



POLITECNICO
MILANO 1863

Evento realizzato con il contributo incondizionato di



11° CONVEGNO DI APPROFONDIMENTO

IL FUTURO DELL'ACQUA

NUOVA DIRETTIVA EUROPEA:
TECNOLOGIE INNOVATIVE E
RISPARMIO ENERGETICO

Raggiungimento della neutralità energetica e ruolo della digestione anaerobica fanghi

Francesca Malpei

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Sezione ambientale

Cosa prevede la nuova Urban Water Directive (file 2022/0345 del 16/10/23)

- **Neutralità energetica (target dal 2030, 100% al 2045, PE >10.000 AE)**
- Trattamento quaternario per rimuovere micro-contaminanti (target dal 2035, 100% 2045, PE > 200.000)
- Recupero P
- Riutilizzo acque e recupero fanghi
- Monitoraggio e riduzione emissioni gas serra (CO₂, CH₄, N₂O)
-

Neutralità energetica

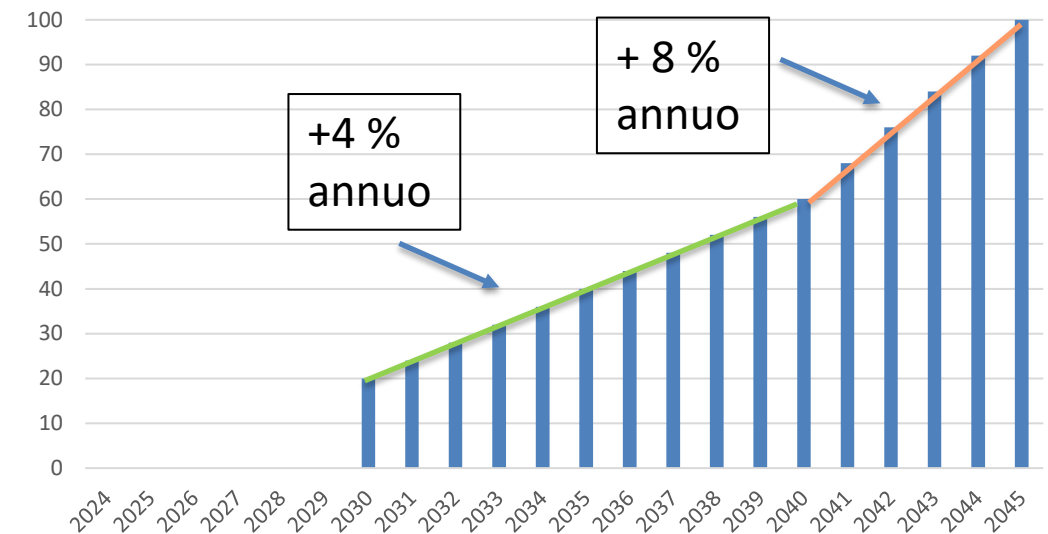
(art.11, comma 1) energy audits (..) every four years, ... identification of the potential for cost-effective measures to reduce the use of energy and /or enhance the use production of renewable energy, with a particular focus to identify and utilise the potential for biogas production, while reducing greenhouse gas methane emissions (audit dal 2030 per PE >100.000).

(art..11, comma 2): ensure that UWWTP treating a load of 10.000 p.e. and above produce the total annual energy from renewable sources (hydraulic, solar, thermal, wind energy and biogas), based notably on the results of the audits..... The energy produced on or off-site.

A maximum of 30% may be purchased from external sources.

(punto 16): however, initiative to achieve energy neutrality should not lead to an increased emission of methane and N₂O

Energia Rinnovabile Prodotta/Energia totale usata
(PE > 10.000), a livello nazionale, %



Water & Energy: a Complex Nexus

Aqua Publica Europea - 17 ottobre 2022

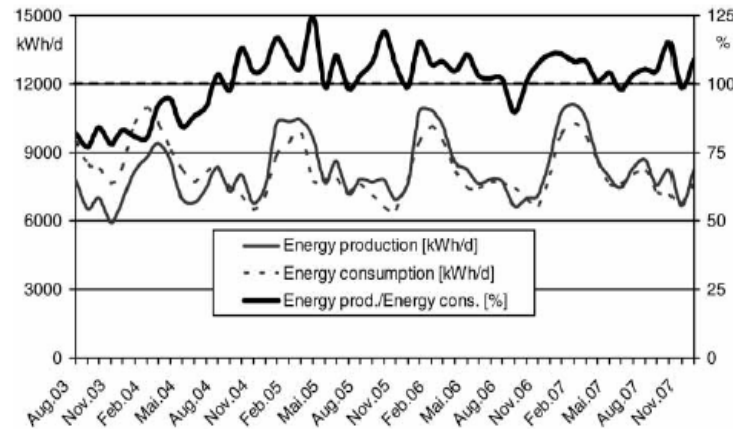
<https://www.aquapublica.eu/article/news/event-report-water-and-energy-complex-nexus>

- La proposta impone **MOLTI** e **CONTESTUALI** **OBIETTIVI**, definendo un percorso.
- Ragionare «**per singoli temi/obiettivi**» non sarà **efficace** in termini di costi/timeline
- **Pianificazione basata su strumenti di analisi e di ottimizzazione multi-obiettivo**, per individuare ed indirizzare la/le soluzioni tecniche percorribili dei «nuovi impianti».



La neutralità: casi di specie

(Novak O. et al., 2011)

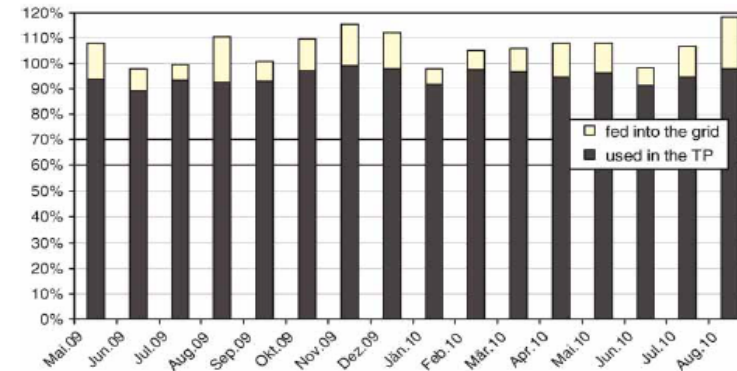


Strass WWTP, Impianto 146.000 AE, N/C= 0,07,
Primario + 2 stadi aerobici (**SRT < 14 d**),
anammox su surnatanti

SRT digestione: 36 d

21,4 kWh_{elettrici}/AE/anno

15,6 L CH₄/AE/d

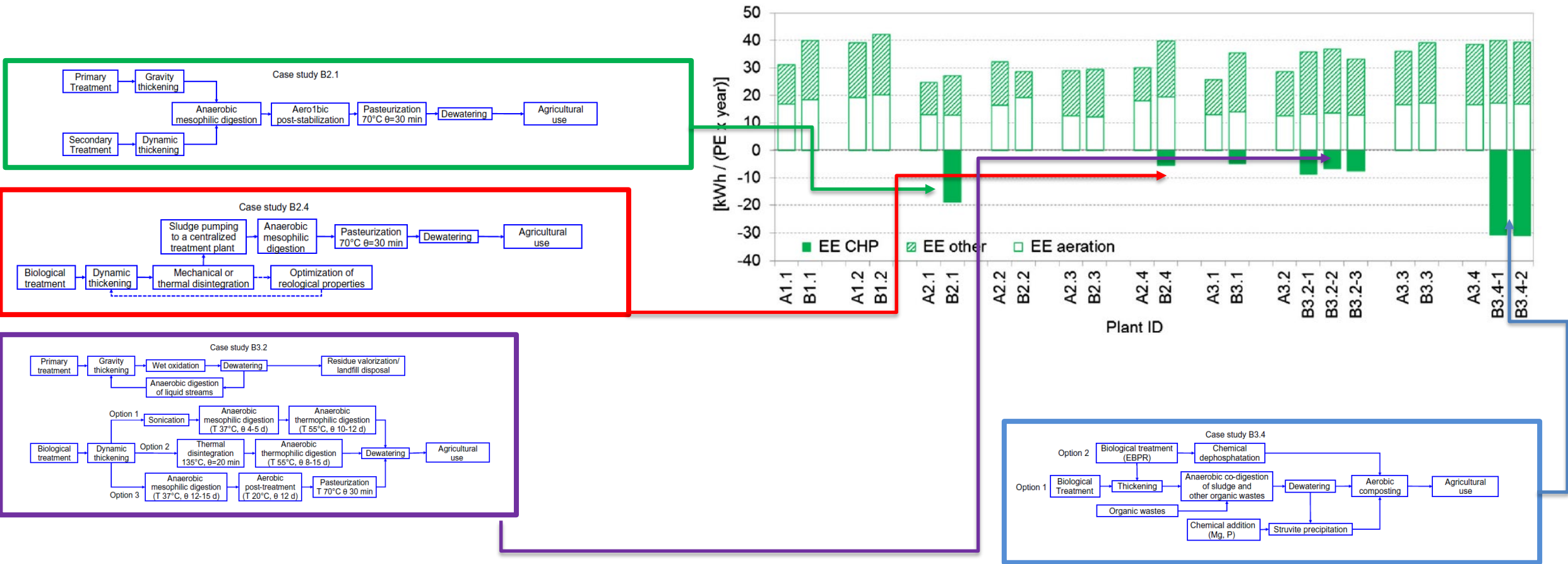


Ischl WWTP, Impianto 50.000 AE, N/C= 0,09,
primario + aerobico (**SRT < 12 d**),

SRT digestione = 80 d

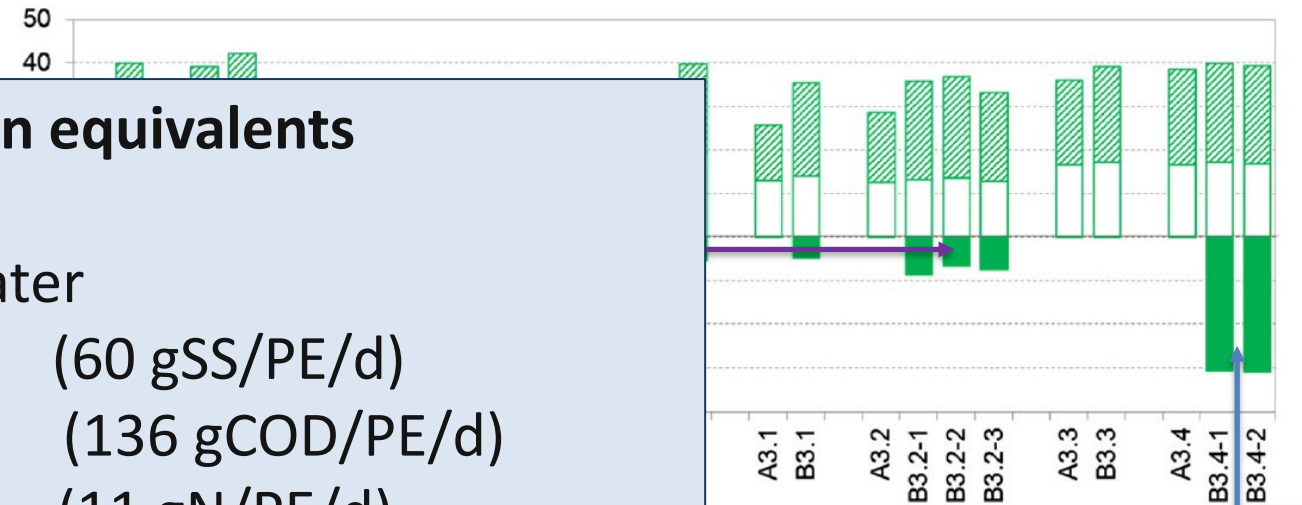
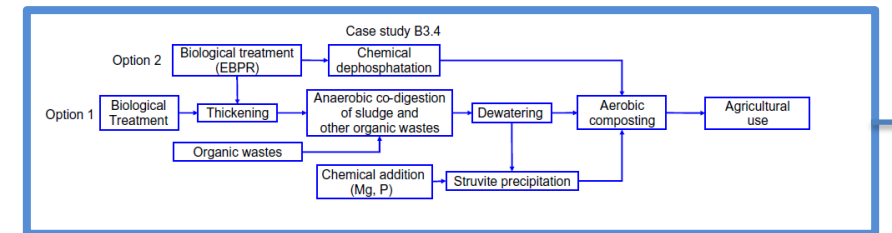
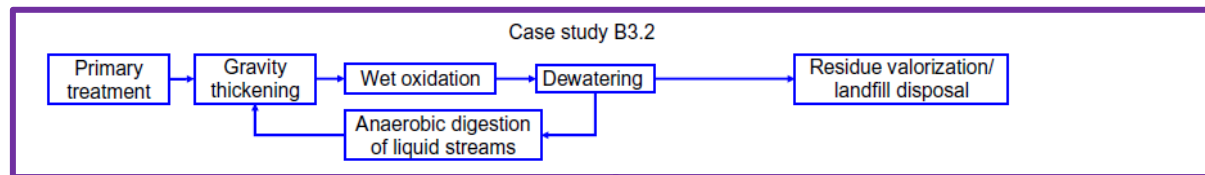
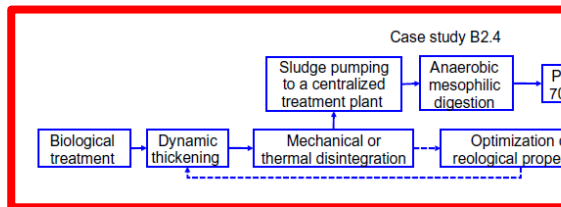
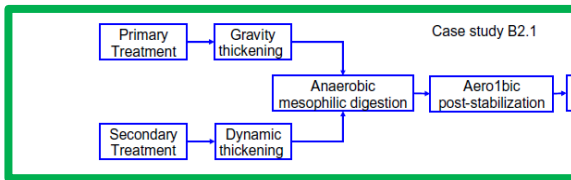
20,6 kWh_{elettrici}/AE/anno da DA

Neutralità/energy footprint (Mininni et al, 2015) <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4013-2>



Neutralità/energy footprint (Mininni et al, 2015)

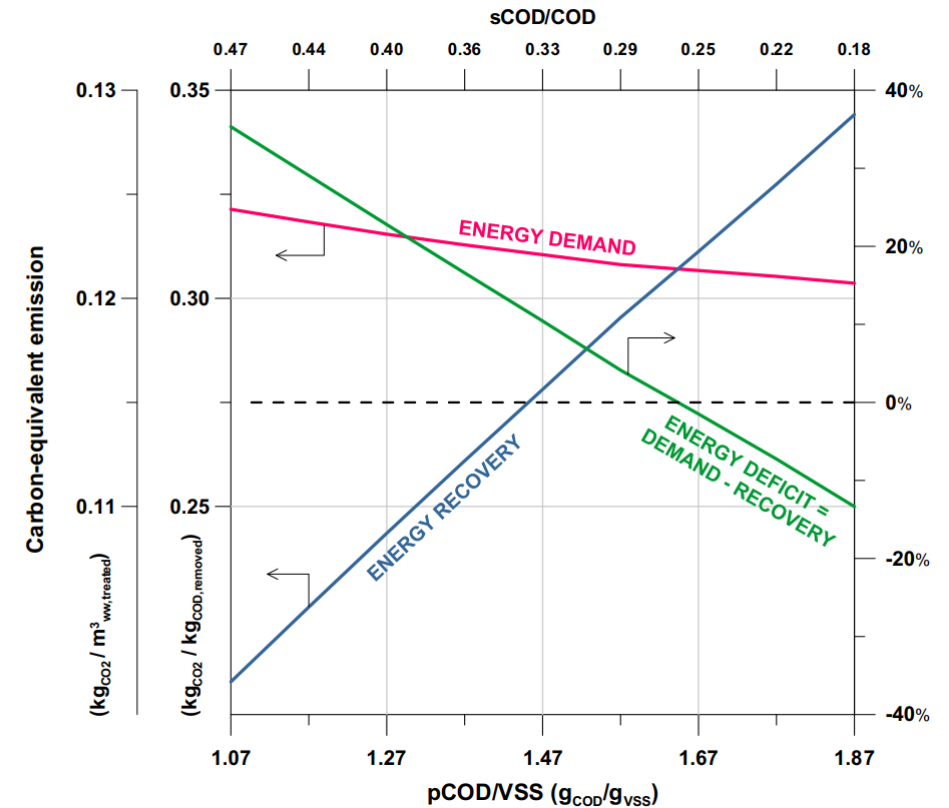
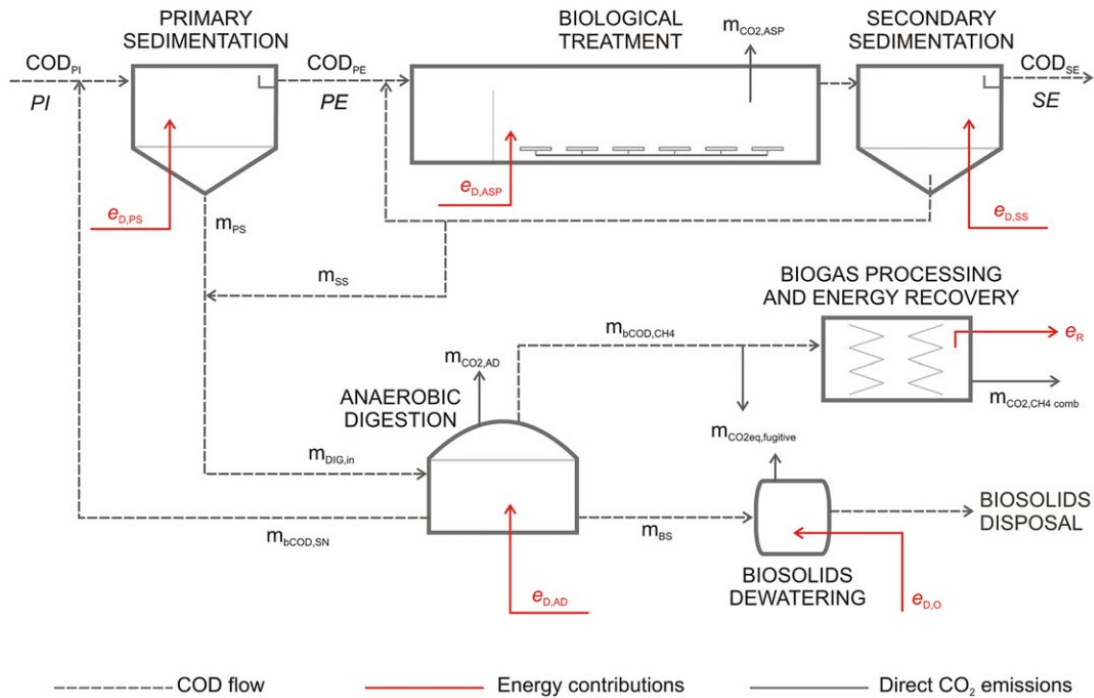
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-4013-2>



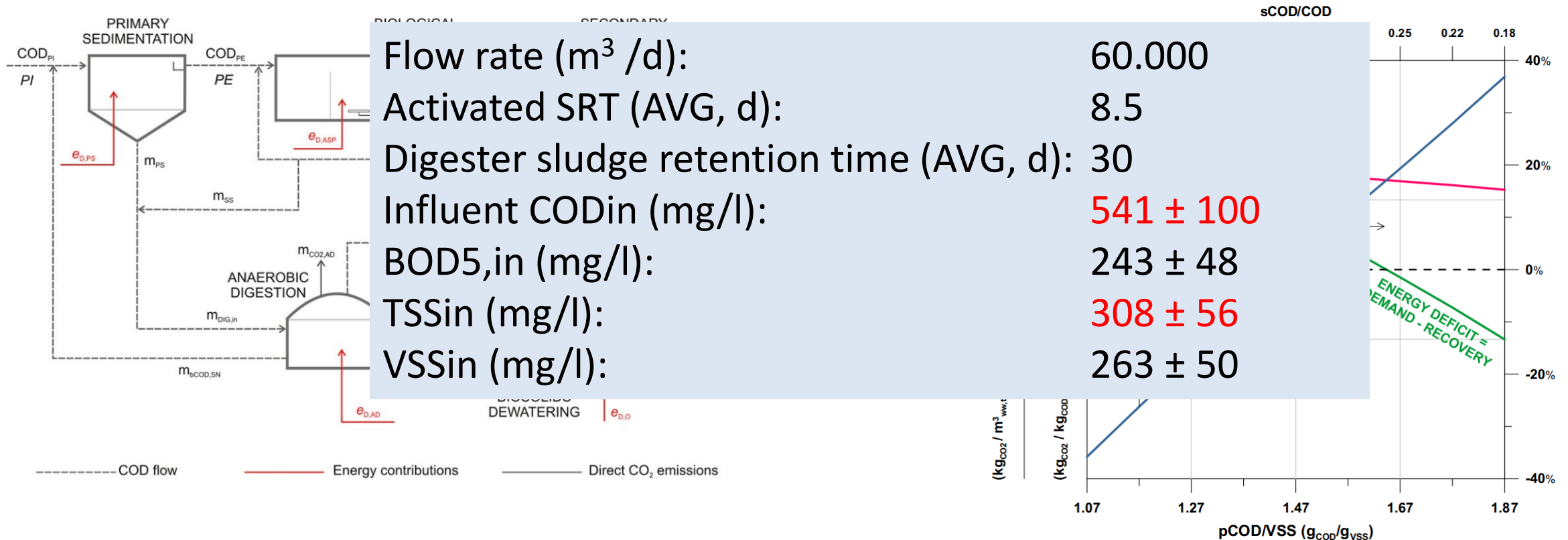
PE Person equivalents

- 273 L/d of wastewater
- 220 mgSS/L (60 gSS/PE/d)
- 500 mgCOD/L (136 gCOD/PE/d)
- 40 mgN/L (11 gN/PE/d)
- 5.5 mgP/L (1.5 gP/PE/d)

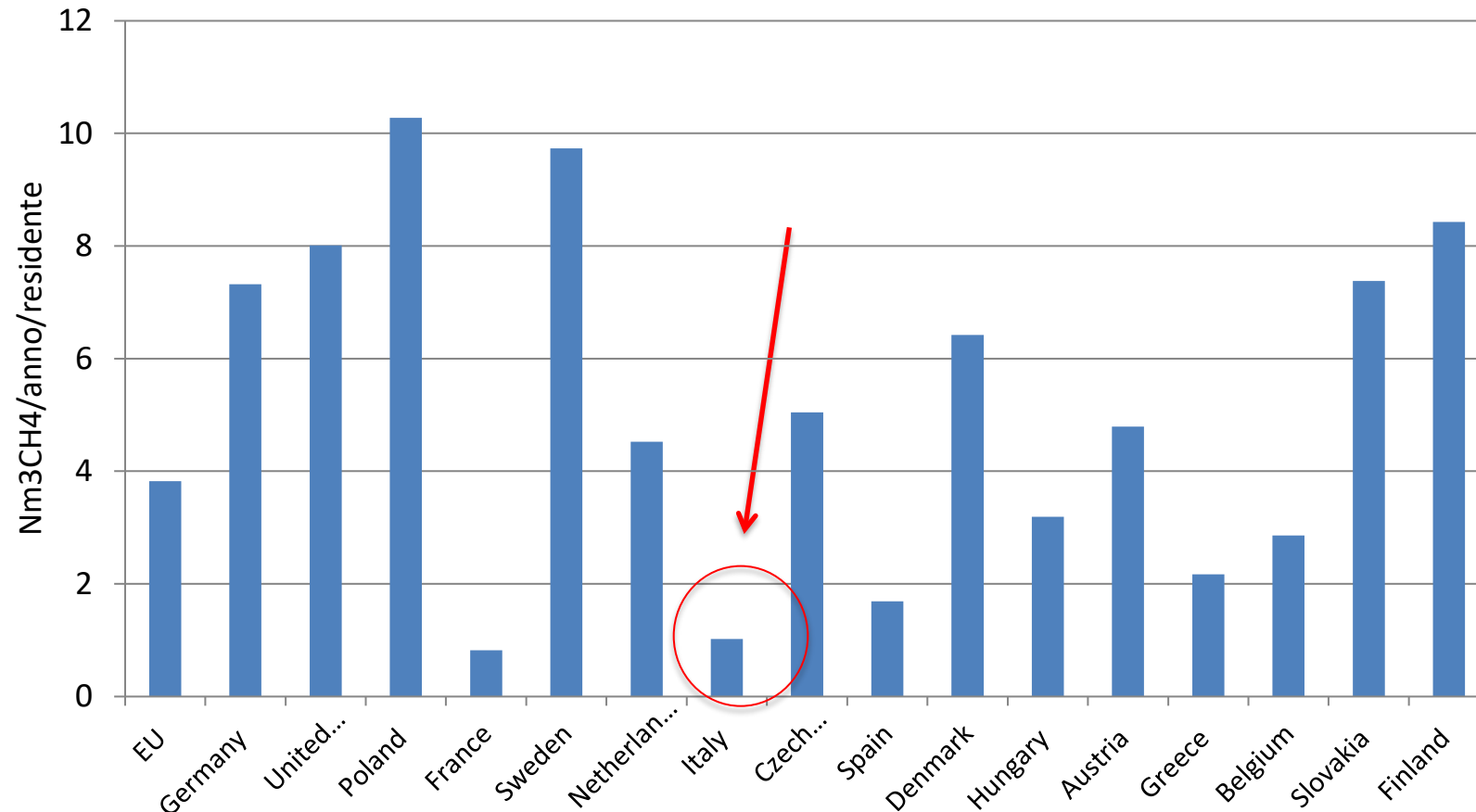
Neutralità/energy footprint (Gori et al, 2011) doi:10.1016/j.watres.2011.08.036



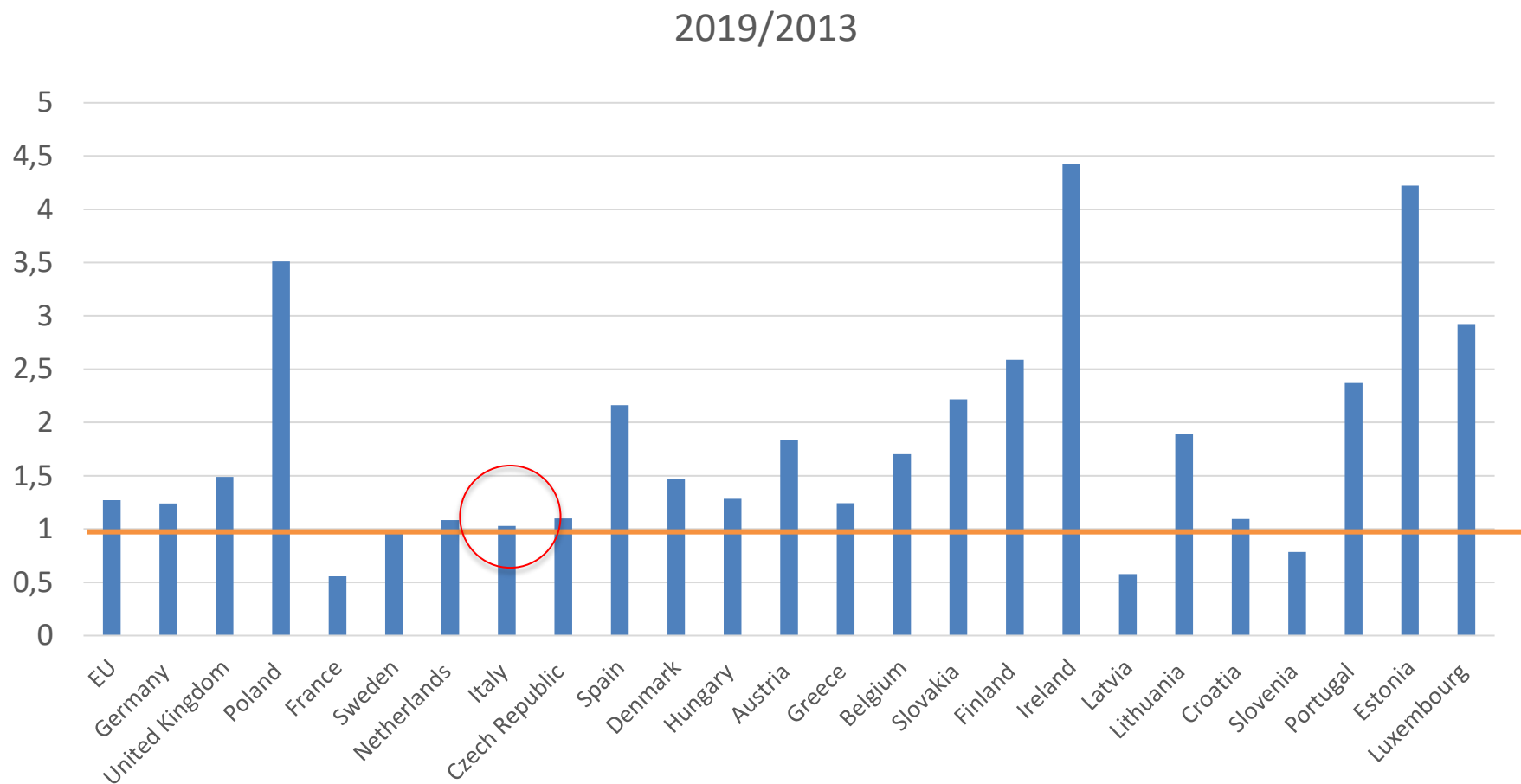
Neutralità/energy footprint (Gori et al, 2011) <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4013-2>



Produzioni medie nazionali di biogas (come metano) da fanghi, per residente
(elaborazione su dati Euroserver Biogas Barometer – 2019)



Aumento produzioni medie nazionali di biogas da fanghi 2019 rispetto a 2013 (elaborazione su dati Euroserver Biogas Barometer)



Quanto siamo lontani dal 20% (con solo biogas) – Analisi frettolosa

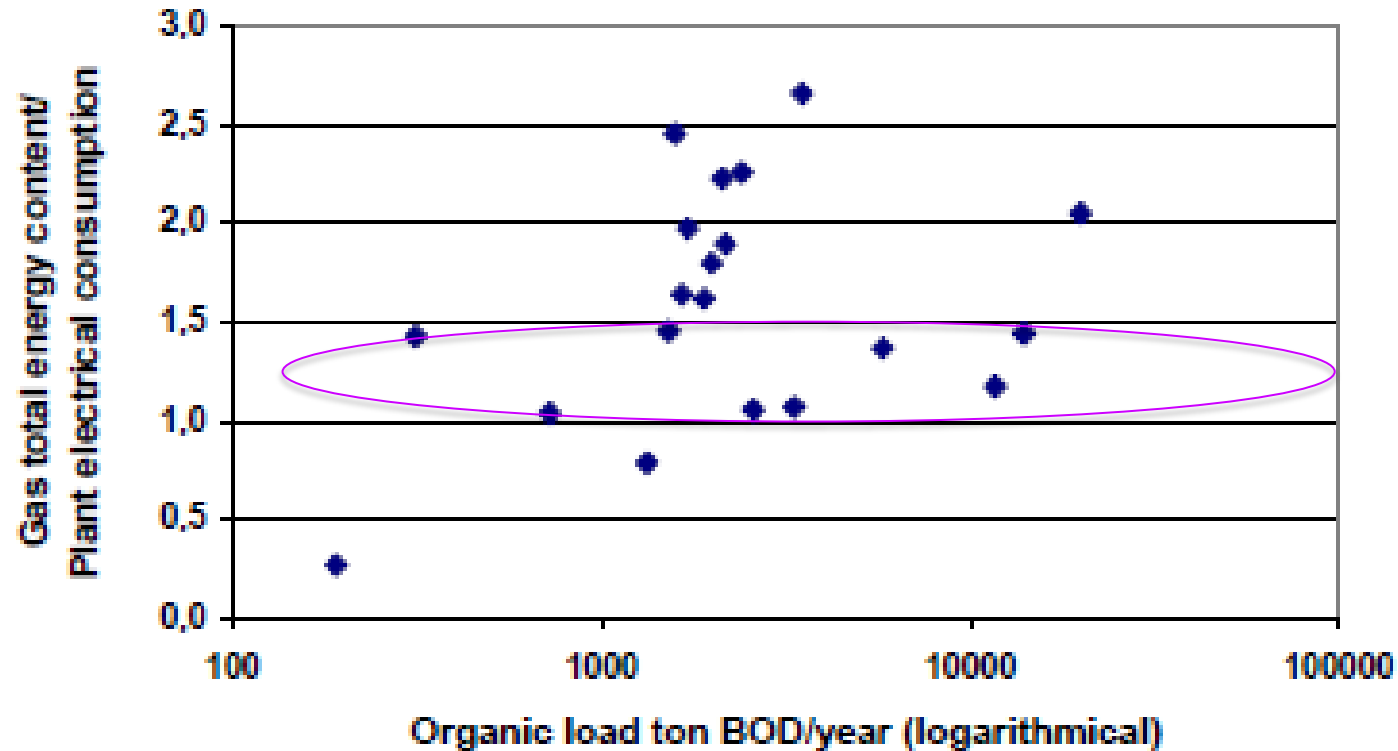
Anno 2022	
Impianto di	
Gestore	
Linea Acque	
Qin media annua	
COD IN load medio anno	
TKN IN load medio anno	
SST IN load medio anno	
Consumo complessivo EE annuo ID, al lordo di eventuali produzioni interne di EErinnovabile (es: PFV, da biogas,...)	
Consumo annuo metano per utenze termiche (riscaldamento DA, uffici, altro)	
Produzione lorda annua EE da fotovoltaico (se esistente)	
Digestione fanghi	
Riceve fango primario (SI/NO)	
Riceve fango biologico (SI/NO)	
Riceve fango misto I + II (SI/NO)	
Riceve FORSU (SI/NO)	
Riceve rifiuti speciali (NO/SI e quali)	
Carico IN fango primario (SI/NO)	
Carico IN fango biologico (SI/NO)	
Carico IN fango misto I + II (SI/NO)	
Carico IN FORSU (SI/NO)	
Carico IN rifiuti speciali (NO/SI e quali)	
Biogas prodotto	
Percentuale CH4	
T° (mesofilo/termofilo)	
HRT medio complessivo	
Presenza di pre-trattamenti del fango per aumentarne la degradabilità (SI/NO)?	

PE da fognatura (base 110 gCOD/PE/d)	PE da rifiuti speciali IN DA	SSV a DA/COD in (kg/kg)	η SSV in DA	Metano prodotto/ CODin totale (Nm ³ /kgCOD)	CODesterno/ CODtotale	CODmetano/ CODtotale in (%)	Energia primaria biogas/ Consumo EE complessivo	EE ricavabile da biogas/ Consumo EE complessivo (η EE = 32%)	T (°C)
60.947	41.238	0,41	51,7%	0,144	40%	45%	128%	41%	35/55
144.546	0	0,30	38%		0	0%	31%	10%	36
148.532	0	0,33		0,155	0	48%	118%	38%	35
31.333	SI, nd			0,100	nd	31%	148%	47%	35
18.453	0			0,131		41%	42%	14%	33



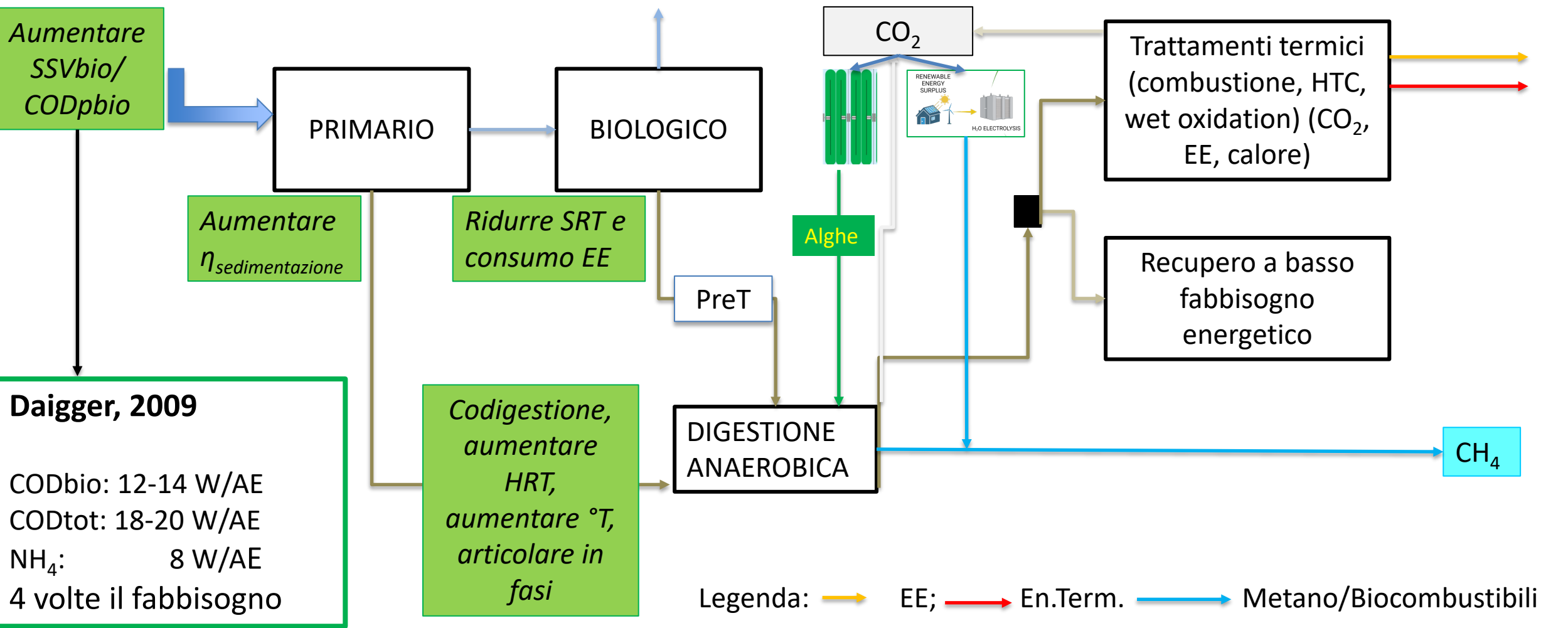
Benchmark svedese (VASS, 2007)

Rapporto tra energia lorda biogas/en.elettrica consumata in impianto



**su base PCS metano*

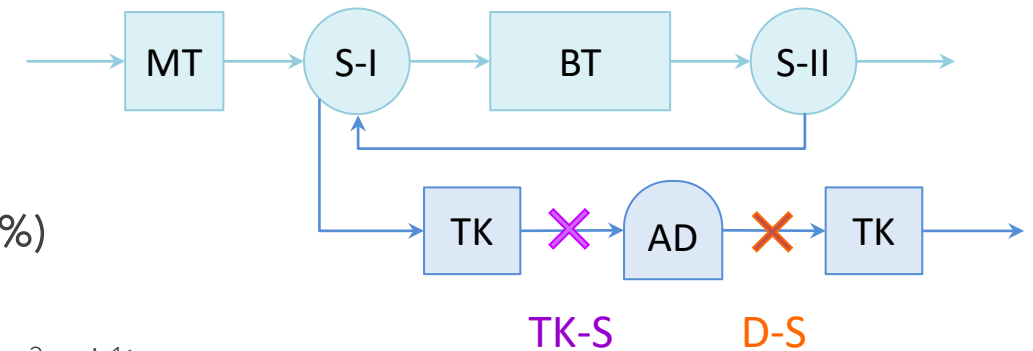
Schema di ragionamento



Pretrattamento fango con O_3

IMPIANTO DI DEPURAZIONE PICCOLA-MEDIA TAGLIA (30'000 AE)

- Refluo in ingresso: 70% industriale + 30% municipale
- Linea acque di tipo convenzionale
- Linea fanghi di tipo convenzionale:
 - miscela di fango primario (~65% su base VS) e secondario (~35%)
 - TK: pre-ispessitore statico (HRT = 24 h)
 - AD: digestore anaerobico (HRT = 20-25 d; OLR = $0.5-2 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)



FANGHI
SCARSAMENTE
DEGRADABILI

Fango pre-ispessito: $BMP = 148 (96-224) \text{ NL CH}_4 \cdot \text{kg SV}^{-1}$

Fango digerito: $BMP = 45 (30-61) \text{ NL CH}_4 \cdot \text{kg VS}^{-1}$

BILANCIO
ENERGETICO
NEGATIVO IN DA

Test di ozonazione in batch a diverso dosaggio di O_3 :

TK-S: 20 - 50 - 90 - 140 $\text{mg O}_3 \cdot \text{g SV}^{-1}$

D-S: 140 - 230 $\text{mg O}_3 \cdot \text{g SV}^{-1}$



Sperimentazione a scala labo e di pilota di campo

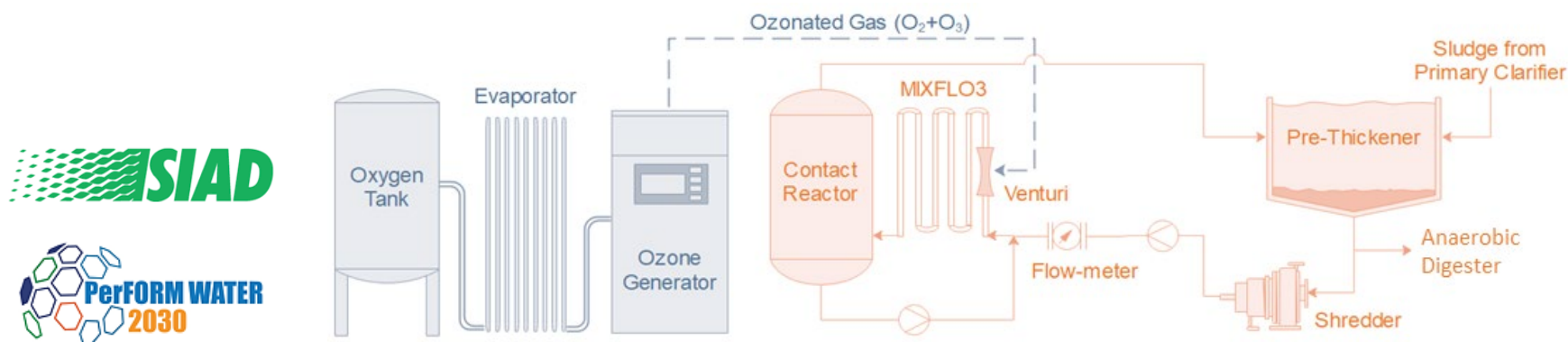
Generatore di ozono: $Q(O_3)_{\max} = 1.8 \text{ kg } O_3/h$

Pre-ispessitore: $Q_{\text{in,pre-ispessitore}} = 9.85 \text{ m}^3/h$
HRT = 1.3 days

Reattore di contatto: $Q_{\text{in,reattore di contatto}} = 3 \text{ m}^3/h$ (31% della $Q_{\text{in,pre-ispessitore}}$)
HRT = 26 minuti ($V = 1 \text{ m}^3$)

Digestore anaerobico: HRT = 8 ÷ 21 (15) d
OLR = 0.6 ÷ 1.5 (1.12) kgSSV/m³/d

Durata sperimentazione: 7 mesi in modalità intermittente; 40 giorni in modalità continua



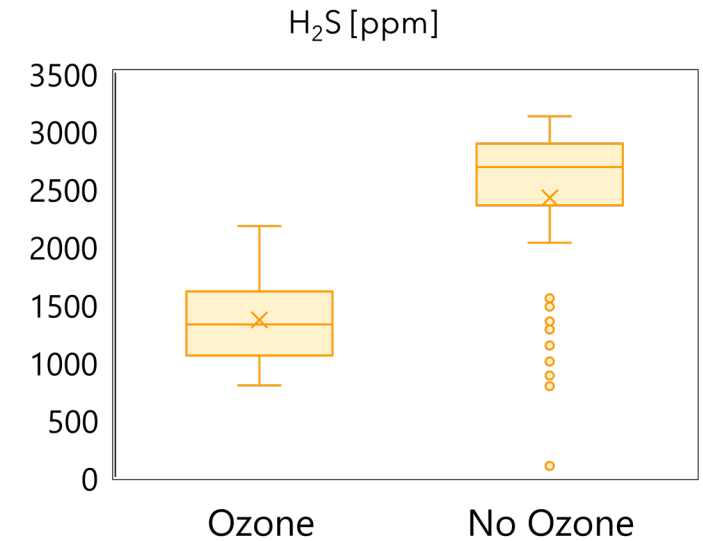
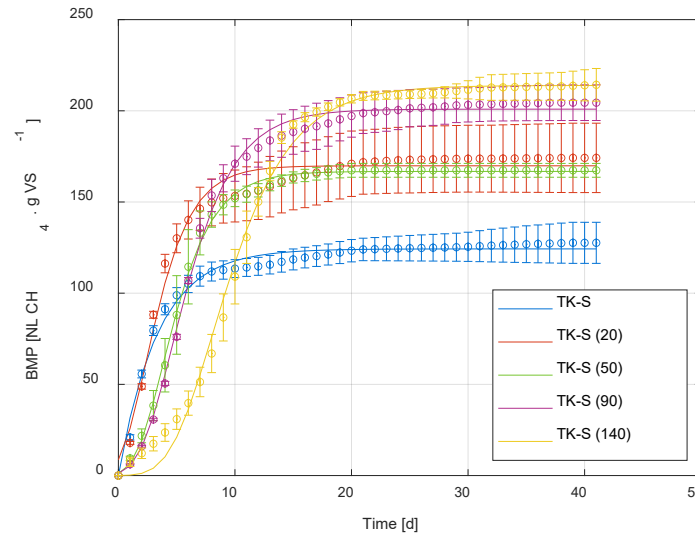
SIAD

**PerFORM WATER
2030**

Risultati sperimentazione a scala pilota di campo e laboratorio



- ✓ Buona corrispondenza con i dati BMP a scala labo
- ✓ **Incremento del 20% della portata specifica di biogas** dopo almeno 1 HRT di funzionamento del digestore in condizioni di alimento continuo di fango pre-trattato.
- ✓ **Riduzione del 50% della concentrazione di H_2S nel biogas** (da 2'390 ppm a 1'280 ppm)



DOI:[10.1016/j.resconrec.2022.106539](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106539)

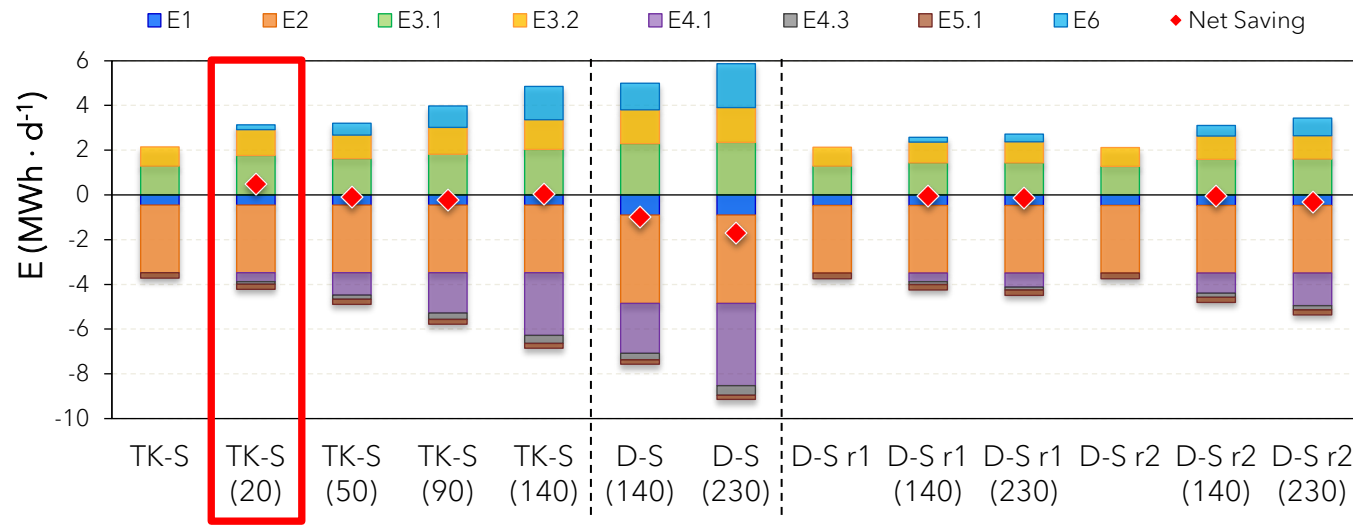


Risultati analisi di scenario

Condizioni al contorno:

- Digester volume = 2000 m³
- HRT = 20 d,
- OLR = 1.0 kg SV · m⁻³ · d⁻¹
- Efficienza di conversione del generatore di ozono da O₂ into O₃ = 10%
- Consumo del generatore di ozono = 10 kWh · kg O₃⁻¹ (range: 7-12 kWh · kg O₃⁻¹)
- TK: dosaggio post-ispessimento
- D: dosaggio post-anaerobico

Bilancio energetico

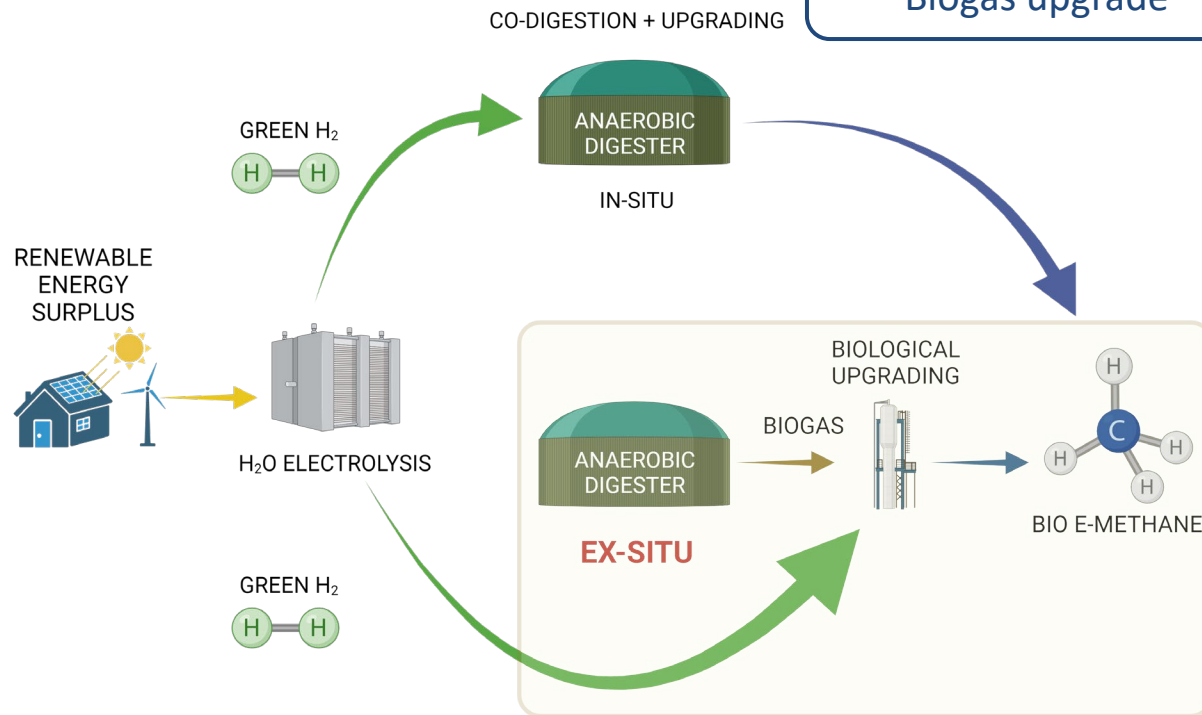


(risparmio netto = 177 MWh · y⁻¹)

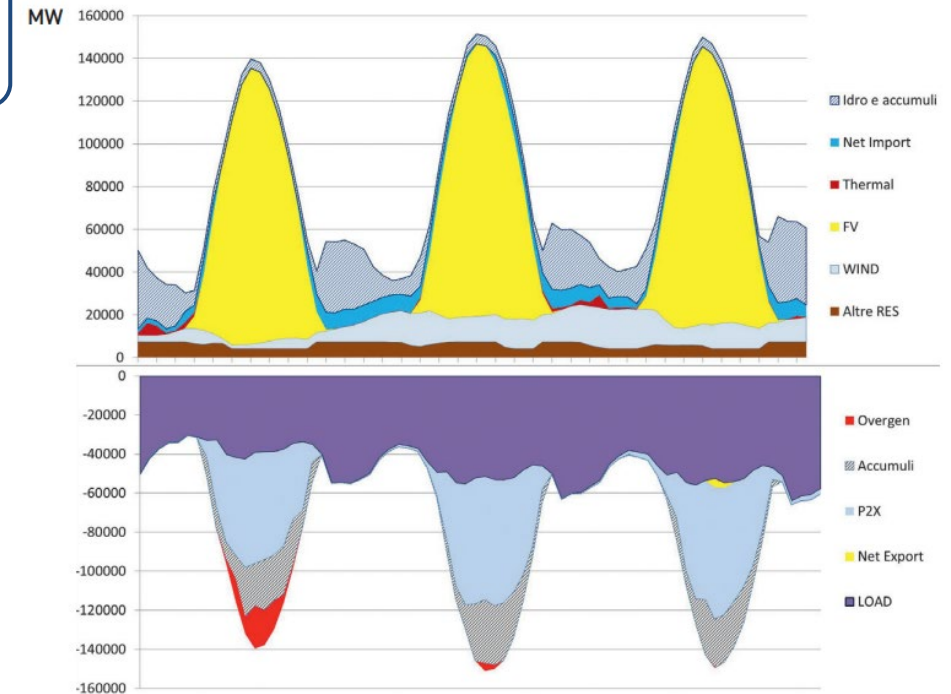


Biometanazione CO₂ con green H₂ e-biomethane

- Stoccaggio energia e H₂
- Carbon Capture Utilization
- Biogas upgrade

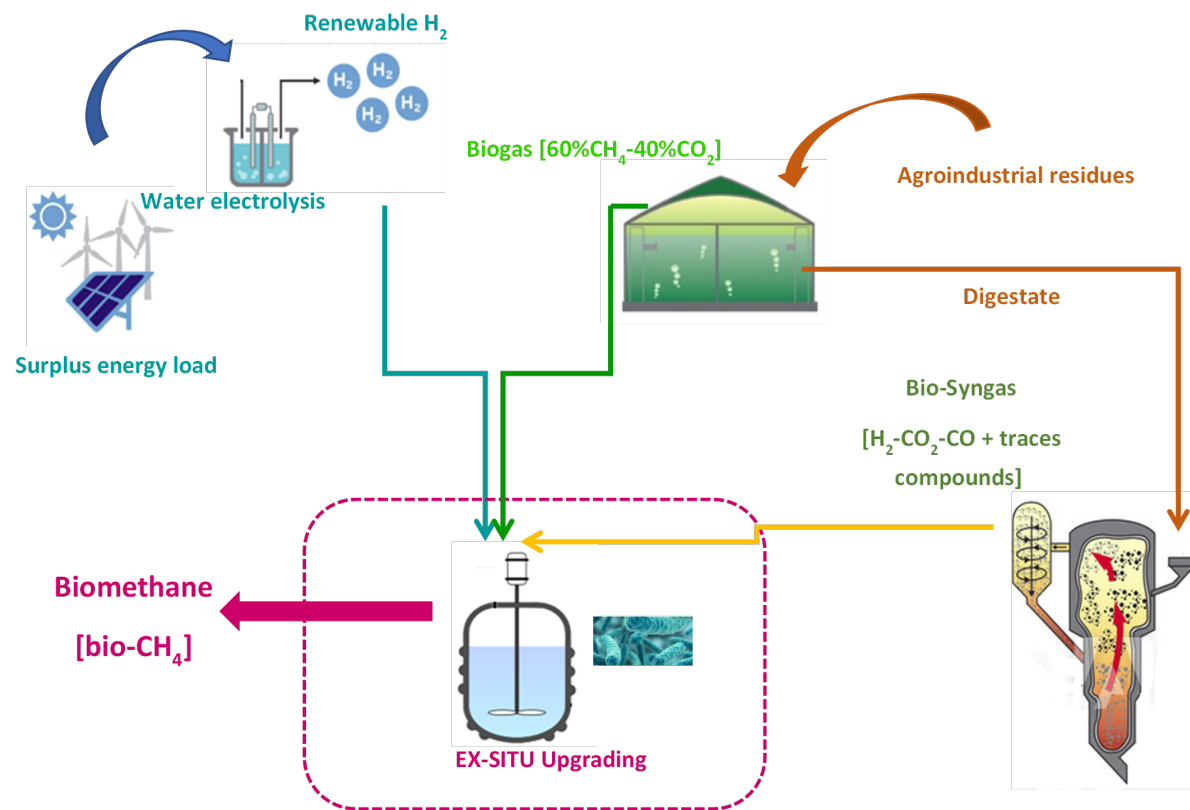


Stime al 2050, RSE Spa

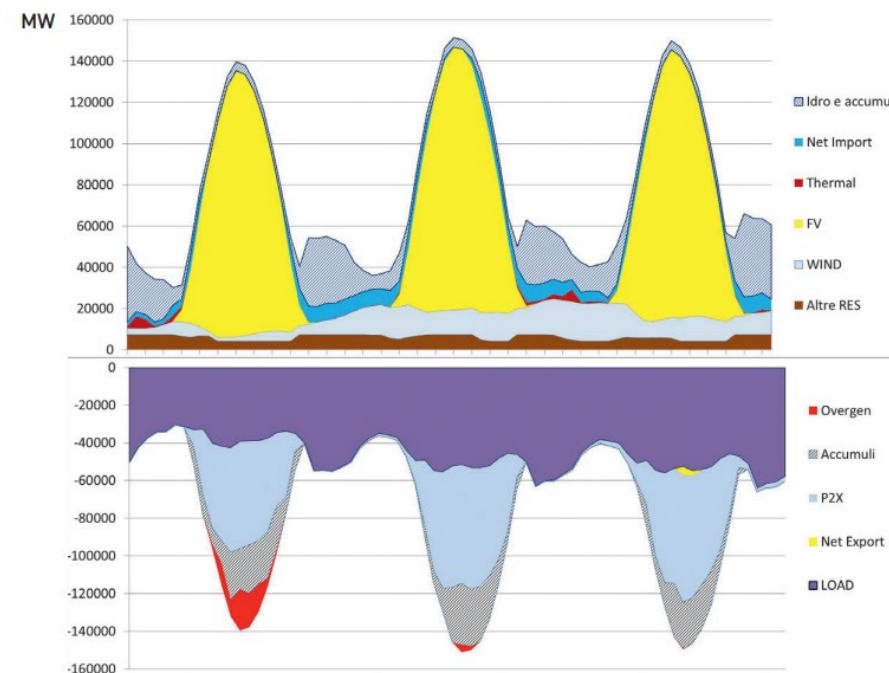


<https://www.biomethaverse.eu/>

Biometanazione CO, CO₂ con green H₂



Stime al 2050, RSE Spa



agritech

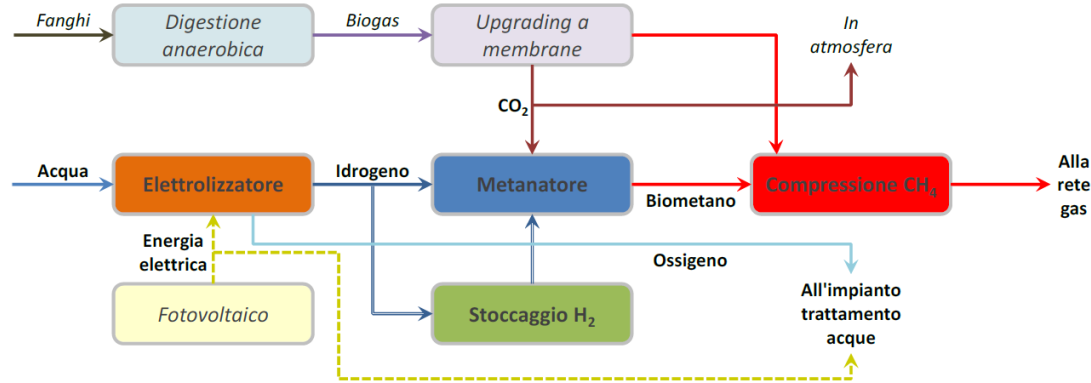
National Research Center for
Technology in Agriculture

Biometanazione CO₂ con green H₂ : caso studio applicato ad ID

Credits: RSE Spa, DENG Politecnico di Milano, prof. Manuele Gatti

Caso 1

(a)

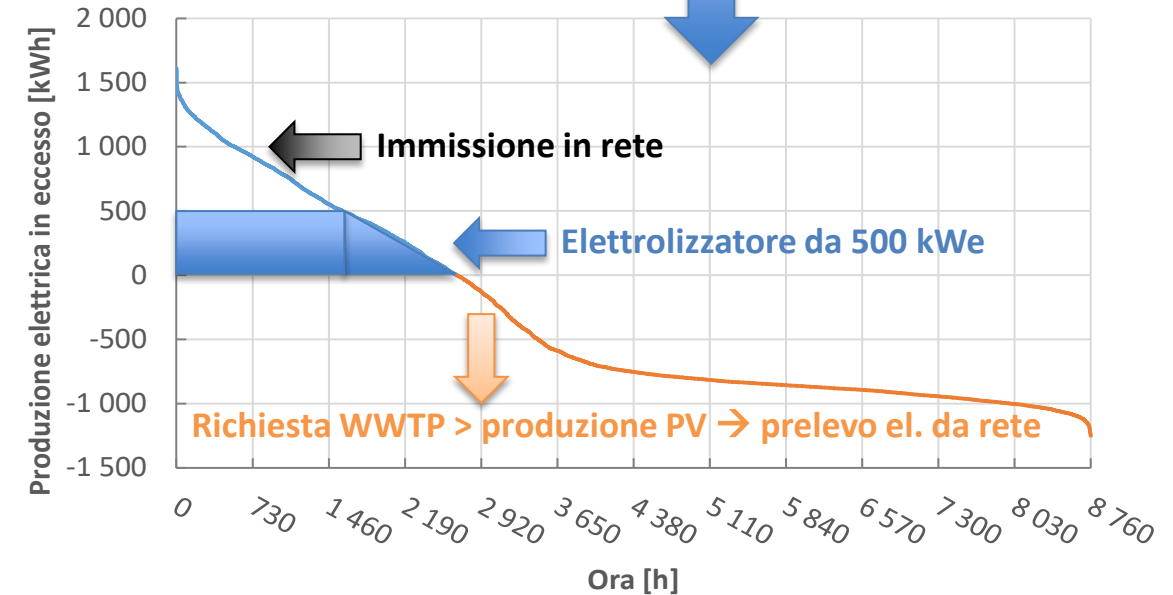
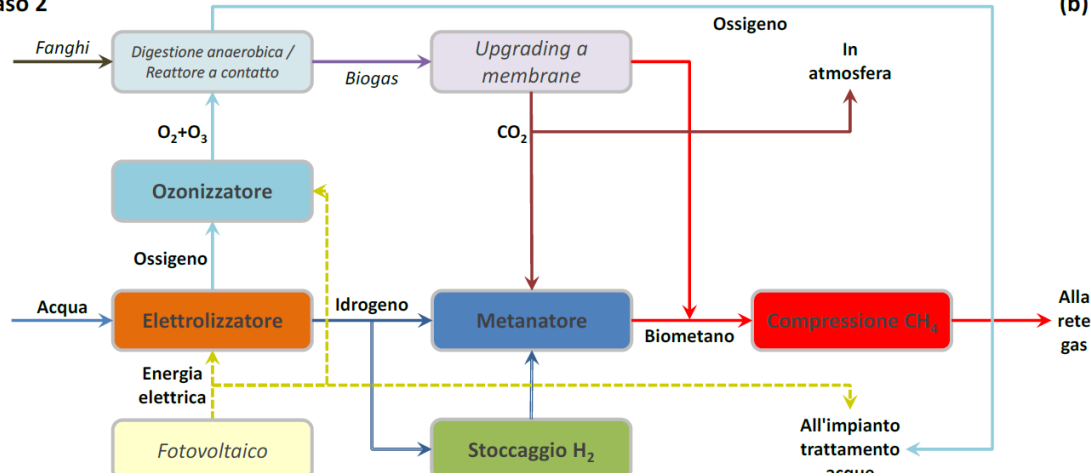


Scenario PV 1: PV installato = 2.045 kW

Scenario PV 2: PV installato = 4.410 kW

Caso 2

(b)



Produzione di biometano e ossigeno/ozono

			Scenario attuale	Caso 1 (O ₂ fanghi attivi)		Caso 2 (Ozono)	
				Scenario PV 1	Scenario PV 2	Scenario PV 1	Scenario PV 2
Bilancio gas	H ₂ prodotto elettrolizzatore	kNm ³ _{H2} /a	-	4.1	209.0	4.1	207.7
	O ₂ prodotto elettrolizzatore	kNm ³ _{O2} /a	-	2	104.5	2.0	103.8
	O ₃ prodotto ozonizzatore	kNm ³ _{O3} /a	-	-	-	14	6.92
	CH ₄ addizionale da fanghi (grazie a O ₃)	kNm ³ _{CH4} /a	-	-	-	1.2	59.1
	CO ₂ biologica consumata metanatore	kNm ³ _{CO2} /a	-	1.0	-	1.0	51.9
	CH ₄ prodotto metanatore	kNm ³ _{CH4} /a	-	1.0	-	1.0	51.9
	H ₂ prodotto elettrolizzatore	kg _{H2} /a	-	36	-	366	18680
	O ₂ prodotto elettrolizzatore	kg _{O2} /a	-	-	-	2903	148244
	O ₃ prodotto ozonizzatore	kg _{O3} /a	-	-	-	290	14824
	CH ₄ addizionale da fanghi (grazie a O ₃)	t _{CH4} /a	-	-	-	0.8	42.3
	CO ₂ biologica consumata metanatore	t _{CO2} /a	-	2.0	102.6	2.0	101.9
	CH ₄ prodotto metanatore	t _{CH4} /a	-	0.7	37.4	0.7	37.2

Costo di produzione dell'idrogeno e del biometano (stime preliminari anno 2020-2021)

	Caso 1 (O ₂ fanghi attivi)		Caso 2 (Ozono)	
	Scenario PV 1	Scenario PV 2	Scenario PV 1	Scenario PV 2
Costo produzione H ₂				<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div><div>28</div><div>26</div><div>24</div><div>22</div><div>20</div><div>18</div><div>16</div><div>14</div><div>12</div><div>10</div><div>8</div><div>6</div><div>4</div><div>2</div><div>0</div></div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div><div>Elettricità</div><div>O&M Sto.</div><div>Inv Sto.</div><div>O&M Ele.</div><div>Inv Ele.</div><div>Totale</div></div><div><div>6.97</div><div>3.63</div><div>0.09</div><div>0.09</div><div>1.77</div><div>1.77</div></div></div>
Costo produzione CH ₄				<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div><div>16</div><div>14</div><div>12</div><div>10</div><div>8</div><div>6</div><div>4</div><div>2</div><div>0</div></div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div><div><div>Ozono</div><div>Idrogeno</div><div>O&M Met.</div><div>Inv Met.</div><div>Totale</div></div><div><div>2.36</div><div>0.50</div><div>1.63</div><div>0.08</div><div>0.08</div></div></div>



Grazie per l'attenzione
francesca.malpei@polimi.it
www.fabbricabionergia.polimi.it