



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:

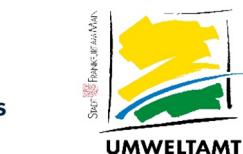


Hessisches Landesamt für
Naturschutz, Umwelt und Geologie

Für eine lebenswerte Zukunft



NW-FVA
Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt



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



Grundwasser nachhaltig bewirtschaften

Systemmodell

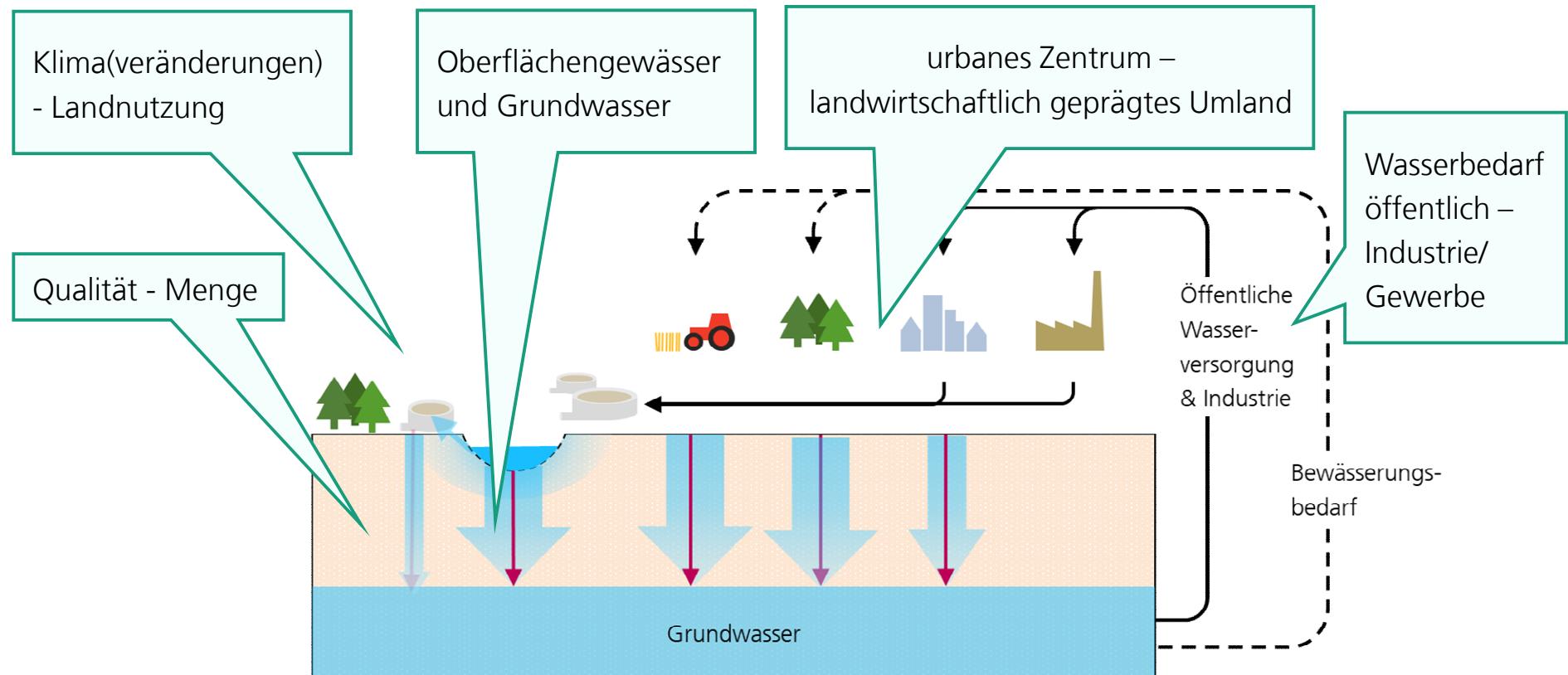
Systemmodelle beschreiben komplexe Sachverhalte und Zusammenhänge. Vereinfachungen sind i.d.R. notwendig. Sie dienen dazu,

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

Wassersystemmodell

→ Wasserversorgung von bzw. Wassermanagement in Ballungsräumen

Komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren:



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:



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



© Pixabay/Frank Bender

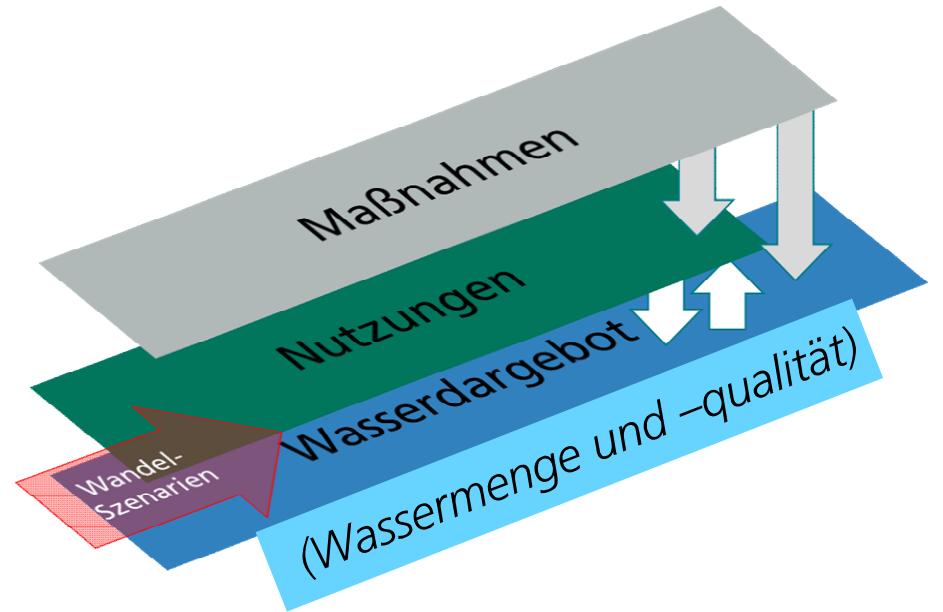
Ziele von WaRM sind...

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.

Zielsetzung

Wassersystemmodell ('WaRM')

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

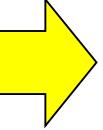


1. Wasserdargebot: hydrologische und hydrochemische Modellbetrachtungen und Bilanzierungen (Fokus: Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried)
2. Nutzungen: Ableitung des Wasserbedarfs mit Einflussparametern (Fokus: Metropolregion)
3. Maßnahmenbewertung und Priorisierung: Effektivität, Effizienz, 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 Wasserdangebot erlaubt Entwicklung	B: Unsicherheit des Wasserdangebots bremst Entwicklung	C: Sinkendes Wasserdangebot 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 Bevölkerungswachstum 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]*	 Ergebnis 160 → 174	 160	 160 → 154	 160 → 174
Öffentliche Wasserversorgung				
Soziökonomische 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 Industrieanmeldung 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 Wegerungseffizienz, Umstellung auf trockenheitsangepasste Sorten/Kulturen) werden im Rahmen der Maßnahmen berücksichtigt.			

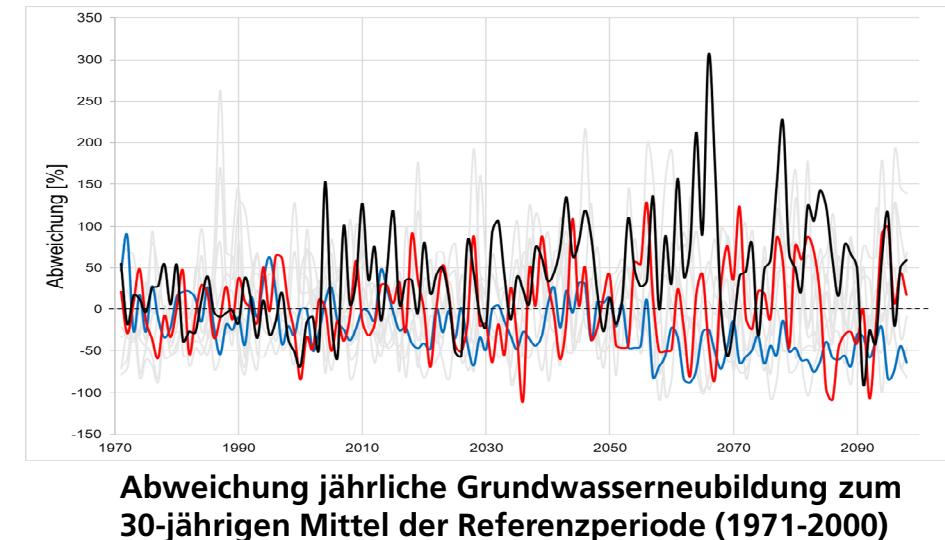
Arbeiten zur Grundwasserquantität

(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

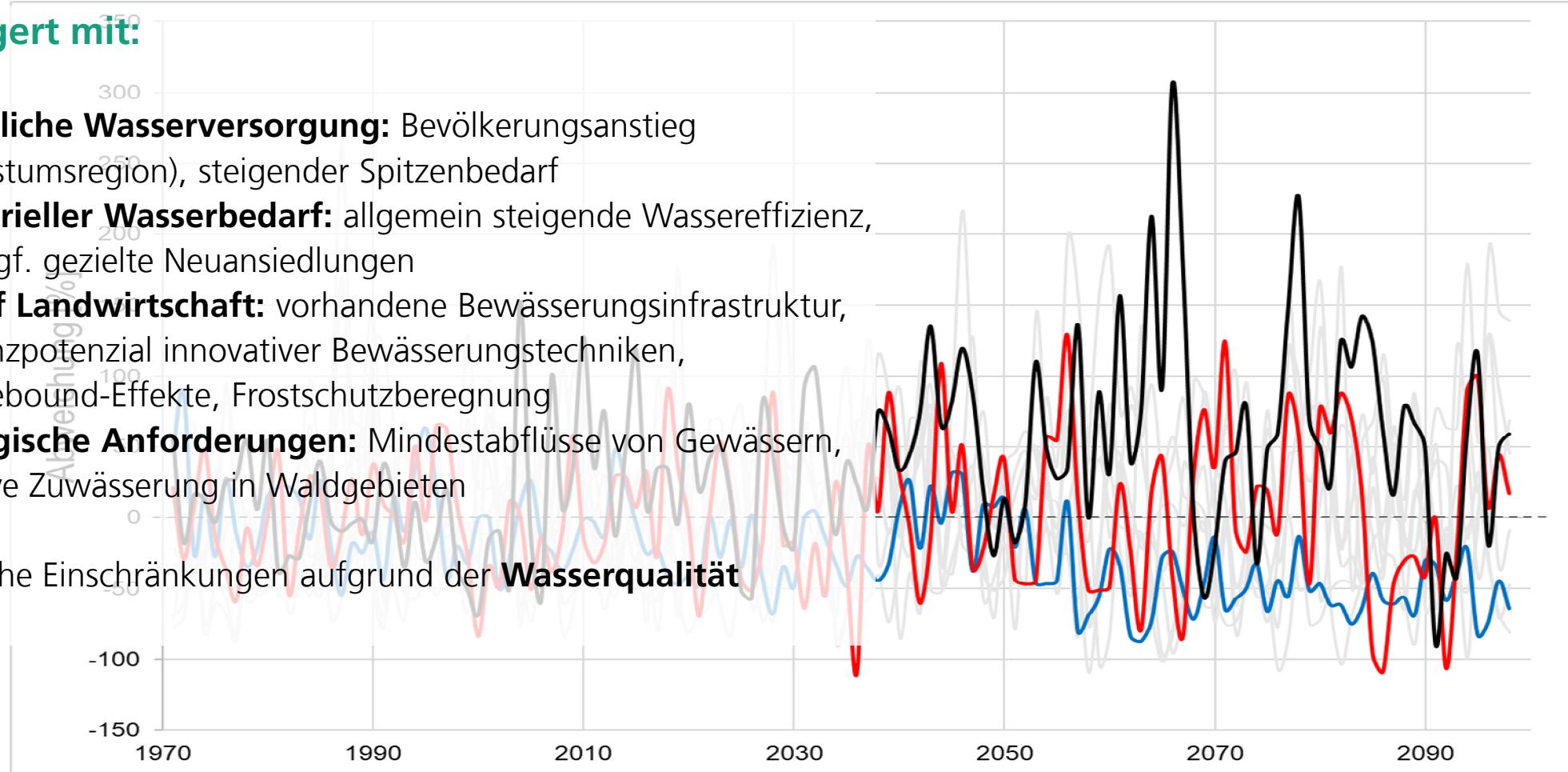
Berechnete Grundwasserneubildung [mm/a]				
1971-2000	2021-2050	2070-2099	DIFF II-I [%]	DIFF III-I [%]
125	127	91	+2	-27
110	129	156	+17	+42
107	136	132	+27	+23
109	122	122	+12	+12
MIROC5_r1_rcp85_CCLM	111	149	-4	+28
MIROC5_r1_rcp26_CCLM	116	103	-0	-11
HadGEM2_r1_rcp85_RCA4	114	160	+40	+59
HadGEM2_r1_rcp85_WETTREG	148	125	-16	-52
MPI-ESM_r1_rcp85_WRF	97	95	-2	+12
MPI-ESM_r1_rcp26_RCA4	104	125	+20	+3



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, Frostschutzberegnung
- **ökologische Anforderungen:** Mindestabflüsse von Gewässern, situative Zuwässerung in Waldgebieten
- mögliche Einschränkungen aufgrund der **Wasserqualität**

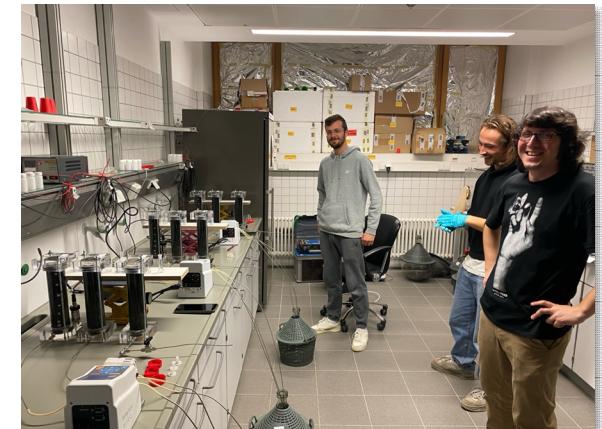
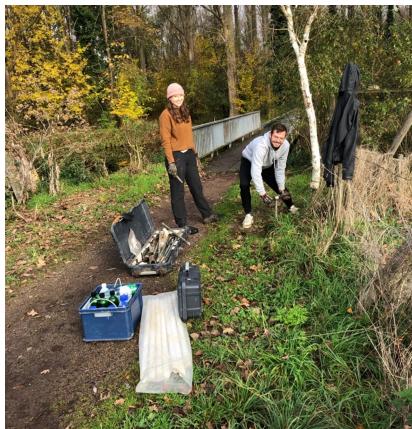
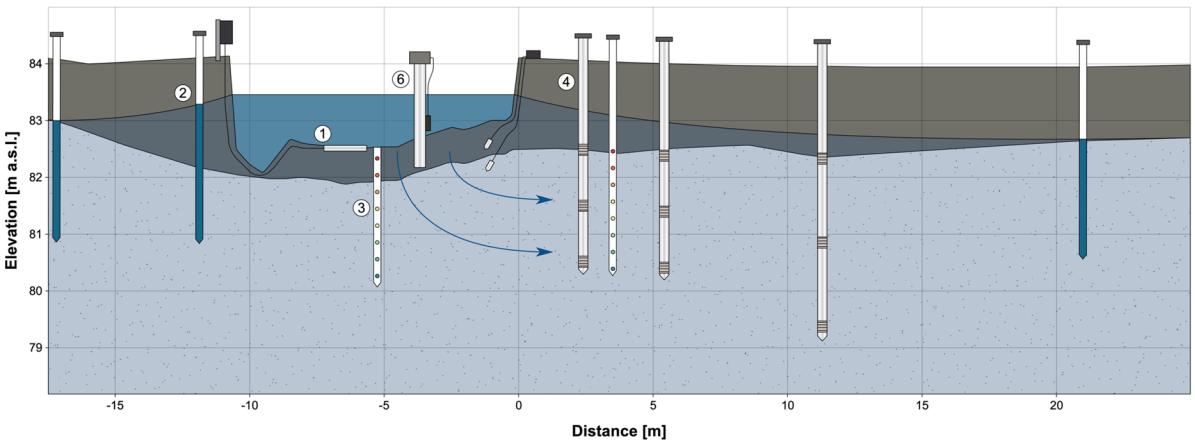


Abweichung jährliche Grundwasserneubildung zum
30-jährigen Mittel der Referenzperiode (1971-2000)
(Quelle: BGS, 2025)

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

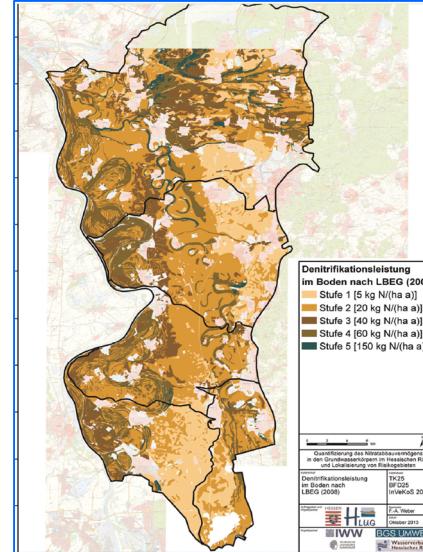


Arbeiten zur Grundwasserqualität

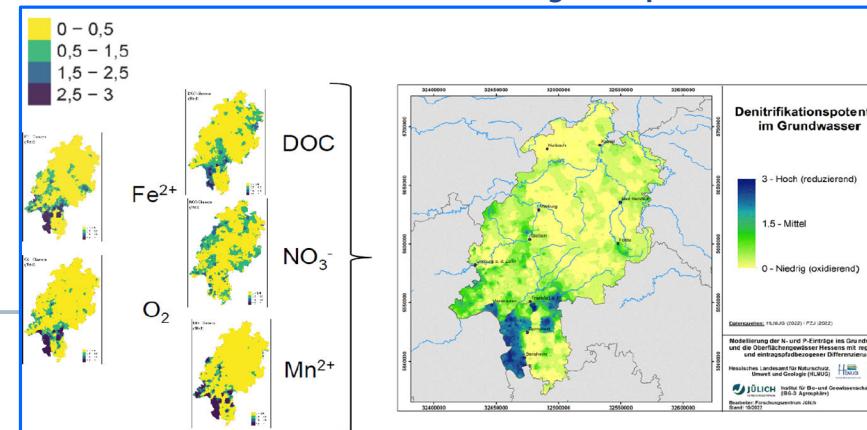
Landwirtschaft: Stickstoffproblematik

- 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

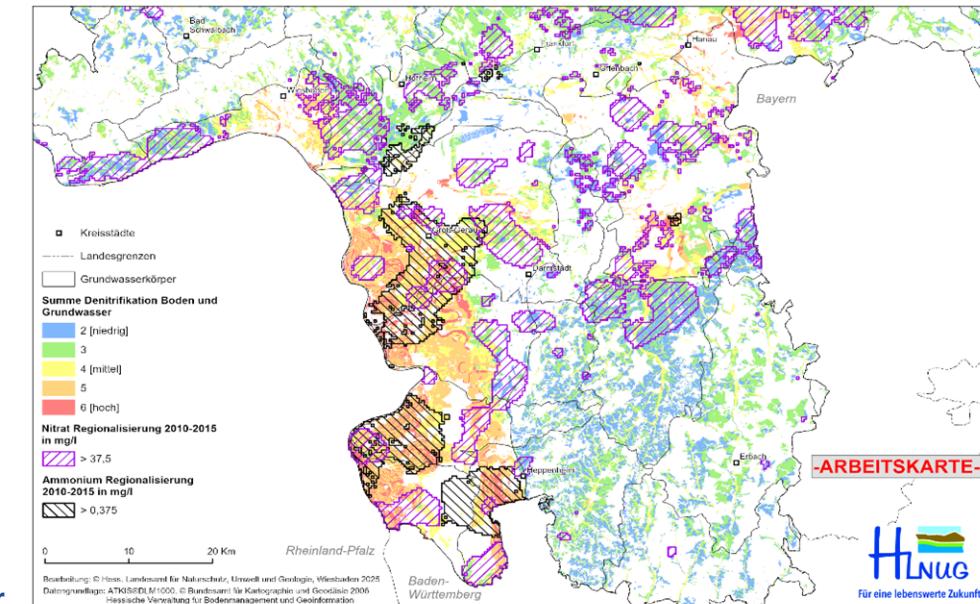
Denitrifikationsleistung in Böden,
auf Grundlage der BFD25



Denitrifikationsleistung im Aquifer



Überlagerung der Denitrifikationspotentiale der Böden und des Grundwassers mit gemessenen, regionalisierten NO₃⁻ und NH₄⁺ Konz. in den Grundwässern



Maßnahmenoptionen

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



Regenwasser

- H1_1: BGI; Dachbegrünung; Regenwasserversickerung Nutzung; -speicherung
- H1_2: Regenwasserbehandlung



Gewässer & Feuchtflächen

- H2_1: Retention; OFW
- H2_2: Renaturierung; Gewässer Feuchtflächen
- H2_3: Bodenspeicherkapazität
- H2_4: Gewässerrandstreifen



Trinkwasser

- H3_1: künstliche GW-Anreicherung
- H3_2: interkommunale/ regionale Verbundsysteme
- H3_3: Begrenzung genehmigungs-freier Grundwasserentnahmen
- H3_4: Tarife; Entgelte; Kosteninternalisierung
- H3_5: TW-einsparung; -substitution



Monitoring



Grundwasserschutz

H4_1: Tarife; Entgelte:



Forstwirtschaft

Priorisierung + Zusammenfassung + Konkretisierung von Maßnahmenoptionen

zeitentnahmemonitoring
H5_2: Monitoring Spurenstoffe



Industrie

H6_1: Festsetzung; Anpassung WSG
H6_2: Regionalpläne, Bauleitplanung & Infrastrukturplanung
H6_3: Risikomanagement TW-Einzugsgebiete



Bildung & Bewusstsein

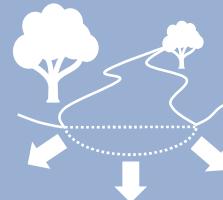
H7_1: Waldumbau
H7_2: Klimarisikokarten; Beratung; Waldbesitzer
H7_3: Oberflächenbewässerung; Waldflächen; Tropfbewässerung

H8_1: Ökolandbau
H8_2: Bewässerungseffizienz
H8_3: Pflanzensorten
H8_4: Weiterbildung/Beratung Landwirtschaft
H8_5: Begrenzung max. Nitrat-Düngung

H9_1: Kooperation industriell-gewerbliche Wasserversorgung
H9_2: Auszeichnung umweltfreundlicher Unternehmen/Kommunen
H9_3: Spurenstoffdialog fortführen
H9_4: Identifizierung Produkthersteller/-anwender; Erfassung Einleiter
H9_5: Innovationspotenziale; Wassernutzung

H10_1: Sensibilisierung und Motivation; Verbraucher
H10_2: Bildungsangebote „Spurenstoffe“
H10_3: Wasserthemen; Fort- und Schulbildung

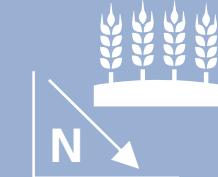
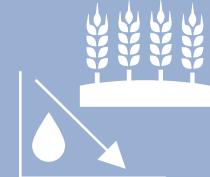
H1_1 Ausbau von BGI (Blauer und grüner Infrastruktur) im urbanen Raum	H2_1 (A) Förderung der GWN durch Retention von Oberflächenwasser	H2_1 (B) Grundwasserschutz durch Sohlabdichtung	H2_4 Gewässerschutz durch Gewässerrandstreifen	H3_1 Künstliche Grundwasser- anreicherung	H3_2 Ausbau interkommunaler und 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 Trinkwasser- versorgung	H6_3 Risikomanagement für Trinkwasser- einzugsgebiete	H7_1 Waldumbau	H7_3 Oberflächen- bewässerung 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 resilenter 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



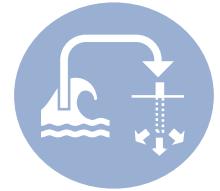
Einsatz effizienter Bewässerungstechnik

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 Vollastbetriebstage)	Deckung Zusatzbedarf (''oberes'' Szenario)
(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

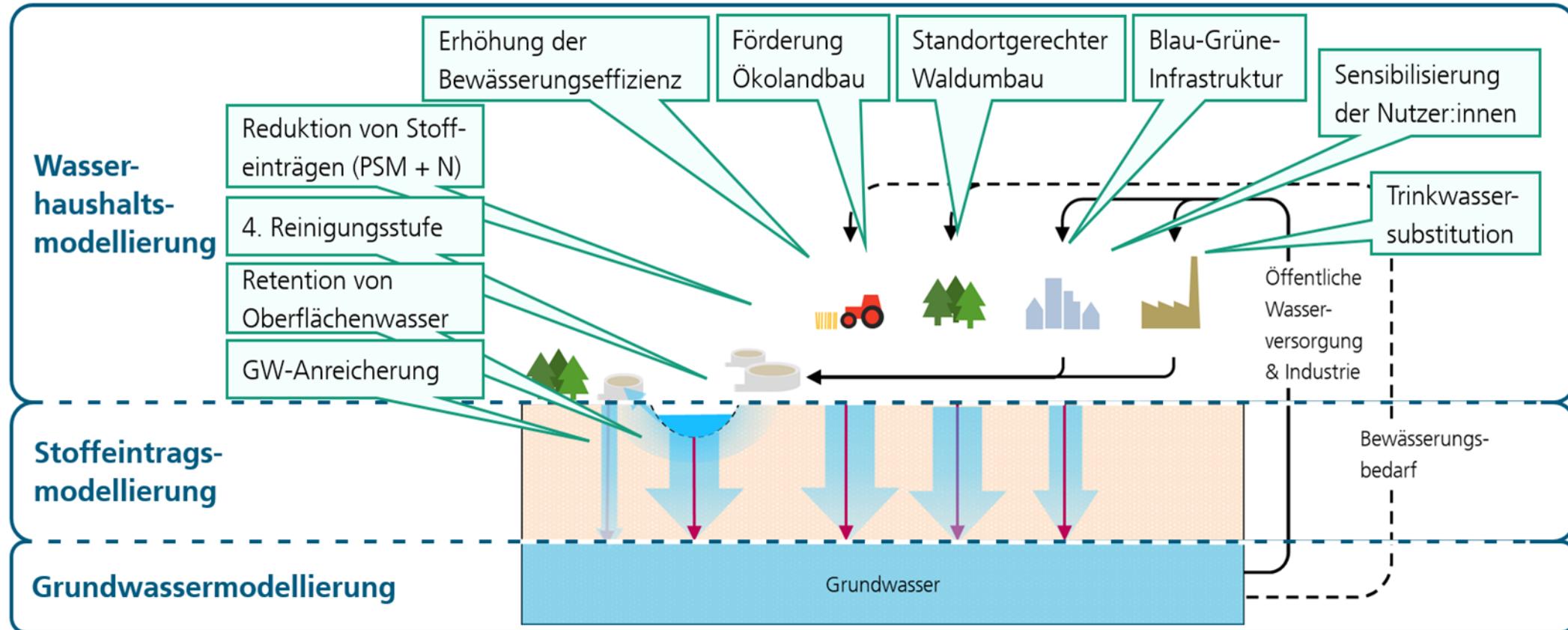


Landwirtschaft

WHR-Machbarkeitsstudie zur Erweiterung der Rheinwasseraufbereitung, 2024:
(https://www.whr-infiltration.de/wp-content/uploads/2024/09/WHR_Machbarkeitsstudie_Erweiterung_Rheinwasseraufbereitung_Januar_2024.pdf)

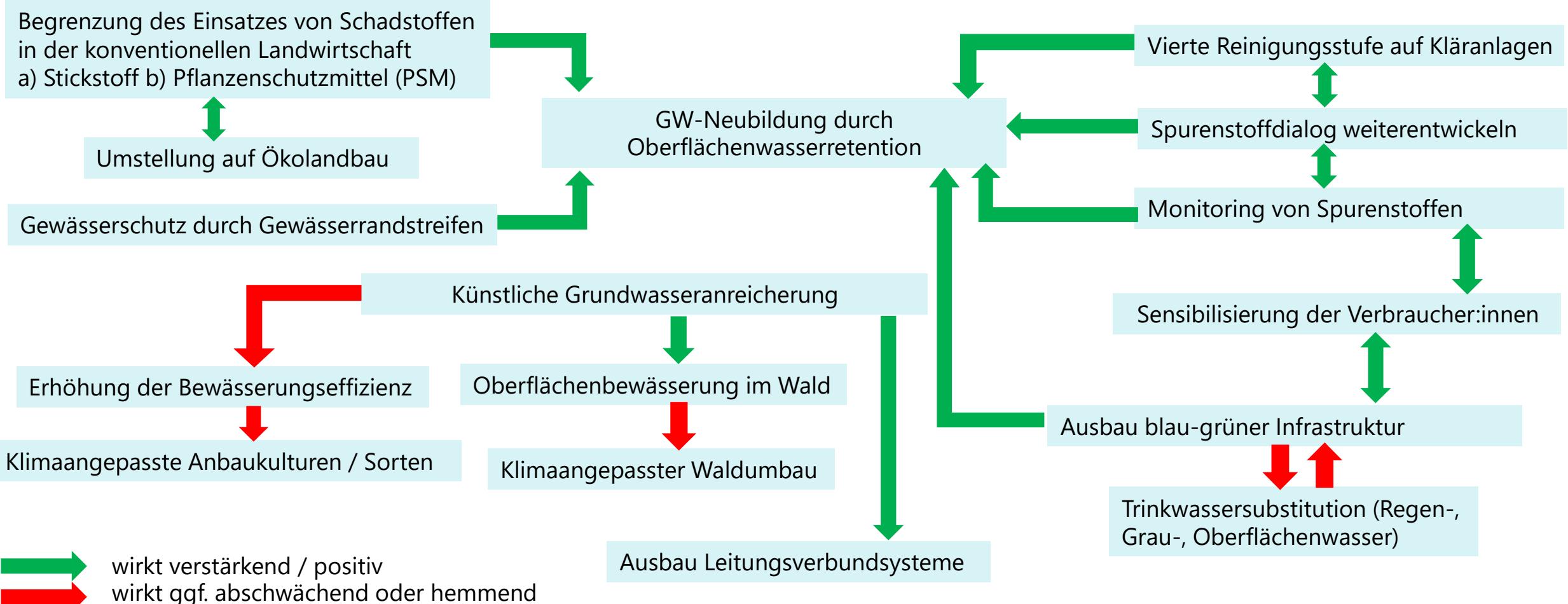
Wassersystemmodell

Modellbausteine und Maßnahmen



Wassersystemmodell

Berücksichtigung von Wechselwirkungen - Beispiele



Implementierung des WaRM-Systemmodells

gewählter Ansatz: Nutzung vorhandener Plattform

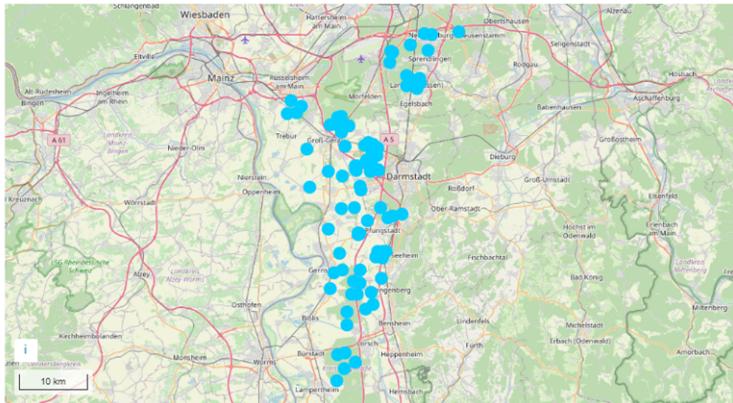
Wassersystemmodell

Grundwasser-Online
Ein Informationsdienst der AG Wasserwerke Hessisches Ried

GWO

START AKUELLES MESSWERTE PROJEKT

Aktuelle Grundwasserstände



Aktuelles



23.06.2025

Grundwasserstände trotzen 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) brachte...
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		
	Aktuell	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Szenario	A	B	C D
Maßnahmen		ja	nein

Vergleich	Vergleich		
	Aktuell	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
Aktuell	A	B	C D
Aktuell	ja		nein

(Änderung) Grundwasserstand

Farbskala in Bezug
zum GW-Bewirtschaftungsplan

Ist-Zustand + Differenz
zum Ist-Zustand



Zusammenfassung

- 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)