



Lange Trockenheit und Starkregen -
Wie sieht ein angepasster Landschaftswasserhaushalt aus?

Ergebnissynthese und Empfehlungen für die klimaresiliente Entwicklung von Fließgewässern und Wasserhaushalt

Projektlaufzeit:

01.02.2022 - 30.04.2025

Förderung:

Das Verbundvorhaben „KliMaWerk“ wurde vom BMFTR innerhalb der Fördermaßnahme „WaX Wasser-Extremereignisse“ im Rahmen des Bundesprogramms „Wasser:N“ gefördert. Wasser:N ist Teil der BMFTR-Strategie FONA.

Gefördert durch:



Projektwebsite:

<https://www.eglv.de/klimawerk-wasserlandschaft/>

Projektpartner:

Lippeverband | Dr. Mario Sommerhäuser, Dr. Nadine Gerner, Hannah Behrens, Dr. Nicolai Bätz
Universität Duisburg-Essen | Dr. Jochem Kail, Hannah-Marie Stappert, Prof. Dr. Daniel Hering
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel | Sven Grantz, Prof. Dr. Paul Wagner, Prof. Dr. Nicola Fohrer
Planungsbüro Koenzen | Tim Wiese, Sarah Lange, Dr. Uwe Koenzen
delta h Ingenieurgesellschaft mbH | Dr. Katrin Brömmel, Prof. Dr. Christoph M. König
Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH | Dr. Alexandra Amann, Dr. Oliver Buchholz
Ecologic Institut gGmbH | Jenny Tröltzsch, Ida Meyenberg, Benedict Bueb, Dr. Ulf Stein



Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



Kontakt:

Dr. Nadine Gerner (gerner.nadine@eglv.de)

Inhaltsverzeichnis

Projektziel und Vorgehensweise	1
Untersuchungsgebiet: Eigenschaften und Klimatrend.....	2
Prognostizierte Klimaveränderungen.....	4
Katalog der Anpassungsmaßnahmen.....	5
Hydrologische Maßnahmenwirkungen	9
Gesamteinzugsgebiet Lippe	9
Einzugsgebiet Hammbach/ Wienbach und Seseke/ Körne	13
Ökologische Maßnahmenwirkungen	18
Empfehlungen für einen gestärkten Landschaftswasserhaushalt und klimaresilientere Fließgewässer	21
Handlungsfeld 1: Gewässer	22
Handlungsfeld 2: Gewässerumfeld	23
Handlungsfeld 3: Regenwasserbewirtschaftung	25
Handlungsfeld 4: Landnutzungsänderung und Bewirtschaftungsformanpassung	27
Handlungsfeld 5: Entwässerungsmanagement	29
Handlungsfeld 6: Governance- und Regulierungsmaßnahmen	30
Fazit	32
Weitere Informationen	33
Literatur.....	33

Projektziel und Vorgehensweise

Das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFRT) geförderte Projekt KliMaWerk.Wasser:Landschaft zeigt den Weg auf zu einem angepassten Landschaftswasserhaushalt, um die Resilienz von Gewässern und ihrem Umfeld gegenüber Starkregen wie auch Trockenheit zu steigern.

Im Projekt wurden geeignete Maßnahmen zur Anpassung von Fließgewässern sowie der Landschaft an Klimaextreme identifiziert. Im Folgenden wurden die hydrologischen und ökologischen Wirkungen dieser Anpassungsmaßnahmen in und an Fließgewässern, in der Landschaft und im urbanen Raum ermittelt (**Abb. 1**). Als Informationsgrundlage dienten hydromorphologische, physiko-chemische und biologische Freilanduntersuchungen im Untersuchungsgebiet – dem Einzugsgebiet der Lippe in Nordrhein-Westfalen. Mithilfe von hydrologischen und statistischen Modellen wurden verschiedene Klimawandelszenarien sowie unterschiedlich ambitionierte Maßnahmenumsetzungsszenarien berechnet.



Abb. 1: Projektablauf, Methoden und Produkte des Projekts KliMaWerk.

Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Werkzeugkasten als Entscheidungshilfe entwickelt und Empfehlungen abgeleitet, die bei der Maßnahmenumsetzung in der Praxis unterstützen. Im folgenden Dokument werden die wesentlichen Ergebnisse des Projekts zusammenfassend beschrieben sowie darauf basierend Handlungsempfehlungen in sechs Handlungsfeldern gegeben.

Untersuchungsgebiet: Eigenschaften und Klimatrend

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden am Beispiel des Einzugsgebiets der Lippe in Nordrhein-Westfalen sowie den beiden darin befindlichen Teileinzugsgebieten Hammbach/Wienbach und Seseke/Körne (**Abb. 2**), die als Fokusgebiete untersucht wurden, erarbeitet. Das Einzugsgebiet der Lippe ist landwirtschaftlich geprägt (68 %) mit Waldanteilen (20 %) und urbanen Räumen (12 %). Die vornehmlich vorkommenden Fließgewässertypen sind nach der Gewässertypenkarte Deutschlands (LAWA) für die Lippe die Folgenden: Typ 9.1 Grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach und Typ 14 Sandgeprägter Tieflandbach (Oberläufe), Sand- und lehmgeprägte Tieflandflüsse (Hauptlauf ab Lippstadt bis Lünen), Typ 15.1 Großer, sand- und lehmgeprägter Tieflandfluss (Unterlauf ab Dorsten bis Wesel). Im Einzugsgebiet kommen weitere, kleinere Fließgewässertypen des Tieflandes vor, in den östlichen Oberläufen auch der Mittelgebirge.

Die Ergebnisse des Projekts lassen sich grundsätzlich unter Berücksichtigung der regionalen und lokalen Besonderheiten auf vergleichbare Einzugsgebiete und Fließgewässertypen übertragen. Spezifische, auf das jeweilige Einzugsgebiet angepasste hydrologische und hydraulische Modellierungen liefern die Grundlagen, um die lokalen Maßnahmenwirkungen abschätzen zu können.

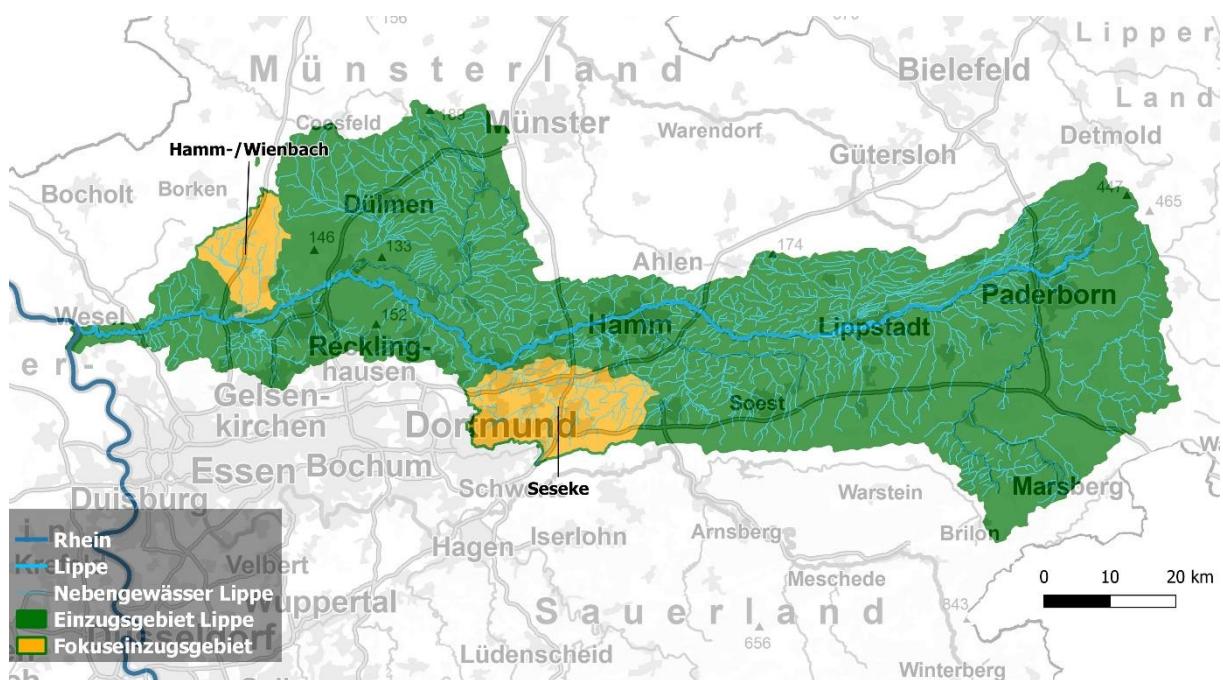


Abb. 2: Einzugsgebiet der Lippe mit den beiden Teileinzugsgebieten Hammbach/Wienbach und Seseke.

Mithilfe einer Akteursanalyse wurden öffentliche und private Stakeholder im Untersuchungsgebiet identifiziert, die mit den relevanten Belastungen sowie Ökosystemfunktionen und -leistungen im Einzugsgebiet in Zusammenhang stehen (z. B. Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Trinkwasserversorger, Naturschutz). Die Akteure wurden partizipativ in die Identifizierung geeigneter Maßnahmen sowie in die Bewertung der Maßnahmenwirkungen, Synergien bzw. Konflikte zwischen Anpassungsmaßnahmen und in die Abschätzung der potentiellen Maßnahmenumsetzung in verschiedenen Szenarien einbezogen.

Statistische Tests mit jährlich aggregierten Wetterdaten aus dem HYRAS Datenprodukt (Rauthe et al., 2013; Razafimaharo et al., 2020) zeigen, dass die jährlichen Niederschlagssummen im Lippeeinzugsgebiet von 1991 bis 2020 im Median um 8,48 mm/Jahr sanken und die Jahresdurchschnittstemperaturen im Median um 0,034 °C/Jahr anstiegen (**Abb. 3**). Beide Trends sind statistisch signifikant, womit verdeutlicht wird, dass bereits in der jüngeren Vergangenheit ein Klimawandel im Untersuchungsgebiet stattgefunden hat.

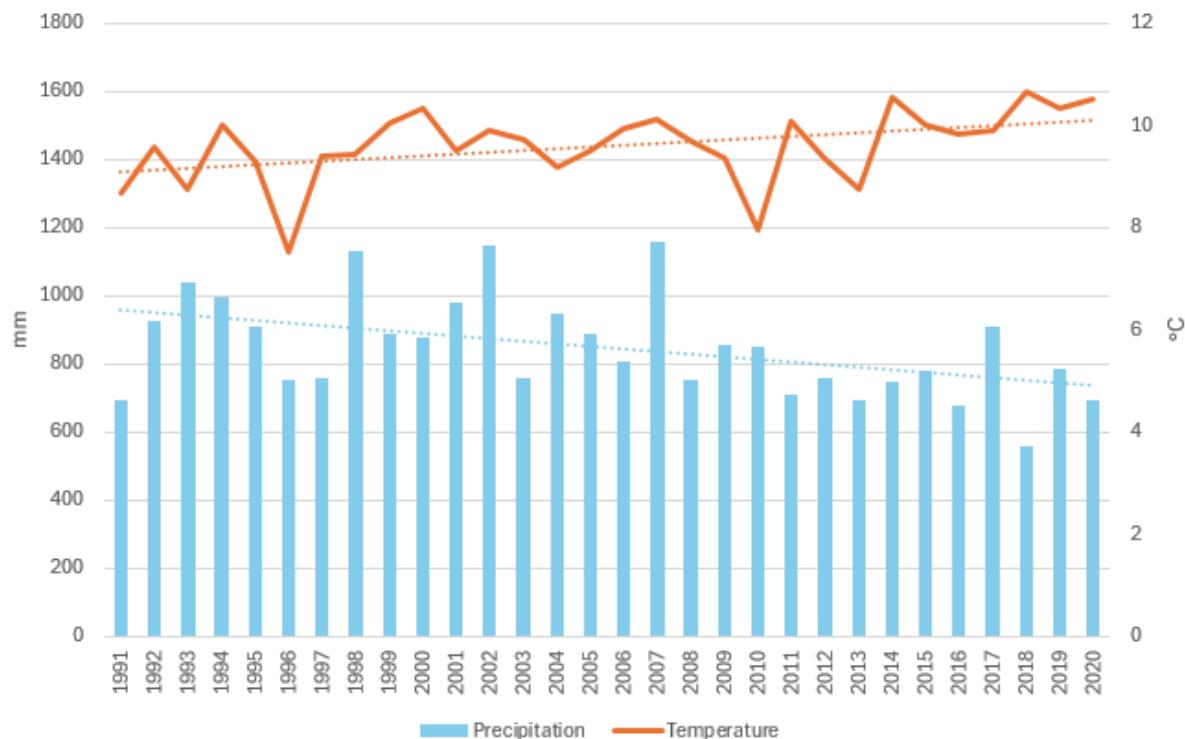


Abb. 3: Klimatrends im Lippeinzuugsgebiet (1991 - 2020) mit linearer Trendlinie (Datenquelle: HYRAS, DWD)

Der Standardized Precipitation-Evaporation Index (SPEI) – ein statistischer Indikator, der Trocken- und Feuchtperioden auf Basis der klimatischen Wasserbilanz (Differenz zwischen der Gesamtniederschlagsmenge und der Summe der potenziellen Verdunstung) identifiziert (Vicente-Serrano et al., 2010) und damit im Gegensatz zum Standardized Precipitation Index (SPI) sowohl Niederschläge als auch Temperaturen berücksichtigt – zeigt, dass das Lippegebiet in der vergangenen Klimareferenzperiode sowohl sehr trockene als auch sehr feuchte Perioden erlebt hat (**Abb. 4**). Entsprechend der oben beschriebenen Trends war jedoch der Zeitraum nach 2009 nahezu durchgehend von relativer Trockenheit geprägt.

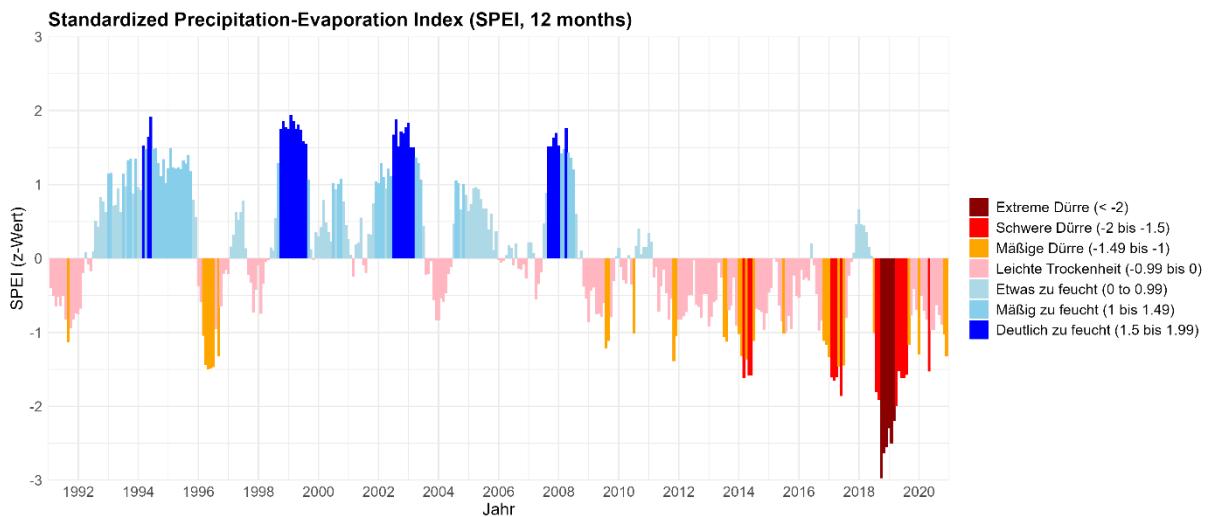


Abb. 4: Standardized Precipitation-Evaporation Index (SPEI), 12-monatig (nach Vicente-Serrano et al. (2010), Datenquelle: Deutscher Wetterdienst DWD).

Prognostizierte Klimaveränderungen

Die Klimaszenarien wurden für die Jahre 2071 bis 2100 berechnet und mit der Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020 verglichen. Der betrachtete Zeitrahmen wurde auf 2071 bis 2100 festgesetzt, um langfristige Veränderungen des Landschaftswasserhaushalts betrachten zu können. Als Referenz wurde die aktuell gültige Klimanormalperiode der Jahre 1991 bis 2020 herangezogen. Als Klimaszenarien wurden die beiden Szenarien RCP2.6 (2-Grad-Ziel) und RCP8.5 (Extremeszenario) verwendet (IPCC, 2013). RCP2.6 liegt die Annahme zugrunde, dass der zusätzliche Strahlungsantrieb durch Klimaschutzmaßnahmen stark begrenzt werden kann. Dagegen ist die Prämisse von RCP8.5 ein Fortschreiten der Industrialisierung wie bisher und ihre Ausweitung im globalen Maßstab. Dies geht einher mit einem weiterhin erheblich wachsenden Ausstoß von Treibhausgasen, die zu einer starken globalen Erwärmung führen.

Es wurde das DWD-Kernensemble betrachtet, welches fünf regionale Projektionen für RCP2.6 und sechs für RCP8.5 umfasst. Hierfür wurde die Änderung der Klimavariablen Temperatur und Niederschlag im Projektgebiet untersucht. Es wird dabei ein Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur um 3,0 °C im Szenario RCP8.5 und um 0,6 °C im Szenario RCP2.6 (jeweils Ensemblemedian) im Vergleich zur Referenzperiode prognostiziert. Der Ensemblemedian der durchschnittlichen jährlichen Niederschläge ändert sich in beiden Szenarien nur geringfügig, wobei die Prognoseunsicherheit – gemessen an der Streuung der Prognosewerte – bei einer stärkeren Klimaerwärmung (RCP8.5) deutlich höher ist.

Die in beiden Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen vorhergesagte Zunahme von Starkregenniederschlägen (LANUV, 2024) birgt für das Lippeeinzugsgebiet ein Risiko von häufiger auftretenden Hochwasserereignissen mit dadurch gesteigertem Schadenspotenzial sowie mehr Erosion und Auswaschung von Nährstoffen aus der Fläche. Während die Prognosen über die Veränderung der Trockenstage zwischen den Klimaprojektionen stark variieren, wird in Zukunft v. a. eine Zunahme von Trockenperioden mit langer Dauer erwartet (LANUV, 2024).

Daraus entsteht im Lippeeinzugsgebiet das Risiko, dass sich die Abflüsse in Fließgewässern bis hin zum vollständigen Trockenfallen verringern und die Bodenfeuchte sowie Grundwasserneubildung sinken.

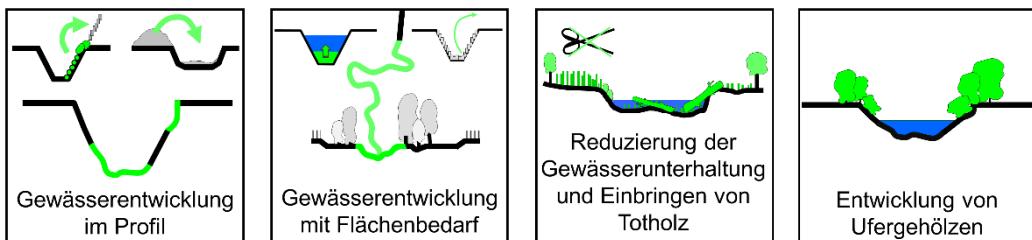
Dies resultiert in Risiken für die Gewässerbiologie ebenso wie Ertragsrisiken für Land- und Forstwirtschaft sowie Wasserversorgungsrisiken für Bevölkerung und Wirtschaft. Darüber hinaus sind im Wirtschaftssektor für die Lippe insbesondere die Transportrisiken hervorzuheben, da die Lippe den Rhein ebenso wie das Westdeutsche Kanalnetz speist.

Katalog der Anpassungsmaßnahmen

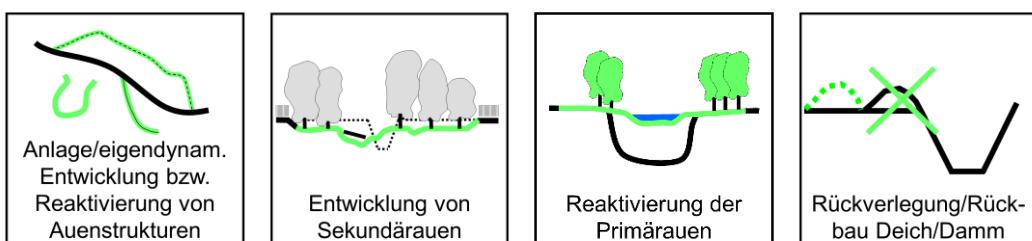
Basierend auf Literaturrecherchen, Experteneinschätzung sowie Stakeholderdialogen wurden die folgenden Maßnahmen als geeignet zur Klimafolgenanpassung identifiziert (**Abb. 5**).

Die Maßnahmen beziehen sich auf Gewässer, Gewässerumfeld (Auen), urbane sowie land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen.

MP 1 – Maßnahmen im Gewässer



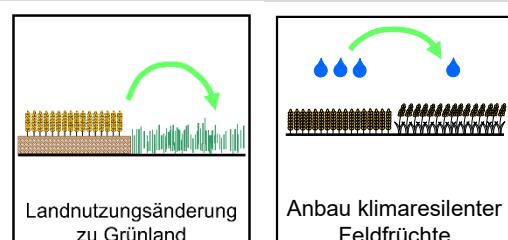
MP 2 – Maßnahmen am Gewässer



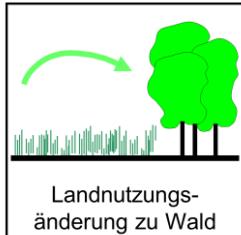
MP 3 – Regenwasserbewirtschaftung



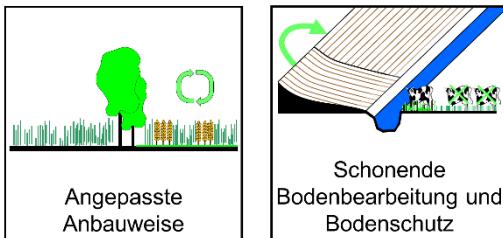
MP 4 – Landnutzungsänderung - Agrarland



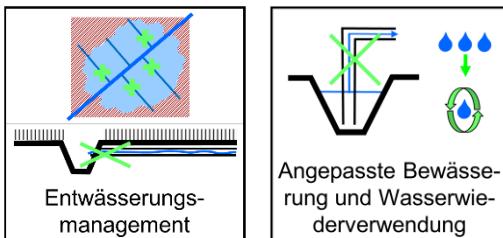
MP 5 – Landnutzungsänderung - Wald



MP 6 – Bewirtschaftungsform anpassen



MP 7 – Entwässerungsmanagement



MP 8 – Governance- und Regulierungsmaßnahmen

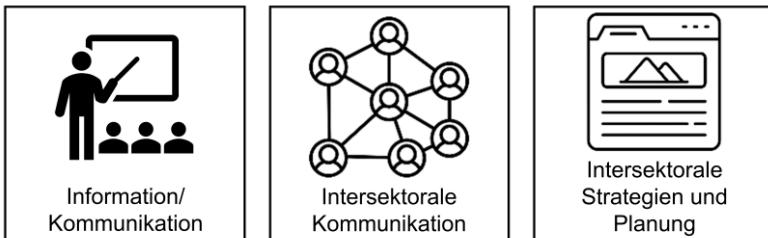


Abb. 5: Übersicht über die Maßnahmenpakete und -bündel.

Die Wirkungen der Maßnahmen wurden im Ist-Zustand untersucht und modelliert. Darauffolgend wurden Änderungen für den Landschaftswasserhaushalt und die Gewässer im Vergleich zum Ist-Zustand modelliert (**Abb. 6**). Diese Änderungen ergeben sich durch die Annahme zweier verschiedener Klimaszenarien sowie der Maßnahmenumsetzung auf zwei unterschiedlichen Ambitionsniveaus (Maßnahmenszenarien).

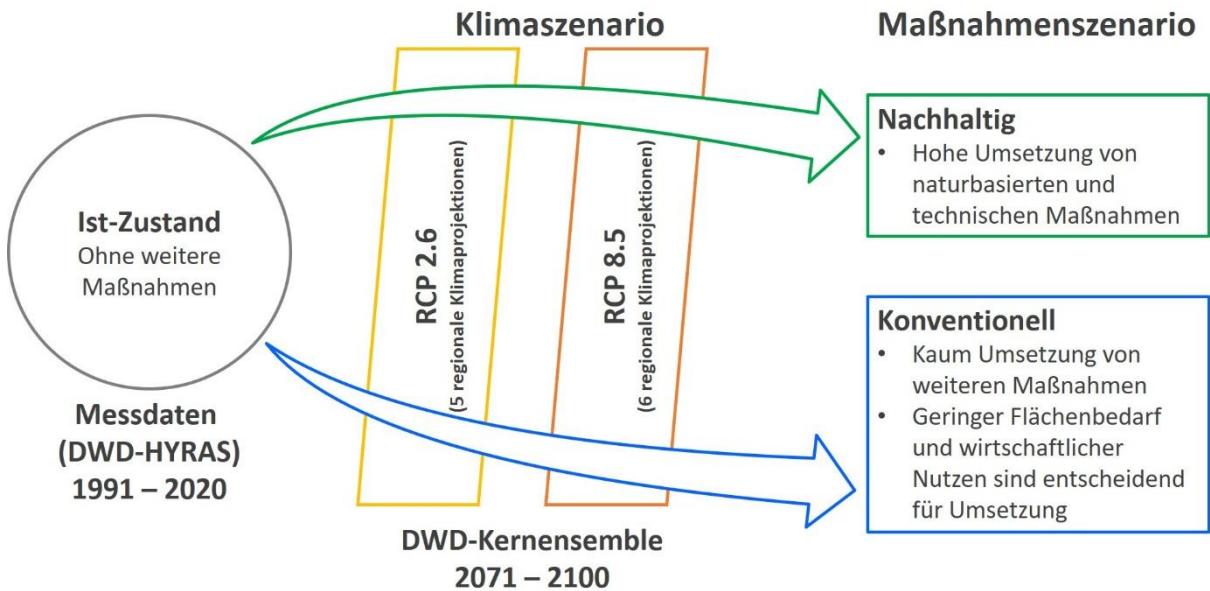


Abb. 6: In KliMaWerk verwendete Klima- und Maßnahmenszenarien sowie Datenquellen.

Für die Arbeiten in KliMaWerk wurden zwei Maßnahmenszenarien entwickelt: Ein „Nachhaltigkeitsszenario“, welches die Entwicklung einer „Schwammlandschaft“ darstellt und neben technischen Anpassungsmaßnahmen insbesondere naturbasierte Maßnahmen zur Resilienzsteigerung des Landschaftswasserhaushalts umfasst. Im Vergleich dazu ein „konventionelles Maßnahmenszenario“, in dem nur Maßnahmen mit einem geringen Flächenbedarf sowie hauptsächlich technische Maßnahmen wie bspw. eine Regenwasserspeicherung im urbanen Raum in geringem Umfang umgesetzt werden (**Tab. 1**).

Tab. 1: Charakteristik der beiden in KliMaWerk verwendeten Maßnahmenszenarien.

Konventionelle Entwicklung	Nachhaltige Entwicklung (Schwammlandschaft)
<ul style="list-style-type: none"> Intensive Bewirtschaftung von Ressourcen mit dem Ziel hoher Produktivität Technische Lösungen für Klimaanpassung angestrebt Hoher Flächendruck U. a. hohe Umsetzung von Regenwasserspeicherung von/auf Dachflächen, in Zisternen sowie im Kanalsystem Nicht umgesetzt werden Maßnahmen, die größere Flächen benötigen, z. B. Flächenentsiegelung und Aufforstung von Ackerland zu Wald 	<ul style="list-style-type: none"> Basiert auf naturbasierten Anpassungsmaßnahmen Bewusstsein und Instrumente zur Erhaltung von Ökosystemleistungen sind vorhanden Synergetischer, kooperativer Ansatz Hohe Umsetzung vieler in KliMaWerk betrachteter Maßnahmen Maßnahmen mit Landnutzungswandel werden aufgrund von Flächenkonflikten teilweise nur eingeschränkt umgesetzt

Für verschiedene Anpassungsmaßnahmen, wie z. B. der Änderung von Acker- bzw. Grünland zu Wald (**Abb. 7**), wurden aus den Landnutzungskarten des Ist-Zustands (Datenquellen: Blickensdörfer et al., 2024; European Environment Agency, 2020; InVeKos - Beantragte und als förderfähig festgestellte

Teilschläge in NRW) neue Zielkarten für die beiden Maßnahmenszenarien erstellt. Hierfür wurden in erster Linie Landnutzungsanpassungen vorgenommen, die auf einen Ausgleich des Wasserhaushaltes durch die Erhöhung der Grundwasserneubildungsraten sowie die Minderung von direkten Oberflächenabflüssen abzielen. Dabei wurden umfassende und regelbasierte, GIS-gestützte Methoden angewandt, die zentrale Kriterien der Landnutzung wie Standortqualität, Erosionsgefährdung oder Baumarteneignung einbeziehen. So konnten grundsätzlich realistisch umsetzbare Potenziale für die Maßnahmenumsetzung ermittelt werden.

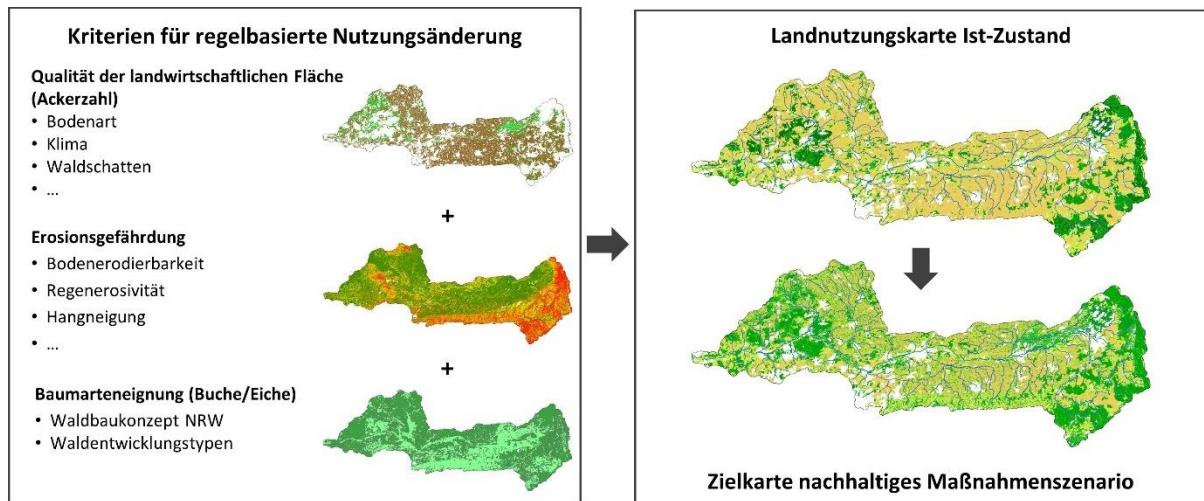


Abb. 7: Herleitung von Landnutzungszielkarten am Beispiel der Anpassungsmaßnahme „Landnutzungsänderung von Acker-/ Grünland zu Wald“.

Hydrologische Maßnahmenwirkungen

Die Simulationen der hydrologischen Wirkungen der beiden Maßnahmenszenarien auf den Landschaftswasserhaushalt im Ist-Zustand (1991-2020) und in den Klimaszenarien (2071-2100) haben gezeigt, dass nur bei einer Umsetzung des nachhaltigen Szenarios deutliche Änderungen sichtbar werden, die im Folgenden dargestellt werden.

Gesamteinzugsgebiet Lippe

Das Gesamteinzugsgebiet der Lippe wurde mit dem Landnutzungsmodell SWAT+ modelliert. Die Ergebnisse der Wasserbilanzsimulationen für die Referenzperiode von 1991 bis 2020 (**Tab. 2**) zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem Ist-Zustand sowie den Szenarien mit einer konventionellen oder einer nachhaltigen Maßnahmenumsetzung.

Tab. 2: Wirkungen der Maßnahmen auf die hydrologischen Prozesse im gesamten Lippeeinzugsgebiet, Referenzzeitraum 1991 bis 2020 bezogen auf die durchschnittlichen Änderungen der Wassermengen pro Jahr.

	Ist-Zustand*	Nachhaltiges	
		Maßnahmenszenario	Relative Änderung
Niederschlag	814 mm	814 mm	keine
Evapotranspiration	417 mm	396 mm	-5 %
Oberflächenabfluss	47 mm	51 mm	+9 %
Drainageabfluss	111 mm	83 mm	-25 %
Zwischenabfluss	41 mm	45 mm	+10 %
Grundwasserneubildung	145 mm	200 mm	+38 %
Speicheränderung	53 mm	39 mm	-8 %

*ohne Maßnahmenumsetzung

Der durchschnittliche Niederschlag pro Jahr betrug 814 mm. Im Vergleich zum Status Quo sinkt die Evapotranspiration im nachhaltigen Maßnahmenszenario um 21 mm. Somit steht durch die abgebildeten Änderungen von Landbedeckung, -nutzung und -management mehr Wasser an der Landoberfläche zur Verfügung. Der Oberflächenabfluss steigt leicht um 4 mm an. Die räumlich aufgelöste Analyse (**Abb. 9**) zeigt hier ausgeprägte regionale Unterschiede. So sind die Anstiege vor allem im bewaldeten und hügeligeren Südosten des Einzugsgebiets zu verzeichnen, in dem ein Wechsel von Nadel- zu Laubbäumen simuliert wurde. Bei Letzteren halten die Kronen im regenreichen Winter weniger Wasser zurück, da sie kein Laub tragen. Dagegen sinkt der Oberflächenabfluss im ländlich oder urban genutzten Tiefland, da hier vor allem infiltrationssteigernde Entsiegelungs- und Landmanagementmaßnahmen greifen.

Besonders stark ausgeprägt ist die Entwicklung beim Drainageabfluss als Folge der Landnutzungsänderungen von agrarisch genutzten zu naturbelassenen Flächen: Der Drainageabfluss wird reduziert um 28 mm. Durch diese Abnahme verbleibt mehr Wasser im Bodenprofil und steht damit für Grundwasserneubildung sowie Zwischenabfluss zur Verfügung. Entsprechend steigt die Grundwasserneubildung von 145 mm im Ist-Zustand auf 200 mm. In den einzelnen Teilgebieten des Einzugsgebiets ergibt sich in der Simulation eine fast durchgängige Steigerung der Grundwasserneubildung auf bis zu 223 mm/a im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahmen (**Abb. 9**).

Der Zwischenabfluss steigt dagegen nur im Nachhaltigkeitsszenario um 4 mm und bleibt bei der konventionellen Maßnahmenumsetzung unverändert.

Die Modellausgaben in den folgenden Karten zeigen, dass die Veränderungen in den Wasserbilanzen räumlich stark variieren. Die Grundwasserneubildung (**Abb. 8**) steigt in allen Teileinzugsgebieten, aber in sehr unterschiedlichem Maße je nach Bodenbeschaffenheit und Landnutzung. Oberflächenabflüsse (**Abb. 9**) sinken dagegen insbesondere in Teileinzugsgebieten mit einem hohen Anteil von bebauten Flächen, die im Zuge der Maßnahmen entsiegt wurden. Dagegen steigen sie besonders stark in den süd-östlichen Mittelgebirgsregionen des Kopfeinzugsgebiets mit größeren Hangneigungen und höheren Waldanteilen.

Grundwasserneubildung [mm]

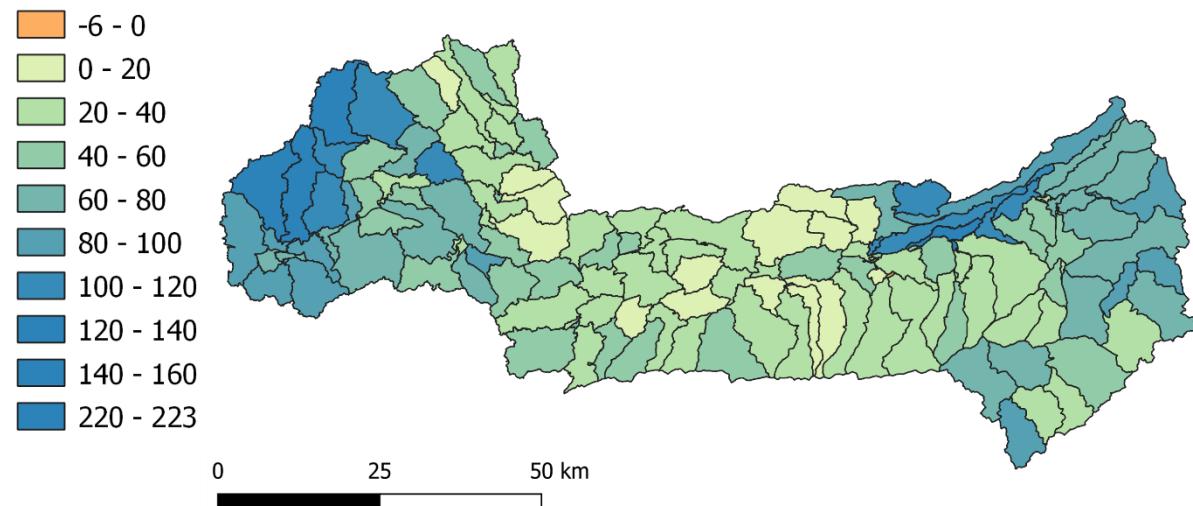


Abb. 8: Änderung der Grundwasserneubildung (Jahresdurchschnitt) im nachhaltigen Maßnahmenszenario verglichen mit dem Ist-Zustand ohne Maßnahmenumsetzung. Betrachteter Zeitraum 1991-2020.

Oberflächenabfluss [mm]

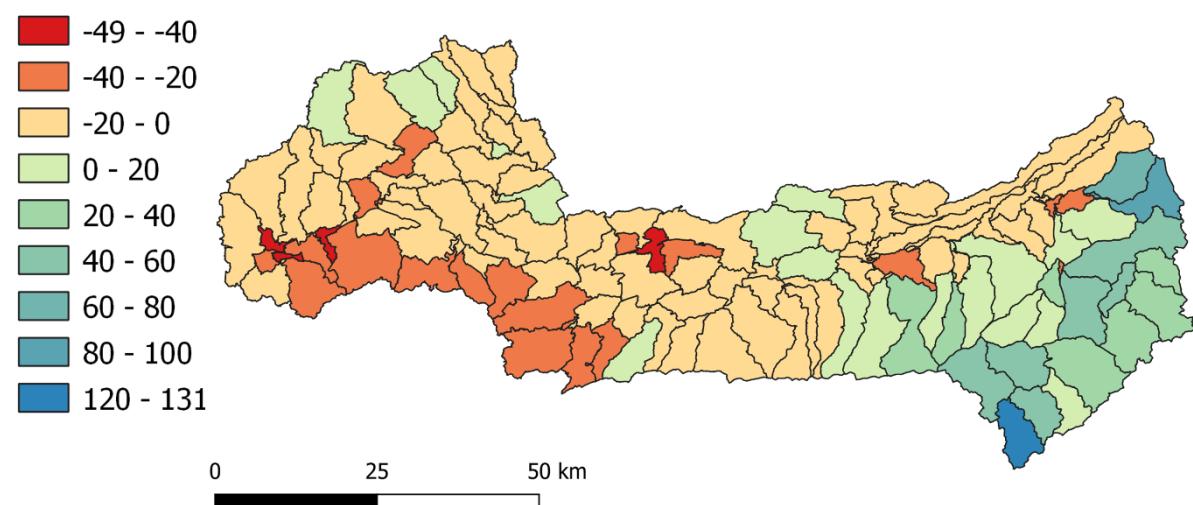


Abb. 9: Änderung des Oberflächenabflusses (Jahresdurchschnitt) im nachhaltigen Maßnahmenszenario verglichen mit dem Ist-Zustand ohne Maßnahmenumsetzung. Betrachteter Zeitraum 1991-2020.

Wirkungen auf das Abflussgeschehen

Die zuvor beschriebenen Änderungen durch die Anpassungsmaßnahmen des nachhaltigen Szenarios wirken sich zudem auf den Abfluss in der Lippe aus. Durch eine erhöhte Retention aufgrund der Maßnahmen fallen Hochwasserspitzen in der Simulation geringer aus und der Abfluss erfolgt verzögert (**Abb. 10**). Der Niedrigwasserabfluss wird bis hinein in die extremen Minima im Sommer durch die Maßnahmen gestärkt.

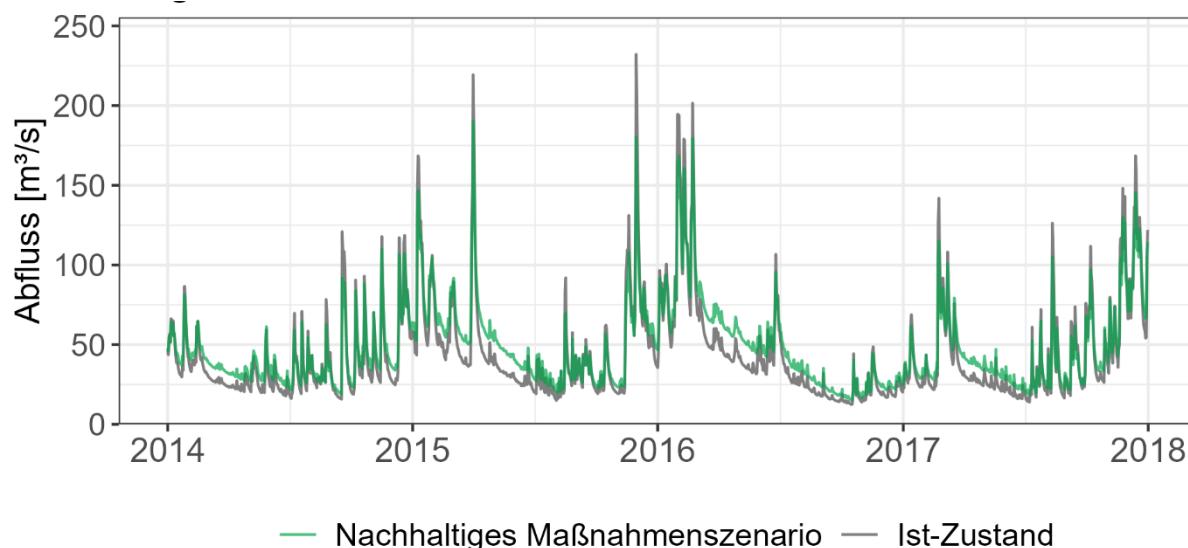


Abb. 10: Einfluss des nachhaltigen Maßnahmenszenarios (grün) auf den Abfluss am Pegel Schermbeck 1, dem Gebietsauslass der Lippe, im Vergleich zum Ist-Zustand ohne Maßnahmenumsetzung (grau). Ausschnitt der Jahre 2014 bis 2018 aus dem betrachteten Zeitraum von 1991 bis 2020.

Die Veränderungen der Abflussindikatoren im Basisszenario (**Abb. 10**) verdeutlichen, wie sich unterschiedliche Klimaszenarien auf Mittelwerte, Extreme und die saisonale Verteilung der Abflüsse in der Lippe auswirken (**Tab. 3**). Der mittlere Abfluss (MQ) bleibt in beiden Klimaszenarien nahezu unverändert, was auf eine insgesamt gleichbleibende Wasserverfügbarkeit hinweist.

Deutlichere Veränderungen ergeben sich in der saisonalen Abflussverteilung, v.a. unter RCP8.5: Die Winterabflüsse steigen um +5 %, während die Sommerabflüsse um -9 % abnehmen. Wassermangel im Sommer kann sich somit verschärfen, während deutlich feuchtere Winter zu erwarten sind. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer unterjährigen Wasserspeicherung und eines angepassten Wasserressourcenmanagements.

Die Hochwasserindikatoren deuten darauf hin, dass bereits im Klimawandelszenario RCP2.6 mit stärkeren höheren Hochwässern (MHQ: +2 %) zu rechnen ist. Im Gegensatz dazu fällt das extremste modellierte Hochwasser niedriger aus (HQ: -4 %). In RCP8.5 steigen das mittlere (MHQ: +5 %) und das extremste Hochwasser (HQ: +4 %) deutlich an. Sehr hohe Abflüsse (q95) nehmen in beiden Klimaszenarien zu.

Starke Abhängigkeiten von der Ausprägung des Klimawandels sind bei den Niedrigwasserindikatoren festzustellen. So kommt es im Szenario RCP2.6 nur zu geringfügigen Änderungen der zu erwarteten Niedrigwasserabflüsse. In RCP8.5 verschärfen sich extreme Trockenereignisse deutlich. Dies zeigt sich im Absinken des MNQ um -14 % sowie des NQ um -35 %.

Zusammenfassend lässt sich aus den Modellergebnissen entnehmen, dass sich mit dem prognostizierten Klimawandel die Abflussdynamik der Lippe verändern wird. Selbst das optimistischere Szenario RCP2.6 zeigt eine Abnahme der sehr niedrigen und eine Zunahme der sehr

hohen Abflüsse. Im Szenario RCP8.5 ist insbesondere der Anstieg der hohen und das Absinken der extrem niedrigen Abflüsse noch stärker ausgeprägt. Dies geht einher mit einem höheren Wasserdargebot im Winter und einem geringeren im Sommer. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen, um dieser Entwicklung zu mehr Extremereignissen entgegenzuwirken.

Tab. 3: Auswirkungen der Maßnahmenumsetzung auf das Abflussgeschehen in der Lippe unter verschiedenen Klimaszenarien, Vergleich der Periode 1971 - 2100 mit der Referenzperiode (1991 - 2020), Ensemblemedian, Pegel Schermbeck 1, Gebietsauslass des Lippeeinzugsgebiets.

Klimaszenario	RCP2.6	RCP2.6	RCP8.5	RCP8.5
Maßnahmenszenario	Status Quo*	Nachhaltig	Status Quo*	Nachhaltig
NQ	-5 %	+68 %	-35 %	+28 %
MNQ	+1 %	+27 %	-14 %	+9 %
MQ	0 %	+11 %	0 %	+11 %
MQ_Winter	-1 %	+8 %	+5 %	+7 %
MQ_Summer	+4 %	+13 %	-9 %	+5 %
MHQ	+2 %	+13 %	+5 %	-11 %
HQ	-4 %	-17 %	+4 %	-14 %
q05	-8 %	+22 %	-8 %	+23 %
q50	+2 %	+27 %	-2 %	+24 %
q95	+4 %	+0 %	+7 %	+4 %

* ohne Maßnahmenumsetzung

Mit der Umsetzung der Maßnahmen steigen die im Gerinne abfließenden Wassermengen auch unter den Bedingungen des Klimawandels (unter RCP2.6 sowie 8.5). So steigt der mittlere Abfluss MQ im nachhaltigen Maßnahmenszenario um 11 %.

Mit den Maßnahmen lassen sich die durch den prognostizierten Klimawandel verstärkten hohen Abflüsse reduzieren. So wird im Klimawandelszenario RCP8.5 durch die Maßnahmen der Anstieg der sehr hohen Abflüsse (q95) abgeschwächt. Dieser beträgt im nachhaltigen Maßnahmenszenario 3 Prozentpunkte weniger als ohne Maßnahmenumsetzung. Der mittlere jährliche Höchstabfluss MHQ sinkt um -11 % anstelle eines Anstiegs von +5 % ohne Maßnahmen – somit kann hier mit den Maßnahmen dem Klimawandeleffekt entgegengewirkt werden. Das extremste Hochwasser HQ im Untersuchungszeitraum fällt ebenso deutlich niedriger aus. Im Klimawandelszenario RCP2.6 kann durch eine nachhaltige Maßnahmenumsetzung der Anstieg der sehr hohen Abflüsse q95 vollständig vermieden werden. Bei den extrem hohen Abflüssen zeigen die Maßnahmen hier eine insgesamt dämpfende Wirkung wobei eine Zunahme von MHQ (+13 %) im nachhaltigen Maßnahmenszenario hier aus dem Rahmen fällt. Dies hängt mit der in diesem Szenario prognostizierten Zunahme der extremen Niederschläge im Winterhalbjahr zusammen, die durch die Maßnahmen nicht ausgeglichen werden kann.

Die Maßnahmen zeigen auch eine deutliche Wirkung auf die Niedrigabflüsse. So steigen die niedrigsten Abflüsse q05 auch unter dem Klimawandelszenario RCP8.5 im nachhaltigen Maßnahmenszenario um +23 % während sie ohne Maßnahmen um -8 % absinken. Bei den extremen Niedrigwasserabflüssen steigen bei einer nachhaltigen Maßnahmenumsetzung dagegen die mittleren Niedrigwasserabflüsse (MNQ) um +9 %. Somit werden die Klimawandelfolgen hier nicht nur verhindert, sondern sogar eine darüberhinausgehende Stärkung erzielt. Im Klimawandelszenario RCP2.6 wird folgerichtig eine erhebliche Stärkung der sehr und extrem niedrigen Abflüsse erzielt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die hier simulierten Maßnahmen zur Steigerung der Retention in

der Landschaft geeignet sind. Bei einer nachhaltigen Maßnahmenumsetzung, die alle Maßnahmenpotentiale berücksichtigt, ist eine Dämpfung der extrem niedrigen und hohen Abflüsse (mit der Ausnahme von MHQ unter RCP2.6) erreichbar. Da das Lippeeinzugsgebiet bereits heute stark anthropogen geprägt ist, stellt dies über die Klimaanpassung hinaus eine wünschenswerte Verbesserung des Status Quo dar.

Einzugsgebiet Hammbach/ Wienbach und Seseke/ Körne

In den Fokusteileinzugsgebieten wurden mit Hilfe des Niederschlagsabflussmodells NASIM und des GrundwassermodeLLS SPRING Detailstudien zu Wirkungen der Maßnahmen auf verschiedene Wasserhaushaltsskomponenten und auf das Abflussgeschehen durchgeführt.

Flächenentsiegelung

Der Abfluss von befestigten Flächen wird maßgeblich durch den Grad der Versiegelung beeinflusst. Durch die modellierte Maßnahmenumsetzung verringert sich der Anteil versiegelter Flächen im EZG Hammbach von 3,1 % auf 1,4 %, im EZG Wienbach von 1,7 % auf 0,4 % und im EZG Körne von 23 % auf 18,8 %. Da beide Szenarien (nachhaltig und konventionell) identische Entseiegelungsmaßnahmen beinhalten, sind Änderungen und damit auch die Auswirkungen auf den Abfluss identisch. Besonders im EZG Körne, das den höchsten Versiegelungsgrad aufweist, ist der Oberflächenabfluss hoch (**Abb. 11**).

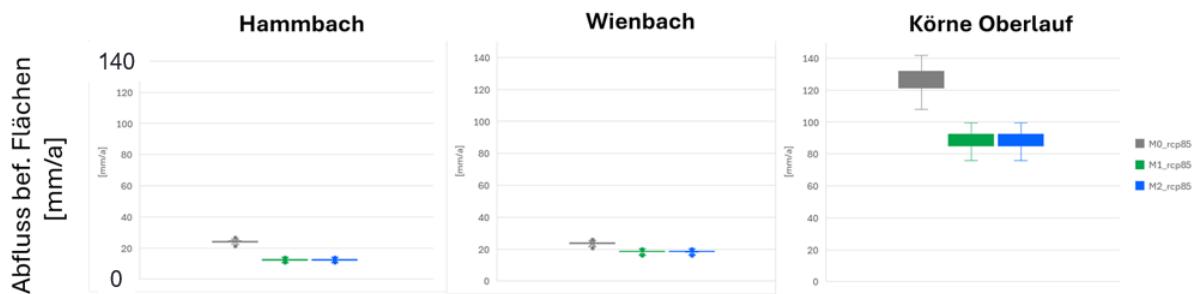


Abb. 11: Box-Plot der Abflussbilanzen befestigter Flächen in mm/a im Ist-Zustand (M0 (grau)), nachhaltigen Maßnahmenszenario (M1 (grün)) und konventionellen Maßnahmenszenario (M2 (blau)), Simulationsdauer 30 Jahre, Klimaszenario RCP8.5.

Durch die Umsetzung der Maßnahmen verringert sich der Oberflächenabfluss in allen Teileinzugsgebieten proportional zur Größe der entsiegelten Flächen. Drei Beispielflächen zeigen dies (**Abb. 12**):

- 1) Ohne Entseiegelung bleibt der Abfluss unverändert.
- 2) Eine vollständige Entseiegelung im Gebiet 2070008 (-11.606 m²) führt zu einer Reduktion des Oberflächenabflusses um rund 6 mm/a.
- 3) Eine Entseiegelung von 80 % in der Stadt (Gebiet 3010021 (-165.428 m²)) bewirkt eine Abnahme des Abflusses um etwa 122 mm/a.

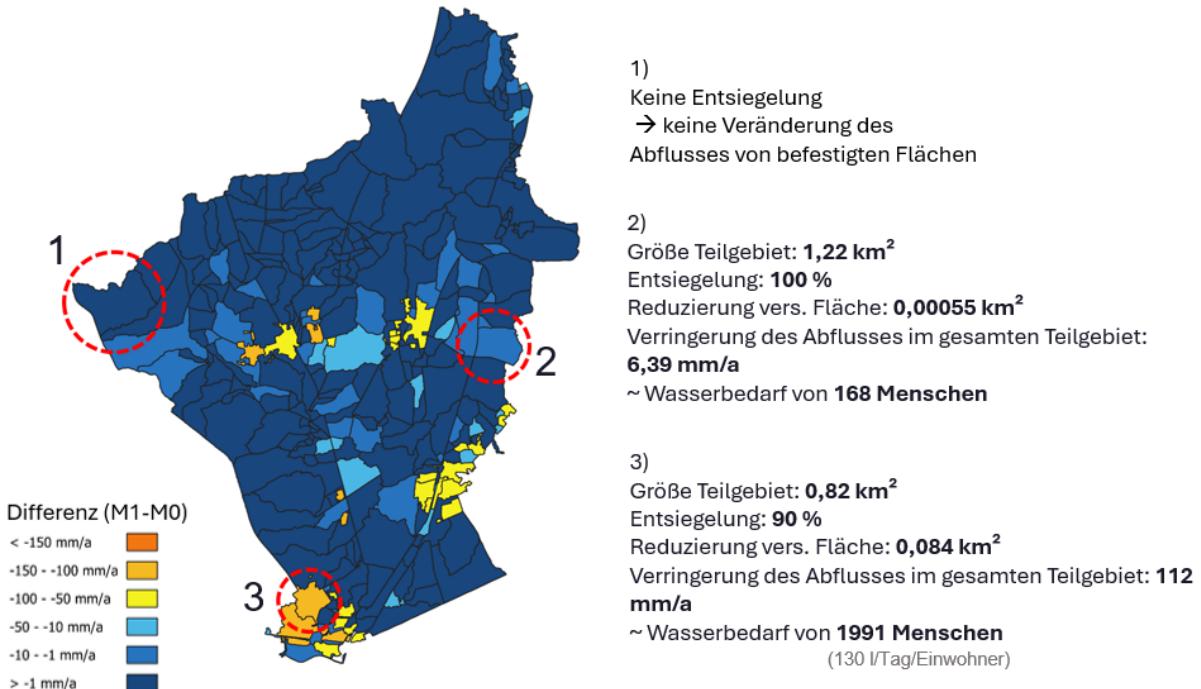


Abb. 12: Abfluss versiegelter Flächen im Einzugsgebiet Hammbach/Wienbach: Bilanzdifferenz zwischen nachhaltigem Maßnahmenszenario (M1) und Istzustand (M0) pro Teilgebiet (3 exemplarische Teilgebiete).

Grundwasserneubildung in der Landschaft

Die Auswertung der Grundwasserneubildung für die beiden Maßnahmenszenarien jeweils im Vergleich zum Ist-Zustand ohne Maßnahmenumsetzung erfolgte anhand von Jahressummen über das Modellgebiet Hammbach/Wienbach (**Abb. 13**). In der Referenzperiode führt die nachhaltige Maßnahmenkombination zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung um +3,1 %, während die konventionelle Maßnahmenkombination zu keiner Veränderung führt. Die nachhaltige Maßnahmenkombination führt zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung von +3,4 % in RCP2.6 bzw. +4,0 % in RCP8.5. Die Ergebnisse zeigen somit, dass nachhaltige Landnutzungsänderungen sich stärkend auf die Grundwasserneubildung und damit positiv auf den Landschaftswasserhaushalt auswirken. Dabei fallen die Wirkungen im ausgeprägterem Klimawandelszenario (RCP8.5) höher aus.

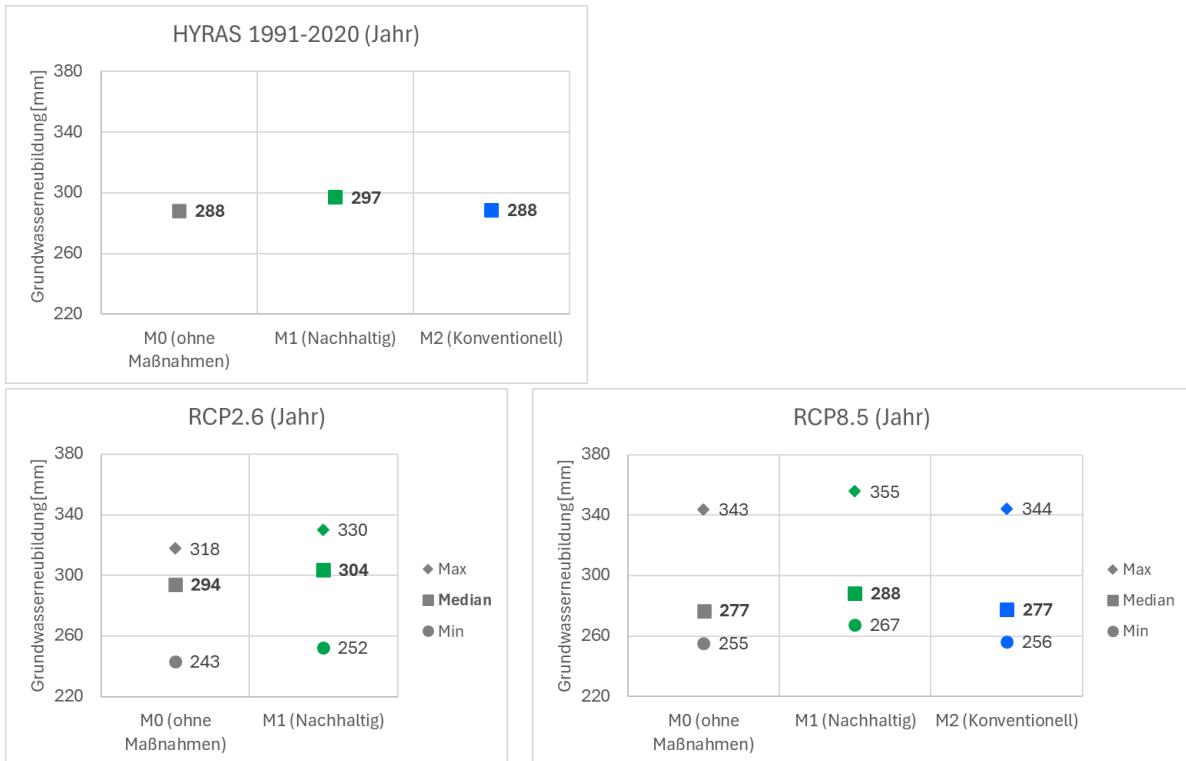


Abb. 13: Grundwasserneubildung im Hammbach/Wienbach-Gebiet (Median der Jahressummen, in mm) in den untersuchten Maßnahmenszenarien in der Referenzperiode 1991-2020 (oben) und in den Klimaszenarien RCP2.6 (unten links) und RCP8.5 (unten rechts) modelliert für die Jahre 2071-2100. Maßnahmenszenarien: Ist-Zustand (M0 (grau)), nachhaltiges Maßnahmenszenario (M1 (grün)) und konventionelles Maßnahmenszenario (M2 (blau)).

Einfluss von Sekundäräulen auf die Grundwasserneubildung

Es wurde die Hypothese untersucht, dass die Schaffung zusätzlicher Retentionsflächen die Versickerung erhöht und somit die Grundwasserneubildung begünstigt. Im Rahmen einer Detailstudie wurde ein ausgewähltes Teilgebiet in einen Auenbereich und angrenzendes Umland unterteilt (**Abb. 14**).

Für ein Szenario 1 wurde der Auenbereich auf die Wasserspiegellage eines mittleren Abflusses (MQ) abgesenkt und zusätzlich zur natürlichen Niederschlagsbelastung mit einem synthetischen Niederschlagsereignis beaufschlagt, um eine gezielte Überflutung zu simulieren. Die daraus resultierende zusätzliche Versickerung wurde auf Grundlage der maximalen kf-Werte der Bodenkarte berechnet.

Da die tatsächliche Grundwasserneubildung auch von der Fließrichtung des Grundwassers abhängig ist, wurden in Szenario 2 die mit dem GrundwassermODELL SPRING berechneten Grundwasserzu- und abflüsse („Leakage“) berücksichtigt. Eine Exfiltration des Grundwassers in das Gewässer wurde dabei als Ausschlusskriterium für eine zusätzliche Grundwasserneubildung gewertet.

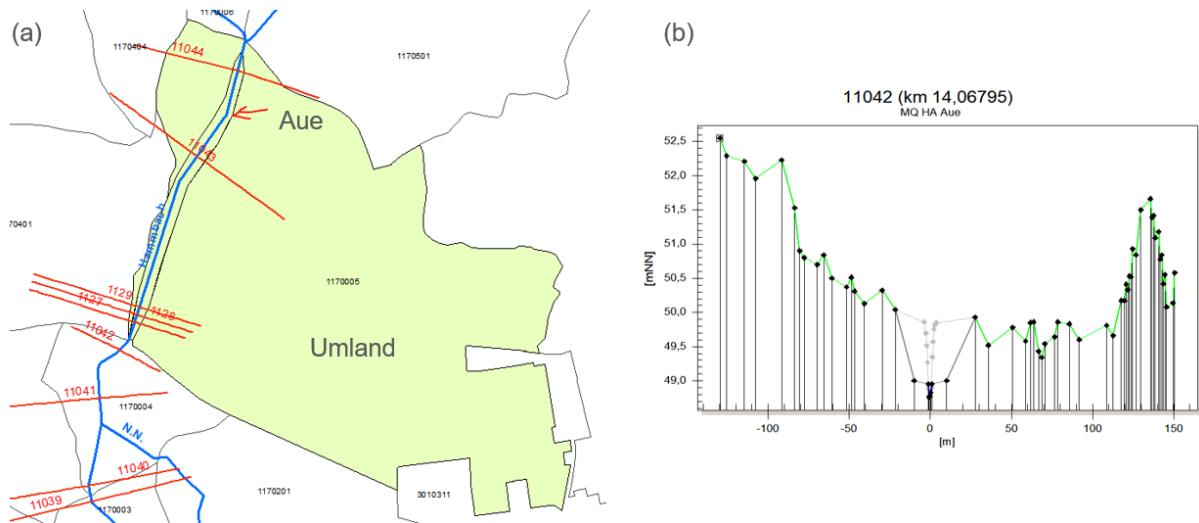


Abb. 14: (a) Modellgebiet (grün) mit ausgewiesem Auenbereich sowie Umland. (b) Beispiel einer Sekundäraue mit Absenkung auf MQ (grau hinterlegt: Zustand vor Anpassung).

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte hinsichtlich Bodenfeuchte, Infiltration und Veränderung der Grundwasserneubildung (**Abb. 15**). Mit Fokus auf den Auenbereich werden in **Abb. 15** für die unterschiedlichen Simulationsläufe (Ist-Zustand, Überflutungs-Szenario 1 und Überflutungs-Szenario 2) die Entwicklung der Bodenfeuchte sowie die Summenlinien der Grundwasserneubildung über einen Zeitraum von 10 Jahren dargestellt. Klar zu erkennen ist, dass bei hohem Bodenwassergehalt im Zuge der Auen-Überflutung die Grundwasserneubildung ansteigt. Im Vergleich zum Ist-Zustand kann das Grundwasser in Überflutungs-Szenario 1 mit einem Plus von 100 mm bzw. in Szenario 2 mit zusätzlichen 75 mm gestärkt werden.

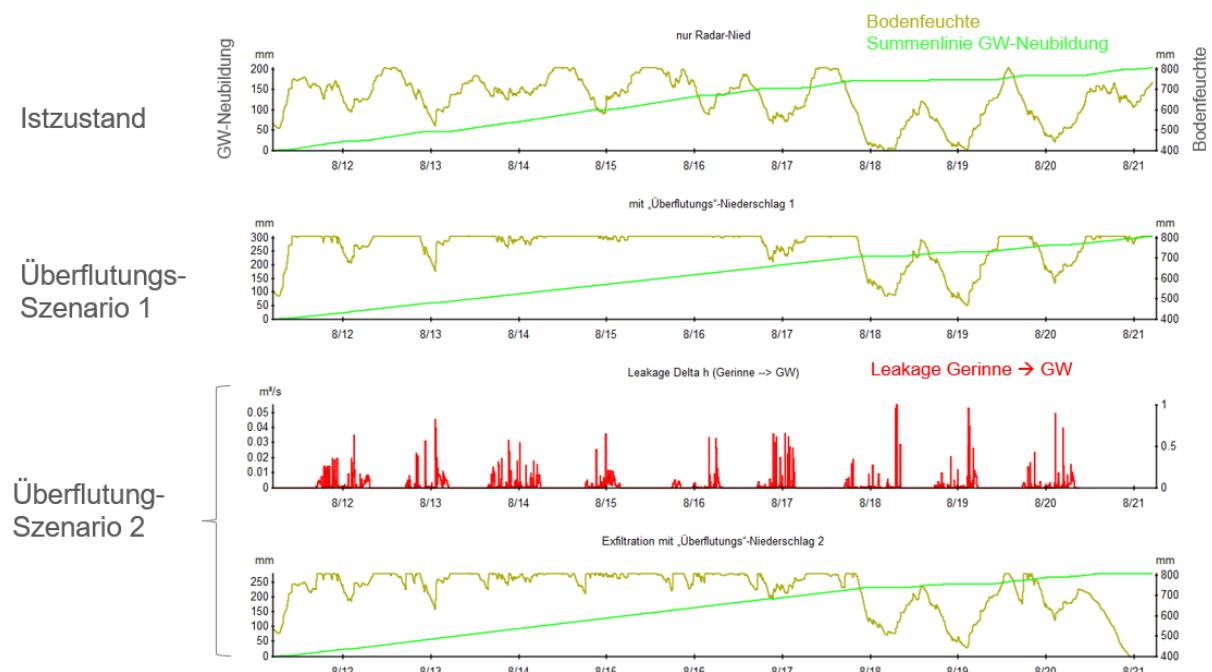


Abb. 15: Ergebnisse der Auenstudie: Vergleich zwischen Ist-Zustand, Überflutungs-Szenario 1 mit zusätzlichem Niederschlag und -Szenario 2 unter Einbezug der Leakage-Daten aus SPRING.

Trockenfallen von Gewässern

Für definierte Punkte im Gewässernetz zeigt **Abb. 16** drei Auswertungen zur Anzahl der Tage im Jahr, an denen der Gewässerabschnitt (repräsentiert durch einen Modellknoten) trockenfällt. Hierbei werden die Extreme der verwendeten Klimaprojektionen mit der geringsten und höchsten Grundwasserneubildung und respektive dem häufigsten und seltensten Trockenfallen abgebildet.

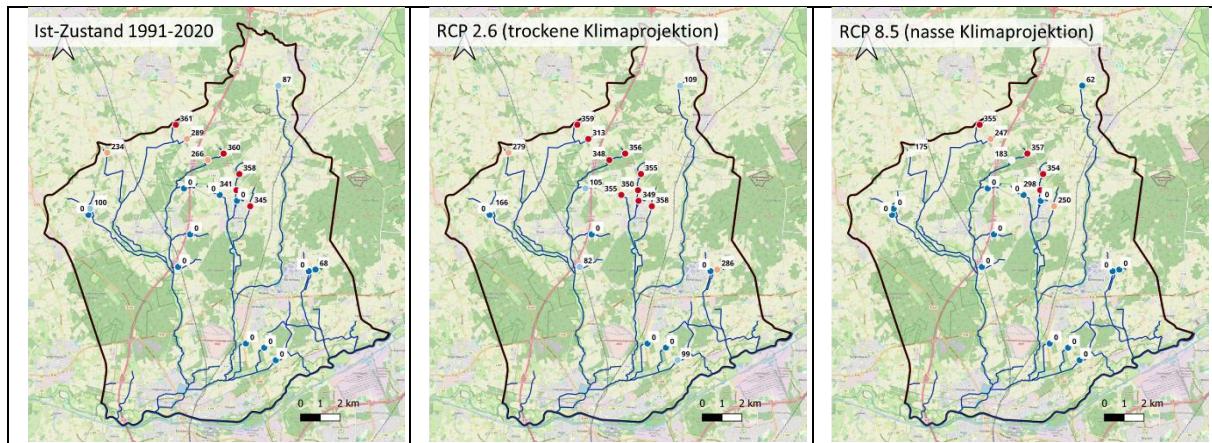


Abb. 16: Anzahl der Tage im Jahr mit Trockenfällen für die Referenzperiode (links), die Projektion 03_RCP2.6 mit geringer Neubildung (Mitte) sowie die Projektion 05_RCP8.5 mit hoher Neubildung (rechts) ohne Maßnahmenumsetzung.

Die statistische Auswertung für das Trockenfallen unter den beiden Klimaprojektionen und die festgelegten Maßnahmenkombinationen erfolgten für Gewässerabschnitte, in denen Abflussverhältnisse und Trockenfallen von den klimatischen Verhältnissen abhängen und variieren (d. h. es treten in den betrachteten Zeitabschnitten sowohl Abfluss als auch Trockenfallen auf) (**Abb. 17**). Die Anzahl der Tage mit Trockenfällen wird über die 10 gewählten Punkte in jedem Jahr gemittelt. Es wird deutlich, dass die Zahl der Tage mit Trockenfällen im Klimaszenario RCP2.6 sinkt, während sie im Klimaszenario RCP8.5 ansteigt. Dabei ist die Spannbreite und damit die Prognoseunsicherheit im Ensemble für RCP2.6 größer als im Ensemble für RCP8.5. Die nachhaltige Maßnahmenumsetzung reduziert die Anzahl der Tage mit Trockenfällen um -5 Tage pro Jahr für RCP2.6 bzw. um -8 Tage für RCP8.5. Die konventionelle Maßnahmenumsetzung bewirkt nur eine sehr geringe Reduktion um -1 Tag pro Jahr.

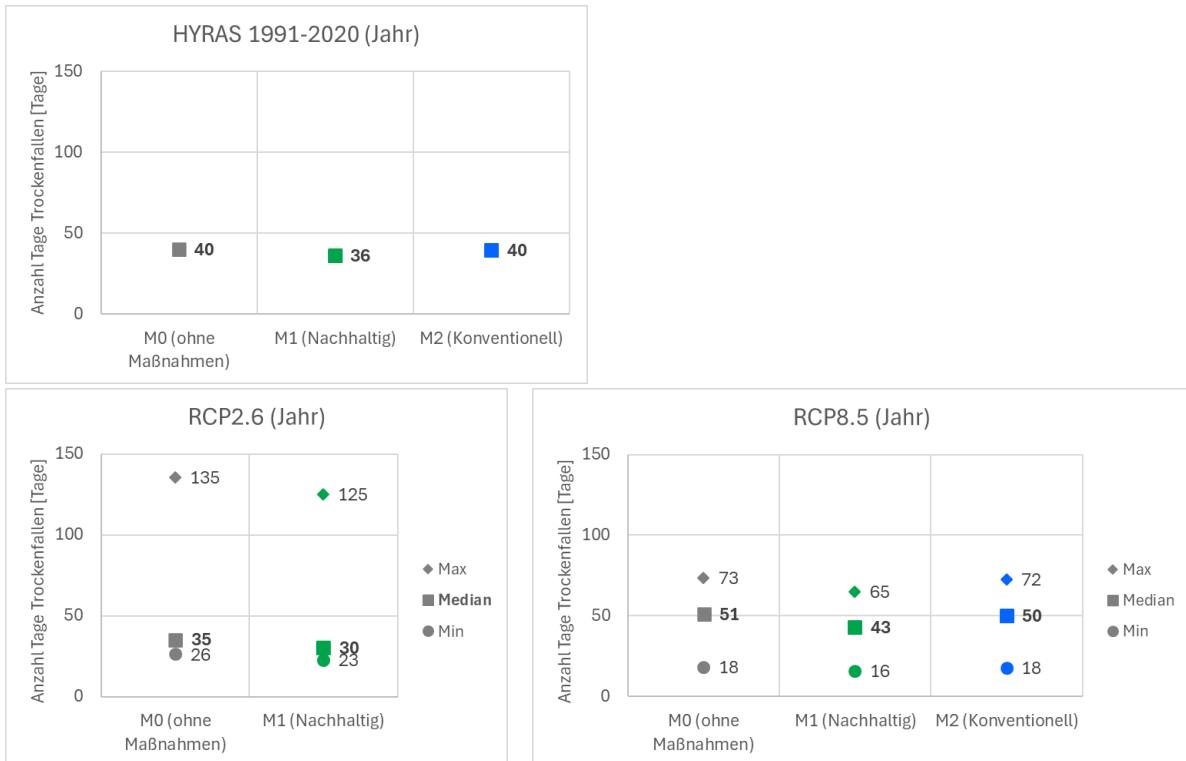


Abb. 17: Anzahl der Tage im Jahr mit Trockenfällen für den Ist-Zustand (links), die Projektion 03_RCP2.6 mit geringer Neubildung (Mitte) sowie die Projektion 05_RCP8.5 mit hoher Neubildung (rechts) ohne Maßnahmenumsetzung.

Ökologische Maßnahmenwirkungen

Die ökologischen Auswirkungen der Klima- und Maßnahmenszenarien wurden anhand der Wirkfaktoren der Hydrologie (Niedrigwasser und Trockenfälle sowie Hochwasser), der Wassertemperatur sowie der Maßnahmen zur ökologischen Verbesserung der Gewässerstrukturqualität (Ufergehölze) für die Organismengruppen Makrozoobenthos, Fische und Makrophyten untersucht. Für die Veränderung der Hydrologie wurden die Maßnahmen herangezogen, die zu einer Veränderung des Abflusses auf Ebene des Landschaftswasserhaushalts führen, d. h. die Maßnahmen zu Regenwasserbewirtschaftung, Landnutzungsänderung, Anpassung der Bewirtschaftungsformen und Entwässerungsmanagement.

Die Wahrscheinlichkeit des Trockenfallens nimmt je nach betrachtetem Klimaszenario deutlich zu, im extremsten Fall um bis zu +9,4 Tage pro Jahr. Die Anpassungsmaßnahmen können die Erhöhung der Trockenfall-Tage zwar im günstigsten Fall bis zur Hälfte reduzieren, vermutlich wird dennoch mit deutlichen Auswirkungen auf die Besiedlung von Fließgewässern durch das Makrozoobenthos zu rechnen sein. In einzelnen Projektionen des RCP8.5 Klimaszenarios wird zudem eine deutliche Abnahme des Abflusses bei Niedrigwasser-Extremen auf rund -9 bis -10 % prognostiziert – dies entspricht einer Reduktion des extremen Niedrigwasserabflusses um gut ein weiteres Drittel. Bei den extremen Klimaprojektionen, in denen eine Aufhöhung des Niedrigwasserabflusses durch Maßnahmen ökologisch besonders wichtig wäre, zeigen die Maßnahmen keine Wirkung. In diesen Fällen ist voraussichtlich trotz Maßnahmenumsetzung mit negativen Auswirkungen der extremen Niedrigwasserereignisse auf das Makrozoobenthos zu rechnen.

Der Hochwasserabfluss nimmt im Klimaszenario RCP8.5 im Mittel zu. Während der mittlere Anstieg des Hochwassers um etwa ein Zehntel vermutlich eher geringe ökologische Auswirkungen haben wird, ist bei einem Anstieg in der extremen Klimaprojektion um etwa ein Drittel durchaus mit Prozessen, die sich negativen auf die Biozönose auswirken können wie einem zunehmenden Sedimenttransport, Instabilität des Substrats auch in den ufernahen Bereichen und einer Erhöhung der Katastrophen-Drift des Makrozoobenthos, zu rechnen.

Die Maßnahmen können für die extremeren Klimaprojektionen nur maximal ein Drittel der klimawandelbedingten Veränderungen kompensieren, dies gilt für Hochwasser wie für das Niedrigwasser und die Wahrscheinlichkeit des Trockenfallens.

Die Auswirkungen der hydrologischen Veränderungen sowie der Maßnahmen in den Klima- und Maßnahmenszenarien auf die biologische Besiedlung der Gewässer wurden mithilfe des Bayesian Belief Networks (BBN) abgeschätzt, unter Berücksichtigung der wesentlichen Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Mit diesem Verfahren konnten nicht nur die Maßnahmen auf Ebene des Landschaftswasserhaushalts, sondern auch die Maßnahmen im Gewässer und Gewässerumfeld (z. B. Entwicklung von Ufergehölzen) berücksichtigt werden. Eine zentrale Rolle bei den Ursache-Wirkungs-Beziehungen im BBN nimmt die Wassertemperatur ein.

In den extremen Klimaszenarien kommt es im Mittel zu einem Anstieg der maximalen Wassertemperatur (Maximum des 7-Tage gleitenden Mittels) um +2 °C, bei einzelnen Projektionen sogar um +3,1 °C. Eine solche Erhöhung der Wassertemperatur kann die Wahrscheinlichkeit für das Verfehlen des Bewirtschaftungsziels „guter ökologischer Zustand“ auf bis zu 84 % erhöhen, sowohl bei den Qualitätskomponenten Makrozoobenthos als auch Fische. Bei den Fischen spielt die Erhöhung der Wassertemperatur im Winter und Frühjahr eine wichtige Rolle für den Reproduktionserfolg (z. B. der Bachforelle, der hierdurch stark beeinträchtigt werden kann), was somit einen wesentlichen Wirkungspfad des Klimawandels darstellt. Die Gegenmaßnahme der Beschattung durch Ufergehölze führt zwar nachweislich an beschatteten Tagen zu einem deutlichen Rückgang der maximalen Wassertemperatur um -2,3 °C und an sonnigen Tagen um bis zu -4 °C bis -5 °C (Kail et al., 2021), dies ist jedoch – bezogen auf den Reproduktionserfolg der Fische – im Winter und Frühjahr aufgrund der fehlenden Belaubung noch nicht wirksam.

Die Ergebnisse des BBN deuten für die Makrophyten darauf hin, dass der Klimawandel keinen substanziellen Einfluss auf ihre Abundanz haben wird. Durch die Entwicklung von dichten Ufergehölzen zur möglichst vollständigen Kompensation des Anstiegs der Wassertemperatur und Verbesserung des ökologischen Zustands kann es jedoch zu einem deutlichen Rückgang der Abundanz der Makrophyten kommen, was für eine Vielzahl von Gewässertypen dem Leitbildzustand näherkäme.

Mittels Feldversuchen zum Stoffabbau im Projekt KliMaWerk kann festgestellt werden, dass es im Klimawandel zu einem deutlich schnelleren Abbau eingetragenen Laubs im Frühjahr und Frühsommer kommen kann. Damit steht dieses organische Material später im Jahr nicht mehr zur Verfügung, was zu Veränderungen im Nahrungsnetz führen kann. Darüber hinaus würde dies die CO₂-Emissionen der kleinen Fließgewässer erhöhen, die einen durchaus relevanten Anteil an den globalen Emissionen haben.

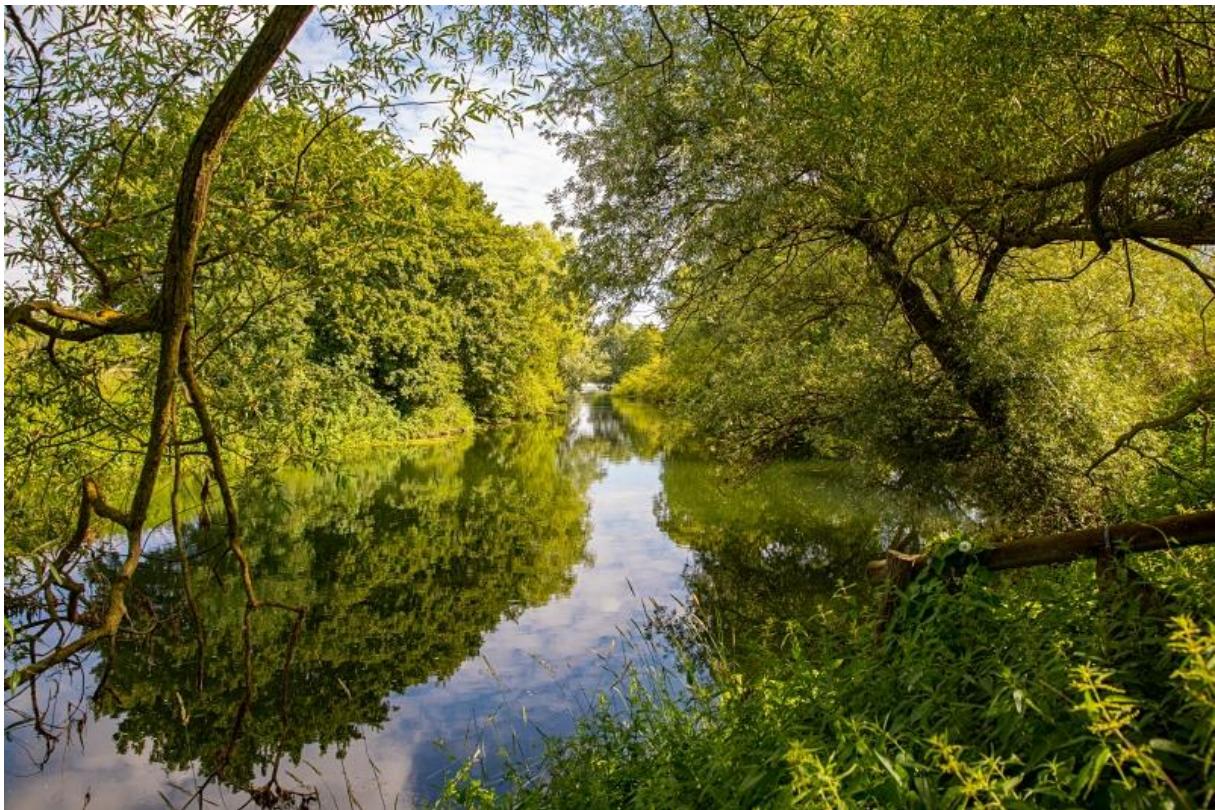


Abb. 18: Lippe bei Werne mit Ufergehölzen (Foto EGLV/A. Fritsche, 2020).

Im Fazit zeigen die Ergebnisse zu den ökologischen Auswirkungen der Klima- und Maßnahmenszenarien, dass sich der Klimawandel auf die ökologisch relevanten hydrologischen Kenngrößen und damit auf die meisten hier untersuchten Organismengruppen und die Ökosystemfunktion der Dekomposition negativ bis stark negativ auswirkt. Von zentraler Bedeutung ist neben der Zunahme von Niedrigwasser und Trockenfallen v. a. die Erhöhung der Wassertemperatur, deren Auswirkungen durch Ufergehölze während der Vegetationsperiode vermindert werden können (**Abb. 18**). Die Ergebnisse zeigen zum einen die Grenzen der Maßnahmen zur Kompensation der klimawandelbedingten Veränderungen der Hydrologie und deren ökologischer Folgen auf, was die Notwendigkeit des Klimaschutzes unterstreicht. Zum anderen wird jedoch deutlich, dass die Möglichkeit durch Beschattung der Gewässer den klimawandelbedingten Anstieg der Wassertemperatur und dessen ökologische Auswirkungen zu kompensieren, grundlegend ist. Für die Überdauerung der Wirbellosen in sommerlichen Niedrigwasser- und Trockenphasen sind vielfältige gewässertypische Habitate wie Unterstände, Kolke, Totholz etc. essenziell.

Empfehlungen für einen gestärkten Landschaftswasserhaushalt und klimaresilientere Fließgewässer

Im Projekt wurden unterschiedliche Szenarien-Kombinationen, bestehend aus der Spannweite der prognostizierten Klimaveränderungen und unterschiedlichen Graden der Maßnahmenumsetzung, modelliert. Ausgehend von diesen Prognosen und von Literaturrecherchen wurden **Handlungsempfehlungen für sechs Handlungsfelder** erarbeitet. Die Handlungsfelder orientieren sich an den für das Projekt definierten Maßnahmenpaketen.

Generell zeigen die im Projekt erzielten Ergebnisse, dass die folgenden Auswirkungen des Klimawandels

- extremere und häufigere Hochwasserereignisse,
- häufigere und länger anhaltende Trockenperioden,
- höherer Wasserbedarf und sinkende Grundwasserstände,
- höhere Luft- und Wassertemperaturen und
- Auswirkungen auf die Flora und Fauna

nur dann effektiv abzumildern sind, wenn die Maßnahmen der Handlungsfelder möglichst weitreichend und konsequent umgesetzt werden.

Dabei liegen in allen Handlungsfeldern grundsätzlich ähnliche Herausforderungen hinsichtlich der Umsetzung der Maßnahmen vor, die im Vorlauf angegangen werden müssen:

- eingeschränkte Flächenverfügbarkeit und fehlende effektive Möglichkeiten der Beschaffung von Flächen,
- fehlende Finanzierung,
- lange Planungs- und Bewilligungsprozesse,
- fehlende Zuordnung von Zuständigkeiten für eine gesamtheitliche Bewirtschaftung von Einzugsgebieten

Lösungsansätze für einige dieser Punkte sind unter den Handlungsempfehlungen für Governance- und Regulierungsmaßnahmen erörtert.



Handlungsfeld 1: Gewässer

Aktueller Zustand und Verschärfung durch Klimaextreme:

Seit Inkrafttreten der Wasserrahmenrichtlinie sind – mit Bezug auf das gesamte Lippeeinzugsgebiet – zahlreiche, aber eher nur lokale Renaturierungsmaßnahmen an Bächen und Flüssen umgesetzt worden. Daher überwiegen an der Lippe, aber auch darüber hinaus – in Nordrhein-Westfalen und der gesamten Bundesrepublik – mäßige bis schlechte gewässerstrukturelle Verhältnisse. Dies spiegelt sich in der häufig geringen Habitatqualität, der oft fehlenden Beschattung und der damit einhergehenden geringeren Resilienz des Ökosystems und der Lebensgemeinschaften gegenüber Extremereignissen wider.

Durch den Klimawandel ist mit häufiger auftretenden und stärker ausgeprägten extremen Hoch- und Niedrigwasserereignissen sowie steigenden Wassertemperaturen zu rechnen. Als Folge erhöht sich der Druck auf das Ökosystem Fließgewässer und die darin vorkommenden Lebensgemeinschaften. Negative Auswirkungen auf den ökologischen Zustand nach Wasserrahmenrichtlinie für die biologischen Qualitätskomponenten Fische und Makrozoobenthos sind die Folge. Zusätzlich werden das Nahrungsnetz und damit die Artenzusammensetzung durch den beschleunigten Abbau organischen Materials verändert, die Sauerstoffkonzentration sinkt und die Freisetzung von Kohlendioxid aus Fließgewässern steigt an.

Handlungsempfehlungen:

Die konsequente und weitreichende Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur und der Beschattung von Fließgewässern (Maßnahmenpaket 1) wird eindringlich empfohlen. Die Maßnahmenumsetzung sollte deutlich über die Streckenansätze des Strahlwirkungskonzeptes hinausgehen und die gesamte Gewässerstrecke umfassen, sofern keine harten Restriktionen wie beispielsweise direkte angrenzende Bebauung vorliegen.

- Durch die schon heute auftretenden und sich auch kurzfristig weiter verstärkenden Effekte des Klimawandels auf die Fließgewässer ist eine aktive Verbesserung der Ufer- und Sohlstrukturen zur Aufwertung der Habitatqualität und Steigerung der Resilienz in allen Gewässern notwendig.
- Die Entwicklung von möglichst durchgängigen naturnahen Ufergehölzen zur Beschattung kompensieren einen Teil des klimawandelbedingten Anstiegs der Tageshöchsttemperaturen in Fließgewässern. Dies betrifft vor allem kleine Fließgewässer in vorrangig landwirtschaftlich geprägten Bereichen, deren Ufer häufig keine Ufergehölze aufweisen und die einen Großteil des Einzugsgebiets der Lippe ausmachen. Insbesondere in diesen für einen Anstieg der Gewässertemperatur anfälligen Gewässern ist die Entwicklung von Ufergehölzen prioritär umzusetzen.



Handlungsfeld 2: Gewässerumfeld

Aktueller Zustand und Verschärfung durch Klimaextreme:

Das unmittelbare Gewässerumfeld und damit der Auenbereich von Fließgewässern unterliegt im Großteil des Einzugsgebiets der Lippe einem hohen Nutzungsdruck durch die Landwirtschaft. In urban geprägten Teilen des Einzugsgebiets hingegen reicht die Bebauung häufig bis direkt an das Ufer heran oder das Gewässer wird durch Deiche am großflächigen Ausufern gehindert. In Folge wird das Wasser bei Hochwasser schnell abgeführt. Bei immer häufiger auftretenden Extremereignissen besteht zudem die Gefahr, dass Deiche dem Hochwasser nicht standhalten oder überspült werden und Flächen unkontrolliert überflutet werden, mit hohen Schäden als Folge.

Handlungsempfehlungen:

Es wird eine konsequente und weitreichende Umsetzung von Maßnahmen im Gewässerumfeld (Maßnahmenpaket 2) empfohlen, die deutlich über hauptsächlich strukturverbessernde Maßnahmen im Gewässer (Maßnahmenpaket 1) hinausgehen. Darunter fallen die Rückverlegung oder der Rückbau von Deichen sowie die Anlage von Sekundär- oder die Aktivierung von Primärauen.

- Die Maßnahmen unterstützen die Retention von Hochwasserabflüssen und können den Scheitelabfluss, insbesondere bei Gewässern mit geringerem Talbodengefälle (ca. < 5 %), reduzieren. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist umso größer, je mehr Raum dem Gewässer zur Verfügung steht. Daher sollten diese Maßnahmen an Gewässerabschnitten ohne harte Restriktionen (z. B. Bebauung) möglichst großräumig umgesetzt werden und die Breite der morphologischen Aue des Gewässers weitestgehend ausgenutzt werden.
- Bewaldete Flächen in den Auen oder Deichvorländern erhöhen die Retentionswirkung deutlich. Die weitestmögliche Anpassung der Landnutzung in Auenbereichen und Deichvorländern zu Wald bzw. einer möglichst naturnahen Entwicklung von Auenbereichen ist daher sinnvoll.
- Durch die Überflutung größerer Flächen im Gewässerumfeld wird die Grundwasserneubildung im Nahbereich der Fließgewässer grundsätzlich gefördert. Die Grundwasserneubildung wird neben vielen weiteren Faktoren stark von der Durchlässigkeit der vorherrschenden Bodenarten beeinflusst. Bei sandigen Böden, wie sie im Einzugsgebiet der Lippe häufig vorkommen, ist aufgrund der hohen Durchlässigkeit mit einem höheren Beitrag zur Grundwasserneubildung zu rechnen, die jedoch von einer Deckschicht aus Auelehm mit geringer Durchlässigkeit herabgesetzt werden kann. Daher ist die Anlage von Flutmulden oder -rinnen, welche diese Deckschicht durchstoßen, sinnvoll, um die Infiltrationskapazität zu erhöhen und ein heterogenes Auenrelief zu schaffen. Auf diese Weise wird das Wasser in der Aue gehalten und die Grundwasserneubildung begünstigt.

- Hierdurch erhöhte oder stabilisierte Grundwasserstände im Nahbereich von Gewässern sind in der Lage, den Abfluss im Fließgewässer in Niedrigwasserphasen zu stützen und somit die Dauer des Auftretens extrem niedriger Abflüsse zu verkürzen.
- Ist die Reaktivierung von Primär- oder die Schaffung von Sekundärauen nicht umsetzbar, kann die Schaffung von Nebengerinnen sowie die Entwicklung von Auengewässern eine Alternative darstellen. Diese Maßnahmen wirken sich zwar i. d. R. nur in geringem Ausmaß auf den Hochwasserrückhalt aus. Durch die Schaffung von Lebensräumen, die im Hauptgewässer nicht vorhanden sind, wird jedoch ebenfalls die Habitatdiversität dieser Gewässerabschnitte erhöht. Einige dieser Auengewässer (z. B. wiederangebundene Altarme) können für die Gewässerfauna – insbesondere die Fische – wertvolle Rückzugsräume während Hochwasserereignissen und Niedrigwasserphasen darstellen. Insgesamt wird somit die (ökologische) Resilienz gegenüber Extremereignissen steigen.



Handlungsfeld 3: Regenwasserbewirtschaftung

Aktueller Zustand und Verschärfung durch Klimaextreme:

Das Potenzial des dezentralen Rückhalts von Niederschlagswasser in Städten und geschlossenen Siedlungslagen ist in vielen Bereichen nicht ausgeschöpft. In Folge sind die konventionellen Entwässerungssysteme bei extremen Starkregenereignissen überlastet und nicht in der Lage das anfallende Wasser schadlos abzuleiten. Die Retentionsfähigkeit urbaner Gebiete ist häufig gering und Optimierungen des Kanalnetzes und die Nutzung von Frei- und Dachflächen zum Rückhalt von Niederschlagswasser erfolgt nur vereinzelt.

In Zukunft wird sowohl die Häufigkeit von Starkregenereignissen als auch die Intensität von Extremereignissen weiter steigen. Hohe wirtschaftliche Schäden durch Überflutungen sind die Folge. Neben den Starkregenereignissen werden auch Phasen mit keinem oder nur wenig Niederschlag häufiger.

Handlungsempfehlungen:

Es wird eine konsequente und weitreichende Umsetzung von Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (Maßnahmenpaket 3) empfohlen. Dazu sind Dach-, Verkehrs- und Freiflächen einzubinden und die lokale (Zwischen-)Speicherung von Niederschlagswasser auszubauen. Dies gilt insbesondere nicht nur für neu erschlossene Gebiete, sondern auch für den Bestand und über bisherige Entwässerungskonzepte hinaus.

- Einzelmaßnahmen wirken nur lokal begrenzt und führend zu keiner messbaren Entlastung der städtischen Entwässerung. Daher sind Maßnahmen des dezentralen Niederschlagswasserrückhalts in Kombination und flächenhaft zu planen und umzusetzen. Der Direktabfluss wird so effektiv verringert und die Kanalisation entlastet. Dazu ist das in vielen Städten vorhandene große Potenzial für die Anlage von Gründächern (in NRW insgesamt ca. 400 km², gemäß Gründachkataster) auszuschöpfen, überschüssiges Niederschlagswasser in Regentonnen oder Zisternen aufzufangen und die lokalen Versickerungsmöglichkeiten, beispielweise in Form von Versickerungsmulden, auszubauen. Neben der Verminderung des Direktabflusses tragen diese Maßnahmen zur Grundwasserneubildung und zur Verbesserung des Stadtklimas bei.

Es wird weiterhin empfohlen, den Grad der Versiegelung signifikant zu senken, indem bereits versiegelte Flächen entsiegelt werden und die Versiegelung neuer Flächen vermieden wird.

- Das Potenzial von zu entsiegelnden Flächen ist sowohl in der Stadt als auch in der Landschaft zu ermitteln. Die Versiegelung von neuen Flächen ist, falls sie nicht zu vermeiden ist, durch die Entsiegelung bestehender Flächen zu kompensieren.
- Der Beitrag von versiegelten Flächen am Oberflächenabfluss eines Einzugsgebiets ist auch in der freien Landschaft nicht zu vernachlässigen. Die Wegeinfrastruktur ist in den letzten

Jahrzehnten auch in land- und forstwirtschaftlich genutzten Bereichen immer weiter ausgebaut und Wege mit einer Asphaltdecke versehen worden. Diese haben, insbesondere wenn sie parallel zur Hangneigung verlaufen, im Vergleich zu ihrem Flächenanteil einen sehr großen Anteil am Oberflächenabfluss eines Gebietes. Eine teilweise Entsieglung (z. B. beschränkt auf die Fahrspuren) oder bei geringer Nutzungsintensität auch eine komplette Entsieglung ist daher empfehlenswert.

- Flächen mit Entsieglungspotential in Städten sind vor allem öffentliche oder gewerbliche Parkplätze. In Abhängigkeit der Größe und der Nutzungsintensität ist eine Teilsieglung stets zu empfehlen. Auch Parkstreifen an wenig befahrenen Straßen können geeignet sein. Es empfiehlt sich Grundstückseigentümer über die Möglichkeiten von Entsieglungsmaßnahmen von privat genutzten Stell- und Hofflächen und die Vorteile (z. B. geringere Niederschlagswassergebühren) zu informieren und in Neubaugebieten einen möglichst geringen Versiegungsgrad festzusetzen.



Handlungsfeld 4: Landnutzungsänderung und Bewirtschaftungsformanpassung

Aktueller Zustand und Verschärfung durch Klimaextreme:

Die Landnutzung im Einzugsgebiet der Lippe und in NRW ist, insbesondere im Tiefland, durch intensive landwirtschaftliche Nutzung geprägt. Durch Flurneuordnungsverfahren und die Technisierung der Landwirtschaft sind die Flächengrößen immer weiter gewachsen. Strukturen, wie Hecken und Feldgehölze, die den Oberflächenabfluss und Erosionserscheinungen vermindern oder zurückhalten, sind verschwunden. Flächen in Gewässernähe bzw. in der Aue sind in den meisten Fällen nicht überflutungstolerant. Die Auswahl der angebauten Pflanzen ist vornehmlich auf Ertragsmaximierung ausgerichtet und nur teilweise an die sich ändernden Klimabedingungen angepasst.

In Zukunft wird der Niederschlag weniger gleichmäßig über das Jahr verteilt sein. Niederschläge im Winterhalbjahr werden zunehmen, während der Sommer von längeren niederschlagsfreien Phasen und Starkregenereignissen geprägt sein wird. Entsprechend wichtiger wird die Fähigkeit der Landschaft Wasser zurückzuhalten und zu speichern.

Handlungsempfehlungen:

Zur nachhaltigen Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts wird empfohlen, in flächig durch Landwirtschaft geprägten Teileinzugsgebieten eine heterogenere Landnutzung anzustreben (Maßnahmenpaket 4 und 5) und die Bewirtschaftungsform von Ackerflächen konsequent hinsichtlich ihres Wasserrückhaltevermögens zu optimieren (Maßnahmenpaket 6). Insbesondere die Änderung der Landnutzung zu Grünland oder Wald ist besonders wirkungsvoll, wenn der Fokus auf sensible Bereiche wie Flächen an steilen Hängen, Abflussmulden und gewässerbegleitende Auen gelegt wird. Die Umsetzung der wassersensiblen und konservierenden Bodenbewirtschaftung wie die hangparallele Bewirtschaftung, Direktsaat oder die Anlage von Ackerrandstreifen sollte nicht nur in sensiblen Bereichen, sondern möglichst weitreichend umgesetzt werden.

- Insbesondere die kombinierte Umsetzung der aufgeführten Maßnahmen führt zur Stärkung des Landschaftswasserhaushalts. Der Oberflächenabfluss wird reduziert und verlangsamt, die Grundwasserneubildung wird erhöht und in Trockenphasen kann das Austrocknen der Gewässer reduziert werden.
- Die Anpassung der Landnutzung hat grundsätzlich eine mindernde Wirkung auf den maximalen Abfluss in Gewässern bei Hochwasserereignissen. Der Oberflächenabfluss auf Grünland- und Waldflächen wird verlangsamt und die Grundwasserneubildung erhöht. Durch eine heterogenere Verteilung der Flächen kann so eine Entzerrung des Abflussgeschehens und damit eine Abflachung des Hochwasserscheitels erreicht werden.
- Für die Umwandlung von Ackerflächen zu extensivem Grünland eignen sich im Tiefland, im Einklang mit der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt, vor allem ehemalige

Niedermoore (vgl. Landesmoorkulisse NRW) sowie Auenböden. In den landwirtschaftlichen geprägten Regionen im Übergang zum Mittelgebirge wie der Soester Börde kann die Anlage von Grünflächen vor allem in Abflussmulden und an sehr steilen Hängen die Bildung von Erosionsrinnen verhindern, den Oberflächenabfluss zurückhalten und das Abflussvolumen durch Infiltration in den Boden reduzieren.

- Durch den Umbau von Nadel- zu Laubwald wird die Evapotranspiration reduziert, während die Grundwasserneubildung ansteigt. Es ist zu berücksichtigen, dass in Mittelgebirgslagen insbesondere im Winter, bedingt durch den Blattabwurf der Laubbäume, auch der Oberflächenabfluss zunimmt und begleitende Maßnahmen zum Rückhalt von Niederschlagswasser sinnvoll sind.
- Die Anwendung wassersensibler und konservierender Bodenbearbeitung sowie angepasster Anbauweisen (z. B. Direktsaat, Anlage von Ackerrand- und Gehölzstreifen) ist geeignet, um auch auf Ackerflächen Niederschlagswasser effektiver zurückzuhalten.
- Der Anbau von wassereffizienten Feldfrüchten, z. B. der Anbau von Hirse, reduziert die Evapotranspiration landwirtschaftlicher Flächendeutlich. Dem Boden wird weniger Wasser entzogen, wodurch Trockenstress vermieden wird und bei gleichzeitigem Rückbau der Entwässerung oder dem Einsatz von steuerbaren Entwässerungssystemen die Grundwasserneubildung maßgeblich erhöht wird. Mit der Umstellung auf reinen Regenfeldbau – d.h. den Anbau von Feldfrüchten ohne Bewässerungserfordernis – werden sowohl der Wasserbedarf als auch die daran gebundene Entnahmen aus Oberflächenwasser und Grundwasser deutlich reduziert. Eine erwartbare Nachfrage zur Erhöhung der Bewässerung (Menge und Fläche) ist überaus kritisch zu sehen und sollte nicht verfolgt werden.



Handlungsfeld 5: Entwässerungsmanagement

Aktueller Zustand und Verschärfung durch Klimaextreme:

Einhergehend mit der intensiven Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lippe und in NRW werden viele Flächen, insbesondere im Tiefland, tiefgründig entwässert. Die Entwässerung erfolgt dabei über Drainagesysteme und Entwässerungsgräben sowie die meist tief eingeschnittenen Fließgewässer selbst. Die technischen Entwässerungssysteme sind häufig nicht steuerbar und sorgen auch im Sommer dafür, dass Niederschlagswasser möglichst schnell abläuft und den Feldfrüchten, der Vegetation und den Gewässern in Trockenphasen nicht mehr zur Verfügung steht.

In Zukunft wird der Niederschlag weniger gleichmäßig über das Jahr verteilt sein. Niederschläge im Winterhalbjahr werden zunehmen, während der Sommer von längeren niederschlagsfreien Phasen und Starkregenereignissen geprägt sein wird. Entsprechend wichtiger wird die Fähigkeit der Landschaft Wasser zurückzuhalten und zu speichern.

Handlungsempfehlung:

Es wird empfohlen, bestehende Drainagen und Entwässerungsgräben zurückzubauen oder zu manuell oder automatisiert steuerbaren Systemen umzubauen, um Abflussspitzen zu reduzieren und die Grundwasserneubildung zu stärken (Maßnahmenpaket 7).

- Insbesondere in Auen und ehemaligen Moorflächen ist der vollständige Rückbau von bestehenden Entwässerungssystemen besonders effektiv, wenn er in Verbindung mit einer Änderung der Landnutzung umgesetzt wird. Die wiedervernässten Auen- und Moorbereiche dienen als wertvolle Wasserspeicher. Zusätzlich wird der Kohlenstoffausstoß von entwässerten Mooren reduziert und in wiedervernässten Feuchtböden wird im großen Maßstab Kohlenstoff gebunden.
- Für weiterhin intensiv landwirtschaftlich genutzte Flächen bieten sich steuerbare Entwässerungssysteme an, die in Abhängigkeit der Jahreszeit und der angebauten Feldfrüchte auch eingestaut werden können. In Dürrephasen kann das Wasser von singulären Starkregenereignissen zum Teil zurückgehalten werden. Abflussspitzen werden reduziert und das Wasser steht den Pflanzen über einen längeren Zeitraum zur Verfügung.



Handlungsfeld 6:

Governance- und Regulierungsmaßnahmen

Handlungsempfehlung:

Die Etablierung eines Wasserbeirats im Sinne eines regionalen Austauschgremiums für das Lippeeinzugsgebiet unter Federführung eines zentralen „Kümmerers“ kann für das Management des regionalen Landschaftswasserhaushalts hilfreich bzw. nötig sein.

- Einbindung von Kommunen (Wesel, Dorsten, Lünen, Kamen, Hamm, Lippstadt...) und Kreisen (Recklinghausen, Unna, Soest, Paderborn, ...), Wasserversorgern, Naturschutzverbänden (NUA, LMU, NABU, ...), Landwirtschaftskammer NRW, Westfälisch-Lippischer Landwirtschaftsverband, Arbeitskreisen der Wasser- und Bodenverbände Westfalen-Lippe, Forstwirtschaft, Landesfischereiverband Westfalen und Lippe, Industrie u.a. in einen einzugsgebietsweiten Wasserbeirat
- Notwendigkeit eines übergeordneten zentralen Kümmerers wie LANUK oder Lippeverband, welcher die Koordination des Beirats übernimmt
- An bestehende lokale bzw. teileinzugsgebietsweite Strukturen wie z. B. den Wasser- und Bodenverband Rhader Bach/Wienbach kann angeknüpft bzw. diese können integriert werden. Evtl. kann auch ein lokaler Austausch sinnvoll sein, wenn bereits Strukturen bestehen.
- Erarbeitung abgestimmter Strategien auf Landschaftsebene, potenzieller Schwerpunkt: **Strategien für Niedrigwasserphasen**

Zur koordinierten Weiterentwicklung auf Einzugsgebietsebene ist ein intersektorales „Leitbild Schwammlandschaft“ notwendig, welches Aspekte der wasserhaushaltssensiblen Flächennutzungs- und Bauleitplanung integriert und Kommunen und Entscheidungsträgern als Grundlage dienen kann.

- Kombiniert Maßnahmen (z. B. dezentrale Regenwasserbewirtschaftung, Entsiegelung) mit der Ausweisung von Grün- und Retentionsflächen, Etablierung von Vorranggebieten für Wasserschutz, Grundwassererneubildung und Hochwasserrückhalt, etc.
- Frühzeitige und kontinuierliche Kommunikation dieser Leitziele an Öffentlichkeit und Entscheidungsträger fördert deren Umsetzung
- Integration von Erfahrungen u. a. vom Seseke-Programm (Nebenfluss Lippe), Life+ Projekt (Lippeaue Hamm) sowie kommunaler bestehender Teilkonzepte (bspw. Abwasserbeseitigungskonzept Hamm)
- Die Zukunftsinitiative Klima.Werk bietet bereits einen regionalen Zusammenschluss der Städte der Emscher-Lippe-Region sowie Emschergenossenschaft und Lippeverband zur Förderung blaugrüner Infrastruktur, auf dem aufgebaut werden kann, um das Leitbild im Einzugsgebiet zu verankern.

Die Etablierung eines interkommunalen Wassernutzungskonzepts wird dringend empfohlen.

- Erweiterung der Kommunalen Wasserversorgungskonzepte
- Regionales **Wassernutzungskonzept**, das Wasserangebot und -bedarf aller Sektoren (u. a. Trinkwasser, Landwirtschaft, Industrie, Ökosystem) bis 2050 bilanziert
- Das Konzept definiert **Prioritäten für Wasserentnahmen** in Dürrephasen und sichert ökologische Mindestabflüsse.
- Das Konzept definiert Maßnahmen zum Schließen von Datenlücken, u. a. zu Wasserentnahmen.
- **Regelmäßige Aktualisierung** und Monitoring des Konzepts sind wichtig, um auf geänderte Klimadaten und Nutzungsentwicklungen reagieren zu können.

Bei der Planung und Implementierung von Maßnahmen werden frühzeitige Beteiligungsformate und eine angemessene Information der Stakeholder dringend empfohlen.

- Sichert höhere Akzeptanz der Maßnahmen
- Lokale Kenntnisse können in die Planung einfließen und das Vertrauen zwischen Behörden, Nutzer:innen und Bevölkerung wird gestärkt.
- Ausbau von **Citizen-Science-Projekten** (z. B. Ausweitung der CrowdWater-App)
- Nutzung vorhandener Plattformen und Netzwerke (z. B. „Beteiligung NRW“ und „Zukunftsinitiative Klima.Werk“)

Fazit

Die Ergebnisse der Forschung im Projekt KliMaWerk.Wasser:Landschaft verdeutlichen, dass der Klimawandel den Landschaftswasserhaushalt in Nordrhein-Westfalen bereits heute spürbar verändert und sich diese Trends in den kommenden Jahrzehnten deutlich verstärken werden. Langanhaltende Trockenperioden, häufiger auftretende Starkregenereignisse und steigende Temperaturen führen zu einer Verschiebung der saisonalen Wasserverfügbarkeit und damit zu einer erhöhten Belastung sowohl für die Ökosysteme als auch für die Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Siedlungsräume. Hinzu kommt eine schon eingetretene, sich weiter verstärkende Wassertemperaturerhöhung mit weitreichenden Folgen für die Gewässerökologie.

Die Modellierungen zeigen, dass eine nachhaltige, naturbasierte Maßnahmenumsetzung die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf hydrologische Prozesse und ökologische Funktionen deutlich abmildern kann.

Besonders wirkungsvoll sind Maßnahmen, die den Wasserrückhalt in der Landschaft erhöhen – etwa durch Landnutzungsänderungen, Wiedervernässung von Auen, Entsiegelung, steuerbares Entwässerungsmanagement und eine konsequente Entwicklung von Ufergehölzen. Diese tragen nicht nur zur Stabilisierung des Wasserhaushalts bei, sondern verbessern auch die ökologische Resilienz der Fließgewässer und die biologische Vielfalt. Um solche Maßnahmen umsetzen zu können, muss die Verfügbarkeit geeigneter Flächen langfristig gesichert werden.

Die Anpassung muss auf Einzugsgebietsebene gedacht und sektorenübergreifend umgesetzt werden. Nur durch ein abgestimmtes Vorgehen von Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Kommunen, Naturschutz, Industrie und Bevölkerung kann der Übergang zu einer klimaresilienten Wasserlandschaft gelingen.

Die verschiedenen Stakeholder stehen vor der Aufgabe, ihre bisherigen Praktiken und Formen der Bewirtschaftung anzupassen. Entscheidend ist dabei, die notwendige Anpassung nicht als Belastung wahrzunehmen, sondern vielmehr als Chance, denn ein Wandel ist unumgänglich, um Wasserknappheit/-mangel sowie Schäden durch Starkregen entgegenzuwirken. Eine frühzeitige und proaktive Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bringt Vorteile sowohl für einzelne Akteure als auch für die gesamte Gesellschaft.

Notwendig ist ein Paradigmenwechsel.

Dieser ist vergleichbar mit früheren gesellschaftlichen Entwicklungen. Änderungen bestehender Praktiken sind zunächst ungewohnt, stellen sich langfristig jedoch als selbstverständlich und vorteilhaft dar.

Weitere Informationen

Weitere Berichte (Schlussbericht, Methoden), Präsentationen sowie die Produkte aus dem KliMaWerk (Maßnahmensteckbriefe, Werkzeugkasten als Entscheidungshilfe) sowie Hinweise zu den verwendeten Modellen finden sich auf der Projektwebsite:

<https://www.eglv.de/klimawerk-wasserlandschaft/>

Literatur

Blickensdörfer, L., Oehmichen, K., Pflugmacher, D., Kleinschmit, B., and Hostert, P.: National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data, *Remote Sens. Environ.*, 304, 114069, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>, 2024.

European Environment Agency: CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly - version 2020_20u1, May 2020, European Environment Agency, <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfdf0>, 2020.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Kail, J., Palt, M., Hering, D.: Woody buffer effects on water temperature: The role of spatial configuration and daily temperature fluctuations. *Hydrological Processes*, 35(1), e14008, 2021.

LANUV: Klimaentwicklung und Klimaprojektionen in Nordrhein-Westfalen: Datengrundlage und Wissenschaftlicher Hintergrund der Klimaanpassungsstrategie, 76 pp., 2024.

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., and Gratzki, A.: A Central European precipitation climatology. Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorol. Z.*, 22, 235–256, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>, 2013.

Razafimaharo, C., Krähenmann, S., Höpp, S., Rauthe, M., and Deutschländer, T.: New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS), *Theor. Appl. Climatol.*, 142, 1531–1553, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w>, 2020.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I.: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *J. Clim.*, 23, 1696–1718, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>, 2010.