Einleitung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck; Dr.-Ing. Jens zum Hingst; TU Clausthal

Das Projekt „Energie- und Wasserspeicher Harz“ wurde innerhalb der Richtlinie Innovation durch Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Bereich Innovationsverbünde mit dem Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft im Zeitraum Juli 2019 bis Juni 2022 durch EFRE-Fördermittel gefördert. Hintergrund des Projektes waren neben den Änderungen im elektrischen Energiesystem mit einer vermehrten Umstellung auf erneuerbare Energien die Auswirkungen des Klimawandels im Harz, wie sie in den Jahren 2017 und 2018 aufgetreten sind. Erst traf die Region ein 1000-jährliches Hochwasser. Kurz darauf folgte eine langanhaltende Dürreperiode mit Rekordminuswerten beim Niederschlag.

Mit steigendem Anteil fluktuierender, regenerativer Einspeisungen in das Stromnetz leisten Energiespeicher mit ihrem Ausgleich von Energiebereitstellung und -nutzung substanzielle Beiträge für ein funktionsfähiges Energiesystem (Beck 2016). Insbesondere zum Ausgleich der Residuallast kommt diesen Technologien eine tragende Rolle bei der Netzstabilisierung zu. Speicherkapazitäten in Norddeutschland sind insbesondere in Kombination mit der Windenergie, die ebenfalls zu großen Teilen in Norddeutschland in die Netze einspeist, von Bedeutung, um Leitungskapazitäten besser auszunutzen und (elektrische) Systemdienstleistungen wie beispielsweise Momentanreserve vor Ort bereitzustellen. Großtechnische Pumpspeicherkraftwerke stellen darüber hinaus eine technologisch ausgereifte Lösung für die Erbringung derartiger stabilisierender Systemdienstleistungen dar; neue Potentiale erscheinen jedoch v. a. aufgrund der erheblichen Eingriffe in die Natur und den damit verbundenen Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung, aber auch aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht realisierbar.

Es zeigte sich, dass die langfristige Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen (unter den gegebenen Rahmenbedingungen) bei einer alleinigen Vermarktung in einem energy only-Markt nicht gegeben ist. Gleichwohl bietet die Technologie prinzipiell das Potential, zusätzliche Deckungsbeiträge auch in anderen Bereichen (z. B. Erbringung von Systemdienstleistungen) zu generieren und einen zusätzlichen volkswirtschaftlichen Nutzen (z. B. Integration in den Hochwasserschutz) zu stiften.

Vor diesem Hintergrund erfolgte im Projekt EWAZ eine innovative Kopplung und systemische Betrachtung energie- und wasserwirtschaftlicher Aspekte. Da der Harz hydrologisch als großes Wasserüberschussgebiet zu betrachten ist und Klimawandelprojektionen zukünftig eine Erhöhung des dortigen mittleren jährlichen Wasserdargebot erwarten lassen, erscheint ein solcher integrativer Ansatz für zwingend geboten.

Die niedersächsische Wasserwirtschaftsverwaltung rechnet damit, dass Starkregenereignisse und Überschwemmungen zukünftig häufiger und intensiver auftreten werden. Derzeit wird die Einführung eines Klimabeiwertes von 15 % diskutiert, der als Sicherheitszuschlag bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen landesweit zu berücksichtigen ist (NLWKN 2017). Das jüngste Hochwasser vom Juli 2017 unterstreicht die aktuelle Brisanz dieser Diskussion. In einigen Gewässern des nördlichen Harzrandes wurden Abflussscheitelwerte registriert, die statistisch einem 1000-jährlichen Hochwasser entsprechen. An einigen Pegeln des nördlichen Harzvorlandes wurden Höchstwasserstände gemessen, die z. T. erheblich über die bislang bekannten Höchstmarken hinausgingen. Im Rahmen der Klimawandelanpassungsstrategie des Landes Niedersachsens sind für die Region westlicher Harz und das dazugehörende Harzvorland sowie für (infrastrukturell) verbundene Regionen geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln, damit die Bürger und infrastrukturellen Einrichtungen auch zukünftig bestmöglich vor Hochwasser geschützt werden.

Unter diesen Voraussetzungen war die Aufgabenstellung dieses interdisziplinären Vorhabens, mit der systemischen Kopplung der Energie- und Wasserwirtschaft eine wissenschaftliche fundierte Konzeption für einen „Energie- und Wasserspeicher Harz“ zu entwickeln, der die zukünftigen überregionalen Anforderungen in den Zieldimensionen Energieerzeugung und -speicherung, Hochwasserschutz, Trinkwassergewinnung sowie der Niedrigwasserabgabe erfüllt.

Im Fokus war das System Energie- und Wasserspeicher Harz mit den gekoppelten Systemdienstleistungen

- Nachhaltige Stabilisierung des Energiesystems (Energieerzeugung und -speicherung),
- Hochwasserschutz,
- Niedrigwasserabgabe sowie
- Trinkwassergewinnung.

Alle vier Teilsysteme sind gekoppelt und beeinflussen sich dadurch gegenseitig (siehe Abbildung 1). Die individuellen Beiträge der einzelnen Aufgaben zum übergeordneten Ziel einer integrativen und nachhaltigen Systemdienstleistung für Niedersachsen mit volkswirtschaftlichem Mehrwert mussten zunächst erfasst und quantifiziert werden.

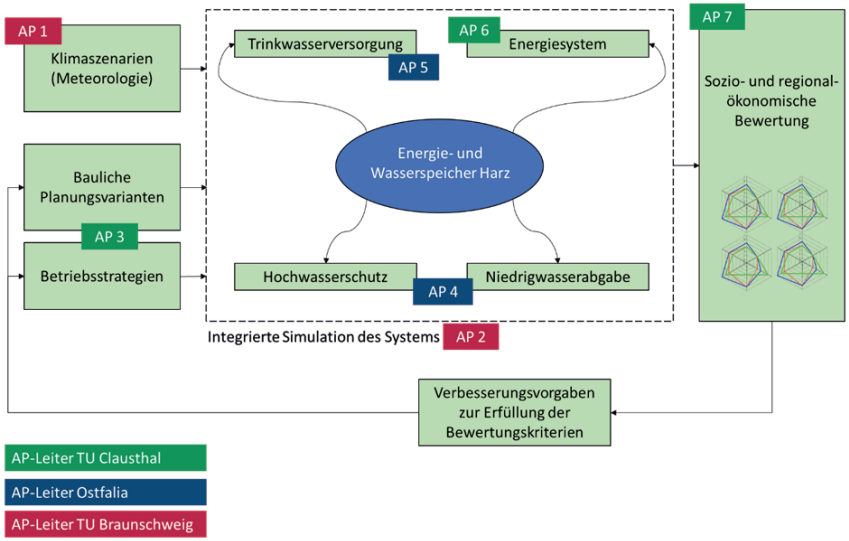

Abbildung 1: Gesamtkonzept

Um den zu erwartenden Nutzen dieser Dienstleistungen zu quantifizieren, wurden Planungsvarianten für ein zukünftiges Wasserspeicher- und Bewirtschaftungssystem definiert. Planungsvarianten wurden definiert als Neubau von Stauanlagen, Erweiterung vorhandener Stauanlagen, Nutzung offener Tagebauten sowie Nutzung untertage Bauwerke bzw. Neuauffahrungen. Mittels mathematischer Modellrechnungen des Gesamtsystems über lange Zeitperioden wurden die Wirkungen der Varianten gegenüber dem heutigen Zustand anhand von Bewertungskriterien quantifiziert.

Zur sozio- und regionalökonomischen Bewertung wurde das definierte System mit unterschiedlichen Betriebsstrategien mathematisch modelliert und simuliert. Die dafür erforderlichen Bewertungskriterien wurden erstmals für ein derartig gekoppeltes System entwickelt und exemplarisch angewendet.

Auf Basis der Ergebnisse wurden Verbesserungsoptionen zur Erfüllung der Bewertungskriterien durch angepasste Betriebsstrategien und - wenn nötig - auch durch Änderungen der Planungsvarianten entwickelt. Diese Iterationsschleife wurden jeweils unter den gegebenen Randbedingungen aus den meteorologischen Klimaszenarien durchlaufen.

Die Arbeit ist in einzelne Arbeitspakete (AP) gegliedert. Die einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden kurz aufgelistet:

Arbeitspaket 1 Klimaszenarien (Meteorologie)

Arbeitspaket 2 Integrierte Modellierung und Optimierung des Systems

Arbeitspaket 3	Bauliche Planungsvarianten und Betriebsstrategien
Arbeitspaket 4	Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe
Arbeitspaket 5	Trinkwasserversorgung
Arbeitspaket 6	Energiesystem
Arbeitspaket 7	Sozio- und regionalökonomische Bewertung

Die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeitspakete sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Durchgeführt wurde das Projekt in Zusammenarbeit der TU Clausthal mit der TU Braunschweig und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften mit den folgenden Einrichtungen:

- TU Clausthal:
    - Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE), Prof. Beck
    - Institut für Wirtschaftswissenschaft (IfW), Prof. Menges
    - Institut für Bergbau (IBB), Prof. Langefeld
    - Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC), Dr. zum Hingst
- TU Braunschweig:
    - Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) mit der Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Prof. Meon
- Ostfalia:
    - Fakultät für Bau-Wasser-Boden, Prof. Röttcher

Die Forschung wurden dabei von den Kooperationspartnern Harz Energie GmbH & Co. KG und Harzwasserwerke GmbH begleitend unterstützt.

Nach der Einarbeitung in das Projekt erfolgte neben den arbeitspaketspezifischen Arbeiten insbesondere die im Verbund gemeinsam durchgeführte Identifikation repräsentativer Standorte im Harz, die einen Möglichkeitsraum für die Analysen des Projektes zulassen. Dabei stand der Systemgedanke im Zusammenwirken verschiedener Standorte/Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen als Schwerpunkt des Projektes im Vordergrund. Ziel ist dabei die Entwicklung einer auf andere Standorte übertragbaren Methodik. Bei der Auswahl der Standorte des definierten Möglichkeitsraumes stand neben der Verfügbarkeit von Daten aus vorangegangenen Betrachtungen und der bestehenden Infrastruktur das Bündelungsgebot im Vordergrund. Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt üblicherweise bei der Errichtung von Trassen zur Energieübertragung (z. B. Südlink). Daher wurden insbesondere Standorte ausgewählt, an denen bereits eine entsprechende (wasserwirtschaftliche) Infrastruktur vorhanden ist. Ziel war somit eine Minimierung der Umweltbelastungen. Im Rahmen dieser Systemstudie wurde dazu ein

technisch möglicher Betrachtungsraum (Möglichkeitsraum) ausgewählt. Dabei sind auch Standorte enthalten, die in der Öffentlichkeit teilweise kritisch gesehen werden. Der Sensitivität dieser Thematik ist sich das Projektteam durchaus bewusst. Für die Auswahl eines Möglichkeitsraums zur Entwicklung einer auf andere Standorte übertragebaren Methodik vor dem Hintergrund des systemischen Zusammenwirkens der einzelnen Maßnahmen wurden hier aber bewusst keine Denkverbote auferlegt.

Einen Meilenstein im Gesamtprojekt stellte die Identifikation potentiell geeigneter Standorte als Möglichkeitsraum für eine spätere Realisierung der Maßnahmen dar. Diese Zwischenergebnisse wurden im März 2021 zusammengefasst und kommuniziert. Am 09.03.2022 wurde ein Workshop mit der Leitung des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) in Goslar durchgeführt. Seitens des MWK nahm Staatssekretärin Dr. Sabine Johannsen in Vertretung für Herrn Minister Thümler teil. Im Workshop erfolgte eine Vorstellung und Diskussion des Gesamtsystems sowie bisheriger Ergebnisse unter Berücksichtigung von Einzelmaßnahmen und Überleitungssystemen. Weiterhin wurde das Simulationssystem und Simulationsergebnisse sowie die Bewertungsfunktion vorgestellt.

Zur Einbindung von zivilgesellschaftlichen Akteuren wurde ein Praxisbeirat während der gesamten Projektlaufzeit eingebunden. Im Folgenden sind die Treffen des Projektteams zu gemeinsamen Workshops mit dem Praxisbeirat aufgeführt, die auch einer kontinuierlichen Ergebnisprüfung gedient haben. Im Beirat waren die folgenden Organisationen und Mitglieder eingeladen, die entweder persönlich oder durch von ihnen bestimmte Vertreter an den Sitzungen teilgenommen haben:

- Harzwasserwerke GmbH
- Harz Energie GmbH & Co. KG
- Oberbürgermeister(in) der Stadt Goslar
- Bürgermeister der Gemeinde Schladen-Werla
- Landrat des Landkreises Goslar
- Stiftung Bergwerk Rammelsberg, Altstadt von Goslar und Oberharzer Wasserwirtschaft
- Energie Ressourcen Agentur Goslar e.V.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

1 Klimaszenarien (AP 1)

Patrick Nistahl, M. Sc., Dipl.-Hydr. Tim Müller, Prof. Dr.-Ing. Günter Meon, TU Braunschweig

1.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Im Sommer 2017 waren der Harz und das Harzvorland bis nach Hannover und Braunschweig einer verheerenden Hochwasserkatastrophe ausgesetzt. Goslar und weite Teile der Region Hildesheim standen unter Wasser. Im Folgejahr 2018 litten die gleiche Region und ganz Mitteleuropa vom Frühling bis zum Spätherbst unter extremer Hitze und Dürre. Auch in 2019 und – etwas abgeminderter in 2020 – gab es monatelang im Norden und Osten Deutschlands kaum Niederschlag, die Trinkwassertalsperren im Harz leerten sich bedenklich.

Die Häufung solcher meteorologisch-hydrologischer Extreme, die in relativ kurzen zeitlichen Abständen zu Engpässen in der Wasserversorgung, aber auch zu Hochwasserkatastrophen führten und denen Teile Deutschlands vor allem im Sommer ausgesetzt waren, ist auffällig. Die Klimaprognosen deuten auf eine Zunahme solcher extremen Situationen des Wasserdargebots in Flussgebieten hin (NLWKN 2021/1). Auch die Harzwasserwerke GmbH, die sechs große Talsperren im westlichen Harz betreibt, befürchtet auf mittlere bis längere Sicht und ohne Ausbau des heutigen Versorgungssystems eine klimabedingte Verknappung des Wasserdargebots bei gleichzeitig steigendem Bedarf in der Nutzerregion bis zur norddeutschen Küste. Zugleich fordert die laufende Energiewende in Niedersachsen eine signifikante Zunahme von Möglichkeiten zur Energiespeicherung.

Vor diesem Hintergrund lag das Ziel des Projektes EWAZ in der Erarbeitung von wasserwirtschaftlichen und energietechnischen Maßnahmen zur Klimawandelanpassung im westlichen Harz. Mithilfe einer angepassten und erweiterten wasserbaulichen Infrastruktur (Speichersysteme) sollten die drei wasserwirtschaftlichen Systemdienstleistungen Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung unter dem erwarteten Klimawandeleinfluss optimiert werden. Als vierte Dienstleistung wurde die Energiespeicherung mittels ober- und untertägiger Pumpspeicher betrachtet.

Die Ziele des Teilprojektes der TU Braunschweig innerhalb des Gesamtverbundes waren die Themen Klimaszenarien (AP 1) und die integrierte numerische Modellierung des Wasserhaushalts und der baulichen Anlagen im Untersuchungsgebiet (AP 2). Des Weiteren gehörte zu den Arbeitszielen die weitere Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten der Ostfalia Hochschule „Oberirdische Speicher, Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung“ und der TU Clausthal mit der Energiesystembetrachtung (AP 6), bergbaulichen Fragestellungen (AP 3) und der sozio- bzw. regionalökonomischen Bewertung (AP 7).

Im Rahmen des Arbeitspaketes Klimaszenarien (AP 1) wurden meteorologische Zeitreihen aufbereitet, als räumliche Datenfelder aus der Vergangenheit und Zukunft analysiert und für die integrierte Modellierung des Gesamtsystems in AP 2 zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden wird zunächst die hydrologisch-meteorologische Datengrundlage beschrieben und die Methodik der hydrologischen Wirkmodellierung erläutert, mit der die natürlichen Zuflüsse zu den Speicheranlagen mit erwarteter Klimaänderung ermittelt wurden.

1.2 Einführung und Vorgehen

Die im Rahmen von EWAZ untersuchten Standortvarianten und Sub-Varianten sollten auch auf ihren Beitrag zur Klimawandelanpassung untersucht werden. Eine gängige Methodik, um zu untersuchen, wie sich der Klimawandel auf die Abflüsse in Oberflächengewässern auswirkt, ist die hydrologische Modellierung von Klimafolgen (Hakala et al. 2019).

Hierbei verwendet ein hydrologisches Modell (siehe auch Kapitel 2.3) Klimaprojektionen als Eingangsdaten. Klimaprojektionen sind Simulationen des Klimas über Zeiträume von mehr als 100 Jahren, welche unter angenommenen Vorgaben u. a. zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentration („Szenarien“) durchgeführt werden. Globale Klimamodelle rechnen das gesamte Weltklima inklusive Rückkopplung durch bspw. die Meere in einer groben horizontalen Auflösung von ca. 100 km. Um hieraus Aussagen auch auf regionaler Ebene ableiten zu können, werden feiner aufgelöste Klimamodelle (ca. 12 km) für begrenzte Gebiete wie z. B. Zentraleuropa simuliert, welche ihre Randbedingungen aus verschiedenen globalen Klimamodellen erhalten (Abbildung 2).

Details zur Auswahl und Vorverarbeitung der verwendeten Klimarealisationen sind in Kapitel 1.4 beschrieben.

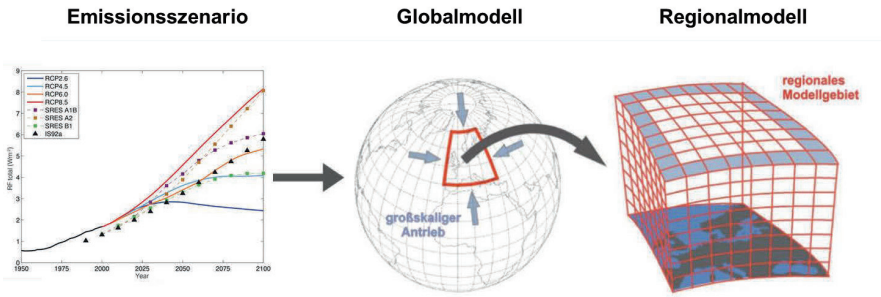

Abbildung 2: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (NLWKN 2021, nach Klimanavigator 2017)

1.3 Historische Beobachtungen

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde zunächst die hydrologische und meteorologische Datenbank an der TU Braunschweig mithilfe von zahlreichen zur Verfügung gestellten Beobachtungsdaten der Harzwasserwerke GmbH für den westlichen Harz und des NLWKN für das gesamte Aller-Leine-Oker Einzugsgebiet erweitert.

Für die Talsperreneinzugsgebiete im westlichen Harz standen insgesamt 70 Niederschlagsstationen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur Verfügung (Abbildung 3):

- 37 Regensammler (Totalisatoren, Monatssummen)
- 11 Regenmesser (Tageswerte)
- 22 Niederschlagsschreiber (15-Minuten-Werte)

Hinzu kamen diverse Niederschlagsstationen des NLWKN für die Einzugsgebiete unterhalb der Talsperren (Abbildung 4) sowie ein im Rahmen des Projektes KliBiW erstellter Rasterdatensatz aus meteorologischen Beobachtungen mit Auflösung von 1 km (NLWKN 2021/1).

Zur Kalibrierung und Validierung standen zudem zahlreiche Abflussdaten aus Harz (Abbildung 4) und Harzvorland sowie die Talsperrendatenbanken mit umfänglichen Wasserbilanzen, Entnahme- sowie Abgaberegeln zur Verfügung.

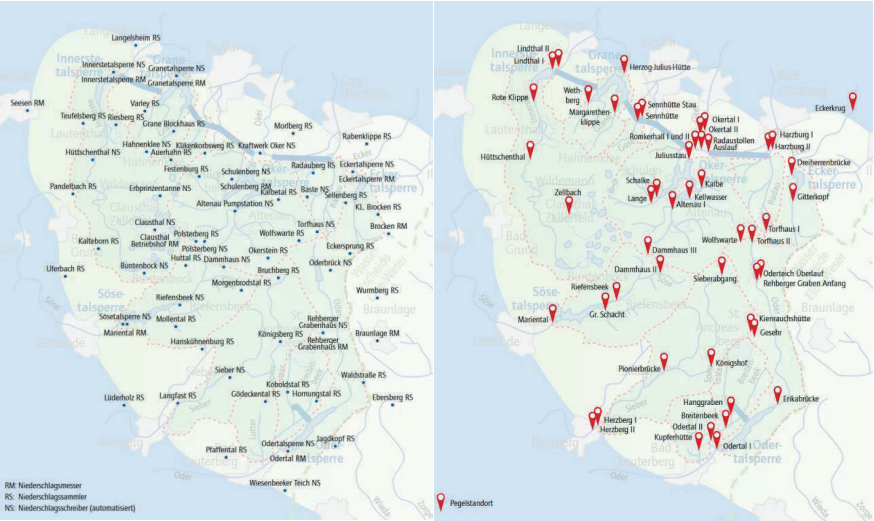

Abbildung 3: Niederschlagsstationen (links) und Pegelstandorte (rechts) im Westharz (Lange und Eggelsmann 2011)

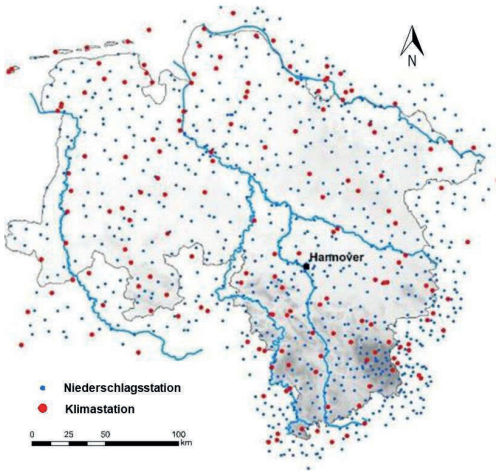

Abbildung 4: Niederschlagssstationen in Niedersachsen (NLWKN 2021/1)

Die deutliche Verfeinerung des existierenden Messnetzes für Niederschlag und Abfluss im Harz sowie die Bilanzen an den sechs großen Talsperren der Harzwasserwerke konnten in das Gesamtsystem integriert werden und bildeten die Basis für a) die Bewertung der Klimaszenarien und b) die Kalibrierung und Validierung des Modellsystems (siehe auch Kapitel 2.6).

1.4 Verwendete Klimarealisationen

Die Auswahl der zu verwendenden Klimarealisationen (Kombinationen aus Emissionsszenario, Globalmodell und Regionalmodell) fand in Abstimmung mit der niedersächsischen Klimafolgenforschung des Projektes KliBiW (NLWKN und TU Braunschweig) statt. Wie auch in KliBiW wurde in EWAZ das sogenannte Kernensemble für Deutschland auf Basis des RCP8.5-Szenarios verwendet, welches vom Bund-Länder Fachgespräch empfohlen wurde. Die aus den Projekten EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment, Jacob et al. 2017) sowie ReKliEs-DE (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Hübener et al. 2017) vorliegenden Realisationen wurden hier in einem ersten Schritt auf Basis der Abbildung des vergangenen Klimas validiert und einzelne Realisationen aus dem Ensemble entfernt (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020). Anschließend wurden mithilfe eines Algorithmus jene Realisationen ausgewählt, welche eine möglichst große Bandbreite der wichtigsten klimatischen Variablen aufweisen (Dalelane et al. 2018). Abschließend wurde das Ensemble mithilfe von Beobachtungsrastern Bias-adjustiert und auf eine Auflösung von 5 km runterskaliert (Brienen et al. 2020).

Neben den sechs Realisationen dieses Kernensembles wurden vom NLWKN zwei ergänzende Projektionen mit der gleichen Auflösung zur Verfügung gestellt, welche im Gegensatz zum Kernensemble (dynamisches Downscaling), auf dem statistischen Regionalmodell WETTReg 2013 basieren (NLWKN 2021/1). Eine Übersicht über die verwendeten Klimarealisationen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Für weitere Informationen zu den repräsentativen Emissionspfaden, den verwendeten Modellkombinationen und den ersten Aufbereitungsschritten sei auch auf die Schlussberichte von KliBiW 6 sowie ReKliEs-DE verwiesen.

Tabelle 1: Übersicht über verwendete Klimarealisationen

Globales Klimamodell / Erdsystemmodell (ESM)	Regionales Klimamodell	Zeitliche und räumliche Auflösung	Art des Downscaling
EC-Earth (r1)	RACMO	5 km, 1 Tag	Dynamisch
EC-Earth (r12)	RACMO		Dynamisch
HadGEM2-ES	WETTREG2013		Statistisch
HadGEM2-ES	WRF361H		Dynamisch
MIROC5	CCLM		Dynamisch
MPI-ESM-LR	CCLM		Dynamisch
MPI-ESM-LR	WETTREG2013		Statistisch
MPI-ESM-LR	WRF361H		Dynamisch

Als Referenzzeitscheibe wurde analog zum Projekt KliBiW 1971-2000 gewählt. Da sehr große wasserwirtschaftliche Maßnahmen, wie sie in EWAZ untersucht wurden, in der Regel eine lange Vorplanungs- und Genehmigungszeit benötigen, erschien die in KliBiW verwendete Zeitscheibe für die nahe Zukunft 2021-2050 als nicht angebracht. Zugleich sollten die Varianten jedoch auch nicht erst auf ihren Einfluss auf den Wasserhaushalt in der üblichen Zeitscheibe der fernen Zukunft (2071-2100) überprüft werden. Als geeignete Zukunftszeitscheibe für die Analyse des Einflusses der Planungsvarianten auf den potentiellen Wasserhaushalt der Zukunft wurde daher die Zeitscheibe 2041-2070 identifiziert.

Die Unsicherheit, die der Modellkette der hydrologischen Modellierung von Klimafolgen zugrunde liegt, ist bei der Betrachtung von sehr kleinen Flusseinzugsgebiete erhöht, da sich zufällige Fehler der Klimamodelle (sog. „Klimarauschen“) bei Betrachtung von sehr wenigen Rasterzellen nicht gegenseitig ausgleichen (Taylor et al. 2012).

Auch aus diesem Grund wurde eine weitere Validierung der Klimarealisationen für die Referenzperiode unter Nutzung der meteorologischen Beobachtungen durchgeführt (Beispiel in Abbildung 5). Eine Auswertung der Niederschlagshöhen hat ergeben, dass vor