

**Durable and sustainable service life extension of existing concrete structures:
A holistic approach within a life cycle perspective**

Prof. Bart Craeye

*Slotevent PWO
A Bridge too Far?*

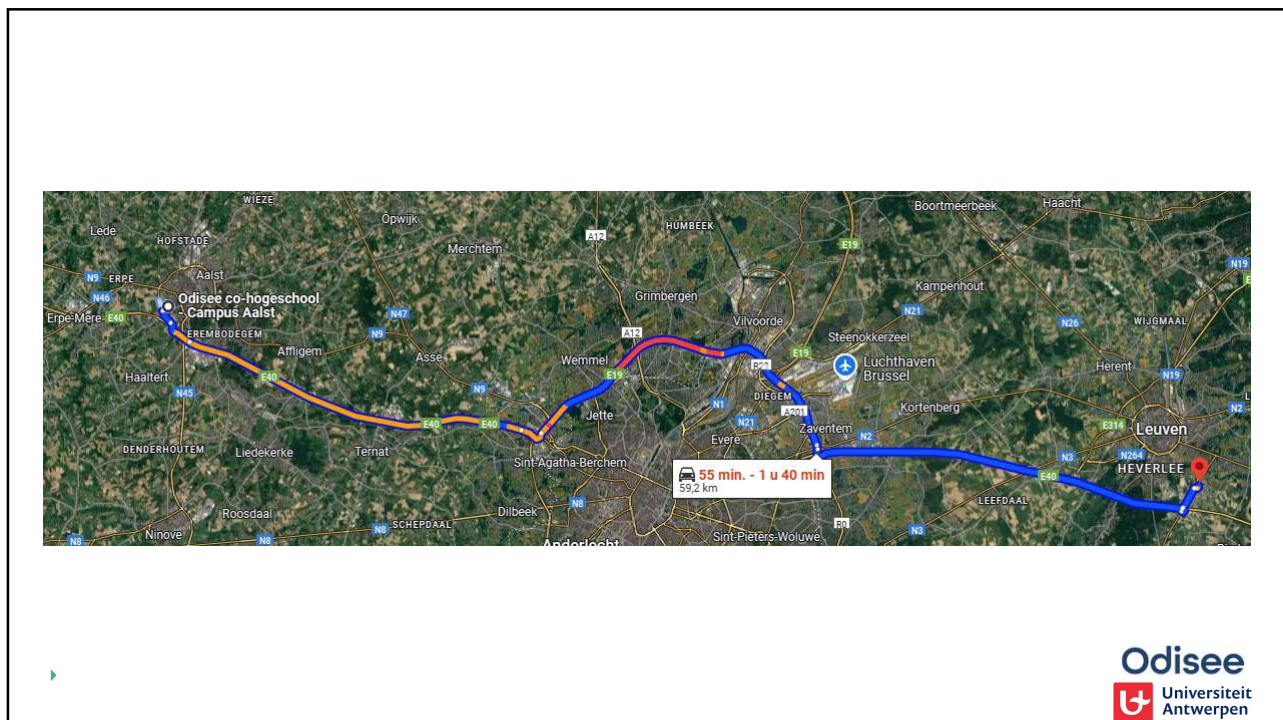
18.12.2024



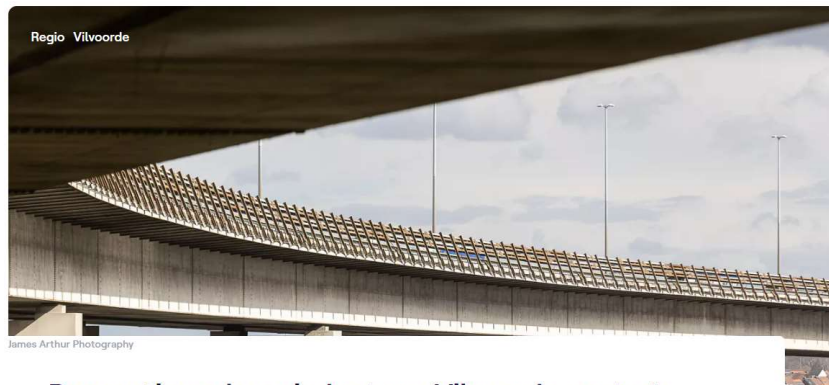
Odisee
UNIVERSITY COLLEGE

EMIB
University of Antwerp
Energy and Materials
in Infrastructure and Buildings

1



2

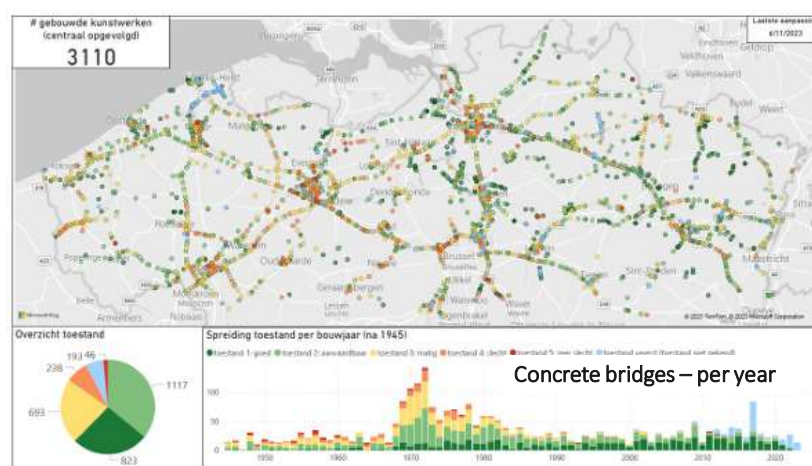


Renovatiewerken viaduct van Vilvoorde gestart: vanaf morgen 8 jaar hinder

vrtnws, 13th of March 2023

3

Prognosis – Condition of bridges in Flanders (Belgium)



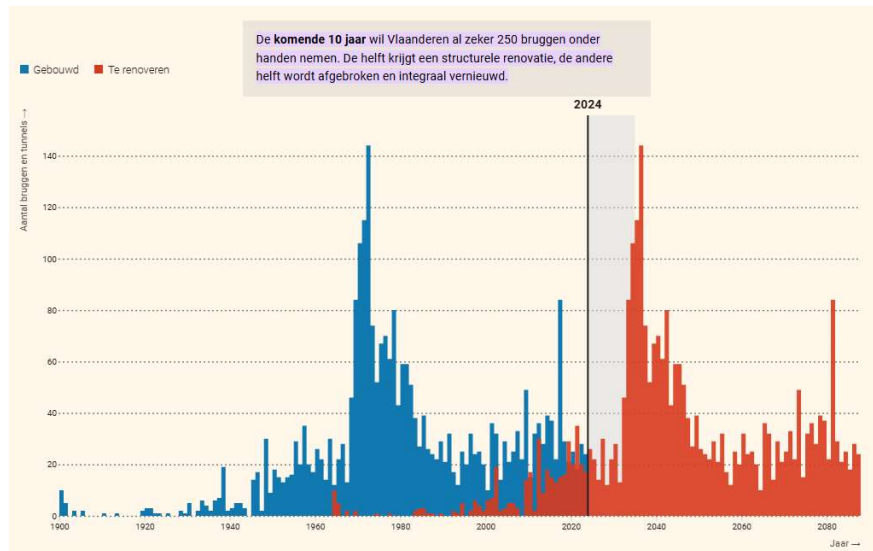
P. Meekels - Concrete Day, 2023

Repair

Maintenance

4

Prognosis – Condition of bridges in Flanders (Belgium)



5

Prognosis – Condition of bridges in Flanders (Belgium)



Vlaams minister van Mobiliteit Peeters zoekt een partner om 49 bruggen te vervangen.
radio2

49 Vlaamse bruggen dringend aan vervanging toe: werken starten vermoedelijk in 2026

Radio2 – 10th of May 2023

6

Neglective approach...



BBC – 18th of August 2018



Odisee
Universiteit
Antwerpen

7

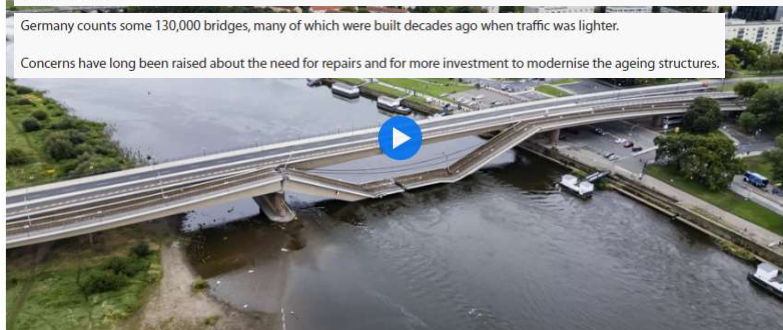
Major bridge partially collapses into river in German city of Dresden

The concrete structure may have suffered from corrosion caused by chloride contamination in the past.

The part of the bridge that fell down contained the section dedicated to tram lines and foot and cycling traffic. It was scheduled for maintenance work next year.

Germany counts some 130,000 bridges, many of which were built decades ago when traffic was lighter.

Concerns have long been raised about the need for repairs and for more investment to modernise the ageing structures.



EuroNEWS
12th of September 2024

Odisee
Universiteit
Antwerpen

8

Vroeger en nu. 18 maart 1992: de Scheldebrug stort in



Ook ons land kende drie brugdrama's: de brandende Schelde en de fanfare die bijna in de afgrond stort

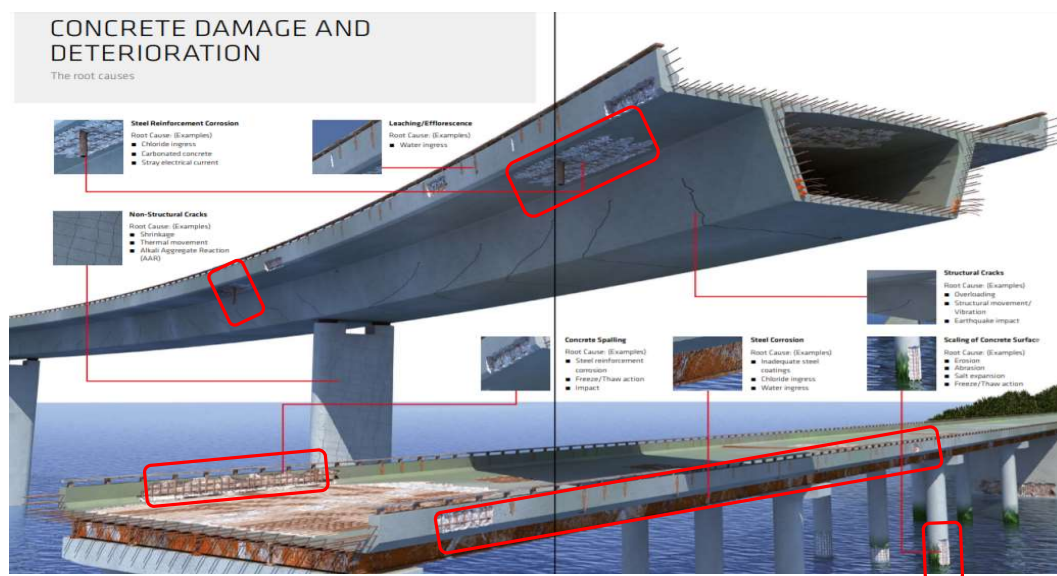


© Gva

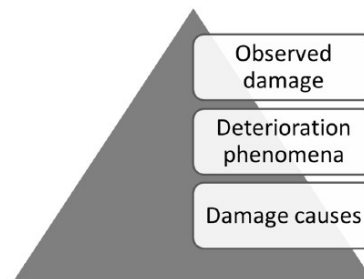
Ons land bleef tot nu toe gelukkig gespaard van drama's zoals dinsdag in Genua. De voorbije eeuw zijn 'slechts' drie bruggen ingestort. In Hasselt stortte 80 jaar geleden de brug over het Albertkanaal in. In Pulle vielen in 1966 twee doden bij een drama. Het laatste ongeval dateert van 1992 in het Oost-Vlaamse Melle, daar kwam een trucker om het leven.

Nieuwsblad
14th of August 2018

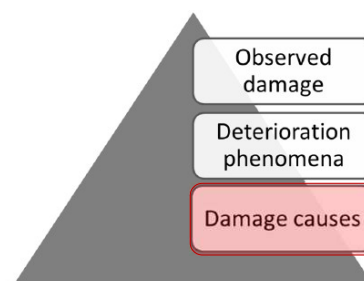
Damage to concrete structures – corrosion



Tip of the iceberg



Damage of concrete structures – main factors/causes contributing to failure



What goes up must come down?

Ingestorte galerij Leeuwarden was doorgeroest
Collapsed gallery in Leeuwarden was entirely corroded



The Netherlands 2011

© Het Nieuwsblad / www.nieuwsblad.be.
GEEN GEWONDEN, WEL GROTE SCHADE AAN APPARTEMENTSGEBOUW JEAN
DUBRUCCLAAN

Balkon tiende verdieping stort naar beneden
Tenth floor balcony collapses



Het instortende balkon sleurde de balkons eronder mee.
Foto: Backaert Didier

Belgium 2015



4 doden en 14 gewonden na instorting balkon in Frankrijk

4 dead, 14 injured after balcony collapse in France

In Frankrijk zijn vier doden gevallen bij de instorting van een balkon van een appartementsgebouw. Veertien anderen raakten gewond. Het ongeval vond plaats tijdens een housewarming in de stad Angers.

Wat een gezellige housewarming in een flat moest worden, is uitgedraaid op een ware nachtmerrie in Angers in het westen van Frankrijk. Toen zich even voor middernacht een tiental mensen buiten op het balkon bevond, donderde de constructie plots naar beneden. Vier mensen lieten het leven. Veertien anderen raakten gewond. Ze zijn naar het ziekenhuis gebracht. Sommigen zijn er erg arm toe, maar niemand zou zich in levensgevaar bevinden. De slachtoffers zijn allemaal studenten.

Het balkon bevond zich op de derde etage van een flatgebouw. In zijn val sleurde het de balkons van de lagere etages mee, maar die waren gelukkig leeg.

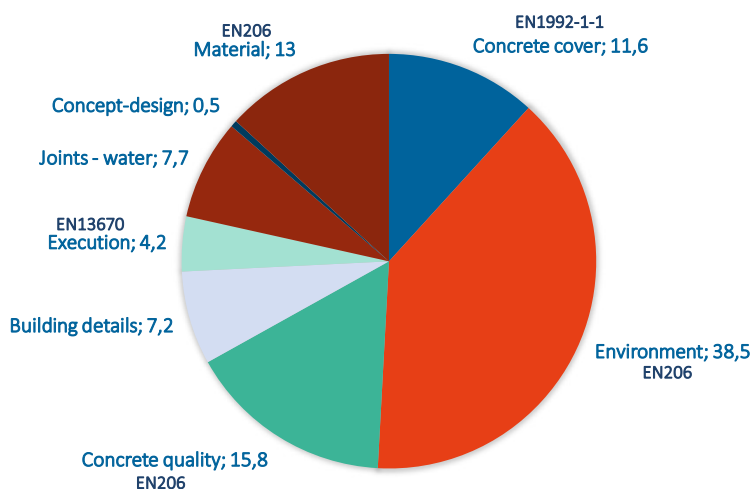
Het flatgebouw zelf is vrij nieuw. Volgens de prefectuur van Maine-et-Loire is het gebouw in de jaren 2000 geplaatst. De eerste vaststellingen wijzen niet op kwaad opzet. Waarschijnlijk gaat het dus om een ongeval.

France 2016



13

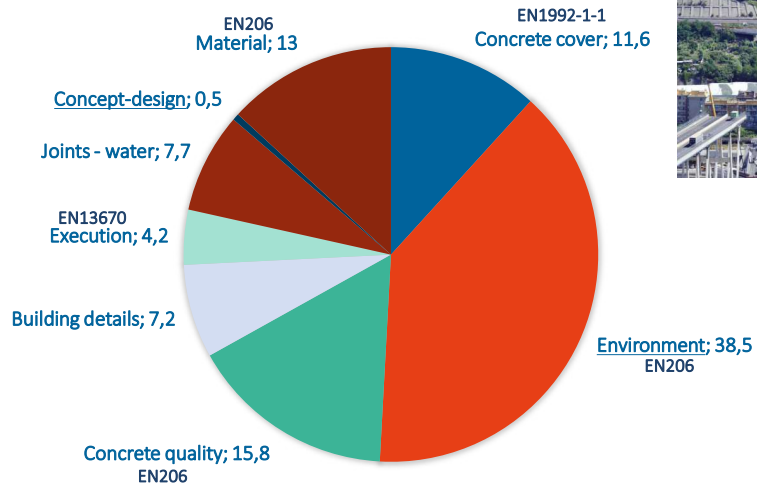
Damage of concrete structures – main factors/causes contributing to failure



► Jones et al. (1997). Development of a holistic approach to ensure the durability of new concrete construction. British Cement Association, Report C/21, pp.81.

14

Damage of concrete structures – main factors/causes contributing to failure



The New York Times

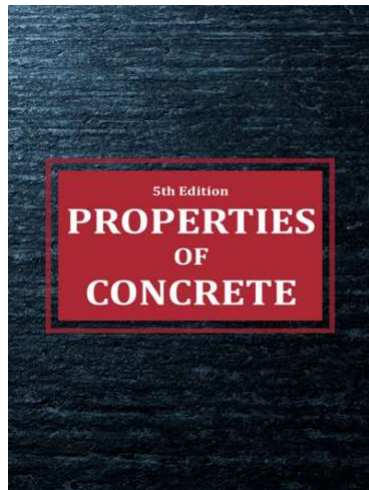
Poor Maintenance and Construction Flaws Are Cited in Italy Bridge Collapse

A report identified corroded cables as being to blame in the

► Jones et al. (1997). Development of a holistic approach to ensure the durability of new concrete construction. British Cement Association, Report C/21, pp.81.

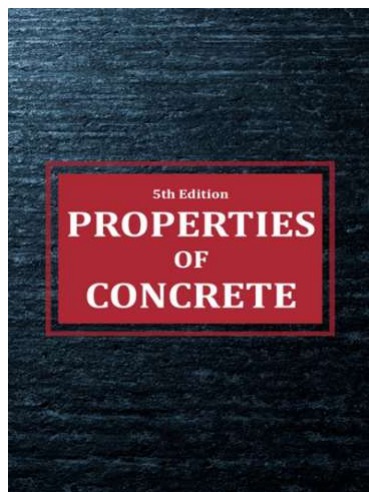


Basics of concrete technology...



“Every idiot can make concrete...”

Basics of concrete technology...



“Every idiot can make concrete.
The problem is: they do...”

A.M. Neville

Andrea from Roborst



19

The fun factor... or just plain ignorance



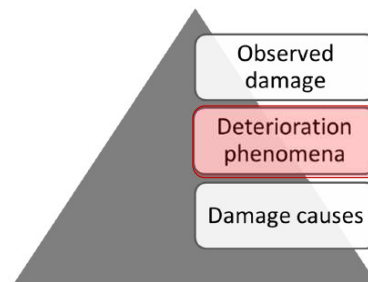
10 cm = 100 kg/m²
50 cm = 500 kg/m²



37 x 70 kg for 10 m² = 259 kg/m²

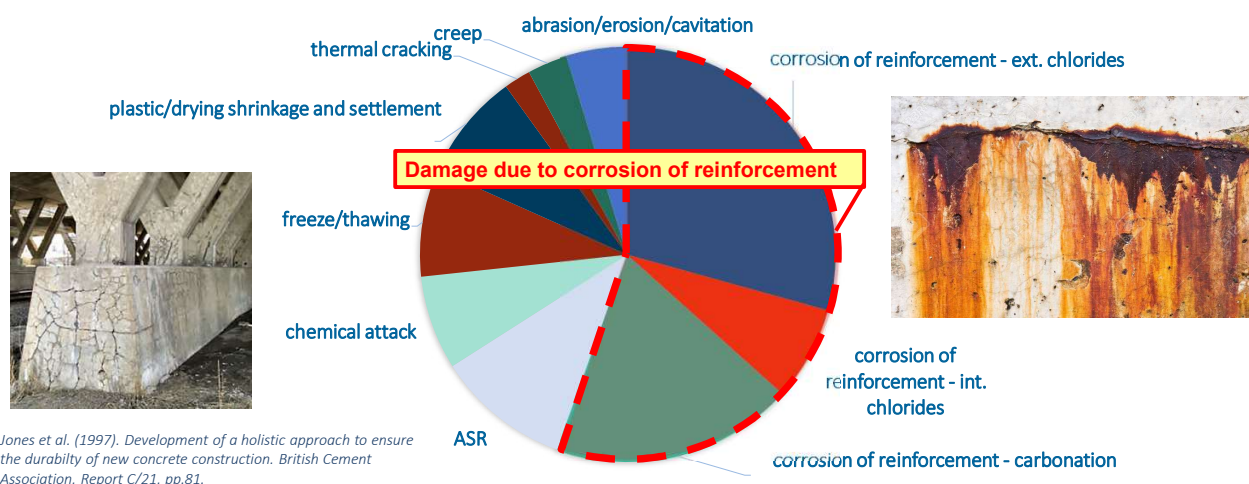
20

Damage of concrete structures – main factors/causes contributing to failure



21

Damage of concrete structures – deterioration processes/phenomena



22

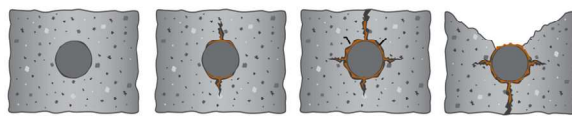
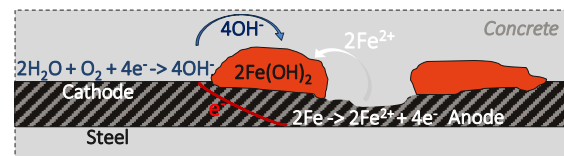
Corrosion of steel in concrete

- 1) H_2O (electrolyte)
- 2) O_2
- 3) Depassivation of steel
 - $pH < 9-10$ carbonation
 - $[Cl^-]/[OH^-] > 0,6$ chloride

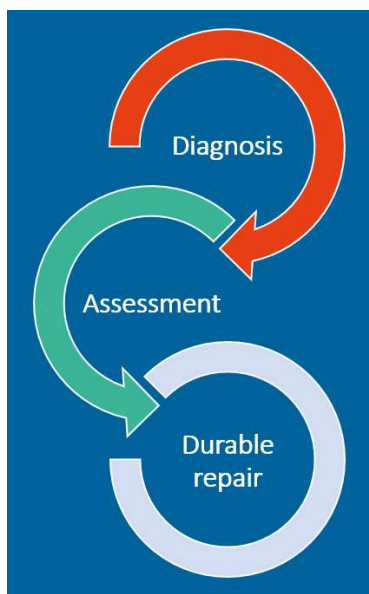
Electro-chemical process

Initiation -> propagation

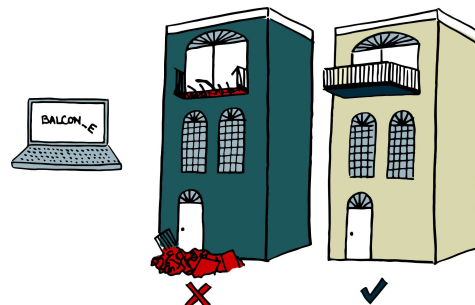
$Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_2O_3$ (rust)



PWO project 'Balcon-e': Diagnosis – assessment and durable repair of concrete balconies



2019-2021: Output (in Dutch) balcon-e.odisee.be



Diagnosis and condition assessment prior to the repair

Condition Assessment of Concrete Structures



Odisee
Universiteit
Antwerpen

25

Diagnosis and condition assessment prior to the repair

- **Condition assessment:** score (1-6) based on inspection and CSI
 - Based on NEN 2767
 - Severity of the defect: 1-2-3
 - Size of the defect: from incidental to general
 - Age of the defect/degree of deterioration: initial – advanced - final
 - Example: corrosion related damage (= **Severity** 3, e.g. corrosion related)

	Incidental <2%	Local 2-10%	Regular 10-30%	Substantial 30-70%	General >70%
In	1	1	2	3	4
Ad	1	2	3	4	5
Fin	2	3	4	5	6

Age
Degree























Size/Amount



Odisee
Universiteit
Antwerpen

26

Diagnosis and condition assessment prior to the repair

		CONDITION					
		1	2	3	4	5	6
ACTION	No action required						
	Restricted usage						
	Protective treatment						
	Repair damage						
	Strengthening						
	Replace/rebuild - demolish						

It's all about what you inspect ...
which is not allways what you expect

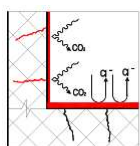


Towards a reliable, durable and sustainable repair strategy

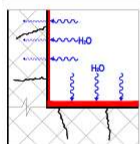


29

Protection and repair principles according to EN 1504-9



PRINCIPLE 1
Protection against ingress



PRINCIPLE 2
Moisture control



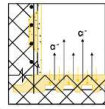
PRINCIPLE 3
Concrete restoration

Concrete damage	Reinforcement corrosion
1. Protection against ingress	7. Preserving or restoring passivity
2. Moisture control	8. Increasing resistivity
3. Concrete restoration	9. Cathodic control
4. Structural strengthening	10. Cathodic protection
5. Increasing physical resistance	11. Control of anodic areas
6. Resistance to chemicals	

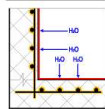
30

Protection and repair principles according to EN 1504-9

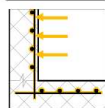
PRINCIPLE 7
Preserving or restoring passivity



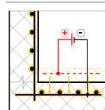
PRINCIPLE 8
Increasing resistivity



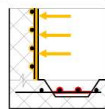
PRINCIPLE 9
Cathodic control



PRINCIPLE 10
Cathodic protection



PRINCIPLE 11
Control of anodic areas



Concrete damage

1. Protection against ingress
2. Moisture control
3. Concrete restoration
4. Structural strengthening
5. Increasing physical resistance
6. Resistance to chemicals

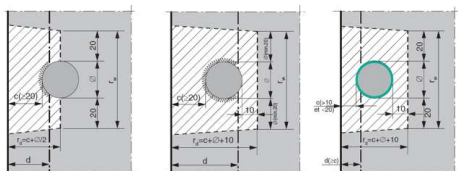
Reinforcement corrosion

7. Preserving or restoring passivity
8. Increasing resistivity
9. Cathodic control
10. Cathodic protection
11. Control of anodic areas

31

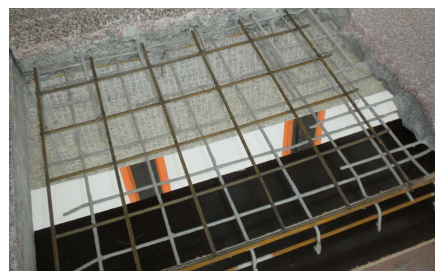
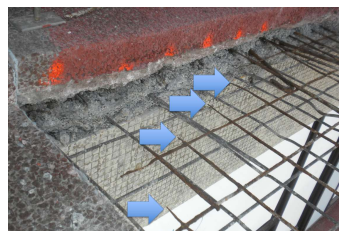
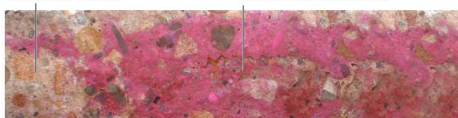
Patch repair and conventional repair

- Remove all contaminated concrete (carbonation – chlorides)
- Clean (+ protect + replace) rebars (Principle 4, 9)
- Repair mortar (patching, spraying, casting) (Principle 3, 7)
- Coating (Principle 1, 2, 8)



Carbonate van beton, geen passiveringbescherming
meer aanwezig (geen verkleuring)

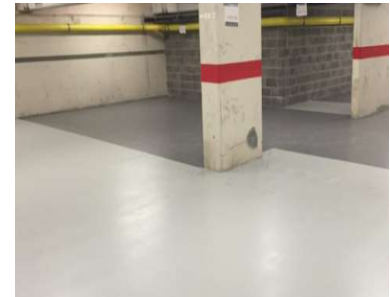
Passieve bescherming (bescherming tegen roest)
van het beton is nog in orde (rode kleur)



32

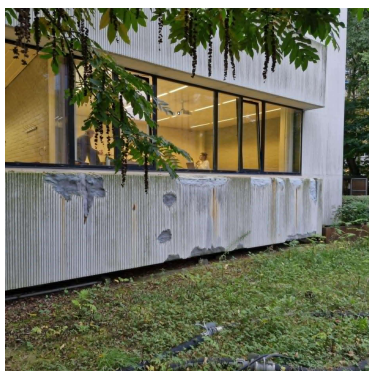
Patch repair and conventional repair

Systeemopbouw



33

Repair damage



CONREPNET (2007)

Premature failure
Service life extension concrete repair

> 25y: 10%

< 10y: 55%

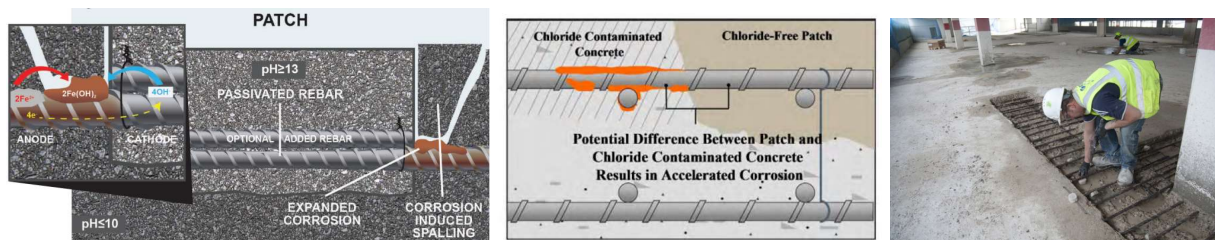
< 5y: 20%

"Inspection and diagnosis prior to the repair is essential in the entire process"

34

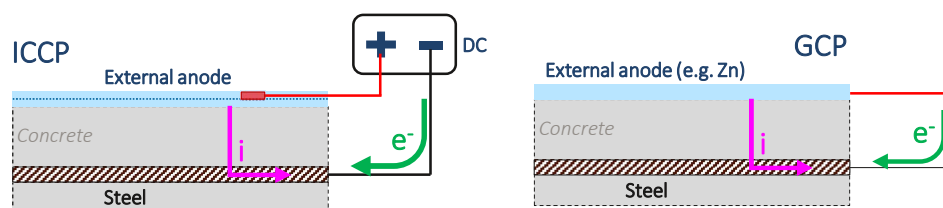
Repair damage: incipient anodes – ring anode – halo effect

- In case not all contaminated concrete is removed
- Macrocell activity – difference in E_{pot}
- Interface effects between repair material and parent concrete



35

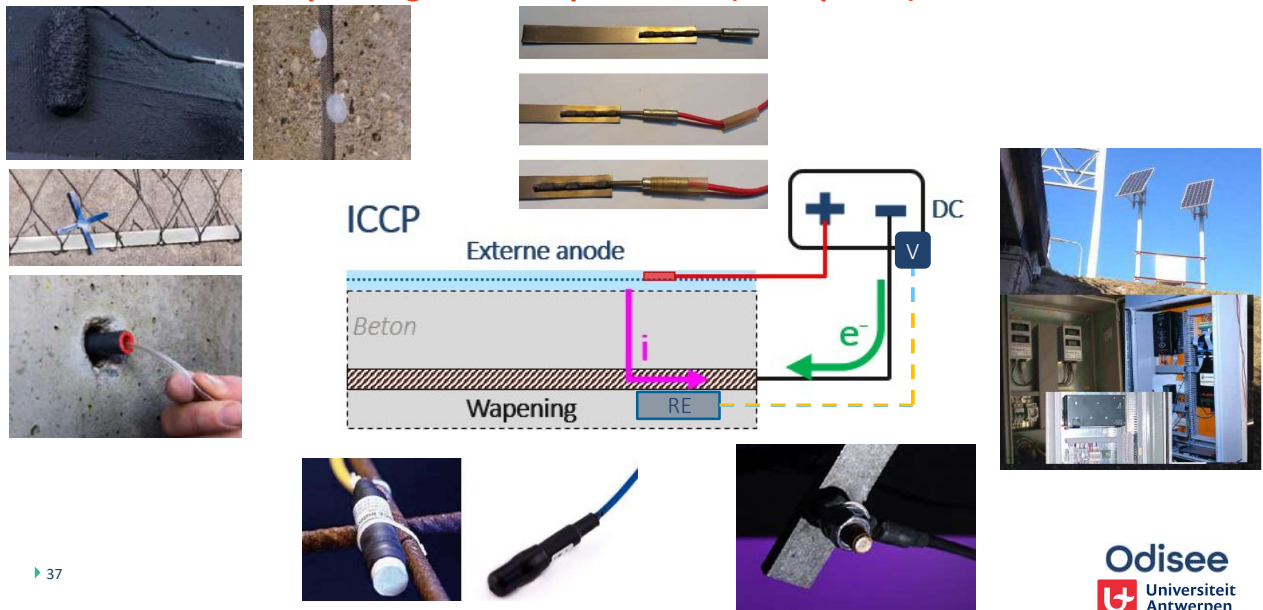
Electro-chemical repair, e.g. cathodic protection (Principle 10)



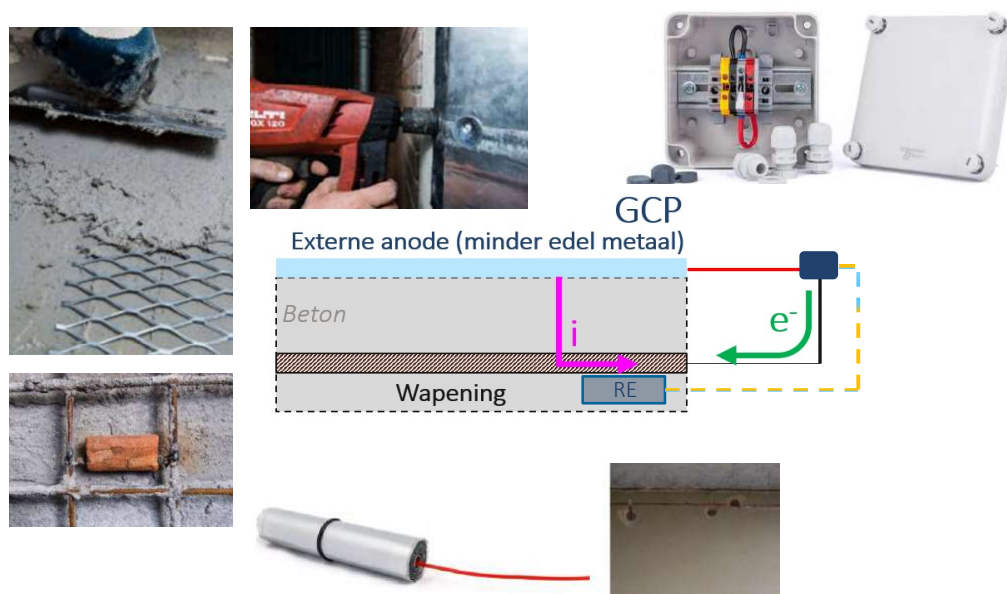
	ICCP			GCP	
	Titanium (TiMMO) mesh	Titanium (TiMMO) strips	Conductive coating	Zinc mesh	Zinc foil
Surface					
	In mortar overlay				
Drilled	Titanium (TiMMO) 'rod'	Ceramic TiO ₂ 'rod'		Prefab units with encasing mortar	Zinc anodes for embedding in mortar paste

36

Electro-chemical repair, e.g. cathodic protection (Principle 10)



Electro-chemical repair, e.g. cathodic protection (Principle 10)



Sloop zwembad Wervik nu echt begonnen



Radio2, 2nd of January 2023

Odisee
Universiteit
Antwerpen

39

Case Stadsschouwburg Antwerp (Belgium)



Antwerpse Stadsschouwburg gaat tegen de vlakte:
"Betonrot weghalen zou miljoenen kosten"

vrtnws, 16th of May 2022

Odisee
Universiteit
Antwerpen

40

Sommige bruggen hoeven helemaal niet zo snel te worden vervangen: 'Het is kapitaalvernietiging'

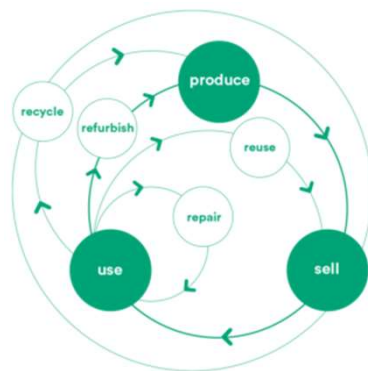
Gepubliceerd op 03-10-2024 om 14:36



Ter illustratie. © Foto: lv-infra

Grijp niet te snel naar de sloophamer. Ook niet als een brug of viaduct volgens de berekeningen onveilig is. Tests zoals proefbelasting vertellen namelijk een ander verhaal. Het kost wat, maar het vroegtijdige slopen van een kunstwerk kost een stuk meer, verzekert directeur Wouter van der Wiel van lv-infra.

Infrasite.nl, 3rd of October 2024



Odisee
Universiteit
Antwerpen

41

Sommige bruggen hoeven helemaal niet zo snel te worden vervangen: 'Het is kapitaalvernietiging'

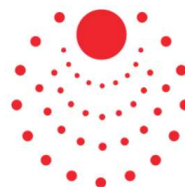
Gepubliceerd op 03-10-2024 om 14:36



Ter illustratie. © Foto: lv-infra

Grijp niet te snel naar de sloophamer. Ook niet als een brug of viaduct volgens de berekeningen onveilig is. Tests zoals proefbelasting vertellen namelijk een ander verhaal. Het kost wat, maar het vroegtijdige slopen van een kunstwerk kost een stuk meer, verzekert directeur Wouter van der Wiel van lv-infra.

Infrasite.nl, 3rd of October 2024

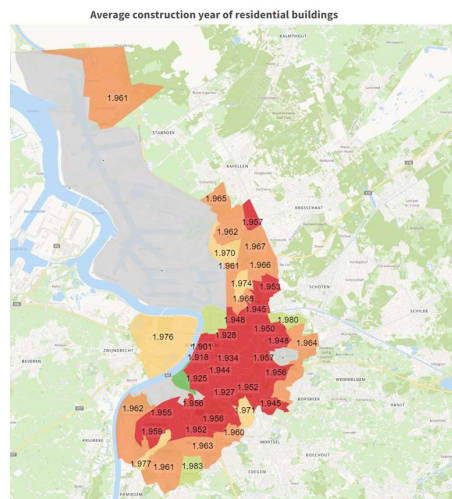


**CLINKER
CEMENT
CONCRETE
CONSTRUCTION
CARBONATION**

Odisee
Universiteit
Antwerpen

42

Case Stadsschouwburg Antwerp (Belgium)



43

Case Stadsschouwburg Antwerp (Belgium)



5. Wat brengt de toekomst?

"De prognose is dat we de komende jaren en decennia een golf van betonherstelprojecten op ons af zullen zien komen. Bij elk project beslissen om een gebouw af te breken en een nieuw te zetten, is geen goed idee."

Craeye erkent dat herstellen duur kan zijn, maar plaatst daar argumenten tegenover. "Er is meer dan geld alleen, er is ook een grote impact op het milieu. Als je elk gebouw met betonrot afbreekt, zit je met een gigantische hoeveelheid betonpuin. Geweldig duurzaam is dat niet."

Volgens Craeye is het daarom beter bij elk gebouw dat betonrot heeft na te gaan wat de beste oplossing is. "Eerst moet je de conditie in kaart brengen, is de constructie nog duurzaam en veilig? Zo ja, dan zijn verschillende herstelscenario's mogelijk, ook voor gebouwen die zwaar zijn aangetast."

vrtnWS, 16th of May 2022

44

Need for a durable and sustainable concrete repair strategy

- EU: 50% van budget/y → repair/rehab of concrete structures
- US: \$ 3 billion/y for maintenance bridges (2007)
- US: \$ 2.5 trillion/y = corrosion related (35% civil construction) (2016)

“ Financial and environmental burden for society ”

- European Green deal (EU)
- Vlaams Energie&Klimaatplan
Circulair Betonakkoord Vlaanderen (BEL)
- Milieutaks – CO₂ heffing



We moeten proberen om het zware werk niet af te schuiven op toekomstige regeringen en toekomstige generaties

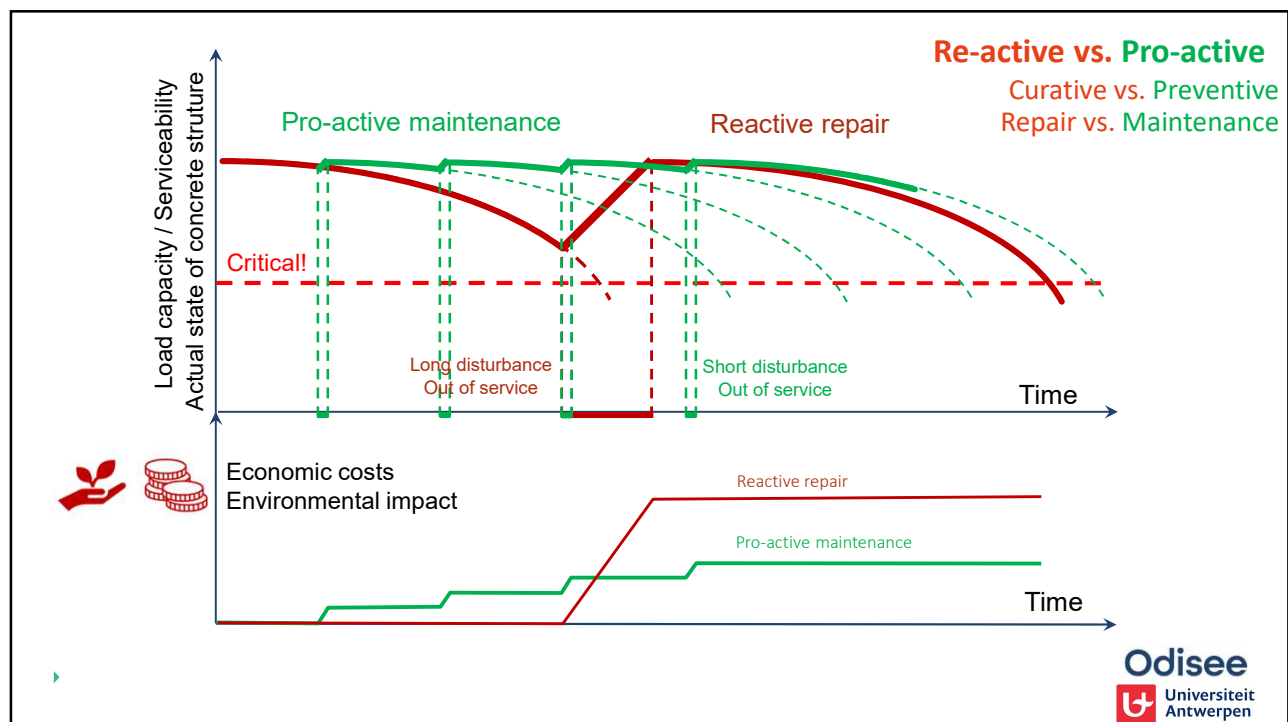
Joeri Roggeij, Grantham Institute, Imperial College London



CIRCULAIR
BETONAKKOORD
VLAANDEREN



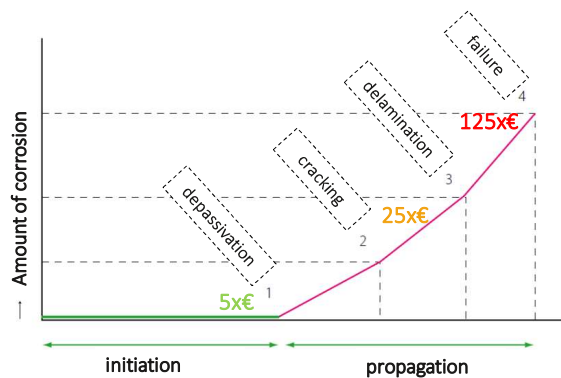
45



46

- Design – Build – Maintain – Operate

- Durable design and execution = €
- Unforeseen maintenance cost = 5 x €
- Repair cost = 25 x €
- Demolish and rebuild = 125 x €



De Sitter's Law of Fives

"If maintenance is not performed, then repairs equalling five times the maintenance costs are required. In turn, if those repairs are not affected, then renewal expenses can reach five times the repair costs. Therefore, postponing the maintenance compounds the amount of deferred maintenance".

\$1 spent on Monitoring
\$5 spent on Preventative Maintenance Before Corrosion Initiation

\$25 spent on Repair and Maintenance after Localized Corrosion Initiation

\$125 spent on Repair and Replacement after Generalized Corrosion

Source: W.R. de Sitter: Cost for Service Life Optimization: The Law of Fives. Durability of Concrete Structures: Workshop Report, Copenhagen 1984

47

Concrete structures rehabilitation decision making through LC(C)A

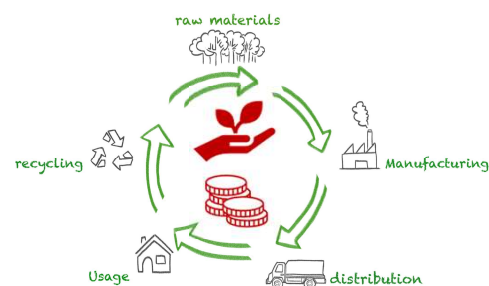
- Goal = sustainable maintenance and repair strategy for decision making within a life cycle strategy

- LCA: life cycle assessment
- LCCA: life cycle cost analysis



- PhD Neel Renne – UAntwerpen EMIB research group
neel.renne@uantwerpen.be

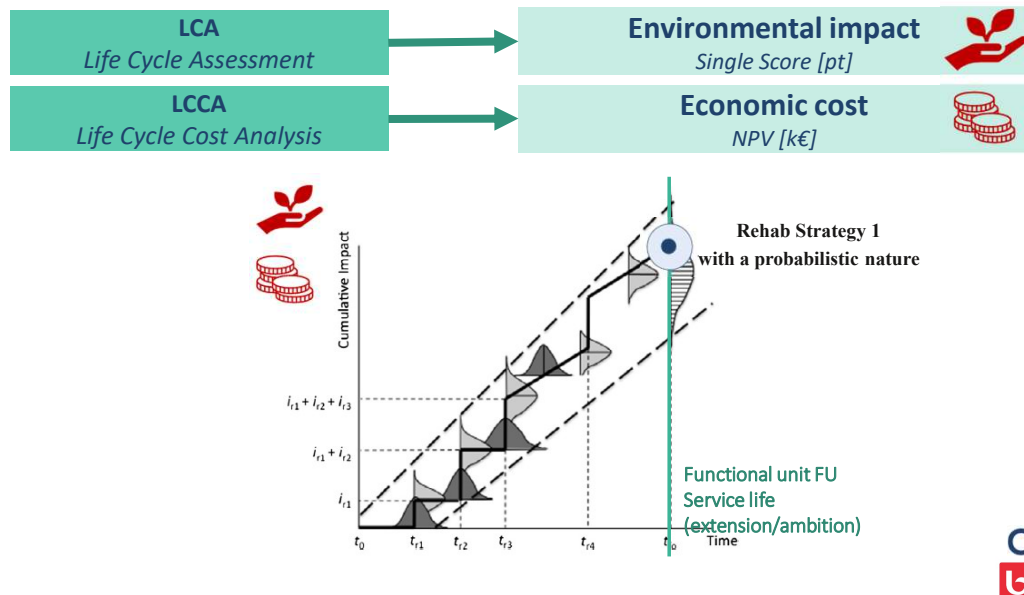
Renne et al. (2022). Sustainable assessment of concrete repairs through life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA). Infrastructures 7 (7100128)



▶ 48

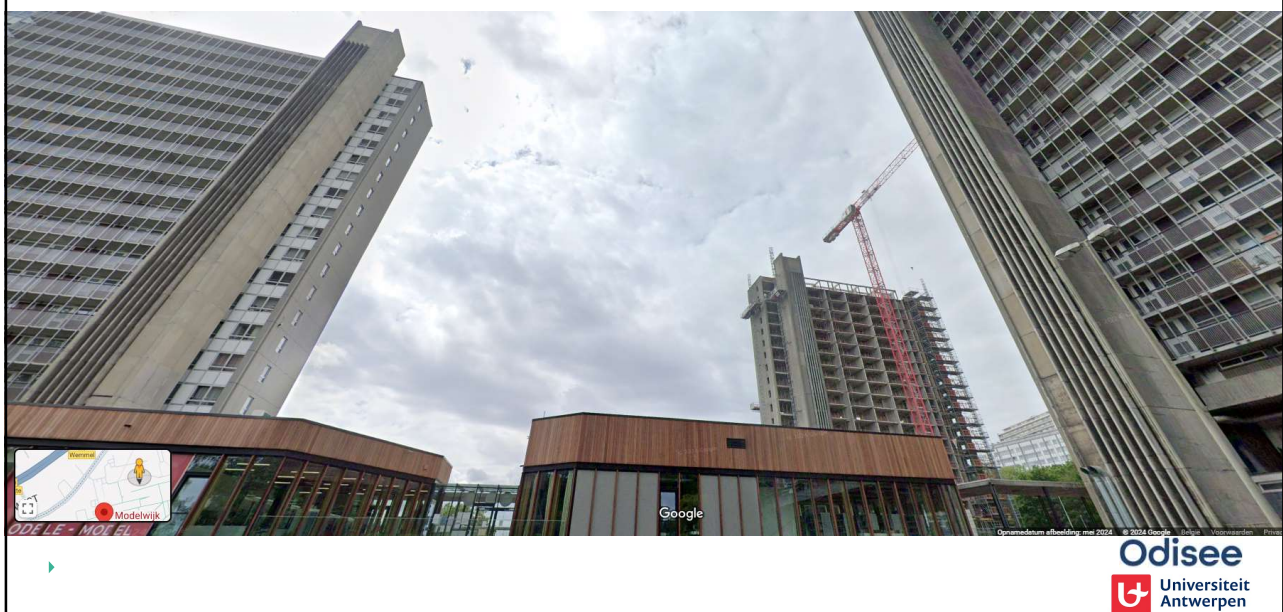
48

Life cycle assessment and life cycle cost analysis



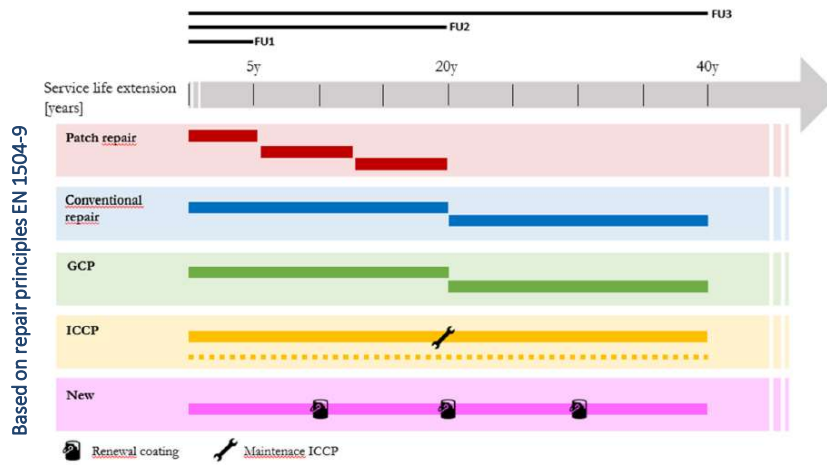
49

Case dependent strategy



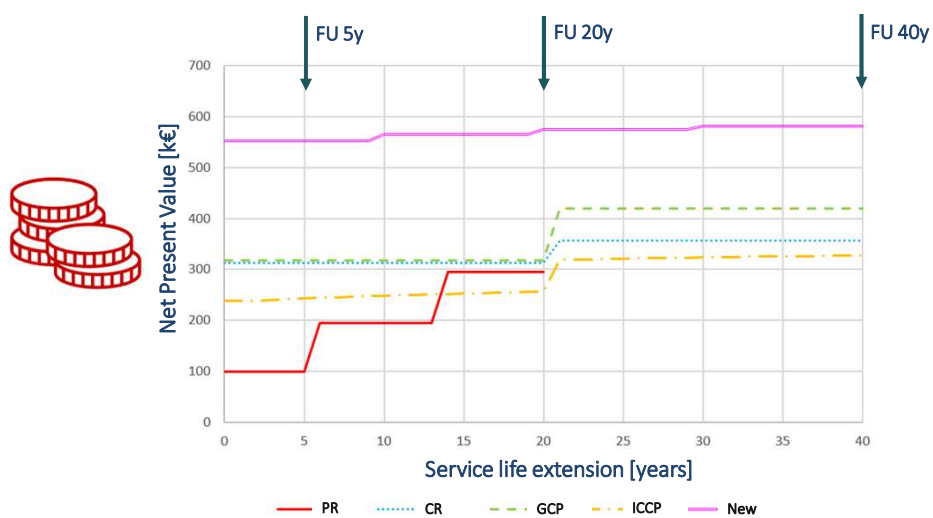
50

Case dependent strategy



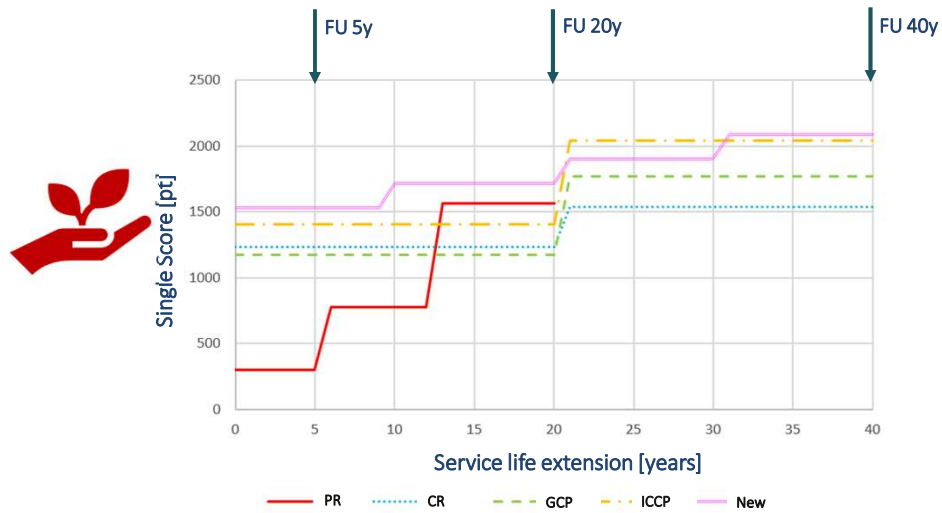
51

Case Modelwijk – LCCA



52

Case Modelwijk – LCA



53

Combining LCA and LCCA in the decision making process



54

Combining LCA and LCCA in the decision making process



Functional unit FU
Service life extension

Rehab Strategy 1

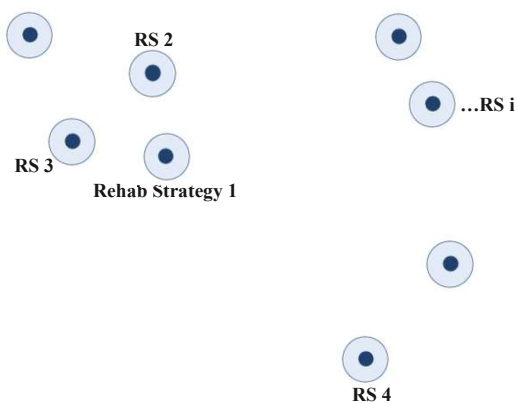


55

Combining LCA and LCCA in the decision making process

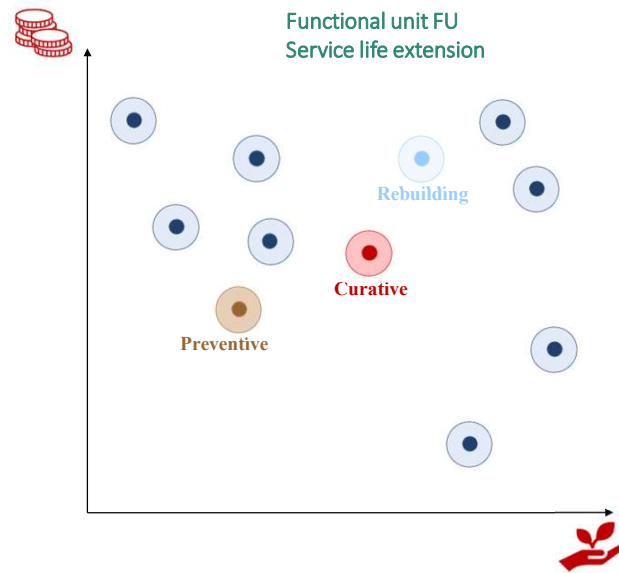


Functional unit FU
Service life extension



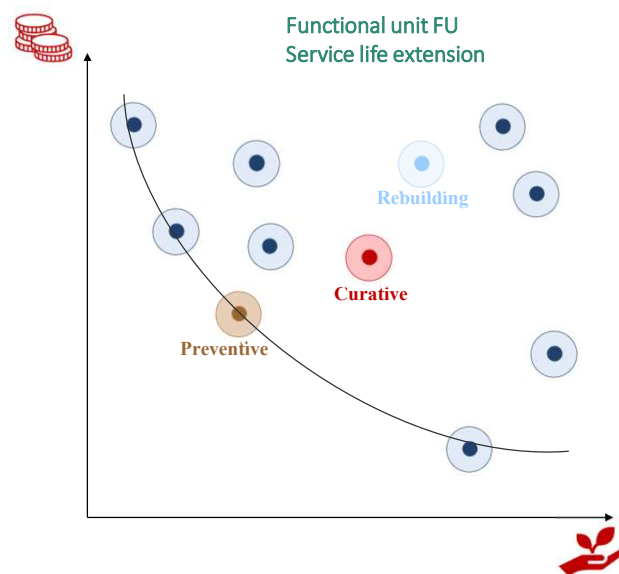
56

Combining LCA and LCCA in the decision making process



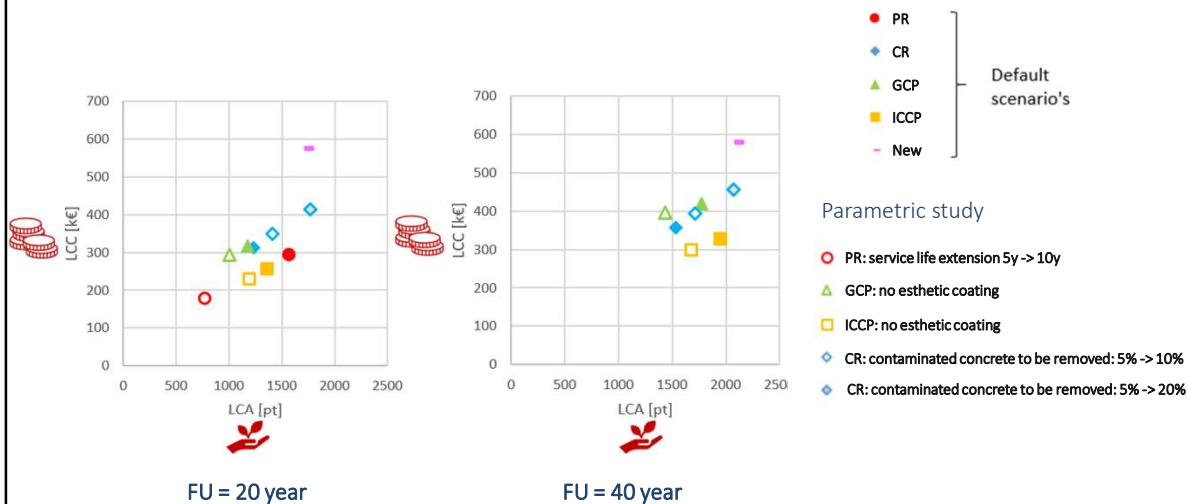
57

Combining LCA and LCCA in the decision making process



58

Case Modelwijk – LCCA vs. LCA



59

Wat brengt de toekomst?

Terwijl de vraag naar betonherstel anno 2020 alleen maar toeneemt, is het gebrek aan goed geschoolde beton-experten nijpend, merkt professor Craeye nog op. "Je zou met andere woorden kunnen stellen dat het beroep betonexpert een knelpuntberoep aan het worden is. Net nu er nood is aan vakbekwaam personeel, niet alleen in op het vlak van diagnose en inspectie, maar evenzeer in de uitvoering van betonherstel-projecten. Tot slot dringt ook een mentaliteitswijziging zich op. In plaats van een curatieve aanpak dient naar preventieve maatregelen en ingrepen. Op lange termijn kost van een preventieve aanpak met onderhoudskosten gespreid over een langere periode en met beperkte maatschappelijke impact lager dan een curatieve aanpak met zeer ingrijpende herstelwerken en bijhorende kostenplaatje", besluit professor Craeye.

K...
We zijn nooit sterk geweest in preventief onderhoud...
Leuk Beantwoorden 16 w 23

K...
Allez, straks spreken we van een pandemie
Leuk Beantwoorden 16 w 12

Harry
Proffesor beton?
Leuk Beantwoorden 16 w

60

60

A bridge too far?

Terwijl de vraag naar betonherstel anno 2020 alleen maar toeneemt, is het gebrek aan goed geschoolde beton-experten nijpend, merkt professor Craeye nog op. "Je zou met andere woorden kunnen stellen dat het beroep betonexpert een knelpuntberoep aan het worden is. Net nu er nood is aan vakbekwaam personeel, niet alleen in op het vlak van diagnose en inspectie, maar evenzeer in de uitvoering van betonherstel-projecten. Tot slot dringt ook een mentaliteitswijziging zich op. In plaats van een curatieve aanpak dient men over te stappen naar preventieve maatregelen en ingrepen. Op lange termijn ligt de investeringskost van een preventieve aanpak met onderhoud en meerdere kleinere kosten gespreid over een langere periode en met beperkte maatschappelijke impact lager dan een curatieve aanpak met zeer ingrijpende herstelwerken en bijhorend kostenplaatje", besluit professor Craeye.

GW
GROND/WEG/WATERBOUW

Magazines

► 61

—Platform over infrastructuur, ruimtelijke inrichting, civiele- en openbare werken—

Odisee
Universiteit
Antwerpen

61



Durable and sustainable service life extension of existing concrete structures:
A holistic approach within a life cycle perspective

Thank you for listening!










Odisee
UNIVERSITY COLLEGE

E

M

i

B

U

University of Antwerp
EMIB | Energy and Materials
in Infrastructure and Buildings

62