

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## SATELLITE

# Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling

FKZ 02WPR1546 A-M

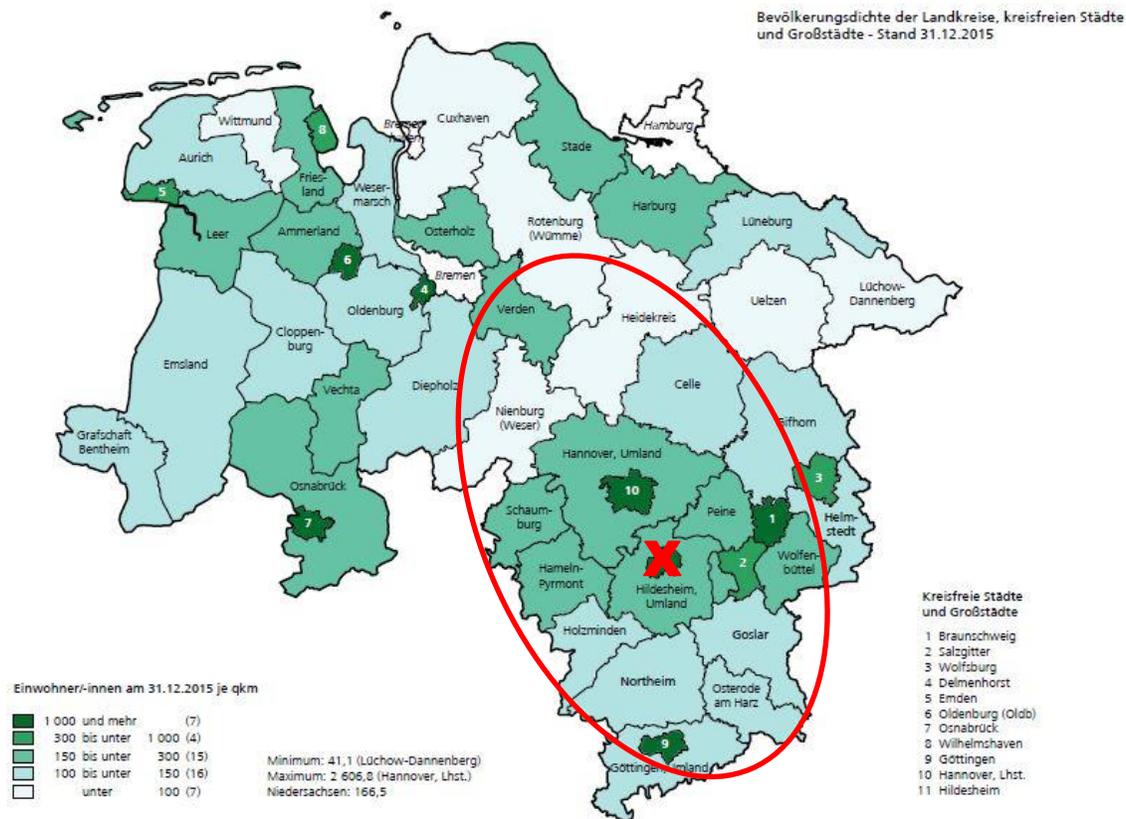
Laufzeit: **1. Phase 01.07.2020 – 30.06.2023** + 2. Phase 01.07.2023 – 30.06.2025

Projektleitung / Gesamtkoordination

Dr.-Ing. M. Beier – ISAH, Leibniz Universität Hannover



# Regionale Rahmenbedingungen SATELLITE

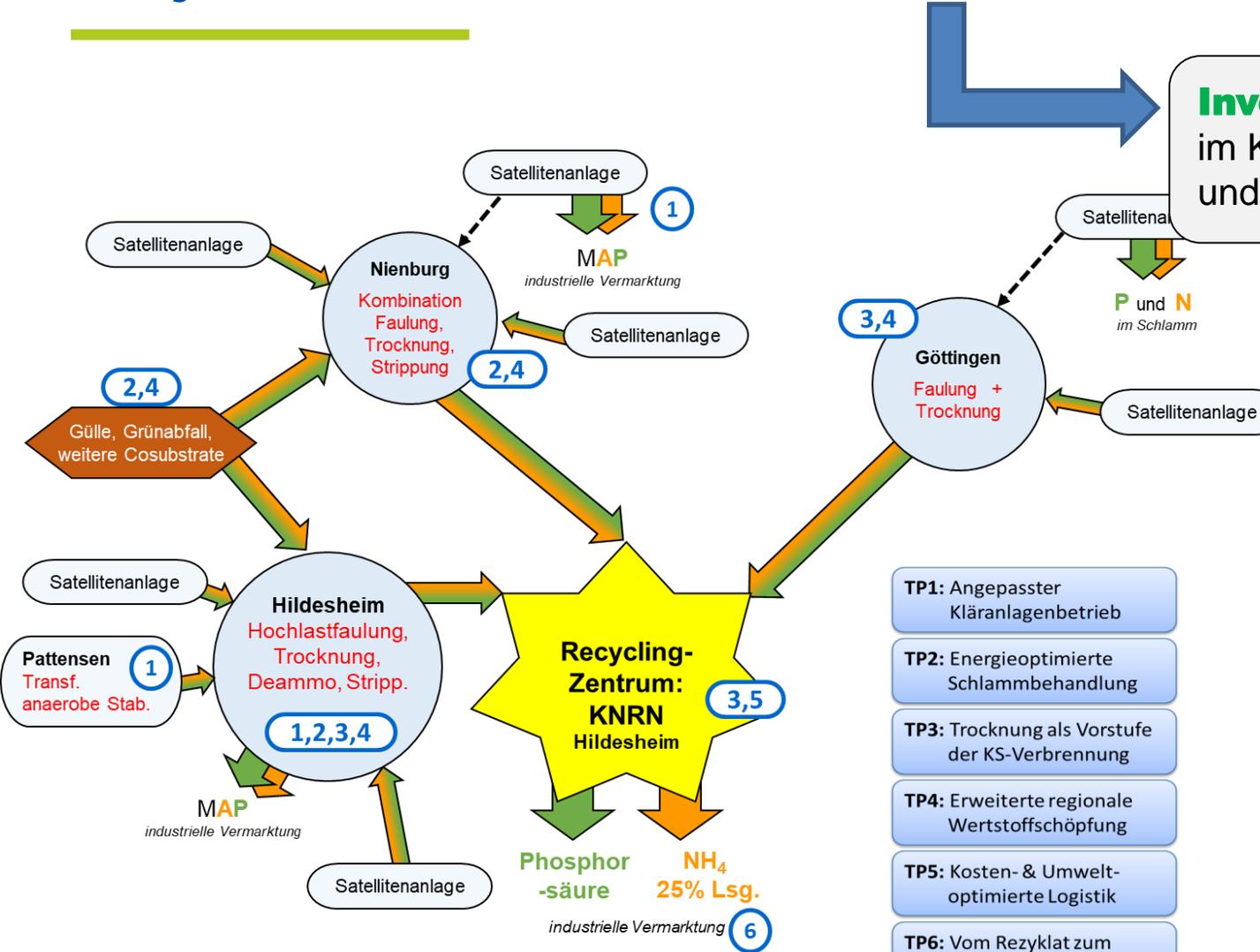


(Bildquelle: [www.ml.niedersachsen.de](http://www.ml.niedersachsen.de))

- stark landwirtschaftlich geprägte Regionen
- Vielzahl selbstverwalteter, kommunal betriebener kleiner Kläranlagen, wenige regionale Zentren mit Faulung
- vorwiegend qualitätsgesicherte landwirtschaftliche Verwertung der Klärschlämme
- Agrarregion mit Nährstoffbedarf und zusätzlichem -potential

Grundlegende Umgestaltung der bisherigen Klärschlammverwertungsstrategien mit Verabschiedung der Klärschlamm- und Düngeverordnung in 2017





**Investitionsentscheidungen**  
 im Kontext Neuauflistung **P-Rückgewinnungsgebot**  
 und **Schlammensorgung**

**Ausgangssituation KNRN-Verbund**

- 56 Kläranlagen (10.000 EW bis > 100.000 EW)
- IST-Zustand Schlamm
  - ⇒ ca. 220.00 t OS/a
  - ⇒ ca. 29.000 t TS/a
  - ⇒ TR im Durchschnitt 13-18%
  - ⇒ Schwankungsbreite von 0,7 bis 85% TR
- Ländliche Struktur → Nährstoffbedarf, Entfernungen, Entscheidungsstrukturen...
- Transportentfernungen (Straße) bis ca. 130 km maximal

**Bau KS-Monoverbrennung am Standort Hildesheim ausgelegt auf 33.500 t TS/a**

- TP1: Angepasster Kläranlagenbetrieb
- TP2: Energieoptimierte Schlammbehandlung
- TP3: Trocknung als Vorstufe der KS-Verbrennung
- TP4: Erweiterte regionale Wertstoffschöpfung
- TP5: Kosten- & Umwelt-optimierte Logistik
- TP6: Vom Rezyklat zum Produkt

# Ebenen der strategischen Investitionsplanung

## a) Gesamt-Schlammmanagement KNRN

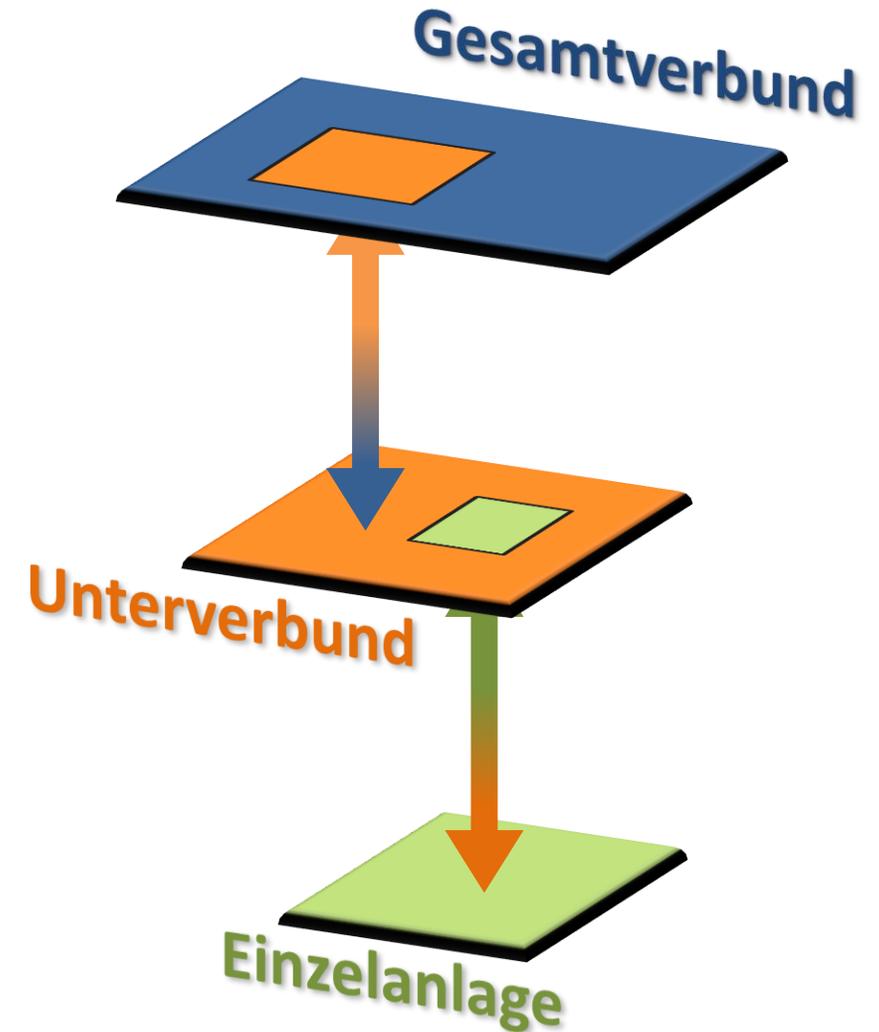
- ↻ Auswirkungen vorgelagerter Entscheidungen auf Schlamm-mengen, -struktur und Transport (Flexibilisierung/Stabilisierung durch übergeordnete Planung und dann Bewirtschaftung)
- ↻ Planung und Implementierung eines nachhaltigen Logistikkonzeptes

## b) Unterverbund / Modellregion

- ↻ Semizentrale Schlammbehandlung
- ↻ Maschinenring, Logistik (Lagern/Transport)
- ↻ Einbeziehung von Wirtschaftsdüngern (Co-Substrat, regionale Nährstoff-Rückführung)

## c) Anpassung Kläranlagenbetrieb

- ↻ Verfahrensauswahl und Transformation der regionalen Kläranlagen



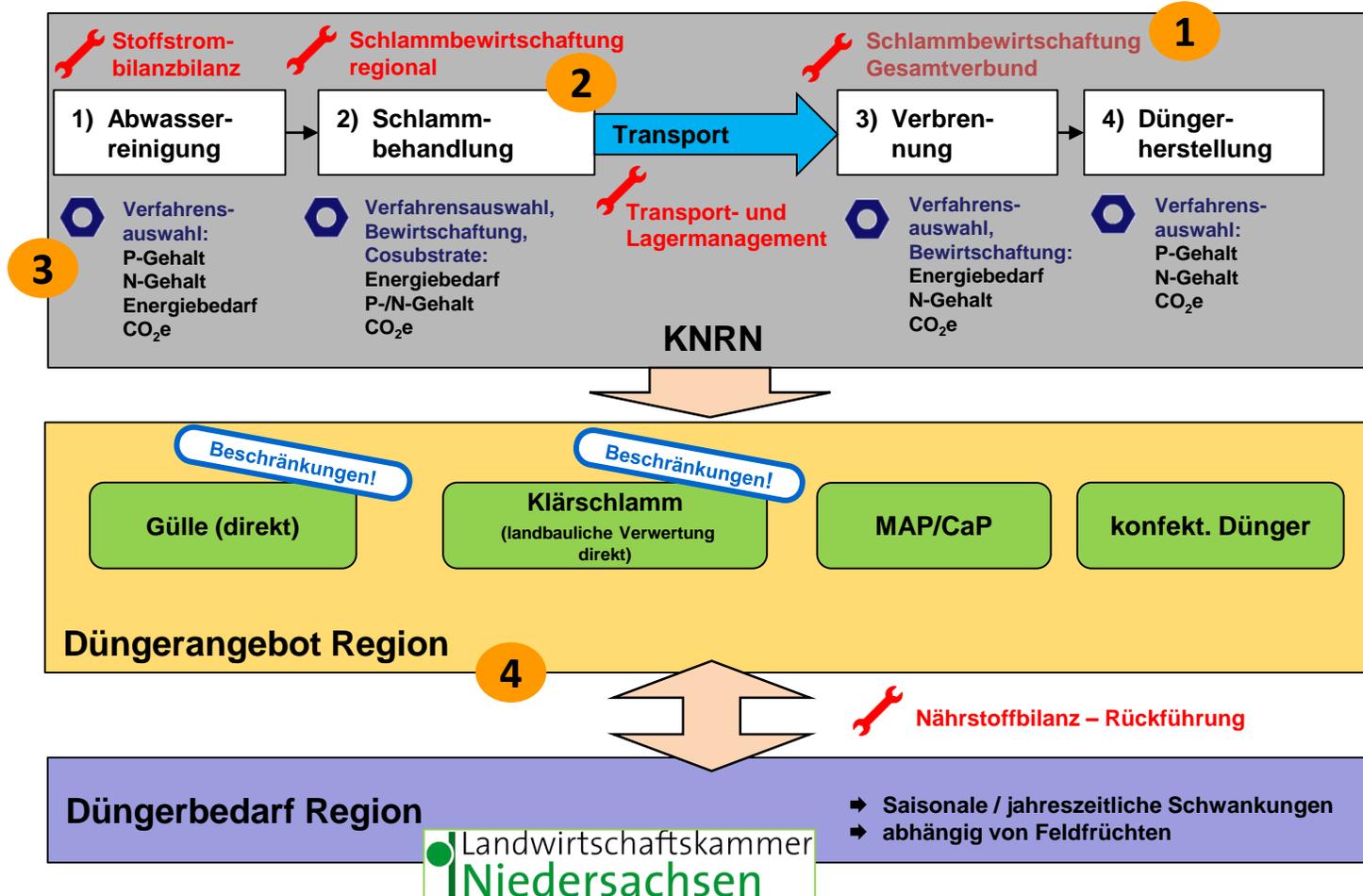
# Betrachtete Verfahrenskette und Themen



Modell- und Methodik-entwicklung



Toolentwicklung



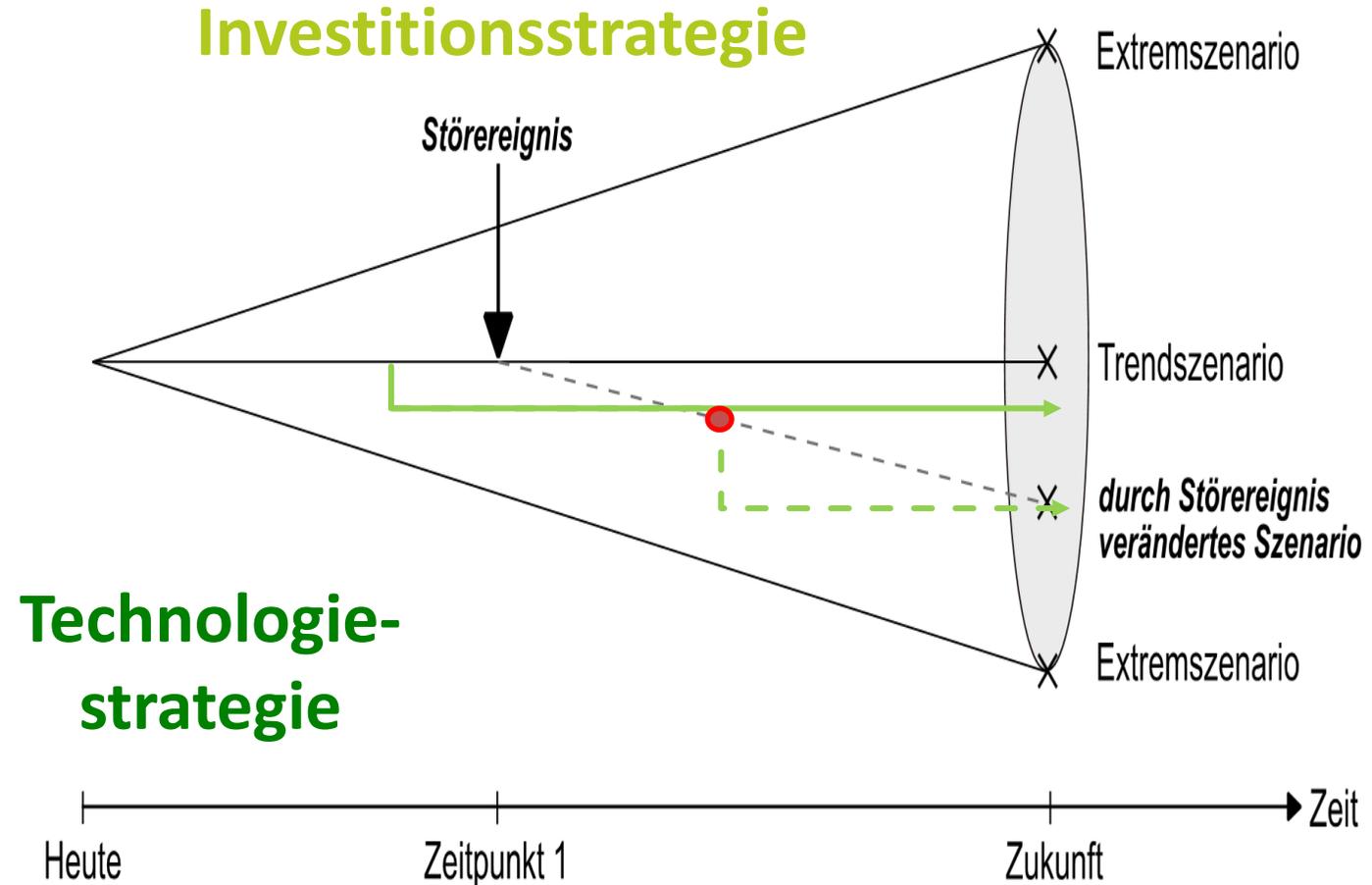
- **Verfahrensbewertung** und Konzeptentwicklung auf Basis von **modellgestützten Szenarienanalysen** für die einzelne Anlage und im Verbund
- Werkzeug zur **Sensitivitätsuntersuchung** des Systems auf zukünftige Entwicklungen oder veränderte Rahmenbedingungen  
Ziel: **Robustheit und Stufenausbau**
- Weiterentwicklung der Modelle zu angepassten **Bewirtschaftungstools**
- **Technikerprobung** für (Sonder-)Verfahren und Erweiterung der **Modulbibliothek**
- Schnittstelle **Nährstoffbereitstellung** zur regionalen und saisonalen Bedarfsplanung der Landwirtschaft

# Entscheidungs-/Planungssituationen



- sehr komplex
- Folgen und Risiken häufig nur schwer im ganzen Umfang einschätzbar, da
  - sehr lange Zeiträume bzw. Lebensjahre von Bauwerken
  - weiter räumlicher Bezug (lokale, regionale, globale Effekte)
  - Unterschiedliche Bereiche betreffend (Wasser, Luft, Boden, etc.)
  - Gleichwertiger Umweltschutzanspruch (Zielkonflikte, Mangelverwaltung, Gefahr der Schadensverlagerung)
- i.d.R. Vielzahl an Alternativen möglich
- Vielzahl von Akteuren involviert

## Strategiekontrolle

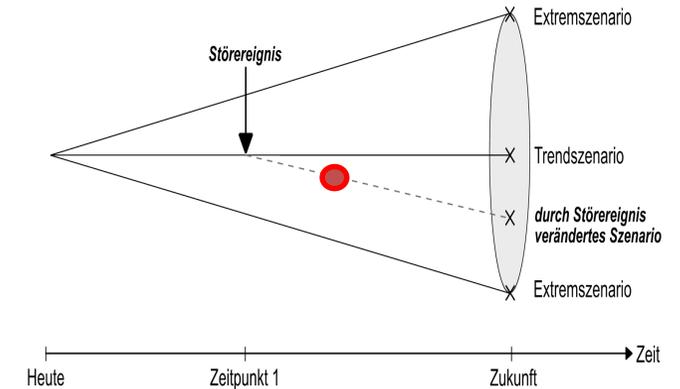
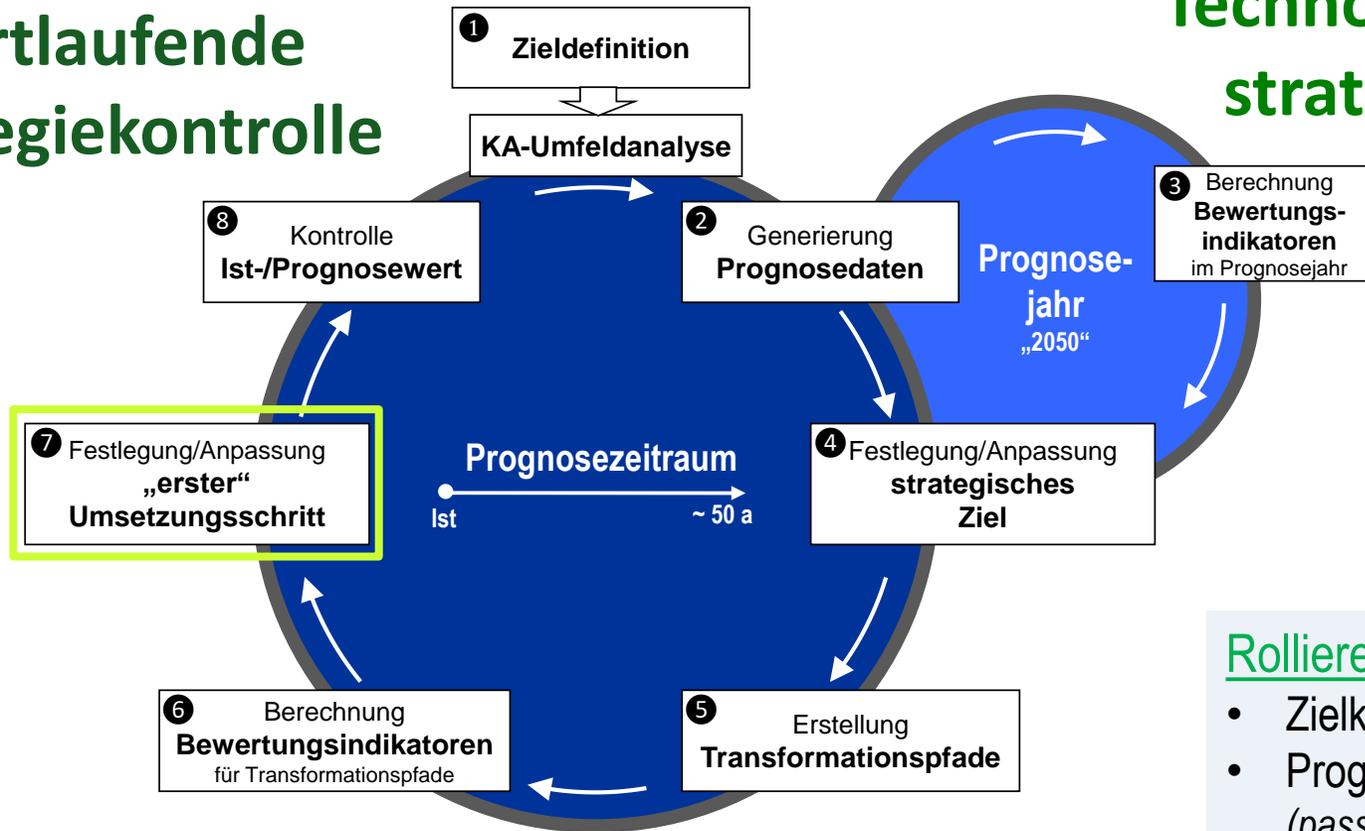


# Elemente der „Strategischen Investitionsplanung“



Fortlaufende  
Strategiekontrolle

Technologie-  
strategie

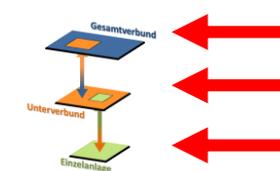


## Rollierende Ansatz – Fortlaufende Kontrolle

- Zielkontrolle (*passt Strategie noch zum Ziel?*)
- Prognosekontrolle (*passen Prognosen noch; gab es Änderungen und damit eine erforderliche Anpassung der Strategie?*)
- Konsistenzprüfung (*passen Technologie-Infos, Modellansätze noch?*)

Investitionsstrategie

# Modelle Gesamtverbund / Unterverbund



*Strukturierte Datenbereitstellung und Wissenstransfer*

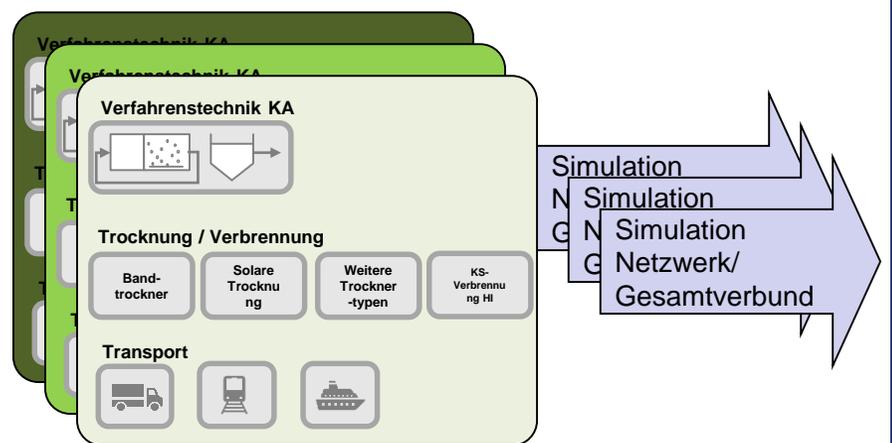
### 1) Bilanzierungs-Modell für die Verbünde

- ⇒ Darstellung IST-Zustand
- ⇒ Szenarienberechnung
- ⇒ Prognosemodelle

### 2) Bewertung

- ⇒ Konzeptauswahl
- ⇒ Transformationsweg – Stufenplan
  - ⇒ Ziel- und Prognosekontrolle
  - ⇒ smarte Bewirtschaftung (Phase 2)

*fallspez. Kennzahlenberechnung*



Stoffströme
Schlamm-mengen und -qualitäten (OS, TM, oTM, P, N, Fe, Al)
Aschemengen und -qualitäten
Reststoffe Verbrennung
Rückgewinnungspotentiale P
Rückgewinnungspotentiale N
Energiebedarf
Strom
Wärme
Kosten
Heizwert Schlamm
Transport
Transportmittel
Transportwege
CO2-Äquivalente
Kosten

**Bewertung Einzelanlage**  
Berücksichtigung individueller Ziele und Randbdg.

**Strategische Ziele Gesamtverbund:**

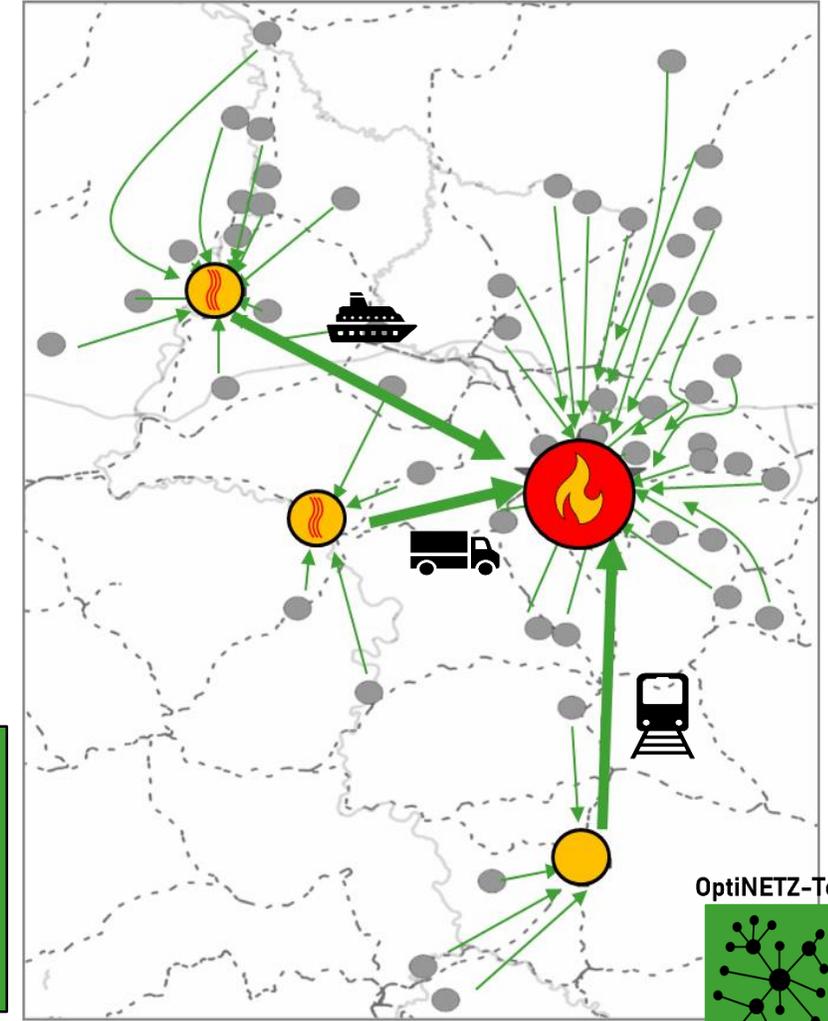
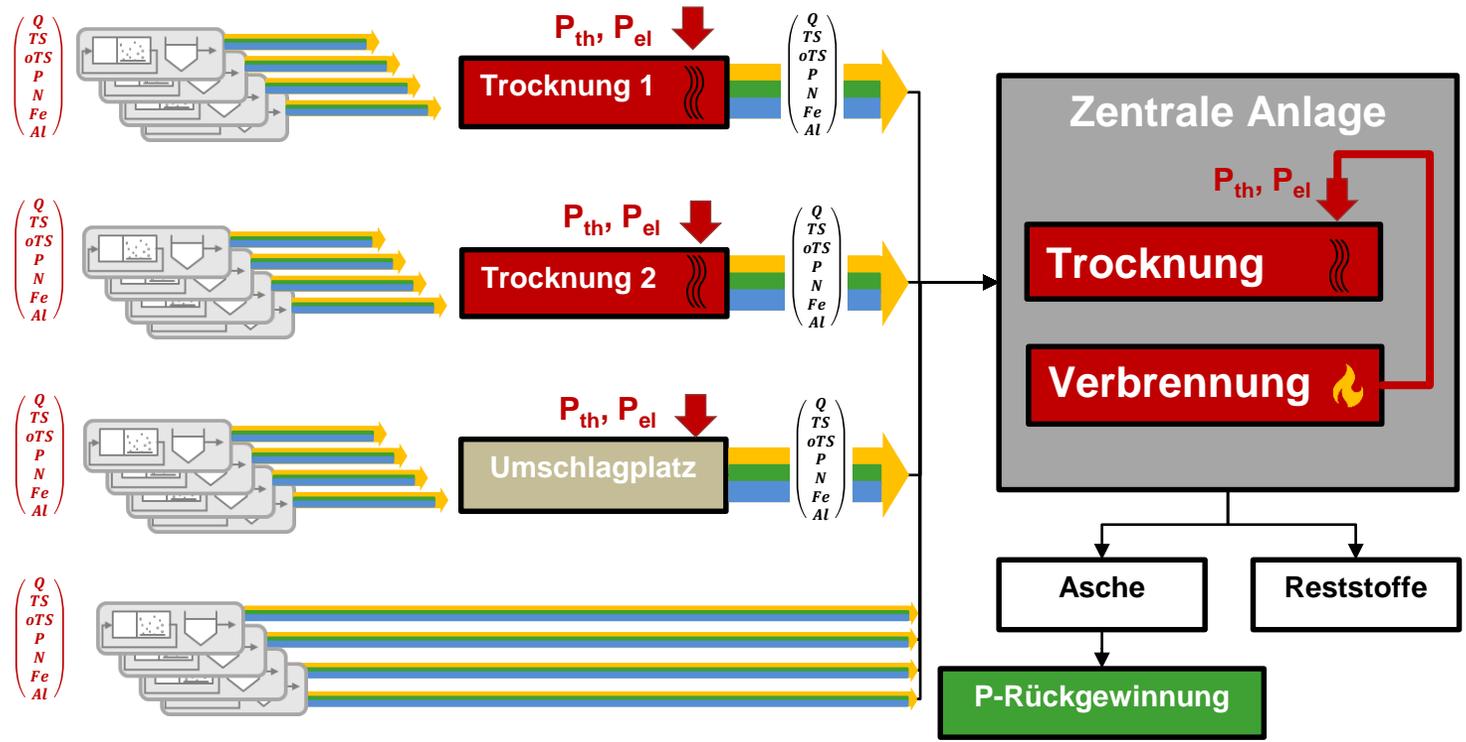
- Minimierung Entsorgungskosten Schlamm
- Maximierung Nährstoffrückgewinnung
- Minimierung Transportkosten
- Einhaltung Fahrtenbegrenzung HI
- Minimierung CO2-Footprint Transport
- ...

**Szenarienauswahl Gesamtverbund**

# Bewirtschaftung Gesamtverbund – OptiNETZ-Tool



INGENIEURBÜRO  
DR. SABRINA BREITENKAMP



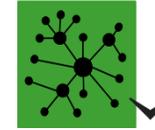
<b>Schlamm</b> ✓ Anfall (Mengen) ✓ Wassergehalt ✓ Qualität ✓ Stabilisierungsgrad ✓ Heizwert	<b>Trocknung + Verbrennung</b> ✓ Energiebedarf ✓ Kosten	<b>Transport</b>  ✓ Kosten ✓ CO <sub>2</sub> -Footprint	<b>Rückgewinnung</b> ✓ Potentielle Rückgewinnung P, N ✓ Reststoffe Rückgewinnung ✓ Kosten
--	---	--	--



# Beispiel Szenarienbetrachtung KNRRN

Gesellschafter und Mengen Stand 06/22

OptiNETZ-Tool



Diepenau-Lavelshoh

Drakenburg

Eystrup

Flecken Steyerberg

Hoya

Leese

Leeseringen

Lemke

Nienburg/Weser

Rehburg

Steimbke

Stolzenau

Uchte

Verden/Aller

Bad Pyrmont

Barsinghausen

Delligsen

Elze

Freden

Gehle-Holpe (Volksdorf)

Hameln

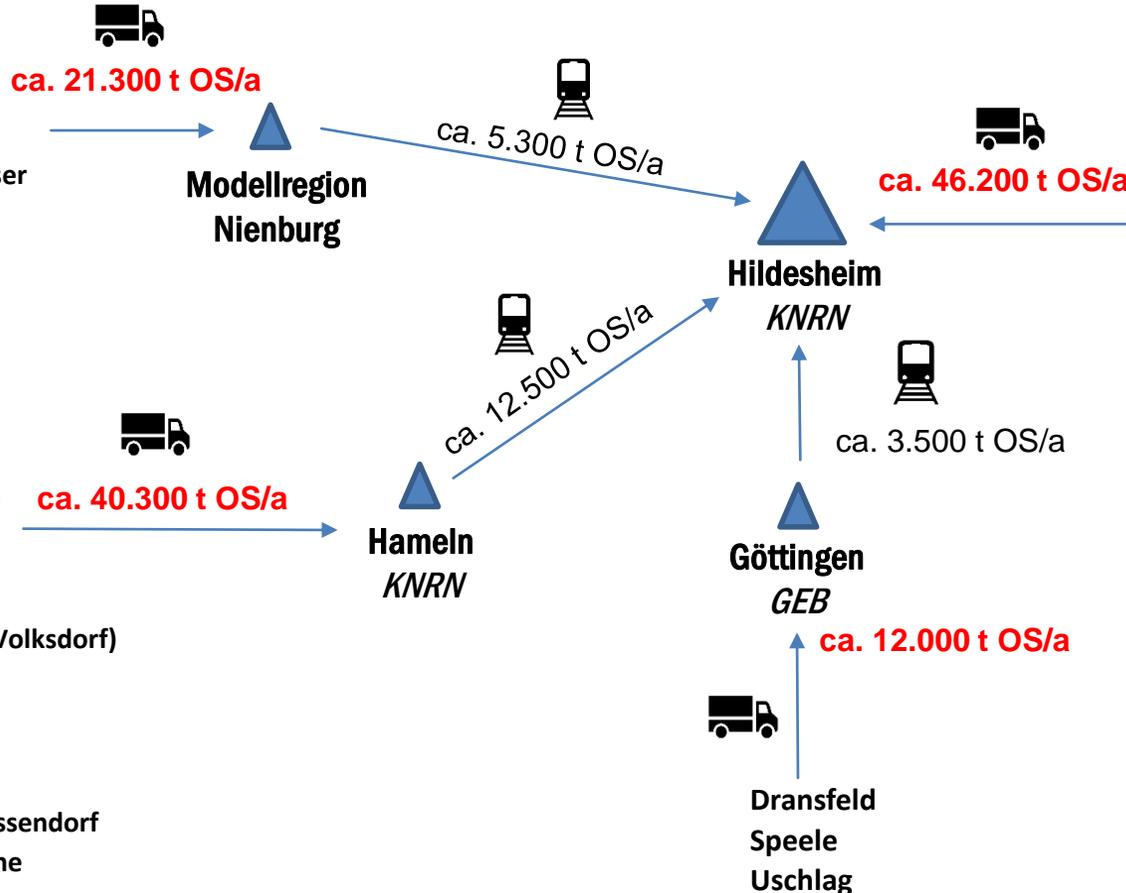
Holzminden

Langenhagen

Springe

Wedemark/Bissendorf

Wunstorf- Luthe



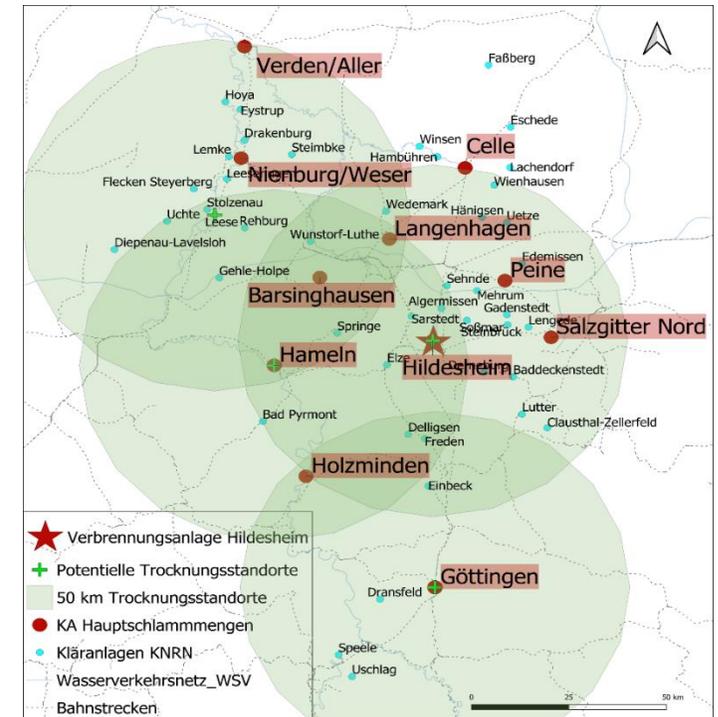
- Algermissen
- Baddeckenstedt
- Celle
- Clausthal-Zellerfeld
- Derneburg
- Edemissen
- Einbeck
- Eschede
- Faßberg
- Hambühren
- Hänigsen
- Hildesheim
- Lachendorf
- Lengede
- Lutter
- Mehrum
- Peine
- Salzgitter Nord
- Sarstedt
- Sehnde
- Soßmar
- Steinbrück
- Uetze
- Wienhausen
- Winsen
- Wipshausen

## 1-3 Trocknungsstandorte:

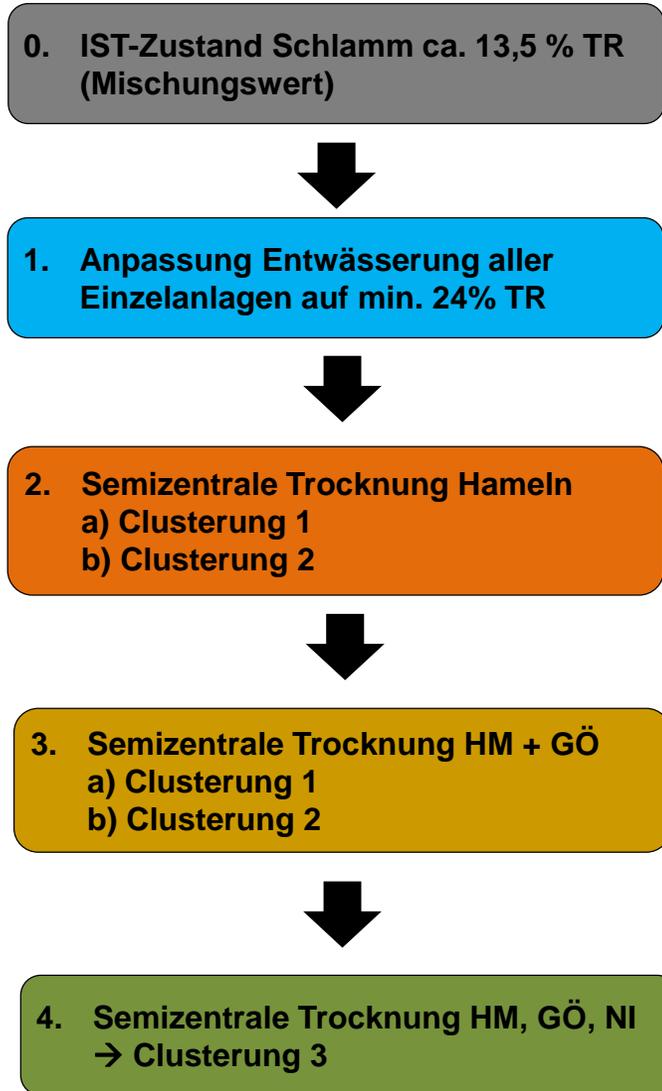
- Hameln: Volltrocknung auf 85%TR min.
- Göttingen: Volltrocknung auf 85% TR min.
- Nienburg: Volltrocknung auf 85% TR min.

## min. Entwässerungsgrad aller Anlagen:

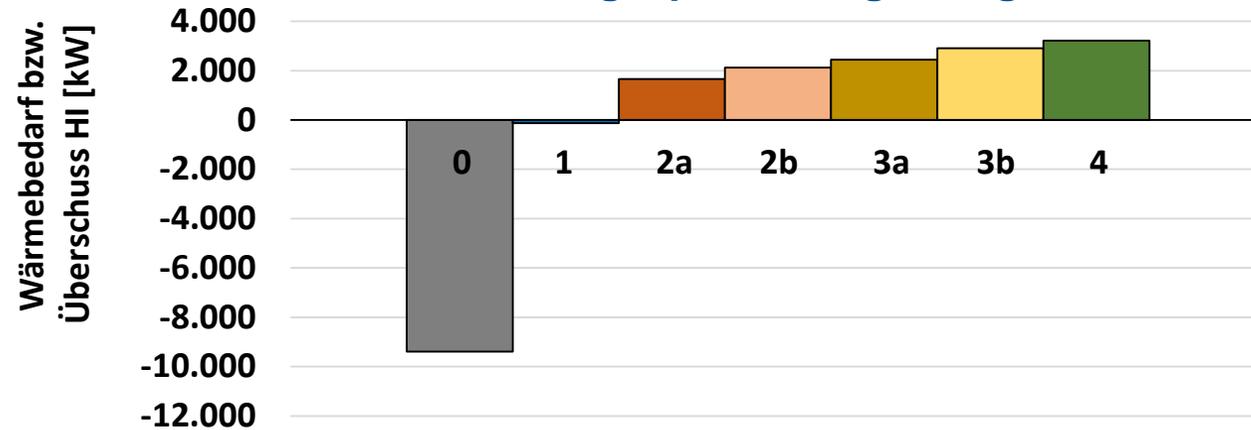
- Entwässerung neu 22%, sonst status quo



# Beispiel Szenarienbetrachtung KNRRN

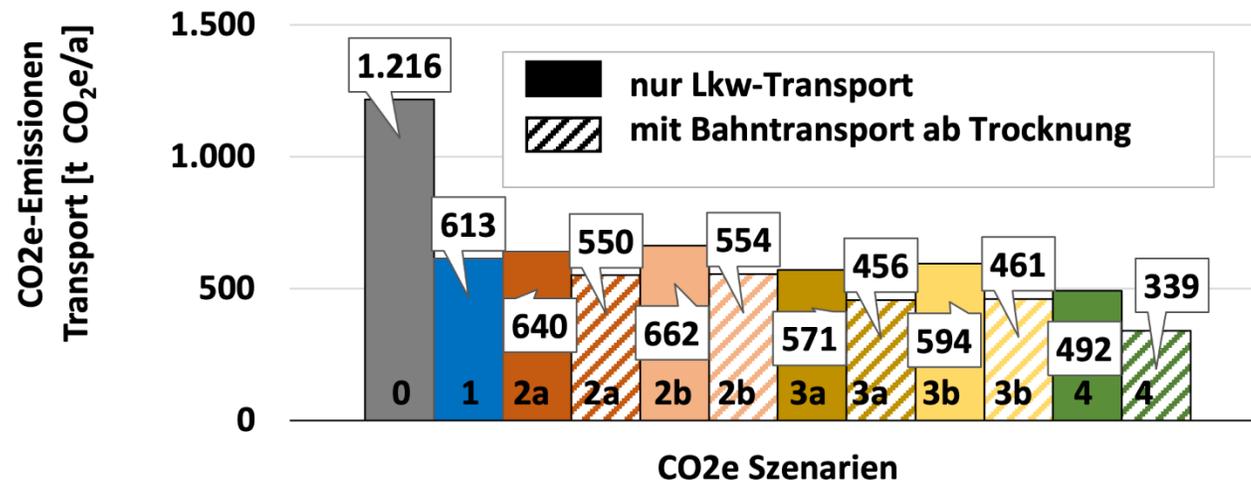


### Zielsetzung Optimierung Energiebilanz Hildesheim



Delta Abwärme Verbrennung - Wärmebedarf Trocknung

### Zielsetzung Minimierung CO<sub>2</sub>-Äquivalente Transport



# Fragestellung dezentraler Verbund



Ziel:

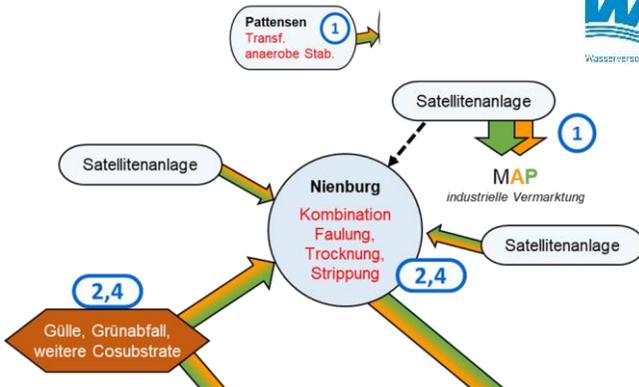
## Abstimmung der Anlageninvestitionen

unter Einbeziehung lokaler Spezifika die Gesamtkette der Klärschlammentsorgung wirtschaftlich und energetisch optimieren

## Strategische Investitionsplanung im regionalen Verbund

mit Blick auf KA-Betrieb, Schlammstabilisierung, -entwässerung und -transport

- Maschinenring „Entwässerung“ Planung und Management
- Semi-zentrale Schlammbehandlung
- Teiltrocknung (solar)
- Einbeziehen von Wirtschaftssubstraten
- Regionaler Nährstoffbedarf und Stickstoffausschleusung



# Beispiel Modellregion + Industrie(substrate)



Industriesubstrate/-potentiale Biogasgewinnung:  
Potentialanalyse 2022 anhand von Stichproben

Chr. Hansen Prozessabwasser (Biochemie)

$$Q_{\text{Biogas, Chr. Hansen}} \approx 447.000 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Chr. Hansen}} \approx 4.471.250 \text{ kWh/a}$$

Oxxynova Prozessabwasser (Chemie)

$$Q_{\text{Biogas, Oxxynova}} \approx 2.390.251 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Oxxynova}} \approx 23.902.510 \text{ kWh/a}$$

Göbber Prozessabwasser  
(Lebensmittel, Konfitüren)

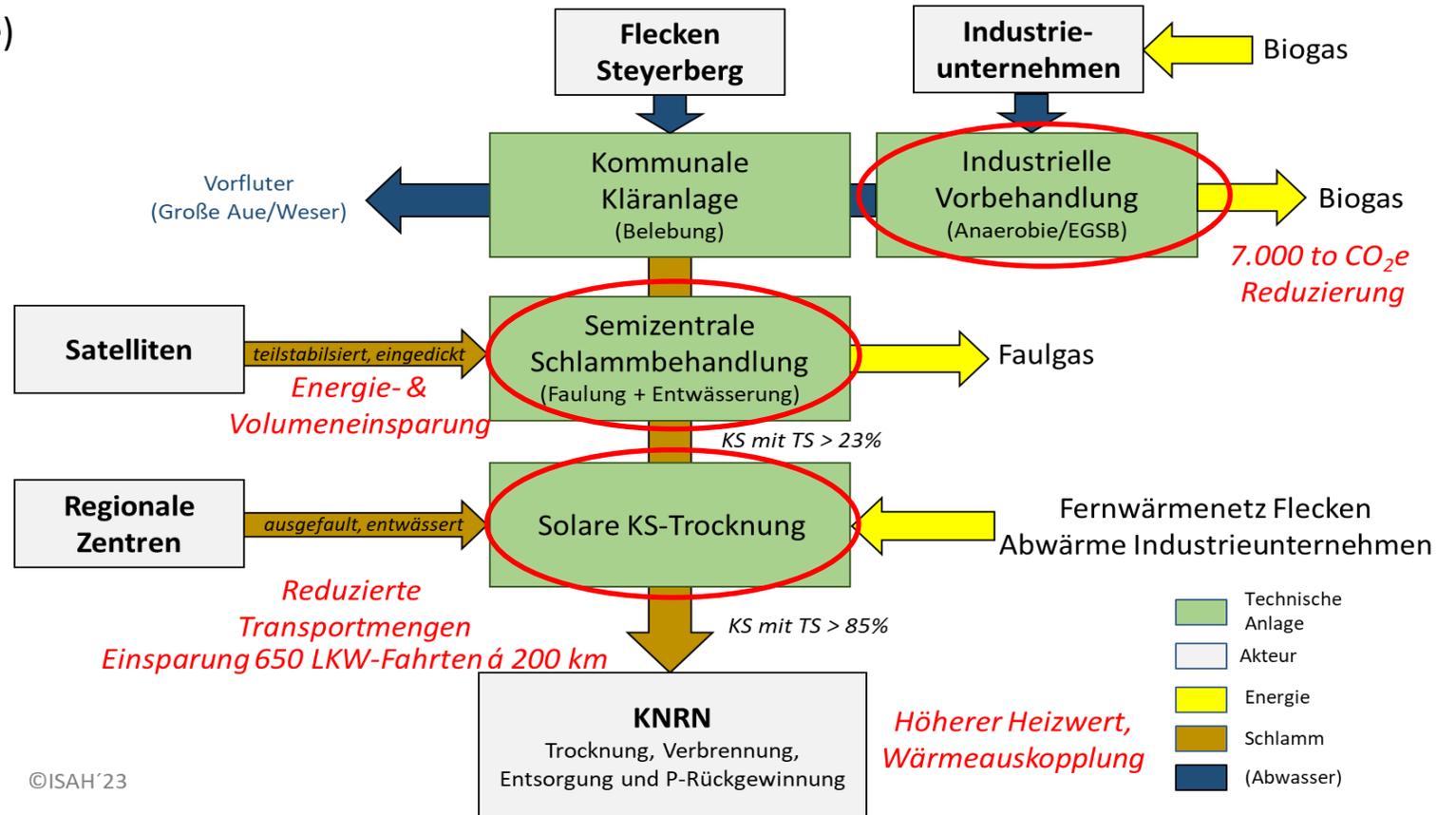
$$Q_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 52.978 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 529.780 \text{ kWh/a}$$

Frischli Prozessabwasser  
(Lebensmittel, Molkeprodukte)

$$Q_{\text{Biogas, Frischli}} \approx 425.234 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Frischli}} \approx 4.252.340 \text{ kWh/a}$$

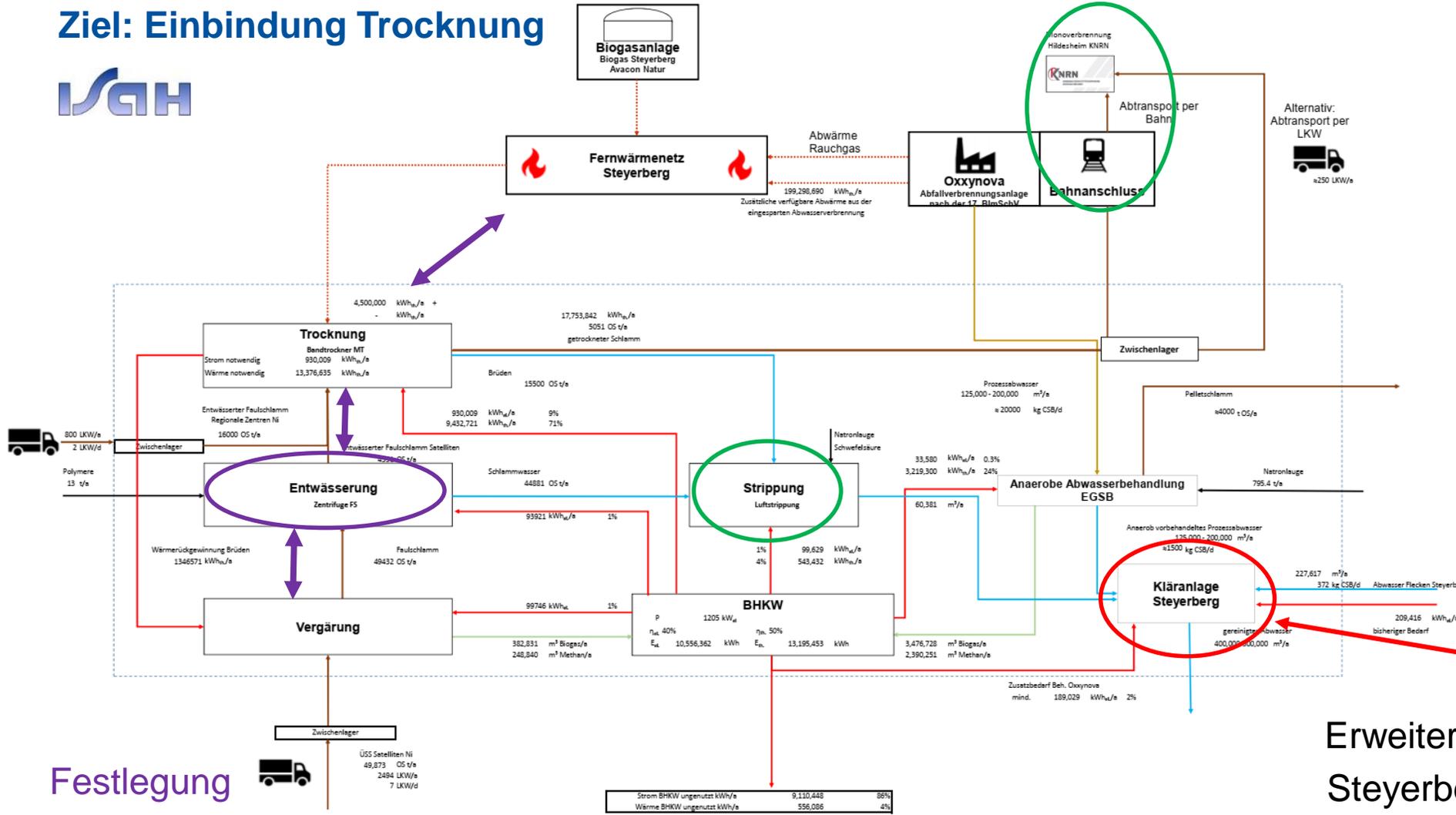


©ISAH'23

# Energiebilanzmodell - Dezentrale Schlammbehandlung



Ziel: Einbindung Trocknung



## Gesamtbilanz

Ca. 9.000 MWh<sub>el.</sub>  
Überschuss pro Jahr

Rund 200.000 MWh<sub>th.</sub>  
Überschuss pro Jahr

Festlegung  
Entwässerungsgrad

Erweiterung der Kapazität der KA Steyerberg zwingend erforderlich



# Beispiel Modellregion + Industrie(substrate)



Industriesubstrate/-potentielle Biogasgewinnung:  
Potentialanalyse 2022 anhand von Stichproben

Chr. Hansen Prozessabwasser (Biochemie)

$$Q_{\text{Biogas, Chr. Hansen}} \approx 447.000 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Chr. Hansen}} \approx 4.471.250 \text{ kWh/a}$$

Oxxynova Prozessabwasser (Chemie)

$$Q_{\text{Biogas, Oxxynova}} \approx 2.390.251 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Oxxynova}} \approx 23.902.510 \text{ kWh/a}$$

Göbber Prozessabwasser  
(Lebensmittel, Konfitüren)

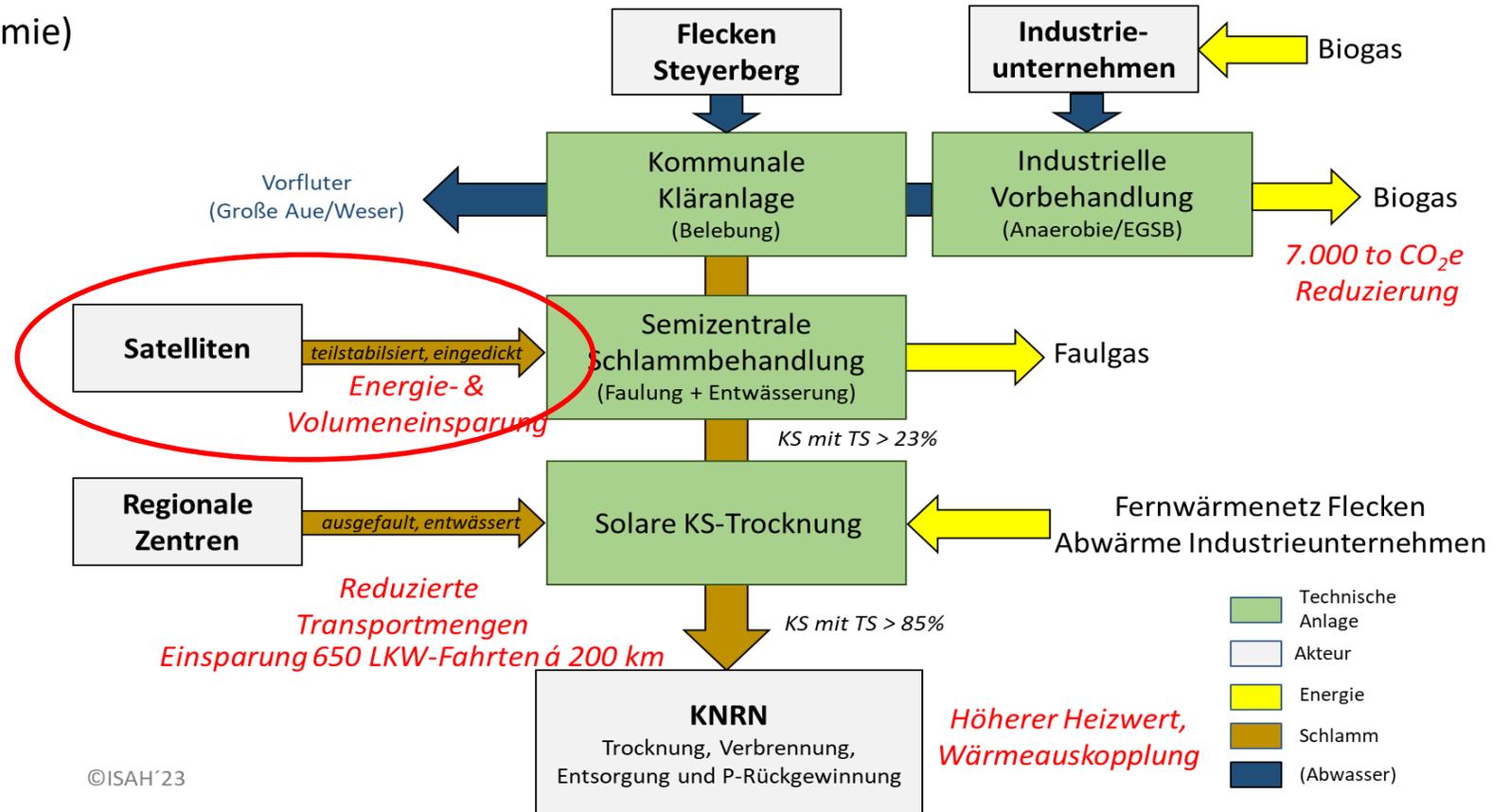
$$Q_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 52.978 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 529.780 \text{ kWh/a}$$

Frischli Prozessabwasser  
(Lebensmittel, Molkeprodukte)

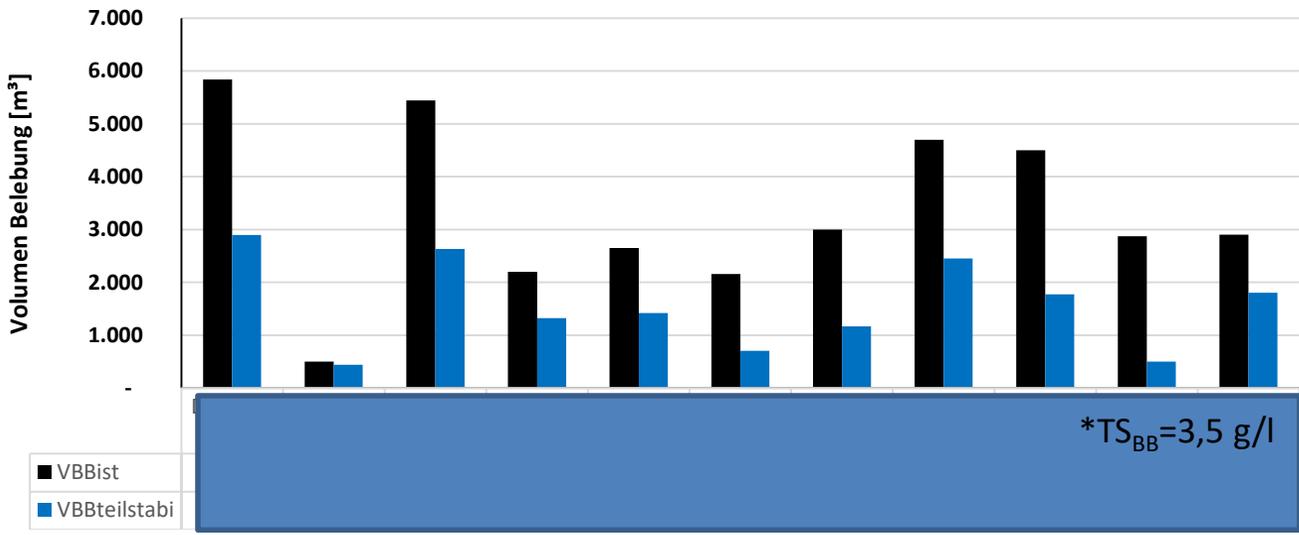
$$Q_{\text{Biogas, Frischli}} \approx 425.234 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

$$E_{\text{Biogas, Frischli}} \approx 4.252.340 \text{ kWh/a}$$



©ISAH'23

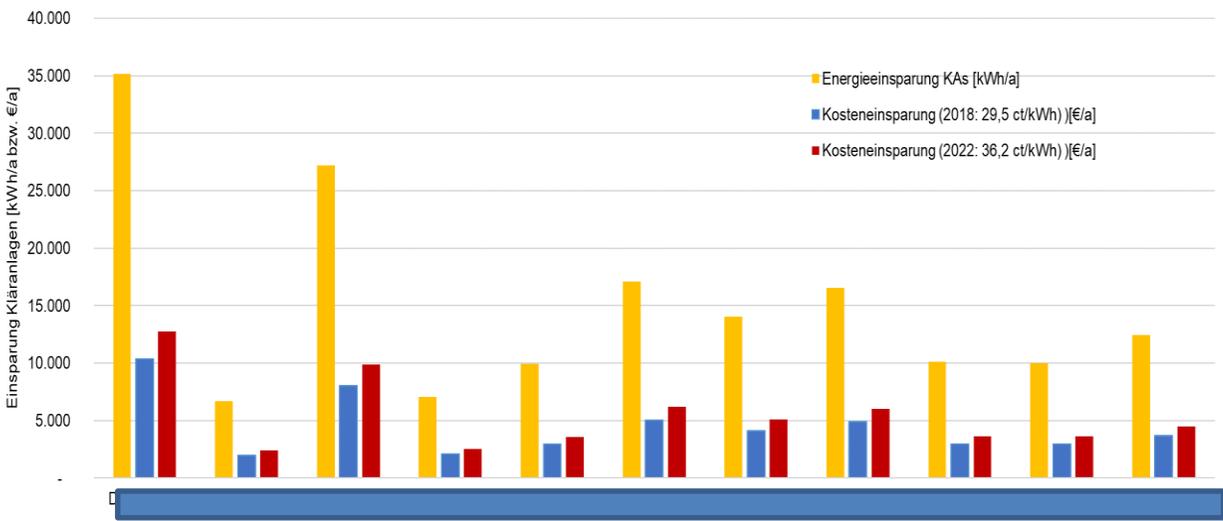
# Potential Umstellung aerobe Teilstabilisierung



Einsparpotential  
 - Beckenvolumen  
 (zusätzliche Kapazität,  
 mittelfristig reduzierte  
 Anlagentechnikkosten)

## Überblick CO<sub>2</sub>e-Emissionen semizentrale Faulung

- Treibhausgasemissionen:
- Biogasnutzung Faulung (Erdgassubstitution) ≈ -532 to CO<sub>2</sub>e/a
  - Verringerung Strombezug Satelliten ≈ -81 to CO<sub>2</sub>e/a
  - Betrieb Faulung ≈ 30 to CO<sub>2</sub>e/a
  - Transport Nassschlamm ≈ 96 to CO<sub>2</sub>e/a
  - Bilanz ≈ -487 to CO<sub>2</sub>e/a



Einsparpotential  
 - Belüftungsenergie  
 Hauptstrombiologie

# Teilstabilisierung „Satellit“

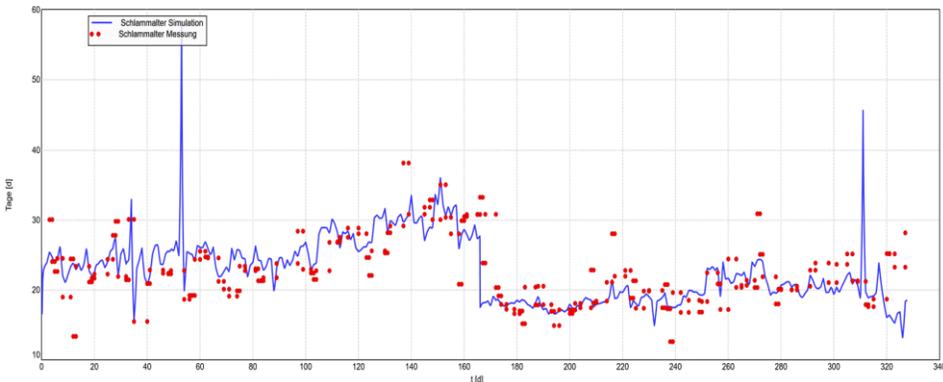
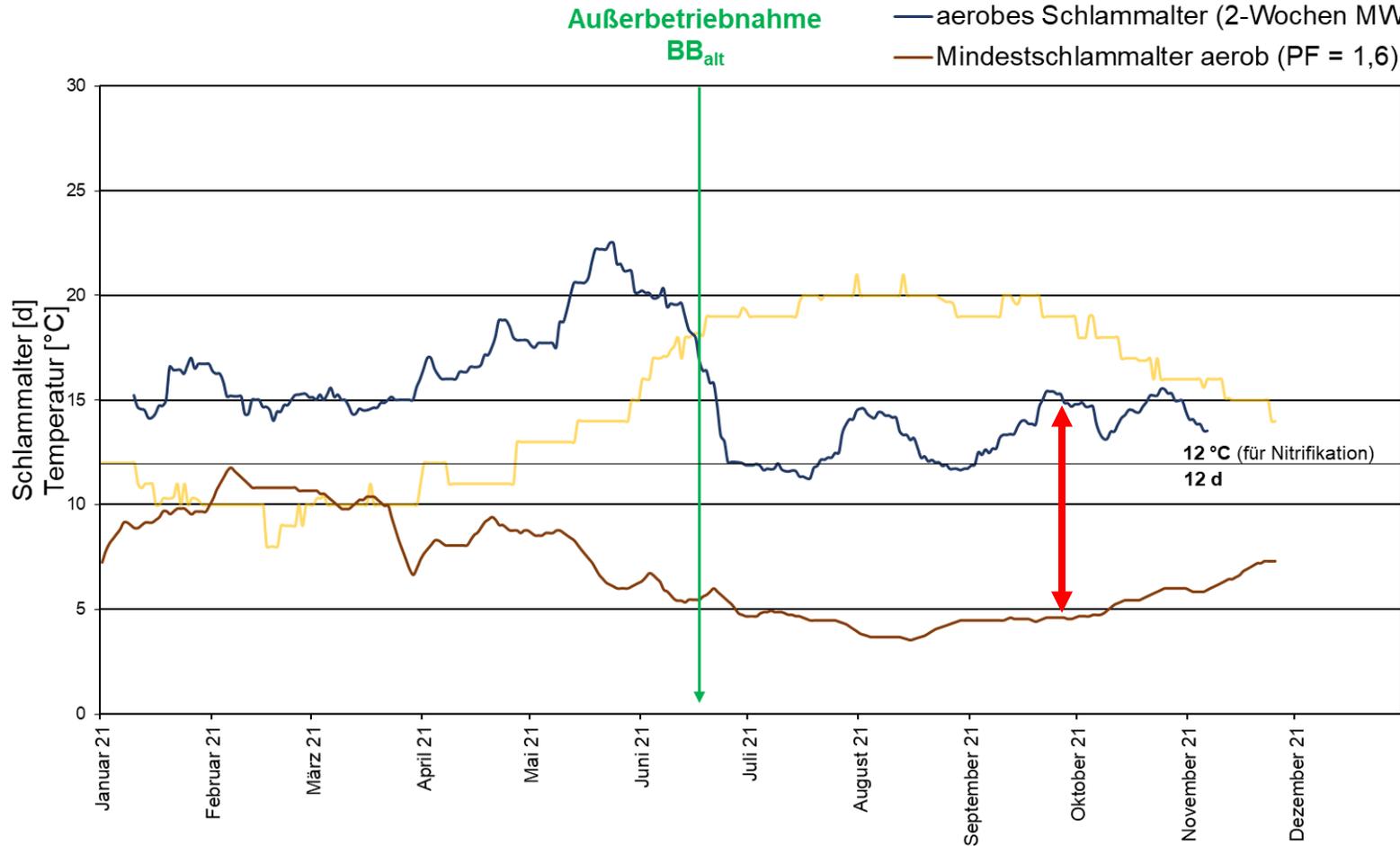


- Ziel-Ablaufwerte  
 $N_{\text{ges,anorg}} = 9,0 \text{ mg/l}$   
 $NH_4 = 2,0 \text{ mg/l}$   
eingehalten

## GT-Umstellung aerob/anaerobe Stabilisierung

- Stromverbrauch bisher reduziert um 12%
- Modellaufbau → Erprobung Umstellung später Bewirtschaftung
- Phase 2
  - Weitere Reduzierung Belüftungsenergie
  - Betriebsstrategie für stabiles  $t_{TS}$

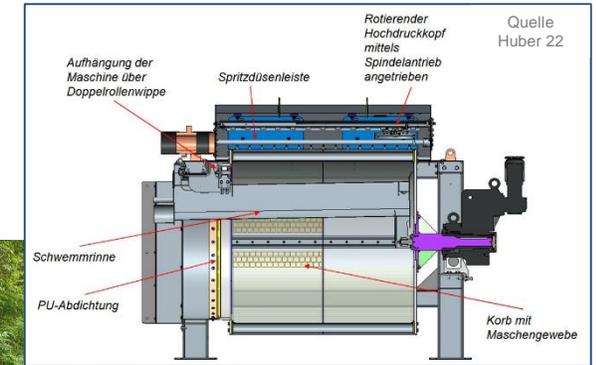
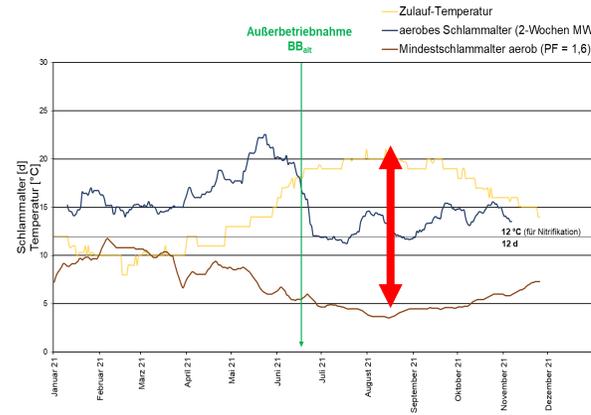
- Zulauf-Temperatur
- aerobes Schlammalter (2-Wochen MW)
- Mindestschlammalter aerob (PF = 1,6)



# Teilstabilisierung „Satellit“



- Ziel-Ablaufwerte  
 $N_{\text{ges,anorg}} = 9,0 \text{ mg/l}$   
 $NH_4 = 2,0 \text{ mg/l}$   
 eingehalten
- Stromverbrauch bisher reduziert um 12%
- Erprobung Umstellung später Bewirtschaftung
- Phase 2
  - Reduzierung Belüftungsenergie
  - Betriebsstrategie für stabiles  $t_{TS}$
- Integration **PS-Abtrennung**  
 Sommer 2022 Trommelsieb  
 → PS-Lager- und Transport



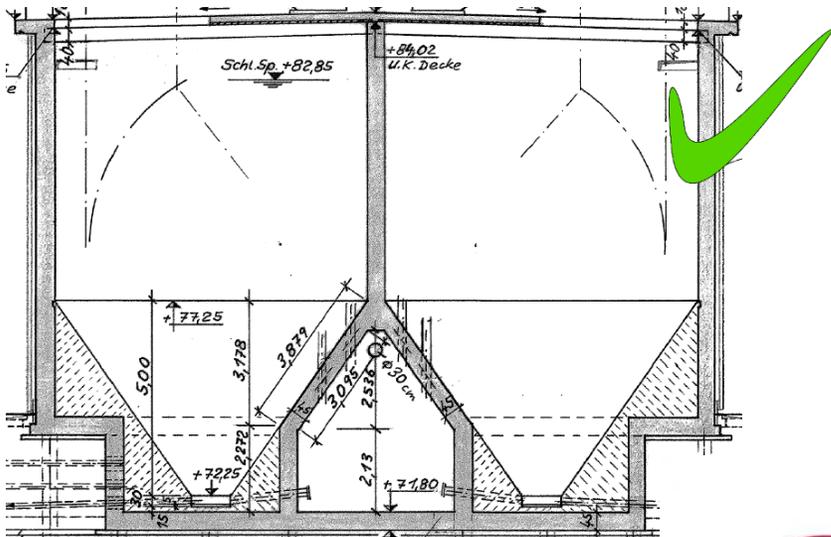
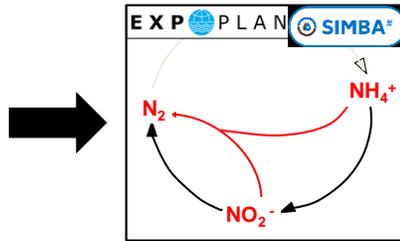
- ➔ 80.000 m<sup>3</sup>/a zusätzlicher Biogasanfall  
 $\cong 517.000 \text{ kWh/a}$  ( $\approx 200.000 \text{ kWh}_{\text{elektr.}}/\text{a}$ )
- ➔ Reduzierter CSB-Belastung/Angebot  
 1.200 kg CSB/d ( $\eta \approx 50\%$ )

# Schwerpunkt angepasster KA-Betrieb



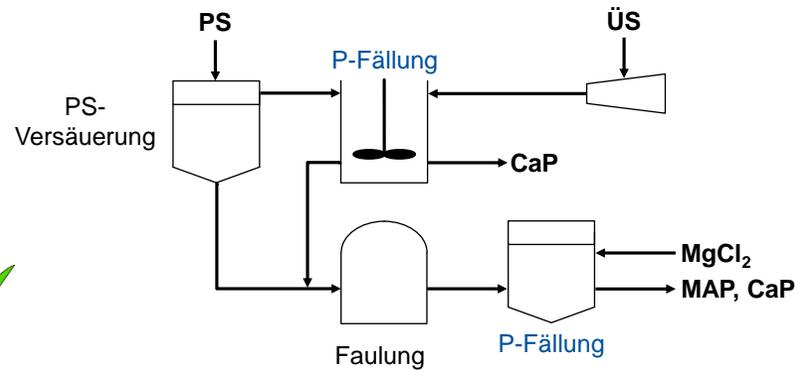
## Deammonifikation Brüden/smarte Regelung

Deammonifikation - einstufig - SBR	
$B_R$	$0.5 \text{ kg N/m}^2\text{d}$
$C_{O_2}$	$\sim 1,5 \text{ mgO}_2\text{/L}$
$t_{Air\_On}$	$2 \text{ h}$
$t_{Air\_Off}$	$4 \text{ h}$
$t_{Settle}$	$1 \text{ h}$
$t_{Decant}$	$1 \text{ h}$
$TS^*$	$6.0 \text{ g/L}$



## KS-Qualität I

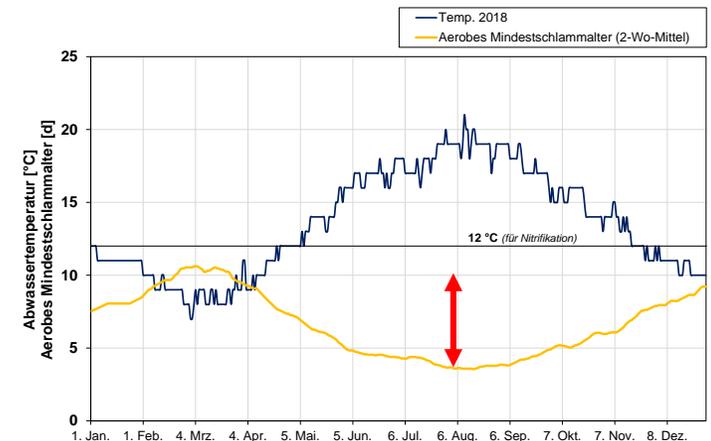
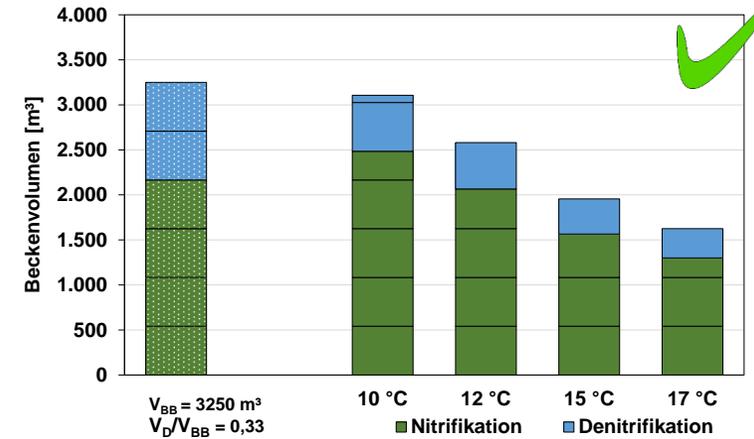
P-Bindung und -konzentration



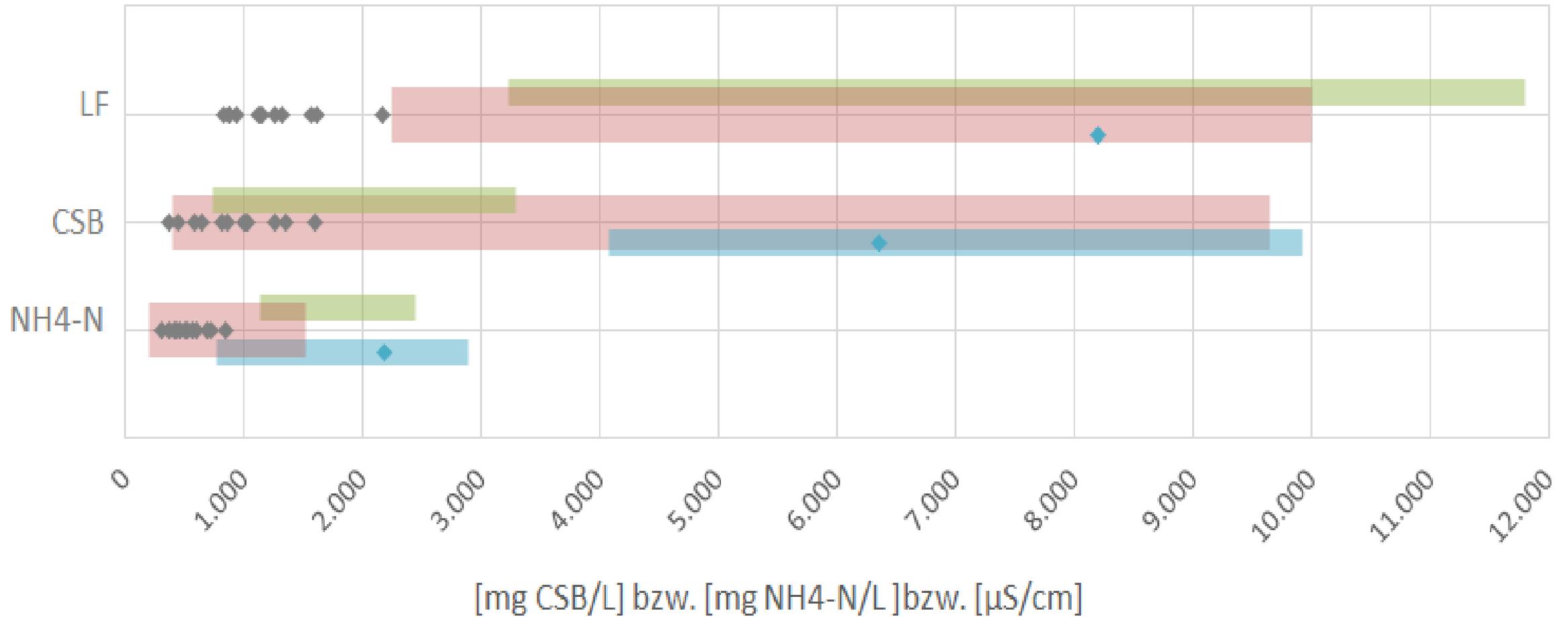
Untersuchung von Verfahren zur P-Aufkonzentrierung im Überschuss- bzw. Faulschlamm auf KAs mit biologischer P-Elimination Ca-Phosphat, Struvit vs. Fe-, Al-Fällung

## KS-Qualität II

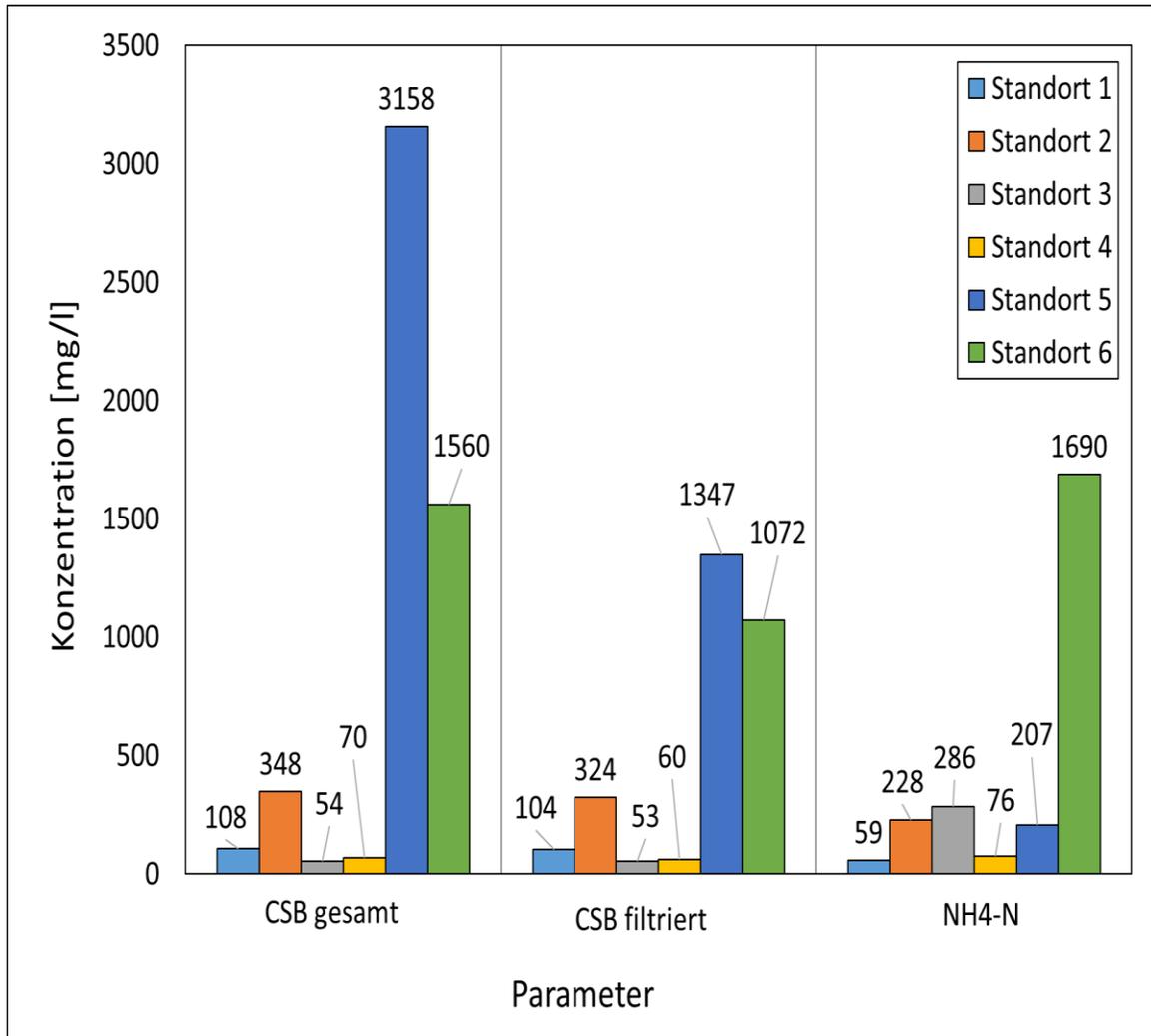
Heizwert / Teilstabilisierung



# Brüdenqualität



# Brüdenqualität Screening - „Hemmung“



## Kennzahlen

- 1) Dünnschicht-/Lineartrockner; 225 – 230°C; 75 – 80 %TR
- 2) Dünnschicht-/Scheibentrockner, 190°C; 80 – 85 %TR
- 3) Dünnschichttrockner; 170°C; 42 %TR
- 4) Trommeltrockner; 360°C; 93 %TR
- 5) Scheibentrockner; 110 – 120°C; 93 %TR
- 6) Scheibentrockner; 168°C; 39 %TR

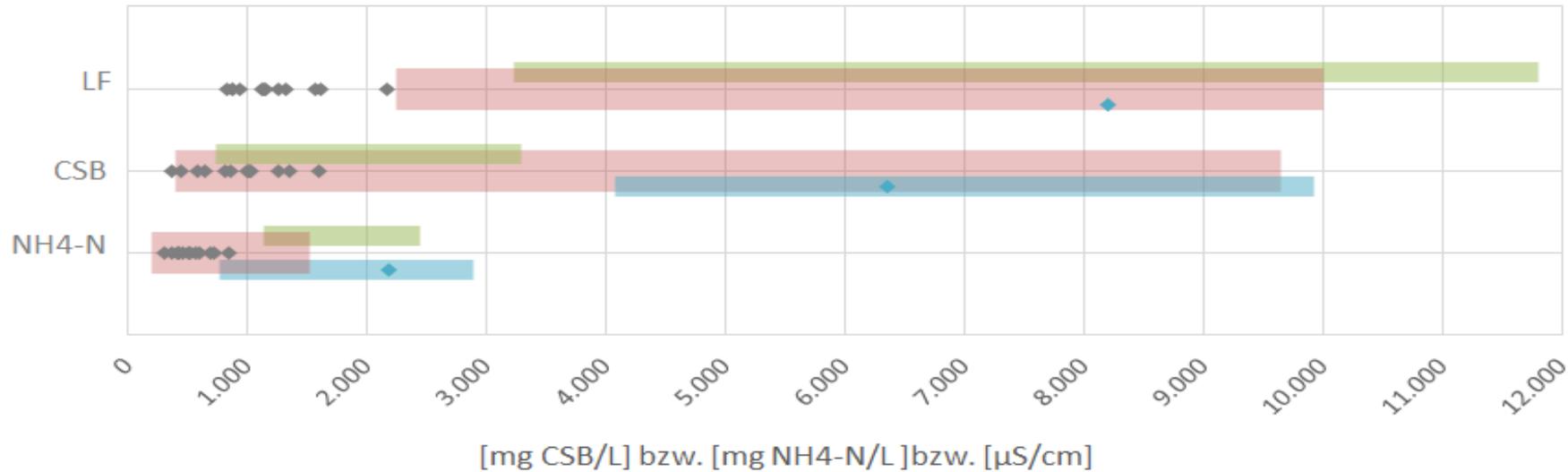
 Einfluss  
Schlammqualität

## Hemmung Nitrifikation

- Standort 1) Keine Hemmung
- Standort 2) Bis zu 60% (1:2 25%)
- Standort 3) Bis zu 6% (1:2 keine Hemmung)
- Standort 6) Keine Hemmung



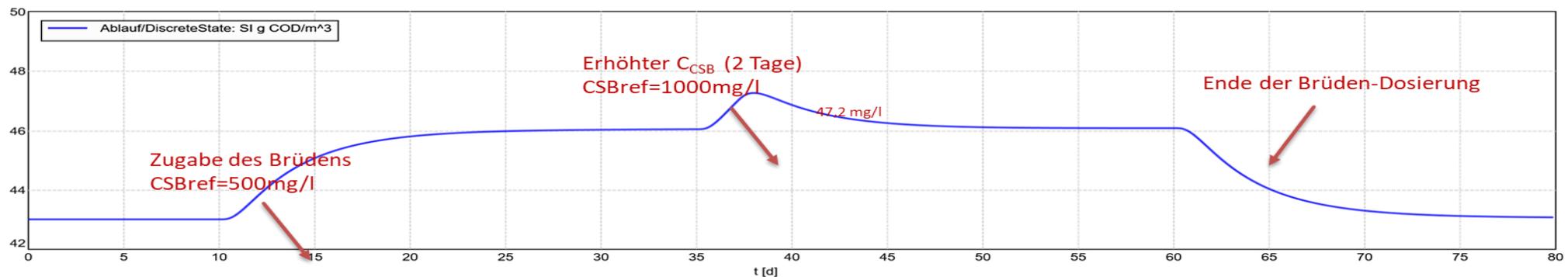
# Brüdenqualität „Auswirkung von CSBref“



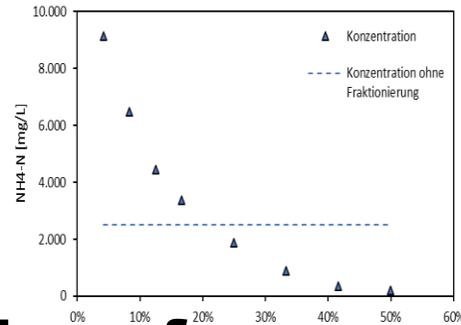
- CSB-Gehalt Brüden: abhängig von Staubmitführungen aus der Trocknung (DWA-M 379)
- 12 – 14% refraktärer CSB (eigene Untersuchung) → **520 mg/l** (650 mg/l bei 5.000 mg/l) **CSBref**



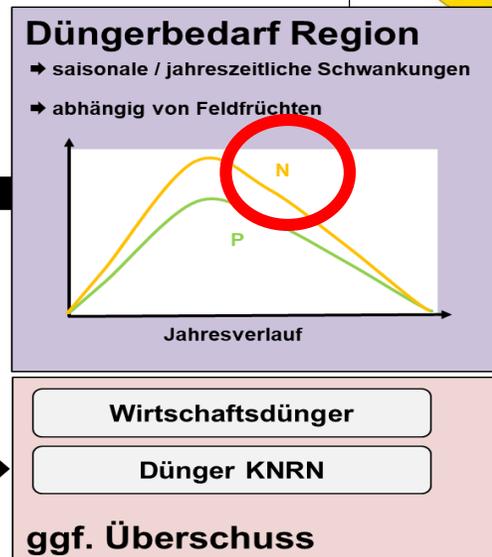
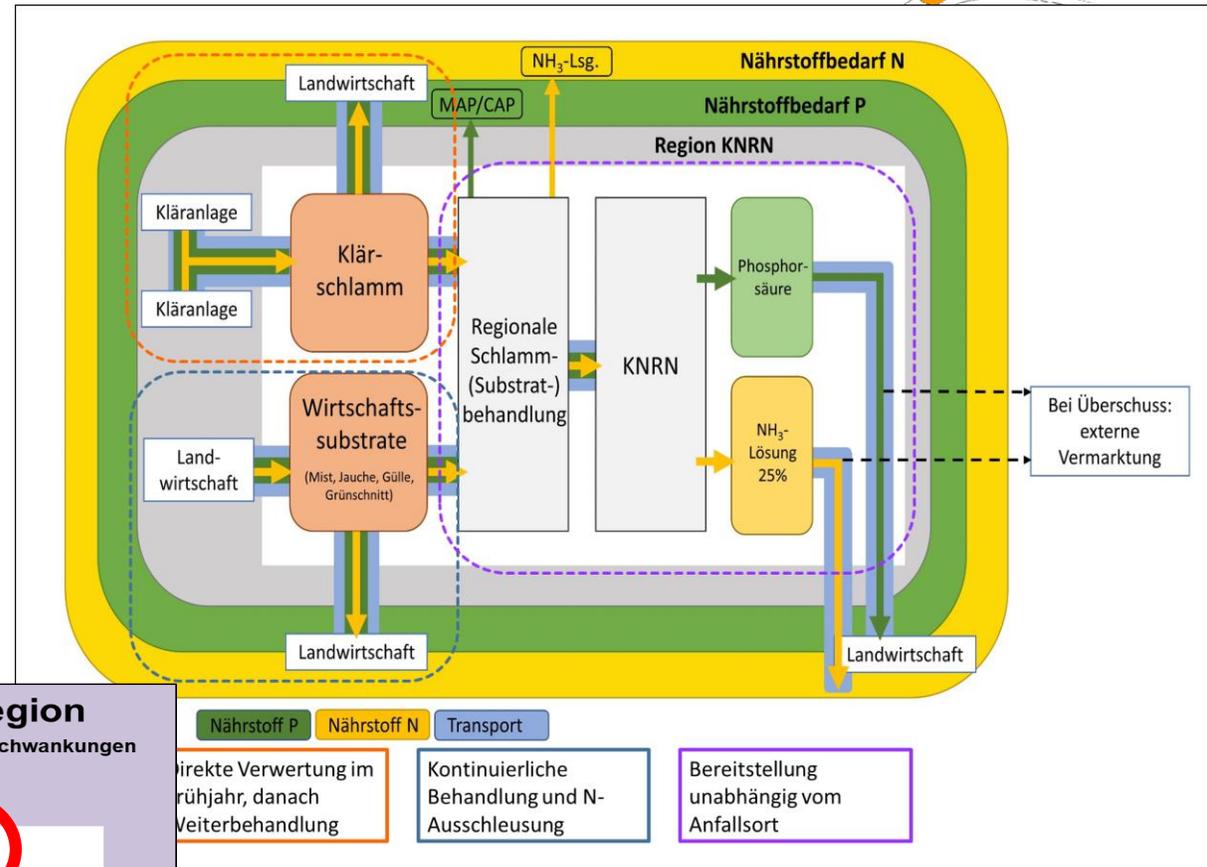
Anstieg um  
4 mg/l



# Nährstoffmanagement



## Stufeneindampfung



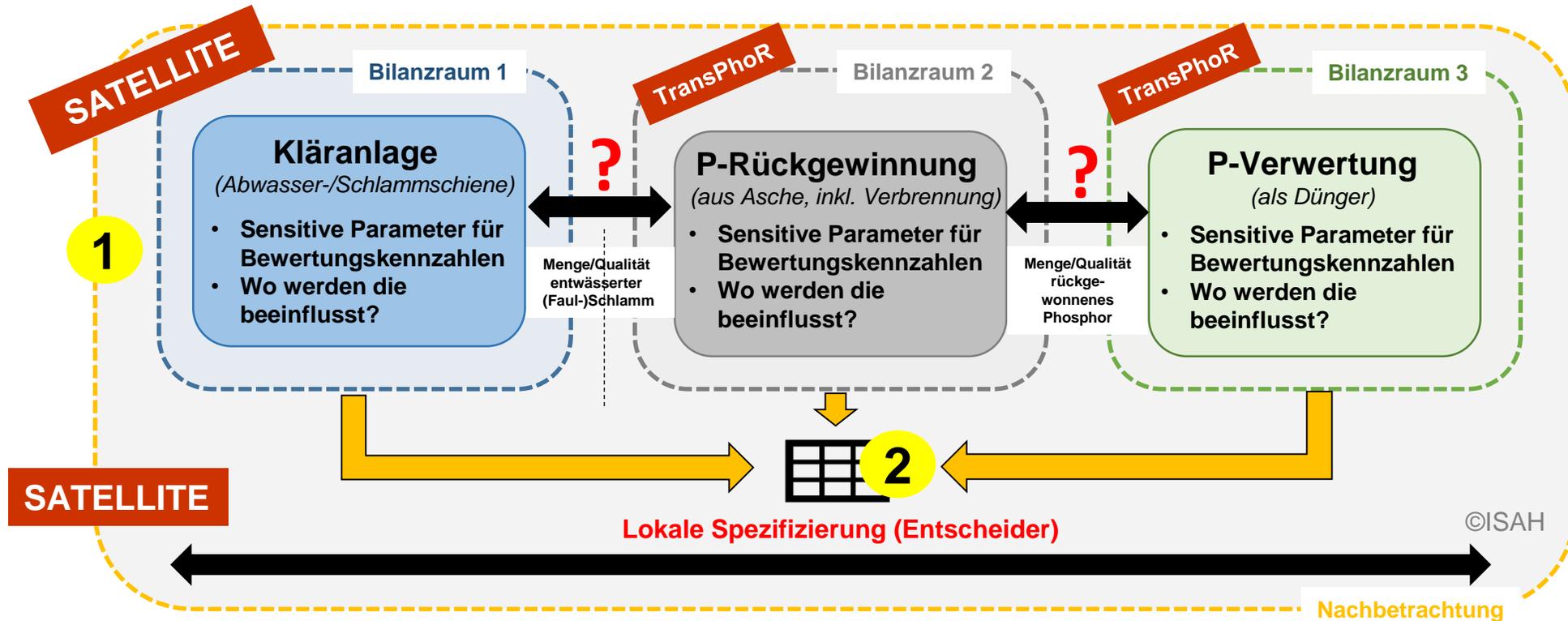
## Definierte N- und NP-Düngemittel



beispielhaft für stark landwirtschaftlich geprägte Regionen

- durch **gemeinsame Projektentwicklung** eine kurzfristige Umsetzung innovativer, tragfähiger Entsorgungs- und Rückgewinnungskonzepte auch für kleinere und mittlere Kommunen möglich wird, bei gleichzeitig hoher Entsorgungssicherheit und Langfristigkeit.
- durch spezifisch angepasste Anlagentechnik und –betrieb der regionalen Kläranlagen die Wirtschaftlichkeit der P-Rückgewinnung gezielt positiv beeinflusst werden kann  
**(strategische Investitionsplanung)**
- und eine für das Recycling-Zentrum **optimale Klärschlammqualität** (Heizwert, P-Gehalt) zum **optimalen Zeitpunkt** (gleichmäßige Auslastung) mit dem **geringsten Umweltimpact** (Transport) bereitgestellt wird
- die **Abstimmung der Anlageninvestitionen** der Schlammbehandlung im Gesamtverbund unter Einbeziehung lokaler Spezifika die thermische Klärschlammmentsorgung wirtschaftlich und energetisch optimiert
- durch Integration von Wirtschaftssubstraten und die zeitliche Entkopplung der Nährstoffbereitstellung eine erhöhte Wirtschaftlichkeit und **regionale Wertstoffrückführung** erreicht werden kann

# Einbindung in Verfahrensbewertung RePhoR



Systemspez. Zusammenhänge

Fallspez. Ausprägung (Stoffbilanz...)

$$\begin{matrix} \text{CO}_2, \text{Kläranlage} \\ \text{kWh}_{\text{Kläranlage}} \\ \text{Fläche}_{\text{Kläranlage}} \end{matrix} ? + \begin{matrix} \text{CO}_2, \text{P-Rück-Verfahren} \\ \text{kWh}_{\text{P-Rück-Verfahren}} \\ \text{Fläche}_{\text{P-Rück-Verfahren}} \end{matrix} ? + \begin{matrix} \text{CO}_2, \text{Dünger} \\ \text{kWh}_{\text{Dünger}} \\ \text{Fläche}_{\text{Dünger}} \end{matrix} ? = \Sigma$$

Kennzahl nach Fragestellung „Optimierungsziel“

# Betrachtete Verfahren sind



- Gezielte **Rückgewinnung/Anreicherung** mittels **Fällung**
- Technisch-betriebliche Umsetzung der **Teilstabilisierung** mit dem Ziel eines optimierten Verbundbetriebs (Gasertrags, Belüftungsenergie, Transport etc.).
- Rückgewinnung von **Stickstoff** über **Eindampfung/Strippung**
- Elimination der N-Rückbelastung mittels **Deammonifikation**
- Integration von regional verfügbaren Wirtschaftssubstraten in das Betriebskonzept der kommunaler **Faulungen (Hochlast/Thermophil)**
- Qualitative Vorkonfektionierung der Schlämme in Abstimmung auf den optimalen Betriebspunkt des Recyclingzentrums durch **Entwässerung und Trocknung**
- Entwicklung und Erprobung angepasster **Logistikkomponenten** für Lagerung und Transport der Produkte (flüssige Makronährstoffe)
- Nutzerspezifische Aufbereitung und Vorkonfektionierung zu marktbarem **Dünger „on demand“**

**Phase 2:  
Toolweiterentwicklung Betrieb  
und Kennzahlvalidierung**