SYDRO CONSULT

Ingenieurgesellschaft für Systemhydrologie • Wasserwirtschaft • Informationssysteme mbH
Mathildenplatz 8 • 64283 Darmstadt • Tel.: 06151 / 367367 • Fax: 06151 / 367348

Handlungsanleitung: Verwendung von hydro-meteorologischen Indizes mit operationeller Vorhersage zur Dürre-Früherkennung für den Betrieb von Talsperren

Rurtalsperre, WVER

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 03DAS095 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Impressum

Fassung vom	27.04.2020 (Fassung vorbehaltlich Anmerkungen durch den Projektträger)
Erstellt von	Dr.-Ing. Hubert Lohr (SYDRO Consult GmbH) Felix Froehlich (SYDRO Consult GmbH) Dr.-Ing. Sandra Richter (SYDRO Consult GmbH)
mit Beiträgen von	Dr. Ing. Irene Slavik (Wahnbachtalsperrenverband) Dr. Ing. Christof Homann (Wasserverband Eifel-Rur)

Inhalt

1 EINLEITUNG 5

1.1 Hintergrund 5

1.2 Anwendungsbereich der Handlungsanleitung 6

2 DER TASK-ANSATZ 6

2.1 Hydro-meteorologische Indizes 6

2.2 Nutzung von Indizes zur Prognose 7

2.3 Einsatz von TASK 8

3 EINSATZMÖGLICHKEITEN DER INDIZES 10

3.1 Einsatz in der Öffentlichkeitsarbeit (Einsatzmöglichkeit A) 10

3.2 Erkennen von Sondersituationen (Einsatzmöglichkeit B) 11

3.3 Indizes und Vorhersagen als fester Bestandteil von Betriebsregeln (Einsatzmöglichkeit C) 11

4 ABLAUFPLAN 12

4.1 Datengrundlage 12

4.2 Bestimmung der Referenzperiode 14

4.3 Verifikation 18

4.4 Integration in den Betrieb 24

4.5 Nachweise 30

5 INTEGRATION VON VORHERSAGEN 35

5.1 Klimamodelle 35

5.2 Indexberechnung mit Vorhersagen 36

5.3 Datengrundlage 37

5.4 Biaskorrektur von Vorhersagen 39

5.5 Qualität der Vorhersage 41

5.6 Integration in den Betrieb 48

6 ERWEITERTE MÖGLICHKEITEN 49

6.1 Korrelation von Indizes mit dem Abfluss 49

6.2 Verwendung eines Niederschlag-Abfluss Modells 49

6.3 Einsatz weiterer hydro-meteorologischer Indizes 50

7 WASSERQUALITÄTSASPEKTE 51

7.1 Einleitung 51

7.2 Vorstellung herkömmlicher Ansatz 51

7.3 Vorstellung neuer Ansatz 52

7.4 Nutzen des neuen Ansatzes 54

8 TASK-METHODE AUS SICHT DER WASSERVERBÄNDE 55

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 56

10 LITERATUR 57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung verschiedener Aggregationen des SPI Index am Beispiel zweier DWD Stationen 7
Abbildung 2: Berechnung von Indizes auf der Basis von Messwerten 8
Abbildung 3: Berechnung von Indizes auf der Basis von Messwerten und Vorhersagen....8
Abbildung 4: TASK-Forschungsansatz: Ableitung von Indizes und Rückkopplung mit dem wasserwirtschaftlichen Betrieb 9
Abbildung 5: Einsatzmöglichkeiten von Indizes 10
Abbildung 6: Beispiel einer Kartendarstellung des SPI Index....10
Abbildung 7: Struktur der DWD Daten auf der opendata.dwd.de Plattform 13
Abbildung 8: Dateiformat der DWD-Daten....13
Abbildung 9: DWD - Deutscher Klimaatlas (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html) 15
Abbildung 10: Wirkung des Referenzzeitraumes auf den SPI am Beispiel der Zeitreihe Köln-Bonn (ID=2667)....17
Abbildung 11: Vergleich zwischen aggregiertem Zufluss und SQI für verschiedene Aggregationszeiträume 20
Abbildung 12: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m aggregierter Abfluss (oben) mit SQI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km² 20
Abbildung 13: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m aggregierter Abfluss (oben) mit SPI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km² 21
Abbildung 14: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m Abflussindex SQI (oben) mit SPI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km²....21
Abbildung 15: Gegenüberstellung 12M Abfluss, 12M Abflussindex SQI und 12M SPI für SPI -1 (oberes Bild), -0.9 (mittleres Bild) und -0.8 (unteres Bild) 21
Abbildung 16: Vergleich zwischen Speicherinhalt und SPI für verschiedene Aggregationszeiträume 23
Abbildung 17: Gegenüberstellung 12M und 24M gleitendes Mittel des Inhaltes zu SPI 12M und 24M (Aabachtalsperre)....23
Abbildung 18: Vergleich zwischen Schwellwertunterschreitungen von Speicherinhalt (oben), Abfluss (mitte) und SPI (unten) 23
Abbildung 19: Komponenten eines Kontingentierungsplanes 28
Abbildung 20: WENN-DANN Regel zur Integration eines Indizes 29
Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der monatlichen Verteilung des Talsperreninhalts im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“....30
Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der monatlichen Verteilung des Talsperreninhalts mit Perzentilen im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“....31
Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung Häufigkeitsanalyse der Abgaben im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“....31
Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung Analyse Anstiegsverhalten im Zufluss/Abfluss im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“....32
Abbildung 25: Beispiel Analyse von Referenzpunkten im Gewässer....33
Abbildung 26: Beispiel Analyse Referenzwasserstand in der Talsperre 34
Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung von Talsperren-bezogenen Veränderungen aufgrund von Anpassungsmaßnahmen 34
Abbildung 28: Schema der Zusammensetzung von Zeitreihen aus Messung und Vorhersage....37

Abbildung 29: Beispiel Index aus Messung (grün) und aus Vorhersagen (blau) mit Darstellung von Median (blaue Linie) und Schwankungsbereich des Ensembles (blaue Fläche) 37
Abbildung 30: Lage der Rasterzellen des NOAA CFS_v2 Modells über Deutschland 38
Abbildung 31: Struktur der NOAA Daten auf den Servern der National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 39
Abbildung 32: Raster mit jeweiligen Zeitbezug dargestellt zur Extraktion von Zeitreihen 39
Abbildung 33: Beispiel für eine Vorhersagezeitreihe vor (rot) und nach (orange gestrichelt) der Biaskorrektur mittels Linear Scaling anhand einer Messzeitreihe (blau). Die Korrekturfaktoren sind oben rechts dargestellt. 40
Abbildung 34: Lage der für die Qualitätsbewertung verwendeten DWD-Stationen (pink: Klimastationen, grün: Niederschlagsstationen) 42
Abbildung 35: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 6M 42
Abbildung 36: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 1M 43
Abbildung 37: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 6M, Station 2497 43
Abbildung 38: Schema zur Bewertung der Qualität von Vorhersagen 44
Abbildung 39: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0 44
Abbildung 40: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, gefiltert auf Monate mit tatsächlichen Schwellwertunterschreitungen 45
Abbildung 41: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, pro Kalendermonat 45
Abbildung 42: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 3M, über die Zeit 46
Abbildung 43: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 1M, über die Zeit 46
Abbildung 44: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 9M, pro Station, oben als Anteile und unten in absoluten Zahlen 47
Abbildung 45: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0 für zwei individuelle Stationen 48
Abbildung 46: 1x1 km² Rastermodells auf Basis von Talsim-NG am Beispiel der Werra 49
Abbildung 47: Korrelation zwischen der Konzentration an gelöstem Mangan und der Sauerstoffkonzentration (links) sowie zwischen der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration mit Daten der Jahre 2000 bis 2016 für das Rohwasser einer Trinkwassertalsperre. 52
Abbildung 48: Gruppierung der Kenngröße „Coliforme“ als Häufigkeit (blaue Balken) und als summierte Häufigkeit (rote Kurve). 53
Abbildung 49: Korrelation zwischen den neuen Wertepaaren „Coliforme Bakterien“ und „Temperatur“. Datenpunkte mit 95 %-Konfidenzintervall. Konfidenzintervalle für die Konzentration coliformer Bakterien entsprechen in etwa der Größe der Symbole. 53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Implementierung von Indizes: Zu ändernde Größe, Handlung und Regel 29

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Seit mehreren Jahren werden in Deutschland durch den Klimawandel bedingte Veränderungen des Niederschlagsregimes (Verschiebungen innerhalb des Jahres, Hochwässer, Starkregenereignisse, Trockenperioden) beobachtet.

Im BMBF geförderten Vorhaben „Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland - ReKliEs-De“ (HLNUG, 2017) wurde die zukünftige Klimaentwicklung in Deutschland untersucht. Dafür wurden Klimaänderungssignale bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode (1971 – 2000) für Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete analysiert. Die Kernbotschaft des Vorhabens unterstützt die zentralen Aussagen verschiedener vorheriger Studien zur Niederschlagsänderung: Die Mehrzahl der Klimaprojektionen simuliert eine Niederschlagsabnahme für den Sommer und eine Zunahme des Winterniederschlags. Durch die höheren Temperaturen tritt der Niederschlag im Winter vermehrt als Regen statt als Schnee auf, welcher schneller abfließt und geringere Grundwasserstände erwarten lässt. Im Sommer wird es dagegen trockener, es wird mehr Perioden mit mehr als 14 Tagen ohne Niederschlag geben.

So zeigten sich an mehreren Talsperren in Nordrhein-Westfalen in der Übergangszeit vom Winter zum Frühjahr Verschiebungen des Niederschlags in Richtung Frühjahr/Sommer. Aufgrund der Speicherwirkung der Talsperren stellt dies auf den ersten Blick noch kein Problem dar. Durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren können aber bereits geringfügige Verschiebungen des Niederschlagsregimes deutliche Auswirkungen auf die Bewirtschaftung haben. So resultiert aus später fallenden Niederschlägen eine verminderte Abflussbildung aufgrund von Verdunstung wegen der im Frühjahr bereits vorhandenen Vegetation. Zudem gelingt es nicht mehr, den im Winter freizuhaltenden Hochwasserschutzraum vor Beginn der abflussarmen Saison zu füllen. Als Konsequenz der geringeren Zuflüsse im Sommer ergeben sich vor allem für Trinkwassertalsperren Probleme hinsichtlich der angestrebten Zielfüllung der Anlagen zum Ende des Winters. Folglich gelingt im Verlauf des Jahres die Erfüllung bestehender und konkurrierender Nutzungen und Anforderungen (Versorgungssicherheit, Talsperrensicherheit, Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Wasserkraft und Freizeitnutzung, Mindestabgaben, Belange der Wasserrahmenrichtlinie) nur eingeschränkt und eine Nutzung muss zugunsten einer anderen angepasst werden oder alle Nutzungen müssen reduziert werden. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die zeitliche Verschiebung der Niederschläge im Zusammenspiel mit häufigeren Starkregenereignissen im Einzugsgebiet in Veränderungen des Stoffeintrags in die Talsperren resultiert. Dies führt zu Beeinträchtigungen der Wasserqualität, die vor allem für die Trinkwasseraufbereitung kritisch sein können.

Aus diesem Grund fand das BMU geförderte Forschungsvorhaben „Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel – TASK“ (http://task.sydro.de/) statt, dessen Ziel es war, Lösungsstrategien für die Auswirkungen des sich durch den Klimawandel verschiebenden Niederschlagsregimes in Form eines übergeordneten Handlungsrahmens zu entwickeln.

Die Empfehlungen daraus und die vorgeschlagene Vorgehensweise sind in die vorliegende Handlungsanleitung eingeflossen. Die Handlungsanleitung soll den Anwendern eine frühzeitige Einschätzung ermöglichen, ob ein Handlungsbedarf hinsichtlich möglicher Folgen des Klimawandels besteht und welche Schritte demzufolge notwendig sind. Dadurch wird das System Talsperre-Einzugsgebiet anpassungsfähiger und somit robuster hinsichtlich möglicher Folgen durch den Klimawandel. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem frühzeitigen Erkennen und dem Talsperrenmanagement von bzw. während Trockenperioden.

1.2 Anwendungsbereich der Handlungsanleitung

Die Handlungsanleitung soll Talsperrenbetreibern und Aufsichtsbehörden eine Unterstützung liefern, um festzustellen, ob die Integration von hydro-meteorologischen Indizes einen Mehrwert für den Talsperrenbetrieb bringen kann und welche Schritte demzufolge für eine Implementierung notwendig sind.

Die Handlungsanleitung gibt somit einen Rahmen vor, innerhalb dessen ein homogenes Vorgehen zur Prüfung und Umsetzung gewährleistet ist, der aber trotzdem gebietsspezifisch je Talsperre umgesetzt werden muss.

2 DER TASK-ANSATZ

2.1 Hydro-meteorologische Indizes

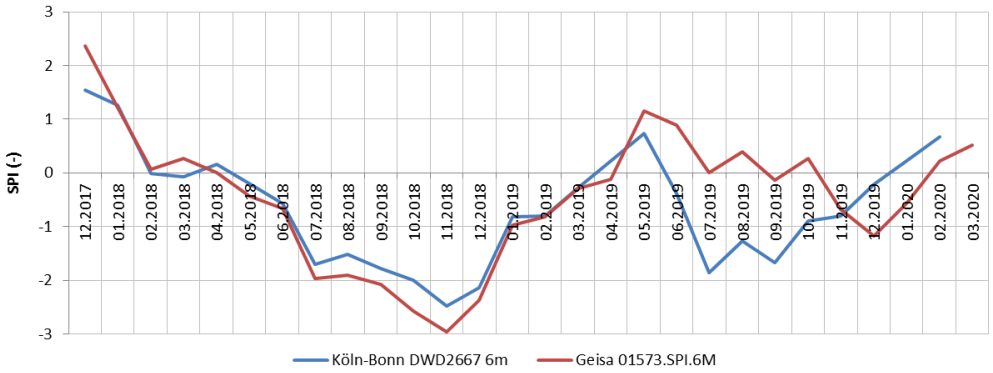
Hydro-meteorologische Indizes sind seit langem Bestandteil der Hydrologie für die Zustandsbeschreibung des Klimas und/oder eines Einzugsgebietes. Obwohl Indizes den Zustand sowohl für Nassperioden als auch für Trockenperioden anzeigen, war der Fokus immer schon auf Trockenheit ausgerichtet. Es existieren weit über 50 verschiedene Indizes (Svoboda & Fuchs, 2016). Bekannt sind die sogenannten Drought-Indizes wie Standardized Precipitation Index (SPI), Palmer Drought Index (PDI), Surface Water Supply Index (SWSI) und etliche mehr.

Indizes vergleichen einen Zustand mit dem Zustand aus einem festzulegenden Referenzzeitraum und ergeben meist einen einheitslosen, normierten Indexwert, der bei 0 liegt, wenn der betrachtete Zustand dem Referenzzustand gleich ist. Positive Indexwerte bedeuten eine im Vergleich zum Referenzzeitraum überdurchschnittliche Situation (nasser), während negative Werte eine unterdurchschnittliche Situation (trockener) bedeuten.

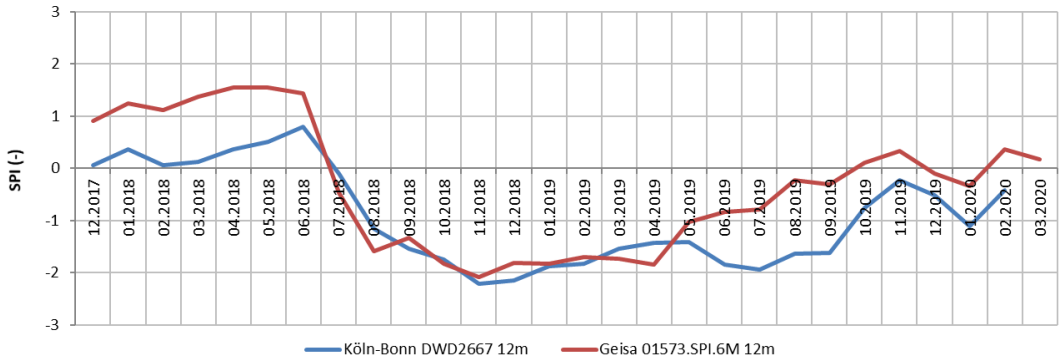
Indizes werden über verschiedene Aggregationszeiträume berechnet. Gebräuchlich ist die Betrachtung von Zeiträumen zwischen 3 bis 48 Monate auf Basis von Monatszeitschritten. Somit stellt ein Index zwar eine Momentaufnahme dar, beinhaltet aber auch ein Gedächtnis der vorangegangenen Zeit. Je länger der Aggregationszeitraum ist, umso größer ist auch das verarbeitete Gedächtnis. Indizes verändern sich bei kurzen Aggregationszeiträumen dadurch schneller als bei langen. Die Interpretation ist folglich einfach: Tritt ein Niederschlagsmangel über einen langen Zeitraum auf, so kann dieser kaum durch hohe Niederschläge kurzer Dauer kompensiert werden. Es braucht somit auch eine gewisse Zeit mit überdurchschnittlichem Niederschlag, um wieder auf einen Normalzustand zurück zu kommen. Aus diesem Grund erlauben Indizes per se schon einen gewissen Ausblick in die Zukunft. Die Trockenperiode 2018 und 2019 ist ein gutes Beispiel. Die Auswirkungen des Niederschlagsdefizits in 2018 setzten sich in 2019 fort. Eine Bilanzierung über mehr als 12 Monate zeigt, dass ergiebige Niederschläge im Januar und Februar 2020 eine gewisse Kompensation bewirken, die aber noch keinen vollständigen Ausgleich bedeuten. So füllen sich Bodenspeicher nur langsam und sind in den tieferen Schichten noch nicht wieder zurück im Normalzustand.

Eine Darstellung zweier DWD Stationen, Köln-Bonn und Geisa aus Thüringen, zeigen die Unterschiede in der Trägheit deutlich. Die Aggregation auf 6 Monate reagiert wesentlich schneller und zeigt nach wenigen Monaten mit mehr Niederschlag eine Erholung an, was aus Sicht eines 6-monatigen Zeitfensters auch sinnvoll ist. Die Langzeitwirkung vom Niederschlagsdefizit wird aber erst deutlich bei einer Aggregation auf 12 oder 24 Monate. Einzelne nasse Monate fallen wenig ins Gewicht. Die Gebietseigenschaften sind letztendlich entscheidend, welche Aggregationsperiode am besten für das jeweilige Gebiet geeignet ist.

6m



12 m



24 m

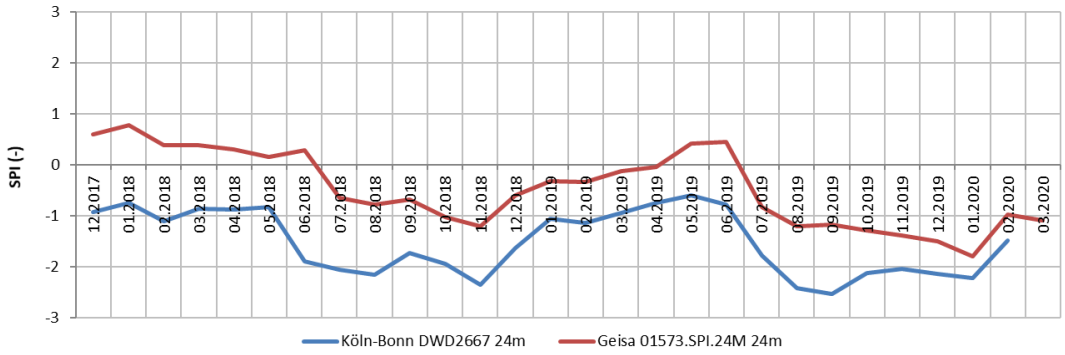


Abbildung 1: Darstellung verschiedener Aggregationen des SPI Index am Beispiel zweier DWD Stationen

2.2 Nutzung von Indizes zur Prognose

Indizes werden üblicherweise auf der Basis von Messwerten berechnet wie in Abbildung 2 dargestellt. Da eine gewisse Wirkung aufgrund der Trägheit des hydrologischen Systems bestehen bleibt, liefert ein Index einen Ausblick in die unmittelbare Zukunft. Somit liefert ein auf Messwerten berechneter Index in gewisser Weise eine erste Möglichkeit, zumindest eine kurzfristige Tendenz für die Zukunft zu liefern.

Wird die Indexberechnung mit Vorhersagen erweitert (siehe Kapitel 5), so verschiebt sich auch die Aussage weiter in die Zukunft (siehe Abbildung 3) und die Tendenz deckt einen größeren Zeitraum nach vorne ab. Die Länge des Aggregationszeitraums und die Lage auf der Zeitachse spielen dabei eine große Rolle, da entscheidend ist, wie viele Anteile gesichertes Wissen (=Messwerte) mit unsicherem Wissen (=Vorhersage) kombiniert werden. Je größer der Anteil an gesichertem Wissen ist, umso sicherer wird die Aussage sein, jedoch ist der Vorhersagezeitraum kürzer. Je mehr Vorhersage in den Aggregationszeitraum integriert wird, umso unsicherer wird die Aussage sein.

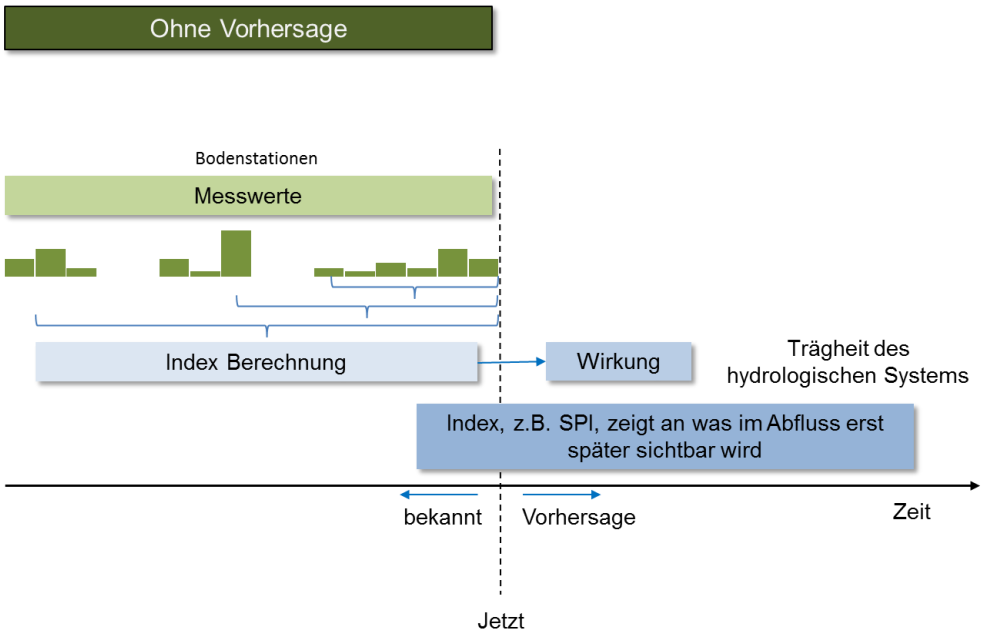


Abbildung 2: Berechnung von Indizes auf der Basis von Messwerten

Jedes Gebiet hat seinen eigenen optimalen Verhältniswert von Anteil Messwerten zu Anteil Vorhersagewerten in Kombination mit einem Aggregationszeitraum. Da Indizes durch Aggregation und Transformation mittels statistischer Verteilung von Input, z.B. Niederschlag, per se robust sind, sollten Indizes auch in Kombination von Messwerten/Vorhersagewerten robust bleiben. Somit ist anzunehmen, dass eine Aussage auf Basis der mit Vorhersagen berechneten Indizes vergleichsweise robuster ist als die direkte Verwendung einer Niederschlagsvorhersage in einem Niederschlag-Abfluss Modell.

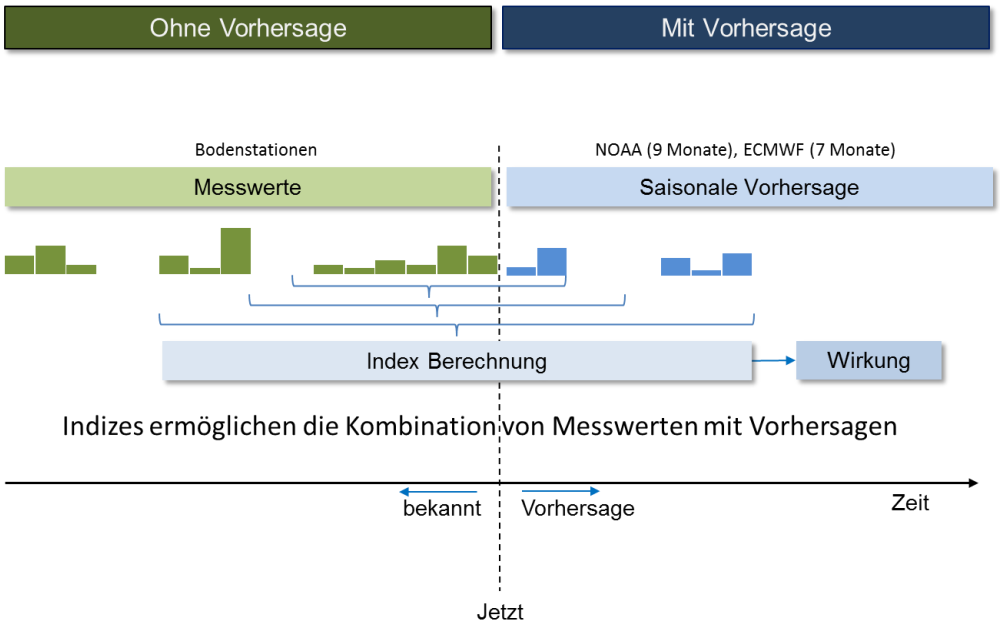


Abbildung 3: Berechnung von Indizes auf der Basis von Messwerten und Vorhersagen

2.3 Einsatz von TASK

Ausgehend von der Grundidee von TASK ist es naheliegend, die Indizes als Indikatoren zu verwenden. Indikatoren sind sozusagen Schalter, die im Wassermanagement Auslöser für Entscheidungen sein können. Bislang werden Indikatoren im Talsperrenbetrieb verwendet, die unmittelbar mit dem Be-

trieb von Stauanlagen zu tun haben, z.B. Wasserstände, Zuflüsse, Niederschlag oder daraus abgeleitete Informationen. Sie geben Auskunft über die aktuellen und relevanten Zustände des Systems und lösen bei Über- oder Unterschreitung von Grenzwerten Handlungen durch den Talsperrenbetreiber aus. Ihre Benutzung für einen vorausschauenden Betrieb ist begrenzt.

Ergänzend stehen nun vorgenannte hydro-meteorlogische Indizes mit oder ohne Vorhersage zur Verfügung. Diese sind geeignet, um Aussagen über den Zustand eines Einzugsgebiets zu erhalten. Der Ansatz des Vorhabens war es, diese Indizes für den Talsperrenbetrieb zu interpretieren. Da diese Indizes unterschiedliche Trägheiten und Wirkungszeiträume besitzen, liefern sie Möglichkeiten für einen vorausschauenden Betrieb. Beispielsweise gibt der Standardized Precipitation Index (SPI) indirekt Hinweise, wie sich z.B. der Abfluss mit unterschiedlichem Zeitbezug in der Zukunft (je nach Einzugsgebietsstruktur unterschiedliche lange) entwickeln wird. Welche Indizes zum Einsatz kommen ist nicht begrenzt, solange diese in der Lage sind, eine vorausschauende Wirkung im wasserwirtschaftlichen System zu liefern. So kann beispielsweise ein auf Basis von Bodenfeuchte gerechneter Index Aufschluss über die Abflussbereitschaft geben.

Wie Indizes zu interpretieren sind, welche Qualität sie in der Früherkennung von hydrologischen Stress- oder besonders dynamischen Bedingungen liefern, wurde innerhalb des Vorhabens als Hindcast Experiment geprüft, d.h. rückblickend mit observierten Werten und im Vergleich mit Vorhersagen.

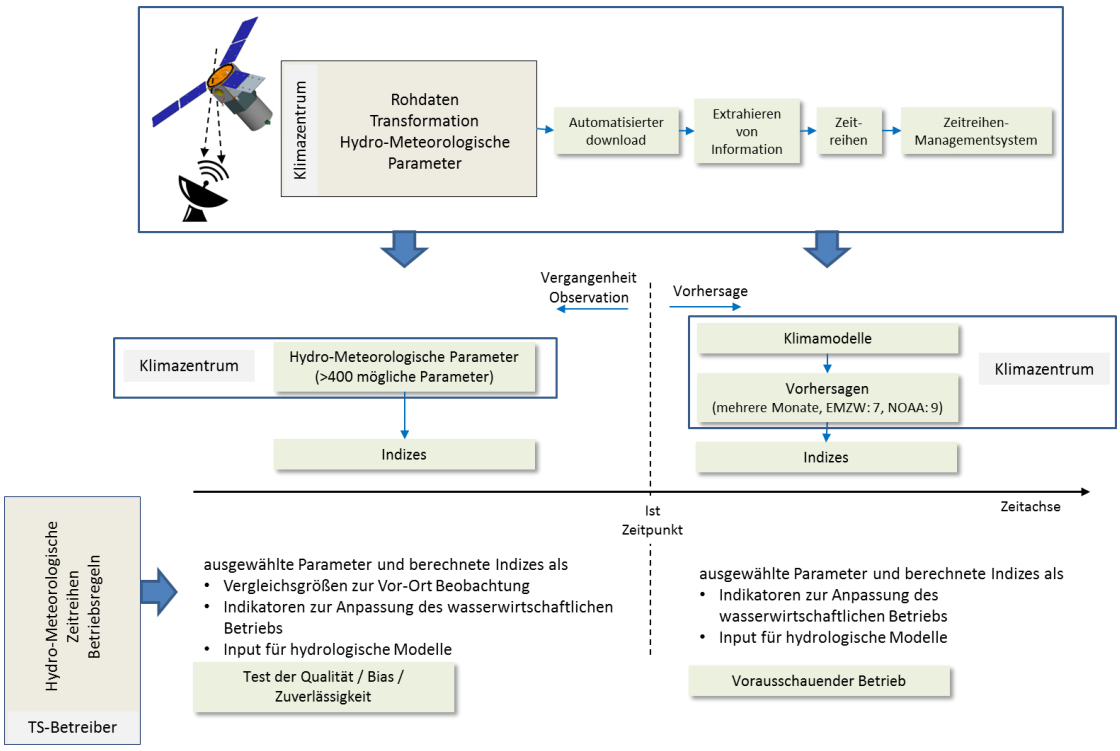


Abbildung 4: TASK-Forschungsansatz: Ableitung von Indizes und Rückkopplung mit dem wasserwirtschaftlichen Betrieb

Mit der Hinzunahme von saisonalen Vorhersagen lassen sich die Schalter für Normal- zu Trockenplan bzw. Trocken- zu Normalplan mit einer Vorhersage verknüpfen (siehe Kapitel 5). Das bedeutet, dass der Schalter nicht nur auf den aktuellen Zustand im Einzugsgebiet, sondern auf einen zu erwartenden Zustand mit einer Wahrscheinlichkeit des Eintretens reagiert. Aufbauend auf den Modellen von NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) stehen theoretisch 9 Monate Vorhersage zur Verfügung, beim EZMW (Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersagen) sind es 7

Monate. Der Einsatz der Vorhersage erlaubt einen Blick in die Zukunft, ob eine Tendenz für eine Trockenphase abzusehen ist und wie stabil diese ist, um Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

3 EINSATZMÖGLICHKEITEN DER INDIZES

Prinzipiell gibt es drei unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten der Indizes (s. Abbildung 5), die nachfolgend beschrieben werden.

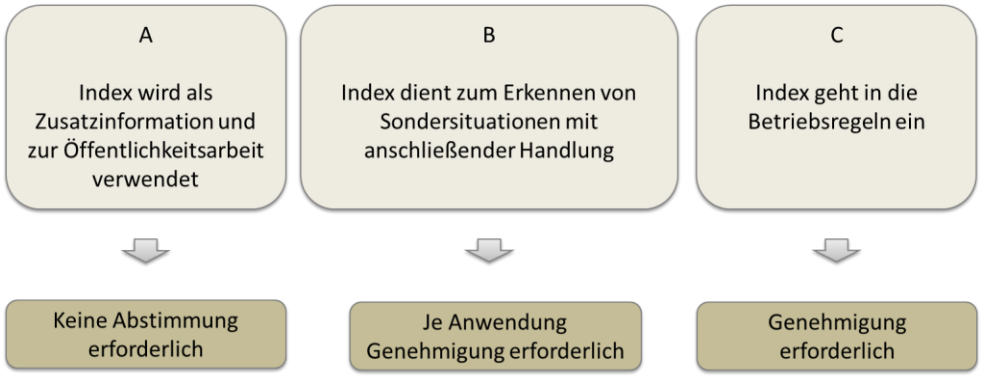


Abbildung 5: Einsatzmöglichkeiten von Indizes

3.1 Einsatz in der Öffentlichkeitsarbeit (Einsatzmöglichkeit A)

Die einfachste Einsatzmöglichkeit sieht vor, Indizes als Zusatzinformation und für die Öffentlichkeitsarbeit zu verwenden. Als Zusatzinformation können diese zu den ohnehin im Monitoringsystem laufenden hydrologischen Messungen Eingang in die Beurteilung der aktuellen Situation im Einzugsgebiet bzw. für den Talsperrenbetrieb finden. Die Öffentlichkeitsarbeit kann insofern gut unterstützt werden, weil Indizes sehr leicht in Kartenform dargestellt werden können und farblich animiert auch einem Laien eine Wassermangelsituation oder Wasserüberschusssituation verständlich dargelegt werden können. Einsatzmöglichkeit A ist somit weder verknüpft mit Betriebsregeln noch wird Einfluss auf den Talsperrenbetrieb genommen. Insofern ist hier keine weitere Prozedur oder Abstimmung mit der Aufsichtsbehörde erforderlich. Ein Beispiel einer Kartendarstellung zeigt Abbildung 6 .

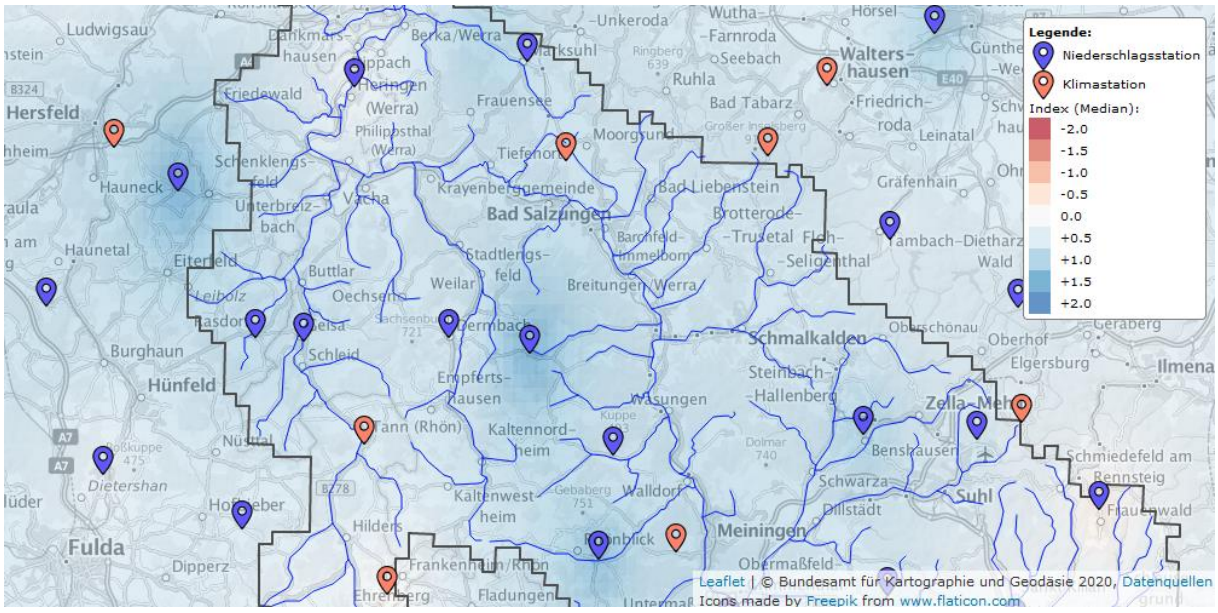


Abbildung 6: Beispiel einer Kartendarstellung des SPI Index

3.2 Erkennen von Sondersituationen (Einsatzmöglichkeit B)

In dieser Einsatzmöglichkeit werden Indizes für die Identifikation von Sondersituationen eingesetzt. Sondersituationen werden auf Basis der TASK Methode i.d.R. Wassermangelsituationen sein. Hierbei dienen die Indizes, z.B. meteorologische wie SPI oder SPEI oder hydrologische wie SSI (Standardized Streamflow Index), dazu, bei Unterschreiten eines vorab festgelegten Schwellwertes einen Prozess zur weitergehenden Analyse des wasserwirtschaftlichen Systems auszulösen. Die Prozesse können unterschiedlicher Art sein und sind im Anwendungsfall B Einzelfallentscheidungen. Der Index löst die Diskussion mit der Aufsichtsbehörde aus, in der die Einzelfallentscheidung besprochen und entschieden wird. Ein Beispiel wäre die temporäre Reduktion der Mindestabgabe, wenn ein SPI den Wert von beispielsweise -1.5 (= kritisch trocken gemäß World Meteorological Organisation) unterschreitet. Ein anderes Beispiel ist, das Aufhöhungsziel im Unterlauf einer Talsperre herabzusetzen. Es ist aber auch denkbar, dass andere Akteure in Maßnahmen einbezogen werden, z.B. Kraftwerksbetreiber, Industrieunternehmen, Landwirtschaft, um ihren Anteil zur Entspannung eines Wasserdefizits beizutragen.

3.3 Indizes und Vorhersagen als fester Bestandteil von Betriebsregeln (Einsatzmöglichkeit C)

Diese Einsatzmöglichkeit stellt die volle Integration von Indizes in die Betriebsregeln dar. Das bedeutet, dass ein Index – oder mehrere Indizes – Bestandteil von Betriebsregeln werden, so wie es der Zufluss zur Talsperre oder der Speicherinhalt selbst ist. Bei Einsatzmöglichkeit C ist die grundsätzliche Entscheidung, wie ein Index auf den Talsperrenbetrieb wirkt, im Vorfeld bereits ausreichend analysiert worden. Wenn der gewählte Index einen Schwellwert über- oder unterschreitet, treten die entsprechenden Betriebsregeln in Kraft. Es handelt sich somit nicht um eine Einzelfallentscheidung. Die Wirkungen solcher Betriebsregeln sind ausreichend analysiert worden, ebenso die Wirkung auf andere Nutzungen wie Hochwasserschutz etc. und die Regeln sind mit den Aufsichtsbehörden abgestimmt und durch diese bereits genehmigt. Somit unterscheidet sich Anwendungsfall C dadurch, dass Sondersituationen in den Betriebsregeln integriert sind und keine neue Analyse bzw. Einzelfallentscheidung erforderlich ist, da alle notwendigen Untersuchungen und Abstimmungen schon im Vorfeld getroffen wurden. Einsatzmöglichkeit C ist anzustreben, weil sie nur einmal den Aufwand erzeugt, die Betriebsregeln zu definieren, zu analysieren und zu genehmigen. Sind die Betriebsregeln intelligent gewählt, bietet es die effizienteste Art, auf hydrologische Sondersituationen zu reagieren. Dies gilt sowohl für den Betreiber als auch für die Aufsichtsbehörde, da beide den Analyse- und Verifikationsprozess nur einmal durchlaufen müssen. Es ist somit eine Erweiterung bestehender Betriebspläne.

4 ABLAUFPLAN

Dieses Kapitel ist angelegt, um eine Unterstützung in der Anwendung von hydro-meteorologischen Indizes zu geben. Die Datengrundlage sowie die Analyse der Daten werden beleuchtet. Die Verifikation, ob sich ein Index zur Erkennung von kritischen hydrologischen Situationen eignet, wird dargelegt, wobei nicht auf alle Konstellationen von Index und Gebietseigenschaften eingegangen werden kann. Die Integration in Betriebsregeln wird ebenfalls behandelt, wobei auch hier gilt, dass dies nicht allumfassend möglich ist, weil es zu viele Optionen einer Integration in bestehende Betriebsregeln gibt. Nachfolgend werden folgende Themen bearbeitet:

1. Datengrundlage
2. Bestimmung der Referenzperiode
3. Verifikation
4. Anwendung
5. Nachweise
6. Dokumentation

In Kapitel 5 ist beschrieben, wie saisonale Vorhersagen aus globalen Klimamodellen in den Prozess integriert werden können.

4.1 Datengrundlage

4.1.1 Messdaten Klima

Als gemessene Klimadaten kommen vorrangig Daten von Bodenstationen des DWD und der Verbände in Frage. Zum Einsatz kommen je nach Index z.B. Niederschlag und Temperatur. Daten vom DWD sind über das Climate Data Center (CDC) des DWD frei verfügbar. Es liegen dort die Datensätze „Historische monatliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland" und „Historische monatliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland" vor.

Der Zugang zu den Daten findet sich hier: https://cdc.dwd.de/portal/

Für eine automatisierte Verarbeitung eignet sich der Zugang über FTP, wo die relevanten Klimadaten unter folgendem Pfad abgelegt sind:

ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/

Von hier aus verzweigt sich der Datenzugang wie folgt:

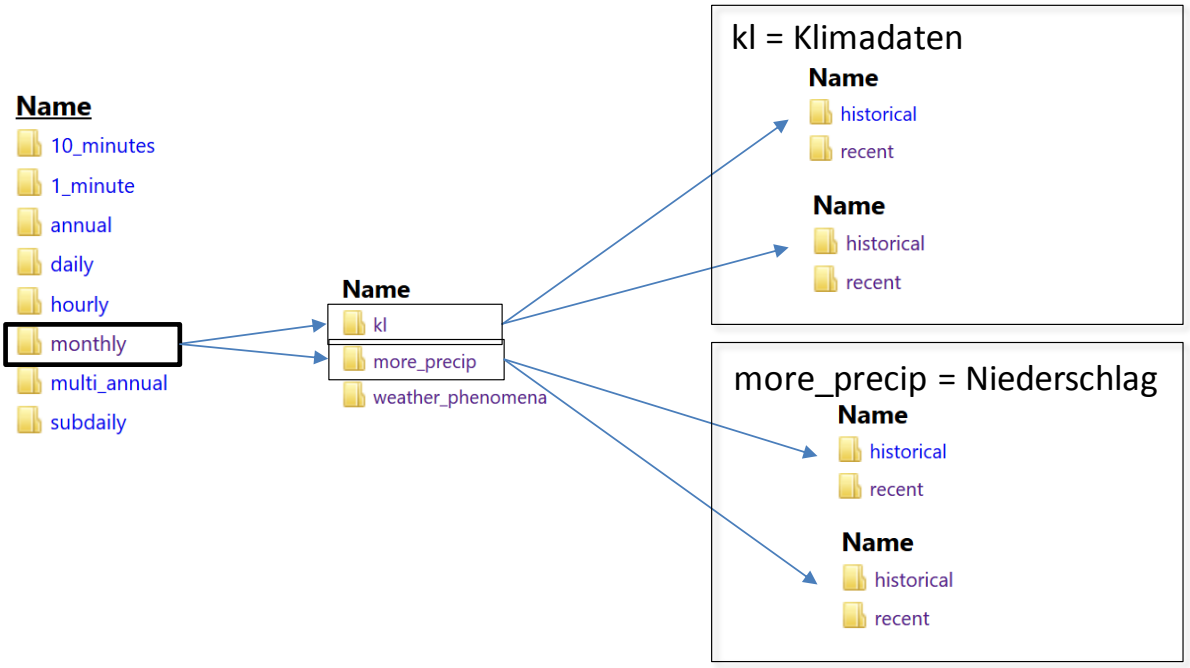


Abbildung 7: Struktur der DWD Daten auf der opendata.dwd.de Plattform

Für die Indexberechnung werden monatliche Daten benötigt. Daten mit höherer zeitlicher Auflösung können ebenfalls von dieser Plattform bezogen werden. Der historische Zeitreihenbestand findet sich in den Ordnern „historical“, aktuelle Daten finden sich in den Ordnern „recent“.

Der DWD legt diese Daten als *.ZIP ab. In jeder *.ZIP Datei befinden sich Dateien zu Metadata und eine Datei mit den Messwerten, zu erkennen am Namen „produkt_*“.

Bei den Dateien handelt es sich um das CSV Format, d.h. Spalten sind mit einem Trennzeichen getrennt, in diesem Fall ein Semikolon:

```
STATIONS_ID;MESS_DATUM_BEGINN;MESS_DATUM_ENDE;QN_4;MO_N;MO_TT;MO_TX;MO_TN;MO_FK;MX_TX;MX_FX;MX_TN;MO_SD_S;QN_6;MO_RR;MX_RS;eor
      2667;20180801;20180831;     3;  4.40;  20.31;   27.17;   13.09;    2.35;  38.3;  18.9;   5.2; 246.68;    9;    45.2;   14.0;eor
      2667;20180901;20180930;     3;  4.35;  15.36;   22.34;    8.62;    2.23;  33.1;  20.1;  -0.3; 190.63;    9;    43.4;   19.6;eor
      2667;20181001;20181031;     3;  4.76;  12.01;   17.58;    6.41;    2.42;  26.7;  15.3;   0.4; 145.39;    9;    26.5;    6.9;eor
      2667;20181101;20181130;     3;  5.51;   7.31;   10.95;    3.51;    2.57;  19.2;  16.5;  -4.3;  74.23;    9;    25.0;    9.7;eor
      2667;20181201;20181231;     3;  6.49;   5.64;    8.47;    2.61;    2.68;  15.0;  18.9;  -4.9;  33.83;    9;   101.9;   15.7;eor
      2667;20190101;20190131;     3;  6.66;   2.41;    4.74;   -0.26;    2.84;   8.8;  22.8; -10.7;  38.18;    3;   101.8;   22.3;eor
      2667;20190201;20190228;     3;  4.79;   6.40;   12.00;    1.12;    2.54;  21.0;  18.7;  -3.5; 127.35;    3;    30.0;   12.3;eor
      2667;20190301;20190331;     3;  5.62;   7.99;   12.67;    2.99;    3.06;  20.4;  28.8;  -2.8;  98.52;    3;    74.7;   18.2;eor
      2667;20190401;20190430;     3;  4.56;  11.33;   17.31;    4.60;    2.53;  25.9;  19.5;  -2.3; 196.96;    3;    50.1;   21.4;eor
      2667;20190501;20190531;     3;  5.37;  11.78;   17.09;    6.07;    2.32;  24.3;  16.5;  -1.8; 165.43;    3;    71.2;   10.6;eor
      2667;20190601;20190630;     3;  3.85;  20.51;   27.11;   13.09;    2.40;  36.2;  26.1;   7.3; 309.70;    3;    38.5;    8.8;eor
```

Abbildung 8: Dateiformat der DWD-Daten

Welche Spalte relevant ist, ist aus den Metadaten zu entnehmen.

Mit etwaigen Datenlücken oder Fehlwerten (in DWD Daten i.d.R. durch -999 gekennzeichnet) muss entsprechend umgegangen werden, so dass sie die Indexberechnung nicht verfälschen.

Eine Erweiterung der Messdaten von Bodenstationen stellen Radardaten dar, wie z.B. das Produkt RADOLAN des DWD. Diese sind angeeicht an Bodenstationen und liefern eine hohe räumliche Auflösung, die grob einem 1 km x 1 km Raster entspricht. Jede RADOLAN Zelle kann als eigene Zeitreihe betrachtet werden, für die die gleichen Bedingungen wie für Bodenstationen gelten. Da RADOLAN-Daten aber erst seit 2006 zur Verfügung stehen, sind diese nur bedingt zur Indexberechnung geeignet, da kein ausreichend langer Referenzzeitraum zur Verfügung steht.

4.1.2 Messdaten Hydrologie

Hydrologische Messdaten in Form von Pegelständen und Abfluss, Wasserständen und Speicherinhalt der Talsperren, Grundwasserständen, Bodenfeuchte sind für die Verifikation notwendig und von

Bedeutung, wenn nicht nur meteorologische, sondern auch hydrologische Indizes betrachtet werden sollen.

Bezüglich Lücken und Fehlwerten gilt die gleiche Aussage wie für die Klimadaten.

4.2 Bestimmung der Referenzperiode

Ein zentraler Aspekt ist die Analyse der Daten. Bei der Ableitung von Indizes geht es darum, Werte mit einem Referenzzeitraum zu vergleichen und den Unterschied zwischen aktuellem Wert zum vergleichbaren Referenzwert abzuleiten und zu bewerten. Somit kommt dem Referenzwert und damit dem Referenzzeitraum eine zentrale Bedeutung zu.

Die Empfehlungen der World Meteorological Organisation (WMO) bezüglich der Zeitreihenanalyse lauten (WMO, Guidelines on the Calculation of Climate Normals, 2017):

- Mindestlänge der Zeitreihe von 30 Jahren, aus denen 80% der Zeit vollständig sein sollen
- Ein Monatswert ist zu verwerfen, wenn
  - 11 oder mehr Werte eines Monats fehlen oder
  - 4 aufeinanderfolgende Tage innerhalb eines Monats fehlen
- Die Zeitreihenwerte müssen homogen und konsistent sein. Dies ist nicht erfüllt, wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:
  - Verlegung des Messortes
  - Änderung des Messgerätes
  - Änderung in der Art der Messung
  - Änderung in der Umgebung des Messortes

Dabei ist jedoch zu beachten, dass in den letzten 50 Jahren die Messgeräte an den meisten Messstellen in Deutschland umgestellt wurden. Durch eine Vielzahl unterschiedlicher Messgeräte auf den größeren DWD-Messstationen kann diese Entwicklung i.d.R. unter Kontrolle gehalten werden, dennoch können die Empfehlungen der WMO nicht immer vollständig eingehalten werden.

Der Referenzzeitraum sollte einen Zustand repräsentieren, der als „normal“ für den Ort der Zeitreihe gilt. Üblicherweise werden in der Meteorologie die Jahre 1961 bis 1990, 1971 bis 2000 verwendet, in der Klimafolgenforschung die Jahre 1981 bis 2010.

Im Klimaatlas des DWD ist zu erkennen, dass es ab den 90er Jahren eine Tendenz zur Erwärmung gibt, die sich seitdem nicht mehr erholt oder ausgeglichen hat. In Abbildung 9, entnommen von der Homepage des DWD, ist als Normalwert die Periode 1961 – 1990 verwendet worden.

Da die letzten Jahre schon eine ansteigende Tendenz der Temperatur zeigten, ist für die Anwendung innerhalb TASK die Empfehlung, die Jahre 1961 bis 1990 zu verwenden. Dies gilt, wenn man die Temperatur als Zeiger für eine Klimaveränderung und somit als Referenz für „Normal“ benutzt. Da es aber nicht direkt auf den Niederschlag übertragbar ist, sind auch spätere Perioden denkbar, z.B. 1980 bis 2010, die in Bezug auf Niederschlag als „normal“ betrachtet werden können.

Bei der Wahl der Referenzperiode sollte aber immer bewusst sein, dass diese unmittelbar die Ergebnisse der Indizes beeinflusst. Eine regenreiche Referenzperiode wird schneller Trockenheit im Index anzeigen, als eine trockene Referenzperiode und umgekehrt.

Weiter unten im Text sind Beispiele dazu aufgeführt.

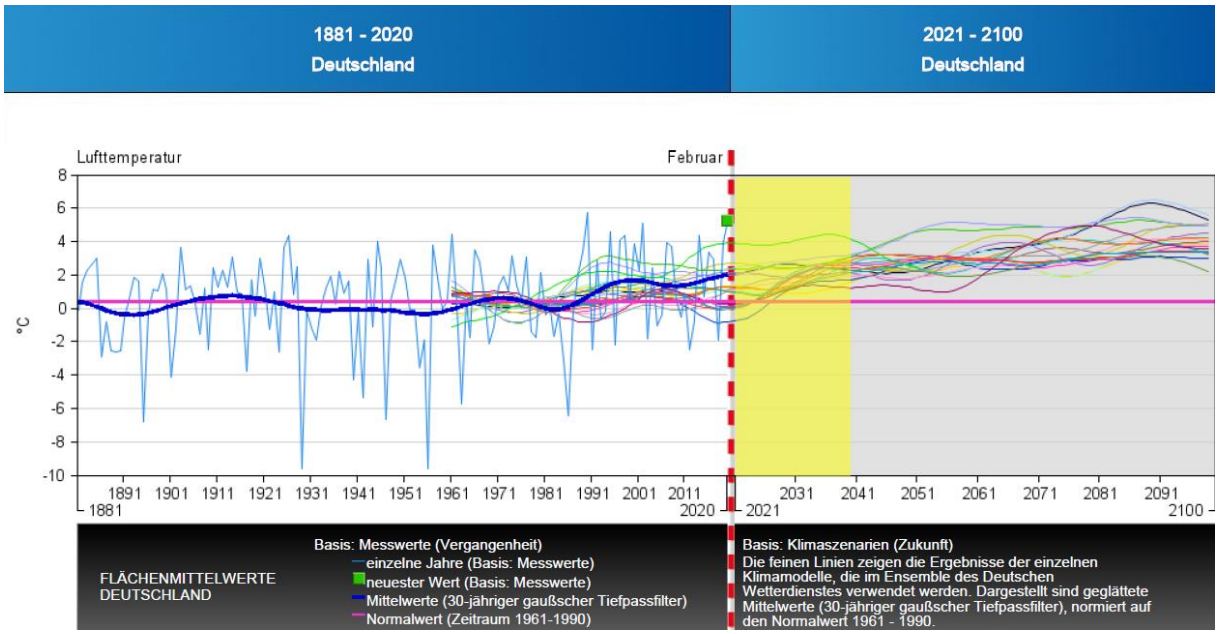
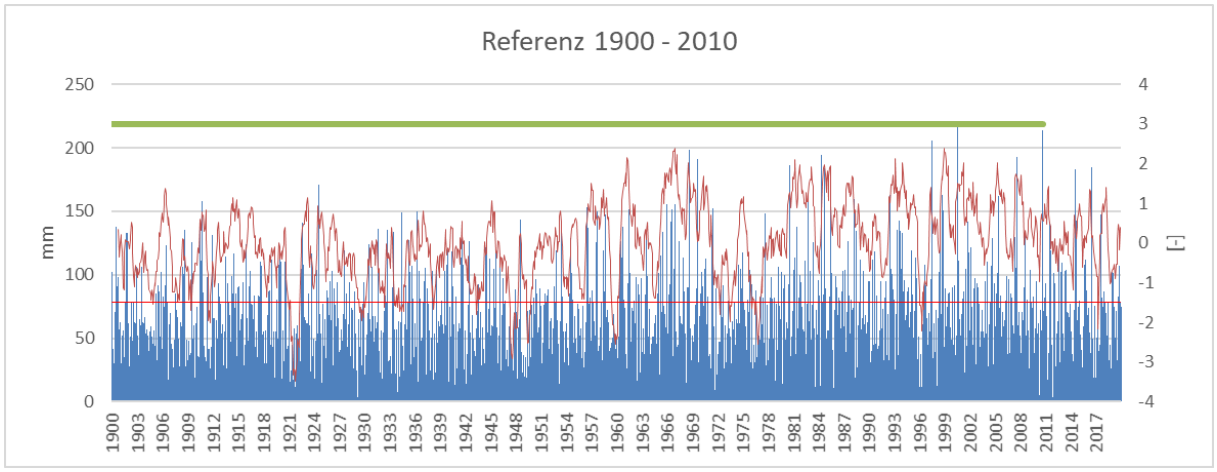


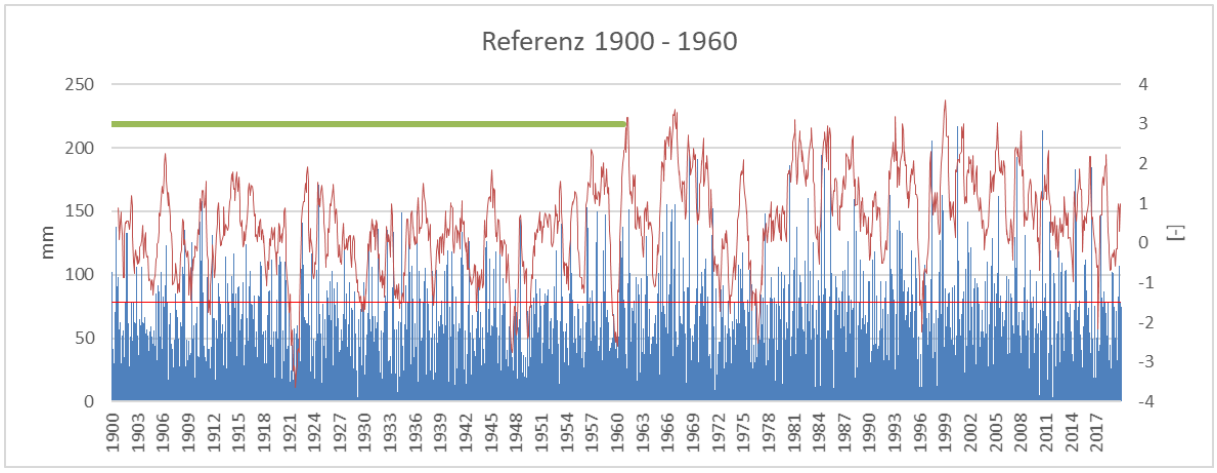
Abbildung 9: DWD - Deutscher Klimaatlas (https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html)

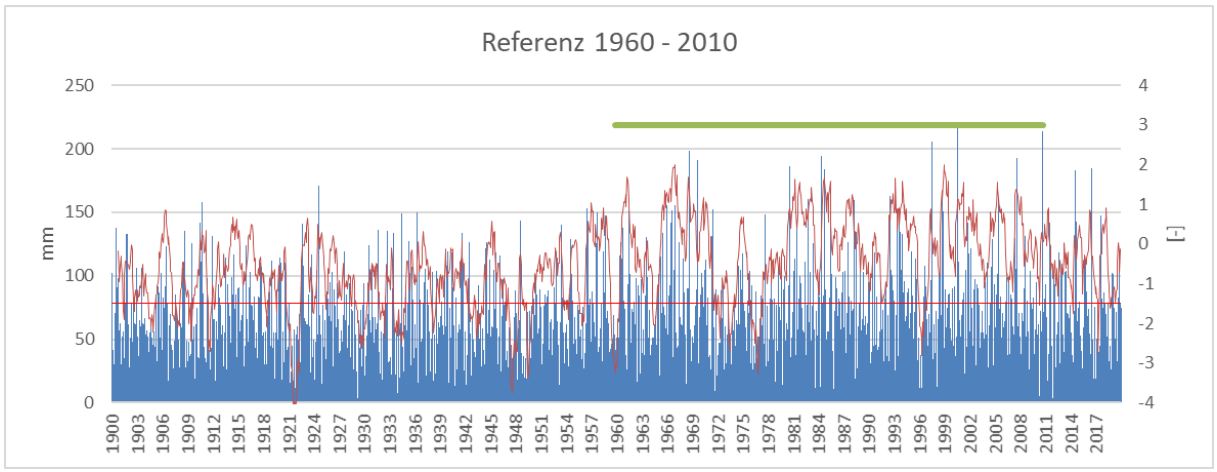
An dieser Stelle folgt keine Erläuterung, wie ein hydro-meteorologischer Index berechnet wird. Es wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (WMO, 2012), (Svoboda & Fuchs, 2016) u.a.

Unterschiedlich gewählte Referenzzeiträume können zu deutlich anderen Aussagen führen, so dass sogar die Aussagekraft der Ergebnisse in Frage gestellt wird bzw. die Sinnhaftigkeit nicht mehr gegeben ist. Dies wird am Beispiel der DWD Station Köln-Bonn (Stations-ID 2667) gezeigt. Die Station ist seit 1891 in Betrieb. Nachfolgend sind Indexberechnungen für fünf unterschiedliche Referenzzeiträume dargestellt. Jede Grafik enthält die Darstellung der Monatssummen des Niederschlags, den SPI basierend auf dem in grün dargestellten Referenzzeitraum und einen Schwellwert mit -1.5, der als kritisch trocken gilt (Hinweis: SPI = -1,5 wird von der WMO als kritisch trocken eingestuft).

Gegenüber den Jahren 1900 bis 1950 scheinen die Niederschläge seit den 60er Jahren gestiegen zu sein. Es gab jedoch Änderungen in der Art der Erfassung der Niederschläge (Änderung ab 1930), die Erfassung erfolgte automatisiert ab 1993. Ob es Änderungen des Messortes gab, ist nicht bekannt.


Referenz 1900 - 2010
mm
[-]
250
200
150
100
50
0
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1900 1903 1906 1909 1912 1915 1918 1921 1924 1927 1930 1933 1936 1939 1942 1945 1948 1951 1954 1957 1960 1963 1966 1969 1972 1975 1978 1981 1984 1987 1990 1993 1996 1999 2002 2005 2008 2011 2014 2017


Referenz 1900 - 1960
mm
[-]
250
200
150
100
50
0
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1900 1903 1906 1909 1912 1915 1918 1921 1924 1927 1930 1933 1936 1939 1942 1945 1948 1951 1954 1957 1960 1963 1966 1969 1972 1975 1978 1981 1984 1987 1990 1993 1996 1999 2002 2005 2008 2011 2014 2017


Referenz 1960 - 2010
mm
[-]
250
200
150
100
50
0
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1900 1903 1906 1909 1912 1915 1918 1921 1924 1927 1930 1933 1936 1939 1942 1945 1948 1951 1954 1957 1960 1963 1966 1969 1972 1975 1978 1981 1984 1987 1990 1993 1996 1999 2002 2005 2008 2011 2014 2017

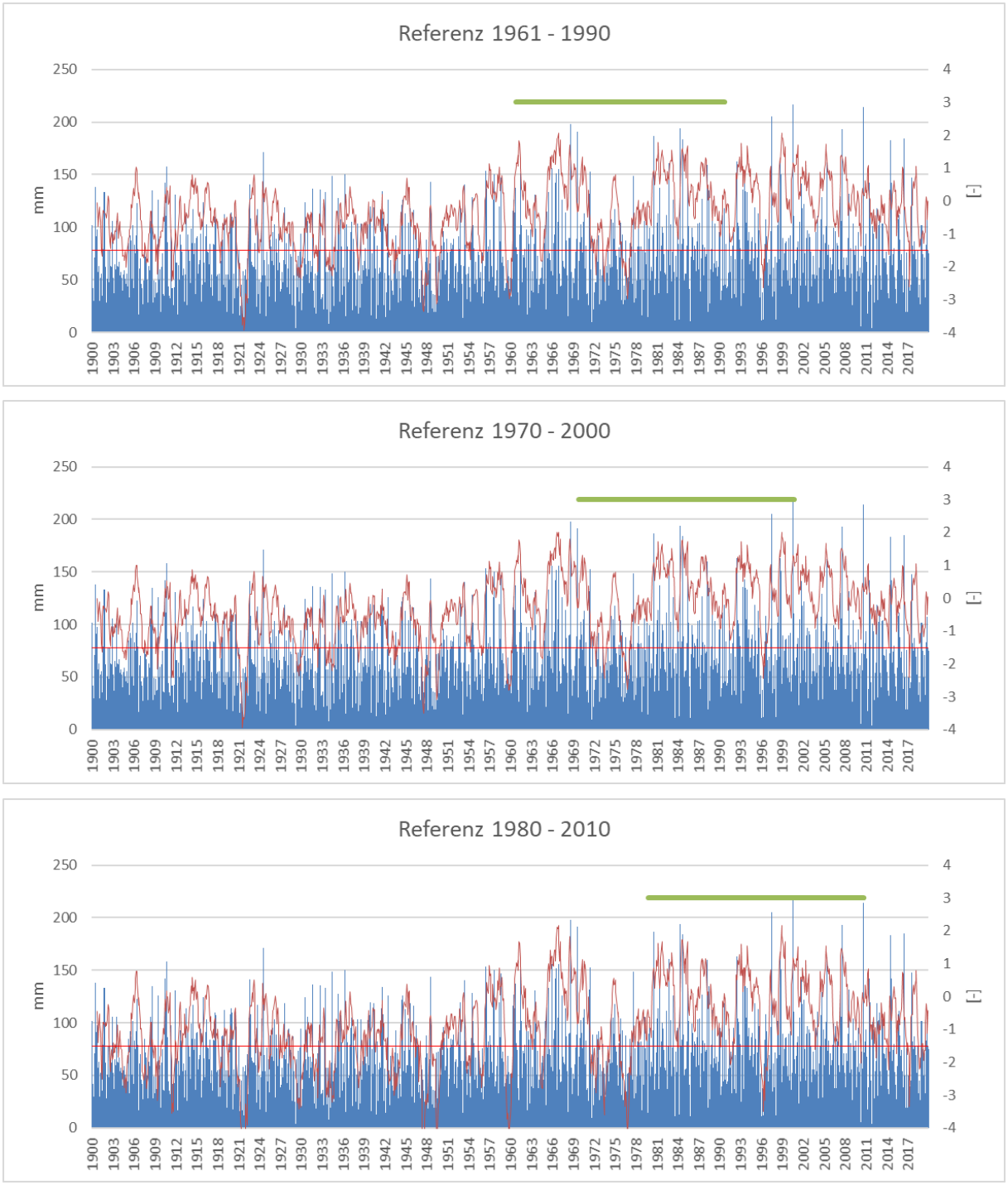


Abbildung 10: Wirkung des Referenzzeitraumes auf den SPI am Beispiel der Zeitreihe Köln-Bonn (ID=2667)

Die Auswertung mit dem Referenzzeitraum 1900 bis 2010 zeigt die dämpfende Wirkung der langen Periode. Dadurch werden Extremwerte relativiert und ein Ausschlag des SPI nach oben wie nach unten begrenzt. Auffällig ist auch, dass bei Verwendung der langen Referenzperiode ab den 60er Jahren, mit Ausnahme von wenigen Jahren in den 70ern und 90ern, der SPI-Index durchweg positiv ist, was als überdurchschnittlich nass zu interpretieren wäre. Dies war sicherlich nicht der Fall. Es wird deutlich, dass es nicht hilfreich ist, die Werte vor 1960 als Normalzustand einzustufen, da nicht klar

ist, ob das Kriterium der Homogenität überhaupt zutrifft. Logischerweise spitzt sich dies zu, wenn „Normal“ als 1900 bis 1960 deklariert wird.

Mit der Referenzperiode von 1960 bis 2010 rutscht der SPI nach unten. Die Zeit vor 1960 wird fast zur Hälfte als kritisch trocken eingestuft. Die 70er und 90er Jahre sowie der Zeitraum ab 2008 werden als überdurchschnittlich trocken deklariert.

Die Jahre 1961 bis 1990, die in bei Klimaprojektionen als Vergleich dienen (DWD, 2019), liefern ein ähnliches Bild wie 1970-2000. Eine Definition der Periode 1970 bis 2000 als „normal“ beinhaltet die tatsächlich trockenen 70er und 90er Jahre und geht dadurch davon aus, dass dies quasi „normal“ ist. Somit steigt der SPI wieder an. In dieser Periode sind die Trockenjahre aber überrepräsentiert und sorgen somit für eine Verzerrung. Sobald die 70er Jahre nicht mehr als Referenz und somit auch nicht mehr als „normal“ behandelt werden, ändert sich der SPI deutlich.

Unabhängig von der Wahl des Referenzzeitraumes lassen sich einige grundsätzliche Aussagen ableiten:

- Die 70er Jahre waren bekanntermaßen sehr trocken. Dies spiegelt sich im SPI deutlich wieder. Über mehrere Jahre hinweg bleibt der SPI unter 1.5.
- 1991 und 1996 erscheinen als kritische Trockenjahre, was bestätigt werden kann.
- Seit ca. dem Jahr 2000 zeigt sich ein negativer Trend des Niederschlags, und zwar bei allen Referenzperioden. Dies wird durch tatsächlich aufgetretene Probleme bei der Talsperrenbewirtschaftung bestätigt.

Eine „Wahrheit“ bezüglich der Definition zum Normalzustand und somit zur Referenzperiode zu finden, ist schwer. Um eine einheitliche Vorgehensweise zu definieren, bietet sich an:

1. Ausschluss der nicht homogenen Anteile aus der Zeitreihe (zwingend notwendig)
2. Prüfung der Mittelwerte verschiedener Zeiträume
3. Verwendung einer Konvention

Im Falle der Zeitreihe Köln-Bonn (Stations-ID 2667) wird der Anteil vor 1960 ausgeschlossen. Die Mittelwerte für verschiedene Perioden liegen bei:

von	bis	Mittelwert mm/a
1961	1990	803
1960	2010	815
1970	2000	801
1980	2010	839

Die Verwendung von 1961-1990 oder 1980-2010 wird empfohlen, wobei 1980-2010 die letzten Jahre als kritischer einstuft.

4.3 Verifikation

Ziel der Verifikation ist die Bestätigung, dass ein Index bekannte kritische Situationen anzeigt. Hierzu gehören:

- Definition, was unter kritischer Situation verstanden wird
- Analyse verschiedener Indizes und Aggregationsstufen und Vergleich mit den kritischen Situationen

Für die Definition von kritischen Situationen bietet sich zuerst der Zufluss zur Talsperre an, dann der Speicherinhalt selbst. Der Inhalt kann irreführend sein, wenn Wasserspiegelabsenkungen bewusst vorgenommen wurden, z.B. im Rahmen von Bauvorhaben.

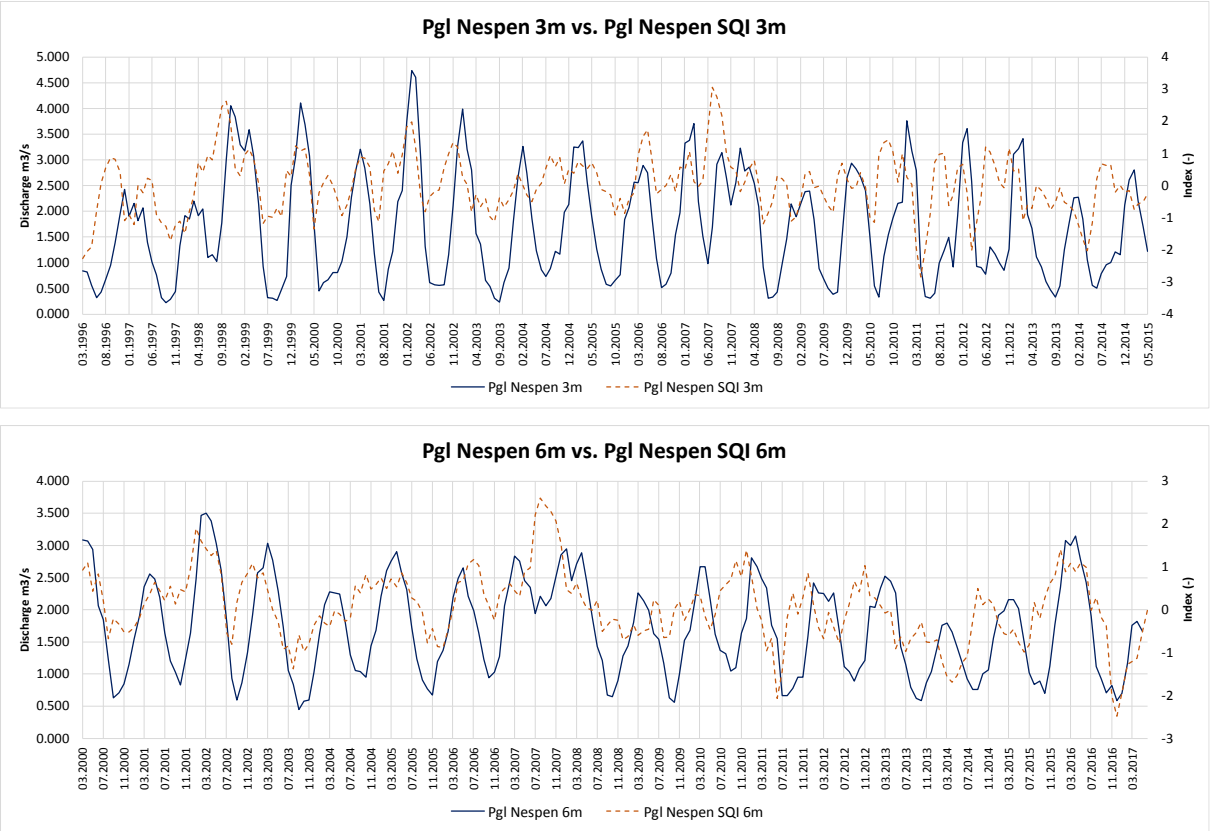
4.3.1 Verifikation auf Basis des Zuflusses

Wird der Zufluss für die Definition von kritischen Situationen verwendet, dann gilt zu klären, welche Situation in der Vergangenheit zu Wasserstress geführt hat. Dabei ist zu bedenken, dass Wasserstress direkt abhängig vom Verbrauch ist und in der Vergangenheit liegende Perioden eventuell nur deshalb ohne Stress geblieben sind, weil der Verbrauch geringer war als heute.

Für die Analyse des Zuflusses bietet sich an, eine statistische Analyse vorzunehmen, oder einen Index zu verwenden, der wie der SPI funktioniert, nur auf den Abfluss angewandt wird. Dieser Index ist bekannt als Standardized Streamflow Index (SSI) oder Standardizes Flow Index (SFI) oder einfach SQI.

Entscheidend für die Analyse des SQI ist die Aggregationsperiode.

Ein erster Vergleich erfolgt auf Basis des gemessenen Zuflusses und des SQI, wobei meistens die 12 Monatsaggregation oder ein Vielfaches davon aufgrund der jährlichen Saisonalität die beste Übereinstimmung liefert. Der Zufluss muss dabei mit der gleichen Anzahl an Monaten aggregiert werden wie der Index. Ein Beispiel ist in folgender Abbildung 11 gegeben:



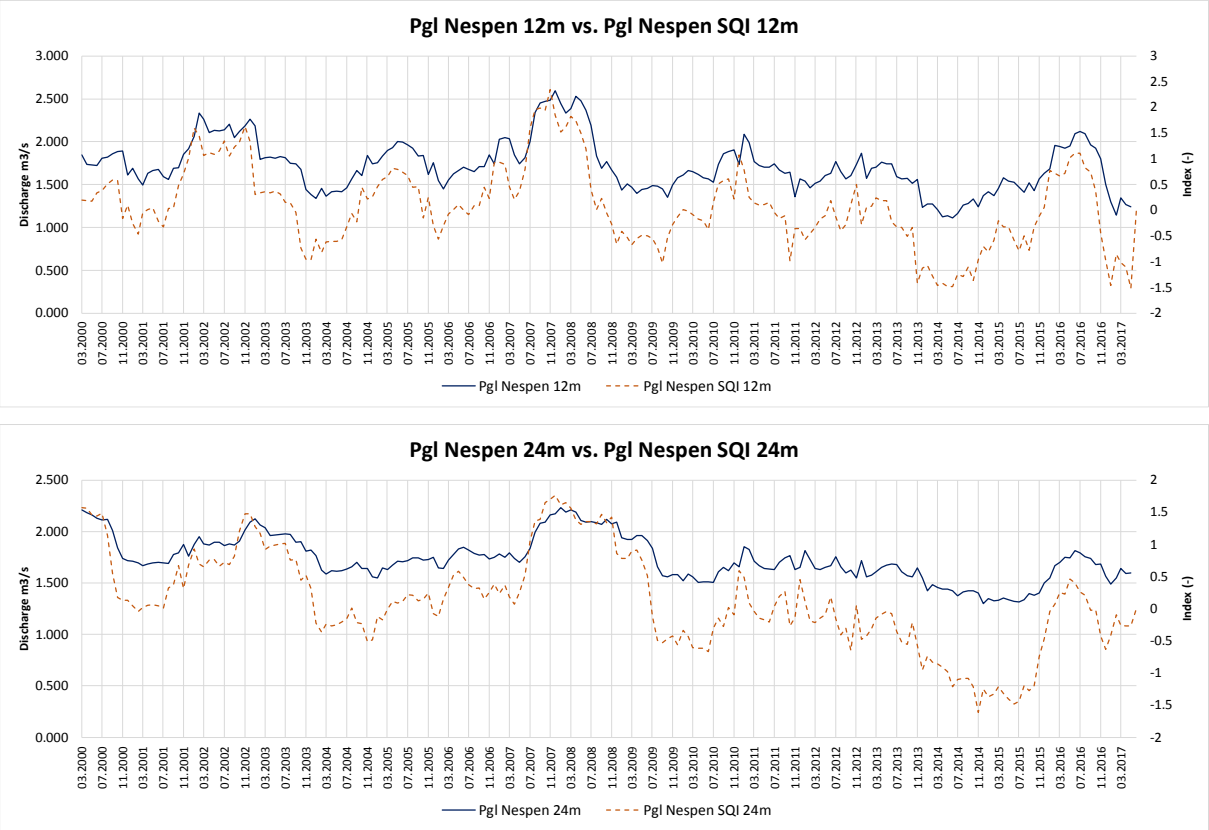


Abbildung 11: Vergleich zwischen aggregiertem Zufluss und SQI für verschiedene Aggregationszeiträume

Ein Vergleich der Ganglinien lässt nur schwer erkennen, ob kritische Perioden auch durch einen Index erkannt wurden. Es ist leichter zu erkennen, wenn die Parameter einander farblich gegenüberstellt werden. Das ist oftmals wesentlich hilfreicher als eine Korrelationsanalyse, da bei der Korrelation zeitliche Verschiebungen nicht leicht erkannt werden und das Ergebnis verzerren können. In den folgenden Abbildungen bedeuten blaue Farben nasse Perioden und gelbe Farben trockene Perioden.

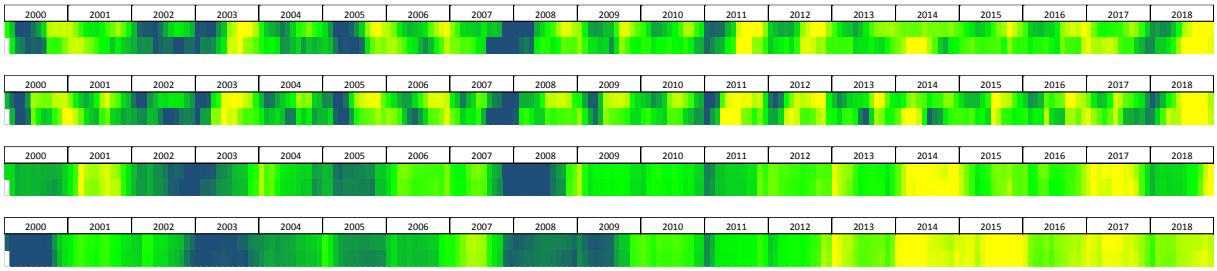


Abbildung 12: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m aggregierter Abfluss (oben) mit SQI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km²

In Abbildung 12 sieht man, dass agreggierter Abfluss und Abflussindex bei 12 Monaten Aggregationsperiode am besten zusammenpassen. Dies ist wie bereits oben erwähnt aufgrund der jährlichen Saisonalität von Abfluss zu erwarten.

Die nächste Erweiterung ist ein Vergleich zwischen dem aggregiertem Abfluss und dem SPI, wie in folgender Abbildung dargestellt.

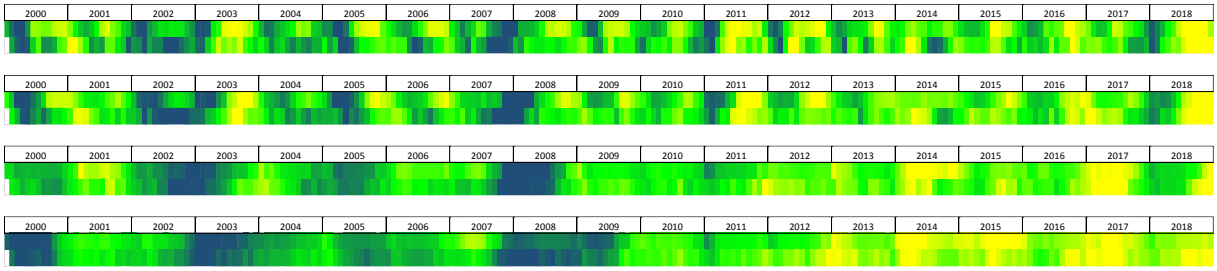


Abbildung 13: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m aggregierter Abfluss (oben) mit SPI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km²

Es ist zu erwarten, dass längere Aggregationsperioden eine bessere Übereinstimmung liefern als kürzere, da sich eine kurze Trockenphase im Niederschlag nicht sofort im Abfluss zeigt. Hier wird der Übergang von meteorologischer Trockenheit zu hydrologischer Trockenheit sichtbar.

Wird der Abflussindex mit dem SPI gegenübergestellt, entsteht die beste Übereinstimmung, ganz besonders bei langen Aggregationsperioden. Dies ist beispielhaft in folgender Abbildung dargestellt:

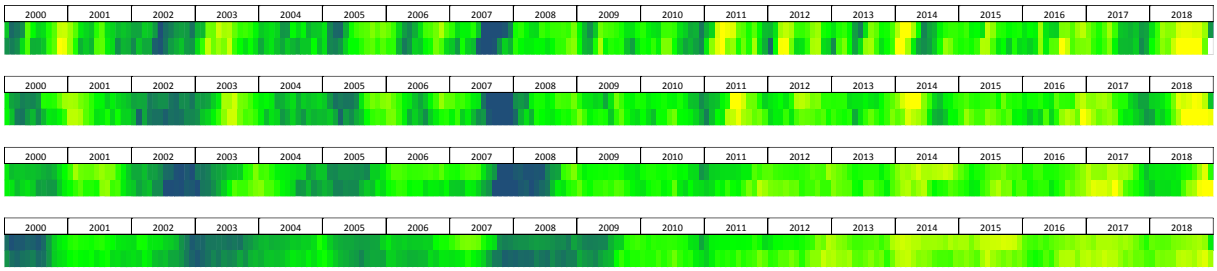


Abbildung 14: Gegenüberstellung 3m, 6m, 12, 24m Abflussindex SQI (oben) mit SPI (unten) aus einem Einzugsgebiet mit ca. 45 km²

Der nächste Schritt in der Verifikation ist die Darstellung einer Unterschreitung von Schwellwerten. Nachfolgend sind drei beispielhafte Ergebnisse vergleichend dargestellt. Die obere Reihe zeigt den aggregierten Abfluss über 12 Monate an mit einem Schwellwert, welcher dem Perzentil 0.15 entspricht. Die mittlere Reihe zeigt den Abflussindex von -1 und die unterste Zeile den SPI mit verschiedenen Schwellwerten. Die Farben zeigen, ob der jeweilige Schwellwert unterschritten (blau) wird oder nicht (grün). Variiert man den Schwellwert des SPI, lässt sich erkennen, welcher SPI-Schwellwert in der Vergangenheit am besten eine Schwellwertunterschreitung im Abfluss angezeigt hätte. Im Beispiel unten ist der SPI mit Schwellwerten von -1.0, -0.9 und -0.8 von oben nach unten dargestellt.

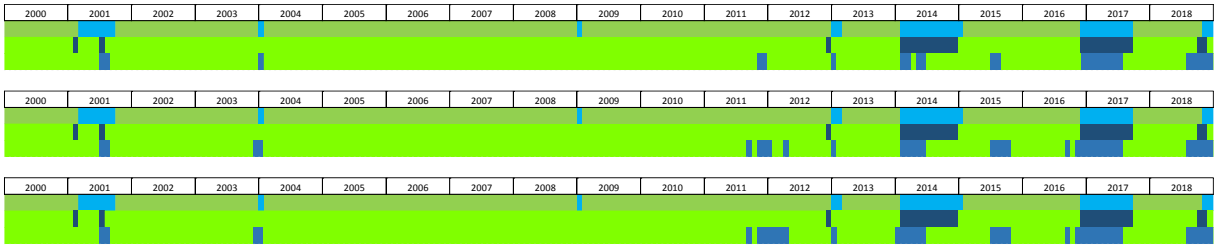


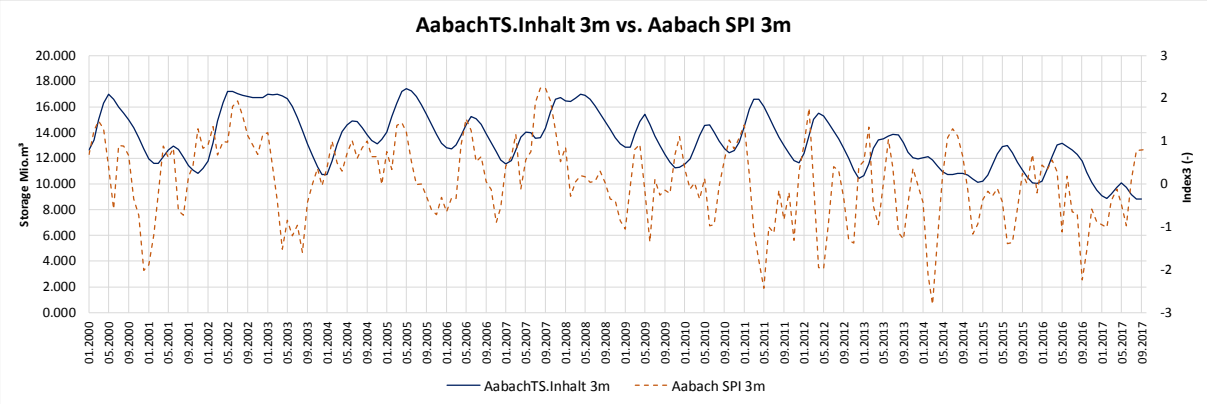
Abbildung 15: Gegenüberstellung 12M Abfluss, 12M Abflussindex SQI und 12M SPI für SPI -1 (oberes Bild), -0.9 (mittleres Bild) und -0.8 (unteres Bild)

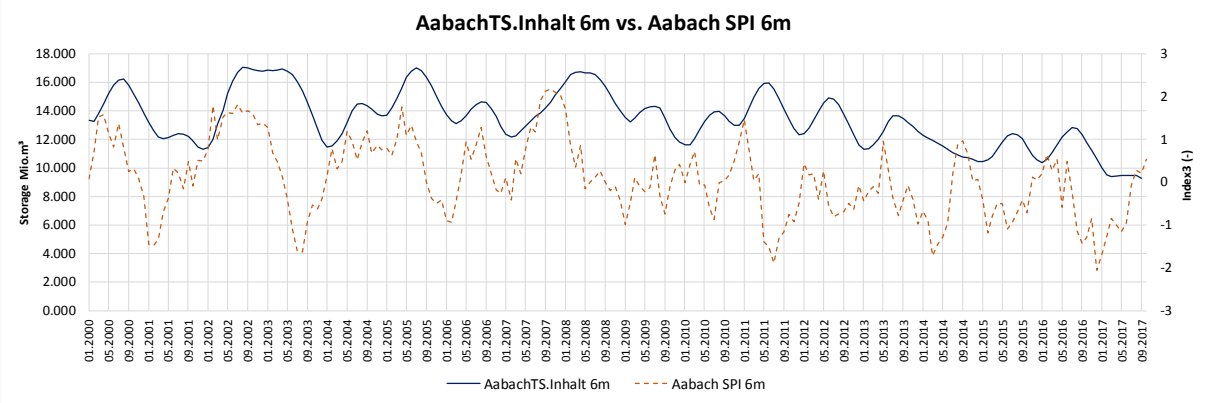
Der Idealfall ist, wenn der SPI vor dem Abfluss das Erreichen des Schwellwertes anzeigt. In allen drei Fällen produziert der SPI Fehlalarme im Jahr 2001 und 2002 und einen im Jahr 2015. Im Übergang 2008 zu 2009 ergibt sich eine kurze Schwellwertunterschreitung im Abfluss, die aber vom SPI nicht erkannt wird. Die restlichen Unterschreitungen des Schwellwertes im Abfluss werden erkannt und dies zum Teil mit Vorlaufzeit.

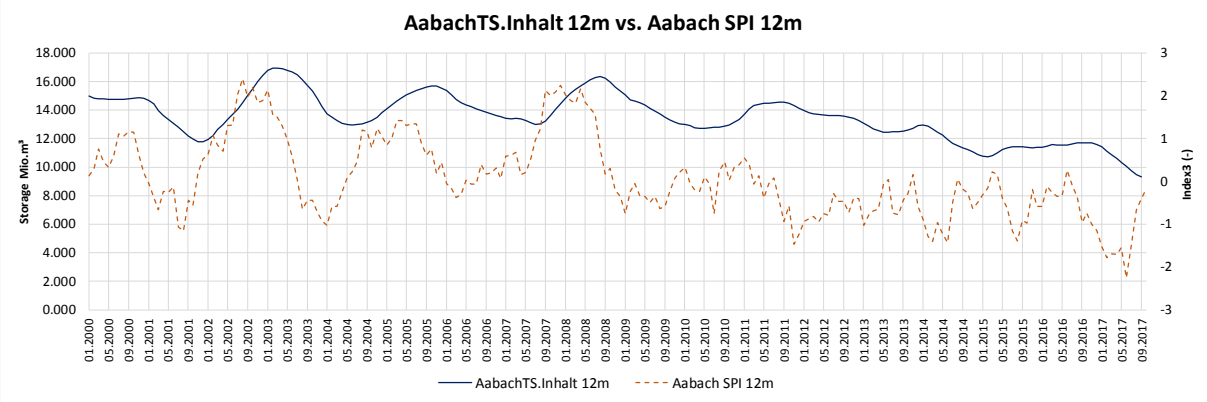
4.3.2 Verifikation auf Basis des Speicherinhaltes

Bei Verwendung des Speicherinhalts müssen zuerst alle Zeiträume identifiziert werden, in denen der Stauinhalt aufgrund von z.B. Wartung bewusst reduziert wurde. Diese sind für eine Analyse ungeeignet. Danach ist das Entnahmeverhalten aus der Talsperre zu analysieren, weil auch dies zu einer Reduktion im Inhalt führen kann, die nicht mit hydrologischen Ursachen verbunden war. Generell wird man bei kleinen Anlagen den Einfluss des Niederschlags und somit des SPI schneller erkennen als bei Überjahresspeichern.

Im Beispiel unten ist sehr deutlich zu erkennen, wie mit zunehmender Länge des Aggregationszeitraums ein Zusammenhang erkennbar wird. Der kurze Aggregationszeitraum ist nicht aussagekräftig, obwohl eine abnehmende Tendenz im Speicherinhalt bereits sichtbar ist. Ab 12 Monaten Aggregationsperiode ist das Ausmaß der Trockenheit deutlich.







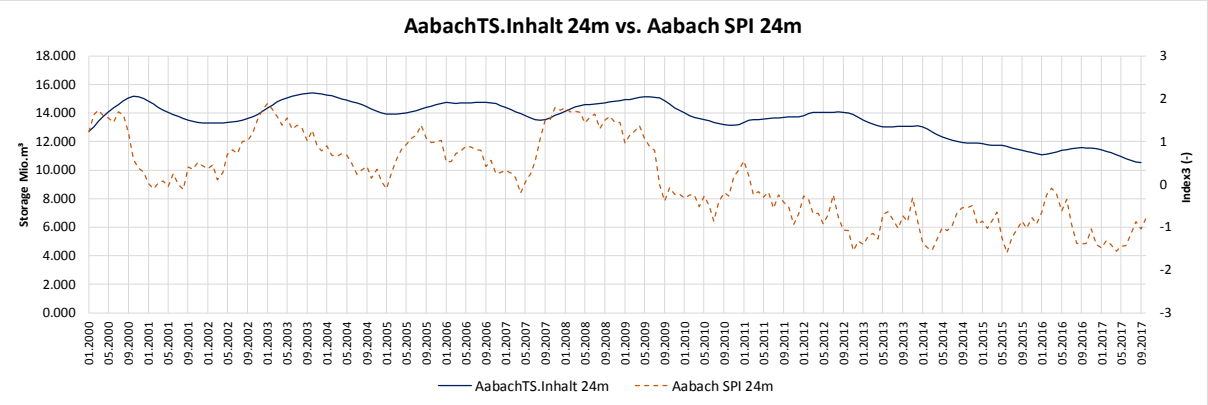


Abbildung 16: Vergleich zwischen Speicherinhalt und SPI für verschiedene Aggregationszeiträume

Seit 2011 sind die Niederschläge im gezeigten Beispiel unterdurchschnittlich und der Talsperreninhalt wäre noch weiter abgesunken, wären nicht bereits Gegenmaßnahmen ergriffen worden.

Die Möglichkeit einer Vorhersage auf Basis eines Indizes funktioniert hier anschaulich bei Nassperioden. Im Bild unten ist die obere Reihe der Inhalt, die untere der SPI.

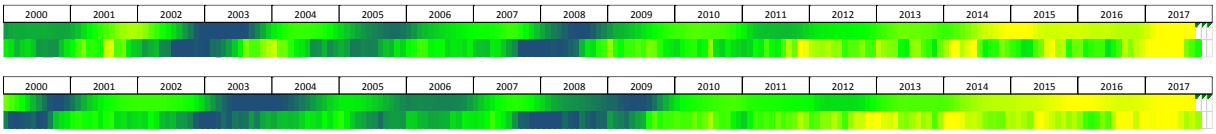


Abbildung 17: Gegenüberstellung 12M und 24M gleitendes Mittel des Inhaltes zu SPI 12M und 24M (Aabachtalsperre)

Die gelben Elemente im SPI (jeweils die untere Reihe in beiden Bildern) deuten auf unterdurchschnittlichen Niederschlag hin. Ab dem Jahr 2011 zeigen sich bereits deutliche Defizite, die im Speicherinhalt ab 2014 zum Tragen kommen.

Wie für den Abfluss bereits erläutert, so können auch Speicherinhalt, Abflussindex und SPI vergleichend dargestellt werden. In nachfolgendem Bild zeigt die obere Reihe den Speicherinhalt mit Unterschreitungen von einem Schwellwert von 0.15 Perzentil an. Die mittlere Reihe zeigt den Abflussindex mit einem Schwellwert von -1 und die unterste Zeile den SPI mit einem Schwellwert von -0.8. Nun zeigt sich, dass im Jahr 2003 die Schwellwertunterschreitung des Index zu spät kommt, das Jahr 2001 die Trockenheit einleitet, die aber noch nicht im Speicherinhalt sichtbar wird und der „Fehlalarm“ im Jahr 2015, wo der Abflussindex seinen Schwellwert nicht unterschreitet, doch keiner war, weil der Speicherinhalt seinen Schwellwert unterschreitet.

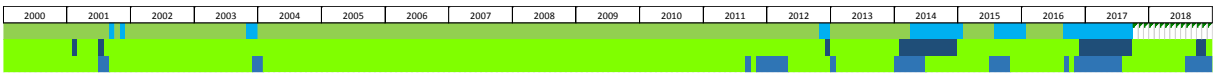


Abbildung 18: Vergleich zwischen Schwellwertunterschreitungen von Speicherinhalt (oben), Abfluss (mitte) und SPI (unten)

4.3.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend besteht die Verifikation aus folgenden Schritten:

- Betrachtung von langjährigen Ganglinien des Zuflusses und/oder des Speicherinhalts und Bestimmung von Aggregationszeiträumen und dazugehörigen Schwellwerten, die das Auftreten von kritischen Situationen am besten wiedergeben.
- Bestimmung des Aggregationszeitraums und Schwellwerts des SPI, der die Unterschreitungen des zuvor bestimmten Schwellwerts im Zufluss/Speicherinhalt am besten wiedergibt, im Idealfall sogar mit etwas Vorlauf vorhersagt.

4.4 Integration in den Betrieb

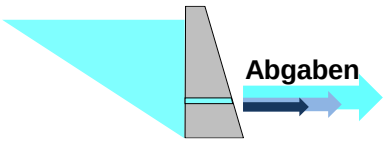
Jede Talsperre und jedes Talsperrensystem besitzt eine eigene Charakteristik und darauf angepasste Betriebsregeln. An diesem Prinzip ändert sich auch durch den Einsatz von Indizes nichts.

Index-basierte Betriebsregeln sind als Ergänzung zu bestehenden Regeln zu verstehen. Sie wirken auf Betriebsregeln nur temporär, wenn es notwendig ist, und sollten klare An- und Ausschaltkriterien besitzen. Folgende generelle Empfehlungen werden zur Anwendung von Index-basierten Regeln ausgesprochen:

- Die Analyse von mehreren Indizes wird empfohlen, insbesondere SPI, SPEI und SQI (oder SSI).
- Die Referenzperiode sollte nicht über das Jahr 2010 hinaus gesetzt werden, da spätestens seit 2014, teilweise schon früher, eine Tendenz zu unterdurchschnittlichen Niederschlägen festgestellt werden kann. Diese Tendenz zeigt sich nur in langen Aggregationsperioden.
- Das Ergreifen von Gegenmaßnahmen sollte nicht erst ab einem Indexwert von < –1,5 beginnen (nach WMO kritisch trocken), sondern besser schon früher, da sonst die Gefahr besteht, dass Gegenmaßnahmen zu spät greifen und drastisch sein müssten, um für eine Erholung des Systems zu sorgen.
- Betriebsregeln zur Trockenheitsvorsorge, wie diese weiter unten aufgeführt sind, sollten über einen längeren Zeitraum bestehen bleiben, damit überhaupt eine Wirkung erzeugt werden kann, selbst wenn der Index wieder über den gewählten Schwellwert ansteigt.
- Es ist ein Ausstiegskriterium zu definieren, um Index-basierte Regeln wieder auszuschalten. Dieses Kriterium sollte mehrdimensional sein, z.B. Speicherinhalt plus Index selbst berücksichtigen. Für ein Ausstiegskriterium mittels Index sollte eine lange Aggregationsperiode (>= 12 Monate) gewählt werden, um ein häufiges An/Aus zu vermeiden (siehe vorangegangener Punkt).
- Es kann hilfreich sein, den kleinsten Indexwert aus verschiedenen Aggregation >9 Monate, z.B. 12, 15, 18, usw. zu verwenden, wenn sich zeigt, dass alle Aggregationszeiträume relevant sein können.
- Es ist anzustreben, eine Indexberechnung operativ durchzuführen, d.h. regelmäßig und automatisiert.

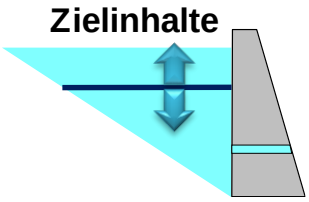
Der TASK Ansatz eignet sich in erster Linie zur Früherkennung von Trockensituationen. Insofern geht es bei seiner Anwendung darum, rechtzeitig einem Wassermangel zu begegnen. Aus diesem Grund stehen die drei folgenden Optionen für eine Integration in Betriebsregeln im Vordergrund, die in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

1. Reduzierung der Abgaben in den Unterlauf
2. Anpassung von Zielinhalten
3. Anpassung von Entnahmen



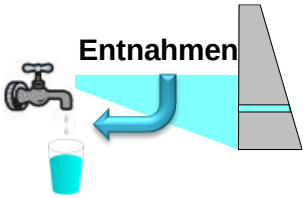
Reduzierung der Abgaben in den Unterlauf

- Lamellenplan (zur Beschreibung der Regelabgabe)
- Niedrigwasseraufhöhung
- Mindestabgabe
- …



Anpassung von Zielinhalten

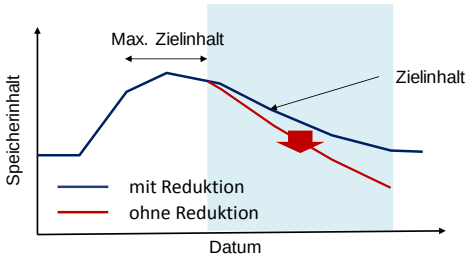
- Bewirtschaftung des HW-Schutzraumes
- Anpassung von Lamellen
- ...



Anpassung von Entnahmen

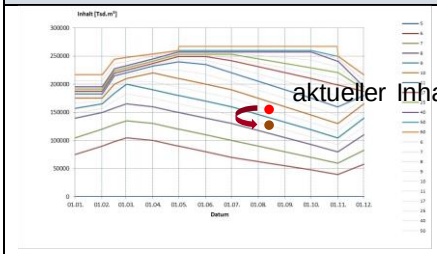
- Reduzierung von Entnahmen
- Begrenzung von Kontingenten
- Start eines Kontingentierungsplans
- ...

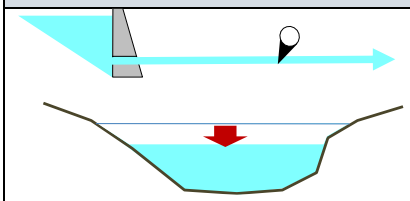
4.4.1 Reduzierung von Abgaben in den Unterlauf



Die Reduzierung von Abgaben in den Unterlauf ist ein naheliegendes Prinzip, um in Trockenphasen fallenden Wasserständen in Talsperren entgegen zu wirken. Der Zeithorizont bezieht sich im Wesentlichen auf den Sommer bis in den Herbst bis zur nächsten abflussintensiven Phase.

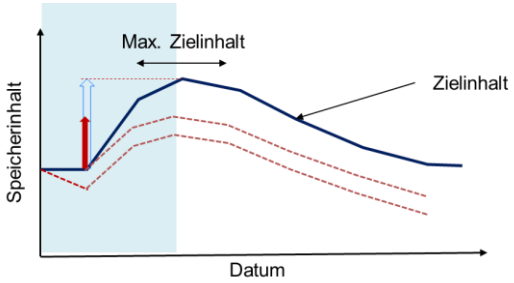
Der Index, basierend nur auf Messwerten oder auf Messwerten mit Vorhersagen, wird regelmäßig berechnet und geprüft, ob er einen zuvor festgelegten Schwellwert unterschreitet. Ist dies der Fall, dann sind in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsregeln unterschiedliche Handlungen möglich.

Lamellenplan	
	• Es wird die Abgabe der nächst tiefer liegenden Lamelle verwendet, was einer Verschiebung des Lamellenplans nach oben entspricht. • Es wird der gesamte Lamellenplan gegen einen extra für Trockenzeiten entwickelten Lamellenplan ausgetauscht. • Es kann die zur Lamelle gehörende Abgabe reduziert werden

Mindestwasseraufhöhung oder Mindestabgabe	
	• Die Abgabe nach Unterstrom wird reduziert. Um welchen Betrag muss zuvor festgelegt und abgestimmt werden. • Die Abgabe nach unten wird proportional zum Zufluss je Zeitschritt gefahren, aber immer kleiner als der Zufluss. • Es wird ein Monatskontingent des Abflusses festgelegt, welches flexibel abgefahren werden kann. Die Menge entspricht einer Monatssumme mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, z.B. Monatssummen eines MNQ, im Extremfall NNQ. Ein Mindestwert in m³/s darf nicht unterschritten werden. Das Kontingent kann dem monatlichen MNQ oder NNQ folgen und ergibt somit ein wenn auch reduziertes, so doch natürliches Abflussregime.

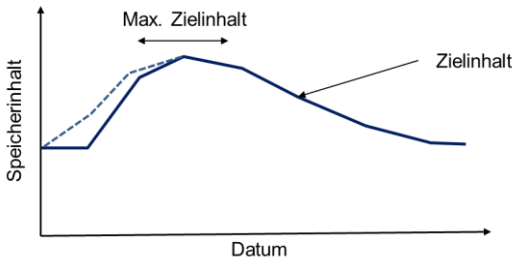
Es ist auch möglich, die oben genannten Ansätze zu kombinieren, wobei ein Zustand, z.B. der Speicherinhalt, als Führungsgröße benötigt wird, wann welche Form der Reduktion gestartet, gekoppelt und wieder beendet werden soll.

4.4.2 Anpassung von Zielinhalten



Die Anpassung von Zielinhalten ist in erster Linie auf die Erreichung einer ausreichenden Füllung im Frühling ausgerichtet. Der Zeithorizont für Maßnahmen ist somit der Winter bis in den Frühling hinein. In dieser Zeit wird der Speicherinhalt aus Gründen des Hochwasserschutzes üblicherweise reduziert. Mit einer Index-basierten Vorhersage kann diese Inhaltslamelle bewirtschaftet werden.

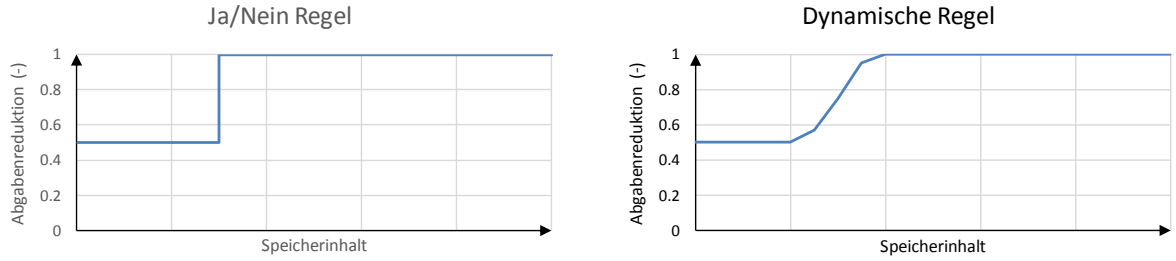
Es geht hier nicht darum, in bestehende Hochwasserschutzräume dauerhaft einzugreifen und diese zu reduzieren, sondern es geht um die flexible Bewirtschaftung dieser Räume. Index-basierte Regeln nach dem TASK-Ansatz können die Füllungsphase früher einleiten, wenn unterdurchschnittliche Niederschläge im Februar bis April vorausgesagt werden und somit die Chance groß ist, dass ein Auffüllen bis zum Zielinhalt bis Ende April nicht gelingen wird.



Die Umsetzung einer Regel zur dynamischen Bewirtschaftung von Zielinhalten verlangt das Zusammenspiel von Prüfungen mit unterschiedlichen Zeithorizonten. Damit ist gemeint, dass zum einen a) über den TASK Ansatz die Gültigkeit der Trockenheitstendenz regelmäßig analysiert wird und b) parallel die Prüfung kurzfristiger Hochwasserereignisse stattfindet.

Dabei besitzt a) einen Zeithorizont von Monaten und b) von wenigen Tagen. Zeigt b) an, dass mit einem Hochwasser zu rechnen ist, welches eine signifikante Füllung der Talsperre zur Folge hat, so dient b) als Ausschaltkriterium für a). Die Füllung der Talsperre kann über Vorhersagen des DWD plus Modell oder über den Ansatz des Erwartungsvolumens oder beides evaluiert werden. Die entsprechenden Nachweise sind in Kapitel 4.5 genannt.

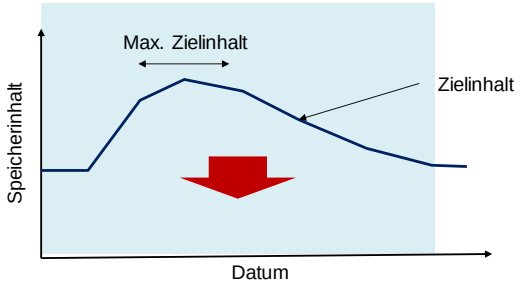
Der Umfang einer dynamischen Bewirtschaftung der oberen Lamelle richtet sich nach der prognostizierten Entwicklung des Index und der Stauinhaltsentwicklung. Je niedriger der Index, d.h. je negativer, umso größer ist das Risiko, den Zielinhalt nicht zu erreichen. Da es sich bei dieser Vorsorgeregel um einen Kompromiss zwischen Wassersparen und Hochwasserschutz handelt, geht es nicht darum, den Zielinhalt um jeden Preis erreichen zu wollen. Dies ist schon aus Gründen der Risikoabwägung und der Einhaltung von Mindestabgaben geboten. Deshalb ist es wichtig, diese Regel dynamisch zu gestalten, d.h. keine 0/1 oder Ja/Nein Bedingungen einzusetzen, sondern funktionale Beziehungen mit einer graduellen Umsetzung.



Beispielhaft ist in obiger Abbildung der Unterschied zwischen einer digitalen Ja/Nein und einer dynamischen Regel dargestellt. Die 0/1 oder Ja/Nein Regel würde ab der Unterschreitung eines bestimmten Speicherinhaltes eine abrupte Reduzierung der Abgaben auf 50 % vorsehen. Die Wirkung wäre sofort sichtbar. Um ein häufiges An/Aus bei Zuflussschwankungen zu vermeiden, muss diese Regel über einen zuvor bestimmten Zeitraum persistent gemacht werden, d.h. sie bleibt für einen Zeitraum eingefroren, auch wenn zwischenzeitlich der Speicherinhalt wieder gestiegen oder gefallen ist. Die dynamische Regel geht dagegen allmählich in den Zustand reduzierter Abgaben über und Schwankungen im Speicherinhalt würden sich gedämpft auf die Abgaben auswirken. Sogar ein An/Aus dieser Regel wäre kaum spürbar. Nach diesem Prinzip gestaltete dynamische Regeln sind mit einem höheren Aufwand zur Prüfung und Nachjustierung verbunden, passen sich aber der Führungsgröße (hier der Speicherinhalt) wesentlich besser an.

Eine Reduzierung der Abgaben für die Erreichung eines Zielinhaltes kann sich der Konzepte aus 4.4.1 bedienen. Hinzu kommt der benötigte AUS-Schalter als Gegenstück zur Risikoabwägung.

4.4.3 Anpassung von Entnahmen



Die Anpassung von Entnahmen stellt unter Umständen einen Eingriff in vertraglich geregelte Bereitstellungsmengen dar. Insofern ist dies nicht die erste Priorität, aber eventuell unvermeidlich, um größere Einbußen zu vermeiden. Nach dem Prinzip der rechtzeitigen Vorsorge wird es besser sein, über einen längeren Zeitraum nur 80 % bedienen zu können, als mit 100 % so lange weiter zu fahren, bis gar keine Entnahmen mehr möglich sind. Schlussendlich hängt das davon ab, ob Versorger Alternativen haben oder nicht.

Der Zeithorizont dieser Maßnahme erstreckt sich über das ganze Jahr. Eine Reduktion von Entnahmen erfordert die Abstimmung mit den an die Talsperre angeschlossenen Vertragspartnern. Eine Zusicherung, dass die einmal kommunizierte Menge dann auch für den mitgeteilten Zeithorizont tatsächlich geleistet werden kann, ist insofern kritisch, weil hier Vorsicht geboten ist, sollte die Trockenheit gravierender werden als ursprünglich angenommen. Mit anderen Worten, Zusagen können nur für einen beherrschbaren Zeitraum gegeben werden.

Die Reduktion von Entnahmen bedingt parallele Schritte, die hier nicht im Einzelnen erläutert werden. Es ist quasi der Eintritt in einen Kontingentierungsplan, der folgende Punkte beinhalten sollte:

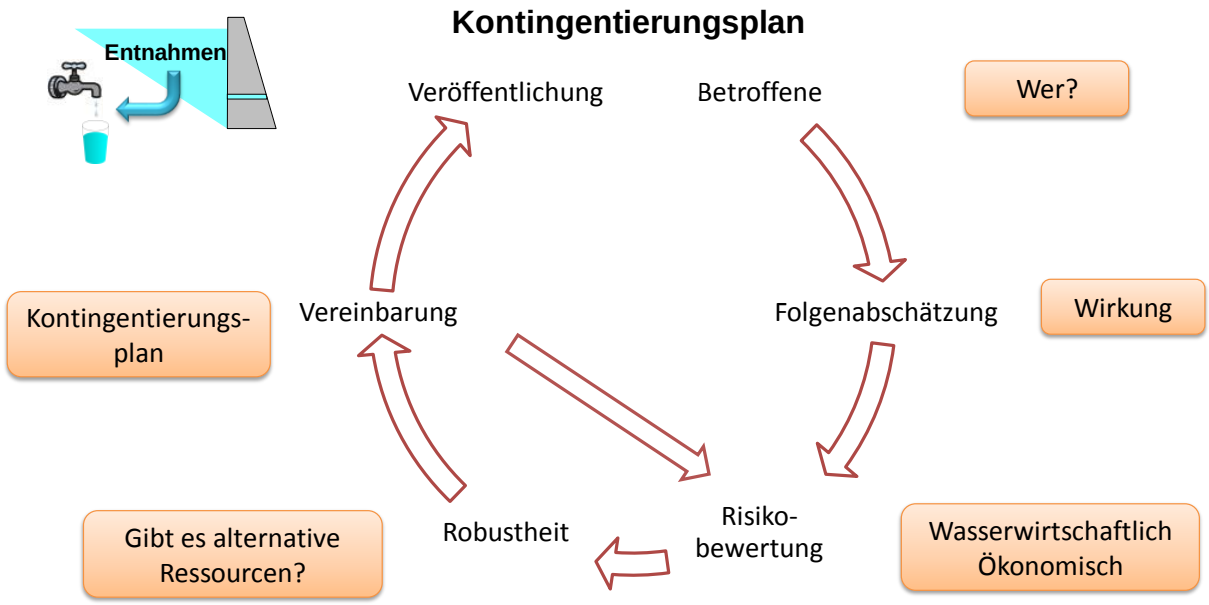


Abbildung 19: Komponenten eines Kontingentierungsplanes

Die Analyse der Komponenten in Abbildung 19 benötigt Zeit, insbesondere der iterative Anteil. Aus diesem Grund ist ein einfacher Einstieg in die Entnahmereduktion nicht möglich.

Kontingentierungsplan
Es wird empfohlen, einen Kontingentierungsplan in „normalen“ Zeiten auszuarbeiten, d.h. nicht in Zeiten von Wasserstress. Nur so wird ein guter und tragfähiger Kompromiss möglich sein, ohne die Emotionalität während Wassermangelzeiten als Einflussfaktor beachten zu müssen.

4.4.4 Praktische Implementierung

Ein Indexwert wird wie jede andere Führungsgröße behandelt, die eine Betriebsregel steuert. Im Unterschied zum aktuellen Speicherinhalt, welcher i.d.R. direkt aus dem Monitoringsystem abgelesen werden kann, muss der Indexwert erst berechnet werden. Da sich Indexwerte aufgrund der Aggregation wenig sprunghaft verhalten, ist keine kontinuierlich operationelle Berechnung notwendig. Als angemessenes Zeitintervall wird eine Berechnung einmal pro Woche empfohlen. Als Ablauf bietet sich an:

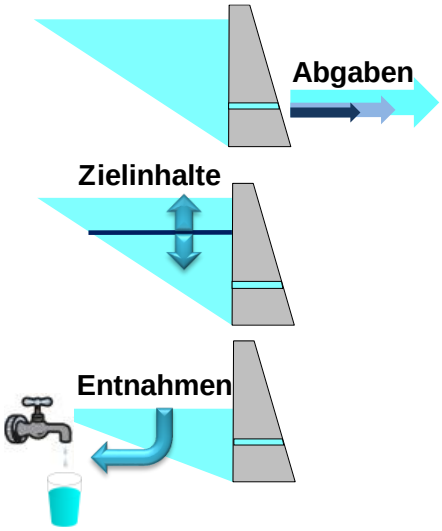
1. Täglicher Abruf der Stationen, deren Klimadaten in den zu berechnenden Index eingehen
2. Zeitreihen zu den Klimadaten mit den neu abgerufenen Daten verlängern
3. Ersatzwertbildung von Fehlwerten
4. Berechnung des Indizes je Station über alle notwendigen Aggregationszeiträume
5. Flächengewichtete Mittelung des Indizes aus den Stationen
6. Ablegen der neuen Indexwerte im Monitoringsystem

Es wird dringend empfohlen, diese Schritte zu automatisieren.

Bevor die Berechnung automatisiert wird, ist einmalig der Referenzzeitraum festzulegen. In einem ersten Berechnungslauf, der nur den Referenzzeitraum umfasst, wird der Index kalibriert und die Parameter abgelegt. Bei allen später durchgeführten automatischen Berechnungen darf der Index

nicht neu kalibriert werden, sondern wird mittels der kalibrierten Parameter erzeugt. Dadurch ist sichergestellt, dass die Basis zur Berechnung des Indizes über die Zeit nicht verändert wird.

Die Verknüpfung zu einer Betriebsregel wird am besten über eine einfache funktionale Beziehung festgelegt:



WENN

Index einen Schwellwert unterschreitet

UND

Begleitende Randbedingungen erfüllt sind

DANN

Reduktion der Abgaben

Abbildung 20: WENN-DANN Regel zur Integration eines Indizes

Wie oben bereits erwähnt, verhalten sich Regeln dynamischer, wenn anstatt „harter" An-/Ausschalter eine Funktion verwendet wird. Dabei kommt es aber darauf an, was genau durch den Index verändert wird. Funktionen sind nur dann eine Lösung, wenn der zu ändernde Zustand überhaupt graduelle Änderungen zulässt.

Tabelle 1: Implementierung von Indizes: Zu ändernde Größe, Handlung und Regel

Zu ändernde Größe	Handlung	Regel
Mindestabgabe	Zunehmenden Reduzierung bei abnehmendem Index	Funktion
Inhaltsabhängige Abgabe	Bei gleichem Stauinhalt geringere Abgabe bei abnehmendem Index	Funktion
Zuflussabhängige Abgabe	Das Verhältnis Abgabe zum Zufluss bei abnehmendem Index wird reduziert	Funktion
Niedrigwasseraufhöhung	Reduktion der Aufhöhung mit abnehmendem Index	Funktion
Umschalten auf andere Lamellen in einem Lamellenplan	Index unterschreitet Schwellwert	An-/Ausschalter
Umschalten auf eine Trockenregel	Index unterschreitet Schwellwert	An-/Ausschalter
Aktuelle Abgabe	Zunehmenden Reduzierung bei abnehmendem Index	Funktion
Abgabenkontingente pro Zeiteinheit	Reduktion der Kontingente bei abnehmendem Index	Funktion
Zielinhalt	Reduzierung des freibleibenden Stauinhaltes bei abnehmendem Index	Funktion

Zu ändernde Größe	Handlung	Regel
Kontingente für Entnahme	Reduktion der Kontingente bei abnehmendem Index	Funktion
Maximale Entnahmemenge	Reduktion bei abnehmendem Index	Funktion

4.5 Nachweise

Eine Veränderung von Betriebsregeln, im Sinne dieses Dokumentes, hat Einfluss auf das Verhalten des Talsperreninhalts, wenn auch nur temporär. Folglich wird für eine Genehmigung ein Nachweis über die Funktionsfähigkeit der Regeln geliefert werden müssen. Nachfolgend sind Schritte aufgeführt und mit Beispielen versehen, die einen Nachweis zur Funktionsfähigkeit erbringen. Unter Funktionsfähigkeit wird verstanden, dass sowohl dem Hauptzweck der Regeländerung, also der Begegnung von Trockensituationen, als auch dem Hochwasserschutz und der Talsperrensicherheit Rechnung getragen werden.

Voraussetzung zur Analyse ist eine Langzeitsimulation des Talsperrensystems mit einem Simulationszeitschritt auf Tagesbasis oder kürzer. Die Länge des Simulationszeitraums sollte nicht kleiner sein als 30 Jahre, den Referenzzeitraum des Indizes beinhalten und bis zum aktuellen Datum reichen, d.h. die Jahre ab 2014 bis heute umfassen.

Abgesehen von einer reinen Gangliniendarstellung kommen folgende Darstellungen und Auswertungen für Nachweise in Frage:

Monatliche Verteilung des Talsperreninhalts:

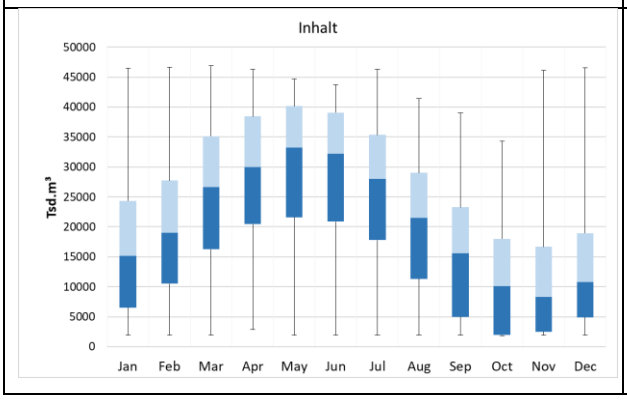
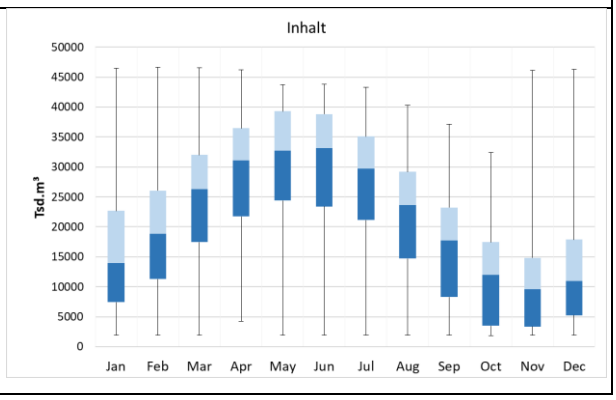
Ohne Anpassung	Mit Index-basierter Regel
	

Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der monatlichen Verteilung des Talsperreninhalts im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“

Die monatliche Verteilung des Talsperreninhalts mit Median, 25- und 75-Perzentil sowie Min und Max zeigt die Veränderung über das Jahr inklusive der Spannweite zwischen Min und Max. Im direkten Vergleich zwischen vorher/ nach Anpassung mit einer Index-basierten Regel wird deutlich, in welchen Monaten die Änderung wirkt und ob es Auswirkungen auf die Extrema gibt. Im Idealfall heben sich die Minimalwerte an und die Maximalwerte bleiben bestehen. Dies wäre der erste Hinweis darauf, dass es keine Beeinflussung im Hochwasserbereich gibt.

Monatliche Verteilung des Talsperreninhalts mit Perzentilen:

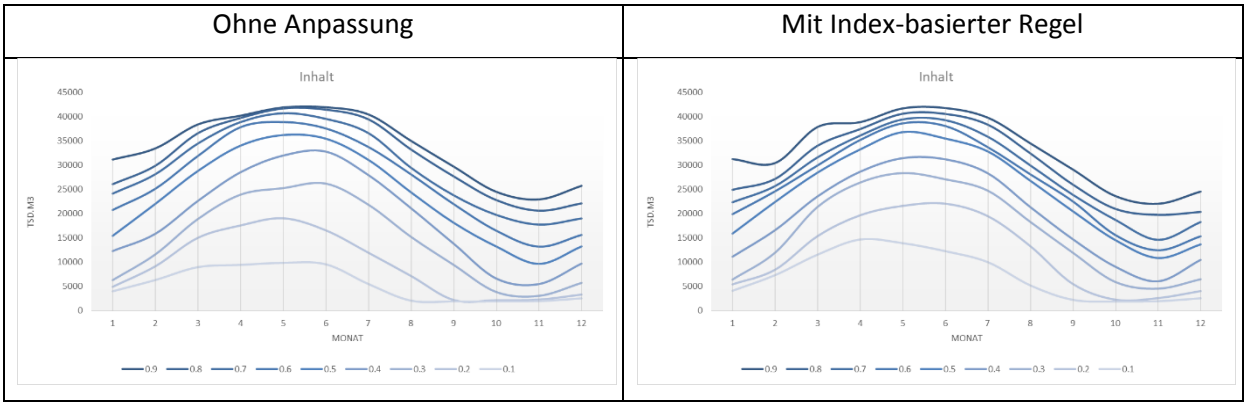


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der monatlichen Verteilung des Talsperreninhalts mit Perzentilen im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“

Die Perzentile 0.1 bis 0.9 geben Aufschluss über Veränderungen im Detail. So wird im Beispiel sichtbar, wie sich die Perzentile mehr stauchen, ohne das 0.9 Perzentil anzuheben, mit Ausnahme von Januar und Februar. Die unteren Perzentile werden generell angehoben und in den Sommer/Herbst hinein gestreckt. Der Zweck dieser Darstellung ist identisch wie die monatliche Verteilung und dient zur Veranschaulichung, dass die neue Betriebsregel im unteren Bereich des Speicherinhalts wirkt, aber nicht im oberen.

Häufigkeitsanalyse der Abgaben:

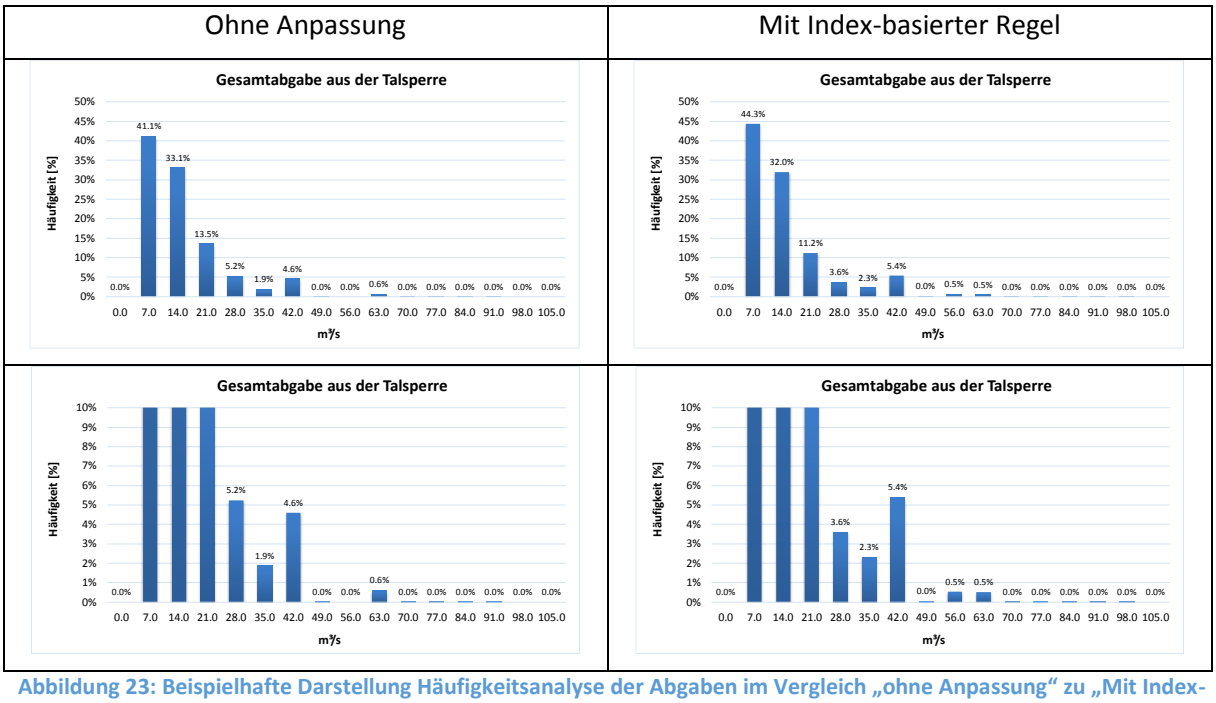


Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung Häufigkeitsanalyse der Abgaben im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“

Die Häufigkeitsanalyse wertet die Gesamtabgaben aus der Talsperre in den Unterlauf aus. Die Klasseneinteilung ist so zu wählen, dass die hohen Werte in Bezug auf kritische Zustände im Unterlauf beurteilt werden können. Im Beispiel sind die Darstellungen in der y-Achse auf 10% begrenzt. Man erkennt, dass die Abgaben im Bereich über 56 m³/s um knapp 1% angestiegen sind, aber nie 70 m³/s erreichen. Diese Zahlen sind im Kontext der Betriebsregeln zu bewerten.

Anstiegsverhalten im Zufluss / Abfluss:

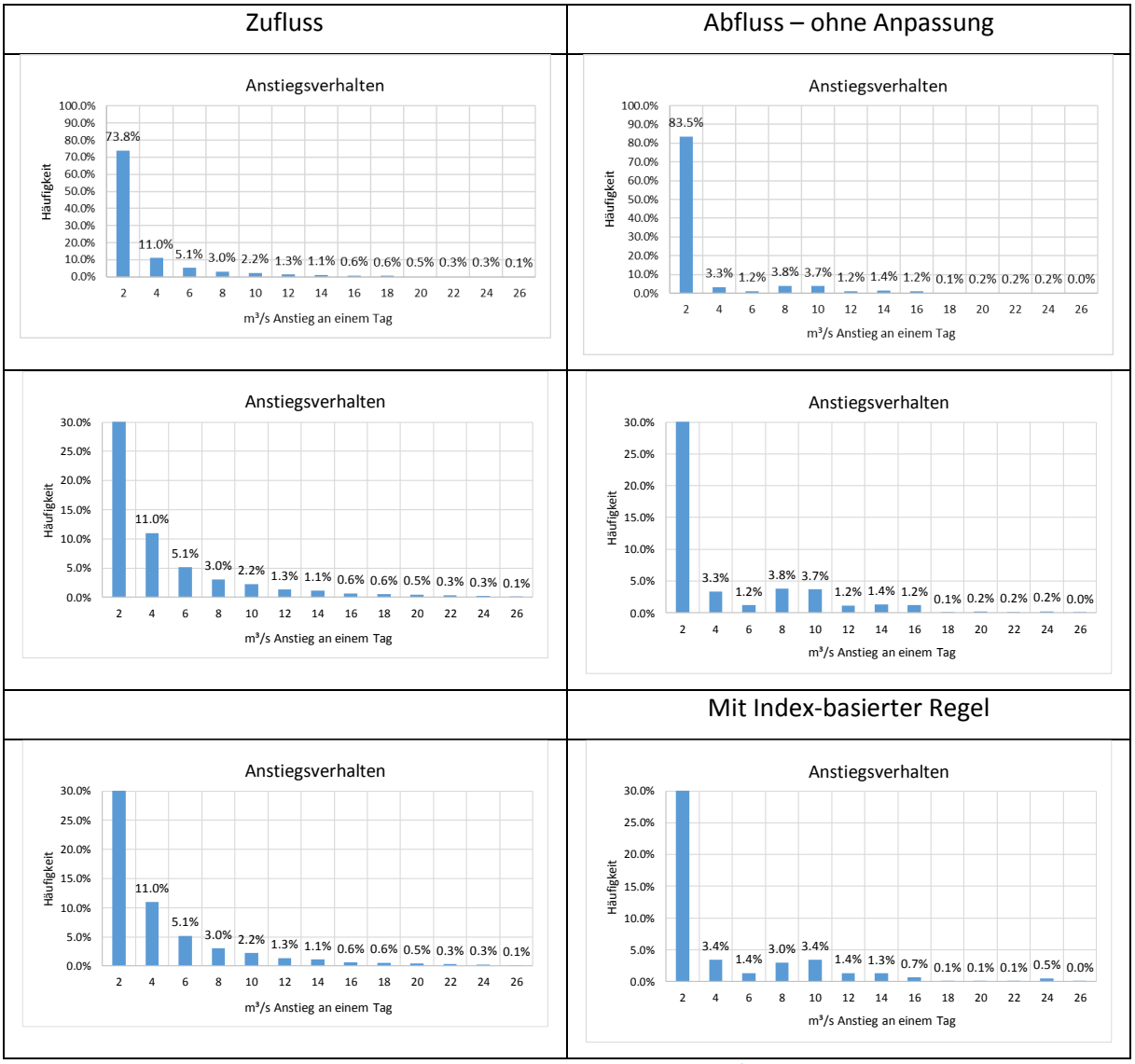


Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung Analyse Anstiegsverhalten im Zufluss/Abfluss im Vergleich „ohne Anpassung“ zu „Mit Index-basierter Regel“

Das Anstiegsverhalten in der Gegenüberstellung Zufluss zu Gesamtabgabe aus der Talsperre zeigt auf, wie sich die Abgaben aus den Betriebsregeln verhalten, wenn der Speicherinhalt aufgrund von Hochwasser ansteigt. Je stärker auf Inhaltsänderungen im Hochwasserfall reagiert wird, umso größer werden Abgabensprünge von einem Tag zum anderen ausfallen. Wenn Einsparungen der Abgaben auch im oberen Speicherinhalt wirken und ein Hochwasser auftritt, muss umso schneller reagiert und gegengesteuert werden. Folglich könnten höhere Abgabensprünge auftreten.

Im Beispiel ist dies nicht zu sehen, da nur marginal eine Änderung im Anstiegsverhalten sichtbar wird. Sollten Abgabensprünge deutlich ansteigen im Vergleich zum Zustand ohne Anpassung, dann kommt entweder eine Überarbeitung der Regeln in Betracht oder man denkt über Begleitmaßnahmen nach, wie z.B. eine Benachrichtigung der Unterlieger.

Analyse von Referenzpunkten im Gewässer:

Im Unterlauf der Talsperren wird es in der Regel neuralgische Punkte im Gewässer geben, die im laufenden Betrieb eine Rolle spielen, z.B. Beginn der Ausuferung an einem Querschnitt mit Schadenspotential usw. Eine Analyse der Überschreitung kritischer Schwellwert des Abflusses hilft bei der

Beurteilung verschiedener Varianten und zeigt die Veränderung gegenüber einem Referenzzustand auf.

Im Bild unten sind zwei Analysen in einem Diagramm dargestellt. Zum einen die Anzahl der Jahre, in denen der Grenzwert überhaupt überschritten wurde, und zum anderen die maximale Anzahl an Überschreitungen in einem Jahr. Natürlich sind auch andere Kriterien denkbar.

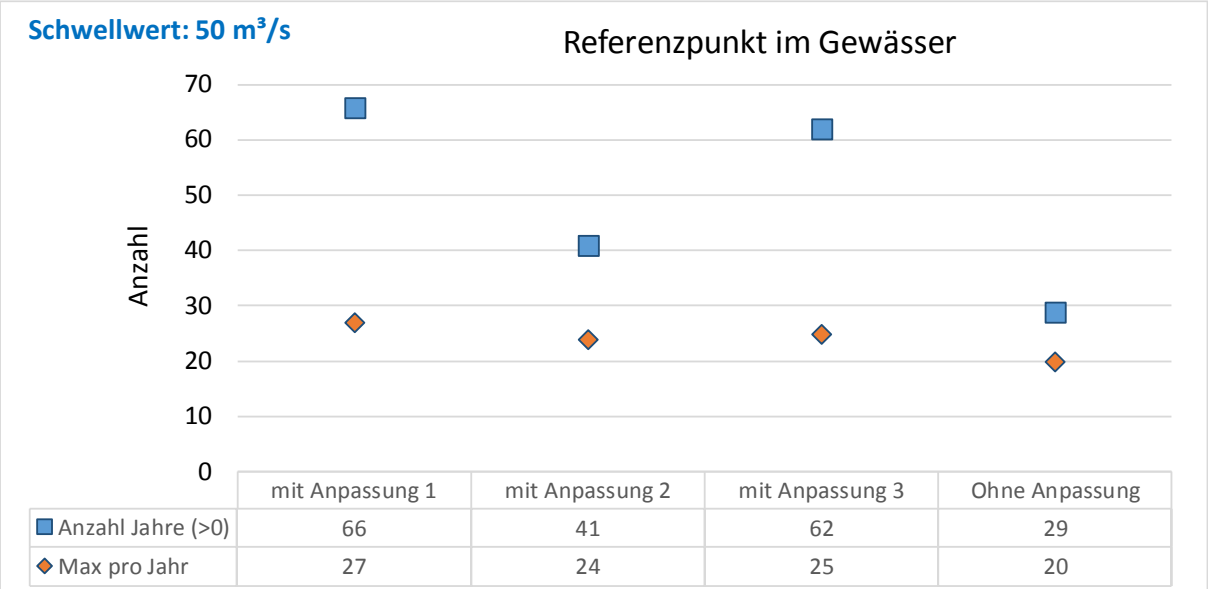
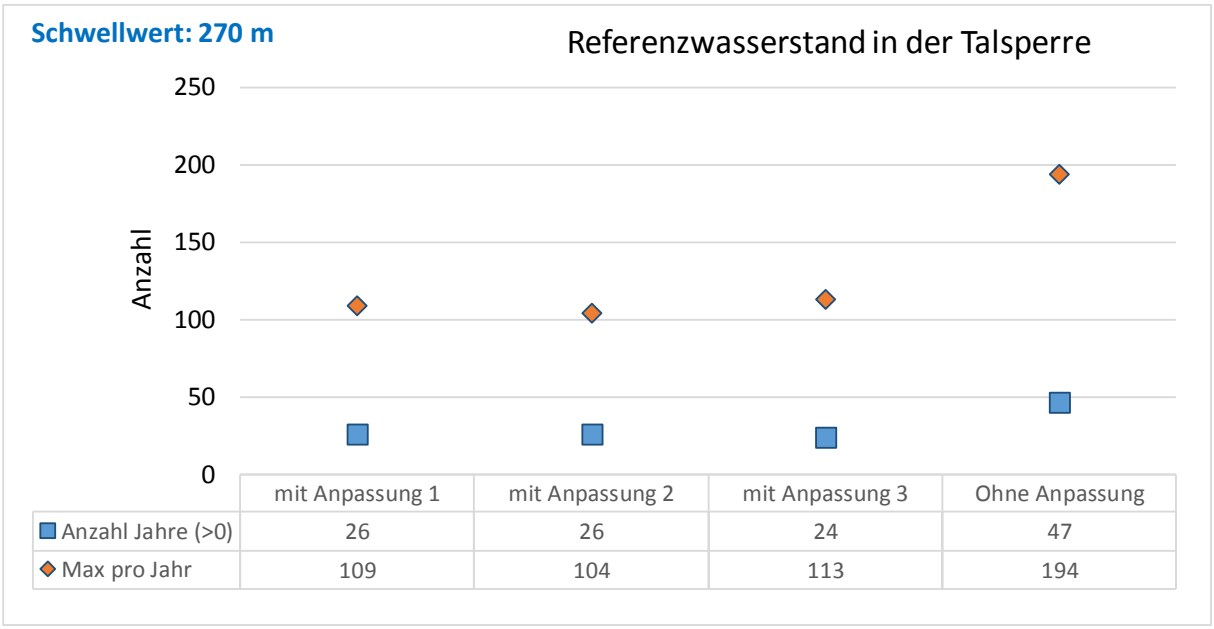


Abbildung 25: Beispiel Analyse von Referenzpunkten im Gewässer

Das Beispiel zeigt drei verschiedene Betriebsregeländerungen (1 bis 3) in denen jeweils ein Trockenheitsindex integriert wurde mit unterschiedlichem Einfluss auf die Abgabensteuerung. „Ohne Anpassung“ ist der Zustand der Betriebsregeln ohne einen Index. In allen Anpassungsszenarien erhöht sich die Anzahl an Jahren, in denen der Schwellwert überschritten wird, die maximale Anzahl pro Jahr bleibt dagegen relativ konstant.

Diese Art der Analyse ist auch sehr gut dazu geeignet, die positive Wirkung der Anpassung mit Indizes zu zeigen, indem der Speicherinhalt analysiert, wie oft ein Grenzwert nicht unterschritten wird.

Im Bespiel ist sehr gut zu erkennen, dass ein Wasserstand von 270 m mit Index-basierten Regeln deutlich seltener unterschritten wird als ohne.



	mit Anpassung 1	mit Anpassung 2	mit Anpassung 3	Ohne Anpassung
Anzahl Jahre (>0)	26	26	24	47
Max pro Jahr	109	104	113	194

Abbildung 26: Beispiel Analyse Referenzwasserstand in der Talsperre

Wasserkraft:

Wenn an Talsperren Wasserkraft erzeugt wird, so ist es interessant zu wissen, ob und wie sich Anpassungen auf die Wasserkraft auswirken. Handelt es sich um ein System mit mehreren Erzeugungspunkten, so können die Szenarien gemeinsam als Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand dargestellt werden.

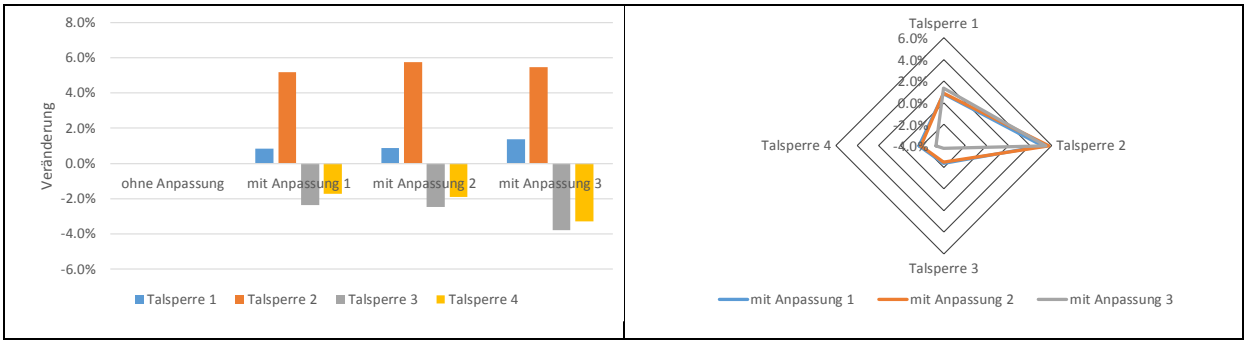


Abbildung 27: Beispielhafte Darstellung von Talsperren-bezogenen Veränderungen aufgrund von Anpassungsmaßnahmen

Im Beispiel zeigt sich Talsperre 2 und 1 als Profiteur einer Anpassungsänderung, während Talsperre 3 und 4 verlieren. Eine solche Auswertung kann auch monetär erfolgen.

5 INTEGRATION VON VORHERSAGEN

Saisonale Vorhersagen werden auf Grundlage von Klimamodellen erstellt. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Bachelorarbeit zum Thema Bias-Korrektur von Langzeitniederschlagsvorhersagen (Herber, 2017) erarbeitet, welche die Grundlage für Kap. 5.1 bildet.

5.1 Klimamodelle

Ein Klimamodell ist ein Konstrukt, mit dessen Hilfe eine Prognose zu zukünftigen Klimaereignissen getroffen werden kann. Klimamodelle werden anhand von computergestützten numerischen Simulationsmodellen erstellt. Eingangsparameter können je nach Art des Modells unterschiedliche Klimafaktoren sein (z.B. Niederschlag, Temperatur, Luftdruck, Verdunstung etc.). Dabei können Messdaten aus der Vergangenheit herangezogen und Erfahrungswerte ergänzt werden. Auch örtliche Faktoren wie landschaftliche Strukturen, Besiedelung oder Vegetation sind zu beachten. Klimamodelle werden zur Beurteilung von Gefahren und Risiken genutzt, sowie um langfristige positive wie negative Veränderungen einer Umgebung virtuell anhand von gesammelten Daten zu reproduzieren oder zukünftige Entwicklungen für eine Region bzw. einen Ort möglichst genau vorherzusagen. Vorhersagemodelle für Klimadaten können je nach Art eine unterschiedliche Komplexität aufweisen, sodass hohe Rechenkapazitäten und Speicherkapazitäten zur Erstellung und Unterhaltung notwendig sind. Es wird neben dem Verwendungszweck die Dimension, flächenbezogen oder räumlich, in einem regionalen oder globalen Klimamodell unterschieden (Spektrum, 2001).

5.1.1 Globale Klimamodelle

Ein globales Klimamodell ist ein erdumfassendes Modell. Dieser Modelltyp verbindet verschiedene Teilsysteme miteinander. Das heißt unterschiedliche Landschaftstypen wie beispielsweise Ozeane, Polkappen oder Landschaftsflächen werden in einem globalen Modell betrachtet. Wie die meisten Klimamodelle sind globale Klimamodelle dreidimensional. Das bedeutet, über den Planeten wird ein großes Raster gelegt, welches neben seiner Fläche eine Höhe hat. Der hiermit verbundene Rechenaufwand ist immens und kann in der Regel nur von Computerclustern oder Supercomputern bewältigt werden, da die Rechenleistung mit herkömmlichen Computern im Verhältnis zur benötigten Leistung zu gering wäre, dass es möglicherweise Tage, Monate oder Jahre dauert, bis die Berechnung eines kompletten Klimamodells durchgeführt wäre (Deutscher Wetterdienst DWD, 2020). In Anbetracht der Limitierung durch Computerleistungen und zeitlichem Aufwand sind in globalen Klimamodellen die Raster mit einer Größe von etwa 100 x 100 km die Regel. Globale Klimamodelle haben den Vorteil, bedingt durch ihre Größe und Komplexität, dass mehrere Parameter entweder isoliert betrachtet werden können oder mit Bezug zueinander bzw. in Wechselwirkung zueinander analysiert werden können. Bei diesen Parametern handelt es sich um Klimagrößen wie beispielsweise Niederschlag, Temperatur, Luftdruck und Sonneneinstrahlung. Ein weiterer wichtiger Punkt, welcher globale Klimamodelle auszeichnet, ist, dass zu den Eingabewerten mehrere Rechendurchläufe gestartet werden können. Dies hat den Vorteil, dass je nach Modell unterschiedliche Grundlagen zu Klimadaten und Analyse Varianten bzw. Szenarien berechnet werden. Ferner sind globale Klimamodelle die Grundlage für regionale feiner gerasterte Modelle (LfU Bayern, 2020).

Globale Klimamodelle besitzen deterministische und statistische Anteile. Innerhalb des TASK Projekts wurden im Wesentlichen die Daten des globalen Klimamodelles CFSv2 von NOAA (National Oceanic and Atmospheric Adimistration) verwendet. Im operationellen Modell CFSv2 von NOAA beginnt die Berechnung mit einer Korrelation zur Meeresoberflächentemperatur mit saisonaler Unterteilung auf der Basis von Daten ab 1982. Von der Meeresoberfläche aus werden die Landmassen berechnet (NOAA, 2014).

5.1.2 Regionale Klimamodelle

Regionale Klimamodelle beziehen sich im Regelfall auf Modell- und Berechnungsdaten aus globalen Klimamodellen. Im Unterschied zu globalen Modellen betrachten regionale Klimamodelle ein begrenztes Gebiet. Dies hat den Vorteil, dass durch die kleinere Auswertungs- und Betrachtungsfläche die Auflösung der Daten auf die zugeschnittene Region höher ist, als bei einem grobgerasterten globalen Klimamodell. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einzelne Umweltparameter wie beispielsweise Niederschlag, Wind, Luftdruck oder Temperatur viel feiner in Abhängigkeit zu ihrer Umgebung untersuchen zu können. Es gibt zwei Verfahren zur Anpassung eines regionalen Klimamodells auf Basis eines globalen Modells (Umweltbundesamt UBA, 2020).

Bei der ersten Modellart handelt es sich um dynamische Klimamodelle. Bei diesen Modellen werden Daten aus globalen Klimamodellen abgeleitet. Dies geschieht im Regelfall mit nichtlinearen Gleichungen. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass weniger Rechenkapazität für die Berechnungen der einzelnen Parameter und die Auswertung der Daten aus dem Modell benötigt werden (Umweltbundesamt UBA, 2020). Die Größenordnung der betrachteten Einzelgebiete liegt zwischen 2,5 km und 50 km. Dabei werden dreidimensionale Ausschnitte genauer berechnet und mögliche Szenarien ausgegeben. Hierfür ist es wichtig, dass kontinuierlich Daten aus den Grenzbereichen geliefert werden, um eine möglichst exakte Aussage zu dem gewünschten Parameter tätigen zu können (Jacob, 2012).

Die zweite Modellart sind statistische Klimamodelle. Ein Beispiel für ein statistisches Klimamodell ist WETTREG (Wetterlagen basierte Regionalisierungsmethode). Diese Modelle basieren auf gesammelten Daten und Erfahrungswerten aus dem Betrachtungsgebiet in Verbindung mit einer Datengrundlage aus einem höheren, übergeordneten globalen Klimamodell, welches die Einflüsse auch außerhalb des Gebiets betrachtet (Umweltbundesamt UBA, 2020). Im Vergleich zu dynamischen Klimamodellen benötigen statistische Klimamodelle deutlich weniger Rechenleistung, da viele Variablen, die berücksichtigt werden, auf empirischen Daten beruhen (Jacob, 2012).

Beide Modellarten stehen immer in Abhängigkeit zu übergeordneten Modellen, welche die Datengrundlage entweder komplett oder anteilig liefern.

5.2 Indexberechnung mit Vorhersagen

Indizes können nach dem Prinzip wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt, durch die Verwendung von Vorhersagen in die Zukunft verlängert werden. Dadurch ist nicht nur der aktuelle Zustand als Eingangsgröße für Betriebsregeln nutzbar, sondern auch eine Tendenz über eine zukünftige Entwicklung. Das bedeutet, dass man vorausschauend, basierend auf Eintrittswahrscheinlichkeiten, Anpassungen vornehmen kann. Dieses Prinzip ist nicht neu, denn alle Betriebsregeln beruhen auf dem Prinzip der Eintrittswahrscheinlichkeiten. So werden Betriebsregeln über die Analyse der Vergangenheit abgeleitet, wobei das Ziel ist, Regeln zu erhalten, die innerhalb eines bestimmten hydrologischen Geschehens (=Wahrscheinlichkeiten) einen zuverlässigen Betrieb gewährleisten. Treten aber hydrologische Phänomene auf, die außerhalb dieses Rahmens liegen, so sind Anpassungen der Regeln erforderlich. Die Wirksamkeit der Anpassungen hängt im Wesentlichen vom Zeitpunkt ab, wann diese getroffen werden. Genau da setzen die saisonalen Vorhersagen an.

Der Unterschied zu herkömmlichen Betriebsregeln besteht darin, dass man auf Basis eines Erwartungswertes handelt, so wie es im Hochwasserfall bei einer Niederschlagsprognose der Fall ist, allerdings mit einem wesentlichen kürzeren Zeitbezug. Die Integration einer saisonalen Vorhersage in die Betriebsregeln kann auf genau dem gleichen Weg erfolgen wie die Integration von Indizes basierend auf bekannten Messwerten. Welche zusätzlichen Schritte nötig sind, wird im Folgenden beschrieben.

Um die Vorhersagen in die Indexberechnung zu integrieren, werden die Messzeitreihen durch Anhängen der Vorhersagen verlängert und der Index dann für diese zusammengesetzten Zeitreihen berechnet. Da die Vorhersagen laufend aktualisiert werden, ist es nötig, in regelmäßigen Abständen (z.B. bei Vorliegen einer neuen Vorhersage) das Zusammensetzen der Zeitreihen und die Indexberechnung neu durchzuführen, wie schematisch in folgender Abbildung dargestellt:

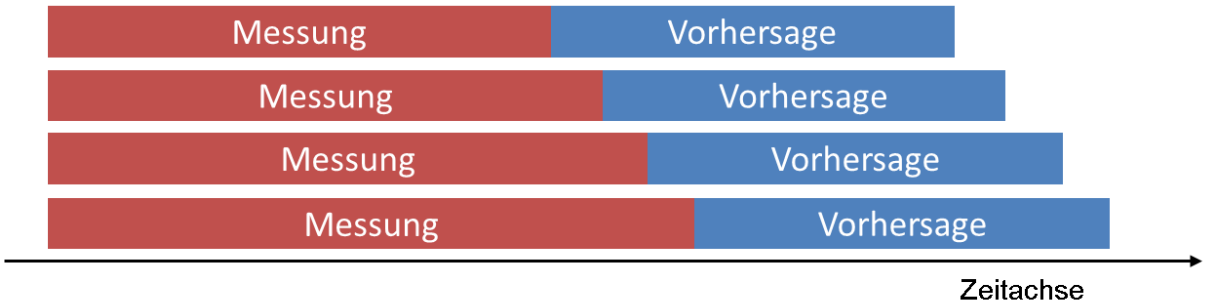


Abbildung 28: Schema der Zusammensetzung von Zeitreihen aus Messung und Vorhersage

Durch die laufende Aktualisierung der Vorhersagen erhält man für einen zukünftigen Zeitpunkt nicht nur ein Ergebnis, sondern im Laufe der Zeit mehrere. Die Vorhersagen des EZMW bestehen sogar grundsätzlich aus nicht nur einer, sondern aus mehreren Vorhersagen, genannt Ensembles. Es ist daher sinnvoll, die Vorhersagen auch als Ensembles zu verarbeiten, um damit nicht nur einen Indexwert, sondern ein Ensemble von Indexwerten zu erhalten (siehe Abbildung 29). Die Spannweite der Indexwerte spiegelt dabei die Unsicherheit der Vorhersagen wieder.

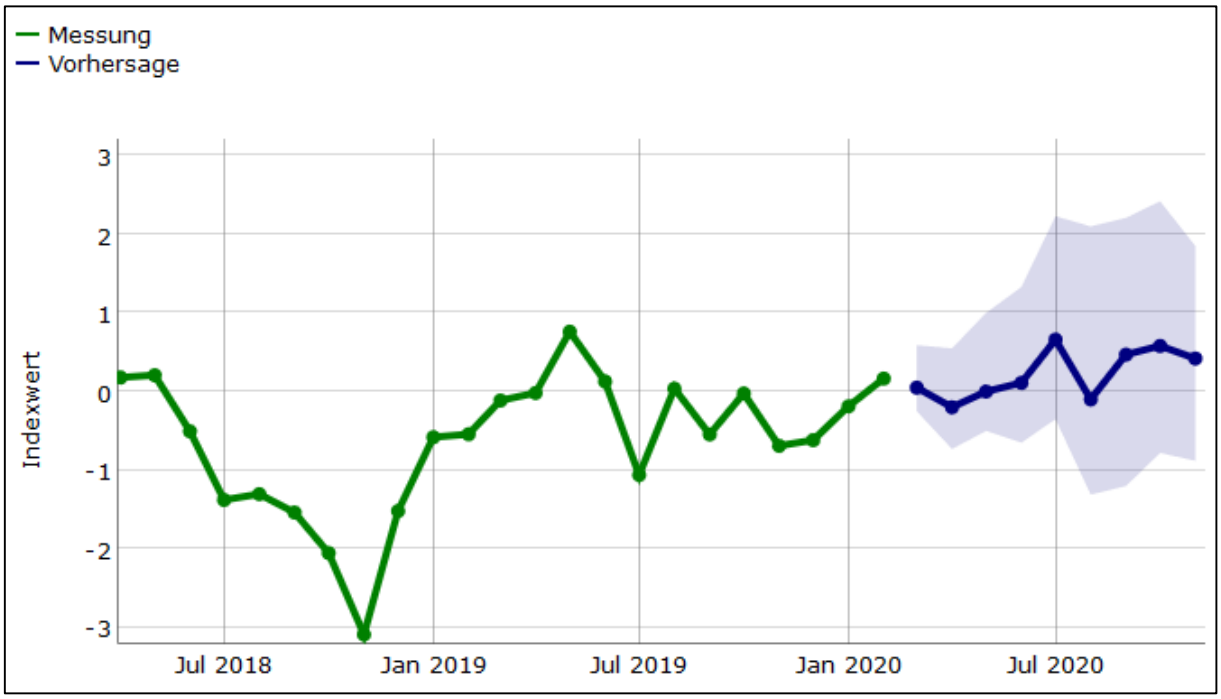


Abbildung 29: Beispiel Index aus Messung (grün) und aus Vorhersagen (blau) mit Darstellung von Median (blaue Linie) und Schwankungsbereich des Ensembles (blaue Fläche)

5.3 Datengrundlage

Verwendbare saisonale Vorhersagen werden z.B. von der US-Behörde National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und dem Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW, englisch ECMWF) bereitgestellt. Die Vorhersagen reichen bis zu neun Monate in die Zukunft und enthalten an die 100 verschiedene Parameter als Tages- und Monatsmittelwerte, wovon, je nach betrachtetem Index, insbesondere Niederschlag und Temperatur ad hoc interessant sind.

Das EZMW betreibt das sogenannte „Seasonal Forecasting System“ (SEAS), dessen fünfte Generation (SEAS5) im November 2017 die Vorgängerversion SEAS4 ablöste (Johnson, et al., 2019). Die Vorhersagedaten des EZMW sind über den Copernicus Climate Data Store verfügbar: https://cds.climate.copernicus.eu.

Das NOAA-Modell CFS_v2 (Climate forecast system version 2) ist von NOAA im National Center for Environmental Prediction (NCEP) am 30. März 2011 eingeführt worden. Das Modell löste das Vorgängermodell CFSv1 (Climate forecast system) ab, welches parallel bis 30. Juni 2012 betrieben wurde. Im Rahmen des Modells werden unterschiedliche Parameter simuliert. Diese umfassen Niederschlag, Luftdruck, relative und spezifische Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Ozon, potentielles Wasser in Wolken und weitere umweltbezogene bzw. meteorologische Parameter (NOAA, 2011).

Auf die Niederschlagsdaten aus dem NOAA-Modell CFS_v2 wird im Folgenden weiter eingegangen, da diese im Rahmen des Vorhabens im Wesentlichen verwendet wurden und zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung kostenfrei zur Verfügung standen. NOAA stellt täglich vier Vorhersagen gestaffelt von einer ein bis neun monatigen Vorhersage bereit (NOAA, 2020). Pro Rasterzelle mit einer Größe von ca. 0,937° x 0,937° stehen die Niederschlagsvorhersagen zur Verfügung. Für Deutschland bedeutet dies in etwa eine Fläche von ca. 66 km x 104 km pro Zelle (siehe Abbildung 30).

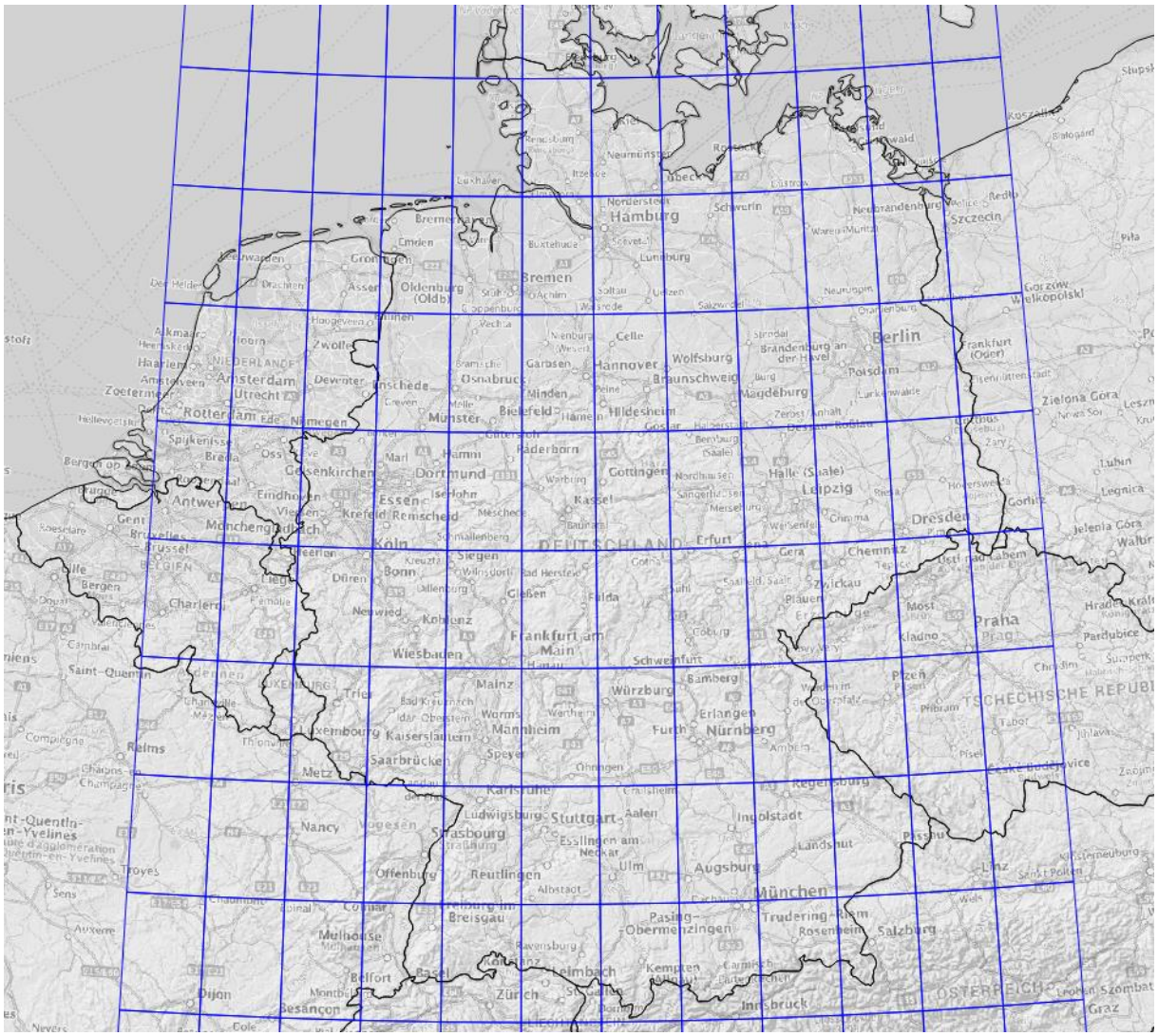


Abbildung 30: Lage der Rasterzellen des NOAA CFS_v2 Modells über Deutschland

Der Wert für Niederschlag wird in der Einheit kg*m²/s bereitgestellt und sollte in mm pro Monat umgerechnet werden.

NOAA-Wert in kg*m²/s *3600s*24h*Monatstageanzahl = NOAA-Wert in mm/Monat

Die Datenstruktur bei NOAA ist komplex. Es gibt eine Vielzahl an zugänglichen URLs mit Zugriff auf Daten, wovon bestimmte mehr oder weniger aktuell gehalten werden. Möchte man sichergehen, dass man tatsächlich die aktuell gültigen Vorhersagen des CFSvs2 Modells vom NOAA Daten Hub lädt, empfiehlt NOAA den operativen Ringspeicher zu nehmen, der die letzten 7 Tage vorhält. Für diesen ist unten die Struktur dargestellt, ausgehend von:

https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/

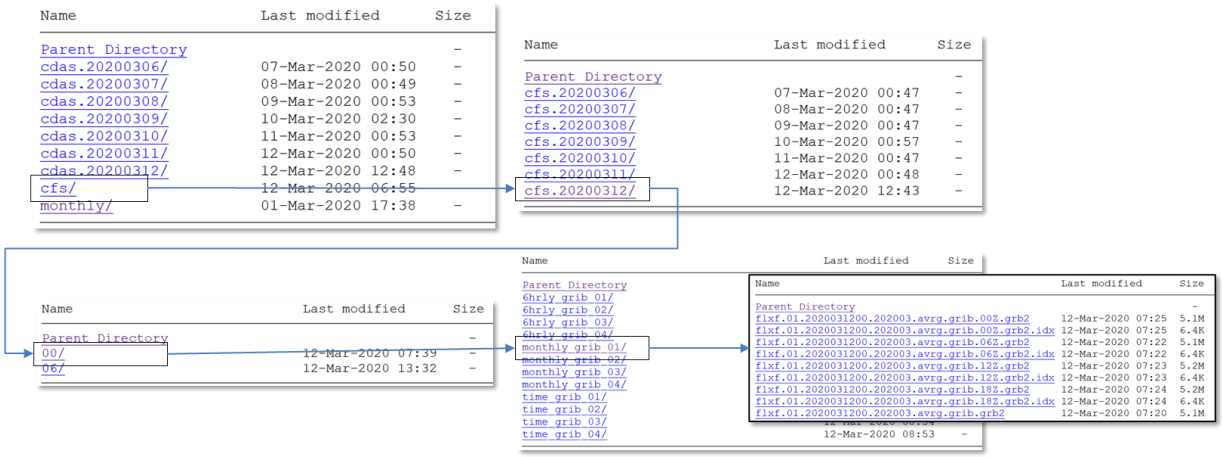


Abbildung 31: Struktur der NOAA Daten auf den Servern der National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

Eine Datei enthält immer die Vorhersagen für einen Zeitpunkt für den gesamten Globus. Das Datenformat ist GRIB2, ein für Massendaten und für Satellitendaten übliches binäres Rasterformat. Um eine Zeitreihe für eine Rasterzelle zu erhalten, muss man über alle Raster für die jeweilige Zelle den Wert auslesen und zu einer Zeitreihe zusammensetzen, wie hier dargestellt.

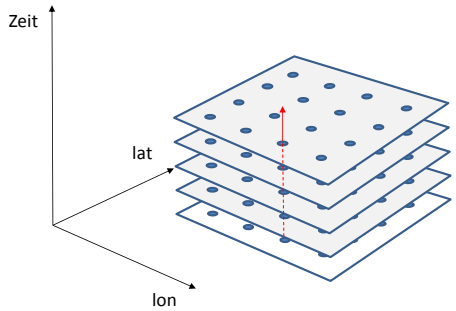


Abbildung 32: Raster mit jeweiligen Zeitbezug dargestellt zur Extraktion von Zeitreihen

Da die Vorhersagen von NOAA mehrmals täglich aktualisiert werden und immer vorhergesagte Monatswerte für die 9 Monate nach dem aktuellen Monat beinhalten, ist es sinnvoll, alle Vorhersagen eines Monats als Ensemblemitglieder zu behandeln und zu verarbeiten.

5.4 Biaskorrektur von Vorhersagen

Saisonale Vorhersagen aus den NOAA oder auch EZMW Modellen besitzen eine grobe räumliche Auflösung und müssen an die jeweilige Örtlichkeit angepasst werden. Dieser Vorgang wird als Downscaling bezeichnet. Im Rahmen der örtlichen Anpassung sollte eine Überprüfung erfolgen, wie gut die Vorhersagen zur jeweiligen Örtlichkeit passen und in welchem Maße die Vorhersagen ange-

passt werden müssen, um besser der lokalen Situation zu folgen. Dieser Vorgang ist die Biaskorrektur.

Die Bestimmung der Biaskorrekturparameter erfolgt durch eine rückblickende Analyse der Daten für den Zeitraum, der sowohl von den Vorhersagen als auch von Messdaten (Bodenstationen bzw. RADOLAN Daten) abgedeckt wird („hindcast“). Bei Verwendung der NOAA-Vorhersagen ist im besten Fall (ohne Datenlücken) somit ein Abgleich für den Zeitraum von April 2011 (Beginn der NOAA-Vorhersagen) bis zum aktuellen Zeitpunkt möglich. Ziel der Biaskorrektur ist die bestmögliche Anpassung der Vorhersagen an die Messwerte eines spezifischen Orts. Die auf Grundlage dieser Analyse bestimmten Biaskorrekturparameter können dann dazu verwendet werden, zukünftige Vorhersagen korrigieren.

Je nach betrachteter Klimagröße kommen unterschiedliche Biaskorrekturmethoden zum Einsatz. Im Rahmen des TASK-Projekts wurden folgende Methoden getestet:

- Linear Scaling
- Distribution Mapping
- Power Transformation
- Local Intensity Scaling
- und Kombinationen der oben genannten Methoden

Im Rahmen des TASK-Projekts hat sich das "Linear Scaling" als geeignetste Methode für monatliche Niederschlagsmengen herausgestellt. Beim Linear Scaling wird für jeden Kalendermonat ein Korrekturfaktor ermittelt, der bei Multiplikation mit dem Vorhersagewert die bestmögliche Anpassung an die Messdaten erzielt.

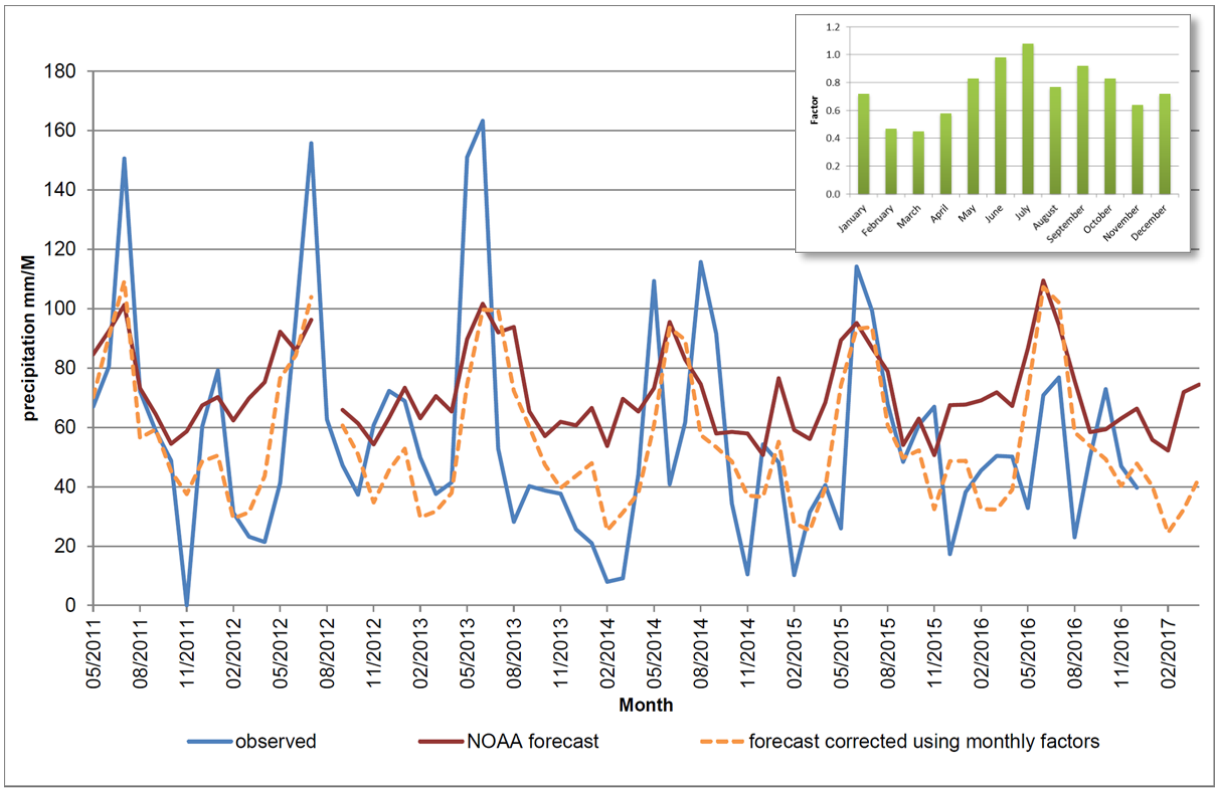


Abbildung 33: Beispiel für eine Vorhersagezeitreihe vor (rot) und nach (orange gestrichelt) der Biaskorrektur mittels Linear Scaling anhand einer Messzeitreihe (blau). Die Korrekturfaktoren sind oben rechts dargestellt.

Ergebnis der Biaskorrekturanalyse sind je nach verwendeter Methode unterschiedliche Biaskorrekturparameter. Die aktuellen Vorhersagen werden dann mithilfe der zuvor berechneten Parameter biaskorrigiert. Die Ableitung neuer Biaskorrekturparameter kann bei jeder neuen Vorhersage erneut

durchgeführt werden, sozusagen eine sich fortlaufend veränderte Kalibrierung. Der Vorteil liegt darin, dass der wachsende Bestand zur Biaskorrektur direkt ausgenutzt wird. Der Nachteil ist, dass die Nachvollziehbarkeit durch die fortlaufend veränderte Kalibrierung verringert wird.

Die Biaskorrekturparameter müssen für jeden betrachteten Ort bzw. jede Messstelle individuell bestimmt werden, auch wenn mehrere Messstellen evtl. innerhalb einer einzigen Kachel des Vorhersagemodells liegen.

5.5 Qualität der Vorhersage

Bevor Vorhersagedaten in den Prozess integriert werden, ist es sinnvoll, zu überprüfen, wie gut die Qualität der Vorhersagen für verschiedene Vorhersagehorizonte ist. Dies kann zum einen bereits im Rahmen der Biaskorrektur erfolgen, indem die Übereinstimmung zwischen Vorhersagen und Messung vor und nach der Biaskorrektur überprüft wird. Ausschlaggebend ist allerdings, wie gut der aus der Kombination von Messung und Vorhersage berechnete Index die relevanten Schwellwerte korrekt trifft.

Durch eine rückblickende Analyse der Vorhersagedaten („hindcast“) können alle vergangenen Vorhersagen, für die mittlerweile ein entsprechender Messwert zur Verfügung steht, überprüft werden.

Bei einer solchen Überprüfung sollte berücksichtigt werden, welchen Vorhersagehorizont (Vorhersagelänge) die einzelnen Werte besitzen und es sollten verschiedene Aggregationszeiträume für den Index getestet werden. Nur so kann beurteilt werden, wie gut die Vorhersagen bei welchem Aggregationszeitraum bis zu welchem Zeithorizont in die Zukunft sind.

Im Rahmen des TASK-Projekts wurde eine solche Bewertung für 50 in der Nähe der Verbandsgebiete der Projektpartner liegende DWD-Stationen durchgeführt. Die Lage dieser Stationen ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Auswertung wurde für alle täglichen NOAA-Vorhersagen zwischen 01.04.2011 und 29.02.2020 durchgeführt (3256 Vorhersagen).

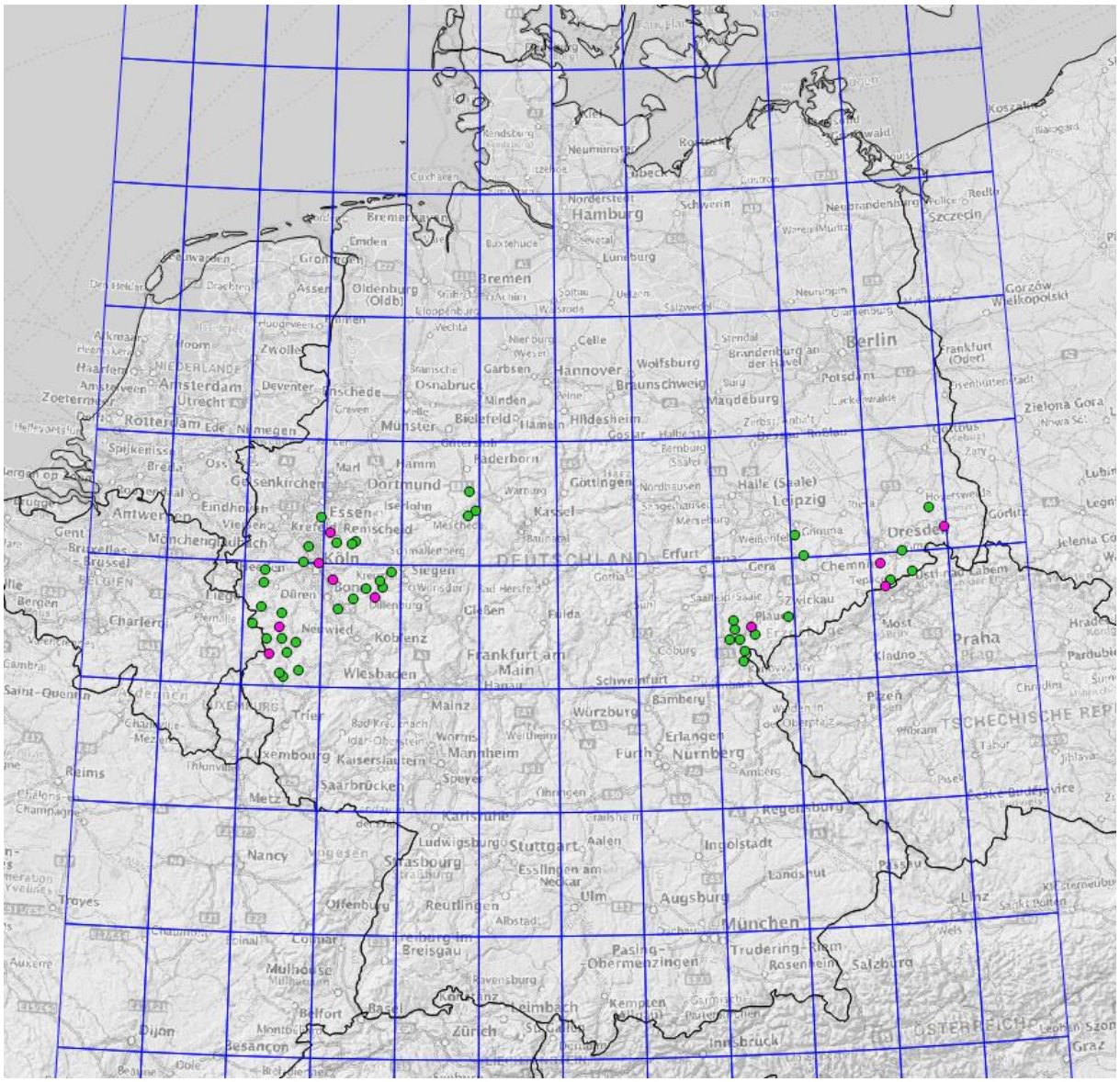


Abbildung 34: Lage der für die Qualitätsbewertung verwendeten DWD-Stationen (pink: Klimastationen, grün: Niederschlagsstationen)

In folgender Abbildung 35 werden die aus Messungen und mit Vorhersagen berechneten SPI-Indexwerte für einen Aggregationszeitraum von 12 Monaten grafisch gegenübergestellt. Es werden hier Vorhersagen mit einer Länge von 6 Monaten betrachtet. In der obersten Zeile wird der über alle 50 betrachteten Stationen gemittelte Indexwert auf einer Farbskala von blau (SPI=1) über grün (SPI=0) bis gelb (SPI=-1) visualisiert. In den Zeilen darunter werden die Unterschreitungen von verschiedenen Schwellwerten mit orangener Farbe hervorgehoben.

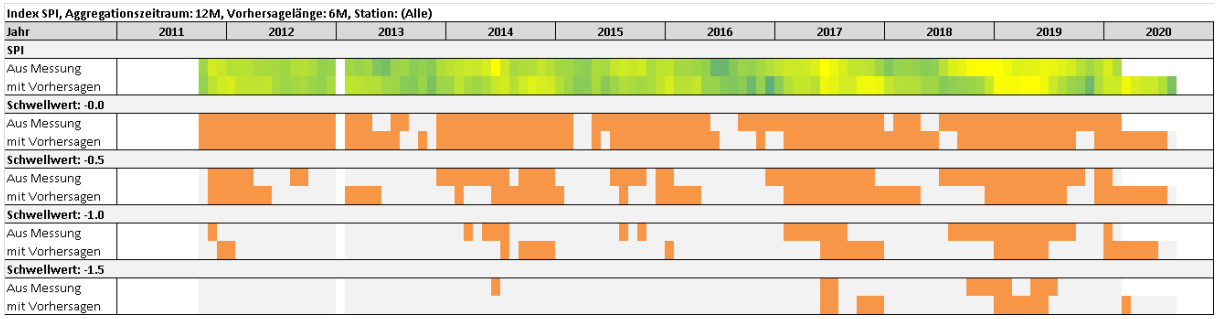


Abbildung 35: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 6M

Folgende Abbildung 36 zeigt das gleiche Bild für eine Vorhersagelänge von nur 1 Monat:

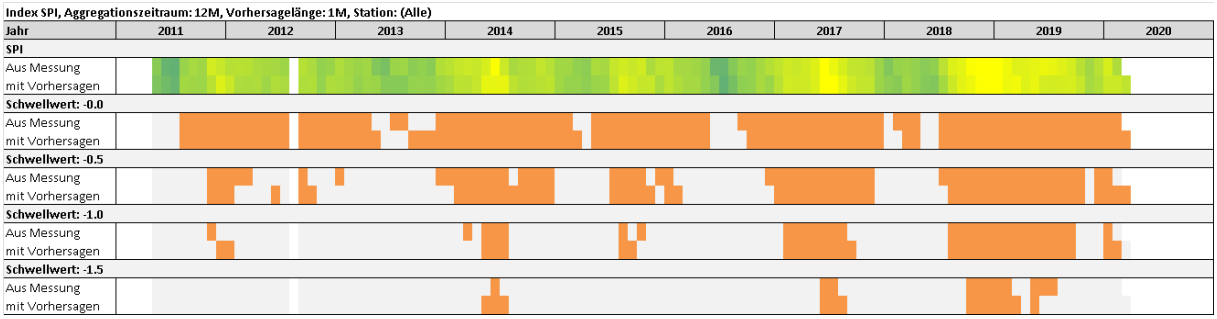


Abbildung 36: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 1M

Für eine konkretere Betrachtung können Stationen einzeln betrachtet werden, wie in folgender Abbildung 40 beispielhaft für die Station Kall-Sistig in Nordrhein-Westfalen gezeigt. Die größeren Lücken in der farblichen Darstellung der Indexwerte gehen auf Lücken in den Niederschlagsmessungen zurück.

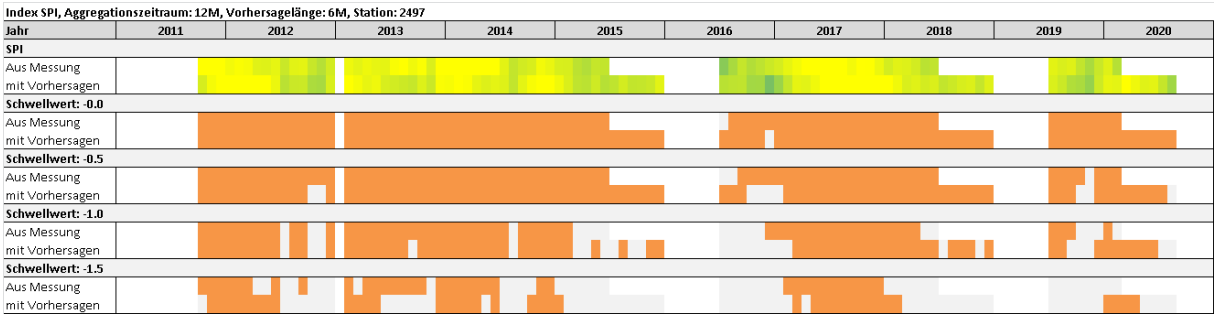


Abbildung 37: Visualisierung von SPI und Schwellwertunterschreitungen, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 6M, Station 2497

Diese Art der Darstellung gibt einen visuellen Eindruck über die Qualität der Vorhersage.

Für eine systematischere Analyse kann überprüft werden, wie oft die Vorhersagen die Unterschreitung eines bestimmten Schwellwerts des Index korrekterweise („positive“) oder fälschlicherweise („false positive“) prognostiziert haben. Andersherum sollte auch überprüft werden, wie oft die Vorhersagen die Nicht-Unterschreitung eines Schwellwerts korrekterweise („negative“) oder fälschlicherweise („false negative“) prognostiziert haben. Dieses Prinzip der Bewertung ist in Abbildung 38 dargestellt.

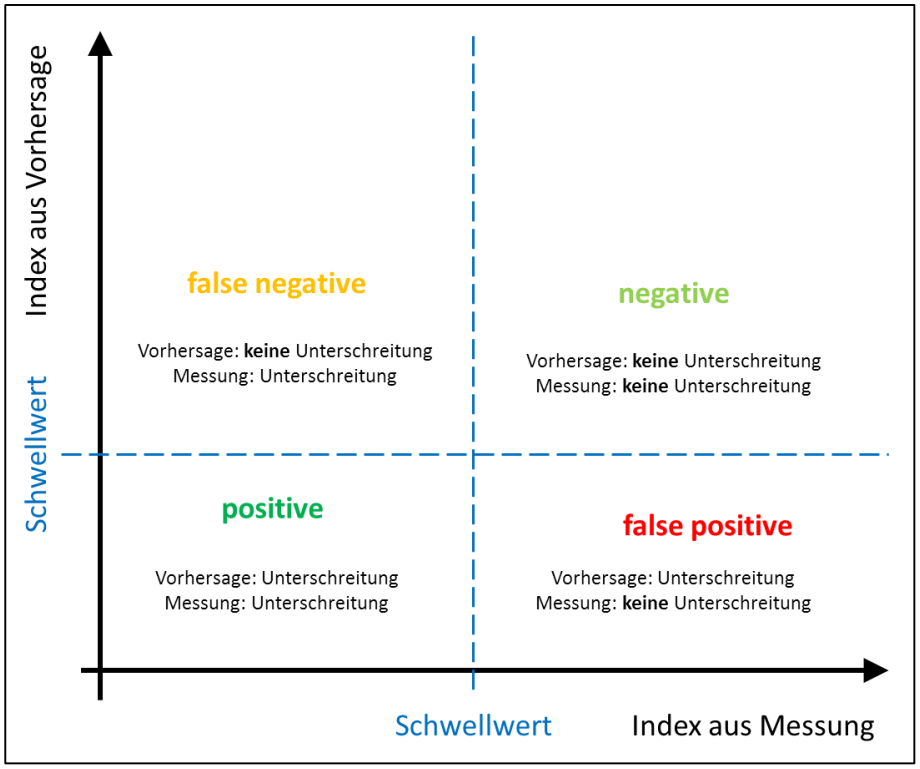


Abbildung 38: Schema zur Bewertung der Qualität von Vorhersagen

Das Gesamtergebnis einer solchen Auswertung für einen Indexschwellwert von SPI = -1.0, gemittelt über alle 50 Stationen, ist in Abbildung 39 dargestellt.

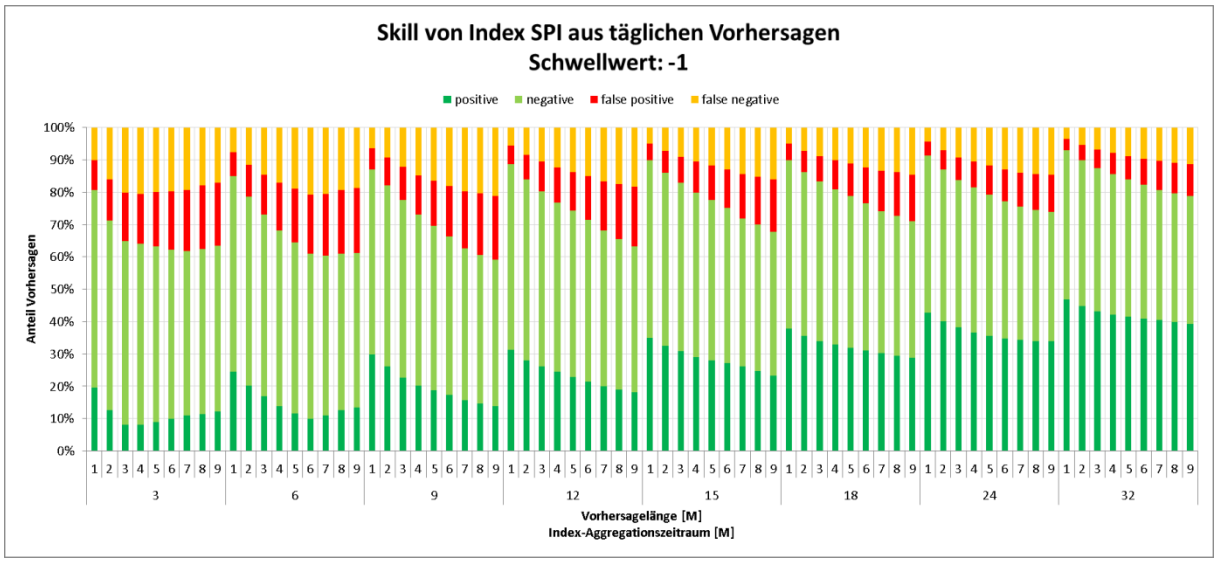


Abbildung 39: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0

Die in Bezug auf den Schwellwert von -1.0 korrekten Vorhersagen („positive“ und „negative“) sind als grüne Balken dargestellt, die inkorrekten Vorhersagen („false positive“ und „false negative“) sind als rote bzw. orangene Balken dargestellt. Die %-Angabe auf der Y-Achse bezieht sich auf die Gesamtanzahl von Vorhersagen für die jeweiligen auf der X-Achse aufgeführten Vorhersagelängen und Index-Aggregationszeiträume.

Für alle Konstellationen von Vorhersagelänge und Index-Aggregationszeitraum wurden mehr korrekte als inkorrekte Vorhersagen gemacht. Je länger der Aggregationszeitraum und je kürzer die Vorhersagelänge, desto mehr Messdaten sind im Aggregationszeitraum enthalten, wodurch die Unsicherheit des mit Vorhersagen berechneten Index abnimmt.

Um die Auswertung anschaulicher zu gestalten, können nur die Monate herausgefiltert werden, in denen auch tatsächlich eine Unterschreitung des Schwellwerts auftrat. Es verbleiben dann nur noch die Kategorien „positive“ bei einer korrekten Vorhersage der Schwellwertunterschreitung und „false negative“ bei einer Vorhersage, die fälschlicherweise keine Schwellwertunterschreitung vorausgesagt hat. Dies ist in Abbildung 40 dargestellt.

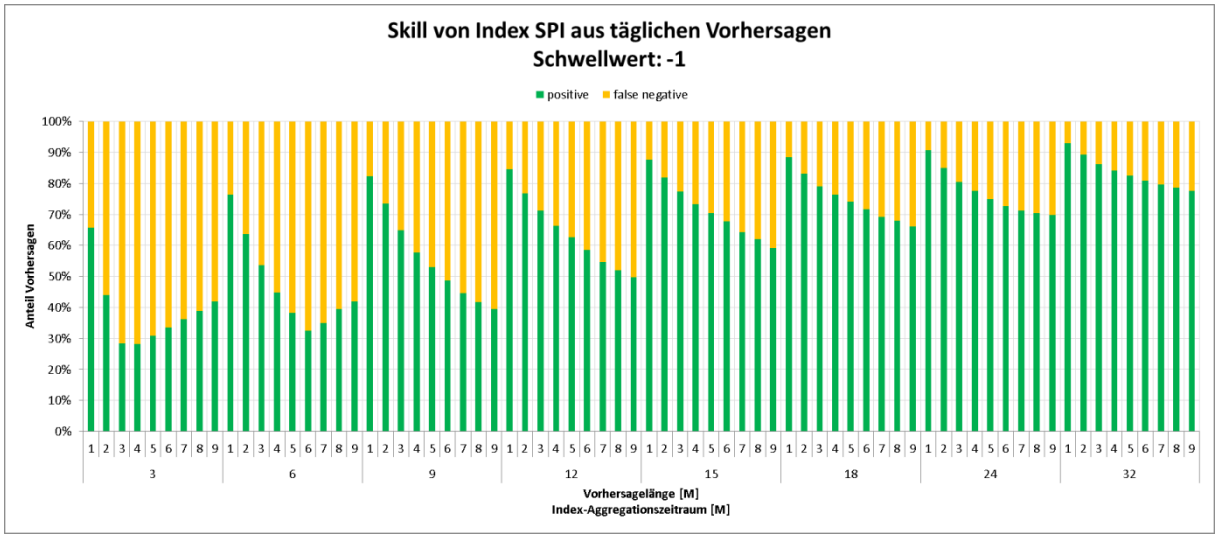


Abbildung 40: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, gefiltert auf Monate mit tatsächlichen Schwellwertunterschreitungen

Die %-Angaben auf der Y-Achse in Abbildung 40 beziehen sich jetzt auf die Gesamtanzahl an Vorhersagen für die Monate, in denen auch eine Schwellwertunterschreitung tatsächlich aufgetreten ist. Im Beispiel oben wurde z.B. bei einem Aggregationszeitraum von 12 Monaten und einer Vorhersagelänge von 6 Monaten bei etwa 60 % der Vorhersagen die Schwellwertunterschreitung korrekt vorausgesagt.

Die Qualität der Vorhersagen ist nicht in allen Jahreszeiten gleich gut oder schlecht. Folgende Abbildung 41 zeigt die Vorhersagequalität für einen Aggregationszeitraum von 12 Monaten in Bezug auf die Kalendermonate Januar bis Dezember. Das Ergebnis zeigt, dass die Vorhersagen für die Monate November bis Juli im Mittel besser waren als für die Monate August, September, Oktober. Der für die Talsperrenbewirtschaftung besonders relevante Zeitraum von Januar bis Juni zeigt eine gute Vorhersagequalität.

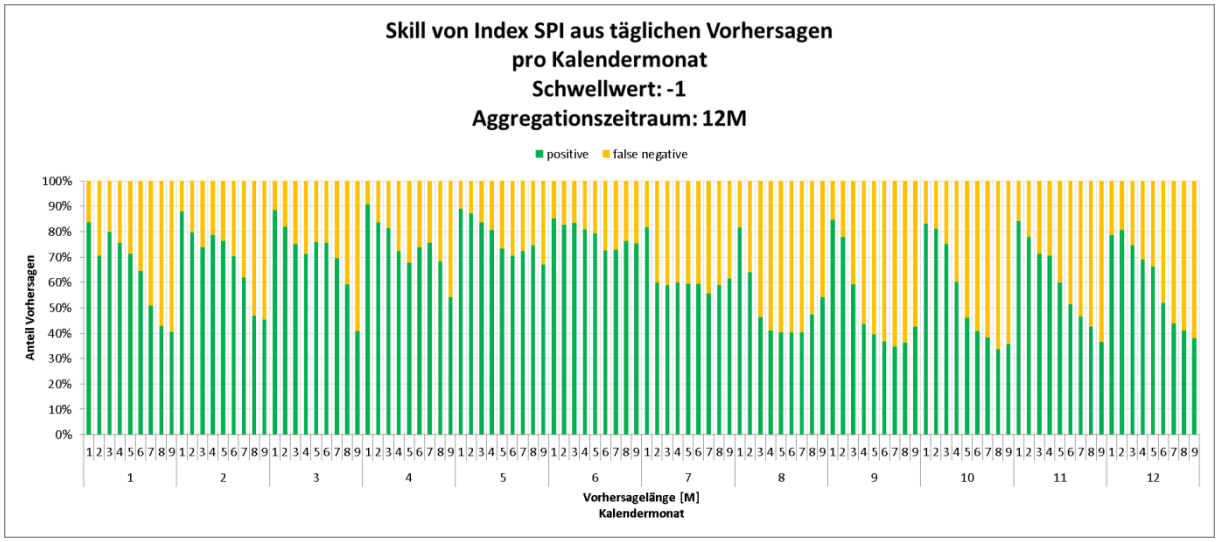


Abbildung 41: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, pro Kalendermonat

Die Vorhersagequalität variiert im betrachteten Zeitraum von 2011 bis 2020 auch über die Zeit. Folgende Abbildung 42 zeigt die mittlere Vorhersagequalität für alle 50 Stationen für einen Indexschwellwert von -1,0, einen Aggregationszeitraum von 12M und eine Vorhersagelänge von 3M über die Zeit. Um die zeitliche Variabilität des Index besser wiederzugeben, sind auf der Y-Achse jetzt die absoluten Anzahlen an Vorhersagen aufgetragen.

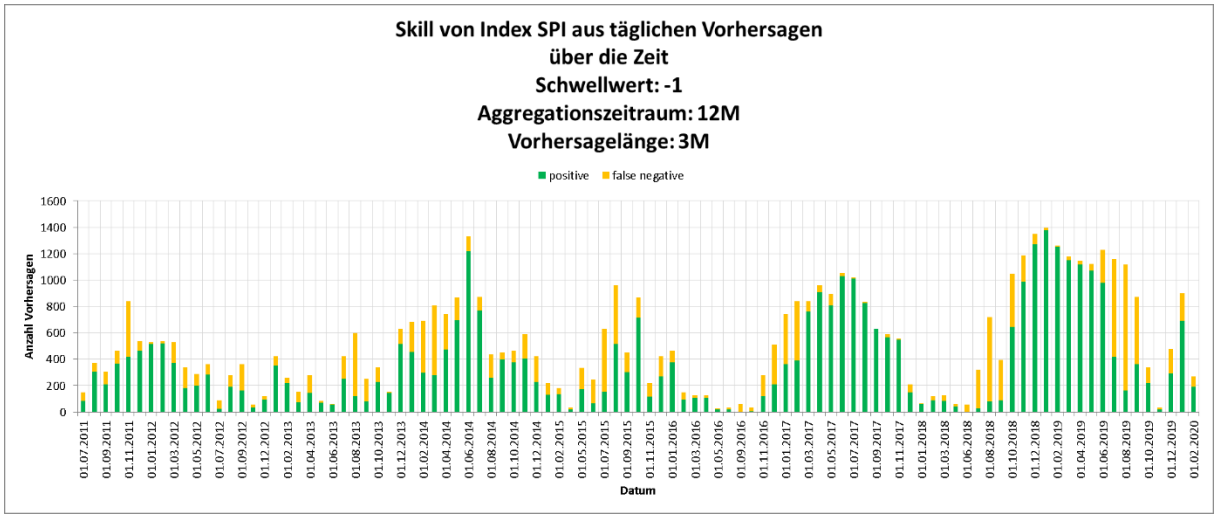


Abbildung 42: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 3M, über die Zeit

Aus dieser Abbildung wird z.B. ersichtlich, dass mit einer Vorhersage von 3 Monaten die Trockenperiode von 2018-2019 an vielen Stationen zuerst zu spät erkannt (3 Monate) und dann zu früh beendet wurde. Mit einer kürzeren Vorhersagezeit von 1 Monat, wie in Abbildung 43 gezeigt, reduziert sich die Anzahl von „false negative“ Vorhersagen deutlich.

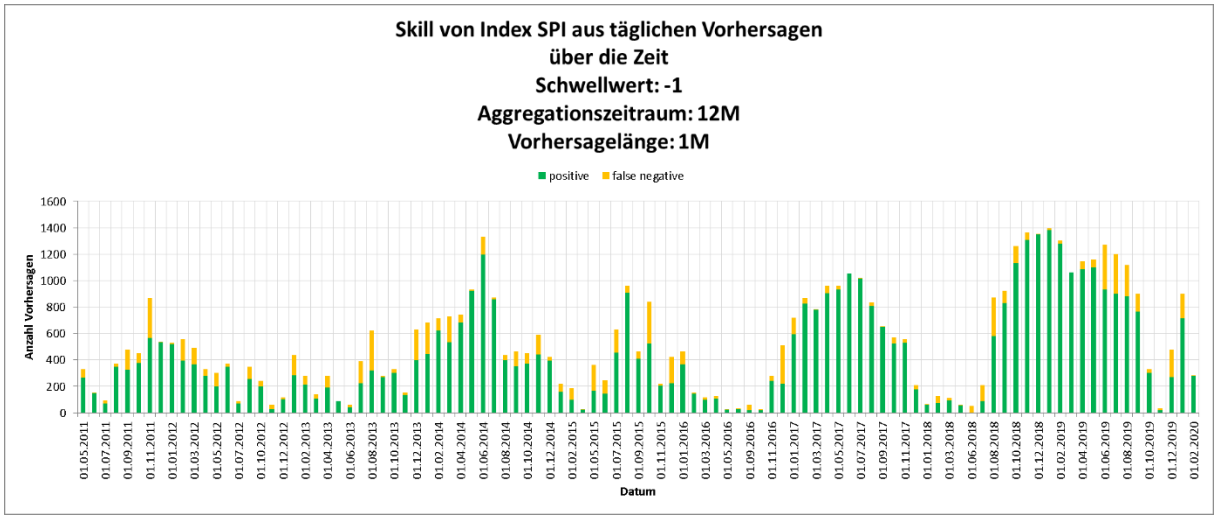


Abbildung 43: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 1M, über die Zeit

Die Vorhersagequalität kann an verschiedenen Stationen ebenfalls durchaus unterschiedlich ausfallen. In Abbildung 44 ist die mittlere Vorhersagequalität über die Zeit für den Schwellwert von -1,0, einen Aggregationszeitraum von 12M und eine Vorhersagelänge von 6M für alle betrachteten Stationen getrennt dargestellt. Wie man an der Gesamthöhe der Balken in der unteren Grafik ablesen kann, war die Häufigkeit, mit welcher der SPI den Schwellwert von -1 unterschritten hat, von Station zu Station stark unterschiedlich.

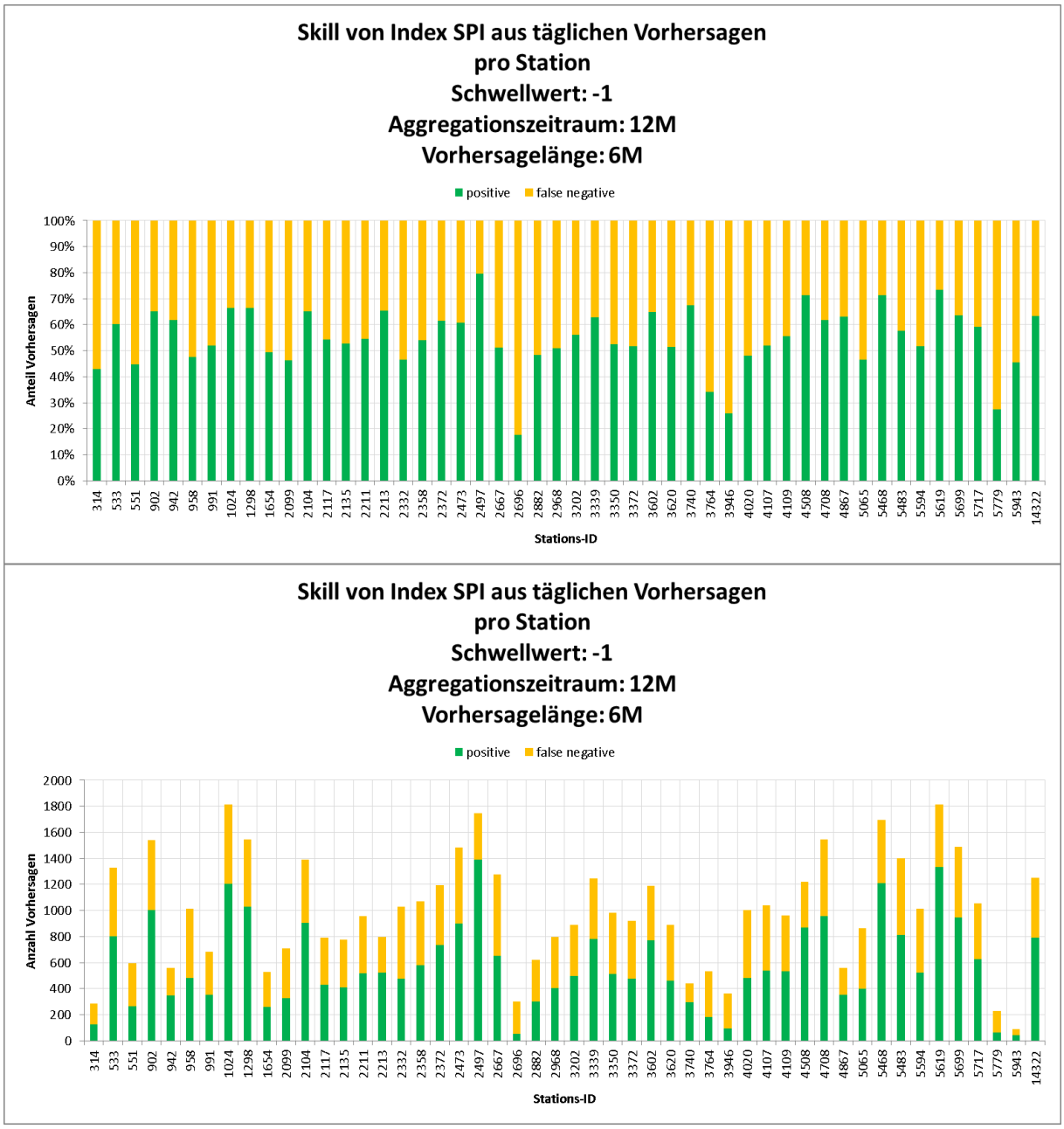


Abbildung 44: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0, Aggregationszeitraum 12M, Vorhersagelänge 9M, pro Station, oben als Anteile und unten in absoluten Zahlen

In obiger Abbildung stechen die Stationen 2497 (Kall-Sistig in Nordrhein-Westfalen) und 2696 (Königswartha in Sachsen) als besonders gut bzw. schlecht heraus. Die Vorhersagequalität an diesen beiden Stationen ist in Abbildung 45 für verschiedene Aggregationszeiträume und Vorhersagelängen dargestellt. Während an der Station 2497 die Anzahl korrekter Vorhersagen in fast allen Konstellationen größer als die Anzahl der inkorrekten Vorhersagen war, und für die Aggregationszeiträume 24M und 32M sogar nahezu 100% der Vorhersagen korrekt waren, gab es an der Station 2696 nur wenige Konstellationen, bei denen mehr korrekte als inkorrekte Vorhersagen auftraten.

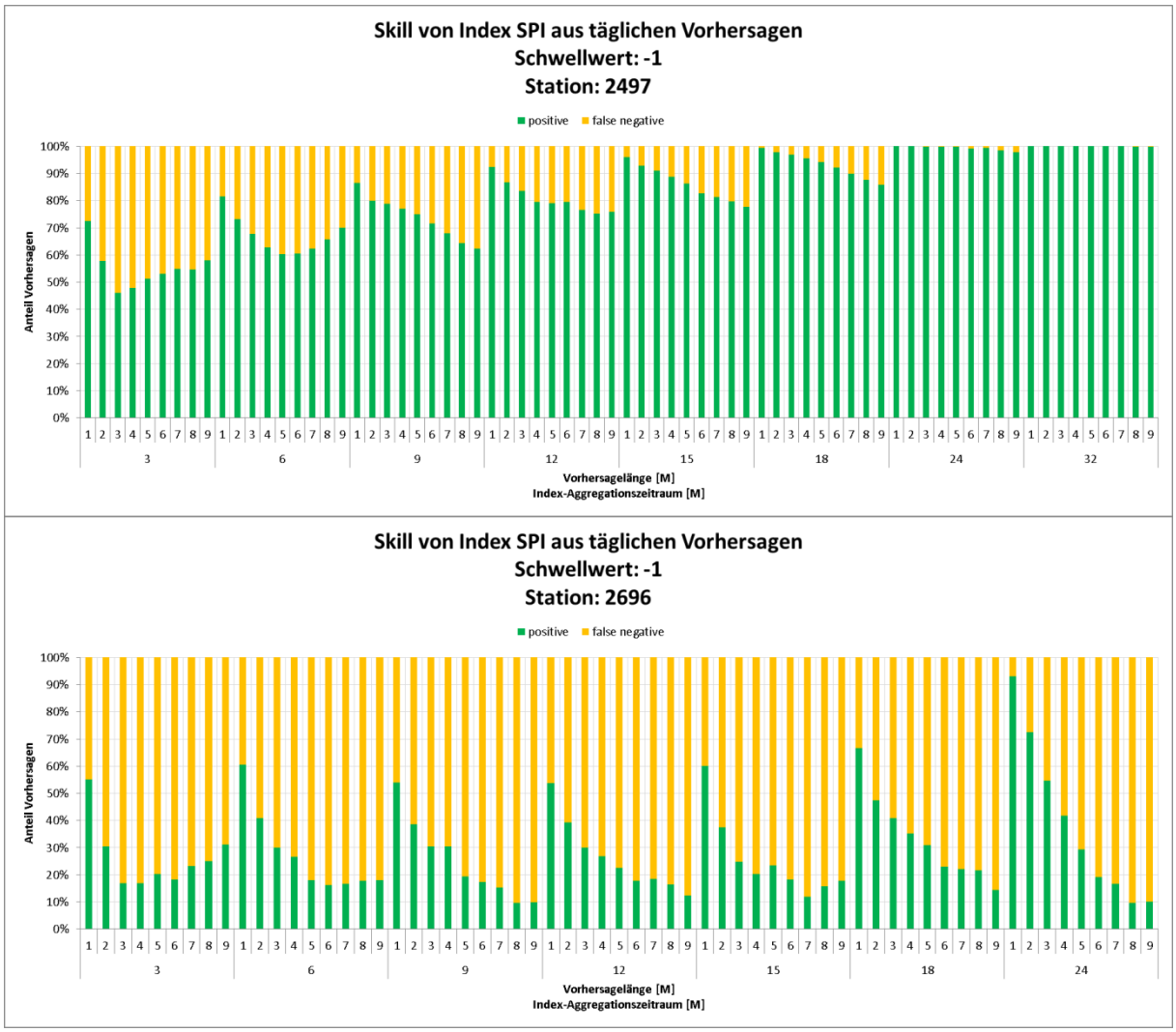


Abbildung 45: Auswertung der Vorhersagequalität für einen Indexschwellwert von -1.0 für zwei individuelle Stationen

Die oben gezeigten Auswertungen zeigen, dass die Qualität der Vorhersagen von vielen Faktoren abhängt. Es ist deshalb notwendig, die Vorhersagequalität für den jeweiligen Anwendungsfall zu analysieren und bei der Wahl der zu verwendenden Stationen, des Aggregationszeitraums und der Vorhersagelänge die Erkenntnisse aus dieser Analyse zu berücksichtigen.

5.6 Integration in den Betrieb

Die Integration von hydro-meteorologischen Indizes mit Vorhersage in die Betriebsregeln erfolgt identisch zu den Aussagen in Kapitel 4.4. Der Unterschied ist, dass anstatt aktueller Indexwerte auch prognostizierte Werte eingehen können. Dabei kann mit Gewichtungen gearbeitet werden, um der Unsicherheit weiter in der Zukunft liegender Werte Rechnung zu tragen. Ein auf Messwerten berechneter Index kann ein höheres Gewicht erhalten als ein Wert, in dem mehrere Monate Prognose in seiner Aggregation enthalten sind.

6 ERWEITERTE MÖGLICHKEITEN

In diesem Kapitel werden Erweiterungen des TASK Konzeptes erläutert. Diese waren nicht Bestandteil des eigentlichen TASK Forschungsprojektes, wurden aber in dessen Verlauf als praktische Erweiterungen erkannt. Die Optionen werden nachfolgend kurz beschrieben.

6.1 Korrelation von Indizes mit dem Abfluss

Durch Korrelationsanalysen mit dem Abfluss wurde festgestellt, dass anhand der berechneten Indizes SPI und SPEI auch eine Aussage über das zu erwartende aggregierte Abflussvolumen an einem spezifischen Ort (z.B. Pegel) in einem Gewässer für kommende Monate möglich ist. Die Indizes korrelierten an beispielhaft betrachteten Stationen gut mit dem Abflussvolumen. Dafür muss das Abflussvolumen aggregiert über einen Zeitraum ermittelt werden. Analog zur Berechnung des SPI/SPEI kann ein hydrologischer Index SQI errechnet werden, welcher dann mit dem SPI/SPEI korreliert wird. Eine gute Stationsdichte ist hier von Vorteil, ebenfalls ist ebenso für jedes Einzugsgebiet individuell zu prüfen, welcher Aggregationszeitraum die besten Ergebnisse liefert. Beispiele dafür finden sich in Kapitel 4.3.

6.2 Verwendung eines Niederschlag-Abfluss Modells

Die saisonale Vorhersage baut darauf auf, dass Vorhersagedaten von NOAA und EZMW verwendet werden, um aus Messdaten und Prognosedaten Indizes zu berechnen. Die Prognosedaten können jedoch ebenfalls verwendet werden, um in ein Niederschlags-Abfluss-Modell (N-A-Modell) einzufließen. Die Anwendung eines N-A-Modells ermöglicht nicht nur eine Aussage über einen Punkt (z.B. Pegel, Talsperrenzufluss) im Gewässer, sondern durch das Modell wird auch eine Projektion in die Fläche möglich. Neben den Vorhersagedaten können anstelle von Stationsdaten Radardaten (RADOLAN-Daten des DWD) einfließen, was eine BIAS-Korrektur mit räumlicher Auflösung auf Basis von Rasterzellen ermöglicht. Somit gelingt es, Aussagen über z.B. die Bodenfeuchte oder Wasserspeicherung in jeder Rasterzelle zu treffen und daraus weitere Indizes abzuleiten. Daraus ergibt sich ein flächenhaftes Bild. Darüber hinaus können mehrere Rasterzellen z.B. zu Gebieten zusammengefasst werden, die sensitiv hinsichtlich der Wasserspeicherung reagieren.

Durch diese Erweiterung können Wassermangelsituationen räumlich differenziert prognostiziert werden, was hilfreich für andere vom Klimawandel Betroffene, wie z.B. die Landwirtschaft, ist.

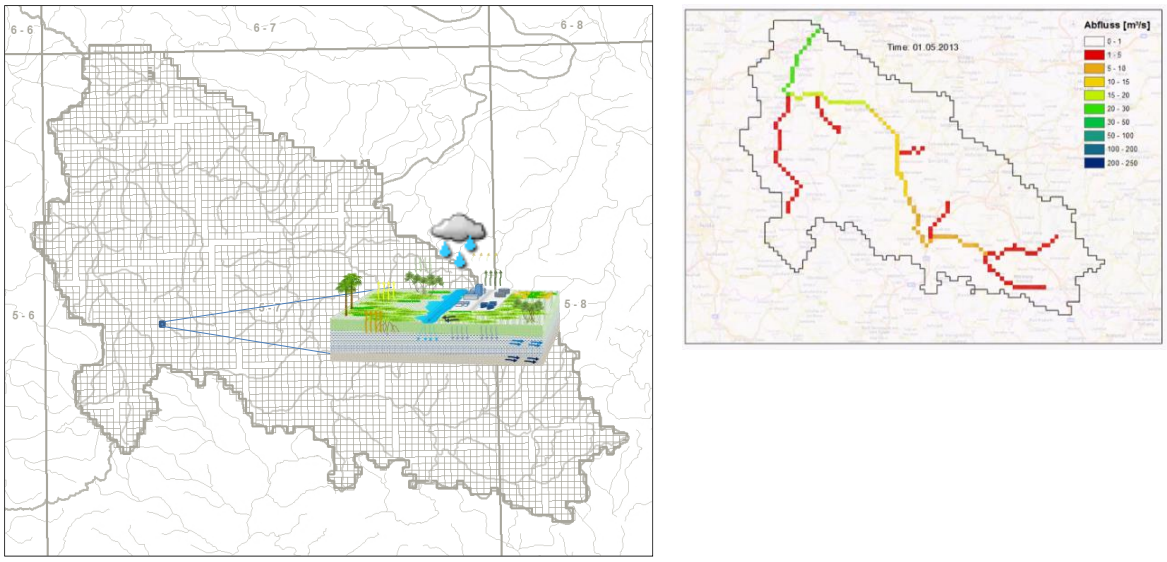


Abbildung 46: 1x1 km² Rastermodells auf Basis von Talsim-NG am Beispiel der Werra

6.3 Einsatz weiterer hydro-meteorologischer Indizes

Innerhalb des Vorhabens wurden als hydro-meteorologische Indizes aus bereits genannten Gründen im Wesentlichen der SPI und der SPEI für die saisonale Vorhersage herangezogen. Es gibt jedoch noch weitere hydro-meteorologische Indizes, die Auskunft über aktuelle und relevante Zustände des wasserwirtschaftlichen Systems geben und für den Ansatz der Verwendung von Vorhersagedaten grundsätzlich in Frage kommen können. Dabei sind jeweils die Stärken, aber auch die Limitierungen der Indizes zu berücksichtigen.

Bekannt sind neben dem SPI und dem SPEI Dürre-Indizes wie z.B. der Standardized Precipitation Index (SPI), der Palmer Drought Index (PDI), der Surface Water Supply Index (SWSI). Darüber hinaus gibt es noch weitere Indizes, die teilweise mehr auf die Landwirtschaft abzielen, teilweise mehr direkten Bezug zu Wasserspeicherung und damit zur Wasserwirtschaft besitzen. Bei der Verwendung weiterer Indizes können auch Messdaten wie Temperatur oder Bodenfeuchte in die Betrachtung mit einfließen.

Die Anwendung des Palmer Drought Index (PDI) wurde im Rahmen vom TASK Projekt getestet und verworfen. Es konnten keine Verbesserungen zum SPEI oder SPI erzielt werden, zumal der erforderliche Parameter der verfügbaren Bodenwasserwasserspeicherung zuerst kalibriert werden muss.

Als vielversprechend werden aber die Indizes betrachtet, die Bodenfeuchte und andere Wasserspeicherung, wie z.B. Grundwasser enthalten. Dazu gehört auch der Talsperreninhalt, der aber mit Vorsicht zu betrachten ist, da auf keinen Fall bewusst herbeigeführte Absenkungen aufgrund von Sanierungen in die Berechnungen einfließen dürfen.

7 WASSERQUALITÄTSASPEKTE

7.1 Einleitung

Bei der Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren sind Aspekte der Wassermenge und Wassergüte zu berücksichtigen. Das Management beinhaltet dabei vor allem proaktive und vorausschauende Maßnahmen, mit denen Veränderungen von Menge und Qualität optimal begegnet werden kann, um Hochwasserschutz und Trinkwasseraufbereitung dauerhaft sicherstellen zu können. Entscheidungen im Talsperrenmanagement, die auf Veränderungen der Wasserqualität beruhen, basieren dabei hauptsächlich auf Erfahrungen und auf der Analyse langjähriger Zeitreihen von Kenngrößen und Parametern der Wasserqualität.

Allerdings gibt es bislang kaum Erfahrungen mit Umfang und Ausmaß der in den letzten Jahren deutlich gewordenen Veränderungen hinsichtlich der Wasserqualität, die durch den Klimawandel hervorgerufen werden. Darüber hinaus sind Auswertungen und Analysen von Kenngrößen und Parametern der Wasserqualität auf der Basis von Zeitreihen nur sehr eingeschränkt geeignet, um aktuelle Trends und kausale Zusammenhänge sowie Ursachen erkennen zu können. Folglich existiert keine praktikable Basis, von der sich Handlungsempfehlungen im Sinne eines proaktiven und vorausschauenden Talsperrenmanagements für neue bzw. unbekannte Situationen ableiten lassen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes ein neuer Ansatz zur Auswertung langjähriger Datenreihen entwickelt, mit dem sich Zusammenhänge und Wechselwirkungen in Talsperren erfassen, rechtzeitig identifizieren, bewerten und eventuell auch vorhersagen lassen. Mit dem neuen Ansatz können auch bislang unbekannte oder neu in Erscheinung tretende Einflussfaktoren identifiziert und bewertet werden. Überdies lassen sich außergewöhnliche und besondere Zustände erfassen, wodurch eine gezielte Ursachenforschung möglich wird. Damit können die bei Anwendung des neuen Ansatzes erzielten Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung im Talsperrenmanagement genutzt und effektive wie wirkungsvolle Maßnahmen abgeleitet werden.

7.2 Vorstellung herkömmlicher Ansatz

Bei der herkömmlichen Betrachtung von Zeitreihen relevanter Parameter und Kenngrößen ist eine Betrachtung und Analyse nur in die Vergangenheit möglich. Dagegen gibt es für ein optimales Talsperrenmanagement keine Möglichkeit für gesicherte und belastbare Prognosen und Vorhersagen in die Zukunft, da bislang keine Modelle für eine mathematische Beschreibung des Verlaufs bzw. der Entwicklung über die Zeit existieren.

Auch mit weitergehenden Ansätzen, bei denen versucht wurde unter Anwendung statistischer Verfahren kausale Zusammenhänge zwischen Parametern und Kenngrößen herzustellen, konnten keine Funktionen für eine mathematische Beschreibung abgeleitet werden. Dies traf selbst für bekannte Zusammenhänge zu, wie beispielsweise der zwischen der Sauerstoffkonzentration und der Konzentration an gelöstem Mangan oder der Temperatur. Abbildung 47 zeigt Korrelationen mit Datensätzen mehrerer Jahre vom Rohwasser einer Trinkwassertalsperre für die Kenngrößen Sauerstoffkonzentration und Konzentration an gelöstem Mangen sowie der Temperatur. Die Bestimmtheitsmaße der Regressionskurven sind mit R^2 = 0,41 bzw. 0,30 sehr niedrig und damit für belastbare Vorhersagen absolut unzulänglich.

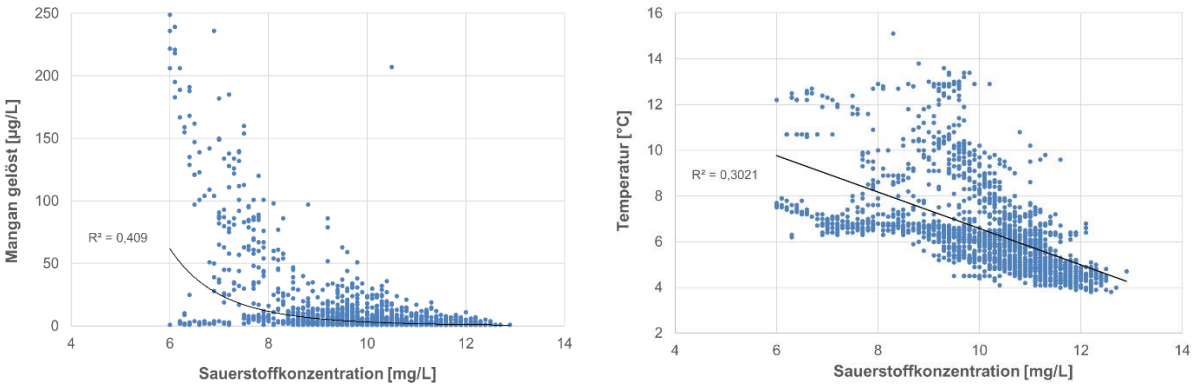


Abbildung 47: Korrelation zwischen der Konzentration an gelöstem Mangan und der Sauerstoffkonzentration (links) sowie zwischen der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration mit Daten der Jahre 2000 bis 2016 für das Rohwasser einer Trinkwassertalsperre.

7.3 Vorstellung neuer Ansatz

Der Ansatz basiert auf einer Reduzierung der als langjährige Zeitreihe vorliegenden Daten-sätze durch Klassifizierung und einer anschließenden statistischen Auswertung. Der Ansatz wurde auf Basis eines umfangreichen Datensatzes einer Trinkwassertalsperre getestet. Dieser beinhaltete zahlreiche Parameter und Kenngrößen der Wasserqualität und umfasste den Zeitraum der Jahre 2000 bis 2016. Betrachtete Parameter und Kenngrößen waren: Füllstand, Temperatur, Trübung, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration, Koloniebildende Einheiten (KBE) bei 20 und 36 °C, Anzahl Coliformer Bakterien, Mangankonzentration, Chlorophyll-a, Ammoniumkonzentration.

Die Bewertung von Zuständen, Ereignissen und Entwicklungen hinsichtlich Wasserqualität funktioniert nach folgendem Grundprinzip:

1. Die Daten werden in eine auswertbare Form gebracht und mittels statistischer Verfahren werden Ausreißer aus den Datenreihen eliminiert.
2. Die Datenreihen jeder Kenngröße bzw. jedes Parameters werden in sinnvolle Gruppen bzw. Kategorien eingeteilt.
3. Innerhalb einer Gruppe bzw. Kategorie erfolgt eine statistische Auswertung, die die Mittelwertbildung und die Bestimmung der 95 %-Konfidenzintervalle umfasst.
4. Die Gruppendatensätze werden durch Herstellung eines Bezugs zum Jahresverlauf sowie durch Korrelation der Kenngrößen untereinander ausgewertet.

In Abbildung 48 ist ein Teil dieser Vorgehensweise, nämlich die Gruppierung und die Mittelwertbildung innerhalb der Gruppen, exemplarisch für die Kenngröße „Coliforme Bakterien“ dargestellt. Zunächst wurden die Daten für die Anzahl an coliformen Bakterien in 12 Gruppen eingeteilt:

- Gruppe 1: Anzahl ≤ 5
- Gruppe 2: Anzahl ≤ 17
- Gruppe 3: Anzahl ≤ 50
- …
- Gruppe 12: Anzahl > 5.000

Die Balken in Abbildung 48 entsprechen der Häufigkeit, d. h. der Anzahl an Datensätzen, die der jeweiligen Gruppe (Konzentration, d. h. Anzahl Coliforme) zugeordnet sind.

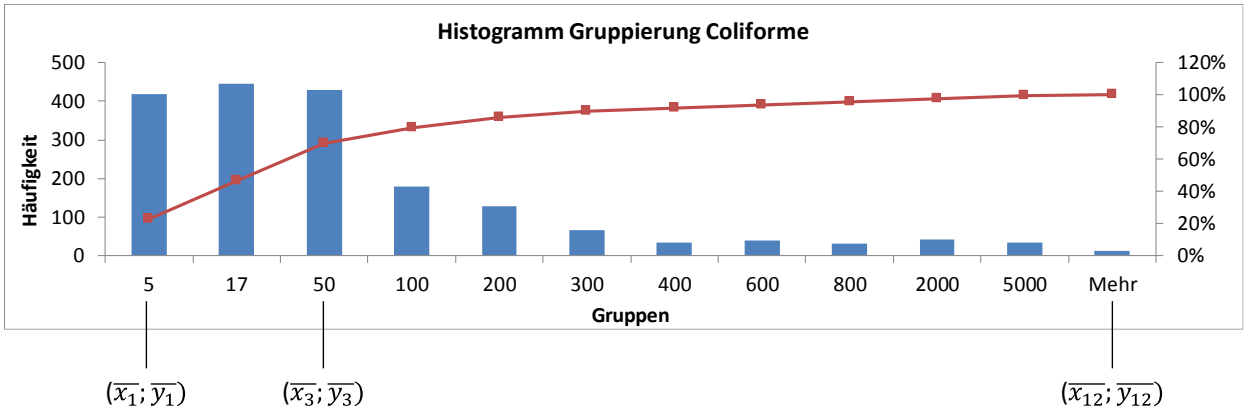


Abbildung 48: Gruppierung der Kenngröße „Coliforme“ als Häufigkeit (blaue Balken) und als summierte Häufigkeit (rote Kurve).

Für jede Wasserprobe sind neben der Kenngröße „Coliforme Bakterien“, der in Abbildung 2 die Variablen *x* zugewiesen wurde, auch andere Kenngrößen, wie z. B. Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Ammoniumkonzentration, ermittelt worden. Dadurch sind Datensätze entstanden, deren Bezugspunkt der jeweilige Zeitpunkt der Probenahme ist, und zu dem die Werte aller analytisch bestimmten Kenngrößen gehören. Damit verfügt jeder Wert für die Kenngröße „Coliforme Bakterien“ (x_i) über einen zugehörigen Wert einer anderen Kenngröße (y_i). In jeder Gruppe befinden sich jetzt Wertepaare (x_i; y_i), für die jeweils ein Mittelwert bestimmt werden kann. Das daraus resultierende Wertepaar $(\overline{x_i}; \overline{y_i})$ kann dann repräsentativ für die ganze Gruppe für die weitergehende Auswertung verwendet werden.

Die weitergehende Auswertung umfasst dabei die Bestimmung des 95 %-Konfidenzintervalls für die neuen Wertepaare $(\overline{x_i}; \overline{y_i})$, die Herstellung eines Bezugs zum Jahresverlauf und die Korrelation zwischen Wertepaaren verschiedener Kenngrößen. Letzteres ist exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt, die eine Korrelation zwischen neuen Wertepaaren $(\overline{x_i}; \overline{y_i})$ enthält, bei denen *x* der Kenngröße „Temperatur“ und *y* der Kenngröße „Coliforme Bakterien“ entspricht.

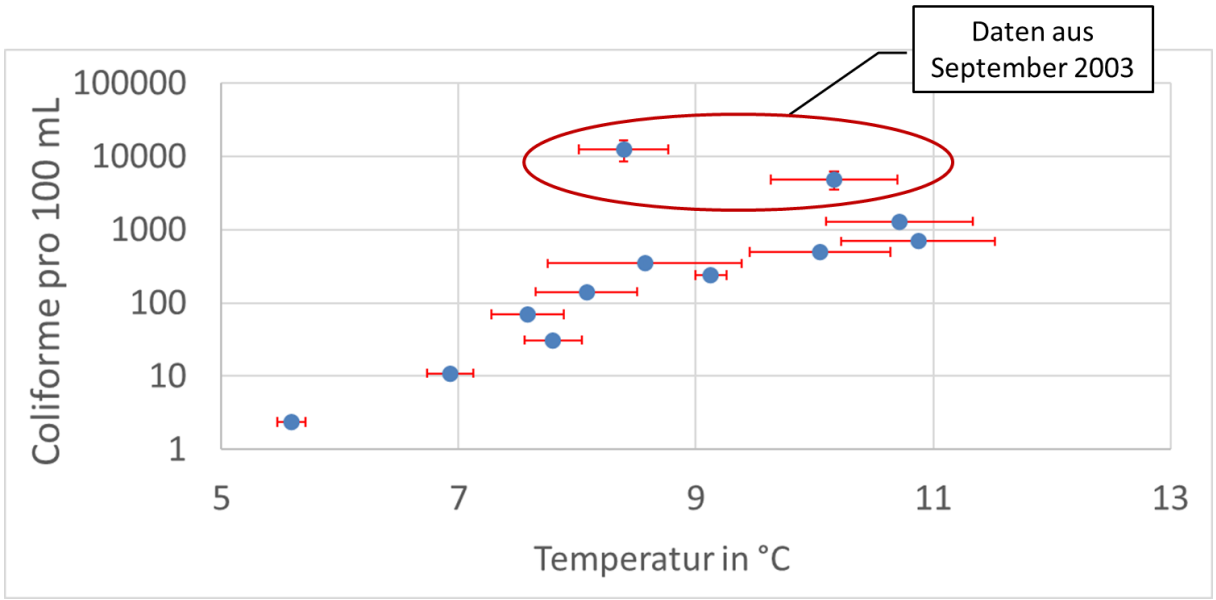


Abbildung 49: Korrelation zwischen den neuen Wertepaaren „Coliforme Bakterien“ und „Temperatur“. Datenpunkte mit 95 %-Konfidenzintervall. Konfidenzintervalle für die Konzentration coliformer Bakterien entsprechen in etwa der Größe der Symbole.

7.4 Nutzen des neuen Ansatzes

Anhand der in Abbildung 49 veranschaulichten Korrelation lässt sich der erwartete Zusammenhang zwischen zunehmender Anzahl an Coliformen Bakterien mit steigender Temperatur gut beschreiben. Daneben sind jedoch auch zwei Datensätze zu erkennen, die diesem „normalen“ Verlauf nicht entsprechen und etwas herausfallen. Ohne die zwei Ausreißerdatensätze kann der Zusammenhang zwischen Temperatur und Anzahl an Coliformen Bakterien gut mathematisch beschrieben und folglich für Vorhersagen genutzt werden. Eine Analyse der Ausreißerdatensätze hat gezeigt, dass es sich hierbei nahezu ausschließlich um Daten aus dem September 2003 handelt. Durch weitergehende Analysen kann geklärt werden, welche Ursachen für die ungewöhnlichen Konstellationen verantwortlich sind und inwieweit sich die daraus resultierenden Erkenntnisse für die Ableitung von Maßnahmen nutzen lassen. In dem Beispielfall wird die Ursache im Wechsel der Analysenmethode für die Bestimmung der Coliformen Bakterien vermutet. Die Daten zeigen, dass offensichtlich aufgrund mangelnder Erfahrung mit der neuen Analysenmethode die Verdünnungen noch nicht ausreichend hoch angesetzt worden sind und man sich folglich außerhalb des Messbereichs befand, der für reproduzierbare Ergebnisse erforderlich gewesen wäre. Folglich wären diese Datensätze als Ausreißer zu eliminieren.

Das zeigt, dass der Ansatz geeignet ist, um bislang unbekannte Situationen und Zusammenhänge erfassen und analysieren zu können. Damit kann er als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung in Bezug auf wirkungsvolle Maßnahmen im Sinne eines proaktiven Talsperrenmanagements genutzt werden. Der Ansatz steht zur direkten Nutzung zur Verfügung und kann grundsätzlich auf alle Gewässersysteme angewendet werden. Die Anwendung erfordert keine Spezialkenntnisse, was diesen Ansatz besonders praxistauglich macht.

8 TASK-METHODE AUS SICHT DER WASSERVERBÄNDE

Spätestens das letzte Jahrzehnt hat gezeigt, dass die in den Prognosen zur Klimaentwicklung angezeigten Veränderungen zum Teil schon heute sichtbar werden und sich auch in den Daten der Niederschlags- und Temperaturmessungen wiederfinden lassen. Die daraus erwachsenden Ansprüche an die Talsperrenbetriebspläne erwecken einen Bedarf an zusätzlichen Bewirtschaftungskriterien, um die Ziele der Bewirtschaftung, für die die Stauvolumina der Talsperren eingerichtet wurden, auch in Zukunft zu erreichen.

Erste Untersuchungen hatten gezeigt, dass die Identifizierung von Trockenperioden auf Grundlage von hydrologischen Indizes sinnvoll und gewinnbringend in den Talsperrenbetrieb für Trockenperioden eingebracht werden kann (DROP, Benefit of governance in DROught adaPtation, ein Interreg IV B-Projekt 2013-2015). Die ausschließlich auf Grundlage von Messdaten ermittelten Indizes haben allerdings den Nachteil, dass ihre Prognoseleistung, die aus der Trägheit des hydrologischen Systems entspringt, recht gering ist und gegenüber der sehr langfristigen Bewirtschaftung größerer und entsprechend träger Talsperrensysteme an der entscheidenden Stelle - der Vorschau auf die nächsten Monate - noch wenig Nutzen bringt. Die in TASK erarbeiteten hydro-meteorologischen Indizes bringen die Methodik die hier entscheidenden Schritte weiter, um in der Praxis eingeführt zu werden.

In Kapitel 3 werden die drei unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten der Indizes geschildert. Der Einsatz in der Kommunikation von Trockenphasen wird sicher eine erste wertvolle Anwendung der Indizes sein, da die aus der Komplexität der Bewirtschaftung entspringenden Schwierigkeit der Kommunikation in hydrologisch außergewöhnlichen Zeiten auf ein einfacheres Niveau gebracht werden kann – wenn die Indizes allgemein bekannt und anerkannt sind. Dazu müssen für die verwendeten Indizes allgemein anerkannte Berechnungsmethoden und eine breite Verfügbarkeit gegeben sein, um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Einzugsgebieten und Talsperrensystemen zu erhalten. Die unterschiedliche Betroffenheit, z.B. von Trockenperioden, kann auf diese Weise verständlich dargestellt und kommuniziert werden.

Die Verwendung der Indizes zur Identifikation von Sondersituationen ermöglicht nach einer Abstimmung der Schwellwerte einen weitgehend unbehelligten Notbetrieb, erfordert aber auch eine Verständigung über darüber hinaus gehende Krisenpläne mit den entsprechend schwierigen Fragen nach Priorisierung bzw. Kontingentierung der Talsperrenfunktionen. Aber auch ohne abschließende Klärung der Krisenpläne wird die Implementierung von Indizes nach dem TASK-Konzept einen großen Nutzen für den Talsperrenbetrieb einbringen. Die direkte Einbindung von Indizes in den Betriebsplan wird auf dem Vertrauen aufbauen, das mit der Einführung und Erprobung der Indizes in den ersten beiden Schritten erworben wurde.

Da die Verfügbarkeit und Qualität von meteorologischen Daten und Prognosen weiterhin zunehmend ist, sollten Untersuchungen zu deren Nutzung weiterhin möglichst zeitnah und fortlaufend durchgeführt werden, um mit der Entwicklung der Anforderungen an die Talsperrenbewirtschaftung Schritt zu halten und für die Zukunft hinreichend vorbereitet zu sein.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Handlungsanleitung basiert auf Erkenntnissen, die im Rahmen des BMU geförderten Vorhabens Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel (TASK) in Zusammenarbeit mit

- Wupperverband,
- Wasserverband Eifel-Rur (WVER),
- Wasserverband Aabach-Talsperre,
- Wahnbachtalsperrenverband (WTV),
- Aggerverband,
- Landestalsperrenverwaltung Sachsen,
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV),
- Bezirksregierung Köln
- Gemeinde Simmerath

gewonnen wurden.

Die Handlungsanleitung unterstützt Talsperrenbetreiber und Aufsichtsbehörden dahingehend, zu beurteilen, ob der Einsatz von hydro-meteorologischen Indizes bei der Anpassung an den Klimawandel eine hilfreiche Ergänzung bei der Talsperrenbewirtschaftung sein kann.

Das in der Handlungsanleitung beschriebene Vorgehen basiert im Wesentlichen auf der Integration von hydro-meteorologischen Indizes in die Bewirtschaftung der Talsperren und auf der Verwendung von Vorhersagedaten (saisonale Vorhersagen). Es hat sich gezeigt, dass die Vorhersagedaten der betrachteten Stationen geeignet sind, um Tendenzen des hydrologischen Systems abzubilden. Für die Indizes werden drei Einsatzmöglichkeiten beschrieben, die Verwendung zur Information der Öffentlichkeit, zum Erkennen von Sondersituationen im Talsperrenbetrieb sowie für die Integration als festen Bestandteil in den Betrieb. Die dritte Einsatzmöglichkeit wird aus Sicht der Verfasser als effizienteste Art angesehen, auf Trockenheit zu reagieren, da sowohl der Talsperren-Betreiber als auch die Aufsichtsbehörde den Analyse- und Verifikationsprozess nur einmal durchlaufen müssen. Es entsteht somit eine dauerhafte Erweiterung bestehender Betriebspläne.

Parallel zur Betrachtung der Wassermenge beinhaltet die Handlungsanleitung auch einen Ansatz zur Berücksichtigung von Wasserqualitätsaspekten, mit dem sich Zusammenhänge und Wechselwirkungen in Talsperren erfassen, rechtzeitig identifizieren, bewerten und eventuell auch vorhersagen lassen.

Die Handlungsanleitung ist je nach Talsperre gebietsspezifisch umzusetzen, gewährleistet aber ein homogenes Vorgehen aus übergeordneter Sicht.

Im Laufe des Vorhabens hat sich angedeutet, dass der gewählte Ansatz ein über die Anwendung von Indizes hinausgehendes Potential besitzt. So wurde festgestellt, dass anhand der berechneten Indizes auch eine Aussage über das zu erwartende Abflussvolumen an definierten Stellen für kommende Monate möglich ist. Dabei sind Methoden von Bedeutung wie z.B. ein operatives Wasserbilanz- und Bodenwasserhaushaltsmodell. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse, hohem Bedarf aus der Praxis und der komplexen Bewertung für Wasserallokation in Mangelzeiten wird in einer Fortsetzung von TASK und einer Implementierung der Projektergebnisse bei der Weiterentwicklung von Talsperrenbetriebsplänen ein erheblicher Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel gesehen.

10 LITERATUR

Deutscher Wetterdienst DWD. (2020). *Klimaprojektionen*. Von https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen_node.html;jsessionid=07FC90ACC45660C1C372ABE6971F67B4.live21062%20[24.08.2017] abgerufen

DWD. (2019). *Klimavorhersagen und Klimaprojektionen.* Offenbach, Deutschland: Deutscher Wetterdienst.

Herber, M. (06. 08 2017). Bias-Korrektur von Langzeitniederschlagsvorhersagen zum Vergleich an ausgewählten Niederschlagsbodenmessstationen. Darmstadt.

HLNUG. (2017). *Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) - Ergebnisbericht.* Wiesbaden.

Jacob, D. B. (2012). *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung, CSC Report 6.* Germany: Climate Service Cener. Von https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/projekte/csc-report6.pdf abgerufen

Johnson, S., Stockdale, T., Ferranti, L., Balmaseda, M., Molteni, F., Magnusson, L., . . . Monge-Sanz, B. (2019). SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geosci. Model Dev.*(12).

LfU Bayern. (2020). *Globale Klimamodelle*. Abgerufen am 03. 03 2020 von https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/klimamodellierung/global/index.htm

NOAA. (2011). *The ncep climate forecast system version 2*. Von National Oceanic and Atmospheric Administration : http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsv2.info/Operational.CFSv2.info.ppt abgerufen

NOAA. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, pp 2185-2208.

NOAA. (2020). *CFSv2 Operational Forecasts**. Abgerufen am 03. 03 2020 von National Oceanic and Atmospheric Administration: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2#CFSv2%20Operational%20Forecasts

Spektrum. (2001). *Lexikon der Geographie: Klimamodelle.* Spektrum.de. Von https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/klimamodelle/4163 abgerufen

Svoboda, M., & Fuchs, B. (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices.* Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP).

Umweltbundesamt UBA. (2020). *Klimamodelle und Szenarien*. Abgerufen am 31. 01 2020 von https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien#textpart-2

WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide.* Geneva, Switzerland, ISBN 978-92-63-11091-6: World Meteorological Organization.

WMO. (2017). *Guidelines on the Calculation of Climate Normals.* Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation.