



**Institute of Construction and Architecture**  
**Slovak Academy of Sciences**  
**Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava 45**



# **Zachytávanie uhlíka vo výrobe zeleného betónu: princípy a perspektívy**

*Martin T. Palou*  
[martin.palou@savba.sk](mailto:martin.palou@savba.sk)



# Betón

Betón, ktorý používa  $\text{CO}_2$  pri výrobe

# Terminológia a otázky

- **Obehové hospodárstvo verzus lineárne hospodárstvo**
- **uhlíková neutralita a uhlíkové hospodárstvo**
- **CCU a CCS**
- **Kde nájdeme CO<sub>2</sub> keby sme ho chceli?**
- **Je CO<sub>2</sub> nepriateľ alebo surovina?**

# Čo je to obehové hospodárstvo?

Obehové hospodárstvo je model výroby a spotreby, ktorý zahŕňa zdieľanie, opätovné používanie, opravy, renováciu a recykláciu existujúcich produktov a materiálov v (takmer) uzavretom okruhu, ktorého cieľom je zachovať najvyššiu úžitkovú hodnotu tak dlho, ako je to možné. Týmto spôsobom sa predlžuje životný cyklus výrobkov, aby sa znížila spotreba surovín a produkcia odpadu.

Keď produkt dosiahne koniec svojej životnosti, zdroje, ktoré ho tvoria, sa udržia v ekonomickom cykle. Môžu sa teda znova a znova použiť na obnovenie hodnoty.

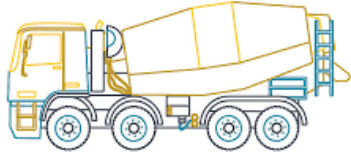
Príklad obehového hospodárstva v stavebníctve



# Transportbetón



# Demolácia



# Štrk a drvené kamenivo



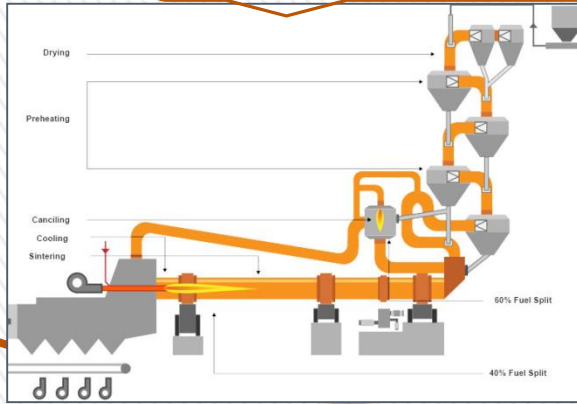
# Výroba agregátov



Zložka surovínovej zmesi na výpal cementu



# Cement



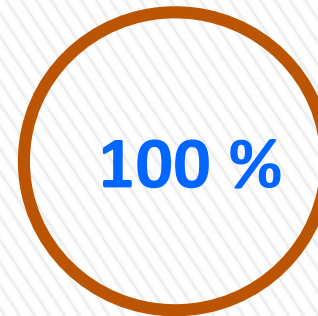
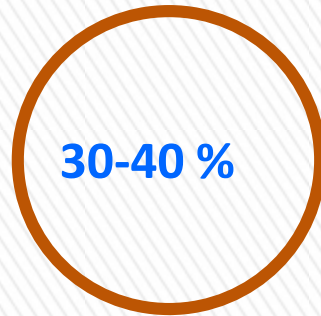
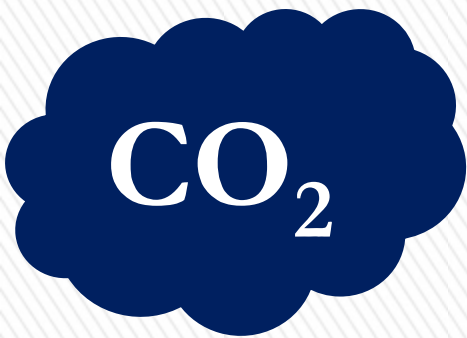
# Uhlíkové hospodárstvo (Zachytávanie, opätovné použitie a skladovanie uhlíka)

- **Carbon Capture and Use (CSU)**
- **Carbon Capture and Storage (CSS)**

*Cieľom je dosiahnuť uhlíkovú neutralitu*



# Čo je uhlíková neutralita?



1990



2030



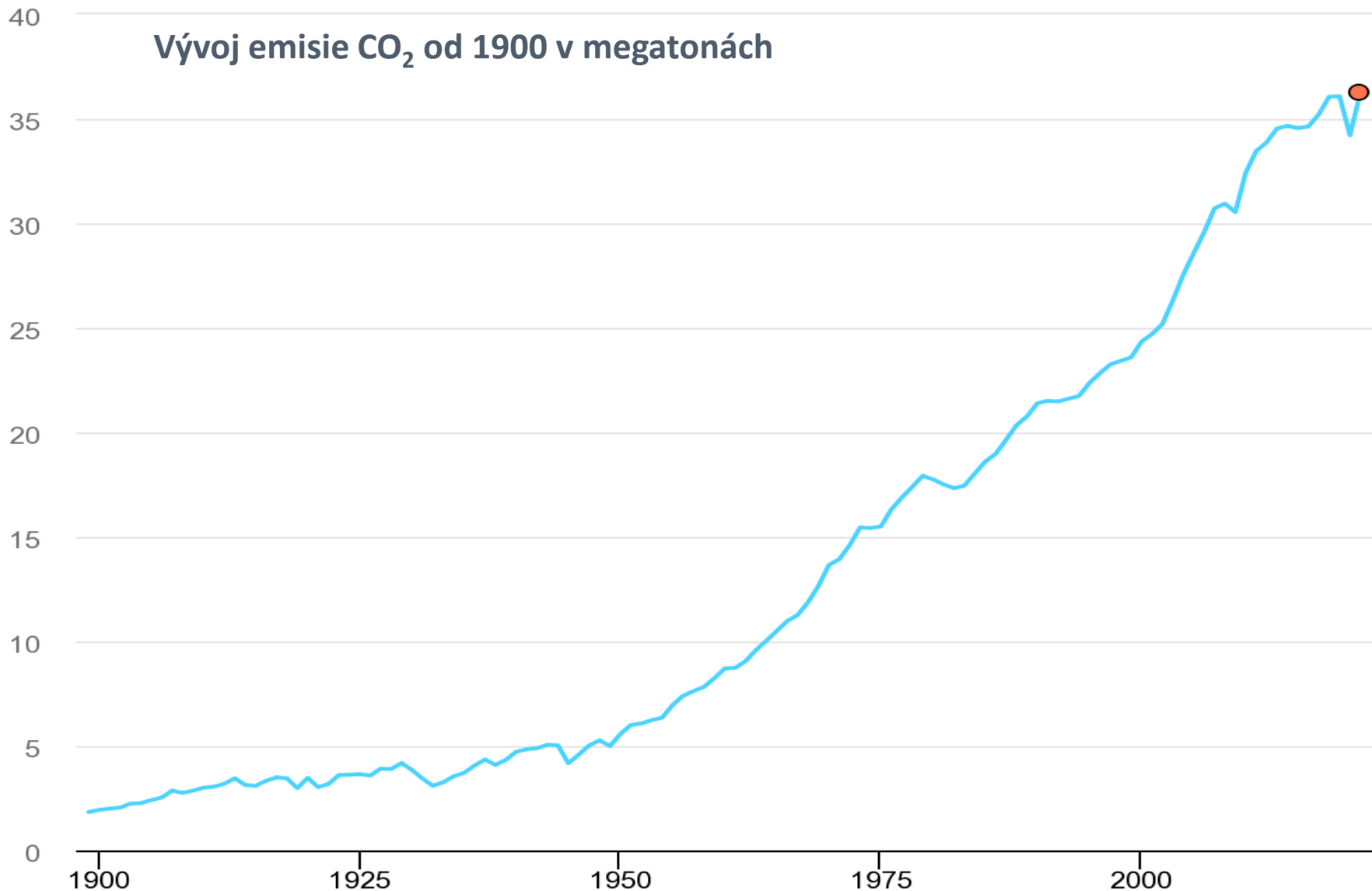
2050



- ❖ Nízko-uhlíkové cementy
- ❖ Nízko-uhlíkové palivá
- ❖ Nízko-uhlíkové betóny
- ❖ Vývoj zelených betónov
- ❖ Vývoj technológie zachytávania CO<sub>2</sub>

Implementácia technológie zachytávania CO<sub>2</sub>

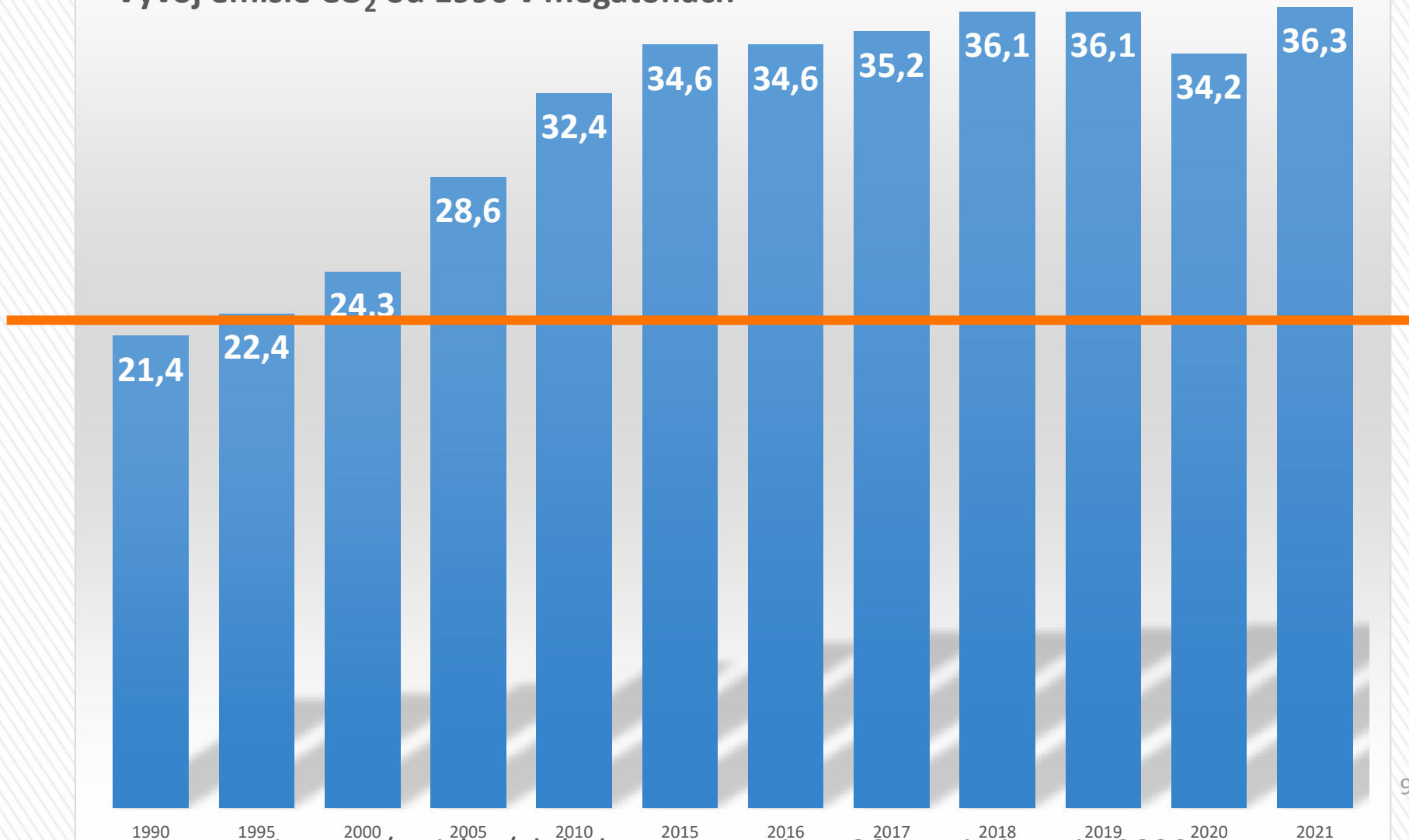
# Vývoj emisie CO<sub>2</sub> od 1900 v megatonách





- 7-10 % emisií zodpovedá cementárenský priemysel

Vývoj emisie CO<sub>2</sub> od 1990 v megatonách



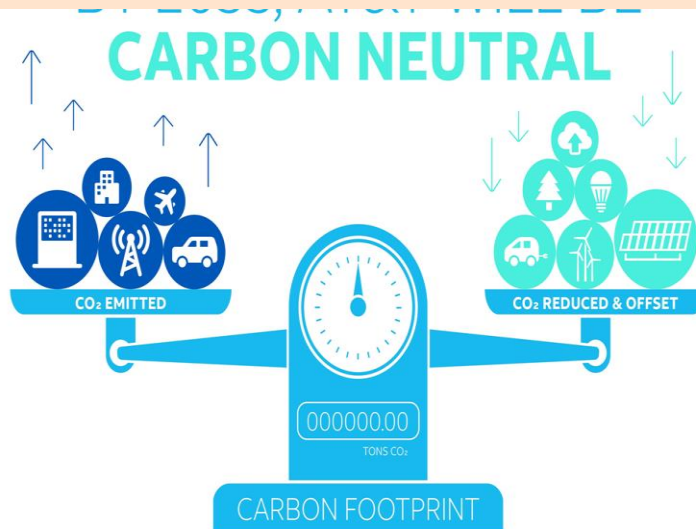
[www.iea.org/articles/global-energy-review-CO<sub>2</sub>-emissions-in-2020](http://www.iea.org/articles/global-energy-review-CO2-emissions-in-2020)

# Uhlíková neutralita

Nerovnováha v současnosti



Koľko sme produkovali, toľko  
sme absorbovali  
2050



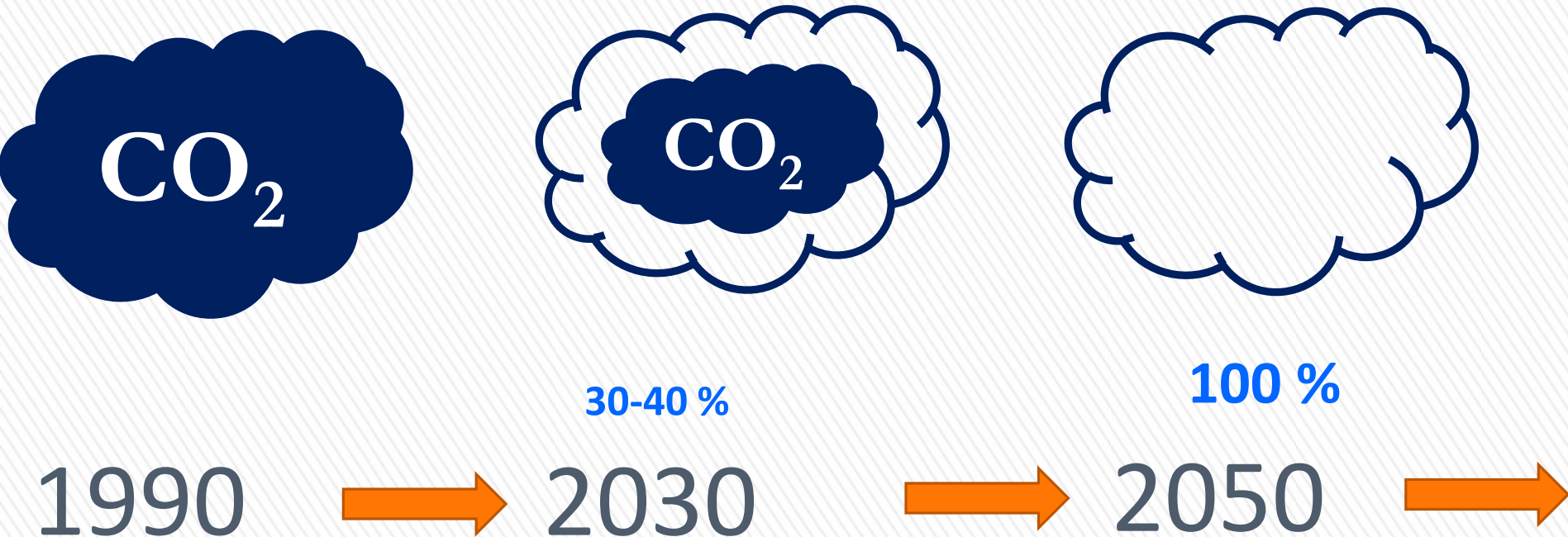
19,0 Gt CO<sub>2</sub>

36,3 Gt CO<sub>2</sub>

# Uhlíková neutralita

11

## Cestná mapa v cementárenském a stavebném priemysle



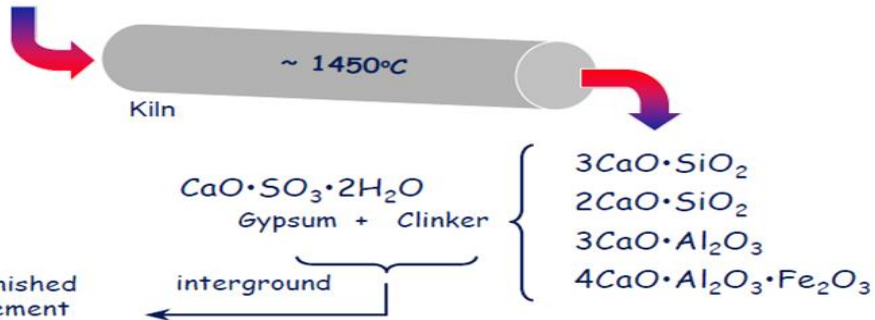
- ❖ Nízko-uhlíkové cementy
- ❖ Nízko-uhlíkové palivá
- ❖ Nízko-uhlíkové betóny
- ❖ Vývoj zelených betónov
- ❖ Vývoj technológie zachytávania CO<sub>2</sub>

Implementácia technológie  
zachytávania CO<sub>2</sub>

- Materiálová spotreba
- Energetická spotreba



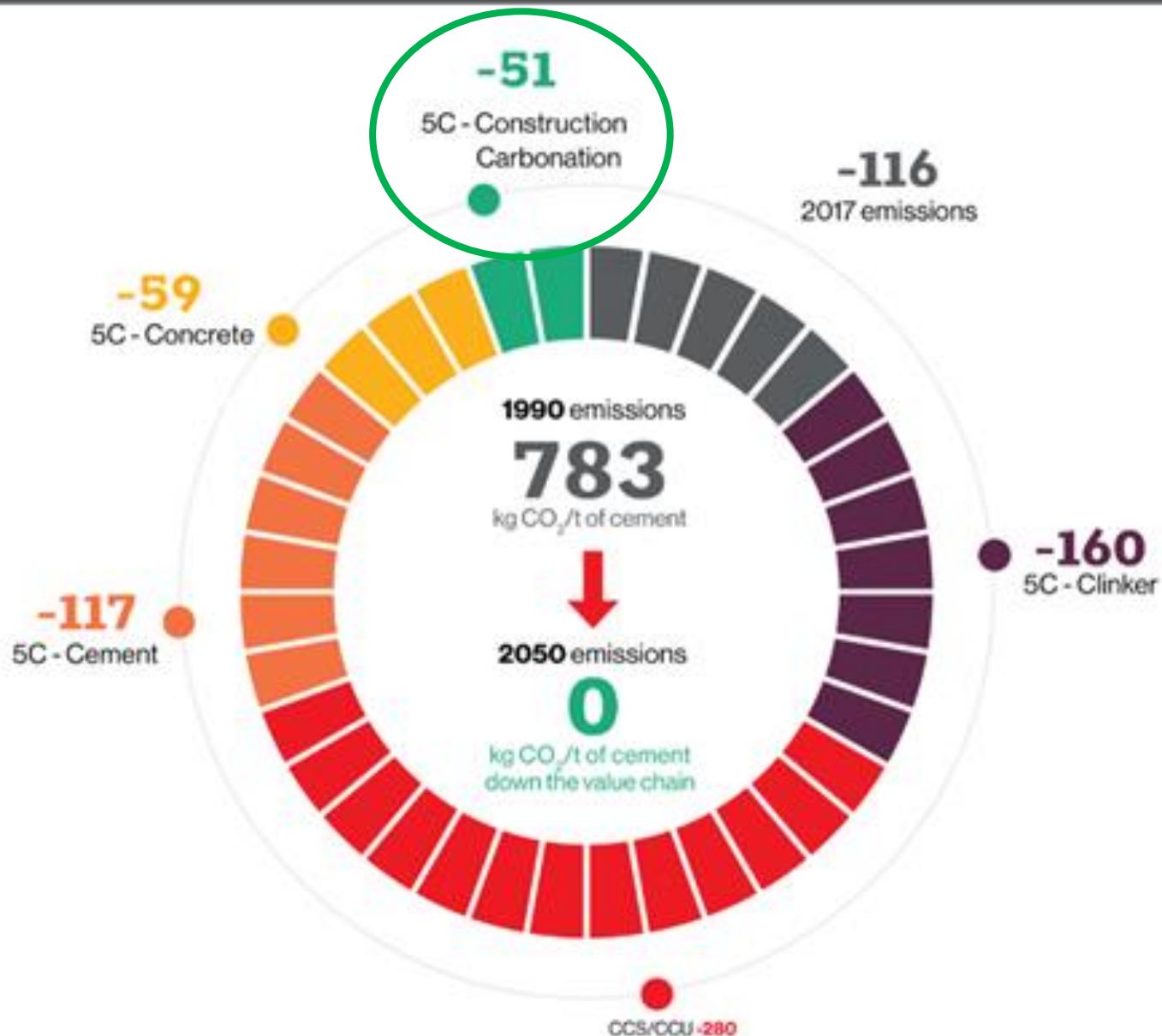
$\text{CaCO}_3$  (limestone)  
 $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (clay, shale)  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (iron oxide)  
 $\text{SiO}_2$  (silica sand)



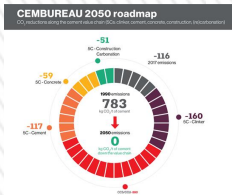
*4 miliardy ton cementu*  
*= 20 miliárd tón betónu*  
*= 2,5 miliárd ton  $\text{CO}_2$  v*  
*roku 2020.*

# CEMBUREAU 2050 roadmap

CO<sub>2</sub> reductions along the cement value chain (5Cs: clinker, cement, concrete, construction, (re)carbonation)







1990: 783 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

## Plán na 5 C

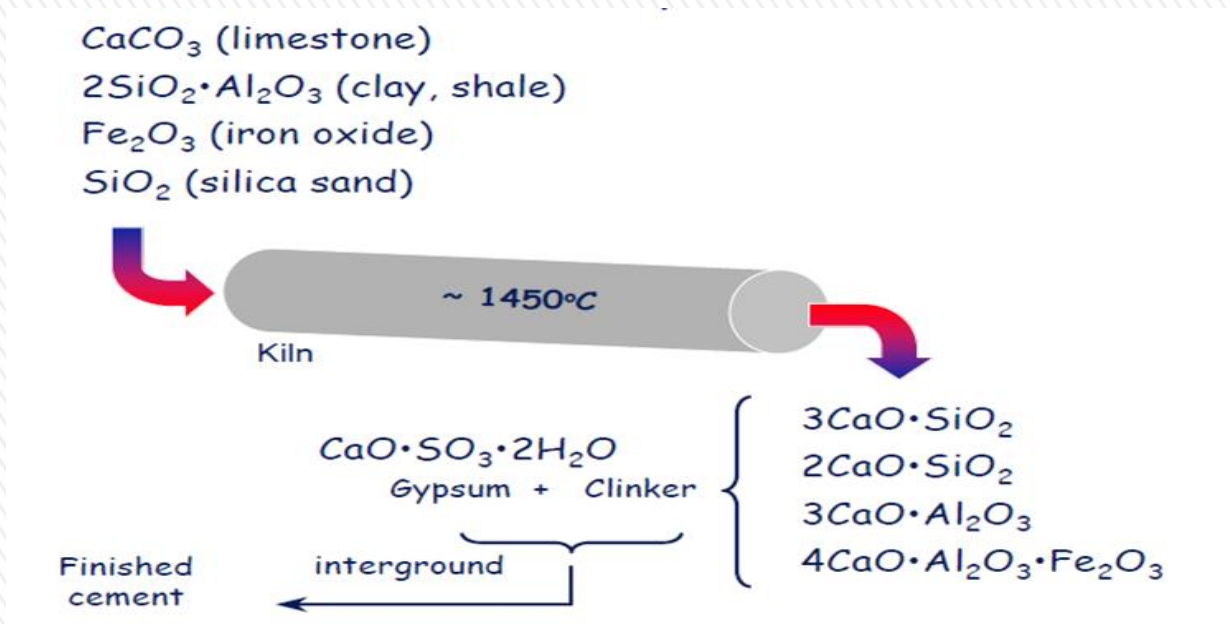
1. Clinker: slinok -160 kg CO<sub>2</sub>/t cementu
2. Cement: cement - 117 kg CO<sub>2</sub>/t cementu
3. Concrete: betón - 59 kg CO<sub>2</sub>/t cementu
4. Construction Carbonation: karbonatácie budov- 51 kg CO<sub>2</sub>/t cementu
5. CCS/CCU -280 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

V roku 2017 plán znižovania uhlíka bol prekročený o 116 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

$$160 + 117 + 59 + 51 + 280 + 116 = 783 \text{ kg CO}_2/\text{t cementu}$$

## 1. C –Clinker: slinok -160 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

Cement = slinok + sadrovec



1. Využitie alternatívnych surovín
2. Využitie alternatívnych palív
3. Modernizácia zariadenia

## 2. C-Cement: cement - 117 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

Vývoj nových druhov kompozitných cementov a spojív využitým sekundárných surovín

**1 typ  
cementu**



**27 typov  
cementu**



**39 typov  
cementu**

### 3. Concrete: betón - 59 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

Betón sa vyrába z

- **cementu,**
- vody,
- hrubých a jemných kamenív,
- prímiesí a prísad.



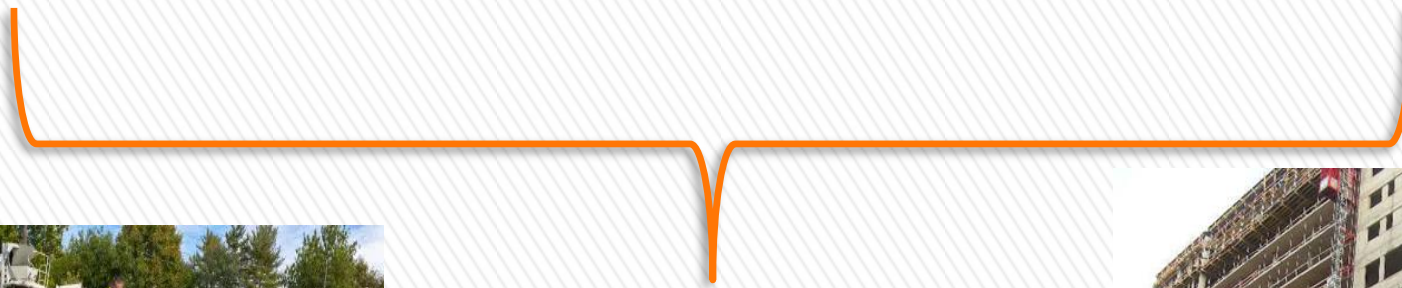
Prísady





# 4. Construction Carbonation: karbonatácie budov

- 51 kg CO<sub>2</sub>/t cementu



CaCO<sub>3</sub> pevná fáza a nerozkladá sa pri izbovej teplote.  
Permanentná sekvestrácia



# Fenolftaleínova skúška – odhad pH a hĺbky karbonatácie

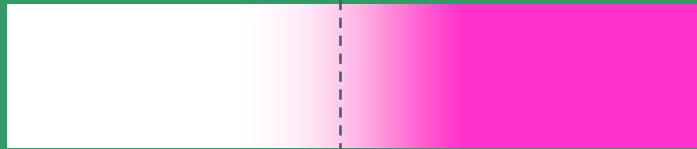
Farba vodných roztokov - pH

„bezf“

pH  $\leq 8.2$

fialová

pH  $\geq 10$



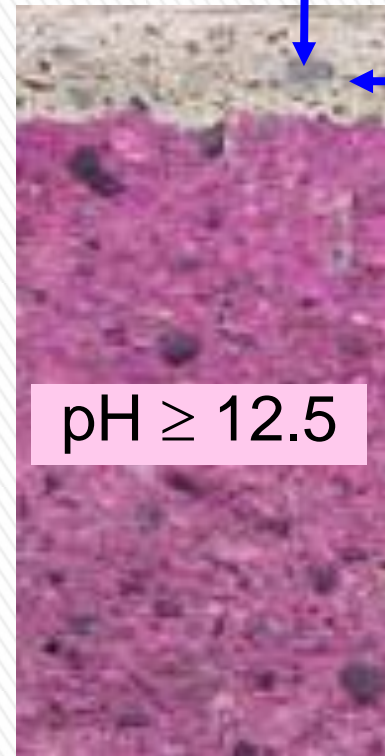
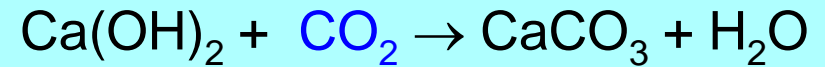
pH  $\cong 9$

Fenolftaleín  
pH indikátor

Nanáša sa na  
čerstvú lomovú  
plochu betónu

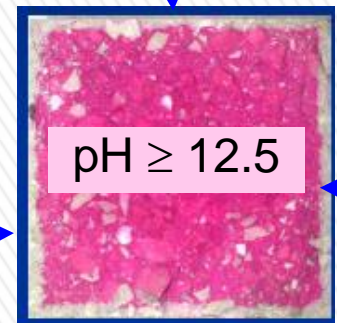


Povrchová skarbonatizovaná  
vrstva betónu



pH  $< 9$

pH  $\geq 12.5$



pH  $\geq 12.5$

Vnútrotná nekarbonatizovaná  
časť

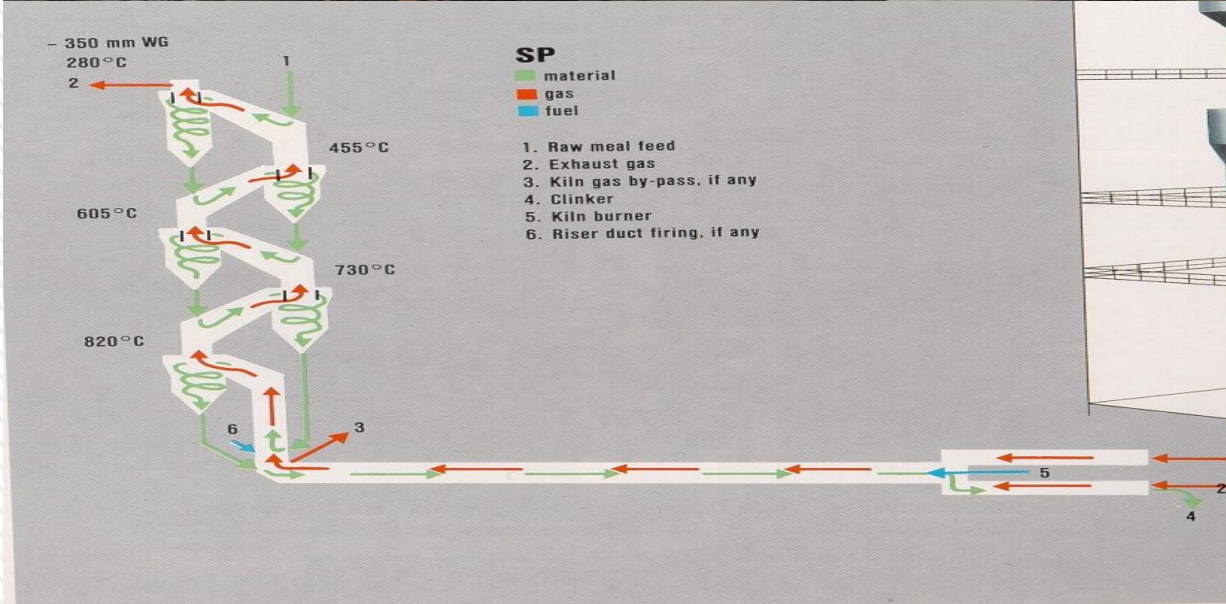
# 5. CCS/CCU -280 kg CO<sub>2</sub>/t cementu

## Zachytávanie CO<sub>2</sub> v cementárenskom priemysle

Súčasná technológia výroby cementu neumožňuje efektívne zachytiť CO<sub>2</sub>



Cementáreň Rohožník

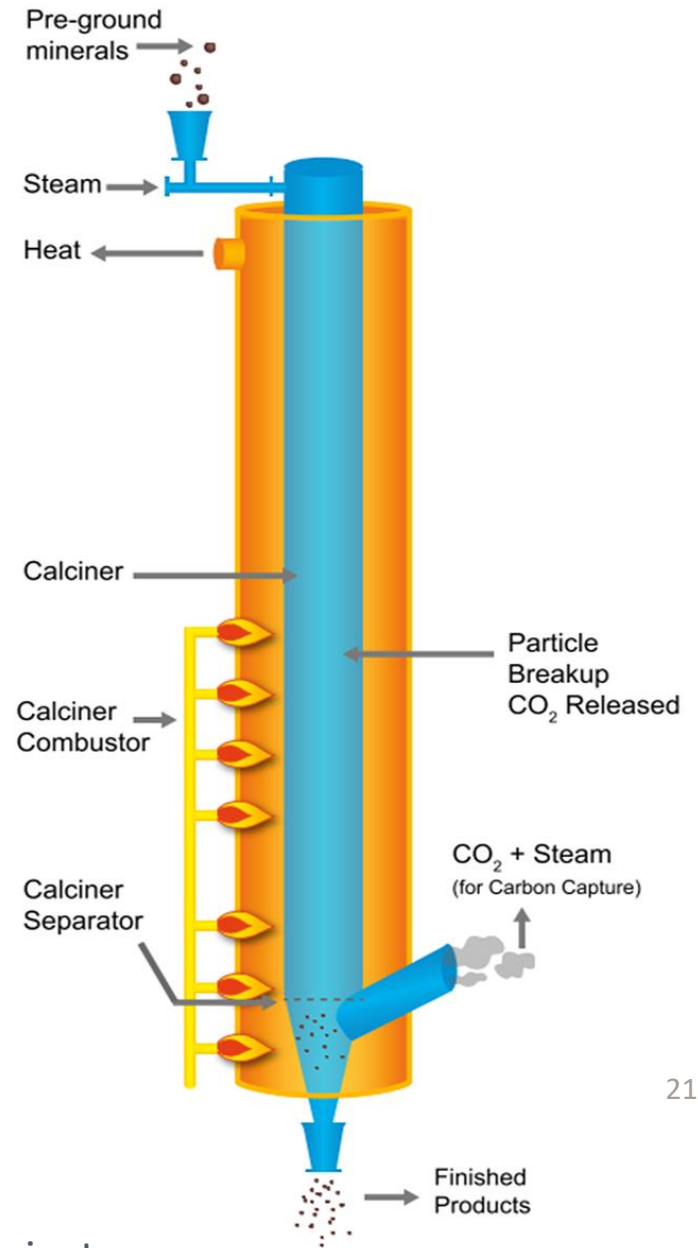




# Zmena technológia výpalu slinku

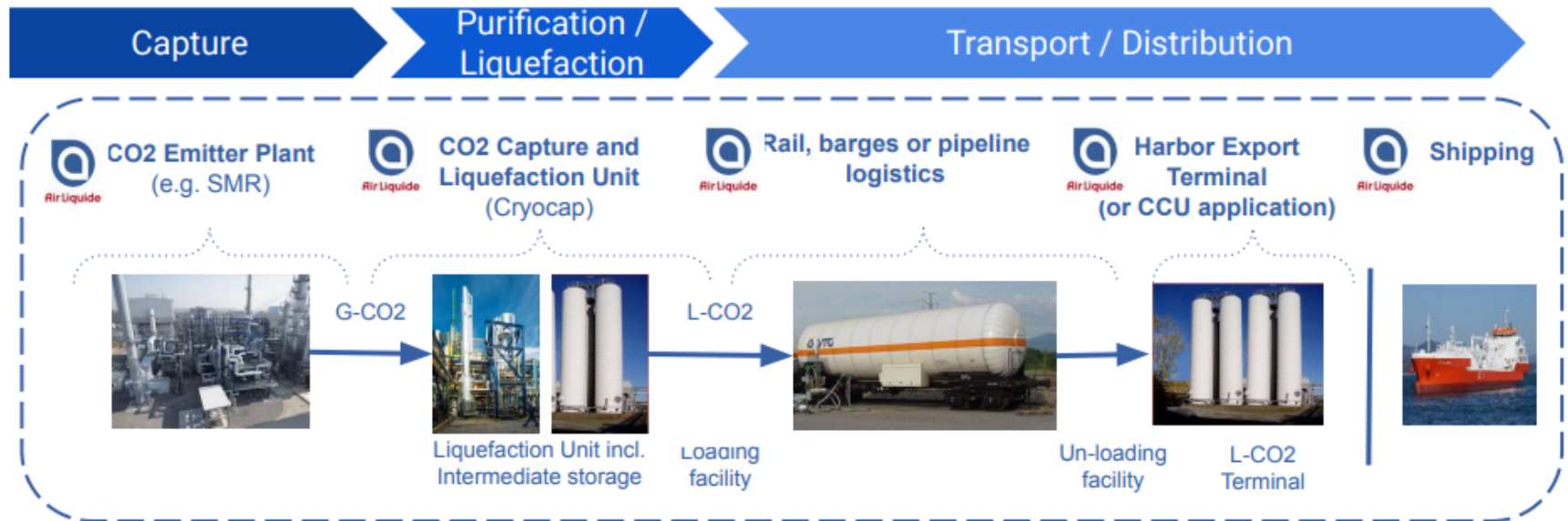


Technológia zachytávania CO<sub>2</sub> v cementárni Heilderberg  
<https://www.heidelbergcement.com/en/leilac-research-project>



# Technológia zachytávania, očistenia, skvapalnenia , doprava a skladovania

## Air Liquide - A key Player in the CCUS value chain



### Air Liquide expertise along the value chain:

- Various CO2 capture technologies (Cryocap FG/Oxy, Amine wash, Rectisol)
- CO2 compression, liquefaction and storage expertise
- Pipeline network operations

THIS DOCUMENT IS PUBLIC

AIR LIQUIDE, A WORLD LEADER IN GASES, TECHNOLOGIES AND SERVICES FOR INDUSTRY AND HEALTH

February 2021

S. Ruban • Air Liquide Engineering & Construction

From capture to storage, CO2 cryogenic technologies & logistic chain

**Air Liquide**  
ENGINEERING & CONSTRUCTION



## Revolúcia v boji proti globálnemu otepľovaniu: vývoj a výroby vysávačov CO<sub>2</sub>

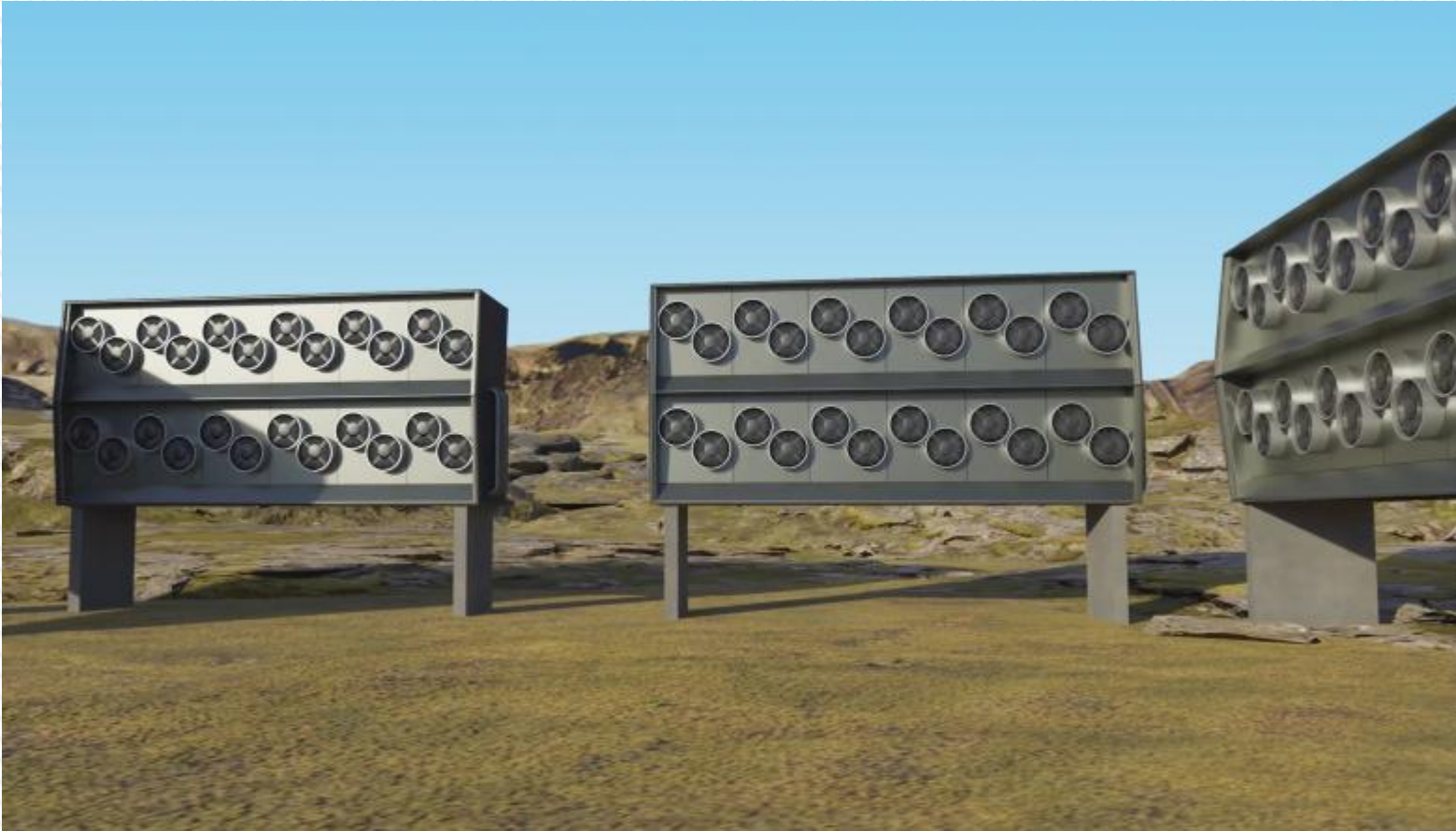
Toto riešenie, ktoré nie je príliš jednoduché, navrhli **Christoph Gebald a Jan Wurzbacher**, dvaja inžinieri zo Švajčiarskeho federálneho technologického inštitútu v Zürichu (ETHZ). [École polytechnique fédérale de Zurich \(EPFZ\)](#)



Osemnásť vysávačov CO<sub>2</sub> na streche spaľovne Hinwil (ZH). Od ich inštalácie v roku 2017 zachytávali 900 ton CO<sub>2</sub>, čo je ekvivalent emisií približne 30 domácností.



# Carbon Capture Vysávač CO<sub>2</sub>



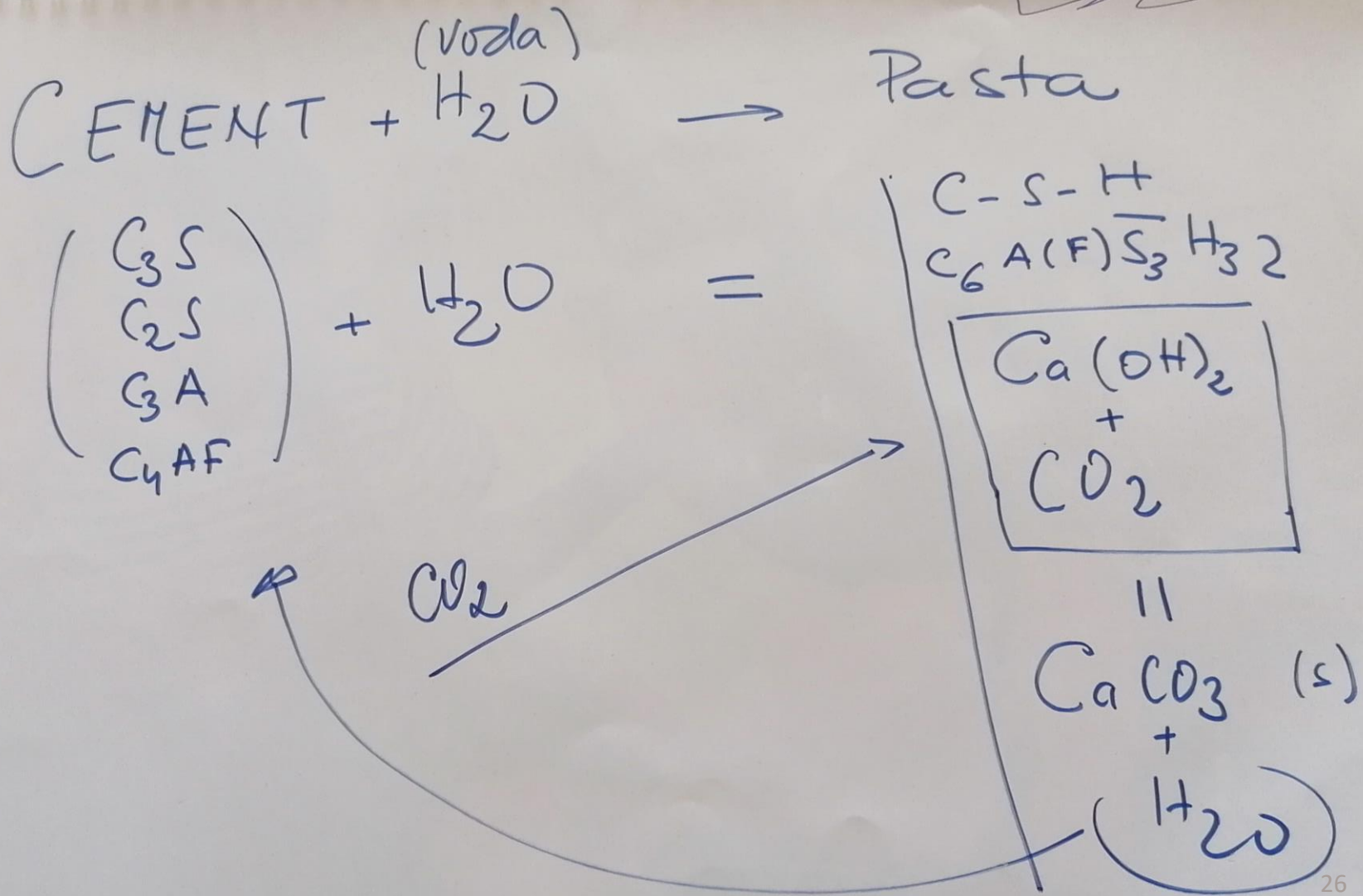
V roku 2020 spoločnosť Climeworks posunula zachytávanie oxidu uhličitého na ďalšiu úroveň na Islande, kde spoločnosť stavila nové, oveľa väčšie zariadenie. S názvom „Orca“, ktoré natrvalo a bezpečne odstráni 4 000 ton atmosférického oxidu uhličitého za rok.



# Betón

Betón, ktorý používa  $\text{CO}_2$  pri výrobe

# Chémia reakcie cementu s vodou



# Chémia reakcie cementu s vodou



$\text{CaCO}_3$  pevná fáza a nerozkladá sa pri izbovej teplote.

Permanentná sekvestrácia



# CO<sub>2</sub> Betón sa vyrába z

- cementu,
- vody,
- hrubých a jemných kamenív,
- prímiesí a prísad.
- CO<sub>2</sub> vo forme plynov alebo kvapaliny



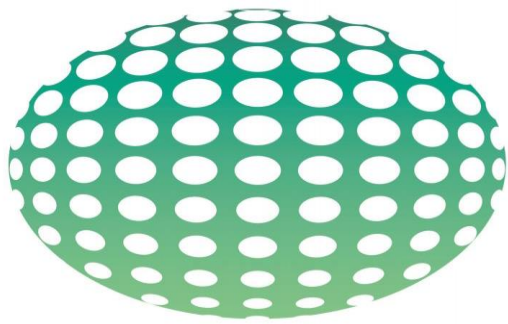
Prísady



CO<sub>2</sub>







# Solidia Technologies



**CO<sub>2</sub> komora pre vytvrdenutie  
betónových výrobkov**







Betónové tvárnice



Plotové tvárnice



Betónové tvárnice



Zatrávňovacia tvárnica

# CO<sub>2</sub> v kvapalnej forme



[CarbonCure Technologies | Reducing Carbon, One Truck At A Time](#)



# CO<sub>2</sub> stanica na betonárke





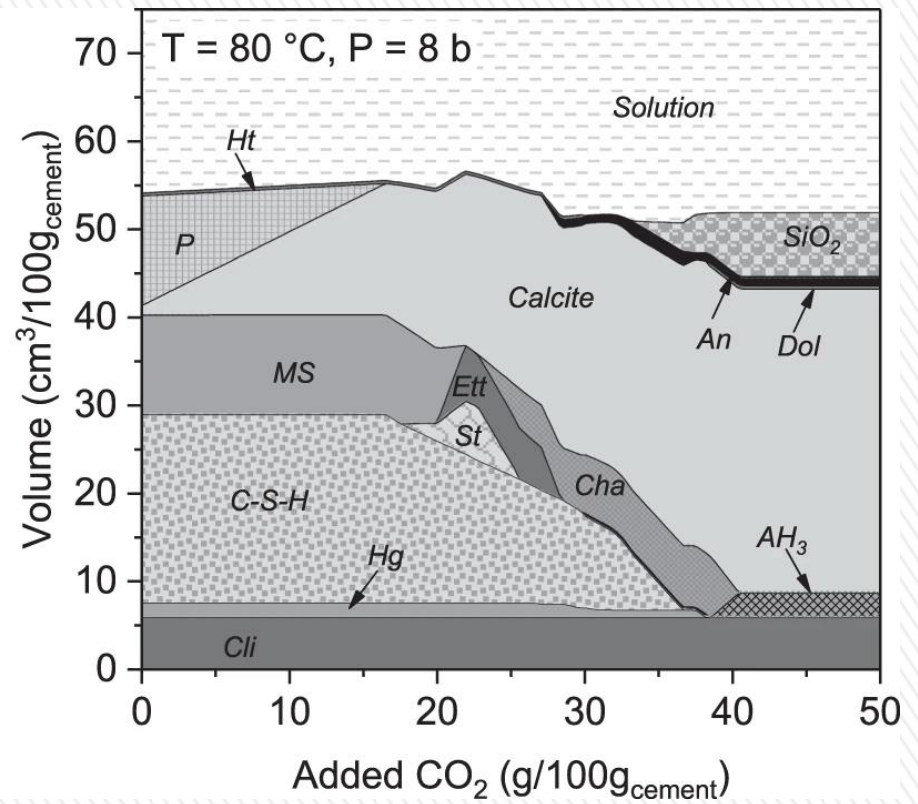
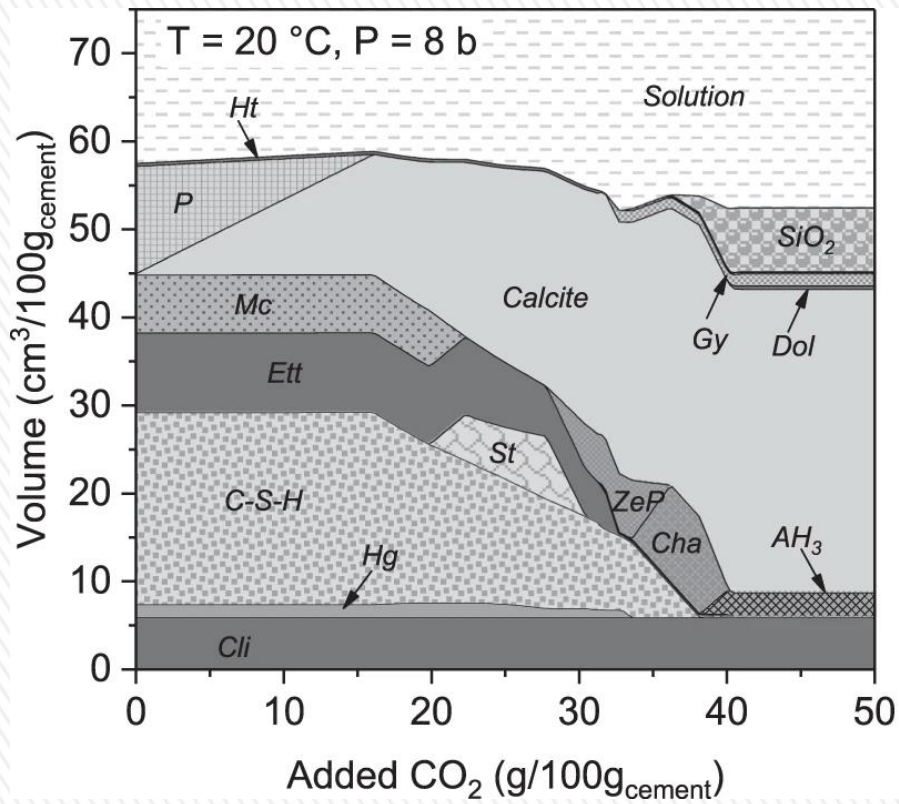
# Letisko Calgary USA





# Betón

Na pôde Ústavu stavebníctva a  
architektúry, SAV



<https://www.nature.com/figure/2> | Scientific Reports (nature.com)

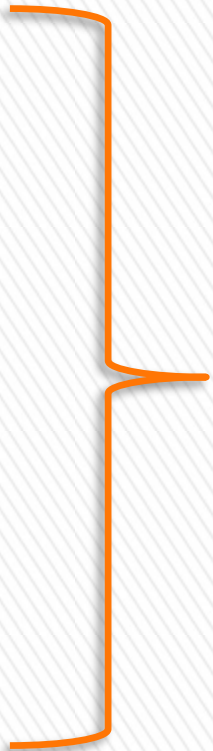


**CO<sub>2</sub> Betón** sa vyrába z cementu, vody, hrubých a jemných kamenív, prímiesí a prísad.

- CO<sub>2</sub> vo forme plynov



VID\_20210428\_105829.mp4



Prísady



Ošetrovanie v CO<sub>2</sub> komore



Ošetrenie v klimatizovanej komore

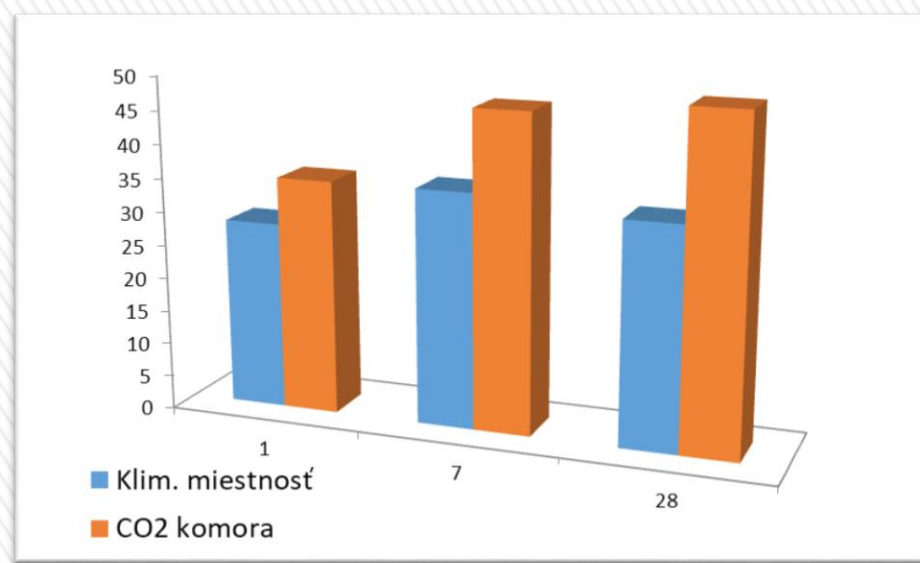
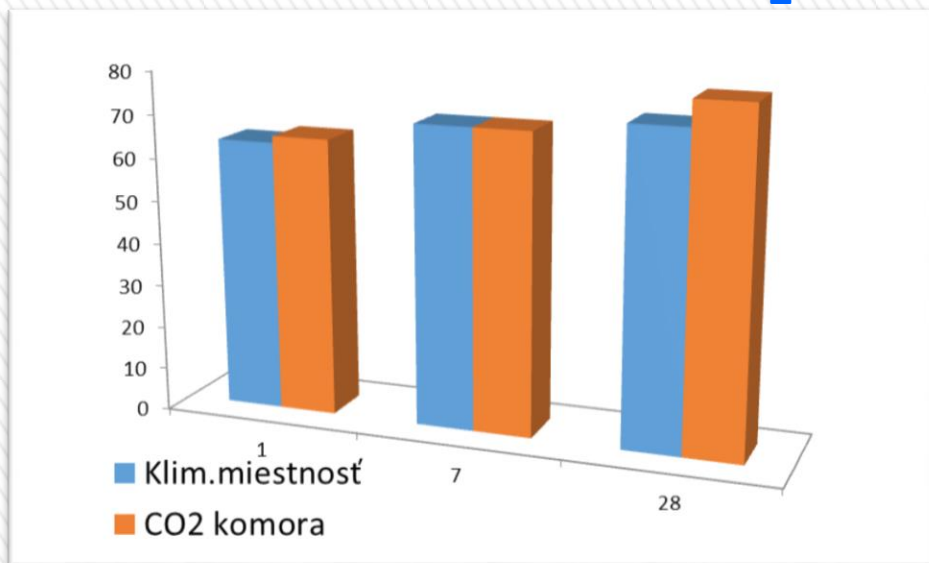


Test mechanických vlastností



Vytvrdenutie výrobkov v CO2 komore zvyšuje mechanické pevnosti

## Príprava vzoriek bez CO<sub>2</sub>



## Príprava vzoriek s CO<sub>2</sub>



# Sledovanie dlhodobej trvanlivosti výrobkov v laboratóriu



Ťažký  
CO<sub>2</sub>  
betón



# Sledovanie dlhodobej trvanlivosti výrobkov v prírode







Ďakujem za pozornosť