

Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Eva Breitenbach

**Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser
im renaturierten Bereich der Elz**



Masterarbeit unter Leitung von Prof. apl. Dr. Jens Lange

Freiburg i. Br., April 2021

Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Eva Breitenbach

**Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser
im renaturierten Bereich der Elz**

Referent:	Prof. apl. Dr. Jens Lange
Koreferentin:	Dr. Natalie Orlowski
Fachbetreuer:	Bernd Walser (Regierungspräsidium Freiburg, Betriebsleiter Flussbetriebshof Riegel)

Masterarbeit unter Leitung von Prof. apl. Dr. Jens Lange

Freiburg i. Br., April 2021

Vorwort

Ich möchte mich herzlich bei Prof. Dr. Jens Lange bedanken, der es ermöglichte, eine Arbeit an der Elz in Zusammenarbeit mit dem Regierungspräsidium Freiburg umzusetzen. Vielen Dank für die Vergabe des Themas und die Betreuung der Arbeit. Prof. Dr. Natalie Orłowski danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Ein großer Dank gilt Bernd Walser, der mir während eines siebenwöchigen Praktikums im Flussbaubetriebshof Riegel (Regierungspräsidium Freiburg) praktisches und theoretisches Wissen der Gewässerunterhaltung und Renaturierungsmaßnahmen der Elz nähergebracht hat und dadurch die Basis für eine Masterarbeit an der Elz geschaffen hat.

Ein Dank geht auch an M. Sc. Jan Greiwe, der durch konstruktive Kritik und Anregungen während gemeinsamen Besprechungen zur Gestaltung der Arbeit beigetragen hat.

Barbara Herbstritt danke ich für die Einführung und Betreuung der Laborarbeit und die Auswertung der Isotopendaten.

Britta Kattenstroth und Jonas Schwarz danke ich für das Bestellen der Materialien für den Piezometerbau und die Bereitstellung der Messgeräte.

Den Mitarbeitern Anton Thoma und Eberhardt Weis des Regierungspräsidium Freiburg, Betriebshof Riegel, danke ich für die Weitergabe ihrer Erfahrungen und für die tatkräftige Unterstützung im Gelände. Armin Hertle, Regierungspräsidium Offenburg, danke ich für das Überprüfen des Geländes vor dem Einbau der Piezometer und das anschließende Einmessen der Grundwassermessstellen.

Ein besonderer Dank gilt Max Schmit für seine persönliche und fachliche Unterstützung während der gesamten Arbeit. Ihm, Alina Domdey und Tanja Vollmar danke ich außerdem für die Unterstützung in der Geländearbeit.

Ein herzlicher Dank geht an meine Eltern, Elke und Walter Breitenbach, die mir mein Studium ermöglicht und mich immer unterstützt haben.

Ein Dank geht auch an Carine Kayser und Claude Schmit, die es ermöglichten, dass ich während pandemiebedingter Schließung der Universität und mehrmaligen Quarantänezeiten einen Rückzugsort und Arbeitsplatz in Luxemburg hatte.

Zu guter Letzt danke ich meinen Korrekturleserinnen Alina Domdey, Rebecca Thoma, Elke Breitenbach, Luisa Kunkel und Sarah Diener für ihr Interesse an der Arbeit und ihre Ausdauer mich auf Fehler hinzuweisen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Verzeichnis der Abbildungen im Text.....	VI
Verzeichnis der Karten im Text.....	VII
Verzeichnis der Tabellen im Text	VIII
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang.....	IX
Verzeichnis der Karten im Anhang.....	X
Zusammenfassung.....	XI
Summary	XII
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.2 Stand der Forschung und methodischer Überblick	3
2. Untersuchungsgebiet Elz	6
2.1 Anthropogene Nutzung	7
2.2 Geologie und Klima	7
2.3 Hydrologie	8
3. Material und Methoden.....	10
3.1 Versuchsaufbau	10
3.2 Vorgehen im Gelände	13
3.2.1 Voruntersuchung	13
3.2.2 Hobo Installation	13
3.2.3 Piezometerbau	14
3.2.4 Datenerhebung	15
3.2.4.1 Wasserproben	15
3.2.4.2 Leitfähigkeit, Sauerstoff	15
3.2.4.3 Abflussmessung.....	16
3.3 Labormethoden	17
3.3.1 Ionenchromatograph	17
3.3.2 Isotopenanalyse	17
3.4 Quantifizierungsmethoden	19
3.4.1 Abflussmessung	19
3.4.2 Darcy Zustrom	20
3.4.3 Mischungsrechnung	22
3.4.4 Energiebilanzmodel.....	25

4.	Prozessverständnis	31
4.1	Prozessverständnis Pegelhöhen	31
4.2	Prozessverständnis Temperatur	35
4.2.1	Temperaturverhältnis aller Piezometer untereinander	35
4.2.2	Temperaturverhalten Elz und Grundwasser	37
4.3	Prozessverständnis Tracer	43
5.	Ergebnisse	45
5.1	Voruntersuchung	45
5.2	Datenauswertung	47
5.2.1	Ionen	47
5.2.2	Isotope	53
5.3	Darcy Zustrom	56
5.4	Mischungsrechnung	59
5.4.1	Grundwasseranteil in der Elz: Haptionen	59
5.4.2	Grundwasseranteil in der Elz: Isotope	63
5.4.3	Oberflächenwasseranteil im Grundwasser	65
5.5	Energiebilanz	67
5.5.1	Kleinskaliger Bereich M1-M2	67
5.5.2	Energiebilanzmodell	71
6.	Diskussion	75
6.1	Voruntersuchung	75
6.2	Rohdaten: Ionen und Isotope	75
6.2.1	Ionen	75
6.2.2	Isotope	78
6.3	Darcy Zustrom	79
6.4	Mischungsrechnung	82
6.4.1	Grundwasseranteil im Oberflächenwasser	82
6.4.1.1	Tracer: Ionen	82
6.4.1.2	Tracer: Isotope	84
6.4.2	Oberflächenwasseranteil im Grundwasser	84
6.5	Energiebilanz	86
6.5.1	Energiebilanz über Mischungsrechnung der Temperatur	86
6.5.2	Energiebilanzmodell	87

6.6	Methoden- und Ergebnisvergleich	90
7.	Schlussfolgerungen	93
8.	Literaturverzeichnis	96
	Anhang	102
	Abkürzungsverzeichnis	116
	Ehrenwörtliche Erklärung	118

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1:	Datensatz Abfluss Elz	19
Abbildung 2:	Phaseneinteilung der Daten entsprechend des Abflusses und Niederschlags	20
Abbildung 3:	Energieflüsse eines Oberflächengewässers.....	26
Abbildung 4:	Wasserstände der Elz und der GW-Piezometer ü. NN	31
Abbildung 5:	Reaktion der GW-Pegel auf Abflussänderung am Peak-Ereignis	34
Abbildung 6:	Temperaturverlauf der Piezometer und der Elz im Bereich MA	36
Abbildung 7:	Temperaturüberblick über das Oberflächen- und Grundwasser	39
Abbildung 8:	Temperaturdifferenz M2 M1 und Strahlungseinfluss.....	40
Abbildung 9:	Temperaturdifferenz und Strahlungseinfluss des gesamten Gewässerabschnitts	42
Abbildung 10:	Ionen-Konzentrationen der Voruntersuchung.....	45
Abbildung 11:	Voruntersuchung Isotope	45
Abbildung 12:	Rohdaten Anionen	47
Abbildung 13:	Boxplots der Anionen je nach Phase	49
Abbildung 14:	Rohdaten der Kationen	51
Abbildung 15:	Boxplots der Kationen je nach Phase.....	52
Abbildung 16:	Isotopenverhältnis des Grund- und Oberflächenwassers	53
Abbildung 17:	Dual Isotope Plot $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$	55
Abbildung 18:	GW-Zustrom pro Tag in Prozent nach Darcy	57
Abbildung 19:	Mischungsverhältnis der Ionen	59
Abbildung 20:	Ionendifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung	60
Abbildung 21:	Anteil des Grundwassers in der Elz.	61
Abbildung 22:	Chlorid-Konzentration des OWs und GWs	62
Abbildung 23:	Mischungsverhältnis der Isotope	63
Abbildung 24:	Isotopendifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung.....	64
Abbildung 25:	Ausschnitt aus dem Datensatz Isotopenverhältnis $\delta^{18}\text{O}$ und Chlorid	66
Abbildung 26:	Temperaturdifferenz M1 und M2 am Tag und in der Nacht	68
Abbildung 27:	Temperaturdifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung	69
Abbildung 28:	Mischungsverhältnis der Temperatur	70
Abbildung 29:	Energiegewinn/-verlust durch den GW-Zufluss	71
Abbildung 30:	Dichtefunktion des GW-Zuflusses in Prozent für fünf verschiedene Szenarien.....	72
Abbildung 31:	Energiebilanz	73
Abbildung 32:	Strahlungsbilanz.....	74
Abbildung 33:	Temperaturverhalten am Standort MC	88
Abbildung 34:	Temperaturdifferenz der Standorte MC und MA	88
Abbildung 35:	Schematische Ergebnisübersicht.....	90

Verzeichnis der Karten im Text

Karte 1:	Topographische Karte des EZG inklusive Zuflüsse	6
Karte 2:	Überblick der Untersuchungsgebiete	10
Karte 3:	Übersichtskarte der Standorte der Probennahme und des Pegels	11
Karte 4:	Übersichtskarte der Messstellen des Grundwassers	12
Karte 5:	Skizze des hydrologischen Dreiecks des Untersuchungsgebiets	33
Karte 6:	Standorte der Temperatur-Logger in der Elz im Messbereich M1-M2 ...	38
Karte 7:	Standorte der Temperatur-Logger in der Elz am Messpunkt MA und MC	41
Karte 8:	Voruntersuchung der Temperatur im Bereich M1-M2	46

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1:	Abflusskennwerte der Elz	9
Tabelle 2:	Übersicht der Eingangsdatensätze	30
Tabelle 3:	Übersicht berechneter und durch Wertebereiche definierte Parameter ...	30
Tabelle 4:	Temperaturübersicht in Grad Celsius je Phase.	39
Tabelle 5:	Übersicht der kf-Werte [m/s] aus der Darcy Berechnung	56
Tabelle 6:	Darcy: Mediane des Grundwasser-Zuflusses über den gesamten Zeitraum.....	57
Tabelle 7:	Mediane der Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers	58
Tabelle 8:	Darcy: Mediane des Grundwasser Zuflusses je Phase.....	58
Tabelle 9:	Mediane des GW-Zustroms anteilig an der Elz für zwei Peak-Ereignis	58
Tabelle 10:	Mediane des GW-Zustroms anteilig an der Elz für zwei NW-Phasen	58
Tabelle 11:	Mischungsrechnung Ionen: Mediane des GW-Zuflusses in die Elz.....	62
Tabelle 12:	Mischungsrechnung Isotope: Mediane des GW-Zuflusses in die Elz	65
Tabelle 13:	Anteil des OWs in den GW-Messstellen für den Abflusspeak zwischen dem 26.09.2020 und 30.9.2020.....	66
Tabelle 14:	Übersicht über den Anteil des GW-Zuflusses zur Elz je Szenario	73
Tabelle 15:	Darcy: Mediane der GW-Anteile über den gesamten Zeitraum	81
Tabelle 16:	Ausschnitt des Datensatzes über die Temperatur	87

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A1:	Messung der Durchsickerung	106
Abbildung A2:	Standort MC, Messstelle Flussmitte unterhalb der Brücke	106
Abbildung A3:	Messstelle M1 oberhalb der Schwelle, Flussmitte	106
Abbildung A4:	Zuflussstelle Z1 kurz vor der Schwelle	107
Abbildung A5:	Zuflussstelle Z2, linker Gewässerrand	107
Abbildung A6:	Messstelle M2	107
Abbildung A7:	Messstelle MC in Hauptstromrichtung, Höhe der Kläranlage	107
Abbildung A8:	Hochwasserfester Hobo	107
Abbildung A9:	Montage eines Hobos durch Spreizdübel	107
Abbildung A10:	Lochbohrung vor Einschlagen des Spreizdübels	108
Abbildung A11:	Zusätzliche Hochwassersicherung durch Stahlseil	108
Abbildung A12:	Rammfilter der Messstelle GW4	108
Abbildung A13:	Einschlagen der Stahlrohre	108
Abbildung A14:	Aufbaggern der Messstelle GW1	109
Abbildung A15:	Überblick der Messstelle GW1	109
Abbildung A16:	Abflussmessung mittels FLOW-MATE	109
Abbildung A17:	Flussquerschnitt der Abflussmessung	109
Abbildung A18:	Isotopenmessung des Niederschlags	110
Abbildung A19:	Boxplot der stabilen Wasserisotope nach Phasen	111
Abbildung A20:	Boxplots des GW-Zustroms zur Elz	111
Abbildung A21:	Therme der Mischungsrechnung	112
Abbildung A22:	Boxplot der einzelnen Szenarios des GW-Zuflusses	112

Verzeichnis der Karten im Anhang

Karte A1:	Voruntersuchung Temperaturdifferenz.....	103
Karte A2:	Übersichtslageplan der Revitalisierung der Elz	104
Karte A3:	Vorlandumgestaltung und Strukturmaßnahmen	104
Karte A4:	Ergebnisse der Gewässerstrukturkartierungen.....	105

Zusammenfassung

Die Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser ist heute ein interdisziplinäres Forschungsfeld, in welchem bisher zahlreiche Studien durchgeführt wurden, die sich mit lokalem Austausch von Grund- und Oberflächenwasser in der Grenzzone, der hyporheischen Zone, befassen. Es werden dabei verschiedene Methoden zur Quantifizierung dieses Austausches betrachtet, da eine Interaktion beider Gewässerkörper für das Ökosystem von Oberflächengewässer, vor allem in Niedrigwasser-Phasen sowie für die Trinkwassergewinnung, von entscheidender Relevanz ist. Liegt eine Interaktion vor, bedeutet das, dass beide Wasserkörper sich quantitativ und qualitativ beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser in einem renaturierten Gewässerabschnitt der Elz bei Riegel/Teningen im Kaiserstuhl. Anhand dreier unterschiedlicher Methoden, der Darcy Abschätzung (1), der Mischungsrechnung (2) und der Energiebilanz (3), wird die Grund- und Oberflächenwasser-Interaktion für zwei unterschiedlich skalierte Untersuchungsgebiete betrachtet. Als Tracer dienen Hauptionen, stabile Wasserisotope und die Temperatur in Grund- und Oberflächenwasser. Mittels der Geländeuntersuchung kann ein umfangreiches Prozessverständnis der Pegelhöhen und des Temperaturverhaltens im Grund- und Oberflächenwasser sowie des Verhaltens von stabilen Wasserisotopen und Hauptionen erlangt werden.

Das Ergebnis zeigt, dass ein Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser im Untersuchungsgebiet einem zeitlichen und räumlichen Wechsel zwischen influenten (Uferfiltration) und effluenten (Exfiltration des Grundwassers in den Fluss) Bedingungen unterliegt. Eine verlässliche quantitative Bestimmung ist aufgrund der geringen Messunterschiede der Tracer nicht uneingeschränkt möglich, jedoch zeigen ereignisbasierte Beobachtungen plausible Anteile des Grund- und Oberflächenwassers.

Mit den ausgewählten Methoden kann die Komplexität der Interaktion von Grund- und Oberflächenwasser nicht gänzlich erfasst werden. Für eine bessere Aussagekraft sind Messmethoden mit genauerer Auflösung erforderlich.

Schlagwörter: Grundwasser- Oberflächenwasser-Interaktion, G-O-I, Grundwasserzufluss, Elz, renaturiertes Gewässer, stabile Wasserisotope, Hauptionen, Darcy-Gesetz, Mischungsrechnung, Energiebilanz

Summary

Today, the interaction of groundwater and surface water is an interdisciplinary research field in which numerous studies have been carried out, dealing with local exchange of groundwater and surface water in the boundary zone/ hyporheic zone, as well as the use of different quantification methods. The interaction of the two water bodies is of crucial importance for the ecosystem of surface waters, especially in low-water periods, as well as for the extraction of drinking water from bank filtrates. If interaction is proved, both water bodies influences each other quantitatively und qualitatively.

The present work deals with the interaction of groundwater and surface water in a renaturalized river section of the Elz near Riegel/Teningen in the Kaiserstuhl. Using three different methods, the Darcy estimation (1), the mixing calculation (2) and an energy balance model (3), two different scaled study areas are considered. Main ions, stable water isotopes and temperature in groundwater and surface water serve as tracers. During the field investigation process understanding of level heights and the temperature behavior in the ground water and surface water as well as an overview of the behavior of stable water isotopes and the main ions was gained.

The result shows that an exchange between ground water and surface water exists in the area with temporal and spatial patterns of influent (bank filtration) and effluent (exfiltration groundwater into the river) conditions. A reliable quantitative determination was not possible without restrictions, due to the marginal differences of the tracers in measurement. But, event-based observations showed plausible proportions of groundwater and surface water.

The selected methods could not completely capture the complexity of the interaction of groundwater and surface water in the investigation area. In order to gain a more reliable result of G-O-I in the study area, more accurate resolution in measurement is required.

Keywords: groundwater- surface water interaction, groundwater infiltration, Elz, renaturalized river, stable isotopes, main ions, Darcy estimation, component mixing model, energy balance

1. Einleitung

„A river's liver“ (dt. „Die Leber des Flusses“) so wurde der Bereich von Flussauen, in welchem die Grund- und Oberflächenwasser Interaktion (G-O-I) stattfinden kann von Fischer et al. (2005) aufgrund ihrer mikrobiellen Wichtigkeit bezeichnet. Dieser Bereich des Flussbettes zwischen Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW) wird als hyporheisches Zone oder hyporheisches Interstitial verstanden und bezeichnet den Bereich, in welchem Fließwege im Sediment oder Wasser beginnen bzw. enden (Lewandowski et al. 2019). Ähnlich einer Leberfunktion werden der Stoffwechsel des Kohlenstoff- und Stickstoffkreislaufs im Fluss durch die „lebenden“ Sedimente der hyporheischen Zone gesteuert (Fischer et al. 2005). Der Austausch von Oberflächengewässern mit darunterliegenden Grundwasserkörpern ist ein wichtiger Prozess, der sowohl den ökologischen Zustand von Oberflächengewässern als auch die Trinkwasserversorgung direkt beeinflusst (Dahl et al. 2007). Das Trinkwasser in großen Ballungsräumen wie beispielsweise in Berlin/Brandenburg oder Köln wird zum Großteil aus den Uferfiltraten der Spree bzw. des Rheins gewonnen (Massmann et al. 2009; RheinEnergie AG). Insbesondere längere Phasen von Trockenheit und Niedrigwasser können gravierende Auswirkungen auf das aquatische Ökosystem und die Feuchtgebiete sowie auf ökonomische Handlungsfelder wie die Forst- und Landwirtschaft oder lokale Stromproduktion haben. Exfiltration von GW ins OW kann einen Anteil des Wasserdefizits in oberflächlichen Gewässern ausgleichen, sofern eine Interaktion vorliegt. Es ist jedoch zu beachten, dass eine Interaktion nicht nur quantitativen, sondern auch qualitativen Einfluss auf die Wasserkörper mit sich bringt. Für ein effizientes Wasser-Ressourcen-Management speziell im Fall von Kontamination einer der beiden Gewässerkörper ist es extrem wichtig die Austauschrate in Masse und Geschwindigkeit bestimmen zu können (Meinikmann et al. 2014).

Traditionell wurden die beiden Systeme, GW und OW, getrennt voneinander gesehen und kaum interdisziplinär untersucht. Seit den letzten zwei Jahrzehnten hat sich dies jedoch geändert und das Interesse an der Interaktion beider Gewässerkörper und der dahinter liegenden Prozesse sowie Methoden der Quantifizierung ist stark gestiegen. (Lewandowski et al. 2019; Nützmann und Lewandowski 2009; Krause et al. 2009; Schmidt et al. 2006)

Heute arbeiten zahlreiche Wissenschaftler aus den Fachbereichen Hydrologie, aquatische Ökologie, Biogeochemie und Umweltwissenschaften, wie in der Forschungsgruppe „Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion“ am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, interdisziplinär zusammen, um den Austausch von GW und OW besser zu erforschen.

Auch aus politischer Sicht gewinnt die Thematik an Relevanz. Die 2000 verabschiedete EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) skizziert einen neuen Ansatz der Wasserwirtschaft, bei der Wechselwirkungen zwischen GW- und OW-Körpern eine wichtige Rolle spielen. Hier heißt es, dass sich der „mengenmäßige Zustand eines Grundwasserkörpers [...] auf die ökologische Qualität der mit diesem Grundwasserkörper verbundenen Oberflächengewässer und Landökosysteme auswirk[t]“ (Europäische Kommission 2000; Dahl et al. 2007). Zudem sind die Grundziele eines „guten ökologischen sowie chemischen Zustand[s] von Oberflächenwasser“ als auch eines „guten chemischen und quantitativen Zustand[s] des Grundwassers“ vertraglich festgelegt (Europäische Kommission 2000).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Thematik der Grund- und Oberflächenwasser Interaktion während Wasserständen des Niedrig- und Mittelwassers. Betrachtet wird ein Untersuchungsgebiet des renaturierten Flussabschnitts der Elz bei Teningen/Riegel im Kaiserstuhl auf zwei unterschiedlichen großen Skalen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen eines Geländepraktikums der Masterstudierenden im Frühjahr 2020 wurde ein kühler Wasserbereich in einem durchströmten, renaturierten Gewässerabschnitt der Elz auffällig. Eine weitere Voruntersuchung bestätigte Abweichungen in Temperatur, Ionen-Konzentration und Isotopen-Verhältnis. Die Elz fließt durch die hydrogeologische Einheit der quartären und pliozänen Sande und Kiese des Oberrheingrabens mit geringen Grundwasserflurabständen, was zur Annahme führt, dass eine G-O-I wahrscheinlich ist (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg). Da es sich bei dem kühleren Bereich vermutlich um einen GW-Zufluss handelt, wird dieser speziell bei Niedrigwasser genauer untersucht. Bei dem untersuchten Gewässerabschnitt handelt es sich um einen Bereich zwischen Köndringen und Riegel, der in den Jahren 2014 bis 2017 im Zuge einer Ausgleichsmaßnahme der Deutschen Bahn für den Ausbau der Rheintalbahn revitalisiert wurde. Umfassende Maßnahmen wie die beidseitige Dammsanierung, eine Dammrückverlegung linksseitig der Fließrichtung bei Köndringen und das Aufbrechen der Doppeltrapezprofile der Elz hin zu einer dynamischen Selbstentwicklung der Elz wurden realisiert (Walser 2017). In den darauffolgenden Jahren profitierte die Elz von diesen Maßnahmen durch Zurückgewinnung an ökologischer Vielfalt und dynamischer Fließwege, wie im Titelbild ersichtlich wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, drei unterschiedliche Methoden, die Darcy Abschätzung (1), die Mischungsrechnung (2) und die Energiebilanz (3), zu nutzen, um den GW-Zufluss eines kleinskaligen Bereichs von 85 m Gewässerabschnitt und eines größeren Gewässerabschnitts von 1844 m im renaturierten Bereich der Elz zu quantifizieren. Dazu werden Piezometerstellen errichtet und Isotopen- und Ionenmessungen aus dem Fluss und dem GW beprobt. Detaillierte Temperaturmessungen entlang des gesamten Gewässerabschnitts, Abflussmessungen sowie Leitfähigkeits- und Sauerstoffmessungen im Fluss und im GW geben weitere Erkenntnisse über ablaufende Prozesse im Untersuchungsgebiet.

Aus diesen Zielen resultieren vier Fragestellungen, nach denen sich die vorliegende Arbeit ausrichtet:

1. **Ist G-O-I in den ausgewählten Abschnitten der Elz bei Niedrig- und Mittelwasser erkennbar?**
2. **Variiert die G-O-I quantitativ mit dem Wasserstand der Elz?**
3. **Welche Methode quantifiziert einen Zufluss des Grund- und Oberflächenwassers plausibel?**
4. **Sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden miteinander vergleichbar, sodass eine allgemeine Aussage über G-O-I getroffen werden kann?**

1.2 Stand der Forschung und methodischer Überblick

Die Tatsache, dass GW und OW lange Zeit getrennt voneinander betrachtet wurden, liegt vor allem an den unterschiedlichen chemischen, biologischen und physischen Eigenschaften beider Wasserkörper. Die schwierige Erfassung von Wasser- und Stoffflüssen führt dazu, dass die Betrachtung einer Interaktion von GW und OW ein relativ neues Forschungsfeld darstellt. (Kalbus et al. 2006; Meinikmann et al. 2014) Heute ist eine holistische Sichtweise mit der Betrachtung von Wechselwirkungen zwischen GW und OW anerkannt. Die Auswirkungen von G-O-I sind hinsichtlich ihrer Relevanz für Umwelt- und Wassermanagement und –schutz jedoch bis heute nicht vollständig verstanden und werden oft unterschätzt. Dies liegt laut Lewandowski et al. (2020) nicht an mangelndem Bewusstsein, sondern an mangelnden Kenntnissen und Erfahrungen geeigneter Mess- und Analyseansätzen. Der lückenhafte Wissenstransfer aus der Forschung hin zur Praxis zeigt auf, dass größere Anstrengungen unternommen werden müssen, um wissenschaftliche Ergebnisse und Methoden für politische Entscheidungsträger sowie praktische Anwendung weiterzugeben. (Lewandowski et al. 2020)

Obwohl anerkannt ist, dass G-O-I für den qualitativen und quantitativen Austausch von Bedeutung ist, sind experimentelle und validierte modellbasierte Nachweise über Prozesse auf verschiedenen Größenordnungen noch selten. Als Ursache führt die Forschungsgruppe von Lewandowski et al. (2020) die interdisziplinäre Zusammenarbeit und den Austausch von mehreren wissenschaftlichen Fachbereichen an. Wechselwirkungen zwischen OW und GW finden in verschiedenen Meeres- und Süßwassersystemen statt. Die dort angewandten Technologien und Ansätze sowie das daraus resultierende Wissen und Prozessverständnis wird selten auf andere Bereiche des Süßwassers transferiert, sodass vorhandenes Potential nicht ausreichend ausgeschöpft wird. Der Großteil der Forschungsarbeiten der G-O-I betrachtet die Wechselwirkung zwischen Flüssen bzw. Bächen und des GWs, gefolgt von dem Austausch von Grund- und Oberflächenwasser in Seen. Nur ein geringer Anteil befasst sich mit dem Austausch der Wasserkörper Meer/Ozean und GW. (Lewandowski et al. 2020)

Es gibt eine Vielzahl von Methoden, um G-O-I in Gewässern zu untersuchen. Um einen Einblick in aktuelle Forschungsarbeiten der Interaktion des Oberflächenwassers von Flüssen und dem GW zu bekommen, sind im Folgenden aktuelle Publikationen der letzten zwei Jahren und ihre methodische Anwendung dargelegt.

Kelly et al. (2019) nutzten die Methode der direkten Abflussmessung, um relevante Aussagen über die Dynamik des GW-Zuflusses eines afrikanischen Flusses zu treffen. Pelletier und Andréassian (2020) erweiterten die klassische Methode der Hydrographen-Separation, bei der in Basisabfluss und schnellen Oberflächenabfluss eingeteilt wird, durch die Berücksichtigung eines hydroklimatischen Gedächtnisses von Einzugsgebieten (EZG). In Slowenien verwendeten Vrzel et al. (2019) verschiedene Modell-Ansätze auf Datensätze des GWs und OWs, um den Einfluss von Niederschlag (N) und OW auf das GW zu quantifizieren. Parlov et al. (2019) arbeiteten mit einem 2-Komponenten-Mischungsmodell basierend auf stabilen Wasserisotopen als Tracer, um die Verteilung von N und OW in der GW-Neubildung zu quantifizieren. Steiness et al. (2019) betrachteten ein flaches, von Gletschern geprägtes Gebiet in Dänemark mit einer Anzahl von Methoden, darunter geoelektrische Messungen, Bodenradar, Wasserstandmessung im GW und OW, Temperaturmessung und Bohrlochmessung zur lithologischen Klassifizierung, des Verhaltens von GW und OW, um ein hochaufgelöstes räumliches Bild von Fließwegen des EZGs und der hyporheischen Zone zu erhalten. Tang et al. (2019) betrachteten den Einfluss des GWs als signifikanten Anteil des Gesamtabflusses, basierend auf Messungen von Temperatur und Chlorophyll eines Karst Gebietes.

Um Wasserströmungen von GW zu OW zu quantifizieren arbeiteten Lee et al. (2020) mit einem Durchsickerungs-Messgerät, in welchem ein bodenloser Zylinder oder eine Stahlwalze mit Auffangbeutel in den Boden eingebracht wird, um exfiltrierendes und infiltrierendes Wasser zu messen, siehe Abbildung A1 im Anhang. Die Ursprungsmethode wird mehrfach modifiziert und durch kontinuierliche Messsonden, beispielsweise der Temperatur, ergänzt. Mittels dieser Methoden-Modifizierung der Temperatur gelang es Yang et al. (2020) aufwärtsströmendes GW in einem 19 m tiefen See in China nachzuweisen.

Dieser Einblick von Forschungen in den vergangenen zwei Jahren zeigt die Vielfalt an Herangehensweisen und die Diversität, mit welcher Forschungsgruppen aktuell die G-O-I untersuchen und quantifizieren. Die aufgezeigten Forschungen decken einen Großteil an räumlicher Skala von punktueller Messung (z. B. Durchsickerungs-Messgerät) bis zur Größenordnung des EZG ab. Der Hauptanteil der betrachteten Forschungen befasst sich mit einem rein hydrologischen Schwerpunkt, was verdeutlicht, dass das Bewusstsein für Schutz von Trinkwasserressourcen angesichts künftiger klimatischer Veränderung gewachsen ist (Lewandowski et al. 2020). Der zweitgrößte Themenschwerpunkt scheint sich mit hydrologisch-biochemischen Wechselwirkungen zu befassen und ein geringer Anteil der Studien befasst sich mit dem Massentransport zwischen GW und OW.

Lewandowski et al. (2020) vermuten hinter der Verteilung der Forschungsschwerpunkte eine schwer erfassbare Komplexität der G-O-I im Massentransport. Die große Vielfalt der Methoden und Modellierungsansätzen zeigt jedoch auch, dass es keine optimale oder zufriedenstellende Methode gibt. Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit, standardisierte Ansätze für die wiederkehrenden Fragenstellungen und insbesondere für eine effiziente Anwendung in der Praxis zu entwickeln. Die Wechselwirkung zwischen GW und OW kann nur dann regelmäßig in politischen und ökologischen Entscheidungen berücksichtigt werden, wenn einfache und robuste Analysemethoden zur Verfügung stehen (Lewandowski et al. 2020).

2.1 Anthropogene Nutzung

Die Landnutzung im direkten Umfeld des Untersuchungsgebiets, dargestellt in Karte 2 im Kapitel 3.1, besteht überwiegend aus einer komplexen Parzellenstruktur aus Grünland, Naturschutzgebiet, Ackerland und locker bebauter Siedlungsfläche vor allem auf Höhe Teningen. Im Bereich der letzten Messstelle befindet sich die Kläranlage „Untere Elz“.

2.2 Geologie und Klima

Landschaftlich hebt sich das Oberrheinische Tiefland mit dem Hochrheintal vom benachbarten Hochschwarzwald ab. Weite Verebnung durch Flussterrassen, die teils lössbedeckt sind und Flussauen mit schmalen Vorbergzonen des Schwarzwalds, des Kaiserstuhls und Dinkelbergs prägen das Landschaftsbild (LUBW 2012), (LGRB).

Geologisch zeichnet sich das Elztal durch holozäne Aufschüttungen quartärer Kiese und Sande des Oberrheingrabens aus. Der geologische Schotterkörper der Neuenburg-Formation führt überwiegend silikatische und karbonatische Sedimente, mit einer Mächtigkeit von bis zu 15 m im Bereich der Riegeler Pforte (LGRB und LUBW 1977).

Der daraus resultierende Leitboden dieser Auenregion ist der Auengley, bestehend aus sandig bis lehmigen Auensedimente über einem Kieshorizont. Nach Angaben des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg LUBW (2012) variiert der Bodenwasserhaushalt lokal bei einer mittleren Feldkapazität (90-140 mm) und einer geringen Kationenaustauschkapazität (50-200 meq/100g).

Die geringe Höhenlage in der Tiefenebene sorgt für mildes Klima und geringe Schwankungen in Niederschlags- und Temperaturverhältnissen (LGRB). Für das Jahr 2020 beläuft sich die Niederschlagssumme auf 576,5 mm, die durchschnittliche Temperatur betrug 12,5°C (AGRIMET). Typische Wetterlagen sind die winterlichen Inversionswetterlagen mit niedrigen Temperaturen und einer Nebeldecke in der Ebene und milden Temperaturen und klare Wetterverhältnisse auf Höhenlagen (LGRB).

2.3 Hydrologie

Die Besonderheit des beprobten Gewässerabschnitts sind die 2015 bis 2017 durchgeführten gewässerbaulichen Aufwertungsmaßnahmen und die Revitalisierung der Elz im Bereich Riegel/ Teningen. Ein Übersichtslageplan der einzelnen Projektarbeiten befindet sich in Anlage A1.2. Im Untersuchungsgebiet wurde der Hochwasserschutzdamm auf Höhe Köndringen saniert und auf der gegenüberliegenden Seite eine Dammrückverlegung vorgenommen. Im Bereich der untersten Messstelle, MC, auf Höhe der Kläranlage „Untere Elz“ wurden Maßnahmen zur Vorlandumgestaltung und Strukturmaßnahmen im Gerinnebett vorgenommen. Zwei Jahre nach Durchführung der letzten Maßnahmen wurde von 2018-2019 eine Erfolgskontrolle durch die Firma HYDRA erhoben, anhand welcher deutlich wurde, dass sich die Gewässerstruktur vor allem im Bereich zwischen Teningen und der Kläranlage „Untere Elz“ deutlich verbessert hat (RP 2019). Die Umgestaltung wirkt sich positiv auf die Fauna und Flora aus, es wurden wieder seltene Vogelarten wie der Flussregenpfeifer und der Eisvogel beobachtet. Außerdem wurden ein guter ökologischer Zustand der Fischfauna und zahlreiche Pionierpflanzen gezählt (RP 2019).

In der direkten Umgebung des Untersuchungsgebiets befindet sich keine aktive Pegelstation, weshalb der Pegel Gutach zur Referenz der Kennwerte der Elz herangezogen wird, siehe Tabelle 1. Durch die stellenweise steile Tallage im EZG sind die Abflüsse der Elz sehr variabel, wodurch sich rasch Hochwasser (HW) bilden können. Die Elz weist ein nivales Abflussregime auf, das sich durch HW im Winterhalbjahr und Niedrigwasser im Sommerhalbjahr auszeichnet (RP 2020b). Starke Hochwasserereignisse des Schwarzwalds, die meist plötzlich auftreten, sind oft auf den Rain-On-Snow-Effekt zurückzuführen (RP 2020b). Dabei fällt auf eine geringmächtige Schneedecke Niederschlag, welcher dadurch schmilzt und zusammen mit dem fallenden Niederschlag den Abfluss bildet.

Nördlich des Untersuchungsgebiets befindet sich das Wasserschutzgebiet (WGS) Malterdingen Gewann Stöckfeld mit einer Fläche von 3,46 km². Die biologische Güte des Elzwassers wird nach der WRRL mit 1 als sehr gering bis nicht belastet, eingestuft. Die Beschattung des Gewässers durch Vegetation und Topographie bewegt sich zwischen 0-5 % (LUBW 2012).

Tabelle 1: Abflusskennwerte der Elz (Datengrundlage: Elz Pegel Gutach, HVZ)

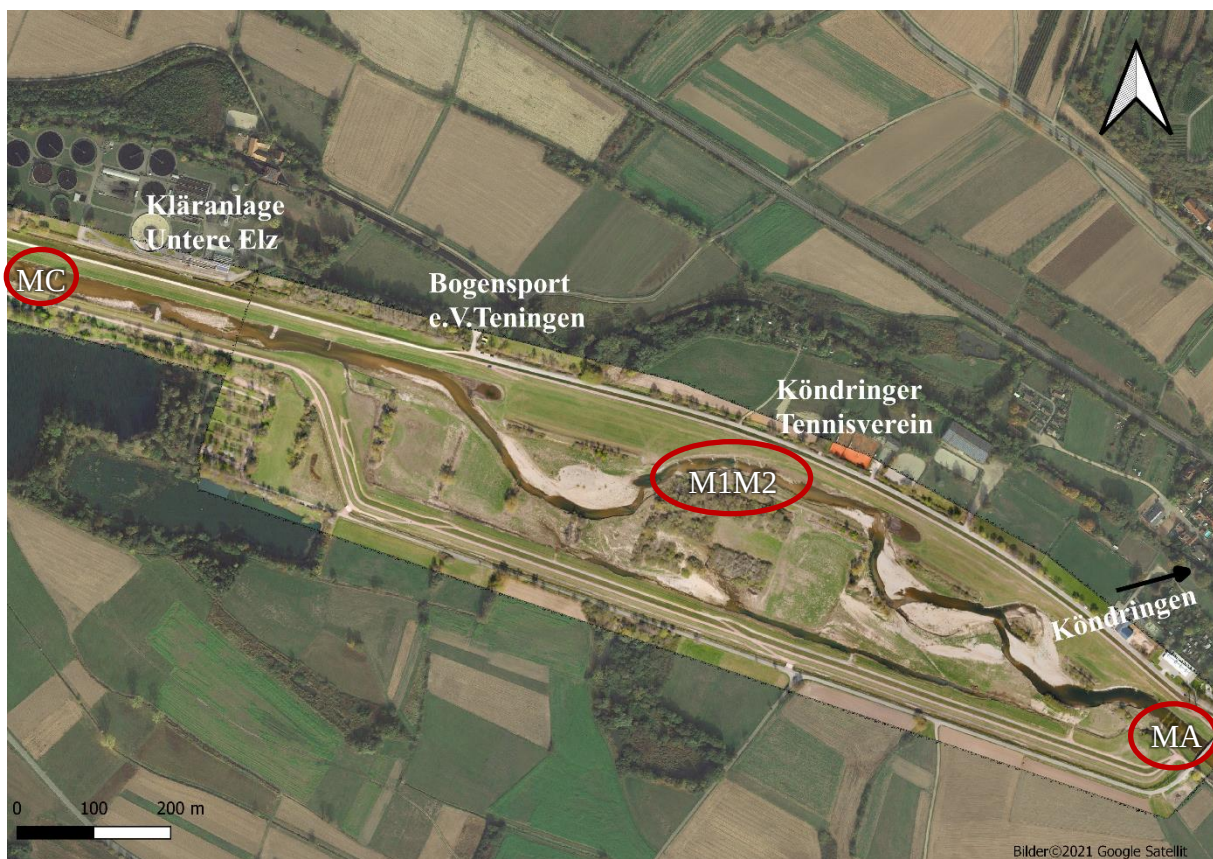
NNQ	0,81 [m³/s]
MNQ	1,58 [m³/s]
MQ	8,7 [m³/s]
HQ ₂	89,6 [m³/s]
HQ ₁₀	169 [m³/s]
HQ ₁₀₀	289 [m³/s]

Die pliozäne und quartäre Lockergesteinsfüllung des Oberrheingrabens stellt einen bedeutenden Porengrundwasserleiter Baden-Württembergs und mit 100 Mrd. m³ das größte GW-Vorkommen Mitteleuropas dar (LGRB). Die mittlere jährliche GW-Neubildung beträgt nach Angaben des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg LUBW (2012) 300-350 mm (Datengrundlage: 1961-1990). Der GW-Flurabstand wird während der Vegetationsperiode zwischen 1-3 m geschätzt. Die vorliegende geologische Neuenburg-Formation ist ein Porengrundwasserleiter mit einem hohen Durchlässigkeitsbeiwert (k_f), welcher nach Angaben des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg LUBW (2012) und Wirsing und Luz (2007) entsprechend des Grobkies mit einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-3}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$ eingestuft ist.

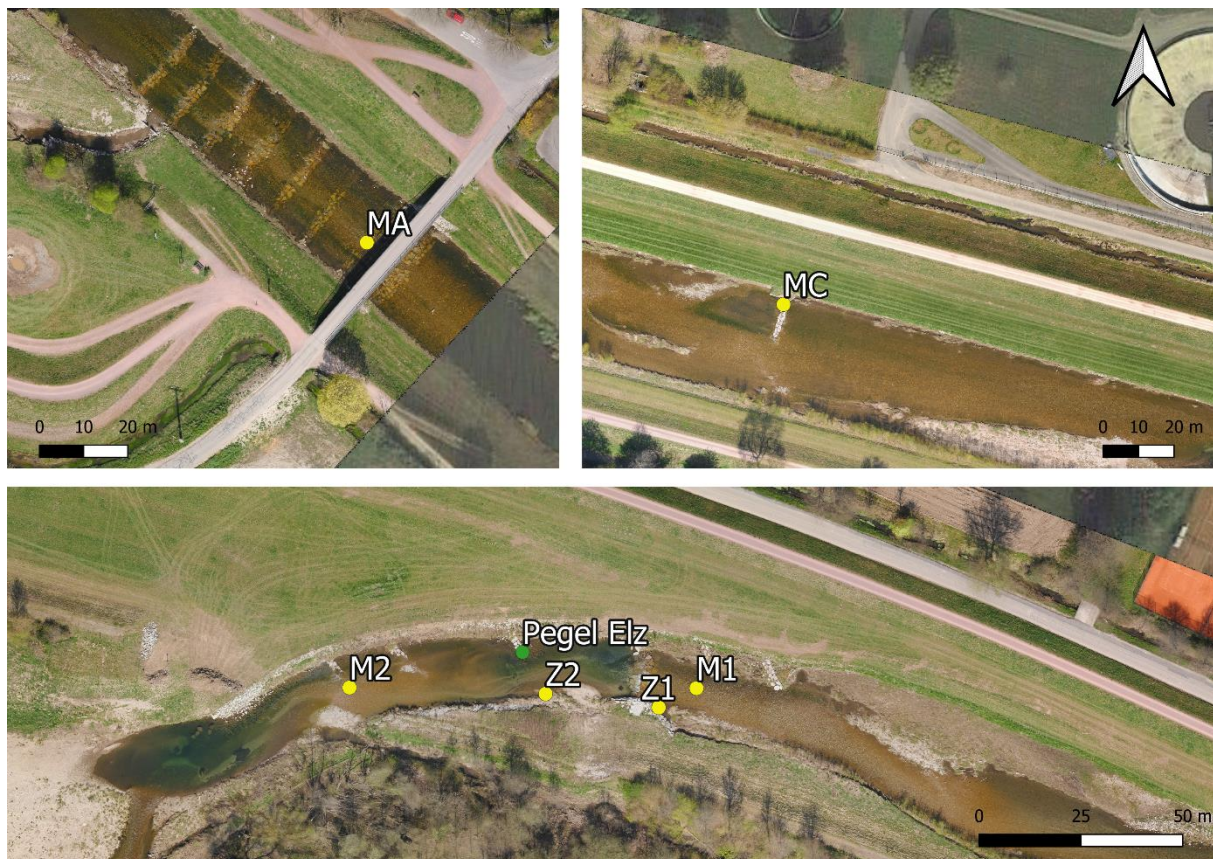
3. Material und Methoden

3.1 Versuchsaufbau

Um den G-O-I im renaturierten Bereich der Elz zu quantifizieren, werden zwei Untersuchungsgebiete definiert. Ein längerer Gewässerabschnitt: gekennzeichnet durch MA bis MC, der sich von der Köndringer Elzbrücke bis hin zur Kläranlage „Untere Elz“ erstreckt und ein sich in diesem Abschnitt befindendes, kleinräumigeres Gebiet, gekennzeichnet mit M1 bis M2. Das kleine Gebiet erstreckt sich zwischen dem Köndringer Tennisverein und dem Bogensportverein Teningen. Eine kartographische Übersicht beider Untersuchungsgebiete ist in Karte 2 visualisiert. Das kleinräumige Gebiet umfasst 86 m Gewässerlänge, das großräumige Gebiet einen Gewässerabschnitt von 1844 m. Im großräumigen Gebiet befindet sich direkt nach dem Messpunkt MA eine Ableitung des Gewässers, aus dem sich ein Seitenarm formt, der vor dem Messpunkt MC wieder zufließt. An den markierten Messstellen in Karte 3 werden Wasserproben entnommen. Der vermutete GW-Zufluss befindet sich im kleinräumigen Gebiet und ist durch die Markierung Z1 und Z2 gekennzeichnet.



Karte 2: Überblick der Untersuchungsgebiete. Grundlage der Karte sind hochaufgelöste Orthofotos der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).



Karte 3: Übersichtskarte der Standorte der Probennahme und des Pegels für die Bereiche MA, MC und das kleinskalige Messgebiet M1-M2. Grundlage der Karte sind hochaufgelöste Orthofotos der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

Neben den Messstellen im OW werden vier GW-Messstellen gerammt, die in Karte 4 dargestellt sind. Dort wird am gleichen Messtag wie die Beprobung des OW eine Beprobung des GWs mittels Kofferpumpe durchgeführt. Die Temperaturmessungen und Wasserstandsaufzeichnungen finden kontinuierlich in 15-minütigem Intervall durch einen Temperatursensor (HOBO) und einen Wasserstands-Logger (Odyssey) statt. Ein weiterer Wasserstands-Logger dient dazu, kontinuierlich im 15-minütigem Intervall den Wasserstand der Elz zu messen und dient dem Untersuchungsgebiet als Pegel, siehe Karte 3.

Das Entnahmeintervall der Wasserproben des OWs und GWs wird nach subjektivem Einschätzen gewonnen. Dabei liegt das Augenmerk darauf, die NW-Phasen der Elz möglichst deutlich darzustellen und die vereinzelt auftretenden Regenereignisse sowie die Retentionsbedingungen zu erfassen.



Karte 4: Übersichtskarte der Messstellen des Grundwassers , Grundlage der Karte sind hochaufgelöste Orthofotos der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

Hinzu kommen 40 Temperatursensoren (HOBO), die sich aufteilen in 5, 30, 5 der Messbereiche MA, M1-M2 und MC und in Karte 6 und Karte 7 dargestellt sind. Die Sonden sind in Hauptfließrichtung sowie in den Randbereichen gleichermaßen verteilt, um eine möglichst realistische Datengrundlage zu gewährleisten.

An zwei Tagen mit unterschiedlichen Wasserständen wird eine Abflussmessung mit einem magnetisch-induktiven Strömungsmesser (FLOW-MATE) im Bereich zwischen M1 und M2 durchgeführt.

Einmalig wird die Sauerstoff-Konzentration und der pH-Wert aller GW- und OW-Messstellen gemessen, um weitere Umweltbedingungen für das Abbau- und Reaktionsverhalten der gelösten Ionen kennenzulernen.

3.2 Vorgehen im Gelände

3.2.1 Voruntersuchung

Eine erste Geländebegehung mit Beprobung, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, fand am 11.08.2020 statt. Die Standortwahl wird, durch die im Geländepraktikum entdeckten, kühleren Wasserbereiche Z1, Z2 und den Messpunkten vor (M1) und nach (M2) dem vermeidlichen Zufluss bestimmt. Fotos der Messstellen im Gelände sind im Anhang A2.2 zu finden. Diese Proben werden anschließend auf Ionen-Konzentration und Isotopenverhältnisse, wie in Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 beschrieben, untersucht.

Eine detailliertere Voruntersuchung der Temperaturverhältnisse des OWs wird am 14.08.2020 durchgeführt. Dabei wurde ein warmer Tag gewählt, damit die Differenz der Temperatur des GWs und des OWs deutlich messbar ist. Hierfür werden drei Abschnitte der Elz auf ihre Leitfähigkeit und Temperatur mittels des Leitfähigkeitsmessgeräts (PCE-PHD 1) untersucht. So werden geeignete Standorte für den Einbau der Temperatursonden ermittelt.

3.2.2 Hobo Installation

40 Temperatursonden HOB0 Pendant der Firma ONSET werden in den Bereiche MA, M1-M2 und MC am 20.08.2020 hochwasserfest eingebaut. Die Temperatur-Logger des Standorts MA wird aufgrund eines Standortwechsels am 07.09.2020 umgesetzt. Die Miniatur-Datenlogger sind wasserdicht, können Temperatur und relative Lichtverhältnisse aufzeichnen und sind für den Unterwassergebrauch konzipiert. Die Messspanne der Temperatur liegt zwischen -20-70°C bei einer Auflösung der Daten von drei Nachkommastellen und einer Messgenauigkeit von $\pm 0,53^\circ\text{C}$ (Onset HOB0 Data Loggers 2013).

Aufgrund der hochwasserfesten Montage in Metallträger wird auf die Verwendung des Lichtsensors verzichtet. Hierzu werden die kleinen Datenlogger in angespitzte, hohle Metallträger geschraubt, siehe Abbildung A8 und anschließend mittels eines Schlagbohrers und Spreizdübels in möglichst große, befestigte Steine des Gerinnebetts eingebracht, siehe Abbildung A9 und Abbildung A10. Wo nötig, vor allem im kleinskaligen Bereich M1-M2, werden Steine versenkt. Da sich der Bereich des vermutlichen GW-Zufluss hinter einer Kiesbank am Gewässerrand befand, welches eine hochwasserfeste Befestigung erschwerte, wird hier zusätzlich ein Stahl- und Kletterseil zur Fixierung genutzt, siehe Abbildung A11.

3.2.3 Piezometerbau

Am 25.08.2020 fand mit Unterstützung des Betriebshof Riegel des Regierungspräsidiums Offenburg und einer externen Baufirma das Einbringen der Piezometer statt. Das Vorhaben ist fotografisch im Anhang A2.3 dokumentiert.

Die größte Herausforderung bestand durch den vorhandenen Kiesboden, durch welchen die Rohre eingebracht werden mussten. Besonders der Piezometer GW1, Fließrichtung rechtsseitig, liegt im verdichteten Vorland der Elz. Hier ist unter der geringen Oberbodenschicht des Magerrasens eine mächtige Kiesschicht zu erwarten. Die anderen drei GW-Messstellen liegen in Fließrichtung linksseitig der Elz in einem renaturierten Vorland und auf einer Kuhweide. Hier ist das Einbringen aufgrund mächtigerer Bodenauflage und weniger verdichtetem Boden und Kies erwartungsgemäß leichter. Das Einbauen ist neben dem vorhandenen Untergrund von weiteren Ungewissheiten wie der Schlagkraft des Baggers, der Stabilität der Stahlrohre und den genauen GW-Flurabständen begleitet.

Jeder der vier Piezometer besteht aus einem angespitzten Rammfilter, welcher ein gelöchertes Stahlrohr besitzt und von innen durch ein eingelassenes Netz ausgekleidet ist, siehe Abbildung A12. Anschließend werden beim Einschlagen Rohrstücke von 1 m mit Muffen angeschraubt. Das anstehende GW wird mittels Leuchtlot geprüft. Insgesamt sind 4 x 2 Zoll Rammfilter mit Innentresse, 8 x 2 Zoll verzinkte Stahlrohre, 9 x Stahlmuffen und 4 x Stahlbodenkappen für die Piezometer-Installation eingebaut.

Die drei GW-Messstellen Fließrichtung linksseitig der Elz können ohne größere Schwierigkeiten eingeschlagen werden. Hier wird für die Messstelle GW2 eine Gesamttiefe von 4,115 m (ein Rammfilter = 1,155 m, 3 x 1 m Stahlrohre), für die Messstelle GW3 eine Tiefe von 2,115 m (ein Rammfilter, 1 x 1 m Stahlrohr) und für die Messstelle GW4 eine Brunnentiefe von 3,155 m (ein Rammfilter, 2 x 1 m Rohre) erreicht. Wie erwartet bereitet die Messstelle GW1 im verdichteten Vorland der Elz, Fließrichtung rechtsseitig der Elz, Probleme, siehe Abbildung A13. Hier muss die Schlagkraft des Baggers schon auf dem ersten Meter erhöht werden. Durch den sich darunter befindenden verdichteten Kies kommt der Rammfilter und das erste Rohrstück in starke Schiefelage. Um eine Beschädigung der Muffe oder ein Brechen des Rohrs zu verhindern, wird das Rohr mittels Bagger und Schlaufe gezogen. Bei diesem Vorgang wird die Muffe und das Gewinde beschädigt, sodass diese vor erneutem Einbringen erst miteinander verschweißt werden muss. Gelöst wird das Problem durch Ausbaggern der Messstelle um ca. 1,5 m und anschließendem Einschlagen. Die gesamte Brunnentiefe an der Messstelle GW1 beträgt 3,657 m (Rammfilter, 3 x ½ m Rohre, 1 x 1 m Rohr).

Vorteil einer Messung mittels Piezometer ist der schnelle Aufbau, sobald die GW-Messstellen eingerichtet sind, und die detaillierte zeitliche Auflösung der gewonnenen Daten. Vor allem für kleinskalige Messbereiche eignete sich diese Messmethode um die Heterogenität des GW-Fließverhaltens mittels hydraulischen Gradienten zu bestimmen (Kalbus et al. 2006).

3.2.4 Datenerhebung

3.2.4.1 Wasserproben

An jedem Messpunkt in Karte 3 werden 100 ml Wasserprobe in eine Braunglasflasche gefüllt. Bei der Probennahme wird darauf achtgegeben, dass die Probennahme in der Mitte des Gerinnebetts im Hauptstrom erfolgt und anschließend gut verschlossen wird, um Verdunstung entgegenzuwirken. Auf dem Transport, vor allem in den Sommermonaten, wird ein möglichst dunkler und kühler Ort gewählt, bevor die Proben im Kühlschrank des Labors bis zur weiteren Analyse lagern. Abbauprozesse und Verdunstungseinflüsse werden so bis zum Messzeitpunkt möglichst gering gehalten.

3.2.4.2 Leitfähigkeit, Sauerstoff

Für die Temperatur und Leitfähigkeitsmessung der Voruntersuchung wird das Leitfähigkeitsmessgerät PCE-PHD 1 der Firma PCE verwendet. Für die Messung der Leitfähigkeit befinden sich in der Sonde Kohlestabelektroden. Der Messbereich der Leitfähigkeit liegt bei 0-200 μS bei einer Messgenauigkeit von $\pm 2 \%$. Die Temperaturmessung deckt eine Spanne von 0-60°C ab und besitzt eine Messgenauigkeit von $\pm 0,8^\circ\text{C}$ (PEC 2020).

Die Messung des Sauerstoffgehalts und des pH-Wertes im OW und in den GW-Messstellen wird mittels einer SenTix Sonde und einer FDO Sonde des Multi 3420 der Firma WTW getätigt. Der Messbereich der pH-Messung bewegt sich zwischen -2-20 mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,004 \%$. Erfassbare Sauerstoff-Konzentrationen liegen im Bereich von 0-20 mg/l bei einer Messgenauigkeit 0,05 % (WTW 2011).

3.2.4.3 Abflussmessung

Die Fließgeschwindigkeit der Elz wird mittels einer magnetisch-induktiven Strömungssonde (MID) gemessen. Dafür wird das Gerät FLO-MATE der Firma Marsh-McBirney/USA (Marsh-McBirney 1990) verwendet. Das Gerät misst den Durchfluss nach dem Faradayschen Gesetz der elektromagnetischen Induktion. In einer durch ein Magnetfeld fließende elektrisch leitende Flüssigkeit (Wasser) wird eine elektrische Spannung (u) induziert. Die Magnitude dieser Spannung ist direkt proportional zur Geschwindigkeit der Strömung (v), zur Stärke des Magnetfeldes (B), und zum Elektrodenabstand (L_E), siehe Gleichung (1).

$$u = B * L * v \quad (1)$$

- u : elektrische Spannung [V]
- B : Stärke des Magnetfeldes [A/m]
- L_E : Elektrodenabstand [m]
- v : Geschwindigkeit der Strömung [m/s]

Der Messbereich der FLO-MATES liegt zwischen -0,15-6 m/s, wobei ein Unsicherheitsbereich von $\pm 2 \%$ angegeben ist (Marsh-McBirney 1990).

Gemessen wird auf einer Wassertiefe von 80 %, 60 % und 20 % ausgehend von der Wasseroberfläche für 10 Sekunden. Mit der Einstellung Fixed Point Averaging (FPA) wird die Messung des 10 Sekunden Intervalls gemittelt. Bei der Auswahl des Querschnitts wird darauf geachtet, dass der Fluss weitestgehend laminar fließt und geringe Querströmungen und Turbulenzen aufweist. Für eine fotografische Dokumentation der Abflussmessung siehe Anhang A2.4.

3.3 Labormethoden

3.3.1 Ionenchromatograph

Zur Ermittlung der Konzentration der gelösten Hauptionen im OW und GW wird ein Ionenchromatograph der Firma Dionex ICS-1100 verwendet. Während des Messverfahrens fließen die filtrierte (0,45 µm) Probe gemeinsam mit einem Fließmittel mittels einer Pumpe durch eine Trennsäule, bestehend aus einem Polymerharz. In der Trennsäule befinden sich Ionentauscher. Durch die unterschiedliche Affinität der Ionen werden diese in einem reversiblen Gleichgewichtsprozess in unterschiedlichem Maß abgelagert. Je nach Interaktion und Intensität mit den Austauschern dauert der Durchgang unterschiedlich lange. Am Ende der Säule wird die Leitfähigkeit gemessen. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird dabei mithilfe eines Suppressors die Leitfähigkeit des Fließmittels durch Überführung in eine nicht-leitende Verbindung unterdrückt. Da die Retentionszeit ionenspezifisch ist, können so die Ionen identifiziert werden. Durch den Vergleich der aus einer Messprobe gewonnenen Daten mit den Standardkonzentrationen, können die Ionen identifiziert und quantifiziert werden. (Thermo Fisher Scientific 2012)

Die mittels des Ionenchromatographen gemessene chromatographische Trennung wird mit der Software Chromeleon dargestellt und fehlerhafte Chromatogramme korrigiert. Die Software wandelt jeden Peak einer Probe im Chromatogramm in eine Konzentration um und gibt eine Zusammenfassung aller Messungen zurück.

3.3.2 Isotopenanalyse

Die Isotopenmessung der stabilen Wasserisotope $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ der Proben des GWs und OWs wird mit dem Laserspektrometer L 1102-i der Firma PICARRO durchgeführt. Die Messgenauigkeit liegt bei $\delta^{18}\text{O}$ bei $\pm 0,2 \text{ ‰}$ und beim $\delta^2\text{H}$ bei $\pm 1 \text{ ‰}$ bezogen auf den V-SMOW2 Standard.

Zur Ermittlung der Isotopenverhältnisse wird eine Probenmenge von ca. 1,8 µl der 1 ml Probenflasche automatisch entnommen und in einen geschlossenen Verdampfer injiziert. Dort wird die Probe unter hohen Temperaturen vaporisiert und mittels eines Stickstoffstroms in eine Laserkammer geleitet. In der druck- und temperaturstabilen Laserkammer wird die Probe nach dem Prinzip der Cavity Ring Down Spektroskopie (CRDS) analysiert. Das CRDS ist ein zeitbasiertes Messsystem, bei dem ein Laser Absorptionslinien durch Gasphase-Moleküle quantifiziert. Da jedes Wasserisotop eine eindeutige Absorptionswelle aufweist, können so die Isotope eindeutig bestimmt werden. (Picarro 2012)

Zur genaueren Verhältnisbestimmung wird jede Messung sechs Mal wiederholt, wobei die ersten drei Injektionen verworfen werden, um dem Memory-Effekt entgegenzuwirken. Aus den letzten drei Injektionen wird der Mittelwert gebildet, welcher dann den resultierenden Verhältnismesswert darstellt. Jede Messung dauert ca. 9 Minuten, was bei sechsmaliger Injektion eine Messdauer von 54 Minuten pro Probe ergibt.

Da die Kondensation von Wasserdampf zu Wolken und N unter Gleichgewichtsbedingungen stattfinden, entsteht eine parallele und proportionale Änderung des $\delta^{18}\text{O}$ und des $\delta^2\text{H}$ im N und dem zurückbleibenden Wasserdampf. Craig (1961) beobachtete diese lineare Korrelation und stellte die Global Meteoric Water Line (GMWL) Gleichung auf.

$$\text{GMWL: } \delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2)$$

Da die GLMW, wie die Namensgebung deutlich macht, globale Gültigkeit besitzt, wird mittels erhobener Isotopenanalysen des Niederschlags des Fahnbergdachs der Hydrologie Freiburg eine Local Meteoric Water Line (LMWL) konstruiert, siehe Gleichung (3). Diese Gleichung ist standortspezifisch und weicht geringfügig von der GMWL ab.

$$\text{LMWL: } \delta^{18}\text{O} = 7,861 * \delta^2\text{H} + 8,367 \quad (3)$$

Die durch Ozeane zusätzlich erzeugten kinetischen Prozesse, welche das „leichtere“ $\delta^2\text{H}$ Wassermolekül bevorzugen, führen zu einem Überschuss an Deuterium-Exzess (d) (Craig 1961). Der d errechnet sich wie in Gleichung (4) beschrieben direkt aus den δ -Werten. Durch Abweichungen des d von der GMWL können Aussagen über die Herkunft des Niederschlags und Verdunstungseinflüsse gemacht werden. Der Deuterium-Exzess wird von Dansgaard (1964) definiert als:

$$d = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O} \quad (4)$$

3.4 Quantifizierungsmethoden

3.4.1 Abflussmessung

Mithilfe zweier Abflussmessungen wird eine lineare P-Q Beziehung ermittelt. Der Pegelstand der Elz wird mit einem Wasserstands-Logger (Odyssey) in 15-minütiger Auflösung überwacht und liefert Daten vom 08.09.2020 bis 10.11.2020. Aus geländetechnischen Gründen liegt der messbare, maximale Messwert des Pegel Elz bei 58 cm Wasserstand, respektive 2,62 m³/s Abfluss. Die Messgenauigkeit beträgt laut Handbuch ± 5 mm, erfahrungsgemäß in der Geländearbeit jedoch ± 1 cm. Das Regierungspräsidium (RP) Freiburg hat vom 31.07.2020 bis 14.10.2020 eine Messung des Wasserstands der Elz in Auftrag gegeben. Der mobile Pegel des RP ist ca. 2590 m flussabwärts des eigenen Pegels in der Elz angebracht. Die ermittelte P-Q Beziehung wird anschließend auf den zusammengeführten Datensatz der Wasserstände des Pegels Elz und des Pegels RP angewandt, wobei ein Zeitversatz des Pegels RP um 135 Minuten berücksichtigt wird. Dieser resultiert aus der mittleren Fließzeit von 0,31 m/s des ermittelten Tracer-Versuchs des Gewässerökologiekurs 2019. Die Messungen, die den Schwellenwert des Pegels der Elz überschreiten, werden durch die Daten des Pegels RP ersetzt, siehe Abbildung 1.

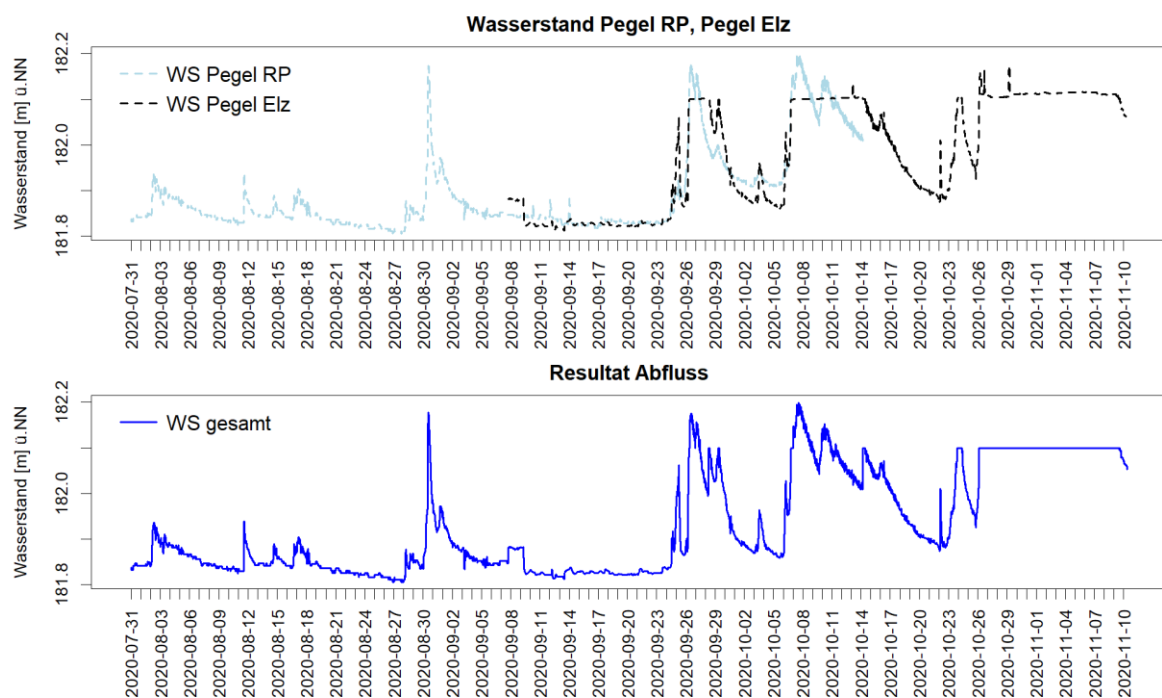


Abbildung 1: Datensatz Abfluss Elz (Datengrundlage: eigene Pegelmessung, Pegelmessung RP)

Um den GW-Zufluss, die gemessenen Konzentrationen der Ionen und die Verhältnisse der Isotope besser auf ihre Umweltbedingung der Abflussmenge und des Niederschlags vergleichen zu können, wird eine Gruppierung in zwei Niedrigwasserphasen (NW1, NW2) und eine Mittelwasserphase (MW) vorgenommen. Die NW1 startet am 31.07.2020, die NW2 beginnt am 04.09.2020 und die MW erstreckt sich von 25.09.2020 bis 30.11.2020, siehe Abbildung 2.

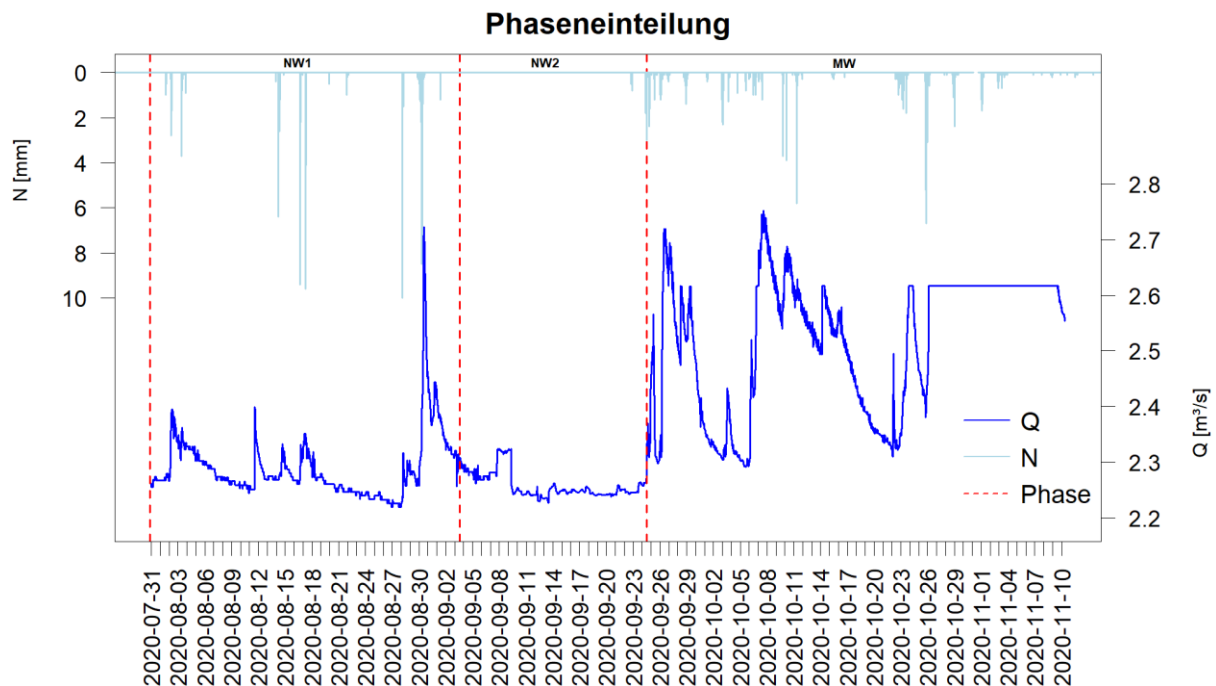


Abbildung 2: Phaseneinteilung der Daten entsprechend des Abflusses und Niederschlags
(Datengrundlage: eigene Pegelmessung, Pegelmessung RP)

3.4.2 Darcy Zustrom

Um den GW-Zufluss durch Berechnung nach dem Darcy Gesetz zu quantifizieren, werden folgende Annahmen getroffen:

- Die durchflossene Fläche steht 90° zur Strömungsrichtung der Elz;
- Die Distanz des Grundwassers zur Elz entspricht dem Abstand der Messstelle zum Gewässerrand der Elz in GW-Fließrichtung;
- Die Länge des Abschnittes des GW-Zuflusses im Gerinnebett wird mittels Temperaturdaten der Hobos abgeschätzt;
- Der Durchlässigkeitsbeiwert wird mittels der Abstandsgeschwindigkeit (v_a) und der Filtergeschwindigkeit (v_f) für die einzelnen GW-Messstellen berechnet, siehe Gleichung (8) und (9).
- Die Messwerte der Isotope werden als konservativer Tracer genutzt, um den zeitlichen Versatz von GW und OW zu ermitteln.

Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit leitet sich aus Darcys Gesetz ab, welches besagt, dass die Wassermenge (Q), die eine Fläche (A) in einem porösen Medium (sandiger Kiesboden) laminar durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten (i) ist. Der hydraulische Gradient berechnet sich aus der Differenz der Höhe des Wasserspiegels des GWs zu Elz und der Distanz der GW-Messstelle zur Gewässerkante der Elz.

$$v = \frac{Q}{A} = -kf * i \quad (5)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta D} \quad (6)$$

kf : Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

i : hydraulischer Gradient

h : Höhe [m]

D : Distanz [m]

Der hydraulische Gradient wird für die Piezometer GW2, GW3 und GW4 berechnet. Die daraus erkenntliche Fließrichtung des GWs wird im hydrologischen Dreieck, Karte 5 ersichtlich. Mittels der Isotopenmesswerte des OWs und des GWs kann eine Verzögerung von 10 Tagen beobachtet werden, siehe Abbildung 16, Peak-Ereignis 28.09.2020 Reaktion im OW, 08.10.2020 Reaktion im GW. Mittels dieser Daten kann die Abstandsgeschwindigkeit (v_a) berechnet werden.

$$v_a = \frac{vf}{\phi} = \frac{\Delta D}{t_{ver}} = \frac{Distanz\ Elz\ [m] - Brunnen\ [m]}{Verzögerungszeit\ [s]} \quad (7)$$

vf : Filtergeschwindigkeit [m/s]

ϕ : Porosität

t_{ver} : Zeitversatz [s]

D : Distanz [m]

Unter der Annahme, dass die nutzbare Porosität bei sandig-kiesigem Boden bei 25 % liegt (Hölting und Coldewey 2009), wird die Filtergeschwindigkeit (v_f) als das Vierfache der Abstandsgeschwindigkeit definiert.

$$v_f = 4 * v_a \quad (8)$$

Zuletzt kann dank der v_f Bestimmung und des Mittelwertes des hydraulischen Gradienten des Messzeitraums der k_f -Wert der einzelnen Piezometer berechnet werden. Mittels der drei Messstellen kann so eine Range der k_f -Werte lokal bestimmt werden.

$$k_f = \frac{v_f}{i} \quad (9)$$

- v_f : Filtergeschwindigkeit [m/s]
 k_f : Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 i : Hydraulischer Gradient

3.4.3 Mischungsrechnung

Um herauszufinden wie viel GW der Elz zufließt und welcher Anteil OW in den Piezometern steckt, wird eine Mischungsrechnung für den kleinräumigen Bereich M1-M2 durchgeführt. Dabei werden als Tracer sowohl die Isotope wie auch die Hauptionen betrachtet. Es handelt sich um ein 2-Komponenten-Mischungsmodell bestehend aus dem OW und GW.

Es wird die Grundannahme getroffen, dass sich der Abfluss, der am unteren Flussabschnitt M2 (Q_{out}) gemessen wird, aus dem Abfluss der oberen Messstelle M1 (Q_{in}) sowie dem GW-Anteil (Q_{GW}) zusammensetzt, Gleichung (10). N und ET werden nicht mitberücksichtigt.

$$Q_{out} = Q_{GW} + Q_{in} \quad (10)$$

Zudem gilt, dass sich die Konzentration des Tracers aus der Masse des Tracers und dem Volumen bestimmen lassen, Gleichung (11).

$$c_{out} = \frac{m_{in}}{Q_{out}} \quad (11)$$

- Q_{out} : Abfluss an der Ausflusstelle [m^3/s]
 m_{in} : Masse des Tracers an der Einflusstelle [mg, %]
 c_{out} : gemessene Konzentration des Tracers an der Ausflusstelle [mg/l, %/l]

Da die Tracer-Konzentration des Gerinnebetts oben und unten sowie die Tracer-Werte des GWs bekannt sind, kann auf Grundlage einer Massenbilanz eine Mischungsrechnung erstellt werden. Die Masse der Ausflusstelle entspricht dem Abflussanteil des Ausflusstortes multipliziert mit der Konzentration des Tracers des Ausflusstortes und gleicht der Summe der einzelnen Abflussanteile des einströmenden Abflusses und des GW-Zuflusses multipliziert mit der jeweiligen Tracer-Menge, Gleichung (12).

$$m_{out} = Q_{out} * c_{out} = Q_{GW} * c_{GW} + Q_{in} * c_{in} \quad (12)$$

- m_{out} : Masse des Tracers an der Ausflusstelle [mg, %]
 c_{GW} : gemessene Konzentration des Tracers im Grundwasser [mg/l, %/l]
 c_{in} : gemessene Konzentration des Tracers an der Einflusstelle [mg/l, %/l]

Im ersten Schritt wird die Gleichung (10) und die Gleichung (12) in die Gleichung (11) gesetzt. So erhält man den Verhältnisanteil des Abflusses am GW-Zufluss.

$$\frac{Q_{in}}{Q_{GW}} = \frac{-Q_{out} * [c_{out} - c_{GW}]}{c_{GW} - c_{in}} \quad (10),(12) \text{ in } (11) \quad (13)$$

Da der Anteil des GWs zum Gesamtabfluss von Relevanz ist, wird die Gleichung danach umgestellt.

$$\frac{Q_{GW}}{Q_{out}} = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in} - c_{GW}} \quad (13)$$

In den folgenden Mischungsrechnungen zur Bestimmung des Anteils des GWs in der Elz wird die Gleichung (13) verwendet. Eine ausführliche Herleitung der Formel befindet sich im Anhang A3.1.

Sklash und Farvolden (1979) haben für eine erfolgreiche Mischungsrechnung mit chemischen Tracern folgende Bedingungen aufgestellt:

- Die Tracer-Gehalte des Ereigniswassers, hier Q_{out} , und des Vorereigniswassers, Q_{in} , müssen sich signifikant unterscheiden;
- Die Konzentrationen der Tracer der beiden Wassertypen müssen räumlich konstant sein, d.h. sie dürfen sich nicht verändern und müssen im Fluss vollständig durchmischt sein;
- Das GW und das vadoses Wasser sind isotopisch äquivalent oder vernachlässigbar;
- Der Oberflächenspeicher trägt nur minimal zum Abflussereignis bei.

Uhlenbrook (1999) und Burns et al. (2001) ergänzten diese Bedingungen:

- Die beiden Komponenten Q_{in} und Q_{GW} addieren sich zu einem Abfluss Q_{out} , weitere Komponenten sind ausgeschossen;
- Ein konservatives Verhalten der Tracer in hydrologischen Systemen ist Voraussetzung für die Durchführung einer Mischungsrechnung.

Daher eignen sich neben den stabilen Wasserisotopen, vor allem kleine und reaktionsträge Ionen wie das Anion Chlorid zur Abflusskomponenten-Separation. Zur Anteilsbestimmung des GWs in der Elz werden deshalb die stabilen Wasserisotope und die Anionen Chlorid, Sulfat und Nitrat verwendet.

Um eine G-O-I zu untersuchen wird im Anschluss eine Anteilsbestimmung des OWs in den Piezometer-Messstellen berechnet. Hierfür werden die Konzentrationen des Isotopenverhältnis $\delta^{18}O$ und die Chlorid-Konzentration im GW und OW während des Peak-Ereignis vom 26.9.2020 bis 30.9.2020 betrachtet. Mittels einer Reaktionsverzögerung von 10 Tagen im GW gegenüber dem OW, kann über die Mischungsrechnung, Gleichung (14) der Anteil des OWs am GW bestimmt werden. Die gemessene Konzentration des Tracers in der Elz wird durch den Mittelwert der vier Messstellen MA, M1, M2, MC zum Zeitpunkt t_0 dargestellt. Die Tracer-Konzentration zum Zeitpunkt t_0 beziehen sich auf den 28.09.2020, die am Zeitpunkt t_{10} auf den 08.10.2020.

$$\frac{V_{Elz,t_0}}{V_{GW,t_{10}}} = \frac{c_{GW,t_0} - c_{GW,t_{10}}}{c_{GW,t_0} - c_{Elz,t_0}} \quad (14)$$

- V_{Elz,t_0} : Volumen der Elz zum Zeitpunkt t_0 [l]
 $V_{GW,t_{10}}$: Volumen des Grundwassers zum Zeitpunkt t_{10} [l]
 c_{Elz,t_0} : gemessene Konzentration des Tracers in der Elz zum Zeitpunkt t_0 [mg/l, ‰/l]
 c_{GW,t_0} : gemessene Konzentration des Tracers im Grundwasser zum Zeitpunkt t_0 [mg/l, ‰/l]
 $c_{GW,t_{10}}$: gemessene Konzentration des Tracers im Grundwasser zum Zeitpunkt t_{10} [mg/l, ‰/l]

3.4.4 Energiebilanzmodell

Um die Energieflüsse der Elz im Bereich MA-MC besser nachvollziehen zu können, wird ein Energiebilanzmodell in Anlehnung an Evans et al. (1998) verwendet. Dieses Modell beschreibt alle in Abbildung 3 dargestellten Energieflüsse einer OWs. Da ein GW-Zustrom in diesem Modell nicht vorgesehen ist, wird dieser nachträglich hinzu modelliert. Da die Fließzeit auf einer Strecke von 1,85 km eine wesentliche Rolle spielt, wird mittels der gewonnen mittleren Fließzeit der Elz eine mittlere Verweilzeit bestimmt. Eine weitere Anpassung des Modells war, dass das Bowen-Verhältnis einen Maximalwert von 1 erhält, da es sonst bei gesättigter Luftfeuchtigkeit von 100 % in der Formel dazu kommen würde, dass durch Null geteilt werden müsste. Hierfür werden die gesättigten Luftfeuchtwerte auf 99,99 % verändert.

Zur Beurteilung des Modells werden 10.000 Parameter-Datensätze nach dem Prinzip von Monte Carlo erstellt, die jeweils unterschiedliche Differenzen der modellierten und gemessenen Temperatur am unteren Messpunkt MC ergeben. Entsprechend der Differenz und der Temperatur des GWs wird dann der GW-Zufluss berechnet. Mittels der 10.000 Durchläufe kann eine Aussage über die Verteilung des berechneten GW-Zuflusses gemacht werden.

Da auf dem kleinskaligen Bereich von knapp über 80 m Fließstrecke die eingehenden Parameter einer Energiebilanz zu ungenau sind, wird für diesen Bereich eine Mischungsrechnung der Gewässertemperaturen durch die dort engmaschig verlegten Temperatursonden nach dem in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Vorgehen berechnet. Die Mischungsrechnung, die eigentlich als Stoffbilanz dient, wird so zur Bestimmung des Energiegewinns bzw. -verlusts über das GW verwendet. Hierbei wird die Temperatur als Konzentration behandelt.

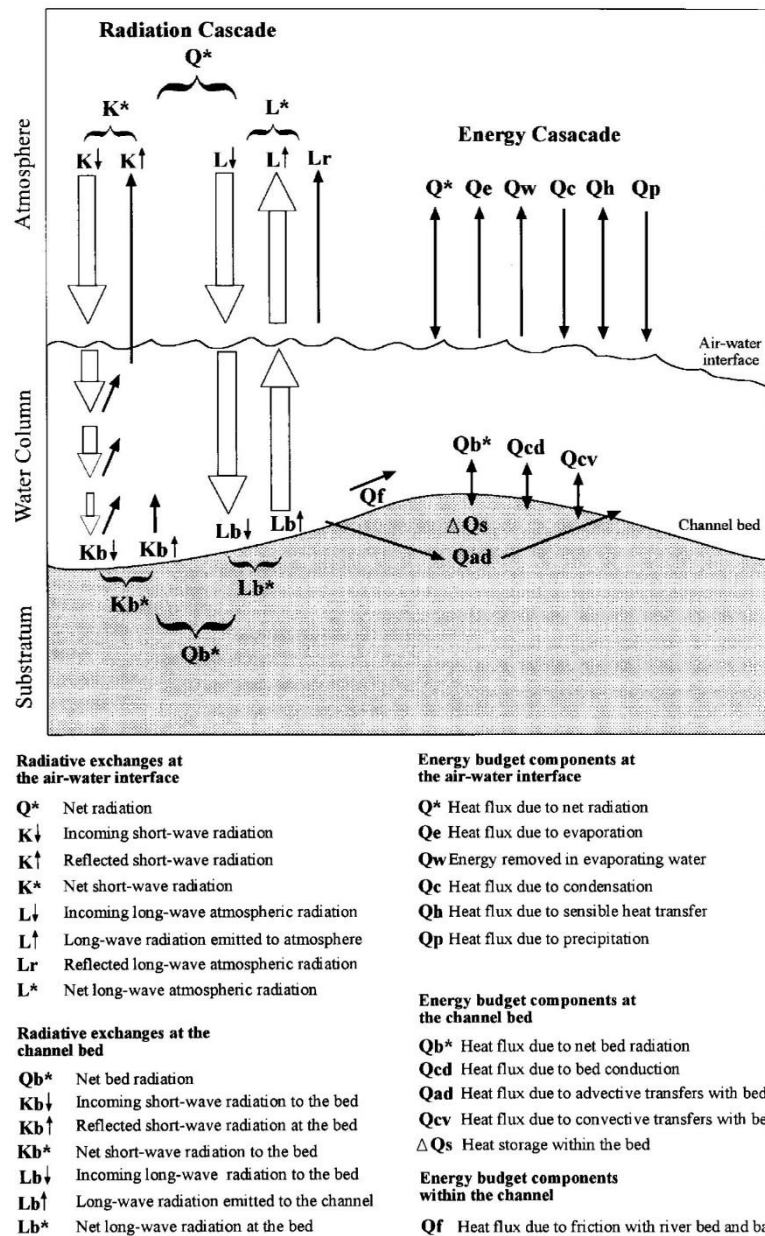


Abbildung 3: Energieflüsse eines Oberflächengewässers, Evans et al. (1998, S. 577)

Wie zu sehen ist, setzt sich die Energiebilanz eines OWs aus den Energieumsätzen an den Grenzflächen, der Wasseroberfläche und dem Gerinnebett, zusammen. Auf der Wasseroberfläche trifft die Globalstrahlung ein und wird zum Teil zurückreflektiert, am Gerinnebett findet dagegen Wärmeleitung statt.

Die gesamte Energiebilanz des Systems setzt sich aus folgenden Gliedern zusammen:

$$Q_n = Q_{rad} + Q_e + Q_h + Q_f + Q_{cd} + Q_p \quad (15)$$

- Q_n : Netto-Energiebilanz [Wm^{-2}]
- Q_{rad} : Netto-Strahlungsbilanz [Wm^{-2}]
- Q_e : latenter Wärmestrom [Wm^{-2}]
- Q_h : fühlbarer Wärmestrom [Wm^{-2}]
- Q_f : Wärmestrom durch Reibungsenergie [Wm^{-2}]
- Q_{cd} : Wärmeleitung am Gerinnebett [Wm^{-2}]
- Q_p : Energie des Niederschlags [Wm^{-2}]

Wobei Q_n für die Netto-Energie steht, welche am Ende zur Verfügung steht. Ist sie negativ kühlt sich das Gewässer ab, bei positiven Werten erwärmt sich das Gewässer. Q_{rad} , in Abbildung 3 als Q^* bezeichnet, ist die Energie der Netto-Strahlungsbilanz, definiert in Gleichung (16), Q_e stellt den latenten Wärmestrom dar, Gleichung (19), Q_h den fühlbaren Wärmestrom, Gleichung (20), Q_f die Reibungsenergie, Gleichung (22), und Q_{cd} die Wärmeleitung am Gerinnebett, Gleichung (23). Q_p spiegelt die Energie durch N wider und wird im Model vernachlässigt.

Die Netto-Strahlungsbilanz (Q_{rad}) setzt sich aus der Summe der kurzwelligen (K^*) und der langwelligen Strahlungsbilanz (L^*) zusammen.

$$Q_{rad} = K^* + L^* \quad (16)$$

Hierbei setzt sich die kurzwellige Nettostrahlung an der Wasseroberfläche aus der ankommenden kurzwelligen Globalstrahlung (K), der kurzwelligen Reflexionsstrahlung (K_{ref}) und aus der ankommenden (K_b) und reflektierten, (K_{b_ref}) kurzwelligen Strahlung am Gerinnebett, zusammen.

$$K^* = K - K_{ref} + K_b - K_{b_ref} \quad (17)$$

In die langwellige Strahlungsbilanz gehen die Faktoren der langwelligen Ausstrahlung der Wasseroberfläche, der langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre und der langwelligen Gegenstrahlung der Ufervegetation ein. Da diese Messdaten nicht zur Verfügung stehen, wird in der Modelberechnung die langwellige Strahlung durch das Stefan-Boltzman-Gesetz bestimmt.

Die langwellige Strahlungsbilanz (L^*) ist das Produkt der Multiplikation der Emissivität der Oberfläche des ausstrahlenden Körpers (ε), die für Wasser 0,97 annimmt (Evans et al. 1998), der Stefan-Boltzmann-Konstante (σ) ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) und der Temperatur des ausstrahlenden Körpers (T).

$$L^* = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (18)$$

Der latente Wärmestrom (Q_e) berechnet sich aus der Evaporations-/Kondensationsrate, dem latenten Wärmestrom der Verdunstung (L) und der Dichte des Wassers (ρ). Der erste Faktor, die Evaporations-/Kondensationsrate, berechnet sich aus der Windgeschwindigkeit (U) multipliziert mit der Differenz des Sättigungsdampfdrucks der Wassertemperatur (E_w) und des Dampfdrucks der Luft (E_a), siehe empirische Formel nach Webb, B., W. und Zhang (1997), Gleichung (19).

$$Q_e = \frac{\left(0,165 * \left(0,8 + \frac{U}{100}\right)\right) * (E_w - E_a)}{86,4} * L * \rho \quad (19)$$

U : Windgeschwindigkeit [m/s]
 E_w : Sättigungsdruck bei Wassertemperatur [kPa]
 E_a : Dampfdruck der Luft [kPa]
 L : Latenter Wärmestrom der Verdunstung [K/Jg]
 ρ : Dichte des Wassers [g/cm³]

Der fühlbare Wärmestrom (Q_h) ergibt sich aus der Bowen-Ratio B_r , Bowen (1926) und dem latenten Wärmestrom (Q_e).

$$Q_h = B_r * Q_e \quad (20)$$

B_r : Bowen-Ratio
 Q_e : latenter Wärmestrom [Wm^{-2}]
 Q_h : fühlbarer Wärmestrom [Wm^{-2}]

Wobei sich die Bowen-Ratio aus dem atmosphärischen Druck (P) multipliziert mit dem Quotienten der Differenz der Wassertemperatur und der Lufttemperatur zu der Differenz des Sättigungsdrucks bei Wassertemperatur E_w und des Dampfdrucks der Luft E_a ergibt (Bowen 1926).

$$Br = 0,61 * 10^{-3} * P * \frac{T_a - T_w}{E_w - E_a} \quad (21)$$

P : Luftdruck [hPa]
 T_a : Lufttemperatur [K]
 T_w : Wassertemperatur [K]

Die Reibungsenergie (Q_f), drückt sich nach Theurer et al. (1984), durch das Gefälle (S), den Abfluss (Q) und die Gerinnebreite (W) aus.

$$Q_f = 9805 * S * \frac{Q}{W} \quad (22)$$

S : Gefälle

W : Gerinnebreite [m]

Die Wärmeleitung am Gerinnebett (Q_{cd}) wird anhand der Wärmeleitfähigkeit des Gerinnebetts (k_c) und der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur des Gerinnebetts und der Temperatur im Wasser geteilt durch die mittlere Tiefe der Messung (z) berechnet:

$$Q_{cd} = k_c * \left(\frac{T_b - T_w}{z} \right) \quad (23)$$

k_c : Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]

z : mittlere Tiefe der Messung [m]

T_b : Temperatur des Gerinnebetts [K]

In das Modell gehen verschiedene Parameter ein, die entweder als feste Datensätze vorhanden sind oder Referenzwerten der Literatur entsprechen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über bestehende Datensätze und ihre Auflösung, die in das Modell der Energiebilanz eingehen, Tabelle 3 verdeutlicht die Parameter, die sich in Wertebereiche fassen lassen und auf Literaturwerten basieren oder fest definierte Werte sind, die aufgrund der Länge des Gewässerabschnitts und des Messzeitraums variieren und einen kleinen definierten Spielraum zur realistischeren Darstellung besitzen.

Tabelle 2: Übersicht der Eingangsdatensätze

Parameter	Auflösung, Besonderheit	Datenherkunft/ Station
<i>Abfluss</i>	15-minütig, std. aggregiert	Pegel Elz Odyssey
<i>Wassertemperatur</i>	15-minütig, std. aggregiert	Hobo Datenlogger
<i>Gewässerlänge/Fläche</i>	m, m ²	Orthofotos (svGeosolution GmbH 2020)
<i>Gefälle</i>	1x1 m	DGM (RP 2020a)
<i>Lufttemperatur</i>	Std. Auflösung, auf 2 m Höhe	Wetterstation Malterdingen (AGRIMET)
<i>Globalstrahlung</i>	Std. Auflösung, auf 2 m Höhe	Wetterstation Malterdingen (AGRIMET)
<i>Windgeschwindigkeit</i>	Std. Auflösung, auf 2 m Höhe	Wetterstation Malterdingen (AGRIMET)
<i>Relative Luftfeuchtigkeit</i>	Std. Auflösung, auf 2 m Höhe	Wetterstation Malterdingen (AGRIMET)
<i>Niederschlag</i>	Std. Auflösung, 50 cm Höhe	Wetterstation Malterdingen (AGRIMET)
<i>Luftdruck ü. NN</i>	Std. Auflösung, Luftdruck auf Stationshöhe	Wetterstation Freiburg, Station 1443 (DWD)

Tabelle 3: Übersicht berechneter und durch Wertebereiche definierte Parameter

Parameter	Bedeutung und Datenherkunft	Wertebereich
<i>Albedo</i>	Reflexionsstrahlung, (Bender und Schaller 2014)	0,05-0,15
<i>alpha</i>	Winkel zwischen Gerinne und Sonnenazimut der Monate Aug., Sep., Okt., (Staay 2021)	142,71°-158,44°
<i>theta</i>	Sonnenhöhe (Winkel), (Staay 2021)	30,8°-50,8°
<i>kc</i>	Wärmeleitfähigkeit, Bereich sandiges Material, locker gepackt, (Schweizer 2021)	1,88-2 [W/m*°C]
<i>H</i>	Uferhöhe	0-2[m]
<i>Faktor F</i>	Anteil der Sonneneinstrahlung, der in der Energiebilanz betrachtet wird	0,6-0,91
<i>VegFaktor</i>	Korrekturfaktor für die langwellige Strahlungsaufnahme der Vegetation	0,2-0,4
<i>z</i>	Mittlere Tiefe der eingebauten Temperatursonden	0,1- 0,5[m]

4. Prozessverständnis

Um die Ergebnisse der Quantifizierungsmethoden richtig einordnen und miteinander ins Verhältnis setzen zu können ist es essenziell die ablaufenden Prozesse zu hinterfragen. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Verhalten von Temperatur und Pegelhöhen im GW und OW näher betrachtet.

4.1 Prozessverständnis Pegelhöhen

Wie das Verhalten der Pegel der GW-Messstellen über den Messzeitraum variiert und auf unterschiedlichen Abfluss der Elz reagiert, ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Pegelstände werden über den gesamten Messzeitraum in 15-minütiger Auflösung gemessen, wodurch kleine Veränderungen wahrgenommen werden können. In Hinblick auf die Ergebnisse des GW-Anteils in der Elz nach Darcy ist das Verhalten der Pegelstände zur Ergebniseinordnung des GW-Zuflusses relevant.

Abbildung 4 macht deutlich, dass das Gefälle der Pegelhöhen die Fließrichtung des GWs im kleinskaligen Untersuchungsgebiet klar definiert. Die Strömungsrichtung verläuft von den Piezometer hin zur Elz. Der Wasserstand des Pegel GW4 weist das höchste Niveau auf, gefolgt von GW3. Die Messstellen GW2 und GW1 unterscheiden sich geringfügig und weisen einen deutlich geringeren Pegelstand als GW3 und GW4 auf.

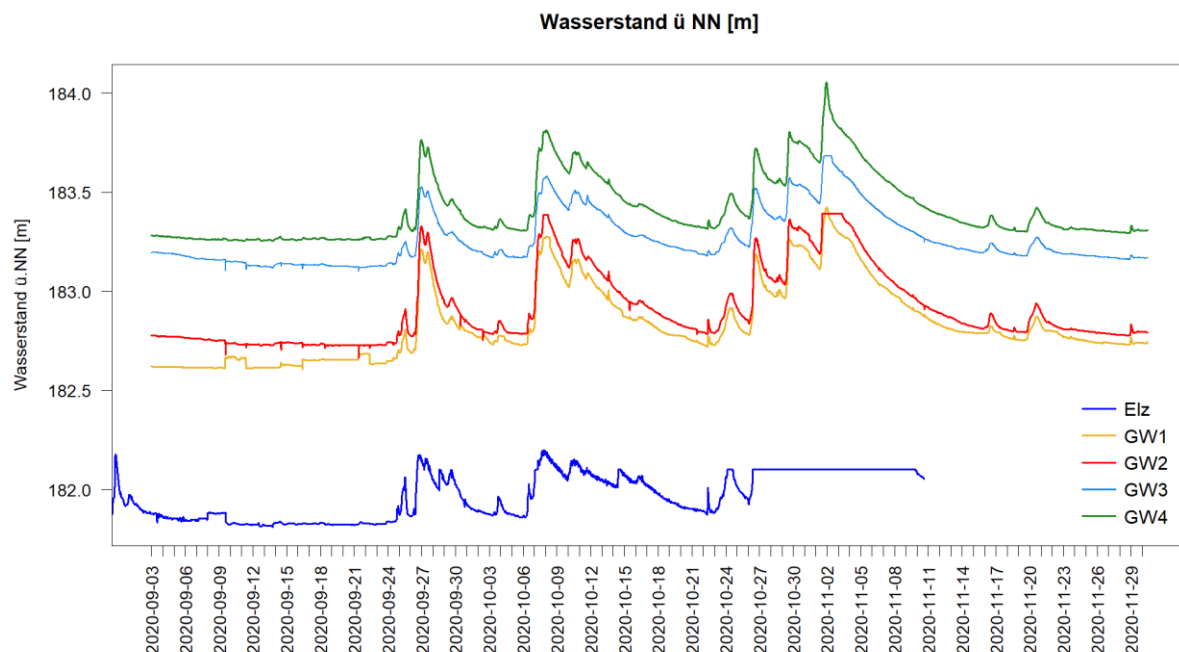
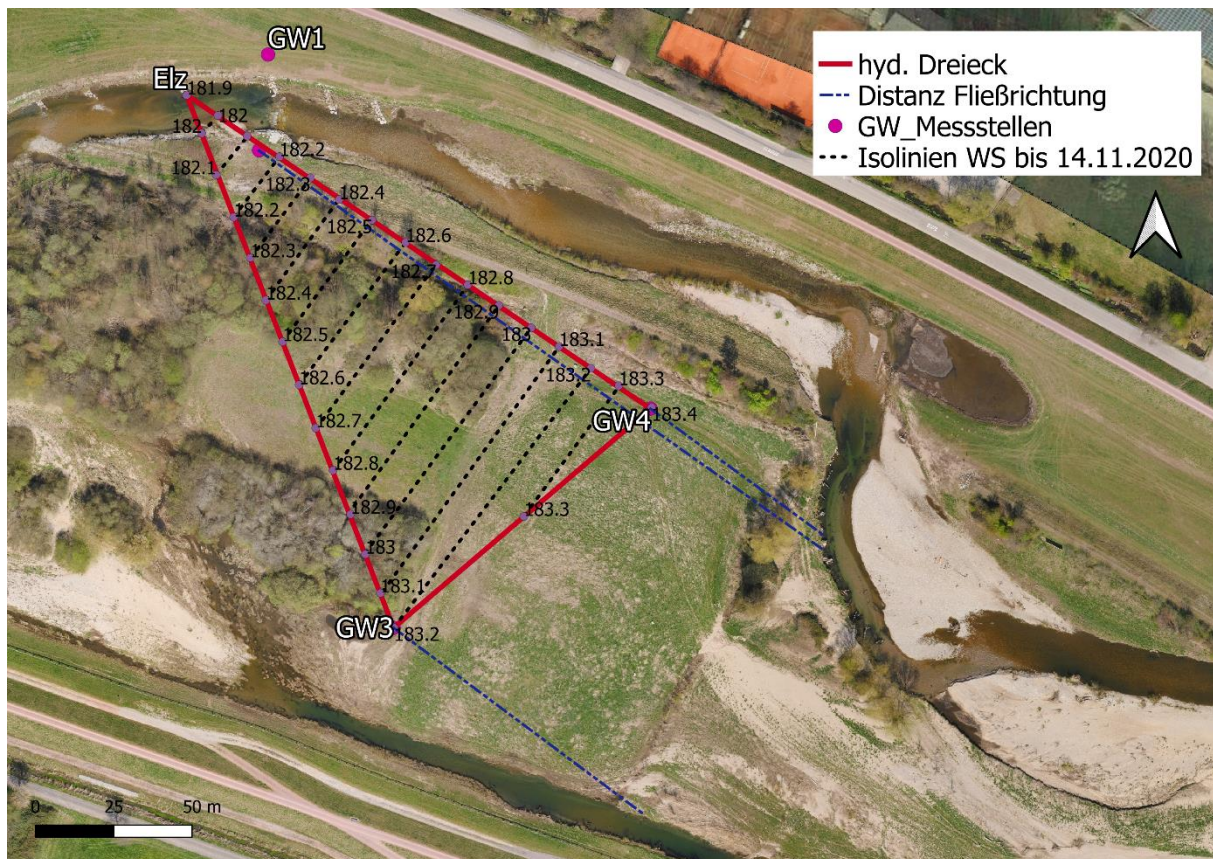


Abbildung 4: Wasserstände der Elz und der GW-Piezometer ü. NN

Um den Einfluss des OW auf die GW-Pegel zu betrachten, wird die Strömungsrichtung, aus der die GW-Pegel beeinflusst werden, mittels des hydrologischen Dreiecks nachvollzogen. Da mindestens drei Höhenangaben nötig sind, um die Richtung des Zuflusses der Piezometer genau bestimmen zu können, kann eine ungefähren GW-Strömungsrichtung durch die Ermittlung des hydrologischen Dreiecks in Karte 5 angenommen werden. Für die GW-Messstelle GW1 kann aufgrund fehlender Messstellen an der rechten Uferseite keine Strömungsrichtung des GWs angegeben werden.

An der direkten Beziehung des Pegelanstiegs der Piezometer als Reaktion auf einen Abflussanstieg ohne große Verzögerung wird deutlich, dass hier das Fließverhalten kein dominanter Prozess sein kann, siehe Abbildung 4. Die simultane, schnelle Reaktion aller Piezometer deutet auf Steuerung durch hydraulische Druckverhältnisse hin. Die Druckübertragung resultiert aus dem weiter flussaufwärts einströmenden Gewässerabschnitt der Elz siehe Karte 5. Der größte Druck wirkt hierbei auf Pegel GW4 ein und breitet sich abnehmend über GW3 zu GW2 bis GW1 über das Untersuchungsgebiet aus. Dieser Druckabfall äußert sich in den unterschiedlich stark steigenden Wasserständen, siehe Abbildung 4.

Die kaum vorhandene Reaktionszeit der Piezometer macht deutlich, dass eine intensive Druckverbindung des GWs und des OWs vorherrscht. Druckgesteuerter exfiltrierender und infiltrierender Wasserfluss aus dem Gerinnebett kann durch geomorphologische Eigenschaften wie die „pool-riffel“ Sequenzen (dt. Rausche-Kolke Abfolge), ein diskontinuierliches Gefälle im Gelände oder Hindernisse im Gerinnebett resultieren (Meinikmann et al. 2014). Gespannte Aquifere können ebenfalls solch schnelle Reaktionen durch Druckdifferenzen verursachen. Hinsichtlich des geologischen Schotterkörpers der Neuenburg-Formation, auf dem sich eine geringe Bodenauflage von Parabraunerden und Lösslehm bildet, kann hier jedoch nicht von einem vollständig gespannten Aquifer ausgegangen werden. Möglich wären kleinere Teilbereiche mit gering gespannten Verhältnissen und diskontinuierliches Gefälle im Gelände. Um das Verhalten des hydraulischen Gradienten eindeutig mit den variierenden Druckverhältnissen abzugleichen, wären Druckfühler in den Piezometer oder der gesättigten Zone nötig (Kalbus et al. 2006).



Karte 5: Skizze des hydrologischen Dreiecks des Untersuchungsgebiets. Grundlage der Karte ist ein hochaufgelöstes Orthofoto der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

Karte 5 zeigt das hydrologische Dreieck, das sich durch die Messstellen Elz- GW3-GW4 aufspannt. Die schwarz gestrichelten Linien stellen die Isolinien des Wasserspiegels dar. Im 90° Winkel dazu steht die Fließrichtung. In Fließrichtung ist die Distanz der Elz und der GW- Messstellen als blaue Strichpunkte dargestellt. Die Distanz GW2 zur Elz beträgt 216,19 m, der Abstand zwischen GW3 und Elz 40,28 m und der Abstand von GW4 zur Elz 62 m. Es zeigt sich, dass GW2 und GW4 Zufluss durch den Hauptstrom der Elz bekommen, GW3 dagegen aus dem Seitenarm.

Da die ermittelten Zuflussstellen der Piezometer durch das hydrologische Dreieck in ihren Höhen nicht bekannt sind und sich flussaufwärts des Untersuchungsgebiets befinden, wird die Annahme getroffen, dass diese höher liegen und auf die Piezometerstellen einen Einfluss haben. Über die genauen Bodenparameter der Zufluss-Bereiche der Piezometer kann keine genaue Angabe gemacht werden, allerdings kann von ähnlichen Bodenparameter wie im Bereich des Abstroms ausgegangen werden.

Um die Reaktionen der GW-Messstellen auf eine Abflussänderung besser beurteilen zu können, werden zwei Peak-Ereignisse (26.09.2020 und 08.10.2020) in Abbildung 5 genauer betrachtet. Dargestellt ist die Differenz des Wasserstandes zu den Mittelwerten der Wasserstände der einzelnen GW-Pegeln und der Elz. Die GW-Pegel reagieren auf einen erhöhten Abfluss der Elz mit einem parallelen Anstiegsmuster der Wasserstände. Mittels Abbildung 5 können Aussagen über die Reaktionszeit und Stärke beider Ereignisse getroffen werden.

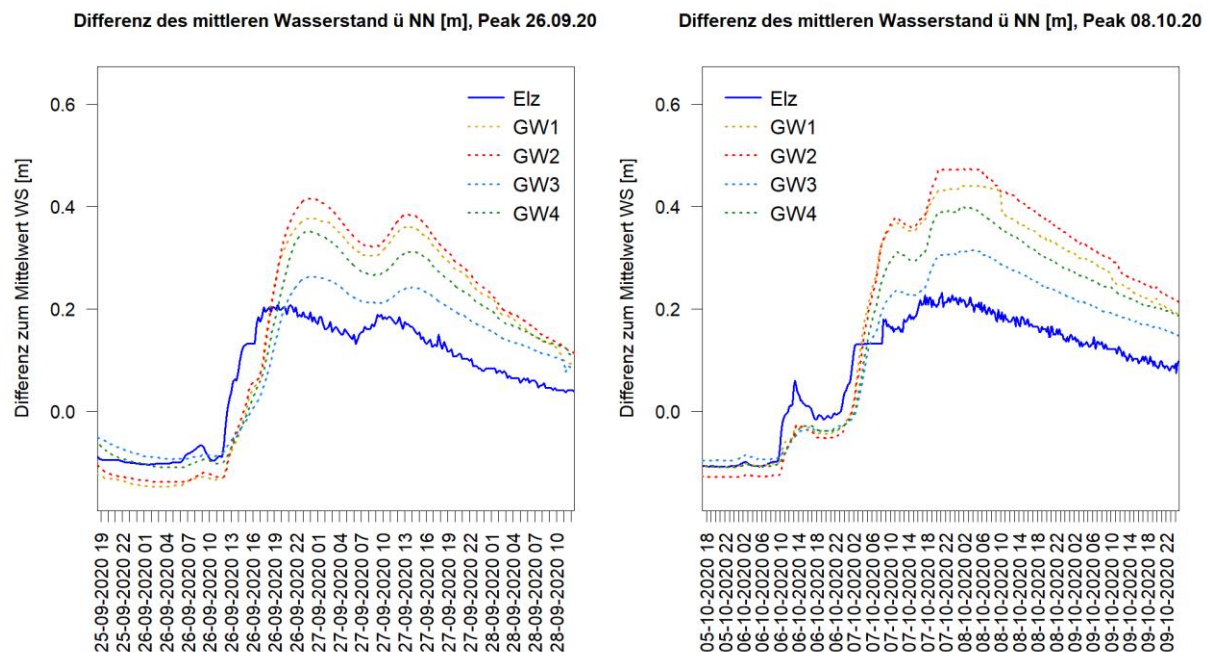


Abbildung 5: Reaktion der GW-Pegel auf Abflussänderung am Peak-Ereignis 26.09.20 und am 08.10.20

Der Pegel GW3 reagiert beim ersten Ereignis (Abbildung 5, links) als erstes mit einem kaum feststellbarem Zeitversatz, jedoch am wenigsten stark. Die schnelle Reaktion ist erklärbar durch die geringe Distanz des Piezometers in Fließrichtung zum Seitenarm und der feuchten Umgebung der Messstelle GW3, in der sich temporär ein Teich und diffuser Zustrom aus dem Seitenarm der Elz bildet, was teilweise zu kürzeren Fließwegen als die in Karte 5 gezeigte GW-Strömung führt.

Kurz darauf reagieren beim ersten Ereignis (Abbildung 5, links) in der Reihenfolge GW4, GW2 und GW1 kaum zeitversetzt. Messstelle GW4 zeigt eine deutlich stärker ausgeprägte Reaktion als GW3 und befindet sich in geringster Distanz zum Hauptstrom der Elz. Die Reaktionsverzögerungen der letzten beiden Pegel GW2 und GW1 liegen beim ersten Ereignis bei maximal 30 Minuten und sind in ihrer Reaktionsstärke sehr ähnlich. Beide Pegel GW2 und GW1 befinden sich im direkten Uferumfeld mit geringer Distanz zur Elz. GW-Messstelle GW2 zeigt die stärkste Reaktion mit einer Differenz von 0,4 m zum Mittelwert des eigenen Wasserstandes.

Beim zweiten Peak-Ereignis am 08.10.20 (Abbildung 5, rechts) ist es schwierig auszumachen welcher der GW-Pegel als erster reagiert hat, allerdings ist die Stärke der Reaktion, die sich durch die Differenzen der Wasserstände zum Mittelwert des Wasserstandes ausdrückt, deutlich differenzierbar. Es zeigt sich die gleiche Reihenfolge wie am Peak-Ereignis vom 26.09.20 mit stärkster Reaktion an GW2, dicht gefolgt von GW1, anschließend GW4 und GW3.

Bei beiden Abflussspitzen in Abbildung 5 wird deutlich, dass die Reaktion der GW-Messstellen stärker ist als die der Elz selbst. Dieses ungewöhnliche Verhalten kann daran liegen, dass der Wasserstand der Elz in Abhängigkeit zum Querschnitt des Gerinnebetts steht, der an der vermuteten Zufluss-Stelle geringer ist als an der Messtelle des Pegels, siehe Karte 5. Eine andere Möglichkeit wäre, dass nicht nur der Abflussanstieg der Elz, sondern weitere Reservoirs zeitgleich auf den Abflussanstieg der Elz reagieren und sich gegenseitig beeinflussen.

4.2 Prozessverständnis Temperatur

Temperaturdaten sind relativ robuste und kostengünstige Parameter, die schnell, einfach und hochaufgelöst im Gelände erhoben werden können, was sie zu sehr attraktiven Tracern der G- O- I Untersuchung macht. Die Temperatur-Tracer Methode beruht auf der Beobachtung, dass GW-Temperaturen ganzjährig stabil sind, wohingegen OW-Temperaturen einen Tagesgang zeigen und saisonalen Schwankungen unterliegen. Die gemessenen Temperaturdaten werden im GW und OW in 15-minütig Intervall erhoben, was zu einer guten Auflösung über den gesamten Messzeitraum führt. So können kleine Veränderungen entdeckt und ein zeitlicher Versatz der Daten mitberücksichtigt werden. Für das Verhalten des Anteils des OW in den Piezometern ist es wichtig zu verstehen, wie die einzelnen Piezometer sich in ihrer Temperatur unterscheiden und über den Messzeitraum variieren. Des Weiteren sind die Temperaturunterschiede des OWs und der GW-Messstelle von Bedeutung, da aus dieser Differenz der anteilige GW-Zustrom zur Elz, entsprechend der Mischungsrechnung mittels Temperatur als Tracer, resultiert.

4.2.1 Temperaturverhältnis aller Piezometer untereinander

Um einen Überblick der Temperatur in den GW-Messstellen im Vergleich zur Elz zu bekommen, wird in Abbildung 6 der Verlauf der Temperaturen in stündlicher Auflösung geplottet. Es zeigt sich, dass die GW-Messstellen GW1 bis GW4 keinen Tagesgang aufweisen, wie das die Elz zeigt. Um eine Aussage über die G-O-I tätigen zu können, ist neben der Bestimmung des Anteils an GW in der Elz entscheidend, wie sich das OW im GW verhält. Da der Einflussbereich des OW flussaufwärts der Piezometer vermutet wird, wie in Kapitel 4.1 erläutert, werden zum Vergleich die Temperaturdaten des Messbereichs MA gewählt.

Betrachtet man den Temperaturgradienten der GW-Messstellen in Abbildung 6, zeigt sich fast über den gesamten Messzeitraum das wärmste Wasser in Piezometer GW1. Lediglich gegen Mitte Oktober weist der Piezometer GW2 minimal höhere GW-Temperaturen auf. Gering kältere Temperaturen mit stärkeren Schwankungen zeigt die Messstelle GW2, dicht gefolgt von der Messstelle GW4. Der Piezometer GW3 zeigt deutlich die geringsten Temperaturen.

Betrachtet man die Dynamik der Temperatur über den Messzeitraum zeigt sich eine wesentliche Abkühlung im OW ab dem 24.09.2020, das GW reagiert auf dieses Ereignis mit geringer Temperaturabnahme am 27.09.20. Hierbei fällt auf, dass die erste Reaktion im Piezometer GW4 zu beobachten ist, dicht gefolgt von GW3. Die Messstelle GW1 und GW2 zeigen keine klare Reaktion, fallen jedoch langsam ab, wobei GW1 stärker reagiert als GW2, siehe Abbildung 6.

Aus der Beobachtung der Temperaturabnahme sowie der Dynamik lässt sich vermuten, dass GW3 und GW4 stärker von infiltrierendem OW beeinflusst sind. GW1 und GW2 reagieren zwar nicht so stark, zeigen jedoch ebenfalls eine Temperaturabnahme. Das führt zur Annahmen, dass hier eine geringere Beeinflussung vorliegt.

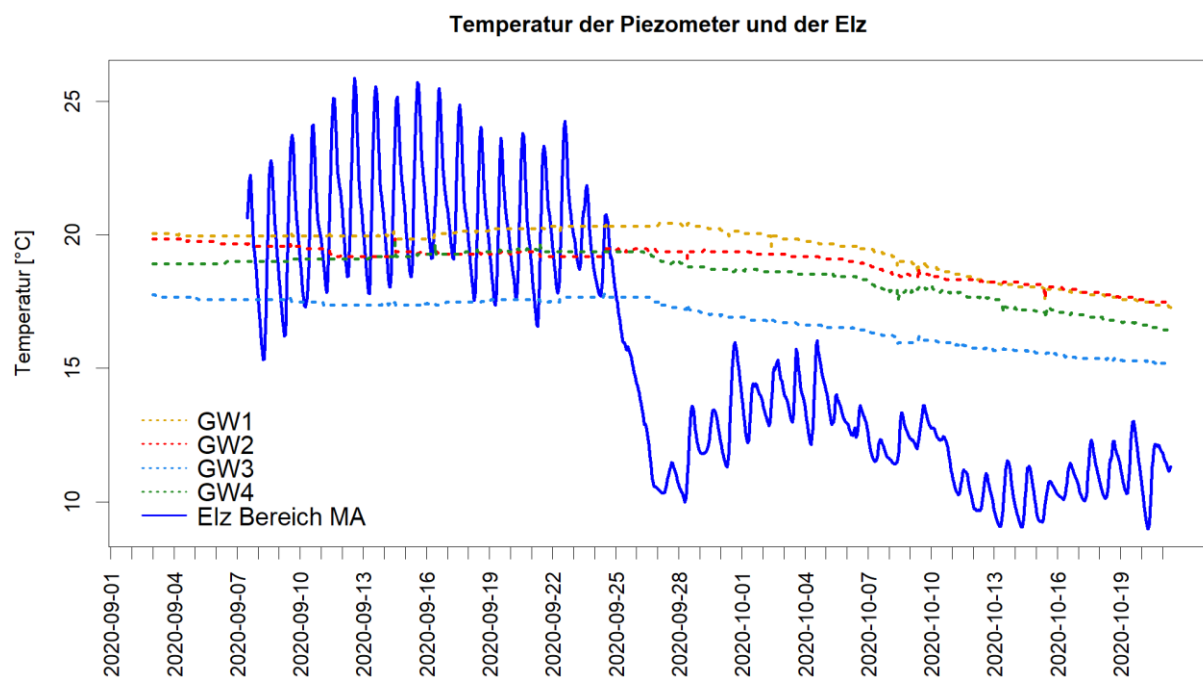


Abbildung 6: Temperaturverlauf der Piezometer und der Elz im Bereich MA

4.2.2 Temperaturverhalten Elz und Grundwasser

Für die Energiebilanz auf dem kleinskaligen Bereich M1-M2 von 82 m, wird mittels der gemessenen Temperaturen eine Mischungsrechnung durchgeführt, um den Anteil des GWs an der Elz zu bestimmen. Die Temperatur dient in der Mischungsrechnung als Tracer, wodurch die Stoffbilanz zum Quantifizieren des Energiegewinns bzw. -verlusts über den Anteil des GWs in der Elz Anwendung findet.

Für eine sinnvolle Berechnung ist ein Prozessverständnis der Temperaturdynamik des GWs und des OWs der Elz notwendig. Um einen Überblick über die Temperaturverteilung zu bekommen, werden mehrere Temperatursonden entlang des Gewässerabschnitts der Elz befestigt. Die gesamte Gewässerstrecke ist in Karte 2 zu sehen, die Aufteilung der Temperatur-Logger in Karte 6 und Karte 7. Für die Bereiche um die Messpunkte MA, M1, M2 und MC werden Temperatur-Logger gruppiert.

Betrachtet wird zuerst der kleinskalige Bereich M1-M2. Hier repräsentieren Temperatur-Logger 9-14 den oberen Standort M1, Hobo 31, 32, 34, 35 den unteren Standort M2. Die Verteilung der Temperatur-Logger ist in Karte 6 visualisiert. Aufgrund fehlerhafter Messwerte kann hier nicht auf Datenlogger 33 zurückgegriffen werden.



Karte 6: Standorte der Temperatur-Logger in der Elz im Messbereich M1-M2. Grundlage der Karte ist ein hochaufgelöstes Orthofoto der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

Um einen Überblick über die Temperaturen über den gesamten Messzeitraum auf dem kleinräumigen Untersuchungsgebiet zu bekommen, wird die Temperaturdifferenz der oberen Messstelle, nahe M1, zur unteren Messstelle, nahe M2, und die Temperaturdifferenz des GWs aus dem Piezometer GW2 zur unteren Messstelle in Abbildung 7 geplottet. Die Wahl des Piezometers GW2 als repräsentatives GW wird basierend auf der räumlichen Nähe getroffen. Aus Abbildung 7 wird deutlich, dass die Differenz der unteren und oberen Messstelle minimal ist. Zu Beginn der Messperiode in den Phasen NW1 und NW2 streut die Temperaturdifferenz geringfügig um Null. Für negative Differenzen bedeutet das, dass die Temperatur im Bereich des Messpunktes M1 leicht wärmer ist als im unteren Messbereich nahe M2, und folglich bei positiven Differenzen M2 höhere Temperaturen als M1 aufweist. Gegen Ende der Messperiode in MW-Phase (ab dem 25.09.2020) zeigen sich kaum Unterschiede beider Messpunkte des OWs. Das GW weist im Vergleich zu den beiden Temperaturgängen in der Elz keinen Tagesgang auf.

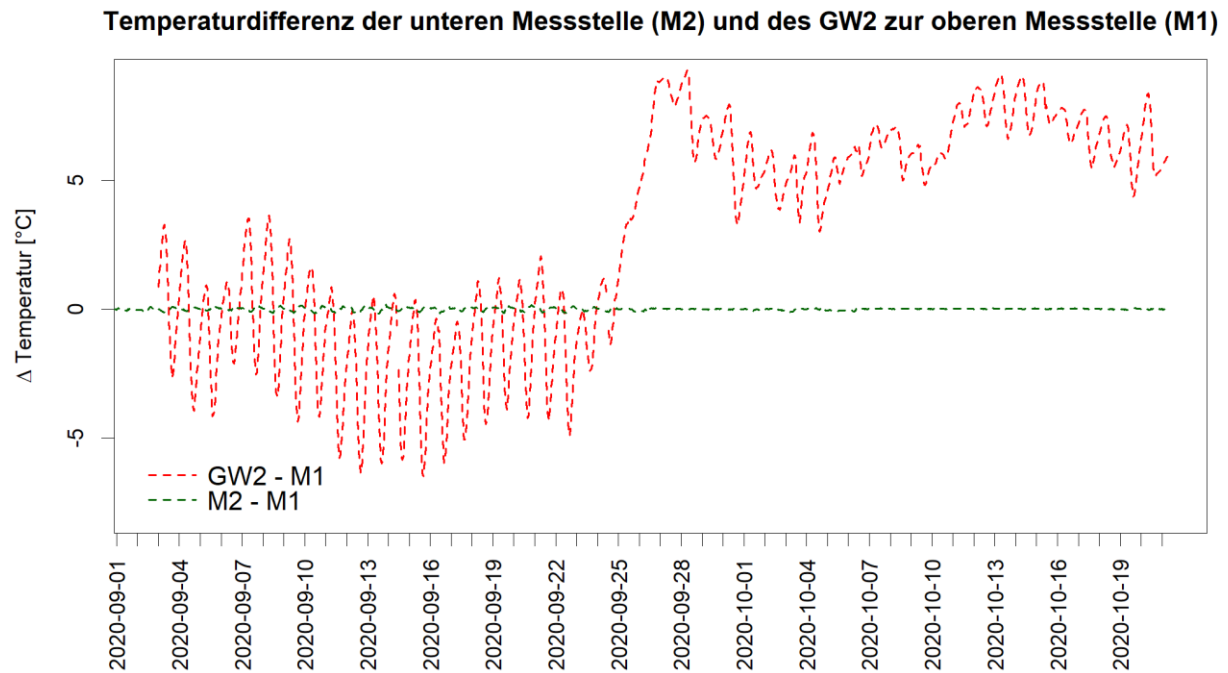


Abbildung 7: Temperaturüberblick über das Oberflächen- und Grundwasser. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz der Messstellen es OW in Grün und die des Oberflächen und GW in Rot in täglicher Auflösung.

Der geringfügige Temperaturunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Standort wird auch in den gruppierten Temperaturwerten je Phase in Tabelle 4 deutlich. Der Unterschied beider Messstellen der Elz zeigt sich hier erst bedingt durch die Auflösung in der dritten Nachkommastelle, wobei die Messgenauigkeit der Hobos bei 0,58°C liegt. Das GW ist in der NW2-Phase kühler als das OW der Elz, in der MW-Phase verhält es sich umgekehrt. Für NW1 zeigt sich eine Tendenz zu leicht wärmerem Wasser im GW, dieser Unterschied liegt jedoch im Bereich der Messungenauigkeit und ist mit Vorsicht zu interpretieren.

Tabelle 4: Temperaturübersicht in Grad Celsius je Phase.

	NW1	NW2	MW
Obere Standort:M1	19,395	20,697	12,231
Unterer Standort:M2	19,359	20,703	12,232
GW2	19,853	19,400	18,648

Die kühlere Temperatur des GWs in der NW2-Phase bestätigt die Messungen im Geländepraktikum und der Voruntersuchung in Kapitel 5.1. Die größeren Temperaturdifferenzen der Messpunkte unterhalb und oberhalb des Untersuchungsgebiets, während der NW2-Phase könnten durch Strahlungseinfluss und zuströmende kühlere GW-Temperaturen bedingt sein.

Um einen Überblick über den Einfluss der Strahlung auf der geringen Distanz des Messbereich M1-M2 zu bekommen, wird in Abbildung 8 die Strahlungsintensität mit den Temperaturdifferenzen der Messstellen in der Elz dargestellt. Hier zeigt sich deutlich, dass es zu größeren Temperaturschwankungen in beiden Messbereichen bei höherer Strahlungsintensität kommt.

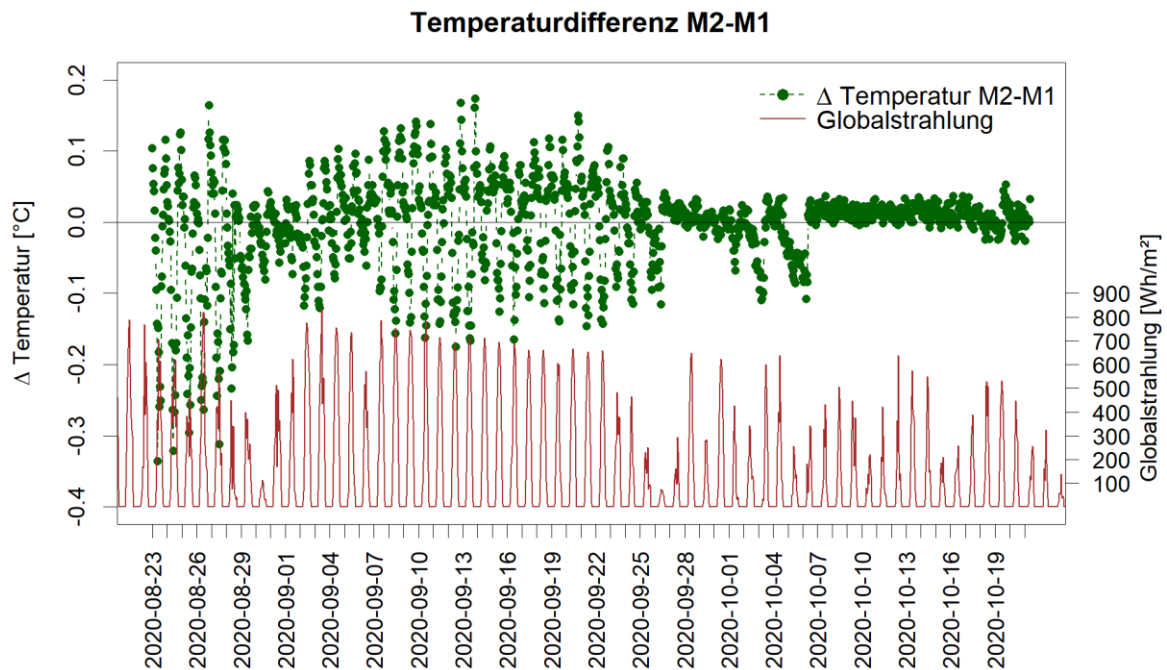


Abbildung 8: Temperaturdifferenz M2 M1 und Strahlungseinfluss. Die Messdifferenzen der oberen und unteren Messstelle der Elz M2 und M1 sind in stündlicher Auflösung dargestellt. Die Strahlungsintensität in stündlicher Auflösung wird der naheliegenden Wetterstation Malterdingen entnommen (AGRIMET).

Für ein ganzheitliches Verständnis der Temperatur-Dynamik des OWs entlang des untersuchten Gewässerabschnitts der Elz ist es sinnvoll, neben dem kleinskaligen Bereich M1-M2 auch das Verhalten der Temperaturen der großen Skala von MA-MC zu betrachten. Hier werden wie bereits für den kleinen Bereich der Elz, die Temperatursensoren gruppiert, um ein stabileres Messergebnis zu erhalten. Wie in Karte 7 dargestellt befinden sich die Temperatur-Logger 1-5 am Standort MA und die Temperatur-Logger 36-40 am Standort MC.



Karte 7: Standorte der Temperatur-Logger in der Elz am Messpunkt MA und MC

Die Differenz der Mittelwerte jedes Standortes zur Messung im Bereich M2 ist in Abbildung 9 in der stündlichen Auflösung zu sehen. Für den Standort MA werden die Temperatursensoren 1-4 verwendet, da Logger 5 im Gelände nicht mehr auffindbar war. Repräsentativ für den Standort MC sind die Temperatursonden 36-40.

Aus Abbildung 9 lässt sich erkennen, dass die Temperaturdifferenz zum Messbereich M2 am größten im Bereich MA ist, gefolgt von MC und M1. Aus den negativen Differenzen von MA zu M2 zeigt sich, dass MA kühlere Temperaturen misst als Standort M2. Die Differenz aus MC und M2 hingegen zeigt mehr positive Temperaturdifferenzen, was daran liegt, dass die gemessenen Temperaturen im Bereich MC wärmer sind. Dadurch ergibt sich ein Temperaturmuster beginnend mit der kältesten Temperatur am Standort MA, gefolgt von den Messstellen flussabwärts M1, M2 und MC. Des Weiteren zeigen sich größere Unterschiede der Standorte bei höherer Strahlungsintensität, wie bereits im kleinskaligen Bereich festgestellt.

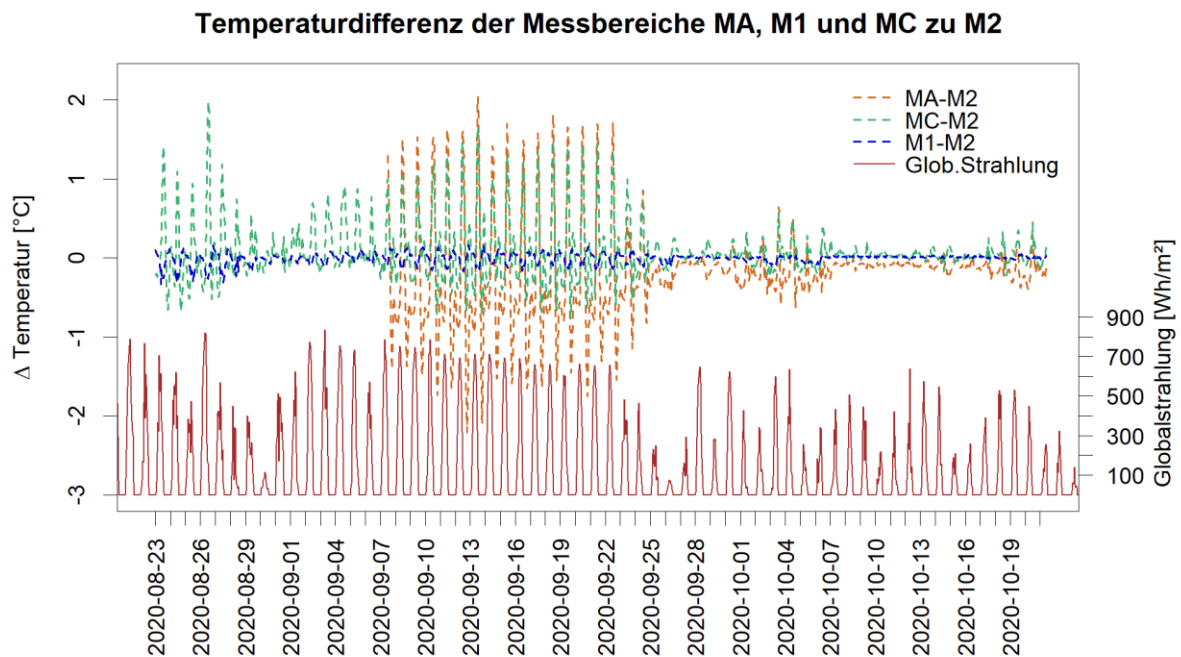


Abbildung 9: Temperaturdifferenz und Strahlungseinfluss des gesamten Gewässerabschnitts. Die Messdifferenzen sind in stündlicher Auflösung dargestellt. Die Strahlungsintensität in stündlicher Auflösung wird der naheliegenden Wetterstation Malterdingen entnommen (AGRIMET).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die GW-Temperatur während der NW-Phase kälter ist als das OW und dass der Strahlungseinfluss bereits auf der geringen Distanz von 82 m sichtbar und bei größerer Distanz deutlicher wird. Es wird deutlich, dass die gemessene Temperatur der Elz entlang des Gewässerabschnittes flussabwärts an Temperatur gewinnt. Weitere Faktoren, die die Temperaturmessung der Sonden beeinflussen, sind die Einbautiefe der Sonden und das Fließverhalten am Standort des Temperatur-Loggers.

4.3 Prozessverständnis Tracer

Für die Berechnung der G-O-I ist die Konzentration bzw. das Verhältnis der Tracer zum Messzeitpunkt ausschlaggebend. Für die Quantifizierungsmethode der Mischungsrechnung ist das Verhalten der Tracer entscheidend, um realistische Aussagen treffen zu können. Prozesse, die die Mischungsrechnung negativ beeinflussen, sind der zeitliche Versatz der Messwerte im GW zum OW und die angenommene Druckdynamik des Aquifers.

Der Tracer der Ionen unterliegt vor allem dem Verdünnungs- und dem Auswaschungsprozess. Die Temperaturdaten weisen einen Tagesgang auf, der hauptsächlich auf die Einstrahlung zurückzuführen ist. Die Isotope unterliegen natürlichen Fraktionierungsprozessen, die in Dansgaard (1964) und Lehner et al. (2019) als Kontinentaleffekt, Höheneffekt, Saisonalitätseffekt und Breiteneffekt beschrieben werden. Auf der Skala des Untersuchungsgebiets spielt hauptsächlich der Prozess der Kondensation eine Rolle, bei der „schwere“ Wasserisotope bei der Bindung von Wasser bevorzugt werden, was zu einer isotopisch „leichteren“ Wolkenbildung und „schwererem“ OW führt.

Mittels der Tracer kann ein Prozessverständnis über die Fließgeschwindigkeit des GWs gewonnen werden, welche in einer Fließgeschwindigkeit von $1,7 \cdot 10^{-2}$ m/s für die Messstelle GW2 und der modifizierten Messstelle GW2* in Fließgeschwindigkeit von $2,78 \cdot 10^{-3}$ m/s resultieren. Für die unkorrigierte Fließgeschwindigkeit GW2 bedeutet das eine Dauer von 11 Minuten 48 Sekunden, bis das GW in der Elz ankommt. Die realitätsnähere, korrigierte Fließgeschwindigkeit ergibt für GW2* eine Dauer von 1 Stunde 12 Minuten. Die Intensität des Austausches des GWs zur Elz ist aufgrund der geringen Distanz zur Messstelle GW2 am höchsten.

Neben der Abschätzung der Fließgeschwindigkeit im Aquifer spielt die Dynamik der Druckübertragung, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, eine große Rolle. Der hydraulische Druck breitet sich von GW4 über GW3 zu GW2 und GW1 aus, siehe Abbildung 4. Wie in Kapitel 5.3 gezeigt, wird eher von einer druckgesteuerten Reaktion auf die Wasserstände in den GW-Messstellen ausgegangen als von einer Fließbewegung. Die Betrachtung der Peak-Ereignisse am 26.09.2020 und am 08.10.2020 in Abbildung 5 ergibt eine Reaktionsverzögerung von maximal 30 Minuten für den Piezometer GW2.

Die Zeitverzögerung des GWs entspricht demnach der genannten 1 Stunde 12 Minuten, die allerdings aufgrund der Auflösung der Datenerhebung der Wasserproben nicht auf dieser Skala berücksichtigt werden kann. Hier liegen ca. zwei Messwerte pro Woche vor, siehe Abbildung 12 oder Abbildung 16. Wäre diese Zeitverzögerung vor der Beprobung abschätzbar gewesen, hätte man die Wasserproben circa eine Stunde vor der OW-Beprobung durchführen können.

Da die genannten Prozesse und der damit einhergehende Zeitversatz nicht über einen Ausgleich der Daten möglich sind, besteht die Möglichkeit, die G-O-I nur für ein Ereignis, in dem das System im Gleichgewicht ist, zu betrachten. Das heißt, dass nur Zeitabschnitte der Datenerhebung in Frage kommen, in denen es keine große Änderung der Konzentration bzw. des Isotopenverhältnisses im GW gibt. So kann am besten garantiert werden, dass die Mischungsrechnung nicht mit den Tracer-Werten im GW berechnet wird, die für die Konzentration bzw. das Verhältnis des OWs zu diesem Zeitpunkt nicht relevant sind. Diese geringen Zeiträume müssten den GW-Zustrom zur Elz am sinnvollsten widerspiegeln.

5. Ergebnisse

5.1 Voruntersuchung

Die Ergebnisse der Voruntersuchung der Ionenanalyse der vier Standorte zeigen, dass die als Zufluss gekennzeichneten Standorte Z1 und Z2 deutliche Konzentrationsunterschiede bezüglich des Chlorids, Nitrats, Sulfats, Calciums und Natriums im Vergleich zu den Messpunkten der Elz M1 und M2 aufweisen. Magnesium kann in den Proben der Voruntersuchung nicht nachgewiesen werden.

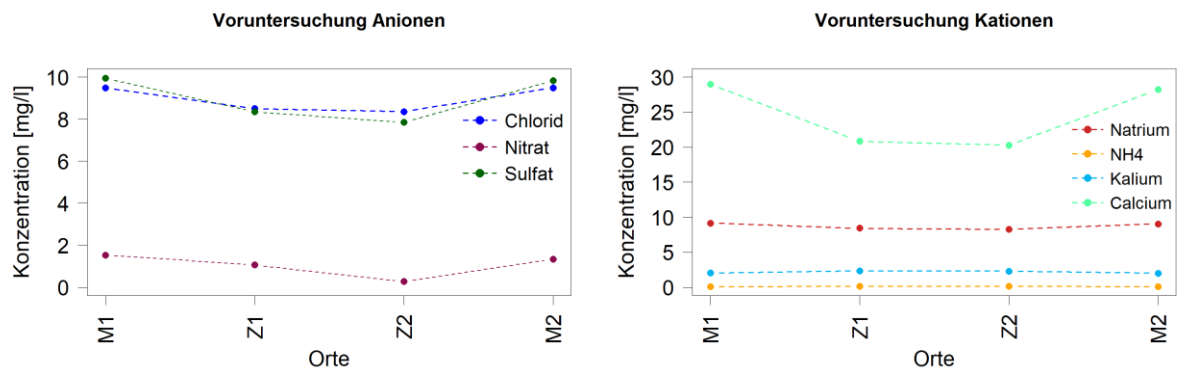


Abbildung 10: Ionen-Konzentrationen der Voruntersuchung. Die Messstandorte werden der Reihe nach flussabwärts genannt, wobei Z1 und Z2 die Standorte des vermuteten GW-Zufluss und M1 und M2 die Messstellen mittig des Gerinnebetts der Elz darstellen.

Das Ergebnis der Voruntersuchung der Isotopenanalyse ergibt für das $\delta^{18}\text{O}$ und das $\delta^2\text{H}$ erhöhte Werte am Zuflussort Z1.

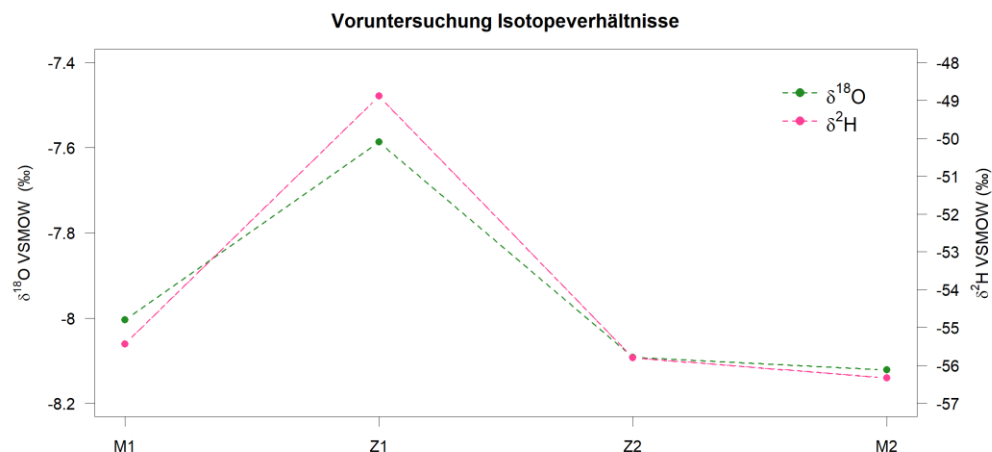
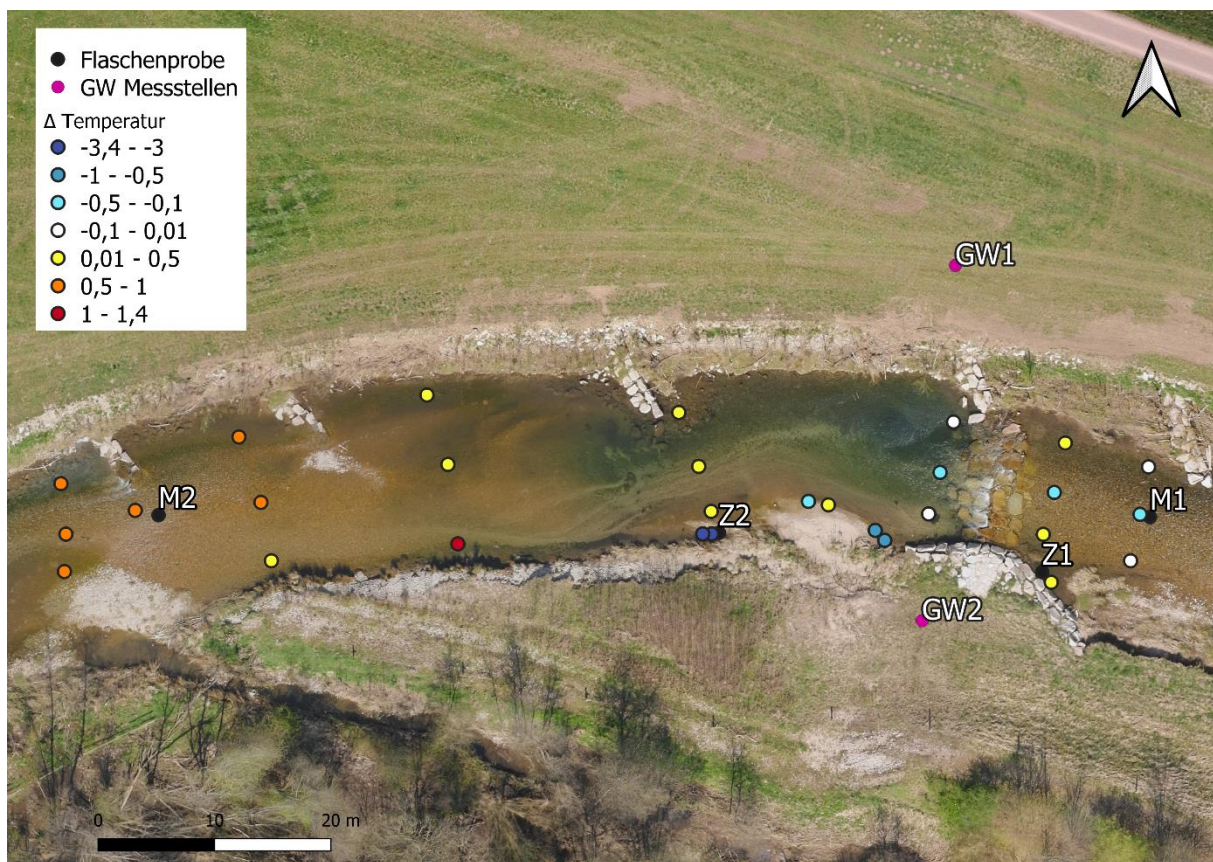


Abbildung 11: Voruntersuchung Isotope. Die Messstandorte werden der Reihe nach flussabwärts genannt, wobei Z1 und Z2 die Standorte des vermuteten GW-Zufluss und M1 und M2 die Messstellen mittig des Gerinnebetts der Elz darstellen.

Bei den Ergebnissen der Voruntersuchung im Labor wird deutlich, dass die Standorte des Zuflusses sich in den Konzentrationen und Verhältnismessungen von den der Messstellen der Elz unterscheiden.

Es bestätigte sich, dass vor allem an der vermutlichen Austrittsstelle des GWs der Messstelle Z2 kältere Temperaturen gemessen werden als im restlichen Gerinnebett der Elz. In Karte 8 sind die Abweichungen der einzelnen Messungen zu den Mittelwerten des Standortes M1-M2 dargestellt. Da der Standort MA nach der Voruntersuchung einmal versetzt wird, gibt es keine Voruntersuchung an dem aktuell definierten Standort MA. Die Standortanalyse MC ist weniger ausschlaggebend und befindet sich graphisch dargestellt im Anhang A1.1.



Karte 8: Voruntersuchung der Temperatur im Bereich M1-M2. Grundlage der Karte ist ein hochauflöstes Orthofoto der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

Dargestellt sind die Abweichungen der einzelnen Messungen zu den Mittelwerten des Standortes M1-M2. Die Messungen finden zeitlich gesehen in Fließrichtung von M1 zu M2 statt mit einem maximalen Zeitversatz von 1 Stunde 8 Minuten.

5.2 Datenauswertung

5.2.1 Ionen

Die Analyse des Ionenchromatographen ergibt für die Anionen Bromid und Nitrit und für das Kation NH_4 sehr geringe bis keine messbaren Konzentrationen. Im Folgenden werden deshalb nur die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat sowie die Kationen Calcium, Natrium, Magnesium und Kalium betrachtet. Die Beprobung der OW-Messpunkte beginnt am 11.08.2020, die des GWs am 28.08.2020, beide enden am 30.10.2020.

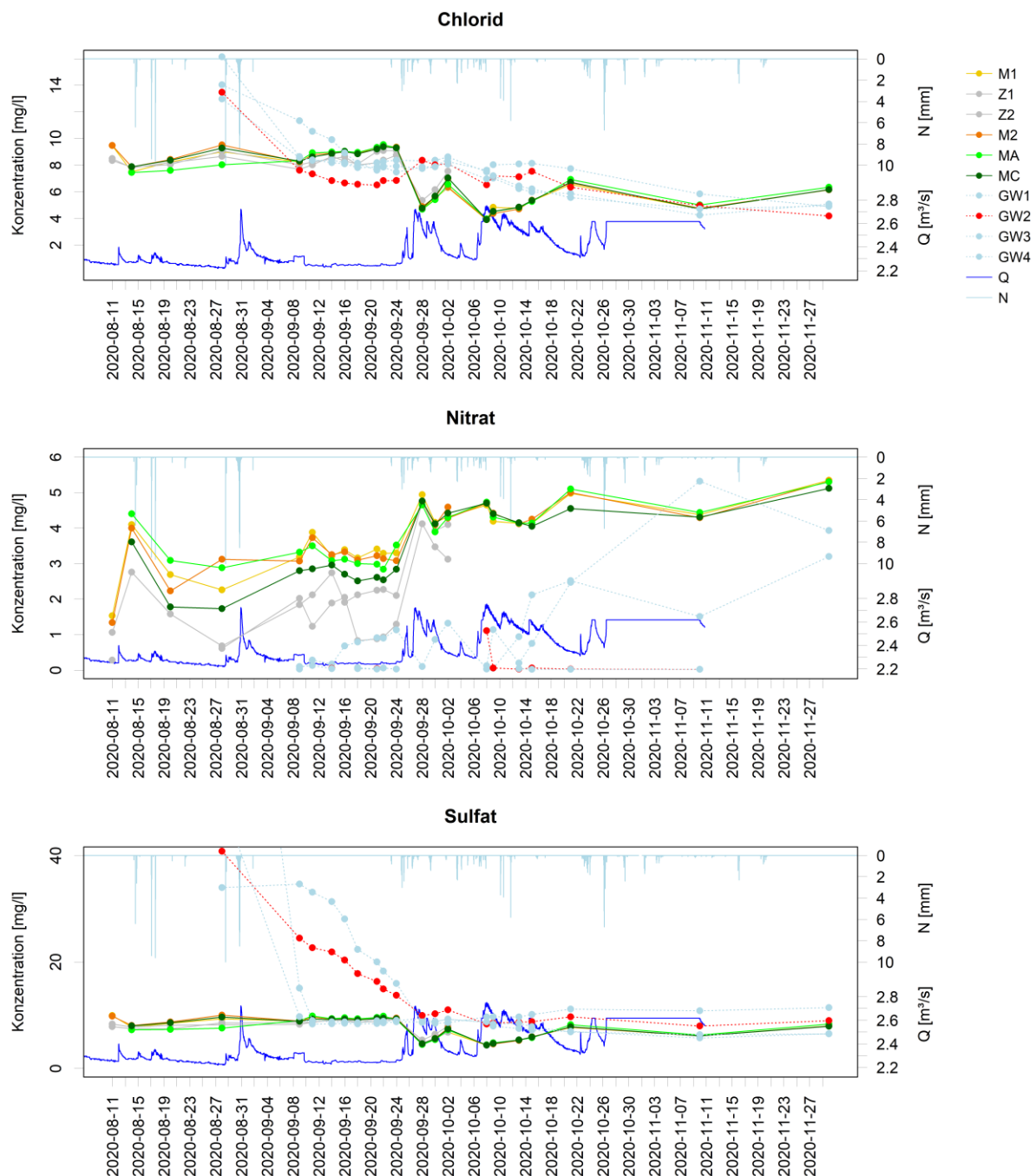


Abbildung 12: Rohdaten Anionen, des GWs und des OWs.

In Abbildung 12 dient das GW2 als Referenz für das GW in der Mischungsrechnung und Energiebilanz und ist rot dargestellt- Die drei weiteren GW-Messstellen GW1, GW3, GW4 sind einfarbig hellblau dargestellt. Die Zufluss-Messstellen Z1 und Z2 werden zu Beginn mitgemessen, sind für die weitere Methodenanwendung jedoch irrelevant und ist grau gekennzeichnet. Zusätzlich werden der Abfluss und die Niederschlagsdaten hinzugeplottet.

Die Konzentrationen der Anionen der Elz-Messstellen (M1, M2, MA, MC) zeigen ein weitgehend uniformes Verhalten innerhalb der einzelnen Anionen. Lediglich in der NW-Phase tritt eine geringe Streuung auf. Die GW-Messungen am ersten Messtag zeigen eine deutlich erhöhte Konzentration.

Wie in Abbildung 12 folgt das Chlorid in den OW-Messpunkten dem Muster einer abnehmenden Konzentration bei Abflussanstieg und zunehmender Konzentration in den Retentionsphasen mit maximaler Konzentration in der NW-Phase. Es zeigt sich jedoch keine Reaktion auf den N und Abflussanstieg am 31.08.2020. Die Chlorid-Konzentration der GW2 liegt in der NW-Phase unter der Konzentration der Elz, ab dem zweiten Peak-Ereignis steigt die Konzentration über die der Elz an und fällt erst am Ende unter die Konzentration der Elz.

Eine Parallele des Verhaltens der Nitrat-Konzentration und des Anstiegs- und Retentionsverhalten des Abflusses wird im OWs deutlich. Die Nitratwerte des GWs liegen unter der Messgenauigkeit von 1 mg/l, siehe Abbildung 12.

Abbildung 12 verdeutlicht, dass die Sulfat-Konzentration der Messstellen der Elz ein ähnliches Muster wie das Chlorid zeigen. Konzentrationsabnahme bei steigendem Abfluss und N. Wie auch das Chlorid reagiert das Sulfat nicht deutlich auf den ersten Peak und das Regenereignis am 31.08.2020. Die Messtelle GW2 zeigt ungewöhnlich hohe Messwerte und einen starken und kontinuierlichen Abfall der Konzentration von 40 mg/l bis auf das Elz-Niveau von 10 mg/l. Interessant ist der Konzentrationsabfall des Sulfats bei Abflusszunahme beim dritten Peak-Ereignis. Für die Berechnung der Mischungsrechnung werden die Messwerte des Sulfats erst ab dem 29.09.2020 in Betracht gezogen.

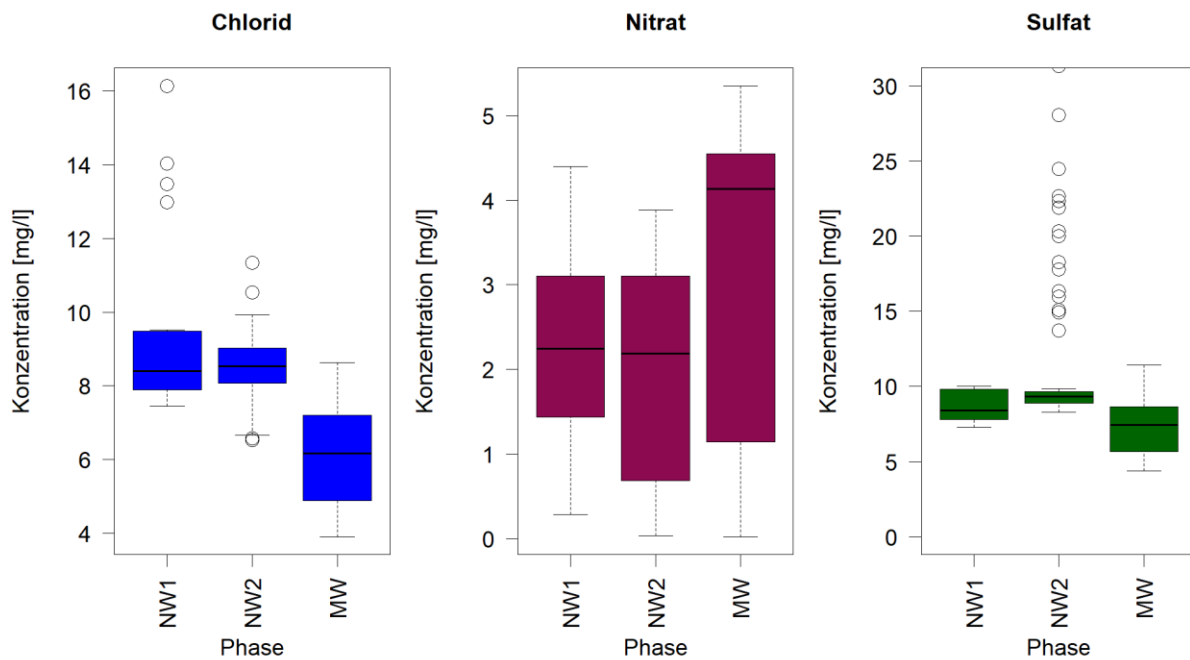


Abbildung 13: Boxplots der Anionen je nach Phase. Dargestellt in Blau die Konzentration des Chlorids [mg/l], in Dunkelrot die Konzentration des Nitrats [mg/l] und in Grün die Konzentration des Sulfats [mg/l]

Die Phaseneinteilung zeigt, dass der Median der Chlorid-Konzentration über den zeitlichen Verlauf abnimmt, der Median der Nitrat-Konzentration zunimmt und die des Sulfats bedingt durch Ausreiser eine sehr geringfügige Zunahme in NW2 und eine starke Abnahme im MW verzeichnet. Der zuvor beschriebene Trend wird hier phasenbezogen deutlich. Zudem liegt ein hoher Interquartilsabstand des Nitrats vor, der auf eine breite Streuung der Messwerte hindeutet. Extremwerte werden nur in den NW-Phasen gemessen.

Betrachtet man das Verhaltensmuster der Kationen der OW-Messstellen in Abbildung 14 zeigt sich ein größtenteils uniformes Verhalten, welches in der NW-Phase zu Streuungen neigt. Vor allem die Messstelle MA neigt zur Abweichung.

Das Calcium der OW-Messstellen zeigt eine Konzentrationsabnahme während starker Niederschläge und Abflussanstieg, in der Retentionsphase steigt die Konzentration wieder und ist in der NW-Phase relativ stabil. Auffällig ist die recht hohe Konzentration von 20 bis 30 mg/l des Calciums im Vergleich zu Magnesium von 2-4 mg/l. Beide treten in natürlichen Gewässern als ständige Begleiter, häufig im Verhältnis 4-5:1 (Ca : Mg), auf (Dittmar 2011). Das GW zeigt hingegen ein kontinuierlich leicht abnehmendes Muster der Konzentration über den Messzeitraum und keine Reaktion auf N und Abflussereignisse.

Das Natrium zeigt in den OW-Messstellen eine Konzentrationsabnahme bei N und Abflusszunahme. Mit der Retentionsphase steigt die Konzentration an, maximale Natrium-Konzentrationen treten in der NW-Phase auf. Die Konzentration des Natriums im GW weist eine kontinuierlich starke Abnahme in der NW-Phase auf. Auffallend ist, dass das Natrium auf den Anstieg des Abflusses am zweiten und dritten Abflussanstieg mit einer Konzentrationsabnahme ähnlich dem Elzwasser reagiert.

Die Konzentrationen des Magnesiums der OW-Messpunkte und des GWs unterscheiden sich mengenmäßig nicht. Das OW zeigt, dass die Messstelle MA zu extremen Konzentrationen innerhalb des Messmusters neigt, die vor allem in der NW-Phase deutlich werden. Hier ist wieder das Muster einer Konzentrationsabnahme bei Abflusszunahme zu beobachten. Das GW zeigt eine konstante Konzentrationsabnahme ohne Beeinflussung durch den N und Abfluss.

Das Kalium an den OW-Messstellen hat eine geringere Konzentration als im GW. Sowohl die Messstellen der Elz wie auch das GW2 reagieren auf die Peaks des Abflusses mit einer Konzentrationsabnahme des Kaliums. Die Kalium-Konzentration im GW nehmen kontinuierlich über den Messzeitraum ab.

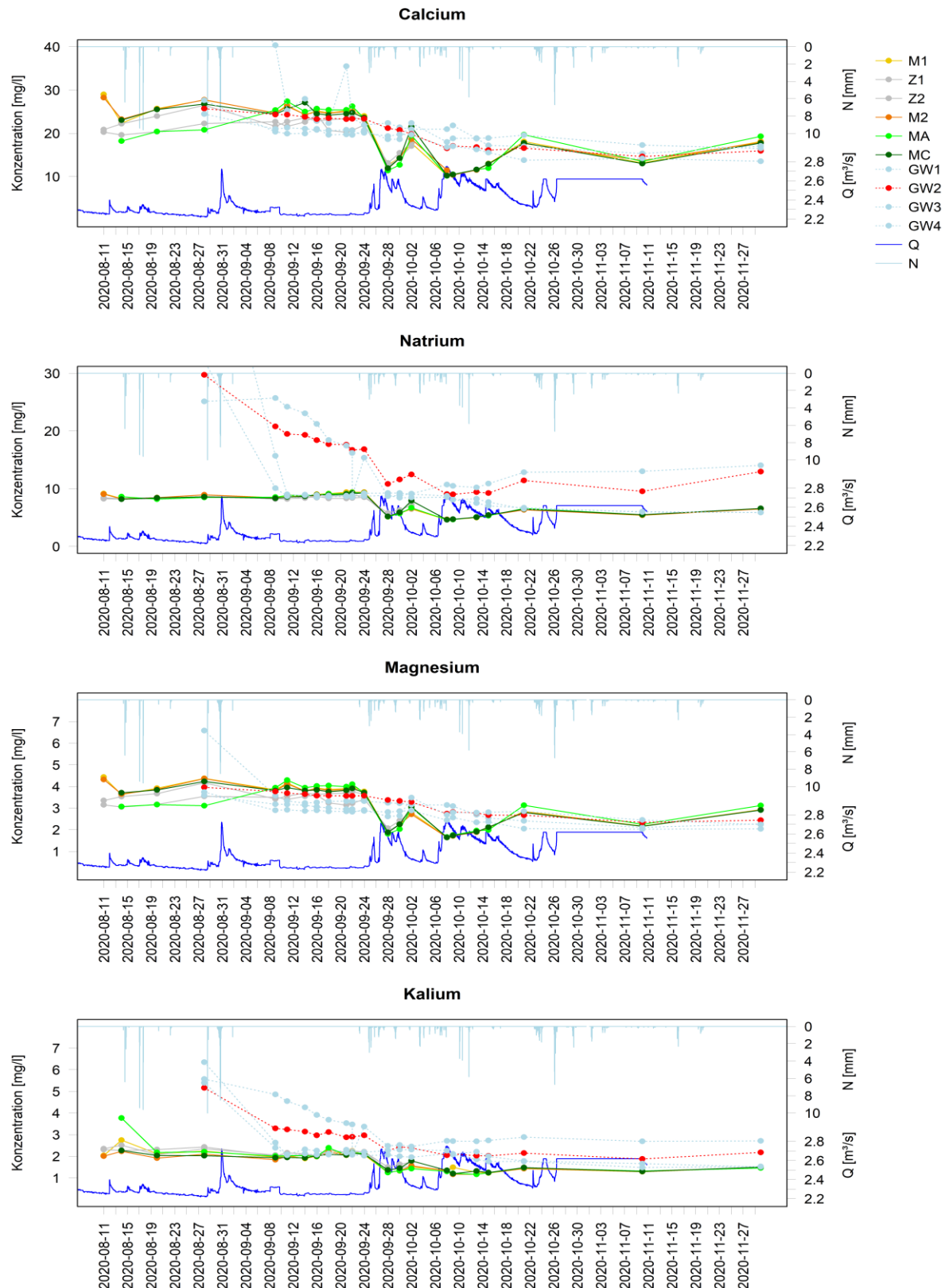


Abbildung 14: Rohdaten der Kationen, des GWs und OWs.

In Abbildung 14 dient GW2 als Referenz für das GW in der Mischungsrechnung und Energiebilanz und ist rot dargestellt. Die drei weiteren GW-Messstellen GW1, GW3, GW4 sind einfarbig hellblau dargestellt. Die Zufluss-Messstellen Z1 und Z2 werden zu Beginn mitgemessen, sind für die weitere Methodenanwendung jedoch irrelevant und ist grau gekennzeichnet. Zusätzlich werden der Abfluss und die Niederschlagsdaten hinzugeplottet.

Die Boxplots aller Kationen zeigen auf den ersten Blick eine Konzentrationsabnahme des NW hin zum MW, wobei die Unterschiede der NW-Phasen sehr gering sind. Den größten Interquartilsabstand und die damit einhergehende Streuung zeigt die MW-Phase. Im Gegensatz dazu streuen die Ionen, besonders Natrium und Kalium, in den NW1-Phase kaum. Calcium, Kalium und Natrium zeigen, wie das Anion Sulfat, die meisten extremen Messwerte in der NW2.

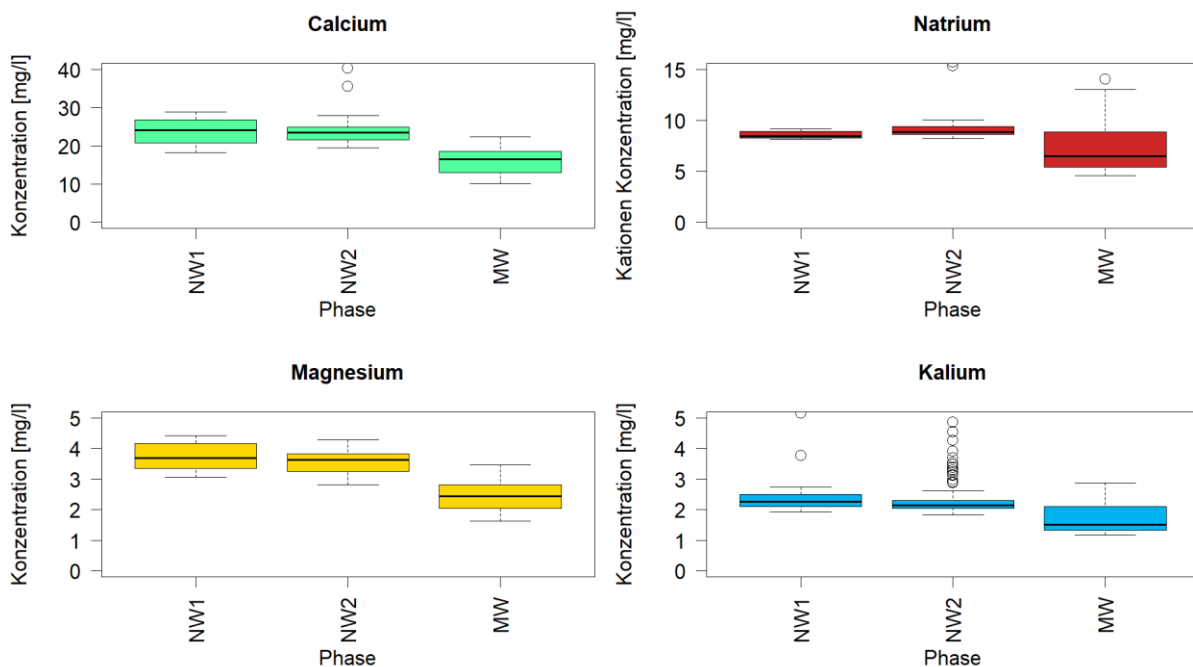


Abbildung 15: Boxplots der Kationen je nach Phase. Dargestellt in Türkis ist die Konzentration des Calciums [mg/l], in Rot die Konzentration des Natriums [mg/l], in Gelb die Konzentration des Magnesiums [mg/l] und in Hellblau die Konzentration des Kaliums

5.2.2 Isotope

Der Probenzeitraum der Ionenmessung und Isotopenmessung sind identisch.

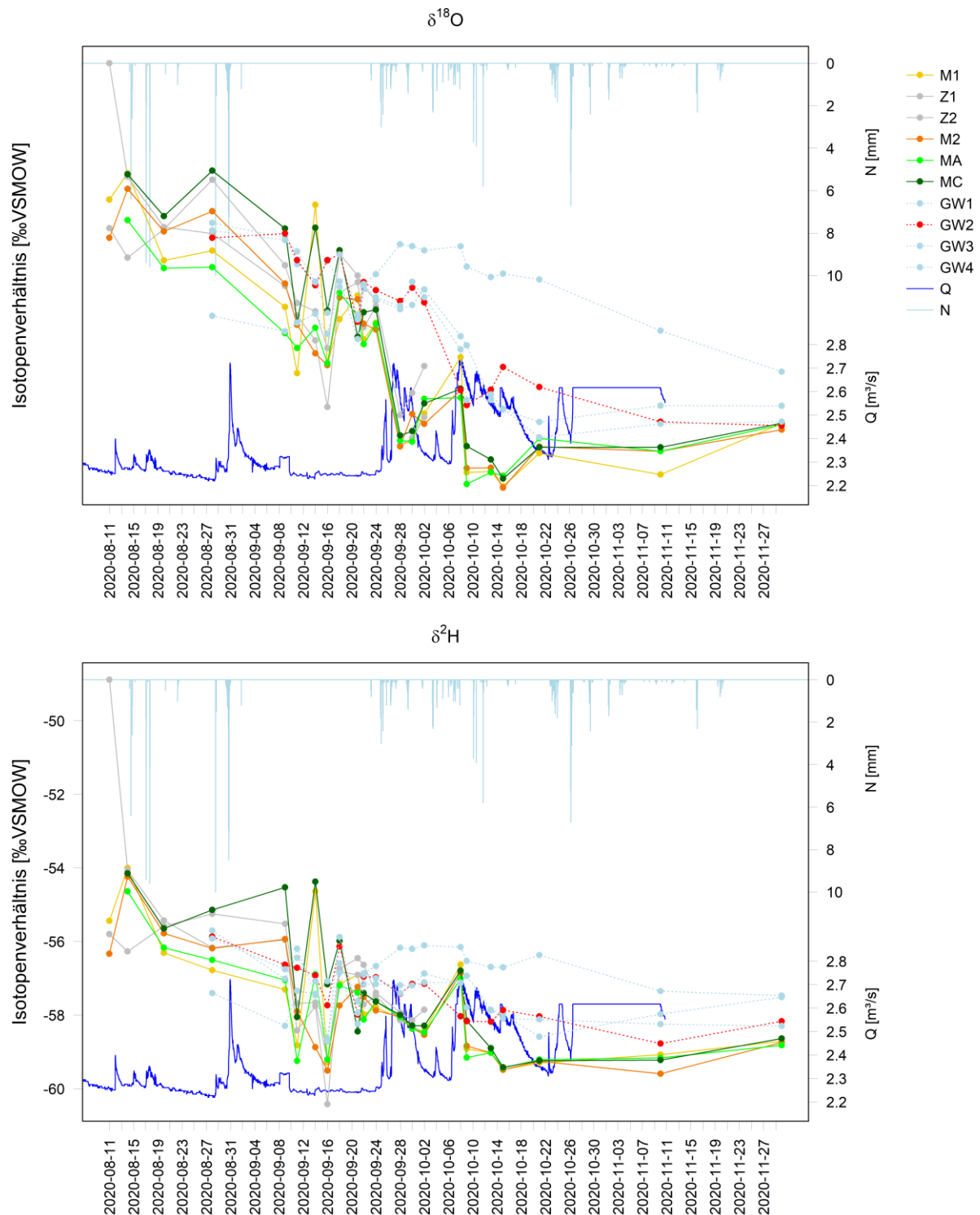


Abbildung 16: Isotopenverhältnis des Grund- und Oberflächenwassers. Die tägliche Auflösung der Daten zeigt die Dynamik der Isotopenverhältnisse [‰ VSMOW] $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ in Relation zur Zeit, zum Abfluss der Elz und zum Niederschlag.

Die Änderung des Isotopenverhältnisses $\delta^{18}\text{O}$ und des $\delta^2\text{H}$ im zeitlichen Verlauf zeigt eine Gruppierung in drei Cluster, entsprechend der Phasengruppierung siehe Abbildung 16 und deutlich Abbildung A19 im Anhang. In der Phase NW1, bis 31.09.2020, sind die geringsten Isotopenverhältnisse zu sehen, bei NW2, ab 04.09.20, ist eine Zunahme des Verhältnisses bei streuenden Messwerten zu sehen. Die MW-Phase, ab 25.09.2020, zeigt die geringsten Isotopenverhältnisse. Die Zunahme der Isotopenverhältnisse über den Messzeitraum bedeutet, dass das Wasser „leichter“ wird bzw. weniger angereichert an „schweren“ Isotopen ist. Die Messpunkte MC und M1 scheinen in den NW-Phasen v.a. der NW2 mehr isotopenangereichertes Wasser geführt zu haben. Deutlich wird das Verhalten von zunehmendem Isotopenverhältnis bei Abflussanstieg und ein abnehmendes Verhältnis in der Retentionsphase.

Die Messwert des Piezometers GW2 zeigen das beschriebene Zunahmemuster in schwächerer Ausprägung als das OW. Das GW verliert über die Zeit an „schweren“ Isotopen. Eine Reaktion der Verhältniszunahme auf hohen Abfluss ist vor allem beim dritten Peak-Ereignis zu beobachten.

In Abbildung 17 sind die Isotopenwerte $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ der einzelnen Messstellen des OWs und des GWs in Relation zueinander geplottet. Die Isotopenwerte des N sind in Form einer LMWL, Gleichung (3), visualisiert. Die Niederschlagswerte stammen aus der kontinuierlichen Niederschlags-Signaturmessung der Hydrologie auf dem Dach des Fahnenbergplatzes.

Die Isotopenwerte der NW1-Phase variieren zwischen -8,4 und -7,6 für $\delta^{18}\text{O}$, für Deuterium liegen die Werte zwischen -57,4 und -48,9. Der Deuterium-Exzess (d) liegt zwischen 8,1 und 11,8.

In der NW2-Phase bewegen sich die Messwerte des $\delta^{18}\text{O}$ zwischen -8,6 und -8,0, für $\delta^2\text{H}$ liegen sie zwischen -60,4 und -54,4. Der d beträgt 7,8 bis 10,4.

In der MW-Phase streuen die Werte des $\delta^{18}\text{O}$ zwischen -8,9 und -8,1 und des Deuteriums von -59,6 bis -56,1. Der d bewegt sich zwischen 8,9 und 12,0.

Daraus resultiert das Muster eines von rechts nach links wandernden Clusters. Das beprobte Wasser ist abnehmend an Isotopen angereichert und wird „leichter“, siehe Abbildung 17 und Boxplots der Phasen Abbildung A19 im Anhang.

Auffällig ist, dass die Wertegruppen in den NW-Phasen fast ausschließlich unterhalb der LMWL liegen. Die Gerade der Messpunkte zeigt für die NW1 eine geringfügig kleine Steigung von 6,972 und für das NW2 eine geringfügig größere Steigung mit 8,209 gegenüber der Steigung der LMWL mit 7,861. Die beiden Gruppen-Cluster der NW-Phasen zeigen mehr Isotopen angereichertes Oberflächen- und Grundwasser als der N. Bei den beiden NW-Situationen liegen alle Werte im identisch engen Wertebereich, der N variiert ereignisbasiert, siehe Anhang A2.5.

Die Wertegruppe des MW zeigt eine Gruppierung der OW-Messungen oberhalb der LMWL und der GW-Messungen auf der LMWL. Die Steigung der Wertegerade ist hier mit 3,983 deutlich geringer. Das bedeutet, die OW-Proben weisen ein Isotopensignatur „leichter“ als der N auf.

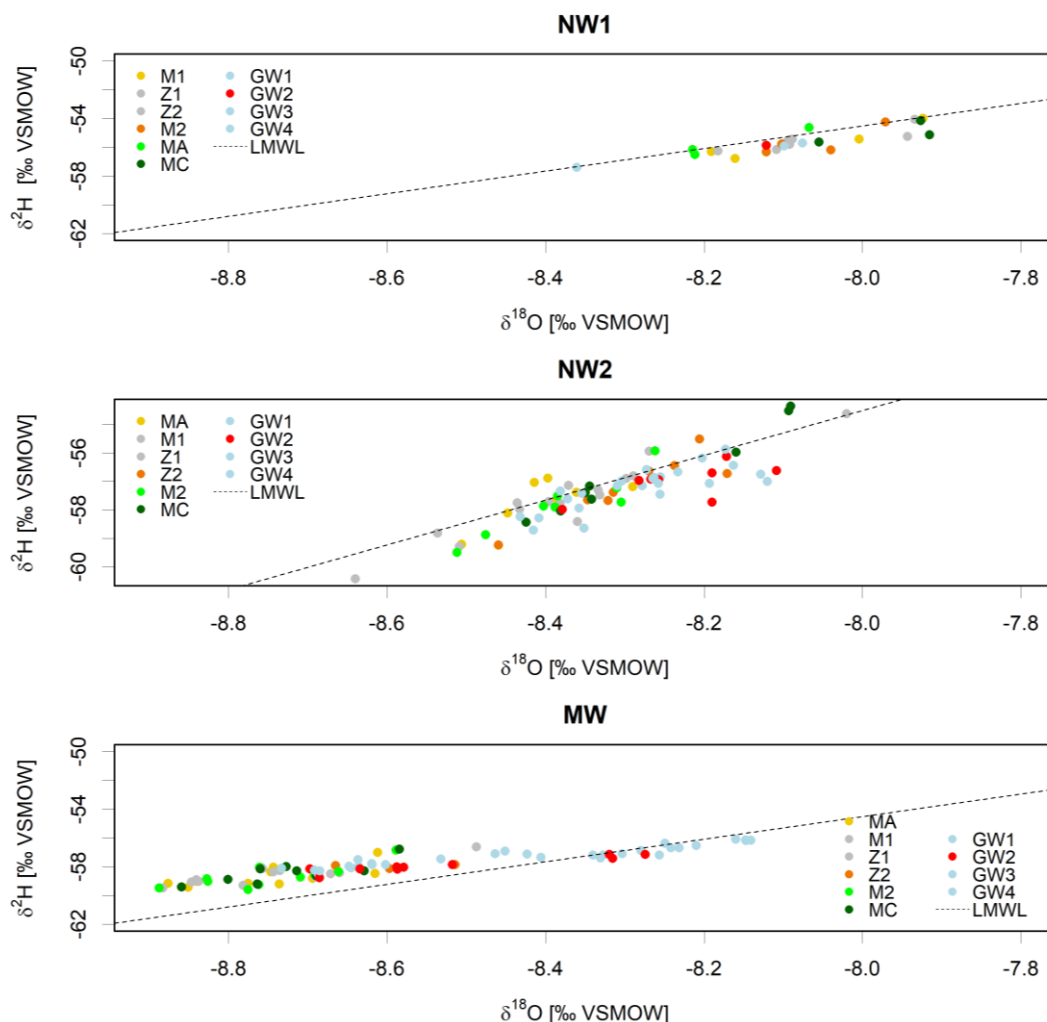


Abbildung 17: Dual Isotope Plot $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$. Relation des Oberflächenwassers und des Grundwassers zur LMWL, gruppiert nach Standorten für die Phasen Niedrigwasser und Mittelwasser.

5.3 Darcy Zustrom

Aus den im Kapitel 3.4.2 beschriebenen Rechnungen ergibt sich, basierend auf dem Gefälle und der Distanz des Piezometers zur Elz, die in Tabelle 5 gezeigte Spannweite der k_f -Werte. Der dadurch resultierende sehr große k_f -Wert des GW2 basiert auf dem großen Gefälle (siehe Abbildung 4) und aus der großen Distanz, die aus der Annahme, dass die Distanz der Messstelle zur Elz 90° in Strömungsrichtung liegt (siehe Kapitel 5.3, Karte 5), resultiert. Da die angenommene Bedingung der Strömungsrichtung in diesem Fall fraglich ist und von einem kürzeren Fließweg ausgegangen werden kann, wird GW2* aus dem Mittelwert des Durchlässigkeitsbeiwerts von GW3 und GW4 gebildet. Die in Tabelle 7 gezeigten Werte bewegen sich nach Boley und Adam (2012) im Bereich für sandigen Kies von $2 \cdot 10^{-2}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s und werden nach DIN 18130-1 als sehr stark durchlässig eingestuft. Da die Fließrichtung von Messstelle GW1 nicht genau bestimmt werden kann, wird diese in der Zustrom Berechnung außen vor gelassen.

Tabelle 5: Übersicht der k_f -Werte [m/s] aus der Darcy Berechnung

GW2: k_f -Wert berechnet	0,223
GW2*: k_f -Wert berechnet	$3,65 \cdot 10^{-2}$
GW3: k_f -Wert berechnet	$3,08 \cdot 10^{-2}$
GW4: k_f -Wert berechnet	$4,23 \cdot 10^{-2}$

Aus den Bodenparametern des Durchlässigkeitsbeiwert und des hydraulischen Gradienten wird der GW-Zustrom der Elz pro Tag berechnet und ist in Abbildung 18 dargestellt.

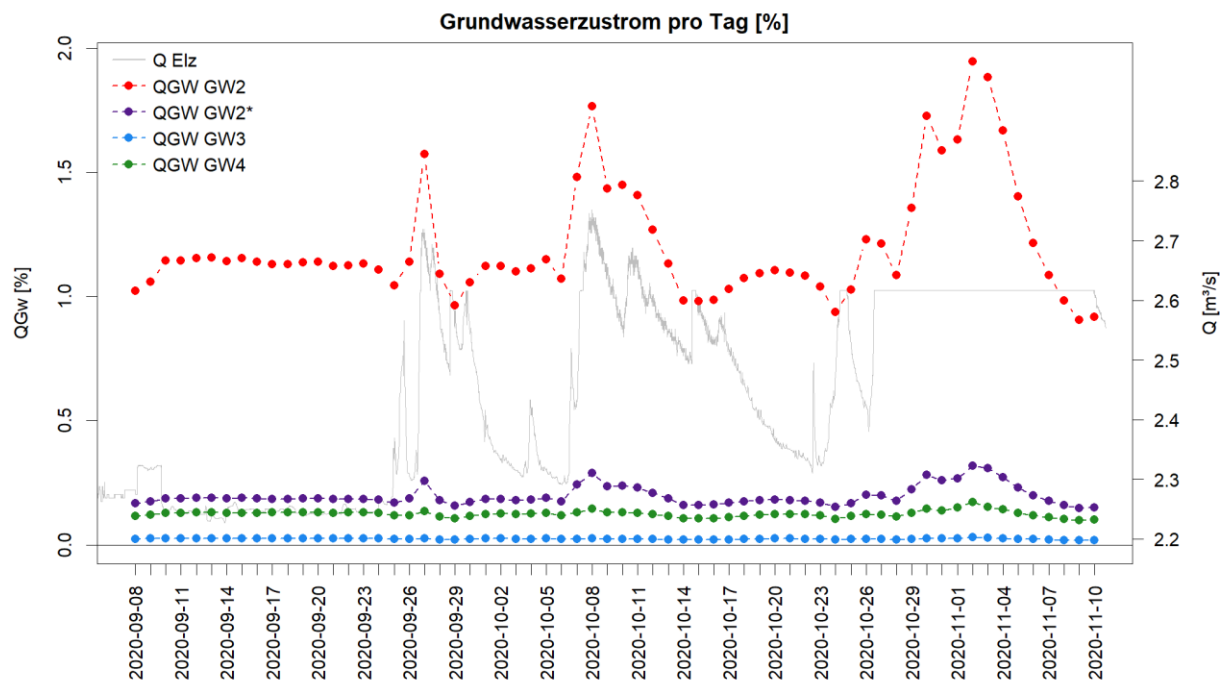


Abbildung 18: GW-Zustrom pro Tag in Prozent nach Darcy. Dargestellt ist der GW-Zustrom pro Tag anteilig am Abfluss der Elz. Der Piezometer GW2 ist in Rot dargestellt, die korrigierte Version des GW2 als GW2* in Dunkellila, GW4 in Dunkelgrün und GW3 in Hellblau. Hinterlegt ist der Abfluss der Elz in grau.

Es wird deutlich, dass der GW-Zufluss und Abfluss der Elz ein paralleles Muster aufweisen. Vor allem GW2 zeigt deutlich: Je höher der Wasserstand der Elz ist, desto mehr GW strömt ihr zu. Die Spannweite des GW-Zustroms anteilig am Abfluss der Elz liegt zwischen 0,02 % (GW3) und 1,94 % (GW2). Der Wertebereich des GW-Zustroms für GW2 liegt aufgrund des sehr hohen k_f -Wertes deutlich höher als für GW4, GW3 und den korrigierten Zufluss GW2*. Die Mediane der einzelnen GW-Messstellen für den gesamten Messzeitraum sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Darcy: Mediane des Grundwasser-Zuflusses über den gesamten Zeitraum

GW2	GW2*	GW3	GW4
1,13 %	0,18 %	0,02 %	0,12 %

Aus den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in Tabelle 7 lässt sich die mittlere Dauer berechnen, die das GW bis zur Elz benötigt. Daraus folgt für Messstelle GW2 mit einer Distanz von 12 m bis zur Elz eine Dauer von 11 Minuten und 48 Sekunden. Da dieser Wert fraglich ist, wird für die gleiche Distanz mit dem korrigierten k_f -Wert in GW2* eine Dauer von 1 Stunde und 12 Minuten ermittelt. Das GW aus der Messstelle GW3 mit einer Distanz von 150 m benötigt 6 Tage und 12 Stunden bis zur Elz und GW4 mit einer Distanz von 50,25 m 11 Stunden und 33 Minuten.

Tabelle 7: Mediane der Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers

	v [m/s]	v [m/d]
GW2	$1,70 \cdot 10^{-2}$	1465,70
GW2*	$2,78 \cdot 10^{-3}$	239,87
GW3	$2,67 \cdot 10^{-4}$	23,10
GW4	$1,21 \cdot 10^{-3}$	104,41

Gruppiert man den GW-Zustrom in die Phasen NW2 und MW liegen die in Tabelle 8 gezeigten Mediane der NW2 geringfügig höher als in der MW-Phase. Die Unterschiede sind in der dritten bzw. vierten Nachkommastelle sichtbar.

Tabelle 8: Darcy: Mediane des Grundwasser Zuflusses je Phase

	GW2	GW2*	GW3	GW4
NW2	1,14 %	0,19 %	0,03 %	0,13 %
MW	1,12 %	0,18 %	0,02 %	0,12 %

Um den größtmöglichen Unterschied des GW-Zufluss zur Elz darzustellen, wird der GQ-Anteil für zwei Peak-Ereignisse und zwei NW-Ereignisse berechnet. Die ereignisbasierten Zuflussanteile des GWs an der Elz entsprechen den Zeiträumen 26.09.2020 bis 28.09.2020 und 07.10.2020 bis 09.10.2020 für die Momente der Peak-Abflüssen. Für die Ereignisse des NW werden die Zeiträume 10.09.2020 bis 17.09.2020 und 18.09.2020 bis 09.10.2020 ausgewählt. Die resultierenden Anteile des GWs an der Elz werden in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 9: Mediane des GW-Zustroms anteilig an der Elz für zwei Peak-Ereignis

Peak-Ereignis	GW2	GW2*	GW3	GW4
26.09 - 28.09.20	1,14 %	0,19 %	0,023 %	0,12 %
07.10 - 09.10.20	1,48 %	0,24 %	0,024 %	0,13 %

Tabelle 10: Mediane des GW-Zustroms anteilig an der Elz für zwei NW-Phasen

NW-Ereignis	GW2	GW2*	GW3	GW4
10.09 - 17.09.20	1,13 %	0,185 %	0,026 %	0,130 %
18.09 - 24.09.20	1,14 %	0,187 %	0,026 %	0,129 %

5.4 Mischungsrechnung

Mittels der in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Mischungsrechnung werden über die Konzentration der Ionen und das Isotopenverhältnis der Anteil des GW-Zuflusses an der Elz und des OWs in den GW-Messstellen ermittelt. Für das GW wird der Piezometer GW2 als repräsentativ angenommen, siehe Abbildung 12 und Abbildung 16.

5.4.1 Grundwasseranteil in der Elz: Haptionen

Betrachtet man die in Abbildung 19 dargestellten Resultate des Mischungsverhältnisses der Rohdaten der Haptionen in täglicher Auflösung berechnet nach Gleichung (13), wird ersichtlich, dass der GW-Zufluss abhängig der Wahl des Ions unterschiedlich stark streut. Der geringste Zufluss liegt bei -40%. Negative Messwerte entstehen, sobald die Konzentrationen an der Ausflussstelle höher als an der Einflussstelle sind oder die Konzentration des GWs größer als die der einströmenden Konzentration ist. Beide Fälle beschreiben lediglich, dass die Konzentrationsänderung nicht durch das GW herbeigeführt wird. Der maximale Anteil des GW-Zuflusses aller Ionen liegt bei über 80%.

Da diese Werte fernab der Realität liegen, werden drei plausible Ionen gewählt und die Eingangsdaten vorab gefiltert.

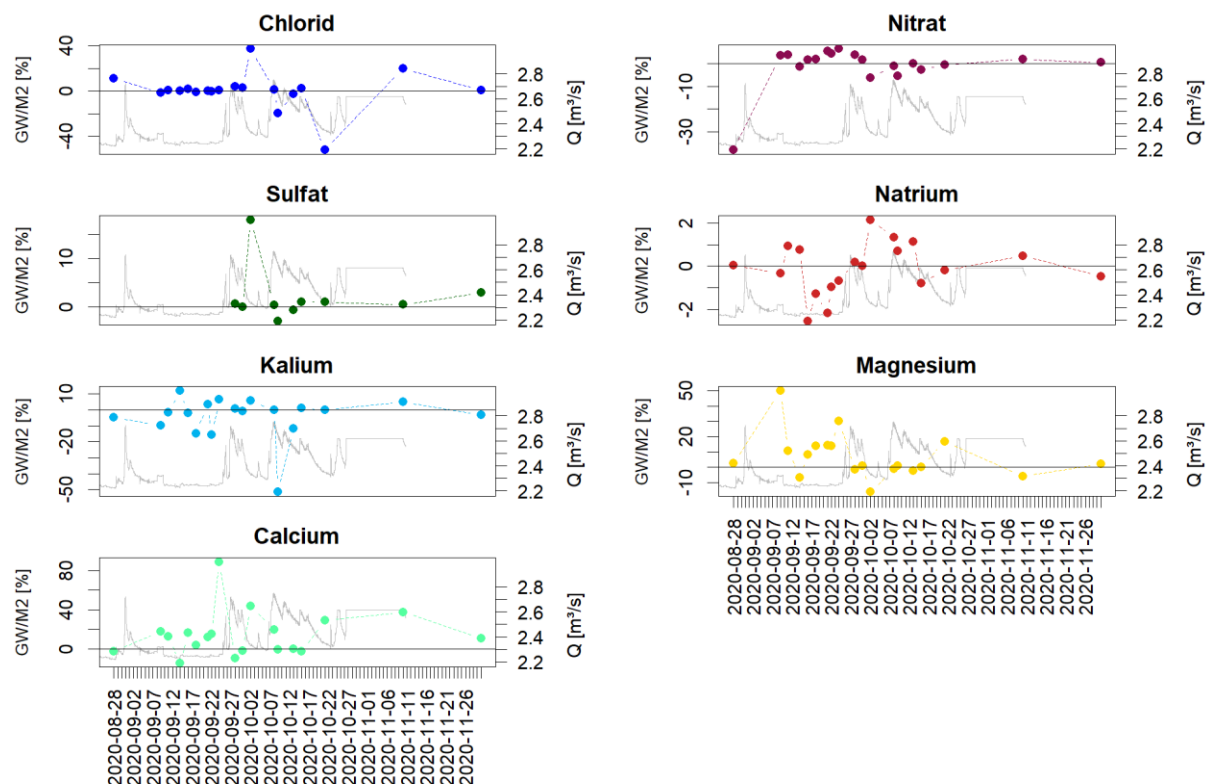


Abbildung 19: Mischungsverhältnis der Ionen. Dargestellt ist der prozentuale tägliche GW-Zufluss anteilig an der Elz die in Grau hinterlegt ist. Der verwendete Datensatz entspricht den gemessenen Rohdaten. Sulfat liegt aufgrund von Mobilisierungsprozessen als gekürzter Datensatz vor.

Aufgrund des geringsten reaktiven Verhaltens werden die drei Anionen Chlorid, Sulfat und Nitrat gewählt und anschließend entsprechend der Glieder der Mischungsrechnung, siehe Gleichung (13), als Differenz geplottet. Die Messgenauigkeit des Ionenchromatographen von $\pm 0,05$ mg/l sind als gestrichelte, rote Linien dargestellt, siehe Abbildung 20.

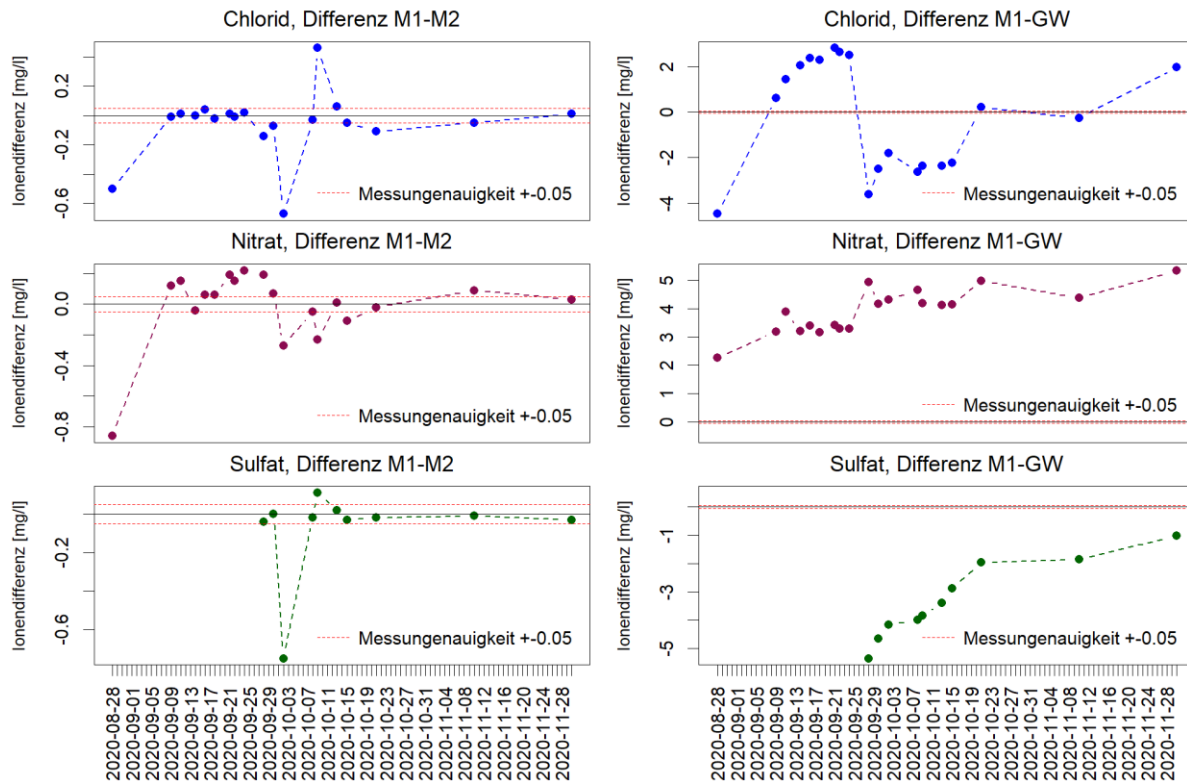


Abbildung 20: Ionendifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung. Die Grafiken bilden die Ionendifferenz in täglicher Auflösung inklusive Messungenauigkeitsbereich ab.

Es wird deutlich, dass die Differenzen der beiden Messpunkte des OWs M1 und M2 sehr gering sind und sich häufig im Bereich der Messungenauigkeit bewegen. GW und OW hingegen unterscheiden sich deutlicher, die Differenz liegt deutlich seltener im Bereich der Messungenauigkeitsgrenze.

Für die weitere Berechnung werden die Datensätze wie folgt verändert: aus den Datensätzen des Sulfats und des Chlorids werden die Extremwerte entfernt und nur Messwerte mit geringer Messdifferenz verwendet, der Sulfat Datensatz wird vorab gekürzt und erst ab dem 02.10.2020 verwendet, im Datensatz des Nitrats werden alle Messwerte der Rohdaten beibehalten und lediglich die GW-Messwerte auf Null gesetzt. Der tägliche Anteil des GW-Zuflusses an der Elz nach Datenkorrektur ist in Abbildung 21 dargestellt. Negative Werte des GW-Zuflusses werden aus dem Datensatz entfernt. Aus dem resultierenden Datensatz wird anteilig am Abfluss der Elz der GW-Zustrom zur Elz über die Ionen-Konzentrationen des Chlorids, des Sulfats und des Nitrats betrachtet. Die Zustrom-Werte sind in Abbildung 21 in täglicher Auflösung dargestellt und zur Übersicht in Tabelle 11 aufgelistet. Eine Gruppierung des GW-Zuflusses zur Elz in Phasen ist im Anhang in Abbildung A20 dargestellt.

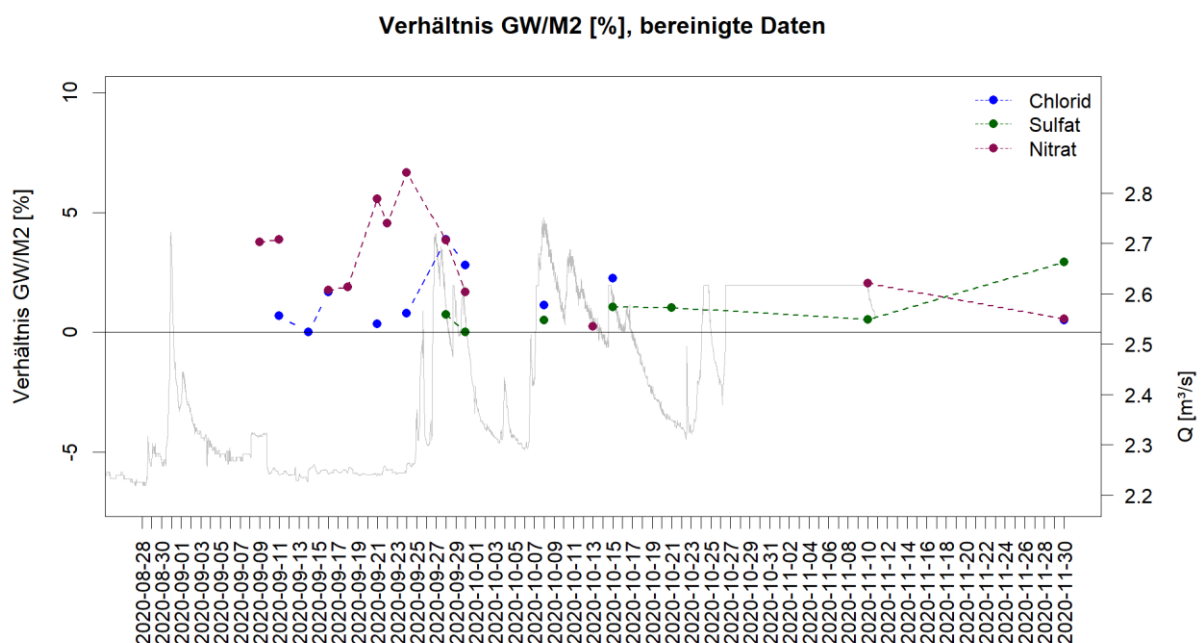


Abbildung 21: Anteil des Grundwassers in der Elz. Dargestellt sind Werte des prozentualen Anteils des Grundwasser am Gesamtabfluss der Elz berechnet über ein Mischungskreuz mit Ionen als Tracer.

Möchte man einen Zeitabschnitt betrachten, in dem sich das System des Aquifers in einem möglichst guten Gleichgewicht befindet, trifft das auf die Messtage mit geringer Konzentrationsänderung zu. Dort wird der geringste Einfluss von Prozessen des Zeitversatzes des GW und OW erwartet. Dieses möglichst stabile System liegt für das Chlorid an den Messtage 14., 16., 18. und 21.9.2020, siehe Abbildung 22.

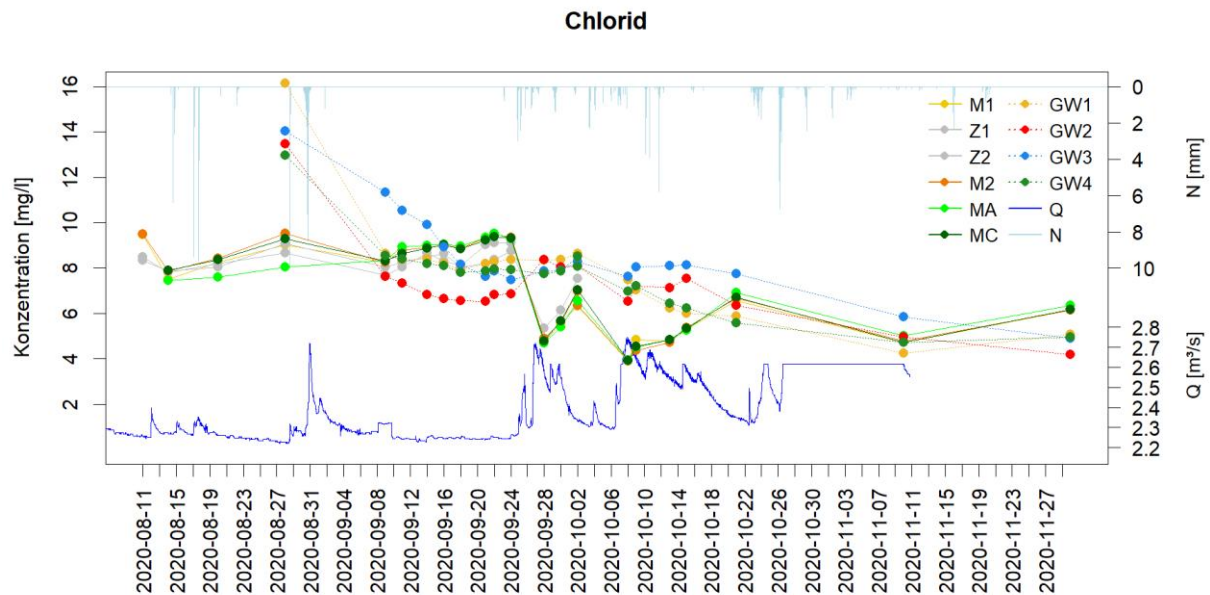


Abbildung 22: Chlorid-Konzentration des OWs und GWs

Tabelle 11: Mischungsrechnung Ionen: Mediane des GW-Zuflusses in die Elz

	Ges. Zeitraum	NW2	MW	System Gleichgewicht
Chlorid	0,97 %	0,68 %	2,25 %	0,29 %
Sulfat	0,75 %	-	0,75 %	-
Nitrat	2,91 %	3,87 %	1,68 %	-

Für den gesamten Messzeitraum bewegt sich der GW-Zufluss zur Elz zwischen 0,75 % und 2,91 %. Ein eindeutiges Muster über die Phasenwerte, Abbildung A20 im Anhang, ist nicht erkennbar. Die Anteilsberechnung über den Tracer Chlorid zeigt einen Anstieg des GWs mit steigendem Abfluss, wohingegen das Nitrat eine gegensätzliche Reaktion von mehr GW-Zufluss in die Elz bei geringerem Abfluss zeigt. Da für das Sulfat nur eine Phase berechnet werden kann, Abbildung A20 im Anhang, kann über die Konzentrationsabnahme oder -zunahme keine Aussage getroffen werden. Für den Zeitraum, in dem das Aquifer System in einem möglichst guten Gleichgewicht steht, kann ein Zuflussanteil von 0,29 % ermittelt werden.

5.4.2 Grundwasseranteil in der Elz: Isotope

Ähnlich wie dem Vorgehen der Ermittlung der Mischungsrechnung mittels Hauptionen, werden bei der Berechnung des GW-Zustroms durch stabilen Wasserisotope zuerst die Rohdaten betrachtet. Wie in Abbildung 23 und Tabelle 12 dargestellt, streut der GW-Zustrom zwischen -171,76 % und 306 % in den Rohdaten. Wie bereits beschrieben sagen negative Zuflusswerte lediglich aus, dass die gemessene Verhältnisänderung der Isotope nicht auf das zuströmende GW in die Elz zurückzuführen ist.

Da auch diese Zuflusswerte fern der Realität liegen, werden auf den Tracer der Isotope verschiedene Filter getestet.

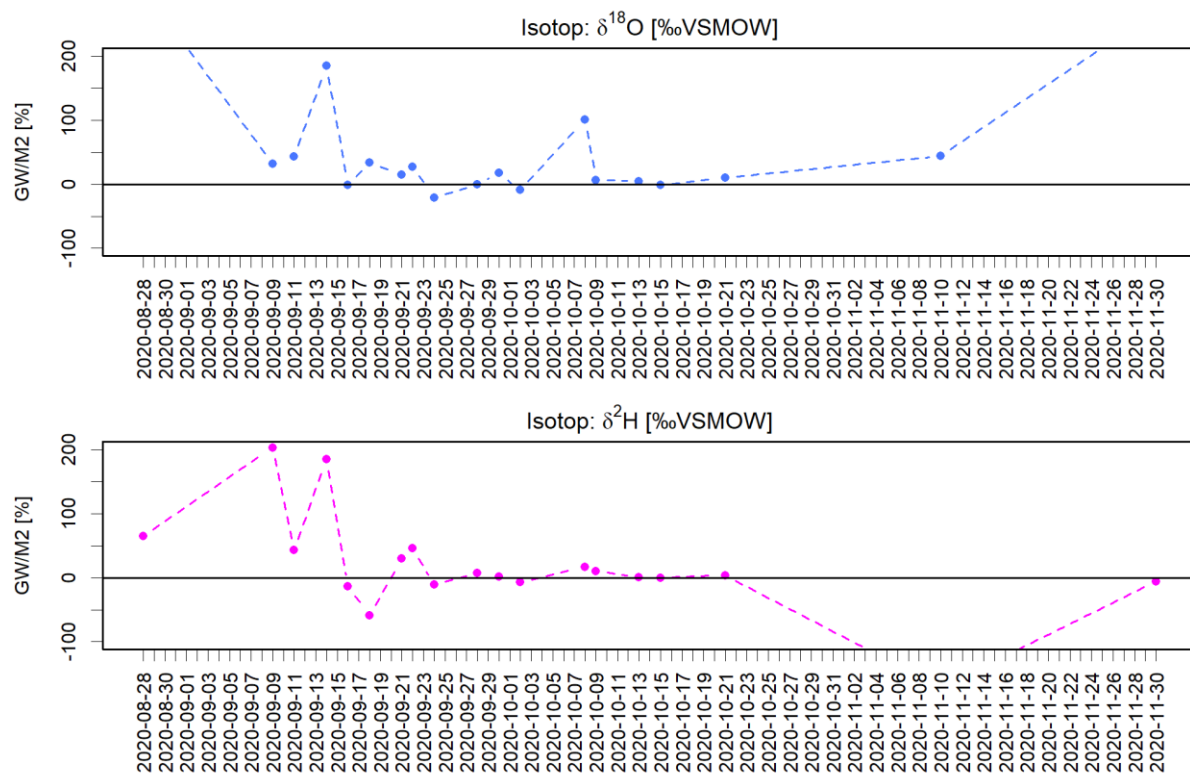


Abbildung 23: Mischungsverhältnis der Isotope. Dargestellt ist der prozentuale tägliche GW-Zufluss anteilig an der Elz. Der verwendete Datensatz entspricht den gemessenen Rohdaten.

Entsprechend der Glieder der Mischungsrechnung, siehe Gleichung (13), werden die Isotopenverhältnisse als Differenz geplottet und die Nachweisgrenze von $\pm 0,16$ ‰VSMOW für $\delta^{18}\text{O}$ und $\pm 0,6$ ‰VSMOW für $\delta^2\text{H}$ als gestrichelte, rote Linien dargestellt, siehe Abbildung 24.

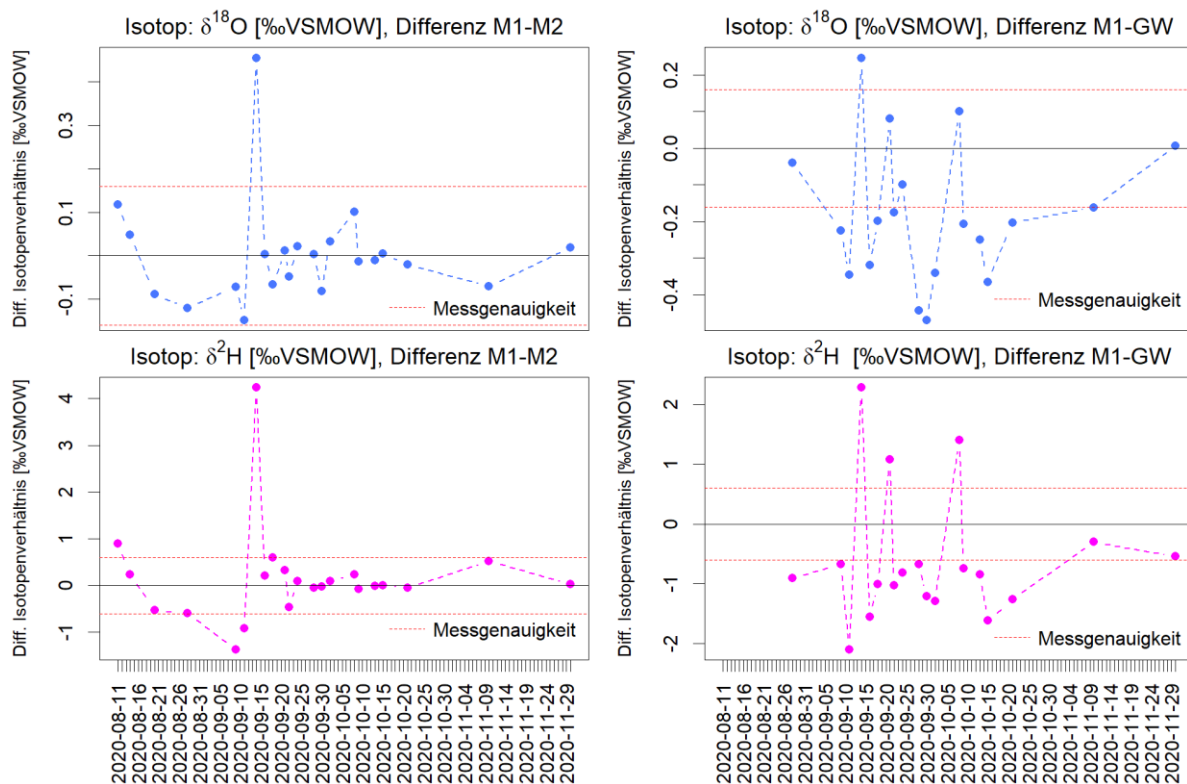


Abbildung 24: Isotopendifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung. Die Grafiken bilden die Isotopendifferenz in täglicher Auflösung inklusive Messungenauigkeitsbereich ab.

Es wird deutlich, dass vor allem die Differenzen der beiden Messpunkte des OWs, M1 und M2, wie auch die Differenz der Ionentracer sehr gering sind und sich häufig im Messungenauigkeitsbereich bewegen. Für den Tracer $\delta^{18}\text{O}$ bewegen sich die Unterschiede in geringfügigen Differenzen im Bereich von 0,1-0,2‰ VSMOW. GW und OW unterscheiden sich marginal mehr, bewegen sich jedoch noch häufig im Bereich der Messungenauigkeit.

Für eine sinnvolle Berechnung des GW-Anteils in der Elz mittels des Isotopenverhältnis wird versucht, den Datensatz vorab zu filtern. Der erste Versuch liegt darin, Berechnungsglieder mit geringen Differenzen durch die Messungenauigkeitsgrenze zu filtern und nur mit deutlich unterschiedlichen Differenzen, welche größer als die Messungenauigkeit sind, das Mischungsverhältnis zu berechnen. Hier wird deutlich, dass nur die Extreme gut abgebildet werden und lediglich vier Mischungsverhältnisse, eins für $\delta^{18}\text{O}$, drei für $\delta^2\text{H}$, für den gesamten Messzeitraum berechnet werden können. Diese Werte bewegen sich zwischen 43,37% und 203,28% GW-Zustrom in die Elz anteilig am Abfluss. Diese Art zu filtern wird schnell verworfen und wie im Kapitel 5.4.1 der Mischungsrechnung über die Ionen-Konzentration eine Filterumkehr vorgenommen.

Im zweiten Versuch werden die Extremwerte aus dem Datensatz entfernt und die Messungenauigkeitsgrenze umgekehrt als Filter verwendet, sodass nur für Differenzen des OWs und des GW zu OW, das innerhalb dieser Grenze liegt, eine Mischungsrechnung durchgeführt wird. Der zweite Versuch resultiert in einem ebenso geringen Datensatz von vier Verhältniswerten, die nur für den Tracer $\delta^{18}\text{O}$ berechnet werden kann. Anteilig am Abfluss der Elz bewegt sich der GW-Zufluss des zweiten Versuchs zwischen 14,60 % und 306 %.

Zur Verdeutlichung der unrealistischen Mischungsverhältnisse wird eine Übersicht in Tabelle 12 aufgelistet. Für die Mediane des anteiligen Zuflusses des GWs, ermittelt über den gesamten Messzeitraum, werden lediglich negative Mischungsverhältnisse vorab entfernt.

Tabelle 12: Mischungsrechnung Isotope: Mediane des GW-Zuflusses in die Elz

	Ges. Zeitraum	Filter 2: ohne min. Differenzen	Filter 1: ohne Extreme
$\delta^{18}\text{O}$	32,58 %	184,48 %	184,40 %
$\delta^2\text{H}$	23,41 %	185,22 %	-

Aufgrund der minimalen Messdifferenzen der Isotopenverhältnisse zwischen den einzelnen Messstellen kann kein plausibler GW-Zufluss ermittelt werden.

5.4.3 Oberflächenwasseranteil im Grundwasser

Um eine G-O-I zu bestätigen, wird der Anteil des OWs in den einzelnen Piezometern bestimmt. Hierfür wird das Abflussereignis des 27.09.2020 bis 30.09.2020 betrachtet und die Reaktionen im OW und GW getrennt beobachtet. Das gleiche Ereignis wird bereits vorab genutzt, um die Abstandsgeschwindigkeit zur k_f -Wert Bestimmung zu berechnen. Die Betrachtung des Ereignisses macht eine Reaktionsverzögerung von 10 Tagen im GW deutlich, welche besonders gut durch die Abnahme des Isotopenverhältnisses $\delta^{18}\text{O}$ und der Chlorid-Konzentration zu beobachten ist, siehe Abbildung 25. Da das Reaktionsverhalten aller GW-Messstellen parallel passiert, wird vereinfacht bei jeder Messstelle von der gleichen Reaktionsverzögerung von 10 Tagen ausgegangen. Das OW zeigt eine Veränderung am 28.09.2020, das GW zeitversetzt am 08.10.2020. Die Reaktion auf den höheren Abfluss der Elz ist zeitgleich in unterschiedlicher Intensität in den Piezometer-Messstellen GW1, GW2 und GW4 zu beobachten. Lediglich Messstelle GW3 zeigt ein anderes Verhalten, dass nicht unmittelbar mit an die Abflussmenge geknüpft ist. Die Reaktion des Isotopenverhältnisse ist im Vergleich zum Chlorid im GW stärker. Die Anteilsbestimmung des OW im GW ist momentspezifisch für den einen Abflusspeak des genannten Zeitraums und stellt nicht die Situation des gesamten Messzeitraums dar.

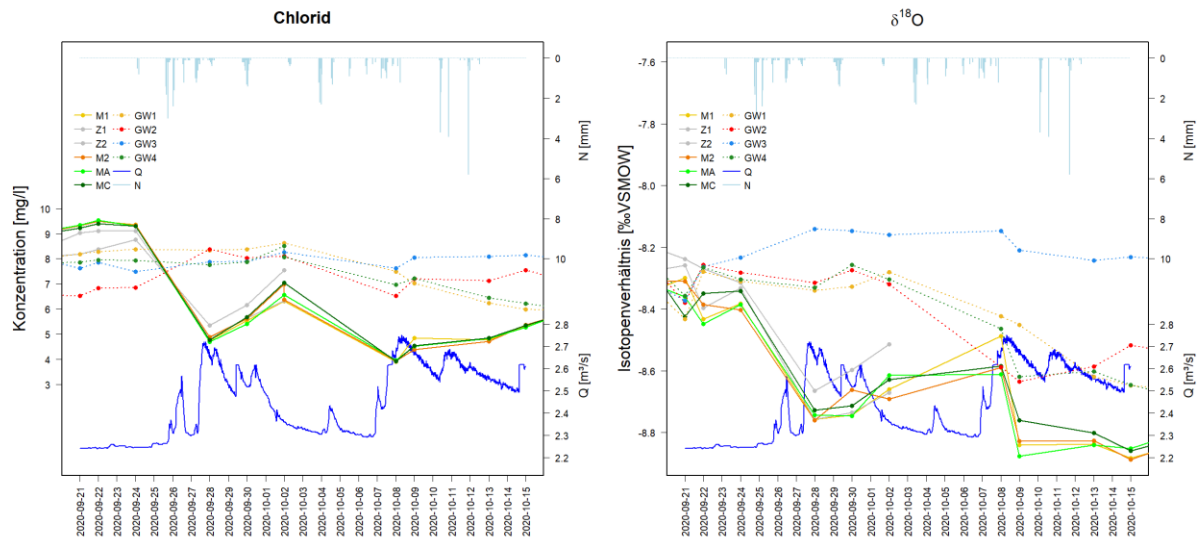


Abbildung 25: Ausschnitt aus dem Datensatz Isotopenverhältnis $\delta^{18}\text{O}$ und Chlorid

Die Ergebnisse in Tabelle 13 zeigen, dass sich der berechnete Anteil des OWs am GW für beide Tracer in der gleichen Größenordnung bewegt. Der geringste OW-Zufluss ist in der Messstelle GW3 zu beobachten, welcher bereits die geringste Reaktion auf den Peak vorab zeigte. Die Messstellen GW1 und GW4 haben einen ähnlich großen OW-Anteil. Mit einem Anteil von über 50 % OW ist die Messstelle GW2 am meisten durch das OW beeinflusst.

Tabelle 13: Anteil des OWs in den GW-Messstellen für den Abflusspeak zwischen dem 26.09.2020 und 30.9.2020

	$\delta^{18}\text{O}$	Chlorid
GW1	20,41 %	23,63 %
GW2	63,12 %	51,18 %
GW3	1,07 %	8,08 %
GW4	31,88 %	26,22 %

5.5 Energiebilanz

5.5.1 Kleinskaliger Bereich M1-M2

Eine Energiebilanz auf einem kleinskaligen Bereich von einer Gewässerstrecke von 82 m zu berechnen ohne alle nötigen Parameter direkt aus dem Untersuchungsgebiet ist herausfordernd. Deshalb wird für die Strecke M1-M2 die Grundannahme getroffen, dass auf der geringen Distanz kein komplexes Energiemodell in der nötigen Auflösung möglich ist. Faktoren wie der zeitliche Versatz des OWs entlang der Gewässerstrecke, der Vegetationsfaktor oder das Gefälle sind hinsichtlich der geringen Distanz vernachlässigbar. Um den Energiegewinn und -verlust auf der Gewässerstrecke dennoch plausible nachvollziehen zu können, wird mittels der gemessenen Temperaturen der Temperatur-Logger im GW und OW eine Mischungsrechnung durchgeführt, um den Anteil des GWs an der Elz zu bestimmen. Die Mischungsrechnung, die eigentlich als Stoffbilanz eingesetzt wird, wird so zur Bestimmung des Energiegewinns bzw. -verlusts für das GW verwendet.

Wie in Kapitel 4.2 des Prozessverständnisses klar wird, spielt Strahlung bereits auf kleiner Distanz eine Rolle, weshalb die Überlegung aufkommt, die Berechnung der Mischungsverhältnisse nur für die nächtlichen Temperaturen durchzuführen. Dort kann davon ausgegangen werden, dass kein Strahlungseinfluss vorliegt. Um dies zu verdeutlichen wird die Temperaturdifferenz der beiden Messstellen der Elz für die täglichen und nächtlichen Werte in Abbildung 26 dargestellt.

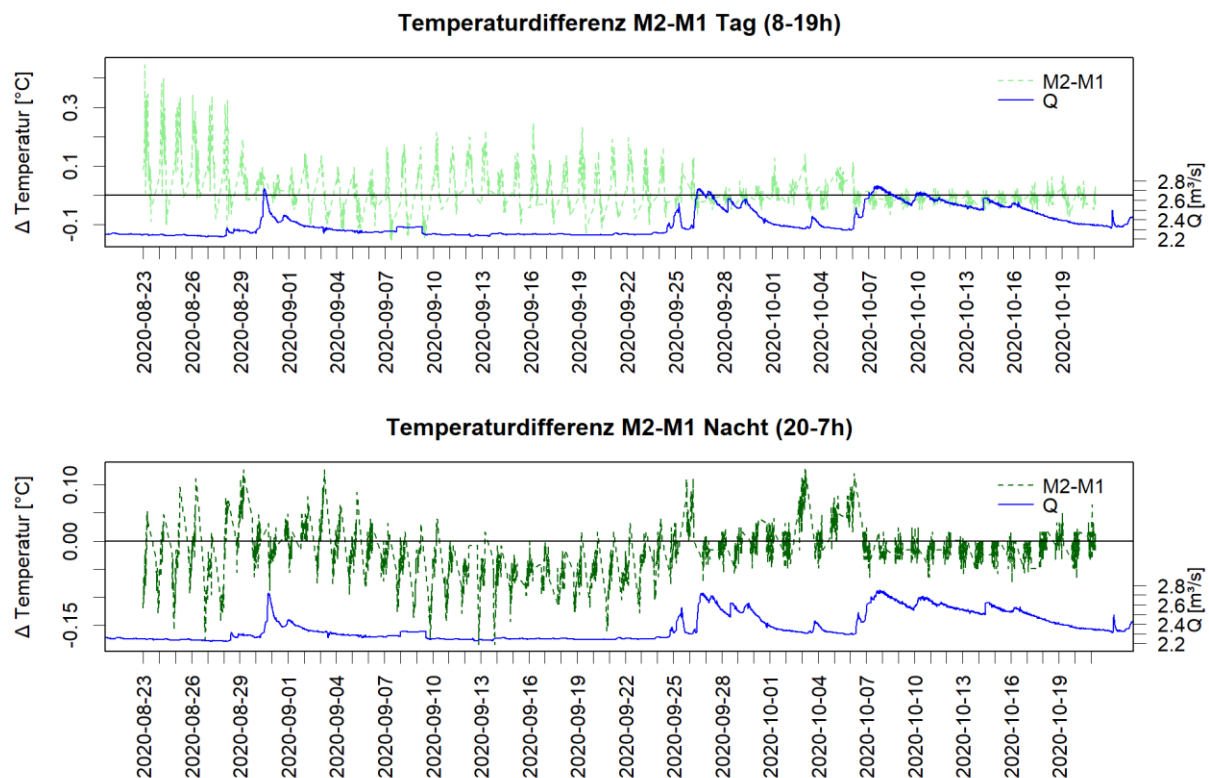


Abbildung 26: Temperaturdifferenz M1 und M2 am Tag und in der Nacht. In stündlicher Auflösung sind die Temperaturdifferenzen des Messbereichs M1 und M2 dargestellt. In blau wird der Abfluss der Elz visualisiert.

Aus Abbildung 26 geht hervor, dass die Temperaturdifferenzen am Tag deutlich größer sind als in der Nacht. Am Tag streuen sie in einem Bereich von $0,5^{\circ}\text{C}$, wohingegen in der Nacht nur eine Spannweite von $0,3^{\circ}\text{C}$ erreicht wird. Ein Glied der Mischungsrechnung wird durch die Differenz der Oberflächenmessstellen M1 und M2 gestellt, siehe Gleichung (13). Die geringe Temperaturdifferenz in der Nacht, die zu einer Unsicherheit der Berechnung führt und zusätzlich deutlich im Bereich der Messungenauigkeit des Temperatur-Loggers von rund $0,5^{\circ}\text{C}$ liegt, spricht gegen eine Verhältnisbestimmung des GWs in der Elz für die nächtlichen Temperaturen. Die nächtlichen Temperaturdifferenzen, gegliedert in die Terme der Mischungsrechnung, sind im Anhang, Abbildung A21, visualisiert und verdeutlichen die ungeeignete Datenlage.

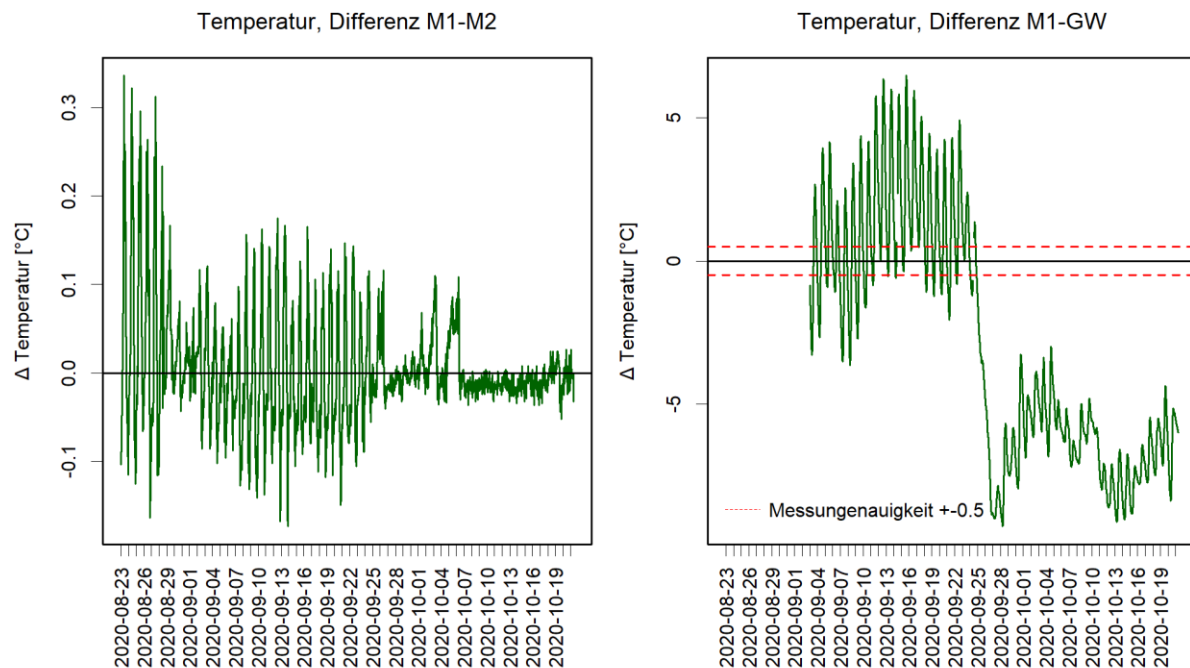


Abbildung 27: Temperaturdifferenz der Berechnungsglieder der Mischungsrechnung, in täglicher Auflösung inklusive Messungenauigkeitsbereich.

Betrachtet man die Differenzen der Glieder der Mischungsrechnung, Gleichung (13), für den gesamten Zeitpunkt in Abbildung 27, zeigt sich die größte Messdifferenz ab dem 25.09.2020 mit Beginn der MW-Phase. Dort unterscheidet sich die Temperatur der Messpunkte der Elz M1 und M2 nur geringfügig, dafür ist ein deutlicher Unterschied zwischen GW zum OW ersichtlich. Dieses Verhalten wird bereits bei den Tracern der Ionen und Isotope beobachtet.

Vor der Berechnung der Mischungsverhältnisse wird der zeitliche Versatz des GWs zum OWs über den korrigierten k_f -Werte GW2* von 1 Stunde und 12 Minuten im Datensatz berücksichtigt, siehe Kapitel 5.3.

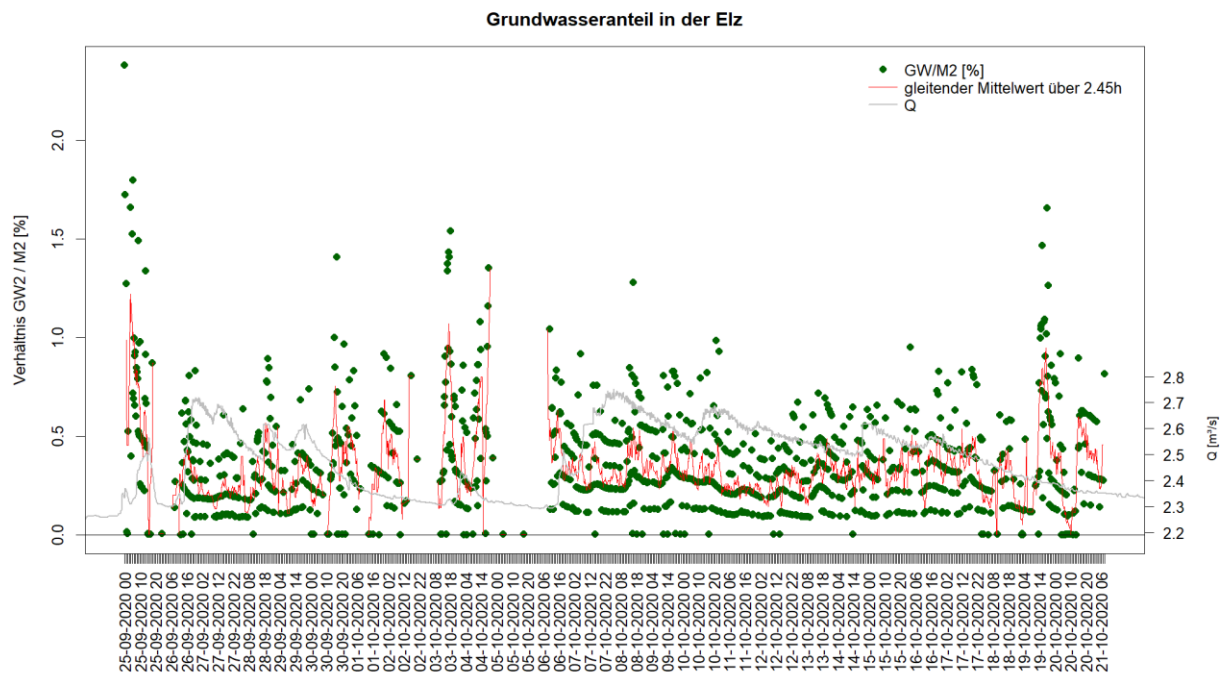


Abbildung 28: Mischungsverhältnis der Temperatur. Dargestellt ist der prozentuale tägliche GW-Zufluss zur Elz. Die Messdaten sind in 15-minütiger Auflösung dargestellt. Grau hinterlegt ist der Abfluss der Elz in m^3/s . Die rote Linie gibt das gleitende Mittel über 2:45 h wieder.

In Abbildung 28 wird deutlich, dass sich ein Großteil des anteiligen Zuflusses durch das GW unter 0,5 % bewegt, was bei einem mittleren Abfluss der Elz in der MW-Phase von $2,488 \text{ m}^3/\text{s}$ einem Zufluss von $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht. Der Median des GW-Anteils in der Elz für die Messperiode entspricht 0,28 % bzw. $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$, der arithmetische Mittelwert liegt bei 0,35 % bzw. $0,009 \text{ m}^3/\text{s}$. Das gleitende Mittel über 2:45 h zeigt das geglättete Verhalten des anteiligen GW-Zuflusses und relativiert die Extrema.

Da aus Tabelle 4 und Abbildung 27 ersichtlich wird, dass das GW während der MW-Phase deutlich wärmere Temperaturen aufweist, kann für diesen Zeitraum von einem Energiegewinn ausgegangen werden. Abbildung 27 zeigt den quantifizierte Energiegewinn bzw. -verlust über den gesamten Messzeitraum, berechnet mittels spezifischer Wärmekapazität anteilig am Zufluss des GWs und dessen Temperatur in 15-minütiger Auflösung. Die MW-Phase, ab dem 25.09.2020 zeigt deutlich einen Energiegewinn, der sich zwischen $1,75 \text{ } \mu\text{W}$ und $82,46 \text{ MW}$ bewegt. In den beiden NW-Phasen zeigt sich hingegen eine Streuung zwischen Energiegewinn und -verlust.

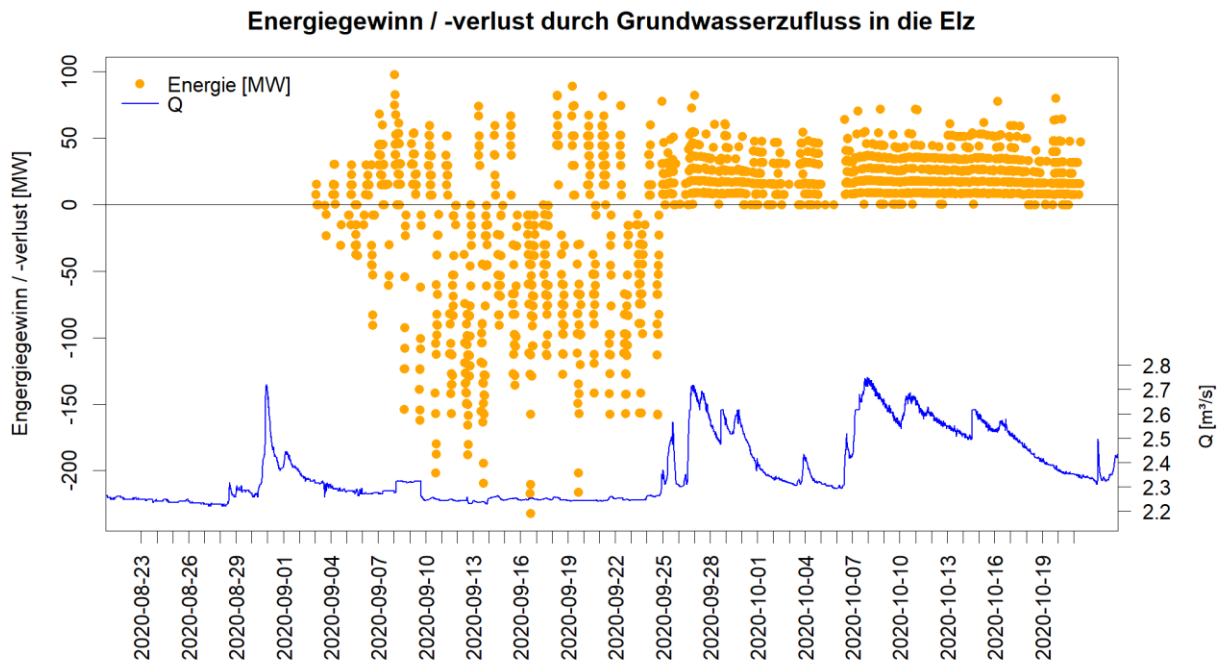


Abbildung 29: Energiegewinn/-verlust durch den GW-Zufluss. Die dargestellten Werte sind in 15-minütiger Auflösung berechnet. Zur Orientierung ist der Abfluss der Elz in Blau dargestellt.

5.5.2 Energiebilanzmodell

Für die gesamte Gewässerstrecke MAMC von über 1,8 km, siehe Karte 4, sind komplexe Interaktionen des GWs und OWs zu erwarten, die die Energiebilanz des Flusssystems beeinflussen. Kurz nach der Messstelle MA flussabwärts befindet sich ein Abstrom der Elz, der den Seitenarm bildet, der, wie in Karte 5 zu sehen ist, nahe des Piezometers GW3 liegt. Vor der Endmessstelle MC fließt der Seitenarm wieder dem Hauptstrom der Elz zu, wodurch vereinfacht von gleichen Wassermassen und Temperaturen am Messpunkt MC ausgegangen wird. Prozesse wie der zeitliche Versatz durch Fließzeit, der mittels mittlerer Verweilzeit aus dem Tracer-Versuch des Gewässerökologiekurses korrigiert wird, und ein Tagesgang der Temperatur auf der gesamten Gewässerstrecken spielen eine Rolle. Die eingehenden Datensätze des Modells sind in Tabelle 2 und Parameter, die als Wertebereich definiert werden, in Tabelle 3 dargestellt.

Das Energiebilanzmodell findet nur dann eine sinnvolle Anwendung, wenn die Grundannahme, dass alle Energieströme mittels plausibler Eingangsdatensätze oder entsprechender Wertespannweite abgebildet werden können, erfüllt ist.

Unter dieser Voraussetzung wird der GW-Zustrom durch die Temperaturdifferenz der modellierten Temperatur und der gemessenen Temperatur am unteren Messpunkt MC definiert. Die modellierte Temperatur weist hierbei keine Beeinflussung durch das GW auf.

Um zu verdeutlichen, wie sich die Temperatur im unteren und oberen Messbereich verhält, werden die Temperatur-Logger, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, in Standorte gruppiert und ein Mittelwert der Gruppe für jeden Zeitschritt berechnet.

Das Energiebilanzmodell berechnet nach dem in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Vorgehen den GW-Zufluss zur Elz. Nach dem Prinzip von Monte Carlo werden für 10.000 Durchläufe der Datensätze von Tabelle 2 und Tabelle 3 der GW-Zufluss zur Elz modelliert. Um den Anteil des GWs für verschiedene Zeitpunkte zu betrachten, werden fünf Szenarien modelliert: der gesamte Datensatz, der Zufluss tagsüber zwischen 8 und 19 Uhr für den gesamten Datensatz, der Zuflussanteil nachts von 20 bis 8 Uhr morgens für den gesamten Datensatz, und die Phasenwerte NW2 und MW, dargestellt in Abbildung 30.

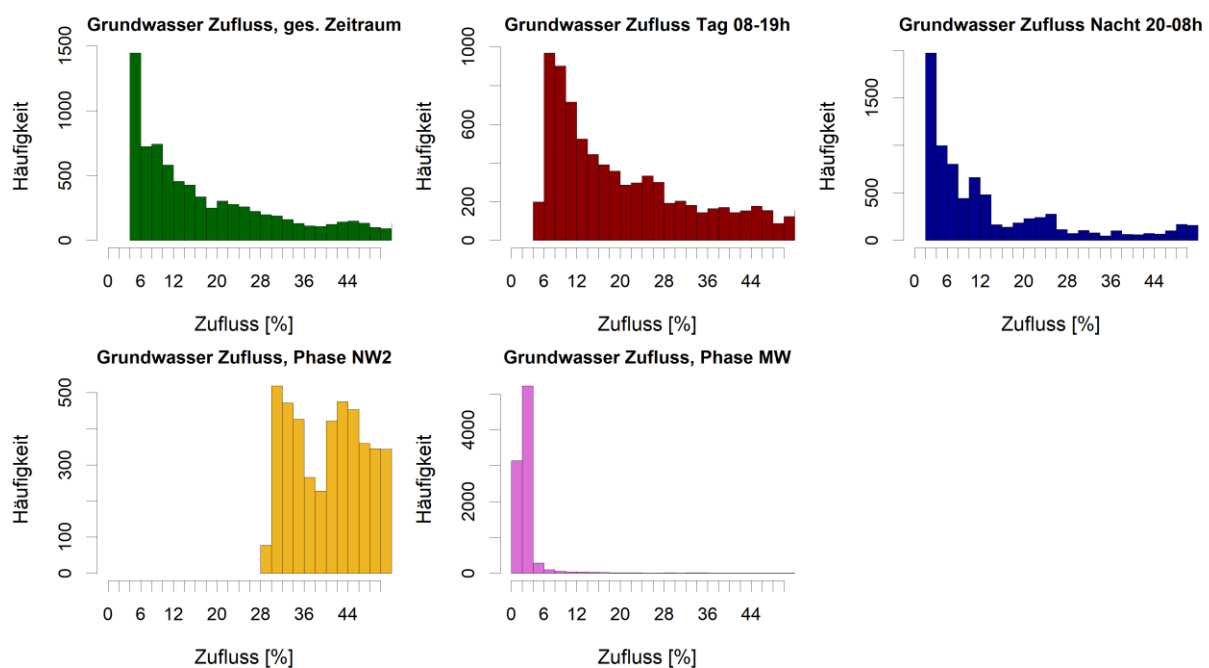


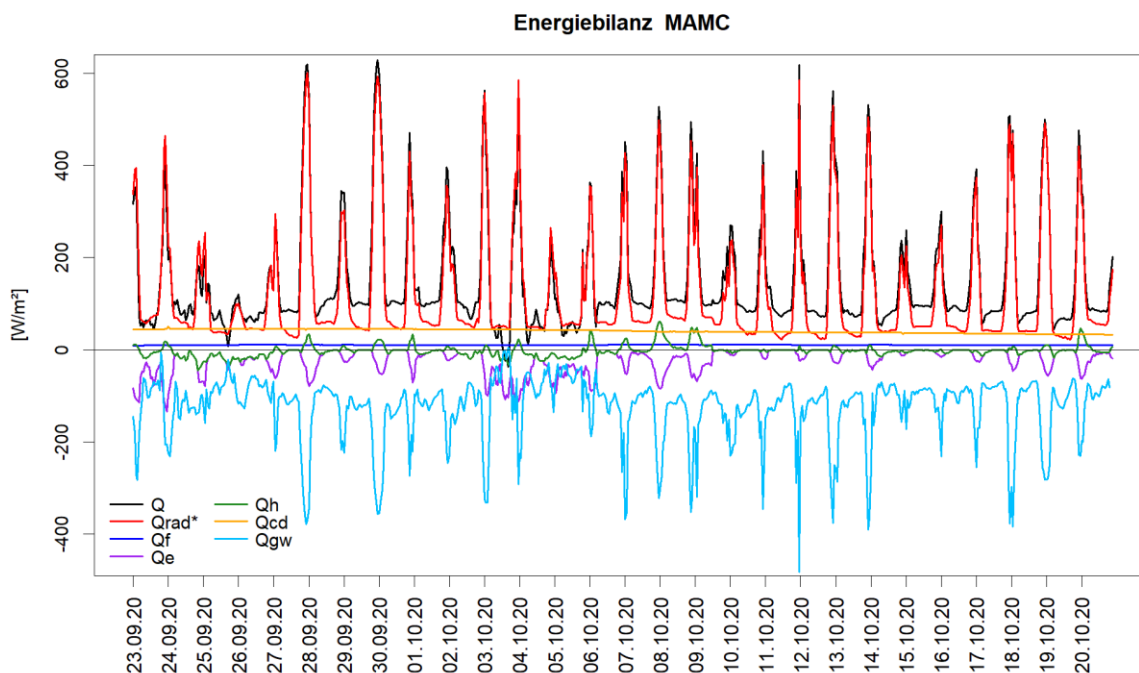
Abbildung 30: Dichtefunktion des GW-Zuflusses in Prozent für fünf verschiedene Szenarien. Der gesamten Datensatz ist in grün, der Zufluss tagsüber in Rot, der Zufluss nachts in dunkelblau und für die Phasen NW2 und MW in Gelb und Rosa dargestellt.

Die Ergebnisse aus Abbildung 30 machen deutlich, dass jedes Szenario eine andere Häufigkeitsverteilung des GW-Zuflusses aufzeigt. Eine Übersicht über die Kennwerte der einzelnen Szenarios ist in Tabelle 14 dargestellt. Ein Boxplot für die fünf Szenarien in Anhang Abbildung A22 gibt Aufschluss über die Streuung und Medianwerte der Datengruppe. Lediglich für das Szenario der MW-Phase sind Werte im Bereich bis zu 2 % GW-Anteil in der Elz bestimmt worden. Da dies als realistisch angesehen werden kann, wird aus den 10.000 Datensätzen anschließend ein Model-Run ausgewählt, für den der GW-Zufluss zwischen 0 und 1 % liegt.

Tabelle 14: Übersicht über den Anteil des GW-Zuflusses zur Elz je Szenario

	Gesamt	Tag	Nacht	NW2	MW
Abfluss Elz Mittelwert [m³/s]	2,389	2,390	2,388	2,259	2,259
Median [m³/s]	0,484	0,561	0,295	1,265	0,050
Anteil [%]	20,46	23,46	12,36	56,00	2,21

Für den ausgewählten Datensatz mit plausiblen Anteil an GW-Zufluss ist die Energiebilanz zeitlich aufgelöst in Abbildung 31 dargestellt. Daraus geht hervor, dass die gesamte Energiebilanz (Q) größtenteils durch den Energiegewinn der Strahlung (Q_{rad^*}) beeinflusst wird. Die Komponenten, aus denen die gesamte Strahlungsenergie resultiert, sind in Abbildung 32 dargestellt. Die Wärmeleitung im Gerinnebett (Q_{cd}) sowie der Wärmestrom durch Reibungsenergie (Q_{f}) bilden einen konstanten, geringen Energiegewinn. Der fühlbare Wärmestrom (Q_{h}) variiert zwischen Energiegewinn und -verlust und ist auf das Zusammenspiel der Luft- und Wassertemperatur und der Luftfeuchtigkeit zurückzuführen. Ist die Lufttemperatur wärmer als die Wassertemperatur findet ein Energiegewinn statt. Über den latenten Wärmestrom (Q_{e}) wird ein geringer Anteil an Energieverlust verzeichnet, der größte Anteil des Energieverlustes ist dem Zufluss des GW geschuldet (Q_{gw}), der aus der Differenz der modellierten und gemessenen Temperatur ermittelt wird.

**Abbildung 31: Energiebilanz**

Die in Abbildung 32 dargestellte gesamte Strahlungsbilanz (Q_{rad^*}) ist dominierend durch die einkommende kurzwellige Strahlung (K^*) beeinflusst. Die einstrahlenden langwelligen Strahlungen der Atmosphäre ($L_{\text{in_atm}}$) und der Vegetation ($L_{\text{in_veg}}$) bewirken ebenfalls einen Gewinn der Strahlungsbilanz. Die einzige negative Komponente des Strahlungsbilanzsystems ist die ausstrahlende langwellige Strahlung (L_{out}).

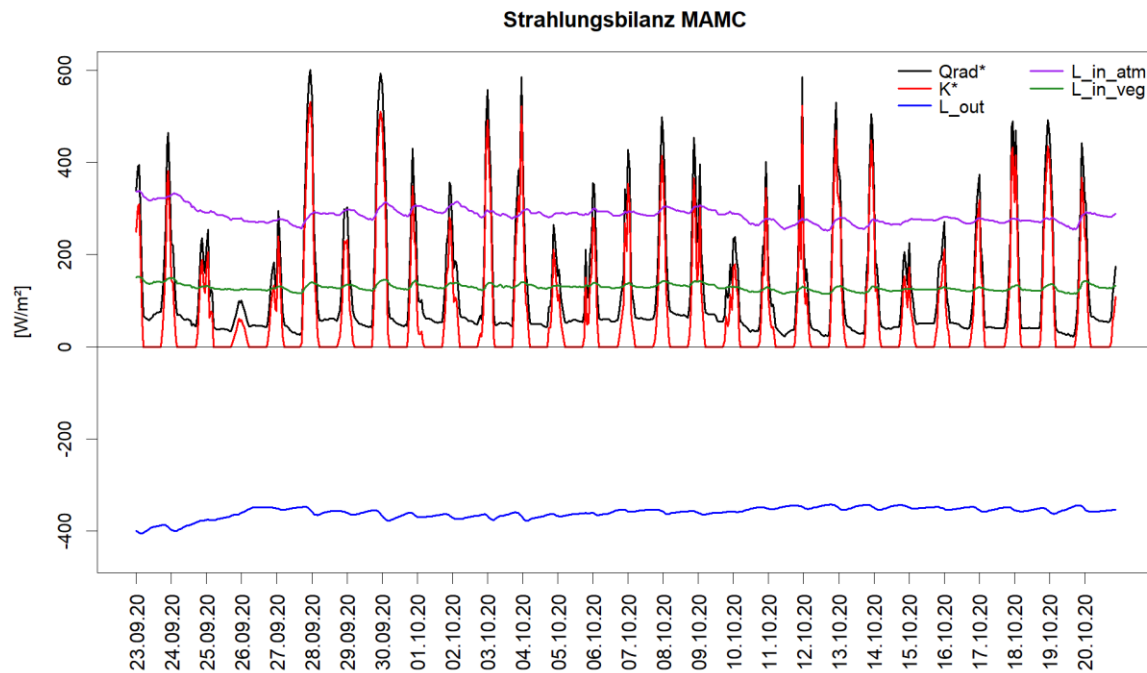


Abbildung 32: Strahlungsbilanz

6. Diskussion

6.1 Voruntersuchung

Da sich deutliche Konzentrationsunterschiede der Ionen an den Zuflussstellen Z1 und Z2 zeigen, ist eine weitere Untersuchung und Durchführung einer Mischungsrechnung zur Feststellung von G-O-I von Interesse. Die gemessene geringere Konzentrationen des Nitrats und Sulfats an den Zufluss-Messstellen könnten ein Zeichen für niedrige Sauerstoffwerte und Denitrifikation im GW sein.

Das deutlich höhere Isotopenverhältnis am Zuflussstandort Z1 zeugt von einer Anreicherung der Isotope im Wasser. Da sich dieses Muster nur am Standort Z1 zeigt, kann dies durch den sonnenexponierten Standort der Messstelle Z1 bedingt sein und steht nicht direkt in Korrelation zum GW-Zufluss. Die Voruntersuchung der Temperatur zeigt deutlich kältere Messungen im vermuteten Zuflussbereich.

Detaillierte Untersuchungen der stabilen Wasserisotope des OWs und des GWs wären zur Bestätigung der Beobachtung und Bestimmung eines GW-Anteils im OW bedeutsam. Für eine Analyse einer G-O-I mittels Energiebilanz wird eine detaillierte Überwachung mit Temperatursonden im GW und OW als sinnvoll erachtet.

6.2 Rohdaten: Ionen und Isotope

6.2.1 Ionen

Im Folgenden werden die Rohdaten der Anionen betrachtet. Die Diskussion stützt sich auf Abbildung 12 und Abbildung 13 aus dem Kapitel 5.2.1.

Das Verhaltensmuster der OW-Messstellen von Chlorid und Sulfat deuten auf einen Verdünnungseffekt der Konzentration aufgrund des ionenarmen Ns und erhöhten Abflusses hin. Mögliche Ursache für die fehlende Reaktion beider Ionen auf den Abfluss und den N am 31.08.2020 kann ein kurzes Starkregenereignis sein. Die gemessenen Nitrat-Konzentrationen zeigen einen gegenläufigen Trend eines Konzentrations-Anstiegs bei Abflussanstieg. Erklärbar ist dieses Verhalten mit diffusem Nitrateinträgen durch Auswaschungsprozesse an der Oberfläche, beispielsweise durch Dünger oder durch die Kuhweide, welche über den Oberflächenabfluss der Elz zufließt.

Die noch ablaufenden Mobilisierungsprozesse nach dem Einbau am 25.08.2020 sind für die erhöhten Messwerte im GW am Anfang der Messreihe verantwortlich. Das GW zeigt in Hinblick auf die Chlorid-Konzentration das Muster einer höheren Konzentration als das OW während der Peak-Ereignisse, andernfalls eine geringere Konzentration. Erklärung für dieses Verhalten ist ein Anstieg des GW-Spiegels durch das ionenarme Niederschlagswasser bei Abflussanstieg, welches zu Lösungsprozessen im GW führen kann. Die Nitrat-Konzentration im GW weist Messwerte nahe der Messgrenze bis Null auf, welche durch Denitrifikationsprozesse bedingt sind. Durch die gemessene geringe Sauerstoffkonzentration von 0,2 mg/l im GW ist dieser Prozess nachweisbar. Der plausibelste Erklärungsansatz für die stark abfallenden Messwerte der Sulfat-Konzentration im GW sind länger andauernde Auswirkungen von Mobilisierungsprozessen nach dem Einbau der Piezometer. Auffällig ist der Konzentrationsabfall des Sulfats am dritten Peak-Ereignis. Eine plausible Erklärung wäre die Annahme, dass in der MW-Phase ein weiteres Wasserreservoir, nämlich das Elzwasser, das zuvor an der Köndringer Brücke abgeflossen ist und um die beweidete Kiesfläche fließt, durch das Kiesbett filtriert und so die Sulfat-Konzentration beeinflusst.

Das Verhalten eines Verdünnungseffekts, der über den zeitlichen Verlauf zunimmt, wird durch den abnehmenden Median der Boxplots in Abbildung 13 verdeutlicht. Der hohe Interquartilsabstand des Nitrats zeigt zudem, dass eine starke Streuung der Messwerte vorliegt, was auf die minimale Konzentrationen von 0 mg/l im GW zurückzuführen ist. Die Extremwerte des Sulfats in den NW2-Phasen sind begründet durch länger andauerndes Einpendeln nach den Mobilisierungsprozessen des Einbaus.

Im Folgenden werden die Rohdaten der Kationen betrachtet. Die Beobachtungen und Diskussionen stützen sich auf Abbildung 14 und Abbildung 15.

Das OW der Elz zeigt in der Konzentration des Calciums, Natriums, Magnesiums und Kaliums einen Verdünnungseffekt. Im Calcium könnte dieses Verhalten auf das Kalk-Kohlesäure-Gleichgewicht zurückzuführen sein, dass durch einen Kohlesäure-Überschuss bestimmt ist. Welche Calciumverbindung und damit Konzentration im Wasser stabil ist, steht in Abhängigkeit zum pH-Wert (Dittmar 2011). Eine Erklärung für die leicht höhere Konzentration könnte sein, dass bei geringerem Abfluss das geogene Calcium mehr Zeit für Verwitterungsprozesse hat und der Lösungsprozess von Calcium temperaturabhängig ist. Bei warmen Wassertemperaturen kann mehr Calcium gelöst werden als bei kalten Wassertemperaturen.

Die Konzentrationsabnahme bei höherem Abfluss bei Natrium, Magnesium und Kalium im OW ist am plausibelsten durch Verdünnung der Konzentration durch ionenärmeren N erklärbar. Bezüglich der Magnesium-Konzentration im OW an der untersten Messstelle MC ist ein reaktives Verhalten und Abbauprozesse entlang des renaturierten Gewässerabschnitts vorstellbar, sodass die maximale Auswirkung der Prozesse dort am deutlichsten wird.

Das Konzentrationsverhalten der Kationen im GW zeigt bis auf kleine Ausnahmen ein konstant abnehmendes Muster. Die Calcium-Konzentration im GW ist, wie die des OWs, maßgeblich bestimmt durch das Kalk-Kohlesäure Gleichgewicht und die Temperatur. Das Verhalten der Natrium-Konzentration im GW mit kontinuierlichem Abfall bei NW und stärkerem Abfall bei MW kann ionenärmerem, infiltrierendem GW oder einem externen Zustrom geschuldet sein. Dies könnte beispielsweise der konzentrationsärmeren Elz direkt durch das nahliegende Gerinnebett oder einer Infiltration des Seitenarms der Elz geschuldet sein, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben. Das Magnesium im GW reagiert eher träge, und ist nicht gut wasserlöslich. Es zeigt keine große Beeinflussung durch Abflussbedingungen. Der geringfügig kontinuierliche Konzentrationsabfall des Kaliums resultiert möglicherweise durch Mobilisierung und Auswaschung der gebunden Kaliumionen aus den Tonpartikeln im Boden und im Gestein. Kalium ist als siebthäufigstes Element in der Erdkruste überwiegend in Mineralen und Gesteinen wie dem Kalifeldspat oder dem Muskowit (Hellglimmer) zu finden (Dittmar 2011). Geringe Anstiege der Konzentration des Kaliums in der NW2 lässt sich durch mehr Zeit für Verwitterungsprozesse erklären.

Generell ist es schwierig das Verhalten der Ionen und ihre meist geringfügigen Messunterschieden, vor allem der stark reaktiven Kationen, zu beurteilen. Da keine Langzeitdaten vorliegen, ist unklar, wie stark ausgeprägt saisonale Schwankungen vor allem im GW erkennbar sind und welches Verhalten unterschiedlichen Abflusswerten geschuldet ist.

6.2.2 Isotope

Zu Beginn werden die $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Isotopenverhältnisse des OWs betrachtet. Betrachtet man nur die OW-Messstellen des $\delta^{18}\text{O}$ Isotopenverhältnis, erkennt man eine Reaktion auf strahlungsintensive Tage mit potenziell hoher Evaporation (E) mit entsprechend angereichertem Wasserisotop bzw. geringerem Isotopenverhältnis vor allem in den NW-Phasen. Die Zunahme mit Isotopen angereichertem Wasser der Messpunkte M1 und MC in den NW-Phasen kann durch den geringen Wasserstand und/oder einstrahlungsexponierte Messstellen begründet sein. Der hohe Abfluss und N äußert sich durch starke Verhältnisabnahme. In den Retentionsphasen nach den Peaks nimmt das Isotopenverhältnis durch kaum fallenden N und E bei einer mittleren Tageseinstrahlung von bis zu 200 W/m^2 erneut zu. Die generelle Zunahme des Verhältnisses kann durch die Zugabe von isotopisch „leichterem“ Niederschlagswasser, das überwiegend in den Herbst- und Wintermonaten fällt, resultieren. Lediglich der letzte Messtag fällt aus dem Muster und ist nicht mittels der Niederschlagsdaten von Teningen zu begründen.

Die NW-Phase ist wie beschrieben hauptsächlich durch Evaporationsprozesse beeinflusst, wohingegen das MW „leichteres“ OW als der N aufweist. Der deutlich höhere Abfluss in der MW-Phase gründet sich auf dem steigenden N, der Abfluss gründet sich allerdings nicht nur auf der Signatur des lokal gefallen N, sondern spiegelt den gesamten N des gesamten EZG wider.

Im Anschluss wird der Schwerpunkt auf das $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Isotopenverhältnis des GWs gelegt. Da im GW ein Verdunstungseinfluss durch Einstrahlung ausgeschlossen werden kann, sind die höheren Isotopenverhältnisse durch Infiltration „leichteren“ Niederschlagswassers oder anderer Reservoirs zu erklären. Eine Abnahme der Isotopenverhältnisse im GW wäre hauptsächlich durch eine G-O-I möglich.

Generell wird durch die Daten die These unterstützt, dass die dominierende Herkunft des GWs bei NW1 und NW2 das GW selbst ist. Bei MW ist die Zusammensetzung des Isotopenverhältnisses etwas anders, was man auch an den deutlich geringeren Hauptionen-Konzentrationen sieht. Hier liegt offensichtlich eine Mischung aus verschiedenen Reservoirs vor und könnte ein Anzeichen für G-O-I sein.

Allerdings liegen auch hier keine Langzeitdaten der Isotope vor, daher ist unklar, wie stark ausgeprägt vor allem im GW ohnehin eine saisonale Schwankung erkennbar wäre oder ob es speziell der NW- bzw. MW-Situationen geschuldet ist.

6.3 Darcy Zustrom

Die Kernbeobachtung der Ergebnisse des GW-Zustroms nach Darcy ist der direkte Zusammenhang des Anstiegs des GW-Zuflusses und des GW-Pegels bei Abflussanstieg der Elz, welcher in Abbildung 18 vor allem durch GW2 deutlich wird. In Abbildung 4 sind die direkten Reaktionen des GWs auf das OW zu sehen.

Die Unterschiede des GW-Zustroms je Piezometer in die Elz stützen sich primär auf die berechneten piezometerspezifischen k_f -Wert, das Gefälle und die Distanz der GW-Messstelle zur Elz. Die durchströmte Fläche entspricht in der Länge dem Flussabschnitt von 6,7 m und wird mittels der Temperatur-Logger abgeschätzt. Die Tiefe variiert und bildet sich aus der Differenz des Wasserstandes der Elz und des Piezometers. Außerdem wird ein Porenvolumen von 25 % berücksichtigt. Folglich variiert die durchströmte Fläche des GWs entsprechend der Auflösung der Pegellogger 15-minütig.

Die drei ausschlaggebenden Parameter - der k_f -Wert, das Gefälle und die Distanz - werden für die einzelnen Piezometer betrachtet und hinsichtlich ihrer Aussagekraft diskutiert.

Das Ergebnis des Durchlässigkeitsbeiwerts für den Piezometer GW2 fällt durch einen sehr großen Wert und deutlich höheren GW-Zufluss auf, siehe Tabelle 5 und Tabelle 6. Grund dafür ist die große Höhendifferenz von knapp 1 m bei geringer Distanz des Pegels zur Elz von rund 12 m (Abbildung 4, Karte 5). Die Annahme, dass der Zuflussbereich des Pegels in der durch das hydrologische Dreieck ermittelten GW-Strömungsrichtung liegt, wie in Karte 5 gezeigt, ist hier unrealistisch. Da in der Realität nicht von einem einzigen, klar definierten Weg des Zustroms ausgegangen werden kann und die Umgebung ähnliche Bodenparameter des sandigen, kiesigen Boden aufweist, ist es wahrscheinlicher, dass Pegel GW2 durch seitlich infiltrierendes OW in näherer Umgebung gespeist wird. Daraus resultiert der in Kapitel 5.3 beschriebene, veränderte Pegelwert GW2*.

Der Piezometer GW3 fällt durch den geringsten k_f -Wert und den sehr geringen GW-Zufluss sowie kaum Reaktion auf hohe Abflussereignisse in Abbildung 18 auf. Abbildung 5 verdeutlicht jedoch, dass GW3 geringe Auswirkungen auf die Peak-Ereignisse am 26.09.2020 und am 08.10.2020 zeigt. Entsprechend der Fließrichtung in Karte 5 ist die Messstelle GW3 durch den Zustrom des Seitenarmes genährt. Der Seitenarm der Elz zeichnet sich bei Niedrigwasserständen durch geringen Wasserstand aus. Zeitweise versickert das OW und ist während der NW-Phase nicht durchgängig. Auch das Fließverhalten des Seitenarms ist deutlich ruhiger und zeichnet sich durch laminares Fließverhalten und Stillwasserbereiche aus. Dieses Verhalten erklärt die geringeren Reaktionen des Pegels auf Peak-Ereignisse.

Die Messstelle GW4 liegt mit dem berechneten k_f -Wert in Tabelle 5 und dem täglichen GW-Zustrom, dargestellt in Abbildung 18, geringfügig über den Werten des Piezometers GW3. Die Distanz des Piezometers zum Zustrom-Bereich im Gerinnebett der Elz ist die kürzeste, siehe Karte 5. Der in Abbildung 4 dargestellte Wasserstand des Piezometers zeigt, dass GW4 über den gesamten Messzeitraum den höchsten Wasserstand ü. NN. zeigt, was zur Annahme führt, dass das einströmende Wasser dort den größten Druck auf das GW ausübt.

Betrachtet man den GW-Zustrom anteilig am Abfluss der Elz in täglicher Auflösung über den gesamten Messzeitraum, zeigt sich das im Kapitel 4.1 beschriebene Verhalten der Zunahme des GW-Zustroms bei Abflussanstieg der Elz. Die Medianwerte des GW-Zustroms bewegen sich, ausgenommen des Pegels GW2, für den gesamten Messzeitraum zwischen 0,02 % und 0,32 %, was einem Zustrom von zwischen 0,0006 m³/s und 0,0074 m³/s entspricht.

Betrachtet man den GW-Zufluss gruppiert nach Phasen in Tabelle 8, zeigt sich geringfügig mehr Abfluss in der MW-Phase als in der NW-Phase, was dem Muster des gesamten Messzeitraums entspricht. Die Unterschiede machen sich erst in der dritten und vierten Nachkommastelle bemerkbar und sind so gering, dass eine sinnvolle Interpretation nicht möglich ist.

Wird der GW-Zustrom zur Elz ereignisorientiert für zwei Peak-Abflüsse und zwei Niedrigwasserstände betrachtet, wäre hier theoretisch der größtmögliche Unterschied des GW-Zustroms in die Elz über die Messperiode sichtbar. Vergleicht man die Resultate der Tabelle 9 und Tabelle 10 ist jedoch kein eindeutiger Unterschied erkennbar. Schon die beiden Peak-Ereignisse unterscheiden sich in der ersten Nachkommastelle des anteiligen GW- Zuflusses der Elz. Hier zeigt sich, dass auch die Betrachtungen einzelner Ereignisse nicht vergleichbar sind.

Zusammenfassend ist der Versuch, die berechneten GW-Anteile der Elz über Darcy in aussagekräftige Gruppen zusammenzufassen, sowohl für die Phasenwerte als auch für einzelnen Ereignisse nicht sinnvoll. Grund dafür sind die zu geringen Unterschiede des Zuflusses des GWs in die Elz. Dazu kommt, dass natürliche Systeme hochdynamisch sind. Kein Peak- Ereignis gleicht einem anderen exakt: Boden, Vegetation, Klima und Abfluss unterliegen Wandlungen und bedingen sich gegenseitig. Da sich jedes System anders verhält ist es schwierig das System der Elz mit anderen Systemen zu vergleichen. Meist werden dafür Modelle verwendet, die unterschiedliche Landnutzung, Vegetation, E, N und Abflussverhalten berücksichtigen (Yang et al. 2015).

Aus diesem Grund wird hier auf Vergleichswerte aus der Literatur verzichtet. Stattdessen wird eine Methodenveränderung der Bestimmung der Gewässerabschnittslänge für die Abschätzung von G-O-I über Darcys Gesetz nach Noorduijn et al. (2014) auf die eigenen Daten angewandt und die so gewonnenen neuen Ergebnisse mit den eigenen Ergebnissen verglichen.

Noorduijn et al. (2014) fanden heraus, dass die Distanz des Piezometers zum Gewässer eine entscheidende Rolle spielt. Die Distanz des Piezometers zum Gewässer repräsentiert den GW- Zufluss zu einem Gewässer am besten für einen gleich großen Gewässerabschnitt. Mit anderen Worten beschreibt ein Piezometer in 8 m Distanz zum Fluss den GW-Zufluss für einen Gewässerabschnitt von 8 m Länge am besten. Da die bisher betrachteten Werte sich auf eine feste Länge des Gewässerabschnitts entsprechend der Temperatur-Logger bezogen, bringt diese Veränderung Dynamik in die durchströmte Fläche des GWs in die Elz.

Die Berechnung des GW-Zuflusses nach Darcy wird so für die eigenen Messdaten mit der Abänderung wiederholt, dass der durchflossene Gewässerabschnitt in der Länge, der Distanz des Piezometers zur Elz entspricht. Die Resultate der Anteile des GWs am OW werden in Tabelle 15 dargestellt und mit den vorab berechneten Ergebnissen verglichen.

**Tabelle 15: Darcy: Mediane der GW-Anteile über den gesamten Zeitraum
, unterschiedliche Methoden**

	GW2	GW2*	GW3	GW4
Ursprüngliche Methode aus Kapitel 3.4.2	1,13 %	0,18 %	0,02 %	0,12 %
Veränderte Methode nach Noorduijn et al. (2014)	2,02 %	0,33 %	0,55 %	0,93 %

Betrachtet man die beiden Ergebnisse, zeigen sich Unterschiede im Anteil des GW-Zuflusses bei allen Piezometern deutlich in den gestiegenen GW-Anteilen in der Elz, vor allem für Piezometer 3 und 4. Durch die weite Distanz der Piezometer 3 und 4 zur Elz von 150 m und 50 m ergibt sich eine knapp 23-fache Gewässerlänge des GW-Zuflusses für GW3 und eine rund 8-fache Gewässerlänge für GW4 im Vergleich zur ursprünglichen Berechnung.

Aus dem Vergleich in Tabelle 15 wird die Abhängigkeit des GW-Zuflusses von der durchströmten Fläche der Elz erkenntlich. Im Vergleich zu den neu berechneten Anteilen sind die ursprünglichen GW-Anteile mit festem Bezug zum Gewässerabschnitt deutlich geringer, teilweise nur ein Fünftel des Betrags. Wie realistisch die neue Berechnung des GW-Zustroms ist, ist fraglich, da die Temperaturdaten der Hobo-Logger den erweiterten Zuflussbereich von 50 m und 150 m nicht mit kühleren Temperaturmessungen am linken Gewässerrand bestätigen können. Für eine bessere Eingrenzung des Zufluss-Bereichs und somit einer weniger fehlerbehafteten Mengenbestimmung des GWs anteilig an der Elz, wären Langzeitdaten der Temperatur- und Pegeldaten in höherer Auflösung nötig.

6.4 Mischungsrechnung

Die Wahl der Tracer für die Berechnung der Mischungsrechnung ist entscheidend, um eine möglichst realistische Aussage über den Zustrom des GWs in die Elz und von der Elz in den GW-Körper tätigen zu können. Deshalb fiel die Wahl auf möglichst konservative Tracer. Für die Berechnung werden deshalb die Anionen aus den Haptionen sowie die stabilen Wasserisotope verwendet. Allgemein ist zu berücksichtigen, dass eine G-O-I vorliegt und der berechnete Anteil des GWs in der Elz aufgrund des bereits gemischten GWs generell niedriger wäre, siehe Kapitel 5.4.3.

6.4.1 Grundwasseranteil im Oberflächenwasser

6.4.1.1 Tracer: Ionen

Da die Rohdaten eine realitätsferne Spannweite des GW-Zuflusses liefern, werden die Daten gefiltert, siehe Abbildung 19. Die erste Idee, die Nachweisgrenze als Filter zu verwenden, erwies sich schnell als unangebracht, da so ein Großteil der Daten unbrauchbar wird und lediglich die extremen Ergebnisse zurückblieben, welche zu einem hohen GW-Zufluss führten.

Aufgrund der geringen Reaktivität des Chlorids und des Sulfats kommen diese beiden Ionen einem konservativen Tracer am nächsten und eignen sich am besten für die Mischungsrechnung. Daneben wird aufgrund des eindeutigen Unterschieds der Konzentrationen des OWs und des GWs das Nitrat als geeigneter Parameter der Mischungsrechnung ausgemacht. Da die Kationen ein sehr reaktives Verhalten aufweisen, wird eine Aussage bereits bei geringen Distanzen unsicher. Sie werden deshalb für die Mischungsrechnung nicht berücksichtigt. Der Piezometer GW2 zeigt die größten Unterschiede in den Messwerten gegenüber dem OW und wird als repräsentativ für das GW angenommen.

Die berechneten Anteile des GW-Zustroms der Elz basierend auf der Mischungsrechnung stützen sich auf die Messunterschiede der Ionen-Konzentration des OWs und des GWs, siehe Gleichung (13). Wie in Abbildung 20 ersichtlich wird, sind die Differenzen der Messstellen gering und liegen zum Großteil im Bereich der Messungenauigkeit. Für die drei Anionen wird deshalb eine Bedingung erstellt, die die Realität möglichst gut abbildet. Die anfängliche Idee wird umgekehrt und für die Datensätze des Chlorids und des Sulfats wurden die Extrema entfernt. Grund dafür ist, dass die Ausreißer zu unrealistisch hohem GW-Zufluss führen und hier andere Effekte eine Rolle gespielt haben müssen. Da der Piezometerbau länger anhaltende Mobilisierungsprozesse des Sulfats hervorgerufen hat, wird diese Messreihe gekürzt. Die Modifizierung des Datensatzes des Nitrats wird aufgrund nachweislich stattfindenden Denitrifikationsprozessen im GW durchgeführt.

Ein negativer GW-Zufluss bedeutet, dass die Konzentrationsänderung nicht auf einen GW- Zufluss zurückzuführen ist, sondern ein anderer Effekt vorliegt, sodass negative Mischungsverhältnisse aus dem Datensatz ebenfalls entfernt werden.

Der daraus resultierende kleine Datensatz besteht aus 12 Messtagen für Chlorid und Nitrat und sieben Messtagen für Sulfat mit möglichst realitätsnahen Werten, siehe Abbildung 21. Die geringen Messdifferenzen, der kleine Datensatz und die Tatsache, dass der Piezometer GW2 hier das GW repräsentiert, bilden zusammen die Unsicherheit der Ergebnisse. Auf dieser Basis können die resultierenden Ergebnisse diskutiert werden.

Betrachtet man den GW-Zustrom anteilig am Abfluss der Elz in täglicher Auflösung im Rohdatensatz in Abbildung 19 und im gefilterten Datensatz in Abbildung 21, ist kein deutliches Muster der GW-Anteile in der Elz in Zusammenhang mit dem Abfluss der Elz ersichtlich. Die Medianwerte des Zustroms an GW bewegt sich zwischen 0,75 % und 2,91 % für den gesamten Messzeitraum. Dies entspricht einem Zustrom von 0,018 m³/s und 0,054 m³/s.

Die gruppierten Phasenwerte des GW-Zuflusses zeigt kein eindeutiges Muster der Quantität des zufließenden GWs in Verbindung zum Abfluss der Elz. Dieses Verhalten ist aufgrund der geringen Datenmenge zu erwarten und eine Gruppierung mit Vorsicht zu interpretieren. Nach dem Resultat des Nitrats fließt der Elz mehr GW in der NW-Phase als in der MW-Phase zu; nach der Mischungsrechnung mittels der Chlorid-Konzentration fließt der Elz in der MW-Phase mehr GW zu als in der NW-Phase. Die Zuflussanteile des GWs zur Elz bewegen sich in der NW-Phase zwischen 0,68 % und 3,87 % und in der MW-Phase zwischen 0,75 % und 2,25 %. Die Werte des Nitrats streuen über beide Phasen stärker als Chlorid und Sulfat in der MW-Phase.

Der am realistischsten einzuschätzende Wert entspricht dem ermittelten Zuflussanteil des Systems im Gleichgewicht. Dort kann von einem möglichst geringen Einfluss des Zeitversatzes von GW und OW und der Druckdynamik ausgegangen werden. Der ermittelte Anteil des GWs liegt bei 0,29 % und kann aufgrund der starken Abnahme der Konzentrationen des Sulfats und der Nitrat-Konzentrationen von Null nur für einen Zeitraum des Chlorids bestimmt werden.

6.4.1.2 Tracer: Isotope

Da die ermittelten GW-Zuflusswerte der Rohdaten zwischen -171,76 % und 306 % fernab der realistischen Zustromwerte des Gebiets liegen, wird versucht eine sinnvolle Filterung durchzuführen. Verwendet man die Messgenauigkeit als Filter, bleiben lediglich vier Datenpunkte übrig, die die Extremwerte widerspiegeln. Wird hingegen die Umkehrlogik, wie zuvor beim Ionentracer verwendet, resultieren ebenso wenige Datenpunkte mit einer unrealistischen Spannweite an Zufluss. Dieses Bemühen zeigt, dass vor allem bei geringem Unterschied die Grenzen der Methode der Mischungsrechnung deutlich werden, da hier der berechnete GW-Zufluss zur Elz deutlich überschätzt wird.

Letztlich kann kein geeigneter Filter für die Daten gefunden werden, da sich die Signatur des OWs und des GWs nur sehr geringfügig voneinander unterscheidet. Es ist nicht möglich, plausible Mischungsverhältnisse des GW-Zustroms in die Elz über die Isotope zu ermitteln.

Allerdings gaben die Isotopenwerte Aufschluss über die Fließgeschwindigkeit des GWs und dessen Herkunft. Durch die zu beobachtende Verzögerung von 10 Tagen, die die Isotopensignatur im GW im Vergleich zum OW zeigt, können piezometerspezifische k_f -Werte berechnet werden. Die daraus berechneten GW-Zuflussmengen über die Darcy Abschätzung sind dadurch gebietsspezifisch und realitätsnah.

6.4.2 Oberflächenwasseranteil im Grundwasser

Für die Interpretation der berechneten OW-Anteile in den einzelnen GW-Messstellen spielt neben den gemessenen Konzentrationsunterschieden die Richtung und damit die Quelle des Zustroms des OWs zur GW-Messstelle eine entscheidende Rolle.

Betrachtet man das Verhalten der Piezometer GW1, GW2 und GW4 zeigt sich unter den dreien ein ähnliches Muster der fast zeitgleichen Konzentrations- bzw. Verhältnisabnahme. Messstelle GW3 hingegen zeigt kaum eine Reaktion auf den N und den gestiegenen Abfluss der Elz, was zu der Vermutung führt, dass dieser Piezometer nur geringfügig dem Einfluss des OWs ausgesetzt ist, siehe Abbildung 25. Der berechnete Anteil von OW in der GW-Messstelle GW3 bewegt sich zwischen 1 und 8 %, siehe Tabelle 13, und spricht für diese Annahme. Wie bereits im Kapitel 6.3 beschrieben, ist die Messstelle GW3 die Einzige, die nach berechneter Fließrichtung nicht durch den Hauptstrom der Elz, sondern durch den kleineren Seitenarm mit bereits beschriebenem ruhigeren Fließverhalten beeinflusst ist, siehe Karte 5.

Die Fließrichtung von GW1 kann nicht genau bestimmt werden, da mindestens drei Höhenangaben dafür nötig sind. Eine Tendenz der Fließrichtung entlang des Gradienten vom Piezometer Richtung Elz kann jedoch bestätigt werden, siehe Abbildung 4. Der hohe Anteil des OWs in Messstelle GW1, der zwischen 20 % und 24 % liegt, lässt sich durch die Höhendifferenz zwischen dem Pegel der Elz und dem Piezometer GW1, der bei ca. 1 m während des betrachteten Events liegt, siehe Abbildung 4, plausibilisieren. Da der Pegel der Elz sich nicht auf einer Höhe mit dem Piezometer befindet, sondern ca. 30 m flussaufwärts, kann dort die Differenz zwischen dem Wasserstand der Elz und dem Piezometer geringer sein. Es ist möglich, dass flussaufwärts OW der Elz seitlich in das sandig-kiesige Ufer filtriert und so ein OW-Zufluss zum Piezometer entsteht. Diese Überlegung wird bereits für die gegenüberliegende Messstelle GW2 zur Berechnung eines plausiblen k_f -Wertes in Kapitel 5.3 als realistisch erachtet.

Das Ergebnis zeigt, dass trotz des nachgewiesenen Gradienten, den die Piezometer zum Pegel der Elz haben, eine gegenseitige Beeinflussung besteht. Hier bestätigt sich die in Kapitel 6.3 dargelegte Annahme, dass die Infiltrationsstellen der Elz flussaufwärts höher liegen und das GW vom OW beeinflusst ist.

Die Ergebnisse beziehen sich allerdings nur auf ein Event, was die Aussagekraft einschränkt. Zudem wird nur das oberflächliche GW der Messstellen beprobt. Über die tieferen Schichten des GWs oder den gesamten GW-Körper kann keine Aussage über die Beeinflussung des OW getroffen werden.

6.5 Energiebilanz

6.5.1 Energiebilanz über Mischungsrechnung der Temperatur

Die Wahl des Zeitabschnitts für die Mischungsrechnung, die anhand der die Temperatur durchgeführt werden kann, ist nicht trivial. Die Überlegung, die Anteilsbestimmung nur für nächtliche Werte zu berechnen, wird aufgrund der geringen Differenzen des OWs, die sich erst in der dritten Nachkommastelle äußerten, wohingegen sich die Messgenauigkeit auf eine Nachkommastelle bezieht, verworfen. Letztlich wird die Berechnung des GW-Anteils in der Elz für die Phase des MWs durchgeführt, obwohl die Temperaturdifferenz der OW-Messstellen sich nicht signifikanter unterschieden als die der Nacht. Motivation, diesen Messzeitraum trotzdem auszuwählen, war der deutliche Messunterschied des GWs zum OW, der aus einer deutlichen Abkühlung des OWs ab dem 25.09.2020 resultiert und in Abbildung 27 ersichtlich wird.

Prozesse, die bei der Verhältnisbestimmung des GWs in der Elz berücksichtigt werden müssen, sind einerseits der zeitliche Versatz der Messwerte im GW im Vergleich zum OW, der bei 1 Stunde 12 Minuten liegt und aufgrund der Auflösung auf 1 Stunde 15 Minuten gerundet wird. Andererseits spielt die bereits angeführte geringe Temperaturdifferenz der Messstellen M1 und M2, die in Kapitel 4.2 deutlich werden, eine wichtige Rolle.

Die dargestellten Ergebnisse in 15-minütiger Auflösung des GW-Zuflusses in Abbildung 28 bewegen sich hauptsächlich im Bereich unter 0,5 % GW-Anteil in der Elz. Auffällig an den Ergebnissen ist die Gruppierung in zeilenähnliche Muster. Grund dafür ist die begrenzte Auflösung der Temperaturmessung auf drei Nachkommastellen.

Inwieweit die geringe Temperaturdifferenz der Messstellen der Elz Einfluss auf die berechneten Mischungsverhältnisse hat, wird anhand eines Ausschnittes des Datensatzes in Tabelle 16 aufgezeigt. Das Messfenster von 45 Minuten am 02.10.2020 verdeutlicht, dass eine geringfügige Temperaturänderung an einem Messpunkt, hier M1, großen Einfluss auf das berechnete Mischungsverhältnis hat. Die scheinbar bessere Auflösung der Temperaturen an den Messstellen M1 und M2 resultieren aus dem Mittelwert mehrerer Temperatursonden an einem Standort. Da die Messgenauigkeit der Temperatursonde bei einer Nachkommastelle liegt, der Datensatz aber zu keinem Zeitpunkt eine so große Messdifferenz aufweist, kann keine verlässliche Aussage über den GW-Anteil in der Elz für diese Methode getroffen werden.

Tabelle 16: Ausschnitt des Datensatzes über die Temperatur

	Temperatur M1 [°C]	Temperatur M2 [°C]	Temperatur GW2 [°C]	Verhältnis GW/M2 [%]
2020-10-02 09:30:00	13,14050	13,17275	19,282	0,525116
2020-10-02 09:45:00	13,15650	13,17275	19,282	0,265284
2020-10-02 10:00:00	13,17267	13,17275	19,282	0,001364

Der berechnete Energiegewinn bzw. -verlust über den gesamten Messzeitraum in Abbildung 29 ist mit der bereits beschriebenen Unsicherheit und eingeschränkten Aussagekraft zu bewerten. Der Energiegewinn zwischen 1,75 μ W und 82,46 MW in der Phase des Mittelwassers sowie die Dynamik des Energiegewinns und -verlustes während der NW-Phasen sind bestenfalls Orientierungswerte.

6.5.2 Energiebilanzmodell

Aus der Energiebilanz in Abbildung 31 geht hervor, dass diese durch die Strahlungsbilanz (Q^*) dominiert wird. Verglichen mit dem eingehenden Datensatz der kurzwelligigen Strahlung lässt das den Schluss zu, dass der modellierte Schattenanteil nur einen geringen Teil der Sonneneinstrahlung abfängt. Da dieses Modell auch mit dem Winkel zur Sonne und der fiktiven Höhe einer Ufermauer rechnet, ist das keine Überraschung. Für eine realistische Abschätzung der Beschattung müsste zusätzlich ein Abstand der Mauer zum Gewässer berücksichtigt werden. Aus der Energiebilanz zeigt sich zudem, dass der Wärmestrom am Gerinnebett den zweitgrößten Energiegewinn darstellt und damit bedeutenden Einfluss hat. Dieser Wert wird allerdings als konstant angenommen und ein Einfluss durch unterschiedliche Wassertemperaturen spielt keine Rolle. Die unterschiedlichen Wassertemperaturen spiegeln sich lediglich im unterschiedlich starken Energieverlust durch das GW wider.

Diese Vereinfachung bei einem dominierenden Energiefluss kann zu einem großen Fehler führen.

Abbildung 33 zeigt, dass der Modelldurchlauf den Verlauf der gemessenen Temperatur einigermaßen gut erfasst. Wobei die modellierten Temperaturen wärmer als die gemessenen Temperaturen sind. Dieses Verhalten war jedoch zu erwarten, da das Modell den GW-Zufluss aus der gemessenen Temperatur herausrechnet.

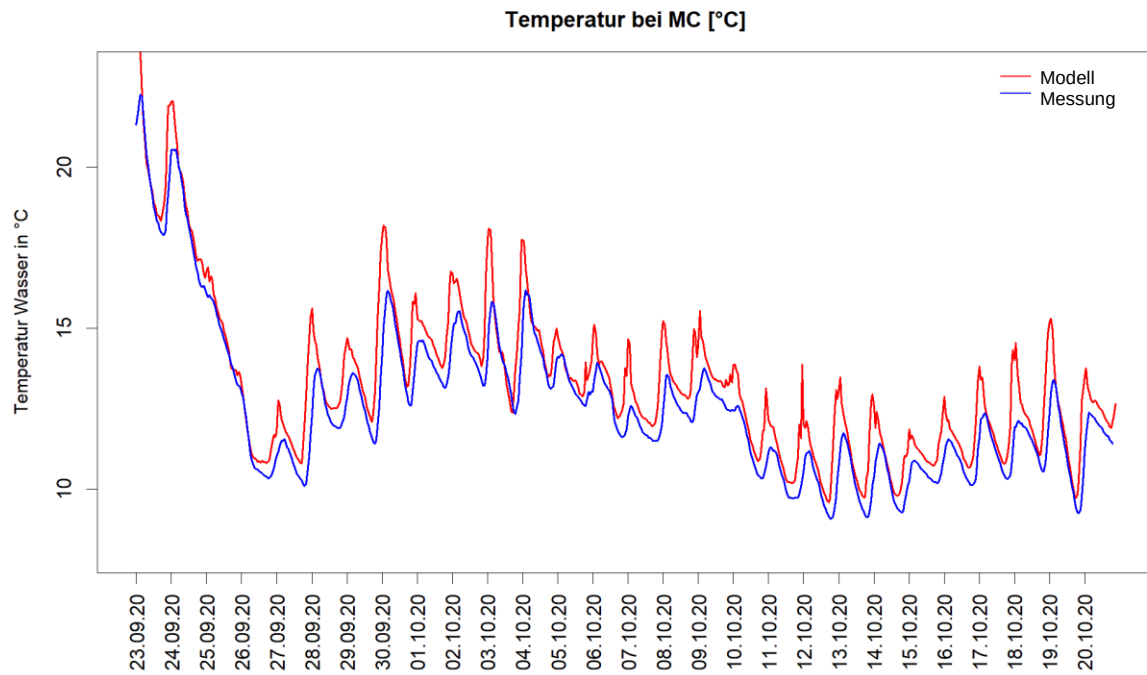


Abbildung 33: Temperaturverhalten am Standort MC. Dargestellt ist die modellierte und die gemessene Temperatur am Standort MC.

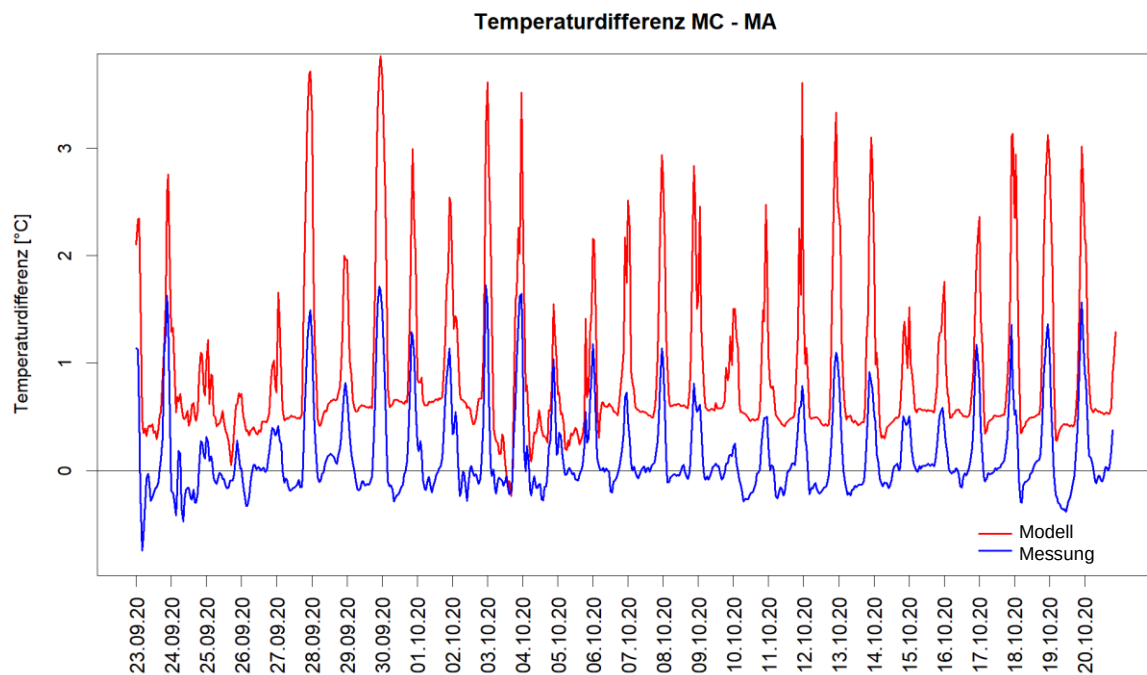


Abbildung 34: Temperaturdifferenz der Standorte MC und MA. Die gemessene Differenz ist in Blau, der ausgewählte Modellauf in Rot dargestellt.

Durch Abbildung 34 wird deutlich, dass der ausgewählte Modell-Run deutliche größere Differenzen der Temperatur aufweist als die reale Messung. Bis auf eine Ausnahme ist die Temperatur an Standort MA immer geringer als am Standort MC. Die Differenzen der gemessenen Wassertemperatur der Messstellen MA und MC sind im Vergleich zum kleinen Untersuchungsgebiet der Messstellen M2 und M1 in Abbildung 27 (links) deutlicher. Wie bereits im kleinskaligen Untersuchungsgebiet unterscheiden sich die Messunterschiede der MW-Phase weniger als in der NW2-Phase.

Unter der Bedingung, dass eine sinnvolle Anwendung des Modells nur stattfinden kann, wenn alle Energieströme mittels plausibler Eingangsdaten abgebildet werden, wird versucht den Anteil des GW-Zustroms zur Elz zu bestimmen. Dies hat jedoch nur in sehr eingeschränktem Maße funktioniert. Betrachtet man die Anteile des GW-Zuflusses in Tabelle 14 für die fünf beschriebenen Szenarien, so liegt der bestimmte GW-Anteil im Median für alle Gruppierungen außer der MW-Phase, deutlich zu hoch, um realistisch zu sein.

Durch die systematische Parametrisierung mittels Monte-Carlo werden 10.000 Datensätze erstellt, die jedoch einzelne Unsicherheiten der Eingabeparameter nicht relativieren. Einige Parameter, die als Wertebereiche definiert sind, korrelieren miteinander, wie der Faktor F und die kurzwellige Strahlung oder der Beschattungsanteil und die Sonnenhöhe bzw. der Sonnenwinkel. Diese Korrelationen werden durch die Parametrisierung jedoch nicht berücksichtigt. Selbst wenn für die Phase des MWs ein realistischer Wert berechnet wird, muss dennoch berücksichtigt werden, dass bereits im kleinskaligen Bereich M1M2, bei dem von einem intensiven Austausch ausgegangen wird, wie im Geländepraktikum und in der Voruntersuchung bestätigt, der GW-Zufluss jedoch nicht eindeutig mittels Temperaturdaten messbar ist. Für die Untersuchung auf großer Skala bedeutet das, dass nur noch größere Unsicherheiten im Ergebnis vorhanden sind.

6.6 Methoden- und Ergebnisvergleich

Die drei verwendeten Methoden werden in Bezug auf Prozesse und ihrem Erfolg in der Quantifizierung der G-O-I bewertet und diskutiert. Zur Orientierung ist in Abbildung 35 eine schematische Übersicht der Methoden und der Ergebnisse dargestellt.

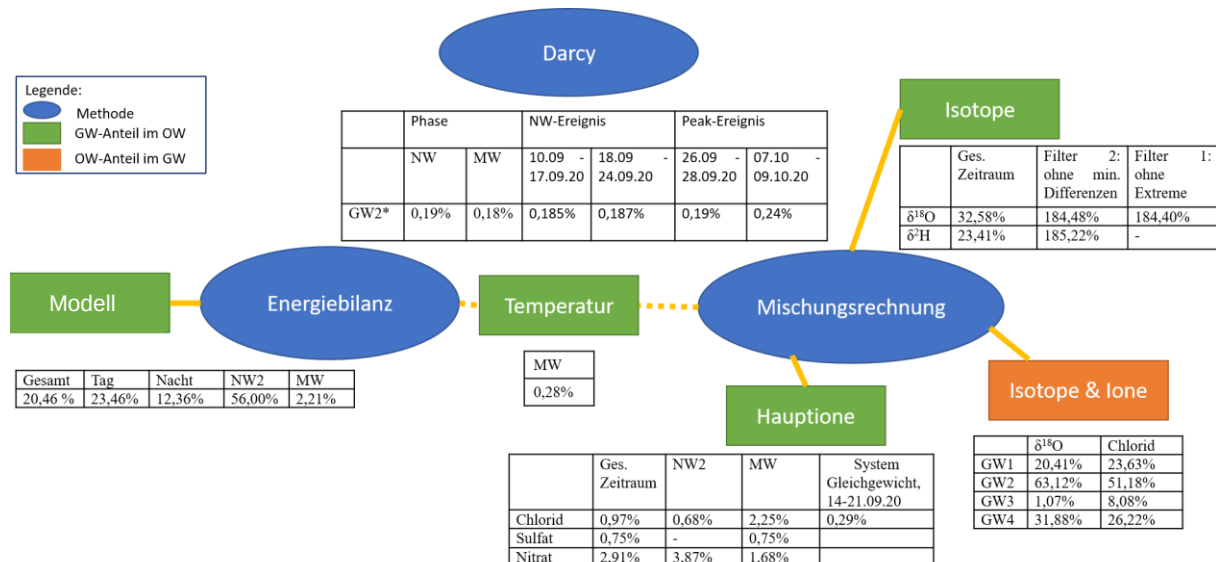


Abbildung 35: Schematische Ergebnisübersicht

Darcy:

Betrachtet man die Quantifizierungsmethode der Berechnung nach Darcy ist der Hauptprozess die Zunahme des GW-Zuflusses bei Abflusszunahme. Hauptursache dieses Phänomens liegt in den unterschiedlichen Pegelhöhen, die die Fließrichtung des GWs definieren und aufgrund des hydraulischen Drucks vorliegen. Die Druckübertragung resultiert aus dem einströmenden OW in die GW-Pegel, wodurch eine Interaktion bestätigt und der erhöhte GW-Zufluss mit Abflussanstieg erklärbar ist. Die Unsicherheit dieser Methode liegt im Abschätzen der Gewässerlänge und der Tiefe des GW-Zuflusses, anhand welchen die durchströmte Fläche des GWs bemessen wird. Die quantitative Bestimmung des GW-Zuflusses zur Elz liefert sowohl für den gesamten Zeitraum einzelne Phasenwerte als auch für ereignisbasierte NW und Peak Momente realitätsnahe GW-Anteile von rund 0,2 % in der Elz.

Mischungsrechnung:

Um mittels Mischungsrechnung plausible Anteile des GWs im OW und des OWs im GW zu bestimmen, werden die Tracer vorab möglichst realistisch gefiltert. Die Grenze der Methode der Mischungsrechnung liegt vor allem in den geringen Messunterschieden, die im OW vorliegen. Um Prozesse des Zeitversatzes des GWs, und OWs möglichst gering zu halten, wird der GW-Anteil für einen bestimmten Zeitraum, in dem sich das System möglichst nahe dem Gleichgewicht befindet, berechnet. Dieser Anteil ist als am wenigsten Fehler belastet zu bewerten.

Außerdem spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle, um G-O-I zu beurteilen. Anhand des Temperaturabfalls in den Piezometern als Reaktion auf das abkühlende OW der Elz lässt sich eine Interaktion und deren Intensität für die einzelnen Messstellen abschätzen. Hier zeigt sich, wie sich über das Prozessverständnis der Temperatur mittels Kombination der Methodik und der Mischungsrechnung über Tracer eine G-O-I quantifizieren lässt.

Energiebilanz:

Betrachtet man den für die Energiebilanz essenziellen Faktor der Temperatur, zeigt sich ein Muster von zunehmender Temperatur entlang des Gewässerabschnitts. Die Differenz der einzelnen Messstellen im kleinskaligen Bereich, bei dem die größte Temperatur-Dynamik erwartet wird, ist so gering, dass sie sich im Bereich der Messungenauigkeit der Temperatur-Logger befindet. Die Grenzen der Methode zeigen sich bei geringen Messunterschieden. Der so ermittelte Wert des GW-Zustroms zur Elz für den Zeitraum der MW-Phase über die Mischungsrechnung im Bereich M1-M2 liegt zwar im realen Bereich, besitzt jedoch aufgrund der hohen Unsicherheit kaum Aussagekraft. Zudem spielt der Faktor der Einbautiefe der Temperatur-Logger sowie das Fließverhalten der Temperatursonden eine nicht unwesentliche Rolle, die nicht berücksichtigt werden und weitere Unsicherheit in die Berechnung bringt.

Das verwendete Energiemodell liefert trotz der Verbesserung über systematische Parametrisierung mittels der Monte-Carlo-Simulation, keine aussagekräftigen, Ergebnissen. Generell gehen in die Energiebilanz zu viele Parameter ein, die alle eine gewisse Unsicherheit aufweisen, um so geringfügige Temperaturunterschiede verlässlich modellieren zu können. Die systematische Parametrisierung nach Monte-Carlo, welche 10.000 Durchläufe berechnet, kann die Unsicherheit der Eingabeparameter nicht relativieren und bestehende Korrelationen zwischen Parametern nicht erkennen. Wie bereits im kleinskaligen Untersuchungsgebiet, zeigt sich lediglich der berechnete Anteil des GWs in der Elz für die MW-Phase realitätsnah, ist jedoch aufgrund vielzähliger Unsicherheiten mit Vorsicht zu verstehen.

Trotz der gleichen Einheit, die die Anteile des GW im OW vergleichbar machen sollte, ist es aufgrund der unterschiedlichen Methoden und der damit einhergehenden Unsicherheiten schwierig. Ein Vergleich ist nicht trivial. Jede Methode muss für sich mit entsprechendem Hintergrundwissen der Stärken und Schwächen beurteilt werden.

Generell eignet sich für den gesamten Messzeitraum die Ermittlung des Anteils über Darcys Gesetz am besten. Momentbezogen auf einzelne Peak- bzw. NW-Ereignisse zeigt auch die Darcy Berechnung plausible Anteile des GWs im OW. Auch die Mischungsrechnung für die Momentaufnahme des sich im Gleichgewicht befindenden Systems und die NW-Ereignisse liefert einen verlässlichen Wert. Die Berechnung des OWs im GW mittels Mischungsrechnung zeigt geringe Unsicherheiten und plausible Anteilswerte, die jedoch keine Vergleichswerte besitzen.

7. Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit ist es, die G-O-I der Elz während unterschiedlicher Wasserstände für zwei unterschiedlich skalierte Gebiete zu untersuchen. Mittels der drei Methoden Darcy Abschätzung (1), Mischungsrechnung (2) und Energiebilanz (3) werden Bestrebungen gemacht, den GW-Anteil in der Elz zu quantifizieren und eine Interaktion beider Wasserkörper zu belegen.

Um auf die erste Forschungsfrage zurückzukommen, kann man feststellen, dass die Resultate vor allem im kleinskaligen Bereich, in dem von intensiven Dynamiken ausgegangen wird, eine G-O-I erkennbar ist. Auf der größeren Skala wird die Aussagekraft des effluents Verhaltens, GW im OW, durch viele Unsicherheiten bestimmt. Der Anteil des GW-Zuflusses zur Elz variiert je nach Methode, zeitlicher und räumlicher Auflösung. Unterschiede zwischen NW- und MW-Phasen sind zu erkennen, jedoch ist eine Gruppierung über diesen längeren Zeitraum in Bezug auf die Aussagekraft der Resultate fraglich.

Um auf die Frage der Variabilität des G-O-I quantitativ am Wasserstand der Elz (2.) einzugehen, zeigt sich bei einer situationsbezogenen Betrachtung, dass es einen räumlichen und zeitlichen Wechsel von effluents und influents Bedingungen gibt. Über eine Mischungsrechnung der Tracer kann eine influente Beziehung des OWs im GW für ein Peak-Ereignis im Mittelwasserbereich bestimmt werden. Dadurch kann eine Interaktion beider Wasserkörper im Untersuchungsgebiet bestätigt werden. Dass eine Abhängigkeit des Anteils des GW im OW zum Gesamtabfluss besteht, wird vor allem in der Methodik der Darcy-Berechnung deutlich und wiederholt sich auch in den anderen Methoden. Demnach fließt bei geringem Abflussverhalten mehr GW zu als bei höherem Abfluss.

Die situationsbedingte Berechnung für ein mittleres Peak-Ereignis des influents Moments zeigt je nach Wahl des Tracers einen Anteil von bis zu 63 % OW im GW. Dieser ist jedoch nur eine Momentaufnahme und mit Vorsicht zu interpretieren. Eine optimale Situation in der Praxis sähe einen Zufluss des GWs ins OW während Trockenperioden vor, um so einen Teil des Wasserdefizits auszugleichen.

Mit den drei angewandten Methoden kann jedoch die Komplexität der Interaktion zwischen GW und OW in diesem Gebiet nicht ausreichend erfasst werden.

Die letzten beiden Forschungsfragen, „welche Methode quantifiziert einen GW-Zufluss plausibel“ (3.) und „Sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden miteinander vergleichbar sind, sodass eine allgemeine Aussage über G-O-I getroffen werden kann?“ (4.), werden zum Teil in dem Kapitel 6.6 beantwortet. Es bleibt die offene Frage, ob eine allgemeingültige Aussage über das G-O-I abgeleitet werden kann.

Voraussetzung für die Methode der Mischungsrechnung war, dass sich das GW signifikant vom OW unterscheidet, was insbesondere bei den stabilen Isotopen, aber auch bei den Ionen und der Temperatur nicht der Fall war. Dies führt dazu, dass mittels dieser Methode keine klare Aussage zur G-O-I gemacht werden kann. Das Modell der Energiebilanz zeigt hinsichtlich der Eingangsparameter Schwächen, die sich in den Resultaten widerspiegeln.

Hinzu kommt, dass besonders bei der Betrachtung einzelner Ereignisse, eine bessere Auflösung und mehr Messdaten klarere Aussagen erlauben würden. Eine längere Messperiode würde zudem Potential für vergleichbare Ereignisse schaffen. Automatische Proben-Sampler wären eine gute Alternative zur Hand-Beprobung, um eine höhere Auflösung ohne größeren Mehraufwand zu erreichen. Mittels dieser könnte auch das Problem der zeitlich versetzten Probennahme, die vor allem bei den Isotopen einen erheblichen Einfluss darstellt, begrenzt werden.

Um bei den GW-Proben einen Einfluss durch den Einbau des Piezometers vor der Messung auszuschließen, ist eine langzeitliche Beprobung der Piezometer sinnvoll. Es ist unklar, wie stark das GW in der Konzentration der stabilen Wasserisotope, der Ionen und der Temperatur saisonal Schwankungen ausgesetzt ist und welches Verhalten auf noch stattfindenden Mobilisierungsprozessen oder unterschiedlichen Abfluss zurückzuführen ist.

Aufgrund der aufgezeigten Unsicherheiten, die die Ergebnisse einzelner Methoden mit sich bringen, ist keine übertragbare Aussage möglich. Jedoch sind einzelne Beobachtungen übertragbar.

Der Durchlässigkeitsbeiwert der einzelner Piezometer gibt eine Spannweite der möglichen Werte im Untersuchungsgebiet im renaturierten Bereich der Elz wieder und kann als Orientierungswert für Berechnungen im Bereich der Elz bzw. der näheren Umgebung und Region mit ähnlicher Lockergesteinsfüllung im Oberrheingraben dienen. Die ermittelte Fließgeschwindigkeit des GWs kann für den Bereich der Elz ebenfalls als Referenzwert angenommen werden. Die berechneten Anteile des OWs der einzelnen Piezometer geben eine Größenordnung für das Interaktionsverhalten in influenter Richtung wieder. Hier wäre es interessant, weitere Untersuchungen vorzunehmen und die Beobachtung durch mehrere Ereignisse zu stützen.

8. Literaturverzeichnis

Agrarmeteorologie Baden-Württemberg (AGRIMET): Wetterstation Malterdingen. Online verfügbar unter www.wetter-bw.de, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Bender, Steffen; Schaller, Michaela (Hg.) (2014): Vergleichendes Lexikon. Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Climate Service Center. 2. Aufl.

Boley, Conrad; Adam, Dietmar (Hg.) (2012): Handbuch Geotechnik. Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner/Springer (Praxis).

Bowen, I. S. (1926): The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. In: *Physical Review* (27), S. 779–787.

Burns, Douglas A.; McDonnell, Jeffrey J.; Hooper, Richard P.; Peters, Norman E.; Freer, James E.; Kendall, Carol; Beven, Keith (2001): Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). In: *Hydrol. Process.* (15), S. 1903–1924. DOI: 10.1002/hyp.246.

Coldewey, Wilhelm Georg; Göbel, Patricia (2015): Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <https://link.springer.com>, zuletzt geprüft am 08.03.2021.

Craig, H. (1961): Isotopic Variations in Meteoric Waters. In: *Science (New York, N.Y.)* 133 (3465), S. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.

Dahl, M.; Nilsson, B.; Langhoff, J. H.; Refsgaard, J. C. (2007): Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater–surface water interaction. In: *Journal of Hydrology* 344 (1-2), S. 1–16. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.06.027.

Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. In: *Tellus* 16 (4), S. 436–468. DOI: 10.3402/tellusa.v16i4.8993.

Deutscher Wetterdienst (DWD): Station 1443: Freiburg, Zeitraum 2020-2021. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://cdc.dwd.de>, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

Dittmar, Thomas (2011): Vorlesung "Wasserinhaltsstoffe". Teil1: Anorganische Wasserinhaltsstoffe. Vorlesung. Technische Universität Dresden, Dresden. Institut für Wasserchemie.

Europäische Kommission (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und Rats vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

Evans, E., C.; McGregor, G., R.; Petts, G., E. (1998): River energy budgets with special reference to river bed processes. In: *Hydrological Process* (12), S. 575–595.

Fischer, Helmut; Kloep, Frank; Wilczek, Sabine; Pusch, Martin T. (2005): A River's Liver – Microbial Processes within the Hyporheic Zone of a Large Lowland River. In: *Biogeochemistry* 76 (2), S. 349–371. DOI: 10.1007/s10533-005-6896-y.

Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LGRB); Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LUBW) (1977): Oberrheingebiet - Bereich Kaiserstuhl-Markgräflerland. Hydrogeologische Karte Baden-Württemberg. 6 Karten. Freiburg i. Br: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg (HVZ): Pegel Gutach Elz. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Online verfügbar unter www.hochwasserzentralen.de, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Hölting, B.; Coldewey, Wilhelm Georg (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Kapitel 3. 1. Aufl. 1 Band: Springer.

Kalbus, E.; Reinstorf, F.; Schirmer, Mario (2006): Measuring methods of groundwater - surface water interaction: a review. In: *Hydrology and Earth System Sciences* (10), S. 873–887.

Kelly, Laura; Kalin, Robert M.; Bertram, Douglas; Kanjaye, Modesta; Nkhata, Macpherson; Sibande, Hyde (2019): Quantification of Temporal Variations in Base Flow Index Using Sporadic River Data: Application to the Bua Catchment, Malawi. In: *Water* 11 (5), S. 901. DOI: 10.3390/w11050901.

Krause, Stefan; Hannah, D. M.; Fleckenstein, J. H. (2009): Hyporheic hydrology: interactions at the groundwater-surface water interface. In: *Hydrol. Process.* 23 (15), S. 2103–2107. DOI: 10.1002/hyp.7366.

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB): Kartenviewer. Landschaftsräume, Hydrogeologische Einheit. Hg. v. Regierungspräsidium Freiburg. Online verfügbar unter www.lgrbwissen.lgrb-bw.de, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2012): Wasser- und Bodatlas Baden-Württemberg. Online verfügbar unter www.pudi.lubw.de, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Lee, Changyong; Kim, Wonbin; Jeon, Sung-Wook (2020): Measurement of Flux at Sediment–Water Interface Using a Seepage Meter under Controlled Flow Conditions. In: *Water* 12 (11), S. 3071. DOI: 10.3390/w12113071.

Lehner, Katharina; Fröllje, Henning; Kubier, Andreas; Pichler, Thomas (2019): Verteilung stabiler Isotope im Grundwasser Nordwestdeutschlands – Untersuchung zum Einfluss von Kontinental-, Höhen- und Landnutzungseffekt. In: *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 24 (3), S. 185–196. DOI: 10.1007/s00767-019-00423-0.

Lewandowski, Jörg; Arnon, Shai; Banks, Eddie; Batelaan, Okke; Betterle, Andrea; Broecker, Tabea et al. (2019): Is the Hyporheic Zone Relevant beyond the Scientific Community? In: *Water* 11 (11), S. 2230. DOI: 10.3390/w11112230.

Lewandowski, Jörg; Meinikmann, Karin; Krause, Stefan (2020): Groundwater–Surface Water Interactions: Recent Advances and Interdisciplinary Challenges. In: *Water* 12 (1), S. 296. DOI: 10.3390/w12010296.

Marsh-McBirney (1990): Flow-Mate Instruction Manual. Model 2000 Portable Flowmeter. Hg. v. Marsh-McBirney. Online verfügbar unter www.uvm.edu, zuletzt geprüft am 13.01.2021.

Massmann, G.; Pekdeger, A.; Dünnebier, U.; Heberer, T.; Richter, D.; Sültenfuß, J.; Tosaki, Y. (2009): Hydrodynamische und hydrochemische Aspekte der anthropogen und natürlich induzierten Uferfiltration am Beispiel von Berlin/Brandenburg. In: *Grundwasser* 14 (3), S. 163–177. DOI: 10.1007/s00767-009-0112-2.

Meinikmann, Karin; Hupfer, Michael; Nützmann, Gunnar; Lewandowski, Jörg (2014): Methoden zur Erfassung von Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen. In: Wolfgang Calmano, Michael Hupfer, Helmut Fischer und Helmut Klapper (Hg.): *Handbuch Angewandte Limnologie. Grundlagen - Gewässerbelastung - Restaurierung - aquatische Ökotoxikologie - Bewertung - Gewässerschutz*. Weinheim: Wiley-VCH (Wiley online library), S. 1–39.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Daten-Kartendienst LUBW. Grundwasser- Potenziale und Funktionen: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Online Karte. Online verfügbar unter www.udo.lubw.baden-wuerttemberg.de, zuletzt geprüft am 08.01.2021.

Noorduijn, Saskia L.; Harrington, Glenn A.; Cook, Peter G. (2014): The representative stream length for estimating surface water–groundwater exchange using Darcy’s Law. In: *Journal of Hydrology* 513, S. 353–361. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.062.

Nützmann, Gunnar; Lewandowski, Jörg (2009): Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an einem Tieflandfluss (Spree). In: *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 14 (3), S. 195–205. DOI: 10.1007/s00767-009-0110-4.

Onset HOBO Data Loggers (2013): Manual HOBO Pendant Temperature/Light Data Logger (UA-002-xx). 3.1. Aufl. Hg. v. Onset Computer Corporation. Online verfügbar unter www.onsetcomp.com, zuletzt geprüft am 12.01.2021.

Parlov, Jelena; Kovač, Zoran; Nakić, Zoran; Barešić, Jadranka (2019): Using Water Stable Isotopes for Identifying Groundwater Recharge Sources of the Unconfined Alluvial Zagreb Aquifer (Croatia). In: *Water* 11 (10), S. 2177. DOI: 10.3390/w11102177.

PEC (2020): Bedienungsanleitung. pH-ORP-EC-TDS-Salz-O₂-pH-Meter PCE-PHD 1. Unter Mitarbeit von PEC. Hg. v. PEC. Online verfügbar unter www.pce-instruments.com, zuletzt geprüft am 12.01.2021.

Pelletier, Antoine; Andréassian, Vazken (2020): Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24 (3), S. 1171–1187. DOI: 10.5194/hess-24-1171-2020.

Picarro (2012): Piccaro L2120-i $\delta D/\delta^{18}O$ Isotopic Water Analyzer. Online verfügbar unter www.piccaro.com, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Regierungspräsidium Freiburg (RP) (Hg.) (2019): Abschlussbericht. Maßnahmenbegleitendes Monitoring zur Erfolgskontrolle an der Elz. Untersuchungsprogramm 2018/2019.

Regierungspräsidium Freiburg (RP) (2020a): Digitales Geländemodell HWGK Maßnahmen E2-E4. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung. nach Überarbeitung AF14127.

Regierungspräsidium Freiburg (RP) (2020b): Dammrückverlegung und Revitalisierung der Elz bei Emmendingen-Wasser und Strukturverbesserung oberhalb des Kollmarsreuter Wehrs. Fortschreibung Bedarfsplanung.

- RheinEnergie AG: Kölner Trinkwasser. Online verfügbar unter https://netzwerk.koeln/verpflegung/pdf/Koelner_Trinkwasser.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2021.
- Ruf, Dieter (2020): Drohnenbefliegung der renaturierten Elz. Am 20.2.2020.
- Schmidt, C.; Bayer-Raich, M.; Schirmer, Mario (2006): Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10 (6), S. 849–859. DOI: 10.5194/hess-10-849-2006.
- Schweizer (2021): Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Mauerwerk, Sonstiges. Online verfügbar unter https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php, zuletzt aktualisiert am 01.03.2021, zuletzt geprüft am 01.03.2021.
- Sklash, Michael; Farvolden, Robert (1979): The role of Groundwater in Storm Runoff. In: *Journal of Hydrology* (43), S. 45–65.
- Staay, M. van der (2021): Sonnen Umlaufbahn berechnen Azimuth und Zenith. Hg. v. SolarTopo. Online verfügbar unter <http://www.solartopo.com/sonnenumlaufbahn.htm>, zuletzt aktualisiert am 01.03.2021, zuletzt geprüft am 01.03.2021.
- Steiness; Jessen; Spitilli; Veen, van't; Højberg; Engesgaard (2019): The Role of Management of Stream–Riparian Zones on Subsurface–Surface Flow Components. In: *Water* 11 (9), S. 1905. DOI: 10.3390/w11091905.
- svGeosolution GmbH (2020): Elz Befliegung am 03.04.2020. Bereich: Teningen-Köndringen-Riegel: svGeosolution GmbH. Orthofotos.
- Tang, Tao; Guo, Shuhan; Tan, Lu; Li, Tao; Burrows, Ryan M.; Cai, Qinghua (2019): Temporal Effects of Groundwater on Physical and Biotic Components of a Karst Stream. In: *Water* 11 (6), S. 1299. DOI: 10.3390/w11061299.
- Thermo Fisher Scientific (2012): Operator's Manual Dionex ICS-1100 Ion Chromatography. 3. Aufl. Hg. v. Thermo Fisher Scientific. Online verfügbar unter www.thermofisher.com, zuletzt geprüft am 14.01.2021.
- Theurer, Fred D.; Voos, Kenneth A.; Miller, William James (1984): Instream Water Temperature Model. Instream Flow Information Paper 16. (16), S. 1–321.
- Uhlenbrook, Stefan: Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. In: *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Bd. 10, S. 1–218.

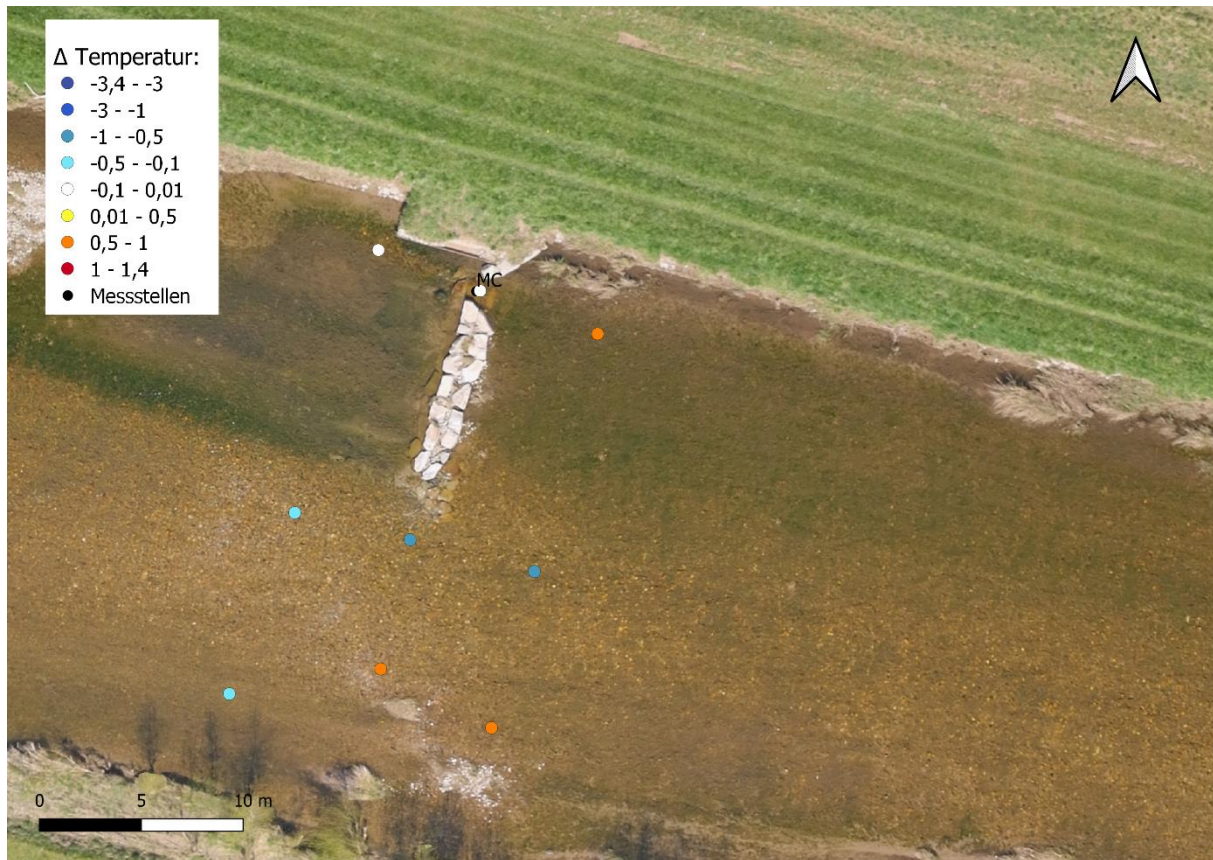
- Vrzel; Ludwig; Vižintin; Ogrinc (2019): An Integrated Approach for Studying the Hydrology of the Ljubljansko Polje Aquifer in Slovenia and Its Simulation. In: *Water* 11 (9), S. 1753. DOI: 10.3390/w11091753.
- Walser, Bernd (2017): Die Revitalisierung der Elz. Vitale Gewässer in Baden-Württemberg. Fachtagung Vitale Gewässer in Baden-Württemberg. LUBW, WBW, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Congress Centrum Pforzheim, 19.10.2017. Online verfügbar unter www.lubw.baden-wuerttemberg.de, zuletzt geprüft am 08.01.2021.
- Webb, B., W.; Zhang, Y. (1997): Spacial and seasonal variability in the components of the river heat budget. In: *Hydrol. Process.* 11 (1), S. 79–101. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199701)11:1<79::AID-HYP404>3.0.CO;2-N.
- Wirsing, G.; Luz, A. (2007): Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg). In: *LGRB-Informationen* (19), S. 1–130.
- WTW (2011): Operating manual Multi 3420.
- Yang, Benqin; Yang, Shiju; Wan, Xing; Hu, Hao; Hu, Die; Hua, Mingda et al. (2020): Temperature models for quantifying groundwater seepage flux applied in a deep lake of a plateau: Yangzonghai Lake, Yunnan, China. In: *Chemosphere* 238, S. 124674. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124674.
- Yang, Zhi; Zhou, Yangxiao; Wenninger, Jochen; Uhlenbrook, Stefan; Wan, Li (2015): Simulation of Groundwater-Surface Water Interactions under Different Land Use Scenarios in the Bulang Catchment, Northwest China. In: *Water* 7 (11), S. 5959–5985. DOI: 10.3390/w7115959.

Anhang

A1. Karten und Tabellen.....	103
A1.1 Voruntersuchung Standort MC	103
A1.2 Revitalisierungsmaßnahmen an der Elz Riegel/ Köndrigen	104
A2. Abbildungen	106
A2.1 Methodische Messung Durchsickerung	106
A2.2 Bilder der Messstandorte der Elz	106
A2.3 Bilder des Geländeaufbaus	107
A2.4 Bilder Abflussmessung	109
A2.5 Isotopenmessung.....	110
A2.6 Phasendarstellung des GW in OW	111
A2.7 Mischungsrechnung über die Temperatur	112
A2.8 Energiebilanz GW-Zufluss	112
A3. Herleitung	113
A3.1 Herleitung des 2-Komponenten Mischungsmodells.....	113

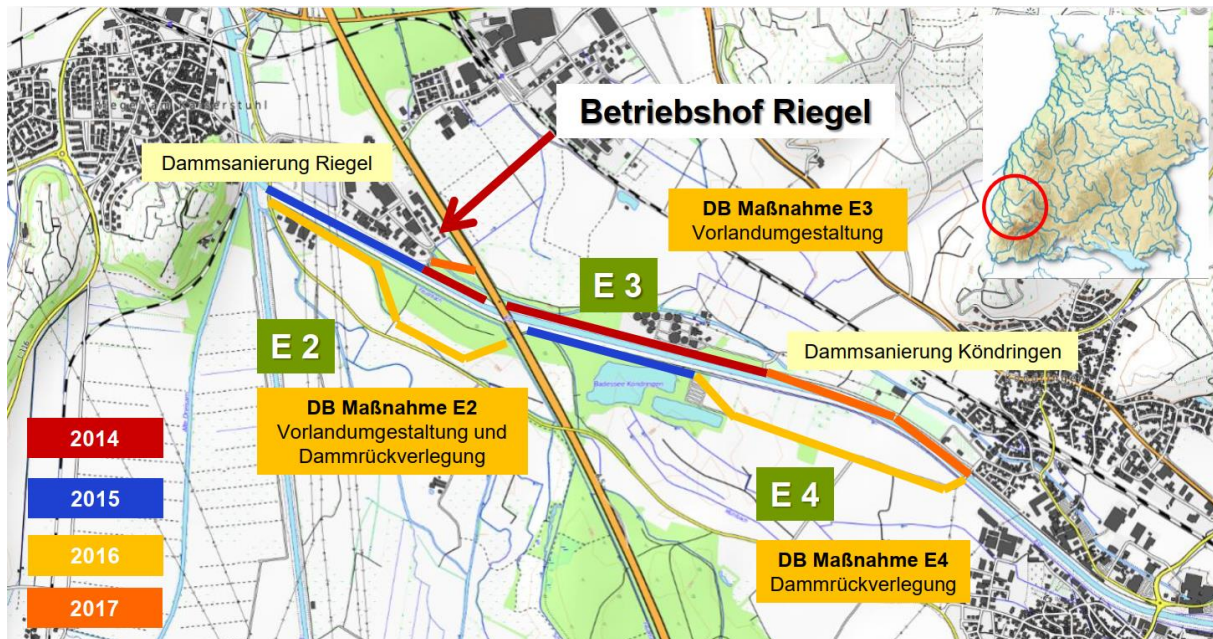
A1. Karten und Tabellen

A1.1 Voruntersuchung Standort MC

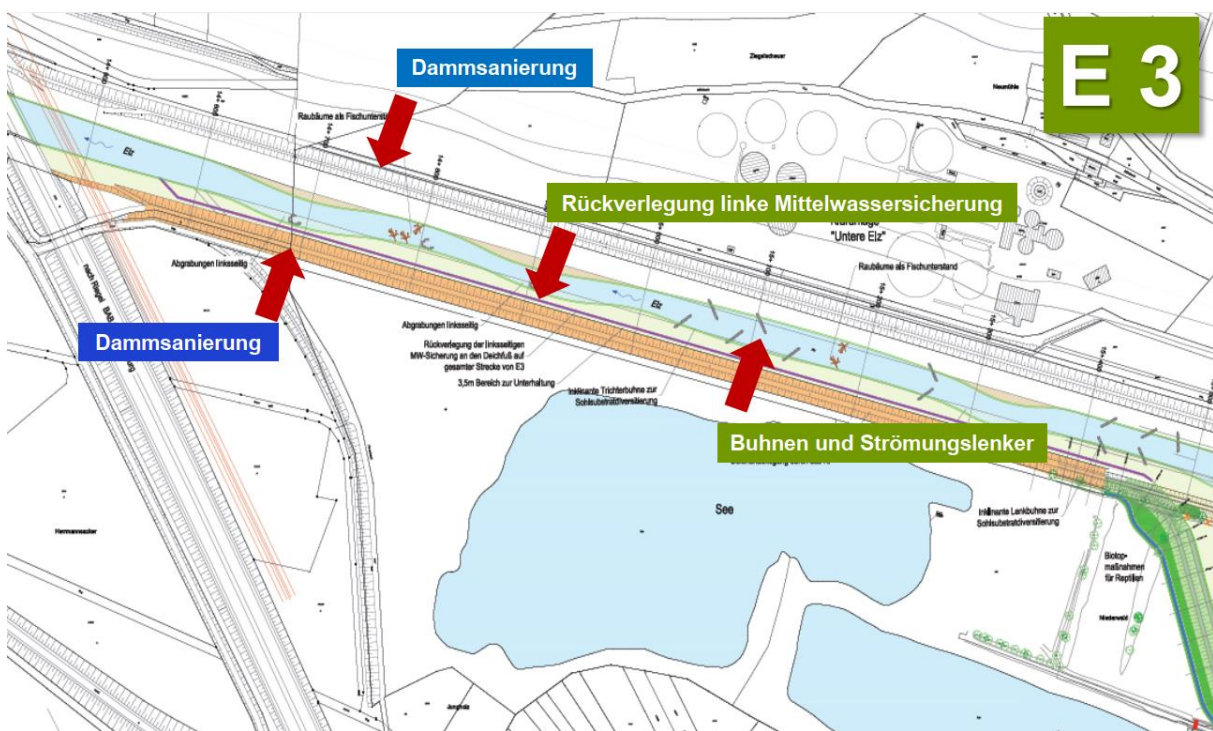


Karte A1: Voruntersuchung Temperaturdifferenz des einzelnen Messwerts zum Mittelwert des Standortes MC. Grundlage der Karte ist ein hochaufgelöstes Orthofoto der Elz aus der Befliegung vom 03.04.2020 (svGeosolution GmbH 2020).

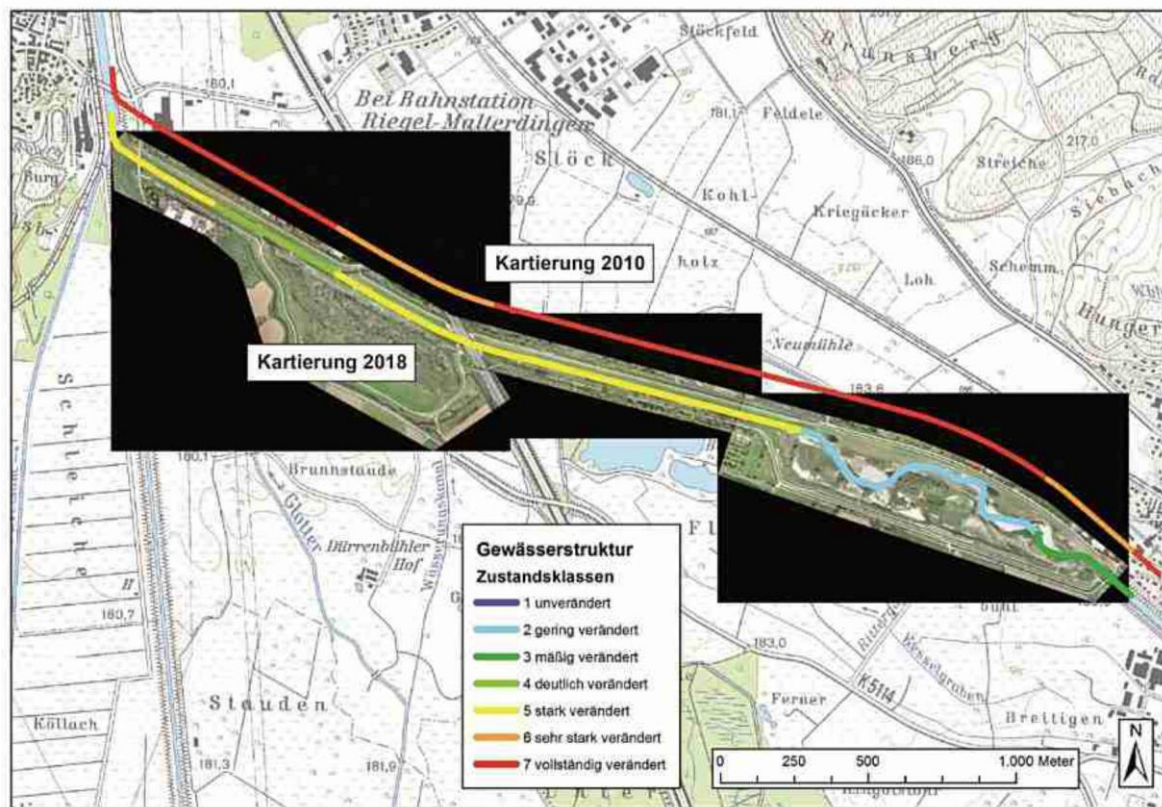
A1.2 Revitalisierungsmaßnahmen an der Elz Riegel/ Köndringen



Karte A2: Übersichtslageplan der Revitalisierung der Elz. (Walser 2017)



Karte A3: Vorlandumgestaltung und Strukturmaßnahmen. (Walser 2017)



Karte A4: Ergebnisse der Gewässerstrukturkartierungen im Vorzustand (oben) und im Jahr 2018 (unten). Abschnittsgrenzen werden 2018 beibehalten, zur Veranschaulichung werden die Abschnitte auf den neuen Verlauf projiziert. Orthofotos vom 14.04.2018. (RP 2019, S. 15)

A2. Abbildungen

A2.1 Methodische Messung Durchsickerung

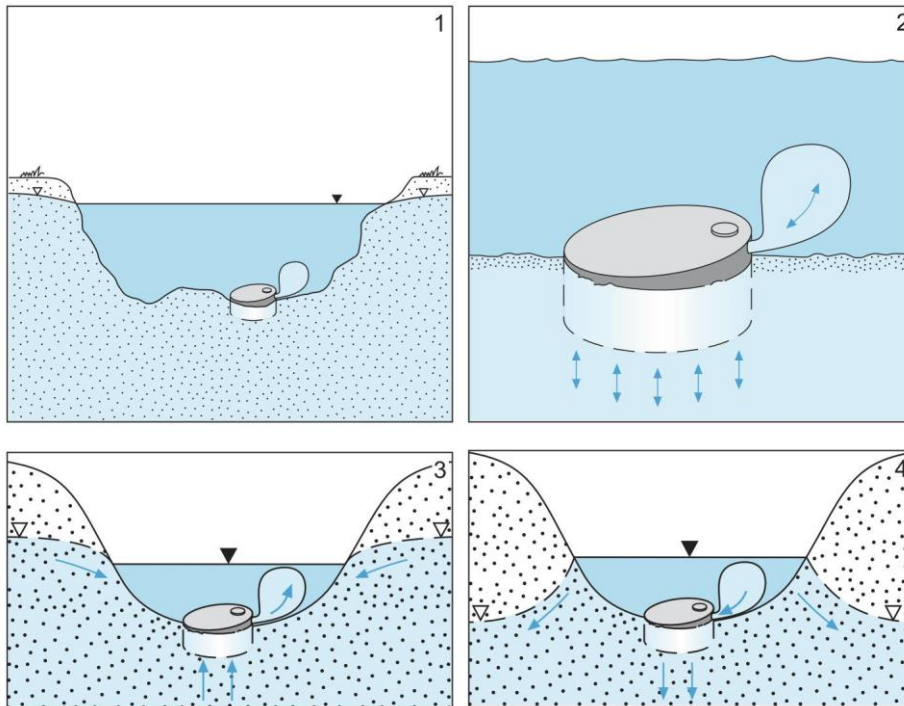


Abbildung A1: Messung der Durchsickerung. Durchsickerungs-Messgerät. 1: Durchsickerungs-Messgerät in einem Oberflächengewässer, 2: Detailansicht, 3: Messsituation bei Effluenz, 4: Messsituation bei Influenz (Coldewey und Göbel 2015, S. 69).

A2.2 Bilder der Messstandorte der Elz



Abbildung A2: Standort MC, Messtelle Flussmitte unterhalb der Brücke



Abbildung A3: Messtelle M1 oberhalb der Schwelle, Flussmitte



**Abbildung A4: Zuflussstelle Z1
kurz vor der Schwelle**



**Abbildung A5: Zuflussstelle Z2, linker Gewässerrand in
Fließrichtung links, hinter der Sandbank**



Abbildung A6: Messstelle M2



**Abbildung A7: Messstelle MC in
Hauptstromrichtung, Höhe der
Kläranlage**

A2.3 Bilder des Geländeaufbaus



**Abbildung A8: Hochwasserfester Hobo
, zusätzlich mit einem Kletterseil gesichert**



**Abbildung A9: Montage eines Hobos durch
Spreizdübel**



**Abbildung A10: Lochbohrung vor Einschlagen
des Spreizdübels**



**Abbildung A11: Zusätzliche Hochwassersicherung
durch Stahlseil**



Abbildung A12: Rammfilter der Messtelle GW4



**Abbildung A13: Einschlagen der Stahlrohre
mittels Hydraulik Hammer**



Abbildung A14: Aufbaggern der Messtelle GW1



Abbildung A15: Überblick der Messtelle GW1

A2.4 Bilder Abflussmessung



**Abbildung A16: Abflussmessung mittels
FLOW-MATE**



**Abbildung A17: Flussquerschnitt der
Abflussmessung**

A2.5 Isotopenmessung

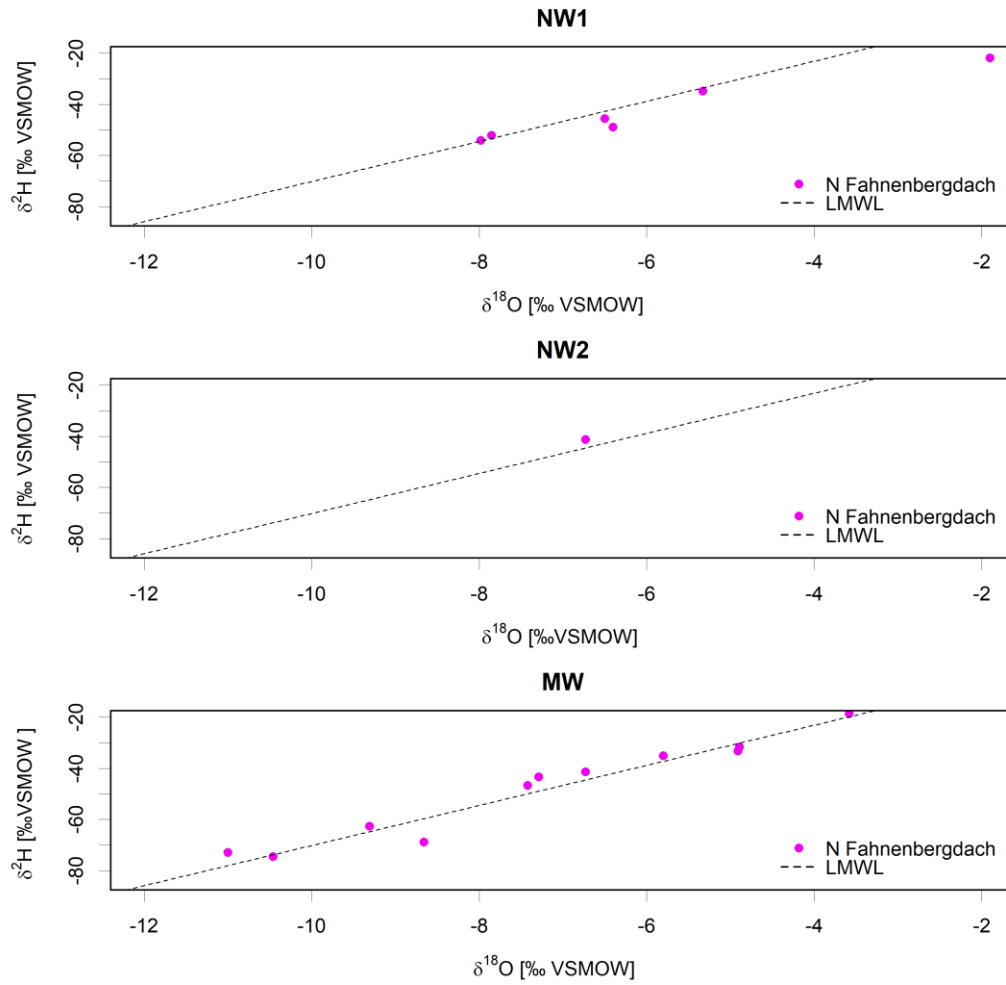


Abbildung A18: Isotopenmessung des Niederschlags, Datengrundlage: kontinuierliche Niederschlags-Isotopenmessung des Fahnenbergdachs, Hydrologie

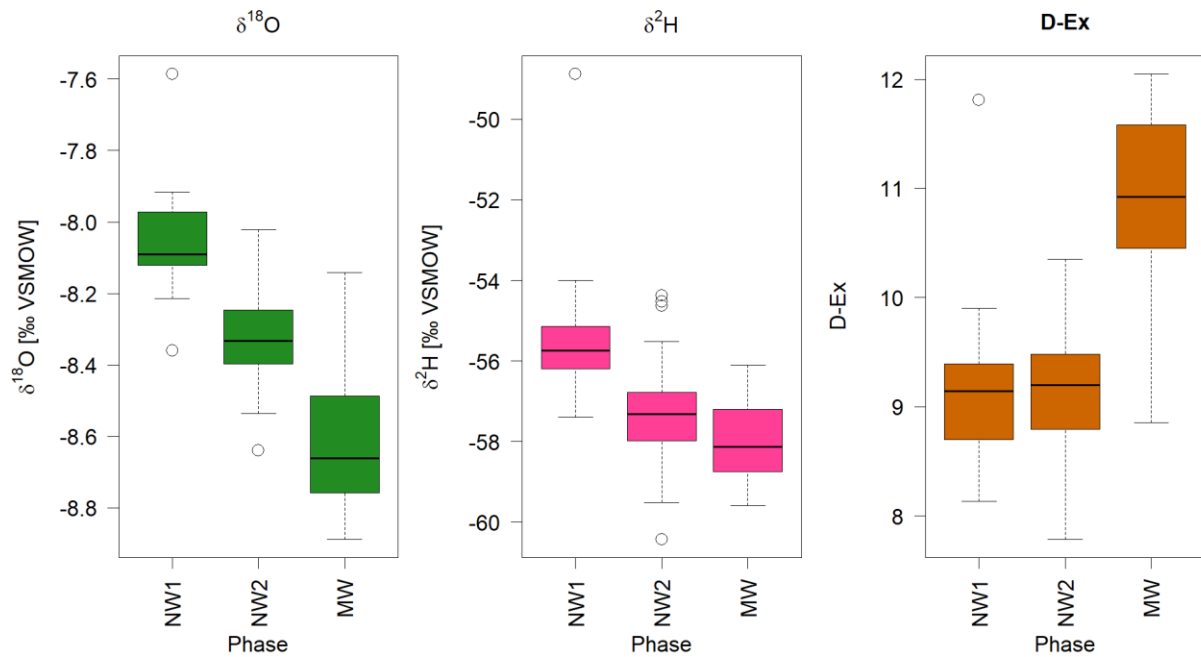


Abbildung A19: Boxplot der stabilen Wasserisotope nach Phasen Niedrigwasser 1 (NW1), Niedrigwasser 2 (NW2) und Mittelwasser (MW). Das $\delta^{18}\text{O}$ Isotopenverhältnis ist in dunkelgrün, das $\delta^2\text{H}$ Isotopenverhältnis in lachsfarben und der d in braun dargestellt.

A2.6 Phasendarstellung des GW in OW

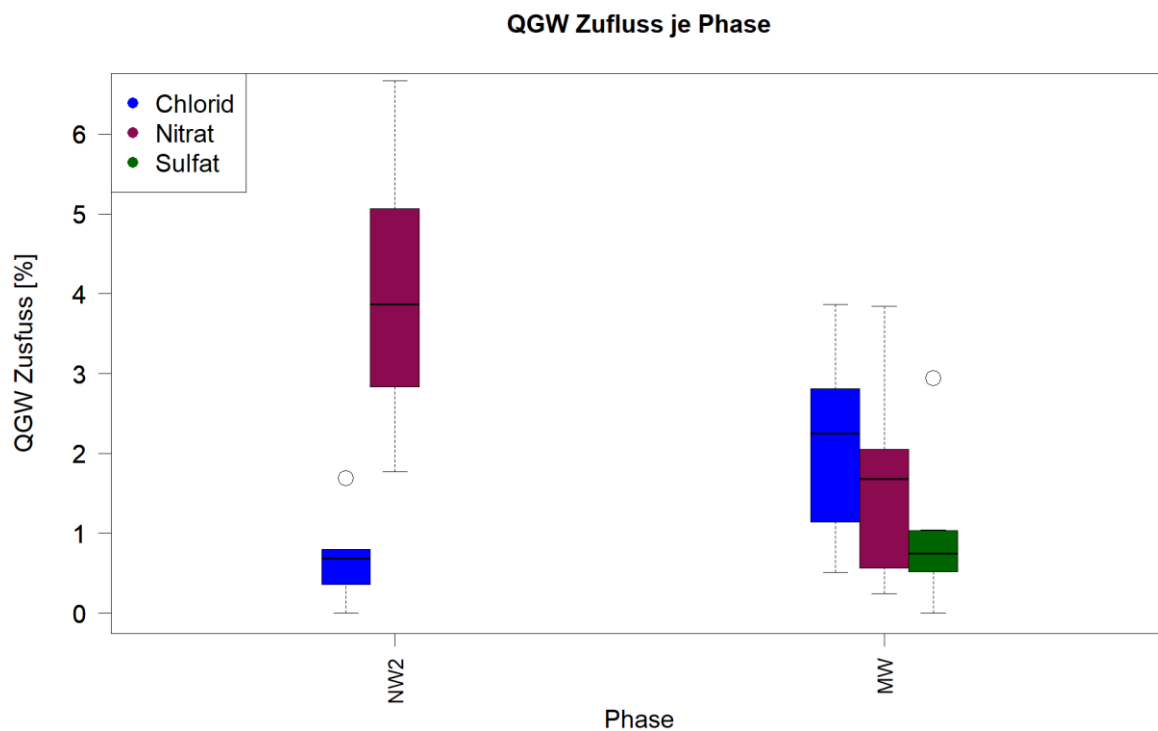


Abbildung A20: Boxplots des GW-Zustroms zur Elz gemessen am Abfluss der Elz, gruppiert in die Phasen NW2 und MW. Berechnung mittels bereinigter Daten.

A2.7 Mischungsrechnung über die Temperatur

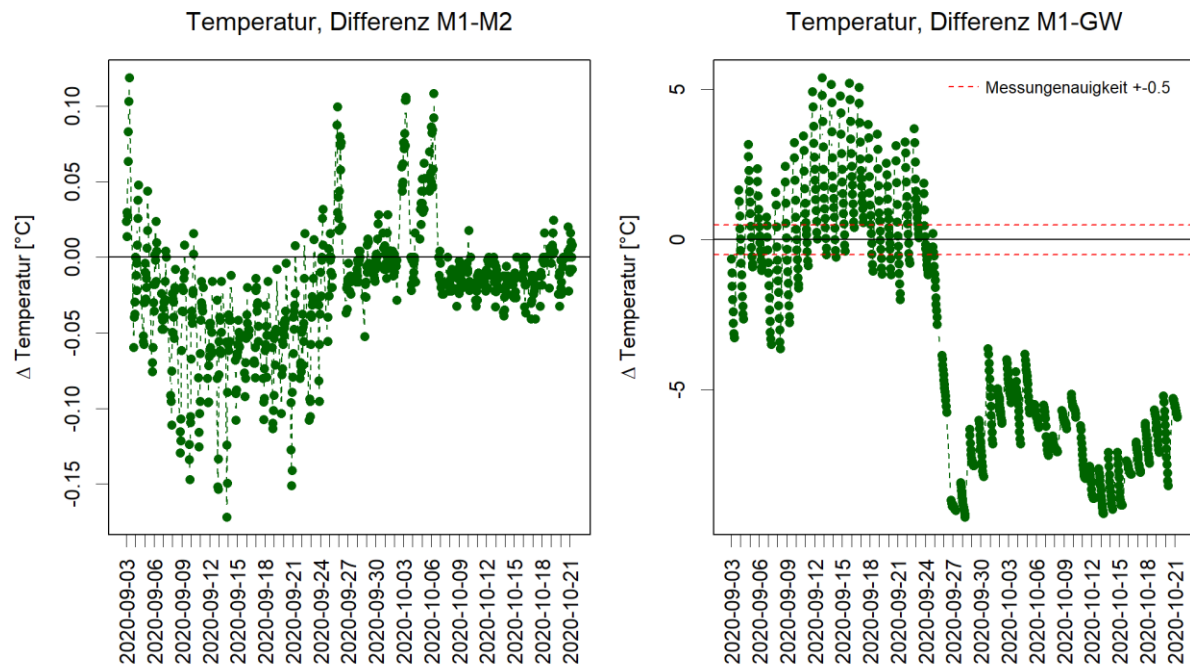


Abbildung A21: Therme der Mischungsrechnung für die Temperaturen bei Nacht (20-7h), in stündlicher Auflösung

A2.8 Energiebilanz GW-Zufluss

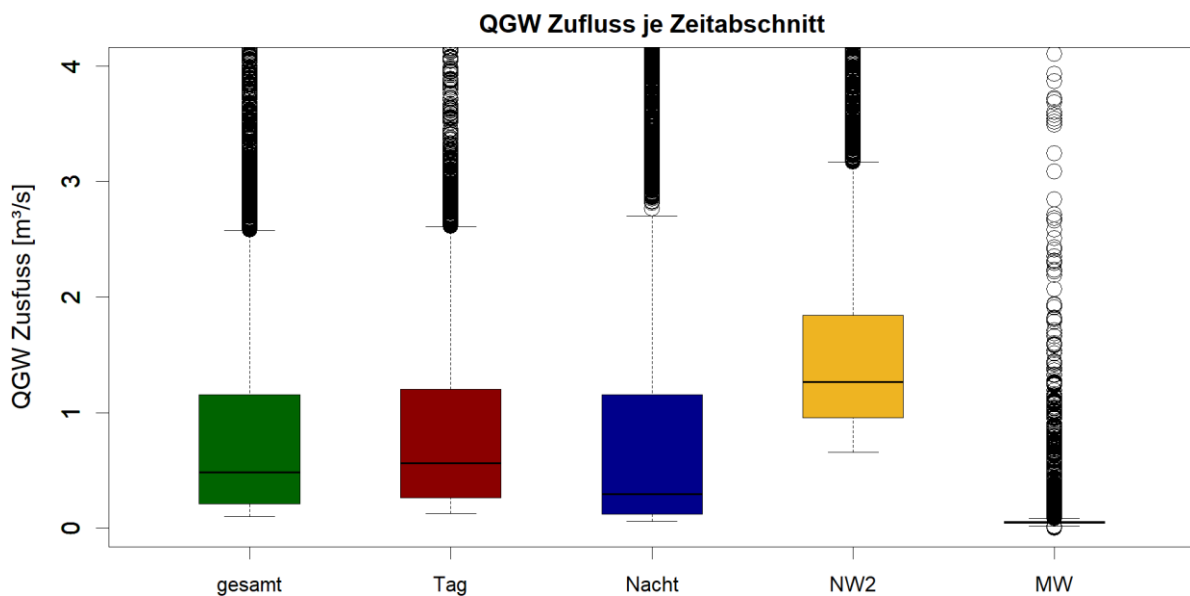


Abbildung A22: Boxplot der einzelnen Szenarios des GW-Zuflusses [m³/s].

A3. Herleitung

A3.1 Herleitung des 2-Komponenten Mischungsmodells

Herleitung der Formel zur Verhältnisbestimmung

M1= erste Mischungsprobe, entspricht der Stelle „ Q_{in} “

M2 = zweite Mischungsprobe (weiter flussabwärts), Gesamtmenge entspricht dem „ Q_{out} “

Allgemein:

$$c(M2) = \frac{m(\text{Tracer in } M2)}{V(M2)} \quad (1)$$

$$m(\text{Tracer in } M2) = V(M2) * c(M2) = V(GW) * c(GW) + V(M1) * c(M1) \quad (2)$$

$$V(M2) = V(GW) + V(M1) \quad (3)$$

(3)& (2) in (1):

$$c(M2) = \frac{V(GW) * c(GW) + V(M1) * c(M1)}{V(GW) + V(M1)}$$

(2 umgestellt):

$$V(M1) = -V(M2) * \frac{[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]} \quad (4)$$

$$\frac{V_{M1}}{V_{GW}} = \frac{\frac{-V(M2) * [c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{V(M2) - V(M1)} \quad (4)$$

$$\frac{V_{M1}}{V_{GW}} = \frac{\frac{-V(M2) * [c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{V(M2) - \frac{(-V(M2) * [c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}$$

$$\frac{V_{M1}}{V_{GW}} = \frac{-V(M2) \frac{[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{V(M2) * (1 + \frac{[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]})}$$

Probenvolumen kürzt sich raus; weitere Berechnung ohne Volumenbestimmung:

$$\begin{aligned}
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{\frac{-[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{1 + \frac{[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}} \\
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{\frac{-[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{\frac{[c(GW) - c(M1)]}{[c(GW) - c(M1)]} + \frac{[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}} \\
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{\frac{-[c(M2) - c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]}}{\frac{[-c(M1) + c(M2)]}{[c(GW) - c(M1)]}} \\
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{[-c(M2) + c(GW)]}{[c(GW) - c(M1)]} * \frac{[c(GW) - c(M1)]}{[-c(M1) + c(M2)]} \\
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{-c(M2) + c(GW)}{-c(M1) + c(M2)} \\
\frac{V_{M1}}{V_{GW}} &= \frac{c(GW) - c(M2)}{c(M2) - c(M1)}
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\frac{V_{M1}}{V_{GW}} = \frac{V(M2) + V(GW)}{V(GW)} = \frac{V(M2)}{V(GW)} - \frac{V(GW)}{V(GW)} = \frac{V(M2)}{V(GW)} - 1$$

$$\frac{V(M1)}{V(GW)} + 1 = \frac{V(M2)}{V(GW)}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{V(M1)}{V(GW)} + 1}$$

Anwenden der (5):

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{c(GW) - c(M2)}{c(M2) - c(M1)} + 1}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{-[c(GW) - c(M2)]}{-[c(M2) - c(M1)]} + 1}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{-c(GW) + c(M2)}{-c(M2) + c(M1)} + 1}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{c(M2) - c(GW)}{c(M1) - c(M2)} + 1}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{c(M2) - c(GW) + c(M1) - c(M2)}{c(M1) - c(M2)}} \quad ; \quad 1 = \frac{c(M1) - c(M2)}{c(M1) - c(M2)}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{1}{\frac{c(M1) - c(GW)}{c(M1) - c(M2)}}$$

$$\frac{V(GW)}{V(M2)} = \frac{c(M1) - c(M2)}{c(M1) - c(GW)}$$

Abkürzungsverzeichnis

<i>A</i>	<i>Fläche [m²]</i>
<i>B</i>	<i>Stärke des Magnetfelds [A/m]</i>
<i>C_{Elz,t0}</i>	<i>gemessene Konzentration des Tracers in der Elz zum Zeitpunkt t₀ [mg/l, ‰/l]</i>
<i>C_{GW,t0}</i>	<i>gemessene Konzentration des Tracers im Grundwasser zum Zeitpunkt t₀ [mg/l, ‰/l]</i>
<i>C_{GW,t10}</i>	<i>gemessene Konzentration des Tracers im Grundwasser zum Zeitpunkt t₁₀ [mg/l, ‰/l]</i>
<i>C_{out}</i>	<i>gemessene Konzentration des Tracers an der Ausflusssstelle [mg/l, ‰/l]</i>
<i>CRDS</i>	<i>Cavity Ring Down Spektroskopie</i>
<i>d</i>	<i>Deuterium-Exzess</i>
<i>E</i>	<i>Evaporation</i>
<i>E_a</i>	<i>Dampfdruck der Luft [kPa]</i>
<i>E_w</i>	<i>Sättigungsdruck der Wassertemperatur [kPa]</i>
<i>EZG</i>	<i>Einzugsgebiet</i>
<i>GMWL</i>	<i>Global Meteoric Water Line</i>
<i>G-O-I</i>	<i>Grundwasser-Oberflächenwasser Interaktion</i>
<i>GW</i>	<i>Grundwasser</i>
<i>HW</i>	<i>Hochwasser</i>
<i>i</i>	<i>hydraulischer Gradient</i>
<i>K</i>	<i>kurzwellige Globalstrahlung [Wm⁻²]</i>
<i>K*</i>	<i>Kurzwellige Strahlungsbilanz [Wm⁻²]</i>
<i>K_b</i>	<i>kurzwellige Strahlung am Gerinnebett [Wm⁻²]</i>
<i>K_{b_ref}</i>	<i>kurzwellige reflektierte Strahlung am Gerinnebett [Wm⁻²]</i>
<i>k_c</i>	<i>Wärmeleitfähigkeit[W/m*K]</i>
<i>k_f</i>	<i>Durchlässigkeitsbeiwert</i>
<i>K_{ref}</i>	<i>kurzwellige Reflexionsstrahlung an Gewässeroberfläche [Wm⁻²]</i>
<i>L</i>	<i>Latenter Wärmestrom der Verdunstung [K/Jg]</i>
<i>L*</i>	<i>langwellige Strahlungsbilanz [Wm⁻²]</i>
<i>L_{in_atm}</i>	<i>langwellige Strahlung in Atmosphäre [W/m²]</i>
<i>L_{in_veg}</i>	<i>langwellige Strahlung in Vegetation [W/m²]</i>
<i>L_{out}</i>	<i>Ausstrahlende langwellige Strahlung [W/m²]</i>
<i>L_E</i>	<i>Elektrodenabstand [m]</i>
<i>LMWL</i>	<i>Local Meteoric Water Line</i>
<i>m_{in}</i>	<i>Masse des Tracers an der Einflusssstelle [mg, ‰]</i>
<i>m_{out}</i>	<i>Masse des Tracers an der Ausflusssstelle [mg, ‰]</i>
<i>MW</i>	<i>Mittelwasser Phase</i>
<i>N</i>	<i>Niederschlag</i>
<i>NW1</i>	<i>Niedrigwasser (Phase) 1</i>
<i>NW2</i>	<i>Niedrigwasser (Phase) 2</i>

OW	Oberflächenwasser
P	Luftdruck [hPa]
Q_{cd}	Wärmeleitung am Gerinnebett [Wm^{-2}]
Q_e	latenter Wärmestrom [Wm^{-2}]
Q_f	Wärmestrom durch Reibungsenergie [Wm^{-2}]
Q_{GW}	Grundwasser Abfluss [m^3/s]
Q_h	fühlbarer Wärmestrom [Wm^{-2}]
Q_{in}	einströmender Abfluss [m^3/s]
Q_{out}	ausströmender Abfluss [m^3/s]
Q_p	Energie des Niederschlags [Wm^{-2}]
Q_{rad}	Nettostrahlung [Wm^{-2}]
RP	Regierungspräsidium
S	Gefälle
T	Temperatur [K]
T_a	Lufttemperatur [K]
T_b	Temperatur des Gerinnebetts [K]
t_{ver}	Zeitversatz [s]
T_w	Wassertemperatur [K]
u	elektrische Spannung [V]
U	Windgeschwindigkeit [m/s]
v	Geschwindigkeit der Strömung [m/s]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
$V_{Elz,t0}$	Volumen der Elz zum Zeitpunkt t_0 [l]
v_f	Filtergeschwindigkeit [m/s]
$V_{GW,t10}$	Volumen des Grundwassers zum Zeitpunkt t_{10} [l]
W	Gerinnebreite [W]
WGS	Wasserschutzgebiet
$WRRL$	Wasserrahmenrichtlinie
Z	mittlere Tiefe der Messung [m]
ε	Emissivität der Oberfläche des ausstrahlenden Körpers
ρ	Dichte des Wassers [g/cm^3]
σ	Stefan-Boltzmann Konstante
ϕ	Porosität [-]

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Eva Breitenbach, geboren am 26.08.1993 in Aschaffenburg, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Freiburg, 12. April 2021

Ort, Datum

Unterschrift