

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

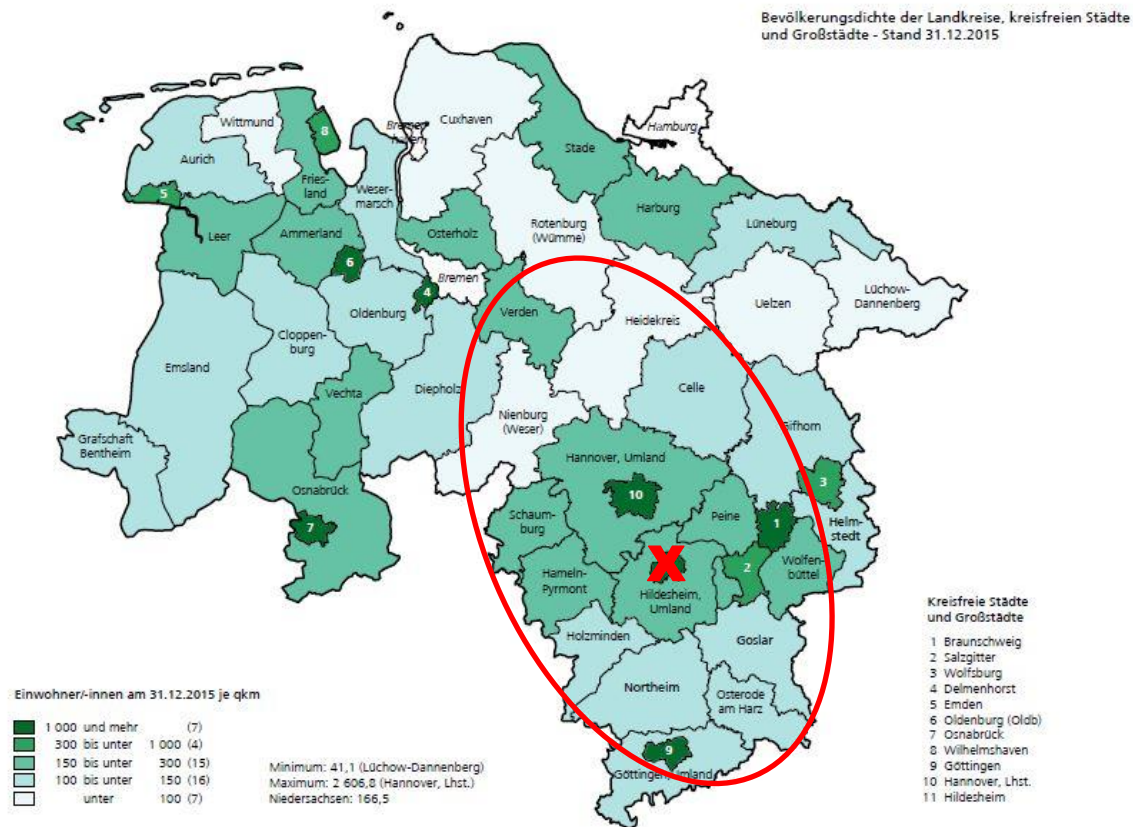
Laufzeit: **1. Phase 01.07.2020 – 30.06.2023** + 2. Phase 01.07.2023 – 30.06.2025

Projektleitung / Gesamtkoordination

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



Regionale Rahmenbedingungen SATELLITE

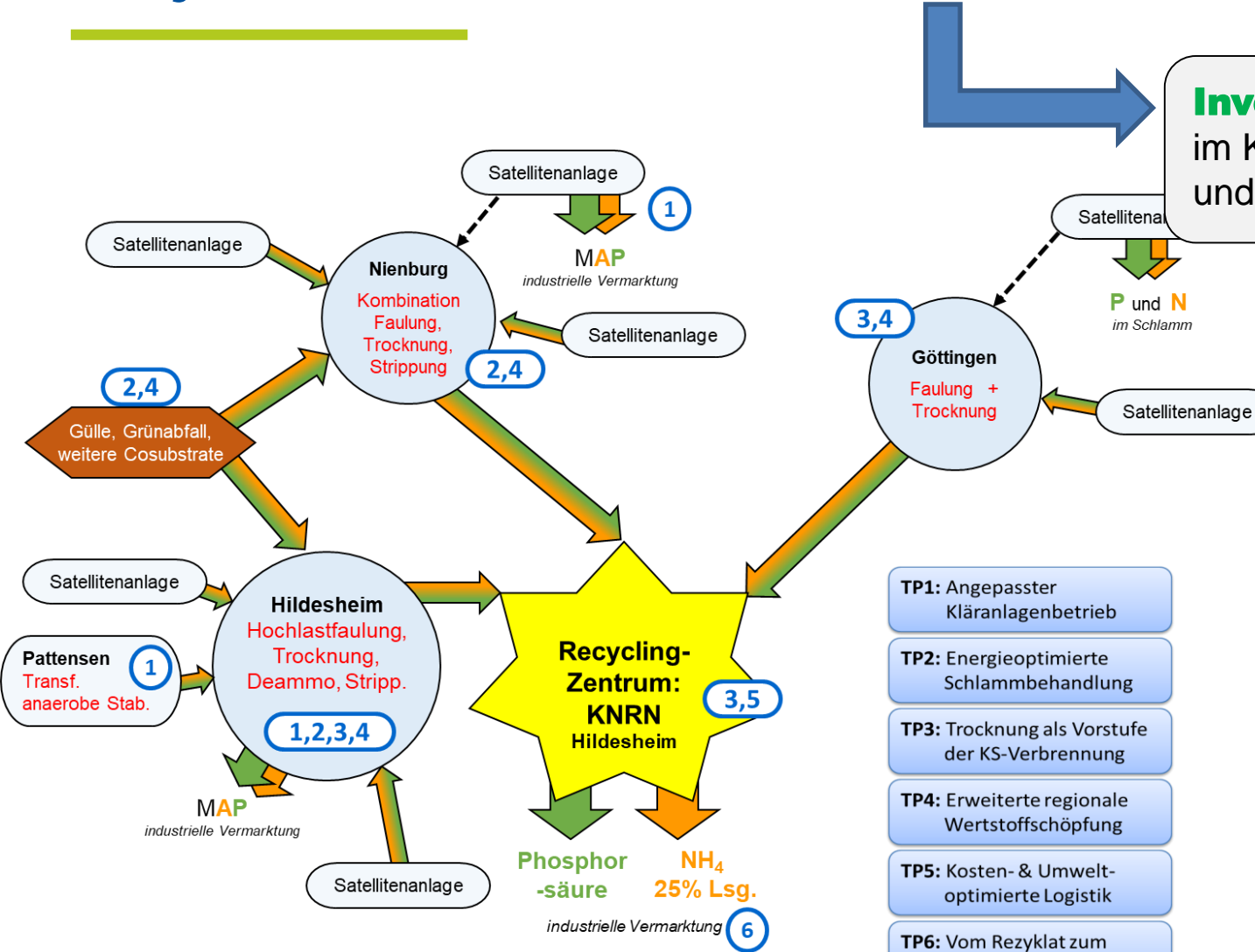


(Bildquelle: www.ml.niedersachsen.de)

- 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

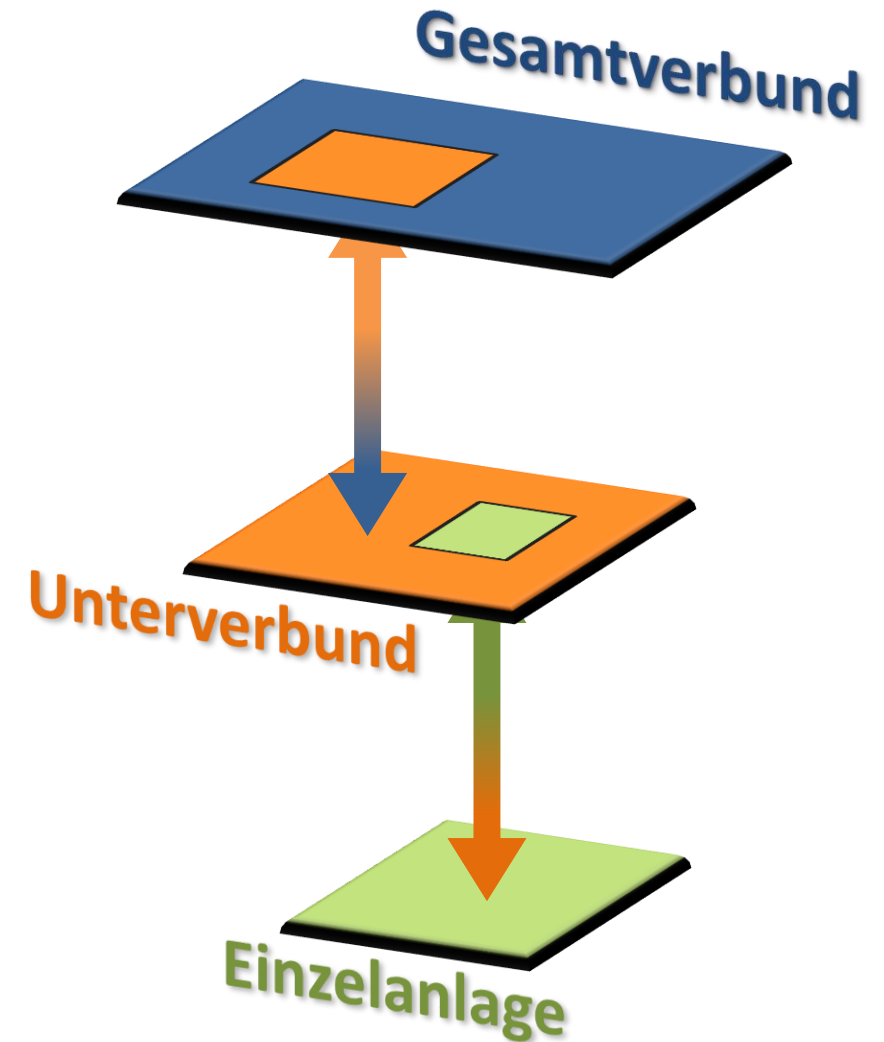
- ↻ Auswirkungen vorgelagerter Entscheidungen auf Schlamm-mengen, -struktur und Transport (Flexibilisierung/Stabilisierung durch übergeordnete Planung und dann Bewirtschaftung)
- ↻ Planung und Implementierung eines nachhaltigen Logistikkonzeptes

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



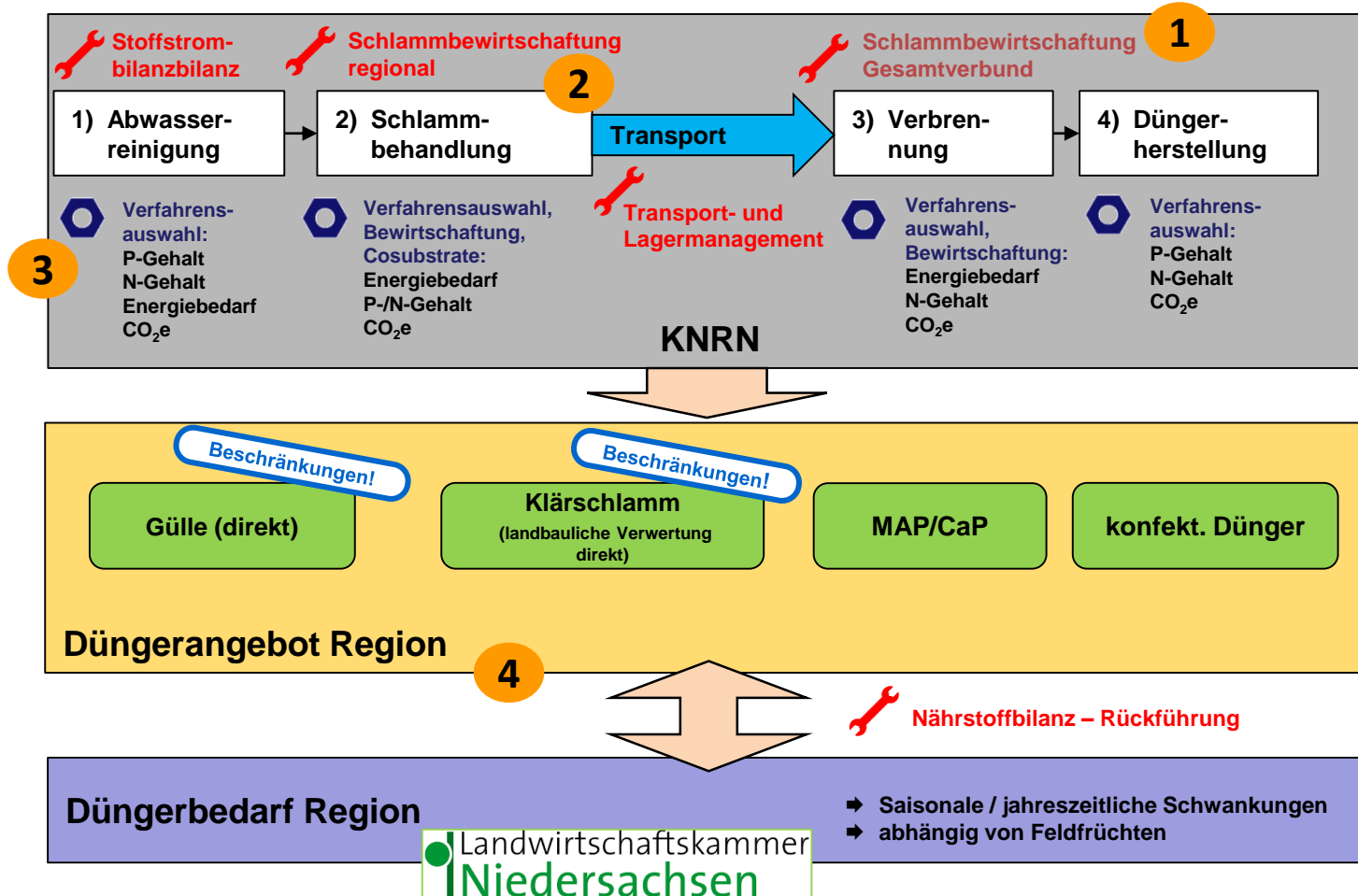
Betrachtete Verfahrenskette und Themen



Modell- und Methodik-entwicklung



Toolentwicklung



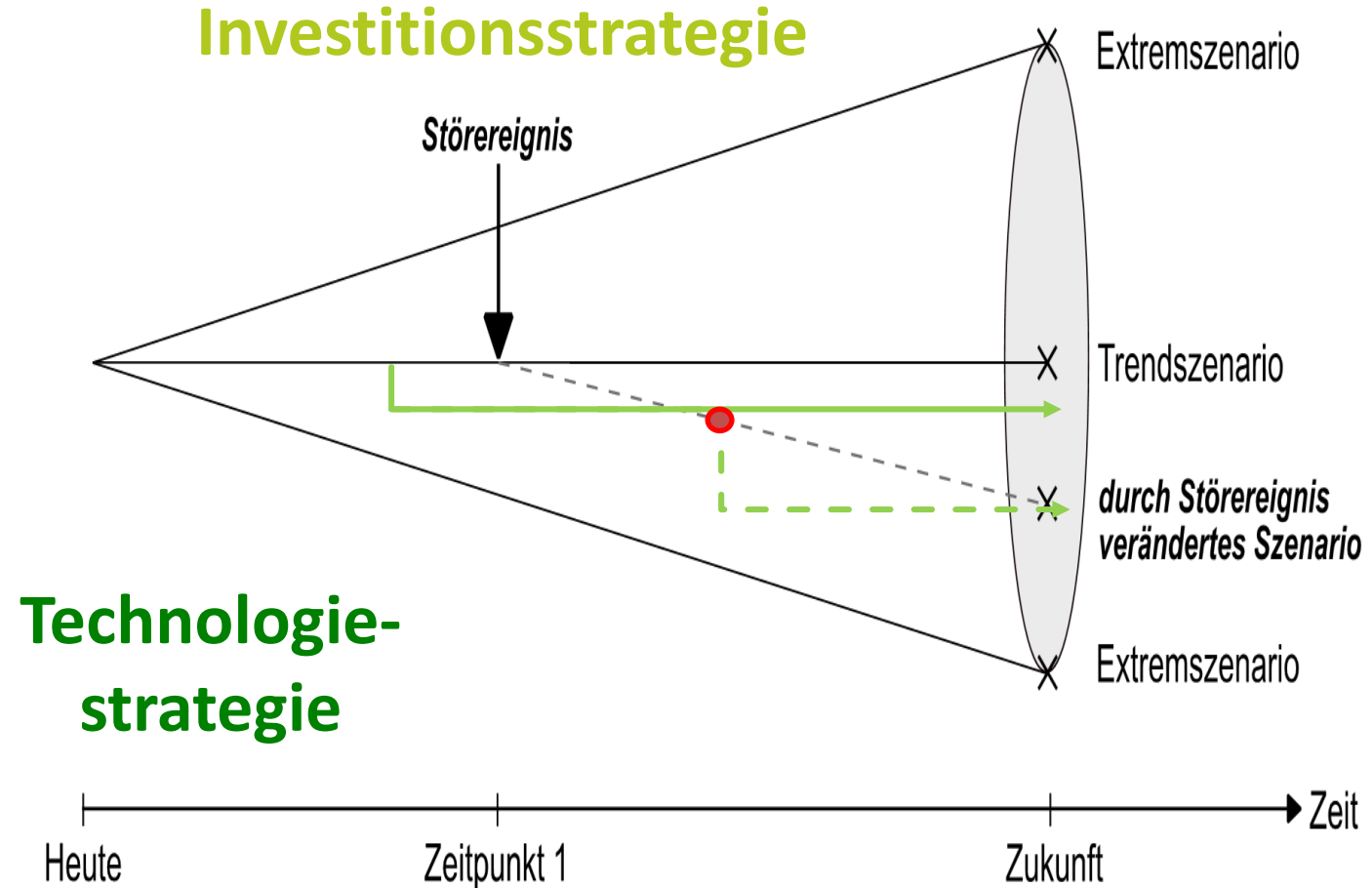
- **Verfahrensbewertung** und Konzeptentwicklung auf Basis von **modellgestützten Szenarienanalysen** für die einzelne Anlage und im Verbund
- Werkzeug zur **Sensitivitätsuntersuchung** des Systems auf zukünftige Entwicklungen oder veränderte Rahmenbedingungen
Ziel: **Robustheit und Stufenausbau**
- 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

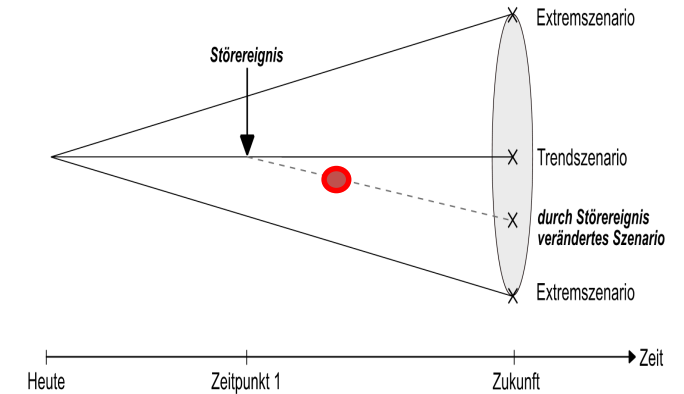
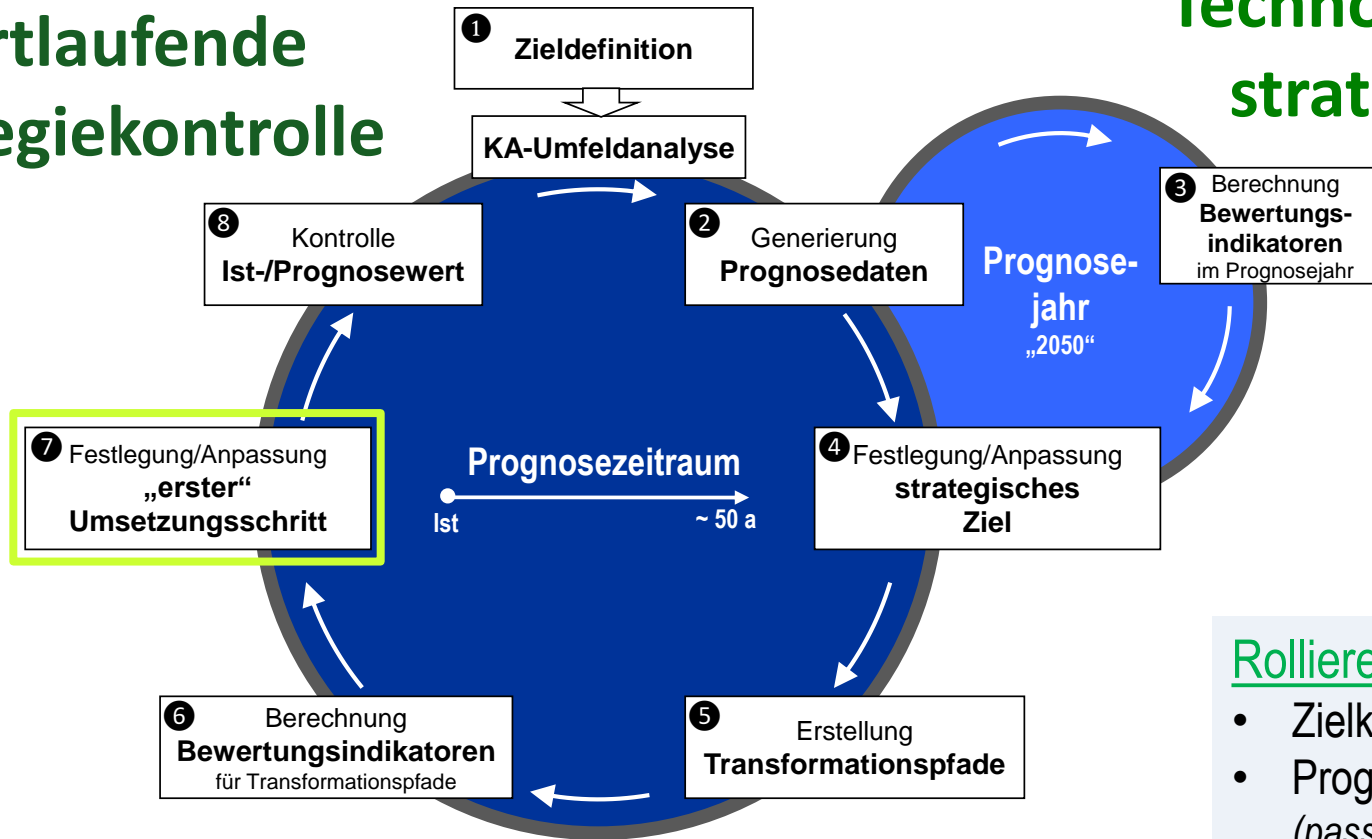


Elemente der „Strategischen Investitionsplanung“



Fortlaufende
Strategiekontrolle

Technologie-
strategie

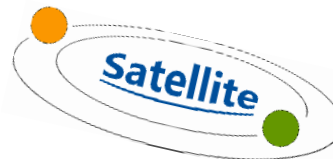
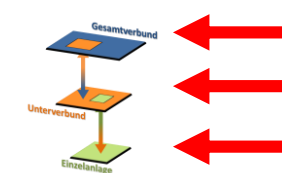


Rollierende Ansatz – Fortlaufende Kontrolle

- 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

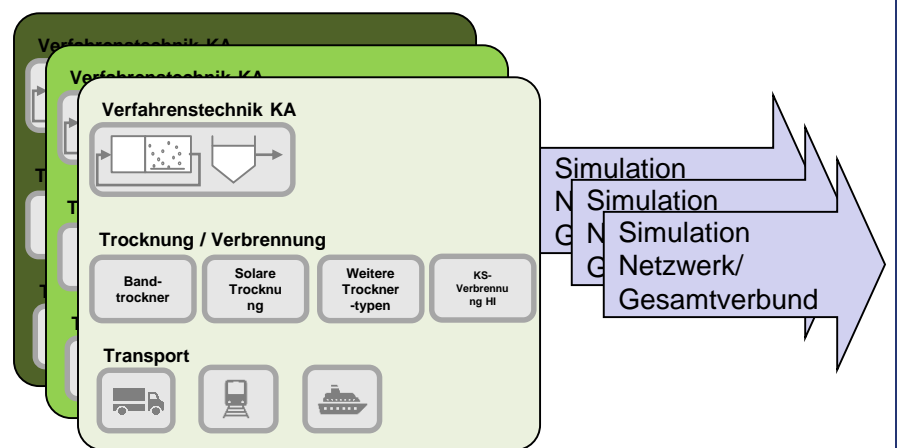
- ⇒ Darstellung IST-Zustand
- ⇒ Szenarienberechnung
- ⇒ Prognosemodelle

✓

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

Strategische Ziele Gesamtverbund:

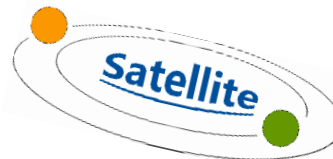
Bewertung Gesamtverbund

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

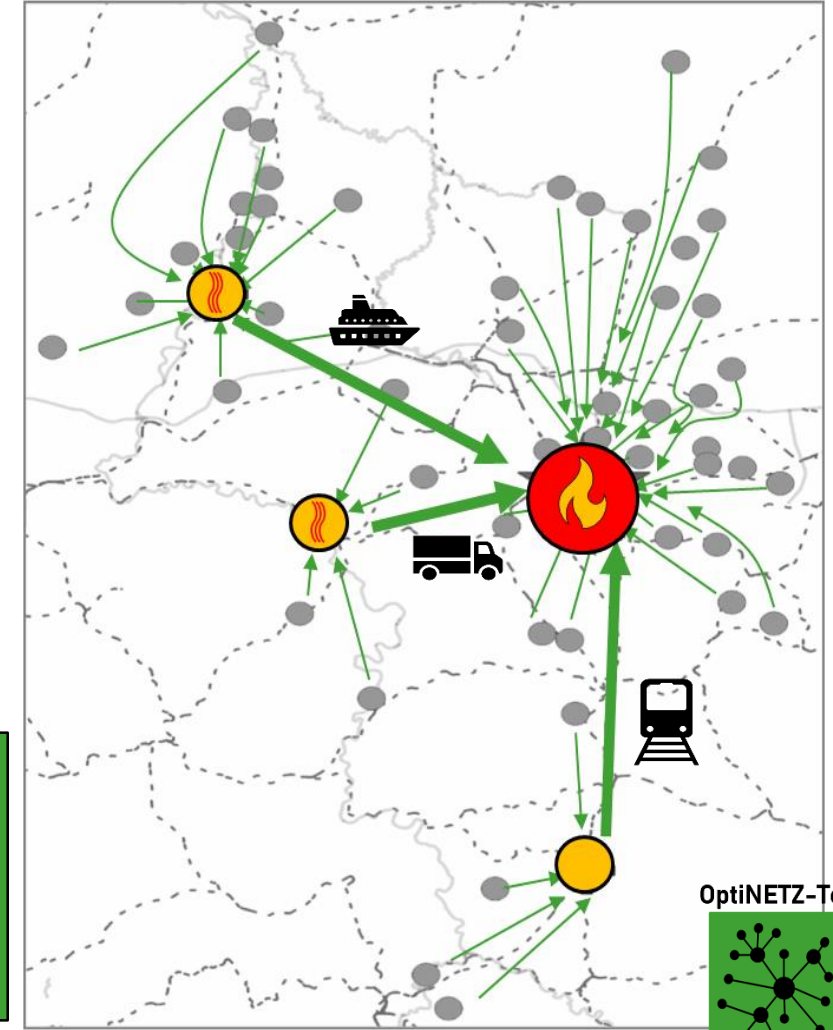
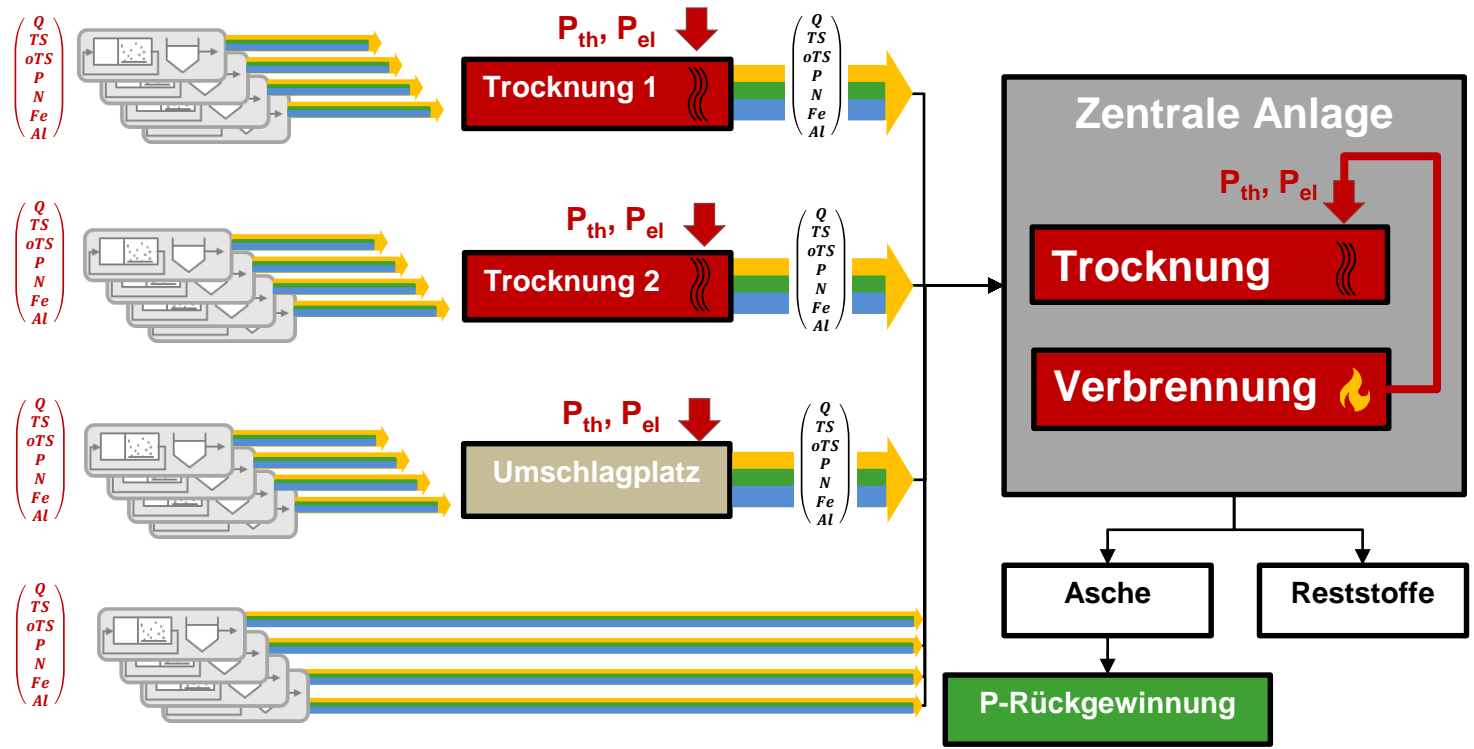
Bewertung Einzelanlage
Berücksichtigung individueller Ziele und Randbdg. ✓

Szenarienauswahl Gesamtverbund

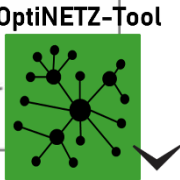
Bewirtschaftung Gesamtverbund – OptiNETZ-Tool



INGENIEURBÜRO
DR. SABRINA BREITENKAMP



Schlamm ✓ Anfall (Mengen) ✓ Wassergehalt ✓ Qualität ✓ Stabilisierungsgrad ✓ Heizwert	Trocknung + Verbrennung ✓ Energiebedarf ✓ Kosten	Transport ✓ Kosten ✓ CO ₂ -Footprint	Rückgewinnung ✓ 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

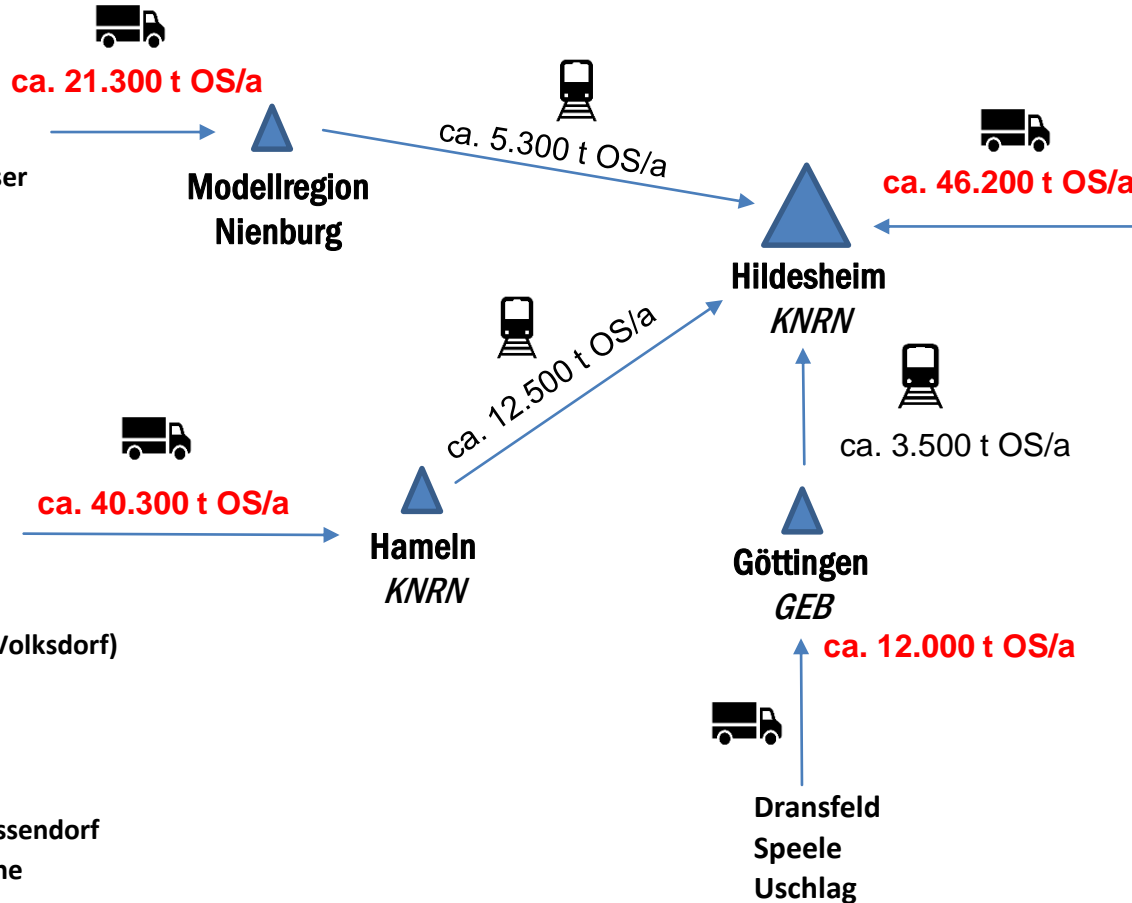
Holzminden

Langenhagen

Springe

Wedemark/Bissendorf

Wunstorf- Luthe



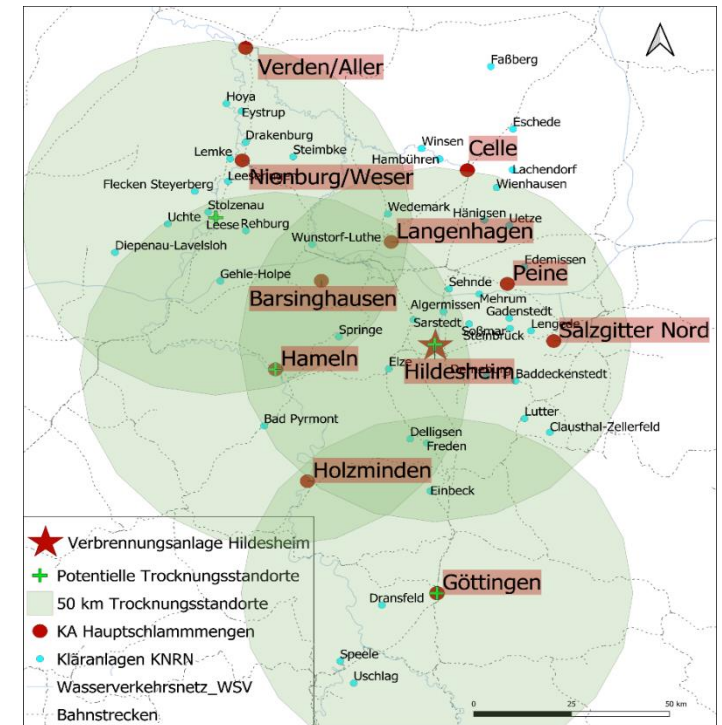
- Algermissen
- Baddeckenstedt
- Celle
- Clausthal-Zellerfeld
- Derneburg
- Edemissen
- Einbeck
- Eschede
- Faßberg
- Hambühren
- Hänigsen
- Hildesheim
- Lachendorf
- Lengede
- Lutter
- Mehrum
- Peine
- Salzgitter Nord
- Sarstedt
- Sehnde
- Soßmar
- Steinbrück
- Uetze
- Wienhausen
- Winsen
- Wipshausen

1-3 Trocknungsstandorte:

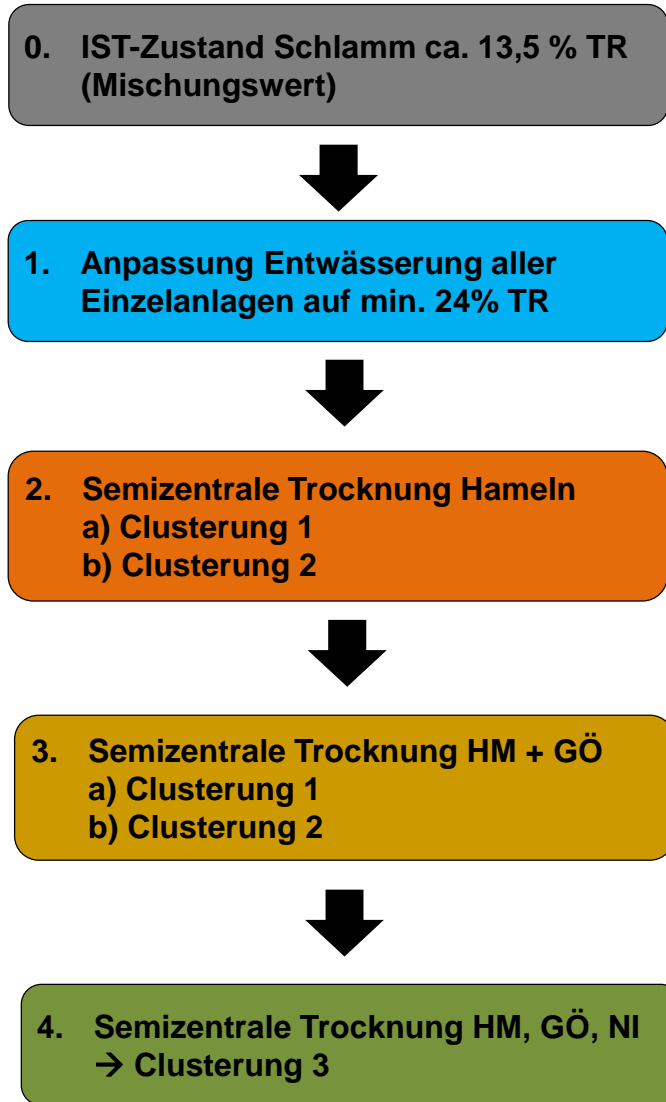
- Hameln: Volltrocknung auf 85%TR min.
- Göttingen: Volltrocknung auf 85% TR min.
- Nienburg: Volltrocknung auf 85% TR min.

min. Entwässerungsgrad aller Anlagen:

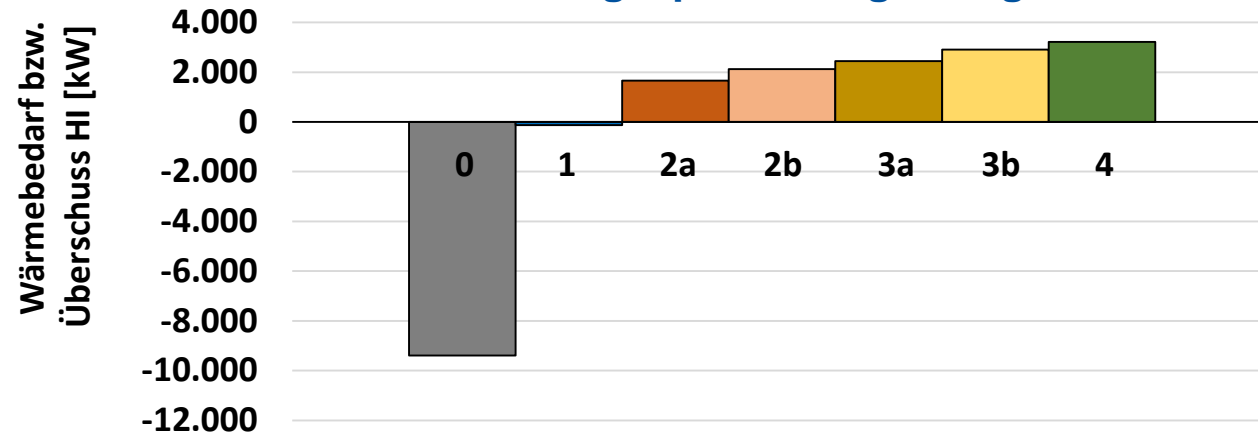
- Entwässerung neu 22%, sonst status quo



Beispiel Szenarienbetrachtung KNRRN

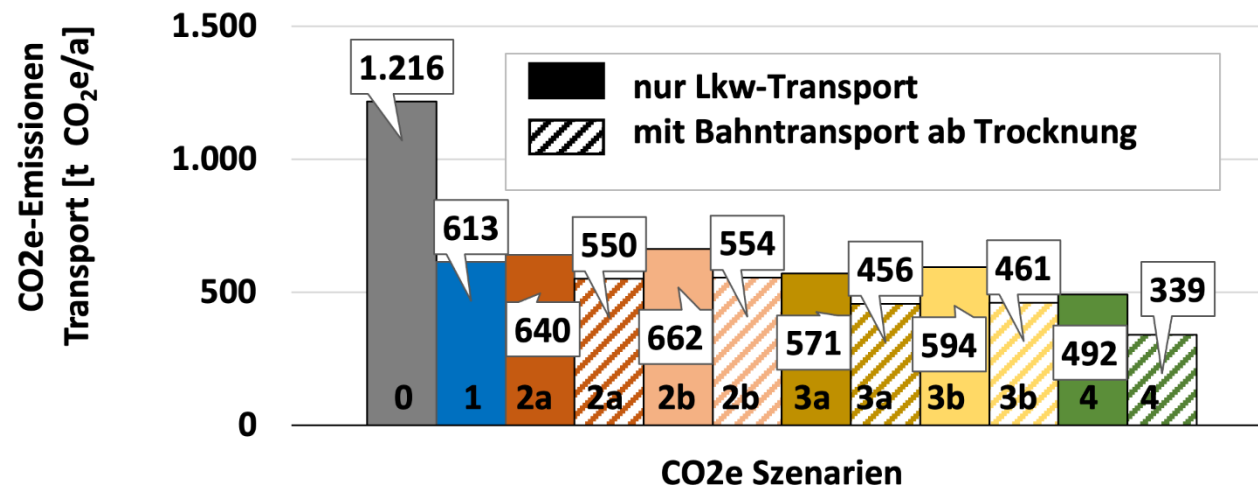


Zielsetzung Optimierung Energiebilanz Hildesheim

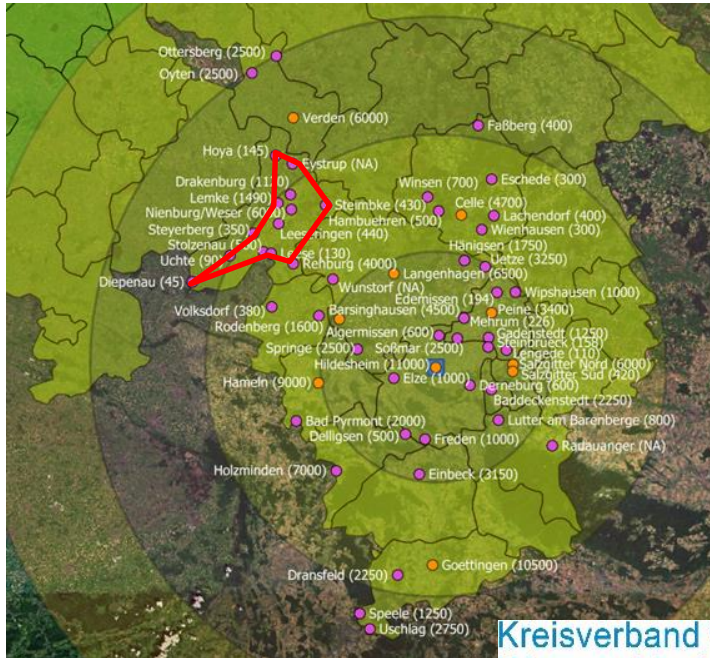
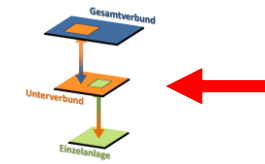
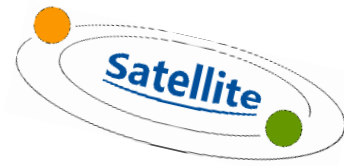


Delta Abwärme Verbrennung - Wärmebedarf Trocknung

Zielsetzung Minimierung CO₂-Äquivalente Transport



Fragestellung dezentraler Verbund



Ziel:

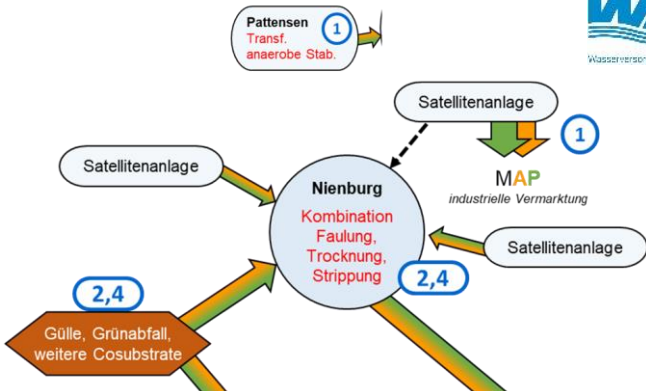
Abstimmung der Anlageninvestitionen

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)

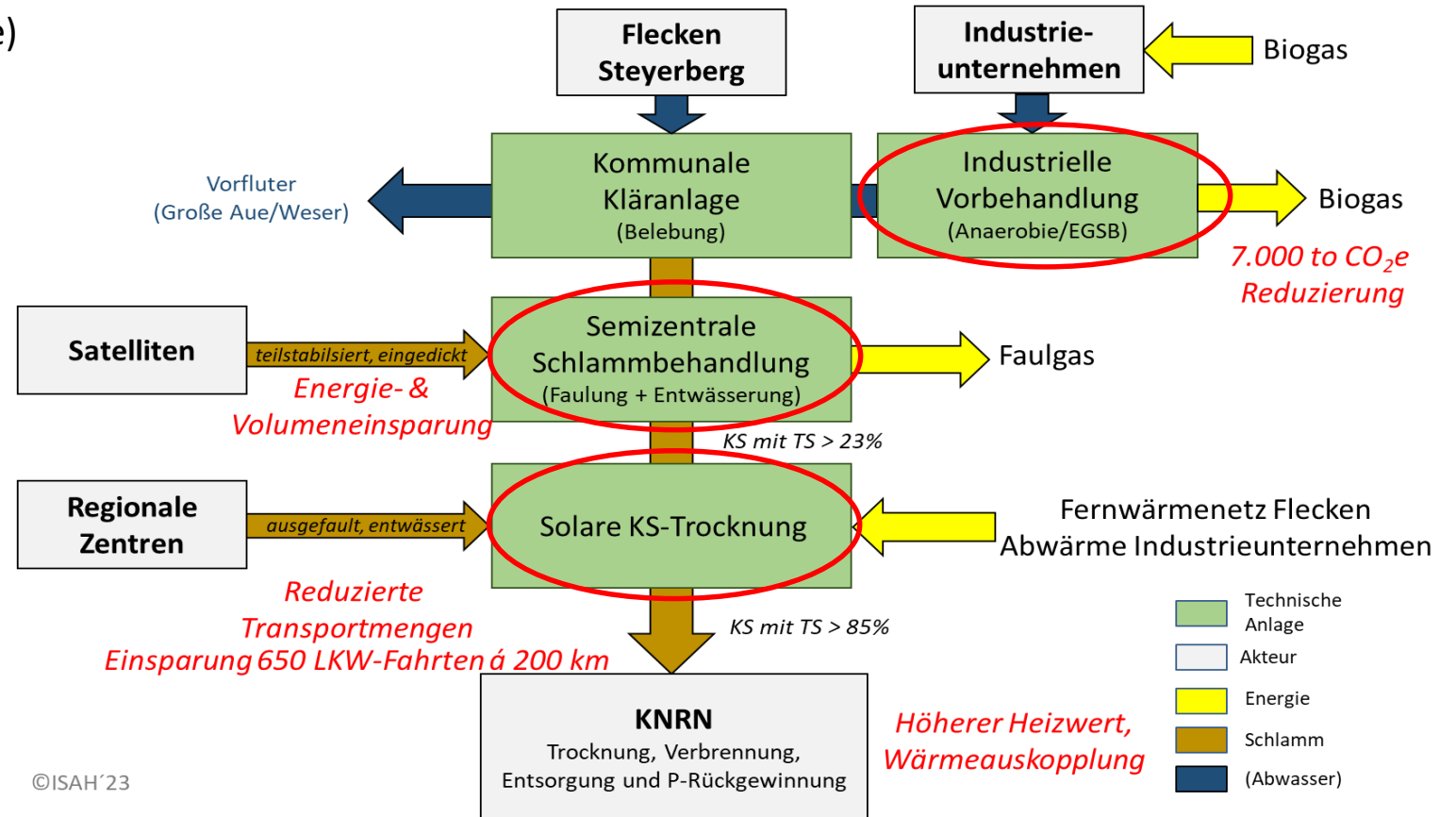
$$Q_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 52.978 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

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

Frischli Prozessabwasser
(Lebensmittel, Molkeprodukte)

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

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

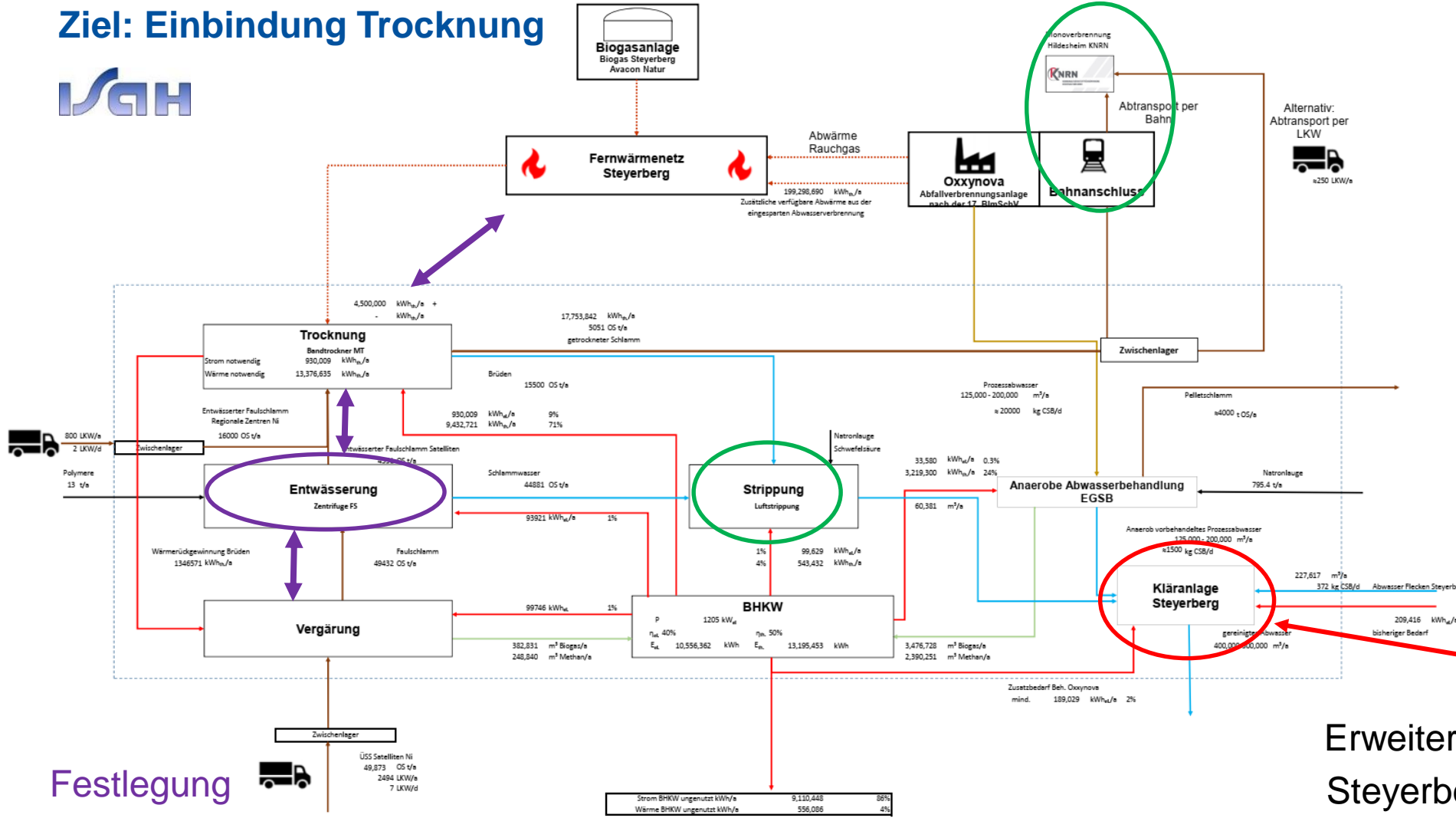


©ISAH'23

Energiebilanzmodell - Dezentrale Schlammbehandlung



Ziel: Einbindung Trocknung



Gesamtbilanz

Ca. 9.000 MWh_{el.}
Überschuss pro Jahr

Rund 200.000 MWh_{th.}
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)

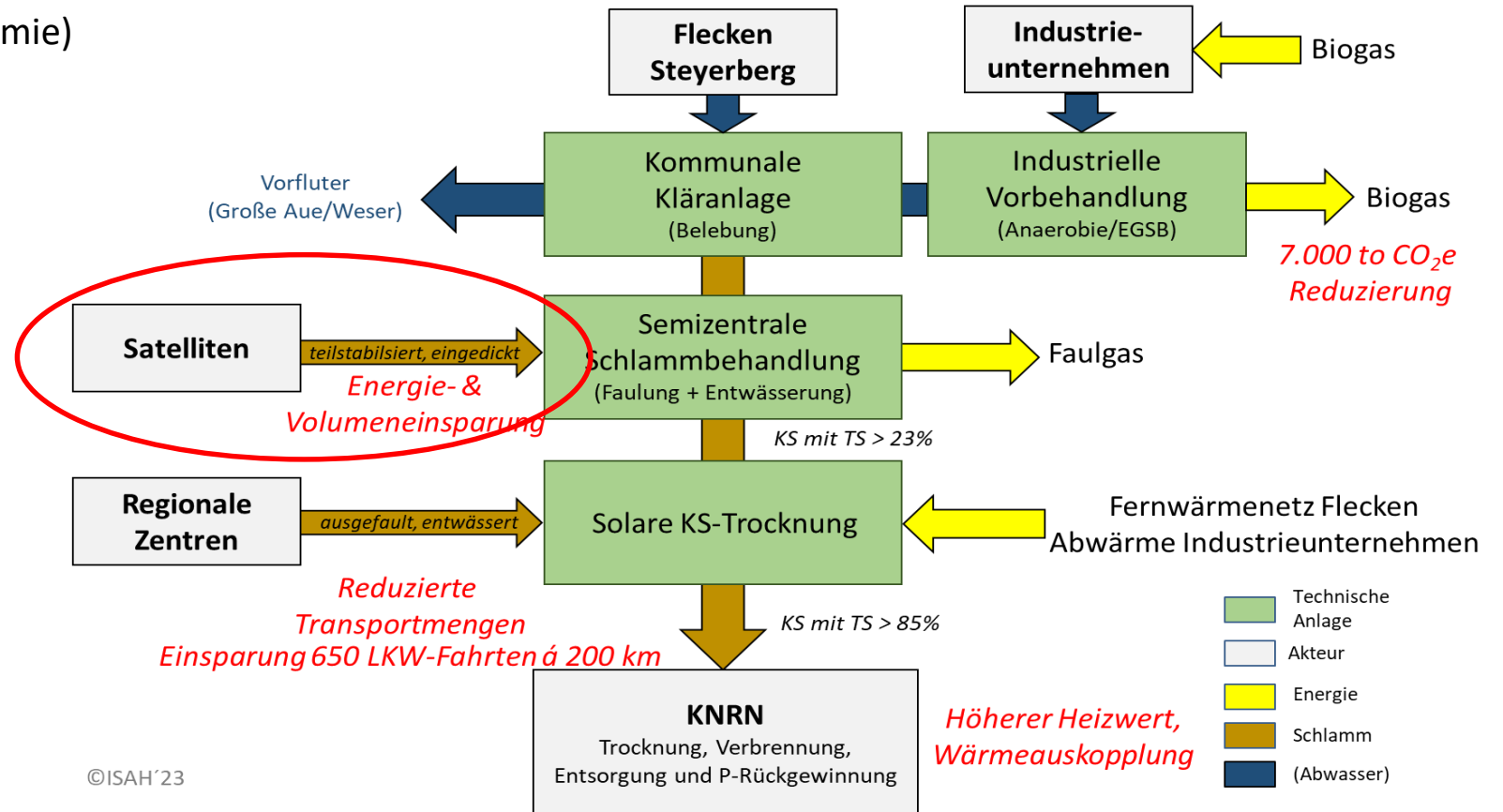
$$Q_{\text{Biogas, Göbber}} \approx 52.978 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{a}$$

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

Frischli Prozessabwasser
(Lebensmittel, Molkeprodukte)

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

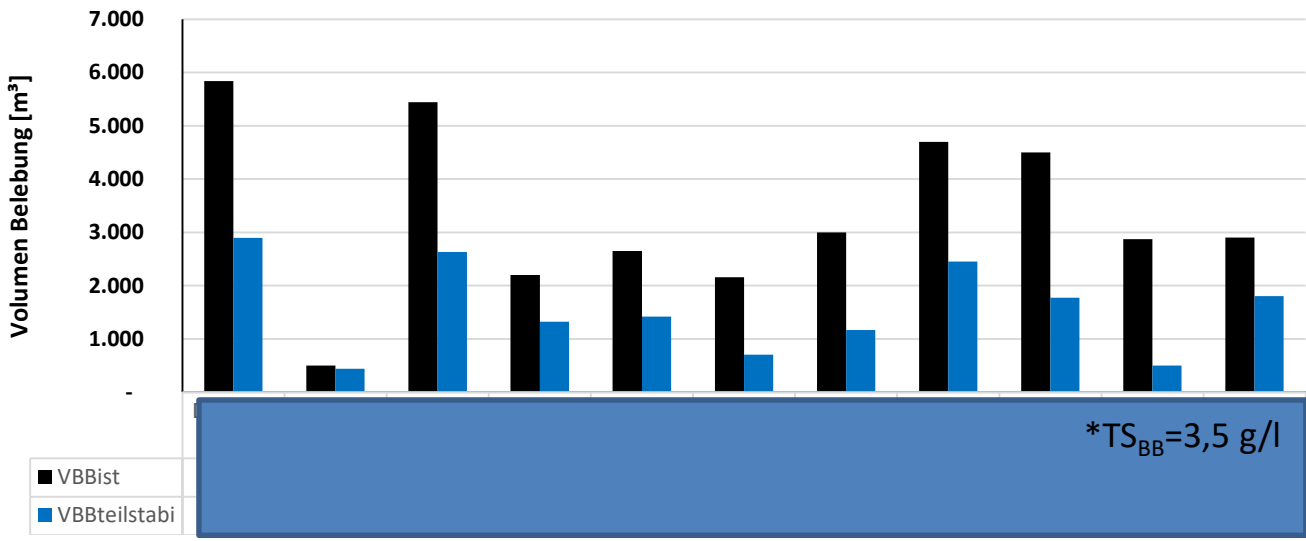
$$E_{\text{Biogas, Frischli}} \approx 4.252.340 \text{ kWh/a}$$



©ISAH'23



Potential Umstellung aerobe Teilstabilisierung

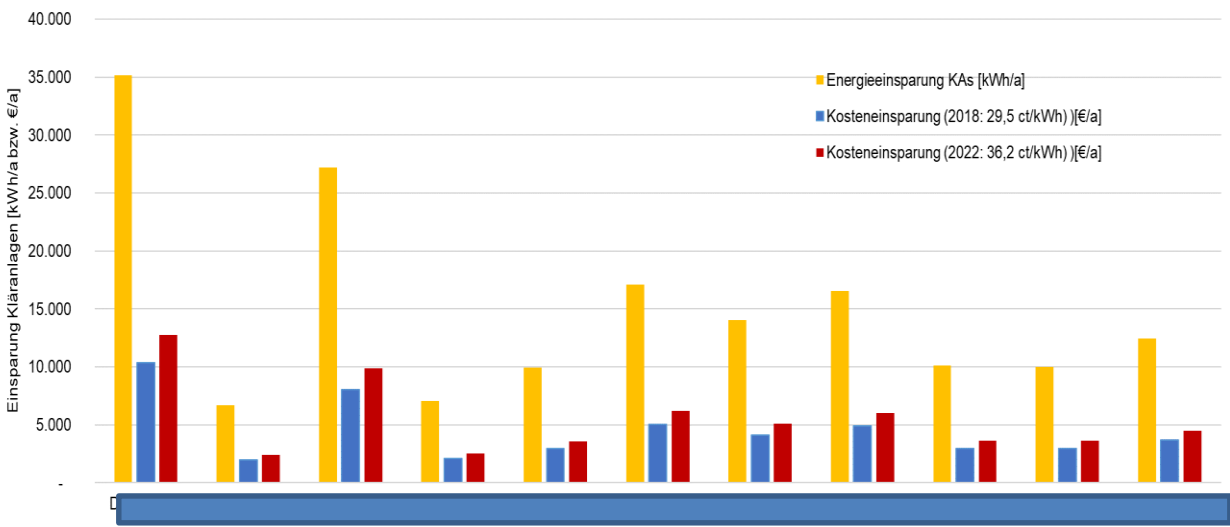


Einsparpotential

- Beckenvolumen (zusätzliche Kapazität, mittelfristig reduzierte Anlagentechnikkosten)

Überblick CO₂e-Emissionen semizentrale Faulung

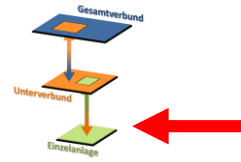
- Treibhausgasemissionen:
- Biogasnutzung Faulung (Erdgassubstitution) ≈ -532 to CO₂e/a
 - Verringerung Strombezug Satelliten ≈ -81 to CO₂e/a
 - Betrieb Faulung ≈ 30 to CO₂e/a
 - Transport Nassschlamm ≈ 96 to CO₂e/a
 - Bilanz ≈ **-487 to CO₂e/a**



Einsparpotential

- Belüftungsenergie Hauptstrombiologie

Teilstabilisierung „Satellit“

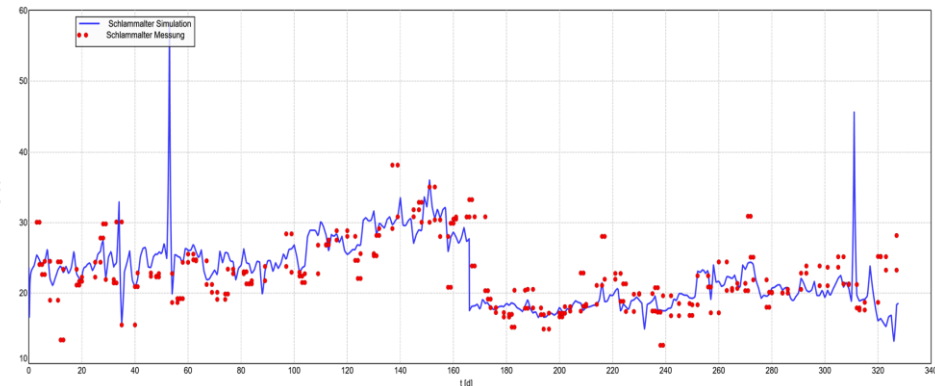
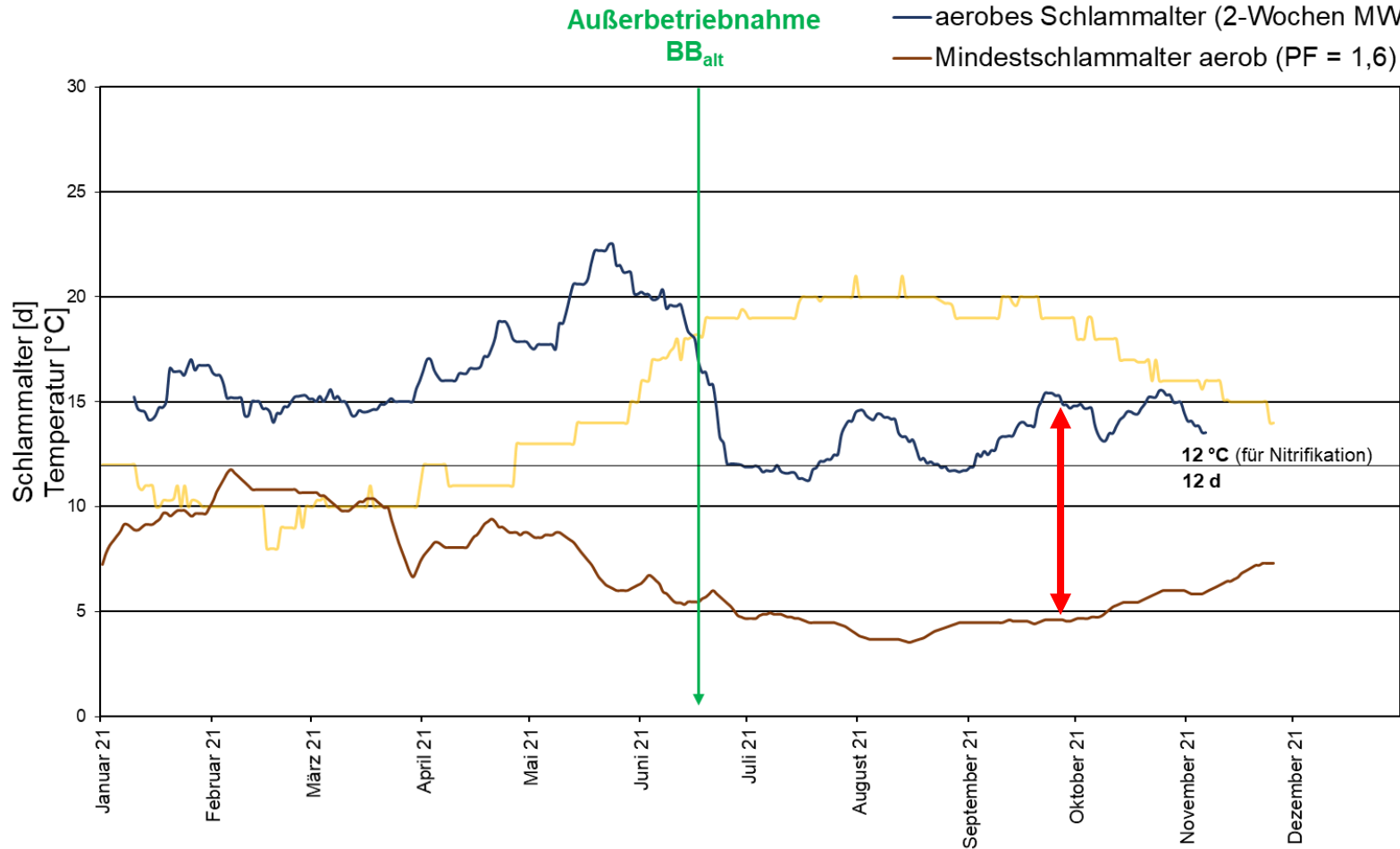


- Ziel-Ablaufwerte
 $N_{\text{ges,anorg}} = 9,0 \text{ mg/l}$
 $NH_4 = 2,0 \text{ mg/l}$
eingehalten

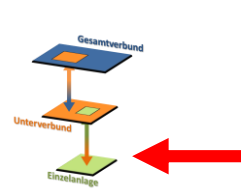
GT-Umstellung aerob/anaerobe Stabilisierung

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

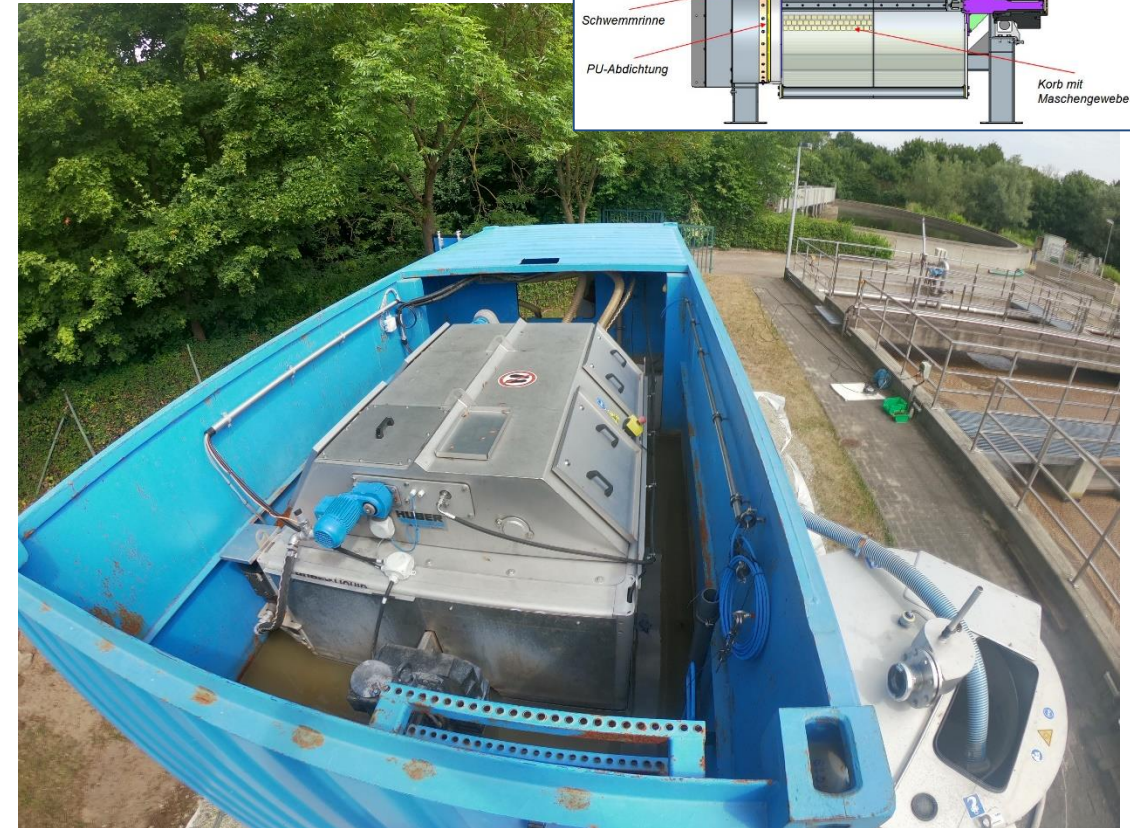
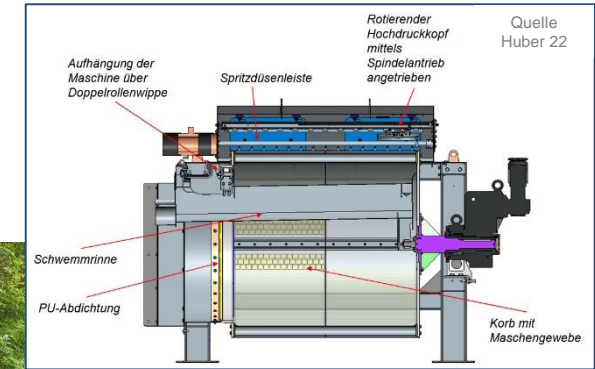
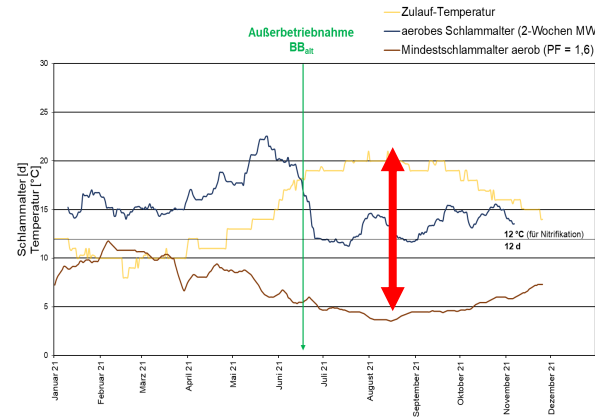
- Zulauf-Temperatur
- aerobes Schlammalter (2-Wochen MW)
- Mindestschlammalter aerob (PF = 1,6)



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



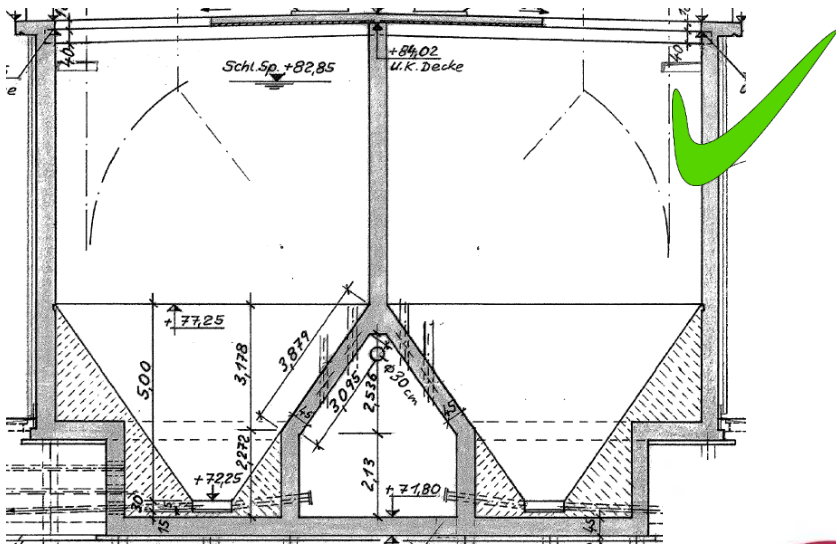
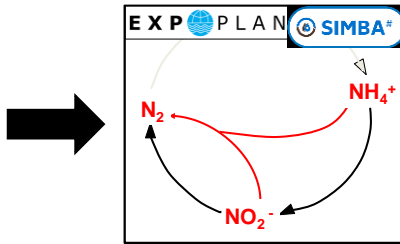
- ➔ 80.000 m³/a zusätzlicher Biogasanfall
 $\cong 517.000 \text{ kWh/a}$ ($\approx 200.000 \text{ kWh}_{\text{elektr.}}/\text{a}$)
- ➔ Reduzierter CSB-Belastung/Angebot
 1.200 kg CSB/d ($\eta \approx 50\%$)

Schwerpunkt angepasster KA-Betrieb



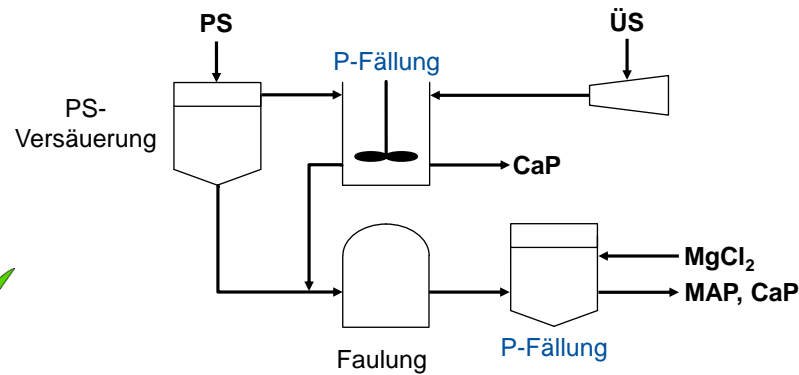
Deammonifikation Brüden/smarte Regelung

Deammonifikation - einstufig - SBR	
B_R	0.5 kg N/m ³ ·d
C_{O_2}	~ 1,5 mg O ₂ /L
t_{Air_On}	2 h
t_{Air_Off}	4 h
t_{Settle}	1 h
t_{Decant}	1 h
TS^*	6.0 g/L



KS-Qualität I

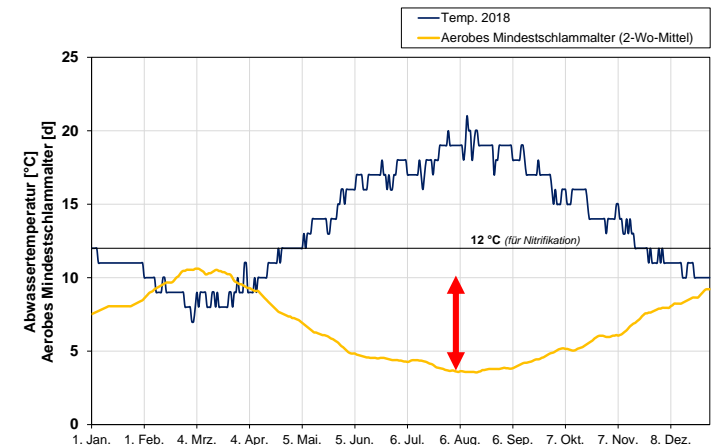
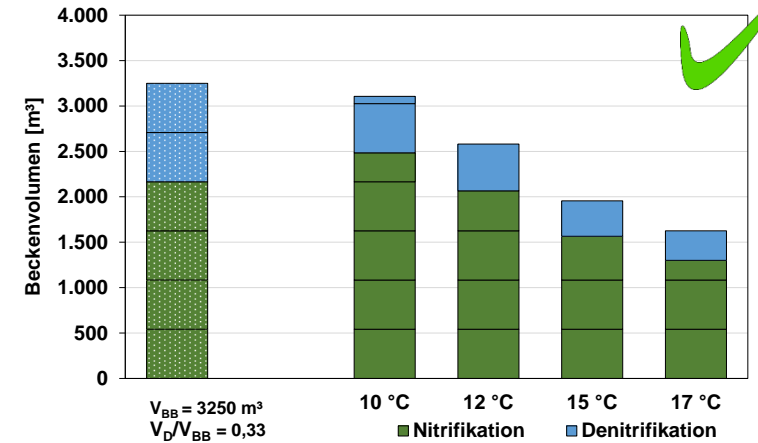
P-Bindung und -konzentration



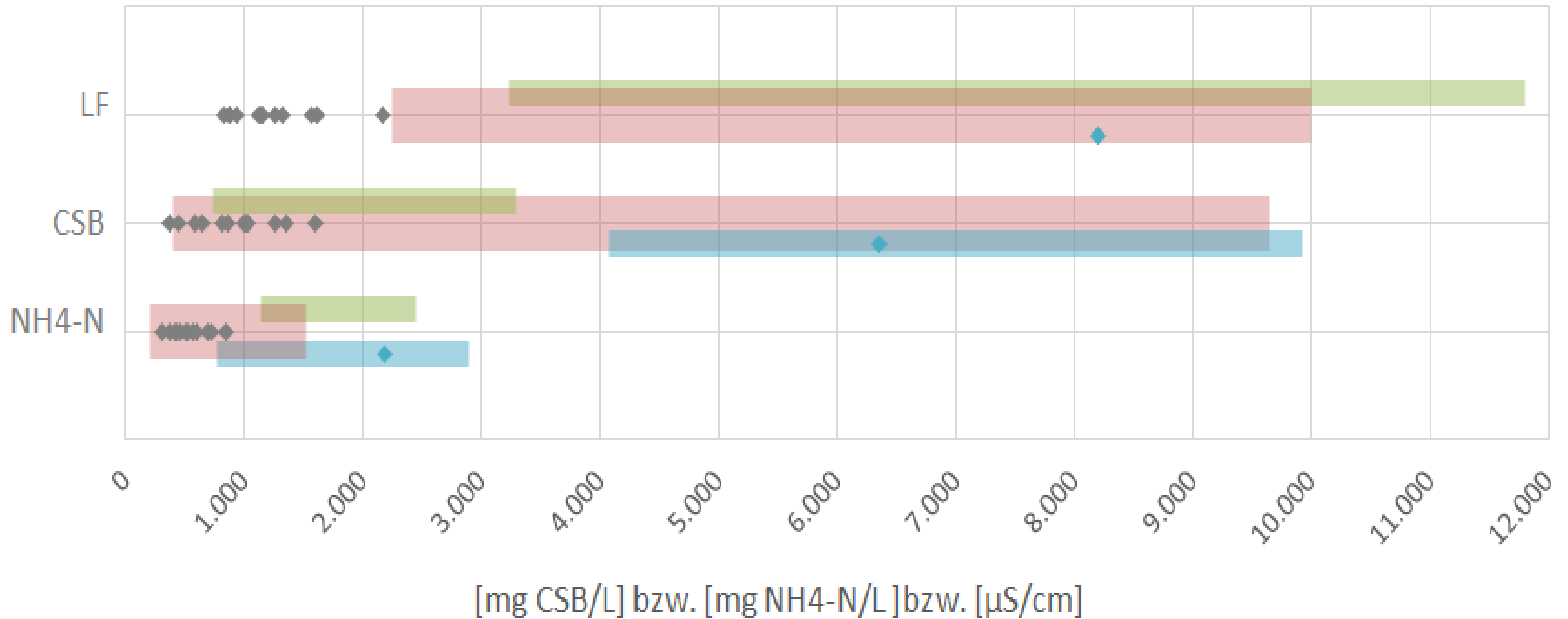
Untersuchung von Verfahren zur P-Aufkonzentrierung im Überschuss- bzw. Faulschlamm auf KAs mit biologischer P-Elimination
Ca-Phosphat, Struvit vs. Fe-, Al-Fällung

KS-Qualität II

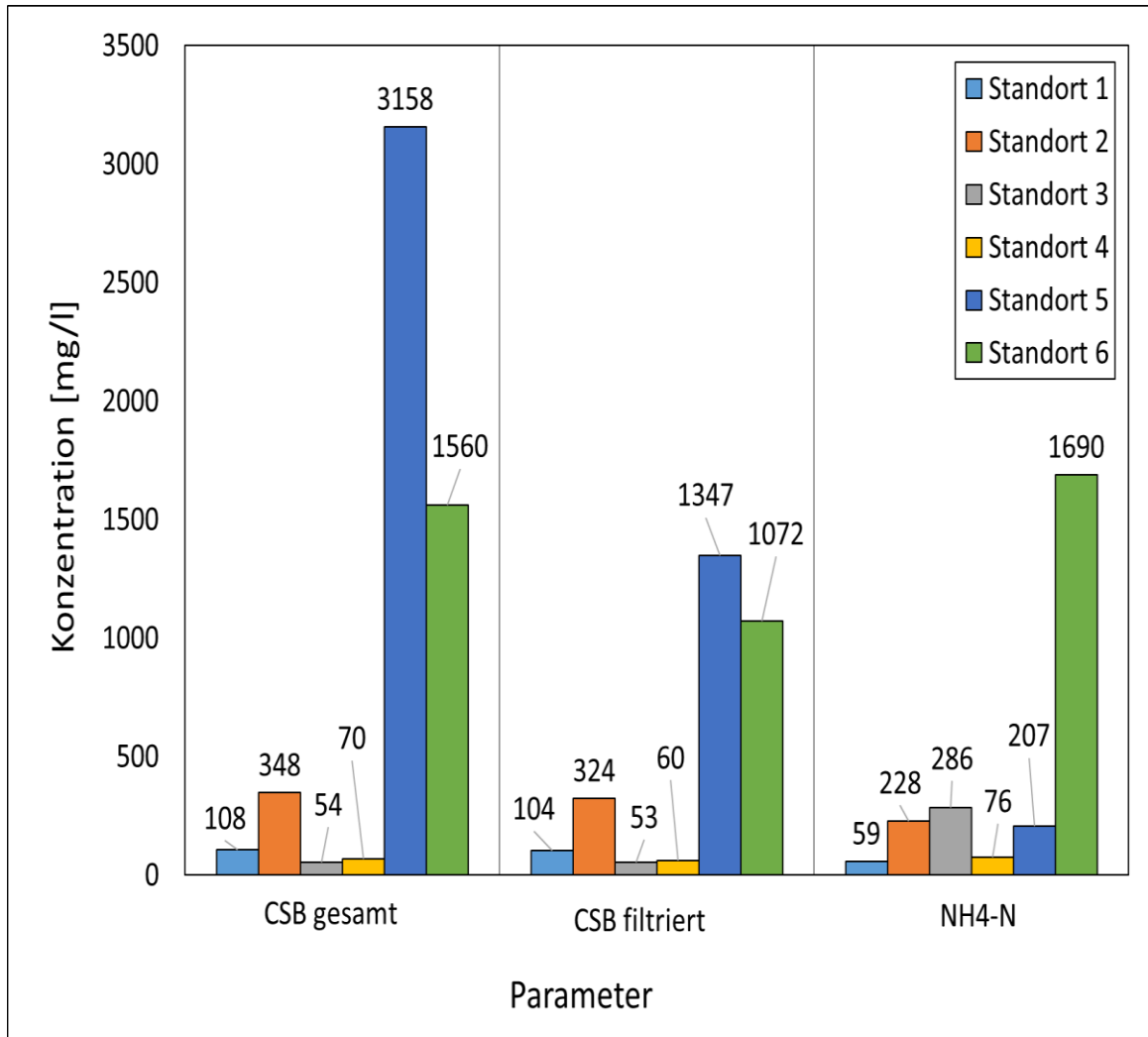
Heizwert / Teilstabilisierung



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

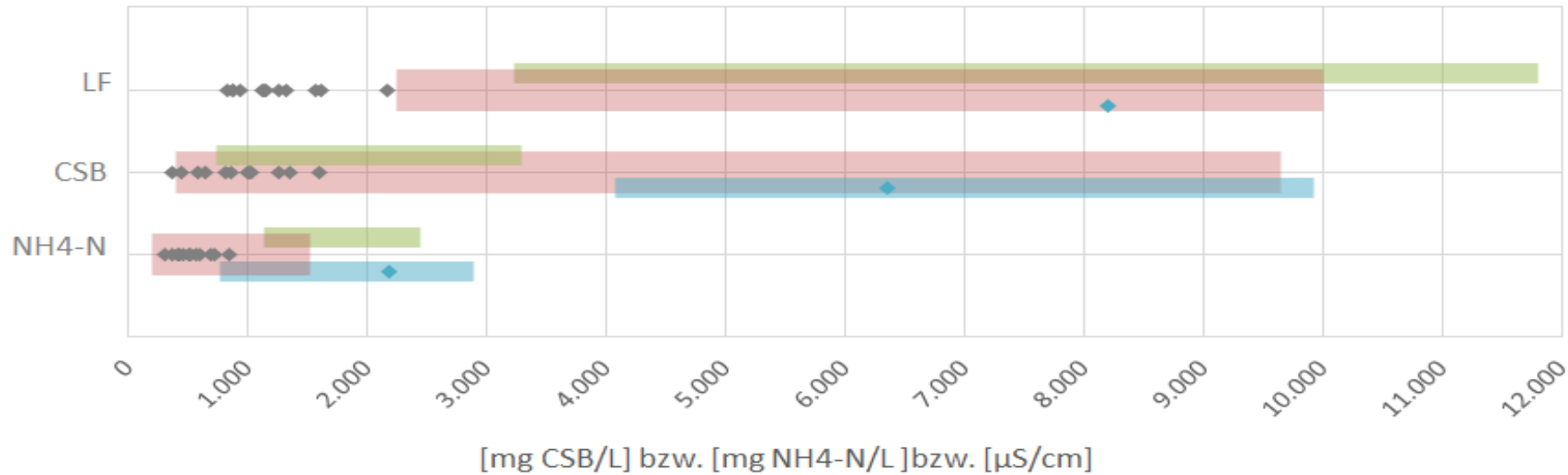
 Einfluss
Schlammqualität

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



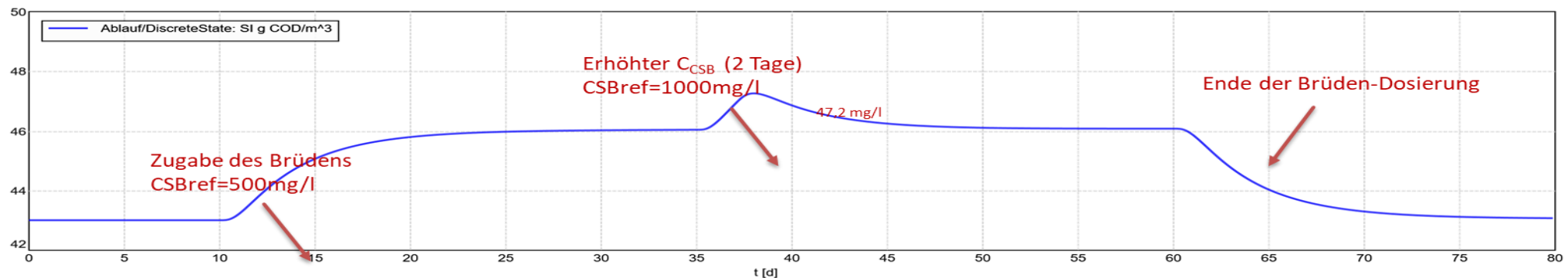
Brüdenqualität „Auswirkung von CSBref“



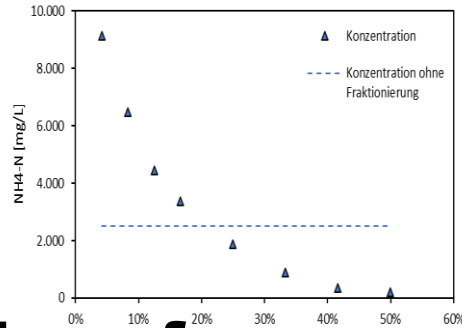
- CSB-Gehalt Brüden: abhängig von Staubmitführungen aus der Trocknung (DWA-M 379)
- 12 – 14% refraktärer CSB (eigene Untersuchung) → **520 mg/l** (650 mg/l bei 5.000 mg/l) **CSBref**



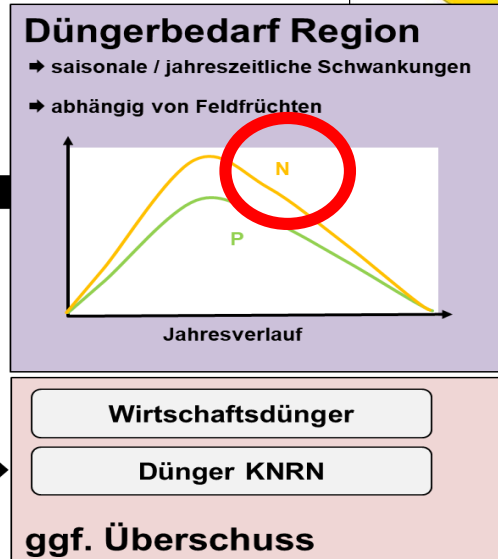
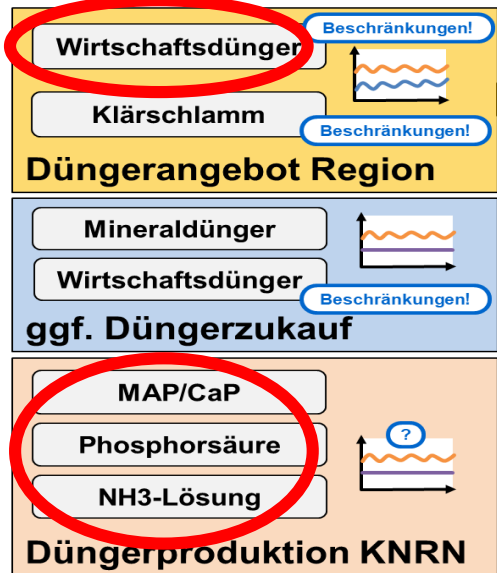
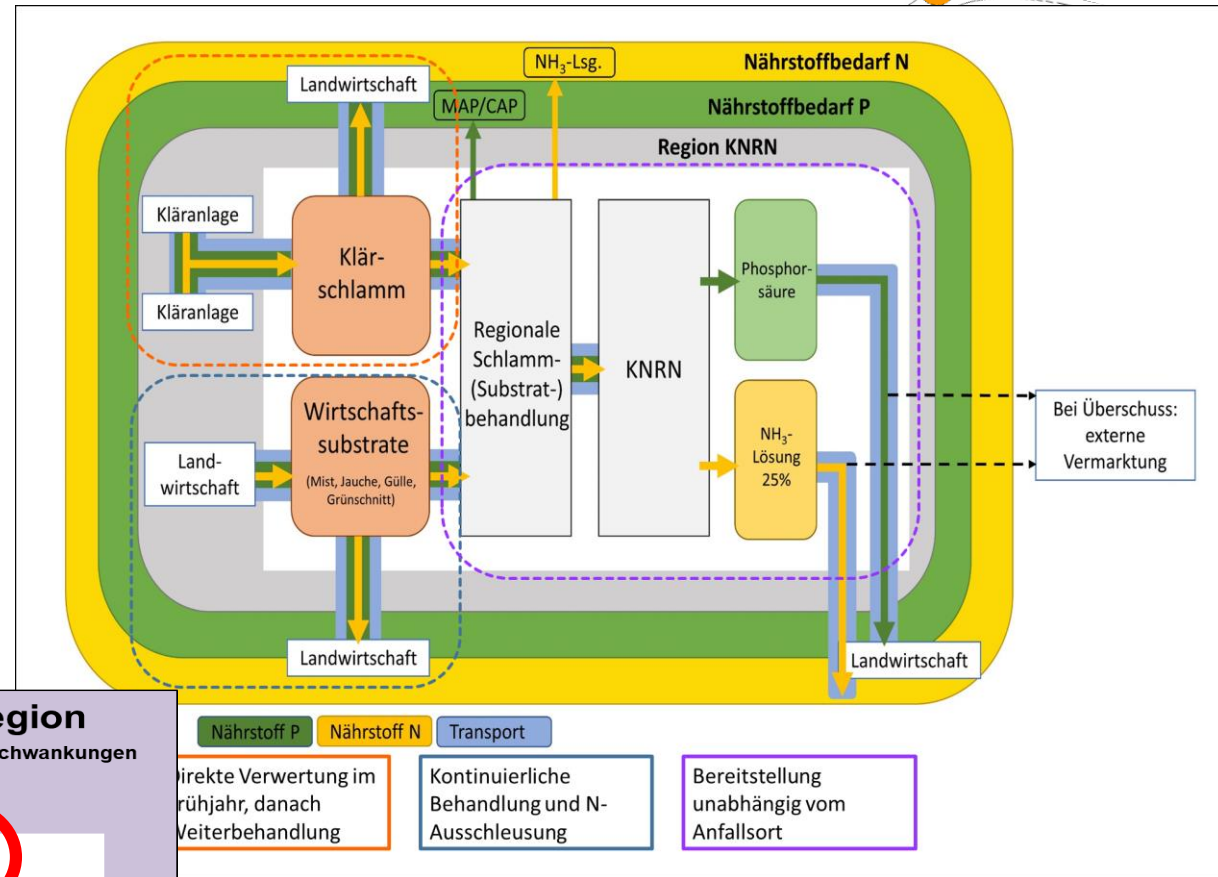
Anstieg um
4 mg/l



Nährstoffmanagement



Stufeneindampfung



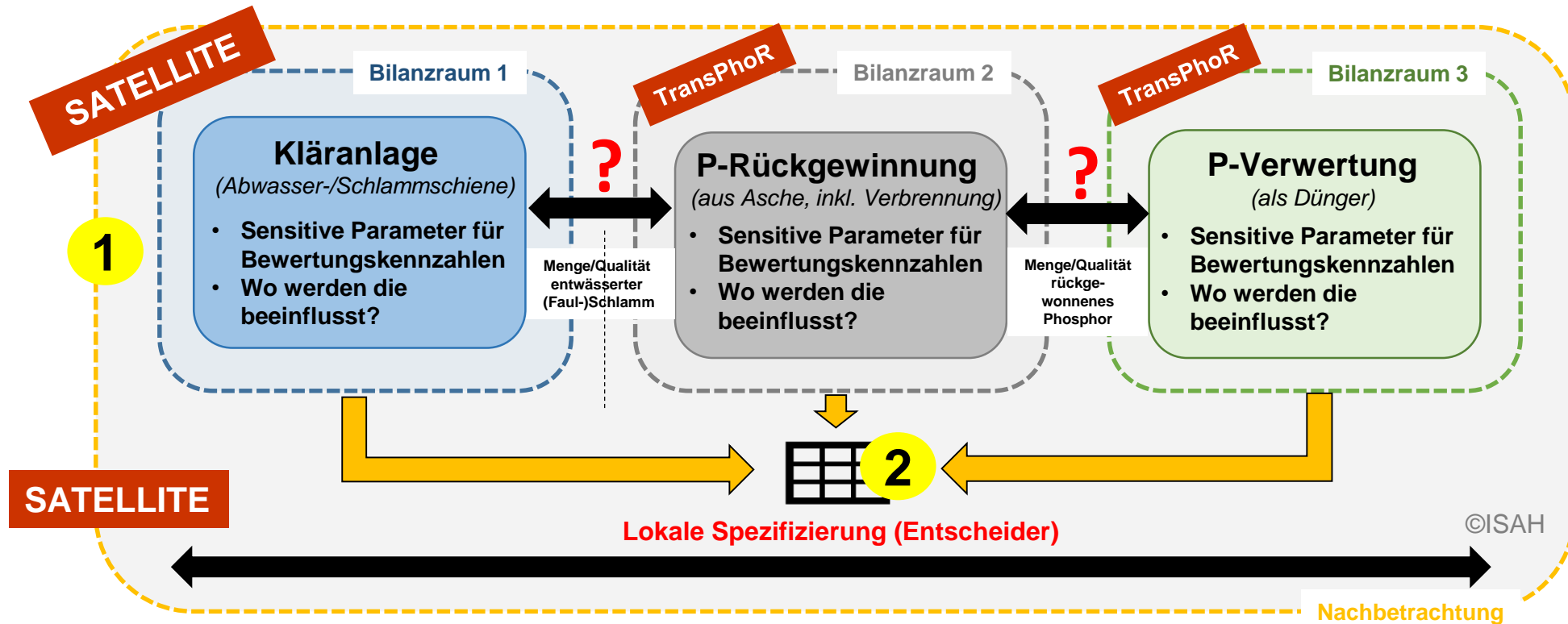
Definierte N- und NP-Düngemittel



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...)

$$\begin{aligned}
 & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \text{3} \\
 & \boxed{\begin{matrix} \text{CO}_2, \text{Kläranlage} \\ \text{kWh}_{\text{Kläranlage}} \\ \text{Fläche}_{\text{Kläranlage}} \end{matrix}} \quad ? & + & \boxed{\begin{matrix} \text{CO}_2, \text{P-Rück-Verfahren} \\ \text{kWh}_{\text{P-Rück-Verfahren}} \\ \text{Fläche}_{\text{P-Rück-Verfahren}} \end{matrix}} \quad ? & + & \boxed{\begin{matrix} \text{CO}_2, \text{Dünger} \\ \text{kWh}_{\text{Dünger}} \\ \text{Fläche}_{\text{Dünger}} \end{matrix}} \quad ? & = & \Sigma
 \end{aligned}$$

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 Kennzahlenvalidierung**