes hydraulisches Verhalten auf, das eine schnelle und eine langsame Abflusskomponente umfasst (Winkler et al., 2016; Pauritsch et al., 2017). Beide Komponenten wurden durch Markierungsversuche mit deutlich kontrastierenden Verweilzeiten erfasst, wobei ein Teil des 2009 eingebrachten Uranins im Postlleitenbach detektiert werden konnte, der das nächstgelegene Kar westlich entwässert (Abbildung 58a; Winkler et al., 2016).

Die Abflussdynamik der Schönebenquelle sowie des übergeordneten Einzugsgebiets wurden bereits mit einem strukturell eng verwandten Modell analysiert (Wagner et al., 2016). Die Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den hier berichteten überein und wurden bereits in Kapitel 2.2.1 detailliert gegenübergestellt.

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen die Ergebnisse der Modellierung. Die Übereinstimmung zwischen beobachteter und modellierter Quellschüttungsganglinie wird als sehr gut bewertet (Abbildung 59, KGE und Korrelationskoeffizient jeweils 0,88), die Schwankungsbreite ist ebenfalls sehr gut erfasst (relative Variabilität 1,00). Niedrige Quellschüttungen werden vom Modell jedoch systematisch überschätzt (Abbildung 60a,b). Die Saisonalität der Schüttungsganglinie wird vom Modell gut getroffen (Abbildung 60c). Die niedrige Bodenwasserspeicherkapazität (32 mm; Abbildung 60d) spiegelt das hochalpine Einzugsgebiet mit kaum ausgebildeter Bodenbedeckung und rascher, tiefer Versickerung infiltrierender Wässer in grobes Blockwerk wider (in Übereinstimmung mit Wagner et al., 2016). Große Teile des Einzugsgebietes werden von Schuttfächern bzw. dem mächtigen Blockgletscher bedeckt und erklären damit die relativ hohe Grundwasserspeicherkapazität von 333 mm (Abbildung 60d; in Übereinstimmung mit Wagner et al., 2016).

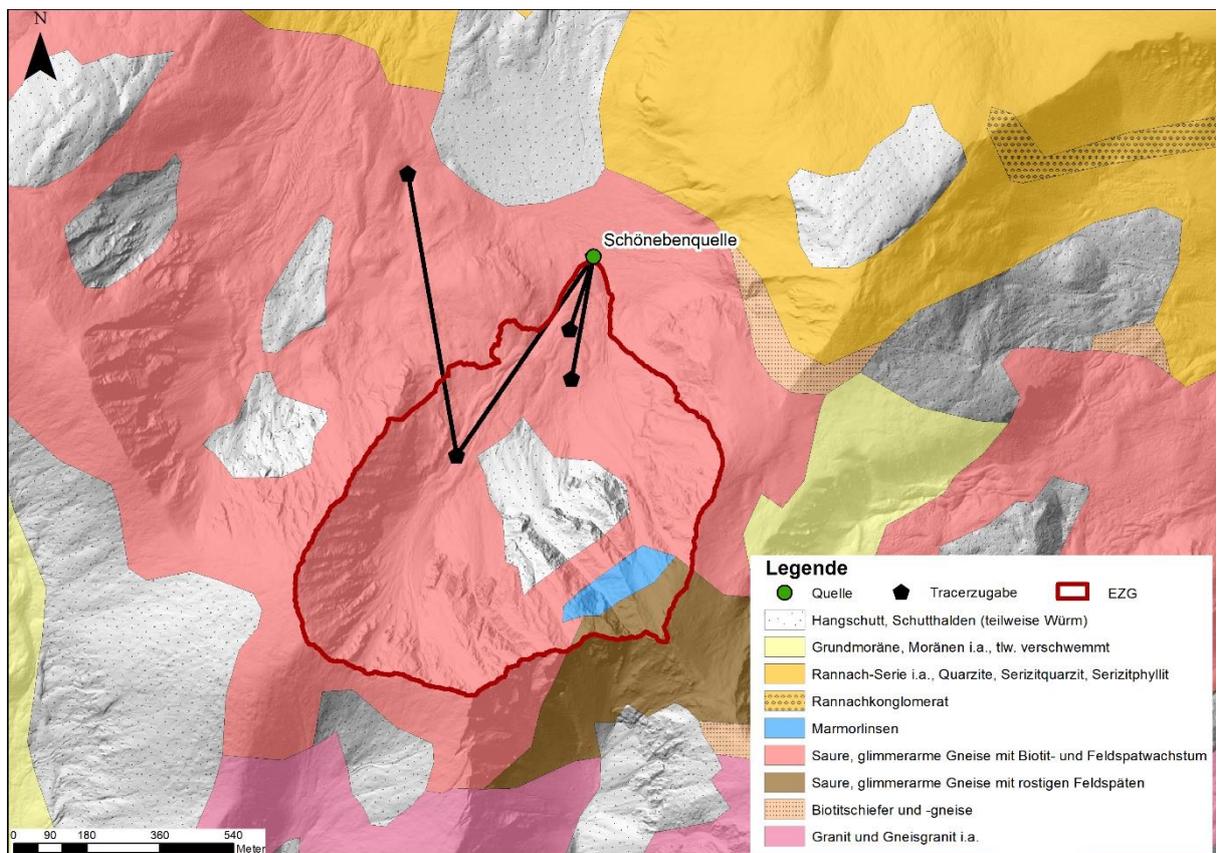
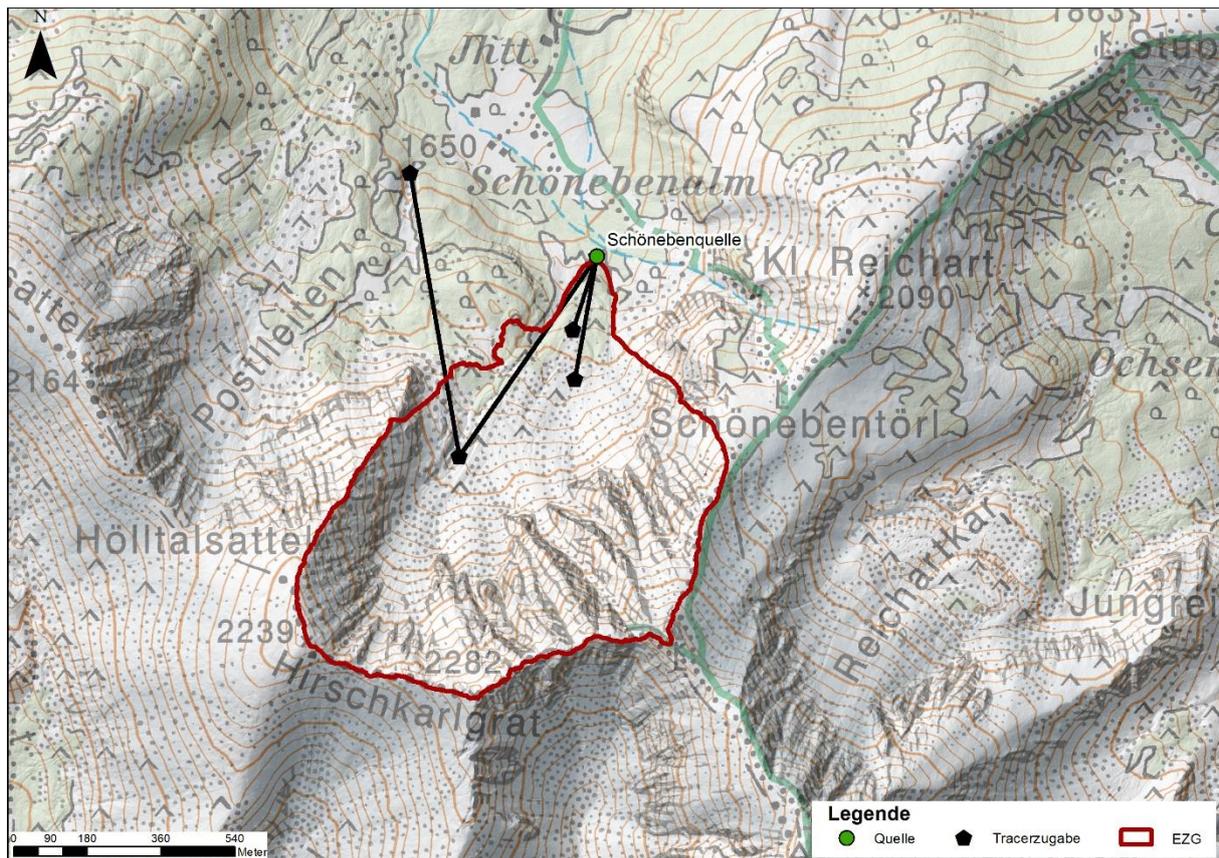


Abbildung 58: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762).

Schönebenquelle

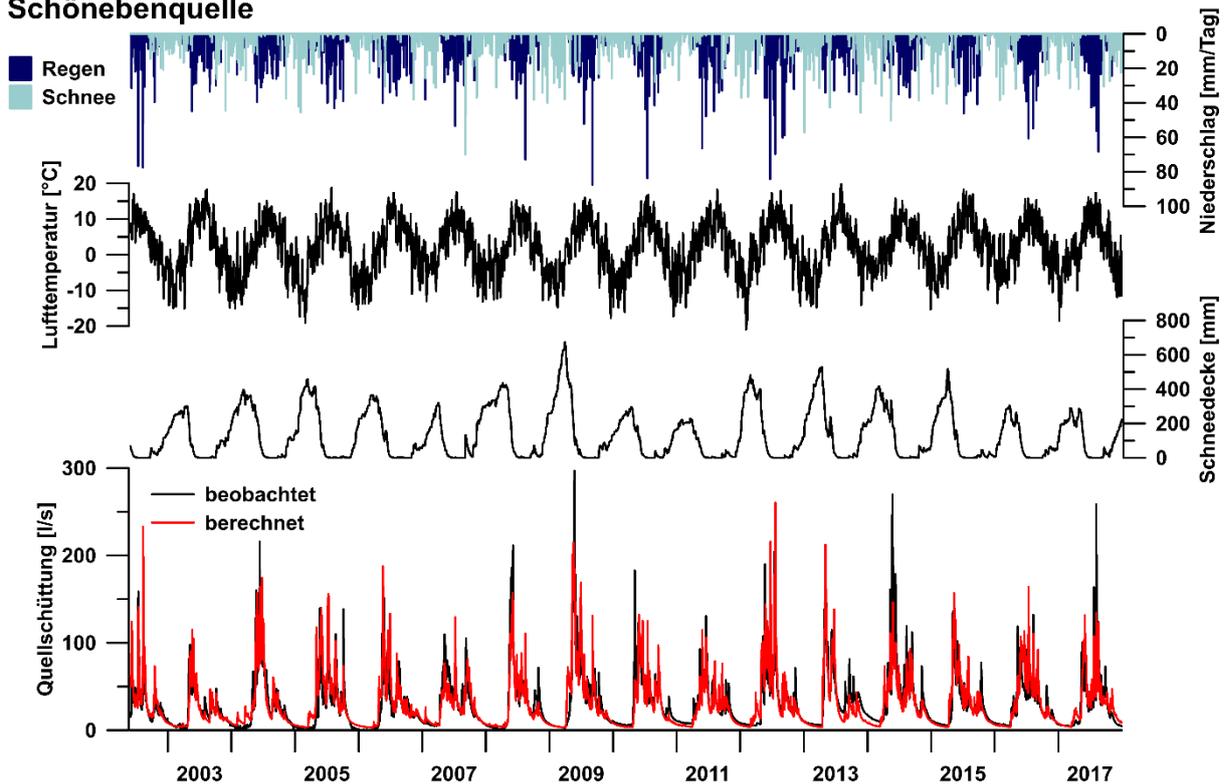


Abbildung 59: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762).

Die relativ kurze Reaktionszeit (1,3 Tage; Abbildung 60d) gibt die schnelle Komponente im Grundwassersystem des reliktschen Blockgletscher wieder, in Übereinstimmung mit den Markierungsversuchen und Auswertungen der Schüttungsganglinie von Winkler et al. (2016). Der Schneeschmelzfaktor (3,4 mm/(°C Tag)) liegt im erwarteten Bereich, der Schneedynamikfaktor (0,00) liegt dagegen zu niedrig (Abbildung 60d).

Der positive Austauschkoefizient lässt sich dagegen kaum mit den Ergebnissen des Markierungsversuches in Einklang bringen: Diese legen nahe, dass ein gewisser (nicht zu großer) Anteil des im Blockgletscher gespeicherten Wassers die aus geklüftetem Festgestein aufgebaute Flanke zwischen Blockgletscher und Postleiten durchquert, aufgrund der Hochlage des untersuchten Einzugsgebietes im Vergleich zu den umgebenden Karen ist jedoch ein unterirdischer Zustrom durch die geklüfteten Flanken in sehr geringem Maße zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Schwierigkeit von Niederschlagsmessungen im Hochgebirge, insbesondere während der von festem Niederschlag geprägten Wintermonate, zu berücksichtigen, welche auch die Grundlage für die interpolierten Werte des SPARTACUS Rasterdatensatzes darstellen. Wagner et al. (2016, 2019) erzielen anhand von Aufzeichnungen einer Wetterstation am Blockgletscher sowie anhand eines weiteren Rasterdatensatzes mit einem strukturell eng verwandten A28165002047 Steiermark HZB-Quellen

Niederschlags-Abfluss-Modell ebenfalls einen positiven Austauschkoeffizienten und kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen.

Schönebenquelle

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,88
Korrelationskoeffizient [-]	0,88
systematischer Fehler [-]	1,00
relative Variabilität [-]	1,00

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
■ Schnee	— beobachtet	— beobachtet	● Optimierter Wert	— Typischer Wertebereich	
■ Regen	— berechnet	— berechnet			

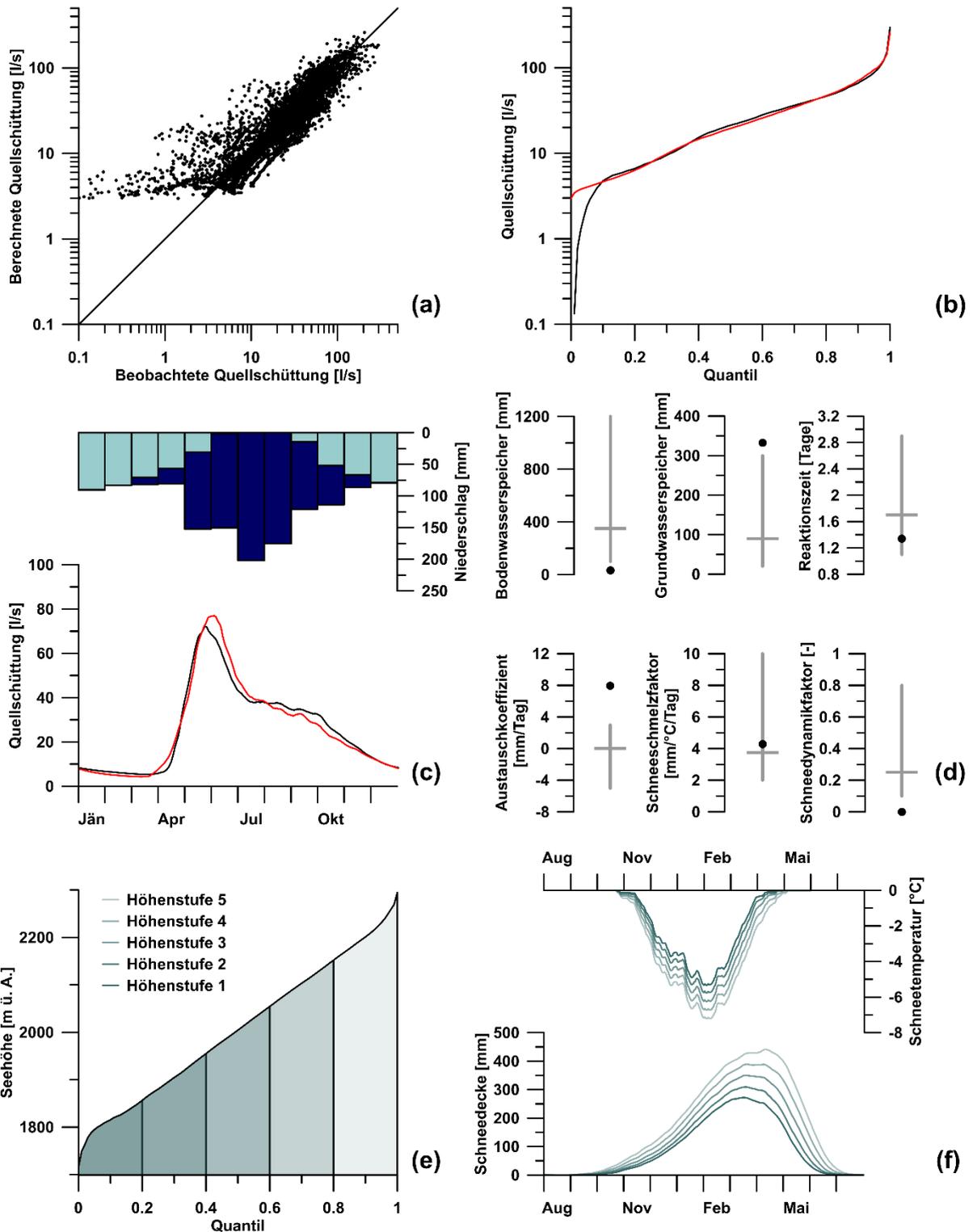


Abbildung 60: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Schönebenquelle (HZB-Nr. 396762). (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.15. Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939)

Die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939) liegt auf 814 m ü. A. in der Gemeinde Landl im Bezirk Liezen am Fuß der Kaltmauer (1929 m) in der westlichen Hochschwabgruppe (Abbildung 1, Abbildung 61a). Von 18.4.1999 bis 31.12.2017 liegt eine weitgehend kontinuierliche Zeitreihe der Quellschüttung vor (Datenlücken 2,0 %). Die starken Schüttungsschwankungen (21 – 759 l/s, Mittelwert 104 l/s) sind charakteristisch für Karstquellen. Die elektrische Leitfähigkeit schwankt zwischen 169 und 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Das umliegende Gebiet wird von Dachsteinkalk, Wettersteinkalk, -dolomit und Hauptdolomit dominiert, untergeordnet treten Lunzer Schichten auf (Abbildung 61b; Bryda und van Husen, 2010). Während sich Dachstein- und insbesondere Wettersteinkalk durch hohe Verkarstungsfähigkeit bei geringer Trennflächendichte auszeichnen, neigen Wetterstein- und Hauptdolomit deutlich weniger zu Verkarstung, weisen eine hohe Trennflächendichte und entsprechend hohe Speicherefähigkeit auf (Strobl, 1992, 2009a; Bryda, 2001; Plan, 2002; Bryda et al., 2013). Die Verkarstungsfähigkeit korreliert deutlich mit dem Ca/Mg-Verhältnis, beide Eigenschaften sind mitunter lokalen Schwankungen innerhalb derselben Einheit unterworfen (Strobl, 1992; Plan, 2002).

Das Gebiet ist tektonisch stark beansprucht, die maßgebliche Mürzalpendecke (Juvavisches Deckensystem; Kristan-Tollmann und Tollmann, 1962; Schmid et al., 2004) zerfällt im potenziellen Einzugsgebiet in die Buchstein-Buchberg Schuppe, die Hochtör-Säusenstein Schuppe, die Riegerin-Türnach Schuppe, die Brandstein-Edelbodenalm Schuppe und die Pfaffingalm-Hochschwab Schuppe (Bryda, 2001; Decker und Reiter, 2001; Bryda und van Husen, 2010; Bryda et al., 2013). Die assoziierten Störungen stellen in der westlichen Hochschwabgruppe tendenziell bevorzugte Infiltrations- und Fließwege dar und prägen die Richtung der unterirdischen Entwässerung (Strobl, 1992; Bryda, 2001; Plan, 2002; Strobl, 2009a; Bryda et al., 2013). Kleinere Quellen entwässern lokale, schwebende Karstwasserkörper über nicht verkarstungsfähigen, häufig geringmächtigen Ton- und Sandsteinen (etwa der Lunzer Schichten) oder Schuttkörper aus Wetterstein- und Hauptdolomit (Bryda et al., 2013).

Für den östlich des Schwabeltales über weite Strecken aufgeschlossenen, stark verkarsteten Dachsteinkalk sowie den unterlagernden Wettersteindolomit nehmen Bryda et al. (2013) ab etwa der Linie Liesenhütte – Arzerbödenalm (1335 m) unterirdische Entwässerung in Richtung des Schwabeltales an, in dem eine Reihe von Quellen entspringt. Die Ausweisung der acht potenziellen Einzugsgebiete der Schwabeltalquelle (Tabelle 45, Abbildung 62) orientiert sich im Wesentlichen an den Verkarstungseigenschaften der Gesteine sowie einer plausiblen Einzugsgebietsgröße im Sinne der Wasserbilanz. Die unterirdische Wasserscheide gegen die großen Karstquellen im Süden (Quellgruppe des Hinterseeaugrabens („Maibründln“); Strobl,

1992; Benischke und Strobl, 2006) und Südwesten (Wassermannsloch, siehe unten) des von Kalt-, See- und Brettermauer gebildeten Massivs ist nur ungenügend bekannt und orientiert sich grob an Schuppengrenzen sowie (im Bereich gering verkarstungsfähiger Gesteine) an orographischen Gegebenheiten (etwa östlich des Wilzinggrabens).

Tabelle 45: Modellerte Szenarien für die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	2,19	1386	1115	1577	718
2	2,65	1494	1115	1655	710
3	3,21	1518	1115	1670	710
4	3,28	1342	1115	1586	718
5	3,93	1320	1115	1590	720
6	4,79	1347	1115	1608	719
7	4,82	1427	1115	1609	714
8	4,95	1331	1112	1568	719
9	5,26	1378	1115	1603	718
10	5,27	1323	1115	1566	720
11	5,49	1386	1115	1629	717

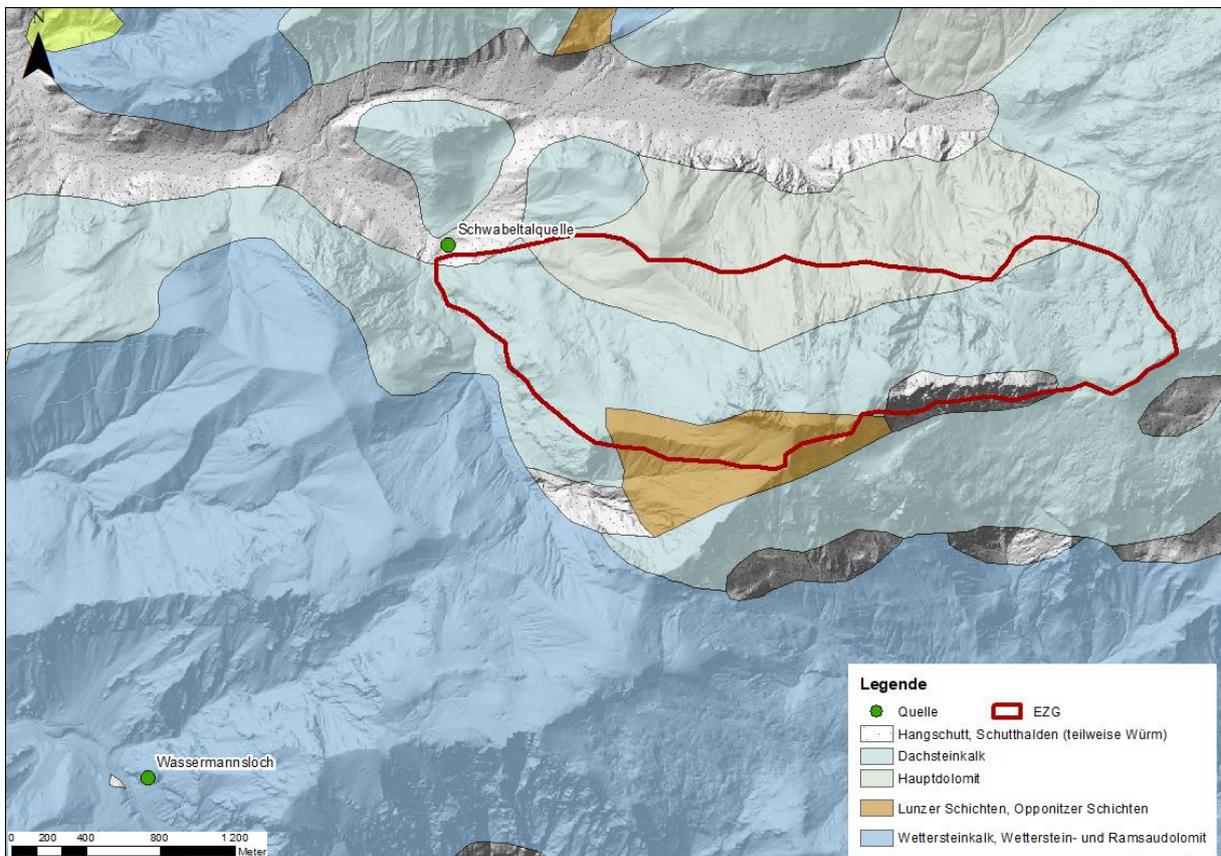


Abbildung 61: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich der Schwabertalquelle (HZB-Nr. 395939). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 3 dargestellt.

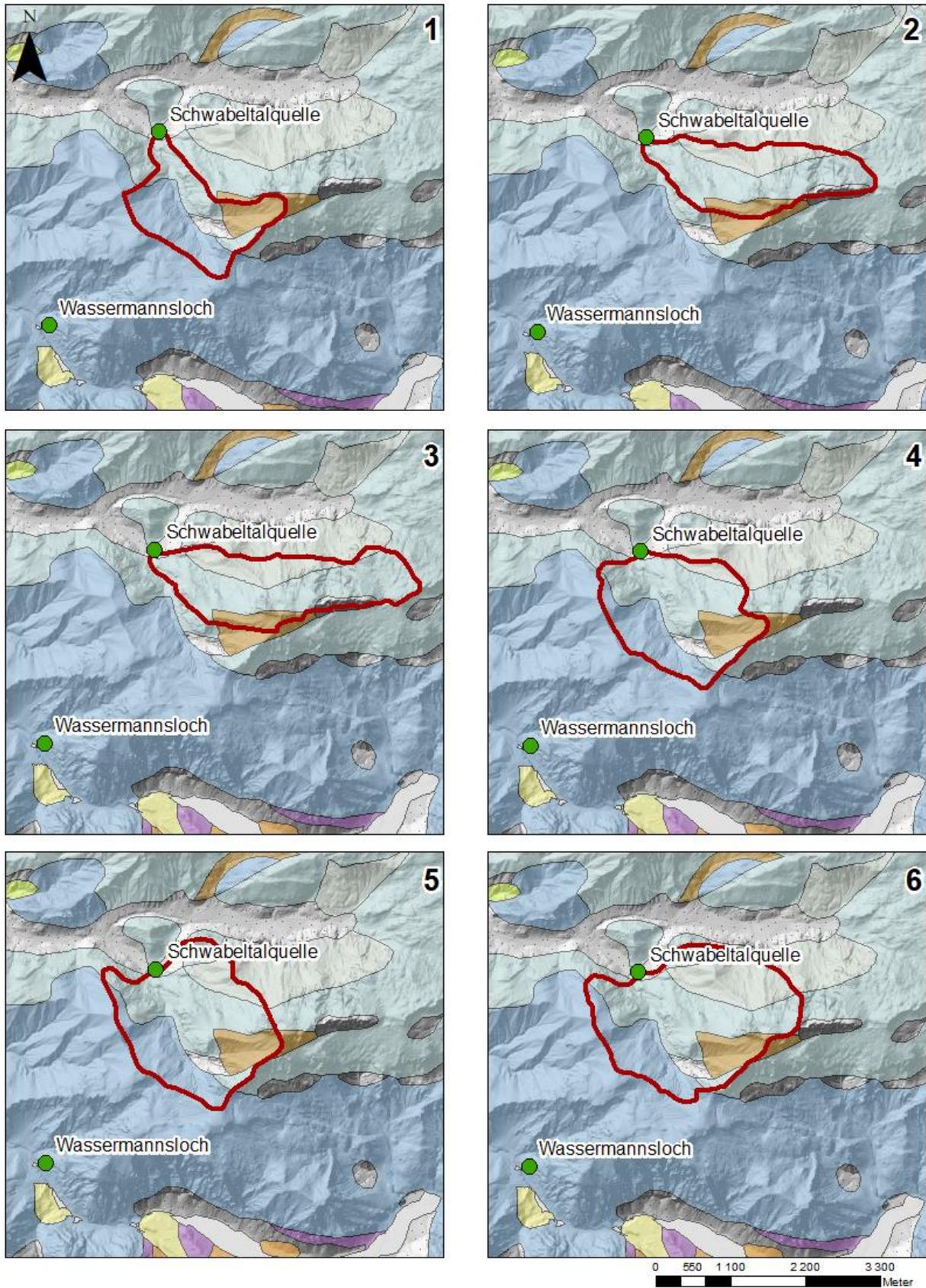


Abbildung 62 Modellierte Szenarien für die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939).

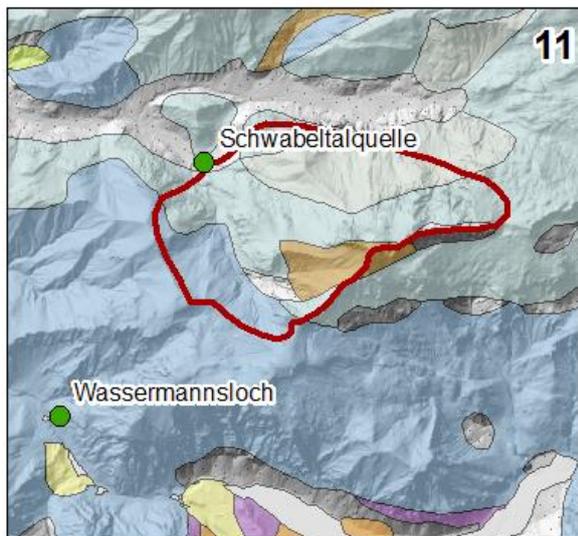
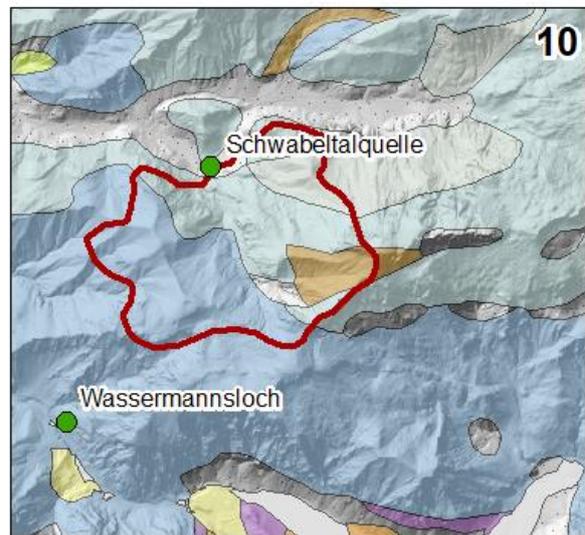
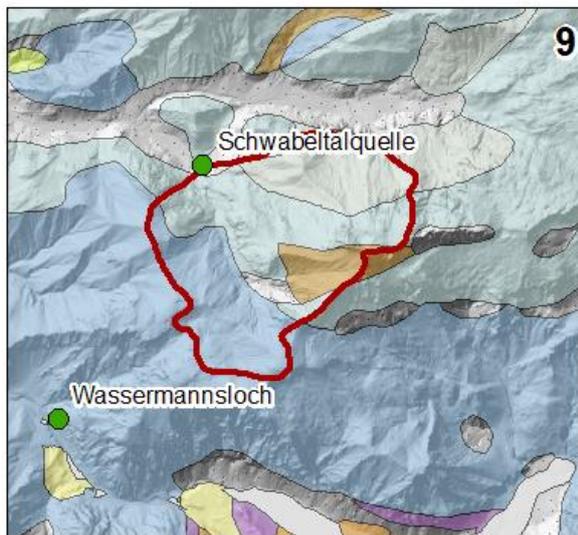
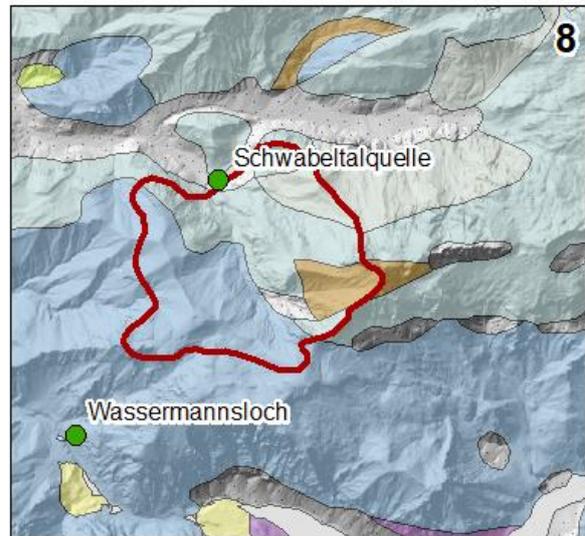
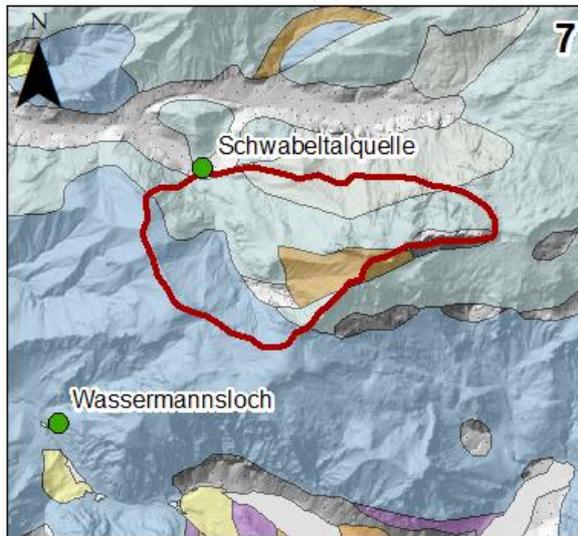


Abbildung 62 (Forts.): Modellierete Szenarien für die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939).

Tabelle 46: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,84	0,84	1,02	1,01
2	0,83	0,83	1,02	1,01
3	0,82	0,82	1,03	1,01
4	0,82	0,82	1,02	1,01
5	0,80	0,81	1,02	1,01
6	0,79	0,80	1,04	1,02
7	0,79	0,79	1,04	1,02
8	0,79	0,79	1,03	1,01
9	0,79	0,80	1,02	1,01
10	0,79	0,79	1,03	1,01
11	0,79	0,79	1,04	1,01

Tabelle 46 und Tabelle 47 stellen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Alle Szenarien zeigen zufriedenstellende Effizienzkriterien (KGE zwischen 0,79 und 0,84), und treffen die Form der Quellschüttung mit ausreichender Genauigkeit (Korrelationskoeffizienten zwischen 0,79 und 0,84). Die Schwankungsbreite der Quellschüttung wird gut abgebildet (tendenziell etwas überschätzt - relative Variabilitäten zwischen 1,02 und 1,04), die Wasserbilanz ist ausgeglichen (systematische Fehler zwischen 1,01 und 1,02).

Tabelle 47: Optimierte Modellparameter für die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	20	9,7	485	1,3	0,80	3,9
2	23	4,4	615	1,4	0,01	6,1
3	21	-2,5	867	1,6	0,54	7,2
4	460	1,0	246	1,4	0,32	4,0
5	540	-1,7	264	1,5	0,00	4,1
6	21	-21,6	902	1,6	0,78	5,3
7	20	-21,8	884	1,5	0,67	6,2
8	642	-6,2	248	1,4	0,04	3,9
9	744	-8,6	234	1,4	0,10	4,5
10	681	-7,7	245	1,3	0,05	4,0
11	16	-37,1	977	1,3	0,76	6,4

Die optimierten Modellparameter zeigen eher hohe Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3), in Einklang mit dem entwässerten Karstsystem, bei insgesamt hoher Streuung (234 – 977 mm). Die Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) schwanken stark (zwischen 16 und 744 mm), liegen aber durchwegs im erwarteten Bereich. Die tendenziell kurze Reaktionszeit (x_4) steht mit dem tiefgreifend verkarsteten Hochschwabmassiv im Einklang. Die Schneeschmelzfaktoren (c_2) sind durchwegs, die Schneedynamikfaktoren (c_1) überwiegend plausibel. Da keine Informationen über allogene Grundwasserneubildung im Einzugsbereich der Quelle vorliegen, werden Austauschkoefizienten (x_2) nahe 0 mm/Tag als plausibel erachtet.

Schwabeltalquelle (Szenario 3)

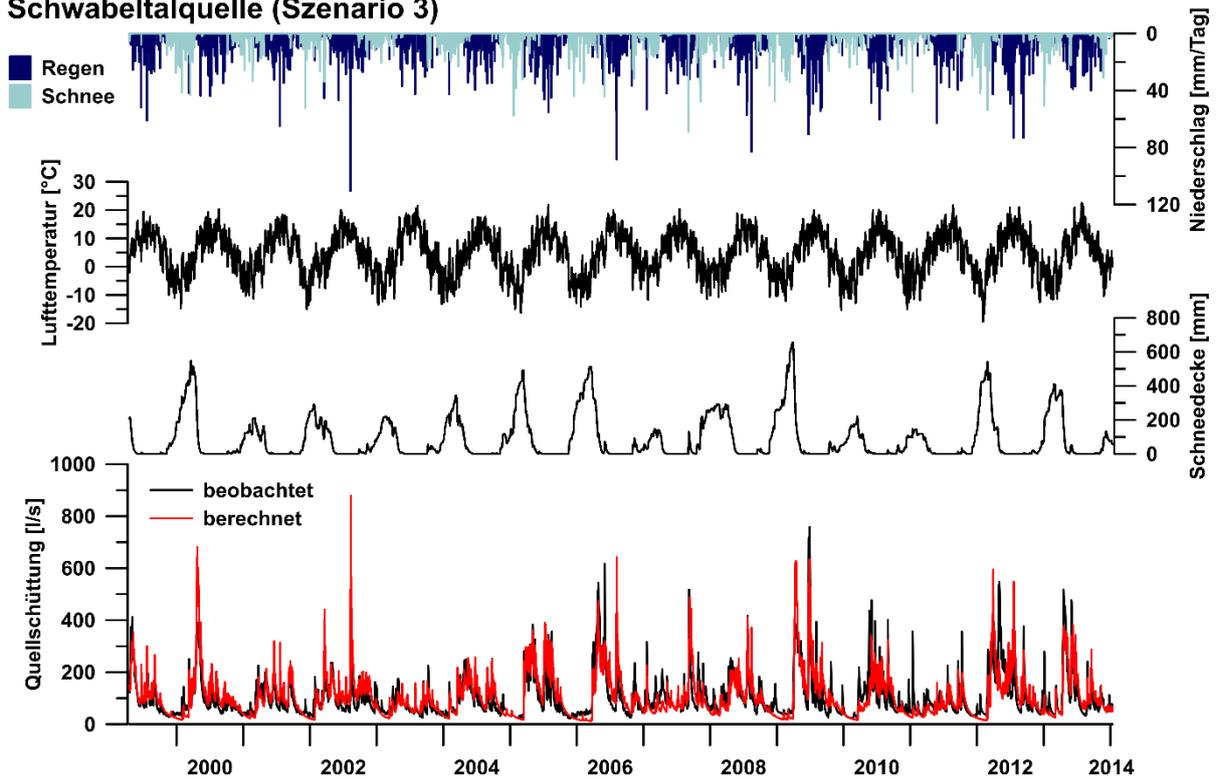


Abbildung 63: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet der Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939), Szenario 3.

Abbildung 63 und Abbildung 64 stellen die Ergebnisse für Szenario 3 zusammen, das sich insbesondere durch seinen ausgeglichenen Austauschkoeffizienten (-2,5 mm/Tag) und vor allem seine hydrogeologische plausible Lage (z.B. im Vergleich zu Szenario 4) von den Alternativen abhebt. Beobachtete und berechnete Quellschüttungsganglinie zeigen sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 63, Abbildung 64a; KGE 0,82; Korrelationskoeffizient 0,82). Die Schwankungsbreite der Ganglinie ist ebenfalls gut abgebildet (relative Variabilität 1,03), lediglich sehr niedrige Quellschüttungen werden vom Modell systematisch unterschätzt (Abbildung 64a,b). Zusammen mit dem niedrigen Austauschkoeffizienten weist der geringe systematische Fehler (1,01) auf eine ausgeglichene Wasserbilanz hin. Die Saisonalität der Schüttungsganglinie wird nur grob getroffen – während der Schneeschmelze im Frühjahr wird die Schüttung stark unter-, während der anschließenden Sommermonate systematisch überschätzt (Abbildung 64c). Alle optimierten Modellparameter weisen plausible Werte auf, die kurze Reaktionszeit steht mit dem intensiv verkarsteten Einzugsgebiet in Einklang.

Schwabeltalquelle (Szenario 3)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,82
Korrelationskoeffizient [-]	0,82
systematischer Fehler [-]	1,01
relative Variabilität [-]	1,03

Niederschlag		Quellschüttung		Modellparameter	
■ Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert			
■ Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich			

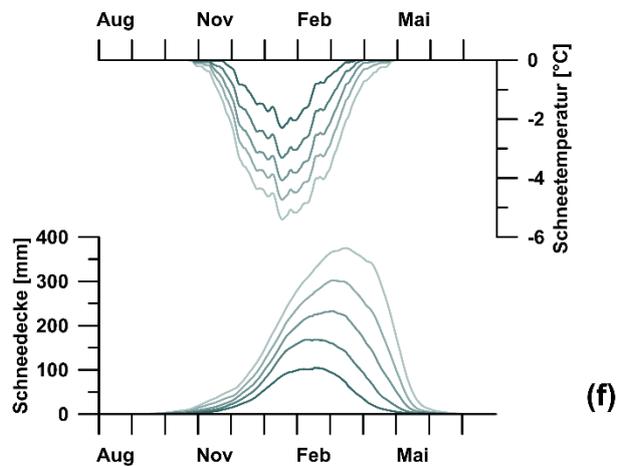
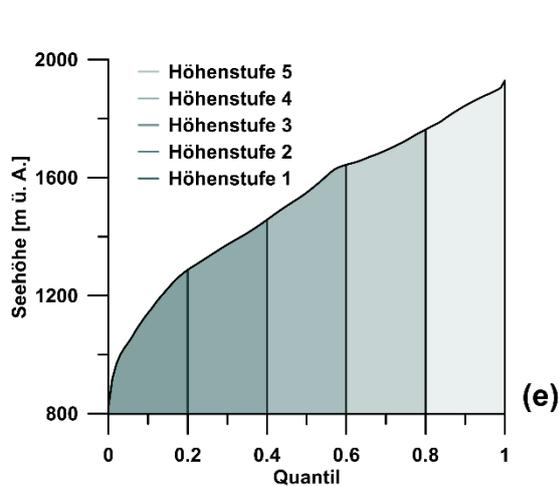
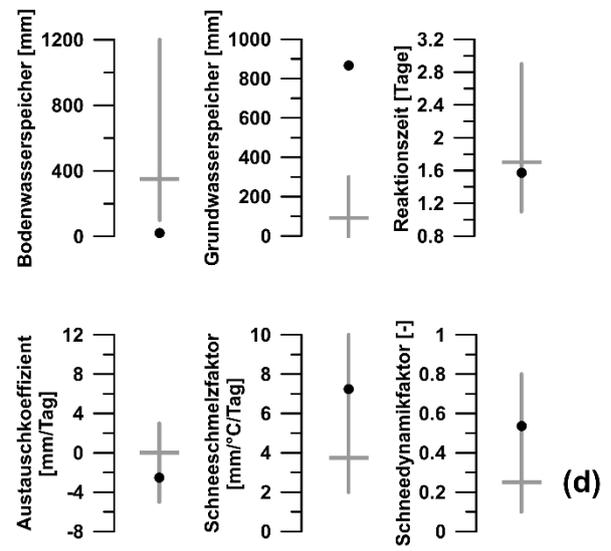
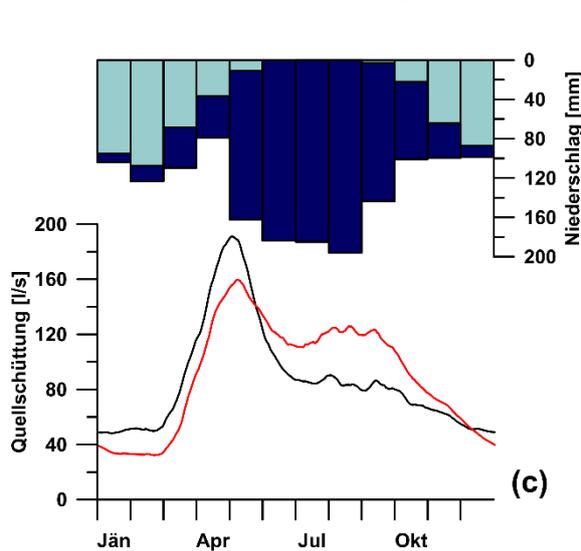
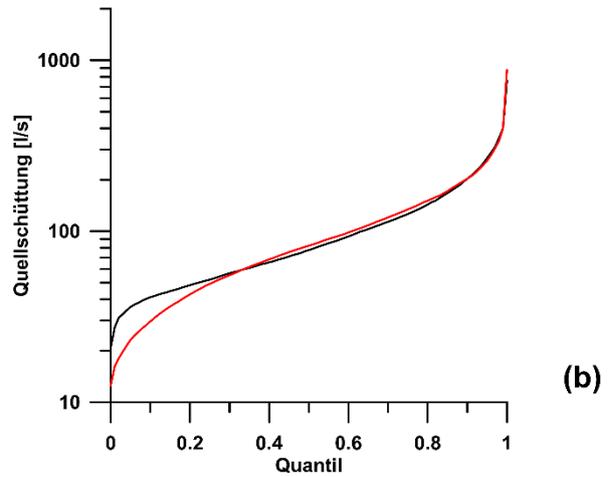
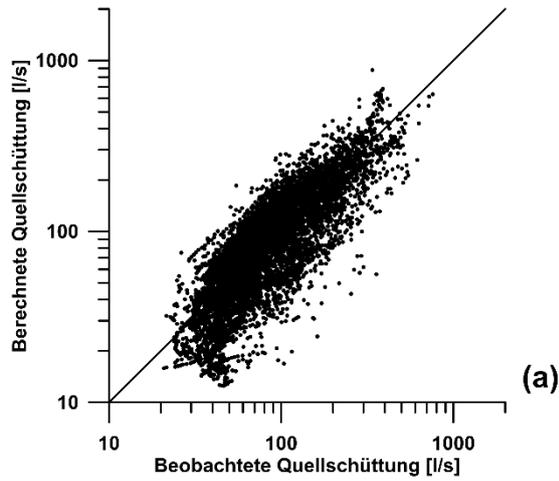


Abbildung 64: Bewertung der Modellierungsergebnisse für die Schwabeltalquelle (HZB-Nr. 395939), Szenario 3. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.1.1.16. Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871)

Das Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871; auch „Schwarze Lacke“) befindet sich in den Nördlichen Kalkalpen auf 584,9 m ü. A. (Abbildung 1, Abbildung 65a). Sie liegt an der Bezirks- und Gemeindegrenze der Gemeinden Eisenerz (Bezirk Leoben) und Landl (Bezirk Liezen). Von 1.1.1997 bis 31.12.2017 liegt eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung der Quellschüttung vor, Datenlücken nehmen lediglich 0,7 % der Beobachtungsperiode ein. Die mittlere Schüttung beträgt 505 l/s (53 – 8267 l/s) und die durchschnittliche Leitfähigkeit schwankt zwischen 148 und 243 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mit einem Mittelwert von 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Die Grundzüge der regionalen, (hydro-)geologischen Situation sind im Kapitel Schwabeltalquelle erörtert, im Folgenden werden sie um die speziell im Zusammenhang mit dem Wassermannsloch entscheidenden Gegebenheiten ergänzt.

Die tiefgreifende Verkarstung folgt in der Regel dem durch die Bruchtektonik vorgegebenen Störungssystem, wobei im regionalen Maßstab das Störungsnetzwerk tendenziell bevorzugte Fließwege darstellt, während die Störungskerne lediglich lokal begrenzte, hydraulische Barrieren ausbilden (Strobl, 1992; Bryda, 2001; Plan, 2002; Bauer et al., 2016). Insgesamt betrachtet sind Verkarstungsstrukturen der westlichen Hochschwabgruppe deutlich an die überwiegend W-E bis SW-NE streichenden, tektonischen Strukturen gebunden (Strobl, 1992; Benischke und Strobl, 2006; Strobl, 2009a). Insbesondere die steil einfallenden, teils beträchtliche Öffnungsweiten zeigenden Störungen bilden bevorzugte Infiltrationsbereiche und bilden teils bis in große Tiefe bevorzugte Wasserwege (Strobl, 2009a). Ein Vergleich der Störungs- und Kluftrichtungen an der Oberfläche mit den Gang- und Kluftrichtungen in Frauenmauer-Langstein-Höhlensystem (Fabiani et al., 1980) bzw. den Höhlen der Hinterseeau (Benischke und Strobl, 2006) zeigt auffallende Übereinstimmung und zeichnet damit die grobe Richtung der Entwässerung vor (Strobl, 2009a). Insgesamt betrachtet stellen vor allem E bis ENE streichende Seitenverschiebungen bevorzugte Fließwege dar und führen damit zu einer W-E gerichteten unterirdischen Entwässerung, die durch entsprechende, frei fließende Höhlenbäche im Frauenmauer-Langstein-Höhlensystem wie im Böse-Mauer-Schacht bestätigt wird (Fabiani et al., 1980; Strobl, 1992, 2009a; Decker und Reiter, 2001; Benischke und Strobl, 2006; Bryda et al., 2013). Auswertungen der Quellschüttungsganglinie mit unterschiedlichen Methoden (Maillet, 1905; Mangin, 1975; Sauter, 1992; Perrin et al., 2003; Geyer et al., 2008; Birk und Hergarten, 2010) deuten übereinstimmend auf einen stark verkarsteten Grundwasserleiter mit kurzer Verweilzeit und konzentriertem Abfluss entlang ausgeprägter Karsthohlräume hin (Strobl, 1992; Katterbauer, 2011).

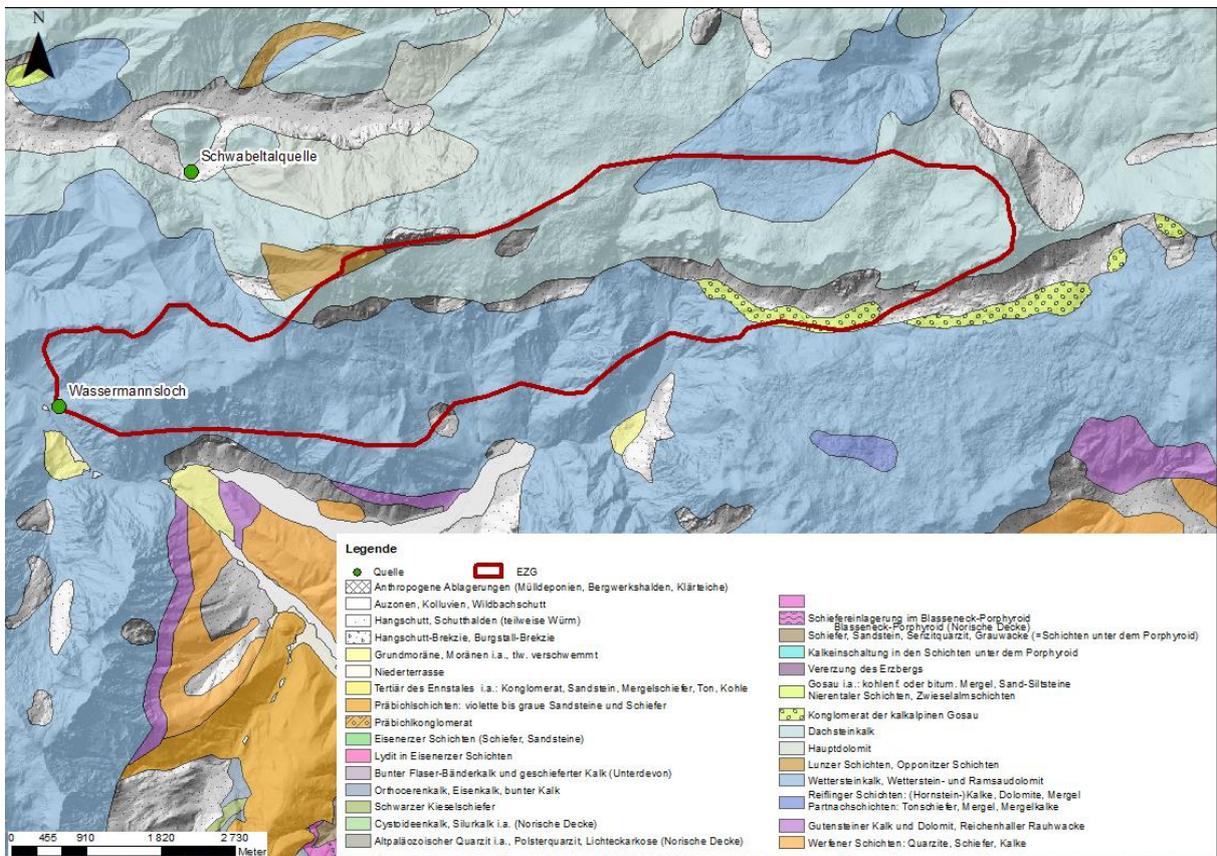
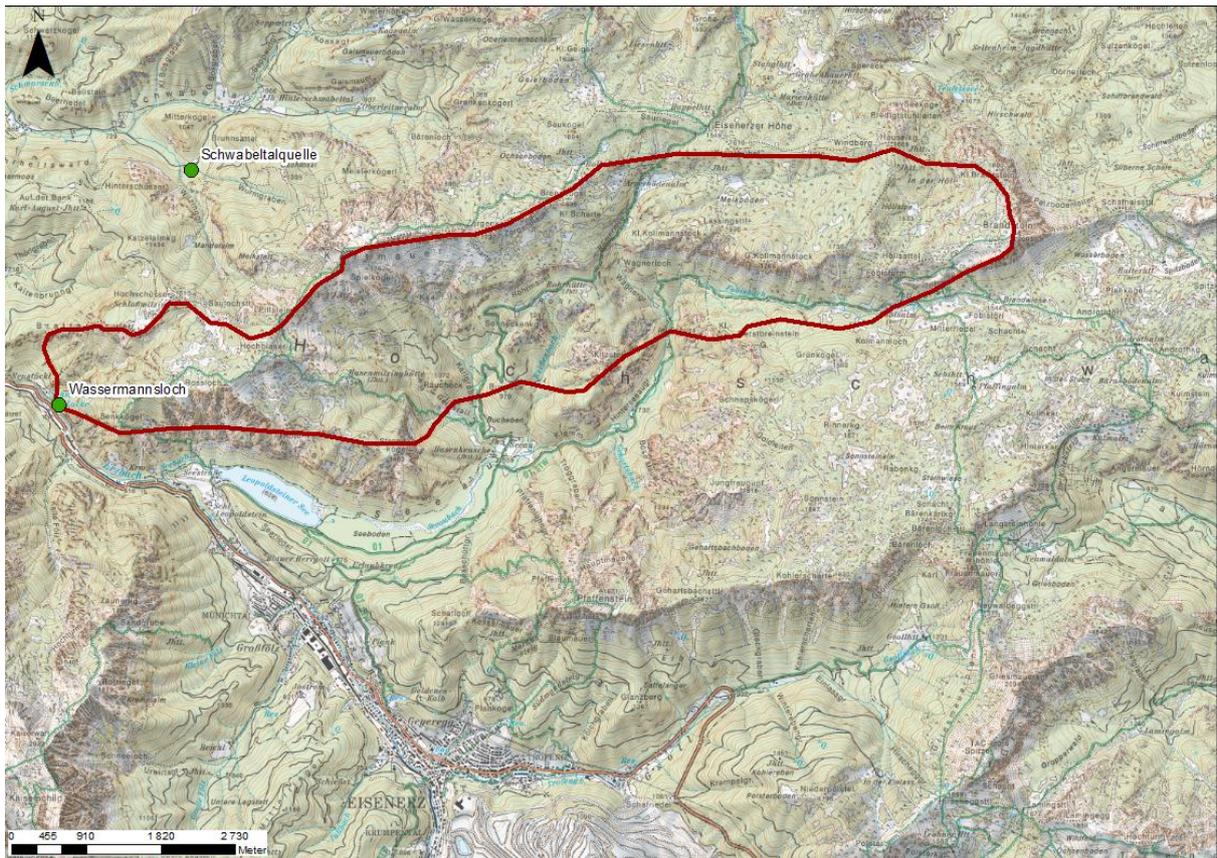


Abbildung 65: (a) Topographie und (b) Geologie im Bereich des Wassermannslochs (HZB-Nr. 395871). Als plausibelstes Einzugsgebiet ist Szenario 7 dargestellt.

Ingesamt werden zehn potenzielle Einzugsgebiete für das Wassermannsloch ausgewiesen. Tabelle 48 stellt ihre wichtigsten Kenngrößen zusammen, Abbildung 66 ihre Lage im Einzelnen dar.

Tabelle 48: Modellierete Szenarien für das Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871), geordnet nach ansteigender Einzugsgebietsfläche. Zum Vergleich von Modellierungsergebnissen und Isotopenanalyse sind die mittlere Seehöhe und Reliefunterschied jedes potenziellen Einzugsgebiets sowie das langjährige (1976 – 2017) Mittel des Jahresniederschlags und der jährlichen potenziellen Evapotranspiration ausgewiesen.

Szenario	Fläche [km²]	Mittlere Seehöhe [m ü. A.]	Relief- unterschied [m]	Mittlerer Niederschlag [mm/Jahr]	Mittlere potenzielle Evapotranspiration [mm/Jahr]
1	1,53	1423	1177	1487	718
2	2,71	1270	1177	1451	726
3	53,42	1301	1177	1459	723
4	4,42	1325	1177	1471	723
5	5,61	1495	1333	1577	715
6	11,31	1519	1333	1682	709
7	53,42	1365	1499	1724	710
8	32,38	1367	1382	1724	710
9	40,72	1444	1408	1690	713
10	32,38	1462	1497	1661	718

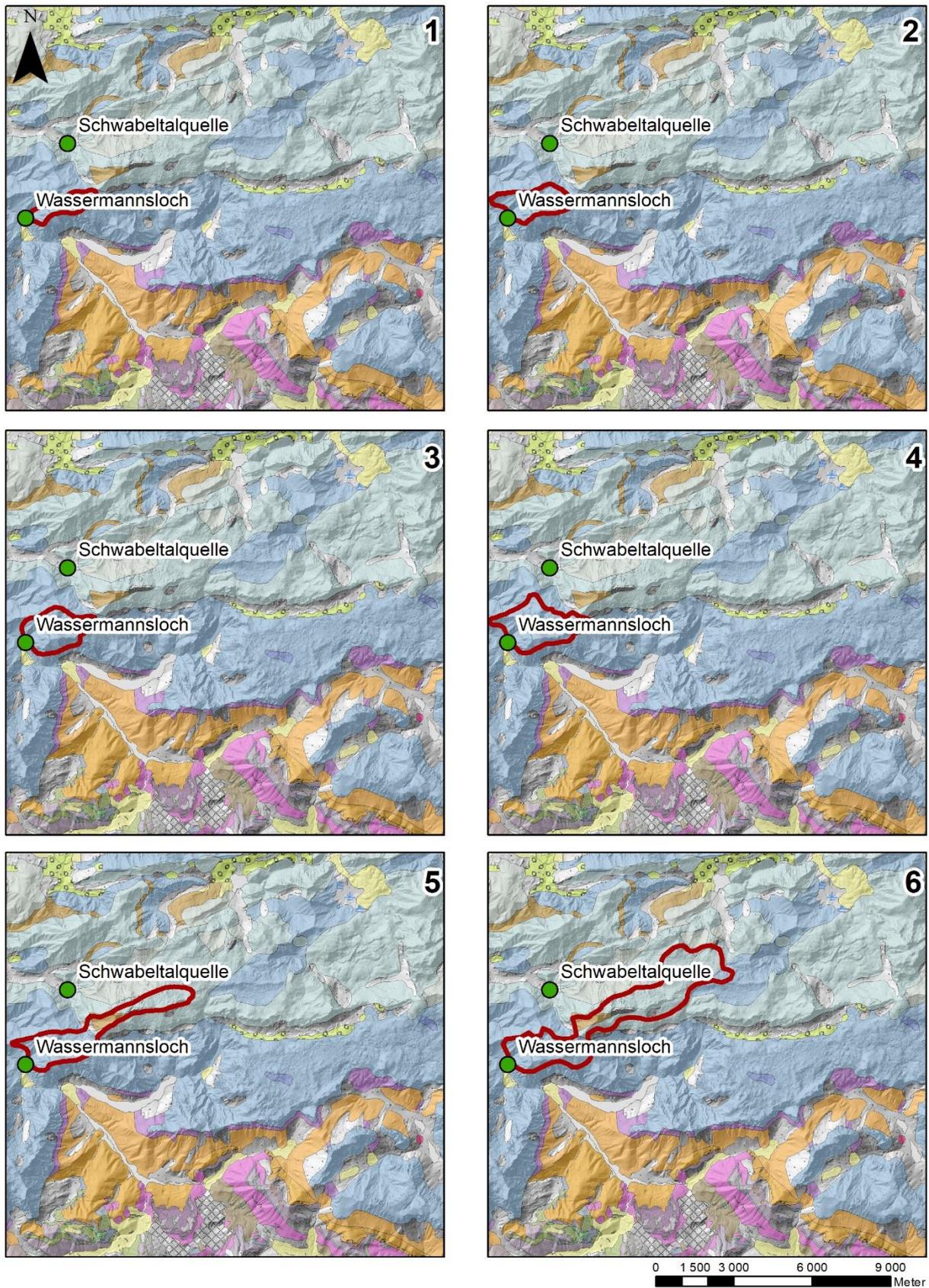
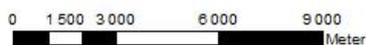
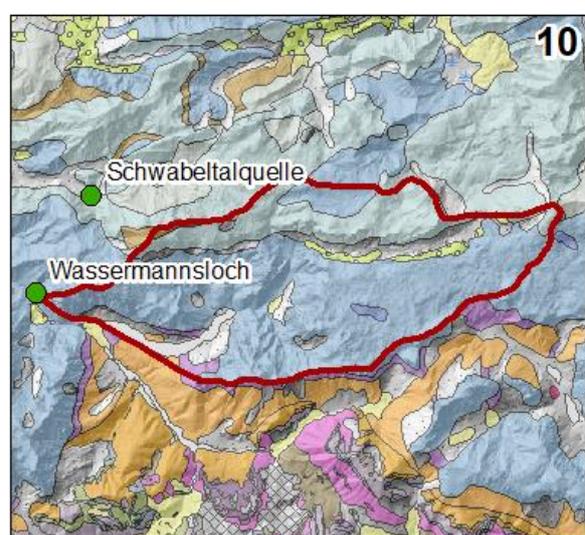
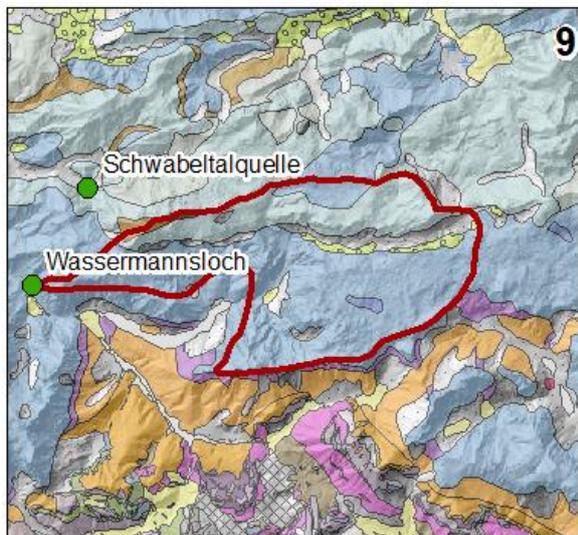
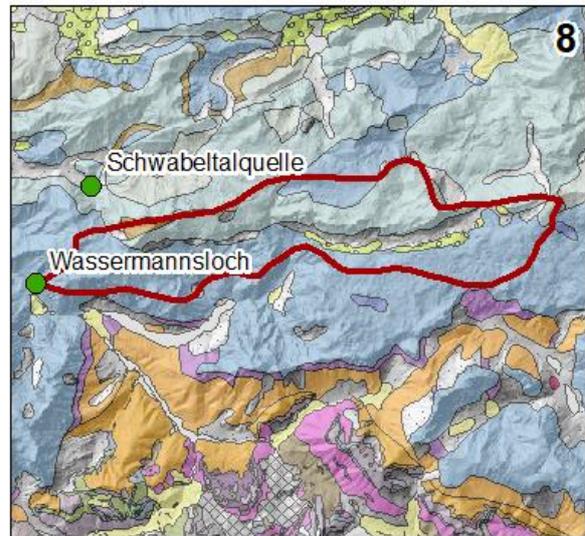
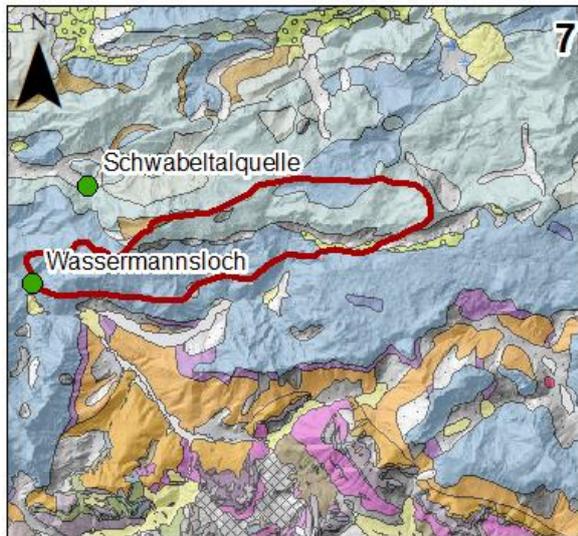


Abbildung 66: Modellierte Szenarien für das Wassermansloch (HZB-Nr. 395871).



Legende

- Quelle
- EZG
- ▨ Anthropogene Ablagerungen (Mülldeponien, Bergwerkshalden, Klärteiche)
- ▤ Moor, Torf, Sumpf, Vernässung
- ▥ Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt
- ▧ Schwemmfächer, Schwemmkegel, Murenkegel (z.T. spät-postglazial)
- ▩ Hangschutt, Schutthalden (teilweise Würm)
- Hangschutt-Brekzie, Burgstall-Brekzie
- Grundmoräne, Moränen i.a., tw. verschwemmt
- ▬ Wallförmige Ufermoränen (End- und Seitenmoränen)
- ▭ Niederterrasse
- ▮ Tertiär des Ennstales i.a.: Konglomerat, Sandstein, Mergelschiefer, Ton, Kohle
- ▯ Präbichlschichten: violette bis graue Sandsteine und Schiefer
- ▰ Präbichlkonglomerat
- ▱ Eisenerzer Schichten (Schiefer, Sandsteine)
- ▲ Lydit in Eisenerzer Schichten
- △ Erzführender Kalk (Kalke mit Siderit - Ankerit - Vererzung), Altpaläozoischer Bänderkalk (Norische Decke)
- ▴ Bunter Flaser-Bänderkalk und geschieferter Kalk (Unterdevon)
- ▵ Orthoerokalk, Eisenkalk, bunter Kalk

- ▭ Schwarzer Kieselnschiefer
- ▮ Radschiefer (Norische Decke)
- ▯ Cystideenkalk, Silurkalk i.a. (Norische Decke)
- ▰ Altpaläozoischer Quarzit i.a., Polsterquarzit, Lichteckarkose (Norische Decke)
- ▱ Blasseneck-Porphyr (Norische Decke)
- ▲ Schiefereinlagerung im Blasseneck-Porphyr
- △ Schiefer, Sandstein, Serizitquarzit, Grauwacke (=Schichten unter dem Porphyr)
- ▴ Kalkeinsschaltung in den Schichten unter dem Porphyr
- ▵ Vererzung des Erzbergs
- ▶ Gosau i.a., Nierentaler Schichten, Zwieselalmschichten
- ▷ Konglomerat der kalkalpinen Gosau
- Dachsteinkalk
- Hauptdolomit
- Lunzer Schichten, Reingrabener Schiefer, Tisoveckalk, Opponitzer Schichten
- ▻ Wettersteinkalk, Wetterstein- und Ramsaudolomit
- ▼ Reifinger Schichten, Partrachschiechten
- ▽ Gutensteiner Kalk und Dolomit, Reichenhaller Rauhwacke
- ▾ Werfener Schichten: Quarzite, Schiefer, Kalke
- ▿ Haselgebirge: Mischgesteine von Evaporiten und Peliten

Abbildung 66 (Forts.): Modellierete Szenarien für das Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871).

Tabelle 49: Effizienzkriterien für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung des Wassermannsloches (HZB-Nr. 395871).

Szenario	Kling-Gupta Effizienzkriterium [-]	Korrelationskoeffizient [-]	relative Variabilität [-]	systematischer Fehler [-]
1	0,20	0,77	0,26	0,79
2	0,28	0,70	0,40	0,74
3	0,34	0,73	0,46	0,74
4	0,44	0,72	0,59	0,75
5	0,64	0,79	0,75	0,84
6	0,85	0,85	0,99	1,00
7	0,81	0,81	1,00	1,00
8	0,83	0,83	1,01	1,00
9	0,82	0,82	1,01	1,00
10	0,76	0,76	1,00	1,00

Tabelle 49 und Tabelle 50 fassen die Ergebnisse der Modellierung zusammen. Fünf der zehn Szenarien zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Quellschüttungsganglinie (Szenario 6 – 9; KGE zwischen 0,76 und 0,85; Korrelationskoeffizienten zwischen 0,76 und 0,85), die übrigen Szenarien zeigen dagegen zufriedenstellende (Szenario 5) oder nicht zufriedenstellende (Szenario 1 – 4) Übereinstimmung. Die Schwankungsbreite der Schüttung wird von Szenario 6 – 10 ausgezeichnet abgebildet (relative Variabilität 0,99 – 1,01), der systematische Fehler ist sehr gering (1,00).

Alle Szenarien weisen plausible Grundwasserspeicherkapazitäten (x_3) und – mit einer Ausnahme – plausible Schneeschmelzfaktoren (c_2) auf. Die Reaktionszeit (x_4) ist tendenziell kurz, in guter Übereinstimmung mit der berichteten, intensiven Verkarstung des Einzugsgebietes. Die Schneedynamikfaktoren (c_1) liegen durchwegs sehr hoch, die Bodenwasserspeicherkapazitäten (x_1) tendenziell niedrig. Die Austauschkoefizienten (x_2) schwanken in Abhängigkeit der angenommenen Einzugsgebietsfläche (vgl. Tabelle 48 mit Tabelle 49). Da überwiegend autogene Grundwasserneubildung angenommen wird, werden Koeffizienten nahe 0 (ausgeglichene Wasserbilanz) als plausibel betrachtet.

Tabelle 50: Optimierte Modellparameter für das Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871). Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)]

Szenario	x_1 [mm]	x_2 [mm/Tag]	x_3 [mm]	x_4 [Tage]	c_1 [-]	c_2 [mm/(°C Tag)]
1	6	29,8	185	1,6	0,99	8,1
2	5	13,6	95	2,0	0,99	10,3
3	9	11,1	84	2,0	0,99	7,0
4	9	6,9	55	2,0	0,99	6,8
5	12	5,8	57	2,0	0,98	17,8
6	18	2,1	103	1,6	0,97	4,9
7	155	-6,5	134	1,4	0,97	6,1
8	18	-28,5	257	1,3	0,96	4,0
9	9	-43,1	289	1,3	0,97	4,2
10	129	-43,1	258	1,3	0,98	4,6

Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen die Modellergebnisse für Szenario 7, das als plausibelstes Einzugsgebiet betrachtet wird. Beobachtete und berechnete Quellschüttungsganglinie zeigen sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 67, Abbildung 68a; KGE und Korrelationskoeffizient jeweils 0,81). Die Schwankungsbreite wird ebenfalls gut abgebildet (relative Variabilität 1,00), das Modell unterschätzt jedoch systematisch die niedrigen Quellschüttungen, während mittlere Schüttungen überschätzt werden (Abbildung 68a,b). Die Saisonalität der Quellschüttungsganglinie wird vom Modell grob getroffen, ihr rasches Ansteigen während der Schneeschmelze im Frühjahr jedoch etwas zu spät berechnet und die Gesamtschüttung im Frühjahr unterschätzt (Abbildung 68c). Während der Sommer- und Herbstmonate wird die Schüttung dagegen systematisch überschätzt (Abbildung 68c). Schneeschmelzfaktor (6,1 mm/(°C Tag)), Bodenwasser- (155 mm) und Grundwasserspeicherkapazität (134 mm) und Reaktionszeit (1,4 Tage) liegen innerhalb des erwarteten Bereichs (Abbildung 68d). Die tendenziell kurze Reaktionszeit steht mit der intensiven Verkarstung des Einzugsgebietes in Einklang. Der Schneedynamikfaktor liegt dagegen sehr hoch (0,97), auf die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit diesem Parameter wurde bereits eingegangen. Der negative Austauschkoefizient (-6,5 mm/Tag) zeigt mäßig starke Abflüsse in benachbarte Einzugsgebiete an.

Wassermannsloch (Szenario 7)

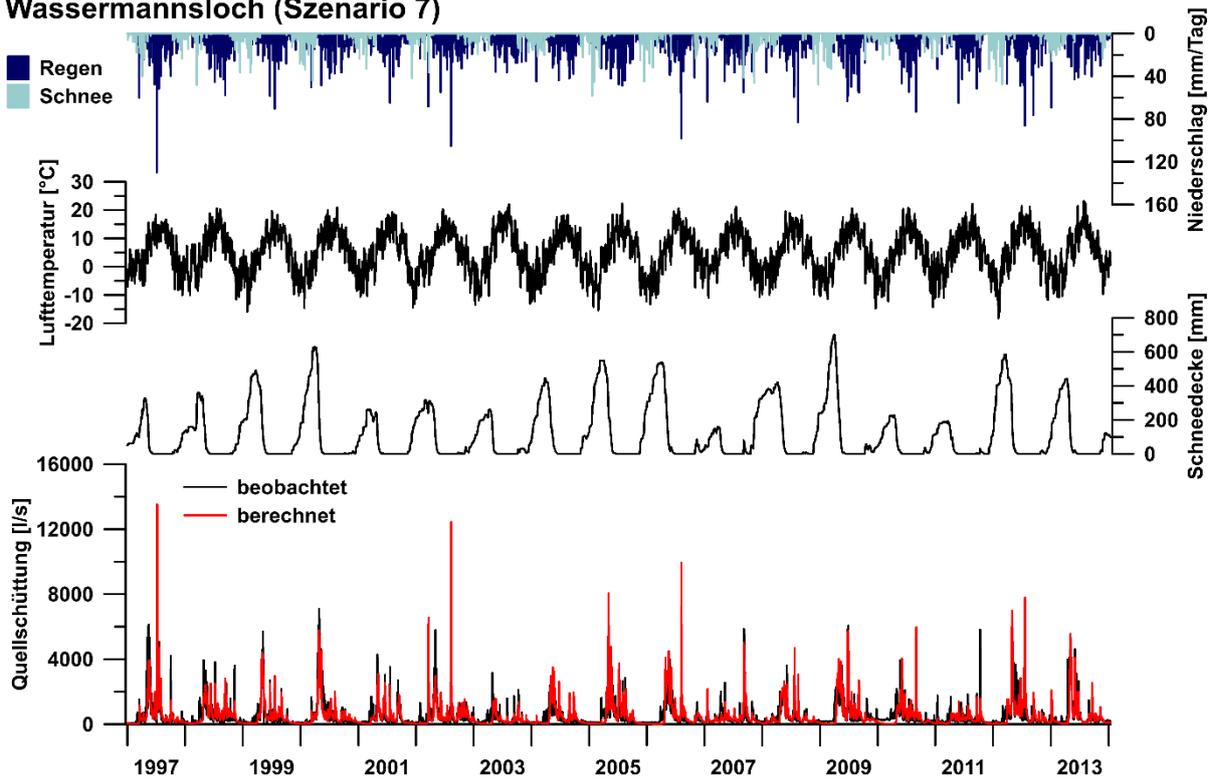


Abbildung 67: Berechnete und beobachtete Quellschüttung, mittlere Schneedeckenhöhe (Wasseräquivalent), mittlere Lufttemperatur, Regen und Schneefall im Einzugsgebiet des Wassermannslochs (HZB-Nr. 395871), Szenario 7.

Wassermannsloch (Szenario 7)

Kling-Gupta-Effizienzkriterium [-]	0,81
Korrelationskoeffizient [-]	0,81
systematischer Fehler [-]	1,00
relative Variabilität [-]	1,00

Niederschlag	Quellschüttung	Modellparameter
Schnee	— beobachtet	● Optimierter Wert
Regen	— berechnet	— Typischer Wertebereich

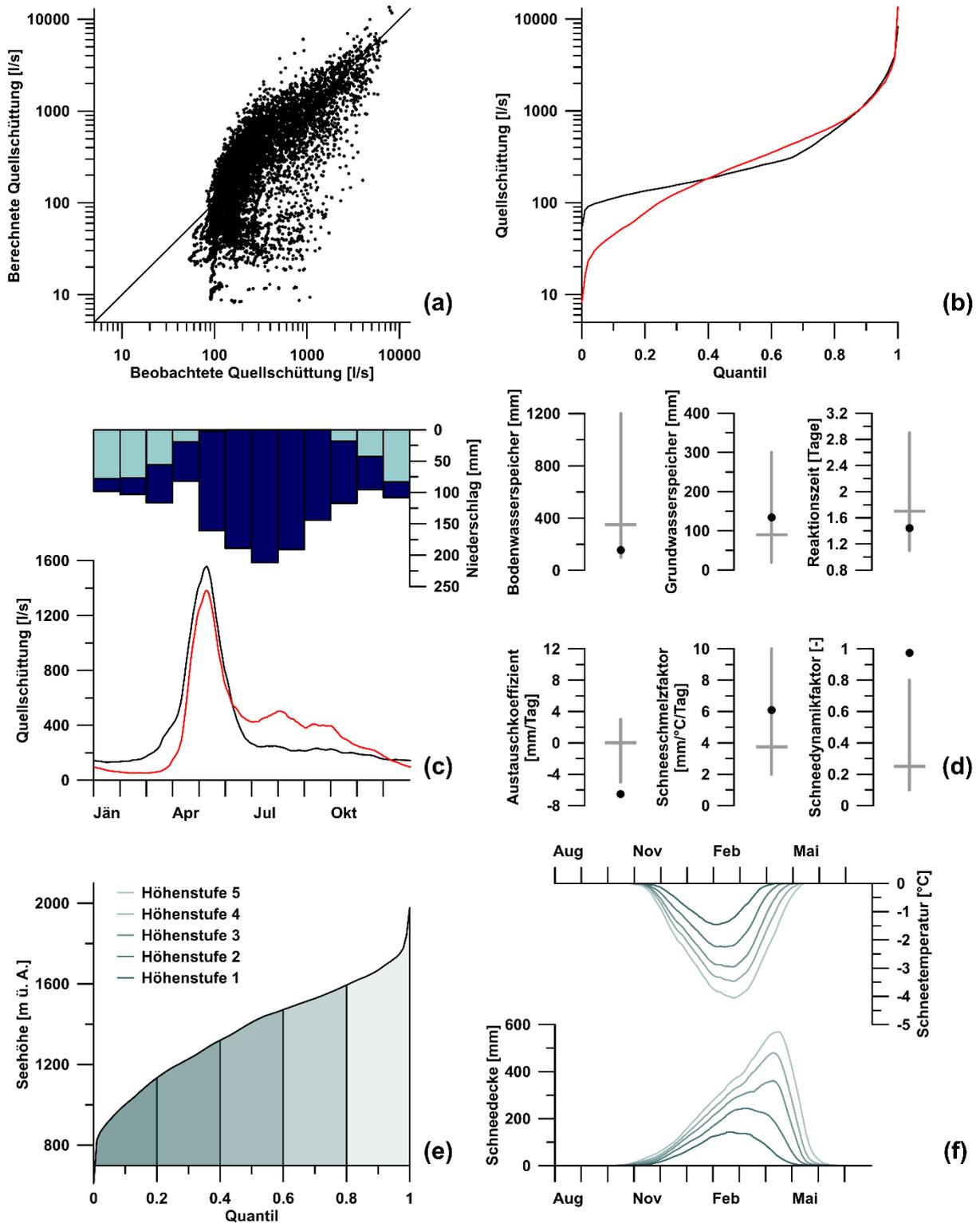


Abbildung 68: Bewertung der Modellierungsergebnisse für das Wassermannsloch (HZB-Nr. 395871), Szenario 7. (a) Korrelation, (b) Dauerlinie, (c) Saisonalität, (d) Optimierte Parameterwerte, (e) Seehöhenverteilung und Höhenstufen, (f) Schneedeckenhöhe und -temperatur.

3.2. Isotopenanalyse

3.2.1. Höhenabhängigkeit von $\delta^{18}\text{O}$ im Niederschlag

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden aktuelle Daten des Österreichischen Isotopenmessnetzes „Austrian Network of Isotopes in Precipitation (ANIP)“, ein Sondermessprogramm der Gewässerzustandsüberwachung (BGBl. II Nr. 479/2006 i.d.g.F), für eine Aktualisierung des Höhengradienten des $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisses im Niederschlag herangezogen. Basierend auf 200 gewichteten Jahresmitteln von 52 über Österreich verteilten Niederschlagsstationen im Zeitraum 2014-2018 wurden aktuelle Höhengradienten ermittelt.

Abbildung 69 zeigt die Höhenabhängigkeit des niederschlagsgewichteten $\delta^{18}\text{O}$ für Österreich im Zeitraum 2014-2018. Demnach variiert der Höheneffekt für diesen Zeitraum jährlich zwischen -0,13 und -0,22 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m, mit einem Mittelwert von -0,16 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m. Hierbei hat jedoch die Kärntner Niederschlagsstation Villacher Alpe (VA) mit einer Seehöhe von 2140 m ü. A. und einem für ihre Höhenlage vergleichsweise hohen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert einen signifikanten Einfluss auf den ermittelten Höhengradienten.

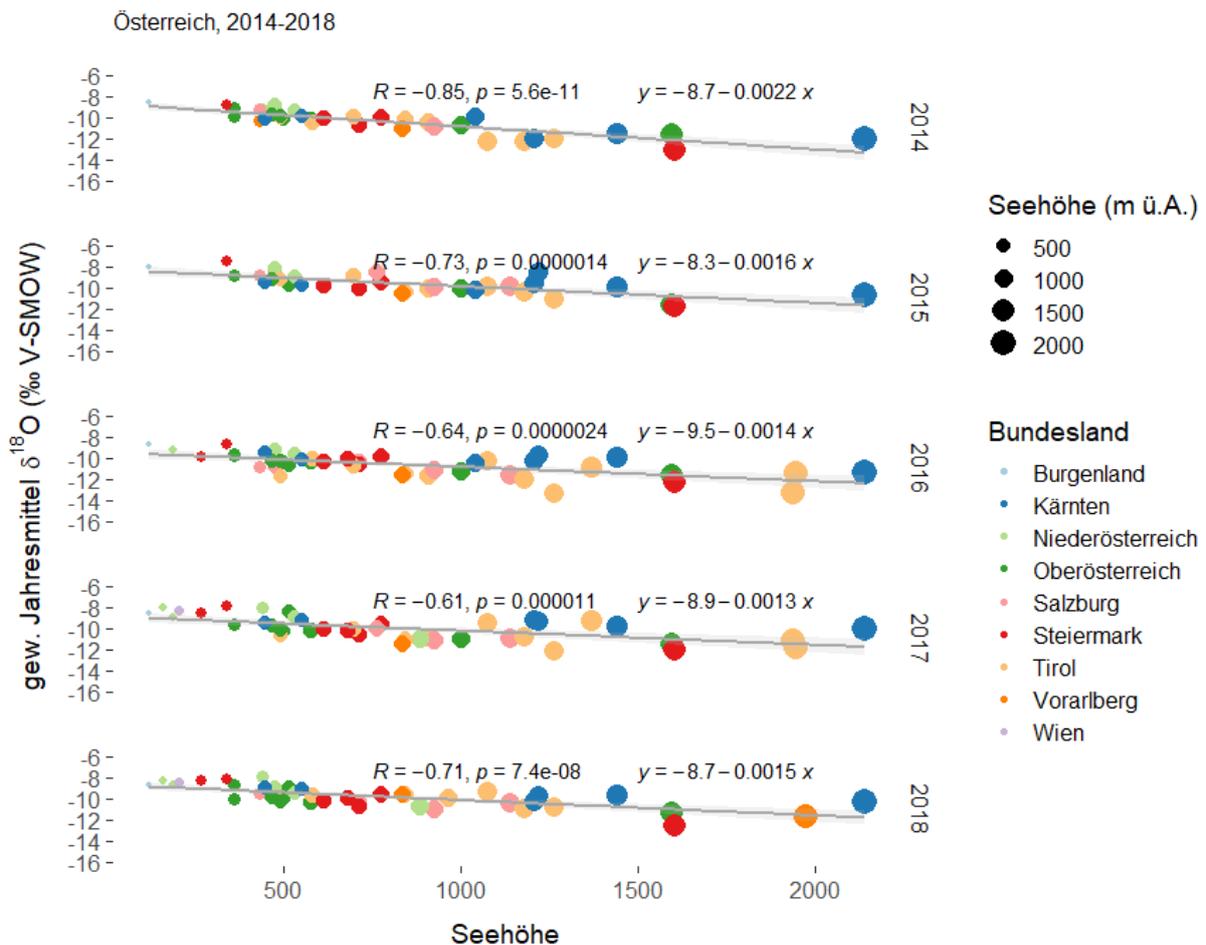


Abbildung 69: Höhenabhängigkeit des $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisses im Niederschlag in Österreich, 2014-2018.

Basierend auf den Erkenntnissen früherer Arbeiten (siehe Kapitel 2.3.3 Auswertung der Isotopendaten) wurde deshalb für die Aktualisierung des Höhengradienten im Niederschlag in der gegenständlichen Untersuchung eine Unterteilung der Niederschlagsstationen entsprechend ihrer Lage in den im HISTALP-Projekt verwendeten klimatologischen Teilregionen (CRS Coarse Resolution Subregions) des erweiterten Alpenraumes (GAR – Greater Alpine Region) vorgenommen (Auer et al. 2007). Demnach ist Österreich durch vier Teilregionen (Nordwest, Nordost, Südwest und Südost) mit gemeinsamen Klimavariationen gekennzeichnet (Abbildung 70; Auer et al. 2007).

Entsprechend dieser Unterteilung liegen die Kärntner Stationen überwiegend in den durch mediterranen Einfluss gekennzeichneten südlichen klimatologischen Teilregionen. Für die Bestimmung der in der vorliegenden Studie verwendeten Höhengradienten wurden die Stationen der zwei nördlichen klimatologischen Teilregionen (Nordost, Nordwest) und der zwei südlichen klimatologischen Teilregionen (Südost, Südwest) jeweils zu einer Gruppe zusammengefasst.

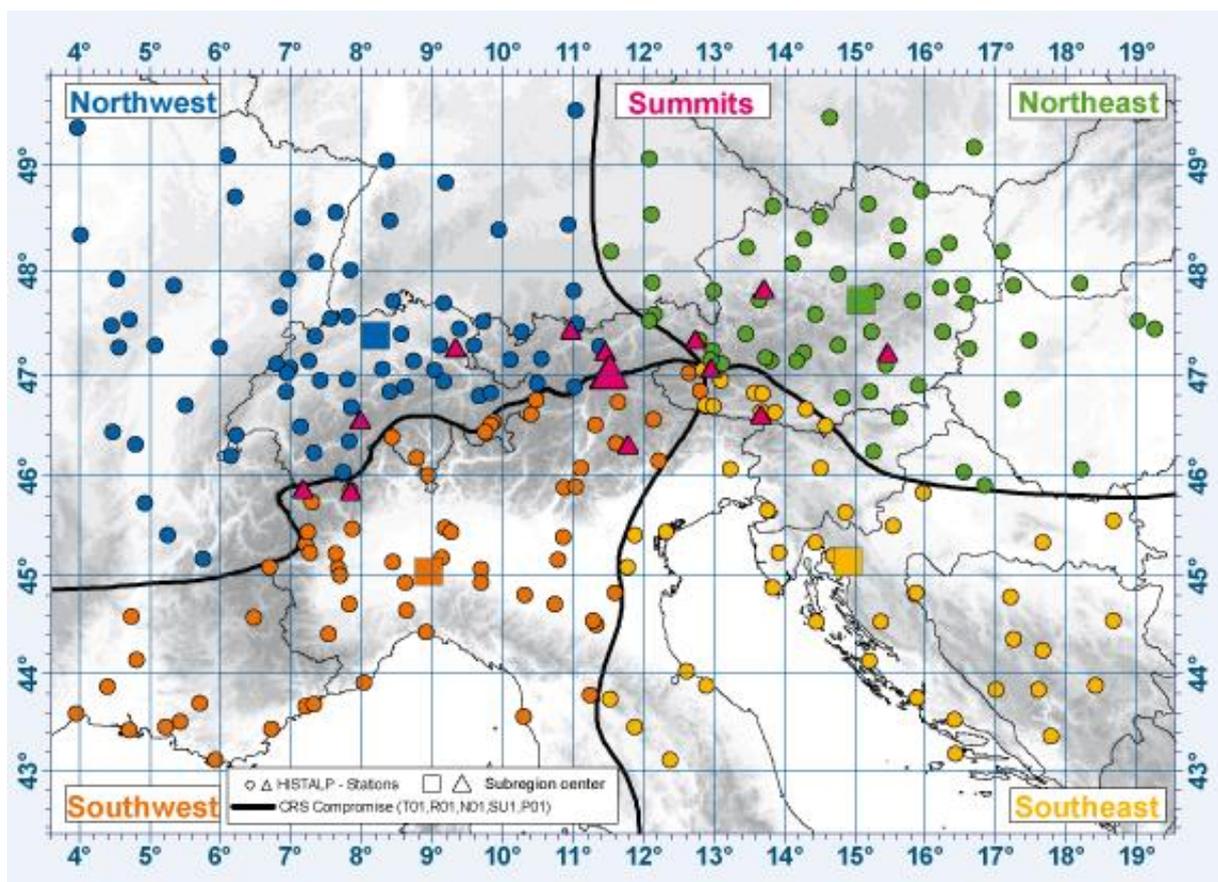


Abbildung 70: Karte der HISTALP-Stationen mit den klimatologischen Teilregionen des erweiterten Alpenraumes (Auer et al. 2007).

Abbildung 71 zeigt die Höhenabhängigkeit von niederschlagsgewichtetem $\delta^{18}\text{O}_w$ für die nördlichen klimatologischen Teilregionen in Österreich im Zeitraum 2014-2018. Die signifikanten Höhengradienten variieren jahresabhängig und in Abhängigkeit von den verfügbaren Stationsdaten zwischen -0,16 und -0,26 ‰ pro 100 m, mit einem Mittelwert von -0,20 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m (Abbildung 71).



Abbildung 71: Höhengradient $\delta^{18}\text{O}_w$ (niederschlagsgewichtet), nördliche klimatologische Teilregionen. Daten aus ANIP - GZÜV-Sondermessprogramm Isotopenmessnetz (ANIP)

Für die südlichen klimatologischen Teilregionen konnte nur in zwei von fünf Jahren ein signifikanter ($p < 0.05$) Zusammenhang zwischen der Seehöhe der Niederschlagsstation und dem niederschlagsgewichtetem $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnis ermittelt werden, die Steigungen schwanken jahresweise zwischen -0,04 und -0,13 ‰ mit einem Mittel von 0,08 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ pro 100 m (siehe Abbildung 72).

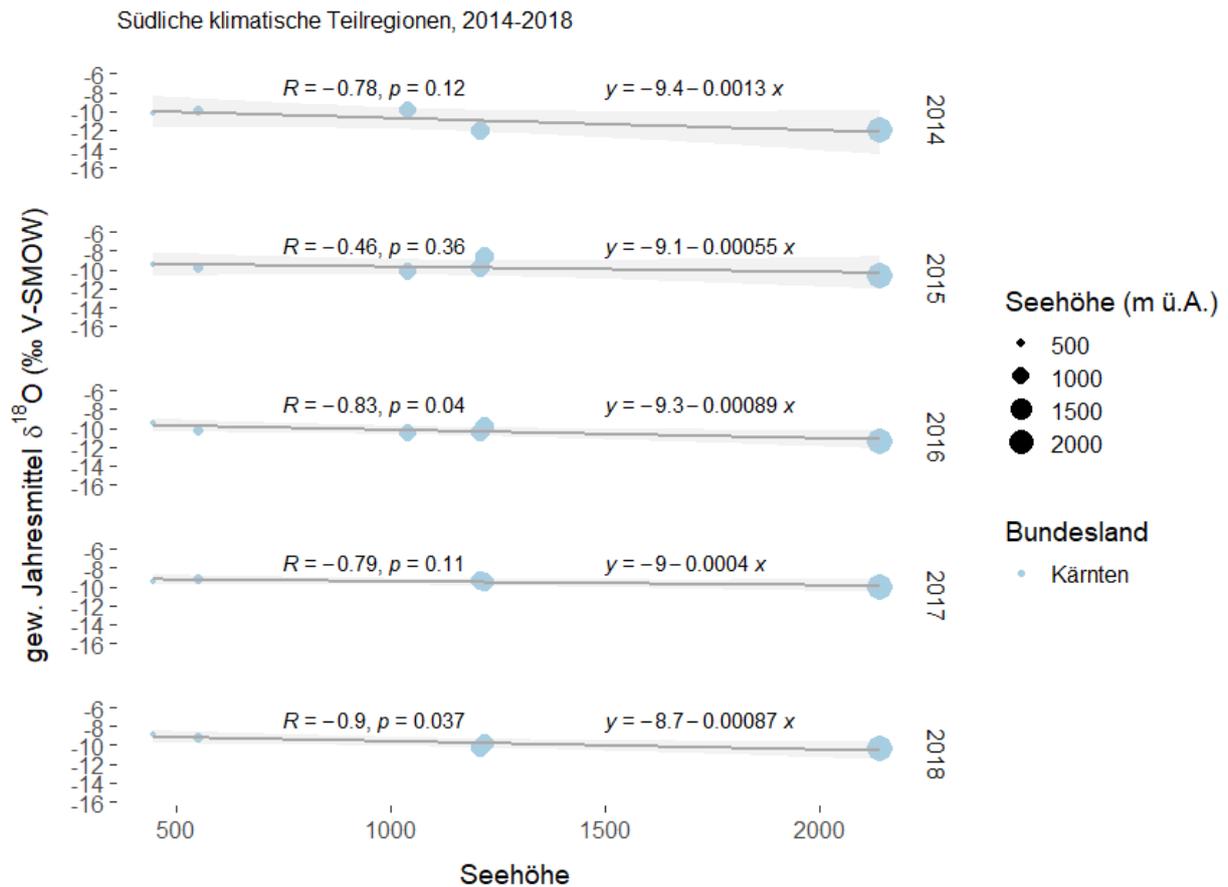


Abbildung 72: Höhengradient für $\delta^{18}\text{O}$ (niederschlagsgewichtet), südliche klimatologische Teilregionen, Quelle: Umweltbundesamt GmbH 2021

3.2.2. Kennwerte und Dynamik von $\delta^{18}\text{O}$ in den Quellen

Zur Abschätzung der mittleren Verweilzeiten (MVZ) und mittleren Höhenlagen der Quelleinzugsgebiete wird in der gegenständlichen Studie vor allem auf die $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse zurückgegriffen. Die Mittelwerte von $\delta^2\text{H}$ in den untersuchten Quellproben sind Tabelle 51, die Einzelwerte im Anhang dargestellt.

Abbildung 73 zeigt die saisonale Entwicklung der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse in den Quellen des HD-Steiermark im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021.

Basisabflussbedingungen kennzeichnen den $\delta^{18}\text{O}$ -Gang der Quellen (Abbildung 73) in der Regel im Spätsommer und Herbst, signifikante Zumischungen jüngerer Komponenten, welche nicht durch weitere Isotopenfraktionierungen (Verdunstung, Kondensation, Ablation der Schneedecke) maskiert wurden, sind aufgrund der Dynamik der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse für das Wassermannsloch, den Ödensee-Kaltwassertrichter, die Riedlbachquelle, die Totes Weib Quelle und den Sagtümpel zu erwarten.

Im etwas geringeren Ausmaß werden demnach die Hammerbach- und Roßlochquelle von schnellen Abflusskomponenten dotiert. Basierend auf den $\delta^{18}\text{O}$ -Gang der Quellen zeigen die Goldschmied-, Brunnader- und Galgenwaldquelle aber auch die Reihbachquelle eine gering ausgeprägte Dynamik, welche auf gute Durchmischung der Grundwasserneubildung und längere Verweilzeiten der Quellwässer hindeutet.

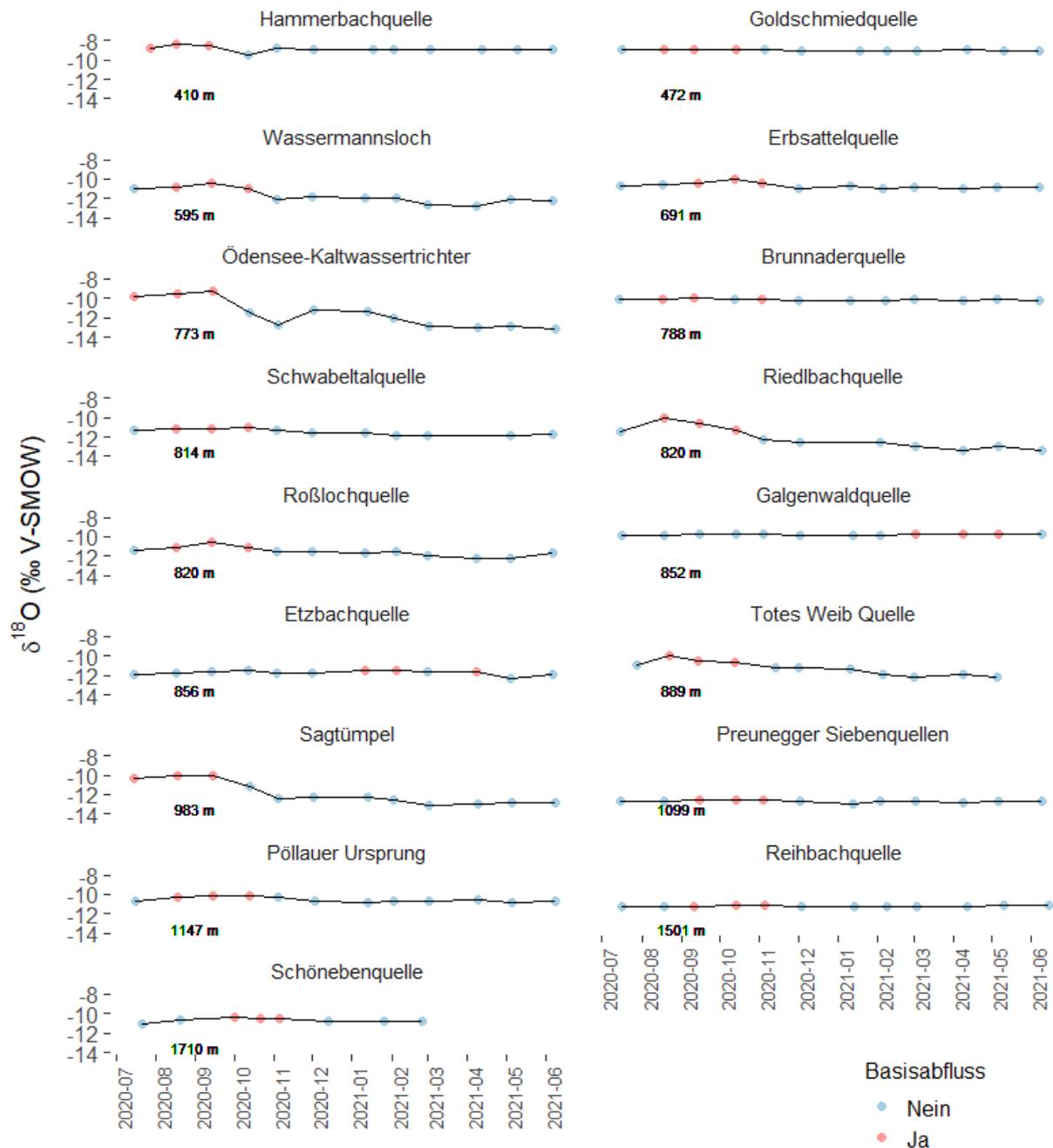


Abbildung 73: Saisonale Entwicklung der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse in den Quellen des HD-Steiermark. Anmerkung: Quellen nach Austrittshöhe sortiert. Festlegung Basisabfluss: 3 höchste (schwerste) $\delta^{18}\text{O}$ -Werte.

Tabelle 51: $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ - und d-Exzess-Mittelwerte der Quellen sowie Steigung (a), Achsenabschnitt (b) und Korrelationskoeffizient (R) der Wasser-Linien der Quellen (QWL) aus der linearen Regression der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Einzelwerte der Quellproben.

Quelle	Höhe [m ü. A.]	n	MW $\delta^{2}\text{O}$	MW $\delta^2\text{H}$	MW d- Exzess	a	b	R
Hammerbachquelle	410	12	-8,89	-60,7	10,4	7,9	9,7	0,97
Goldschmiedquelle	472	12	-9,01	-62,1	10,0	9,0	19,0	0,92
Wassermansloch	595	12	-11,71	-80,4	13,3	7,7	9,3	0,99
Erbsattelquelle	691	12	-10,68	-74,5	11,0	7,6	6,5	0,99
Ödensee- Kaltwassertrichter	773	12	-11,62	-81,1	11,9	7,8	9,9	1
Brunnaderquelle	788	12	-10,14	-69,4	11,7	5,5	-14	0,82
Schwabeltalquelle	814	11	-11,50	-78,8	13,2	7,5	7,6	0,99
Riedlbachquelle	820	11	-12,14	-85,1	12,0	7,9	10,0	1
Roßlochquelle	820	12	-11,55	-79,4	13,0	7,5	7,5	0,99
Galgenwaldquelle	852	12	-9,79	-67,4	10,9	4,0	-28,0	(0,4)*
Etzbachquelle	856	12	-11,71	-81,1	12,7	6,3	-7,1	0,96
Totes Weib Quelle	889	11	-11,28	-77,2	13,0	7,4	6,3	1
Sagtümpel	983	12	-11,93	-82,6	12,9	7,6	7,9	0,99
Preunegger Siebenquellen	1099	12	-12,70	-91,3	11,9	5,0	-26	0,65
Pöllauer Ursprung	1147	12	-10,54	-71,6	12,8	9,0	23	0,98
Reihbachquelle	1501	12	-11,21	-75,9	13,8	8,1	15,0	(0,52)*
Schönebenquelle	1710	8	-10,67	-71,1	14,3	7,6	9,8	0,96

*nicht signifikant bei $p < 0,05$

In Tabelle 52 sind Kennwerte der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse sowie die Spanne/Amplitude (|Min-Max|) des Quell- $\delta^{18}\text{O}$ -Verlaufes und die daraus berechnete Mittlere Verweilzeit (MVZ) der jungen Schüttungskomponente angegeben.

Tabelle 52: $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse der untersuchten Quellen im Zeitraum 2020/21 sortiert nach Austrittshöhe der Quelle (n = Anzahl Messwerte, Min = Minimum, HF = high flow / hohe Schüttungen, MW = Mittelwert, σ = Standardabweichung, Max = Maximum, BF = Basisabfluss, MVZ = mittlere Verweilzeit in Jahren).

Quelle	Höhe [m ü. A.]	n	Min	HF	MW	σ	Max	BF	Min-Max	MVZ
			$\delta^{18}\text{O}$ (‰ V-SMOW)							
Hammerbachquelle	410	12	-9,46	-9,15	-8,89	0,28	-8,37	-8,52	1,09	1,5
Goldschmiedquelle	472	12	-9,10	-9,09	-9,01	0,06	-8,90	-8,94	0,20	[> 3]
Wassermannsloch	595	12	-12,73	-12,51	-11,71	0,73	-10,44	-10,75	2,29	0,7
Erbsattelquelle	691	12	-10,94	-10,91	-10,68	0,28	-9,99	-10,27	0,95	1,8
Ödensee- Kaltwassertrichter	773	12	-13,11	-13,01	-11,62	1,43	-9,28	-9,54	3,83	0,4
Brunnaderquelle	788	12	-10,29	-10,26	-10,14	0,09	-10,00	-10,03	0,29	[> 3]
Schwabeltalquelle	814	11	-11,91	-11,88	-11,50	0,31	-11,01	-11,13	0,90	0,5
Riedlbachquelle	820	11	-13,45	-13,28	-12,14	1,15	-10,04	-10,64	3,41	0,5
Roßlochquelle	820	12	-12,24	-12,06	-11,55	0,47	-10,53	-10,96	1,71	1,0
Galgenwaldquelle	852	12	-9,93	-9,86	-9,79	0,06	-9,72	-9,74	0,21	[> 3]
Etzbachquelle	856	12	-12,29	-12,02	-11,71	0,23	-11,46	-11,52	0,83	2,0
Totes Weib Quelle	889	11	-12,15	-12,06	-11,28	0,70	-10,02	-10,40	2,13	0,8
Sagtümpel	983	12	-13,16	-13,00	-11,93	1,17	-10,05	-10,16	3,11	0,5
Preunegger Siebenquellen	1099	12	-13,03	-12,85	-12,70	0,13	-12,51	-12,56	0,52	[> 3]
Pöllauer Ursprung	1147	12	-10,82	-10,80	-10,54	0,24	-10,18	-10,21	0,64	2,6
Reihbachquelle	1501	12	-11,29	-11,26	-11,21	0,04	-11,15	-11,18	0,14	[> 3]
Schönebenquelle	1710	8	-11,04	-10,87	-10,67	0,21	-10,39	-10,46	0,65	-

Insgesamt liegen die Isotopenwerte der 2020/2021 untersuchten Quellen geringfügig über der für Österreich ermittelten durchschnittlichen Meteorischen Wasserlinie (AMWL) (Abbildung 74). Diese basiert auf niederschlagsgewichteten Jahresmitteln der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse von 52 österreichischen Niederschlagsstationen im Zeitraum 2014-2018, umfasst Stationen bis ~ 2.000 m Seehöhe und wird durch Gleichung 18 wider gegeben:

$$\delta D = (8,08 \pm 0,28)\delta^{18}\text{O} + (9,81 \pm 3,93) \quad \text{Gl. 18}$$

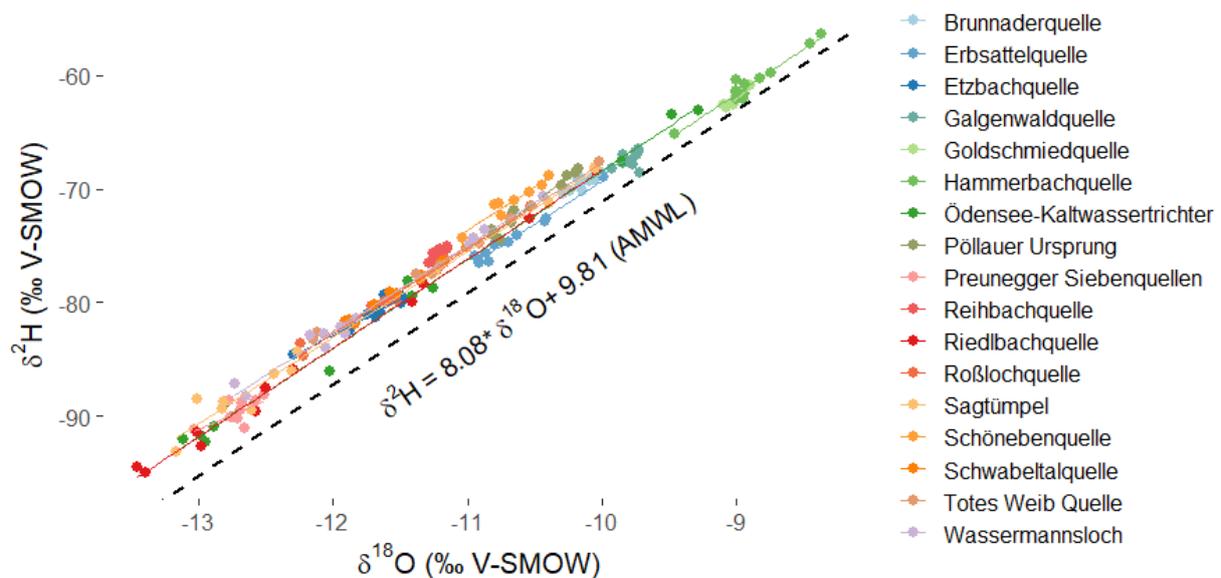


Abbildung 74: $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse der untersuchten Quellen des HD-Steiermark im Vergleich zur österreichischen LMWL (Austrian Meteoric Water Line, AMWL).

Steigung und Achsenabschnitt sowie Korrelationskoeffizient (R) der im bivariaten $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm für die jeweilige Quelle ermittelten linearen Regressionsgeraden sind in Tabelle 51 angegeben. Die im Vergleich zur LMWL niedrigeren Steigungen der Brunnaderquelle und Galgenwaldquelle deuten auf Verdunstungseffekte während der Grundwasserneubildung hin, jene der Etzbachquelle und Preunegger Siebenquellen wahrscheinlich eher auf den Einfluss von Schneeschmelze oder Verdunstungseffekte aufgrund allogener Grundwasserneubildungskomponente. Vergleichsweise hohe Steigungen und Achsenabschnitte wurden für die Goldschmiedquelle und den Pöllauer Ursprung ermittelt, die Ursache dafür ist unklar.

Die beiden Quellen mit den niedrigsten Austrittshöhen (Hammerbachquelle, Goldschmiedquelle) zeigen erwartungsgemäß die schwersten $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Verhältnisse (Abbildung 73, Abbildung 74, siehe Werte in Spalte „Max“ in Tabelle 52).

Aufgrund der niedrigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte kann bei der Etbachquelle und beim Wassermansloch eine Einzugsgebietshöhe deutlich über dem Quellniveau angenommen werden (Abbildung 73, Abbildung 74, Tabelle 52).

Die Quellen mit dem höchstgelegenen Quellaustritt (Schönebenquelle) zeigt verhältnismäßig abgereicherte $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse für ihre Höhenlage, so dass hier eventuell den Höheneffekt überlagernde Einflüsse vorliegen (Tabelle 52).

3.2.3. Mittlere Verweilzeiten der Quellschüttungskomponente

Tabelle 52 fasst die berechneten Mittleren Verweilzeiten zusammen.

Die Abschätzung für die Schüttungskomponente mit kurzen Mittleren Verweilzeiten ergibt eine Größenordnung von 0,4 bis 0,8 Jahren (5-10 Monaten) für den Ödensee-Kaltwassertrichter, die Riedlbachquelle, den Sagtümpel, das Wassermansloch und die Totes Weib Quelle.

Verweilzeiten der einer noch durch eine $\delta^{18}\text{O}$ -Dynamik geprägte Schüttungskomponente von > 1 Jahr wurden für die Roßloch-, Hammerbach-, Erbsattel-, Schwabeltal- und Etbachquelle sowie den Pöllauer Ursprung bestimmt. Für die Schönebenquelle wurde aufgrund des unvollständigen Jahresganges keine MVZ berechnet. In früheren Untersuchungen sind auf Basis von Isotopenuntersuchungen für die Schönebenquelle jedoch MVZ von 0,6 Jahren (7 Monaten) bestimmt worden (Winkler et al., 2016).

Längere Aufenthaltszeiten (> 3 Jahre) der Abflusskomponente im hydrogeologischen System müssen aufgrund der wenig ausgeprägten $\delta^{18}\text{O}$ -Dynamik für die Preunegger Siebenquellen, die Brunnaderquelle, die Galgenwald-, Goldschmied- und Reihbachquelle erwartet werden.

3.2.4. Mittlere Höhenlage der Quelleinzugsgebiete

Für die Abschätzung der Einzugsgebietshöhenlagen auf Basis der durchgeführten Isotopenmessungen wurde festgelegt, dass:

- die Basisabflussbedingungen (d.h., der Mittelwert der jeweils drei höchsten in der Quelle gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse = baseflow, BF) die Mindesthöhe des Einzugsgebietes widerspiegelt;

- der Mittelwert der in der Quelle gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse die mittleren Schüttungsbedingungen und damit die mittlere Einzugsgebietshöhenlage wiedergeben;
- die Minimalwerte bzw. jene, die hohen Schüttungen repräsentierenden drei leichtesten $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse (= high flow, HF) Hinweise auf maximale Seehöhen der Einzugsgebiete geben. In der Regel führen Abschätzungen auf Basis dieser Werte jedoch zur Überschätzung der maximalen Einzugsgebietshöhen, da saisonale Effekte und insbesondere der Einfluss der Schneeschmelze neben dem Höheneffekt ebenfalls zu leichteren $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnissen führen können.
- die Abschätzung der mittleren Einzugsgebietshöhen auf Basis eines mittleren Höhengradienten von 0,198 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ je 100 m Seehöhe mit einer Regressionsgeraden von $\delta^{18}\text{O} = -0,00198 \cdot \text{Höhe} - 8,6$ (Variante 1) für alle Quellen, die links von der Regressionsgeraden liegen, erfolgt.
- für alle Quellen, die rechts dieser Geraden liegen, erfolgt die Abschätzung der mittleren Einzugsgebietshöhe auf Basis einer im Offset (Achsenabschnitt) angepassten Regressionsgeraden $\delta^{18}\text{O} = -0,002 \cdot \text{Höhe} - 8,0$ (Variante 2).
- Die Schönebenquelle wird mit der Regressionsgerade für die südliche klimatologische Teilregionen gut erfasst $\delta^{18}\text{O} = -0,0008 \cdot \text{Höhe} - 9,18$ (Variante 3).
- Die ermittelten Höhen werden auf die Zehnerstelle gerundet.

Dass es sich hierbei um eine Abschätzung mit hohen Unsicherheiten handelt, die in der Zusammenschau mit weiteren Indikatoren und Modellen betrachtet diskutiert werden muss, ist aus Abbildung 75 ersichtlich. Die für die Sagtümpel-Quelle demonstrierte Vorgangsweise ist nur valide, wenn die für die nördlichen klimatologischen Teilregionen ermittelte Höhenbeziehung des $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisses die Neubildungsbedingungen im Einzugsgebiet der Sagtümpel-Quelle und der jeweils übrigen untersuchten steirischen Quellen widerspiegeln. Dies muss im Einzelfall durch einzugsgebietsbezogene Isotopenuntersuchungen weiter abgeklärt werden.

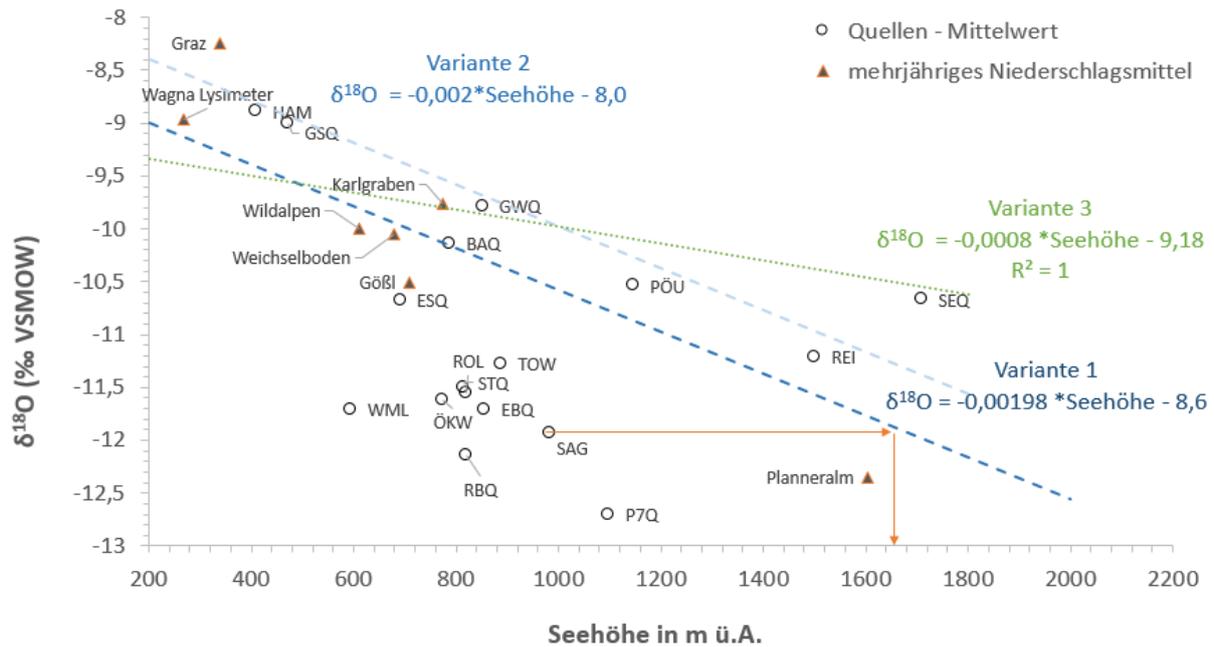


Abbildung 75: Höhenabhängigkeit von $\delta^{18}\text{O}$ in den Quellen (Mittelwert, $\delta^{18}\text{O}_{\text{MW}}$) im Verhältnis zu den für Niederschlag ermittelten Zusammenhang zwischen $\delta^{18}\text{O}$ und der Seehöhe. Hierbei geben die Variante 1 und 2 die Verhältnisse in den nördlichen, die Variante 3 die Verhältnisse in den südlichen klimatologischen Teilregionen wieder.

Die auf diese Weise ermittelten mittleren Höhenlagen der Quelleinzugsgebiete sind in Tabelle 53 angegeben.

Die größten Abweichungen zwischen Austrittshöhe und mittlerer Höhenlage des Quelleinzugsgebietes ergeben sich auf Basis der aktuellen Isotopenuntersuchungen für das Wassermannsloch, den Ödensee-Kaltwassertrichter, die Riedlbach-, Roßloch- und Etbachquelle sowie den Sagtümpel und die Preunegger Siebenquellen. Dies bestätigt die bisherigen Erkenntnisse zu den alpin geprägten Einzugsgebieten dieser Karstquellen.

Tabelle 53: $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse (MW = Mittelwert, BF = Basisabfluss) der untersuchten Quellen im Zeitraum 2020/21 sowie Austrittshöhen (Austritt) und Mindest- bzw. mittlere Höhenlagen der Quelleinzugsgebiete sowie Differenz zwischen mittlerer Höhenlage des Quelleinzugsgebietes und Austrittshöhe der Quelle sortiert nach Austrittshöhe der Quelle. Ermittelte Einzugsgebietshöhen auf Zehnerstelle gerundet. Variante = die Variante des Höhengradienten (siehe Abbildung 75).

Quelle	BF	MW	Austritts- Höhe	Mindest- EZG- Höhe	Mittlere EZG- Höhe	Differenz	Variante
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ V- SMOW)		(m ü.A.)				
Hammerbachquelle	-8,52	-8,89	410	260	450	40	2
Goldschmiedquelle	-8,94	-9,01	472	470	510	38	2
Wassermannsloch	-10,75	-11,71	595	1090	1570	975	1
Erbsattelquelle	-10,27	-10,68	691	840	1040	349	1
Ödensee- Kaltwassertrichter	-9,54	-11,62	773	470	1530	757	1
Brunnaderquelle	-10,03	-10,14	788	1020	1070	282	2
Schwabeltalquelle	-11,13	-11,50	814	1260	1480	446	1
Riedlbachquelle	-10,64	-12,14	820	1030	1790	970	1
Roßlochquelle	-10,96	-11,55	820	1190	1490	670	1
Galgenwaldquelle	-9,74	-9,79	852	870	900	48	2
Etzbachquelle	-11,52	-11,71	856	1460	1600	744	1
Totes Weib Quelle	-10,40	-11,28	889	910	1350	461	1
Sagtümpel	-10,16	-11,93	983	790	1680	697	1
Preunegger Siebenquellen	-12,56	-12,70	1099	2000	2070	971	1
Pöllauer Ursprung	-10,21	-10,54	1147	1110	1270	123	2
Reihbachquelle	-11,18	-11,21	1501	1590	1610	109	2
Schönebenquelle	-10,46	-10,67	1710	1600	1860	150	3

3.3. Trendanalyse

Für Langzeittrends liegen bei 8 (Brunnaderquelle, Hammerbachquelle, Ödensee-Kaltwassertrichter, Preunegger Siebenquellen, Reihbachquelle, Sagtümpel, Schwabeltalquelle und Wassermannsloch; Tabelle 1) von 17 steirischen HZB-Messstellen Schüttungsdaten über eine Zeitspanne von zumindest 20 Jahren (1998 – 2017) weitgehend kontinuierlich vor (Tabelle 1). Bei 12 Quellen (vorhin genannten plus Erbsattel, Roßlochquelle, Riedlbachquelle, Schönebenquelle, Tabelle 1) reicht die Datenreihe über eine Zeitspanne von 10 Jahren (2008 – 2017). Da jeweils 80 % der Daten im genannten Zeitraum als Voraussetzung für die Trendanalyse festgelegt wurden (Kapitel 2.4) fallen die tatsächlich analysierten Zeitreihen gegebenenfalls etwas kürzer aus (z. B. Schwabeltalquelle 1999 – 2017). Abbildung 76 zeigt die Trends (positiver, negativer, kein Trend) für die jeweiligen Zeitspannen an den Quellen, wobei die Analyse auf ein Signifikanzniveau von 99 % ($p = \leq 0.01$) bezogen ist. 7 Quellen (Brunnaderquelle, Ödensee-Kaltwassertrichter, Preunegger Siebenquellen, Reihbachquelle, Sagtümpel, Schwabeltalquelle und Wassermannsloch) zeigen einen positiven Trend über 20 Jahre. Für den Zeitraum 2008 – 2017 zeigen 4 (Goldschmiedquelle, Hammerbachquelle, Preunegger Siebenquellen und Wassermannsloch) von 12 Quellen einen negativen Trend, 5 (Brunnaderquelle, Ödensee-Kaltwassertrichter, Riedlbachquelle, Sagtümpel und Schwabeltalquelle) einen positiven Trend und 3 (Erbsattelquelle, Reihbachquelle, Schönebenquelle) keinen signifikanten Trend.

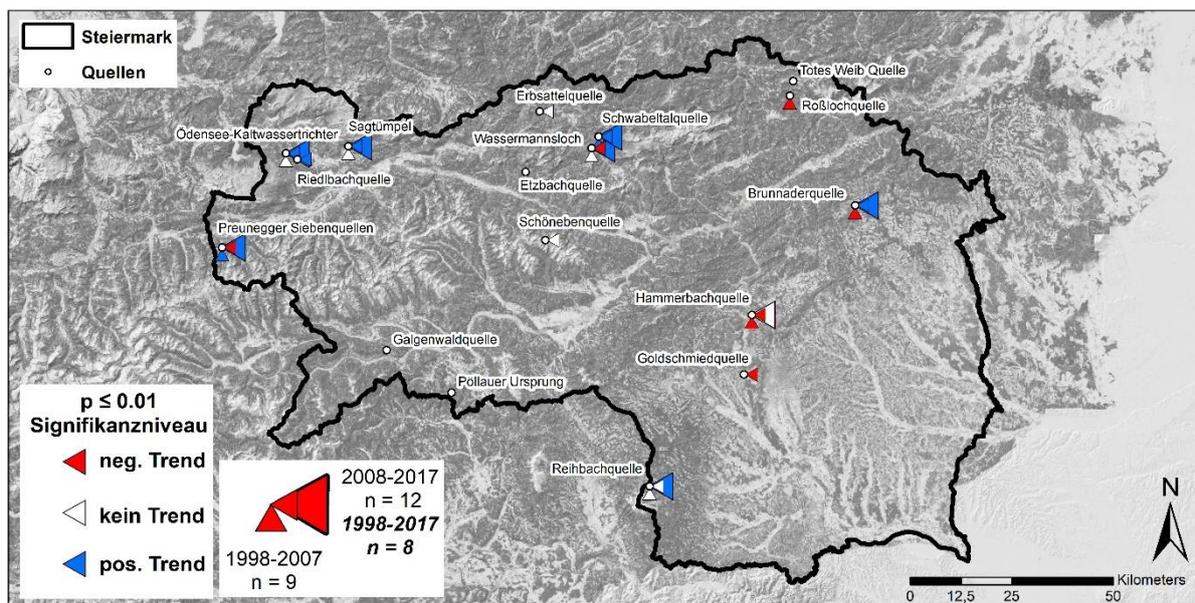


Abbildung 76: Ergebnisse der Trendanalyse für den Parameter Quellschüttung für Quellen mit weitgehend kontinuierlichen Datenreihen von mindestens 10 und 20 Jahren.

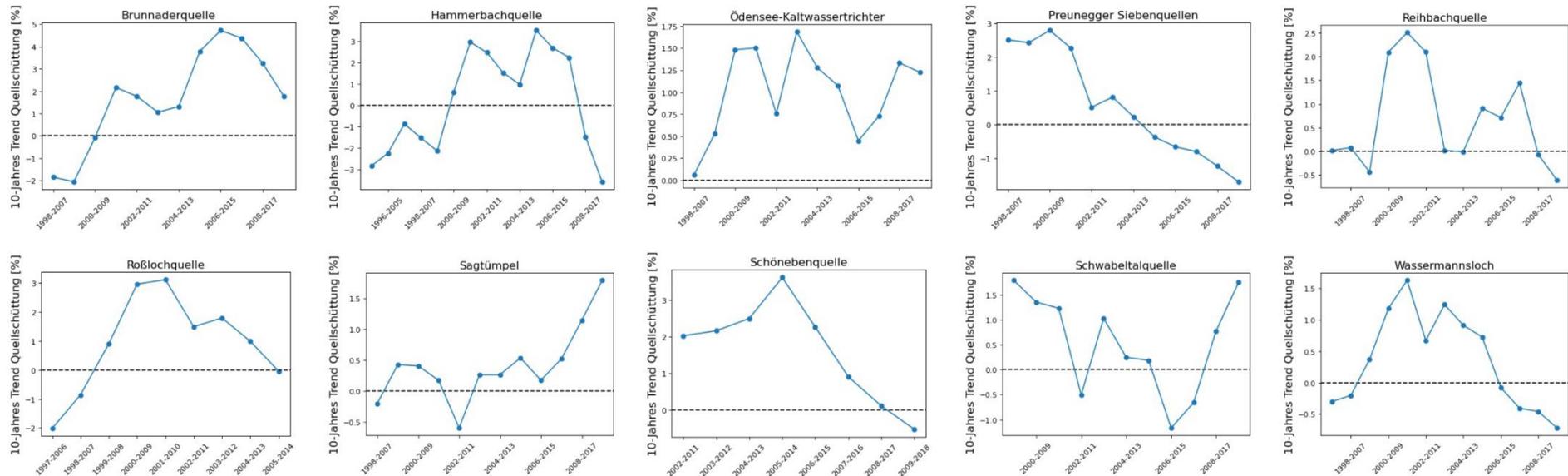


Abbildung 77: Zeitliche Entwicklung der 10-Jahres-Trends. Datenpunkte repräsentieren den jeweiligen Theil-Sen-Schätzwert, bezogen auf die mittlere Quellschüttung im gesamten Beobachtungszeitraum (prozentuelle Änderung pro Jahr). Dargestellt sind alle Trendanalysen im jeweiligen Zeitraum (ohne Signifikanztest).

Abbildung 77 zeigt die zeitliche Entwicklung der 10-Jahres-Trends für zehn steirische Quellen mit ausreichend langem Beobachtungszeitraum (Brunnaderquelle, Hammerbachquelle, Ödensee-Kaltwassertrichter, Preunegger Siebenquellen, Reihbachquelle, Roßlochquelle, Sagtümpel, Schönebenquelle, Schwabeltalquelle und Wassermannsloch). Die ermittelten Änderungsraten (Theil-Sen-Schätzwerte) zeigen die Variabilität und Entwicklung der 10-Jahres-Trends über den gesamten Beobachtungszeitraum. Die Änderungsraten schwanken in der Größenordnung einiger Prozentpunkte und wechseln in 9 von 10 Fällen zwischenzeitlich das Vorzeichen (ohne Berücksichtigung der Signifikanz, vgl. Abbildung 76). Dieses Ergebnis verdeutlicht die Notwendigkeit ausreichend langer Datenreihen für die zuverlässige Berechnung langfristiger Trends (> 10 Jahre). Die Berechnung auf zehnjährlicher Basis ist für diesen Zweck nicht geeignet.

Der Pardé-Koeffizient zeigt die saisonale Abflussdynamik der Quellen (Abbildung 78). Die untersuchten Quellen können grob in zwei Gruppen untergliedert werden: (i) eine Gruppe mit ausgeprägter Saisonalität und (ii) eine Gruppe, die einen sehr ausgeglichenen Schüttungsjahresgang zeigt. Des Weiteren kann die Gruppe mit ausgeprägter Saisonalität wiederum unterteilt werden, eine Untergruppe weist ein ausgeprägtes Maximum im Frühjahr (Mai und Juni) und die zweite Untergruppe ihr Maximum im Herbst (August bis in den Dezember) auf. Die Quellen Wassermannsloch, Sagtümpel, Schönebenquelle, Etbachquelle, Riedlbachquelle, Schwabeltalquelle, Roßlochquelle, Preunegger Siebenquellen und Ödensee Kaltwassertrichter zeigen eine deutliche Saisonalität mit den höchsten Schüttungswerten im Mai (Abbildung 78). Die hohen Pardékoeffizienten (bis 3,3) bedeuten, dass in diesem Monat die mittlere Schüttung ein Mehrfaches des Jahresmittelwertes beträgt. Galgenwaldquelle und Pöllauer Ursprung zeigen zwar auch eine Saisonalität, jedoch liegen die Schüttungsmaxima im August bzw. November. Brunnaderquelle, Erbsattelquelle, Goldschmiedquelle und Reihbachquelle zeigen einen ausgeglichenen Schüttungsverlauf um den Jahresmittelwert der Schüttung (entspricht dem Wert 1 in Abbildung 78).

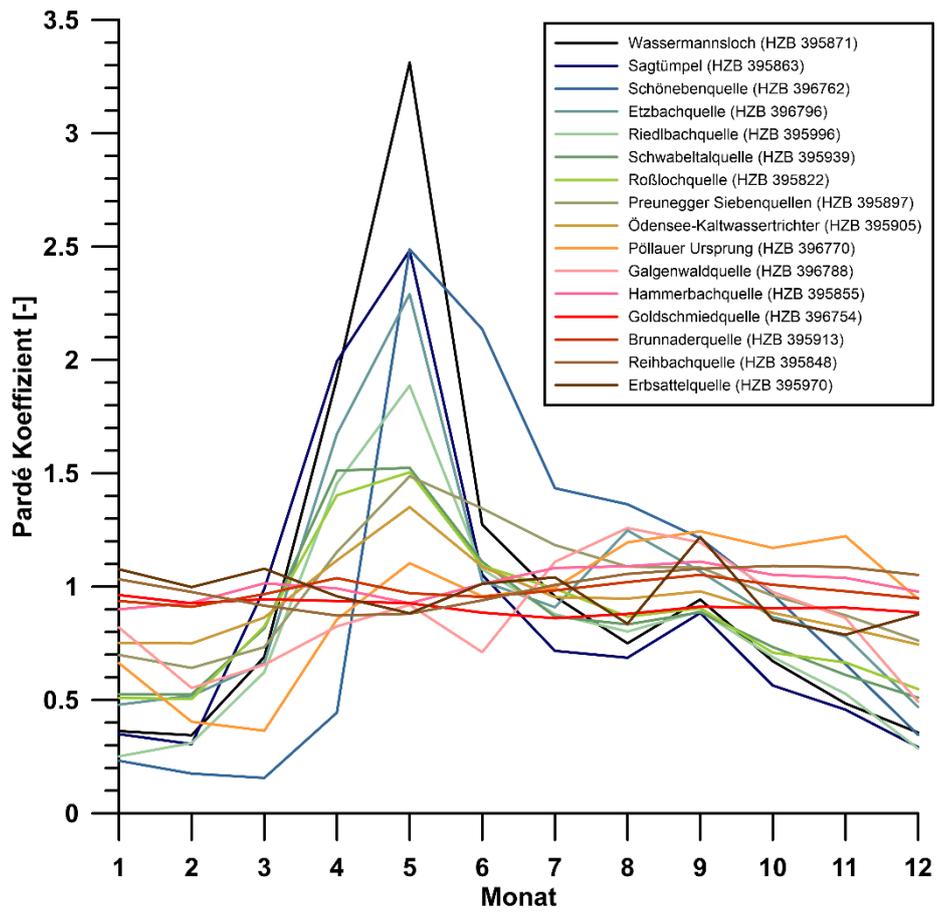


Abbildung 78: Pardé-Koeffizienten (Monatsmittelwert/Jahresmittelwert der Schüttung) der einzelnen untersuchten Quellen.

4. Interpretation und Diskussion

4.1. N-A- Modellierung

Generell zeigen die Ergebnisse, dass mit dem verwendeten N-A-Modell die Abflussdynamik der einzelnen Quellmessstellen gut reproduziert und simuliert werden kann. Somit konnten für alle Quellmessstellen die entsprechenden plausibelsten Einzugsgebiete ausgewiesen werden. Insbesondere für die komplexen Grundwassersysteme der großen Karstquellen (z.B. Riedlbachquelle, Roßlochquelle, Schwabeltalquelle, Wassermannsloch) werden mit dem gewählten, vergleichsweise einfachen Modellansatz sehr gute Ergebnisse erzielt (ähnliche Schlussfolgerung und ausführliche Diskussion für ein strukturell eng verwandtes Niederschlags-Abfluss-Modell bei Wagner et al., 2013). Das gilt auch bei komplizierten Entwässerungsstrukturen, wie die Wasserbilanzrechnung für das gemeinsame Einzugsgebiet des Schmelz- und Hammerbaches zeigt (siehe Kapitel 3.1.1.6) – ungeachtet der Tatsache, dass für dieses Projekt keine Abflussdaten am Pegel Schmelzbach ausgewertet wurden.

Die im Zuge der Kalibration optimierten Modellparameter und Austauschterme stehen durchwegs mit den lokalen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften im Einklang. Intensiv verkarstete Einzugsgebiete zeigen kurze hydraulische Reaktionszeiten, stets in Übereinstimmung mit sämtlichen vorliegenden hydrogeologischen Informationen zu hohen Fließgeschwindigkeiten und kurzen Verweilzeiten, die anhand von Markierungsversuchen und Isotopendaten in Vorstudien ermittelt wurden. Das einfache Niederschlags-Abfluss-Modell ist aufgrund seiner Struktur (schnelle und langsame Komponente, Abbildung 2) in der Lage, komplexe Grundwassersysteme wie Karstaquifere oder Blockgletscher zufriedenstellend abzubilden, die mindestens zwei Abflusskomponenten aufweisen.

Liegt keine schnelle Komponente vor, simuliert das Modell die Schüttungsganglinie häufig zwar zufriedenstellend, die im Zuge der Kalibration optimierten Modellparameter nehmen in diesem Fall jedoch extreme Werte an (Goldschmiedquelle und Reihbachquelle; siehe Kapitel 3.1.1.5 bzw. 3.1.1.10). Im speziellen Fall des Ödensee Kaltwassertrichters ist trotz Vorliegen einer schnellen Komponente die Modellierung ausgesprochen schwierig. Dies wird auf die komplexe Entwässerungsstruktur des Einzugsgebietes mit zumindest drei weiteren, hydraulisch teils sehr unterschiedlichen Quellen (Ödensee, warmer See, Quellbezirk Strummern) zurückgeführt, die vom einfachen Austauschterm nur ungenügend erfasst wird (siehe Kapitel 3.1.1.7).

Abbildung 79 stellt die optimierten Parameterwerte für die 16 modellierten Quellen (jeweils plausibelstes Szenario dargestellt) den typischen Wertebereichen für Oberflächengewässer gegenüber (Kapitel 2.2.2). Die Bodenwasserspeicherkapazität ist tendenziell niedrig. Dies

spiegelt die (hoch-)alpine Lage der modellierten Quelleinzugsgebiete wider (geringe Vegetation, teilweise geringe Bodenbildung /-mächtigkeit). Die Grundwasserspeicherkapazität nimmt im Vergleich zu den berichteten Literaturangaben tendenziell höhere Werte an. Dies erklärt sich aus der Anwendung des Niederschlags-Abfluss Modells im gegenständlichen Projekt auf Quellen alpiner Einzugsgebiete, in denen der Grundwasserspeicher in besonders hohem Maße (meist zur Gänze) zur Quellschüttung im Vergleich zum Abfluss von Oberflächengewässern beiträgt. Bei Vorliegen eines ausgeprägten Feinkluftsystems nimmt die Grundwasserspeicherkapazität besonders hohe Werte an (z.B. Etzbachquelle), in Übereinstimmung mit lokalen hydrogeologischen Untersuchungen. Die hydraulische Reaktionszeit nimmt bei Vorliegen zweier Abflusskomponenten (z.B. intensive Verkarstung, Blockgletscher) niedrige Werte an (spiegelt sich in der ausgeprägten Saisonalität dieser Quellen wider, vgl. Abbildung 78).

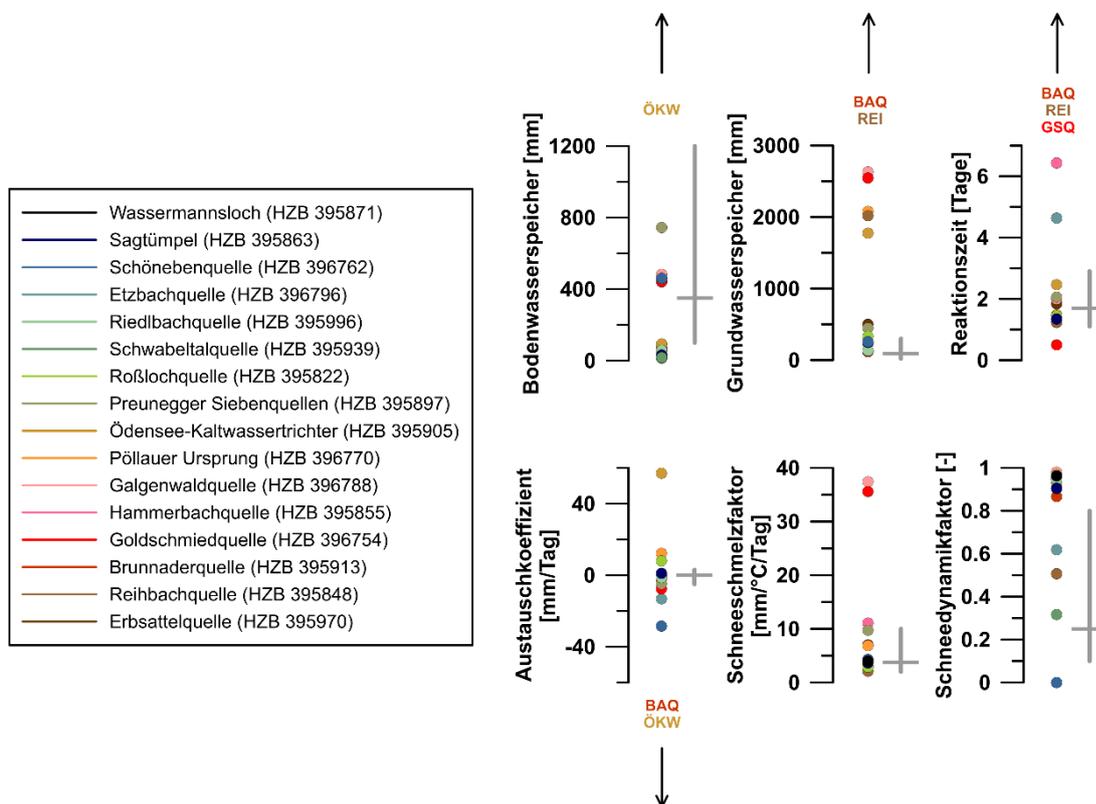


Abbildung 79: Optimierte Modellparameter für die 16 modellierten Quelleinzugsgebiete (jeweils plausibelstes Szenario dargestellt). Die Farbgebung entspricht Abbildung 78. Die grauen Balken geben den Median (horizontaler Balken) bzw. das 80 % Konfidenzintervall (vertikaler Balken) der jeweiligen Parameter für Oberflächengewässer an (Kapitel 2.2.2). BAQ = Brunnaderquelle, GSQ = Goldschmiedquelle, ÖKW = Ödensee-Kaltwassertrichter, REI = Reihbachquelle.

Die Einbindung und Koppelung des Schneemodells CemaNeige mit GR4J+ erhöht die Anzahl der zu kalibrierenden Modellparameter und ist noch nicht vollständig ausgereift, insbesondere die Validierung des Schneedynamikfaktors gestaltet sich schwierig. Diese Problematik ist bei Kalibration eines Schnee- und Abflussmodells allein auf eine Schüttungsganglinie bekannt, die Einbeziehung zusätzlicher, unabhängiger Informationen zur Schneedecke wie etwa der Schneedeckenverbreitung aus Satellitendaten verbessert die Situation (Parajka et al., 2007; Parajka und Blöschl, 2008; Riboust et al., 2019).

Die sich daraus ergebende Unschärfe wird durch Kombination des gewählten Modellansatzes mit einem weiteren, unabhängigen Ansatz (Isotopenanalyse) erheblich reduziert. Die gemeinsame Auswertung beider Ansätze wird in Kapitel 4.2 diskutiert und mit den Ergebnissen der Trendanalyse verglichen.

4.2. Synthese

Dieses Kapitel führt die Ergebnisse der N-A-Modellierung, der Isotopenanalyse sowie der Trendanalyse zusammen. Der Vergleich der mittleren Einzugsgebietshöhe, die jeweils unabhängig mit dem N-A-Modell und den Isotopendaten ermittelt wurden, ermöglicht die Validierung der in Kapitel 3.1.1 ausgewiesenen Einzugsgebiete. Die Saisonalität der Quellschüttungsganglinie wird in Kapitel 3.1.1 einzeln besprochen, in diesem Kapitel wird sie mit den ermittelten Pardé Koeffizienten (Kapitel 3.3) und mittleren Verweilzeiten (Kapitel 3.2.3) verglichen.

4.2.1. Mittlere Einzugsgebietshöhe

Beide verwendete Methoden (N-A-Modell und Isotopenansatz) ermöglichen die Ausweisung einer mittleren Einzugsgebietshöhe, wobei jede mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Ergebnisse der N-A-Modellierung werden durch die flächige Ausdehnung des Einzugsgebiets in Abhängigkeit des geologischen Untergrunds beeinflusst. Die Unsicherheiten der Isotopenmethode liegen in der unterschiedlichen starken Ausprägung des Höheneffekts in Abhängigkeit von der Herkunft der Luftmassen und der Einzugsgebietstopographie, in der Erfassung der Isotopensignatur des Niederschlags und entsprechenden Quantifizierung des Höheneffekts. Zudem beeinflussen die Saisonalität, Verdunstungseffekte allgemein und Fraktionierungseffekte im Zuge der Schneeschmelze die Isotopensignatur der Grundwasserneubildungskomponente und somit der Quellwässer.

Tabelle 54 zeigt die Gegenüberstellung (Differenz) der beiden mittleren Einzugsgebietshöhen (gemäß N-A-Modellierung (Tabelle 5) bzw. Isotopenanalyse (Tabelle 53)) und die Abweichung zur Höhererstreckung des Einzugsgebietes (höchster Punkt abzüglich Lage der Quelle als tiefster Punkt). Generell liegen die Ergebnisse beider Methoden in derselben Größenordnung, wobei 5 der 17 Quellen eine Differenz von mehr als 33% aufweisen (die Goldschmiedquelle liegt mit 32,7 % knapp unter dieser Schwelle) und bei der Erbsattelquelle sogar 79 % Abweichung auftreten. Im Groben bestätigen jedoch die Ergebnisse der Isotopenanalysen jene der N-A-Modellierung.

Durch Kombination beider Ansätze gelingt es, die jeweiligen Unsicherheiten der Methoden teilweise auszugleichen. Insbesondere erlaubt die Kombination, aus einem Satz plausibler, modellierter Einzugsgebiete das wahrscheinlichste zu wählen. Im Fall der Eitzbachquelle entspricht das gewählte Szenario der N-A-Modellierung (Szenario 9) dem höchstgelegenen aller modellierten Einzugsgebiete (Kapitel 3.1.1.3), in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Isotopenanalyse. Ähnliches gilt für die Roßlochquelle, in diesem Fall entspricht das gewählte Szenario 7 dem zweithöchsten aller modellierten Szenarien (Kapitel 3.1.1.12). Dies

steht im Einklang mit den Ergebnissen der Isotopenanalyse (zeigen ein sehr hoch gelegenes Einzugsgebiet an), gegen das ebenfalls sehr hoch gelegenen Szenario 5 sprechen hier die Ergebnisse des Markierungsversuches (Assadian, 1970). Im Fall der Galgenwaldquelle spricht der Vergleich aller modellierter Szenarien (Kapitel 3.1.1.4) mit den Ergebnissen der Isotopenanalyse ebenfalls für das gewählte Einzugsgebiet (Szenario 4). Im Fall der Schwabeltalquelle (Kapitel 3.1.1.15) bestätigen die Ergebnisse der Isotopenanalyse ebenfalls die Auswahl von Szenario 3, unter allen modellierten Szenarien wird die Übereinstimmung beider Ansätze lediglich von einem (aufgrund der regionalen Grundwasserabströmrichtung jedoch als weniger plausibel bewerteten) Szenario übertroffen (Szenario 2). Bei der Untersuchung komplexer hydrologischer Systeme stimmen die Ergebnisse der Isotopenanalyse ebenfalls in den meisten Fällen mit den gezogenen Schlussfolgerungen überein. Im Fall von Brunnaderquelle (Kapitel 3.1.1.1) und Preunegger Siebenquellen (Kapitel 3.1.1.9) bestätigen die anhand der Isotopenanalyse ermittelten, vergleichsweise hoch gelegenen mittleren Einzugsgebietshöhen die angenommene allogene Grundwasserbildung. Bei der Brunnaderquelle erfolgt diese im höchstgelegenen Teil des Sulzaubach-Einzugsgebietes bzw. der nördlichen Zubringer des Dissaubaches; im Fall der Preunegger Siebenquellen im hoch gelegenen Anteil des Preuneggbach-Einzugsgebietes. In beiden Fällen infiltrieren die entsprechenden Oberflächengewässer jeweils im Nahbereich der Quelle und beeinflussen damit die Isotopensignatur des Quellwassers, indem es zu einer Anreicherung von leichteren Isotopen kommt, welche auf höher gelegene Einzugsgebiete schließen lassen.

Im Fall von Erbsattelquelle, Hammerbachquelle und Pöllauer Ursprung können die Ergebnisse der N-A-Modellierung und der Isotopenanalyse dagegen nicht vollständig zufriedenstellend in Einklang gebracht werden.

Tabelle 54: Vergleich der Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit jenen der Isotopenanalyse hinsichtlich der Höhenlage der Einzugsgebiete. Alle Seehöhen sind in [m ü. A.] angegeben. Differenz = Mittlere EZG-Seehöhe (N-A-Modellierung) – Mittlere EZG-Seehöhe (Isotopenanalyse). Die Abweichung entspricht der Differenz, normiert auf den Reliefunterschied (gemäß Niederschlags-Abfluss-Modellierung). Gelb = erhebliche Differenz, durch Kombination beider Methoden dennoch gutes Ergebnis erzielbar. Rot = Ergebnisse der beiden Methoden können nicht zufriedenstellend in Einklang gebracht werden.

Quelle	Seehöhe Quelle	Mindest-EZG-Seehöhe (Isotopenanalyse)	Mittlere EZG-Seehöhe (Isotopenanalyse)	Mittlere EZG-Seehöhe (N-A-Modellierung)	Differenz [m]	Abweichung [%]	Maximale EZG-Seehöhe (N-A-Modellierung)
Brunnaderquelle	788	1020	1070	963	-107	-22	1264
Erbsattelquelle	691	840	1040	846	-194	-79	938
Etzbachquelle	856	1460	1600	1567	-33	-3	2023
Galgenwaldquelle	852	870	900	946	46	22	1061
Goldschmiedquelle	472	470	510	554	44	33	607
Hammerbachquelle	410	260	450	791	341	49	1099
Ödensee-Kaltwassertrichter	773	470	1530	1435	-95	-9	1851
Pöllauer Ursprung	1147	1110	1270	1562	292	39	1892
Preunegger Siebenquellen	1099	2000	2070	1699	-371	-36	2125

Tabelle 54 (Forts.): Vergleich der Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit jenen der Isotopenanalyse hinsichtlich der Höhenlage der Einzugsgebiete. Alle Seehöhen sind in [m ü. A.] angegeben. Die Abweichung entspricht der Differenz, normiert auf den Reliefunterschied (gemäß Niederschlags-Abfluss-Modellierung). Gelb = erhebliche Differenz, durch Kombination beider Methoden dennoch gutes Ergebnis erzielbar. Rot = Ergebnisse der beiden Methoden können nicht zufriedenstellend in Einklang gebracht werden.

Quelle	Seehöhe Quelle	Mindest-EZG- Seehöhe (Isotopenanalyse)	Mittlere EZG- Seehöhe (Isotopenanalyse)	Mittlere EZG- Seehöhe (N-A- Modellierung)	Differenz [m]	Abweichung [%]	Maximale EZG- Seehöhe (N-A- Modellierung)
Reihbachquelle	1501	1590	1610	1680	70	19	1873
Riedlbachquelle	820	1030	1790	1455	-335	-37	1737
Roßlochquelle	820	1190	1490	1265	-225	-26	1699
Sagtümpel	983	790	1680	1546	-134	-13	1980
Schönebenquelle	1710	1600	1860	2006	146	25	2295
Schwabeltalquelle	814	1260	1480	1518	38	3	1929
Totes Weib Quelle	910	910	1350	nicht modelliert			
Wassermansloch	595	1090	1570	1367	-203	-15	1977

4.2.2. Mittlere Verweilzeit

Der Vergleich der mittleren Verweilzeiten der durch saisonale $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse geprägten Abflusskomponente (Tabelle 52) mit den jeweils zugehörigen Pardé-Koeffizienten (Abbildung 78) zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen Verweilzeit und Saisonalität.

Der Großteil der von ausgeprägter Saisonalität der Schüttung gezeichneten Quellen (hoher Pardé-Koeffizient) weist mittlere Verweilzeiten ≤ 1 Jahr (berechnet für die Abflusskomponente mit kurzen MVZ anhand der Isotopenanalyse) auf (Ödensee-Kaltwassertrichter, Riedlbachquelle, Roßlochquelle, Sagtümpel, Schwabeltalquelle, Wassermannsloch). Diese Gruppe weist zugleich kurze hydraulische Reaktionszeiten ≤ 2 Tage auf (Parameter x_4 der Niederschlags-Abfluss-Modellierung). Diese Ergebnisse zeigen übereinstimmend das Vorhandensein eines stark ausgeprägten Karstsystems an, dessen durch Lösung erweiterte Hohlräume von niedriger Speicherfähigkeit (kurze mittlere Verweilzeit) und hoher Durchlässigkeit (kurze Reaktionszeit) charakterisiert sind. Die stark ausgeprägte Saisonalität folgt aus dem Zusammenspiel dieser beiden Eigenschaften.

Die ebenfalls starken saisonalen Schüttungsschwankungen unterworfenen Eitzbachquelle zeichnet sich durch eine mittlere Verweilzeit von 2 Jahren bei einer Reaktionszeit von 2 Tagen aus. Diese Eigenschaften zeigen ein deutlich ausgeprägtes Karstsystem an und dokumentieren darüber hinaus eine gute Speicherfähigkeit. Letztere steht im Einklang mit dem in Kapitel 3.1.1.3 besprochenen, ausgeprägten Feinkluft- und Porensystem des Karstgrundwasserleiters.

Dagegen steht bei Brunnaderquelle, Goldschmiedquelle und Reihbachquelle die gering ausgeprägte Saisonalität der Quellschüttung (Abbildung 78) in Einklang mit den errechneten hohen Reaktionszeiten (> 16 Tage) und hohen mittleren Verweilzeiten (> 3 Jahre).

Pöllauer Ursprung und Galgenwaldquelle nehmen in dieser Hinsicht eine Position zwischen diesen beiden Gruppen ein.

Die komplexe Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung im Fall der Preunegger Siebenquellen (siehe Kapitel 3.1.1.9) führt dagegen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während kurze hydraulische Reaktionszeit (1,5 Tage) und starke Schüttungsschwankungen (Abbildung 78) das Vorhandensein einer schnellen Komponente andeuten, ergibt sich für dieselbe eine mittlere Verweilzeit > 3 Jahre anhand der Isotopenanalyse. Dies deutet darauf hin, dass die Quelle von taleinwärts versickernden Wässern des Preuneggerbachs beeinflusst ist.

Die Hammerbachquelle zeigt tendenziell gering ausgeprägte Saisonalität (Abbildung 78) bei relativ kurzer Verweilzeit der jungen Abflusskomponente (1,5 Jahre) und mäßig kurzer Reaktionszeit (2 Tage). Die komplexe hydraulische Wechselwirkung zwischen Hammerbach-

und Schmelzbachquelle (siehe Kapitel 3.1.1.6) erschwert in diesem Zusammenhang eindeutige Aussagen, erklärt aber auch durch Übertrag von Wässern ins Schmelzbachsystem das gedämpfte Abflussverhalten (geringe Saisonalität, mäßig kurze Reaktionszeit)

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge dieses Projekts wurde versucht, durch die Kombination der zwei unterschiedlicher Untersuchungsmethoden Niederschlags-Abfluss-Modellierung und Isotopenanalyse die Einzugsgebiete von 16 alpinen Quellen auszuweisen und zu charakterisieren. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Kombination der beiden Methoden sehr gut für die hydrogeologische Fragestellung der Einzugsgebiete anwendbar ist. Zudem ermöglicht die Kombination eine Reduktion der Unsicherheiten beider Methoden, da jede Methode für sich separat ihre Grenzen und somit klare Unsicherheiten bei der Interpretation der Ergebnisse aufweist.

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung basiert auf einem Zwei-Abflusskomponentenansatz (schnelle und langsame Abflusskomponente) und für diese Methode können nachstehende Schlussfolgerungen festgehalten werden:

- Es konnte bei fast allen Quellen die Schüttungsdynamik (hoher Korrelationskoeffizient) recht gut nachgebildet werden (auch bei jenen, die nicht zwei Abflusskomponenten aufweisen).
- Unter Einbeziehung der physikalisch relevanten Modellparameter Bodenwasserspeicher x_1 [mm], Austauschkoefizient x_2 [mm/Tag], Grundwasserspeicher x_3 [mm], Reaktionszeit x_4 [Tage], Schneedynamikfaktor c_1 [-], Schneeschmelzfaktor c_2 [mm/(°C Tag)] kann klar differenziert werden, bei welchen Quellen das Modell sehr gute oder weniger gute Resultate liefert.
- Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass nur mit einer fundierten, umfassenden Betrachtungsweise der Modellierungsergebnisse zuverlässige Resultate erzielt werden können. Die alleinige Betrachtung der Korrelation zwischen modellierten und beobachteten Ganglinien ist nicht ausreichend, um beurteilen zu können, ob die modellierten Ergebnisse aussagekräftig sind.
- In Summe legen die Ergebnisse eine systematische Analyse aller 16 modellierten Quelleinzugsgebiete unter Verwendung einer einheitlichen Modellstruktur vor und liefern mögliche Anhaltspunkte für eine verbesserte Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse.
- Insbesondere für die Schneemodellierung steht eine Reihe von Optionen bereit, etwa durch Einbeziehung zusätzlicher Schneedeckeninformation (Parajka und Blöschl, 2008; Riboust et al., 2019) oder weiterer Schneemodelle (z. B. Parajka et al., 2007; Bergström und Lindström, 2015; Andrews und Guillaume, 2018). Beide Optionen sind innerhalb der verwendeten Modellstruktur und Softwareumgebung umsetzbar (für eine

Übersicht siehe Astagneau et al., 2021) bzw. zum Teil bereits in das verwendete R Package airGR integriert (Riboust et al., 2019).

- Bei Einbeziehung zusätzlicher, unabhängiger Informationen wie etwa Mischungsmodelle auf Basis natürlicher Tracer (Wagner et al., 2021) wird eine verbesserte Parameteridentifizierung und Prognosefähigkeit des Modells erwartet.

Die Ergebnisse der Isotopenanalyse (mittlere Einzugsgebietshöhe und Verweilzeit) stimmen über weite Bereiche mit den Erkenntnissen aus der N-A-Modellierung überein und stellen somit eine gute Validierungsmöglichkeit dar. Auffallend sind jedoch die teilweise recht großen Unsicherheiten, die sich aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Einflüsse und den damit zusammenhängenden unterschiedlichen Niederschlagssignaturen in Abhängigkeit der Lage im und um den Alpenraum ergeben. Dies spiegelt sich vor allem in den Korrelationen der Isotopensignatur zur Seehöhe wider. Neben verschiedenen Effekten wie beispielsweise Verdunstung und Höheneffekt ist letztendlich die vorhandene Datendichte auf Basis der Niederschlagsstationen ein wesentliches Kriterium. Hier liefern die Daten des österreichischen Niederschlagsmessnetzes ANIP bereits eine hervorragende Grundlage. Allerdings gibt es insbesondere in höher gelegenen alpinen Gebieten starke lokale Variationen des Isotopensignals im Niederschlag. Bedingt wird dies einerseits durch den ausgeprägten Höheneffekt im alpinen Raum und andererseits durch das Aufeinandertreffen von Luftmassen unterschiedlicher Herkunft. Auch bestimmte kleinräumige meteorologische Faktoren, die das lokale Isotopensignal im Niederschlag zusätzlich beeinflussen können, sind noch nicht vollständig verstanden, wären aber zur verbesserten Charakterisierung des hydrologischen Kreislaufs eine wichtige Voraussetzung. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang ein verbessertes Verständnis der flächenhaften Verteilung des Isotopensignals im Niederschlag. Neben der Wahl geeigneter Interpolationsmethoden erfordert dies die Ermittlung der maßgeblichen meteorologischen und geographischen Einflussgrößen auf die Verteilung der Wasserisotope im Niederschlag unter Berücksichtigung regionaler und orographischer Unterschiede (z.B. Differenzierung Alpennord-/Südseite, Ost-/Westalpen). Des Weiteren können die stabilen Isotope des Wassermoleküls in Zukunft auch verstärkt als natürliche Umweltindikatoren eingesetzt werden, um besser zu verstehen, wie sich Extremwetterereignisse und klimabedingte Langzeitänderungen des Wasserkreislaufes auf die Grundwasserneubildung und das Abflussgeschehen auswirken, was gerade im alpinen Raum zur Verbesserung des Wassermanagements entscheidend ist.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Kombination beider unabhängiger Methoden sehr zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Für alle 16 modellierten Quelleinzugsgebiete konnten die Einzugsgebiete ausgewiesen und charakterisiert werden.

Die Ergebnisse sind als wesentliche Grundlagen für künftige wasserwirtschaftliche Fragestellungen in Zusammenhang mit Quellwässern und ihrer Einzugsgebiete sowohl in quantitativer als auch qualitativer Hinsicht zu sehen. Dies gewinnt vor allem unter Berücksichtigung des fortschreitenden Klimawandels und der damit verbundenen Auswirkungen und Herausforderungen durch die sich ändernde Grundwasserneubildung an Bedeutung. Möglichst gut erfasste Einzugsgebiete und somit modellierbare Schüttungsganglinien ermöglichen die Auswirkungen von sich ändernden Eingangsgrößen (z.B. Niederschlag, Lufttemperatur, ...) zu quantifizieren und unter Berücksichtigung von Klimaszenarien konkrete Aussagen und Prognosen für Quellen zu erstellen. Die daraus ableitbare Kenntnis über Speichervolumina und des Auslaufverhaltens ermöglicht eine planbare, nachhaltige Nutzung dieser Quellwässer und stellt somit eine bedeutende Ergänzung und Erweiterung für die Studie „Wasserschatz 2050“ dar.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'G. Winkler', is positioned above the typed name.

Assoz. Prof. Mag. Dr. Gerfried Winkler

Graz, 22.03.2022

Literatur

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hg.) (2015): Wasserversorgungsplan Steiermark 2015. Ein Leitfaden für die öffentliche Wasserversorgung. Graz.

Andrews, F. T.; Guillaume, J. H. (2018): hydromad. Hydrological Model Assessment and Development. R package. <http://hydromad.catchment.org/>, letzter Zugriff 7.11.2021.

Assadian Arabi, M. (1970): Die hydrogeologische Untersuchung des Tonion, hoher Student und nähere Umgebung mit geologischer Aufnahme. Dissertation, Universität Wien.

Astagneau, P. C.; Thirel, G.; Delaigue, O.; Guillaume, J. H. A.; Parajka, J. Brauer, C. C.; Viglione, A.; Buytaert, W.; Beven, K. J. (2021): Hydrology modelling R packages – a unified analysis of models and practicalities from a user perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 (7), S. 3937-3973.

Auer, I.; Böhm, R.; Jurkovic, A.; Lipa, W.; Orlik, A.; Potzmann, R.; Schöner, W.; Ungersböck, M.; Matulla, C.; Briffa, K.; Jones, P.; Efthymiadis, D.; Brunetti, M.; Nanni, T.; Maugeri, M.; Mercalli, L.; Mestre, O.; Moisselin, J.-M.; Begert, M.; Müller-Westermeier, G.; Kveton, v.; Bochnicek, O.; Stastny, P.; Lapin, M.; Szalai, S.; Szentimrey, T.; Cegnar, T.; Dolinar, M.; Gajic-Capka, M.; Zaninovic, K.; Majstorovic, Z.; Nieplova, E. (2007): HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int. J. Climatol.* 27 (1), S. 17–46. DOI: 10.1002/joc.1377.

Bauer, F. (1989): Die unterirdischen Abflussverhältnisse im Dachsteingebiet und ihre Bedeutung für den Karstwasserschutz. Hg. v. Umweltbundesamt. Wien (Report, 28).

Bauer, H.; Schröckenfuchs, T. C.; Decker, K. (2016): Hydrogeological properties of fault zones in a karstified carbonate aquifer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Hydrogeol J* 24 (5), S. 1147–1170. DOI: 10.1007/s10040-016-1388-9.

Becker, L. P. (1987): Die quartären Talfüllungen im Raume Schladming. In: A. Matura (Hg.): Arbeitstagung 1987 Schladming. Wien: Geologische Bundesanstalt, S. 124–133.

Beck-Mannagetta, P. (1980): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 188 Wolfsdberg. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Behrens, H.; Benischke, R.; Bricelj, M.; Harum, T.; Käss, W.; Kosi, G.; Leditzky, H. P.; Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Maurin, V.; Rajner, V.; Rank, D.; Reichert, B.; Stadler, H.; Stichler, W.; Trimborn, P.; Zojer, H.; Zupan, M. (1992): Investigations with Natural and Artificial Tracers in the Karst Aquifer of the Lurbach System (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie* 43, S. 9–158.

Benischke, R. (2021): Review. Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal* 160 (5), S. 19. DOI: 10.1007/s10040-020-02278-9.

Benischke, R.; Strobl, E. (2006): Der Böse-Mauer-Schacht - Speläologisch-hydrogeologische Forschungen zur unterirdischen Entwässerung des westlichen Hochschwabgebietes. *Joannea Geol. Paläont.* 8, S. 5–23.

Bergström, S.; Lindström, G. (2015): Interpretation of runoff processes in hydrological modelling-experience from the HBV approach. *Hydrol. Process.* 20), S. 2525-2545.

Berka, R., Schubert, G., Elster, D., Hoyer, St., Berka, I., Weibold, J., Brüstle, A., Fellingner, G., Schifko, Th., Atzenhofer, B. (2014): Endbericht zum Projekt „Datenbank Wasserentnahmen – digitale Wasserbücher der österreichischen Bundesländer“. Unveröffentlichter Bericht, 20 S., Geologische Bundesanstalt, Wien

Birk, S.; Hergarten, S. (2010): Early recession behaviour of spring hydrographs. *Journal of Hydrology* 387 (1-2), S. 24–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.026.

Blöschl, G.; Kirnbauer, R.; Gutknecht, D. (1991): Distributed Snowmelt Simulations in an Alpine Catchment. 1. Model Evaluation on the Basis of Snow Cover Patterns. *Water Resour. Res.* 27 (12), S. 3171–3179.

Bormann, H. (2010): Runoff regime changes in German rivers due to climate change. *ERD* 64 (3), S. 257–279. DOI: 10.3112/erdkunde.2010.03.04.

Brielmann, H. (2020): Abschätzung der mittleren Einzugsgebietslagen von Quellen (HD Steiermark). Wien: Umweltbundesamt.

Bryda, G. (2001): Geologische Kartierung im Hochschwabgebiet - Entscheidungshilfe zur Abgrenzung von Quelleinzugsgebieten. In: Mandl, G. W. (Hg.): Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2001 Neuberg an der Mürz. Geologische Karten 1:50000 Blatt 103 Kindberg und 104 Mürzzuschlag. 3. - 7. September 2001, Neuberg an der Mürz. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, 2001), S. 220–231.

Bryda, G.; Husen, D. van (2010): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 101 Eisenerz. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Bryda, G.; Husen, D. van; Kreuss, O.; Koukal, V.; Moser, M.; Pavlik, W.; Schönlaub, H. P.; Wagreich, M. (2013): Erläuterungen zu Blatt 101 Eisenerz. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000).

Coron, L.; Thirel, G.; Delaigue, O.; Perrin, C.; Andréassian, V. (2017): The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software* 94, S. 166–171.

Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16 (4), S. 436–468. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

Decker, K.; Reiter, F. (2001): Strukturgeologische Methoden zur Charakterisierung von Karstgrundwasserwegen im Hochschwabmassiv. In: Mandl, G. W. (Hg.): Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2001 Neuberg an der Mürz. Geologische Karten 1:50000 Blatt 103 Kindberg und 104 Mürzzuschlag. 3. - 7. September 2001, Neuberg an der Mürz. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, 2001), S. 206–212.

Dinçer, T.; Payne, B.R., Yen, C.K., Zötl, J (1972): Das Tote Gebirge als Entwässerungstypus der Karstmassive der nordöstlichen Kalkhochalpen (Ergebnisse von Isotopenmessungen). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie* 24, S. 71–109.

Ebner, F.; Flack, J.; Gräf, W.; Krainer, B.; Schirnik, D.; Suetter, G.; Tschelaut, W. (1985): Brekzien, Konglomerate und Sandsteine im Grazer Bergland und im Raum Trofaiach - Eisenerz unter dem Aspekt einer Nutzungsmöglichkeit als Dekorgesteine. *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.* 6, S. 11–17.

Ebner, F.; Stingl, K. (1998): Geological Frame and Position of the Early Miocene Lignite Opencast Mine Oberdorf (N Voitsberg, Styria, Austria). *Jb. Geol. B.-A.* 140 (4), S. 403–406.

Ebner, F.; Becker, L. P.; Schuster, R. (2017): Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50 000. Blatt 163 Voitsberg. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Edijatno; Oliveira Nascimento, N. de; Yang, X.; Makhlof, Z.; Claude, M. (1999): GR3J. A daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44 (2), S. 263–277.

Eicher, H. (1976): Die Entwässerung des Grebenzenkalkstockes und seine Neukartierung im Kärntner Bereich. *Carinthia II* 86, S. 151–161.

Fabiani, E.; Weissensteiner, V.; Wakonigg, H. (1980): Grund- und Karstwasseruntersuchungen im Hochschwabgebiet. Teil 1: Naturräumliche Grundlagen - Geologie, Morphologie, Klimatologie. Hg. v. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz (Berichte der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung, 44).

Flügel, H. W.; Neubauer, F. (Hg.) (1984): Steiermark. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen).

Flügel, H. W.; Hubmann, B. (2000): Das Paläozoikum von Graz: Stratigraphie und Bibliographie. Wien: Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW) (Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommissionen, 13).

Flügel, H. W.; Nowotny, A.; Gross, M. (2011): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 164 Graz. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Ford, D.; Williams, P. W. (2007): Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, Hoboken: John Wiley & Sons.

Froehlich, K.; Kralik, M.; Papesch, W.; Rank, D.; Scheifinger, H.; Stichler, W. (2008): Deuterium excess in precipitation of Alpine regions – moisture recycling. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 44: S. 61-70.

Geyer, T.; Birk, S.; Liedl, R.; Sauter, M. (2008): Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. *Journal of Hydrology* 348 (3-4), S. 452–463. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.10.015.

Gross, M. (2015): Die neogenen Formationen auf der geologischen Karte GÖK50 164 Graz (Steiermark, SE-Österreich). *Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark* 144, S. 105–132.

Gupta, H. V.; Kling, H.; Yilmaz, K. K.; Martinez, G. F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria. Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1-2), S. 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

Gupta, H. V.; Kling, H. (2011): On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resour. Res.* 47 (10), 877. DOI: 10.1029/2011WR010962.

Hager, B.; Foelsche, U. (2015): Stable isotope composition of precipitation in Austria. *AJES* 108 (2), S. 2–13. DOI: 10.17738/ajes.2015.0012.

Harlacher, C.; Clemens, T.; Sauter, M. (2003): Chemische und thermische Reaktionen der Wässer von Karstquellen im Hochgebirge (Totes Gebirge, Österreich) auf Niederschlagsereignisse. Graz: Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Berichte der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung, 84).

Haslinger, K.; Bartsch, A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves method. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (3), S. 1211–1223. DOI: 10.5194/hess-20-1211-2016.

Hausegger, S. (2006): Die Interndeformation von Großhangbewegungen am Beispiel der Massenbewegung Lärchberg-Galgenwald (Murau, Steiermark). Magisterarbeit. Karl-Franzens-Universität, Graz.

Hausleber, M.; Obwegs, M.; Kainz, S.; Vremec, M.; Collenteur, R.; Wagner, T.; Winkler, G. (in Bearbeitung): Zeitreihen- und Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreichs. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.

Helsel, D. R.; Hirsch, R. M.; Ryberg, K. R.; Archfield, S. A.; Gilroy, E. J. (2020): Statistical Methods in Water Resources: U. S. Geological Survey (USGS) (U. S. Geol. Surv. Techniques and Methods, book 4, chapter A3).

Henne, P.; Krauthausen, B.; Stummer, G. (1994): Höhlen am Dachstein. Derzeitiger Forschungsstand, Anlage der Riesenhöhlensysteme am Dachstein-Nordrand und Bewertung der unterirdischen Abflußverhältnisse. *Die Höhle* 45, S. 48–67.

Herlicska, H.; Boroviczeny, F.; Mandl, G. W.; Pavuza, R.; Stummer, G.; Lassnig, M.; Lorbeer, G. E. (1994): Pilotprojekt "Karstwasser Dachstein". Bd. 1: Karstwasserqualität. 2 Bände. Wien: Umweltbundesamt (Monographien / Umweltbundesamt, 41).

Herrmann, E. (Hg.) (1993): Die Tauplitz-Schachtzone im Toten Gebirge, Stmk. Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher (Wissenschaftliche Beihefte zur Zeitschrift "Die Höhle", 44).

Hiebl, J.; Frei, C. (2016): Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability. *Theor Appl Climatol* 124 (1-2), S. 161–178. DOI: 10.1007/s00704-015-1411-4.

Hiebl, J.; Frei, C. (2018): Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theor Appl Climatol* 132 (1-2), S. 327–345. DOI: 10.1007/s00704-017-2093-x.

Hießleitner, G. (1935): Zur Geologie der Erz führenden Grauwackenzone des Johnsbachtales. *Jb. Geol. B.-A.* 85, S. 81–100.

Hießleitner, G. (1958): Zur Geologie der Erz führenden Grauwackenzone zwischen Admont-Selztal-Liezen. *Jb. Geol. B.-A.* 101, S. 35–78.

Hirsch, R. M.; Slack, J. R. (1984): A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resour. Res.* 20 (6), S. 727–732. DOI: 10.1029/WR020i006p00727.

- Hirsch, R. M.; Slack, J. R.; Smith, R. A. (1982): Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resour. Res.* 18 (1), S. 107–121.
- Holzer, H. (1964): Geologische Luftbildinterpretation: Zur photogeologischen Karte des Dachsteinplateaus. *Jb. Geol. B.-A.* 107, S. 1–9.
- Humer, G. (1995): Niederschlagsisotopenmessnetz Österreich. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt. Wien (Monographien, 52).
- Husen, D. van (1979): Verbreitung, Ursachen und Füllung glazial übertiefter Talabschnitte an Beispielen in den Ostalpen. *Eiszeitalter u. Gegenwart* 29, S. 9–22.
- Husen, D. van (1997): LGM and late-glacial fluctuations in the Eastern Alps. *Quaternary International* 38/39, S. 109–118.
- Joanneum Research GIS Steiermark (1999): GEOFAST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 103 Kindberg. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Katterbauer, U. (2011): Charakterisierung und Vergleich von Quelleneinzugsgebieten in Karbonatgesteinen mit Quellschüttungsdaten und physikochemischen Daten. Masterarbeit. Karl-Franzens-Universität, Graz.
- Kern, Z.; Kohán, B.; Leuenberger, M. (2014): Precipitation isoscape of high reliefs. Interpolation scheme designed and tested for monthly resolved precipitation oxygen isotope records of an Alpine domain. *Atmos. Chem. Phys.* 14 (4), S. 1897–1907. DOI: 10.5194/acp-14-1897-2014.
- Kern, Z.; Hatvani, I.; Czuppon, G.; Fórizs, I.; Erdélyi, D.; Kanduč, T.; Palcsu, L.; Vreča, P. (2020): Isotopic 'Altitude' and 'Continental' Effects in Modern Precipitation across the Adriatic–Pannonian Region. *Water* 12 (6), S. 1797. DOI: 10.3390/w12061797.
- Koppenwallner, F. (1964): Der Plan der Fledermaushöhle auf der Tonionalpe (Steiermark). *Die Höhle* 15 (4), S. 81–83.
- Kralik, M.; Papesch, W.; Stichler, W. (2003): Austrian network of isotopes in precipitation (ANIP): Quality assurance and climatological phenomenon in one of the oldest and densest networks in the world. In: International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hg.): Intern. Sympos. On Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management, 19–23 May 2003. Wien (C&SPaperSeries), S. 95–97.
- Kreuss, O. (2014): GEOFAST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 100 Hieflau. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Kristan-Tollmann, E.; Tollmann, A. (1962): Die Mürzalpendecke - eine neue hochalpine Einheit der östlichen Kalkalpen. *Sitzungsberichte Der Akademie Der Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse* 171, S. 7–39.
- Kübeck, C.; Maloszewski, P. J.; Benischke, R. (2013): Determination of the conduit structure in a karst aquifer based on tracer data-Lurbach system, Austria. *Hydrol. Process.* 27 (2), S. 225–235. DOI: 10.1002/hyp.9221.
- Laimer, H. J. (2010): Neue Ergebnisse zur Karsthydrogeologie des westlichen Toten Gebirges (Österreich). *Grundwasser* 15 (2), S. 113–122. DOI: 10.1007/s00767-009-0126-9.
- Leavesley, G. H.; Stannard, L. G. (1995): The precipitation-runoff modeling system – PRMS. In: Singh, V. P. (Hg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications. S. 281–310.
- Legrain, N.; Stüwe, K.; Wölfler, A. (2014): Incised relict landscapes in the eastern Alps. *Geomorphology* 221 (2), S. 124–138. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.010.
- Legrain, N.; Dixon, J.; Stüwe, K.; Blanckenburg, F. von; Kubik, P. (2015): Post-Miocene landscape rejuvenation at the eastern end of the Alps. *Lithosphere* 7 (1), S. 3–13. DOI: 10.1130/L391.1.
- L'hôte, Y.; Chevallier, P.; Coudrain, A.; Lejeune, Y.; Etchevers, P. (2005): Relationship between precipitation phase and air temperature. Comparison between the Bolivian Andes and the Swiss Alps / Relation entre phase de précipitation et température de l'air: comparaison entre les Andes Boliviennes et les Alpes Suisses. *Hydrological Sciences Journal* 50 (6), S. 87. DOI: 10.1623/hysj.2005.50.6.989.

- Lindbichler, P. (2021): Geomonitoring einer Großhangrutschung am Lärchberg bei Mura mit ausgewählten bildgebenden Verfahren. Masterarbeit, Karl-Franznes Universität Graz.
- Lobitzer, H. (2012): Geologische Spaziergänge. Ausseerland-Salzkammergut. 2. Aufl. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Loeschke, J.; Kretschmar, T.; Langer, V.; Streck, M. (1990): Zur Geologie der Norischen Decke nordwestlich von Kalwang (Eisenerzer Alpen, Steirische Grauwackenzone/Österreich). *Jb. Geol. B.-A.* 133 (2), S. 345–363.
- Maillet, E. (1905): *Essai d'hydraulique souterraine et fluviale*. Paris: Librairie scientifique A. Hermann.
- Majone, B.; Bertagnoli, A.; Bellin, A. (2010): A non-linear runoff generation model in small Alpine catchments. *Journal of Hydrology* 385 (1-4), S. 300–312.
- Mandl, G. W. (2001a): Die östlichen Kalkhochalpen: Stratigraphie und fazielle Differenzierung vom Perm bis in den Jura. In: Mandl, G. W. (Hg.): Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2001 Neuberg an der Mürz. Geologische Karten 1:50000 Blatt 103 Kindberg und 104 Mürzzuschlag. 3. - 7. September 2001, Neuberg an der Mürz. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, 2001), S. 71–87.
- Mandl, G. W. (2001b): Zum tektonischen Bauplan der östlichen Kalkhochalpen. In: Mandl, G. W. (Hg.): Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2001 Neuberg an der Mürz. Geologische Karten 1:50000 Blatt 103 Kindberg und 104 Mürzzuschlag. 3. - 7. September 2001, Neuberg an der Mürz. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt, 2001), S. 123–131.
- Mandl, G. W. (2016): Das Kalkalpine Stockwerk auf GK50 Blatt 103 Kindberg. In: Schuster, R.; Ilickovic, T. (Hg.): Arbeitstagung 2015 der Geologischen Bundesanstalt Geologie der Kartenblätter GK50 ÖK 103 Kindberg und ÖK 135 Birkfeld. Mitterdorf im Müürztal 21.–25. September 2015. 2. Aufl. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt), S. 88–112.
- Mandl, G. W.; Matura, A. (1995): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 127 Schladming. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Mandl, G. W.; Husen, D. van; Lobitzer, H. (2012): Erläuterungen zu Blatt 96 Bad Ischl. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000).
- Mandl, G. W.; Hejl, E.; Husen, D. van (2014): Erläuterungen zu Blatt 127 Schladming. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000).
- Mangin, A. (1975): *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Dissertation. Université de Dijon, Dijon.
- Matura, A.; Schuster, R. (2014): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 135 Birkfeld. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- Maurin, V.; Zötl, J. (1964): Karsthydrologische Untersuchungen im Toten Gebirge. *Österr. Wasserwirtschaft* 16 (5/6), S. 112–123.
- Mayaud, C.; Wagner, T.; Benischke, R.; Birk, S. (2013): Understanding changes in the hydrological behaviour within a karst aquifer (Lurbach system, Austria). *Carbonates Evaporites*.
- Merlivat, L.; Jouzel, J. (1979): Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 84: S. 5029-5033. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC084iC08p05029>.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50 (3), 885-900.
- Moser, H.; Rauert, W. (1980): *Isotopenmethoden in der Hydrologie*. Berlin, Stuttgart: Gebr. Borntraeger (Lehrbuch der Hydrogeologie, 8).
- Moser, M.; Pavlik, W. (2014): GEOFASST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 97 Bad Mitterndorf. Wien: Geologische Bundesanstalt.

- Mouelhi, S.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V. (2006): Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318 (1-4), S. 200–214. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970): River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part 1: A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10, S. 282 – 290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2017): ÖWAV-Regelblatt 205 Nutzung und Schutz von Quellen in nicht verkarsteten Bereichen. Wien.
- Parajka, J.; Merz, R.; Blöschl, G. (2007): Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling. Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Process.* 21 (4), S. 435–446. DOI: 10.1002/hyp.6253.
- Parajka, J.; Blöschl, G. (2008): The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology* 358 (3-4), S. 240–258. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.06.006.
- Pardé, M. (1947): *Fleuves et rivières*. Colin, Paris.
- Pauritsch, M.; Wagner, T.; Winkler, G.; Birk, S. (2017): Investigating groundwater flow components in an Alpine relict rock glacier (Austria) using a numerical model. *Hydrogeology Journal* 25 (2), S. 371–383. DOI: 10.1007/s10040-016-1484-x.
- Perrin, C.; Michel, C.; Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, S. 275–289.
- Piller, W. E.; Hubmann, B.; Ebner, F.; Ferretti, A.; Kido, E.; Krainer, K.; Neubauer, F.; Schönlaub, H. P.; Suttner, T. J. (2014): *The lithostratigraphic units of the Austrian Stratigraphic Chart 2004 (sedimentary successions)*. Vol. I: The Paleozoic Era(them). 2. Aufl. Wien: Geologische Bundesanstalt (Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 66).
- Plan, L. (2002): *Speläologisch-tektonische Charakterisierung der Karstwasserdynamik im Einzugsgebiet der bedeutendsten Quelle der Ostalpen (Kläfferquelle, Hochschwab)*. Veröffentlichung der Diplomarbeit am Institut für Geologie der Universität Wien. Wien: Verband Österreichischer Höhlenforscher (SPELDOK, 11).
- Plan, L.; Filipponi, M.; Behm, M.; Seebacher, R.; Jeutter, P. (2009): Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology — A case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). *Geomorphology* 106 (1-2), S. 118–129.
- Poisel, R.; Hermann, S.; Kittl, H.; Preh, A. (2003): Die Großhangbewegung Lärchberg-Galgenwald bei Murau. *Felsbau* 21 (5), S. 110–119.
- Poisel, R.; Angerer, H.; Pöllinger, M.; Kalcher, T.; Kittl, H. (2009): Mechanics and velocity of the Lärchberg-Galgenwald landslide (Austria). *Engineering Geology* 109 (1-2), S. 57-66.
- Probst, G. (1993): Erfassung der Wasserreserven in den Eisenerzer Alpen (Steiermark). *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.* 14, S. 109–117.
- R Core Development Team (2021): *The R Project for Statistical Computing*. R version 4.1.0. <https://www.r-project.org/>, letzter Zugriff 7.11.2021.
- Repis, W. (1964): Die Fledermaushöhle auf der Tonionalpe (Steiermark). *Die Höhle* 15, S. 64–68.
- Riboust, P.; Thirel, G.; Le Moine, N.; Ribstein, P. (2019): Revisiting a Simple Degree-Day Model for Integrating Satellite Data. Implementation of Swe-Sca Hystereses. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 67 (1), S. 70–81. DOI: 10.2478/johh-2018-0004.
- Sauter, M. (1992): *Quantification and Forecasting of Regional Groundwater Flow and Transport in a Karst Aquifer (Gallusquelle, Malm, SW. Germany)*. Hg. v. Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen. Tübingen (Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), Reihe C, 13).
- Schäffer, G. (1982): *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 96 Bad Ischl*. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Scheidleder, A.; Mandl, G. W.; Boroviczeny, F.; Hofmann, T.; Trimborn, P.; Stichler, W.; Grat, W.; Schubert, G. (2001): Pilotprojekt "Karstwasser Dachstein". Bd. 2: Karsthydrologie und Kontaminationsrisiko von Quellen. Wien: Geologische Bundesanstalt; Umweltbundesamt (Archiv für Lagerstättenforschung, 21).

Schmid, S. M.; Fügenschuh, B.; Kissling, E.; Schuster, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 97 (1), S. 93–117.

Schönlaub, H. P. (1979): Das Paläozoikum in Österreich. Verbreitung, Stratigraphie, Korrelation, Entwicklung und Paläogeographie nicht-metamorpher und metamorpher Abfolgen. *Abh. Geol. B.-A.* 33.

Schönlaub, H. P. (1980): Die Grauwackenzone. In: Rudolf Oberhauser (Hg.): *Der Geologische Aufbau Österreichs*. Wien: Springer Vienna, S. 265–289.

Schubert, G. (2017): Karstwasser Dachstein. In: Wimmer-Frey, I.; Römer, A.; Janda, C. (Hg.): *Angewandte Geowissenschaften an der GBA. Arbeitstagung 2017 Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden*. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt), S. 86–93.

Seebacher, R. (2016): Projekt Renaturierung Sagtümpelquelle. „Wassermannprojekt Tauplitz“. Bad Mitterndorf.

Sen, P. K. (1968): Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63 (324), S. 1379–1389.

Spitz, M. M. (2016): Flow component characterization of a complex karst spring. Application of natural and artificial tracers at the example of the Eitzbach-Spring, Johnsbachtal. Masterarbeit. Karl-Franzens-Universität, Graz.

Strobl, E. (1992): Hydrogeologie des westlichen Hochschwab, nördlich von Eisenerz (Steiermark). Dissertation. Karl-Franzens-Universität, Graz.

Strobl, E. (2009a): Hydrogeologische Untersuchungen im südlichen Hochschwab, Eisenerzer Seeau – Pfaffingplateau. In: Gerhard Bryda (Hg.): *Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2009 Leoben*. Blatt 101 Eisenerz. 31.08. - 04.09.2009. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt), S. 143–152.

Strobl, E. (2009b): Exkursionspunkt P7: Schwarze Lacke - Wassermann Loch. In: Gerhard Bryda (Hg.): *Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2009 Leoben*. Blatt 101 Eisenerz. 31.08. - 04.09.2009. Wien: Geologische Bundesanstalt (Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt), S. 235–236.

Stromberger, B. (2005): Die Brunnaderquelle bei Falkenstein. Geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Einzugsgebiet. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (Hg.): *Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich*. Wien (Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros, 70), S. 42–53.

Theil, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 1. Confidence regions for the parameters of linear regression equations in two variables. *Ned. Akad. Wentsch Proc.* 53, S. 386–392.

Theil, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 2. Confidence regions for the parameters of linear regression equations in three and more variables. *Ned. Akad. Wentsch Proc.* 53, S. 521–525.

Theil, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3. Confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Ned. Akad. Wentsch Proc.* 53, S. 1397–1412.

Turner, A. (1958a): Erläuterungen zu Blatt 158 Stadl an der Mur und 159 Murau. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000).

Turner, A. (1958b): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 158 Stadl an der Mur und 159 Murau. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Turner, A.; Husen, D. van (1978): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 160 Neumarkt in Steiermark. Wien: Geologische Bundesanstalt.

Turner, A.; Husen, D. van (1980): Erläuterungen zu Blatt 160 Neumarkt in Steiermark. Wien: Geologische Bundesanstalt (Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000).

- Tollmann, A. (1960): Die Hallstätter Zone des östlichen Salzkammergutes und ihr Rahmen. *Jb. Geol. B.-A.* 103, S. 37–131.
- Tollmann, A. (1976): Monographie der Nördlichen Kalkalpen. Teil 2: Analyse des klassischen nordalpinen Mesozoikums. Stratigraphie, Fauna und Fazies der Nördlichen Kalkalpen. Wien: Franz Deuticke.
- Tollmann, A. (1977): Geologie von Österreich. Bd. 1: Die Zentralalpen. Wien: Franz Deuticke.
- Turcotte, R.; Fortin, L.-G.; Fortin, V.; Fortin, J.-P.; Villeneuve, J.-P. (2007): Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada. *Hydrol Res* 38 (3), S. 211–234. DOI: 10.2166/nh.2007.009.
- U. S. Army Corps of Engineers (USACE) (Hg.) (1956): Snow hydrology. Summary report of the snow investigations. Portland, OR.
- Valéry, A. (2010): Modélisation précipitations – débit sous influence nivale Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Dissertation. AgroParisTech, Paris.
- Valéry, A.; Andréassian, V.; Perrin, C. (2014a): 'As simple as possible but not simpler'. What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of Hydrology* 517 (2), S. 1166–1175. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059.
- Valéry, A.; Andréassian, V.; Perrin, C. (2014b): 'As simple as possible but not simpler'. What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology* 517 (12), S. 1176–1187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.
- Verband Österreichischer Höhlenforscher, 2021; <https://hoehle.org/laengste-tiefste>; zusammengestellt von Theo Pfarr, Robert Seebacher und Lukas Plan; abgerufen am 5.11.2021
- Wagner, T.; Fritz, H.; Stüwe, K.; Nestroy, O.; Rodnight, H.; Hellstrom, J.; Benischke, R. (2011): Correlations of cave levels, stream terraces and planation surfaces along the River Mur-Timing of landscape evolution along the eastern margin of the Alps. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)* 134 (1-2), S. 62–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.04.024.
- Wagner, T.; Mayaud, C.; Benischke, R.; Birk, S. (2013): Ein besseres Verständnis des Lurbach-Karstsystems durch ein konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell. *Grundwasser* 18 (4), S. 225–235. DOI: 10.1007/s00767-013-0234-4.
- Wagner, T.; Pauritsch, M.; Winkler, G. (2016): Impact of relict rock glaciers on spring and stream flow of alpine watersheds. Examples of the Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). *AJES* 109 (1), S. 84–98. DOI: 10.17738/ajes.2016.0006.
- Wagner, T.; Themeßl, M.; Schüppel, A.; Gobiet, A.; Stigler, H.; Birk, S. (2017): Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environmental Earth Sciences* 76 (1), S. 33.
- Wagner, T.; Pauritsch, M.; Mayaud, C.; Kellerer-Pirklbauer, A.; Thalheim, F.; Winkler, G. (2019): Controlling factors of microclimate in blocky surface layers of two nearby relict rock glaciers (Niedere Tauern Range, Austria). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 105 (2), S. 1–24. DOI: 10.1080/04353676.2019.1670950.
- Wagner, T.; Pleschberger, R.; Kainz, S.; Ribis, M.; Kellerer-Pirklbauer, A.; Krainer, K.; Philippitsch, R.; Winkler, G. (2020): The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps. *AJES* 113 (1), S. 1–23. DOI: 10.17738/ajes.2020.0001.
- Wagner, T.; Kainz, S.; Krainer, K.; Winkler, G. (2021): Storage-discharge characteristics of an active rock glacier catchment in the Innere Ölgrube, Austrian Alps. *Hydrol. Process.* 35 (5), S. 42. DOI: 10.1002/hyp.14210.
- Winkler, G.; Wagner, T.; Pauritsch, M.; Birk, S.; Kellerer-Pirklbauer, A.; Benischke, R.; Leis, A.; Morawetz, R.; Schreilechner, M. G.; Hergarten, S. (2016): Identification and assessment of groundwater flow and storage components of the relict Schöneben Rock Glacier, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). *Hydrogeol J* 24 (4), S. 937–953. DOI: 10.1007/s10040-015-1348-9.

World Meteorological Organization (1986): Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational hydrology report, 23. Geneva.

Zötl, J. (1957): Neue Ergebnisse der Karsthydrologie. Untersuchungen im Dachsteingebiet mit Hilfe der Sporentriftmethode. Erdkunde 11, S. 107–117.

Anhang: Messwerte

Tabelle A1: Erhobene Felparameter (LF = elektrische Leitfähigkeit; O₂ = Sauerstoffgehalt; SI O₂ = Sauerstoffsättigung; WT = Wassertemperatur)

Quelle	Datum	LF [μS/cm]	WT [°C]	pH [-]	SI O ₂ [%]	O ₂ [mg/l]
Brunnaderquelle	14.07.2020	530	10,9			
Brunnaderquelle	17.08.2020	535	10,9			
Brunnaderquelle	11.09.2020	536	11			
Brunnaderquelle	12.10.2020	545	10,9			
Brunnaderquelle	03.11.2020	546	10,8			
Brunnaderquelle	01.12.2020	572	10,6	7,126		
Brunnaderquelle	11.01.2021	579	10,6	7,224		
Brunnaderquelle	07.02.2021	579	10,6	7,373		
Brunnaderquelle	01.03.2021	553	10,2	7,238	99,3	
Brunnaderquelle	08.04.2021	573	10,4	7,317	81,4	8,4
Brunnaderquelle	05.05.2021	580	10,5	6,992	81,3	8,2
Brunnaderquelle	07.06.2021	593	10,7	7,215	78,7	10,6
Brunnaderquelle	04.07.2021	600	10,8	7,093	77,9	7,92
Brunnaderquelle	18.10.2021	565	10,9	7,196	77,1	7,9
Erbsattelquelle	15.07.2020	365	9,2			
Erbsattelquelle	17.08.2020	393	9			
Erbsattelquelle	14.09.2020	398	8,9			
Erbsattelquelle	12.10.2020	373	8,9			
Erbsattelquelle	03.11.2020	398	8,8			
Erbsattelquelle	01.12.2020	395	9	7,736		
Erbsattelquelle	11.01.2021	397	8,7	7,793		
Erbsattelquelle	05.02.2021	382	8,6	7,754		
Erbsattelquelle	01.03.2021	395	8,5	7,924	84,3	
Erbsattelquelle	08.04.2021	394	8,3	7,85	87,7	9,76
Erbsattelquelle	05.05.2021	393	8,6	7,65	85,5	9,24
Erbsattelquelle	07.06.2021	390	8,6	7,625	86	8,6
Erbsattelquelle	04.07.2021	399	9,4	7,418	86,2	9,12

Erbsattelquelle	18.10.2021	392	9	7,553	82,9	8,96
Etzbachquelle	15.07.2020	180	6,4			
Etzbachquelle	17.08.2020	190,9	6,5			
Etzbachquelle	14.09.2020	190,7	6,5			
Etzbachquelle	12.10.2020	198,1	6,5			
Etzbachquelle	03.11.2020	183,9	6,4			
Etzbachquelle	01.12.2020	207	6,5	8,062		
Etzbachquelle	11.01.2021	218	6,5	7,908		
Etzbachquelle	05.02.2021	231	6,5	7,925		
Etzbachquelle	01.03.2021	227	6,5	8,028	95,1	
Etzbachquelle	08.04.2021	218	6,3	7,954	95,8	
Etzbachquelle	05.05.2021	182,4	6	7,905	96,9	10,82
Etzbachquelle	07.06.2021	186,9	5,9	8,08	97,9	11,07
Etzbachquelle	04.07.2021	198,8	6,4	7,813	96,1	10,67
Etzbachquelle	18.10.2021	203	6,5	7,676	94,1	10,51
Galgenwaldquelle	16.07.2020	462	6,2			
Galgenwaldquelle	18.08.2020	494	6,4			
Galgenwaldquelle	15.09.2020	489	6,2			
Galgenwaldquelle	13.10.2020	495	6,1			
Galgenwaldquelle	04.11.2020	492	6,1			
Galgenwaldquelle	02.12.2020	513	5,8	8,122		
Galgenwaldquelle	13.01.2021	497	5,8	8,015		
Galgenwaldquelle	03.02.2021	512	5,8	8,062		
Galgenwaldquelle	02.03.2021	498	5,7	8,066	98,3	
Galgenwaldquelle	09.04.2021	493	6	8,172	97	10,96
Galgenwaldquelle	06.05.2021	505	6,1	8,165	95,3	10,52
Galgenwaldquelle	09.06.2021	507	6,2	8,002	97,3	10,88
Galgenwaldquelle	02.07.2021	524	6,6	8,021	96,1	10,63
Galgenwaldquelle	19.10.2021	526	6,3	7,892	93,1	10,49
Goldschmiedquelle	16.07.2020	573	10,4			
Goldschmiedquelle	18.08.2020	607	10,8			
Goldschmiedquelle	11.09.2020	614	10,9			
Goldschmiedquelle	14.10.2020	615	10,6			

Goldschmiedquelle	05.11.2020	618	10,5			
Goldschmiedquelle	03.12.2020	625	10,2	7,248		
Goldschmiedquelle	18.01.2021	624	9,7	7,215		
Goldschmiedquelle	08.02.2021	625	9,6	7,367		
Goldschmiedquelle	03.03.2021	626	9,5	7,348	85,3	
Goldschmiedquelle	12.04.2021	628	9,4	7,33	85,4	9,28
Goldschmiedquelle	10.05.2021	626	9,4	7,37	85,4	9,23
Goldschmiedquelle	07.06.2021	634	9,6	7,281	85,4	9,23
Goldschmiedquelle	03.07.2021	635	9,9	7,23	86	9,2
Goldschmiedquelle	15.10.2021	621	10,4	7,405	85,5	-
Hammerbachquelle	28.07.2020	331	9,8			
Hammerbachquelle	17.08.2020	370	10,6			
Hammerbachquelle	11.09.2020	371	11,1			
Hammerbachquelle	12.10.2020	333	10,5			
Hammerbachquelle	03.11.2020	352	9,8			
Hammerbachquelle	02.12.2020	351	8,7	7,573		
Hammerbachquelle	18.01.2021	368	7	7,559		
Hammerbachquelle	03.02.2021	374	6,8	7,529		
Hammerbachquelle	03.03.2021	354	7,1	7,383	98,2	
Hammerbachquelle	12.04.2021	353	7,7	7,626	98,1	11,18
Hammerbachquelle	10.05.2021	356	8,4	7,708	97,8	10,93
Hammerbachquelle	07.06.2021	366	8,9	7,53	97,3	10,83
Hammerbachquelle	04.07.2021	376	9,5	7,408	97,1	10,54
Hammerbachquelle	15.10.2021	376	9,9	7,471	96,9	-
Kalter Bach	28.07.2020	264	5,3			
Ödensee-Kaltwassertrichter	15.07.2020	182	5,7			
Ödensee-Kaltwassertrichter	18.08.2020	201	6			
Ödensee-Kaltwassertrichter	15.09.2020	266	5,7			
Ödensee-Kaltwassertrichter	13.10.2020	222	5,6			
Ödensee-Kaltwassertrichter	04.11.2020	187,2	5,5			
Ödensee-Kaltwassertrichter	02.12.2020	256	5,1	7,605		
Ödensee-Kaltwassertrichter	13.01.2021	255	5,1	7,779		
Ödensee-Kaltwassertrichter	03.02.2021	260	5,9	7,718		

Ödensee-Kaltwassertrichter	02.03.2021	220	5,5	7,752	88,6	
Ödensee-Kaltwassertrichter	09.04.2021	207	5,1	7,835	-	
Ödensee-Kaltwassertrichter	06.05.2021	157,4	5,2	7,929	96,8	11,22
Ödensee-Kaltwassertrichter	09.06.2021	148,1	5,2	7,919	101,3	11,83
Ödensee-Kaltwassertrichter	02.07.2021	187,6	6	7,677	85,30	9,74
Ödensee-Kaltwassertrichter	19.10.2021	196	5,3	7,688	89,8	10,54
Pöllauer Ursprung	16.07.2020	290	5,7			
Pöllauer Ursprung	18.08.2020	320	5,8			
Pöllauer Ursprung	15.09.2020	319	5,6			
Pöllauer Ursprung	13.10.2020	314	5,7			
Pöllauer Ursprung	04.11.2020	351	5,7			
Pöllauer Ursprung	03.12.2020	314	5,8	7,672		
Pöllauer Ursprung	13.01.2021	309	5,9	7,612		
Pöllauer Ursprung	03.02.2021	308	6	7,692		
Pöllauer Ursprung	02.03.2021	310	6	7,772	97	
Pöllauer Ursprung	09.04.2021	316	5,8	7,803	97,2	10,68
Pöllauer Ursprung	06.05.2021	309	5,6	7,697	99,6	10,89
Pöllauer Ursprung	09.06.2021	310	5,7	7,743	105,5	11,64
Pöllauer Ursprung	02.07.2021	270	5,9	7,63	96,4	10,56
Pöllauer Ursprung	19.10.2021	306	6	7,727	92,9	10,21
Preunegger Siebenbrunnquelle	15.07.2020	168	6,4			
Preunegger Siebenbrunnquelle	18.08.2020	183,3	6,9			
Preunegger Siebenbrunnquelle	15.09.2020	184,5	6,9			
Preunegger Siebenbrunnquelle	13.10.2020	186,1	6,8			
Preunegger Siebenbrunnquelle	04.11.2020	183,2	6,7			
Preunegger Siebenbrunnquelle	02.12.2020	173,4	6,4	8,092		
Preunegger Siebenbrunnquelle	13.01.2021	191	6	7,94		
Preunegger Siebenbrunnquelle	03.02.2021	196,9	5,9	7,922		
Preunegger Siebenbrunnquelle	02.03.2021	200	5,6	7,893	87,9	

Preunegger Siebenbrunnquelle	09.04.2021	197,5	5,5	7,783	87,8	9,76
Preunegger Siebenbrunnquelle	06.05.2021	188,4	5,6	7,859	87,4	9,65
Preunegger Siebenbrunnquelle	09.06.2021	173,4	5,8	7,626	88,2	9,77
Preunegger Siebenbrunnquelle	02.07.2021	182,6	6,3	7,711	88	9,61
Preunegger Siebenbrunnquelle	19.10.2021	189,7	6,8	7,633	85,7	9,3
Reibachquelle	16.07.2020	119	6,1			
Reibachquelle	18.08.2020	129,8	6,2			
Reibachquelle	11.09.2020	132	6,2			
Reibachquelle	14.10.2020	110	5			
Reibachquelle	05.11.2020	133,6	6,1			
Reibachquelle	03.12.2020	135,7	6	7,825		
Reibachquelle	14.01.2021	136,1	6,1	7,395		
Reibachquelle	08.02.2021	135,6	6,1	7,643		
Reibachquelle	03.03.2021	134,7	6,1	7,593	96,5	
Reibachquelle	12.04.2021	131,8	6,1	7,691	96,4	10,09
Reibachquelle	10.05.2021	133,2	6,1	7,612	97,6	10,22
Reibachquelle	14.06.2021	132,5	6,1	7,589	97,3	10,25
Reibachquelle	03.07.2021	133,9	6,1	7,468	97,9	10,27
Reibachquelle	15.10.2021	134,5	6,1	7,435	98,3	10,3
Riedlbachquelle	15.07.2020	218	5,5			
Riedlbachquelle	18.08.2020	242	5,6			
Riedlbachquelle	15.09.2020	261	5,5			
Riedlbachquelle	13.10.2020	248	5,5			
Riedlbachquelle	04.11.2020	234	5,5			
Riedlbachquelle	02.12.2020	260	5,6	8,01		
Riedlbachquelle	13.01.2021	-	-	-		-
Riedlbachquelle	03.02.2021	249	5,7	7,857		
Riedlbachquelle	02.03.2021	235	5,6	7,855	88,9	
Riedlbachquelle	09.04.2021	216	5,6	7,781	91,8	10,57
Riedlbachquelle	06.05.2021	191,5	5,5	7,829	97,2	11,14
Riedlbachquelle	09.06.2021	190,4	5,4	7,855	91,2	10,56

Riedlbachquelle	02.07.2021	246	5,6	7,634	82,8	9,51
Riedlbachquelle	19.10.2021	239	5,6	7,606	86,9	10,06
Roßlochquelle	15.07.2020	263	6,2			
Roßlochquelle	17.08.2020	283	6,3			
Roßlochquelle	14.09.2020	275	6,3			
Roßlochquelle	12.10.2020	294	6,3			
Roßlochquelle	03.11.2020	264	6,1			
Roßlochquelle	01.12.2020	307	6,4	7,664		
Roßlochquelle	11.01.2021	308	6,4	7,825		
Roßlochquelle	05.02.2021	307	6,5	7,842		
Roßlochquelle	01.03.2021	288	6,3	7,797	94,2	
Roßlochquelle	08.04.2021	246	6,1	7,788	101,1	11,56
Roßlochquelle	05.05.2021	207	5,9	7,879	102	11,43
Roßlochquelle	07.06.2021	277	6,1	7,757	93,5	-
Roßlochquelle	04.07.2021	306	6,4	7,776	90,9	10,19
Roßlochquelle	18.10.2021	293	6,5	7,569	92,7	10,41
Sagtümpel	15.07.2020	251	5,9			
Sagtümpel	18.08.2020	262	6			
Sagtümpel	15.09.2020	287	5,9			
Sagtümpel	13.10.2020	262	5,8			
Sagtümpel	04.11.2020	259	5,6			
Sagtümpel	02.12.2020	270	5,5	8,078		
Sagtümpel	13.01.2021	266	5,4	8,146		
Sagtümpel	03.02.2021	242	6	8,109		
Sagtümpel	02.03.2021	233	5,6	8,139	95,7	
Sagtümpel	09.04.2021	221	5,5	8,054	94,1	
Sagtümpel	06.05.2021	194,9	5,2	7,976	96,6	10,93
Sagtümpel	09.06.2021	194,1	5,6	7,82	97,5	11,07
Sagtümpel	02.07.2021	251	5,9	7,466	91,3	10,19
Sagtümpel	19.10.2021	263	5,6	7,482	94,9	10,79
Schönebenquelle	21.07.2020	59,6	2,5			
Schönebenquelle	20.08.2020					
Schönebenquelle	01.10.2020	56	2,7			

Schönebenquelle	22.10.2020	61,1	2,6			
Schönebenquelle	14.12.2020	66,8	2,6	-		-
Schönebenquelle	26.01.2021	68,7	2,2	-		-
Schönebenquelle	25.02.2021	66,1	2,3	-	-	-
Schwabeltalquelle	15.07.2020	225	6,0			
Schwabeltalquelle	17.08.2020	241	5,7			
Schwabeltalquelle	14.09.2020	251	5,7			
Schwabeltalquelle	12.10.2020	251	5,7			
Schwabeltalquelle	03.11.2020	251	6,1			
Schwabeltalquelle	01.12.2020	267	5,7	7,951		
Schwabeltalquelle	11.01.2021	269	5,7	8,192		
Schwabeltalquelle	05.02.2021	253	5,9	8,103		
Schwabeltalquelle	01.03.2021	246	5,7	7,866	94,8	
Schwabeltalquelle	08.04.2021	-	-	-	-	-
Schwabeltalquelle	05.05.2021	220	5,7	7,866	107,6	12,06
Schwabeltalquelle	07.06.2021	243	6,1	7,879	93,4	6
Schwabeltalquelle	04.07.2021	239	6,7	7,633	95,5	10,57
Schwabeltalquelle	18.10.2021	253	6,4	7,64	95,7	-
Totes Weib	28.07.2020	-	-			
Totes Weib	17.08.2020	-	-			
Totes Weib	23.08.2020	317	6,7			
Totes Weib	14.09.2020	338	7,7			
Totes Weib	12.10.2020	349	5,9			
Totes Weib	03.11.2020	-	-			
Totes Weib	01.12.2020	369	3,1	-		
Totes Weib	11.01.2021	334	0,4	-		
Totes Weib	05.02.2021	303	5,4	8,165		
Totes Weib	01.03.2021	299	5,3	8,483	-	
Totes Weib	08.04.2021	397	1,8	8,354	-	-
Totes Weib	05.05.2021	257	7,2	8,262	97,4	10,15
Totes Weib	18.10.2021	303	5,8	7,599	98,5	-
Totes Weib	-	-	-	-	-	-
Wassermansloch	15.07.2020	210	6,3			

Wassermannsloch	17.08.2020	214	6,3			
Wassermannsloch	14.09.2020	221	6,4			
Wassermannsloch	12.10.2020	217	6,4			
Wassermannsloch	03.11.2020	204	6,4			
Wassermannsloch	01.12.2020	224	6,4	8,171		
Wassermannsloch	11.01.2021	222	6,7	8,068		
Wassermannsloch	05.02.2021	229	6,8	8,19		
Wassermannsloch	01.03.2021	218	6,8	8,077	101,5	
Wassermannsloch	08.04.2021	197,3	6,5	8,346	100,9	-
Wassermannsloch	05.05.2021	183,1	6,1	8,106	99,6	11,41
Wassermannsloch	07.06.2021	178,3	6,1	8,125	102,6	6
Wassermannsloch	04.07.2021	202	6,6	7,886	100,2	11,43
Wassermannsloch	18.10.2021	216	6,7	7,978	101,5	11,72

Tabelle A2: Stabile Isotopendaten.

Quelle	Datum	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Brunnaderquelle	14.07.2020	-69.3	-10.09
Brunnaderquelle	17.08.2020	-68.6	-10.03
Brunnaderquelle	11.09.2020	-68.6	-10
Brunnaderquelle	12.10.2020	-69.1	-10.07
Brunnaderquelle	03.11.2020	-69.2	-10.05
Brunnaderquelle	01.12.2020	-70.2	-10.24
Brunnaderquelle	11.01.2021	-70.4	-10.29
Brunnaderquelle	07.02.2021	-70.1	-10.26
Brunnaderquelle	01.03.2021	-70.2	-10.15
Brunnaderquelle	08.04.2021	-69.0	-10.19
Brunnaderquelle	05.05.2021	-69.1	-10.16
Brunnaderquelle	07.06.2021	-69.7	-10.17
Erbsattelquelle	15.07.2020	-74.7	-10.69
Erbsattelquelle	17.08.2020	-74.1	-10.63
Erbsattelquelle	14.09.2020	-72.8	-10.42
Erbsattelquelle	12.10.2020	-68.9	-9.99
Erbsattelquelle	03.11.2020	-72.6	-10.41
Erbsattelquelle	01.12.2020	-76.5	-10.91
Erbsattelquelle	11.01.2021	-74.7	-10.75
Erbsattelquelle	05.02.2021	-75.9	-10.94
Erbsattelquelle	01.03.2021	-75.7	-10.86
Erbsattelquelle	08.04.2021	-76.1	-10.92
Erbsattelquelle	05.05.2021	-75.0	-10.80
Erbsattelquelle	07.06.2021	-76.4	-10.84
Etzbachquelle	15.07.2020	-82.2	-11.88
Etzbachquelle	17.08.2020	-81.1	-11.74
Etzbachquelle	14.09.2020	-80.9	-11.65
Etzbachquelle	12.10.2020	-79.4	-11.48
Etzbachquelle	03.11.2020	-81.0	-11.70
Etzbachquelle	01.12.2020	-80.6	-11.70
Etzbachquelle	11.01.2021	-80.1	-11.49

Etzbachquelle	05.02.2021	-79.7	-11.46
Etzbachquelle	01.03.2021	-81.3	-11.68
Etzbachquelle	08.04.2021	-79.3	-11.62
Etzbachquelle	05.05.2021	-84.6	-12.29
Etzbachquelle	07.06.2021	-82.5	-11.88
Galgenwaldquelle	16.07.2020	-67.4	-9.83
Galgenwaldquelle	18.08.2020	-67.0	-9.84
Galgenwaldquelle	15.09.2020	-66.5	-9.73
Galgenwaldquelle	13.10.2020	-66.8	-9.75
Galgenwaldquelle	04.11.2020	-67.0	-9.74
Galgenwaldquelle	02.12.2020	-67.7	-9.84
Galgenwaldquelle	13.01.2021	-68.3	-9.93
Galgenwaldquelle	03.02.2021	-67.7	-9.80
Galgenwaldquelle	02.03.2021	-67.8	-9.77
Galgenwaldquelle	09.04.2021	-66.7	-9.73
Galgenwaldquelle	06.05.2021	-68.6	-9.72
Galgenwaldquelle	09.06.2021	-67.5	-9.78
Goldschmiedquelle	16.07.2020	-62.0	-8.97
Goldschmiedquelle	18.08.2020	-60.9	-8.90
Goldschmiedquelle	11.09.2020	-61.6	-8.97
Goldschmiedquelle	14.10.2020	-61.4	-8.95
Goldschmiedquelle	05.11.2020	-61.9	-8.97
Goldschmiedquelle	03.12.2020	-62.9	-9.08
Goldschmiedquelle	18.01.2021	-62.5	-9.09
Goldschmiedquelle	08.02.2021	-62.5	-9.03
Goldschmiedquelle	03.03.2021	-62.6	-9.10
Goldschmiedquelle	12.04.2021	-61.9	-9.00
Goldschmiedquelle	10.05.2021	-62.6	-9.03
Goldschmiedquelle	07.06.2021	-62.5	-9.03
Hammerbachquelle	28.07.2020	-59.8	-8.75
Hammerbachquelle	17.08.2020	-56.4	-8.37
Hammerbachquelle	11.09.2020	-57.2	-8.45
Hammerbachquelle	12.10.2020	-65.2	-9.46

Hammerbachquelle	03.11.2020	-60.2	-8.83
Hammerbachquelle	02.12.2020	-60.8	-8.94
Hammerbachquelle	18.01.2021	-61.5	-9.00
Hammerbachquelle	03.02.2021	-62.1	-8.95
Hammerbachquelle	03.03.2021	-61.6	-8.94
Hammerbachquelle	12.04.2021	-60.4	-9.00
Hammerbachquelle	10.05.2021	-62.1	-9.00
Hammerbachquelle	07.06.2021	-61.4	-9.00
Ödensee-Kaltwassertrichter	15.07.2020	-67.6	-9.86
Ödensee-Kaltwassertrichter	18.08.2020	-63.5	-9.48
Ödensee-Kaltwassertrichter	15.09.2020	-63.0	-9.28
Ödensee-Kaltwassertrichter	13.10.2020	-78.1	-11.44
Ödensee-Kaltwassertrichter	04.11.2020	-89.1	-12.81
Ödensee-Kaltwassertrichter	02.12.2020	-78.8	-11.25
Ödensee-Kaltwassertrichter	13.01.2021	-79.5	-11.41
Ödensee-Kaltwassertrichter	03.02.2021	-86.1	-12.02
Ödensee-Kaltwassertrichter	02.03.2021	-92.3	-12.94
Ödensee-Kaltwassertrichter	09.04.2021	-91.7	-12.99
Ödensee-Kaltwassertrichter	05.05.2021	-90.9	-12.88
Ödensee-Kaltwassertrichter	09.06.2021	-92.1	-13.11
Pöllauer Ursprung	16.07.2020	-71.9	-10.65
Pöllauer Ursprung	18.08.2020	-68.8	-10.26
Pöllauer Ursprung	15.09.2020	-68.3	-10.18
Pöllauer Ursprung	13.10.2020	-68.6	-10.20
Pöllauer Ursprung	04.11.2020	-69.7	-10.30
Pöllauer Ursprung	03.12.2020	-72.6	-10.67
Pöllauer Ursprung	13.01.2021	-73.6	-10.82
Pöllauer Ursprung	03.02.2021	-74.5	-10.76
Pöllauer Ursprung	02.03.2021	-73.0	-10.67
Pöllauer Ursprung	09.04.2021	-71.6	-10.53
Pöllauer Ursprung	06.05.2021	-74.1	-10.81
Pöllauer Ursprung	09.06.2021	-72.1	-10.66
Preunegger Siebenquellen	15.07.2020	-89.5	-12.69

Preunegger Siebenquellen	18.08.2020	-88.8	-12.68
Preunegger Siebenquellen	15.09.2020	-88.1	-12.51
Preunegger Siebenquellen	13.10.2020	-88.6	-12.57
Preunegger Siebenquellen	04.11.2020	-89.1	-12.59
Preunegger Siebenquellen	02.12.2020	-90.1	-12.74
Preunegger Siebenquellen	13.01.2021	-91.3	-13.03
Preunegger Siebenquellen	03.02.2021	-90.2	-12.76
Preunegger Siebenquellen	02.03.2021	-91.1	-12.65
Preunegger Siebenquellen	09.04.2021	-88.6	-12.77
Preunegger Siebenquellen	06.05.2021	-90.3	-12.71
Preunegger Siebenquellen	09.06.2021	-90.3	-12.71
Reihbachquelle	16.07.2020	-75.6	-11.23
Reihbachquelle	18.08.2020	-75.6	-11.25
Reihbachquelle	11.09.2020	-75.5	-11.2
Reihbachquelle	14.10.2020	-75.3	-11.15
Reihbachquelle	05.11.2020	-75.5	-11.18
Reihbachquelle	03.12.2020	-76.0	-11.23
Reihbachquelle	14.01.2021	-76.6	-11.29
Reihbachquelle	08.02.2021	-76.5	-11.22
Reihbachquelle	03.03.2021	-77.2	-11.22
Reihbachquelle	12.04.2021	-75.3	-11.20
Reihbachquelle	10.05.2021	-76.4	-11.18
Reihbachquelle	14.06.2021	-75.1	-11.15
Riedlbachquelle	15.07.2020	-80.0	-11.41
Riedlbachquelle	18.08.2020	-68.4	-10.04
Riedlbachquelle	15.09.2020	-72.6	-10.54
Riedlbachquelle	13.10.2020	-78.3	-11.33
Riedlbachquelle	04.11.2020	-85.9	-12.29
Riedlbachquelle	02.12.2020	-87.6	-12.50
Riedlbachquelle	03.02.2021	-89.6	-12.57
Riedlbachquelle	02.03.2021	-92.7	-12.98
Riedlbachquelle	09.04.2021	-94.6	-13.45
Riedlbachquelle	06.05.2021	-91.5	-13.01

Riedlbachquelle	09.06.2021	-95.0	-13.39
Roßlochquelle	15.07.2020	-78.0	-11.35
Roßlochquelle	17.08.2020	-76.2	-11.17
Roßlochquelle	14.09.2020	-71.5	-10.53
Roßlochquelle	12.10.2020	-76.5	-11.17
Roßlochquelle	03.11.2020	-79.6	-11.58
Roßlochquelle	01.12.2020	-79.9	-11.52
Roßlochquelle	11.01.2021	-80.0	-11.62
Roßlochquelle	05.02.2021	-79.9	-11.59
Roßlochquelle	01.03.2021	-82.5	-11.92
Roßlochquelle	08.04.2021	-84.7	-12.22
Roßlochquelle	05.05.2021	-83.7	-12.24
Roßlochquelle	07.06.2021	-80.3	-11.71
Sagtümpel	15.07.2020	-71.2	-10.39
Sagtümpel	18.08.2020	-68.2	-10.05
Sagtümpel	15.09.2020	-68.1	-10.05
Sagtümpel	13.10.2020	-77.2	-11.23
Sagtümpel	04.11.2020	-86.3	-12.44
Sagtümpel	02.12.2020	-84.3	-12.26
Sagtümpel	13.01.2021	-86.1	-12.30
Sagtümpel	03.02.2021	-89.5	-12.60
Sagtümpel	02.03.2021	-93.2	-13.16
Sagtümpel	09.04.2021	-88.6	-13.01
Sagtümpel	06.05.2021	-89.4	-12.82
Sagtümpel	09.06.2021	-88.7	-12.81
Schönebenquelle	21.07.2020	-74.3	-11.04
Schönebenquelle	20.08.2020	-71.0	-10.65
Schönebenquelle	01.10.2020	-68.9	-10.39
Schönebenquelle	22.10.2020	-70.2	-10.54
Schönebenquelle	06.11.2020	-69.7	-10.45
Schönebenquelle	14.12.2020	-71.2	-10.77
Schönebenquelle	26.01.2021	-71.4	-10.80
Schönebenquelle	25.02.2021	-72.4	-10.75

Schwabeltalquelle	15.07.2020	-77.7	-11.34
Schwabeltalquelle	17.08.2020	-76.3	-11.19
Schwabeltalquelle	14.09.2020	-76.4	-11.18
Schwabeltalquelle	12.10.2020	-75.2	-11.01
Schwabeltalquelle	03.11.2020	-77.9	-11.35
Schwabeltalquelle	01.12.2020	-79.1	-11.58
Schwabeltalquelle	11.01.2021	-79.2	-11.52
Schwabeltalquelle	05.02.2021	-81.7	-11.91
Schwabeltalquelle	01.03.2021	-81.9	-11.84
Schwabeltalquelle	05.05.2021	-81.6	-11.88
Schwabeltalquelle	07.06.2021	-80.2	-11.69
Totes Weib Quelle	28.07.2020	-74.8	-10.91
Totes Weib Quelle	23.08.2020	-67.6	-10.02
Totes Weib Quelle	14.09.2020	-71.5	-10.52
Totes Weib Quelle	12.10.2020	-72.7	-10.67
Totes Weib Quelle	13.11.2020	-76.8	-11.20
Totes Weib Quelle	01.12.2020	-77.6	-11.27
Totes Weib Quelle	11.01.2021	-77.5	-11.38
Totes Weib Quelle	05.02.2021	-81.9	-11.88
Totes Weib Quelle	01.03.2021	-83.3	-12.15
Totes Weib Quelle	08.04.2021	-82.6	-11.91
Totes Weib Quelle	05.05.2021	-82.7	-12.12
Wassermannsloch	15.07.2020	-75.0	-10.98
Wassermannsloch	17.08.2020	-73.6	-10.87
Wassermannsloch	14.09.2020	-70.6	-10.44
Wassermannsloch	12.10.2020	-74.3	-10.95
Wassermannsloch	03.11.2020	-82.7	-12.06
Wassermannsloch	01.12.2020	-81.4	-11.82
Wassermannsloch	11.01.2021	-82.1	-11.94
Wassermannsloch	05.02.2021	-82.8	-11.91
Wassermannsloch	01.03.2021	-88.3	-12.64
Wassermannsloch	08.04.2021	-87.1	-12.73
Wassermannsloch	05.05.2021	-83.9	-12.05

Wassermannsloch	07.06.2021	-82.9	-12.17
-----------------	------------	-------	--------