

Wasserforum 2025, 26. November 2025, Gießen

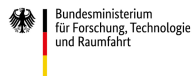
Stärkung der Wasserresilienz in Hessen durch Umsetzung der Forschungsergebnisse aus dem Verbundprojekt »WaRM« – Wassersystemmodell Rhein/Main

Dr. Thomas Hillenbrand

Dr. Jan Greiwe

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Gefördert durch:



FONA
Nachhaltiges Wassermanagement



Hessisches Ministerium für
Landwirtschaft und Umwelt,
Weinbau, Forsten, Jagd und
Heimat



Systemmodell

Systemmodelle beschreiben komplexe Sachverhalte und Zusammenhänge. Vereinfachungen sind i.d.R. notwendig. Sie dienen dazu,

- ... Funktionalitäten und Wechselwirkungen innerhalb des Systems aufzuzeigen und**
- ... Aussagen über Auswirkungen von (kleinen) Veränderungen im System treffen zu können.**

→ Wasserversorgung von bzw. Wassermanagement in Ballungsräumen

Klima(veränderungen) - Landnutzung

Qualität - Menge

Oberflächengewässer und Grundwasser

urbanes Zentrum – landwirtschaftlich geprägtes Umland

Wasserbedarf öffentlich – Industrie/ Gewerbe

Öffentliche Wasserversorgung & Industrie

Bewässerungsbedarf

Grundwasser

BMBF-Verbundprojekt „WaRM“



WaRM: Nachhaltige, flexible Grundwasserbewirtschaftung in Ballungszentren auf Basis eines Wassersystemmodells am Beispiel der Modellregion Frankfurt/Rhein-Main – Modellierung, Maßnahmenableitung, Governance

Partner:



assoziierte Partner:



Laufzeit: 01.03.2023 – 28.02.2026; Förderung: BMBF; Webseite: <https://w-rm.de>

BMBF-Verbundprojekt „WaRM“

Metropolregion Rhein/Main:

- Untersuchungsgebiet mit hohen wasserwirtschaftlichen Herausforderungen:
 - Wassermenge: steigender Bedarf (Wachstumsregion, Landwirtschaft), Nutzung der Grundwasservorkommen angrenzender Regionen (u.a. Hessisches Ried)
 - Wasserqualität: Belastungen u.a. mit Nitrat, Pflanzenschutzmitteln, Spurenstoffen
 - in der Vergangenheit bereits intensive Wassernutzungskonkurrenzen und verschiedene Ansätze zur Lösung der Wassernutzungskonflikte; jetzt zusätzlich: Auswirkungen des Klimawandels

Ziele von WaRM sind...

das Entschärfen von Wasser-Nutzungskonflikten in der Metropolregion Rhein/Main,
... durch Maßnahmenbündel,
... die in einem Wassersystemmodell modelliert und bewertet werden,
... das Grundwasserquantität und -qualität mit einem Policy Modell zu Maßnahmen und Governance verknüpft.

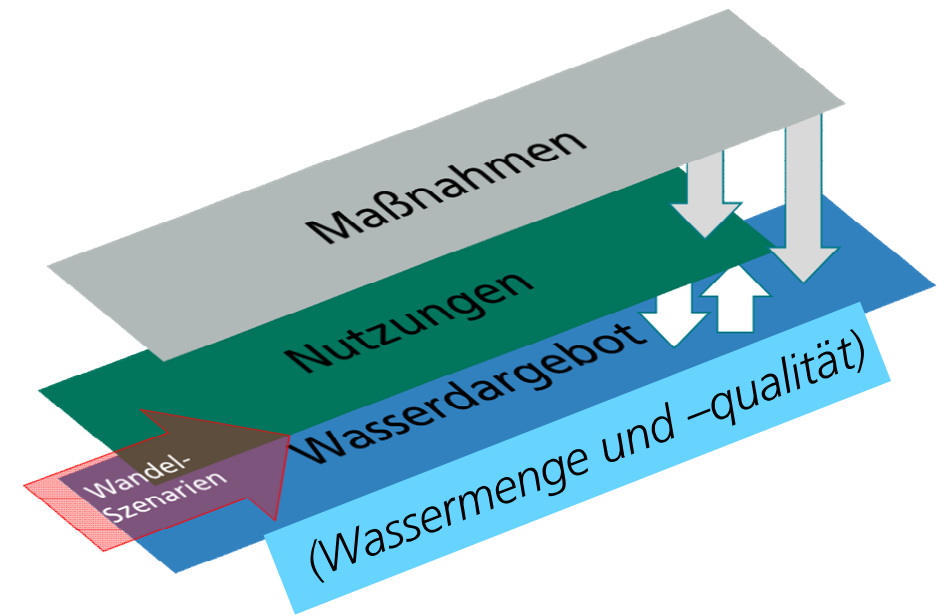


© Pixabay/Frank Bender

Zielsetzung

Wassersystemmodell ('WaRM')

Gesamtansatz zur Verbindung von Wassermodellen und -bilanzierungen (Quantität und Qualität) mit einem Policy-Modellierungsansatz mit 3 „Lagen“


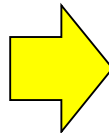




1. *Wasserdargebot: hydrologische und hydrochemische Modellbetrachtungen und Bilanzierungen (Fokus: Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried)*
2. *Nutzungen: Ableitung des Wasserbedarfs mit Einflussparametern (Fokus: Metropolregion)*
3. *Maßnahmenbewertung und Priorisierung: Effektivität, Effizienz, Zusatzeffekte, Governance-Strukturen, Hemmnisse*

- **integrierter Maßnahmenplan:** nachhaltige Lösungskonzepte unter Berücksichtigung und Bewertung aller Handlungsoptionen (wasserwirtschaftlich-technische und politisch-administrative)
- wichtige Ansätze zur **Stärkung der Wasserresilienz** u.a. hinsichtlich Wasserqualität, Wassermenge, Wasserrückhaltung, Wassereffizienz, Sensibilisierung, Governance

Szenarienbetrachtungen

Ziel: Abdeckung einer plausiblen Bandbreite + Stresstest („D“)

Szenarienüberarbeitung	A: Ausreichendes Wasserdargebot erlaubt Entwicklung	B: Unsicherheit des Wasserdargebots bremst Entwicklung	C: Sinkendes Wasserdargebot führt zu Anpassung	D: Stresstest
Klimaprojektion	EC-EARTH_r12_rcp85_RACMO	MPS-ESM_r1_rcp85_WRF	HadGEM2_r1_rcp85_WETTREG	HadGEM2_r1_rcp85_WETTREG
Grundwasserhaushalt	Deutlich höhere	Etwa gleichbleibende	Deutlich niedrigere	Deutlich niedrigere
Beschreibung / Wirtschaft	Die Region boomt aufgrund attraktiver Bedingungen für Wirtschaft und Bevölkerung.	Die Region bleibt wirtschaftlich stabil im Sinne einer Fortsetzung aktueller Trends, allerdings steigen die Bevölkerungszahlen nicht so stark wie in Szenario A.	Die Region verliert an Attraktivität; Industrie und Landwirtschaft haben zunehmend Probleme, sodass sich die Raten für Versiegelung und Bevölkerungszuwachs im Vergleich zum aktuellen Trend abschwächen.	Die Region ist zunehmend von Wasserknappheit betroffen, gleichzeitig kommt es durch Zuwanderung aus noch stärker betroffenen Regionen zu einem deutlichen Bevölkerungswachstum.
Siedlungs- und Verkehrsflächen	+8,6 % (Szenario "Dynamik", BBSR)	+6,3 % (Szenario "Trend", BBSR)	+3,2 % (Szenario "Stabilität", BBSR)	+8,6 % (Szenario "Dynamik", BBSR)
Bevölkerungsentwicklung	+5,7 % (obere Variante WRM, 2023)	+4,9 % (mittlere Variante WRM, 2023)	+4 % (untere Variante WRM, 2023)	+5,7 % (obere Variante WRM, 2023)
Pro-Kopf-Verbrauch [l/d]*	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>
Ergebnis	160 → 174	160	160 → 154	160 → 174
Öffentliche Wasserversorgung				
Sozioökonomische Faktoren	Bedarfe ergeben sich aus den Annahmen zu Bevölkerungswachstum und Pro-Kopf-Verbrauch			
Witterungsabhängigkeit	Witterungsabhängiger Zuschlag (≈ 5 % in Trockenjahren)			
Eigenförderung Industrie	Gleichbleibend 50 Mio. m³/a (Abschätzung). Ergänzend zu den Szenarien wird beispielhaft der Fall einer Industrieansiedlung mit einem Bedarf in der Größenordnung von 1 Mio. m³/a betrachtet.			
Landwirtschaft (inkl. Beregnungsbedarf)	Der sich im Rahmen der Szenarien ändernde Wasserbedarf für Beregnung wird aus dem Wasserhaushaltsmodell ermittelt. Prognosen zur landwirtschaftlichen Entwicklung sind nicht Teil der Szenarien. Einzelne Aspekte (Erhöhung der Weregungseffizienz, Umstellung auf trockenheitsangepasste Sorten/Kulturen) werden im Rahmen der Maßnahmen berücksichtigt.			

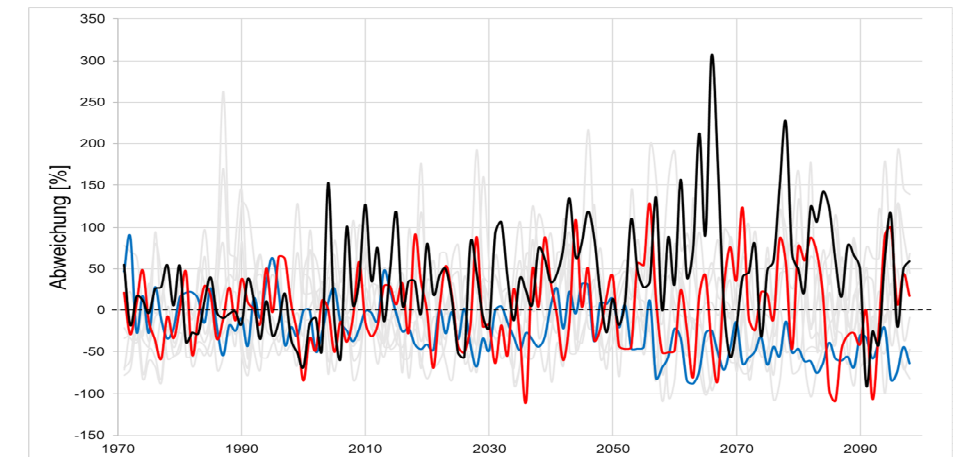
Arbeiten zur Grundwasserquantität

(Federführung: BGS, NW-FVA)

- Modellierung Wasserhaushalt („MIKE SHE“ bzw. „LWF-Brook90“ im Bereich von Forstflächen) und Modellierung Grundwasserstand („SPRING“)
 - Auswahl eines Klimaensembles zur Ermittlung der Bandbreite zukünftiger klimatischer Entwicklungen
 - Berücksichtigung des variierenden Wasserbedarfs für landwirtschaftliche Kulturen: Anstieg der Verdunstung in der (verlängerten) Vegetationsperiode
 - Schnittstellen zu Maßnahmenoptionen
- Ergebnisse:
 - sehr große Spanne der Zu- und Abnahme der berechneten Grundwasserneubildung
 - Änderung der Grundwasserneubildung bis zur Mitte des Jahrhunderts von -7 % bis +30 % bzw. bis zum Ende des Jahrhunderts von -51 % bis +26 %
 - vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts: mehrjährige Trockenperioden mit massiv reduzierter Grundwasserneubildung zu erwarten

Zu- und Abnahme der berechneten Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet

	Berechnete Grundwasserneubildung [mm/a]				
	1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIFF II-I [%]	DIFF III-I [%]
CanESM2_r1_rcp85_CCLM	125	127	91	+2	-27
EC-EARTH_r1_rcp85_RACMO	110	129	156	+17	+42
EC-EARTH_r12_rcp85_RACMO	107	136	132	+27	+23
EC-EARTH_r12_rcp85_EPISODES	109	122	122	+12	+12
MIROC5_r1_rcp85_CCLM	116	111	149	-4	+28
MIROC5_r1_rcp26_CCLM	116	116	103	+0	-11
HadGEM2_r1_rcp85_RCA4	114	160	181	+40	+59
HadGEM2_r1_rcp85_WETTREG	148	125	71	-6	-52
MPI-ESM_r1_rcp85_WRF	97	95	109	-2	+12
MPI-ESM_r1_rcp26_RCA4	104	125	107	+20	+3

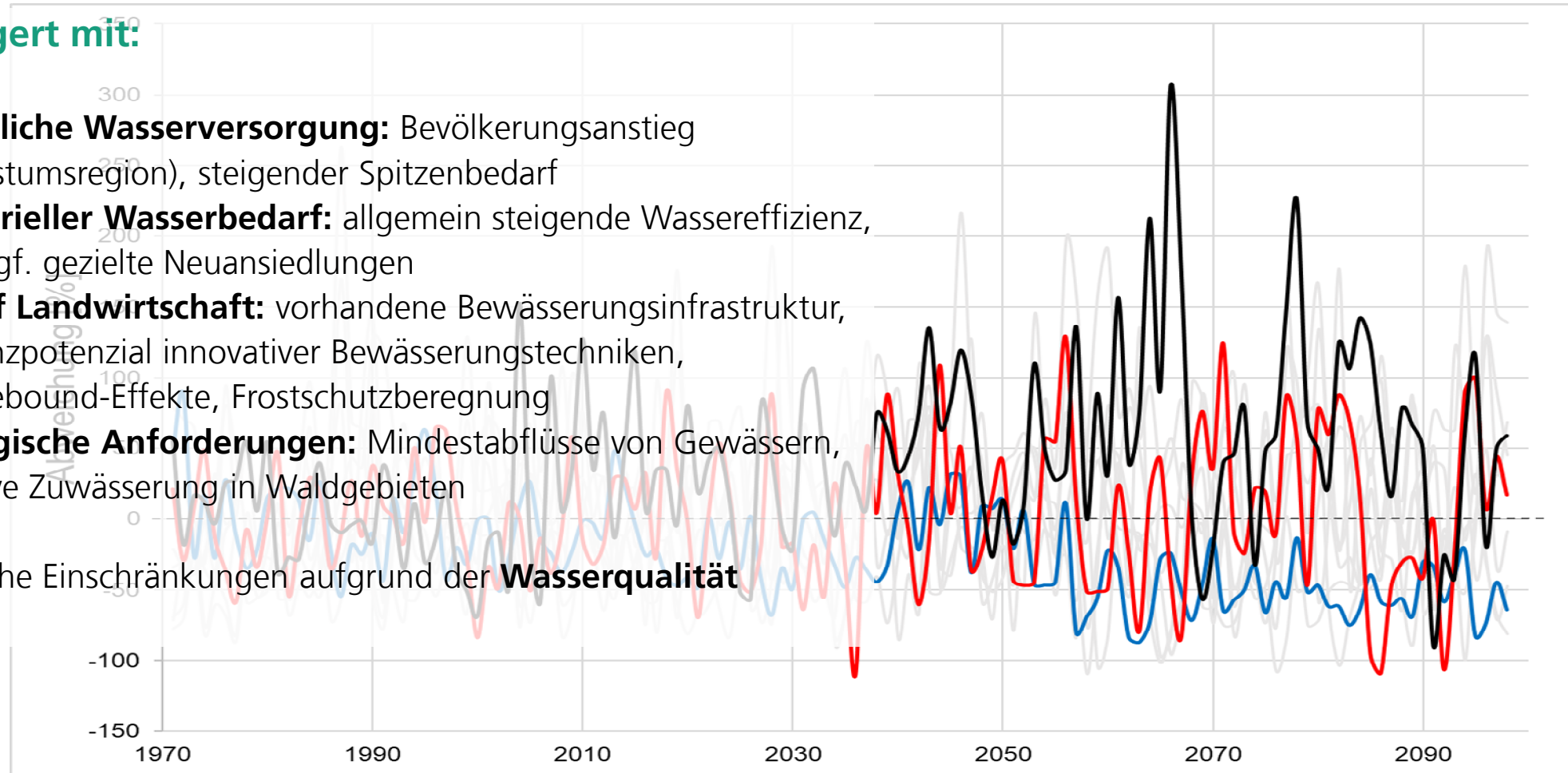


Abweichung jährliche Grundwasserneubildung zum 30-jährigen Mittel der Referenzperiode (1971-2000)

Arbeiten zur Grundwasserquantität

überlagert mit:

- **öffentliche Wasserversorgung:** Bevölkerungsanstieg (Wachstumsregion), steigender Spitzenbedarf
- **industrieller Wasserbedarf:** allgemein steigende Wassereffizienz, aber ggf. gezielte Neuansiedlungen
- **Bedarf Landwirtschaft:** vorhandene Bewässerungsinfrastruktur, Effizienzpotenzial innovativer Bewässerungstechniken, ggf. Rebound-Effekte, Frostschtzberegnung
- **ökologische Anforderungen:** Mindestabflüsse von Gewässern, situative Zuwässerung in Waldgebieten
- mögliche Einschränkungen aufgrund der **Wasserqualität**



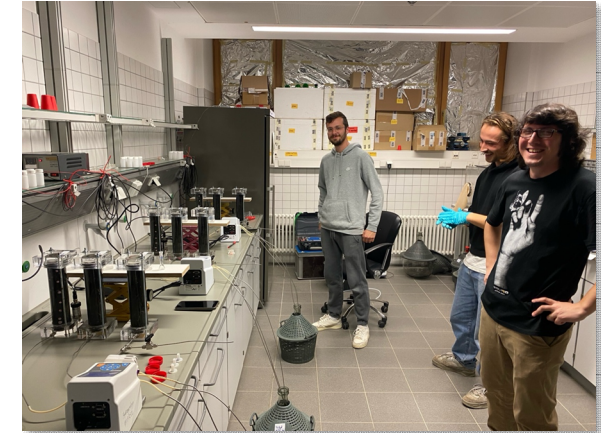
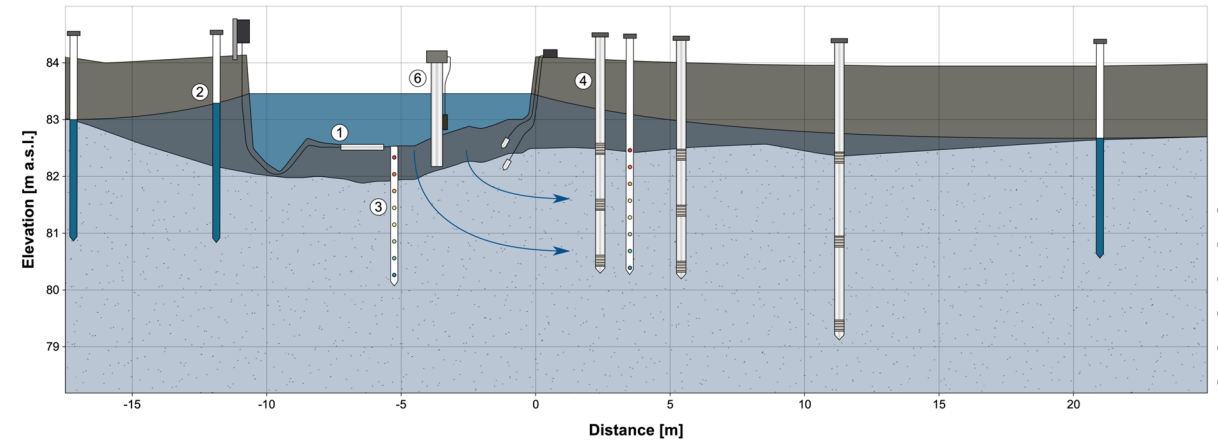
Abweichung jährliche Grundwasserneubildung zum
30-jährigen Mittel der Referenzperiode (1971-2000)
(Quelle: BGS, 2025)

Arbeiten zur Grundwasserqualität

Infiltration von organischen Spurenstoffen

- in vielen Abschnitten infiltriert Oberflächenwasser mit hohen Anteilen von gereinigtem Abwasser in das Grundwasser
- In situ Untersuchungen + Laboruntersuchungen zur Ausbreitung von Spurenstoffen im Grundwasser
- Analyse von 24 organischen Spurenstoffen (überwiegend Pharmaka) mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften

→ wichtige Ergebnisse: Gefährdung des Grundwassers nicht nur durch als mobil bekannte Spurenstoffe, sondern bei dauerhafter Exposition auch durch Spurenstoffe mit geringer Mobilität

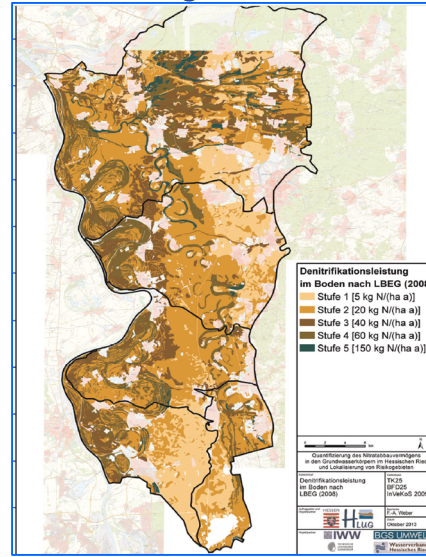


Arbeiten zur Grundwasserqualität

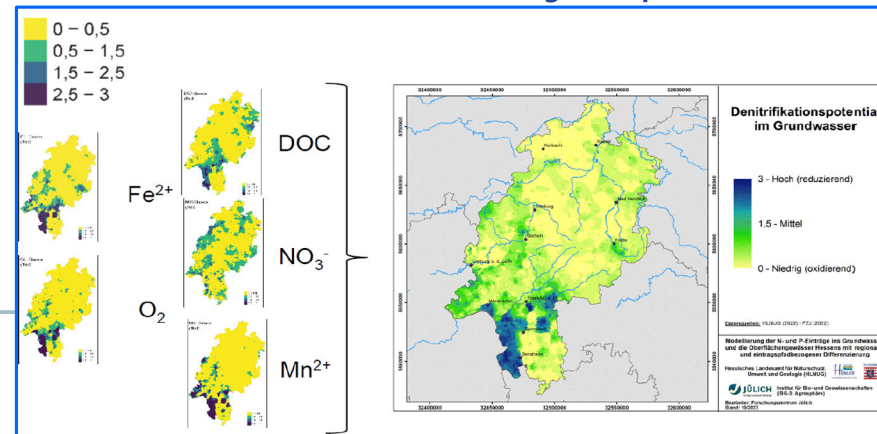
Landwirtschaft: Stickstoffproblematik

- N-Überschuss und Bodeneigenschaften sind maßgeblich für die Denitrifikation → selektive Bestimmung von Nitrat-Abbauraten (Labor- und Felduntersuchungen)
- Abschätzung des Nitratabbauvermögens im Aquifer und in Böden → Identifizierung von Gebieten, in denen kein oder ein unvollständiger Nitratabbau stattfindet
- Ziel: Prognoseinstrument für die (semi-quantitative) Abschätzung von Effekten, spezifische Beratungsstrategien in Maßnahmengebieten, stärkere Berücksichtigung des Klimawandels

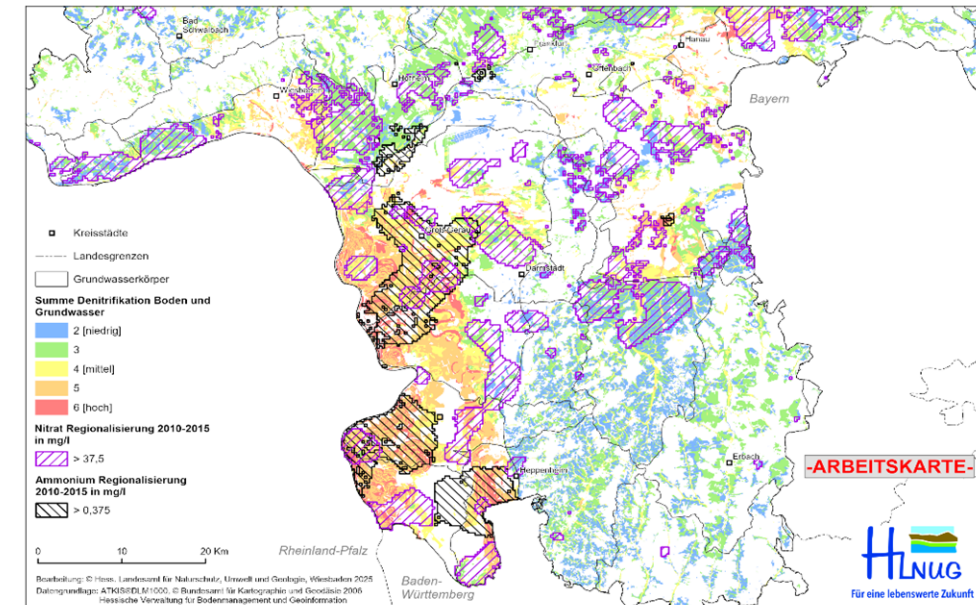
Denitrifikationsleistung in Böden,
auf Grundlage der BFD25



Denitrifikationsleistung im Aquifer



Überlagerung der Denitrifikationspotentiale der Böden und des
Grundwassers mit gemessenen, regionalisierten NO_3^- - und NH_4^- -
Konz. in den Grundwässern

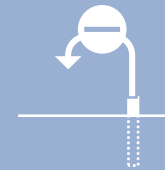
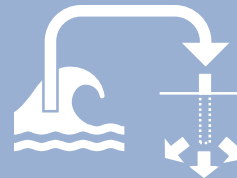
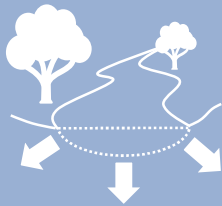


Maßnahmenoptionen

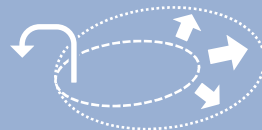
ca. 40 Maßnahmen (aus > 200) in 10 Handlungsfeldern



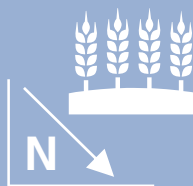
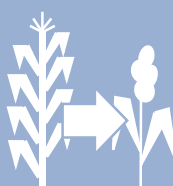
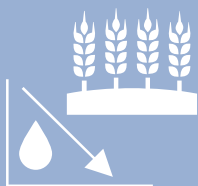
H1_1 Ausbau von BGI (Blauer und grüner Infrastruktur) im urbanen Raum	H2_1 (A) Förderung der GWN durch Retention von Oberflächenwasser	H2_1 (B) Grundwasserschutz durch Sohlabdichtung	H2_4 Gewässerschutz durch Gewässerrandstreifen	H3_1 Künstliche Grundwasseranreicherung	H3_2 Ausbau interkommunaler und regionaler Verbundsysteme	H3_3 Begrenzung genehmigungsfreier Grundwasserentnahmen
---	--	---	--	---	---	---



H3_5 Substitution von Trink- und Grundwasser (a) im urbanen Bereich und (b) in der LW	H4_2 Vierte Reinigungsstufe	H5_2 Ausweitung des Monitorings von Spurenstoffen	H6_1 Festsetzung ggf. Anpassung von WSG für die Trinkwasserversorgung	H6_3 Risikomanagement für Trinkwasser-einzugsgebiete	H7_1 Waldumbau	H7_3 Oberflächenbewässerung im Wald
---	-----------------------------	---	---	--	----------------	-------------------------------------



H8_1 Umstellung auf Ökolandbau	H8_2 Bewässerungseffizienz	H8_3 Klimaangepasste Anbaukulturen / Sorten	H8_5 Begrenzung des Einsatzes von Stoffen in der konventionellen Landwirtschaft a) Stickstoff b) PSM	H9_3 Spurenstoffdialog fortführen und inhaltlich weiterentwickeln	H10_1 Sensibilisierung der Verbraucher:innen und Praktiker:innen
--------------------------------	----------------------------	---	--	---	--



Wirkung von Maßnahmen

Forst (NW-FVA)

Waldumbau



Durch Waldumbau können die Wälder im Rhein-Main-Gebiet resilienter für zukünftige klimabedingte Stressfaktoren gemacht werden – wesentliche Änderungen des Grundwasserhaushalts sind dadurch nicht zu erwarten.

Oberflächenbewässerung



Waldbewässerung kann zu einer Stabilisierung gefährdeter Waldlebensraumtypen (insb. 9160 Eichen-Hainbuchenwälder) im Rhein-Main-Gebiet beitragen – hierfür sind jedoch erhebliche zusätzliche Wassermengen notwendig.

Wirkung von Maßnahmen

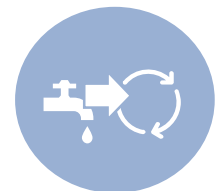
Siedlungsraum

Blau-grüne Infrastruktur



Bei konsequenter Umsetzung kann die Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet (HR + Frankfurt) um etwa 30 Mio. m³ erhöht werden.

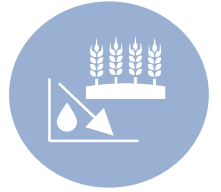
Regen- und Grauwassernutzung



Durch die Nutzung von Regen- und Grauwasser kann der jährliche Trinkwasserverbrauch im Untersuchungsgebiet (HR + Frankfurt) um etwa 2 Mio. m³ reduziert werden.

Wirkung von Maßnahmen

Landwirtschaft



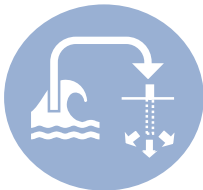
Einsatz effizienter Bewässerungstechnik













Durch den Einsatz effizienterer Bewässerungstechnik (Tropfbewässerung, Düsenwagen) kann der Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung rechnerisch um bis zu 25 % im Vergleich zur derzeit eingesetzten Technik reduziert werden.

Wie sich der absolute landwirtschaftliche Wasserbedarf entwickelt, ist in hohem Maße abhängig vom zukünftigen Klima, den Anbaukulturen und –praktiken (u.a. Frostschutz-Beregnung) sowie möglicherweise auftretenden Rebound-Effekten.

Wirkung von Maßnahmen

Erweiterung der Rheinwasseraufbereitung



Ausbaugrad	Technische Kapazität (m³/h)	Wasserwirtschaftliche Kapazität (Mio. m³/Jahr) (305 Volllastbetriebstage)	Deckung Zusatzbedarf („oberes“ Szenario) vollständig erfüllbar teilweise erfüllbar nicht erfüllbar
(Bestand BWW Biebesheim	5.400	39,5	 )
Bestand BWW Biebesheim + Kapazitätserweiterung BWW Biebesheim	10.800	79,1	   (Mitte / Nord)
Bestand BWW Biebesheim + Kapazitätserweiterung BWW Biebesheim + weiterer Standort für Entnahme aus der fließenden Welle	16.200	118,6	   (Mitte / Nord)
Bestand BWW Biebesheim + Kapazitätserweiterung BWW Biebesheim + weiterer Standort für Entnahme aus der fließenden Welle + Standort für Uferfiltrat südlich der Weschnitz (nur Landwirtschaft)	19.600	143,5	   (Mitte / Nord)  (Süd)



öff. Wasser-
versorgung



Natura 2000-
Gebiete



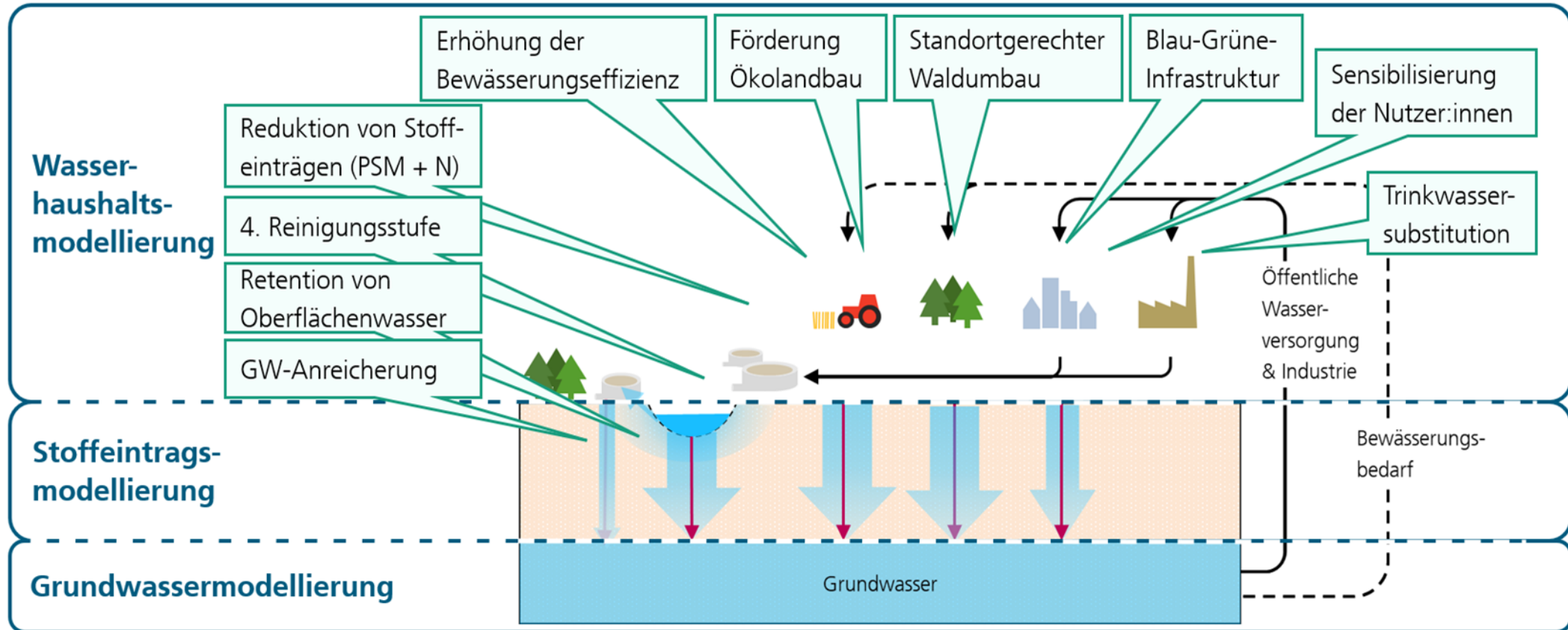
Landwirtschaft

WHR-Machbarkeitsstudie zur Erweiterung der Rheinwasseraufbereitung, 2024:

(https://www.whr-infiltration.de/wp-content/uploads/2024/09/WHR_Machbarkeitsstudie_Erweiterung_Rheinwasseraufbereitung_Januar_2024.pdf)

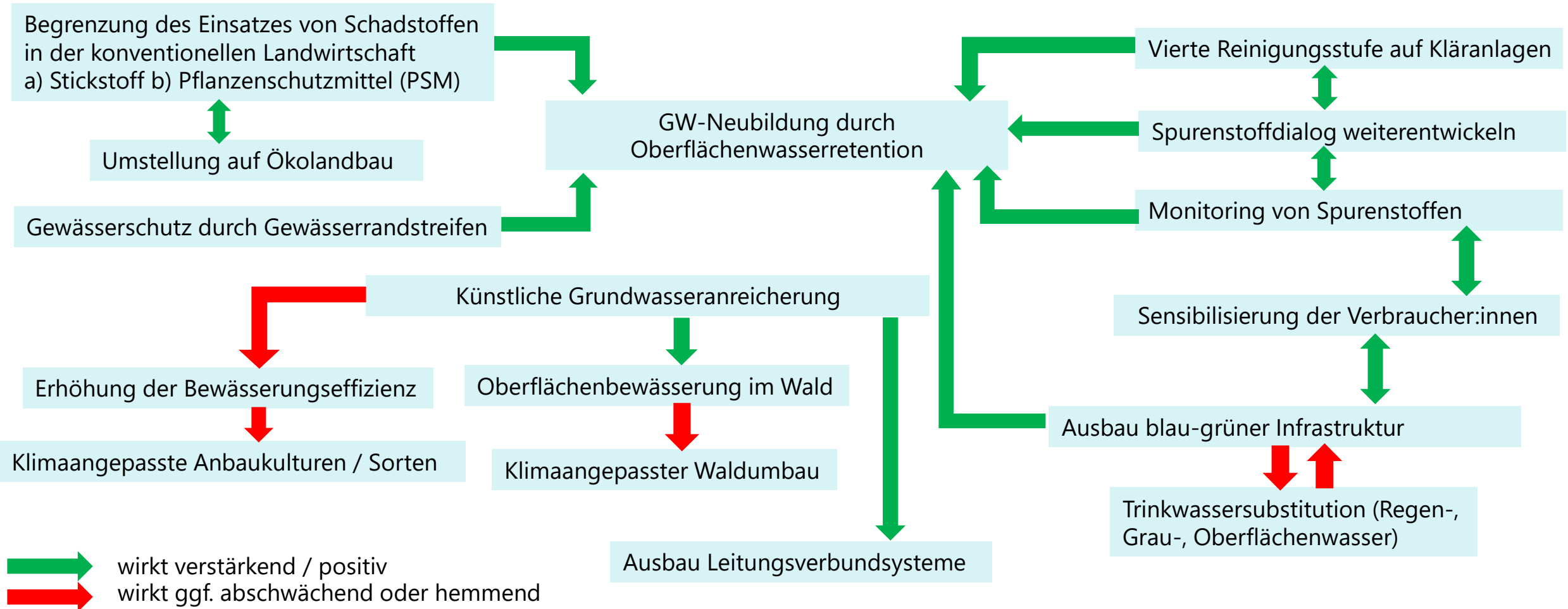
Wassersystemmodell

Modellbausteine und Maßnahmen



Wassersystemmodell

Berücksichtigung von Wechselwirkungen - Beispiele



Implementierung des WaRM-Systemmodells

gewählter Ansatz: Nutzung vorhandener Plattform

Grundwasser-Online
Ein Informationsdienst der AG Wasserwerke Hessisches Ried

Wassersystemmodell

Login →

START

AKTUELLES

MESSWERTE

PROJEKT

Aktuelle Grundwasserstände

▼ Aktuelles

23.06.2025
Grundwasserstände trotz trocken-warmer Witterung
Das hydrologische Winterhalbjahr (Nov. 2024 bis April 2025) blieb mit ... mehr...

13.01.2025
Nasse Witterung mit erhöhten Grundwasserständen setzt sich fort
Das abgeschlossene hydrologische Jahr (Nov. 2023 bis Okt. 2024) bracht... mehr...

17.06.2024
Nasse Monate beenden mehrjährige Trockenperiode - Grundwasserspeicher im Ried gut gefüllt
Das hydrologische Winterhalbjahr (Nov. 2023 bis April 2024) erbrachte ...

Wassersystemmodell Rhein-Main

WaRM

Zeithorizont	Referenz				Vergleich					
	Aktuell	Nahe Zukunft		Ferne Zukunft		Aktuell	Nahe Zukunft		Ferne Zukunft	
Szenario		A	B	C	D		A	B	C	D
Maßnahmen		ja		nein			ja		nein	

(Änderung) Grundwasserstand

Farbskala in Bezug zum GW-Bewirtschaftungsplan

Ist-Zustand + Differenz zum Ist-Zustand

- modellbasierte Verbindung wichtiger Themenfelder der Grundwasserbewirtschaftung (Grundwasserneubildung, Grundwasserstand, Wasserbedarf in verschiedenen Sektoren, Grundwasserqualität) ist möglich und umsetzbar
 - **Ansatz eines Systemmodells ist sinnvoll, praktikabel** und notwendig, um künftige Entwicklungen und unterschiedliche Wechselwirkungen darstellen zu können
 - „Unsicherheit wird Normalität“ (WBGU, 2024): **Szenarienbetrachtungen** im Wasserbereich notwendig
- Ergebnisse zeigen beispielhaft den erhöhten Handlungsdruck durch Klimawandel, Bevölkerungswachstum, Flächennutzung und Beeinträchtigungen der Wasserqualitäten → für Modellregion: **Grundwasserneubildung stark schwankend, Bewässerungsbedarf steigend, Stickstoff- und Spurenstoffthematik weiterhin hoch relevant**
- zur Verbesserung der Wasserresilienz stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung – wichtig ist ein gezielter Mix aus mehreren Maßnahmen
- Ziel des WaRM-Projekts: **gut handhabbares Tool** für ein umfassendes, regionales Grundwassermanagement
 - Grundlage für **strategische Betrachtungen**, Schnittstelle zur **Öffentlichkeit**, Unterstützung der **Kommunikation** der Stakeholder (auch im Konfliktfall)
- Ansatz ist übertragbar auf vergleichbare Gebiete bspw. in Hessen

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Kontakt

Dr. Thomas Hillenbrand
Leiter Geschäftsfeld Wasserwirtschaft
thomas.hillenbrand@isi.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI

WaRM-Abschlussveranstaltung
(mit integriertem Workshop zur künftigen
Nutzung der WaRM-Ergebnisse)
20.01.2026 (Regionalverband Frankfurt)