

# Bewertung von Maßnahmen eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushaltes durch hydrologische Modellierung

Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

Lucas Alcamo, M. Sc. | Nicole Scherer, M. Sc. | Moritz Wirthensohn, M. Sc. | Niklas Keßel, M. Sc.

**Technische Universität München**

**Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement**

*8. November 2024*

*Universität Bayreuth, Wasserkontroversen IV: Wasserrückhalt in der Landschaft*

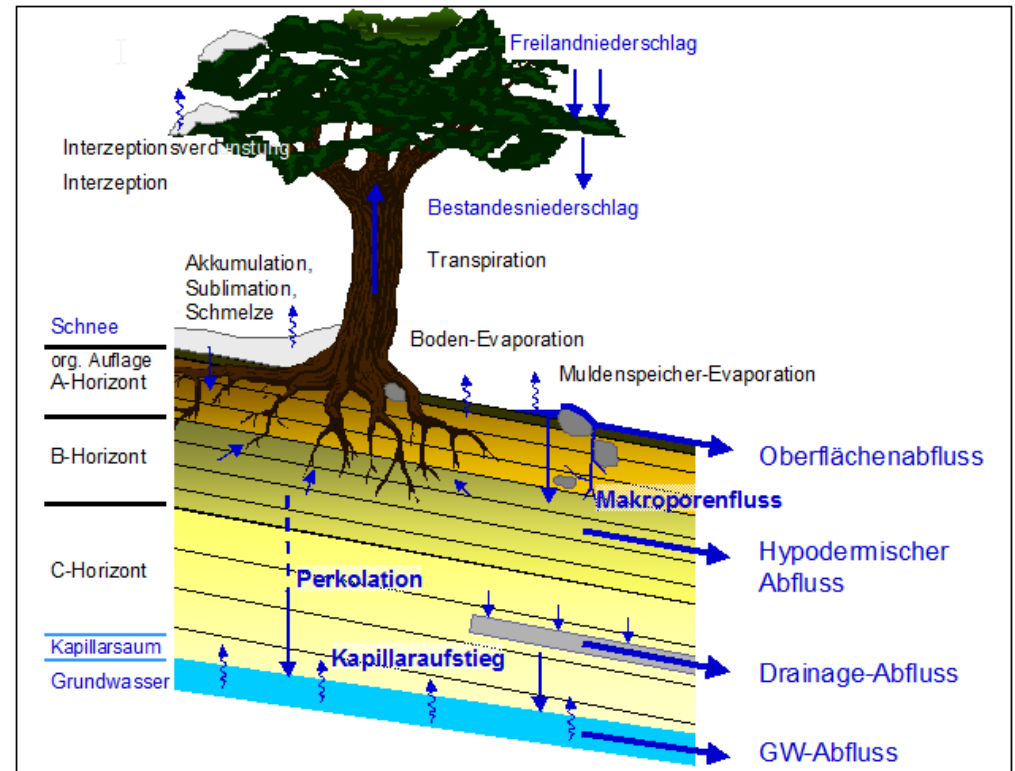
# Gliederung

- Einführung
- Projekt STUDIO
- Projekt AQUASOL
- Projekt Grüne Gräben+
- Projekt RETOUCH
- Fazit



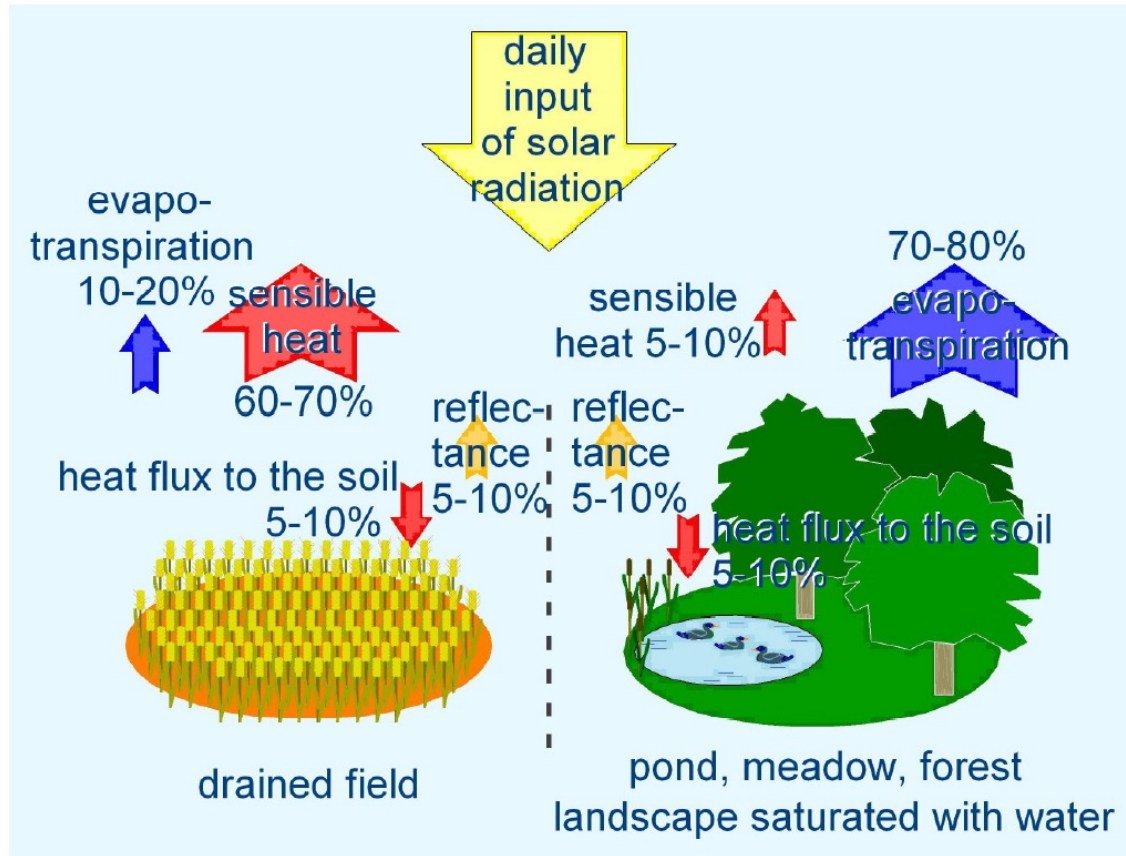
# Problemlage

- Klimawandel: längere Dürreperioden, stärkere Starkregen
- Landnutzung ↔ Landschaftswasserhaushalt
- Wasserableitung (noch) die Regel
- Homogenisierung der Landschaft: Resilienz ↓
- Folgen: Grundwasserstände ↓, landwirtschaftliche Erträge ↓, forstliche Vitalität ↓



Quelle: Klöcking, B. (Ed.) 2009. Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO, 53 S., [online verfügbar: <http://www.arcegmo.de/PSCN.pdf>].

# Veränderung des Landschaftswasserhaushaltes



(Aus: Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm,  
M. Kravcík, J. Pokorný, J. Kohutiar, M. Kovác, E. Tóth (2007))

# Naturnahe Maßnahmen - Slovak Water Tour



Video: Nicole Tatjana Scherer.



# Naturnahe Maßnahmen - Slovak Water Tour



Video: Nicole Tatjana Scherer.



# Naturnahe Maßnahmen - Slovak Water Tour



Bild: Nicole Tatjana Scherer.



# Naturnahe Maßnahmen

Welche Maßnahmen sind möglich?



Anpassung im  
Wegebau



Aufstauung von Rückegassen



Reisigmatten



Kleinräumige  
Versickerungsmulden



Ausrichten von Totholz  
entlang Hängen



# Naturnahe Maßnahmen

Wie kann die Effizienz dieser Maßnahmen ausgewertet werden?

→ Durch Feldmessungen ein besseres Verständnis der Infiltrationsprozesse bekommen.

→ Basierend auf den Feldmessungen mittels hydrodynamischer Modellierung die Maßnahmen für verschiedene Szenarien auswerten



Kleinräumige Versickerungsmulden

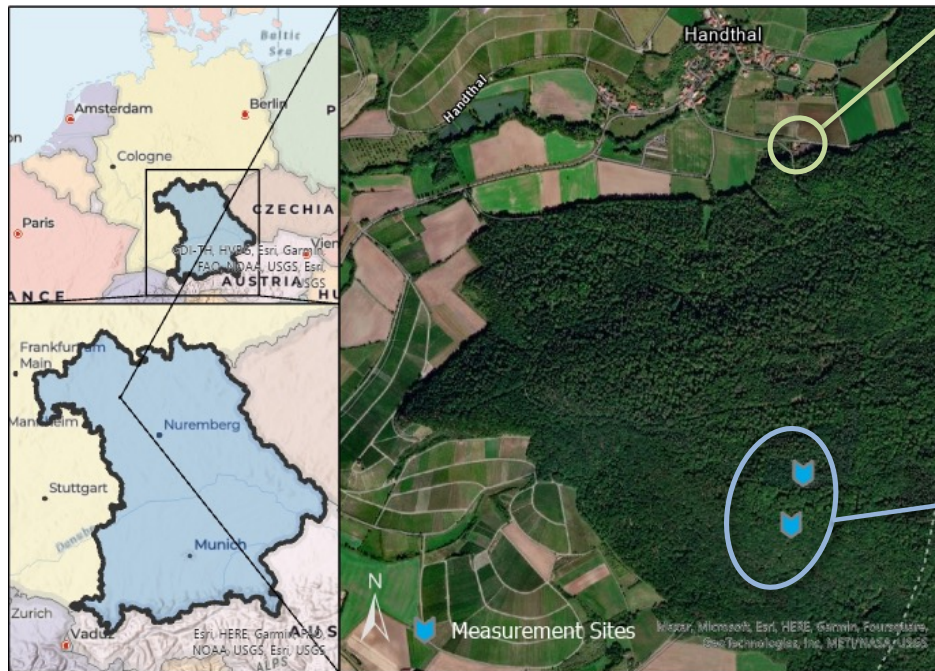


Ausrichten von Totholz entlang Hängen

# Untersuchungsgebiet



“Steigerwald Zentrum”



Untersuchungsgebiet  
und Messstellen

# Feldmessungen

Ziel:

- Infiltrationsprozesse im Untersuchungsgebiet besser verstehen
- Grundlage für die Modellierung schaffen

Vermessung

Meteorologische Messungen

Bodenfeuchte Messungen

# Feldmessungen

Vermessung

Meteorologische Messungen

Bodenfeuchte Messungen

Drohngestützte  
LiDAR-Vermessung

Wetterstationen

Niederschlags-  
messungen

Händische "HandiTRASE"  
Messungen

Kontinuierlich-messende  
Bodenprofile



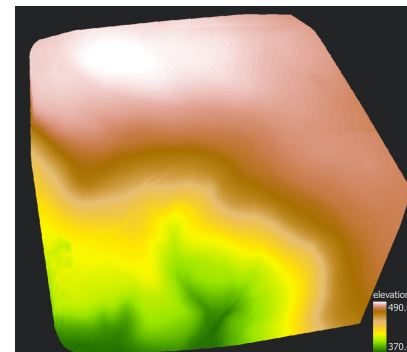
# Feldmessungen

## – Ausgewählte Ergebnisse

Ziel: Erhalt eines hochpräzisen DGM der Erdoberfläche im Wald, um kleinräumige Geländemodifikation zu untersuchen. (Flug durch eine externe Firma durchgeführt)

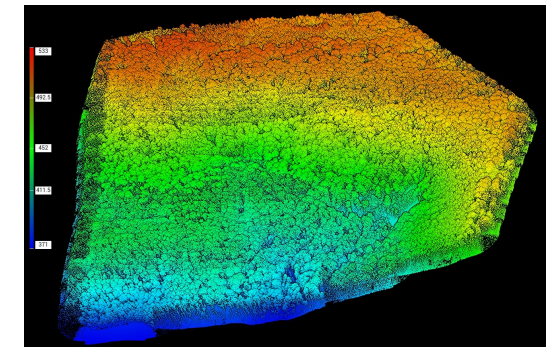
### Ergebnis:

- 3D Scan des Untersuchungsgebiet.
- 10 cm DGM.



Vermessung

Drohngestützte LiDAR-Vermessung



# Feldmessungen

## – Ausgewählte Ergebnisse

Ziel: Erhalt eines hochpräzisen DGM der Erdoberfläche im Wald, um kleinräumige Geländemodifikation zu untersuchen. (Flug durch eine externe Firma durchgeführt)

### Ergebnis:

- 3D Scan des Untersuchungsgebiet.
- 10 cm DGM.

Hoher Detailgrad!

Vermessung

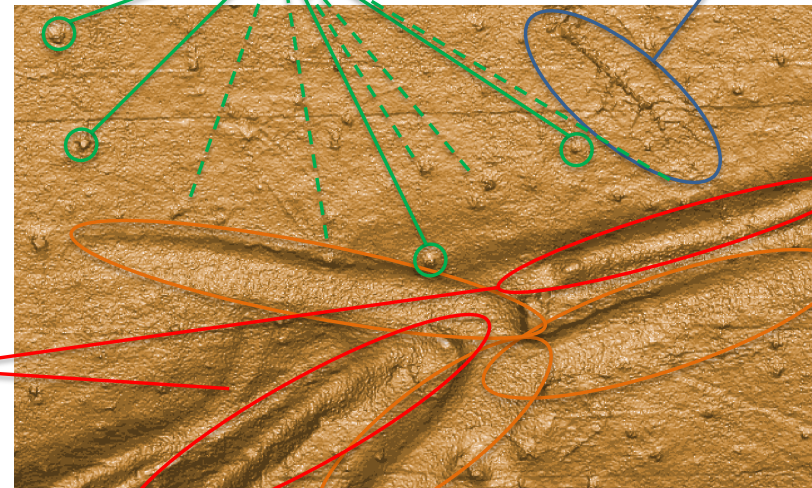
Drohngestützte LiDAR-Vermessung

Umgefallener Baum

Baumstämme

Waldweg

Gräben  
(alte Rückegassen)

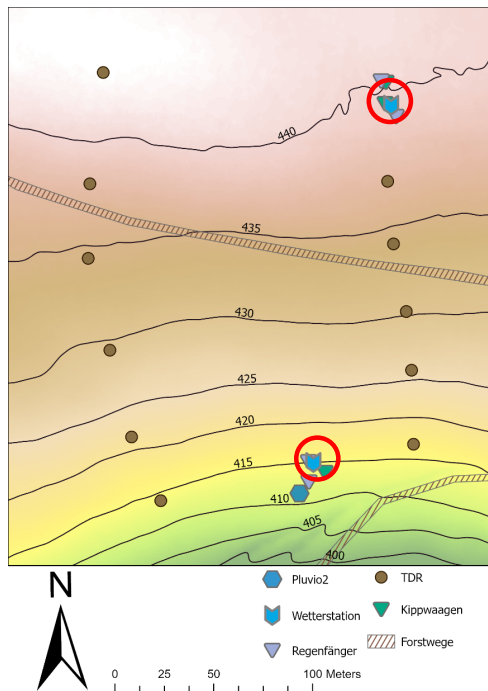


# Feldmessungen – Ausgewählte Ergebnisse

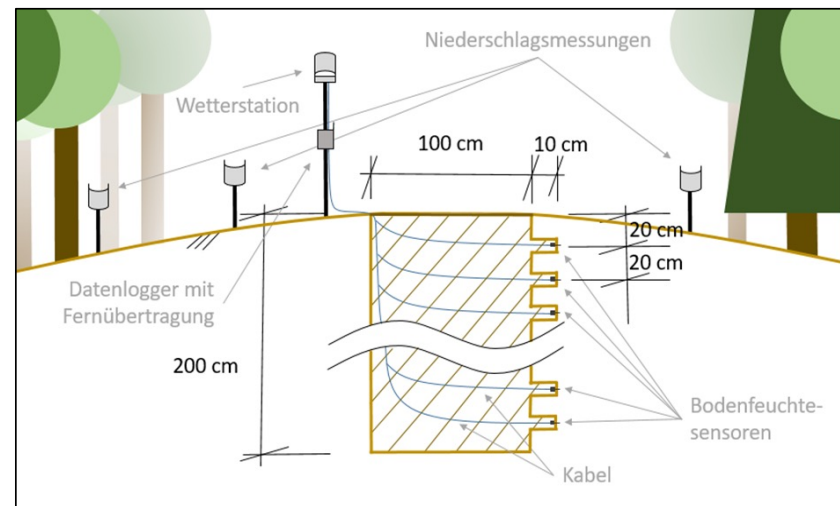
Bodenfeuchte Messungen

Händische "HandiTRASE"  
Messungen

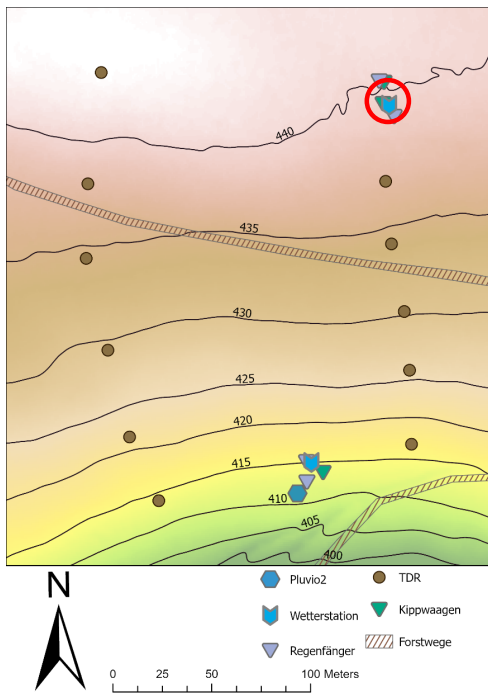
Kontinuierlich-messende  
Bodenprofile



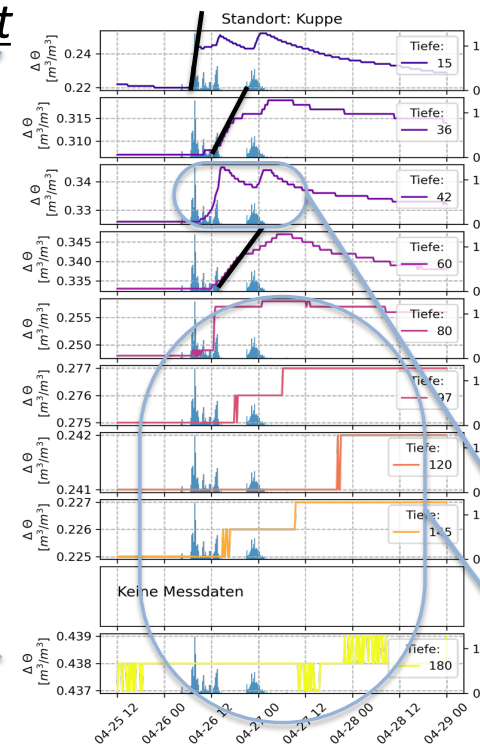
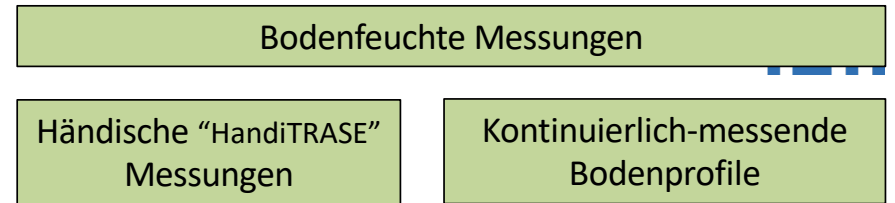
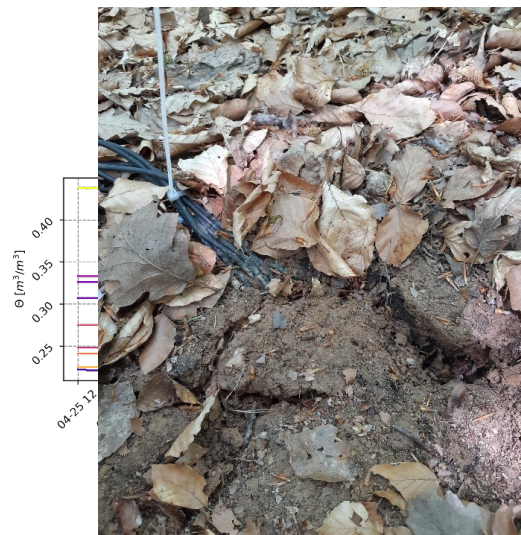
Ziel: Zeitliche und räumlich-vertikale Beobachtung der Bodenwasserdynamik



# Feldmessungen – Ausgewählte Ergebnisse



## Infiltrationsgeschwindigkeit



Infiltrationsgeschwindigkeit  
≈ 21.81 cm/h

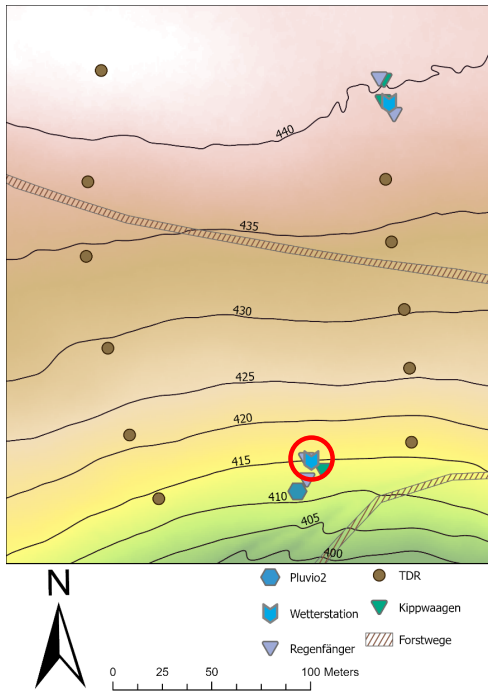
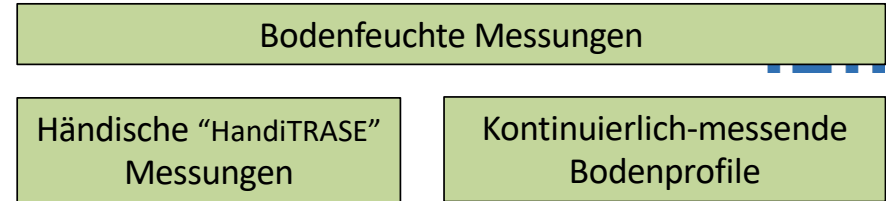
Infiltrationsgeschwindigkeit  
Sand  
= 11.78 cm/h  
(Rawls et al., 1983)

Ausreißer

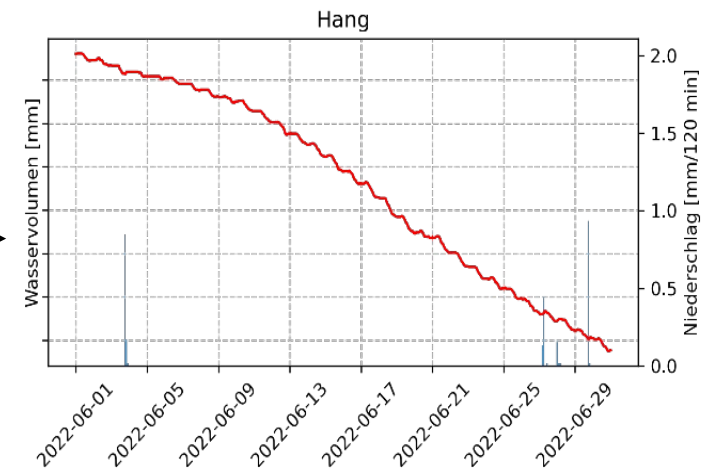
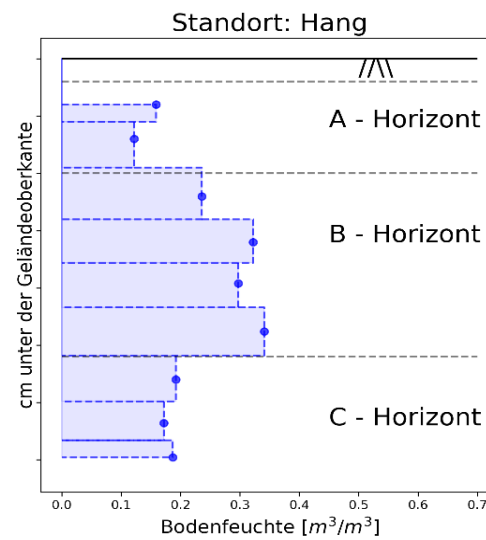
“Rauschen”



# Feldmessungen – Ausgewählte Ergebnisse

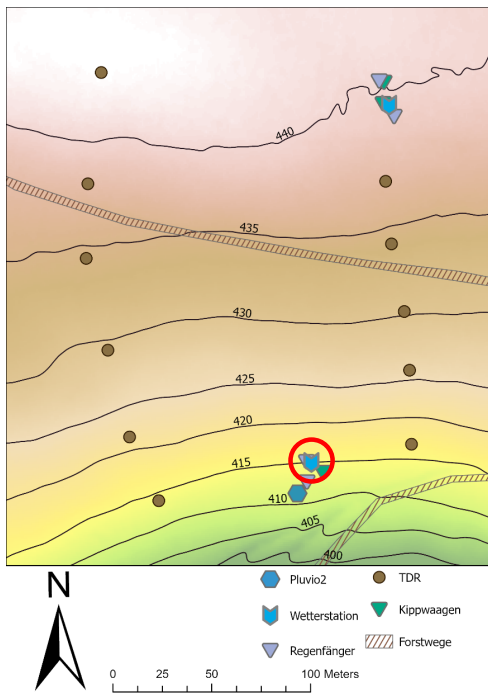
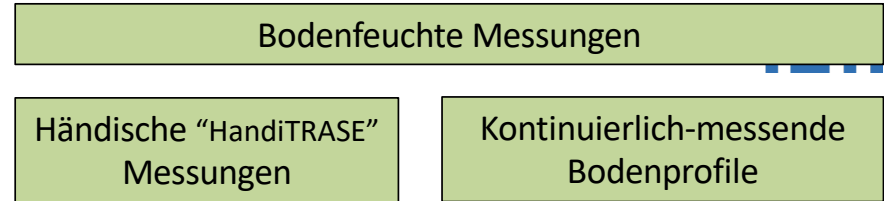


## Wasserbilanz

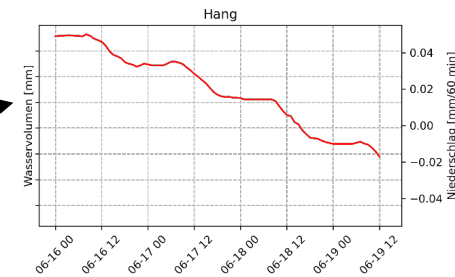
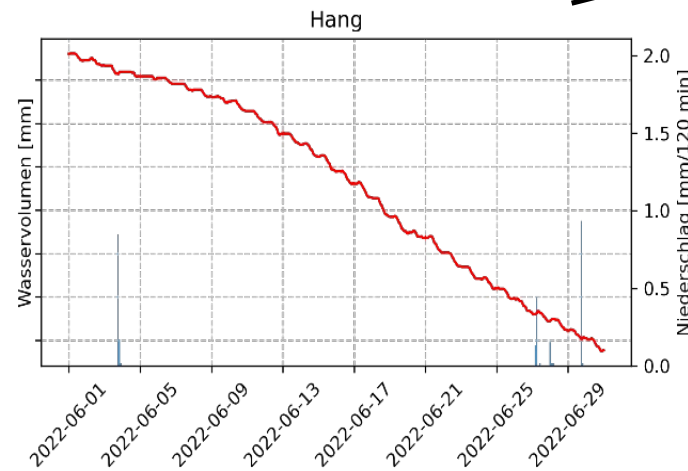


# Feldmessungen

## – Ausgewählte Ergebnisse



### Wasserbilanz



- Tag/Nacht Rhythmus sichtbar
  - Evaporation kann abgeschätzt werden
- Verlust des Wasservolumens + Niederschlagssumme  
Anzahl der Tage
- = 2.13 mm/Tag (Durchschnitt im Juni)**

# Hydrodynamische Modellierung – Modellwahl

## Ziel (Erinnerung):

- Evaluierung der Effizienz der Maßnahmen im Bezug auf die Erhöhung der Infiltration

## Wie:

- Hydrodynamische Niederschlags-Abflussmodellierung, um Oberflächenabfluss im Untersuchungsgebiet zu untersuchen
- Infiltration muss berücksichtigt werden!

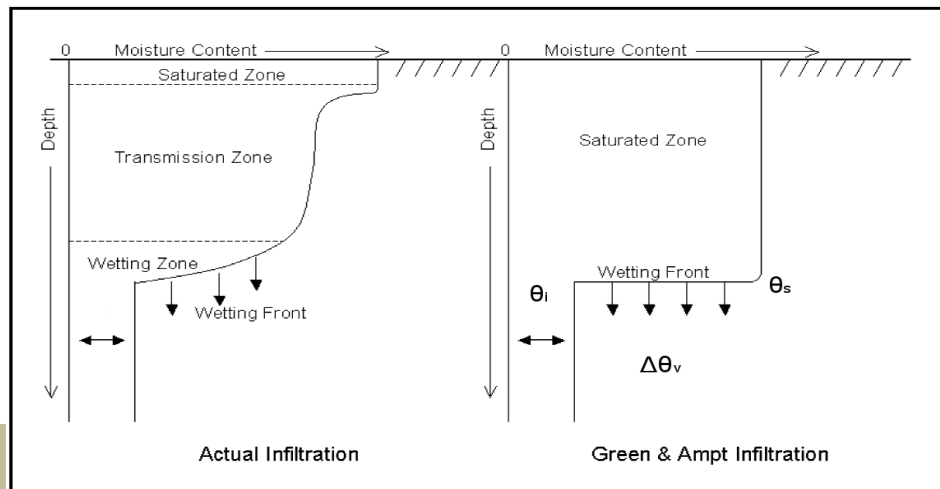
## Maßnahmen:



Kleinräumige  
Versickerungsmulden



Ausrichten von Totholz  
entlang Hängen



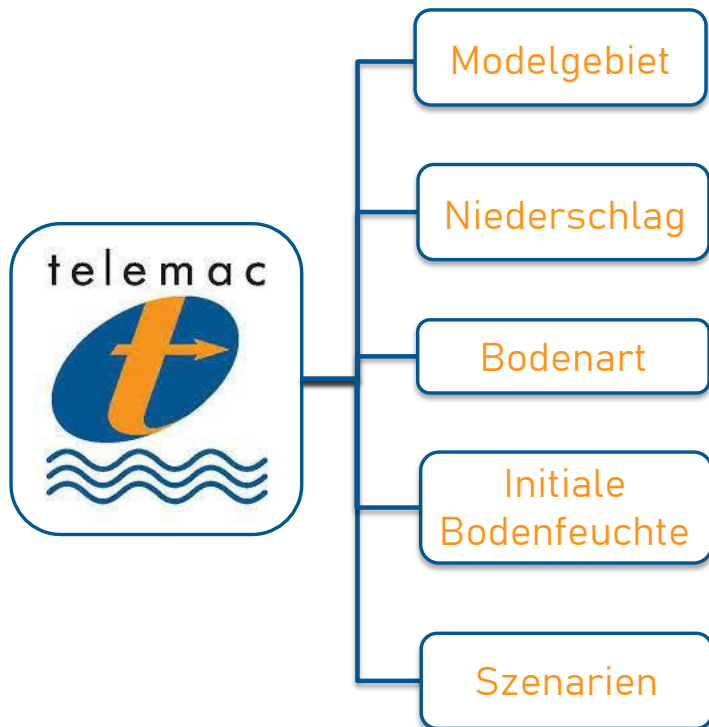
TELEMAC as a hydrodynamic rainfall-runoff model: New extension using the Green-Ampt-infiltration

Karl Broich, Thomas Obermaier, Lucas Alcamo, Markus Disse  
karl.broich@tum.de, Munich, Germany  
Chair of Hydrology and River Basin Management Munich, Technical University of Munich TUM, Munich, Germany

## Modellwahl:

- TELEMAC 2D + Green & Ampt Infiltrations-Erweiterung (Broich et al., 2021)

# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau



## Sechs Topographieszzenarien:

Ist-Zustand

Totholz:

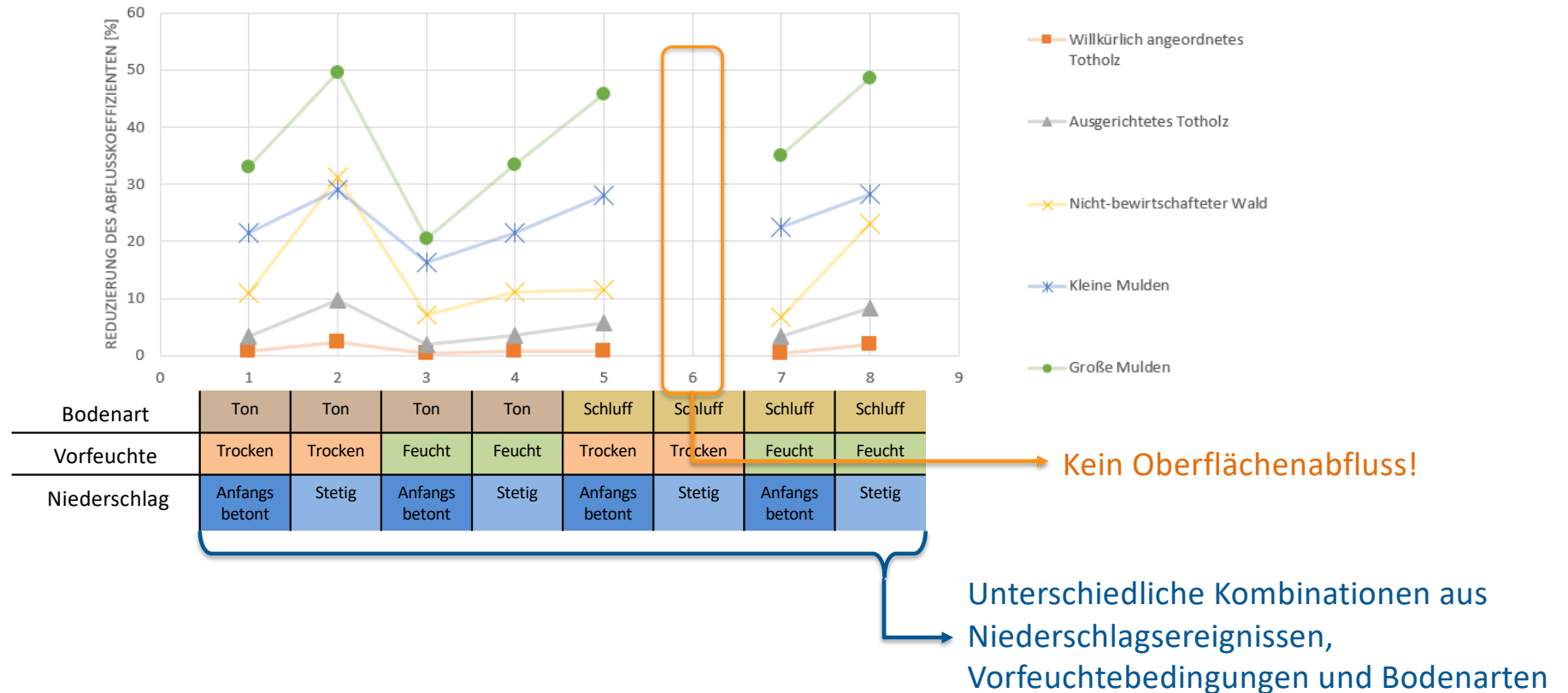
- Willkürlich angeordnet
- Senkrecht zum Gefälle ausgerichtet
- Nicht-bewirtschafteter Wald

Mulden (14 m<sup>3</sup>)

- Klein
- Groß

# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Reduzierung des Abflusskoeffizienten im Vergleich zum Ist-Zustand (0.0 - 0.231)



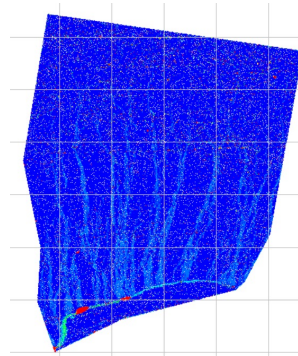
# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

## Infiltrationssumme

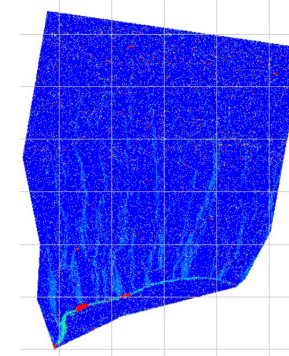
(Beispiel des Szenarios mit tonigen Boden, trockenem Vorfeuchtebedingungen und 120-minütigem Starkregen-Ereignis)

Größe des EZG: 1 ha

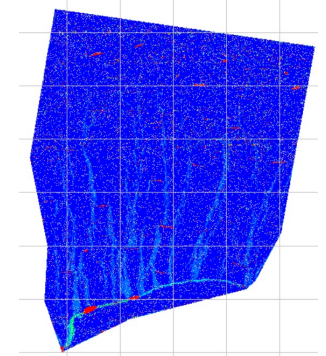
Ist-Zustand



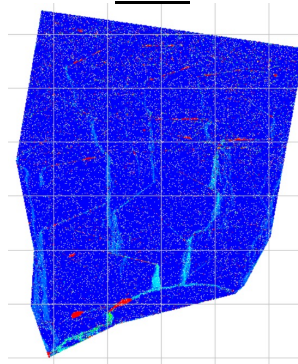
Willkürlich angeordnetes Totholz



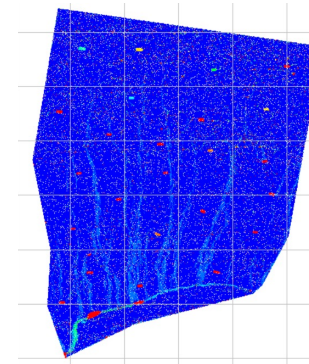
Ausgerichtetes Totholz



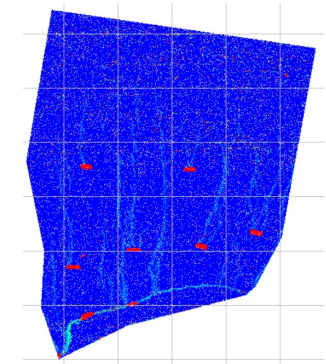
Nicht-bewirtschafteter Wald



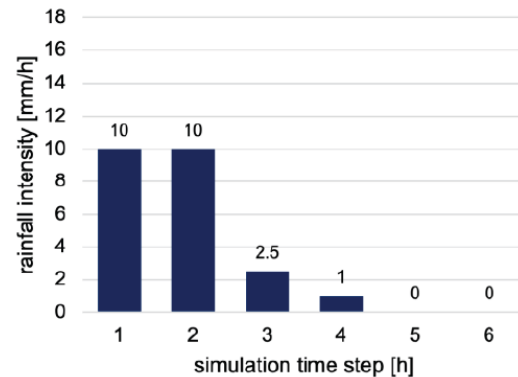
Kleine Mulden



Große Mulden

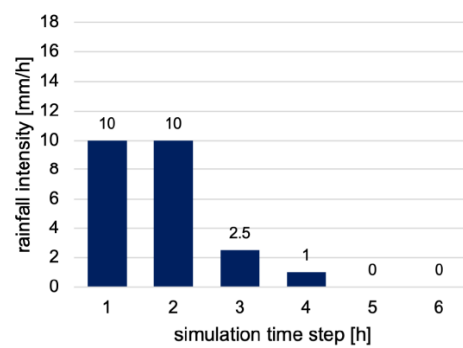
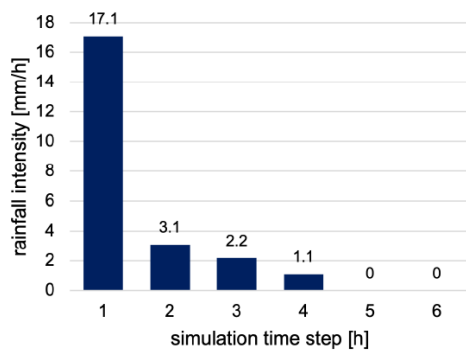


Infiltrationssumme [mm]	
34.5	
33.0	
31.5	
30.0	
28.5	
27.0	
25.5	
24.0	
22.5	
21.0	



# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

## Retentionsvolumen



Szenario	Niederschlagsereignis	$\theta_i$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Verbliebenes Wasservolumen [m <sup>3</sup> ]	Verbliebenes Wasservolumen [m <sup>3</sup> ]
			Ton	Schluff
<i>Willkürlich angeordnetes Totholz</i>	1	0.1315	4.224	3.407
	2	0.1315	4.283	(1.704)
	1	0.2335	4.458	3.673
	2	0.2335	4.768	4.768
<i>Angeordnetes Totholz</i>	1	0.1315	4.866	3.936
	2	0.1315	4.832	(1.730)
	1	0.2335	5.220	4.263
	2	0.2335	5.458	4.665
<i>Nichtbewirtschafteter Wald</i>	1	0.1315	7.438	5.918
	2	0.1315	6.614	(1.825)
	1	0.2335	8.185	6.687
	2	0.2335	8.134	6.699
<i>Kleine Mulden</i>	1	0.1315	10.380	6.338
	2	0.1315	6.146	(1.582)
	1	0.2335	12.670	9.608
	2	0.2335	10.926	6.750
<i>Große Mulden</i>	1	0.1315	14.208	8.503
	2	0.1315	7.808	(1.558)
	1	0.2335	14.984	13.394
	2	0.2335	14.877	8.995

# Hydrodynamische Modellierung

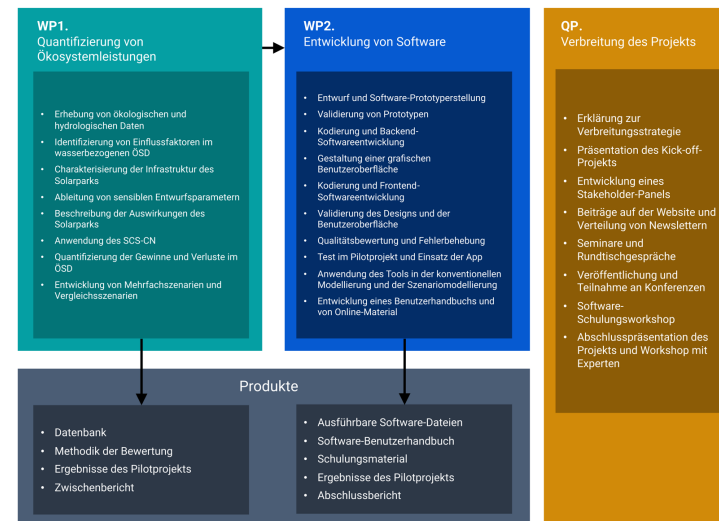
## – Zusammenfassung

- ✓ Für alle Totholz und Muldenszenarien (in denen es zu Oberflächenabfluss kam) wurde der Abflusskoeffizient reduziert und die Infiltration erhöht.
- ✓ Mulden reduzieren den Abfluss effizienter als Totholz.
- ✓ Totholz führt zu einer flächigen Erhöhung der Infiltration.

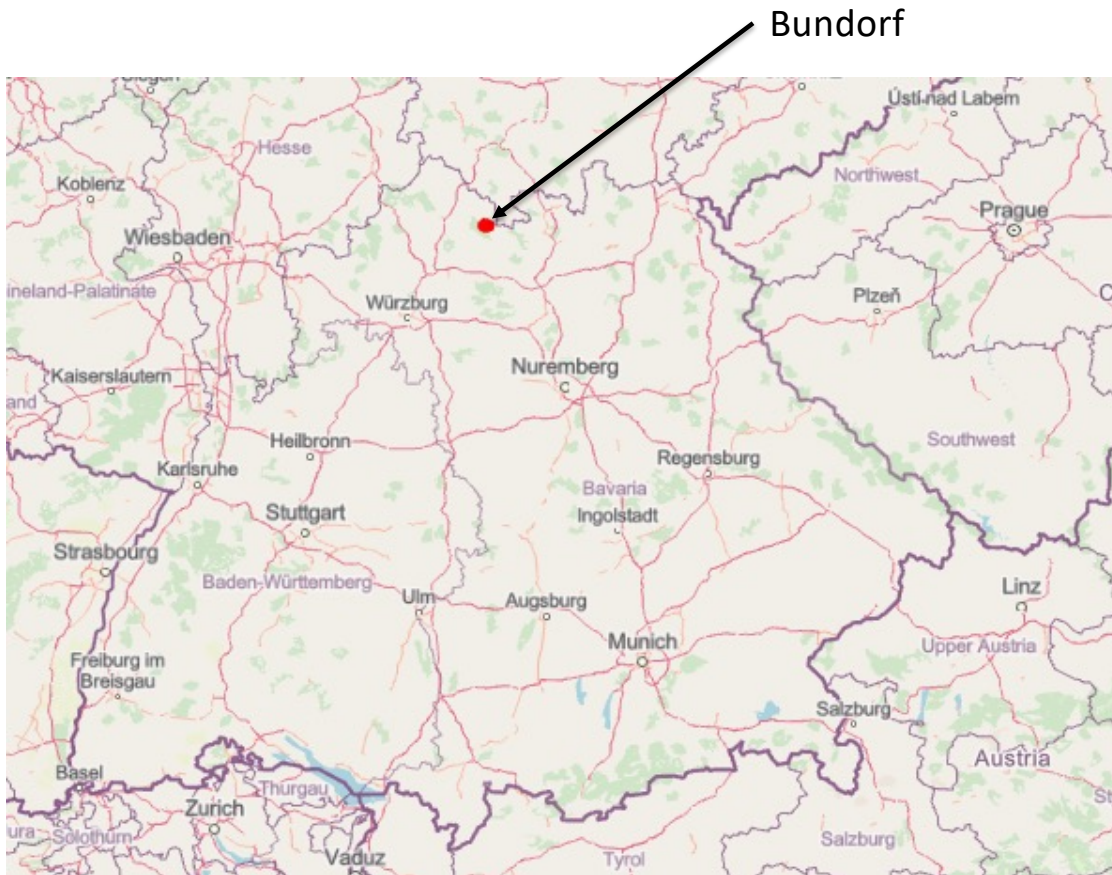


# AQUASOL

## Verbesserte Grundwasserneubildung und Wasserqualität durch Solarparks



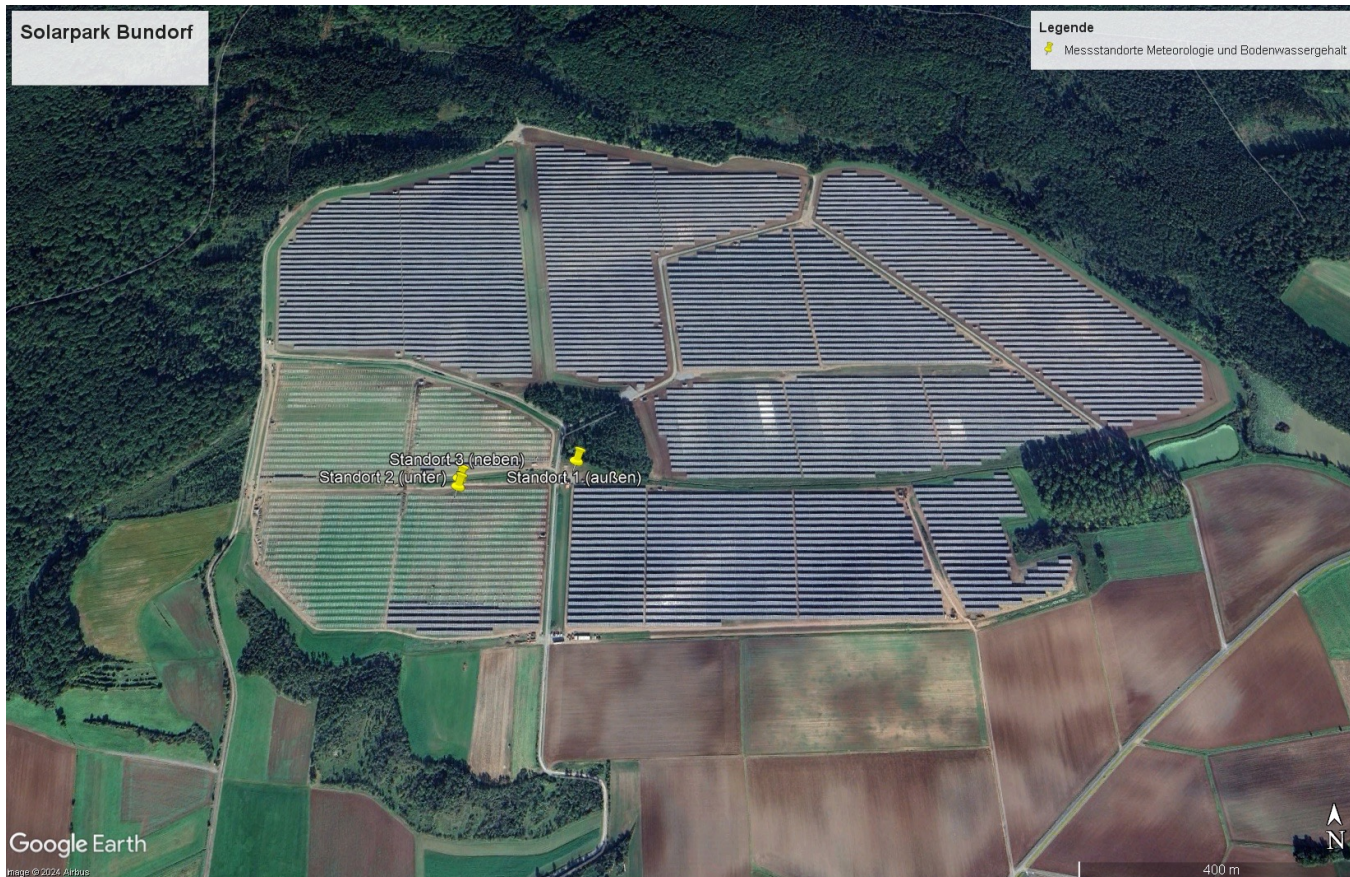
# Solarpark Bundorf



- Betreiber: MaxSolar
- Seit 2021 in Betrieb
- 125 ha → eine der größten Solarparks Bayerns
- 125 MW Leistung → 37.500 Haushalte
- Bundorf gilt als eine der trockensten Regionen Bayerns

**maxsolar**  
energy concepts

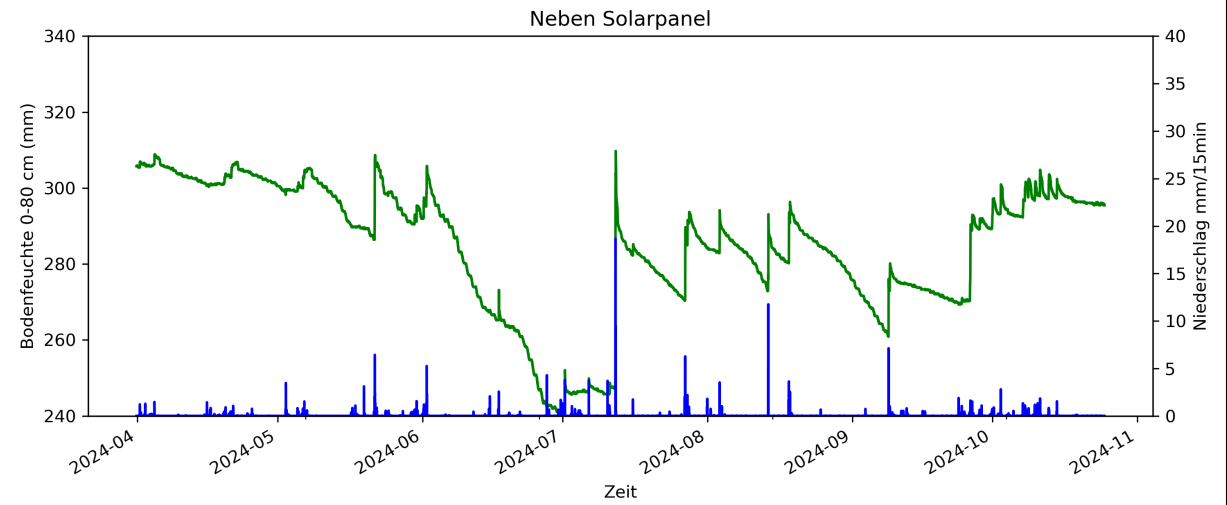
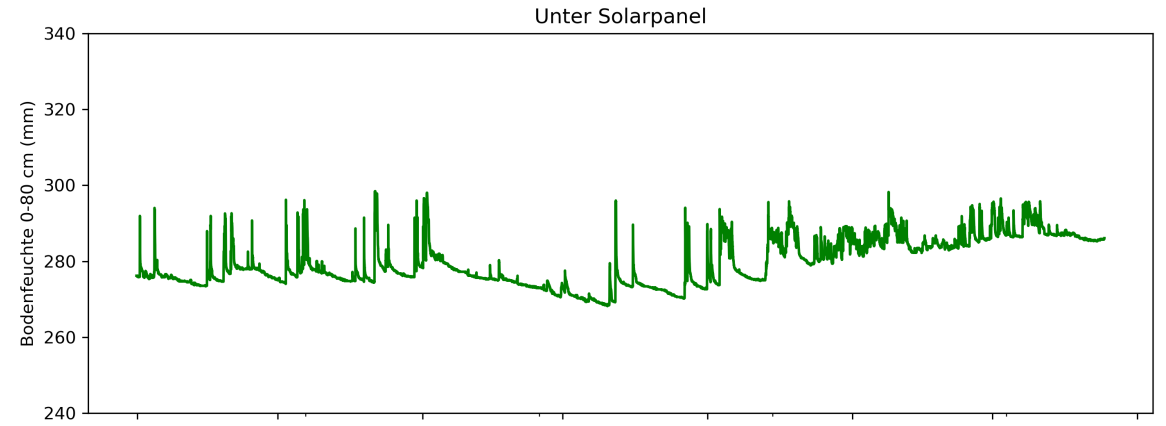
# Messaufbau



## 3 Messstationen:

- Wetterstationen
- Bodenfeuchtesensoren
- Evaporationsmessung
- Messungen seit Februar 2024

# Messaufbau



# Hydrodynamische Modellierung – Modellwahl

## Ziel:

- Abschätzung des Einflusses von Solarpanels auf Infiltration und Oberflächenabfluss

## Wie:

- Hydrodynamische Niederschlags-Abflussmodellierung, um Oberflächenabfluss im Untersuchungsgebiet zu untersuchen
- Neue Niederschlagsverteilung durch die Solarpanels
- Infiltration muss berücksichtigt werden, vor allem unter den Solarpanels

## Modellwahl:

- TELEMAC 2D + Green & Ampt Infiltrations-Erweiterung mit neuem Ansatz

TELEMAC as a hydrodynamic rainfall-runoff model: New extension using the Green-Ampt-infiltration

Karl Broich, Thomas Obermaier, Lucas Alcamo, Markus Disse

[karl.broich@tum.de](mailto:karl.broich@tum.de), Munich, Germany

Chair of Hydrology and River Basin Management Munich, Technical University of Munich TUM, Munich, Germany



Revised Implementation of the Green-Ampt Infiltration Method in TELEMAC-2D

Leon Frederik De Vos<sup>1</sup>, Karl Broich<sup>2</sup>, Moritz Wirthensohn<sup>2</sup>, Nils Rütther<sup>1</sup>

[Frederik.de-vos@tum.de](mailto:Frederik.de-vos@tum.de), Munich, Germany

<sup>1</sup>: TUM, Chair of Hydraulic Engineering

<sup>2</sup>: TUM, Chair of Hydrology and River Basin Management

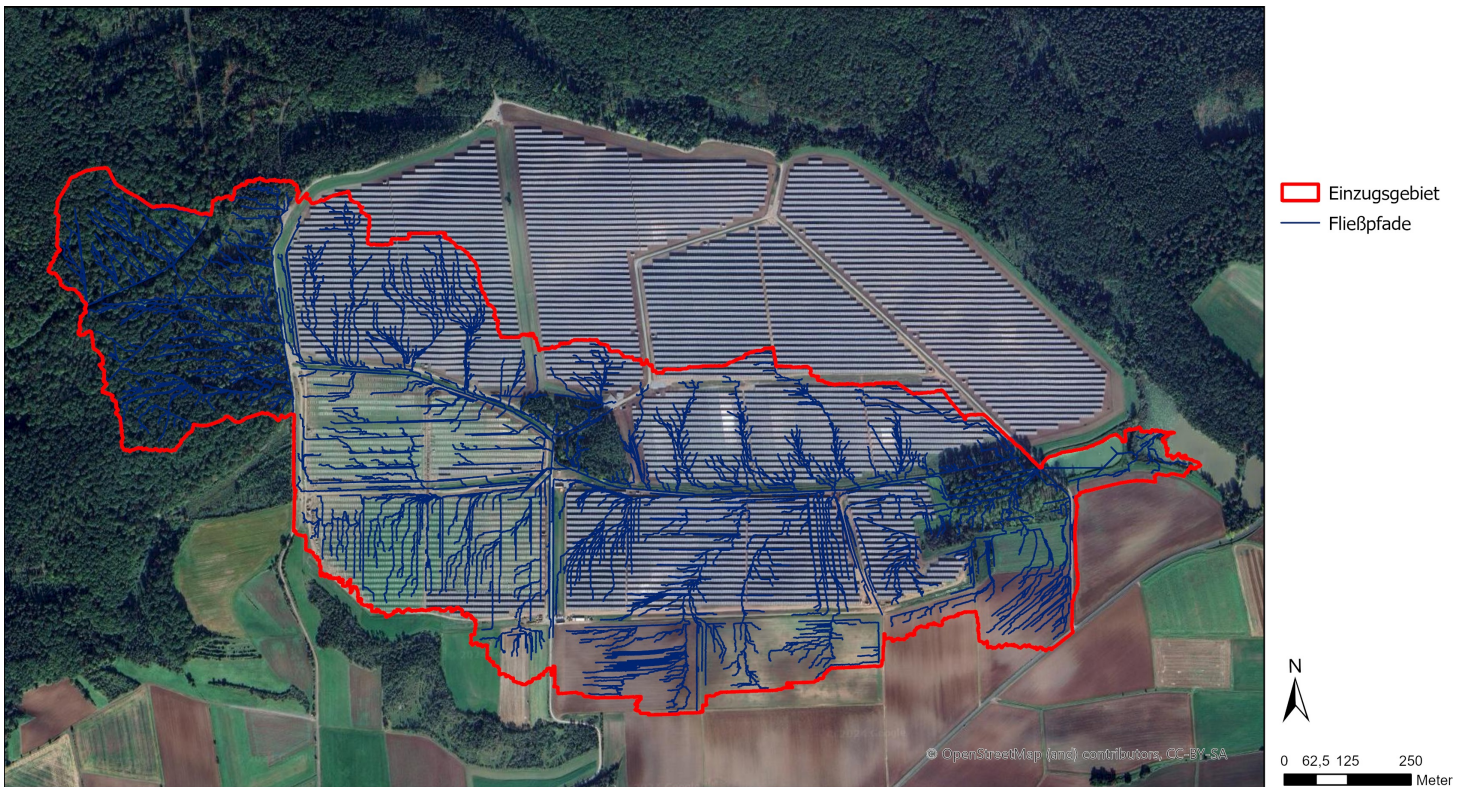
# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau



# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau

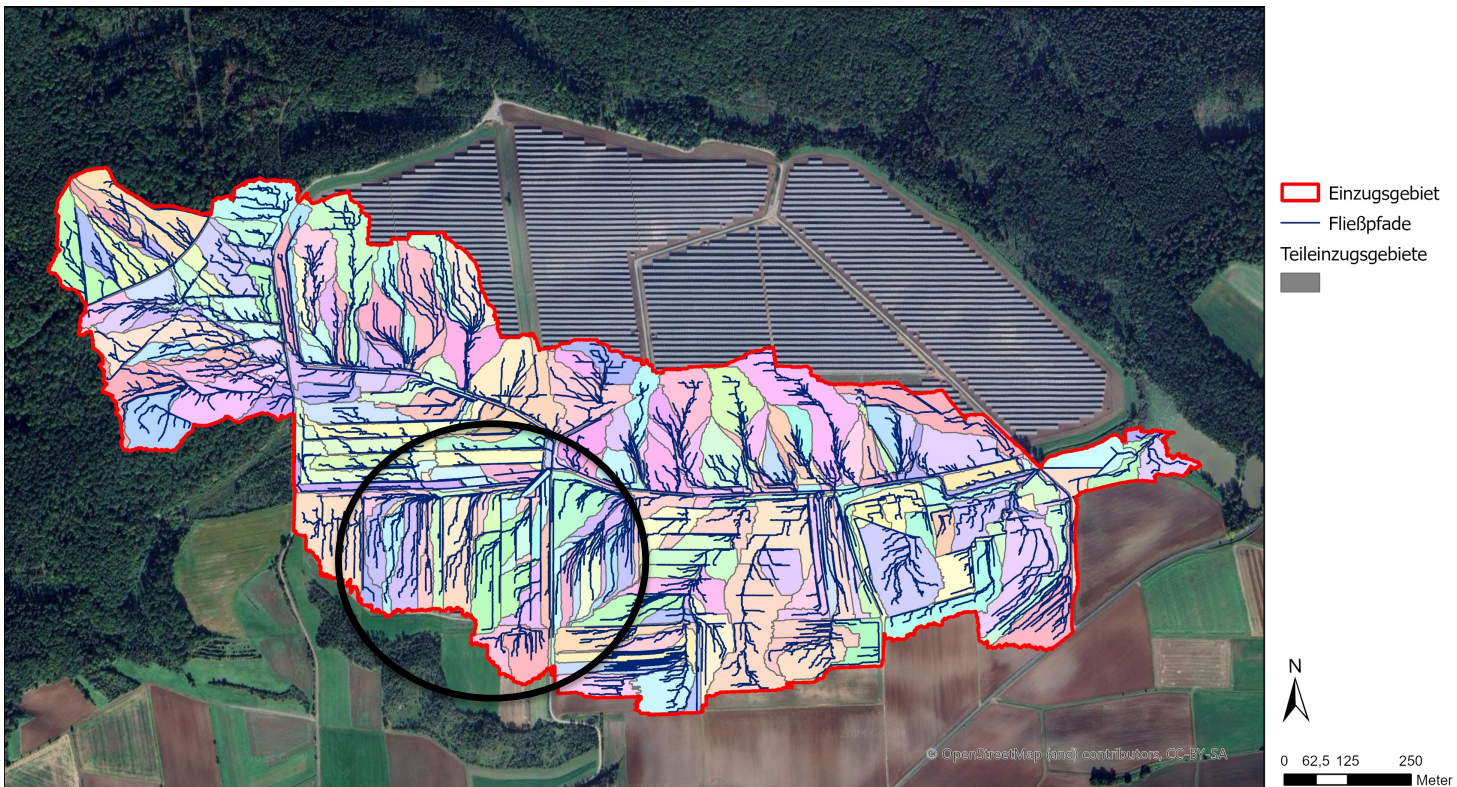


# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau

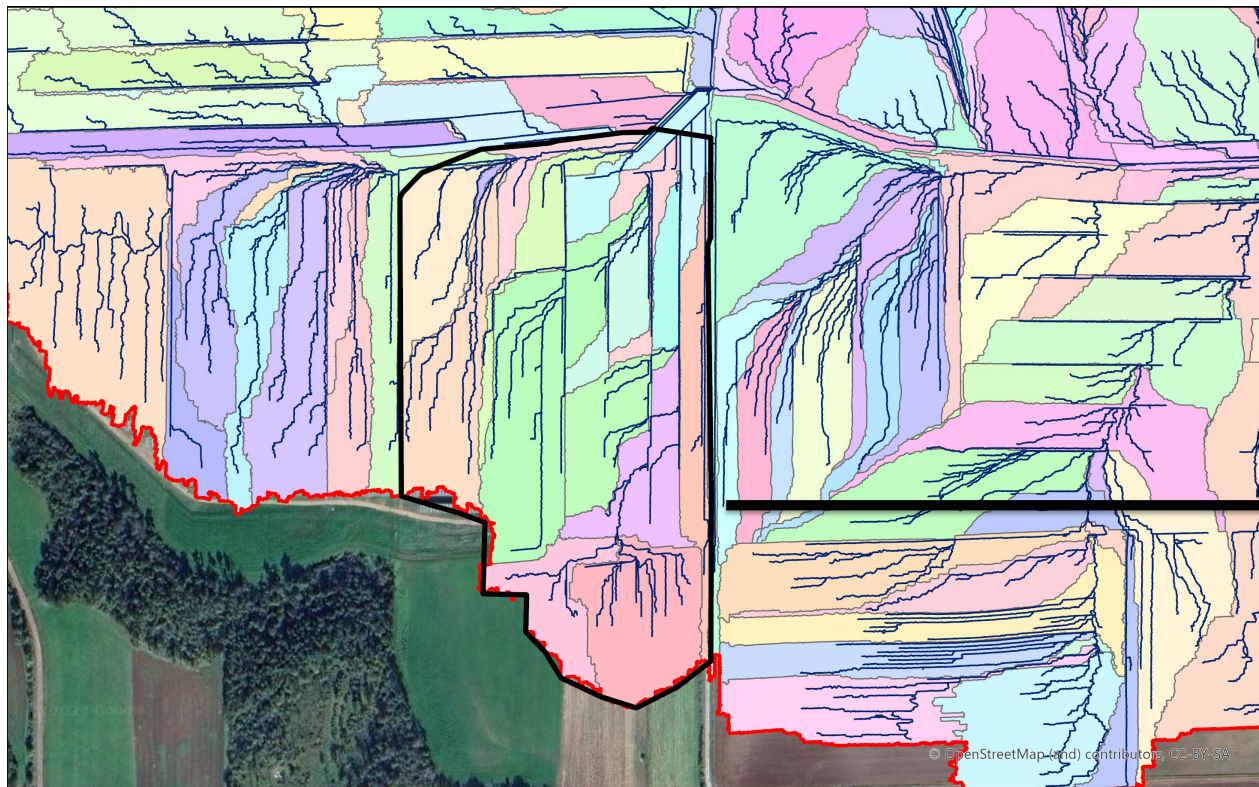




# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau

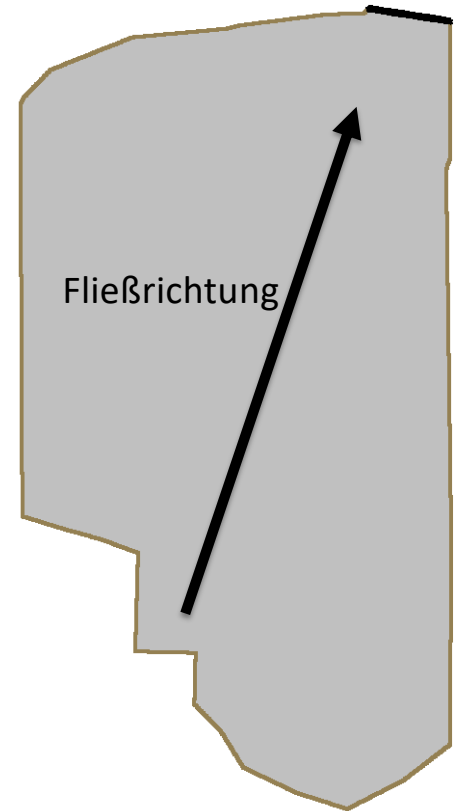


# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau

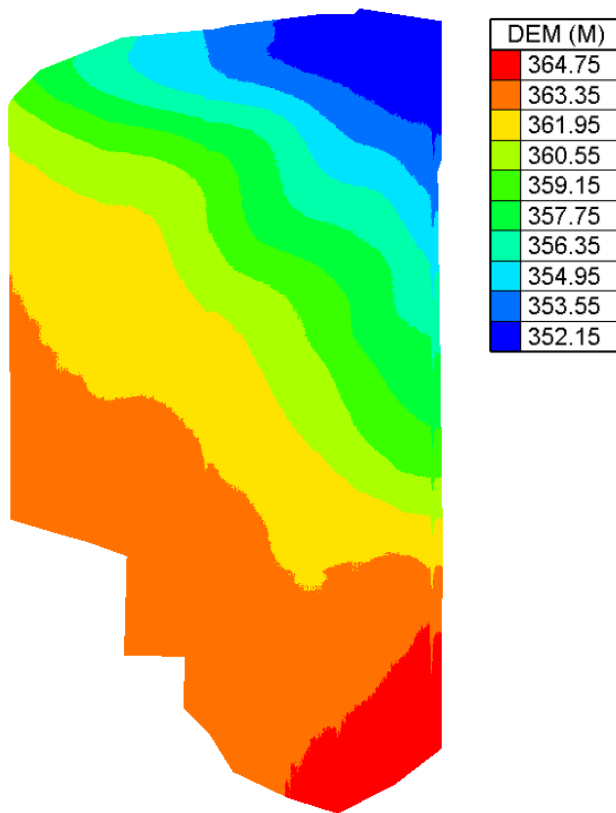


- Einzugsgebiet
- Fließpfade
- Teileinzugsgebiete
- Modellgrenze

Modellnetz



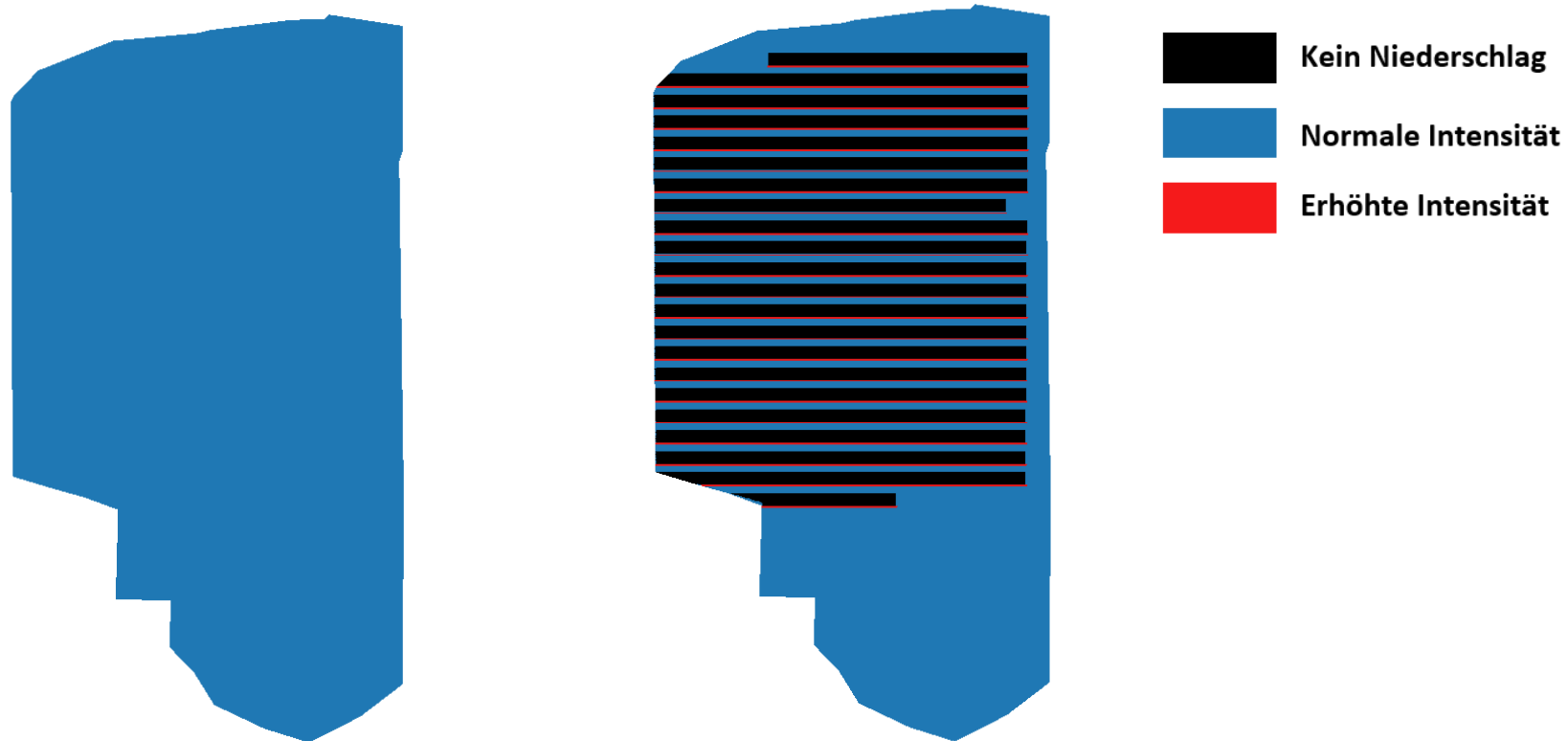
# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau



- 70300 m<sup>2</sup>
- Auflösung: 50 cm
- Freier Auslauf
- Strickler Beiwert: 25 m<sup>1/3</sup>/s
- Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit: 22.9 mm/h
- Anfangsfeuchte des Bodens: Trocken

# Hydrodynamische Modellierung – Modellaufbau

Niederschlagsverteilung ohne und mit Solarpanels



# Hydrodynamische Modellierung – Szenarien

Niederschlag: KOSTRA 10 jährlich mit einer Dauer von 30 Minuten

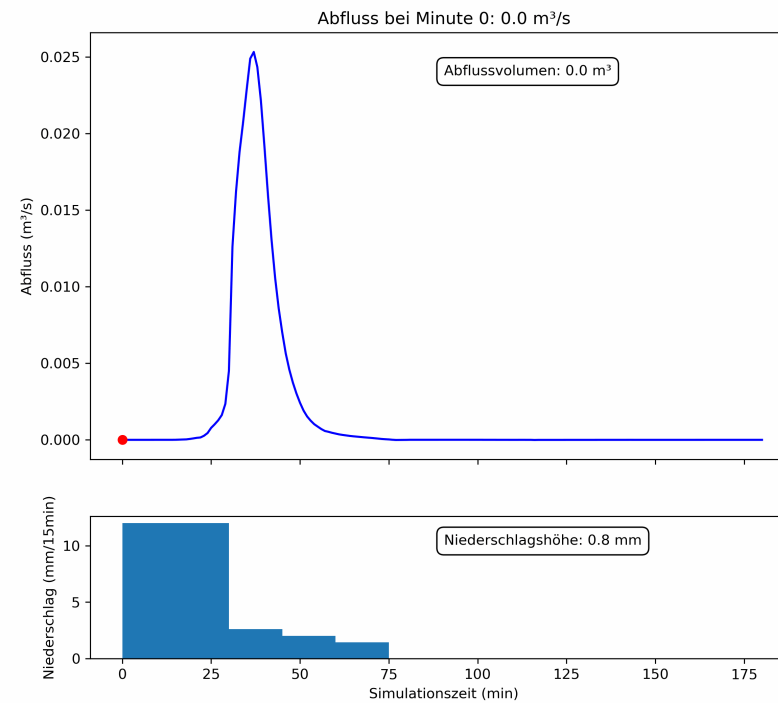
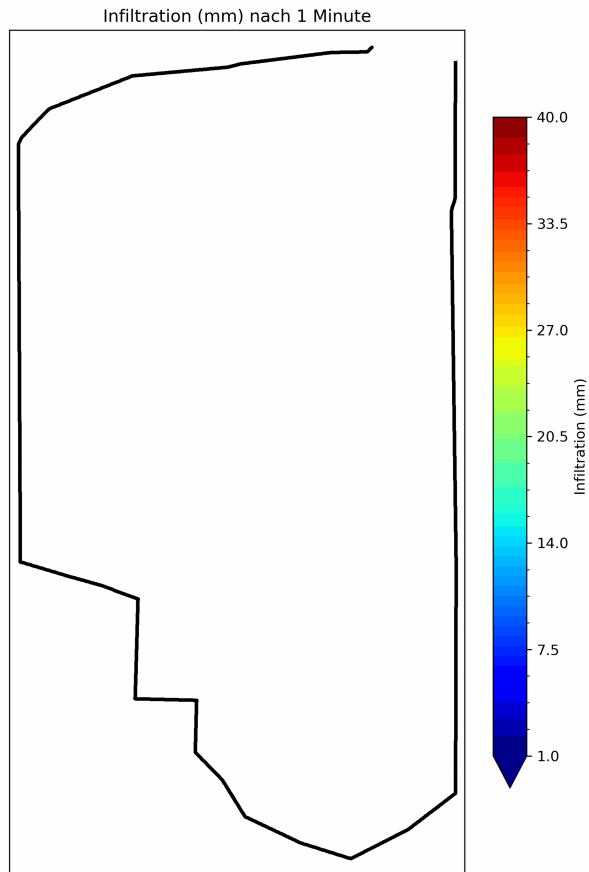
Szenario 1: Ohne Solarpanels

Szenario 2: Mit Solarpanels

Szenario 3: Mit Solarpanels und mit 4 eingebaute Mulden

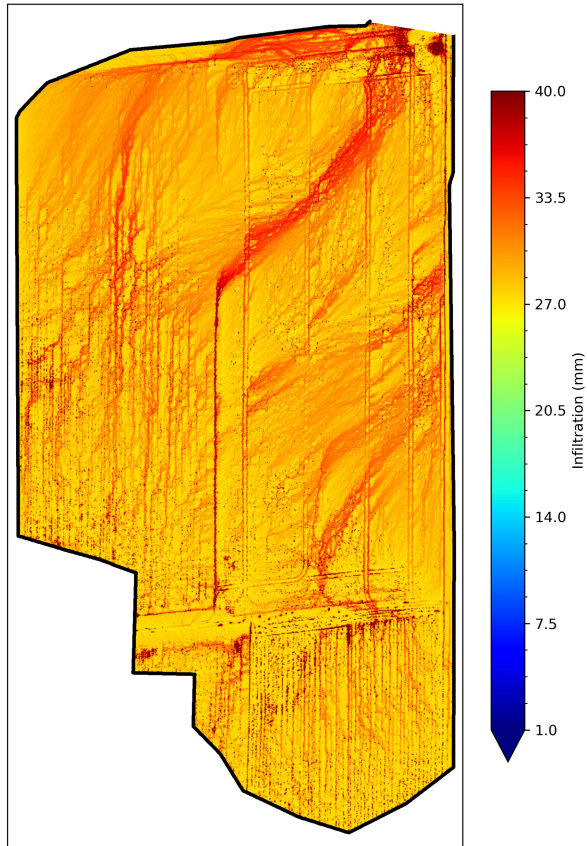
# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Ohne Solarpanels  
KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



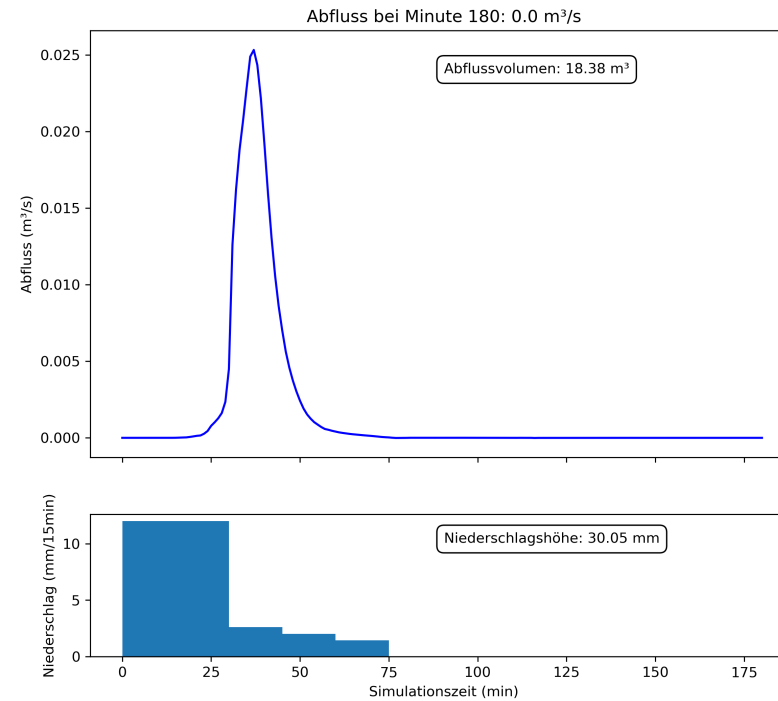
# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Infiltration (mm) nach 180 Minuten



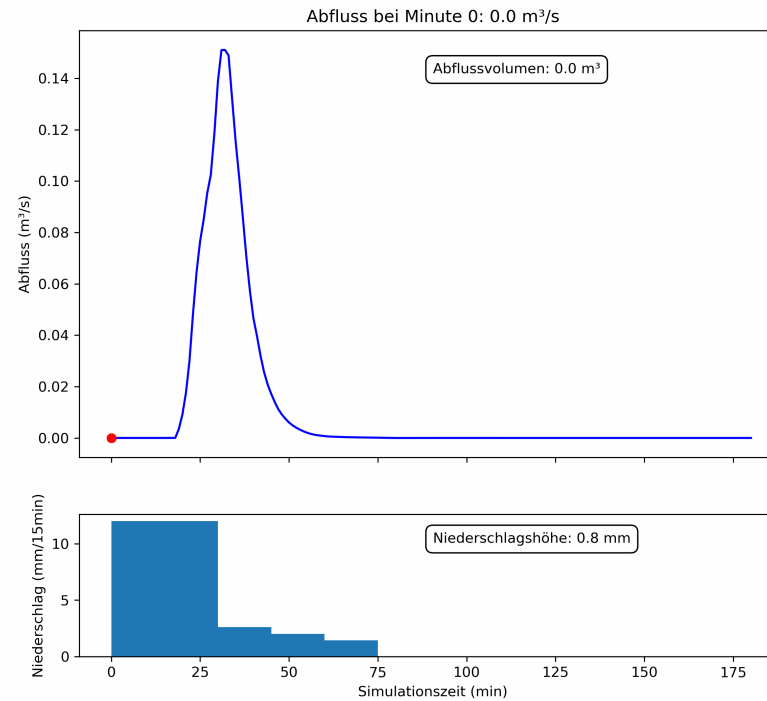
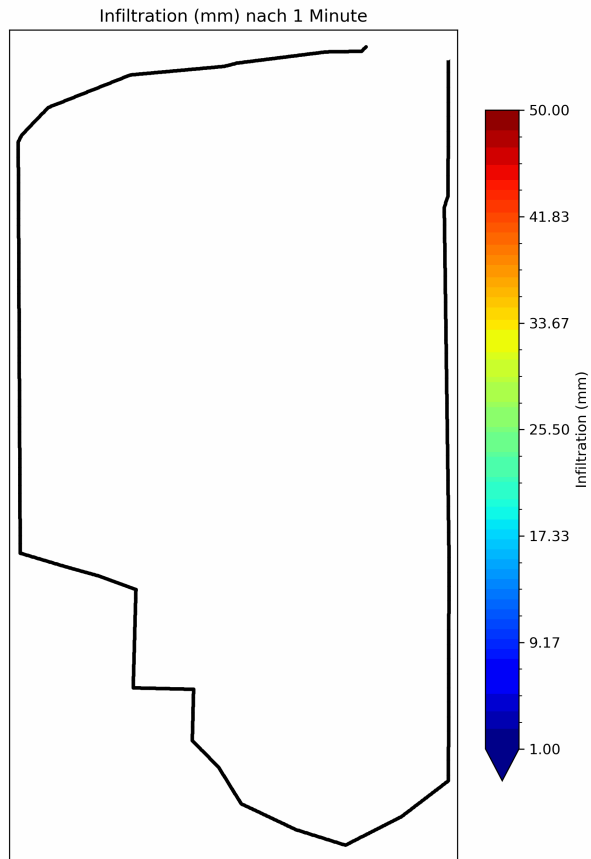
Ohne Solarpanels

KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

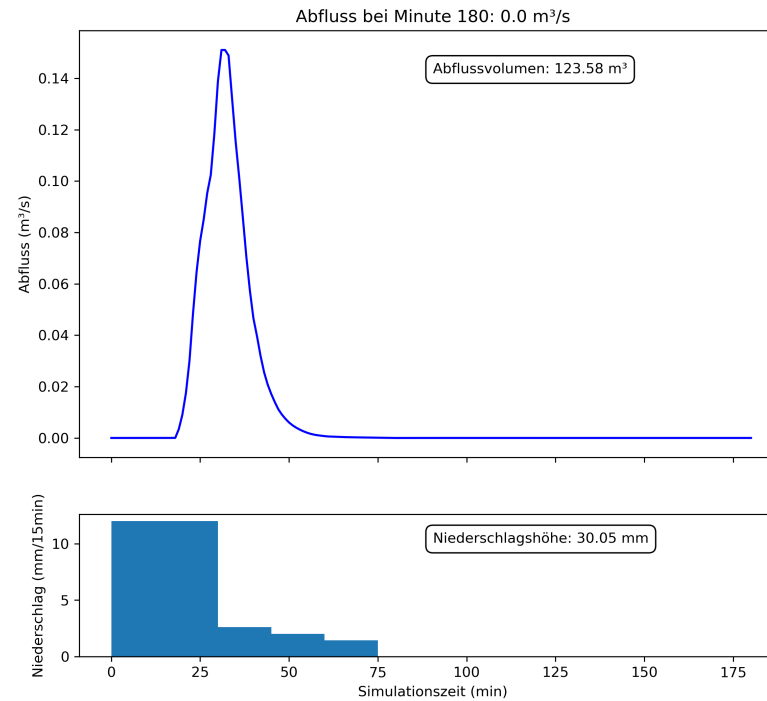
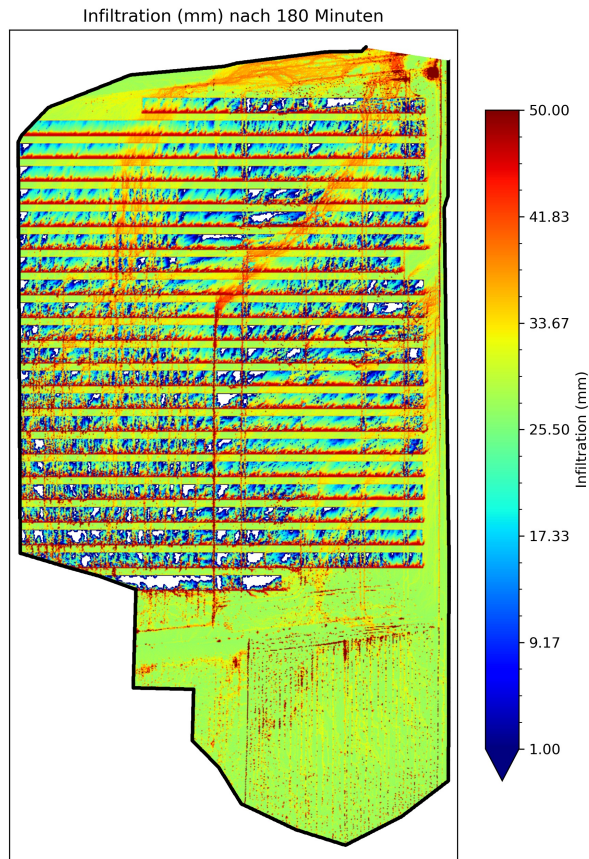
Mit Solarpanels  
KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



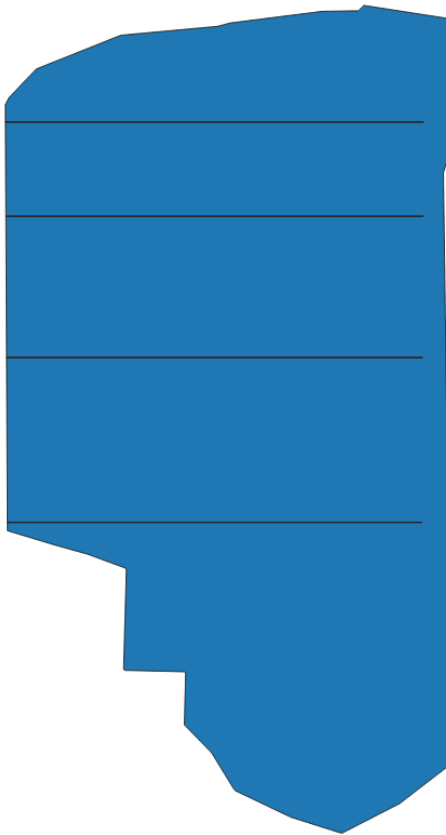


# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

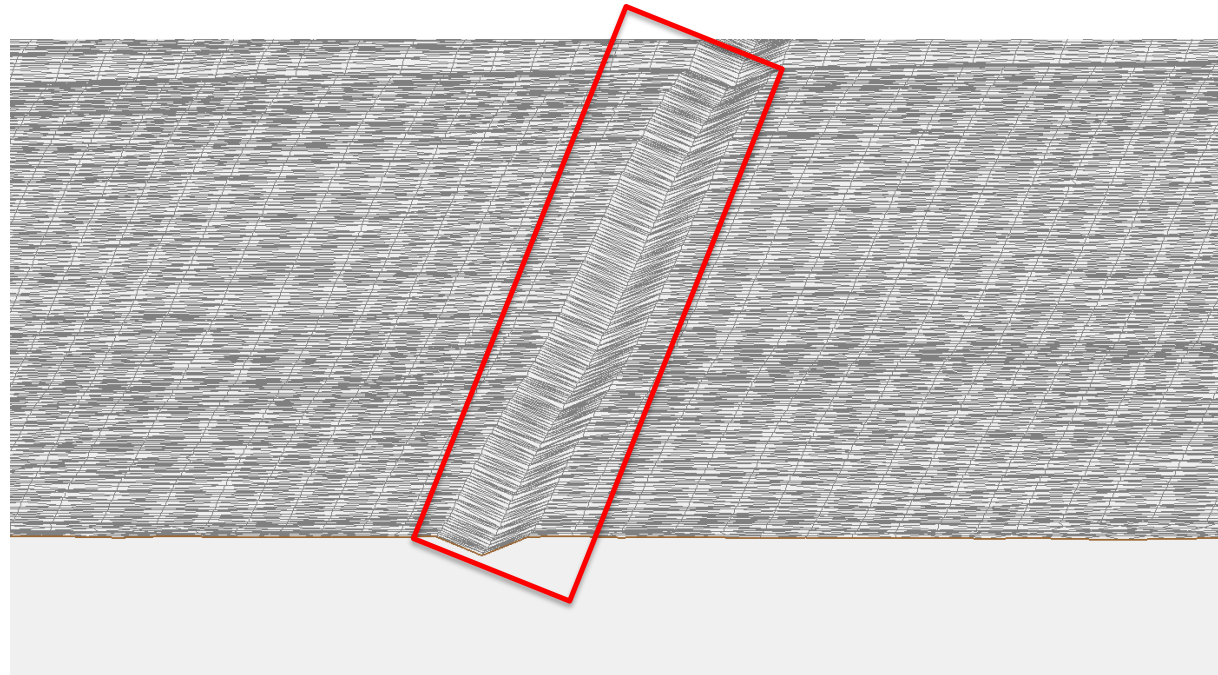
Mit Solarpanels  
KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



# Hydrodynamische Modellierung – Mulden

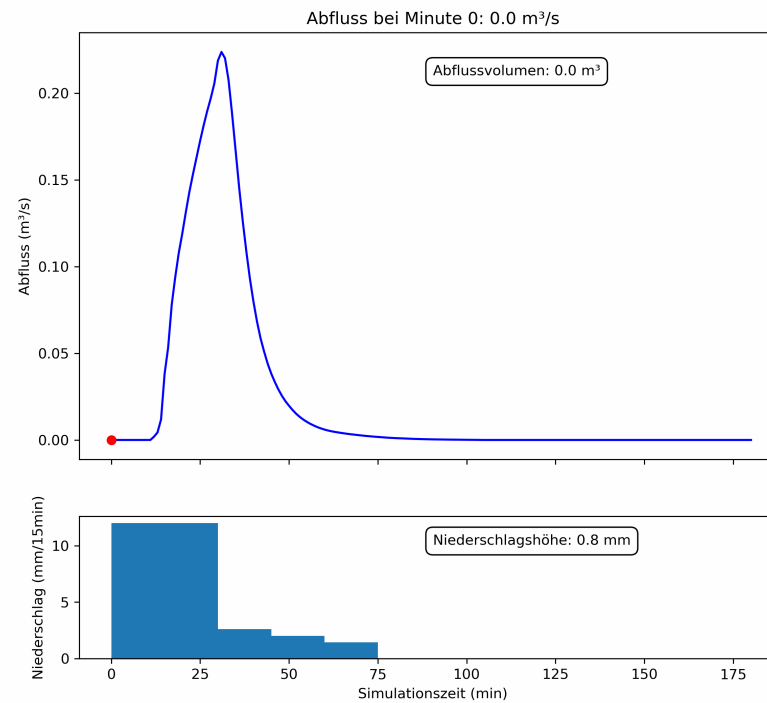
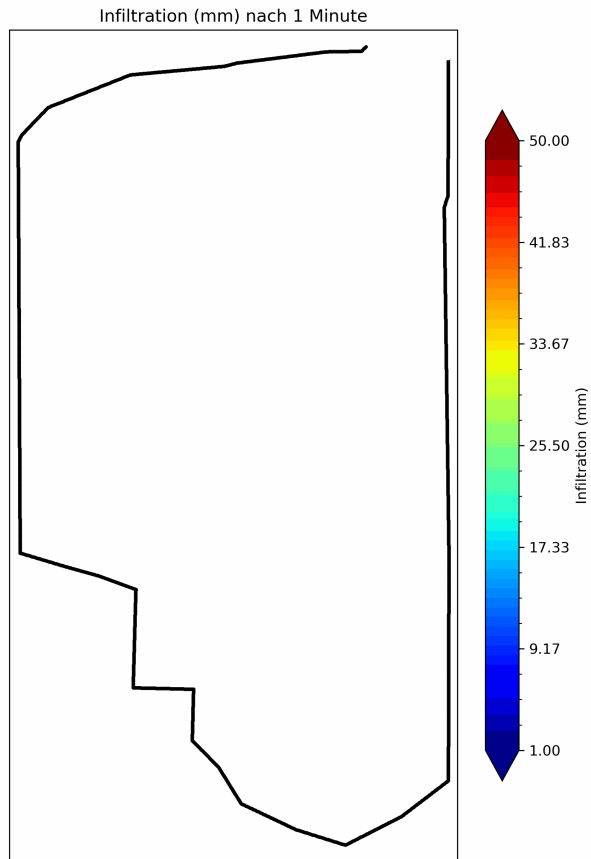


- Einbau von vier 20 cm tiefen Mulden an den Stellen, wo der Niederschlag von den Panels fließt



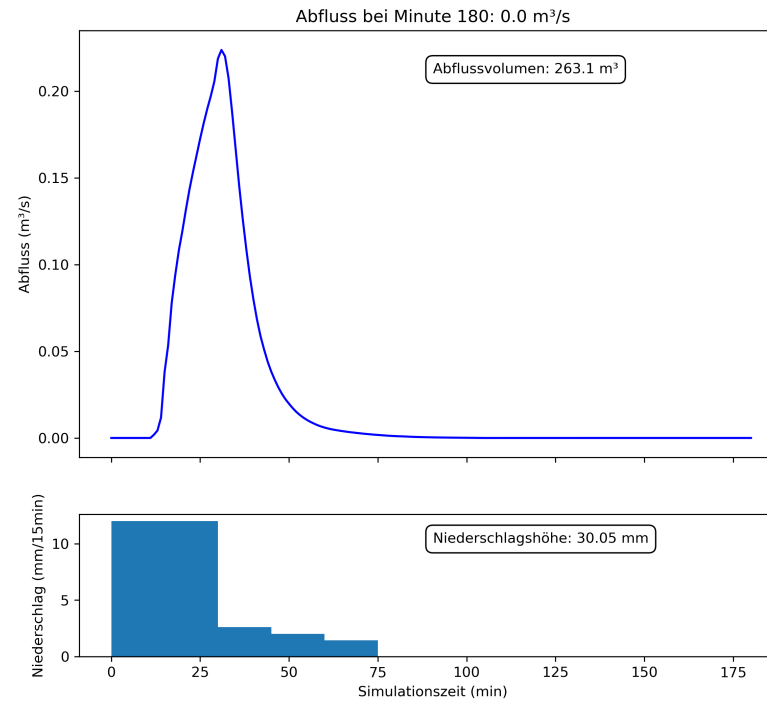
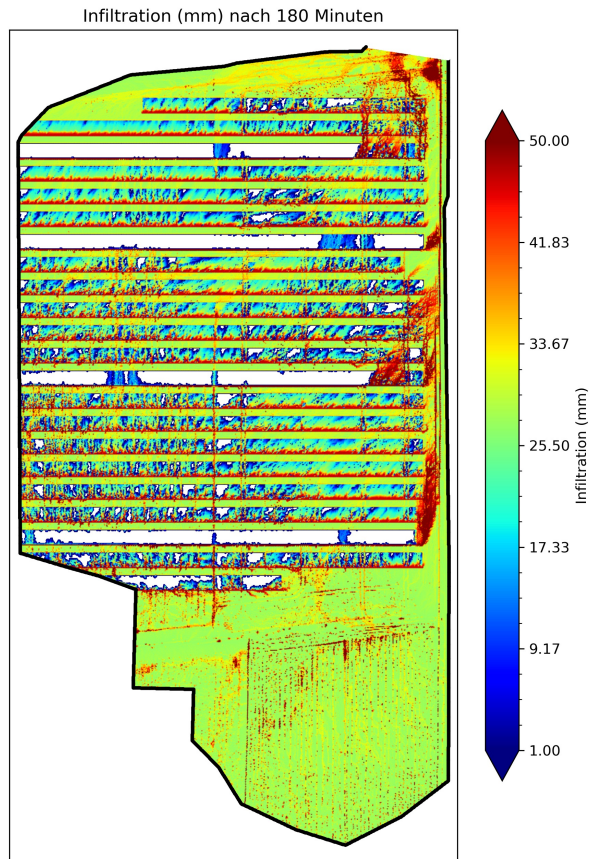
# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Mit Solarpanels, mit Mulden  
KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Mit Solarpanels, mit Mulden  
KOSTRA Niederschlag – 10 a, 30 Minuten



# Hydrodynamische Modellierung – Ergebnisse

Niederschlagsvolumen:  $30.05 \text{ mm} \times 70300 \text{ m}^2 = 2112.5 \text{ m}^3$

	Ohne Solarpanels	Mit Solarpanels, ohne Mulden	Mit Solarpanels, mit Mulden
Abflussvolumen m <sup>3</sup>	18.38 m <sup>3</sup>	123.58 m <sup>3</sup>	263.1 m <sup>3</sup>
Abflusskoeffizient	0.0087	0.058	0.12



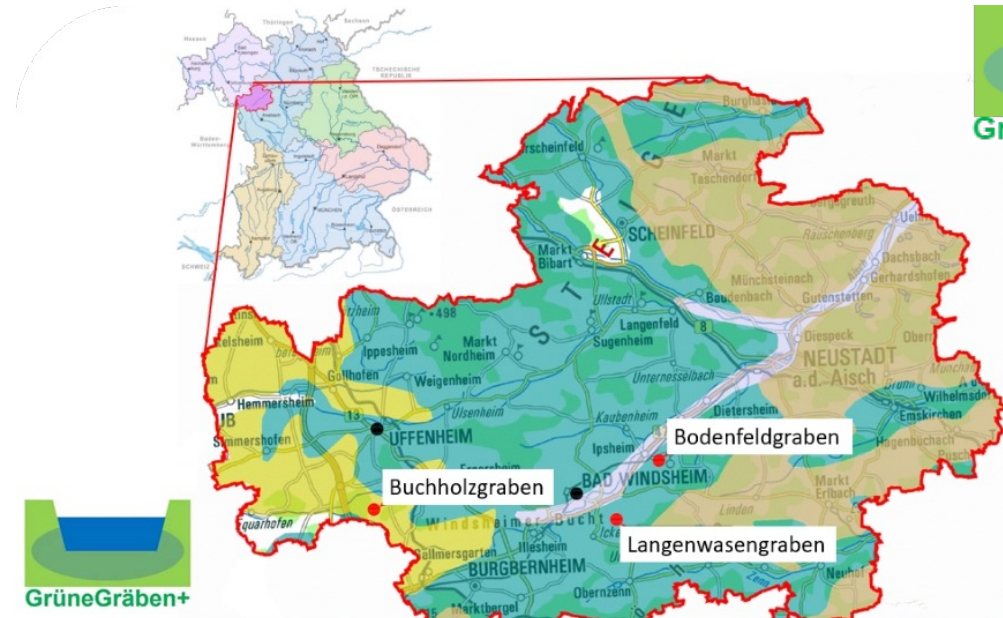
Mulden sollten angepasst werden, um eine Reduktion des Abflusses zu erreichen

**Abschlusskolloquium AQUASOL**  
**Dienstag, den 19. November 2024 von 13:00 bis 17:00 Uhr**  
 im Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus

# Grüne Gräben Pilotprojekt des WWA Ansbach



- „Grüne Gräben“ zum Wasserrückhalt in der Fläche
- Erarbeitung weiterer Maßnahmen mit Stakeholdern
- Hydrologische Modellierung durch die TU München



**Buchholzgraben bei Vorderpfeilach**

- Geologische Haupteinheit: Löß/Lößlehm
- Staulänge: ca. 100 m
- Stauvolumen: ca. 56 m<sup>3</sup>
- Stauhöhe: ca. 0,75 m
- Einzugsgebiet: ca. 0,17 km<sup>2</sup>

**Langenwasengraben bei Ickelheim**

- Geologische Haupteinheit: Gipskeuper
- Staulänge: ca. 36 m
- Stauvolumen: ca. 10 m<sup>3</sup>
- Stauhöhe: ca. 0,6 m
- Einzugsgebiet: ca. 1,88 km<sup>2</sup>

**Bodenfildgraben Bei Oberndorf**

- Geologische Haupteinheit: Gipskeuper
- Staulänge: ca. 65 m
- Stauvolumen: ca. 19 m<sup>3</sup>
- Stauhöhe: ca. 0,55 m
- Einzugsgebiet: ca. 0,34 km<sup>2</sup>

EUWID Wasser und Abwasser > News > Wirtschaft

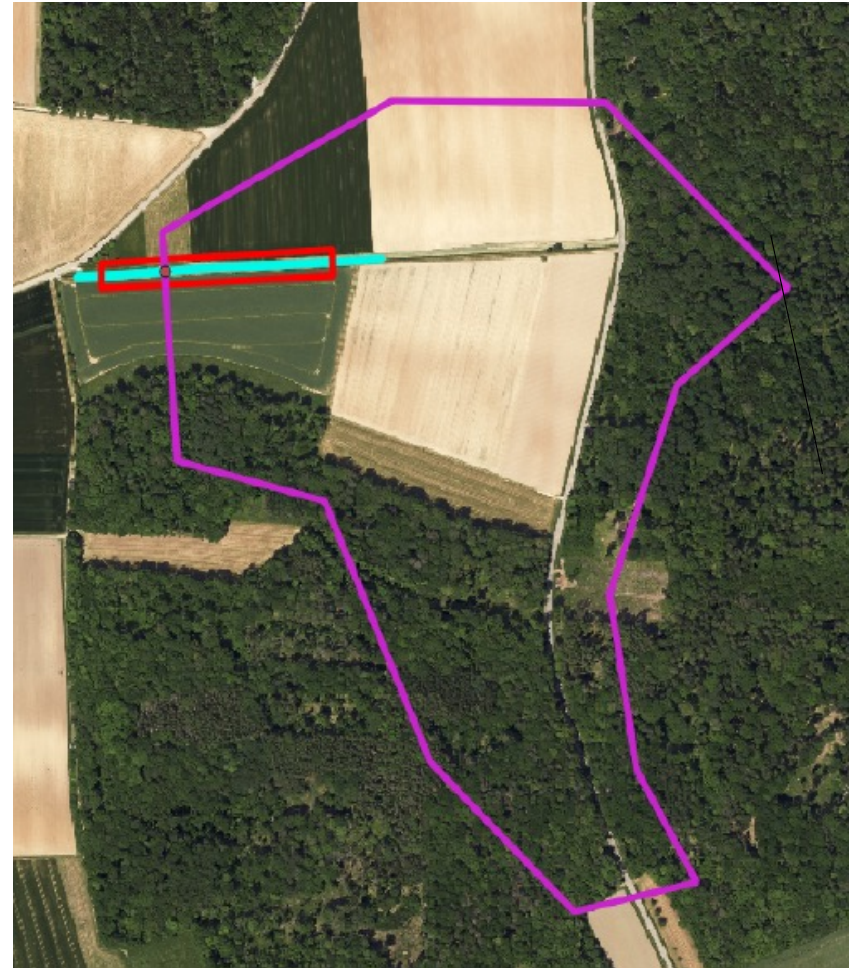
## Wasserzukunft: Kreis Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim stellt sich klimaresilient auf

Glauber: Kreis zu Freiluftlabor für die Klimaanpassung geworden

EUWID+ 11.04.2024 | Michaela Plazzo | ca. 4 Min | Erschienen in Ausgabe 18/2024

# Grüne Gräben Pilotprojekt des WWA Ansbach

- „Grüne Gräben“ zum Wasserrückhalt in der Fläche
- Erarbeitung weiterer Maßnahmen mit Stakeholdern
- Hydrologische Modellierung durch die TU München



# Grüne Gräben Pilotprojekt des WWA Ansbach

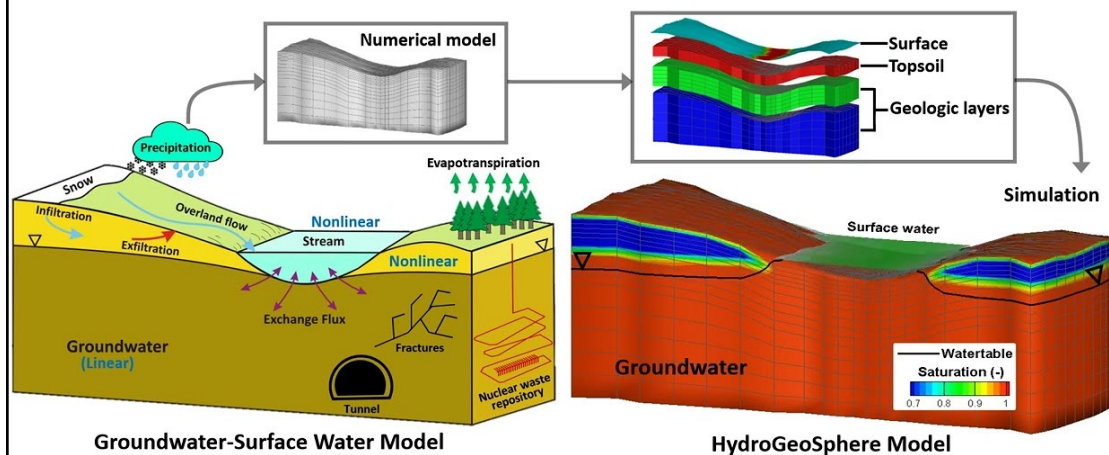
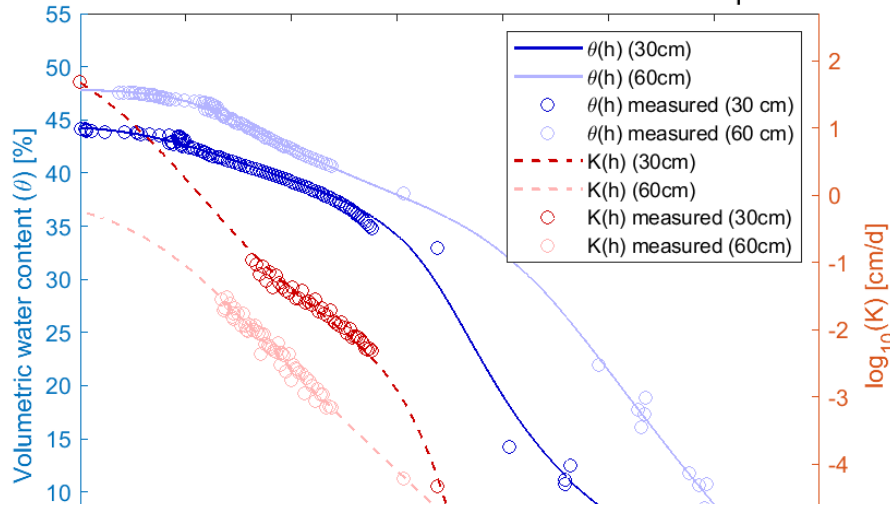
- „Grüne Gräben“ zum Wasserrückhalt in der Fläche
- Erarbeitung weiterer Maßnahmen mit Stakeholdern
- Hydrologische Modellierung durch die TU München





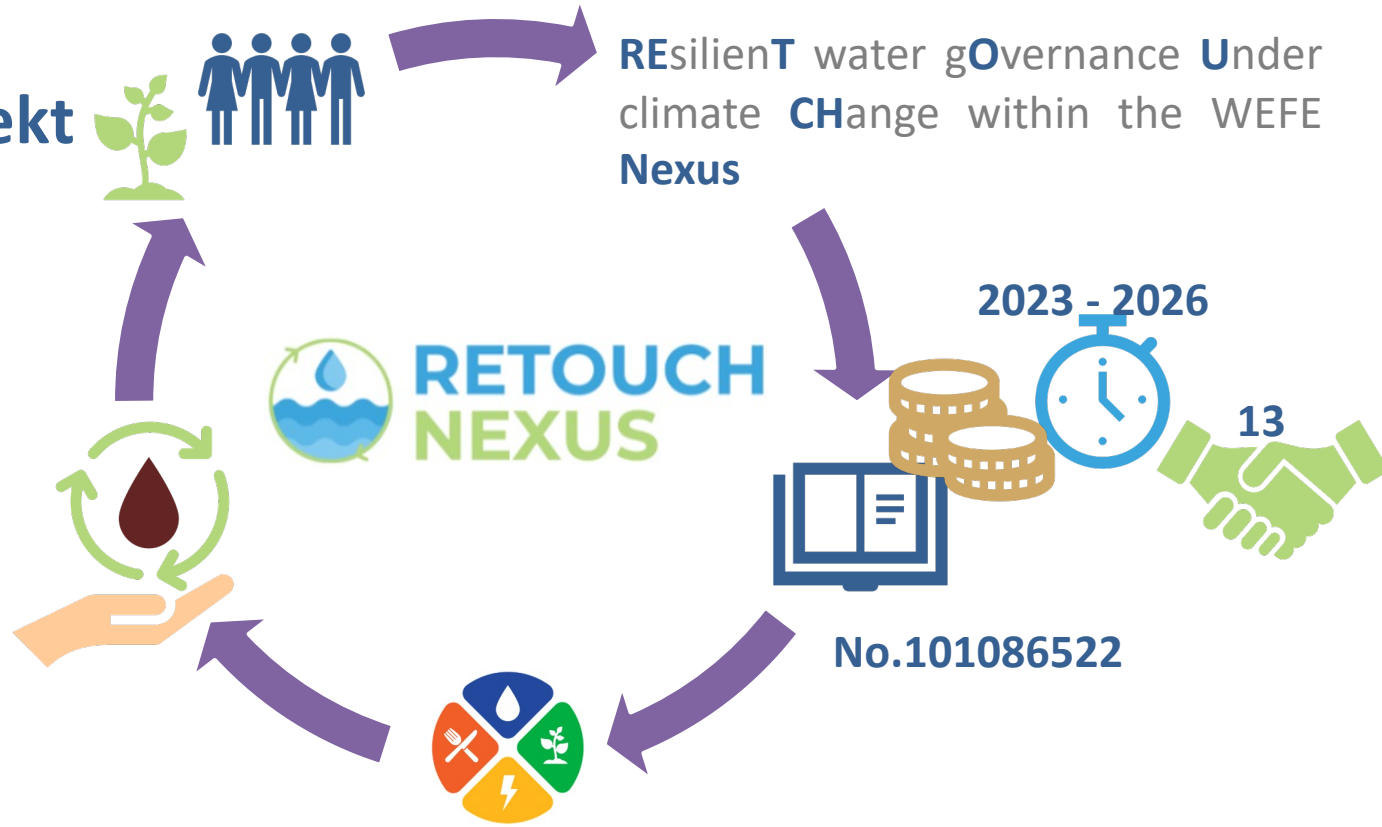
# Grüne Gräben Pilotprojekt des WWA Ansbach

Retention- & hydraulic conductivity curves BHG<sub>1</sub>



Integrated Water Resources & HydroGeoSphere

# RETOUCH Nexus EU Horizon Projekt




<https://retouch-nexus.eu/> <https://www.cee.ed.tum.de/hydrologie/forschung/laufende-projekte/retouch-nexus/>

# RETOUCH Nexus



## Ziel RETOUCH NEXUS:

- robuste,
- Integrative,
- nachhaltige und
- skalierbare  
Wasserbewirtschaftungspraktiken

➔ Evidenzbasierter Ansatz

➔ 6 Fallstudien innerhalb der EU

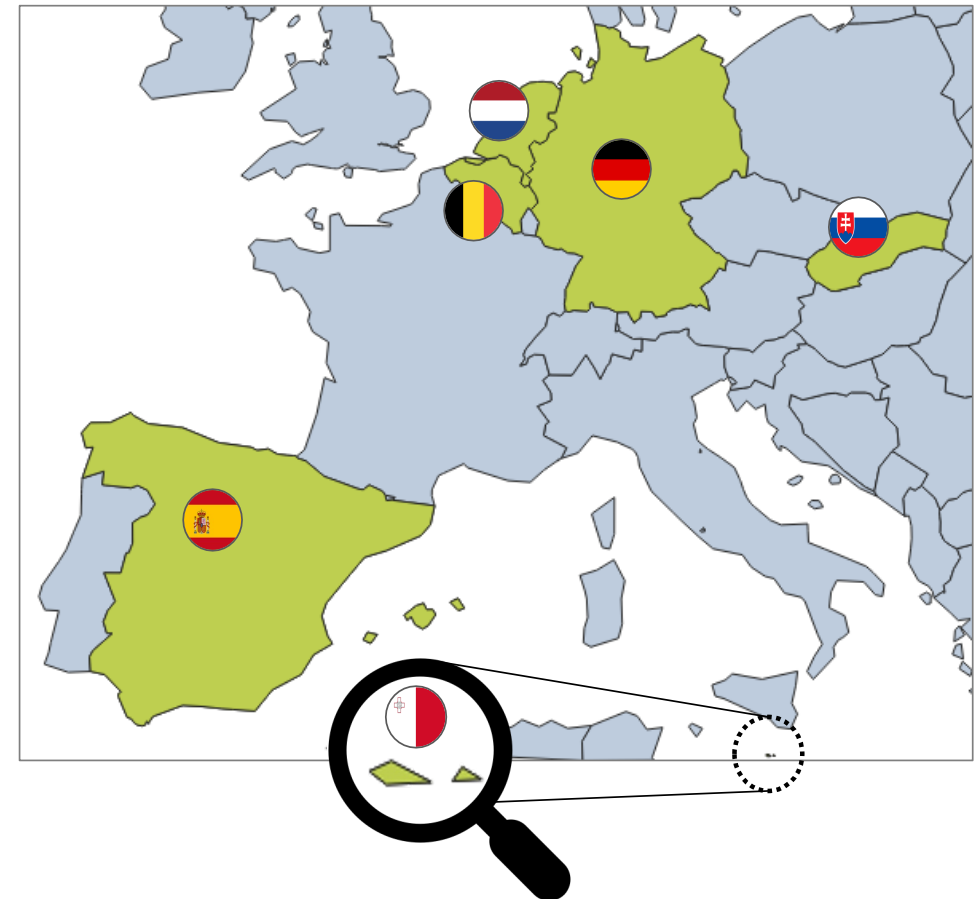


Abbildung1: Lage der Fallstudien des RETOUCH Nexus Projektes

# Fallstudie des Oberen Main

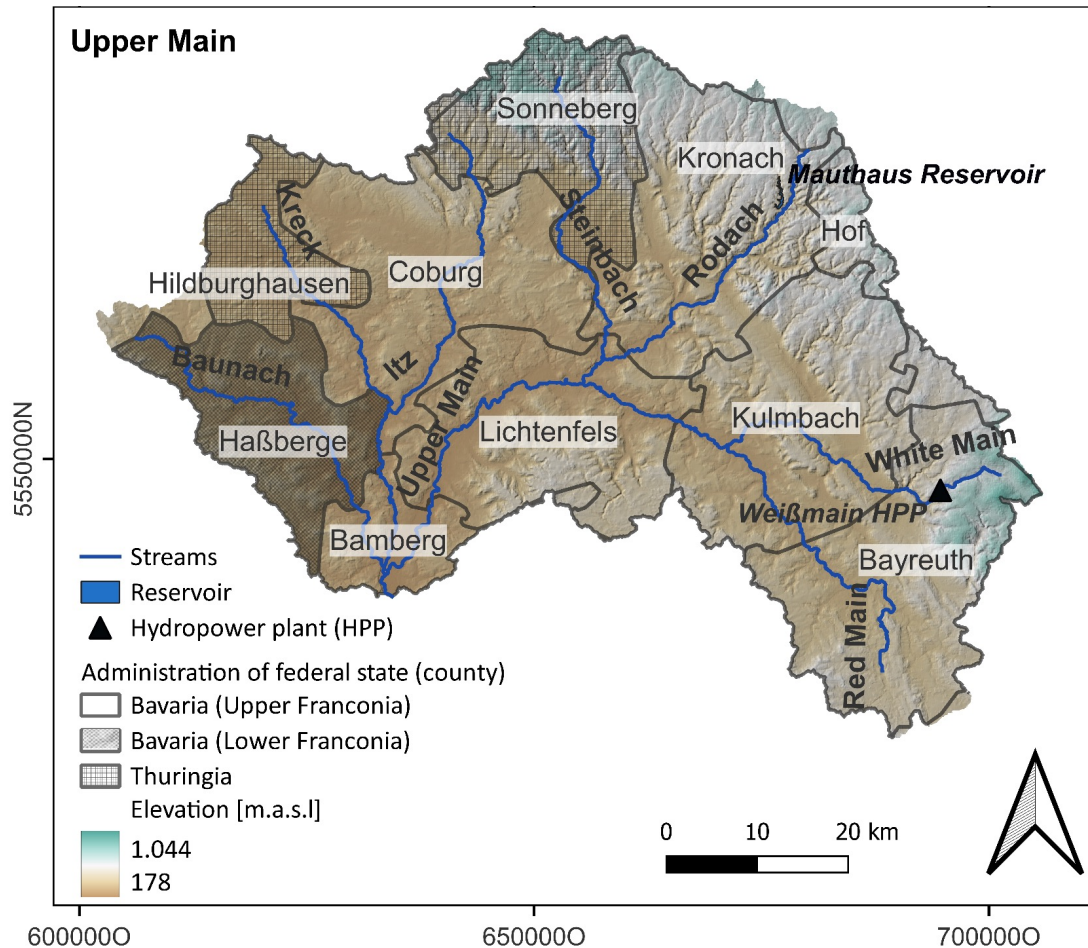


Abbildung 3: Lage des Oberen Maingebiets.

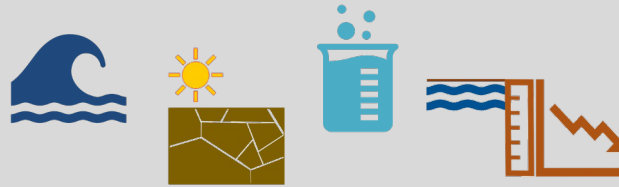
- **EZG-Größe:** 4.646 km<sup>2</sup>
- **Höhenlage:**
  - Ost-West-Gefälle
  - [178, 1044] müNN
  - ~ 75% in niedrigeren Lagen [178,500] müNN
- **Gewässernetz:**
  - Zwei Quellen:
    - Weißer Main
    - Roter Main
  - Weitere Nebenflüsse
- **Mauthaus Talsperre**
- **Weißmain-Kraftwerk**

# Motivation

## Stressfaktoren



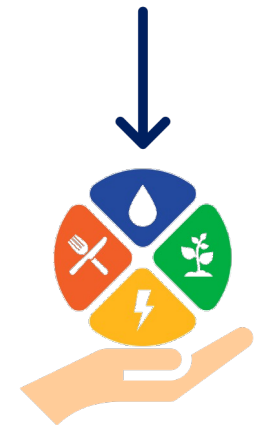
## Aktuelle Herausforderungen



## Neue Herausforderungen

Klima  
Sozioökonomie  
resiliente Anpassung

## Sektorübergreifender Dialog



## Modell Toolbox

# SWAT+



### (Dynamische) Landnutzungsänderungen

- Ent- bzw. Wiederbewaldung
- Urbanisierung
- Moorrenaturierung
- Fruchtfolgen
- Düngemittel- und Pestizid-Einsatz

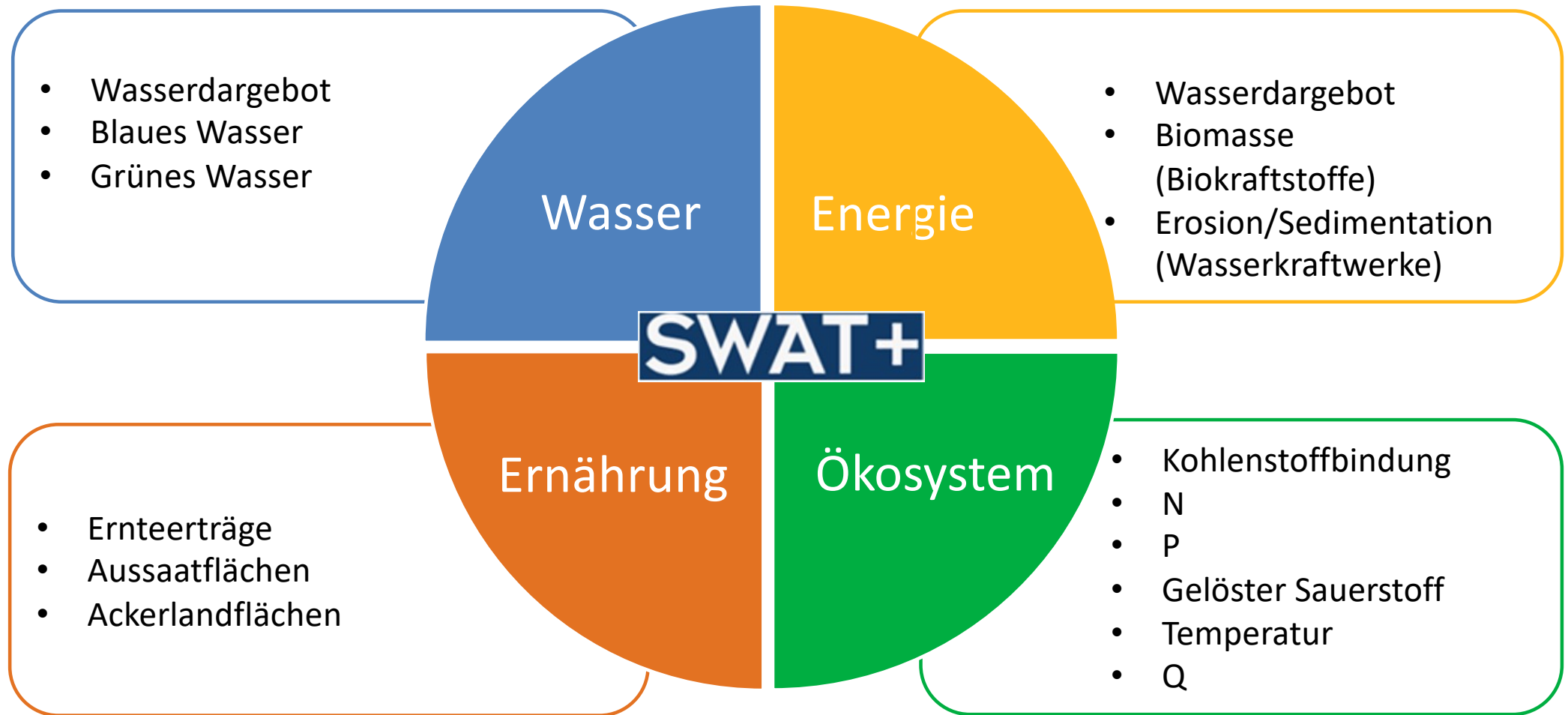
Bodenerosion  
Überschwemmungsgefahr  
Wassermangel  
Bodenwassergehalt  
Einfluss auf Ernte und Ökosysteme

### Naturbasierte Lösungen

- Wiederbewaldung
- Moorrenaturierung
- Regenrückhaltebecken
- Angepasste Bodennutzung
- Filter- / Pufferstreifen
- Angepasste Kulturen
- Bodenbearbeitung

Dürre- und Hochwasserschutz  
Erosionsschutz  
Nährstoffrückhalt  
Resilienz vor Effizienz

# WaterEnergyFoodEcosystem (WEFE) - Indikatoren



# Einbindung von Interessensvertretern

**Erstes Stakeholder Treffen:  
Regierung Oberfranken**



**Nächstes Treffen  
mit Interessensvertretern aller Sektoren  
Januar/Februar 2025**

Abbildung 7: Erstes Stakeholder Treffen mit der Regierung Oberfranken im Juni 2024.



# Fazit



- Speicherfähigkeit der bayerischen Landschaft wiederherstellen (bodenschonende Bearbeitungsmethoden, Wasserrückhaltmaßnahmen, Oberflächenwasser lenken und leiten)



- Hydrodynamische Niederschlags-Abflussmodellierung mit gekoppeltem Infiltrationsmodell ist geeignet für die Auswertung der Maßnahmen.



- **Messen, Modellieren, Monitoren (intelligente Modellwahl notwendig)**

- Dezentrale Speicherbecken und Grüne Gräben als kombinierte Maßnahme für Dürre- und Hochwasserschutz (Starkregen).



- Hochwasser, Dürre, Ökosystemfunktionen und Ökonomie systemisch denken!

- Resilienz vor Effizienz, naturbasierte Maßnahmen bevorzugen.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**