

## Fliessgewässer im Nordwestschweizer Jura in Zeiten der Trockenheit und des Klimawandels

Peter Lüscher, Rolf Weingartner, Daniela Pavia Santolamazza und Henning Lebreuz

### *Zusammenfassung*

*Trockenheit und Niedrigwasser sind aus hydrologischer Sicht der Gewässer eine der grössten Herausforderungen in der Schweiz. In diesem Beitrag werden die Niedrigwasserverhältnisse im Nordwestschweizer Jura untersucht. Dabei steht die Frage der heutigen und zukünftigen Trockenheitsanfälligkeit im Mittelpunkt. Die Resultate belegen, dass signifikante Unterschiede zwischen Ketten- und Tafeljura bestehen, wobei die Fliessgewässer im Tafeljura insgesamt trockenheitsanfälliger sind. Gelingt es nicht, die Treibhausgasemissionen wirkungsvoll zu begrenzen, wird die Trockenheitsanfälligkeit gemäss dem Szenario ohne Massnahmen (RCP 8.5) bis Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen.*

## 1 Einleitung

In den Jahren 2003, 2011, 2015 und 2018 erlebte die Schweiz überdurchschnittlich heisse und trockene Sommer. Gemäss den Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert wird die Wahrscheinlichkeit heisser und trockener Sommer weiter zunehmen (NCCS 2021). Die Auswirkungen solcher klimatischen Extreme sind vielfältig. Sie können zu grossen ökologischen und sozio-ökonomischen Schäden führen. Aus hydrologischer Sicht ist die Sommertrockenheit – und die damit verbundenen Niedrigwassersituationen (Abb. 1) – eine der grössten Herausforderungen für die Schweiz. Die vorliegende Untersuchung fokussiert auf die heutige und zukünftige Niedrigwassersituation im Nordwestschweizer Jura, der sich in den Ketten- und Tafeljura gliedert. Es wird aufgezeigt, wie sich die Niedrigwassersituation zwischen diesen beiden Gebieten unterscheidet und welche Fliessgewässer von der Trockenheit besonders betroffen sind und sein werden.

---

Adresse des Autorenteam: Dr. Peter Lüscher, Schmiedengasse 50, CH-4104 Oberwil; E-Mail: luescher.pet@bluewin.ch



Abb. 1 Trockenfallen (Abfluss  $Q = 0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) der Sissle in Eiken (AG) am 11. August 2018.

Foto: P. Lüscher

## 2 Der Untersuchungsraum

Der hydrologische Untersuchungsraum “Nordwestschweizer Jura” ist Teil des schweizerischen Mittelgebirges und wird im Süden durch die Wasserscheiden der ersten Juraketten, im Norden durch den Rhein, im Westen durch die Birs und ihre Nebenflüsse sowie im Osten durch die Aare begrenzt. An der Gesamtfläche von  $1'656 \text{ km}^2$  haben fünf Kantone ganz (BL) oder teilweise (AG, BE, JU, SO) Anteil. Durch den unterschiedlichen tektonischen Bau wird der Jura auch hier in den Kettenjura mit seinen Falten, Längs- und Quertälern (Klusen) und in den ungefalteten Tafeljura mit seinen flach liegenden Tafeln zwischen den Kastentälern unterteilt. Der Kettenjura ist im Untersuchungsraum mit  $1'104 \text{ km}^2$  doppelt so gross wie der Tafeljura ( $552 \text{ km}^2$ ). Aufgrund signifikanter hydrogeographischer Unterschiede (vgl. Kap. 4) werden die beiden Teilräume vergleichend untersucht. Die Grundlage für die Analysen bilden insgesamt 41 gemessene Einzugsgebiete unterschiedlicher Fläche (vgl. Abb. 2 und Tab. 1). Wird ein grösseres Teileinzugsgebiet durch mehrere Messstellen abgedeckt, werden die Teileinzugsgebiete zwischen den Pegeln wo immer möglich separat betrachtet. Die Einzugsgebiete sind von der Topographie her abgeleitet. Die Karstphänomene in den vorwiegend aus Kalk bestehenden Einzugsgebieten der Flüsse und Bäche sowie die allenfalls vorhandenen unterirdischen Wasserscheiden werden nicht berücksichtigt. Dies obwohl sie aus hydrologischer Sicht relevant sein können, wie dies z. B. Lüscher (1975) bereits vor rund 50 Jahren belegte. Hydrogeographische Auswirkungen hat die Höhenausdehnung im Untersuchungsraum: vom Rheingebiet auf etwa  $260 \text{ m ü. M.}$  bis zur Hasenmatt auf der Weissensteinkette mit  $1'445 \text{ m ü. M.}$

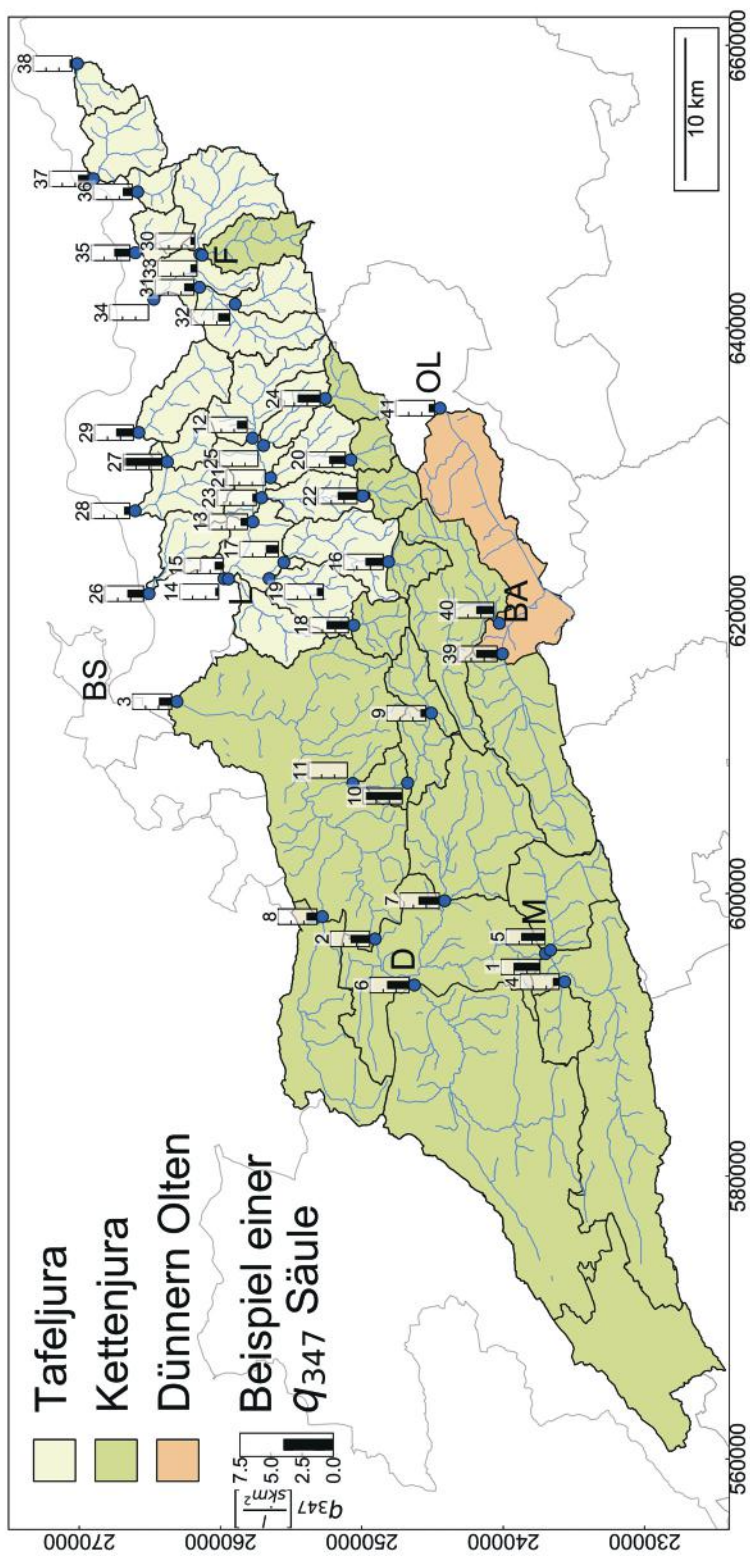




Abb. 2 Das Untersuchungsgebiet "Nordwestschweizer Jura" mit den 41 Einzugs- und Teileinzugsgebieten (vgl. Tab. 1), Messstellen und Säulen mit  $q_{347}$ -Abflusswerten in  $l/(s \cdot km^2)$  (Daten siehe Kap. 3.2); Abkürzung der Ortschaften: BS Basel; D Delémont (Delsberg); MM Moutier; BA Balsthal; OL Olten; L Liestal; F Frick.

Tab. 1 Liste der verwendeten Einzugs- und Teileinzugsgebiete.

<b>Nummer in Abb. 2</b>	<b>Laufabschnitte ohne Zuflüsse</b>	<b>Standort Messstation</b>	<b>Kanton</b>	<b>(Teil-)Einzugs- gebiet in km<sup>2</sup></b>
1	Birs	Moutier	BE	127.0
2	Birs	Soyhières	JU	96.0
3	Birs	Münchenstein	BL	206.0
4	Chalière	Moutier	BE	18.1
5	Raus	Moutier	BE	41.0
6	Some	Delémont	JU	214.0
7	Scheulte	Vicques	JU	73.0
8	Lützel	Kleinlützel	SO	66.0
9	Lüssel	Beinwil	SO	14.0
10	Lüssel	Erschwil	SO	19.0
11	Lüssel	Breitenbach	SO	12.8
12	Ergolz	Ormalingen	BL	29.9
13	Ergolz	Itingen	BL	111.0
14	Ergolz	Liestal	BL	46.2
15	Orisbach	Liestal	BL	20.8
16	Vordere Frenke	Waldenburg	BL	12.6
17	Vordere Frenke	Bubendorf	BL	33.0
18	Hintere Frenke	Reigoldswil	BL	14.6
19	Hintere Frenke	Bubendorf	BL	23.6
20	Homburgerbach	Buckten	BL	9.6
21	Homburgerbach	Thürnen	BL	20.8
22	Diegterbach	Diegten	BL	13.1
23	Diegterbach	Sissach	BL	19.6
24	Eibach	Zeglingen	BL	12.9
25	Eibach	Gelterkinden	BL	14.2
26	Violenbach	Augst	AG	16.9
27	Buuserbach	Maisprach	AG	10.5
28	Magdener Bach	Rheinfelden	AG	22.7
29	Möhlinbach	Zeiningen	AG	26.6
30	Sissle	Hornussen	AG	37.2
31	Bruggbach	Gipf	AG	27.2
32	Wöflinswilerbach	Wittnau	AG	17.4
33	Staffeleggbach	Frick	AG	20.8
34	Sissle	Eiken	AG	20.5
35	Kaisterbach	Kaisten	AG	12.1
36	Sulzerbach	Rheinsulz	AG	8.3
37	Etzgerbach	Etzgen	AG	25.3
38	Guntenbach	Leuggern	AG	9.2
39	Dünnern	Laupersdorf	SO	67.5
40	Augstbach	Balsthal	SO	64.0
41	Vergleichsstation Dünnern	Olten	SO	102.5

## 3 Daten und Niedrigwasserkenngrossen


### 3.1 Verwendete Daten

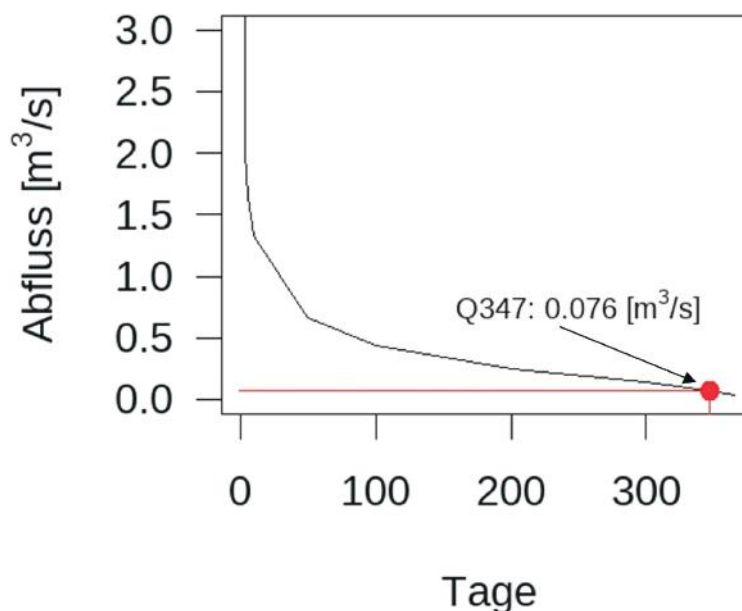
Die vorliegenden Untersuchungen basieren auf den Abflussdaten des Bundesamtes für Umwelt (BAFU; auf Bestellung und ) sowie der kantonalen Fachstellen AG, BE, BL und SO. Die Niederschlags- und Verdunstungsdaten stammen von MeteoSchweiz () oder wurden dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (BAFU 1992–2010) entnommen, aus dem auch weitere Informationen wie die Gebietseigenschaften der Einzugsgebiete bezogen wurden. Mit einer Umfrage bei den kantonalen Fischerei-Aufsichtsämtern AG, BE, BL, JU und SO wurde ermittelt, wo in Trockenjahren seit dem Jahr 2000 Bachbetten trockenfielen und/oder wo Notabfischungen durchgeführt wurden.

### 3.2 Wie werden Niedrigwasser beschrieben?

Niedrigwassersituationen werden in der Regel mit den beiden nachfolgenden Kenngrössen beschrieben:

- Der Abflusswert  $Q_{347}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] definiert den Tagesmittelabfluss, der an 347 Tagen des Jahres (entspricht 95 % aller Tage) erreicht oder überschritten wird. Er wird aus der mittleren Dauercurve berechnet und dient auch als Vorgabe für die Restwassermenge eines Fliessgewässers (Abb. 3). Die Abflussspende eines Einzugsgebietes ist  $q_{347}$ , definiert als Liter pro Sekunde und Quadratkilometer [ $\text{l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ].
- Mit NM7Q wird der Durchschnitt der kleinsten Abfluss-Tagesmittel von sieben aufeinanderfolgenden Tagen eines Messjahres definiert (Tab. 2).

Abb. 3 Mittlere Dauercurve des Möhlinbachs in Zeiningen (1982–2017) (Daten: )



Oktober	m <sup>3</sup> /s	
1.	4.16	
2.	4.15	
3.	4.15	
...		
...		
25.	3.75	
26.	3.63	
27.	3.57	
28.	3.49	→
29.	3.49	
30.	3.35	
31.	3.35	

NM7Q = 3.53 m<sup>3</sup>/s

Tab. 2 Beispiel von NM7Q der Birs bei Münchenstein im Oktober 2021.

#### 4 Sind Ketten- und Tafeljura zwei hydrogeographisch unterschiedliche Grosslandschaften?

Im Folgenden wird auf der Basis wichtiger Gebietskenngrössen aufgezeigt, in welchem Ausmass sich der Ketten- und Tafeljura aus hydrogeographischer Sicht unterscheiden und welche Bedeutung dies grundsätzlich für die Niedrigwasserverhältnisse hat. Dieser Vergleich basiert auf den eingangs erwähnten Einzugsgebieten, von denen 19 im Kettenjura und 21 im Faltenjura liegen.

Auf der Basis von Abb. 4 lassen sich folgende Unterschiede herausarbeiten: Im Kettenjura (KJ) ist die Streuung der Fläche der Einzugsgebiete deutlich grösser als im Tafeljura (TJ), obschon die medianen Werte beider Teilregionen ähnlich sind. Das arithmetische Mittel der Gebietsflächen ist deshalb aussagekräftiger: Im Kettenjura ist diese Grösse mit 57 km<sup>2</sup> mehr als das Doppelte des Tafeljuras. Die mittleren Höhen der Einzugsgebiete sind im Kettenjura deutlich höher, was wichtige Auswirkungen auf die Temperatur-, Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse hat (siehe Kap. 1 und Kap. 5.2). Bezüglich der Flussdichte unterscheiden sich die beiden Teilregionen kaum. Die im Vergleich mit der übrigen Schweiz kleinen Werte sind ein Hinweis auf den geologischen Bau des Juras, dessen Kalkformationen gut durchlässig sind und damit kein dichtes Gewässernetz zulassen. Der Waldanteil ist im Kettenjura deutlich höher als im Tafeljura. Dies ist bedingt durch die Topografie mit steilen Flanken, welche eine landwirtschaftliche Nutzung im Vergleich zum Tafeljura erschweren. Insgesamt unterscheiden sich die beiden Teilregionen hydrogeographisch deutlich. Die Abbildungen 2 und 4 belegen, dass diese Unterschiede auch die Niedrigwasserverhältnisse massgeblich beeinflussen.

Die Analyse des Untersuchungsraums und seiner Gebietsparameter zeigt insgesamt, dass sich Ketten- und Tafeljura hydrogeographisch wesentlich unterscheiden. Im Folgenden soll untersucht werden, ob diese Unterschiede auch bei den Niedrigwasserverhältnissen erkennbar sind.

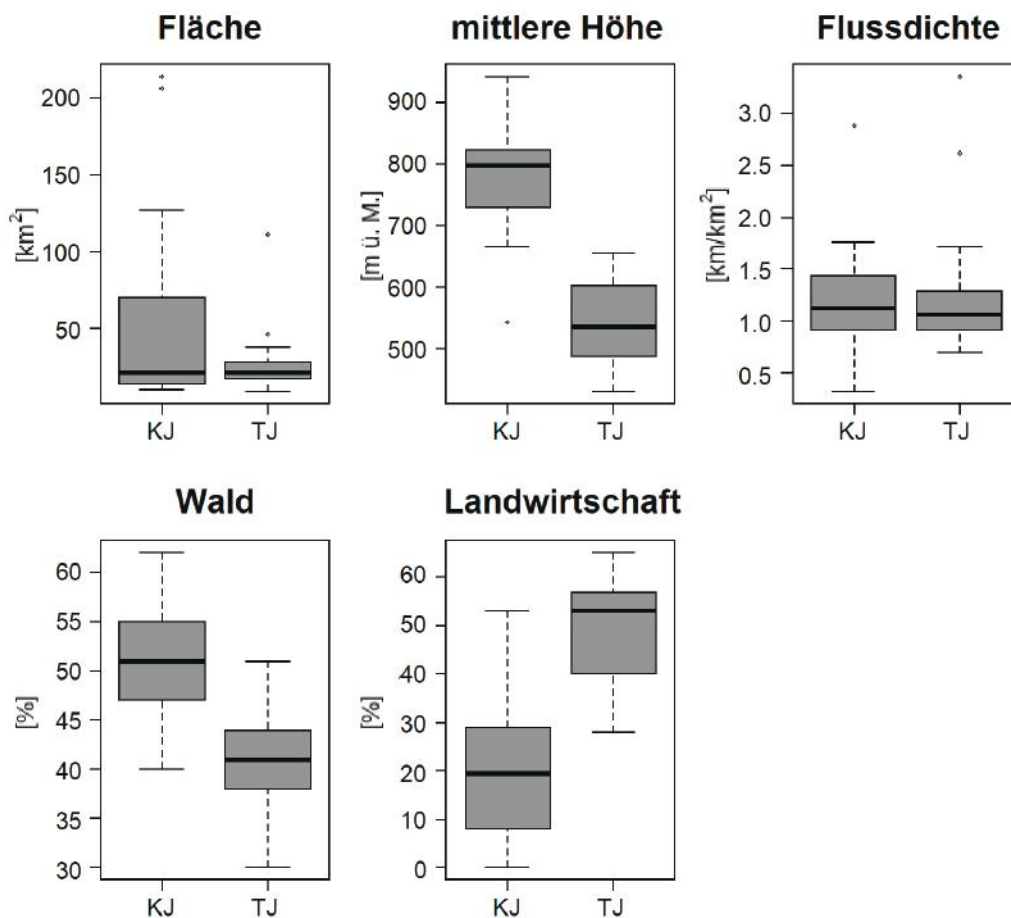



Abb. 4 Die fünf hydrologisch relevanten Kenngrößen der Häufigkeitsverteilungen im Untersuchungsgebiet Ketten- (KJ) und Tafeljura (TJ) (Daten: )<sub>4</sub>). Lesebeispiel: Der Boxplot beschreibt z. B. bei der mittleren Höhe im Tafeljura fünf kennzeichnende Lagemasse: Maximum (655 m ü. M.), 3. Quartil oder 75 %-Grenze (602 m ü. M.), Median oder 50 %-Wert (535 m ü. M.), 1. Quartil oder 25 %-Grenze (489 m ü. M.) sowie Minimum (430 m ü. M.).

## 5 Historische Entwicklung und aktuelle Situation

### 5.1 Lufttemperatur

In der Schweiz hat die mittlere Jahrestemperatur seit Messbeginn um 1864 bereits um 2 °C zugenommen (BAFU 2021, 12.). Seit Beginn der 1990er-Jahre werden durchwegs überdurchschnittliche Temperaturen gemessen, wie auch das Beispiel der Station Basel-Binningen belegt (Abb. 5): Die Abweichungen vom Mittelwert der Standardperiode 1961–1990 sind – mit Ausnahme von 1996 – seit 1988 durchwegs positiv. Das Jahr 2018 weist die höchste positive Abweichung der gesamten Messperiode auf. Der Temperaturanstieg seit 1988 von mehr als 1 °C ist deutlich erkennbar und statistisch mit 99 % signifikant.

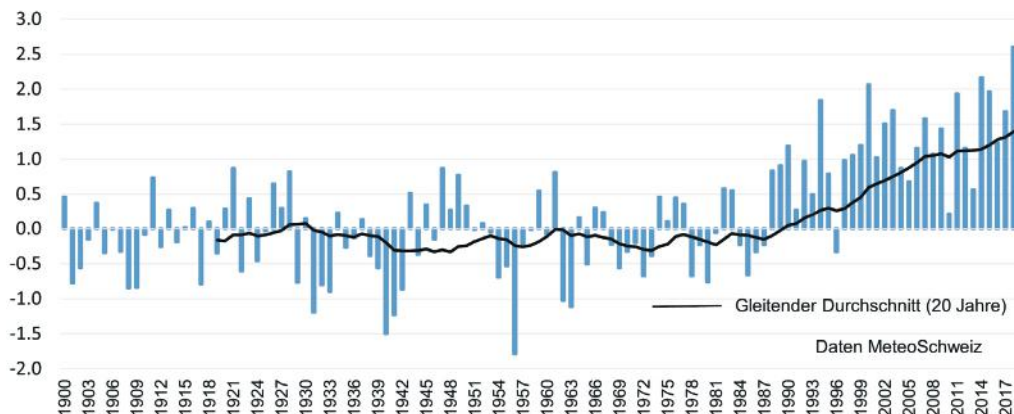


Abb. 5 Jahresmitteltemperatur der meteorologischen Station Basel-Binningen 1900–2020: Abweichung vom langjährigen Durchschnitt (Normperiode 1961–1990).

Die Erhöhung der Lufttemperatur hat direkte Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Höhere Temperaturen bedeuten eine Erhöhung der Verdunstung, eine Zunahme der Starkniederschlags-Intensitäten und einen Anstieg der 0 °C-Grenze mit entsprechenden Auswirkungen (geringerer Schneeanteil am Niederschlag). Zudem nimmt der Wasserbedarf in der Landwirtschaft bei steigenden Temperaturen zu, was insbesondere auch Auswirkungen auf das aquatische Ökosystem hat.

## 5.2 Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und klimatische Wasserbilanz


Jahresniederschlag und -verdunstung sind stark höhenabhängig, so dass sich deutliche Unterschiede zwischen Ketten- und Faltenjura ergeben (vgl. Abb. 6). Der Jahresniederschlag nimmt mit der Höhe um rund 1 mm/m zu, was im schweizweiten Vergleich einen sehr grossen Gradienten darstellt. Bei der Verdunstung kann man von einer Abnahme von ca. -0.2 mm/m ausgehen (BAFU 1992–2010, Tafel 4.1). Die höhenbedingte Veränderung des Abflusses ist somit primär durch die Veränderung des Niederschlags gesteuert (linker Boxplot in Abb. 6).

Die *klimatische Wasserbilanz*  $\text{Abfluss} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung}$  ( $A = N - V$ ) in Abb. 6 zeigt auf, welche Abflusshöhen auftreten würden, wenn die Verdunstung vom Niederschlag subtrahiert wird. Dabei bleibt allerdings die Zwischenspeicherung des Wassers in Boden und Untergrund, die auf den Abfluss ausgleichend wirkt, unberücksichtigt.

Die meteorologische Station La Chaux-de-Fonds (Abb. 7) repräsentiert in etwa die Verhältnisse im Kettenjura, diejenige in Basel-Binningen jene im Tafeljura. Die langjährige mittlere klimatische Jahres-Wasserbilanz ergibt für La Chaux-de-Fonds einen Jahresniederschlag von 1'389 mm und für Basel 843 mm. Die Jahresverdunstung ist in Basel mit 525 mm rund 50 mm höher als in La Chaux-de-Fonds. Aus der klimatischen Wasserbilanz resultiert in La-Chaux-de-Fonds mit 913 mm ein rund dreimal höherer Jahresabfluss als in Basel (317 mm)!

Die grossen hydrologischen Unterschiede zeigen sich auch im saisonalen Verlauf der klimatischen Bilanz (Abb. 7), bei dem im Sommer (JJA) in Basel rechnerisch sogar negative Abflüsse resultieren. Dieser Vergleich ist nicht nur ein starker Beleg für die höhenbedingten Unterschiede zwischen den Teilregionen, sondern auch für die hohe Disposition der Einzugsgebiete im Tafeljura trocken zu fallen. Diese Disposition hat seit 1961 zugenommen. So zeigen *Weingartner & Schwanbeck* (2020, 19), dass die sommerlichen Niedrigwasserabflüsse im Jura seit 1961 signifikant abgenommen haben.



Abb. 6 Streuung der Mittelwerte von Niederschlag, Verdunstung und Abfluss in den 40 Einzugsgebieten des Untersuchungsgebietes im Ketten- (KJ) und Tafeljura (TJ) (Daten: 4).

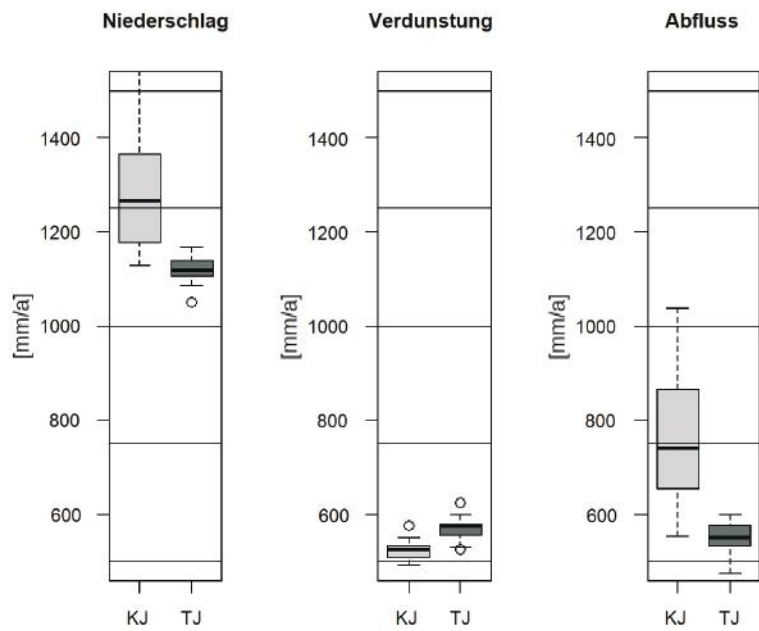

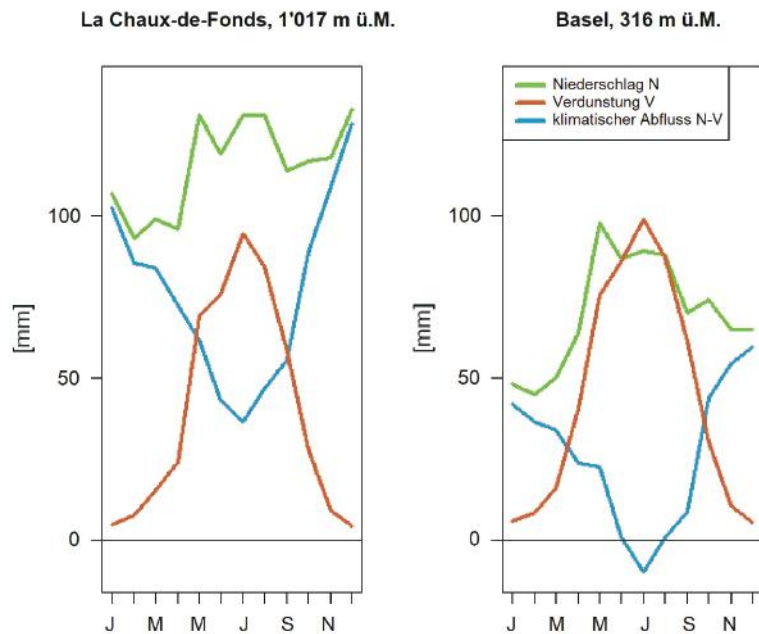






Abb. 7 Klimatische Wasserbilanzen  $A = N - V$  im Jahresverlauf der meteorologischen Stationen La Chaux-de-Fonds und Basel-Binningen (Daten: 2).



### 5.3 Trockenjahre und Niedrigwasser seit 2000

Seit der Jahrtausendwende ist eine auffällige Häufung von Trockenperioden in Kombination mit Hitzeperioden zu beobachten. Dies führte zu ausgeprägten Niedrigwassersituationen, die durch die Kenngrössen NM7Q mit ihren Jährlichkeiten beschrieben werden können (Tab. 3).

Tab. 3 NM7Q in Kubikmeter pro Sekunde (m<sup>3</sup>/s) an den sieben BAFU-Stationen in den sieben Trockenjahren seit 2000, mit Angabe der Jährlichkeiten (Daten: ).

Station	2003	2009	2011	2015	2017	2018	2020	
Birs Moutier	0.53	0.7	0.66	0.61	0.53	0.86	0.66	
Birs Soyhières	1.6	1.92	1.99	1.94	2.11	2.13	2.12	
Birs Münchenstein	1.78	2.9	2.8	2.01	2.32	1.67	2.1	
Scheulte Vicques	0.1	0.26	0.16	0.24	0.21	0.2	0.2	
Sorne Delémont	0.6	0.7	0.77	0.56	0.69	0.75	1.07	
Ergolz Liestal	0.18	0.36	0.3	0.19	0.29	0.28	0.24	
Dünnern Olten	0.2	0.32	0.28	0.41	0.34	0.34	0.38	
								<b>Jährlichkeiten</b>
								 > 50 Jahre
								 10 - 50 Jahre
								 < 10 Jahre

An sechs von sieben Stationen liegen die tiefsten NM7Q-Werte im Jahr 2003. Ihre hohen Jährlichkeiten untermauern die extreme Niedrigwassersituation in diesem Jahr. An drei Stationen wurde sogar die Jährlichkeit von 50 Jahren überschritten. Besonders häufig sind sehr kleine Niedrigwasserabflüsse im Delsberger Becken aufgetreten, wie die Daten der Sorne belegen. Da von den sieben Stationen in Tab. 3 mit derjenigen der Ergolz nur gerade ein Einzugsgebiet aus dem Tafeljura vorhanden ist, können allfällige Unterschiede zwischen Tafel- und Kettenjura hier nicht ermittelt werden.

Über die flächennormierte *NM7q-Abflusssspende* lassen sich die Niedrigwasserverhältnisse unterschiedlich grosser Einzugsgebiete direkt vergleichen (Abb. 8a und 8b).

Die kleinsten Werte (< 1 l/(s\*km<sup>2</sup>)) weisen die Dünnern und die Ergolz auf. Dies sind sehr kleine Werte, sind sie doch rund 15-mal kleiner als der mittlere Abfluss. In den Zeitreihen meist deutlich zu erkennen sind die vorher erwähnten Trockenjahre. Die NM7Q-Werte haben in den letzten Jahrzehnten bei den in Abb. 8a dargestellten Stationen signifikant abgenommen, was zeigt, dass sich der Klimawandel bereits heute auf die Niedrigwasserverhältnisse auswirkt.

Eines der Probleme längerer Trockenzeiten ist das *Trockenfallen von Gewässerabschnitten*. Trockene Bach- und Flussbetten sind Extremsituationen bei den grundsätzlich immer wasserführenden Fliessgewässern im Untersuchungsgebiet (Abb. 1). Für die Trockenjahre seit 2000 haben die kantonalen Fischereiaufsichten das Trockenfallen einzelner Abschnitte der Fliessgewässer gemeldet (Tab. 4).

Tab. 4 Trockenfallen einzelner Gewässerabschnitte (2003–2018) pro Jahr. Dargestellt ist die betroffene Anzahl Gewässer.

Jahre	2003	2009	2011	2015	2017	2018	Total
Tafeljura	6	1	7	7	7	9	37
Kettenjura	3	0	1	1	3	5	13
Total	9	1	8	8	10	14	50

Besonders häufig trat diese Situation im Jahr 2018 auf (14-mal). In den sechs betrachteten Trockenjahren waren die Gewässer im Tafeljura insgesamt viel stärker betroffen (37-mal) als im Kettenjura (13-mal). Ganz extreme Verhältnisse wurden beim Guntenbach im Tafeljura und beim Staffeleggbach im Kettenjura beobachtet, welche in fünf bzw. in allen Trockenjahren trockenfielen. Immer wieder mussten in diesen Extremsituationen Fische umgesiedelt werden (Abb. 9). Die Anzahl des Trockenfallens wird – neben dem  $q_{347}$ -Wert – bei der Analyse der Niedrigwassersensibilität herbeigezogen (siehe Kap. 5.6).

### Zeitreihen NM7Q 1992-2019 an 7 Stationen

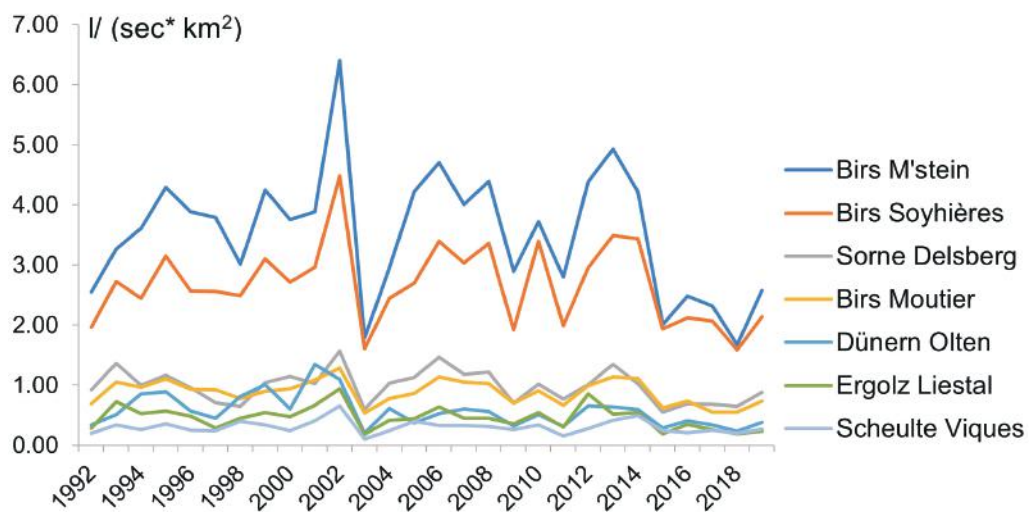


Abb. 8a Zeitreihe von NM7q 1992–2019 mit den sieben Trockenjahren ab dem Jahr 2000 (vgl. Tab. 3), NM7q-Abflusspende in Liter pro Sekunde und Quadratkilometer (Daten: ).

### Q347 Sissle Eiken

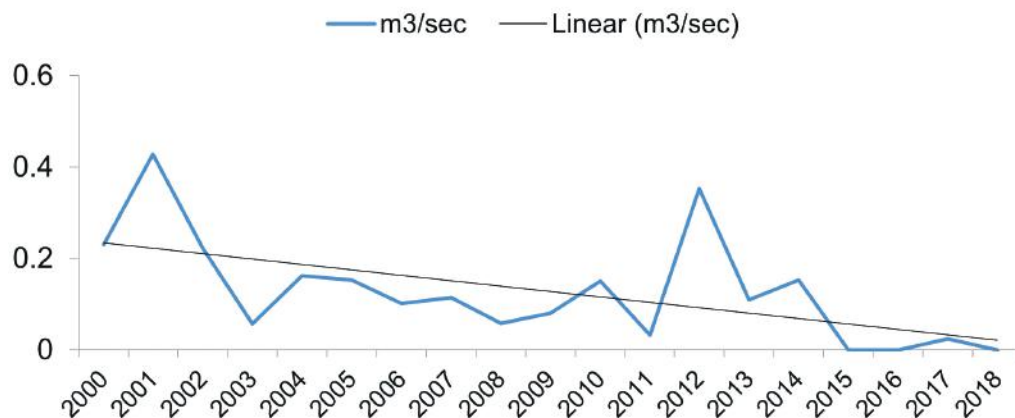


Abb. 8b Zeitreihe für  $q_{347}$  der Sissle in Eiken (Daten: ).



Abb. 9 Notabfischung in der Sissle mit einem Elektrofanggerät und mit Netzen im Juli 2018.  
 Foto: Denis Kalt, Aargauer Zeitung

#### 5.4 Häufigkeitsverteilung der $q_{347}$ -Werte im Ketten- und im Tafeljura

Der Vergleich der Streuung der Niedrigwasserkenngrosse  $q_{347}$  in Tab. 5 bestätigt die bei der klimatischen Wasserbilanz (vgl. Abb. 6) diskutierten Unterschiede zwischen Ketten- und Tafeljura. Zwar ist hier der Überschneidungsbereich der Kenngrössen relativ gross, aber dennoch sind die medianen  $q_{347}$ -Werte im Kettenjura rund zweimal grösser als im Tafeljura. Zudem ist zu beachten, dass die Kenngrösse  $q_{347}$  und damit auch die Niedrigwassersituation innerhalb der beiden Teilregionen grösseren räumlichen Schwankungen unterworfen ist.

Tab. 5 Kennziffern der beiden Häufigkeitsverteilungen von  $q_{347}$ .

	Minimum	1. Quartil	Median	3. Quartil	Maximum
Kettenjura	1.0	2.8	3.7	4.3	5.3
Tafeljura	0.4	1.4	1.7	3.2	4.2

Für die Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit (vgl. Kap. 5.5) werden im Folgenden das 1. Quartil und der Median der  $q_{347}$ -Werte der jeweiligen Teilregion als Schwellenwerte verwendet.

## 5.5 Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit mit einem Ampelsystem

Wie gezeigt wurde, unterscheiden sich Kettenjura und Tafeljura aus der Sicht der Niedrigwasser- verhältnisse signifikant: Der Tafeljura ist im Allgemeinen trockenheitsanfälliger als der Kettenju- ra. Um beurteilen zu können, wie trockenheitsanfällig die 40 hier betrachteten (Teil-)Einzugsge- biete sind, wurde ein Ampelsystem aufgebaut. Dabei ist zu beachten, dass es sich um eine relative Beurteilung handelt, welche sich auf die jeweilige Teilregion bezieht und nur ein Vergleich der Einzugsgebiete innerhalb einer Teilregion ermöglicht.

Für den Aufbau des Ampelsystems werden im Folgenden, wie bereits erwähnt, als Schwellen- werte je das 1. Quartil und der Median für die  $q_{347}$ -Werte verwendet. Liegt ein Wert beispielsweise unterhalb des 1. Quartils, bedeutet das eine vergleichsweise starke Trockenheitsanfälligkeit, was im Punktesystem mit “3” bewertet wird. *Weingartner et al. (2020)* beschreiben in ihrer Studie zur Trockenheitsanfälligkeit schweizerischer Gewässer, dass der  $q_{347}$ -Wert ein aussagekräftiger Para- meter ist, um die Trockenheitsanfälligkeit zu beurteilen. Tabelle 6 zeigt das vollständige Bewer- tungsschema und die daraus abgeleiteten Ergebnisse. Als zweites Kriterium wurde die Anzahl der trockenen Bachbetten in den sechs Trockenjahren berücksichtigt. Stimmt die Beurteilung der bei- den Kriterien nicht überein, wurde der schlechtere Fall in die Gesamtbewertung übernommen.

Tab. 6 Kriterien für die drei Stufen der Niedrigwassersensitivität im Ketten- (KJ) und im Tafeljura (TJ).

Kriterien			
<b>A. Niedrigwasserabfluss</b> (siehe Kennziffern in Tab. 5)			
$q_{347}$ l/(s*km <sup>2</sup> )	kleiner als 1. Quartil KJ 2.8 l/(s*km <sup>2</sup> ) TJ 1.4 l/(s*km <sup>2</sup> )	zwischen 1. Quartil und dem Medianwert Median: KJ 3.7 l/(s*km <sup>2</sup> ) TJ 1.7 l/(s*km <sup>2</sup> )	grösser als der Medianwert
Sensitivität	3 stark	2 mittel	1 klein
<b>B. Anzahl der trockenen Bachbetten in den 6 Trockenjahren seit 2000</b> (pro Gewässerabschnitt)			
Anzahl	6, 5 oder 4	3 oder 2	1 oder 0
Sensitivität	3 stark	2 mittel	1 klein

## 5.6 Welche Gebiete sind heute schon sensitiv bezüglich Niedrigwasser?

Auf der Basis des Ampelsystems (Tab. 6) können die heute schon stark betroffenen Gebiete aus- geschieden werden (Tab. 7). Die entsprechenden Abflussstationen sind in der Karte für die Sensi- tivität ‘heute’ mit roten, gelben und grünen Kreisen dargestellt (Abb. 13, Kap. 7.2).

Im Kettenjura sind somit sechs von 19 Einzugsgebieten heute schon stark trockenheitsanfällig. Es sind meist kleinere Einzugsgebiete oder der Oberlauf eines grösseren Flusses. Im Tafeljura sind neun von 21 Einzugsgebieten in der Sensitivitätsstufe 3. Hier sind vor allem die Unterläufe von Bächen oder kleinere Einzugsgebiete im Aargauer Tafeljura betroffen, welche in den Rhein ent- wässern.

Tab. 7 Anzahl der jeweils betroffenen Einzugsgebiete im Ketten- (KJ) und im Tafeljura (TJ), beurteilt auf der Basis des Ampelsystems.

Sensitivität	Kennzahl		
	3 stark	2 mittel	1 klein
Kettenjura	6	5	8
Tafeljura	9	8	4
Total	15	13	12

## 6 Zukünftige Veränderungen vor dem Hintergrund der Klimaänderung

### 6.1 Zukünftige Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im Nordwestschweizer Jura

Seit Messbeginn 1864 sind die Temperaturen im Jura deutlich angestiegen. Bei einem Szenario ohne Klimaschutzmassnahmen, also bei weiterhin steigenden Treibhausgasemissionen (RCP 8.5, Szenario ohne Klimaschutz; vgl. ☀<sub>5</sub>) ist im Jura mit einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur bis Mitte dieses Jahrhunderts zwischen 2 und 3 °C zu rechnen, wobei die Erwärmung im Sommer etwas höher ausfallen wird als im Winter. Gegen Ende dieses Jahrhunderts wird sich die Erwärmung weiter fortsetzen, so dass die Jahresmitteltemperatur gegenüber heute um 3.5–5 °C steigen wird. Aber auch bei den anderen Szenarien – RCP 4.5 (mittleres Szenario) und RCP 2.6 (Szenario mit Klimaschutz) – werden die Temperaturen gegenüber heute weiter ansteigen, allerdings in einem geringeren Ausmass als bei RCP 8.5 (☀<sub>4</sub>).

Auch beim *Niederschlag* sind mehr oder weniger grosse Veränderungen zu erwarten (Tab. 8). Während sich die Jahresniederschlagssummen im einstelligen Prozentbereich verändern werden, sind im Winter deutliche Zunahmen und im Sommer deutliche Abnahmen zu erwarten.

Tab. 8 Veränderung der Periodenmittel des Niederschlags im Einzugsgebiet der Birs in Münchenstein gegenüber Periode 1981–2010 beim Szenario RCP 8.5 (☀<sub>4</sub>).


	Winter	Sommer	Jahr
2045 – 2074	+5 bis +25 %	+2 bis -27 %	+6 bis -4 %
2070 – 2099	+11 bis +38 %	-6 bis -42 %	+9 bis -7 %

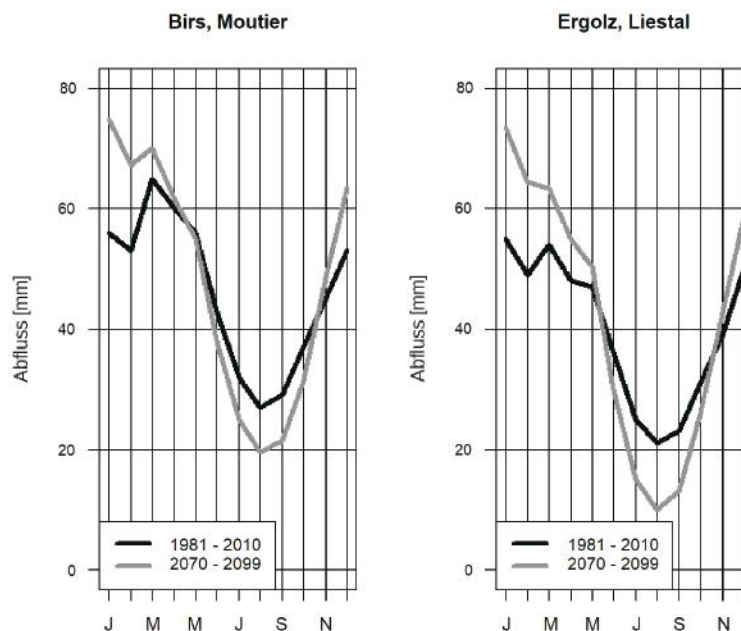
Die Prognosehorizonte liegen sehr weit in der Zukunft, was mit entsprechender Unsicherheit verbunden ist. Die heutige bereits bestehende Sommertrockenheit (vgl. Abb. 7) wird sich im Jura weiter verstärken, zumal die Verdunstung mit steigender Temperatur zunehmen wird, allerdings nur so lange, wie Wasser zur Verdunstung überhaupt verfügbar ist. Im Gegensatz dazu werden die Niederschlagsmengen im Winter zunehmen. Der Unterschied zwischen Winter (feucht) und Sommer (trocken) wird sich also weiter verstärken. Die heute in den Daten bereits erkennbaren Trends werden sich somit in der Zukunft fortsetzen und intensivieren.

## 6.2 Hydrologische Szenarien und die Abflussregimes

Die Veränderungen von Temperatur und Niederschlag werden sich direkt bei den Abflussregimes zeigen: eine Abflusszunahme im Winter, eine Abnahme im Sommer sowie eher geringe Veränderungen bei den Jahresvolumina. Die saisonalen Abflussveränderungen lassen wiederum Unterschiede zwischen Ketten- und Tafeljura erkennen (Abb. 10).

Unter RCP 8.5 werden die Jahresabflüsse gegen Ende Jahrhundert im Mittel etwa um 30 % zu nehmen. Im Sommer, der für die Niedrigwassersituation entscheidend ist, sind die Abflüsse bereits tief, wobei jene im Tafeljura deutlich kleiner sind als im Kettenjura. Mit dem Klimawandel werden die Abflüsse im Mittel weiter abnehmen, wobei die grössten Abnahmen im August auftreten werden: einer Abnahme des Monatsmittels von rund 30 % bei der Birs steht eine Abnahme von etwa 50 % bei der Ergolz gegenüber. Bereits aus den Abflussregimes, die die saisonalen Schwankungen der mittleren Monatsabflüsse beschreiben, ist erkennbar, dass die Sommertrockenheit vor allem in den Einzugsgebieten des Tafeljuras zu einer grossen Herausforderung wird.

Abb. 10 Abfluss-szenarien der Periode 2070–2099 unter dem Szenario RCP 8.5, Werte in mm (Liter pro Sekunde und Quadratmeter), für Kettenjura (Birs Moutier) und Tafeljura (Ergolz Liestal) (Daten: )<sub>4</sub>).



## 7 Niedrigwasser im Nordwestschweizer Jura heute und in Zukunft

### 7.1 Veränderung der beiden spezifischen Kennzahlen

Wie werden sich unter Szenario RCP 8.5 die beiden spezifischen Kennzahlen für die Niedrigwasser –  $Q_{347}$  und NM7Q – verändern? Die Auswertung der neusten Daten aus  $\text{☉}_4$  (Mai 2022) zeigen die Abb. 11 und 12.

Im Vergleich mit der Birs (im Kettenjura) sind bei der Ergolz (im Tafeljura) alle drei Häufigkeitswerte klar tiefer (Abb. 11). Dabei ist die Abnahme beim Median, dem wahrscheinlichsten Wert, bei der Ergolz mehr als doppelt so gross. Dies bedeutet, dass unter dem Szenario der  $Q_{347}$ -Wert und damit die Restwassermenge in den Flüssen und Bächen im Tafeljura um mehr als ein Drittel geringer wären.

Grosse Unterschiede bei den beiden Flüssen gibt es auch beim NM7Q-Wert im Sommer und im Herbst (Abb. 12). In beiden Jahreszeiten sind die Werte der Ergolz deutlich tiefer als diejenigen der Birs. Die Medianwerte der Ergolz liegen in beiden Jahreszeiten bei -50 %, bei der Birs sind es -15 % bzw. -20 %.

Unter dem Szenario RCP 8.5 ist eine grosse Abnahme der beiden Kennzahlen  $Q_{347}$  und NM7Q bis gegen Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten, ein weiteres Indiz für die verstärkte Niedrigwassersensibilität vor allem im Tafeljura.

Abb. 11 Abnahme der  $Q_{347}$ -Werte bis 2085 in % (RCP 8.5, Klimaszenario ohne Klimaschutz); Lesebeispiel Ergolz Liestal: im günstigsten Fall (Max.) nehmen die  $Q_{347}$ -Werte um 20 % zu, im ungünstigsten um fast 80 % ab, beim Median, dem wahrscheinlichsten Wert, nehmen sie um 36 % ab.

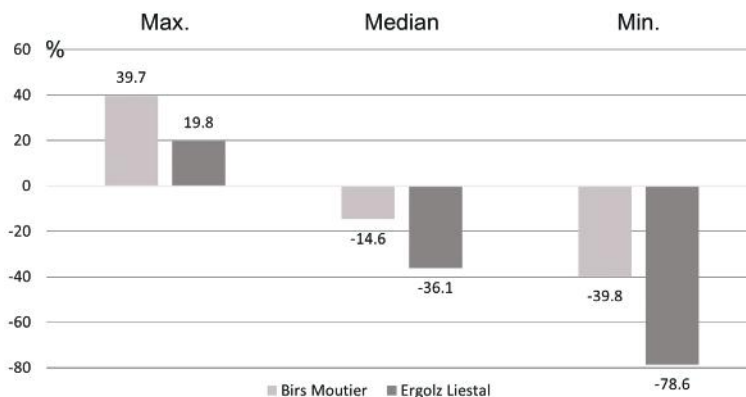
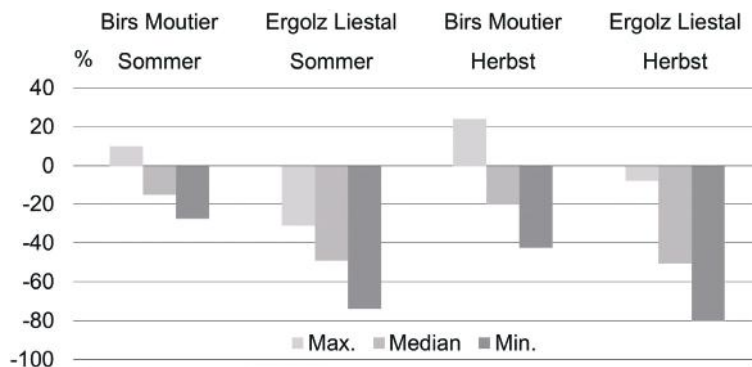


Abb. 12 Abnahme von NM7Q bis 2085 in % (RCP 8.5, Klimaszenario ohne Klimaschutzmassnahmen).





## 7.2 Die Sensitivität bezüglich Niedrigwasser heute und in Zukunft

Aus den Werten für  $q_{347}$  heute und den um 20 % für den Kettenjura und um 30 % für den Tafeljura verringerten neuen Werten (siehe Abnahmen der Medianwerte in Abb. 11 und 12) wurden die drei Sensitivitätsstufen neu berechnet (Ampelsystem). Sie sind mit den Ergebnissen der Anzahl der trockenen Bachbetten in den sechs Trockenjahren (siehe Tab. 4) plausibilisiert und allenfalls korrigiert worden.

Die in der Karte (Abb. 13) dargestellte Sensitivität bezüglich Niedrigwasser zeigt die grosse räumliche Variabilität sowohl im Ketten- wie auch im Tafeljura. Die beiden Grossregionen unterscheiden sich bezüglich Anfälligkeit auf Niedrigwasser heute nur wenig. Die Unterschiede werden in Zukunft – gegen Ende des Jahrhunderts mit dem Szenario RCP 8.5 (ohne Klimamassnahmen) – deutlich grösser, wie dies in Abb. 14 klar zum Ausdruck kommt.

Aus den Ergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Beim Szenario ohne Klimamassnahmen wird die Anfälligkeit auf Niedrigwasser bis gegen Ende des Jahrhunderts gegenüber heute signifikant zunehmen.
- Die bezüglich Niedrigwasser nachgewiesene Sensitivität im Tafeljura mit 14 von 21 (67 %) Gewässern ist deutlich stärker als im Kettenjura mit 10 von 19 (53 %).
- In Zukunft werden nur je zwei Einzugsgebiete im Ketten- und im Tafeljura kaum anfällig auf Niedrigwasser sein.
- Tendenziell nähert sich jedoch der Kettenjura in Zukunft dem Tafeljura an.

## 8 Fazit

An 40 Stationen im Untersuchungsraum “Nordwestschweizer Jura” wurden die Niedrigwasser mit Hilfe der Kennziffern  $Q_{347}$  und NM7Q sowie mit dem Trockenfallen von Gewässerabschnitten untersucht. Dabei wurden bezüglich der Niedrigwassersensibilität schon heute signifikante Unterschiede zwischen Ketten- und Tafeljura festgestellt. Ohne wirkungsvolle Klimaschutzmassnahmen wird diese Anfälligkeit bezüglich Niedrigwasser bis Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen: 36 der 40 Gewässer würden mittel (12) bis stark (24) betroffen sein.

Der Klimaschutz ist also ganz klar der Schlüssel, um eine Verschärfung der Niedrigwassersituation zu verhindern. Im Weiteren müssen aber auf lokaler und regionaler Ebene unbedingt auch Anpassungsmassnahmen ergriffen werden. Wesentlich ist dabei die Revitalisierung der Fliessgewässer (Abb. 15). Dazu gehört auch die Beschattung der Gewässer, um eine dramatische Erhöhung der Wassertemperaturen bei Niedrigwasser zu vermeiden, und die Schaffung von Rückzugsgebieten für Fische. Diese Massnahmen sind einzubetten in ein integrales Wasserressourcenmanagement, das von der Wissenschaft schon lange gefordert, aber in der Praxis nur teilweise umgesetzt wird. Ein solches Management beinhaltet auch eine Planung für Trockenheitssituationen, welche aufzeigt, wer wie viel Wasser mit welcher Priorität beziehen kann. Ein wichtiger Beitrag dazu ist eine verbesserte Vorhersage von Niedrigwasser. Deshalb ist es sehr zu begrüßen, dass der Bundesrat im Frühjahr 2022 beschlossen hat, die Niedrigwasservorhersage in der Schweiz auszubauen.

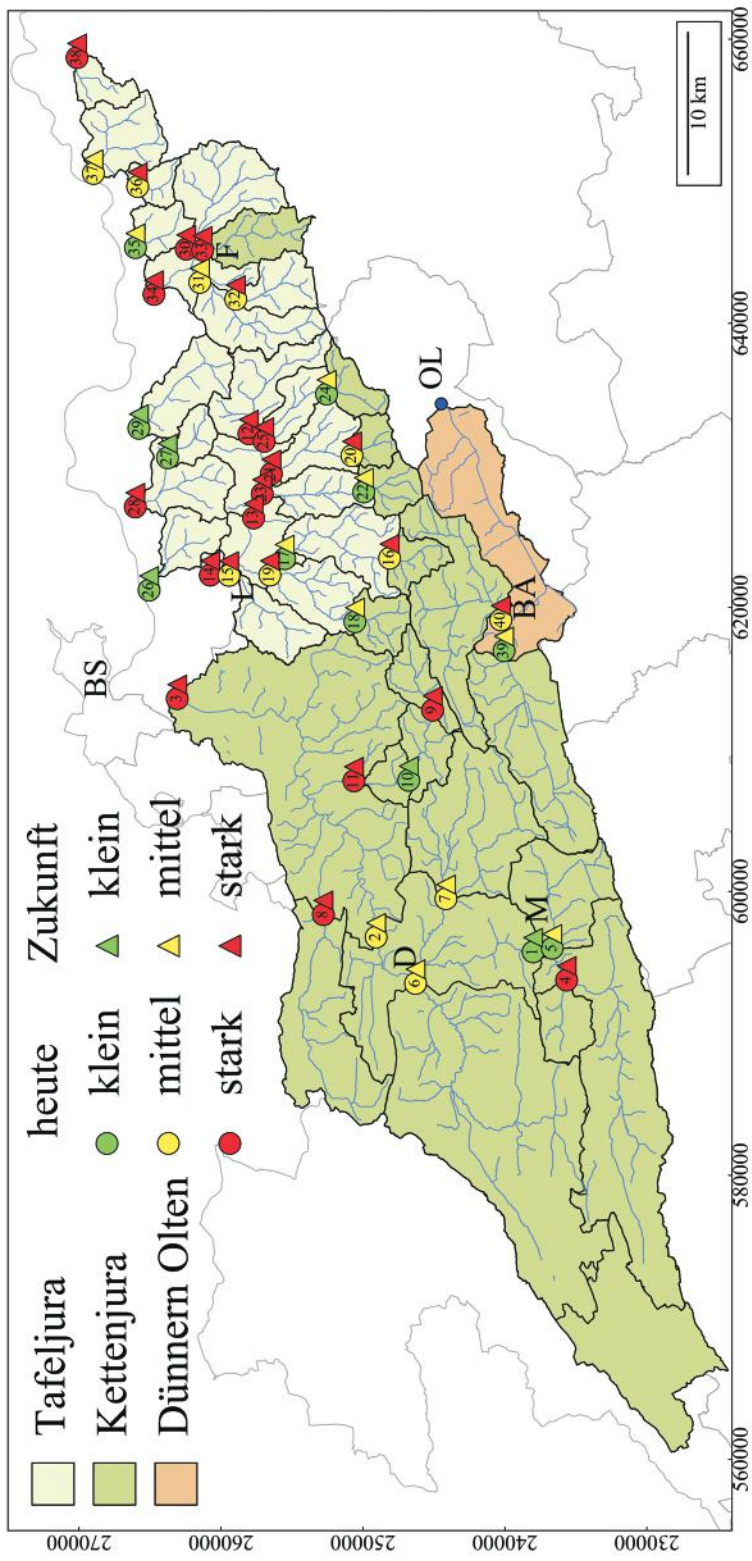


Abb. 13 Die Anfälligkeit auf Niedrigwasser heute und in der Zukunft (im Zeichen des Klimawandels gegen Ende des Jahrhunderts). Gebietsnummern verweisen auf Abb. 2 bzw. Tab. 1; Abkürzung der Ortschaften: BS Basel; D Delémont; M Moutier; BA Balsthal; OL Olten; L Liestal; F Frick.

Abb. 14 Häufigkeitsdiagramme bezüglich Niedrigwassersensitivität (Anzahl Gebiete: Kettenjura 19, Tafeljura 21).

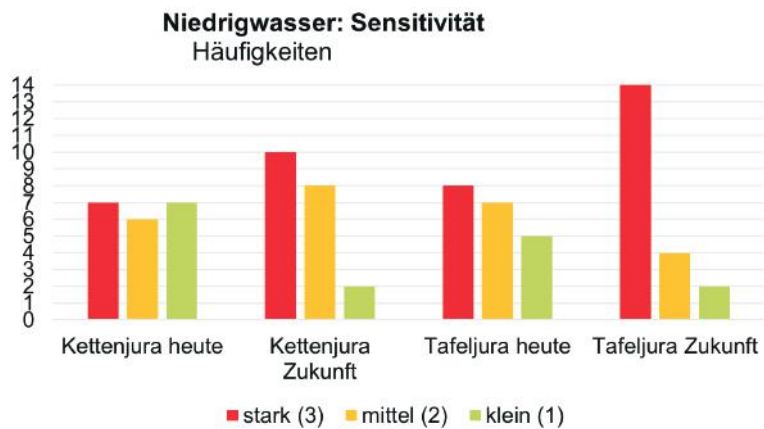







Abb. 15 Revitalisierte Birs bei Reinach, Blick von der Brücke in der Heid Richtung Nordnordost.

Foto: P. Lüscher

## Literatur

- BAFU 1992–2010. *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*. Bern, 63 Tafeln.
- BAFU (Hrsg.) 2021. *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft*. Umweltwissen Nr. 2101, Bern, 1–138.
- Lüscher P. 1975. *Beiträge zur Hydrographie, Hydrometeorologie und Hydrologie des Dünnerntals (Solothurner Jura)*. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Bern, 1–189.
- NCCS (Hrsg.) 2021. *Schweizer Gewässer im Klimawandel*. National Centre for Climate Services, Zürich, 1–28.
- Weingartner R. & Schwanbeck J. 2020. *Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 – 2018*. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, 1–41.

## Internetquellen

- 1  [hydrodaten.admin.ch/de](http://hydrodaten.admin.ch/de)
- 2  <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/messwerte>
- 3  <https://www.ag.ch/app/envis/#hydroweb>
- 4  <https://hydrologischeratlas.ch/>
- 5  <https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>