

# Klimaszenarien zur Optimierung eines Talsperren-Betriebsplans

Die Wiehltalsperre wird zur Trinkwasserversorgung betrieben, muss aber auch Anforderungen wie Hochwasserschutz und Mindestwasserführung erfüllen. Der Betrieb erfolgt daher bereits aktuell anhand eines komplexen Lamellenplans. Um den Ansprüchen auch bei Klimaänderung gerecht zu werden, erfolgt eine Neuoptimierung des Betriebs anhand von Klimawandelszenarien. Kritisch erweisen sich die Einführung eines Trockenplans, eine zuverlässige Umschaltung in den Trockenplan und eine Kontingentierung der Wasserentnahme in Dürrephasen.

Hubert Lohr, Angela Rebscher, Nada Abdelwahab, Sandra Richter, Felix Froehlich, Wim Dissevelt und Helge Klopsch

## 1 Ausgangslage

Die Wiehltalsperre ist die größte Talsperre des Aggerverbands und wird seit 1973 zur Trinkwasserversorgung betrieben. Bei einer Einzugsgebietsgröße von 46,4 km<sup>2</sup> und einem Speichervolumen von 31,8 Mio. m<sup>3</sup> fasst die Wiehltalsperre ca. einen Jahresabfluss ( $MQ = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Nahezu die Hälfte des Jahreszuflusses wird für die Trinkwasserversorgung genutzt. Zusammen mit der Genkeltalsperre versorgt die Wiehltalsperre ca. 500 000 Menschen mit etwa 25 Mio. m<sup>3</sup> Trinkwasser pro Jahr.

Neben dem primären Zweck der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung ist beim Betrieb auch der Ausgleich zwischen weiteren Ansprüchen zu beachten. Dies sind insbesondere der Hochwasserschutz sowie der Erhalt einer ökologischen Mindestwasserführung im Unterstrom. Die Wiehltalsperre wird daher seit 2006 mit einem komplexen Lamellenplan betrieben, welcher die einzustellende Abgabe abhängig von Zeitpunkt im Jahr, aktuellem Speichervolumen sowie (bei Hochwasser) aktuellem Zufluss definiert. In Nassphasen findet eine Anhebung des Speichervolumens statt, ohne dass es zu einer erhöhten Hochwassergefährdung der Unterlieger kommt. In Trockenphasen kann das gespeicherte Volumen genutzt werden, während gleichzeitig ein aus Qualitätsaspekten relevanter Mindestwasserstand (15 Mio. m<sup>3</sup>) in der Talsperre sowie die Mindestwasserabgabe (0,1 m<sup>3</sup>/s) erhalten bleiben. Dieses komplexe Verhalten im Laufe eines Jahresganges wurde anhand langjähriger Klimareihen und der definierten Nutzungsziele optimiert.

### Kompakt

- Die Simulation von Klimaszenarien an der Wiehltalsperre ergibt Unterschreitungen des Mindestinhalts.
- Ein zusätzlicher Lamellenplan für Trockenphasen mit einer Kontingentierung der Wasserversorgung bietet Vorteile.
- Klimaindizes sind für die Detektierung von Trockenphasen für den Talsperrenbetrieb geeignet.

Insbesondere in den Dürresommern 2018 und 2019 haben sich im Betrieb der Talsperre jedoch Konstellationen aus Zufluss, Speicherstand und Wasserentnahme ergeben, die bisher nicht berücksichtigte Extremsituationen darstellten. Vergleichbare oder sogar gravierendere Extrema sind aufgrund des Klimawandels in Zukunft häufiger zu erwarten. Um die Wiehltalsperre auch bei einer Klimaänderung unter Einhaltung der genannten Ansprüche optimal betreiben zu können, wird in einem mehrstufigen Prozess eine Methodik entwickelt, einen für künftige Entwicklungen geeigneten Betrieb sicherzustellen.

## 2 Modellierung des wasserwirtschaftlichen Systems

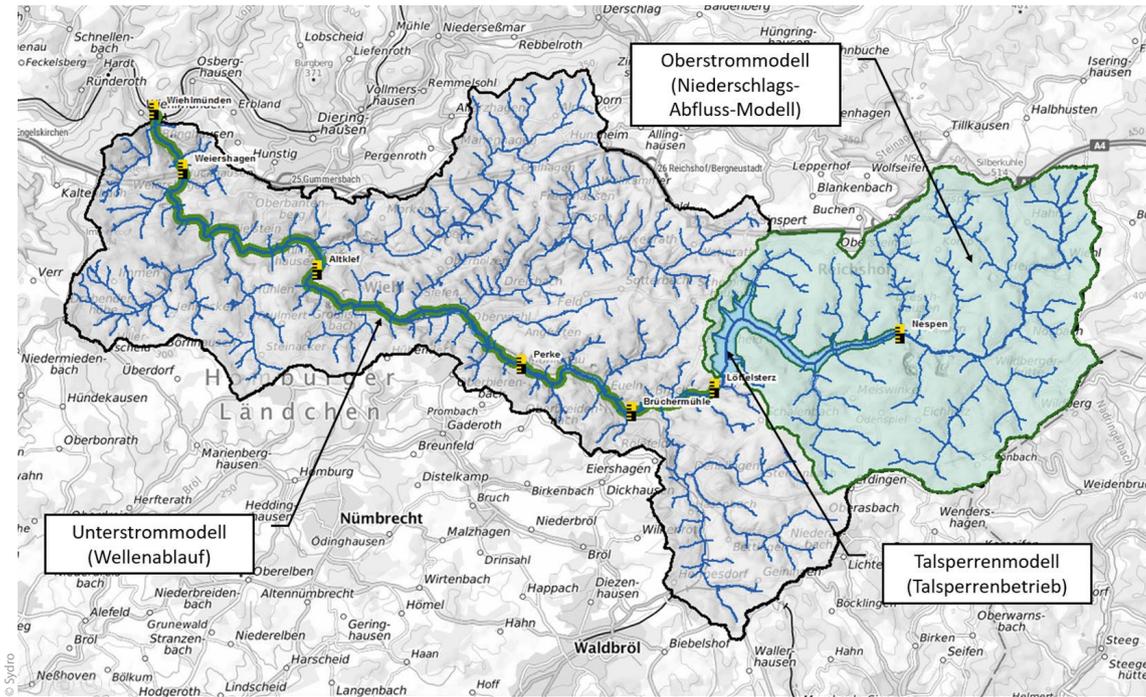
Die Übertragung der Szenarien in einen simulierten Talsperrenbetrieb erfolgt über eine Modellkaskade aus Oberstrommodell, Talsperrenmodell und Unterstrommodell (**Bild 1**), die Anpassung des Betriebsplans über einen evolutionären Optimierungs-Algorithmus [1], welcher mit der Simulation des Talsperrenbetriebs gekoppelt wird.

Für die gesamte Modellkaskade wird das Bewirtschaftungs-, Flussgebiets- und hydrologische Modell Talsim-NG [2] genutzt. Dieses bietet unter anderem die Möglichkeit einer nicht-linearen Berechnung der Boden- und Grundwasserspeicher zur realistischen Abbildung von Trockenphasen sowie ein umfangreiches Modul zur Talsperren-Bewirtschaftung.

Das Oberstrommodell stellt ein hydrologisches Modell des Talsperren-Einzugsgebiets dar und dient zur Transformation von Klimazeitreihen in Zuflusszeitreihen zur Talsperre. Eine Kalibrierung und Validierung des Modells erfolgt am Pegel Nespen sowie an den Aufzeichnungen der Wasserstände in der Talsperre.

Abflüsse aus dem Oberstrommodell werden als Input für das Talsperrenmodell eingesetzt, das die Wiehltalsperre sowie ihre Betriebsregeln umfasst und für die Speicherbewirtschaftung sowie Regelloptimierung zum Einsatz kommt.

Das Unterstrommodell ist ein weiteres hydrologisches Modell, das mit den simulierten Talsperren-Abgaben als Zufluss zur Überprüfung des Hochwasserschutzes der Unterlieger genutzt wird.



**Bild 1:** Einzugsgebiet der Wiehl mit Darstellung der drei aufgestellten Teilmodelle

### 3 Modellierung des Klimawandels im Talsperrenbetrieb

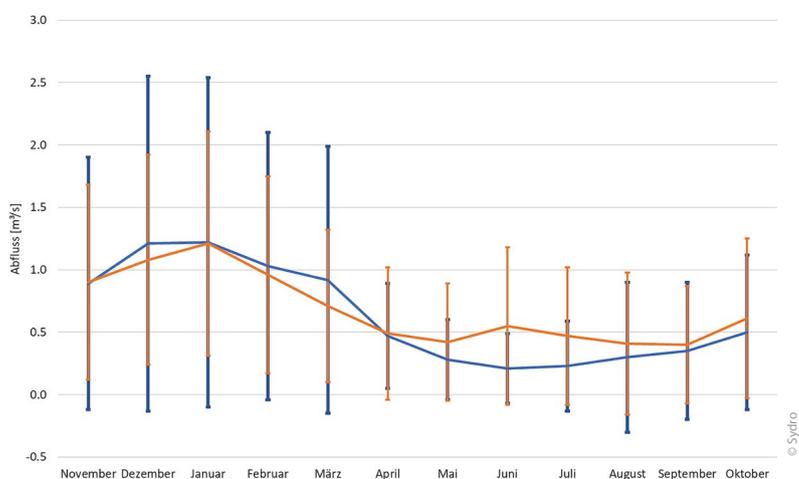
Es werden das kalibrierte Oberstrommodell sowie Bias-korrigierte Klimaszenarien genutzt, um Zuflusszenarien für die Wiehltalsperre bis zum Jahr 2100 zu erzeugen. Alle Datensätze (Messung/Klimawandelszenarien) werden in einen Referenzzeitraum (1970-2020) und einen Prognosezeitraum (2021-2100) unterteilt.

Als Grundlage dienen zunächst verifizierte Klimawandelszenarien für die Klimagrößen Niederschlag und Temperatur. Diese werden als Tageswerte aus dem ReKliEs-De-Datenpool [3] bezogen. Hier werden entsprechend dem prognostizierten Klimaänderungssignal insgesamt vier Realisierungen aus den Emissionsszenarien RCP 2.6 und 8.5 gewählt. Die vorhandenen langen Zeitreihen (1970-2100) werden mit einem Scaled-Distribution-Mapping-Ansatz (SDM-Ansatz) [4] Bias-korrigiert. Als Referenz dienen Zeitreihen für das Gebiet aus dem REGNIE-Datensatz [5].

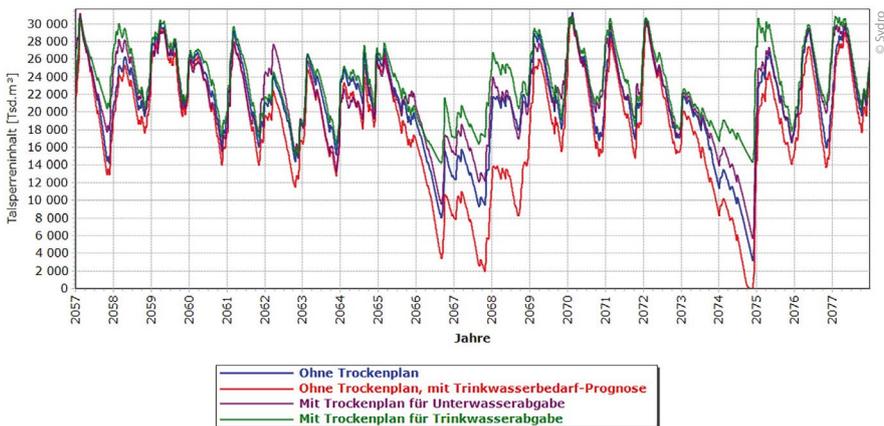
Der SDM-Ansatz erlaubt, dass Saisonalität und Klimaänderungssignal bei der Bias-Korrektur nicht verzerrt werden. Dies hat sich für die vorliegende Problemstellung als besonders wertvoll erwiesen, da es durch die verwendete Korrektur möglich ist, den Referenzzeitraum für alle Realisierungen sehr gut zu reproduzieren und gleichzeitig die prognostizierte Klimaänderung relativ zu erhalten. Die Kalibrierung des Oberstrommodells sowie die Bias-Korrektur der Klimaszenarien wurden u. a. über einen Vergleich der Abflussstatistiken innerhalb einer Referenzperiode zwischen Modell und Pegelmessung verifiziert. In den

Klimaszenarien zeigen sich im Wesentlichen eine Verschiebung der Saisonalität und eine Zunahme von Extremereignissen, insb. der Trockenphasen (**Bild 2**).

Bei einer Modellierung dieser Zuflusszenarien unter Beibehaltung des aktuellen Lamellenplans im Talsperrenmodell zeigen sich mehrere Situationen, bei denen der Mindestinhalt nicht eingehalten werden kann, sowie zwei längere Phasen mit einer signifikanten Unterschreitung des Mindestinhalts (Szenarien „Ohne Trockenplan“ in **Bild 3**). Diese Unterschreitungen verschärfen sich unter Ansatz ergänzender Prognosen für den Trinkwasserbedarf weiter bis zu einem Leerlaufen der Talsperre.



**Bild 2:** Monatliche Mittelwerte und Standardabweichungen des Abflusses am Pegel Nespen aus Messung und Modell vor und nach Bias-Korrektur (BK) für verschiedene Zeitscheiben



**Bild 3:** Modellierter zeitlicher Verlauf des Talsperreninhalts für verschiedene Szenarien (Ausschnitt)

### 4 Speicherberechnung und Optimierung

Es wurde eine multikriterielle, evolutionäre Optimierung der Betriebsregeln durchgeführt. Damit lassen sich auch die Zusammenhänge gegensätzlicher Ziele aufzeigen. Die resultierende Paretofront zeigt alle Lösungen an, die nicht mehr verbessert werden können, ohne eines der Ziele zu verschlechtern, so dass jede Lösung für diesen Punkt eine optimale Parameterkombination, z. B. einen optimierten Lamellenplan, besitzt (**Bild 4**). Welche Lösung aus der Paretofront als die Beste betrachtet wird, hängt von der Bewertung der Nutzungen ab.

Für die Optimierung wurde aus der langen Abflusszeitreihe der Klimatransformation ein kürzerer Zeitraum (2050-2079) ausgewählt, in dem zwei intensive Trockenperioden vorkommen.

Eine Erhöhung des Talsperreninhalts in den Dürrephasen der Klimaszenarien lässt sich durch eine Neu-Optimierung des bestehenden Lamellenplans unter Nutzung der Klimaszenarien nicht erzielen. Hier resultiert lediglich eine „Anhebung“ des Bestandsplans (siehe Szenario „Mit Trockenplan für Unterwasserabgabe“ in **Bild 3**). Eine Erhöhung des Talsperreninhalts in Trockenphasen kann nur durch Verringerung des Hochwasserschutzes erzielt werden. Dies bestätigt den bestehenden Lamellenplan als optimalen Kompromiss aus den bestehenden Ansprüchen.

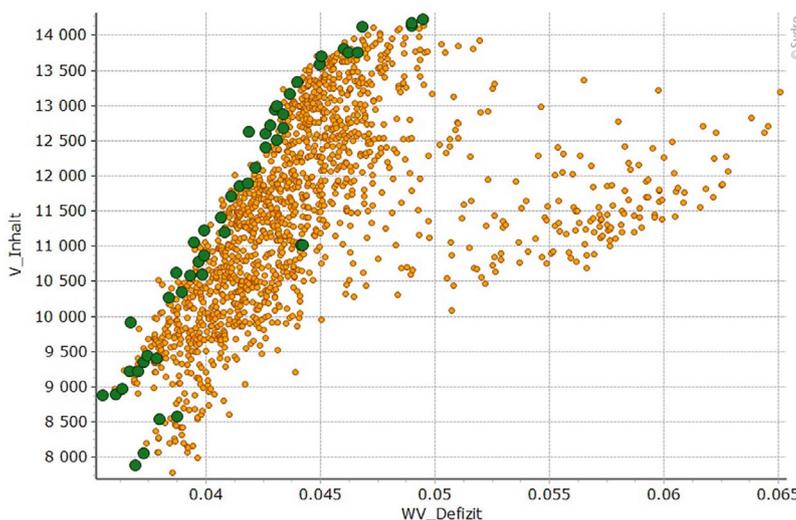
### 5 Einführung eines Trocken-Plans auf Basis von Klimaindizes

Als erweiterter Ansatz werden zwei Betriebspläne für die Wiehltalsperre erstellt, einer für Normalperioden und einer für Trockensituationen. Optimiert wird lediglich die Trockenseite unter Beibehaltung des bestehenden Hochwasserschutzkonzepts. Entscheidend ist neben dem ergänzenden Trockenplan auch eine zuverlässige und stabile Umschaltung.

Zum geeigneten Wechsel zwischen Normal- und Trockenplan wurde daher eine Umschaltregel definiert, welche auf einem Klima- bzw. Niederschlagsindex einerseits und dem aktuellen Zustand der Talsperre andererseits basiert. Das Ziel ist, dass die Umschaltung in den Trockenplan bei drohenden Trockenphasen frühzeitig erfolgt und die Umschaltregel gleichzeitig stabil ist, also keine häufige Umschaltung innerhalb kurzer Zeiträume erfolgt. Letzteres wird erreicht, indem die Rückschaltung in den Normalplan erst erfolgt, wenn sich alle Anzeichen einer Trockenphase (Klimaindex, aktueller Zustand der Talsperre) erholt haben und mindestens geringfügig über dem Durchschnitt liegen.

Zur Ermittlung einer klimatischen Trockenperiode wird der Klimaindex Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) [6] genutzt.

Auch wenn die Umschaltregel sich hierbei als zuverlässig und stabil zeigt und ein sinnvolles Optimierungsergebnis mit Absenkungen des Lamellenplans bzw. Reduktion auf Mindestabgabe in der Trockenphase resultiert, zeigen sich in der Ganglinie des Talsperreninhalts nur eher geringfügige Verbesserungen (Szenario „Mit Trockenplan für Unterwasserabgabe“ in **Bild 3**). Wesentliche Erkenntnisse sind, dass bei Eintritt einer Dürresituation das Einsparpotential über die Abgaben gering ist, da die Abgabe in diesen Phasen auch im Normalplan nur wenig von der Mindestabgabe abweicht, und dass auch ein 3-monatiger Vorlauf des Index nicht ausreichend ist, um die Abgaben rechtzeitig zu reduzieren.



**Bild 4:** Ausschnitt aus einem Optimierungsergebnis mit Darstellung der Zielerreichung verschiedener Lösungen in Bezug auf die Zielfunktionen Talsperreninhalt („V\_Inhalt“) und Wasserversorgung („WV\_Defizit“), die dritte Zielfunktion für den Hochwasserschutz ist hier nicht dargestellt, die grünen Lösungen stellen die Pareto-Front dar

## 6 Kontingentierung der Wasserversorgung

Entsprechend wurde als weitere Ergänzung für den Trockenplan eine Kontingentierung der Wasserentnahme für die Trinkwasserversorgung vorgesehen. Hier kann eine verhältnismäßig kleine Einschränkung (z. B. Begrenzung auf 90 % der normalen Entnahme) in Verbindung mit den bereits vorgesehenen Maßnahmen eine merkliche Verbesserung des Talsperreninhalts unter Einhaltung des vorgesehenen Mindestinhaltes ermöglichen.

Im Zustand des Trockenplans wird dafür auch die Wasserentnahme mit einem Lamellenplan versehen, der abhängig vom Talsperreninhalt nur eine reduzierte Entnahme vorsieht.

Die Idee ist, in einer Konstellation, in der eine Reduktion der Trinkwasserabgabe unumgänglich ist, eine frühzeitige geringe Reduktion der regulären Entnahme klar gegenüber einer Ausschöpfung der Trinkwasserentnahme bis zum Erreichen des Mindest-Talsperreninhalts und folgender, vollständiger Abschaltung der Trinkwasserentnahme vorzuziehen. Dies gilt insbesondere, da z. B. Gartenbewässerung und die Befüllung von Swimming-Pools keine Nutzung von Trinkwasser im Sinne eines Lebensmittels darstellen und eine zeitweise Einschränkung derer damit vertretbar erscheint.

## 7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Als Reaktion auf die Trockenjahre 2018-2020 wurden für die Wiehltalsperre Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf die Sicherheit des Talsperrenbetriebs und die Trinkwasserversorgung untersucht.

Hierfür wurden zunächst ein Oberstrommodell sowie Klimaszenarien genutzt, um Zuflusszenarien bis zum Jahr 2100 zu erzeugen. Für den Prognosezeitraum zeigt sich insb. eine Verschiebung der Saisonalität und eine Zunahme von Trockenphasen. Bei einer Modellierung dieser Szenarien unter Beibehaltung des aktuellen Lamellenplans zeigen sich wiederholte und zum Teil deutliche Unterschreitungen des Mindestinhalts. Diese Situation verschärft sich unter der Annahme einer erhöhten Trinkwassernachfrage weiter.

Hubert Lohr, Angela Rebscher, Nada Abdelwahab, Sandra Richter, Felix Froehlich, Wim Dissevelt and Helge Klopsch

### Use of climate scenarios for optimizing reservoir operation

The reservoir Wiehltalsperre is operated by the Aggerverband and serves mainly water supply purposes. However, additional purposes such as flood control and minimum flow requirements downstream must also be covered. To achieve this, the reservoir is operated using a complex pool-based plan that was optimized for defined objectives on the basis of long-term climate records. In order to be able to optimally operate the reservoir even under changing climate conditions, we develop and optimize an additional pool-based plan for dry periods. A decisive factor is determining a suitable rule for switching to the dry operation plan and the establishment of quotas for water supply withdrawals.

Für Dürrephasen wird ein Betrieb im Trockenplan eingeführt. Dieser umfasst eine optimierte Umschaltregel, eine Reduktion der Unterstromabgaben und einen ergänzenden Lamellenplan zur Kontingentierung der Trinkwasserversorgung.

Die modellierte Situation in den Zuflusszenarien kann sich voraussichtlich noch verschärfen, da nicht alle mit einer Klima-veränderung einhergehenden Aspekte im aktuellen Modell berücksichtigt sind. Zu beachten ist hierbei und generell, dass das Ziel der Optimierung ist, sowohl den Talsperreninhalt als auch die Versorgungssicherheit hochzuhalten, aber dabei nicht den Trockenplan auf das extremste Klimawandelszenario für das Jahr 2100 auszulegen. Vielmehr geht um die Erkenntnis, wie robust das System ist und ab wann mit zunehmenden Einbußen zu rechnen ist. Die ergänzte Kontingentierung der Trinkwasserentnahme greift daher nur, wenn tatsächlich eine mit den Szenarien vergleichbar gravierende Situation entsteht.

Die implementierte Umschaltung in den Trockenplan anhand des SPEI bietet perspektivisch auch die Möglichkeit, mittelfristige Klimavorhersagen zu nutzen, um einen längeren Vorlauf für die Umschaltung zu erreichen, und damit die Möglichkeiten einer Reduzierung der Unterstromabgabe besser zu nutzen.

### Autoren

**Dr.-Ing. Hubert Lohr**  
**Angela Rebscher**  
**Nada Abdelwahab**  
**Dr.-Ing. Sandra Richter**  
**Felix Froehlich**  
 Sydro Consult GmbH  
 Mathildenplatz 8  
 64283 Darmstadt  
 h.lohr@sydro.de  
 a.rebscher@sydro.de  
 n.abdelwahab@sydro.de  
 s.richter@sydro.de  
 f.froehlich@sydro.de

**Wim Dissevelt**  
**Helge Klopsch**  
 Aggerverband  
 Sonnenstraße 40  
 51645 Gummersbach  
 wim.dissevelt@aggerverband.de  
 helge.klopsch@aggerverband.de

### Literatur

- [1] BlueM: Software BlueM.Opt (<https://bluemodel.org/bluem/bluem-opt/>, Abruf 01.04.2023).
- [2] Sydro Consult (Hrsg.): Software Talsim-NG (<http://www.talsim.de/>, Abruf 01.04.2023).
- [3] Hübener, H.; Bülow, K.; Fooker, C. et al.: ReKliEs-De Ergebnisbericht, 2017, (<https://reklies.hlnug.de>, Abruf 01.04.2023).
- [4] Switanek, M. B.; Troch, P. A.; Castro, C. L et al.: Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. In: Hydrol. Earth Syst. Sci. 21 (2017), S. 2 649-2 666, (doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017).
- [5] DWD (Hrsg.): REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, 2020 ([www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/download/regnie\\_beschreibung\\_pdf.pdf](http://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/download/regnie_beschreibung_pdf.pdf), Abruf 01.04.2023).
- [6] Vicente-Serrano, S. M.; Beguería, S.; López-Moreno, J. I.: A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. In: Journal of Climate 23 (2010), S. 1 696-1 718.

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-023-1843-1>