ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Ανάλυση Κύκλου Ζωής
2η φάση του ΑΚΖ: αβεβαιότητα και ποιότητα δεδομένων

ΔΙΑΛΕΞΗ 4Β

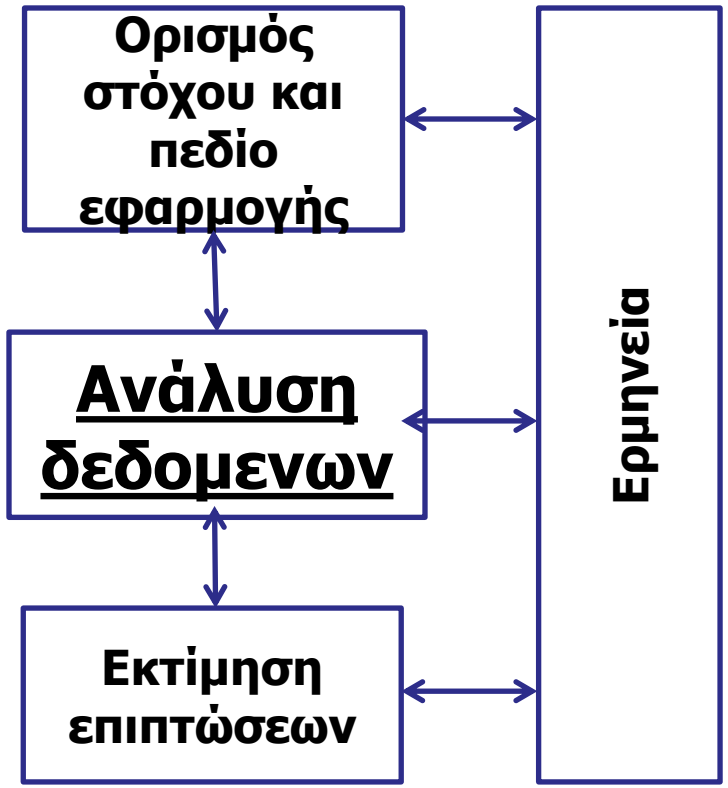
Γιώργος Α. Τσαλίδης

Περιεχόμενα

1. Εργασία
2. Ανάλυση Δεδομένων Κύκλου Ζωής
3. Ποιότητα δεδομένων
4. Αβεβαιότητα δεδομένων
5. Δεδομένα προσκηνίου και παρασκηνίου

Ανάλυση κύκλου ζωής

Πλαίσιο LCA, σειρά ISO 14040



ISO 14040 Πλαίσιο αξιολόγησης κύκλου ζωής – Οι τέσσερις φάσεις μιας ΑΚΖ (ISO, 1997)

https://www.youtube.com/watch?v=AqRd4ZuspCM&t=2s



Ανάλυση Δεδομένων

- Ορισμός του συστήματος
- Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση της χρήσης ενέργειας, νερού και υλικών και περιβαλλοντικών εκπομπών
- Όλα τα απαραίτητα δεδομένα συλλέγονται και οργανώνονται σε μορφή διαγράμματος ροής

Απογραφή εμφιάλωσης

Μια μονάδα παράγει 1.000 φιάλες νερού.
Εξετάζουμε μόνο το στάδιο της εμφιάλωσης.

Από την είσοδο υλικών στη μονάδα μέχρι την έξοδο του συσκευασμένου προϊόντος.

Καταγράψτε 4 εισροές και 3 εκροές, μαζί με τις μονάδες μέτρησής τους.



Τι περιλαμβάνει η φάση «Ανάλυση Δεδομένων (LCI)»;

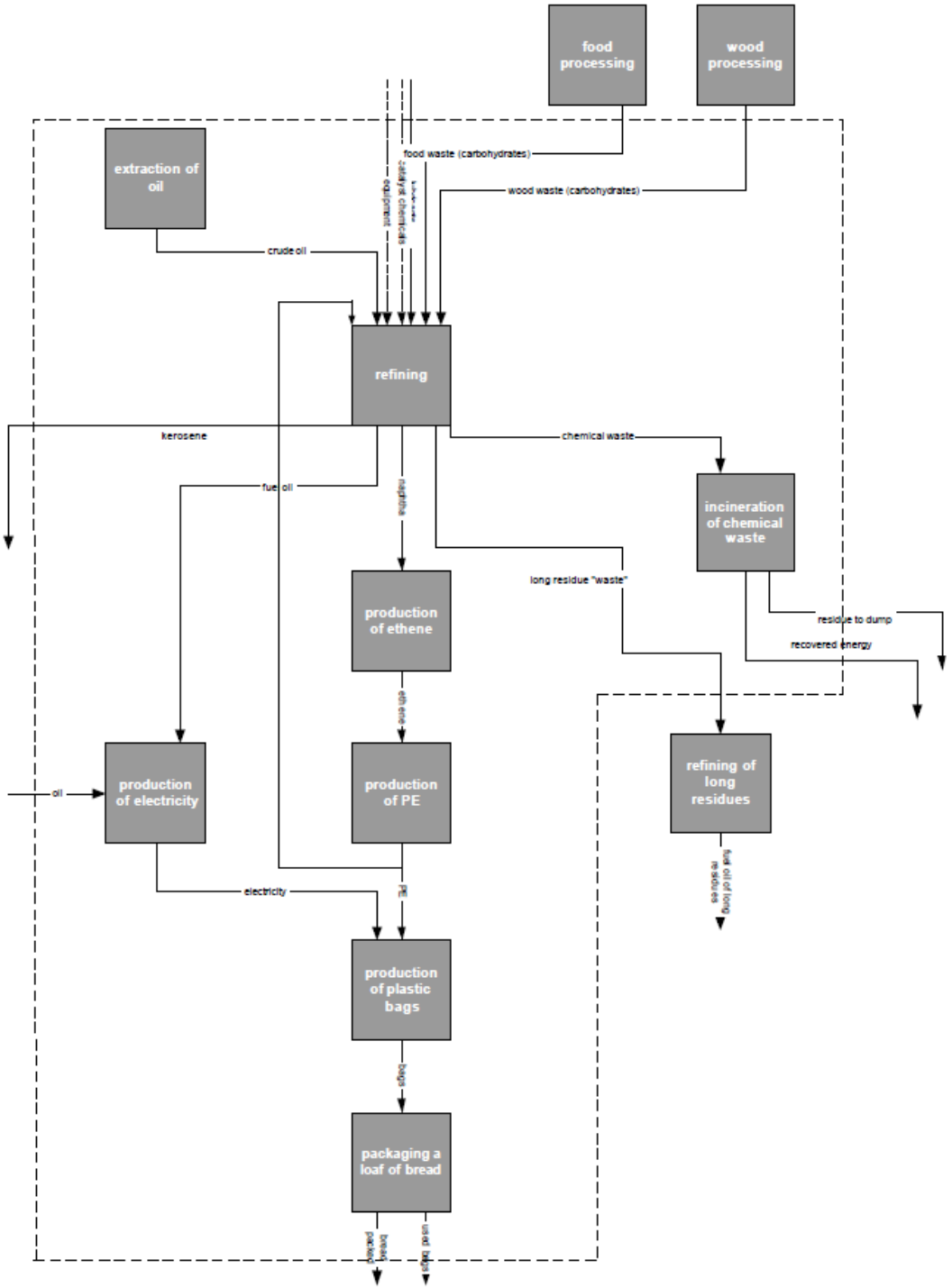
Ορισμός συστήματος, ποσοτικοποίηση χρήσης ενέργειας/νερού/υλικών και εκπομπών, οργάνωση όλων των απαραίτητων δεδομένων σε διάγραμμα ροής.



Διάγραμμα ροής

ΔΗ

ΜΗ



Ανάλυση Δεδομένων

- Αυτή η φάση βασίζεται σε:
  - Πρώτη ύλη (υλικά που εξάγουμε απο την φύση)
  - Ενέργεια
  - Περιβαλοντικές εκπομπές
  - Προϊόντα

- Βασίζεται σε 3 φυσικούς νόμους:
  - Διατήρηση της μάζας → $M_{in} = M_{out}$
  - Διατήρηση της ενέργειας → $E_{in} = E_{out}$
  - Αύξηση εντροπίας

Πού πήγαν τα 10 kg;

Είσοδος υλικού: 100 kg
Προϊόν: 75 kg
Στερεά απόβλητα: 15 kg

Είναι πλήρης η απογραφή;
Τι μπορεί να εξηγεί τη διαφορά;

Μη καταγεγραμμένες εκπομπές ή υγρά απόβλητα, (συσσώρευση στη διεργασία), σφάλμα μέτρησης ή ασυμφωνία περιόδων καταγραφής



Ποιοι φυσικοί νόμοι χρησιμοποιούνται ως έλεγχοι συνοχής στην LCI;

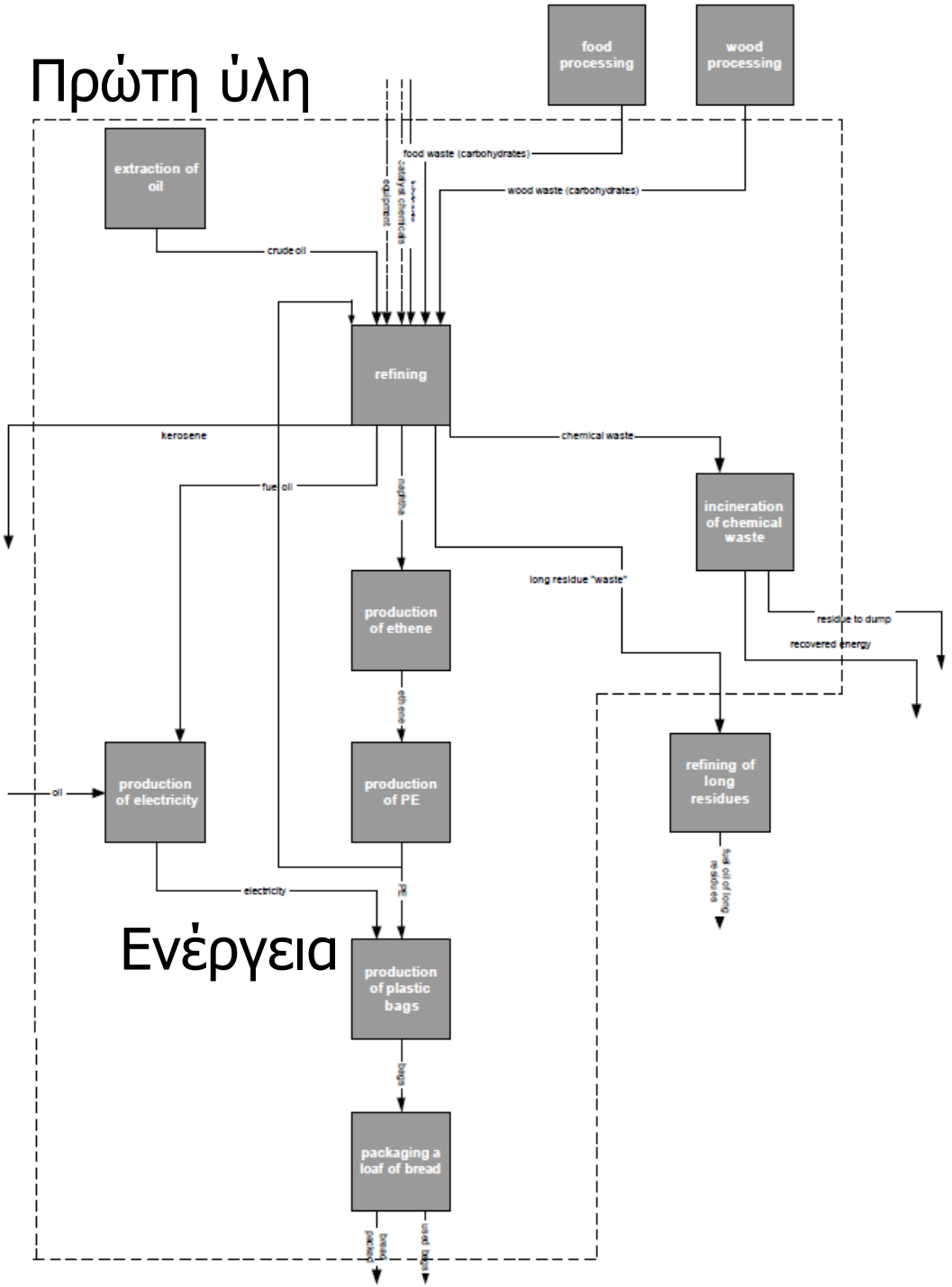
1. Διατήρηση μάζας (Min = Mout),
2. διατήρηση ενέργειας (Ein = Eout), και
3. αύξηση εντροπίας.

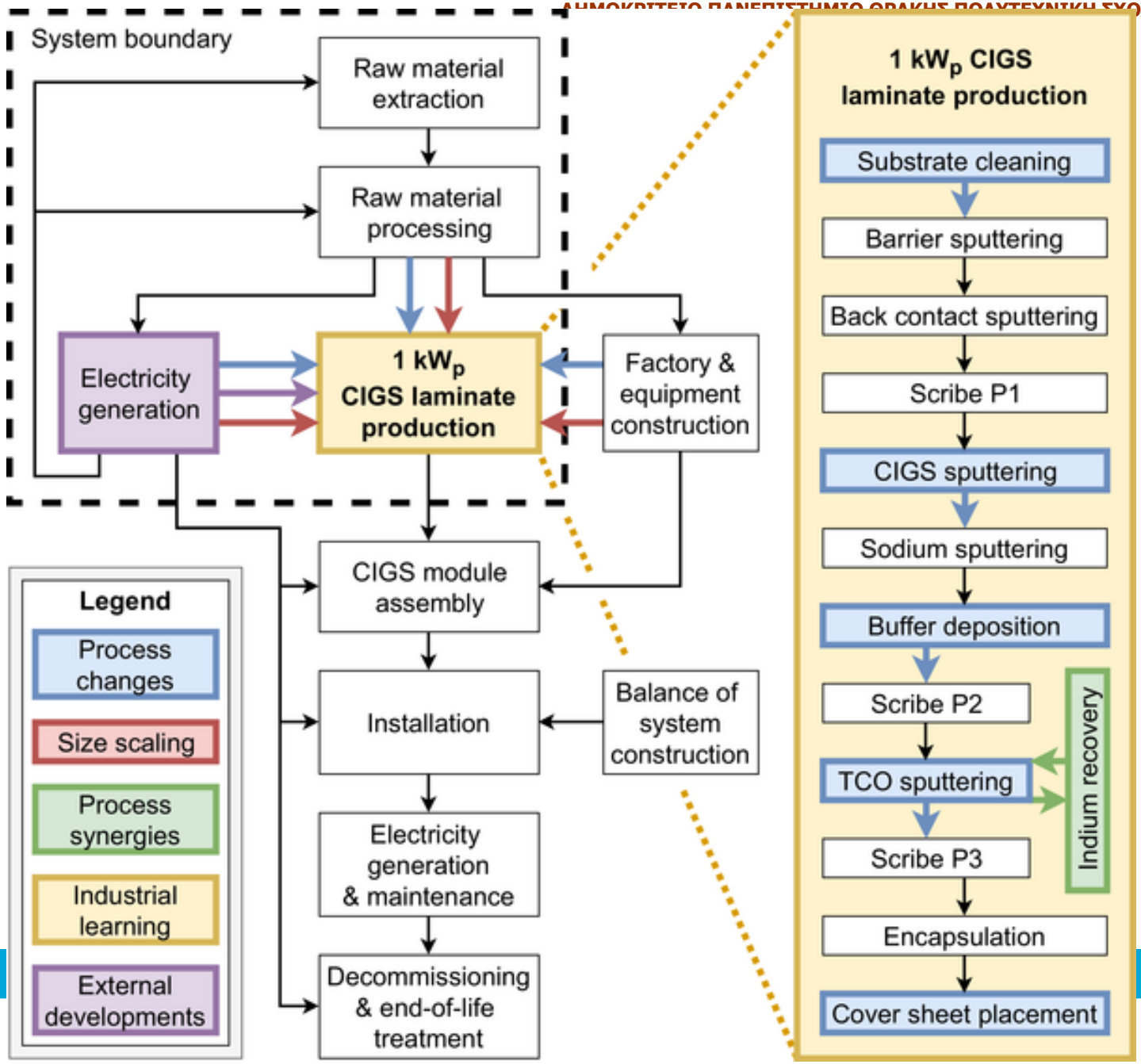
Διάγραμμα ροής

Πρώτη ύλη

Προϊόν

Ενέργεια





DOI: 10.1111/jiec.13027

Ανάλυση Δεδομένων – Αποτελέσματα (1)

- Υπάρχουν αποτελέσματα σε αυτό το επίπεδο! → ρύποι που απελευθερώνονται στο περιβάλλον και υλικά και ενέργεια που καταναλώνεται

Εκπομπές	Υλικά	Ενέργεια
CO_2	Πετρέλαιο	kWh ηλεκτρισμού
CO	Σιδηρομετάλλευμα	kWh θερμότητας
CH_4		

- Όταν μια μελέτη σταματά μετά από αυτή τη φάση, είναι μια μελέτη Life Cycle Inventory

Ανάλυση Δεδομένων – Αποτελέσματα (2)

Pb–Acid Battery Manufacturing			Raw data [50]		Normalised data	
			Value	Unit	Value	Unit
Assembly	Energy consumption	Electricity	10.71	MJ/(kg battery)	0.74	MJ/(kWh storage)
Component production	Electrodes	Antimony (Sb)	0.71	g/100 g battery	0.49	g/(kWh storage)
		Arsenic (As)	0.03	g/100 g battery	0.02	g/(kWh storage)
		Copper (Cu)	0.01	g/100 g battery	0.01	g/(kWh storage)
		Lead (Pb)	60.97	g/100 g battery	41.96	g/(kWh storage)
		Oxygen (O_2)	2.26	g/100 g battery	1.56	g/(kWh storage)
	Electrolyte	Sulfuric Acid (H_2SO_4)	10.33	g/100 g battery	7.11	g/(kWh storage)
		Water (H_2O)	16.93	g/100 g battery	11.65	g/(kWh storage)
	Separator	Glass	0.20	g/100 g battery	0.14	g/(kWh storage)
		Polyethylene (PE)	1.83	g/100 g battery	1.26	g/(kWh storage)
	Case	Polypropylene (PP)	6.73	g/100 g battery	4.63	g/(kWh storage)

Επίσης πόσα απόβλητα ανά λειτουργική μονάδα!



Ποια αποτελέσματα προκύπτουν ήδη στο επίπεδο LCI;

Πότε μια μελέτη θεωρείται μόνο LCI;

Ρύποι προς περιβάλλον, κατανάλωση υλικών/ενέργειας, απόβλητα ανά λειτουργική μονάδα

Αν η μελέτη σταματά εδώ, χαρακτηρίζεται ως «Life Cycle Inventory» μελέτη.

Ποιότητα δεδομένων

- Η ποιότητα των δεδομένων έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα ΑΚΖ
- Πρέπει να γίνεται σωστή αξιολόγηση των δεδομένων σε κάθε ΑΚΖ
- **Μετρημένα, υπολογισμένα ή εκτιμώμενα δεδομένα:**
  - Ακριβή
  - Πλήρη
  - Σταθερά
  - Να εκπροσωπούν την διαδικασία/δεργασία
- Να είστε επικριτικοί με τα datasets!

Ποιο δεδομένο επιλέγετε;

Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρισμού ελληνικής μονάδας το 2026:

Επιλογή	Διαθέσιμα δεδομένα
1	Ίδια μονάδα: ένας μήνας του 2026
2	Ίδια μονάδα: όλο το 2025, ίδιος εξοπλισμός
3	Μονάδα άλλης χώρας: στοιχεία του 2010

Ποια επιλέγετε αρχικά;
Τι άλλο θα ζητούσατε;



Τι σημαίνει «ποιότητα δεδομένων» και ποια βασικά κριτήρια αξιολόγησης τίθενται;

Ακρίβεια, πληρότητα, σταθερότητα και αντιπροσωπευτικότητα της διαδικασίας.

Απαιτείται κριτική στάση απέναντι στα δεδομένα.

Επικύρωση και αποκοπή δεδομένων

- Ισοζύγιο μάζας
- Ισοζύγιο ενέργειας
- Αποτελέσματα φάσης ανάλυση δεδομένων
- Ανάλυση συνεισφοράς και ανάλυση ευαισθησίας
- Κατ' αρχήν, όλα πρέπει να περιλαμβάνονται **ΑΛΛΑ** μπορεί κανείς να αποκόψει διαδικασίες που δεν συμβάλλουν στα αποτελέσματα επειδη:
  - Δεν υπάρχουν δεδομένα
  - Δεν υπάρχει χρόνος
  - Δεν υπάρχουν λεφτά



Ποια είναι τα βήματα «επικύρωσης» και πότε/γιατί επιτρέπεται «αποκοπή» δεδομένων;

Έλεγχοι ισοζυγίων μάζας/ενέργειας, ανάλυση συνεισφοράς & ευαισθησίας
Επιτρέπεται αποκοπή για ροές/διεργασίες μη ουσιώδεις, ή όταν λείπουν δεδομένα/χρόνος/πόροι, πάντα με ρητή τεκμηρίωση.

Μικρή ποσότητα, μικρή επίπτωση;

Πρώτη ύλη: 1.000 kg
Βοηθητική χημική ουσία: 2 kg
Λείπουν δεδομένα παραγωγής της ουσίας.

«Είναι μόλις το 0,2% της μάζας της πρώτης ύλης.
Ας την παραλείψουμε».

Συμφωνείτε; Τι θα ελέγχατε πρώτα;

Αβεβαιότητα δεδομένων (1)

- Αβεβαιότητες που οφείλονται σε εννοιολογικά λάθη (υποθέτοντας τη σημασία άσχετων πληροφοριών και παράβλεψη σχετικών πληροφοριών) κατά τη συλλογή δεδομένων

- Αβεβαιότητες στις συνθήκες δοκιμής και στις μεθόδους μέτρησης για τον προσδιορισμό των ροών αναφοράς

- Αβεβαιότητες στον προσδιορισμό της ακριβούς φύσης της αλληλεπίδρασης με άλλα συστήματα προϊόντων (συνεπακόλουθη προσέγγιση AKZ)

Αβεβαιότητα δεδομένων (2)

Πρέπει να «μάθουμε» – καταλάβουμε το σύστημα προϊόντος (product system) που αναλύουμε!

Πώς «μαθαίνουμε» το σύστημα προϊόντος (product system);



Σύστημα προϊόντος



Σύστημα προϊόντος



Σύστημα προϊόντος



Συλλογή δεδομένων

- Διαθέσιμες βάσεις δεδομένων:
  - Βάση δεδομένων EcoInvent
  - Βάση δεδομένων I-O Exiobase
  - Βάση δεδομένων U.S. Life Cycle Inventory Database
  - Βάση δεδομένων CPM LCA (Πανεπιστήμιο Chalmers)

- Διεθνής βιβλιογραφία

- Εμπειρικά δεδομένα από πειράματα

- Έρευνες-ερωτηματολόγια



Από πού συλλέγονται δεδομένα LCI; Δώστε βασικές πηγές.

1. Βάσεις δεδομένων (π.χ. Ecoinvent, Exiobase, etc.),
2. διεθνής βιβλιογραφία,
3. πειράματα,
4. έρευνες/ερωτηματολόγια.

Βάσεις δεδομένων (1)

- Στις βάσεις δεδομένων τα δεδομένα οργανώνονται σε διεργασίες (process units) με έμφαση στο προϊόν

OUTPUT - Product		
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production mix	1.000	kWh
INPUT – Electricity/heat		
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, hard coal	0.148	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, lignite	0.119	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, oil	0.016	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, natural gas	0.159	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, nuclear	0.270	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, biomass	0.024	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, hydropower	0.182	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, wind	0.046	kWh
Electricity, high voltage {EURO}| electricity production, other	0.036	kWh

Final Pre-proof

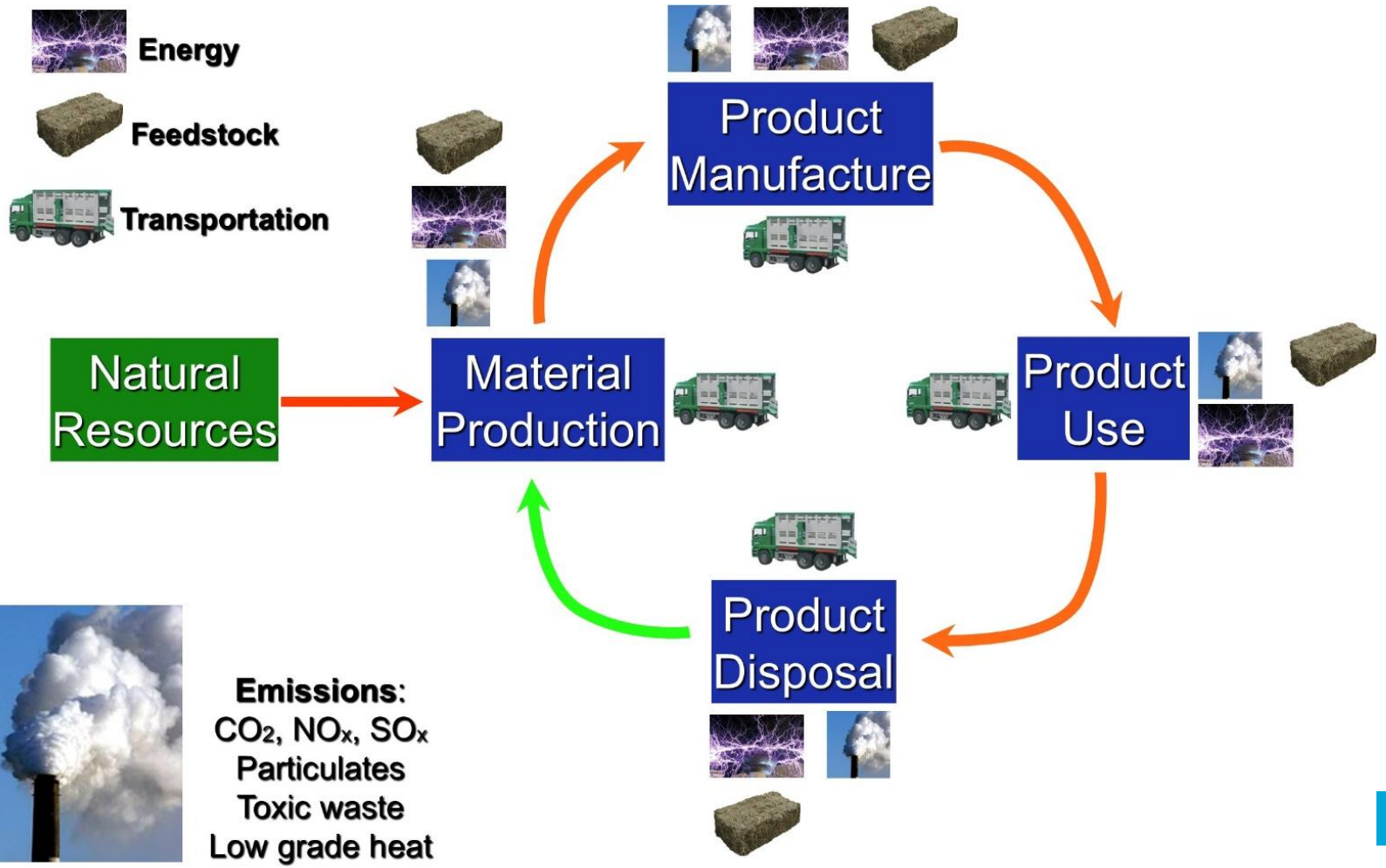
Βάσεις δεδομένων (3)

- Στις βάσεις δεδομένων τα δεδομένα οργανώνονται σε διεργασίες μονάδων

- Κάθε διεργασία βασίζεται στην εισροή ή εκροή ενδιαφέροντος
  - Για καλλιέργεια σιταριού: 1 κιλό σιτάρι ή 1 € σιτάρι

- Η κατανομή είναι ενσωματωμένη σε σύνολα δεδομένων
  - Ποιόν τύπο κατανομής?

Δεδομένα προσκηνίου και παρασκηνίου



Προσκηνίου ή παρασκηνίου;

Μελετάμε τη λειτουργία μονάδας εμφιάλωσης. Χαρακτηρίστε κάθε πληροφορία:

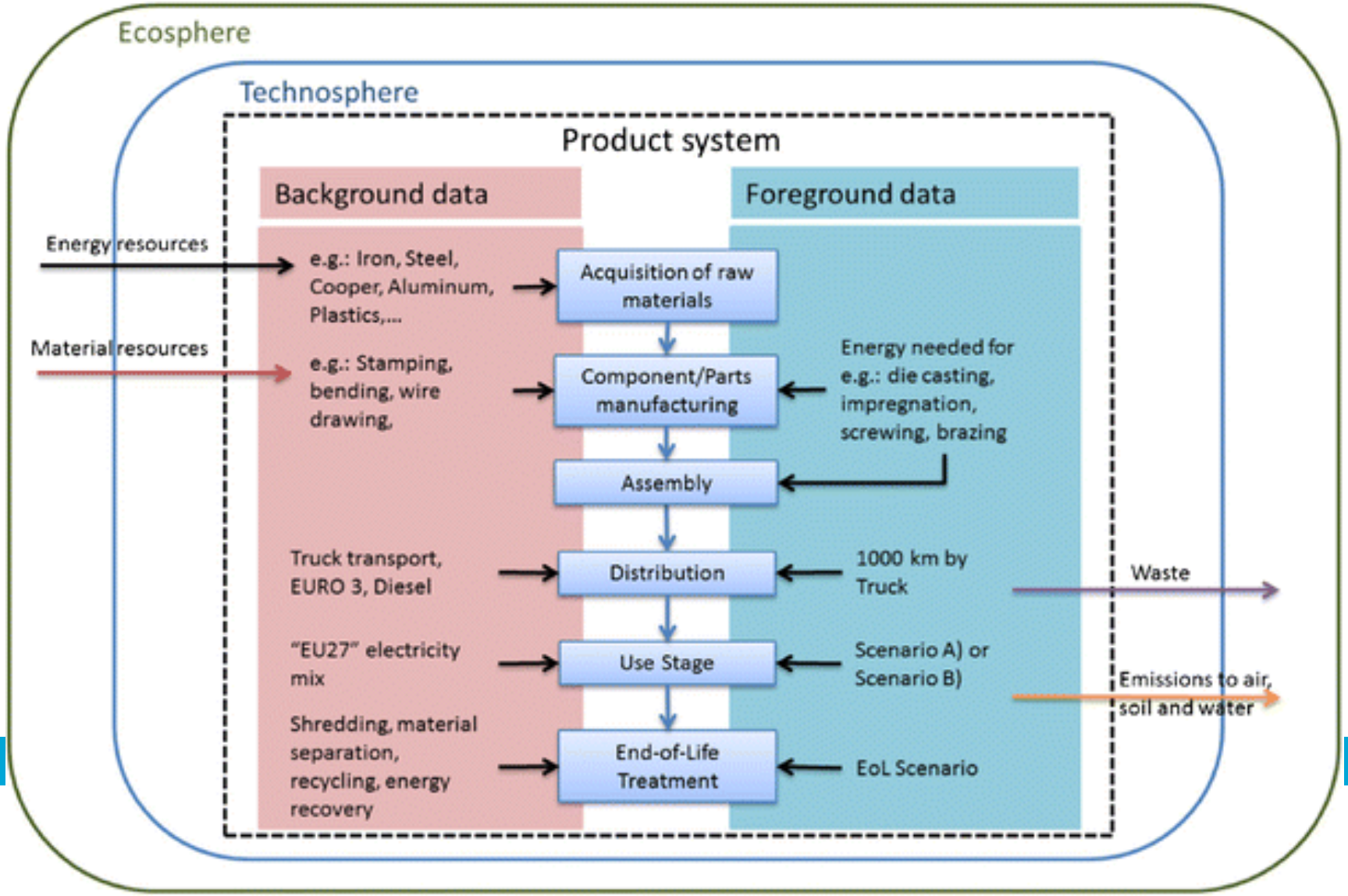
Πληροφορία	Προσκηνίου ή παρασκηνίου;
Μετρημένες kWh της μονάδας	
Dataset παραγωγής αγοραζόμενου ηλεκτρισμού	
kg φιαλών που χρησιμοποιεί η μονάδα	
Dataset παραγωγής αγοραζόμενων φιαλών	



Τι διακρίνει «δεδομένα προσκηνίου» από «δεδομένα παρασκηνίου»; Παραδείγματα;

Προσκηνίου: εισροές/εκροές εντός ορίων συστήματος (π.χ. μονάδα διεργασίας).
Παρασκηνίου: ηλεκτρισμός, εμπορεύματα, μεταφορές από γενικές βάσεις.

Δεδομένα προσκηνίου και παρασκηνίου



Δεδομένα προσκηνίου

- Τυπικά δεδομένα πρώτου πλάνου:
  - εισόδους και εξόδους διεργασιών μονάδας στα όρια του συστήματος

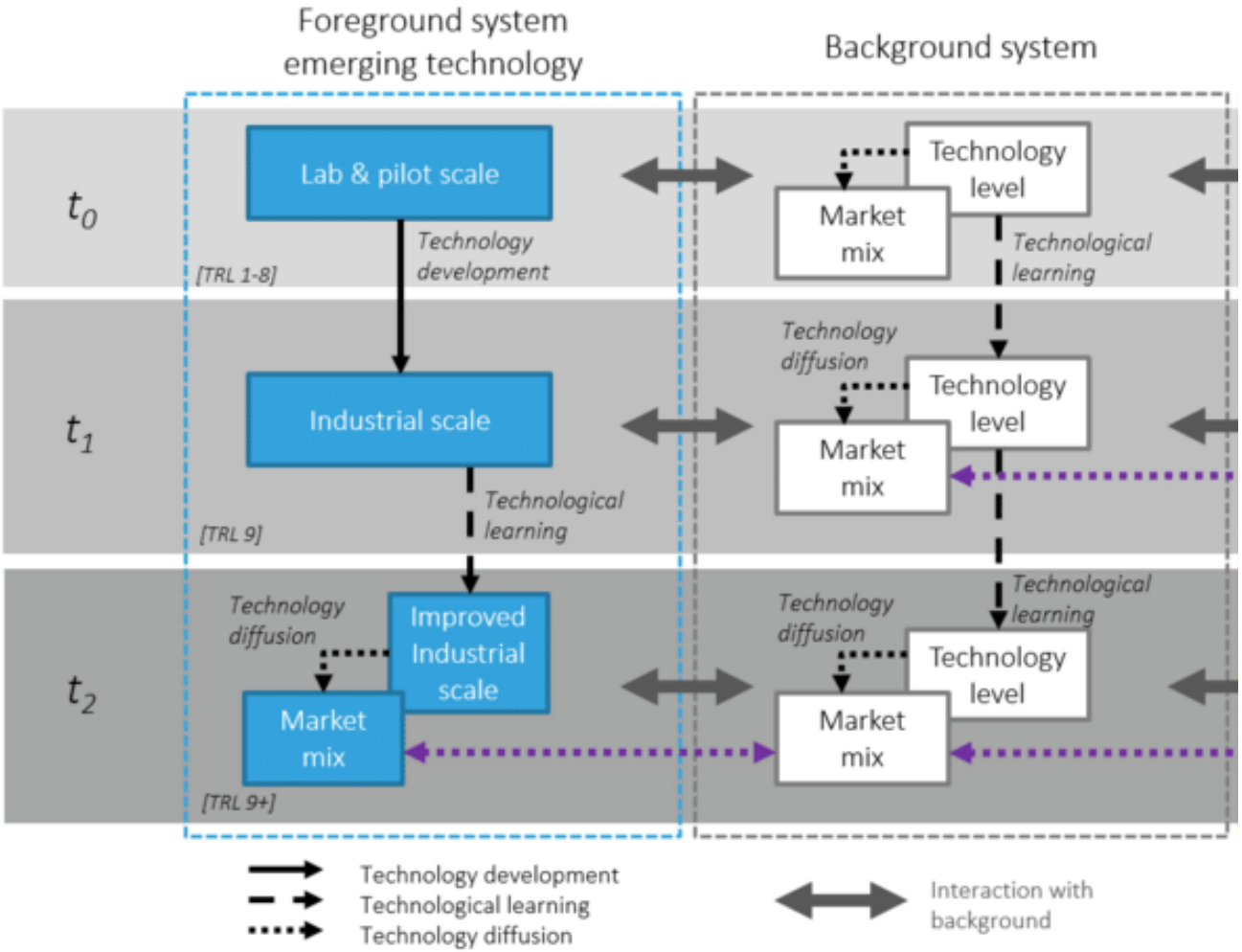
- Πηγές:
  - *Βιβλιογραφία*
  - Προσωπικά πειράματα
  - Προσωπική μοντελοποίηση (π.χ. με Aspen Plus)
  - Εξαγορά από εταιρείες

Δεδομένα παρασκηνίου

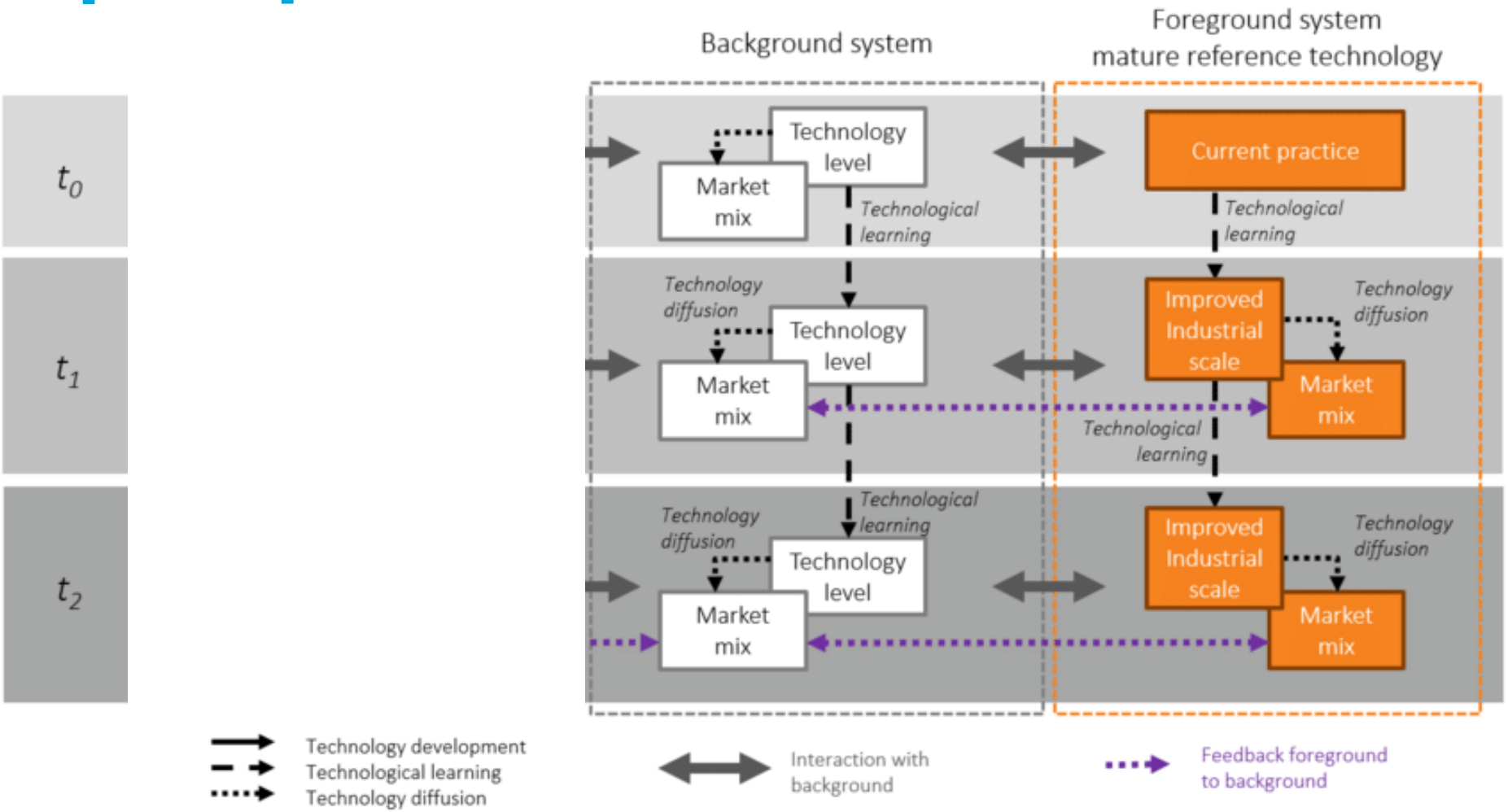
- Τυπικά δεδομένα φόντου:
  - Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
  - Παραγωγή εμπορεύματων/αναλώσιμων
  - Όχημα και παραγωγή καυσίμου για μεταφορά

- Πηγές:
  - Βιβλιογραφία
  - Βάσεις δεδομένων

Παράδειγμα 1: πολλά δεδομένα προσκηνίου

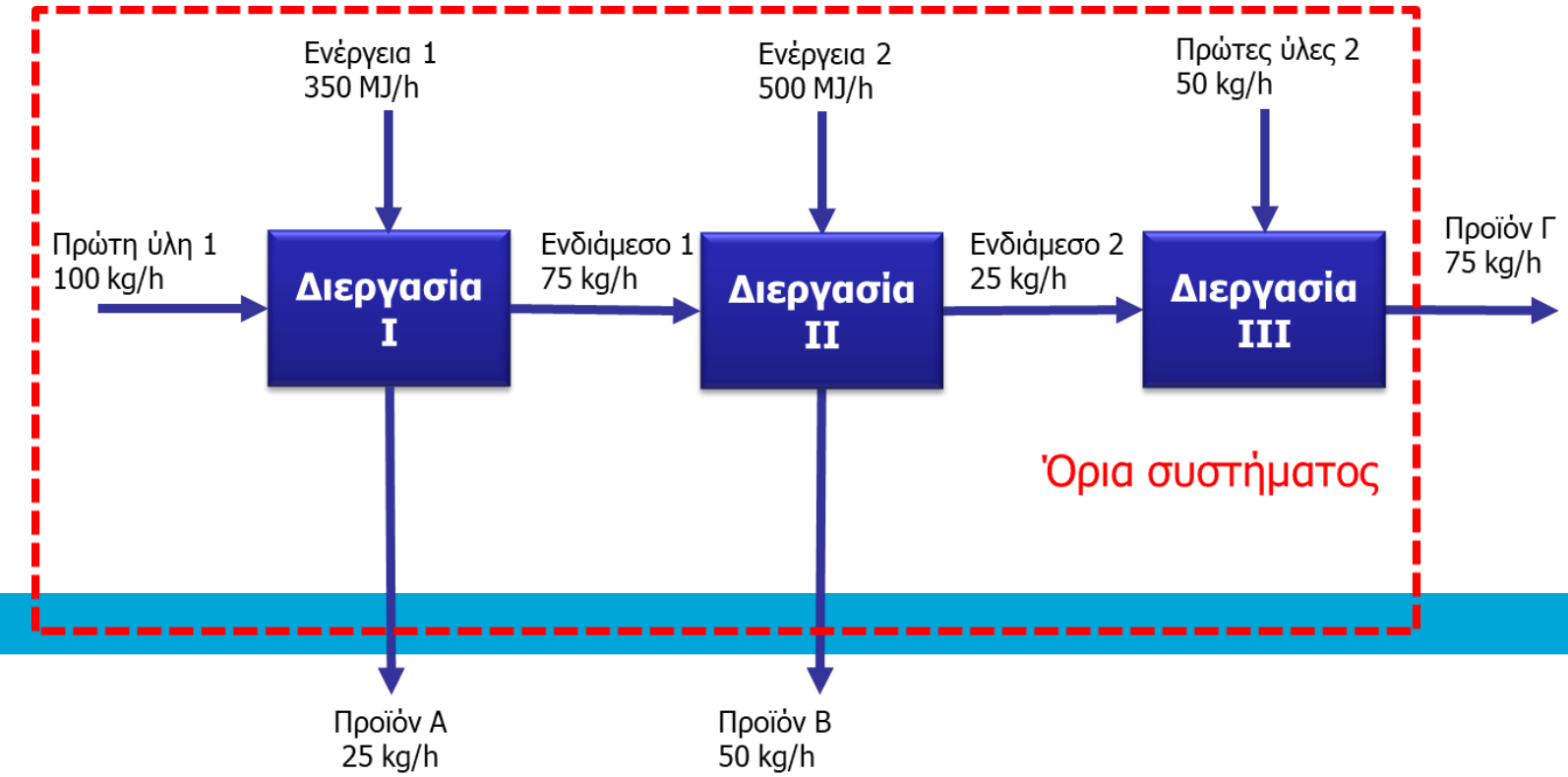


Παράδειγμα 2: πολλά δεδομένα παρασκηνίου



Δεδομένα προσκηνίου ή παρασκηνίου;

- Παραγωγή ενέργειας 1
- Πρώτη ύλη 1
- Ενδιάμεσο προϊόν 2
- Παραγωγή ενέργειας 1
- Ενδιάμεσο προϊόν 2
- Προϊόν Α
- Αν είχαμε Εκπομπές;



Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (1)

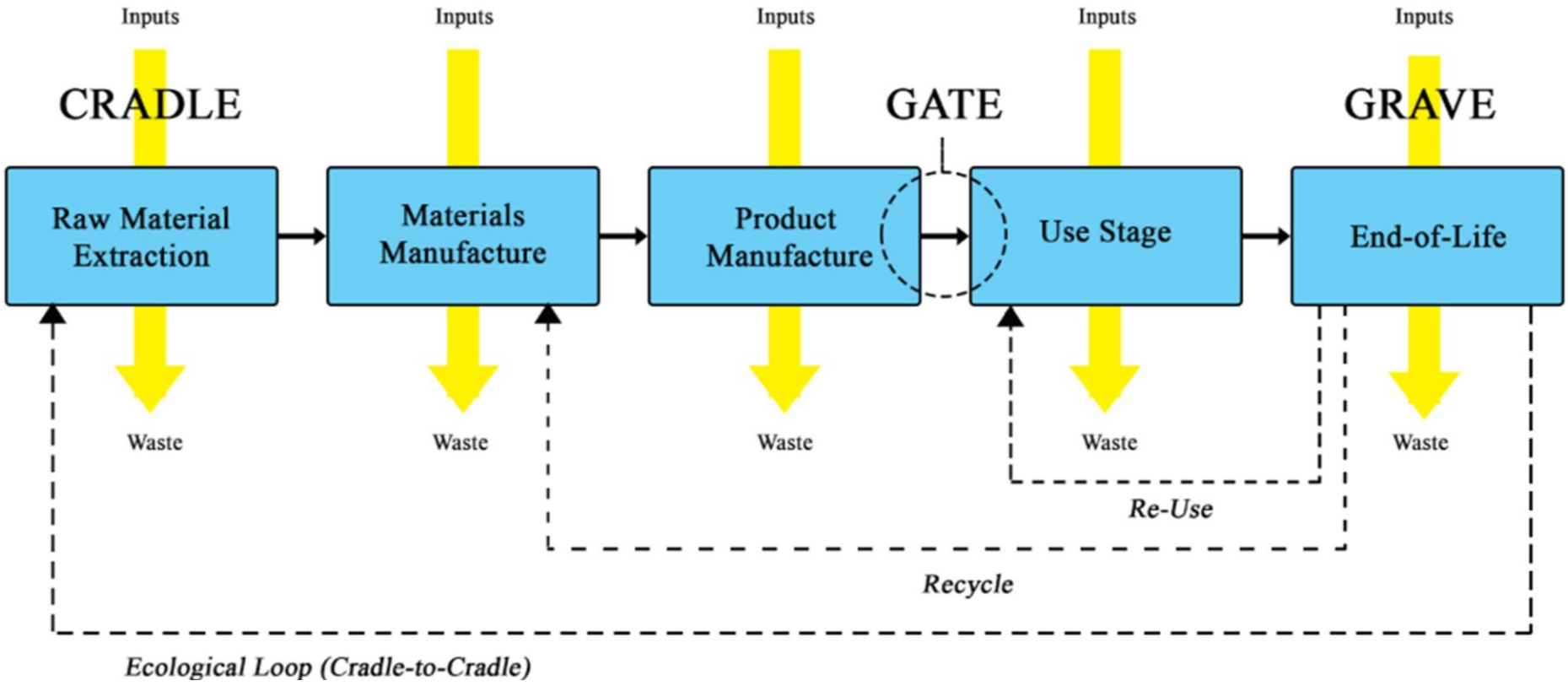
Μια κάθετη τομή με την οποία συλλέγονται δεδομένα για όλα τα σχετικά στάδια, αλλά σε μικρότερη λεπτομέρεια, είναι γενικά προτιμότερη από την εξάλειψη των διαδικασιών σε κάθε δεδομένο στάδιο.

Αυτό συνεπάγεται ότι ένας έλεγχος, ή μια προ-εκτίμηση, απαιτείται πριν από την έναρξη της ΑΚΖ για ένα απλοποιημένο γκρουπ δεδομένων.

Analysis of LCA simplification methods (Hunt et al., 1998)

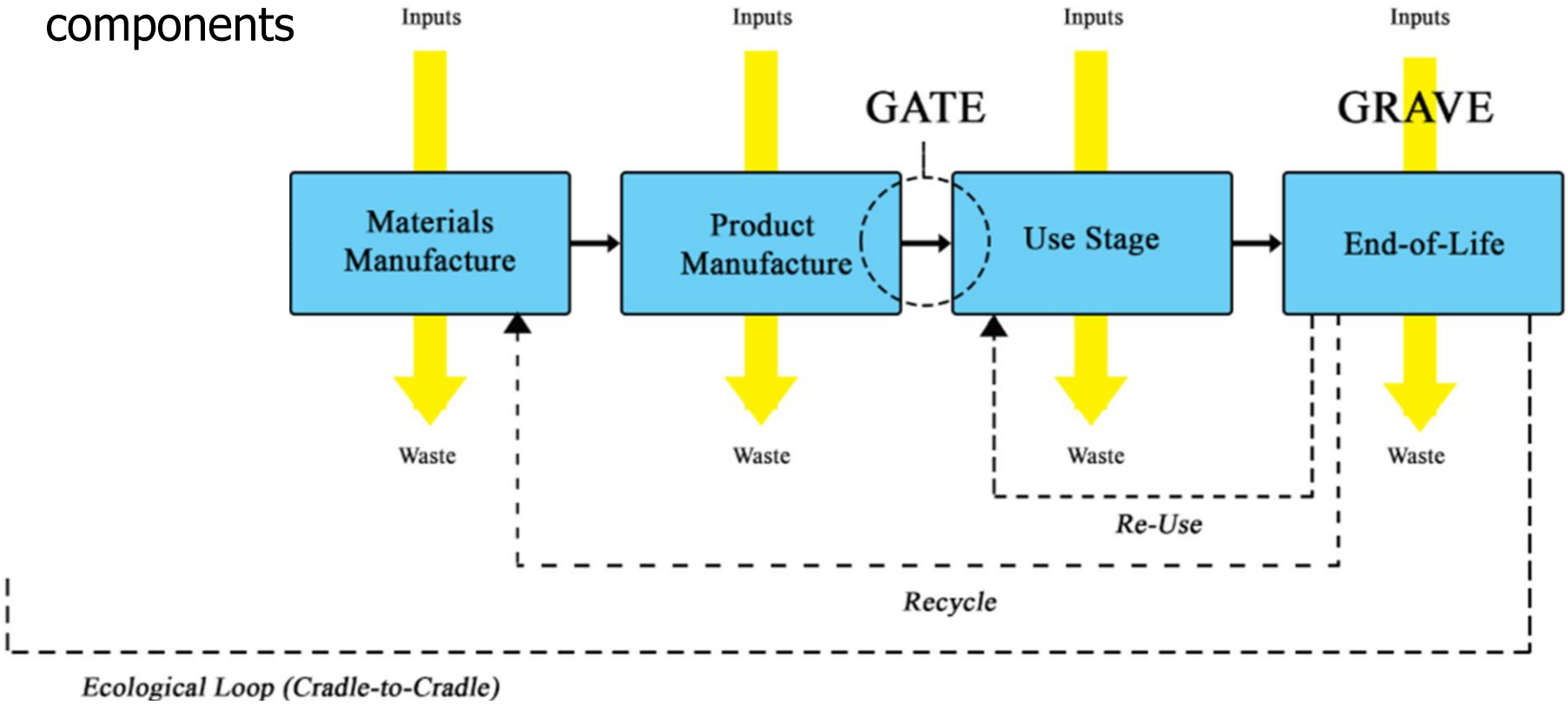
Cut-off method	Description (applied to packaging, industrial chemicals, household cleaners, etc.)	Success rate (same ranking as detailed LCA)
Removal of upstream components	all processes prior to primary material production (e.g., polymerisation) are excluded	58%
Removal of partial upstream components	as above, but the one preceding step is included (e.g., monomer production)	70%
Removal of downstream components	all processes after primary material production are excluded (manufacturing, use, end of life)	67%
Removal of up- and downstream components	only primary materials production is included (e.g., only polymerisation)	35%

Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (3)

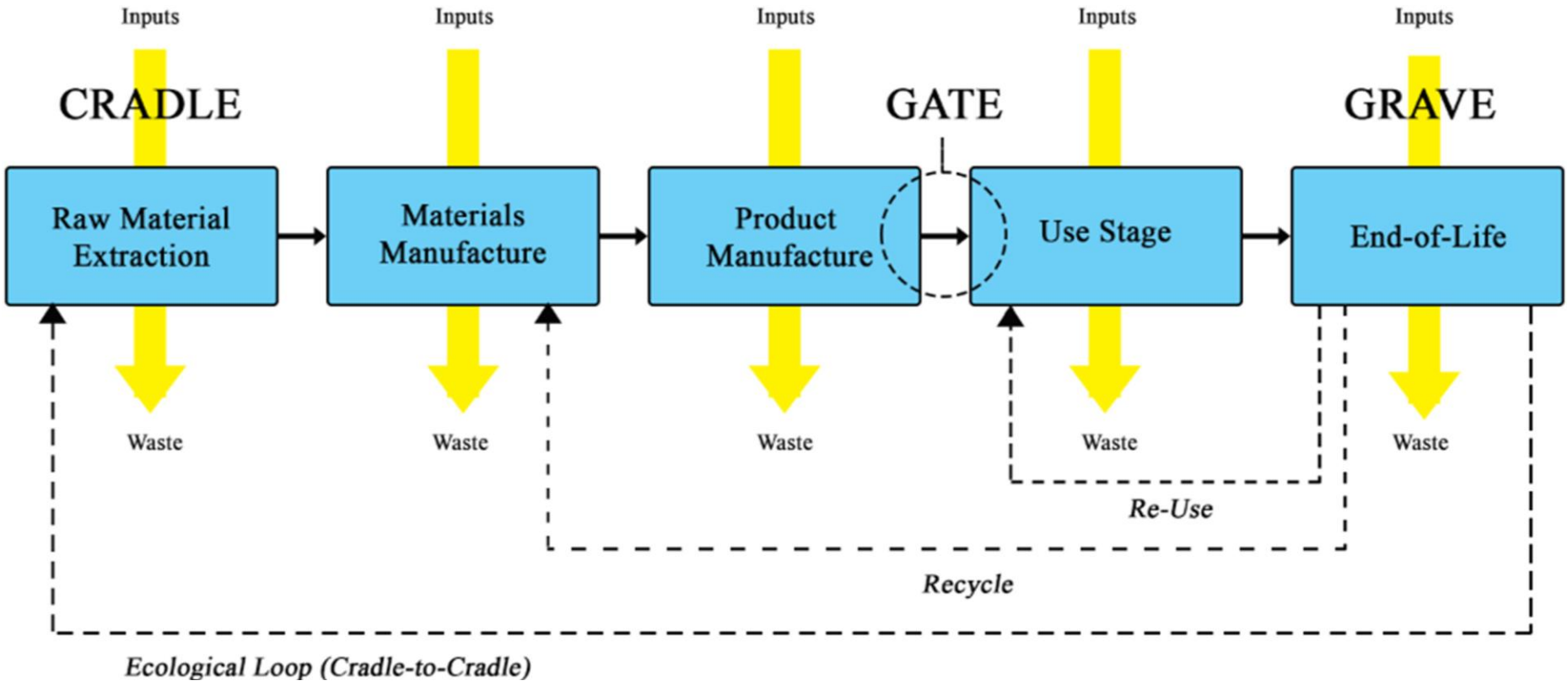


Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (3)

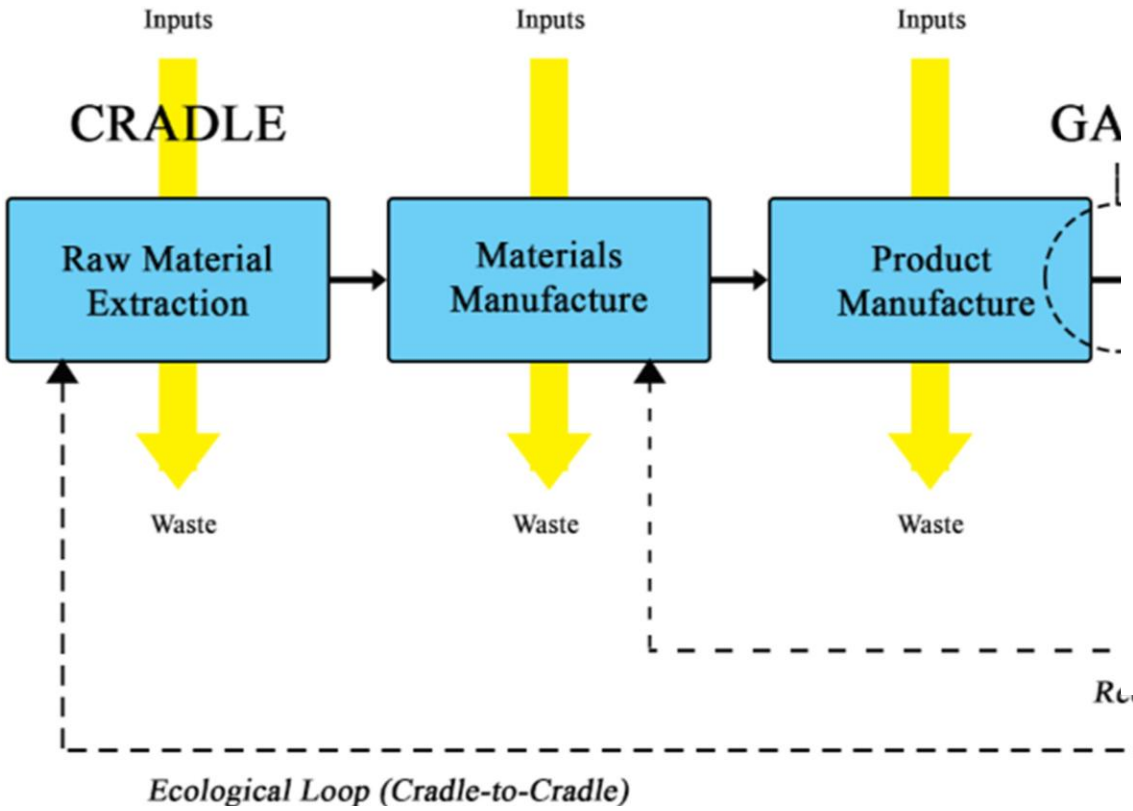
Removal of upstream components



Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (4)

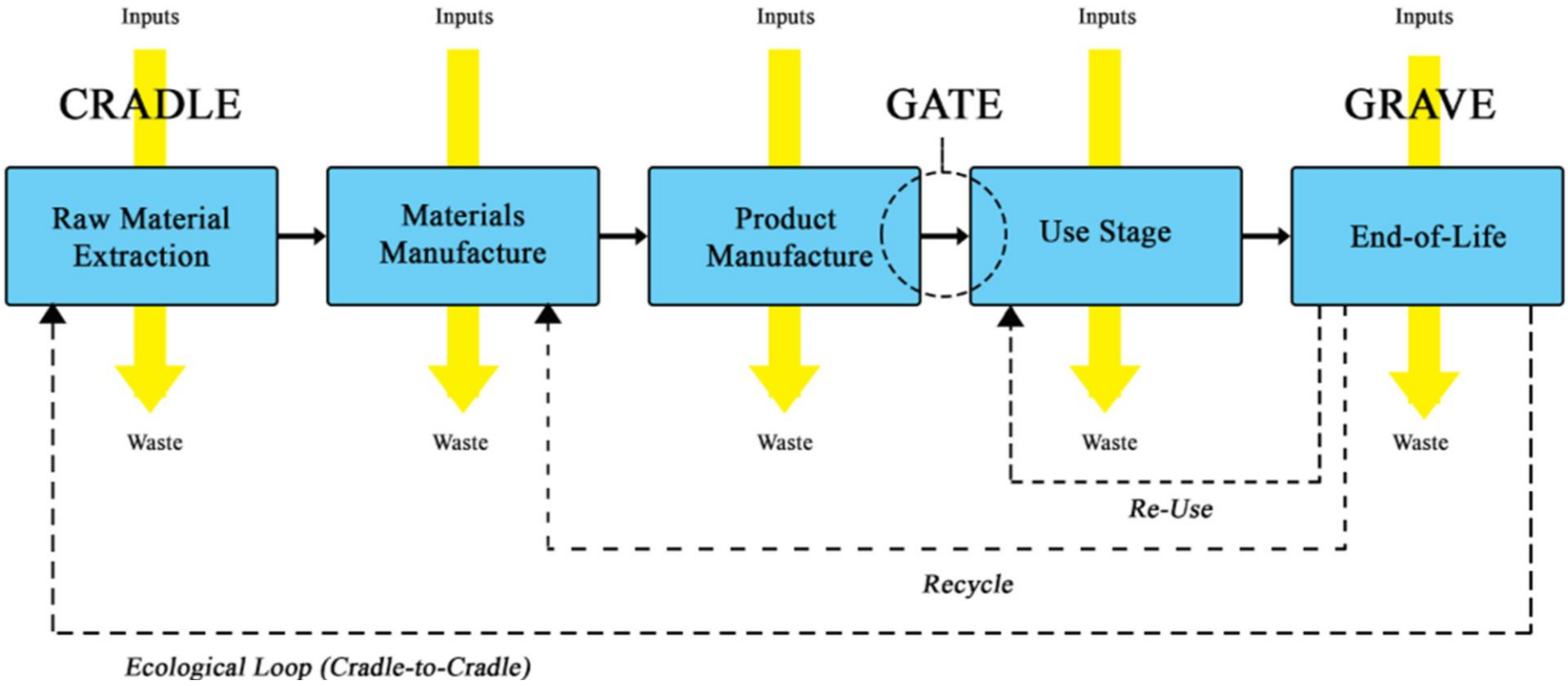


Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (4)



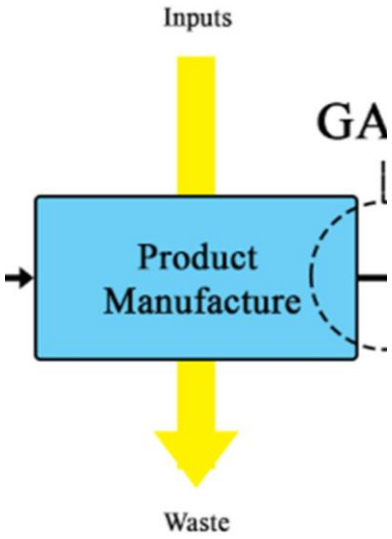
Removal of downstream components

Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (5)

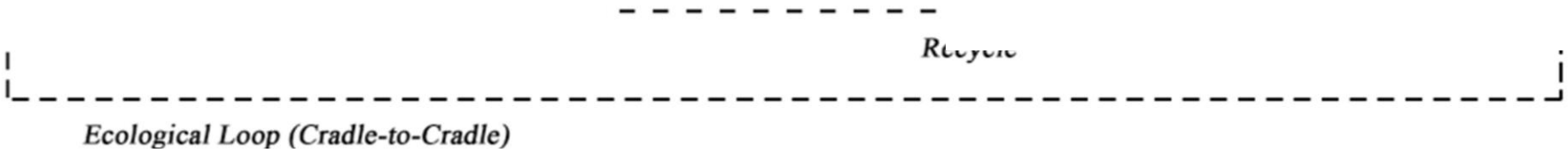


Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (5)

Removal of upstream components



Removal of downstream components

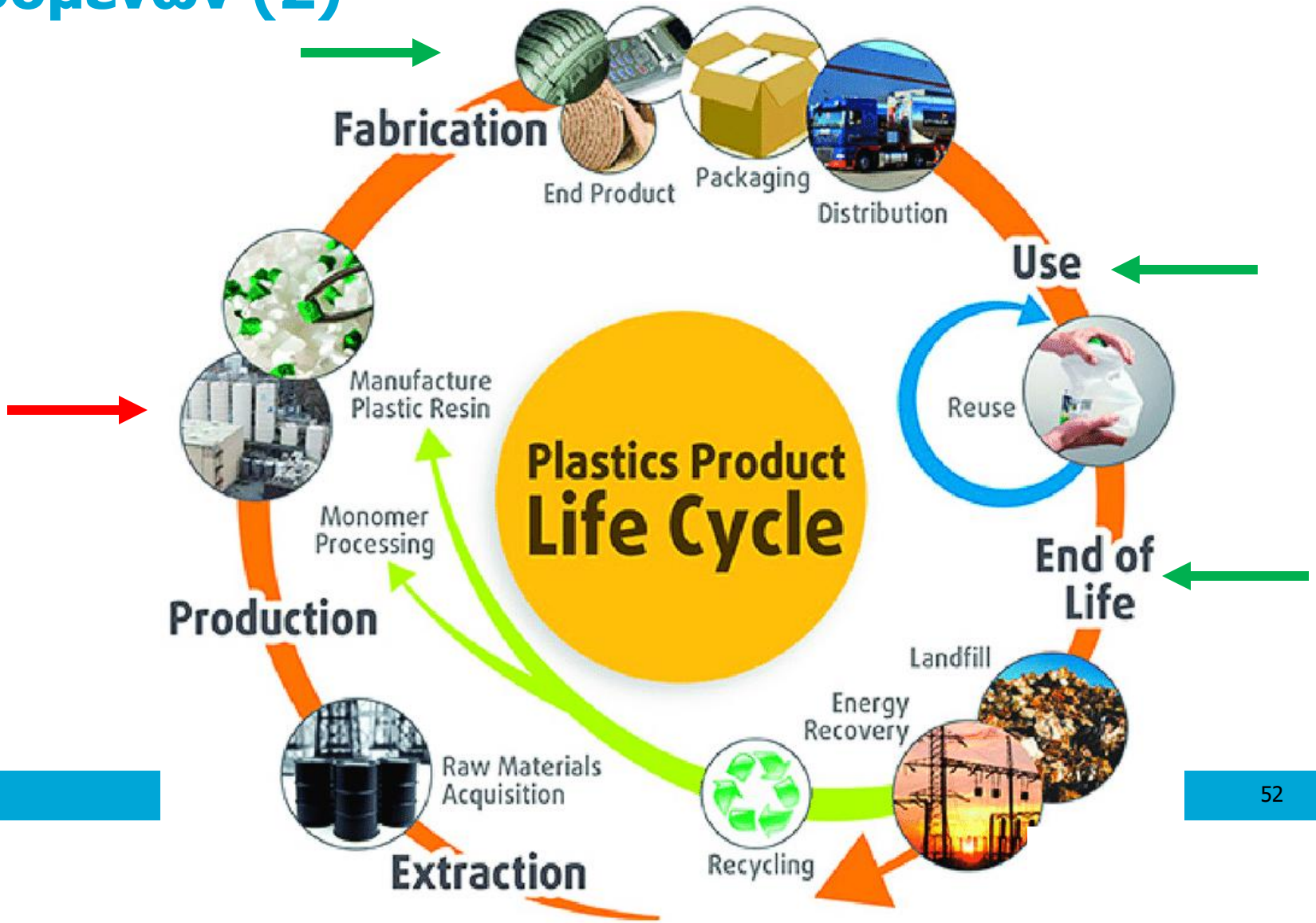




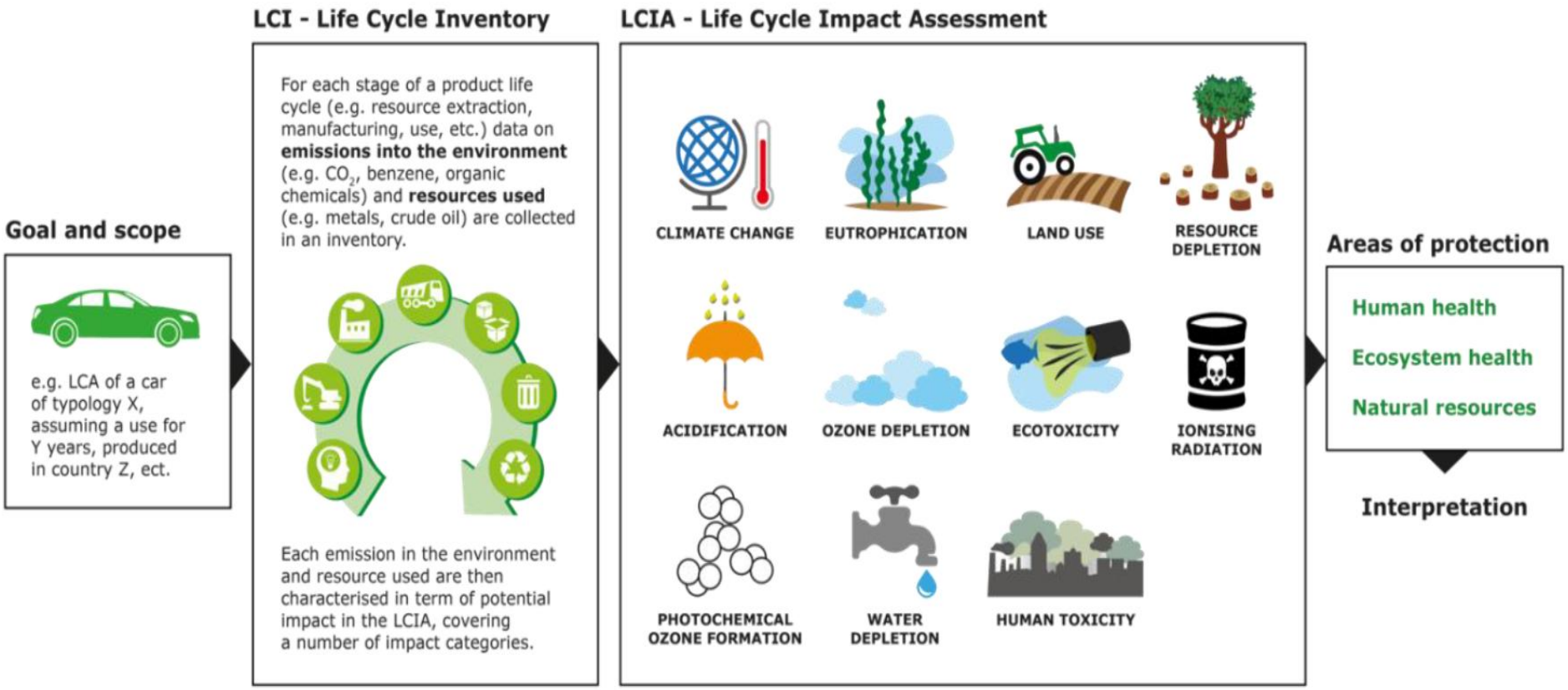
Ποια προσέγγιση απλοποίησης της LCI προτείνεται και γιατί;

«Κάθετη τομή», συλλογή βασικών δεδομένων για όλα τα στάδια με μικρότερη λεπτομέρεια, αντί για εξάλειψη διαδικασιών
Προϋποθέτει προ-εκτίμηση πριν την έναρξη.

Απλοποίηση της φάσης Ανάλυσης δεδομένων (2)



Ανασκόπηση


Goal and scope
e.g. LCA of a car of typology X, assuming a use for Y years, produced in country Z, ect.
LCI - Life Cycle Inventory
For each stage of a product life cycle (e.g. resource extraction, manufacturing, use, etc.) data on **emissions into the environment** (e.g. CO_2, benzene, organic chemicals) and **resources used** (e.g. metals, crude oil) are collected in an inventory.
Each emission in the environment and resource used are then characterised in term of potential impact in the LCIA, covering a number of impact categories.
LCIA - Life Cycle Impact Assessment
CLIMATE CHANGE
EUTROPHICATION
LAND USE
RESOURCE DEPLETION
ACIDIFICATION
OZONE DEPLETION
ECOTOXICITY
IONISING RADIATION
PHOTOCHEMICAL OZONE FORMATION
WATER DEPLETION
HUMAN TOXICITY
Areas of protection
Human health
Ecosystem health
Natural resources
Interpretation

Ανασκόπηση

Goal and scope



e.g. LCA of a car of typology X, assuming a use for Y years, produced in country Z, ect.

LCI - Life Cycle Inventory

For each stage of a product life cycle (e.g. resource extraction, manufacturing, use, etc.) data on **emissions into the environment** (e.g. CO_2, benzene, organic chemicals) and **resources used** (e.g. metals, crude oil) are collected in an inventory.



Each emission in the environment and resource used are then characterised in term of potential impact in the LCIA, covering a number of impact categories.

Let's play!



Εργασία: εμφιαλωμένο νερό

- LCA: σύγκριση ecoinvent και BAFU:2026 για PET και γυαλί.
- Κοινή λειτουργική μονάδα: 1 m³ εμφιαλωμένου νερού στην πύλη του εργοστασίου.
- Ίδιες ποσότητες ανά συσκευασία και ίδια μέθοδος EF 3.1 στο openLCA.
- Επέκταση LCC: κόστος των εισροών ανά m³ για τις δύο συσκευασίες.

Σχεδιασμός της σύγκρισης

Μοντέλο	Συσκευασία	Βάση δεδομένων
E PET	PET	ecoinvent
B PET	PET	BAFU:2026
E GLASS	Γυαλί	ecoinvent
B GLASS	Γυαλί	BAFU:2026

Κύρια σύγκριση LCA: ecoinvent–BAFU ανά συσκευασία.
LCC: ίδιες τιμές μονάδας για κοινές εισροές στα δύο σενάρια.

Όρια και κοινές παραδοχές

- Περιλαμβάνουμε προμήθεια υλικών και ηλεκτρισμό εμφιάλωσης, με όριο στην πύλη του εργοστασίου.
- Διανομή, ψύξη, επιστροφές και τέλος ζωής εξαιρούνται από την κύρια σύγκριση.
- Διατηρούμε 125 kg γυαλιού ανά m^3. Η επαναχρησιμοποίηση απαιτεί πρόσθετα δεδομένα.
- Το μοντέλο είναι εκπαιδευτικό και μερικό. Δηλώνουμε τις ελλείψεις της απογραφής.

LCA: υλικά συσκευασίας

Εισροή	Μονάδα	PET	Γυαλί
Φιάλη PET	kg	20	—
Γυάλινη φιάλη	kg	—	125
Πώματα LDPE	kg	1	2,35
Χάρτινες ετικέτες	kg	0,94	0,83
Πλαστικό φιλμ PE	kg	2,91	—

Ποσότητες ανά 1 m^3 εμφιαλωμένου νερού.
Η παύλα δηλώνει ότι δεν δίνεται εισροή για το σενάριο.

LCA: ενέργεια και βοηθητικά

Εισροή	Μονάδα	PET	Γυαλί
Ηλεκτρισμός Ελλάδας	kWh	12	12
Κόλλα	kg	0,07	0,10
Νερό καθαρισμού	L	—	37,5
Καυστική σόδα	kg	—	7,5

Ανά 1 m^3. Νερό: 37,5 L = 0,0375 m^3.
Παραδοχή: 7,5 kg καθαρού NaOH = 15 kg διαλύματος 50%.

Εκροές και επαναχρησιμοποίηση

Εκροή του Excel	Μονάδα	PET	Γυαλί
PET προς ανακύκλωση	kg	10	—
PET προς ταφή	kg	10	—
Γυαλί προς επαναχρησιμοποίηση	kg	—	125

Εφαρμογή LCA στο openLCA

- Δημιουργούμε τέσσερα μοντέλα με έξοδο αναφοράς 1 m^3 εμφιαλωμένου νερού.
- Αντιστοιχίζουμε κάθε εισροή σε dataset και ελέγχουμε μονάδα, γεωγραφία και πάροχο.
- Για κάθε συσκευασία κρατάμε τις ίδιες ποσότητες στις δύο βάσεις.
- Υπολογίζουμε με την ίδια EF 3.1 και ελέγχουμε συνδέσεις και μη χαρακτηρισμένες ροές.

Ανάλυση αποτελεσμάτων LCA

- Παρουσιάζουμε τις κατηγορίες της EF 3.1: κλιματική αλλαγή, στη χρήση ορυκτών ενεργειακών πόρων και φωτοχημική οξείδωση, με τις μονάδες του λογισμικού.

- Συγκρίνουμε ecoinvent - BAFU ανά συσκευασία και εντοπίζουμε τις μεγαλύτερες αποκλίσεις.

- Εξετάζουμε σημαντικές εισροές και τεκμηρίωση datasets. Αλλάζει η κατάταξη PET–γυαλιού;

- Ευαισθησία ηλεκτρισμού: 9,6 και 14,4 kWh/m³, με όλα τα υπόλοιπα σταθερά.

LCC: κόστος συσκευασίας

Εισροή	Μονάδα	PET	Γυαλί	Τιμή μονάδας
Φιάλη PET	kg	20	—	€0.015 (€/m³)
Γυάλινη φιάλη	kg	—	125	0.0001 (€/m³)
Πώματα LDPE	kg	1	2,35	0.001 (€/m³)
Χάρτινες ετικέτες	kg	0,94	0,83	0.001 (€/m³)
Πλαστικό φιλμ PE	kg	2,91	—	0.002 (€/m³)

Ποσότητες ανά 1 m³.

LCC: ενέργεια και βοηθητικά

Εισροή	Μονάδα	PET	Γυαλί	Τιμή μονάδας
Ηλεκτρισμός	kWh	12	12	0.001 (€/kWh)
Κόλλα	kg	0,07	0,10	0.0001 (€/kg)
Νερό καθαρισμού	L	—	37,5	0.0001 (€/L)
NaOH καθαρισμού	kg	—	7,5	0.0001 (€/kg NaOH)

Κοινή ημερομηνία τιμών και ίδιος χειρισμός ΦΠΑ.
Τιμολογείται διάλυμα NaOH 50% → χρησιμοποιούμε 15 kg και τιμή ανά kg διαλύματος.

Υπολογισμός κόστους εισροών

- Κόστος εισροής = ποσότητα ανά m^3 × τιμή μονάδας.

- Αθροίζουμε τα επιμέρους κόστη σε €/m^3. Για €/L διαιρούμε το αποτέλεσμα με 1.000.

- Πρόκειται για μερικό κόστος εισροών.
- Πλήρης LCC απαιτεί και άλλα κόστη, κοινά όρια και χρονικό ορίζοντα.

Παραδοτέα της εργασίας

1. Βασική LCA: έκθεση 8–12 σελίδων και Excel απογραφής, παρόχων και αποτελεσμάτων.

2. Περιλαμβάνουμε γραφήματα διαφορών και συνεισφορών, ευαισθησία και συζήτηση τέλους ζωής.

3. Επέκταση LCC: πίνακας τιμών με πηγές, κόστος ανά εισροή και συνολικό κόστος ανά m^3.

4. Δηλώνουμε παραδοχές και ελλείψεις. Ομάδες, προθεσμία και τρόπος υποβολής ανακοινώνονται από τον διδάσκοντα.



Σας ευχαριστώ