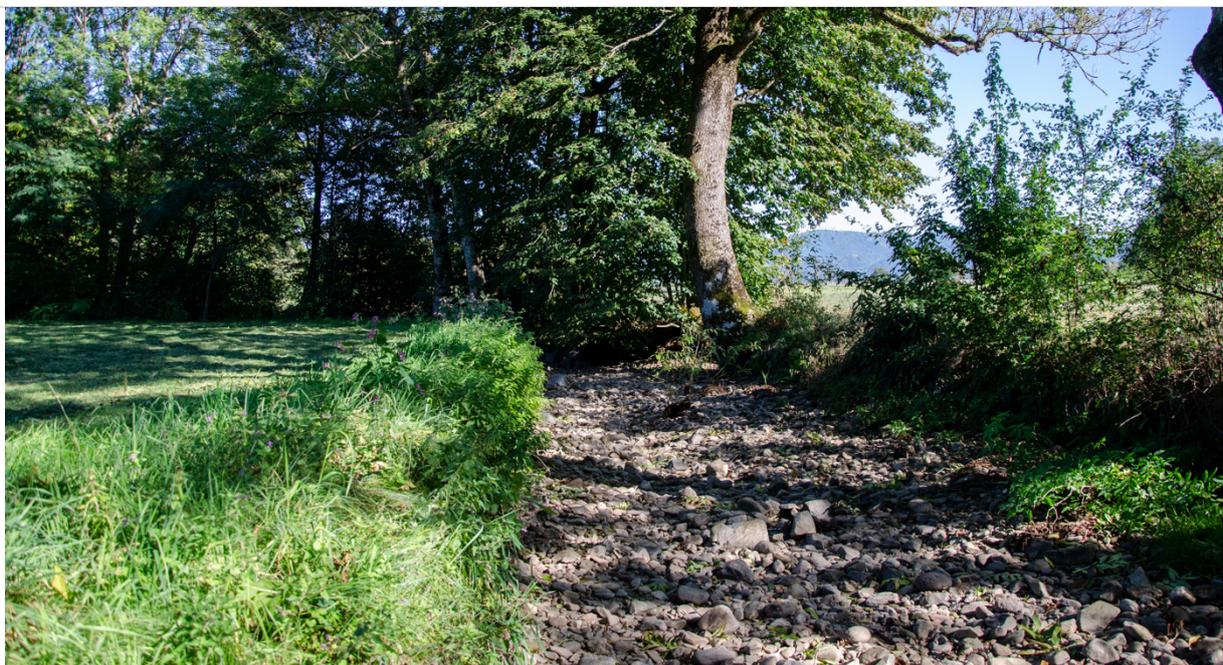


Projekt 2019-09

DüMa3sam - Wegweiser zum integrativen Dürremanagement im Einzugsgebiet der Dreisam

Abschlussbericht



Ansprechpartner:

Prof. Dr. Kerstin Stahl, kerstin.stahl@hydrology.uni-freiburg.de

Amelie Herzog, amelie.herzog@hydrology.uni-freiburg.de

Dr. Veit Blauhut, veit.blauhut@hydrology.uni-freiburg.de

Erstellungsdatum:

31.07.2023

Inhalt

1	Projektüberblick	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Projektziele	3
1.3	Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens	3
2	Projektbeschreibung	4
3	Umsetzung und Ergebnisse	6
3.1	Monitoring des longitudinalen Trockenfallens	6
3.2	Modellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion	7
3.3	Austausch mit Akteuren und Öffentlichkeit	8
3.4	Ausbildung und Einbindung von Studierenden	9
3.5	Wissenschaftliche Konferenzen und Veröffentlichungen	9
4	Zusammenfassung fachlicher Erkenntnisse	11
4.1	Das longitudinale Trockenfallen von Gewässern	11
4.2	Möglichkeit der Detektion von Schwall-Sunk-Erscheinungen	12
4.3	Szenarienmodellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion	14
5	Ausblick/Übertragbarkeit	16
5.1	Messung und Information über das Trockenfallens von Gewässerabschnitten	16
6.3	Wegweiser zum Dürremanagement	17
6.2	Wahrnehmung von hydrologischer Dürre	17
	Literaturangaben	18
6	Anlage: Projekterkenntnisse	19

1 Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

Durch die öffentliche Wahrnehmung des wiederholten Trockenfallens der Zuflüsse im Dreisamtal oberhalb von Freiburg i. Breisgau und der Dreisam unterhalb von Freiburg i. Breisgau in den Jahren ab 2015 entstand ein allgemeines Interesse verschiedener Gruppen von Wassernutzern, Wasserversorgern, Umweltverbänden sowie der öffentlichen Verwaltung an der Untersuchung der hydrologischen Verhältnisse in Hinblick auf die Frage der Wasserverfügbarkeit sowie der Entstehung und Ursachen von Dürre im Dreisamtal. Da es weder auf europäischer, noch auf nationaler, noch auf föderaler Ebene gesetzliche Richtlinien zum Umgang mit Dürre gibt, ist die Gestaltung eines Dürremanagements nur durch partizipative Strukturen möglich. Das übergeordnete Ziel des Projektes war es daher eine wissenschaftliche Grundlage zu schaffen, die ein besseres Verständnis und somit die Grundlage für eine gut informierte Diskussion über die Gestaltung eines Dürremanagements im Dreisamtal ermöglicht. Der Fokus lag hierbei auf der Untersuchung der hydrologischen Gegebenheiten in Zusammenhang mit dem Trockenfallen der Zuflüsse im Zartener Becken und die Bereitstellung der Erkenntnisse hierüber.

1.2 Projektziele

Aufbauend auf den Vorarbeiten zur Messung von Wasserständen im Dreisamtal im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten, der Aufnahme von Dürreauswirkungen im Rahmen einer Projektstudie mit Studierenden der Universität Freiburg und der Öffentlichkeitsarbeit zur Wahrnehmung und zu Konfliktpotentialen bei Dürre einer "Initiative Dürremanagement" in den Jahren 2017-2019 verfolgte das Projekt im Wesentlichen drei Ziele:

1. Das Verständnis der ablaufenden Prozesse und hydrologischen Situation bei Dürre und die Wahrnehmung dieser zu verbessern.
2. Methoden zu entwickeln, die als Informationsgrundlage hierzu dienen, insbesondere die Bereitstellung eines zeitlich und räumlich hochaufgelösten Datensatzes zum Trockenfallen der Zuflüsse im Dreisamtal.
3. Eine Modellierung von Trockenzeiten und Wassernutzungsszenarien durchzuführen und deren Potential zu erörtern, als Grundlage für die Entwicklung potentielle Lösungsansätze in Hinblick auf ein zukünftiges Dürre Management zu dienen.

1.3 Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens

Zur Bewertung von hydrologischen Dürren (extremes Niedrigwasser) an Flusslängsprofilen und auf kleinen Skalen fehlen derzeit die notwendigen hydrometrischen Daten. Eine Bewertung der Verhältnisse bei Niedrigwasser und der Entwicklung von Dürre auf der Basis von Messdaten ist daher rückwirkend und vor allem für lange Zeiträume nicht möglich. Durch speziell angelegte experimentelle hydrometrische Messungen kann lediglich ein aktueller Zustand abgebildet werden. Sollten im Untersuchungszeitraum keine Dürre auftreten wäre also keine Analyse des Trockenfallens möglich gewesen; eine Einordnung in ein Langzeitverhalten, d.h. Veränderungen aufgrund klimatischer oder menschlicher Einflüsse entlang eines Gewässernetzes ist insgesamt nicht möglich.

Messungen des Austrocknens von Gewässern mit herkömmlichen hydrometrischen Messmethoden sind mit hoher Ungenauigkeit behaftet und nur punktuell an Pegeln, z.B. des Landes verfügbar, die jedoch oft nicht auf sehr geringe Wasserstände ausgelegt sind und an intermittierenden (regelmäßig trockenfallende) Gewässer meist gar nicht existieren. Aus diesem Grund wird aktuell an der Entwicklung neuer, flexibler einsetzbarer, Messmethoden gearbeitet. Zunächst müssen jedoch verschiedene dieser Messmethoden getestet und verglichen werden, um herauszufinden, welche sich besonders gut zur Messung eines Austrocknens von Gewässerabschnitten eignen. Dabei sind die Fehlerquellen zunächst nicht bekannt und der Erfolg der Messmethode somit nicht von Anfang an garantiert.

Für eine Modellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion an den Zuflüssen im Dreisamtal musste zunächst die Modellgrundlage geschaffen werden, da neben dem Modell des Wasserversorgers kein Open-Source Modell existierte bei dem z.B. in die Parametrisierung eingegriffen werden konnte. Die Modellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion ist komplex. Die Unsicherheit der Simulation von Oberflächen-Grundwasser-Interaktionen ist grundsätzlich hoch, da hierzu keine Messdaten vorhanden sind. Zunächst sollte daher überprüft werden, ob das Modell die beobachtete Dynamik der Grundwasserstände, des Abflusses sowie der Wasserstände grundsätzlich abbilden kann.

Dürre betrifft auch in Mitteleuropa eine große Anzahl unterschiedlicher Wassernutzungen (z.B. Stahl et al. 2016). Die Wahrnehmung von Trockenheit und Dürre lokaler Akteure ist stark vom spezifischen Interesse der Akteure beeinflusst, die sich aus den unterschiedlichsten Gründen mit dem Thema Dürre auseinanderzusetzen (z.B. DRIeR Zahlen und Fakten: www.drier.uni-freiburg.de/factsheets). Der Erfolg partizipativer Ansätze ist daher abhängig vom Engagement und der Offenheit gegenüber einem breiten Themenspektrum und Kompromissbereitschaft im Umgang mit Wasserknappheit.

2 Projektbeschreibung

Der Projektablauf wurde maßgeblich durch die Einschränkungen während der COVID19 Pandemie geprägt. Während zu Beginn des Projekts noch ein Treffen mit der Dürreinitiative Freiburg stattfinden konnte, waren die Rahmenbedingungen für weitere Treffen mit dieser Initiative sowie auch für ein ursprünglich geplantes Schulprojekt und andere Formen der Information und Kommunikation während der Jahre 2020 und 2021 schwierig. Nach mehrfachem Verschieben der Pläne wurde deshalb bei andauernden Unsicherheiten die grundsätzliche Entscheidung gefällt, sich auf den wissenschaftlichen Teil und die hydrologischen Grundlagen sowie deren Publikation bzw. Vorbereitung zur Publikation als Fachartikel zu fokussieren. Ein Nachholen der ursprünglich geplanten Kommunikationsaspekte im Projektjahr 2022 war aus verschiedenen Gründen nicht möglich und sinnvoll. Der ursprüngliche Koordinator des Projekts, Dr. Veit Blauhut, verließ in dieser Zeit die Universität Freiburg und die Projektmitarbeiterin Amelie Herzog konnte mit einem eingeworbenen Stipendium noch einen (ebenfalls aufgrund COVID verschobenen) Auslandsaufenthalt absolvieren. Der Fokus auf die wissenschaftliche Ausarbeitung konnte so erfolgreich zu Fachpublikationen und dem Einreichen der Dissertation von Amelie Herzog im Juli 2023 zum Projektende führen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Ablauf der Hauptaktivitäten und Ergebnisse des Projekts.

Tabelle 1: Hauptschritte im Projektablauf vom Beginn am 1.10.19 bis zum Ende am 31.7.2023

Ziele	Zeitraum	Beschreibung	Ergebnis
I Vernetzung lokaler Akteure: Dürreinitiative	2019	Vorbereitung der Arbeiten. Im Januar 2020 wurde das Projekt der Dürreinitiative vorgestellt. Aufgrund der pandemiebedingten Situation konnten jedoch keine weiteren Treffen stattfinden.	Der Verein Regiowasser e.V. berichtete über das Treffen: https://www.akwasser.de/node/116
II Messung des Trockenfallens	2020-2021	Messmethoden: Implementierung und Vergleich. Es wurden kontinuierliche Messungen von Wasserständen mit dem Ziel der Bestimmung von Null-Wasserständen und zusätzliche Abfluss-Messungen an 20 Standorten im Zartener Becken durchgeführt. Viele Messstellen wurden vom Hochwasser Anfang 2021 zerstört und der Sommer 2021 war eher feucht, so dass der Sommer 2020 als Haupt-Dürreereignis untersucht wurde.	<i>Datensatz:</i> Herzog, A., Stahl, K., Blauhut, V., and Weiler, M.: Water Level Dataset Dreisam Valley V1.0, https://doi.org/10.6094/UNIFR/228702 <i>Abschlussarbeiten:</i> Verena Völz (B.Sc.) Lukas Althoff (B.Sc.) Felicita Allgaier (B.Sc.) Nils Turner (B.Sc.) Dominik Pintilie (B.Sc.)
III Analyse des longitudinalen Trockenfallens	2021-2022	Auf Basis der Ergebnisse aus II wurde das longitudinale Trockenfallen in 2020 mittels der erhobenen analysiert und u.a. der monatliche Prozentsatz des Trockenfallens an jedem Standort ermittelt, sowie einzelne Situationen im Detail analysiert und die Datenqualität zweier Messverfahren verglichen und bewertet.	<i>Veröffentlichung:</i> Herzog, A., Stahl, K., Blauhut, V., and Weiler, M.: Measuring zero water level in stream reaches: A comparison of an image-based versus a conventional method, Hydrological Processes, 36, https://doi.org/10.1002/hyp.14658
IV Verständnis der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion und Szenarienmodellierung	2022-2023	Es wurde eine Kombination des hydrologischen Modells RoGeR und des GW-Modells Modflow6 verwendet, um die hydrologische Situation nach zu vollziehen. Mittels Modellierung wurde ein unbeeinflusstes Szenario mit einem klimatisch veränderten (Einfluss von GW-Neubildung) Szenario und einem Szenario mit Wasserentnahme aus dem GW simuliert und Effekte auf die Oberflächen-GW-Interaktion und das Trockenfallen des Gewässernetzes untersucht.	<i>Abschlussarbeiten:</i> Alexandra Martin (B.Sc.) Luisa Rieth (M.Sc.): "Situationsanalyse Wassernutzung" in Zusammenarbeit mit badenovaNetze <i>Geplante Veröffentlichung:</i> Herzog, A., Hellwig, J., & Stahl, K. (n.d.). A model-based investigation of influences on hydrologic connectivity using stress tests

3 Umsetzung und Ergebnisse

3.1 Monitoring des longitudinalen Trockenfallens der Gewässer

Ab April 2020 wurde das Messnetz zur Messung des Trockenfallens des Gewässernetzes unter erschwerten Bedingungen aufgrund der Einschränkungen der Feldarbeit durch die Corona-Pandemie vorangetrieben. Zum Monitoring des Wasserstands wurden zusätzlich zu dem Messverfahren mittels Kamera und QR-Codeplatten an einigen Standorten, auch kapazitive Wasserstandsdatenlogger (Fa. Odyssey) sowie Pegellatten angebracht (Abb. 1). Weitere Systeme, z.B. Ultraschall mit Fernübertragung wurden zeitweise getestet. Manuelle Wasserstands- und Abflussmessungen wurden regelmäßig durchgeführt um PQ-Beziehungen zur Ermittlung des Abflusses aus dem Wasserstand der Kamerabilder oder Odyssee-Sonden ermitteln zu können. Die so über die Sommermonate 2020 erhobenen Daten bildeten die Basis für den folgenden Methodenvergleich mit dem evaluiert wurde, welche dieser unterschiedlichen, kostengünstigen Methoden sich am besten zur Messung des Wasserstandes und des Trockenfallens eignet. Auf Basis der Messungen wurde letztlich ein Datensatz an Nullwasserständen erstellt und auch als Datengrundlage des Fachartikels von Herzog et. al. (2022) im Repositorium "Freidok" veröffentlicht (<https://freidok.uni-freiburg.de/data/228702>).

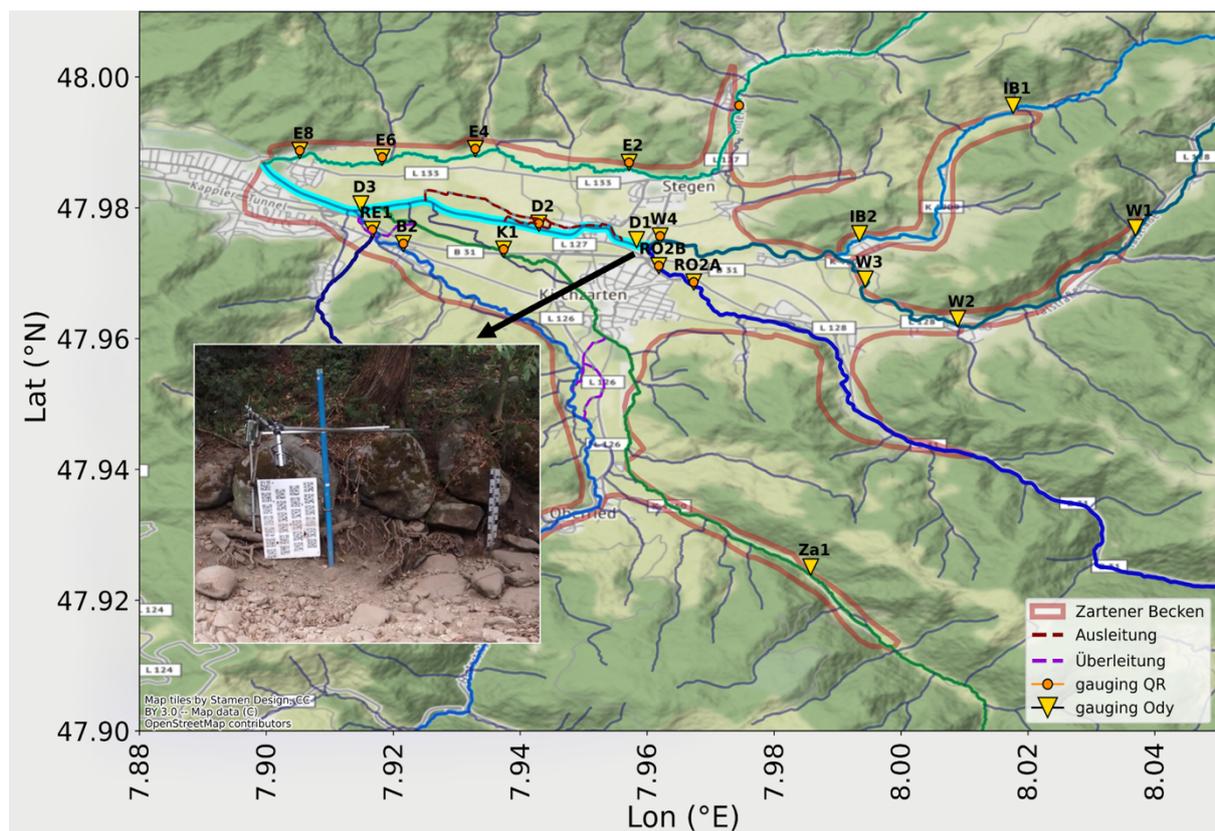


Abb. 1: Installiertes Monitoring im Zartener Becken, Foto vom Kamerastandort von W4 mit QR code Platte und Odyssee Sonde. Die Standorte sind nach den Bachnamen benannt (Za für Zartener Bach, W für Wagensteigbach, IB für Ibenbach, E für Eschbach, RO für Rotbach, B für Brugga und D für Dreisam) und flussabwärts nummeriert.

3.2 Modellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion

Für die Bestimmung von Einflussfaktoren, die hydrologische Dürre begünstigen, ist ein besseres Prozessverständnis der vertikalen und longitudinalen Konnektivität von Gewässerabschnitten notwendig. Traditionelle, hydrologische Modelle erlauben es nicht, eine Aussage über die Oberflächen-Grundwasser (GW) -Interaktion einzelner Gewässerabschnitte zu treffen. Es wurde daher ein hydrologisches Modell mit einem Grundwassermodell gekoppelt, um den Austausch zwischen Grundwasserleiter und Gerinnebett für jede Flusszelle im Untersuchungsgebiet (Zartener Becken) zu berechnen. Das Modell hat eine räumliche Auflösung von 100 m x 100 m und eine zeitliche Auflösung von 1 Tag. Eine Referenzsimulation, d.h. unter Annahme unbeeinflusster natürlicher Bedingungen, wurde für den Zeitraum der Grundwasserneubildung von 2009-2022 durchgeführt. Eine folgende Szenarien-Modellierung hatte das Ziel, den grundsätzlichen Einfluss klimatischer Gegebenheiten mit anderer Grundwasserneubildung sowie mit GW-Nutzung auf das Trockenfallen der Zuflüsse und auf die Oberflächen-GW-Interaktion damit zu vergleichen.

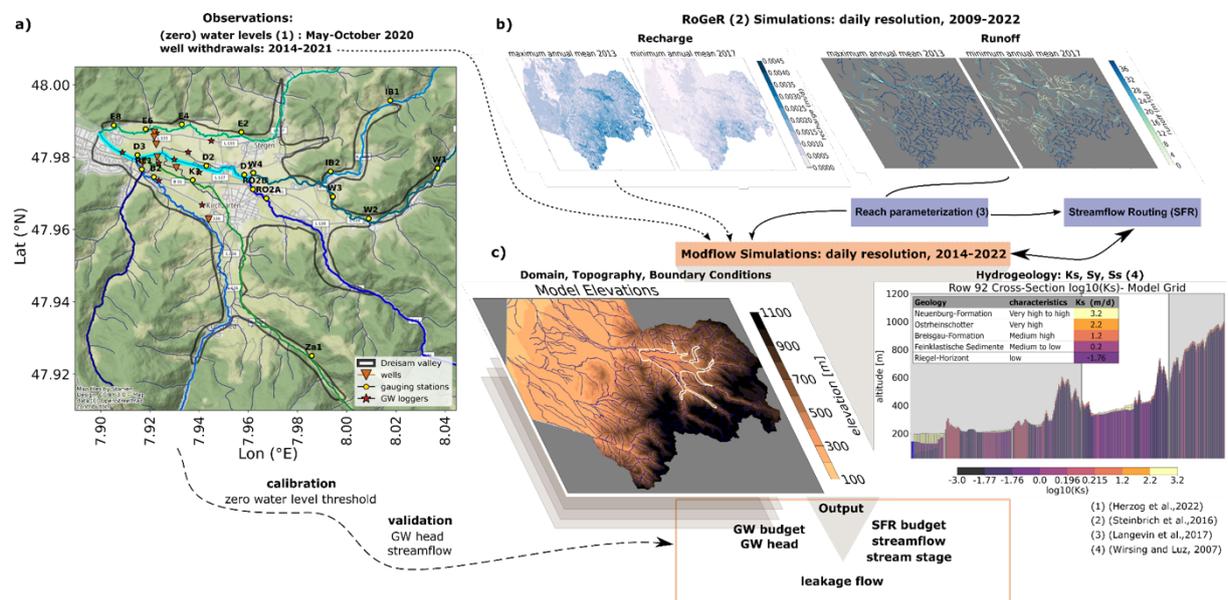


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des GW-Modells für a) die Standorte des Wasserstandsmessnetz (s. Abb. 1) im Zartener Becken als Teilgebiet von b/c) dem gesamten Modellgebiet der topographischen Einzugsgebiete von Dreisam und Neumagen/Möhlin für die Modellierung der Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss mit dem Modell RoGeR sowie Angaben zu den angenommenen hydrogeologischen Parametern.

In Anlehnung an andere 'Stress-Test'-Modellexperimente (z.B. Stoelzle et al. 2020 oder Hellwig et al., 2021) wurden die klimatischen Gegebenheiten der GW-Neubildung als 'Stress-Test' verändert. Hierbei wurde als Klima-Stress die simulierte GW-Neubildung aus dem Modell RoGeR verwendet und Veränderungen in der Magnitude/Menge und in der Saisonalität der GW-Neubildung eingeführt (Abb.3). Diese Veränderungen in der Menge der GW-Neubildung bestehen aus einer Abfolge der GW-Neubildung im Jahr mit der niedrigsten und mittleren GW-Neubildung seit 2010. Bei der Veränderung der Saisonalität wird der Effekt einer besonders niedrigen GW-Neubildung im Winter auf die Verhältnisse im folgenden Jahr 2020 berücksichtigt, indem der Winter mit der niedrigsten GW-Neubildung dem trockenen Sommer 2020 vorausgeschaltet wurde. Für die Freiburger Trinkwasserversorgung werden im Einzugsgebiet ungefähr $8.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ aus dem GW entnommen. Im Modell wurden als 'Nutzungs-Stress' die GW-Entnahmen basierend auf Daten der badenovaNetze (2014-2021) über Modell-Entnahmebrunnen als weiteres Szenario angenommen und mit den verschiedenen Klima-Stress Situationen kombiniert.

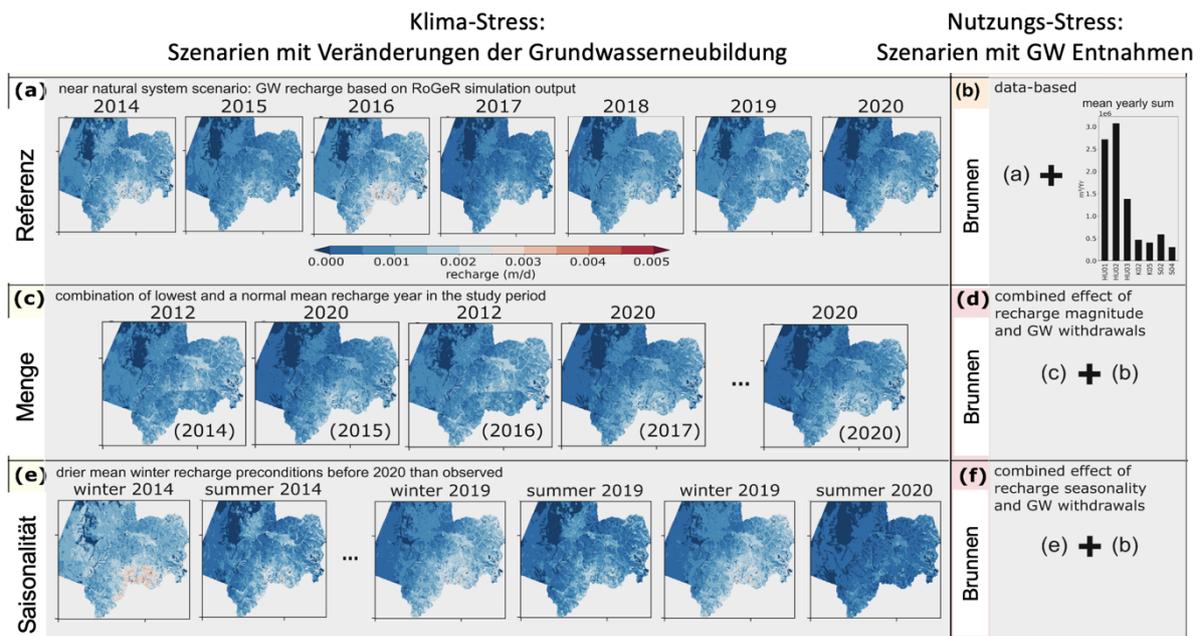


Abb. 3: Schematische Darstellung der sechs Modellszenarien mit a) der unbeeinflussten Referenz mit tatsächlicher Abfolge der Grundwasserneubildung über die Jahre 2014-22 sowie verschiedene Stresstestszenarien mit den GW-Neubildungsvarianten c) und e) und diese jeweils als Kombination mit Wasserentnahmen aus Modell-Entnahmehäusern entsprechend der Förderung der bnNetze b), d), f). Zu beachten: weitere real existierende Entnahmen im Zartener Becken sind nicht berücksichtigt.

3.3 Austausch mit Akteuren und Öffentlichkeit

Die Interaktion mit Akteuren und generell Öffentlichkeitsarbeit im Sinne von Workshops und Diskussionen konnte aufgrund der pandemiebedingten Situation nicht in Präsenz stattfinden und erschien im virtuellen Format wenig sinnvoll. Abgesehen von einem Auftakttreffen zur Präsentation des Projekts im Januar 2020 konnten daher keine weiteren Treffen der Dürreinitiative stattfinden. Alternativ wurde mit Einzelpersonen gesprochen und statt eines Workshops eine Umfrage mit einem Online Fragebogen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Erfahrung des Sommers 2020, der Wahrnehmung des Dürreerisikos und der Abfrage, welche Szenarien zur Unterstützung der geplanten Modellierung durchgeführt werden sollten. Die Ergebnisse der Umfrage mit kaum Rücklauf waren größtenteils jedoch nicht repräsentativ für die Vielfalt der eigentlichen Wassernutzungsformen im Dreisamgebiet, d.h. zu selektiv. Es stellte sich heraus, dass das befragte Thema zu komplex für eine verallgemeinernde schriftliche Umfrage war und somit wurden die Ergebnisse nicht weiter verwendet. Als Beispiel für ein sehr spezifisches, lokales, Interesse insbesondere an den bildgebenden Wasserstandsmessungen können die Anfragen von von Seiten des Ortsvorstands Ebnet und der Stadt Freiburg genannt werden, die Interesse an beobachteten schnellen kurzfristigen Schwall-Sunk Phänomenen am Eschbach in Ebnet hatten.

In einem Vortrag im Rahmen des öffentlichen Kolloquiums der Naturforschenden Gesellschaft wurden im Januar 2023 u.a. auch Ergebnisse des Projekts präsentiert (Kerstin Stahl: Dürre im Südwesten: Herausforderungen für das Flussgebietsmanagement am Beispiel von Dreisam und Rhein).

3.4 Ausbildung und Einbindung von Studierenden

Studierende wurden auf verschiedene Weise eingebunden, auch wenn zum Beispiel die geplante Schulkooperation, eine Weiterführung der Umfragen während Projektstudien, und andere interaktive Formate in Gruppen aufgrund der Pandemiesituation nicht möglich waren. Studentische Hilfskräfte trugen maßgeblich zu Aufbau und Wartung der Messstandorte bei. Abschlussarbeiten mit individueller Geländearbeit oder Computerarbeit waren zwischenzeitlich möglich und wurden genutzt.

Folgende Abschlussarbeiten erstellten insbesondere die PQ Beziehungen für die Standorte:

- Völz, Verena (BSc, 2020): Analyse der longitudinalen Abflussverhältnisse im Zartner Becken - Vergleich Tracer und FlowMate zur Abflussmessung
- Allgeier, Felicitas (BSc, 2021): Unsicherheit von Abflusswerten im Dreisam Einzugsgebiet - Saltztracer-Abflussmessungen
- Althoff, Lukas (BSc, 2021): Unsicherheit von Abflusswerten im Dreisam Einzugsgebiet - FlowMate-Abflussmessungen
- Turner, Nils (BSc, 2021): Repräsentativität und Unsicherheit von Abflusswerten im Einzugsgebiet der Dreisam - Integration der Messungen

Zwei weitere Arbeiten widmeten sich der Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Wasserqualität (Hauptionen und Temperatur) und erarbeiteten insbesondere Schwierigkeiten bei der Vergleichbarkeit der Messung dieser bei geringen Wasserständen und hohen Wassertemperaturen.

- Pintilie, Dominik (BSc, 2020): Messnetzwerk für die elektrische Leitfähigkeit im Zartener Becken
- Martin, Alexandra (BSc, 2021): Untersuchungen zur Oberflächengewässer-Grundwasser Interaktion im Zartner Becken mittels Wassertemperatur

Eine Masterarbeit, die direkt von badenovaNetze betreut wurde schaffte 2022 noch einen Überblick über die Grundwassernutzungen im Dreisamtal:

- Rieth, Luisa (MSc, 2022) Wassernutzungsanalyse während klimatisch bedingter Dargebotsschwankungen im Zartner Becken

3.5 Wissenschaftliche Konferenzen und Veröffentlichungen

Die Teilnahme an wissenschaftlichen Fachtagungen war ebenfalls eingeschränkt, aber teilweise in virtuellen Formaten möglich. Amelie Herzog konnte Ergebnisse des Messmethoden-Vergleichs bei der Ozcar-Tereno Konferenz im Oktober 2021 in Strasbourg, die Analyse der Daten online bei der European Geosciences Union (EGU) im April 2021 und zuletzt noch erste Modellierungsergebnisse beim Tag der Hydrologie in Bochum im März 2023 präsentieren. Es wurde darüber hinaus ein englischer Fachartikel zum Monitoring des longitudinalen Trockenfallens im Dreisamtal veröffentlicht. Ein weiterer Fachartikel zur Szenarienmodellierung ist zur Veröffentlichung geplant. Alle wissenschaftlichen Beiträge, die im Rahmen des DüMa3sam-Projekts entstanden werden im Folgenden aufgelistet:

- Herzog, A.; Stahl, K.; Blauhut, V.; Schuetz, T.: Longitudinal streamflow intermittency monitoring and analysis in a meso-scale catchment with temperate climate. Presentation at Ozcar-Tereno Conference Oct., 5-7, Strasbourg, 2021
- Herzog, A., Stahl, K., Weiler, M., and Blauhut, V.: Monitoring zero water level in a drought-affected headwater stream network, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-8426, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8426>, 2021.

- Herzog, A., Hellwig, J., Stahl, K.: Monitoring und Analyse hydrologischer Dürre-Ereignisse in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Poster at Tag der Hydrologie, 2023. March 21-23, Bochum, 2023
- Herzog, A., Stahl, K., Blauhut, V., & Weiler, M. (2022). Measuring zero water level in stream reaches: A comparison of an image-based versus a conventional method. *Hydrological Processes*, 36(8), e14658. <https://doi.org/10.1002/hyp.14658>
- Herzog, A., Hellwig, J., & Stahl, K. (n.d.). A model-based investigation of influences on hydrologic connectivity using stress tests [manuscript in preparation for submission to *Hydrological Earth System Sciences*]

4 Zusammenfassung fachlicher Erkenntnisse

4.1 Das longitudinale Trockenfallen von Gewässern

Die fachlichen Erkenntnisse betreffen insbesondere die Methodik des Messens von Trockenfallen sowie die Muster der zeitlich-räumlichen Trockenfall-Dynamik in den Gewässern des Zartener Beckens. Insgesamt zeigt der Vergleich der beiden Wassertands-Messverfahren, des kapazitiven (Odyssey-Wasserstandslogger) und dem bildbasierten Messverfahren (Kamera und QR-Codeplatten), dass das kapazitive Messverfahren zuverlässigere Daten liefert. Dies ist auf eine höhere Genauigkeit, den geringeren Wartungsaufwand sowie Einflussfaktoren aus der Umwelt zurückzuführen, die eine Auslesung der QR-Codes erschweren. Insbesondere Lichtreflexionen, Überbelichtung und Verschmutzung beeinflussten die automatisierte Erkennung zu stark. Zusätzliche Details und Beispiele zu den Schwierigkeiten und Messgenauigkeiten zur hier gezeigten Zusammenfassung sind im Fachartikel von Herzog et al. (2022) in der Zeitschrift "Hydrological Processes" zu finden.

Bei der Untersuchung zeitlich-räumlicher Muster des Auftretens des Trockenfallens an den Messstandorten im Zartener Becken im Zeitraum zwischen Mai und Oktober 2020 zeigen sich Unterschiede. Zu erkennen ist, dass es am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets früher als im östlichen Teil zu Austrocknungen kam (Abb. 4 und Abb. 5). So war z.B. der Standort E8 im gesamten Monat Juli trocken, 67% der Zeit im August und 65% der Zeit im September. Es zeigt sich eine standortspezifische Dynamik dieser Trockenereignisse. So lassen sich an einigen Standorten besonders lange Trockenereignisse (insbesondere am Eschbach, E4, E6 und E8) beobachten während es an anderen Standorten (insbesondere Wagensteigbach W4, W2) zu einem häufigen Wechsel von trockenem und fließendem Zustand kommt.

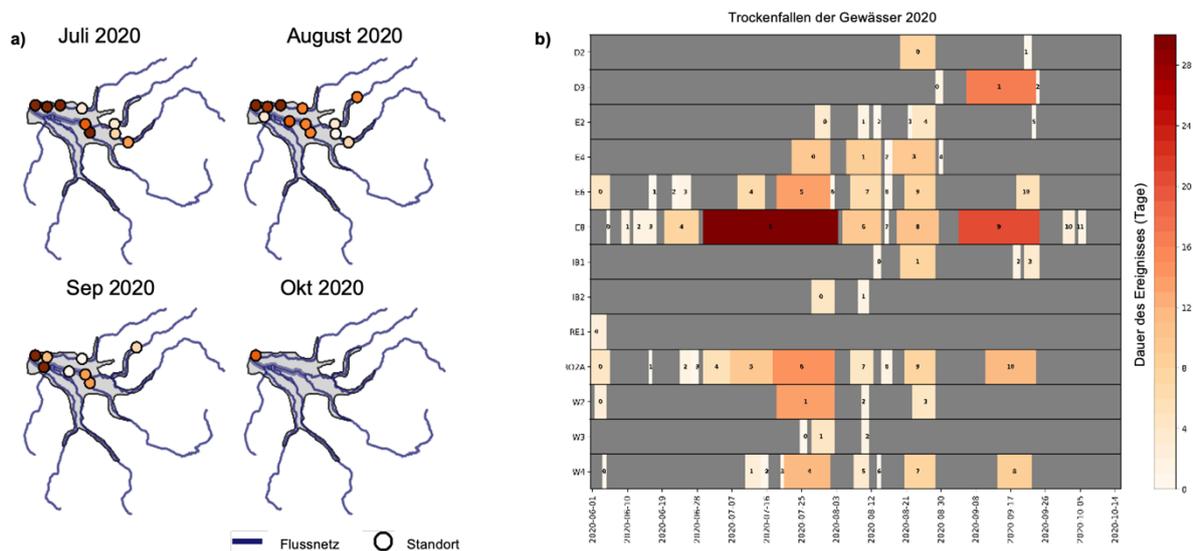


Abb. 5: Das Auftreten von Nullwasserständen (Trockenfallen) im Zartener Becken von Mai bis Oktober 2020 an den einzelnen Standorten, a) räumlich pro Monat und b) zeitlich detailliert pro Standort.

In wissenschaftlichen Studien zur hydrologischen Analyse intermittierender Fließgewässer wird zwischen Gewässern unterschieden, die von unten nach oben entlang des Flusses trockenfallen oder von oben nach unten. An einzelnen Zuflüssen im Dreisamtal verlief das longitudinale Muster des Trockenfallens von unten nach oben (z.B. am Eschbach) (Abb. 5). An flussaufwärts gelegenen Standorten trat das Trockenfallen an diesen Standorten somit weniger häufig und außerdem erst später im Sommer auf. Diese Tendenz, die vermuten lässt, dass ein Gewässer zu dieser Zeit keinen

Grundwasseranschluss hat und Basisabfluss aus dem Grundwasser erhält, sondern dass es maßgeblich durch Abflussbildung aus dem Oberlauf gespeist wird, der dann auf der Fließstrecke ins Flussbett versickert, ist jedoch nicht an allen Zuflüssen so klar zu beobachten wie am Eschbach.

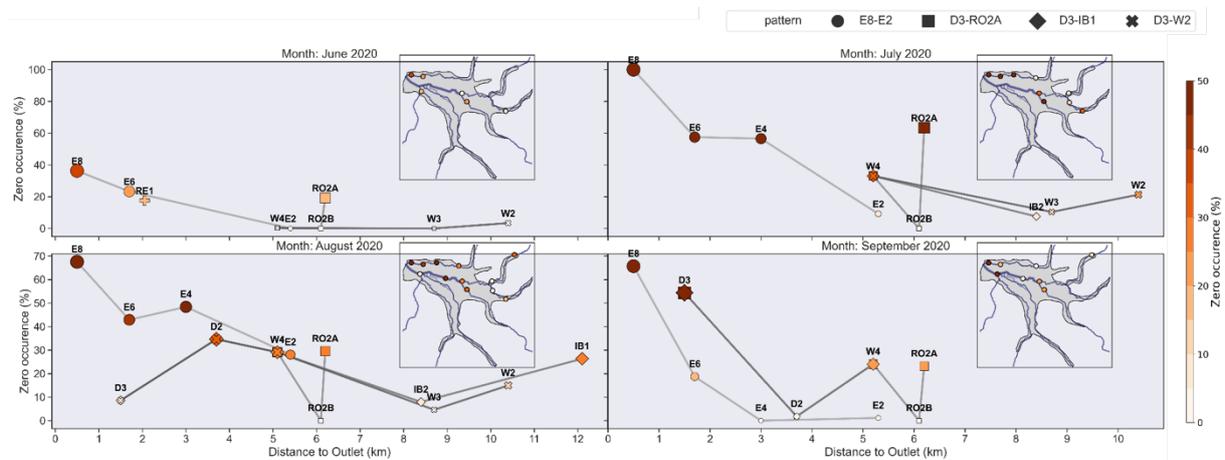


Abb. 4: Das monatliche, longitudinale Muster des Trockenfallens im Sommer 2020.

Trotz der Schwierigkeiten mit der automatisierten Bestimmung der Nullwasserstände anhand der Kamerafotos der QR-codeplatten ist bei der Datenanalyse zum Trockenfallen an Gewässerabschnitten die Bildinformation eine wertvolle Zusatzinformation. Sie kann zur Validierung des kapazitiv gemessenen Trockenfallens und zum Bestimmen eines Schwellenwerts bei sogenanntem 'ponding' (Poolbildung mit stehendem Wasser) herangezogen werden. Durch die Annahme eines Grenzwerts können so auch dann Trockenereignisse ermittelt werden.

Einen sicheren Standort zu finden stellte sich ebenfalls als schwierig heraus. Alle für Niedrigwasser ausgelegten Messsysteme wurden bei einem Hochwasser Anfang 2021 stark beschädigt oder gar zerstört. Somit standen für die Auswertung eines Trockenereignisses ausschließlich Messungen des Jahres 2020 zur Verfügung, da das Jahr 2021 im Sommer relativ feucht war.

Ergänzend zum Monitoring der Wasserstände wurden im Frühjahr/Sommer 2020 und 2021 regelmäßige Abflussmessungen durchgeführt. Mit den ermittelten Abfluss-Wasserstands-Beziehungen wurde der Abfluss an jedem Standort ermittelt. Die Unsicherheiten sind dabei, wie im Niedrigwasserbereich zu erwarten, sehr hoch. Auch wurden Wasserqualitätsparameter aufgenommen, die jedoch bei extremem Niedrigwasser und hohen Temperaturen ebenfalls große Unsicherheiten aufwiesen und nicht zur weiteren Erklärung der Trockenfalldynamik herangezogen wurden. Hauptionen wurden im Labor analysiert und von Pinitilie (2020) ausgewertet. Bei geringer Wasserführung und insbesondere am Eschbach, waren die Gesamtionenkonzentrationen am höchsten. Es gab jedoch keine Auffälligkeiten oder Anhaltspunkte, dass die Werte der Erklärung der Trockenfalldynamik dienlich sind. Sie spiegeln insbesondere die landwirtschaftliche Nutzung der jeweiligen Einzugsgebiete wieder und können somit im Folgeprojekt StressRes für weitere Auswertungen herangezogen werden.

4.2 Möglichkeit der Detektion von Schwall-Sunk-Erscheinungen

Aufgrund der speziellen Beobachtungen und Nachfragen von Akteuren nach Schwall-Sunk-Erscheinungen am Eschbach, Ibenbach und Wagensteigbach wurde zusätzlich zur Analyse des Trockenfallens eine Analyse kurzzeitiger (schneller) Zunahmen und Abnahmen der Wasserstände (beispielhaft für den Standort E8) durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass positive Abweichungen (Schwall-Ereignisse) gegenüber negativen Abweichungen (Sunk-Ereignisse) überwiegen (insbesondere bei 15-minütigen aber auch bei stündlichen Abweichungen) (Abb. 6). Ungefähr die Hälfte der

signifikanten Abweichungen treten in der Nacht auf. Anhand der Daten von 2020 ist somit kein Unterschied im Auftreten der Fluktuationen zwischen Tag und Nacht zu erkennen. Dies bestätigt sich bei Betrachtung der Bilderserien, die mit dem bildbasierten Messverfahren aufgenommen wurden. Es sind zwar sprunghafte Anstiege zu sehen, die nicht in Verbindung mit einem lokalen Niederschlagsereignis stehen, aber die Abnahme des Wasserstandes erfolgt daraufhin langsam (Beispiel in Abb.7). Ein zeitgleicher Anstieg des Wasserstandes und Abflusses am amtlichen Pegels der Dreisam in Ebnet lässt den Schluss zu, dass das Niederschlagsereignis im Schwarzwald im Oberlauf der Zuflüsse stattfand und die Zuflüsse somit von oben her gespeist wurden (Abb. 7).

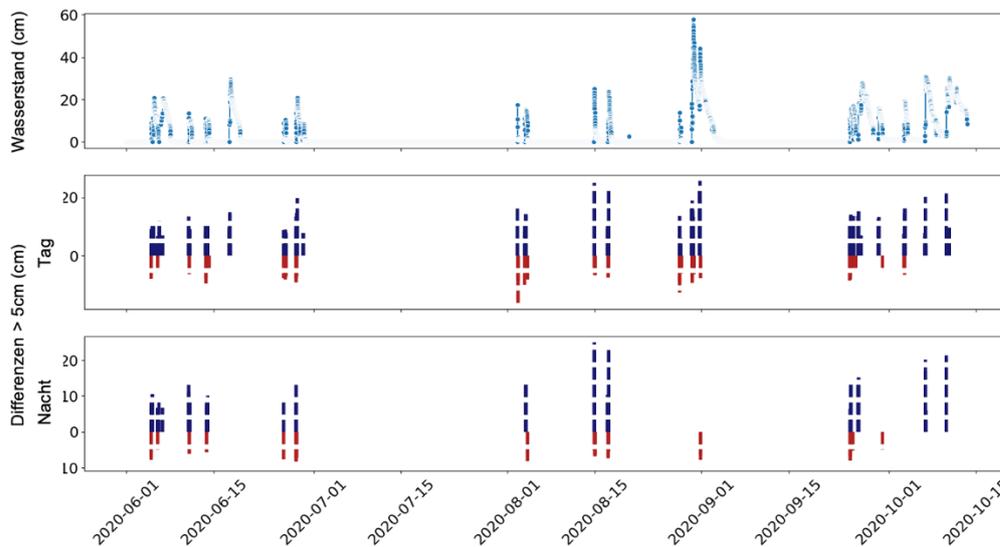


Abb. 6: Die gemessenen Wasserstände am Standort E8 (oben). Die Abweichungen der Wasserstände > 5cm innerhalb 1 Stunde (Mitte) und Abweichungen der Wasserstände > 5cm in der Nacht zwischen 20:00 und 06:00 (unten).

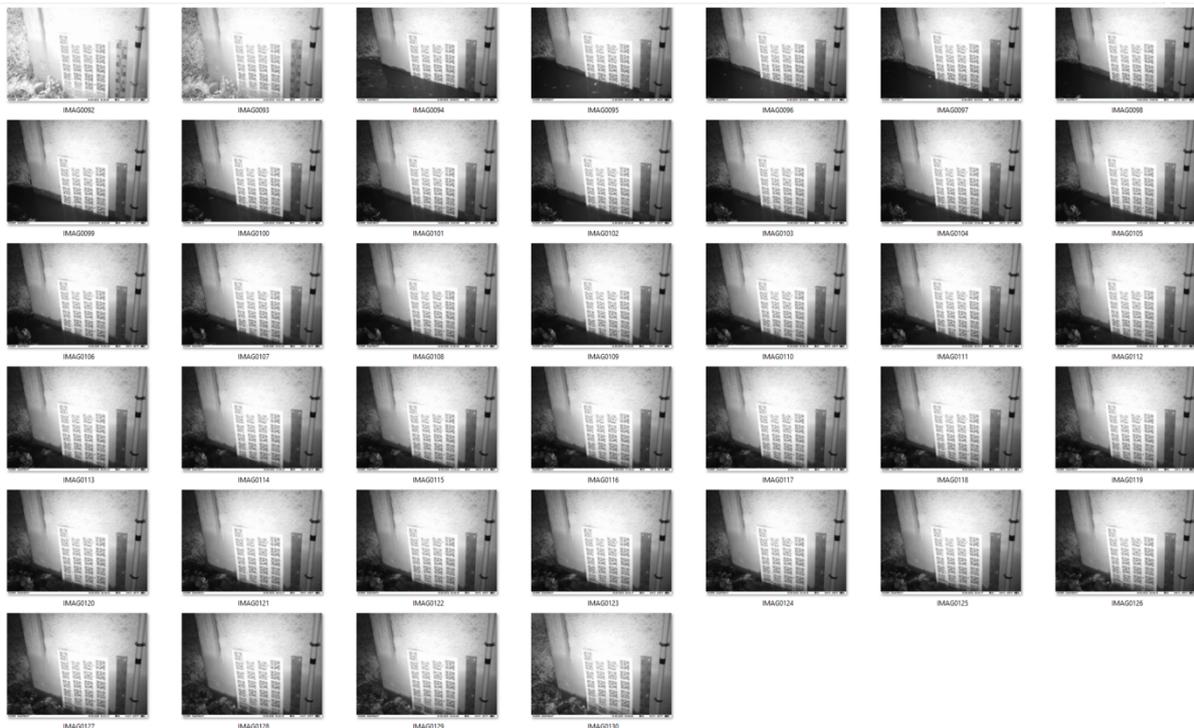


Abb. 7: Fotos der QR codeplatte am Standort E8 in Ebnet mit automatischer Kamera: Schneller Anstieg des Wassers und langsame Abnahme des Wasserstandes an E8 vom 14.08.2020 um 19:30 bis zum 15.08.2020 um 05:00.

In den Daten konnte somit kein Hinweis auf spezielle Sunk-Ereignisse gefunden werden. Die gemessenen Wasserstände wurden jedoch am Rand des Flussbettes erhoben. Aus diesem Grund kann Poolbildung im Flussbett und die räumlich laterale Kontraktion und Expansion des Flusses nicht erfasst werden. Das Auftreten von Sunk- und Schwall-Erscheinungen, die zu Pool-Bildung führen, kann somit nicht ausgeschlossen werden. Messmethoden hierfür gibt es aber nicht.

4.3 Szenarienmodellierung der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion

Die Modellergebnisse für den Referenz-Modellauf zeigen grundsätzlich eine verminderte vertikale Konnektivität von GW-Leiter und Gerinnebett bei tiefen GW-Ständen (GW-Dürre). Diese Entkopplung des Oberflächen- und GW-Systems bei tiefen GW-Ständen ist im Nordosten des Zartener Beckens (Eschbach) besonders ausgeprägt. Hierbei ist zu beachten, dass das Ziel dieser Modellierung nicht die Reproduktion der genauen derzeitigen Bedingungen im Modell sind. Die Parametrisierung des Gerinnebetts sowie die Topographie ist bei einer Zellgröße von 100m x 100m in der Modellversion sehr grob und eine offline-Kopplung mit dem Gesamtmodell erschwert eine genauere Bestimmung der ober- und unterirdischen Randzuflüsse. Eine Quantifizierung der Oberflächen-GW-Interaktion ist daher auf Basis der Modellierung nicht möglich und bedürfte weiterer Anpassungen der Modellparameter. Auch gibt es eine 'unbeeinflusste Referenz' seit Jahrzehnten nicht mehr und diese lässt sich somit auch nicht validieren. Grundsätzlich überschätzt das Modell somit von vorneherein den Prozentsatz der auftretenden Nullwasserstände an den Rändern des Zartener Beckens.

Ziel des Modellexperiments ist es hingegen, die Prinzipien der Oberflächen-Grundwasser (OW-GW)-Interaktion modelltechnisch zu erfassen, um die grundsätzlichen existierenden Muster des Trockenfallens besser zu verstehen. In der wissenschaftlichen Literatur wurde dies bisher kaum auf der Skala gesamter Einzugsgebiete und Flussnetze durchgeführt und ausgewertet. Zur Validierung eines modellsimulierten Austauschs zwischen Oberflächen- und GW-System existieren normalerweise keine Messdaten entlang eines ganzen Gewässernetzes. Die im Projekt erhobenen longitudinalen Trockenfall-Muster bieten daher eine neue Möglichkeit, gemessene und modellierte longitudinale zeitlich-räumliche Verläufe des Trockenfallens relativ zu vergleichen und so das Systemverständnis und die Systemmodellierbarkeit zu verbessern.

Somit sind nur die relativen Unterschiede zwischen den Stresstests als Ergebnisse relevant. Die Oberflächen-GW-Interaktion für die Modellszenarien mit veränderter klimatischer Vorbedingung (GW-Neubildung) ist vergleichbar mit der Referenzsimulation. Bei hohen GW-Ständen bleibt die Oberflächen-GW-Interaktion bestehen (Abb. 8 b)). Hierbei wechseln entlang der Zuflüsse exfiltrierende und infiltrierende Gewässerabschnitte ab. Unter den Modellszenarien ist die Abweichung von der Referenzsimulation bei den Szenarien mit GW-Entnahmen höher als bei Szenarien ohne GW-Entnahmen (Abb. 8 c)) und die Variabilität der simulierten Oberflächen-GW-Interaktion ist im nordöstlichen Bereich besonders hoch (Abb. 5 d)). Der Einfluss der GW-Entnahmen auf die Oberflächen-GW-Interaktion zeigt sich auch bei der standortspezifischen Auswertung der Modellszenarien für die Messstandorte des Monitoringsystems. Bei Berücksichtigung von GW-Entnahmen im Modell nimmt die Oberflächen-GW-Interaktion an Gewässerabschnitten in diesem Bereich ab (Abb. 8 a)).

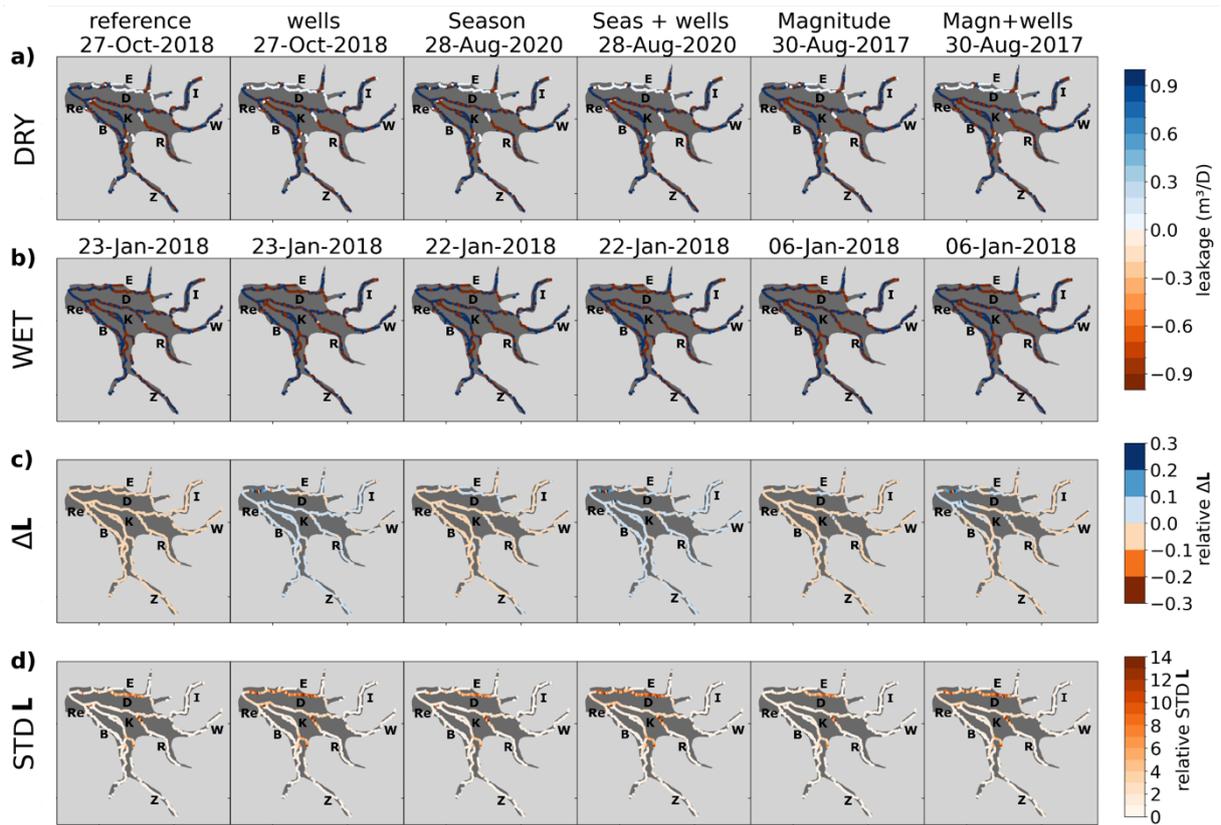


Abbildung 8: Simulierter Austausch zwischen Grundwasser und Flussbett im Zartener Becken bei a) besonders tiefem und b) hohem GW-Stand für die Referenz-Simulation und die Modellszenarien. c) Die relative Abweichung des Mittelwerts im Vergleich zur Referenzsimulation und d) die relative Standardabweichung für jedes Szenario.

5 Ausblick und Übertragbarkeit

5.1 Messung und Information über das Trockenfallen von Gewässerabschnitten

Mit der Messung des zeitlichen und räumlichen Trockenfallens von Gewässerabschnitten im Dreisamtal wurde Neuland betreten. Eine Bewertung der Messungen muss sich sowohl auf die Technik als auch auf die möglichen Anwendungen beziehen. Aus technischer Sicht fällt die Bewertung und somit die Übertragbarkeit der Entwicklungen gemischt aus. **Optimal geschützte Standorte für die bildgebenden low-cost Messungen zu finden, die dann auch eine automatische Bildverarbeitung erlauben zeigte sich als schwierig (Details siehe Herzog et al., 2022).** Die bewährten kapazitiven in Rohre eingebrachten Wasserstandssonden zeigten sich im Vergleich als einfacher und etwas robuster, wenn auch teurer und nicht komplett hochwassersicher. Schwall-Sunk-Ereignisse, die zu Pool-Bildung führen, würden evtl. von den am Rand eingebrachten kapazitiven Sonden nicht erfasst. Insgesamt schwierig ist auch bei beiden Systemen die Bestimmung eines Schwellenwerts zur Definition eines 'trockenen Gerinnes', insbesondere bei Poolbildung im Gerinne. Fotos an sich sind jedoch sehr einfach zu verstehen und können einfach kommuniziert werden und so z.B. Transparenz über hydrologische Situationen und deren Entwicklung schaffen. Auch wenn dies aufgrund der Pandemiebedingungen nicht ausreichend im Projekt berücksichtigt werden konnte, wäre es sinnvoll dies mit Akteuren zu prüfen. In Zukunft sollte das Monitoring von Nullwasserständen daher über längere Zeiträume und auch im Winter fortgeführt werden. Die erarbeiteten Vor- und Nachteile der Funktionalität der getesteten Messeinrichtung sind sicherlich übertragbar auf andere Standorte.

Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Datensätze des Trockenfallens, wie sie in DüMa3sam erhoben wurden, sind dennoch insgesamt selten und werden angesichts der Tendenz der Zunahme an Trockenphasen in Zukunft zunehmend für Forschung und Praxis benötigt werden. Die im DüMa3sam-Projekt erhobenen Daten von 2020 sind repräsentativ für ein Dürrejahr, das in Zukunft häufiger auftreten könnte. Dennoch ist die Erhebung von Daten in einem Dürresommer nicht ausreichend, um ein ganzheitliches Bild davon zu bekommen, wie sich das Trockenfallen in einzelnen, extrem trockenen Jahren unterscheidet und wie es sich über längere Zeiträume hinweg entwickelt. Messungen sind die Grundlage für eine Charakterisierung der longitudinalen Muster des Trockenfallens in verschiedenen Einzugsgebieten. Diese Charakterisierung trägt zu einem verbesserten Verständnis der Dynamik des Trockenfallens und der Prozesse bei, die das Trockenfallen begünstigen. Hierbei wurden Unterschiede in der Dynamik des Trockenfallens an verschiedenen Zuflüssen und Standorten im Einzugsgebiet sichtbar. Eine detailliertere Analyse aller Kontrollfaktoren des Trockenfallens sollte noch mehr darauf achten wirklich unterschiedliche Standorte entlang eines Flusses zu wählen. Das Projektmessnetz hatte hierfür nicht an jedem Zufluss die gleichen Möglichkeiten. Weiterhin sollten bei der Anlage eines Messnetzes und zum Schaffen von Transparenz gegenüber der Öffentlichkeit alle Wassernutzungen im Einzugsgebiet berücksichtigt werden. Eine Situationsanalyse der Wassernutzungen u.a. im Rahmen der Masterarbeit von Luisa Rieth zeigte jedoch, dass ein Mangel an Informationen zur Gesamtheit der Wassernutzungen besteht. Somit ist es auch schwierig, Messungen so anzulegen, dass sie den Einfluss dieser erfassen würden.

Die gemessenen Nullwasserstände können aber dazu verwendet werden, zu überprüfen, ob das Trockenfallen in physikalischen Modellen in richtiger Weise abgebildet wird und ob ein Gewässer z.B. übereinstimmend von 'oben nach unten' oder 'unten nach oben' austrocknet. Die lokale Interpretation tatsächlicher Gegebenheiten erfordern jedoch detailliertere Modellentwicklungen wie in einem Projekt wie DüMa3sam.

6.3 Wegweiser zum Dürremanagement

Hydrometrische Daten des Trockenfallens von Gewässerabschnitten können auf zweierlei Weise für eine Dürremanagement wichtig sein:

- in Echtzeit (im Krisenfall) zur Erhellung der Situation oder zum Test der Wirksamkeit von akuten Maßnahmen oder
- zur vorausschauenden Planung, z.B. der Priorisierung oder Einschränkung bestimmter Wassernutzungen

Die Szenarien-Modellierung zeigt beispielhaft, wie anfällig oder resilient das System unter veränderten klimatischen Bedingungen für GW-Entnahmen als Stressor ist und wie diese das Trockenfallen in Gewässerabschnitten entlang des Flussnetzes potentiell beeinflussen mögen. Das erstellte Modell lässt mangels Detailgrad eine quantitative Aussage für die spezifischen Situation im Dreisamtal noch nicht zu, könnte aber in Zukunft noch detaillierter parametrisiert werden und nach ausreichender Validierung dann erörtern, welche Gewässerabschnitte im Einzugsgebiet im Fall von GW-Dürre besonders vulnerabel sind.

Somit kann Szenarien-Modellierung in Zukunft im Prinzip wichtige Informationen darüber liefern, wo Strategien zum Dürre- Management sinnvoll sind. Da derzeit jedoch noch zu wenig Information über die verteilten Entnahmen im Dreisamtal bekannt ist (Rieth, 2022) und auch in dieser Studie einzig die Entnahmen der Wasserversorgung für Freiburg modelltechnisch überhaupt versucht wurden zu berücksichtigen, sollte nochmal stärker in vollumfängliche Inventare der Nutzungen von Oberflächen und Grundwasser investiert werden um z.B. mögliche Reduktionen mit Stresstests realitätsnah simulieren zu können. Der Ansatz, Wassernutzungs-Strategien in einem partizipativen Prozess durch Diskussionen und Workshops mit verschiedenen Wassernutzern und Akteuren zu entwickeln sollte hierbei weiter verfolgt werden, um Konfliktpotentiale zu mindern. Es zeigte sich jedoch, dass zusätzlich zu den Wasserstandsdaten auch noch weitere Messdaten zur Oberflächen-GW-Interaktion benötigt werden, um die Plausibilität des simulierten Austauschs zwischen Oberflächen- und GW-System besser bewerten zu können.

6.2 Wahrnehmung von hydrologischer Dürre

Aufgrund der Covid-Pandemie waren die partizipativen Formate, die im Rahmen des Projekts vorgesehen waren, leider nicht erfolgreich und mit der nötigen Interaktion durchführbar. Aufgrund des trockenen Sommers im Jahr 2022 und im Frühling 2023 besteht jedoch kein Mangel an grundsätzlicher Wahrnehmung von Trockenheit. Während 2022 war es zwar nicht mehr möglich den Austausch mit Akteuren nachzuholen, jedoch konnte durch die Universität Freiburg ein weiterführendes Projekt "StressRes" (finanziert vom BMBF im Rahmen des Programms "Nachhaltige Grundwassernutzung (LURCH)" mit badenovaNetze als assoziiertem Partner eigeworben werden. Das Projekt wird sich neben einer verstärkten Berücksichtigung von Land- und Wasserwirtschaft auch weiterhin der Thematik von DüMa3sam widmen. Es hat u.a. zum Ziel die Stresstest-Modellierung auf lokaler Ebene noch weiterzuentwickeln und die OF-GW Interaktionen dabei systematischer zu berücksichtigen. Daher wird das Monitoring der Wasserstände teilweise fortgeführt. Geplant ist auch ein Echtzeit-Monitoring zu entwickeln und einen "Stresstest-Demonstrator", mit dem Szenarien nach Bedarf generiert werden können. Um die regionalen Besonderheiten von hydrologischer Dürre besser zu erklären und das Verständnis für die Prozesse zu kommunizieren wäre es jedoch sinnvoll auch von Seiten der Behörden Echtzeit Messdaten zum Trockenfallen zu erheben und transparent zu veröffentlichen.

Literaturangaben

Hellwig, J., Stoelzle, M., and Stahl, K. (2021) Groundwater and baseflow drought responses to synthetic recharge stress tests, *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 1053–1068, <https://doi.org/10.5194/hess-25-1053-2021>,

Herzog, A., Stahl, K., Blauhut, V., & Weiler, M. (2022). Measuring zero water level in stream reaches: A comparison of an image-based versus a conventional method. *Hydrological Processes*, 36(8), e14658. <https://doi.org/10.1002/hyp.14658>

Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., and Provost, A. M. (2017) Documentation for the MODFLOW 6. Groundwater Flow Model, <https://doi.org/10.3133/tm6A55>.

Steinbrich, A., Leistert, H., and Weiler, M. (2021) RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen, *RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen*, 2021, 94–101, <https://doi.org/10.3243/kwe2021.02.004>, 2021.

Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Kampragou, E., Van Loon, A. F., Barker, L. J., Melsen, L. A., Bifulco, C., Musolino, D., de Carli, A., Massarutto, A., Assimacopoulos, D., and Van Lanen, H. A. J.: Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 801–819, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>, 2016.

Stoelzle, M., Staudinger, M., Stahl, K., and Weiler, M. (2020) Stress testing as complement to climate scenarios: recharge scenarios to quantify streamflow drought sensitivity, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383, 43–50, <https://doi.org/10.5194/piahs-383-43-2020>.

Wirsing, G. and Luz, A. (2007) Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg), *LGRB Informationen*, 19, 1–130.

6 Anlage: Projekterkenntnisse

Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.

(Je Punkt maximal 300 Zeichen.)

1.	An den Messstandorten, die am stärksten vom Trockenfallen betroffen sind, wurden über 60 % des Sommers 2020 Nullwasserstände gemessen. Zum Verständnis der genauen Prozesse, die das Trockenfallen verursachen, fehlen jedoch noch genauere physiographische Daten und Wassernutzungsinformationen.
2.	Die generellen Richtungen der GW-OF-Interaktion entlang der Flüsse konnten modelliert werden, z.B. auch die Entkopplung der GW-OF-Interaktion bei tiefen GW Ständen. Um lokale Besonderheiten abzubilden, sind die Modelle jedoch noch zu gering aufgelöst.
3.	Unterschiedliche lokale Wahrnehmungen des Trockenfallens von Gewässern erschwert die öffentliche Diskussion. Geeignete Formate zur Bereitstellung von Messdaten (Grundwasserstände, Nullwasserstände, Fotostrecken) könnten mehr Transparenz schaffen.