



Potentiel de réduction des GES dans le canton de Lucerne en substituant les engrais minéraux par les engrais de ferme et les engrais recyclés

05.11.2025, 5^e Journée de la recherche de l'Industrie gazière suisse

Michael Studer *et al.*

Finalité du projet

- ▶ Etude du **potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre** dans le canton de Lucerne moyennant la fermentation anaérobie des engrais agricoles
 - ▶ dans de grandes (scénario 2)
 - ▶ ou de petites installations de biogaz décentralisées (scénario 3)
- ▶ Identification des sites potentiels d'implantation pour les installations de biogaz en fonction des facteurs suivants:
 - ▶ distribution locale du substrat
 - ▶ quantités minimales de substrat
 - ▶ distances maximales de transport
- ▶ Analyse de la **substitution des engrais minéraux**
 - ▶ représentation des besoins actuels en nutriments (scénario 1)
 - ▶ prise en compte de la disponibilité végétale accrue de l'azote dans le lisier fermenté

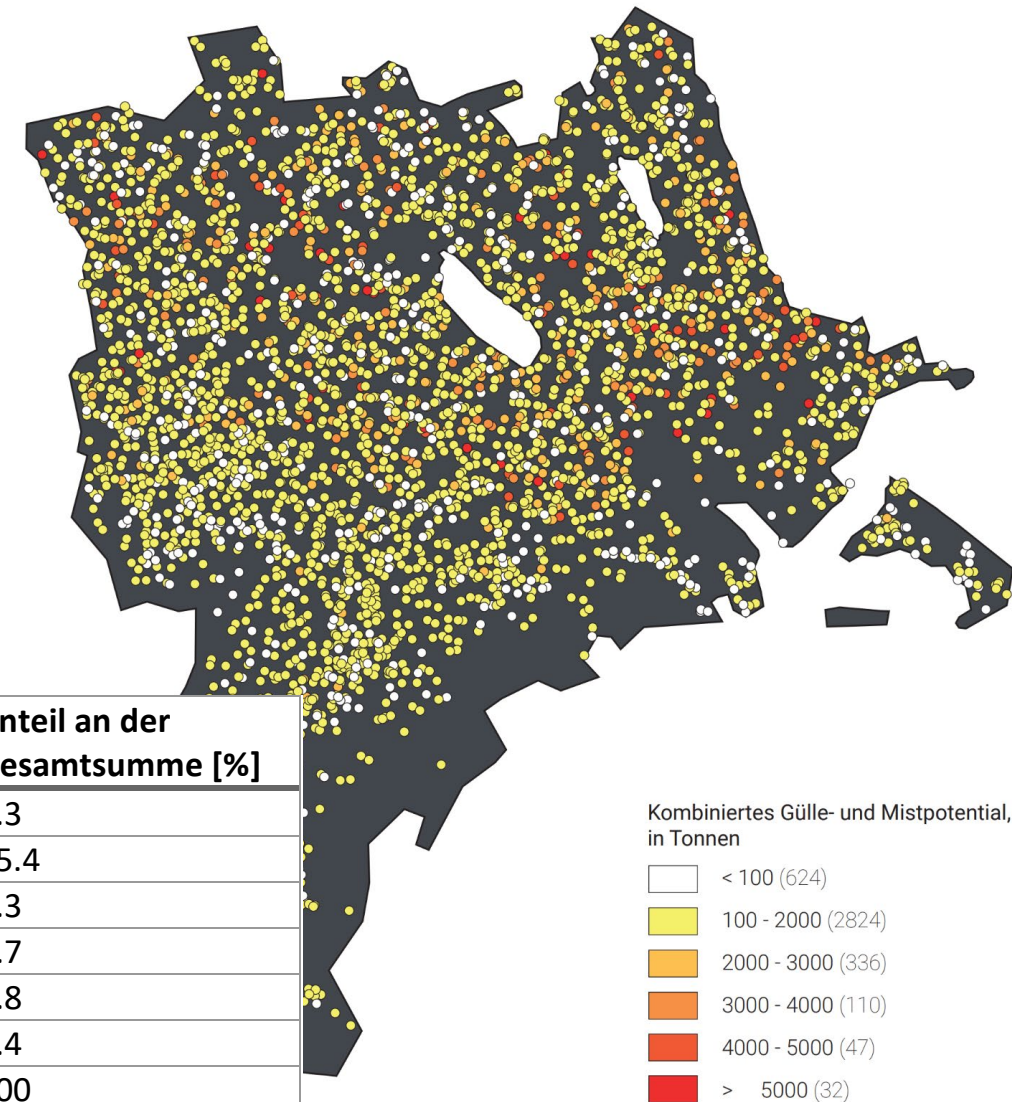
Production d'engrais de ferme et nombre d'installations potentielles de biogaz

Production d'engrais de ferme dans le canton de Lucerne

Kombiniertes Gülle- und Mistpotential
Pro Betrieb im Kanton Luzern

- ▶ 4'005 exploitations dans le ct LU
- ▶ 4.5 mio. t de lisier et de fumier
- ▶ La plupart des exploitations produisent moins de 2'000 t d'engrais de ferme par année

Grössenkatgorie [t]	Summe Gülle- und Mistpotential	Anteil an der Gesamtsumme [%]	Anzahl Betriebe	Anteil an der Gesamtsumme [%]
0-100	14'046	0.3	336	8.3
100 - 2000	2'380'514	52.7	3019	75.4
2000 - 3000	922'971	20.4	374	9.3
3000 - 4000	500'726	11.1	147	3.7
4000 - 5000	316'861	7.0	71	1.8
> 5000 t	380'346	8.4	58	1.4
Summe	4'515'465	100	4005	100



Apports en nutriments dans le canton de Lucerne

► Données cumulées du:

- + potentiel d'engrais de ferme * teneurs en nutriments
- + données HODUFLU

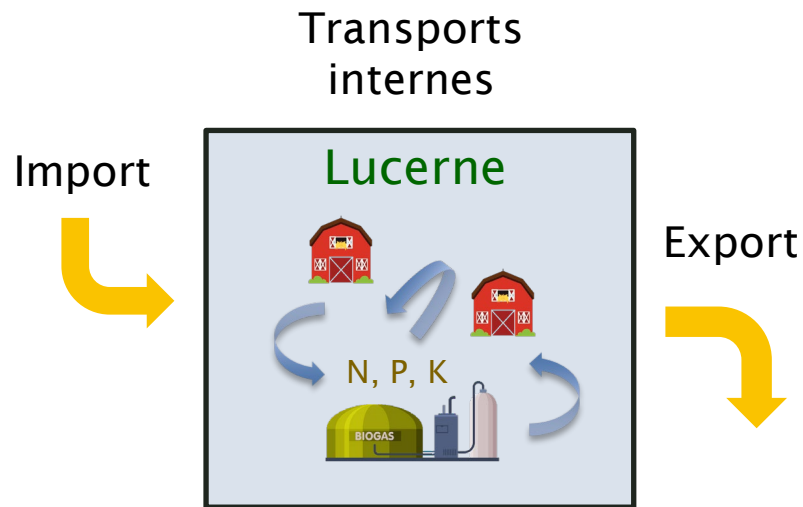
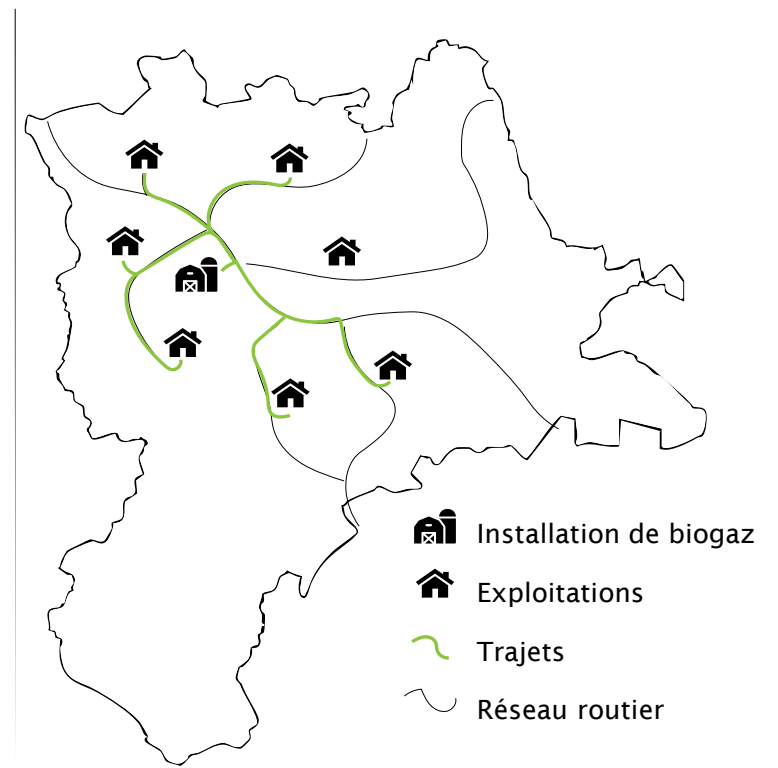


Tabelle 6 | Richtwerte der Gehalte an Trockensubstanz (TS), organischer Substanz (OS) und Nährstoffen von Hofdüngern verschiedener Nutztierarten bei Stallhaltung.

Tierart/Hofdüngerart	Gehalte (kg/m ³ unverdünnte Gülle bzw. kg/t Mist)										
	TS	OS	N _{tot} ³	N _{lös} ³	N _{verf} ³	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	Ca
Kühe/Rindviehaufzucht											
Vollgülle ¹	90	70	3,9	2,1	2,0–2,7	0,74	1,7	6,2	7,5	0,61	1,5
Gülle, kotarm ¹	75	40	4,5	2,9	2,9–3,8	0,47	1,1	9,0	11	0,58	1,0
Stapelmist ²	190	150	4,5	0,7	0,9–1,8	1,3	3,0	5,1	6,1	0,93	3,0
Laufstallmist ²	210	175	4,9	1,2	1,2–2,5	0,94	2,2	8,4	10	0,82	2,2
Rindviehmast											
Vollgülle ¹	90	65	4,0	2,1	2,0–2,8	0,55	1,3	3,7	4,5	0,37	1,2
Laufstallmist ²	210	155	4,1	1,0	1,0–1,8	0,57	1,3	4,4	5,3	0,42	1,5
Kälber											
Kälbermist ²	200	150	5,0	1,9	1,3–2,5	1,1	2,5	4,7	5,7	0,89	1,7
Pferde											
Pferdemist, frisch ²	350	300	4,4	1,2	0,3–0,8	1,1	2,5	8,1	9,8	0,6	2,5
Pferdemist ²	350	240	6,8	0,7	0,7–1,8	2,2	5,0	16,2	19	1,3	5,0
Schafe/Ziegen											
Schaf-/Ziegenmist ²	270	200	8,2	2,4	3,3–4,9	1,6	3,7	14	17	1,3	4,9
Schweine											
Schweinegülle Mast ^{1,4}	50	36	6,5	4,6	3,3–4,6	1,4	3,2	3,0	3,6	0,88	2,1
Schweinegülle Zucht ^{1,5}	50	33	4,7	3,3	2,4–3,4	1,2	2,7	2,5	3,0	0,56	1,5
Schweinemist ²	270	230	8,8	2,6	3,5–5,3	2,9	6,6	6,0	7,3	1,5	5,0

Estimation du nombre d'installations de biogaz selon les différents scénarios

- ▶ Programmation d'un script pour calculer la répartition des engrais de ferme entre les installations de biogaz
- ▶ Démarche :
 - ▶ Répartir les grandes exploitations
 - ▶ Compléter avec les 'petites exploitations', en commençant par l'exploitation la plus proche [km] jusqu'à concurrence de la taille minimale [t/a]
 - ▶ Réduction des distances de transport
- ▶ -> *nombre d'installations de biogaz*
- ▶ -> *quantité d'engrais de ferme par installation de biogaz*
- ▶ -> *quantité de N et P par installation de biogaz*

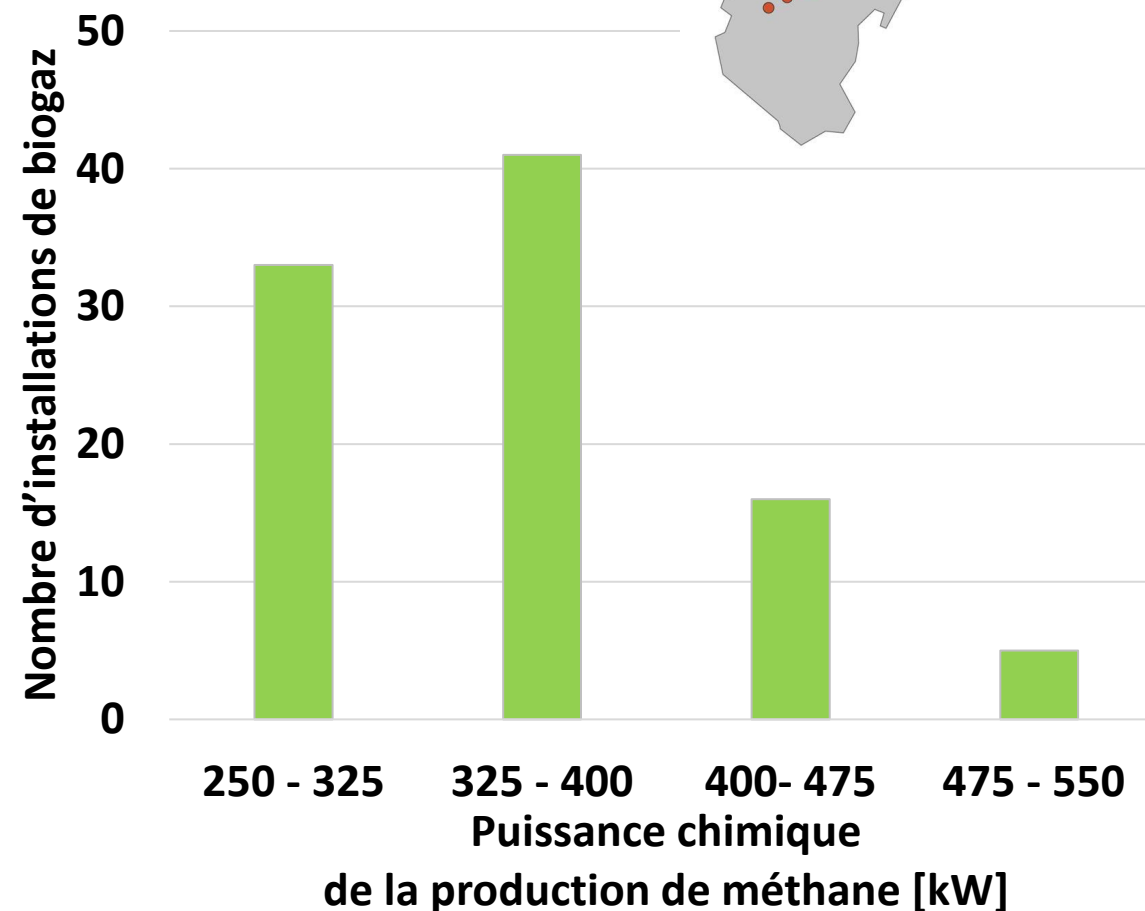


Paramètres de modélisation

Paramètres	Scénario 2 grandes installations	Scénario 3 petites installations
Quantité cible d'engrais de ferme pour une installation de biogaz	40'000 – 45'000 t	2'000 – 5'000 t
Quantité minimale d'engrais de ferme produit sur site requis pour une installation de biogaz	500 t fumier ou 1'000 m ³ lisier	200 t fumier ou 500 m ³ lisier
Distance de transport maximale admise entre exploitation et installation de biogaz	15 km	5 km
Quantité par chargement	20 t fumier ou 25 m ³ lisier	20 t fumier ou 25 m ³ lisier
Nombre minimal de transports par an	6	6

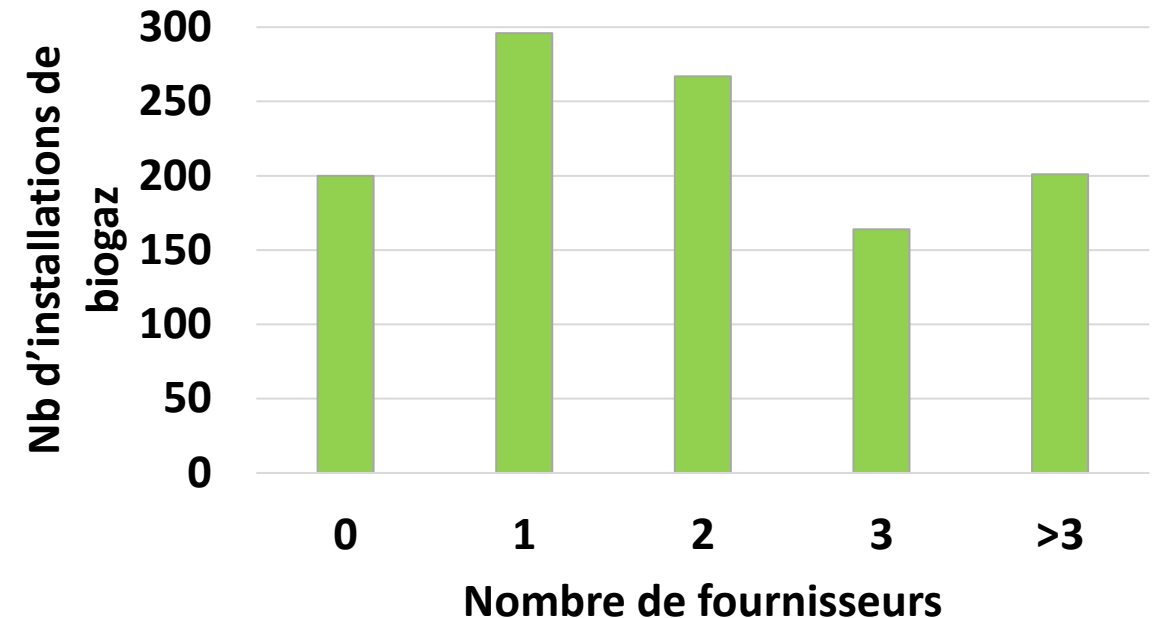
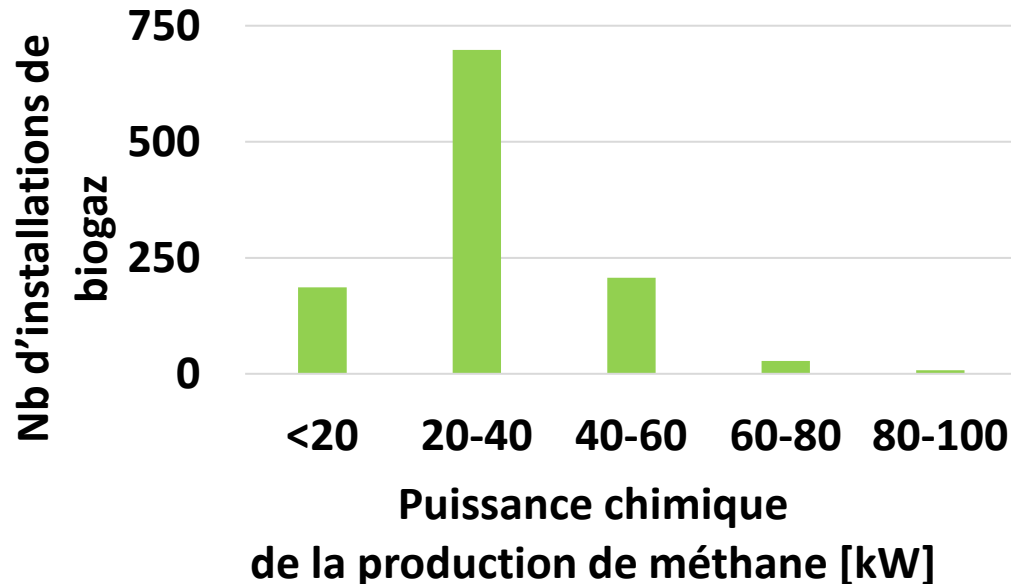
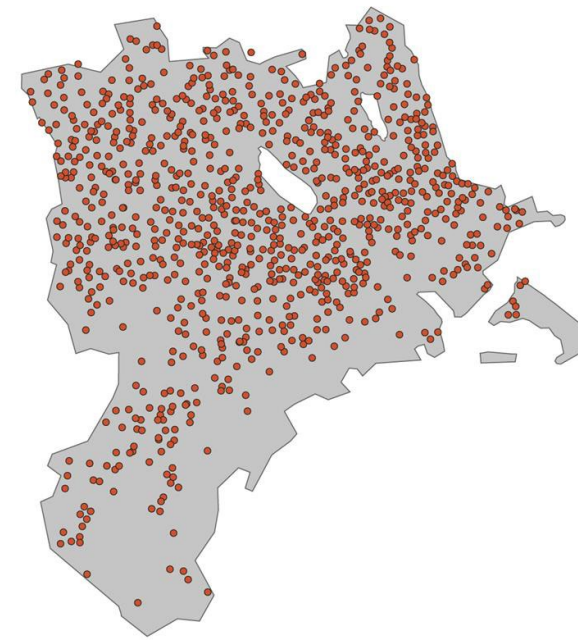
Scénario 2

- ▶ **95 installations de biogaz**
 - ▶ 95% des engrais de ferme sont fermentés
 - ▶ 30 mio. Nm³ (1'178 TJ = 327 GWh) méthane par an
- ▶ Moyennes référentielles par installation:
 - ▶ 44'667 t/a engrais de ferme
 - ▶ 36 fournisseurs (18 – 83)
 - ▶ 395 kW puissance chimique



Scénario 3

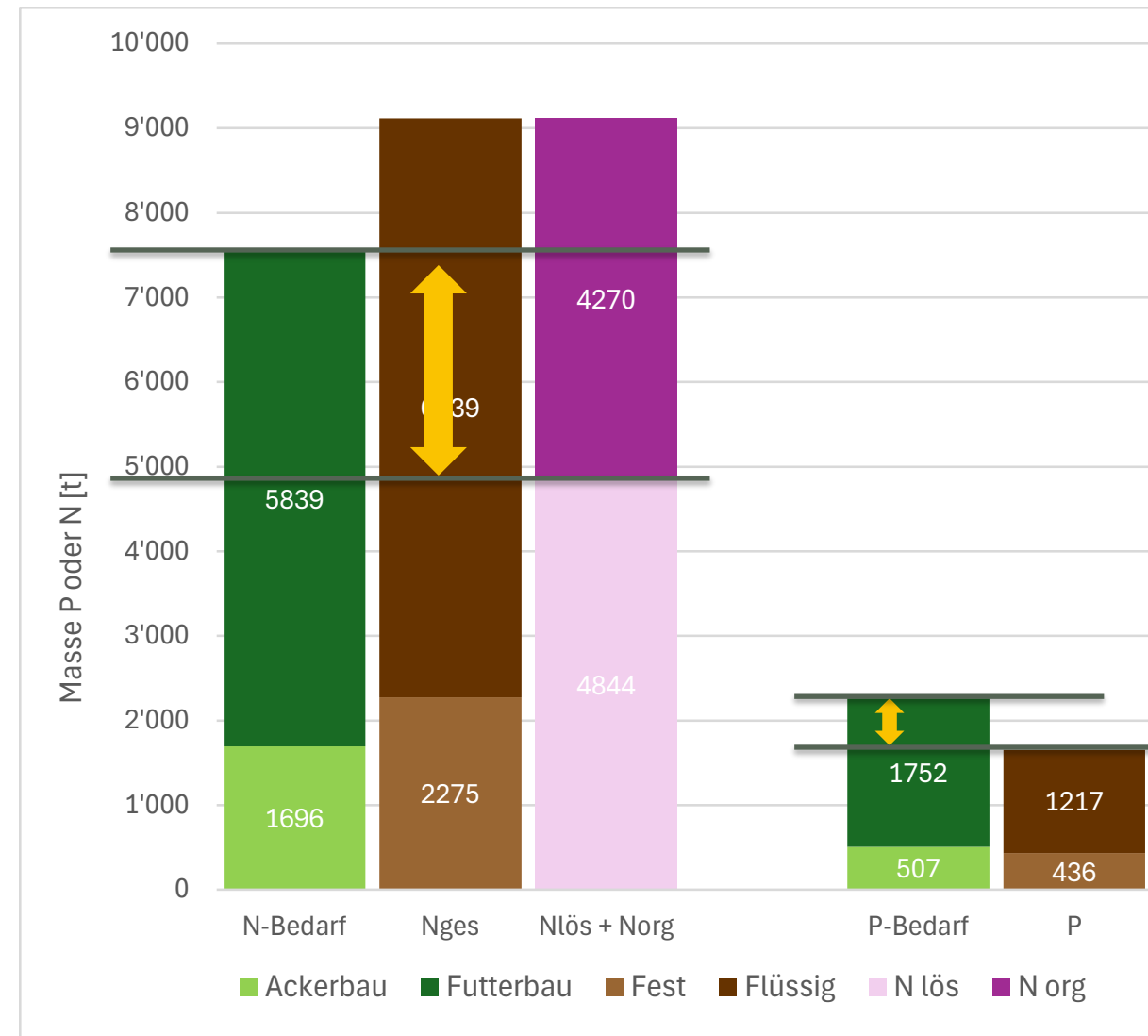
- ▶ **1'128 installations de biogaz**
 - ▶ 98% des engrais de ferme sont fermentés
- ▶ Moyennes référentielles par installation:
 - ▶ 3'820 t/a engrais de ferme
 - ▶ 35 kW puissance chimique



Couverture de la demande en nutriments et substitution potentielle des engrais minéraux

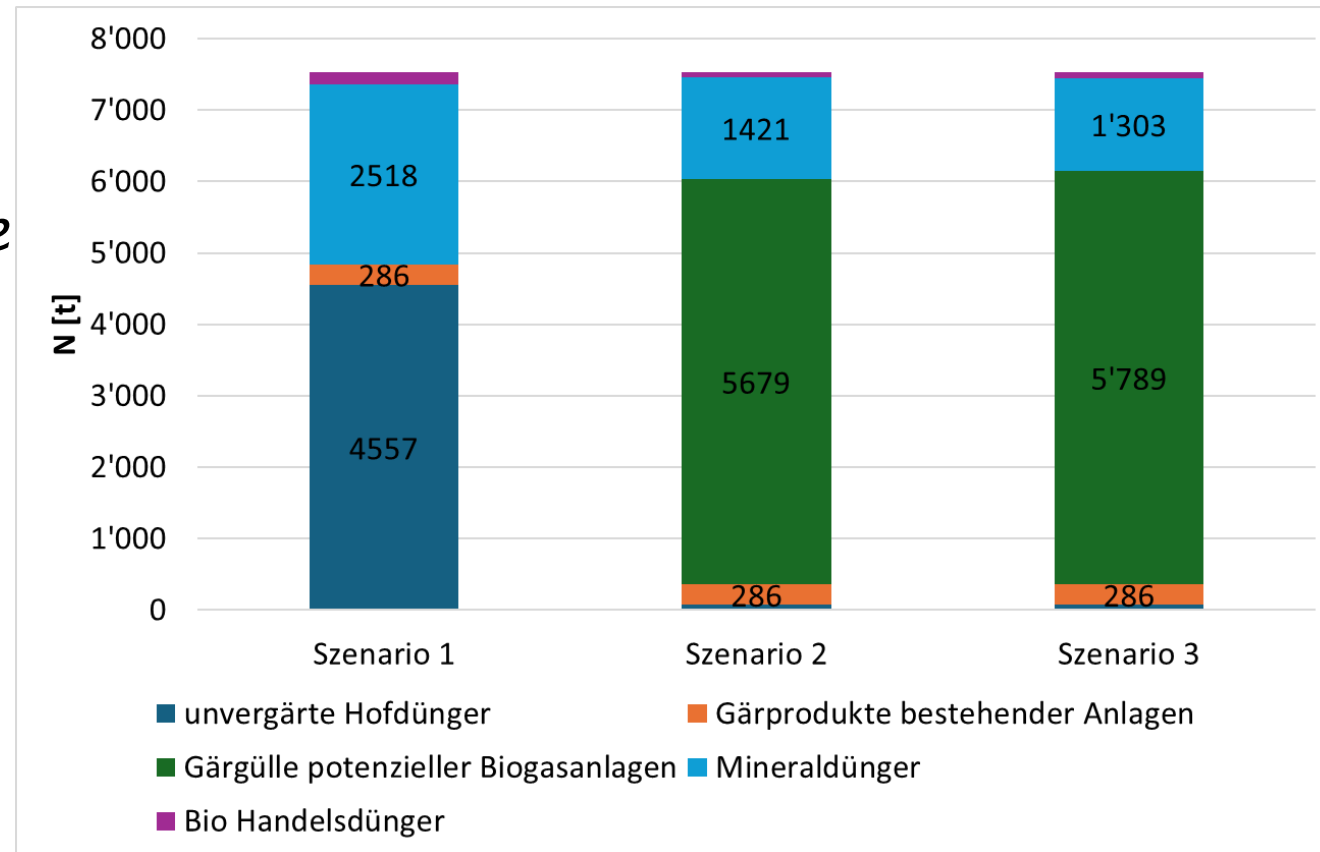
Couverture actuelle de la demande en nutriments des cultures (scénario 1)

- ▶ La demande en azote des cultures est couverte uniquement par N_{solv} dans la gestion actuelle des engrais !
- ▶ La demande de N et de P nécessite des apports supplémentaires d'engrais



Demande en azote des cultures dans les scénarios 2 et 3

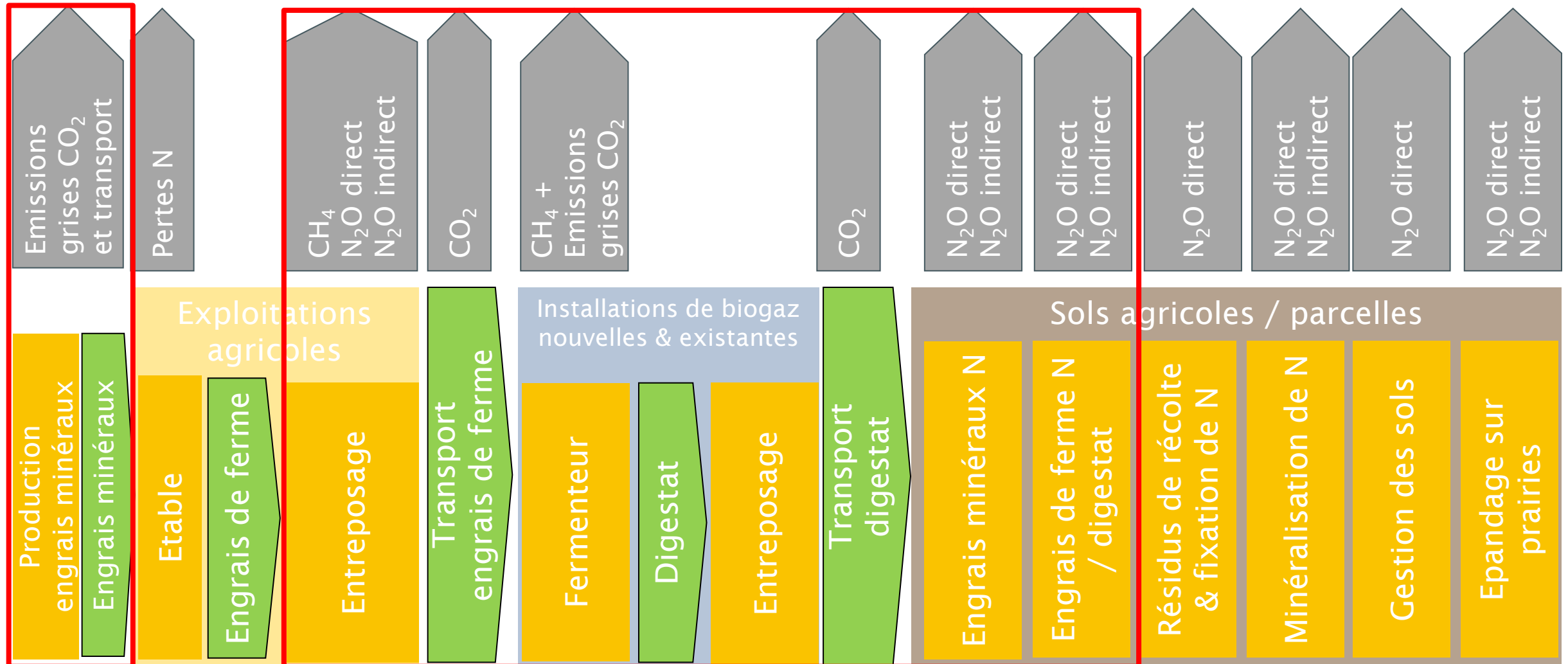
- ▶ Env. 30% du N_{org} sont minéralisés en N_{solv} dans le digesteur anaérobie
- ▶ *-> une part assez importante de la demande en azote peut être couverte
-> la demande en engrais minéraux baisse*
- ▶ La demande en N peut être couverte à hauteur de 75,4% par les engrais de ferme
- ▶ La demande en engrais minéraux azotés baisse de 1'097 t, soit 44% (scénario 2), respectivement de 1'232 t, soit 48% (scénario 3)



Emissions de gaz à effet de serre



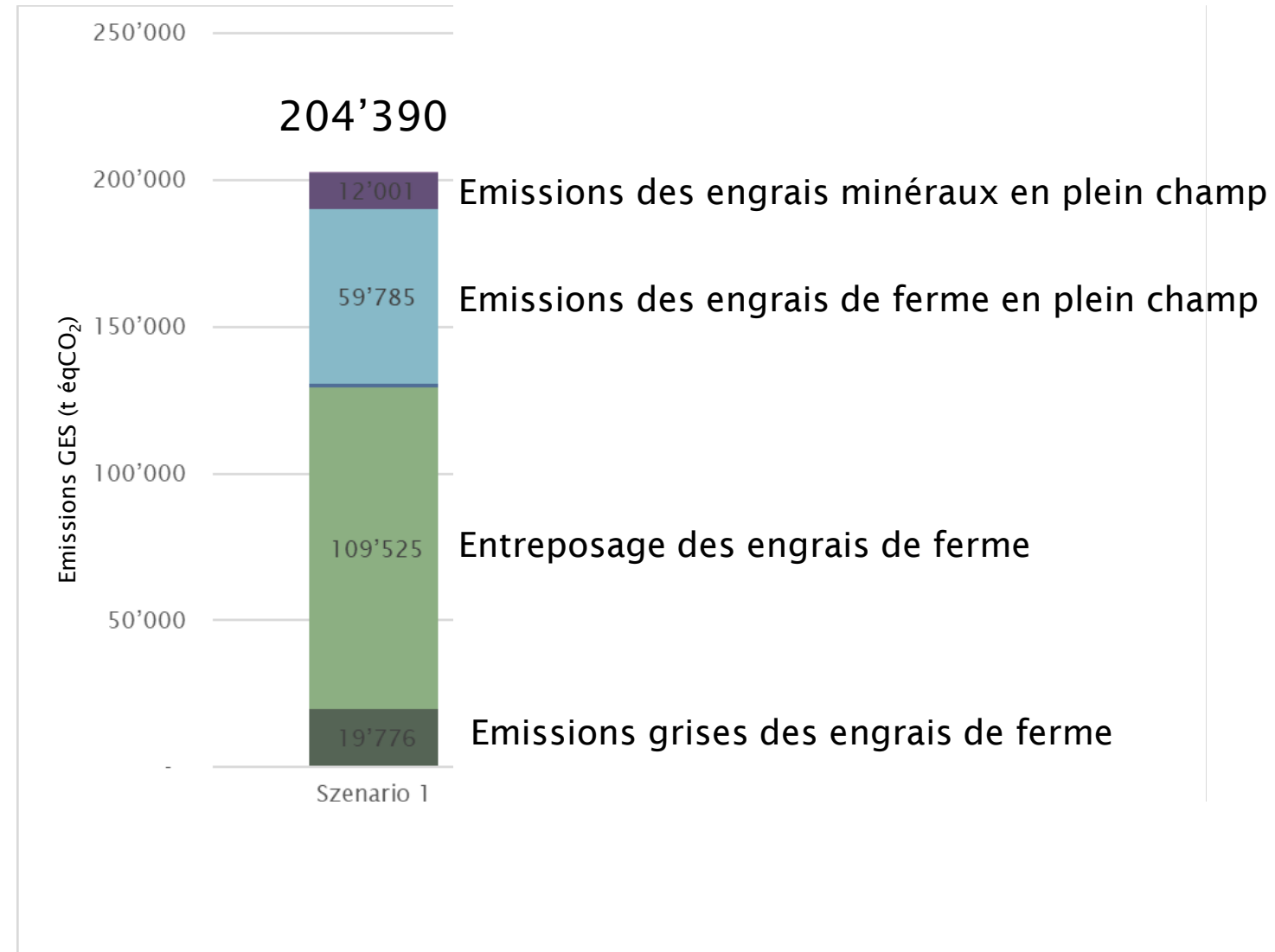
Emissions de GES: limites systémiques scénario 2 et 3





Emissions actuelles de GES

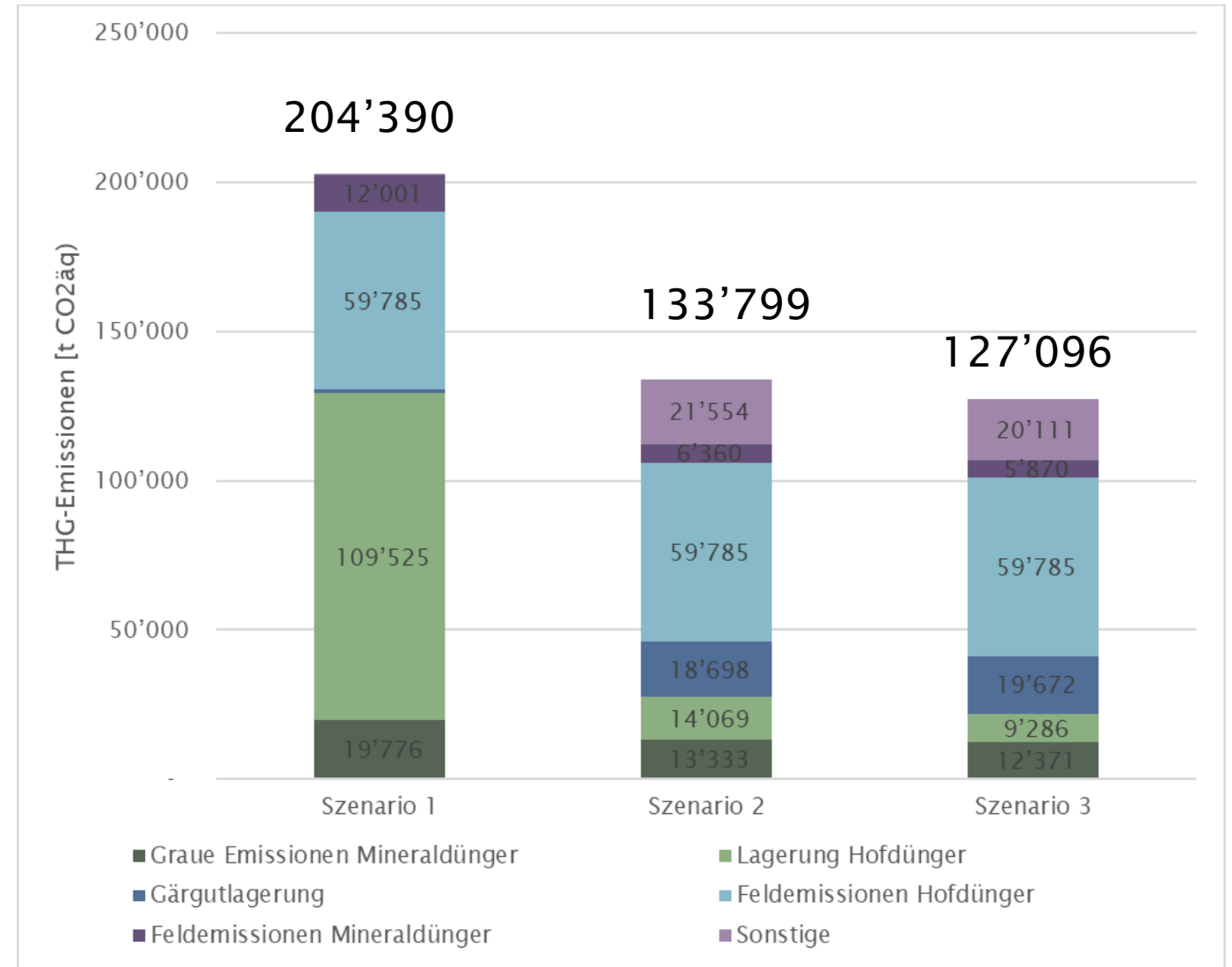
- L'entreposage des engrais de ferme génère les émissions de GES les plus importantes





Emissions de GES selon les 3 scénarios

- ▶ Les émissions de GES pourraient être réduites de > 35 %
 - ▶ Engrais de ferme entreposés moins longtemps
 - ▶ Émissions en plein champ constantes
 - ▶ Nouvelles émissions dues à l'entreposage des digestats (3% du BMP) et fuites des installations de biogaz (2% du BMP)





Comparatif des émissions de GES pour les 3 scénarios

Processus	Scénario 1 (t éqCO ₂)	Scénario 2 (t éqCO ₂)	Scénario 3 (t éqCO ₂)
Emissions grises installations biogaz nouvelles	-	5'471	5'532
Emissions grises installations biogaz existantes	17	17	17
Emissions grises engrais minéraux	19'776	- 37%, - 7'400 t	12'371
Entreposage engrais de ferme	109'525	- 92%, - 100'000 t	9'286
Transport	-	3'601	1'449
Emissions engrais de ferme en plein champ	59'785	59'785	59'785
Emissions fermentation	735	+ 12'400 t	13'114
Emissions entreposage digestats	1'103	+ 18'500 t	19'672
Emissions engrais minéraux en plein champ	12'001	6'360	5'870
Total	204'390	133'799	127'096

Estimation des coûts liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre

Estimation des *coûts liés à la réduction* des émissions de GES

	Scénario 3		Scénario 2		Scénario 2	
Parameter	Kleine BHKW	Biogasanlage	Grosse BHKW	Biogasanlage -	Grosse Biogasanlage –	Einspeisung Biomethan
Anlagenparameter						
V _{Hofdünger}	3'821 m ³ /a		44'667 m ³ /a		44'667 m ³ /a	
V _{Fermenter}	628 m ³		7'343 m ³		7'343 m ³	
Methanertrag	27'672 m ³ /a		311'425 m ³ /a		311'425 m ³ /a	
Bruttoenergie E _{chem}	276'260 kWh/a		3'114'252 kWh/a		3'425'677 kWh/a	
Wirkungsgrad BHKW	29 %		37 %		n.a.	
Leistung BHKW	9 kW		132 kW		n.a.	
Stromertrag	80'276 kWh/a		1'152'273 kWh/a		n.a.	
Vermiedene THG-Emissionen	67.2 t CO ₂ äq/a		728 t CO ₂ äq/a		728 t CO ₂ äq/a	

Parameter	Kleine Biogasanlage - BHKW	Grosse Biogasanlage - BHKW	Grosse Biogasanlage – Einspeisung Biomethan
Kosten			
Investition Fermenter und bauliche Massnahmen	530'000 CHF	3'700'000 CHF	3'700'000 CHF
Investition BHKW	70'000 CHF	300'000 CHF	n.a.
Investition Gasaufreinigung	n. a.	n. a..	650'000 CHF
Investitionskostenbeitrag	n. a.	n. a.	355'508 CHF
Abschreibungen	33'500 CHF/a	215'000 CHF/a	232'225 CHF/a
Zinsen Fremdkapital	18'000 CHF/a	120'000 CHF/a	119'835 CHF/a
Unterhalt Anlage (inkl. Stromverbrauch Aufreinigung)	16'050 CHF/a	104'500 CHF/a	146'494 CHF/a
Arbeitszeit für Betrieb	1 h/d	4 h/d	4 h/d
Lohnkosten Betrieb	14'600 CHF/a	58'400 CHF/a	58'400 CHF/a
Transportkosten	638 CHF/a	48'380 CHF/a	48'380 CHF/a
Kosten total	81'783 CHF/a	546'280 CHF/a	605'333 CHF/a



Parameter	Kleine Biogasanlage BHKW	Grosse Biogasanlage - BHKW	Grosse Biogasanlage – Einspeisung Biomethan
Erlös			
Stromerlös	40'138 CHF/a	449'387 CHF/a	n. a.
Methanerlös	n. a.	n. a.	513'852 CHF/a
Bilanz			
Gewinn / Verlust	-41'644 CHF/a	-96'893 CHF/a	-91'482 CHF/a
Stromgestehungskosten	1.02 CHF/kWh	0.47 CHF/kWh	n. a.
Methangestehungskosten	n. a.	n. a.	0.18 CHF/kWh
Kosten THG-Vermeidung	798 CHF/t CO ₂ äq	243 CHF/t CO ₂ äq	235 CHF/t CO ₂ äq

Conclusion



Conclusion

- ▶ La fermentation des engrais de ferme en quantité accrue permet de réduire environ de moitié la demande en engrais minéraux azotés
- ▶ La fermentation des engrais de ferme est une mesure efficace pour la protection du climat
 - ▶ Dans le canton de Lucerne, une telle mesure permettrait d'éviter jusqu'à 75'000 t eqCO_2 (13% des émissions agricoles totales)
 - ▶ Ecourter l'entreposage des engrais de ferme est le plus grand levier de réduction des émissions de GES
 - ▶ Réduire l'utilisation des engrais minéraux a un effet moindre sur la réduction des émissions de GES
 - ▶ Pour atteindre l'objectif zéro net à l'horizon 2050, les émissions incompressibles de GES doivent être compensées par des technologies à émissions négatives (NET)
 - ▶ Compte tenu des subventions actuelles, les certificats CO_2 devraient être vendus à environ 800 CHF, soit 240 CHF/t eqCO_2
 - ▶ Direct air capture (Climeworks) coûte aujourd'hui environ 1'000 CHF / t CO_2