

Fluss- und Abwasserwärme in Hessen

Potenziale und Anwendungschancen

*U. Jordan, T. Morck, N. Siebert, V. Liese, L. Höft, D. Laner, I. Vateva,
L. Scharenberg, S. Theobald, J. Zipplies, J. Sieglar, B. Schäfer, O. Kusyy, K. Vajen*

1. Abwasser: Wärmeentzugspotenziale
2. Fließgewässer: Wärmeentzugspotenziale & Simulation mehrerer Wärmeentnahmen aus einem Gewässer
3. Verschneidung Wärmeentzugspotenziale mit Bedarfen

Förderung/Auftraggeber



HESSEN
Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie, Verkehr,
Wohnen und ländlichen Raum



Fließgewässer:

- Wärmeentzug mit Wärmepumpen
- Abkühlung der Gewässer

Fachgebiete Solar & Anlagentechnik + Wasserbau & Wasserwirtschaft

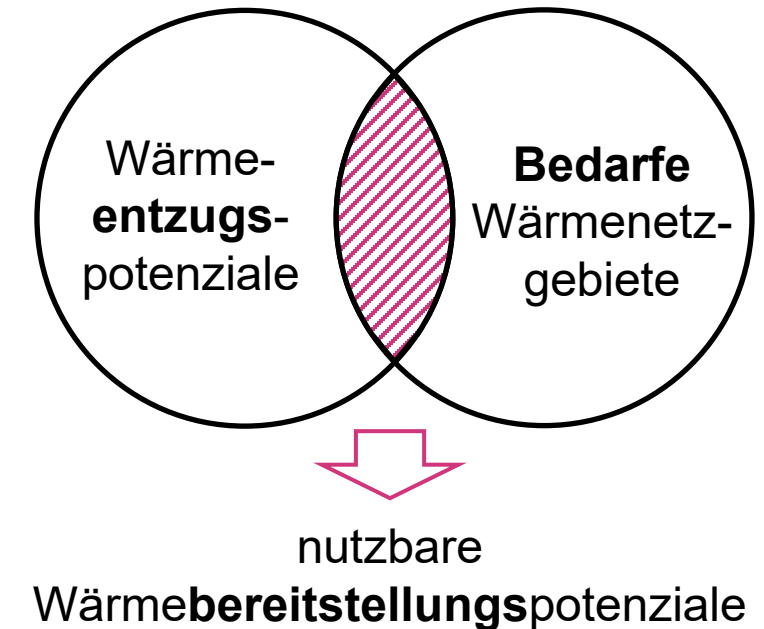


Abwasser:

- Wärmepumpen am Auslauf von Kläranlagen

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft

Tagesaufgelöster Abgleich für alle Kommunen:



Ziele:

1. Potenzialabschätzung mit hoher Genauigkeit (Saisonalität, Einschränkungen)
2. Unterstützung der kommunalen Wärmeplanung

Wärmenutzung aus dem Auslauf von Kläranlagen

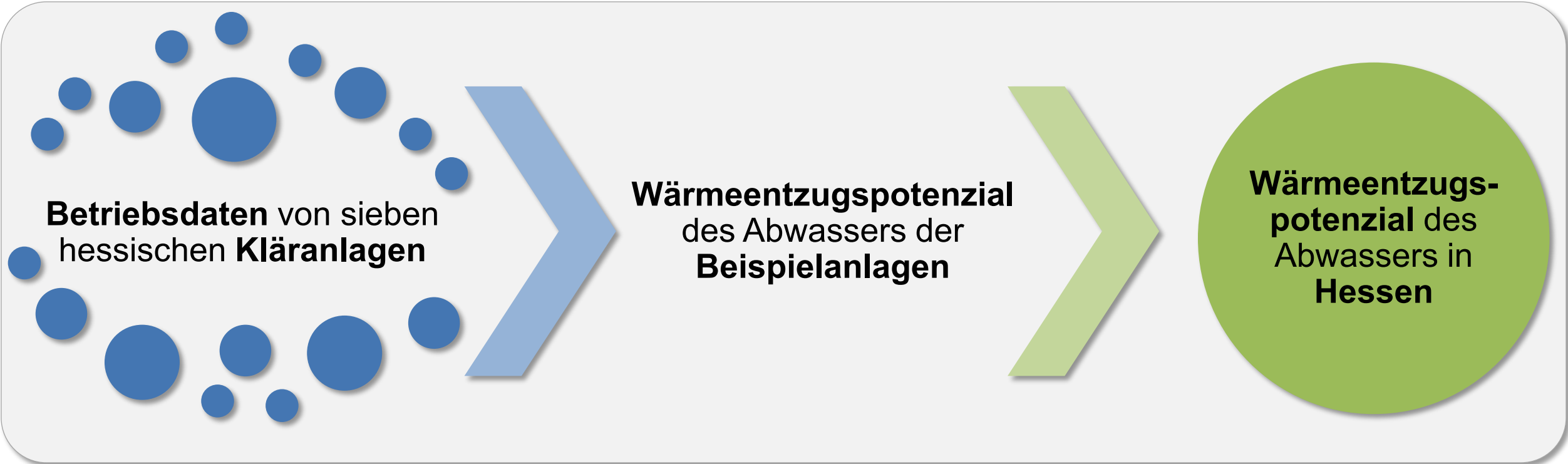
Potenziale für Hessen

Förderung/Auftraggeber



HESSEN
Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie, Verkehr,
Wohnen und ländlichen Raum

Abwasser: Vorgehensweise



Betriebsdatenauswertung und Berechnung des **Wärmeentzugspotenzials** als **Jahresgang**

$$W_{Abw} = c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{T,d} \cdot \Delta T$$

Übertragbarkeit der Ergebnisse auf alle Kläranlagen in Hessen (> 1.000 EW)

→ Simulation der **Jahresprofile** von $\dot{V}_{T,d}$ und ΔT

Abwasser: Datengrundlage



Betriebsdaten von 7 hessischen Beispielkläranlagen

- Ausbaugröße
- Täglicher Abfluss
- Tagestemperatur des Abwassers

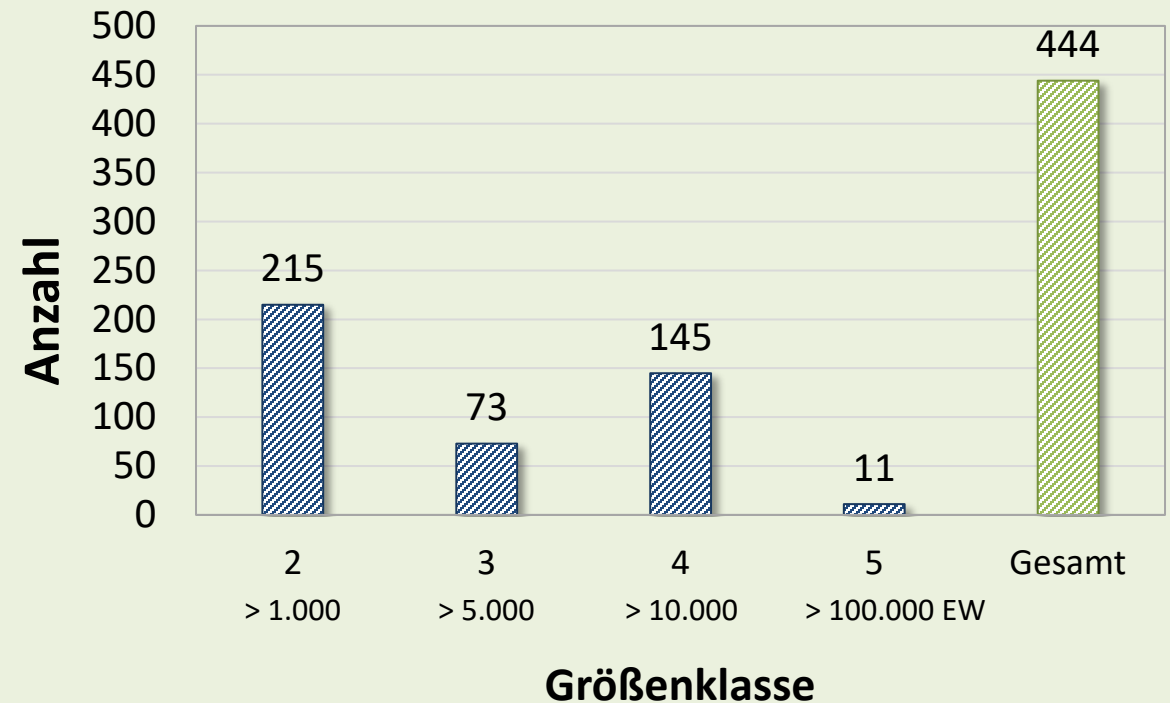
Parameter	Einheit	Wert
Ausbaugröße	[EW]	2.000 – 95.000
$\dot{V}_{T,d,aM}$	[m ³ /d]	280 – 11.050
Mittlere Jahrestemperatur	[°C]	11,6 – 15,9

Kriterien für Auswahl der Beispielkläranlagen

- Behandlung von kommunalem Abwasser
- Breites Spektrum an Ausbaugrößen
- Technische Anlage

Hessenweite Daten aus Leistungsvergleich DWA Landesverband Mitte

- Ausbaugröße
- Jahresschmutzwassermenge

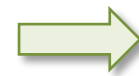


Abwasser: Saisonale Verläufe von Temperatur & Abfluss

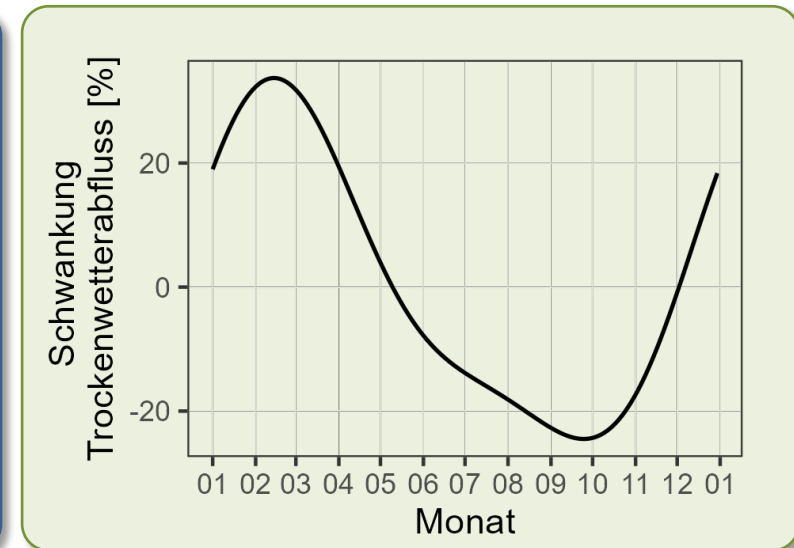
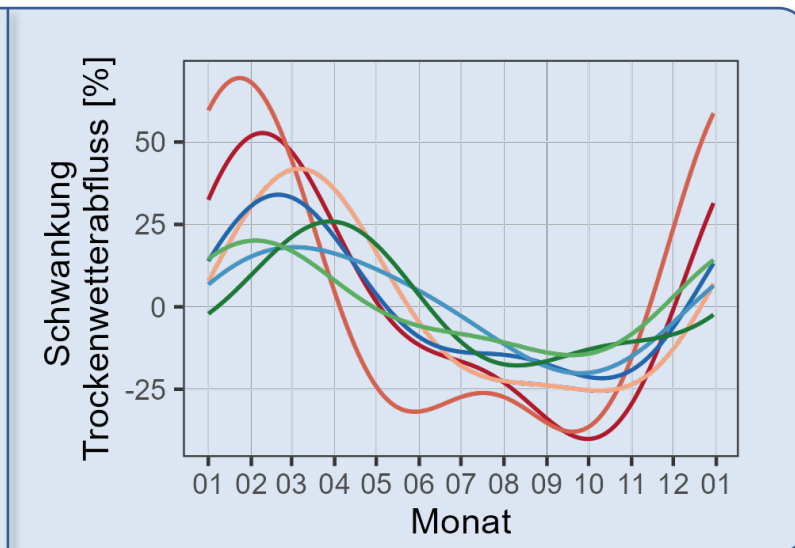
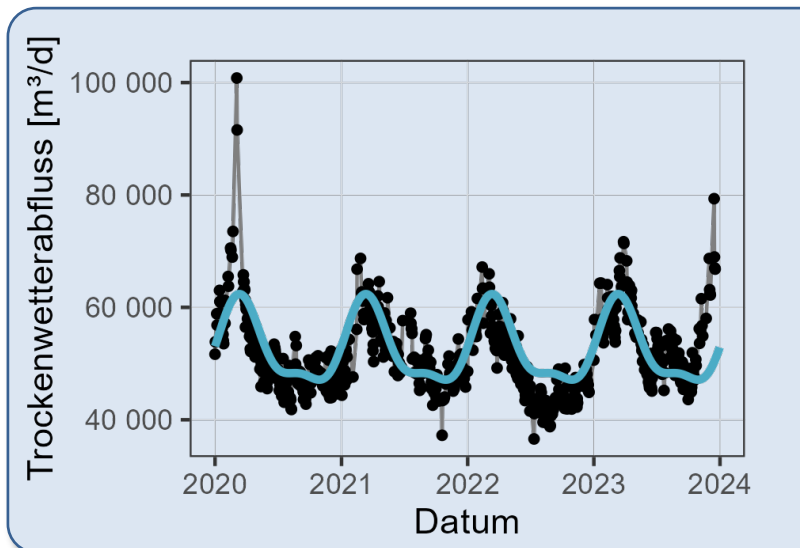
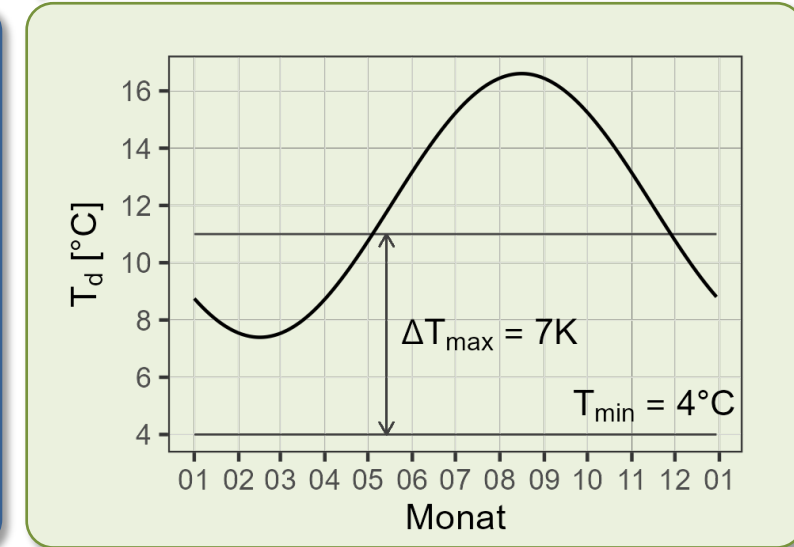
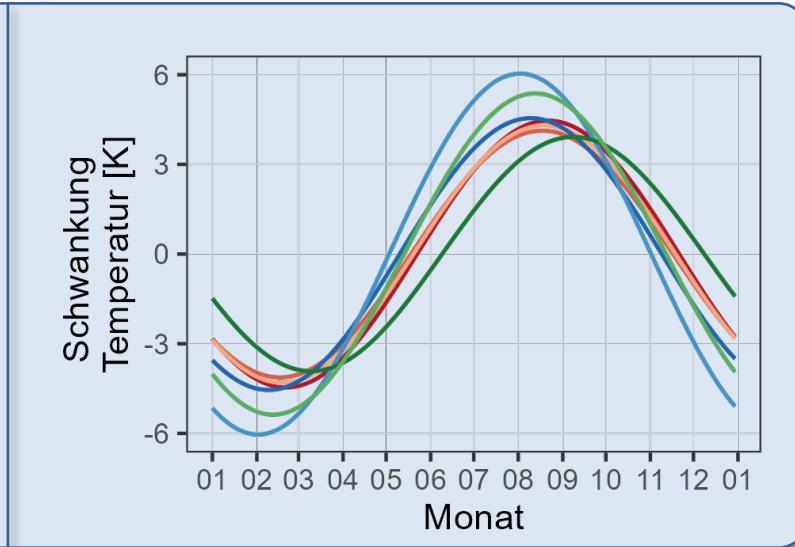
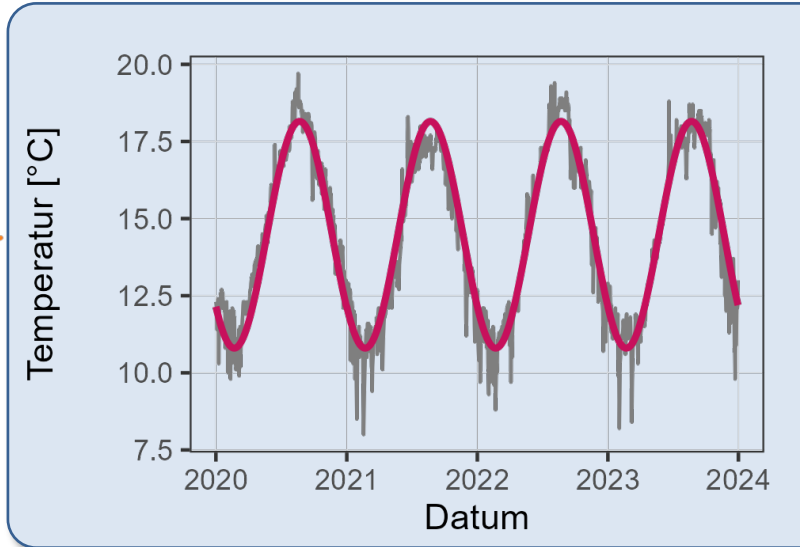
Betriebsdaten



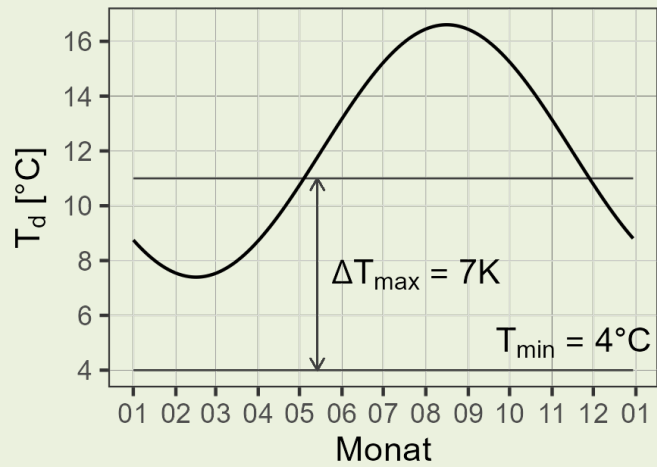
Saisonale Schwankungen



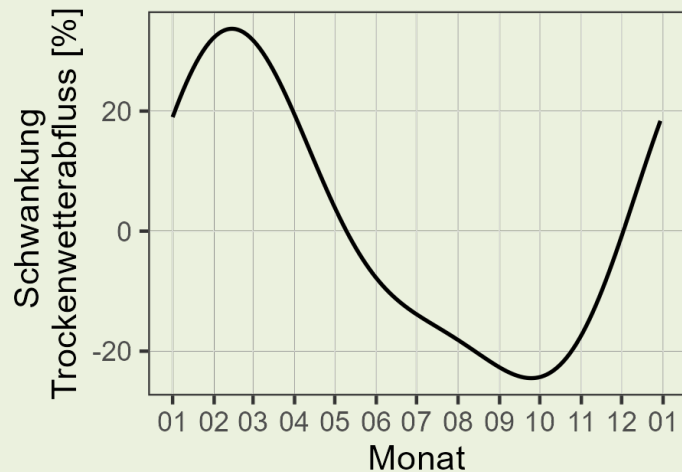
„Standard“-Jahresprofile



Abwasser: Übertragung auf hessische Kläranlagen

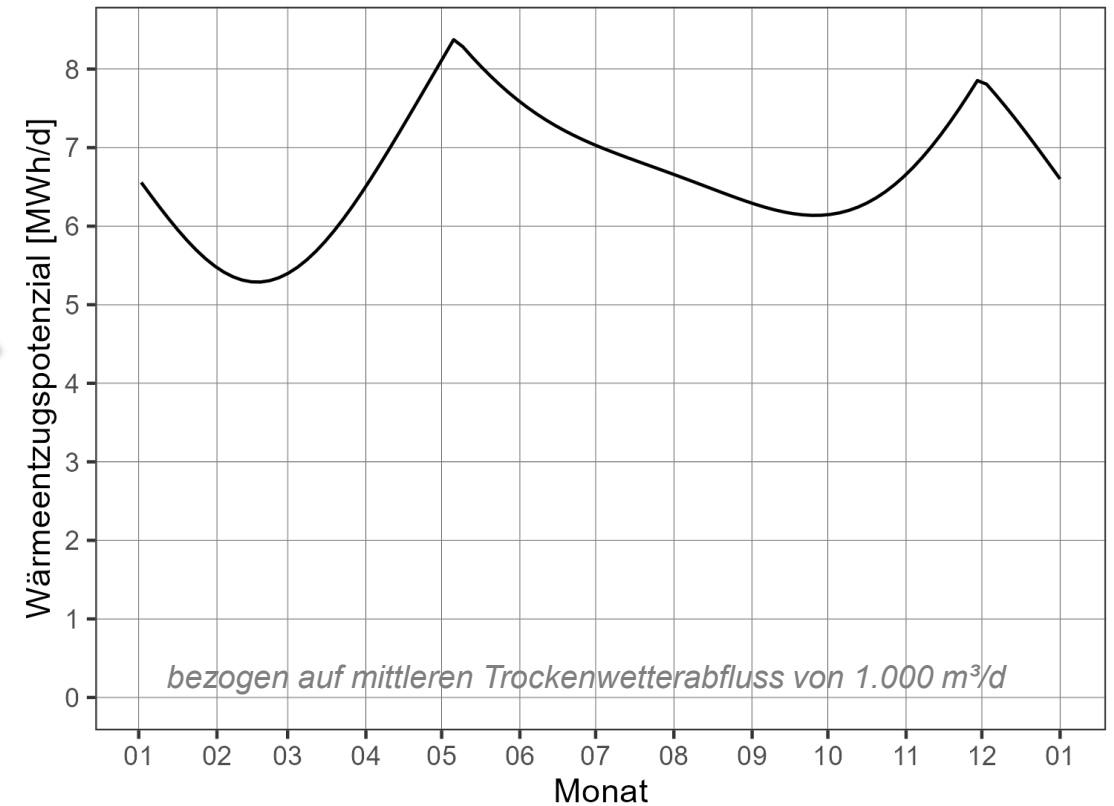


$$\text{Wärmeentzugspotenzial} = c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{T,d,St} \cdot \Delta T_{ST}$$

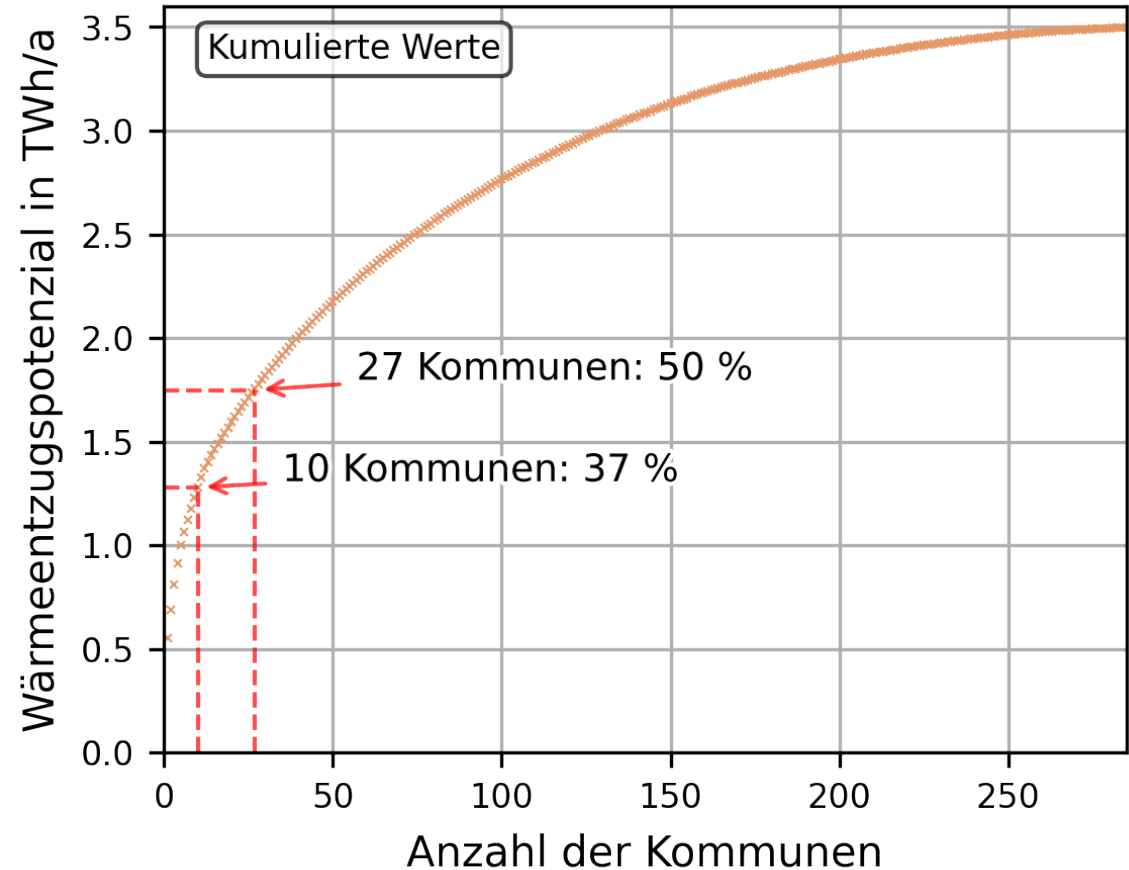
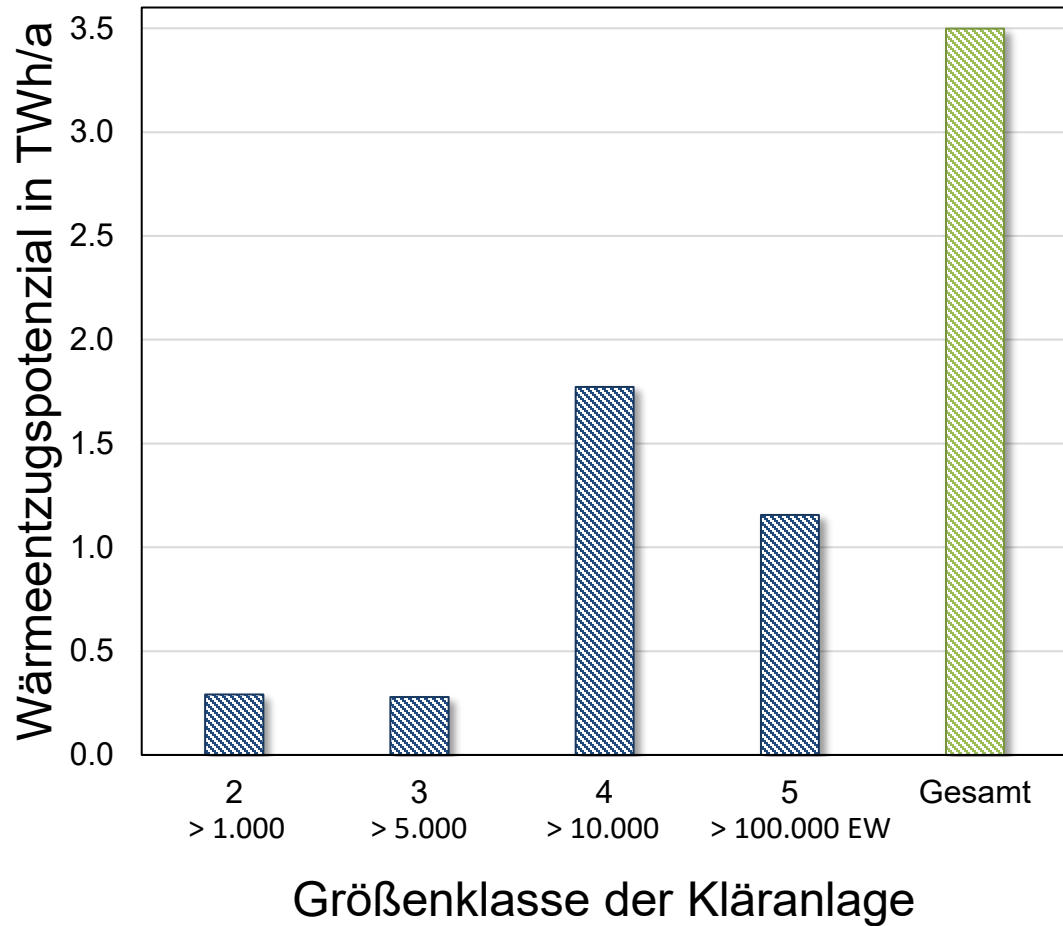


Standardprofil

bei 12°C mittlerer Jahrestemperatur im Abwasser

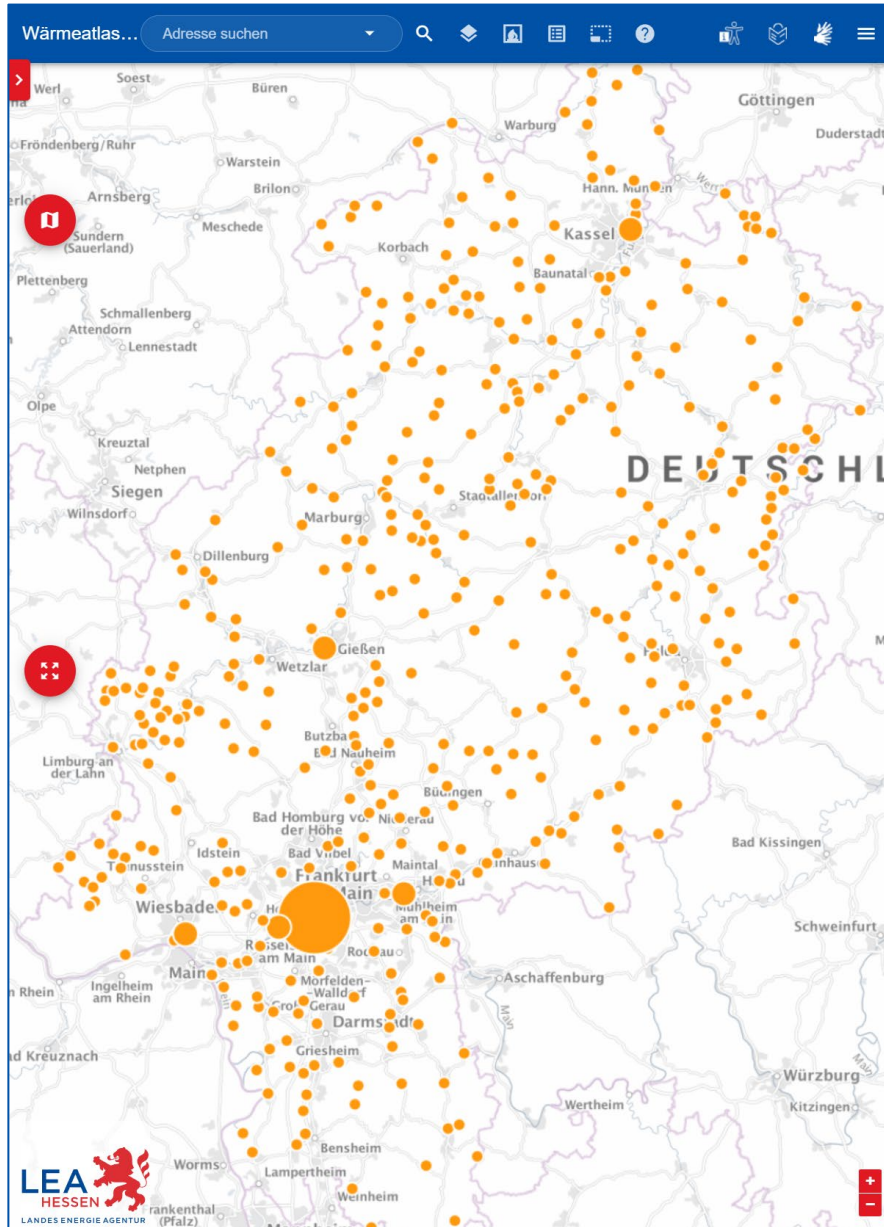


Abwasser: Wärmeentzugspotenziale in Hessen



- Die 10 größten Kommunen können über 1/3 des Gesamtwärmeentzugspotenzials bereitstellen.
- Die 27 größten Kommunen können ca. 50 % des Gesamtwärmeentzugspotenzials bereitstellen

Abwasser: Wärmeatlas Hessen



Legende

Kläranlagen

- 0 - 100 [GWh/a]
- 100 - 200 [GWh/a]
- 200 - 300 [GWh/a]
- 400 - 430 [GWh/a]
- > 430 [GWh/a]

Informationen zu:

- Jahresschmutzwassermenge
- Wärmeentzugspotenzial
- Profile in Tagesauflösung
- USW.

www.waermeatlas-hessen.de

Thermische Nutzung von Fließgewässern

Potenziale für Hessen & Modellierung gegenseitiger thermischer Beeinflussung

Förderung/Auftraggeber



HESSEN
Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie, Verkehr,
Wohnen und ländlichen Raum

- Daten: Temperaturen, Abflüsse
- Betriebsunterbrechung im Winter
- Kumulative Abkühlung entlang eines Flusslaufs

Auswahl der Fließgewässer

Auswahlkriterium:

Flussabschnitte mit mittlerem Niedrigabfluss

MNQ > 0,5 m³/s

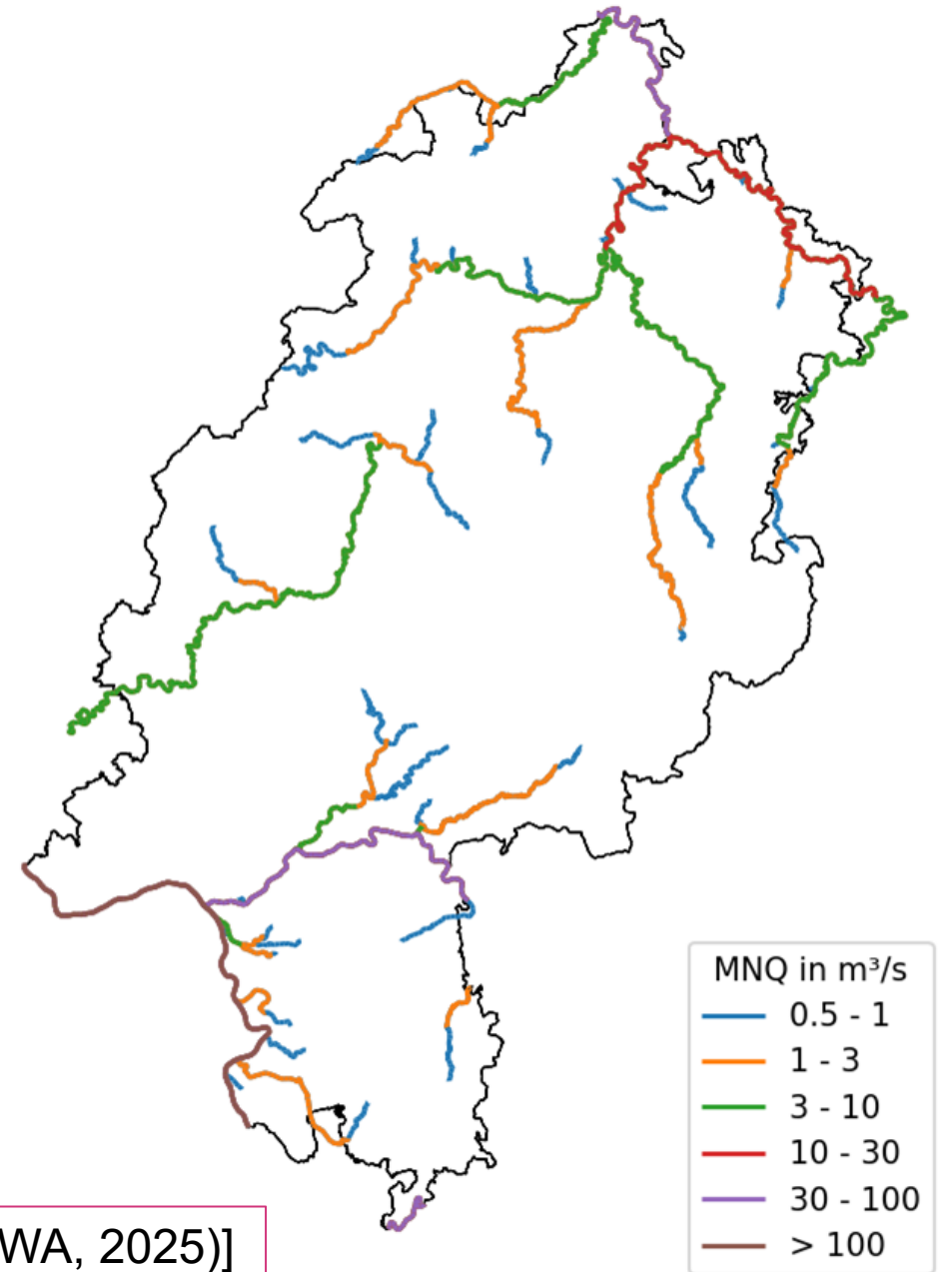
Entnahme 10 % MNQ & Abkühlung um 5 K

⇒ Wärmeentzug von > 1 MW

⇒ mit Abkühlung des gesamten Fließgewässers
um höchstens 0,5 K

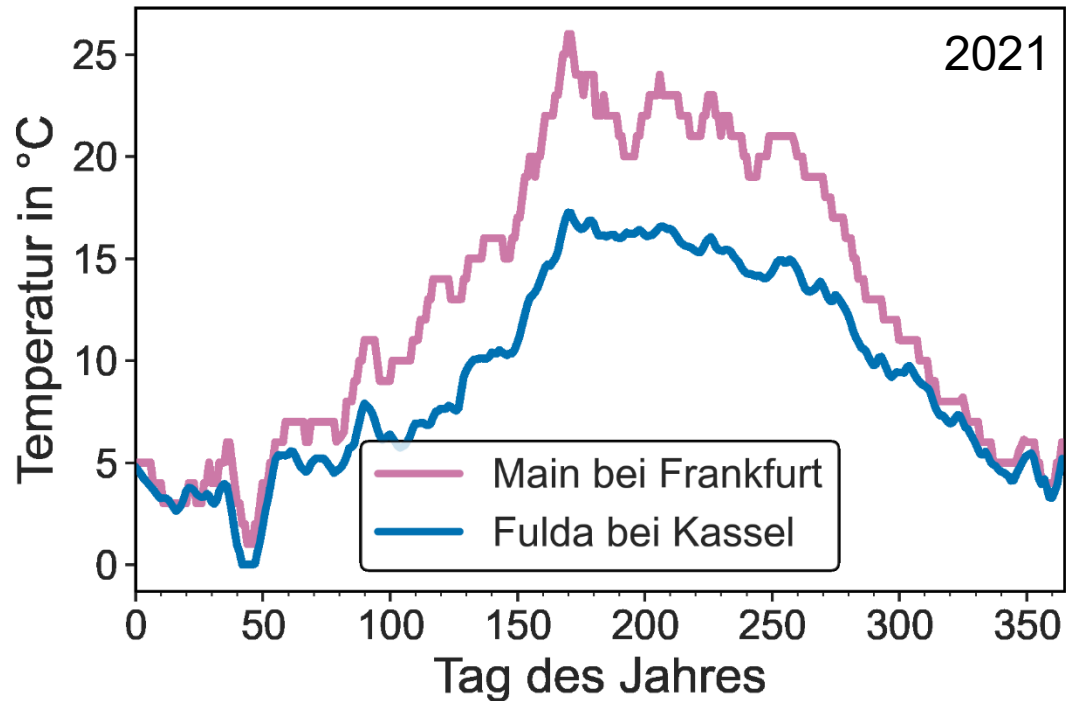
- ca. **1500 Flusskilometer** betrachtet
- Erfasst **173 hessische Kommunen** (~ 40 %)

[Orientiert am Leitfaden der Landesarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2025)]



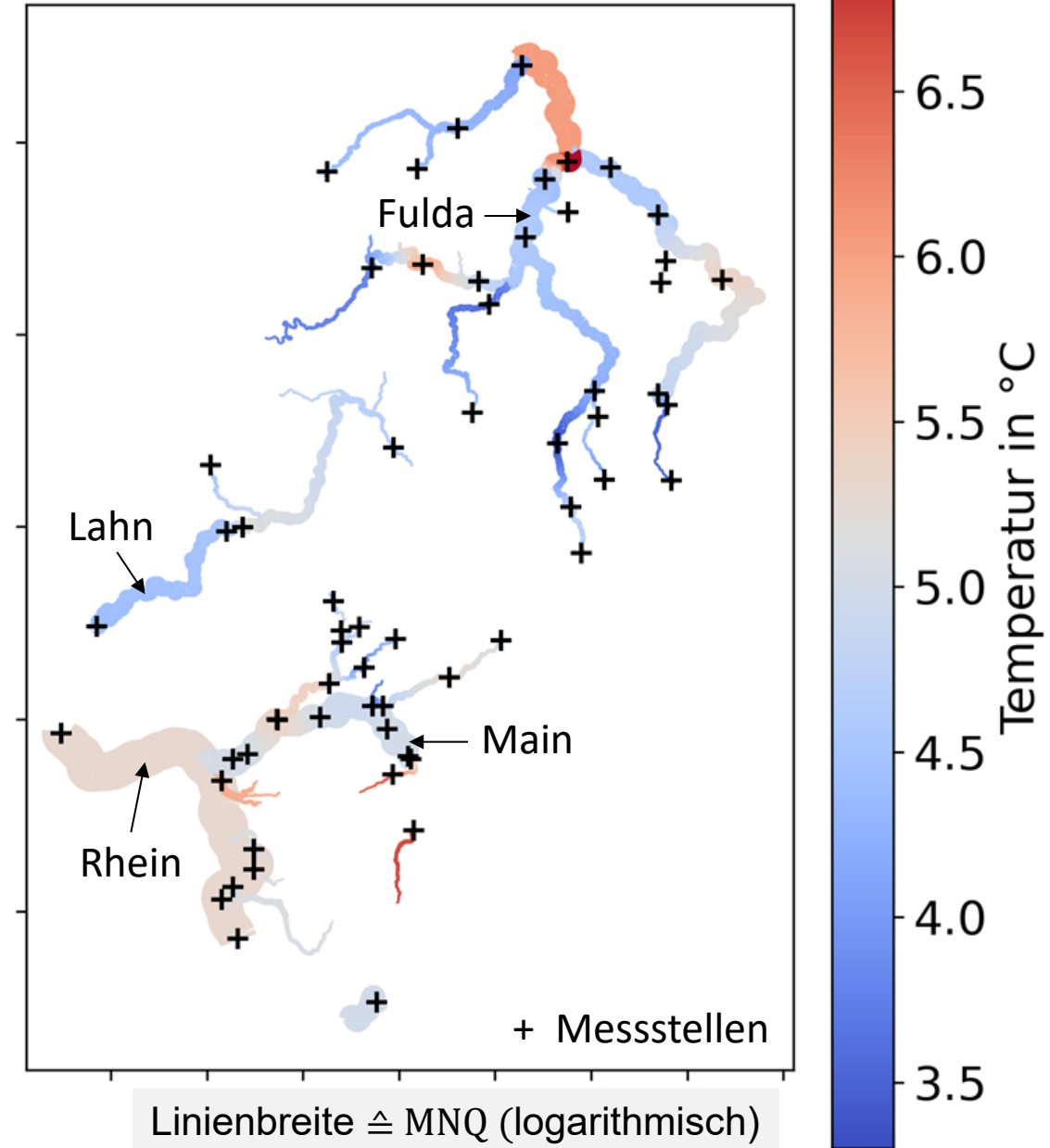
Ermittlung Fließgewässertemperaturen

- Datengrundlage: ~100 Messstellen in Hessen
- Aufbereitung & Interpolation für alle Flussabschnitte



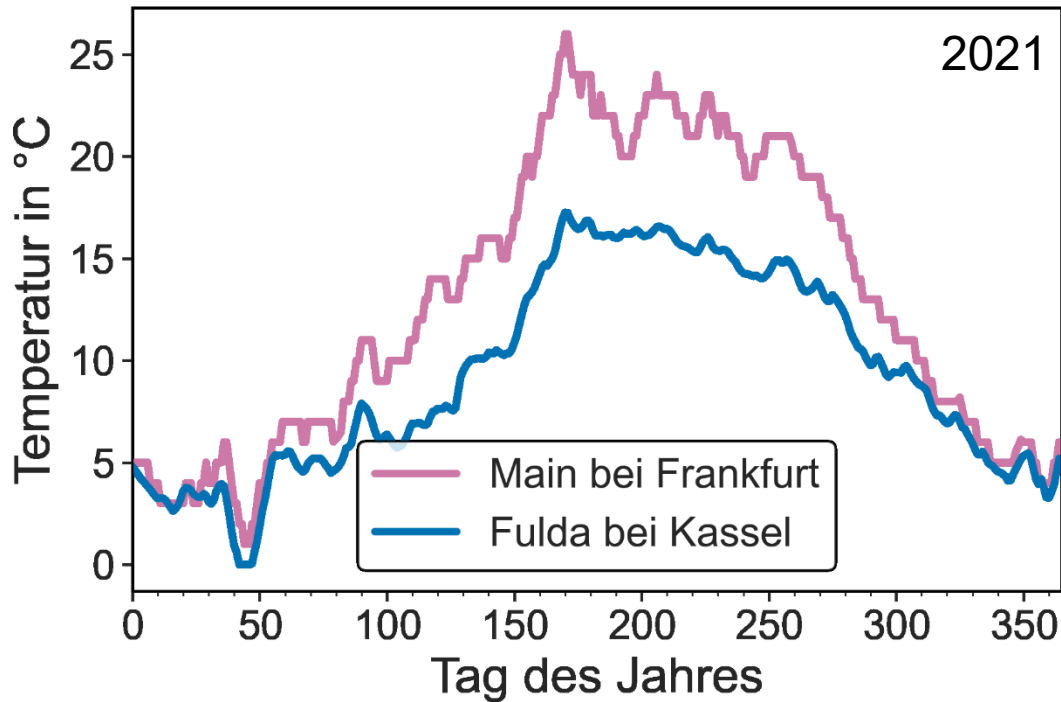
Temperaturprofile: räumlich & zeitlich

Temperaturen 1. Januar 2021

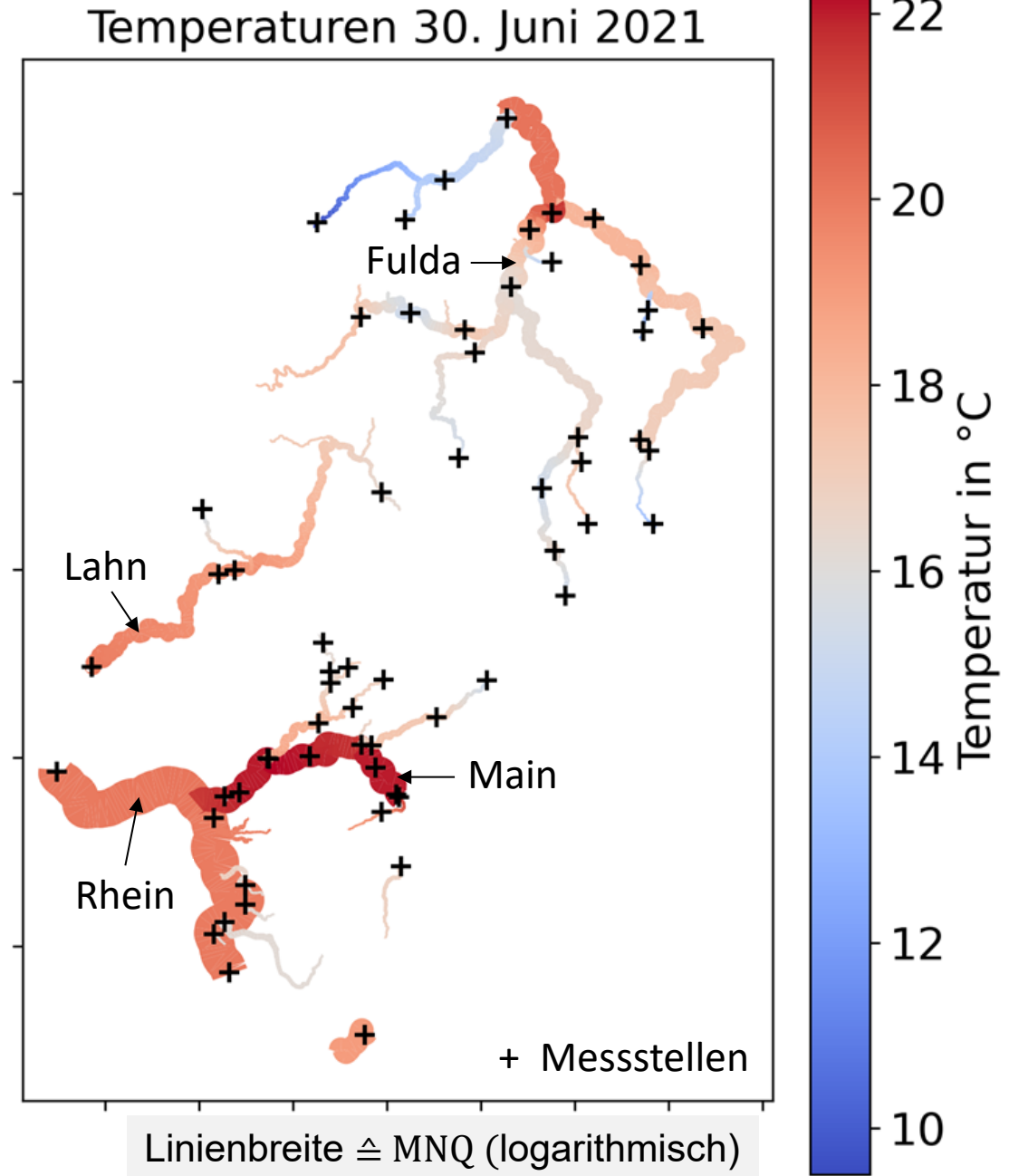


Ermittlung Fließgewässertemperaturen

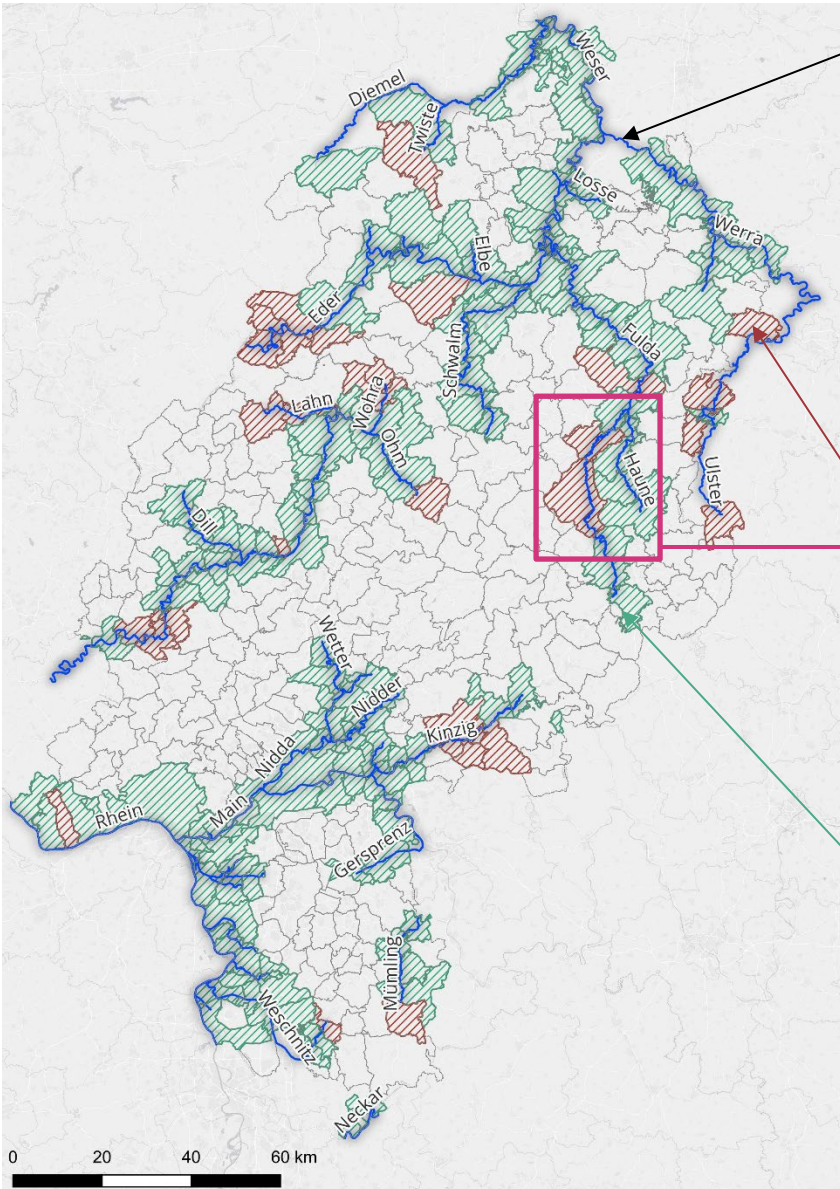
- Datengrundlage: ~100 Messstellen in Hessen
- Aufbereitung & Interpolation für alle Flussabschnitte



Temperaturprofile: räumlich & zeitlich



Einschränkungen durch Schutzgebiete

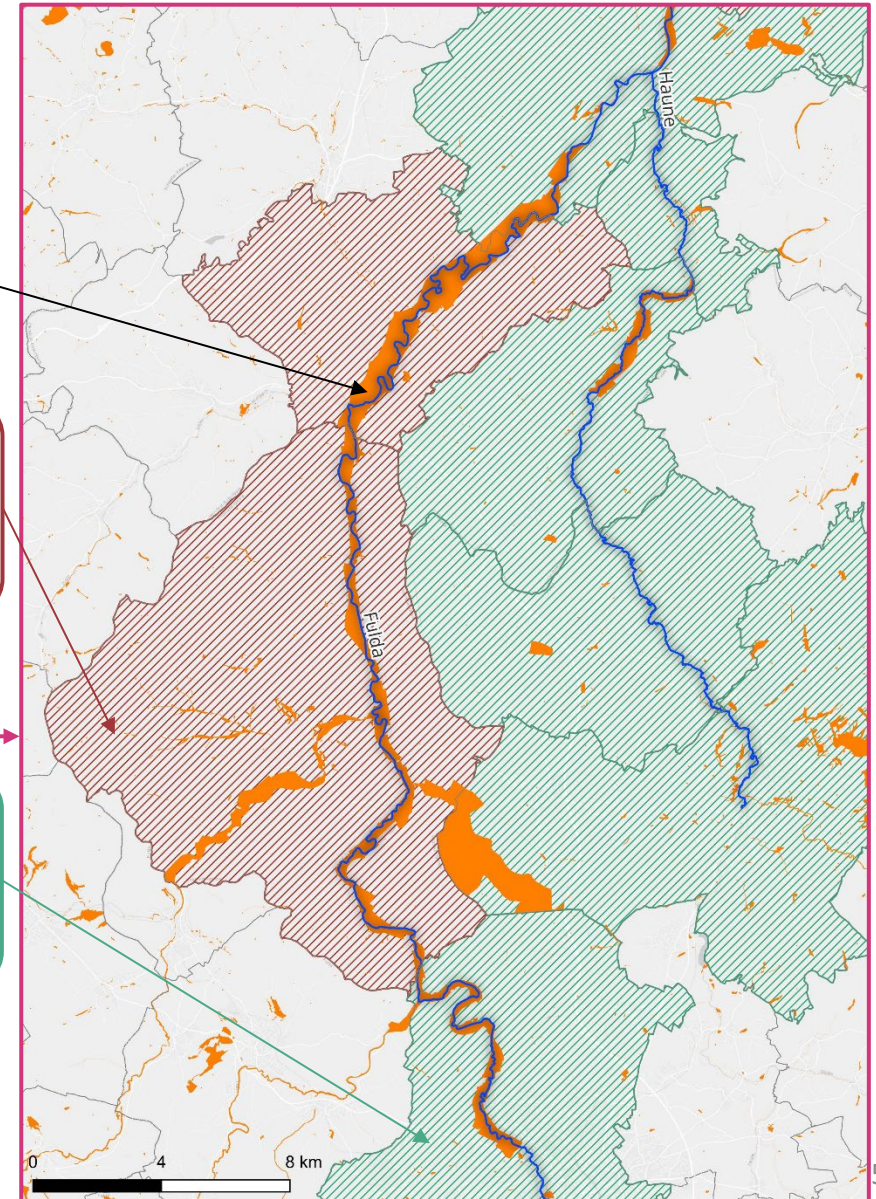


Fließgewässer

FFH/Natura 2000-Gebiete & geschützte Biotope (§ 30 BNatSchG)

17 % der Kommunen entlang der betrachteten Fließgewässer ausgeschlossen

keine Einschränkung: jeweils eine Wärmeentnahme in **144 Kommunen**



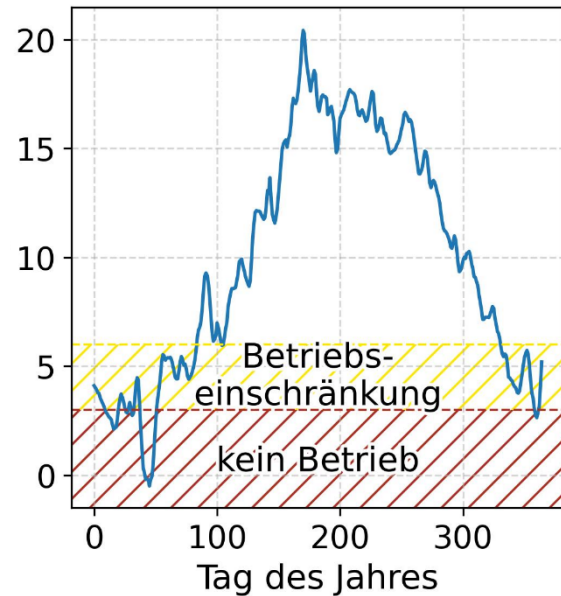
- Daten: T, Abflüsse
- Betriebsunterbrechung im Winter
- Kumulative Abkühlung entlang eines Flusslaufs

Einschränkungen durch niedrige Gewässertemperaturen

Beispiel für einen Flussabschnitt (Fulda bei Kassel):

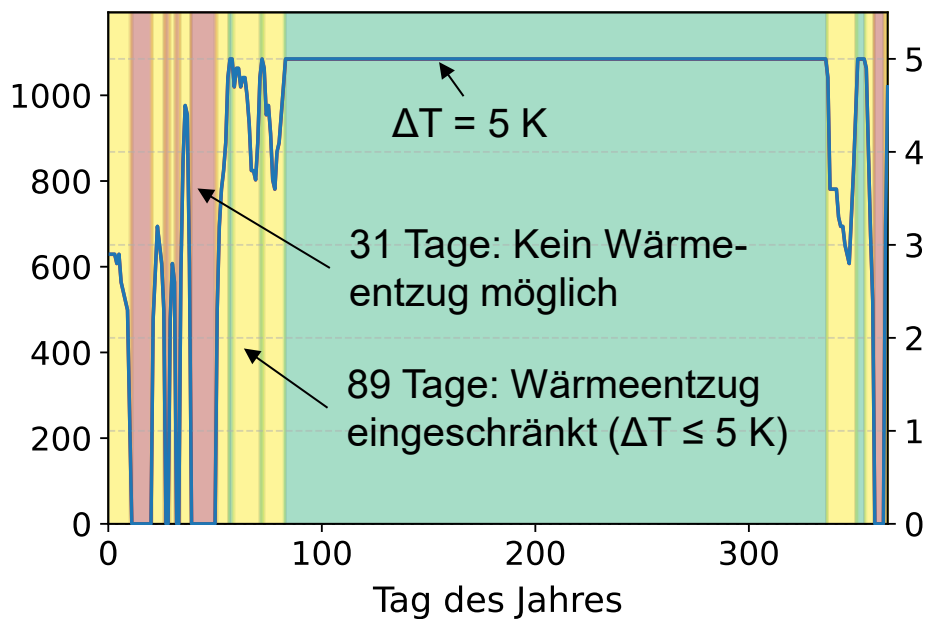
Jahresprofil Wassertemperatur \Rightarrow Wärmeentzugspotenzial

$T_{\text{Gewässer}}$ in °C



\dot{Q} in MWh/d

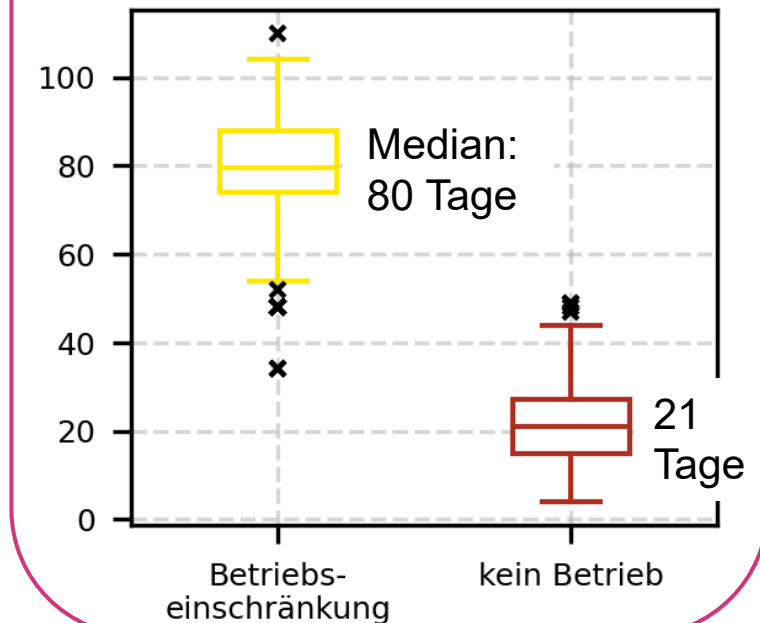
$\Delta T_{\text{Gewässer}}$ in K



Hessen

144 betrachtete Kommunen

Anzahl Tage

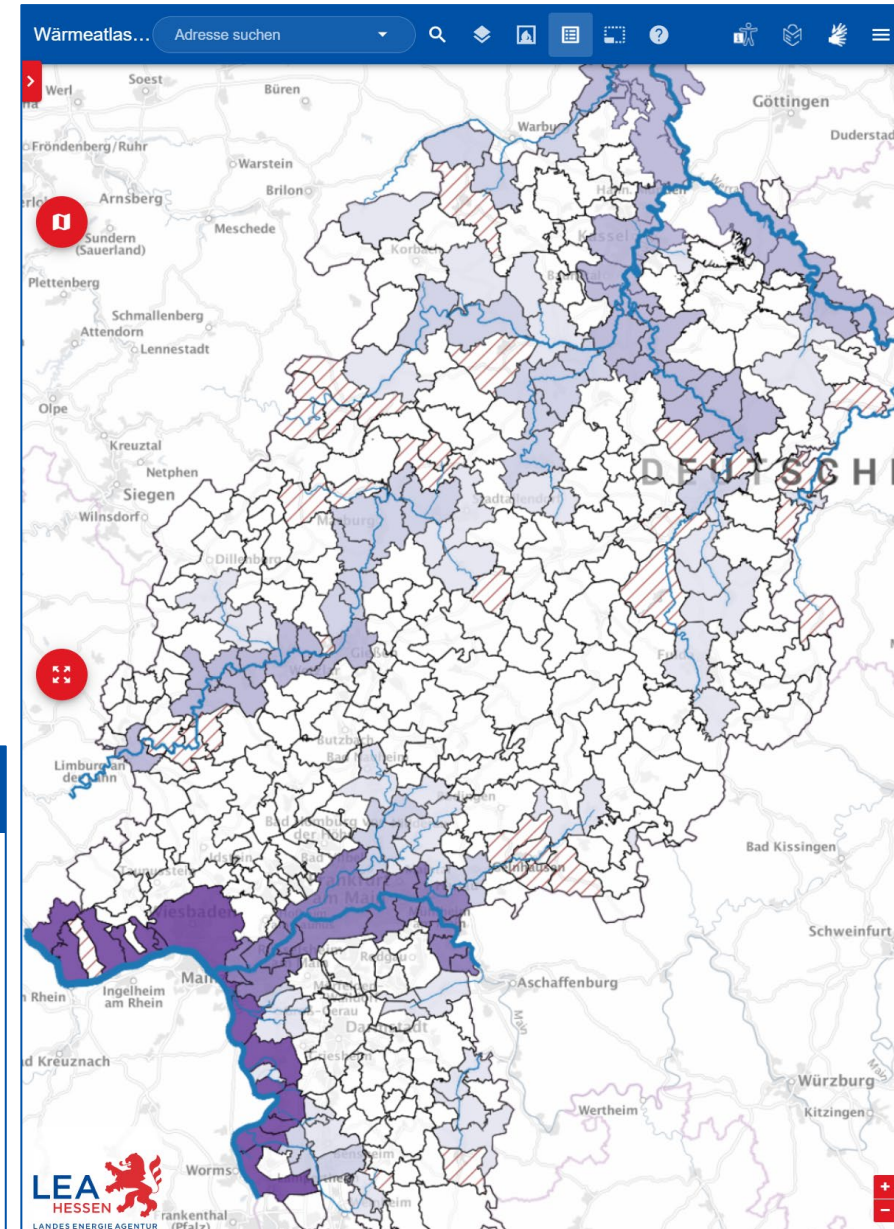
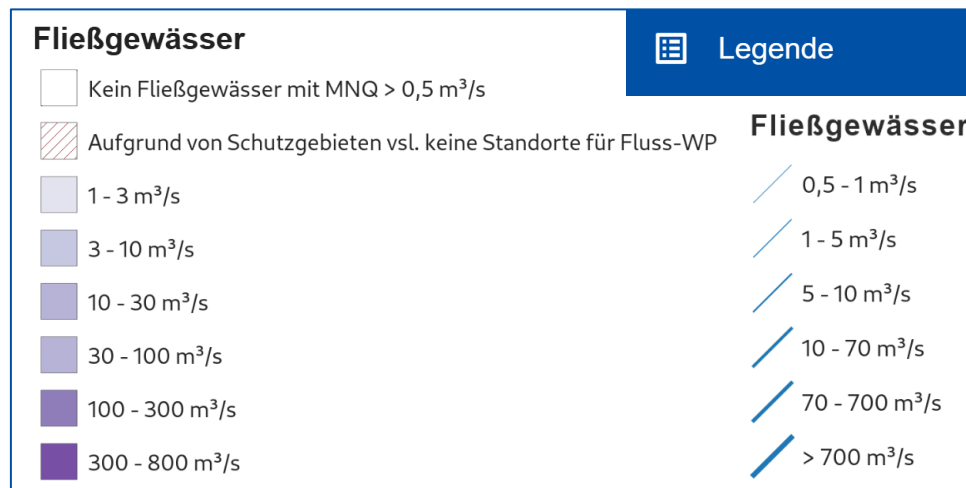


- Entnahme **10 % MNQ** & Abkühlung um bis zu **5 K**, $T_{\text{Einleitung}} \geq 1^\circ\text{C}$ & $T_{\text{Gewässer, durchmischt}} \geq 3^\circ\text{C}$
- vorherige Wärmeentnahmen: 0,5 K Abkühlung gegenüber Ist-Zustand angesetzt
- kältestes Wetterjahr der letzten 10 Jahre (2021) \rightarrow **Worst Case**

Ergebnisse Wärmeentzugspotenzial Fließgewässer

- **Hessen: 111 TWh/a Wärmeentzugspotenzial**
- Rhein (84 TWh) & Main (16 TWh) dominieren Ergebnis: sehr hohe Abflüsse
- **Kommunenscharfe Ergebnisse** veröffentlicht:
 - Mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ)
 - Wärmeentzugspotenzial
 - Tage Betriebseinschränkung & kein Betrieb
 - usw.

www.waermeatlas-hessen.de



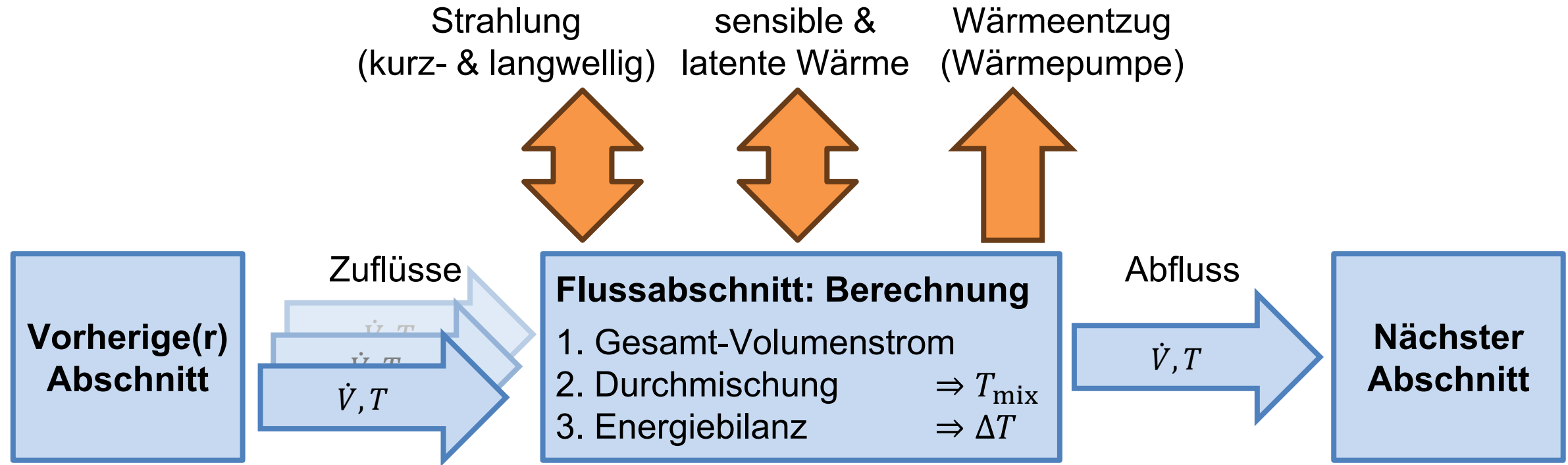
- Daten: T, Abflüsse
- Betriebsunterbrechung im Winter
- Kumulative Abkühlung entlang eines Flusslaufs

Modellierung der Energiebilanz

Wie wirken sich mehrere Wärmeentnahmen hintereinander auf die Flusstemperatur aus?

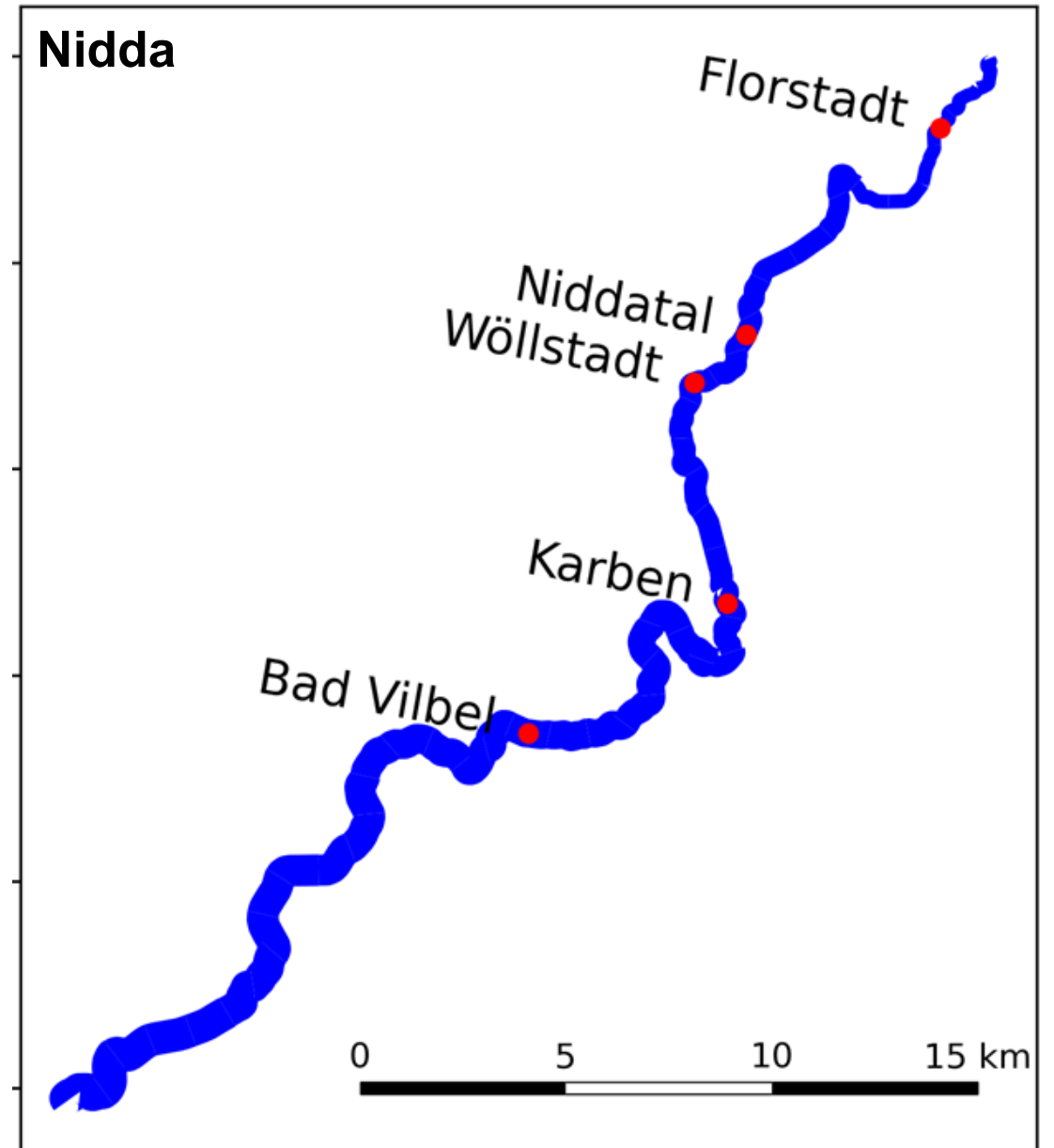
⇒ Entwicklung eines Simulationsmodells 

- Tagesmittelwerte
- Flussverlauf: E-Bilanzen (1km-Abschnitte)
- Parameter
 - Breite, Verschattung
 - Wetter (Einstrahlung, Bewölkung, T_{Luft} , p_{Luft} , rF , v_{Wind})



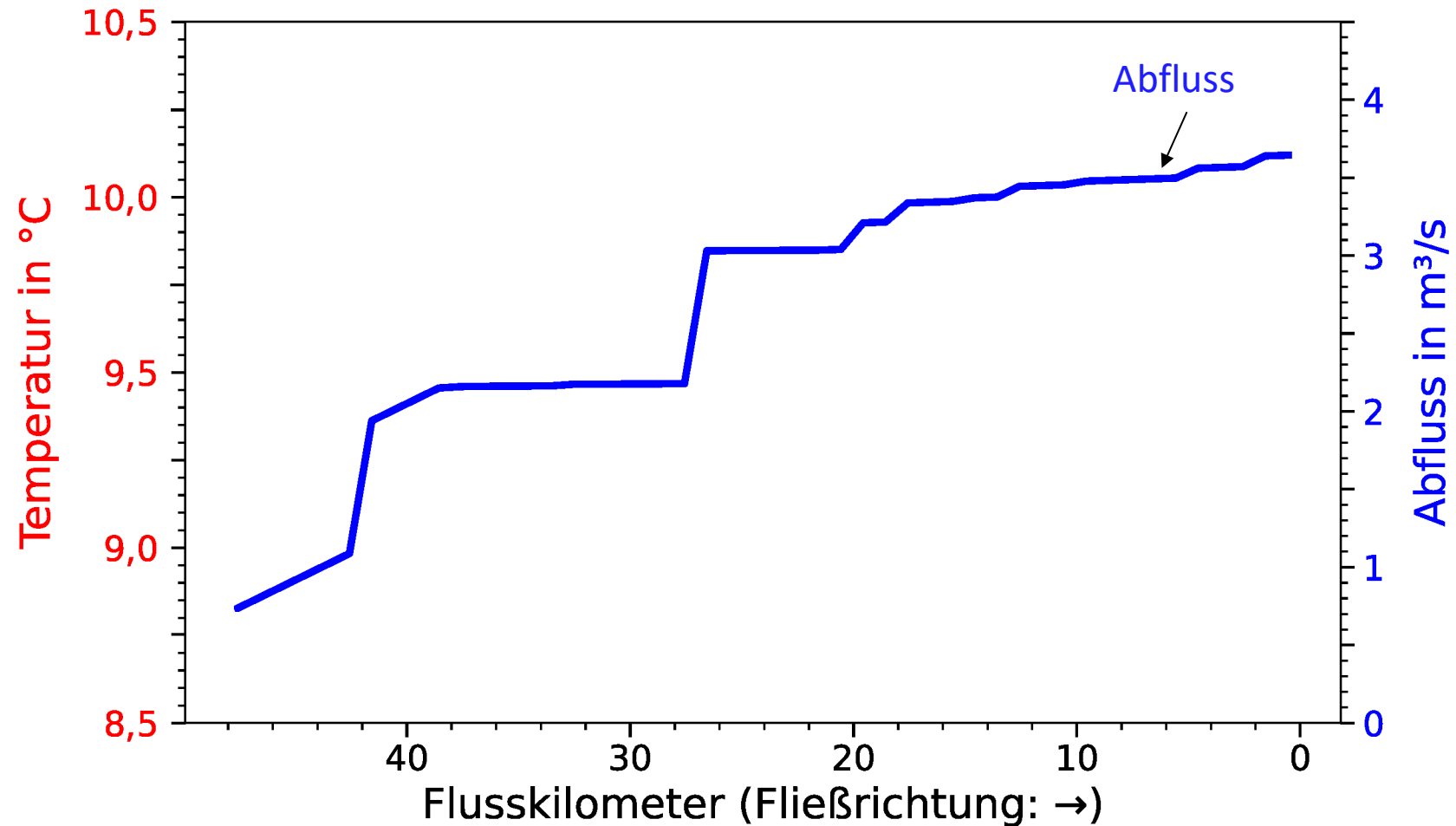
Simulation Wärmeentzug Nidda

- Wärmeentnahmen in 5 Kommunen
- Berechnung des Wärmeentzugspotenzials



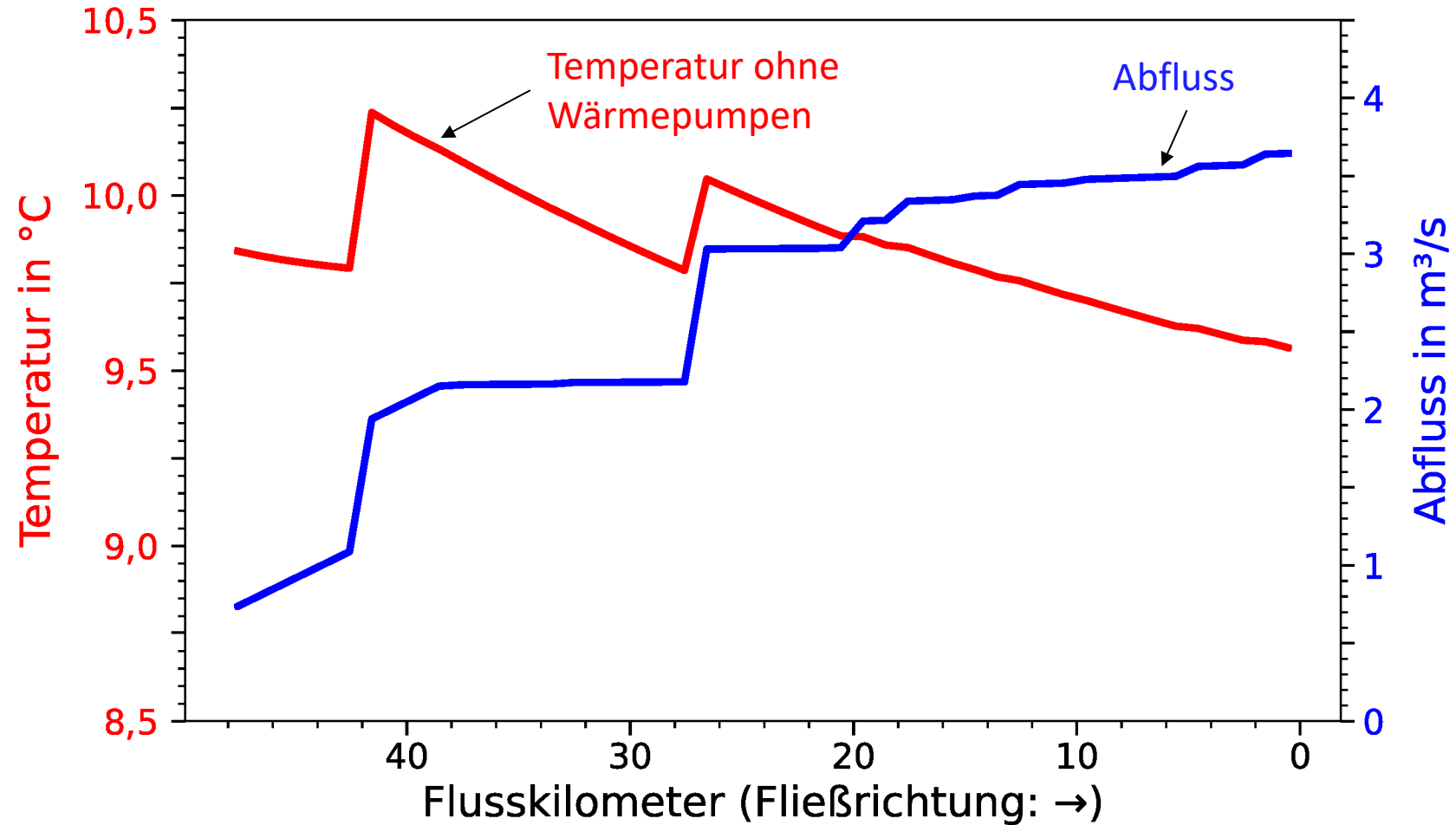
Simulation Wärmeentzug Nidda: Beispiel 10.10.2021

Beispiel: Tag mit **niedrigstem Abfluss** (nahe MNQ)



Simulation Wärmeentzug Nidda: Beispiel 10.10.2021

Beispiel: Tag mit **niedrigstem Abfluss** (nahe MNQ)



Simulation Wärmeentzug Nidda: Beispiel 10.10.2021

Beispiel: Tag mit **niedrigstem Abfluss** (nahe MNQ)

⇒ stärkste Temperaturabsenkung des Jahres: **1,2 K**

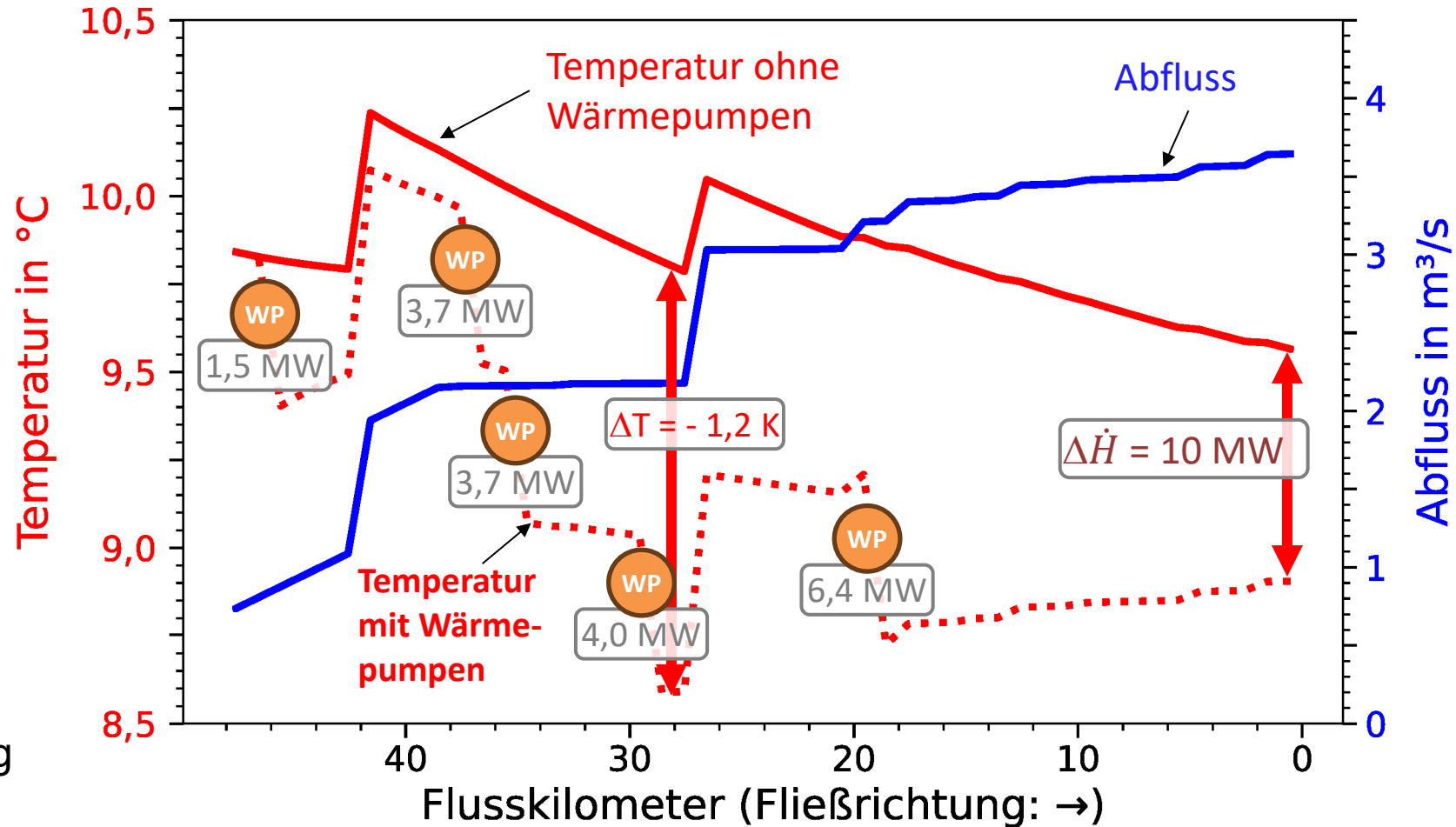
⇒ $\sum \dot{Q}_{WP} = 19 \text{ MW}$

19 MW Gesamt-Wärmeentzug durch Wärmepumpen



$\Delta \dot{H} = 10 \text{ MW}$ an Mündung

⇒ Wärmeeintrag aus der Umgebung in das abgekühlte Gewässer



Thermische Nutzung von Fließgewässern



- ⇒ Interpolierte **Messdaten** stehen zur Verfügung: T, \dot{V}
1500 km, $\Delta s = 1$ km; bis zu 25 Jahre, $\Delta t = 1$ Tag

- ⇒ **Betriebsunterbrechung von Wärmepumpen im Winter**
Worst Case: kältestes Jahr, $T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$
Median: 21 Tage kein Betrieb
80 Tage eingeschränkter Betrieb

- ⇒ **Kummulative Abkühlung** entlang eines Flusslaufs
Beispiel Nidda: \dot{Q} -Entzug > 19 MW, $\Delta \dot{H} = 10$ MW an Mündung
 $\Delta T_{\max} = -1,2$ K \Rightarrow unproblematisch

Resultierende Wärmebereitstellungsszenarien für Kommunen in Hessen

Welcher Anteil des Wärmeentzugspotenzials kann in den hessischen Kommunen realistisch verwendet werden?

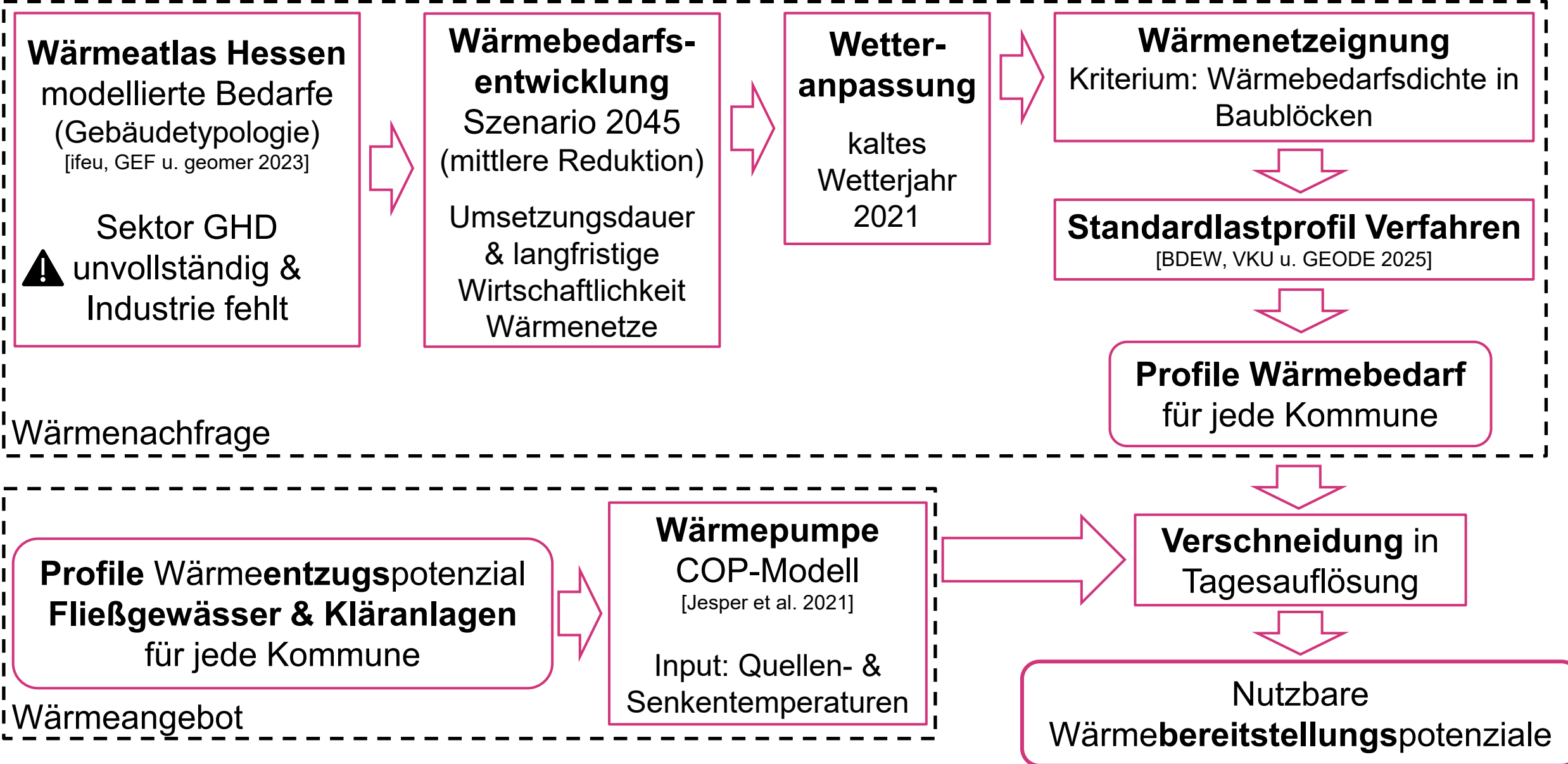
→ saisonaler Abgleich von Wärmeangebot- & Nachfrage

Förderung/Auftraggeber



HESSEN
Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie, Verkehr,
Wohnen und ländlichen Raum

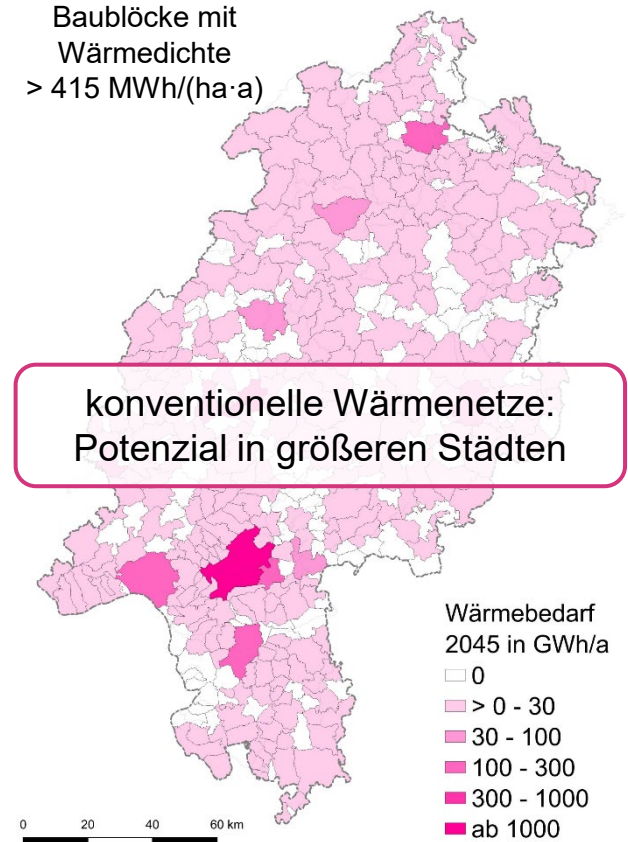
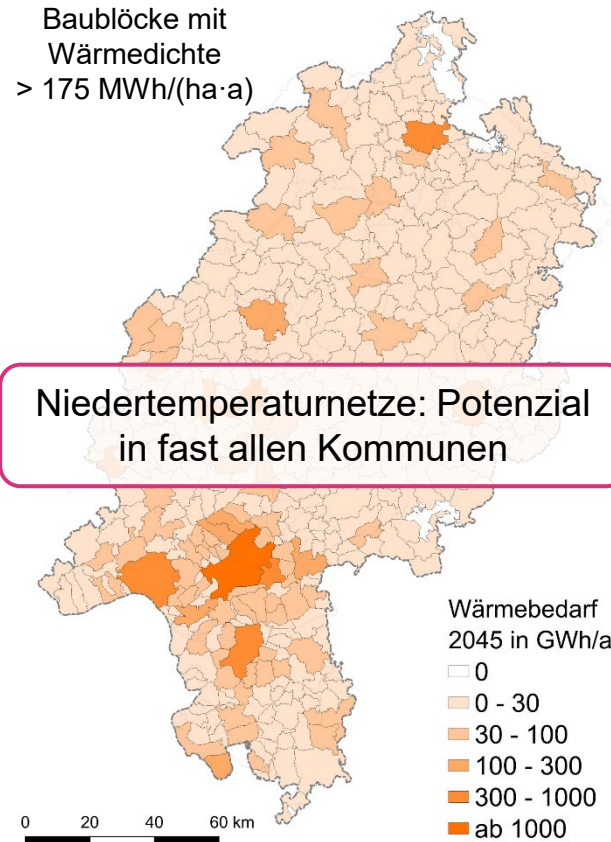
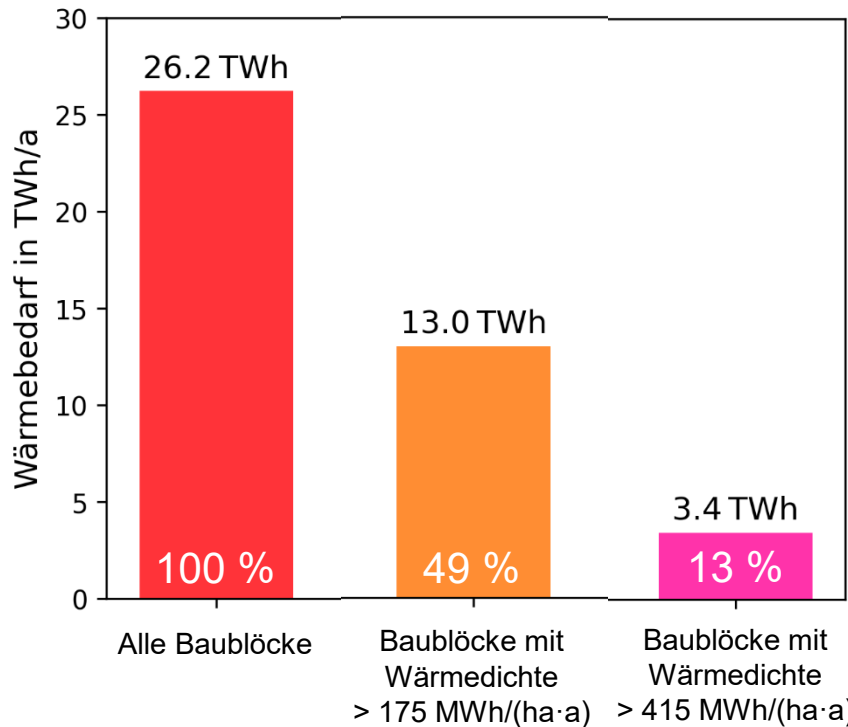
Saisonaler Abgleich von Wärmeangebot- & Nachfrage



Wärmebedarfe in Gebieten mit Wärmenetzeignung

- Abschätzung Wärmenetzeignung: Kriterium Wärmedichte in Baublöcken
- KWW Leitfaden Kommunale Wärmeplanung [Ortner et al. 2024]
 - ab 175 MWh/(ha·a) → Empfohlen für Niedertemperaturnetze im Bestand
 - ab 415 MWh/(ha·a) → Richtwert für konventionelle Wärmenetze im Bestand

Räumliche Lage der Baublöcke innerhalb der Kommunen nicht genauer ausgewertet & **! Anschlussquote 100 %**

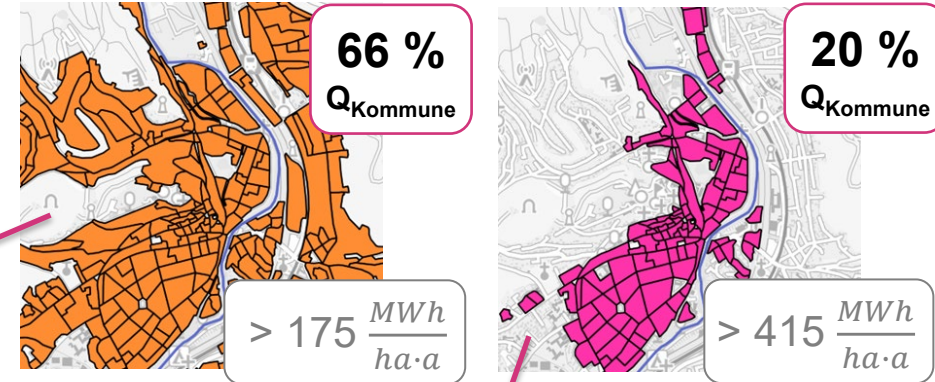


Abgleich von Entzugspotenzialen mit Wärmebedarfen

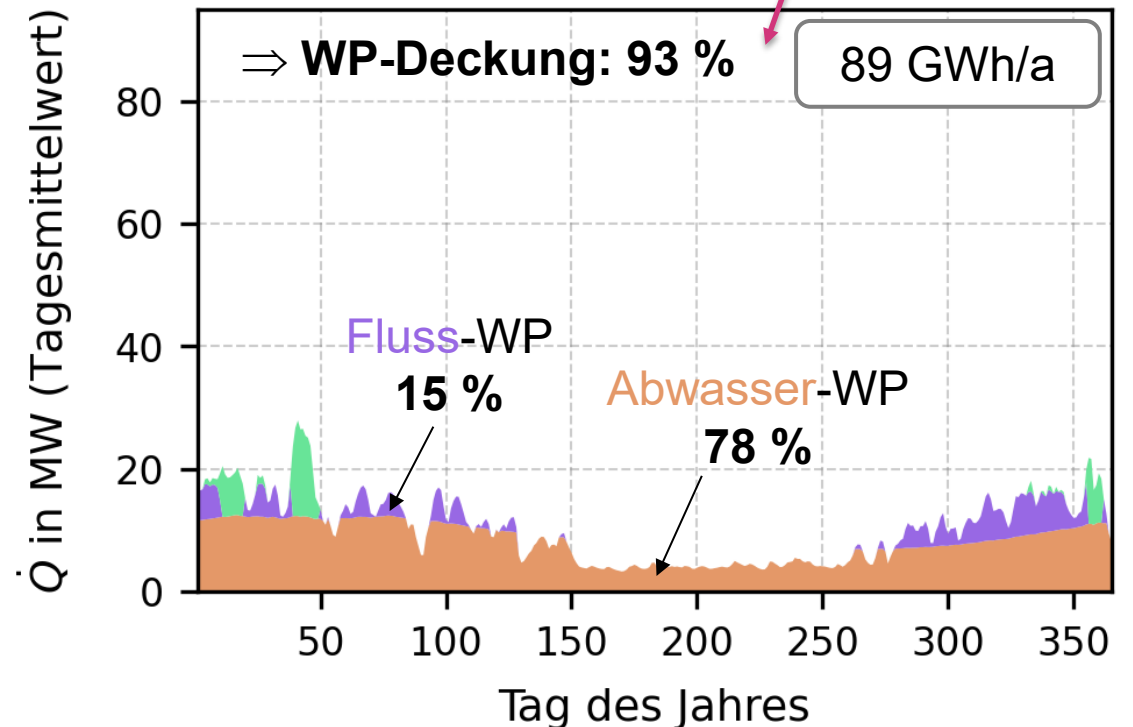
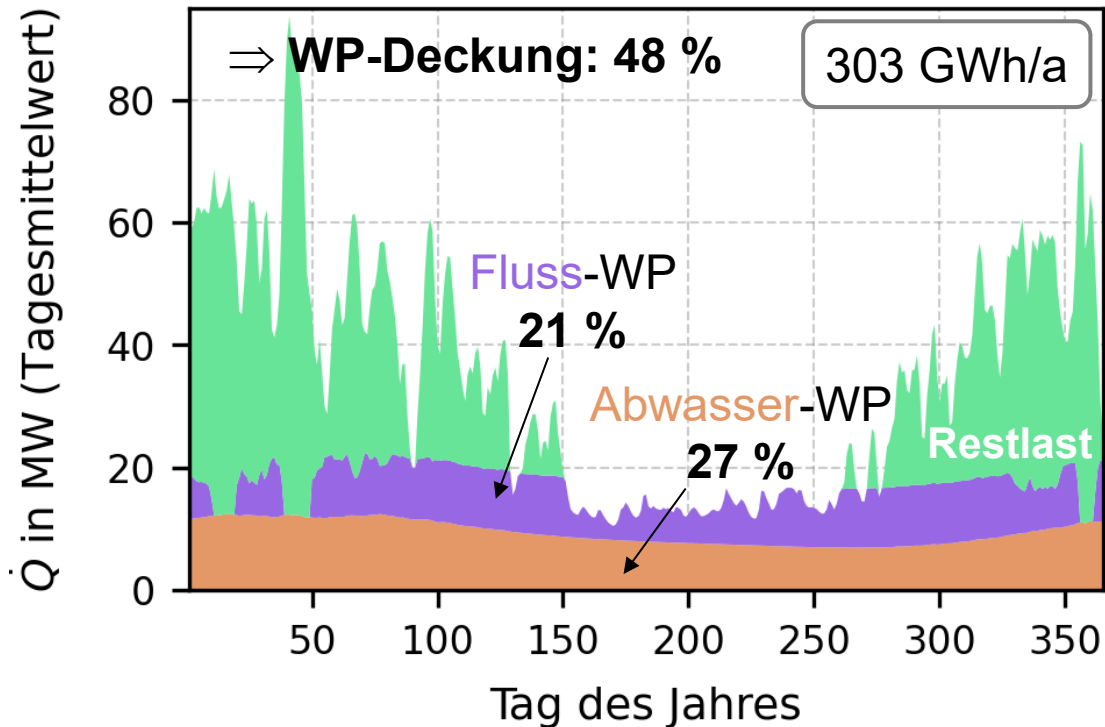
Verschneidung Potenziale und Bedarfe in Tagesauflösung

- Priorität 1: Abwasserwärmepotenzial
- Priorität 2: Flusswärmepotenzial

Wärmenetzzeignung nach Wärmedichte



Beispiel Marburg:

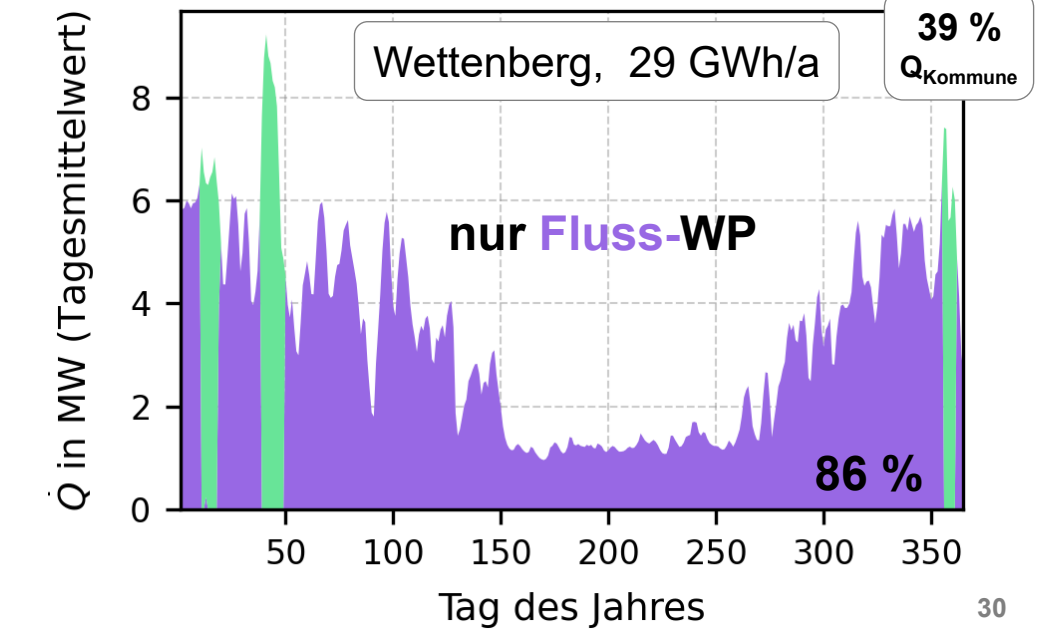
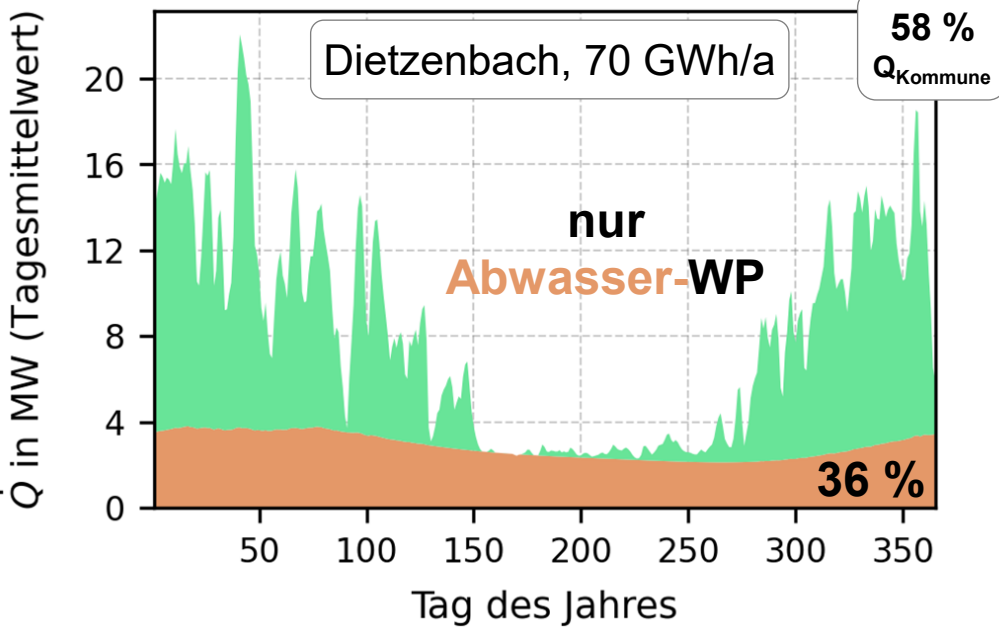
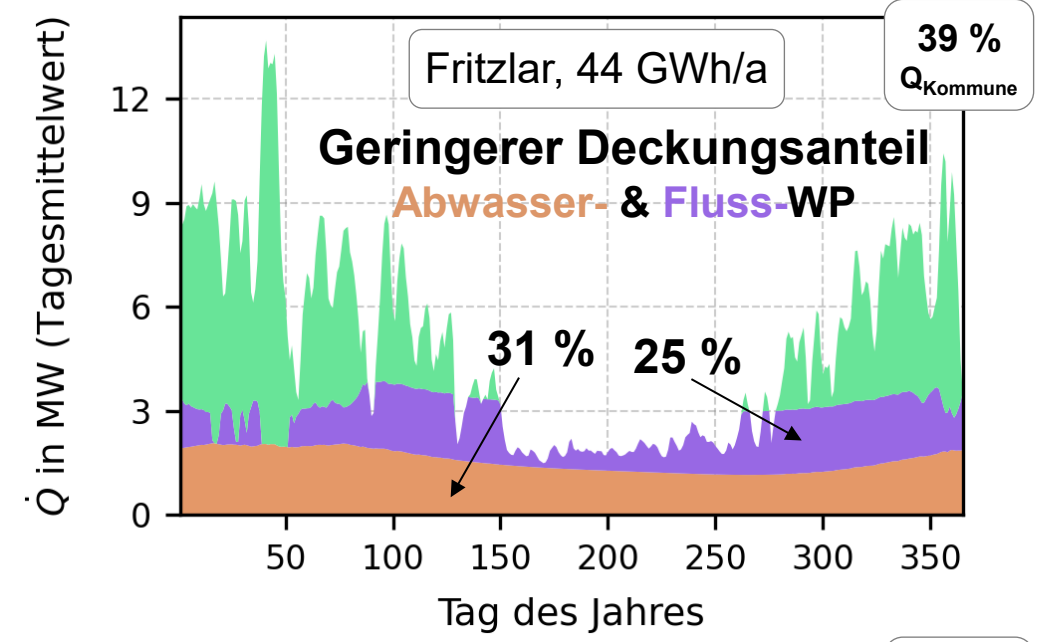
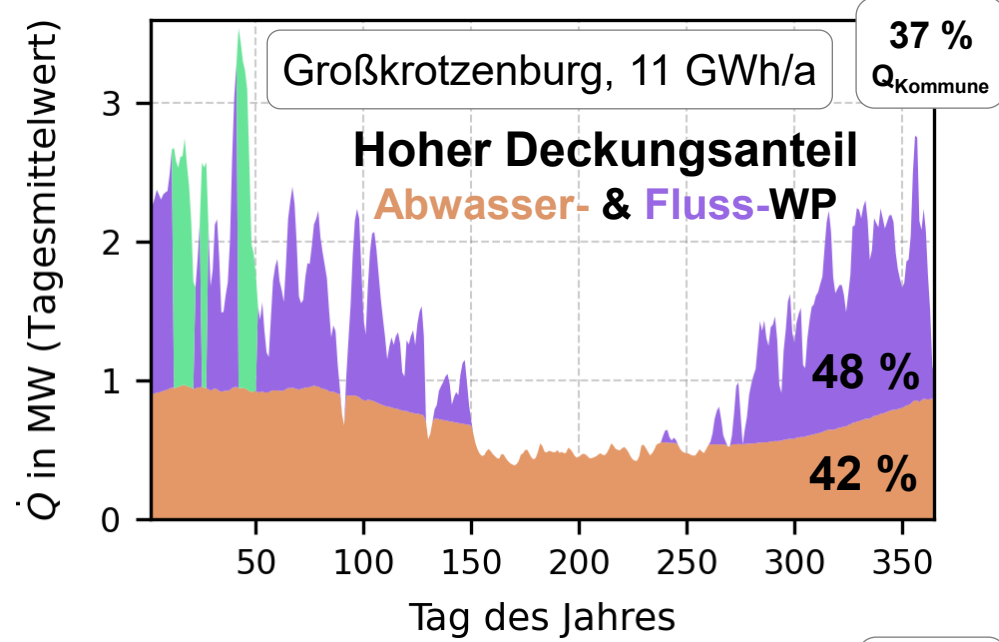


Nutzbare Wärmebereitstellungspotenziale in einzelnen Kommunen

Baublöcke mit
Wärmedichte
> 175 MWh/(ha·a)

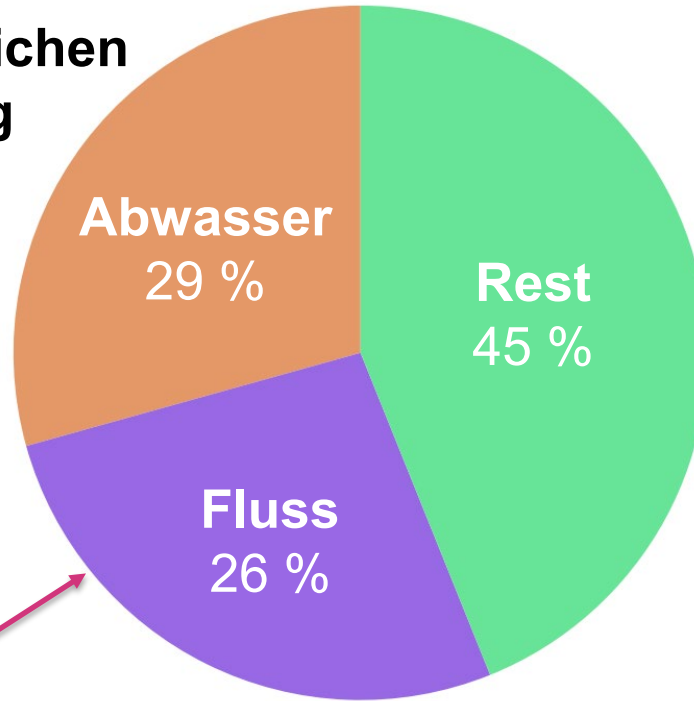
↓

Große
Wärmenetz-
eignungsgebiete



Nutzbare Wärmebereitstellungspotenziale Abwasser- & Fluss-WP

Aufteilung der möglichen Wärmebereitstellung



Baublöcke mit Wärmedichte > 175 MWh/(ha·a)



Große Wärmenetz-eignungsgebiete



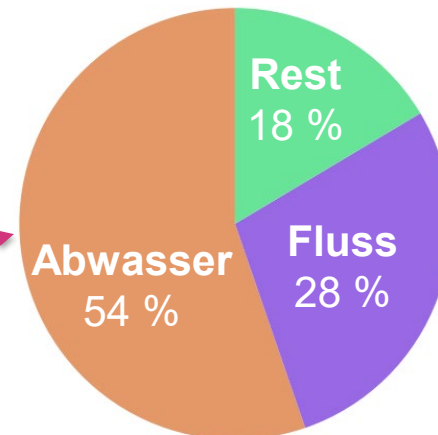
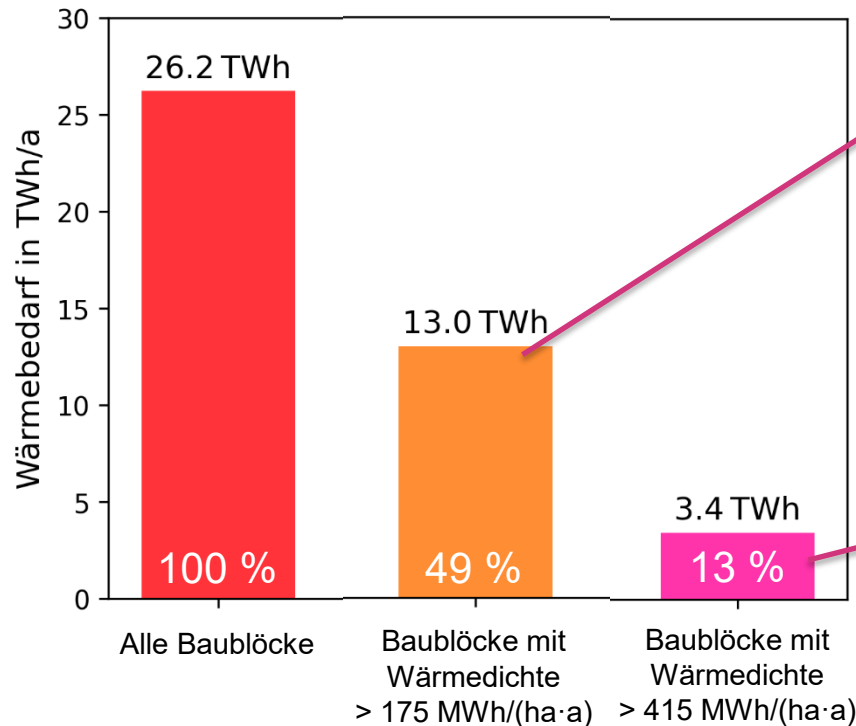
Baublöcke mit Wärmedichte > 415 MWh/(ha·a)



Kleine Wärmenetz-eignungsgebiete



11 .. 27 % des Bedarfs aller Baublöcke könnte über **Abwasser- & Fluss-WP** gedeckt werden

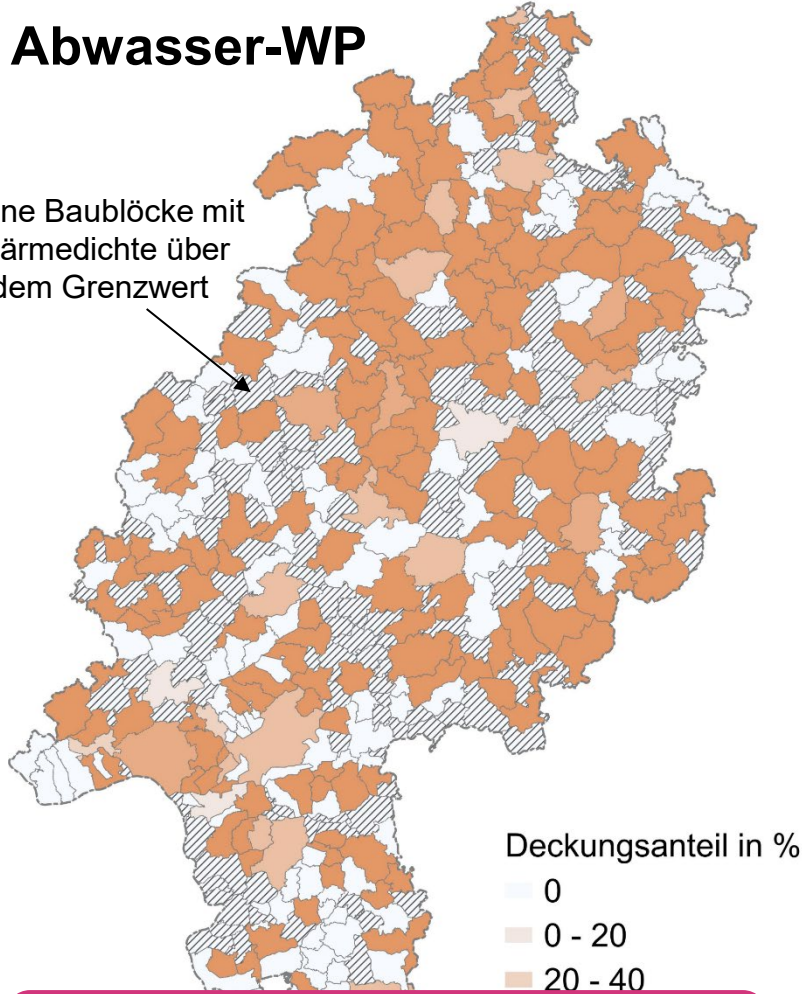


Deckungsanteile Abwasser- & Fluss-WP in den Kommunen

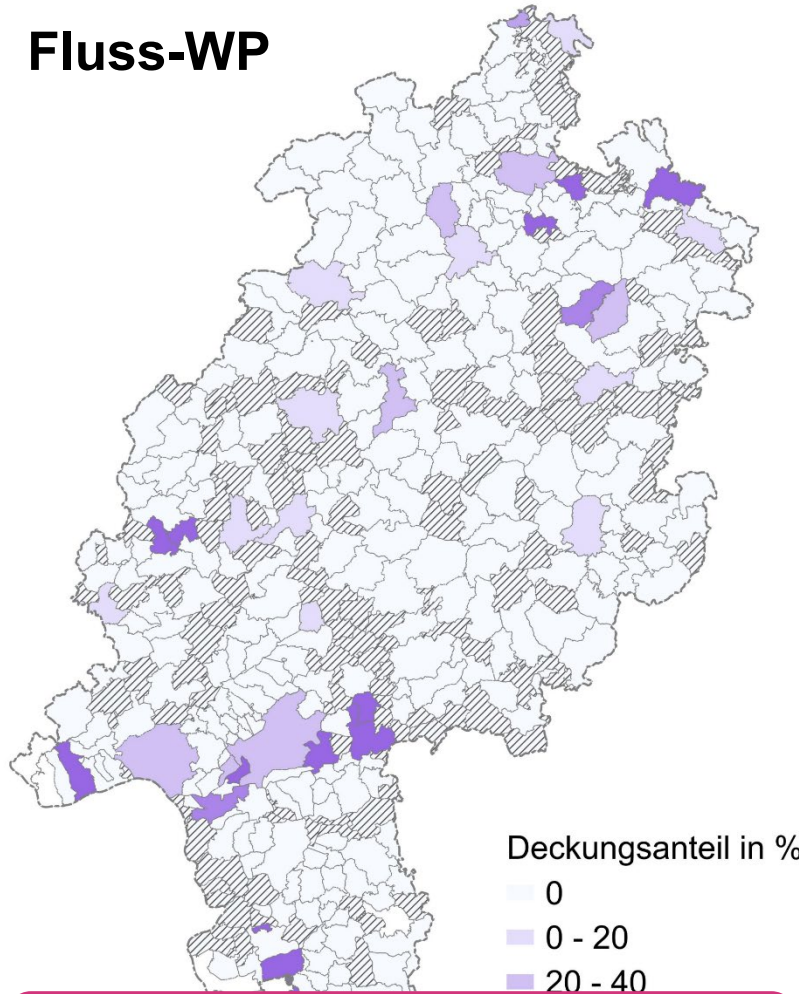
Kleine Wärmenetzeignungsgebiete (Wärmedichte $\geq 415 \text{ MWh}/(\text{ha}\cdot\text{a})$) \Leftrightarrow 11 % WP-Deckung

Abwasser-WP

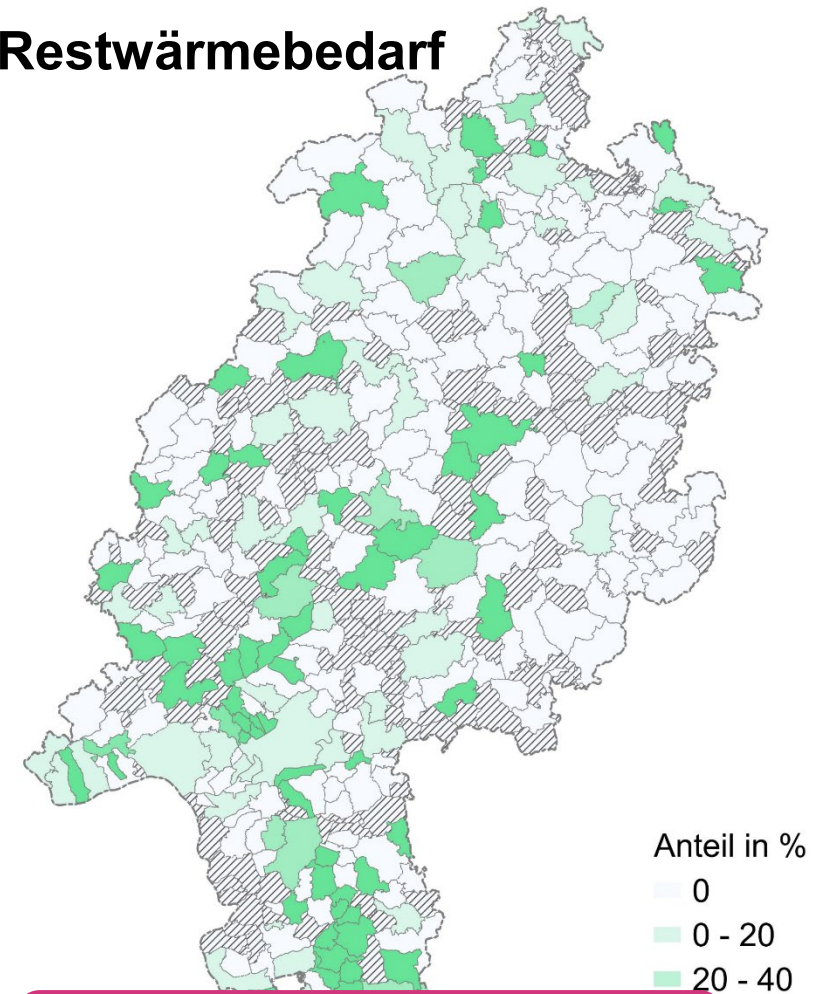
Keine Baublöcke mit
Wärmedichte über
dem Grenzwert



Fluss-WP



Restwärmebedarf



➤ Hoher Deckungsanteil in den meisten Kommunen mit Kläranlage

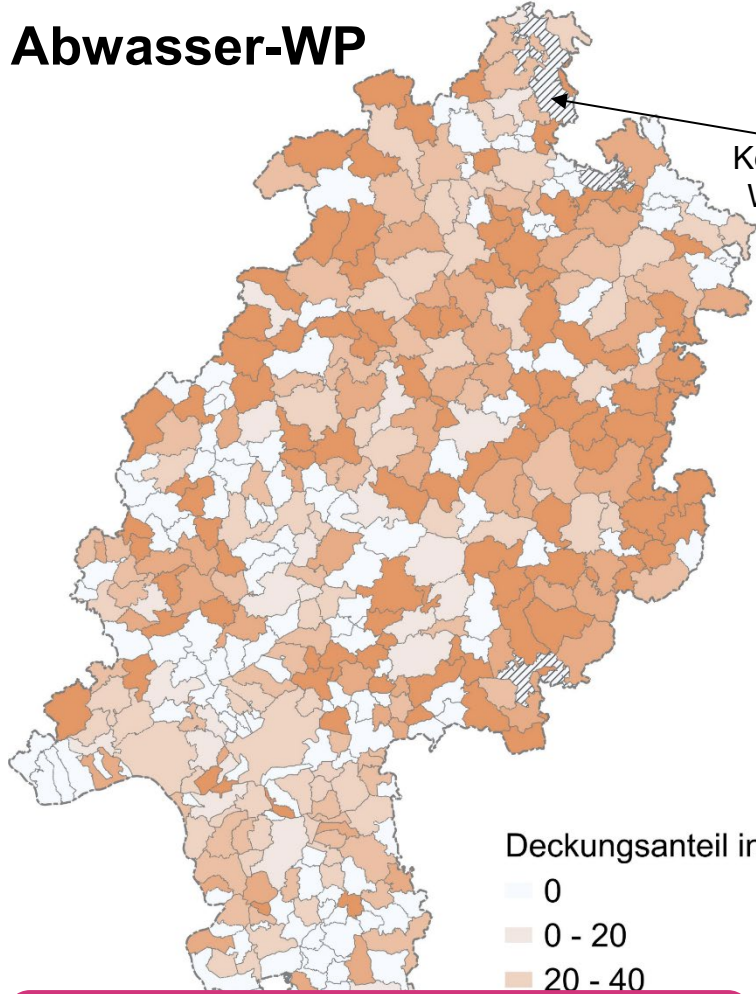
➤ Hoher Deckungsanteil in Kommunen entlang großer Flüsse ohne KA

➤ Restwärmebedarf in Kommunen mit Fluss oder KA gering

Deckungsanteile Abwasser- & Fluss-WP in den Kommunen

Große Wärmenetzzeignungsgebiete (Wärmedichte $\geq 175 \text{ MWh}/(\text{ha}\cdot\text{a})$) \Leftrightarrow 27 % WP-Deckung

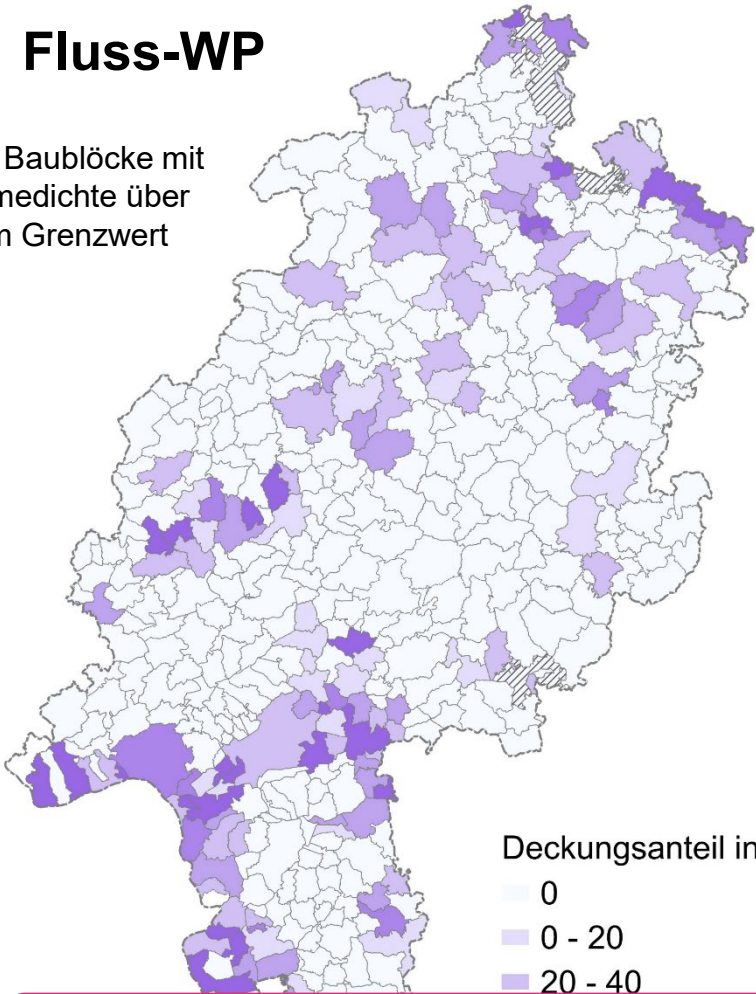
Abwasser-WP



Keine Baublöcke mit Wärmedichte über dem Grenzwert

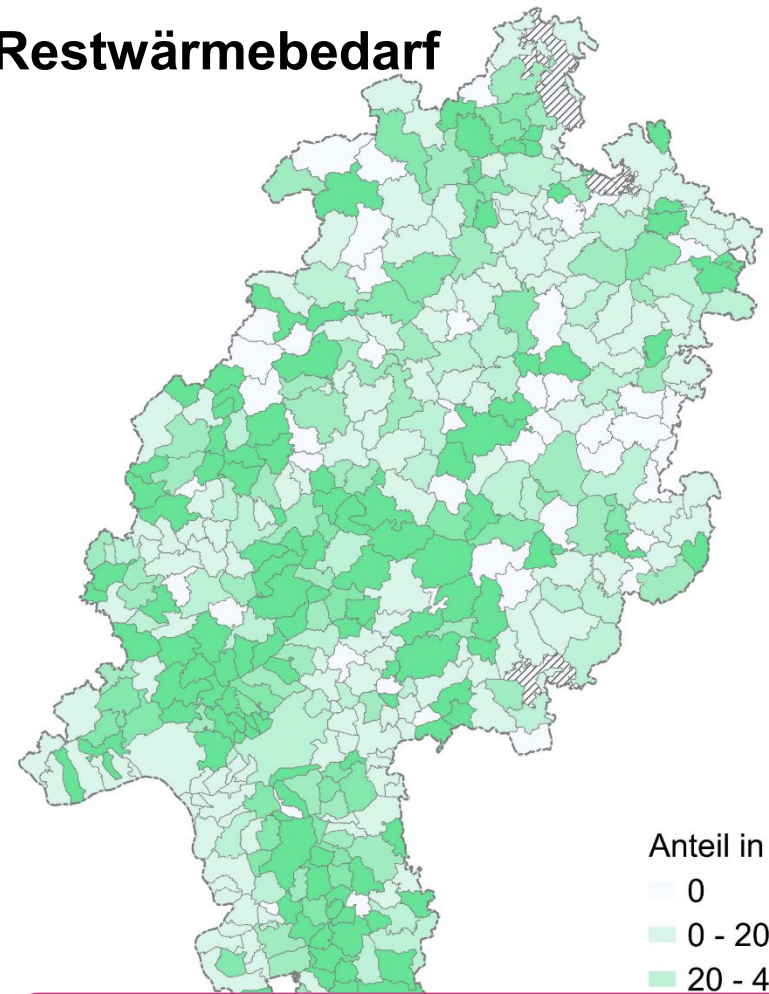
Deckungsanteil in %
 0
 0 - 20
 20 - 40

Fluss-WP



Deckungsanteil in %
 0
 0 - 20
 20 - 40

Restwärmebedarf



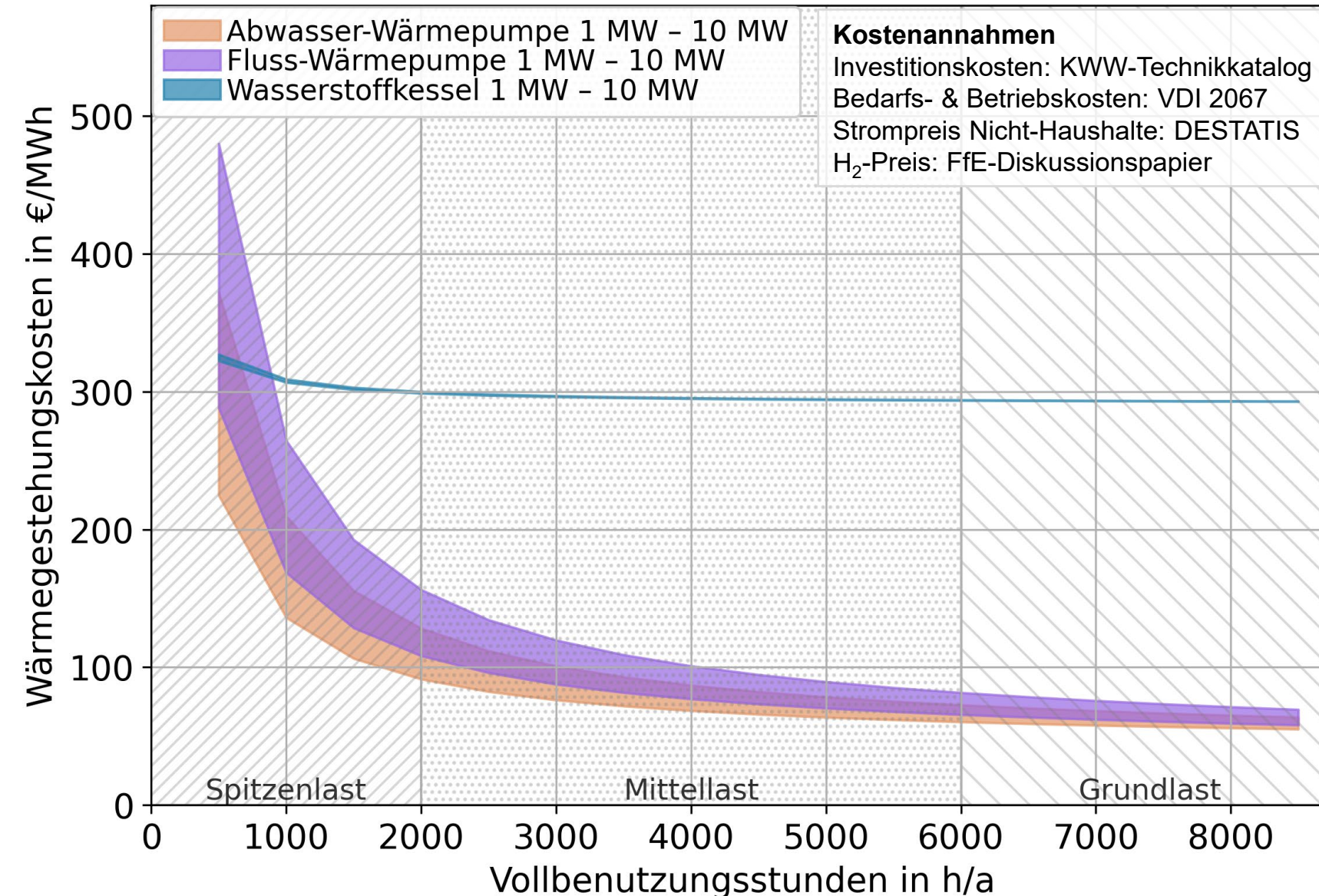
Anteil in %
 0
 0 - 20
 20 - 40

➤ Hoher Deckungsanteil in kleineren Kommunen mit Kläranlage

➤ Höhere Deckungsanteile in Kommunen entlang großer Flüsse, auch mit KA

➤ Restwärmebedarf auch in Kommunen mit Fluss oder KA

Wärmegestehungskosten abhängig von der Betriebsweise

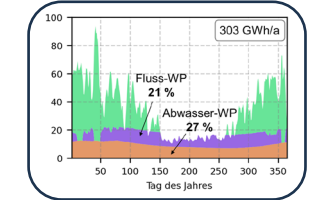


- **Vollkostenrechnung:** Investitions-, Bedarfs-, & Betriebsgebundene Kosten
- inkl. BEW Investitions- & Betriebskostenförderung
- Wärmegestehungskosten \neq Wärmeverkaufspreis

Fluss- & Abwasser WP
außer in der absoluten
Spitzenlast günstiger als
H₂-Kessel

Mittellast: 60 - 160 €/MWh

Zusammenfassung: Potenziale für Fluss- und Abwasserwärme in Hessen



Überlagerung auf Kommunenebene

Wärmeentzugspotenzial

Wärmebedarf

Nutzbare Wärmebereitstellungspotenzial

Klär-anlagen



- T & \dot{V} - Messwerte von 7 Anlagen → Standardprofile
- ~450 Kläranlagen: Trockenwetterabflüsse

$$\Sigma Q = 3,5 \text{ .. } 4,2 \text{ TWh/a}$$

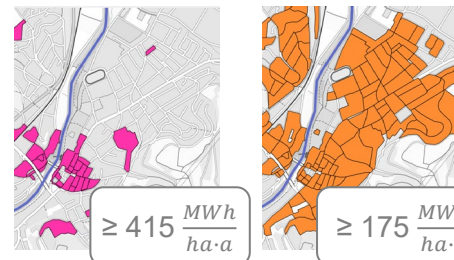
$$Q_{\text{tot}} = 26 \text{ TWh/a}$$

Hessen, 2045, ohne Industrie

Wärmebedarfsdichte in Baublöcken



kleine & große Wärmenetz-Eignungsgebiete



(nach der Wärmepumpe)



$$\Sigma Q = 2,4 \text{ .. } 4,9 \text{ TWh/a}$$

Fließ-gewässer



- T & \dot{V} - Messwerte (~100 Stationen)
- 1500 km Fließgewässer
- Einschränkungen: Schutzgebiete & Temperaturgrenzwerte
- 1D-Modell: Abbildung mehrerer Wärmeentzüge in Reihe

$$\Sigma Q = 111 \text{ TWh/a}$$



$$\Sigma Q = 1,3 \text{ .. } 4,3 \text{ TWh/a}$$

(in 2045, Bereich für kleine .. große Wärmenetzgebiete)

⇒ 11 .. 27 % des Wärmebedarfs kann über Abwasser- & Flusswärmepumpen gedeckt werden

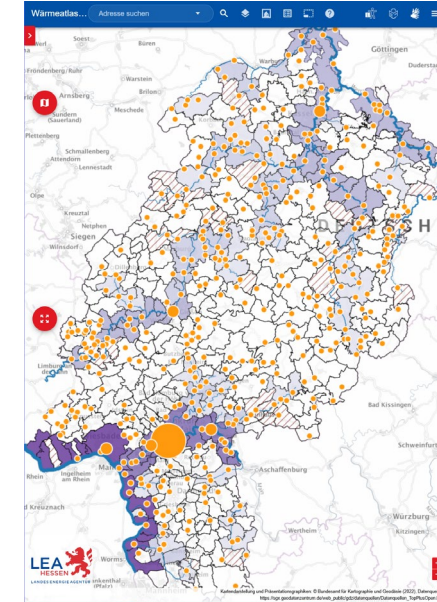
Fazit & Ausblick



Detaillierte Analyse: Wärmepotenziale aus Abwasser & Fließgewässern

Saisonale T & \dot{V} -Profile, Abgleich von Angebot & Nachfrage

- Datenbank zur Unterstützung der Kommunen
- Methodik übertragbar auf andere Regionen
- Grundlage für weitergehende Untersuchungen



waermeatlas-hessen.de

Konservative Annahmen Potenzialberechnung:
kaltes Wetterjahr, strenge Grenzwerte, Abwassertemp.

Optimistische Annahmen Wärmenetzeignung:
Lokalisierung Wärmebedarfe & -quellen, Anschlussquote

Ausblick:

- **Sensitivitätsanalyse** ausgewählter Parameter
- **Anwendung 1D-Modell** auf alle betrachteten Flüsse
- Untersuchung von **Nahfeldeffekten** (Temperaturfahnen, Schichtung, ...)
- Lokalisierung Wärmebedarfe & -quellen durch detailliertere **Wärmenetauslegung** mit Algorithmus