

Kunnen we de betonkringloop verlengen en optimaliseren?



Dr. ir. arch. Philip Van den Heede



Promotor: Prof. dr. ir. Nele De Belie

**Laboratorium Magnel vr. Betononderzoek
Universiteit Gent (UGent)**



Studiedag Circulair Beton

12 maart 2019, Ingenieurshuis Antwerpen

Binnen Labo Magnel wordt levenscyclusanalyse (LCA) gebruikt om het milieuvoordeel van nieuwe betontypes in te schatten

(1)

**Zelfhelend beton
(SHC)**

Impact of Self-Healing Engineered materials on steel
CORrosion of reinforced concrete (ISHECO)



AGENTSCHAP
INNOVEREN &
ONDERNEMEN

SIM



Samen voor sterk innoveren

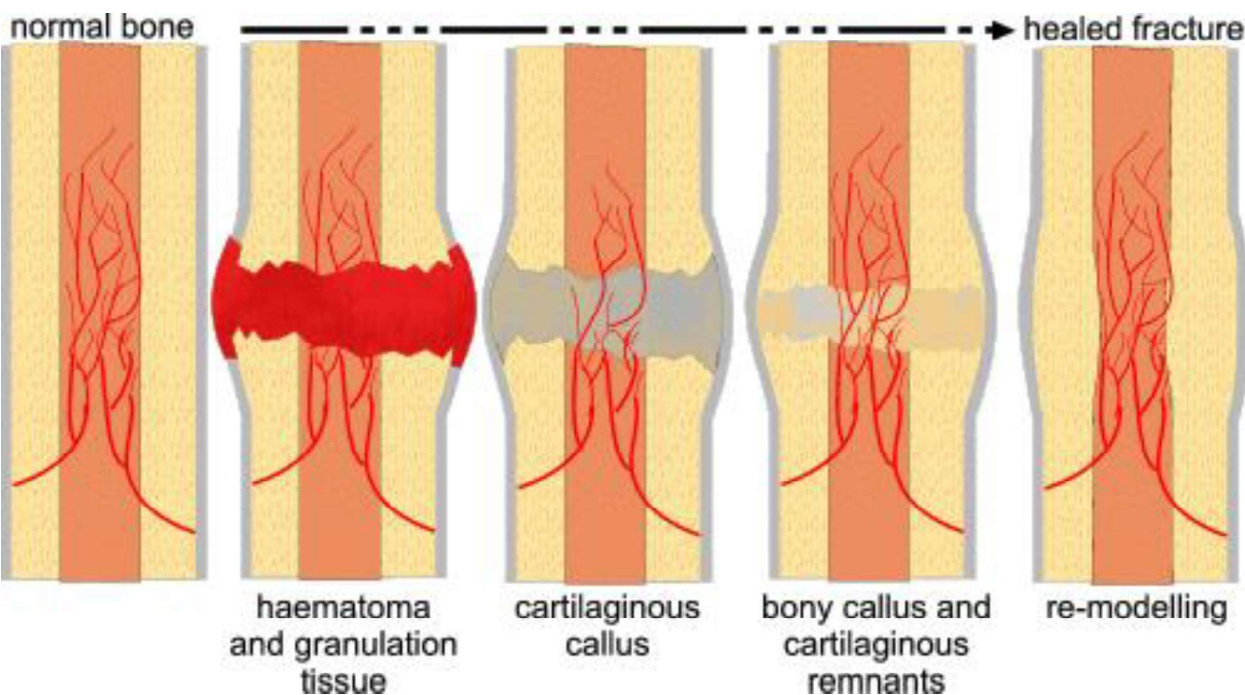
(2)

**Volledig Recycleerbaar Beton
(CRB)**

Completely recyclable concrete for a more
environment-friendly construction (De Schepper)

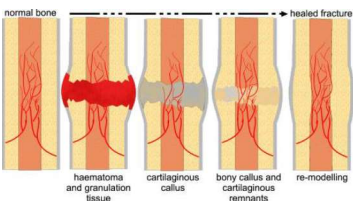
rebar

Inspiratiebron: Het menselijk lichaam

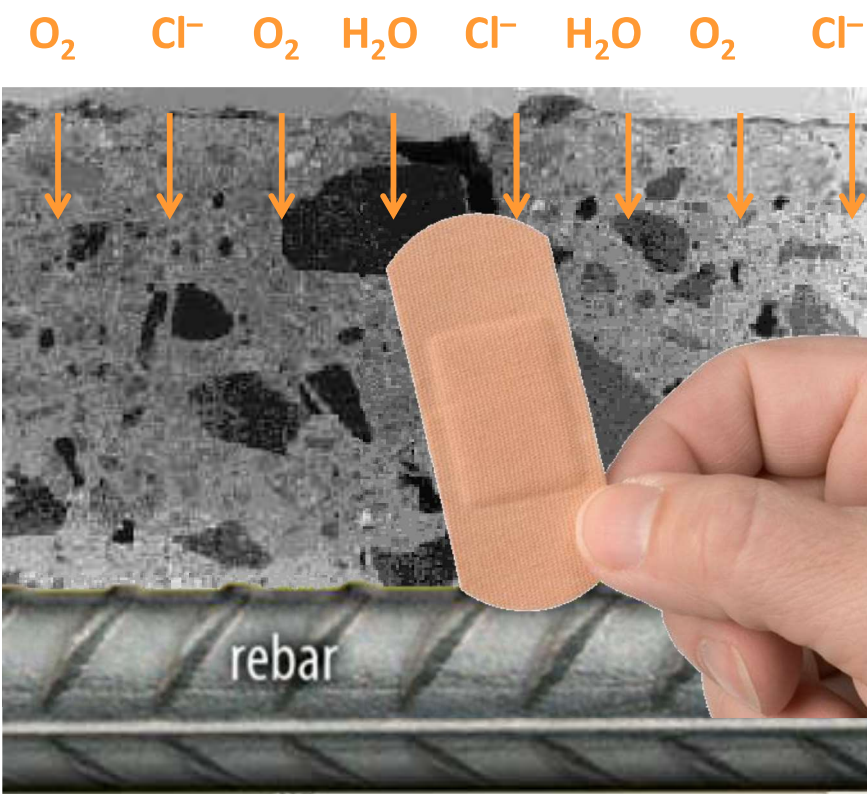


Heling van scheuren in beton om versnelde actieve corrosie van het wapeningsstaal tegen te gaan

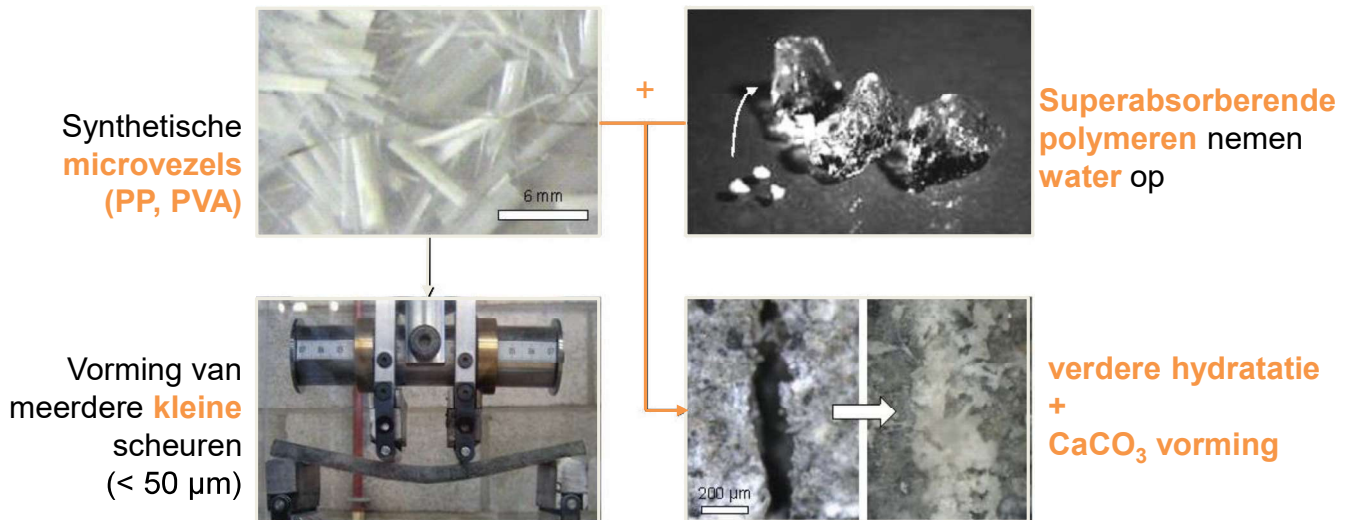
Tragere indringing door capillaire opslorping & diffusie



Tijd tot start actieve corrosie ↗

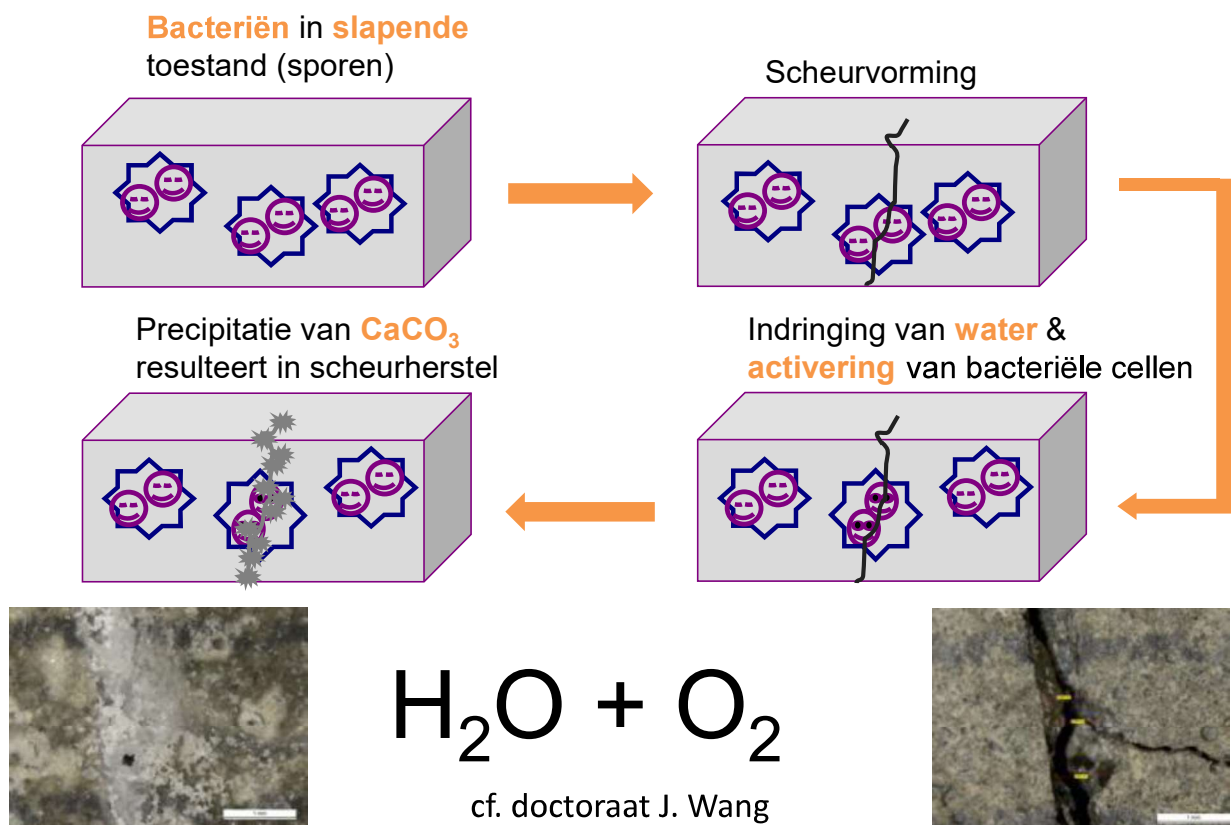


Strategie 1: Gestimuleerde autogene heling met behulp van microvezels (en superabsorberende polymeren)

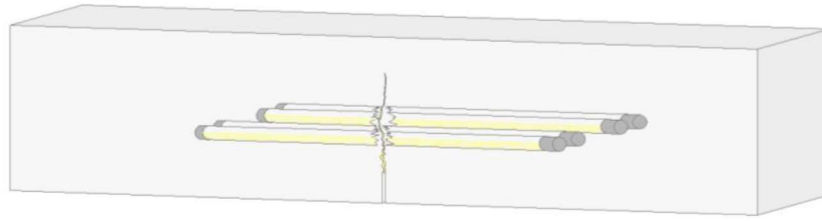


cf. Doctoraat D. Snoeck

Strategie 2: Autonome heling door inmenging van ingekapselde bacteriële sporen



Strategie 3: Autonome scheurheling door inmenging van ingekapseld polyurethaan



- 1/ Betonmatrix **scheurt** o.i.v. schadefenomeen
- 2/ Breuk **capsules**, vrijstelling **helend agens** langsheen de scheurvlakken o.i.v. capillariteit
- 3/ Polymerisatie helend agens. Aaneenhechting scheurvlakken

Helend agens

- Herwinning **impermeabiliteit**
- Herwinning **sterkte**

Capsules

- **Breuk** bij scheurvorming
Brosse materialen voor incapsulatie (Glas, Keramische materialen)
- **Overleven mixproces** beton
EN **breuk** bij scheurvorming
(Materialen voor incapsulatie met een tijdsafhankelijke brosheid)

cf. doctoraat K. Van Tittelboom

Welke levensduurverlenging is mogelijk met polyurethaan gebaseerd zelfhelend beton in **mariene omgevingen**?

Wanneer?



Scheurvorming in beton en autonome scheurheling in **mariene omgevingen**: Milieu-performantie gerelateerde effecten



Weerstand tegen chloride-indringing

Levensduurvoorspelling

Levenscyclusanalyse

FACULTY OF ENGINEERING
AND ARCHITECTURE

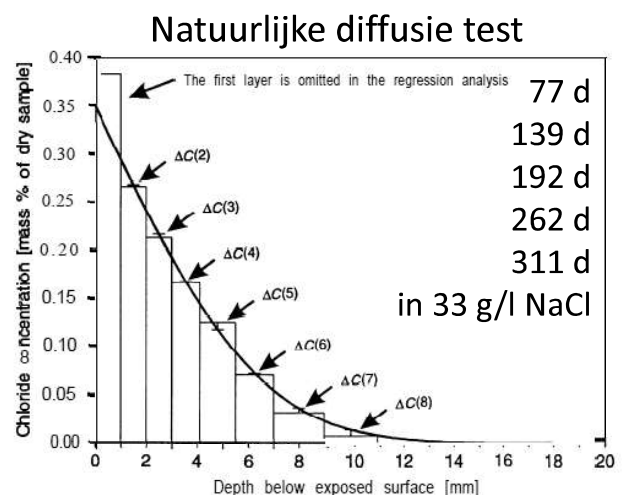


Weerstand tegen chloride-indringing van ongescheurd traditioneel beton voor mariene omgevingen (1)

Blootstellingsklasse XS2

Referentie k-waarde concept F15-beton, C40/50

Chloride diffusie



Weerstand tegen chloride-indringing van ongescheurd traditioneel beton voor mariene omgevingen (1)

Collepari (1972)

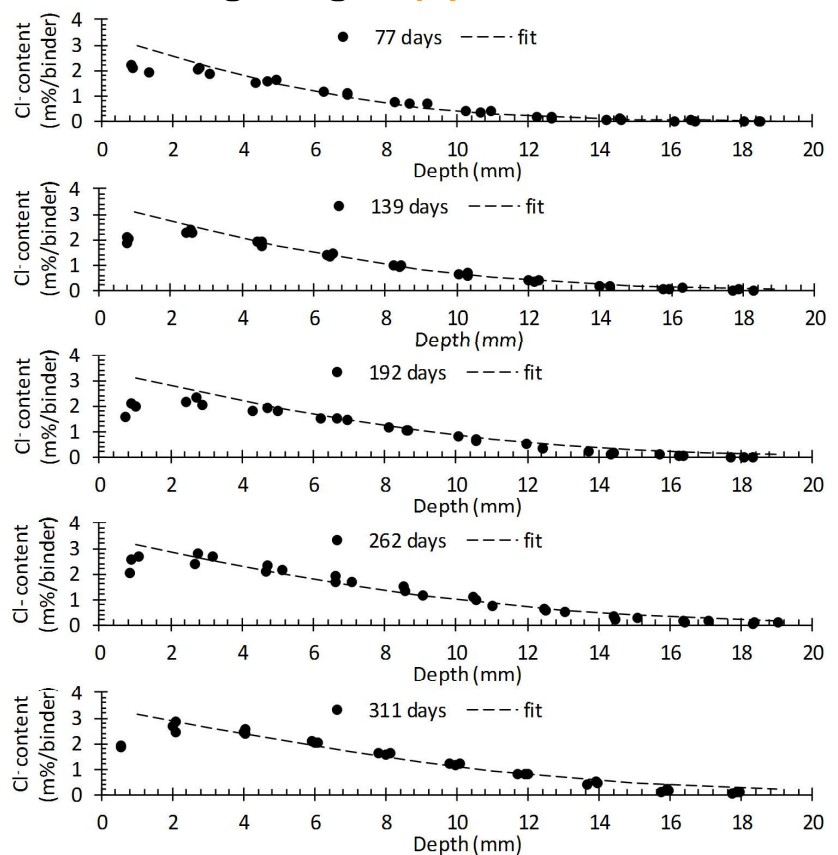
$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{app} \cdot t}} \right) \right]$$

C_s : Oppervlakte-concentratie
 D_{app} : Schijnbare diffusie-coeff.

Visser et al. (2002)

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot \frac{D_0}{(1-n)} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}} \right) \right]$$

C_s : Oppervlakte-concentratie
 D_0 : Ogenblikkelijke diffusie coeff.
 n : Verouderingsexponent



Weerstand tegen chloride-indringing van (on)gescheurd traditioneel beton en PU-gebaseerd zelfhelend beton (2)

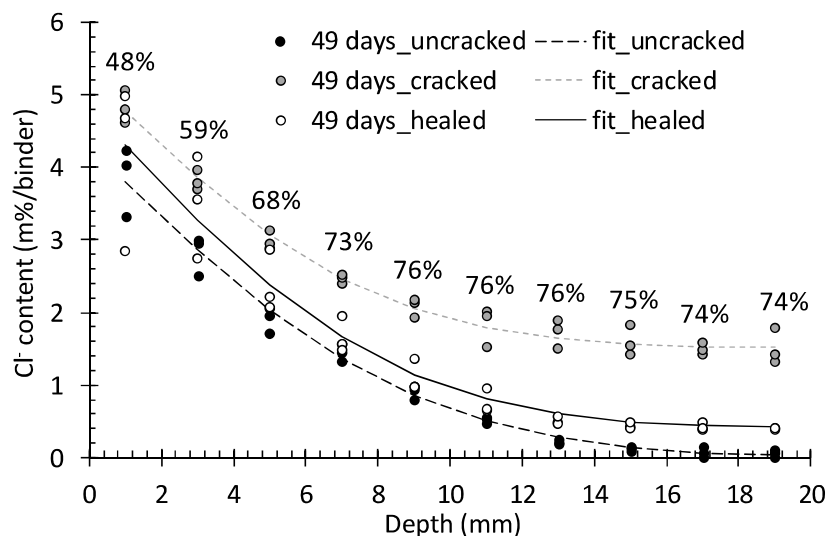
Efficiëntie zelfheling
per laag

Collepari (1972)

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{app} \cdot t}} \right) \right]$$

C_s : Oppervlakte-concentratie
 D_{app} : Schijnbare diffusie-coeff.

Focus op het chloride-gehalte per laag, niet op de gefitte parameters!



Scheurvorming in beton en autonome scheurheling in **mariene omgevingen**: Milieu-performantie gerelateerde effecten



Weerstand tegen chloride-indringing



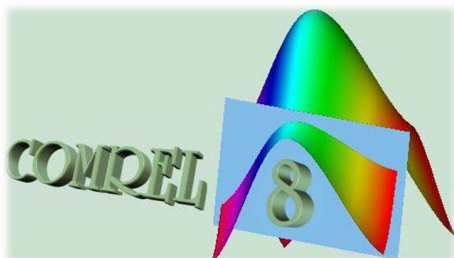
Levensduurvoorspelling

Levenscyclusanalyse



Inschatting levensduur van (on)gescheurd traditioneel beton en PU-gebaseerd zelfhelend beton

Probabilistische levensduurvoorspelling in:



$$C_{\text{crit}} = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \text{erf} \left(\frac{d}{\sqrt{4 \cdot k_e \cdot \frac{D_0}{1-n} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot t}} \right) \right]$$

Cf. Visser et al. (2002)

Toestand oppervlak	Tijd tot depassivatie
Gescheurd	8 jaar
Minimale heling	36 jaar
Maximale heling	68 jaar
Ongescheurd	104 jaar

First Order Reliability Method (FORM)

Faalkans: ≤ 0.10

Betrouwbaarheidsindex β : ≥ 1.3

Scheurvorming in beton en autonome scheurheling in **mariene omgevingen**: Milieu-performantie gerelateerde effecten



Weerstand tegen chloride-indringing

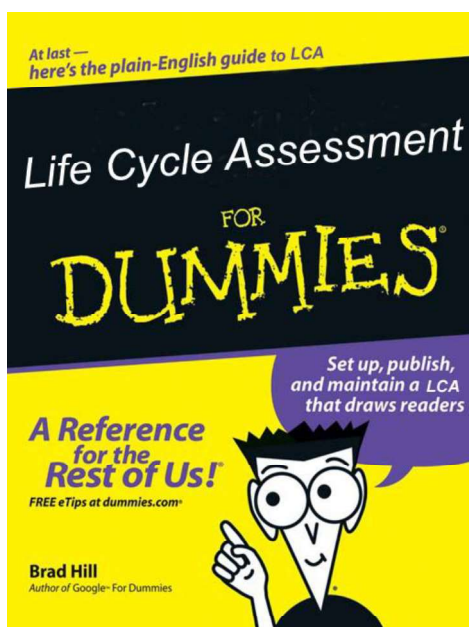
Levensduurvoorspelling

FACULTY OF ENGINEERING
AND ARCHITECTURE

Levenscyclusanalyse



Oorsprong van LCA: Analyse grondstof- en milieuprofiel drank- recipiënten voor Coca-Cola

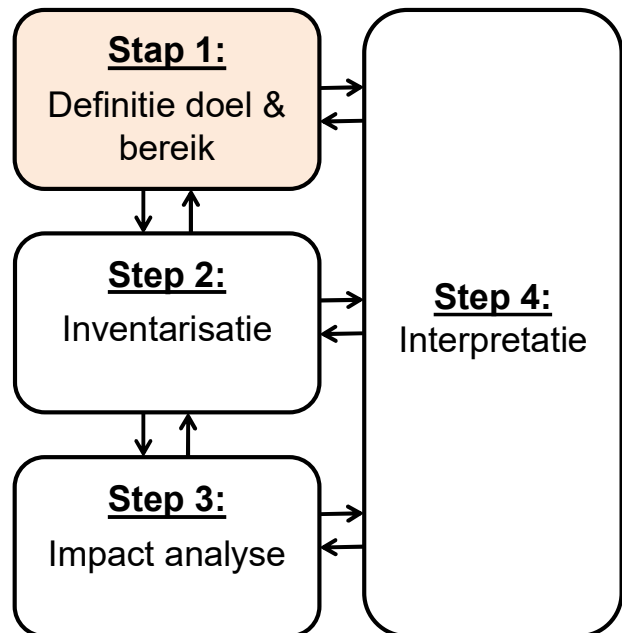
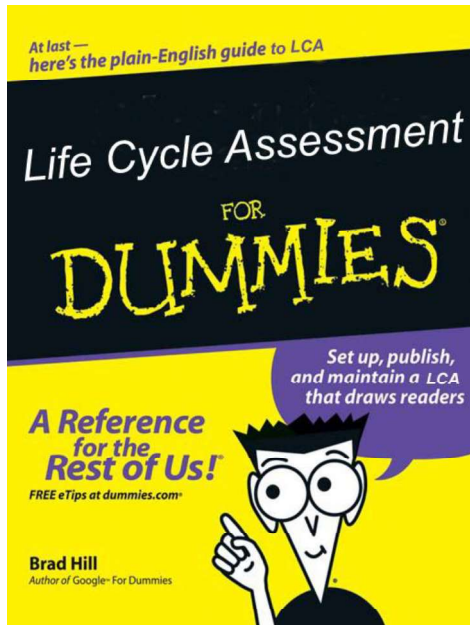


1st studie voor Coca-Cola in 1969



**Meest recente normen over de te hanteren
LCA-methodologie: ISO 14040-14044 (2006)**

De bekomen informatie inzake duurzaamheid en levensduur werden in beschouwing genomen bij de LCA



Twee te beschouwen aspecten bij definitie van het bereik van de LCA-studie

Bereik

Behelst defintie van:

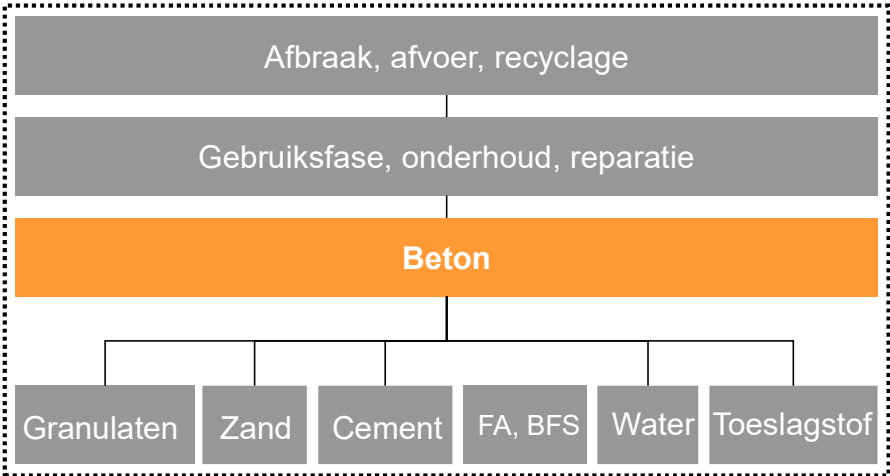
- de functionele eenheid (FU)
- de systeemgrenzen

Voorbeelden:



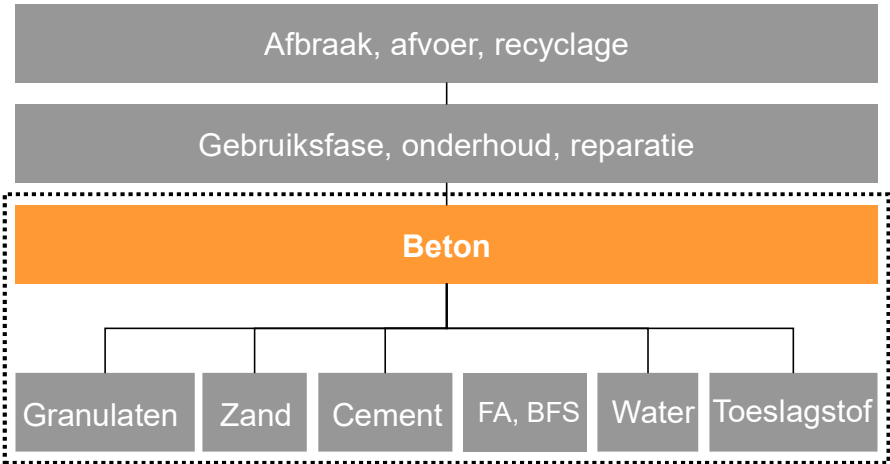
De **steemgrenzen** worden vastgelegd in een procesboom

‘wieg-tot-graf’



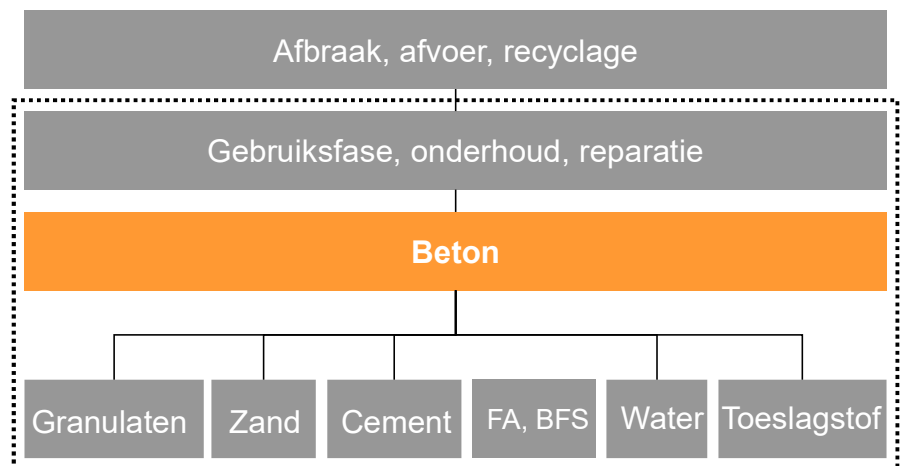
De **steemgrenzen** worden vastgelegd in een procesboom

‘wieg-tot-poort’



De **systeemgrenzen** worden vastgelegd in een procesboom

‘wieg-tot-poort’ plus



Voor stap 1 is de definitie van de functionele eenheid (FU) heel belangrijk

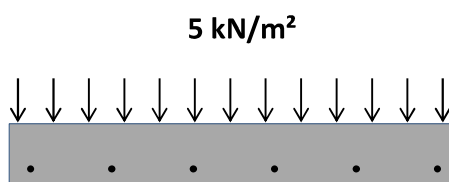


Doel

LCA begroot de vermindering in milieu-impact voor zelfhelend beton met een langere levensduur

Bereik

FU: betonvolume voor een uniform belaste plaat met een opgelegde ontwerplevensduur van 100 jaar



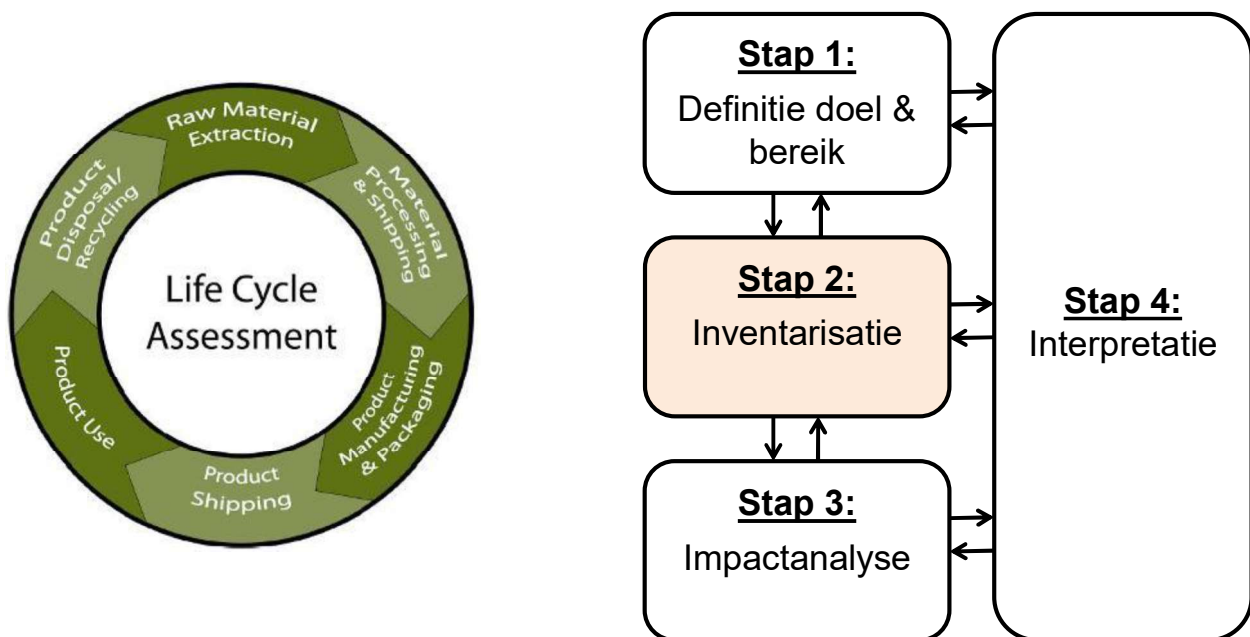
Twee verschillende onderhoudsscenario's werden in beschouwing genomen

Scenario 1	Tijdsafhankelijke reparatie van traditioneel (gescheurd) beton
Verwachte levensduur	8 jaar
Tijdsafhankelijk onderhoud	Vervanging van de betondekking van 50 mm
Aantal reparaties binnen een tijdspanne van 100 jaar	12
Scenario 2	Reparatievrij PU-gebaseerd zelfhelend beton
Verwachte levensduur	104 years
Tijdsafhankelijk onderhoud	Geen
Aantal reparaties binnen een tijdspanne van 100 jaar	Geen

Twee verschillende configuraties voor de capsules in zelfhelend beton

Configuratie 1	1 laag capsules in de scheurgevoelige trekzone van de plaat
Vereist aantal capsules om 0,3 mm wijde en 25 mm diepe scheuren te helen	4150 capsules
Configuratie 2	Bulk-toevoeging van capsules over de volledige dikte (0.17 mm) van de plaat
Vereist aantal capsules om 0,3 mm wijde en 25 mm diepe scheuren te helen	7 × 4150 = 29050 capsules

De bekomen informatie inzake duurzaamheid en levensduur werden in beschouwing genomen bij de LCA



Inventarisatiedata m.b.t. gebruik van grondstoffen, energie, emissies en afval werden verzameld

Afkomstig uit:



LCA database

&



EPD's

Materialen	LCA data (< Ecoinvent of EFCA)
Granulaten	gravel, round, at mine/CH U
Zand	sand at mine/CH U
Cement	portland cement, Strength class Z 52.5, at plant/CH U
Vliegashouders	Benaderd als bijproduct
Water	tap water, user/CH U
SP	EFCA, 2006
Glazen capsule	Glass tube, borosilicate, at plant/DE U
PU-gebaseerd helend agens	Polyurethane, flexible foam, at plant/RER U (modified)

De materiaalstatus van secundair cementeerbare materialen is geëvolueerd



De **product status** van bindmiddelen zoals vliegas en silica fume:

een afvalproduct?

een bijproduct?

Massa- en economische allocatie-coëfficiënten kunnen worden berekend voor bijproducten FA en SF cf. Chen et al. (2009, 2010)

X

**Massa-allocatie:
unrealistisch hoge impact
voor de bijproducten**

$$C_m = \frac{m_{\text{by-product}}}{m_{\text{mainproduct}} + m_{\text{by-product}}}$$



**Economische allocatie:
Aanvaardbare impact
voor de bijproducten**

$$C_e = \frac{(\text{€} \cdot m)_{\text{by-product}}}{(\text{€} \cdot m)_{\text{mainproduct}} + (\text{€} \cdot m)_{\text{by-product}}}$$

Voor zowel FA en SF werd geopteerd voor het economische allocatieprincipe

FA allocatie %
toegepast op :
 'Electricity, hard coal,
 at power plant/BE U'

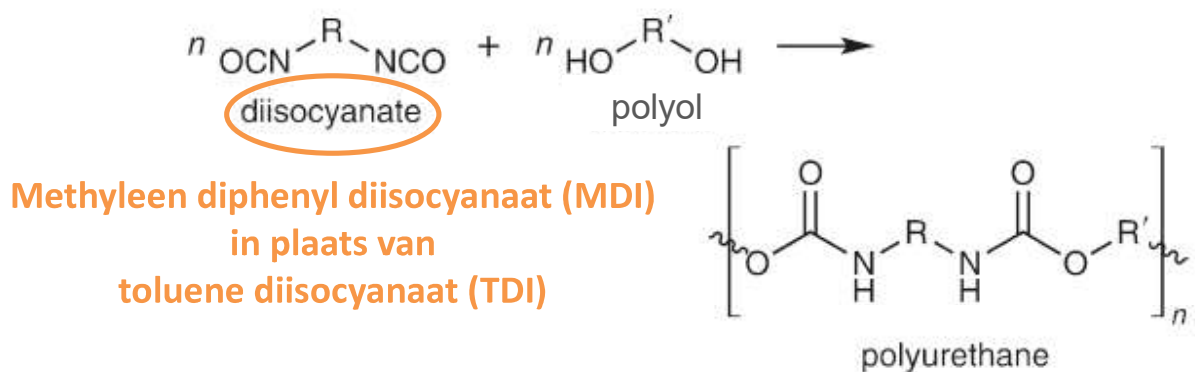
Product	Massa geproduceerd	Markt- Prijs
Electriciteit	1 kWh*	0,06 €/kWh
FA	0,052 kg	35 €/t
Si-metaal	1 kg	1729 €/t
SF	0,15 kg	750 €/t

* Equivalent aan 0,367 kg steenkool om elektriciteit te produceren

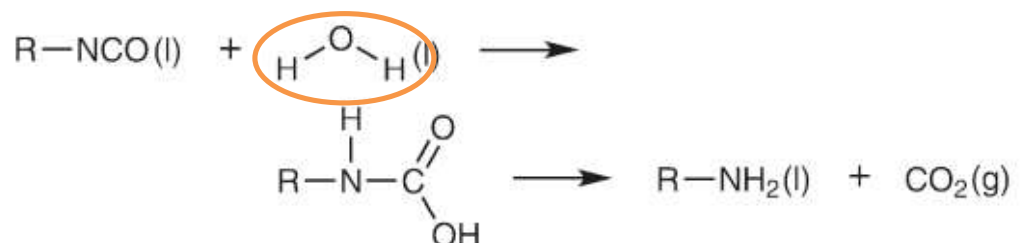
SF allocatie %
toegepast op :
 'MG-silicon, at
 plant/NO U'

Product	Massa- allocatie	Economische allocatie
Electriciteit	87,6%	97,1%
FA	12,4%	2,9%
Si-metaal	87,0%	93,9%
SF	13,0%	6,1%

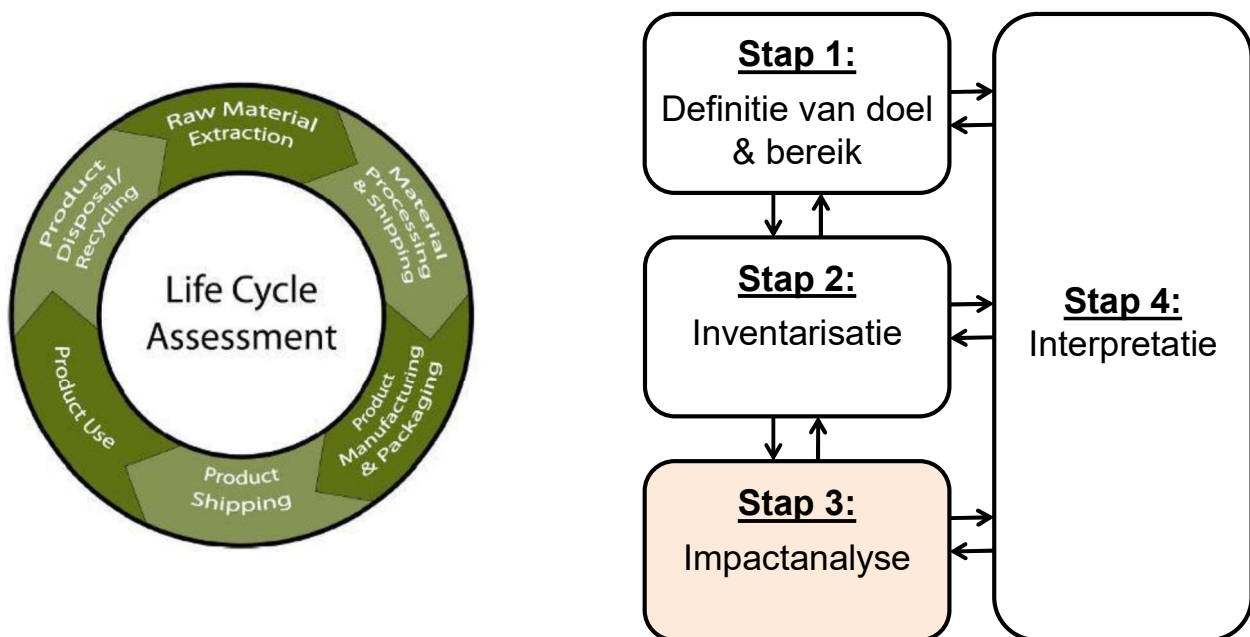
Aanpassingen aan de Ecoinvent LCI voor polyurethaan om deze te doen overeenstemmen met het PU-gebaseerd helend agens



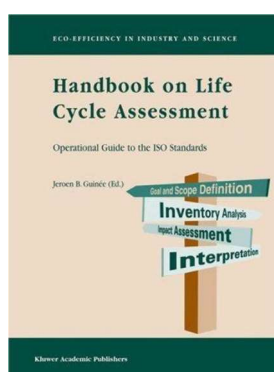
Watertoevoer wordt verzekerd door het vochtgehalte van het beton



De bekomen informatie inzake duurzaamheid en levensduur werden in beschouwing genomen bij de LCA



Om een algemeen beeld van de milieu-impact te verkrijgen, werd gebruikgemaakt van de **CML-methode**

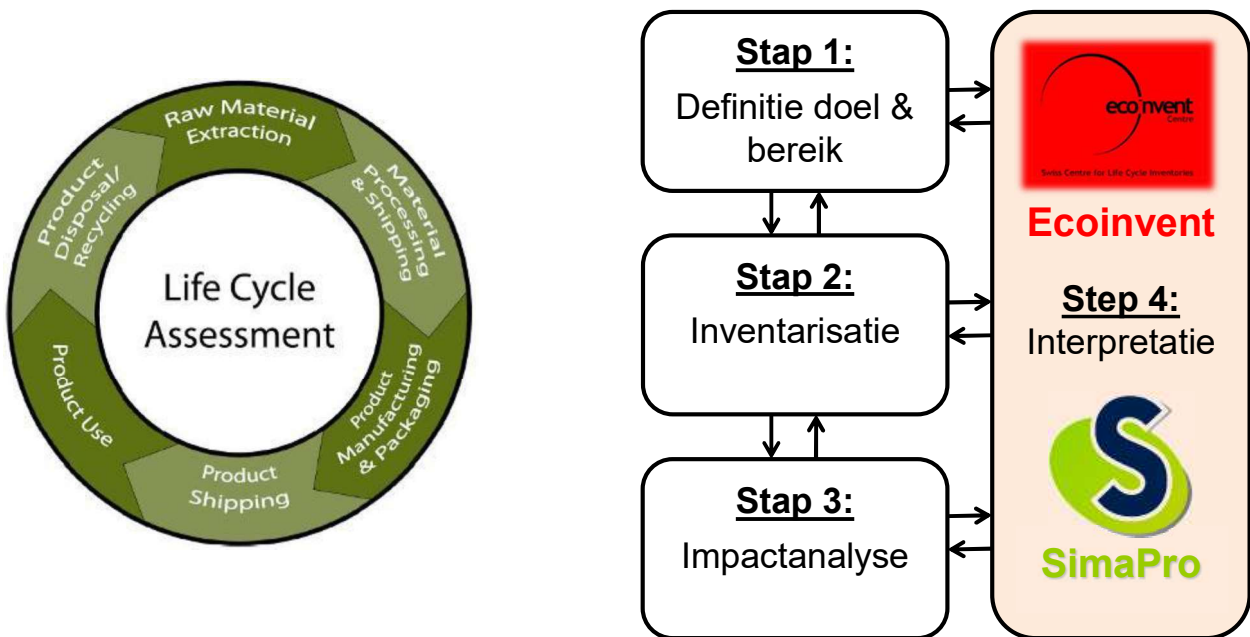


Center of
Environmental science
Leiden University

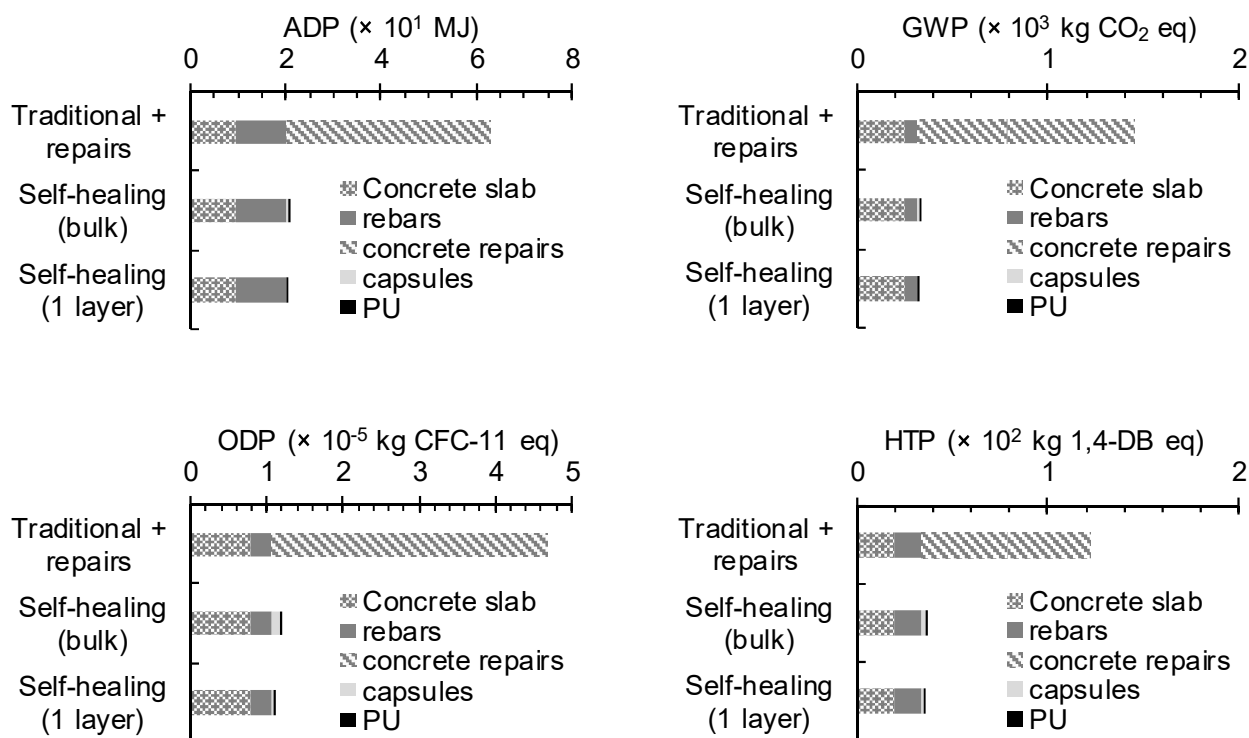
CML-IA impact method: verschaft een eco-profiel met 10 basis impact-indicatoren

- **Abiotic depletion** (ADP, MJ fossil fuels)
- **Global warming** (GWP, kg CO₂ eq)
- **Ozone depletion** (ODP, kg CFC-11 eq)
- **Human toxicity** (HTP, kg 1,4-DB eq)
- **Freshwater aquatic ecotoxicity** (FAETP, kg 1,4-DB eq)
- **Marine aquatic ecotoxicity** (MAETP, kg 1,4-DB eq)
- **Terrestrial ecotoxicity** (TETP, kg 1,4-DB eq)
- **Photochemical ozone creation** (POCP, kg C₂H₄ eq)
- **Acidification** (AP, kg SO₂ eq)
- **Eutrophication** (EP, kg PO₄ eq)

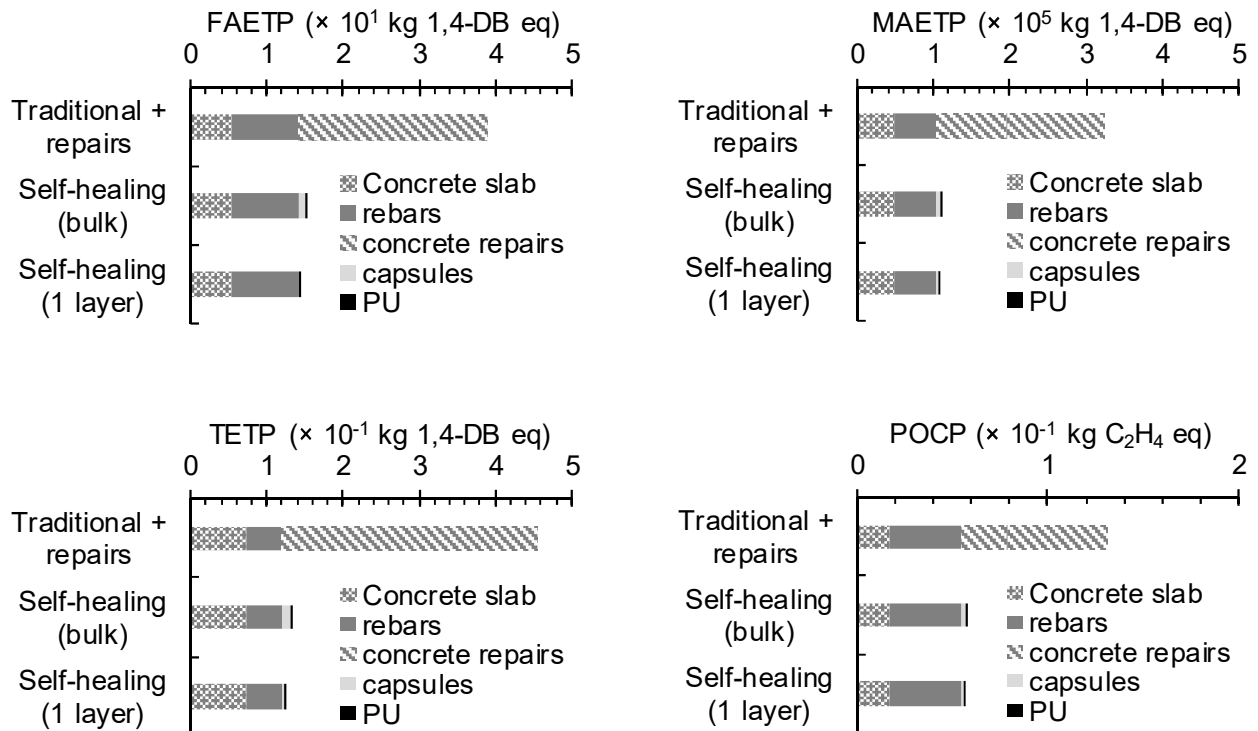
De bekomen informatie inzake duurzaamheid en levensduur werden in beschouwing genomen bij de LCA



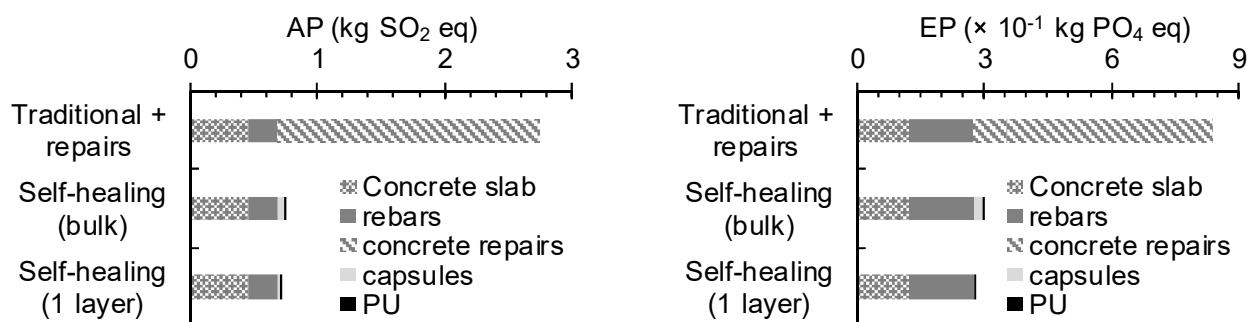
Het eco-profiel van PU-gebaseerd zelfhelend beton in vergelijking traditioneel (gescheurd) beton (1)



Het eco-profiel van PU-gebaseerd zelfhelend beton in vergelijking traditioneel (gescheurd) beton (2)



Het eco-profiel van PU-gebaseerd zelfhelend beton in vergelijking traditioneel (gescheurd) beton (3)



Conclusies

- De impacten van de capsules gevuld met helend agens zijn minimaal!
- Hun impacten zijn verwaarsloosbaar in vergelijking met die van meervoudige reparatie van de betondekking!



Binnen Labo Magnel wordt levenscyclusanalyse (LCA) gebruikt om het milieuvoordeel van nieuwe betontypes in te schatten

(1)

Zelfhelend Beton (SMC)

Impact of Self-Healing Engineered materials on steel Corrosion of reinforced concrete (ISHFSC)

(2)

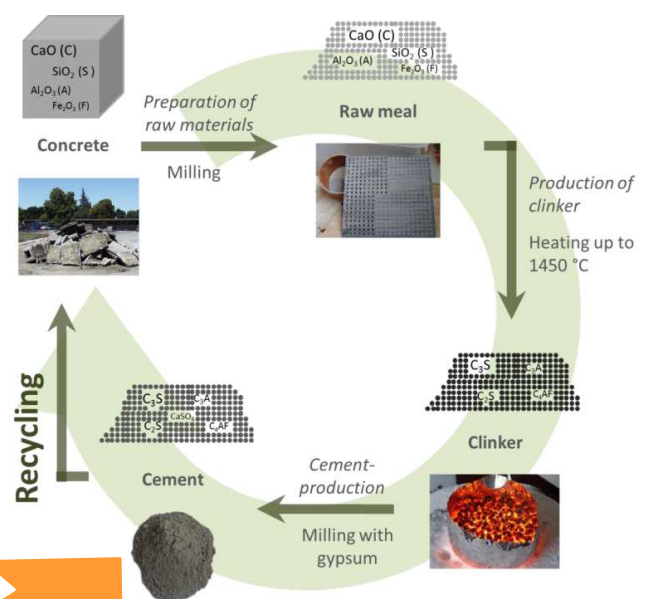
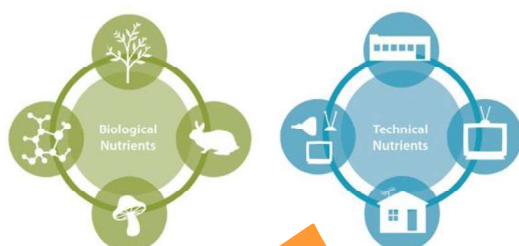
Volledig Recycleerbaar Beton (CRC)

Completely recyclable concrete for a more environment-friendly construction (De Schepper)

Mits een optimale chemische samenstelling kan betonpuin worden ingezet als grondstof voor de cementproductie

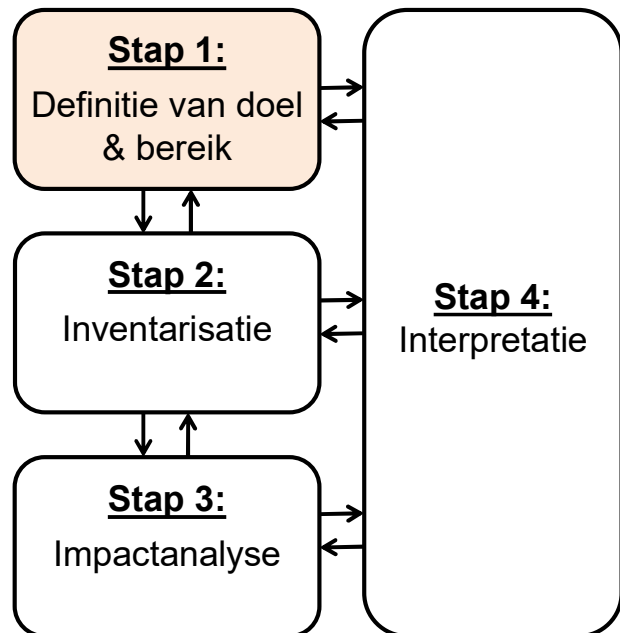
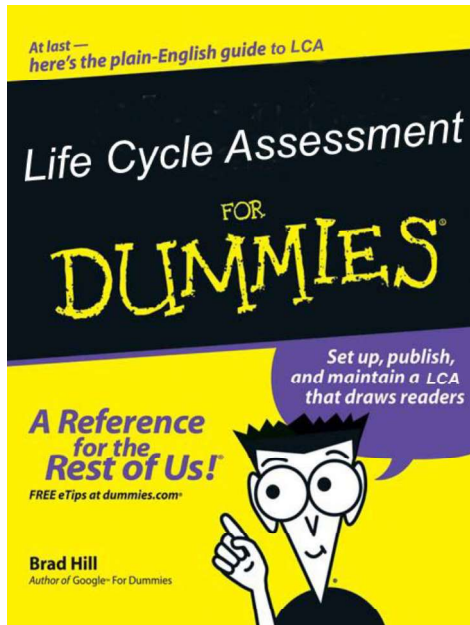
Wieg-tot-Wieg = 'design for reincarnation'

Afval wordt een waardevol materiaal



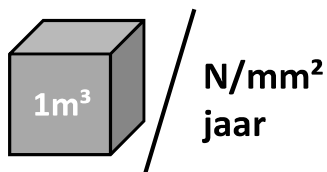
C2C voor beton

De traditionele 4 stappen van de LCA-methodologie werden doorlopen



cf. ISO 14040-14044 (2006)

De functionele eenheid houdt rekening met de sterkte en de levensduur van CRC

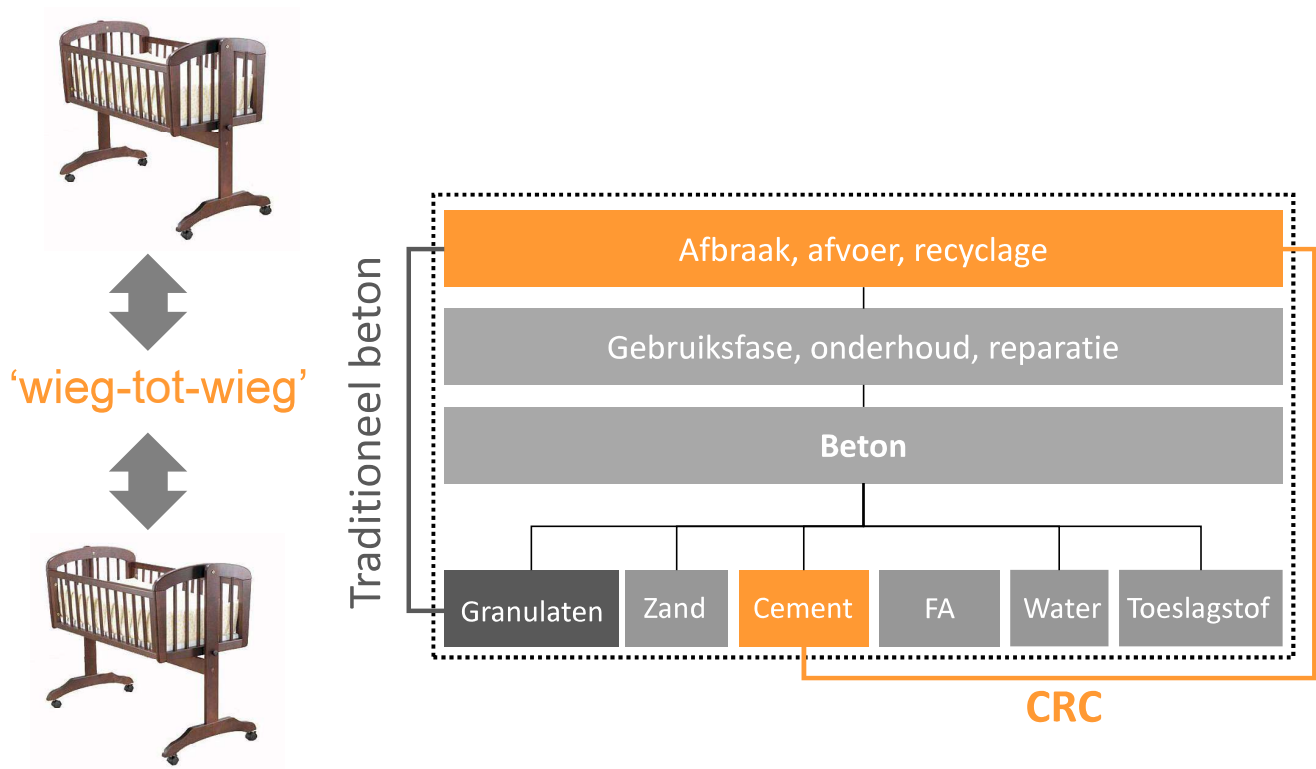


Bereik

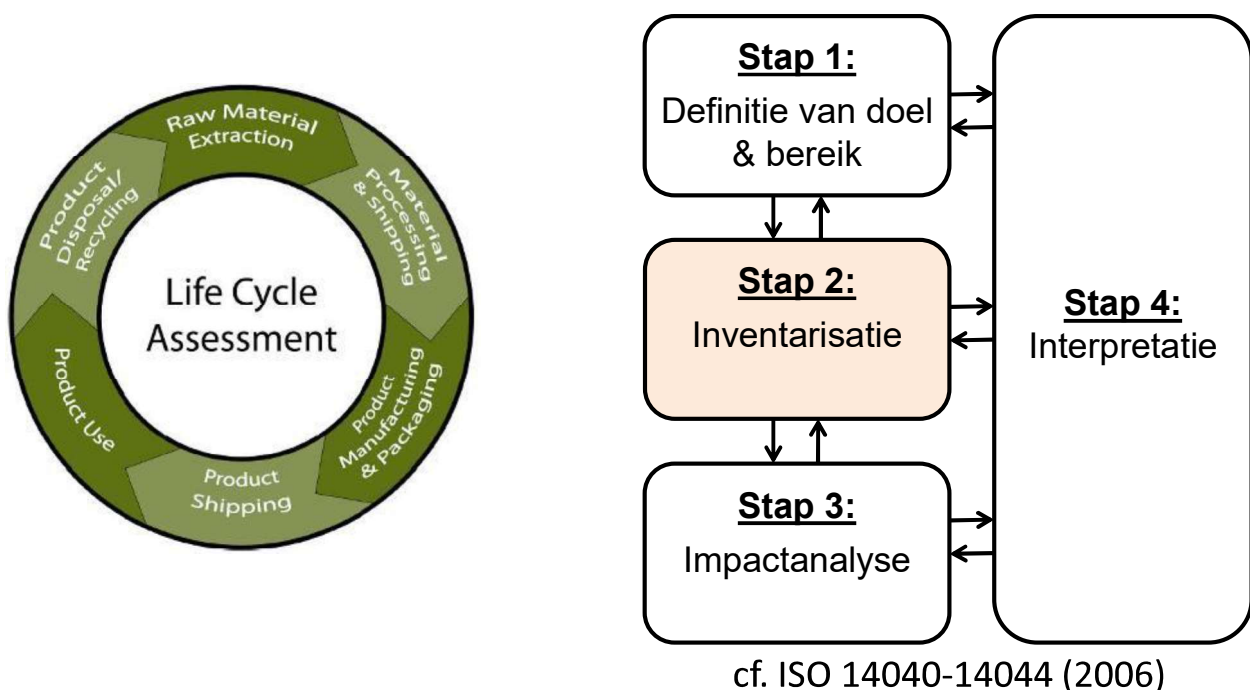
FU: beton **volume per N/mm²** sterkte **en per jaar** levensduur

Concrete mix	Druksterkte [MPa]	Levensduur [jaar]	Functionele eenheid [m³ / (N/mm² · jaar)]
CRC1 – $k_{0.5}$ – 2 maand nabehandeling	65.1	81	$1.90 \cdot 10^{-4}$
CRC1 – $k_{0.5}$ – 4 maand nabehandeling	65.1	63	$2.44 \cdot 10^{-4}$
CRC1 – andere berekeningen	65.1	>100	$1.53 \cdot 10^{-4}$
CRC2b	84.2	>100	$1.19 \cdot 10^{-4}$
T(0.50)	57.8	>100	$1.73 \cdot 10^{-4}$
T(0.45)	69.3	>100	$1.44 \cdot 10^{-4}$

Based on the functional unit choice the system boundaries for LCA are determined



De traditionele 4 stappen van de LCA-methodologie werden doorlopen

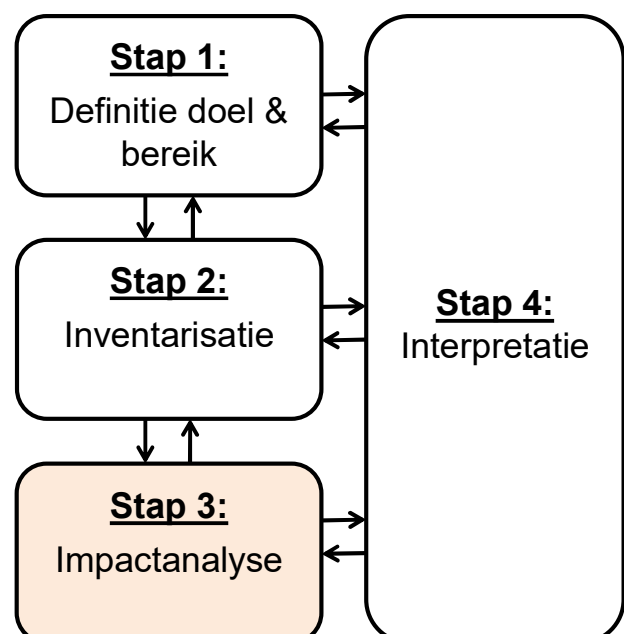
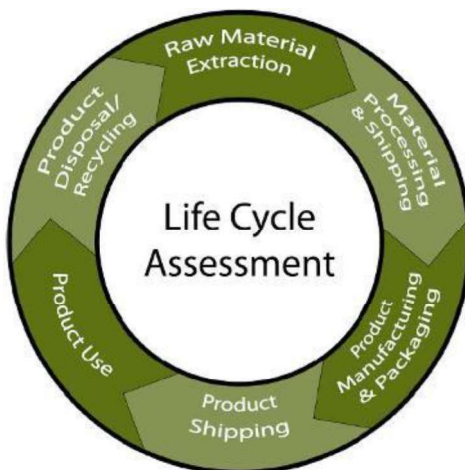


Implementatie van recyclage door de levering van de grondstoffen te scheiden van het productieproces

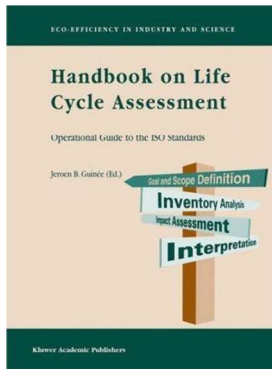
Materialen	LCA data (< Ecoinvent or EFCA)	Subprocessen met opportuniteiten tot recyclage
Granulaten	gravel, round, at mine/CH U	>> levering grondstoffen (incl. transport) >> productie granulaten
Zand	sand at mine/CH U	
Cement	portland cement, Strength class Z 52.5, at plant/CH U	>> levering grondstoffen (incl. transport) >> klinkerproductie >> cementproductie
Vliegas	varies with their status: waste or by-product	
Water	tap water, user/CH U	
SP	EFCA, 2006	



De traditionele 4 stappen van de LCA-methodologie werden doorlopen



Om een algemeen beeld van de milieu-impact te verkrijgen, werd gebruikgemaakt van de **CML-methode**

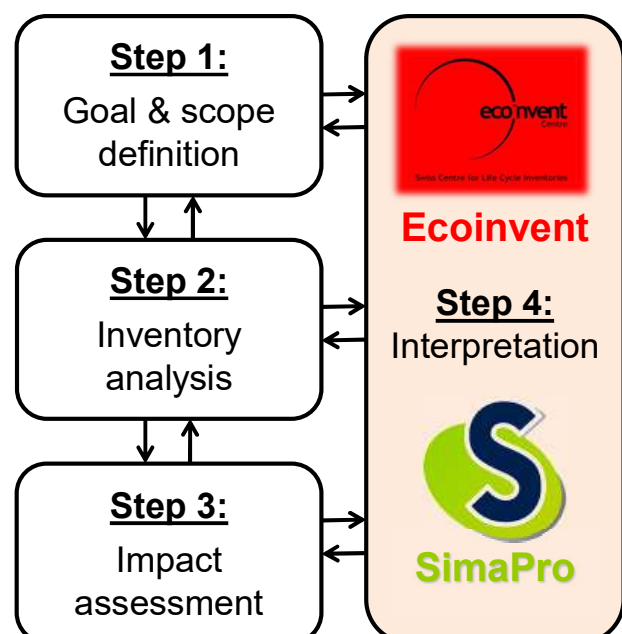
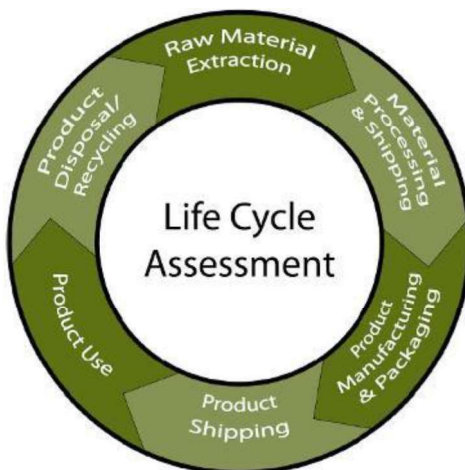


Center of
Environmental science
Leiden University

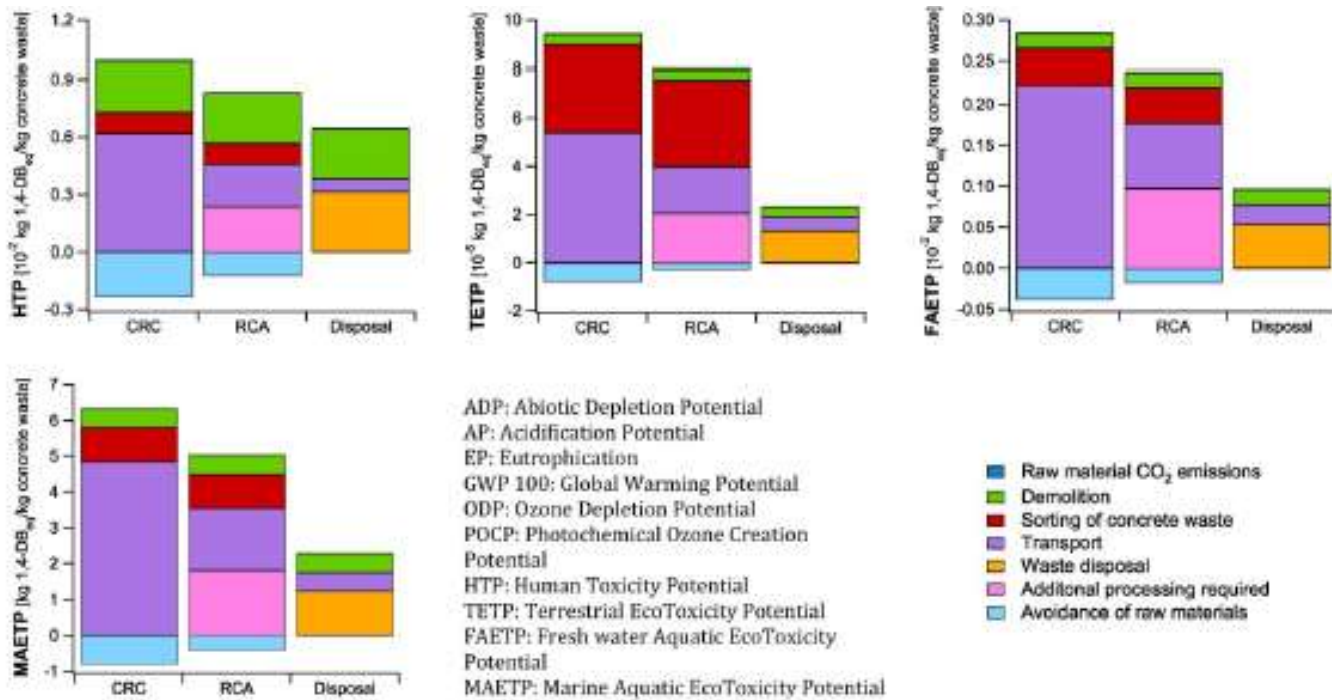
CML-IA impact method: verschaft een eco-profiel met 10 basis impact-indicatoren

- **Abiotic depletion** (ADP, MJ fossil fuels)
- **Global warming** (GWP, kg CO₂ eq)
- **Ozone depletion** (ODP, kg CFC-11 eq)
- **Human toxicity** (HTP, kg 1,4-DB eq)
- **Freshwater aquatic ecotoxicity** (FAETP, kg 1,4-DB eq)
- **Marine aquatic ecotoxicity** (MAETP, kg 1,4-DB eq)
- **Terrestrial ecotoxicity** (TETP, kg 1,4-DB eq)
- **Photochemical ozone creation** (POCP, kg C₂H₄ eq)
- **Acidification** (AP, kg SO₂ eq)
- **Eutrophication** (EP, kg PO₄ eq)

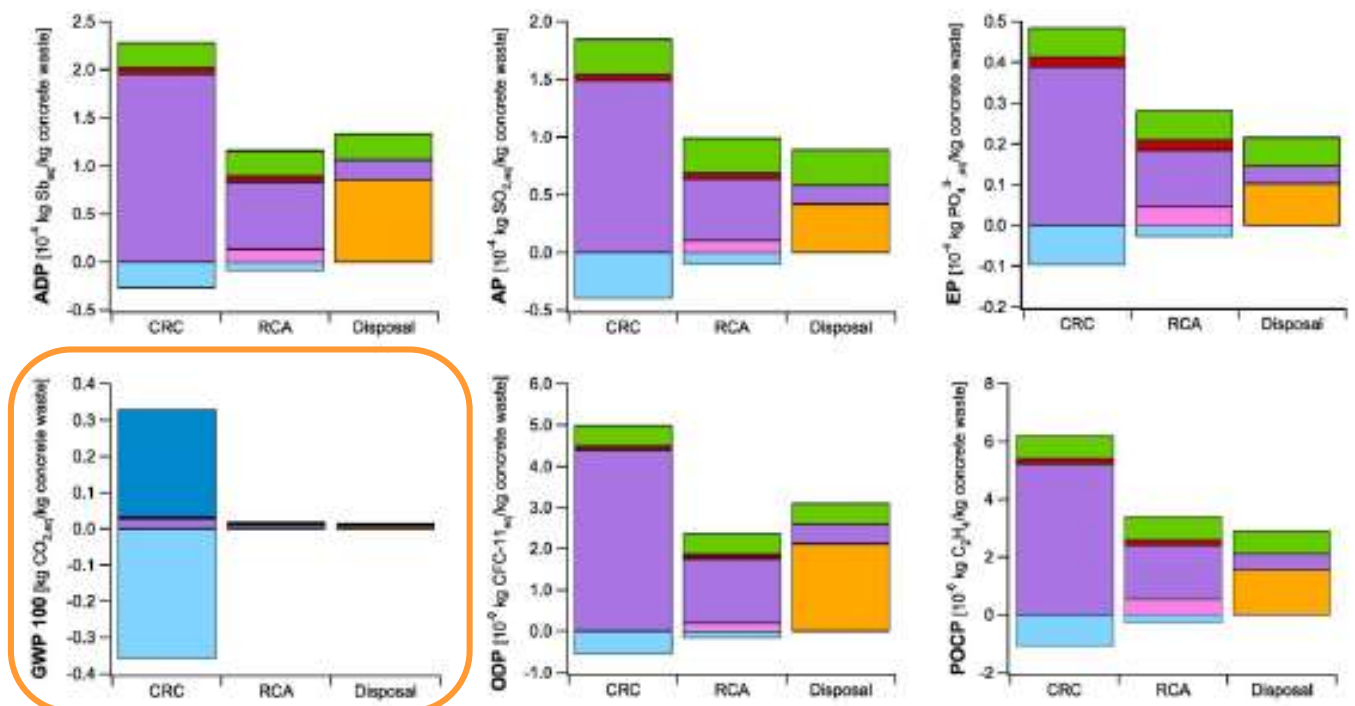
De traditionele 4 stappen van de LCA-methodologie werden doorlopen



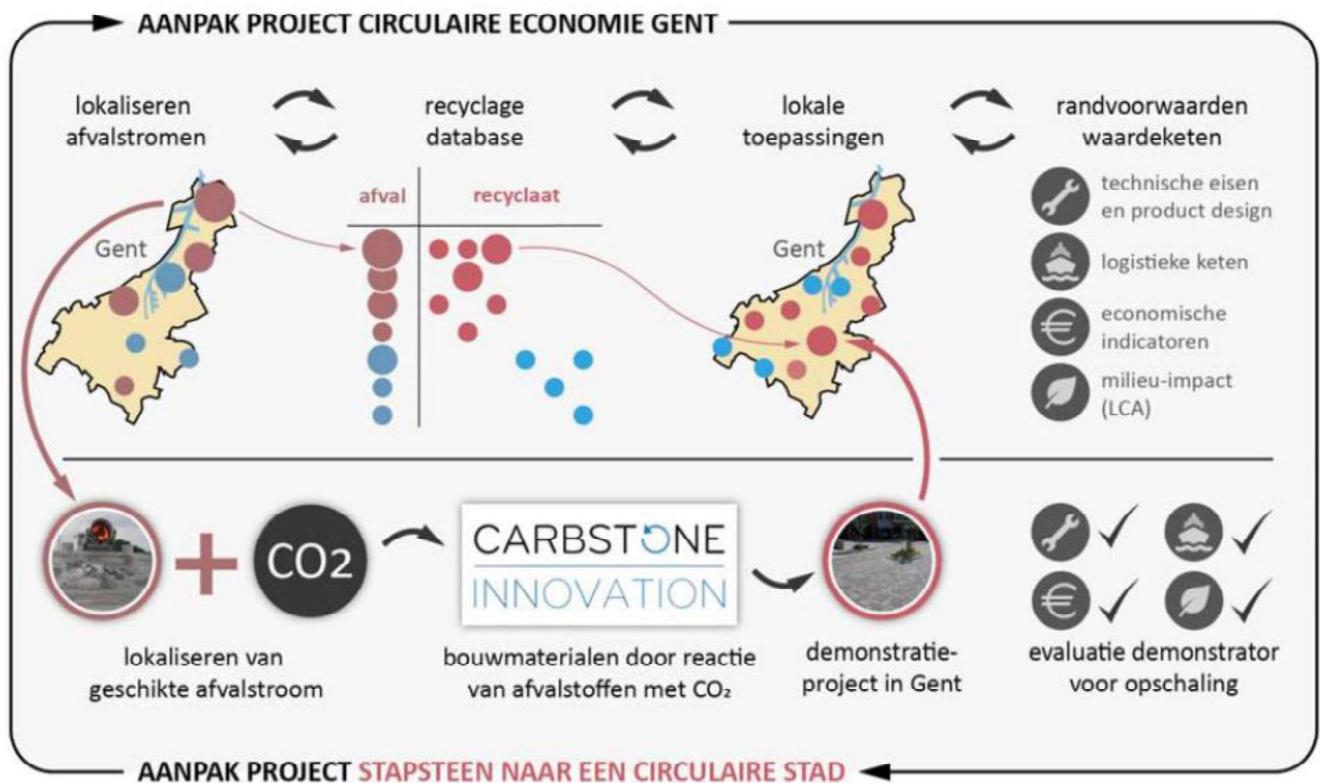
LCA voor CRC – Vergelijking afvalscenario's



LCA voor CRC – Vergelijking afvalscenario's



Lopend LCA-onderzoek met aandacht voor circulaire economie region Gent



Bedankt voor uw aandacht!



Dr. ir. arch. Philip Van den Heede

FACULTY OF ENGINEERING
AND ARCHITECTURE

Promotor: Prof. dr. ir. Nele De Belie
**Laboratorium Magnel vr. Betononderzoek
Universiteit Gent (UGent)**



Studiedag Circulair Beton
12 maart 2019, Ingenieurshuis Antwerpen