









KLIWA-Kurzbericht

Leitfaden zur Durchführung von KLIWA-Stresstests

(Stand: 08.07.2019)

im Rahmen der Kooperation KLIWA –

Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft



Impressum

Bearbeitung: Kooperation KLIWA – <u>www.kliwa.de</u> –

Redaktion:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Hans-Högn-Straße 12 95030 Hof/Saale

Ronja Fliß

Ronja.Fliss@lfu.bayern.de

Maria Foltyn

Maria.Foltyn@lfu.bayern.de

Jörg Neumann

Joerg.Neumann@lfu.bayern.de

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1 76185 Karlsruhe

Gabriel Fink

Gabriel.Fink@lubw.bwl.de

Thomas Gudera

Thomas.Gudera@lubw.bwl.de

Manuela Nied

Manuela.Nied@lubw.bwl.de

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Str. 7 55116 Mainz

Christof Baumeister

Christof.Baumeister@lfu.rlp.de

Christian Iber

Christian.Iber@lfu.rlp.de

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustr. 186 65203 Wiesbaden

Mario Hergesell

Mario.Hergesell@hlnug.hessen.de

Inhalt

1	Ein	leitung	5
2	KL	IWA-Stresstest: Zwei Wege zum Ziel	6
	2.1	Szenarientyp 1: Ansatz über "Stellvertreter-Zeiträume"	7
	2.2	Szenarientyp 2: Ansatz über Wahrscheinlichkeiten	8
3	Dui	rchführung eines KLIWA-Stresstests	8
	3.1	Allgemeiner Ablauf der Szenarienbildung	8
	3.2	Auswahl des Szenarientyps (=Arbeitsblock 1)	10
	3.3	Empfehlungen zu den Eingangsdaten	11
	3.3.	.1 Datengrundlage	11
	3.3.	.2 Zeiträume	11
	3.3.	Räumliche Ausdehnung	12
4	Em	pfehlungen zur Auswertung	12
5	Lite	eratur	13
A	NHAN	NG A SZENARIENTYP 1	14
	A.1	Datengrundlagen	14
	A.2	Räumliche Ausdehnung	14
	A.3	Arbeitsschritte zur Auswahl/Erzeugung charakteristischer bzw. extremer Ereign (= Arbeitsblock 2)	
	A.4	Arbeitsschritte zur Kombination charakteristischer Ereignisse über Kriterienkata	
		(=Arbeitsblock 3)	
	A.5	Allgemeine Hinweise/Empfehlungen	16
A	NHAN	NG B SZENARIENTYP 2	17
	B.1	Datengrundlagen	17
	B.2	Räumliche Ausdehnung	17
	B.3	Arbeitsschritte zur Erzeugung charakteristischer Ereignisse mittels Wahrscheinlichkeiten (= Arbeitsblock 2)	17
	B.4	Arbeitsschritte zur Modifikation extremer Ereignisse (= Arbeitsblock 3)	
	B.5	Allgemeine Hinweise/Empfehlungen	

Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 1: Schema der Arbeitsschritte innerhalb des KLIWA-Stresstests (Stand	
21.05.2019)	9
Tabellenverzeichnis	
Tabelle 1: Kriterientabelle zur Auswahl des Szenarientyps	10
Tabelle 2: Empfehlung für (hydro-)meteorologische Variablen zur Beschreibung	
charakteristischer Ereignisse (Arbeitsschritt 2)	15

1 Einleitung

In KLIWA wurde ein methodischer Ansatz zur Durchführung von Stresstests entworfen. Dieser wurde von den Arbeitsgruppen Grund- und Niedrigwasser erstmals auf dem 6. KLIWA Symposium (2017) vorgestellt. Dieser Ansatz verfolgt zwei Ziele:

- 1) Die Sensitivität eines Gebietes gegenüber (hydro-)meteorologischen Ereignissen zu ermitteln und
- 2) darauf aufbauend die damit verbundenen Auswirkungen auf verschiedene wasserwirtschaftliche Nutzungen in diesem Gebiet abschätzen zu können.

Im Fokus stehen zunächst die Auswirkungen von meteorologischer Trockenheit auf Grundwasser und Oberflächengewässer. Für den Themenbereich Gewässerökologie sind mittelfristig ebenfalls Stresstestuntersuchungen angedacht.

Ein Stresstest im Allgemeinen analysiert die Sensitivität und Anpassungsfähigkeit eines Systems, das einer erhöhten Beanspruchung ("Exposition") ausgesetzt wird. Der KLIWA-Stresstest im Speziellen ist eine im Vorhaben KLIWA abgestimmte und standardisierte Methode zur Erstellung von Szenarien dieser erhöhten Exposition (Stresstestszenarien) und zur Auswertung und Darstellung der Sensitivität und Anpassungsfähigkeit.

Die Ergebnisse des KLIWA-Stresstests ermöglichen eine ereignis- und gebietsspezifische Quantifizierung der (potenziellen) Auswirkungen von besonderen klimatischen und hydrologischen Verhältnissen auf ein System. Dieses System kann dabei sowohl natürlich sein (z. B. ein Einzugsgebiet) als auch anthropogen (z. B. eine bestimmte wasserwirtschaftliche Nutzung). Damit geben die Ergebnisse des KLIWA-Stresstests Auskunft über Grenzen der Belastbarkeit der betrachteten Umwelt- und wasserwirtschaftlichen Systeme in Süddeutschland. Solche Belastbarkeitsgrenzen dienen auch als Orientierungshilfe für Planungen weiterer Akteure (Wasserversorger, etc.). Des Weiteren hat der KLIWA-Stresstest eine hohe Anschaulichkeit und eignet sich auch als eine Ergänzung zur Betrachtung von Klimaprojektionen.

Ziel dieses Leitfadens ist es, einen Überblick über die beiden aktuell vorhandenen Stresstestszenarien innerhalb des KLIWA-Stresstests zu geben. Dazu wird auf

- das Grundkonzept des KLIWA-Stresstests (Kapitel 2),
- die grundlegenden Kriterien zur Durchführung (Kapitel 3, Anhänge A & B) sowie
- Empfehlungen zur Auswertung und Bewertung (Kapitel 4)

eingegangen. Der Leitfaden soll auch eine Entscheidungshilfe für die Wahl des Szenarientyps je nach Fragestellung sein.

2 KLIWA-Stresstest: Zwei Wege zum Ziel

Der KLIWA-Stresstest besteht grundsätzlich aus einer Bearbeitungskette mit vier Elementen:



(Hydro-)meteorologische oder hydrologische Szenarien des KLIWA-Stresstests beruhen immer auf vergangenen Zeiträumen mit einer bestimmten Charakteristik, welche eine Belastungssituation hervorruft. KLIWA unterscheidet zwischen zwei Szenarientypen:

- *Szenarientyp 1* ("Stellvertreter-Zeiträume") löst die einzelnen gemessenen Zeiträume aus ihrem ursprünglichen zeitlichen Verbund und kombiniert diese zu neuen Stresssituationen (z. B. Rekombination von historischen Trocken- und Feuchtperioden).
- Szenarientyp 2 ("Wahrscheinlichkeiten") modifiziert die Zeitreihe einer Größe, sodass ein gemessenes (Extrem)-Ereignis eine vorher definierte Wahrscheinlichkeit erhält (z. B. reduzierte Grundwasserneubildung mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren).

Welcher Szenarientyp geeignet ist, hängt sowohl von der Fragestellung als auch den Randbedingungen ab (siehe Kap. 3.2). Eine detaillierte Beschreibung und Diskussion der Vor- und Nachteile der beiden Szenarientypen findet sich in KLIWA-Heft 23, Tab. 5-5. Welches Wirkmodell durch die Szenarien angetrieben wird, ist für die Szenarienbildung selbst irrelevant.

Den Szenarientypen gemein ist, dass die Belastungssituation für eine bestimmte Fragestellung über drei Bestandteile definiert wird: 1) Welches System wird unter Stress gesetzt (z. B. Grundwasserleiter)? 2) Was löst den Stress aus (z. B. geringe Grundwasserneubildung)? 3) Was ist die Stressreaktion bzw. Systemantwort (z. B. Basisabfluss im Gewässer). Daran kann als vierter Bestandteil die Frage angeschlossen werden, welche wasserwirtschaftlichen Nutzungen von der Belastungssituation betroffen sind und in welcher Weise.

Wirkmodelle werden mit den hydrometeorologischen oder hydrologischen Szenarien angetrieben (z. B. Grundwassermodell mit Grundwasserneubildungsszenarien). Sie berechnen die szenariospezifische, räumliche und zeitliche Ausprägung von Systemvariablen (z. B. Basisabfluss).

Kennwerte fassen Ausprägungen von Systemvariablen zusammen (z. B. gewässerkundliche Niedrigwasserkennwerte).

Die **Interpretation** der Kennwerte ist vom Szenarientyp abhängig und erfolgt unter den Gesichtspunkten

- Was passiert, wenn bekannte Ereignisse in einer häufigeren/ungünstigeren Kombination auftreten (*Szenarientyp 1*)?
- Was passiert, wenn ein Ereignis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt (*Szenarientyp 2*)?

Beide Szenarientypen werden im Folgenden hinsichtlich ihres Verwendungsbereichs und ihrer Merkmalsausprägung kurz erläutert. Weitere Information zu allgemeinen Arbeitsschritten für die Durchführung eines KLIWA-Stresstest findet sich in den nachfolgenden Kapiteln und im Anhang wieder.

2.1 Szenarientyp 1: Ansatz über "Stellvertreter-Zeiträume"

Ziel: Auswirkungen auf Wassernutzungen im Vergleich zu vergangenen Ereignissen.

<u>Verwendungsbereich:</u> Wenn einfache und klar kommunizierbare Ergebnisse erforderlich sind.

Gemessene Zeiträume sind anschaulich, da diese Ereignisse "erlebt" worden sind und somit leichter ein Bezug hergestellt werden kann.

<u>Hintergrund:</u> Auf Basis der Messungen wird ein synthetisches Stresstestszenario erstellt, indem singuläre "Stellvertreter-Zeiträume" (Halbjahre, ganze Jahre, Witterungen, etc.) aneinandergereiht werden.

Die Vergleichsgrundlagen bilden dabei die Daten eines festgelegten Referenzdatensatzes für ein ausgewähltes Fallstudiengebiet im Gebietsmittel. Die "Stellvertreter-Zeiträume" zeichnen sich durch eine besondere Charakteristik (Stressor) in Bezug auf wichtige Variablen (Systemeingangsgrößen) wie z. B. Niederschlag und Temperatur aus und werden in Kombinationen mit weiteren Zeiträumen unterschiedlicher Charakteristik zu Simulationszeiträumen zusammengefügt. Welche Charakteristik diese Zeiträume haben, hängt von der Fragestellung ab.

<u>Arbeitsschritte</u>: Die allgemeinen Arbeitsschritte beschreibt Anhang A. Ein konkretes Umsetzungsbeispiel ist im Dokument "Szenarientyp 1: Beispiel eines Stresstest der AG GW Bayern" zu finden.

<u>Hinweis:</u> Die Zusammenstellung von "Stellvertreter-Zeiträumen" ist zu einem gewissen Grad stets auch eine Ermessensentscheidung des Bearbeiters.

2.2 Szenarientyp 2: Ansatz über Wahrscheinlichkeiten

<u>Ziel:</u> Auswirkung auf Wassernutzungen bei Ereignissen mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten und unterschiedlichen Sekundärmerkmalen (z. B. Dauer).

<u>Verwendungsbereich:</u> Wenn die Vulnerabilität eines Systems, d. h. die Empfindlichkeit und Anpassungskapazität, der Wahrscheinlichkeit einer Störung gegenübergestellt werden soll (Sensitivitätsuntersuchung).

Hintergrund: Für eine gemessene Variable (Systemeingangsgröße) wird ein Zeitraum mit einer bestimmten Charakteristik gewählt. Dieser wird so modifiziert, dass die Ausprägung der Variablen bzw. das Stressereignis in diesem Zeitabschnitt einer Wahrscheinlichkeit entsprechen, die im Vorfeld mittels Extremwertstatistik ermittelt wurde (Stressor). Dabei ist möglich, auch Sekundärmerkmale (z. B. Dauer, Fülle, Defizit, ...) einzubeziehen.

Grundlage für die Extremwertstatistik bildet ein möglichst langer Referenzdatensatz für ein ausgewähltes Fallstudiensystem bzw. -gebiet.

Die Verwendung von Wahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten ist bei der Analyse von Hochwassergefahren und bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen etc. vorgeschriebene Praxis. Viele wasserwirtschaftliche Systeme müssen so bemessen sein, dass sie bis zu einem bestimmten Störungsniveau (z. B. Hochwasserscheitel) funktionieren. Anlagen des technischen Hochwasserschutzes sind hinsichtlich ihrer Vulnerabilität eher einfache Systeme. Die Vulnerabilität lässt sich über klar erkennbare, eindimensionale Grenzwerte des Wasserstandes bzw. Abflusses definieren: Ist der Wasserstand höher als der Grenzwert, läuft die Schutzanlage über. Dahingegen richtet sich der *Szenarientyp 2* an komplexe Systeme (z. B. ganze Einzugsgebiete oder Ökosysteme). Zu diesen ist für gewöhnlich nicht bekannt, wie stark sie auf unterschiedliche Niveaus einer Störung reagieren und ob durch Kombinationseffekte Verzögerungen oder Sprünge in der Auswirkung auftreten. *Szenarientyp 2* kann die Störungsniveaus stufenlos variieren. Die resultierenden Auswirkungen lassen sich direkt den Störungsniveaus zuordnen und diskontinuierliche Änderungen identifizieren.

Arbeitsschritte: Die allgemeinen Arbeitsschritte beschreibt Anhang B.

3 Durchführung eines KLIWA-Stresstests

3.1 Allgemeiner Ablauf der Szenarienbildung

Das Grundgerüst für die Bildung der "(hydro-)meteorologischen oder hydrologischen Szenarien" (siehe auch Kap. 2) ist für alle Szenarientypen gleich. Abbildung 1 zeigt die Arbeitsblöcke (dunkelblau hinterlegt) als schematischen Überblick: Zu Beginn steht die Auswahl des Typs zur Szenarienbildung (1) mithilfe einer Kriterientabelle (Kapitel 3.2). Darauf folgt die Auswahl bzw. Erzeugung von einzelnen Zeiträumen mit bestimmter Charakteristik (2)

und anschließend die **Bildung von Szenarienzeiträumen** (3). Die Szenarienzeiträume gehen schließlich in die **Wirkmodellierung** und **Auswertung** (4 & 5) ein.

Dieses Grundgerüst wird mit definierten Arbeitsschritt-Bausteinen (blau hinterlegt) gefüllt. Diese Bausteine bauen aufeinander auf (dicke blaue Pfeile) und unterscheiden sich durch die Anforderungen des jeweiligen Szenarientyps methodisch voneinander.

Zum Inhalt der Arbeitsschritt-Bausteine sei auf die Anhänge A (Szenarientyp 1) und B (Szenarientyp 2) verwiesen. Sie geben die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der Bausteine in Form allgemeiner Festlegungen vor. Zum besseren Verständnis wird diese Rahmenvorgabe durch gesonderte Steckbriefe mit konkreten Umsetzungsbeispielen aus bereits durchgeführten Studien ergänzt. Dies betrifft unterschiedliche Themenbereiche (z. B. Grundwasser, Niedrigwasser).

Empfehlungen zur Datengrundlage folgen im Kapitel 0.

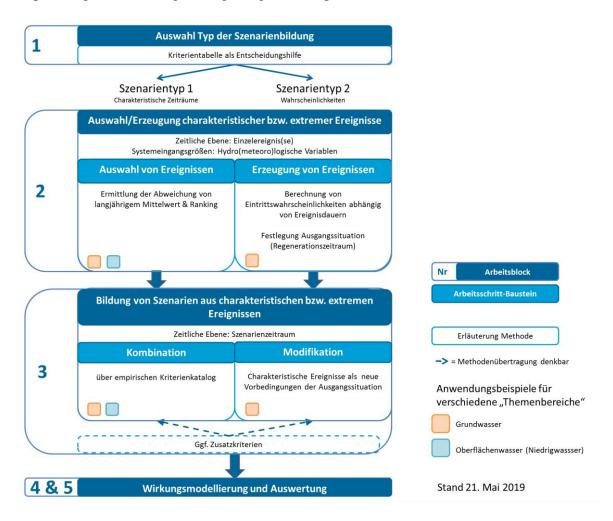


Abbildung 1: Schema der Arbeitsschritte innerhalb des KLIWA-Stresstests (Stand 21.05.2019)

3.2 Auswahl des Szenarientyps (=Arbeitsblock 1)

Die Bildung von KLIWA-Stresstest-Szenarien ist mit zwei verschiedenen Szenarientypen möglich. Tabelle 1 gibt eine Entscheidungshilfe: Treffen überwiegend die Kriterien a) zu, ist *Szenarientyp 1* (Stellvertreter-Zeiträume) von Vorteil, treffen überwiegend die Kriterien von b) zu, ist *Szenarientyp 2* (Wahrscheinlichkeiten) zu wählen.

Tabelle 1: Kriterientabelle zur Auswahl des Szenarientyps

Tabelle 1. Kitterlentabelle zi	ır Auswahl des Szenarientyps	
Entscheidungskriterium	a)	b)
Ziel	gute Kommunizierbarkeit, Realitätsnä- he über bekannte Bedingungen der Vergangenheit	Systemreaktion auf Bemessungsereignisse (Ereignisse mit bestimmter Wahrscheinlichkeit und Ausprägung)
		Sensitivitätsanalyse
Konsistenz der hydrome- teorologischen Größen	Betrachtung/Wirkmodell erfordert mehrere zueinander konsistente (hyd- ro-)meteorologische Größen	Betrachtung/Wirkmodell benötigt nur eine oder keine zueinander konsistenten (hydro-)meteoro- logischen Größe
Räumliche Vergleich- barkeit	Vergleichbarkeit der Ausprägung des Stresstestszenarios zwischen verschie- denen Teilgebieten ist weniger relevant (aber qualitativ möglich)	Ausprägung des Stresstestszenarios soll quantifizierbar, räumlich mög- lichst ähnlich und vergleichbar sein
Werkzeuge	Wenig Bearbeitungskapazitäten, Werkzeuge zur automatisierten Vorauswahl und Analyse zu erstellen	Bearbeitungskapazitäten zur Erstellung von Werkzeugen zur automatisierten Vorauswahl und Analyse sind vorhanden
Bearbeitungsaufwand	Abarbeitung/Auswertung vieler verschiedener Stresstestvarianten ist nicht möglich bzw. wird nicht als nötig erachtet	automatisierte Abarbeitung mög- lich → Bei Bedarf viele verschie- dene Stresstestvarianten möglich, um Grenzzustände zu identifizieren
Arbeitsschritte	Siehe Anhang A	Siehe Anhang B
	⇒ Szenarientyp 1 (Stellvertreter- Zeiträume) von Vorteil	⇒ Szenarientyp 2 (Wahrscheinlichkeiten) von Vorteil

3.3 Empfehlungen zu den Eingangsdaten

3.3.1 Datengrundlage

Der KLIWA-Stresstest benötigt Zeitreihen von repräsentativen Messdaten hydrometeorologischer Größen im gesamten Untersuchungsgebiet. Die zeitliche Auflösung der Zeitreihen richtet sich nach der Fragestellung des jeweiligen KLIWA-Stresstest-Szenarios sowie den Anforderungen des Wirkmodells.

Relevante Prozesse (z. B. Extremwerte) müssen durch die Daten abgebildet werden. Bei Ereignissen kurzer Dauer empfiehlt sich die Tageswertauflösung. Sind als charakteristische Ereignisse jedoch beispielsweise Halbjahre mit bestimmten mittleren Eigenschaften von Interesse, kann zu deren Auswahl eine monatliche oder gar halbjährliche Auflösung der Zeitreihe ausreichend sein.

Die Auswahl/Erzeugung der Zeiträume mit bestimmter Charakteristik sollte nach Möglichkeit auf dem gleichen Datensatz beruhen, mit dem auch das Wirkmodell betrieben wird. Ist dies nicht möglich, soll zumindest auf eine größtmögliche Ähnlichkeit beider Datensätze geachtet werden. Das betrifft vor allem:

- den Raumbezug: Beide Datensätze sollten bestenfalls deckungsgleich sein, mindestens aber das Untersuchungsgebiet vollständig abdecken. Weiterhin sollte eine ähnliche räumliche Auflösung vorliegen, um Skaleneffekte zu vermeiden (betrifft vor allem Rasterdaten).
- den Wertebereich innerhalb des Untersuchungsgebietes: Flächenhafte Eingangsdaten werden über Interpolationsverfahren erzeugt. Je nach Methode können sich deren Ergebnisse unterscheiden und demnach eine unterschiedliche Häufigkeitsverteilung bzw. unterschiedliche Extremwerte besitzen. Dies beeinflusst die Auswahl/Erzeugung charakteristischer Ereignisse. Bei unterschiedlichen Wertebereichen der Eingangsdatensätze sind die Ergebnisse der Wirkungsmodellierung ggf. nicht mehr konsistent.

3.3.2 Zeiträume

Beide Szenarientypen bedienen sich eines "Referenz- und Ereigniszeitraumes" sowie eines "Szenarienzeitraumes". Der Referenz- und Ereigniszeitraum sind Bestandteil des Arbeitsblockes 2, der Szenarienzeitraum Bestandteil des Arbeitsblockes 3 (Abbildung 1).

Der **Referenzzeitraum** beschreibt den Wertebereich eines langjährigen Verhaltens. In *Szena- rientyp 2* dient der Referenzzeitraum zur Ableitung der Extremwertstatistik. In *Szenarientyp 1* werden aus dem Referenzzeitraum die langjährigen mittleren Eigenschaften berechnet.

Es wird eine mindestens 30-jährige Zeitreihe für den Referenzeitraum empfohlen. Insbesondere für den Referenzeitraum von *Szenarientyp 2* sind sehr lange Zeitreihen von Vorteil.

Aus dem **Ereigniszeitraum** werden die charakteristischen Ereignisse des KLIWA-Stresstest abgeleitet. Für *Szenarientyp 2* sind Referenz- und Ereigniszeitraum gleich. Für *Szenarientyp 1* können beide Zeiträume identisch sein, müssen aber nicht.

Der **Szenarienzeitraum** ergibt sich aus der Neukombination/Modifikation der charakteristischen Ereignisse. Seine Länge hängt von der Fragestellung ab und kann sowohl Monate (*Szenarientyp 2*) als auch Jahre umfassen (*Szenarientyp 1*).

3.3.3 Räumliche Ausdehnung

Die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebietes eines KLIWA-Stresstests richtet sich nach der Fragestellung und kann beispielsweise einen Naturraum, ein ober- oder unterirdisches Einzugsgebiet oder sonstige Abgrenzungen umfassen.

Eine Empfehlung zu Mindest- bzw. Maximalgrößen eines Untersuchungsgebietes orientiert sich an folgenden Kriterien:

- mindestens: modelltechnisch ausreichend belastbar abbildbare Gebietsgröße
- maximal: vergleichbare meteorologische Bedingungen innerhalb des Gebietes → Prüfung im Vorfeld

Die Auswahl eines deutlich größeren räumlichen Gebiets, z. B. einer Landesfläche, kann je nach Fragestellung aber ebenfalls infrage kommen. Dann kann es sinnvoll sein, unterschiedliche naturräumliche Eigenschaften innerhalb eines Untersuchungsgebietes über Zusatzkriterien in den Arbeitsschritten zu berücksichtigen. Dies ist in der Ergebnisinterpretation zu diskutieren.

4 Empfehlungen zur Auswertung

Die Auswertung des KLIWA-Stresstests richtet sich im Detail nach dem Szenarientyp, dem betrachteten System (z. B. unterirdisches Einzugsgebiet) und der jeweiligen Fragestellung. Aus den Erfahrungen der durchgeführten Stresstest-Fallstudien können jedoch allgemeingültige Empfehlungen abgeleitet werden.

So empfiehlt es sich, in der Beschreibung der Stressreaktion hydro(geo-)logische Variablen zu verwenden, die in der wasserwirtschaftlichen Praxis gängig sind (z. B. MQ, MNQ). Dies erleichtert die Kommunikation der Ergebnisse.

Bei einem Stresstest als Sensitivitätsuntersuchung interessiert das gesamte Spektrum der Stress-Reaktionen. Daher sind nicht nur mittlere Zustände auszuwerten, sondern es ist vor allem die Bandbreite von Stressreaktionen (Minima, Maxima) zu betrachten.

Sofern ein Vergleich mit den Ergebnissen von Klimaprojektionen angestrebt wird, sollten relative Abweichungen in Bezug auf den gängigen Referenzzeitraum (in KLIWA 1971-2000)

dargestellt werden. Denkbar sind auch Absolutwerte, die sich aus einer Delta-change-Berechnung aus Messwerten und (relativen) Abweichungen des Stresstests bzw. der Projektionen ergeben. Das erleichtert die Kommunikation. In beiden Fällen ist aber zu beachten, dass Klimaprojektionen bei der Abbildung von Extremwerten Schwächen haben.

Der *Szenarientyp 1* ist innerhalb des Szenarienzeitraums durch einen Wechsel von Stress- und Erholungsphasen charakterisiert. Hier empfiehlt sich die Wirkung der jeweiligen Phasen auszuwerten, beispielsweise auf Basis des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses (Mo-MNQ) im Sommerhalbjahr, um Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung abzuschätzen. Im Sommerhalbjahr treten üblicherweise Niedrigwasserverhältnisse bei gleichzeitig hohem Wasserbedarf seitens der Bevölkerung auf.

In *Szenarientyp* 2 eignen sich die Kenngrößen maximale Ausprägung einer Stressreaktion und Regenerationsdauer gut, um die Elastizität eines Systems unter unterschiedlichen charakteristischen Ereignissen zu beschreiben. Sie beziehen sich jeweils auf eine bestimmte Auswirkungsvariable (z. B. Basisabfluss).

Beispiele zur Auswertung von KLIWA-Stresstests finden sich in den KLIWA-Heften 22 und 23 (KLIWA 2018a bzw. 2018b) sowie dem Bericht zur Pilotstudie Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale (LFU 2018).

5 Literatur

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2018a): Klimawandel in Süden Deutschlands; Herausforderungen - Anpassungen. Folgen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte, Heft 22.

KLIWA, KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERWIRTSCHAFT (2018b): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen. KLIWA-Berichte, Heft 23.

LFU, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2018): Pilotstudie Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale. Bericht aus der Kooperation KLIWA (Klimawandel und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft). 275 S.

ANHANG

Die in Abbildung 1 gezeigten Abläufe der Arbeitsschritte für den *Szenarientyp 1* "Stellvertreter-Zeiträume" und *Szenarientyp 2* "Wahrscheinlichkeiten" werden im folgenden Anhang detailliert erläutert. Dabei sind im Anhang A die Arbeitsschritte für den *Szenarientyp 1* beschrieben, im Anhang B für den *Szenarientyp 2*.

ANHANG A SZENARIENTYP 1

A.1 Datengrundlagen

<u>Für die Auswahl charakteristischer Ereignisse:</u> Flächendeckender Datensatz von Niederschlag und Temperatur, monatliche Auflösung (z. B. Langzeitsimulation der Vergangenheit der KLIWA-Länder mittels GWN-BW im Zeitraum 1951-2018)

<u>Für Wirkmodellierung:</u> Datensatz, der alle relevanten Eingangsgrößen des Wirkmodells in der benötigten zeitlichen Auflösung enthält (z. B. HYRAS)

A.2 Räumliche Ausdehnung

Nach Fragestellung, z. B.

- Naturräume
- Untersuchungsgebiete (z. B. ober- oder unterirdische Einzugsgebiete)

A.3 Arbeitsschritte zur Auswahl/Erzeugung charakteristischer bzw. extremer Ereignisse (= Arbeitsblock 2)

- 1. Erstellung eines Grobkonzepts zur gewünschten Belastungssituation in Abhängigkeit der Fragestellung, d. h.:
 - a. Welche Arten von charakteristischen Einzelereignissen sollen kombiniert werden (z. B. Normaljahre + Jahre mit trockenem Frühjahr + Jahre mit feuchtem Sommer + ...)?
 - b. Welche Jahresabschnitte (z. B. hydrologisches Jahr, Halbjahre, Monate, ...) sind dafür zu betrachten?
 - c. In welcher Reihenfolge soll die Kombination ungefähr stattfinden? Die genaue Kombination ist in einem folgenden Arbeitsschritt (siehe Kap.A.4) zu spezifizieren
- 2. Festlegung der notwendigen (hydro-)meteorologischen Variablen zur Beschreibung der charakteristischen Ereignisse (Empfehlung siehe Tabelle 2, je nach Fragestellung mehrere Variablen möglich)
- 3. Festlegung des Ereignis- und des Referenzzeitraums
- 4. Bildung der langjährigen mittleren Eigenschaften der gewählten (hydro-)meteorologischen Variablen im festgelegten Jahresabschnitt für den Referenzzeitraum im Untersuchungsgebiet (Gebietsmittelwert)

- 5. Berechnung der Abweichung der hydrometeorologischen Variablen je Jahresabschnitt (Jahr, Halbjahr, Monate, ...) vom jeweiligen langjährigen Mittelwert; die Berechnung erfolgt im Ereigniszeitraum jahresweise
- 6. Klassifizierung der Abweichungen je Jahresabschnitt (Vorsortierung der Ereignisse)
- 7. Bildung einer Rangliste der Ereignisse entsprechend der Stärke ihrer Abweichung vom Mittelwert
- 8. Auswahl der gewünschten charakteristischen Ereignisse entsprechend der Abweichungen, der Vorsortierung und der Rangliste.
 - a. Besonders hohe Abweichungen gelten als Extremereignisse
 - b. Bei Bedarf gemeinsame Betrachtung mehrerer Variablen
- 9. OPTIONAL: Betrachtung von Zusatzkriterien parallel zu Schritt 8
 - a. Berücksichtigung des Verlaufs innerhalb eines Einzelereignisses (ggf. sind Perioden mit "störenden" Eigenschaften als Ausschlusskriterium zu werten)
 - b. Berücksichtigung der Aktualität gewählter charakteristischer Ereignisse (Kommunizierbarkeit)
 - c. Wenn Daten zur Jahresauswahl ungleich Eingangsdatensatz für Wirkmodell: unbedingt Zeitraum der Datenverfügbarkeit prüfen!
 - d. Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Meteorologie (bei großen Gebieten und wenn mehrere Naturräume erfasst werden)
 - e. Im Bedarfsfall: Kombination von Einzelereignissen mit bestimmten Eigenschaften zu Zielereignis, wenn kein entsprechendes Ereignis im Referenz- oder Modellierungsdatensatz vorhanden (Beispiel siehe Exkurs 02)

Tabelle 2: Empfehlung für (hydro-)meteorologische Variablen zur Beschreibung charakteristischer Ereignisse (Arbeitsblock 2, Schritt 2)

	Variable		
	Meteorologisch	Hydrologisch	Sonstige
Bereits angewen- det/empfohlen	Niederschlag, Temperatur		
Optional möglich, ggf. als Zusatzkriterium (bisher nicht umgesetzt)	Klimatische Wasserbilanz, Globalstrahlung,	Grundwasserneubildung, pegelbezogene Abfluss- größen,	Wassertemperatur,

A.4 Arbeitsschritte zur Kombination charakteristischer Ereignisse über Kriterienkatalog (=Arbeitsblock 3)

- 1. Definition der Szenariendauer (z. B. 30 Jahre wie die KLIWA-Stresstests)
- 2. Kombination der charakteristischen Ereignisse mit folgenden Mindestanforderungen:
 - a. mind. 1 Normaljahr zu Beginn, das nicht in die Stresstestdauer hinein gezählt wird → Ziel: Einschwingen und Normalisieren des Systems
 - b. gemäßigte Trockenjahre (trockener Winter und trockener Sommer) hintereinander mit nachgeschalteter Erholungsphase (z. B. 2x Normaljahr + 1x feuchter Sommer)

- Ziel: Betrachtung der rein sommerlichen Zehrung
- c. x (1-3) Extremjahre (trockener Winter und trockener Sommer) hintereinander mit nachgeschalteter Erholungsphase von x Jahren Dauer
 - Ziel: Betrachtung eines generellen Wassermangels kürzerer Zeiträume
- d. x (>3) Extremjahre (trockener Winter und trockener Sommer) hintereinander mit nachgeschalteter Erholungsphase von x Jahren Dauer Ziel: Suche neuer Gleichgewichtszustände
- e. zwischen Stressphasen jeweils 2x nasser Winter + 1x Normaljahr Ziel: System normalisieren:
- 3. Die weitere Füllung der Stresstestdauer unterliegt keiner Vorgabe
- 4. Zusatzkriterien (optional):
 - a. Vorabschätzung einer maximalen Trockenheitsdauer über MNQ/MQ-Verhältnis an ausgewählten Pegeln
 - Ziel: ausreichende Anzahl von Jahren, wenn neue Gleichgewichtszustände erfasst werden sollen
 - b. Nutzung des Wahrscheinlichkeitsansatzes, angewendet auf Andauern von Defizitphasen (klimatische Wasserbilanz?)
 - Ziel: Einordnung von Stresstest-Situationen in Verhalten in der Vergangenheit und über Klimaprojekten in der Zukunft (siehe c)
 - c. Eingrenzung der Dauer von Extremphasen/Erholungsphasen: Informationen zur Häufigkeit aus Klimaprojektionen (Bedingung: Screening-Werkzeug vorhanden)
 - Ziel: Betrachtung ausgewählter Bereiche des Projektionsensembles (z. B. untere oder obere Bandbreite)

A.5 Allgemeine Hinweise/Empfehlungen

Die Kombination von Einzelereignissen zu neuen Zeitreihen benötigt im Allgemeinen die Vergabe eines fiktiven Simulationsdatums und ggf. eine Korrektur von Schalttagen. Andernfalls können Probleme in der Wirkmodellierung oder der späteren Auswertung auftreten.

BEISPIEL: Bereich Trockenheit/Oberflächenwasser (Pilotstudie Bayern): Erläuterung zu Arbeitsschritt 9 e.

Der KLIWA-Stresstest in der Niedrigwasser-Pilotstudie Bayern sollte als Einzelereignis unter anderem das hydrologische Jahr 2015 mit trockenem Winter und darauffolgendem trockenen Sommer enthalten. Der meteorologische Eingangsdatensatz für die Wasserhaushaltsmodellierung umfasste 2015 jedoch nicht. Daher wurde das gewünschte Einzelereignis über die Kombination des trockenen Winterhalbjahrs von 1996 und des trockenen Sommerhalbjahrs von 2003 zusammengestellt.

ANHANG B SZENARIENTYP 2

B.1 Datengrundlagen

- Zeitreihen der gemessenen Vergangenheit, ggf. durch Modellierung erzeugte Variablen (GWN-BW, RoGER) als Grundlage für den Ereignis- bzw. Referenzzeitraum (siehe Kap. 3.3.2)

B.2 Räumliche Ausdehnung

Nach Fragestellung, z. B.

- Naturräume
- Untersuchungsgebiete (z. B. ober- oder unterirdische Einzugsgebiete)

B.3 Arbeitsschritte zur Erzeugung charakteristischer Ereignisse mittels Wahrscheinlichkeiten (= Arbeitsblock 2)

- 1. Festlegung des Grundgerüsts des Stresstests. Dabei werden die drei Bestandteile einer Belastungssituation für eine Fragestellung definiert:
 - Welches *System* wird unter Stress gesetzt (z. B. Grundwasserleiter)? Was löst den *Stress* aus (z. B. geringe Grundwasserneubildung)? Was ist die *Stressreaktion* Systemantwort bzw. (z. B. Basisabfluss im Gewässer). Dabei gibt es folgende Festlegungen und Variationsmöglichkeiten:
 - a. Stressor: (extreme) Ausprägung einer Systemeingangsgröße, durch die Stress erzeugt wird (das Stress auslösende Ereignis). Im Beispiel des GW-Stresstests ist die Systemeingangsgröße die Grundwasserneubildung, der Stressor ist die Grundwasserneubildungs-Unterschreitung mit bestimmter Jährlichkeit. Entsprechend dieser Definition kann Stressor aber auch ein Hochwasser oder Starkregen mit bestimmter Wahrscheinlichkeit sein (die Systemeingangsgröße sind dann Abfluss- bzw. Niederschlagszeitreihen).
 - Der Stressor kann mit zusätzlichen Kenngrößen beschrieben werden (z. B. mit Dauer eines Ereignisses). Es handelt sich dann um einen mehrdimensionalen Stressor.
 - b. Ein mehrdimensionaler Stressor ermöglicht, charakteristische Ereignisse zu definieren (z. B. Kombinationen von Andauern und Eintrittswahrscheinlichkeiten der Stresskenngröße). Ein Beispiel hierfür ist der KOSTRA-Bemessungsniederschlag.
 - c. Referenzzeitraum: Zeitraum zur Bildung der Extremwertstatistik (Schritt 3) und des langjährigen mittleren Verhaltens
 - d. Ereigniszeitraum: Setzt sich zusammen aus dem Stresszeitraum und dem unmittelbar anschließenden Regenerationszeitraum. Die Datengrundlage für beide Zeiträume ist jeweils ein zusammenhängender Ausschnitt aus der gemessenen Vergangenheit.

- i. Stresszeitraum: Dies ist der Zeitraum, in dem das System den jeweiligen charakteristischen Ereignissen ausgesetzt wird. Er ist mindestens so lang, wie das längste charakteristische Ereignis. Im Beispiel des Grundwasserstresstests wird die gemessene Grundwasserneubildung einer Trockenperiode verwendet. Der Stresszeitraum kann aber auch ein durchschnittlicher Systemzustand sein.
- ii. Regenerationszeitraum: Dies ist der Zeitraum, in dem das System sich vom Stress regeneriert. Dies können gemessene Extremjahre oder auch durchschnittliche Jahre sein. Die Auswahl richtet sich nach der Frage, in welchem Zustand bzw. unter welchen Bedingungen sich das System erholen soll?
- 2. Ermittlung der zeitlichen Skala relevanter Prozesse: Bei Niedrigwasser genügen Tageswerte, bei Hochwasser werden mindestens stündliche Daten benötigt.
- 3. Ermittlung der Ausprägung von Ereignissen bestimmter Wahrscheinlichkeit: Bildung einer Extremwertstatistik des Stressors (z. B. Grundwasserneubildung) für unterschiedliche Andauern: Der Systeminput wird mit Methoden der Extremwertstatistik analysiert (Ergebnis ist z. B. Extremwertverteilung der jährlichen Grundwasserneubildungssumme)
- 4. Auswahl gemessener Ereignisse

B.4 Arbeitsschritte zur Modifikation extremer Ereignisse (= Arbeitsblock 3)

- 5. Ermittlung des Faktors $F = S_w(W, x, y, ...)/S_g(x, y, ...)$ für verschiedene W und konstanten Zusatzkenngrößen (x,y,...), beispielsweise der Dauer. Dabei $ist\ S_w(W,x,y,...)$ ein Stressor eines Ereignisses mit bestimmter Wahrscheinlichkeit (W) und mit evtl. Zusatzkenngrößen (x,y,...), das in Schritt 3 ermittelt wurde. $S_g(x,y,...)$ ist ein gemessenes Ereignis evtl. mit den Zusatzkenngrößen (x,y,...)
- 6. Modifikation des Stresszeitraums der ausgewählten gemessenen Ereignisse (bei konstanten Eigenschaften *x*,*y*,...). Gemessene Ereignisse werden dabei so modifiziert, dass sie danach eine bestimmte Wahrscheinlichkeit aufweisen:
 - a. Das charakteristische Ereignis endet stets mit dem Ende des Stresszeitraums, beginnt also so lang vorher wie die Andauer über weitere Kenngrößen (x,y,...) definiert ist (z. B. 2 Monate vor Ende des Stresszeitraums)
 - b. Berechnung erfolgt für jeden Zeitschritt in der unter Arbeitsschritt 2 festgelegten zeitlichen Auflösung (z. B. für jeden Tag)
 - c. Multiplikation von F (Arbeitsschritt 5) mit dem Wert jedes Zeitschritts des gemessenen Ereignisses.
- 7. OPTIONAL: Variation zusätzlicher Kenngrößen bei konstanter Wahrscheinlichkeit:
 - a. Ermittlung von F (siehe Schritt 5) wobei die Kenngrößen (x,y,...) variiert werden und W konstant gehalten wird.
 - b. Entsprechend Schritt 6 werden die Ereignisse für variable, zusätzliche Kenngrößen ermittelt.

B.5 Allgemeine Hinweise/Empfehlungen

In der Pilotstudie Niedrigwasser Baden-Württemberg wurden folgende Varianten zur Modifikation der charakteristischen Ereignisse geprüft:

- Variation des gemessenen Vorgängerjahrs: Stress- und Regenerationszeitraum basieren nicht auf einer zusammenhängenden Zeitreihe, sondern werden unabhängig voneinander kombiniert.
- Durchführung der Schritte 3 bis 6 nicht auf Grundlage einer Extremwertstatistik der gemessenen Vergangenheit, sondern auf Grundlage eines Klimaänderungssignals

Diese Zusatzkriterien wären prinzipiell für beide Szenarientypen denkbar.