

OST
Ostschweizer
Fachhochschule

OptimiX

Tobias Gnos¹, Robin Vetsch¹, Simone Stürwald², Elin Brood²

17. Juni 2024

¹ICE Institut für Computational Engineering, ²IBU Institut für Bau und Umwelt

Agenda



Einführung Beton



Ziele Optimix



Datenverarbeitung



Verwendete Modelle



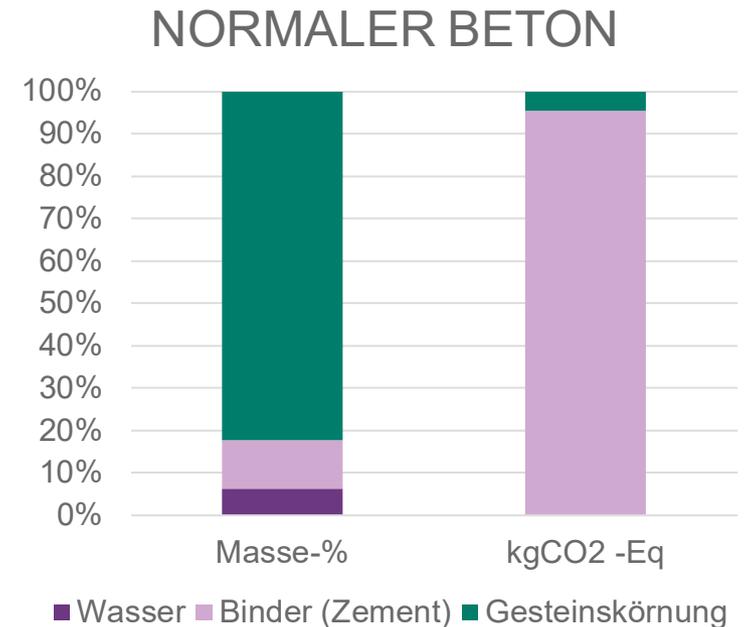
Outlook / Optimierung

Einführung Beton



Motivation

- Die Zementindustrie ist ein wichtiger Verursacher von Kohlenstoffemissionen: **8 % der weltweiten CO₂-Emissionen** stammen aus der Zementindustrie
 - Die Schweizer Klimastrategie will bis 2050 netto null erreichen
 - Änderungen der Normen ermöglichen leistungsbezogene Mischungen → neue Zemente und Zusatzstoffe können zugelassen werden
- Ein Ziel der Zementindustrie ist es, den Zementanteil in Betonmischungen zu reduzieren und durch nachhaltigere Materialien zu ersetzen



OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit KI

Beton Zutaten

Zement



Aggregate



Wasser



Zusatzstoffe



OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit KI

Zement

Walzenschüsselmühle



Verkleinern des Kalksteins

Drehrohrofen



Brennen des Rohmehls bei 1450 °C
Scheidet CO₂ ab.

Kugelmühle



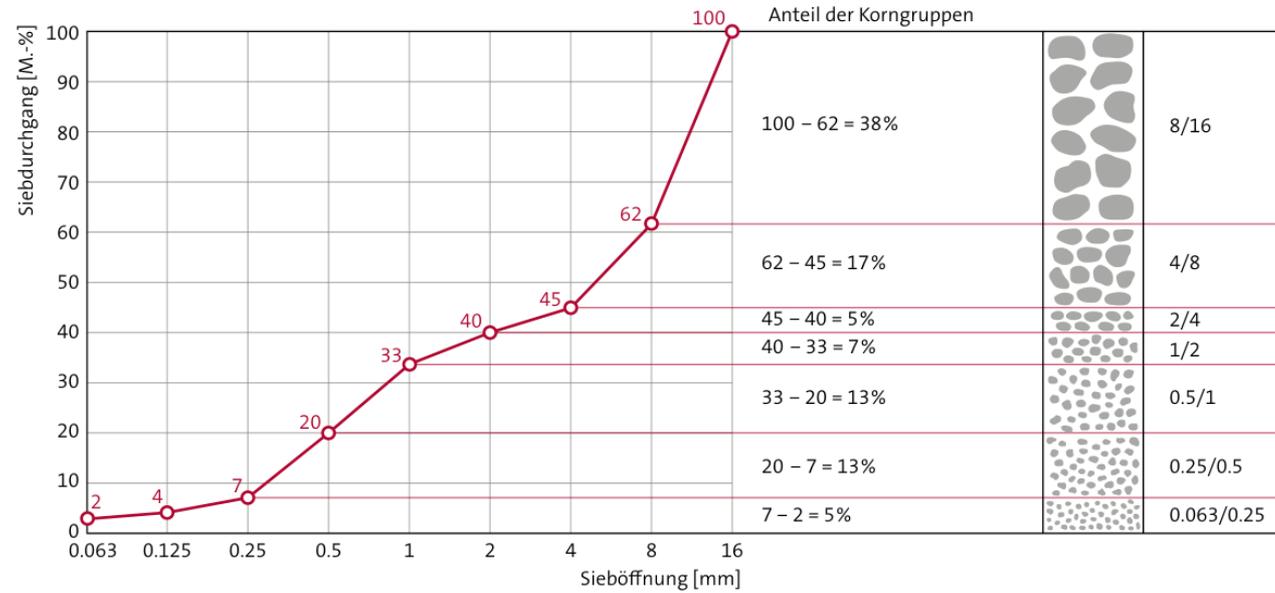
Feines Mahlen des Klinkers

Aggregate

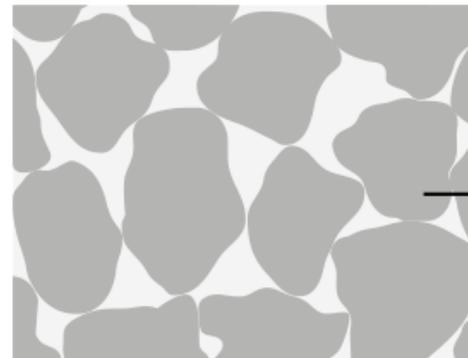
Mischung verschiedener Grössen
Mit / ohne Recykliertem Material



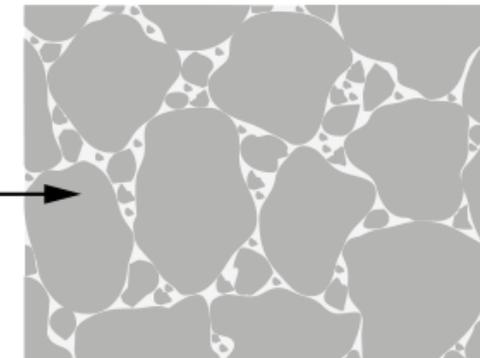
Ziel: Dichte Packung



Grosser Hohlraumgehalt bei einem Einkornmisch



Geringer Hohlraumgehalt bei einem gut abgestuften Kornmisch



OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit KI

Wasser



Rezept	
Reaktives Wasser	

Production			
Reaktives Wasser		Nicht-Reaktives Wasser	
Zugegebenes Wasser	Wasser aus den Zusatzmitteln	Oberflächenwasser Aggregate	Aggregate Wasserabsorption

Test	
Reaktives Wasser	Nicht-Reaktives Wasser

OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit Ki

Beton Messwerte

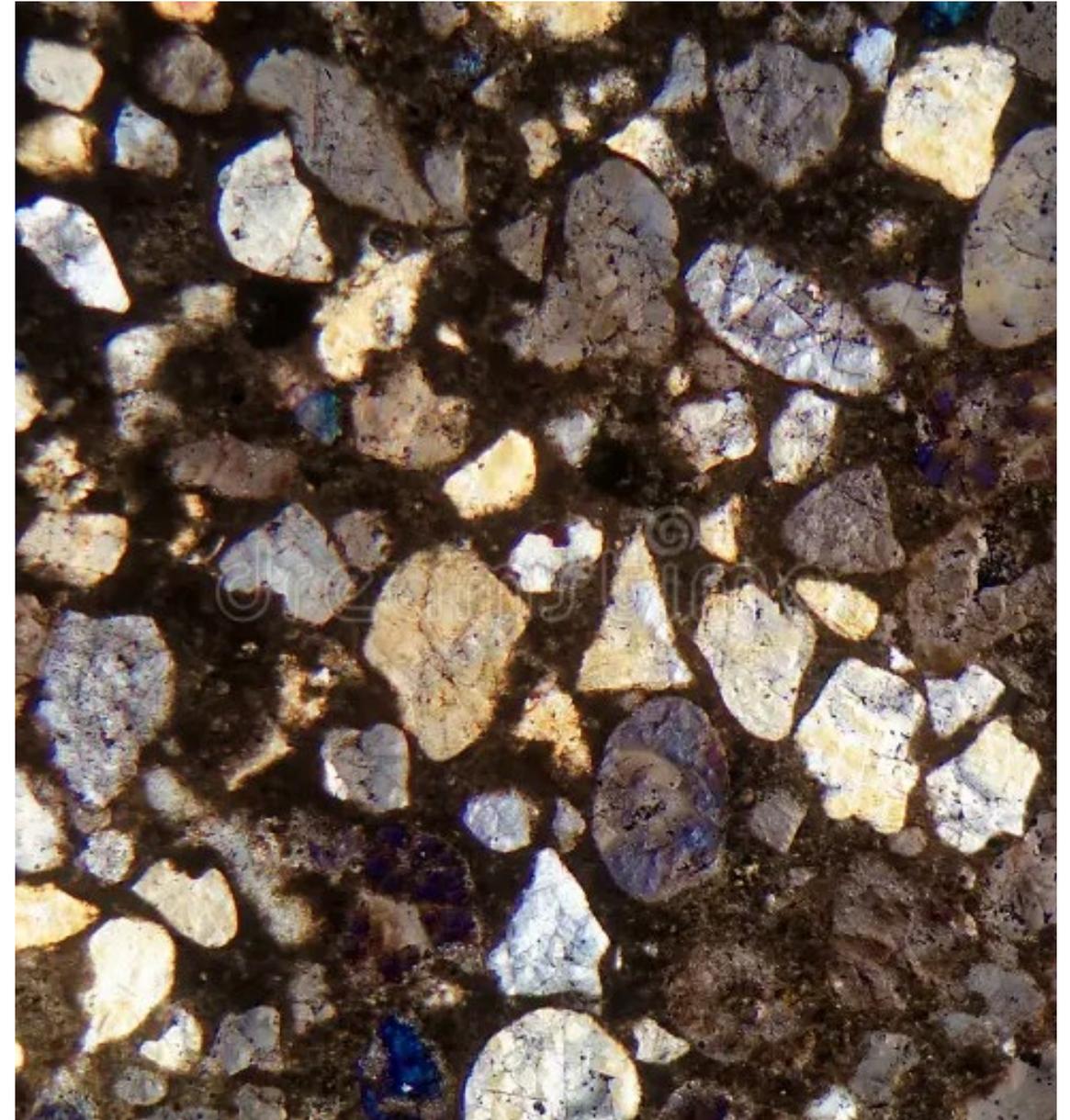
Verarbeitbarkeit
Ausbreitmass



Druckfestigkeit
Nach 7 / 28 Tagen



Ziele Optimx



OptimiX – CO2 Reduktion

Know-how Beton



IBU | Institut für
Bau und Umwelt



Betonmodelle zur Vorhersage
von Druckfestigkeit und Konsistenz

Optimierungs-Tool für
Betonmischungen

Know-how KI



ICE | Institut für
Computational Engineering

→ Umweltverträglichkeit verbessern



→ Kosten einsparen



CO₂-Reduktion

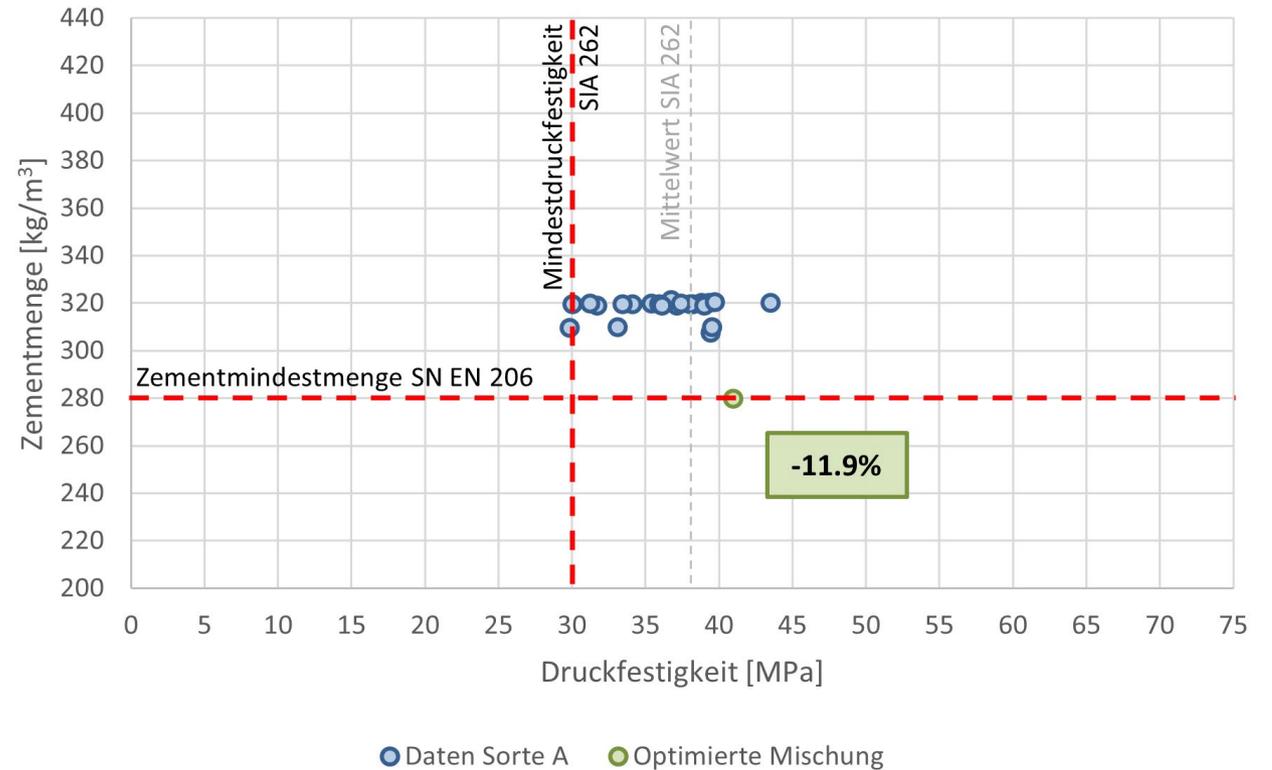
- Ansätze zur Reduzierung der CO₂-Emissionen aus dem Bindemittel:
 - Reduktion des Zementleims (Erhöhung der Verdichtung der Gesteinskörnung)
 - Zement mit geringem Klinkeranteil
 - Alternative Bindemittel
 - Mehr recycelte Materialien
- Herausforderungen:
 - Einhaltung der technischen Anforderungen
 - Kosten, Verfügbarkeit, Produktionsprozesse
- Betonwerke haben unterschiedliche Dokumentationsarten:
 - Unterschiedliche Rezepte mit den gleichen Zutaten / Rohstoffen
 - Eigenschaften von Mischungen

Vorprojekt Beton KI, Labordaten

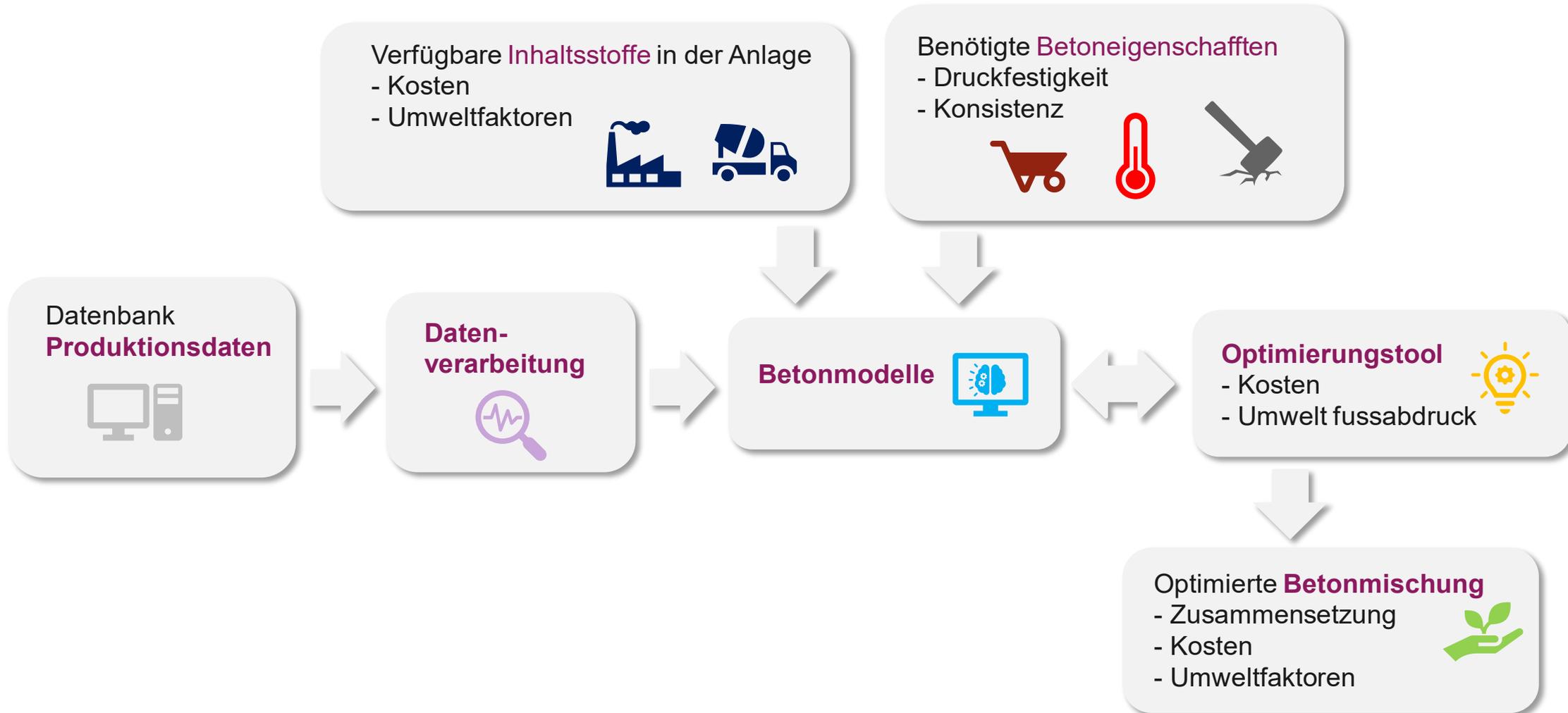
Datenanalyse und Formulierung eines Optimierungsproblems zur Bestimmung optimaler Betonrezepturen:

- Modellierung der Druckfestigkeit des Betons mittels künstlicher neuronaler Netze
- Modellansätze zur Beschreibung der Verarbeitbarkeit
- **Werkversuch** bestätigte das Optimierungspotential

Zementmengenoptimierung Sorte A



Overview



Datenverarbeitung



ML Pipeline

- Datensatzgrösse: 25'000 Betonmischungen (mit ca. 130 Spalten) von fünf verschiedenen Herstellern mit jeweils mehreren Werken.
- Beinhalten teilweise Handwerte
- Starke Filterung der Daten notwendig
- **EDA:**
 - Analyse der Daten (Korrelationen, Vergleich Testdaten und Chargenprotokoll)
 - Sind zeitlich abhängige Trends erkennbar?
- **Feature Vorverarbeitung:**
 - One-hot Encoding der Firmennamen und Werksnummern
 - Sin-Cos Transformation des Produktionsdatums (Monat und Tag)
 - Verallgemeinerung und Reduktion der Inhaltsstoffe
- **Trainingsprozess:**
 - Normalisierung der Daten
 - PCA → bringt eine Verschlechterung der Daten
 - Modelle: XGBoost, Random-Forest, SVM, Gradient Boosting von scikit-learn, MLP in Tensorflow
- **Analyse des Modells:**
 - Welche Mischungen zeigen die schlechtesten Resultate?

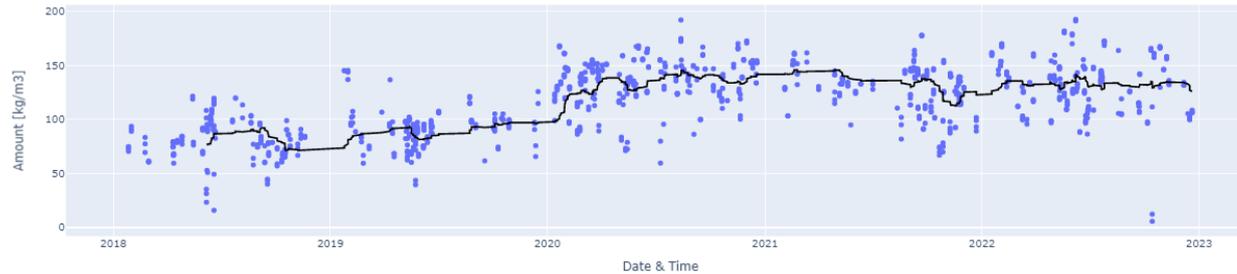
OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit KI

Explorative Datenanalyse (EDA)

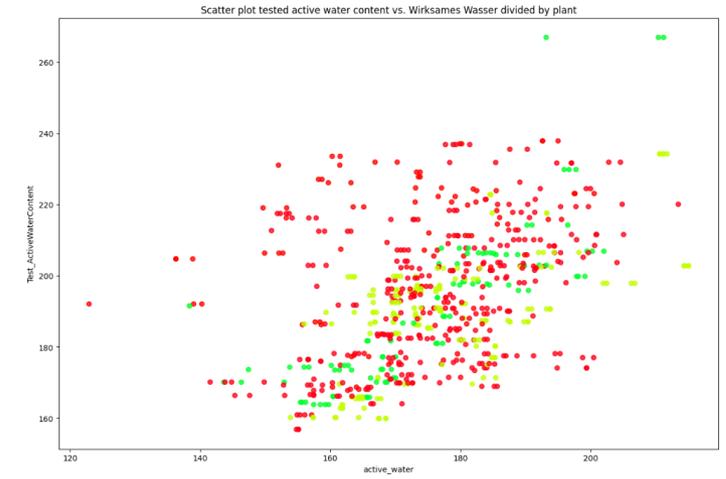
Zementanteil nach Datum



Wasseranteil nach Datum

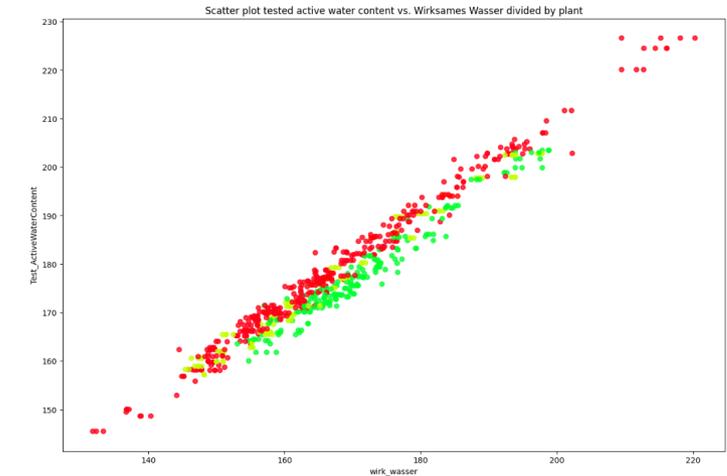


Gemessener
Wasseranteil



Berechneter Wasseranteil

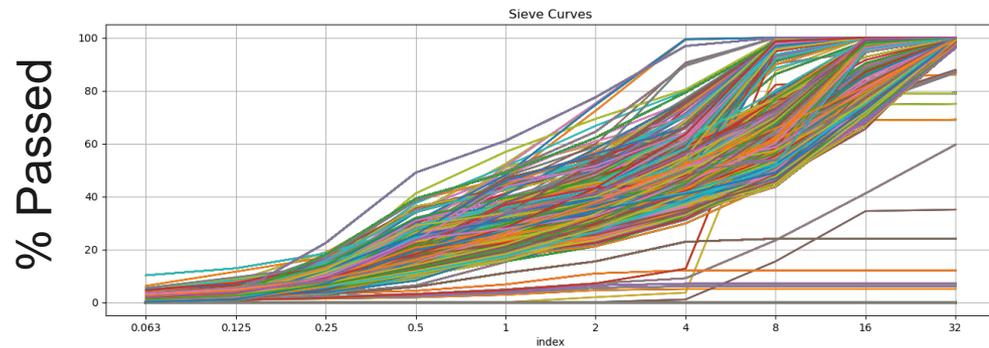
Gemessener
Wasseranteil



Berechneter Wasseranteil

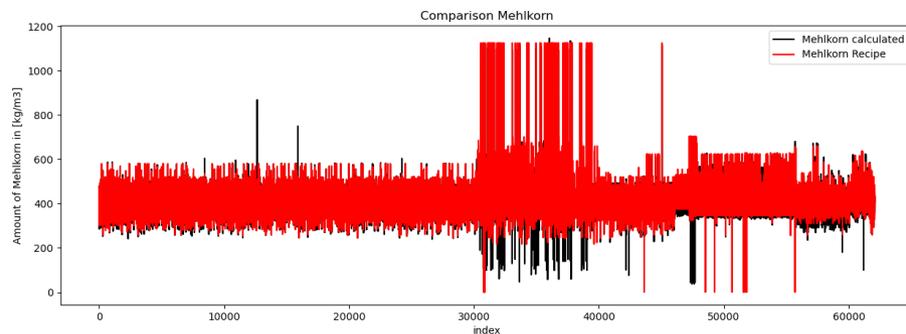
Feature Vorverarbeitung / Filterung

Siebkurven

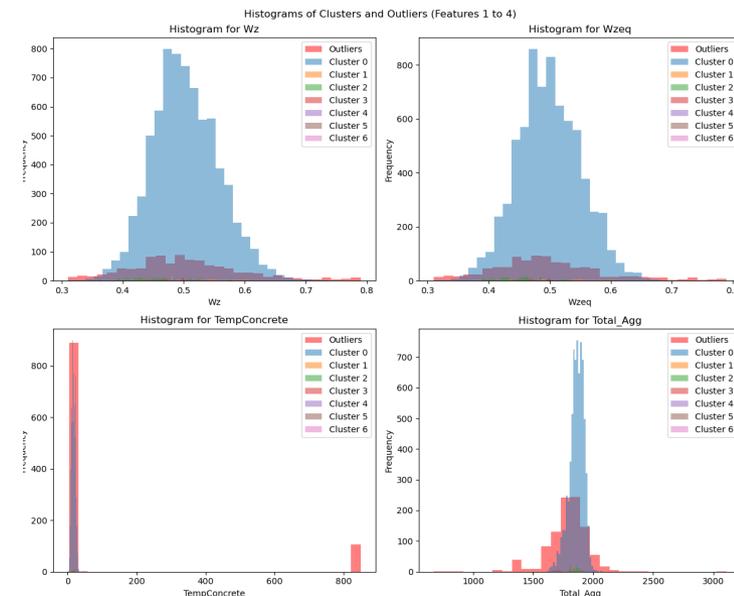
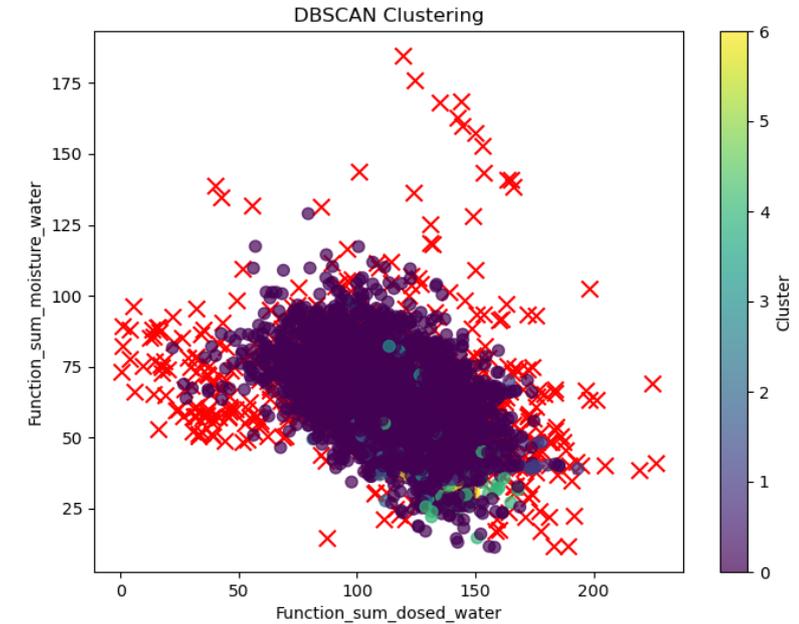


Gesteinsgrösse

Ausreisser Detektion Einzelwerte



Ausreisser
Detektion
Cluster

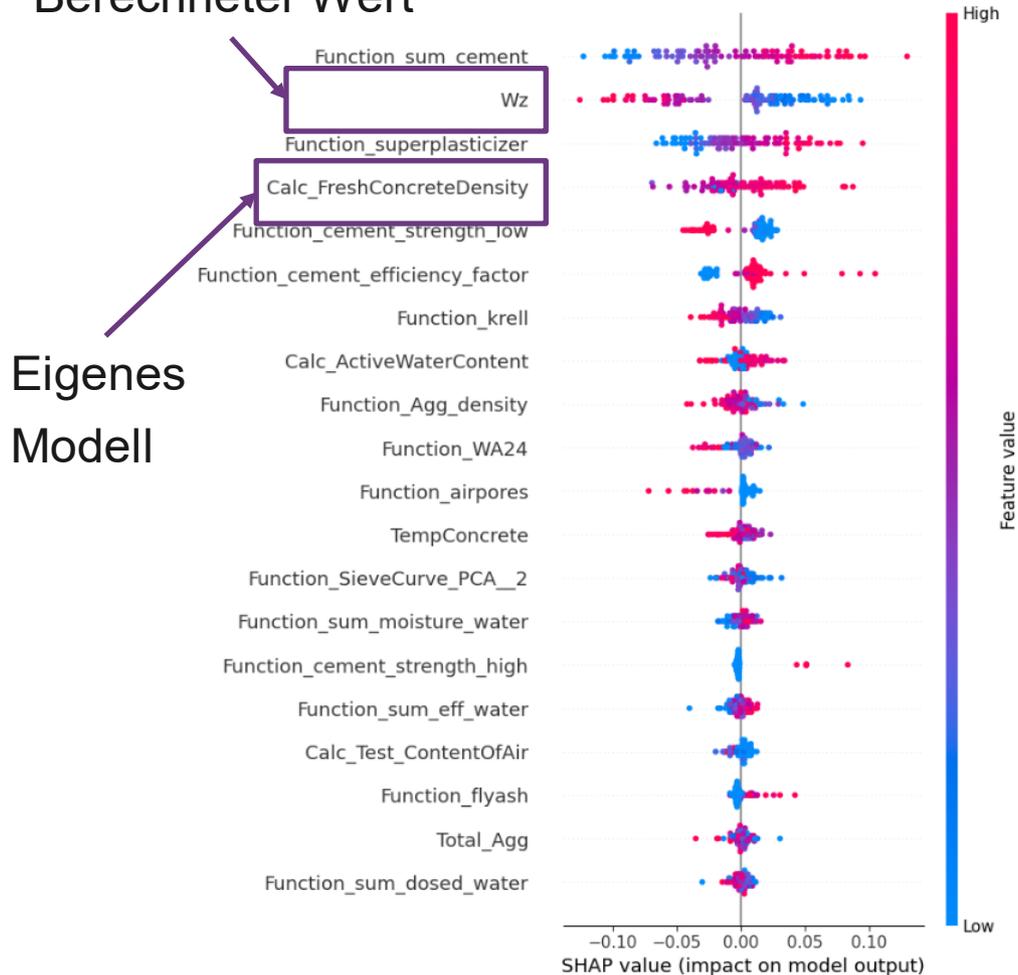


Verwendete Modelle

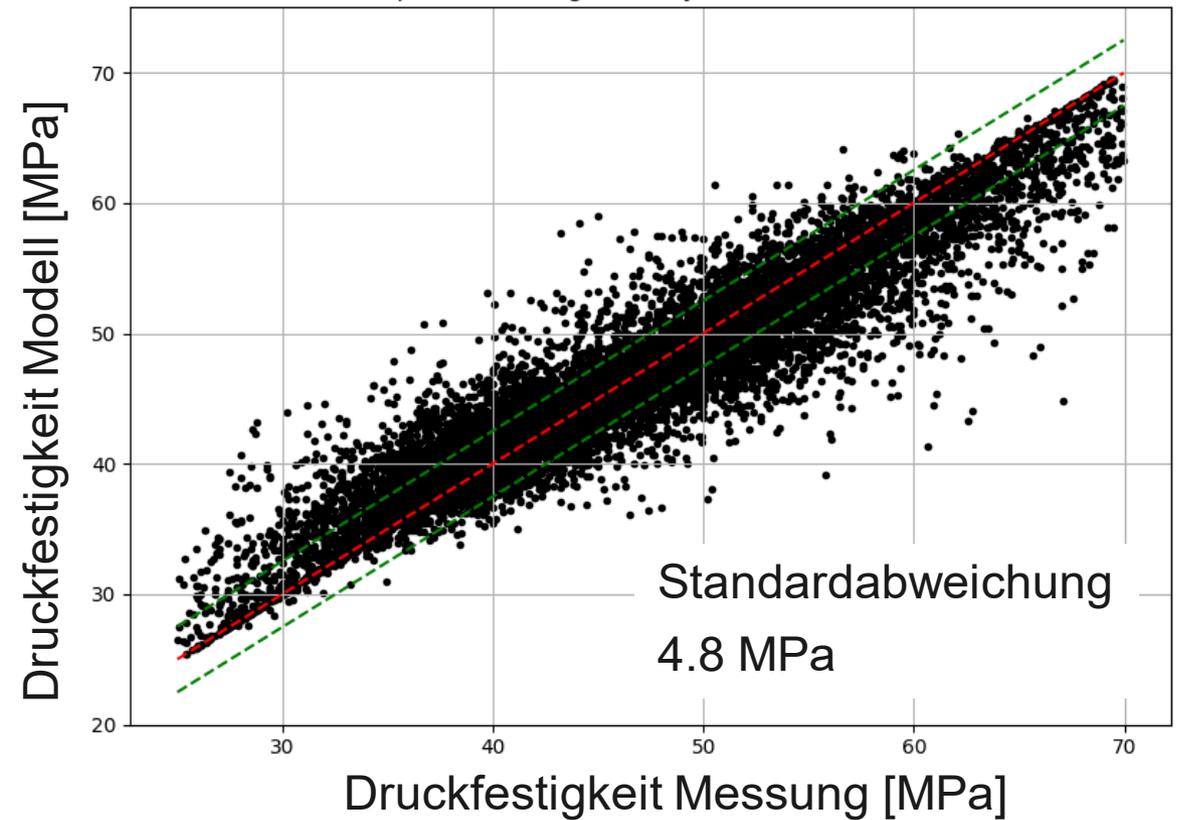


Modelle Output

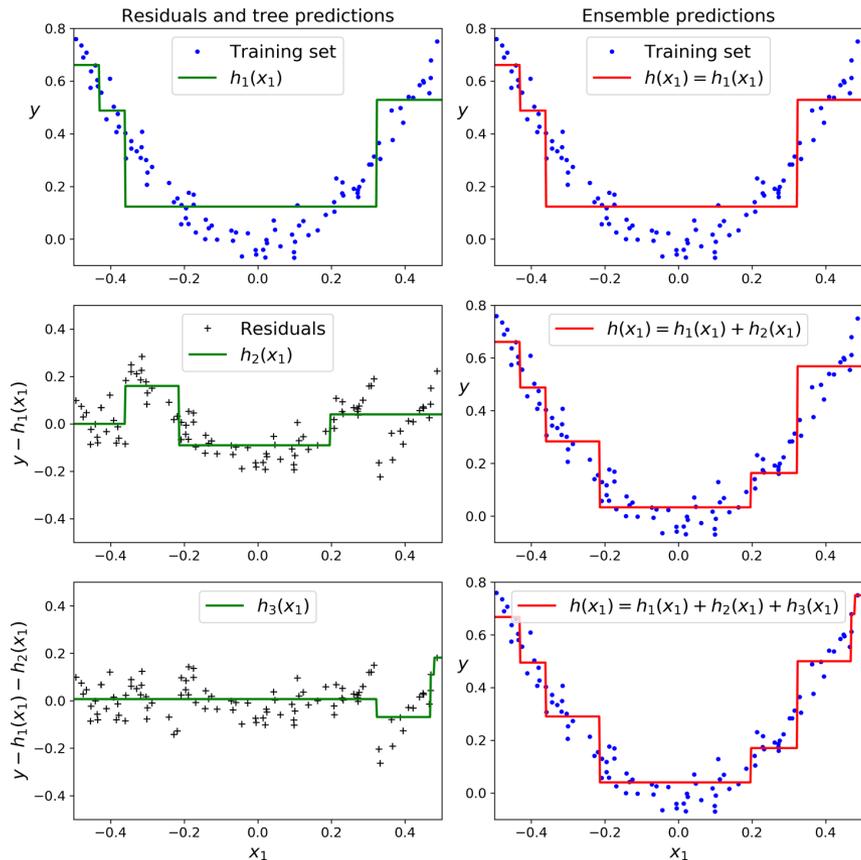
Berechneter Wert



Eigenes Modell

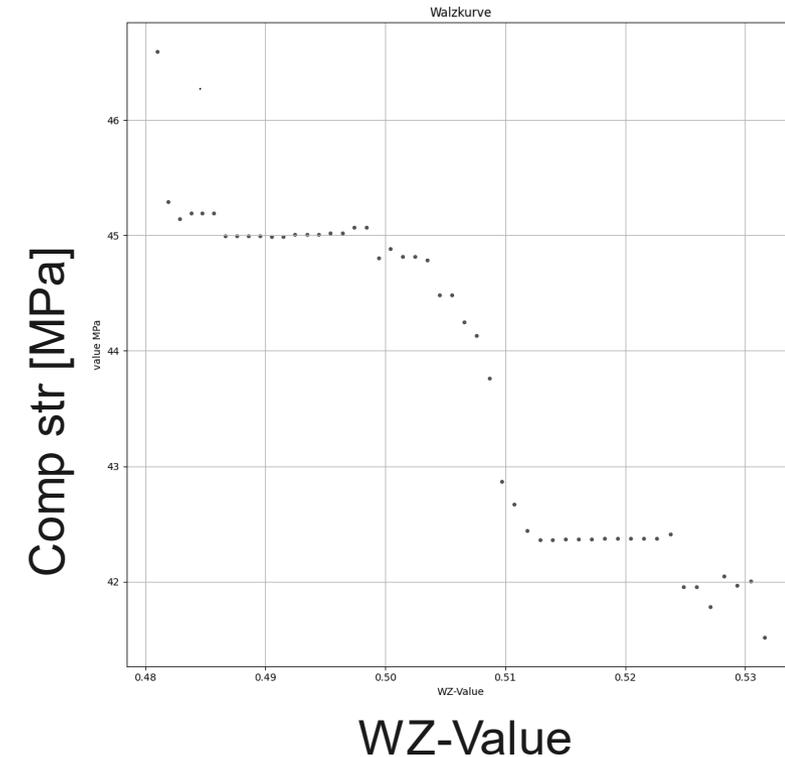


Vorhersagemodell - XGBoost

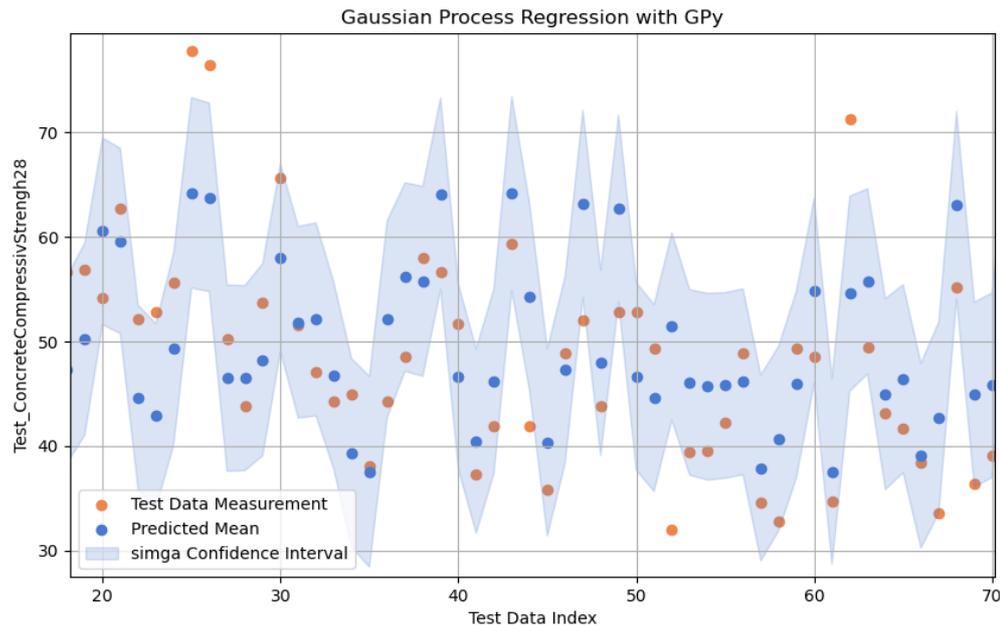


Eigenschaften

- Genauestes Modell
 - Standardabweichung 4.8 MPa
- Viele Inputparameter möglich
 - (Berücksichtigung verschiedener Zusatzmittel wie verflüssiger möglich)
- Kein kontinuierlicher Output
- Keine Extrapolation



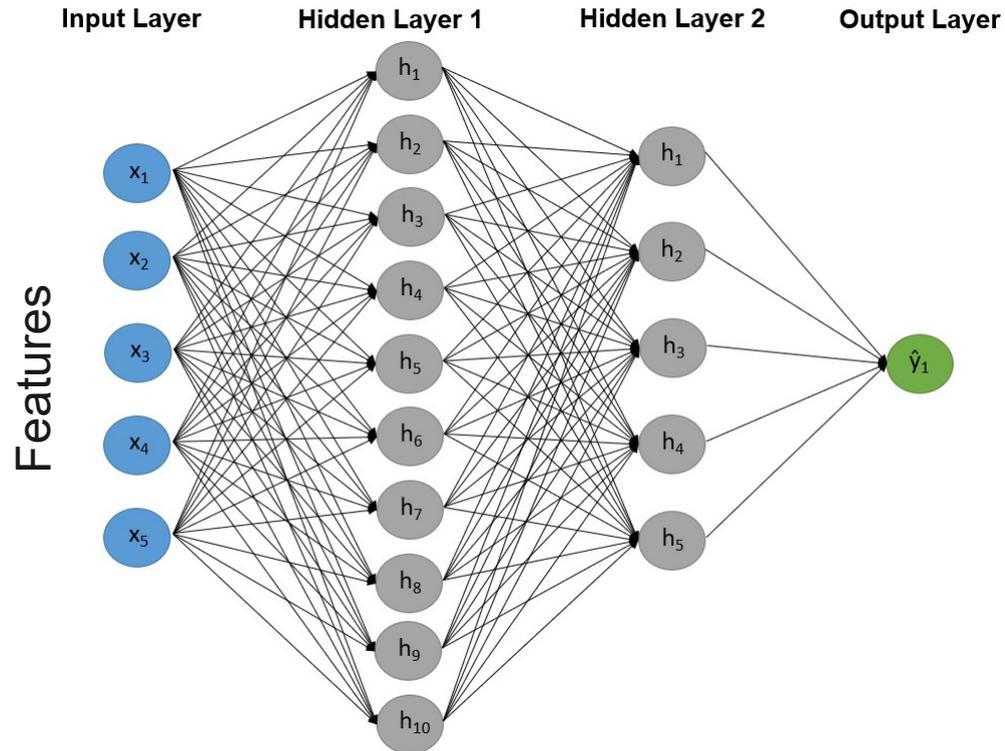
Gaussian Process



Eigenschaften

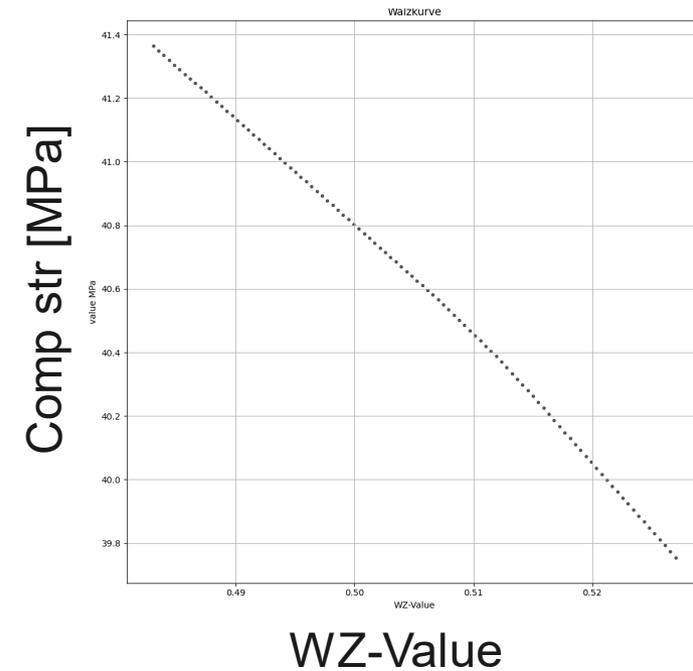
- Nur mit wenigen Input Features möglich (~10 Features)
- Standardabweichung 5.5 MPa
- Extrapolation möglich
- Konfidenzintervall als resultat
 - Gerade bei der Extrapolation nur bedingt aussagekräftig
- Kontinuierlicher output

Neuronal network

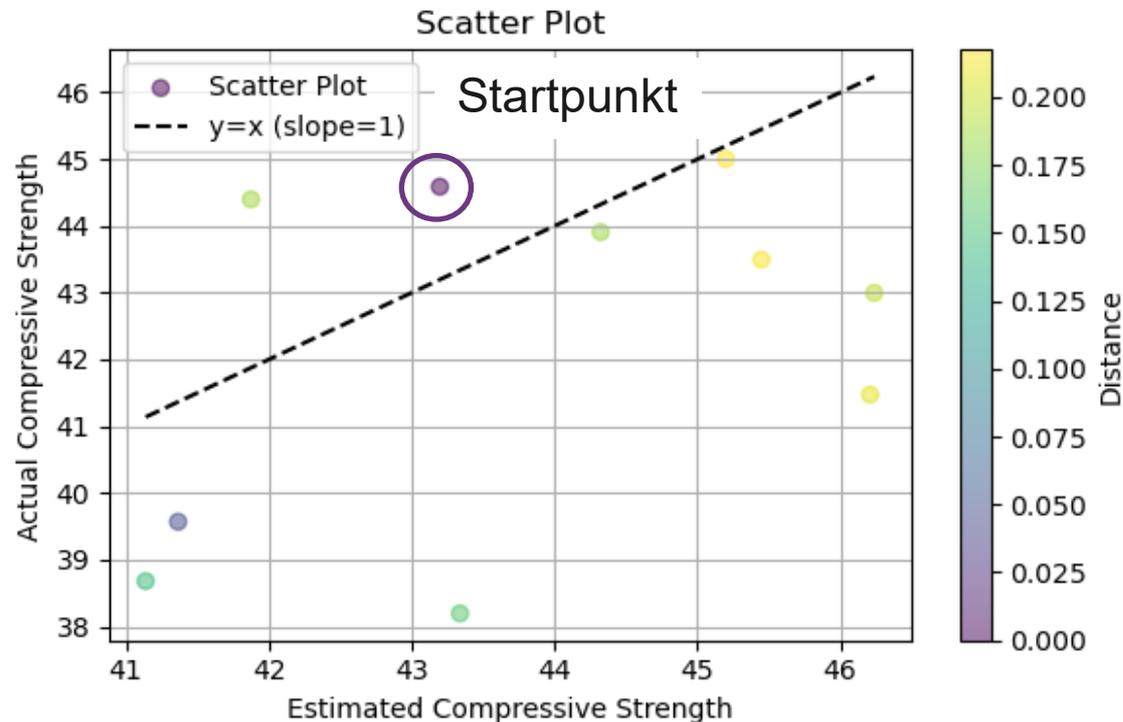


Eigenschaften

- Bestes Netz momentan: Standardabweichung 5.2 MPa
- Extrapolation möglich
- Kontinuierlicher Output



KNN / nearest neighbor

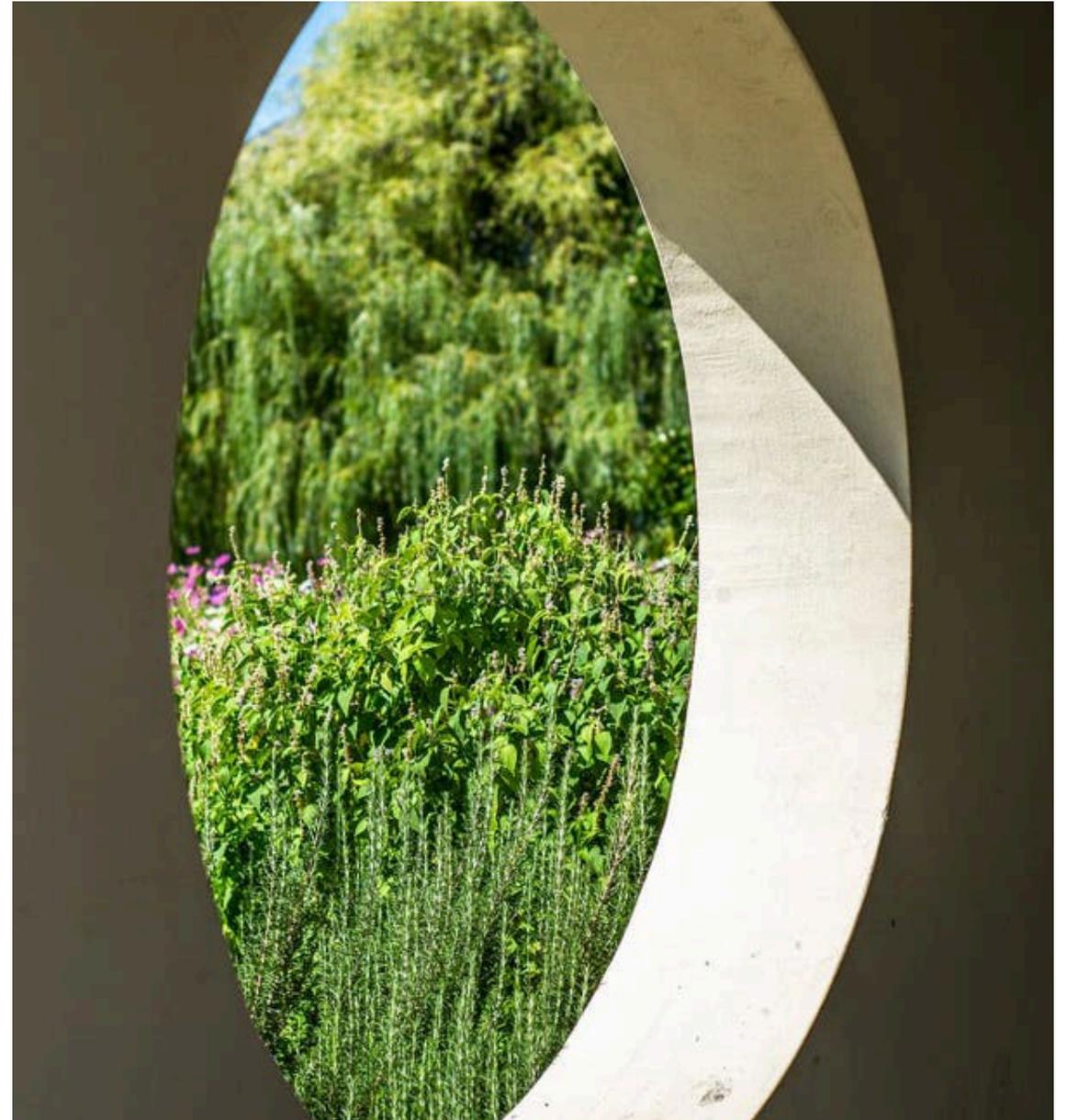


Eigenschaften

- Standardabweichung 5.1 MPa
- Kein kontinuierlicher Output
- Keine Extrapolation

WZ-Value

Ausblick



OptimiX - Nachhaltige Betonmischungen mit KI

Optimierung – Nachhaltigkeit - Preis

Produktökobilanz mit Ecoinvent-Daten - Entwurf

Globales Erwärmungspotenzial (GWP)

Hersteller Name: _____ Datum: 2024-02-15
 Adresse: _____
 Beton: C25/30 XC2 C3 32
 Rezept Nr.: xx
 Bezeichnung: A100

w/z	0.6	GWP					
		A1			A2		
Material	Sorte	Menge [kg/m³]	kg CO ₂ -eq/ kg Material ¹	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton	% Lkw	Distanz	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
Zement	CEM I	300	0.740	222.0	100%	300	11.0
Gesteins-körnung	Sand	1000	0.005	5.3	100%	20	2.4
	Kies	950	0.007	6.3	100%	20	2.3
Zusatzmittel	Frischwasser	180	0.000	0.014	100%	0	2.6
	Fliesmittel	3	0.000	0.0	100%	300	0.1
Zusatzstoffe	Flugasche	0	2.300	0.0	100%	20	0.0
			233.6		18.5		

1. Ecoinvent cut-off cumulative LCIA v3.9.1, IPCC 2021 GWP100

A3	
Herstellung Betonwerk ²	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
	2.5

2. Basierend auf generischen Werte für Betonherstellung (Strom, Kraftstoff etc.)

C3	
Entsorgung Beton ³	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
	35.3

3. Basierend auf generischen Werte für Betontonsorgung

Die deklarierte Einheit ist 1 m³ unbewehrter Beton

Name	Wert	Einheit
Deklarierte Einheit	1	m3

	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
A1	233.6
A2	18.5
A3	2.5
C3	35.3
Total	289.9

Produktökobilanz mit KBOB-Daten - Entwurf

Globales Erwärmungspotenzial (GWP)

Hersteller Name: _____ Datum: 2024-04-15
 Adresse: _____
 Beton: C25/30 XC2 C3 32
 Rezept Nr.: xx
 Bezeichnung: A100

w/z	0.6	GWP									
		Rohstoffgewinnung					Transport				
Material	Sorte	Menge [kg/m³]	Pro kg Material ¹		Pro m ³ Beton		Pro m ³ Beton		Pro m ³ Beton		
			kg CO ₂ -eq	UBP	kg CO ₂ -eq	UBP	% Lkw	Distanz	kg CO ₂ -eq	UBP	
Zement	CEM II/A	300	0.752	894.8	225.6	268'435	100%	300	16.5	30'960	
Gesteins-körnung	Sand	1000	0.003	7.7	7'659	100%	20	3.7	6'880		
	Kies	950	0.005	13.1	4.4	12'465	100%	20	3.5	6'536	
Zusatzmittel	Frischwasser	180	0	0.5	0	'96	100%	0	1.8	3'389	
	Fliesmittel	3	0.463	755.9	1.4	2'268	100%	300	0.2	310	
Zusatzstoffe	Flugasche	0	0	0	0.0	0	100%	20	0	0	
			234.1		290'922		25.5		48'075		

1. KBOB Ökobilanzdaten (v4 UVEK 2022)

Herstellung (CO ₂)		Herstellung (UBP)	
Herstellung Betonwerk ²	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton	Herstellung Betonwerk ²	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
	3.5	7'643	

2. Basierend auf generischen Werte für Betonherstellung (Strom, Kraftstoff etc.)

Entsorgung (CO ₂)		Entsorgung (UBP)	
Entsorgung Beton ³	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton	Entsorgung Beton ³	kg CO ₂ -eq/ m ³ Beton
	30.3	85'083	

3. Basierend auf generischen Werte für Betontonsorgung

Die deklarierte Einheit ist 1 m³ unbewehrter Beton

Name	Wert	Einheit
Deklarierte Einheit	1	m3

	kg CO ₂ -eq	UBP
Rohstoff-gewinnung	234.1	290'922
Transport	25.5	48'075
Herstellung	3.5	7'643
Entsorgung	30.3	85'083
Total	293.5	431'723

Choice of Method: KBOB v4 UVEK 2022 Ecoinvent Ecoinvent cut-off cumulative LCIA v3.9.1

If "default" is chosen, the program:
 1. Uses emission values based on the chosen method
 2. Uses a standard distance for the calculation, depending on the ingredient, combined with emission values according to default or self-defined values

Material	(Fixed recipe) kg/m3	Default ¹	Self-defined	GWP in [kg CO ₂ /eq per kg]	UBP [UBP/ kg]	Modules	Source/Link
Zement		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.646	895	A1-A3	v4 UVEK 2022
Sand		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	xx	xx	xx	xx
Kies		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Wasser		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Zusatzmittel		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Zusatzstoffe		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

Transport	Transport (truck, train...)	Default ¹	Self-defined	Distance [km]	GWP in [kg CO ₂ /eq per tkm]	UBP [UBP/tkm]	Source/Link
Zement	(pull down...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[default]	0.183	344	v4 UVEK 2022
Sand	Ship	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	xx	xx	xx	xx
Kies	Ship	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Wasser	-	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Zusatzmittel	Truck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Zusatzstoffe	Train	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

User advice:
 -Stick to the chosen method
 -Ensure quality of self-defined data
 -State sources of self-defined data properly (ex EPD number)
 -Make sure that all/the same modules are considered...

Implementierung

