



Weiterentwicklung und Implementierung eines KI-gestützten Hybrid-Systems zur dynamischen Gefährdungsbeurteilung von Deponien – Erkenntnisse aus der Praxis

21. Deponiefachtagung 12.03.2025

Dr.-Ing. Julian Hofmann
FloodWaive Predictive
Intelligence GmbH

Christoph Bröcker
Abfallwirtschaftsgesellschaft
Grafschaft Bentheim mbH

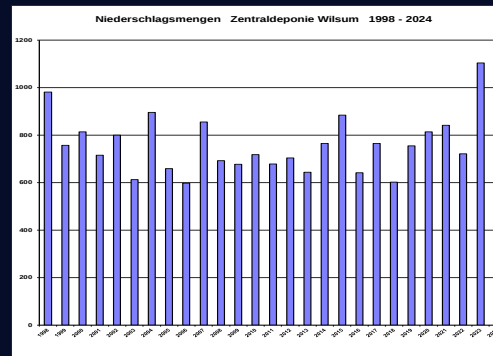


Sickerwasser-/Niederschlagsituation in Niedersachsen

10/2023 – 03/2024

- Flächendeckende Situation in NS
- Niederschlag: Bis zu 120 % über langjährigem Mittel (durchschnittlich +47 %)
- 60 % Fremdentorgung erforderlich
- Maßnahmen
- Entsorgung in geeignete Anlagen
- Speichern in Deponie, Havariebecken
- Keine Havarie

Bild: Deponie Wilsum 01/24



2023 regenreichste Jahr seit

30 Jahren: 1.100 mm

- + 50 % über langjährigem Mittel
- Januar bis Juni: Ca. + 15 %
- Juli bis Dezember: Ca. + 70 %

Luftbild Deponie Wilsum II 06.07.2023



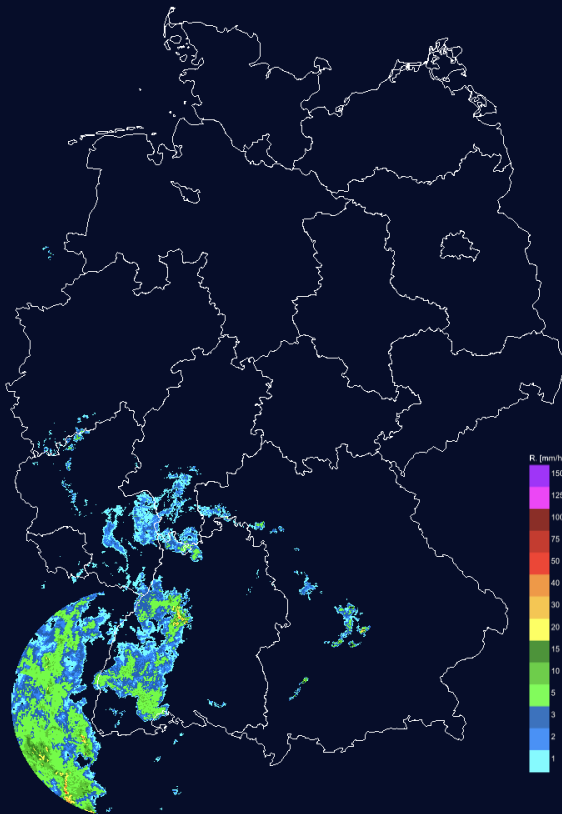
Luftbild Deponie Wilsum II 14.01.2025



Zahlreiche Vorhersagen | Was sind die Auswirkungen?

Niederschlagsvorhersage Juli 2021

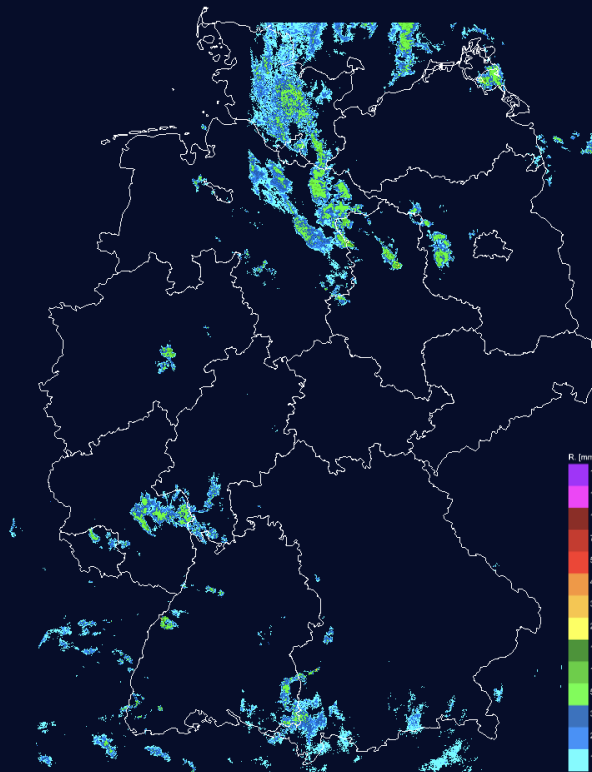
DWD Rainfall 12.07.2021 22:00



Animation: FloodWaive Predictive Intelligence GmbH
Source: Deutscher Wetterdienst, RADOLAN 2021

Niederschlagsvorhersage Mai / Juni 2024

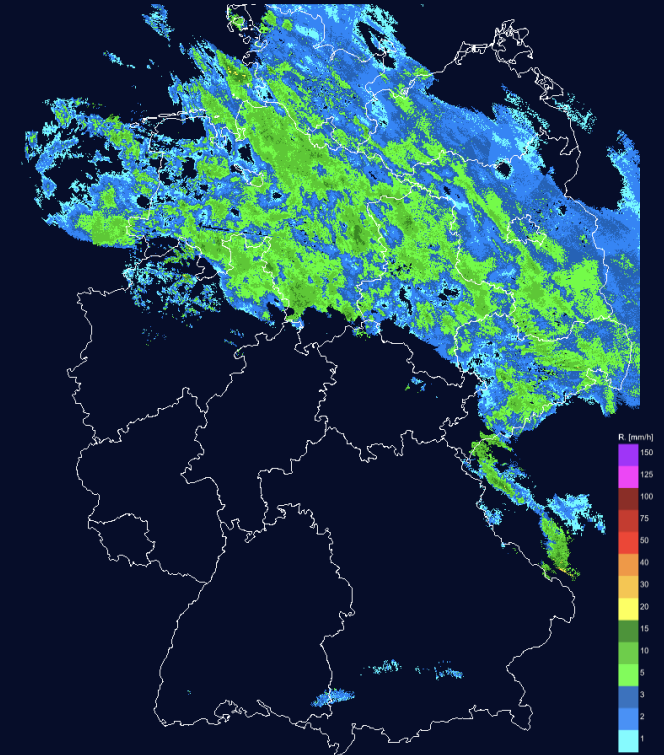
DWD Rainfall 31.05.2024 00:00



Animation: FloodWaive Predictive Intelligence GmbH
Source: Deutscher Wetterdienst, RADOLAN 2024

Niederschlagsvorhersage Winterhochwasser 2023/24

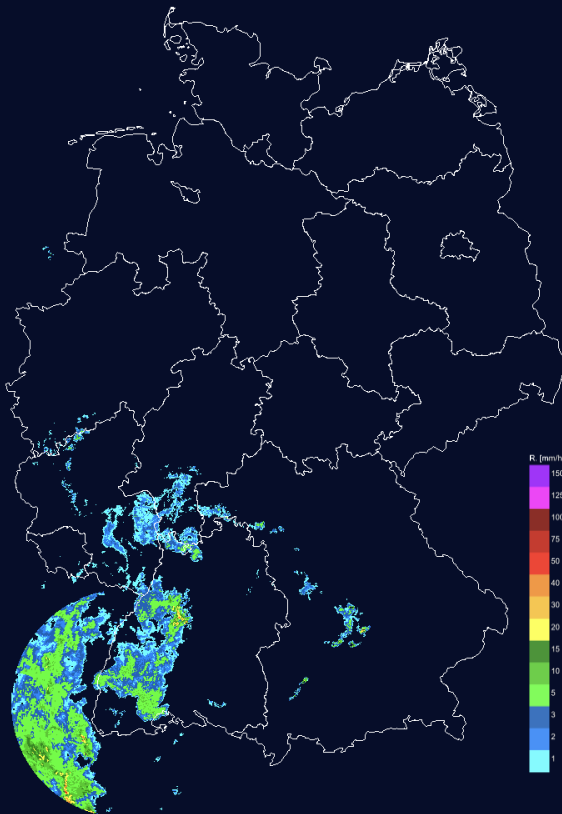
Rainfall 24.12.2024 00:00



Zahlreiche N-Vorhersagen | Keine Impaktvorhersagen verfügbar!

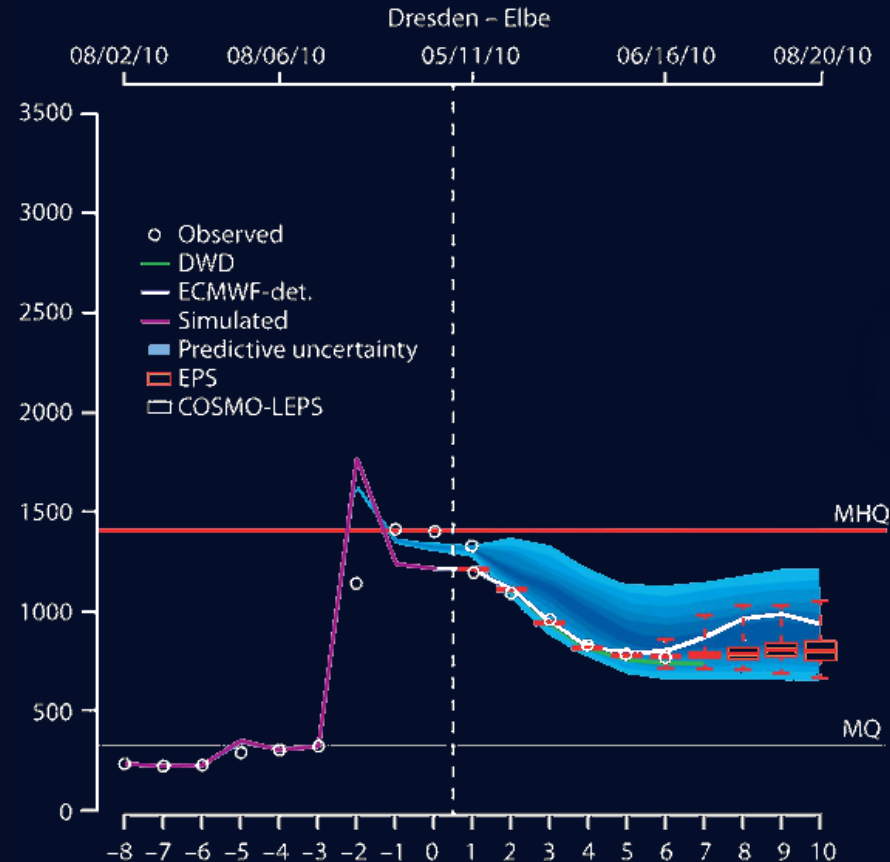
Niederschlagsvorhersage Juli 2021

DWD Rainfall 12.07.2021 22:00



Animation: FloodWaive Predictive Intelligence GmbH
Source: Deutscher Wetterdienst, RADOLAN 2021

Abflussvorhersagen an Pegeln großer Flüsse



Quelle: Schreiner, 2022 - Elbe

Problem

keine Auswirkungen
ableitbar!



Rechenzeit klassischer
2D-Modelle > 48h

Variable dynamische Niederschlagsereignisse & Randbedingungen

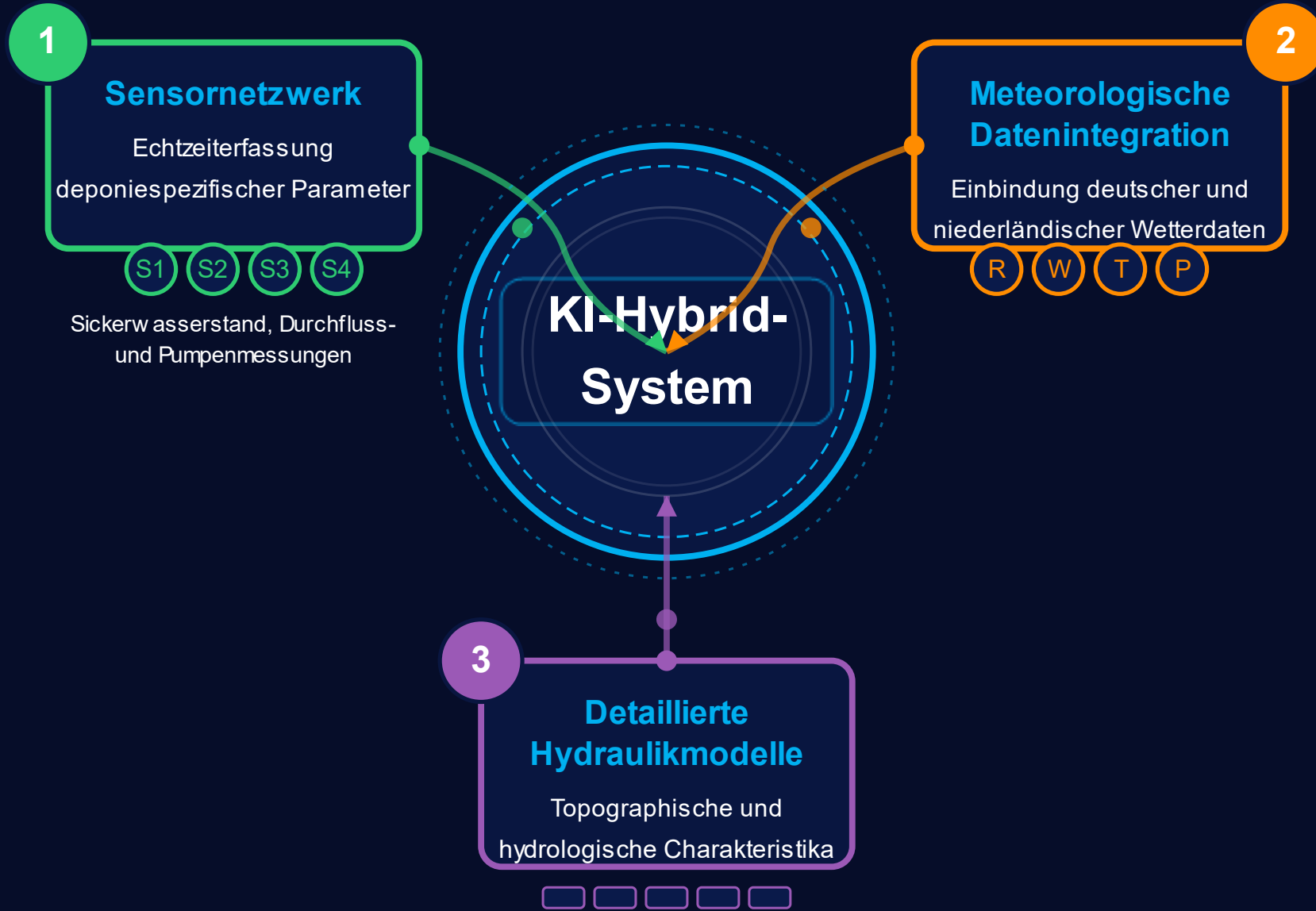
Kläranlage Sinzig Starkregenereignis Juli 2021



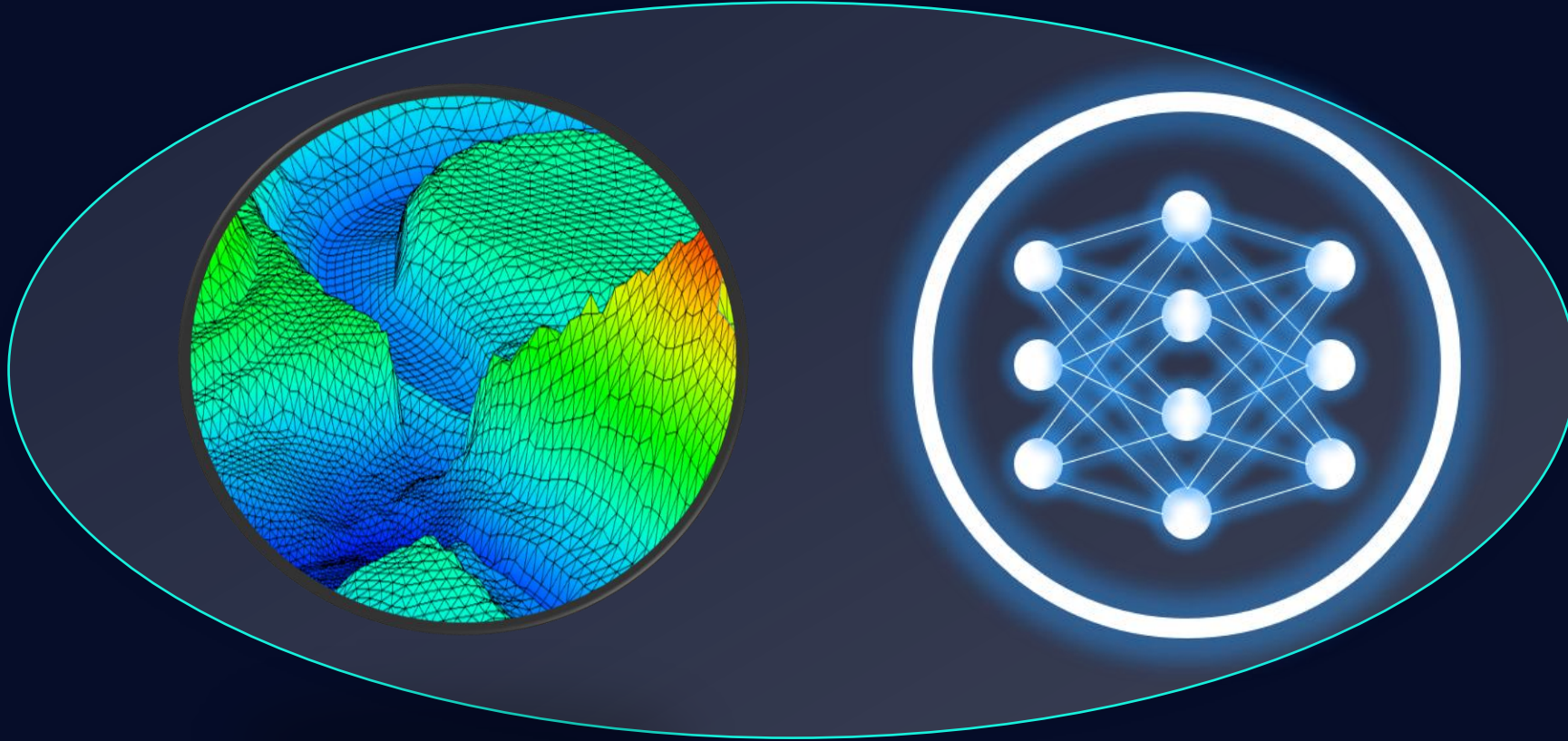
Zentraldeponie Wilsum Januar 2024



Integration (1) insitu Sensorik, (2) Wetterdaten & (3) Physik-Modelle



Fusion: Physikalische Modelle mit Künstlicher Intelligenz



Kurze Rechenzeit

Hohe Modellgüte

Hohe Skalierbarkeit

Enorme Rechenanforderungen 2D Hydraulische Simulationen

Kontiunität: $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}h}{\partial y} = 0$

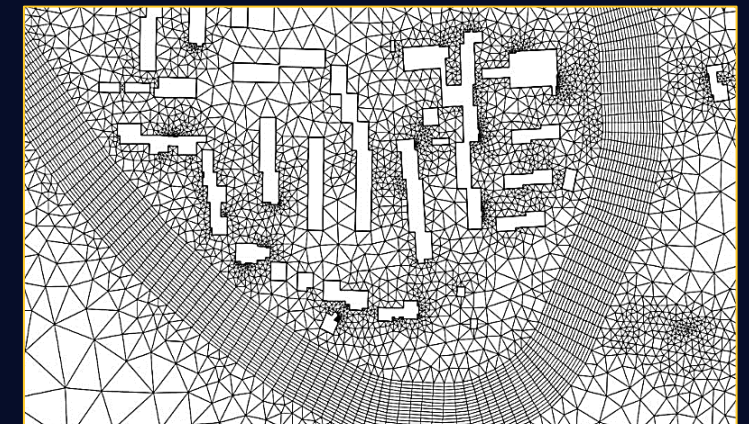
X Impuls: $\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial x} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{bx}}{p} + v \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} D_{xx} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x} D_{xy}$

Y Impuls: $\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{u} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = -g \frac{\partial z_w}{\partial y} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{by}}{p} + v \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} D_{xy} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial y} D_{yy}$

- (1) Lokale Beschl.
- (2) Konvekt. Beschl.
- (3) Gravitationskraft
- (4) Sohlreibung
- (5) Innere Reibung
- (6) Dispersion

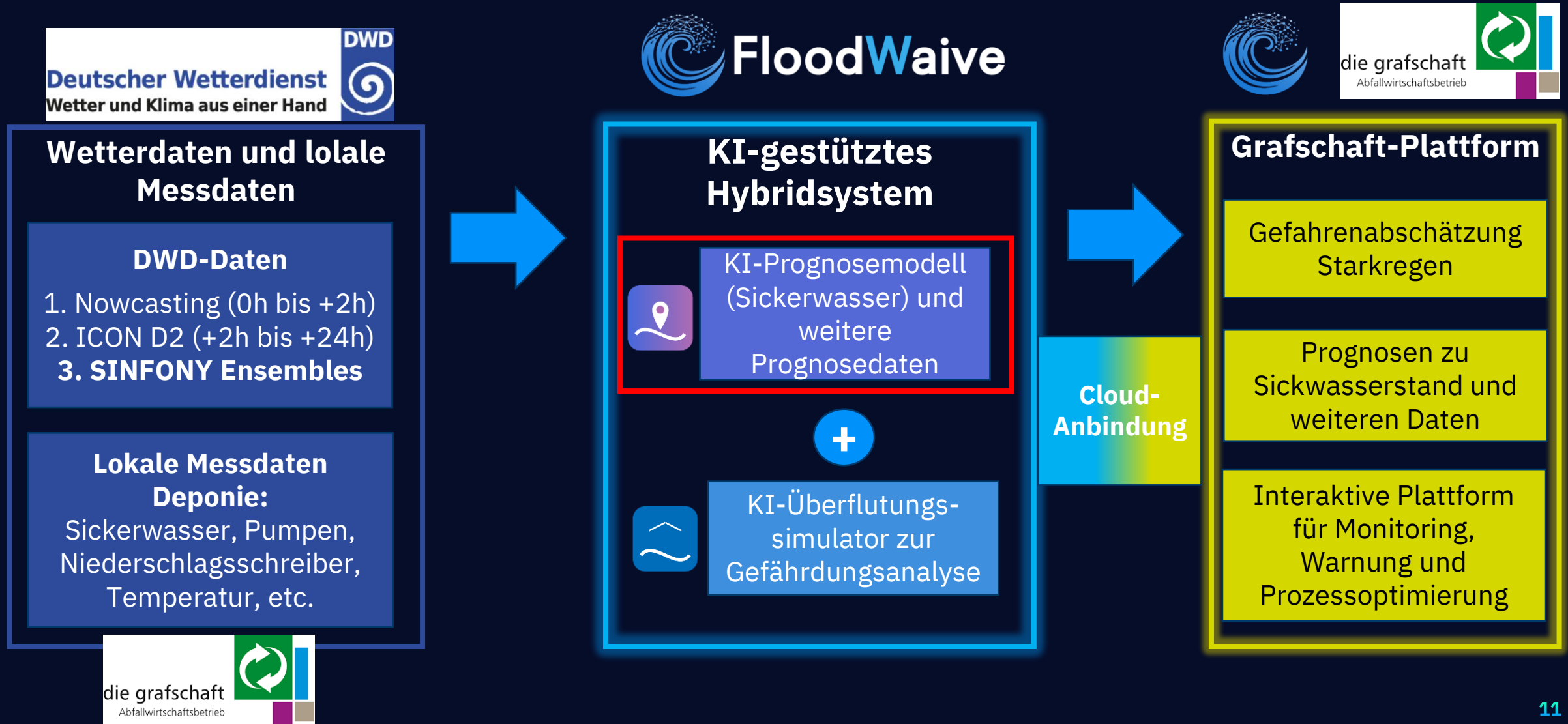
Verwendung von 2D physikalisch-basierter Modelle als Training

- Lösung der vollständigen 2D Flachwassergleichung
- Räumliche & zeitliche Diskretisierung: Finite Volumen Verfahren
- Flexible Mesh: Lokale Anpassungen der Auflösungen möglich
- Grundlage für das Training des KI-Modells DeepWaive

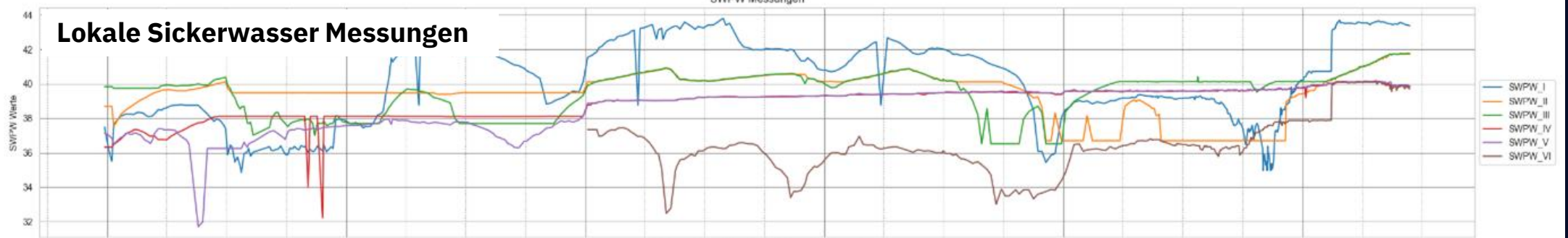


Lösung der 2D Flachwassergleichung für jede Zelle!

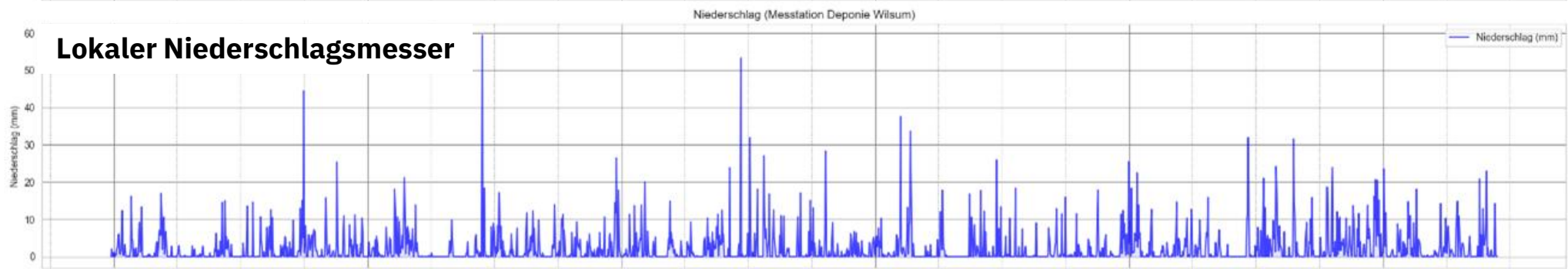
Datenfluss und Verarbeitung und Monitoring



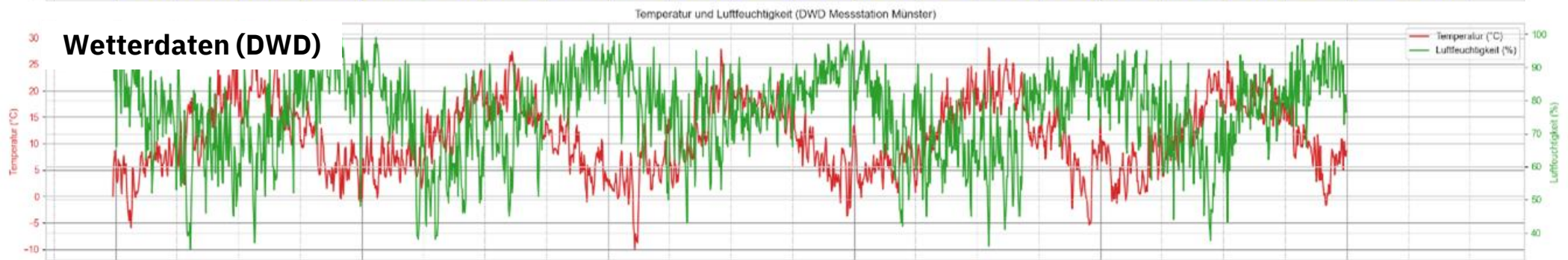
Lokale Sickerwasser Messungen



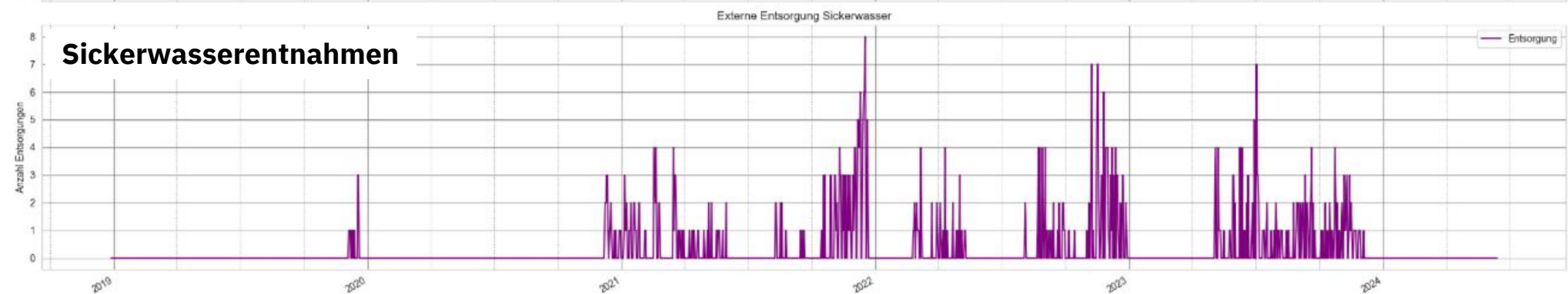
Lokaler Niederschlagsmesser



Wetterdaten (DWD)



Sickerwasserentnahmen



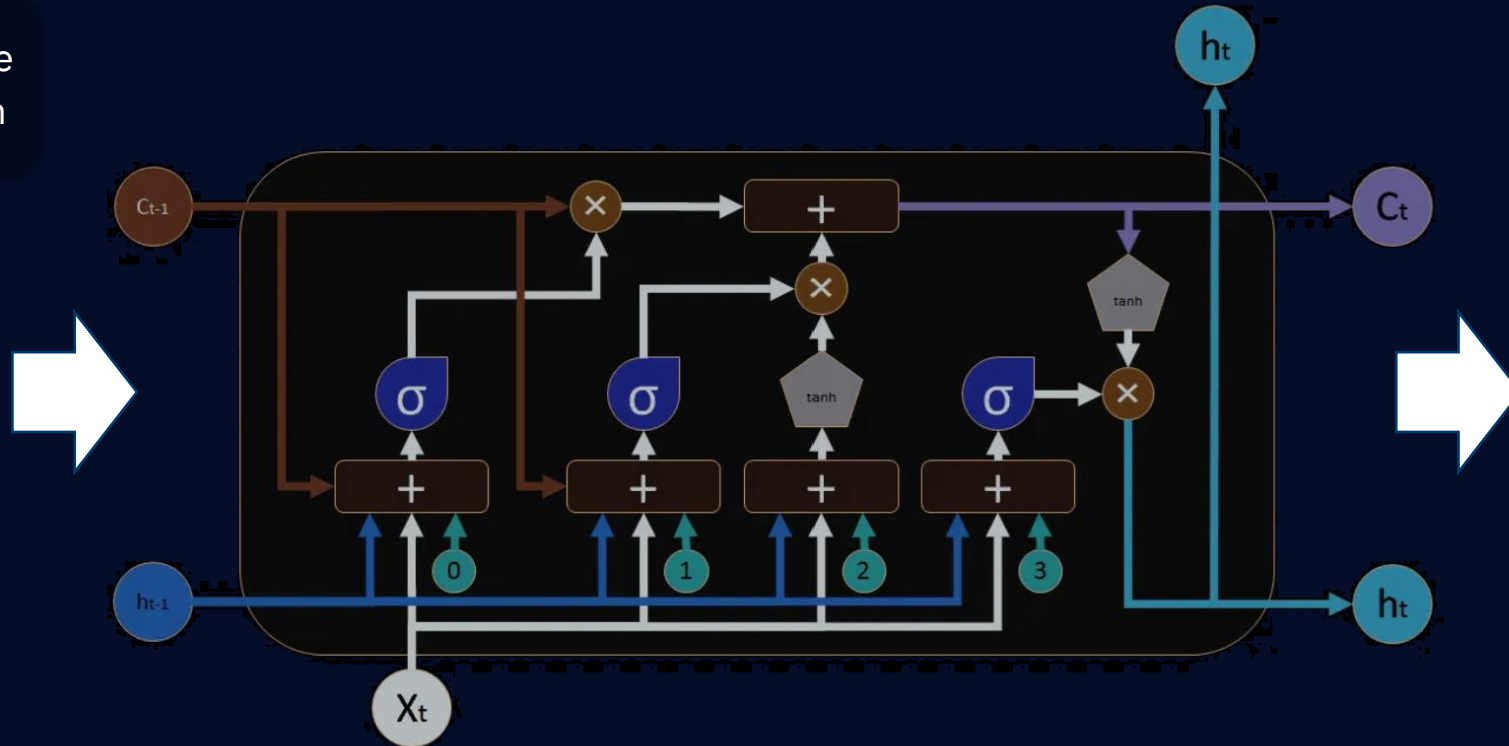
Funktionsweise und Training LSTM | Sickerwasserstandsprognose

Kurzfristige und langfristige
Niederschlagsvorhersagen

Niederschlagsdaten
Temperatur, Feuchte

Gemessene
Sickerwasserstände
Pumpenwerte

Weitere Geodaten
und Daten der
Deponie



Prognose zu
Sickerwasserstand
bei dynamischen
neuen Wetterlagen

Inputs:



Input vector



Memory from
previous block



Output of
previous block

outputs:



Memory from
current block



Output of
current block

Nonlinearities:



Sigmoid



Hyperbolic
tangent

Bias:



Vector operations:

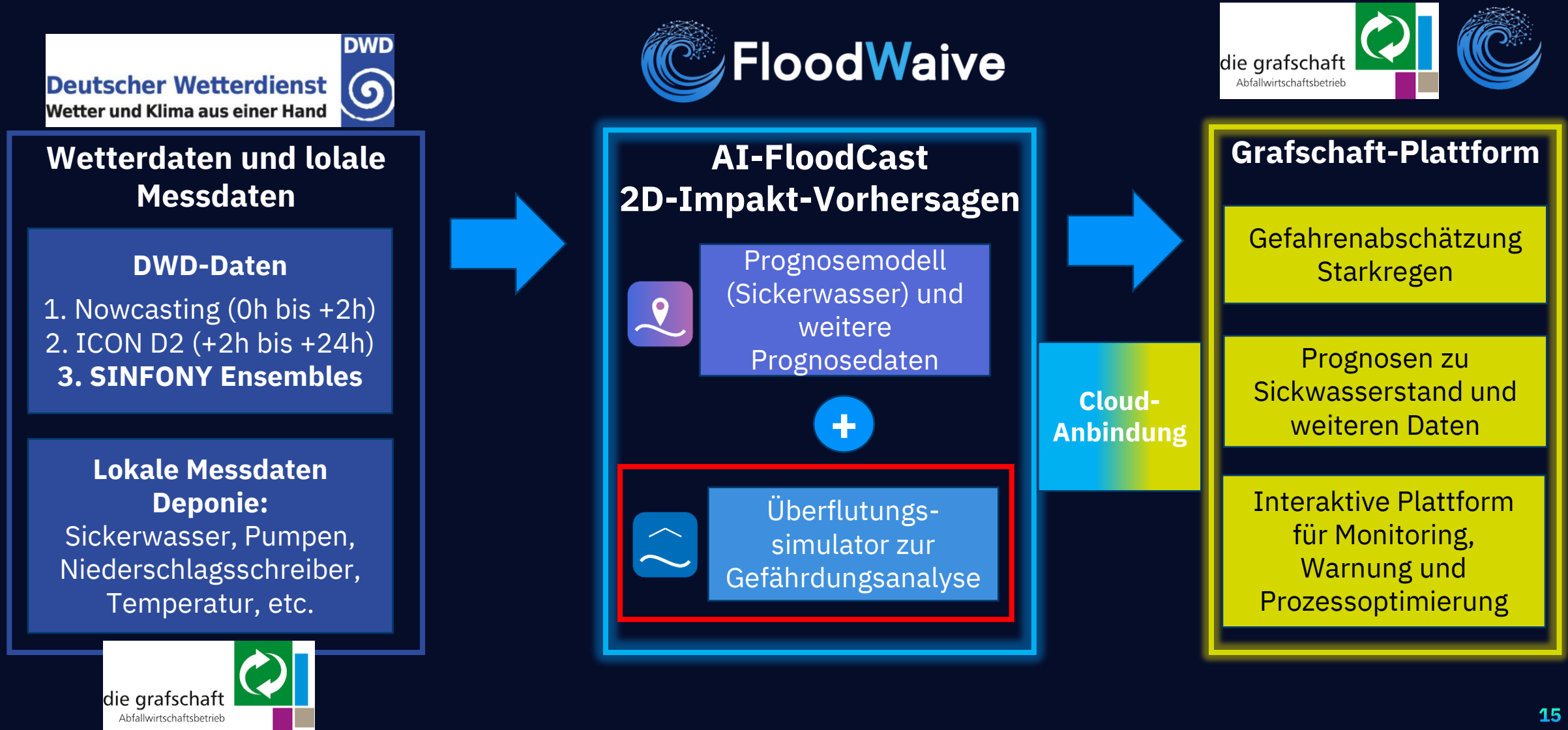


Element-wise
multiplication

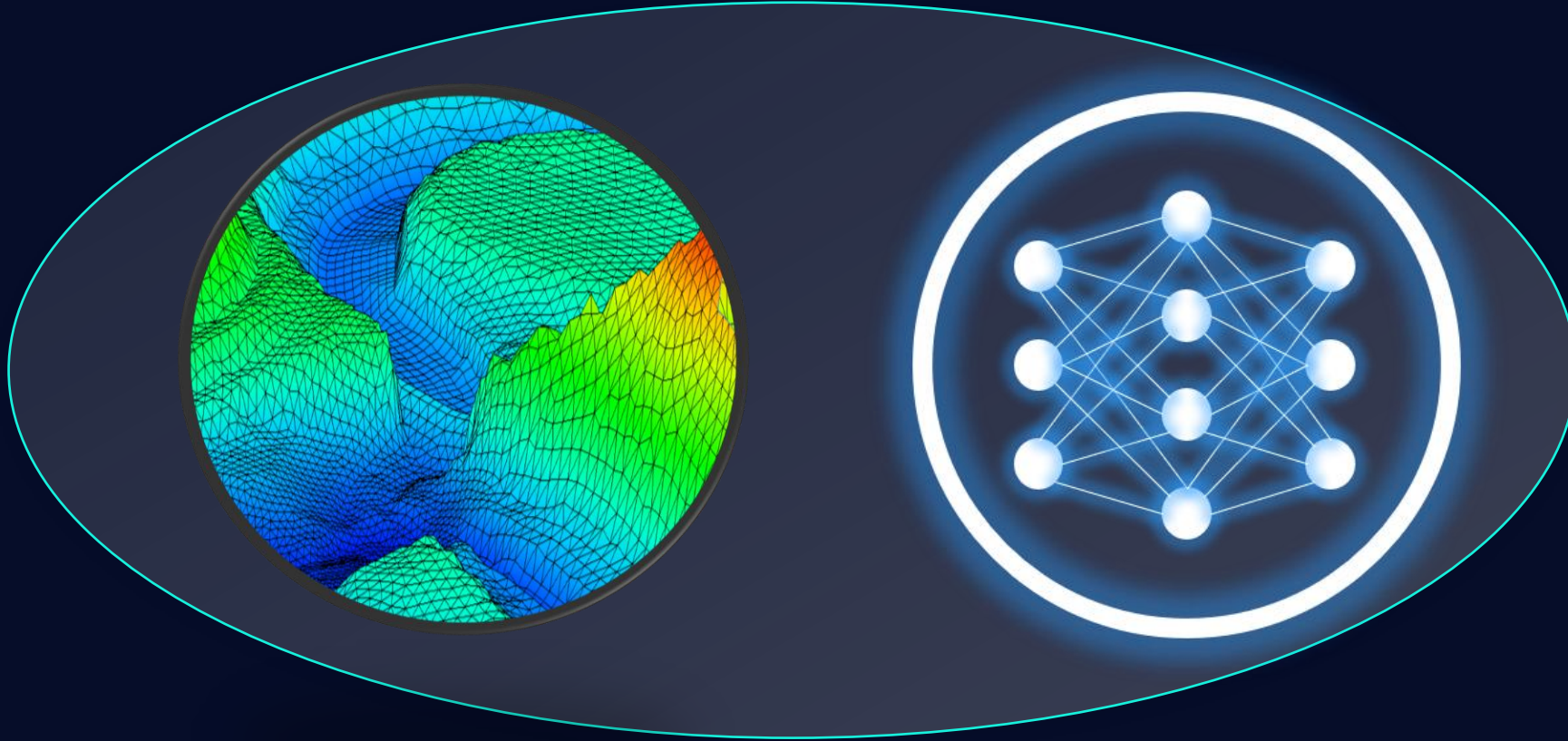


Element-wise
Summation /
Concatenation

Datenfluss und Verarbeitung und Monitoring



Fusion: Physikalische Modelle mit Künstlicher Intelligenz



Kurze Rechenzeit

Hohe Modellgüte

Hohe Skalierbarkeit

BENCHMARKING

Vergleich: Hydraulisches 2D-Modell mit KI-Hybrid-Modell

2D Hydrodynamisches Modell

Rechenzeit: 780 min

Heterogener Niederschlag: 50mm/h



Water Depth [m]

DeepWaive Model

Rechenzeit: 0.25 sec

Heterogener Niederschlag: 50mm/h



Water Depth [m]

Performance Vergleich

Beschleunigung: 10⁵

R²: 0.301
RMSE: 0.00



Water Depth Differences [m]

FloodWaive KI-Hybrid-Modell

Rechenzeit: 1 sec

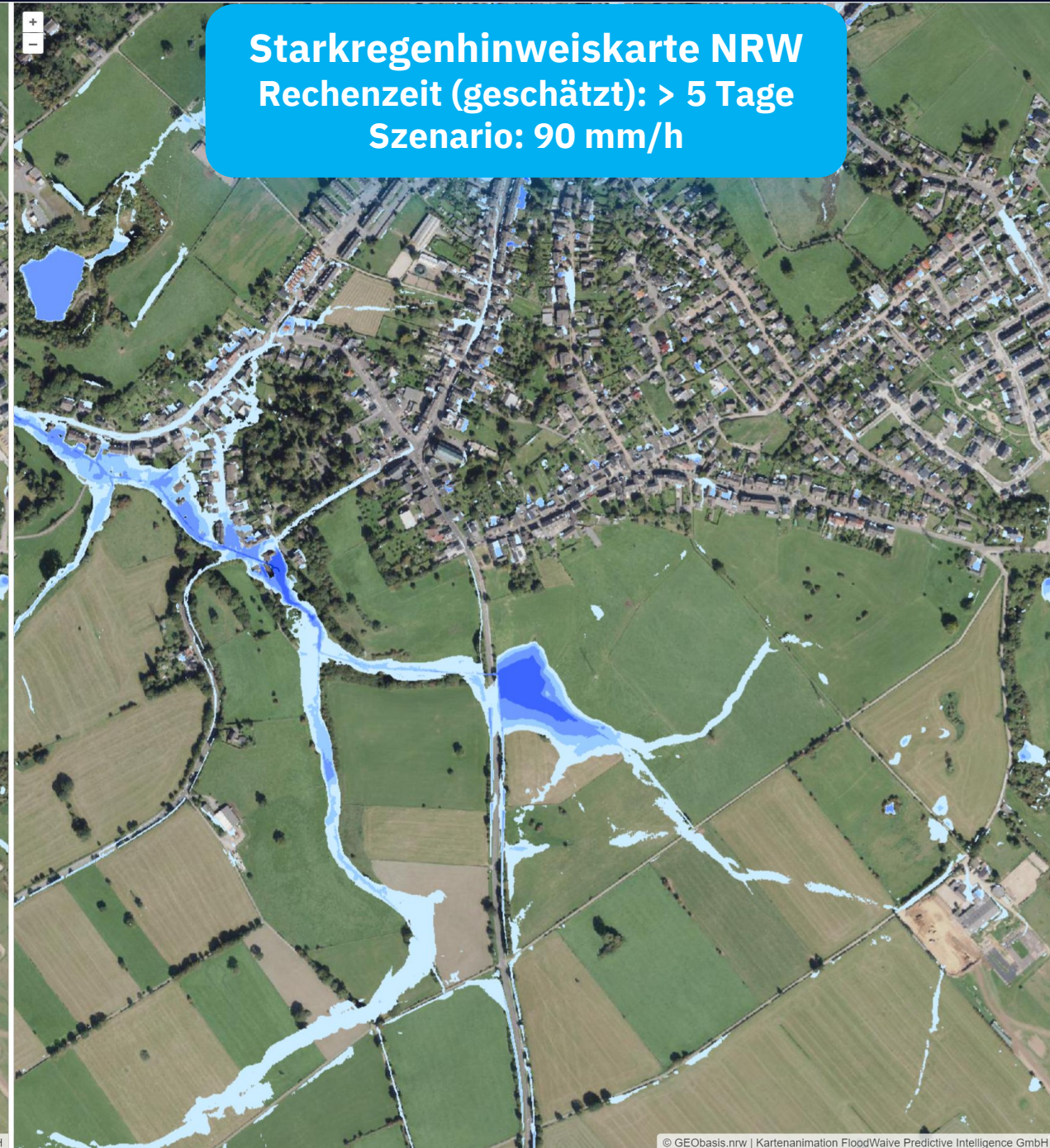
Szenario: 90mm/h



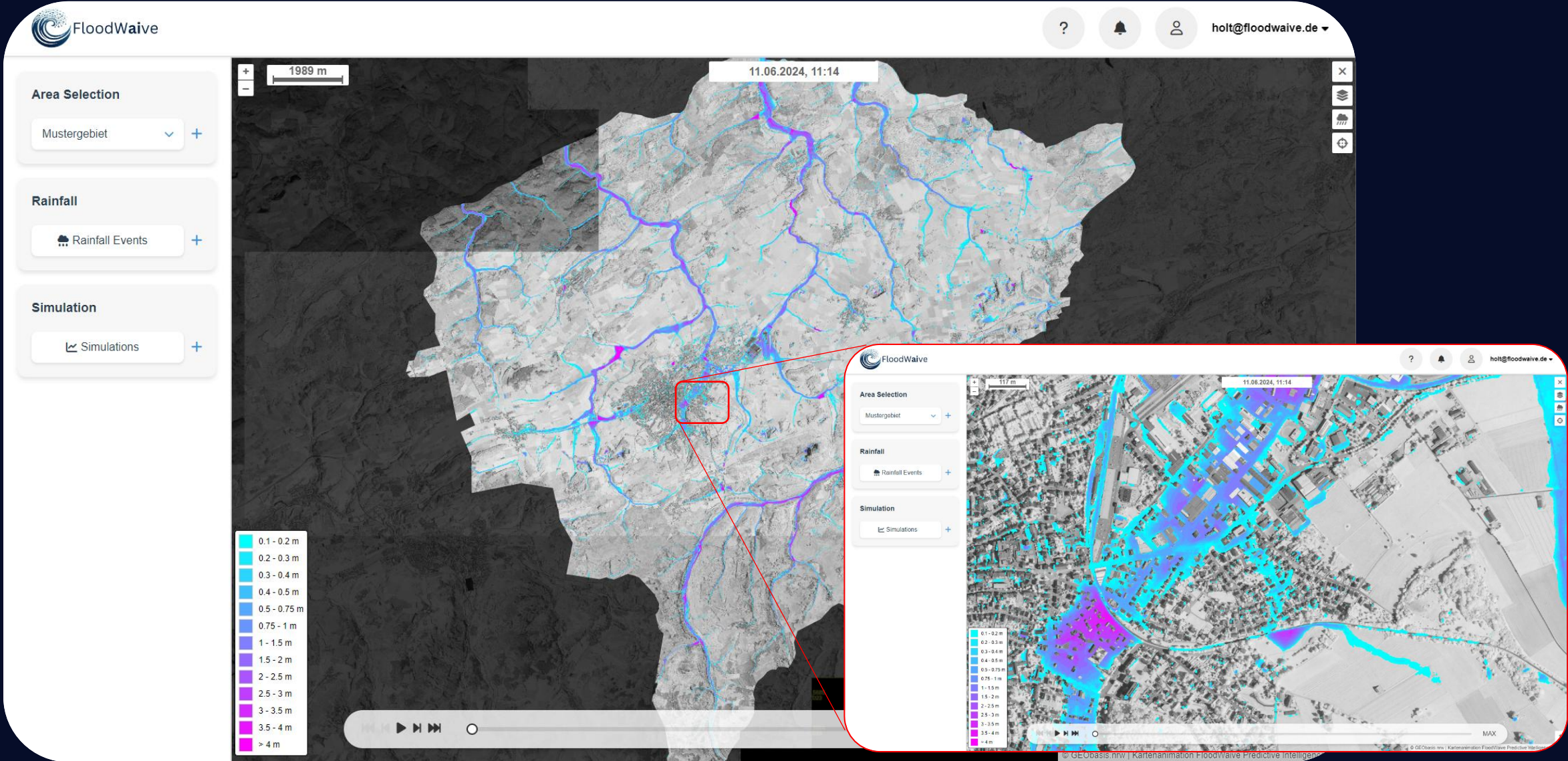
Starkregenhinweiskarte NRW

Rechenzeit (geschätzt): > 5 Tage

Szenario: 90 mm/h



Sehr große Gebiete | 1 m Auflösung | 1 Sek. Rechenzeit



Gefahrenbeurteilung Starkregen und Überflutungen





Legende

Topografie
Zentraldeponie
Wilsum II

 Analysegebiet
 Deponiegelände



Gefahrenbeurteilung Starkregen und Überflutungen



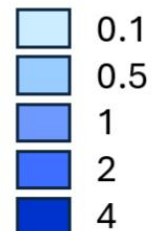
Szenario

Ereignis:
intensiv (30a)
 $d = 1 \text{ h}$

Dargestellter
Zeitpunkt nach
Ereignisbeginn:
2 h

Legende

Max.
Überflutungstiefen
[m]



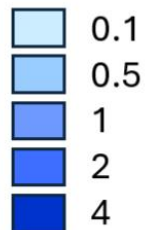
Szenario

Ereignis:
außergewöhnlich
(100a)
 $d = 6 \text{ h}$

Dargestellter
Zeitpunkt nach
Ereignisbeginn:
7 h

Legende

Max.
Überflutungstiefen
[m]

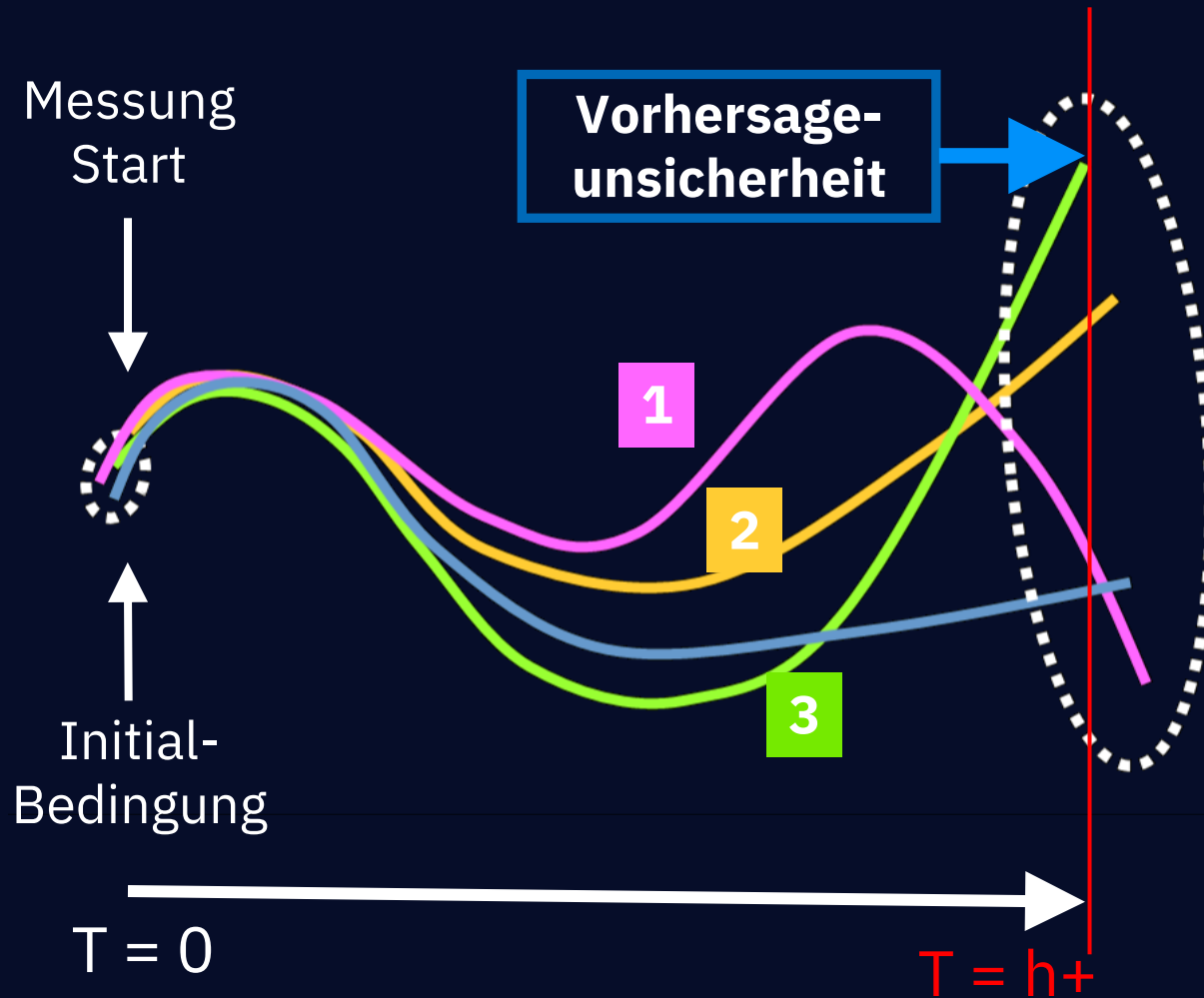


Dauerstufe	Intensiv (30a)	Außergewöhnlich (100a)	Extrem
$d_1 = 1 \text{ h}$	36,8 mm	46,5 mm	90 mm
$d_6 = 6 \text{ h}$	57,9 mm	73,3 mm	-

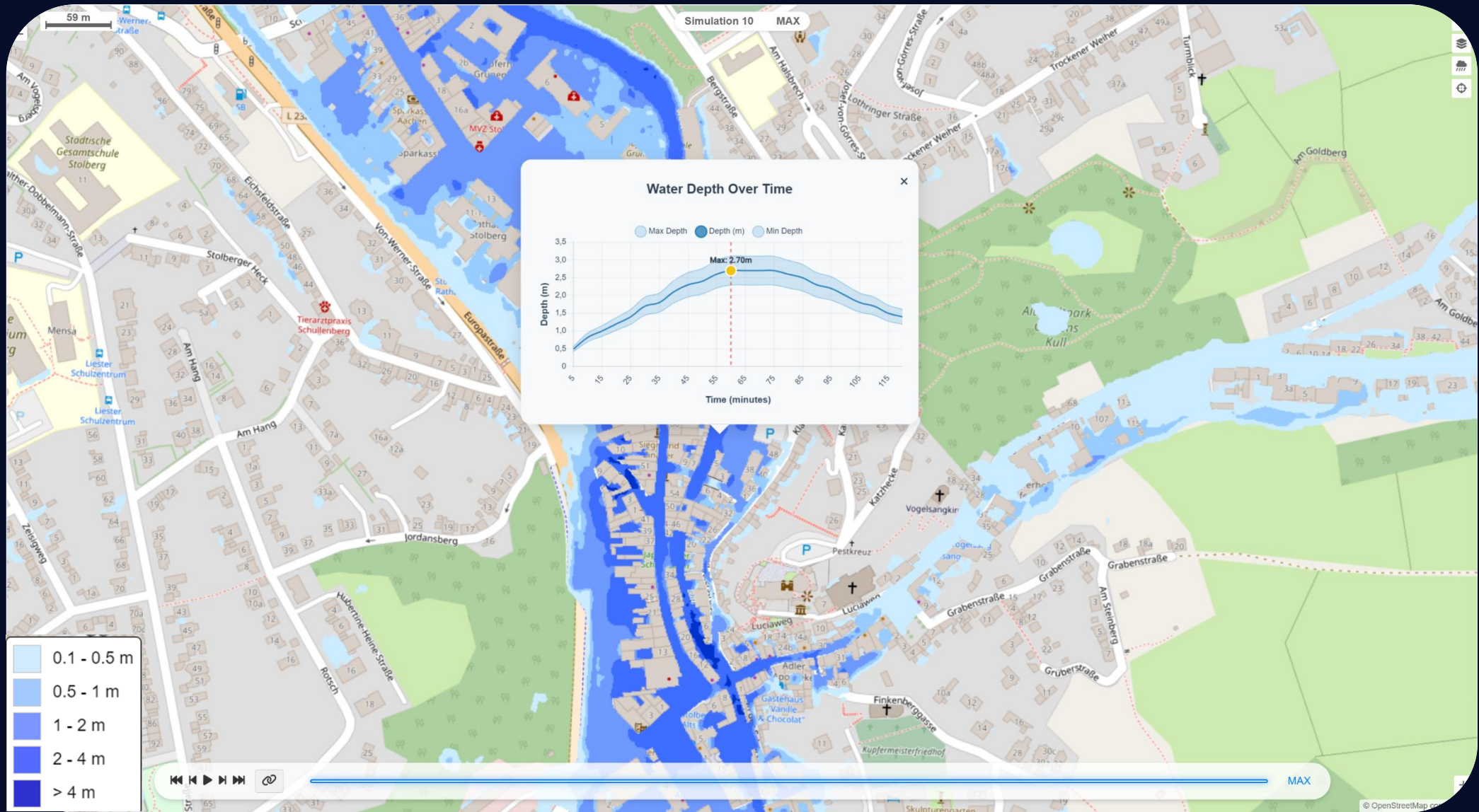




Verfahren der ensemble-basierten Überflutungsvorhersage



Probabilistische Überflutungsvorhersage



Evaluation und Potenziale des KI-Hybrid Systems

1. Ganzheitliche Prozessbetrachtung:

- Integrierte Datenanalyse und multivariate Korrelationsmodelle
- Identifikation und Optimierung kritischer Prozessvariablen und deren Wechselwirkungen

2. Validierungsergebnisse:

- Performanceanalyse zeigt vielversprechende Prädiktionsgüte
- Verbesserungspotenzial durch erweiterte Messpunktdichte und Langzeitdatenreihen

3. Übertragbarkeit & Erweiterung:

- Adaptierbarkeit auf weitere Deponiestandorte durch modulare Systemarchitektur und API-basierte Integration in Systeme

4. Ingenieurtechnische & Regulatorische Aspekte:

- KI-Spezialwerkzeug im ingenieurtechnischen Entscheidungsprozess
- Verantwortungsvolle KI-Nutzung – technisches Verständnis bleibt Grundvoraussetzung – kritische Prüfung notwendig





FloodWaive



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

FloodWaive Predictive Intelligence GmbH

Jülicher Straße 209d, 52070 Aachen

info@floodwaive.de

www.floodwaive.de



AI RiskAnalyzer

Rapid Risk Analytics
and Dynamic Evaluation
of Protective Measures



AI FloodCast

Impact-based
Flood Forecasting
and Early Warning



Flood Risk Consulting

Event Location-based
Flood Risk Profiling
and Assessment

Datenfluss- und Funktionsweise der Plattform

